



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

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

子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置場址

特性審驗技術之關鍵課題研究

計畫編號：105FCMA011

計畫主持人：董家鈞

子計畫一主持人：董家鈞

受委託機關(構)：社團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月



**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  
子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置場址  
特性審驗技術之關鍵課題研究**

受委託單位：社團法人中華民國大地工程學會

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 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 120 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 106 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

本研究為低放射性廢棄物處置為期 4 年計畫的第二年，該計畫的目標是建立一個與隧道處置場址特徵化相關之平行驗證技術，本研究之成果期望有助於提高低放廢物處置之管制能力。本計畫第一年已完成國際研究資訊之回顧，內容包含場址的初始狀態和正常演變，以及國內特殊地質條件等。今年我們根據 Forsmark 場址所收集的數據，重點回顧了隧道處置場址關鍵參數的不確定性，此場址之中-高放射性廢物處置調查結果豐富，有利於了解關鍵參數的不確定性。再者，進一步針對隧道周圍岩體的水力耦合參數進行敏感性分析。利用 Oda 連續模型評估破裂面之特徵化(例如：密度、持續性、開口寬、粗糙度、強度、位態...等)對受不同邊界應力影響的隧道之水力傳導和流體流動的影響。模擬結果認為，破裂面特徵和邊界應力將主導地下水流動，其中最重要的參數是破裂面之開口寬。現地應力和不連續面方向的分佈為均向分布時，結果顯示等勢線為圓形且流動方向皆指向隧道中心；如果現地應力和不連續面方向的分佈為異向分布，則隧道周圍的流動方向不再沿著徑向方向，地下水流分析應考慮應力誘發和固有的異向性。

## Abstract

This study is the second year of a four-year project. The goal of this project is to establish a parallel verification technique related to the site characterization of tunnel disposal. It is anticipated that the achievement of this study can contribute to enhance the regulation capability for the low-level radioactive waste disposal project. The first year of this project completed the international researches review, including the initial state and the reference evolution of the site, as well as domestic special geological conditions. This year we focus on reviewing the uncertainty of key parameters of tunnel disposal sites based on the data collected from Forsmark site. The abundant investigation results of high- to medium-level radioactive waste disposal project could be beneficial to understanding the uncertainty of key parameters. Following the uncertainty analysis, we perform the sensitivity analysis of the hydro-mechanical coupling parameters of rock mass around a tunnel. Oda's continuum model is used to evaluate the influence of fracture characteristics (e.g, intensity, persistency, aperture, roughness, strength, orientation...) on hydraulic conductivity and fluid flow around a tunnel subjected to different boundary stress. It is concluded that the fracture characteristics and boundary stress will dominate the groundwater flow. The most important parameter is the fracture aperture. The equal potential lines are circle shape and the flow vectors are along the radial direction of the circular shape tunnel for isotropic fracture distribution and boundary stress. The flow vectors around a tunnel are no longer along the radial direction if the in-situ stress and distribution of fracture orientations are anisotropic. The stress-induced and inherent anisotropic should be consider for groundwater flow analysis.

# 目錄

中文摘要 .....	I
Abstract .....	II
目錄 .....	3
圖目錄 .....	5
表目錄 .....	6
第一章 前言 .....	7
第二章 國際處置場址之初始狀態量化資訊研析 .....	9
2.1 瑞典核燃料和廢物管理公司(SKB)之分階段場址調查流程概述 .....	9
2.2 各調查階段場址特徵化參數之建立 .....	10
第三章 力學-水力特徵化之不確定性評估 .....	13
3.1 場址初始狀態量化參數之不確定性 .....	13
3.2 破裂面幾何特徵統計建模之方法 .....	24
3.2 破裂面幾何特徵之不確定性評估 .....	29
第四章 力學-水力特性對流場敏感度分析 .....	31
4.1 分析方法 .....	31
4.2 以粗糙度係數( $JRC_0$ )為變數之分析結果 .....	33
4.3 以不連續面單壓強度( $JCS_0$ )為變數之分析結果 .....	37
4.4 受風化作用影響之結果 .....	42
4.5 結果與討論 .....	43
第五章 力學-水力特性對坑道周圍流場敏感度分析 .....	44
5.1 分析方法 .....	44
5.2 水力傳導係數分布 .....	47
5.3 等向裂隙( $D_{33}=0$ )對於坑道周圍流場之影響 .....	49
5.4 異向裂隙( $D_{33}=2$ )對於坑道周圍流場之影響 .....	50
5.3 結果與討論 .....	51
第六章 坑道處置場址特性之安全評估審查重點及注意事項 .....	52
6.1 近岸離島通用之審查重點建議 .....	52

6.2 特定候選場址之審查重點建議 .....	53
第七章 結論與建議 .....	54
7.1 結論 .....	54
7.2 建議 .....	55
參考文獻 .....	56
附錄一 .....	57
附錄二 .....	65
附錄三 .....	72
附錄四 .....	77



## 圖目錄

圖 2.1 SKB 建置 FORSMARK 地區 SDM-SITE 之主要參考架構 .....	10
圖 3.1 FORSMARK 處置場址地質圖(第 2.2 版) .....	14
圖 3.2 目標區的破裂面域(FFM)以及變形帶(ZFM)三維模型 .....	15
圖 3.3 單軸抗壓強度 A)和拉伸強度 B)與深度之關係，並按岩石類型進行分類之結果.....	17
圖 3.4 楊氏係數 A)和柏松比 B)與深度之關係，並按岩石類型進行分類之結果.....	18
圖 3.5 2002-2007 年 FORSMARK 場址調查所有取心鑽孔和衝擊鑽探鑽孔配置圖，以及傾斜鑽孔於地面上的投影.....	21
圖 3.6 圖 3.5 中各個鑽孔場址(DS)詳細配置圖，包含鑽探點附近或第四紀沉積物中的鑽孔..	22
圖 3.7 2006 年於編號 5 號鑽孔場址(DS5)中鑽孔 HFM14(P 點)進行三週干涉試驗 .....	23
圖 4.1 未考慮風化作用之情形下， $JRC_0$ 與初始力學內寬 $E_0$ 之關係圖 .....	34
圖 4.2 未考慮風化作用之情形下， $JRC_0$ 與力學內寬 $E$ 之關係圖 .....	34
圖 4.3 未考慮風化作用之情形下， $JRC_0$ 與水力內寬 $E$ 之關係圖 .....	35
圖 4.4 未考慮風化作用之情形下， $JRC_0$ 與水力傳導係數 $K$ 之關係圖 .....	35
圖 4.5 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$ 與初始力學內寬 $E_0$ 之關係圖 .....	38
圖 4.6 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$ 相對於 $JRC_0$ 之適用範圍.....	38
圖 4.7 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$ 與力學內寬 $E$ 之關係圖 .....	39
圖 4.8 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$ 與水力內寬 $E$ 之關係圖.....	39
圖 4.9 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$ 與水力傳導係數 $K$ 之關係圖.....	39
圖 5.1 本研究採用之座標系統圖.....	45
圖 5.2 不連續面位態密度函數分布圖( $D_{33}=0$ (左)， $D_{33}=2$ (右)).....	46
圖 5.3 隧道開挖前水力傳導係數分布圖( $D_{33}=0$ ) .....	47
圖 5.4 隧道開挖水力傳導係數分布圖( $D_{33}=0$ ) .....	48
圖 5.5 隧道開挖水力傳導係數分布圖( $D_{33}=2$ ) .....	48
圖 5.6 均質均向水力傳導係數條件下隧道開挖周圍岩盤總水頭分布圖( $D_{33}=0$ ).....	49
圖 5.7 均質均向水力傳導係數條件下隧道開挖周圍岩盤隧道開挖流速向量分布圖( $D_{33}=0$ )....	49
圖 5.8 隧道開挖周圍岩盤總水頭分布圖( $D_{33}=2$ ) .....	50
圖 5.9 隧道開挖周圍岩盤隧道開挖流速向量分布圖( $D_{33}=2$ ) .....	51

## 表目錄

表 2.1 節錄 SKB 在各階段確定或更新的參數表，並說明每個參數之用途.....	11
表 3.1 SKB 於 FORSMARK 處置場址之岩石類型分類表.....	13
表 3.2 目標區中每個鑽孔樣本進行不同測試方法的次數.....	16
表 3.3 岩石域 RFM029 單軸抗壓強度測試結果.....	17
表 3.4 五個岩石域的樣本進行不同試驗方法測試破裂面的數目.....	19
表 3.5 所有傾斜試驗(TILT TESTS)的計算結果，共 163 次測試.....	20
表 3.6 不連續面位態模型.....	25
表 3.7 破裂面尺寸-歐基里得假設之構造連續模型 (TCM).....	26
表 3.8 破裂面尺寸-分形構造連續模型 (TCMF).....	26
表 3.9 破裂面尺寸-露頭尺度模型(OSM).....	27
表 3.10 破裂面尺寸-構造斷層模型(TFM).....	27
表 3.11 平均 P32 密度，破裂面“不受 DZ 影響”.....	28
表 3.12 平均 P32 密度，破裂面“受 DZ 影響”.....	28
表 4.1 不考慮風化作用下，變數為 $JRC_0$ 之計算結果.....	35
表 4.2 不考慮風化作用下，變數為 $JCS_0$ 之計算結果.....	40
表 4.3 相同條件下，不考慮風化作用以及考慮風化作用之結果.....	42
表 5.1 本研究使用之參數表.....	45

# 第一章前言

我國近年來積極推動低放射性廢棄物處置工作，經濟部已核定 2 處建議候選場址，台灣電力公司已針對此 2 處場址進行調查規劃，目前朝向坑道處置之方向進行技術發展。政府對於低放射性廢棄物處置進行嚴密把關是一貫的目標，除了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。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，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二年度，去年度「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」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，本年度計畫將根據去年研究之結果進一步提出審驗技術建立，依：(1)場址特性審驗技術建立；(2)工程設計審驗技術建立；(3)結構穩定性驗證方法；(4)長期安全分析審驗方法；(5)生物圈情節分析審查技術等 5 個主題分別由 5 個子計畫進行研析。

本子計畫彙整國際間場址特性調查成果(TR-01-29、R-07-45、R-07-31、R-07-47)，盤點瑞典關於場址特性相關參數之定量化成果，透過以上報告蒐集包含地質、岩石力學、水文地質等有關場址初始之量化資訊，以分析各參數不確定性，並進一步針對處置坑道周圍岩盤之力學-水力耦合特性之相關參數，透過等值化擬連續體理論模型探討場址特性參數對水力傳導係數流經處置坑道地下水流量與壓力之敏感度，並嘗試最後提出審查案例精進之建議。期盼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。

以下說明與子計畫一(以下簡稱本計畫)高度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)已針對審查導則場址及設施設計相關條文，提供修訂方向建議，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。針對坑道處置之場址特性, 自 105 年度開始, 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, 去年度(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。本年度計畫進一步提出我國關於坑道處置場址特徵化工作需精進之關鍵議題, 針對場址初始狀態進一步定量化, 並進一步針對力學-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, 目標期望可協助建立管制單位對於坑道處置安全審查及分析驗證之能力, 以使國內處置管制技術能與國際接軌。

本報告第一章為計畫說明; 第二章根據瑞典 Forsmark 處置場址報告書, 彙整處置場址初始狀態之定量化資訊, 提供後續不確定性評估之重要資訊; 第三章針對瑞典 Forsmark 處置場址的不確定性評估進行說明; 第四章則是對處置場的力學-水力特性之流場敏感性進行分析, 找出可能對於流場敏感性之因子; 第五章進一步探討隧道開挖對於流場之影響; 第六章則是提供低放射性廢棄物最終處置技術有關場址特性章節審查之建議; 最後第七章提出本計畫之結論與建議。

## 第二章 國際處置場址之初始狀態量化資訊研析

目前國際間已興建數座低放射性廢棄物最終處置場，包含美國、法國、日本、瑞典、英國、西班牙以及芬蘭等國家。然而，這些國家對於低放射性廢棄物處置方式有所差異，除了依據廢棄物之核種半化期長短與活度採取近地表、中等深度以及深地質處置等處置方法之外，亦須配合當地自然、社會、環境與廢棄物特性等整體性進行通盤考量。例如日本六個所村採用地面處置窖式即為近地表低放處置場；美國 Barnwell 及 Richland 兩處處置場採用淺地表壕溝掩埋技術進行低放處置；另外，瑞典 Forsmark 處置場為坑道處置形式，即將廢棄物放置於較深之岩層中。

因我國目前朝向坑道處置之方向進行技術發展，因此，勢將面對裂隙岩盤介質，因此，岩盤不連續面特性對流場之影響為關鍵課題。目前國際間裂隙岩盤不連續面特性調查成果資料發表，以高放場址較為豐富，故本計畫嘗試蒐集瑞典 Forsmark 高放處置場址不連續面特徵調查之量化資料，並掌握該場址不連續面特性之變異性，以進一步作為對水力特性敏感度分析之參考。

### 2.1 瑞典核燃料和廢物管理公司(SKB)之分階段場址調查流程概述

雖然高、低放對於場址調查與安全評估有不同程度之要求，但是瑞典核燃料和廢物管理公司(SKB)於兩個不同的地點(Forsmark 和 Laxemar / Simpevarp 地區)調查與場址特徵化工作之流程還是相當值得參考，以下概略說明之。於 Forsmark 場址，每次資料調查結束後，SKB 將針對場址資料進行分析並進行建模(場址描述模型)工作，場址描述模型(site descriptive model, SDM)集結了包含地質學、岩石力學、熱力學、水文地質學、水文地球化學以及地表系統描述的綜合模型，SKB 於 2002 年完成第 0 版(SKB, 2002)場址描述模型(SDM)，建立了場址調查前所需的資訊；2004 年 6 月完成第 1.1 版(SKB, 2004; SKB, 2005a)。第 1.2 版完成了 SDM 初始場址調查工作(initial site investigation, ISI)，以及完成初步的處置庫設計(layout D1)、初步安全評估(preliminary safety evaluation, PSE)(SKB, 2005b)和安全評估(safety assessment, SR-Can)(SKB, 2006a)。

SKB 於整個場址調查工作(Complete Site Investigation, CSI)期間，進行了三個階段的分析和建模工作，每個階段最重要的工作是嘗試並解決處置場工程和安全評估的不確定性。第 2.1

版(SKB 2006b)更新了 Forsmark 地質模型，第 2.2 版和 2.3 版已完成建立綜合不同學科領域的場址描述模型 SDM-Site，其中有關 SDM-Site 的主要參考架構如圖 2.1 所示。以下將說明 Forsmark 不同階段應彙整之場址特性初始狀態之量化資訊，並呈現與水力-力學耦合分析比較相關之參數資料統計結果，以作為後續參數敏感度分析之參考。

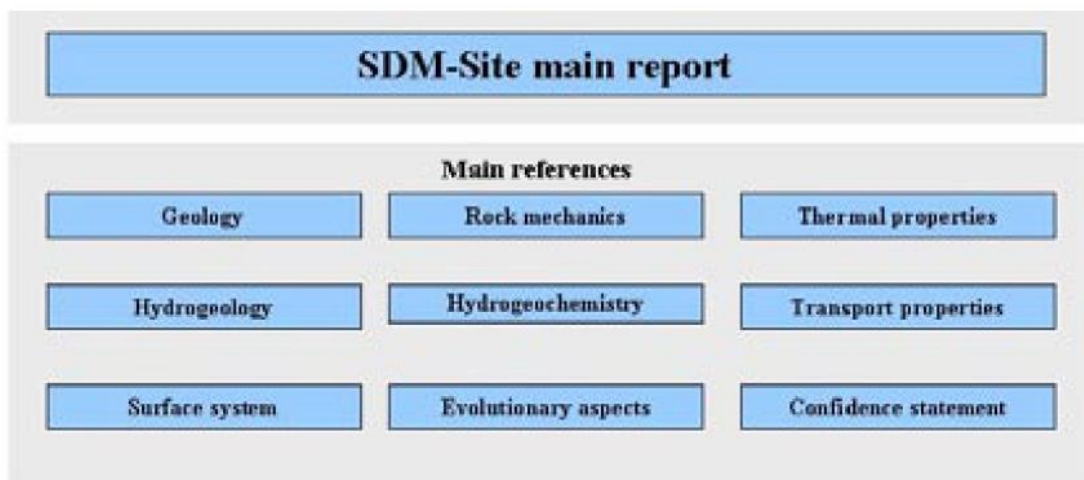


圖 2.1 SKB 建置 Forsmark 地區 SDM-Site 之主要參考架構

## 2.2 各調查階段場址特徵化參數之建立

SKB 針對 Forsmark 處置場址各領域所需之參數進行調查，調查項目包含地質、岩石力學、水文地質、熱特性、水文地球化學、岩石的傳輸特性以及地表生態(其中水文地球化學、岩石傳輸特性及熱特性在本計畫中不討論)，這些調查的結果將提供後續模型建置之重要資料，而最終結果將提供設施設計和安全評估。因此必須詳細地進行調查和建模，以利提供做為判斷場址適用性的重要資訊。以下將介紹 SKB 對於各領域所需確認之參數，這些重要資訊日後可檢視國內低放處置所考慮之因素是否完備。

SKB 針對不同領域詳細的分類參數的類別、每個參數被確定的時間(包含參數更新)以及參數的用途。最初先進行可行性研究(FS)，可行性研究之後進行場址調查(分別為初始(ISI)和完整(CSI)場址調查)，最後進行詳細描述(DC)。以表 2.1 為例，表 2.1 節錄與本研究有關之參數，由表可知許多參數在較早階段已透過調查而獲得，隨著陸續的調查工作得到新的資訊並進行更新。另外，地質、岩石力學、水文地質、水文地球化學、岩石的傳輸特性以及地表生態詳見附錄一。再者，本研究集中彙整有關岩石力學、以及水文地質方面相關參數，SKB 針對處置場址區域樣本進行單軸及三軸試驗(包含抗壓強度、抗拉強度、楊氏係數以及柏松比等)，

以及傾斜試驗(例如：摩擦角、凝聚力)等，並透過統計分析彙整出各參數特性範圍，相關參數詳見附錄二、附錄三以及第三章，透過蒐集這些參數可進一步討論不確定性。

表 2.1 節錄 SKB 在各階段確定或更新的參數表，並說明每個參數之用途

參數組	參數	確定參數的時間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
<b>地質參數</b>						
局部次要 破裂面域	方位			X	X	為水文地質模型和岩石力學模型(處置場設計)的輸入資料。破裂面填充礦物等為水文地球化學模型的輸入資料。
	長度		X	X	X	
	開口寬度			X	X	
	性質(破裂面數量、間距、塊體尺寸、破裂面特性、風化/蝕變)			X	X	
破裂面- 隨機 描述的數據	密度(不同組)		X	X	X	為詳細的水文地質模型和詳細的岩石力學模型的輸入資料。為核種傳輸模型間接輸入資料。破裂面填充礦物等為水文地球化學模型的輸入資料。
	方位		X	X	X	
	跡線長度(trace length)		X	X	X	
	粗糙度			X	X	
	風化(蝕變)			X	X	
<b>岩石力學</b>						
破裂面帶	幾何		X	X	X	描述性岩石力學模型中將岩石細分成不同的岩體。
破裂面 力學特性	正向變形特性			X	X	離散岩石力學模型，輸入岩體的變形特性數據。
	切向變形特性			X	X	
	剪切強度、節理粗糙度、節理抗壓強度、基礎摩擦 $\phi_b$ 、破裂面後摩擦 $\phi_r$			X	X	
邊界條件和輔助數據	現地應力、大小和方向		X	X	X	穩定性評估
<b>水文地質</b>						
隨機模擬的破裂面帶和破裂面增加岩體	幾何 - 岩體具有類似的水力特性	(X)	X	X	X	計算模型
	破裂面帶及破裂面的空間分佈和幾何性質的統計描述		X	X	X	DFN models
	導水率的統計分佈		X	X	X	
	水力傳導係數的統計分佈		X	X	X	SC models

\*FS 為可行性研究時期；ISI 為初始場址調查時期；CSI 為完整場址調查時期；DC 為詳細描述時期。

我國低放處置建議候選場址目前已針對許多項目進行初始狀態量化工作，但目前受限於社會因素，許多進一步的參數量化工作目前仍無法進行，但透過本研究研析 SKB 之經驗，針對不同時期針對各項參數調查，什麼參數建議首先調查，或是否需要依照時間的演進更新場址量化參數，仍可提供國內處置技術做為參考重點。



### 第三章 力學-水力特徵化之不確定性評估

場址參數的不確定性攸關處置場址設施設計之安全，上一章介紹了場址初始狀態參數量化的相關資訊，本章依據上一章的量化資訊彙整與本研究較相關之參數，並探討參數的不確定性，包含了地質資料、岩石力學以及水文地質，接著討論模型的不確定性，詳細討論如下：

#### 3.1 場址初始狀態量化參數之不確定性

SKB 對於 Forsmark 處置場址範圍進行場址初始狀態量化分析，其中包含地質、岩石特性、水文地質、水文地球化學、岩石的傳輸特性以及地表生態進行量化，本節將彙整與本研究較相關之主題進行討論，討論內容如下：

##### 1. 地質構造

SKB 對於 Forsmark 處置場址範圍進行岩體的分類，共分為 A 至 D 四個群組，如表 3.1 所示。每個群組中，不同的岩石類型根據其岩石組成、粒度和相對年齡進行區分，並且建置一個岩石類型的代碼系統(例如，111058 屬於 D 組年齡的細至中粒花崗岩)。圖 3.1 的地質圖上顯示，整個場址區域由不同岩石類行組成，其中紫色方框的目標區(紅色框線為候選區域)大部分由中粒變質花崗岩-花崗閃長岩組成。

Forsmark 場址區域一共歸類出 14 種岩石域以及 6 個獨立的破裂面結構域(以下簡稱破裂面域)。整體上目標區域之岩石域(RFM)由 RFM029 和 RFM045 所組成(如圖 3.1)，而目標區域中含有四個破裂面域(FFM)，包括 FFM01、FFM02、FFM03 和 FFM06，破裂面區之三維模型如圖 3.2 所示。

表 3.1 SKB 於 Forsmark 處置場址之岩石類型分類表

岩石分組	
Group D的岩石僅部分受到延性變形和變質影響。	
Group D (c 1,851 million years)	•細至中等顆粒花崗岩和細晶岩(111058)。偉晶岩、偉晶花崗岩(101061)。
Group C岩石在角閃岩相變質條件下受低滲透韌性變形影響。	
Group C (c 1,864 million years)	•細至中粒變質花崗閃長岩、正英閃長岩(101051)。
Group A和Group B的岩石在角閃岩相變質條件下受到穿透韌性變形影響。	

岩石分組	
<b>Group B</b> (c 1,886–1,865 million years)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•含有黑雲母的中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩(101057)和細晶變質花崗岩(101058)，兩者都以斜角閃岩和不規則夾雜物(102017)為主。局部鈉長石化花崗岩(104)。</li> <li>•變質正英閃長岩-花崗閃長岩(101054)與角閃岩包體(102017)。變質花崗閃長岩(101056)。</li> <li>•超基性岩(101004)。變質閃長岩、石英閃長岩和輝長岩(101033)。</li> </ul>
<b>Group A</b> (supracrustal rocks older than 1,885 million years)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•硫化物礦化、可能是次生的岩石(沉積構造)(109010)。</li> <li>•火成岩(103076)、鈣矽酸鹽岩(108019)和氧化鐵礦化(109014)。下層沉積岩(106001)。</li> </ul>

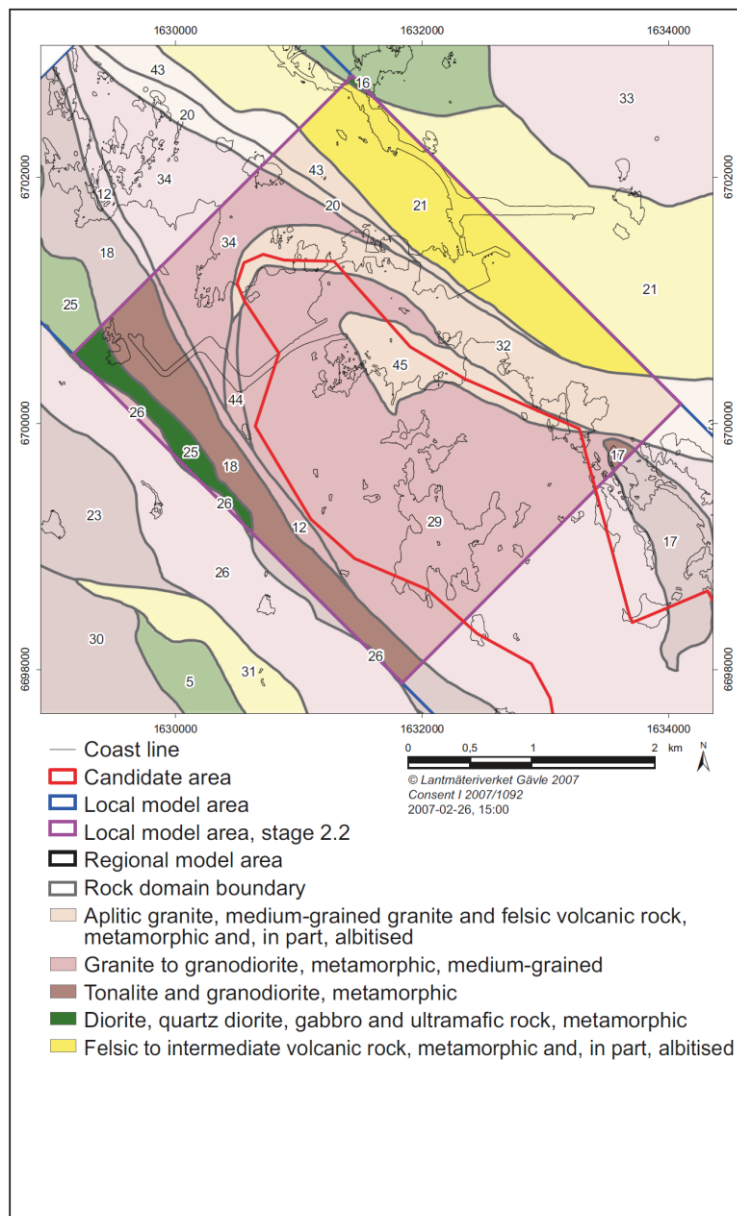


圖 3.1 Forsmark 處置場址地質圖(第 2.2 版)

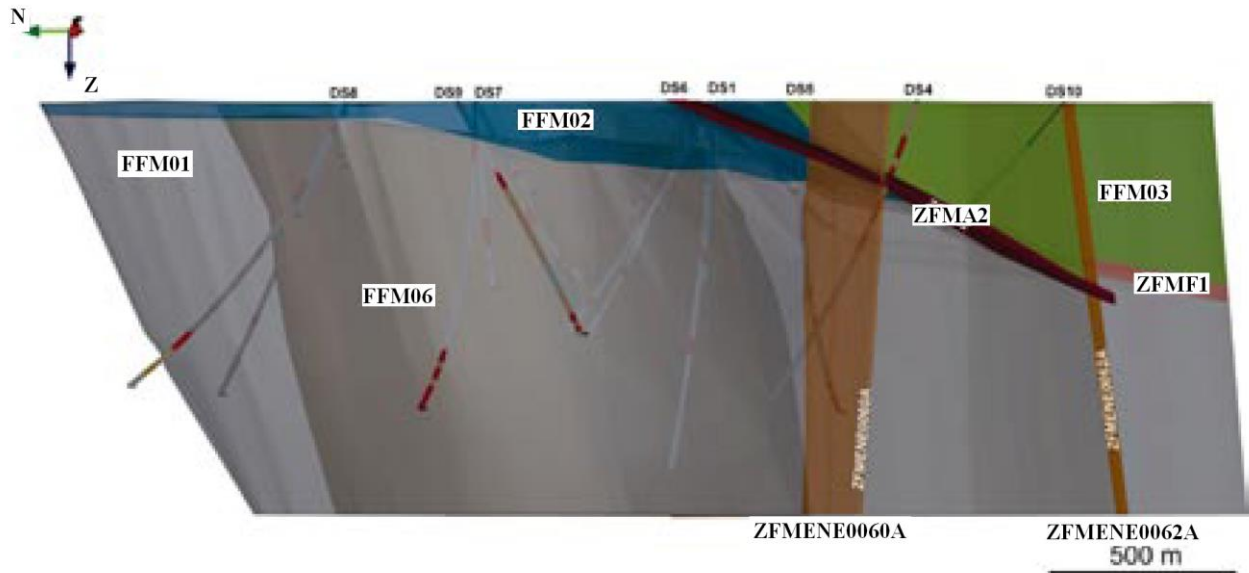


圖 3.2 目標區的破裂面域(FFM)以及變形帶(ZFM)三維模型

岩石域 RFM029 中的主要岩石類型是中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩(75%，101057)。其次為偉晶岩和偉晶花崗岩(13%，101061)、中粒變質花崗岩類(5%，101051)和角閃岩(4%，102017)。岩石域 RFM045 主要的岩石類型分別為細晶變質花崗岩(101058)和中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩(101057)，分別占本區域的約 51%和 18%。其次要的岩石類型基本上與 RFM029 相同，包括偉晶岩和偉晶岩花崗岩(14%，101061)、中粒變質花崗岩類(9%，101051)和角閃岩(6%，102017)。

破裂面域 FFM01 於目標區的深部，FFM02 於場址區域的西北側近地表區域，FFM03 位於目標區的東南部，變形帶 ZFMA2 和 ZFMF1 的正上方，FFM06 的位置如圖 3.2 中深灰色部分，此破裂面域與岩石域 RFM045 重合，其特徵為普遍的分佈細粒度變質(鈉長石化)花崗岩，以及具有較高的石英含量(與未變質的花崗岩相比)。

根據瑞典 Forsmark 之經驗，可提供我國兩處低放處置建議候選場址地質調查之重要參考依據，針對場址區域中岩體分類、岩石分類系統、岩石域與破裂面三維模型等分析方式，可做為我國場址地質調查重要參考，完整且詳細的場址區域調查，可降低處置場址之不確定性因素。

## 2. 岩石力學

### 岩石域

岩石力學方面，SKB 主要針對 Forsmark 處置場址區域 RFM029 和 RFM045 兩個岩石

域中的岩體進行測試，岩石域中又細分成破裂面域 FFM01、FFM02、FFM03 和 FFM06，並簡要說明相鄰的岩石域 RFM017、RFM018 和 RFM034 的資料。每個岩石區域進行的完整岩體實驗室試驗的數量和類型見表 3.2。完整岩體中進行試驗程序共包括 97 次單軸壓縮試驗、94 次三軸壓縮試驗和 205 次拉伸試驗。壓縮試驗則分為 FFM01 進行 63 個試驗、FFM03 進行 21 次試驗以及 FFM06 進行 5 次試驗。整個場址調查期間的重點為目標區域 FFM01 和 FFM06 中 400-500 公尺的試驗深度下測試力學特性。測試結果主要是完整、新鮮和不確定的岩石。大多數測試樣品整體上保持完整，只有少數樣本較不完整，其中鑽孔 KFM04A 中在岩石域 RFM018 的四個樣本歸類於變形帶(ZFMNW1200)。

表 3.2 目標區中每個鑽孔樣本進行不同測試方法的次數

鑽孔	岩石域	破裂面域	單軸壓縮	三軸壓縮	拉伸試驗
KFM01A	RFM029	FFM01	14	14	30
KFM01A				6	
KFM01C	RFM029	FFM01	-	5	-
KFM01D	RFM029	FFM01	-	4	20
KFM02A	RFM029	FFM01	5	4	10
KFM02A	RFM029 PDZ	-	4	4	10
KFM02A	RFM029	FFM03	5	4	10
KFM02B				6	
KFM03A	RFM029	FFM03	12	12	30
KFM03A	RFM017	FFM03	4	4	10
KFM04A	RFM018 DZ	-	4		11
KFM04A	RFM029	FFM01	10	8	22
KFM05A	RFM029	FFM01	10	8	20
KFM06A	RFM029	FFM01	10	-	5
KFM06A	RFM045	FFM06	5	-	-
KFM07A	RFM029	FFM01	8	4	6
KFM08A	RFM029	FFM01	-	6	1
KFM09A	RFM034	FFM01	6	3	14
KFM09A	RFM044	FFM05	-	2	6
Total			97	94	205

表 3.3 顯示了岩石域 RFM029 單軸抗壓強度的測試結果，這些岩石域的力學特性結果彙整於附錄二。岩石域 RFM029 中的主要岩石類型為中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩(101057)，而岩石域 RFM045 主要由細晶變質花崗岩(101058)組成，目標區域中的其他岩石類型還包含了角閃石-花崗閃長岩、偉晶岩和角閃岩。SKB 為了獲更具有品質的訊息，進行實驗室間的交叉試驗，不同測量系統(即不同儀器、觀察者、環境等)的重複測量獲得

不同的結果，這些試驗主要交叉比對可再現性的資訊。主要力學測試於赫爾辛基工業大學 (HUT)比較單軸、三軸和間接拉伸強度試驗。此外，加拿大礦業和礦物科學實驗室(CANMET)也進行了間接和直接拉伸強度試驗。另外，不同深度與完整岩石樣本的特性圖如圖 3.3 及圖 3.4。

表 3.3 岩石域 RFM029 單軸抗壓強度測試結果

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	47	157	226	225	289	28.8
FFM01	偉晶岩、偉晶花崗岩	10	192	228	231	266	21
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	13	203	220	221	251	12.9
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	143	150	152	155	5.6
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	166	205	206	242	32.6

no FFM：可能的變形帶。

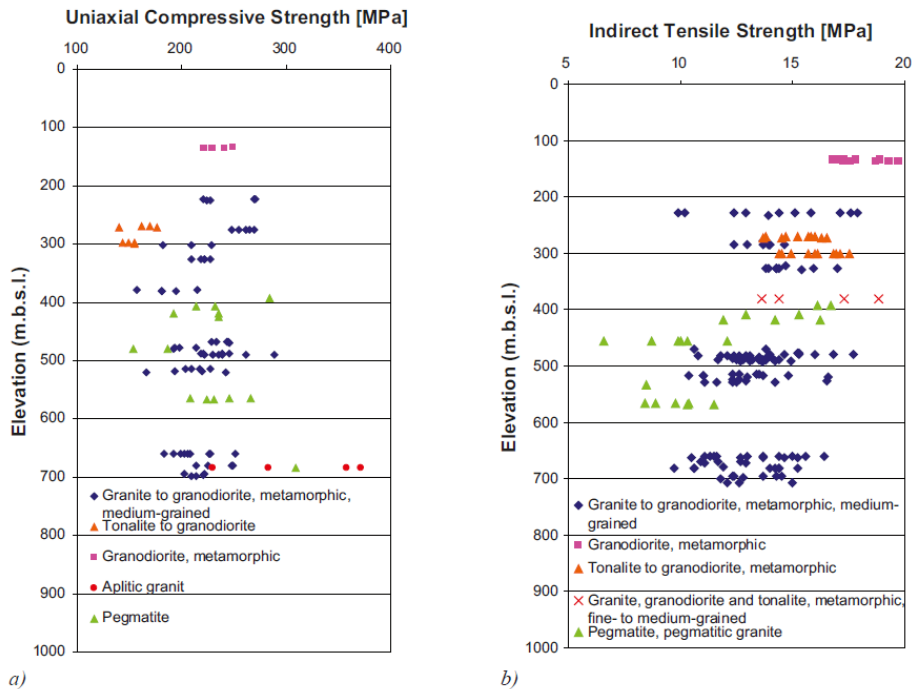


圖 3.3 單軸抗壓強度 a)和拉伸強度 b)與深度之關係，並按岩石類型進行分類之結果

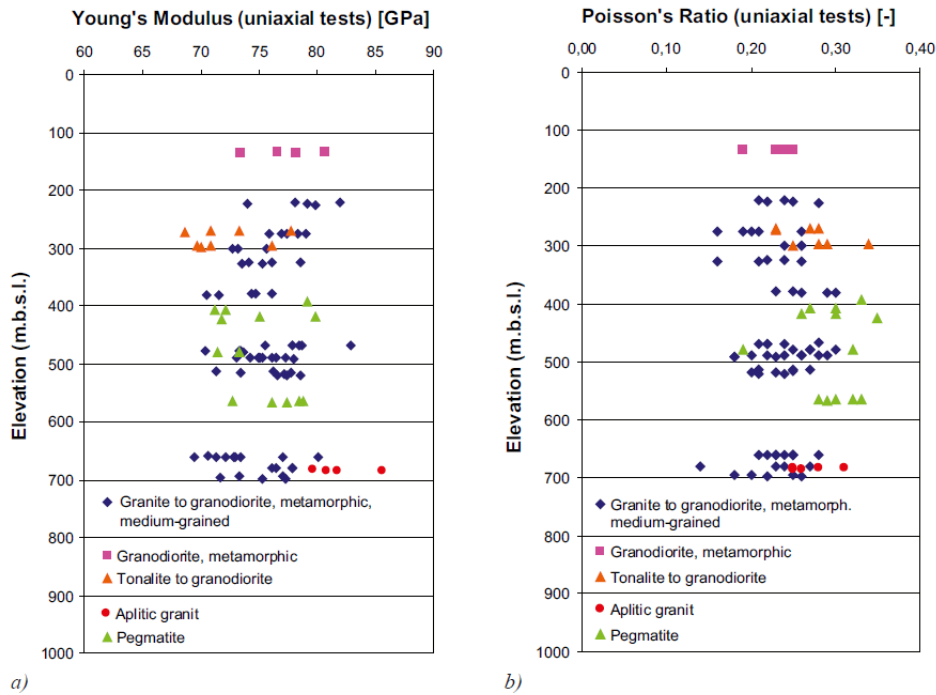


圖 3.4 楊氏係數 a)和柏松比 b)與深度之關係，並按岩石類型進行分類之結果

由圖 3.3a 可知，主要岩石類型(中粒變質花崗岩-花崗閃長岩)的單軸抗壓強度具有隨著深度緩慢降低的趨勢，其他岩石類型樣本數量太少，無法觀察到明顯變化的趨勢。而拉伸強度隨深度的變化(圖 3.3b)中，主要岩石類型的拉伸強度呈現隨著深度緩慢降低的趨勢，而其他岩類型沒有顯示出明顯的趨勢。壓縮和拉伸強度隨著深度輕微降低可能來自岩心取樣時解壓造成之微裂隙。另外，針對變質花崗岩、中等顆粒的花崗閃長岩觀察的結果發現，楊氏係數亦顯示出隨深度增加而緩慢降低的趨勢(圖 3.4a)，其中深度約 300 公尺時降低最為明顯。而柏松比的測試結果沒有明顯的趨勢(圖 3.4b)。

### 破裂面域

破裂面域(FFM)是指在岩石單元中相似的破裂面密度岩體。破裂面域 FFM01、FFM02 和 FFM03 主要代表岩石域 RFM029 的岩體，而 FFM06 等同於岩石域 RFM045 的岩體。破裂面域之岩石力學特性主要根據 RFM029、RFM045、RFM012、RFM034 以及 RFM044 五個岩石域進行測試，每個破裂面域進行的實驗室試驗之數量和類型見表 3.4。其中利用傾斜試驗(tilt tests)求取凝聚力與抗剪摩擦角之方式說明於後：傾斜試驗可以求得基本抗剪摩擦角與  $JRC$ ，因此，可根據 3.1 式繪製破壞包絡線(曲線)，應力範圍為 0-20 MPa，再者，用 3.2 式回歸 3.1 式之曲線得到截距以及直線與水平夾角，即為凝聚力與抗剪摩擦角。所有傾斜試驗的參數如表 3.5 所示，其他破裂面域傾斜試驗的結果見附錄三，其中  $c_p^{MC}$  以及

$\phi_p^{MC}$  為凝聚力峰值和摩擦角峰值， $c_r^{MC}$  為殘餘凝聚力以及  $\phi_r^{MC}$  殘餘摩擦角。結果顯示，其中 FFM01 和 DZ 之間的評估摩擦角和凝聚力差異非常小。另外，開口與閉合破裂面的剪力試驗結果詳見附錄三。

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b^{BB} + JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad 3.1$$

$$\tau = c_p^{MC} + \sigma_n \tan(\phi_p^{MC}) \quad 3.2$$

表 3.4 五個岩石域的樣本進行不同試驗方法測試破裂面的數目

鑽孔	岩石域	破裂面域	破裂面的傾斜試驗	張開性破裂面的剪力試驗	緊閉隙破裂面的剪力試驗
KFM01A	RFM029	FFM01	20	1	
KFM01A	RFM029	FFM02	11	4	
KFM01A	RFM029DZ		10	1	
KFM01D	RFM029	FFM01			4
KFM02A	RFM029	FFM01	13	4	
KFM02A	RFM029	FFM03	9	1	
KFM02A	RFM029DZ		18	2	
KFM03A	RFM029	FFM03	30	8	
KFM03A	RFM029DZ		5		
KFM03B	RFM029	FFM03	2		
KFM03B	RFM029 DZ		1		
KFM04A	RFM029	FFM01	22	2	
KFM04A	RFM029	FFM04	2		
KFM04A	RFM029 DZ		2	4	
KFM05A	RFM029	FFM01	4	8	
KFM05A	RFM029 DZ		5		
KFM06A	RFM029	FFM01		6	
KFM07A	RFM029	FFM01		5	
KFM08A	RFM029	FFM01		2	
KFM08A	RFM029 DZ			3	
KFM09A	RFM044	FFM05	5	2	
KFM09A	RFM44 DZ		1		
KFM09A	RFM034	FFM01		1	
KFM09A	RFM012	FFM04		3	
KFM09A	RFM029	FFM01	1		
KFM09A	RFM029 DZ		2		
Total			163	57	4

表 3.5 所有傾斜試驗(tilt tests)的計算結果，共 163 次測試

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, $\phi_p^{MC}$ [°]	25.8	30.8	30.9	34.9	3.1
Peak cohesion, $c_p^{MC}$ [MPa]	0.2	0.5	0.5	0.7	0.1
Residual friction angle, $\phi_r^{MC}$ [°]	20.3	26.2	26.8	32.8	3.9
Residual cohesion, $c_r^{MC}$ [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.6	0.1

岩石力學性質的經驗方法估計受到地質參數不確定性，以及經驗方法本身所引起的不確定性影響。評估參數的變化範圍取決於輸入數據的不確定性；特徵化岩體可能受到樣本數的大小以及人為之影響。

根據 SKB 之調查發現，破裂面域 FFM01 和 FFM06 的岩石力學特性顯示具有最高值，破裂面域 FFM02 最低。破裂面域 FFM01 和 FFM06 之間的變形特性差異很小，FFM01 的平均變形模量為 69GPa，FFM06 的平均變形模量為 70GPa，其中，破裂面域 FFM06 中具有更高的破裂面密度。破裂面域 FFM06 及破裂面域 FFM01 的平均單軸抗壓強度分別為 126 MPa 和 109 MPa，儘管完整的岩石具有較高的強度，FFM06 中較高的破裂面密度降低了岩體強度。其中，內聚力的不確定性顯著高於其他參數。

透過現地調查岩石的特性，並透過試驗結果統計其不確定性，對於後續處置坑道建置而言至關重要，而本研究於後面章節對於水力-力學特性之敏感性分析，岩石單壓強度之大小可能會對於處置坑道周圍岩石流場之敏感性有顯著影響，而傾斜試驗可間接得到粗糙度係數(JRC)，這些參數可能會嚴重影響處置場區域之流場，本研究於後面章節會對於粗糙度係數以及不連續面之岩石單壓強度與流場敏感度有進一步討論，因此，詳細的分析結果，除可降低其不確定性，亦可對於後續研究及處置設施設計提供重要資訊。

### 3. 水文地質

SKB 對於 Forsmark 候選區域(如圖 3.5)的十二個鑽孔位置(DS)進行取心鑽孔和衝擊鑽探鑽孔試驗，候選區域長約 6 公里，寬 2 公里，圖 3.6 顯示了鑽孔場址的詳細地圖，包含 25 個取心鑽孔和 38 個衝擊鑽探鑽孔。其中取心鑽孔鑽孔 KFM04B、KFM07A 和 KFM09A 位於西北候選區域的外圍，鑽孔 KFM11A 和 KFM12A 位於候選區域之外。



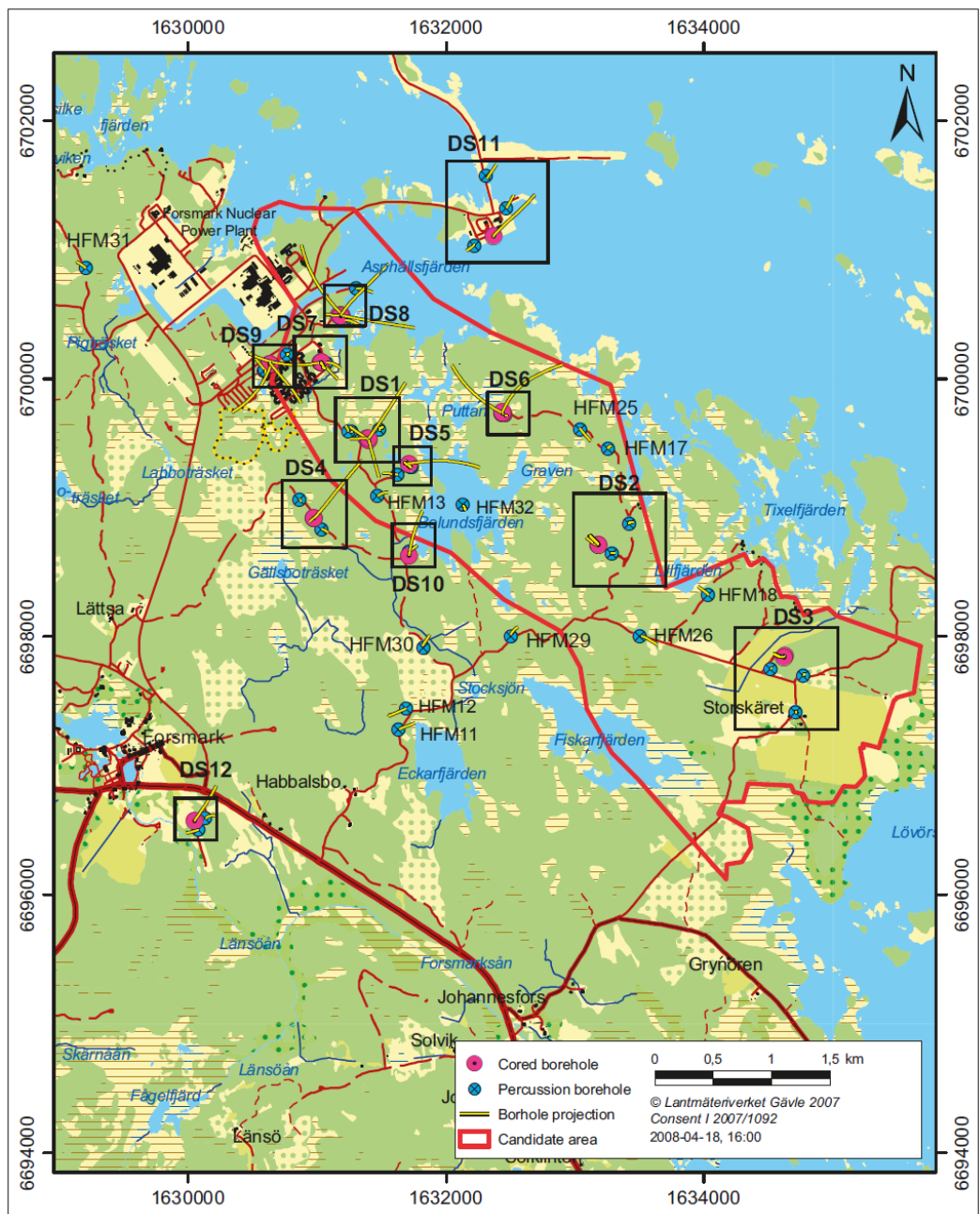


圖 3.5 2002-2007 年 Forsmark 場址調查所有取心鑽孔和衝擊鑽探鑽孔配置圖，以及傾斜鑽孔於地面上的投影

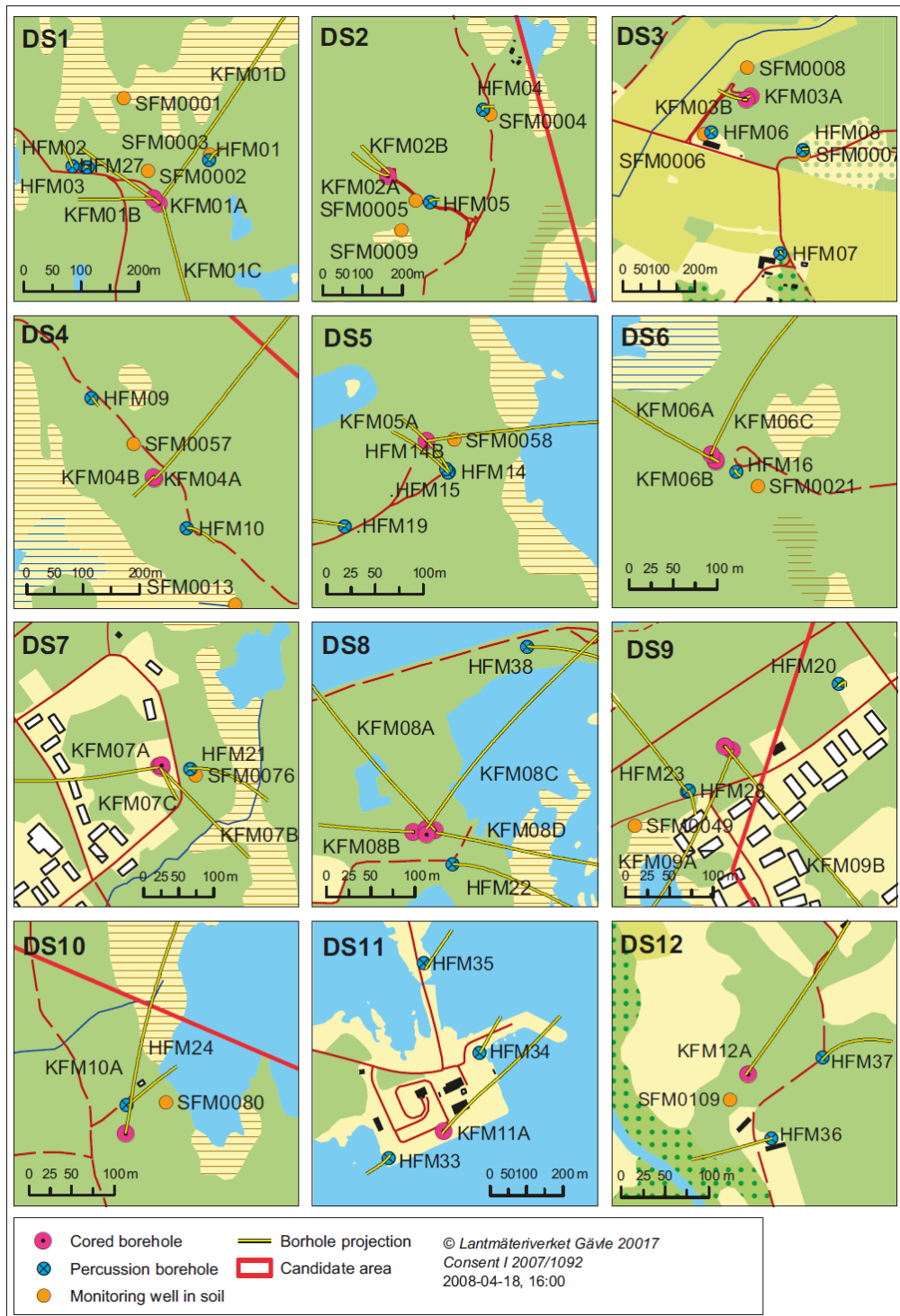


圖 3.6 圖 3.5 中各個鑽孔場址(DS)詳細配置圖，包含鑽探點附近或第四紀沉積物中的鑽孔

SKB 於 Forsmark 候選區域內進行一系列的跨孔(干擾)試驗評估，此試驗的結果強烈受到構造地質、破裂面系統的水力特性和資料採集的位置影響，其中，完整場址調查階段(CSI)進行的最重要的大規模干擾試驗。例如，2006 年度於編號 5(DS5)鑽孔場址之 HFM14 鑽孔的干擾試驗中，通過抽水試驗進行干擾試驗流量約 350L/min。候選區域中共有 36 個觀察鑽孔(105 個監測截面)監測地下水位，在這 36 個鑽孔中，其中 12 個鑽孔為取心鑽孔(55 個

監測截面)，另外 24 鑽孔為衝擊鑽探鑽孔(50 個監測截面)，每個監測截面，估計抽樣 21 天的資料進行測試。水力分析包括水力擴散細數估計、邊界條件解釋，圖 3.7，圖中顯示 2006 年在鑽孔 HFM14 中使用的監測網絡的簡化 2D 視圖，以及對應於 0.01 公尺的洩降響應時間。

根據 SKB 之結果指出，試驗範圍內最上層 150m 之岩體具有連接良好的裂隙網絡，且淺層岩體脂含水層具高的異向性及幾乎沒蓄水率(storativity)。也就是說，破裂面系統在水平方向上具有很好的穿透性，並與露頭區有良好的水力連接。其中，具有較高的水力擴散率之岩體，其主因根據 BIPS 圖像顯示，節理薄片具有非常寬的孔隙。

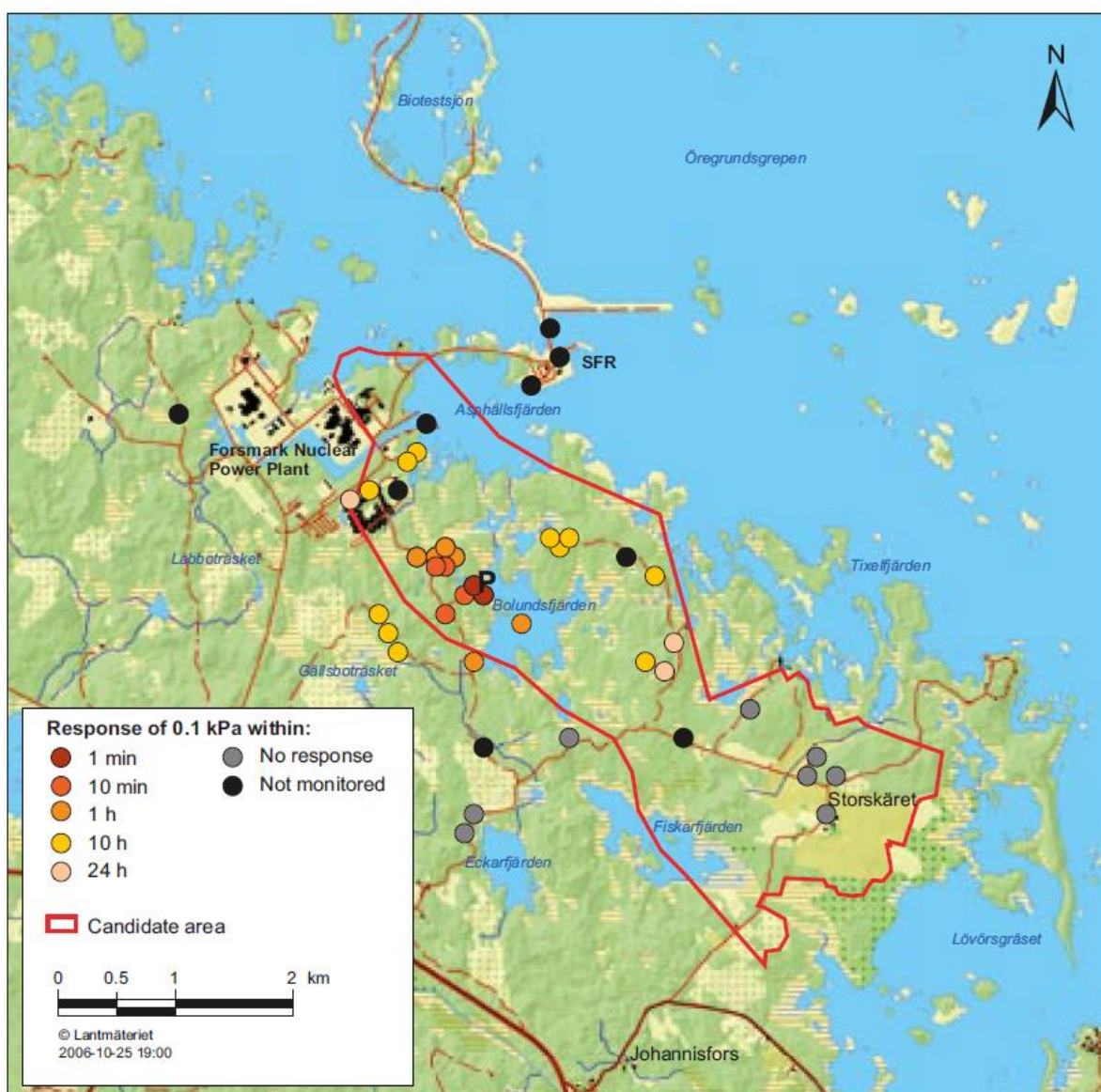


圖 3.7 2006 年於編號 5 號鑽孔場址(DS5)中鑽孔 HFM14(P 點)進行三週干涉試驗

## 3.2 破裂面幾何特徵統計建模之方法

統計地質離散破裂面網絡模型的基本方法是以基岩中破裂面的方位和終止關係為基礎，劃分為每個不同組別的破裂面域，減少相關的參數變化，降低 DFN 模型的總體的變化或不確定性。要完全模擬 DFN，需要的資訊包含 a)破裂面位態；b)破裂面尺寸；c)破裂面形狀；d)破裂面密度；e)破裂面空間控制，包括尺度化關係和位置模型；f)破裂面終止關係。此外，在建模過程中，應個別處理“受變形帶影響”的岩體。受變形帶影響之岩體破裂面密度相對於整體岩石為高，標有“受變形帶影響”的區域應使用不同的  $P_{32}$  強度( $P_{10}$  單位長度的破裂面數(鑽孔)； $P_{21}$  每單位面積的破裂面長度(露頭)； $P_{32}$  單位體積岩體破裂面積)。因此，為了降低模擬的不確定性，必須掌握這些“受變形帶影響”岩體的資訊。為了有效的進行 DFN 模擬，SKB 針對上述 DFN 模式所需之資訊，包含破裂面位態、尺寸、密度及空間等進行模型建置，敘述如下：

### 1. DFN 位態模型

破裂面位態模型主要由破裂面的方位、地質特徵和幾何關係發展而來。SKB 建構地質 DFN 位態模型的工作流程如下：

- (1) 使用露頭測繪資料，確定每個破裂面域中的破裂面位態。
- (2) 進行立體投影(stereoplots)分析。
- (3) 經由分配球面概率分佈量化位態組(Orientation sets)。
- (4) 根據走向區分露頭組(outcrop sets)：
  - a) 普現群組(Global)；
  - b) 局部群組(Local)。
- (5) 每個破裂面區域中，針對鑽孔和露頭數據的每個破裂面組之擬合方位分佈被彙編成單個數據集。每個破裂面組的最終方位模型包含：
  - a) 平均極點( $\varphi, \theta$ )適用於單一區域；
  - b) 潛在變異的單變數 Fisher 集中度參數在平均極點位置( $K_{mp}$ )；

c) Fisher 集中度參數( $\kappa$ )的平均值。

(6) 參數變異性透過 Fisher 集中度參數  $\kappa$ (正態分佈)的統計分佈進行規範。

以破裂面域 FFM01 為例，表 3.6 為整理出 FFM01 中各個參數值，包含每個破裂面域中屬於哪個破裂面組、露頭組分類、平均極點以及 Fisher 分佈。另外，完整之參數如附錄四。

表 3.6 不連續面位態模型

破裂面域	破裂面組	露頭組分類	平均極點			Fisher 分佈 $\kappa$		
			Trend	Plunge	$\kappa_{mp}$	Mean	Std. dev.	Median
FFM01	NE	Global	314.9	1.3	47.4	20.9	9.4	17.8
FFM01	NS	Global	270.1	5.3	47.0	21.3	13.2	20.3
FFM01	NW	Global	230.1	4.6	32.3	15.7	8.1	12.6
FFM01	SH	Global	0.8	87.3	48.9	17.4	7.1	14.4
FFM01	ENE	Local	157.5	3.1	100.0	34.1	17.0	34.1
FFM01	EW	Local	0.4	11.9	30.0	13.9	5.6	13.5
FFM01	NNE	Local	293.8	0.0	33.1	21.8	0.9	NA
FFM01	SH2	Local	164.0	52.6	NA	35.43	NA	NA
FFM01	SH3	Local	337.9	52.9	10.2	17.1	0.1	NA

## 2.DFN 尺寸模型

尺寸模型是指對破裂面面積的數學描述，不同的破裂面組可能需要不同的尺寸模型。地質 DFN 的尺寸模型由兩種替代模型組成：一個建立在耦合尺寸-密度關係(TCM / TCMF)之上，主要來自地表露頭數據，以及第二個模型(OSM + TFM)，其主要來自地表露頭，其尺寸資訊主要來自鑽孔數據。此外，由於已經通過地質和構造變形程度來區分破裂面區域，因此可以合理地假定破裂面的尺寸模型因破裂面而不同。破裂面和次要變形帶域的統計模型包含兩個不同大小的模型替代方案：

- (1) 構造連續模型(TCM)：假設破裂面總體為一個很大的範圍(例如，從公尺延伸到公里)，此模型允許多個尺度上組合資料集。構造連續模型替代方案之間的唯一區別是歐基里德(Euclidean)假設 (TCM)或分形(TCMF)尺寸-密度尺度化。以破裂面域

FFM01 為例，表 3.7 及表 3.8 為上述兩種構造連續模型之參數，完整之參數如附錄四。

- (2) 露頭比例模型+構造斷層模型(OSM + TFM)：不考慮單一耦合尺寸密度的複合尺寸模型。在這個具體的參數化中，假設破裂面屬於不同尺度不同密度的不同群體(節理和斷層)。破裂面域 FFM01 之露頭比例模型如表 3.9(完整參數參閱附錄四)，構造斷層模型如表 3.10。

表 3.7 破裂面尺寸-歐基里得假設之構造連續模型 (TCM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius $r_0$ (m)	Exponent ( $k_r$ )	Match $P_{32}$ $r_{0-\infty}$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.66	3.02	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.06	2.78	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.59	2.85	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.82	2.85	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.32	3.25	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.17	3.1	1.12
FFM01	NNE	Local	使用露頭比例尺寸模型			
FFM01	SH2	Local	根據露頭比例使用 SH 組的尺寸模型			
FFM01	SH3	Local	根據露頭比例使用 SH 組的尺寸模型			

表 3.8 破裂面尺寸-分形構造連續模型 (TCMF)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius $r_0$ (m)	Exponent ( $k_r$ )	Match $P_{32}$ $r_{0-\infty}$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.72	3.01	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.06	2.76	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.63	2.85	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.72	2.83	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.34	3.25	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.17	3.13	1.12
FFM01	NNE	Local	使用露頭比例尺寸模型			
FFM01	SH2	Local	根據露頭比例使用 SH 組的尺寸模型			
FFM01	SH3	Local	根據露頭比例使用 SH 組的尺寸模型			

表 3.9 破裂面尺寸-露頭尺度模型(OSM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius $r_0$ (m)	Exponent ( $k_r$ )	Match $P_{32}$ $r_0-\infty$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.039	2.64	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.039	2.90	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.039	2.44	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.039	2.61	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.039	2.20	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.039	3.06	1.12
FFM01	NNE	Local	Power Law	0.039	3.00	4.39
FFM01	SH2	Local	From SH	0.039	2.61	0.92

表 3.10 破裂面尺寸-構造斷層模型(TFM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius $r_0$ (m)	Exponent ( $k_r$ )	Match $P_{32}$ $r_0-564$ (1/m)
All Domains	NE	Global	Power Law	28	3	0.0285
All Domains	NS	Global	Power Law	28	2.2	0.0003
All Domains	NW	Global	Power Law	28	2.06	0.0003
All Domains	SH	Global	Power Law	28	2.83	0.0286
All Domains	ENE	Global	Power Law	28	3.14	0.0871
All Domains	EW	Global	Power Law	28	2.85	0.0014

### 3. DFN 密度模型

地質 DFN 模型的破裂密度與尺寸和空間模型密切相關。最終密度模型建立在以下假設之上：

- 露頭比例模型中的破裂域 FFM01 和 FFM06，大小-密度匹配點基於使用王氏解法(Wang solution)從核心鑽孔數據獲取平均  $P_{32}$  值，假設分佈最小半徑等於鑽孔半徑的分佈。
- 對於所有其他模型(TFM、TCM、TCMF)和露頭比例模型的其他區域(FFM02 和 FFM03)，尺寸密度匹配點建立在同時匹配從核心鑽孔獲得的平均  $P_{32}$  值與匹配相關表面露頭上的  $P_{21}$  值的  $P_{32}$  值。最小半徑通常設定為大於鑽井的最小半徑。在可能的情況下，量化  $P_{32}$  的變異性。雖然沒有強烈的深度依賴性，但  $P_{32}$  確實隨岩性和破裂域而變化。另外，沒有限制  $P_{32}$  應該在空間上作為伽馬分佈而變化。在密度模型表中呈現的值表示在 0.5m 和 564m 之間的截斷的  $P_{32}$  值(破裂面域 FFM01 如表 3.11 及表 3.12，完整之參數參閱附錄四)。另請注意，TFM 模型僅在不受 DZ 影響的破裂配對時才有效。

表 3.11 平均  $P_{32}$  密度，破裂面“不受 DZ 影響”

破裂面域	破裂面組	群組種類	Mean $P_{32}$ (0.5–564 m)			(28–564 m)
			OSM	TCM	TCMF	TFM
FFM01	NE	Global	0.33	2.30	2.50	0.0285
FFM01	NS	Global	0.13	0.24	0.26	0.0003
FFM01	NW	Global	0.29	1.10	1.15	0.0003
FFM01	SH	Global	0.13	0.95	0.85	0.0286
FFM01	ENE	Local	1.24	1.60	1.70	0.0871
FFM01	EW	Local	0.07	0.34	0.33	0.0014
FFM01	NNE	Local	0.34	使用 OSM	使用 OSM	NA
FFM01	SH2	Local	0.19	使用 OSM	使用 OSM	NA
FFM01	SH3	Local	0.19	使用 OSM	使用 OSM	NA

表 3.12 平均  $P_{32}$  密度，破裂面“受 DZ 影響”

破裂面域	破裂面組	群組種類	Mean $P_{32r_0-\infty}$	Mean $P_{32}$ (0.5–564 m)		
				OSM	TCM	TCMF
FFM01	NE	Global	5.45	1.04	7.22*	7.22*
FFM01	NS	Global	2.60	0.26	0.49	0.49
FFM01	NW	Global	2.42	0.75	2.79*	2.79*
FFM01	SH	Global	2.44	0.50	3.69*	3.69*
FFM01	ENE	Local	3.90	1.76	2.27	2.27
FFM01	EW	Local	2.85	0.19	0.87	0.87
FFM01	NNE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM01	SH2	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM01	SH3	Local	2.24	0.46	使用 OSM	使用 OSM

\*  $r_0$  適合在 FFM01 中大於  $r_{\min}(0.5 \text{ m})$ ；因此， $P_{32}$  增加。



### 3.2 破裂面幾何特徵之不確定性評估

因破裂面岩體水力-力學耦合問題在於破裂面之幾何與力學-水力參數統計特性，以下摘要總結 SKB 報告(引用文獻)地質特徵化模型建立團隊於 Forsmark 場址特徵化 2.2 階段與破裂面統計量化有關之不確定性評估獲致之結論，希望根據 Forsmark 場址特徵化經驗所獲得之參數不確定性範圍，可作為低放坑道處置之參考(並非要求低放處置有與 Forsmark 場址特徵化一樣的調查強度，只是提供參數不確定評估結果，作為低放場址調查重點方向決定之參考)。

- (1) 破裂面位態：地質 DFN 參數化的分析結果顯示，三個破裂面域(FFM01，FFM03 和 FFM06)，有四個普現群組一致，分別為 NE、NS、NW 和 SH 之破裂面組。破裂面域 FFM02 相較於其他域中增加兩個普現群組(分別為 ENE 和 EW 破裂面組)，但這兩個群組於其他破裂面域中歸類於局部群組。有效掌握處置場區域之破裂面位態，可能是降低不確定性之關鍵因素之一。
- (2) 破裂面尺寸：“構造連續”為影響不確定性最大的因素，地質 DFN 參數化過程中完成的統計分析結果可說明，露頭和鑽孔測量的破裂面與公里尺度的變形區可能是不同的群體。可能影響大概為一個破裂密度的數量級，對岩體的滲透性的影響大約為一個數量級。如果採用構造連續模型，則最重要的不確定性是尺度大於幾十公尺之不確定性因素，此影響構造連續模型的尺度模型。因此，可能需要注意是否可使用構造連續體，允許單一模型包含鑽孔、露頭、地磁線和變形區數據。如果不使用構造連續體，且破裂面尺度差異較大(大尺度如：斷層/變形區之破裂面；小尺度：節理)，是否有尺寸之限制？
- (3) 破裂面密度：所使用的模型(包含歐基里得假設、分形或其他類型的模型)所涵蓋的範圍(地表至處置深度)；當深度因素被評估時，除了最上面的 100 公尺以外，破裂面密度似乎沒有深度的系統性變化。除近地表環境外，密度變化不是深度的系統函數。假設忽略深度因素，則會稍微高估平均密度(約 10%)。破裂密度隨岩性、破裂面組和破裂面域變化而變化。因此，國內在進行相關研究時，可能須注意所使用的模型所涵蓋的範圍(地表至處置深度)，且破裂密度如何隨深度而變化，假設不考慮深度變化，則評估不確定性因素會增加多少。

- (4) 岩石類型：不同岩石類型的數據組合將對於不確定性產生最大的影響。假設將這些數據進行組合，對每個區域分別建模(包含具有非常不同的破裂密度的幾種獨特的岩石類型(例如角閃岩))，則可減小影響，可能影響密度大約半個數量級，對岩體的滲透率有相應的影響。因此需關注一些議題，包含岩石類型如何影響不確定性?如果不考慮岩石類型之因素，則不確定性會如何變化?

最後，SKB 地質團隊建議水文地質團隊、工程團隊以及負責安全評估者應檢視地質團隊所提出之不確定性是否滿足其分析需求。同時，因 FFM01 以及 FFM06 兩區之破裂面尺寸量化結果不確定性太高(缺少 FFM01 以及 FFM06 兩處之破裂面軌跡長資料，不確定性高達 2-3 個數量級)，地質團隊亦建議後續隧道或豎井開挖時應盡可能調查相關資料。最後，所有資料使用者必須自行評估不確定性是否滿足其分析需求。使用資料者若發現不確定性過大，則應進行進一步之調查與分析以降低不確定性。

破裂面參數之統計特性不確定性關鍵課題之一是尺寸效應，根據露頭、鑽井以及地物探測獲得之資料進行昇尺度建模，不確定性是很高的，由露頭到公里級尺寸，破裂面密度與滲透係數差異可以差到一個數量級。若直接昇尺度的可能性不存在，且斷層帶或變形區附近之破裂面特性與遠離這些區域之破裂面特性非常不同，那麼多大的斷層帶或變形區應該被獨立出來分析?多小的節理系統可以被納入擬連續體昇尺度模型中?這些問題都存在不確定性，根據非常有限的抽水試驗資料分析結果顯示，尺寸超過 200 公尺之破裂面不納入擬連續體滲透隙數平均化的情況下，破裂面密度與滲透係數可能下降 0.66-09 倍。破裂面密度昇尺度關係(由鑽井/露頭尺度至處置窖尺度)模式建立也具有不確定性，由露頭尺度推估處置窖尺度之破裂面密度最大增加 1.6 倍。不同岩石分區位之破裂面密度也會不一樣，若統計時將不同岩石分區分開，則破裂面密度(以及滲透係數)之不確定性可減少約半個數量級。至於深度相關之破裂面密度若忽略不考慮，可能會高估破裂面密度約 10%，而破裂面方位對破裂面密度不確定性的影響，主要來自於破裂面分組時的不確定性。

## 第四章 力學-水力特性對流場敏感度分析

本章節探討可能對於坑道處置場址岩體裂隙中流場的敏感度因子，過去常用來模擬破裂介質中水流之方法有兩種，其一為擬連續體模式(continuum approach)，另一類則採用離散模式(discrete approach)。擬連續模式中，裂隙岩體被假設為一均勻等值孔隙介質，此種方法將每組破裂面的流動性質以平均值表示，因此這類模式適合較大範圍的岩體，不需要對單一破裂面之性質完全了解；離散模式通常假設岩體為多組不連續面分割，經調查岩體之不連續面分布，再利用統計方法，以建立岩體離散裂隙模型。綜上所述，前者方法較適用於大區域、不連續面數量相對極多之模擬區域，而後者方法適用於小區域、不連續面數量相對較少之模擬區域。然而，地質處置範圍較適合上述擬連續體模式之方法，因此本章主要採用擬連續體模式之方法進行分析。

### 4.1 分析方法

Oda 於 1985 提出破裂張量概念，將岩體視為均質異向性之介質，假設岩體之材料為不透水材質，地下水只能透過岩體中的破裂面流動，並根據破裂面形狀、內寬、位態、長度等參數，以二維連續模式導出破裂岩體滲透係數張量(如式 4.1)：

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{e_m} \int_0^{l_m} \int_{\Omega} l^2 e^3 \hat{n}_i \hat{n}_j E(\hat{n}) f(l) g(e) d\Omega dl de \quad (4.1)$$

其中  $\rho$  為不連續面體密度(Volume density)，代表單位體積岩體之不連續面個數， $l$  為破裂面長度， $e$  為開口寬。由上式得知每個參數對於裂隙岩體水力傳導係數的影響程度不同， $\rho$  與水力傳導係數成一次方關係， $l$  與水力傳導係數為平方關係， $e$  為三次方關係。再者，利用滲透係數張量可進一步求得水力傳導係數  $k_{ij}$ (式 4.2)：

$$k_{ij} = \frac{1}{12} (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (4.2)$$

由式(4.1)與(4.2)可知，水力傳導係數與不連續面密度成正比，與裂隙大小(長度)平方成正比，也就是說，裂隙大小對水力傳導係數之影響大於裂隙密度。另外，由式(4.1)與(4.2)亦可知，水力傳導係數與裂隙開口寬三次方成正比，為影響岩盤中流體流動之最關鍵因子，以下不連續特性敏感度分析將集中於裂隙開口寬  $e$  相關之參數。

裂隙開口寬為不連續面位態與應力之函數，本研究計算開口寬之方法如式 4.3，首先假設一未受應力作用之初始開口寬  $E_0$  減去因應力作用而改變之開口寬閉合量  $\Delta E$  得到力學內寬  $E$ 。

$$E = E_0 - \Delta E \quad (4.3)$$

其中，初始開口寬的計算方法本研究使用 JRC(不連續面粗糙度係數)與 JCS(不連續面單壓強度)之概念(Bandis, 1983)，如式(4.4)：

$$E_0 = \frac{JRC_0}{5} \left( 0.2 \frac{\sigma_c}{JRC_0} - 0.1 \right) \quad (4.4)$$

$JRC_0$  為不連續表面之粗糙度係數(試驗室尺寸 10 cm)， $JCS_0$  為不連續面表面之單壓強度(試驗室尺寸 10 cm)， $\sigma_c$  為完整的岩石單壓強度，假設不連續面未受風化作用的影響，此時不連續面之單壓強度可視為完整岩石之單壓強度( $JCS_0 = \sigma_c$ )。

Bandis et al. (1983)認為單一不連續面之正向應力  $\sigma_n$  與不連續面開口寬受正向應力之閉合量  $\Delta E$  之關係可用雙曲線模擬，如式(4.5)所示：

$$\sigma_n = \frac{\Delta E}{a - b\Delta E} \quad (4.5)$$

其中， $a$ 、 $b$  為常數(可由實驗獲得)。

$$a = 1/k_0 \quad (4.6)$$

$$b = 1/k_0 b_n^m \quad (4.7)$$

將式(4.6)、式(4.7)帶入式(4.5)，可得不連續面開口寬閉合量  $\Delta E$ (如式 4.8)，即可求得力學內寬  $E$ ，其中  $k_0$  為節理受某一正向應力時之初始正向勁度， $b_n^m$  為不連續面內寬最大閉合量。

$$\Delta E = \frac{a\sigma_n}{1 + b\sigma_n} \quad (4.8)$$

Bandis et al. (1983)認為初始正向勁度  $K_0$ (式 4.9)與不連續面內寬最大閉合量  $b_n^m$ (式 4.10)也可使用 JRC、JCS 之概念有如下之經驗公式：

$$k_0 = 0.02 \left( \frac{JCS_0}{E_0} \right) + 2JRC_0 - 10 \quad (4.9)$$

$$b_n^m = 0.3 - 0.006JRC_0 + 2.24 \left( \frac{JCS_0}{E_0} \right)^{-0.25} \quad (4.10)$$

上述各公式中參數之適用範圍如下：

$$JRC_0 : 5 \sim 15 ; JCS_0 : 22 \sim 182 \text{ (MPa)} ; E_0 : 0.1 \sim 0.6 \text{ (mm)}$$

上述之計算得到力學內寬，最後透過式(4.11)力學-水力內寬轉換公式(Bandis, et al. 1985)得到水力內寬  $e$ ，並帶入 Oda model 即可求得水力傳導係數。

$$e = \frac{E^2}{JRC_0^{2.5}} \quad (4.11)$$

## 4.2 以粗糙度係數( $JRC_0$ )為變數之分析結果

本節探討未受到擾動或風化作用，如上一節式(4.4)中，不連續面之單壓強度可視為完整岩石之單壓強度( $JCS_0 = \sigma_c$ )，因此式(4.4)之初始開口寬只與粗糙度係數  $JRC_0$  有關，因此式(4.4)可縮減為  $E_0 = 0.02JRC_0$ 。再者，假設各參數值：破裂面密度  $\rho = 5$  (條/ $m^3$ )，破裂面長度  $l = 5$  (m)， $JCS_0 = 100$  (MPa)，以  $JRC_0$  為變數(4~16)針對不同邊界應力進行計算(所有詳細的數據如表 4.1)，並針對不同均向邊界應力  $\sigma_n$  進行計算( $\sigma_n = 0.15$  MPa、0.9 MPa、1.8 MPa、6.0 MPa、7.5 MPa)，計算結果如下：

圖 4.1 為  $JRC_0$  與初始力學內寬  $E_0$  之關係。由於不考慮風化作用之情況，不連續面之單壓強度視為完整岩石之單壓強度，因此簡化後  $E_0$  與  $JRC_0$  為正比之關係，與計算結果(圖 4.1)相符。再者，透過式(4.3)可進一步計算出力學內寬，計算結果如圖 4.2 所示，結果可發現其趨勢與初始力學內寬之結果相似，但可發現當邊界應力越大，對於力學內寬的敏感度越大。得到力學內寬之結果可透過式(4.11)之力學-水力內寬轉換公式將力學內寬轉換成水力內寬，計算結果如圖 4.3，結果可發現其敏感度與力學內寬有相同之趨勢， $JRC_0$  愈大，其受到邊界應力之敏感度則愈大。

最後，利用以上資料進一步求得水力傳導係數  $K$ ，其關係圖如圖 4.4，可以發現其趨勢與水力內寬之結果相似，但放大了約 3 次方倍，與式 4.1 水力傳導係數與開口寬成三次方關係相符。

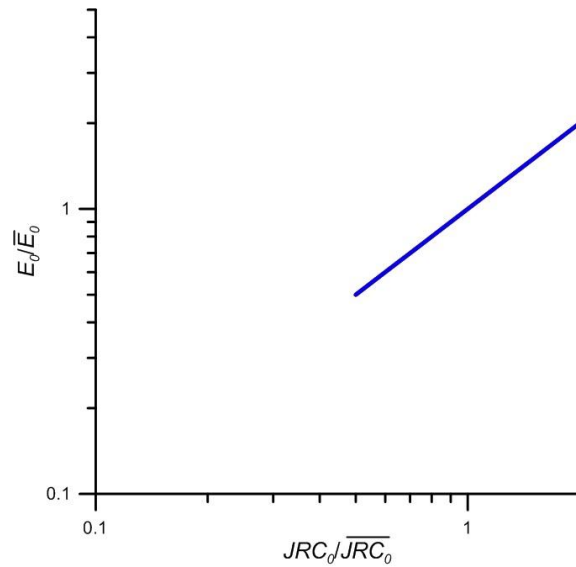


圖 4.1 未考慮風化作用之情形下， $JRC_0$  與初始力學內寬  $E_0$  之關係圖

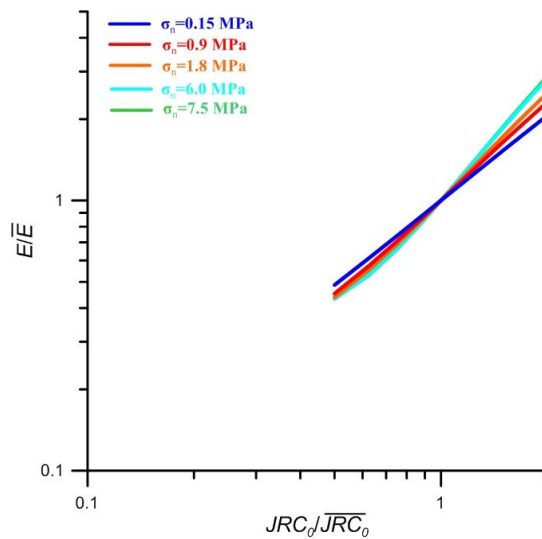


圖 4.2 未考慮風化作用之情形下， $JRC_0$  與力學內寬  $E$  之關係圖

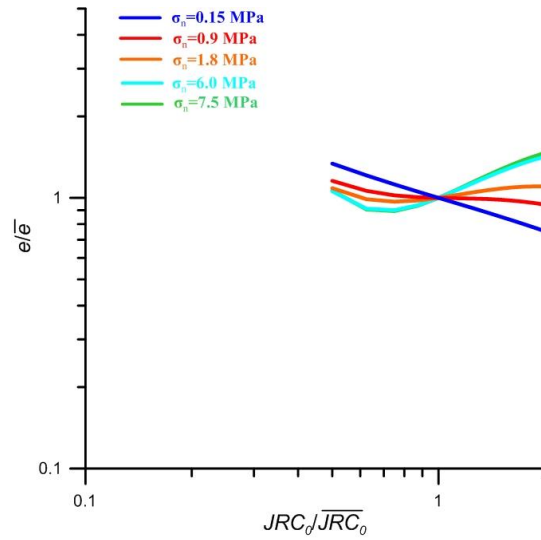


圖 4.3 未考慮風化作用之情形下， $JRC_0$  與水力內寬  $e$  之關係圖

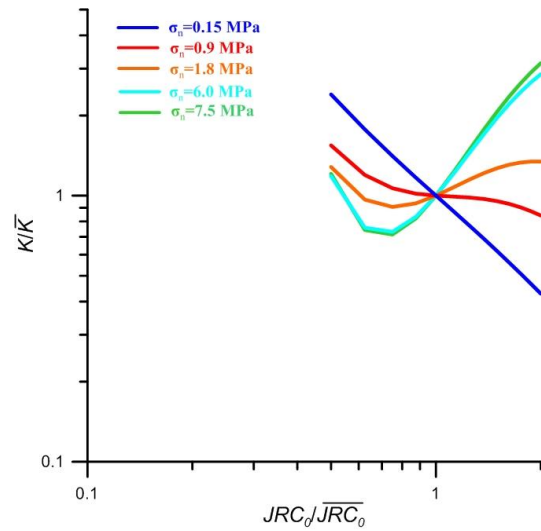


圖 4.4 未考慮風化作用之情形下， $JRC_0$  與水力傳導係數  $K$  之關係圖

表 4.1 不考慮風化作用下，變數為  $JRC_0$  之計算結果

參數設定	$JRC_0$	$E_0$ (mm)	$E$ (mm)	$e$ (mm)	$K$ (m/sec)
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 10M(0.15MPa)	4	0.08	7.4196E-05	1.7203E-04	2.7770E-11
	5	0.1	9.3242E-05	1.5552E-04	2.0517E-11
	6	0.12	1.1269E-04	1.4401E-04	1.6290E-11
	7	0.14	1.3247E-04	1.3537E-04	1.3529E-11
	8	0.16	1.5250E-04	1.2847E-04	1.1566E-11
	9	0.18	1.7269E-04	1.2272E-04	1.0080E-11
	10	0.2	1.9296E-04	1.1775E-04	8.9042E-12
	11	0.22	2.1329E-04	1.1336E-04	7.9450E-12
	12	0.24	2.3363E-04	1.0942E-04	7.1456E-12
	13	0.26	2.5397E-04	1.0585E-04	6.4689E-12
14	0.28	2.7429E-04	1.0259E-04	5.8894E-12	

	15	0.3	2.9460E-04	9.9596E-05	5.3884E-12
	16	0.32	3.1489E-04	9.6831E-05	4.9520E-12
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 60M(0.9MPa)	<i>JRC<sub>0</sub></i>	<i>E<sub>0</sub></i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>e</i> (mm)	<i>K</i> (m/sec)
	4	0.08	5.7540E-05	1.0346E-04	6.0408E-12
	5	0.1	7.2867E-05	9.4982E-05	4.6737E-12
	6	0.12	8.9789E-05	9.1425E-05	4.1680E-12
	7	0.14	1.0802E-04	9.0007E-05	3.9771E-12
	8	0.16	1.2727E-04	8.9484E-05	3.9082E-12
	9	0.18	1.4726E-04	8.9245E-05	3.8769E-12
	10	0.2	1.6776E-04	8.8997E-05	3.8447E-12
	11	0.22	1.8858E-04	8.8617E-05	3.7957E-12
	12	0.24	2.0960E-04	8.8069E-05	3.7256E-12
	13	0.26	2.3072E-04	8.7357E-05	3.6360E-12
	14	0.28	2.5187E-04	8.6506E-05	3.5308E-12
	15	0.3	2.7303E-04	8.5545E-05	3.4144E-12
	16	0.32	2.9416E-04	8.4502E-05	3.2911E-12
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 120M(1.8MPa)	<i>JRC<sub>0</sub></i>	<i>E<sub>0</sub></i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>e</i> (mm)	<i>K</i> (m/sec)
	4	0.08	4.8499E-05	7.3506E-05	2.1662E-12
	5	0.1	6.1157E-05	6.6907E-05	1.6336E-12
	6	0.12	7.6005E-05	6.5509E-05	1.5333E-12
	7	0.14	9.2635E-05	6.6192E-05	1.5818E-12
	8	0.16	1.1068E-04	6.7679E-05	1.6908E-12
	9	0.18	1.2982E-04	6.9358E-05	1.8198E-12
	10	0.2	1.4976E-04	7.0927E-05	1.9462E-12
	11	0.22	1.7028E-04	7.2249E-05	2.0570E-12
	12	0.24	1.9118E-04	7.3275E-05	2.1458E-12
	13	0.26	2.1235E-04	7.4002E-05	2.2104E-12
	14	0.28	2.3367E-04	7.4456E-05	2.2513E-12
	15	0.3	2.5509E-04	7.4669E-05	2.2707E-12
	16	0.32	2.7653E-04	7.4679E-05	2.2716E-12
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 400M(6.0MPa)	<i>JRC<sub>0</sub></i>	<i>E<sub>0</sub></i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>e</i> (mm)	<i>K</i> (m/sec)
	4	0.08	3.6142E-05	4.0820E-05	3.7099E-13
	5	0.1	4.4343E-05	3.5174E-05	2.3736E-13
	6	0.12	5.5360E-05	3.4755E-05	2.2898E-13
	7	0.14	6.8579E-05	3.6278E-05	2.6041E-13
	8	0.16	8.3567E-05	3.8578E-05	3.1316E-13
	9	0.18	9.9982E-05	4.1138E-05	3.7971E-13
	10	0.2	1.1755E-04	4.3695E-05	4.5501E-13
	11	0.22	1.3603E-04	4.6112E-05	5.3480E-13



	12	0.24	1.5526E-04	4.8322E-05	6.1540E-13
	13	0.26	1.7506E-04	5.0292E-05	6.9380E-13
	14	0.28	1.9531E-04	5.2017E-05	7.6765E-13
	15	0.3	2.1592E-04	5.3502E-05	8.3531E-13
	16	0.32	2.3681E-04	5.4763E-05	8.9577E-13
	<i>JRC</i> <sub>0</sub>	<i>E</i> <sub>0</sub> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>e</i> (mm)	<i>K</i> (m/sec)
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 500M(7.5MPa)	4	0.08	3.4616E-05	3.7446E-05	2.8639E-13
	5	0.1	4.2198E-05	3.1854E-05	1.7629E-13
	6	0.12	5.2652E-05	3.1437E-05	1.6946E-13
	7	0.14	6.5329E-05	3.2920E-05	1.9459E-13
	8	0.16	7.9786E-05	3.5167E-05	2.3721E-13
	9	0.18	9.5684E-05	3.7677E-05	2.9172E-13
	10	0.2	1.1275E-04	4.0202E-05	3.5439E-13
	11	0.22	1.3077E-04	4.2611E-05	4.2197E-13
	12	0.24	1.4955E-04	4.4835E-05	4.9157E-13
	13	0.26	1.6895E-04	4.6844E-05	5.6064E-13
	14	0.28	1.8884E-04	4.8627E-05	6.2716E-13
	15	0.3	2.0913E-04	5.0190E-05	6.8957E-13
	16	0.32	2.2973E-04	5.1541E-05	7.4679E-13

### 4.3 以不連續面單壓強度( $JCS_0$ )為變數之分析結果

探討不連續面單壓強度  $JCS_0$  之結果，此節計算過程與前一節相似，本研究將  $JRC_0$  設定為 8，其餘參數與前一小節之參數設定相同(即破裂面密度  $\rho=5$  (條/m<sup>3</sup>)、破裂面長度  $l=5$  (m)、 $JCS_0=\sigma_c$ )，改變  $JCS_0$ (20~180MPa)並觀察其結果，結果如下(所有詳細的數據如表 3)：

由於不考慮風化作用， $JCS_0=\sigma_c$ ，因此計算結果可發現  $JCS_0$  與  $E_0$  無關(如圖 4.5)。進一步求得力學內寬  $E$ ，本研究發現  $JCS_0$  有一個適用範圍，當  $JCS_0$  值約為 20~40 MPa 時，計算邊界應力  $\sigma_n$  為 6.0、7.5 MPa 之結果力學內寬  $E$  為負值，此結果表示開口寬閉合量  $\Delta E$  大於初始開口寬  $E_0$ ，造成不合理的情況發生。因此，假設當開口寬完全閉合時，開口寬閉合量  $\Delta E$  等於初始力學內寬  $E_0$ ，並可計算出  $JCS_0$  對應  $JRC_0$  的一個適用範圍，如圖 4.6 所示，各曲線右側為適用範圍，代表所計算出來的  $E_0 > \Delta E$ 。由圖可知，邊界應力  $\sigma_c$  越大， $JCS_0$  之適用範圍愈受到限制，表示邊界應力愈大裂隙愈容易完全閉合。

圖 4.7、圖 4.8 及圖 4.9 分別為力學內寬、水力內寬及水力傳導係數與  $JCS_0$  之關係，結果

顯示相同之趨勢，邊界應力  $\sigma_n$  對於開口寬之之影響非常劇烈，並且在較高的邊界應力條件下，越容易達到開口寬完全閉合之狀態。

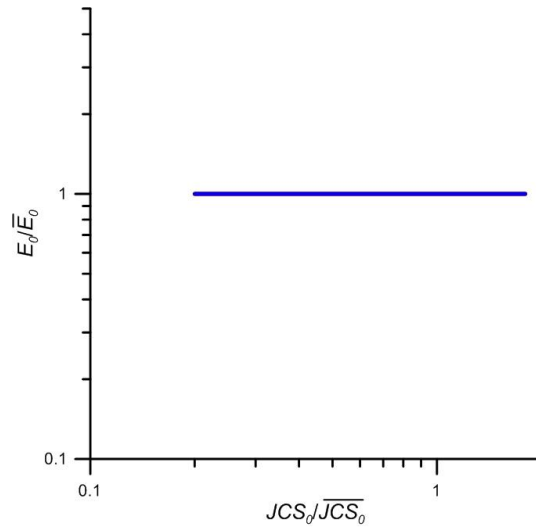


圖 4.5 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$  與初始力學內寬  $E_0$  之關係圖

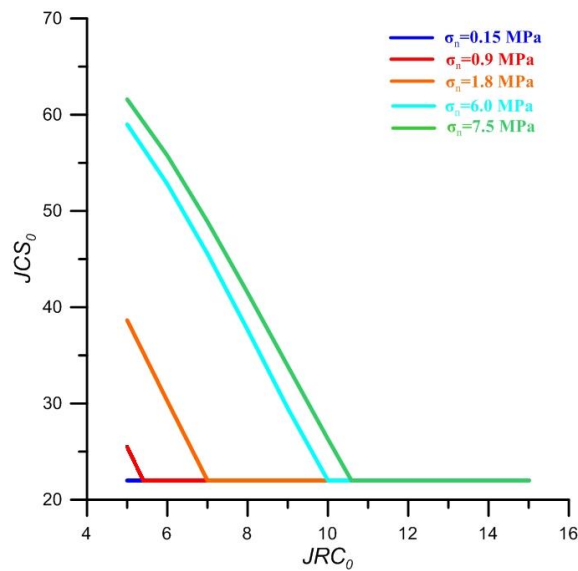


圖 4.6 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$  相對於  $JRC_0$  之適用範圍

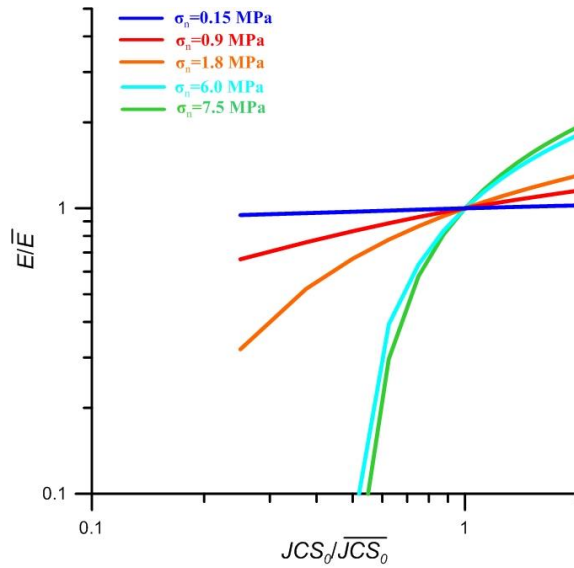


圖 4.7 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$  與力學內寬  $E$  之關係圖

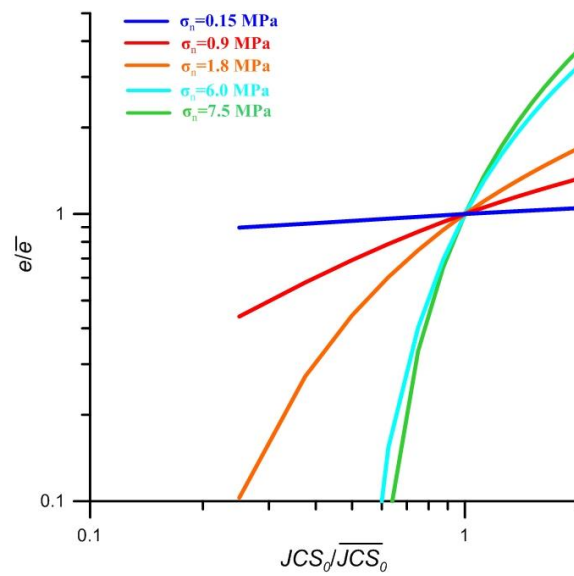


圖 4.8 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$  與水力內寬  $e$  之關係圖

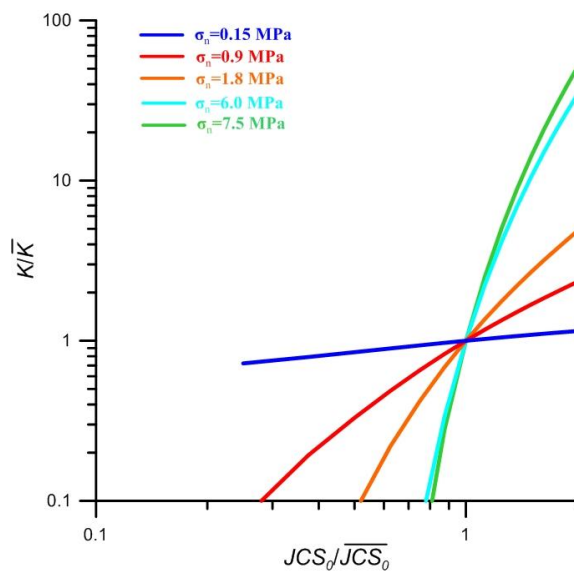


圖 4.9 未考慮風化作用之情形下， $JCS_0$  與水力傳導係數  $K$  之關係圖

表 4.2 不考慮風化作用下，變數為  $JCS_0$  之計算結果

參數設定	$JCS_0$ (MPa)	$E_0$ (mm)	$E$ (mm)	$e$ (mm)	$K$ (m/sec)
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向): 10M(0.15MPa)	20	0.16	1.4327E-04	1.1339E-04	7.9523E-12
	30	0.16	1.4548E-04	1.1692E-04	8.7184E-12
	40	0.16	1.4718E-04	1.1966E-04	9.3450E-12
	50	0.16	1.4852E-04	1.2185E-04	9.8674E-12
	60	0.16	1.4961E-04	1.2364E-04	1.0310E-11
	70	0.16	1.5051E-04	1.2514E-04	1.0690E-11
	80	0.16	1.5128E-04	1.2642E-04	1.1020E-11
	90	0.16	1.5193E-04	1.2752E-04	1.1309E-11
	100	0.16	1.5250E-04	1.2847E-04	1.1566E-11
	110	0.16	1.5300E-04	1.2932E-04	1.1795E-11
	120	0.16	1.5344E-04	1.3007E-04	1.2001E-11
	130	0.16	1.5384E-04	1.3074E-04	1.2189E-11
	140	0.16	1.5420E-04	1.3135E-04	1.2360E-11
	150	0.16	1.5452E-04	1.3191E-04	1.2518E-11
	160	0.16	1.5482E-04	1.3242E-04	1.2665E-11
	170	0.16	1.5510E-04	1.3290E-04	1.2802E-11
	180	0.16	1.5537E-04	1.3335E-04	1.2933E-11
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向): 60M(0.9MPa)	$JCS_0$ (MPa)	$E_0$ (mm)	$E$ (mm)	$e$ (mm)	$K$ (m/sec)
	20	0.16	8.0324E-05	3.5642E-05	2.4696E-13
	30	0.16	9.2062E-05	4.6820E-05	5.5981E-13
	40	0.16	1.0071E-04	5.6030E-05	9.5939E-13
	50	0.16	1.0743E-04	6.3760E-05	1.4138E-12
	60	0.16	1.1285E-04	7.0356E-05	1.8995E-12
	70	0.16	1.1734E-04	7.6064E-05	2.4003E-12
	80	0.16	1.2114E-04	8.1067E-05	2.9059E-12
	90	0.16	1.2441E-04	8.5505E-05	3.4097E-12
	100	0.16	1.2727E-04	8.9484E-05	3.9082E-12
	110	0.16	1.2981E-04	9.3088E-05	4.3996E-12
	120	0.16	1.3209E-04	9.6384E-05	4.8837E-12
	130	0.16	1.3416E-04	9.9428E-05	5.3612E-12
	140	0.16	1.3606E-04	1.0227E-04	5.8337E-12
	150	0.16	1.3783E-04	1.0494E-04	6.3035E-12
	160	0.16	1.3949E-04	1.0749E-04	6.7735E-12
	170	0.16	1.4107E-04	1.0994E-04	7.2475E-12
180	0.16	1.4260E-04	1.1233E-04	7.7302E-12	
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向):	$JCS_0$ (MPa)	$E_0$ (mm)	$E$ (mm)	$e$ (mm)	$K$ (m/sec)
	20	0.16	3.2264E-05	5.7504E-06	1.0371E-15
	30	0.16	5.2503E-05	1.5228E-05	1.9261E-14
	40	0.16	6.7021E-05	2.4814E-05	8.3336E-14
50	0.16	7.8152E-05	3.3741E-05	2.0952E-13	

120M(1.8MPa)	60	0.16	8.7061E-05	4.1872E-05	4.0042E-13
	70	0.16	9.4415E-05	4.9245E-05	6.5136E-13
	80	0.16	1.0063E-04	5.5944E-05	9.5496E-13
	90	0.16	1.0599E-04	6.2060E-05	1.3037E-12
	100	0.16	1.1068E-04	6.7679E-05	1.6908E-12
	110	0.16	1.1486E-04	7.2876E-05	2.1110E-12
	120	0.16	1.1861E-04	7.7718E-05	2.5603E-12
	130	0.16	1.2203E-04	8.2262E-05	3.0362E-12
	140	0.16	1.2518E-04	8.6560E-05	3.5374E-12
	150	0.16	1.2810E-04	9.0656E-05	4.0637E-12
	160	0.16	1.3086E-04	9.4593E-05	4.6164E-12
	170	0.16	1.3347E-04	9.8408E-05	5.1979E-12
	180	0.16	1.3597E-04	1.0214E-04	5.8117E-12
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向): 400M(6.0MPa)	<b><math>JCS_0</math> (MPa)</b>	<b><math>E_0</math> (mm)</b>	<b><math>E</math> (mm)</b>	<b><math>e</math> (mm)</b>	<b><math>K</math> (m/sec)</b>
	20	0.16	-	-	-
	30	0.16	-	-	-
	40	0.16	5.6162E-06	1.7425E-07	2.8855E-20
	50	0.16	2.5843E-05	3.6894E-06	2.7392E-16
	60	0.16	4.1799E-05	9.6518E-06	4.9041E-15
	70	0.16	5.4863E-05	1.6628E-05	2.5074E-14
	80	0.16	6.5855E-05	2.3958E-05	7.5009E-14
	90	0.16	7.5304E-05	3.1327E-05	1.6768E-13
	100	0.16	8.3567E-05	3.8578E-05	3.1316E-13
	110	0.16	9.0896E-05	4.5642E-05	5.1859E-13
	120	0.16	9.7477E-05	5.2490E-05	7.8879E-13
	130	0.16	1.0345E-04	5.9118E-05	1.1269E-12
	140	0.16	1.0892E-04	6.5536E-05	1.5353E-12
	150	0.16	1.1397E-04	7.1759E-05	2.0155E-12
160	0.16	1.1868E-04	7.7807E-05	2.5692E-12	
170	0.16	1.2309E-04	8.3700E-05	3.1982E-12	
180	0.16	1.2725E-04	8.9459E-05	3.9049E-12	
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向): 500M(7.5MPa)	<b><math>JCS_0</math> (MPa)</b>	<b><math>E_0</math> (mm)</b>	<b><math>E</math> (mm)</b>	<b><math>e</math> (mm)</b>	<b><math>K</math> (m/sec)</b>
	20	0.16	-	-	-
	30	0.16	-	-	-
	40	0.16	-	-	-
	50	0.16	1.8068E-05	1.8034E-06	3.1989E-17
	60	0.16	3.5159E-05	6.8287E-06	1.7368E-15
	70	0.16	4.9132E-05	1.3335E-05	1.2934E-14
	80	0.16	6.0879E-05	2.0474E-05	4.6811E-14
	90	0.16	7.0969E-05	2.7823E-05	1.1748E-13
	100	0.16	7.9786E-05	3.5167E-05	2.3721E-13
	110	0.16	8.7602E-05	4.2394E-05	4.1558E-13

	120	0.16	9.4615E-05	4.9453E-05	6.5966E-13
	130	0.16	1.0097E-04	5.6323E-05	9.7451E-13
	140	0.16	1.0679E-04	6.2999E-05	1.3638E-12
	150	0.16	1.1216E-04	6.9490E-05	1.8302E-12
	160	0.16	1.1714E-04	7.5807E-05	2.3761E-12
	170	0.16	1.2181E-04	8.1967E-05	3.0037E-12
	180	0.16	1.2620E-04	8.7987E-05	3.7153E-12

#### 4.4 受風化作用影響之結果

裂隙表面風化作用會造成初始開口寬  $E_0$  增加，進一步造成水力傳導係數  $k$  增加，舉例而言，在相同條件下(假設破裂面密度  $\rho=5$ 、破裂面長度  $l=5$ 、正向應力(均向)=0.15MPa、 $JRC_0=8$  以及  $\sigma_c=100$  MPa)，不考慮風化作用時，初始力學內寬  $E_0$  計算結果為 0.16(mm)，但受到風化作用影響時，不連續面單壓強度下降(假設  $JCS_0$  下降至 50 MPa)，初始力學內寬  $E_0$  變為 0.48 (mm)，進一步影響了力學內寬  $E$ 、水力內寬  $e$  以及水力傳導係數  $k$ ，其中水力內寬  $e$  與力學內寬  $E$  的平方成正比(如式 4.11)，而水力傳導係數  $k$  又與水力內寬三次方成正比，因此，初始力學內寬  $E_0$  改變對於水力傳導係數  $k$  之影響非常巨大，分析過程中應加以考慮是否受到風化作用影響之因素。

表 4.3 相同條件下，不考慮風化作用以及考慮風化作用之結果

破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 邊界應力(均向): 10M (0.15MPa) $JRC_0=8$ $\sigma_c=100$ MPa	不考慮風化( $JCS_0=\sigma_c$ )	考慮風化( $JCS_0=50$ MPa)
	$E_0=0.16$ (mm)	$E_0=0.48$ (mm)
	$E=1.5250E-04$ (mm)	$E=4.6237E-04$ (mm)
	$e=1.2847E-04$ (mm)	$e=1.1810E-03$ (mm)
	$k=1.1566E-11$ (m/sec)	$k=8.9846E-09$ (m/sec)

## 4.5 結果與討論

本章討論了力學-水力特性對流場之敏感度，除了計算破裂面長度、破裂面密度與水力傳導係數之關係，主要針對不連續面粗糙係數( $JRC$ )及不連續面單壓強度( $JCS$ )進行分析，其相關討論如下：

1. 水力傳導係數與不連續面密度成一次方關係，與破裂面長度成平方關係，與水力內寬成三次方關係。
2. 不連續面粗糙係數( $JRC$ )對於流場之敏感度：不連續面粗糙係數相對於其他參數而言，對於流場之敏感度較小，當  $JRC_0$  增加或減少 1 倍時，力學內寬、水力內寬及水力傳導係數幾乎不會超過 2 倍之變化範圍。
3. 不連續面單壓強度( $JCS$ )對於流場之敏感度：不連續面單壓強度對於流場敏感度較高，且在未考慮風化作用之情況下， $JCS_0$  小於一定程度時，開口寬會完全閉合，此情況在邊界應力愈大之情況愈明顯。
4. 邊界應力  $\sigma_n$  對於流場之敏感度：由分析結果得知，邊界應力對於流場之敏感度非常敏感，但邊界應力之大小大約到達一定的程度時，其敏感度開始趨緩，假設處置場是以地下坑道形式，表示接近地表處敏感度比較大(邊界應力  $\sigma_n=0.15、0.9、1.8$  MPa)，但到較深處(邊界應力  $\sigma_n=6.0、7.5$  MPa)時，其影響較小。
5. 風化作用對於對於流場之敏感度：在是否考慮風化作用之相比結果發現，考慮風化作用使初始開口寬增加，進一步影響到水力傳導係數，導致結果變化幅度更為明顯。

## 第五章力學-水力特性對坑道周圍流場敏感度分析

目前國內有關低放射性廢棄物處置傾向坑道處置，然而處置坑道通常位於岩盤中，開挖過程的湧水以及核種是否會透過流經岩盤之地下水而影響生物圈，均為坑道處置重要課題，因此評估處置坑道周圍岩盤之滲透特性及地下水流動特性即相當重要。岩體因沉積、構造或變質作用，導致滲透係數受不連續面控制而具先天異向性。應力亦影響裂隙開口寬，進而影響岩盤滲透係數，因此岩體滲透特性具有應力導致之異向性。本章節首先探討均向及異向不連續面受水力傳導係數的影響程度；再者，進一步針對隧道周圍之流場進行討論。分析結果如下所述。

### 5.1 分析方法

#### 1. 座標系統及參數選取

探討坑道開挖後應力重新分布造成應力異向性，處置坑道周圍附近之岩盤滲透特性之影響，本研究使用 Kirsch (1898)所提出的二維彈性理論，以開挖後坑道周圍應力重新分布來計算滲透係數值，本研究所使用之參數如表 5.1，座標系統如圖 5.1，關係如下：

$$l = \sin\phi \cos\theta \quad \text{式(5.1)}$$

$$m = \sin\phi \sin\theta \quad \text{式(5.2)}$$

$$n = \cos\phi \quad \text{式(5.3)}$$

其中  $\theta = 2\pi - \beta$  ( $0 \leq \theta \leq 2\pi$ )， $\phi = \varphi$  ( $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ )。β為不連續面傾向方向，φ則為不連續面傾角。



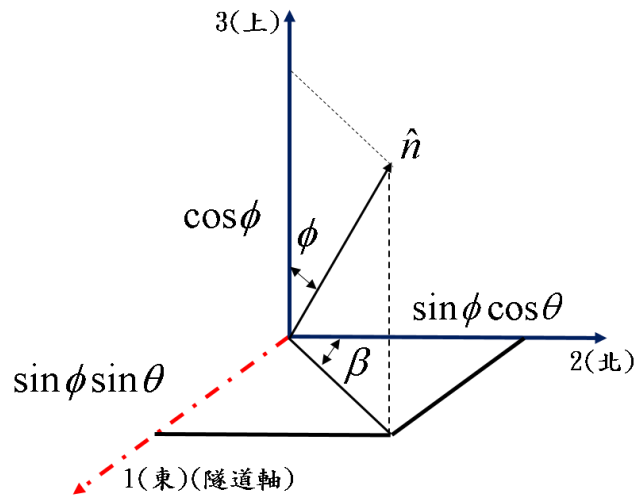


圖 5.1 本研究採用之座標系統圖

如圖 5.1，軸 1 代表東方，軸 2 代表北方，軸 3 代表上方，本研究之坑道開挖面落在軸 2 軸 3 平面上。

表 5.1 本研究使用之參數表

應力狀態	垂直應力張量 $\sigma_{ij}$ (MPa) (岩體有效單位重為 $15 \text{ kN/m}^3$ )	7.5
	側向岩壓係數	1.0
不連續面 特性	不連續面長度 $p$ (公尺)	1
	不連續面粗糙度係數 $JRC$	15
	不連續面單壓強度 $JCS$ (MPa)	100
	體密度 $\rho$ (條/ $\text{m}^3$ )	5
	不連續面法線向量分佈密度函數	$D_{33}=0、2$

## 2. 不連續面參數設定

岩體不連續面之方位分布調查成果，常以不連續面法線向量立體投影圖呈現，本研究採用組構張量為係數之向量展開以逼近向量分布資料，並定義方向密度函數  $E(\hat{n})$ ，其物理意義為某向量  $\hat{n}$  佔全部向量之總比例數，且各方向之總和為 1，如式(5.4)所示

$$\int E(\hat{n})d\Omega = 1 \quad \text{式(5.4)}$$

再者，利用  $n$  階組構張量為逼近係數求得不連續面位態分佈  $E(\hat{n})$ ，其中組構張量階數越高，所逼近之結果越準確，而本研究採用 2 階第三類組構張量逼近不連續面位態分佈  $E(\hat{n})$  如式(5.5)

$$E(\hat{n}) = 1 + D_{ij}n_i n_j \quad \text{式(5.5)}$$

根據式(5.5)，若不連續面分布恰與座標系統 1、2、3 三個座標軸一致，式中  $D_{11}$ 、 $D_{22}$  與  $D_{33}$  值則可反應不連續面法線向量於空間分布異向性程度，其中， $D_{11}$ 、 $D_{22}$  與  $D_{33}$  之和為 0。本研究分析分別採用  $D_{33}=0$  及  $D_{33}=2$ ，當  $D_{11}$ 、 $D_{22}$  與  $D_{33}$  值皆為 0 時( $D_{11}=D_{22}=D_{33}=0$ )，表示不連續面位態密度函數  $E(\hat{n})$  為均向分布，岩體中各方向之不連續面分布個數皆相同。當  $D_{33}=2(D_{11}=D_{22}=-1)$  時，代表法線向量之不連續面密度較其他兩軸大，即不連續面位態分布具有先天異向性，圖 5.2 至圖 5.3 分別代表不同  $D_{33}$  之不連續面位態機率密度函數分布，可看出  $D_{33}=0$  時，密度函數分布為一球狀，代表四面八方之不連續面密度皆相同，當  $D_{33}$  增加至 2 時，軸 3 之密度增加，軸 1 與軸 2 密度則減少。

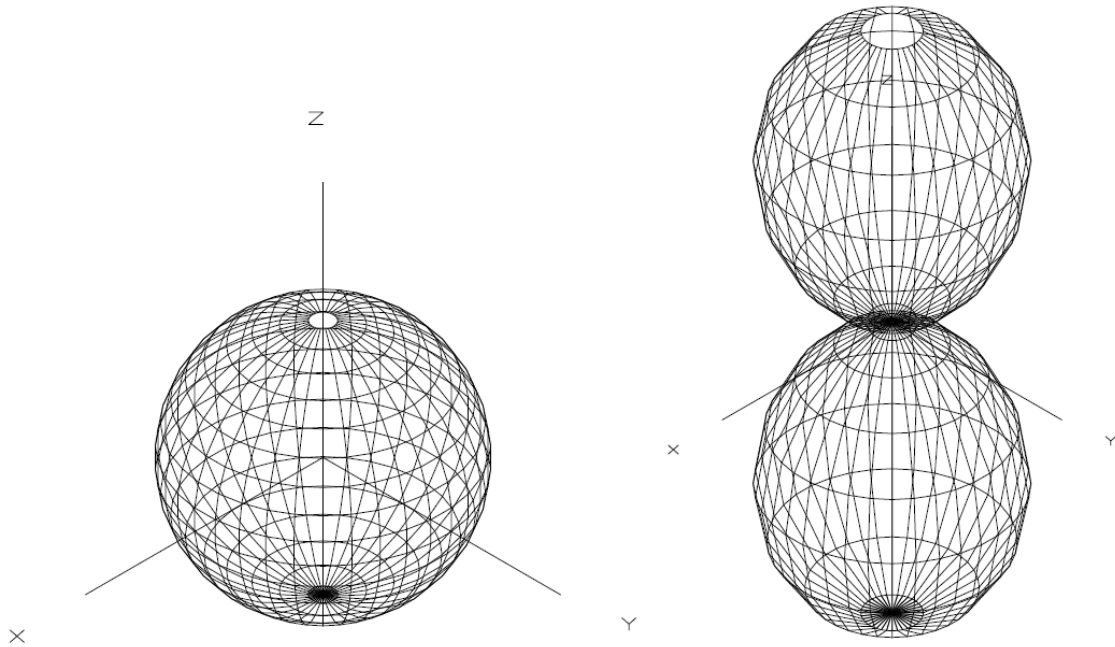


圖 5.2 不連續面位態密度函數分布圖( $D_{33}=0$ (左)， $D_{33}=2$ (右))

## 5.2 水力傳導係數分布

### 1. 隧道開挖前之水力傳導係數

隧道開挖前裂隙岩體水力傳導係數之結果，參數設定如表 5.1，假設不連續面為均向分布( $D_{33}=0$ )，平均邊界應力為 7.5 MPa，均向邊界應力下隧道開挖前模型內水力傳導係數分布如圖 5.3，最大與最小主值均為  $2.76E-05$  m/sec，且於模型內各處皆相同，水力傳導係數異向比為 1。

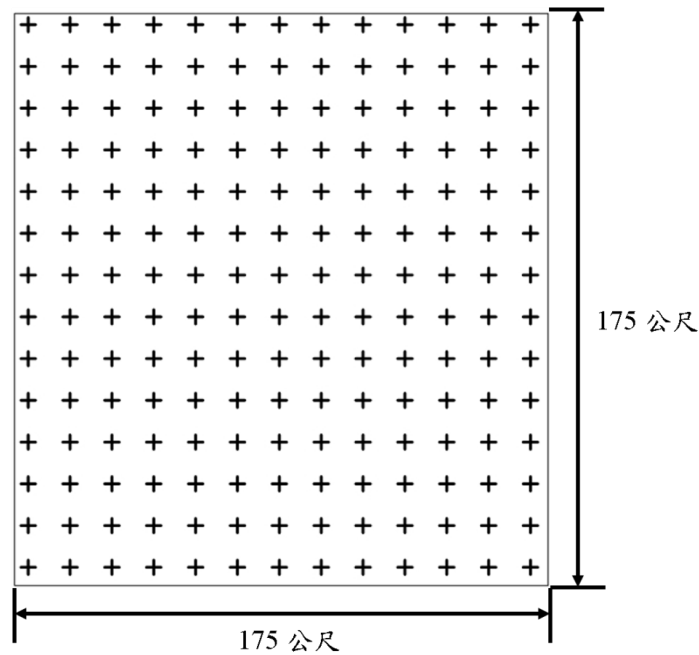


圖 5.3 隧道開挖前水力傳導係數分布圖( $D_{33}=0$ )

### 2. 隧道開挖應力重新分布對水力傳導係數之影響

本節將考慮隧道開挖後應力重新分布造成之應力異向性對隧道周圍岩盤水力傳導係數之影響，假設邊界應力相同之情況，且平均邊界應力為 7.5 MPa 條件下，不連續面為均向分布( $D_{33}=0$ )及異向分布之結果。

圖 5.4 為均向邊界應力下之水力傳導係數於隧道周圍之分布，由內而外分別為  $r/a=1$ 、1.25、1.5、1.75、2，其中  $r$  為距隧道中心之距離， $a$  為隧道半徑(在此為 5m)，圖中 '+' 字向量大小代表於軸 2 與軸 3 平面上之最大與最小主水力傳導係數。

可發現受到隧道開挖應力重新分布之影響，水力傳導係數主方向皆是隧道徑向與切向，由圖中可看出近隧道處 '+' 字向量長短明顯不同，代表有明顯的水力傳導係數異向性；因不

連續面及邊界應力為均向分布，故隧道各方向之滲透特性皆一致。

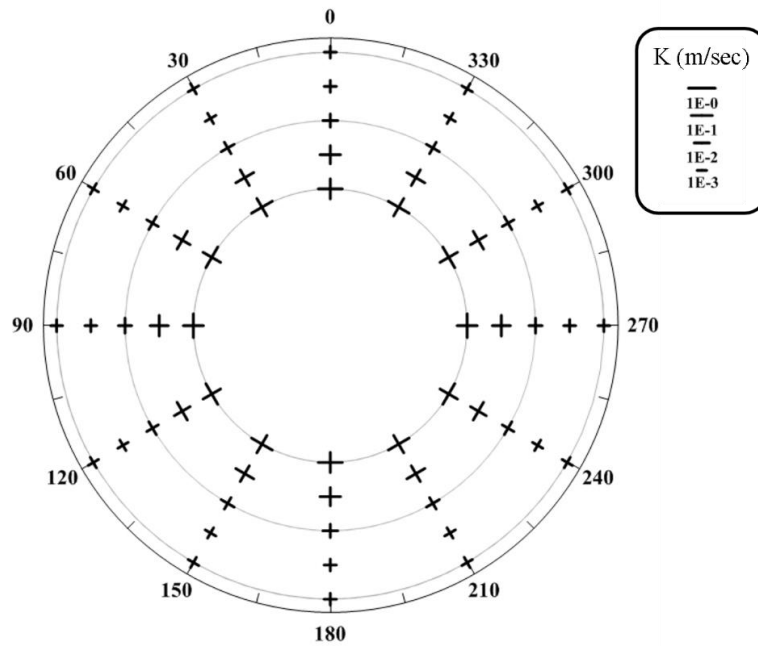


圖 5.4 隧道開挖水力傳導係數分布圖( $D_{33}=0$ )

圖 5.5 為  $D_{33}=2$  之水力傳導係數於隧道周圍之分布，明顯可看出近隧道處水力傳導係數主方向不再是徑向與切向，隨著不連續面先天異向性增加，水力傳導係數主方向亦跟著改變，而隧道各方向水力傳導係數分布存在差異，且於近隧道處依然可看出明顯異向性。

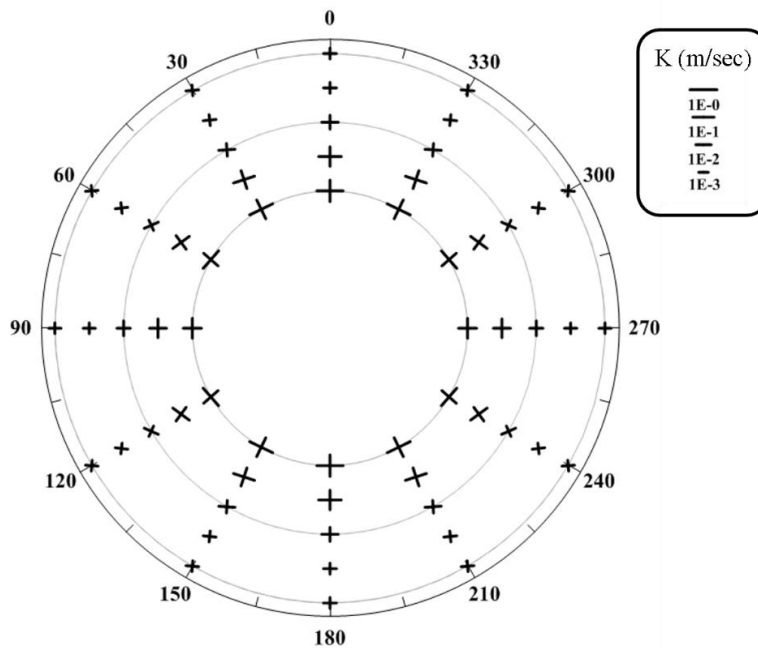


圖 5.5 隧道開挖水力傳導係數分布圖( $D_{33}=2$ )

### 5.3 等向裂隙( $D_{33}=0$ )對於坑道周圍流場之影響

圖 5.6 為隧道開挖周圍岩盤總水頭分布，由圖可知在均質均向條件下，水頭由邊界向隧道遞減，水力梯度則由邊界向隧道遞增，圖 5.7 為流速分布，範圍為流場圖中(圖 5.6)之紅框，由圖可知，越接近隧道流速越快，紅色虛線範圍為流速值大於平均數值之範圍，且流向皆指向隧道中心。

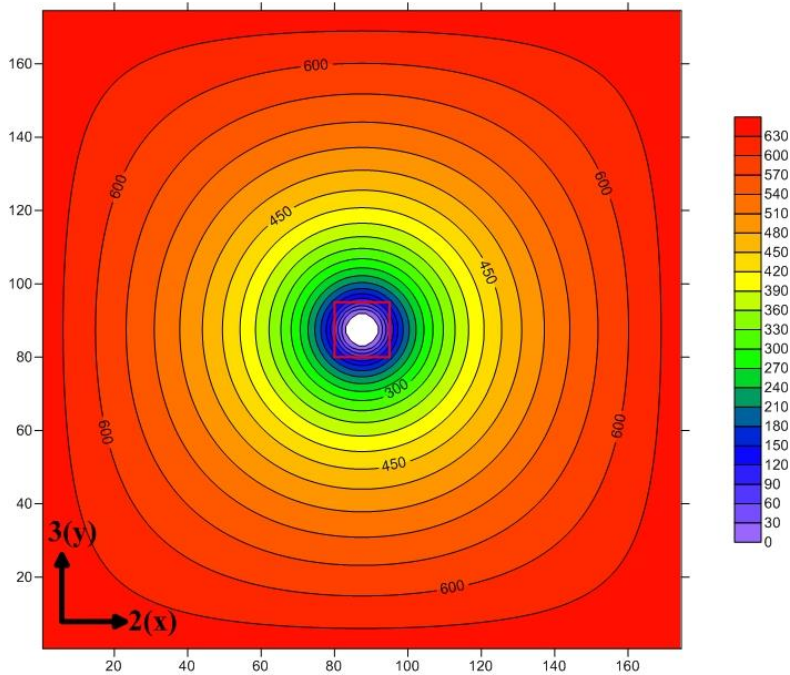


圖 5.6 均質均向水力傳導係數條件下隧道開挖周圍岩盤總水頭分布圖( $D_{33}=0$ )

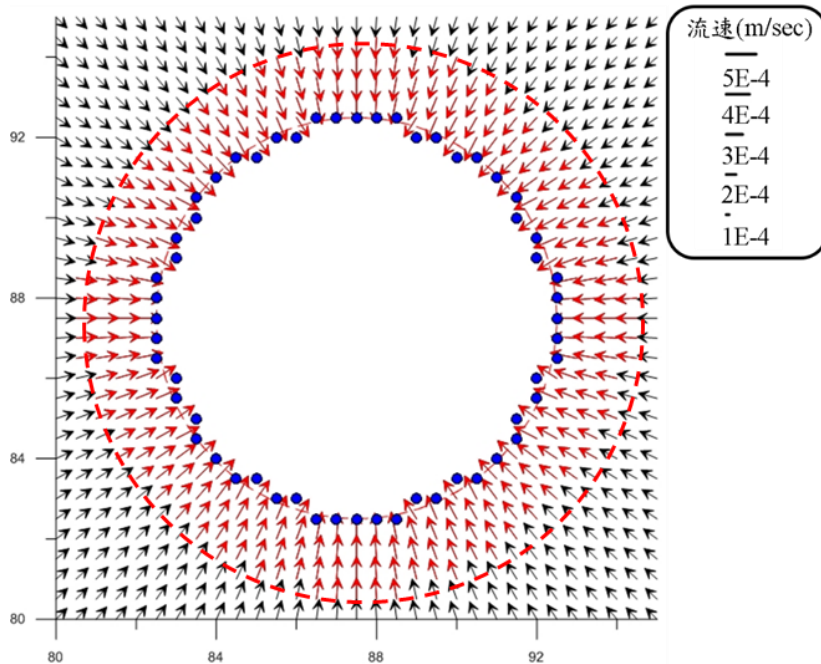


圖 5.7 均質均向水力傳導係數條件下隧道開挖周圍岩盤隧道開挖流速向量分布圖( $D_{33}=0$ )

## 5.4 異向裂隙( $D_{33}=2$ )對於坑道周圍流場之影響

本節考慮不連續面先天異向性對於隧道周圍流場及隧道滲流量之影響，假設  $D_{33}=2$  進行分析。 $D_{33}=2$  條件下隧道開挖周圍岩盤總水頭分布如圖 5.8，由結果得知等勢能線形狀為扁的橢圓，顯示不連續面先天異向性增加造成水力傳導係數異向性也隨之增加，而近隧道壁面處，受到應力重新分布的影響，等勢能線恢復為圓形。

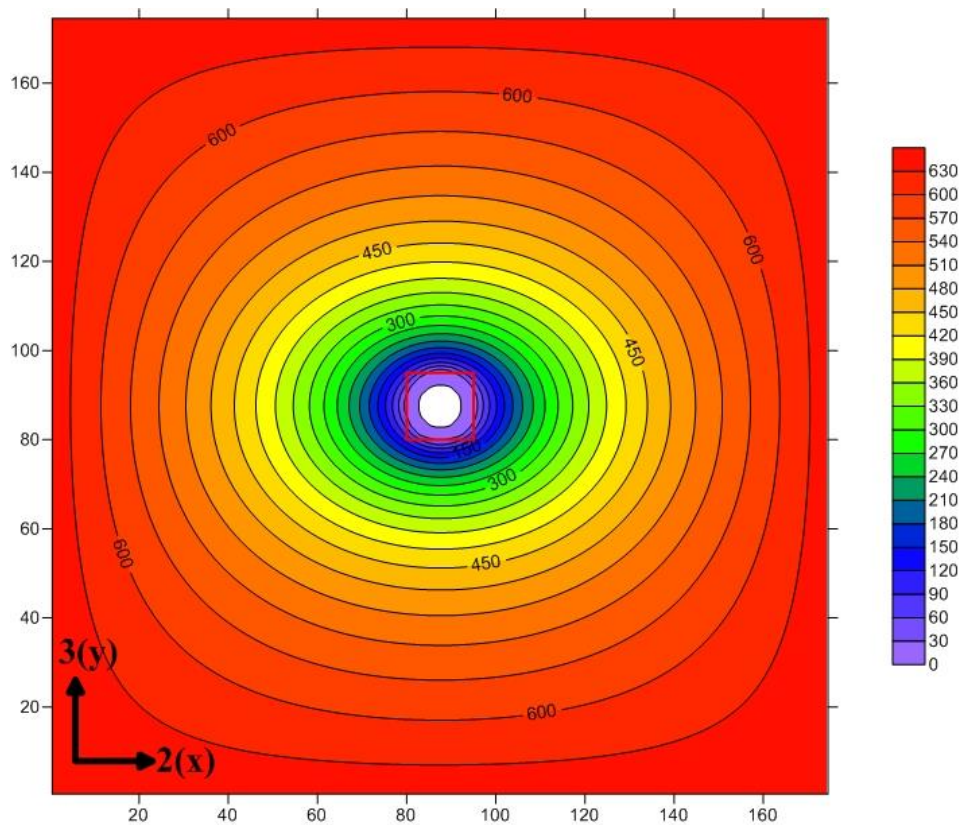


圖 5.8 隧道開挖周圍岩盤總水頭分布圖( $D_{33}=2$ )

$D_{33}=2$  之流速分布如圖 5.9，先天異向性導致水平分量流速增加，而流速在隧道頂拱與側壁之差異加大，隧道頂拱之流速明顯大於隧道側壁，虛線範圍為流速值大於平均數值之範圍，表示不連續面先天異向性影響隧道周圍地下水流動行為甚巨。隧道總滲流量為  $0.0541 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，隧道頂拱之入流量大於隧道側壁。由結果得知，先天異向性程度增加，流入隧道的總滲流量減少，表示水平不連續面於隧道側壁受壓效應大於水平不連續面於隧道頂拱之解壓效應。

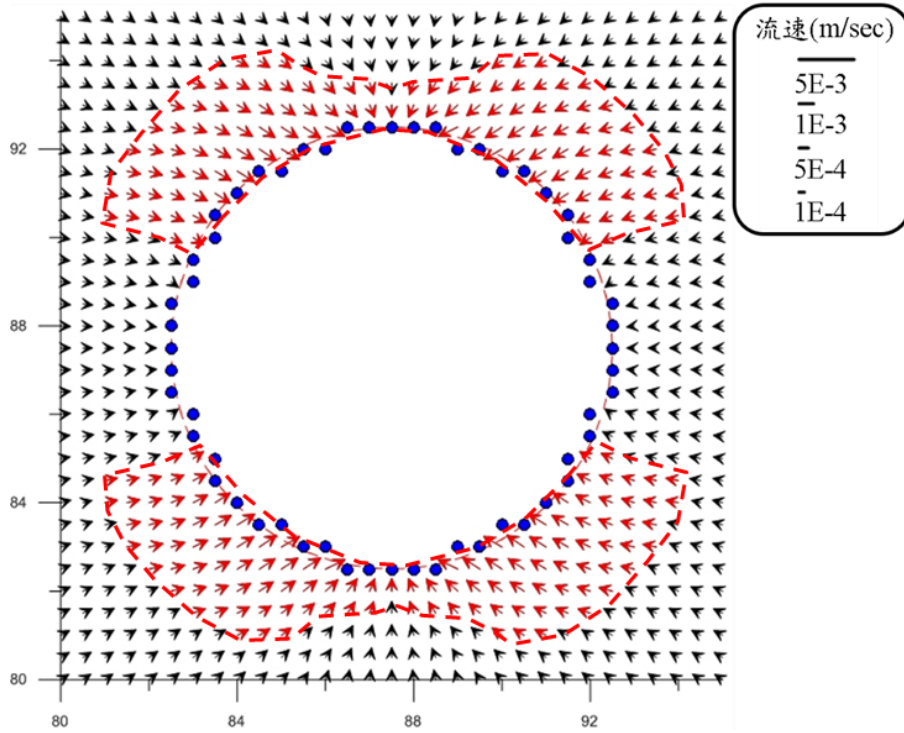


圖 5.9 隧道開挖周圍岩盤隧道開挖流速向量分布圖( $D_{33}=2$ )

### 5.3 結果與討論

本章首先探討隧道周圍岩盤水力傳導係數異向性與異質性對流場之影響，其中分別針對均質均向、均質異向以及異質均向進行分析，再者，隧道開挖導致應力重新分布，分別探討均向及異向邊界應力對於水力傳導係數之影響，最後探討先天異向性對隧道開挖水力傳導係數之影響，其重點如下：

1. 本研究假設現地應力為均向(7.5 MPa)，於不連續面分佈為均向及異向條件下，分別計算坑道周圍應力異向性分布之岩盤滲透係數。
2. 不連續面位態呈均向分佈，總水頭等值線由邊界向隧道呈同心圓狀遞減，流向皆指向隧道中心。
3. 不連續面位態為異向分佈時，總水頭等值線呈橢圓狀由邊界向隧道遞減，流向不再指向隧道中心，在距離隧道壁面約一倍半徑處逐漸變回圓形。
4. 不連續面位態分佈異向性及隧道開挖導致坑道周圍應力重新分佈，造成應力異向性對滲透係數主值、主方向與異向性比影響顯著。

## 第六章坑道處置場址特性之安全評估審查重點及注意事項

本研究彙整了國際間有關場址特性之量化參數，並針對其中有關水力-力學特性之重要參數探討其不確定性，再者，針對攸關母岩之水力傳導係數的重要參數進行分析，並探討各參數對於水力傳導之敏感性。另外，前期研究之成果包含了國內外之場址特性調查成果彙整，以及國內候選處置場特殊地質等課題。本章根據前述之成果以及前期之研究，提出低放處置有關場址特性審查之意見及注意事項，相關重點如下。

### 6.1 近岸離島通用之審查重點建議

1. 對於坑道處置之場址特徵化，審查單位應注意三項關鍵課題，包括：

- (1) 確認場址特徵化方法之適合性；
- (2) 確認場址特徵化成果已可供工程設計及安全評估所需；
- (3) 場址特徵化之不確定性。

場址特徵化工作需要留意場址的複雜性，必須多方面分析及彙整對於處置場址安全至關重要之參數，這些特徵化之成果亦需對於工程規劃設計具有關聯性。再者，掌握這些參數之不確定性，提供做為後續工作之重要參考資料，避免造成超乎預期之結果。舉例而言，場址抬昇量採平均值，估計此一參數之不確定性，並且此參數之不確定性對工程規劃設計(如處置深度)之影響程度；根據文獻資料，不同地層、不同尺度條件下，水力傳導係數值的不確定性；根據現有資料，現地應力大小與方向之不確定性。這些關鍵因子可能對於處置場址安全評估至關重要，因此對於審查單位而言，建議應留意這幾項關鍵課題。

除了場址特徵化參數之不確定性，參數敏感度亦應有所評估。舉例而言，地層水力傳導滲透係數異向性比對於流場之敏感度；區域性流場評估改變牡丹層與潮州層水力傳導係數比值對結果之影響程度；硬頁岩隨深度改變水力傳導係數之設定，其影響分析結果之程度。審查單位也應注意這個關鍵課題，並對執行單位進行審查。對於執行單位而言，這些資訊的掌握度愈高，對於後續場址特徵化調查與概念模式建立工作愈有幫助。也建議執行單位逐步強化參數不確定性與敏感度之量化評估。



2. 主應力方向除了攸關處置坑道配置規劃以外，候選場址主應力方向與主應力值均將影響裂隙岩盤之水力特性，不連續面特性分析及統計結果也是關鍵參數，場址特徵化審查宜注意此兩項之特徵化結果。
3. 應注意候選場址未來抬升、侵蝕量化結果以及對處置設施安全性影響之評估是否完備。
4. 注意地質圖比例尺與原始資料調查精度應能匹配。
5. 候選場址區域海水面變化趨勢估計之原理與方法合宜性應加以評估。
6. 參數或評估之依據，宜有支援報告支持。
7. 工程配置規劃構想原則充足，如處置坑道位置(例如：烏坵場址為何置於小坵北側)、軸向配置、深度等；另外，審查單位須審核執行單位工程配置與重要場址特徵化資訊(例如：達仁場址高角度裂隙區位)套疊之充足性亦應加以評估。
10. 開挖擾動區特性評估是關鍵議題之一。

## 6.2 特定候選場址之審查重點建議

1. 達仁場址高角度裂隙對場址設計、施工性及安全評估可能產生不可忽略之影響，執行時應注意調查方法，其中調查目的應包括剪裂帶位置確認以及水力-力學特性評估。
2. 達仁場址附近有文獻報導曾發生過大規模海底山崩事件，達仁場址海嘯評估應注意海底山崩對於處置場之影響是否已合宜考慮。
3. 我國兩處候選場址坑道開挖擾動的影響程度差異可能相當大，審查時應注意。

## 第七章 結論與建議

在四年期的計畫中，過去已針對國際間低放射性廢棄物處置場址特性進行研析，並與我國潛在場址環境進行比較，本計畫進一步的蒐集國際間低放射性廢棄物處置場址有關初始狀態定量化資訊，並參考瑞典 SKB 相關技術報告，彙整重要定量化之結果，透過這些量化資訊，可進一步釐清不確定性。再者，本計畫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，並對其做敏感度分析，透過這些國外處置經驗，最後回饋於國內低放處置審驗技術。本計畫期中重要成果總結如下：

### 7.1 結論

1. 本計畫蒐集與瑞典 SKB 技術報告，彙整有關處置場址初始狀態之定量化資訊，一方面可學習 SKB 於各階段場址調查流程，一方面本報告亦集中呈現與本研究較相關包含了地質、岩石力學、水文地質之資訊，希望能做為後續審查要項擬定之參考。
2. 彙整 SKB 使用之相關模型，探討參數對於模型之不確定性因素，其中，破裂面參數之統計特性不確定性關鍵課題之一是尺寸效應，由露頭到公里級尺寸，破裂面密度與滲透係數差異可以差到一個數量級。根據有限的分析結果顯示，破裂面不納入擬連續體滲透隙數平均化的情況下，破裂面密度與滲透係數可能下降 0.66-09 倍。破裂面密度與尺寸關係，破裂面密度最大增加 1.6 倍；若將不同岩石分區分開，則破裂面密度(以及滲透係數)之不確定性可減少約半個數量級；不考慮深度相關因素，可能會高估破裂面密度約 10%；破裂面方位對破裂面密度的不確定性主要來自於破裂面分組時的不確定性。
3. 水力傳導係數與不連續面密度成一次方關係，與破裂面長度成平方關係，與水力內寬成三次方關係。不連續面粗糙係數對於流場之敏感度相對於不連續面單壓強度而言，對於流場敏感度較低，流場對邊界應力(現地應力)非常敏感(特別在接近地表處)；另外，風化作用也會影響流場。
4. 由結果顯示，當隧道周圍不連續面位態呈均向分佈，總水頭等值線由邊界向隧道呈同心圓狀遞減，流向皆指向隧道中心；不連續面位態呈非均向分佈，總水頭等值線呈扁橢圓狀向隧道遞減，流向不再指向隧道中心。

## 7.2 建議

1. 對於後續場址初始狀態量化工作，瑞典 SKB 之方法值得參考，以分階段之步驟進行場址參數量化及參數更新。
2. 建議對於特定影響處置場安全之參數宜進行詳細的調查，包含場址初始狀態各參數之不確定性，以及這些參數對於模型之不確定性因素。
3. 對於強烈影響水力傳導係數之參數(包含破裂面長度、水力內寬、不連續面單壓強度以及風化作用)建議特別留意，宜有詳細調查。
4. 隧道開挖造成應力重新分布，以及非均向之不連續面位態，可能強烈影響處置坑道周圍岩體之流場，建議對這些因素進行詳細的評估。

## 參考文獻

1. Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R., 1983. Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 20(6), 249-268.
2. Bandis, S.C., Barton, N.R., Christianson, M., 1985. Application of joint behavior to rock mechanics problems. *Proc Int. Symp. On Fundamentals of Rock Joints*, Bjorliden.
3. SKB, 2001. Site investigations: Investigation methods and general execution programme. SKB TR-01-29.
4. SKB, 2002. Forsmark - site descriptive model version 0. SKB R-02-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
5. SKB, 2004. Preliminary site description Forsmark area - version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
6. SKB, 2005a. Preliminary site description Forsmark area - version 1.2. SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
7. SKB, 2005b. Preliminary safety evaluation for the Forsmark area. Based on data and site descriptions after the initial site investigation stage. SKB TR-05-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
8. SKB, 2006a. 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, Svensk Kärnbränslehantering AB.
9. SKB, 2006b. Site descriptive modeling Forsmark stage 2.1. Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering. SKB R-06-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
10. SKB, 2007a. Geology Forsmark- Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45.
11. SKB, 2007b. Rock Mechanics Forsmark- Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-31.
12. SKB, 2007c. Thermal properties-Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-47.
13. Oda, M., 1985. Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Geotechnique*, 35(4), 483-495.
14. 原能會物管局，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)。
15. 原能會物管局，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。
16. 原能會物管局，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。
17. 原能會物管局，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。

附錄一

附表一.1 地質

參數組	參數	確定參數的時間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
地形	地形	X	X			概述、地質構造模型、構造識別。
土壤覆蓋	土壤覆蓋層厚度		X	X		土壤模型(Soil model) (間接用於土壤和環境、表層水文地質、生物圈模型)。
	土壤分佈	X	X			
	土壤描述		X			
	土壤類型		X			
	底部沉積物		X	X		
	新構造運動特徵		X			新構造運動評估
<b>基岩-岩石類型</b>						
場址內所發現的岩石類型	岩石類型分佈(空間和百分比)	X	X	X	X	岩性模型 (Lithological model) (間接用於理解岩石力學、水文地質和地球化學)
	捕獲岩(xenoliths)			X	X	
	岩脈	X	X	X	X	
	接觸(contacts)		X	X		
	年代			X		
	礦產潛力 - 工業礦產	X	X			
岩石類型說明	礦物成分		X	X	X	岩性模型 (Lithological model) (間接用於理解岩石力學、水文地質和地球化學)
	晶粒大小		X	X	X	
	礦物定位(mineral orientation)		X	X	X	
	微破裂面(microfractures)			X	X	
	密度		X	X		
	孔隙率			X		
	磁感率(susceptibility) $\gamma$ 輻射等(gamma radiation etc)		X			
	礦物蝕變/風化		X	X	X	
<b>基岩 - 構造</b>						
塑性構造	褶皺(幾何)		X	X	X	地質構造模型 (Geological-structural model)
	葉理(foliation)		X	X		
	線理(lineation)		X	X	X	
	脈狀紋(veining)		X	X		
剪裂帶 (Shear zones)	年代			X		
	性質、範圍	X	X	X	X	
<b>脆性構造</b>						
區域和局部主要破裂面域	位置	X	X	X		地質構造模型。處置場設計。為水文地質模型和岩石力學模型的輸入資料。
	方位		X	X		
	長度	X	X	X		
	寬度		X	X		
	移動(Movements)(尺寸, 方			X		

	向)				破裂面填充礦物等為水文地球化學模型的輸入資料。
	年代			X	
	性質(破裂面數量、間距、塊體尺寸、破裂面特性、破裂面填充(破裂面礦物)、風化/蝕變		X	X	X
局部次要破裂面域	位置		X	X	X
	方位			X	X
	長度		X	X	X
	開口寬度			X	X
	移動(movements)(尺寸，方向)			X	X
	年代			X	X
	性質(破裂面數量、間距、塊體尺寸、破裂面特性、破裂面填充(破裂面礦物)、風化/蝕變			X	X
破裂面- 隨機描述的數據	密度(不同組)		X	X	X
	方位		X	X	X
	跡線長度(trace length)		X	X	X
	聯繫模式(contact pattern)			X	X
	孔徑寬度			X	X
	粗糙度			X	X
	風化(蝕變)			X	X
	破裂面填充(破裂面礦物)			X	X
	年代			X	X
					為詳細的水文地質模型和詳細的岩石力學模型的輸入資料。 為核種傳輸模型間接輸入資料。 破裂面填充礦物等為水文地球化學模型的輸入資料。

附表一.2 岩石力學

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
破裂面帶	幾何		X	X	X	描述性岩石力學模型中將岩石細分成不同的岩體。
破裂面力學特性	法線方向變形特性			X	X	離散岩石力學模型，輸入岩體的變形特性數據。
	剪切方向變形特性			X	X	
	剪切強度					
	節理粗糙度					
	節理抗壓強度			X	X	
完整岩石的力學特性	基礎摩擦 $\phi_b$					
	破裂面後摩擦 $\phi_r$					
	(楊氏)彈性係數		X	X	X	離散岩石力學模型，輸入岩體的變形特性數據。
	柏松比( $\nu$ )		X	X	X	
	強度		X	X	X	
抗拉強度		X	X	X		
壓痕指數(Indentation index)				X	X	可鑽性評估
岩體的力學特性	楊氏係數(彈性)			X	X	岩石力學模型
	柏松比 ( $\nu$ )			X	X	岩石力學模型
	不同系統的岩石分類(RMR、Q)		X	X	X	確定不同系統的變形和強度特性。
	動態傳播速度，壓力波		X	X	X	動態分析模型
	動態傳播速度，剪切波			X	X	動態分析模型
	強度			X	X	岩石力學模型
密度和熱特性	密度		X	X	X	岩石力學模型
	熱膨脹係數		X	X	X	岩石力學模型
邊界條件和輔助數據	原位應力、大小和方向		X	X	X	可鑽性評估
	觀察變形和地震活動	X	X			岩石力學模型“驗證”

附表一.3 水文地質

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
模擬確定性 破裂面帶	幾何 - 區域和局部主要破裂面帶	X	X	X	X	計算模型
	導水率或水力傳導係數的確定性或統計分佈		X	X	X	計算模型
	儲存係數		(X)	X	X	瞬態計算模型
隨機模擬的破裂面帶和破裂面增加岩體	幾何 - 岩體具有類似的水力性能	(X)	X	X	X	計算模型
	破裂面帶及破裂面的空間分佈和幾何性質的統計描述		X	X	X	DFN models
	導水率的統計分佈		X	X	X	
	水力傳導的統計分佈		X	X	X	SC models
	具體存儲計算模型和存儲係數的統計分佈		(X)	X	X	瞬態計算模型
土壤層	幾何 - 土體具有類似的水力性能		X	X		計算模型
	水力傳導率		(X)	X		計算模型
	明確的蓄水量(Specific storage)		(X)	X		瞬態計算模型
地下水水力特性	密度、粘度和壓縮性		X	X	X	計算模型
	鹽度		X	X	X	
	溫度		X	X		計算模型
邊界條件和輔助數據	氣象和水文資料	X	X	X	(X)	定義邊界條件和地下水模型(gwm)和生物圈模型(bm)
	補充/排出區		X	X	X	定義邊界條件和gwm及bm的校準
	部分鑽孔和地表水道中的壓力或水頭		X	X	X	定義邊界條件和gwm和bm的校準
	鹽度		X	X	X	定義邊界條件和gwm的校準
	GW流過鑽孔		(X)	X	X	gwm校準
	區域邊界條件(解釋)，過去和未來演變		X	X	(X)	定義邊界條件 (當前條件、古水文地質學視角、可能場景的分析)



附表一. 4 水文地球化學

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
變量	pH, Eh		X	X	X	傳輸模型 處置罐腐蝕 燃料溶解，膨潤土
主要成分	TDS (sum of main components), Design Na, K, Ca, Mg, Canister corrosion HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Cl, Si		X	X	X	地球科學理解 設計 處置罐腐蝕 膨潤土穩定性
微量元素	Fe, Mn, U, Th, Ra, Al, Li, Cs, Sr, Ba, HS, I, Br, F, NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , HPO <sub>4</sub> , Canister corrosion REE, Cu, Zr, Rb		X	X	X	地球科學理解 傳輸模型 處置罐腐蝕
溶解氣體	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , Ar, He, C <sub>x</sub> H <sub>x</sub> , O <sub>2</sub>		X	X	X	地球科學理解 傳輸模型
穩定同位素	<sup>2</sup> H in H <sub>2</sub> O, <sup>18</sup> O in H <sub>2</sub> O and SO <sub>4</sub> , <sup>13</sup> C in DIC and DOC, <sup>34</sup> S in SO <sub>4</sub> and HS, <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He, <sup>11</sup> B, <sup>37</sup> Cl, Xe同位 素, Kr同位素		X	X	X	地球科學理解 傳輸模型
放射性 同位素	T, <sup>14</sup> C in DIC and DOC, <sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U, <sup>36</sup> Cl, Rn, <sup>226</sup> Ra		X		X	地球科學理解 傳輸模型
其他	DOC (溶解有機材料)、腐植酸、黃 腐酸、膠體、細菌		X		X	傳輸模型 燃料溶解
破裂面填充 礦物	固相中的主要元素和微量元素 $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$ , <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr, <sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U, 方 解石和氧化鐵的形態 <sup>34</sup> S in FeS, FeS <sub>2</sub>			X	X	地球科學理解 傳輸模型
岩石矩陣	孔隙水中的總鹽度			X	X	傳輸模型

附表一.5 岩石的傳輸特性

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
處置孔尺寸特性	地下水化學		X	X	X	源項模型中的參數(溶解度， 吸附) 評估處置罐、膨潤土的穩定性
	地下水流量		(X)	X	X	源項模型(處置罐腐蝕)
	破裂面孔徑，幾何			(X)	X	源項模型(處置罐腐蝕)
流路特性 (Properties of flow paths)	流路(Flow paths)		(X)	X	X	安全評估
	沿流動路徑的傳輸阻力		(X)	X	X	安全評估
	分散性			X	X	傳輸計算
	流動孔隙率			X	X	傳輸計算
岩石特性	吸附係數			X	X	安全評估
	基質擴散率			X	X	安全評估
	基質孔隙率			X	X	安全評估
	最大穿透深度			X	X	安全評估
	地下水化學			X	X	確定相關吸附數據
土壤層/受體的 傳輸性質	水通量			X		生物圈模式、土地和環境，參 見表面生態系統
	流動孔隙率			X		
	吸附係數			X		
	生物活性			X		
輔助數據	示踪劑測試(Tracer tests)			X	X	驗證/校準
	破裂面填充的化學分析			X	X	地球科學理解
	岩石的化學分析			X	X	地球科學理解
	地下水中的地下水化學、膠體、氣體等			X	X	排除其他傳輸機制 地球科學理解，預測變化

附表一.6 地表生態

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
地質學	地形；土地隆起；土壤層；暴露的岩石		X	X	X	理解、安全評估、自然與環境監測
水文地質 地下水	補充/排放區；土壤水和地下水；地下水位；井			X	X	see above
水文地質 地表水、湖泊、河道和海洋	底部地形；水位；水循環(Water turnover)；體積、鹽度			X	X	see above
水文地質 計量學	沉澱；徑流；蒸散		X	X	X	see above
水文地球化學 湖泊和海中的土壤和沈積物	C (POC、DOC、DIC)；N (NO <sub>3</sub> 、NO <sub>2</sub> 、NH <sub>4</sub> 、Tot N、Org N)；P (PO <sub>4</sub> 、Org P、Tot P)；Si、I、K、Fe；微量物質；放射性核種；有毒有機污染物；含水量；氧化還原區			X	X	see above
水文地球化學 土壤水及地下水、湖泊、河道和海洋	C (POC、DOC、DIC、Alk)；N (NO <sub>3</sub> 、NO <sub>3</sub> <sup>+</sup> 、NO <sub>2</sub> 、NH <sub>4</sub> 、Tot N、Org N)；P (PO <sub>4</sub> 、Org P、Tot P)；Si、I、K、Fe；微量物質；放射性核種；有毒有機污染物；pH；O <sub>2</sub> ；鹽度；在地表水中還有葉綠素和顆粒含量			X	X	see above
生態系統 林業	數量 (m <sup>3</sup> / ha)；生產(Production)；輪作(Rotation)；年齡結構			X		see above
生態系統 農業	生產作物(Production crops)；畜牧業、肉類生產；範圍、位置和面積			X	X	see above
生態系統 釣魚、打獵和戶外娛樂	釣魚和狩獵的範圍；蘑菇和漿果採摘的範圍等			X	X	see above
生態系統 有毒污染物	生物量中的有毒污染物			X		see above
生態系統 植物	植被類型、關鍵棲息地族群、優勢種紅皮書物種		X	X	X	see above
生態系統 動物	物種、生物量、生產紅皮書物種		X	X	X	see above
氣候	地面結凍(天數、深度)；冰況；風；氣壓；日長；日照；日照角；生長期；			X	X	see above

<b>水生參數</b> 湖泊、河道 和海洋	湖型；沉積物類型；氧含量；氧化；分層；光照條件；溫度；海水循環；潮流；暴露程度；鹽度			<b>x</b>	<b>x</b>	see above
-----------------------------	--	--	--	----------	----------	-----------

## 附錄二

附表二.1 單軸抗壓強度

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩- 花崗閃長岩	47	157	226	225	289	28.8
FFM01	偉晶岩、偉晶花崗岩	10	192	228	231	266	21
FFM03	中粒度變質花崗岩- 花崗閃長岩	13	203	220	221	251	12.9
FFM03	變質長石-花崗閃長 岩	4	143	150	152	155	5.6
no FFM	中粒度變質花崗岩- 花崗閃長岩	4	166	205	206	242	32.6

(Rock domain : RFM045)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM06	細晶岩脈變質花崗岩	5	229	310	320	371	66.7

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	140	162	166	176	15.7

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	4	222	236	236	249	12.0

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩- 花崗閃長岩	4	192	199	195	214	10.3
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	153	170	170	187	23.8

附表二.2 三軸抗壓強度

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum TCS [MPa]	Mean TCS [MPa]	Median TCS [MPa]	Maximum TCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	44	222	333	323	525	73.2
FFM01	細至中等顆粒變質花崗岩-花崗閃長岩和輝光岩	4	260	369	379	457	90.3
FFM01	偉晶岩-偉晶花崗岩	5	245	329	321	448	76.9
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	12	239	310	318	372	41.7
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	171	199	199	228	23.6
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	274	320	308	391	50.5

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	176	193	195	207	12.7

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	3	226	297	307	359	66.7

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	2	315	325	325	336	15.3
FFM01	偉晶岩、偉晶花崗岩	1	359	359	359	359	-

(Rock domain : RFM044)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM05	偉晶岩、偉晶花崗岩	2	348	405	405	462	80.4

附表二.3 抗拉強度

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	92	9.7	13.5	13.7	17.9	1.57
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	12	8.4	11.5	11.0	16.2	2.64
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	30	10.4	13.6	13.8	17.0	1.71
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	10	14.4	16.0	16.1	17.5	1.11
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	10	11.1	13.3	12.6	16.6	1.91

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	10	13.7	15.2	15.5	16.5	1.01

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	11	16.8	18.0	17.8	19.7	0.98

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	8	14.0	15.6	15.3	17.7	1.19
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	6	6.6	9.6	10.0	12.1	1.83

(Rock domain : RFM044)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
FFM05	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	13.6	16	15.9	18.8	2.44
FFM05	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	16.1	16.4	16.4	16.7	0.42

附表二. 4 楊氏係數(單軸試驗)

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	47	69.5	75.7	75.9	82.9	2.85
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	10	71.1	75.3	75.6	79.8	3.23
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	13	70.6	75.2	75.3	70.1	2.82
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	69.7	71.7	70.4	76.2	3.01
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	76.6	77.5	77.3	78.6	0.83

(Rock domain : RFM045)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM06	細晶岩脈變質花崗岩	5	80.0	81.9	81.3	85.6	2.60

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	68.7	72.6	72.1	77.8	3.92

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	4	73.4	77.2	77.4	80.7	3.04

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	70.4	72.7	73.4	73.6	1.54
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	71.5	72.4	72.4	73.3	1.30



附表二.5 楊氏係數(三軸試驗)

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	44	66.1	74.3	74.4	85.4	4.00
FFM01	細至中等顆粒變質花崗岩-花崗閃長岩和輝光岩	4	66.4	66.7	66.8	71.1	2.44
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	5	65.4	70.9	69.8	76.3	4.26
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	12	69.5	73.8	73.6	77.2	2.56
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	65.4	70.9	71.6	74.8	3.94
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	71.4	71.9	71.7	71.0	0.71

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	65.9	69.9	70.7	72.2	2.80

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	3	70.5	74.6	75.7	77.6	3.68

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	2	68.7	70.1	70.1	71.4	1.88
FFM01	偉晶岩、偉晶花崗岩	1	77.2	77.2	77.2	77.2	-

(Rock domain : RFM044)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM05	偉晶岩、偉晶花崗岩	2	67.7	69.4	69.4	71.0	2.34

附表二. 6 柏松比(單軸試驗)

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	47	0.14	0.23	0.24	0.30	0.036
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	10	0.26	0.3	0.3	0.35	0.027
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	13	0.16	0.23	0.24	0.27	0.029
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	0.25	0.29	0.29	0.34	0.037
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	0.20	0.22	0.22	0.24	0.018

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	0.23	0.25	0.25	0.28	0.026

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	4	0.19	0.23	0.24	0.25	0.026

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	0.25	0.27	0.27	0.30	0.021
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	0.19	0.26	0.26	0.32	0.092

附表二.7 柏松比(三軸試驗)

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	44	0.15	0.19	0.19	0.26	0.027
FFM01	細至中等顆粒變質花崗岩-花崗閃長岩和輝光岩	4	0.20	0.24	0.24	0.27	0.030
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	5	0.20	0.24	0.25	0.28	0.036
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	12	0.17	0.20	0.21	0.22	0.019
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	0.19	0.21	0.20	0.23	0.017
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	0.17	0.19	0.20	0.20	0.015

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	0.18	0.19	0.19	0.21	0.015

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	3	0.18	0.18	0.18	0.19	0.006

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	2	0.24	0.25	0.25	0.25	0.007
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	1	0.17	0.17	0.17	0.17	-

(Rock domain : RFM044)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM05	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	0.23	0.24	0.24	0.25	0.014

### 附錄三

#### 附表三.1 傾斜試驗的結果

FFM01 傾斜試驗的計算結果，共 63 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, $\phi_p^{MC}$ [°]	29.5	33.9	33.9	36.6	1.7
Peak cohesion, $c_p^{MC}$ [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.7	0.1
Residual friction angle, $\phi_r^{MC}$ [°]	22.6	29.7	30.1	37.9	2.9
Residual cohesion, $c_r^{MC}$ [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.6	0.1

FFM02 傾斜試驗的計算結果，共 7 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, $\phi_p^{MC}$ [°]	25.8	30.8	30.9	34.9	3.1
Peak cohesion, $c_p^{MC}$ [MPa]	0.2	0.5	0.5	0.7	0.1
Residual friction angle, $\phi_r^{MC}$ [°]	20.3	26.2	26.8	32.8	3.9
Residual cohesion, $c_r^{MC}$ [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.6	0.1

FFM03 傾斜試驗的計算結果，共 41 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, $\phi_p^{MC}$ [°]	32.2	34.5	34.2	37.7	1.5
Peak cohesion, $c_p^{MC}$ [MPa]	0.2	0.5	0.5	0.8	0.1
Residual friction angle, $\phi_r^{MC}$ [°]	23.7	29.3	29.6	33.5	2.5
Residual cohesion, $c_r^{MC}$ [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.7	0.1

FFM04 傾斜試驗的計算結果，共 2 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, $\phi_p^{MC}$ [°]	33.1	34.5	34.5	35.8	1.9
Peak cohesion, $c_p^{MC}$ [MPa]	0.3	0.5	0.5	0.6	0.2
Residual friction angle, $\phi_r^{MC}$ [°]	32.3	33.0	33.0	33.7	1.0
Residual cohesion, $c_r^{MC}$ [MPa]	0.3	0.5	0.5	0.6	0.2

FFM05 傾斜試驗的計算結果，共 5 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, $\phi_p^{MC}$ [°]	31.4	33.4	33.4	34.8	1.3
Peak cohesion, $c_p^{MC}$ [MPa]	0.3	0.4	0.4	0.6	0.1
Residual friction angle, $\phi_r^{MC}$ [°]	24.3	27.8	27.3	32.4	3.4
Residual cohesion, $c_r^{MC}$ [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.5	0.1

附表三.2 開口裂隙的直接剪力試驗結果

每個破裂面域之剪切勁度  $K_{S0.5}$  試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $K_{S0.5}$ (MPa/mm)	Mean $K_{S0.5}$ (MPa/mm)	Median $K_{S0.5}$ (MPa/mm)	Maximum $K_{S0.5}$ (MPa/mm)	Std.dev. $K_{S0.5}$ (MPa/mm)
FFM01	29	1	10	9	23	6
FFM02	4	4	8	8	12	4
FFM03	9	4	8	7	15	4
FFM04	3	1	8	10	12	6
FFM05	2	4	6	6	8	3
DZ	10	3	12	10	35	10
<b>ALL</b>	<b>57</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>35</b>	<b>6</b>

每個破裂面域之剪切勁度  $K_{S5}$  試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $K_{S5}$ (MPa/mm)	Mean $K_{S5}$ (MPa/mm)	Median $K_{S5}$ (MPa/mm)	Maximum $K_{S5}$ (MPa/mm)	Std.dev. $K_{S5}$ (MPa/mm)
FFM01	29	7	26	25	46	9
FFM02	4	21	26	27	31	4
FFM03	9	23	31	29	43	7
FFM04	3	12	16	14	22	5
FFM05	2	14	20	20	25	7
DZ	10	7	26	26	41	9
<b>ALL</b>	<b>57</b>	<b>7</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>46</b>	<b>8</b>

每個破裂面域之剪切勁度  $K_{S20}$  試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $K_{S20}$ (MPa/mm)	Mean $K_{S20}$ (MPa/mm)	Median $K_{S20}$ (MPa/mm)	Maximum $K_{S20}$ (MPa/mm)	Std.dev. $K_{S20}$ (MPa/mm)
FFM01	29	18	34	33	52	10
FFM02	4	25	33	32	41	8
FFM03	9	20	35	36	49	10
FFM04	3	18	23	22	29	5
FFM05	2	23	25	25	26	2
DZ	10	19	31	33	44	8
<b>ALL</b>	<b>57</b>	<b>18</b>	<b>33</b>	<b>32</b>	<b>52</b>	<b>10</b>

每個破裂面域的膨脹角  $\Psi_{0.5}$  試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $\Psi_{0.5}$ (°)	Mean $\Psi_{0.5}$ (°)	Median $\Psi_{0.5}$ (°)	Maximum $\Psi_{0.5}$ (°)	Std.dev. $\Psi_{0.5}$ (°)
FFM01	29	7.8	14.6	14.4	27.1	4.1
FFM02	4	11.5	15.2	15.9	17.6	2.9
FFM03	9	14.0	16.4	15.4	20.2	2.2
FFM04	3	9.5	10.1	10.0	10.9	0.7
FFM05	2	144	14.7	14.7	15.0	0.4
DZ	10	0.3	14.4	16.4	22.8	6.4
<b>ALL</b>	<b>57</b>	<b>0.3</b>	<b>14.6</b>	<b>14.9</b>	<b>27.1</b>	<b>4.2</b>

每個破裂面域的膨脹角  $\psi_5$  試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $\Psi_5$ (°)	Mean $\Psi_5$ (°)	Median $\Psi_5$ (°)	Maximum $\Psi_5$ (°)	Std.dev. $\Psi_5$ (°)
FFM01	29	2.5	7.7	7.6	13.7	2.7
FFM02	4	1.6	2.2	2.2	2.6	0.5
FFM03	9	0.5	3.1	3.4	6.3	2.1
FFM04	3	5.4	6.6	6.4	7.9	1.3
FFM05	2	8.7	8.8	8.8	8.8	0.1
DZ	10	1.0	5.7	4.2	13.0	4.3
<b>ALL</b>	<b>57</b>	<b>0.5</b>	<b>6.2</b>	<b>6.1</b>	<b>13.7</b>	<b>3.4</b>

每個破裂面域的膨脹角  $\psi_{20}$  試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $\Psi_{20}$ (°)	Mean $\Psi_{20}$ (°)	Median $\Psi_{20}$ (°)	Maximum $\Psi_{20}$ (°)	Std.dev. $\Psi_{20}$ (°)
FFM01	29	0.2	3.2	3.1	9.6	2.1
FFM02	4	0.2	2.1	1.9	4.3	2.2
FFM03	9	0.2	2.3	1.9	6.1	1.7
FFM04	3	0.3	1.3	1.5	2.2	1.0
FFM05	2	1.9	2.3	2.3	2.6	0.5
DZ	10	0.5	3.0	3.2	46	1.3
<b>ALL</b>	<b>57</b>	<b>0.2</b>	<b>2.8</b>	<b>2.6</b>	<b>9.6</b>	<b>1.9</b>

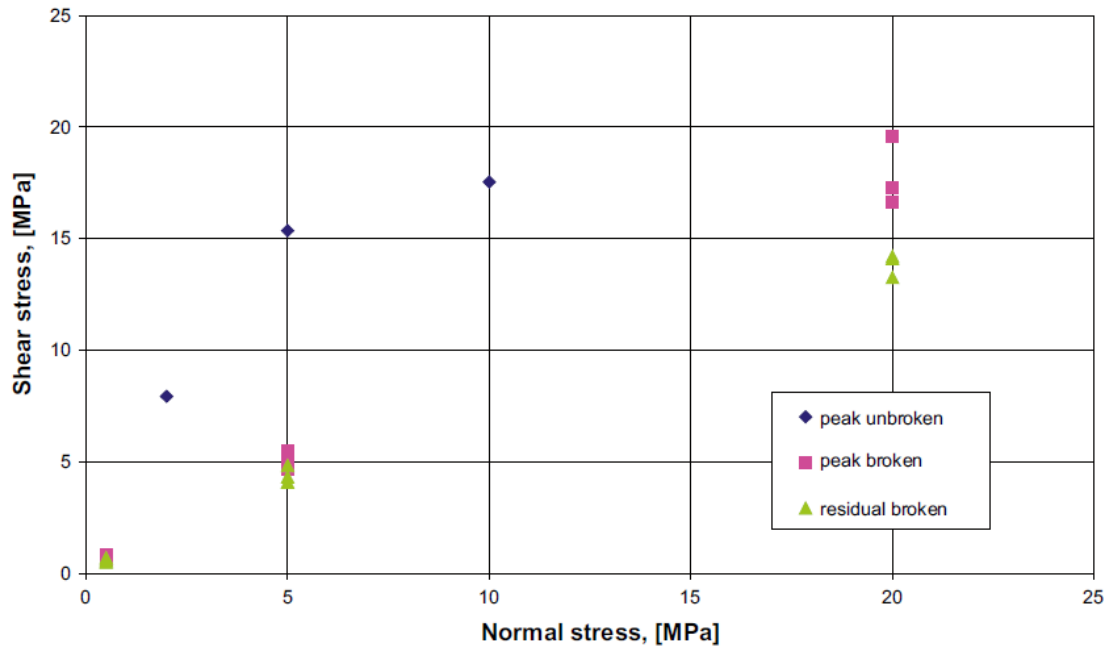
每個破裂面域的殘餘摩擦角 ( $\phi_r$ ) 試驗，共 57 個試驗。來自測試類型 I 和類型 II 的值被轉換為測試類型 III。

FFM	Number of samples	Minimum $\phi_r$ (°)	Mean $\phi_r$ (°)	Median $\phi_r$ (°)	Maximum $\phi_r$ (°)	Std.dev. $\phi_r$ (°)
FFM01	29	27.9	34.9	34.6	41.9	3.4
FFM02	4	24.1	34.8	37.3	40.3	7.3
FFM03	9	25.7	34.2	36.1	41.5	6.2
FFM04	3	29.6	32.2	32.4	34.6	2.5
FFM05	2	32.2	34.3	34.3	36.4	3.0
DZ	10	30.3	34.8	35.1	36.8	2.0
<b>ALL</b>	<b>57</b>	<b>24.1</b>	<b>34.6</b>	<b>35.1</b>	<b>41.9</b>	<b>4.0</b>

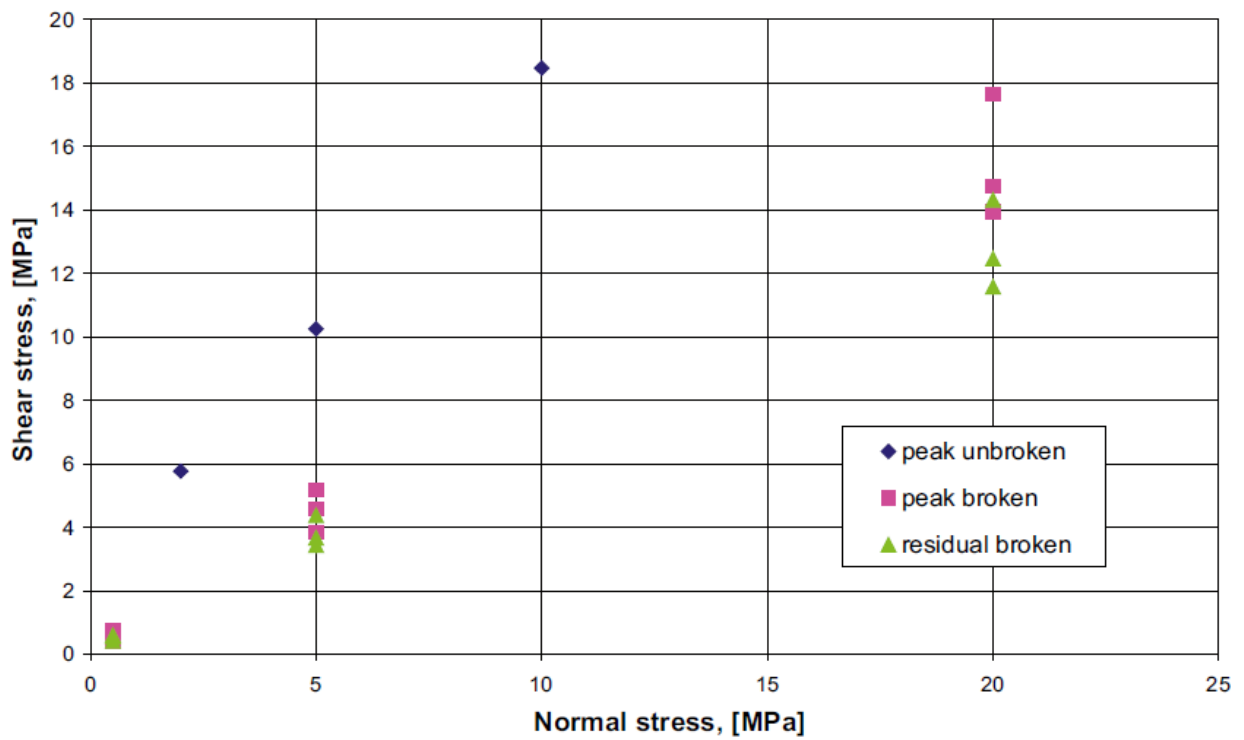
每個破裂面域的殘餘凝聚力 ( $c_r$ ) 試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $c_r$ (°)	Mean $c_r$ (°)	Median $c_r$ (°)	Maximum $c_r$ (°)	Std.dev. $c_r$ (°)
FFM01	29	0.1	0.3	0.3	0.8	0.2
FFM02	4	0.1	0.4	0.2	1.3	0.6
FFM03	9	0.2	0.5	0.3	1.1	0.4
FFM04	3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1
FFM05	2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.1
DZ	10	0.0	0.3	0.3	0.6	0.2
<b>ALL</b>	<b>57</b>	<b>0.0</b>	<b>0.4</b>	<b>0.3</b>	<b>1.3</b>	<b>0.2</b>

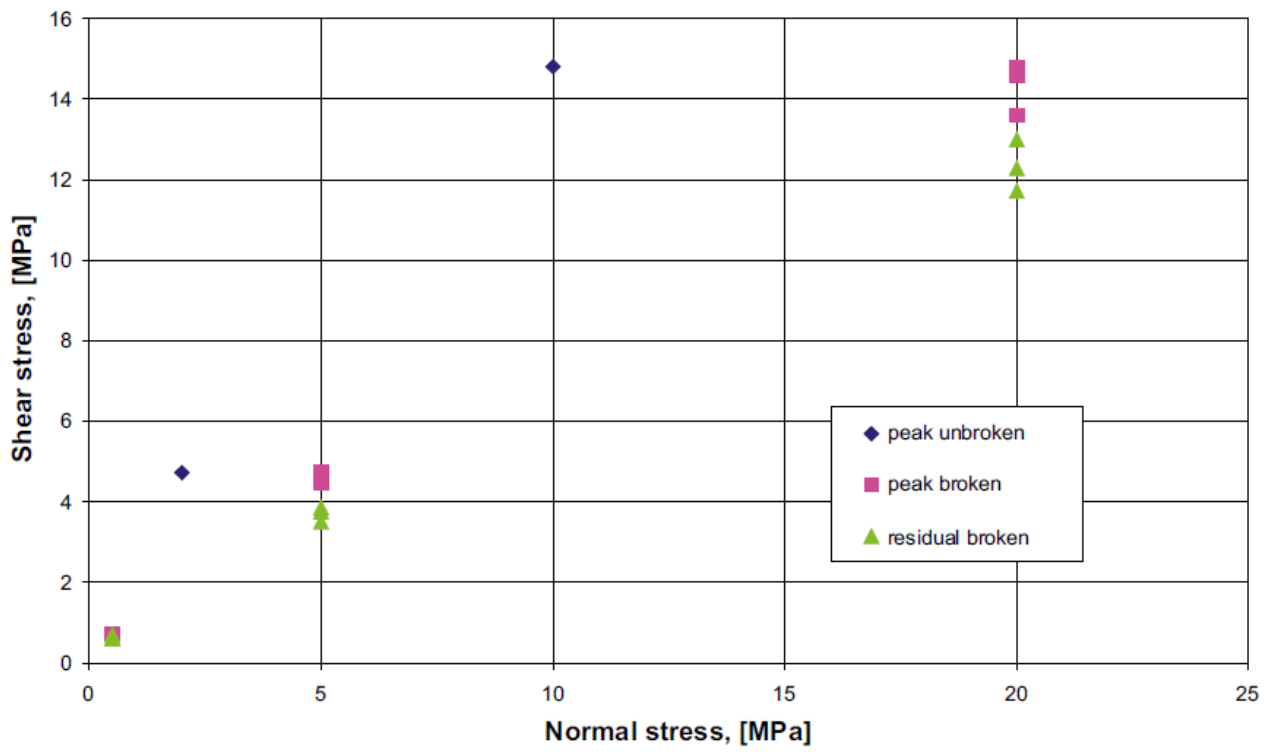
附圖三.1 閉合性破裂面的直接剪力試驗結果



附圖三.1A 鑽孔 KFM01D 閉合破裂面剪切試驗 482.83



附圖三.1B 鑽孔 KFM01D 閉合破裂面剪切試驗 588.28



附圖三.1C 鑽孔 KFM01D 閉合破裂面剪切試驗 658.34



## 附錄四

附表四.1 不連續面位態模型參數

破裂面域	破裂面組	Global or local set?	概率分佈	平均極點			Fisher 分佈 $\kappa$		
				Trend	Plunge	$\kappa_{mp}$	Mean	Std. dev.	Median
FFM01	NE	Global	Univ. Fisher	314.9	1.3	47.4	20.9	9.4	17.8
FFM01	NS	Global	Univ. Fisher	270.1	5.3	47.0	21.3	13.2	20.3
FFM01	NW	Global	Univ. Fisher	230.1	4.6	32.3	15.7	8.1	12.6
FFM01	SH	Global	Univ. Fisher	0.8	87.3	48.9	17.4	7.1	14.4
FFM01	ENE	Local	Univ. Fisher	157.5	3.1	100.0	34.1	17.0	34.1
FFM01	EW	Local	Univ. Fisher	0.4	11.9	30.0	13.9	5.6	13.5
FFM01	NNE	Local	Univ. Fisher	293.8	0.0	33.1	21.8	0.9	NA
FFM01	SH2	Local	Univ. Fisher	164.0	52.6	NA	35.43	NA	NA
FFM01	SH3	Local	Univ. Fisher	337.9	52.9	10.2	17.1	0.1	NA
FFM02	NE	Global	Univ. Fisher	315.3	1.8	33.8	27.0	24.0	22.9
FFM02	NS	Global	Univ. Fisher	92.7	1.2	24.1	30.7	27.1	19.2
FFM02	NW	Global	Univ. Fisher	47.6	4.4	18.6	19.7	22.9	13.9
FFM02	SH	Global	Univ. Fisher	347.4	85.6	87.8	23.2	8.8	20.4
FFM02	ENE	Global	Univ. Fisher	157.9	4.0	100.0	53.2	35.1	47.6
FFM02	EW	Global	Univ. Fisher	186.3	4.3	46.5	34.2	20.6	33.2
FFM02	NNE	Local	Univ. Fisher	107.2	1.8	NA	45.3	NA	NA
FFM02	NNW	Local	Univ. Fisher	73.0	5.6	NA	11.6	NA	NA
FFM03	NE	Global	Univ. Fisher	311.1	2.7	81.3	25.9	9.8	24.7
FFM03	NS	Global	Univ. Fisher	270.2	6.9	91.4	19.7	10.8	18.2
FFM03	NW	Global	Univ. Fisher	42.4	2.8	84.8	18.4	7.3	17.4
FFM03	SH	Global	Univ. Fisher	348.8	71.0	77.3	13.1	5.7	11.8
FFM03	ENE	Local	Univ. Fisher	164.8	1.2	NA	44.0	NA	NA
FFM03	EW	Local2	Univ. Fisher	196.5	7.3	50.7	27.2	17.6	22.7
FFM06	NE	Global	Univ. Fisher	125.7	10.1	54.6	45.1	21.5	53.3
FFM06	NS	Global	Univ. Fisher	91.0	4.1	100.0	19.5	7.8	15.2
FFM06	NW	Global	Univ. Fisher	34.1	0.8	100.0	16.1	6.1	15.9
FFM06	SH	Global	Univ. Fisher	84.3	71.3	100.0	10.8	5.1	10.8
FFM06	ENE	Local	Univ. Fisher	155.4	8.3	NA	20.8	NA	NA
FFM06	SH2	Local	Univ. Fisher	0.0	47.5	NA	12.7	NA	NA

附表四.2 破裂面尺寸-歐基里得假設之構造連續模型 (TCM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius r <sub>0</sub> (m)	Exponent (k <sub>r</sub> )	Match P <sub>32</sub> r <sub>0-∞</sub> (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.66	3.02	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.06	2.78	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.59	2.85	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.82	2.85	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.32	3.25	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.17	3.1	1.12
FFM01	NNE	Local	從露頭尺度使用尺寸模型			
FFM01	SH2	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			
FFM01	SH3	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			
FFM02	NE	Global	Power Law	0.35	3.02	3.31
FFM02	NS	Global	Power Law	0.04	2.78	1.61
FFM02	NW	Global	Power Law	0.23	2.85	2.12
FFM02	SH	Global	Power Law	0.14	2.85	2.78
FFM02	ENE	Global	Power Law	0.26	3.25	3.65
FFM02	EW	Global	Power Law	0.16	3.1	1.19
FFM02	NNE	Local	從露頭尺度使用尺寸模型			
FFM02	NNW	Local	無法參數化；沒有破裂面尺寸資料可用			
FFM03	NE	Global	Power Law	0.24	2.95	2.91
FFM03	NS	Global	Power Law	0.36	2.93	1.49
FFM03	NW	Global	Power Law	0.59	2.90	1.46
FFM03	SH	Global	Power Law	0.20	2.81	0.96
FFM03	ENE	Local	Power Law	0.93	3.24	0.44
FFM03	EW	Local2	Power Law	0.5	3.13	0.74
FFM06	NE	Global	Power Law	0.35	3.02	3.30
FFM06	NS	Global	Power Law	0.039	2.78	2.15
FFM06	NW	Global	Power Law	0.32	2.85	1.61
FFM06	SH	Global	Power Law	0.79	2.85	0.64
FFM06	ENE	Local	Power Law	0.74	3.25	0.98
FFM06	SH2	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			

附表四.3 破裂面尺寸-分形構造連續模型 (TCMF)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius $r_0$ (m)	Exponent ( $k_r$ )	Match $P_{32}$ $r_{0-\infty}$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.72	3.01	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.06	2.76	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.63	2.85	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.72	2.83	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.34	3.25	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.17	3.13	1.12
FFM01	NNE	Local	從露頭尺度使用尺寸模型			
FFM01	SH2	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			
FFM01	SH3	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			
FFM02	NE	Global	Power Law	0.36	3.01	3.31
FFM02	NS	Global	Power Law	0.05	2.76	1.61
FFM02	NW	Global	Power Law	0.24	2.85	2.12
FFM02	SH	Global	Power Law	0.12	2.83	2.78
FFM02	ENE	Global	Power Law	0.27	3.25	3.65
FFM02	EW	Global	Power Law	0.19	3.13	1.19
FFM02	NNE	Local	從露頭尺度使用尺寸模型			
FFM02	NNW	Local	無法參數化；沒有破裂面尺寸資料可用			
FFM03	NE	Global	Power Law	0.21	2.94	2.91
FFM03	NS	Global	Power Law	0.31	2.92	1.49
FFM03	NW	Global	Power Law	0.69	2.89	1.46
FFM03	SH	Global	Power Law	0.25	2.81	0.96
FFM03	ENE	Local	Power Law	1.04	3.25	0.44
FFM03	EW	Local2	Power Law	0.5	3.13	0.80
FFM06	NE	Global	Power Law	0.38	3.01	3.30
FFM06	NS	Global	Power Law	0.039	2.76	2.15
FFM06	NW	Global	Power Law	0.34	2.85	1.61
FFM06	SH	Global	Power Law	0.70	2.83	0.64
FFM06	ENE	Local	Power Law	0.78	3.25	0.98
FFM06	SH2	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			

附表四.4 破裂面尺寸-露頭尺度模型(OSM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius $r_0$ (m)	Exponent ( $k_r$ )	Match $P_{32}$ $r_{0-\infty}$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.039	2.64	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.039	2.90	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.039	2.44	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.039	2.61	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.039	2.20	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.039	3.06	1.12
FFM01	NNE	Local	Power Law	0.039	3.00	4.39
FFM01	SH2	Local	From SH	0.039	2.61	0.92
FFM01	SH3	Local	From SH	0.039	2.61	0.84
FFM02	NE	Global	Power Law	0.10	2.64	3.31
FFM02	NS	Global	Power Law	0.06	2.90	1.61
FFM02	NW	Global	Power Law	0.04	2.44	2.12
FFM02	SH	Global	Power Law	0.07	2.61	2.78
FFM02	ENE	Global	Power Law	0.039	2.20	3.65
FFM02	EW	Global	Power Law	0.15	3.06	1.19
FFM02	NNE	Local	Power Law	0.5	3.00	1.35
FFM02	NNW	Local	無法參數化；沒有破裂面尺寸資料可用			
FFM03	NE	Global	Power Law	0.07	2.62	2.91
FFM03	NS	Global	Power Law	0.05	2.63	1.49
FFM03	NW	Global	Power Law	0.36	2.59	1.46
FFM03	SH	Global	Power Law	0.12	2.57	0.96
FFM03	ENE	Local	Power Law	0.65	2.70	0.30
FFM03	EW	Local2	Power Law	1.03	3.36	0.44
FFM06	NE	Global	Power Law	0.039	2.64	3.30
FFM06	NS	Global	Power Law	0.039	2.90	2.15
FFM06	NW	Global	Power Law	0.039	2.44	1.61
FFM06	SH	Global	Power Law	0.039	2.61	0.64
FFM06	ENE	Local	Power Law	0.039	2.20	0.98
FFM06	SH2	Local	Power Law	0.039	2.61	1.03

附表四.5 平均 P<sub>32</sub> 強度，破裂面“不受 DZ 影響”

破裂面域	破裂面組	群組種類	Mean P <sub>32</sub> (0.5–564 m)			(28–564 m)
			OSM	TCM	TCMF	TFM
FFM01	NE	Global	0.33	2.30	2.50	0.0285
FFM01	NS	Global	0.13	0.24	0.26	0.0003
FFM01	NW	Global	0.29	1.10	1.15	0.0003
FFM01	SH	Global	0.13	0.95	0.85	0.0286
FFM01	ENE	Local	1.24	1.60	1.70	0.0871
FFM01	EW	Local	0.07	0.34	0.33	0.0014
FFM01	NNE	Local	0.34	Use OSM	Use OSM	NA
FFM01	SH2	Local	0.19	Use OSM	Use OSM	NA
FFM01	SH3	Local	0.19	Use OSM	Use OSM	NA
FFM02	NE	Global	1.14	2.30	2.50	0.0285
FFM02	NS	Global	0.25	0.24	0.26	0.0003
FFM02	NW	Global	0.67	1.10	1.15	0.0003
FFM02	SH	Global	0.86	0.95	0.85	0.0286
FFM02	ENE	Global	1.65	1.60	1.70	0.0871
FFM02	EW	Global	0.34	0.34	0.40	0.0014
FFM02	NNE	Local	1.35	Use OSM	Use OSM	NA
FFM02	NNW	Local	無法參數化			
FFM03	NE	Global	0.86	1.45	1.30	0.0285
FFM03	NS	Global	0.34	1.10	0.95	0.0003
FFM03	NW	Global	1.18	1.70	1.95	0.0003
FFM03	SH	Global	0.43	0.45	0.55	0.0286
FFM03	ENE	Local	0.36	0.74	0.80	0.0871
FFM03	EW	Local2	1.17	0.95	1.10	0.0014
FFM06	NE	Global	0.63	2.30	2.50	0.0285
FFM06	NS	Global	0.21	0.29	0.31	0.0003
FFM06	NW	Global	0.50	1.10	1.15	0.0003
FFM06	SH	Global	0.13	0.95	0.85	0.0286
FFM06	ENE	Local	0.44	1.60	1.70	0.0900
FFM06	SH2	Local	0.21	Use OSM	Use OSM	NA

附表四.6 平均  $P_{32}$  強度，破裂面“受 DZ 影響”

破裂面域	破裂面組	群組種類	Mean $P_{32r_{0-\infty}}$	Mean $P_{32}$ (0.5–564 m)		
				OSM	TCM	TCMF
FFM01	NE	Global	5.45	1.04	7.22*	7.22*
FFM01	NS	Global	2.60	0.26	0.49	0.49
FFM01	NW	Global	2.42	0.75	2.79*	2.79*
FFM01	SH	Global	2.44	0.50	3.69*	3.69*
FFM01	ENE	Local	3.90	1.76	2.27	2.27
FFM01	EW	Local	2.85	0.19	0.87	0.87
FFM01	NNE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM01	SH2	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM01	SH3	Local	2.24	0.46	Use OSM	Use OSM
FFM02	NE	Global	5.24	1.80	3.64	3.95
FFM02	NS	Global	4.72	0.73	0.71	0.77
FFM02	NW	Global	2.35	0.74	1.22	1.27
FFM02	SH	Global	6.59	2.04	2.24	2.01
FFM02	ENE	Global	5.05	0.50	2.21	2.35
FFM02	EW	Global	0.18	0.05	0.05	0.06
FFM02	NNE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM02	NNW	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM03	NE	Global	4.52	5.25	2.25	2.02
FFM03	NS	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM03	NW	Global	1.15	1.49	1.34	1.53
FFM03	SH	Global	2.48	2.24	1.15	1.41
FFM03	ENE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM03	EW	Local2	0.41	0.72	0.89	1.03
FFM06	NE	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	NS	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	NW	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	SH	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	ENE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	SH2	Local	0.00	0.00	0.00	0.00



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

計畫編號：106FCMA011

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：張玉萍

受委託機關(構)：財團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月





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

受委託單位：財團法人中華民國大地工程學會

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：張玉璘

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 109 萬 5,600 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 106 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

本計畫以國際原子能總署之「放射性廢棄物處置特定安全要求」(NO. SSR-5)、美國核能管制委員會之「低放射性廢棄物最終處置執照申請標準審查規範」(NUREG-1200)、以及所蒐集之美國、瑞典、日本、加拿大等國之處置案例為研究對象。由於各國處置系統設計因其處置場環境特徵差異，導致其處置設施考量安全功能之方式不盡相同。美國近地表處置設施屬沙漠環境，藉由排水設施與遠離地下水等設計要求，可避免產生核種外釋現象，並據此處置概念研訂其處置設施審查之主要設計特徵。採用坑道處置設施之國家，視其處置設施所處地下水流環境與其低放射性廢棄物特性，有採用強化處置設施圍阻功能作為主要處置策略，亦有採用強化遲滯功能作為主要處置策略。共通點在於所處置廢棄物所含長半化期核種與活度越高，則處置設施考量之多重障壁功能越多。

為分析出坑道式處置設施設計審驗考量，本計畫以 SSR-5 處置安全概念之多重安全功能、圍阻功能、隔離功能、監測與控制功能為基礎，分析與彙整前述案例設計考量，研擬可適用於低放射性廢棄物坑道處置之 13 項「主要設計特徵」，作為處置設施設計審驗之主要項目。再以審查申請者設定之「設計準則」是否能適切反映「主要設計特徵」與「設計基準」之特徵，作為處置設計審查架構。進而研擬「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)」第三章之精進建議。

# Abstract

In this project, the Disposal of Radioactive Waste Specific Safety Requirements (NO. SSR-5) of IAEA, the Standard Review Plan for the review of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1200) of U.S. NRC, as well as the disposal cases of America, Sweden, Japan, and Canada were studied. The design of disposal system, which is restricted by different environment characteristics, considers safety functions variously from country to country. In America, the near-surface disposal facility is in a desert environment, design requirements such as drainage facility and away from groundwater prevent nuclide release, and those requirements become the basis of determining the main design characteristics of disposal facility inspection. In some countries, they adopt the concept of tunnel disposal facility, their main disposal strategies depend on the groundwater environment and the characteristics of low-level radioactive wastes, and the main disposal strategy may be enhancing the confining function of the disposal facility, or enhancing the retardation function of the disposal facility. There is one thing in common between countries, the higher the amount of long half-life nuclides and activity of disposal waste, the more functions of multi-barrier are considered.

In order to develop the approach for inspecting tunnel disposal facility design, this project referred to the disposal safety concept mentioned in the SSR-5. On the basis of its multi-safety function, containment function, retardation function, supervising and controlling function, this project analyzed and integrated the approaches of aforementioned cases, and further determined 13 “main design characteristics” specifically for low-level radioactive waste tunnel disposal. They are the main items for disposal facility design inspection. The inspection of disposal facility design is under the structure of inspecting whether the “design criteria” proposed by the applicant appropriately reflects the feature of “main design characteristic” and “design basis”. The aforementioned results were utilized to propose the advanced suggestions for Chapter 3 of the Low level radioactive waste final disposal facility safety analysis report inspection guide (version 0).

# 目錄

第一章 前言 .....	1
1.1 計畫目的 .....	1
1.2 工作項目 .....	2
1.3 工作進度 .....	3
第二章 國外低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法 .....	4
2.1 美國低放射性廢棄物處置法規蒐集與研析 .....	5
2.1.1 美國處置安全管制概述 .....	5
2.1.2 NUREG-1200 之處置設計審查方式簡介 .....	6
2.1.3 「主要設計特徵」審查規範概述 .....	9
2.1.4 「正常與異常狀況之設計考量」審查規範概述 .....	16
2.1.5 11 項設計功能之評估準則 .....	23
2.1.6 處置概念之目標、功能、設計特徵與原則關聯性分析 .....	30
2.2 瑞典低放射性廢棄物坑道處置設施案例蒐集與研析 .....	36
2.2.1 瑞典之處置安全管制概述 .....	36
2.2.2 SFR 處置設施與安全原則考量概述 .....	37
2.2.3 確保多重障壁系統之遲滯核種功能 .....	39
2.3 日本低放射性廢棄物坑道處置設施規劃案例蒐集與研析 .....	46
2.3.1 日本之處置安全管制概述 .....	46
2.3.2 日本餘裕深度處置概念與基本考量 .....	47
2.3.3 第二種廢棄物處置事業相關之安全審查基本考量 .....	50
第三章 國際坑道處置放射性廢棄物分類特性與其工程障壁系統安全功能 .....	53
3.1 低放射性廢棄物分類特性 .....	53
3.1.1 IAEA 的低放射性廢棄物分類特性 .....	53
3.1.2 我國低放射性廢棄物分類特性 .....	54
3.1.3 美國低放射性廢棄物分類 .....	58
3.1.4 瑞典之低放射性廢棄物分類特性 .....	59
3.1.5 日本之低放射性廢棄物分類特性 .....	60
3.1.6 加拿大之低放射性廢棄物分類特性 .....	60
3.2 瑞典處置案例之廢棄物分類與處置概念分析 .....	61
3.2.1 核種存量與盛裝容器 .....	61
3.2.2 廢棄物分類與處置工程障壁設計關聯性分析 .....	65

3.2.3 案例探討 .....	70
3.3 加拿大處置案例之廢棄物分類與處置概念分析 .....	71
3.3.1 DGR 處置設施規劃與安全特徵概述 .....	71
3.3.2 低放與中放廢棄物與盛裝容器特性 .....	75
3.3.3 處置坑道設計 .....	82
3.3.4 案例探討 .....	88
第四章 我國低放處置技術工程設計模式審驗方式 .....	92
4.1 處置工程設計特徵功能與安全功能分析 .....	92
4.1.1 放射性廢棄物處置特定安全要求 .....	92
4.1.2 工程設計特徵功能與安全功能之關聯分析 .....	94
4.2 低放處置技術工程設計模式審驗方式 .....	96
第五章 「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)」精進建議 .....	99
第六章 結論與建議 .....	104
參考文獻 .....	106
附錄一、「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」精進建議-第三章 設施之設計基準 .....	附-1

## 表目錄

表 1.3-1 工作進度表 .....	3
表 2.1.6-1 主要設計特徵功能要求、設計準則、設計基準等關聯性分析表.....	32
表 2.6.2-1 安全原則與其對應之安全功能(SKB, 2014) .....	38
表 2.7.2-1 餘裕深度處置的主要廢棄物種類.....	47
表 3.1.2-1 單一長半化期核種濃度值.....	55
表 3.1.2-2 單一短半化期核種濃度值.....	55
表 3.1.2-3 低放射性廢棄物均勻固化體測試項目、方法及標準.....	57
表 3.1.4-1 瑞典 SKB 放射性廢棄物分類標準 .....	59
表 3.1.5-1 日本放射性廢棄物分類與處置概念.....	60
表 3.1.6-1 加拿大放射性廢棄物分類標準(CNSC, 2016).....	60
表 3.2.1-1 2075 年之最佳的放射性核種存量估計值[Bq](SKB, 2014)	62
表 3.2.1-2 經不確定性分析後之 2075 年放射性核種存量估計值 [Bq] (SKB, 2014) .....	63
表 3.2.3-1 瑞典案例之處置坑道工程障壁系統主要安全功能.....	71
表 3.3.2-1 DGR 處置場的低放射性廢棄物分類(NWMO, 2011b).....	75
表 3.3.2-2 DGR 處置場的中放射性廢棄物分類(NWMO, 2011b).....	76
表 3.3.2-3 低放射性廢棄物包件型式(HATCH, 2010).....	77
表 3.3.2-4 中放射性廢棄物包件型式(HATCH, 2010).....	77
表 3.3.2-5 A 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010) .....	78
表 3.3.2-6 B 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010) .....	78
表 3.3.2-7 C 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010) .....	79
表 3.3.2-8 D 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010).....	80
表 3.3.2-9 E 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010) .....	80
表 3.3.2-10 F 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010).....	81
表 3.3.3-1 坑道設計限制與因應措施(HATCH, 2010).....	82
表 3.3.3-2 處置坑道斷面尺寸(HATCH, 2010).....	83
表 4.1.2-1 低放處置安全功能與處置設計考量關聯分析表(1/2).....	95
表 4.1.2-1 低放處置安全功能與處置設計考量關聯分析表(2/2).....	96
表 4.2-1 坑道處置工程設計之建議主要設計特徵與考量 .....	98

## 圖目錄

圖 2.1.2-1 處置設計審查章節架構示意圖 .....	8
圖 2.6.2-1 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).....	37
圖 2.6.2-2 各處置坑道之預估放射性廢棄物處置總量(SKB, 2014) ...	38
圖 2.6.3-1 1BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014) .....	40
圖 2.6.3-2 2BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014) .....	41
圖 2.6.3-3 1BTF 與 2BTF 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	42
圖 2.6.3-4 筒倉處置封閉設計示意圖(SKB, 2014) .....	43
圖 2.7.2-1 餘裕深度處置盛裝容器概念示意圖(電氣事業聯合會, 2011) .....	48
圖 2.7.2-2 餘裕深度處置設計概念示意圖 .....	48
圖 2.7.2-3 餘裕深度處置坑道障壁系統斷面示意圖 .....	49
圖 2.7.3-1 餘裕深度處置各階段的基本安全機能 .....	51
圖 2.7.3-2 餘裕深度處置地下設施單元與基本安全機能之關聯性....	51
圖 3.1-1 IAEA 之放射性廢棄物分類概念(IAEA, 2009).....	54
圖 3.2.1-1 SFR 處置場規畫使用之盛裝容器示意圖(SKB, 2014) .....	64
圖 3.2.2-1 BRT 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	65
圖 3.2.2-2 1BLA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014) .....	68
圖 3.2.2-3 2-5BLA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	69
圖 3.2.3-1 瑞典案例之處置坑道廢棄物特性示意圖 .....	70
圖 3.2.3-2 瑞典案例之盛裝容器與工程障壁示意圖 .....	70
圖 3.3.1-1 DGR 處置場概念示意圖(NWMO, 2011a).....	72
圖 3.3.1-2 DGR 處置設置規劃示意圖(NWMO, 2011a).....	72
圖 3.3.3-1 panel 1 處置區之處置坑道規劃(HATCH, 2010) .....	84
圖 3.3.3-2 panel 2 處置區之處置坑道規劃(HATCH, 2010) .....	84
圖 3.3.3-3 P1 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010).....	86
圖 3.3.3-4 P2 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010).....	86
圖 3.3.3-5 P3 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010).....	87
圖 3.3.3-6 P4 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010).....	87
圖 3.3.3-7 P5 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010).....	87
圖 3.3.3-8 P6 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010).....	88
圖 3.3.4-1 豎井封閉設計示意圖(HATCH, 2010).....	89



圖 3.3.4-2 封閉牆位置分布圖(HATCH, 2010).....	90
圖 3.3.4-3 封閉牆的設計概念示意圖(HATCH, 2010).....	90
圖 3.3.4-4 F 型廢棄物包件(F5、F6、F7、F8)示意圖(HATCH, 2010)	91
圖 3.3.4-5 D 型廢棄物包件與混凝土基座示意圖(HATCH, 2010).....	91
圖 4.2-1 處置設計審查考量架構示意圖 .....	97

# 第一章 前言

## 1.1 計畫目的

我國近年來積極推動低放射性廢棄物處置工作，經濟部已核定 2 處建議候選場址，台灣電力公司針對此 2 處場址進行調查，目前朝向坑道處置技術之方向發展。政府對於低放射性廢棄物處置必須做好嚴密的把關，除了提升相關技術的熟悉度，也必須建置適合國內低放處置之審驗技術與規範。

「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」之執行方向針對處置坑道之場址特性、工程設計、長期穩定、生物圈劑量評估以及長期安全等，透過國際資訊研析、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，近程目標在於彙整國外放射性廢棄物坑道處置設施安全評估審查技術，研析國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與精進對策。長程目標可協助建立管制單位對於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。此計畫為此四年期工作之第二年度，去年度低放計畫「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」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，本年度計畫將根據去年研究之結果進一步提出審驗技術建立，分別依：(1)場址特性審驗技術建立；(2)工程設計審驗技術建立；(3)結構穩定性驗證方法；(4)長期安全分析審驗方法；(5)生物圈情節分析審查技術等 5 個主題進行研析。

本計畫為「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」之子計畫「低放射性廢棄物坑道處置工程設計審驗技術建立之資訊研析」。低放射性廢棄物最終處置工程設計除須滿足既有管理法規規範，如：「放射性物料管理法」、「放射性物料管理法施行細則」、「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」、「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」、「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」等。考量「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」主要依循美國以近地表處置設施為對象之 NUREG-1200 架構與精神訂定，為因應我國 2 處建議候選場址均可能採用地下坑道處置方式，擬針對坑道處置工程設計與審查驗證技術進行研究，用以提升其設計驗證之審查技術，並可作為修訂「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」之參據。

爰此，需蒐集國外坑道處置型式之低放處置工程設計相關資料，針對其處置設施所在環境特徵、處置系統之安全功能考量，以及工程障壁系統之安全功能設計要項與驗證方式進行研究，作為研擬我國低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法之參考。彙整前述研究成果，分別提出適合我國之低放處置技術工程設計模式與符合坑道處置概念之「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」精進建議。

## 1.2 工作項目

工作項目分別為：

- (1) 國外低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法資訊蒐集與研析。
- (2) 國際坑道處置放射性廢棄物分類特性與其工程障壁系統安全功能研析。
- (3) 提出我國低放處置技術工程設計模式審驗方式。
- (4) 「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。
- (5) 成果報告撰寫。

### 1.3 工作進度

工作進度如表 1.3-1 所示。

表 1.3-1 工作進度表

工作項目	年月												備註
	106 1	106 2	106 3	106 4	106 5	106 6	106 7	106 8	106 9	106 10	106 11	106 12	
子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法之研究			※			※			※			※	
國外低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法資訊蒐集與研析													
國際坑道處置放射性廢棄物分類特性與其工程障壁系統安全功能研析													
研提我國低放處置技術工程設計模式審驗方式													
研提「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)」之精進建議													
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 %	
預定查核點	第一季：應完成工項一 40% 研析內容。 第二季：應初步完成工項一，與工項二約 30% 研析內容，並提出期中報告 第三季：綜合分析工項一與工項二之研析內容，並就其成果初擬工項三與工項四之研究方向。 第四季：完成各工項要求與修訂建議，並完成撰寫研究成果報告。												
說明： 1. 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2. 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。 3. 每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。													

## 第二章 國外低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法

考量「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」主要參考美國核能管制委員會(U.S. NRC)之「低放射性廢棄物最終處置執照申請標準審查規範」(NUREG-1200)架構與精神訂定。因此本章節蒐集其處置工程設計相關章節內容，分析其審查方式。

於 2.1 節「美國低放射性廢棄物處置法規蒐集與研析」中，先說明本章節所涉及之美國主要法規規範，分別為 1994 年之 NUREG-1200 Ver.3 與 U.S. NRC 網站上公布之 2015 年修訂版次之 10CFR61「放射性廢棄物陸域處置執照申請要求」內容。於 2.1.1 節概述美國處置安全管理概述，2.1.2 節則概述 NUREG-1200 之處置設計審查方式。再針對主要設計特徵審查(NUREG-1200 3.1 節與 3.2 節)之主要設計特徵、正常/異常狀況之設計考量下所訂定的主要設計原則、以及該標準審查規範之審查範圍、審查程序與接受準則等，分節進行說明與討論。2.1.3 節說明其主要設計特徵審查範圍、審查程序與接受準則，2.1.4 節說明正常/異常狀況之設計考量審查規範，2.1.5 節彙整其 11 項功能要求之主要設計特徵與主要設計原則，以利了解其審查內容。於 2.1.6 節彙整前述審查規範並分析其審查原則。對國外採用坑道式處置之低放射性廢棄物處置設計案例進行分析。於 2.2 節分析已興建營運且於近期申請擴建之瑞典案例，於 2.3 節分析地理環境與我國相似，尚處規劃階段之日本案例。

## 2.1 美國低放射性廢棄物處置法規蒐集與研析

### 2.1.1 美國處置安全管理概述

美國其低放射性廢棄物管理主要源於 1954 年頒布之原子能法(Atomic Energy Act of 1954)與低放射性廢棄物政策法修訂案(Low-Level Radioactive Waste Policy Amendments Act of 1985)，並由美國核能管制委員會 NRC(Nuclear Regulatory Commission)負責核能設施之運轉安全、申照許可的頒發與更新、核物料與放射性廢棄物安全管理等監督工作。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。2009 年起，美國 NRC 考量耗乏鈾(depleted uranium)等長半化期廢棄物處置、風險告知與功能基準、以及過去執行經驗，開始推動大規模修法。惟迄今於 U.S. NRC 網站上公布之 2015 年 10CFR61 內容，仍與原版本條文內容相似。

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。其處置設施之執照申請許可仍需通過美國核管會審核後頒發。美國能源部於 2016 年提出超 C 類放射性廢棄物最終處置環境衝擊影響評估報告，其中提出可能採用之 5 種處置型式，惟美國政府尚未決定其最終採行之型式。

## 2.1.2 NUREG-1200 之處置設計審查方式簡介

美國核能管制委員會之「低放射性廢棄物最終處置執照申請標準審查規範」(NUREG-1200)為指導審查人員進行低放射性廢棄物最終處置執照申請審查之作業指引，其主要目標在確保審查作業品質與一致性。為此，對於各項審查作業均會載明審查此項目之審查責任、審查範圍、審查程序、接受準則、審查發現陳述方式、審查執行方式與參考文獻等。就其項目內容說明如下：

- (1) 審查責任：主要界定審查此項目所需之審查者專業職能(或單位)其分工。
- (2) 審查範圍：主要說明該項目應說明之資料範圍、目標與法規要求、主要審查項目與要求。
- (3) 審查程序：大致區分為資料是否完備的程序性審查與實質的安全審查。
- (4) 接受準則：為使審查者可採取一致性的審查立場，此部分分為適用的法規、法規或技術指引、其他相關領域之規範或標準。
- (5) 審查發現：此部分主要說明審查者應如何說明其審查結論。
- (6) 執行：說明審查人員如何執行審查與其準則。
- (7) 參考文獻：列舉應用於審查過程之參考文獻。

由於 NUREG-1200 標準審查規範其所規範之處置設施為近地表處置設施。依 10CFR61.7 之處置概念僅適用於放射性廢棄物陸域處置，而近地表處置為陸域處置之一種，指在地表約 30m 範圍內進行處置。其處置設施全部或部分構築於地面，上方由覆蓋層提供保護。處置區用於進行廢棄物處置，包含處置單元與緩衝區，廢棄物置放於處置單元內進行處置。緩衝區是指廢棄物下方，以及處置單元至場址邊界間之區域，其空間用於執行監測作業，提供核種遷移之預警，與必要時採取改善措施。

為了解該標準審查規範欲描述之內容與精神，對於處置設施設計相關之名詞進行定義與說明如下：

- (1) 主要設計特徵(Principal Design Feature)：處置設施用以確保處置設施興建、運轉與封閉安全，需要透過審慎規劃與設計之重要設施或重要部分。
- (2) 主要設計準則(Principal Design Criteria)：設計準則用於規範處置設施必要的設計、製造、興建、測試、結構功能要求、系統與組件之功能要求與設計標準，用以合理保證處置設在

運轉與封閉後均不會增加公眾健康與安全之風險。主要設計準則可能是用於技術的重要評判標準，或是基於滿足設計適宜性與接受性之設計相關決策。主要設計準則是由申請者提出，用於確保處置設施可以符合美國相關法規的功能目標與技術要求。

- (3)設計基準(Design Bases)：用於識別處置設施結構、系統或組件之具體功能，與設計控制參數依據之特定數值或數值範圍。
- (4)設計限制(Design Limit)：用於確保設計可符合主要設計特徵與設計基準之參數限值。
- (5)自然事件設計基準 (Design-Basis Natural Event)：設施設計時，會預期發生某些特定強度之自然事件，並評估這些自然事件對於設施造成之荷載或影響程度。依據自然事件訂定之荷載或影響程度，即稱為自然事件設計基準。所述自然事件可能包含地震、火山活動、颱風、洪水、海嘯等。設計時，通常會同時考量自然事件正常與異常發生之狀況，再根據其發生時期之可能性，評估自然事件需考量之嚴重程度。

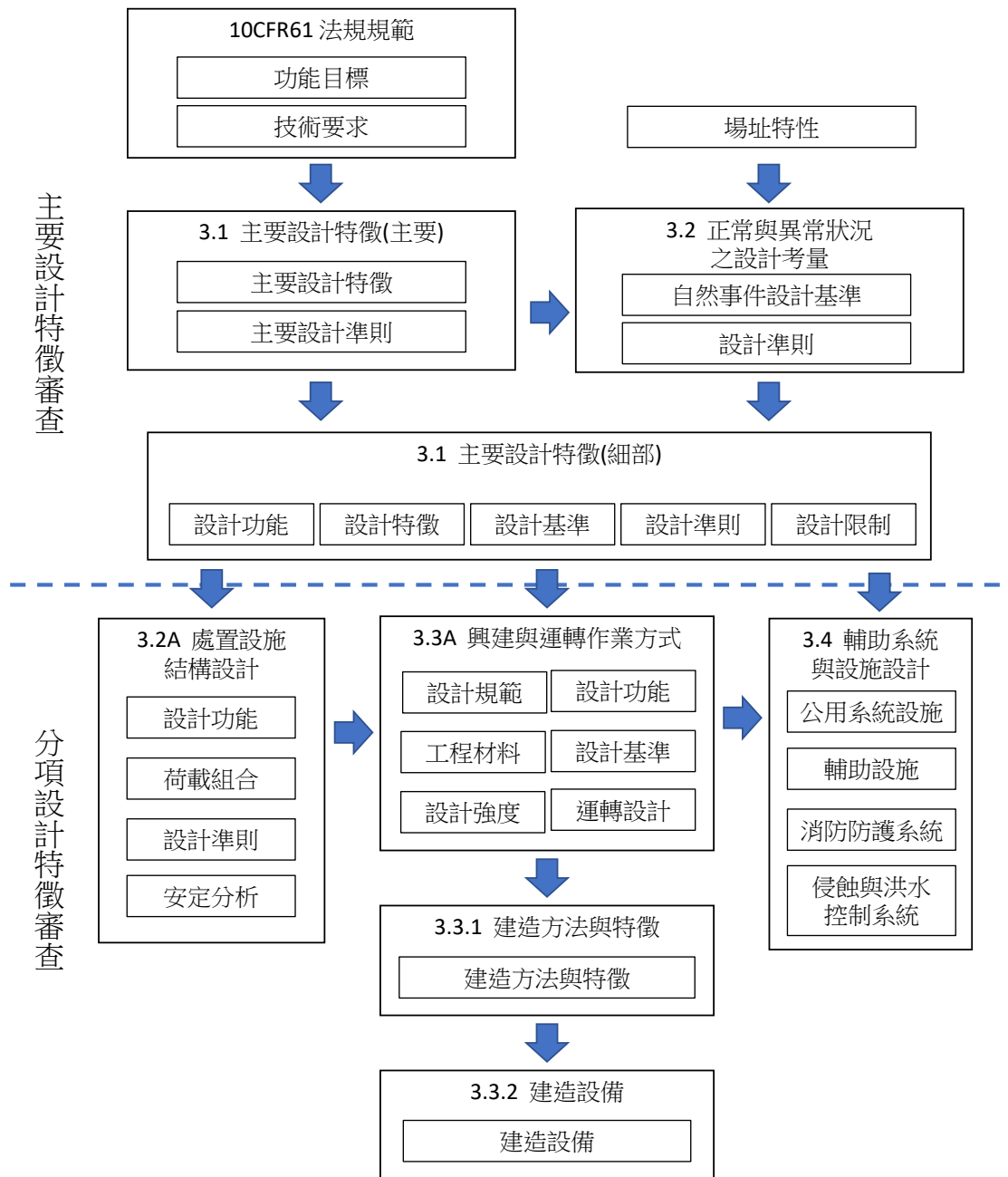
依該審查規劃之章節編排，處置設施設計屬於第三章「設計與建造」，章節架構與內容簡述如下：

- (1)3.1 節 主要設計特徵：主要說明處置場設計須符合之目標與功能要求，並據此審視其主要設計特徵。
- (2)3.2 節 正常與異常狀況之設計考量：此節主要審查與處置場設計目標與功能要求相關之設計準則，查證設計準則與設計目標與功能之關聯性，以及確認對應之設計準則是否合適。
- (3)3.2A 節 處置設施結構設計：主要審查結構設計之設計準則、荷載與荷載組合、採用之設計規範與標準是否合適，以及是否符合法規要求目標與功能。
- (4)3.3A 節 處置設施建造與運轉考量：主要審查設施設計採用之工程材料與配比、設計強度，以及處置運轉與封閉作業進行方式，確認其是否符合功能目標與技術要求。
- (5)3.3.1 節 建造方法與特徵：主要審查與確保處置設施功能與穩定相關之施工方式，包含整地、排水、處置區預防沉陷、回填等工程進行方式，確認其是否符合功能目標與技術要求。
- (6)3.3.2 節 建造設備：主要依前述施工方式審查其設備、規格與性能、維管、檢查與替代性，確保符合前述建造需求可妥適達成，藉以符合功能目標與技術要求。



(7)3.4 節 輔助系統與設施設計：區分為公用系統設施、輔助設施、消防防護系統，以及侵蝕與洪水控制系統等 4 部分，分別進行審查。

彙整其處置設計審查架構如圖 2.1.2-1 所示。



備註：本計畫整理繪製。

圖 2.1.2-1 處置設計審查章節架構示意圖

### 2.1.3 「主要設計特徵」審查規範概述

本節就該標準審查規範之審查方式與內容進行說明，有關於 11 項設計功能要求之主要設計特徵則另於 2.1.5 節彙整說明。

#### (1) 審查範圍

於主要設計特徵之審查範圍說明，審查者需審查之處置設施主要設計特徵需符合美國相關核能管制要求，可提供低放射性廢棄物長期隔離、最小化處置設施封閉後持續維護作業之需求、改進場址之自然環境特徵，用以保護群眾的健康與安全。所述美國相關核能管制要求包含 10CFR61.12(b) ~ (e)、61.13(a)、61.13(b)、61.13(d)、10CFR61.23(b) ~ (f)、10CFR61.41~61.44、61.50(7)(8)、61.51(a)(1) ~ (6)、61.52(a)(1) ~ (10)。審查者需評估與下列功能要求相關之處置設施與處置單元主要設計特徵：

1. 降低處置單元水滲透
2. 處置單元覆蓋層完整性
3. 回填物、廢棄物及覆蓋物等構造物結構穩定
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. 場址封閉與穩定性
7. 減少長期維護需求
8. 具無意闖入者之防護功能
9. 合理抑低職業曝露
10. 合適的處置場監測規劃
11. 提供適當監管與補救之緩衝區

審查者主要需評估是否已充分描述主要設計特徵，並基於 3.2 節確認其設計基準，是否可符合主要設計準則與 10CFR61.51(a)所述之技術要求底限。

10CFR61.51(a)主要規範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。

10CFR61 Subpart C 主要規範處置功能目標，略分為：10CFR61.40 一般要求、10CFR61.41 保護一般公眾免於放射性釋出的危害、10CFR61.42 保護無意闖入者、10CFR61.43 保護運轉期間之個人、10CFR61.44 封閉後具穩定性。前述 10CFR61.51(a)2.與 3.項與處置功能目標較有直接關聯者為 10CFR61.44 封閉後具穩定性。封閉後具穩定性之處置功能目標規範為：處置設施必須基於實現長期穩定性與儘量排除封閉後主動維護需求之目標，進行選址、設計、使用、運轉與封閉等作業，以便確保封閉後僅需進行監控、監測或較少的維管作業。

## (2)審查程序

審查者將依據接受準則內容，分別評估 11 項主要設計特徵的描述，分別進程序審查與實質審查。程序審查時，審查者將依循「低放射性廢棄物處置設施執照許可申請之標準格式與內容」NUREG-1199 與 NUREG-1200 規定，審查主要設計特徵與其設計功能之描述與分析的完整性。而實質審查則是著重於確認或驗證主要設計特徵是否符合其接受準則。

## (3)接受準則

標準審查規範的接受準則主要判斷其法規符合性，於規範中略分為法規要求(Regulatory Requirements)、法規指引(Regulatory Guidance)與法規評估準則(Regulatory Evaluation Criteria)。分別針對所審查項目明列其相關法規要求、指引與評估準則。

## 1.法規要求

NUREG-1200 規範其「主要設計特徵」審查適用之美國法規分別說明如下：

### A.10CFR61.12 (b)~(e)要求：

為證明申請者提出之內容符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標與 Subpart D 之技術要求，於 10CFR61.12「特定技術資訊」要求中，規範申請者需提出之資訊內容，所涉要求概述如下：

(A).10CFR61.12(b)：需說明處置設施與處置單元之 11 項主要設計特徵。

(B).10CFR61.12(c)：需說明主要設計特徵與設計功能之關聯性。

(C).10CFR61.12(d)：需說明自然事件(或現象)設計基準與主要設計特徵之關聯性。

(D).10CFR61.12(e)：需說明設計時採用之規範(code)與標準(standard)，以及那些會規範與標準將適用於設施興建。

### B.10CFR61.13(a)、(b)、(d)要求：

為證明申請者提出之內容符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標，於 10CFR61.13「技術分析」要求中，規範申請者需提出之技術分析資訊內容，所涉要求概述如下：

(A).10CFR61.13(a)：傳輸途徑分析需能明確證明處置設施可合理的確保放射性釋出對人類的曝露未超過 10CFR61.41 規定之限值。傳輸途徑分析需明確的區別處置場址環境特徵與設計特徵，對於隔離(isolate)與分離(segregate)放射性廢棄物之功能，並考量各類可能傳輸途徑。

(B).10CFR61.13(b)：需分析對個人無意闖入的防護。必須說明符合放射性廢棄物分類與分離要求之合理保證，並提供合適之無意闖入防護障壁

(C).10CFR61.13(d)：需分析長期穩定性與封閉後持續主動維護的需求。必須根據處置場自然環境特徵進行分析，包含如侵蝕、塊體崩壞、邊坡破壞、廢棄物與回填材料沉陷、處置單元覆蓋層與鄰近土壤的入滲、與地表排水。分析須能合理的確保處置場址封閉後無需持續主動維護。

C.10CFR61.23(b)~(f)要求：

要求申請者證明其設計可滿足對大眾健康安全提供適當保護，並符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標與 Subpart D 之技術要求。於 10CFR61.23 「執照核發標準」要求中，規範申請者需提出之資訊內容，所涉要求概述如下：

- (A).10CFR61.23(b)：需證明處置設施能符合 10CFR 61.41 保護一般公眾免於放射性釋出的危害要求。申請人須提出處置場址、處置設計、處置設施運轉(包括設備、設施、與程序)、處置場址封閉、與封閉後監管，均能合理保護公眾健康與安全的證明。
- (B).10CFR61.23(c)：需證明處置設施能符合 10CFR 61.42 保護無意闖入者之要求。申請人須提出處置場址、處置設計、處置設施運轉(包括設備、設施、與程序)、處置場址封閉、與封閉後監管，均能合理保護無意闖入者的證明。
- (C).10CFR61.23(d)：需證明處置設施符合 10CFR 20 輻射防護標準規範。申請人需提出處置設施運轉(包括設備、設施、與程序)能適當保護公眾健康與安全的證明。
- (D).10CFR61.23(e)：需證明處置設施可實現長期穩定性與在確實可行的情況下排除封閉後主動維護之需求。申請人須提出處置場址、處置設計、處置設施運轉(包括設備、設施、與程序)、處置場址封閉、與封閉後監管，均能合理保護公眾健康與安全的證明。
- (E).10CFR61.23(f)：需證明處置設施能符合 10CFR 61 Subpart D 之技術要求。

D.10CFR61.41~61.44 要求：

10CFR61.41~61.44 屬於 10CFR61 Subpart C 處置功能目標之要求，概述如下：

- (A).10CFR61.41 保護一般公眾免於放射性釋出的危害：應採取合理措施盡可能降低放射性釋放至環境中。經由地下水、地表水、空氣、土壤、植物或動物等途徑釋放至環境之放射性濃度，不得對公眾的任何個人造成超過相當於全身 25 毫侖目、甲狀腺 75 毫侖目、與其他器官 25 毫侖目之年劑量。(1 毫西弗約為 100 毫侖目)
- (B).10CFR61.42 保護無意闖入者：處置設施之設計、運轉、與封閉，於處置場址撤除主動監管後，需保證對無意闖入處置場址、占用場址或接觸廢棄物之個人提供保護。

(C).10CFR61.43 保護運轉期間之個人：處置設施運轉除放射性釋出應遵照 10CFR61.41 之外，需符合 10CFR20「輻射防護標準」要求，並遵循合理抑低原則。

(D).10CFR61.44 封閉後具穩定性：處置設施必須基於實現長期穩定性與儘量排除封閉後主動維護需求之目標，進行選址、設計、使用、運轉與封閉等作業，以便確保封閉後僅需進行監控、監測或較少的維管作業。

E.10CFR61.50 (7)與(8)要求：

10CFR61.50 為處置場址適宜性要求，主要規範處置場址之環境特徵。

(A).10CFR61.50(7)：處置場址地下水位必須有足夠深度，足以避免地下水侵入至廢棄物。美國核管會考慮允許此規定的例外狀況，若處置設施位於地下水位面以下，則須確定其場址環境特徵將使核種將以擴散方式為主要傳輸特性，且其核種傳輸結果能符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標。美國並不允許將廢棄物處置於地下水位面變動帶中。

(B).10CFR61.50(8)：處置場之水文地質單元不得將地下水排放至處置場區地表面。

F.10CFR61.51(a)之(1)~(6)要求：

10CFR61.51 為處置場設計要求，依處置深度分為(a)近地表處置與(b)非近地表處置型式，非近地表處置型式尚無詳細規範內容，近地表處置設計要求摘述如下：

(A).10CFR61.51(a)之(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。

(B).10CFR61.51(a)之(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)。

(C).10CFR61.51(a)之(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)。

(D).10CFR61.51(a)之(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。

(E).10CFR61.51(a)之(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。

(F).10CFR61.51(a)之(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。

G.10CFR61.52(a)之(1)~(10)要求：

10CFR61.52 為處置場運轉與封閉要求，依處置深度分為(a)近地表處置與(b)非近地表處置型式，非近地表處置型式尚無詳細規範內容，近地表處置場運轉與封閉要求摘述如下：

(A).10CFR61.52(a)之(1)：依 10CFR61.55 分類規定屬 A 類之放射性廢棄物，須與其他分類廢棄物分離處置於不同處置單元，以避免 A 類廢棄物與其他廢棄物產生交互影響，而導致無法滿足 10CFR61 Subpart C 之功能目標要求。若 A 類廢棄物符合 10CFR61.56(b)之穩定性要求則不須分離處置。

(B).10CFR61.52(a)之(2)：C 類廢棄物處置依 10CFR61.55 規定，應於廢棄物頂部與上方覆蓋層表面之距離至少為 5 公尺，或需設計無意闖入者障壁，以防止至少 500 年內之無意闖入者侵入。

(C).10CFR61.52(a)之(3)：廢棄物處置應遵循本節(a)之(4)~(11)規定。

(D).10CFR61.52(a)之(4)：放射性廢棄物包件定置時應維持其完整性，盡量減少定置後包件間之空隙，並允許於空隙間進行填充。

(E).10CFR61.52(a)之(5)：放射性廢棄物包件間之空隙應予以填充，以減少未來發生沉陷之可能性。

(F).10CFR61.52(a)之(6)：放射性廢棄物的定置與覆蓋，應降低覆蓋層表面劑量至符合要求，最低限度須使執照申請者依 10CFR61.30 移轉執照時，須符合 10CFR20 「輻射防護標準」 Subpart D 公眾之個人輻射劑量限值規定，分別為 10CFR20.1301 「公眾之個人輻射劑量限值」與 10CFR20.1302 「公眾之個人輻射劑量限值符合性」要求。

(G).10CFR61.52(a)之(7)：必須採地形測量方式，精準測繪與標示處置單元邊界與位置，清楚界定各處置單元邊界以利判識。地形測量應依國家標準規定進行與紀錄。

(H).10CFR61.52(a)之(8)：處置廢棄物與處置場邊界之間，以及所處置廢棄物下方，均應設有緩衝區。緩衝區應具有足夠空間執行 10CFR61.53(d)規定之環境監測作業，以及必要時可進行改善作業。

(I).10CFR61.52(a)之(9)：對任一已填滿並覆蓋之處置單元，均應依核准之封閉計畫，執行封閉與穩定措施作業。

(J).10CFR61.52(a)之(10)：處置場運轉作業不得對已完成之封閉與穩定措施產生不利影響。

(K).10CFR61.52(a)之(11)：處置設施僅能處置放射性廢棄物或受放射性污染之廢棄物。

## 2.法規評估準則

主要設計特徵之 11 項設計功能、設計細節與主要設計準則於其他章節亦有說明，例如與場址相關之設計基準於該審查規範第二章詳述，而設施功能得安全評估則於該審查規範第六章。而設計審查章節要求說明主要設計特徵之考量，是為了確保申請者能在此章節內清楚說明所有主要設計特性徵間的相互關係，並顯示所有設計特性徵已在此整合並做了完整的考量。

審查者對於所要求之特定主要設計特徵資料，與對設計完整度(假設的有效性、引用方法、研究與計算結果等)之評估，將依該標準審查規範進行審查作業並做出結論。此部分合併「正常與異常狀況之設計考量」相關內容，於 2.1.4 節進行整合說明。



## 2.1.4 「正常與異常狀況之設計考量」審查規範概述

本節就該標準審查規範之審查方式與內容進行說明，有關於 11 項設計功能要求之主要設計特徵則另於 2.1.5 節彙整說明。

### (1) 審查範圍

審查者需審查申請人所建立之低放處置場主要設計準則，以合理保證主要設計特徵於正常與異常狀況下，均可提供低放射性廢棄物長期隔離、最小化處置設施封閉後持續維護作業之需求、改進場址之自然環境特徵，用以保護群眾的健康與安全。確保符合美國相關核能管制要求包含 10CFR61.12(b) ~ (g)、10CFR 61.13(a) ~ (d)、10CFR61.23(a) ~ (f)、10CFR61.40 ~ 10CFR 61.44、10CFR 61.51(a)、10CFR 61.52(a)。審查者將針對正常與異常狀況下，與 11 項主要設計特徵之功能要求、10CFR61 功能目標與技術要求相關之主要設計準則。審查者需評估之內容包含：

1. 依據 10CFR61.12(C)與(d)規定，評估正常與異常(氣象、地質構造、水文等場址特性於標準審查規範第二章相關小節討論)狀況之主要設計準則與 10CFR61 Subpart C 功能目標之關聯性是否已充分考量。
2. 驗證標準審查規範第六章所述之分析與評估結果，確認其主要設計特徵之設計成果，其功能符合 10CFR61.41 之功能目標與 10CFR61.13 對技術分析資料之要求。
3. 驗證申請人的評估是否合理，可確保處置設施於正常與異常狀況下，不會發生大於 10CFR61 所允許之曝露規定。

### (2) 審查程序

審查者將依據接受準則內容，審查申請者所提出之各項設計功能要求，以及是否符合 10CFR61 Subpart C 功能目標規範，分別進行程序審查與實質審查。

#### 1. 程序審查

程序審查時，審查者將依循「低放射性廢棄物處置設施執照許可申請之標準格式與內容」NUREG-1199 與 NUREG-1200 規定，審查申請者之描述與分析的完整性，包含

1. 針對正常、異常與意外狀況之主要設計準則。
2. 各項設計特徵之功能要求。
3. 各項設計特徵之功能分析。

## 2. 實質審查

實質審查時，審查者將針對主要設計徵 11 項設計功能之主要設計準則進行評估。確認其主要設計準則可使處置設施於正常與異常狀況下，其各項結構、系統、組件與設計功能，可符合申請者所提出之各項設計功能需求。其他相關之設計基準、設計限制與設計細節（假設、方法、計算與結果）亦可根據此節或後續章節之標準審查規範進行，具體執行方式取決於申請者所提供之安全分析報告內容。

審查者將比對申請者建立之主要設計基準，與其所採用之設計基準事件與意外狀況，說明如下：

### A. 穩定性考量

主要設計特徵之短期與長期穩定性分析，應包含靜載重與活載重為宜。針對長期穩定性考量，異常狀態之設計基準包括：1. 最大地震(標準審查規範 2.3.2 節)(2) 可能最大洪水(PMF)與可能最大降雨(PMP)(標準審查規範 6.3.1 節)(3) 極端氣象條件(標準審查規範 2.2 節)。

針對短期正常運轉狀況之穩定性考量，審查者可針對上述事件之載重給予許可。其餘較不嚴苛之自然事件，在申請者以個案證實其設計基準可達到 10 CFR 61 之功能目標與技術要求的前提下，審查者亦可給予接受。

### B. 輻射曝露

審查者將審查申請人對於異常狀況或意外事件下，於非限制區之輻射曝露評估、功能模擬評估分析與模式。審查者必須確定於異常狀況或意外事件下，各主要設計準則能保證主要設計特徵達成設計功能。若將導致無法符合 10CFR61 Subpart C 功能目標規範，則視為不可接受。

## (3) 接受準則

### 1. 法規要求

NUREG-1200 規範其「正常與異常狀況之設計考量」審查適用之美國法規分別說明如下：

A.10CFR61.12 (b)~(g)要求：

為證明申請者提出之內容符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標與 Subpart D 之技術要求，於 10CFR61.12 「特定技術資訊」要求中，規範申請者需提出之資訊內容，所涉要求概述如下：

- (A).10CFR61.12(b)：需說明處置設施與處置單元之 11 項主要設計特徵。
- (B).10CFR61.12(c)：需說明主要設計特徵與設計功能之關聯性。
- (C).10CFR61.12(d)：需說明自然事件(或現象)設計基準與主要設計特徵之關聯性。
- (D).10CFR61.12(e)：需說明設計時採用之規範(code)與標準(standard)，以及那些會規範與標準將適用於設施興建。
- (E).10CFR61.12(f)：需說明處置場建造與運轉，至少需包含：處置單元建造方法、廢棄物堆置、廢棄物分區處置程序與區域、無意闖入者障壁類型、處置場交通與排水系統、調查管制計畫、廢棄物貯存方法與區域、控制地表水和地下水接觸廢棄物的方法。對於可能會影響功能目標符合性之作業，如處理與處置含有螯合劑或其他非放射性物質亦須加以說明
- (F).10CFR61.12(g)：需說明處置場封閉計畫，需包括利於處置場封閉以及降低主動維護需求之設計特徵說明。

B.10CFR 61.13(a) ~ (d) 要求：

為證明申請者提出之內容符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標，於 10CFR61.13「技術分析」要求中，規範申請者需提出之技術分析資訊內容，所涉要求概述如下：

- (A).10CFR61.13(a)：傳輸途徑分析需能明確證明處置設施可合理的確保放射性釋出對人類的曝露未超過 10CFR61.41 規定之限值。傳輸途徑分析需明確的區別處置場址環境特徵與設計特徵，對於隔離(isolate)與分離(segregate)放射性廢棄物之功能，並考量各類可能傳輸途徑。
- (B).10CFR61.13(b)：需分析對個人無意闖入的防護。必須說明符合放射性廢棄物分類與分離要求之合理保證，並提供合適之無意闖入防護障壁。

(C).10CFR61.13(c)：分析運轉期間的個人防護。須包括評估操作、貯存、與處置廢棄物期間，正常運轉與意外情況下預期的曝露。分析須能合理保證，可確曝露劑量符合 10 CFR 20 之要求。

(D).10CFR61.13(d)：需分析長期穩定性與封閉後持續主動維護的需求。必須根據處置場自然環境特徵進行分析，包含如侵蝕、塊體崩壞、邊坡破壞、廢棄物與回填材料沉陷、處置單元覆蓋層與鄰近土壤的入滲、與地表排水。分析須能合理的確保處置場址封閉後無需持續主動維護。

#### C.10CFR61.23(a) ~ (f) 要求：

要求申請者證明其設計可滿足對大眾健康安全提供適當保護，並符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標與 Subpart D 之技術要求。於 10CFR61.23 「執照核發標準」要求中，規範申請者需提出之資訊內容，所涉要求概述如下：

(A).10CFR61.23(a)：申請人應具備合理的訓練與資歷，足以執行保護健康與減低對生命或財產發生危害的處置運轉作業要求。

(B).10CFR61.23(b)：需證明處置設施能符合 10CFR 61.41 保護一般公眾免於放射性釋出的危害要求。申請人須提出處置場址、處置設計、處置設施運轉(包括設備、設施、與程序)、處置場址封閉、與封閉後監管，均能合理保護公眾健康與安全的證明。

(C).10CFR61.23(c)：需證明處置設施能符合 10CFR 61.42 保護無意闖入者之要求。申請人須提出處置場址、處置設計、處置設施運轉(包括設備、設施、與程序)、處置場址封閉、與封閉後監管，均能合理保護無意闖入者的證明。

(D).10CFR61.23(d)：需證明處置設施符合 10CFR 20 輻射防護標準規範。申請人需提出處置設施運轉(包括設備、設施、與程序)能適當保護公眾健康與安全的證明。

(E).10CFR61.23(e)：需證明處置設施可實現長期穩定性與在確實可行的情況下排除封閉後主動維護之需求。申請人須提出處置場址、處置設計、處置設施運轉(包括設備、設施、與程序)、處置場址封閉、與封閉後監管，均能合理保護公眾健康與安全的證明。

(F).10CFR61.23(f)：需證明處置設施能符合 10CFR 61 Subpart D 之技術要求。

D.10CFR61.40 ~ 10CFR 61.44 要求：

10CFR61.41~61.44 屬於 10CFR61 Subpart C 處置功能目標之要求，概述如下：

- (A).10CFR61.40 一般要求：處置設施之選址、設計、運轉、封閉、與封閉後管制，須能合理確保對人類造成的曝露限值符合 10CFR61.41 至 10CFR 61.44 之功能目標。
- (B).10CFR61.41 保護一般公眾免於放射性釋出的危害：應採取合理措施盡可能降低放射性釋放至環境中。經由地下水、地表水、空氣、土壤、植物或動物等途徑釋放至環境之放射性濃度，不得對公眾的任何個人造成超過相當於全身 25 毫侖目、甲狀腺 75 毫侖目、與其他器官 25 毫侖目之年劑量（1 毫西弗約為 100 毫侖目）。
- (C).10CFR61.42 保護無意闖入者：處置設施之設計、運轉、與封閉，於處置場址撤除主動監管後，需保證對無意闖入處置場址、占用場址或接觸廢棄物之個人提供保護。
- (D).10CFR61.43 保護運轉期間之個人：處置設施運轉除放射性釋出應遵照 10CFR61.41 之外，需符合 10CFR20「輻射防護標準」要求，並遵循合理抑低原則。
- (E).10CFR61.44 封閉後具穩定性：處置設施必須基於實現長期穩定性與儘量排除封閉後主動維護需求之目標，進行選址、設計、使用、運轉與封閉等作業，以便確保封閉後僅需進行監控、監測或較少的維管作業。

E.10CFR 61.51(a)要求：

10CFR61.51(a)為近地表處置場設計要求，摘述如下：

- (A).10CFR61.51(a)之(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。
- (B).10CFR61.51(a)之(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)。
- (C).10CFR61.51(a)之(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)。
- (D).10CFR61.51(a)之(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。

(E).10CFR61.51(a)之(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。

(F).10CFR61.51(a)之(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。

F.10CFR 61.52(a)要求：

10CFR61.52(a)為近地表處置場運轉與封閉要求，摘述如下：

(A).10CFR61.52(a)之(1)：依 10CFR61.55 分類規定屬 A 類之放射性廢棄物，須與其他分類廢棄物分離處置於不同處置單元，以避免 A 類廢棄物與其他廢棄物產生交互影響，而導致無法滿足 10CFR61 Subpart C 之功能目標要求。若 A 類廢棄物符合 10CFR61.56(b)之穩定性要求則不須分離處置。

(B).10CFR61.52(a)之(2)：C 類廢棄物處置依 10CFR61.55 規定，應於廢棄物頂部與上方覆蓋層表面之距離至少為 5 公尺，或需設計無意闖入者障壁，以防止至少 500 年內之無意闖入者侵入。

(C).10CFR61.52(a)之(3)：廢棄物處置應遵循本節(a)之(4)~(11)規定。

(D).10CFR61.52(a)之(4)：放射性廢棄物包件定置時應維持其完整性，盡量減少定置後包件間之空隙，並允許於空隙間進行填充。

(E).10CFR61.52(a)之(5)：放射性廢棄物包件間之空隙應予以填充，以減少未來發生沉陷之可能性。

(F).10CFR61.52(a)之(6)：放射性廢棄物的定置與覆蓋，應降低覆蓋層表面劑量至符合要求，最低限度須使執照申請者依 10CFR61.30 移轉執照時，須符合 10CFR20「輻射防護標準」 Subpart D 公眾之個人輻射劑量限值規定，分別為 10CFR20.1301「公眾之個人輻射劑量限值」與 10CFR20.1302「公眾之個人輻射劑量限值符合性」要求。

(G).10CFR61.52(a)之(7)：必須採地形測量方式，精準測繪與標示處置單元邊界與位置，清楚界定各處置單元邊界以利判識。地形測量應依國家標準規定進行與紀錄。

(H).10CFR61.52(a)之(8)：處置廢棄物與處置場邊界之間，以及所處置廢棄物下方，均應設有緩衝區。緩衝區應具有足夠空間執行 10CFR61.53(d)規定之環境監測作業，以及必要時可進行改善作業。

(I).10CFR61.52(a)之(9)：對任一已填滿並覆蓋之處置單元，均應依核准之封閉計畫，執行封閉與穩定措施作業。

(J).10CFR61.52(a)之(10)：處置場運轉作業不得對已完成之封閉與穩定措施產生不利影響。

(K).10CFR61.52(a)之(11)：處置設施僅能處置放射性廢棄物或受放射性污染之廢棄物。

## 2.法規評估準則

主要設計特徵於標準審查規範 3.1 節進行審查。輔助系統與設施設計則於標準審查規範 3.4 節進行審查。若申請人選擇於後續之標準審查計畫中提供要求的設計細節，則可能無法對其主要設計特徵之細節進行審查。然而，依據要求須在本節提出所有 3.1 節主要設計特徵之所有主要設計準則。本節之法規評估準則是為了確保申請人所提出之主要設計準則，可建立結構、系統或組件之設計、測試與功能要求，確保於正常、異常與意外狀況下，處置設施可確保其設計、興建與運轉，均可符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標。審查者將驗證申請者提供之設計資訊符合標準審查規範指導，並適當與正確的應用於第六章的功能評估分析。

審查者將針對主要設計特徵之 11 項設計功能，其主要設計準則進行審查。此部分合併「主要設計特徵」相關內容，於 2.1.5 節進行整合說明。

## 2.1.5 11 項設計功能之評估準則

本節主要彙整「主要設計特徵」與「正常與異常狀況之設計考量」要求之 11 項設計功能之法規評估準則，彙整該標準審查規範對於 11 項設計功能之設計特徵、設計功能與設計準則，以利了解審查者之法規評估準則。「主要設計特徵」之法規評估準則，是以確保申請者能清楚說明所有主要設計特性徵間的相互關係，並顯示所有設計特性徵已在此整合並做了完整的考量，並評估其設計完整度(假設的有效性、引用方法、研究與計算結果等)。「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則，是為了確保申請人所提出之主要設計準則，可建立結構、系統或組件之設計、測試與功能要求，確保於正常、異常與意外狀況下，處置設施可確保其設計、興建與運轉，均可符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標。以下分就 11 項設計功能進行說明：

### (1)降低處置單元水滲透

#### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

對主要設計特徵的描述至少須符合：1.10CFR61.51(a)(4)為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而設計的覆蓋層。2.10 CFR61.51(a)(5)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。

#### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

降低處置單元水滲透之主要設計準則，需足以支持於相關滲透分析所需設計資料。故其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則、2.設計特徵需與主要設計特徵一致、3.涵蓋場址所有排水系統與處置單元覆蓋層設計、4.識別場址降雨可能之滲透量。不論是地面或地下排水系統設計，其水文事件設計基準必須是最嚴重之可能最大降雨(PMP)。

功能評估採用之滲水量，必須基於根據長期降雨紀錄，分析嚴重的與持續的兩種考量之入滲率。因此，不須對造成覆蓋層增加滲水事件進行分析，但需要對因場址環境而導致剝蝕現象，進而改變覆蓋層入滲率之影響，則需進行評估。另需提供運轉、封閉與主動監管期間，因入滲率增加事件而實施之改善措施描述(如：維護或改變覆蓋層坡度)，以顯示可維持設計特徵與設計功能。



用於引導或控制場區降雨或季節性地下水遠離處置單元之主要設計準則，應確定地下排水系統之設計排水量與地下水位。其地下水位與設計排水量應至少基於 1. 最嚴重之可能最大降雨(PMP)事件、2.單一排水系統組件遭意外堵塞之意外事件。

## (2)處置單元覆蓋層完整性

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於處置單元覆蓋層之主要設計特徵的描述至少須符合：1.10CFR61.51(a)之(1) 設計需朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。2.10CFR61.51(a)之(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。

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

處置單元覆蓋層完整性之主要設計準則，需足以支持於相關完整性分析所需設計資料，包含滲透作用、排水系統、侵蝕保護、沉陷或沉降評估等，且其準則應具一致性。故其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則、2.設計特徵需與主要設計特徵一致。

處置單元覆蓋物侵蝕保護之主要設計準則必須至少說明：1.正常狀況之的地表水流速和風速、2.異常狀況之地表水流速與風速，以及用於長期穩定性分析之水位。不需要分析因意外狀況而造成覆蓋層侵蝕增加。

確保沉陷或沉降不會影響覆蓋層完整性之主要設計準則，至少需說明：1.預估廢棄物與回填材料堆置後之壓密狀況，評估沉陷總量與差異沉陷量。2.於廢棄物仍有害之期間，預估其覆蓋層材料強度與耐受度。3.最大可能地震事件導致之地表震動。不須分析因意外事件導致之沉陷或沉降

## (3)回填物、廢棄物及覆蓋物等構造物結構穩定

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於回填物、廢棄物及覆蓋物等構造物之結構穩定主要設計特徵描述，須符合 10CFR61.51(a)之(1) 設計需朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。

## 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

回填物、廢棄物及覆蓋物等構造物結構穩定之主要設計準則，需足以支持於相關結構穩定分析所需設計資料，包含沉陷與沉降、邊坡穩定、工程結構物穩定性。其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則。2.設計特徵需與主要設計特徵一致。3.與後續相關章節一致之審查資訊。

確保回填物、廢棄物及覆蓋物等構造物結構穩定之主要設計準則應至少說明：1.盛裝容器與容器內填充材料間的空隙體積。2.因運轉而產生的空隙。3.異常事件設計基準對於結構穩定性的影響。4.於廢棄物仍有害之期間，回填物、廢棄物型態及覆蓋物材料因環境而產生之劣化狀況。不須分析因意外事件導致結構穩定性降低之影響。

### (4)運轉期降低廢棄物與水接觸

#### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於運轉期降低廢棄物與水接觸之主要設計特徵描述，須符合10CFR61.51(a)之(6)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。

#### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

運轉期降低廢棄物與水接觸之主要設計準則需與相關章節之審查資訊一致並支持其分析。其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則。2.說明廢棄物之貯存、開啟與封閉處置單元。3.設計特徵需與主要設計特徵一致。4.處置單元覆蓋層表面與自處置單元排除地表水設計，以及暫貯區域。5.說明處置單元表面自然材料與排水材料間之相對滲透率，以及處置單元排水系統集水能力。6.說明暴露於空氣中之廢棄物臨時貯存區平台與使用之覆蓋物。

運轉期降低廢棄物與水接觸之設計基準水文事件與「降低處置單元水滲透」之地下排水系統相同。設計準則需涵蓋運轉期間之主動排水系統組件意外失效狀況，以及封閉後被動排水系統組件意外失效狀況。

### (5)運轉期及封閉期場區之排水功能

#### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於運轉期及封閉期場區之排水功能主要設計特徵描述，須符合：1.10CFR61.51(a)之(4)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。2.10CFR61.51(a)之(5)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。

## 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

運轉期及封閉期場區之排水功能的主要設計準則，需與相關章節之審查資訊一致並支持其分析。其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則。2.說明運轉階段(短期)與封閉階段(長期)場址排水系統狀況。3.設計特徵需與主要設計特徵一致。4.場址地表水排水設計特徵、分流結構、地表洩水坡降等。

運轉期及封閉期場區之排水功能之設計基準水文事件與「降低處置單元水滲透」之正常與異常狀況相同。若有需要，需設定對應之設計準則用於考量上游水庫潰壩或下游排水堵塞之意外狀況。

## (6)場址封閉與穩定性

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於場址封閉與穩定性之主要設計特徵描述，須符合：1.10CFR61.51(a)之(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。2.10CFR61.51(a)之(2)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)。3.10CFR61.51(a)之(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)。

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

場址封閉與穩定性之主要設計準則，需與相關章節之審查資訊一致並支持其分析，其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則。2.設計特徵需與主要設計特徵一致。

場址封閉與穩定性之主要設計準則，需說明：1.應提出處置場封閉計畫之相關事項。2.封閉與可能主動維護要求之異常事件設計基準與影響。不須分析封閉後意外事件之影響。

## (7)減少長期維護需求

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於減少長期維護需求之主要設計特徵描述，須符合：10CFR61.51(a)之(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. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

減少長期維護需求之主要設計準則，需與相關章節之審查資訊一致並支持其分析。其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則。2.設計特徵需與主要設計特徵一致。

減少長期維護需求之主要設計準則，需分別就下列項目說明與討論可採行方案用以避免長期維護需求：1.預測材料耐久性。2.預測侵蝕作用。3.預測排水系統劣化影響。4.預測監控系統劣化。5.基於異常事件設計基準對長期維護需求之潛在影響。不須分析長期維護意外事件之影響。

## (8)具防止無意闖入處置場障壁

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於無意闖入者障壁之主要設計特徵描述，須符合 10CFR61.42 處置設施之設計、運轉、與封閉，於處置場址撤除主動監管後，需保證對無意闖入處置場址、占用場址或接觸廢棄物之個人提供保護。

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

無意闖入者障壁之主要設計準則，需與相關章節之審查資訊一致並支持其分析。其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則。2.設計特徵需與主要設計特徵一致。

無意闖入者障壁之主要設計準則，需說明標誌、工程屏蔽和隔離穩定與非穩定廢棄物之材料，與其劣化之可能範圍。若 C 類廢棄物堆置於處置單元覆蓋層表面以下深度少於 5 公尺之位置，將可能要求分析無意闖入者之意外事件影響。

## (9)合理抑低職業曝露

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於合理抑低職業曝露之主要設計特徵描述，須符合：1.10CFR61.12(k)需說明管制與監測放射性排放之輻射安全管制計畫，以確保符合 10CFR20「輻射防護標準」對於職業輻射曝露與人員、車輛、設備、建築物與處置場的污染管制。計畫內容需包含程序、儀器、設施與設備，於正常運轉與意外事件之況狀均須說明。2.10CFR61.43 處置設施運轉除放射性釋出應遵照 10CFR61.41 之外，需符合 10CFR20「輻射防護標準」要求，並遵循合理抑低原則。

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

合理抑低職業曝露之主要設計準則，需與相關章節之審查資訊一致並支持其分析。其法規評估準則要求主要設計準則必須：1.清楚說明主要設計準則。2.設計特徵需與主要設計特徵一致。

合理抑低職業曝露之主要設計準則，需依據標準審查規範 7.3 說明：1.接收、檢查、管控、貯存和處置區域之合理抑低。2.對已知較高活度廢棄物之屏蔽需求。3.堆置非穩定性廢棄物盛裝容器意外破損之備案。

## (10)合適的處置場監測規劃

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於處置場監測之主要設計特徵描述，須符合：1. 10CFR61.12(k)說明管制與監測放射性排放之輻射安全管制計畫，以確保符合 10CFR20「輻射防護標準」對於職業輻射曝露與人員、車輛、設備、建築物與處置場的污染管制。計畫內容需包含程序、儀器、設施與設備，於正常運轉與意外事件之況狀均須說明。2.10CFR61.12(i)需說明處置場規劃接收、貯存與處置之放射性廢棄物種類、總量、分類與規格。3.10CFR61.53「環境監測」要求，分別為：

A.10CFR61.53 之(a)：提出執照申請時，申請人應執行運轉前監測計畫，用以提供處置場址基本環境資料。申請人應取得場址的生態、氣象、氣候、水文、地質、地球化學與地震等資料，若數據特性受到季節性變化影響，則監測資料至少須涵蓋 12 個月。

B.10CFR61.53 之(b):若核種傳輸分析顯示可能無法符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標時,執照持有人應進行改善計畫。

C.10CFR61.53 之(c):處置設施建造與運轉期間,執照持有人應持續執行監測計畫,持續記錄監測數據,以提供設施建造與運轉期間健康與環境影響評估,及長期效應與減輕措施等評估需求。監測系統應能提供核種釋出且離開場址邊界前的早期預警作用。

D.10CFR61.53 之(d):處置場封閉後,負責處置場址運轉後監測的執照持有人,應依據處置場運轉歷史及處置場封閉與穩定計畫,來維持監測系統。監測系統應能提供核種釋出且離開場址邊界前的早期預警作用。

## 2.「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

處置場監測規劃之主要設計準則,需與相關章節之審查資訊一致並支持其分析。其法規評估準則要求主要設計準則必須:1.清楚說明主要設計準則。2.設計特徵需與主要設計特徵一致。

處置場監測規劃之主要設計準則,需說明:1.監控系統設備與組件之生命週期。2.設備劣化之可能速率與各種監測設備失效事件的處理行動。3.異常事件設計基準下對場址監測系統的影響。不須分析意外事件對於場址監測系統之影響。

## (11)提供適當監管與補救之緩衝區

### 1.「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於緩衝區之主要設計特徵描述,須符合 10CFR61.52(a)之(8)處置廢棄物與處置場邊界之間,以及所處置廢棄物下方,均應設有緩衝區。緩衝區應具有足夠空間執行 10CFR61.53(d)規定之環境監測作業,以及必要時可進行改善作業。

### 2.「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

緩衝區之主要設計準則,需與相關章節之審查資訊一致並支持其分析。其法規評估準則要求主要設計準則必須:1.清楚說明主要設計準則。2.設計特徵需與主要設計特徵一致。

緩衝區之主要設計準則,需說明:1.可供監控所需的空間尺寸。2.發生預期外之核種遷移事件,採取改善措施所需之空間尺寸。不需要對緩衝區進行意外事件影響分析。

## 2.1.6 處置概念之目標、功能、設計特徵與原則關聯性分析

### (1)處置概念與功能目標分析

依 10 CFR61.7 其主要適用於陸域近地表處置型式，且處置系統考量之基礎為穩定性，分別包含處置場與廢棄物之穩定性。因此可發現 10CFR61 Subpart C 功能目標以確保健康安全以及處置穩定性作為要求目標，分別為：1.保護一般公眾免於放射性釋出的危害、2.保護無意闖入者、3.保護運轉期間之個人、4.封閉後具穩定性。

依 10 CFR61.7 之處置概念，需先對廢棄物進行分類，並依廢棄物穩定性進行分區與分離處置，原則上並不允許將不具穩定性之廢棄物與具穩定性之廢棄物堆置於相同的處置單元中，以避免因劣化而產生不利影響。因此，除對 B 類與 C 類廢棄物體有穩定性要求，其盛裝容器亦要求須具有穩定性功能(例如:300 年穩定性之高完整性容器)。對於易於遷移的特定核種，亦可訂定處置總量上限以限制潛在曝露風險。封閉後之監管期至少 100 年，因此對於 A 類與 B 類廢棄物不須規範額外的無意闖入者障壁要求。C 類廢棄物則要求較深之處置深度(廢棄物頂部與上方覆蓋層表面之距離至少為 5 公尺)，或至少維持效能 500 年之無意闖入者障壁要求。當廢棄物定置與覆蓋後，使滲水與廢棄物之接觸最小化。進而達到核種遷移最小化、避免長期主動維護，以及降低無意闖入者之潛在曝露風險。

基於此處置概念，10CFR61 Subpart D 訂定相關之技術要求共 10 項，分別為與處置場設計關聯性較高之 61.50 處置場址適宜性要求、61.51 處置設計要求、61.52 處置設施運轉與封閉要求、61.53 環境監測要求、61.54 替代的設計與運轉要求。其中 61.54 主要是提供採用不同處置概念之近地表處置設施之要求彈性。因此，處置設施設計之「主要設計特徵」與「正常與異常狀況之設計考量」之技術要求，主要源自於 10CFR61.50~61.53。基於前述處置穩定性與安全考量，61.55 規範廢棄物分類要求、61.56 廢棄物特性要求、61.57 包件標示要求，與 61.58 替代的廢棄物分類與特性要求。最後針對封閉後管理訂定 61.59 監管要求。

依 10 CFR61.7 與 10CFR61.50~53 要求，歸納處置設計主要考量對象包含：1.處置單元、2.廢棄物堆置與空隙回填、3.覆蓋層、4.排水系統、5.無意闖入者障壁、6.緩衝區、7.環境監測系統。除整體處置設施設計均考量合理降低長期維護需求之考量外。處置場址以地下水特徵考量為主，用以避免地下水入滲之廢棄物體、處置單元與覆蓋層之主要考量為降低水入侵、設施運轉與封閉之穩定性、排水功能、輻射防護與無意闖入障壁。緩衝區與環境監測系統主要考量為提供早期預警與必要改善作業空間。

## (2)處置概念與 IAEA 之安全功能關聯性分析

基於前述處置概念，分析美國陸域近地表處置設施設計主要之安全功能。隔離功能主要考量為封閉後監管期與無意闖入障壁。圍阻功能為其設計之主要考量，透過場址環境特性與處置設施設計達到降低入滲水量、引導水體遠離廢棄物、設施長期結構穩定與廢棄物穩定要求等，達成將核種定置於處置區之圍阻功能。並藉由緩衝區與環境監測系統設計，提供早期預警與必要進行改善作業時所需空間(含廢棄物下方空間)，確保封閉後之主動監管期間仍可維持其圍阻功能。在此處置概念中，較少考量遲滯功能，僅於 10CFR61.50(7) 以特例方式考量，若場址環境特徵將使核種將以擴散方式為主要傳輸特性，且其核種傳輸結果能符合 10CFR61 Subpart C 之功能目標，則允許處置設施可位於地下水面以下。

## (3)主要設計特徵功能要求、設計準則、設計基準等關聯性分析

依 2.1.3 節~2.1.5 節所述之內容，彙整主要設計特徵、設計功能要求與設計準則等考量於表 2.1.6-1 中，用以呈現其關聯性。



表 2.1.6-1 主要設計特徵功能要求、設計準則、設計基準等關聯性分析表

主要設計特徵 功能要求	設計項目	主要設計準則	主要設計基準	設計要求(申請者提出)
1.降低入滲水量	處置單元、地下排水系統、覆蓋層	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(4)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。</li> <li>10CFR61.51(a)(5)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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>平均降雨量推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨推估之入滲率</li> <li>覆蓋層剝蝕特性影響之入滲率</li> <li>最大可能降雨</li> <li>地下水位</li> <li>場址環境滲水特性</li> <li>需考量單一排水系統組件意外堵塞事件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>處置單元設計滲水性要求(需小於覆蓋層)</li> <li>需訂定進行主動維護之入滲率</li> <li>避免積水設計要求</li> <li>地下排水系統設計要求</li> <li>覆蓋層排水設計要求</li> </ul>
2.處置單元覆蓋層完整性	覆蓋層	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(1)設計需朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。</li> <li>10CFR61.51(a)(4)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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>常時地表水流速與風速</li> <li>地表水最大流速與最大風速</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>覆蓋層侵蝕保護設計要求(材料特性與耐久性)</li> <li>沉陷總量/差異沉陷量限值</li> <li>邊坡穩定設計要求</li> </ul>
3.回填物、廢棄物及覆蓋物等構造物結構穩定	廢棄物型態與堆置、空隙回填材料、覆蓋層	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(1)設計需朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大地力學特性</li> <li>設計載重與載重組合</li> <li>最大可能地震</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢棄物包件空隙體積與運轉對空隙的影響要求</li> <li>廢棄物與回填物壓密沉陷限值</li> <li>沉陷總量/差異沉陷量限值</li> <li>結構設計之載重與載重組合</li> <li>異常地震事件對結構安定影響</li> <li>材料劣化特性</li> </ul>

主要設計特徵 功能要求	設計項目	主要設計準則	主要設計基準	設計要求(申請者提出)
4.運轉期降低廢棄物與水接觸	處置單元、覆蓋層、排水系統、暫貯區與臨時覆蓋物	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(6)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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>平均降雨量推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨</li> <li>地下水位</li> <li>場址環境滲水特性</li> <li>需考量運轉期間主動排水系統組件與封閉後被動排水系統組件意外失效事件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>處置單元設計滲水性要求(需小於覆蓋層)</li> <li>避免積水設計要求</li> <li>地下排水系統設計要求</li> <li>覆蓋層排水設計要求</li> <li>暫貯區之排水與臨時覆蓋物設計要求</li> </ul>
5.運轉期及封閉期場區之排水功能	覆蓋層、排水系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(4)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。</li> <li>10CFR61.51(a)(5)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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>平均降雨量推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨</li> <li>地下水位</li> <li>場址環境滲水特性</li> <li>需考量運轉期間主動排水系統組件與封閉後被動排水系統組件意外失效事件</li> <li>必要時考量上游潰壩或下游排水堵塞之意外狀況</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>覆蓋層排水設計要求</li> <li>場區排水設計要求</li> </ul>
6.場址封閉與穩定性	處置設施	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(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。</li> <li>10CFR61.51(a)(2)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(10CFR61 Subpart C)。</li> <li>10CFR61.51(a)(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(10CFR61 Subpart C)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計載重與載重組合</li> <li>異常事件載重</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>主動維護要求</li> </ul>

主要設計特徵 功能要求	設計項目	主要設計準則	主要設計基準	設計要求(申請者提出)
7.減少長期維護需求	處置設施	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>異常自然事件設計基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料耐久性要求</li> <li>侵蝕保護設計要求</li> <li>排水系統設計要求</li> <li>監控系統設計要求</li> <li>啟動長期維護作業之要求</li> </ul>
8.無意闖入者之防護功能	無意闖入者障壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.42 處置設施之設計、運轉、與封閉，於處置場址撤除主動監管後，需保證對無意闖入處置場址、占用場址或接觸廢棄物之個人提供保護。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>無意闖入者事件設計基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>無意闖入者障壁設計要求</li> <li>材料耐久性要求</li> </ul>
9.合理抑低職業曝露	處置設施、運轉作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.12(k)需說明管制與監測放射性排放之輻射安全管制計畫，以確保符合10CFR20「輻射防護標準」對於職業輻射曝露與人員、車輛、設備、建築物與處置場的污染管制。</li> <li>10CFR61.43 處置設施運轉除放射性釋出應遵照 10CFR61.41 之外，需符合10CFR20「輻射防護標準」要求，並遵循合理抑低原則。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>輻射防護設計標準</li> <li>可能導致職業人員輻射曝露量提高之意外事件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>輻射屏蔽設計要求</li> <li>輻射防護計畫要求</li> </ul>
10.合適的處置場監測規劃	監測系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.12(k)說明管制與監測放射性排放之輻射安全管制計畫，以確保符合10CFR20「輻射防護標準」對於職業輻射曝露與人員、車輛、設備、建築物與處置場的污染管制。</li> <li>10CFR61.12(i)需說明處置場規劃接收、貯存與處置之放射性廢棄物種類、總量、分類與規格。</li> <li>10CFR61.53「環境監測」要求</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>異常事件設計基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境監測計畫要求</li> <li>監測系統與設備設計要求</li> <li>監測系統設備與組件之設計年限</li> <li>監測設備失效之處理要求</li> <li>異常事件設計基準對監測系統之影響評估</li> </ul>

主要設計特徵 功能要求	設計項目	主要設計準則	主要設計基準	設計要求(申請者提出)
11.提供適當 監管與補救之 緩衝區	緩衝區	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10CFR61.52(a) (8)處置廢棄物與處置場邊界之間，以及所處置廢棄物下方，均應設有緩衝區。</li> <li>• 緩衝區應具有足夠空間執行10CFR61.53(d)規定之環境監測作業，以及必要時可進行改善作業。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 核種異常釋出事件設計基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 監控所需的空間尺寸</li> <li>• 發生預期外之核種遷移事件，採取改善措施所需之空間尺寸</li> </ul>

## 2.2 瑞典低放射性廢棄物坑道處置設施案例蒐集與研析

### 2.2.1 瑞典之處置安全管制概述

瑞典的核能管制機構原為瑞典核能檢查署(Swedish Nuclear Power Inspectorate, 簡稱 SKI)及瑞典輻射防護研究院(Swedish Radiation Protection Institute, 簡稱 SSI), SKI 負責核能安全管制, SSI 則負責輻射安全管制, 保護人民與環境免受輻射傷害。2007 年 4 月, 瑞典政府宣佈將此二機構合併成瑞典輻射安全機關(Swedish Radiation Safety Authority, 簡稱 SSM), 並於 2008 年 7 月 1 日正式成立與運作。

2008 年前瑞典之處置安全管制主要依據 SSI 訂定的「用過核燃料與核能廢棄物的最終管理, 對於人類健康與環境之保護」(SSI FS 1998:1)、「SSI FS 1998:1 導則之應用」(SSI FS 2005:5), 及 SKI 訂定的「核物料與核能廢棄物之處置安全」(SKIFS 2002:1)。而 2008 年以後則遵循 SSM 訂定之「SSM 的導則與一般建議: 用過核燃料與核能廢棄物的最終管理, 對於人類健康與環境之保護」(SSMFS 2008:37)。

#### (1) 對人類健康之安全防護要求

用過核燃料或放射性廢棄物處置設施封閉後, 對群體中的個人最大曝露風險, 其有害影響的年風險應低於  $10^{-6}$ 。其中, 有害影響是參考 ICRP 60 號報告中所提到之游離輻射造成的癌症及遺傳性缺陷, 而有害影響的概率亦可根據 ICRP 60 號報告的轉換因子 7.3%/Sv 換算成劑量, 即 0.014mSv/yr。

如果此群體涵蓋人數較多, 則可依群體中個人風險的算術平均, 驗證個人風險是否符合法規最高年風險  $10^{-6}$  之要求。如果此群體涵蓋的人數較少, 則個人風險的最高年風險不可超過  $10^{-5}$ , 此種狀況下, 計算個人風險時應合理考量生活習慣與居住地區的特性。

#### (2) 環境保護

用過核燃料與放射性廢棄物的最終管理, 應能保護生物多樣性與生物資源永續利用, 免於受到游離輻射的有害影響, 並應說明游離輻射對棲息地與生態系統的生物影響。

## 2.2.2 SFR 處置設施與安全原則考量概述

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 2.6.2-1 所示。SFR 處置場可分為兩部分，分別為 1988 年完成並開始營運的 SFR-1，包含 4 條處置坑道，以及 1 座 70 公尺高的混凝土筒倉。以及未來將擴充的 SFR-3，預計擴建新增 6 條處置坑道。

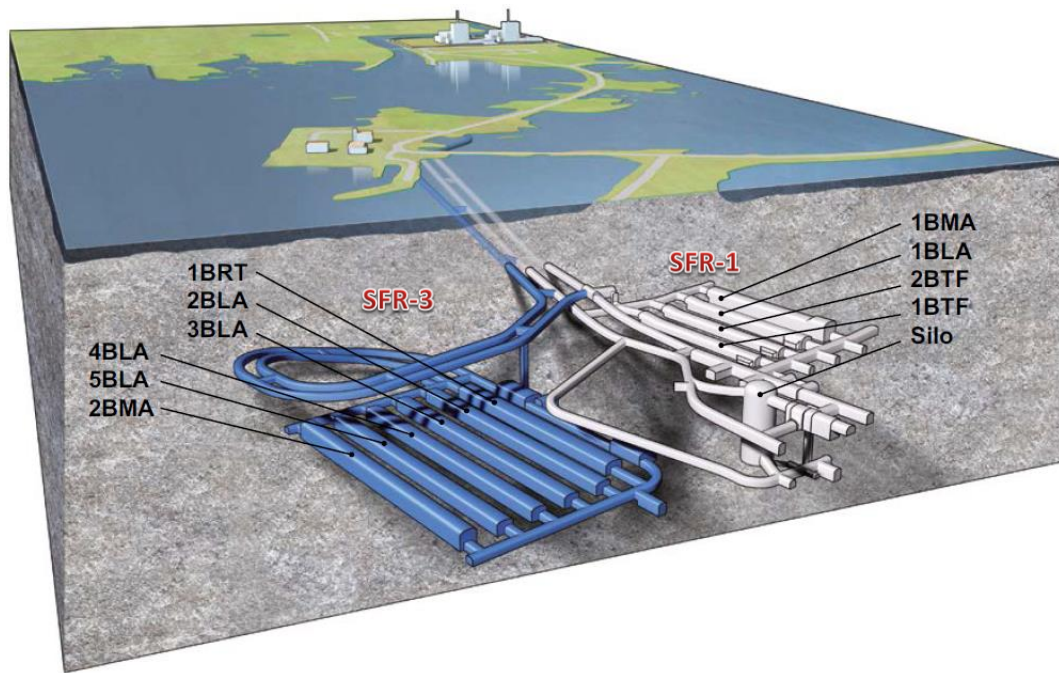


圖 2.6.2-1 SFR 處置場(SFR-1，白色部分)與擴建計畫(SFR-3，藍色部分)配置圖(SKB, 2014)

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 63,000m<sup>3</sup>，主要處置電廠和其他核能設施產生的放射性廢棄物。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。其中，放置於筒倉的廢棄物為處置場總活度之主要占比。

SFR-3 鄰近 SFR-1，位於海床下約 120 公尺處，設計處置容量為 108,000m<sup>3</sup>。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。2~5BLA 處置坑道用以處置低放射性廢棄物，BRT 處置坑道用以處置沸水式反應爐壓力槽，2BMA 處置坑道則處置中放射性廢棄物。各處置坑道所處置的廢棄物數量與來源，如圖 2.6.2-2 所示。

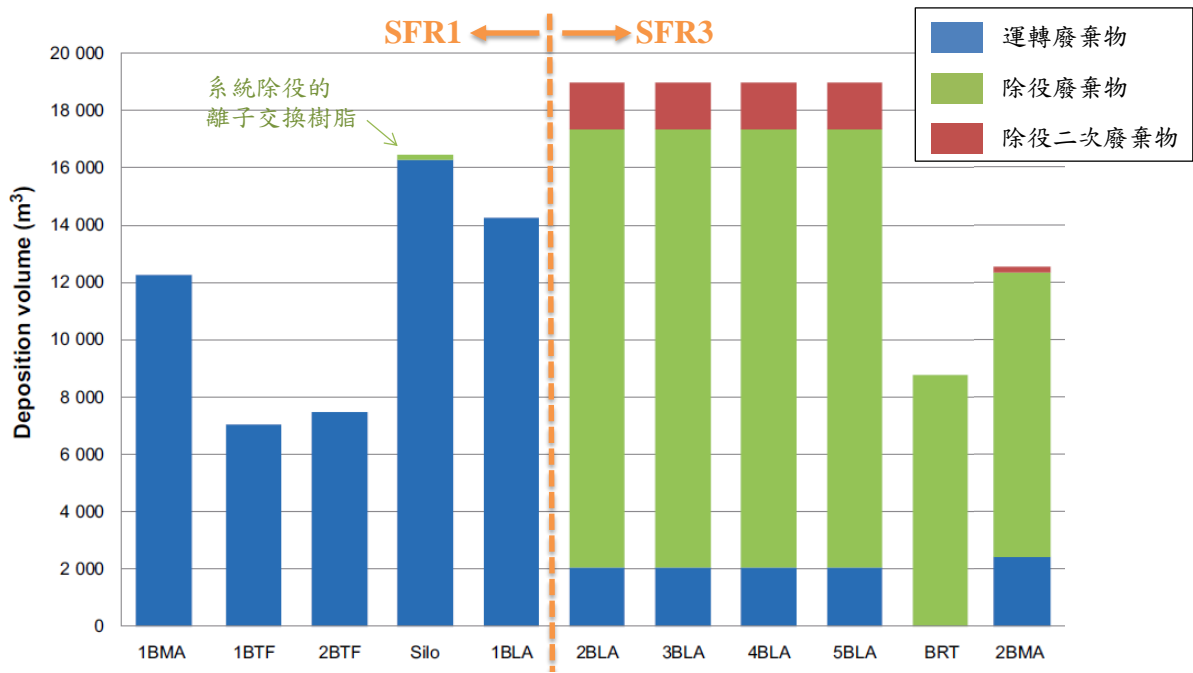


圖 2.6.2-2 各處置坑道之預估放射性廢棄物處置總量(SKB, 2014)

瑞典之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 2.6.2-1。

表 2.6.2-1 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

依其安全功能概念，類似於 NUREG-1200 之主要設計特徵設計功能要求。其限制長半化期核種活度之安全原則，相似於 10CFR61.7 處置概念中所述，訂定特定核種之處置總量上限，用以限制潛在曝露風險，屬於處置管理手段。

### 2.2.3 確保多重障壁系統之遲滯核種功能

依 SKB 於 2014 年彙編之長期安全評估報告(SKB, 2014)中所述，遲滯核種功能主要藉由限制平流傳輸和確保有效的吸附能力，用以達到確保多重障壁系統之遲滯核種功能之設計目標。此安全原則適用於廢棄物、工程障壁、封塞和處置母岩環境。

如表 2.6.2-1 所列，確保多重障壁系統之遲滯核種功能包含了：1.低流量、2.良好的遲滯功能、3.避免在處置場附近鑿井。除了避免在處置場附近鑿井之安全功能，屬處置管理手段外。其餘之低流量與良好的遲滯功能兩項安全功能，則屬於多重障壁系統設計考量。

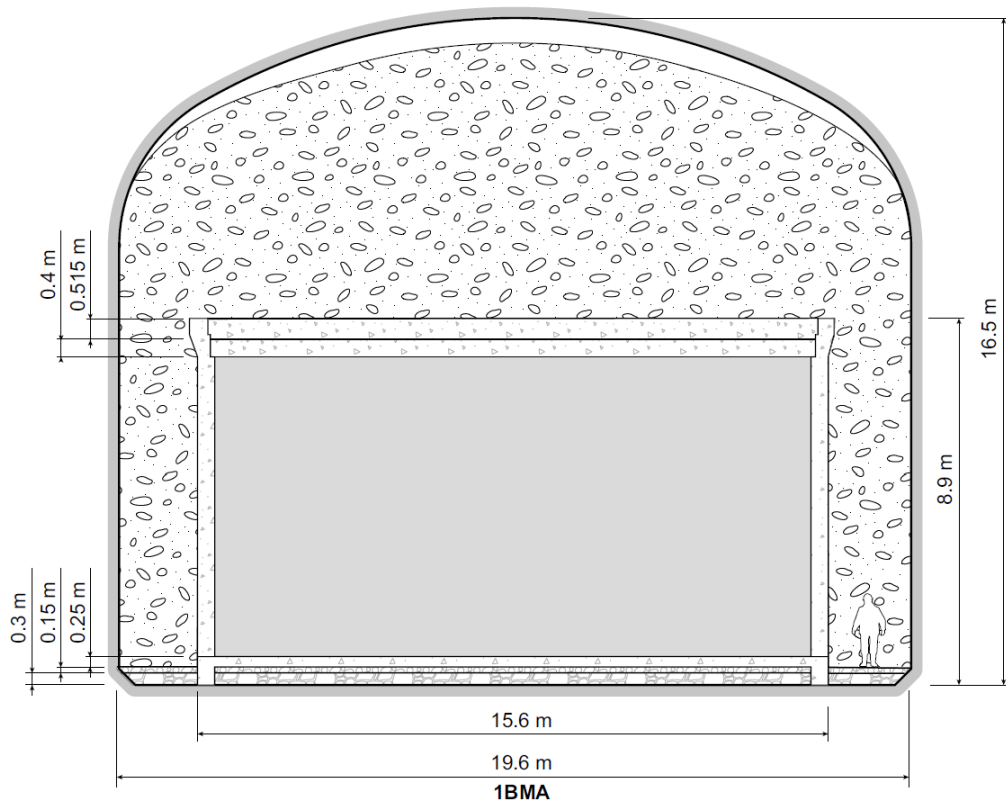
#### (1)實現低流量安全功能

主要可將其區分為工程障壁系統與處置母岩環境之考量：

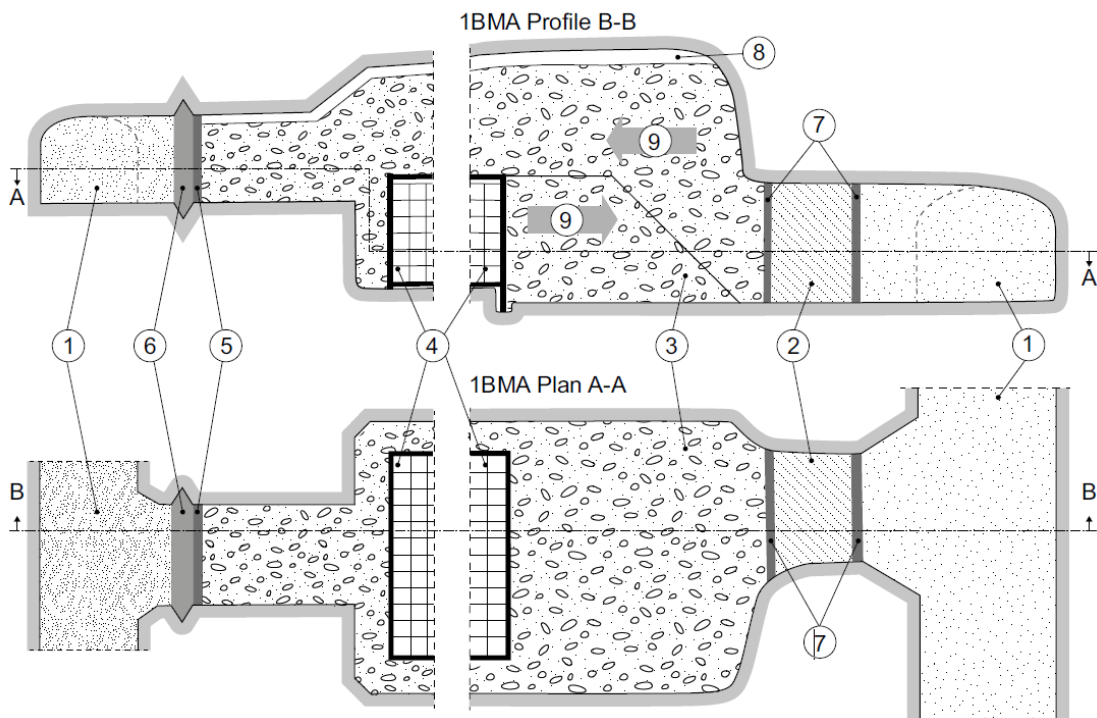
- 1.選擇處置母岩環境具有較低水力梯度流場環境區位，或具有低水力傳導係數之緻密母岩環境，則較易實現低流量安全功能。此考量類似於主要設計準則中規範有利之場址環境特徵。
- 2.工程障壁系統可藉由低水力傳導係數設計要求，使該設施具不易滲水特性，進而達成工程障壁系統內之低流量環境。或同樣利用滲水性設計要求，與周圍母岩或障壁系統形成高滲水率對比，而達到形成低流量環境之安全功能。

有關工程障壁系統之低流量安全功能，僅適用於處置坑道內具有處置窖設施之 1BMA 與 2BMA 處置坑道(如圖 2.6.3-1 與圖 2.6.3-2)，盛裝容器具有低滲水性之混凝土模組與混凝土箱或以鋼桶承裝經水泥固化廢棄物之為 1BTF 與 2BTF 處置坑道(如圖 2.6.3-3)，以及具有膨潤土層設計之筒倉(如圖 2.6.3-4)。筒倉主要是以膨潤土層之自膨脹特性設計出低水力傳導係數之障壁，而 1BMA 與 2BMA 處置坑道則是利用處置窖設計與填充高滲水性之碎石，形成高滲水率對比，迫使水流集中於碎石區流動。同樣的 1BTF 與 2BTF 處置坑道則是以盛裝容器之低滲水性設計，搭配填充高滲水性之碎石，用以形成高滲水率對比。此考量可以視為將「儘可能降低處置坑道內流經廢棄物之流量」訂定為主要設計準則。因此，瑞典將水力梯度、水力傳導係數、水力反差(高滲水率對比)與筒倉氣壓訂為安全功能指標。





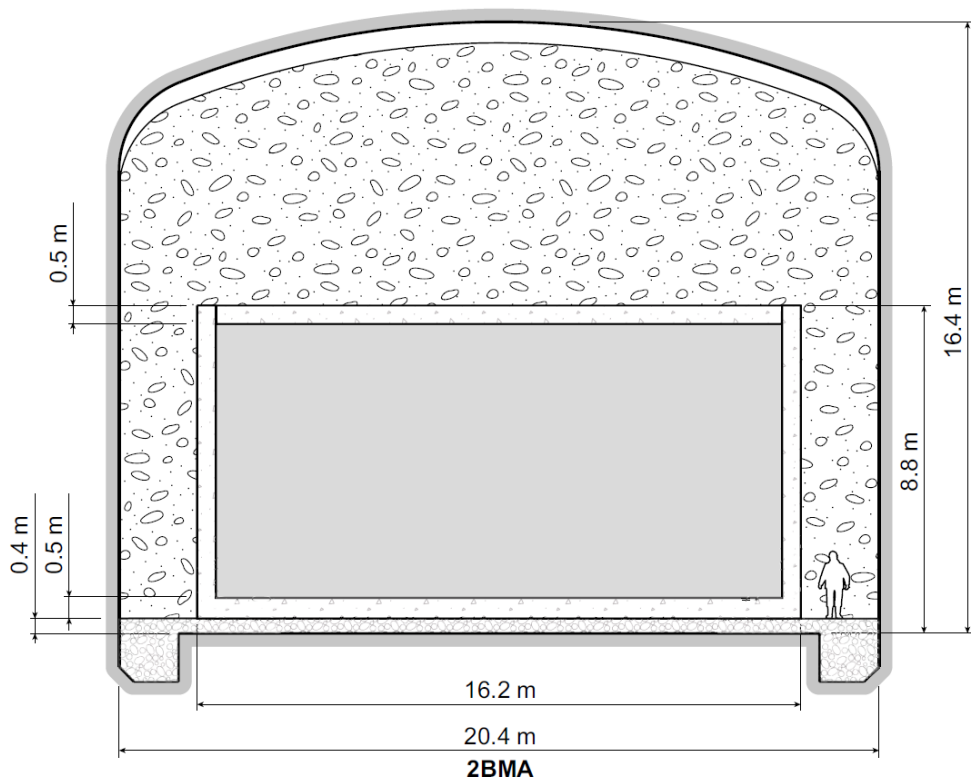
橫剖面



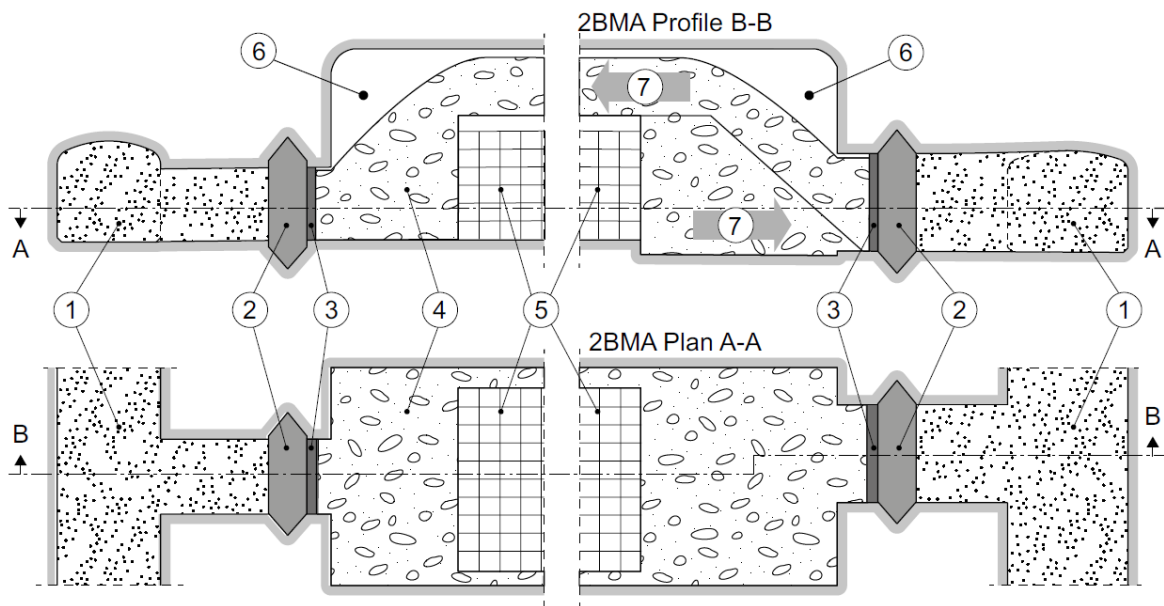
縱剖面

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 2.6.3-1 1BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



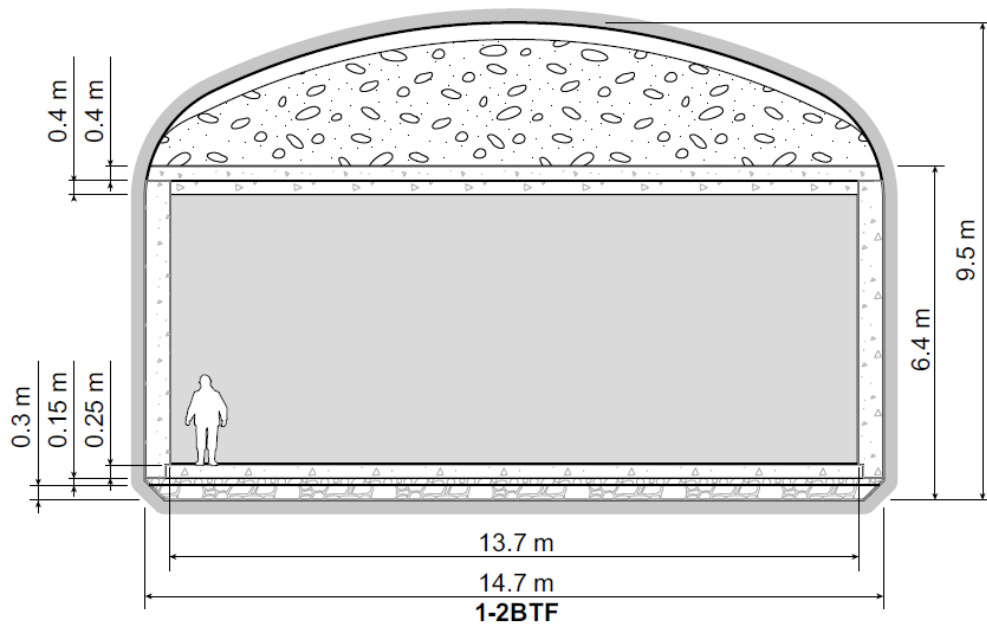
橫剖面



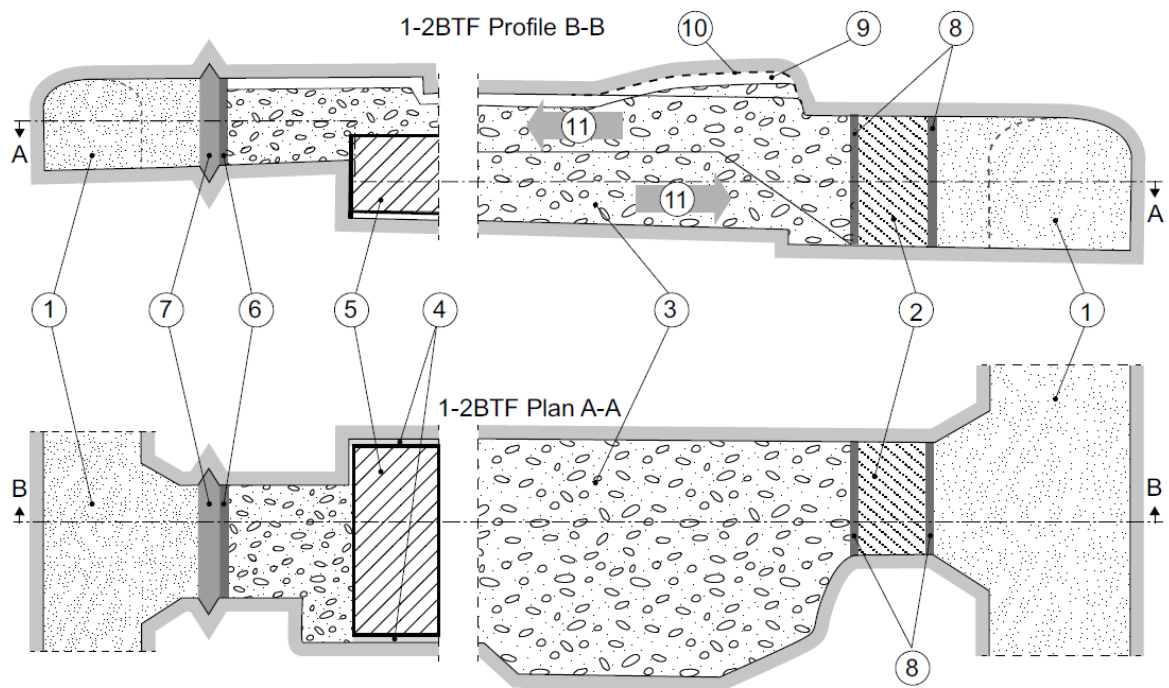
縱剖面

- 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 2.6.3-2 2BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



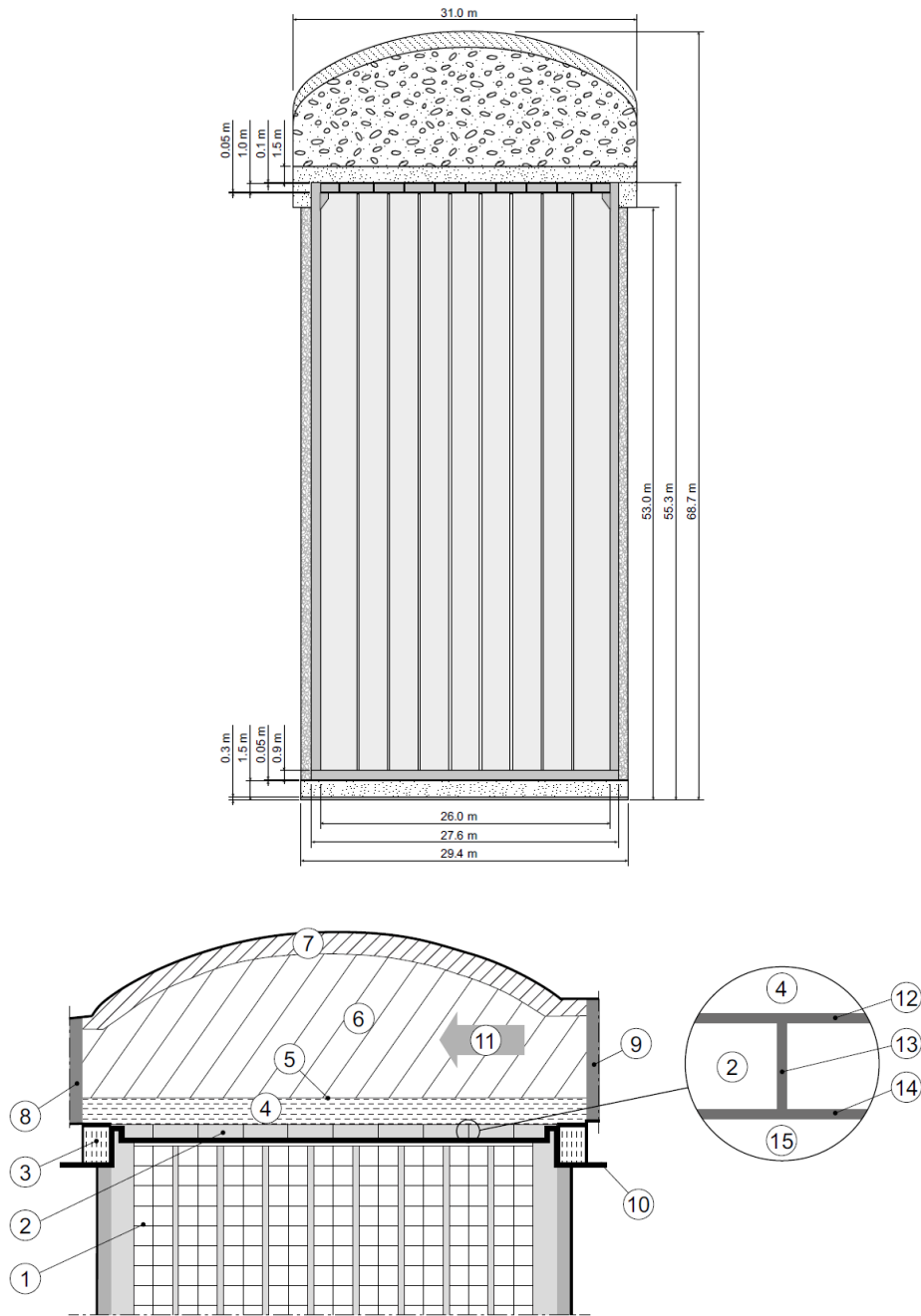
橫剖面



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 2.6.3-3 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 2.6.3-4 筒倉處置封閉設計示意圖(SKB, 2014)

## (2)實現良好的遲滯功能

依其確保良好遲滯功能的考量包含：限制平流傳輸、力學穩定性、限制溶解度、吸附能力與有利的化學環境。設計考量之對象則包含廢棄物體、盛裝容器、處置窖、緩衝材料、回填、封塞等之工程障壁系統，以及處置母岩環境。

### 1.限制平流傳輸

廢棄物盛裝容器具有低水力傳導係數特性，搭配周圍工程障壁系統設計，將可降低流經之水量，進而達到限制廢棄物包件平流傳輸與核種釋出。其餘之工程障壁系統則與前述藉由低水力傳導係數設計要求，使該設施具不易滲水特性。或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，迫使水流集中於碎石區流動。如此，均可使廢棄物包件形成低流量環境而達成限制平流傳輸功能。由於其考量與前項實現低流量安全功能相同，故其未將限制平流傳輸列入實現良好的遲滯功能之安全功能指標中。

### 2.力學穩定性

考量力學穩定性可避免設施因力學破壞產生裂縫後，而導致限制平流傳輸功能下降。因此，針對廢棄物、盛裝容器、處置窖、緩衝材料、回填、封塞等之工程障壁系統，以及處置坑道與母岩均有其力學穩定性要求。惟其對於實現良好的遲滯功能屬於間接效益，故其未將力學穩定性列入實現良好的遲滯功能之安全功能指標中。

### 3.限制溶解度

部分核種其溶解於水中的濃度將可能會有其限值，如 C-14、Nb59、Nb63，但瑞典於其安全評估中並未考量核種之溶解度限值。另外，如核電廠反應器壓力槽等活化金屬廢棄物，其核種釋出主要是受到腐蝕速率控制，故將腐蝕速率列為實現良好的遲滯功能之安全功能指標中。而腐蝕速率主要受化學環境影響，其設計則是依循 5.有利的化學環境之考量。

### 4.吸附能力

許多核種會被廢棄物包件內的固體材料吸附，其吸附能力取決於固體材料特性和孔隙水的化學特性。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。原則上，不僅只有廢棄物體中的混凝土、水泥或瀝青可吸附核種，離子交換樹脂、灰燼、腐蝕產物以及廢棄物包件也可吸附核種。處置在筒倉、BMA 和 BTF 的廢棄物，其吸附特性取決於廢棄物的型式。但在安全分析中，瑞典只考慮廢棄物包件中水泥材料的吸附性。

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。只要水泥材料在化學上沒有明顯變化，如孔隙水的 pH 值高於 10.5，則有利於確保核種吸附。

從廢棄物包件釋出的核種，會被廢棄物包件周圍的混凝土灌漿、混凝土結構和混凝土結構外的碎石吸附。此外，當核種釋出後往聯絡坑道傳輸時，也會被封塞中的材料吸附，而達到遲滯的效果。其中，水泥材料(混凝土牆、灌漿等)因其比表面積較大，對核種的吸附效果最好。但須注意的是，安全分析時仍會將處置場中其他材料(例如膨潤土)的吸附性納入計算。由於 1BLA 和 2~5BLA 內的水泥材料數量極少，故在這些處置坑道內不考慮吸附。

故其設定「可吸附的表面積」作為吸附能力之安全功能指標。

## 5. 有利化學環境

對於確保核種遲滯功能而言，化學環境將影響吸附及腐蝕速率等重要特徵，其重要化學環境參數包含：pH、氧化還原電位和錯合劑濃度等。

A. 只要水泥材料在化學上沒有明顯變化，孔隙水就會具有高 pH 值，可確保對重要的陽離子具有良好的吸附效果。另外，假設水泥材料在一般的 pH 範圍內，對陰離子的吸附效果不佳。

B. 氧化還原電位是吸附的重要參數，就 SFR 處置場而言，低氧化還原電位會使重要的核種釋出較為緩慢。

C. 廢棄物內含有錯合劑(例如：乙二胺四乙酸、氨基三醋酸和檸檬酸)，廢棄物中的有機物質(特別是纖維質)降解也會產生錯合劑。這些錯合劑會在溶液中與某些核種錯合，並且因為此化學形式的改變，降低固體表面對核種的吸附性。因此應盡量降低錯合劑的濃度。

此外，反應爐壓力槽的腐蝕，也會受到高 pH 值和低氧化還原電位限制。故其設定 pH、氧化還原電位和錯合劑濃度作為有利化學環境之安全功能指標。

## 2.3 日本低放射性廢棄物坑道處置設施規劃案例蒐集與研析

### 2.3.1 日本之處置安全管制概述

日本的核能管制機關原為內閣府下轄之原子力安全委員會，主要負責建立安全原則與標準。以及經濟產業省下轄之原子力安全保安院，負責確保核能工業安全，並管制處置與貯存設施，以及核能設施的除役。此兩機構於 2012 年合併及改組為原子力規制委員會，專責管理和監督日本的核能政策與設施。

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，其中相當於我國低放射性廢棄物處置之分類為「第二種廢棄物處置」。於同法第 51 條之 3 規定處置事業申請許可之基準為 1.申請者具有推動處置事業所需之足夠技術能力與財務基礎。2.放射性廢棄物處置設施或放射性廢棄物管理設施之位置、構造與設備，對於核子燃料或受核子燃料污染物可能導致災害之防護目標符合原子力規制委員會相關規範。

第二種廢棄物處置事業之主要規範為「核子燃料或受核子燃料污染物之第二種廢棄物處置事業相關規則」，其第 6 條規範了處置事業之技術基準，惟目前僅規範近地表處置窖式與壕溝式之處置事業技術基準。處置事業申請許可之審查基準，原依循日本原子力安全委員會之相關安全審查指引以及日本原子力安全保安院之審查規則，這些規則之訂定主要是基於爐規法第 51 條之 3 規定制定。為符合本計畫蒐集坑道式處置設施設計考量之目標，以適用於採坑道型式之餘裕深度處置之審查規則「第二種廢棄物處置事業相關之安全審查基本考量」(日本原子力安全委員會，2010)作為研析對象。

日本於放射性廢棄物處置設施管理期間(含運轉與監管)，基於合理抑低原則考量下，輻射劑量限值為 0.05 mSv/yr。另外，基於處置設施的長期安全考量具有較高之不確定性，於結束管理期後採用風險管理概念，依不同發生頻率事件之對應情節採取不同的劑量限值：

(1)基本情節：劑量限值為 10  $\mu$ Sv/yr。

考量在正常情況下處置設施的工程障壁，地層隆起或侵蝕及氣候變遷所引起的地下水變異範圍較小。

(2)變異情節：劑量限值為 0.3 mSv/yr。

考量在正常情況下，處置設施工程障壁比預期提早發生劣化，地層隆起或侵蝕及氣候變遷所引起的地下水變異範圍較大。

(3)人為或稀有事件情節：劑量限值定為 10~100 mSv/yr。

日本原子力安全委員會建議以 10 mSv/yr 劑量作為通用的參考水平，若劑量低於此水平則可以忽略其稀有事件所造成之影響。當進行較保守的條件設定時，可採 100 mSv 作為年劑量限值。

## 2.3.2 日本餘裕深度處置概念與基本考量

### (1)基本考量

依日本原子力委員會「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」中，對於餘裕深度處置安全之基本考量如下：

- 1.基於避免人類活動可能造成的影響，廢棄物處置必須具足夠深度，且須一併考量其地下蘊藏之天然資源狀況，用以降低人為活動而導致曝露的可能性。
- 2.選擇抑制核種遷移機能較佳之地層。
- 3.處置設施密閉機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。
- 4.處置設施需進行數百年之管理作業。

### (2)規劃接受之廢棄物與盛裝容器

規劃處置之廢棄物如表 2.7.2-1。

表 2.7.2-1 餘裕深度處置的主要廢棄物種類

產生場所	產生時期	主要廢棄物
原子爐設施	運轉中	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射性金屬廢棄物(燃料棒、金屬護箱、可燃性毒物、原子爐內構造物)</li> <li>• 使用過的樹脂(一次性)</li> </ul>
	除役時	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 金屬類(放射性/污染)</li> <li>• 放射性混凝土廢棄物</li> <li>• 附帶的廢棄物(水中濾器等)</li> <li>• 黑鉛</li> </ul>
再處理設施	運轉中	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射性金屬廢棄物(金屬護箱、可燃性毒物)</li> <li>• 運轉過程所產生的廢棄物</li> </ul>
	除役時	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 金屬類(污染)</li> <li>• 附帶的廢棄物</li> </ul>
MOX 燃料加工設施	運轉中	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 運轉過程所產生的廢棄物</li> </ul>
	除役時	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 金屬類(污染)</li> <li>• 附帶的廢棄物</li> </ul>



廢棄物盛裝容器除採現行低放射性廢棄物處置設施所使用的 200 升(55 加侖)鋼製廢料桶外，也考慮使用更大的方型鋼製容器，如圖 2.7.2-1。

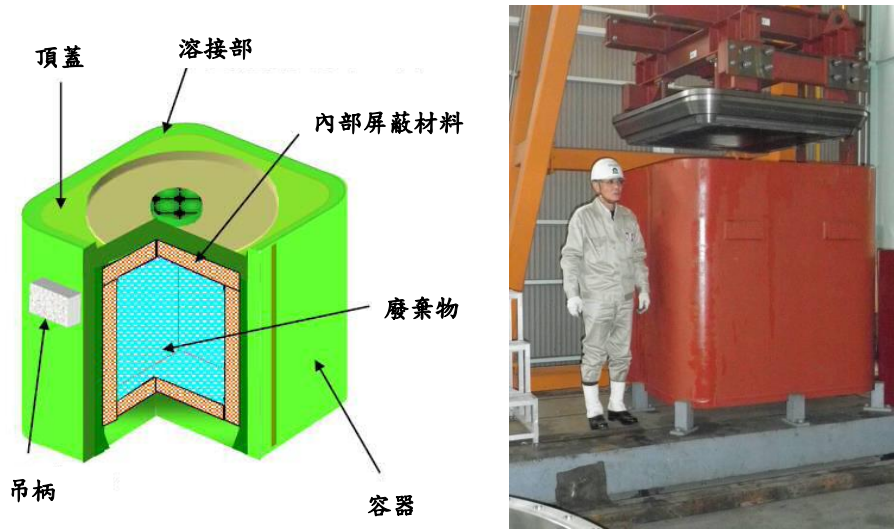


圖 2.7.2-1 餘裕深度處置盛裝容器概念示意圖(電氣事業聯合會，2011)

### (3)處置設施概念

餘裕深度廢棄物處置設施包含地面與地下設施。地面設施包含廢棄物接收、檢查等設施，檢查完成的廢棄物將經由運輸坑道運送至地下設施進行定置，設施整體規畫概念可參見圖 2.7.2-2 所示。

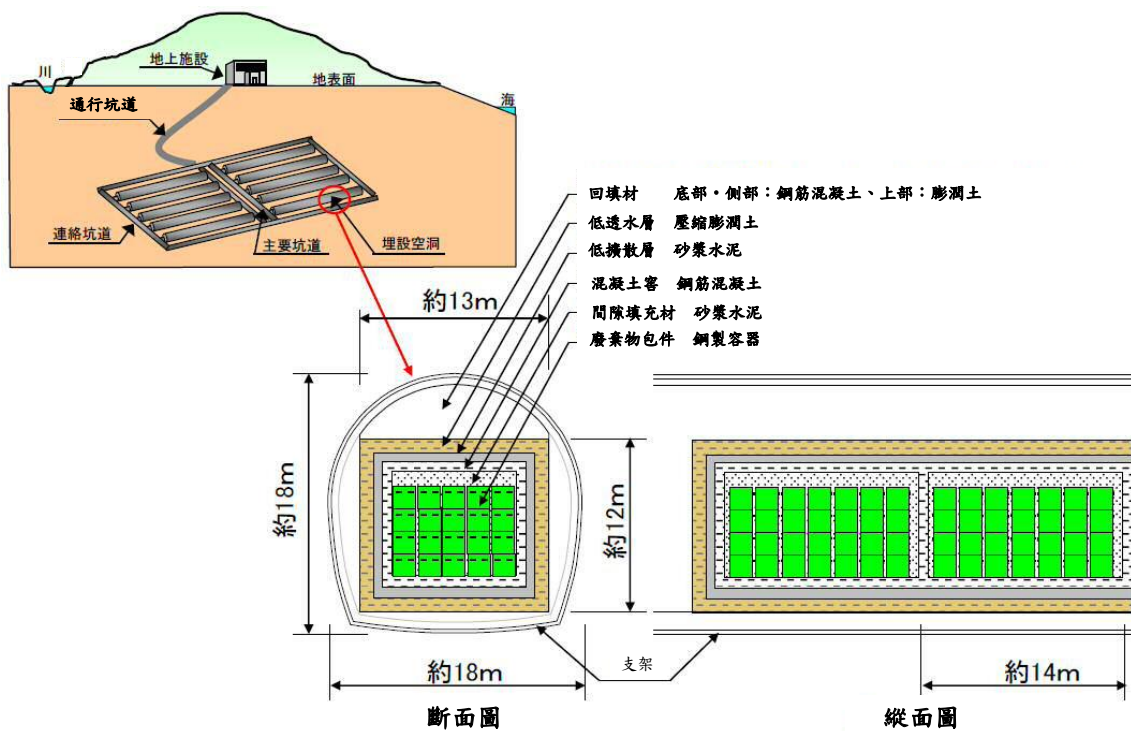


圖 2.7.2-2 餘裕深度處置設計概念示意圖

處置設施設計除了延續前述基本考量，另外增加考量如下：

- 1.選擇無天然資源的場所，且放射性核種抑制遷移機能高的地下數十公尺深之地層中，設置處置坑道。
- 2.於處置坑道中設置混凝土處置窖，用以定置廢棄物。
- 3.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。
- 4.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。

餘裕深度處置設施為了減少入侵至處置設施的地下水量，以達與現行的低放射性廢棄物處置設施（近地表處置設施）同等以上的核種密閉性能要求，將考量使用高配比膨潤土。另外，水泥砂漿等水泥系材料於現行處置設施中預期只有提供核種的吸附性能，但若於混凝土處置窖內側或外側使用更緻密的材料，則可以期待發揮抑制擴散的效果。這種由高性能材料所構成的隧道型處置設施如圖 2.7.2-3 所示。

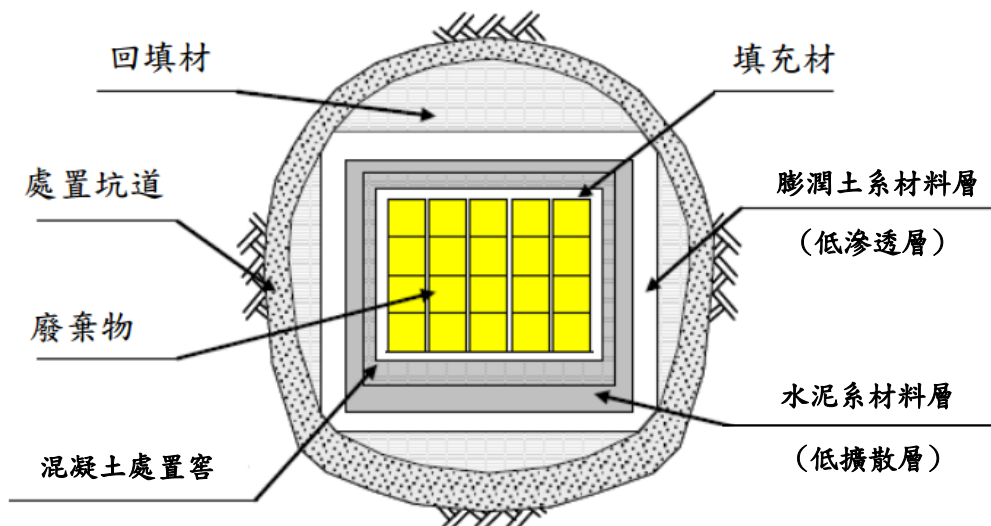


圖 2.7.2-3 餘裕深度處置坑道障壁系統斷面示意圖

### 2.3.3 第二種廢棄物處置事業相關之安全審查基本考量

依「第二種廢棄物處置事業相關之安全審查基本考量」(日本原子力安全委員會，2010)其基於「選擇抑制核種遷移機能較佳之地層」與「處置設施密閉機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」之基本考量，進一步探討其可能之功能目標：

(1)「選擇抑制核種遷移機能較佳之地層」考量之天然障壁系功能目標：

- 1.於滲透性低、地下水流場水力梯度小的地層中設置處置設施，用以降低通過處置設施的地下水水量，達到降低放射性核種遷移速度的功能。
- 2.選擇遠離生活環境的地層中設置處置場，用以確保當放射性核種從處置設施釋出時，具有足夠時間使核種衰減而降低濃度。

(2)「處置設施需具備之密閉機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」考量之工程障壁系統功能目標：

- 1.為了盡可能抑制因放射性核種藉由地下水遷移，進而對周圍民眾所造成的曝露劑量影響，將長期抑制釋出的放射性核種。
- 2.必須透過現代技術與資料設想工程障壁的劣化因素，並於設計中極力排除劣化的可能性，確保工程障壁長期的低滲透性和低擴散性。另外也必須考慮與之對應的廢棄物密閉機能於可能發生的情況。
- 3.設計上無法排除的劣化因素，將於安全評估中評估其對放射性核種密閉機能的影響。

此外，基於回避人類活動所造成的影響，廢棄物必須處置於足夠的深度中(例如距地表 50~100 公尺的深度)，且一併考量其地下蘊藏之天然資源狀況，用以降低人為活動而導致曝露的可能性。處置設施必需進行數百年之管理作業，以確保其安全性。

依其基本安全機能考量分為屏蔽、密閉、抑制遷移與隔離，其與處置事業各階段之關聯性如圖 2.7.3-1 所示。處置設施依其規劃概念，接收與定置廢棄物之運轉時期約在數十年，封閉後進入管理時期，參考第二種廢棄物處置事業相關時程規劃至少長達數百年，而後考量之時間約可延伸至十萬年後。在此期間內，處置設施須具備「基本安全機能」，以防止放射性物質或其污染物擴散而產生災害。

基本安全機能	管理期間			管理期結束以後
	接收~定置	定置~回填施工(搬運、施工坑道回填)	回填完成後至管理期間結束	
密閉		密閉		
屏蔽		屏蔽		
抑制遷移			抑制遷移	機能期待期間
隔離	該機能並無要求，但仍屬持續確保期間			隔離

圖 2.7.3-1 餘裕深度處置各階段的基本安全機能

處置設施從廢棄物接收至坑道回填結束期間，所需具備之基本安全機能為「密閉」與「屏蔽」。「密閉」機能主要是利用低透水性的特性，抑止地下水侵入工程障壁，並藉由地下處置設施的力學安定性等措施，抑制地下水與廢棄物接觸。「屏蔽」機能則利用設施結構及設備操作，用以降低廢料包件對輻射業務從業人員及週遭民眾的輻射量。

回填結束後的「基本安全機能」則著重於「抑制遷移」與「隔離」，「抑制遷移」主要是藉由工程障壁與天然障壁組合而成的處置系統，抑制放射性物質向人類生活圈遷移。「隔離」機能考量管理期結束後，如何減少人類偶發性活動時之暴露或降低輻射影響。同時，為避免人類進入處置場址周圍，須將連絡通道進行適當的封堵。

配合前述餘裕深度處置概念分析其地下設施單元與基本安全機能之關聯性如圖 2.7.3.-2。

		窖內空隙填充材	處置窖	低擴散層	低透水層	坑內空隙填充材	回填材	處置坑道	
基本安全機能	密閉	—	●	—	●	—	—	—	
	屏蔽	●	●	●	—	—	—	—	
	抑制遷移	核種吸附性	●	●	●	—	—	—	—
		低擴散性	—	—	●	—	—	—	—
		低透水性	—	—	—	●	●	—	—
	防止遷移路徑形成	—	—	—	—	—	●	—	
	隔離	確保隔離距離	—	—	—	—	—	—	●
		阻止民眾入侵	—	—	—	—	—	●	—

圖 2.7.3-2 餘裕深度處置地下設施單元與基本安全機能之關聯性

當廢棄物從廢棄物接收設施運輸至處置坑後，廢棄物雖然仍會釋出輻射，但由於有地層的屏蔽，因此可以預期對一般民眾所造成的曝露劑量會十分微小。另外，廢棄物放置盛裝容器並定置於處置窖中，且這些容器與設施均具備密閉機能。因此，在正常的處理過程中，放射性核種幾乎不會有從廢棄物中釋出的可能性。若是評估廢棄物處理作業的過程導致含有水分或表面污染等，則必須考量氫等氣體狀放射性核種的釋出，或廢棄物與水體接觸，使放射性核種混入排水中的可能性。因此，正常狀況下之評估項目包含：廢棄物的輻射、從廢棄物接收設施排氣系統以氣體為介質釋出的放射性核種、從廢棄物接收設施排水系統以水體為介質釋出的放射性核種。

異常狀況參考「第二種廢棄物處置設施之位置、構造與設備之基準相關規則」(原子力規制委員會，2013)，應考量地震、海嘯、洪水、颱風、降雨、積雪、火山活動等可能之自然事件引發之外力對處置設施功能影響。此外，依「第二種廢棄物處置事業相關之安全審查基本考量」(日本原子力安全委員會，2010)另需考量發生坑道湧水、火災、爆炸、喪失電力等可能之影響。於管理期間考量如下：

- (1) 考量因外力導致廢棄物破損，放射性核種釋出的事件。此為廢棄物從接收至定置的移動過程中，可能會發生的事件。異常時的評估為考量墜落事故短時間所造成的影響。
- (2) 火災、爆炸的起因為考量熱與化學作用的影響，使廢棄物內放射性核種釋出的事件。由於廢棄物不具可燃性與爆炸性物質，並且已盛裝於容器中加以密封。另外廢棄物接收設施及處置坑道內限制攜帶可燃性物質進入，同時也進行適當的營運管理，因此不考量此類異常事件。
- (3) 考量因湧水導致廢棄物進水，使廢棄物內之放射性核種釋出的事件。由於廢棄物已盛裝於容器中加以密封，且於處置坑道內的施工將進行適當的營運管理，因此不考量此異常事件。

於管理期間結束後之正常與異常狀況評估，則納入安全分析中依基本情節、變異情節、人為或稀有事件情節，分別進行分析與評估。

# 第三章 國際坑道處置放射性廢棄物分類特性與其工程障壁 系統安全功能

## 3.1 低放射性廢棄物分類特性

### 3.1.1 IAEA 的低放射性廢棄物分類特性

依據 IAEA 於 2009 年提出之放射性廢棄物分類(No. GSG-1)，依活度、核種半化期與可能的處置方式如圖 3.1-1，區分為：

- 1.HLW 高放射性廢棄物：含有高活度濃度之短半化期與長半化期核種，建議採用深地質處置。
- 2.ILW 中放射性廢棄物：含有相當活度濃度之長半化期核種，建議採用中等深度處置(約數十至數百公尺)
- 3.LLW 低放射性廢棄物：含有較高活度濃度之短半化期核種，亦含有少量長半化期核種，建議採用近地表處置(約為地表至 30 公尺深)。
- 4.VLLW 極低放射性廢棄物：其放射性活度濃度接近或略高於可豁免管制限值，建議採用地表回填處置。
- 5.VSLW 極短半化期廢棄物：核種半化期短於 100 天，建議採貯存方式使其衰變至可豁免管制。
- 6.EW 可豁免管制廢棄物：放射性核種濃度極低，符合豁免管制規定之廢棄物。

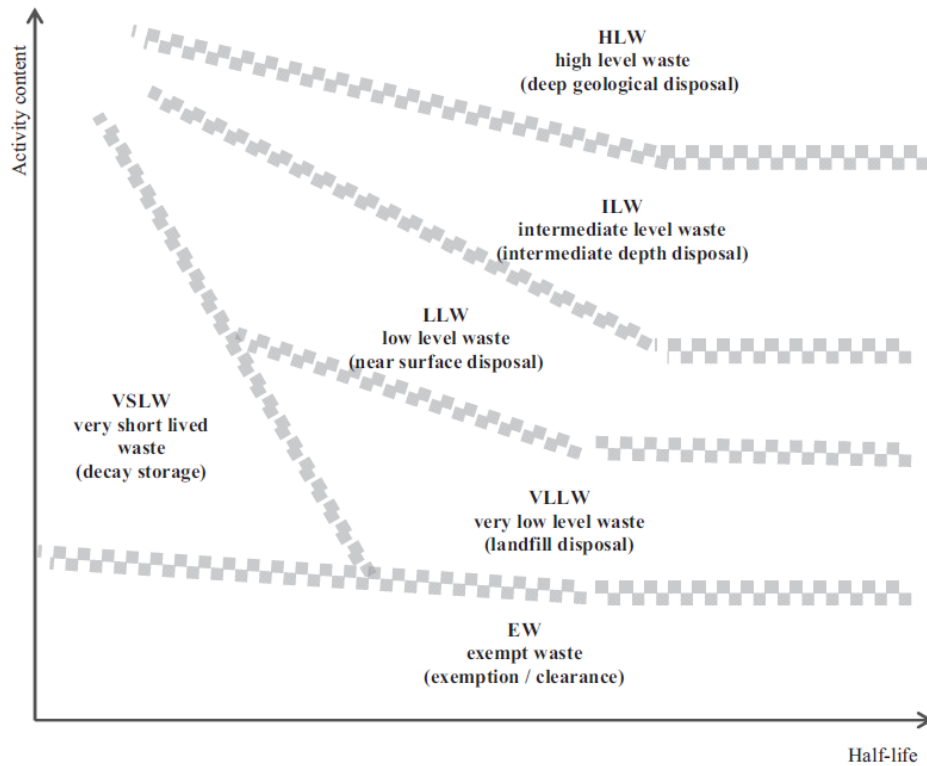


圖 3.1-1 IAEA 之放射性廢棄物分類概念(IAEA, 2009)

### 3.1.2 我國低放射性廢棄物分類特性

依我國「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第三條，規定低放射性廢棄物依其放射性核種濃度，可分為 A 類、B 類、C 類與超 C 類等四種：

- 1.A 類廢棄物：指低放射性廢棄物所含核種濃度低於(含)表 3.1.2-1 濃度值之十分之一倍及低於(含)表 3.1.2 第一行之濃度值者；或廢棄物所含核種均未列入表 3.1.2-1 及附表 3.1.2-2 者。
- 2.B 類廢棄物：指低放射性廢棄物所含核種濃度高於表 3.1.2-2 第一行之濃度值且低於(含)第二行之濃度值者。
- 3.C 類廢棄物：指低放射性廢棄物所含核種濃度高於表 3.1.2-1 濃度值十分之一倍且低於(含)表 3.1.2-1 之濃度值者；或高於表 3.1.2-2 第二行之濃度值且低於(含)第三行之濃度值者。
- 4.超 C 類廢棄物：指低放射性廢棄物所含核種濃度高於表 3.1.2-1 之濃度值者，或高於表 3.1.2-2 第三行之濃度值者。

表 3.1.2-1 單一長半化期核種濃度值

核種	濃度值
C-14	0.30 TBq/m <sup>3</sup>
C-14 (活化金屬內)	3.0 TBq/m <sup>3</sup>
Ni-59 (活化金屬內)	8.1 TBq/m <sup>3</sup>
Nb-94 (活化金屬內)	0.0074 TBq/m <sup>3</sup>
Tc-99	0.11 TBq/m <sup>3</sup>
I-129	0.0030 TBq/m <sup>3</sup>
TRU (半化期大於 5 年之超鈾阿伐放射核種)	3.7 kBq/g
Pu-241	130 kBq/g
Cm-242	740 kBq/g

表 3.1.2-2 單一短半化期核種濃度值

核種	濃度值 (TBq/m <sup>3</sup> )		
	第一行	第二行	第三行
半化期小於 5 年之所有核種總和	26	註一	註一
H-3	1.5	註一	註一
Co-60	26	註一	註一
Ni-63	0.13	2.6	26
Ni-63 (活化金屬內)	1.3	26	260
Sr-90	0.0015	5.6	260
Cs-137	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。可從實際執行運送、吊卸與最終處置作業時，考量體外輻射與衰變熱，而限制這些核種之濃度。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。

註二：多核種之分類：

若低放射性廢棄物中含有多核種時，其分類應按下式判斷。

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i,0}} \leq 1$$

式中，

$C_i$ ：第  $i$  個核種之濃度。

$C_{i,0}$ ：第  $i$  個核種第 0(0=A,B,C)類之濃度限值。

$n$ ：所含核種的數目。

若滿足上式，則可歸為第 0 類廢棄物。



此外，根據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第四條規定，

1. A類廢棄物應符合第五條之規定。A類廢棄物與B類廢棄物或C類廢棄物混合處置者，應符合B類廢棄物或C類廢棄物之相關規定。
2. B類廢棄物應固化包裝，其廢棄物應符合第五條及第六條之規定。B類廢棄物與C類廢棄物混合處置者，應符合C類廢棄物之相關規定。
3. C類廢棄物應固化包裝，其廢棄物除符合第五條及第六條之規定外，應加強處置區之工程設計，以保障監管後誤入者之安全。
4. 超C類廢棄物非經主管機關核准，不得於低放處置設施進行處置。不適合固化或固化後不符合第六條規定之A類廢棄物，應盛裝於設計使用年限至少能維持一百年結構完整之容器或封存於具相同容器功能之工程障壁中或以其他經主管機關核准之方法進行處置。

不適合固化或固化後不符合第六條規定之B類廢棄物及C類廢棄物，應盛裝於經主管機關核准之高完整性容器或以其他經主管機關核准之方法進行處置。

根據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第五條規定：

低放處置設施最終處置之廢棄物，應符合下列規定：

1. 自由水之體積不得超過總體積百分之零點五。
2. 在常溫常壓下不致引起爆炸。
3. 具耐火性。
4. 不得含有毒性、腐蝕性及感染性之物質。
5. 不得含有或產生危害人體之有毒氣體、蒸氣及煙霧。

根據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第六條規定：

低放射性廢棄物經均勻固化後，應符合下列規定：

1. 水泥或高溫熔融固化體機械強度以單軸抗壓強度測試，每平方公分應大於十五公斤；瀝青固化體機械強度以針入度測試，應小於一〇〇。
2. 溶出指數應大於六。

3.經耐水性測試後，應符合第一款之規定。

4.經耐候性測試後，應符合第一款之規定。

5.經耐輻射測試後，應符合第一款之規定。

6.經耐菌性測試後，應符合第一款之規定。

前條第一款、第三款及前項規定之測試項目、方法及標準如附表三(如表 3.1.2-3)。

表 3.1.2-3 低放射性廢棄物均勻固化體測試項目、方法及標準

項次	測試項目	測試方法	標準
一	自由水	ANSI/ANS55.1 方法。	1.自由水含量應小於固化體體積之百分之零點五。 2.自由水之 pH 值應介於 4~11 之間，若為水泥固化體，則其自由水之 pH 值應大於 9。
二	耐火性	1.水泥及高溫熔融固化體免測。 2.瀝青固化體以 ASTM-D92 方法。 3.塑膠固化體以 ASTM-D2863 方法。	1.瀝青固化體之燃燒點應大於 250 <sup>0</sup> C。 2.塑膠固化體之燃燒指數應大於 28。
三	機械強度	1.除瀝青固化體外，一般固化體以 ASTM C39 或 CNS 1232 測試。 2.瀝青固化體以 ASTM C-D6 測試針入度。	1.除瀝青固化體外，一般固化體之抗壓強度應大於每平方公分 15 公斤。 2.瀝青固化體之針入度應小於 100。瀝青固化體含瀝青重量比應超過百分之五十以上。
四	溶出率	ANSI 16.1(水泥固化體可測試五天)。	固化體內各核種溶出指數應大於 6。
五	耐水性	固化體須於常溫下，浸水 90 天後測試機械強度。	測試結果符合第三項之標準。
六	耐候性	固化體經溫濕度循環變化後測試機械強度。	測試結果符合第三項之標準。
七	耐輻射性	固化體以 Co-60 照射之加馬輻射照射，吸收劑量達一百萬戈雷 (Gy) 後測試機械強度。	測試結果符合第三項之標準。
八	耐菌性	ASTM G21 後再測機械強度。	測試結果符合第三項之標準。

### 3.1.3 美國低放射性廢棄物分類

依美國核管會 10CFR61.55 規定，其依廢棄物所含長短半化期核種濃度而將廢棄物分為 A、B、C、及超 C 類，我國低放射性廢棄物法定分類即參考美國 10 CFR 61.55 加以制定。另 10CFR61.56(a)與(b)則是對於廢棄物特性進行規定，其中 A 類廢棄物必須符合 10 CFR 61.56(a)基本要求，而 B 類與 C 類須再符合 10 CFR 61.56(a)之要求。10CFR61.56(a)與(b)分別規定如下：

- 1.10CFR61.56(a)之 1.處置廢棄物不可用硬紙箱或塑膠箱包裝。
  - 2.10CFR61.56(a)之 2.液體廢棄物必須固化或採可吸收液體廢棄物兩倍體積之吸收物質加以包裝。
  - 3.10CFR61.56(a)之 3.廢棄物應儘可能降低自由流體和非腐蝕性液體含量，液體體積不得超過總體積 1%。
  - 4.10CFR61.56(a)之 4.廢棄物不可含有潛在變形、爆炸分解的物質，在常溫常壓下不得有化學反應或與水反應後產生爆炸。
  - 5.10CFR61.56(a)之 5.運輸、處理、處置廢棄物過程中，廢棄物內不可含有或產生有毒氣體、蒸氣或煙霧，以致產生危害作業人員。
  - 6.10CFR61.56(a)之 6.廢棄物不得具自燃性。廢棄物含有自燃性材料應進行處理、調製、與包裝成不可燃。
  - 7.10CFR61.56(a)之 7.氣體廢棄物須承裝成在 20°C 溫度時壓力不超過 1.5 個大氣壓之容器，單一容器之總活度不得超過 100 居里(Ci)。
  - 8.10CFR61.56(a)之 8.放射性廢棄物含有害性、生物性、致病性、或感染性物質者，須以最大的實務能力予以處理，以減少非放射性物質的可能危害。
- B 類廢棄物除須滿足上述基本要求外，還須滿足 10CFR61.56(b)所規定的下列三項對廢棄物穩定的要求：
- 9.10CFR61.56(b)之 1.廢棄物須承受廢棄物間的荷重、設備擠壓、出現水份、細菌、輻射效應、化學變化等因素，仍可維持結構穩定和型態尺寸。

10.10CFR61.56(b)之 2.液體廢棄物或含液體的廢棄物，須轉變形體合理抑低其自由水與轉變為非腐蝕液體，但任何情況下，將廢棄物置放於保證穩定性設計的處置容器中時，其液體含量不得超過廢棄物形體積的 1%。或者廢棄物本身處理成穩定形體時，其液體含量不得超過廢棄物形體積的 0.5%。

11.10CFR61.56(b)之 3.廢棄物之內以及廢棄物與其包件之間的空隙應儘量減少。

### 3.1.4 瑞典之低放射性廢棄物分類特性

瑞典之低放射性廢棄物處置設計與營運，主要為瑞典核子燃料和廢棄物管理公司(SKB)。雖然瑞典尚無法定的放射性廢棄物分類標準，但在實務上，其處置設施設計與處置規劃時仍已考量其廢棄物分類特性。依據瑞典SKB公司對於廢棄物分類與其處置考量，整理如表 3.1.4-1 所列。IAEA 於其瑞典放射性廢棄物概況報告(IAEA, 2013)中，認為 LLW-SL 屬於 LLW 分類，而瑞典之 LILW-LL 與 ILW-SL 則是歸類於 IAEA 之 ILW 分類。

表 3.1.4-1 瑞典 SKB 放射性廢棄物分類標準

瑞典 SKB 分類	定義	處置型式與設施
HLW	1.亦即用過核子燃料 2.衰變熱 $>2\text{kW}/\text{m}^3$ 3.含大量長半化期核種(半化期長度大於 31 年) 4.短半化期核種數量超過限制數量	深層地質處置設施 (SFK)
LILW-LL	1.含大量長半化期核種(半化期長度大於 31 年) 2.短半化期核種數量超過限制數量	深層地質處置設施 (SFL)
ILW-SL	1.含大量短半化期核種(半化期長度小於 31 年) 2.廢棄物包件的劑量率小於 $500\text{ mSv/h}$ . 3.可含有長半化期核種(半化期長度大於 31 年)，數量需低於限制數量	低放射性廢棄物最終處置設施(SFR)
LLW-SL	1.含少量短半化期核種(半化期長度小於 31 年) 2.廢棄物包件以及未屏蔽之廢棄物的劑量率小於 $2\text{ mSv/h}$ . 3. 可含有長半化期核種(半化期長度大於 31 年)，數量需低於限制數量	低放射性廢棄物最終處置設施(SFR)
VLLW-SL	1.含少量短半化期核種(半化期長度小於 31 年) 2.廢棄物包件的劑量率小於 $0.5\text{ mSv/h}$ . 3. 可含有長半化期核種(半化期長度大於 31 年)，數量需低於限制數量	淺地層掩埋 (各電廠與核能設施)

### 3.1.5 日本之低放射性廢棄物分類特性

日本依「爐規法實施令」將放射性廢棄物依核種輻射強度區分為第一種廢棄物與第二種廢棄物，相對於我國則稱為高放射性與低放射性廢棄物，其分類與處置考量，詳如 3.1.5-1 所列。

表 3.1.5-1 日本放射性廢棄物分類與處置概念

廢棄物分類		主要來源	處置方式
第一種廢棄物		再處理設施	地質處置
第二種廢棄物	超鈾廢棄物	MOX 燃料加工廠	地質處置
	含鈾廢棄物	鈾濃縮或燃料加工廠	地質處置
	放射性較高	核能發電廠	餘裕深度處置
	放射性較低	核能發電廠	近地表處置
	放射性極低	核能發電廠	近地表壕溝處置

### 3.1.6 加拿大之低放射性廢棄物分類特性

加拿大標準協會 CSA(Canadian Standards Association)與加拿大核能安全委員會 CNSA(Canadian Nuclear Safety Commission)，制訂 N292 系列標準，將放射性廢棄物區分為 3 類，其分類標準如表 3.1.6-1 所列，規劃將中低放射性廢棄物均處置於深地層處置設施 DGR 中。IAEA 於其加拿大放射性廢棄物概況報告(IAEA, 2012)中，認為其分類與 IAEA 之廢棄物分類相符。

表 3.1.6-1 加拿大放射性廢棄物分類標準(CNSC, 2016)

分類標準	LLW	ILW	HLW
阿伐	< 400 Bq/g	無限制	無限制
長半化期貝它/加馬	< 10 kBq/g	無限制	無限制
未屏蔽接觸劑量率 (Unshielded contact dose rate)	< 2 mSv/h	>2 mSv/h	無限制
衰變熱能	-	< 2 kW/m <sup>3</sup>	無限制

## 3.2 瑞典處置案例之廢棄物分類與處置概念分析

瑞典低放處置設施以其規劃處置廢棄物之半衰期特性與總活度進行管控，隨著廢棄物中所含長半化期核種之數量與活度提升，其工程障壁系統安全功能對應之設計越多。如對於反應爐壓力容器，因活化金屬之核種釋出特性受腐蝕速率影響，而採用混凝土障壁提供增強遲滯核種功能之近場環境。其次，則是對於具長半化其核種之廢棄物，選用具遲滯功能之盛裝容器，或利用工程障壁系統之設計搭配，控制處置窖內為低流量狀態，提供遲滯功能。由於核種存量與盛裝容器考量為廢棄物分類處置之首要考量，以下先就此部分進行說明，再針對廢棄物分類與處置工程障壁設計關聯性進行討論。

### 3.2.1 核種存量與盛裝容器

#### (1) 處置坑道核種存量

根據 SKB 估算在 SFR 封閉時各個處置窖規劃處置之廢棄物存量如表 3.2.1-1 所列。核種存量亦包含不確定性對預估之影響，如表 3.2.1-2。不確定因素包括測量的不確定性、相關因素的不確定性和計算方法的不確定性，但廢棄物的不確定性並未包含於其中。

#### (2) 盛裝容器簡介

瑞典 SFR 處置設施規劃採用之盛裝容器如圖 3.2.1-1 所示，包含標準貨櫃、鋼模組、四倍鋼模組、鋼桶與托盤、混凝土箱與混凝土模組，分述如下：

##### 1. 標準貨櫃(ISO container)

標準貨櫃用於盛裝運轉或除役的低放射性固體廢棄物。貨櫃為碳鋼製品，尺寸分別為「20 英尺全高或半高貨櫃」、「10 英尺全高或半高貨櫃」。一個 20 英尺全高貨櫃尺寸為 6.1 m × 2.5 m × 2.6 m。

##### 2. 鋼模組(Steel mould)

鋼模組主要用盛裝水泥固化廢棄物、瀝青固化廢棄物或利用混凝土固化之金屬廢棄物等。鋼模組材質為碳鋼，外部尺寸是 1.2 m × 1.2 m × 1.2 m。

##### 3. 四倍鋼模組(Tetra mould)

四倍鋼模組存放的廢棄物主要為混凝土、鋼材與砂，廢棄物裝填入容器後將灌滿混凝土。四倍鋼模組，外部尺寸是 2.4 m × 2.4 m × 1.2 m，是鋼模組的四倍大。

表 3.2.1-1 2075 年之最佳的放射性核種存量估計值[Bq](SKB, 2014)

Nuclide	1BMA	2BMA	1BTF	2BTF	Silo	1BLA	2-5BLA	BRT	Total
H-3	8.09E+08	3.31E+12	6.82E+07	1.07E+08	8.97E+09	2.00E+08	1.94E+11		3.52E+12
Be-10	2.21E+05	2.19E+04	1.37E+04	2.48E+04	9.89E+05	6.53E+02	1.26E+03		1.27E+06
C-14 org*	1.47E+11	3.96E+09	9.84E+09	6.07E+09	7.56E+11	7.91E+07	2.25E+08		9.23E+11
C-14 oorg*	1.90E+12	1.44E+10	1.89E+11	2.69E+11	2.72E+12	4.03E+09	9.27E+08		5.10E+12
C-14 ind*		5.09E+09					1.19E+09	1.02E+10	1.65E+10
Cl-36	3.34E+08	2.02E+08	1.44E+07	1.66E+07	8.94E+08	2.17E+07	4.60E+07	7.21E+06	1.54E+09
Ca-41		1.56E+10					3.91E+09		1.95E+10
Fe-55	5.35E+10	1.05E+11	8.33E+07	1.14E+08	2.73E+12	8.78E+06	4.45E+08	1.49E+10	2.91E+12
Co-60	4.08E+11	1.99E+12	1.67E+10	2.36E+10	1.29E+13	1.03E+09	2.59E+10	1.93E+11	1.55E+13
Ni-59	2.10E+12	9.50E+11	3.31E+10	3.83E+10	6.85E+12	3.99E+09	1.15E+10	1.60E+11	1.01E+13
Ni-63	1.47E+14	9.23E+13	2.04E+12	2.27E+12	5.48E+14	3.04E+11	1.12E+12	1.44E+13	8.07E+14
Se-79	2.10E+08	7.29E+06	1.57E+07	1.54E+07	1.05E+09	4.00E+05	5.94E+06		1.31E+09
Sr-90	5.49E+11	3.60E+11	3.48E+10	5.76E+10	3.61E+12	7.42E+08	2.40E+10	2.32E+10	4.66E+12
Zr-93	3.68E+08	1.06E+09	2.29E+07	4.14E+07	4.48E+09	1.09E+06	2.95E+07	1.84E+08	6.19E+09
Nb-93m	1.73E+10	1.31E+13	1.44E+09	2.35E+09	9.33E+12	7.68E+07	1.34E+11	1.06E+12	2.36E+13
Nb-94	3.67E+09	9.12E+10	2.53E+08	4.13E+08	8.67E+10	3.14E+07	9.81E+08	7.94E+09	1.91E+11
Mo-93	7.89E+08	4.24E+09	1.13E+08	1.33E+08	9.48E+09	3.80E+07	5.39E+07	3.00E+09	1.78E+10
Tc-99	6.22E+09	1.42E+09	2.30E+09	5.45E+08	5.00E+10	1.85E+09	4.98E+08	4.49E+08	6.32E+10
Pd-107	5.25E+07	2.55E+09	3.92E+06	3.86E+06	2.75E+08	1.00E+05	1.72E+06		2.89E+09
Ag-108m	1.95E+10	4.06E+10	1.51E+09	2.21E+09	2.30E+11	1.94E+08	1.53E+09	1.62E+09	2.97E+11
Cd-113m	7.98E+08	9.32E+07	7.67E+07	6.34E+07	9.58E+09	1.96E+06	6.13E+06		1.06E+10
In-115		3.13E+05							3.13E+05
Sn-126	2.62E+07	1.75E+07	1.96E+06	1.93E+06	2.05E+08	5.00E+04	7.93E+06	7.53E+05	2.62E+08
Sb-125	4.37E+07	2.62E+08	7.47E+06	1.04E+07	1.32E+11	4.74E+05	4.46E+06	1.34E+07	1.32E+11
I-129	1.46E+08	7.67E+06	2.27E+07	1.02E+07	9.84E+08	4.35E+05	1.94E+06		1.17E+09
Cs-134	1.45E+08	2.26E+08	7.10E+04	8.86E+04	2.20E+11	1.58E+04	1.39E+06		2.20E+11
Cs-135	8.41E+08	5.33E+07	1.03E+08	1.85E+07	4.47E+09	3.07E+06	1.75E+08		5.67E+09
Cs-137	8.15E+12	8.95E+11	7.12E+11	6.22E+11	5.97E+13	1.84E+10	4.95E+11		7.05E+13
Ba-133	4.89E+07	1.43E+08	4.03E+06	6.19E+06	6.16E+08	2.20E+05	1.26E+07		8.31E+08
Pm-147	3.71E+08	4.06E+08	3.84E+06	4.57E+06	3.59E+11	3.02E+05	1.19E+06	1.37E+06	3.60E+11
Sm-151	8.26E+10	3.55E+10	6.51E+09	6.13E+09	4.63E+11	1.68E+08	5.88E+09	3.42E+08	6.00E+11
Eu-152	9.47E+07	1.33E+11	6.19E+07	6.54E+06	8.64E+08	1.02E+08	1.73E+10	5.41E+05	1.52E+11
Eu-154	2.33E+10	6.83E+09	1.98E+09	1.80E+09	5.24E+11	4.01E+07	2.67E+08	9.27E+07	5.59E+11
Eu-155	1.02E+09	3.74E+08	4.96E+07	5.83E+07	9.96E+10	1.54E+06	1.16E+07	2.40E+06	1.01E+11
Ho-166m	1.41E+09	5.22E+08	8.79E+07	1.59E+08	6.83E+09	4.18E+06	9.03E+07	7.99E+03	9.10E+09
U-232	8.85E+04	1.46E+05	1.62E+04	6.73E+03	6.20E+05	2.34E+03	9.35E+03	6.86E+03	8.96E+05
U-234	6.66E+06	3.04E+06	9.86E+05	4.55E+05	3.58E+07	1.33E+05	4.38E+05		4.75E+07
U-235	3.00E+06	7.82E+04	1.84E+07	1.12E+05	1.42E+07	2.98E+08	3.23E+08	1.49E+01	6.57E+08
U-236	2.64E+06	6.00E+06	4.02E+05	3.55E+05	1.58E+07	3.99E+04	2.06E+05	3.92E+05	2.59E+07
U-238	5.95E+06	1.23E+06	8.55E+05	8.75E+05	3.28E+07	7.33E+08	1.77E+08		9.52E+08
Np-237	2.73E+07	7.68E+06	1.07E+06	1.98E+06	5.36E+08	6.75E+04	2.61E+05	4.70E+05	5.75E+08
Pu-238	7.52E+09	4.42E+10	2.09E+09	4.56E+08	7.29E+10	3.47E+08	1.52E+09	2.72E+09	1.32E+11
Pu-239	2.77E+09	6.78E+09	4.68E+08	1.89E+08	1.70E+10	6.60E+07	2.77E+08	4.16E+08	2.80E+10
Pu-240	3.87E+09	9.21E+09	5.20E+08	2.65E+08	2.39E+10	6.74E+07	2.95E+08	5.92E+08	3.87E+10
Pu-241	2.40E+10	1.66E+11	7.30E+09	2.42E+09	3.07E+11	1.29E+09	5.74E+09	9.05E+09	5.23E+11
Pu-242	2.00E+07	5.02E+07	2.96E+06	1.37E+06	1.23E+08	3.99E+05	1.71E+06	3.11E+06	2.03E+08
Am-241	2.91E+10	4.12E+10	6.14E+09	1.83E+09	2.32E+13	5.23E+08	1.94E+09	1.99E+09	2.32E+13
Am-242m	4.46E+07	1.83E+08	7.34E+06	3.21E+06	3.22E+08	1.02E+06	4.84E+06	1.32E+07	5.79E+08
Am-243	2.02E+08	6.62E+08	3.25E+07	1.78E+07	1.60E+09	4.00E+06	1.86E+07	4.14E+07	2.57E+09
Cm-243	1.85E+07	1.03E+08	3.82E+06	4.15E+05	1.89E+08	7.58E+05	3.40E+06	6.38E+06	3.25E+08
Cm-244	6.73E+08	1.07E+10	2.68E+08	2.84E+07	9.26E+09	5.39E+07	2.80E+08	6.76E+08	2.19E+10
Cm-245	1.99E+06	1.01E+07	2.95E+05	1.36E+05	1.49E+07	3.97E+04	2.18E+05	6.83E+05	2.84E+07
Cm-246	5.27E+05	3.34E+06	7.82E+04	3.60E+04	4.29E+06	1.05E+04	6.61E+04	2.24E+05	8.58E+06
Total	1.60E+14	1.14E+14	3.06E+12	3.30E+12	6.72E+14	3.38E+11	2.05E+12	1.59E+13	9.71E+14

\* C-14 has been divided into organic, inorganic and induced activity.

表 3.2.1-2 經不確定性分析後之 2075 年放射性核種存量估計值 [Bq] (SKB, 2014)

Nuclide	1BMA	2BMA	1BTF	2BTF	Silo	1BLA	2-5BLA	BRT	Total	Ratio**
H-3	4.06E+10	2.02E+13	3.41E+09	5.38E+09	4.57E+11	1.01E+10	5.43E+11		2.12E+13	6.04
Be-10	1.11E+07	9.85E+05	6.88E+05	1.24E+06	4.98E+07	3.42E+04	2.49E+04		6.38E+07	50.2
C-14 org*	1.71E+11	6.90E+09	1.15E+10	7.08E+09	8.88E+11	9.38E+07	1.21E+09		1.09E+12	1.18
C-14 oorg*	2.21E+12	2.41E+10	2.20E+11	3.13E+11	3.19E+12	4.78E+09	4.98E+09		5.97E+12	1.17
C-14 ind*		1.76E+10					6.41E+09	1.85E+10	4.26E+10	2.59
Cl-36	6.67E+08	8.00E+08	4.81E+07	4.06E+07	3.91E+09	2.88E+07	1.13E+08	1.31E+07	5.63E+09	3.66
Ca-41		6.07E+10					1.01E+10		7.08E+10	3.63
Fe-55	2.72E+11	4.65E+11	4.17E+08	5.71E+08	1.52E+13	5.05E+07	2.64E+09	2.72E+10	1.59E+13	5.48
Co-60	4.74E+11	3.74E+12	1.71E+10	2.41E+10	2.40E+13	2.01E+09	1.66E+11	3.51E+11	2.88E+13	1.85
Ni-59	6.30E+12	2.12E+12	1.03E+11	1.16E+11	2.09E+13	1.27E+10	6.62E+10	2.91E+11	2.99E+13	2.95
Ni-63	4.40E+14	2.02E+14	6.43E+12	6.88E+12	1.67E+15	9.57E+11	6.57E+12	2.62E+13	2.36E+15	2.93
Se-79	1.05E+10	3.77E+08	7.86E+08	7.71E+08	5.30E+10	2.06E+07	5.84E+07		6.55E+10	50.2
Sr-90	6.62E+11	8.65E+11	4.76E+10	1.24E+11	4.76E+12	2.88E+09	1.80E+11	4.23E+10	6.68E+12	1.43
Zr-93	1.84E+10	3.87E+09	1.15E+09	2.07E+09	1.00E+11	5.69E+07	2.09E+08	3.36E+08	1.26E+11	20.4
Nb-93m	3.46E+11	2.50E+13	2.88E+10	4.70E+10	4.00E+13	1.66E+09	8.69E+11	1.92E+12	6.81E+13	2.88
Nb-94	1.84E+10	1.80E+11	1.27E+09	2.07E+09	3.61E+11	1.95E+08	6.15E+09	1.45E+10	5.84E+11	3.05
Mo-93	3.71E+10	9.80E+09	1.84E+09	1.70E+08	7.37E+10	4.72E+08	3.87E+08	5.46E+09	9.55E+10	5.36
Tc-99	1.11E+10	5.01E+09	8.30E+09	6.44E+08	1.94E+11	6.52E+09	3.06E+09	8.19E+08	2.29E+11	3.63
Pd-107	2.10E+09	4.72E+09	1.57E+08	1.54E+08	1.07E+10	4.14E+06	1.39E+07		1.79E+10	6.19
Ag-108m	9.74E+11	1.73E+11	7.56E+10	1.11E+11	5.09E+12	9.85E+09	8.46E+09	2.96E+09	6.44E+12	21.7
Cd-113m	4.00E+10	4.15E+09	3.85E+09	3.17E+09	5.03E+11	1.04E+08	1.79E+08		5.55E+11	52.2
In-115		8.28E+05							8.28E+05	2.65
Sn-126	1.05E+09	7.45E+07	7.87E+07	7.72E+07	5.91E+09	2.07E+06	5.58E+07	1.37E+06	7.25E+09	27.7
Sb-125	4.61E+08	1.27E+09	7.47E+07	1.04E+08	1.54E+12	5.55E+06	3.03E+07	2.45E+07	1.54E+12	11.6
I-129	2.81E+08	4.50E+07	9.05E+07	1.19E+07	3.18E+09	1.33E+06	1.45E+07		3.63E+09	3.09
Cs-134	1.93E+08	3.30E+08	8.54E+04	1.06E+05	5.85E+11	4.05E+04	9.24E+06		5.86E+11	2.66
Cs-135	1.13E+09	3.22E+08	2.38E+08	2.16E+07	9.40E+09	6.01E+06	1.21E+09		1.23E+10	2.18
Cs-137	8.35E+12	4.58E+12	8.05E+11	6.31E+11	8.99E+13	3.14E+10	3.45E+12		1.08E+14	1.53
Ba-133	9.99E+07	5.30E+08	8.09E+06	1.24E+07	1.36E+09	5.90E+05	3.33E+07		2.05E+09	2.47
Pm-147	7.63E+08	8.59E+08	7.68E+06	9.14E+06	1.18E+12	9.08E+05	5.51E+06	2.49E+06	1.18E+12	3.28
Sm-151	1.66E+11	1.36E+11	1.33E+10	1.23E+10	1.03E+12	3.97E+08	1.58E+10	6.23E+08	1.38E+12	2.29
Eu-152	2.07E+08	4.78E+11	1.24E+08	1.31E+07	2.29E+09	2.22E+08	4.57E+10	9.86E+05	5.26E+11	3.47
Eu-154	4.71E+10	1.93E+10	4.04E+09	3.61E+09	1.48E+12	1.03E+08	8.01E+08	1.69E+08	1.55E+12	2.78
Eu-155	2.07E+09	9.72E+08	1.00E+08	1.17E+08	3.17E+11	4.45E+06	3.48E+07	4.37E+06	3.20E+11	3.17
Ho-166m	2.83E+09	2.11E+09	1.78E+08	3.21E+08	1.41E+10	1.04E+07	2.39E+08	1.46E+04	1.98E+10	2.17
U-232	1.92E+05	3.45E+05	3.24E+04	1.37E+04	1.54E+06	7.60E+03	3.66E+04	1.25E+04	2.18E+06	2.43
U-234	1.41E+07	9.71E+06	1.97E+06	9.25E+05	8.24E+07	4.29E+05	1.44E+06		1.11E+08	2.34
U-235	6.02E+06	2.29E+05	3.69E+07	2.23E+05	2.85E+07	7.21E+08	1.03E+09	2.71E+01	1.82E+09	2.77
U-236	5.53E+06	1.21E+07	8.05E+05	7.15E+05	4.05E+07	1.29E+05	9.61E+05	7.14E+05	6.14E+07	2.37
U-238	1.22E+07	3.91E+06	1.71E+06	1.76E+06	6.99E+07	1.55E+09	4.47E+08		2.08E+09	2.19
Np-237	5.49E+07	1.58E+07	2.13E+06	4.06E+06	1.60E+09	2.08E+05	1.06E+06	8.57E+05	1.68E+09	2.92
Pu-238	1.23E+10	9.10E+10	3.95E+09	5.95E+08	1.74E+11	1.12E+09	6.22E+09	4.95E+09	2.95E+11	2.24
Pu-239	3.79E+09	1.49E+10	8.38E+08	2.59E+08	3.42E+10	2.12E+08	1.10E+09	7.57E+08	5.60E+10	2.00
Pu-240	5.26E+09	1.97E+10	9.01E+08	3.62E+08	4.82E+10	2.15E+08	1.23E+09	1.08E+09	7.70E+10	1.99
Pu-241	5.80E+10	3.51E+11	1.46E+10	4.89E+09	7.72E+11	4.22E+09	2.36E+10	1.65E+10	1.24E+12	2.38
Pu-242	4.24E+07	1.03E+08	5.93E+06	2.78E+06	3.06E+08	1.29E+06	7.01E+06	5.66E+06	4.74E+08	2.34
Am-241	7.14E+10	1.98E+11	5.15E+10	5.94E+09	2.81E+14	6.08E+09	2.21E+10	3.62E+09	2.81E+14	12.1
Am-242m	9.55E+07	3.62E+08	1.47E+07	6.53E+06	8.23E+08	3.31E+06	2.07E+07	2.40E+07	1.35E+09	2.33
Am-243	2.74E+08	1.31E+09	5.54E+07	2.35E+07	3.09E+09	1.27E+07	8.02E+07	7.54E+07	4.93E+09	1.91
Cm-243	2.99E+07	2.12E+08	7.55E+06	7.85E+05	4.07E+08	2.46E+06	1.40E+07	1.16E+07	6.85E+08	2.11
Cm-244	1.42E+09	2.15E+10	5.19E+08	3.42E+07	2.61E+10	1.75E+08	1.26E+09	1.23E+09	5.22E+10	2.38
Cm-245	4.21E+06	2.00E+07	5.90E+05	2.76E+05	4.09E+07	1.28E+05	1.01E+06	1.24E+06	6.83E+07	2.41
Cm-246	1.12E+06	6.50E+06	1.57E+05	7.32E+04	1.22E+07	3.40E+04	3.27E+05	4.08E+05	2.08E+07	2.42
Total	4.61E+14	2.61E+14	7.85E+12	8.30E+12	2.17E+15	1.06E+12	1.20E+13	2.89E+13	2.95E+15	3.04

\* C-14 has been divided into organic, inorganic and induced activity.

\*\* Ratio to best estimate radionuclide inventory given in Table 4-6.



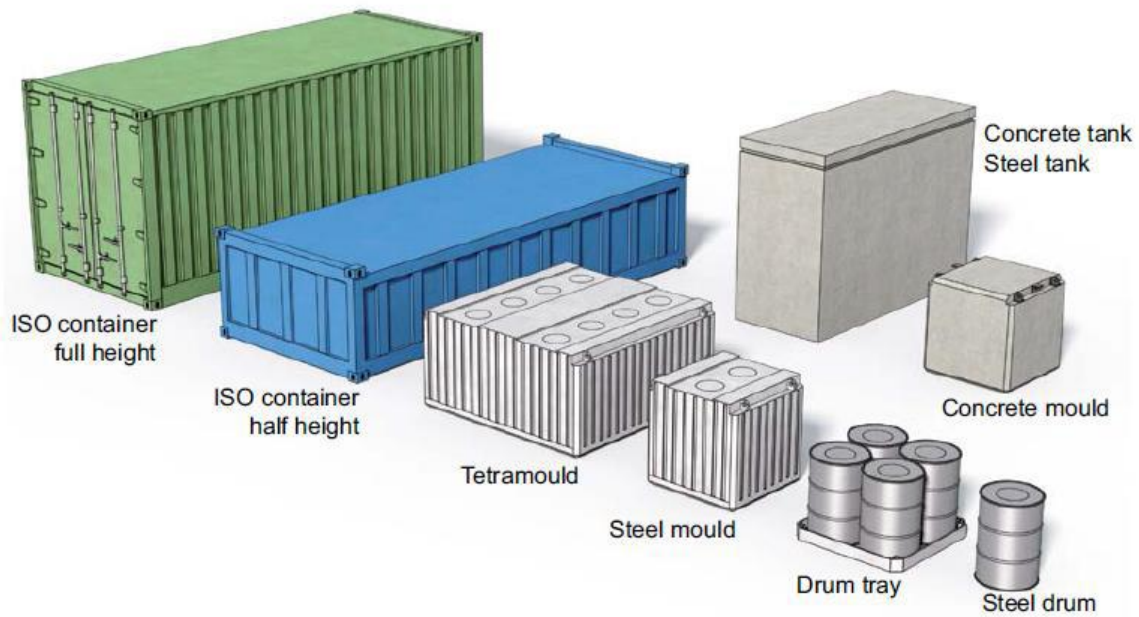


圖 3.2.1-1 SFR 處置場規畫使用之盛裝容器示意圖(SKB, 2014)

#### 4. 鋼桶與托盤(Steel drum and drum tray)

鋼桶通常置放在托盤裡，主要用於盛裝水泥固化廢棄物、瀝青固化廢棄物或焚化灰燼。此外，鋼桶亦可能放置在標準貨櫃內，為碳鋼製或不銹鋼製，鋼桶的標準尺寸是直徑 0.6 m 及高度 0.9 m。一個托盤外部尺寸為 1.2 m × 1.2 m × 0.9 m 可存放 4 個鋼桶。

#### 5. 混凝土箱(Concrete tank)

混凝土箱用於存放脫水的低階放射性離子交換樹脂、過濾助劑(filter aids)和污泥。混凝土箱是由 15 cm 厚的鋼筋混凝土製造，外部尺寸為 3.3 m × 1.3 m × 2.3m。

#### 6. 混凝土模組(Concrete mould)

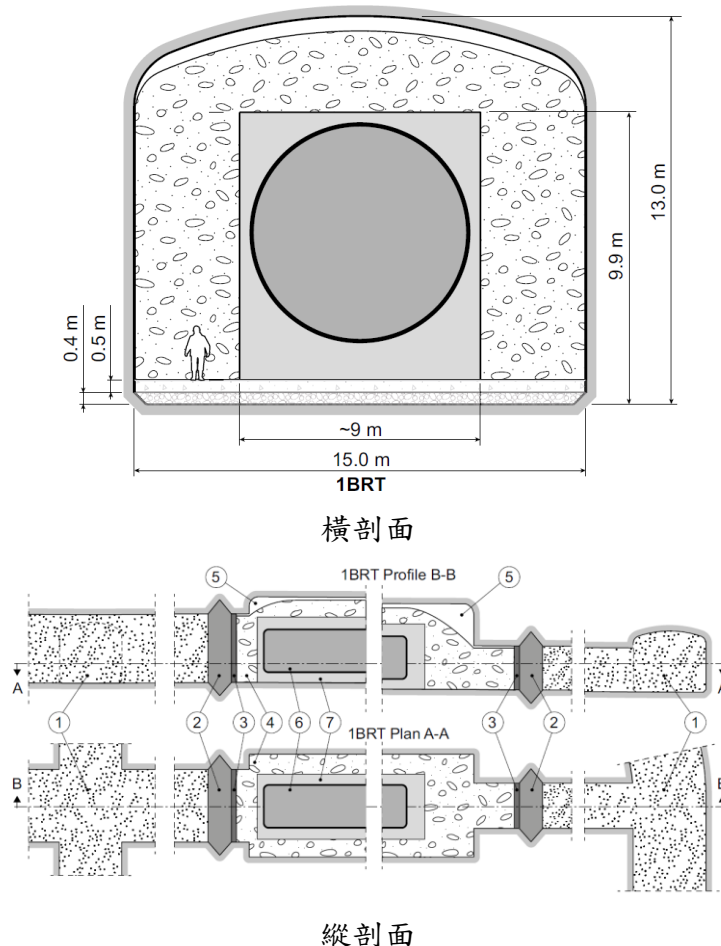
混凝土模組主要用於盛裝固化廢棄物，包括離子交換樹脂、過濾助劑與蒸發器濃縮物或混凝土固化之金屬廢棄物。混凝土模組為鋼筋混凝土製品，壁厚通常為 10 cm，但有時更厚，外部尺寸是 1.2 m × 1.2 m × 1.2m。

### 3.2.2 廢棄物分類與處置工程障壁設計關聯性分析

參考 SKB 於 2014 年彙編之長期安全評估報告(SKB, 2014a)，其廢棄物分類與處置工程障壁設計之關聯性，依工程障壁系統設計觀點可略分為：1.反應爐壓力容器處置系統、2.筒倉、3.具較佳遲滯功能之障壁系統、4.未回填之處置坑道系統。

#### (1)反應爐壓力容器處置系統：BRT 處置坑道

BRT 處置坑道主要處置沸水式反應爐壓力容器(RPV)，採用橫式置放，處置窖寬 15 m，高 13m，長度 240 m。封閉時所有 RPV 均將灌入水泥漿，藉以降低腐蝕速率。RPV 周圍與坑道間空隙將填入碎石，如圖 3.2.2-1。分析其工程障壁設計概念，主要利用 RPV 附近之混凝土提供降低活化金屬腐蝕率與吸附功能，周圍碎石可利用水力反差降低流經廢棄物之流量，惟其廢棄物型態為活化金屬，核種傳輸特性主要受金屬腐蝕率控制，故其障壁功能以抑低腐蝕速率、確保吸附功能。



- 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 3.2.2-1 BRT 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)

## (2)筒倉處置系統：筒倉

筒倉主要處置中放射性廢棄物，包含以水泥或瀝青固化之廢棄物(離子交換樹脂)、以水泥固化之金屬廢棄物。廢棄物盛裝容器為鋼模組、混凝土模組與鋼桶。為混凝土澆置之圓柱狀處置窖，高約 70m、直徑約 30m，底部基礎為 90%的砂與 10%的膨潤土混合材料，與周圍岩體間填入膨潤土提供低水力傳導係數特性，如圖 2.6.3-4。

分析其工程障壁設計概念，主要利用膨潤土形成低流量環境，混凝土模組與筒倉內之混凝土支撐牆提供吸附特性與維持環境之 pH 值。故其障壁功能為提供低流量環境、確保吸附功能與良好化學環境。

## (3)具較佳遲滯功能之障壁系統：1BMA、2BMA 與 1BTF、2BTF 處置坑道

### 1. 1BMA 與 2BMA 處置坑道

均為處置中放射性廢棄物之處置坑道，1BMA 為包含水泥或瀝青固化、或經固化之金屬組件之運轉廢棄物，2BMA 則為金屬或混凝土型式之除役廢棄物。1BMA 處置坑道之廢棄物盛裝容器主要為混凝土模組、鋼模組與鋼桶。2BMA 處置坑道之廢棄物盛裝容器主要為混凝土模組與鋼模組。1BMA 處置坑道設置鋼筋混凝土處置窖寬約 20m、高 17m、長 160m，具有 15 個隔間作為處置廢棄物使用。2BMA 之處置窖約 20m、高 16m、長 275m 具有 14 個底部為 16m 正方形之混凝土沉箱作為處置廢棄物使用。封閉時將密封處置窖並於處置窖與坑道間填入碎石，如圖 2.6.3-1 與圖 2.6.3-2。

分析其工程障壁設計概念，主要利用處置窖與坑道間碎石與處置窖之滲水特性差異形成水力反差，進而降低流經廢棄物之流量。處置窖填充水泥漿，處置窖與部分盛裝容器均為混凝土製品，可提供吸附特性與維持環境之 pH 值。故其障壁功能為提供低流量環境、確保吸附功能與良好化學環境。

### 2. 1BTF 與 2BTF 處置坑道

主要處置包含脫水樹脂、焚化後的灰燼等放射性廢棄物，1BTF 之廢棄物盛裝容器主要為鋼桶與混凝土模組，2BTF 則主要為混凝土箱。1BTF 於坑道壁設置混凝土牆，再利用混凝土模組形成隔間，置入鋼桶後以水泥漿填充空隙，密封後再於其與坑道間空隙回填砂石。2BTF 之封閉概念相似，惟其改為以堆疊混凝土箱為主，再進行水泥漿填充與碎石回填，如圖 2.6.3-3。

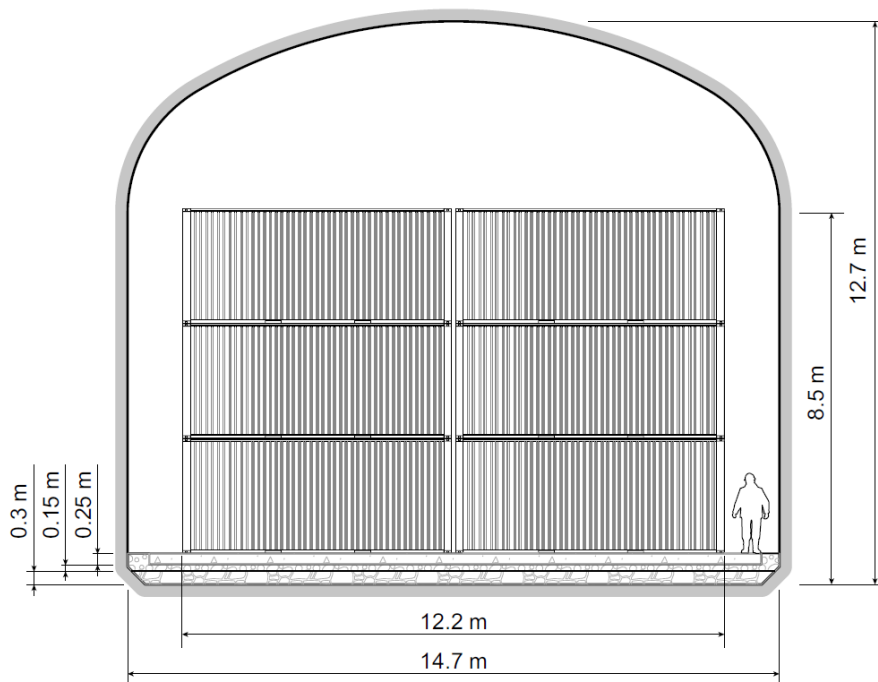
分析其工程障壁設計概念，主要利用處置窖與坑道間碎石與處置窖之滲水特性差異形成水力反差，進而降低流經廢棄物之流量。透過填充水泥漿，混凝土牆與混凝土盛裝

容器屬混凝土材料特性，可提供吸附特性與維持環境之 pH 值。故其障壁功能為提供低流量環境、確保吸附功能與良好化學環境。

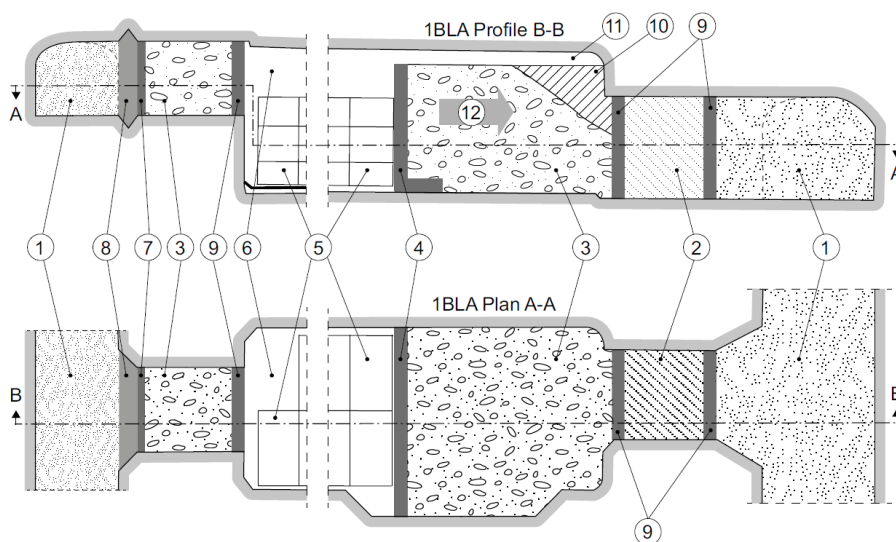
#### (4)未回填之處置坑道系統：1-5BLA 處置坑道

主要處置低放射性廢棄物，1BLA 主要為電廠運轉產生之垃圾與廢金屬，而其餘處置坑道則以除役廢棄物為主，廢棄物盛裝容器均為標準貨櫃。處置坑道窖寬 15m、高 13m、長 160m，貨櫃採兩排平行存放，堆疊高度為 3 層或 6 層(半高標準貨櫃)。封閉時並不會在標準貨櫃附近進行回填，僅於處置坑道與聯絡坑道進行封塞與回填作業，提供較佳之力學穩定性，如圖 3.2.2-2 與圖 3.2.2-3。

分析其工程障壁設計概念，其工程障壁系統並無特別之安全功能考量，雖然有混凝土底版與回填設計，2-5BLA 雖於標準貨櫃兩側設有支撐牆但僅供穩定貨櫃堆疊使用。但其並無法達到提供低流量與遲滯功能。較特別的考量是標準貨櫃周圍並無進行回填，因此控制坑道滲水入滲率與時間將成為其確保核種傳輸之考量。然在無工程障壁系統提供安全功能保證的前提下，封閉前利用噴凝土進行止水並非可靠的手段。因而，控制處置坑道內處置之核種存量，成為其重要的安全功能考量。由表 3.2.1-1 與表 3.2.1-2 亦可發現 1BLA 與 2-5BLA 處置坑道之總活度與長半化期核種活度均相對較低。



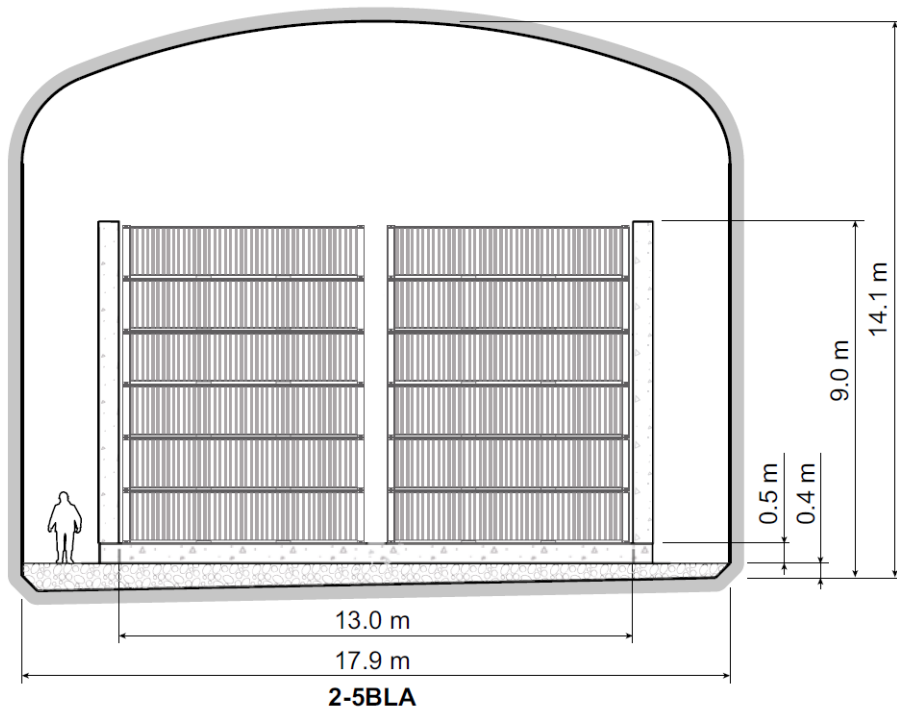
1BLA  
橫剖面



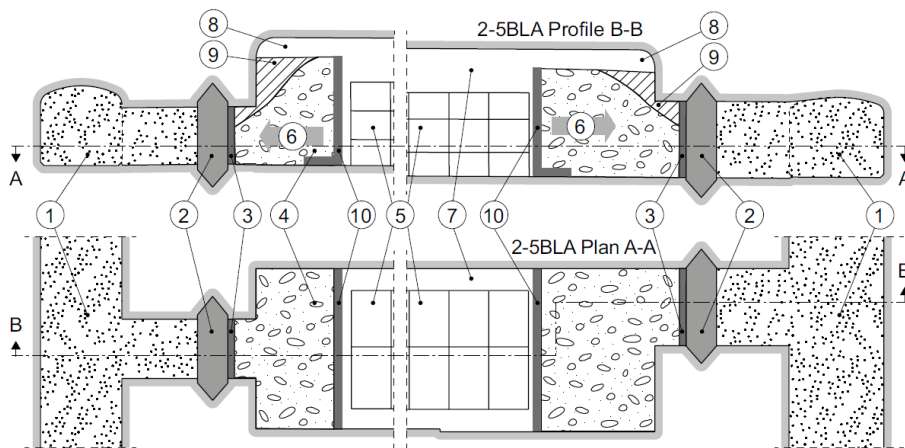
縱剖面

- 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 3.2.2-2 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 3.2.2-3 2-5BLA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)

### 3.2.3 案例探討

經前述分析可知，SFR 處置設施之工程障壁設計與廢棄物分類之關聯性，主要反應於其處置坑道規劃處置之放射性廢棄物核種存量、廢棄物盛裝容器類型，是否有設置處置窖，以及回填方式等設計，用以實現其「限制處置總活度」、「低流量」與「良好的遲滯功能」等安全功能。進一步彙整其處置坑道之廢棄物特性、盛裝容器與工程障壁設計，以及其處置坑道工程障壁系統主要安全功能，如圖 3.2.3-1、圖 3.2.3-2 與表 3.2.3-1。

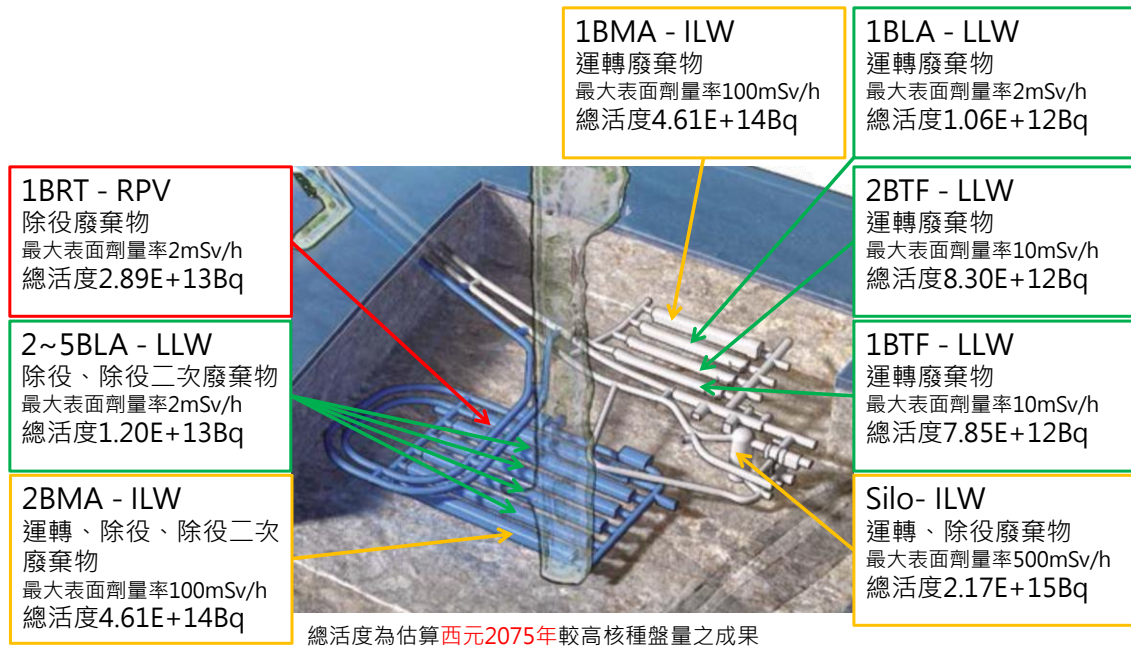


圖 3.2.3-1 瑞典案例之處置坑道廢棄物特性示意圖

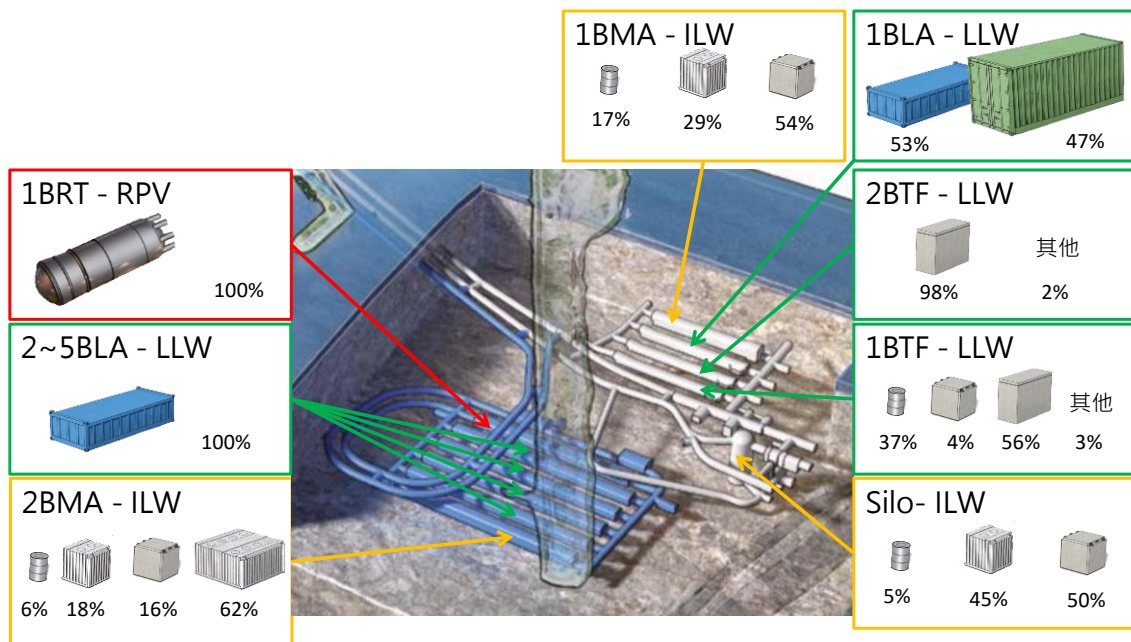


圖 3.2.3-2 瑞典案例之盛裝容器與工程障壁示意圖

表 3.2.3-1 瑞典案例之處置坑道工程障壁系統主要安全功能

	處置窖 低流量環境	遲滯功能 (吸附與有利化學環境)	腐蝕速率	限制處置 總活度
1BLA	---	---	---	低總活度與短 半化期為主
1BTF	水力反差	包件的水泥材料、混凝土類障壁	---	---
2BTF	水力反差	混凝土類障壁	---	---
2~5BLA	---	---	---	低總活度與短 半化期為主
1BMA	水力反差	包件的水泥材料、混凝土類障壁	---	---
2BMA	水力反差	包件的水泥材料、混凝土類障壁	---	---
Silo	水力傳導係數 (膨潤土)、 氣體壓力	包件的水泥材料、混凝土類障壁	---	---
1BRT	---	包件的水泥材料、混凝土類障壁	RPV	---

### 3.3 加拿大處置案例之廢棄物分類與處置概念分析

為比較坑道式處置設施其廢棄物分類與處置設計關聯性，另蒐集處置放射性廢棄物型態較多之加拿大處置設施規劃案例，分析其工程障壁設計與廢棄物分類之關聯性。

#### 3.3.1 DGR 處置設施規劃與安全特徵概述

加拿大安大略電力公司(Ontario Power Generation, OPG)與 Bruce 核能電廠所在的 Kincardine 地方政府商議在該公司之西部廢棄物管理設施(Western Waste Management Facility, WWMF)附近進行中低放射性廢棄物處置，規劃採用深地層處置(Deep Geologic Repository, DGR)，如圖 3.3.1-1 所示。處置設施位於地表下 680m 處，地質環境為古生代的穩定石灰岩與頁岩層。規劃處置電廠運轉以及反應爐維修或更新時產生的低放射性廢棄物和中放射性廢棄物，例如用過反應爐組件、純化反應爐水系統、用過樹脂與過濾器。處置場的設計容量為 200,000 m<sup>3</sup>，約為 52,232 個包件。處置設施主要包含 2 條豎井、2 條通行隧道、31 條處置坑道及服務區，如圖 3.3.1-2 所示。



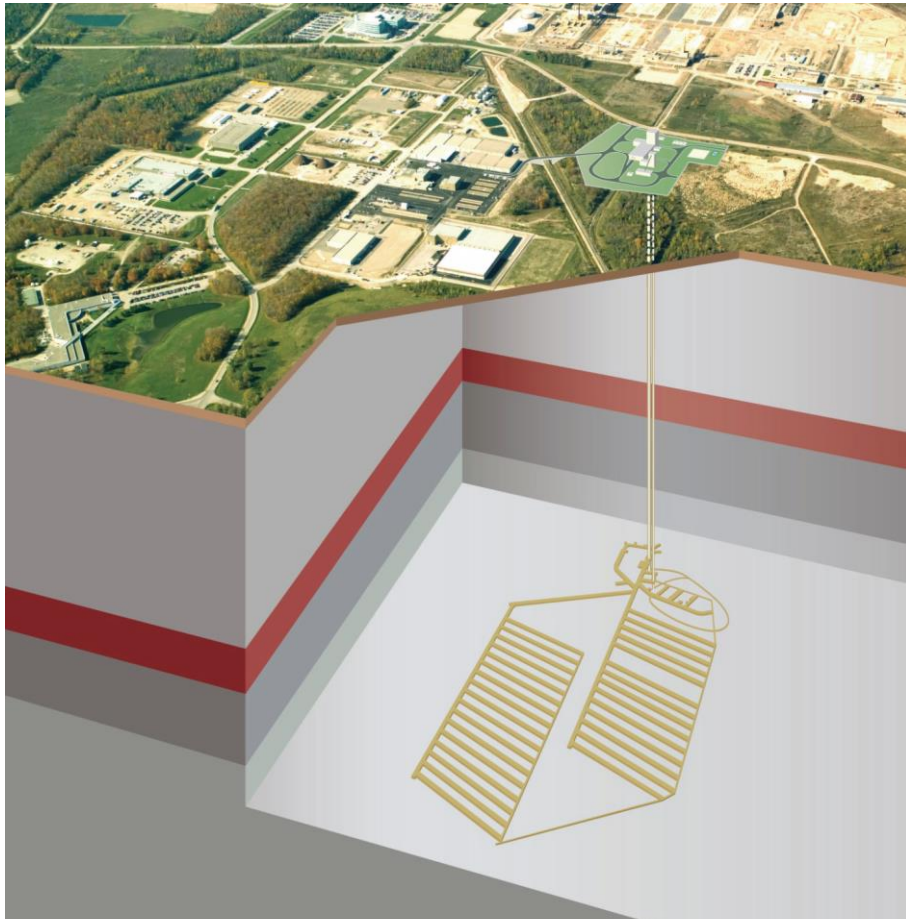


圖 3.3.1-1 DGR 處置場概念示意圖(NWMO, 2011a)

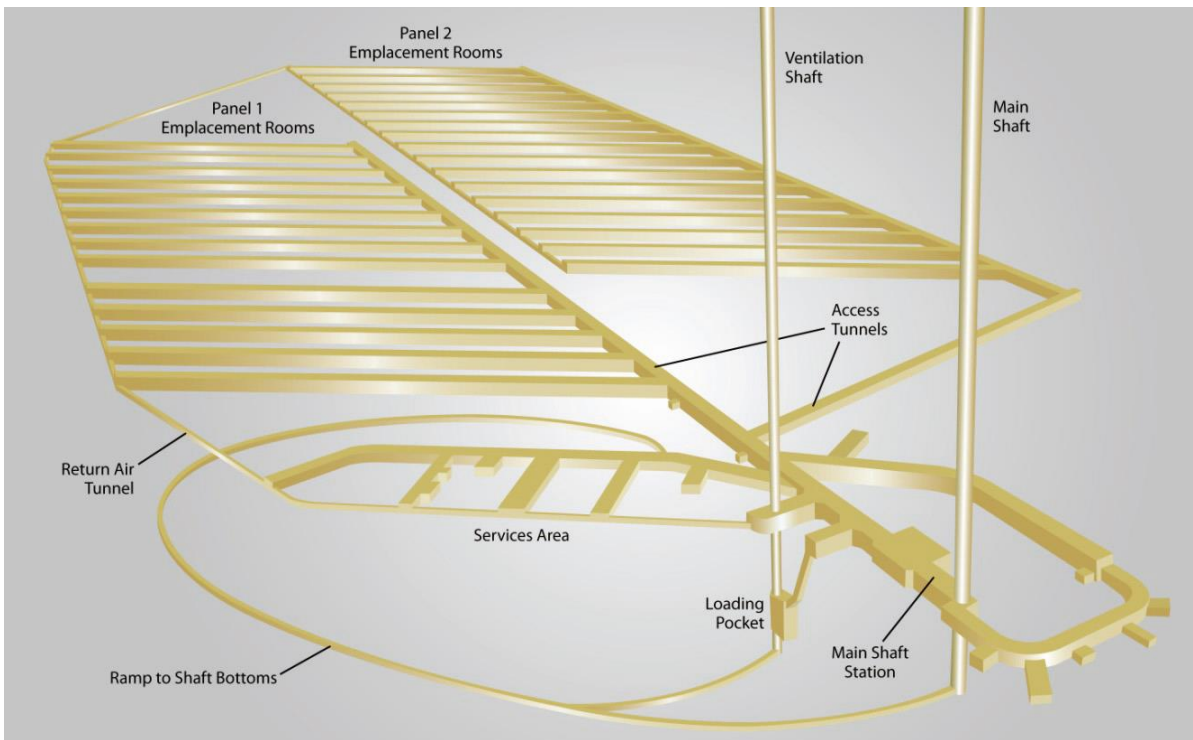


圖 3.3.1-2 DGR 處置設置規劃示意圖(NWMO, 2011a)

豎井包含主要豎井及通風豎井，主要豎井連接地表接收設施及通行隧道，廢棄物經由主要豎井運送至地下設施後，再由通行隧道運送至處置坑道貯存，通風豎井則連接地表與服務區，服務區主要作為人員工作、機具置放及維修保養等場所，故通風豎井亦須提供在服務區的工作人員所需的維生機能。通行隧道之長度分別為 500m 及 800m，各別連接至 Panel 1 及 Panel 2 處置區。每條處置坑道皆為 250m 長，處置坑道的寬度約介於 7.6m~8.6m 之間，高度則介於 5.8m~7.2m 之間。

#### (1)DGR 處置場的安全目標

DGR 處置場的安全目標為提供低放射性和中放射性廢棄物的長期安全管理，且不會對環境或人類的健康和安全造成不合理的風險。並藉由比較 DGR 的預期功能和以法規要求為基礎的功能準則，確保 DGR 處置場可達到安全目標。

此外，DGR 處置場封閉後的長期安全，可藉由處置場滿足安全功能的程度來判斷。此安全功能包括將廢棄物與生物圈隔離，以及長期圍阻廢棄物。因此，若可證明 DGR 可提供長期隔離和圍阻、符合預封閉和封閉後的安全準則、DGR 系統具穩健性、DGR 系統可以安全的建造、運轉與除役，則可說明 DGR 處置場符合整體安全目標。

#### (2)處置設施的設計準則

依據加拿大核安全管理法規的規定、聯邦或省的導則以及國際導則，針對 DGR 的設計和安全建立具體的準則，並將準則用於 DGR 的設計和確認 DGR 的安全。彙整與設計相關的準則如下：

- 1.DGR 處置場應能安全的接收和處置，電廠運轉或電廠維修更新產生的低放射性和中放射性廢棄物。
- 2.封閉的處置場(包含密封的豎井)和周圍地質圈，將被動地圍阻和隔離放射性廢棄物，以保護環境和人類的健康與安全。
- 3.設計容量為 200,000m<sup>3</sup>。
- 4.處置設施應能運轉 100 年(包括廢棄物放置、預封閉監測、除役)。
- 5.處置設施每 8 小時的運轉能力，不得少於 24 個低放射性廢棄物包件或 2 個中放射性廢棄物包件。
- 6.處置場應盡量鄰近 WWMF，以盡可能減少運輸距離。

7.處置設施應符合所有法規要求。

8.DGR 的地下設施應與深鑽孔維持至少 100m 的距離。

### (3)確保封閉後安全的處置設施安全特徵

DGR 處置場為確保封閉後的長期安全，針對廢棄物和處置設施說明其安全特徵。

#### 1.廢棄物

廢棄物裝在各種鋼製或混凝土製的盛裝容器內，盛裝容器可避免廢棄物與水接觸，若是混凝土盛裝容器，則可對污染物的遷移提供化學障壁。因盛裝容器的設計並非用來長期隔離和圍阻廢棄物，故在封閉後的安全分析中，盛裝容器不具任何障壁功能。

#### 2.處置坑道

處置場封閉時，處置坑道不回填，故處置坑道將不會成為污染物傳輸的障壁。但此空間可留予廢棄物腐蝕和降解過程中產生的氣體。

#### 3.處置坑道封閉牆

封閉牆雖可作為污染物傳輸的障壁，然而其設計目的係為保障營運安全，而非封閉後的長期安全。

#### 4.混凝土封塞體(concrete monolith)

混凝土封塞體設置於豎井的底部，用以提供豎井密封和豎井附近處置坑道的長期結構支撐，亦可限制水和氣體流進或流出 DGR 及豎井。

#### 5.膨潤土/砂混合物

膨潤土/砂以 70：30 的比例混合，作為豎井的主要密封材料。其可限制地下水及氣體流進豎井，且在 DGR 的鹽水條件下會膨脹，作為污染物遷移的持久物理及化學障壁。

#### 6.瀝青砂膠混合物(asphalt mastic mix)

瀝青砂膠混合物為次要的豎井密封材料，可做為獨立具自密封(selfsealing)、低透水性的障壁，以限制地下水和氣體的流動，以及污染物的遷移。

#### 7.混凝土擋牆(concrete bulkheads)

混凝土擋牆位於 Guelph 和 Salina A1 層，隔離膨潤土/砂與所有流體接觸，並為其上方的膨潤土/砂提供結構支撐。混凝土擋牆可限制地下水與氣體流進豎井，但非長期耐久障壁。

### 3.3.2 低放與中放廢棄物與盛裝容器特性

#### (1)廢棄物分類

DGR 的放射性廢棄物依據其來源和產生過程進行分類，各類低放與中放廢棄物的說明詳見表 3.3.2-1 與表 3.3.2-2。再依此分類評估其核種活度，並將其活度衰變至 DGR 處置封閉的時間(2026 年)，DGR 處置場接收的低放射性廢棄物總活度為 8.83E+14 Bq，中放射性廢棄物的總活度為 1.53E+16 Bq。

表 3.3.2-1 DGR 處置場的低放射性廢棄物分類(NWMO, 2011b)

廢棄物分類	說明
底灰(bottom ash)	廢棄物燃燒產生的非均質灰與渣(clinker)
濾袋灰(baghouse ash)	廢棄物燃燒產生的細緻均質灰
壓縮廢棄物(包) (Compact Bales)	一般是壓密的固體低放廢棄物；例如：壓密的空廢棄物桶、橡膠軟管、橡膠面積地墊、輕量金屬、焊條、塑料管、防火毯及防火阻燃材料、金屬罐、絕緣體、通風過濾器、空氣軟管、金屬拖把水桶、電纜、車床屑、金屬屑、玻璃、塑料組、橡膠、Vicraft 罩、橡膠手套。
壓縮廢棄物(箱) (Box Compacted)	同上
不可加工(箱) Non-Pro. (boxes)	不可壓縮或表面劑量率大於 2 mSv/h 之固體低放射性廢棄物；例如：大尺寸金屬物體(如：樑、離子交換容器、角鐵、金屬板)、混凝土及水泥塊、金屬組件(如：管材、棚架管、金屬板、馬達、法蘭盤、閥門)、電線電纜及吊索、呼吸過濾器、機床、紙、塑膠、吸濕產品、實驗室密封源、饋線管。
不可加工(桶) Non-Pro.(drums)	一般小的粒狀或固化的低放射性廢棄物；例如：地板清掃、清潔劑和吸濕劑、金屬屑、玻璃製品、燈泡、瀝青低放射性廢棄物。
不可加工(其他) Non-Pro. (other)	大的及形狀不規則的物品；例如：熱交換器、封裝磁磚孔、屏蔽封塞、以及其他雜項大型物品(如：通風櫥、手套箱、加工設備)。
LL 樹脂(LL Resin)	來自輕水輔助系統的用過離子交換樹脂。
ALW 樹脂(ALW Resin)	來自活性液體廢棄物處理系統的用過離子交換樹脂。
ALW 污泥(ALW Sludge)	來自 Bruce 活性液體廢棄物處理系統的污泥。
蒸汽產生器 (Steam Generators)	維修更新後報廢的蒸汽產生器。蒸汽產生器由鉻鎳鐵合金 600 管、碳鋼外殼、保護罩和管板等組成。

表 3.3.2-2 DGR 處置場的中放射性廢棄物分類(NWMO, 2011b)

廢棄物分類	說明
緩和劑樹脂 (Moderator resin)	來自緩和劑淨化系統的用過離子交換樹脂。
PHT 樹脂(PHT resin)	來自 PHT 淨化系統的用過離子交換樹脂。
離子交換柱(IX Columns)	來自主 Pickering PHT 淨化系統的用過離子交換樹脂，裝置於鋼容器包裝中。
其他樹脂(Misc. resin)	來自電廠輔助系統的用過離子交換樹脂。
CANDECON 樹脂 (CANDECON Resin)	來自核熱傳輸系統的化學除污過程所產生的用過離子交換樹脂。
照射爐心組件(Irradiated core components)	包括通量檢測器和液體區域控制棒。
過濾器及過濾元件 (Filters and filter elements)	來自不同電廠處理系統的過濾器及過濾元件。
更新廢棄物-壓力管 (Retube Wastes-Pressure Tubes)	來自大規模管狀廢棄物的燃料通道廢棄物。
更新廢棄物-末端接頭 (Retube Wastes-End Fittings)	來自大規模管狀廢棄物的燃料通道廢棄物。
更新廢棄物-排管(Retube Wastes-Calandria Tubes)	來自大規模管狀廢棄物的燃料通道廢棄物。
更新廢棄物-排管插件 (Retube Wastes-Calandria Tube Inserts)	來自大規模管狀廢棄物的燃料通道廢棄物。

## (2)廢棄物包件特性

廢棄物包件依據尺寸、重量和處置機具可分為 A~F 等六大類，並將其依據放射性高低，彙整成低放射性廢棄物和中放射性廢棄物，詳如表 3.3.2-3 和表 3.3.2-4 所列。在符合職業劑量要求和合理抑低的前提下，大部分廢棄物包件皆不須遠端遙控處理設備。各廢棄物包件的表面最大劑量率為 2.0 mSv/hr，而距離廢棄物包件表面 1m 處之最大劑量率為 0.1 mSv/hr。超出此劑量率限值的廢棄物包件，應外加屏蔽，使其低於劑量率限值。各類廢棄物之說明如下：

### 1.A 型-箱式廢棄物(Bin-Type Waste)

A 型廢棄物包件皆為低放射性廢棄物，其採用的盛裝容器共有 8 種，如表 3.3.2-5 所列。A 型廢棄物包件的特徵為包件尺寸小(最大尺寸：2.54m × 1.78m × 1.88m)、重量輕(<5.9t)和數量多(佔全部廢棄物的 73.4%)。不須外包裝的盛裝容器，若超過接收標準要求的劑量率限值，則仍需使用外包裝。A 型廢棄物包件大都採用軌道車或輕型堆高機進行搬運與處置。

表 3.3.2-3 低放射性廢棄物包件型式(HATCH, 2010)

Waste Category	Group	Container Type	Overpack	Container Code <sup>2</sup>
Operational Wastes	A1	Ash Bin (Old) - bottom ash (AIBO2)	Yes	BINOPK
	A1	Ash Bin (New) - bottom ash (AIBN)	Yes	BINOPK
	A1	Drum Rack - baghouse ash (DRACK)	Yes	BINOPK
	A1	Ash Bin (new) - baghouse ash (AIBN)	Yes	BINOPK
	A2	Compactor Box		B25
	A3	Bale Rack		BRACK
	A1 / A4	Drum Rack - non-processible drums	~10%	BINOPK/ DRACK
	A5	Drum Bin		DBIN
	A6	Non-Pro Bin (47" high)		NPB47
	A7	Non-Pro Bin		NPB4
	A1	Low Level Resin Box (90") (RB90)	Yes	BINOPK
	A8	Low Level Resin Pallet Tank		RTK
	A1	ALW Sludge Box (NPBSB)	Yes	BINOPK
	B1	Shield Plug Container		SPC
	B2	Heat Exchanger		HX
	F4	Encapsulated Tile Hole		ETH
Reactor Refurbishment Wastes	F1	Steam Generators - Bruce A		SGSGMT
	F2	Steam Generators - Bruce B		SGSGMT
	F3	Steam Generators - Pickering B		SGSGMT

<sup>2</sup> : Container code represents the final package to be accepted by the DGR.

表 3.3.2-4 中放射性廢棄物包件型式(HATCH, 2010)

Waste Category	Group	Container Type	Shield Used	Container Code <sup>3</sup>
Operational Wastes	C1, E1	Resin Liner	No	RL
	C2	Resin Liner in Overpack	No	RLOPK
	F5	Resin Liner Shells from Quadricells	Disposable	-
	E2, F6	Resin Liner - Shield 1	Disposable	RLSHLD1
	E3, F7	Resin Liner - Shield 2	Disposable	RLSHLD2
	E4, F8	Resin Liner - Shield 3	Disposable	RLSHLD3
	D1	IC-2 Liner	Re-useable	THLIC2
	D2	IC-18 T-H-E Liner	Re-useable	THLIC18
	C3	ILW Shield	Disposable	ILWSHLD
C4	Tile Hole Liner	No	THLSTG3	
Reactor Refurbishment Wastes	F9	Retube Waste (Pressure Tubes)	Disposable	RWC(PT)
	F10	Retube Waste (End Fittings)	Disposable	RWC(EF)

<sup>3</sup> : Container code represents the final package to be accepted by the DGR.

表 3.3.2-5 A 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

Container Type		Stack <sup>24</sup>	Dimensions <sup>24</sup>			Average Mass kg	Maximum Mass kg	Number
			L	W	H			
A1	LLW Container Overpack	3	2.54	1.78	1.88		5,865	3,141
<b>Overpacked in BINOPK:</b>								
Ash Bin (Old) - bottom ash						4,541	5,108	269
Ash Bin (New) - bottom ash						3,195	3,501	816
Drum Rack - baghouse ash						3,081	3,416	47
Ash Bin (new) - baghouse ash						3,195	3,501	134
Drum Rack - non-processible drums						3,081	3,416	296
Low Level Resin Box (90")						5,246	5,865	45
ALW Sludge Box						3,411	3,771	1,534
<b>No Overpacking Requirement:</b>								
A2	Compactor Box	5	1.84	1.12	1.30	2,722	3,281	5,298
A3	Bale Racks	5	2.29	1.22	1.20	1,600	1,963	1,491
A4	Drum Rack - non-pro drums	5	2.29	1.22	1.20	1,490	1,825	2,663
A5	Drum Bin	5	1.96	1.32	1.03	1,450	1,740	3,317
A6	Non-Pro Bin (47" high NPB47)	5	1.96	1.32	1.19	1,460	1,735	15,349
A7	Non-Pro Bin (NPB4)	4	2.29	1.22	1.47	1,066	1,248	4,978
A8	Low Level Resin Pallet Tank <sup>25</sup>	3	1.24	1.24	1.68	2,000	2,420	2,126
<b>Total</b>								<b>38,363</b>

## 2.B 型-重型非堆高機(Heavy Non-Forklift)

B 型廢棄物包件為低放射性廢棄物，共有 2 種型式，分別為屏蔽封塞盛裝容器和熱交換器，如表 3.3.2-6 所列。B 型廢棄物包件尺寸大且重量相對較重，不適合使用堆高機搬運，主要以軌道車或吊車進行搬運與處置。

屏蔽封塞盛裝容器的數量僅有 9 個，為各類廢棄物包件中數量最少的一種。其重量相當重，且無法堆疊，須利用吊車進行搬運與放置。熱交換器在處置之前，須先將噴嘴、支撐件等凸出物切開，開口處皆須用密封版焊接封閉，此程序有助於提升處置坑道內的堆疊品質。切下的碎料，則可放於低放射性廢棄物處置箱中，使劑量率低於接收標準。為了規劃目的，假設所有熱交換器的尺寸皆相同(直徑 2m、長度 4.57m)，並假設有 25% 的熱交換器會超過主豎井可載運的大小限制，故需灌漿穩固後再予切割。

表 3.3.2-6 B 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

Container Type		Dimensions			Average Mass kg	Maximum Mass kg	Number
		L	W (or dia)	H			
B1	Shield Plug Container	3.00	1.80	1.80	25,583*	28,100	9
B2	Heat Exchanger	4.57	2.00		N/A	30,000	82
<b>Total</b>							<b>91</b>

\* Mass of loaded container complete with shielding.

### 3.C 型-輕型中放射性廢棄物(Light ILW)

C 型廢棄物包件為中放射性廢棄物，共有 4 種型式，如表 3.3.2-7 所列。C 型廢棄物包件的尺寸和搬運方式與 A 型廢棄物包件相似，但數量比 A 型廢棄物包件少。C 型廢棄物包件內不含新鮮樹脂襯套(fresh Resin Liners)。磁磚孔襯套(Tile Hole Liners)的重量假設含灌漿的重量，每個置放架(Rack)可放 2 個磁磚孔襯套。

無屏蔽樹脂襯套(C1、C2)為裝有用過離子交換樹脂的碳鋼容器、不鏽鋼容器或是內層碳鋼的不鏽鋼容器。這些樹脂為中放射性廢棄物，需要屏蔽以確保處理時的安全。搬運時可利用移動式吊車將原本貯存於地面下的襯套取出，並放在托架上，再以輕型堆高機將其移動至平板拖車上，運送至 DGR。

磁磚孔襯套(C3)為長度 3m、直徑 0.61m 的鋼管，取出時，襯套需灌漿，以使內容物穩定，並提供屏蔽。灌漿後的襯套重量接近 2 ton。每個可堆疊的置放架可放置 2 個襯套，並成為一個可處置的包件。

中放射性廢棄物屏蔽(C4)用於放置原本貯存在地面下 T-H-E 襯套的廢棄材料，屏蔽箱的直徑 1m、高度 1.7m、重量 2.29 ton。中放射性廢棄物屏蔽具有完整的堆高機插口，可使用輕型堆高機進行堆放。

表 3.3.2-7 C 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

Container Type		Dimensions			Average Mass kg	Maximum Mass kg	Number
		L	W (or dia)	H			
C1	Resin Liners (Unshielded, no overpack) Pre In-Service Date	1.915	1.915	2.15		5,215	288
C2	Portion of 400 (Unshielded, overpacked) Pre In-Service Date	1.915	1.915	2.22		6,670	92
C3	Tile Hole Liners in Rack	3.453	1.520	0.80	4,565	4,965	101 <sup>[26]</sup>
C4	ILW Shield	1.700	1.000		2,290	2,519	7,383
<b>Total</b>							<b>8,176</b>

### 4.D 型-磁磚孔等效襯套(Tile Hole Equivalent (T-H-E) Liners)

D 型廢棄物包件為中放射性廢棄物，共有 2 種型式，如表 3.3.2-8 所列。D 型廢棄物包件為內含灌漿固定的細長管，劑量率較高。襯套重量包括低密度的灌漿和 27,146 kg 的傳送容器(Transfer Bell)。襯套需先灌漿填充內部空隙使其穩定，灌漿用的材料為特別開發的低密度灌漿材料，灌漿不僅可以穩定內容物，亦可提供部分屏蔽作用。由於襯套的活度較高，運送時需有屏蔽，故須裝在傳送容器(Transfer Bell)內。D 型廢棄物包件的搬運和放置，須利用特製的 T-H-E 處理器和水平放置機器。



表 3.3.2-8 D 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

Waste Type		Dimensions		Grout Mass kg	Average Mass kg	Maximum Mass kg	Number
		H	W (or dia)				
D1	IC-2 Liner	7.6	0.61	706	32,352	32,702	20
D2	IC-18 T-H-E Liner	10.7	0.55	907	31,653	31,873	444
-	T-H-E Transfer Bell	11.8	0.89	-	-	27,146	-
Total							464

#### 5.E 型-新鮮樹脂襯套(Fresh Resin Liners)

E 型廢棄物包件為中放射性廢棄物，共有 5 種型式，如表 3.3.2-9 所列。E 型廢棄物包件皆為電廠產生的樹脂襯套，並假設其直接由電廠送至 DGR 的廢棄物包件接收大樓(WPRB)。部分新鮮樹脂襯套(E2、E3、E4)需要屏蔽，其他(E1、E5)則不需要。E2 採用的屏蔽 1 為厚度 250mm 的混凝土，E3 採用的屏蔽 2 為厚度 350mm 的混凝土，每個屏蔽內有 2 個樹脂襯套，並將每個屏蔽視為一個廢棄物包件運送到處置區。E4 採用的屏蔽 3 為厚度 350mm 混凝土+厚度 40mm 鋼內襯，每個屏蔽內有 1 個樹脂襯套。E5 即使放在屏蔽 3 內，仍會超過接收標準的劑量率限值，故需先將其長時間放在貯存區等待活度衰變，再放入屏蔽 3 內運送至 DGR，亦或是直接將其放在屏蔽 3 內，並在保健物理學家的監督下，以特殊程序運送。

表 3.3.2-9 E 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

Container Type		Dimensions			Maximum Mass kg	Number
		L	W (or dia)	H		
E1	Resin Liners, No shield required, Post In-Service Date	1.915	1.915	2.15	5,215	212
E2	Resin Liners Shield 1, Post In-Service Date		2.20	4.25	26,850 – 28,650	86 Liners 43 Shields
E3	Resin Liners Shield 2, Post In-Service Date		2.40	4.45	36,150	227 Liners 114 Shields
E4	Resin Liners Shield 3, Post In-Service Date		2.53	2.74	28,965	476
E5	Resin Liners, Delay Transfer for Decay, Post In-Service Date		2.53	2.74	28,965	62
Total						1063

#### 6.F 型-重型可使用堆高機(Heavy Forkliftable)

F 型廢棄物包件包含低放射性廢棄物和中放射性廢棄物，共有 10 種型式，如表 3.3.2-10 所列。蒸氣反應爐切段(F1、F2、F3)係將蒸氣反應爐切割成較小且可直接運送到 DFR 處置的包件。蒸氣反應爐將先填充低密度灌漿，以穩固內部，再用鑽石線鋸切

割成數段。每個切段的切口將用 65mm 密封鋼板焊接密封，密封鋼板除可提供屏蔽作用外，其平坦的表面亦有利於處置坑道內的堆疊。

封裝磁磚孔(Encapsulated Tile Holes)(F4)為低放射性廢棄物，高 4.6m、直徑 1.5m、重量 25 ton。假設封裝磁磚孔包件包含了封裝充滿廢棄物磁磚孔的圓柱鋼管(厚度 9.5mm)。磁磚孔的內容物已經灌漿穩固，鋼管和磁磚孔間的環狀空間亦予以灌漿，鋼管底部再以混凝土密封。

樹脂襯套屏蔽(F5、F6、F7、F8)係樹脂襯套與其外加屏蔽，主要是為了安全處理大部分的樹脂襯套及保護工作人員。由於樹脂襯套有不同的劑量率，需搭配不同的屏蔽設計。

管線更換廢棄物盛裝容器(F9、F10)與反應更新過程有關。目前 Bruce A 反應爐更新產生的管線更換廢棄物，其使用的盛裝容器有 2 種，一種用於體積小的組件(壓力管、重水式反應爐壓力槽管、重水式反應爐壓力槽管插件)，另一種容器略窄且長，用於未切割的端部組件。管線更換廢棄物盛裝容器由鋼-混凝土-鋼組成，廢棄物包件可堆疊，最大重量為 35 ton。

表 3.3.2-10 F 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

Container Type		Dimensions			Mass	Maximum Mass	Number
		L	W (or dia)	H	kg	kg	
F1	Steam Generator Segments Bruce A	2.37 - 4.12	2.40 - 2.60		35,044	35,000	128
F2	Steam Generator Segments Bruce B <sup>26</sup>	2.27 - 2.99	2.50 - 3.60		34,966	35,000	192
F3	Steam Generator Segments Pickering	3.17 - 4.46	1.80 - 2.50		27,435	35,000	192
F4	Encapsulated Tile Hole	4.6	1.5		25,000	27,500	66
F5	Resin Liner Shell from Quadricells in Pallet	2.62	2.62	5.01	28,650 <sup>[29,30]</sup>	35,000	120 Liners 60 Shells
F6	Resin Liner Shield 1, Pre In-Service Date	4.25	2.2			29,760	198 Liners 99 Shields
F7	Resin Liner Shield 2, Pre In-Service Date	4.45	2.4			36,150	700 Liners 350 Shields
F8	Resin Liner Shield 3, Pre In-Service Date	2.74	2.53			30,420	252 Liners 252 Shields
F9	Retube Waste (Pressure Tubes)	1.85	1.85	2.25	29,100	35,000	458
F10	Retube Waste (End Fittings)	1.7	3.35	1.92	33,500	35,000	918
Total							4,075

### 3.3.3 處置坑道設計

處置坑道設計時，除需滿足 3.31 節所列準則外，亦需考量設計限制，並針對設計限制提出設計時的因應措施，詳見表 3.3.3-1。依據此設計限制，共設計出六種尺寸的坑道斷面，彙整如表 3.3.3-2。由於處置坑道不回填，坑道內亦未設置其他工程障壁，故處置坑道的設計以確保運轉階段的安全為主，封閉後的安全則仰賴豎井的密封以及地質圈的隔離與遲滯。

表 3.3.3-1 坑道設計限制與因應措施(HATCH, 2010)

限制	設計的因應措施
為了便於設計和確保地面穩定性，開挖斷面形狀需標準化。	設計了 6 種坑道斷面，每一條坑道僅採用一種斷面。
處置坑道數量 31 條，分成三個階段放置廢棄物包件。	處置空間可彈性運用，某些廢棄物包件可以處置在不同的坑道斷面內。
DGR 須能容納來自電廠和貯存場的廢棄物包件。	每個處置階段的處置坑道，足以容納該階段運來的廢棄物包件與數量。
處置坑道的斷面設計應具有穩定性，以及可容納開挖所需設備。	處置坑道的寬度等於或小於 8.6m。
地下設施的配置和場址所佔空間有限。	處置坑道的長度均一，皆為 250m。
廢棄物包件搬運和放置設備的操作和堆疊能力。	處置坑道具有足夠的寬度和高度，可讓所有的設備在坑道內操作。根據 WWMF 的經驗，包件到牆壁之間須留 30cm 的間距，包件與包件之間須留 5cm 的間距。
廢棄物包件的堆疊能力和最大堆疊高度。	處置坑道具有足夠的高度，可使 A 型廢棄物包件堆疊至其設計限制。
滿足包件放置要求，例如需要安裝門式吊車或混凝土置放陣列。	處置 B 型和 D 型廢棄物包件的處置坑道，配有門式吊車。
開挖和興建成本最小化。	坑道斷面形狀依據廢棄物包件形狀而設計，以使包件放置數量最大化。另外，需要用到軌道的處置坑道，盡可能接近主豎井和服務區，以使軌道安裝數量最小化。
包件尺寸和數量預估的不確定性。	保留 2 條處置坑道作為備用坑道，以因應容量的增加。
必須提供通風。	配合處置坑道的操作和堆疊淨空區，設計通風管線的形狀和位置。

表 3.3.3-2 處置坑道斷面尺寸(HATCH, 2010)

坑道類型	廢棄物分類	廢棄物包件	坑道數量	坑道寬	坑道高	軌道/門式吊車	通風管道
P1	低放射性廢棄物	A 型	17 條	8.6 m	7 m	No	1 個 (圓形)
P2	低放射性廢棄物	F 型	1 條	8.6 m	6.35 m	No	2 個 (圓形)
	中放射性廢棄物	C 型、E 型、F 型					
P3	中放射性廢棄物	C 型、E 型、F 型	5 條	8.4 m	5.8 m	No	2 個 (圓形)
P4	中放射性廢棄物	C 型、F 型	3 條	7.8 m	6.5 m	No	2 個 (圓形)
P5	低放射性廢棄物	F 型	2 條	8.4 m	6.2 m	No	2 個 (圓形)
P6	低放射性廢棄物	B 型	3 條	8.1 m	7.2 m	Yes	2 個 (方形)
	中放射性廢棄物	D 型					

DGR 的處置坑道分為 panel 1 和 panel 2 兩個處置區，共有 31 條處置坑道，各坑道的編號、位置和坑道斷面型式如圖 3.3.3-1 和圖 3.3.3-2 所示。其中，為了確保廢棄物包件的數量或尺寸變更時，仍有空間可處置廢棄物，保留 panel 1 處置區的 1 號處置坑道和 panel 2 處置區的 1 號處置坑道，作為備用處置坑道。此外，為了配合不同廢棄物包件型式的運送規劃，安排處置坑道放置廢棄物包件的位置與順序。panel 2 處置區的所有處置坑道，皆用來放置處置場開始運轉後第 1 年~第 5 年接收的廢棄物包件。panel 1 處置區的 1 號~3 號處置坑道，用來放置處置場開始運轉後第 3 年~第 35 年接收的 B 型和 D 型廢棄物包件。panel 1 處置區的 6 號~14 號處置坑道，用來放置處置場開始運轉後第 6 年~第 20 年接收的廢棄物包件。panel 1 處置區的 4 號~5 號處置坑道，用來放置處置場開始運轉後第 21 年~第 35 年接收的 A 型和 F 型廢棄物包件。

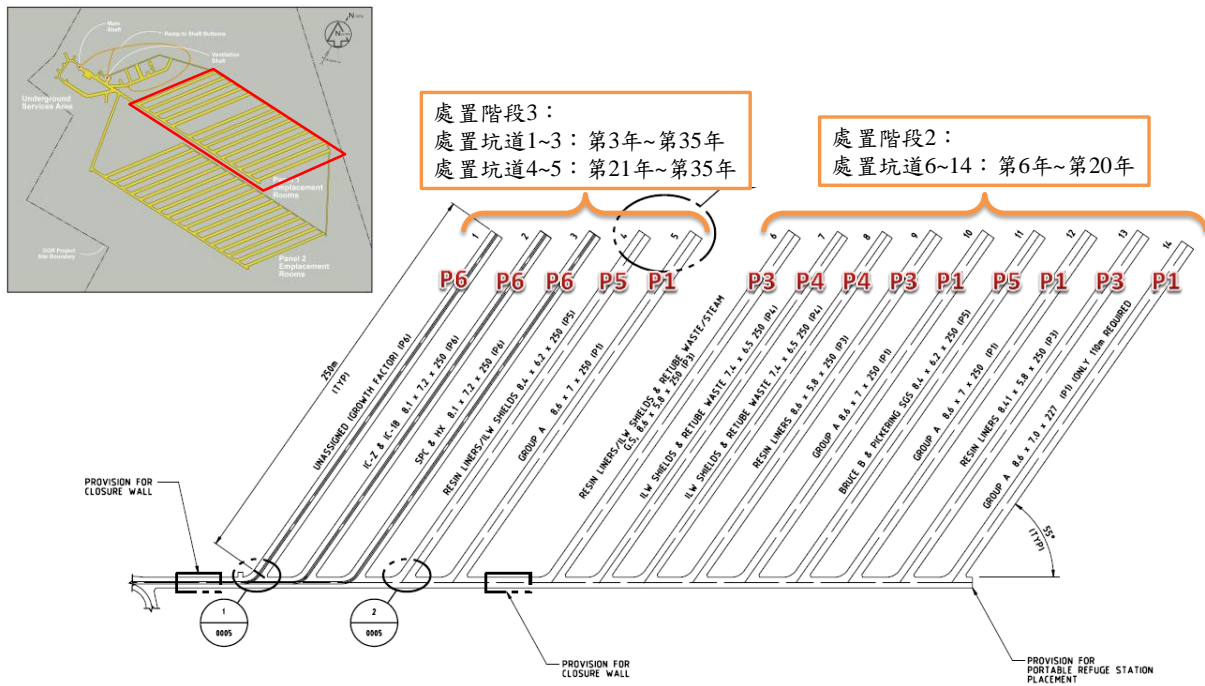


圖 3.3.3-1 panel 1 處置區的處置坑道規劃(HATCH, 2010)

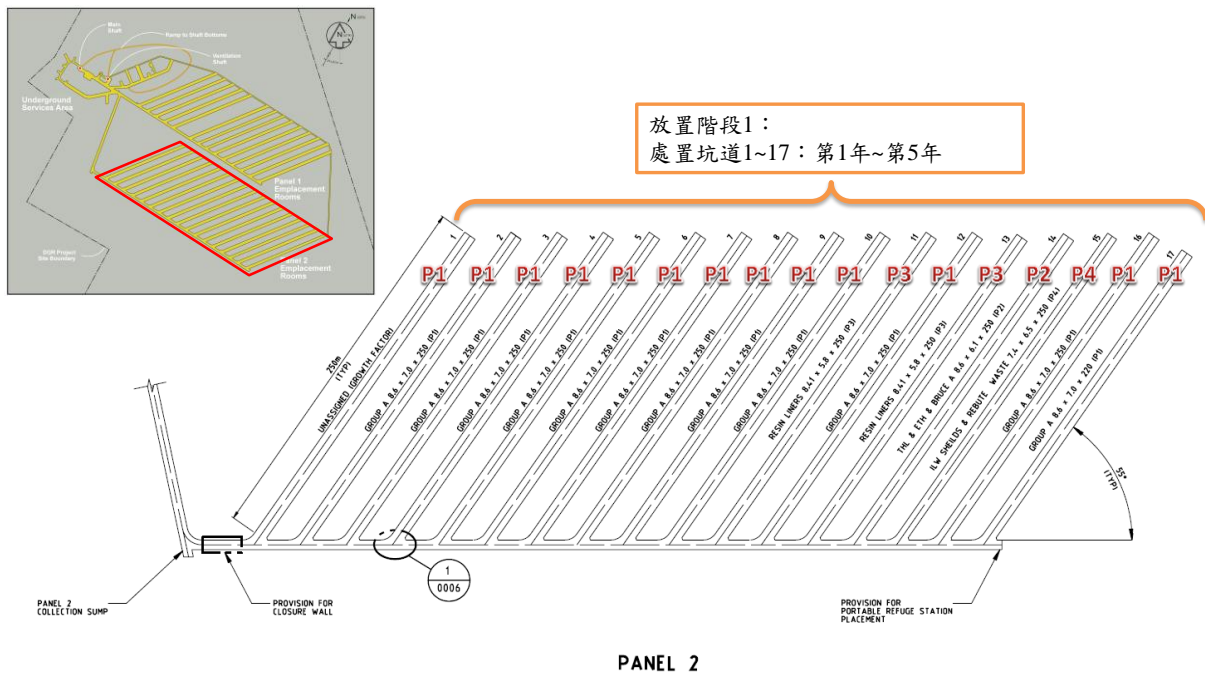


圖 3.3.3-2 panel 2 處置區的處置坑道規劃(HATCH, 2010)

不同類型的坑道斷面，可容納的廢棄物包件亦不同。為有效堆疊廢棄物包件，又要滿足運轉期間的操作需求和確保工作人員安全，概列廢棄物包件配置原則，包括：

- (1)廢棄物包件的堆疊方式，主要受限於包件構造和處置坑道的淨空要求，以低者為主。
- (2)處置 A 型廢棄物包件的處置坑道，不可放置其他廢棄物包件。

- (3)熱交換器(B2)、封裝磁磚孔(F4)、蒸氣反應爐切段(F1、F2、F3)、屏蔽封塞盛裝容器(B1)等廢棄物包件可混合放在同一個處置坑道內。
- (4)可藉混合排放較低和較高劑量率的同類型廢棄物包件，以管理處置坑道內的整體劑量率。
- (5)處置坑道容量已考量容量增加因子，確保有足夠的空間可處置所有體積的廢棄物包件。
- (6)處置 IC-2 Liners(D1)和 IC-18 T-H-E(D2)的處置坑道內，由於處置機具特殊，坑道口至少需留有 48m 的操作空間。
- (7)為使工作人員的劑量率降至最低，將從與主豎井相隔最遠的處置坑道開始堆置，以減少工作人員開車經過含有廢棄物包件處置坑道的時間。

以下將分別說明各坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式。

- (1)P1 坑道斷面：P1 坑道斷面僅放置 A 型廢棄物包件，皆為低放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-3 所示。由於 A 型廢棄物包件數量最多，故 P1 坑道斷面的處置坑道數量亦最多。另外，此類型坑道因採用 1 個圓形通風管道的設計，故部分 A 型廢棄物包件堆疊時，最上層角落的位置無法堆置包件。
- (2)P2 坑道斷面：P2 坑道斷面放置 C 型、E 型和 F 型廢棄物包件，內含低放射性和中放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-4 所示。處置場開始運轉後第 1 年~第 5 年，需要一條 P2 坑道斷面的處置坑道，以放置高度最高的廢棄物包件。此類型坑道為保留較高的空間放置廢棄物包件，採用 2 個圓形通風管道的設計。
- (3)P3 坑道斷面：P3 坑道斷面放置 C 型、E 型和 F 型廢棄物包件，皆為中放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-5 所示。P3 坑道斷面的處置坑道，專門用來處置樹脂襯套，不論是否使用屏蔽的樹脂襯套，都可放在此類處置坑道。
- (4)P4 坑道斷面：P4 坑道斷面放置 C 型和 F 型廢棄物包件，皆為中放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-6 所示。
- (5)P5 坑道斷面：P5 坑道斷面放置 F 型廢棄物包件，皆為低放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-7 所示。
- (6)P6 坑道斷面：P6 坑道斷面的處置坑道共有 3 條，1 條專門用來放置低放射性的 B 型廢棄物包件，1 條專門用來放置中放射性的 D 型廢棄物包件，另 1 條則為備用坑道，其堆疊方

式如圖 3.3.3-8 所示。因 P6 坑道斷面的處置坑道保持開放的時間較長，對於坑道內的基礎設施和包件的完整性，需有相對應的設計和控制。PANEL 1 處置區的備用處置坑道雖採用 P6 坑道斷面，但可接收任何型式的廢棄物包件。

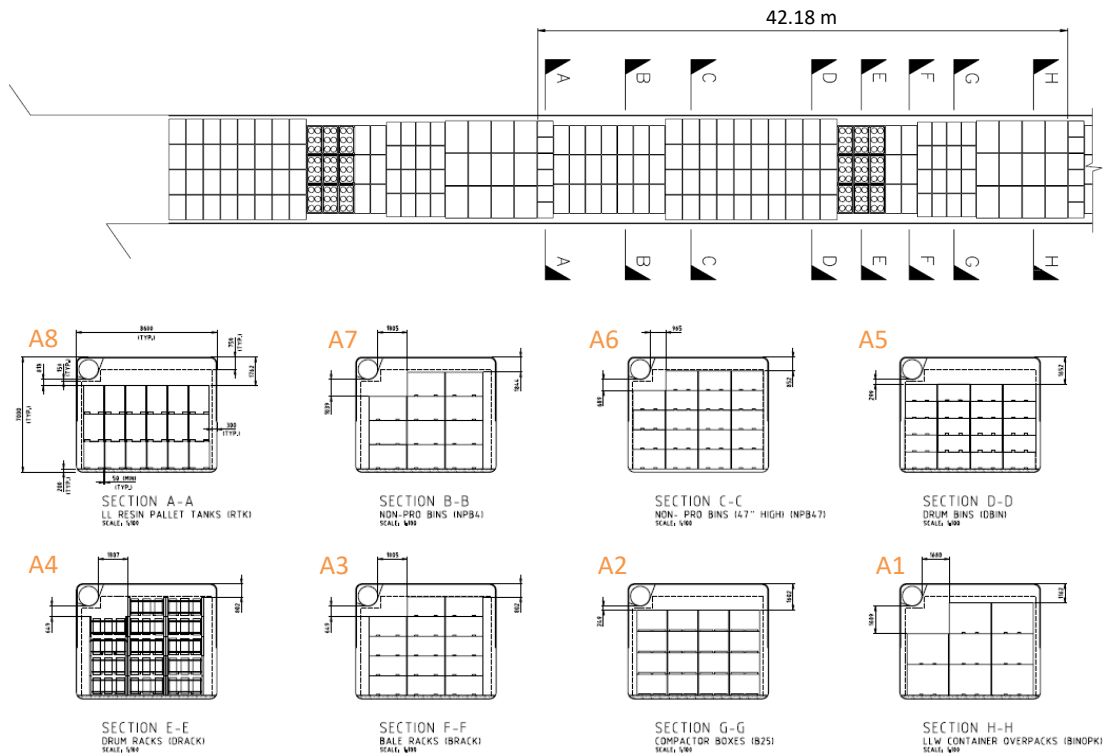


圖 3.3.3-3 P1 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

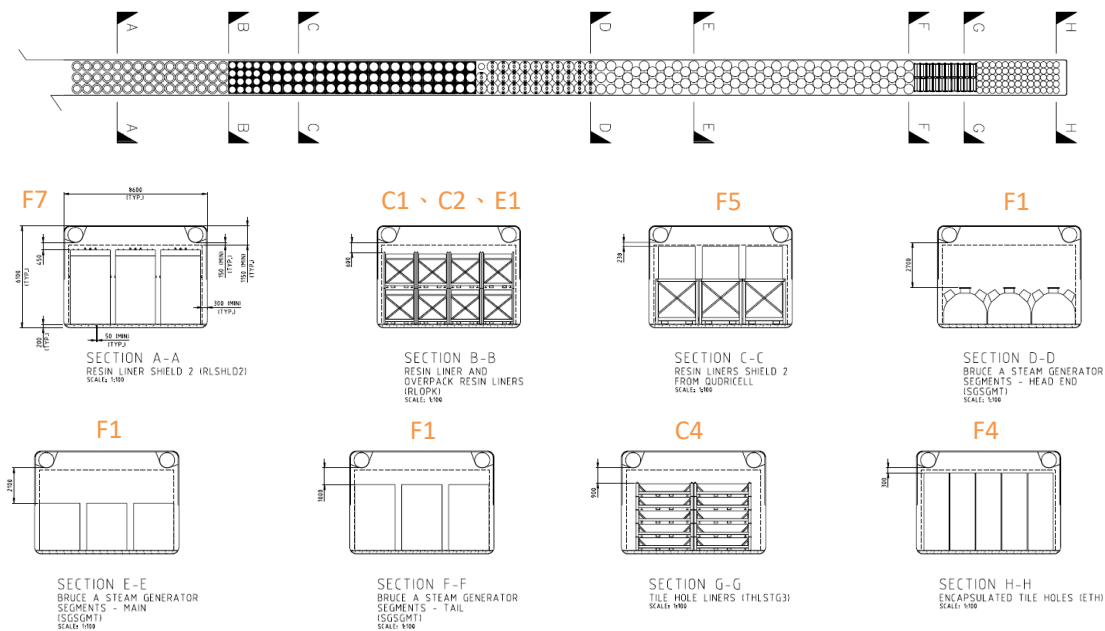


圖 3.3.3-4 P2 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

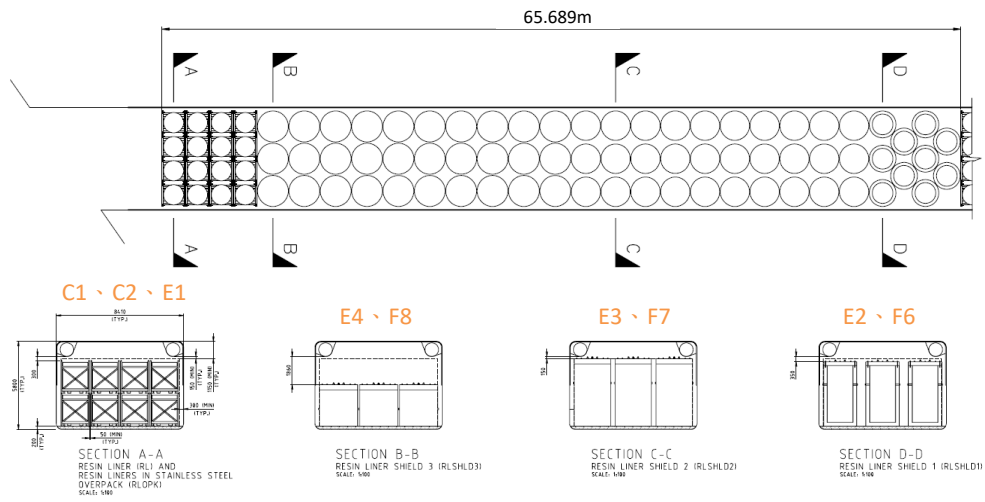


圖 3.3.3-5 P3 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

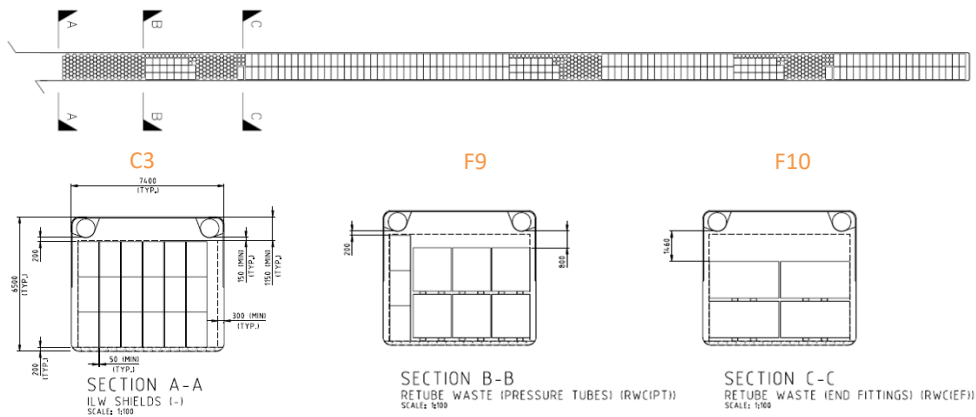


圖 3.3.3-6 P4 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

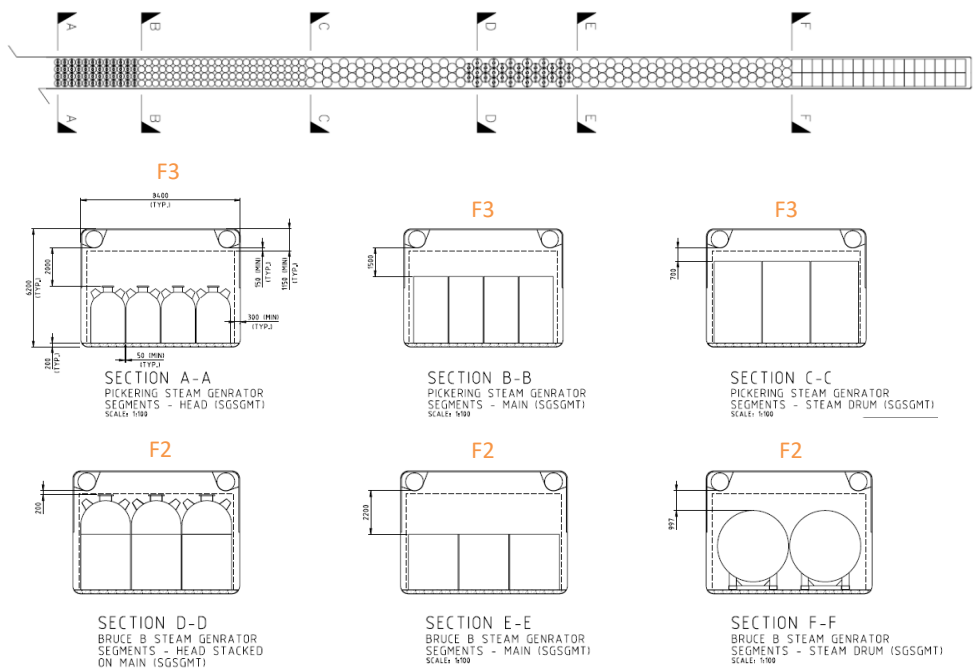


圖 3.3.3-7 P5 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)



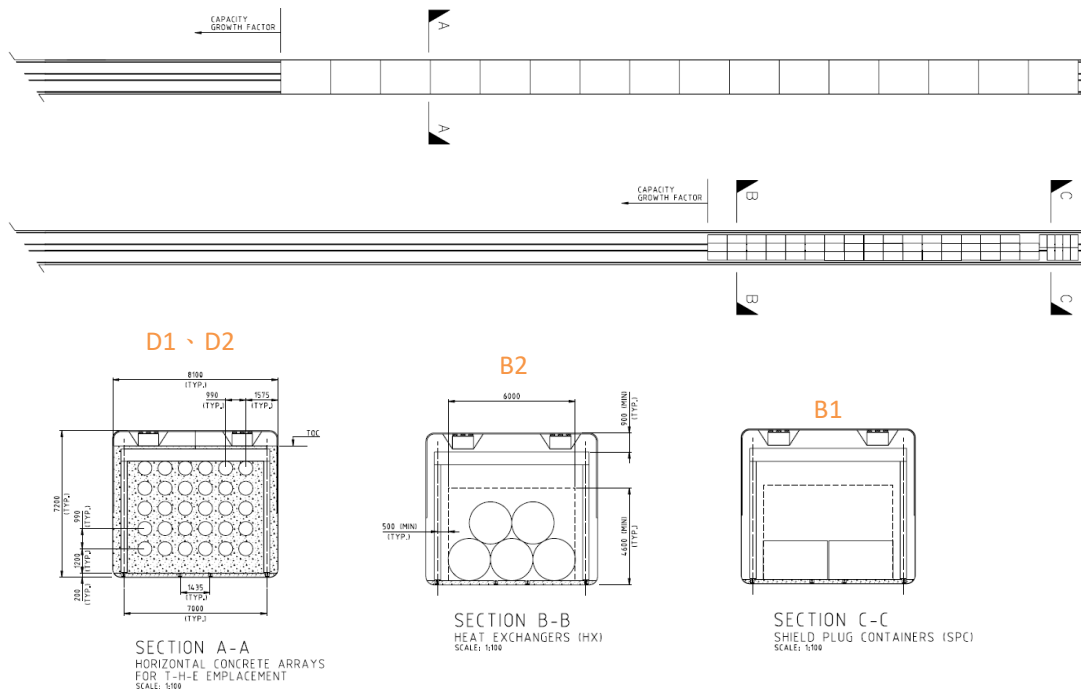


圖 3.3.3-8 P6 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

### 3.3.4 案例探討

分析 DGR 處置設施封閉後之安全功能，主要為抑制水入滲至處置區域，其次為抑制氣體透過豎井傳輸至處置設施外。而其設計主要透過封閉豎井，以及處置區設置封閉牆來達成此安全功能。其次，中放廢棄物將會使用圍阻功能較佳之盛裝容器，或是定置於混凝土基座中，混凝土可提供較佳之吸附功能、與相對較佳的圍阻功能。以下分就此 3 項設計考量進行說明：

#### (1) 封閉豎井

封閉豎井時，將會先移除與挖除襯砌、支撐與開挖造成的損傷擾動帶。封閉所使用的材料包含混凝土、與砂石混和之膨潤土、瀝青。其最底下之處置聯絡坑道區將採用混凝土封閉，除做為豎井密封材料支撐，並須達到可承受 14MPa 的內部氣壓要求。往上為經過壓密與砂石混和之膨潤土，利用其膨脹性可再緊密與豎井壁接合。再往上為瀝青，主要考量瀝青可以與該地層相容，而形成更佳之封閉效果。在往上的兩個混凝土封塞，則是設置於具有較高流通性地層，作為阻水功能使用，如圖 3.3.4-1 所示。

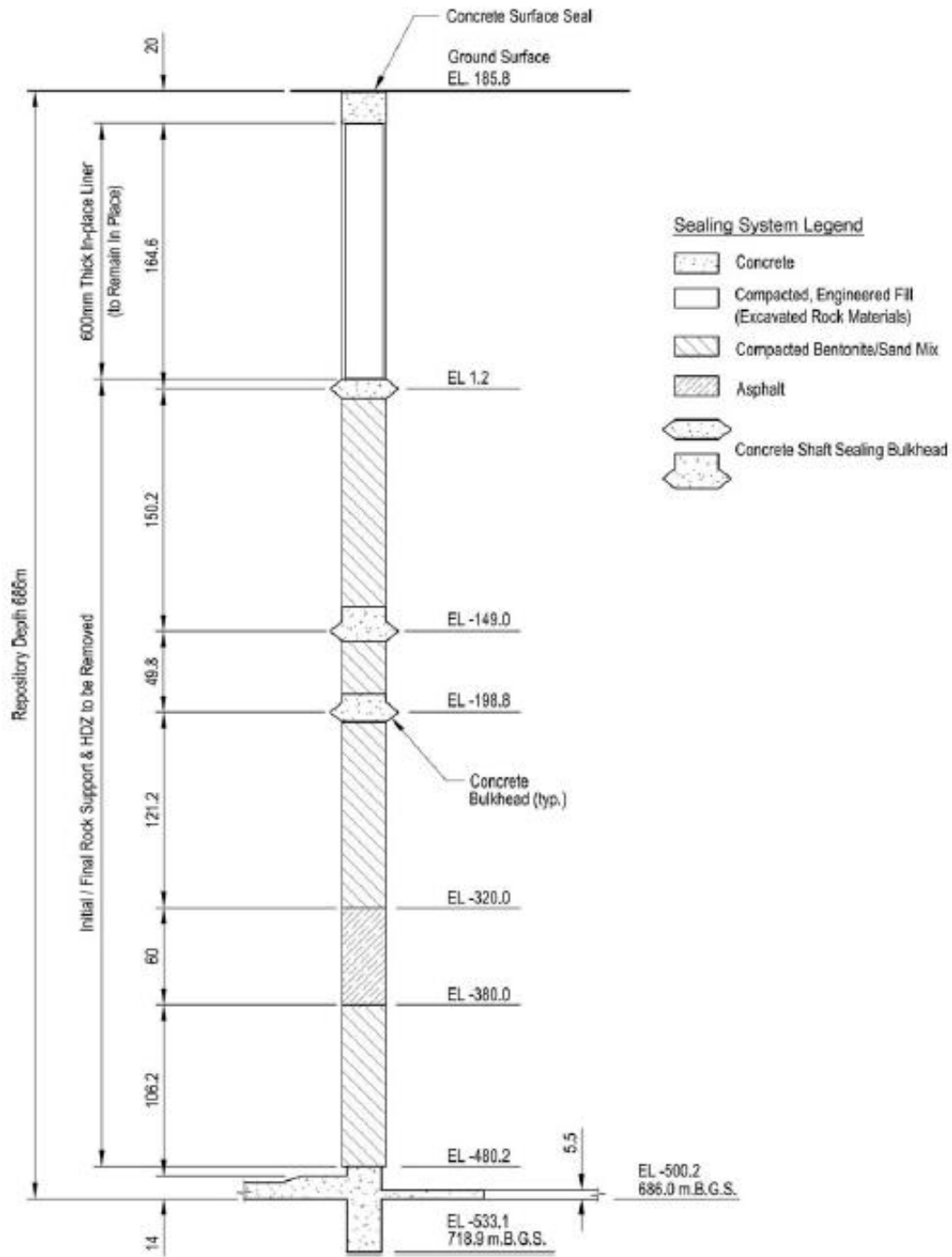


圖 3.3.4-1 豎井封閉設計示意圖(HATCH, 2010)

## (2) 設置封閉牆

當處置區內的處置坑道放滿廢棄物包件時，將在通行隧道上設置封閉牆，封閉牆的位置如圖 3.3.4-2 所示。封閉牆可限制氬氣、天然和廢棄物產生的甲烷以及受污染的水之釋出。封閉牆的設計概念如圖 3.3.4-3 所示。

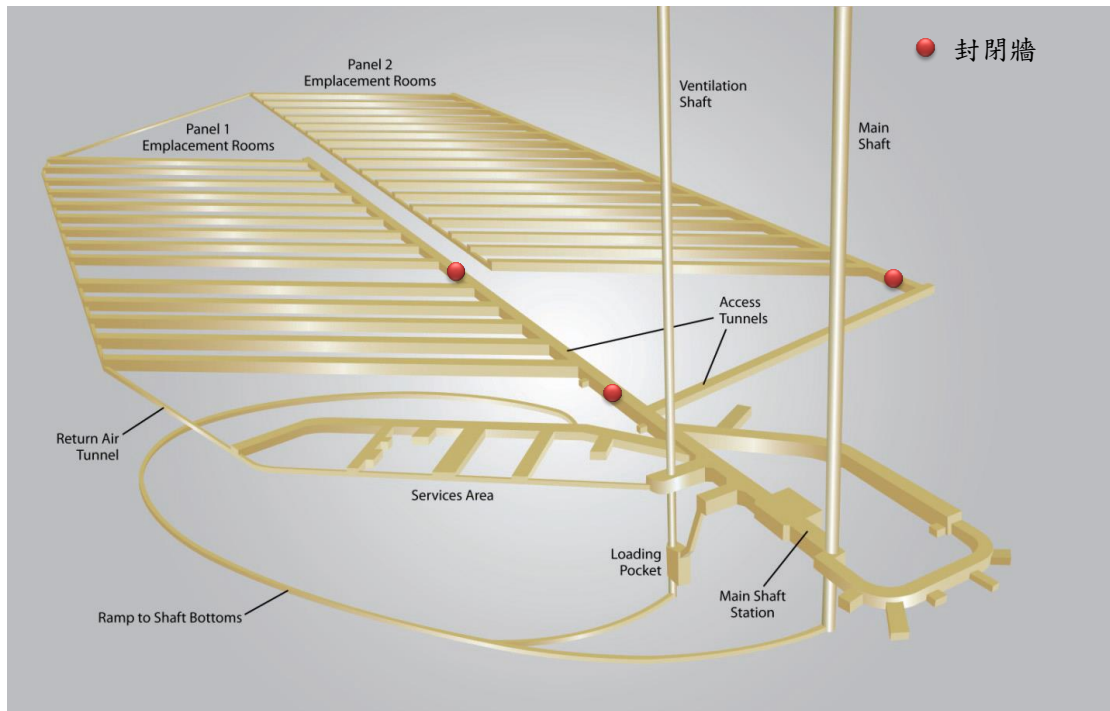


圖 3.3.4-2 封閉牆位置分布圖(HATCH, 2010)

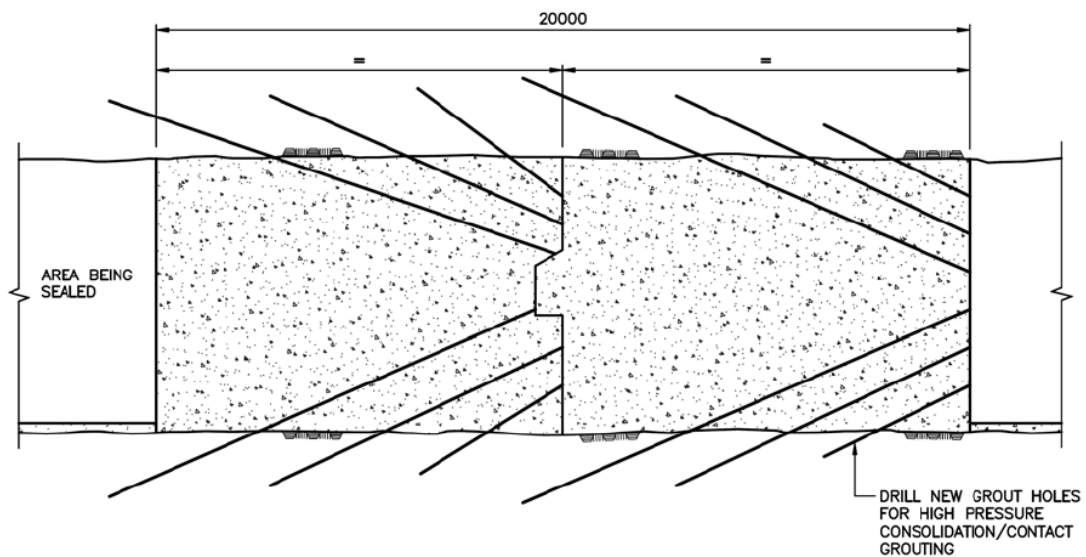


圖 3.3.4-3 封閉牆的設計概念示意圖(HATCH, 2010)

### (3)中放廢棄物盛裝容器與障壁

中放廢棄物多為活化金屬類廢棄物，依 DGR 規劃此型態廢棄多為直接堆置，或加入避免廢棄物滾動之堆置設計，而盛裝容器則分屬 F 型之樹脂襯套屏蔽(F5、F6、F7、F8)如圖 3.3.4-4，與 D 型廢棄物包件如圖 3.3.4-5。其中 D 型廢棄物包件雖然內部已有灌漿填充，但運送時仍須外加屏蔽，處置時則是定置於混凝土基座中並加上屏蔽蓋，為 DGR 處置坑道中最為運輸輻射屏蔽與工程障壁系統考量最多之設計。

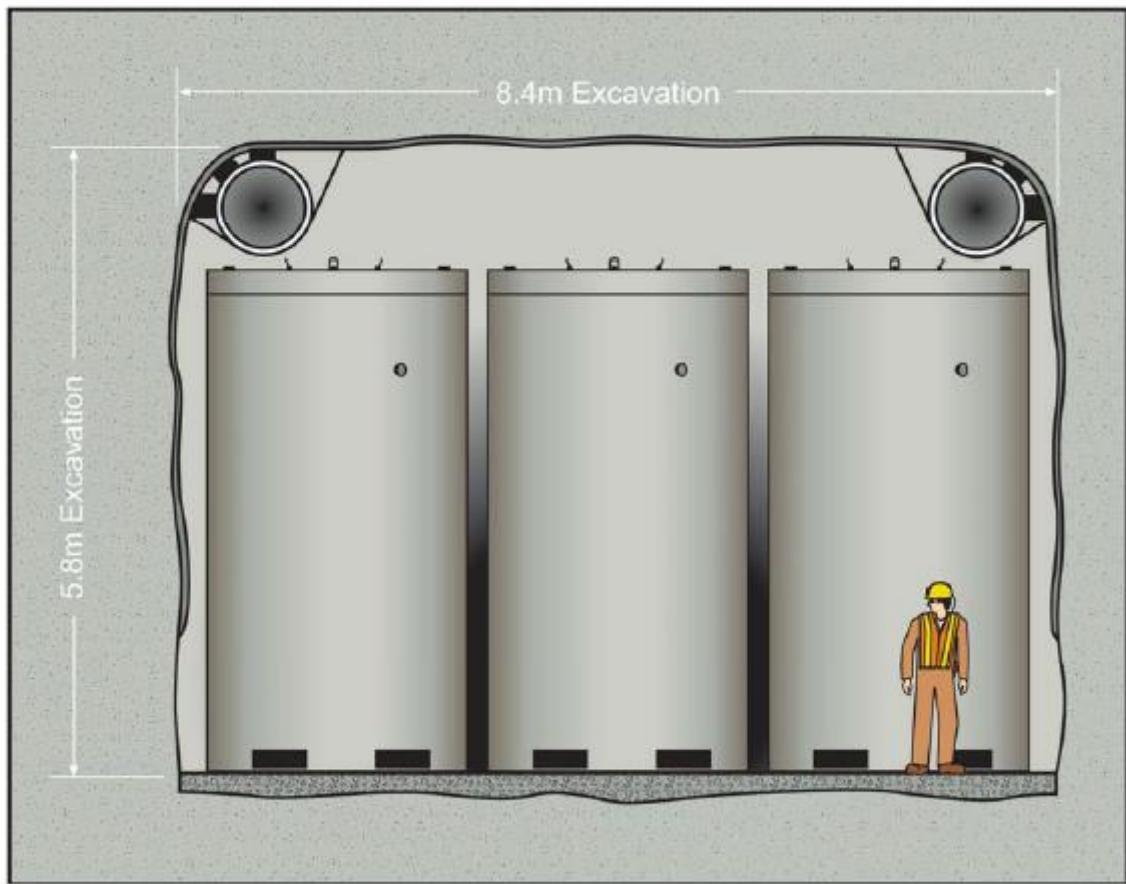


圖 3.3.4-4 F 型廢棄物包件(F5、F6、F7、F8)示意圖(HATCH, 2010)

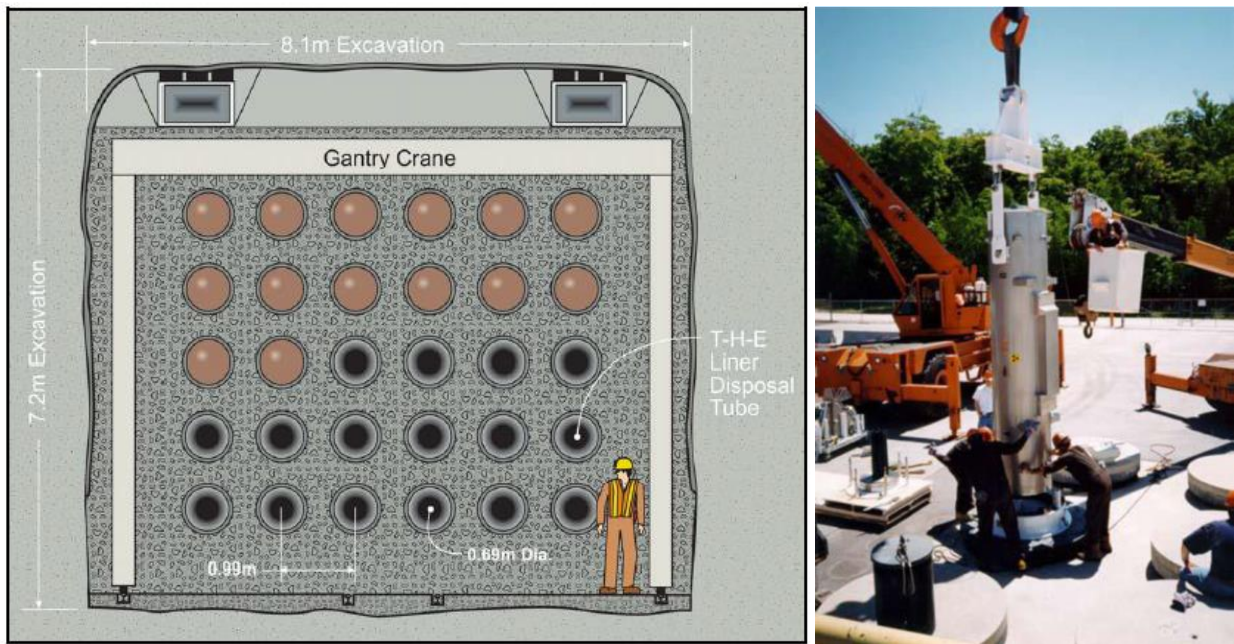


圖 3.3.4-5 D 型廢棄物包件與混凝土基座示意圖(HATCH, 2010)

## 第四章 我國低放處置技術工程設計模式審驗方式

### 4.1 處置工程設計特徵功能與安全功能分析

由於所蒐集之美國、瑞典、日本與加拿大案例，其均按該國處置場址所在環境進行處置系統設計考量。因各國環境與廢棄物特性差異，致使各國處置系統著重之處亦有所差異，而不易比較。由於處置工程設計之目標在於確保處置安全，為能對各案例進行整合與分析，利用處置安全要求作為彙整基礎，藉以分析各國案例之設計特徵功能與安全功能考量方式，並嘗試區分坑道形式處置系統與近地表處置系統之考量差異。

#### 4.1.1 放射性廢棄物處置特定安全要求

依據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, 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，與處置工程設計相關之安全要求包含：

(1).處置安全設計概念之多重安全功能的要求(要求 7)：

為能藉由多重安全功能確保處置安全，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。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。實體障壁系統之功能應由各種物理作用、化學作用與運轉控制共同實現。應確認各障壁與控制及整體處置系統之能力，確實可達成安全論證中所設定之功能。且處置系統整體功能應不可過度依賴某項單一安全功能。

處置系統之實體障壁是由工程施設或實體物質所構成，如：廢棄物體、盛裝容器、回填材料、母岩環境與地質構造等。安全功能則是可實現圍阻與隔離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、核種保留量，以及核種遷移之遲滯特性。透過主動控制可實現安全功能，亦可增進對於自然與工程障壁系統與安全功能之信心。透過數個實體與其他元件共同實現安全功能，可以確保當任一元件無法完整發揮預期功能時(如：發生意外的作用或發生低發生機率事件)，仍保有充足之安全餘裕。

(2).圍阻放射性廢棄物功能的要求(要求 8)：

為了圍阻放射性廢棄物中所含核種，應選擇合適之母岩環境，並設計可提供圍阻功能之工程障壁系統。在廢棄物可能導致的危害，因核種衰變而有顯著降低之前，應確保圍阻功能。此外，對於會產生熱能的廢棄物，在其總熱能仍會對於處置系統功能產生不利影響前，亦應確保圍阻功能。

圍阻功能之目的，在於避免與降低放射性核種釋出，藉以圍阻放射性廢棄物所含核種於工程障壁系統中衰變。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。如果在應實現圍阻功能期間，因放射性廢棄物活度過高而超過對無意入侵者之保護考量，則需考量替代處置方案。若為再處理之玻璃固化體與用過核子燃料等具高活度之廢棄物，則亦須考量廢棄物體之耐久性。

(3). 隔離放射性廢棄物功能的要求(要求 9)：

處置設施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，進行選址、設計與運轉。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。為此，應同時考量處置系統受自然演化與事件所造成之影響。

隔離功能之目的，在於將放射性廢棄物與其可能導致的危害，透過設計使其分離於可接近之生物圈環境以外，使可能減損處置設施完整性之因素的影響降至最低，同時也意味著遲滯放射性核種自處置設施外釋之遷移速度。例如：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(例如於近地表處置設施需突破場址控制系統方可能接近廢棄物)、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，以上設計概念均屬隔離範疇。因此，對於近地表設施除透過選址和設施設計外，亦須透過運轉控制與制度管理來提供隔離功能，而地質處置則主要透過處置設施所在地層提供隔離功能。如果設施所在環境會受地質作用抬升或侵蝕，而無法確保處置設施與生物圈隔離之可靠性，則須評估人類無意入侵之可能性與後果。

(4). 被動安全特徵的監測與控制功能的要求(要求 10)：

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，以使被動安全特徵能確實達成安全論證中所設定之功能。

監測與監測之目的並不是測量放射性數值，而是確保可以實現其安全功能。例如：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。

(5). 處置設施設計的要求(要求 16)：

處置設施與其工程障壁系統的設計應能實現對廢棄物與其可能導致的危害之圍阻功能，與地表與母岩環境之物理與化學特性兼容，並補足環境功能特徵至可確保封閉後之安全功能。此外，處置設施與其工程障壁系統之設計應可確保運轉期間之安全。

## 4.1.2 工程設計特徵功能與安全功能之關聯分析

依前節 IAEA「放射性廢棄物處置特定安全要求」(NO. SSR-5)安全要求之處置安全概念，其安全功能分別以多重安全功能、圍阻功能、隔離功能、監測與控制功能為核心。考量放射性廢棄物處置安全分析尺度至少達千年，為提高多重障壁系統可靠性，遂以透過多個障壁單元共同實現安全功能，確保即便發生意外事件而導致某單元安全功能未能完整發揮，仍可藉由其餘多重障壁單元保有安全餘裕。

確保處置系統安全有賴於多重障壁系統實現圍阻與隔離廢棄物功能，並利用各種監測與控制系統設計，確認與維持處置系統之整體安全功能。雖然多重障壁系統設計時，須同時考量場址環境特性、處置設施材料耐久性、設施功能需求、運轉作業規劃等，共同達成多重安全功能之目標。但就安全功能實現程度而言，由廢棄物體、盛裝容器、填充材料、處置窖或覆蓋層、回填層所組成之工程障壁系統為實現圍阻功能之主體。而隔離功能設計，則較側重依場址環境特性搭配場保安系統軟硬體設施共同達成功能要求。

基於低放射性廢棄物以短半化期核種為主之特性，於處置系統設計時首重圍阻功能。依前述章節分析內容並以處置環境較為相似之瑞典坑道處置案例為例，略可依低放射性廢棄物所含長半化期核種與活度作為區分。若屬於活度較高者，則以提高廢棄物體與盛裝容器，乃至於其外側工程障壁系統之圍阻功能要求為主，如 3.2 節所述之 BMA 坑道與筒倉。若屬於活度較低者則圍阻功能要求較低，如 3.2 節所述之 BLA 坑道。活度稍高者，則利用盛裝容器外側回填層形成高水力反差環境，增強圍阻功能之可靠性，如 3.2 節所述之 BTF 坑道。

為了解安全功能與處置設計之關聯性，依前節所述之安全要求內容，以第二章所述之功能要求、目標、主要設計特徵等處置工程設計作業架構分析其考量內容，另增加分析各功能關鍵作用時期考量，詳如表 4.1.2-1 所列。其後分析其審查重點，分別為：

- (1) 確認每一個設計特徵可以如安全論證所述內容發揮其功能。
- (2) 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
- (3) 如果設施所在環境會受地質作用抬升或侵蝕，而無法確保處置設施與生物圈隔離之可靠性，則須評估人類無意入侵之可能性與後果。
- (4) 如果在應實現圍阻功能期間，因放射性廢棄物活度過高而超過對無意入侵者之保護考量，則需考量替代處置方案。

表 4.1.2-1 低放處置安全功能與處置設計考量關聯分析表(1/2)

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。
	設計之隔離功能考量，如：提升接近廢棄物的困難度、遲滯放射性核種自處置設施外釋之遷移速度、地層岩覆及抬升與侵蝕等之綜合特徵(適用地質處置)。
	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。



表 4.1.2-1 低放處置安全功能與處置設計考量關聯分析表(2/2)

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

## 4.2 低放處置技術工程設計模式審驗方式

分析 2.1 節至 2.5 節所述之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.審查作業考量三大區塊，說明處置技術工程設計審驗方式，其架構略如圖 4.2-1 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。美國於 10CFR61 法規中已明確定義其近地表處置設施之環境與處置系統特徵概念，並將與實現安全功能相關之處置設施設計項目明列為「主要設計特徵」。用以規範申請者須清楚說明所有主要設計特性徵與其相互關係，以利確認處置系統設計是否已完整考量。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。

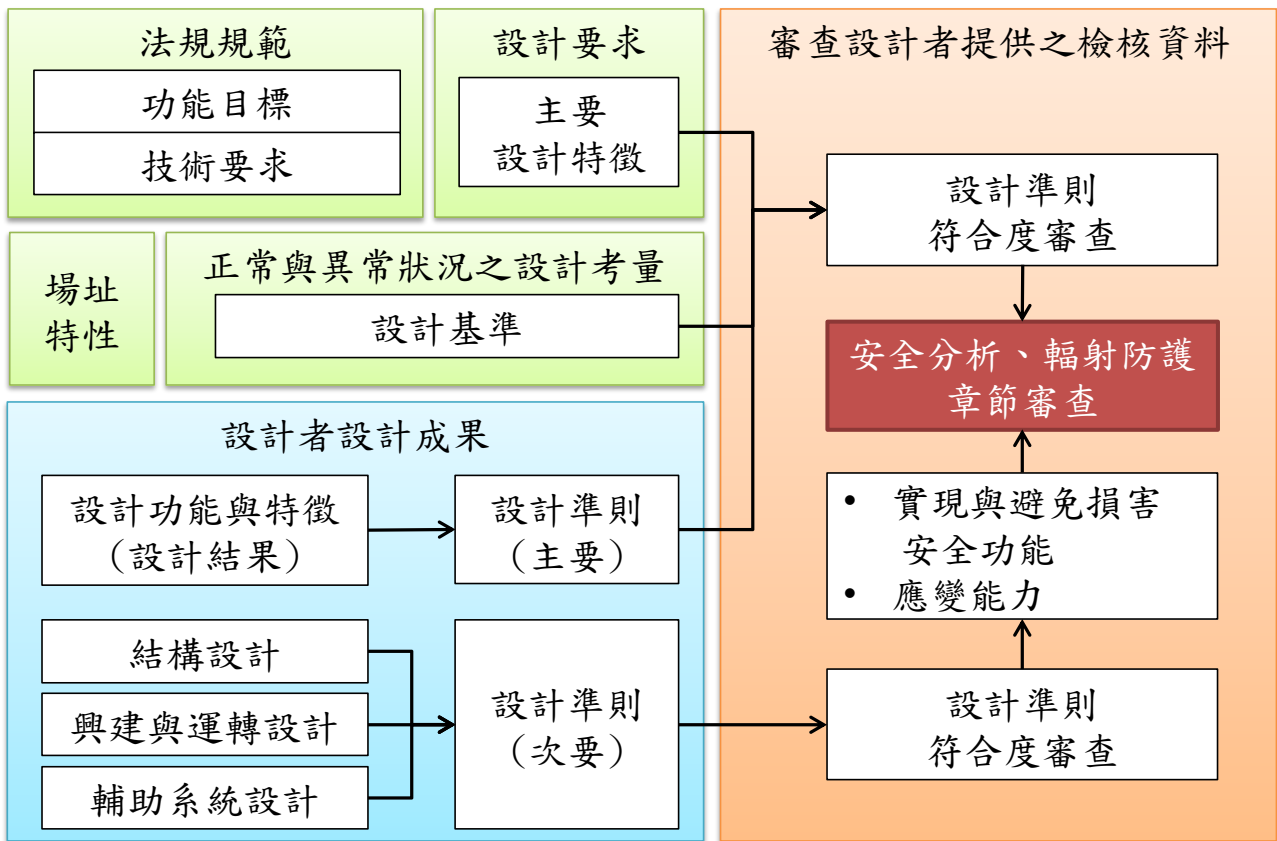


圖 4.2-1 處置設計審查考量架構示意圖

設計準則研擬方式與設計成果是否符合設計準則之驗證方式，主要遵循設計規範或行業標準，並不會一定會直接反應至安全功能的評量上，例如：結構安定分析、沉陷分析等。因此，處置設施設計審查將會先對申請者訂定之「設計準則」符合度進行評量，如：設計準則是否正確考量其正常與異常情節對應之設計基準、設計準則是否符合其設計規範或行業標準、設計限制值或控制參數是否合理等。其次則是依申請者提供之設計驗證資料，評量申請者之設計成果是否均符合其設計準則。而對於安全功能的達成程度，則需透過安全分析章節或輻射防護章節審查成果進行確認。此外，監測與控制安全功能之相關設計、興建與運轉設計、以及輔助系統設計等，主要審查其可實現性、避免損害安全功能與應變能力。因此，可利用「主要設計特徵」來規範申請者須說明主要設計特徵與安全功能之關係。參考 NUREG-1200 所訂定之 11 項主要設計特徵，以及所蒐集坑道處置案例之安全功能考量，研擬坑道處置工程設計驗證需考量之「主要設計特徵」12 項，據以審視申請者所提出之「主要設計特徵」與「正常與異常狀況之設計考量」是否適切。「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。並整理其安全功能與主要考量時期考量如表 4.2-1 所列。

表 4.2-1 坑道處置工程設計之建議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
地面設施之封閉後保安設計	隔離	解除監管前
坑道處置設施之無意闖入者防護功能	隔離	封閉後
場址封閉與穩定性	隔離(遲滯)	封閉後
合適的廢棄物管控規劃	監測與控制	運轉
合適的處置場監測規劃	監測與控制	封閉後
減少長期維護需求	監測與控制	封閉後
提供適當監管與補救之緩衝區	監測與控制	封閉後
合理抑低職業曝露	輻射防護	運轉

建議未來於審查申請者提供之處置工程設計之文件時，宜檢視其設計是否包含表 4.2-1 所述之主要設計特徵項目，並依其訂定之功能目標與設計基準訂定其設計準則。藉以符合 IAEA SSR-5 之相關安全要求。

## 第五章 「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)」精進建議

本計畫參考 NUREG-1200 之內容與架構，依審查範圍、程序審查、審查要點與接受基準、審查發現、相關法規及技術規範之架構，重新整理第三章設施之設計基準，詳如附錄一。本章僅節錄考量 4.2 節低放處置技術工程設計模式審驗方式中，建議調整或新增之「主要設計特徵」關聯內容。主要為「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 3.3.1 節內容。說明如下：

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：

- (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)說明工程障壁系統結構完整性之設計基準、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、設計要項及設計規格。
- (7)說明坑道處置設施之無意闖入者防護功能之設計基準、設計要項及設計規格。
- (8)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。
- (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。
- (10)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。
- (11)減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。
- (12)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。
- (13)合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。

上述供審查作業所提供資料中，各分項審查要點包含如下。

(1)降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明：

- 1.導引場區逕流或坑道滲水離開處置單元。
- 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：

- 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。

(2)工程障壁系統結構完整性之設計，是否清楚說明，採取的方法可使工程障壁系統：

- 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

工程障壁系統結構完整性的主要設計準則至少應說明：

- 1.廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量。
- 2.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。
- 3.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。
- 4.設計基準異常事件對於結構穩定性的效應。
- 5.相關於最大地震的異常地表震動。

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：

- 1.一般運作狀況時的地表水和風速。
- 2.異常性地表水與風速以及正常水位。

(3)工程障壁具良好遲滯功能之設計，是否清楚說明：

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、化學環境控制等。

2.工程障壁單元可達成之遲滯能力。

主要設計準則至少應說明：

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。

2.障壁單元依時性之遲滯能力。

3.設計基準異常事件對於障壁單元遲滯能力的影響。

(4)降低廢棄物與水接觸之設計，是否清楚說明使用方法可使廢棄物在處置場運轉階段與封閉後，可降低與水的接觸。主要設計準則至少應：

1.說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元。

2.處置設施採地表式處置工程障壁系統時，說明處置單元覆蓋層的排水和暫存區域之排水設計。

3.處置設施採地表式處置工程障壁系統時，描述處置單元地面自然材料與排水材料及地面排水間的滲透性，處置設施採坑道型式時，描述回填材料及坑道口封堵材料間之滲透性。

4.描述暴露於空氣中之廢棄物暫時存放平臺與覆蓋物。是否提出防範運轉期主動性排水系統組件意外破壞和封閉後被動性排水系統組件被破壞之設計準則。

(5)處置場運轉期及封閉期之場區排水設計，是否說明達成下列排水功能之方法：

1.引導逕流、坑道滲水或地下水遠離廢棄物之方法。

2.控制排水系統流出處置單元之方法。

主要設計準則至少應說明：

1.運轉期及封閉期場址表土或坑道的排水狀況。

2.涵蓋表土的排水特性，分流結構和表土排水斜坡等。是否提出因應上游水庫毀壞或下游排水堵塞之設計準則。

(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保安設施或措施，以避免個人不經意的侵入處置設施。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。

(7)坑道處置設施無意闖入者防護之設計，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。

(8)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：

- 1.提供廢棄物長期隔離的功能與避免經常性維護之需求。
- 2.提供場址封閉與穩定規劃，並可改善場區自然環境特性。

場址封閉及長期穩定之主要設計準則應至少說明：

- 1.設計時應提出場址封閉規劃的相關項目。
- 2.封閉與可能主動維護的設計基準。

(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：

- 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。
- 2.預測解除監管後對於保護無意闖入者之被動安全功能。

(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：

- 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。

(11)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：

- 1.材料之耐用性。
- 2.侵蝕作用。

3.障壁系統退化的效應。

4.監控系統的退化。

(12)緩衝區之設計，是否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：

1.監測所需的空間尺寸。

2.採取應變措施所需時間。

(13)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：

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。



## 第六章 結論與建議

- (1)本計畫依 IAEA 「放射性廢棄物處置特定安全要求」(NO. SSR-5)所述之處置安全功能與要求為基礎，彙整所蒐集之國際處置工程設計案例，藉以整合各國不同環境特性與不同處置設計之考量。
- (2)處置設施設計以實體工程障壁系統實現多重安全功能，並搭配監測與控制設計確保其安全功能。工程障壁系統之安全功能以圍阻與隔離功能為核心，當處置場址特徵非屬乾燥環境，則工程障壁設計增加考量遲滯功能。
- (3)就安全功能實現程度而言，由廢棄物體、盛裝容器、填充材料、處置窖或覆蓋層、回填層所組成之工程障壁系統為實現圍阻功能之主體。而隔離功能設計，則較側重依場址環境特性搭配場保安系統軟硬體設施共同達成功能要求。
- (4)基於低放射性廢棄物以短半化期核種為主之特性，於處置系統設計時首重圍阻功能。依低放射性廢棄物所含長半化期核種與活度作為區分基礎，長半化期核種活度越高則其搭配之工程障壁圍阻功能要求越高，且優先提高廢棄物體與盛裝容器要求。反之較低者，配合其環境特徵亦可採用遲滯設計來達到圍阻功能。
- (5)由於處置系統安全功能屬於整體考量，故以安全論證作為審查對象。也因此，處置工程設計審驗時，主要審查其設計準則是否符合安全功能考量，以及設計準則是否合理考量正常與異常情節。主要之審查對象為反映安全功能之「主要設計特徵」、反映場址與情節特性作用之「設計基準」、申請者規範其具體設施設計要求之「設計準則」，其審查架構如圖 4.2-1 所示。
- (6)經本計畫分析，建議坑道處置設計審驗可利用「主要設計特徵」作為審查主體，基於實現圍阻與隔離功能考量，建議主要設計特徵為：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。
- (7)由於處置設施設計審查時，將先審視訂定之設計準則是否可實現安全功能。其後，主要以設計規範與行業標準作為審驗基準，評量申請者所提出設計成果是否符合設計準則，而安

全功能之實現程度則是於安全分析章節進行審驗。因此，建議可針對處置設施設計與安全分析介面為分析對象，精進設計特徵參數與安全分析特徵參數關聯設定之審驗技術。

## 參考文獻

1. 日本內閣，2016，「核原料物質、核燃料物質及原子爐的規範法律」。
2. 日本原子力安全委員會，2010，「第二種廢棄物處置事業相關之安全審查基本考量」。
3. 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」。
4. 日本原子力安全委員會放射性廢棄物廢止措置專門部會，2010，「第二種廢棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」。
5. 日本原子力規制委員會，2013，「第二種廢棄物處置設施之位置、構造與設備之基準相關規則」。
6. 日本原子力規制委員會，2015，「核子燃料或受核子燃料污染物之第二種廢棄物處置事業相關規則」。
7. 行政院原子能委員會，2012，「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」。
8. 電氣事業聯合會，2011，餘裕深度處置概要(簡報資料)。
9. HATCH, 2010, OPG's Deep Geologic Repository for L&ILW Preliminary Design Report.
10. IAEA, 2009, Classification of radioactive waste, No. GSG-1.
11. IAEA, 2011, DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE, SPECIFIC SAFETY REQUIREMENTS, No. SSR-5.
12. NWMO, 2011a, OPG's Deep Geologic Repository for Low and Intermediate Level Waste: Postclosure Safety Report, NWMO DGR-TR-2011-25。
13. NWMO, 2011b, OPG's Deep Geologic Repository for Low and Intermediate Level Waste: Postclosure Safety Assessment: Data, NWMO DGR-TR-2011-32。
14. SKB. 2014, Safety analysis for SFR Long-term safety. SKB TR-14-01.
15. U.S. NRC, 1982 (2105 Version), Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste, 10CFR61.

16. U.S. NRC, 1994, Standard Review Plan for the review of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility Revision 3, NUREG-1200

# 附錄一、「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」精進建議-第三章 設施之設計基準

## 3.1 審查範圍

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：一、設計目標與功能需求；二、設施設計；三、結構設計；四、處置單元設計；五、輻射安全設計；六、輔助設施或系統之設計；七、公共設施或系統之設計；八、設計成果。

## 3.2 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內容包含以下資訊：

- (1)處置設施設計基準、設計要項及設計規格。
- (2)處置設施主要結構物、使用需求規劃及其配置。
- (3)處置設施主要結構物結構分類、設計荷重及其組合。
- (4)處置設施主要結構物工程材質、屏蔽材料特性與設計標準（包括其覆蓋、回填等）、地表防洪及地下排水系統之設計。
- (5)輻射安全設計
  - 1.說明輻射防護分區規劃，並說明各區之輻射安全限值。
  - 2.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。
  - 3.說明廢棄物含有核種之活度、比活度、分布情形，並說明各區於正常運轉期間之廢棄物存量安排。
  - 4.說明使用的輻射屏蔽分析軟體與屏蔽參數設定資料。
  - 5.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：
    - A.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。

B.廢棄物接收、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。

C.對較高活度廢棄物之屏蔽設計。

- (1)廢棄物暫貯區、檢整或處理系統、粉塵與廢水收集排放處理系統、廢棄物傳送系統、分析或偵測系統等之設計(包含各系統失效時之補救措施)。
- (2)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(包含各系統失效時之補救措施)。
- (3)設計成果適當比例尺之詳細圖說，以及設計細部資料。

### 3.3 審查要點與接受基準

安全分析報告內本章的內容應符合以下各節所述要求。

#### 3.3.1 設計目標與功能需求

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：

- (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)說明工程障壁系統結構完整性之設計基準、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、設計要項及設計規格。
- (7)說明坑道處置設施之無意闖入者防護功能之設計基準、設計要項及設計規格。
- (8)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。
- (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。
- (10)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。

- (11)減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。
- (12)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。
- (13)合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。

上述供審查作業所提供資料中，各分項審查要點包含如下。

(1)降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明：

- 1.導引場區逕流或坑道滲水離開處置單元。
- 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：

- 1.最大降雨(PMP)所導致之最壞狀況。
- 2.因意外狀況所產生之排水系統堵塞。

(2)工程障壁系統結構完整性之設計，是否清楚說明，採取的方法可使工程障壁系統：

- 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

工程障壁系統結構完整性的主要設計準則至少應說明：

- 1.廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量。
- 2.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。
- 3.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。
- 4.設計基準異常事件對於結構穩定性的效應。
- 5.相關於最大地震的異常地表震動。

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：

1.一般運作狀況時的地表水和風速。

2.異常性地表水與風速以及正常水位。

(3) 工程障壁具良好遲滯功能之設計，是否清楚說明：

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、化學環境控制等。

2.工程障壁單元可達成之遲滯能力。

主要設計準則至少應說明：

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。

2.障壁單元依時性之遲滯能力。

3.設計基準異常事件對於障壁單元遲滯能力的影響。

(4)降低廢棄物與水接觸之設計，是否清楚說明使用方法可使廢棄物在處置場運轉階段與封閉後，可降低與水的接觸。主要設計準則至少應：

1.說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元。

2.處置設施採地表式處置工程障壁系統時，說明處置單元覆蓋層的排水和暫存區域之排水設計。

3.處置設施採地表式處置工程障壁系統時，描述處置單元地面自然材料與排水材料及地面排水間的滲透性，處置設施採坑道型式時，描述回填材料及坑道口封堵材料間之滲透性。

4.描述暴露於空氣中之廢棄物暫時存放平臺與覆蓋物。是否提出防範運轉期主動性排水系統組件意外破壞和封閉後被動性排水系統組件被破壞之設計準則。

(5)處置場運轉期及封閉期之場區排水設計，是否說明達成下列排水功能之方法：

1.引導逕流、坑道滲水或地下水遠離廢棄物之方法。

2.控制排水系統流出處置單元之方法。

主要設計準則至少應說明：

1.運轉期及封閉期場址表土或坑道的排水狀況。



2.涵蓋表土的排水特性，分流結構和表土排水斜坡等。是否提出因應上游水庫毀壞或下游排水堵塞之設計準則。

(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。

(7)坑道處置設施無意闖入者防護之設計，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。

(8)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：

- 1.提供廢棄物長期隔離的功能與避免經常性維護之需求。
- 2.提供場址封閉與穩定規劃，並可改善場區自然環境特性。

場址封閉及長期穩定之主要設計準則應至少說明：

- 1.設計時應提出場址封閉規劃的相關項目。
- 2.封閉與可能主動維護的設計基準。

(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：

- 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。
- 2.預測解除監管後對於保護無意闖入者之被動安全功能。

(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：

- 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。

(11)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：

- 1.材料之耐用性。
- 2.侵蝕作用。
- 3.障壁系統退化的效應。
- 4.監控系統的退化。

(12)緩衝區之設計，是否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：

- 1.監測所需的空間尺寸。
- 2.採取應變措施所需時間。

(13)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：

- 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。

### 3.3.2 設施設計

說明處置設施主要結構物、使用需求規劃及其配置。為促進處置設施達到妥善規劃與配置，在設施設計方面，須提供下列資料供審查：

- (1)說明處置設施主要結構物之設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求，以及對應引用法規與報告之依據。包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等。
- (2)處置設施主要結構物與通過重要系統的三視圖及細部設計。主要結構物，包括各種處置單元、貯存廠房、接收與吊卸廠房、除污與檢整廠房、輔助廠房與公共廠房。
- (3)各種處置設施內外的排水與集水系統的剖面圖及細部設計。

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

- (1)應檢核處置設施是否滿足主要結構物之設計目標、確認使用需求規劃及其配置，相關的設計基準與功能需求是否完整，引用法規與報告是否適當與具代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果是否正確與合理。
- (2)主要結構物的正視圖與剖面圖是否能正確顯示各重要系統的配置，是否符合設計與建造規範。
- (3)各種處置設施內外的排水與集水系統的剖面圖是否可顯示出其功能。

### 3.3.3 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。為促進處置設施各類重要結構物的安全，在結構設計方面，須提供下列資料供審查。

- (1)主要結構物之結構分類與各類結構的負載。負載包括靜負載和活負載、偶發液態水平和垂直壓力之負載、土壤壓力之負載、溫度差之熱負載、風壓力之負載，地震之負載，膨脹壓力之負載。
- (2)說明混凝土結構物及鋼構結構物之設計所選用之負載組合，並說明所選用負載組合的原因。
- (3)適用之法規、標準和規範。
- (4)設計與分析步驟之資料包含：
  - 1.每一個結構及其基礎之描述，若結構物經破壞將導致工作人員或民眾之輻射危害，需提出結構物補強措施等。
  - 2.設計的假設包含邊界狀況和假設之基礎等。
  - 3.設計的分析步驟描述包含電腦程式和有效性。
  - 4.描述設計基準地震力之計算方法。
  - 5.用以確認設計的方法。
- (5)結構設計應考量場址特性之影響(氣象、地質、地震、地表水、地下水、地球化學與大地工程特性)。

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

- (1)主要結構物之結構分類是否適當，各類結構的負載因子是否正確且充分考量。
- (2)混凝土結構之設計，必須依規範考量最大的可能負載組合。鋼構結構物之設計，其設計方法須符合相關規範，強度設計必須考量最大的可能負載組合。
- (3)所引用的法規、標準或規範是否適切。
- (4)設計與分析步驟：結構分析與設計、結構系統與構件之資料，使用之設計、分析方法和結果其安全性是否符合相關規範之要求。
- (5)場址衝擊因素：是否已清楚定義與評估可能影響結構安全之場址特性。

### 3.3.4 處置安全設計

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。為促進處置設施安全，應慎選工程材質與屏蔽材料，並須考量處置設施覆蓋與回填、地表防洪、地下排水系統及、護坡工程或處置坑道工程等，在處置設施長期安全設計方面，須提供下列資料供審查。

- (1)工程材質與屏蔽材料之組成、密度、抗壓強度、耐久性、退化率、滲水性、核種吸附性等特性及其設計標準。
- (2)地表防洪的材料特性、設計標準、排水功能。
- (3)地下排水系統的材料特性與排水規劃、排水設計、抑低滲入處置單元設計。
- (4)護坡工程或處置坑道工程的材料特性與設計標準，及處置設施在建造、運轉與封閉等各個階段護坡工程或處置坑道工程之穩定監測規劃等。
- (5)適用之法規、標準和規範。

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

- (1)工程材質與屏蔽材料之組成與特性是否符合場址特性要求。設計標準是否適切。
- (2)地表防洪的材料特性、設計標準、排水功能是否可防止水入侵至處置單元。
- (3)地下排水系統的材料特性與排水規劃、排水設計是否適當。是否可抑低地下水滲入處置單元。

(4)護坡工程或處置坑道工程的材料特性、設計標準、穩定監測規劃等是否適當，是否具長期穩定的特性，穩定監測規劃，必須述明在處置設施建造、運轉與封閉等各個階段執行前，即提出詳細之監測計畫。監測計畫之內容須包括：

- 1.監測項目與參數。
- 2.監測頻率。
- 3.監測系統、組件、裝設位置、資料傳遞方式、故障排除與更換週期。
- 4.資料判讀與分析之執行單位。

(5)所引用的法規、標準或規範是否適切。

### 3.3.5 輻射安全設計

(1)申請者須詳實說明各輻射防護區之劃分原則、條件與輻射劑量限值：

- 1.設施外之輻射劑量限值，須符合「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第8條之規定。
- 2.設施內各區輻射劑量限值，須說明考量之輻射源、工作環境、作業條件，以及占用因數。

(2)輻射屏蔽結構與屏蔽分析

- 1.說明輻射屏蔽結構之構造強度、比重、厚度、材料等有關資訊，並說明輻射屏蔽結構是否一併考慮在建築物結構體內。
- 2.針對暫時性之輻射屏蔽，須說明暫時性輻射屏蔽之材料、厚度等有關資訊，並說明使用條件。
- 3.說明正常運轉期間，各區最大廢棄物存量設計、核種活度、比活度，以及廢棄物堆置規劃。
- 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。
- 5.提供設施配置圖，配置圖上須標示屏蔽牆厚度。

(3)職業曝露合理抑低

- 1.說明輻射監測區之規劃，包含輻射劑量限值、輻射監測系統，以及監測區範圍平面圖。
- 2.說明管制區依處置設施作業屬性及輻射劑量等條件，進行區域細部劃分。每個區域須依其作業環境特性說明規劃之輻射防護設備(如輻射監測設備、空浮監測設備、輔助型劑量計或防護衣物等)。
- 3.說明進入管制區之審查、防護及管制措施；離開管制區之污染偵測設備、除污規劃、管制措施等。
- 4.詳實說明處置設施內各區域(如廢棄物接收、暫貯、檢整、搬運、處置及控制中心等)之合理抑低設計，確保職業曝露可低於「游離輻射防護安全標準」第7條之規定。
- 5.針對較高活度的廢棄物，須說明規劃之屏蔽設計(如使用遠端操控作業、暫時性輻射防護屏蔽等)，確保工作人員之輻射安全，並符合合理抑低原則。

### 3.3.6 輔助設施或系統之設計

說明廢棄物暫貯區、廢棄物檢整或處理系統、粉塵與廢水收集排放處理系統、廢棄物傳送系統、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。其設計應能達成：

- (1)協助處置設施之運轉，維護工作人員安全。
- (2)協助處置設施建造需求。
- (3)對封閉措施不會產生負面影響。  
須提供下列資料供審查。
  - (1)各種輔助設施的設計基礎及適用準則之描述，包括設施配置圖、工程藍圖、建造規格等。
  - (2)適用之法規、標準和規範。
  - (3)各種輔助建物的安全使用年限及其內重要設備的更換週期。
  - (4)各種輔助設施對建造、運轉與封閉的影響。
  - (5)處置場所屬交通系統的設計：涵蓋道路的配置、用途、建材、交通管制、以及道路表水的排水系統。
  - (6)各輔助設施或系統失效時之補救措施。

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

- (1)各種輔助設施是否能有效協助處置設施之運轉並維護工作人員安全。
- (2)所引用的法規、標準和規範是否適切。
- (3)在預期的安全使用年限期間，每一建物是否均能安全地使用。重要設備的更換週期是否適切。是否提供雙備援或多重備援。
- (4)各種輔助設施對處置場建造、運轉與封閉是否不會產生負面的影響。
- (5)處置場所屬交通系統是否足以協助處置設施之安全運轉且對處置場建造、運轉與封閉不具負面影響。
- (6)各輔助設施或系統失效時之補救措施是否適切。

### 3.3.7 公共設施或系統之設計

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。為確保每一公用系統能有效協助處置設施運轉並維護工作人員安全，須提供下列資料供審查。

- (1)通訊系統之設計與安裝：說明處置作業期間，各作業區與場區(控制中心)人員維持清晰聯繫之視訊或音訊系統設計，以及緊急應變時期對外聯繫之通訊設計與設備。
- (2)電力系統之設計與安裝：說明可提供處置設施安全運轉所需之電力需求與電力系統與設備。
- (3)供水系統之設計與建造：說明於處置設施建造、運轉及消防各項用水，以及工作人員飲用水與人員除污用溫水等用水之用水需求與供水系統設計。
- (4)供氣系統之設計與安裝：說明於處置設施建造與運轉期間作業所需之燃料氣體、氣體與量體設計計算書與供氣設計。
- (5)照明系統之設計與安裝：說明處置設施建造、運轉之照明設計與緊急照明設計。
- (6)一般事業廢棄物處理系統之設計與建造：說明依國家環保法規規範設計之一般事業廢棄處理設計。
- (7)通風系統之設計與安裝：

- 1.說明通風系統於污染區與無污染區之風區間(正壓/負壓)與隔離設計。
- 2.說明污染區通風系統之避免擴散污染、污染偵測與避免污染逸散設計。避免污染逸散設計若採高效率過濾器過濾，應說明點檢與維護計畫。

(8)消防系統之設計：

- 1.說明消防邏輯系統與應變作業之消防規劃邏輯、消防程序緊急應變標準作業程序、與其偵測、疏散與避難等行為所採用之設備與系統設計，並需說明消防作業期間，如何確保工作人員與公眾免於輻射與火警災害。
- 2.說明預防輻射與火災防護規劃。

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

(1)通訊系統之設計與安裝：

- 1.在廢棄物接受、吊卸與處置作業之所有時間，不論是視訊或音訊是否皆可清晰的聯繫場區的人員。
- 2.是否可與場區外官方單位維持可靠的聯繫，特別是在緊急應變的時期。
- 3.是否會與設施的設計或運作相抵觸。

(2)電力系統之設計與安裝：是否可對處置設施安全運轉，提供充足的電力。

(3)供水系統之設計與建造：

- 1.對處置設施建造、運轉及消防，是否皆可提供足夠的水量。
- 2.是否可提供工作人員足夠的飲用水。
- 3.是否可提供工作人員除污用的溫水。

(4)供氣系統之設計與安裝：

- 1.對處置設施建造與運轉，是否可提供足夠且適當氣體，以利作業之進行。
- 2.是否可提供場區必須的燃料氣體。



(5)照明系統之設計與安裝：

- 1.對處置設施建造與運轉，是否可提供充足的照明。
- 2.對於可預期的意外狀況，是否可提供緊急照明。

(6)一般事業廢棄物處理系統之設計與建造：

- 1.是否符合國家環保法規。
- 2.是否會與設施的設計或運轉相抵觸。

(7)通風系統之設計與安裝：

- 1.是否考量污染區與無染區的不同通風系統。
- 2.污染區的通風設計，是否由低污染區傳送到高污染區，是否經過高效率過濾器過濾與偵測後才排放，設備之點檢與維修規劃是否合宜。

(8)消防系統之設計與安裝：

- 1.消防程序、材料、設備和系統，是否可保護工作人員與公眾免於輻射與火警災害。
- 2.須具有預防輻射與火災災害的防護規劃。

### 3.3.8 設計成果

為確保處置設施之各項設計，符合其設計目標與功能，並便於查閱與追蹤，各項設計成果，須提供下列資料供審查。

- (1)各重要設計成果之詳細圖說，應說明採用的比例尺。
- (2)各重要設計成果之細部報告及其相關附冊等。

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

- (1)各重要設計成果之詳細圖說是否完整。圖說比例尺是否適當性。
- (2)設計成果細部報告與附冊是否正確與完整。

### 3.4 審查發現

審查人員應審查確認安全分析報告中，有關本章節規定所提供資訊充分且完整適當，足以符合本章節要求，並確認與現行法規相符合，據此可得出評審結果，判定文件是否完備。

### 3.5 相關法規與技術規範

- (1) 低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則。
- (2) 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。
- (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。
- (4) 放射性物質安全運送規則。
- (5) 游離輻射防護法。
- (6) 游離輻射防護法施行細則。
- (7) 游離輻射防護安全標準。



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

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  
子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置結構  
穩定性驗證方法研究

計畫編號：105FCMA011

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)：社團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月

**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  
子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置結構  
穩定性驗證方法研究**

受委託單位：社團法人中華民國大地工程學會

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 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 79.68 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**

**中華民國 106 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

根據低放射性廢棄物處置技術先進國家的經驗，最終處置方式多採近地表處置，依廢棄物埋藏於地表或地下之方式，可再區分為(1)地表壕溝、(2)混凝土窖與(3)坑道處置三種。其中，坑道處置係將放射性廢棄物埋置於數十公尺的地下，透過工程障壁與天然障壁所構成的多重障壁系統，以限制或遲滯放射性核種的遷移。坑道處置在設計、建造、運轉與封閉等各階段，除了需考量場址特性的影響，所需技術也遠較其他處置方式複雜。

為能確保處置坑道在運轉階段能維持坑道結構之穩定性，本研究除蒐整低放射性廢棄物處置先進國家分析有關處置坑道結構穩定之經驗及國內既有的坑道結構穩定分析方法與驗證技術外，並進一步根據我國低放射性廢棄物可能場址，對鄰近既有坑道進行地質、建造過程與劣化現況之資料蒐集與現場調查。針對影響坑道結構穩定性之可能影響因子與肇因進行討論，並研析相關的數值分析、試驗與檢測等驗證方法，據此建立了外島與本島坑道處置結構穩定性審查之假想案例，提出我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性分析流程與驗證重點，及低放處置審查導則(第0版)相關條文修訂建議，俾為後續發展處置坑道結構穩定性審驗技術奠基，以縮短審驗技術發展時程。

關鍵詞：低放射性廢棄物處置、坑道處置、坑道結構穩定分析

---

## Abstract

With the international experiences of low-level radioactive waste disposal technology in the advanced countries, the final disposal of nuclear energy is mostly conducted near land surface. It could be divided into surface trenches, concrete vaults and deposition tunnels according to the waste buried location. Radioactive waste in the deposition tunnels is buried in tens of meters underground, it is restricted or delayed the migration of radioactive nuclear species through the multiple barrier system of artificial and natural barrier. The impacts of site characteristics during design, construction, operation, and closure phases need to be considered for the deposition tunnels, and the required technology is more complex than other disposal methods.

In order to ensure the stability of the tunnel structure during the operation phase, this study reviewed the experiences in the advanced countries about the stability analysis of low-level radioactive waste tunnels, and integrated domestic existing tunnel structure stability analysis methods and verification techniques. Furthermore, this research collected data and investigated the information on the current conditions of the existing tunnels in the potential low radioactive waste disposal site in our country. It discussed the potential factors which could affect the stability of tunnel structure, and analyzed the relevant numerical data, experiments, and detection methods. Thus, it established hypothetical review cases of tunnel structural stability, which could lay a review technique foundation and shorten the development process.

**Keywords: Low Level Radioactive Waste, Deposition Tunnel, Stability Analysis of Tunnel Structure**

---

---

## 目錄

摘要 .....	I
Abstract .....	II
目錄 .....	III
表目錄 .....	VI
圖目錄 .....	VII
第一章、前言 .....	1
1.1 計畫背景 .....	1
1.2 計畫目的與重要性 .....	1
1.3 計畫工作項目與期程規劃 .....	2
1.4 與本研究計畫有關之國外文獻 .....	3
1.5 報告內容 .....	4
第二章、國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法 .....	6
2.1 瑞典 SFR 長期穩定性分析 .....	6
2.1.1 場址介紹 .....	6
2.1.2 地質條件 .....	10
2.1.3 坑道裂隙測繪 .....	10
2.1.4 岩石與裂隙之力學參數 .....	13
2.1.5 回填材料力學參數 .....	16
2.1.6 現地應力 .....	17
2.2 “3DEC”數值分析 .....	18
2.2.1 數值模型尺寸 .....	18
2.2.2 分析模式 .....	19
2.2.3 數值模型觀測點 .....	22
2.2.4 長期劣化分析-強度參數折減模擬 .....	22
2.2.5 現地應力 .....	25
2.3 數值分析結果 .....	26

---

---

2.3.1 變形岩塊模型分析結果 .....	26
2.3.2 剛體岩塊模型分析結果 .....	32
2.4 小結 .....	33
第三章、國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法 .....	35
3.1 影響國內隧道結構穩定性之關鍵因子 .....	35
3.1.1 外力因素 .....	35
3.1.2 環境因素 .....	38
3.1.3 非力學因素 .....	39
3.2 隧道結構穩定性之分析方法 .....	39
3.2.1 有限元素法 .....	40
3.2.2 有限差分法 .....	40
3.2.3 邊界元素法 .....	41
3.2.4 離散元素法 .....	41
3.2.5 不連續變形分析法 .....	42
3.2.6 岩塊理論 .....	42
3.2.7 物理模型法 .....	42
3.3 隧道運轉階段結構穩定性之驗證方法 .....	43
3.3.1 光學檢測之類型 .....	44
3.3.2 微變形監測技術 .....	47
3.3.3 導電與電子檢測之類型 .....	50
3.3.4 物理波動檢測之類型 .....	52
3.3.5 其他檢測類型 .....	52
3.4 小結 .....	55
第四章、建立坑道處置結構穩定性審查假想案例 .....	56
4.1 建立本土坑道假想案例之重要性 .....	56
4.2 假想案例——外島翟山坑道 .....	57
4.2.1 地理位置 .....	57
4.2.2 金門島地質條件 .....	58
4.2.3 翟山坑道建造與營運歷史 .....	59

---



---

4.2.4 坑道出露之地質材料與地質構造 .....	60
4.2.5 坑道現況調查 .....	60
4.3 假想案例二—本島台鐵安朔隧道.....	69
4.3.1 地理位置 .....	69
4.3.2 地質條件、岩體分類與隧道斷面支撐工法 .....	69
4.3.3 安朔隧道施工階段之災變記錄 .....	72
4.3.4 檢測項目與方法 .....	73
4.4 小結.....	74
第五章、我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術.....	77
5.1 「無襯砌坑道」之結構穩定驗證方法.....	77
5.2 「襯砌坑道」之結構穩定驗證方法.....	82
5.3 處置坑道結構穩定性驗證方法之審驗技術.....	85
第六章、我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點.....	87
6.1 低放處置坑道結構穩定性模式審驗重點.....	87
6.2 低放處置審查導則(第0版)相關條文修訂建議.....	88
第七章、結論與建議.....	92
7.1 結論.....	92
7.2 建議.....	93
參考文獻.....	94
附錄 A 隧道施工規範、技術手冊及相關文獻.....	99
附錄 B 審查意見與處理情況.....	103
附錄 C 期末簡報.....	109

---

## 表目錄

表 1.3-1 計畫工作項目與期程規劃 .....	2
表 2.1-1 裂隙位態描述 .....	11
表 2.1-2 岩體力學參數 .....	13
表 2.1-3 破碎帶之岩體力學參數 .....	13
表 2.1-4 根據 163 組傾斜儀試驗獲得之節理粗糙度與摩擦角等參數 .....	15
表 2.1-5 根據 163 組傾斜儀試驗獲得之 MOHR-COULOMB 強度參數 .....	16
表 2.1-6 於數值模型中所採用的裂隙參數 .....	16
表 2.1-7 數值模型中採用之混凝土材料參數 .....	17
表 2.1-8 數值模型中採用之回填砂材料參數 .....	17
表 2.1-9 數值模型考量的現地應力與方向 .....	17
表 3.1-1 影響處置坑道襯砌結構穩定性之因素與現象 .....	36
表 3.1-2 岩心風化程度分類表 .....	38
表 3.3-1 隧道施工安全監測與營運安全檢監測之差異性比較 .....	48
表 3.3-2 定義不同尺度量測之比較 .....	49
表 3.3-3 各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測之比較 .....	54
表 4.2-1 金門坑道工程建設資料 .....	59
表 4.3-1 安朔隧道地質條件與施工期間破壞型式總表 .....	71
表 4.3-2 施工階段於安朔隧道之災變及其原因彙整 .....	72
表 4.3-3 營運期間於安朔隧道檢測項目、方法與檢測結果 .....	73
表 4.4-1 翟山坑道與安朔隧道假想案例資料彙整 .....	76
表 5.2-1 處置坑道檢監測項目與技術列表-岩石力學有關項目 .....	83
表 5.3-1 本文建議坑道處置結構穩定性分析流程 .....	86
表 6.1-1 坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點 .....	87
表 6.2-1 坑道處置結構穩定性分析流程與低放處置審查導則章節之關連性 .....	89
表 6.2-2 審查導則編修要點建議 .....	90

## 圖目錄

圖 1.4-1 已蒐集之重要報告文獻封面 .....	3
圖 2.1-1 瑞典 SFR 所處地理位置示意圖 .....	7
圖 2.1-2 SFR 地下空間立體視圖 .....	7
圖 2.1-3 SFR-1 所屬處置窖之(A)空間配置與(B)斷面形狀與尺寸 .....	8
圖 2.1-4 SFR-1 處置窖之斷面細部尺寸、廢棄物堆置情況及採取的封塞填充材料 .....	9
圖 2.1-5 SFR-1 處置場地質破裂帶之空間分佈圖 .....	10
圖 2.1-6 BMA 處置窖裂隙測繪圖 .....	11
圖 2.1-7 三維裂隙岩體網絡模型 .....	12
圖 2.1-8 以 SCHMIDT 等面積投影展示裂隙分佈 .....	12
圖 2.1-9 與處置窖長軸方向幾近垂直的二條節理其空間分佈 .....	13
圖 2.1-10 不同取樣深度條件下之強度與節理參數 .....	15
圖 2.2-1 SFR 處置窖長期穩定性數值模型 .....	18
圖 2.2-2 3DEC 數值模型裂隙分佈 .....	19
圖 2.2-3 變形塊體模型 .....	20
圖 2.2-4 變形塊體模型之坑道位置、尺寸及弱面分佈 .....	20
圖 2.2-5 變形塊體模型考慮的八組不同的裂隙網絡條件 .....	21
圖 2.2-6 剛體模型 .....	21
圖 2.2-7 數值模型觀測點設置位置 .....	22
圖 2.2-8 摩擦角與折減步次之關係曲線 .....	23
圖 2.2-9 逐次劣化影響範圍示意圖 .....	24
圖 2.2-10 以岩體強度折減情形下考量處置窖之長期穩定分析結果 .....	24
圖 2.2-11 考量現地應力作用下之垂直等應力線分佈圖 .....	25
圖 2.3-1 變形岩塊模型分析結果(位移量分佈) .....	27
圖 2.3-2 變形岩塊模型分析結果(最大主應力分佈) .....	27
圖 2.3-3 變形岩塊模型分析結果(塑性區分佈) .....	28
圖 2.3-4 變形岩塊模型分析結果(垂直向位移分佈) .....	29
圖 2.3-5 變形岩塊模型分析結果(最大主應力分佈) .....	30

---

圖 2.3-6 變形岩塊模型分析結果(塑性區分佈).....	31
圖 2.3-7 剛體岩塊模型在強度折減分析結果 .....	32
圖 2.3-8 剛體岩塊模型在強度折減分析結果 .....	33
圖 3.1-1 山岳隧道受震損害型態示意圖 .....	37
圖 3.2-1 FLAC 用於分析大地工程之示意圖.....	41
圖 3.2-2 日本學者之室內隧道實驗 .....	43
圖 3.3-1 TS360 系統 .....	45
圖 3.3-2 DIBIT 測量成果展開圖 .....	46
圖 3.3-3 曾文水庫防淤隧道工程豎井閘室(往上游測)光達掃描成果展示圖 .....	47
圖 3.3-4 曾文水庫防淤隧道工程豎井閘室襯砌微變監測技術作業架構 .....	48
圖 3.3-5 跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構 .....	49
圖 3.3-6 透地雷達原理示意圖 .....	50
圖 3.3-7 多相線性陣列電磁波雷達與傳統透地雷達比較 .....	51
圖 3.3-8 多相線性陣列電磁波雷達與隧道檢測車 .....	51
圖 4.1-1 國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較 .....	56
圖 4.2-1 翟山坑道位置示意圖 .....	57
圖 4.2-2 金門地質圖 .....	58
圖 4.2-3 翟山坑道現勘位置 .....	61
圖 4.2-4 翟山坑道入口處地質現況 .....	62
圖 4.2-5 翟山坑道入口處洞口防護設施 .....	62
圖 4.2-6 翟山坑道入口處岩坡風化情形 .....	63
圖 4.2-7 翟山坑道坑道段之圍岩 .....	64
圖 4.2-8 主要節理面位態 .....	65
圖 4.2-9 翟山坑道坑道段之地質現況 .....	65
圖 4.2-10 翟山坑道側壁之基性岩脈群(1).....	66
圖 4.2-11 翟山坑道側壁之基性岩脈群(2).....	67
圖 4.2-12 翟山坑道側壁之基性岩脈群(3).....	67
圖 4.2-13 翟山坑道頂拱處局部基性岩脈地下水入滲 .....	68
圖 4.2-14 翟山坑道側壁處基性岩脈與花崗片麻岩交界處已呈現風化現象 .....	68

---

---

圖 4.2-15	翟山坑道近出海口處節理密布，頂拱及側壁岩面呈現鏽染情況.....	69
圖 4.3-1	南迴線金崙隧道至安朔隧道區域地質圖.....	70
圖 4.3-2	安朔隧道支撐工法斷面圖.....	71
圖 5.1-1	無襯砌坑道主要的破壞模式.....	78
圖 5.1-2	無襯砌坑道之穩定性與破壞模式.....	79
圖 5.1-3	金門無支撐地下坑道安全檢測與評估流程圖.....	80
圖 5.1-4	金門無支撐地下坑道頂拱之地面光達掃描部分結果.....	81
圖 5.1-5	金門無支撐地下坑道頂拱之光學影像照片.....	81

---

## 第一章、前言

### 1.1 計畫背景

根據國際間低放射性廢棄物處置技術先進國家的經驗，最終處置方式多採近地表處置，依廢棄物埋藏於地表或地下之方式，可進一步區分為地表壕溝、混凝土窖與坑道處置三種；其中，坑道處置係將放射性廢棄物埋置於數十公尺的地下，透過工程障壁與天然障壁所構成的多重障壁系統，以限制或遲滯放射性核種的遷移，其在設計、建造、運轉與封閉等各階段，除了需考量場址特性的影響，所需技術也遠較其他處置方式複雜。

有鑑於坑道處置為我國低放射性廢棄物處置方式之潛在選項，同時考量我國地質條件具特殊性，為確保處置設施與處置坑道結構在運轉階段的穩定性，物管局102年與103年委託進行之「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展」(周鼎等人，2013)及「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)，已整理出處置坑道結構穩定之影響因素計有外力、環境與非力學因素；此外，在前期研究中亦藉由蒐集營運中交通隧道的維護經驗，整理了隧道襯砌異狀關鍵肇因，及其對應的檢測與監測方法(楊長義與李宏輝，2015)。為能確保處置坑道在運轉階段能維持坑道結構之穩定性，實有必要持續蒐整國際低放射性廢棄物處置先進國家之經驗與技術，並掌握國內既有的坑道結構穩定分析方法與驗證技術，以提升及具體落實低放處置審查技術之本土化。

### 1.2 計畫目的與重要性

本子項計畫延續前期研究，進一步針對低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性之驗證方法進行國際資訊蒐整與研析，同時考量本土地質條件之特殊性，亦將汲取國內隧道工程經驗，並根據我國低放射性廢棄物可能場址，對鄰近既有的坑道現況進行地質、建造歷史與現況之資料蒐集與調查，針對可能影響坑道結構穩定性之影響因子進行討論，及研析相關的數值分析、試驗與檢測等驗證方法，據此建立坑道處置結構穩定性審查假想案例，為後續發展處置坑道結構穩定性審驗技術奠基，並縮短審驗技術發展歷程。

### 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	106 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性驗證方法研究			※			※			※			※
國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析												
國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法												
建立坑道處置結構穩定性審查假想案例												
提出我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術												
提出我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證												
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 與本研究計畫有關之國外文獻

本研究於計畫執行期間，蒐集了國際低放射性廢棄物處置機構提出之相關技術報告，尤其以處置坑道結構穩定性有關之驗證方法與分析經驗，為本年度國際資訊研析之重點，已蒐整之主要技術文獻其報告封面如圖1.4-1所示。

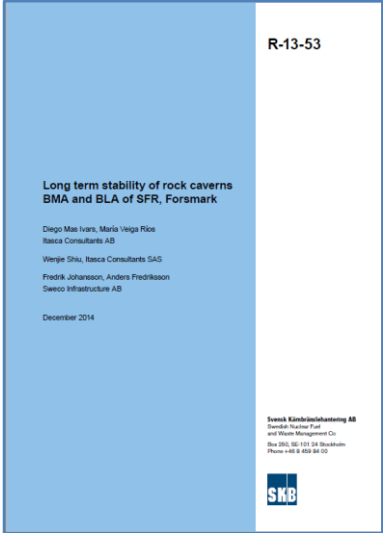
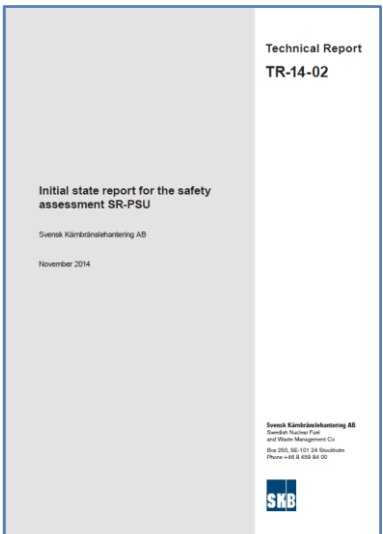
	<p>SKB, 2014. Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark. (R-13-53)</p> <p>SKB針對SFR-1的BMA與BLA處置窖的長期穩定性進行之三維數值分析。</p>
	<p>SKB, 2014. Initial state report for the safety assessment SR-PSU. (TR-14-02)</p> <p>SKB於2014年整理SFR-1、SFR-3各處置坑道之設施介紹、各元件尺寸、設計考量因素、檢監測項目與封閉規劃。</p>

圖1.4-1 已蒐集之重要報告文獻封面



---

## 1.5 報告內容

本研究之工作項目細分為「國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析」、「國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法」、「建立坑道處置結構穩定性審查假想案例」、「提出我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術」及「提出我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證」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題列各章標題，其內容分別如下列所述：

### 第二章 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法

針對坑道處置結構穩定性之驗證方法，本項工作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性驗證方法有關之現地試驗、檢監測項目、數值分析與工程案例等相關經驗與成果。

### 第三章 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法

根據國內一般坑道襯砌之異狀統計資料顯示(周鼎等人，2013；楊長義與李宏輝，2014)，常見的襯砌異狀依序為裂縫、滲漏水與剝落，造成上述襯砌結構異狀的影響因素包括了外力(地震作用、邊坡運動與開挖擾動)、環境(風化作用與岩石依時變形特性)與非力學因素(混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足...等)，由於上述襯砌異狀攸關處置坑道結構穩定性，甚至可能影響處置坑道在運轉階段之功能性與使用性，透過國內一般坑道其在設計、建造與運轉階段之相關技術報告蒐整研析，釐清影響坑道結構穩定性之關鍵因子，與符合國內地質與環境條件所採取的驗證方法，為本項工作重點。

### 第四章 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例

根據我國低放射性廢棄物可能場址所處場址特性與可能採取的處置坑道型式，以台灣本島(有襯砌結構)或外島(無襯砌結構)既有坑道為假想案例，蒐集坑道結構在運轉階段可能產生的裂縫、滲漏水與剝落等異狀，並針對其可能的肇因與驗證方法進行討論。

---

## 第五章 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術

綜整第二、三、四章成果，依我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道型式，整理出處置坑道結構在運轉階段可能產生之異狀及坑道結構穩定性之驗證方法。

## 第六章 我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點

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性模式驗證重點，此外並依「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 結論與建議

綜整本研究成果並提出結論與建議，供未來相關研究與應用之參考。

## 第二章、國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法

本章整理瑞典SFR處置場針對1BMA與1BLA處置窖，採數值方法進行之長期穩定性分析，內容含括場址介紹、地質條件、裂隙調查及數值模型建模及其分析過程與結果，相關經驗值得我國參考。

### 2.1 瑞典 SFR 長期穩定性分析

瑞典SFR中、低放處置場在TR-14-01長期安全評估技術報告中 (SKB, 2014)，曾針對處置窖在沒有適當的回填，及10,000年的時間尺度條件，評估了處置窖周圍岩壁可能因岩體風化、強度降低而導致岩體鬆動，進而造成岩塊掉落的可能性。在長時間條件下，處置窖周圍岩體的鬆動，可能造成處置窖的混凝土結構之尺寸、幾何形狀和性質改變，也會引起滲流流量和滲流方向的變化，影響放射性核種傳輸(SKB, 2008)。

基於上述考量，SKB利用 3DEC 數值分析工具進行處置窖的長期穩定性分析，分析過程考慮了處置場之地質條件、岩石力學特性與處置窖幾何尺寸等，其相關分析方法與經驗結果，可供我國未來低放處置坑道進行長期穩定分析之參考。

#### 2.1.1 場址介紹

瑞典SFR中低放廢棄物處置場位於Forsmark核電廠附近離岸約一公里遠，在波羅的海海面下50公尺深的海床內(海水覆蓋深度約5公尺)，其地理位置如圖2.1-1所示。SFR-1處置場從1976年開始規劃，1983年取得建造許可，1988年取得運轉許可，目前係由SKB公司委託電廠代為營運。SFR-1處置場處置容量可達63,000立方公尺，延伸計畫SFR-3處置場將再興建5條處置坑道及1條專為核電廠反應器壓力槽的處置坑道，詳圖2.1-2，預計可處置108,000立方公尺廢棄物。

SFR-1處置場目前接收中放射性廢棄物與低放射性廢棄物，主要是核電廠運轉產生的放射性廢棄物，以及醫療、工業及研究機構所產生的低放射性廢棄物(SKB, 2011a)。SFR-1處置場位在海床的下方，故透過二條平行之交通隧道以連接Forsmark核電廠(NPP)。目前的SFR-1處置場，包含一個處置筒倉(Silo)與四條岩盤處置窖(Rock vault)，以因應不同的廢棄物種類。廢棄物處置筒倉(Silo)位處海平面下60公尺處，筒倉底部位置更深達

海平面下130公尺處。SFR-1處置場的四條處置窖坑道，其空間配置與斷面形狀及尺寸，詳圖2.1-2至圖2.1-4所示。



圖2.1-1 瑞典SFR所處地理位置示意圖(SKB, 2008)

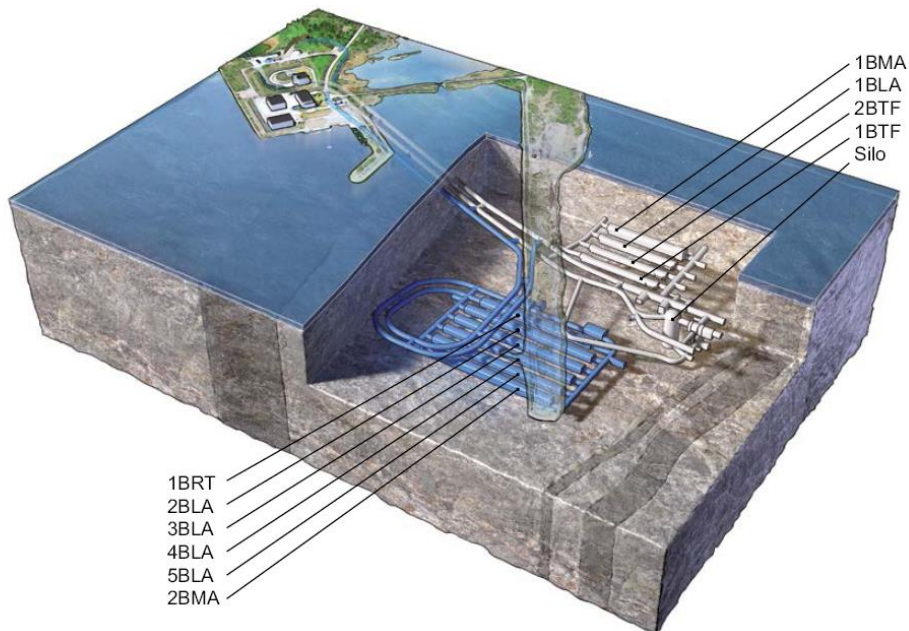


圖2.1-2 SFR 地下空間立體視圖。淺灰色部分為現有的SFR-1處置場、藍色部分為計畫擴建的SFR-3部分。處置窖包括了1-2 BMA處置窖、1-5BLA處置窖、1-2BTF處置窖、筒倉與BRT處置窖(SKB, 2014a)

1BTF與2BTF處置窖寬約15公尺、高約9.5公尺、長160公尺，主要的廢棄物種類為脫水的低放射性離子交換樹脂。處置窖側壁與頂拱均施作噴凝土襯砌，底板則為混凝土澆置而成，下方為排水性良好的基礎，沿著兩側岩壁設置了1公尺高的護壁板(baseboard)。1BTF處置窖規劃存放鋼桶(steel drum)形式的廢棄物包件(waste packaging)，為能提供鋼桶良好的支撐，混凝土槽係沿著坑道方向放置兩側，以混凝土箱(concrete mould)組成隔牆(partition wall)，鋼桶置入後逐一進行灌漿填封作業。2BTF處置窖的廢棄物包件僅有混凝土槽(concrete tank)，其堆置方式為一層排有四個混凝土槽，一個工作面堆置二層，完成堆置後以預先組裝而成的混凝土元件覆蓋其上作為輻射屏蔽。BLA處置窖部分，主要是存放低放射性且經過固化處理的廢棄物，處置窖寬15公尺、高12.5公尺、長160公尺，使用起重機將貨櫃逐一堆疊處置，貨櫃以兩排平行存放，如圖2.1-4所示，依貨櫃的尺寸(視貨櫃為full-height或half-height) 每排堆疊3或6層，處置窖的排水基礎澆注混凝土板，岩壁和頂拱施作噴凝土。

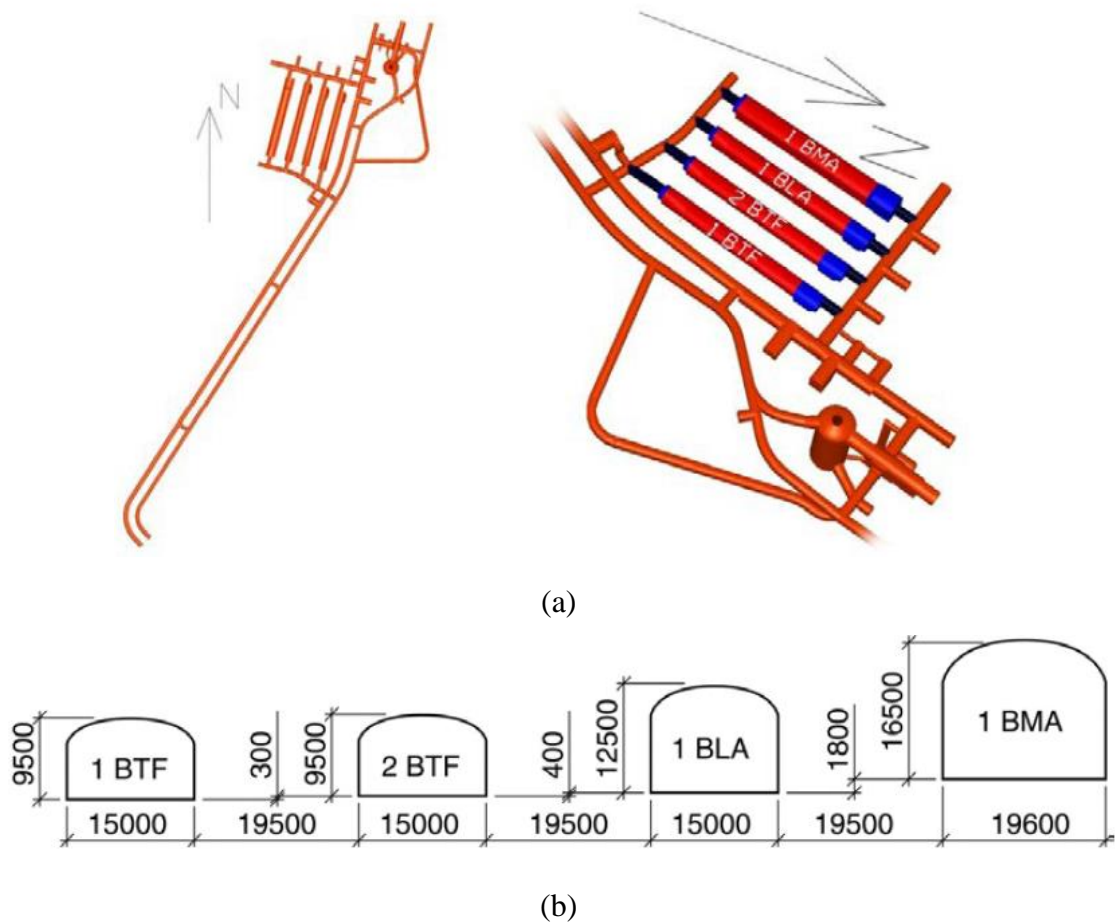
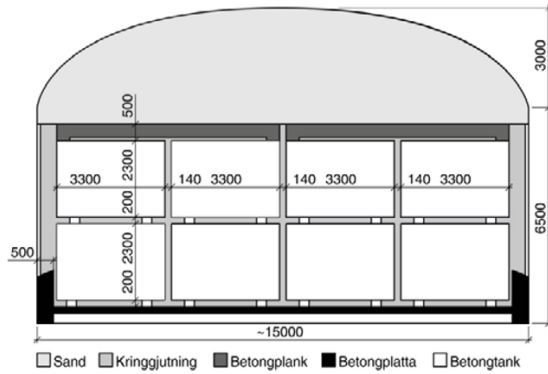


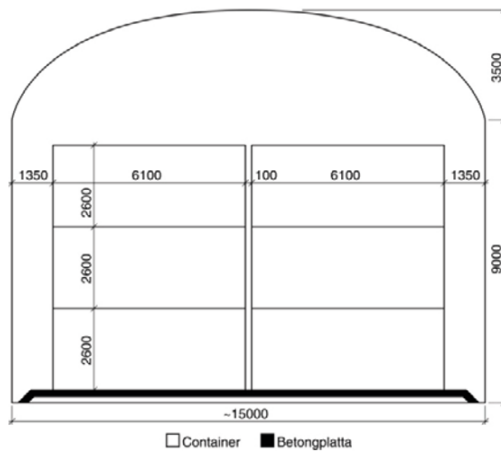
圖2.1-3 SFR-1所屬處置窖之(a)空間配置與(b)斷面形狀與尺寸 (SKB, 2014b)

Length: 160 m  
 Width: 15 m  
 Height of walls: 6.5 m  
 Height of tunnel arch: 3 m  
 Total height: 9.5 m  
 Total volume: 19,700 m<sup>3</sup>



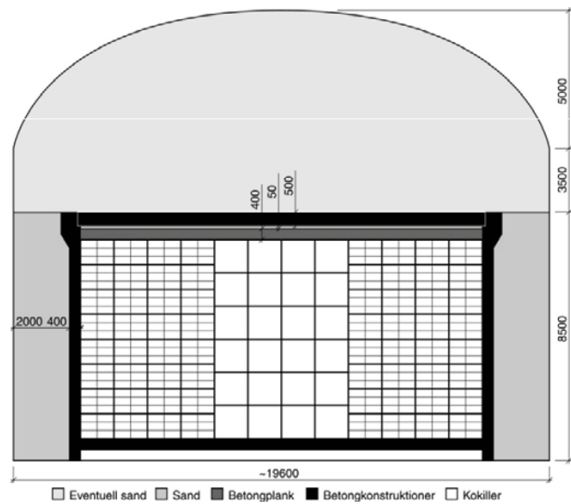
(a)

Length: 160 m  
 Width: 15 m  
 Height of walls: 9 m  
 Height of tunnel arch: 3.5 m  
 Total height: 12.5 m  
 Total volume: 27,600 m<sup>3</sup>



(b)

Length: 160 m  
 Width: 19.6 m  
 Height of walls: 11.5 m  
 Height of arch: 5 m  
 Total height: 16.5 m  
 Total volume: 47,650 m<sup>3</sup>



(c)

圖2.1-4 SFR-1處置窖之斷面細部尺寸、廢棄物堆置情況及採取的封塞填充材料：(a)1BTF與2BTF、(b)BLA與(c)BMA (SKB, 2014b)

### 2.1.2 地質條件

SFR的母岩種類含括了三種不同的岩石種類(SK B, 2011b)，分別是長英質(Felsic)至中等變質火山岩類(Intermediate metavolcanic rocks)、屬Svecofennian生成年代之近花崗岩類(Granitoid)與粗顆粒狀之偉晶岩類(Pegmatite)。在地質破裂帶(Fracture zones)部分，Forsmark區域的原岩條件多呈現塊狀形態(block-like pattern)的破裂，變形特性明顯的區域為地質破裂帶，依規模大小區分為二，破裂區範圍超過10公里者屬區域性破裂區(regional zones)，範圍低於10公里者屬局部破裂區(local zones)(Andersson, 2000)。SFR-1處置場地質破裂帶之空間分佈圖如圖2.1-5所示。

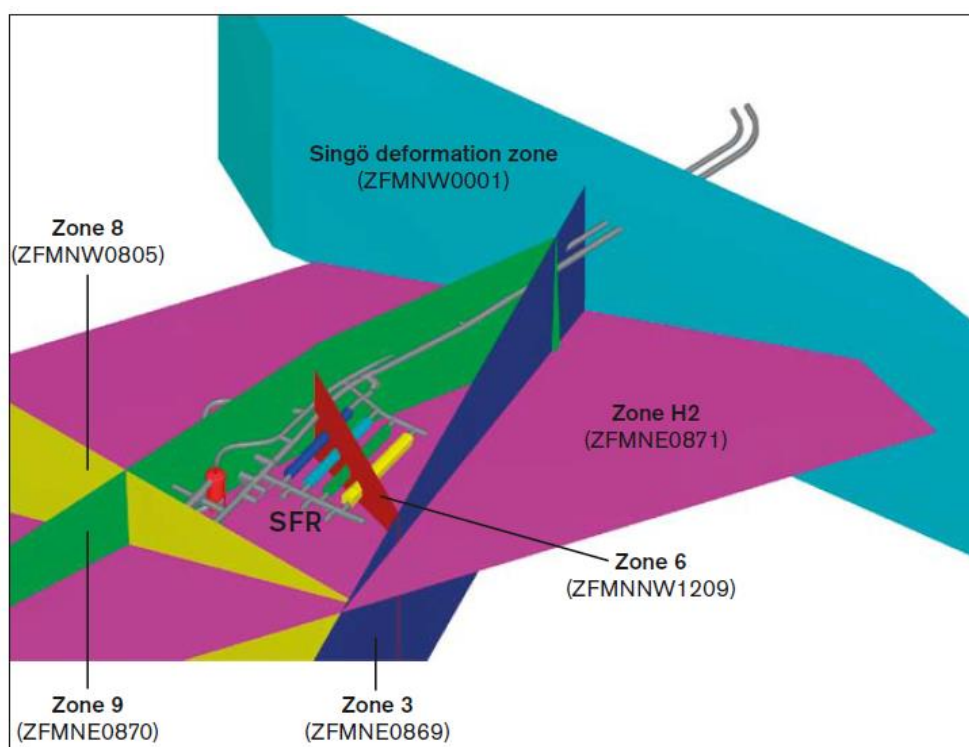


圖2.1-5 SFR-1處置場地質破裂帶之空間分佈圖(SK B, 2011b)

### 2.1.3 坑道裂隙測繪

SKB進行了坑道裂隙測繪(fracture mapping of caverns)，藉以瞭解地質破裂帶及岩體裂隙對處置坑道的影響，並作為後續數值分析建模之依據，以BMA處置窖為例，其裂隙測繪結果如圖2.1-6。在現地裂隙調查過程中，對於處置窖沿線的地質主控構造(dominant structure)、具規律性出現的地質構造與不具規律性但經研判其對處置窖穩定性可能有影響的裂隙，均詳實計載於坑道裂隙測繪圖中。現地調查結果，判釋出可能影響處置窖穩

定性之弱面(節理面)計三組，如表2.1-1，表列之弱面走向係相對於處置窖長軸方向(處置窖長軸方向為N30°E)。另外，根據表2.1-1可進一步建構裂隙岩體網絡(discrete fracture network, DFN)模型，如圖2.1-7，與等面積投影展示之裂隙分佈，如圖2.1-8。

調查結果亦顯示，走向幾乎與處置窖長軸方向互為垂直之弱面計有兩條，第一條之傾角與傾向分別為27°與161°，第二條則為70°與25°，節理內寬約1公尺，如圖2.1-9。

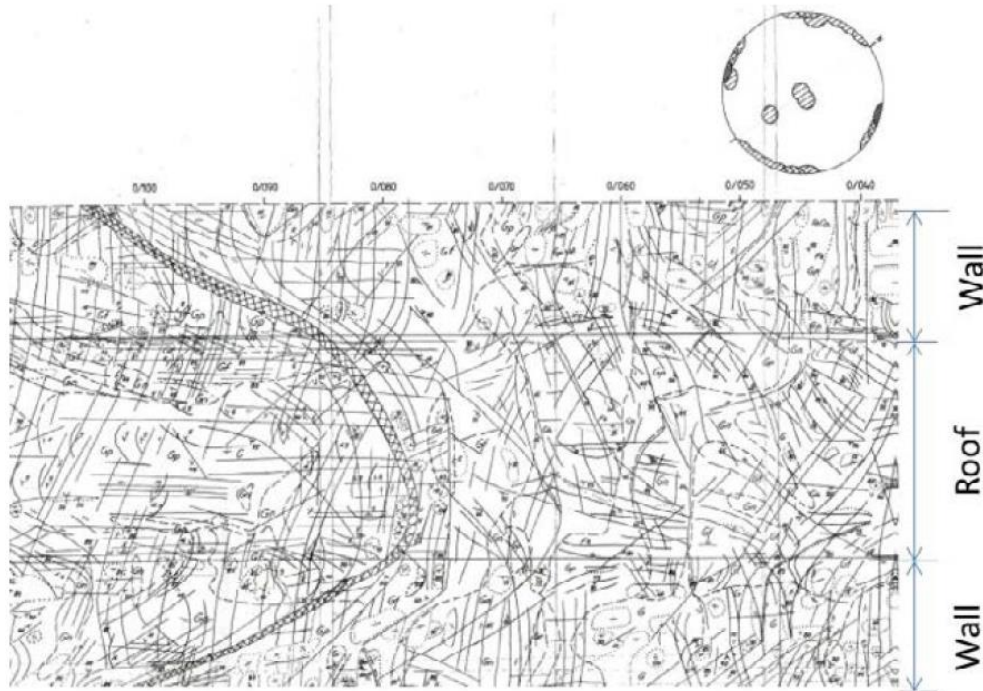


圖2.1-6 BMA處置窖裂隙測繪圖(SKB, 2014c)

表2.1-1 裂隙位態描述(SKB, 2014c)

Strike of fractures with respect to longitudinal axis of caverns [°]	Dip [°]	Average distance between fractures
13 ± 20	90 ± 5	2 m
97 ± 27	90 ± 14	2 m
0 ± 180	0 ± 17	3 m

註：處置窖長軸方向為N30°E



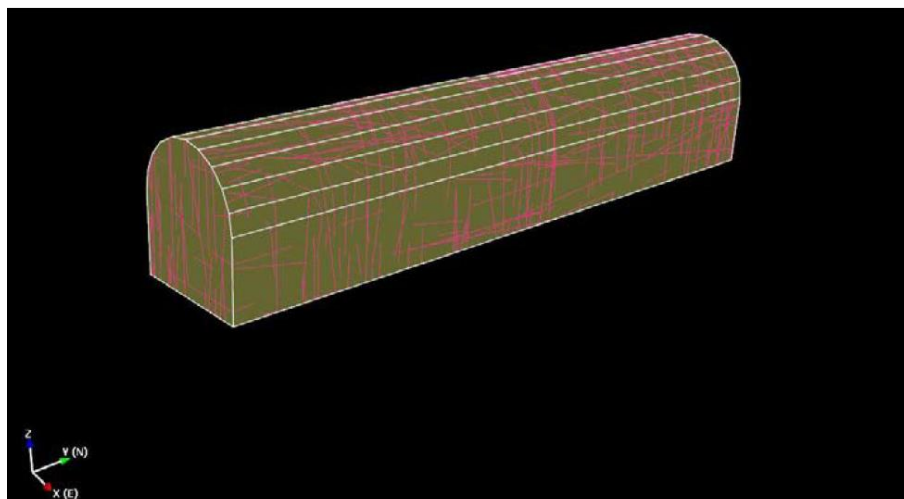


圖2.1-7 三維裂隙岩體網絡模型(SKB, 2014c)

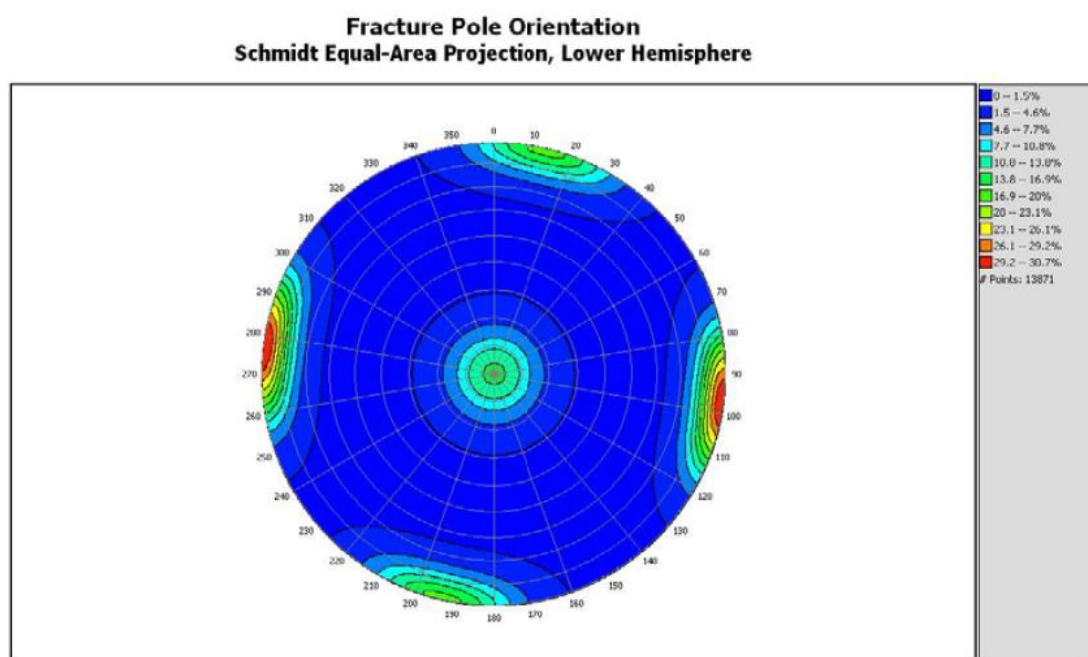


圖2.1-8 以Schmidt等面積投影展示裂隙分佈(SKB, 2014c)

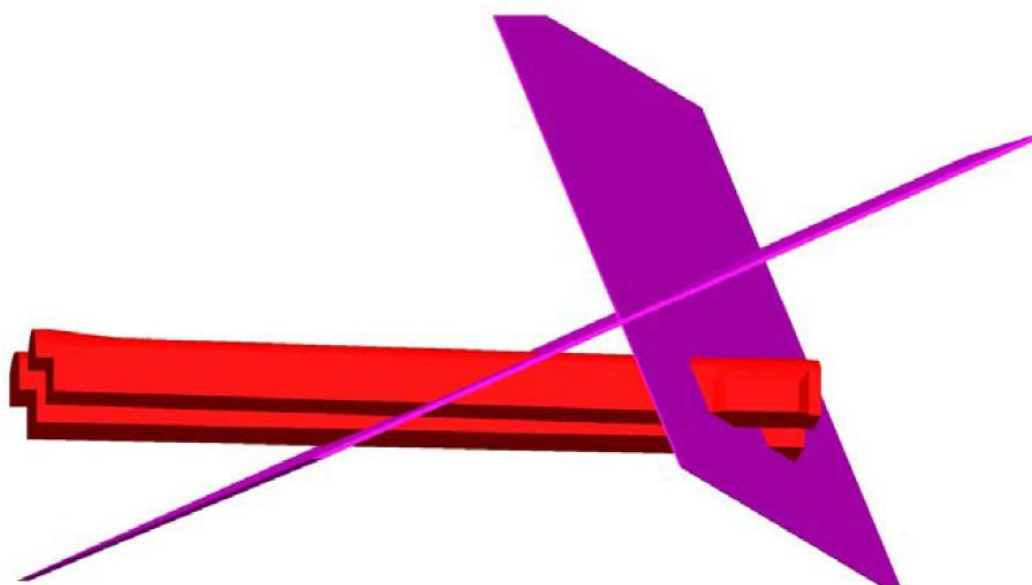


圖2.1-9 與處置窖長軸方向幾近垂直的二條節理其空間分佈(SKB, 2014c)

### 2.1.4 岩石與裂隙之力學參數

嚴謹的數值分析，其在模型尺寸、網格精度、邊界條件、材料組成律與材料之物性與力學特性等參數，須審慎規劃與選定。為建構合理的數值分析模型，SKB根據Glamheden等人(2007a)的調查及反算分析(back analysis)結果，選定岩體力學參數，詳如表2.1-2與表2.1-3所示。其中，表2.1-2為二條節理之間之岩體力學參數，表2.1-3為破碎帶之岩體力學參數，雖然破碎帶岩體有較高的摩擦角，但其凝聚力與抗張強度均小於破碎帶以外之岩體參數。

表2.1-2 岩體力學參數(SKB, 2014c)

Modulus of deformation [GPa]	Poisson's ratio [-]	Friction angle [°]	Cohesion [MPa]	Tensile strength [MPa]	Dilation angle [°]
60	0.23	40	23.3	-6.8	15

表2.1-3 破碎帶之岩體力學參數(SKB, 2014c)

Modulus of deformation [GPa]	Poisson's ratio [-]	Friction angle [°]	Cohesion [MPa]	Tensile strength [MPa]	Dilation angle [°]
16	0.43	51	2.0	-0.1	15

在裂隙力學參數部分，主要是根據 Barton and Choubey (1977)提出的尖峰剪力強度準則(Empirical peak shear strength criterion)：

$$\tau_p = \sigma_n \tan[JRC \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n}) + \phi_b] \quad (2.1)$$

其中，節理粗糙係數(JRC)與節理側壁強度 (JCS)其值與選取的裂隙長度有關，所獲得的量測結果轉換為標準裂隙長度100 mm之量測值，標示為JRC<sub>100</sub> 及JCS<sub>100</sub>。此外， $\phi_b$  裂隙(或節理面)的基本摩擦角，若裂隙為潮溼條件，節理面基本摩擦角  $\phi_b$  應修正為殘餘摩擦角  $\phi_r$ 。當正向應力  $\sigma_n$  達到一定程度以上，可利用式(2.1)評估 Mohr-Coulomb強度準則之力學參數，如式(2.2)：

$$\tau_p = c_p + \sigma_n \tan \phi_p \quad (2.2)$$

其中， $c_p$  與  $\phi_p$  為尖峰凝聚力與尖峰摩擦角，若節理或裂隙的剪力行為已達峰後條件，其強度準則力學參數應修正為  $c_r$  與  $\phi_r$ ，即殘餘凝聚力與殘餘摩擦角。SKB在處置場場址進行大量的鑽探與試驗研究，並整理出基本摩擦角  $\phi_b$ 、殘餘摩擦角  $\phi_r$ 、JRC<sub>100</sub> 及 JCS<sub>100</sub>與取樣深度的關係，如圖2.1-10，其結果顯示：(i)隨著取樣深度越深，基本摩擦角  $\phi_b$  與殘餘摩擦角  $\phi_r$  有略為增加的趨勢、(ii) JRC<sub>100</sub> 與 JCS<sub>100</sub> 與取樣深度無關。

此外，Glamheden等人(2007b) 根據163組傾斜儀試驗，整理了節理粗糙度、摩擦角與Mohr-Coulomb強度參數，如表2.1-4與表2.1-5，在數值模型中，所採用的裂隙材料參數如表2.1-6所示。

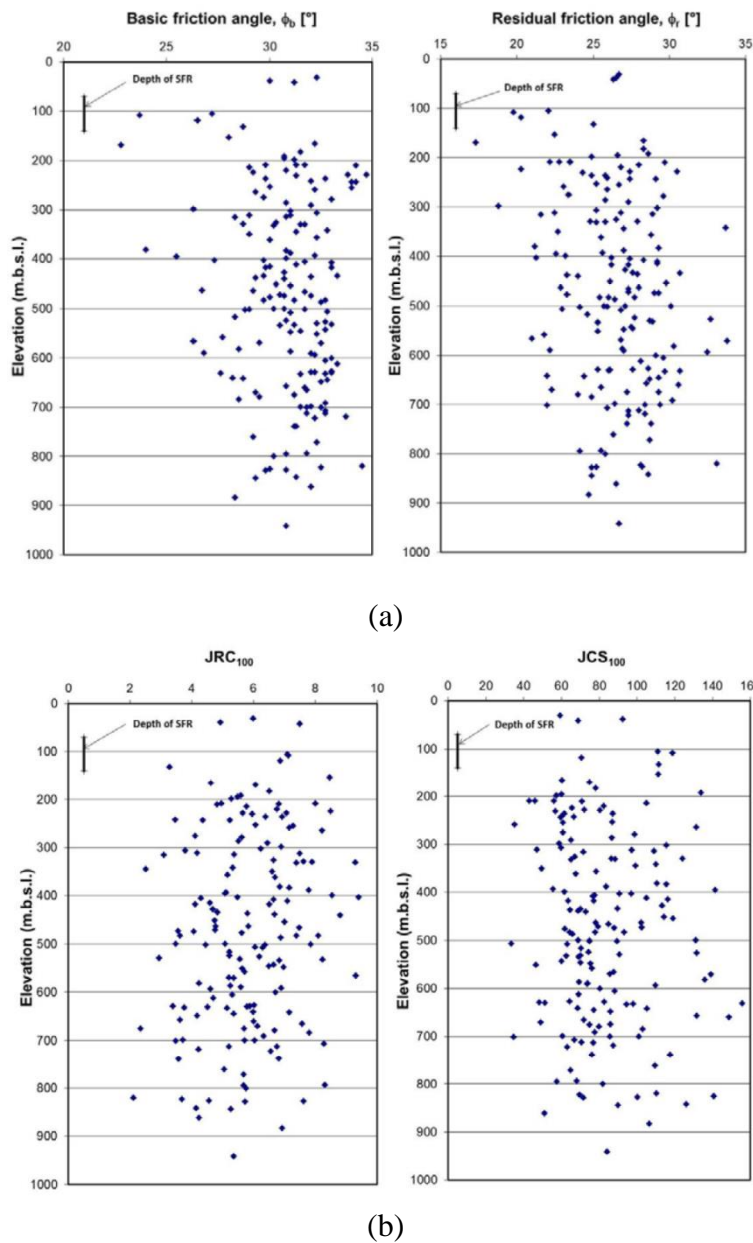


圖2.1-10 不同取樣深度條件下之強度與節理參數：(a)基本摩擦角與殘餘摩擦角、(b) JRC<sub>100</sub> 與 JCS<sub>100</sub> (SKB, 2014c)

表2.1-4 根據163組傾斜儀試驗獲得之節理粗糙度與摩擦角等參數(SKB, 2014c)

	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Basic friction angle (°)	22.8	30.8	31.2	34.7	2.0
JRC <sub>100</sub>	2.1	5.8	5.8	9.4	1.5
JCS <sub>100</sub> MPa	33	83	77	156	25
Residual friction angle (°)	17.3	26.4	26.7	33.8	2.9

表2.1-5 根據163組傾斜儀試驗獲得之Mohr-Coulomb強度參數(SKB, 2014c)

Parameter	Minimum	Mean	Median	Maximum	Std.dev
$\phi_p, ^\circ$	25.8	33.8	33.9	37.7	1.9
$c_p, \text{MPa}$	0.2	0.5	0.5	0.8	0.1
$\phi_r, ^\circ$	20.3	29.4	29.6	37.9	3.0
$c_r, \text{MPa}$	0.2	0.4	0.4	0.7	0.1

表2.1-6 於數值模型中所採用的裂隙參數(SKB, 2014c)

Friction angle, $\phi_r$ [ $^\circ$ ]	Cohesion, $c_r$ [MPa]	Normal stiffness [GPa/m]	Shear stiffness [GPa/m]
25.0	0.05	80.0	2.0

此外，在SKB R-13-53(SKB, 2014)技術報告中，說明了幾點有關裂隙參數選定與假設的考量：

- (1) 膨脹角(dilation angle)假設為零。
- (2) 不考慮孔隙水壓力的影響(現地的壓力水頭約 60公尺，孔隙水壓力為 0.6 MPa)。
- (3) 風化作用下，節理面JCS值將折減，當 $JCS/\sigma_n=1$ 時( $\sigma_n$ 為正向應力，與岩覆深度有關)以式(2.3)取代式(2.1)：

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \tag{2.3}$$

- (4) 殘餘摩擦角部分，根據Barton(2002)的研究，指出節理含泥條件下，其殘餘摩擦角約為8至17度；根據Forsmark地區之傾斜儀試驗結果，節理面在不含夾泥條件下之殘餘摩擦角約為15至17度，對於風化之裂隙其殘餘摩擦角最低值約8度。

### 2.1.5 回填材料力學參數

在BMA處置窖的長期穩定性模擬分析，亦將回填材料納入考量，其回填材料包括混凝土與砂，材料參數如表2.1-7與表2.1-8。

表2.1-7 數值模型中採用之混凝土材料參數(SKB, 2014c)

Modulus of deformation [GPa]	Poisson's ratio [-]	Friction angle [°]	Cohesion [MPa]	Tensile strength [MPa]	Dilation angle [°]
17	0.15	38	8.17	1.05	10

表2.1-8 數值模型中採用之回填砂材料參數(SKB, 2014c)

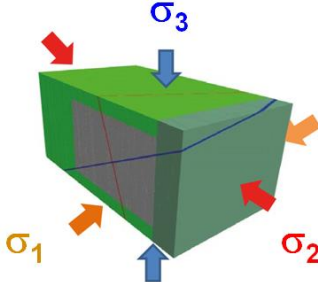
Modulus of deformation [MPa]	Poisson's ratio [-]	Friction angle [°]	Dilation angle [°]
6	0.3	32	15

### 2.1.6 現地應力

根據SKB(2002)的現地應力量測與分析報告，數值模型採用的現地應力如表2.1-9。

表2.1-9 數值模型考量的現地應力與方向

$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
$\sigma_h, \text{MPa}$	$\sigma_h, \text{MPa}$	$\sigma_v, \text{MPa}$
$4.8 + 0.095 \cdot z$	$1.4 + 0.028 \cdot z$	$0.027 \cdot z$



## 2.2 “3DEC”數值分析

為探討處置窖因岩體在長時間條件下，可能因長期劣化(long term degradation)導致岩體崩解(decomposition of rock mass)之可能影響，採用的數值工具為ITASCA公司出版的3DEC三維離散體分析軟體，屬隧道工程與岩石邊坡工程等岩石力學相關領域所採用之數值工具。根據SKB在1BMA與1BLA處置窖長期穩定性數值分析經驗，分析程序為：

- (1) 輸入初始材料參數並選定彈性模式進行運算。
- (2) 完整岩石部分改採莫爾-庫倫材料模式(Mohr-Coulomb)，裂隙部分更改為庫倫滑移裂隙模式(Coulomb slip fracture mode)，並進行運算直到滿足平衡條件。
- (3) 處置窖開挖模擬。
- (4) 1BMA處置窖回填砂土與混凝土後之模擬分析。
- (5) 針對處置窖周圍岩體的強度參數進行折減與模擬。
- (6) 重複步驟(5)，直到(i)岩塊開始掉落(針對變形岩塊模型)至處置窖，或(ii)處置窖填滿岩塊(針對剛體岩塊模型)。

上述步驟中，項次(5)係藉著強度參數的折減以反映地質材料長期劣化的影響，SKB在此一部分提出的作法與經驗，可作為我國未來在處置窖長期穩定分析之參考。

### 2.2.1 數值模型尺寸

考量數值運算效能，所建立的3DEC長期穩定分析模型僅考量 BMA與BLA兩個相鄰的處置窖，模型尺寸為240 × 140 × 100公尺，如圖2.2-1(a)，且為軸對稱之3DEC 數值模型，如圖2.2-1(b)。

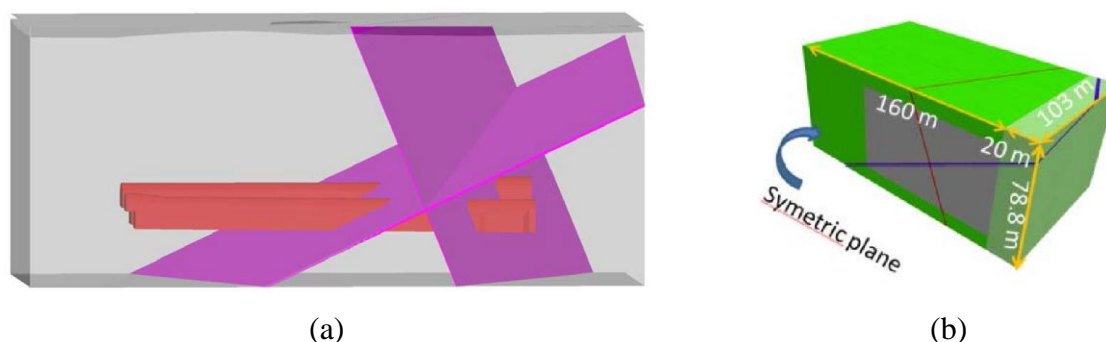


圖2.2-1 SFR處置窖長期穩定性數值模型(a)模型尺寸為 240 × 140 × 100 m、(b)為軸對稱之3DEC 數值模型 (SKB, 2014c)

此外，在變形塊體模型分析中(詳2.2.2節)，3DEC模型區的裂隙分佈區分內、外二區，如圖2.2-2所示，內區如圖中灰色部分，其裂隙分佈密度較高，外區如綠色部分，其裂隙分佈密度較低。

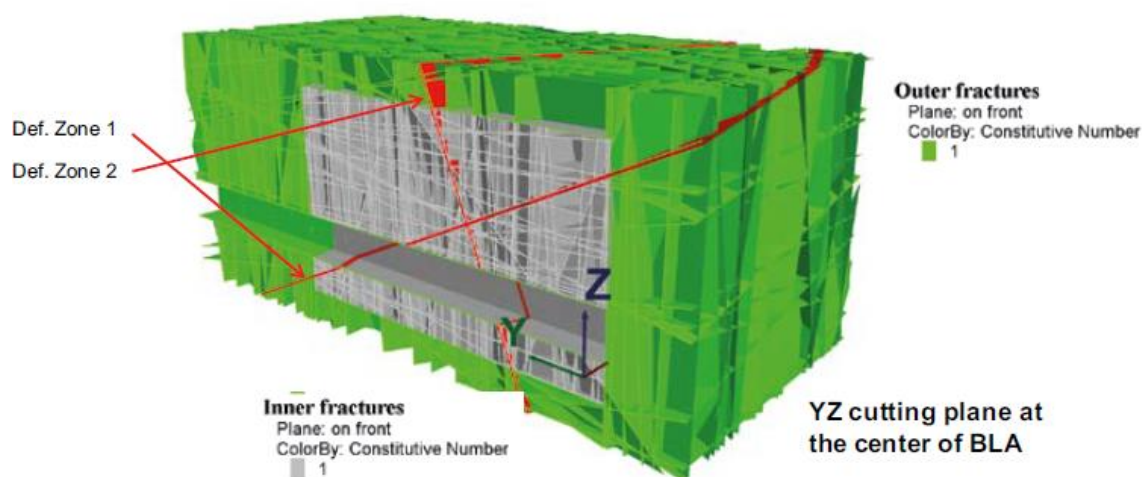


圖2.2-2 3DEC 數值模型裂隙分佈 (SKB, 2014c)

## 2.2.2 分析模式

3DEC長期穩定分析模型考量了兩種分析模型(analyzed models)，分別是變形塊體模型(models with deformable blocks)與剛體模型(models with rigid blocks)。在變形塊體模型條件下，坑道位置、尺寸及兩條主要弱面分佈，詳如圖2.2-3所示，並將BMA處置窖封閉後，填入混凝土與回填砂亦一併納入模擬與分析，如圖2.2-4。相關考量說明如下：

- (1) 根據表2.1-1裂隙位態描述，經統計分析整理出 8 組不同的裂隙網絡，如圖2.2-5。
- (2) 變形岩塊模型運算較為耗時(一組模型約需3個月始能完成分析)。
- (3) 所有的裂隙(fracture)均為完全的平面之無限結構(perfectly planar and infinite structure)，模型中同時考量了兩條影響處置坑道穩定性之弱面，並根據調查結果設定弱面內寬為1公尺。
- (4) 當岩體產生明顯的位移，則停止程式運算；模擬岩塊開始掉落時的裂隙摩擦角，定義為臨界摩擦角(the critical friction angle)。
- (5) 數值模型區分：(i)外部岩體區(outer zone)與(ii)內部岩體區(inner zone)，二者的裂隙間距不同，模擬之BMA與BLA處置窖位於內部岩體區。

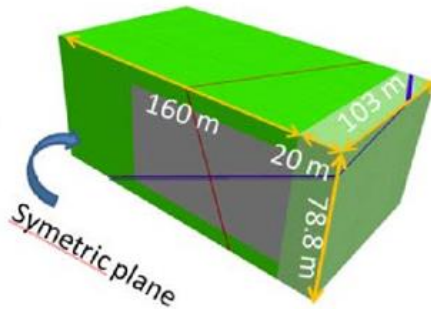


**3DEC DP 4.20**

©2011 Itasca Consulting Group, Inc.  
 Step 0  
 18/11/2011 16:54:28

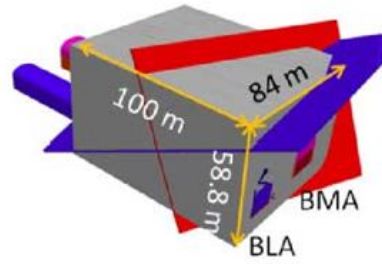
**Block**

- Colorby: Region
- inner blocks
  - deformable zone 2
  - deformable zone 1
  - outer blocks
  - BLA
  - BMA
  - concrete
  - sand



Outer rock

外部岩體區，裂隙間距 6 m



Inner rock

內部岩體區，裂隙間距 2~3 m

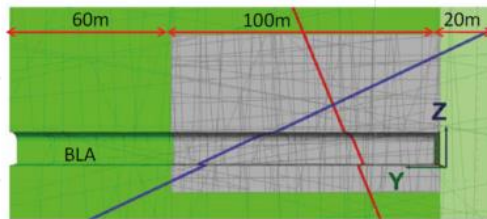
圖2.2-3 變形塊體模型(models with deformable blocks) (SKB, 2014c)

**3DEC DP 4.20**

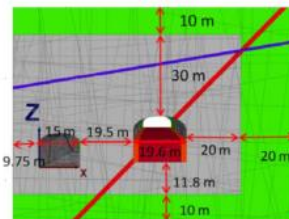
©2011 Itasca Consulting Group, Inc.  
 Step 0  
 18/11/2011 16:41:32

**Block**

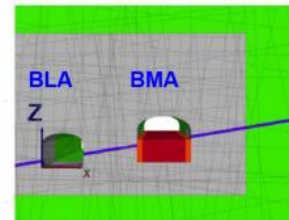
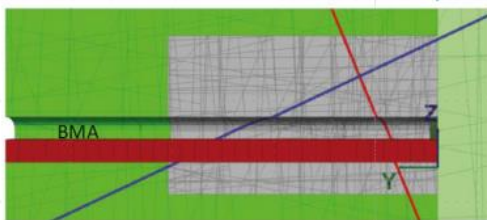
- Plane: on front  
 Colorby: Region
- inner blocks
  - deformable zone 2
  - deformable zone 1
  - outer blocks
  - BLA
  - BMA
  - concrete
  - sand



平行處置窖長軸方向之縱斷面  
 (y軸方向為處置窖長軸方向)



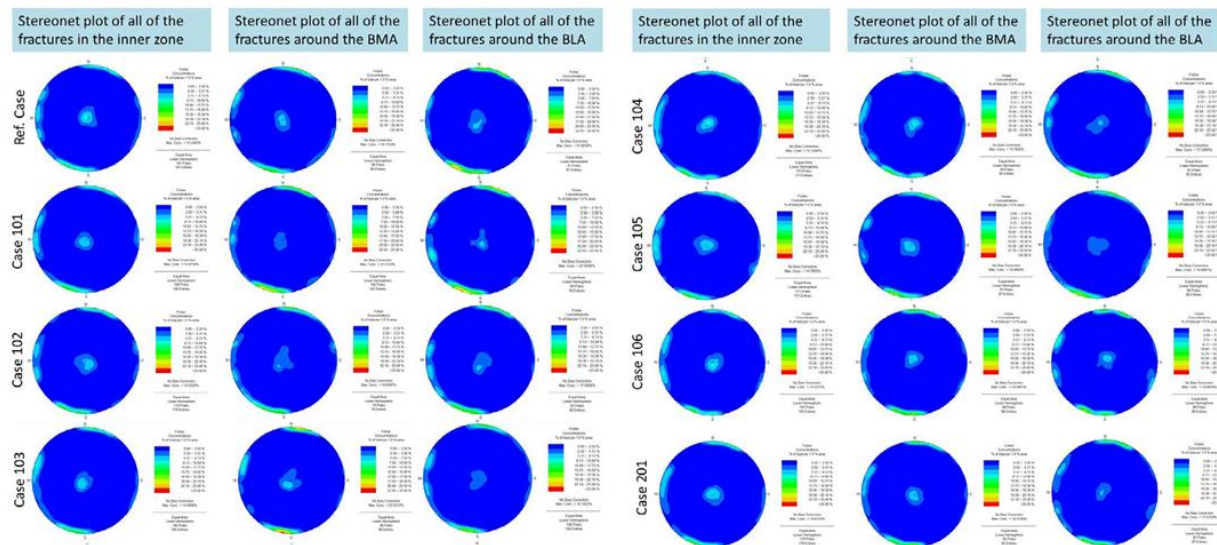
Deformation zone 2 (red intersects the center of BMA at about Y = 80 m



Deformation zone 1 intersects the center of BMA at about Y = 20 m

垂直處置窖長軸方向之橫斷面  
 (BMA處置窖中，紅色與深紅色分別為模擬砂與混凝土的填入)

圖2.2-4 變形塊體模型之坑道位置、尺寸及弱面分佈(SKB, 2014c)



變形岩塊模型(deformable block models)採用之8組不同的裂隙網絡條件

圖2.2-5 變形塊體模型考慮的八組不同的裂隙網絡條件(SKB, 2014c)

在剛體模型部分，如圖2.2-6，相關考量說明如下：

- (1) 僅考慮兩種分析案例：(i)根據裂隙的平均位態(走向與傾角)設置裂隙網絡、(ii)考量最不利的裂隙位態分佈，於特定的裂隙位態標準差條件下設置裂隙網絡，此分析案例是為參考案例(Ref. case)。
- (2) 評估處置窖在封閉後，因材料劣化導致岩體強度降低甚而喪失，進而造成岩體潰塌(total collapse)，岩塊填滿處置窖。
- (3) 剛體岩塊模型分析時間較為省時快速。

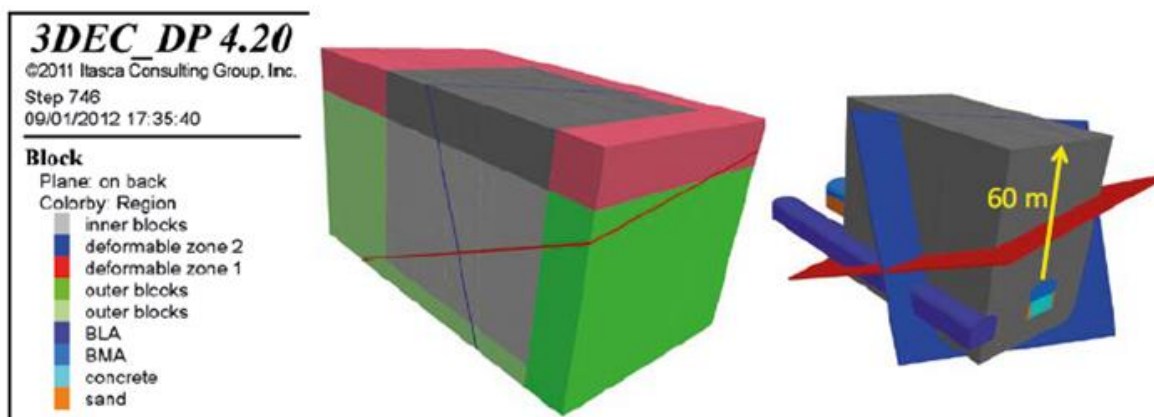


圖2.2-6 剛體模型(models with rigid block) (SKB, 2014c)

### 2.2.3 數值模型觀測點

由於SFR處置場址計有兩條變形帶弱面對坑道穩定性有潛在影響，故在 3DEC 模型中，除考慮岩體裂隙外，亦根據實際的地質調查結果，依變形帶的位態與內寬建立弱面元素，為瞭解變形帶對坑道穩定性的影響，其分別在坑道長軸方向緊鄰變形帶處設置了四個觀測位置，於每一個觀測位置在垂直方向上各設置4個垂直觀測點，詳如圖2.2-7。

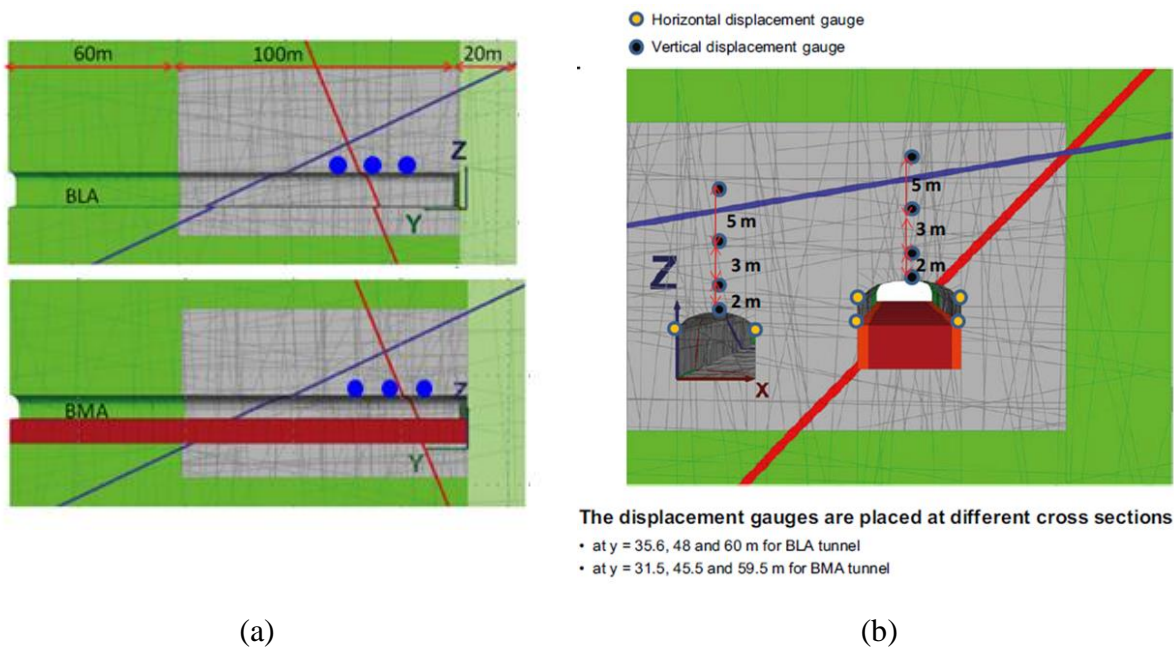


圖2.2-7 數值模型觀測點設置位置(a)模型縱剖面與(b)模型橫切面 (SKB, 2014c)

### 2.2.4 長期劣化分析-強度參數折減模擬

為探討岩體力學性質可能因長期風化、材料劣化引致力學強度降低、變形性增加，造成處置坑道長期穩定性的影響，SKB在其 3DEC 分析模型中，提出以下幾點作法：

- (1) 假設劣化僅發生在裂隙，完整岩石的力學特性不變。
- (2) 劣化影響範圍：

係自鄰近處置窖周圍之岩體，隨折減步次(reduction step)  $n$  的增加往外延伸。

$$r_{red,n} = r_i + n \cdot \delta r \quad (2.4)$$

$r_i$ : 處置窖半徑， $\delta r$ : 0.5 m

(3) 剪力強度折減：

數值分析過程中，每經過一次折減步次(reduction step)的運算後，摩擦角隨之遞減，如圖2.2-8，可知隨著數值分析的迭代運算過程，代表岩體強度劣化的影響範圍愈大，且緊鄰處置窖的岩體強度劣化將愈趨嚴重，如圖2.2-9。

$$\tau_n = c \cdot r_{c,n} + \sigma_n \cdot \tan(\phi \cdot r_{\phi,n}) \quad (2.5)$$

$$r_{c,n} = n - n \quad (2.6)$$

$$r_{\phi,n} = a^{n-1}, a = 0.9 \quad (2.7)$$

$\tau_n$ 為  $n$  次折減後之剪力強度， $r_{c,n}$  與  $r_{\phi,n}$  分別為第  $n$  次折減運算後之凝聚力與摩擦角折減係數， $a$  為折減因子( $a = 0.9$ )，從式(2.6)可知，凝聚力在第一次的折減步次運算後其值為零。

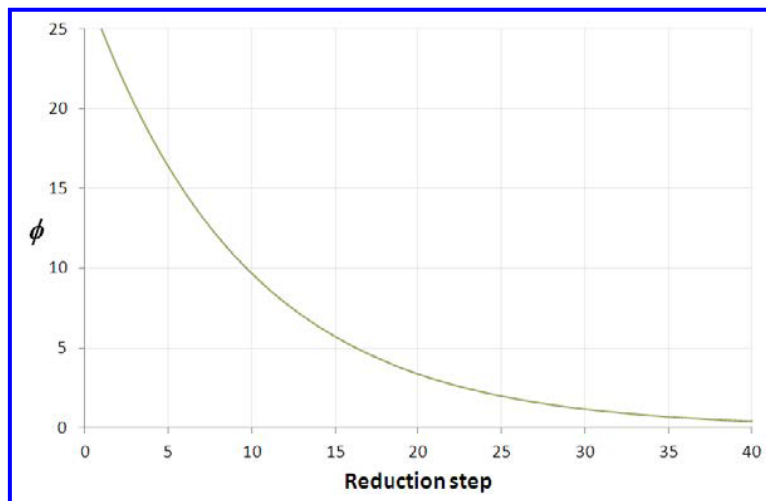


圖2.2-8 摩擦角與折減步次之關係曲線 (SKB, 2014c)

(4) 裂隙勁度折減：

$$K_{N,n} = K_N \cdot r_{\phi,n} \quad (2.8)$$

$$K_{S,n} = K_S \cdot r_{\phi,n} \quad (2.9)$$

經由「強度參數折減分析方法」，上述劣化影響範圍與剪力強度折減之設定，可透過3DEC 進行處置窖長期穩定分析，以圖2.2-10為例，隨著折減因子由 65.6% 降至 13.5% 的過程中，鄰近處置窖之圍岩強度參數與變形參數隨之遞減，岩體鬆動範圍亦逐漸擴大。其中，所提出的「強度參數折減分析方法」僅可反映(i)材料強度劣化及(ii)劣化範圍隨時

間的變化；但對於其他可能影響劣化及其分佈範圍的因子，例如既有的岩體破裂帶，或因岩體變形引致的應力分佈等，則不列入考量。

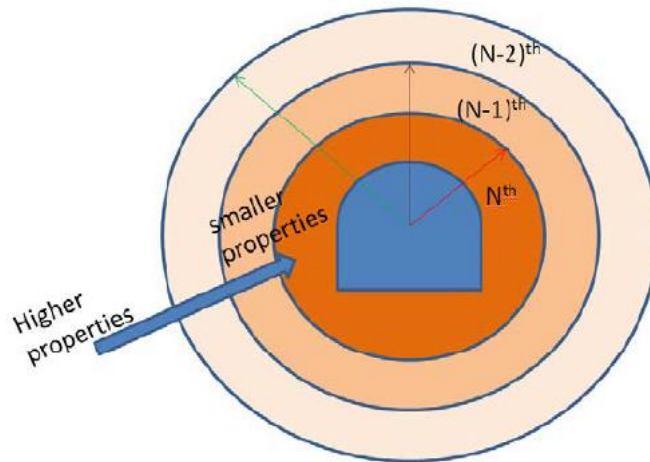


圖2.2-9 逐次劣化影響範圍示意圖 (SKB, 2014c)

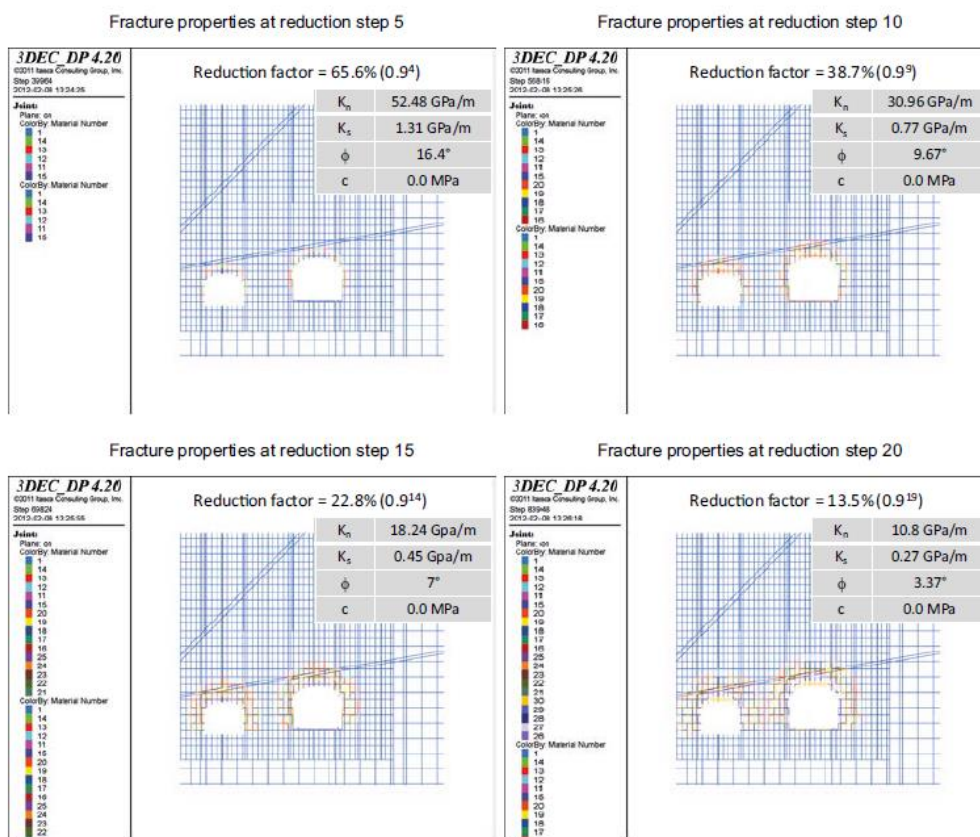
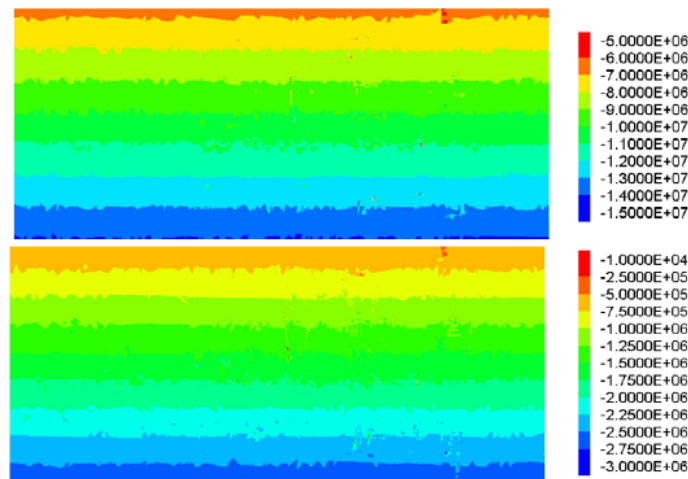


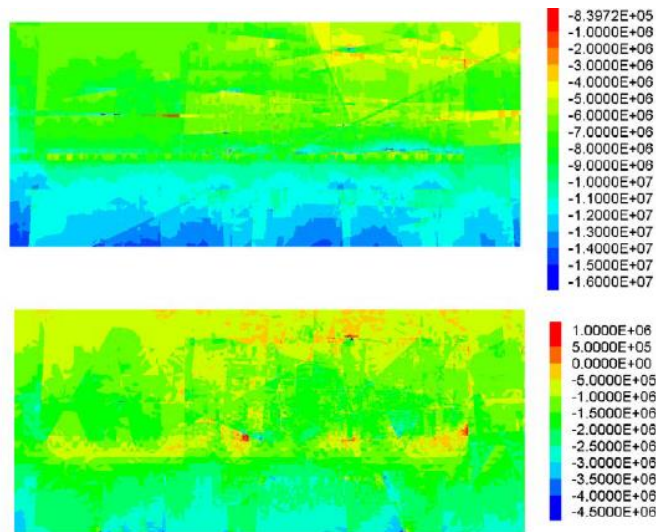
圖2.2-10 以岩體強度折減情形下考量處置窖之長期穩定分析結果(SKB, 2014c)

### 2.2.5 現地應力

根據2.2.2節數值分析程序，3DEC數值模型建立後，先以彈性模式進行平衡運算，接續將(i)岩石材料設定為 Mohr-Coulomb 材料模式，及(ii)裂隙設定為 Coulomb slip材料模式後，再進行一次平衡運算。以裂隙網絡編號 case 105的分析結果為例，其在彈性模式運算，及岩石與裂隙分別設定相對應的材料後，所獲得的等應力線分佈如圖2.2-11。



(a)



(b)

圖2.2-11 考量現地應力作用下之垂直等應力線分佈圖(取平行於BLA長軸方向之縱剖面為例) (SKB, 2014c)

圖2.2-11(a)顯示彈性模式條件下，垂直應力隨深度變化呈現層狀分佈；若分別將岩石材料設定為 Mohr-Coulomb 材料模式，及裂隙設定為 Coulomb slip材料模式後，垂直應力的分佈隨裂隙的空間分佈而有所變化，如圖2.2-11(b)。

## 2.3 數值分析結果

### 2.3.1 變形岩塊模型分析結果

以參考案例(Reference case)為例，模擬分析之位移、最大主應力與塑性區分佈，示如圖2.3-1至圖2.3-3，茲將其分析結果整理如下：

- (1) 開挖完成階段(end of excavation step)，岩塊最大位移量約 2~3 cm，主要位於側壁(西側)，及側壁與頂拱交界處，如圖2.3-1；此外，僅在變形帶出現張力引致之塑性破壞，如圖2.3-3。
- (2) 處置窖回填後進行岩體參數折減模擬，其初始裂隙摩擦角自25度逐次遞減至7.84度時岩塊開始有顯著滑動，故定義臨界摩擦角(the critical fracture friction angle)為7.84度；此時，1BLA處置窖僅在變形帶出現張力引致之塑性破壞，1BMA部分，在斷面位置 $Y = 20$  m處，破裂帶有張力引致之塑性破壞；在 $Y = 40$  m處，破裂帶存在張力與剪力引致之塑性破壞；另外，在回填砂土部分，有剪力，及剪力與張力引致之塑性破壞，研判係受兩側岩體擠壓所致，如圖2.3-3。
- (3) 以裂隙網絡編號 case 105之 3DEC 模型，同時考量初始裂隙摩擦角僅為15度，且無初始凝聚力之條件，其初始裂隙參數最差之情境(scenario)，此一假想條件係根據前述 Forsmark 地區之傾斜儀試驗結果，節理面在不含夾泥條件下之殘餘摩擦角約為15至17度。其分析結果如圖2.3-4至圖2.3-6：在開挖完成階段，岩塊最大位移量為2.5~5.5 cm，塑性區仍只出現在變形帶，且屬張力破壞所引致。

上述開挖模擬分析，係考慮無任何加勁(reinforcement)條件下進行之分析，在開挖完成後，視考慮的初始條件，其岩塊最大位移量為 2~3 cm，或2.5~5.5 cm，但之後開挖面即達到穩定。

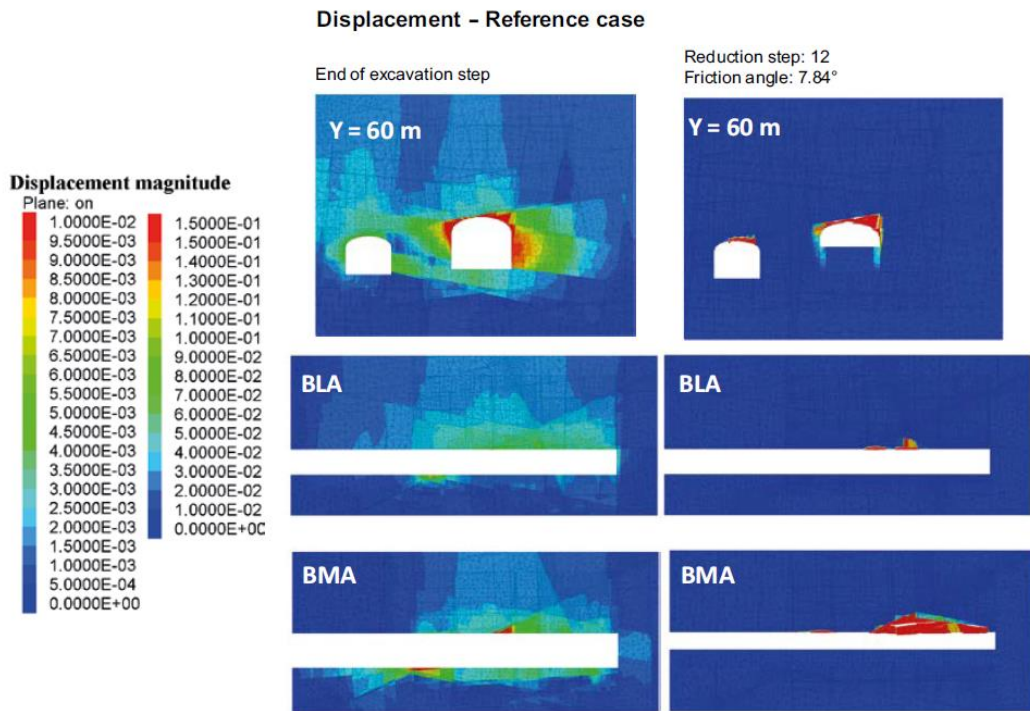


圖2.3-1 變形岩塊模型分析結果(位移量分佈) (SKB, 2014c)

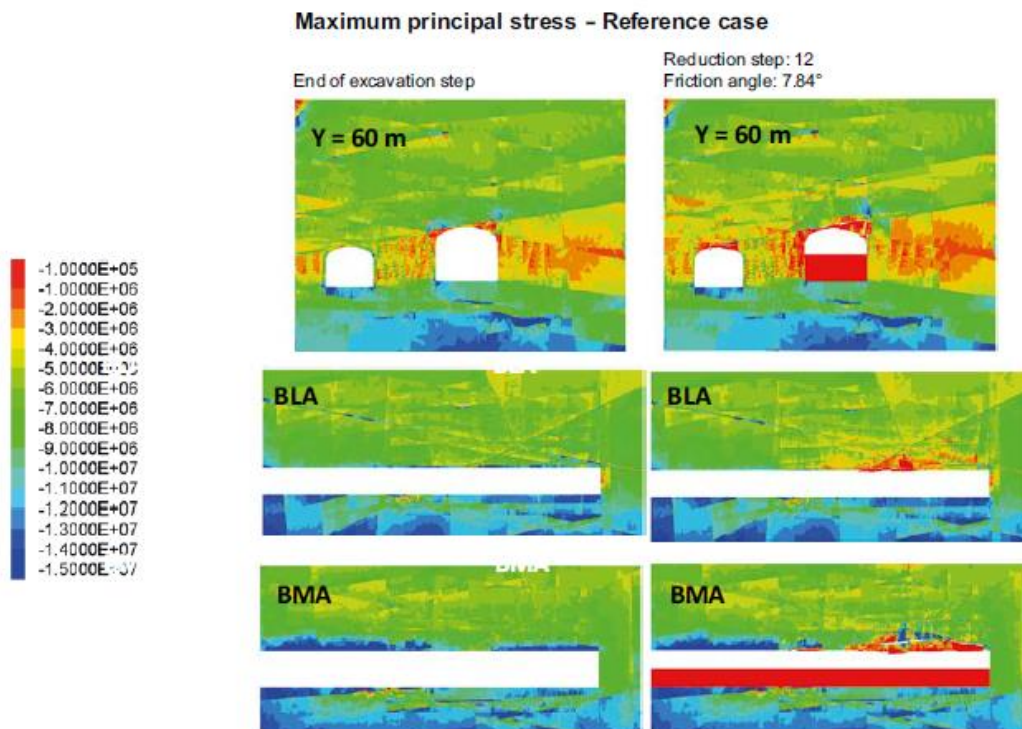
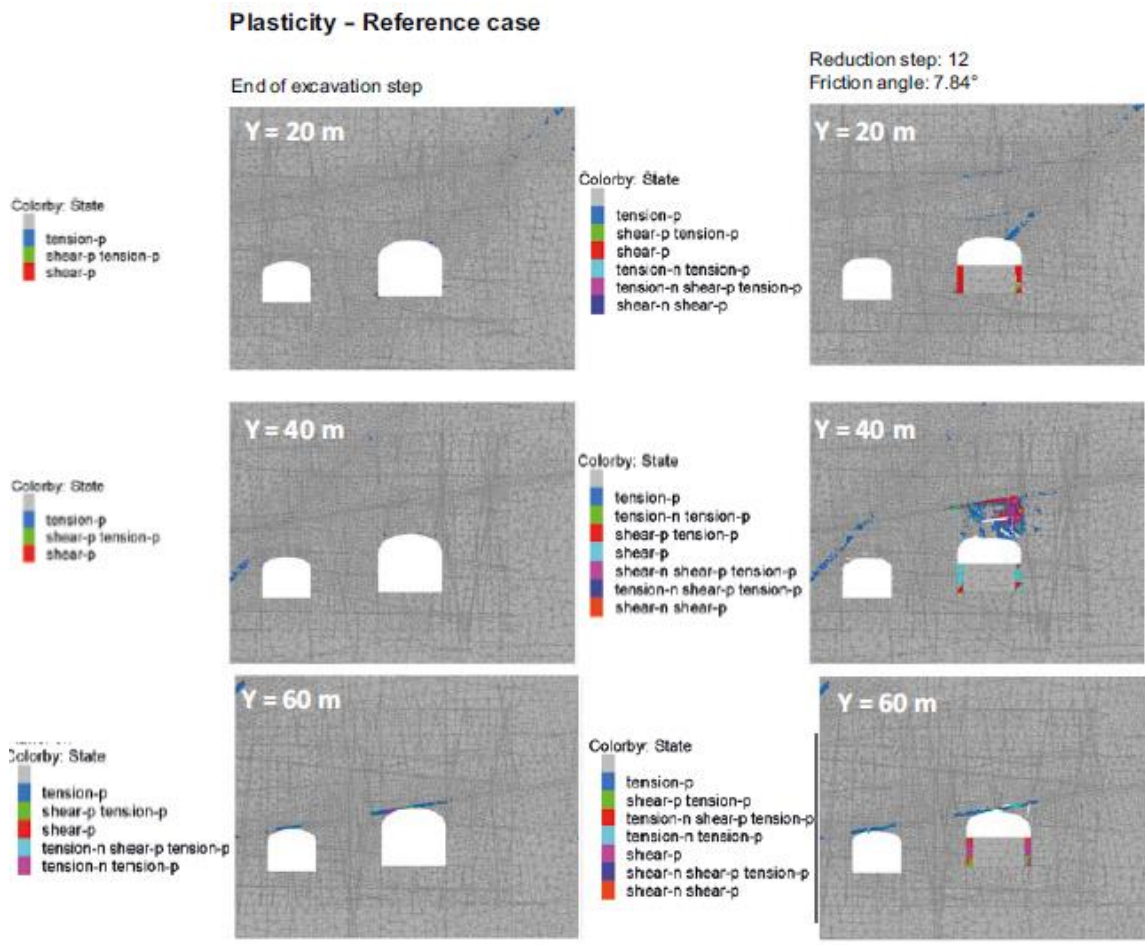
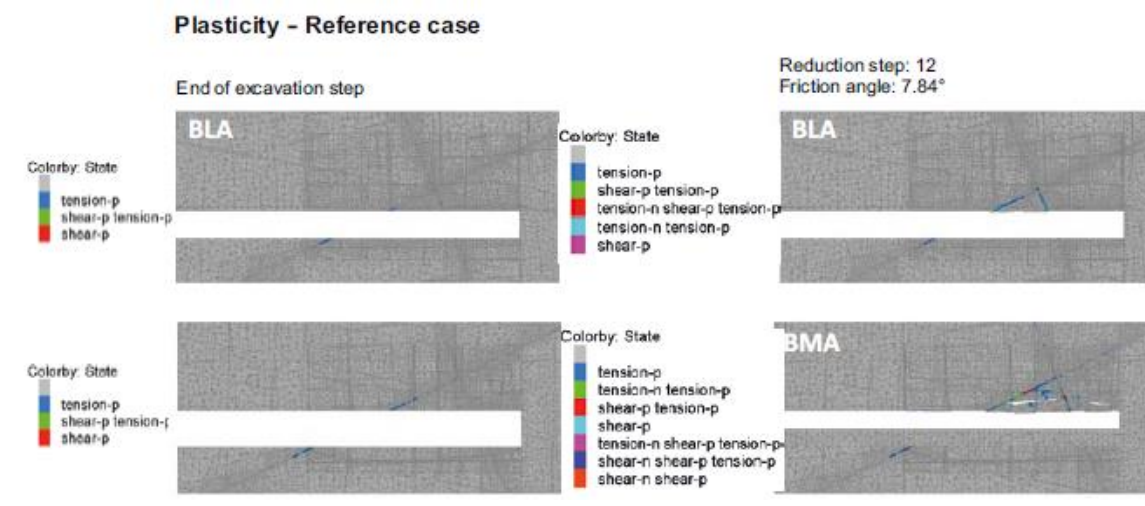


圖2.3-2 變形岩塊模型分析結果(最大主應力分佈) (SKB, 2014c)



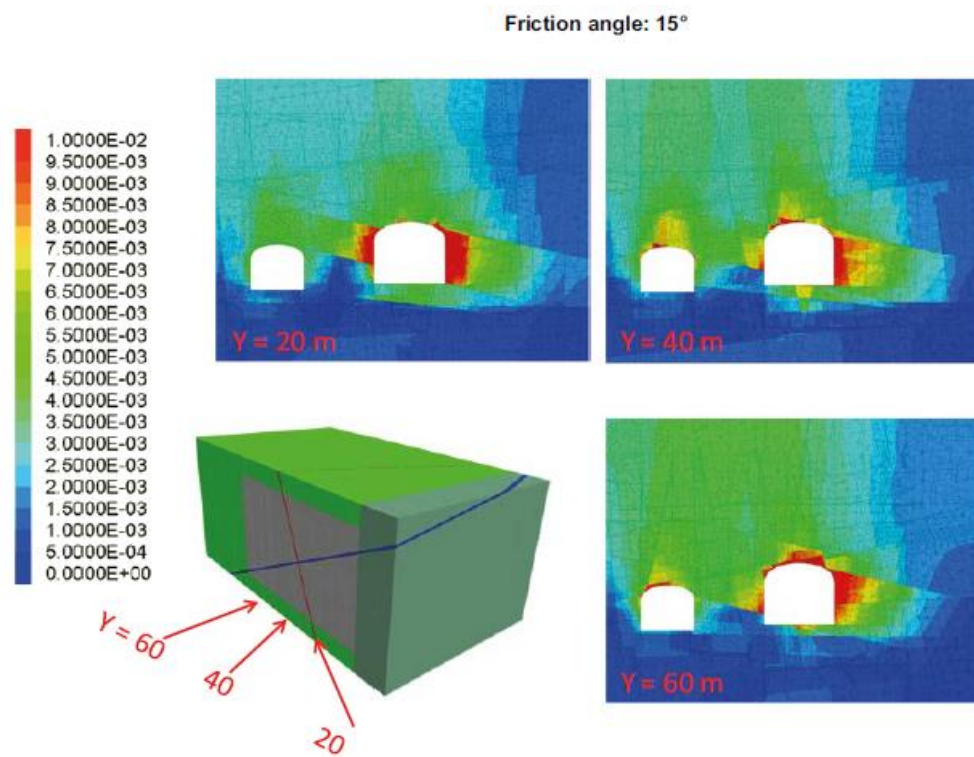


(a)

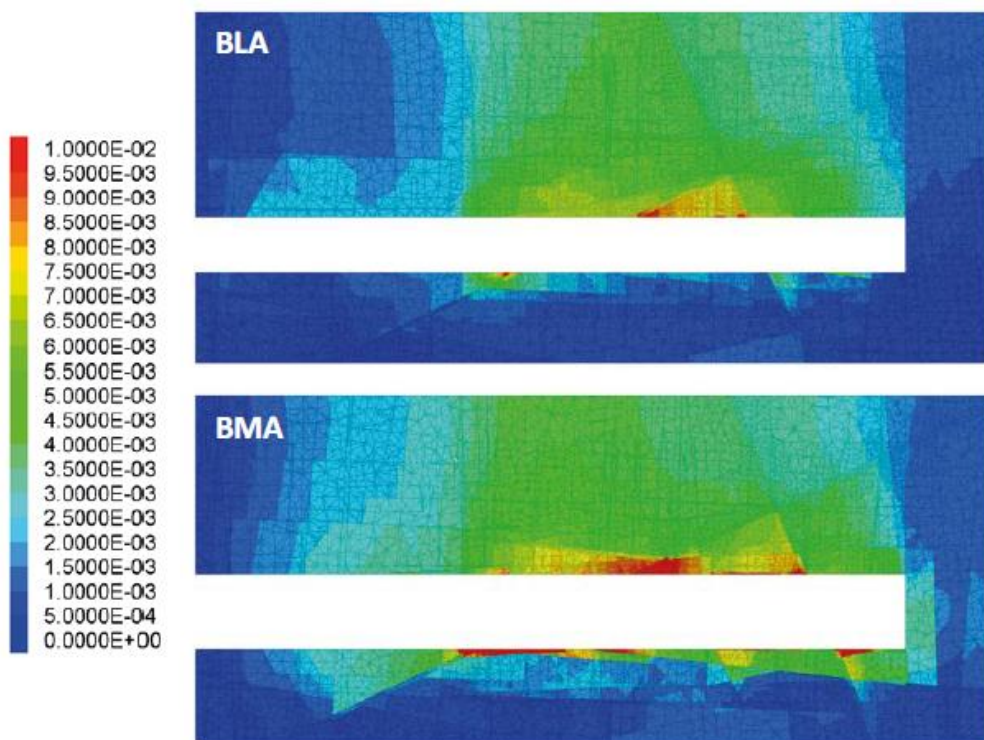


(b)

圖2.3-3 變形岩塊模型分析結果(塑性區分佈) (SKB, 2014c)

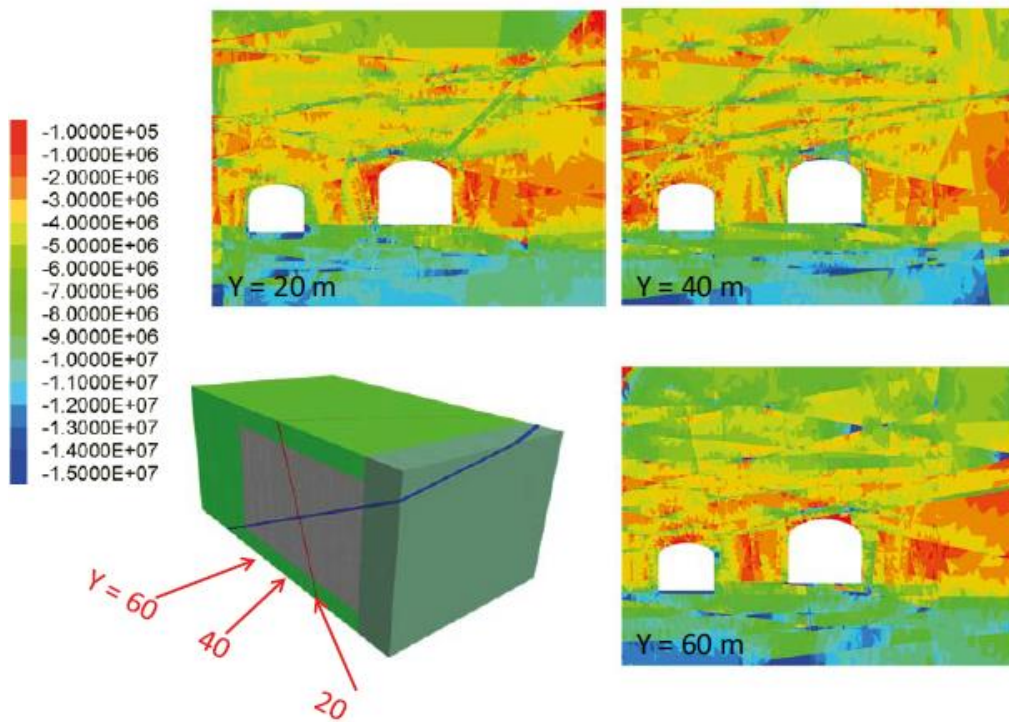


(a)

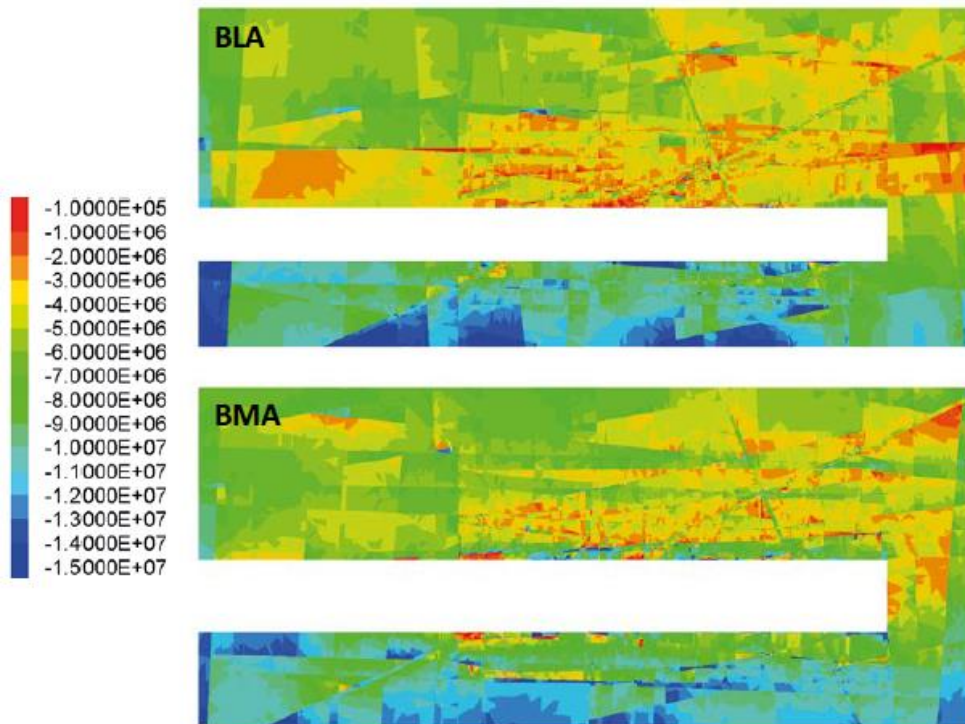


(b)

圖2.3-4 變形岩塊模型分析結果(裂隙網絡編號 case 105，初始摩擦角15度)：處置窖(a)橫切面與(b)縱剖面之垂直向位移分佈 (SKB, 2014c)

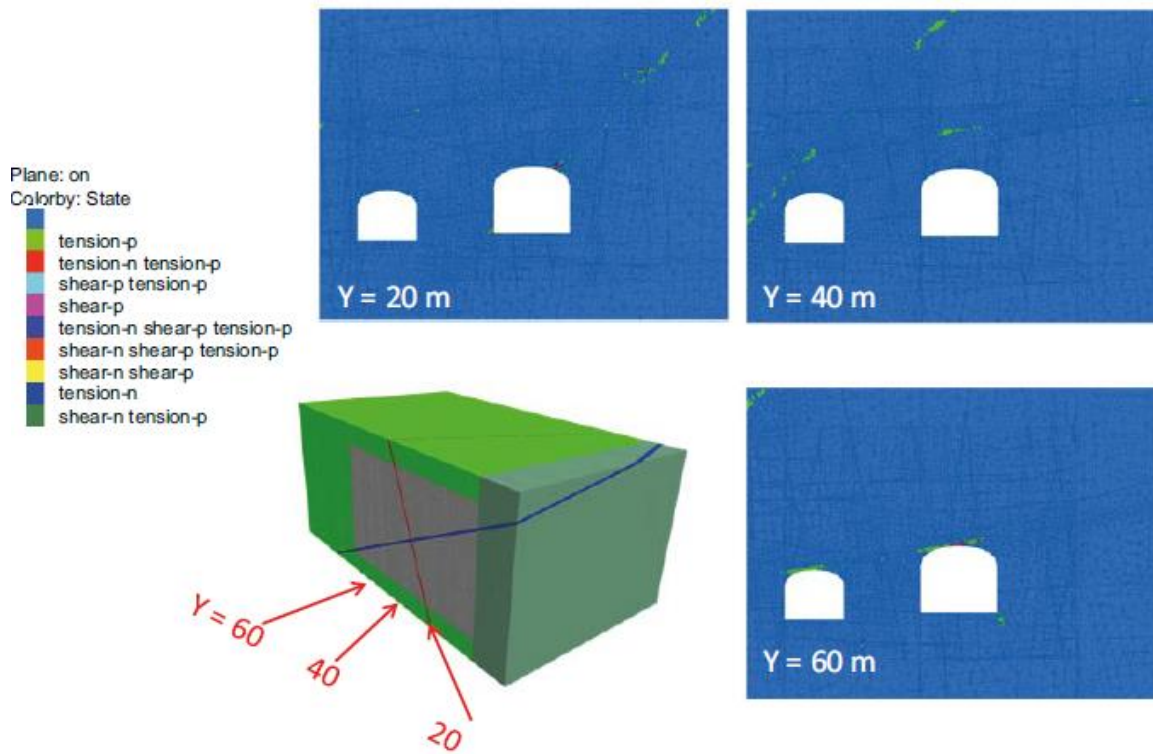


(a)

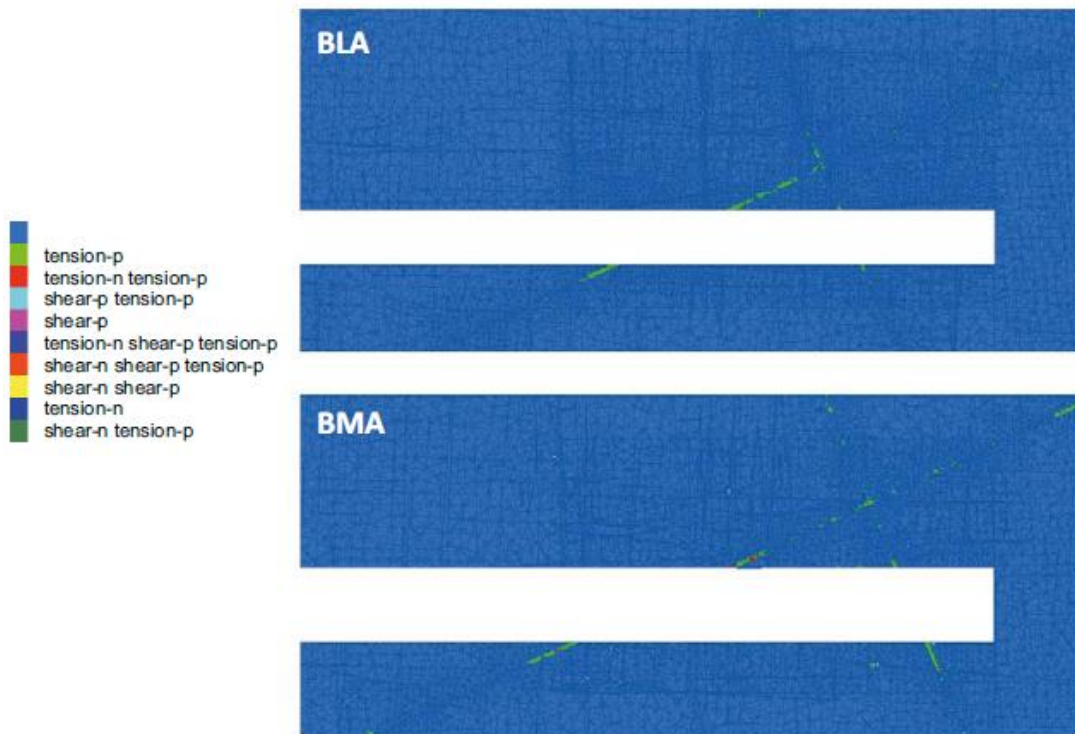


(b)

圖2.3-5 變形岩塊模型分析結果(裂隙網絡編號 case 105，初始摩擦角15度)：處置窖(a)橫切面與(b)縱剖面之最大主應力分佈 (SKB, 2014c)



(a)



(b)

圖2.3-6 變形岩塊模型分析結果(裂隙網絡編號 case 105，初始摩擦角15度)：處置窖(a)橫切面與(b)縱剖面之塑性區分佈 (SKB, 2014c)

### 2.3.2 剛體岩塊模型分析結果

相較於變形岩塊模型，剛體岩塊模型因假設岩塊為不可變形之剛體，所有的變形僅發生在裂隙、弱面等不連續面，故其運算速度相對較快；因此，針對處置窖可能因為周圍岩體劣化，引致岩塊滑入並填滿坑道之可能情況，若採用變形岩塊模型進行分析將較為耗時，故採剛體模型進行分析。

根據其分析結果顯示，當裂隙摩擦角折減至 5.71 度，處置窖頂拱處的岩塊開始掉落，如圖 2.3-7。若裂隙摩擦角折減至 1 度以下，處置窖的變形分析如圖 2.3-8，其結果顯示最終的鬆動岩塊範圍將可延伸至原本處置窖頂拱上方 34 公尺處。

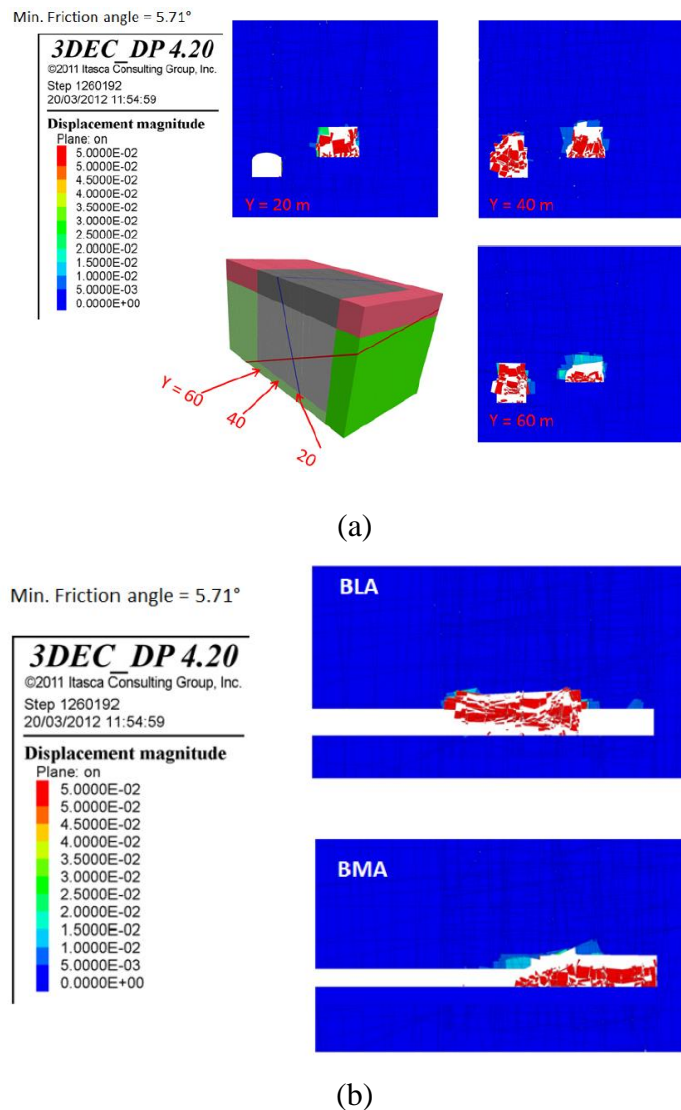
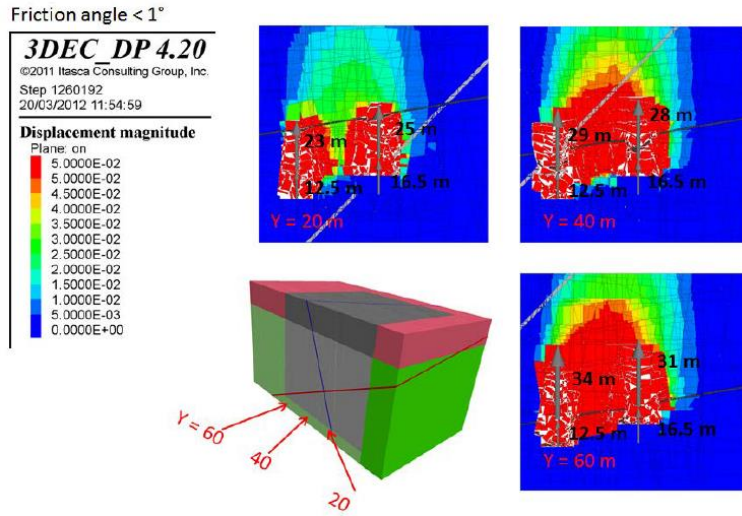
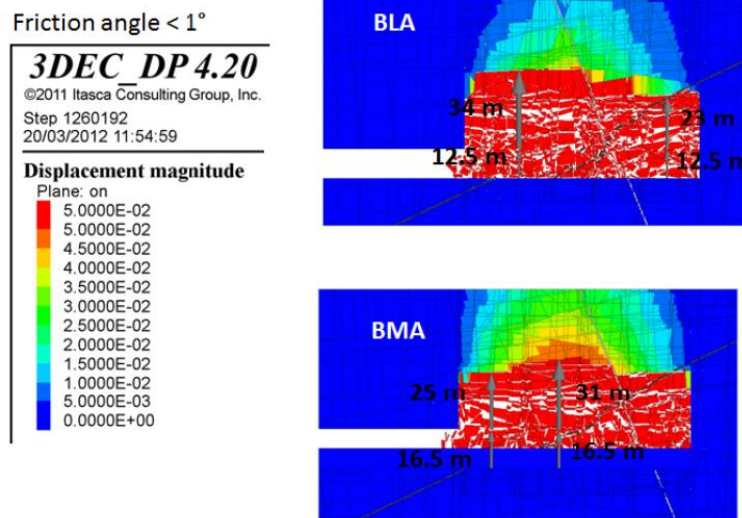


圖 2.3-7 剛體岩塊模型在強度折減分析結果(裂隙摩擦角降至 5.71 度)：(a)橫切面 Y=20、40 與 60 m 處及 (b) 平行於坑道長軸方向之縱剖面有鬆動岩塊掉落 (SKB, 2014c)



(a)



(b)

圖2.3-8 剛體岩塊模型在強度折減分析結果(裂隙摩擦角降至1度以下)：(a)橫切面Y=20、40與 60 m處及(b)平行於坑道長軸方向之縱剖面有鬆動岩塊掉落(SKB, 2014c)

## 2.4 小結

本章蒐整了國外瑞典SFR低放射性廢棄物處置場址相關背景資料，包括了地質條件、坑道裂隙測繪、岩石與裂隙力學參數、回填材料力學參數與現地應力等，於坑道處置結構穩定性驗證過程所需蒐集之資料。此外，在長期穩定性分析部分：

---

**(1) 岩體數值模型建構**

根據(i)裂隙位態及統計分析建立之裂隙網絡DFN，與變形岩塊數值模型(models with deformable blocks)之建模經驗；或(ii)在考量運算效率，分別依裂隙的平均位態(走向與傾角)與最不利的裂隙位態分佈而建立之剛體岩塊數值模型(models with rigid blocks)，均可作為我國低放坑道處置長期穩定數值分析之參考。

**(2) 岩體長期劣化分析方式**

導致之岩體崩解情境，在變形塊體模型部分，考量岩體長期劣化導致之岩體崩解情境，隨著數值運算步次的持續進行，透過「強度參數折減分析方法」使材料強度持續弱化及其劣化影響範圍的持續擴大，據以模擬岩體材料經長期劣化後對處置坑道穩定性的影響。此一分析作法，可供我國未來針對岩體材料劣化對處置坑道長期穩定分析之參考。

## 第三章、國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法

### 3.1 影響國內隧道結構穩定性之關鍵因子

隧道建置於地表下，其結構穩定性與所處圍岩岩性及地質條件有關，因此(1)在建造初期需經過充分的地質調查與試驗，獲得足夠的參數加以設計；(2)並於施工期間監測圍岩的行為，才能確保隧道結構的穩定性。

依據原子能委員會放射性物料管理局於 2012 年至 2016 年度間，委託研究計畫報告「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展」(王泰典等人，2012)及「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫五—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)之研究，經彙整一般坑道在營運期間所產生的襯砌裂縫、滲水與龜裂等異狀及其肇因，同時考量我國本土隧道案例顯示之滲漏水問題，及其可能加速襯砌材料劣化而對處置坑道結構穩定性之負面影響，歸納整理出坑道穩定性之影響因素計有三項，包括(I)外力因素、(II)環境因素及(III)非力學因素，如表3.1-1所示。

#### 3.1.1 外力因素

係指坑道整體結構(包括坑道周圍圍岩)在受到大於坑道結構強度的外在作用力下，使坑道結構造成不穩定。主要原因包括地震作用、邊坡運動與開挖擾動之影響，相關內容摘述說明如后：

##### (1) 地震作用

地震作用期間，地下結構體受震方向包括水平向及垂直向，且整體結構於短時間內來回往返多次受力而擺動變形，襯砌因擺動變形所產生之應力與彎矩，其複合受力機制對隧道產生不同之影響，若此複合應力超出襯砌之極限強度，則會使混凝土產生剝落、錯動、龜裂及滲漏水等異狀。在國內重大地震引致之隧道受損型態中，包括襯砌破壞(遭斷層剪斷、縱、橫、斜向龜裂)、因邊坡坍塌引致破壞、底版(路面)龜裂或隆起與側壁向內擠壓變形等型式，如圖3.1-1。



表3.1-1 影響處置坑道襯砌結構穩定性之因素與現象 (楊長義與李宏輝, 2014)

處置坑道結構長期穩定 影響項目與肇因		襯砌或其他坑道結構之異狀
外力因素	地震作用	1.襯砌遭斷層剪斷破壞 2.襯砌縱向龜裂 3.襯砌橫向龜裂 4.襯砌單側斜向龜裂 5.襯砌環狀斜向龜裂 6.底版(路面)龜裂或隆起 7.側壁向內擠壓變形 8.滲漏水 9.隧道因邊坡坍塌破壞
	邊坡運動	襯砌裂縫具偏壓特徵，例如： 1.襯砌肩部產生開口性張力裂縫 2.裂縫可能呈現縱向、環向與斜向型態
	開挖擾動	1.襯砌裂縫具塑性壓特徵： (1)挫曲、(2)開口裂縫、(3)剪力裂縫、(4)側壁擠出、(5)仰拱隆起 2.襯砌裂縫具鬆弛土壓特徵： (1)頂拱產生開口性裂縫、(2)側壁產生壓縮裂縫或剪力裂縫、(3)鬆弛土壓集中於小範圍之橢圓形、半月形、格子狀或放射狀之裂縫
環境因素	風化作用引致岩石強度弱軟化	1. 圍岩強度弱化或依時變形特性顯著，致岩盤鬆動產生岩壓造成二次支撐之襯砌結構受力產生異狀，其異狀特徵如塑性壓與鬆弛土壓者 2. 於施工建造階段可能引致開挖斷面擠壓、岩盤剝落、抽心落盤等問題
	依時性變形特性	
非力學因素	混凝土中性化	網狀裂縫
	鋼筋保護層厚度不足	條狀裂縫
	鹼值粒料反應	龜殼狀裂縫
	混凝土澆置中斷(冷縫)	連漪狀裂縫
	襯砌背後空洞或厚度不足	

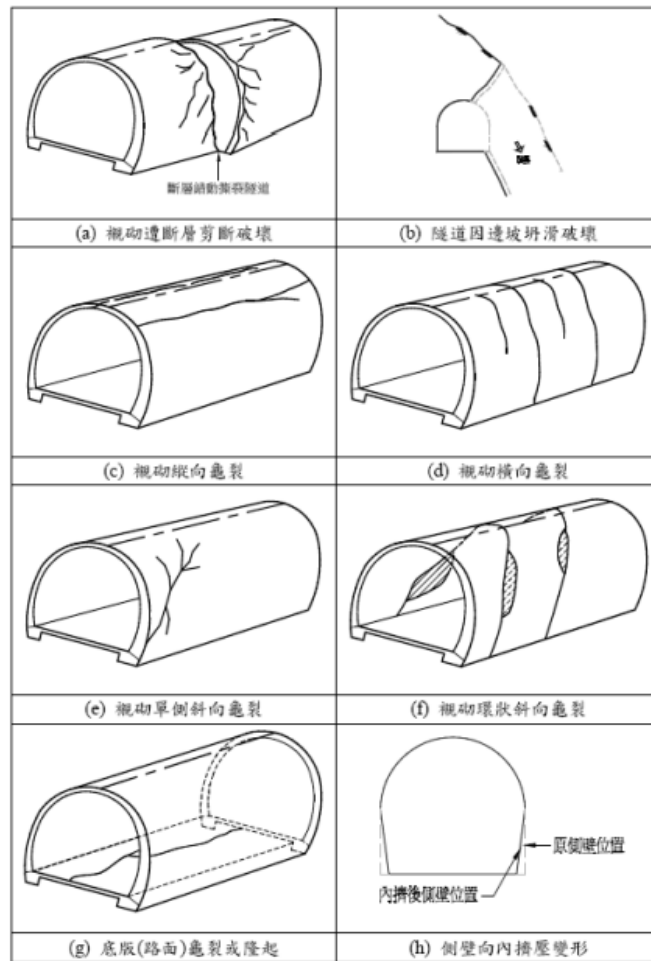


圖3.1-1 山岳隧道受震損害型態示意圖(王文禮等人，2000)

(2) 邊坡運動

邊坡潛移作用引致隧道異狀之型態，區分為邊坡潛移方向垂直、斜交與平行於隧道軸向等3種類別。透過資料蒐集與調查(襯砌影像、隧道異狀及現地崩崖)、研判襯砌裂縫型態及監測作業，可對邊坡潛移引致隧道異狀進行診斷與提出因應措施。

(3) 開挖擾動

坑道因開挖作用對圍岩形成擾動，造成現地岩體應力釋放，使得坑道與豎井周圍岩體特定區域內，應力及應變產生變化，造成圍岩產生變形或形成微裂隙，並改變水力傳導或吸附行為，影響岩體對於核種傳輸的遲滯能力。此一特定區域在大地工程領域稱之

為開挖擾動帶(EDZ)，亦為坑道變形的影響因素。且軟弱岩盤受開挖擾動後，開挖擾動帶範圍隨時間遞增而增大，開挖擾動對岩盤之依時性變形有顯著影響。

### 3.1.2 環境因素

因我國特殊之地質與氣候環境影響，岩石材料多因風化作用強烈，使岩石弱軟化迅速，且長期依時行為明顯，其強度與變形性依時變化大。以下分項說明如后：

#### (1) 風化作用引致岩石強度弱軟化

地表或接近地表的岩石，因為與空氣和水接觸，或者受生物活動影響，發生了化學和物理的變化，因而改變了這些岩石的化學成分和物理性質，地質上叫做風化作用(weathering)，依其過程又可區分為物理性風化與化學性風化兩種方式。

表3.1-2 岩心風化程度分類表(ISRM, 1981)

風化等級	風化程度	描述
W0	新鮮	岩質新鮮，無風化跡象，但主要不連續面(如節理面)可能會有輕微氧化鐵鏽染變色現象。地質錘敲擊聲十分清脆。
W1	輕微風化	整個岩體的不連續面幾乎都有輕微明顯的氧化鐵鏽染變色現象，部分長石礦物已受風化分解。地質錘敲擊聲大致清脆。
W2	中度風化	岩石材料風化分解成土壤者約一半。新鮮或微變色岩石仍脈絡相連或以團塊狀存在。地質錘敲擊聲有悶音。
W3	高度風化	岩石材料風化分解成土壤者超過一半。新鮮或微變色岩石以不連續脈絡或團塊狀存在。岩心可用手指捏碎。地質錘敲擊聲極悶或是一敲岩心即散開。
W4	完全風化	岩石材料已完全分解，但原本之岩石組構仍可肉眼分辨。手指可捏碎，泡水會散開。所有長石礦物已轉變成黏土礦物。
W5	殘餘土壤	所有的岩石材料已完全分解成土壤，原本之岩石組構已消失無法分辨。

物理性風化作用又稱崩解作用，此作用可使物體的顆粒失去結合力，由大塊碎成細粒，成為礫、砂、粉砂等，可是沒有顯著的化學成分的改變。物理性風化的原因是溫度改變、凍裂作用、生物作用和剝離作用；岩石因溫度改變，造成熱脹冷縮，反覆進行，經若干時日之後，大幅減弱岩石中礦物顆粒間結合的程度，促使岩石崩裂。而化學性風化作用又稱分解作用，因岩石接觸到水、氧和酸，發生化學變化。岩石中的礦物成分或化學成分改變，使原來礦物因溶解而流失，也可能有新的礦物生成例如黏土礦物，這種作用會引起岩石內部結構改變或體積變化，一般是體積變大而使密度變小，導致岩石強度自然降低。風化程度可參考國際岩石力學學會(ISRM)岩石風化度分類表進行分級，如表3.1-2所示。

## (2) 依時性變形對坑道長期穩定的影響

岩石材料在相同應力持續作用狀態下，隨時間產生之變形行為稱之為潛變(creep)，即稱為岩石材料之依時性變形行為。常見的依時變形模式主要可分為(i)黏彈模式(Visco-elastic model)、(ii)黏彈塑模式(Visco-elasto-plastic model)與(iii)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最廣泛使用，係以彈簧及阻尼基本元件組合模擬材料在受力狀態下，應變變形量隨時間變化之增大行為。另外，依時性變形特性參數與場址特性之間，岩體材料變形模數、強度、岩層組成比例對岩體依時變形特性影響相當顯著，而環境因素，如瞬間水位的急遽變化亦會造成岩體材料之依時性變形。

### 3.1.3 非力學因素

係指坑道結構因混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足、鹼值粒料反應、混凝土澆置中斷(冷縫)、襯砌背後空洞或厚度不足等因素，造成襯砌產生裂縫等異狀。

## 3.2 隧道結構穩定性之分析方法

目前在隧道結構穩定性分析上，有多種方法。在數值模擬方面，應用於連續體分析的有限元素法(Finite Element Method, FEM)、有限差分法(Finite Difference Method, FDM)及邊界元素法(Boundary Element Method, BEM)，應用於離散體分析的離散元素法(Distinct Element Method, DEM)、不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis,

DDA)。另外有以幾何概念發展的岩塊理論(Block Theory)及以實體模擬的物理模型法(Physical Model Method)，茲概述如后。

### 3.2.1 有限元素法

有限元素法(Finite Element Method, FEM)係利用虛功原理(virtual works theory)將有限空間之材料離散化(discretization)，使各元素間連接成一連體系統(continuous system)，藉由各元素矩陣組合成整體結構矩陣，進而運算求其未知量。整體運算結構須滿足固體力學的4種分析條件：(1) 平衡方程式(equation of equilibrium)、(2)應力-應變之組成律關係(constitutive law)、(3)位移-應變之諧和性(compatibility)、(4)位移-荷重之總體勁度矩陣(global stiffness matrix)。

目前在套裝軟體中，以達梭系統 SIMULIA 旗下的 ABSQUS 軟體使用最為廣泛，可適用於黏土、沙土到岩石的各種岩土材料，以及高壓混凝土結構分析(如高圍壓隧道、放射性廢棄物掩埋隧道等受高壓之混凝土結構)。

### 3.2.2 有限差分法

有限差分法(Finite Difference Method, FDM)是一種計算微分方程近似解的數值方法。其原理係對某一函數 $y = f(x)$ ，先將變數 $x$ 離散化，以特定的間距 $\Delta h$ 區隔為 $x_1$ 、 $x_2$ 、...、 $x_{n-1}$ 、 $x_n$ 、 $x_{n+1}$ 、...，其所對應的函數值分別為 $y_1 = f(x_1)$ 、 $y_2 = f(x_2)$ 、...、 $y_{n-1} = f(x_{n-1})$ 、 $y_n = f(x_n)$ 、 $y_{n+1} = f(x_{n+1})$ 、...，即可透過各變數的泰勒展開式進行彼此間的數值運算，求得微分方程的近似解。

目前在隧道工程的應用上，主要以美國 Itasca Consulting Group Inc.發行之數值分析軟體 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)之應用較為廣泛。FLAC 程式能針對應力控制的隧道問題進行分析，求得各開挖施工階段中，岩體變形、應力與塑性區大小，以及各支撐構件之應力大小等，為一簡便且多功能的分析工具。但是對於由岩石弱面所組合而成的岩楔(Rock Wedge)所引致的構造控制問題，FLAC 目前並沒有適當的分析模式，是該程式在應用上最大的限制，應用情形如圖3.2-1所示。

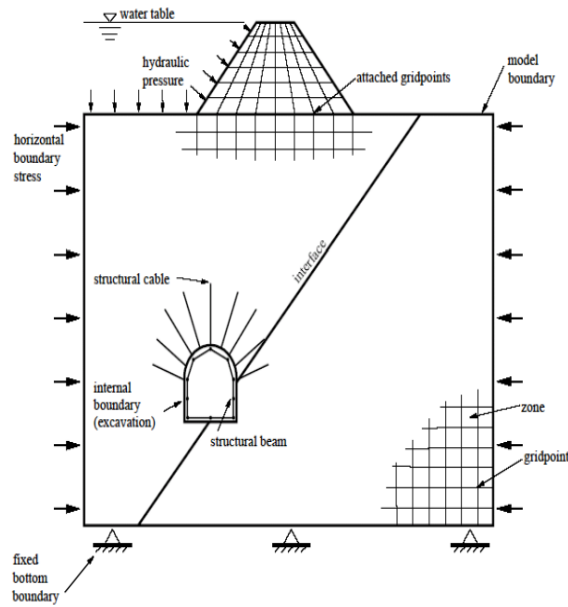


圖3.2-1 FLAC用於分析大地工程之示意圖

### 3.2.3 邊界元素法

邊界元素法(Boundary Element Method, BEM)係根據元素特性離散邊界積分方程式後，以電腦計算得到方程式解之數值方法。積分方程式通常是根據物理和力學問題推導出控制其現象之偏微分方程式，再利用基本解、散度定理(divergence theorem)及積分運算元推導出相對應之邊界積分方程式。

邊界元素法具有減少數值計算之複雜度和獲得高準確性之解的優點。邊界元素法只需要在定義域之邊界切割網格和數值計算，可以降低問題之一階維度，所以設定元素等前處理和數值計算都較為容易。另外，由於邊界元素法是將基本解代入問題之偏微分方程式，然後利用散度定理及積分運算元推導出相對應之邊界積分方程式，以數學技巧或數值模擬求解積分方程，所以邊界元素法的分析結果具有高精準度。然而許多問題之基本解未必能取得，也因此限制了邊界元素法的應用，且邊界積分方程式多為奇異性積分，所以處理積分時容易產生誤差，以致無法求得精確結果。

### 3.2.4 離散元素法

離散元素法(Distinct Element Method, DEM)是由 Cundall (1974)首先提出的數值方法，將模擬的對象拆解成各自獨立的顆粒(particle)來分析，顆粒與顆粒接觸後的互動關係以牛頓第二運動定律計算，離散元素法由於顆粒間各自獨立，可以記錄顆粒的位移、

旋轉、接觸力等資訊，而且相對於連續性的數值分析，離散元素法的顆粒各自獨立，沒有像有限元素法的網格有變形限制，故可用來分析不連續性的變形問題。

目前以離散元素法為基礎所開發應用於岩石力學領域分析的程式中，主要為ITASCA公司旗下的UDEC、3DEC、PFC2D、PFC3D等4款軟體，其中UDEC與3DEC主要用於塊體分析，PFC2D與PFC3D則用於顆粒流的運算。

### 3.2.5 不連續變形分析法

不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)是石根華(1984)所發表的新數值方法，其模擬之元素(或塊體)為可分離、可變形、可移動、可轉動，且塊體與塊體之間可以是完全非連續的，不同於有限元素法與邊界元素法所模擬之元素間為連續且不可分開。因此能自然的處理塊體的大變位分析與非連續性節理的運算。DDA採用「全勢能法」(total potential energy)為理論基礎，因而整個分析系統之能量總合除可達到基本物理學或基本力學上所要求之原則外，其作用力亦能達到平衡。其優點為整體之理論與數值分析架構簡單，且數值運算容易，因此不連續元素法能以較為簡化之理論架構處理岩石塊體間之非連續力學行為。

### 3.2.6 岩塊理論

岩塊理論(Block Theory)又稱為關鍵塊體理論(Key Block Theory)，為石根華(1985)所創。在岩層中，岩體雖因不連續面而切割成各自獨立的塊體，但在開挖前會因為互相箝制而形成穩定平衡的狀態，經開挖後，因某些塊體的形狀、位置，會引致鄰塊之連鎖滑移，而引發一連串崩落，其最先破壞整體平衡的塊體，稱為「關鍵塊體」。因此，根據現地地質以及開挖面位態量測資料分析岩體內可能產生的不連續面塊體，找出關鍵塊體，進而強化工程結構物如地下廠房、隧道等之穩定性，是此方法最主要的運用。

### 3.2.7 物理模型法

物理模型法(Physical Model Method)係在建構模型試驗時，掌握模型與實體之間的相似關係，以模型相似理論為原則，為模型做基本設計，將複雜的實體行為化為簡單的物理現象，據以轉換於模型試驗中。首先確定研究的實體物理行為，瞭解現象發生過程中受那些主要控制變數影響，藉由實體觀察結果作為模型試驗探討的方向與模型建構的依

據，明確地將實體行為機制以精準的試驗規劃與量測設備將試驗結果作定性與定量分析，再由模型試驗的結果推算出實體於此相似行為作用下的物理量變化。例如朝倉俊弘等人(1994)進行縮小尺寸 1/30 的純混凝土襯砌試驗，探討載重型態、特定襯砌肇因對襯砌型態之影響。野城一榮等(2004)延續朝倉俊弘等人(1994)之雙線隧道襯砌模型，如圖 3.2-2(a)，探討隧道襯砌受集中荷重作用時的荷重—位移關係。小島芳之等人(2006)設計引致隧道襯砌異狀之外力型態—集中荷重、偏壓與塑性壓之試驗，探討隧道襯砌受不同外力型態作用時的荷重—位移關係。佐野信夫等人(2006)建立實驗過程中襯砌剛性與裂縫進展的關係，藉觀察裂縫發展評估襯砌現有之剛性。Kojima與Yashiro(2005)為了解鄰近施工對隧道可能的影響，建立如圖 3.2-2(b)之實驗模型，於地表反覆進行開挖與回填，獲得加卸載過程隧道襯砌受力的變化。

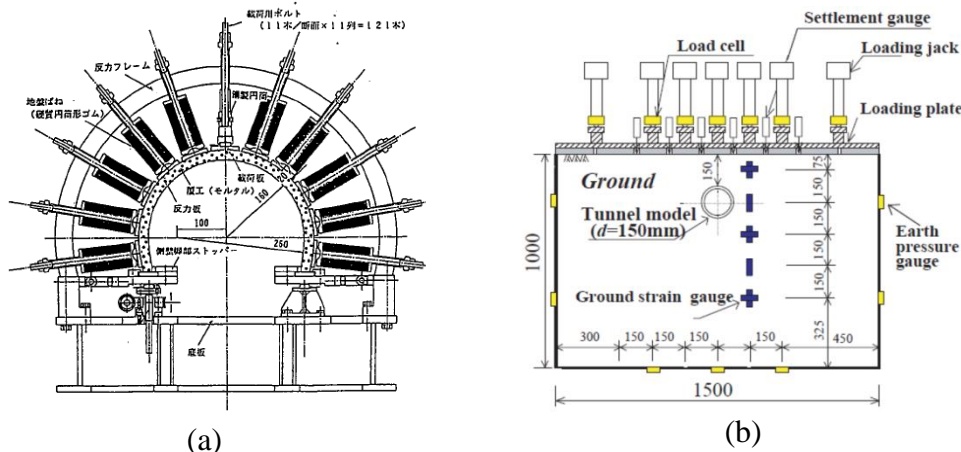


圖3.2-2 日本學者之室內隧道實驗(a)純混凝土雙線隧道模型試驗(朝倉俊弘等，1994) (b) 反覆加卸載隧道模型(Kojima and Yashiro, 2005)

### 3.3 隧道運轉階段結構穩定性之驗證方法

就隧道結構穩定性而言，研擬適切的檢測與監測方法，及襯砌異狀肇因的診斷流程，藉以掌握處置坑道長期變形行為，為鞏固處置坑道結構穩定之關鍵要項。隧道安全廣受各國重視，國外多有因應各國境內坑道狀況而制定的檢測技術報告(Benford, 1983；Miyaguchi, 1986；日本土木學會，2002、2003)。國內部分，亦有相關的技術報告可供參閱(黃燦輝，1997；黃燦輝，2008)。本研究引用部分前期報告之成果，整理目前既有營運中坑道廣泛使用的檢監測技術。



### 3.3.1 光學檢測之類型

#### (1) 目視與攝影檢測

目視檢測(Visual inspection)，即採目視方式觀察隧道襯砌表面是否有異常龜裂、滲水、腐蝕等現象，並將其紀錄於圖上。通常在嚴重或有疑慮之處，輔以照片或攝影紀錄。

#### (2) 隧道淨空測量

隧道淨空測量係運用測量儀器及其原理，根據已知的方位觀測各隧道里程、斷面距離、角度、高程等數據，經計算求得隧道淨空斷面的位置、面積或體積。測量基本原點係透過已知點與未知點之間的水平角、垂直角、水平距、斜距及高程差等關係，計算其相關位置及坐標。依據測量已知點與未知點的方式，測量方法又可進一步細分，如前方交會法與後方交會法等。由於隧道內空間狹隘，單純使用前方交會法或後方交會法，測量精度受到限制，因此進行淨空測量時，有時利用較多已知坐標的控制點，推算求點的坐標。

#### (3) 襯砌影像掃描

隧道襯砌表面裂縫、滲漏水、剝落、空洞等情況可以用照相或攝影的方式記錄其表面之影像，藉由影像掃描快速的將隧道壁面狀態記錄下來，再判釋隧道襯砌異狀之狀況，以供隧道改善之規劃與設計之參考。襯砌影像掃描的裝置，目前主要可分為：

- TS360隧道全斷面掃描系統：

其組成包括：(i)雷射影像掃描儀(TS360B)；(ii)紅外線熱像掃描儀(TS360BT)；以及(iii)雷射淨空掃描儀(TS360BP)等三大部份組成，如圖3.3-1所示。操作時，將該系統放置於沿隧道前進之軌道車或工作架上，雷射光、紅外線等藉由360°旋轉的稜鏡反射功能，將掃描器的射線偏轉，在工作車輛行駛穿越受測隧道的斷面時，受測隧道襯砌表面的狀況即可被以360°螺旋管狀的形式，一次且迅速地對受測隧道作全斷面掃描調查，可獲得隧道全斷面的灰階影像、溫度分佈影像以及淨空剖面。

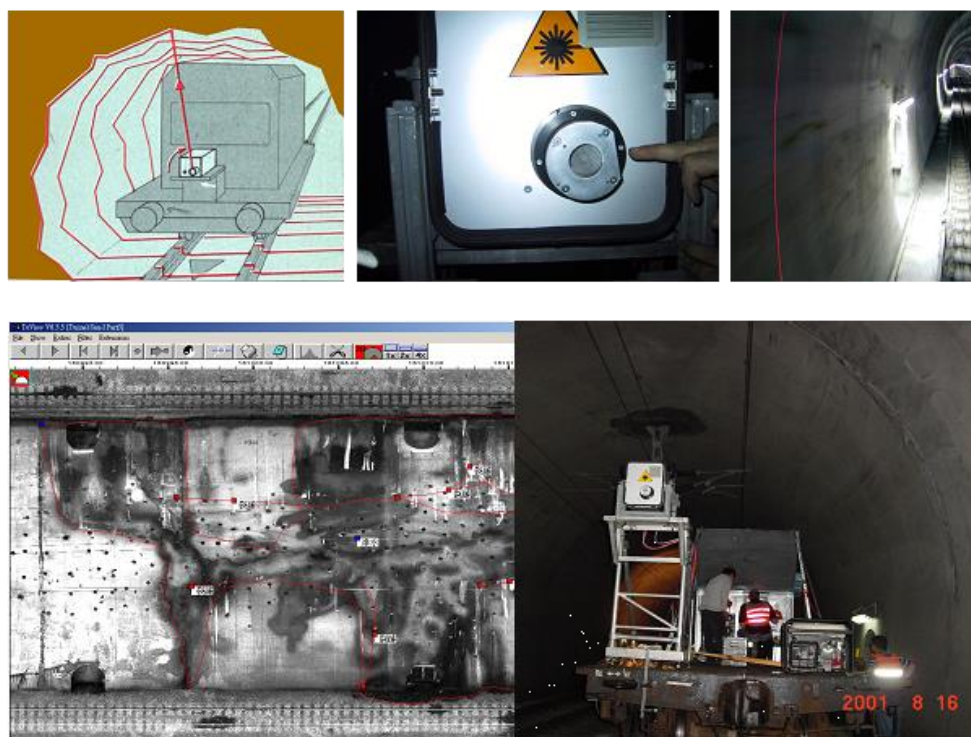


圖3.3-1 TS360系統

- DIBIT三維隧道影像掃描儀

DIBIT三維隧道影像掃描儀(DIBIT tunnel scanner,簡稱DIBIT系統)為可攜式隧道影像記錄器。DIBIT系統模擬航空照相之原理，對相同目標攝取重疊影像，藉以取得隧道表面之影像像素點(Pixel)立體坐標。對一般公路隧道規模而言，隧道斷面需分別攝取重疊影像，進而組合構成全斷面。

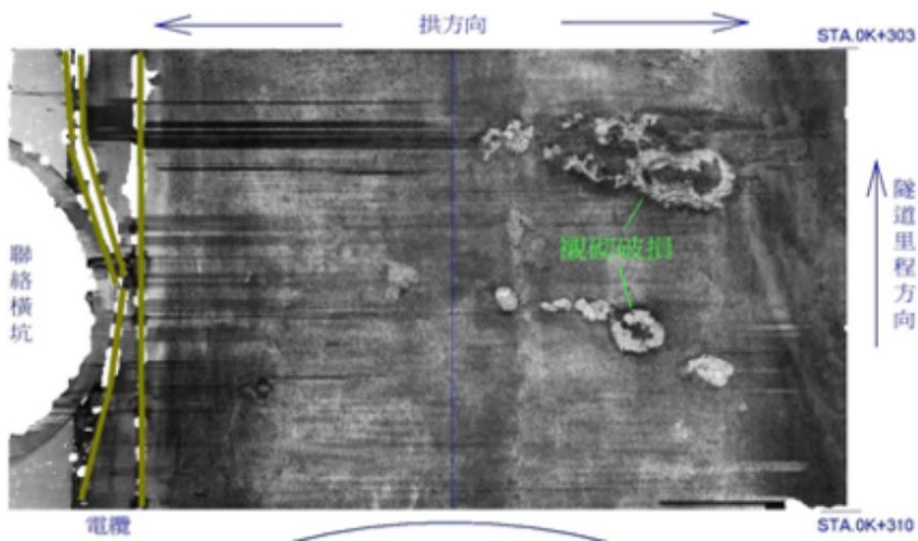


圖3.3-2 DIBIT 測量成果展開圖(葛文忠、俞旗文，2005)

- 熱紅外線掃瞄

透過紅外線熱影像儀器進行電磁波偵測，並將偵測所得訊號轉換成可供人類視覺辨識的影像圖形，可進一步計算出溫度分佈值。由於隧道內溫度變化可能與襯砌背後孔洞、內部缺陷、含水狀況或裂縫等有關，藉由測得溫度分佈，配合影像等資料，可以推測得到襯砌表面乾濕、剝落、不同材料之熱傳導係數之變化及內部空洞等資訊。

- 三維雷射掃瞄技術

三維雷射掃瞄技術（又稱光達（Light Detection And Ranging, LiDAR））為新興的測量技術，具有快速、自動、高精度收集三維空間資料特性。透過雷射對目標物進行高密度的掃瞄，紀錄雷射訊號的走時、反射強度或相位，可以快速地完成量測工作。在隧道工程的應用上，最初多為施工階段的監測作業，如水利署(2016)運用於曾文水庫防淤隧道工程開挖支撐快速評估，如圖3.3-3。目前國內已有學者開始將此技術應用於隧道變位監測，如江怡萱(2014)利用原始資料中的現地特徵，將多時期多測站光達資料整合至共同坐標基準，再建立隧道二維變形分析模型及隧道三維變形分析模型，進行全隧道變位訊號估計與品質評估，驗證此技術為現行隧道安全監測任務中一項具體可行的技術方案。



圖3.3-3 曾文水庫防淤隧道工程豎井閘室(往上游測)光達掃描成果展示圖(水利署, 2016)

### 3.3.2 微變形監測技術

在進入運轉營運階段，因隧道的變位大致在施工期間即已達到初步穩定，前、後檢測的變位非常小，大多僅有數毫米，就目前的工程測量技術並無法獲得測點精準的位移量，此點可從表3.3-1所列有關隧道施工安全監測與營運安全檢監測之比較得知。為了解營運中隧道襯砌承受荷重的變異影響，邱雅筑等人(2012)基於運動學的觀點，分離襯砌位移為剛體運動及變形兩大分量，並分別探討近域與遠域外力變化造成的襯砌剖面變形性特徵曲線(profile-deformational characteristic curve)，繼而建立量測襯砌剖面變形曲線所需的微變監測技術架構，如圖3.3-4，其內容包括了平面控制測量、高程控制測量、路線測量暨回歸計算、襯砌3D絕對坐標全斷面測量與襯砌剖面變形曲線繪製及應用等主要項目。

基於坐標框架與儀器特性，現行測量作業通常考慮待測區域的位置與範圍以選擇滿足精度要求且作業簡便的方式進行。若所採用的測量方法進行待測區的變位或變形監測時，需配合額外的參考點或固定點，始能比較不同時期特定点位坐標的變化。賴彥儒(2013)根據常見的工程測量與監測作業及其選用的坐標特性，劃分了三個不同尺度的測量作業，分別是全域尺度、介觀尺度與局部尺度，詳表3.3-2。為能對待測區域實施多時期測量，必須針對變形參數進行統計檢定測試以確定變形是否確實存在而非受到測量誤差的影響，賴彥儒(2013)經由一系列的測試研究，驗證其分析方法可將不同時期的監測資訊轉至絕對坐標系統下，並得到絕對量測精度；同時，根據王泰典等人(2009)與邱雅筑等人(2012)提出的襯砌微變監測技術作業架構，將全域尺度下的GPS測量作業、介觀尺度下的測量作業及局部尺度下的測量作業相結合，提出了跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構，如圖3.3-5。

表3.3-1 隧道施工安全監測與營運安全檢監測之差異性比較(邱雅筑等人，2012)

項目	施工過程安全監測	營運過程安全檢監測
應力變化	隧道開挖引致應力調整幅度大、圍岩變形量大	安全檢測期間沒有開挖應力調整所造成的變形
支撐之效果	前進面效應與一次支撐支持隧道穩定、支撐勁度相對應力調整量較小	一次支撐與二次支撐襯砌支持隧道穩定，支撐勁度相對外力變化量較大
隧道變形量	監測量測所得變位明顯，可達數十毫米以上	測量所得位移不明確，常僅有數個毫米
測量之精度	既有工程測量技術可滿足精度要求	既有工程測量技術尚無法提供測點精準位移量
岩體參數與反算分析技術的應用性	透過反算分析可求得現地應力與岩體力學參數	隧道變型量較小且精度不足，反算分析結果變異較大

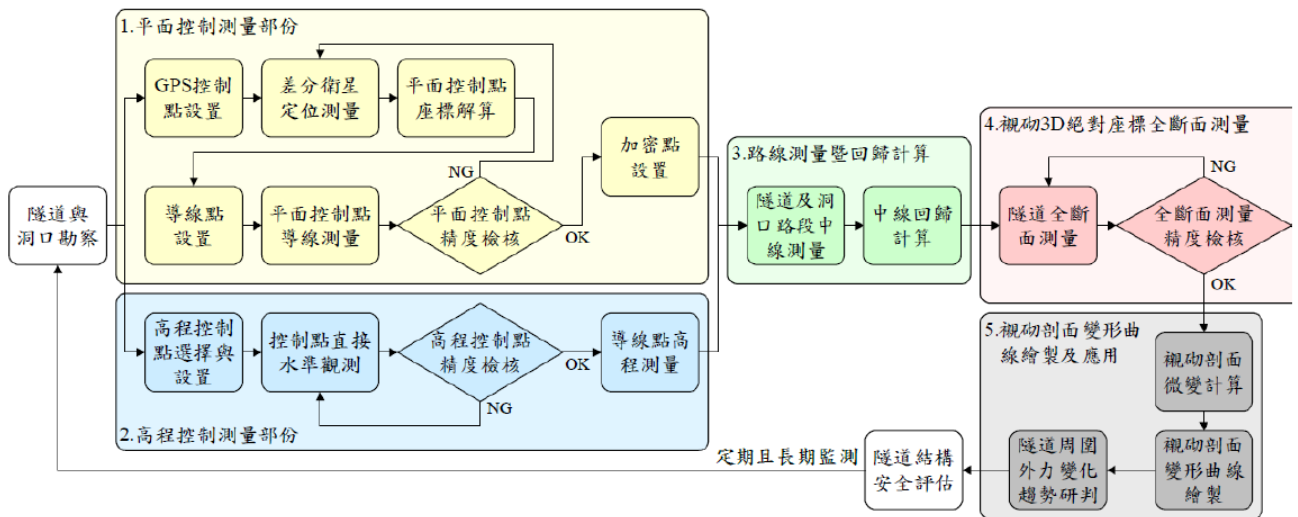


圖3.3-4 曾文水庫防淤隧道工程豎井間室襯砌微變監測技術作業架構(邱雅筑等人，2012)

表3.3-2 定義不同尺度量測之比較(賴彥儒，2013)

不同尺度 比較項目	全域尺度 Macro-scale	介觀尺度 Meso-scale	局部尺度 Micro-scale
坐標系統	國家絕對坐標系 TWD97、 TWVD2001	國家絕對坐標系 TWD97、 TWVD2001	測站單元之 測站坐標系
施測方式	GPS靜態測量 水準測量	加密控制測量	單站自由測站法
已知點	衛星控制點 一、二等水準點	隧道控制點 Meso-scale Control	測站中心
待測點	隧道控制點 Meso-scale Control	加密控制網 Meso-Network	監測剖面點 Tunnel Profile 局部加密控制網 Meso-Network(net#)

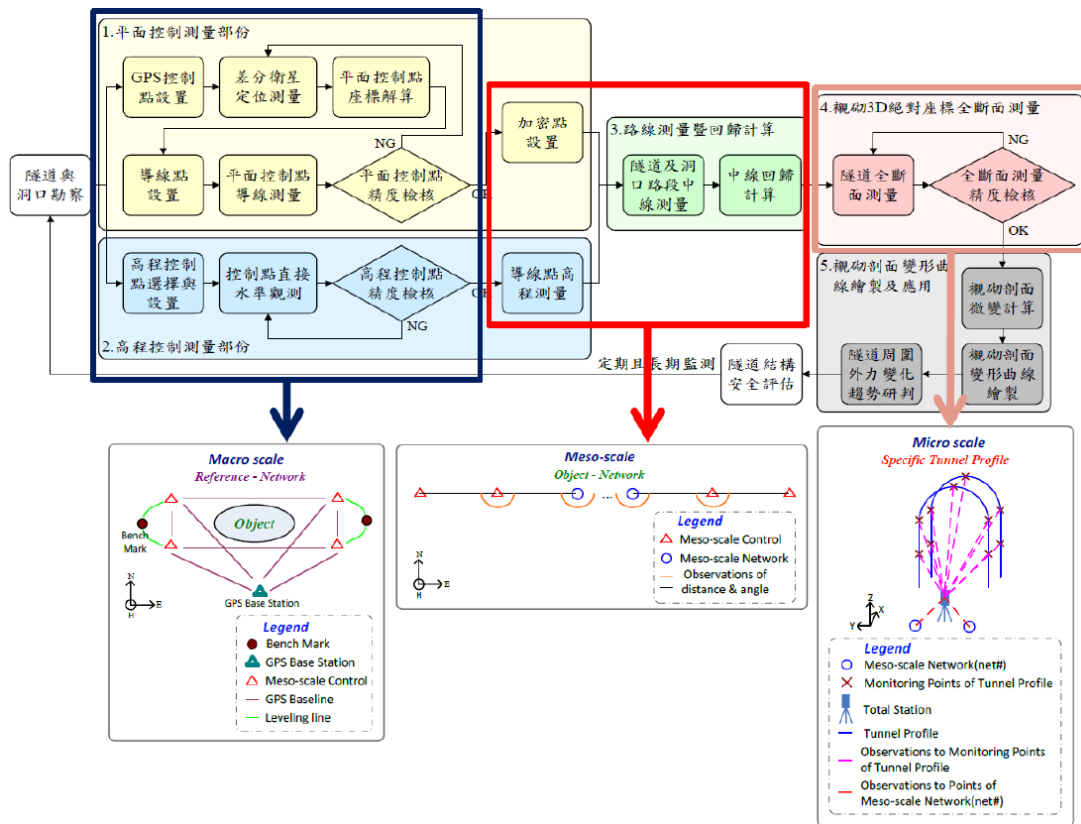


圖3.3-5 跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構(賴彥儒，2013)

### 3.3.3 導電與電子檢測之類型

#### (1) 透地雷達

透地雷達(ground penetration radar)簡稱GPR，是一種反射電磁波探測法，以高壓線圈為探測源，產生高頻電磁波射入探測區域介質內，在行經電磁特性如導電率(conductivity) 或介電常數(dielectric constant)變化的界面或異常體時，會依斯涅爾定律(Snell's law)將部份能量反射回來，反射能量的強度依此界面的反射係數(又稱反射率)而定，透過天線接收並記錄於儀器內，將連續之歷時記錄排在一起，則成雷達波剖面，分析反射波的走時、強度及相位，即可獲得探測區域介質電磁特性異常的幾何位置，進而推估相關的地質構造及結構體的完整性，有關透地雷達原理示意，如圖3.3-6。

若襯砌和岩盤交接良好，應用透地雷達探測可能無法看到明顯的反射界面，但若襯砌中存在蜂窩、背後空洞、含水等缺陷，則可藉由透地雷達探查測出，而且由於不必和襯砌緊密接觸、施測快速，因此透地雷達可以說是襯砌完整性調查非常有效的工具。

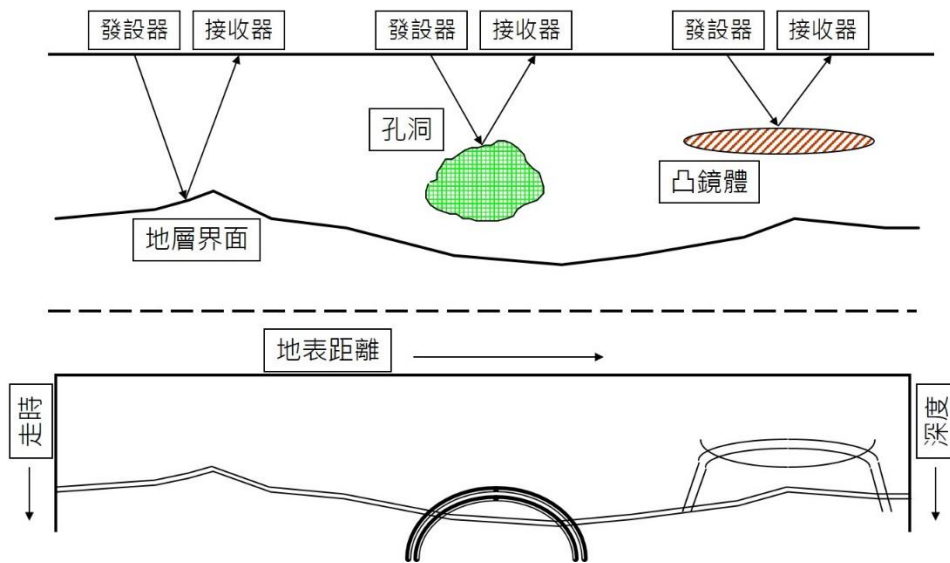


圖3.3-6 透地雷達原理示意圖

#### (2) 多相線性陣列電磁波雷達

多相線性陣列電磁波雷達(multipath linear array electromagnetic wave radar)的原理類似透地雷達，係由多個雷達線性排列組合而成，透過不同位置雷達對電磁波訊號的解析，可解析出襯砌背後缺陷的三維空間分佈。多相線性陣列電磁波雷達與電磁波雷達(即傳統透地雷達)比較如圖3.3-7所示。日本東鐵道公司曾針對隧道檢測車的檢測精度進行

試驗，驗證可有效檢測出襯砌背後的裂縫、冷縫、空洞與蜂窩等各種缺陷，如圖3.3-8所示。

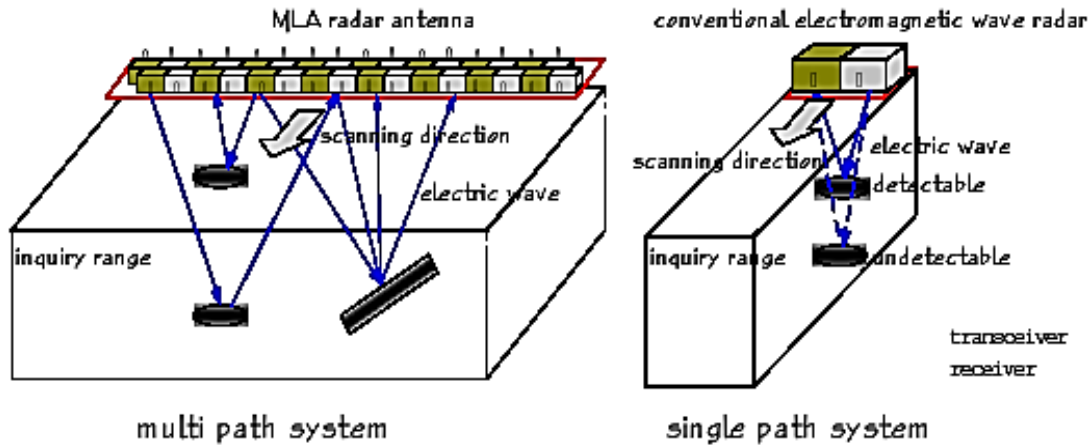


圖3.3-7 多相線性陣列電磁波雷達與傳統透地雷達比較

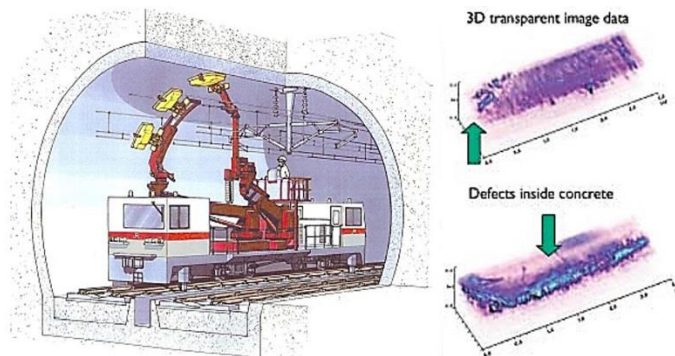


圖3.3-8 多相線性陣列電磁波雷達與隧道檢測車(王泰典，2007)

### (3) 自然電位法探測鋼筋腐蝕

結構物中之鋼筋腐蝕，因時間或其他因素造成一電化學反應，有如電池一般，代表一通電，即可產生電流，因此混凝土內腐蝕與未腐蝕之鋼筋間產生某種程度的電位差。故藉著鑽孔將探測器放入，接觸鋼筋而造成一電流迴路，如此可於混凝土表面測得範圍內(約2 m × 2 m)之鋼筋電位差，經比對即可瞭解鋼筋之腐蝕程度，而據以評估結構體之強度。惟於此之前，將擇重要具代表性(如強度劣化區、滲漏水處、中性化區等)處，利用鋼筋位置探測儀探測壁面內鋼筋位置，再鑽孔接通電流迴路，進行鋼筋腐蝕探測。

### (4) 電阻法探測鋼筋腐蝕



當人工電場加諸於鋼筋混凝土結構物等，因混凝土及鋼筋等介質電導性的不同，使得結構物之電位產生不均勻的分佈，此時若測量其電阻變化狀況，可據此做定性或定量的解析。電阻法係以電阻儀器在現場量測鋼筋混凝土的電阻，根據量測結果判定鋼筋腐蝕的可能性。

### 3.3.4 物理波動檢測之類型

#### (1) 敲擊回音法

敲擊回音法(impact-echo method)是應用物理波動技術探測裂縫深度的一種方法，其源於1983年由美國國家標準及科技院(National Institute of Standards and Technology)發展之低頻暫態應力波傳原理之非破壞性檢測方法。施作程序係利用機械性敲擊產生暫態應力波動並導入待測物體內，應力波遇到內部的孔隙或瑕疵時，形成反射波反射回待測物體表面，藉由接收器的序時訊號接收及分析，並不斷地移動敲擊及接收的位置，可以估計出孔隙或瑕疵的位置及形狀。

#### (2) 超音波檢測

超音波檢測是指「以低能量高頻率的超音波，對物件(內部)瑕疵加以檢測」。一般超音波檢測所使用頻率由 1MHZ 至 25MHZ，基本設備需有電子訊號產生器，藉著換能器(或稱探頭 Transducer of Probe or search Unit)發射出超音波，再經由藕合劑(Couplant)傳入試件中。在試件中，超音波會有或多或少的衰減，當傳至介面時，超音波可能反射或透射，藉由偵檢、分析反射或透射訊號，則可檢測出瑕疵，並可定出瑕疵位置。

### 3.3.5 其他檢測類型

混凝土強度的探測方法有許多種，如混凝土強度錘法、測試槍法、拉拔試驗、貫入阻力法等。其中混凝土強度錘法與測試槍法，只能測得混凝土表面之強度指標，惟因其施作簡便，因此常使用於現場之簡易測試。進行試驗前應對材料表面進行適當處理，將可獲得更具代表性之結果。

針對各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測的特性，包括檢測方式、空間定位精度、檢測速度以及所需的配合設備及相關作業等，黃燦輝等人(2008)於「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發」總結報告書中，整理了各種檢測技術應用於隧道襯砌之定位精度與檢測速度比較，詳如表3.3-3，可供未來處置坑道襯砌結構檢測技術選定之參考。

此外，在行政院原子能委員會放射性物料管理局103年委託研究計畫「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，已根據國外中、低放處置坑道及國內營運中一般坑道之經驗，提出處置坑道在運轉期之檢監測項目建議，包括了岩盤穩定性監測、坑道斷面監測、襯砌裂縫、裂縫擴展、襯砌受力與變形及水文地質相關參數監測等項目。

表3.3-3 各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測之比較(修改自黃燦輝，2008)

非破壞性檢測技術		檢測方式	空間定位精度	檢測速度	配合設備/作業
光學技術類	目視/攝影/錄影檢測	三維面狀	低	視異狀程度、隧道照明而定，0.2~1.5km/人時	一般攝、錄器材與量尺
	隧道淨空測量	三維點狀	甚高	單一斷面施作迅速	需設測量控制點、內業處理
	隧道影像掃描(TS360系統)	三維面狀	高	2~5km/hr	需工作車配合及內業處理
	隧道影像掃描(DIBIT系統)	三維面狀	高	100 m/hr	需測量定位配合及內業處理
	熱紅外線掃描	三維面狀	高	2~5km/hr	需測量定位配合及內業處理
導電與電子技術類	透地雷達	二維線狀	視配合作業而定	0.5~1.5km/hr	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架、需內業處理
	多相線性陣列電磁波雷達	二維線狀	視配合作業而定	0.2~0.3km/hr	
	自然電位法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架
	電阻法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	
物理波動技術類	敲擊回音法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架、需內業處理
	超音波檢測	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	
	打擊聽音法	局部點狀	視配合作業而定	單點極快，全面性施作需大量人力	
其他類	混凝土強度錘	局部點狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架
	測試槍	局部點狀	視配合作業而定	單點施作迅速	

### 3.4 小結

(1)襯砌裂縫與(2)滲水為影響坑道長期穩定的關鍵因子。其中，尤以坑道襯砌發生裂縫為國內坑道在營運過程中最常見之異狀。而造成上述坑道異狀之原因，概可區分為三大類：(I)外力因素(地震作用、邊坡運動與開挖擾動)、(II)環境因素(風化作用引致岩石強度弱軟化、依時性變形特性)及(III)非力學因素(混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足、鹼值粒料反應、冷縫及襯砌背後空洞或厚度不足等)。針對處置坑道在運轉階段，因外力因素、環境因素或非力學因素之作用，導致坑道結構穩定性可能受到影響，其對應的驗證方法整理如以下二點：

#### (1) 外力因素與環境因素對坑道結構穩定性的影響驗證

針對外力因素與環境因素影響下之處置坑道結構穩定性分析與驗證，考量縮尺物理模型試驗的邊界條件，及模擬材料與真實材料的相似關係，並不易反映出真實處置坑道所處外力因素(邊界條件)與環境因素(模擬材料之選定)的影響。循此，仍可透過既有的隧道結構穩定數值模擬分析方法，包括有限元素法、有限差分法、邊界元素法、離散元素法等理論基礎所發展的數值分析工具進行數值模型建模與參數分析，惟環境因素部分，因涉及岩石強度弱軟化及依時性變形特性(潛變)，仍需透過實驗建立具強度弱軟化或具依時性變形特性之岩石材料組成律，繼而可參考第二章瑞典SKB所採用的「強度參數折減分析方法」(SKB, 2014)進行相關的數值分析工作。

#### (2) 非力學因素對坑道結構穩定性的影響驗證

混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足、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，則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對坑道結構穩定性的可能影響。

## 第四章、建立坑道處置結構穩定性審查假想案例

### 4.1 建立本土坑道假想案例之重要性

一般坑道依其地質條件、岩體強度與支撐特性、坑道斷面形狀、尺寸及用途，採襯砌或無襯砌之設計。根據前期研究(楊長義與李宏輝，2014)，國內本土坑道具襯砌者，在運轉階段襯砌可能出現裂縫或滲漏水等異狀，且國內的襯砌異狀與國外坑道相較，二者實有部分差異，如圖4.1-1，例如國外襯砌異狀以裂縫所佔比例最高(79%)，其次依序為仰拱隆起或沉陷(34%)、剝落(33%)與滲漏水(23%)；而在國內案例，仍以裂縫比例最高(92%)，其次依序為滲漏水(72%)、剝落(43%)與仰拱隆起或沉陷(13%)。再者，國內外隧道襯砌異狀比例最高之前四項均是：裂縫、滲漏水、剝落與仰拱隆起或沉陷，國內外均以裂縫所佔比例最高。但國內隧道發生裂縫的比例高達92%，遠高於國外的79%，顯示國內隧道襯砌幾乎都會出現裂縫問題。

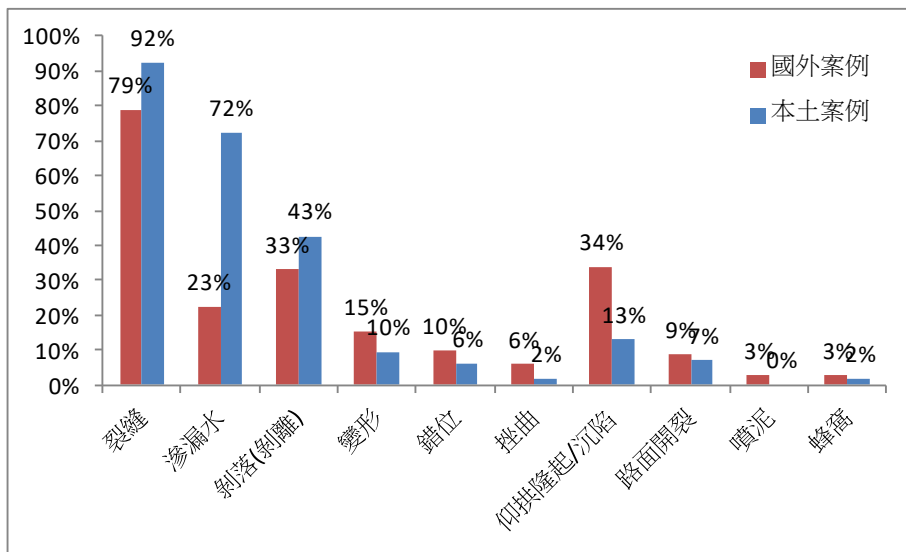


圖4.1-1 國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較(楊長義與李宏輝，2014)

經濟部已公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」二處為低放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址。本研究為發展安全管制驗證技術之需要，同時考量我國低放射性廢棄物可能場址特性，故蒐整本土坑道假想案例分別為外島與本島案例各一處：

- A. 在外島坑道假想案例部分：主要是考量無襯砌結構之坑道亦屬可能採取的處置坑道型式，故本研究以金門既有之無襯砌結構坑道為假想案例，蒐集坑道地理位置、地

質條件、建造與營運歷史、出露之地質材料與地質構造等資料，並分別就坑道之入口、坑道段與水道段進行現況調查。

- B. 在本島假想案例部分：本研究根據前期研究「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫五：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) 已蒐整之交通部台灣鐵路管理局「南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告」(交通部台灣鐵路管理局, 2008) 中，所列之安朔隧道檢測案例，整理納入本研究之具襯砌型式之坑道假想案例。據此，建立坑道處置結構穩定性審查假想案例，為後續發展處置坑道結構穩定性審驗技術奠基，期能縮短審驗技術發展歷程。

## 4.2 假想案例一—外島翟山坑道

### 4.2.1 地理位置

翟山坑道位於金門島本島西南側南面海岸突出部的翟山內，地理位置為北緯 $24^{\circ}23'18.69''$ ，東經 $118^{\circ}19'5.10''$ 。翟山坑道包含坑道和水道兩部分，坑道段由陸上坑道入口銜接至水道，全長101公尺，寬約6公尺，高約3.5公尺；水道部分呈A字形，有兩處出口，詳圖4.2-1，總長357公尺，寬11.5公尺，高8公尺。

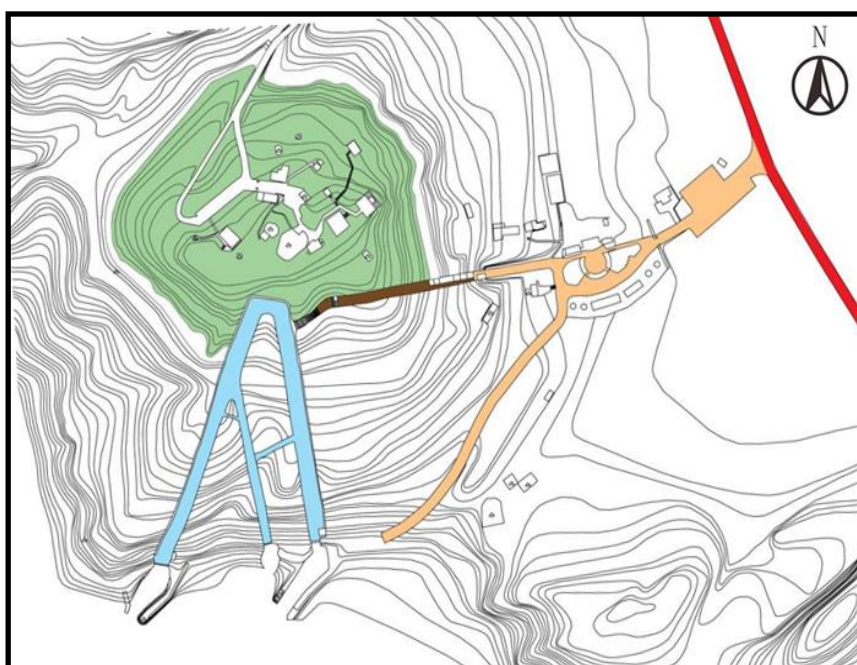


圖4.2-1 翟山坑道位置示意圖(吳宗江, 2012)



成解壓與剝蝕作用，形成大型洋蔥狀剝離節理或頁狀節理，影響地表地形發育以及近地表坑道的穩定性。(林蔚等人，2011；李亮瑩等人，2012)

### 4.2.3 翟山坑道建造與營運歷史

翟山坑道是一座由陸地通往海面之通道，主要功能為提供登陸小艇泛水及迴轉，內有停靠碼頭，可隨時載運國軍登陸部隊與補給物資(國防部三軍大學「戰役史研究小組」，1993)。翟山坑道於民國 52 年 12 月 14 日動工開鑿，於民國 53 年 10 月完工，如表 4.2-1，開鑿石料約 8 萬 6,000 立方公尺，工程經費約 1,113 萬餘元。

表 4.2-1 金門坑道工程建設資料(吳宗江，2012)

建設名稱	開鑿日期	完工日期	備註
太武山東區後勤坑道	45年4月1日	46年5月15日	由各守備隊分區開鑿
北坑道	45年4月16日	46年2月24日	由陸軍26、68師派工兵開鑿
東坑道	46年11月1日	47年3月20日	由陸軍27、32師派工兵開鑿
前山前坑道	47年10月1日	52年7月底	由陸軍58、26師派工兵、步兵開鑿
成功坑道	48年7月9日	49年12月底	由陸軍41、68師派工兵、步兵開鑿
料羅修護坑道	48年5月18日	48年12月26日	由陸軍69師派工兵開鑿
夏興坑道	50年11月28日	51年5月5日	由陸軍93師派工兵、步兵開鑿
漁村坑道	53年1月17日	53年9月10日	由陸軍33師派工兵、步兵開鑿
翟山坑道	52年12月14日	53年10月	由陸軍58師派工兵、步兵開鑿
塔山坑道	52年7月16日	53年10月上旬	由陸軍26師派工兵、步兵開鑿
九宮坑道	52年12月20日	53年10月	由陸軍41師派工兵、步兵開鑿

施工部隊為陸軍步兵師及工兵營，施工人員以工兵為主、步兵為輔，工兵的軍士官經過測量之後，在岩壁做上記號，由工兵部隊以氣鑽進行鑽孔，依指示從不同地方鑽出不同深度的石孔，再由有經驗的士官將雷管埋入，並依序放置黃色炸藥、拉出引線再用泥土密封，最後將引線拉出洞外編號並引爆。爆破後由小組人員入內確認安全之後，再



由步兵隨之入內搬運石塊清渣(金門縣文化局, 2013)。坑道建造過程中, 基於花崗片麻岩與花崗岩的岩質佳, 為快速建造並投入防禦工事, 因此未設置系統性的支撐或襯砌。

翟山坑道完工後由海軍海灘總隊小艇第二大隊進駐, 由於泥沙淤積、兩岸關係和緩等因素, 海灘總隊第二大隊第二中隊撤離, 營區改由金門防衛司令部金西師接管, 至民國 75 年, 因泥沙淤積且戰備功能減退, 坑道封閉除役。民國 86 年, 金防部將翟山坑道移交金門國家公園管理處, 經整修後隨即開放參觀, 現已成為金門著名的觀光景點。本坑道迄今五十多年, 適與處置坑道預定設計之營運期程相近, 且未設置系統性的支撐或襯砌, 其目前所顯現工程性質現況與母岩劣化變化, 正足以提供推估處置坑道封閉前之穩定狀況。

#### 4.2.4 坑道出露之地質材料與地質構造

翟山坑道中主要出露的岩類為弱片麻狀的花崗片麻岩、角閃岩脈、花崗岩脈、偉晶岩脈及十餘條東北-西南走向基性岩脈群。地質構造上, 可觀察到順韌性剪切帶低角度侵入的角閃岩脈, 其接觸帶平行於圍岩的片麻理及糜嶺岩帶, 並且接觸帶上呈現圍岩因侵入作用發生混合岩化接觸圈, 產生部份融熔並形成長英質岩脈, 顯現出長英質岩漿以不混熔的現象混合在角閃岩漿中的特殊現象。接近東西走向侵入的花崗岩脈與偉晶岩脈, 伴生東西走向小型低角度韌性正斷層, 斷距僅約數十公分。

#### 4.2.5 坑道現況調查

因金門地區地下坑道皆屬於冷戰時期之軍事設施, 在長期戰備及軍事管制之情況下, 相關資訊及研究成果甚為缺乏, 因此, 對於坑道現況之瞭解必須透過現地調查進行。翟山坑道為無襯砌之岩石坑道(僅在洞口段有施作混凝土結構, 避免鬆動之風化岩塊掉落), 由於開挖岩面未施作襯砌, 因此可直接進行開挖面地質狀況之觀察與監測。以下分別介紹坑道入口處之洞口段、坑道段與水道段之地質現況, 相關位置如圖4.2-3所示。



圖4.2-3 翟山坑道現勘位置

#### (1) 坑道入口處

如圖4.2-3所列A處，坑道入口處節理密布，主要為一組密集的東北-西南走向高角度剪力節理，以及一組低角度之解壓節理，如圖4.2-4所示。洞口岩體受節理面交互截切而呈現破碎狀，因此構築鋼筋混凝土洞門作為洞口防護設施，並設置鋼線防護網以攔截墜落之岩塊，此處為本坑道目前唯一設置之支撐與防護系統，如圖4.2-5。此外，觀察洞口附近圍岩長期受地表水作用，導致花崗片麻岩呈現高度風化至完全風化狀態，岩坡面上植被茂密，如圖4.2-6所示。



圖4.2-4 翟山坑道入口處地質現況



圖4.2-5 翟山坑道入口處洞口防護設施



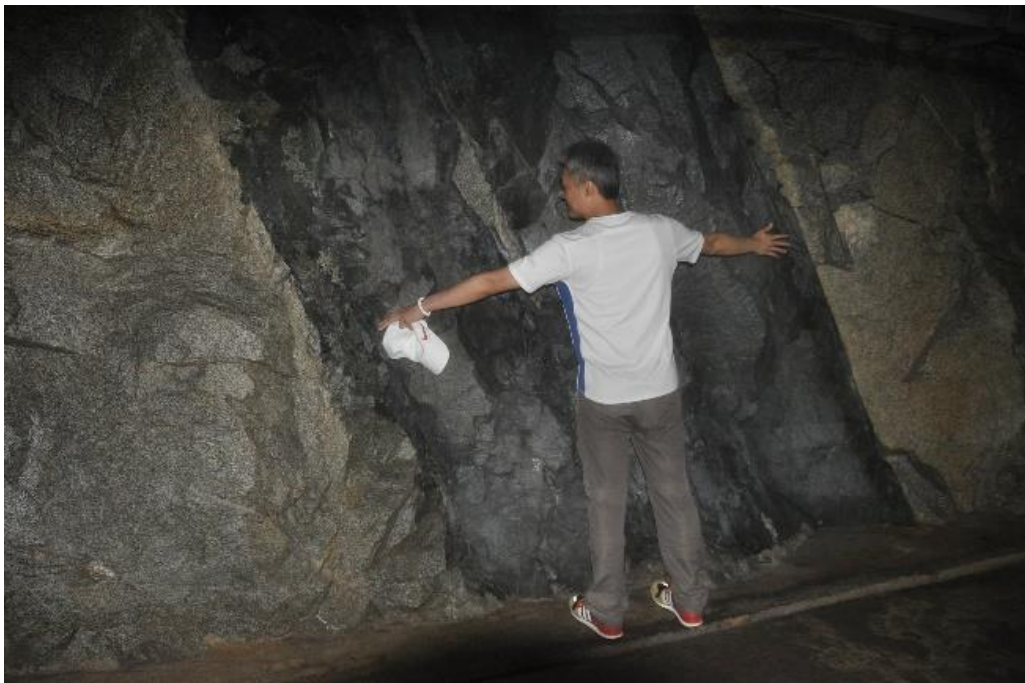
圖4.2-6 翟山坑道入口處岩坡風化情形

## (2) 陸上坑道段

陸上坑道段如圖4.2-3所列B處，坑道段之圍岩以花崗片麻岩為主，如圖4.2-7，開挖面之岩性良好，主要節理面位態計有三組：(i) Joint set 1： $N30^{\circ}E/N88^{\circ}$ 、(ii) Joint set 2： $N60^{\circ}W/S83^{\circ}$ 、(iii) Joint set 3： $N50^{\circ}E/S23^{\circ}$ ，如圖4.2-8所示。岩體局部區域出現東北-西南走向之灰黑色基性侵入岩脈群，如圖4.2-9及圖4.2-10所示。基性岩脈為圍岩在早期構造活動中，張裂作用導致岩漿侵入節理所形成，從開挖面上可觀察基性岩脈在三維空間之分佈型態。



(a)



(b)

圖4.2-7 翟山坑道坑道段之圍岩：(a)花崗片麻岩與(b) 黑色基性侵入岩脈

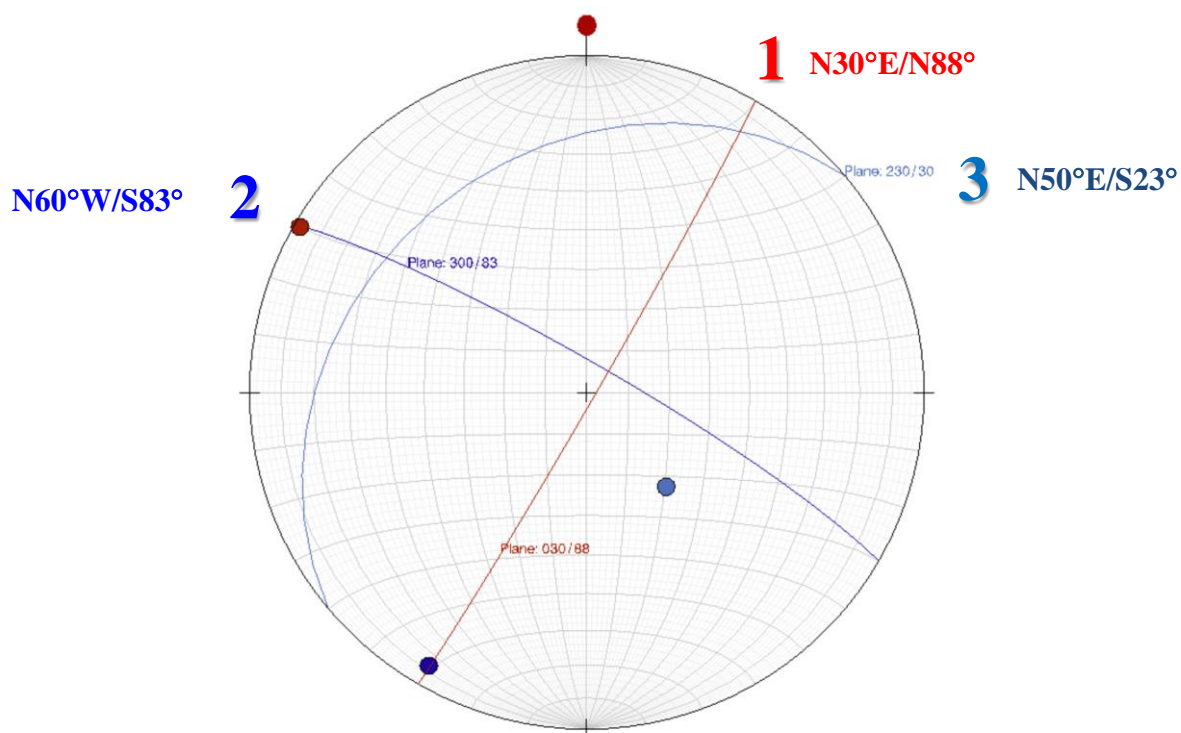


圖4.2-8 主要節理面位態計有三組：(i) Joint set 1：N30°E/N88°、(ii) Joint set 2：N60°W/S83°、(iii) Joint set 3：N50°E/S23°



圖4.2-9 翟山坑道坑道段之地質現況



圖4.2-10 翟山坑道側壁之基性岩脈群(1)

### (3) 水道段

水道段如圖4.2-3所列C、D、E處，其圍岩亦以花崗片麻岩為主，局部區域出現基性岩脈與偉晶岩脈。圖4.2-11中，自坑道側壁延伸至頂拱處之灰黑色岩脈為基性岩脈群；圖4.2-12中，左側側壁上之白色岩脈為偉晶岩脈，圍岩與侵入岩脈之岩性良好，但呈現部分風化現象，頂拱處局部風化之基性岩脈呈現白色，且因地下水入滲已有碳酸鈣結晶，詳如圖4.2-13，此一風化之基性岩脈延伸至側壁處，亦可觀察到基性岩脈與花崗片麻岩交界處已呈現風化現象，如圖4.2-14。

水道段近出海口處節理密布，由於覆蓋較淺且節理似已相互連通，並與地表破裂(碎)帶相連，導致滲水嚴重，頂拱及側壁岩面上之鏽染情形隨處可見，如圖4.2-15所示；局部區域之岩面鏽染嚴重，顯示長期受地下水或雨水滲流侵蝕。



圖4.2-11 翟山坑道側壁之基性岩脈群(2)



圖4.2-12 翟山坑道側壁之基性岩脈群(3)





圖4.2-13 翟山坑道頂拱處局部基性岩脈地下水入滲



圖4.2-14 翟山坑道側壁處基性岩脈與花崗片麻岩交界處已呈現風化現象



圖4.2-15 翟山坑道近出海口處節理密布，頂拱及側壁岩面呈現鏽染情況

### 4.3 假想案例二—本島台鐵安朔隧道

#### 4.3.1 地理位置

根據交通部台灣鐵路管理局「南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告」(交通部台灣鐵路管理局, 2008)進行之七座隧道檢測紀錄, 包括金崙、多良一號、大竹二號、大竹一號、大鳥、大武二號及安朔隧道, 全區路線橫跨台東縣太麻里鄉、大武鄉及達仁鄉, 東臨太平洋, 西與屏東縣以中央山脈相隔, 本研究僅整理摘錄安朔隧道之檢測資料, 並分述如后。

#### 4.3.2 地質條件、岩體分類與隧道斷面支撐工法

南迴鐵路沿線地層劃分為七個岩段, 詳圖 4.3-1, 案例所處之地層分屬第二岩段(L2)與第三岩段(L3)。第二岩段(L2)係整合覆蓋於第一岩段上, 分佈範圍從香蘭至大溪地區、大武溪中及上游地區, 以及菩安山背斜軸附近地區, 因分佈範圍廣, 岩性在各地略有變異。菩安山背斜軸附近出露岩層屬於本段上部, 主要由厚塊狀硬頁岩或板岩及少數厚層變質砂岩所組成。

安朔隧道岩性以硬頁岩為主, 硬頁岩及變質砂岩互層次之, 里程 36K+419-36K+672.4 公尺處為斷層破碎帶, 按 CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類, 岩體強度約為 10 至 50 MPa, 地下水狀況為輕微滲水至嚴重湧水, 主要不連續面為劈理與節理, 三組節理位態為  $J1=N37^{\circ}\sim 47^{\circ}W/89^{\circ}NE$ 、 $J2=N69^{\circ}\sim 84^{\circ}E/85^{\circ}SE$  及  $J3=N33^{\circ}\sim 43^{\circ}E/86^{\circ}SE$ ,

二組劈理位態為 $C1=N20^{\circ}E/48^{\circ}SE$ 與 $C2=N26^{\circ}W/38^{\circ}NE$ 。施工期間隧道破壞型式以岩塊墜落、岩塊翻倒與岩層之材料破壞為主，如表4.3-1所示。

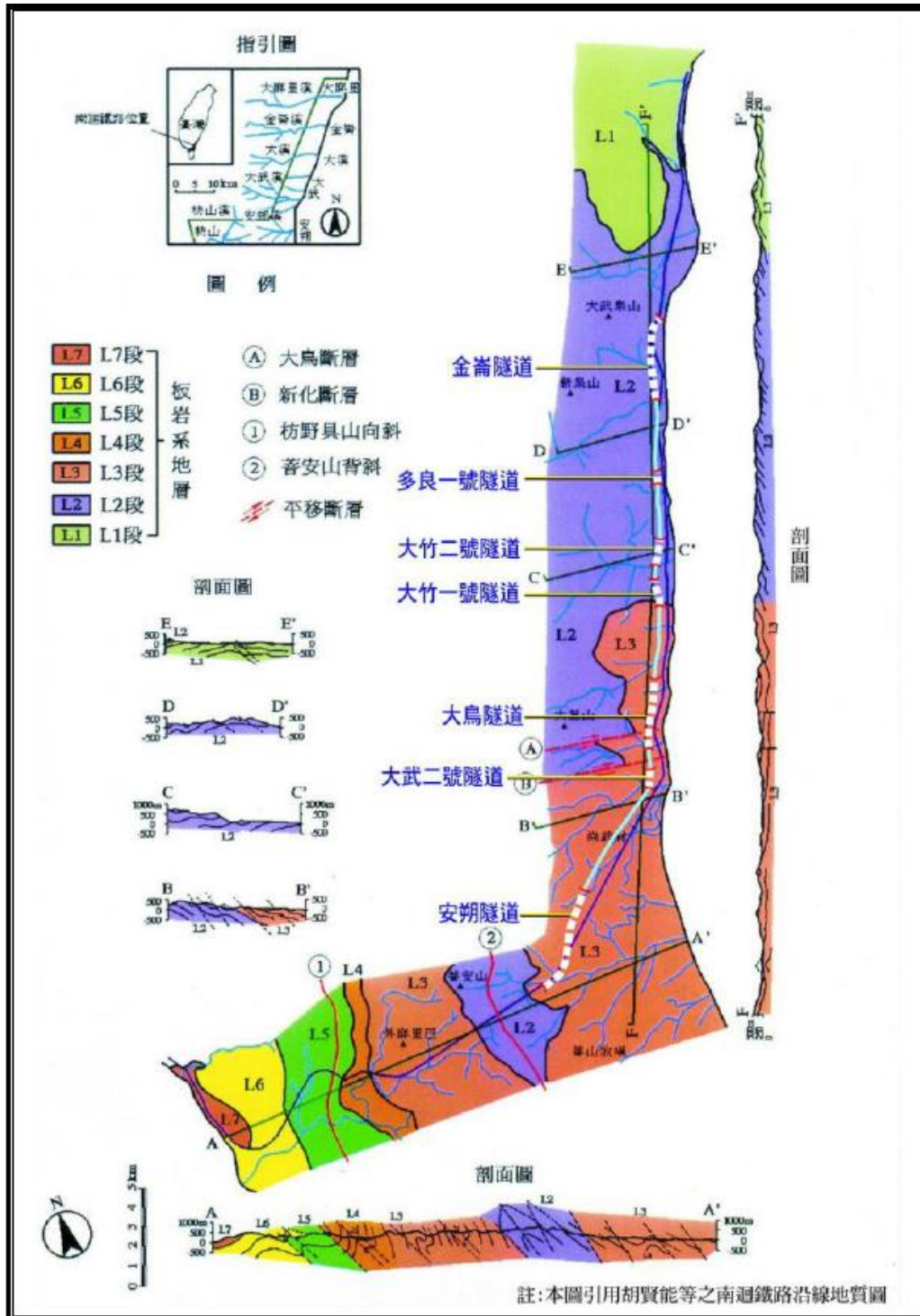


圖4.3-1 南迴線金崙隧道至安朔隧道區域地質圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

安朔隧道斷面採雙線馬蹄型設計，起拱線淨寬9.1公尺，路基面寬8.15公尺，施工工法分別採用明挖覆蓋工法、美國鋼支保支撐工法(傳統工法)與新奧工法，如圖4.3-2所示。隧道沿線每600公尺設置一處大型避車洞，另每40公尺設置一處小型避車洞。於民國80年12月完工啟用，迄今已營運26年之久。

表4.3-1 安朔隧道地質條件與施工期間破壞型式總表(交通部台灣鐵路管理局，2008)

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
安朔	32k+167~32k+262	—	—	—	—	—	—
	32k+262~32k+654	硬頁岩為主，少部分變質砂岩	破碎帶	III~V	20~40	輕微滲水	—
	32k+654~33k+848	硬頁岩	—	IV~V	20~50	輕度~中度湧水	岩塊墜落 岩塊翻倒 材料破壞
	33k+848~34k+033	硬頁岩	—	IV~V	25~40	輕度~嚴重湧水	岩塊墜落
	34k+033~36k+419	硬頁岩及硬頁岩與變質砂岩之互層為主	破碎帶	IV~V	20~40	輕微滲水~中度以上湧水	岩塊墜落 材料破壞
	36k+419~36k+672.4	斷層泥為主	斷層 破碎帶	III~V	10~40	輕度滲水	岩塊墜落
	36k+672.4~37k+650	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國81年)

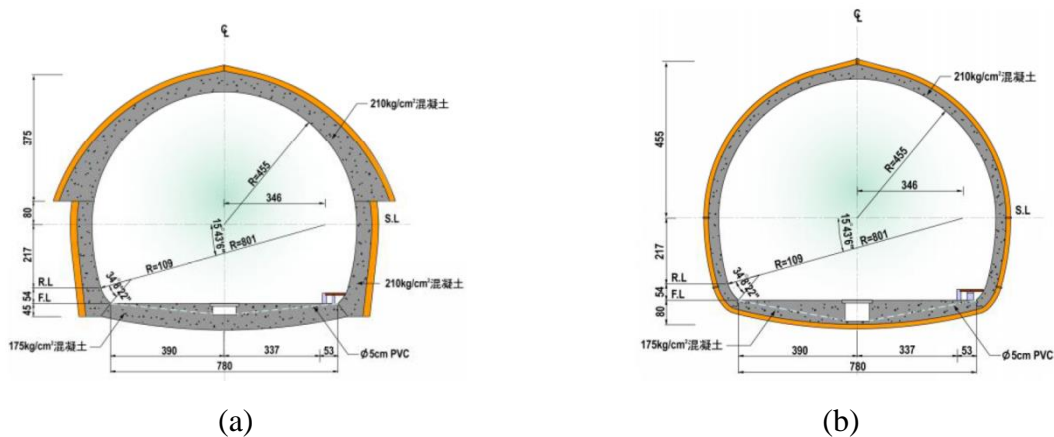


圖4.3-2 安朔隧道支撐工法斷面圖：(a)雙線隧道美國鋼支堡工法標準斷面圖；(b) 雙線隧道新奧工法標準斷面圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

### 4.3.3 安朔隧道施工階段之災變記錄

據「南迴鐵路工程-工程輯要」(南迴鐵路工程處，1992)記載之安朔隧道施工階段災變位置及描述，整理施工期間的災變類型及發生原因如表4.3-2，可知工程災變主要發生在第IV與第V類岩體區，災變類型區分擠壓、抽心與落盤、湧水及隧道覆蓋層下、地層滑動等，至於工程災變之原因，與鬆動岩盤、破碎及風化岩層、斷層帶、偏壓及淺覆蓋等因素有關，前三項與地質條件有關，後二項屬隧道選線及地形條件之影響。

表4.3-2 施工階段於安朔隧道之災變及其原因彙整(楊長義與李宏輝，2014)

災變類型	發生位置	發生原因
擠壓	1. 支保變形(ASSM 工法) 2. 鋼支保變形(NATM 工法)、噴凝土裂縫 3. 開挖斷面擠壓變形(頂拱下陷 1 m、側壁往內擠壓 30 cm、底部向上隆起 26cm)	1. 鬆動岩盤產生岩壓，或因地質鬆軟破碎與偏壓顯著所導致 2. 疏鬆且膠結不良之含泥層岩盤經開挖後引致開挖面擠壓 3. 遇破碎泥岩(疑是斷層帶)
抽心與落盤	1. 頂拱 2. 開挖面	1. 因剪力楔型岩塊坍塌，或遇含泥量高之破碎硬頁岩及其碎屑，及開挖通過斷層帶引致抽心 2. 因岩盤破碎含大量粘土層及風化岩層，或因開挖面通過斷層破碎帶引致落盤
湧水	1. 山側 60° 2. 開挖面	1. 地下水位高及開挖擾動 2. 逢颱風雨季致地下水位上升，湧水不斷
隧道覆蓋層下陷、地層滑動	1. 近洞口段 2. 近洞口段	1. 地質破碎引致隧道覆蓋層下陷 2. 地質軟弱、隧道覆蓋厚度僅 5-12 m，經開挖後引致地層滑動及地表裂隙

#### 4.3.4 檢測項目與方法

檢測項目包括「裂縫與滲水調查」、「襯砌及背後空洞調查」、「裂縫寬度與深度調查」、「混凝土強度檢測」與「混凝土中性化調查」等項目，相關檢測方法與結果詳如表4.3-3所示。

表4.3-3 營運期間於安朔隧道檢測項目、方法與檢測結果

項目	方法與技術	檢測結果
裂縫與滲水調查	1. 目視檢查 2. 隧道影像掃描技術	提供隧道全線襯砌表面裂縫及滲水位置與分佈情形，供後續維護與持續追蹤比對之參考
襯砌及背後空洞調查	透地雷達	具代表性的異狀可歸納成三種型態：(A)裂隙發達；(B)背後疏鬆；(C)厚度改變
裂縫寬度與深度調查	超音波	施測區域其裂縫深度為襯砌設計厚度的34%至43%，供後續維護與掌握混凝土襯砌是否有繼續劣化現象之參考
混凝土強度檢測	1. 混凝土強度錘試驗 (Schmidt hammer test) 2. 鑽心取樣進行室內抗壓試驗	1. 混凝土強度錘試驗易受混凝土表面狀況(蜂窩、裂縫與剝落)影響，檢測數值僅供一般性襯砌強度檢驗參考 2. 於隧道目視檢查之混凝土劣化處、襯砌剝落處、裂縫位置、混凝土膠結不良處、滲水位置等側壁或頂拱進行鑽孔取樣後進行室內抗壓強度試驗，試驗組數中僅有一個試體試驗值低於設計強度 210 kgf/cm <sup>2</sup>
混凝土中性化調查	混凝土中性化試驗	安朔隧道襯砌混凝土中性化深度多在3公分以內

#### 4.4 小結

根據本研究蒐整之外島無襯砌坑道及本島具襯砌坑道假想案例計二處，茲將坑道所處地點、完工啟用日期、地質條件、坑道屬性、斷面尺寸、長度及坑道結構異狀等，整理如表4.4-1。此外，針對於坑道所處地質條件，及對坑道結構穩定性之影響因素整理如下：

##### (1) 地質條件

- a. 外島假想案例：翟山坑道屬花崗片麻岩與花崗岩，岩體單壓强度高，開挖後無需支撐結構輔助，岩體可維持良好的自立性；惟須考慮地質構造(geological structural)可能引致的岩塊滑動與掉落。例如，坑道所處岩體中既有的兩組剪力節理及一組解壓節理，及經坑道開挖形成的自由面，可能造成坑道在側壁產生局部的楔形破壞及頂拱處產生之落盤。此外，於金門島常見有基性岩脈入侵，其經風化作用後呈現黏土化，對於地下水入滲及坑道斷面結構的影響需進一步評估。
- b. 本島假想案例：東部之台鐵南迴線安朔隧道，其地質條件以硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之，岩體分類屬第III至V類。

##### (2) 外力因素—開挖擾動之影響

- a. 外島假想案例：翟山坑道因國防戰備需求，於一年內即完成施工並啟用，其施工方法主要採鑽炸法，經現地勘查仍可發現施工當時遺留的炸孔與爆破裂紋，對於圍岩岩體的損傷，例如鬆動岩塊的形成與裂隙長度的擴展伸長、分佈密度的增加等，需透過定期的維護(1.目視檢查與2.鬆動岩塊敲除)以降低局部岩塊破壞造成工作人員之危害。
- b. 本島假想案例：台鐵南迴線安朔隧道於施工階段發生之擠壓、落盤、湧水及少部份底部隆起等，係與鬆動岩盤、破碎及風化岩層、斷層帶、偏壓及淺覆蓋等因素有關，為確保隧道斷面穩定性，支撐工法採取鋼支保工法與新奧工法，並以混凝土襯砌作為其二次襯砌；惟後續營運階段檢測發現，於襯砌發生之隧道異狀，部分成因實與上述肇因有關，例如於頂拱處襯砌產生的裂縫與其上方的鬆動岩盤有關。

---

(3) 環境因素—大地材料依時變形性與弱軟化特性之影響

大地材料依時變形性與弱軟化特性，與岩石材料種類、礦物組成與含量、節理與裂隙等弱面條件及地下水有關：

- a. 外島假想案例：翟山坑道位於花崗片麻岩與花崗岩區，坑道自啟用迄今已逾50年，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。
- b. 本島假想案例：台鐵南迴線安朔隧道所處地質條件屬第III至V類之岩體分類，自啟用迄今已26年，惟根據其在施工階段的災變類型與後續檢測之結果，研判其大地材料依時變形性與弱軟化特性較為顯著。

(4) 非力學因素—混凝土材料劣化

主要是針對本島假想案例且具襯砌之坑道結構者，需考量混凝土澆置品質及所處環境對混凝土材料劣化之可能影響，主要是在使混凝土強度的降低，與裂隙的增加導致地下水入滲等影響穩定性問題。



表4.4-1 翟山坑道與安朔隧道假想案例資料彙整

	翟山坑道	台鐵南迴線安朔隧道
地點	金門縣古崗村	台東縣達仁鄉
完工日/目前運轉	民國 53 年/ 53 年	民國 80 年/26 年
地質條件	<ol style="list-style-type: none"> <li>岩性：花崗片麻岩與花崗岩</li> <li>構造：岩體有偉晶岩脈與基性岩脈入侵有兩組剪力節理、一組解壓節理</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>岩性：硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之</li> <li>構造：CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類，36K+719 - 36K+672.4 處為斷層破碎帶，主要不連續面為劈理與節理</li> </ol>
坑道屬性	軍事隧道(現為觀光用)	交通隧道
斷面尺寸	<ol style="list-style-type: none"> <li>陸上坑道段：寬約 6 m，高約 3.5 m</li> <li>水道段：寬約 11.5 m，高約 8 m</li> </ol>	寬 7.8 m，高 7.3 m
長度	<ol style="list-style-type: none"> <li>陸上坑道段：101 m</li> <li>水道段：357 m</li> </ol>	5,481 m
襯砌	無	有
開挖方式	鑽炸法	明挖覆蓋工法、美國鋼支保支撐工法(傳統工法)及新奧工法
坑道結構異狀(運轉階段)	<ol style="list-style-type: none"> <li>陸地洞口段：岩體風化、地表水入滲、落石。</li> <li>陸上坑道段：坑道側壁與頂拱有局部鬆動岩塊引致落石。</li> <li>水道段：坑道側壁與頂拱有局部鬆動岩塊引致落石；基性岩脈因地下水入滲引致風化速度加劇，造成坑道滲水。</li> <li>近海洞口段：鏽染風化嚴重、地表水入滲。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>襯砌裂縫、滲水、剝落。(裂縫深度約為襯砌設計厚度之 34~43%)</li> <li>部分區段襯砌背後疏鬆、襯砌厚度不一</li> <li>襯砌混凝土中性化(深度約 3cm) [註：襯砌設計厚度 65cm]</li> </ol>

## 第五章、我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審

### 驗技術

本研究主要針對低放射性廢棄物坑道處置結構之穩定性，蒐整國際低放射性廢棄物處置先進國家相關經驗，同時針對國內既有的坑道結構穩定分析方法與驗證技術進行盤點，並以我國低放射性廢棄物可能場址之鄰近既有坑道，包含「無襯砌坑道」及「有襯砌坑道」兩種型式，研析並比較此二類坑道在運轉階段之坑道異狀。

針對「無襯砌坑道」部分，根據坑道現況調查，獲知其坑道異狀主要是(1)滲漏水、(2)岩塊鬆動及(3)節理因基性岩脈入侵，長時間經風化作用後呈現黏土化等現象；而針對「有襯砌坑道」部分，知其坑道異狀主要是發生在襯砌結構的(1)變形、(2)裂縫與(3)滲漏水為主。

循此，有關「無襯砌坑道」的結構穩定性驗證方法，國內一般坑道設計較少考慮採用，故本研究蒐整國外有關處置坑道結構穩定分析經驗及國立台北科技大學與金門大學研究團隊(李亮瑩等人，2012)於金門進行之無支撐地下坑道安全檢測與維護經驗，可作為本研究發展驗證方法審驗技術之參考。而有關「有襯砌坑道」部分，評估坑道在運轉階段之結構穩定性端賴相關之檢監測技術，本研究將根據2014年研究成果：「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫五一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)研究中，摘錄與本研究有關之處置坑道運轉期檢監測要項研析成果，作為發展低放坑道處置結構穩定性驗證方法之基本依據。

#### 5.1 「無襯砌坑道」之結構穩定驗證方法

「無襯砌坑道」的破壞模式主要有二種，分別是(I)重力引致之岩塊滑動破壞，屬地質構造主控之破壞(gravity-induced structurally controlled block movement)與(II)應力引致之剝落破壞(stress-induced spalling)，如圖5.1-1所示。

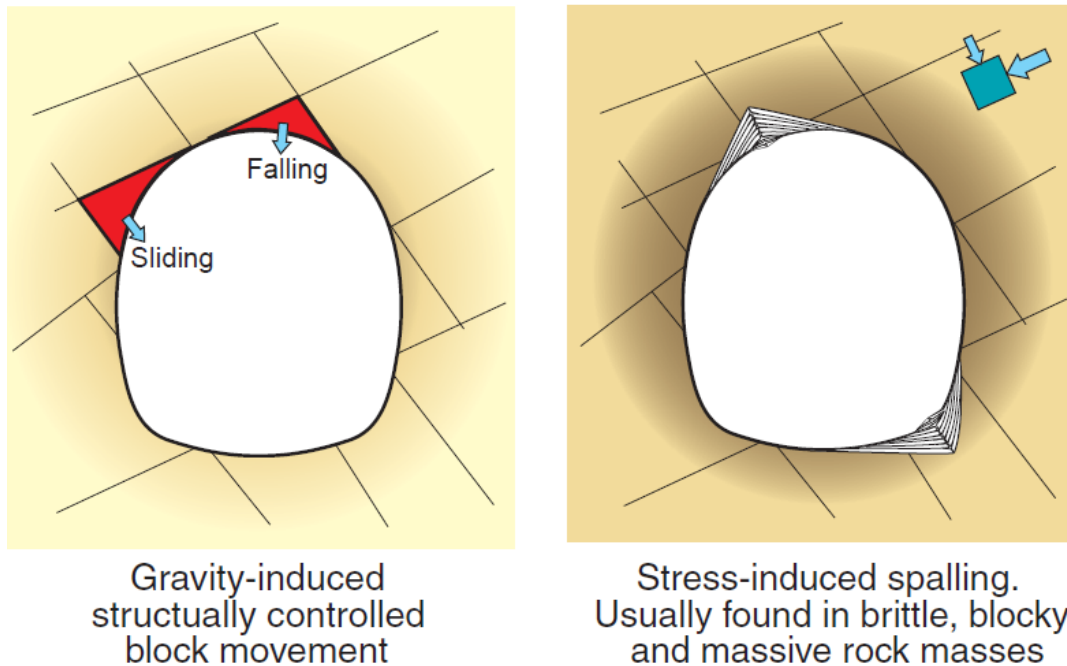


圖5.1-1 無襯砌坑道主要的破壞模式：(a) 重力引致之岩塊滑動破壞與(b)應力引致之剝落(spalling)破壞(SKB, 2011)

(I)地質構造主控之破壞一般多發生在淺層隧道，其現地應力值相對較低；(II)應力引致之剝落破壞，則一般發生在深層隧道，其現地應力值相對較高。不同的岩體破碎程度條件及其所在現地應力條件下，隧道之破壞模式詳如圖5.1-2所示。隨著現地應力的增加，岩體中的裂隙、節理受到較高的圍束應力，此時岩體的行為將趨於脆性(brittle) 圖5.1-2中，按地質強度指數(GSI)區分完整岩體( $GSI > 75$ )、中度裂隙分佈岩體( $50 < GSI < 75$ )與高度裂隙分佈岩體( $GSI < 50$ )。其中，圖5.1-2中 $Di$ 為損傷指數(damage index)，其定義為開挖面最大切線應力 $\sigma_{max}$  (maximum tangential stress)與岩石室內試驗單壓強度 $\sigma_c$ 之比值，亦即  $Di = \sigma_{max} / \sigma_c$ 。若現地應力之最大主應力( $\sigma_1$ )與岩石單壓強度( $\sigma_c$ )之比值  $\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$  或是損傷指數  $Di < 0.4(\pm 0.1)$ ，則屬地質構造主控之破壞。

處置坑道若是位處地質破碎帶或是無施作做襯砌結構之條件，可採(1)伸張計或(2)位移計進行岩盤穩定性之監測；若是監測單一潛在滑動岩塊，則可採用裂縫計進行監測(楊長義與李宏輝，2014)。另外，根據李亮瑩等人(2012)進行之金門花崗岩體無襯砌地下坑道之安全檢測與維護經驗主要是針對覆蓋較淺且深度少於10 m之坑道，依其調查結果指出坑道在使用多年後坑壁有滲水現象，部分節理面呈開張、剪動狀，節理面內壁風化

，尤其以夾泥節理面最為明顯，並有局部範圍坑道地面發現小規模墜落岩塊(李亮瑩等人，2012)。

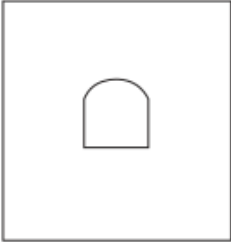
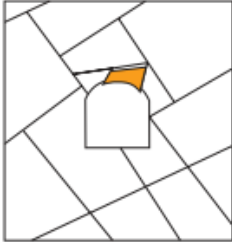
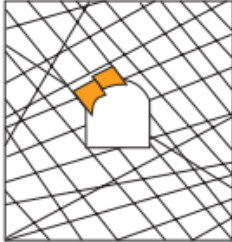

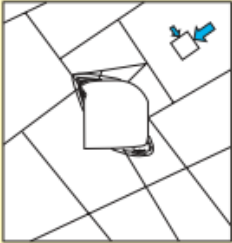
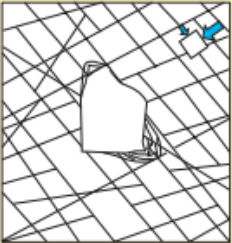
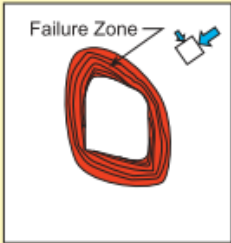

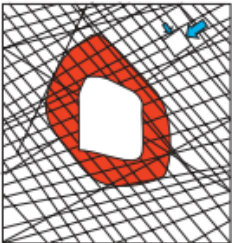
	Massive ( $GSI > 75$ )	Moderately Fractured ( $50 > GSI < 75$ )	Highly Fractured ( $GSI < 50$ )	
Low In-Situ Stress ( $\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$ )	 Linear elastic response.	 Falling or sliding of blocks and wedges.	 Unravelling of blocks from the excavation surface.	$D_f < 0.4 (\pm 0.1)$
Intermediate In-Situ Stress ( $0.15 < \sigma_1 / \sigma_c < 0.4$ )	 Brittle failure adjacent to excavation boundary.	 Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.	 Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.	$0.4 (\pm 0.1) > D_f < 1.1 (\pm 0.1)$
High In-Situ Stress ( $\sigma_1 / \sigma_c > 0.4$ )	 Brittle failure around the excavation.	 Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.	 Squeezing and swelling rocks. Elastic/plastic continuum.	$D_f > 1.1 (\pm 0.1)$

圖5.1-2 無襯砌坑道之穩定性與破壞模式(Hoek et al., 1980)

為掌握坑道節理位態分佈，李亮瑩等人(2012)依圖5.1-3之檢測與評估流程，分別進行路線勘查、坑道側壁出露之節理面位置與位態初步調查、坑道幾何量測、節理面位態調查與節理面描述，最後採用地面光達(LiDAR)進行掃描，獲得之點雲資料如圖5.1-4，並與光學照片影像進行節理位置比對，如圖5.1-5。在岩塊墜落潛能研判部分，則採用了

(1)岩塊理論(石根華, 1985)與(2)UWEDGE 程式進行分析。透過岩塊理論, 可據以分析確認關鍵岩塊(key block)並協助判定坑道內可能移動、或存在墜落潛能之不穩定岩塊分佈的位置; 此外, UWEDGE 軟體係由加拿大RocScience 公司發展的分析軟體, 同樣可用來分析坑道內可能移動岩塊的可能位置、形狀及其大小, 以提供岩塊理論分析所得知之關鍵岩塊相互比對, 作為坑道穩定安全之評估所用。

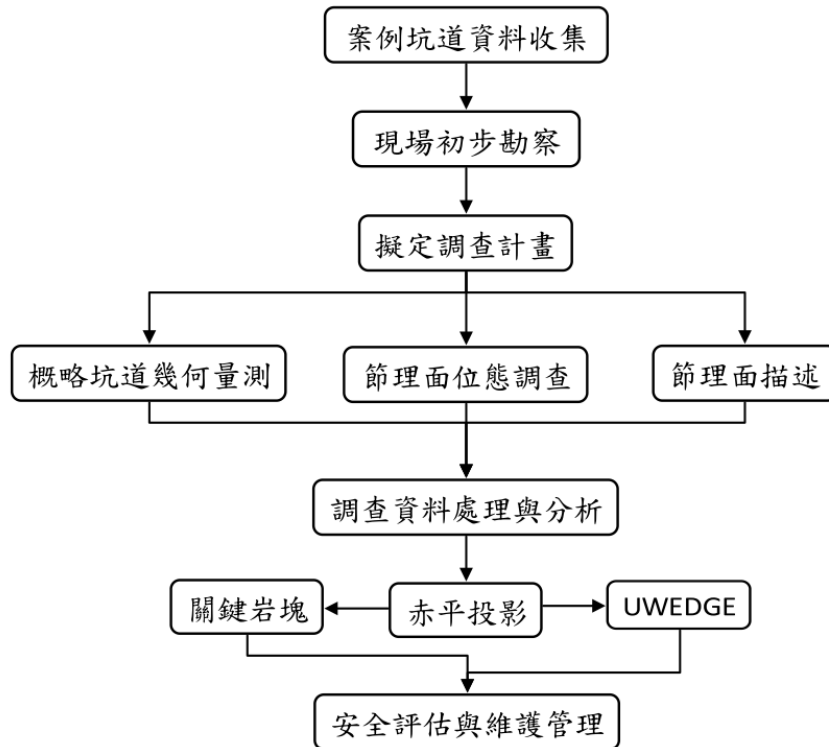


圖5.1-3 金門無支撐地下坑道安全檢測與評估流程圖(李亮瑩等人, 2012)

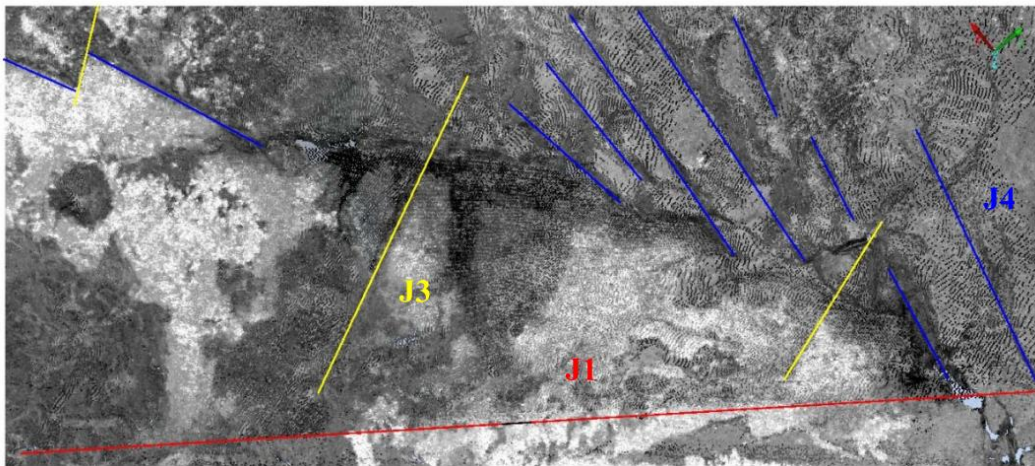


圖5.1-4金門無支撐地下坑道頂拱之地面光達掃描部分結果(李亮瑩等人，2012)

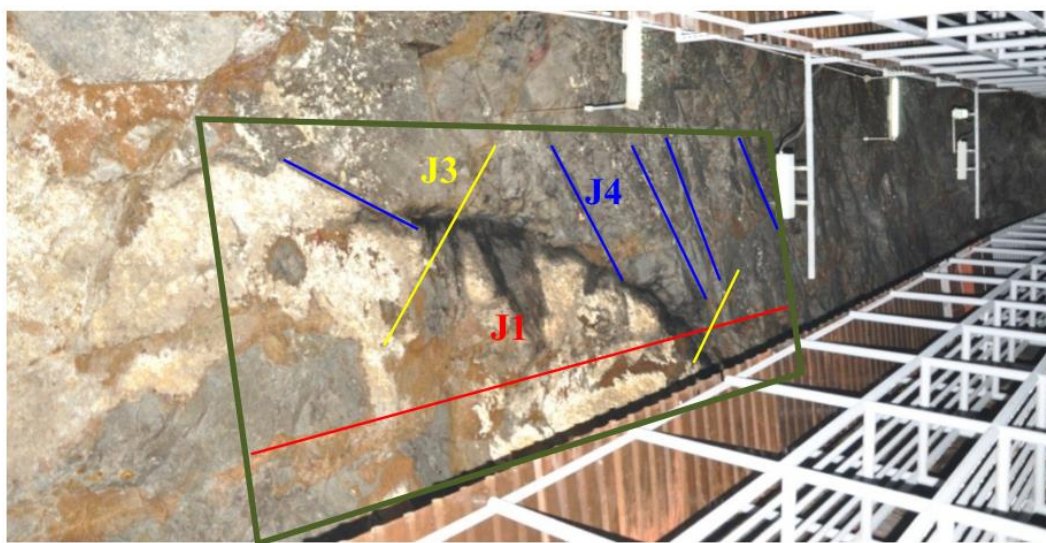


圖5.1-5 金門無支撐地下坑道頂拱之光學影像照片(李亮瑩等人，2012)

此外，根據SKB技術報告TR-01-38(SK B, 2001)，進行處置場初期設計時，須詳加考量與下列與岩石力學有關之項目，以確保處置坑道結構在運轉階段的穩定性：

- (i) 處置設施的深度；
- (ii) 處置場的配置，包括聯絡坑道路線與基礎設施；
- (iii) 坑道形狀與尺寸；
- (iv) 聯絡坑道與處置坑道的建造方法，例如鑽炸工法或機械式開挖；
- (v) 現地應力空間分佈；
- (vi) 聯絡坑道及處置坑道空間配置之關係；
- (vii) 處置坑道間距形成的岩柱寬度等。

## 5.2 「襯砌坑道」之結構穩定驗證方法

根據本案(2014)前期研究成果：「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫五—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)研究已蒐整了國外中、低放處置坑道及國內營運中一般坑道之經驗，本案進一步將之整理成(見表5.2-1)在設計階段、建造階段、運轉階段，處置坑道結構穩定性之相關檢監測項目：

### (1) 坑道斷面之穩定性監測

坑道斷面監測，包括坑道斷面之收斂(內空變位)與襯砌變形。若處置坑道位處地質破碎帶且具襯砌結構之情況，建議採(1)伸張計、(2)鋼捲尺收斂計、或(3)3D光學量測系統，進行坑道斷面之收斂性(內空變位)量測。基於處置坑道結構穩定性之考量，掌握處置坑道在運轉階段的變形量為重要課題。但若未來處置坑道經一次支撐、二次支撐加固後，傳統的測量技術可能無法提供微小變位之監測，建議可採用本團隊新開發的襯砌微變監測技術與跨尺度多時序監測整合技術(見3.3.2節與圖3.3-4、圖3.3-5)，以有效量測襯砌之微小變形，俾利評估掌握坑道結構穩定行為。

### (2) 襯砌裂縫及裂縫擴展

處置坑道結構穩定特性影響因素，包括(1)地震作用、(2)邊坡運動與(3)開挖擾動影響岩體性質等，可藉由運轉期襯砌異狀觀察上述因素對坑道結構的影響，並可透過隧道影像掃描技術與裂縫位移計記錄裂縫分佈及裂縫擴展的情況。

### (3) 襯砌受力與變形

由襯砌之應力與應變量測結果，可做為判斷襯砌結構受力後的行為是否符合原設計之依據，並供評估坑道結構與圍岩間的力學機制。目前，可採用的技術是可在襯砌埋設光纖感測器，以量測支撐環片內部應變，進而計算評估環片的受力與變形。

### (4) 水文地質相關參數監測

掌握岩體之導水特性與地下水滲流狀況，不僅是處置坑道在預防放射性核種傳播之重要課題，亦是評估地下水是否造成坑道結構安全的重要參數。一般可透過水文地質鑽孔監測地下水位變化，或經由雙封塞導水試驗以量測現地岩體導水特性。另外可分別於坑道內觀測點，設置流量計與水壓計，以記錄地下水之滲流量與滲流壓力。

表5.2-1 (a) 處置坑道檢監測項目與技術列表-岩石力學有關項目(楊長義與李宏輝，2014)

	設計階段		建造階段		運轉階段	
	檢監測項目	技術或儀器	檢監測項目	技術或儀器	檢監測項目	技術或儀器
岩 石 力 學	無	無	開挖面觀察	目視	岩盤穩定性	位移量測/伸張計 應力量測/計測岩栓
			淨空變位與頂拱下陷	位移量測/收斂觀測儀及收斂岩釘、光學式收斂監測、電子式收斂監測	單一潛在滑動岩塊	位移量測/裂縫計
			仰拱隆起	加列收斂岩釘、伸縮儀、沉陷觀測釘等	坑道斷面收斂	位移量測/伸張計、捲尺收斂計
			中心線量測 地中變位量測	收斂計	內空變位	3D光學量測系統
					襯砌裂縫分佈與擴展	隧道影像掃描、裂縫位移計
			地表及地中沉陷	位移量測/地表沉陷點觀測、地中變位計、插入式傾斜計、插入式地中變位計	襯砌變形	襯砌微變監測技術
			岩栓軸力	應力量測/計測岩栓		跨尺度多時序監測整合技術
			一次襯砌應力量測	應力量測/電子式襯砌應力量測		襯砌黏貼應變計
			一次襯砌應變量測	應變量測/噴凝土應變計量測	坑道環片受力與變形	於環片組立時埋設光纖感測器
			二次襯砌應力量測	應力量測/電子式襯砌應力量測	坑道襯砌的位移及受力後的反應、頂拱的沉陷量	斷面收斂量測系統(襯砌表面感測器、溫度感測器、傾斜感測器及裂縫量測)



表5.2-1 (b) 處置坑道檢監測項目與技術列表-水文地質及坑道襯砌有關項目(楊長義與李宏輝，2014)

	設計階段		建造階段		運轉階段	
	檢監測項目	技術或儀器	檢監測項目	技術或儀器	檢監測項目	技術或儀器
水文地質	地下水位	水文地質鑽孔	地下水位	水文地質鑽孔	地下水位	水文地質鑽孔
	岩體導水特性	雙封填塞導水試驗	岩體導水特性	雙封填塞導水試驗	岩體導水特性	雙封填塞導水試驗
	地下水滲流量	觀測站設置流量計	地下水滲流量	觀測站設置流量計	地下水滲流量	觀測站設置流量計
	地下水滲流壓力	水壓計	地下水滲流壓力	水壓計	地下水滲流壓力	水壓計
坑道襯砌	無	無	無	無	混凝土中性化	混凝土中性化檢測
					鋼筋保護層厚度不足	透地雷達探測
					襯砌背後孔洞	透地雷達、熱紅外線掃描
					襯砌裂縫寬度與深度	超音波試驗
					混凝土劣化	史密特錘試驗、鑽孔取樣進行單壓試驗

### 5.3 處置坑道結構穩定性驗證方法之審驗技術

處置坑道之所需支撐型式與所處母岩地質條件及岩石力學特性有關。針對強度較高、變形較小之花崗岩體，其地下坑道多屬無支撐設計之「無襯砌坑道」，如前述瑞典SFR中、低放處置場，及外島金門翟山坑道等。但若是岩體強度較低、彈性係數較低者，仍可透過適當的岩體支撐系統，包括岩栓、掛網噴凝土、混凝土襯砌等等，即形成「有襯砌坑道」之結構型式，如前述本島台鐵安朔隧道。

本研究綜整前述各章成果，針對處置坑道結構穩定性，提出一整合性的分析流程，詳如表5.3-1：包含「資料蒐集與分析」、「坑道結構穩定分析」與「檢測與監測」：

#### (1) 資料蒐集與分析

工作項目包括(I)地質暨地下水文資料蒐集、(II)岩石物理特性、岩石與弱面力學特性蒐集及(III)弱面空間分佈與統計分析。

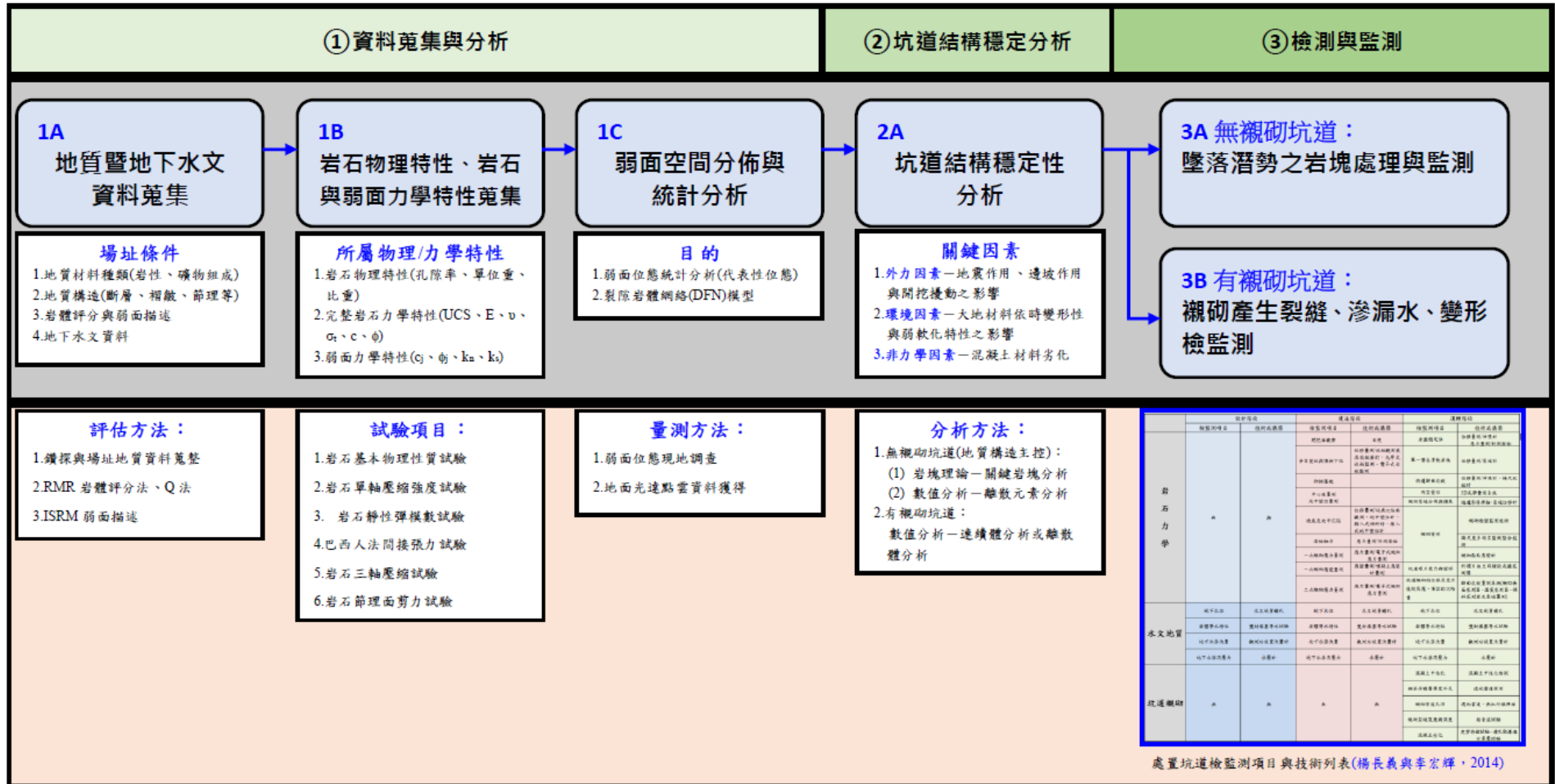
#### (2) 坑道結構穩定分析

襯砌裂縫與滲水為影響坑道結構穩定之關鍵因子，其肇因區分外力因素、環境因素及非力學因素。針對外力因素與環境因素可能導致處置坑道結構穩定性之影響評估，可採用數值分析方法進行驗證；若是屬於地質構造主控，且為無支撐之地下坑道者，亦可採岩塊理論進行高潛勢墜落岩塊分析。

#### (3) 檢測與監測

運轉階段，處置坑道結構之穩定性，可依表5.3-1所列之檢監測項目與技術列表，可進一步針對「岩石力學」、「水文地質」與「坑道襯砌」三者對應之檢監測項目與技術，進行坑道結構之檢測與監測，以驗證處置坑道結構之穩定性。

表5.3-1 本文建議坑道處置結構穩定性分析流程



## 第六章、我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點

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，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，以提出低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議。

### 6.1 低放處置坑道結構穩定性模式審驗重點

已知(1)襯砌裂縫與(2)滲水兩者為影響坑道結構穩定的關鍵因子，其肇因區分為外力因素、環境因素與非力學因素，據此，(A)本研究提出坑道處置結構穩定評估與審查要項，詳如表6.1-1所示；此外，(B)本研究蒐整國內一般隧道相關之施工規範，詳如附錄，並將(C)本研究所提低放處置坑道結構穩定性影響項目有關之規範，同時列於表6.1-1，以供未來相關審驗工作之參考。

惟涉及地震力對隧道的影響部分，國內僅「台北捷運系統工程土木工程設計手冊」與「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」述及土層隧道耐震設計，國外規範部分則是包括日本與中國大陸等，此部分精進仍有賴相關之國際資訊蒐整補充之。

表6.1-1 坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點

處置坑道結構穩定性影響項目與肇因		處置坑道結構穩定性審驗重點 (本計畫建議)	備註 (相關規範)
外力因素	地震作用	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法是否適切？是否足以反映坑道結構受震行為？ (3) 是否依據「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)第三章之場址特性描述，提出合理的設計基準地震？	台北捷運系統工程土木工程設計手冊(針對土層隧道)

處置坑道結構穩定性 影響項目與肇因		處置坑道結構穩定性審驗重點 (本計畫建議)	備註 (相關規範)
	邊坡運動	(1) 選定之 <b>大地材料參數與坑道尺寸</b> 是否正確？ (2) 採用之 <b>分析方法</b> 是否適切？是否足以反映坑道 <b>洞口</b> 段可能受到邊坡運動之影響？	公共工程施工網 要規範
	開挖擾動	(1) 選定之 <b>大地材料參數與坑道尺寸</b> 是否正確？ (2) 採用之 <b>開挖工法對圍岩擾動的影響評估</b> 是否合理？ (3) 採用之 <b>分析方法</b> 是否適切？是否足以反映坑道 <b>圍岩</b> 因開挖擾動引致之範圍與鬆動土壓之影響？	公共工程施工網 要規範 隧道施工技術規 範 施工說明書技術 規定 山岳隧道之施工
環境 因素	風化作用引致岩 石強度弱軟化	(1) 選定之 <b>大地材料參數與坑道尺寸</b> 是否正確？ (2) 採用之 <b>分析方法與材料組成模式</b> 是否適切？是否足以反映坑道 <b>圍岩強度弱軟化</b> 之影響？	無
	依時變形特性	(1) 選定之 <b>大地材料參數與坑道尺寸</b> 是否正確？ (2) 採用之 <b>分析方法與材料組成模式</b> 是否適切？是否足以反映坑道 <b>圍岩依時變形特性</b> 之影響？	無
非力學 因素	混凝土中性化	(1) 選定之 <b>檢測方法</b> 是否適切？	舊交通隧道之安 全檢測、維修與 補強技術研訂 (I)(II) 隧道非破壞性檢 測技術之開發總 結報告書
	鋼筋保護層厚度 不足	(2) 施測或取樣 <b>位置</b> 是否合宜？	
	鹼值粒料反應	(3) <b>樣本數</b> 是否具代表性？	
	混凝土澆置中斷( 冷縫)		
	襯砌背後空洞或 厚度不足		

## 6.2 低放處置審查導則(第 0 版)相關條文修訂建議

我國「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)共分13章，依目前所列之章節，並未直接述及有關坑道處置結構穩定性之條文。但是，基於坑道處置方式可能為我國未來低放射性廢棄物處置採用方式之一，同時考量我國地質條件不若國

外處置場之場址所具備極良好天然障壁優勢，為確保坑道處置結構穩定性，實有必要針對現有的低放處置審查導則提出相關之修訂建議。

經檢視目前的「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)，同時比對表5.3-1之坑道處置結構穩定性分析流程，本研究所提之「①資料蒐集與分析」、「②坑道結構穩定分析」與「③檢測與監測」與審查導則所對應章節關係，詳如表6.2-1所示。

為求審查導則修訂建議之內容能更趨完善，本子計畫研究將前期105年度研究所提出之建議內容一併整理於表6.2-2，並就本計畫研析內容，將相關之增訂與修訂建議內容同列於表6.2-2。

表6.2-1 坑道處置結構穩定性分析流程與低放處置審查導則章節之關連性

審查導則相關章節 分析流程項次	第三章 「場址特性 描述」	第四章 「處置設施 之設計」	第五章 「處置設施 之建造」	第六章 「處置設施 之運轉」	第七章 「處置設施 之安全評估」
① 資料蒐集與分析	◎				
② 坑道結構穩定分析		◎	◎	◎	◎
③ 檢測與監測		◎	◎	◎	◎

表6.2-2 審查導則編修要點建議

章 節	審查導則編修要點建議	
	105*	106
第三章 場址 特性 描述	<p><b>提供要項部分：</b>                      提供工程地質及岩石力學等大地工程特性參數之調查與試驗結果，包括地質與地層、斷層、裂隙分布、地下水分布、岩石力學特性與岩體評分初步建議，及坑道開挖可能引致之圍岩擾動範圍，與大地工程材料依時性與抗侵蝕特性等應一併提出。</p> <p><b>審查作業部分：</b>                      調查架構是否符合描述場址地工特性、水文地質與現地應力特性之需求？調查與評估方法是否適當與具代表性？調查成果是否足以描述場址大地工程特性？是否充分考慮圍岩受開挖擾動後，造成圍岩工程材料特性的可能變異？是否經過適當的取樣，並提供室內或現地試驗相關佐證資料？採用的取樣與試驗方法是否符合大地工程專業規範？岩體評分建議是否適切？</p>	<p><b>提供要項部分：</b>                      提供工程地質，及土壤與岩石等大地工程特性參數之調查與試驗結果，包括地質與地層、斷層、裂隙分布、地下水分布、岩石力學特性、<b>弱面描述</b>與岩體評分初步建議，及<b>坑道開挖可能引致之圍岩擾動範圍</b>，與大地工程材料依時<b>變形性與弱軟化抗侵蝕</b>特性之<b>評估方法</b>等應一併提出。</p> <p><b>審查作業部分：</b>  <del>調查架構是否符合描述場址地工特性、水文地質與現地應力特性之需求？</del>調查與評估方法是否適當與具代表性？<b>弱面位態調查與統計分析方法是否合理？</b>調查成果是否足以描述場址大地工程特性？<del>是否充分考慮圍岩受開挖擾動後</del><b>造成圍岩工程材料特性的可能變異？</b>是否經過適當的取樣，並提供室內或現地試驗相關佐證資料？採用的取樣與試驗方法是否符合大地工程專業規範？<b>弱面描述</b>與岩體評分建議是否適切？<b>所提大地工程材料依時變形性與弱軟化特性之評估方法是否可行？</b></p>
第四章 處置 設施 之 設計	<p><b>提供要項部分：</b>                      根據「場址特性描述」所提供的大地工程特性參數，提出影響坑道結構長期穩定之可能因子，及具以提出因應的坑道設計與維護策略。</p> <p><b>審查作業部分：</b>                      所提處置坑道之設計是否考量建造過程可能遭遇之問題與因應策略？處置坑道在使用年限內，可能遭遇之滲水、變形、支撐構件強度降低等影響，其在處置坑道設計如何因應與強化。</p>	<p><b>提供要項部分：</b>                      根據「場址特性描述」所提供的大地工程特性參數與<b>弱面空間分佈</b>，提出坑道結構穩定性分析方法，並分別針對影響坑道結構穩定之「外力因素」與「環境因素」進行分析，<del>據以影響坑道結構長期穩定之可能因子，及具以</del>提出因應的坑道設計與維護策略。</p> <p><b>審查作業部分：</b>                      所提坑道結構穩定性分析方法是否適切？是否足以反映大地工程特性，及「外力因素」與「環境因素」對坑道結構穩定性之影響？所提處置坑道之設計是否考量建造過程可能遭遇之問題與因應策略？<del>處置坑道在使用年限內，可能遭遇之滲水、變形、支撐構件強度降低等影響，其在處置坑道設計如何因應與強化</del></p>
第五章 處	<p><b>提供要項部分：</b>                      根據「場址特性描述」所提供的場址地質構造、水文地質概況與大地工程特性參數，針對坑道開挖工法與支撐方式，及建造期間可能遭遇的工程地質問題，研擬因應策略。</p>	<p><b>提供要項部分：</b>                      根據「場址特性描述」之<b>地質、地下水</b><del>所提供的場址地質構造</del><b>水文地質概況</b>與大地工程特性參數，<b>針對提出</b>坑道開挖工法與支撐方式，及<b>針對</b>建造期間可能遭遇的工程地質問題，研擬因應策略。</p>

章 節	審查導則編修要點建議	
	105*	106
置 設 施 之 建 造	<p><b>審查作業部分：</b> 所提開挖工法與支撐方式是否確實考量場地地質構造、水文地質概況與大地工程特性參數？針對圍岩擾動與超挖量的控制是否合宜？可能遭遇的工程地質問題與因應策略是否合理可行？</p>	<p><b>審查作業部分：</b> 是否確實根據「場址特性描述」之地質、地下水與大地工程特性參數提出適切的<del>所提</del>開挖工法與支撐方式是否確實<del>考量場地地質構造、水文地質概況與大地工程特性參數？</del>開挖工法造成<del>針對</del>圍岩的擾動評估與超挖量的控制是否合宜？可能遭遇的工程地質問題與因應策略是否合理<del>可行</del>？</p>
第 六 章  處 置 設 施 之 運 轉	<p><b>提供要項部分：</b> 說明處置設施在運轉階段，針對岩體穩定性、坑道支撐結構與地下水入滲狀況所實施的檢測項目、檢測方法與頻率、檢測執行單位與組成人員。</p> <p><b>審查作業部分：</b> 檢測項目是否足以反映岩體穩定性、坑道支撐結構與地下水入滲之實際狀況？檢測方法是否具體可行？檢測頻率是否合適？檢測執行單位與組成人員是否具備執行檢測工作與數據判讀之能力。</p>	<p><b>提供要項部分：</b> 說明處置設施在運轉階段，針對岩體穩定性、坑道<del>支撐</del>結構與地下水入滲狀況所實施的檢<del>監</del>測項目、檢<del>監</del>測方法與<del>技術</del>頻率、檢<del>監</del>測執行週期、檢測執行單位與組成人員。</p> <p><b>審查作業部分：</b> 檢<del>監</del>測項目是否足以反映岩體穩定性、坑道<del>支撐</del>結構與地下水入滲之實際狀況？<del>提出之</del>檢<del>監</del>測方法與<del>技術</del>是否具體可行？<del>檢測頻率</del>檢<del>監</del>測執行週期是否合適？檢測執行單位與組<del>人</del>成人員是否具備執行檢測工作與數據判讀之能力。</p>
第 七 章  處 置 設 施 之 安 全 評 估	<p><b>提供要項部分：</b> 應充分說明處置坑道的設計考量、與岩石力學及水文地質有關的設計參數、參數基準量測值、運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料、檢監測方法與技術、執行檢監測週期，並提供檢監測參數合理範圍，以供相關安全評估與維修補強判定之參考。</p> <p><b>審查作業部分：</b> 應檢核處置坑道在運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料是否完整？採用的檢監測方法與技術是否可行？執行檢監測之週期是否合理？提供的監測參數合理範圍如何獲得與驗證？</p>	<p><b>提供要項部分：</b> 應充分說明處置坑道的設計考量、<del>與岩石力學及水文地質有關的設計參數</del>大地工程特性參數與弱面空間分佈<del>參數</del>基準量測值、運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料、檢監測方法與技術、<del>執行</del>檢監測<del>執行</del>週期，並提供檢監測參數合理範圍，以供相關安全評估與維修補強判定之參考。</p> <p><b>審查作業部分：</b> 應檢核處置坑道在運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料是否完整？採用的檢監測方法與技術是否可行？<del>執行</del>檢監測<del>執行</del>週期是否合理？提供的監測參數合理範圍如何獲得與驗證？</p>

註\*：「低放射性廢棄物坑道處置工程地質與長期穩定審驗技術建立之資訊研析」(楊長義與李宏輝，2016)所提審查導則編修要點建議。



## 第七章、結論與建議

本計畫透過蒐集並研析(1)國外低放廢棄物坑道處置結構穩定性之驗證經驗，與(2)國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法，接續完成；(3)我國外島與本島坑道處置結構穩定性審查假想案例之建立、提出(4)我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術與(5)我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點。

本計畫依約所完成之各項工作成果，綜整於7.1節，未來可研究與精進之課題則建議於7.2節。

### 7.1 結論

#### (1) 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法

蒐整了國外瑞典SFR低放射性廢棄物處置場址相關背景資料，與坑道處置結構穩定性驗證過程所選定地質與大地工程特性參數；此外，依循SFR利用離散體分析軟體3DEC所建構「岩體數值模型」與「岩體長期劣化分析」之方式，均可供我國未來針對岩體材料劣化對處置坑道結構穩定性之影響分析參考。

#### (2) 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法

綜整一系列前期研析有關國內一般坑道其在設計、建造與運轉階段之技術報告成果，可獲知(I)襯砌裂縫與(II)滲水二者為影響我國本土坑道長期穩定的關鍵因子；本研究並針對處置坑道在運轉階段，因外力因素、環境因素或非力學因素之作用，所導致坑道結構穩定性之可能影響，提出相對應的驗證與評估方法，包括既有的隧道結構穩定數值模擬分析方法與檢、監測技術等。

#### (3) 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例

考量我國低放射性廢棄物可能場址特性，本研究蒐整兩個本土坑道假想案例，分別為外島與本島案例各一處。在外島坑道假想案例部分，主要是考量無襯砌結構之坑道亦屬可能採取的處置坑道型式，故以金門既有之無襯砌結構坑道為假想案例；本島假想案例部分，則是以台鐵南迴線安朔隧道為例。並將兩案例坑道之建造資訊、地質條件與運轉階段之坑道結構異狀等資訊彙整於表4.4-1；另分別針對坑道長期穩定之影響因素，包括外力因素、環境因素與非力學因素進行分析與討論。

#### (4) 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術

針對「無襯砌坑道」及「有襯砌坑道」兩種型式，研析比較此二類坑道在運轉階段之坑道異狀，及相對應的結構穩定性驗證方法；並綜整前述各項成果，針對處置坑道結構穩定性，提出一整合性的評估與驗證分析流程：包含「資料蒐集與分析」、「坑道結構穩定分析」與「檢測與監測」，詳如表5.3-1。

#### (5) 我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點

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；此外，為求審查導則修訂建議之內容能更趨完善，本子計畫研究將前期105年度研究所提出之建議內容，與本子計畫研析之增訂與修訂建議內容同列於表6.2-2。

## 7.2 建議

本研究已針對低放射性廢棄物處置坑道，依「無襯砌坑道」及「有襯砌坑道」兩種型式提出其在運轉階段之可能異狀，與坑道結構穩定性分析流程、驗證項目、評估與驗證方法，為能更進一步具體落實審驗技術本土化，應將國內現行一般隧道之設計方法或規範，與低放處置坑道結構穩定性驗證項目進行關聯性比較與適用性討論並精進之。

---

## 參考文獻

- [1] Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén K-A, Ericsson L O, 2000. What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. SKB TR-00-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [2] Barton N, Choubey V, 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* 10, 1–54.
- [3] Barton N, 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39, 185–216.
- [4] Bodén A, Lundin J, 2007. SFR kontrollprogram, Bergkontroll-Bergkontrollgruppens årsrapport 2006, Huvudrapport. Doknr 2448900-001, Vattenfall Power Consultant AB, 2007-03-05.
- [5] Cundall, P. A. 1971. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock system. In: Proc. Int. Symp. Rock Fracture, Nancy, II-8.
- [6] Glamheden R, Mærsk Hansen L, Fredriksson A, Bergqvist L, Markström I, Elfström M, 2007a. Mechanical modelling of the Singö deformation zone. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.1. SKB R-07-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [7] Glamheden R, Fredriksson A, Röshoff K, Karlsson J, Hakami H, Christiansson R, 2007b. Rock mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [8] Haapanen, R., Aro, L., Koivunen, S., Lahdenperä, A-M., Kirkkala, T., Hakala, A., Helin, J., and Ikonen, A.T.K. 2011. Selection of real-life analogues for future lakes and mires at a repository site. Full paper, International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity: Environment & Nuclear Renaissance, 19-24 June 2011, Hamilton, Ontario. *Radioprotection* 46(6): S647–S651.
- [9] HAGROS, A., JOHANSSON, E. & ÖHBERG, A. “Research and monitoring programme of the bedrock in the VLJ repository at Olkiluoto for 2006-2017”, Teollisuuden Voima Oy, Work Report VLJ-10/05, 2005.

- 
- [10] Hjerpe, T., Ikonen, A.T.K., and Broed, R. 2010. Biosphere Assessment Report 2009. Posiva Report 2010-03.
- [11] Hoek, E. and E. T. Brown, 1980. Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [12] Hoel, E. and Wood, D.F., Support in underground hard rock mines, Underground Support Systems, 35, 1987.
- [13] Hökmark H, 1993. Numerical analysis of time-dependent deformations in the rock surrounding the SFR repository. Clay Technology AB, Lund, Internal report.
- [14] Holmén J G, Stigsson M, 2001. Modelling of Future Hydrogeological Conditions at SFR.
- [15] Forsmark. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [16] IAEA. 2001. Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. IAEA -TECDOC-1208.
- [17] IAEA, 2014, Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, Specific Safety Guide No. SSG-31, Vienna.
- [18] Kasa, S. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2009 – Foreign materials. Posiva Working Report 2010-46.
- [19] Lahti, M. (ed.) and Siren, T. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2010 – Rock Mechanics. Posiva Working Report 2011-47.
- [20] Miller, B., Arthur, J., Bruno, J., Hooker, P., Richardson, P., Robinson, C., Arcos, D., and West, J. 2002. Establishing baseline conditions and monitoring during construction of the Olkiluoto URFC access ramp. Posiva Report 2002-07.
- [21] MoDeRn. 2013. MoDeRn Monitoring Reference Framework report. MODERN DELIVERABLE (D-1.2).
- [22] MoDeRn. 2013. State of Art Report on Monitoring Technology DELIVERABLE. MODERN DELIVERABLE (D-N:2.2.2).
- [23] NRC. 1991, Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev. 2, 1991)
- [24] NRC. 1994, Standard Review Plan for the review of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1200, Rev. 3, 1994)
-

- 
- [25] Öhberg A., Johansson E., Anttila P. and Saari J., 2011, Two decades of rock monitoring experiences at the two underground repositories for operating waste in Finland, 2011 World Tunnel Congress and 37th General Assembly, Helsinki, Finland.
- [26] Penttinen, T., Partamies, S., Lahdenperä, A.-M., Pitkänen, P., Ahokas, T., and Kasa, S. 2011. Results of monitoring at Olkiluoto in 2009 – Hydrogeochemistry. Posiva Working Report 2010-44.
- [27] Posiva. 2002. The observational method applied to engineering and construction of the access to the ONKAIO facility. Posiva Report 2002-48.
- [28] Posiva. 2003. Programme of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of the ONKALO. Posiva Report 2003-05.
- [29] Posiva. 2012. Monitoring at Olkiluoto – a Programme for the Period Before Repository Operation. Posiva Report 2012-01.
- [30] Posiva. 2013. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2012, Rock Mechanics. Posiva Report 2013-47.
- [31] RWMC. 2005. Monitoring of Geological Disposal – Current Status and Technical Possibilities. RWMC Technical Report RWMC-TRE-04004.
- [32] Read, R.S. (2004): 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, 1251-1275.
- [33] Richard E. Goodman, Gen-hua Shi. 1985. Block Theory and Its Application to Rock Engineering, PRENTICE-HALL, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- [34] Shi, G-H, and Goodman, R.E. 1984. Discontinuous Deformation Analysis. Proc. of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 269-277.
- [35] SKB, 2002. Forsmark – site descriptive model version 0. SKB R-02-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [36] SKB. 2003. Design, construction and performance of the clay-based isolation of the SFR silo. SKB R-03-30.
- [37] SKB, 2004. Preliminary site description Forsmark area – version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
-

- 
- [38] SKB. 2007. Construction experiences from underground works at Forsmark. SKB R-07-10.
- [39] SKB. 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase, SKB Report R-08-05.
- [40] SKB. 2011a. International perspective on repositories for low level waste. SKB R-11-16.
- [41] SKB. 2011b. Site investigation SFR Bedrock geology. SKB R-10-49.
- [42] SKB. 2013. Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2012. SKB TR-13-10.
- [43] SKB. 2014a. Safety analysis for SFR Long-term safety. SKB TR-14-01.
- [44] SKB. 2014b. Initial state report for the safety assessment. SKB TR-14-02.
- [45] SKB. 2014c. Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark. SKB R-13-53.
- [46] Schubert W, Goricki A, Button E A, Riedmüller G, Pölser P, Steindorfer A F, Vanek R, 2001. Consistent excavation and support determination for the design and construction of tunnels. Felsbau 19, 85–92.
- [47] 王文禮、王泰典、蘇灼謹、林峻弘、譚家瑞、黃燦輝，2000，台灣中部岩石隧道之震害與修復，地工技術，第81期，第5-18頁。
- [48] 交通部台灣鐵路管理局，2008，南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告。
- [49] 江怡萱，2013，雷射掃描技術於隧道內空變位監測之應用，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- [50] 林蔚、李寄嶼、楊小青、陳正宏，2011，五萬分之一臺灣地質圖及說明書—金門，經濟部中央地質調查所。
- [51] 吳宗江，行政院國科會專題研究成果報告，2012，典藏金門戰地文化-坑道3D數位化與展示，2012。
- [52] 周鼎、吳禮浩、王泰典、李宏輝、李佳翰、詹尚書、許珮筠、曹孟真，2012，坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展，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。
- [53] 周鼎、吳禮浩、王泰典、李宏輝，2013，坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展，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。
-

- 
- [54] 黃燦輝、林銘郎、王泰典，2008，隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發，交通部鐵路改建工程局東部工程處委託研究計畫。
- [55] 董家鈞、楊長義、李宏輝，2014，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放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。
- [56] 董家鈞、楊長義、李宏輝，2015，處置坑道結構長期穩定需求及監測方法之研究，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。
- [57] 董家鈞、楊長義、李宏輝，2016，低放射性廢棄物坑道處置工程地質與長期穩定審驗技術建立之資訊研析，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。
- [58] 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。
- [59] 張吉佐、侯秉承、張博翔，2007，台灣隧道設計與施工，2007海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會。
- [60] 張吉佐、劉弘祥，2001，山岳隧道工程設計與實例手冊。
- [61] 臺灣省政府交通處南迴鐵路工程處，1992，南迴鐵路工程：工程輯要。
- [62] 藍維恭、蘇文崎、林志權、周坤賢、陳正勳，2015，臺9線南迴公路安朔草埔段隧道工程特殊考量及施工挑戰，2015，中華技術。

## 附錄 A 隧道施工規範、技術手冊及相關文獻

整理自王泰典等人(2012)與陳正勳等人(2008)

項次	名稱	出版者/作者	出版年度	規範內容(或適用條件)
1	潛盾隧道施工技术規範之研討	中華民國隧道協會	1999	(1) 工程管理 (2) 工址調查 (3) 施工與設備 (4) 環片與襯砌 (5) 輔助工法 (6) 附屬工程
2	公共工程施工網要規範	行政院公共工程委員會	2001	(1) 隧道施工管理(02401) (2) 隧道施工通則(02402) (3) 岩體分類與開挖支撐類型(02403) (4) 洞口開挖及邊坡保護(02411) (5) 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖(02412) (6) 先進支撐(02421) (7) 鋼支保(02422) (8) 隧道用岩栓(02423) (9) 隧道噴凝土(02424) (10) 隧道襯砌(02425) (11) 隧道鑽孔及灌漿(02432) (12) 隧道計測及儀器(02447) (13) 隧道防水層(02448)
3	隧道施工技术規範	交通部台灣區國道新建工程局	2003	針對鑽炸法及非全斷面機械開挖之隧道施工，參考行政院公共工程委員會頒布之公共工程施工網要規範 02401~3, 02411~2, 02421~5, 02432、02447~8 等 13 章訂定
4	施工說明書技術規定	交通部公路總局	2005	針對鑽炸法及非全斷面機械開挖之隧道施工，並參考行政院公共工程委員會頒布之公共工程施工網要規範訂定： (1) 隧道施工安全 (2) 隧道施工通則 (3) 岩體分類與開挖支撐類型



				(4) 洞口開挖及邊坡保護 (5) 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖 (6) 豎井開挖 (7) 鋼支撐架 (8) 隧道用岩栓 (9) 隧道噴凝土 (10) 隧道襯砌 (11) 隧道鑽孔及灌漿 (12) 隧道計測及儀器 (13) 隧道防水層 (14) 隧道其他工作
5	潛盾隧道設計及施工準則與解說	中華民國隧道協會	2009	(1) 第一~四章：設計作業 (2) 第五章施工設備：包括概論、地面設備、工作井設備、隧道內設備 (3) 第六章施工：包含概論、測量、環片之製作、環片之儲存、搬運及處理、潛盾機之製造、組裝及檢查、潛盾機維護管理、工作井、潛盾發進到達、潛盾施工、二次襯砌與步道、輔助工法、聯絡通道、施工監測、施工管理、品質管理、安全衛生管理、環境保護措施、各種條件下之施工
6	山岳隧道之施工	榮民工程事業管理處(林福星編著)	1981	(1) 施工計畫 (2) 開挖方法 (3) 鑽岩 (4) 開炸 (5) 岩碴處理 (6) 支保 (7) 襯砌 (8) 壓縮空氣量計算 (9) 隧道換氣與照明設備 (10) 斜坑 (11) 豎井 (12) 隧道工程特種施工之實例
7	實用隧道工程	汪燮之	1987	(1) 岩石隧道施工

	學			<ul style="list-style-type: none"> <li>(2) 無爆破岩石隧道施工</li> <li>(3) 土質隧道施工</li> <li>(4) 豎井</li> <li>(5) 沉埋管隧道</li> </ul>
8	隧道工程	榮民工程 事業管理 處	1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 現代隧道施工技術在台灣地區之應用</li> <li>(2) 隧道工法之演進與展望</li> <li>(3) 隧道施工機具及設備</li> <li>(4) 隧道施工之通風</li> <li>(5) 隧道之排水系統</li> <li>(6) 隧道開炸之施工探討</li> <li>(7) 超挖控制之爆破技術</li> <li>(8) 隧道突發事件及對策</li> <li>(9) 隧道施工的湧水對策</li> <li>(10) 施工進度表於隧道工程之製作與應用</li> <li>(11) 隧道施工之品質控制</li> </ul>
9	公路隧道設計、施工—半剛性支撐工法	交通部公路總局第二區養護工程處(張嘉德編著)	1993	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 施工內容：包括開炸、機械挖掘、噴凝土施工、岩栓施工、鋼支保組裝、襯砌施工</li> <li>(2) 施工中之現象與對策</li> <li>(3) 計測</li> </ul>
10	營建自動化推廣手冊叢書	內政部營建署	1997~ 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 隧道監測自動化系統</li> <li>(2) 隧道工程全能作業班</li> <li>(3) 台灣隧道施工技術之發展及其成效</li> <li>(4) 隧道施工地質探查技術</li> <li>(5) 隧道施工湧水處理技術</li> <li>(6) 隧道氣爆處理技術</li> </ul>
11	隧道工程實務	國立台灣科技大學營建工程系(陳志南主編)	1998	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 隧道施工技術</li> <li>(2) 隧道施工管理</li> <li>(3) 隧道工程災變處理實務</li> <li>(4) 隧道工程施工與管理</li> <li>(5) 隧道鑽炸實務</li> </ul>
12	隧道施工技術、品管與案例彙編	中華民國隧道協會(劉弘祥主	2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 山岳隧道鑽炸法</li> <li>(2) 山岳隧道 TBM</li> <li>(3) 軟土潛盾隧道</li> </ul>

		編)		
13	台北捷運系統 工程土木工程 設計手冊	台北捷運 局	1998	述及土層隧道耐震設計
14	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	高雄捷運 局	2002	述及土層隧道耐震設計
15	美國南加州捷 運地下結構耐 震設計準則		1984	述及土層隧道耐震設計
16	台灣高鐵設計 規範			覆蓋深度 $\leq 15\text{m}$ 之隧道耐震設計
17	日本隧道工程 標準規範及解 說(山岳工程篇)		1996	覆蓋深、地盤良好等不考慮。 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)
18	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)
19	山岳隧道工程 技術準則及解 說	工程會	2003	洞門
20	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
21	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
22	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)

## 附錄 B 審查意見與處理情況

項次	審查意見	處理情況
1	相關參考文獻如有電子檔部分，請於成果報告光碟中一併提供。	已依委員意見修訂，相關文獻資料電子檔於期末報告定稿時一併寄送。
2	中、英文摘要多為工作項目描述，請補充簡要計畫成果，以完整呈現計畫概況。	已依委員意見修訂，將計畫成果於中、英摘要補述。
3	「潛在場址」為低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例中定義之專有名詞，本報告中假想案例並非完全符合本名詞定義，應避免使用法律上已有定義之名詞，請全數修正為「可能場址」。	感謝審查委員意見，已將報告內中相關文字修訂為「可能場址」。
4	第 7 頁圖 2.1-2，SFR 地下空間立體視圖漏未提及 BTF，請補充。	依審查意見完成修正。
5	表 3.3-3 中，DIBIT 系統之檢測速度相較於其他方法似乎過度緩慢，請確認是否正確。	<ul style="list-style-type: none"> <li>文獻出處所列檢測速度為 0.01~0.1 m/hr。</li> <li>另查詢其它相關文件，相同的掃描系統(DIBIT)其掃描速度為 100 m/hr，此數值應屬合理。</li> </ul>
6	4.2.2 金門地質條件說明，係根據中央地質調查所提出之金門區域地質研究成果，經查地調所於 2011 年出版金門地質圖幅及說明書(2011，林蔚)，建議相關說明與附圖(4.2-2)採上述之資料。	依審查意見，將相關內文說明依金門地質圖幅及說明書(2011，林蔚)於以補充。
7	第 69 頁內文及表 4.4-1 安朔隧道之斷層破碎帶里程與表 4.3-1 不一致，請確認後更正。另節理位態及劈理位態如角度單位為度，上標請勿省略。C1 之斜線符號誤植，請更正。	依審查意見完成修正(1)內文與表列內容不一致與(2)角度單位及(3)斜線符號等處。
8	第 72 頁內文中之災變類型請與表 4.3-2 一致。	依審查意見完成修正。
9	第 81 頁倒數第 2 行語焉不詳，請修正。	感謝審查委員意見，已修訂如下： (v)現地應力空間分佈； (vi)聯絡坑道及處置坑道空間配置之關係；
10	第 82 頁第 7 行，請確認此處之坑道是否應為具有襯砌之坑道。	感謝委員建議，已將「(1)岩盤之穩定性監測」相關內容調整至 5.1 「無襯砌坑道」之結構穩定驗證方法。

11	<p>第 83 頁表 5.2-1(a)，請確認建造階段「仰拱隆起」及「中心線量測地中變位量測」之技術或儀器為何，若無亦請註明。另請確認運轉階段「開挖面觀察」之技術或儀器是否漏列收斂計。</p>	<p>感謝委員建議，已修訂如下：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 建造階段「仰拱隆起」及「中心線量測地中變位量測」之技術或儀器為何，已加列收斂岩釘、伸縮儀、沉陷觀測釘等。</li> <li>• 運轉階段「開挖面觀察」之技術或儀器已增列收斂計。</li> </ul>
12	<p>表 6.2-1 標題及第 88 頁倒數第 3 行，「低放審查導則」之簡稱無法看出本導則係用於低放最終處置之審查，請修正為「低放處置審查導則」。目錄亦請一併修正。</p>	<p>依審查意見完成修正。</p>
13	<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 「坐標」一詞已為現行法定名詞，請修正全報告中之「座標」為「坐標」。</li> <li>(2) 報告中多處出現「、及」、「、與」等符號誤用，請修正。</li> <li>(3) 全報告中，「銹染」請一致修正為「鏽染」。</li> <li>(4) 表目錄中，「MOHR-COULOMB」之大小寫請與內文中表 2.1-5 標題一致。</li> <li>(5) 表目錄漏列表 4.3-1 及表 4.3-2，請補列。</li> <li>(6) 表目錄中，表 5.2-1(A)及表 5.2-1(B)之大小寫請與內文相關表格之標題一致。</li> <li>(7) 圖目錄中，「SCHMIDT」之大小寫請與內文中圖 2.1-8 標題一致。</li> <li>(8) 圖目錄中，「CASE」之大小寫請與內文中圖 2.3-4、圖 2.3-5 及圖 2.3-6 標題一致。</li> <li>(9) 圖目錄中，漏列圖 3.1-1 及圖 4.1-1，請補列。</li> <li>(10) 第 1 頁第 5 行，請修正「人工障壁」為「工程障壁」。</li> <li>(11) 第 5 頁倒數第 1 及 2 行，請修正兩處之「結論」為「結論與建議」。</li> <li>(12) 第二章之章名有誤，應修正為「國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法」。目錄、頁尾、1.5 節及 7.1 節等處亦請一併修正。</li> <li>(13) 第 6 頁 7 行，請修正「跨度」為「尺度」。</li> <li>(14) 第 7 頁第 1 行，請修正「形狀與尺寸」為「形狀及尺寸」。</li> </ol>	<p>感謝委員建議，已依審查意見完成修正。</p>

	<p>(15) 第 8 頁最末行，請修正「拱頂」為「頂拱」。</p> <p>(16) 第 21 頁第 1 行，請修正「模型形」為「模型」。</p> <p>(17) 第 9 頁圖 2.1-4，請修正「…尺寸及廢棄物…」為「…尺寸、廢棄物…」、請修正「(3)」為「(c)」。</p> <p>(18) 第 10 頁第 4 行，請修正「(Granitoid)」為「(Granitoid)」。倒數第 4 行，請修正「處置坑」為「處置坑道」。</p> <p>(19) 第 14 頁倒數第 5 行，請修正「隨者」為「隨著」。</p> <p>(20) 第 17 頁內文中，請修正「表 2.1-11」為「表 2.1-9」。</p> <p>(21) 第 20 頁圖 2.2-4，請修正「較長軸」為「長軸」。</p> <p>(22) 第 26 頁第 12 行，請修正「…滑動時…」為「…滑動…」。倒數第 7 行，請修正「想定」為「假想」。倒數第 5 行，請修正「圖 2.3-5」為「圖 2.3-6」。</p> <p>(23) 第 35 頁第 3 行，請修正「…岩性與地質…」為「…岩性及地質…」。第 6 行，請修正「物料管理局」為「放射性物料管理局」。第 7 行，請修正「服務」為「發展」。第 9 行，請修正「所產的」為「所產生的」。</p> <p>(24) 第 35 頁最末行及第 37 頁，請修正「圖 3.3-1」為「圖 3.1-1」。</p> <p>(25) 第 38 頁第 9 行，請修正「區分物理風化與化學風化」為「區分為物理性風化與化學性風化」。表 3.1-2，W1 之描述欄，請修正「以受」為「已受」；W5 風化程度欄，請修正「殘於土壤」為「殘餘土壤」。</p> <p>(26) 第 39 頁第 5 行，請修正「又可稱」為「又稱」。倒數第 10 行，請修正「依時變特性」為「依時變形特性」。最末行，請修正「…不連續變形分析法…」為「…、不連續變形分析法…」。</p> <p>(27) 第 40 頁第 4 行，請修正「theo」為「theory」。第 11 至 12 行，「高壓混凝土結構分析」前方請補上「以及」二字、「核廢料」請修正為「放射性廢棄物」、「掩埋隧道」請修正為「處置坑道」、「受高壓混凝土結構」為「受高壓之混凝土結構」。倒數第 3 行，請修正「構建」為「構件」。</p>	
--	---	--


	<p>(28) 第 42 頁第 4 行，請修正「公司所旗下」為「公司旗下」。</p> <p>(29) 第 43 頁第 5 行，請修正「圖 3.2-2a」為「圖 3.2-2(a)」。 第 9 行，請修正「圖 3.2-2b」為「圖 3.2-2(b)」。</p> <p>(30) 第 44 頁第 3 行，請修正「是否異常龜裂」為「是否有異常龜裂」。第 4 行，請修正「腐蝕現象」為「腐蝕等現象」、請修正「疑惑」為「疑慮」。 倒數第 9 行，請修正「壁面」為「壁面」。</p> <p>(31) 第 49 頁介觀尺度之英譯有誤，請修正。</p> <p>(32) 第 50 頁第 3 行，請修正「fadar」為「radar」。</p> <p>(33) 第 52 頁倒數第 12 行，請修正「超波」為「超音波」。倒數第 10 行，請修正「檢測」為「瑕疵」。</p> <p>(34) 第 52 頁「Couplant」之中文名稱為「藕合劑」，請修正。</p> <p>(35) 第 53 頁句末請加上句號。</p> <p>(36) 第三章「物理波動檢測之類型」應為 3.3.4 節，「其他檢測類型」應為 3.3.5 節，節次有誤，請修正。 目錄亦請一併修正。</p> <p>(37) 第 55 頁第 3 行，請修正「可區分三大類」為「可區分為三大類」。倒數第 7 行，請修正「特徵」為「特性」、請修正「第三章」為「第二章」。</p> <p>(38) 第 56 頁第 7 行，請修正「比例也最高」為「比例最高」。</p> <p>(39) 第 57 頁第 6 行，請修正「據襯砌」為「具襯砌」。</p> <p>(40) 第 60 頁倒數第 4 行，請修正「瞭解」為「瞭解」。 倒數第 2 行，請修正「施做」為「施作」。</p> <p>(41) 第 61 頁最末行，請修正「植披」為「植被」、請修正「圖 4.2-6」為「圖 4.2-6」。</p> <p>(42) 第 69 頁倒數第 8 行，請修正「二岩段」為「第二岩段」。倒數第 6 行，請修正「後塊狀」為「厚塊狀」。</p> <p>(43) 第 72 頁第 2 行，請修正「南迴鐵路-工程輯要」為「南迴鐵路工程-工程輯要」。</p> <p>(44) 第 73 頁第 3 行，請修正「結國祥如」為「結果詳如」。表 4.3-3 標題，請修正「…安朔隧道營運期</p>	
--	---	--

	<p>間檢測項目…」為「…安朔隧道檢測項目…」。</p> <p>表目錄亦請一併修正。表 4.3-3 倒數第 5 行，請修正「組述」為「組數」。</p> <p>(45) 第 74 頁第 8 行，請修正「自力性」為「自立性」。倒數第 8 行，請修正「定期的與維護」為「定期的維護」。倒數第 4 行，請修正「鋼支堡」為「鋼支保」。</p> <p>(46) 第 76 頁表 4.4-1 標題，請修正「假設案例」為「假想案例」。表目錄亦請一併修正。請修正所有「路上」為「陸上」。第 7 行，請修正「岩入侵」為「岩脈入侵」。</p> <p>(47) 第 82 頁第 5 行及第 92 頁倒數第 12 行，請修正「運轉期間」為「運轉階段」。</p> <p>(48) 第 82 頁第 7 行，請修正「施做」為「施作」。</p> <p>(49) 第 85 頁第 2 行，請修正「…地質條件與岩石力學…」為「…地質條件及岩石力學…」。第 9 行，請修正「地質資料蒐集與分析」為「資料蒐集與分析」。第 11 行，請修正「…分佈統計…」為「…分佈與統計…」。</p> <p>(50) 第 86 頁表 5.3-1，場址條件欄請修正「摺皺」為「褶皺」、「地下水分文資料」為「地下水文資料」。1B 末尾請補上「蒐集」二字。試驗項目欄請修正「岩石靜彈模數試驗」為「岩石靜性彈模數試驗」。</p> <p>(51) 第六章頁尾誤植為第七章，請更正。</p> <p>(52) 第 87 頁第 7 行，請修正「區分」為「區分為」。</p> <p>(53) 第 88 頁表 6.1-1，請修正「依時性變形特性」為「依時變形特性」。倒數第 4 行，請修正「屏障」為「障壁」。最末行，請刪除「評估與驗證」等字。</p> <p>(54) 第 89 頁第 5 行及第 93 頁倒數第 6 行，請修正「表度 6.2-2」為「表 6.2-2」。</p> <p>(55) 第 90 至 91 頁表 6.2-2，請修正「因子」為「章節」。</p> <p>(56) 第 90 頁第四章 106 年提供要項部分，「坑道結構穩定性…據以」等字應為藍字。第五章 106 年提供要項部分，「與大地工程特性參數」等字應為黑字。</p>	
--	--	--



<p>(57) 第 91 頁第五章 106 年審查作業部分，「是否」、「根據「場址特性描述」、「造成」及「評估」等字應為藍字。第六章 106 年提供要項部分最末行，請在技術後方補上「頻率」。審查作業部分，請修正「施測頻率」為「檢測頻率」、請修正「組人成人員」為「組人成人員」。第七章 106 年審查作業部分倒數第 2 行，請修正「檢監測」為「檢監測之」。</p> <p>(58) 第 93 頁第 3 行，請修正「各章」為「各項」。</p> <p>(59) 參考文獻〔49〕、〔50〕、〔52〕至〔54〕，請修正「核能研究所」為「放射性物料管理局」。</p> <p>(60) 附錄 6 規範內容(9)，請修正「換器」為「換氣」。</p> <p>(61) 附錄 9 出版者/作者請用全稱，以維持一致性。</p> <p>(62) 附錄 20 規範內容，請修正「、」為「、」。</p>	
--	--

## 附錄 C 期末簡報



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


低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性  
驗證方法研究

期末審查簡報

淡江大學 楊長義  
國防大學理工學院 李宏輝  
金門大學 許宗傑

社團法人中華民國大地工程學會

中華民國106年12月19日



### 簡報綱要

- 壹、計畫目的
- 貳、工作內容與期程規劃
- 參、成果報告章節 vs. 完成的工作項目
- 肆、執行成果說明

## 壹、計畫目的

- I. 針對低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性之驗證方法進行國際資訊蒐整與研析。
- II. 針對可能影響坑道結構穩定性之影響因子進行討論，及研析相關的數值分析、試驗與檢測等驗證方法。
- III. 根據我國低放射性廢棄物潛在場址，對鄰近既有的坑道現況進行地質、建造歷史與現況之資料蒐集與調查，建立坑道處置結構穩定性審查假想案例。
- IV. 建立我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術。

3

## 貳、工作內容與期程規劃

工作內容	106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性驗證方法研究			※			※			※			※
國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析												
國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法												
建立坑道處置結構穩定性審查假想案例												
提出我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術												
提出我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證												
成果報告撰寫												
工作進度估計百分比 (累積數)	0%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

4

## 參、成果報告章節 vs. 完成的工作項目

**Ch2 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法**

- 本章節整理瑞典SFR處置場針對1BMA與1BLA處置室，採數值方法進行之長期穩定性分析，內容含坑場址介紹、地質條件、裂隙調查及數值模型建構、及其分析過程與結果。

**Ch3 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法**

- 透過國內一般坑道其在設計、運轉與運轉期間之相關技術報告蒐整研析，釐清影響坑道結構穩定性之關鍵因子，與符合國內地質與環境條件所採取之驗證方法。

**Ch4 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例**

- 以①台灣本島(有襯砌結構)或②外島(無襯砌結構)既有坑道為假想案例，蒐集坑道結構在運轉期間可能產生之裂縫、滲漏水與剝離等異狀，並針對其可能的釐因與驗證方法進行討論。

**Ch5 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審技術**

- 綜整前述成果，依我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道型式，釐清出處置坑道結構在運轉期間可能產生之異狀及坑道結構穩定性之驗證方法。

**Ch6 我國低放處置技術之坑道結構穩定性模式驗證重點**

- 綜整前述資料及國內外採擷的關鍵參數，①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驗證重點，並依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查準則(第0版)」與本研究有關之章節進行研析與討論，提出②低放處置審查準則(第0版)相關條文修訂建議。

5

## I. 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析(1/2)

肆、執行成果說明(01/10)

Long term stability of rock covers BMA and BLA of SFR, Forsmark (SKB, 2014)

Layout of the SFR-1

SFR-1 之處置室與隧道佈局圖

**Numerical model**

- 數量模型尺寸 (200 x 100 x 100 m)
- 考慮地質條件的結構
- 為數值模型可知，採對稱之三維模型
- 數值模型，在模型中儲存於 180A 與 181A 處置室

**Material properties-Fracture**

Critical peak shear strength criterion (Barton and Choubey, 1977)

$$\tau_c = \sigma_n \left[ \tan \phi_0 + \frac{JRC}{JCS} \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{cs}} \right)^a \right]$$

- JRC (粗糙度係數) 與 JCS (原岩峰值強度) 與岩質對於裂隙產生有關，建議將裂隙面與結核面以 100 mm 之距離為 a，JRC<sub>100</sub> and JCS<sub>100</sub>
- 若裂隙為深部條件，建議將基本裂隙角  $\phi_0$  改採 粗糙度係數  $JRC$

岩質 1 (深部裂隙) 試驗用之岩質性質與裂隙面係數				岩質 2 (深部裂隙) 試驗用之岩質性質與裂隙面係數			
Material	Mean	Stdev	Max/min	Material	Mean	Stdev	Max/min
Joint roughness angle	2.0	0.2	0.7 - 3.7	0.0	0.0	0.0	0.0 - 0.0
JRC <sub>100</sub>	11	0.8	1.4 - 16.0	0.0	0.0	0.0	0.0 - 0.0
JCS <sub>100</sub>	84	20	31 - 180	0.0	0.0	0.0	0.0 - 0.0
Basic friction angle $\phi_0$	17.0	0.8	10.0 - 23.0	0.0	0.0	0.0	0.0 - 0.0

6

肆、執行成果說明(02/10)

### I. 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析(2/2)

- 材料劣化之模擬，係假設劣化僅發生在裂隙，完整岩石的力學特性不變。
- 劣化影響範圍：係自鄰近處置室周圍之岩體，隨折減步數(reduction step)  $n$  的增加往外延伸。  
 $r_{red,n} = r_i + n \cdot \delta r$   
 $r_i$ : 處置室半徑,  $\delta r$ : 0.5 m
- 裂隙剪力強度折減:  
 $\tau_c = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi \cdot r_{\phi,n})$   
 $r_{\phi,n} = n - n$   
 $r_{\phi,n} = a^{n-1}$ ,  $a = 0.9$   
 $\tau_c$ 、 $r_{c,n}$  與  $r_{\phi,n}$  分別為  $n$  次折減後之剪力強度、凝聚力與摩擦角折減係數,  $a$  為折減因子; 凝聚力在第一次的折減步次運算後其值為零。
- 裂隙動度折減:  
 $K_{N,n} = K_N \cdot r_{\phi,n}$   
 $K_{N,n} = K_N \cdot r_{\phi,n}$

劣化影響範圍與摩擦角遞減狀況(SKB, 2014)

肆、執行成果說明(03/10)

### II. 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法(1/2)

處置坑道圍岩結構長期穩定之驗證項目(羅長義與李宇輝, 2014) 隧道圍岩破壞性檢測技術之比較(段海自量博, 2005)

處置坑道圍岩長期穩定之驗證項目	驗證其他坑道結構之異狀		驗證項目		適用圍岩	適用圍岩	適用圍岩	適用圍岩	適用圍岩		
	圍岩劣化	圍岩劣化	圍岩劣化	圍岩劣化							
1. 外力因素	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	1. 地質調查與地質編圖 2. 地質調查與地質編圖 3. 地質調查與地質編圖 4. 地質調查與地質編圖 5. 地質調查與地質編圖	
	2. 環境因素	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化
		3. 非力學因素	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化	1. 圍岩劣化 2. 圍岩劣化 3. 圍岩劣化 4. 圍岩劣化 5. 圍岩劣化

## II. 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法(2/2)

肆、執行成果說明(06/10)

### 「無襯砌坑道」之結構穩定驗證方法

	Massive (RFR < 0.25)	Moderately Fractured (0.25 < RFR < 0.50)	Highly Fractured (0.50 < RFR)	
Low to Slightly Stress (0.1, 0.2, 0.3, 0.4)				RFR < 0.25
Intermediate to Slightly Stress (0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7)				0.25 < RFR < 0.50
High to Slightly Stress (0.7, 0.8, 0.9, 1.0)				RFR > 0.50

金門無支撐地下坑道頂拱之地震光檢掃描面分析結果  
(李俊強等人, 2012)

無襯砌坑道之穩定性與破壞模式(Hoek et al., 1980)

## III. 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例(1/2)

肆、執行成果說明(04/10)

**1. 坑道結構缺陷之真象與判斷**

坑道結構缺陷之真象與判斷之第一性，如何從表面觀察到坑道內部之真象，再經監測與檢測，其過程與程序之真象與判斷，有待相關技術方法與設備之進一步發展與研製，以有效與即時地反映坑道之真象。

**2. 地下水對坑道岩體及襯砌的影響**

國內外坑道岩體與襯砌比較，國內坑道岩體與襯砌之真象與判斷，其真象與判斷之真象與判斷，其在2009年仍舊 2.5m/min 的速率(高於 20 U/min)，同時亦應考慮地下水滲透進入襯砌後之真象與判斷。

主要管理參考之法，其真象與判斷之真象與判斷！

Event out 1 : N30 E 588°

Event out 2 : 200° W 585°

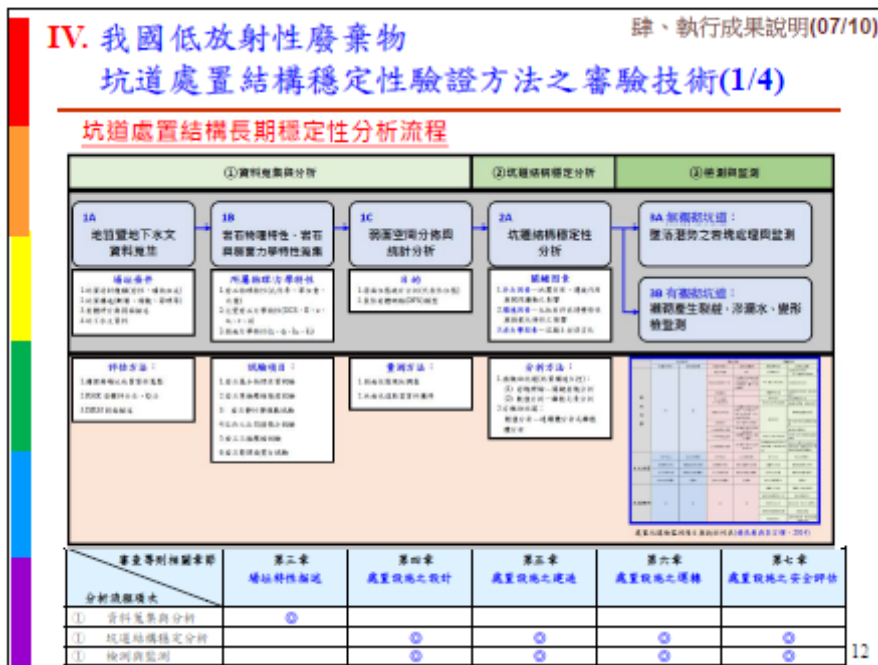
Event out 3 : N30 E 523°

肆、執行成果說明(05/10)

### III. 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例(2/2)

	羅山坑道	台鐵南迴線安南隧道
地點	金門縣古崗村	台東縣達仁鄉
完工日/目前運轉	民國53年/53年	民國80年/26年
地質條件	1. 岩性：花崗片麻岩與花崗岩 2. 構造：岩體有偉晶岩脈與基性岩入侵有兩組剪裂節理、一組解壓節理	1. 岩性：硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之 2. 構造：CSIR岩體分類為第III至V類，36K+719 - 36K+672.4處為斷層破碎帶，主要不連續面為劈理與節理
坑道屬性	軍事隧道(視為觀光用)	交通隧道
斷面尺寸	1. 路上坑道段：寬約6 m，高約3.5 m 2. 水邊段：寬約11.5 m，高約8 m	寬7.8 m，高7.3 m
長度	5,481 m	1. 路上坑道段：101 m 2. 水邊段：357 m
襯砌	無	有
開挖方式	鑽炸法	明挖覆蓋工法、圓鋼支撐支撐工法(傳統工法)及新工法
坑道結構異狀(運轉期間)	1. 陸地洞口段：岩體風化、地表水入滲、落石。 2. 路上坑道段：坑道側壁與頂拱有局部鬆動岩塊引致落石。 3. 水邊段：坑道側壁與頂拱有局部鬆動岩塊引致落石；基性岩脈因地下水入滲引致風化速度加劇，造成坑道滲水。 4. 近海洞口段：錯節風化嚴重、地表水入滲。	1. 襯砌裂縫、滲水、剝落。(裂縫深度的為襯砌設計厚度之34~43%) 2. 部分區段襯砌會後磁裂，襯砌厚度不一 3. 襯砌混凝土中性化(厚度的3cm) [註：襯砌設計厚度65cm]

11



IV. 我國低放射性廢棄物 坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(2/4)		肆、執行成果說明(08/10)	
坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點			
處置坑道結構長期穩定影響項目與肇因	坑道處置結構長期穩定審驗重點 (本計畫建議)		備註 (相關規範)
外力因素	地震作用	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法是否適切？是否足以反映坑道結構受震行為？ (3) 是否依據「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)第三章之場址特性描述，提出合理的設計基準地震？	台北捷運系統工程土木工程設計手冊(針對土層隧道)
	邊坡運動	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法是否適切？是否足以反映坑道洞口段可能受到邊坡運動之影響？	公共工程地工綱要規範
	開挖擾動	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之開挖工法對圍岩擾動的影響評估是否合理？ (3) 採用之分析方法是否適切？是否足以反映坑道圍岩因開挖擾動引致之範圍與鬆動土質之影響？	公共工程地工綱要規範 隧道施工技術規範 地工說明書 技術規定 山岳隧道之施工

13

IV. 我國低放射性廢棄物 坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(3/4)		肆、執行成果說明(09/10)	
坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點			
處置坑道結構長期穩定影響項目與肇因	坑道處置結構長期穩定審驗重點 (本計畫建議)		備註 (相關規範)
環境因素	風化作用引致岩石強度弱軟化	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法與材料組成模式是否適切？是否足以反映坑道圍岩強度弱軟化之影響？	無
	依時性變形特性	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法與材料組成模式是否適切？ (3) 是否足以反映坑道圍岩依時變形特性之影響？	無
非力學因素	混凝土中性化	(1) 選定之檢測方法是否適切？	舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I)(II) 隧道非破壞性檢測技術之開發總結報告書
	鋼筋保護層厚度不足	(2) 施測或取樣位置是否合宜？	
	輸送材料反應	(3) 樣本數是否具代表性？	
	混凝土流置中斷(冷縫)		
	襯砌背後空洞或厚度不足		

14



**IV. 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)**

肆、執行成果說明(10/10)

審查事項與審查重點		審查相對應審查建議	
107 <sup>1</sup>	108 <sup>2</sup>	107 <sup>1</sup>	108 <sup>2</sup>
<p><b>審 查 要 點 107<sup>1</sup></b></p> <p>一、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>二、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>三、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>四、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>五、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>六、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>七、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>八、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>九、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>十、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p>	<p><b>審查要點 108<sup>2</sup></b></p> <p>一、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>二、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>三、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>四、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>五、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>六、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>七、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>八、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>九、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>十、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p>	<p><b>審查要點 107<sup>1</sup></b></p> <p>一、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>二、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>三、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>四、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>五、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>六、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>七、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>八、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>九、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>十、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p>	<p><b>審查要點 108<sup>2</sup></b></p> <p>一、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>二、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>三、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>四、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>五、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>六、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>七、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>八、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>九、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p> <p>十、 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)</p>

註1：「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)」係由本局委託「3081 低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(4/4)」研究報告所提出。

簡報結束 敬請指教



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

## 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

#### 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

計畫編號：105FCMA011

計畫主持人：董家鈞

子計畫四主持人：李明旭

受委託機關(構)：社團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月

# 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

### 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

受委託單位：社團法人中華民國大地工程學會

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 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 99.8 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 106 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

核種傳輸機制為核種由處置設施(近場)經地質圈(遠場)再進入生物圈之主要途徑，而坑道處置為國內低放射性廢棄物處置之主要方式，因此系統性的探討坑道處置之近場與遠場核種傳輸驗證技術有其必要性，瑞典SKB針對SR-PSU site之申照程序有一系列技術報告提供完整參考資訊，本計畫在國際坑道處置長期安全分析審驗方法，主要參考TR-14-09: Radionuclide Transport and Dose Calculations for the Safety Assessment SR-PSU技術報告內有關核種傳輸驗證技術，也同時參考近場機制之TR-14-04: Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU及遠場機制之TR-14-05: Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-PSU等二本技術報告，以釐清核種傳輸驗證與近場、遠場機制之相互關聯。透過整理與研析國際先進國家技術報告，有助了解國際上在坑道處置核種傳輸驗證技術之最新發展趨勢，裨益國內未來在坑道處置長期安全分析審驗方法之精進。第二項工作為近岸環境坑道處置遠場核種傳輸數值模擬之參數敏感度分析，利用本計畫105年度建置之近岸環境遠場數值模擬網格，進行遠場核種傳輸參數敏感度分析，以釐清核種在地質圈傳輸之關鍵參數與其對核種遷移與遲滯之可能影響程度，將有助於未來進行場址調查時建立所需鑑別之關鍵場址參數。第三項工作為建立坑道處置之近場核種傳輸數值模擬技術，以HYDROGEOCHEM系列模式建立坑道處置之近場數值模擬網格，參考TR-14-04與TR-14-09所考慮的近場機制與模擬策略，建立符合國內處置現況之近場數值模擬網格，並進行模擬測試，做為下一階段銜接遠場核種傳輸數值模擬的基礎。第四項工作為綜整本計畫105年度與本年度之關鍵成果與發現，提出在坑道處置長期安全分析模式審查重點或注意事項，針對模式、關鍵參數與不確定性處理等提出說明與建議，期望建立與提升國內長期安全評估近場與遠場傳輸驗證之技術能力。

# Abstract

Radionuclide transport is the major pathway of radioactive waste reaching biosphere from the waste disposal facilities. Tunnel disposal is one of proposed disposal approaches for domestic low-level waste. It is necessary to systemically investigate and develop required verification techniques for near-field/far-field radionuclide transports of long-term safety assessment. This study reviewed verification techniques of radionuclide transport in three SKB technical reports: Radionuclide Transport and Dose Calculations for the Safety assessment SR-PSU (TR-14-09), Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU (TR-14-04) and Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-PSU (TR-14-05). Studying international technical reports not only to learning the newly developed technologies on verifying radionuclide transport verification technology but also to enhance domestic reviewing techniques on radionuclide transports in long-term safety assessment. The second task is to perform sensitivity analysis of far-field parameters on radionuclide transport using grids developed in 2015 project to identify key geological parameters affecting radionuclide migrations. Outcomes will benefit establishment of key parameters for future site characterization studies. The third task is to develop numerical techniques for near-field radionuclide transports as part of our simulation systems on simulating radionuclide migrations. The HYDROGEOCHEM model was used to build 3D near-field simulation grids for current design concept of tunnel disposal and with similar strategies developed in TR-14-04 and TR-14-09 reports. Preliminary test runs of near-field grids were performed to ensure successful connections with far-field grids to achieve systematic simulations of radionuclides. The fourth task is to provide review suggestions, including models, key parameters, and handling of uncertainties, on long-term safety models by synthesizing key outcomes and findings in 2015 project and current studies. Both reviews of international technical reports and developments of simulating radionuclide transport techniques achieved in this study will facilitate the development and enhancement of long-term safety assessment techniques in both near-field and far-field investigations.

# 目錄

摘要 .....	iii
Abstract .....	iv
圖目錄 .....	vi
表目錄 .....	viii
第一章 前言 .....	1
第二章、國際間低放坑道處置場址的核種傳輸驗證技術資訊研析 .....	3
2.1 SR-PSU 核種傳輸與劑量計算之模式與資料連結 .....	3
2.2 核種傳輸計算之初始存量核種篩選原則 .....	4
2.3 SR-PSU 核種傳輸計算所考慮之核種衰變鏈 .....	5
2.4 核種傳輸計算與水文模式的耦合 .....	6
2.5 近場模式 .....	6
2.6 遠場模式 .....	8
第三章、低放坑道處置近岸環境下的遠場傳輸數值模擬參數敏感度研析 .....	10
3.1 水力傳導係數之敏感度分析 .....	11
3.2 擴散係數之敏感度分析 .....	16
3.3 延散係數之敏感度分析 .....	20
3.4 情境變化之敏感度分析 .....	25
第四章、低放坑道處置之近場多子核種傳輸驗證技術建立 .....	28
4.1 近場(處置坑道)環境水文地質介紹 .....	28
4.2 二維案例數值解之近場(處置坑道)傳輸數值模擬 .....	31
4.2.1 案例 1—穩態流場及穩態傳輸案例 .....	32
4.2.2 案例 2—穩態流場及暫態傳輸案例 .....	35
4.2.3 案例 3—多條核衰變鏈案例 .....	38
第五章、低放坑道處置長期安全分析模式審查重點或注意事項 .....	45
第六章、結論與建議 .....	49
參考文獻 .....	51

## 圖目錄

圖 2.1 SR-PSU 核種傳輸與劑量計算的模式與資料鏈結 (來源：Fig.2.3 in TR-14-09) .....	4
圖 2.2 SR-PSU 初始存量核種輻射劑量與半衰期 (來源：Fig.3.1 in TR-14-09) .....	4
圖 2.3 核種傳輸與水文模式的耦合 (來源：Fig.9.1 in TR-14-09).....	6
圖 2.4 IBLA 模型的控制體積(來源：Fig. 9.14 in TR-14-09).....	7
圖 2.5 IBLA 核種傳輸計算概念模型 (來源：Fig. 9.15 in TR-14-09).....	7
圖 2.6 遠場水文地質模型 (來源：Fig. 9.20 in TR-14-09).....	8
圖 2.7 遠場核種傳輸概念模型(來源：Fig. 9.21 in TR-14-09).....	9
圖 3.1 觀察點分布圖.....	10
圖 3.2 不同水力傳導係數時觀察點 A 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	12
圖 3.3 不同水力傳導係數時觀察點 B 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	13
圖 3.4 不同水力傳導係數時觀察點 C 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	14
圖 3.5 不同水力傳導係數時觀察點 D 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	15
圖 3.6 不同擴散係數時觀察點 A 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	16
圖 3.7 不同擴散係數時觀察點 B 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	17
圖 3.8 不同擴散係數時觀察點 C 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	18
圖 3.9 不同擴散係數時觀察點 D 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	19
圖 3.10 不同延散係數時觀察點 A 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	21
圖 3.11 不同延散係數時觀察點 B 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	22
圖 3.12 不同延散係數時觀察點 C 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	23
圖 3.13 不同延散係數時觀察點 D 濃度圖(A) $^{238}\text{Pu}$ (B) $^{234}\text{U}$ (C) $^{230}\text{Th}$ (D) $^{226}\text{Ra}$ .....	24
圖 3.11 觀察點 A Pu-238 濃度圖(A) Case1-3 (B) Case4-6 (C) Case7-9 (D) Case10-12 .....	26
圖 4.1 近岸坑道處置設施俯視圖.....	28
圖 4.2 A 類廢棄物處置坑道剖面圖(來源：台灣電力公司，2016).....	29
圖 4.3 B、C 類廢棄物處置坑道剖面圖(來源：台灣電力公司，2016).....	29
圖 4.4 近場(處置坑道)二維網格.....	30
圖 4.5 近場(處置坑道)流場邊界條件.....	31
圖 4.6 近場(處置坑道)傳輸邊界條件.....	32
圖 4.7 案例 1—A 類廢棄物處置坑道壓力水頭分布圖.....	32
圖 4.8 案例 1—B、C 類廢棄物處置坑道壓力水頭分布圖 .....	33
圖 4.9 案例 1—A 類廢棄物處置坑道流場與總水頭圖.....	33

圖 4.10 案例 1—B、C 類廢棄物處置坑道流場與總水頭圖 .....	33
圖 4.11 案例 1—A 類廢棄物處置坑道相對活度分布圖 .....	34
圖 4.12 案例 1—B、C 類廢棄物處置坑道相對活度分布圖 .....	34
圖 4.13 案例 2—A 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(1 年).....	35
圖 4.14 案例 2—A 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(100 年).....	35
圖 4.15 案例 2—A 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(1,000 年).....	36
圖 4.16 案例 2—B、C 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(1 年).....	36
圖 4.17 案例 2—B、C 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(100 年).....	37
圖 4.18 案例 2—B、C 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(1,000 年).....	37
圖 4.19 案例 3—A 類廢棄物處置坑道關鍵核種外釋活度圖.....	42
圖 4.20 案例 3—B、C 類廢棄物處置坑道關鍵核種外釋活度圖 .....	42
圖 4.21 案例 3— $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 核種在不同類型坑道外釋活度圖 .....	43
圖 4.22 案例 3— $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 核種在不同類型坑道外釋活度圖 .....	44
圖 4.23 案例 3— $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 核種在不同類型坑道外釋活度圖 .....	44



## 表目錄

表 2.1 SR-PSU 核種傳輸計算所考慮之核種衰變鏈 (來源：Table3.1 in TR-14-09).....	5
表 2.2 SR-PSU 核種傳輸計算所考慮之單一核種 (來源：Table3.2 in TR-14-09).....	6
表 3.1 核種衰變鏈參數.....	10
表 3.2 水力傳導係數參數調整.....	11
表 3.3 擴散係數參數調整.....	16
表 3.4 延散係數參數調整.....	20
表 3.5 情境案例說明.....	25
表 3.6 觀察點濃度峰值.....	26
表 3.7 濃度峰值到達時間(year).....	27
表 4.1 近場(處置坑道)8 種障壁材質之水文與傳輸參數.....	30
表 4.2 案例 3—12 條核種衰變鏈參數(1~2 條).....	38
表 4.3 案例 3—12 條核種衰變鏈參數(3~12 條).....	40
表 4.4 案例 3—A 類及 B、C 類廢棄物核種活度總量 .....	41
表 5.1 近場關鍵作用與關鍵變數互動矩陣-以水文作用、化學作用與核種傳輸作用為例 ...	46
表 5.2 遠場關鍵作用與關鍵變數互動矩陣-以水力作用為例 .....	47

# 第一章 前言

近地表處置與坑道處置為國際上常採用之低放射性廢棄物最終處置方式，其中坑道處置則是目前國內低放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址的主要處置方式，這可由經濟部於民國 101 年所核定公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」等 2 處低放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址的場址特性說明，其中「台東縣達仁鄉」建議候選場址採用近岸坑道處置，「金門縣烏坵鄉」建議候選場址為海床下坑道處置。處置場址安全評估雖涉及許多專業領域的技術要項，然而由於核種傳輸機制為放射性核種進入生物圈之主要途徑，因此坑道處置之近場與遠場核種傳輸驗證技術便顯得格外重要。而從安全評估角度，近場安全評估在確認坑道處置工程障壁之安全圍阻與遲滯功能，遠場部分則在評估處置場址所在水文地質環境之安全遲滯功能，以「台東縣達仁鄉」建議候選場址為例，遠場包含海岸地區集水區與近岸海域，本年度計畫接續 105 年度遠場模擬技術成果進一步發展近岸坑道處置近場流場與核種傳輸模擬技術。

廢棄物處置工作涉及眾多專業領域，對主管機關而言需有專業的審驗技術，以協助提升國人對處置進程的信心。在處置設施安全評估的審查技術提升，一方面可透過研析國外先進國家技術報告以學習最新的安全評估程序、技術與方法，一方面則可投入資源實際發展安全評估技術，透過技術建置實質掌握審驗要項。以坑道處置為例，國內多年來在物管局科研經費支持下，針對低放射性廢棄物最終處置設施相關之隧道處置水文地質概念模式審查技術(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)等議題，已經逐年累積許多研究成果，國內研究團隊在部分技術要項的研發能力已逐漸成熟，但處置技術多年來也有新的思維與做法，加上計算機演算能力與資料庫技術的大幅提升，持續的精進審驗技術實有其必要性。

國際上在最終處置安全評估技術發展，除了受限於部分資料取得不易外，大部分先進國家的技術報告，在開放資料原則下，使得許多資料的獲取漸漸容易，如國際原子能總署(IAEA)相關技術報告中，針對近地表低放射性廢棄物處置場安全評估方法即有相關技術報告(IAEA, 2004)，其附錄中即評比相關模式軟體、案例與所需輸入資料等，最新發展為針對處置設施重

新定義安全案例與安全評估規範(IAEA, 2012)。美國核能管制委員會(NRC)對低放射性廢棄物處置場址之安全評估方法建立相關技術導則(NRC, 2000)，針對情節、概念模式發展技巧、核種外釋機制以及相對應的數學評估模式進行探討。瑞典 SKB 在處置長期安全評估工作則有許多完整技術報告，如與 SR-PSU site 有關之一系列技術報告，在各主要技術要項都可供國內技術發展借鏡。如 TR-14-09: Radionuclide Transport and Dose Calculations for the Safety Assessment SR-PSU 技術報告內有關核種傳輸驗證技術，近場機制之 TR-14-04: Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU 及遠場機制之 TR-14-05: Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-PSU 等技術報告，皆有詳細與豐富資訊可供國內參考。

本計畫今年度工作重點在研析國際核種傳輸驗證技術報告，釐清坑道處置近場與遠場核種傳輸驗證的技術要項，並建立近場核種傳輸數值模擬技術及遠場核種傳輸數值模擬之參數敏感度分析為主要技術建置工作，並綜整 105 年度與本年度成果提出坑道處置長期安全分析模式審查重點或注意事項。今年國際技術報告研析瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-09 (Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU, SKB 2014c)，該報告為 SR-PSU 場址申照程序中有關核種傳輸模擬計算之重要技術報告，提供核種由近場處置設施經遠場地質圈至生物圈之核種傳輸模擬與劑量計算過程與成果，研析此報告將有助於釐清坑道處置近場與遠場核種傳輸驗證的技術要項。近場核種傳輸數值模擬技術部分將以 HYDROGEOCHEM 系列模式，參考 TR-14-04 與 TR-14-09 所考慮的近場機制與模擬策略，期建立符合國內處置現況所需之近場三維數值模擬網格，並進行初步模擬測試，做為下一階段銜接遠場數值模擬的基礎。遠場核種傳輸數值模擬部分將利用本子計畫 105 年度建置之近岸環境遠場模擬網格，以 HYDROGEOCHEM 系列模式進行遠場參數敏感度分析，協助釐清核種在地質圈傳輸之關鍵參數與其對核種遷移與遲滯之可能影響程度，有助於對地質圈參數不確定性分析的確立。

放射性廢棄物最終處置設施安全評估工作在處置作業中扮演相當重要之地位，為確保國內處置安全評估工作之效益，俾益未來整體處置安全評估工作，能通過國際同儕審查與符合國際水平，國內在此方面之技術上，需與國際接軌。因此本計畫近程目標，除彙整國外放射性廢棄物處置設施安全評估審查技術，也不斷發展符合本土所需之驗證評估關鍵技術，協助解決國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與規劃精進對策。而在長程目標，則希望透過先進模式工具的整合發展來協助管制單位對於處置安全評估建立獨立審查及分析之能力，以協助提升國人對處置工作的信心。

## 第二章、國際間低放坑道處置場址的核種傳輸驗證技術資訊研 析

本章主要內容為節錄瑞典 SR-PSU 場址技術報告 TR-14-09 之核種傳輸驗證技術，該報告為 SR-PSU 場址申照程序中之核種傳輸模擬計算之重要安全評估技術報告，提供核種由處置設施(近場)、經地質圈(遠場)至生物圈之核種傳輸模擬與劑量計算過程與成果，是處置設施長期演化安全評估的重要論證基礎，也是 SKB 申請執照的重要技術支援報告之一，透過研析此報告將有助於釐清坑道處置近場與遠場核種傳輸驗證的技術要項。研析重點在採用之模式架構、資料與不同模式間之連結。

### 2.1 SR-PSU 核種傳輸與劑量計算之模式與資料連結

SR-PSU 場址核種傳輸的計算時間尺度為至 100,000 年，模擬期間考慮的演變條件包含障壁劣化、氣候變遷與海岸線移動等。核種傳輸的動態計算為接續水文與水文地質的模擬結果。而水文與水文地質的模擬為考慮因近場、地質圈或生物圈演化所造成邊界條件的改變在特定的演變時間以穩態進行模擬。也就是水文與水文地質的模擬是採用幾個穩態模擬來描述 100,000 年的演化過程，而不同穩態模擬時間段所需要的暫態水流相關資料，則採用線性內插估計取得。

SR-PSU 場址核種傳輸與劑量計算的模式與資料鏈結關係如圖 2.1 所示，圖中矩形與橢圓形分別代表模式與資料，模式與資料的鏈結關係說明如下：

1. 水文地質模式提供遠場的水流流場資料與生物圈核種傳輸模式所需的遠場水流資料
2. 近場水流模式承接遠場水流模擬資料提供近場水流資料
3. 近場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
4. 遠場核種傳輸模擬提供生物圈核種傳輸模擬所需之核種外釋資料
5. 場址特性生物圈模擬支援生物圈核種傳輸模擬以計算劑量

核種傳輸模擬計算至對人體的年有效劑量，其他生物體為劑量吸收率。對人體的年有效劑量再轉換為風險(限值為  $10^{-6}$ )，依據 ICRP 1990 Recommendations，個人有效劑量至群體風險的轉換因子為 0.073/Sv，在不考慮情境的發生機率條件， $14 \mu\text{Sv}$  的劑量值對應的風險約為  $10^{-6}$ 。

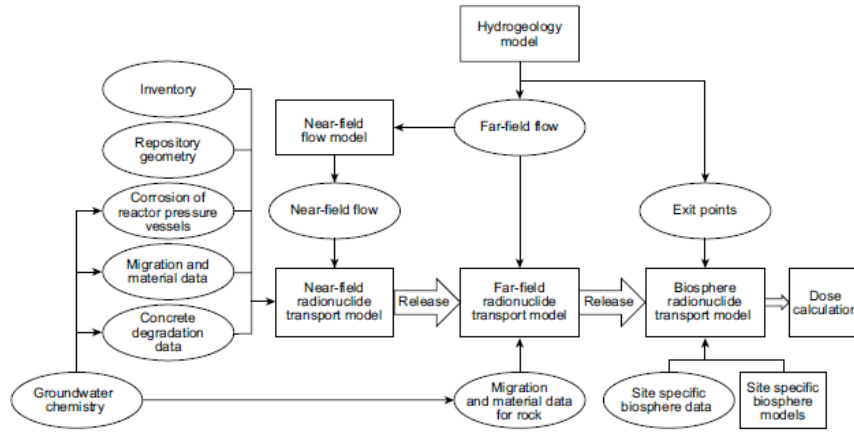


圖 2.1 SR-PSU 核種傳輸與劑量計算的模式與資料鏈結 (來源：Fig.2.3 in TR-14-09)

## 2.2 核種傳輸計算之初始存量核種篩選原則

SR-PSU 場址核種傳輸計算之初始存量(inventory)核種篩選原則有二項：

1. 核種半衰期為 10 年以上
2. 初始存量核種的輻射劑量(radiotoxicity)攝取劑量在處置場封閉時超過 10 mSv.

依據此二項原則，圖 2.2 為各種存量核種初始輻射劑量與半衰期的關係圖，圖中的垂直虛線為 10 年半衰期的篩選界線，水平虛線為 10 mSv 的篩選界線。

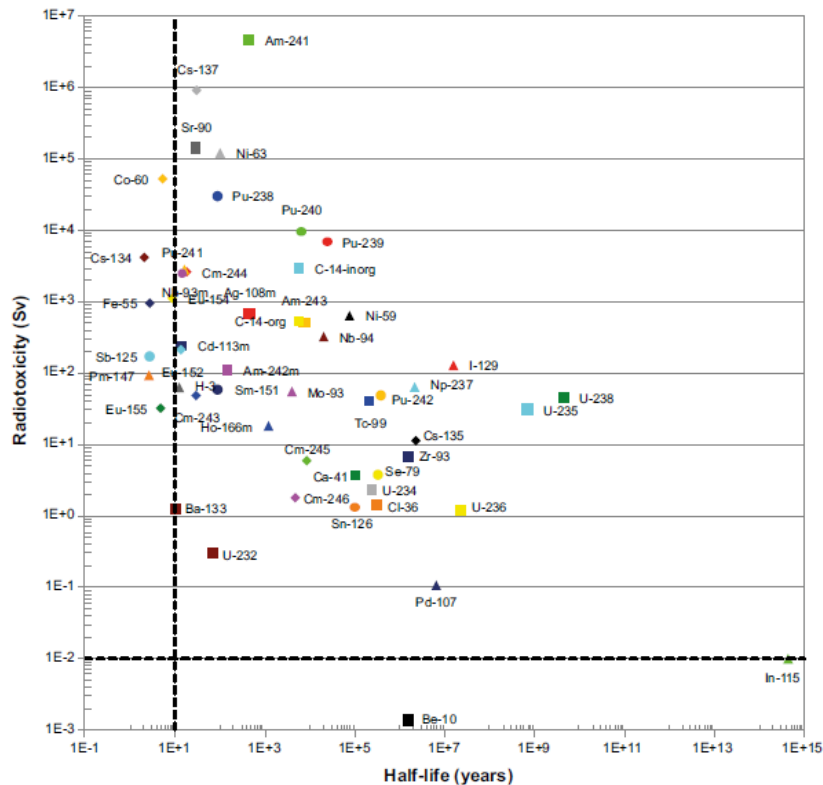


圖 2.2 SR-PSU 初始存量核種輻射劑量與半衰期 (來源：Fig.3.1 in TR-14-09)

### 2.3 SR-PSU 核種傳輸計算所考慮之核種衰變鏈

SR-PSU 核種傳輸計算所考慮之核種衰變鏈如表 2.1 所示。表中以黑色粗體顯示的核種為在物料初始存量即存在且直接模擬；以黑色顯示的核種為物料初始存量不存在，但在衰變鏈過程產生而納入模擬；以紅色粗體顯示的核種為不模擬核種傳輸的短半衰期核種，而以劑量轉換係數加總反算其母核種之等效劑量；以綠色顯示的核種為穩定同位素。而表 2.2 為 SR-PSU 核種傳輸所考慮之單一核種，也就是這些核種並未考慮在表 2.1 的衰變鏈過程。

表 2.1 SR-PSU 核種傳輸計算所考慮之核種衰變鏈 (來源：Table3.1 in TR-14-09)

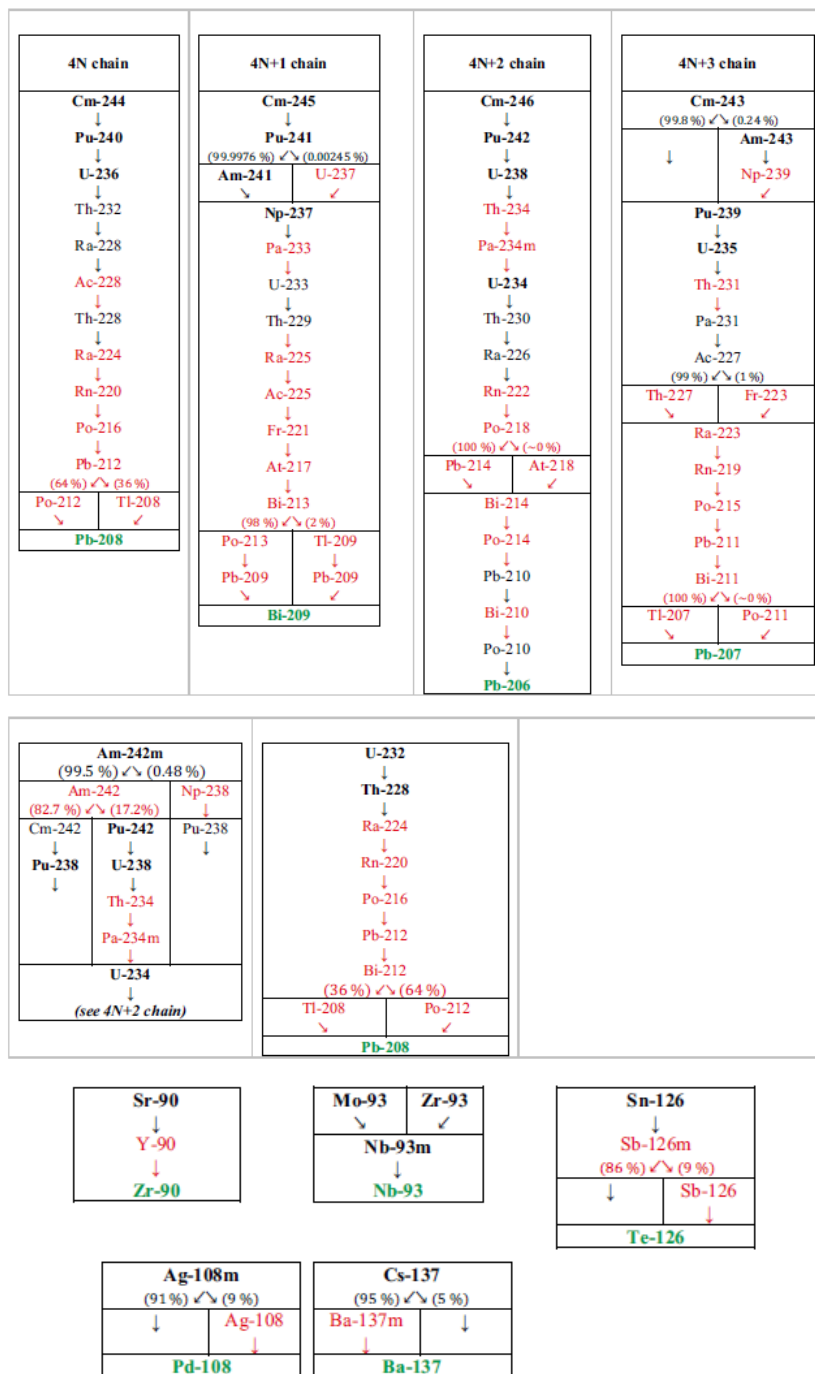


表 2.2 SR-PSU 核種傳輸計算所考慮之單一核種 (來源：Table3.2 in TR-14-09)

Radionuclide	
H-3	Tc-99
C-14 <sup>1</sup>	Pd-107
Cl-36	Cd-113m
Ca-41	I-129
Ni-59	Ba-133
Ni-63	Cs-135
Co-60	Sm-151
Se-79	Ho-166m
Nb-94	

<sup>1</sup> C-14 was included in the calculation in three forms: organic, inorganic and induced.

## 2.4 核種傳輸計算與水文模式的耦合

核種傳輸模擬的首要工作為耦合水文模式的模擬成果，遠場、近場、核種傳輸、劑量評估間的資料流通架構如圖 2.3 所示，在遠場流場模擬使用 DarcyTools 軟體，生物圈地表水文模擬使用 Mike-SHE 軟體，近場流場模擬使用 COMSOL-Multiphysics 軟體 (為 3 維有限元素法架構)，近場與遠場核種傳輸模擬使用 Ecolego 區塊模式軟體，生物圈核種傳輸與劑量評估同時使用 Ecolego 軟體。

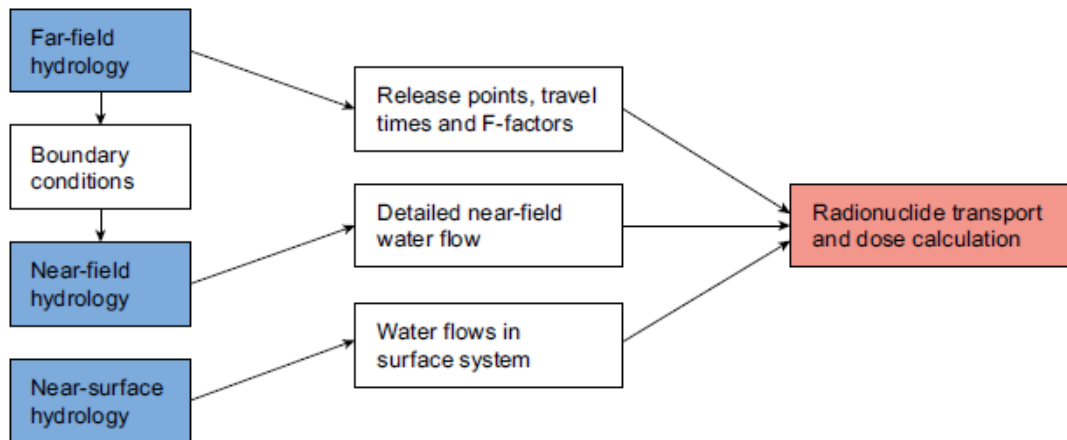


圖 2.3 核種傳輸與水文模式的耦合 (來源：Fig.9.1 in TR-14-09)

## 2.5 近場模式

近場核種傳輸模式所考慮的主要作用有：

1. 核種衰變與衰變鏈
2. 平流：進行直接模擬
3. 擴散：進行直接模擬
4. 延散：考慮孔隙介質特性

5. 吸附：影響核種平流與擴散
6. 溶解限制：雖未直接考慮在主要模擬案例，但在其他特殊支援案例有加以探討
7. 核種變化：依據不同時期假設的化學條件預先估計出不同的吸附係數，供計算核種的改變
8. 腐蝕：反應爐壓力容器的腐蝕，依照 pH 在處置窖的變化加以估計

以 1BLA 的模型為例，圖 2.4 為 1BLA 模型的控制體積，大部分廢棄物使用標準貨櫃，直接置放在混泥土地板，不回填與灌漿。採用 10 個區塊來描述 1BLA 的廢棄物。圖 2.5 為 1BLA 的核種傳輸計算概念模型，不考慮個別的廢棄物包件，但考慮可能的吸附，例如雖然不直接模擬混泥土地板的存在，但混泥土的吸附能力以吸附參數加以估計。

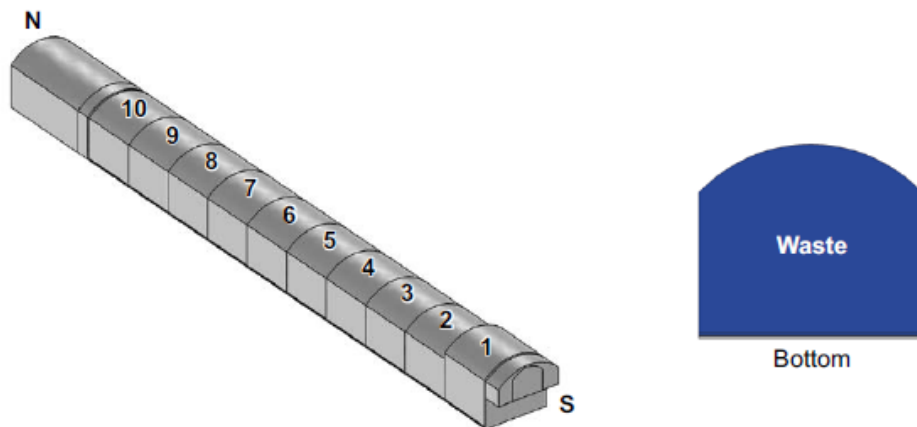


圖 2.4 1BLA 模型的控制體積(來源：Fig. 9.14 in TR-14-09)

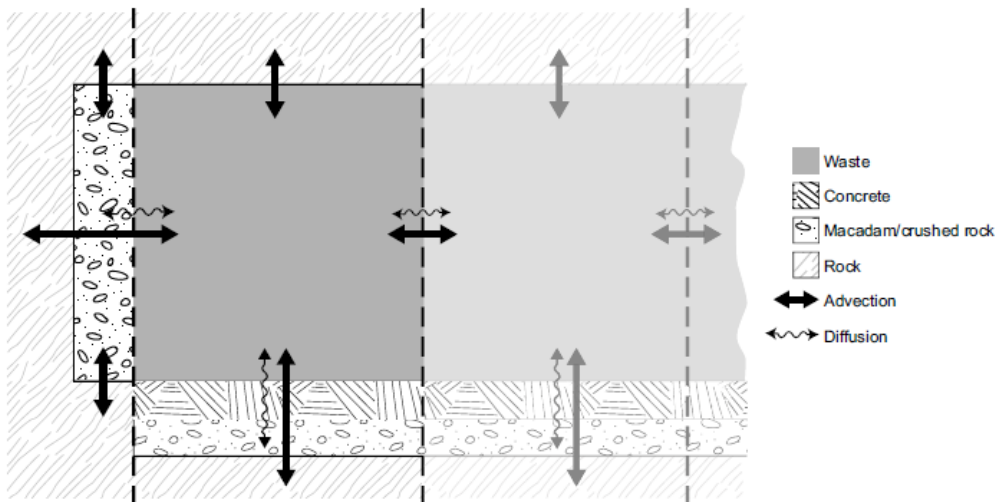


圖 2.5 1BLA 核種傳輸計算概念模型 (來源：Fig. 9.15 in TR-14-09)



## 2.6 遠場模式

遠場模式所考慮的水文地質模型如圖 2.6 所示，模擬範圍水平約 1.5km，垂直約 1.1 km，地質圖的幾何形狀在核種傳輸模擬時並不考慮，而是在水文地質模擬時考慮。遠場流場模擬使用 DarcyTools 軟體。從不同處置窖至生物圈的流場模擬結果之平流傳輸時間與距離，將被使用在區塊核種傳輸模擬使用，這是遠場流場與核種傳輸的連結關鍵。

此外，由於水流傳輸時間的計算並未考慮遲滯效應，因此並無法直接反應核種至地質圈的遷移。核種的遲滯僅在核種傳輸模擬時透過考慮下列二個機制處理：

1. 核種由裂隙網絡透過擴散進入母岩內部孔隙網絡
2. 吸附作用

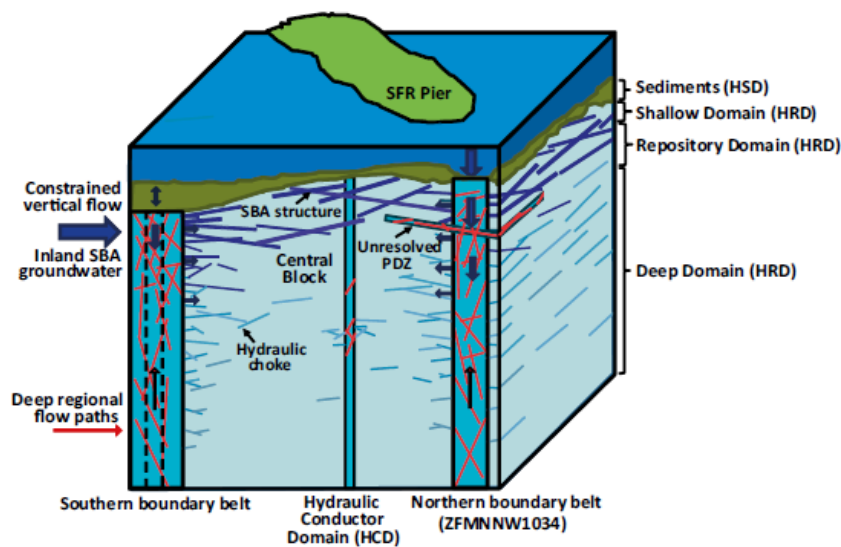


圖 2.6 遠場水文地質模型 (來源：Fig. 9.20 in TR-14-09)

遠場核種傳輸所考慮的主要作用有：

1. 核種衰變與衰變鏈
2. 平流：透過穩態水文地質模擬取得
3. 延散：在核種傳輸模擬時，利用無因次 Peclet number(=平流傳輸/延散傳輸)計算
4. 母岩擴散：用以估計裂隙平流傳輸與母岩擴散的交換
5. 吸附：僅考慮母岩吸附，忽略裂隙內吸附

圖 2.7 為遠場核種傳輸概念模型，共有 240 個區塊，圖中藍色方塊代表有水體平流通過之裂隙，白色方塊代表母岩擴散，藍色實箭號代表平流交換，藍色虛線箭號代表延散，黃色箭號代表擴散。

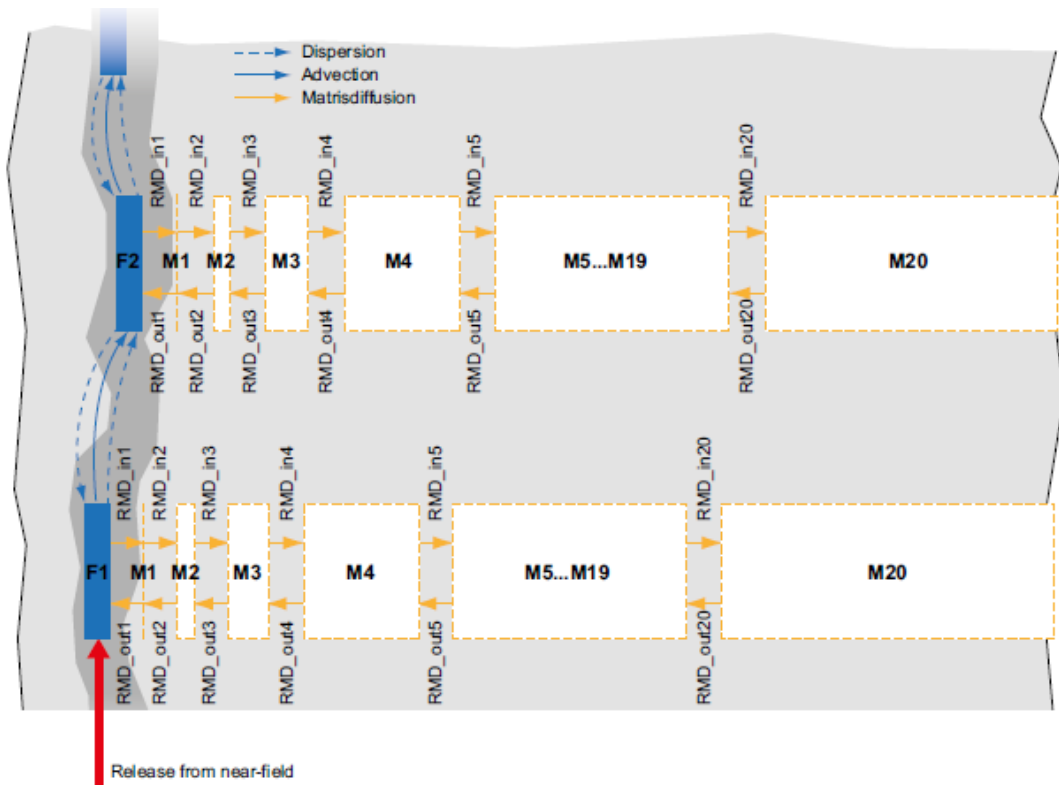


圖 2.7 遠場核種傳輸概念模型(來源：Fig. 9.21 in TR-14-09)

### 第三章、低放坑道處置近岸環境下的遠場傳輸數值模擬參數敏感度研析

採用 105 年度本子計畫所建置之近岸環境遠場模擬網格，利用 HYDROGEOCHEM 系列模式模擬遠場參數之敏感度分析，以釐清核種在地質圈傳輸的關鍵參數與其對核種遷移可能之影響，有助於地質圈參數不確定性分析，在本章節中分為兩部分，第一部分為水文地質參數之敏感度分析，包含 3.1 節水力傳導係數之敏感度分析、3.2 節擴散係數之敏感度分析、3.3 節延散係數之敏感度分析，各節內將水文地質參數各別調整 10 倍、1 倍、0.1 倍進行模擬比較，第二部分為 3.4 節情境分析，變數為 2 種滲透率、2 種海平面型態、3 種水力傳導係數，組合為 12 種模式案例。所有模擬選用 4N+2 長半衰期核種衰變鏈  $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$  做為示範核種衰變鏈，4 核種之衰變常數及吸附因子如表 3.1。模擬結果挑選四個觀察點以繪圖呈現濃度變化，點 A 位在海岸地表，點 B 位在處置設施前緣上部地表，點 C 位在處置設施正上方地表，點 D 位在處置設施上游地表。觀察點位置如圖 3.1 所示。

表 3.1 核種衰變鏈參數

核種	$^{238}\text{Pu}$	$^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$
遲滯因子 [-]	10000	14000	50000	500
衰變常數 [1/year]	$7.9 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-4}$

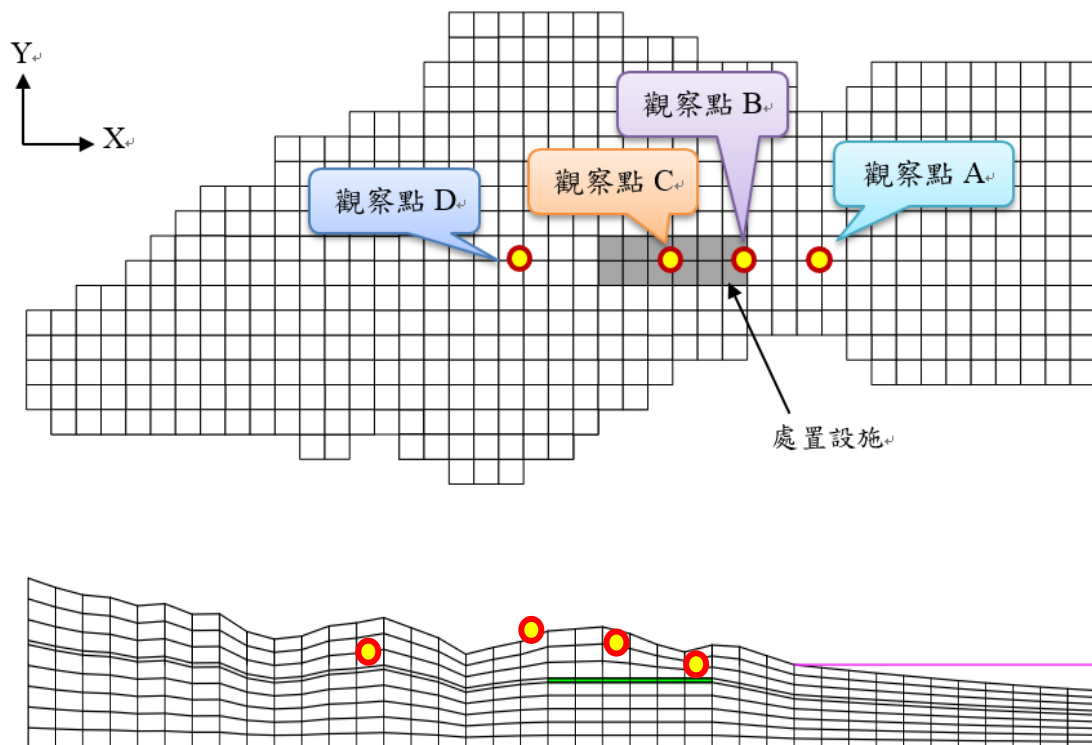


圖 3.1 觀察點分布圖

### 3.1 水力傳導係數之敏感度分析

本小節為探討水力傳導係數改變對於核種遷移結果的影響，除水力傳導係數外其餘參數皆為定值，比較水力傳導係數如表 3.2 整體調整 10 倍、1 倍、0.1 倍之模擬結果。處置設施周圍濃度變化試以  $^{238}\text{Pu}$  衰變鏈作為模擬核衰變鏈，核種於各觀察點濃度變化，如圖 3.2~圖 3.5 所示。

表 3.2 水力傳導係數參數調整

水文地質分層	k 值(m/day)		$k_x, k_y$		$K_z$	
	10 倍	10 倍	1 倍	1 倍	0.1 倍	0.1 倍
Layer 1 (地表至地表下 50~200m)	3.00 E -1	8.99 E -1	3.00 E -2	8.99 E -2	3.00 E -3	8.99 E -3
Layer 2 (Layer1 底部往下 50~200m)	3.00 E -2	8.99 E -2	3.00 E -3	8.99 E -3	3.00 E -4	8.99 E -4
Layer 3 (Layer2 底部至海平面下 400m)	3.00 E -4	3.00 E -4	3.00 E -5	3.00 E -5	3.00 E -6	3.00 E -6

於觀察點 A 位置如圖 3.2 所示， $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$  濃度隨著水力傳導係數增加上升，且濃度峰值到達時程提前， $^{226}\text{Ra}$  未有類似其母核種之變化特徵，推測是濃度團因水力傳導係數增加而外移，例如 10 倍 K 值的  $^{226}\text{Ra}$  最高濃度小於原 K 值之  $^{226}\text{Ra}$  最高濃度。

於觀察點 B 位置如圖 3.3 所示， $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{234}\text{U}$  濃度隨著水力傳導係數增加而上升， $^{230}\text{Th}$  濃度峰值由大到小依序為 K、0.1K、10K， $^{226}\text{Ra}$  濃度峰值由大到小依序為 0.1K、K、10K， $^{230}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  兩者濃度峰值皆不隨水力傳導係數增加而增長，但差異皆小於一個量級。

於觀察點 C 位置如圖 3.4 所示，濃度變化與觀察點 B 較為相近，因皆為處置設施周圍地表，唯  $^{230}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  濃度有些微差異。觀察點 D 為監控處置設施上游地表濃度變化如圖 3.5 所示，10 倍 K 值的增加導致濃度大幅上升，0.1 倍 K 值及原 K 值濃度變化相近。

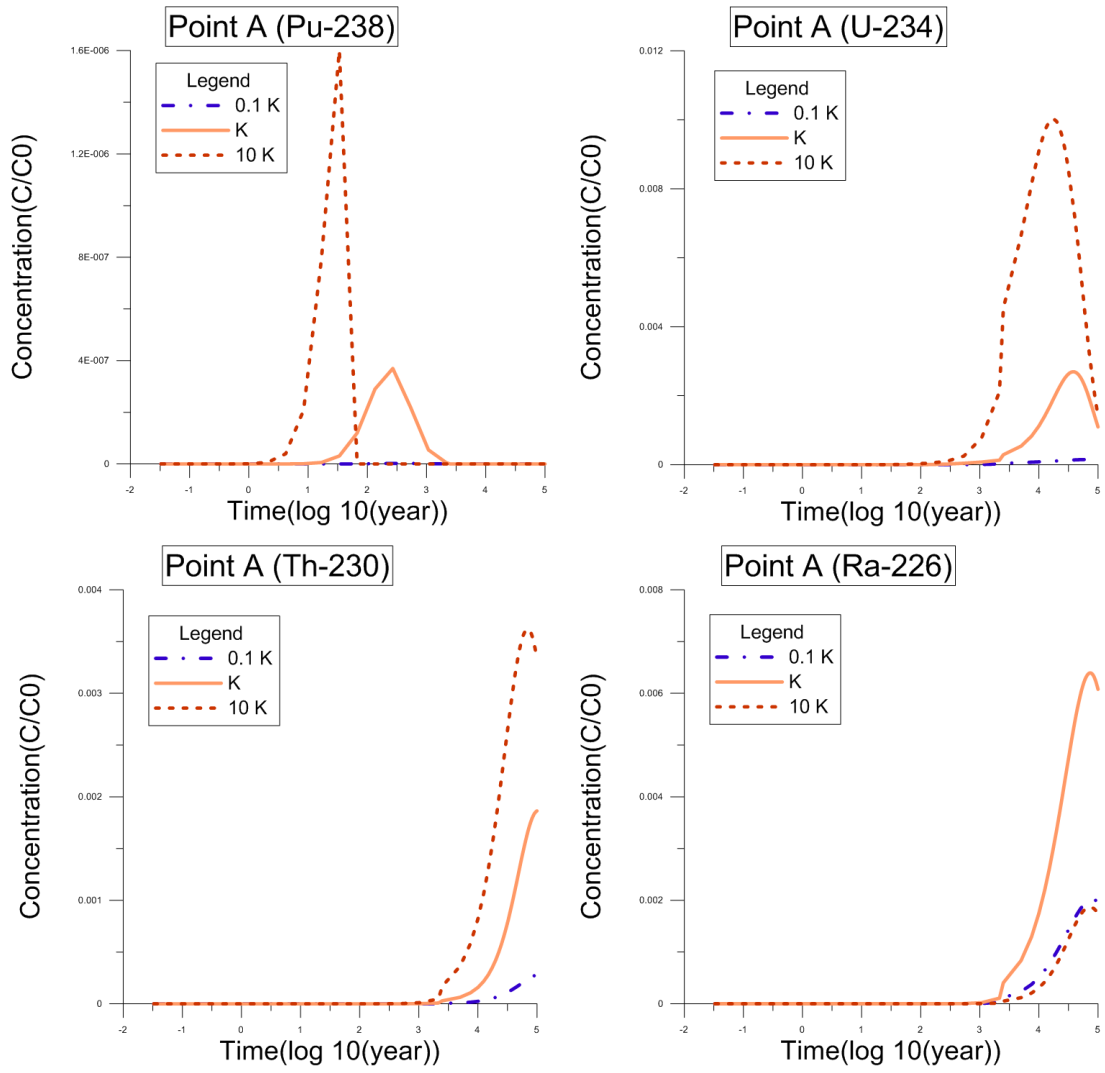


圖 3.2 不同水力傳導係數時觀察點 A 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

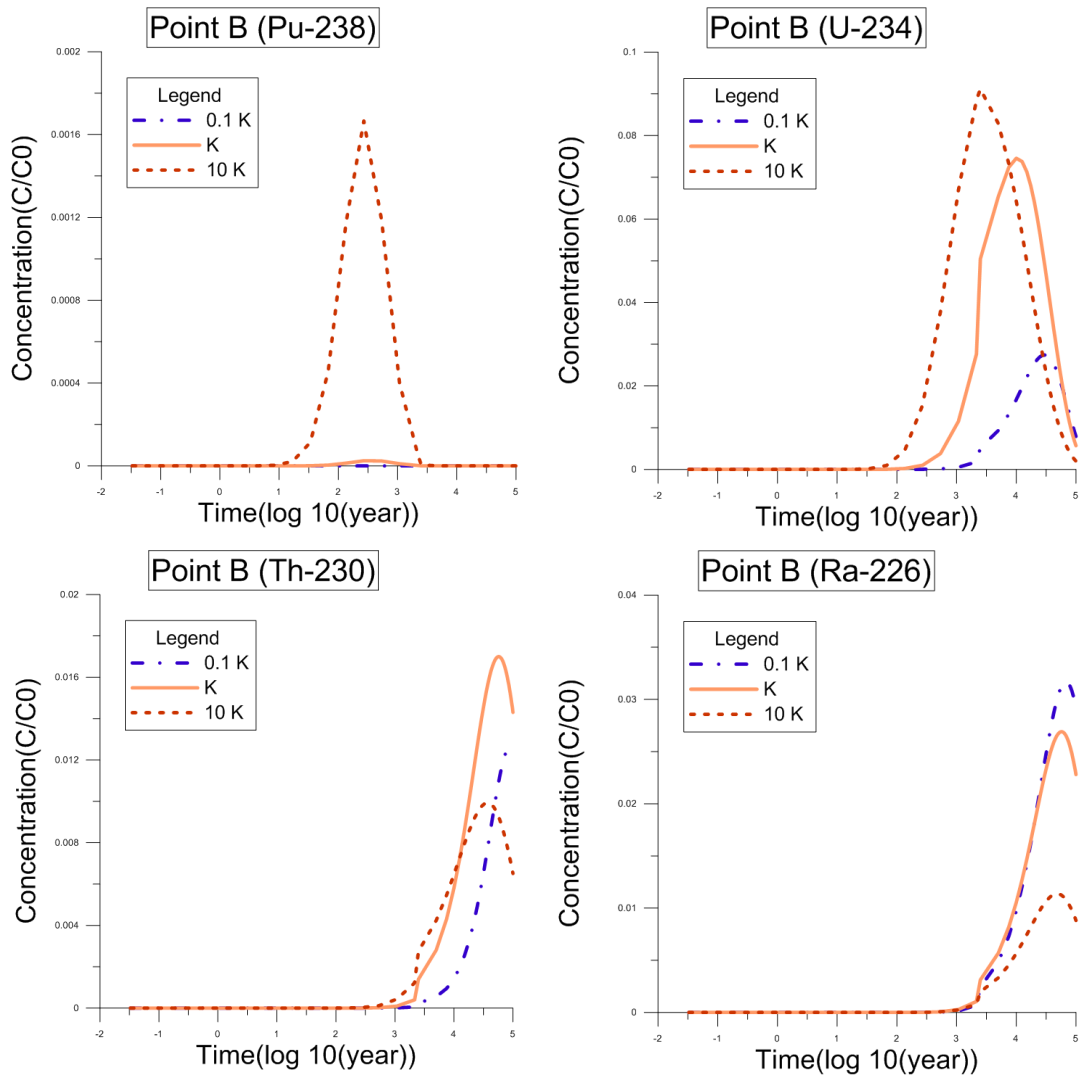


圖 3.3 不同水力傳導係數時觀察點 B 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

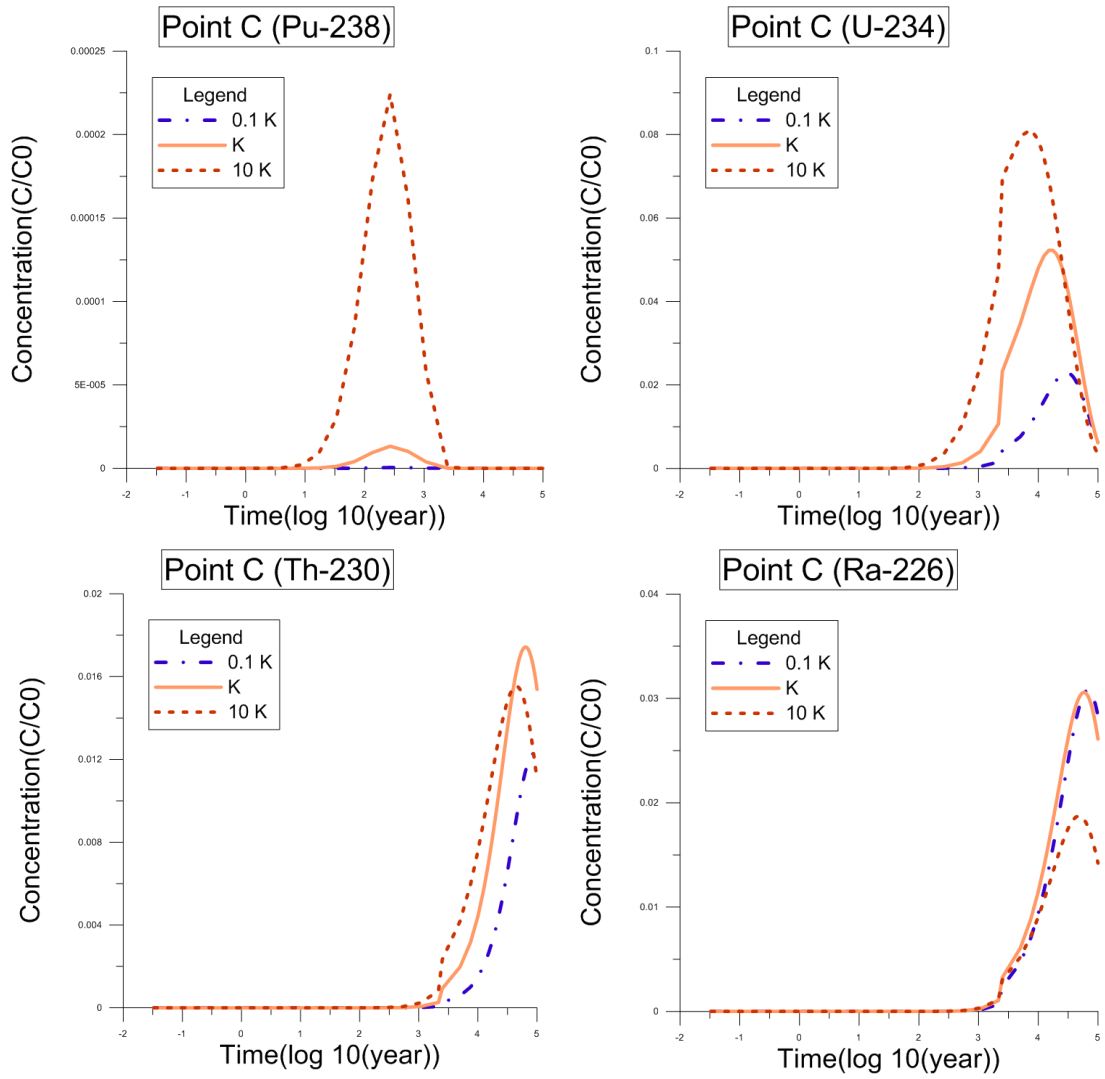


圖 3.4 不同水力傳導係數時觀察點 C 濃度圖(A) <sup>238</sup>Pu (B) <sup>234</sup>U (C) <sup>230</sup>Th (D) <sup>226</sup>Ra

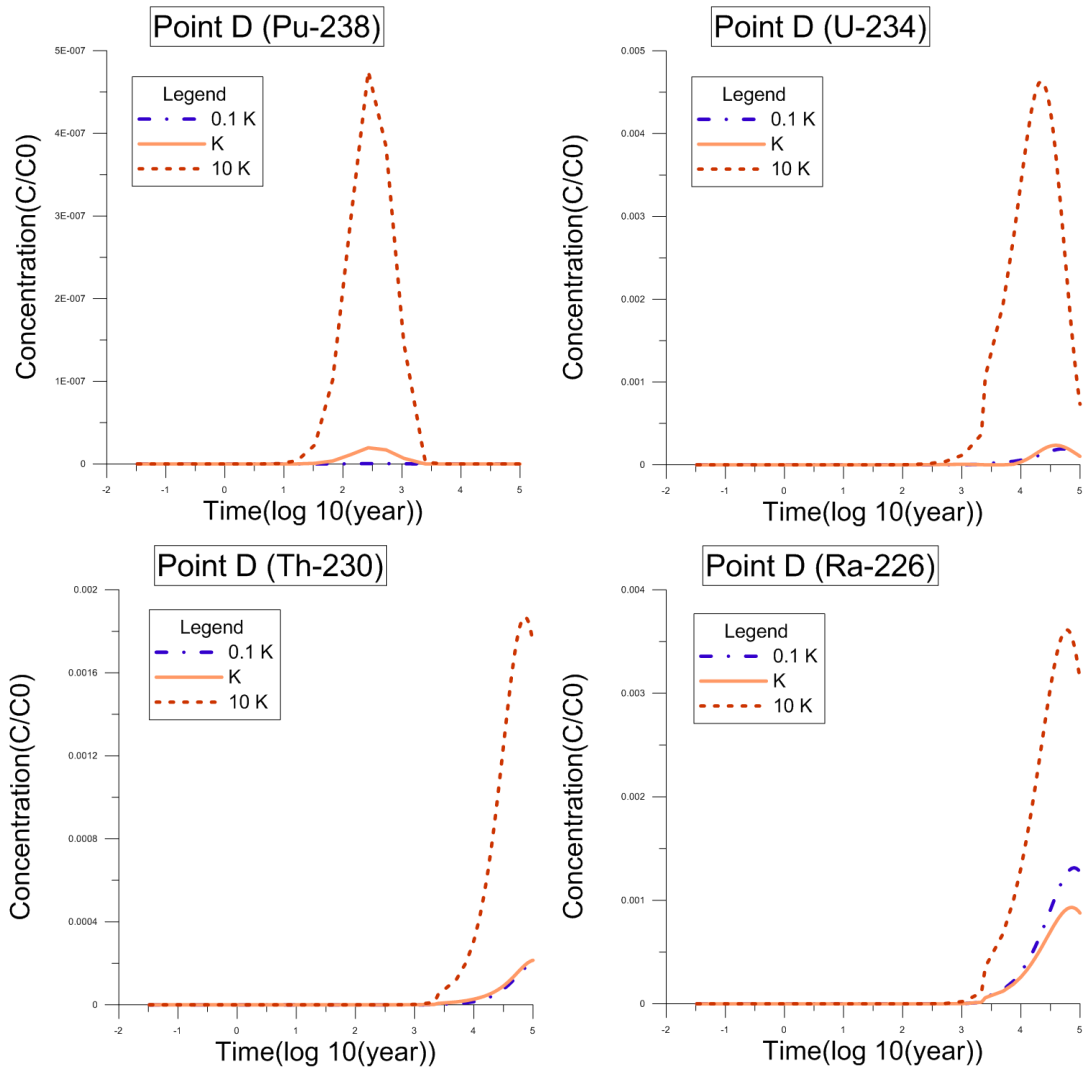


圖 3.5 不同水力傳導係數時觀察點 D 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

整體而言，時間軸的濃度峰值推進依照衰變鏈順序，K 值大小會推進濃度整體位置改變，間接影響觀測點位濃度變化，K 值的改變，對於衰變鏈較後端子核種如  $^{230}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  之濃度圍中心位置改變較為顯著。另外水力傳導係數高估或低估會對半衰期較短的核種濃度如  $^{238}\text{Pu}$  有較大的影響。



### 3.2 擴散係數之敏感度分析

此節探討擴散係數改變對於核種遷移的影響，除改變擴散係數外其餘參數皆為定值，將擴散係數調整 10 倍、1 倍、0.1 倍如表 3.3 所示，協助了解擴散係數在整體遠場核種濃度遷移模擬可能之影響程度，處置設施周圍濃度變化觀察點比照水力傳導係數敏感度分析所設觀察點。擴散係數敏感度分析結果如下圖 3.6-圖 3.9，因調整倍數後與原係數濃度差異並不突出，將  $^{238}\text{Pu}$  在各觀察點之濃度圖做為示意，得知擴散係數並非影響遠場核種傳輸之關鍵係數。

表 3.3 擴散係數參數調整

水文地質分層 \ 擴散係數( $\text{m}^2/\text{day}$ )	擴散係數 10 倍	擴散係數 1 倍	擴散係數 0.1 倍
Layer 1 (地表至地表下 50~200m)	1.0 E -3	1.0 E -4	1.0 E -5
Layer 2 (Layer1 底部往下 50~200m)	1.0 E -3	1.0 E -4	1.0 E -5
Layer 3 (Layer2 底部至海平面下 400m)	1.0 E -3	1.0 E -4	1.0 E -5

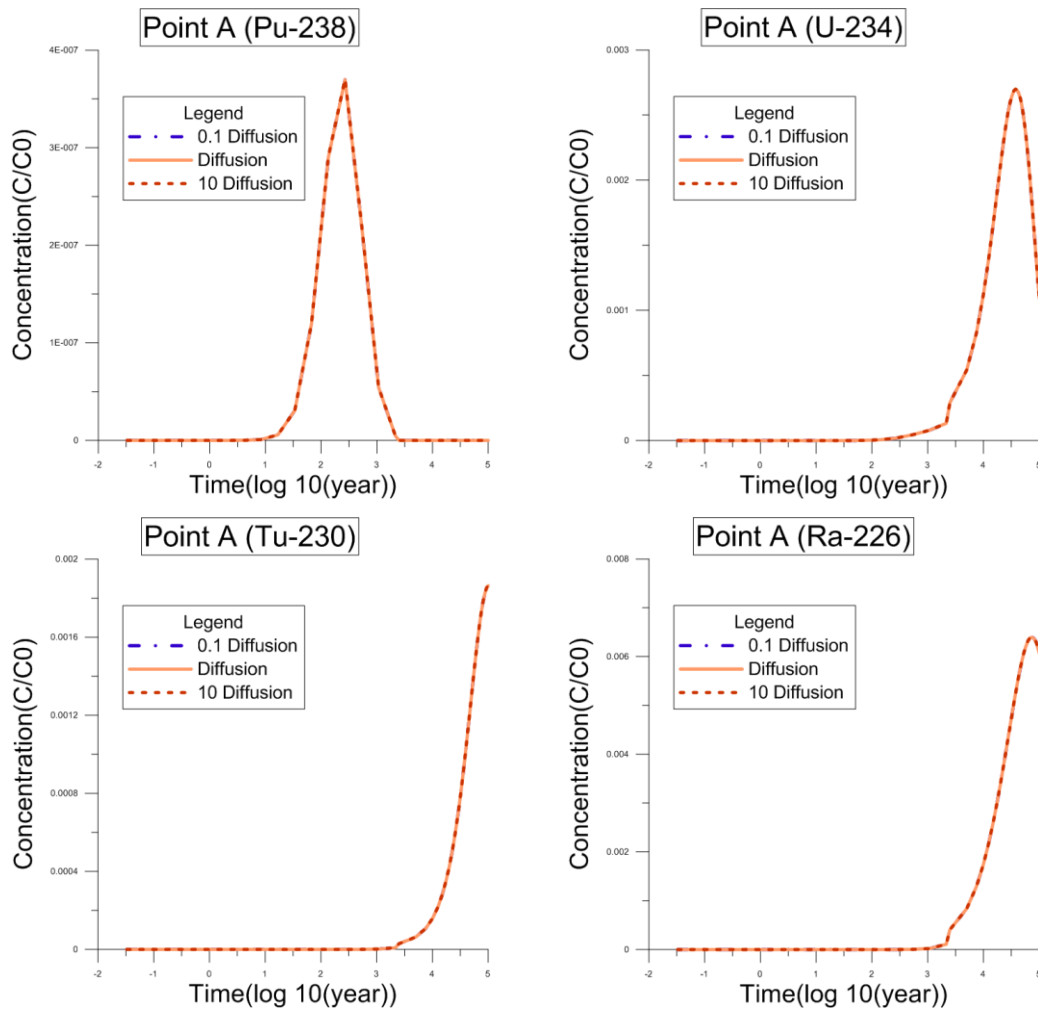


圖 3.6 不同擴散係數時觀察點 A 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

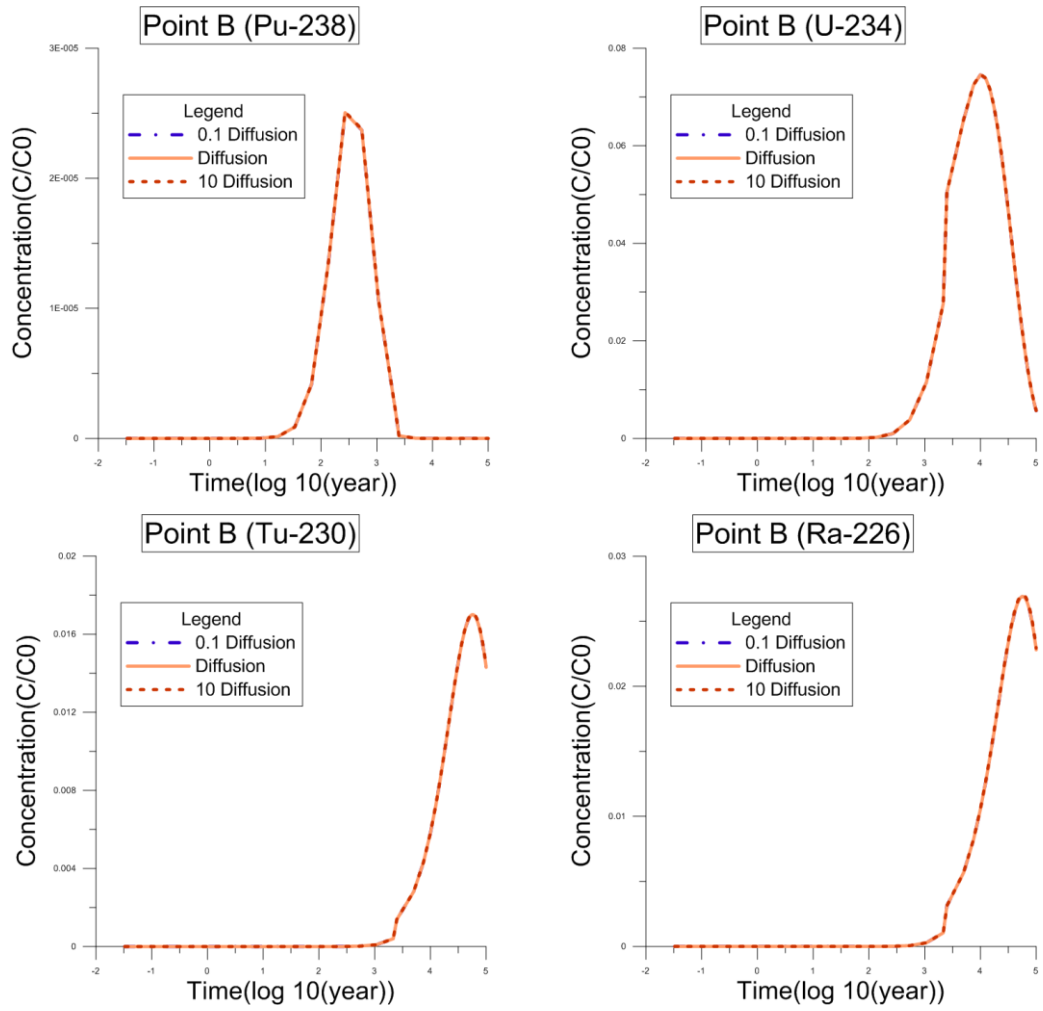


圖 3.7 不同擴散係數時觀察點 B 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

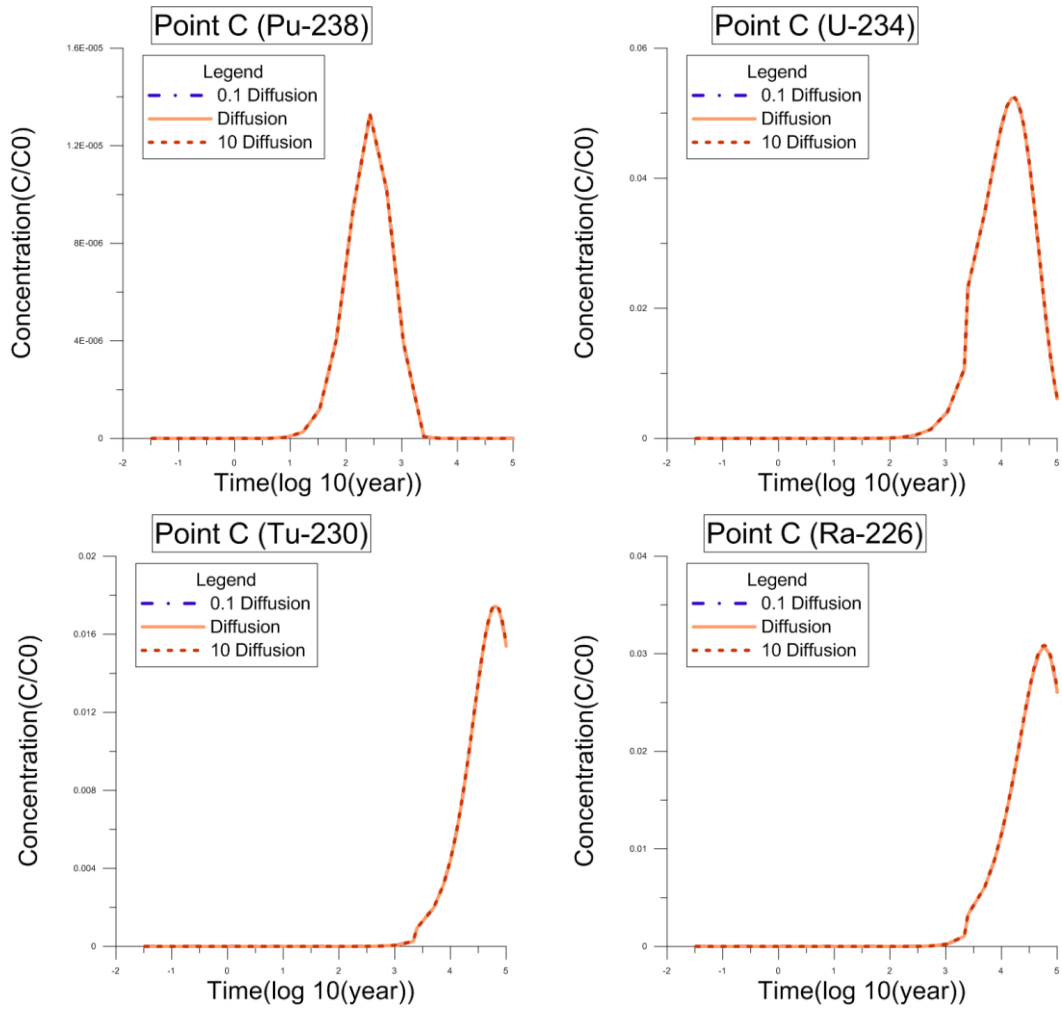


圖 3.8 不同擴散係數時觀察點 C 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

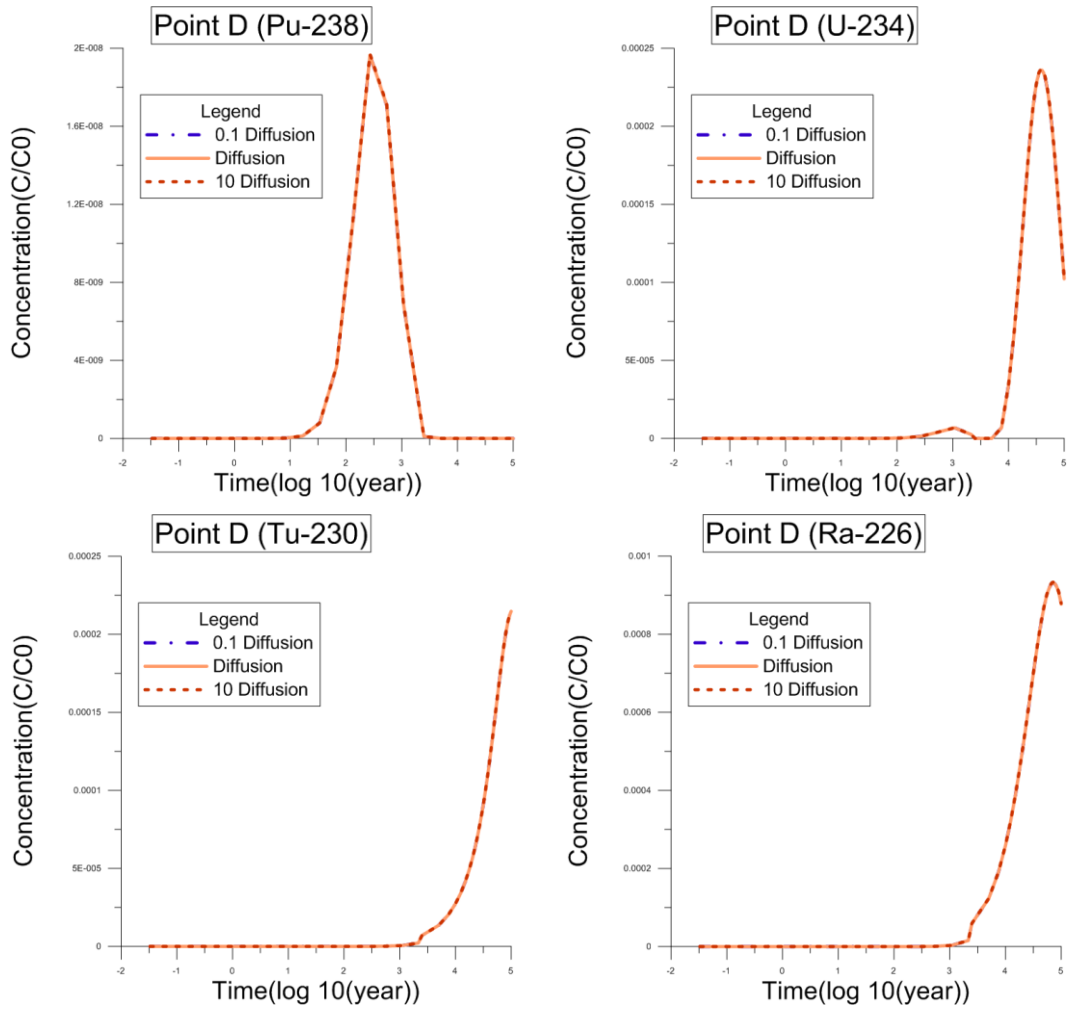


圖 3.9 不同擴散係數時觀察點 D 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

### 3.3 延散係數之敏感度分析

遠場核種傳輸中擴散係數並非影響核種濃度變化之關鍵參數，本節討論同樣為傳輸係數的延散係數做為分析參數，觀察對於遠場核種傳輸影響程度，除延散係數外之係數皆設為定值，比較將延散係數如表 3.4 整體調整 10 倍、1 倍、0.1 倍之模擬結果，處置設施周圍濃度觀察點在本敏感度分析中與其餘兩係數之敏感度分析觀察點一致，各核種濃度於觀察點 A、觀察點 B、觀察點 C、觀察點 D 如圖 3.10~圖 3.13 所示。

表 3.4 延散係數參數調整

水文地質分層	延散係數(m)		縱向延散		側向延散	
	10 倍	10 倍	1 倍	1 倍	0.1 倍	0.1 倍
Layer 1 (地表至地表下 50~200m)	8000.0	2000.0	800.0	200.0	80.0	20.0
Layer 2 (Layer1 底部往下 50~200m)	8000.0	2000.0	800.0	200.0	80.0	20.0
Layer 3 (Layer2 底部至海平面 下 400m)	8000.0	2000.0	800.0	200.0	80.0	20.0

由圖 3.10 顯示於觀察點 A 時濃度變化隨延散係數增加而增長，而濃度峰值隨延散係數增加而提前時程，差距多寡依據衰變鏈依序遞減。由圖 3.11 顯示於觀察點 B 時  $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$  濃度峰值隨同延散係數增加而提前時程，在  $^{230}\text{Th}$ ，最高濃度由大到小依序分別是原延散係數、10 倍延散係數、0.1 倍延散係數， $^{226}\text{Ra}$  最高濃度順序由大到小依序為原延散係數、0.1 倍延散係數、10 倍延散係數。而觀察點 C 與 B 點皆為處置設施上方地表，因此核種濃度變化類似。觀察點 D 與觀察點 A 同樣核種濃度變化類似，但  $^{234}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  位於觀察點 D 的最高濃度小於觀察點 A 濃度一個量級。整體而言，延散係數與水力傳導係數對於遠場核種傳輸中核種濃度分布的影響較大，可視為關鍵參數，低估或者高估關鍵參數都將對整個遠場模擬結果造成較大的影響。

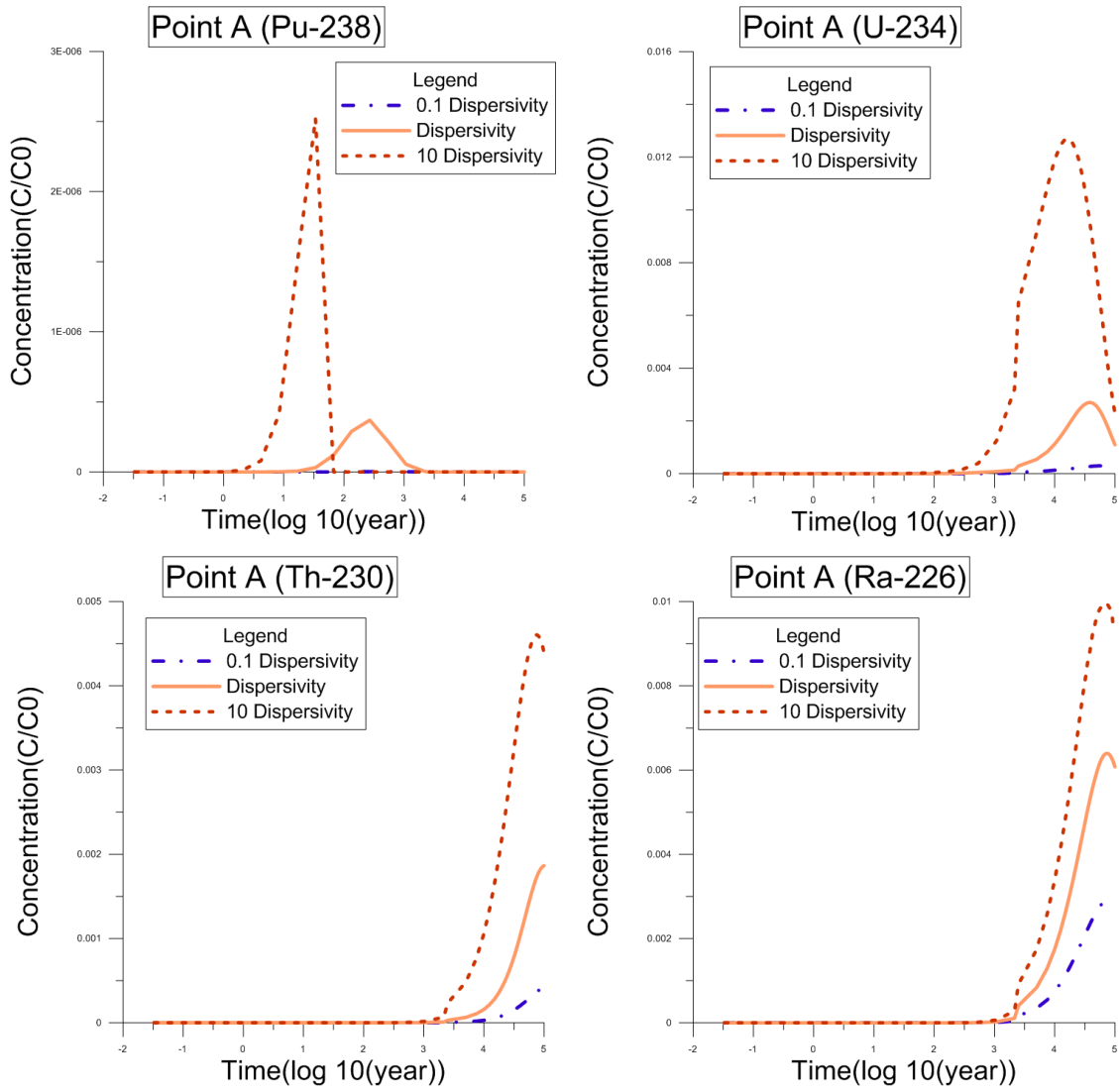


圖 3.10 不同延散係數時觀察點 A 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

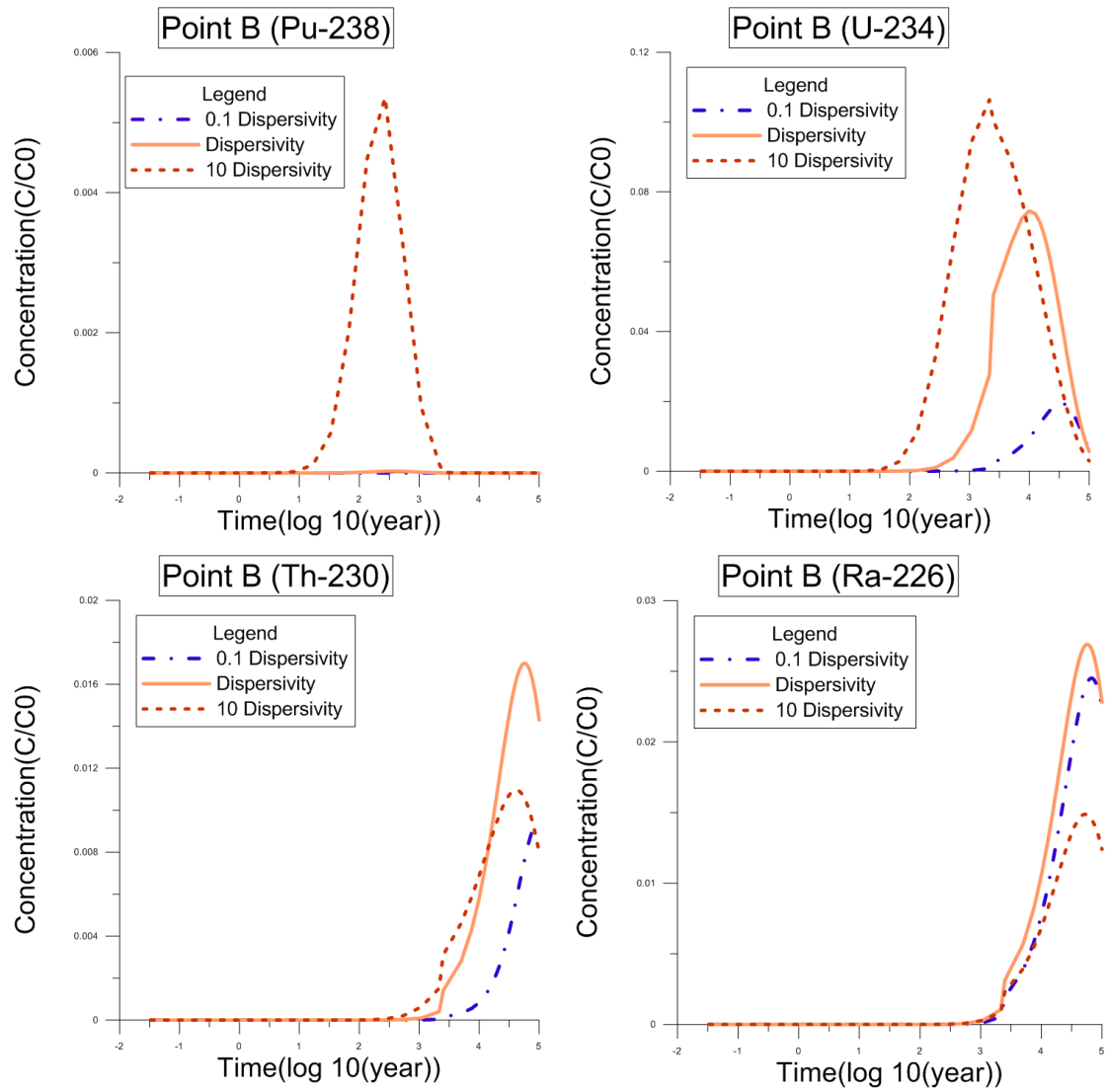


圖 3.11 不同延散係數時觀察點 B 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

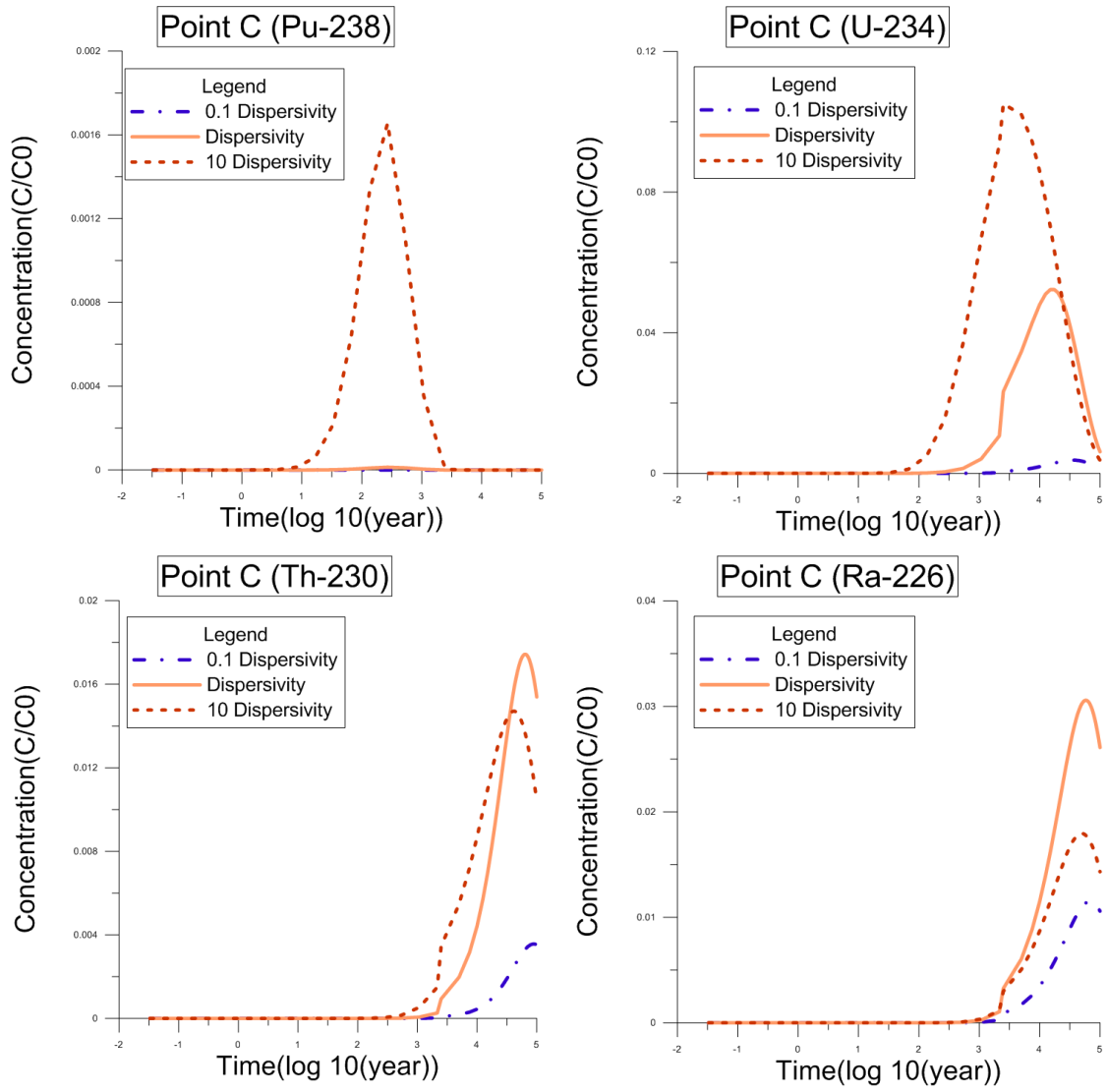


圖 3.12 不同延散係數時觀察點 C 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$



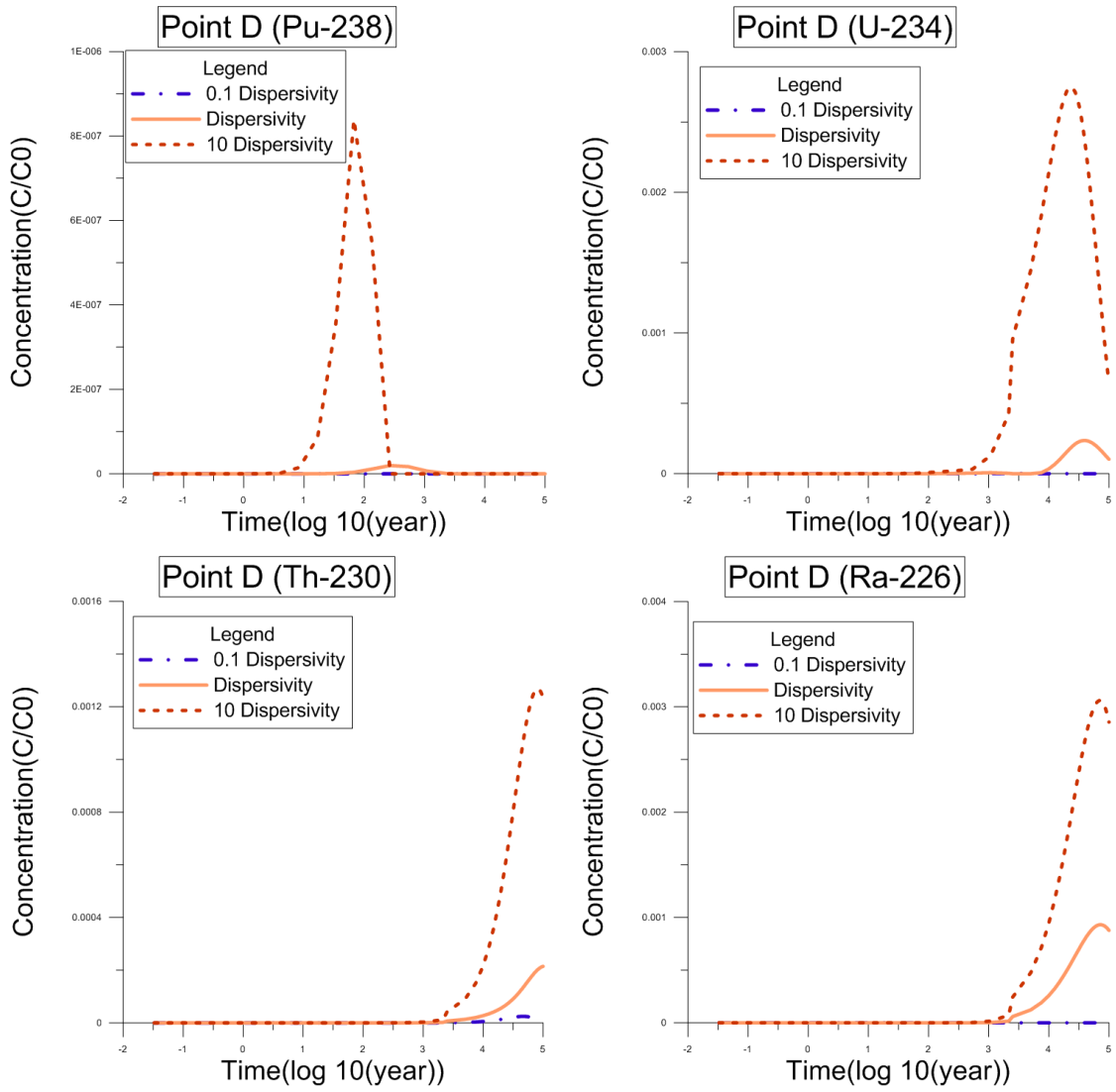


圖 3.13 不同延散係數時觀察點 D 濃度圖(A)  $^{238}\text{Pu}$  (B)  $^{234}\text{U}$  (C)  $^{230}\text{Th}$  (D)  $^{226}\text{Ra}$

### 3.4 情境變化之敏感度分析

本節針對海平面變化及入滲率改變等情境變化案例進行模擬，同時考慮在不同情境下水力傳導係數改變時濃度的變化量，以入滲率、海平面變化、水力傳導係數 3 種變數，共設計 12 種案例類型，如表 3.5 所示。其中水力傳導係數以現有參考值 10 倍、1 倍、0.1 倍為設置數據，推測入滲率因降雨或土地利用產生改變將其原年降水量 3% 更改為 10% 年降水量，海平面變化參考台灣電力公司(2016)報告顯示海平面在未來逐漸下降，因此案例設計只考慮海退情節，案例中將海平面逐漸下修，約在五千年後海平面相較於現今海平面下降 60 公尺。圖 3.11 為 12 種案例時 Pu-238 在觀察點 A 的濃度變化。

表 3.5 情境案例說明

	入滲率(%)	海平面變化	水力傳導係數
Case 1	3%	×	0.1 倍
Case 2			1 倍
Case 3			10 倍
Case 4	10%		0.1 倍
Case 5			1 倍
Case 6			10 倍
Case 7	3%	○	0.1 倍
Case 8			1 倍
Case 9			10 倍
Case 10	10%		0.1 倍
Case 11			1 倍
Case 12			10 倍

由表 3.6 所示，觀察點 A 中水力傳導係數對濃度峰值的影響依其大小依序為 10 倍、1 倍、0.1 倍，入滲率的改變對濃度峰值的影響不大，發生海退現象後濃度峰值較低，觀察點 B、C、D 較觀察點 A 接近處置設施因此唯有水力傳導係數對濃度峰值產生明顯影響。峰值到達時間由表 3.7 所示，觀察點 A 因水力傳導係數改變峰值到達時間依序為 10 倍、1 倍、0.1 倍，觀察點 B 及觀察點 D 為處置設施斜上方因此到達時間依序為水力傳導係數 10 倍、1 倍、0.1 倍，觀察點 C 為處置設施正上方地表，濃度峰值到達時間一致，並未因水力傳導係數改變而有所差異。整體而言，入滲率的增加有助於放射性核種遷移的滲透率，但同時可能稀釋放射性核種濃度，海平面下降導致觀察點 A 更加乾燥，可能產生不飽和情況導致阻礙放射性核種遷移。

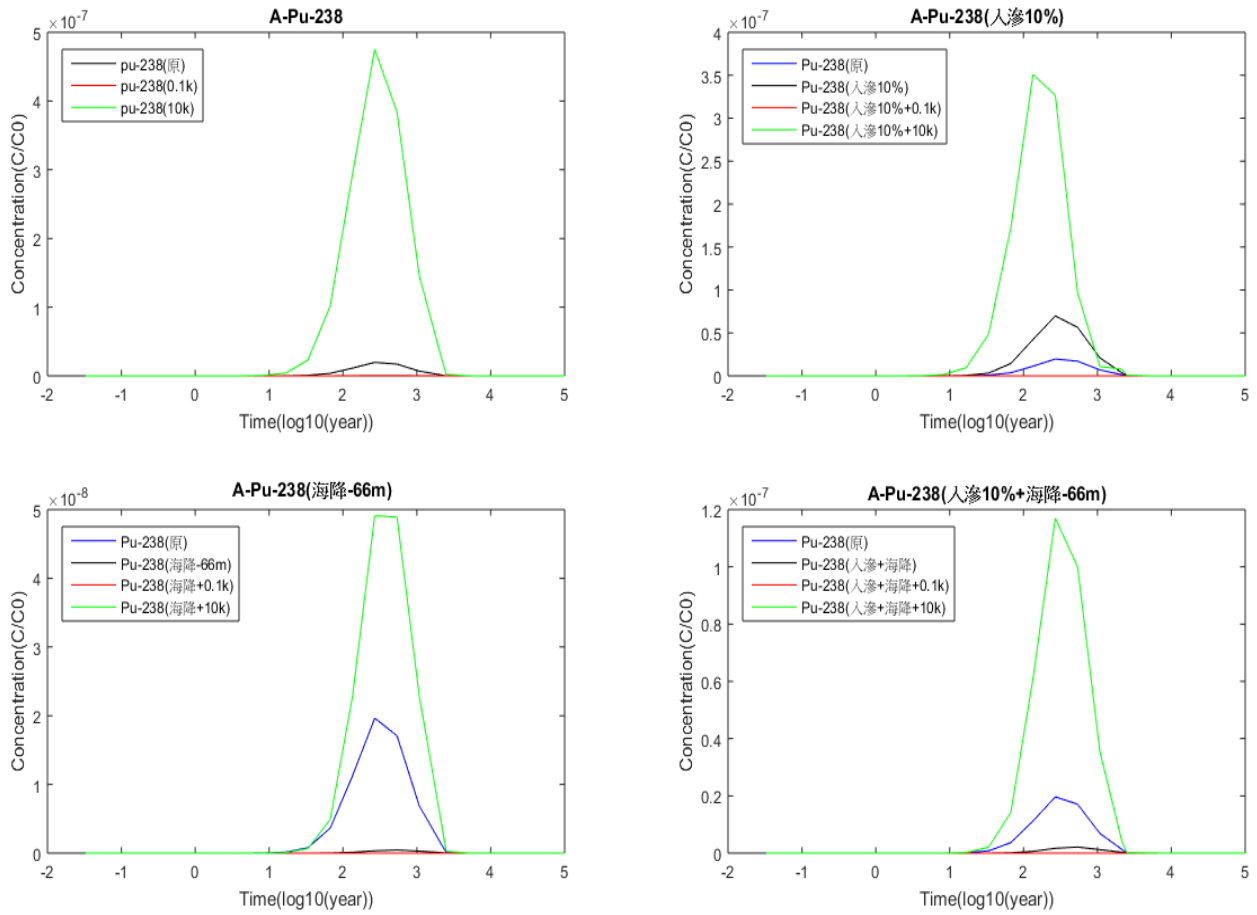


圖 3.11 觀察點 A Pu-238 濃度圖(A) Case1-3 (B) Case4-6 (C) Case7-9 (D) Case10-12

表 3.6 觀察點濃度峰值

Case	Infiltration rate	Sea level change	Hydraulic Conductivity	Point A	Point B	Point C	Point D
1	3%	×	0.1 times	$6.00 \times 10^{-11}$	$1.60 \times 10^{-07}$	$4.86 \times 10^{-07}$	$5.36 \times 10^{-10}$
2			1 times	$6.93 \times 10^{-08}$	$2.50 \times 10^{-05}$	$1.33 \times 10^{-05}$	$1.96 \times 10^{-08}$
3			10 times	$1.80 \times 10^{-06}$	$1.67 \times 10^{-03}$	$2.24 \times 10^{-04}$	$4.75 \times 10^{-07}$
4	10%		0.1 times	$6.68 \times 10^{-11}$	$1.91 \times 10^{-07}$	$7.86 \times 10^{-07}$	$8.18 \times 10^{-10}$
5			1 times	$8.39 \times 10^{-08}$	$3.67 \times 10^{-05}$	$3.39 \times 10^{-05}$	$6.98 \times 10^{-08}$
6			10 times	$2.17 \times 10^{-06}$	$2.85 \times 10^{-03}$	$5.29 \times 10^{-04}$	$3.51 \times 10^{-07}$
7	3%	○	0.1 times	$1.47 \times 10^{-12}$	$1.57 \times 10^{-07}$	$4.86 \times 10^{-07}$	$5.36 \times 10^{-10}$
8			1 times	$4.55 \times 10^{-10}$	$1.27 \times 10^{-05}$	$1.06 \times 10^{-05}$	$1.75 \times 10^{-08}$
9			10 times	$4.91 \times 10^{-08}$	$7.92 \times 10^{-04}$	$1.31 \times 10^{-04}$	$6.04 \times 10^{-07}$
10	10%		0.1 times	$1.91 \times 10^{-12}$	$1.91 \times 10^{-07}$	$7.86 \times 10^{-07}$	$8.18 \times 10^{-10}$
11			1 times	$2.12 \times 10^{-09}$	$3.30 \times 10^{-05}$	$3.39 \times 10^{-05}$	$6.97 \times 10^{-08}$
12			10 times	$1.17 \times 10^{-07}$	$1.28 \times 10^{-03}$	$3.15 \times 10^{-04}$	$3.35 \times 10^{-07}$

表 3.7 濃度峰值到達時間(year)

Case	Infiltration rate	Sea level changes	Hydraulic Conductivity	Point A	Point B	Point C	Point D
1	3%	×	0.1 times	500	500	250	500
2			1 times	250	250	250	250
3			10 times	50	250	250	250
4	10%		0.1 times	500	500	250	500
5			1 times	250	250	250	250
6			10 times	50	250	250	150
7	3%	○	0.1 times	500	500	250	500
8			1 times	500	250	250	250
9			10 times	150	250	250	250
10	10%		0.1 times	500	500	250	500
11			1 times	500	250	250	250
12			10 times	150	250	250	250

## 第四章、低放坑道處置之近場多子核種傳輸驗證技術建立

本章承接第二章 SR-PSU 所提出的模擬架構與想法，提出創新的做法來進一步發展近場模擬技術，將近場拆分為近場(處置設施)、近場(處置坑道)兩種不同空間尺度的模擬網格，主要考量近場(處置設施)相較於處置坑道的多重工程障壁來說空間尺度仍然太大，受限於計算資源使得解析度太低以致於無法有效模擬工程障壁的圍阻功能，因此建立近場(處置坑道)之較小空間尺度網格來模擬多重工程障壁功能，使用 HYDROGEOCHEM 系列數值模式(Yeh, 2009) 進行核種傳輸數值模擬，以二維有限元素網格概念化描述處置設施工程障壁系統，以達到核種遷移時多重障壁的圍阻與遲滯功能，4.1 節為近場(處置坑道)環境水文地質介紹，4.2 節為二維近岸坑道數值解之近場(處置坑道)傳輸數值模擬案例，進行近場(處置坑道)初步模擬測試，做為下一階段銜接近場(處置設施)及遠場數值模擬的基礎。

### 4.1 近場(處置坑道)環境水文地質介紹

近場主要考慮處置設施及處置坑道周圍的多重工程障壁及開挖擾動區，參考過去研究成果(經濟部，2011)的處置設施規劃圖，整個處置設施由 13 條 A 類廢棄物處置坑道及 2 條 B、C 類廢棄物處置坑道共 15 條處置坑道及四周的通行隧道組成，圖 4.1 為處置設施俯瞰圖，長寬分別為 1225 公尺、852 公尺及 20 公尺，黃色為 A 類廢棄物處置坑道深橘色為 B、C 類廢棄物處置坑道，此為近場(處置坑道)，並銜接近場(處置設施)網格模擬進行，圖中顯示 A 類及 B、C 類放射性廢棄物之處置坑道之位置分布。

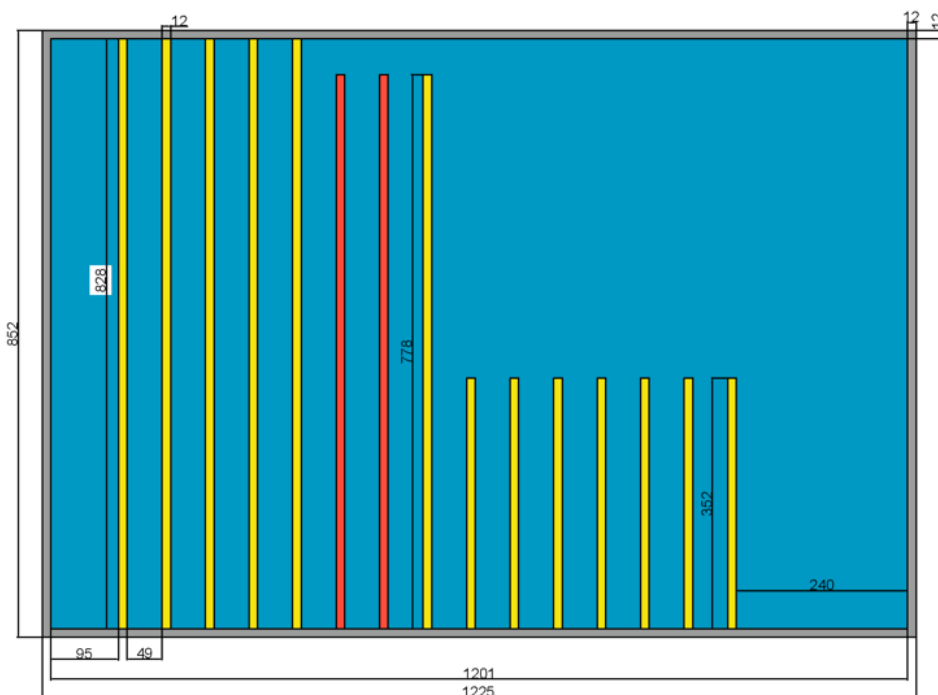


圖 4.1 近岸坑道處置設施俯視圖

存放 A 類放射性廢棄物及 B、C 類放射性廢棄物之處置坑道剖面圖如圖 4.2、圖 4.3 所示 (來源：「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」, 2016, 台灣電力公司), A 類處置坑道剖面由內而外分別為廢棄物體、水泥砂漿、處置窖、回填材料、二次襯砌、基礎層、擾動區等七種材質, B、C 類處置坑道剖面由內而外分別為盛裝容器、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, 各材質水文及傳輸參數如表 4.1 所示, 處置坑道寬與高為 12 公尺、11 公尺, 而中間黃色區塊的盛裝容器部分為放置 55 加侖桶位置, 進行近場(處置坑道)核種傳輸模擬時將做為核種的源項區塊。

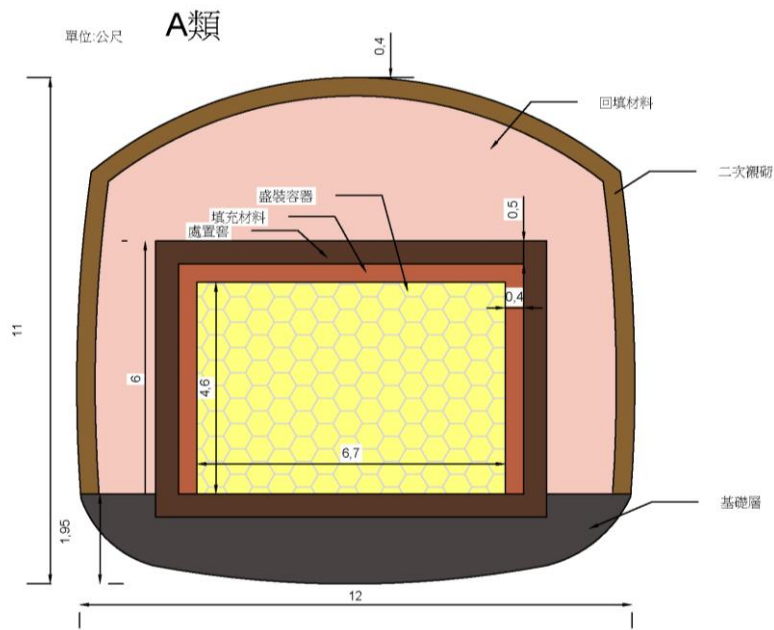


圖 4.2 A 類廢棄物處置坑道剖面圖(來源：台灣電力公司，2016)

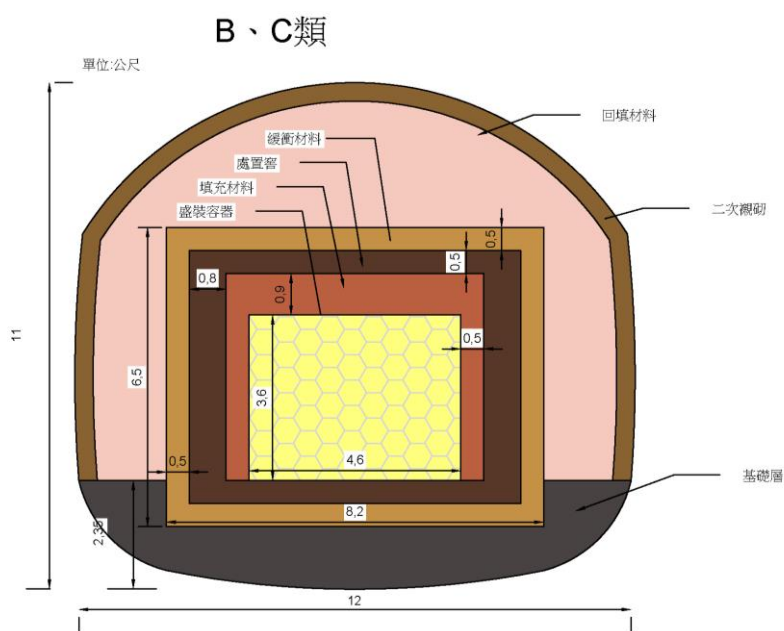


圖 4.3 B、C 類廢棄物處置坑道剖面圖(來源：台灣電力公司，2016)

表 4.1 近場(處置坑道)8 種障壁材質之水文與傳輸參數

組件	孔隙率 (-)	$k_x, k_y, k_z$ (m/day)	擴散係數 $D$ (m <sup>2</sup> /day)	縱向延散 (m)	側向延散 (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
水泥砂漿	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

近場(處置坑道)部分採用二維網格，如此在簡化計算資源時同時也達到核種外釋時多重障壁的圍阻遲滯功能，接著根據處置坑道剖面圖，利用 GMS 水文環境工具將其網格化，近場(處置坑道)寬度為 60 公尺(處置坑道本身寬度及距離隔壁坑道間距)，高度為 20 公尺，為了更符合處置坑道剖面為蛋型的部分，因此中間區塊的網格使用三角網格，近場(處置坑道)二維網格如圖 4.4 所示，共 1005 個點及 838 個元素所構成。

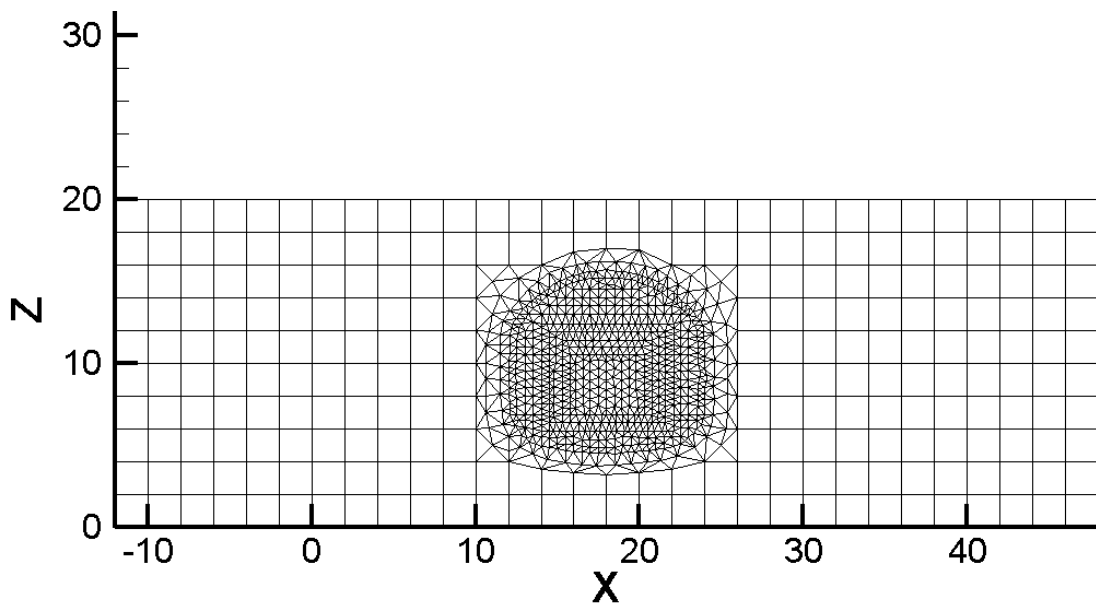


圖 4.4 近場(處置坑道)二維網格

## 4.2 二維案例數值解之近場(處置坑道)傳輸數值模擬

基本情節設定假設近場(處置坑道)中假設外部無核種流入，核種源項為處置坑道中心的廢棄物體。地下水模擬部分，利用遠場流經處置坑道水頭值做為四周 Dirichlet 邊界水頭，流場邊界如圖 4.5 所示。傳輸邊界條件，四周邊界設定為零活度梯度，核種相對活度皆為 0，採用變動邊界條件(variable boundary condition)，傳輸邊界條件如圖 4.6 所示。所謂傳輸的變動邊界條件在 HYDROGEOCHEM 中的運算過程為，當流場方向為由模擬場域內部向外，則傳輸邊界條件採用零活度梯度邊界(zero concentration gradient)也就是內部核種活度將隨流場帶出模擬區域，而當流場方向為由外部流向內部模擬區域，則邊界條件自動設定為通量邊界(flux type)，將由外部核種活度(本案例為 0)乘上流入的流量為邊界條件。

近場(處置坑道)核種傳輸共進行三個案例的模擬，案例 1 與案例 2 主要觀察近場(處置坑道)流場及傳輸分佈特徵，核種外釋部分先不考慮核衰變，假設源項為固定相對活度 1，案例 1 為穩態流場及穩態傳輸模擬，案例 2 為穩態流場及暫態傳輸模擬。案例 3 為多條核種衰變鏈之穩態流場及暫態傳輸模擬，觀察暫態傳輸模擬之各法規核種，因核種衰變鏈與近場傳輸機制交互影響下，核種衰變鏈相對活度時空分布情形。

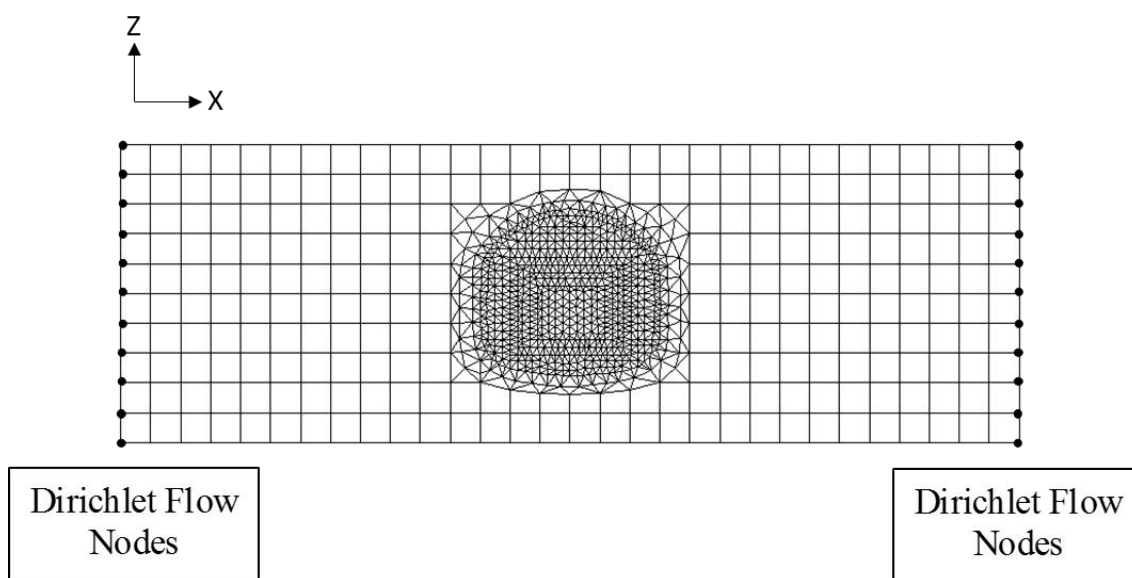


圖 4.5 近場(處置坑道)流場邊界條件



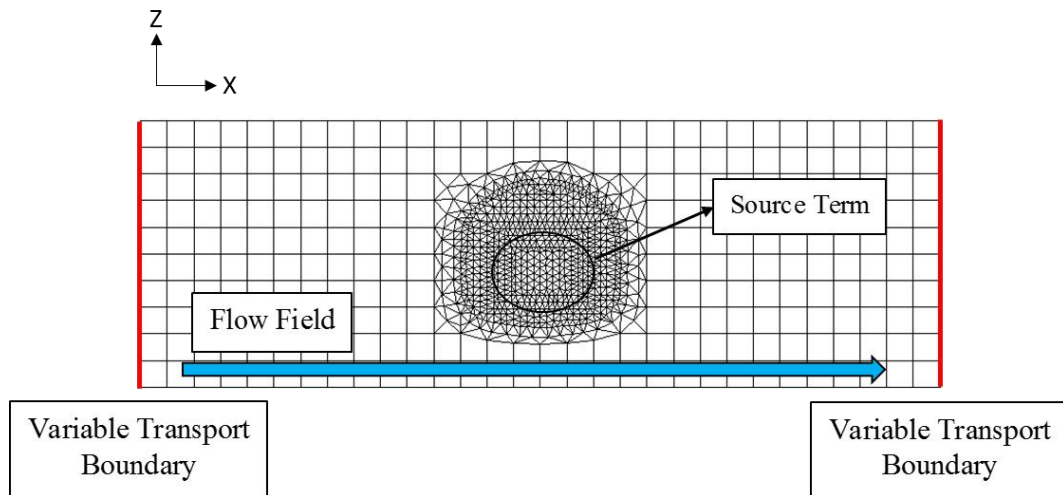


圖 4.6 近場(處置坑道)傳輸邊界條件

#### 4.2.1 案例 1—穩態流場及穩態傳輸案例

近場(處置坑道)的優勢流場為由左至右(西向東)，近場(處置坑道)內地下水流速大約為  $3.54E-06 \sim 6.14E-09$  (m/day)，A 類廢棄物處置坑道與 B、C 類廢棄物處置坑道的主要差異來自於 B、C 類廢棄物處置坑道多了一層工程障壁：緩衝材料，緩衝材料的水力傳導係數相對於其他種類的工程障壁材質大約為百分之一至千分之一，導致兩種坑道的總水頭及流速分布出現不同結果，B、C 類廢棄物處置坑道內平均流速低於 A 類廢棄物處置坑道內平均流速 47 倍左右 ( $9.74E-09$  (m/day) 與  $4.58E-07$  (m/day))，穩態傳輸上觀察到核種在 A 類廢棄物處置坑道中向右方隨流場方向外釋，而 B、C 類廢棄物處置坑道中核種活度大部分留在處置坑道內，少量核種以處置坑道為中心向四周擴散，圖 4.7 為近場(A 類廢棄物處置坑道)壓力水頭分布，圖 4.8 為近場(B、C 類廢棄物處置坑道)壓力水頭分布，圖 4.9 為近場(A 類廢棄物處置坑道)流場與總水頭分布，圖 4.10 為近場(B、C 類廢棄物處置坑道)流場與總水頭分布，圖 4.11 為近場(A 類廢棄物處置坑道)核種相對活度分布圖，圖 4.12 為近場(B、C 類廢棄物處置坑道)核種相對活度分布圖。

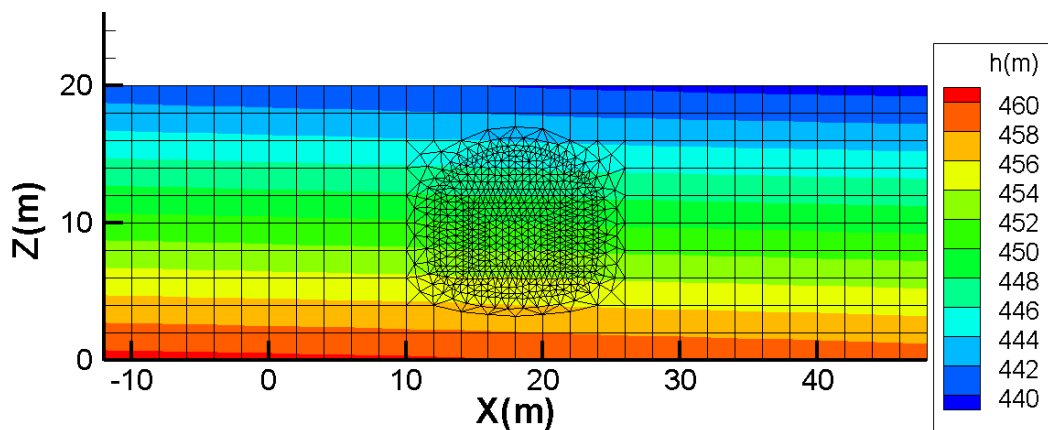


圖 4.7 案例 1—A 類廢棄物處置坑道壓力水頭分布圖

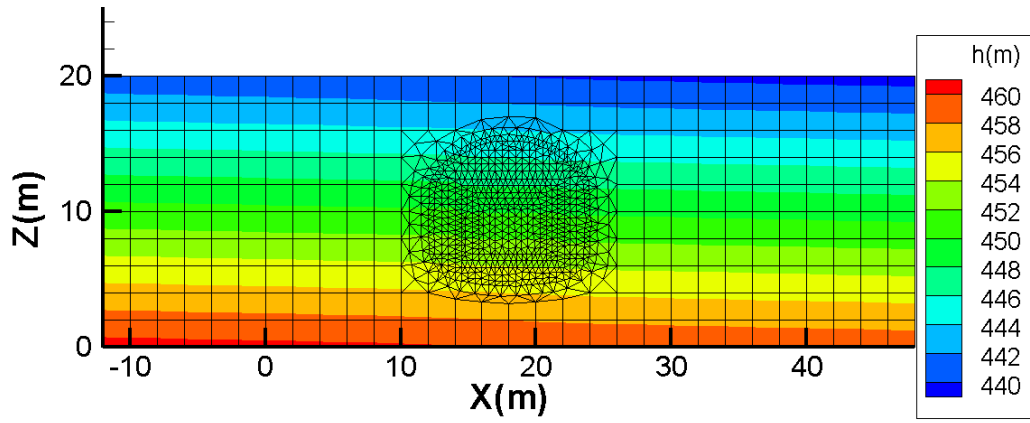


圖 4.8 案例 1-B、C 類廢棄物處置坑道壓力水頭分布圖

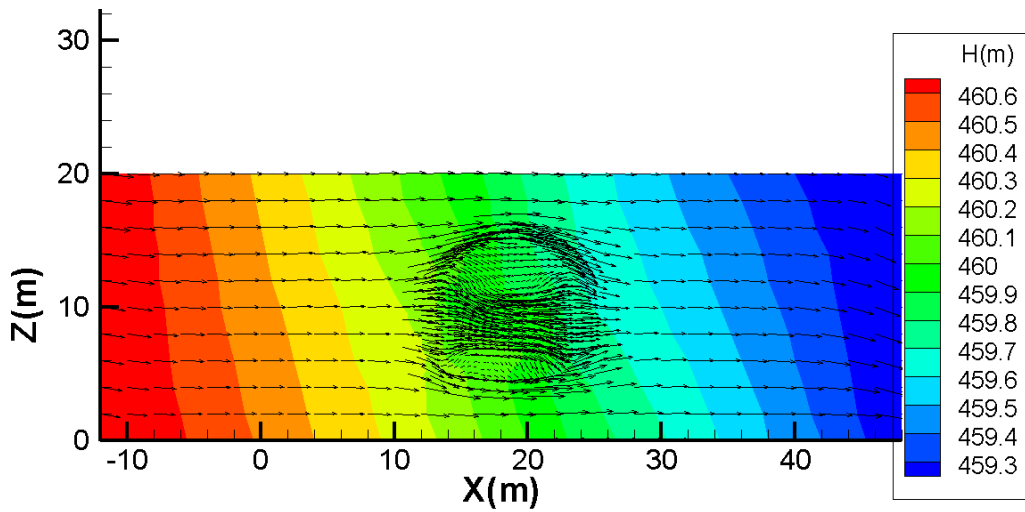


圖 4.9 案例 1-A 類廢棄物處置坑道流場與總水頭圖

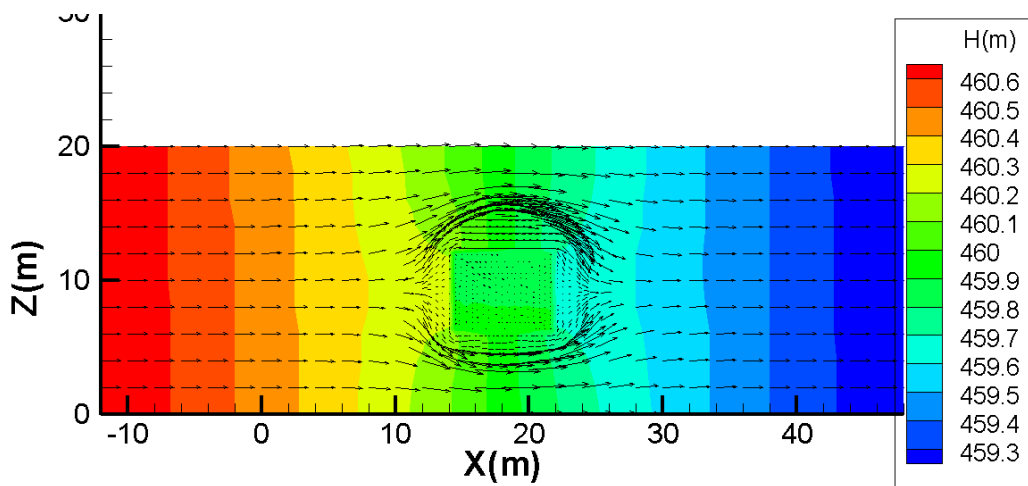


圖 4.10 案例 1-B、C 類廢棄物處置坑道流場與總水頭圖

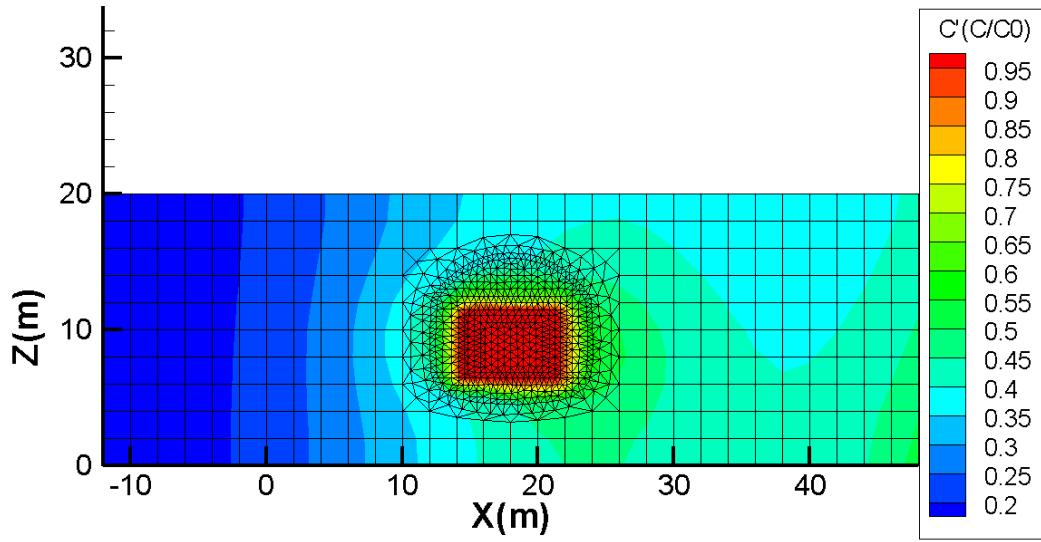


圖 4.11 案例 1—A 類廢棄物處置坑道相對活度分布圖

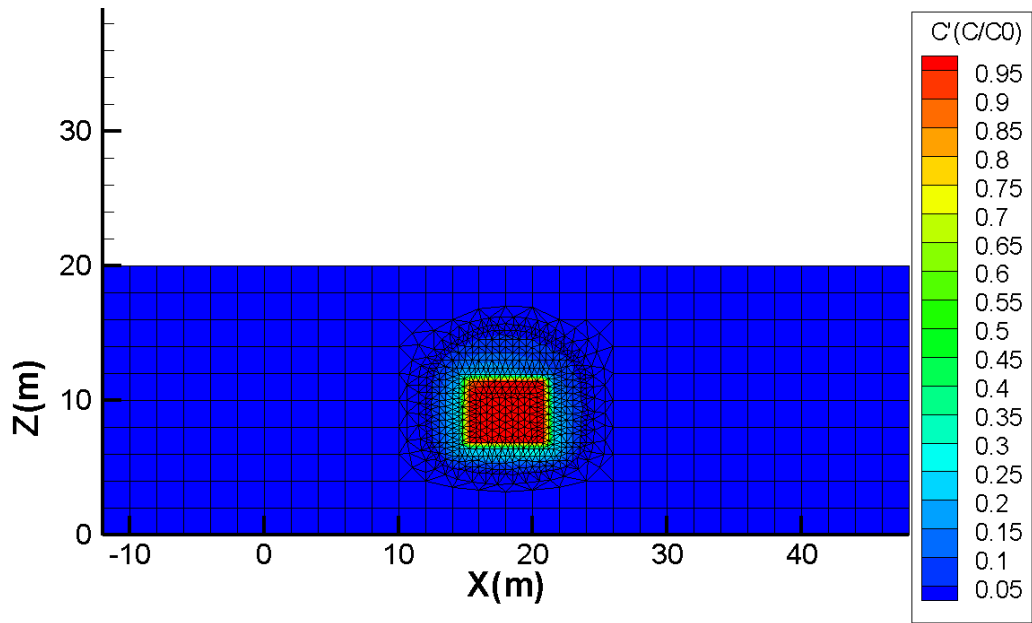


圖 4.12 案例 1—B、C 類廢棄物處置坑道相對活度分布圖

## 4.2.2 案例 2—穩態流場及暫態傳輸案例

圖 4.13、圖 4.14、圖 4.15 為 A 類廢棄物處置坑道模擬 1 年、100 年、1,000 年後相對活度分布情形，圖 4.16、圖 4.17、圖 4.18 則為 B、C 類廢棄物處置坑道模擬 1 年、100 年、1,000 年後相對活度分布情形。在近場(處置坑道)中，可發現 A 類廢棄物處置坑道在 1~100 年時核種多集中於處置坑道內，接著在 100 年~1,000 年間核種以處置坑道為中心向四周外釋，而受到流場影響，核種於右側外釋量多於左側，B、C 類廢棄物處置坑道由於多重工程障壁的不同，核種外釋相對 A 類廢棄物處置坑道緩慢許多，即便模擬時間到 1,000 年大部分核種仍集中於處置坑道內。

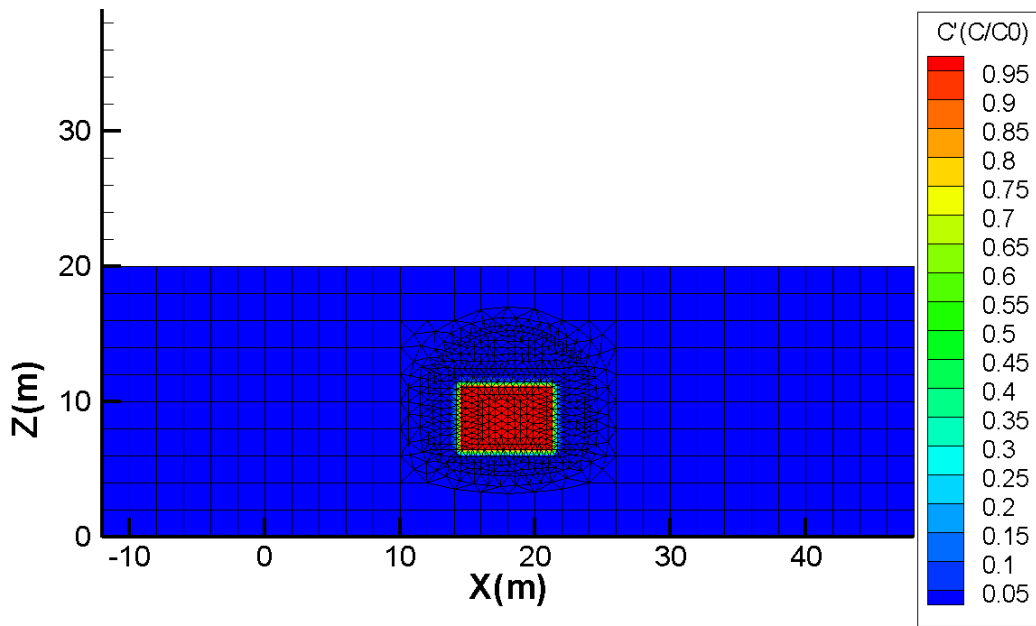


圖 4.13 案例 2—A 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(1 年)

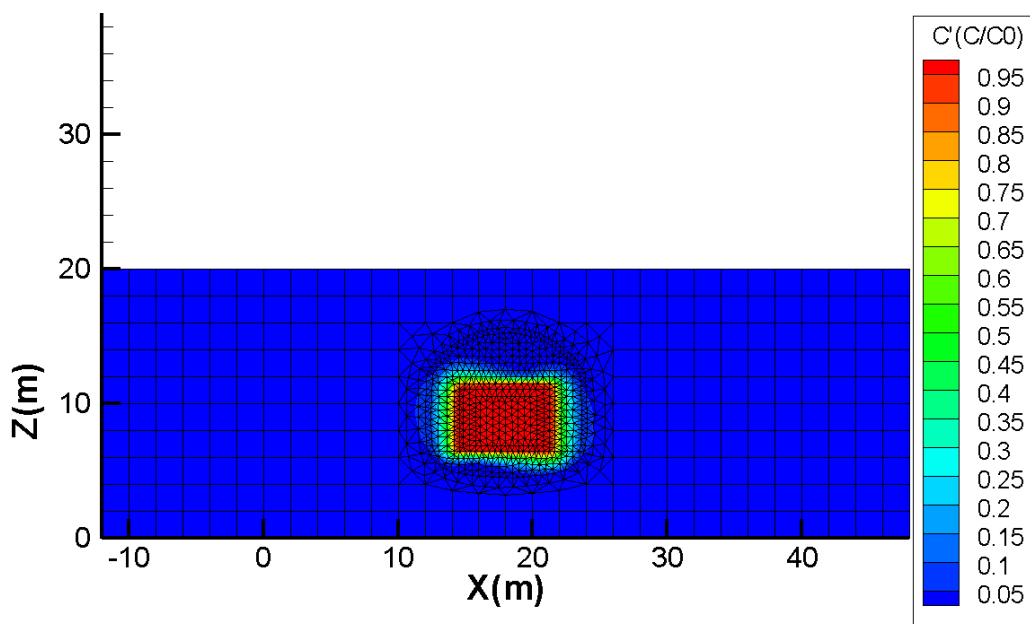


圖 4.14 案例 2—A 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(100 年)

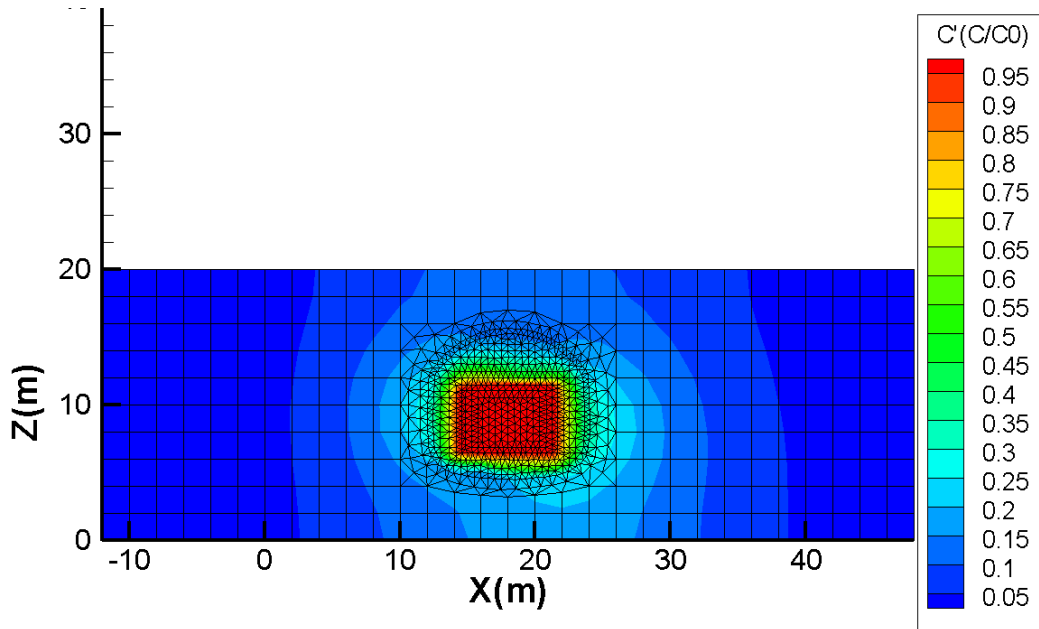


圖 4.15 案例 2—A 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(1,000 年)

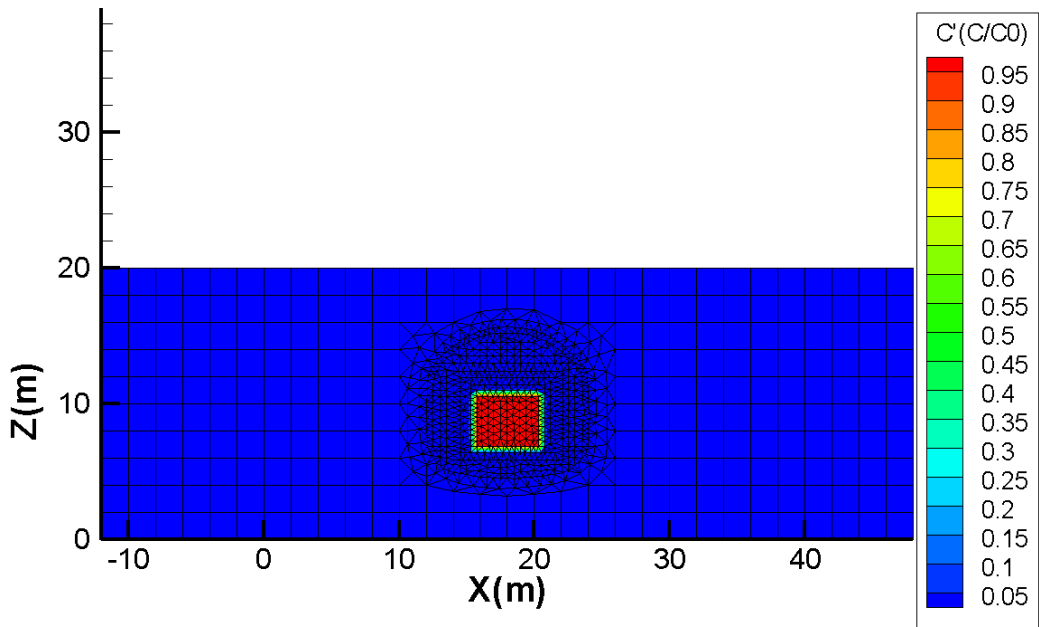


圖 4.16 案例 2—B、C 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(1 年)

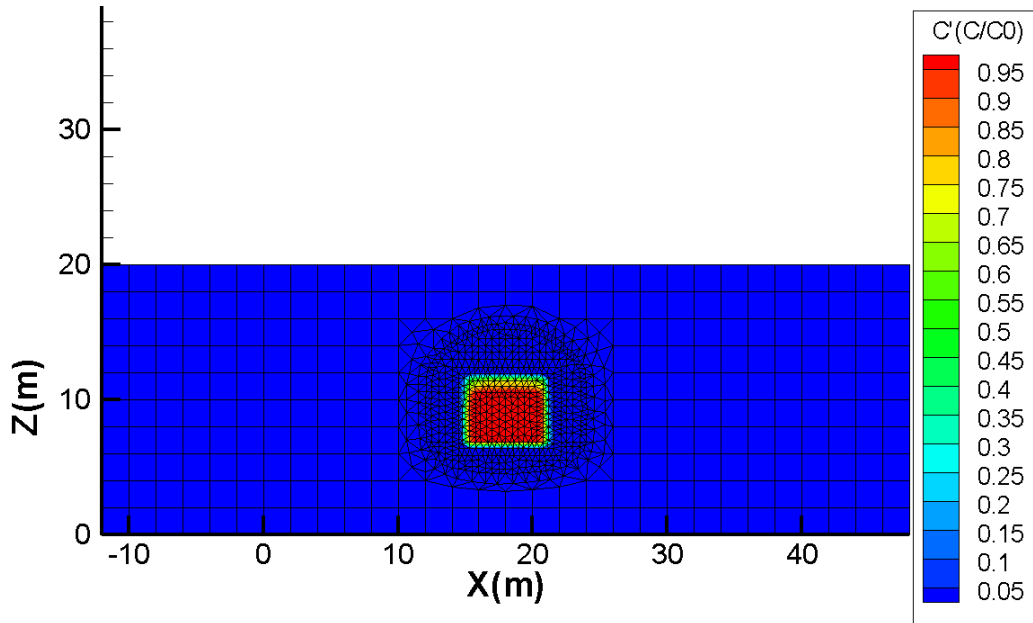


圖 4.17 案例 2-B、C 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(100 年)

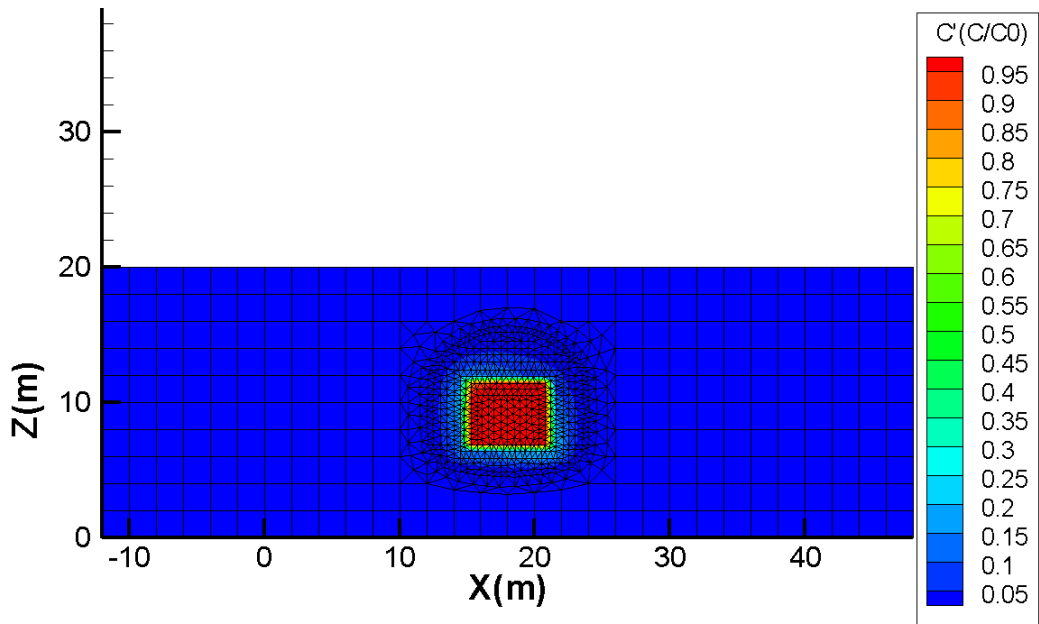


圖 4.18 案例 2-B、C 類廢棄物處置坑道核種相對活度分布圖(1,000 年)

### 4.2.3 案例 3—多條核衰變鏈案例

案例 3 為多條核衰變鏈傳輸模擬，核種採用 12 條法規核種衰變鏈，所依據之法規為「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，12 條衰變鏈分別為

1.  $^{242}\text{Cm} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$
2.  $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am} \rightarrow ^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{Pa} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th} \rightarrow ^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac} \rightarrow ^{221}\text{Fr} \rightarrow ^{217}\text{At} \rightarrow ^{213}\text{Bi} \rightarrow ^{213}\text{Po} \rightarrow ^{209}\text{Pb} \rightarrow ^{209}\text{Bi}$
3.  $^{99}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Ru}$
4.  $^{94}\text{Nb} \rightarrow ^{94}\text{Mo}$
5.  $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$
6.  $^{129}\text{I} \rightarrow ^{129}\text{Xe}$
7.  $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba}$
8.  $^{59}\text{Ni} \rightarrow ^{59}\text{Co}$
9.  $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$
10.  $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Zr}$
11.  $^{63}\text{Ni} \rightarrow ^{63}\text{Cu}$
12.  $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$ ，

皆為 4N 半衰期核種之衰變鏈，核種之吸附常數參考前人研究成果(台灣電力公司,2016)，所有核種之衰變常數及在各材質吸附常數如表 4.2、表 4.3，部分核種於某些材質中無相關吸附常數資料，則採取保守估計假設無吸附現象，並採用穩態流場與暫態傳輸觀察各核種活度外釋情形。

表 4.2 案例 3—12 條核種衰變鏈參數(1~2 條)

第 1 條	衰變常數 (1/day)	K <sub>d</sub> (m <sup>3</sup> /kg)		
		水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
<sup>242</sup> Cm	4.26E-03	250	1000	5000
<sup>238</sup> Pu	2.16E-05	250	5000	50
<sup>234</sup> U	7.73E-09	250	5	5
<sup>230</sup> Th	2.52E-08	250	1000	1000
<sup>226</sup> Ra	1.19E-06	1.25	1	500
<sup>222</sup> Rn	1.81E-01	0	0	0
<sup>218</sup> Po	3.47E+02	0	0	0
<sup>214</sup> Pb	3.47E+01	12.5	50	100
<sup>214</sup> Bi	4.95E+01	0	0	0

<sup>214</sup> Po	3.65E+08	0	0	0
<sup>210</sup> Pb	8.54E-05	12.5	50	100
<sup>210</sup> Bi	1.38E-01	0	0	0
<sup>210</sup> Po	5.01E-03	0	0	0
<sup>206</sup> Pb	Stable	12.5	50	100
<b>第 2 條</b>				
<sup>241</sup> Pu	1.32E-04	250	5000	50
<sup>241</sup> Am	4.39E-06	250	1000	5000
<sup>237</sup> Np	8.83E-10	250	5	5
<sup>233</sup> Pa	2.57E-02	250	1000	5
<sup>233</sup> U	1.19E-08	250	5	5
<sup>229</sup> Th	2.58E-07	250	1000	1000
<sup>225</sup> Ra	4.64E-02	1.25	1	500
<sup>225</sup> Ac	6.96E-02	250	1000	5000
<sup>221</sup> Fr	2.31E+02	0	0	0
<sup>217</sup> At	1.87E+06	0	0	0
<sup>213</sup> Bi	2.17E+01	0	0	0
<sup>213</sup> Po	1.41E+10	0	0	0
<sup>209</sup> Pb	4.95E+00	12.5	50	100
<sup>209</sup> Bi	Stable	0	0	0



表 4.3 案例 3-12 條核種衰變鏈參數(3~12 條)

第 3 條	衰變常數 (1/day)	K <sub>d</sub> (m <sup>3</sup> /kg)		
		水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
<sup>99</sup> Tc	9.04E-09	0.3	0	0
<sup>99</sup> Ru	Stable	0	0	0
<b>第 4 條</b>				
<sup>94</sup> Nb	9.35E-08	0	100	100
<sup>94</sup> Mo	Stable	0	0	0.1
<b>第 5 條</b>				
<sup>60</sup> Co	3.60E-04	12.5	50	10
<sup>60</sup> Ni	Stable	12.5	50	10
<b>第 6 條</b>				
<sup>129</sup> I	1.21E-10	1.25	0	0.1
<sup>129</sup> Xe	Stable	0	0	0
<b>第 7 條</b>				
<sup>137</sup> Cs	6.29E-05	2	50	50
<sup>137</sup> Ba	Stable	1	1	200
<b>第 8 條</b>				
<sup>59</sup> Ni	1.90E-08	12.5	50	10
<sup>59</sup> Co	Stable	12.5	50	10
<b>第 9 條</b>				
<sup>14</sup> C	3.33E-07	1	1	0.1
<sup>14</sup> N	Stable	0	0	0
<b>第 10 條</b>				
<sup>90</sup> Sr	6.59E-05	1	1	200
<sup>90</sup> Y	2.61E-01	0	0	0
<sup>90</sup> Zr	Stable	2500	1000	100
<b>第 11 條</b>				
<sup>63</sup> Ni	1.90E-05	12.5	50	10
<sup>63</sup> Cu	Stable	0	0	0
<b>第 12 條</b>				
<sup>3</sup> H	1.54E-04	0	0	0
<sup>3</sup> He	Stable	0	0	0

初始核種活度保守假設 A 類及 B、C 類的 55 加侖桶內，皆為法規判斷之活度上限值，再由預計存放至處置設施的運轉廢棄物及除役廢棄物計算出 A 類廢棄物為 554,020 桶，B、C 類廢棄物為 32,556 桶，推算出所有核種總活度值代入 A 類及 B、C 類廢棄物處置坑道之廢棄物體做為初始活度，核種實際活度值如表 4.4 所示。

表 4.4 案例 3—A 類及 B、C 類廢棄物核種活度總量

核種	核種活度值(TBq)	
	A 類廢棄物	B、C 類廢棄物
<sup>242</sup> Cm	1.56E+04	9.15E+03
<sup>241</sup> Pu	2.74E+03	1.61E+03
<sup>238</sup> Pu	7.79E+01	4.58E+01
<sup>137</sup> Cs	4.10E+03	1.11E+06
<sup>129</sup> I	3.32E+01	1.95E+01
<sup>99</sup> Tc	1.22E+03	7.16E+02
<sup>94</sup> Nb	8.20E+01	4.82E+01
<sup>90</sup> Sr	1.66E+02	1.69E+06
<sup>63</sup> Ni	1.58E+05	1.86E+06
<sup>60</sup> Co	2.88E+06	1.76E+06
<sup>59</sup> Ni	8.98E+04	5.27E+04
<sup>14</sup> C	3.66E+04	2.15E+04

將各衰變鏈母核種活度量作為初始活度進行近場(處置坑道)核種傳輸模擬後，計算外釋出 A 類廢棄物處置坑道及 B、C 類廢棄物處置坑道四周之 11 種關鍵核種(<sup>238</sup>Pu、<sup>241</sup>Am、<sup>99</sup>Tc、<sup>60</sup>Co、<sup>129</sup>I、<sup>137</sup>Cs、<sup>59</sup>Ni、<sup>14</sup>C、<sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y、<sup>63</sup>Ni) 活度，如圖 4.19、圖 4.20 所示，外釋的關鍵核種中又以 <sup>59</sup>Ni、<sup>14</sup>C、<sup>99</sup>Tc 活度較高，<sup>59</sup>Ni 及 <sup>99</sup>Tc 主要為其初始活度高及長半衰期因素導致，而 <sup>14</sup>C 雖然半衰期較短，但初始活度較高，且障壁對於 <sup>14</sup>C 之吸附性功能較低，導致外釋活度有較高的情形，圖 4.21~圖 4.23 為各關鍵核種在不同處置坑道的外釋比較結果，大部分情形在初始活度差不多時由於 B、C 類廢棄物處置坑道有多一層緩衝材料，工程障壁圍阻功能較好，因此 A 類廢棄物處置坑道外釋活度較高，但在 <sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 卻是 B、C 類廢棄物處置坑道外釋活度較高，主因為 <sup>90</sup>Sr 在 B、C 類的初始活度為高出 A 類 10000 倍。

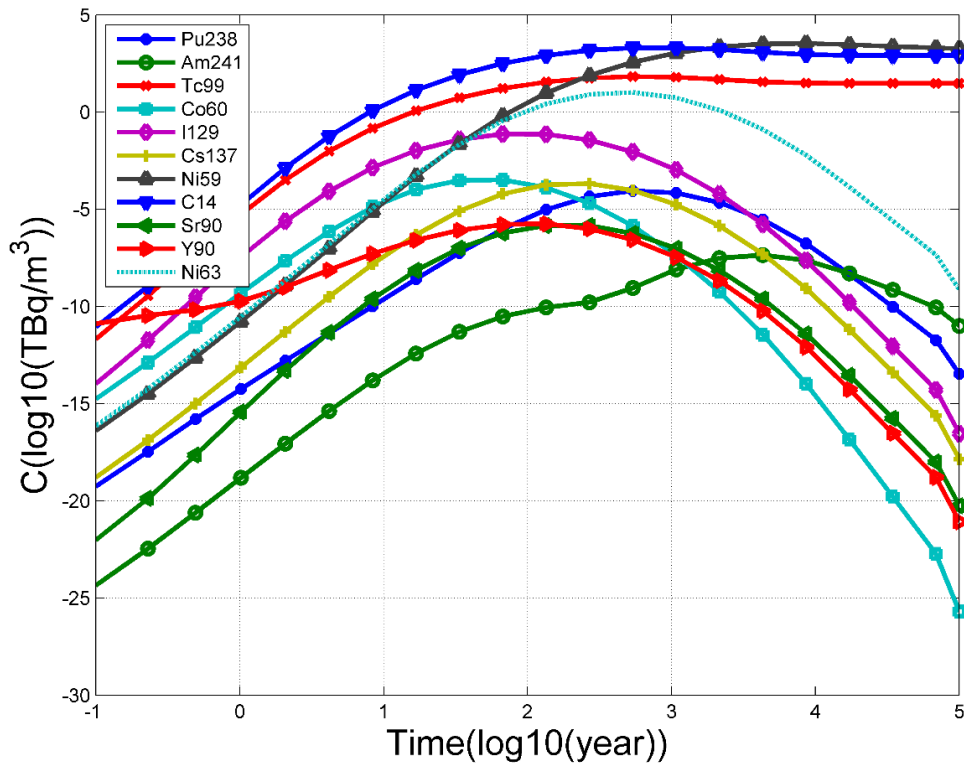


圖 4.19 案例 3—A 類廢棄物處置坑道關鍵核種外釋活度圖

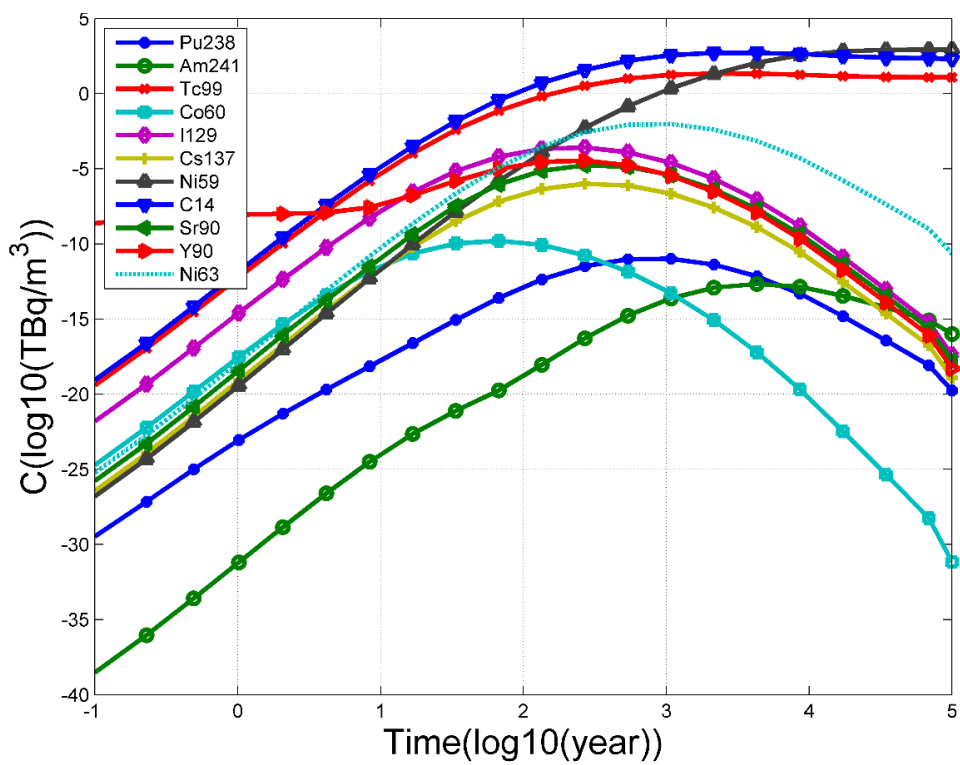


圖 4.20 案例 3—B、C 類廢棄物處置坑道關鍵核種外釋活度圖

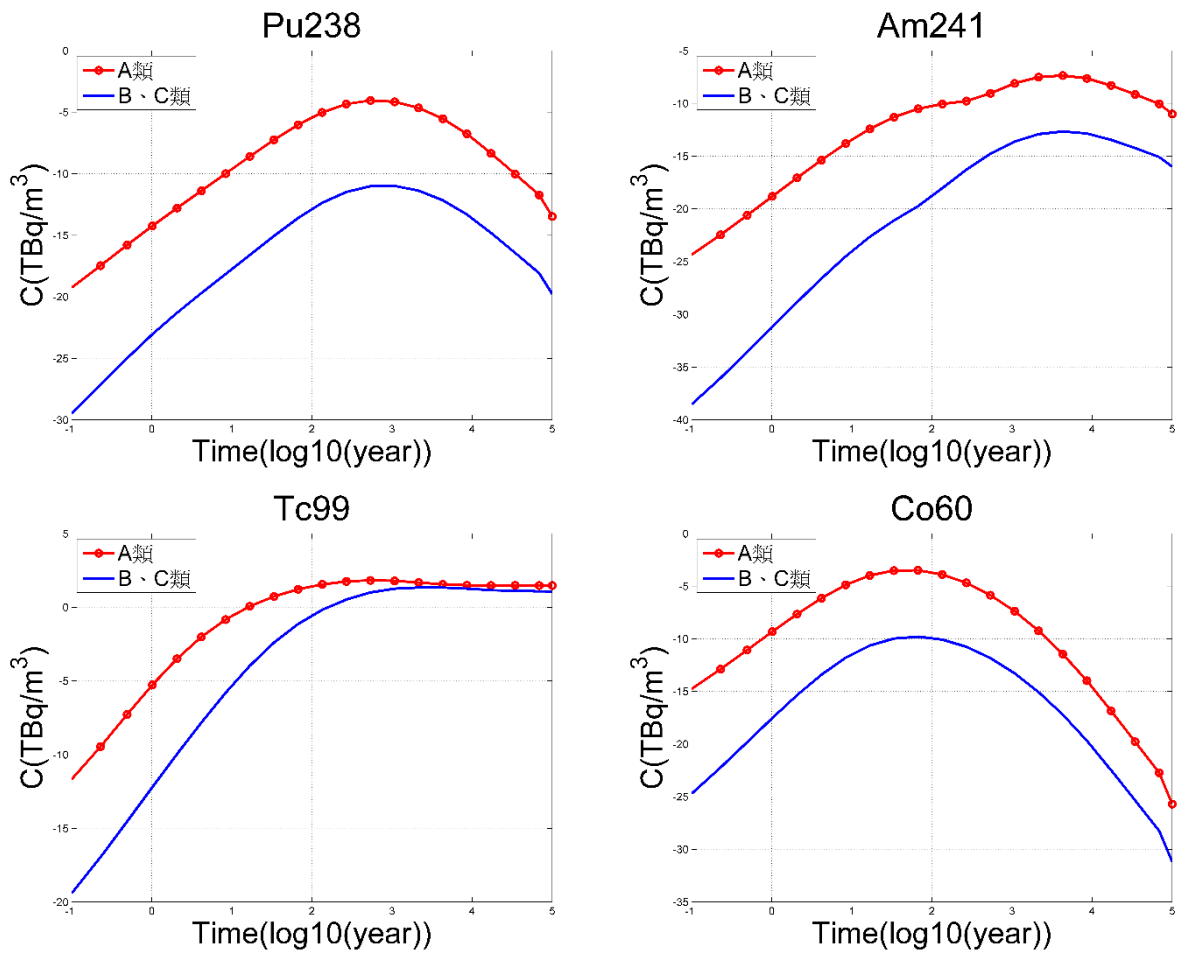


圖 4.21 案例 3— $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{60}\text{Co}$  核種在不同類型坑道外釋活度圖

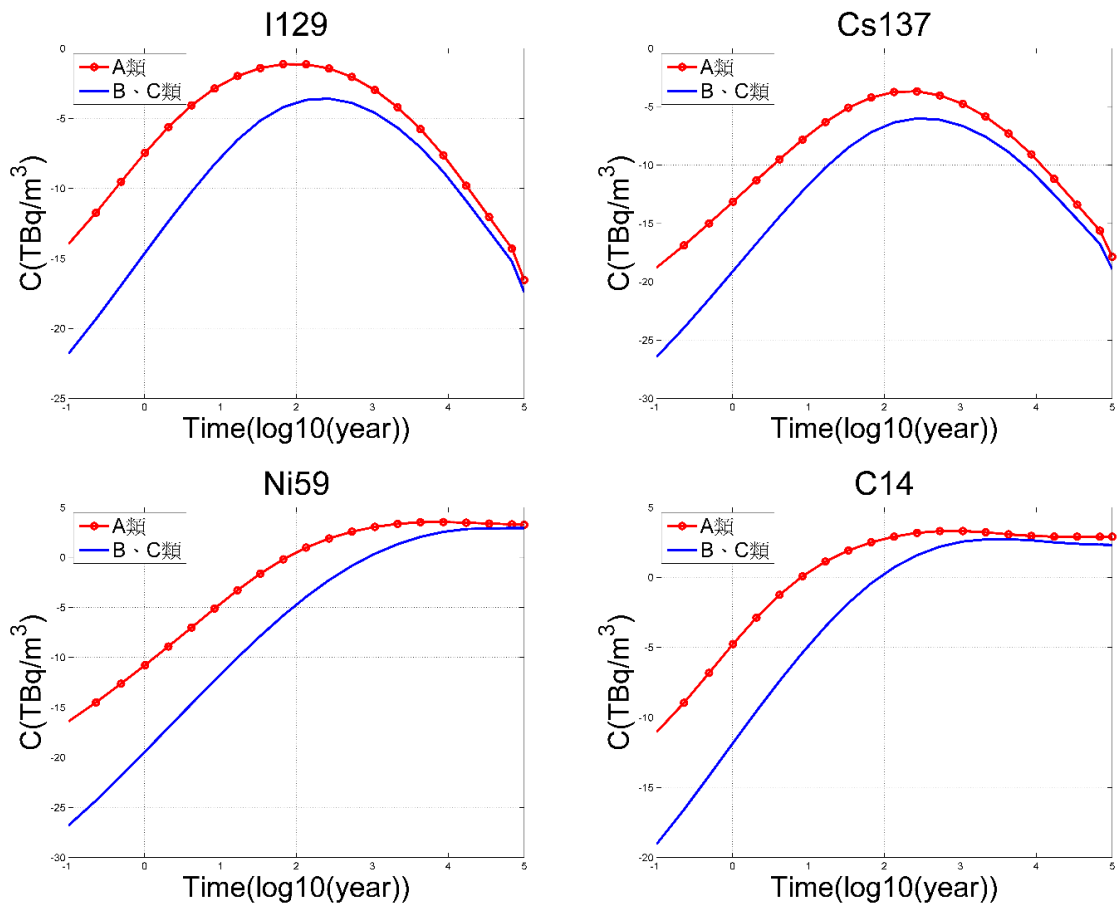


圖 4.22 案例 3— $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$  核種在不同類型坑道外釋活度圖

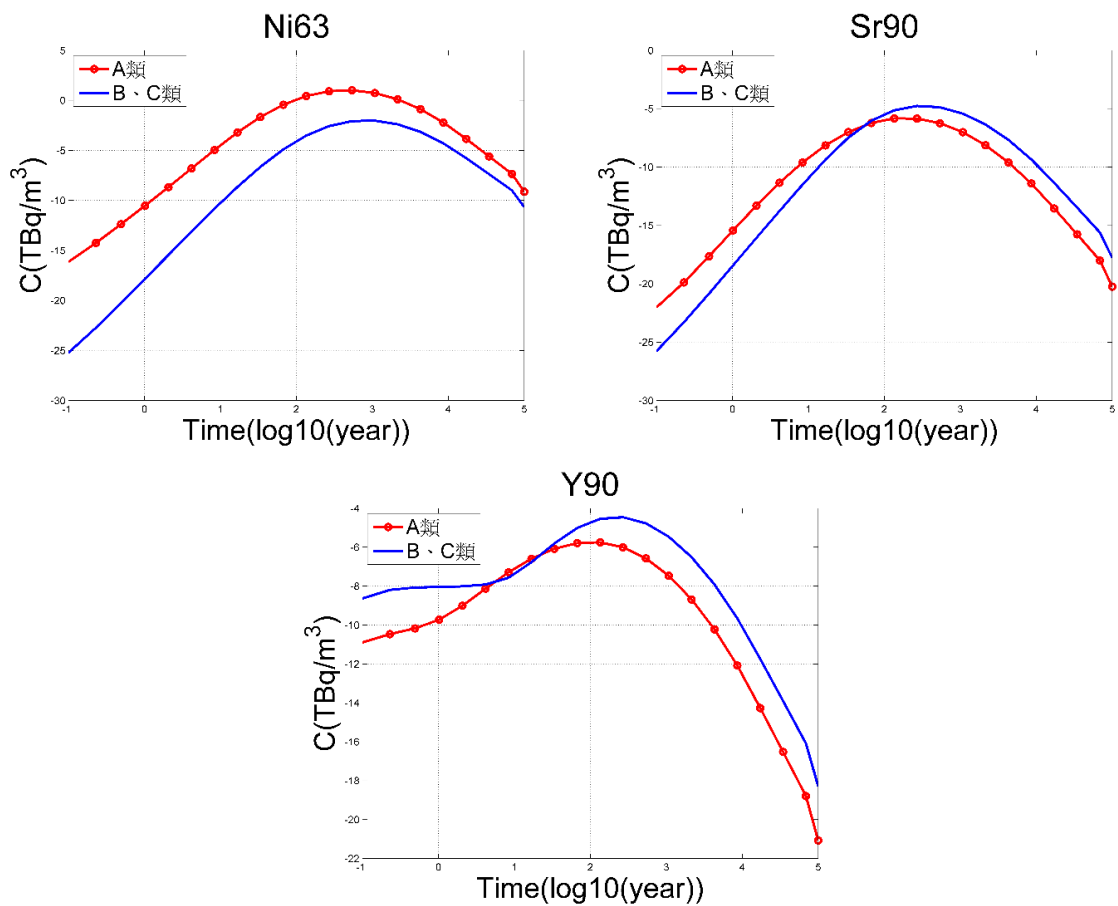


圖 4.23 案例 3— $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{63}\text{Ni}$  核種在不同類型坑道外釋活度圖

# 第五章、低放坑道處置長期安全分析模式審查重點或注意事項

## 項

本章綜整本計畫 105 年度與本年度之關鍵成果與發現，提出坑道處置長期安全分析模式審查重點或注意事項，將針對模式、關鍵參數與不確定性處理等提出說明與建議。在模式部分包含水文模式與傳輸模式的銜接與鏈結，這部分也包含由近場至遠場之連結，特別是不同模擬階段間的輸出與輸入資訊的鏈結關係，如何透過不同模式模擬階段的整合應用以達到長期安全分析的系統化評估目的。在關鍵參數部分，總整 SR-PSU 技術報告在不確定分析過程與本計畫所進行之敏感度分析所鑑別的關鍵參數。提出坑道處置長期安全分析模式審查重點或注意事項，精進國內近場與遠場核種傳輸驗證之技術能力，以下說明低放射性廢棄物坑道處置長期安全分析模式審查重點或注意事項。

### 1. 近場關鍵作用與關鍵變數

SR-PSU 近場安全評估考慮的關鍵作用包含熱作用、水力作用、力學作用、化學作用、核種傳輸作用等 5 大項，關鍵變數包含幾何形貌、溫度、水文變數、力學應力、材質組成、水組成與氣體變數等 7 個關鍵變數，在 105 年度以 BLA 處置窖為例建立近場關鍵作用與關鍵變數的互動矩陣，可用來檢核近場安全評估所考慮之作用與變數是否完備。這裡需說明由於 BLA 處置窖其設計並未包含具有障壁功能的工程結構，處置窖的混泥土地板與噴漿內襯並未具有任何限制流動的物質，因此 BLA 障壁並不具任何抑制移流傳輸的安全功能。以表 5.1 近場關鍵作用與關鍵變數互動矩陣之水文作用為例，水文作用雖又可在分為未飽和水流與飽和水流二項子作用，關鍵變數有 7 個，但主要還是考慮飽和水流作用與關鍵變數的關聯，例如所採用模式須能計算飽和水流對水文變數(包含流場方向、大小、分布、飽和度、壓力水頭、冰或水相態等)的影響(即表中 P+)，而模式須能反應因為幾何形貌、水文變數、水組成等關鍵變數改變對地下水流的影響(即表中 V+)。

再以核種傳輸作用為例，可以再分為核種形成與核種水相傳輸二種作用。因此，為釐清關鍵作用與關鍵參數間是否有充足連結，可以建立如表 5.1 的檢核表格。所採用模式須能計算核種形成對水組成的影響(即表中 P+)，而模式需能反應因為溫度與水組成等關鍵變數對核種形成的影響(即表中 V+)。而若是考慮核種水相傳輸，所採用模式須能計算核種水相傳輸對水組成的影響(即表中 P+)，而模式需能反應因為幾何形貌、水文變數、材質組成與水組成等關鍵變數對核種水相傳輸作用的影響(即表中 V+)。因此為釐清近場關鍵作用與關鍵參數間是否有充足連結，可以建立如表 5.1 的檢核表格。

表 5.1 近場關鍵作用與關鍵變數互動矩陣-以水文作用、化學作用與核種傳輸作用為例

作用	水文作用		化學作用		核種傳輸作用	
	未飽和水流		平流與延散		核種形成	
變數	飽和水流		水相物種形成與反應		核種水相傳輸	
			微生物作用			
幾何形貌	V+	-	-	-	-	-
	V+	-	-	-	V+	-
溫度	-	-	-	-	V+	-
	-	-	V+	-	-	-
水文變數	-	-	V+	-	-	-
	V+	P+	V+	-	V+	-
力學應力	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
材質組成	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	V+	-
水組成	-	-	V+	P+	V+	P+
	V+	-	V+	V+	V+	P+
氣體變數	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-

## 2. 遠場關鍵作用與關鍵變數

SR-PSU 遠場安全評估考慮的地質圈關鍵作用包含熱傳作用、結冰作用、地下水流、氣體流動/溶解、完整岩體的變形、現存裂隙的位移、裂隙產生、裂隙內的侵蝕沉積、平流傳輸/溶解相核種混合、母岩擴散傳輸、吸附、地下水/母岩反應、裂隙礦物的溶解/沉澱、微生物作用、裂隙灌漿的剝蝕、膠體作用、甲烷水合物的形成、脫鹽、地(面)電流、核種種類分佈、水相核種傳輸、氣相核種傳輸等，共計有 22 種地質圈作用。而每一種地質圈作用皆有其對應交互影

響的關鍵變數，本子計畫在 105 年度整理分析 SR-PSU 場址遠場關鍵作用與關鍵變數間之互動矩陣，可用來檢核遠場安全評估所考慮之作用與變數是否完備。以表 5.2 遠場關鍵作用與關鍵變數互動矩陣之水力作用為例，雖然關鍵變數有 13 個，在地下水流作用部分，所採用模式須能計算地下水流對地下水壓力、地下水組成與飽和度的影響（即表中 P+），而模式須能反應因為母岩溫度、地下水壓力、氣相流體、處置場幾何形貌、裂隙與孔隙幾何形貌、飽和度等關鍵變數改變對地下水流的影響（即表中 V+）。因此為釐清遠場關鍵作用與關鍵參數間是否有充足連結，可以建立如表 5.2 的檢核表格。

表 5.2 遠場關鍵作用與關鍵變數互動矩陣-以水力作用為例

關鍵變數	關鍵作用			
	地下水流		氣體流動與溶解	
母岩溫度	V+	-	V+	-
地下水流	-	-	-	-
地下水壓力	V+	P+	V+	-
氣相流體	V+	-	-	-
處置場幾何形貌	V+	-	V+	-
裂隙與孔隙幾何形貌	V+	-	V+	-
母岩應力	-	-	-	-
母岩礦物	-	-	-	-
裂隙礦物	-	-	-	-
地下水組成	-	P+	V+	-
氣體組成	-	-	V+	P+
結構與零星物質	-	-	-	-
飽和度	V+	P+	V+	-

在模擬系統架構之水文模式與傳輸模式銜接方式，參考瑞典 SR-PSU 場址技術報告，水文地質模式可提供遠場水流資料，近場模式水流資料由遠場水流模擬提供，近場模式得遠場水流資料後可提供遠場核種外釋資料，遠場核種傳輸模擬可提供生物圈核種傳輸模擬所需資料，進而計算劑量。本計畫於 105 年度報告中已完成遠場模式建置，本年度發展將近場拆分為近場處置坑道、近場處置設施兩種不同空間尺度的網格模擬(第四章)，主要考量為提升運算效率與有效模擬工程障壁的圍阻功能。因此審驗重點應檢視所採用之長期安全分析架構在不同模式間之銜接方式是否合理，不同模式間提供或所需之輸入與輸出資訊是否有合理銜接，



銜接過程之模式或資料之假設是否合理。

模擬近場處置坑道成果，A 類工程障壁較 B、C 類圍阻核種功能弱，A 類於模擬 100 年後核種以處置坑道為中心向四周外釋，而 B、C 類工程障壁 1000 年內大部分核種仍圍阻於處置坑道附近。這主要由於 B、C 類工程障壁多建構一層緩衝材料，且應以現行設計之 A 類工程障壁之核種圍阻功能是否滿足管制標準需求為主要審驗考量。

參考 SKB 技術報告，核種傳輸計算選取核種原則為核種半衰期為 10 年以上且核種輻射劑量攝取劑量在處置場封閉時超過 10mSv。本研究共模擬 12 條衰變鏈(第四章)，分析得知外釋核種中以  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  濃度較高， $^{59}\text{Ni}$  及  $^{99}\text{Tc}$  擁有較高初始濃度及長半衰期， $^{14}\text{C}$  因障壁對其吸附性較低導致外釋濃度高。審驗重點可著重觀察  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  之核種外釋劑量。

遠場地質圈參數敏感度分析結果得知，水力傳導係數較擴散係數、延散係數影響程度高，本年度在情境方面假設氣候變遷使入滲率增加，於遠場整體模擬顯示，較多入滲量雖然會稀釋核種濃度，但亦有助於核種遷移；而當海平面下降，模擬結果為原近岸處核種濃度降低，主要為因海平面下降，不飽和含水層範圍增加而減緩核種遷移至地表之速度與濃度。綜合變因模擬採用水力傳導係數為 10 倍、入滲率增加、無海退情況之組合，核種外釋濃度最高。遠場參數的選用與核種遷移特徵息息相關，因此審驗重點需關注所選用水力傳導係數與入滲率等遠場參數之合理性與海退情節之估算是否合理。

根據 TR14-09 報告 2.4.2 節不確定性的處理所述，不確定性來源包含選用情境的不確定性、系統與模式不確定性與參數不確定性等。其中情境不確定性並不在該報告討論範圍。其餘不確定性來源說明如下：

- (1) 系統與模式不確定性：模擬系統與模式所採用之假設應避免導致輻射風險的低估，但有時並不容易直接判斷這些假設是否會導致輻射風險的低估，因此該報告建議應採用其他替代模式來界定模擬成果的不確定性範圍，也就是執行平行驗證的另一項目的。
- (2) 參數不確定性：採用敏感度分析方法，透過輸入參數的變動範圍來呈現模擬成果的機率分布。其中若參數不隨時間改變，可以採用類似蒙地卡羅模擬方式來量化不確定性分布；而時變參數(如穩態流場應用於時變傳輸模擬)，則可依據多組模擬成果建立時變參數的經驗分布式，再進行模擬評估。數值方法的不確定性，通常選用合適的數值方法，數值方法的不確定性遠小於其他參數不確定。

此外，SKB 低放處置設施長期安全評估的演算工作涵蓋 100,000 年，為使所有演算情節的發展有所依據，需進行氣候演化的技術建置工作，也就是處置設施封閉後，氣候演化將使地表特徵產生怎樣的改變，例如海退至何種高程，建議國內在氣候演化的相關技術建置，可以有更積極的想法。

## 第六章、結論與建議

1. 研析瑞典 SR-PSU 場址技術報告 TR-14-09 之核種傳輸驗證技術，釐清坑道處置近場與遠場核種傳輸驗證的技術要項，透過發展整合模擬架構提昇國內核種傳輸模擬技術能力，如近場與遠場之銜接技術，利用遠場模擬之流場資料做為近場(處置設施)流場邊界進行流場模擬，再以近場(處置設施)模擬之流場資料做為近場(處置坑道)流場邊界進行流場模擬，於核種傳輸部分則由近場(處置坑道)之外釋核種濃度做為近場(處置設施)之源項，並以此類推至遠場傳輸模擬。模式銜接的關鍵，在於不同階層模式的輸出入資訊是否有被合理使用，銜接過程若有簡化，這些簡化的假設是否會導致所評估核種濃度的低估。
2. 完成近場(處置坑道)地下水流場與傳輸模擬，採用相對濃度模擬多核種傳輸的時空分布，進階分析核種離開處置坑道的濃度與時間分布特性，並完成近場(處置設施、處置坑道)模式銜接，模式分別執行三種案例，穩態流場的相對濃度穩態傳輸、相對濃度暫態傳輸、多核種衰變鏈暫態傳輸。由相對濃度暫態傳輸模擬結果，在假設工程障壁完成前提下，處置坑道濃度外釋主要透過擴散，B、C 類處置坑道圍阻功能優於 A 類，由於多建構一層緩衝材料。多核種衰變鏈暫態傳輸在 100 年內以  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{14}\text{C}$  外釋活度最高，100 年後以  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  濃度最高，主要差異來自初始活度、半衰期長度、吸附性等因子。
3. 近岸環境遠場模擬傳輸參數之敏感度分析，採 HYDROGEOCHEM 數值模擬工具針對三項水文地質參數及加入兩種情境變化進行評估，第一部份測試改變單一水文地質參數，第二部份為改變水力傳導係數與加入情境變化，分析處置設施上、中、下游陸域地表及海平面交界處濃度隨時間變化之情形，由第一部份可得知水力傳導係數在水文地質參數中扮演關鍵影響，第二部份測試也發現水力傳導係數較入滲率及海平面變化對核種傳輸的影響為高，但入滲率的增加可稀釋外釋核種濃度且有助遷移，海平面下降陸域範圍增多，增加不飽和含水層減緩放射性核種遷移至地表，在水力傳導係數 10 倍、入滲率增加且無海退的情況下地表有較高濃度峰值。
4. 本計畫目前模擬案例尚未考慮在近岸環境下因海水入侵或核種遷移之海域，因海水組成成分與陸域地下水差異之影響，建議應研究海水與淡水對核種傳輸之差異比較研究。
5. 近場處置坑道中排水廊道封閉使用之填充材料，是否影響工程障壁的安全功能，建議應建立相關技術研究探討。
6. 參考 SKB TR14-04 與 TR14-05 技術報告作法，建議應建立符合國內低放射性廢棄物處置現況所需之關鍵作用與關鍵變數檢核表，如本報告表 6.1 與 6.2 所示，供安全評估審驗作業時用以檢核關鍵作用與關鍵參數間是否有充分考慮與建立相互連結的模擬功能。

7. 參考 SKB TR14-09 技術報告建議，參數不確定性的處理，可以透過參數的敏感度分析來呈現評估成果的機率分布，用以量化因為參數不確定性所影響的劑量機率分布。
8. 針對安全評估模式與系統的不確定性，SKB TR14-09 技術報告建議，可以透過進行平行驗證，選用其他替代模式進行安全評估來量化因為模式選用所造成的輻射劑量不確定性範圍。
9. 安全評估模式計算結果的正確性，除模式功能的適用性外，主要建立在輸入資料是否充足與正確，因此選用參數值需有所依據，例如從文獻或是實驗取得皆需提供資料的溯源資訊以確保資料品質，且建立使用資料的審驗標準程序，進而可降低模擬結果誤差，提升整體安全評估水準，建議應建立安全評估資料驗證技術。
10. 低放射性廢棄物處置設施長期安全評估的演算長達 100,000 年，為使所有演算情節的發展有所依據，例如處置設施封閉後，氣候演化將使地表特徵產生怎樣的改變？海退至何種高程？建議國內應積極進行氣候演化的技術建置工作。

## 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. 台灣電力公司，2016，低放射性廢棄物最終處置技術評估報告。
15. IAEA, 2004, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities.
16. IAEA, 2012, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards.
17. Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 3: Safety Assessment of the Geological Disposal System, JNC-TN1410 2000-04, 458 pp.
18. SKB, 2014a, Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, TR-14-04.
19. SKB, 2014b, Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-05.
20. SKB, 2014c, Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU, TR-14-09.
21. 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

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

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

計畫編號：105FCMA011

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：林文勝

受委託機關(構)：社團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月

# 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

### 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

受委託單位：社團法人中華民國大地工程學會

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 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 850,952 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 106 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

摘要 .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1. 前言 .....	1
1.1. 研究背景與目的 .....	1
1.2. 瑞典 SFR 處置場擴建之 SR-PSU 安全評估計畫 .....	2
2. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用 .....	9
2.1. 生物圈組件 .....	9
2.1.1. 表土層 .....	9
2.1.2. 表土層水 .....	10
2.1.3. 地表水 .....	10
2.1.4. 氣體和當地大氣 .....	10
2.1.5. 初級生產者 .....	10
2.1.6. 分解者 .....	10
2.1.7. 濾食性動物 .....	11
2.1.8. 草食動物 .....	11
2.1.9. 肉食動物 .....	11
2.1.10. 人類 .....	11
2.1.11. 邊界組件 .....	12
2.1.11.1. 地質圈 .....	12
2.1.11.2. 外部條件 .....	12
2.2. 特徵 .....	12
2.3. 生物圈作用 .....	13
2.3.1. 生物作用 .....	13
2.3.2. 與人類行為有關的作用 .....	17
2.3.3. 化學、力學和物理作用 .....	18
2.3.4. 傳輸作用 .....	20
2.3.5. 熱和輻射作用 .....	23
2.3.6. 地景開發作用 .....	24
2.4. 生物圈交互作用 .....	25
2.4.1. 一般生物圈交互作用矩陣 .....	25
2.4.2. 生物圈物理組件之間交互作用 .....	36
3. 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 .....	50
3.1. SR-PSU 生物圈情節分析 .....	50
3.1.1. 生物圈情節分析方法 .....	51
3.1.2. 潛在曝露點和環境介質區域 .....	51
3.1.3. 人體曝露途徑分析 .....	53
3.2. 生物圈安全評估與輻射劑量標準 .....	55
3.2.1. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對人體之輻射劑量 .....	55
3.2.1.1. 對人體之輻射劑量 .....	55
3.2.2. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對非人類生物群之輻射劑量 .....	61
3.2.2.1. 對非人類生物群之輻射劑量 .....	61
3.2.2.1.1. 背景 .....	61



3.2.2.1.2 ERICA 劑量測定模型納入 Ecolego .....	61
3.2.2.1.2.1. 基本概念 .....	62
3.2.2.1.2.2. 計算內部曝露 .....	62
3.2.2.1.2.3. 計算外部曝露 .....	63
3.2.2.1.2.4. 總劑量率計算 .....	64
3.2.2.1.2.5. 生物圈物體生態系統的過渡 .....	65
4. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用與模式發展建議 .....	66
4.1. 特徵、事件及作用對應到 SR-PSU 生物圈建模 .....	66
4.2. SR-PSU 生物圈建模作業 .....	68
4.3. SR-PSU 生物圈組件、特徵與對應之模式發展建議 .....	72
4.3.1. 生物圈組件與對應之模式發展建模作業 .....	72
4.3.2. 生物圈特徵與對應之模式發展建模作業 .....	79
4.3.3. 生物圈作用與對應之模式發展建模作業 .....	82
4.3.4. 生物圈核種傳輸之模式發展建議 .....	104
5. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項 .....	105
5.1. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點 .....	105
5.2. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查注意事項 .....	105
5.2.1. 生物圈建模作業是否完整進行審查 .....	105
5.2.2. 生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查 ...	106
5.2.3. 生物圈評估情節分析之曝露途徑是否完整進行審查 .....	107
6. 結論與建議 .....	108
7. 參考文獻 .....	111

## 圖目錄

圖 1 瑞典 FORSMARK 中低放射性廢棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013).....	3
圖 2 FORSMARK 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 生物圈潛在的曝露途徑示意圖 .....	51
圖 7 評估放射性核種釋出對非人類生物群的影響.....	61
圖 8 SR-PSU 安全評估計畫廢棄物體、近場、遠場地質圈、生物圈與氣候之評估模式流程圖(AMF).....	71

## 表目錄

表 1 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單.....	5
表 2 生物圈交互作用矩陣.....	33
表 3 生物圈交互作用矩陣(IM)中的作用的簡要定義。.....	34
表 4 地質圈對其他物理組件之作用.....	36
表 5 表土層對其他物理組件之作用.....	37
表 6 表土層水對其他物理組件之作用.....	38
表 7 地表水對其他物理組件之作用.....	39
表 8 氣體及當地大氣對其他物理組件之作用.....	40
表 9 初級生產者對其他物理組件之作用.....	41
表 10 分解者對其他物理組件之作用.....	43
表 11 濾食性動物對其他物理組件之作用.....	44
表 12 草食動物對其他物理組件之作用.....	45
表 13 肉食動物對其他物理組件之作用.....	46
表 14 人類對其他物理組件之作用.....	47
表 15 外部條件對其他物理組件之作用.....	48
表 16 陸域環境的環境介質及其相關的環境類型.....	52
表 17 水環境的環境介質及其相關的環境類型.....	52
表 18 陸域生態環境中的曝露途徑情節（以 TER-1 至 TER-29 標示）和相關活動 .....	53
表 19 水域生態環境中的曝露途徑情節（以 AQ-1 至 AQ-15 標示）和相關活動.....	54
表 20 經由攝食、吸入與外部曝露的母核種劑量係數.....	58
表 21 經由攝食、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數.....	59
表 22 經由攝食、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種輻射)劑量係數.....	60
表 23 組件、特徵和作用對應到 SR-PSU 生物圈中的不同的建模作業。.....	66
表 24 SR-PSU 生物圈建模作業之評估模式流程(AMF)對應項目及參考文獻說明 .....	69

## 摘要

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是否能滿足處置要求。本計畫分析瑞典 Forsmark 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 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。工作項目包含：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；提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議。研究結果顯示，特徵、事件及作用對於放射性核種在生物圈中之傳輸和累積與對於人類和非人類生物群的劑量暴露分及途徑具有重要性。在生物圈交互作用矩陣中，包括：10 物理組件(2 個邊界組件)、6 個特徵變量和 50 個作用歷程。生物圈評估對於人類和環境變化計算需與未來生物圈條件的假設氣候狀態一致，需考慮不同的生態系統之間的曝露途徑的組合。本研究成果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應用

## **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 exposure pathway analysis and dose assessment of biosphere in SR-PSU which are priority in the technical reports of R13-43, R14-02 focused on the biosphere FEPs and exposure route cases. Mover, the study also focused on the collecting and aggregating the component, feature, processes and interactions in the biosphere. Research and analysis on the biosphere exposure route case and dose assessment of tunnel disposal technical report, and analysis about international tunnel disposal technical report on the biosphere features, events and processes (FEPs) and model development used in the nuclide transport and dose assessment are also included. Finally, we proposed the suggestions of biosphere dose assessment for low-level radioactive waste disposal. This study results are as follows:

Biosphere features, events and processes (FEPs) important for radionuclide transport and accumulation in the biosphere and exposure of humans and non-human biota are identified and defined. In the interaction matrix (IM), the biosphere is divided into 10 physical components (surrounded by 2 boundary components), 6 variables (features) acting on the physical components and 50 processes whereby the physical components can affect each other. The future biosphere conditions for calculations of consequences for human beings and the environment should be selected in agreement with the assumed climate state. Consideration should also be taken to the possibility of individuals being exposed to combinations of exposure pathways within and between different ecosystems. The results of the report can provide regulatory departments as references for the safety plan review of radiological dose assessment in low-level radioactive waste disposal.

# 1. 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，來圍隔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，該部後續選址工作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。針對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技術規範及技術，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，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。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。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。本(106)年度將蒐集瑞典 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。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，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應用，以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 市 Forsmark 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 Forsmark 位置圖如圖 1 所示，位於 Forsmark 港口與旁邊 Forsmark 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。

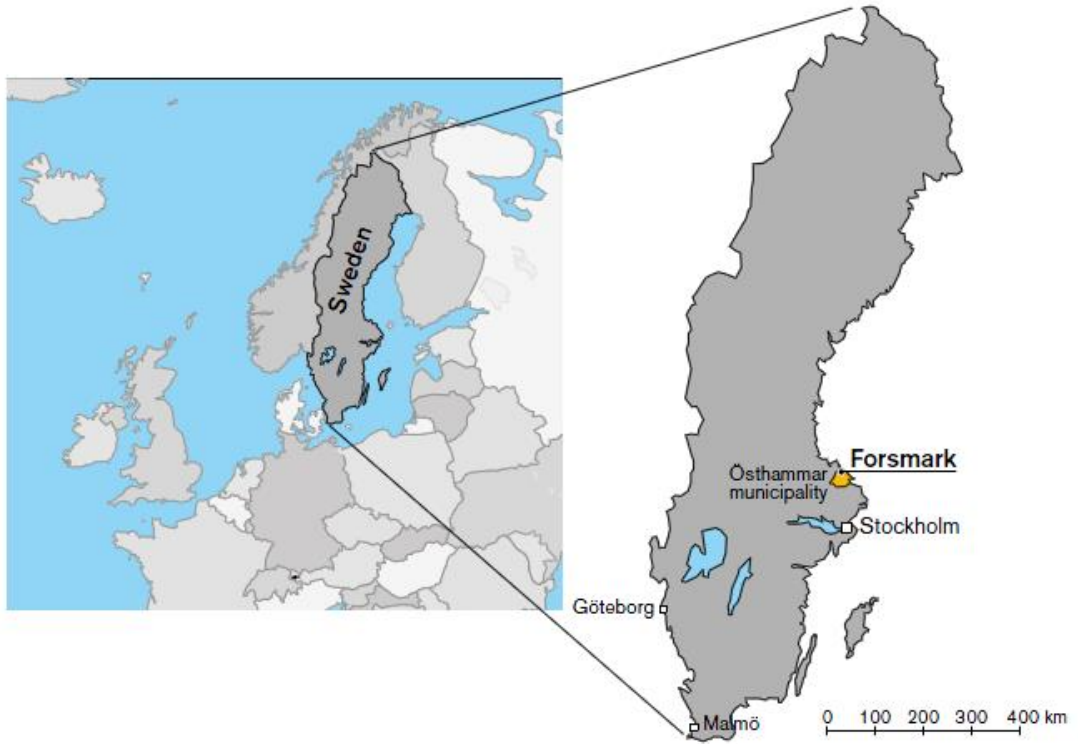


圖 1 瑞典 Forsmark 中低放射性廢棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013)



圖 2 Forsmark 之 SFR 設施地表部分示意圖(SKB, 2013)



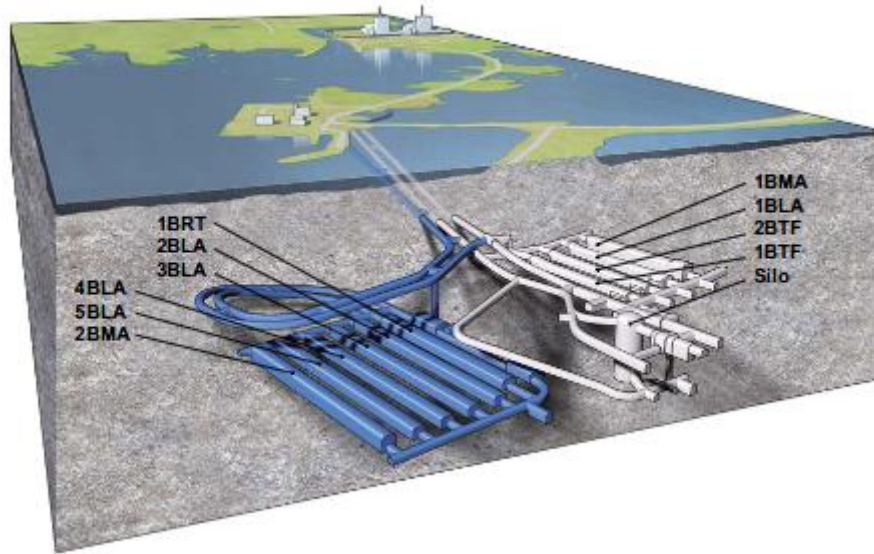


圖 3 SFR 設施概念示意圖（灰色是目前已營運中的 SFR1，藍色是規劃中的 SFR3）  
(SKB, 2014a)

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 Forsmark 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 Forsmark 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。

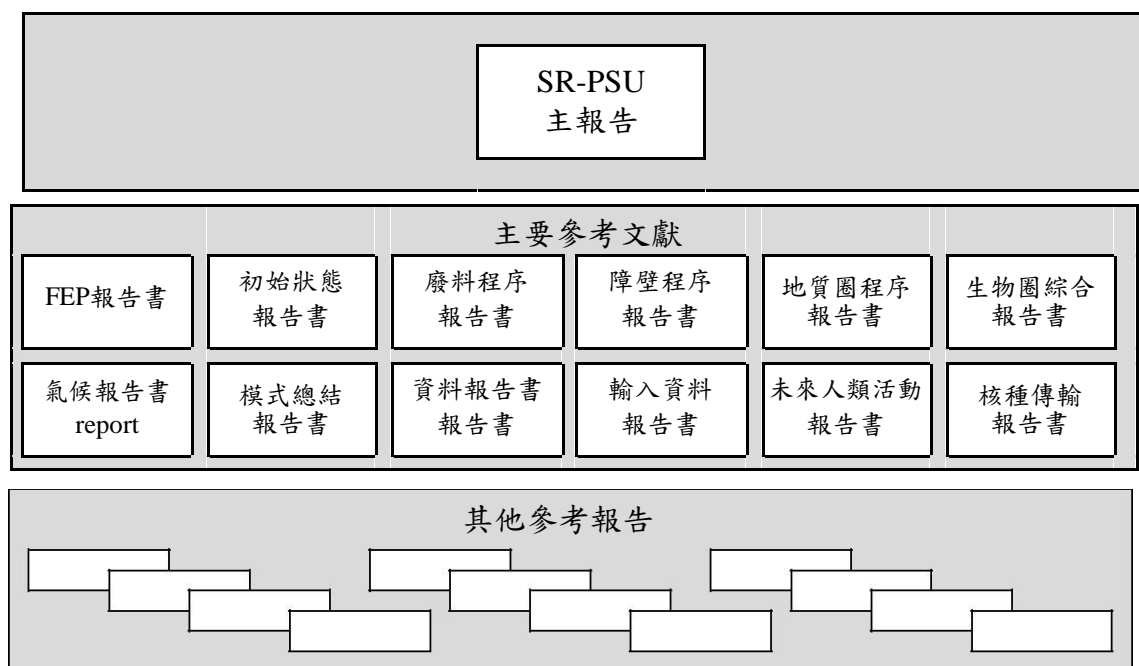


圖 4 SR-PSU 計畫主報告、主要參考文獻與其他參考報告階層示意圖

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)，本年度計畫將研析 R13-43、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究。

R13-43 這份報告係針對生物圈組件間之特徵、作用和交互作用進行研析，其描述 Forsmark 地區放射性廢棄物處置有關生物圈組件間的作用過程和相互影響作用之安全評估。這份報告以交互矩陣(IM)描述生物圈組件及相互作用。其章節包括：第 1 章「介紹 SKB 工作與生物圈組件相互作用交互矩陣(IM)背景和歷史」、第 2 章「讀者的指南」、第 3 章「介紹 IM 的概念與其發展所採用的方法」、第 4 章「SKB 定義生物圈的物理組件：該生物圈的物理組件屬於生物圈的一部分，並與其他物理特性是不同的(如初級生產者，表土層或地表水)」、第 5 章「介紹影響生物圈的發生、速度以及過程方向(例如幾何形狀，溫度)的特徵(變量)」、第 6 章「介紹生物圈安全性評估的過程：生態影響、景觀開發、轉移和生態系統中放射性核種的累積，或人類和其他生物的輻射曝露」、第 7 章

「介紹生物圈 IM，描述生物圈物理組件間相互作用過程」、第 8 章「總結生物圈安全評估是重要的過程」、附錄 A「生物圈交互矩陣(IM)圖」、附錄 B「交互矩陣(IM)圖中在安全評估認定為需要的生物圈進程」、附錄 C「描述的特徵(變量)進程，反之亦然的影响表」、附錄 D「交互矩陣(IM)圖中的專有名詞列表」。

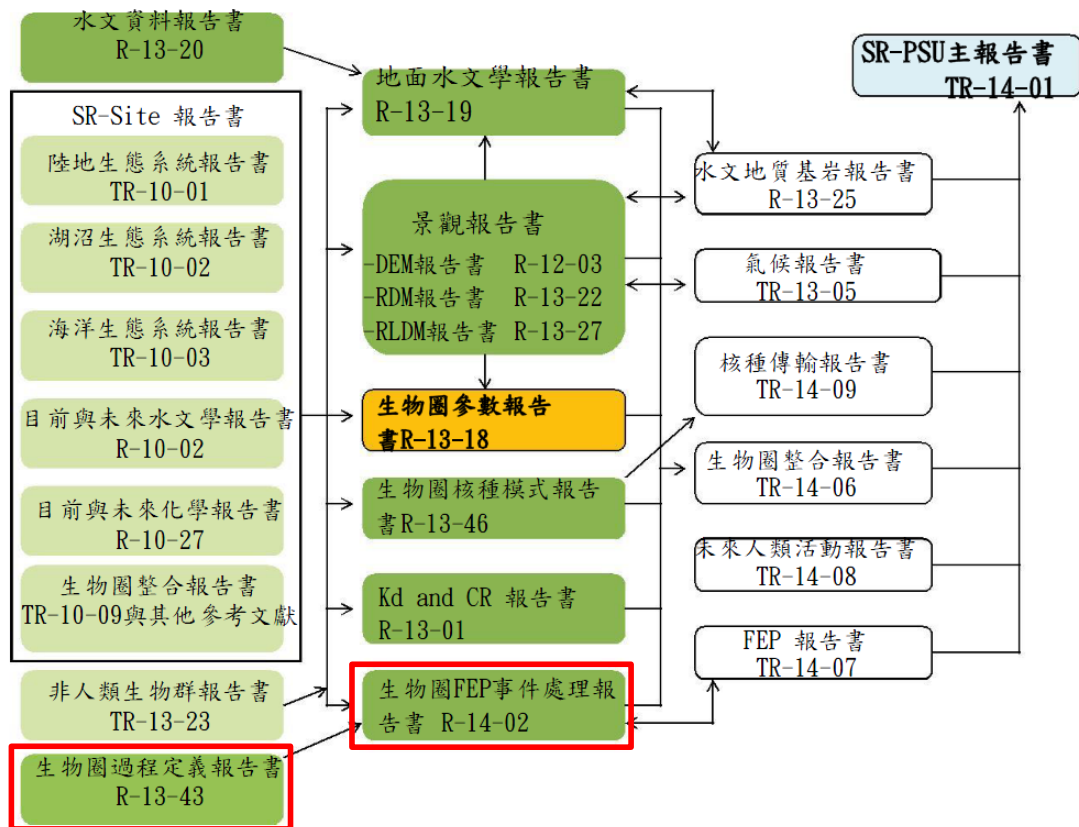


圖 5 SR-PSU 有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估相關報告關聯圖

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

R14-02 這份報告是 SR-PSU 生物圈、特徵、事件及作用(FEPs)與模式發展建議，可提供生物圈評估之曝露途徑情節分析。本報告提出生物圈模型的發展假設與曝露途徑情節，並評估各種曝露途徑核種傳輸至受影響最大的人類群體之輻射劑量。其章節包括：第 1 章「引言」、第 2 章「SR-PSU 生物圈特徵事件作用之處理」、第 3 章「曝露途徑分析」、第 4 章「農地灌溉」、第 5 章「曝露於泥炭或木材燃燒之受污染的空氣」、第 6 章「濕地轉變至農業用地」、第 7 章「水流至表土層離散化與區域描繪的敏感度」、第 8 章「生物圈有經驗數據自然碳循環之放射性核種傳輸模式模擬比較」、第 9 章「總結」、附

錄 A「Forsmark 地質處置場在安全評估之生物圈的交互作用矩陣需考慮事項」、附錄 B「評估模型流程圖：AMF」、附錄 C「參數值」。

前述報告具體描述生物圈基本假設及核種傳輸建模主題，完成放射性核種傳輸至生物圈模型之生物圈特徵、事件及作用與模式發展建議，提供生物圈評估之核種遷移途徑、曝露途徑分析和傳輸至受影響最大之人類群體劑量分析。

由於生物圈的特徵、事件與作用，係探討核種在環境中遷移及累積，進而評估人類受到的健康及安全的影響。在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。研析核種於生物圈之特徵、事件與作用可建立系統方法，瞭解核種遷移、累積及進入生態系統後，對於人類造成曝露的各種作用。生物圈評估需建構交互作用矩陣 (Interaction Matrix, IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。在生物圈交互作用矩陣中，包括：10 物理組件 (2 個邊界組件)、6 個特徵變量和 50 個作用歷程，本計畫針對有關的生物圈安全評估之特徵、事件與作用的作用矩陣，與對人類和非人類生物群的曝露計算進一步說明。工作項目如下：

- 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
- 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項

## 2. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用

為研析坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用，蒐集 SR-PSU 之 R13-43 報告。R13-43 報告描述 Forsmark 地區放射性廢棄物處置生物圈組件 (Components) 間的過程和相互作用之安全評估。這份報告以交互作用矩陣 (IM) 描述生物圈組件相互作用。其章節包括：第 1 章「介紹 SKB 工作與生物圈組件交互作用矩陣 (IM) 背景和歷史」、第 2 章「讀者的指南」、第 3 章「介紹 IM 的概念與其發展所採用的方法」、第 4 章「SKB 定義生物圈的物理組件：該生物圈的物理組件屬於生物圈的一部分，並與其他物理特性是不同的（如初級生產者，表土層或地表水）」、第 5 章「介紹影響生物圈的發生、速度以及過程方向（例如幾何形狀，溫度）的特徵（變量）」、第 6 章「介紹生物圈安全性評估的過程：生態影響、地景開發、轉移和生態系統中放射性核種的累積，或人類和其他生物的輻射曝露」、第 7 章「介紹生物圈 IM，描述生物圈物理組件間相互作用過程」、第 8 章「總結生物圈安全評估是重要的過程」、附錄 A「生物圈交互作用矩陣 (IM) 圖」、附錄 B「交互作用矩陣 (IM) 圖中在安全評估認定為需要的生物圈進程」、附錄 C「描述的特徵（變量）進程，反之亦然的影响表」、附錄 D「交互作用矩陣 (IM) 圖中的專有名詞列表」。

### 2.1. 生物圈組件

共 10 個組件代表不同的環境媒介（表土層、表土層水、地表水、氣體和當地大氣）和生物群體（初級生產者、分解者、濾食性動物、草食動物、肉食動物、人類），另外還有 2 個邊界組件（地質圈和外部條件）包含在交互作用矩陣 (IM) (如表 2) 中，以下簡介說明。

#### 2.1.1. 表土層

表土層由風化的岩石碎片組成並覆蓋其下的岩石、以及冰川和後冰期的沉積物。新形成的土壤和沈積物包括死亡的有機物質。另外，岩石露出的表面包含在 SKB 調查資料中。地形，即包括土地的地勢和形狀在內的幾何程度，即基座和表土層表面的位置 (x, y, z)。而且，各種各樣包括人造結構，例如道路，房屋等。表土層的幾何、構造和孔隙度包含在對角線元素中。這個對角線元素稱為第四紀沉積物 (QD) 在 SKB 的初始生物圈 IM 中，並以表土層名詞定義。

### 2.1.2. 表土層水

表土層水是表土層內飽和水和非飽和的孔隙水，包括冰霜和冰。井列在 IM 的對角線元素中，但深鑽入地質圈的井則為地質圈對角線元素。這個對角線元素在表土層中包括數量和組成（作為水組成的特徵）。表土層水不包括基岩中的水，因為這是在地質圈矩陣中處理的。這個對角線元素不應該與地下水的傳統定義混淆，不包括在非飽和區的孔隙水，但包括地質圈的深層地下水。

### 2.1.3. 地表水

地表水在這裡定義為陸地表面以上的水，存在地面、溪流、河流、濕地、湖泊、開放水域和海洋中，而不是在岩石、表土層或大氣中的水 (Heath, 1987)。岩石表面上的雨水，陸地和水面上的雪和冰，以及水滴在植被上等皆係屬於地表水。該對角線元素包含地表水的數量和化學成分之溶解元素和顆粒物質。顆粒物質不視為一個單獨的區塊，就像在表土層中的表土層和水一樣，因為顆粒物質在水中是一小部分並且隨著水流被帶動。同樣的，水和大氣中的顆粒不被視為單獨的區塊。這有助於將對角線元素的數量保持為可管理的數量，但會導致一些過程（例如：吸附）發生在對角線元素內。考慮水的所有物理狀態，即這個對角線元素還包括冰霜和冰，而大氣水屬於組成氣體和當地的大氣。

### 2.1.4. 氣體和當地大氣

包含表土層及表土層水之大氣氣體及地表水氣泡。氣體流和氣體組成亦包括在該元素中，所以亦包括風和當地大氣中顆粒，即水滴、花粉等。水中氣泡包含在此 IM 對角線元素中，故地表水中溶解氣體亦包括在此對角線元素的“地表水”中。當地大氣被定義為研究區域之上與與研究區域氣體產生交換的大氣層，此區域被大氣包圍，屬於生物圈的邊界系統並包含在對角線元素的外部條件中。

### 2.1.5. 初級生產者

初級生產者是指能夠利用陽光或無機化合物氧化的自營生物，作為從無機碳源合成有機化合物的能源。該有機化合物作為細胞呼吸和生長的燃料。初級生產者包括綠色植物、藻類和自營細菌。初級生產者的特性包括物種、數量（即生物質）和幾何。實例包括草、草本植物、灌木叢、樹木、浮游植物、微絨毛、水生植物和大型藻類。

### 2.1.6. 分解者

分解者是以死亡植物和動物為食物來源的有機體（細菌、真菌或動物），並將複雜的有機化合物分解成二氧化碳、水和無機化合物。在某種意義上，大多數肉食動物獵食已死亡的獵物，植物物質在草食動物攝食之前已經死亡。然而，分解者不會主動影響其食物資源的可利用率，但取決於其他因素，如動植物衰老、疾病及動物打鬥或植物葉片的破碎；而草食動物、濾食性動物和肉食動物直接影響其資源的利用率以利可食用。分解者的特徵包括物種、數量（即生物量）和幾何形狀。作為分解者實例是細菌、土壤動物群（如蚯蚓），以及一些水生底棲動物群。

### 2.1.7. 濾食性動物

濾食性動物是食用顆粒狀有機物和小生物（浮游植物）的水生生物和浮游動物經由循環水通過動物系統過濾掉。濾食性動物包括各式各樣的動物，例如雙殼類（例如貽貝）、海綿、甲殼類動物（例如蝦）甚至鯨魚。濾食性動物是水生生態系統中重要的一組生物，它們可以大大影響水中的顆粒物和營養物質的數量，並且傳輸顆粒物從水柱到生物群。因此，它們被視為單獨的對角線元素，儘管它們是混合的分解者、草食動物和肉食動物。濾食性動物的特點包括物種、數量（即生物量）和幾何形狀。

### 2.1.8. 草食動物

草食動物是食用初級生產者（即植物、藻類和自養細菌）的動物。雜食動物在功能上是草食動物和肉食動物的混合，包括在本段和在肉食動物（見下段文）。特徵包括草食動物的物種和數量（即生物量）。草食動物的種類包括一些昆蟲、嚙齒動物、魚類和較大的哺乳動物。

### 2.1.9. 肉食動物

肉食動物是食用其他動物的動物。雜食動物在功能上是草食動物和肉食動物的混合，包括在本段和草食動物（見上段文）。特點包括肉食動物的物種和數量（即生物量）。肉食動物的例子包括一些物種昆蟲、鳥類、魚類和哺乳動物。

### 2.1.10. 人類

人類被定義為經由安全評估，生活在受潛在釋出放射性核種影響地區的所有人類，這個對角線元素包括：特徵、人數以及他們的活動，例如釣魚。抽水和人為排放（例如水，化學物質或熱）包括在水域系統，且還包括農業、灌溉和建築之陸域系統。



## 2.1.11. 邊界組件

### 2.1.11.1. 地質圈

地質圈是指圍繞在處置場的基岩，也包括存在於基岩飽和區的深層地下水和氣體。因此，這個 IM 對角線也包括深鑽井元素。地質圈是生物圈的邊界，交界處位於風化岩石的頂部在與表土層的交接處，即地質圈是在沉積物（水域系統）和土壤（陸域生態系統）下面的固體岩石。在 SKB 定義中，岩石露頭是表土層的一部分。然而，只有岩石露頭的頂層被認為是表土層的一部分，所以就在地表以下，岩石露頭成為地質圈的一部分。文獻上，地質圈通常被定義為地球最密集的部分，主要由岩石和表土層組成，因此也偏離了 SKB 的定義。在 SKB 的 IM 中，表土層被視為單獨的對角線元素（見下文）。地質圈的組成部分在 SKB 的技術報告 R-01-13 及 TR-10-45 中進一步描述。

### 2.1.11.2. 外部條件

在生物圈交互作用矩陣或矩陣內確定受生物圈影響之外部條件，會影響當地條件的外部因素。外部條件包括周圍的生態系統和超出邊界的大氣與當地大氣。它們還包括全球氣候和太陽日照等全球性條件。

## 2.2. 特徵

特徵是影響生物圈組件之特性、功能、條件或屬性，或影響兩個組件之間的交互作用的速率或方向。許多特徵影響每個物理組件，和物理組件間交互作用。SKB 確定了生物圈組件和作用的六個重要特徵：幾何、材料組成、放射性核種總量、演替階段、溫度和水組成。

### **Fea 01 幾何**

幾何包括景觀的幾何描述，如地形和測深、表土層的深度和體積、泥炭、水等。該特徵還包括生物體的幾何形狀，即它們的形狀、表面積和體積。

### **Fea 02 材料組成**

材料組成包括化學成分（例如礦物質和營養物質的濃度）以及物理特徵如砂粒尺寸和孔隙率。

### **Fea 03 放射性核種總量**

放射性核種總量包括放射性核種及其活度，對所有物理和生物圈系統的生物組件（即

所有物理對角線元素，如表土層，地表水和生物群）所關切的核種。

#### **Fea 04 演替階段**

演替階段是生物圈交互作用矩陣的一個特徵，用於確定生態系統之間的差異。Forsmark 的地景不斷演變，由於持續的海岸線位移和相關的生態系統的演替。因此，海洋生態系統通常逐漸轉化為湖泊，陸續變成濕地和森林。此外，濕地被人類排水後於農業使用。不同的交互作用對於生態系統演替不同階段很重要。生物圈交互作用矩陣通常適用於各種生態系統，生態系統的具體作用過程可能足夠重要，並須納入安全評估時，“演替階段”的特徵可納入進行考慮。即演替階段決定生態系統是海洋盆地、湖泊、溪流、森林、濕地或農田。

#### **Fea 05 溫度**

溫度一個獨特的物理性質，以決定熱接觸 SKB 的交互作用矩陣中兩個物體之間的熱流方向，溫度僅限於感興趣系統物理組件中的溫度（即所有物理對角線元素，如地質圈，表土層、生物群和水）。溫度取決於氣候，當地地方對氣候的影響與這一溫度特徵有關，而大型氣候系統及其影響屬於對角線元素的“外部條件”。

#### **Fea 06 水組成成分**

水組成成分包括生物圈組件中的溶解元素和化合物、膠體和懸浮顆粒（包括死亡的有機物質）。離子和元素的含量決定於如 pH 值、鹽度和營養濃度。因此，水的組成對於生物組件和作用速率的存在和變化程度是重要的。各種傳輸、化學和生物作用過程均影響水的組成成分。

### **2.3. 生物圈作用**

SKB 對於生物圈安全評估提出 50 個作用歷程。生物圈中作用的不同種類的作用，分為以下幾類：(1)生物作用(2)與人類行為相關的作用(3)化學、力學和物理作用(4)傳輸作用(5)熱和輻射。

#### **2.3.1. 生物作用**

生物作用是依賴生物體的作用過程。曝露於放射性核種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池中的放射性核種分佈，如擾亂沉積物或影響水分組成。生物作用過程可能涉及人類和其他

生物體。詳如 2.3.2。

### **Bio01 生物擾動**

生物擾動是經由植物、動物、細菌和真菌混合水域和陸域表土層中的顆粒。這種土壤或沉積物翻轉導致污染物如放射性核種的再分佈。該過程還為土壤和沈積物增加氧氣。生物擾動的例子是蚯蚓利用土壤為食物，蛤蜊在沉積物和人類犁耕地尋找庇護棲息地。生物擾動會影響表土層土壤化學、空氣和水量。

### **Bio02 消耗**

消耗是由有機體（顆粒物和其他生物）攝食物質。除了攝食外，顆粒（例如風化土壤）也可能被無意地消耗。飲用水、溶解的元素和氣體的攝入量都不包括在消耗量中，但當作為“攝食”（參見 Bio15）。生物體的消耗是從食物鏈的底層向頂級捕食者和人類運送放射性核種的重要途徑。

### **Bio03 死亡**

生物體從活的區塊轉移到死亡的有機物質池。死亡是由有機體死亡產生死的有機物質。死的有機物質可能源自生物體的死亡，但也可以經由散開（例如從樹木落下的葉子和樹枝）產生。死亡有機物質的產生和消耗都可能在生物體之間以及生物與水、土壤和沈積物之間重新分配元素。

### **Bio04 分解**

對死亡有機物質的分解，能將富含能量的有機分子分解成二氧化碳、水和無機營養物質，以及(或)較不複雜的有機分子。與所有其他生物群一樣，分解物的攝食和排泄被視為的以下 Bio15 及 Bio05 的“攝食”和“排泄”作用。然而，除了攝食和排泄之外，分解會影響不可降解物質的可用量，並從有機物質中釋放出水分，這可能會影響表土層水和水的組成成分。此外，分解可能釋放累積在死亡有機物質中的放射性核種。分解速率取決於死亡有機物質的化學特性和環境條件，如氣候和土壤類型。應該注意的是，分解速率可能很重要，降低分解速率可導致碳儲存的產生和增加，和相關的元素累積，例如，泥炭和沈積物。

### **Bio05 排泄**

排泄是化學元素和化合物從生物體經由介質釋放到周圍環境中。排泄可以經由特殊部位或器官，如植物中的氣孔，動物排泄器官或直接經過細胞膜（例如汗液）發生。排

泄物中含有糞便。經由呼吸作用釋放出二氧化碳也是排泄的一個例子。排泄物會影響水分、氣體、表土層土和生物群的組成。因此，生物群對放射性核種的排泄對於其在生物圈中的傳輸和累積可能是重要的。

### **Bio 06 食物供應**

食品的生產和供應的過程並提供給消費者使用。初級生產者、動物和死亡有機物可以作為食物來源使用，並向消費者提供食物。微生物消耗的溶解元素在 Bio22 “元素供應” 作用中進行。除了供應食物外，人類還可以利用材料和生物進行其他目的，但是在 Bio 11 “材料供應” 作用中會分開處理。

### **Bio 07 生長**

生長是生物體的生成。生長取決於初級生產和消費。然而，光合作用（初級生產總值）固定的所有化學能量並不是轉化為新的生物量；由於細胞呼吸和滲出物大部分也被損失。因此，對於初級生產者而言，生長等於總初級生產減去呼吸（即淨初級生產）減去排泄。同樣，消費者消費的所有材料都不能轉化為新的生物質；一些由於排泄而損失（例如呼吸和糞便）。生長在放射性核種評估中可能是重要的，因為增加的生物量可能會稀釋生物體中的放射性核種。

### **Bio 08 棲息地供應**

環境中的生物體或非生物成分提供其他生物體的基質或掩蔽物。棲息地的例子是：一塊可耕種的土地、藤壺或墨角藻的岩石底層、昆蟲藏匿樹幹。地表水也可以為生物體提供棲息地，只要水分合適。

### **Bio 09 侵入**

侵入是生物體（包括人類）進入處置場的過程，例如移動、鑽孔或增植。侵入可能影響岩石結構、水力傳導性、侵蝕潛勢、處置場物理和力學特性、氧氣條件和處置場附近生物材料的數量。這是生物圈影響地質圈的進程之一。

### **Bio 10 材料供應**

可讓人類利用的材料量（除餵養以外的目的）。主要生產者通常作為食物以外的其他目的，例如作為紙、建築材料、烹飪火、衣服（例如棉花）。地質圈提供礦物和化石燃料。材料供應的其他例子是當人類利用手工藝品和衣物的動物貝殼、皮膚、毛皮和象牙時。

### **Bio 11 移動**

地表水中生物體的移動。地表水中有機體的存在和移動可能對地表水的流動產生影響。濾食性動物經由其過濾器官產生水流對地表水流動產生影響。在世界某些地區，大型草食動物（如河馬）的運動可能會產生地表水流動。在瑞典亦有大型草食動物和肉食動物，例如麋鹿（麋鹿）、熊和海豹，但是它們不會影響地表水的運動到任何明顯的程度。

### **Bio 12 顆粒釋放/捕集**

顆粒釋放/捕集是顆粒從生物體釋放到環境中，或由生物體捕集環境中的顆粒。顆粒的釋放是經由例如破碎、產卵、花粉和種子釋放。在陸地地區，顆粒物的釋放通常是季節性地出現，其中大量釋放，例如：松花粉在春季可以達到大面積釋放。在水域區域，經由產卵動物可以在短時間內釋放出大量的顆粒。生物捕集顆粒，例如毛皮、鰓和粘液。在水域生態系統中，濾食性動物可捕集多數顆粒物，可影響水澄清度、營養濃度，及顆粒物質從水柱到生物群的物質的傳輸。在陸地地區，顆粒也可能被動物身上捕集，但是捕集更多是屬於無意的。顆粒的存在影響水和空氣的組成，這個過程可能對於附著於顆粒表面的放射性核種的傳輸很重要。

### **Bio 13 初級生產**

初級生產（這裡指初級生產總量）是總固定的無機碳。綠色植物、藻類和一些細菌通過光合作用（使用陽光作為能量來源）和化學合成（使用化學化合物作為能源）從無機物質產生有機化合物。這裡的主要生產是指初級生產總量，即初級生產者對無機碳的總固定。淨初級生產量是產生的數量（碳），是從總初級生產中減去呼吸時的淨效應。淨初級生產可以用作草食動物的食物，在 Bio 06 “食物供應”作用中進行處理（見上文）。初級生產率取決於許多因素，其中一些重要的因素是：太陽能日照、氣候、基質以及植物葉片和其他綠色部分面積。經由生物群對許多放射性核種的攝食直接取決於初級生產，使得該過程成為從非生物到生物組件之放射性核種的傳輸途徑。

### **Bio 14 刺激/抑制**

當組件影響另一組件時，發生刺激/抑制（正或負），例如：生物群可能競爭空間，從而抑制彼此影響生物量和生產。非生物成分可以通過提供有利的化學條件（例如 pH 和鹽度），有利的溫度，避風等來刺激生物組件。類似地，非生物成分可能通過提供不合適的生活條件來抑制生物群。生物組件也可以刺激或抑制彼此，刺激例子是放牧，其刺激初級生產者的耐放牧物種，甚至可以增加植物群落的生物量和初級生產。生物體可以經

由，例如毒素生產、寄生，和空間與資源競爭。人類對生態系統的刺激和抑制可能對生態系統產生巨大的影響，因為人類利用土地進行糧食和物質生產，而且還有全球性的對自然生態系統土地利用的巨大影響。

### **Bio 15 攝食**

攝食是由生物體（包括人類）引入來自周圍介質的元素或水。它包括飲用、吸入和皮膚轉移。生物體可以通過飲用、吸入、根吸收或直接通過細胞膜以吸收水分和物質。有機體吸收和排泄放射性核種會影響生物體內以及生物圈系統其他成分中的放射性核種的濃度。

### **2.3.2. 與人類行為有關的作用**

人類行為可能對生物圈有很大的影響，例如經由引入生物群或化學元素的種類，或經由大量干擾或去除材料。用水、材料使用、人為排放和物種引入/滅絕皆是與人類行為有關的作用。

### **Bio 16 人為排放**

由於灌溉和施肥釋放的放射性核種。燃燒而釋放到大氣中的泥炭或柴火，包括在劑量計算中。人為排放可能會影響環境的化學成分和溫度，這反過來可能對生物組件和生物作用很重要。

### **Bio 17 材料使用**

人類利用濕地乾草、海藻和泥炭或木材。人類利用環境中於餵養以外的目的（見 Bio02 “消費”）、飲用（參見 Bio15 “攝食”）和用水（見下文 Bio19）。地質圈中的礦物和化石燃料、可用於產生能源的風（當地大氣）和生物群、衣服（如毛皮和棉花）、造紙、著色和建築材料（木材、蘆葦、葉子）。這些所有活動都可能影響生物圈系統中放射性核種的累積和傳輸以及對人類的劑量。人類對於材料使用也可能影響物種分佈、生物量和產生。

### **Bio 18 物種引入/消滅**

由於人類活動於處置場內之物種引入或消滅。生物群落被視為處於平衡狀態。物種引入的不同途徑，例如：農業、水產養殖、有害生物控制和其他物種無意中闖入。近年來有的幾個例子的外來物種引進至瑞典並適應了瑞典的新環境。一些最著名的是引進貂（*Mustela vison*），斑馬貽貝（*Dreissena polymorpha*）和小龍蝦（*Pasifastacus leniusculus*）。

雖然上述例子的引入對於生態系統來說已經產生了相當負面影響，但物種的引入也可能對人類產生正面的影響。而從更長的時間來看，瑞典大多數作物物種已被引入。除了引進外來物種之外，人類還可以經過狩獵、收集或擾亂生活棲息地來消除某個地區的物種，例如瑞典和世界各地的一些種群和物種目前正面臨滅絕威脅，在瑞典已經滅絕物種的例子是中點啄木鳥（*Dendrocopos medius*）和歐洲野牛。

## **Bio 19 用水**

在菜園情節中考慮灌溉的影響。用水是人類除了飲用以外的目的所使用的水量。用水的例子是能源生產、灌溉、污水沖洗、洗衣服、淋浴和給水供應鏈中的損失（例如從管道洩漏）。灌溉可能會增加食物中的放射性核種濃度。

### **2.3.3. 化學、力學和物理作用**

化學、力學和物理作用是由於機械力或物理和化學規律而發生的作用過程。化學、機械力和物理作用過程可以影響元素和化合物的狀態，這對於放射性核種的傳輸是重要的。例如，在一些物理化學狀態下，元素與顆粒緊密結合，但在其他狀態下，它們可以容易地被水溶解和傳輸。此外，這些過程可以影響放射性核種的生物利用度，這取決於放射性核種是否以易於被生物體吸收的物理化學形態存在。

## **Bio 20 壓力變化**

壓力是作用於單位面積的力。這裡，壓力是指空氣和水的壓力，壓力的變化是指空氣和水的壓力變化。該方法還包括絕熱溫度變化，即由於壓力變化而導致的升溫或冷卻。空氣所施加的壓力（大氣壓力）在地球上變化很大，其影響氣候、天氣、海平面、水的傳輸等。水對海底施加的壓力取決於海平面大小，這可能是由於天氣和等靜壓的變化（參見 Bio49 “海平面變化”和 Bio48 “岩石表面位置變化”作用）。

## **Bio 21 壓密**

壓密是鬆散的、柔軟的或液體的土壤材料變得聚集堅固和凝聚成岩石的任何過程。該負載過程排出孔隙水和孔隙空氣，並減少表土層土壤體積。對於表土層土壤轉化成固體岩石是一個緩慢的過程，它需要逐漸減小體積和增加密度，並對應為增加的載荷或壓縮應力。這個過程受到表土層土壤的重量（厚度和密度）的影響。由於壓密固結的結果，受放射性核種污染的空气或水可能與水一起傳輸到表土層。這是生物圈影響地質圈的進程之一，並在地質圈的交互作用矩陣中得到進一步的處理。SKB 亦使用壓密固結來描述

表土層壓實，例如在濕地排水期間。

### **Bio 22 元素供應**

元素濃度被認為是特徵的一部分（例如 CR 值）。來自集水區域可供人類和其他生物使用的元素和其他基質的元素量。元素通常被定義為不能經由化學方法分解成更簡單物質的物質。有些定義更寬泛，除了元素外還包括可被於生物體吸收的液態或氣態的化合物。例如二氧化碳的儲存以及溶解在水中的營養物質，可被水域初級生產者在初級生產中利用，或可讓消費者呼吸的氧氣量。初級生產對營養素的需求往往大於供應量，在這種情況下，元素供應將限制初級生產。

### **Bio 23 加載**

加載是由下層岩石上的材料（表土層或冰）的重量引起的力作用。地層的重量（厚度和密度）影響地球環境中的機械應力，從而影響裂縫發生讓地下水能流到地表面。類似地，在冰川期間冰蓋厚度的變化將影響岩石中的機械應力，這是生物圈影響地質圈的進程之一，並在地質圈的交互作用矩陣中進一步處理。

### **Bio 24 相變**

相變是物質在固體、液體和氣體不同狀態之間的變化。相變是由於溫度和（或）壓力的變化而發生的，有時與反應有關。相變對生物圈內放射性核種傳輸可能是很重要的過程。副作用是蒸發和凝結（即水從液相轉化為氣相，反之亦然），溶解和脫氣（通過水-大氣和土壤-大氣交界面的氣體通量）和水的冷凍。相變會影響濕度和水的化學成分、大氣和表土層。

### **Bio 25 物理性質變化**

在生物圈交互作用矩陣中，物理性質的變化限於水的體積、密度和（或）粘滯度的變化。其他物理性質：顏色、密度、電荷、長度、壓力，則不包括在內。溫度對水的密度有很大的影響，淡水在約 4°C 達到最大密度，水的體積與密度有關，全球暖化導致海平面上升的原因。除了溫度、體積和密度也受壓力和鹽度影響，其中高壓和高濃度的溶解鹽導致密度增加和體積減小。流體粘滯度（流體對剪切力的阻力量度）也受溫度影響並隨溫度降低。

### **Bio 26 反應**

化學反應是一種或多種化學元素或化合物形成新化合物的變化。“反應”在這裡限



於化學反應，不包括風化、分解和光合作用（作為單獨的作用過程處理）。反應可以釋放或消耗熱量。它們影響顏色和密度，並可以誘發相變，反應包括受溫度影響的反應速率。雖然許多反應對放射性核種的傳輸和累積的直接影響有限，但它們對於生態系統功能可能是重要的，因此對放射性核種的傳輸和累積是屬於間接影響。

### **Bio 27 吸附/脫附**

吸附是溶解的物質粘附到表面或被顆粒（例如土壤或沉積物顆粒）吸著的過程，其中，脫附是相反的過程，由此脫附過程物質將被釋出。吸附包括：吸附（由於顆粒表面處的離子交換而引起）、分配（疏水基質與顆粒的表面相關）和吸入（吸附到顆粒內部），所有的最終結果為這三種子過程是物質與顆粒的結合。此外，這些子過程在實際作用中難以相互區分。吸附/脫附受固體物質的化學成分、電荷和表面積以及溶解物質的吸附性質的影響。生物圈系統的不同水分組成和水分中的顆粒數量會影響吸附/脫附，因此影響生物圈系統不同區塊的水中和固相之放射性核種和其他元素的濃度。分配係數  $K_d$  通常作為這種複雜相互作用的量度。

### **Bio 28 供水**

供水是生態系統（包括人類）中有機體可以利用的水流。供水通常限於人類供水，生物體的供水可以用於飲用（參見 Bio15 “攝食”），人類也可將水用於其他目的，如灌溉、洗滌或工業用途（參見 Bio19 “用水”）。

### **Bio 29 風化**

風化是岩石和碎石分解和分解成更小的顆粒物，這個過程不包括侵蝕。風化可以是化學，力學和/或生物作用，化學風化由於水、氧、二氧化碳和有機酸的化學作用而溶解和分解固體物質；力學風化是由霜凍、溫度變化、風和鹽結晶的物理作用引起的；生物風化是由植物和動物的作用破壞岩石和石頭及其組成礦物。

### **Bio 30 風應力**

風應力是由於風作用產生的機械力並影響生物圈地表面。當風速高時，作用在生物圈上的壓力很高，風應力影響地表水。水波（見 Bio32 “對流”）和海水中含水量（參見 Bio39 “再懸浮”）。

#### **2.3.4. 傳輸作用**

傳輸作用是將元素和物質從系統中的一個點運送到另一個點的過程。傳輸過程可能

會對系統中放射性物質的最終位置或者將其從相關系統運出而產生很大的影響。

### **Bio 31 加速度**

加速度是氣體、液體或物體的速度變化隨時間的變化。加速度可以是正或負，即速度的增加或降低。加速度受到生物圈中的生物和非生物組件的影響，如地形、初級生產者的類型和位置、人造建築物等。風和水的速度又影響水柱的混合和停留時間（對流）以及人類和其他生物的生活條件（見 Bio14 之刺激/抑制）

### **Bio 32 對流**

對流定義為物質（例如水）或液體或氣體中的性質（例如溫度）的傳輸。定義包括對流和平流傳輸以及擴散傳輸。在水文學、海洋學、氣象學和其他大型環境科學中，擴散和對流的過程往往不同。分子擴散傳輸（或混合）是由分子在流體/氣體內的隨機運動引起的，而平流（和對流）傳輸是指通過周圍介質的大量運動傳遞熱量或質量。對流在某些學科中被定義為平流的特殊情況，其中大量運動由其起始在周圍介質中的密度梯度（例如熱或鹽度），導致垂直接流動。在本報告中，所有平流、對流和擴散的傳輸都是一起作用的，以保持作用過程的可管理性，這個過程稱為對流。生態系統對流的例子是河流、地下水抽取/補注，和在湖泊內混合（春季和秋季時之翻轉）。

### **Bio 33 覆蓋**

覆蓋是由諸如冰或植被之類的東西覆蓋在地表面，從而減少入射光以及減少地表水和大氣之間的氣體和顆粒交換的過程。湖上的冰蓋影響可蒸發的水量，大氣和地表水之間的氧氣和二氧化碳的交換以及地表水的流動。初級生產者的密集覆蓋也有類似的影響。

### **Bio 34 沉積**

沉積是由於重力作用將材料或元素傳遞到任何類型的表面。因此，該方法包括沉澱和大氣降水。大氣降水發生是由於乾沉積或濕沉積（雨、雪和冰雹）。沉積受到顆粒的密度和體積以及它們正在下沉的介質密度（空氣、水）所影響。此外，對流和紊流，如風速和氣流，都會影響沉積。沉積物會改變表土層土壤的組成、幾何形狀和孔隙率、地面水流量，以及放射性核種和其他有毒物質在土壤表面上的沉積，可能會改變表面的物理和化學性質（礦物學）。

### **Bio 35 流出**

流出為將某些物質從模型區域流出的作用過程。任何物質都可以流出，例如生物、

水、氣體、元素、化合物和熱量。人類從場區移動出（移出）也包括在這個作用過程中。流出可能是主動方式（生物體強制遷移）或被動的（由風、氣流、下游排水等引起）。非生物作用的流出影響現場的溫度、元素和其他基質的數量。生物作用的流出會影響現場居民的數量和相關過程（如消費和生產）。

### **Bio 36 流入**

流入為將某些物質傳輸到模型區域的過程。任何物質都可以流入，例如生物、水、氣體、元素、化合物和熱量。人類從場區移動入（移入）也包括在這個作用過程中。流入可能是主動的（生物體強制遷移）或被動（由風、氣流、水流等引起）。非生物作用的流入會影響現場的溫度、元素和其他基質的數量。生物作用的流入會影響現場居民的數量和相關過程（如消費和生產）。

### **Bio 37 截獲**

截獲是指所有被植被所截獲/保留元素的所有濕和乾沉積物，不會立即滲入地下或參與地下水傳輸或徑流過程。在植被上保留的降水不受限制，被截留的水和元素的數量受到地上生物量、植被類型、可用葉面積、沉積量、沉積類型（乾或濕）和初級生產者的吸收所影響。放射性核種可存在於大氣中並經由沉積而掉落或存在於灌溉的水中。截獲可能從輻射角度來看是重要的，截留沉積物的比率影響植被中放射性核種的數量，如果植被被消耗，動物和人類的劑量也將受到影響。

### **Bio 38 搬遷**

搬遷是固體物質和固定的生物從一個點轉移到另一個點。搬遷可以經由水或風、冰川侵蝕、滑坡或人類活動如挖掘、土壤傳輸和工業採礦的侵蝕來傳達。搬遷可將污染物和放射性核種釋放到水和空氣中。更細的顆粒被風和水重新懸浮，這被視為一個單獨的作用過程，參見 Bio39 再懸浮。

### **Bio 39 再懸浮**

再懸浮是沉積在表面上的物質重新輸送到上層介質中的過程。在生物圈中，在沉積物和水柱之間，以及表土層土壤和空氣之間的界面再懸浮的作用可能是重要的。在水域環境中，再懸浮增加顆粒和水柱之間表面相互作用，從而影響吸附/脫附作用過程。大量的沉積物質可能在海洋和野生生態系統中發生再懸浮。土壤中顆粒的大小分佈亦會影響在水或空氣中再懸浮的物質量，從而影響水或空氣中的顆粒含量。更大的顆粒在搬遷

(Bio38) 下進行處理。

#### **Bio 40 飽和度**

飽和度為表土層土壤含水量的變化。當表土層土壤裡的所有孔隙充滿水時，屬於完全飽和。表土層土壤水流（對流）的大小和方向影響飽和度。水流依賴於降水、蒸散量，土壤的水力特性、孔隙度等。飽和度對於陸域生物群是重要的，因為它決定了植物的生活條件。

#### **2.3.5. 熱和輻射作用**

熱和輻射作用是涉及溫度、太陽日照和放射性核種特異性特徵的作用過程。

#### **Bio 41 放射性衰變**

放射性核種衰變為其他放射性核種或穩定核種。衰變過程會使放射性核種轉化並導致核種活度降低。大量不穩定放射性核種的衰變可能會對水的組成產生影響，放射性核種產生衰變熱可能影響生物圈系統不同組件的溫度。

#### **Bio 42 曝露**

曝露指生物體或死亡生物體/物質曝露於  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  或中子輻射的過程。曝露可以是源於體外的外部曝露或源自體內的內部曝露。生物圈系統所有的放射性核種的濃度、位置和類型都會影響外部曝露，而生物體內部放射性核種的濃度、位置和類型會影響內部曝露。在短時間內曝露於高劑量可能會導致確定性的健康影響，從血液細胞數量輕微降低到可能死亡。即使在低劑量下，慢性曝露（或長時間的曝露）被認為是增加曝露個體隨機效應的可能性，如癌症和誘發遺傳異常的可能性。

#### **Bio 43 熱儲存**

熱儲存（熱容量）是材料（固體、氣體或液體）存儲熱能的能力。儲藏溫度影響生物圈不同組件的溫度，包括陸地和水域系統。水的熱儲存能力非常高，超過了幾種物質（如液體  $\text{NH}_3$ ），並且防止水域生態系統溫度的極端變化。此外，水的比熱影響了湖泊和海洋分層、混合以及對流。儘管表土層土壤的熱容量低於水中的熱容量，但是表土層土壤的密度和熱特性決定可儲存的熱量，從而也影響陸地生態系統的溫度。

#### **Bio 44 輻射**

輻射（經由電離輻射）是物體曝露於輻射和吸收能量的過程。放射性核種在表土層土壤和水中的輻射作用可能會影響材料的礦物結構。

## **Bio 45 光相關作用**

光相關作用是指涉及光進入生物圈（日光）的過程和與此相關的過程，即吸收，散射和反射。光相關作用不包括光合作用（其被視為生物過程，參見 Bio13 的初級生產）。許多因素（如水的組成、植被的程度和類型、雪的存在和水波的形成）影響光反射、散射和吸收的程度。光相關作用又影響生物圈的其他部分，例如：日照度（以及輻射的吸收/散射/反射程度）會影響溫度和光合作用。

## **Bio 46 輻射分解**

輻射分解是由輻射引起分子的分解。原則上，輻射分解可能是水分子以外的分解。在實際狀況案例中，水的輻射分解是最重要的，輻射分解會導致水因放射性作用而分解，從而影響生物圈系統不同組件的水分組成。輻射分解也可以局部改變氧化還原條件，從而改變其他化合物的形態和溶解度。

## **Bio 47 放射性核種釋出**

放射性核種釋放是從處置場之固體放射性廢棄物釋放核種經由地質圈到生物圈。

### **2.3.6. 地景開發作用**

生態系統（海洋、土地或陸地）的類型和地景的幾何影響放射性核種的傳輸和累積。因此，地景開發作用的影響在安全評估中可能很重要。

## **Bio 48 岩石表面位置變化**

岩石表面位置的變化是指岩石表面位置的垂直變化。由於構造、等靜壓反彈或處置場引起的變化。等靜止反彈是在冰河時期對土地施加的負載的恢復，這導致了地殼的沈陷。一旦冰蓋覆蓋較薄，壓力開始下降，地殼開始反彈（等靜壓反彈）。等靜壓反彈導致海岸線變化（陸地上升），新的陸地和湖泊從海面出現。等靜壓反彈和海平面變化（見 Bio49）是決定海岸線位置的兩個因素，因此對未來生態系統產生重大影響。然而，岩石表面位置的變化也可能發生，而不改變生態系統類型，即在岩石地表位置變化之後，地景中的陸地地點可能繼續是陸地的。處置場誘發的變化，例如，洞穴坍塌導致周圍岩石塌陷或由於地震造成新構造的移動。這會影響周圍岩石的應力狀況，並可能影響到表土層的高度。

## **Bio 49 海平面變化**

海平面變化是海平面相對於陸地表面的上升和下降。由於海洋表面的高度增加（例

如，由於地球表面的幾何形狀的變化，海洋中的水分的增加或降低），海平面上升可能降低海洋的儲存能力和（或）土地高度的下降（例如由於冰蓋加載或構造活動，參見上文 Bio48 “岩石地表位置的變化”）。相反的，由於海洋高度的下降和（或）由於與上述相反的過程而導致相對海平面的下降，陸地表面高度的升高。在任何時間，相對海平面變化的速度由這些因素的組合決定。現在，由於全球變暖造成的大陸冰融化，由於水量隨著氣溫的增加而增加，造成全球海平面上升。相對應地，由於體積減少和水在大陸冰上被束縛，氣候變冷時，海平面會下降。在最近的冰川期間，全球海平面比現在低了 120 米。海平面上升並不是在世界上平均發生，而且受不同尺度的因素的影響：全球（引力場）、區域（等靜壓反彈/沉降）和當地（降水和風力）。

### Bio 50 閾值

閾值(Thresholding)受水位、山體滑坡、人類挖掘、水壩和土地上升的影響（後者可能由於不均勻等級隆升引起的傾斜而改變閾值）。人類往往影響過去的閾值，並經由降低閾值獲得新的農田。閾值是重要的，因為它設置了湖泊和海洋之間的邊界，並確定湖泊幾何（體積、面積、深度）。係為水域在海和湖之間的內插值參數。

## 2.4. 生物圈交互作用

交互作用矩陣(IM)是能系統性識別生物圈作用流程之有用工具。SKB 提供了適用於 Forsmark 場址所有種類生態系統以及其他具有相似條件地理位置之生物圈交互作用矩陣。由對角線元素表示的系統組件可以經由一個或多個進程彼此交互作用。根據生態系統和地理位置，交互作用對於放射性核種的傳輸和累積可能藉以判斷重要或不重要。SKB Forsmark 的處置場（深度>30 米），完成之識別交互作用對於放射性核種的傳輸和累積，及估算對人類和其他生物群的輻射曝露，具有相當之重要性。

### 2.4.1. 一般生物圈交互作用矩陣

表 2 為 SKB 對於生物圈交互作用矩陣，於前述 2.1 節已提出 10 個組件代表不同的環境媒介（表土層、表土層水、地表水、氣體和當地大氣）和生物群體（初級生產者、分解者、濾食性動物、草食動物、肉食動物、人類），另外還有 2 個邊界組件（地質圈和外部條件）包含在交互作用矩陣（IM）中。另外 2.2 節已提出之 6 個特徵（在對角線上顯示）和 2.3 節已提出之 50 個生物圈作用（變量作用在矩陣之非對角線上之作用過程）。表 3 列出生物圈交互作用矩陣(IM)中的作用的簡要定義。包括作用、定義、矩陣中交互

作用（列：行）編號、FEP 資料庫編號。

表 2 生物圈交互作用矩陣

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	地質圖	Bio48 Bio23 Bio29	Bio32	Bio32	Bio32						Bio10 Bio28	
2	Bio21 Bio32 Bio23	表土層 Fea 01~06	Bio32 Bio24 Bio26 Bio27 Bio50	Bio31 Bio24 Bio26 Bio39 Bio27 Bio50	Bio31 Bio20 Bio24 Bio41 Bio26 Bio39	Bio22 Bio42 Bio08 Bio45 Bio38 Bio14	Bio22 Bio42 Bio06 Bio08 Bio14	Bio42 Bio08 Bio14	Bio42 Bio08 Bio14	Bio42 Bio08 Bio14	Bio42 Bio06 Bio08 Bio10 Bio14	Bio35 Bio50
3	Bio20 Bio32 Bio29	Bio24 Bio38 Bio40 Bio27 Bio29	表土層水 Fea 01~06	Bio32	Bio41 Bio24	Bio22 Bio42 Bio08 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio08 Bio14 Bio28	Bio42 Bio14 Bio28	Bio42 Bio14 Bio28	Bio42 Bio14 Bio28	Bio42 Bio14 Bio28	Bio35
4	Bio20 Bio32 Bio23 Bio29	Bio34 Bio38 Bio39 Bio40 Bio27 Bio29	Bio32	地表水 Fea 01~06	Bio33 Bio24 Bio38 Bio29	Bio22 Bio42 Bio08 Bio45 Bio38 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio06 Bio08 Bio38 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio06 Bio08 Bio38 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio08 Bio38 Bio14 Bio28	Bio22 Bio42 Bio08 Bio38 Bio14 Bio28	Bio42 Bio08 Bio14 Bio28	Bio35 Bio35
5	Bio32	Bio34 Bio26 Bio38 Bio39	Bio32 Bio24	Bio32 Bio34 Bio24 Bio30	當地大氣 Fea 01~06	Bio22 Bio42 Bio38 Bio14	Bio22 Bio42 Bio14	Bio22 Bio42 Bio14	Bio22 Bio42 Bio14	Bio22 Bio42 Bio14	Bio34 Bio22 Bio42 Bio14	Bio35
6	Bio09	Bio01 Bio32 Bio03 Bio45 Bio26	Bio32 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio31 Bio32 Bio33 Bio03 Bio05 Bio37 Bio45 Bio26 Bio12 Bio27 Bio15	Bio31 Bio33 Bio05 Bio45 Bio26 Bio12 Bio27 Bio15	初級生產者 Fea 01~06	Bio08 Bio14	Bio06 Bio08 Bio14	Bio06 Bio08 Bio14	Bio14	Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
7	Bio09	Bio01 Bio02 Bio32 Bio03 Bio04 Bio05 Bio45 Bio26	Bio32 Bio04 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio31 Bio02 Bio03 Bio04 Bio05 Bio45 Bio11 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio05 Bio45 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio14	分解者 Fea 01~06	Bio06 Bio14	Bio14	Bio06 Bio14	Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
8	Bio09	Bio01 Bio32 Bio03 Bio45 Bio26 Bio27	Bio32 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio31 Bio02 Bio03 Bio05 Bio45 Bio11 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio05 Bio15	Bio02 Bio08 Bio14	Bio02 Bio08 Bio14	濾食性動物 Fea 01~06	Bio02 Bio14	Bio02 Bio06 Bio14	Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
9	Bio09	Bio01 Bio32 Bio03 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio32 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio31 Bio03 Bio05 Bio45 Bio11 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio05 Bio45 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio02 Bio14	Bio14	Bio06 Bio14	草食動物 Fea 01~06	Bio06 Bio14	Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
10	Bio09	Bio01 Bio32 Bio03 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio32 Bio05 Bio45 Bio26 Bio27 Bio15	Bio03 Bio05 Bio45 Bio11 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio05 Bio45 Bio12 Bio26 Bio27 Bio15	Bio14	Bio02 Bio14	Bio02 Bio06 Bio14	Bio02 Bio14	肉食動物 Fea 01~06	Bio02 Bio06 Bio10 Bio14	Bio35
11	Bio09 Bio11	Bio16 Bio21 Bio17 Bio38	Bio16 Bio15 Bio19	Bio31 Bio16 Bio15 Bio19	Bio16 Bio32 Bio15	Bio02 Bio14	Bio18		Bio02 Bio18 Bio14	Bio18	人類 Fea 01~03	
12	Bio48	Bio48 Bio36 Bio45	Bio36 Bio45 Bio40	Bio32 Bio36 Bio45 Bio49	Bio36 Bio45 Bio26	Bio36 Bio45 Bio14	Bio36 Bio14	Bio36 Bio14	Bio36 Bio14	Bio36 Bio14	Bio36 Bio14	外部條件



表 3 生物圈交互作用矩陣(IM)中的作用的簡要定義。

這些作用過程分為以下幾類：1) 生物作用，2) 與人類行為有關的作用，3) 化學，力學和物理作用，4) 傳輸作用，5) 熱和放射性作用以及地景開發作用。\*表示雖然主要與涉及非人類生物群的相互作用相關的過程也可能涉及人類。

作用	定義	交互作用矩陣中 (列：行)	FEP 編號
<b>生物作用</b>			
1 生物擾動	生物擾動是水域和陸域表土層藉由植物、動物、細菌和真菌造成之混合作用	6:2, 7:2, 8:2, 9:2, 10:2	Bio01
2 消耗量*	消耗是生物體的物質攝食	7:2, 7:4, 8:4, 8:6, 8:7, 8:8, 8:9, 8:10, 9:6, 10:7, 10:8, 10:9, 10:10, 10:11, 11:2, 11:6, 11:7, 11:8, 11:9, 11:10	Bio02
3 死亡*	生物體從活的區塊轉移到死亡的有機物質	6:2, 6:4, 7:2, 7:4, 8:2, 8:4, 9:2, 9:4, 10:2, 10:4, 11:2, 11:4	Bio03
4 分解	分解者對死亡有機物的分解	7:2, 7:3, 7:4	Bio04
5 排泄*	化學元素和化合物從生物體經由介質釋放到周圍環境中	6:3, 6:4, 6:5, 7:2, 7:3, 7:4, 7:5, 8:3, 8:4, 8:5, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:2, 11:3, 11:4, 11:5	Bio05
6 食物供應	食品的生產和供應的過程並提供給消費者使用。初級生產者、動物和死亡有機物可以作為食物來源使用	2:7, 2:11, 4:7, 4:8, 6:8, 6:9, 6:11, 7:8, 7:10, 7:11, 8:8, 8:10, 8:11, 9:8, 9:10, 9:11, 10:8, 10:10, 10:11, 11:10	Bio06
7 生長*	生物體產生生物量	6:6, 7:7, 8:8, 9:9, 10:10, 11:11	Bio07
8 棲息地供應	環境中的生物體或非生物成分提供其他生物體的基質或掩蔽物。	2:6, 2:7, 2:8, 2:9, 2:10, 2:11, 3:6, 3:7, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 4:11, 6:6, 6:7, 6:8, 6:9, 8:6, 8:7	Bio08
9 侵入*	生物體 (包括人類) 進入處置場的過程，例如移動、鑽孔或增值	6:1, 7:1, 8:1, 9:1, 10:1, 11:1	Bio09
10 材料供應	可讓人類利用的材料量 (除餵養以外的目的)	1:11, 2:11, 6:11, 7:11, 8:11, 9:11, 10:11	Bio10
11 移動*	動物在地面水中移動	7:4, 8:4, 9:4, 10:4, 11:4	Bio11
12 顆粒釋放/捕集*	顆粒從生物體釋放到環境中，或由生物體捕集環境中的顆粒。	6:4, 6:5, 7:4, 7:5, 8:4, 9:4, 9:5, 10:4, 10:5, 11:4	Bio12
13 初級生產	初級生產 (這裡指初級生產總量) 是總固定的無機碳	6:6	Bio13
14 刺激/抑制*	當組件影響另一組件時，發生刺激/抑制 (正或負)，例如：生物群可能競爭空間，從而抑制彼此影響生物量和生產。	2:6, 2:7, 2:8, 2:9, 2:10, 2:11, 3:6, 3:7, 3:8, 3:9, 3:10, 3:11, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 4:11, 5:6, 5:7, 5:8, 5:9, 5:10, 5:11, 6:6, 6:7, 6:8, 6:9, 6:10, 6:11, 7:6, 7:7, 7:8, 7:9, 7:10, 7:11, 8:6, 8:7, 8:8, 8:9, 8:10, 8:11, 9:6, 9:7, 9:8, 9:9, 9:10, 9:11, 10:6, 10:7, 10:8, 10:9, 10:10, 10:11, 11:6, 11:7, 11:8, 11:9, 11:10, 11:11, 12:6, 12:7, 12:8, 12:9, 12:10, 12:11	Bio14
15 攝食*	由生物體 (包括人類) 引入來自周圍介質的元素或水。它包括飲用、吸入和皮膚轉移	6:3, 6:4, 6:5, 7:3, 7:4, 7:5, 8:3, 8:4, 8:5, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:3, 11:4, 11:5	Bio15
<b>與人類行為有關的作用</b>			
16 人為排放	由於灌溉和施肥釋放的放射性核種。燃燒而釋放到大氣中的泥炭或柴火，包括在劑量計算中	11:2, 11:3, 11:4, 11:5	Bio16
17 材料使用	人類利用濕地乾草、海藻和泥炭或木材。	11:1, 11:2, 11:6, 11:7, 11:8, 11:9, 11:10	Bio17
18 物種引進/消滅	由於人類活動於處置場造成物種引進或消滅。	11:6, 11:7, 11:8, 11:9, 11:10	Bio18
19 用水	菜園情節情景中考慮灌溉的影響。	11:3, 11:4	Bio19

作用	定義	交互作用矩陣中（列：行）	FEP 編號
<b>化學、力學和物理的作用</b>			
20 壓力變化	在地表面上空氣和水的壓力變化	2:2, 2:5, 3:1, 4:1, 4:4, 5:5	Bio20
21 壓密	鬆散的土壤材料變得聚集堅固和凝聚成岩石的過程。該過程排出孔隙水和孔隙空氣，並減少表土層土壤體積	2:1, 2:2	Bio21
22 元素供應	來自集水區域可供人類和其他生物使用的元素和其他基質的元素量。	2:6, 2:7, 3:6, 3:7, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 5:6, 5:7, 5:8, 5:9, 5:10, 5:11	Bio22
23 加載	下層岩石上的材料（表土層或冰）的重量引起的力作用。	2:1, 4:1	Bio23
24 相變	相變是物質在固體、液體和氣體不同狀態之間的變化	2:3, 2:4, 2:5, 3:2, 3:3, 3:5, 4:4, 4:5, 5:3, 5:4, 5:5	Bio24
25 物理性質變化	水的體積、密度和（或）粘滯度的變化	2:2, 4:4	Bio25
26 反應	反應”在這裡限於化學反應，不包括風化、分解和光合作用	2:3, 2:4, 2:5, 3:3, 4:4, 5:2, 5:5, 6:2, 6:3, 6:4, 6:5, 6:6, 7:2, 7:3, 7:4, 7:5, 8:2, 8:3, 8:4, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:5, 12:5	Bio26
27 吸附/脫附	吸附是溶解的物質粘附到表面或被顆粒（例如土壤或沉積物顆粒）吸著的過程	2:3, 2:4, 3:2, 4:2, 4:4, 5:5, 6:3, 6:4, 6:5, 7:3, 7:4, 7:5, 8:2, 8:3, 8:4, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:2, 11:4, 11:5	Bio27
28 供水	生態系統（包括人類）中有機體可以利用的水流，如灌溉	1:11, 3:6, 3:7, 3:8, 3:9, 3:10, 3:11, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 4:11	Bio28
29 風化	風化是岩石和碎石分解和分解成更小的顆粒物	1:2, 2:2, 3:1, 3:2, 4:1, 4:2	Bio29
30 風應力	風作用產生的機械力並影響生物圈地表面。	5:4	Bio30
<b>傳輸作用</b>			
31 加速度	加速度是氣體、液體或物體的速度變化隨時間的變化。加速度可以是正或負，即速度的增加或降低。	2:4, 2:5, 6:4, 6:5, 7:4, 8:4, 9:4, 11:4, 11:5	Bio31
32 對流	物質（例如水）或液體或氣體中的性質（例如溫度）的傳輸	1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 2:1, 2:3, 3:1, 3:3, 3:4, 4:1, 4:3, 4:4, 5:1, 5:3, 5:4, 5:5, 6:2, 6:3, 6:4, 7:2, 7:3, 8:2, 8:3, 9:2, 9:3, 10:2, 10:3, 11:2, 11:3, 11:5, 12:4	Bio32
33 覆蓋	冰或植被之類的東西覆蓋在地表面，從而減少入射光以及減少地表水和大氣之間的氣體和顆粒交換的過程	4:5, 6:4, 6:5, 11:4	Bio33
34 沉積	由於重力作用將材料或元素傳遞到任何類型的表面。因此，該方法包括沉降和大氣降水。	4:2, 5:2, 5:4, 5:11	Bio34
35 流出	某些物質從模型區域流出的作用過程	2:12, 3:12, 4:12, 5:12, 6:12, 7:12, 8:12, 9:12, 10:12, 11:12	Bio35
36 流入	將某些物質傳輸到模型區域的過程	4:12, 12:2, 12:3, 12:4, 12:5, 12:6, 12:7, 12:8, 12:9, 12:10, 12:11	Bio36
37 截獲	降雨不會到達地面並保留在植被上	6:4	Bio37
38 搬遷	固體物質和固定的生物從一個點轉移到另一個點	2:2, 2:6, 3:2, 4:2, 4:5, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 5:2, 5:6, 11:2	Bio38
39 再懸浮	沉積在表面上的物質重新輸送到上層介質中的過程	2:4, 2:5, 4:2, 4:5, 5:2	Bio39
40 飽和度	水分含量影響表土層土壤的物理和化學特性	3:2, 4:2, 12:3	Bio40

作用	定義	交互作用矩陣中（列：行）	FEP 編號
<b>熱和輻射作用</b>			
41 放射性衰變	衰變為其他放射性核種或穩定核種	2:2, 2:5, 3:3, 3:5, 4:4, 5:5, 6:6, 7:7, 8:8, 9:9, 10:10, 11:11	Bio41
42 曝露	曝露指生物體或死亡生物體/物質曝露輻射的過程。曝露可以是源於體外的外部曝露或源自體內的內部曝露。	2:6, 2:7, 2:8, 2:9, 2:10, 2:11, 3:6, 3:7, 3:8, 3:9, 3:10, 3:11, 4:6, 4:7, 4:8, 4:9, 4:10, 4:11, 5:6, 5:7, 5:8, 5:9, 5:10, 5:11, 6:6, 7:7, 8:8, 9:9, 10:10, 11:11	Bio42
43 熱儲存	熱儲存再固體和水體	2:2, 3:3, 4:4, 5:5	Bio43
44 輻射	輻射（經由電離輻射）是物體曝露於輻射和吸收能量的過程	2:2	Bio44
45 光相關作用	光進入生物圈（日光）的過程和與此相關的過程，即吸收，散射和反射。	2:2, 2:6, 4:4, 4:6, 5:5, 6:2, 6:3, 6:4, 6:5, 6:6, 7:2, 7:3, 7:4, 7:5, 8:2, 8:3, 8:4, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 10:2, 10:3, 10:4, 10:5, 11:5, 12:2, 12:3, 12:4, 12:5, 12:6	Bio45
46 輻射分解	輻射引起分子的分解	3:3, 4:4	Bio46
47 放射性核種釋出	核種從處置場釋出	1:1	Bio47
<b>地景開發作用</b>			
48 岩石表面位置的變化	岩石表面位置的變化是指岩石表面位置的垂直變化	1:2, 12:1, 12:2	Bio48
49 海平面變化	海平面相對於陸地表面的上升和下降	12:4	Bio49
50 閾值	水域在海和湖之間的內插值參數	2:3, 2:4, 2:12	Bio50

## 2.4.2. 生物圈物理組件之間交互作用

系統組件表示對角線元素可以經由一個或多個作用過程彼此相互作用。一些作用過程發生在交互作用矩陣(IM)中的許多地方。以下表 4 至表 15 分別描述表 2 中交互作用矩陣(IM)每個框的意義及交互作用矩陣中（列：行）之說明。

### 1. 地質圈對其他物理組件之作用

表 4 地質圈對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
<b>1：1</b>	<b>地質圈</b> 是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。地質圈位於生物圈矩陣的邊界。與生物圈矩陣相關的地質圈內作用是(a)放射性核種釋出。
<b>1：2</b>	<b>地質圈</b> 影響表土層之作用：a) Bio48 岩石表面位置變化，b) Bio23 對流，c) Bio29 風化。
<b>1：3</b>	<b>地質圈</b> 影響表土層水之作用：a) Bio32 對流。

矩陣中 (列：行)	說明
1：4	地質圈影響地表水之作用：a) Bio32 對流。
1：5	地質圈影響氣體及當地大氣之作用：a) Bio32 對流。
1：6	地質圈無影響主要生產者之作用。
1：7	地質圈無影響分解者之作用。
1：8	地質圈無影響濾食性動物之作用。
1：9	地質圈無影響草食性動物之作用。
1：10	地質圈無影響肉食性動物之作用。
1：11	地質圈影響人類之作用：a) Bio10 材料供應，b) Bio28 供水。
1：12	地質圈無影響外部條件之作用。

## 2. 表土層對其他物理組件之作用

表 5 表土層對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
2：1	表土層影響地質圈之作用：a) 壓密，b) 對流，c) 加載。
2：2	表土層是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。表土層在內部受幾何、材料組成、溫度、水分、演替階段和放射性核種總量等特徵所影響。受以下作用所影響：a) 壓力變化，b) 壓密，c) 儲熱，d) 輻射，e) 光相關作用，f) 物理性質變化，g) 放射性衰變，h) 搬遷和 i) 風化。
2：3	表土層影響表土層水之作用：a) Bio32 對流，b) Bio24 相變，c) Bio26 反應，d) Bio27 吸附/脫附，e) Bio50 閾值。
2：4	表土層影響地表水之作用：a) Bio31 加速度，b) Bio24 相變，c) Bio26 反應，d) Bio39 再懸浮，e) Bio27 吸附/脫附，f) Bio50 閾值。
2：5	表土層影響氣體與當地大氣之作用：a) Bio31 加速度，b) Bio20 壓力變化，c) Bio24 相變，d) Bio41 放射性衰變，e) Bio26 反應，f) Bio39 再懸浮。
2：6	表土層影響初級生產者之作用：a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，

矩陣中 (列：行)	說明
	c) Bio08 棲息地供應，d) Bio45 光相關作用，e) Bio38 搬遷，f) Bio14 刺激/抑制。
2：7	表土層影響分解者之作用：a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio06 食物供應，d) Bio08 棲息地供應，e) Bio14 刺激和抑制。
2：8	表土層影響濾食性動物之作用：a) Bio42 曝露，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
2：9	表土層影響草食動物之作用：a) Bio42 曝露，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
2：10	表土層影響肉食動物之作用：a) Bio42 曝露，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
2：11	表土層影響人類之作用：a) Bio42 曝露，b) Bio06 食物供應，c) Bio08 棲息地供應，d) Bio10 材料供應和 e) Bio14 刺激/抑制。
2：12	表土層影響外部條件之作用：a) Bio35 流出和 b) Bio50 閾值。

### 3. 表土層水對其他物理組件之作用

表 6 表土層水對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
3：1	表土層水影響地質圈之作用：a) Bio20 壓力變化，b) Bio32 對流，c) Bio29 風化。
3：2	表土層水影響表土層之作用 a) Bio24 相變，b) Bio38 搬遷，c) Bio40 飽和度，d) Bio27 吸附/脫附，e) Bio29 風化。
3：3	表土層水是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。受幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量等特徵所影響。水中受以下作用所影響：a) 對流，b) 儲熱，c) 相變，d) 放射性衰變，e) 放射分解和 f) 反應。
3：4	表土層水影響地表水之作用 a) Bio32 對流。
3：5	表土層水影響氣體與當地大氣之作用 a) Bio41 放射性衰變，b) Bio24

矩陣中 (列：行)	說明
	相變。
3：6	表土層水影響初級生產者之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio08 棲息地供應，d) Bio14 刺激/抑制，e) Bio28 供水
3：7	表土層水影響分解者之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio08 棲息地供應 d) Bio14 刺激/抑制 e) Bio28 供水。
3：8	表土層水影響濾食性動物之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio14 刺激/抑制，c) Bio28 供水。
3：9	表土層水影響草食動物之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio14 刺激/抑制，c) Bio28 供水。
3：10	表土層水影響肉食動物之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio14 刺激/抑制，c) Bio28 供水。
3：11	表土層水影響人類之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio14 刺激/抑制，c) Bio28 供水。
3：12	表土層水影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

#### 4. 地表水對其他物理組件之作用

表 7 地表水對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
4：1	地表水影響地質圈之作用 a) Bio20 壓力變化，b) Bio32 對流，c) Bio23 加載，d) Bio29 風化。
4：2	地表水影響表土層之作用 a) Bio34 沉積 b) Bio38 搬遷，c) Bio39 再懸浮，d) Bio40 飽和度，e) Bio27 吸附/脫附，f) Bio29 風化。
4：3	地表水影響表土層水之作用。a) Bio32 對流。
4：4	地表水是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。為地面收集水或河流、湖泊濕地或海洋中的水，而不是地下水或大氣水。地表水受到內部幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量等特徵所影響。地表水由以下作用所影響：a) 壓力變化，b) 對流，c) 儲熱，d) 光相關作用，e) 相變，f) 物理性質，g) 放射性

矩陣中 (列：行)	說明
	衰變，h) 放射分解，i) 反應，和 j) 吸附/脫附。
4：5	地表水影響氣體及當地大氣之作用 a) Bio33 覆蓋，b) Bio24 相變，c) Bio38 搬遷，d) Bio39 再懸浮。
4：6	地表水影響初級生產者之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio08 棲息地供應 d) Bio45 光相關作用 e) Bio38 搬遷 f) Bio14 刺激/抑制 g) Bio28 供水。
4：7	地表水影響分解者之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio06 食物供應 d) Bio08 棲息地供應 e) Bio38 搬遷 f) Bio14 刺激/抑制 g) Bio28 供水。
4：8	地表水影響濾食性動物之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio06 食物供應 d) Bio08 棲息地供應 e) Bio38 搬遷 f) Bio14 刺激/抑制 f) Bio28 供水。
4：9	地表水影響草食動物之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio08 棲息地供應 d) Bio38 搬遷 e) Bio14 刺激/抑制 f) Bio28 供水。
4：10	地表水影響肉食動物之作用 a) Bio22 元素供應 b) Bio42 曝露 c) Bio08 棲息地供應 d) Bio38 搬遷 e) Bio14 刺激/抑制 f) Bio28 供水。
4：11	地表水影響人類之作用 a) Bio42 曝露，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制，d) Bio28 供水。
4：12	地表水影響外部條件之作用 a) Bio35 流出，b) Bio36 流入。

#### 5. 氣體及當地大氣對其他物理組件之作用

表 8 氣體及當地大氣對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
5：1	氣體及當地大氣影響地質圈之作用 a) Bio32 對流。
5：2	氣體及當地大氣影響表土層之作用 a) Bio34 沉積，b) Bio26 反應，c) Bio38 搬遷，d) Bio39 再懸浮。

矩陣中 (列：行)	說明
5:3	氣體及當地大氣影響表土層水之作用 a) Bio32 對流和 b) Bio24 相變。
5:4	氣體及當地大氣影響地表水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio34 沉積， c) Bio24 相變，d) Bio30 風應力。
5:5	氣體及當地大氣是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。定義為生態系統上方的氣體層，與水進行氣體交換。氣體組成和氣體流量包含在該元素中，還包括大氣流和風。受以下作用所影響 a) 變化的壓力，b) 對流，c) 儲熱，d) 光相關作用，e) 相變，f) 放射性衰變，g) 反應，和 h) 吸附/脫附。
5:6	氣體及當地大氣影響初級生產者之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio38 搬遷，d) Bio14 刺激/抑制。
5:7	氣體及當地大氣影響分解者之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio14 刺激/抑制。
5:8	氣體及當地大氣影響濾食性動物之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio14 刺激/抑制。
5:9	氣體及當地大氣影響草食動物之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio14 刺激/抑制。
5:10	氣體及當地大氣影響肉食動物之作用 a) Bio22 元素供應，b) Bio42 曝露，c) Bio14 刺激/抑制。
5:11	氣體及當地大氣影響人類之作用 a) Bio34 沉積 b) Bio22 元素供應， c) Bio42 曝露，d) Bio14 刺激/抑制。
5:12	氣體及當地大氣影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

6. 初級生產者對其他物理組件之作用

表 9 初級生產者對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
6:1	初級生產者影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵。



矩陣中 (列：行)	說明
6:2	初級生產者影響表土層之作用 a) Bio01 生物擾動，b) Bio32 對流，c) Bio03 死亡，d) Bio45 光相關作用，e) Bio26 反應。
6:3	初級生產者影響表土層水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio05 排泄，c) Bio45 光相關作用，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，f) Bio15 攝食。
6:4	初級生產者影響地表水之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio32 對流，c) Bio33 覆蓋，d) Bio03 死亡，e) Bio05 排泄，f) Bio37 截獲，g) Bio45 光相關作用，h) Bio26 反應，i) Bio12 顆粒釋放/捕集，j) Bio27 吸附/脫附，k) Bio15 攝食。
6:5	初級生產者影響氣體及當地大氣之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio33 覆蓋，c) Bio05 排泄，d) Bio45 光相關作用，e) Bio26 反應，f) Bio12 顆粒釋放/捕集，g) Bio27 吸附/脫附，h) Bio15 攝食。
6:6	初級生產者是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。內部受到幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量等特徵所影響。受以下作用所影響：a) 曝露，b) 生長，c) 棲息地供應，d) 光照相關過程，e) 初級生產，f) 放射性衰變，g) 反應，h) 刺激/抑制。
6:7	初級生產者影響分解者之作用 a) Bio08 棲息地供應，b) Bio14 刺激/抑制。
6:8	初級生產者影響濾食性動物之作用 a) Bio06 食物供應，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
6:9	初級生產者影響草食動物之作用 a) Bio06 食物供應，b) Bio08 棲息地供應，c) Bio14 刺激/抑制。
6:10	初級生產者影響肉食動物之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
6:11	初級生產者影響人類之作用 a) Bio06 食物供應，b) Bio10 材料供應，c) Bio14 刺激/抑制。
6:12	初級生產者影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

## 7. 分解者對其他物理組件之作用

表 10 分解者對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
7:1	分解者影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵。
7:2	分解者影響表土層之作用 a) Bio01 生物擾動, b) Bio02 消耗, c) Bio32 對流, d) Bio03 死亡, e) Bio04 分解, f) Bio05 排泄, g) Bio45 光相關作用, 和 h) Bio26 反應。
7:3	分解者影響表土層水之作用 a) Bio32 對流, b) Bio04 分解, c) Bio05 排泄, d) Bio45 光相關作用, e) Bio26 反應, f) Bio27 吸附/脫附, g) Bio15 攝食。
7:4	分解者影響地表水之作用 a) Bio31 加速度 b) Bio02 消耗 c) Bio03 死亡 d) Bio04 分解 e) Bio05 排泄 f) Bio45 光相關作用 g) Bio11 移動 h) Bio12 顆粒釋放/捕集, i) Bio26 反應, j) Bio27 吸附/脫附, 和 k) Bio15 攝食。
7:5	分解者影響氣體與當地大氣之作用 a) Bio05 排泄, b) Bio45 光相關作用, c) Bio12 顆粒釋放/捕集, d) Bio26 反應, e) Bio27 吸附/脫附, 以及 f) Bio15 攝食。
7:6	分解者影響初級生產者之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
7:7	分解者是一個對角線元素, 已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。分解者受到幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分組成和放射性核種總量等特徵所影響。分解者受以下作用影響: a) 曝光, b) 生長, c) 放射性衰變, 和 d) 刺激/抑制。
7:8	分解者影響濾食性動物之作用 a) Bio06 食物供應, 和 b) Bio14 刺激/抑制。
7:9	分解者影響草食動物之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
7:10	分解者影響肉食動物之作用 a) Bio06 食物供應, 和 b) Bio14 刺激/抑制。
7:11	分解者影響人類之作用 a) Bio06 食物供應, b) Bio10 材料供應, 和

矩陣中 (列：行)	說明
	c) Bio14 刺激/抑制。
7:12	分解者影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

8. 濾食性動物對其他物理組件之作用

表 11 濾食性動物對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
8:1	濾食性動物影響水域生態系統地質圈之作用 a) Bio09 入侵。
8:2	濾食性動物影響水域生態系統表土層之作用 a) Bio01 生物擾動，b) Bio32 對流，c) Bio03 死亡，d) Bio45 光相關作用，e) Bio26 反應，f) Bio27 吸附/脫附。
8:3	濾食性動物影響表土層水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio05 排泄，c) Bio45 光相關作用，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，以及 f) Bio15 攝食。
8:4	濾食性動物影響水域生態系統地表水之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio02 消耗 c) Bio03 死亡，d) Bio05 排泄 e) Bio45 光相關作用 f) Bio11 移動 g) Bio12 顆粒釋放/捕集，h) Bio26 反應，i) Bio27 吸附/脫附，和 j) Bio15 攝食。
8:5	濾食性動物影響水域生態系統氣體及當地大氣之作用 a) Bio05 排泄，b) Bio15 攝食。
8:6	濾食性動物影響水域生態系統初級生產者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio08 棲息地供應，以及 c) Bio14 刺激/抑制。
8:7	濾食性動物影響水域生態系統分解者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio08 棲息地供應，以及 c) Bio14 刺激/抑制。
8:8	濾食性動物是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。內部受到幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量特徵所影響。受以下作用所影響：a) 消耗，b) 曝露，c) 食物供應，d) 生長，e) 放射性衰變，f) 刺激/抑制。
8:9	濾食性動物影響水域生態系統草食動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio14

矩陣中 (列：行)	說 明
	刺激/抑制。
8：10	濾食性動物影響水域生態系統肉食動物之作用 a)Bio02 消耗，b)Bio06 食物供應，和 c) Bio14 刺激/抑制。
8：11	濾食性動物影響水域生態系統人類之作用 a)Bio06 食物供應，b)Bio10 材料供應，以及 c) Bio14 刺激/抑制。
8：12	濾食性動物影響水域生態系統外部條件之作用 a) Bio35 流出。

9. 草食動物對其他物理組件之作用

表 12 草食動物對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說 明
9：1	草食動物影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵。
9：2	草食動物影響表土層之作用 a) Bio01 生物擾動，b) Bio32 對流，c) Bio03 死亡，d) Bio05 排泄，e) Bio45 光相關作用，f) Bio26 反應，g) Bio27 吸附/脫附，h) Bio15 攝食。
9：3	草食動物影響表土層水之作用 a)Bio32 對流，b)Bio05 排泄，c)Bio45 光相關作用，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，以及 f) Bio15 攝食。
9：4	草食動物影響地表水之作用 a)Bio31 加速度，b)Bio03 死亡，c)Bio05 排泄，d) Bio45 光相關作用，e) Bio11 移動，f) Bio12 顆粒釋放/捕集，g) Bio26 反應，h) Bio27 吸附/脫附，和 i) Bio15 攝食。
9：5	草食動物影響氣體及當地大氣之作用 a) Bio05 排泄，b) Bio45 光相關作用，c) Bio12 顆粒釋放/捕集，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，以及 f) Bio15 攝食。
9：6	草食動物影響初級生產者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio14 刺激/抑制。
9：7	草食動物影響分解者之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
9：8	草食動物影響水生生態系統濾食性動物之作用 a) Bio06 食物供應，和 b) Bio14 刺激/抑制。
9：9	草食動物是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。受

矩陣中 (列：行)	說明
	幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種總量等特徵所影響。受以下作用影響：a) 曝露，b) 生長，c) 放射性衰變，和 d) 刺激/抑制。
9：10	草食動物影響肉食動物之作用 a) Bio06 食物供應，和 b) Bio14 刺激/抑制。
9：11	草食動物影響人類之作用 a) Bio06 食物供應，b) Bio10 材料供應，和 c) Bio14 刺激/抑制。
9：12	草食動物影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

#### 10. 肉食動物對其他物理組件之作用

表 13 肉食動物對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
10：1	肉食動物影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵。
10：2	肉食動物影響表土層之作用 a) Bio01 生物擾動，b) Bio32 對流，c) Bio03 死亡，d) Bio05 排泄，e) Bio45 光相關作用，f) Bio26 反應，g) Bio27 吸附/脫附，h) Bio15 攝食。
10：3	肉食動物影響表土層水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio05 排泄，c) Bio45 光相關作用，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，以及 f) Bio15 攝食。
10：4	肉食動物影響地表水之作用 a) Bio03 死亡，b) Bio05 排泄，c) Bio45 光相關作用，d) Bio11 移動，e) Bio12 顆粒釋放/捕集，f) Bio26 反應，g) Bio27 吸附/脫附，和 h) Bio15 攝食。
10：5	肉食動物影響氣體及當地大氣之作用 a) Bio05 排泄，b) Bio45 光相關作用，c) Bio12 顆粒釋放/捕集，d) Bio26 反應，e) Bio27 吸附/脫附，以及 f) Bio15 攝食。
10：6	肉食動物影響初級生產者之作用 a) Bio14 刺激/抑制。
10：7	肉食動物影響分解者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio14 刺激/抑制。
10：8	肉食動物影響水生生態系統中濾食性動物之作用 a) Bio02 消耗，b)

矩陣中 (列：行)	說明
	Bio06 食物供應，和 c) Bio14 刺激/抑制。
10：9	肉食動物影響草食動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio14 刺激/抑制。
10：10	肉食動物是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。受到幾何、材料組成、演替階段、溫度、水分和放射性核種等特徵所影響。受以下作用所影響：a) 消費，b) 曝露，c) 食物供應，d) 生長，e) 放射性衰變，和 f) Bio14 刺激/抑制。
10：11	肉食動物影響人類之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio06 食物供應，c) Bio10 材料供應，d) Bio14 刺激/抑制。
10：12	肉食動物影響外部條件之作用 a) Bio35 流出。

#### 11. 人類對其他物理組件之作用

表 14 人類對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
11：1	人類影響地質圈之作用 a) Bio09 入侵，b) Bio17 材料使用。
11：2	人類影響表土層之作用 a) Bio16 人為排放，b) Bio21 壓密，c) Bio02 消耗，d) Bio32 對流，e) Bio03 死亡，f) Bio05 排泄，g) Bio17 材料使用，h) Bio38 搬遷，以及 i) Bio27 吸附/脫附。
11：3	人類影響表土層水之作用 a) Bio16 人為排放，b) Bio32 對流，c) Bio05 排泄，d) Bio15 攝食和 e) Bio19 用水。
11：4	人類影響地表水之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio16 人為排放，c) Bio33 覆蓋，d) Bio03 死亡，e) Bio05 排泄，f) Bio11 移動，g) Bio12 顆粒釋放/捕集，h) Bio27 吸附/脫附，i) Bio15 攝食和 j) Bio19 用水。
11：5	人類影響地表水之作用 a) Bio31 加速度，b) Bio16 人為排放，c) Bio32 對流，d) Bio05 排泄，e) Bio45 光相關過程，f) Bio26 反應，g) Bio27 吸附/脫附，h) Bio15 攝食。
11：6	人類影響初級生產者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio17 材料使用，c) Bio18 物種引入/滅絕，d) Bio14 刺激/抑制。
11：7	人類影響分解者之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio17 材料使用，c) Bio18

矩陣中 (列：行)	說明
	物種引入/滅絕，d) Bio14 刺激/抑制。
11：8	人類影響水生生態系統中濾食性動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio17 材料使用，c) Bio18 物種引入/滅絕，d) Bio14 刺激/抑制。
11：9	人類影響草食動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio17 材料使用，c) Bio18 物種引入/滅絕，d) Bio14 刺激/抑制。
11：10	人類影響肉食動物之作用 a) Bio02 消耗，b) Bio06 食物供應，c) Bio17 材料使用，d) Bio18 物種引入/滅絕，以及 e) Bio14 刺激/抑制。
11：11	人類是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。人類在內部受到幾何，材料組成和放射性核種總量的特徵所影響。人類受到以下作用影響：a) 曝露，b) 生長，c) 放射性衰變，和 d) 刺激/抑制。
11：12	人類影響外部條件之作用 a) 流出。

## 12. 外部條件對其他物理組件之作用

表 15 外部條件對其他物理組件之作用

矩陣中 (列：行)	說明
12：1	外部條件影響地質圈之作用 a) Bio48 岩石地表位置的變化。
12：2	外部條件影響表土層之作用 a) Bio48 岩石表面位置變化，b) Bio36 流入，c) Bio45 光相關作用。
12：3	外部條件影響表土層水之作用 a) Bio36 流入 b) Bio45 光相關作用，c) Bio40 飽和度。
12：4	外部條件影響地表水之作用 a) Bio32 對流，b) Bio36 流入，c) Bio45 光相關作用，d) Bio49 海平面變化。
12：5	外部條件影響氣體與當地大氣之作用 a) Bio36 流入，b) Bio45 光相關作用和 c) Bio26 反應。
12：6	外部條件影響初級生產者之作用 a) Bio36 流入，b) Bio45 光相關作用，c) Bio14 刺激/抑制。
12：7	外部條件影響分解者之作用 a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。
12：8	外部條件影響濾食性動物之作用 a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。

矩陣中 (列：行)	說明
<b>12：9</b>	<b>外部條件影響草食動物之作用</b> a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。
<b>12：10</b>	<b>外部條件影響肉食動物之作用</b> a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。
<b>12：11</b>	<b>外部條件影響人類之作用</b> a) Bio36 流入和 b) Bio14 刺激/抑制。
<b>12：12</b>	<b>外部條件</b> 是一個對角線元素，已在 2.1 生物圈組件中進一步描述。外部條件位於生物圈矩陣的邊界。應考慮全球氣候變化，社會經濟因素也可能影響示範區域的人類住區的其他因素，這屬於未來人類活動，非 SKB 具體生物圈評估。另還有更為災難性的事件，如隕石影響或人為入侵情境可單獨考慮。為了全面處理這些全球事件，SKB 的 FEP 清單是根據國際 FEP 清單進行檢查的，並由該領域的專家進行審核。



### 3. 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

#### 3.1. SR-PSU 生物圈情節分析

SR-PSU 提供生物圈評估之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。

SSM (2008) 提出生物圈條件和環境的保護指導方針：1. 對人類和環境變化計算需與未來生物圈條件的假設氣候狀態一致。目前場址生物圈條件和周圍環境應進行評估，包括：農業用地，森林，濕地（沼澤），湖，海或其他相關的生態系統等。亦須考慮陸地抬升（或沉陷）等可預見的變化。2. 風險分析包括有限選擇的曝露途徑，但這些選擇，應根據的目前瑞典環境中所發生的人類使用和自然資源的多樣性的分析。需考慮不同的生態系統之間的曝露途徑的組合。圖 6 說明人類對某個地區的潛在曝露途徑示意圖。

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。

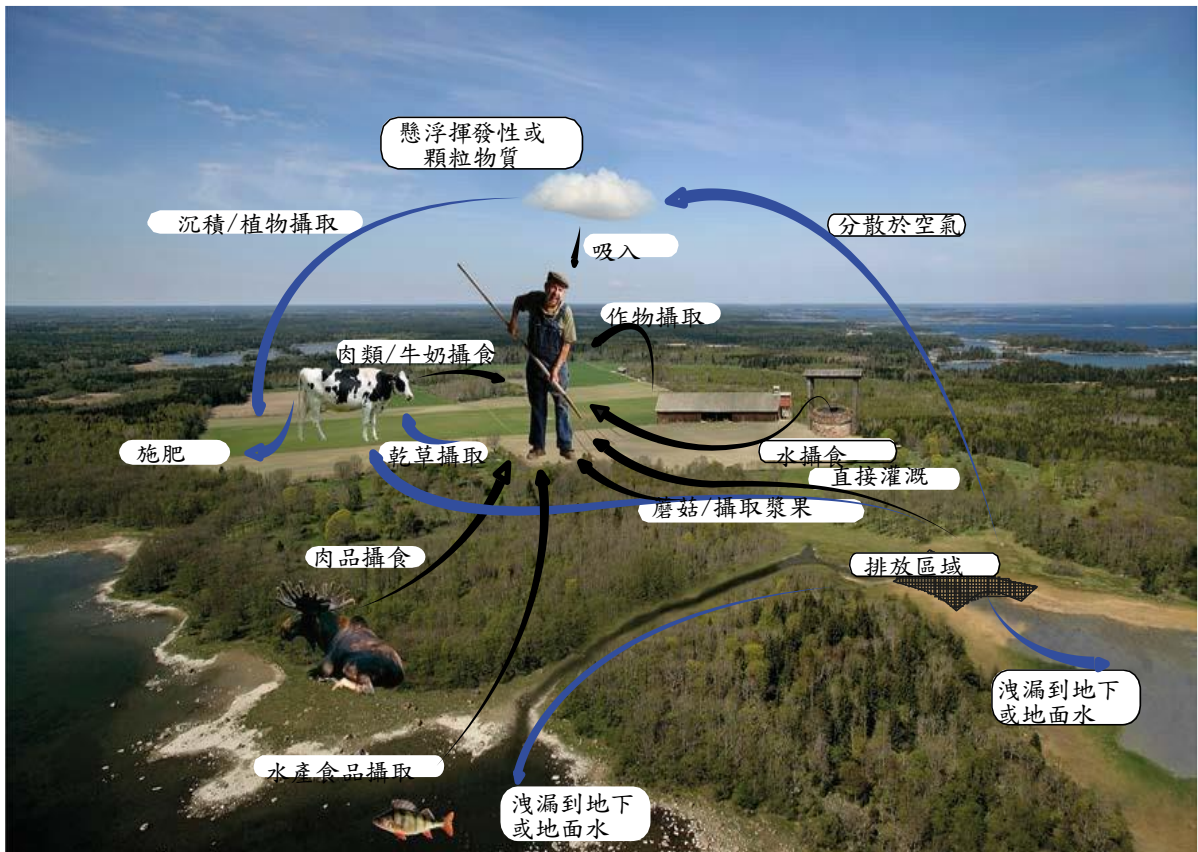


圖 6 生物圈潛在的曝露途徑示意圖

### 3.1.1. 生物圈情節分析方法

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. 核種傳輸和宿命：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。

### 3.1.2. 潛在曝露點和環境介質區域

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）處置場受污染的地下水很可能會被排放到某些生態系統的次層，即海盆、湖泊和濕地（SKB 2014a）。然後，經由水文循環過程，放射性核種可能被傳輸到地表水和沈積物、泥炭和生態系統的大氣環境，且可經由地表水和地下水流動傳輸到其他地區。此外，人類居民可能會用受污染的植被作為農田的飼料和肥料，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產生放射性核種污染的不同類型環境介質表示。需要考慮的環境介質，包括大氣、表土層、水和非人類生物群（初級生產者和消費者）。環境介質需進一步的區分環境介質及其相關環境類型，表 16 列出有關陸域環境的環境介質及其相關的環境類型，表 17 則表示有關水生環境的環境介質及其相關的環境類型。

表 16 陸域環境的環境介質及其相關的環境類型

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 17 水環境的環境介質及其相關的環境類型

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

### 3.1.3. 人體曝露途徑分析

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）。

在 Forsmark 地質處置設施的預期劑量評估中，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。組合 Forsmark 的地質處置設施相關的各種環境介質與曝露途徑，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（如表 18），與 15 個水域環境曝露途徑（如表 19）。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。

表 18 陸域生態環境中的曝露途徑情節（以 Ter-1 至 Ter-29 標示）和相關活動

交互作用矩陣給定曝露途徑位置（見 2.4 節生物圈交互作用矩陣）。最後一行給定後續安全評估的建議

環境介質	曝露途徑情節		相關活動	交互作用矩陣	安全評估建議
大氣-戶外	Ter-1	吸入氣體	所有戶外活動	5:11	是
	Ter-2	吸入塵土	所有戶外活動	5:11	是
	Ter-3	外部輻射曝露	所有戶外活動	5:11	否
大氣-室內	Ter-4	吸入氣體	所有戶外活動	5:11	否
	Ter-5	吸入塵土	所有戶外活動	5:11	否
	Ter-6	外部輻射曝露	所有戶外活動	5:11	否

環境介質	曝露途徑情節		相關活動	交互作用矩陣	安全評估建議
表土層-土壤(無機)	Ter-7	故意攝食土壤	攝食	2:11	否
	Ter-8	無意中攝食土壤	攝食，犁，挖，收穫，園藝，玩，聚會，野餐。	2:11	是
	Ter-9	停留在在戶外來自地面的外部輻射曝露	陸域環境存有土壤所有戶外活動	2:11, 3:11	是
	Ter-10	停留在在室內來自地面的外部輻射曝露	所有戶外活動	2:11, 3:11	否
表土層-泥炭土	Ter-11	故意攝食泥炭土	攝食	2:11	否
	Ter-12	無意中攝食泥炭土	攝食，收穫，園藝，玩，聚會，野餐。	2:11	是
	Ter-13	停留在在戶外來自地面的外部輻射曝露	在沼澤中所有戶外活動。	2:11, 3:11	是
	Ter-14	停留在在室內來自地面的外部輻射曝露	所有戶外活動	2:11, 3:11	否
	Ter-15	環境直接汙染 (吸入氣體/ 塵土)。	燃燒泥炭	2:11	是
	Ter-16	土壤直接汙染。	用泥炭灰施肥	2:11	是
井水	Ter-17	攝食井水	飲用	1:11, 3:11	是
	Ter-18	來自井水的外部輻射曝露	洗澡和淋浴	1:11, 3:11	否
	Ter-19	作物和土壤間接 <sup>1</sup> 汙染	攝食用井水灌溉的農作物。	1:11, 3:11	是
	Ter-20	動物飲水間接 <sup>1</sup> 汙染	攝食已飲用井水的動物肉或其他動物製品 (牛奶，腎臟等)。	1:11, 3:11	是
主要生產者。	Ter-21	攝食作物、漿果和蘑菇	攝食	6:11	是
	Ter-22	來自核種存於植被之戶外外部輻射曝露	環境有植被地方的戶外活動	6:11	是
	Ter-23	來自核種存於植被之室內外部輻射曝露	建築物存有植被地方的室內活動	6:11	否
	Ter-24	來自植被作用建築材料室內之部輻射曝露	木材等植被作為建築材料之建築物的室內活動	6:11	否
	Ter-25	環境間接汙染 (吸入氣體/ 塵土)	燃燒木材和其他植被。	6:11	是
	Ter-26	土壤間接汙染	用來自木材的飼料或灰分的餵養草食動物。	6:11	是
消費者	Ter-27	消費者攝食	攝食	9:11, 10:11	是
	Ter-28	來自動物的戶外外部輻射曝露	與動物接觸 (如畜牧業，騎馬，寵物)	9:11, 10:11	否
	Ter-29	來自動物的室內外部輻射曝露	與動物接觸 (如畜牧業，寵物)	9:11, 10:11	否

表 19 水域生態環境中的曝露途徑情節 (以 Aq-1 至 Aq-15 標示) 和相關活動

交互作用矩陣給定曝露途徑位置 (見 2.4 節生物圈交互作用矩陣)。最後一行給定後續安全評估的建議

環境介質	曝露途徑情節		相關活動	交互作用矩陣	安全評估建議
大氣-戶外	Aq-1	吸入氣體	游泳，划船，釣魚	5:11	否
	Aq-2	吸入氣溶膠	游泳，划船，釣魚	5:11	否
	Aq-3	浸入時的外部輻射曝露	游泳，划船，釣魚	5:11	否
地表水	Aq-4	攝食地表水	飲用	4:11	是
	Aq-5	浸入時的外部輻射曝露	游泳	4:11	否

環境介質	曝露途徑情節		相關活動	交互作用矩陣	安全評估建議
	Aq-6	水面上的外部輻射曝露	划船，釣魚。	4:11	否
	Aq-7	作物和土壤間接污染	攝食用污染地表水灌溉的農作物	4:11	是
	Aq-8	動物飲用污染水的間接污染	攝食已飲用污染地表水的動物肉或其他動物製品（牛奶，腎臟等）。	4:11	是
表土層—沉積物	Aq-9	來自沉積物的外部輻射曝露	曬日光浴，釣魚，野餐，露營	2:11	是
	Aq-10	故意攝食沉積物	攝食	2:11	否
	Aq-11	無意中攝食沉積物	曬日光浴，釣魚，野餐，露營	2:11	否
初級生產者	Aq-12	攝食食物	攝食	6:11	否
	Aq-13	動物攝食淡水主要生產者的間接污染	攝食已食用污染食物的動物肉或其他動物製品（牛奶，腎臟等）。	6:11	否
	Aq-14	土壤用水域主要生產者進行施肥之間接污染	攝食用污染的水域初級生產者施肥的作用	6:11	是
消費者	Aq-15	攝食受污染消費者。	攝食。	7:11, 8:11, 9:11, 10:11	是

### 3.2. 生物圈安全評估與輻射劑量標準

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食作用。

#### 3.2.1. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對人體之輻射劑量

##### 3.2.1.1. 對人體之輻射劑量

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

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

其中：

- $Dose_{ing,water}$  : 攝食水途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{ing,food}$  : 攝食食物途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{ext}$  : 外部曝露途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{inh}$  : 吸入途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]

攝食水的單一核種劑量取決於用水量[m<sup>3</sup> y<sup>-1</sup>]和所消耗水中核種濃度[Bq m<sup>-3</sup>]，如下式：

$$Dose_{ing,water} = AC_{ing,water} ingRate_{water} doseCoef_{ing,water} \quad (2)$$

其中：

- $AC_{ing,water}$  : 飲用水所含核種活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]
- $ingRate_{water}$  : 每年飲用水攝食率 [m<sup>3</sup> y<sup>-1</sup>]
- $doseCoef_{ing,water}$  : 攝食飲用水中核種的劑量係數[Sv Bq<sup>-1</sup>]

由於食物攝食途徑單一核種所造成的內在曝露取決於食物中活度濃度、食物消耗量、與飲食所有食物量，攝食食物途徑的核種劑量為

$$Dose_{ing,food} = ingRate_c doseCoef_{ing,food} \sum AC_{food,i} f_{cont,food,i}, \quad \sum f_{cont,food,i} \leq 1 \quad (3)$$

其中：

- $ingRate_c$  : 成年人每年能量需求量[kgC y<sup>-1</sup>](以碳單位表示)
- $AC_{food,i}$  : 某食物 i 含核種活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>],
- $f_{cont,food,i}$  : 飲食中攝食某食物 i 的比率[kgC kgC<sup>-1</sup>]
- $doseCoef_{ing,food}$  : 劑量係數[Sv Bq<sup>-1</sup>]

外部曝露由表土土壤的核種活度濃度、上層土壤的密度、於地表停留時間與外在接觸的劑量參數所決定，外部曝露途徑的核種劑量為：

$$Dose_{ext} = AC_{ground} dens_{ground} t_{exposure} doseCoef_{ext} \quad (4)$$

其中：

- $AC_{ground}$  : 表土土壤的核種活度濃度[Bq kgDW<sup>-1</sup>]
- $dens_{ground}$  : 上層土壤的密度[kgDW m<sup>-3</sup>]
- $t_{exposure}$  : 於地表停留時間[h y<sup>-1</sup>]
- $doseCoef_{ext}$  : 外在接觸途徑的劑量參數[(Sv h<sup>-1</sup>)/(Bq m<sup>-3</sup>)]

吸入途徑的核種劑量由空氣中核種活度濃度、吸入率與吸入途徑的核種劑量參數

所決定，吸入途徑的核種劑量為：

$$Dose_{inh} = AC_{air} inhRate t_{exposure} doseCoef_{inh} \quad (5)$$

其中：

- $AC_{air}$  : 空氣中核種活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]  
 $inhRate$  : 吸入率[m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>]  
 $doseCoef_{inh}$  : 吸入途徑的核種劑量參數[Sv Bq<sup>-1</sup>]

氣體形式的放射性核種 (C-14) 和吸附到塵埃顆粒 (其他放射性核種) 的放射性核種都會有空氣活度濃度劑量：

$$\begin{aligned} AC_{air}^{RN} &= AC_{ground}^{RN} conc_{Dust} \\ AC_{air}^{14C} &= AC_{atmos,L1}^{14C} + AC_{ground}^{14C} conc_{Dust} \end{aligned} \quad (6)$$

- $AC_{ground}$  : 空氣中的活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]  
 $conc_{Dust}$  : 在空氣中吸入細小土壤顆粒的濃度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]  
 $AC_{atmos,L1}^{14C}$  : 在空氣中吸入氣態 C-14 活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]  
 $doseCoef_{i,agg} = doseCoeff_i \cdot doseinground_{iagri}$  (7)

$doseinground_{iagri}$  : 一個比例因子，在 50 年內栽培土壤中累積的子放射性核種的曝露劑量[Bq Bq<sup>-1</sup>]

$i$  : 指曝露途徑，即外在、攝食和吸入

SR-PSU 安全評估計畫劑量係數依據 ICRP (1996 年) 建議值，在表 20 列出攝食、吸入與外部曝露的母核種劑量係數，表 21 列出經由攝食、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數。表 22 列出經由攝食、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種輻射)劑量係數，SR-PSU 安全評估計畫考慮空氣，土壤和水傳輸途徑，藉由廢棄物體、近場、遠場各種評估模式分析核種洩漏出近場後於遠場傳輸，當得到核種進入生物圈核種濃度後，再利用表 22 核種劑量係數 (Dose coefficient) 與食物攝食率等參數利用方程式(1)-(5)計算對於人體曝露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝食水、攝食食物、外部曝露和吸入等四部分輻射劑量。



表 20 經由攝食、吸入與外部曝露的母核種劑量係數

Radionuclide	Half-life	Decay modes <sup>1</sup>	Ingestion Sv Bq <sup>-1</sup>	Inhalation Sv Bq <sup>-1</sup>	Type	External exposure Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-2</sup>
H-3	12.35y	β-	1.8E-11	2.6E-10	S	-	-
C-14	5,730y	β-	5.8E-10	6.2E-12	CO <sub>2</sub>	2.1E-19	4.6E-17
			2.9E-11*	-	-	-	-
Cl-36	3.01E5y	EC,β+,β-	9.3E-10	7.3E-09	M	4.8E-17	4.0E-14
Ca-41	1.4E5y	EC	1.9E-10	1.8E-10	S	-	-
Ni-59	7.5E4y	EC	6.3E-11	4.4E-10	S	-	-
Co-60	5.271y	β-	3.4E-09	3.1E-08	S	3.0E-13	8.3E-12
Ni-63	96y	β-	1.5E-10	1.3E-09	S	-	-
Se-79	65,000y	β-	2.9E-09	6.8E-09	S	2.9E-19	5.9E-17
Sr-90	29.12y	β-	2.8E-08	1.6E-07	S	1.2E-17	5.9E-15
Mo-93	3.5E3y	EC	3.1E-09	2.3E-09	S	8.0E-18	1.4E-14
Nb-93m	13.6y	IT	1.2E-10	1.8E-09	S	1.4E-18	2.5E-15
Zr-93	1.53E6y	β-	1.1E-09	2.5E-08	F	-	-
Nb-94	2.03E4y	β-	1.7E-09	4.9E-08	S	1.8E-13	5.4E-12
Tc-99	2.13E5y	β-	6.4E-10	1.3E-08	S	2.1E-18	2.3E-16
Pd-107	6.5E6y	β-	3.7E-11	5.9E-10	S	-	-
Ag-108m	127y	EC,IT	2.3E-09	3.7E-08	S	1.7E-13	5.6E-12
Cd-113m	13.6y	β-	2.3E-08	1.1E-07	F	1.2E-17	6.4E-15
Sn-126	1.0E5y	β-	4.7E-09	2.8E-08	M	2.5E-15	1.7E-13
I-129	1.57E7y	β-	1.1E-07	3.6E-08	F	1.8E-16	7.0E-14
Ba-133	10.74y	EC	1.5E-09	1.0E-08	S	3.5E-14	1.3E-12
Cs-135	2.3E6y	β-	2.0E-09	8.6E-09	S	6.2E-19	9.7E-17
Cs-137	30.0y	β-	1.3E-08	3.9E-08	S	1.6E-17	1.1E-14
Sm-151	90y	β-	9.8E-11	4.0E-09	M	1.3E-20	1.3E-17
Eu-152	13.33y	β-,EC,β+	1.4E-09	4.2E-08	M	1.3E-13	3.9E-12
Ho-166m	1.20E3y	β-	2.0E-09	1.2E-07	M	1.9E-13	5.9E-12
Pb-210	22.3y	β-	6.9E-07	5.6E-06	S	3.8E-17	7.7E-15
Po-210	138.38d	α	1.2E-06	4.3E-06	S	9.5E-19	2.9E-17
Ra-226	1,600y	α	2.8E-07	9.5E-06	S	5.6E-16	2.2E-14
Ac-227	21.773y	β-,α	1.1E-06	5.5E-04	F	8.6E-18	5.1E-16
Th-228	1.9131y	α	7.2E-08	4.0E-05	S	1.4E-16	7.7E-15
Th-229	7,340y	α	4.9E-07	2.4E-04	F	5.6E-15	2.8E-13
Th-230	7.7E4y	α	2.1E-07	1.0E-04	F	2.1E-17	2.3E-15
Pa-231	3.276E4y	α	7.1E-07	1.4E-04	M	3.4E-15	1.4E-13
U-232	72y	α	3.3E-07	3.7E-05	S	1.5E-17	2.9E-15
U-233	1.585E5y	α	5.1E-08	9.6E-06	S	2.4E-17	2.2E-15
U-234	2.445E5y	α	4.9E-08	9.4E-06	S	6.6E-18	2.1E-15
U-235	703.8E6y	α	4.7E-08	8.5E-06	S	1.3E-14	5.0E-13
U-236	2.3415E7y	α	4.7E-08	8.7E-06	S	3.4E-18	1.8E-15
Np-237	2.14E6y	α	1.1E-07	5.0E-05	F	1.3E-15	9.1E-14
Pu-238	87.74y	SF,α	2.3E-07	1.1E-04	F	2.2E-18	2.3E-15
U-238	4.468E9y	SF,α	4.5E-08	8.0E-06	S	1.5E-18	1.5E-15
Pu-239	24,065y	α	2.5E-07	1.2E-04	F	5.1E-18	1.0E-15
Pu-240	6,537y	SF,α	2.5E-07	1.2E-04	F	2.2E-18	2.2E-15
Am-241	432.2y	α	2.0E-07	9.6E-05	F	7.2E-16	8.4E-14
Pu-241	14.4y	α,β-	4.8E-09	2.3E-06	F	1.0E-19	6.2E-18
Am-242m	152y	α,IT	1.9E-07	9.2E-05	F	2.8E-17	8.1E-15
Pu-242	3.763E5y	SF,α	2.4E-07	1.1E-04	F	1.9E-18	1.8E-15
Cm-242	162.8d	SF,α	1.2E-08	5.9E-06	S	2.5E-18	2.5E-15
Am-243	7,380y	α	2.0E-07	9.6E-05	F	2.4E-15	1.7E-13
Cm-243	28.5y	α,EC	1.5E-07	6.9E-05	F	1.0E-14	4.2E-13
Cm-244	18.11y	SF,α	1.2E-07	5.7E-05	F	1.7E-18	2.3E-15
Cm-245	8,500y	α	2.1E-07	9.9E-05	F	5.9E-15	2.9E-13
Cm-246	4,730y	SF,α	2.1E-07	9.8E-05	F	1.6E-18	2.1E-15

\*Dose coefficients (Sv Bq<sup>-1</sup>) for exposure from ingestion (doseCoef\_ing) and inhalation (doseCoef\_inh) (ICRP 1996). Dose coefficients (Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-3</sup> and Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-2</sup>) for external exposure (doseCoef\_ext, doseCoef\_ext\_surf) (Eckerman and Leggett 1996, Eckerman and Ryman 1993) due to spatially uniformly distributed radionuclides to an infinite depth and surface exposure respectively. Values include only radiations emitted by the indicated radionuclide

\*Dose coefficient used for ingestion of water (Leggett 2004).

<sup>1</sup> Decay modes: β- for beta minus decay, β+ for beta plus decay, EC for electron capture, α for alpha decay, IT for isometric transition, and SF for spontaneous fission.

表 21 經由攝食、吸入與外部曝露的短半衰期子核種劑量係數

核種	半衰期	衰變方式 <sup>3</sup>	攝食 Sv Bq <sup>-1</sup>	吸入 Sv Bq <sup>-1</sup>	型式 Type	外部曝露 <sup>2</sup> Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-3</sup>	Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-2</sup>
Y-90	64.0h	β-	2.7E-09	1.5E-09	S	7.7E-16	3.9E-13
Ag-108	2.37m	EC,β+,β-	-	-	-	2.2E-15	3.2E-13
Sb-126	12.4d	β-	2.4E-09	3.2E-09	S	3.1E-13	9.8E-12
Sb-126m	19.0m	IT,β-	3.6E-11	2.0E-11	S	1.7E-13	5.6E-12
Ba-137m	2.552m	IT	-	-	-	6.5E-14	2.1E-12
Tl-207	4.77m	β-	-	-	-	4.4E-16	2.0E-13
Tl-208	3.07m	β-	-	-	-	4.2E-13	1.1E-11
Pb-209	3.253h	β-	5.7E-11	6.1E-11	S	1.5E-17	1.1E-14
Tl-209	2.20m	β-	-	-	-	2.4E-13	6.9E-12
Bi-210	5.012d	β-	1.3E-09	9.3E-08	M	1.1E-16	1.3E-13
Bi-211	2.14m	α,β-	-	-	-	4.6E-15	1.6E-13
Pb-211	36.1m	β-	1.8E-10	1.2E-08	S	5.6E-15	3.4E-13
Po-211	0.516s	α	-	-	-	8.6E-16	2.7E-14
Bi-212	60.55m	β-,α	2.6E-10	3.1E-08	M	2.1E-14	8.1E-13
Pb-212	10.64h	β-	6.0E-09	1.9E-07	S	1.2E-14	4.9E-13
Po-212	0.305us	α	-	-	-	-	-
Bi-213	45.65m	β-,α	2.0E-10	3.0E-08	M	1.4E-14	6.0E-13
Po-213	4.2us	α	-	-	-	-	-
Bi-214	19.9m	β-	1.1E-10	1.4E-08	M	1.8E-13	5.2E-12
Pb-214	26.8m	β-	1.4E-10	1.5E-08	S	2.4E-14	8.6E-13
Po-214	164.3us	α	-	-	-	9.3E-18	2.9E-16
Po-215	0.001780s	α	-	-	-	1.8E-17	6.0E-16
Po-216	0.15s	α	-	-	-	1.9E-18	5.8E-17
At-217	0.0323s	α	-	-	-	3.2E-17	1.1E-15
At-218	2s	α	-	-	-	9.4E-17	1.3E-14
Po-218	3.05m	α,β-	-	-	-	1.0E-18	3.1E-17
Rn-219	3.96s	α	-	-	-	5.5E-15	1.9E-13
Rn-220	55.6s	α	3.5E-09 <sup>1</sup>	2.1E-08 <sup>2</sup>	-	4.1E-17	1.3E-15
Fr-221	4.8m	α	-	-	-	2.7E-15	1.0E-13
Rn-222	3.8235d	α	-	-	-	4.2E-17	1.4E-15
Fr-223	21.8m	β-	2.4E-09	8.9E-10	F	3.5E-15	2.8E-13
Ra-223	11.434d	α	1.0E-07	8.7E-06	S	1.1E-14	4.4E-13
Ra-224	3.66d	α	6.5E-08	3.4E-06	S	9.1E-16	3.3E-14
Ac-225	10.0d	α	2.4E-08	8.5E-06	S	1.1E-15	5.3E-14
Ra-225	14.8d	β-	9.9E-08	7.7E-06	S	1.7E-16	3.9E-14
Th-227	18.718d	α	8.8E-09	1.0E-05	S	9.3E-15	2.5E-13
Th-231	25.52h	β-	3.4E-10	3.3E-10	S	6.2E-16	5.6E-14
Pa-233	27.0d	β-	8.7E-10	3.9E-09	S	1.8E-14	6.7E-13
Pa-234	6.70h	β-	5.1E-10	4.0E-10	S	2.1E-13	6.5E-12
Pa-234m	1.17m	β-,IT	-	-	-	1.9E-15	3.9E-13
Th-234	24.10d	β-	3.4E-09	7.7E-09	S	4.1E-16	2.7E-14
U-237	6.75d	β-	7.6E-10	1.9E-09	S	9.3E-15	4.4E-13
Np-238	2.117d	β-	9.1E-10	3.5E-09	F	6.3E-14	1.9E-12
Np-239	2.355d	β-	8.0E-10	1.0E-09	S	1.3E-14	5.5E-13
Am-242	16.02h	EC,β-	3.0E-10	2.0E-08	S	8.6E-16	5.8E-14

\* Dose coefficients (Sv Bq<sup>-1</sup>) for exposure from ingestion (doseCoef\_ing) and inhalation (doseCoef\_inh) (ICRP 1996) for short-lived progeny not explicitly modelled. Dose coefficients (Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-3</sup> and Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-2</sup>) for external exposure (doseCoef\_ext and doseCoef\_ext\_surf) (Eckerman and Leggett 1996, Eckerman and Ryman 1993) due to spatially uniformly distributed radionuclides to an infinite depth and surface exposure respectively. Values *include only* radiations emitted by the indicated radionuclide.

<sup>1</sup> (NRC 1999).

<sup>2</sup> (ICRP 1993) recommended mean value.

<sup>3</sup> Decay modes: β<sup>-</sup> for beta minus decay, β<sup>+</sup> for beta plus decay, EC for electron capture, α for alpha decay, IT for isomeric transition, and SF for spontaneous fission.

表 22 經由攝食、吸入與外部曝露的核種(包括母核種與子核種輻射)劑量係數

核種	攝食 Sv Bq <sup>-1</sup>	吸入 Sv Bq <sup>-1</sup>	外在曝露 Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-3</sup> Sv h <sup>-1</sup> per Bq m <sup>-2</sup>	
H-3	1.8E-11	2.6E-10	—	—
C-14	5.8E-10	6.2E-12	2.1E-19	4.6E-17
Cl-36	9.3E-10	7.3E-09	4.8E-17	4.0E-14
Ca-45	1.9E-10	1.8E-10	—	—
Ni-59	6.3E-11	4.4E-10	—	—
Co-60	3.4E-09	3.1E-08	3.0E-13	8.3E-12
Ni-63	1.5E-10	1.3E-09	—	—
Se-79	2.9E-09	6.8E-09	2.9E-19	5.9E-17
Sr-90 <sup>†</sup>	3.1E-08	1.6E-07	7.9E-16	4.0E-13
Mo-93	3.1E-09	2.3E-09	8.0E-18	1.4E-14
Nb-93m	1.2E-10	1.8E-09	1.4E-18	2.5E-15
Zr-93	1.1E-09	2.5E-08	—	—
Nb-94	1.7E-09	4.9E-08	1.8E-13	5.4E-12
Tc-99	6.4E-10	1.3E-08	2.1E-18	2.3E-16
Pd-107	3.7E-11	5.9E-10	—	—
Ag-108m <sup>†</sup>	2.3E-09	3.7E-08	1.7E-13	5.6E-12
Cd-113m	2.3E-08	1.1E-07	1.2E-17	6.4E-15
Sn-126 <sup>†</sup>	5.1E-09	2.8E-08	2.1E-13	7.1E-12
I-129	1.1E-07	3.6E-08	1.8E-16	7.0E-14
Ba-133	1.5E-09	1.0E-08	3.5E-14	1.3E-12
Cs-135	2.0E-09	8.6E-09	6.2E-19	9.7E-17
Cs-137 <sup>†</sup>	1.3E-08	3.9E-08	6.2E-14	2.0E-12
Sm-151	9.8E-11	4.0E-09	1.3E-20	1.3E-17
Eu-152	1.4E-09	4.2E-08	1.3E-13	3.9E-12
Ho-166m	2.0E-09	1.2E-07	1.9E-13	5.9E-12
Pb-210 <sup>†</sup>	6.9E-07	5.6E-06	1.4E-16	1.3E-13
Po-210	1.2E-06	4.3E-06	9.5E-19	2.9E-17
Ra-226 <sup>†</sup>	2.8E-07	9.5E-06	2.0E-13	6.1E-12
Ac-227 <sup>†</sup>	1.2E-06	5.5E-04	3.6E-14	1.7E-12
Th-228 <sup>†</sup>	1.4E-07	4.4E-05	1.9E-13	5.2E-12
Th-229 <sup>†</sup>	6.1E-07	2.4E-04	2.9E-14	1.2E-12
Th-230	2.1E-07	1.0E-04	2.1E-17	2.3E-15
Pa-231	7.1E-07	1.4E-04	3.4E-15	1.4E-13
U-232	3.3E-07	3.7E-05	1.5E-17	2.9E-15
U-233	5.1E-08	9.6E-06	2.4E-17	2.2E-15
U-234	4.9E-08	9.4E-06	6.6E-18	2.1E-15
U-235 <sup>†</sup>	4.7E-08	8.5E-06	1.3E-14	5.6E-13
U-236	4.7E-08	8.7E-06	3.4E-18	1.8E-15
Np-237 <sup>†</sup>	1.1E-07	5.0E-05	1.9E-14	7.6E-13
Pu-238	2.3E-07	1.1E-04	2.2E-18	2.3E-15
U-238 <sup>†</sup>	4.8E-08	8.0E-06	3.0E-15	4.4E-13
Pu-239	2.5E-07	1.2E-04	5.1E-18	1.0E-15
Pu-240	2.5E-07	1.2E-04	2.2E-18	2.2E-15
Am-241	2.0E-07	9.6E-05	7.2E-16	8.4E-14
Pu-241 <sup>†</sup>	4.8E-09	2.3E-06	3.3E-19	1.7E-17
Am-242m <sup>†</sup>	1.9E-07	9.2E-05	1.2E-15	7.5E-14
Pu-242	2.4E-07	1.1E-04	1.9E-18	1.8E-15
Cm-242	1.2E-08	5.9E-06	2.5E-18	2.5E-15
Am-243 <sup>†</sup>	2.0E-07	9.6E-05	1.6E-14	7.3E-13
Cm-243	1.5E-07	6.9E-05	1.0E-14	4.2E-13
Cm-244	1.2E-07	5.7E-05	1.7E-18	2.3E-15
Cm-245	2.1E-07	9.9E-05	5.9E-15	2.9E-13
Cm-246	2.1E-07	9.8E-05	1.6E-18	2.1E-15

<sup>†</sup> Dose coefficients include contribution from short-lived radioactive progeny assuming secular equilibrium.

<sup>†</sup> Dose coefficients for exposure from ingestion (doseCoef\_ing) and inhalation (dose\_coef\_inh) (ICRP 1996). Dose coefficients(Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-3</sup> and Sv h<sup>-1</sup> per Bq m<sup>-2</sup>) for external exposure (doseCoef\_ext and doseCoef\_ext\_surf) (Eckerman and Leggett 1996, Eckerman and Ryman 1993) due to spatially uniformly distributed radionuclides to an infinite depth and surface exposure respectively. Values include radiations emitted by the indicated radionuclide as well as the contribution from short-lived radioactive progeny

### 3.2.2. SR-PSU 生物圈安全評估計畫對非人類生物群之輻射劑量

#### 3.2.2.1. 對非人類生物群之輻射劑量

##### 3.2.2.1.1. 背景

以人類中心主義觀點保護環境持有觀點已有轉變（如 ICRP1977），ICRP（2007）指出，其目的應該是維護生物的影響微乎其微，維持生物的多樣性、保護物種和自然棲息地，以及區域的健全狀態和生態系統維護。

##### 3.2.2.1.2. ERICA 劑量測定模型納入 Ecolego

SR-PSU 對於非人類生物安全評估是採用 ERICA 評估方法，即吸收劑量率，包括：核種從地質圈釋出後、核種在環境介質中的濃度（土壤、沈積物、水和空氣），對於內部劑量率，係由生物群質量和幾何、濃度比率、內部劑量轉換參數、核種在生物群內濃度求算而得。對於外部劑量，係由棲息地居住（土壤、沈積物、水和空氣）、生物群質量和幾何、外在劑量轉換參數、棲息地居住因子求算而得，該評估方法如圖 7 所示，先針對個別核種算出劑量，在總和每個核種造成的劑量總和。ERICA 劑量測定模型目前已納入 Ecolego 安全評估模式中。

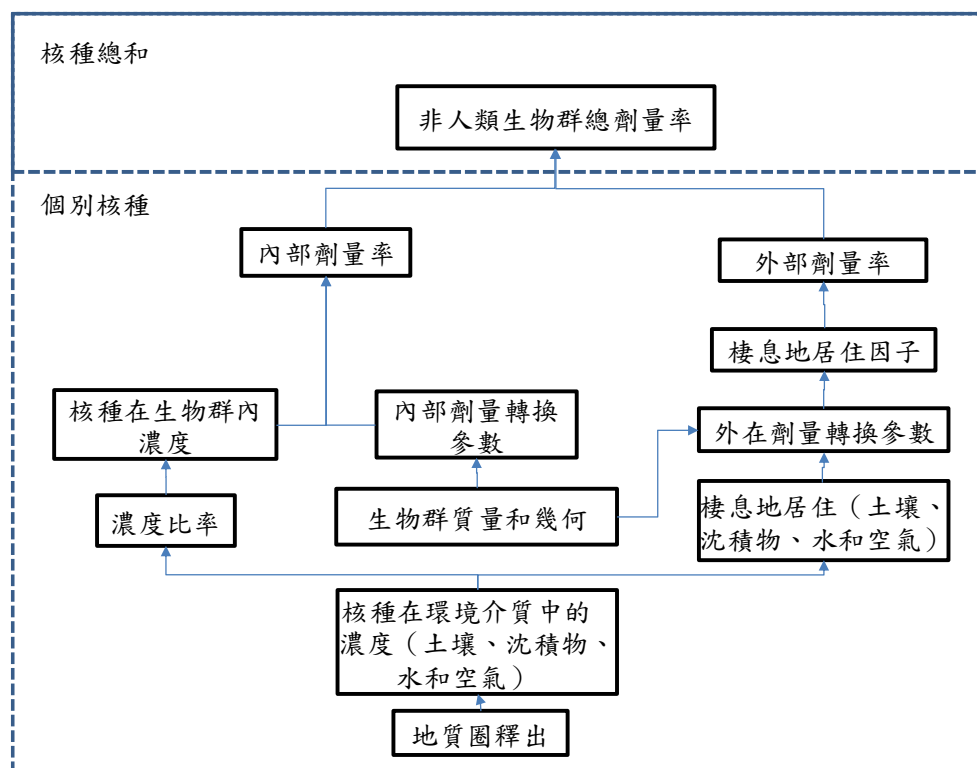


圖 7 評估放射性核種釋出對非人類生物群的影響

### 3.2.2.1.2.1. 基本概念

在 ERICA 工具中每個被考慮的生物體幾何數據，以及放射性核種衰變性質、棲息地居住的資料、生物體類型及劑量轉換係數 (Dose conversion coefficients, DCC)，這些數據與放射性核種在環境介質中、或在生物體內活度濃度，到劑量率計算有關。在 ERICA 中，兩組劑量轉換係數定義如下：

- 用於計算由內部輻射引起的輻射劑量曝露， $DCC_{int}$  定義為一生物體內每單位活度濃度 (Bq/kg fw) 吸收劑量率 ( $\mu\text{Gy/h}$ )
- 用於計算由於外部曝露而引起的輻射劑量曝露， $DCC_{ext}$  定義為一環境介質中每單位濃度 (Bq/kg 或 Bq/l fw) 的外部吸收劑量率 ( $\mu\text{Gy/h}$ )。

水域表層沉積物中的活度濃度，係對生活在沉積物中或沉積物上的生物體的外部曝露。在陸域生態系統中，內部和外部曝露則使用表面泥炭中的放射性核種濃度計算。主要生物圈物體 (157\_2) 沒有確定的湖泊狀態，因為它從海洋灣演變成濕地地區。然而，由於淺表面水棲息地 (池塘) 在土地形成期間很可能形成生物圈物體，所以沼澤的孔隙水濃度用於計算這個生物圈物體中的林地生物群的劑量率。淡水域物體到沉積物則使用表面泥炭中的放射性核種濃度進行計算。

### 3.2.2.1.2.2. 計算內部曝露

計算內部曝露以下列方程式表示：

$$DoseRate_{int,j} = w_{low\beta} (DCC_{int,low,\beta,j} + w_{\alpha} DCC_{int,\alpha,j}) AC_j \quad (8)$$

其中：

$w_{low\beta}$ ：內部低能量  $\beta$  輻射的加權因子[無單位]

$w_{\beta\gamma}$ ：內部 (高能)  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的加權因子[無單位]

$w_{\alpha}$ ：內部  $\alpha$  輻射的加權因子[無單位]

$DCC_{int,low,\beta,j}$ ：生物體  $j$  的內部低  $\beta$  輻射的劑量轉換係數 [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per Bq  $\text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$DCC_{int,\beta,\gamma,j}$ ：生物體  $j$  的內部  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的劑量轉換係數 [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per Bq  $\text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$DCC_{int,\alpha,j}$ ：生物體  $j$  的內部  $\alpha$  輻射的劑量轉換係數 [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per Bq  $\text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$AC_j$ ：全身生物體中的放射性核種活度濃度 [Bq  $\text{kg}_{FW}^{-1}$ ]

$$AC_j^{RN} = CR_j^{RN} AC_{water}^{D,RN} \quad (9)$$

其中：

$CR_j^{RN}$ ：生物體 j 的放射性核種 x 的濃度比 [ $\text{kg}_{\text{DW}} \text{kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

$AC_{\text{water}}^{D,RN}$ ：溶解的放射性核種在水中的活度濃度 [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$$AC_{\text{water}}^D = AC_{\text{regoUp,ter,tot}}^D \quad (10)$$

$$AC_j^{RN} = CR_j^{RN} AC_{\text{regoUp,ter,tot}}^{RN} \quad (11)$$

其中：

$CR_j^{RN}$ ：生物體 j 的放射性核種的濃度比 [ $\text{kg}_{\text{DW}} \text{kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

$AC_{\text{regoUp,ter,tot}}^{RN}$ ：上層泥炭層中放射性核種的總活度濃度，包括有機和無機活度 [ $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

$$AC_j^{14C} = SA_{\text{water}}^{14C} f_{C,j} = \frac{AC_{\text{water}}^{D,14C}}{\text{conc}_{\text{DIC,aqu}}} f_{C,j} \quad (12)$$

其中：

$SA_{\text{water}}^{14C}$ ：溶質相中無機碳在水中的比活性 [ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]

$AC_{\text{water}}^{D,14C}$ ：溶解的無機碳-14 在水中的活度濃度 [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$\text{conc}_{\text{DIC,aqu}}$ ：溶解的無機碳在水中的濃度 [ $\text{kgC m}^{-3}$ ]

$f_{C,j}$ ：生物體整體碳的分數 j [ $\text{kgC kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

$$AC_j^{14C} = AC_{\text{pp,ter}}^{14C} f_{C,j} \quad (13)$$

其中：

$AC_{\text{pp,ter}}^{14C}$ ：C-14 在初級初級生產者中的活度濃度 [ $\text{Bq kgC}^{-1}$ ]

$f_{C,j}$ ：全身碳的分數 [ $\text{kgC kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

$$AC_j^{3H} = \frac{AC_{\text{water}}^{D,3H}}{\text{dens}_{\text{water}}} (1 - f_{\text{DW},j}) \quad (14)$$

其中：

$AC_{\text{water}}^{D,3H}$ ：氚在水中的活度濃度 [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$\text{dens}_{\text{water}}$ ：水的密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ]（參數值  $1000 \text{kg m}^{-3}$ ）

$f_{\text{DW},j}$ ：物群全身乾重的分數 [ $\text{kg}_{\text{DW}} \text{kg}_{\text{FW}}^{-1}$ ]

### 3.2.2.1.2.3. 計算外部曝露

計算外部曝露以下列方程式表示：

$$\text{DoseRate}_{\text{ext},j}^{\text{aqu}} = (0.001 \text{m}^3 \text{l}^{-1}) (w_{\text{low}\beta} \text{DCC}_{\text{ext,low}\beta,j} + w_{\beta\text{r}} \text{DCC}_{\text{ext,\beta\text{r},j}}) AC_{\text{occup},j} \quad (15)$$

其中：

$0.001 \text{m}^3 \text{l}^{-1}$ ：單位變換因子

$w_{low\beta}$  : 外部低能  $\beta$  輻射的輻射權重因子[無單位]

$w_{\beta r}$  : 外部  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的輻射權重因子[無單位]

$DCC_{ext,low\beta,j}$  : 生物體  $j$  的外部低  $\beta$  輻射的劑量轉換係數[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per  $\text{Bq l}^{-1}$ ]

$DCC_{ext,\beta r,j}$  : 生物體  $j$  的外部  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的劑量轉換係數[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per  $\text{Bq l}^{-1}$ ]

$AC_{occup,j}$  : 生物體  $j$  [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]居住修正的活度濃度[ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$$AC_{occup,j} = \left( v_{water,j} + \frac{v_{wat.surf,j}}{2} + \frac{v_{sed.surf,j}}{2} \right) AC_{water,surf} + \left( \frac{v_{sed.surf,j}}{2} + v_{sed,j} \right) AC_{regoUp,tot,aqu} \quad (16)$$

其中：

$v_{water,j}$  : 棲息地水中生物體  $j$  的居住因子[無單位]

$v_{wat.surf,j}$  : 生物體  $j$  在其表面的棲息地水中的居住因子[無單位]

$v_{sed.surf,j}$  : 生物體  $j$  在其表面的棲息地沉積物中的居住因子[無單位]

$v_{sed,j}$  : 棲息地中生物體  $j$  的居住因子[無單位]

$AC_{water,surf}$  : 水中總放射性核種活度濃度[ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$AC_{regoUp,tot,aqu}$  : 表面沉積物中總放射性核種活度濃度[ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$$AC_{regoUp,tot,aqu} = AC_{regoUp,aqu} + AC_{regoUp,org,aqu} \quad (17)$$

其中：

$AC_{regoUp,aqu}$  : 表面沉積物中無機形式的活度濃度[ $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

$AC_{regoUp,org,aqu}$  : 有機物中相應的活度濃度[ $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

$$DoseRate_{ext,j}^{ter} = (w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,onsoil,j} v_{onsoil,j} + w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,insoil,j} v_{onsoil,j} + w_{\beta r} DCC_{ext,\beta r,inAir,j} v_{onsoil,j}) AC_{regoUp,tot,ter} \quad (18)$$

其中：

$w_{\beta r}$  : 外部  $\beta$  伽馬輻射的輻射權重因子 [無單位]

$DCC_{ext,\beta r,k,j}$  : 生物體  $j$  在棲息地  $k$  (在土壤上,在土壤內或空氣中) 的外部  $\beta$  和  $\gamma$  輻射的劑量轉換係數[ $\mu\text{Gy h}^{-1}$  per  $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

$v_{k,j}$  : 棲息地  $k$  中的生物體類型  $j$  的居住因子[無單位]

$AC_{regoUp,tot,ter}$  : 表面泥炭中總放射性核種活度濃度[ $\text{Bq kg}_{\text{DW}}^{-1}$ ]

#### 3.2.2.1.2.4. 總劑量率計算

總劑量率計算可由下列方程式表示：

$$DoseRate_{total,j} = DoseRate_{ext,j} + DoseRate_{int,j} \quad (19)$$

$DoseRate_{ext,j}$  : 生物體類型 j [ $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ] (方程式 264 或 267) 中的加權外部劑量率 [ $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ]

$DoseRate_{int,j}$  : 生物體類型 j [ $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ] (方程式 257) 中的加權內部劑量率 [ $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ]

### 3.2.2.1.2.5. 生物圈物體生態系統的過渡

生物圈物體生態系統的過渡，是指當物體完全出現在正常的海平面時，在劑量率的計算需考慮進來，當生物圈物體從海洋狀態，直至達到湖泊的閾值，或為沒有適當的湖泊階段的生物圈物體。在海洋期間，劑量率估計僅為海洋生物。但非海洋階段之後，對湖泊-沼澤，劑量率的計算需考慮淡水域物體。陸域生態系統（例如濕地物種），在第一個陸域的物體形成後一年，陸域部分已經出現生物圈物體中，劑量率的計算需考慮陸域生物。



## 4. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用與模式發展建議

### 4.1. 特徵、事件及作用對應到 SR-PSU 生物圈建模

SR-PSU 已建立生物圈基本假設及核種傳輸建模主題，完成放射性核種傳輸至生物圈模型的之生物圈特徵、事件及作用與模式發展建議，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。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。

生物圈評估需建構交互作用矩陣(Interaction Matrix,IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。在生物圈交互作用矩陣中，包括：10 物理組件(及 2 個邊界組件)、6 個變量和 50 個作用歷程，SKB 對於生物圈安全評估原提出 50 個作用歷程，SKB 經評估後刪去 5 個，包括：Bio11 (動物在地表水系統移動)、Bio20 (地面上空氣或水之壓力改變)、Bio23 (由材料重量引起影響底層岩石之荷重)、Bio44 (生物圈物體曝露於電離輻射和吸收能量的作用)、Bio46 (放射性核種衰變能量引致分子分解引起)，提出 45 個作用如表 23 對於生物圈安全評估之特徵、事件與作用的作用矩陣，與對人類和非人類生物群的曝露計算進一步說明。

表 23 組件、特徵和作用對應到 SR-PSU 生物圈中的不同的建模作業。

組件、變量和作用係按 SKB FEP 數據庫編號 CompBio =生物圈的組件，VarBio =生物圈的變量，Bio =生物圈的作用。 Aqua =水域生態系統，Mire =沼澤生態系統，Agri =農業系統，NHB =非人類生物群，Kd / CR =吸附/脫附值和濃度比。

組件、特徵、作用		核種模式					支持核種模式建模作業						
		傳輸模擬			劑量計算		地景模擬	水文模擬	生態系統特定參數				
		水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	人類	非人類生物群 NHB			水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	Kd/CR	人類 NHB
組件													
CompBio01	地質圈				X		X	X					
CompBio02	表土層	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CompBio03	表土層水	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CompBio04	地表水	X	X	X	X	X	X	X	X			X	

組件、特徵、作用		核種模式					支持核種模式建模作業						
		傳輸模擬			劑量計算		地景模擬	水文模擬	生態系統特定參數				
		水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	人類	非人類 生物 群 NHB			水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	Kd/CR	人類 NHB
CompBio05	氣體和當地大氣	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
CompBio06	初級生產者	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
CompBio07	分解者				X						X	X	
CompBio08	濾食性動物				X			X			X	X	
CompBio09	草食動物				X	X		X	X		X	X	
CompBio10	肉食動物				X	X		X	X		X	X	
CompBio11	人類				X			X	X	X		X	
CompBio12	外部條件	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
特徵													
VarBio01	幾何	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
VarBio02	材料組成	X	X	X			X	X	X	X	X		
VarBio03	放射性核種總量	X	X	X	X	X							
VarBio04	演替階段	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
VarBio05	溫度	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
VarBio06	水組成成分	X	X	X	X	X		X	X	X	X		
生物作用													
Bio01	生物擾動	X		X				X		X			
Bio02	消耗	X	X		X	X	X	X	X	X		X	
Bio03	死亡	X	X				X	X	X				
Bio04	分解	X	X	X			X	X	X	X			
Bio05	排泄	X	X					X	X	X	X		
Bio06	食物供應				X		X	X	X	X			
Bio07	生長						X			X			
Bio08	棲息地供應				X	X	X	X	X	X		X	
Bio09	侵入			X	X							X	
Bio10	材料供應				X		X	X	X	X		X	
Bio12	顆粒釋放/捕集	X	X					X	X	X			
Bio13	初級生產	X	X				X	X	X	X			
Bio14	刺激/抑制						X	X	X	X			
Bio15	攝食	X	X		X	X		X	X	X	X	X	
與人類行為有關的作用													
Bio16	人為排放			X	X					X		X	
Bio17	材料使用			X	X					X		X	
Bio18	物種引入/消滅				X	X		X		X			
Bio19	用水			X	X							X	
化學、力學和物理作用													
Bio21	壓密			X						X			
Bio22	元素供應						X	X	X	X	X		
Bio24	相變	X	X	X				X	X	X	X		
Bio25	物理性質變化	X	X	X				X	X	X	X		

組件、特徵、作用		核種模式					支持核種模式建模作業						
		傳輸模擬			劑量計算		地景模擬	水文模擬	生態系統特定參數				
		水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	人類	非人類 生物 群 NHB			水域 Aqua	沼澤 Mire	農業 Agri	Kd/CR	人類 NHB
Bio26	反應	X	X	X					X	X	X	X	
Bio27	吸附/脫附	X	X	X	X	X						X	
Bio28	供水				X	X	X	X					X
Bio29	風化								X	X	X	X	
Bio30	風應力						X		X	X	X		
傳輸作用													
Bio31	加速度							X					
Bio32	對流	X	X	X				X	X	X	X		
Bio33	覆蓋	X	X				X	X	X	X			
Bio34	沉積	X	X				X	X	X	X			
Bio35	流出	X	X	X			X	X					
Bio36	流入	X	X	X			X	X					
Bio37	截獲			X				X			X		
Bio38	搬遷			X			X				X		
Bio39	再懸浮	X			X		X		X				
Bio40	飽和度						X	X			X		
輻射和熱作用													
Bio41	放射性衰變	X	X	X	X	X							X
Bio42	曝露				X	X							X
Bio43	熱儲存								X	X			
Bio45	光相關作用								X	X	X		
Bio47	放射性核種釋出	X	X	X									
地景開發作用													
Bio48	岩石表面位置變化						X	X					
Bio49	海平面變化						X	X					
Bio50	閾值						X	X					

## 4.2. SR-PSU 生物圈建模作業

SR-PSU 進行大規模建模工作，所有建模作業都詳列在評估模式流程圖(AMF;如圖 8) 其中有關生物圈建模作業標記為綠色。以下對於生物圈建模作業進行簡短描述，而完整的描述則見表 24 生物圈建模作業評估模式流程(AMF)說明。

### 放射性核種傳輸模擬(Radionuclide transport modelling)：

計算放射性核種經由生物圈物體內的環境介質進行遷移，並在環境中隨著時間傳輸和

濃度累積。

#### 劑量計算(Dose calculations)：

利用模擬之放射性核種傳輸濃度，計算核種於人類或非人類生物群之劑量率。劑量計算參數來自於 Forsmark 地表地景輸入參數及劑量轉換參數。

#### 地景模擬(Landscape modelling)：

地面地景係隨著時間而演變，前一次冰期循環以來的海岸線演化以及湖泊生態系統的演替，發現整體地貌地景正在轉向濕地（進一步描述可參閱 SKB 2014a）。地景模擬可提供地景幾何隨時間演變的資訊。

#### 水文模擬(Hydrological modelling)

放射性核種傳輸主要係由水流所帶動。水文模擬提供場址於不同時間點（即地景於海洋、湖泊和陸地階段）水流資訊。

#### 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。相反的，來自該場址點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的所有相關的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。

生物圈建模活動列在表 24 中，並附有相關參考文獻報告可資參考，每個建模作業都詳列在評估模式流程圖（AMF）如圖 8，AMF 概述了所有的模擬流程及評估作業。

表 24 SR-PSU 生物圈建模作業之評估模式流程(AMF)對應項目及參考文獻說明

安全評估 模式建立	說明	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

安全評估 模式建立	說明	參考文獻	評估模式流程之建模作業
劑量計算	由放射性核種傳輸模式的濃度應用於對人類和非人類生物群的劑量計算	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 •生物圈物體識別
	表土層深度模型(RDM) 描述 Forsmark 表土層的地層和深度	SKB TR-13-20	
	從過去和現在 Forsmark 表土層湖泊發展模型 (RLDM) 描述了未來湖泊的表土層深度	SKB R-13-27	
	地景發展模式 (LDM) 識別生物圈物體 (放射性核種可能進入生物圈的區域), 描述生物圈物體的發展, 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	Forsmark 的現在和未來的水文合成被用於放射性核種傳輸模型的輸入	SKB R-13-19	• 地表水文 • 良好調查
生態特定 參數	Kd and CR 於 SR-PSU 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

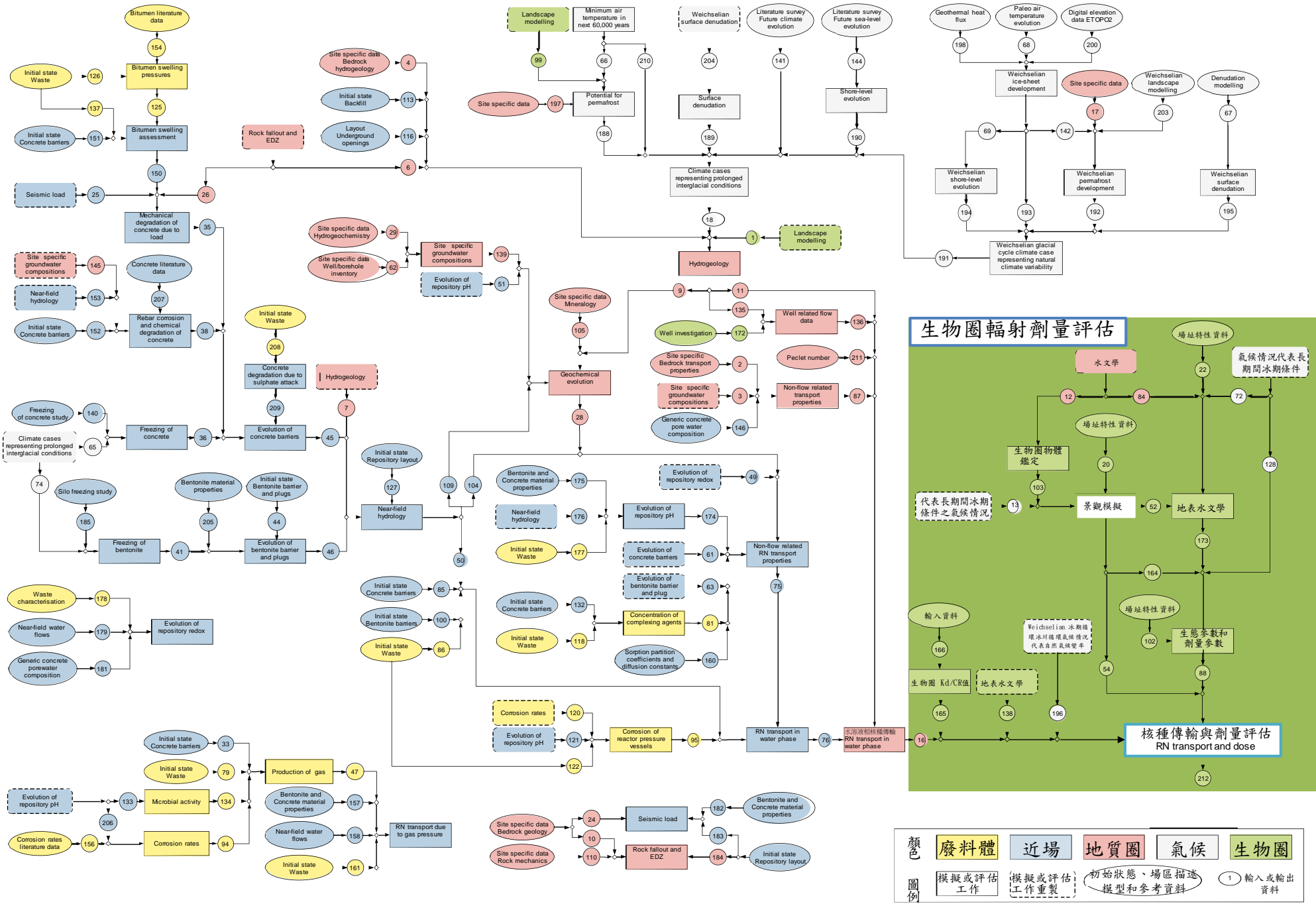


圖 8 SR-PSU 安全評估計畫廢棄物體、近場、遠場地質圈、生物圈與氣候之評估模式流程圖(AMF)

### 4.3. SR-PSU 生物圈組件、特徵與對應之模式發展建議

生物圈有共有 10 個組件代表不同的環境媒介（表土層、表土層水、地表水、氣體和當地大氣）和生物群體（初級生產者、分解者、濾食性動物、草食動物、肉食動物、人類），另外還有 2 個邊界組件（地質圈和外部條件）。生物圈特徵是影響生物圈組件之特性、功能、條件或屬性，或影響兩個組件之間的交互作用的速率或方向。生物圈 6 個重要特徵：幾何、材料組成、放射性核種總量、演替階段、溫度和水組成。生物圈 45 個作用

前述 10 個組件及 6 個重要特徵對應之模式發展建議，包括：放射性核種傳輸模擬、劑量計算、地景模擬、水文模擬、生態系統特定參數，分述如下：

#### 4.3.1. 生物圈組件與對應之模式發展建模作業

##### 4.3.1.1. 表土層

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.1 節；SKB FEP 資料庫編號: CompBio02。

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種傳輸中每層表土層由（一個或多個）區塊代表。

最頂層的區塊由沉積物在水域生態系統和泥炭在陸地生態系統中所組成。含氧頂部表土層分為兩個區塊：一個是放射性核種吸附在固體上或溶解孔隙水（表土層水，見下一節），一個是有機物中的放射性核種。底層沉積物或泥炭是冰期沉積物的一個組成部分，分為兩個區塊：一個是放射性核種吸附在固體上/溶解在孔隙水中，一個是有機物質中的放射性核種。後期冰層下面較古老的沉積物主要包括冰磧物和冰川粘土，且分屬兩個不同的區塊。

(2) 劑量計算：地面的外部曝露包括在人類劑量計算中。上層表土層（頂層表土層成分）

也被認為是非人類生物群落的棲息地，因此，分析上層表土層放射性核種的濃度有助於棲息生活在上層表土層上面或其裡面生物體之劑量率計算。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：表土層深度模式描述目前 Forsmark 地區之表土層類型和深度。地景發展模式模擬未來 Forsmark 地貌地景表土層分布，分為冰川粘土、湖泊後期冰川粘土和極地起源和泥炭。

(2) 水文模擬：表土層土壤包含在水文模式模擬區域內。

- (3) 生態系統特定參數：不同的表土層特性定義為不同的區間，例如孔隙率、密度、水飽和度和礦化率，還有現場觀測生物擾動深度用於定義上層表土層。固體/液體分配係數(Kd)用於建立放射性核種於表土層土壤中的吸附模型。

#### 4.3.1.2. 表土層水

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.2 節；SKB FEP 資料庫編號: CompBio03。

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種的傳輸是由表土層土壤水流所帶動。在表土層內的放射性核種部分被表土層固體部分吸附，或溶解在表土層水中。利用固體/液體分配係數 (Kd) 來模擬核種溶解和吸附之間的分佈。抽水井（即從表土層中抽水）亦包含在放射性核種傳輸模式中，井水用途為灌溉田園使用。
- (2) 劑量計算：從井水包括在劑量計算中，劑量來自作為人類吃的牲畜動物食品，該牲畜先食用井水和人類直接飲用井水。上層表土層（包括表土層水）也被認為是非人生物群的棲息地並存有放射性核種的濃度，因此對於棲息於表土層土壤的生物體造成劑量率。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：濕地指標識別作業考慮表土層水用於劃定濕地地區生物圈物體之地表地景。
- (2) 水文模擬：於表土層區塊之飽和區和未飽和區利用水文模擬水流。介於不同表土層區塊之間水流速度參數，用於放射性核種傳輸模式內。
- (3) 生態系統特定參數：固體/液體分佈係數 (Kd) 用於模擬表土層水中放射性核種的溶解濃度。農地是唯一處於飽和/未飽和狀態是生態系統，孔隙水含量參數使用於農地系統。

#### 4.3.1.3. 地表水

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.3 節；SKB FEP 資料庫編號: CompBio04

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：海洋盆地、湖泊和河流中的放射性核種模型都包括地表水的環境傳輸媒介。地表水包括水中的溶解元素和化合物以及顆粒物質。並假設平



衡條件下之分配係數 (Kd) 表示一個區塊內液相和固相放射性核種之分佈。另考慮到耐火性有機顆粒物中所含放射性核種可能不一定與地表水達到液相和固相濃度平衡狀態，所以以一個區塊代表放射性核種 (包括 C-14) 儲存在有機物中。

(2) 劑量計算：地表水被人類和牲畜所攝取，並造成人體的輻射劑量。地表水也是非人類生物群的棲息地，因此地表水中放射性核種的濃度對生活在地表水中的生物物種具有輻射劑量率。

### 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景發展模式描述了地貌地景之地表水的演變發展。

(2) 水文模擬：本質上，水文模式模擬地表水和地下水所有水流來源及所有不同水流來源之間水文變化。在淹沒狀態佔主要的時期，模擬跨流域的水流水文變化。對於地表地貌已經高於海平面以上的時間段，則主要需要模擬地表水流量 (河流和陸地流量) 模擬。

(3) 生態系統特定參數：放射性核種傳輸模式需要的參數，包括 Forsmark 地表水的特徵、固體/液體分配係數 (Kd 值) 用於評估放射性核種在地表水中固體顆粒物質上的吸附狀態。

#### 4.3.1.4. 氣體和當地大氣

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.4 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio05

#### 2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：SKB 已經開發完成一個新的大氣概念和數值模型，為 SR-PSU 安全評估的一部分，需要區分不同的大氣層 (見 SKB R-13-46 生物圈核種模式報告)。然而，大氣動力學的速度很快，與大氣層上層的交流幅度比與地表水的交換大很多。因此，為了模式目的，在模擬過程大氣可以被視為生態系統區塊模型的匯 (或源)，以及當地大氣中揮發性放射性核種的濃度是使用穩態解計算。

(2) 劑量計算：曝露在大氣中的氣體包括在對人類劑量及對非人類生物的劑量率。

### 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：當地的大氣蒸發散量是影響當地水平衡的重要因素。

(3) 生態系統特定參數：氣體交換和當地大氣的特性係由生態系統特定參數所決定。

#### 4.3.1.5.初級生產者

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.5 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio06
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：初級生產者當作模式模擬的區塊。
  - (2) 劑量計算：初級生產者在很多情況下是人類和草食動物最重要的食物來源，因此是劑量計算的重要組成部分，例如在描述由於從乾草從濕地到動物食品的放射性核種轉移，或經由攝食栽培作物而引起的輻射曝露。在非人類生物群劑量評估中亦考慮不同初級生產者造成的劑量率。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：這個模型描述了淺海灣和湖泊蘆葦和泥炭的演變發展。這種向內生長是由初級生產者的增長和有機物質的累積所造成的。
  - (2) 水文模擬：初級生產者經由諸如根系吸收和蒸散等過程來影響水平衡，這些作用過程都包括在水文模擬建模中。
  - (3) 生態系統特定參數：初級生產者按生物量和淨初級生產量來描述。初級生產者對放射性核種的吸收利用元素濃度比參數（CR）進行模擬。

#### 4.3.1.6.分解者

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.6 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio07
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：分解者將有機部分中結合的放射性核種分解，並由此作用過程轉移至表土層土壤區塊模式內的無機部分。然而，放射性核種在分解者和其他生物群中的濃度量，與生物圈的其他區塊相比是較小的。因此，雖然考慮了解析過程，但分解者本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。
  - (2) 劑量計算：在非人生物群劑量評估模式中計算分解者的劑量率。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：利用分解者的元素濃度比參數（CR）之活性濃度以進行非人

類生物群劑量評估。在劑量計算中需包括分解者的特徵（如尺寸和形狀）。

#### 4.3.1.7. 濾食性動物

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.1 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio03
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種在濾食性動物和其他生物群中的濃度量，與生物圈的其他區塊相比是較小的。因此，雖然考慮了濾食性動物作用過程，但濾食性動物本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。
  - (2) 劑量計算：在非人生物群劑量評估模式中計算濾食性動物的劑量率。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：濾食性動物沒有明確包含在人類的傳輸或劑量計算中，但它們是水域生態系統中食物鏈的一部分，可能會影響與顆粒物質濃度和分解有關的參數估計值，這需要使用場址特定參數數據。此外，利用濾食性動物的元素濃度比參數（CR）之活性濃度以進行非人類生物群劑量評估。

#### 4.3.1.8. 草食動物

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.8 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio09
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種在草食動物和其他生物群中的濃度量，與生物圈的其他區塊相比是較小的。因此，雖然考慮了草食動物作用過程，但草食動物本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。
  - (2) 劑量計算：草食動物對人類的劑量有影響，因為畜養草食動物、魚類和野味是人類飲食的一部分。草食動物的劑量率也計算在非人類生物群評估中。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：草食動物沒有明確包含在人類的傳輸或劑量計算中，但它們

是陸域和水域生態系統中食物鏈的一部分，並可能影響生物量和淨初級生產。利用草食動物的元素濃度比參數（CR）之活性濃度以進行非人類生物群劑量評估。另外，在生物圈物體中草食動物係為人類的食物來源，在人類劑量評估需納入考慮。

#### 4.3.1.9. 肉食動物

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.9 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio10

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種在肉食動物和其他生物群中的濃度量，與生物圈的其他區塊相比是較小的。因此，雖然考慮了肉食動物作用過程，但肉食動物本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。

(2) 劑量計算：肉食動物（例如食魚魚類如鱸魚和梭魚）對人類的劑量有影響，因為是人類食物的一部分。食肉動物的劑量率也計算在非人類生物群評估中。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：肉食動物在陸域和水域生態系統中的存在可能在一定程度上影響不同參數的估算，這可藉由使用場址特定參數以間接含括。預計對於福斯馬克周邊地區的影響不大，該原因係由於較大的肉食動物的數量規模很少，有時甚至可以忽略不計。利用肉食動物的元素濃度比參數（CR）之活性濃度以進行非人類生物群劑量評估。另外，在生物圈物體中肉食動物係為人類的食物來源，在人類劑量評估需納入考慮。

#### 4.3.1.10. 人類

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.10 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio11

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：雖然考慮到人為行為作用過程並影響放射性核種傳輸，但人類本身並不包括在放射性核種傳輸模型中。

(2) 劑量計算：計算對人類的輻射劑量，以關鍵群體為代表性。詳細人類曝露途徑分析

可見本報告之第三章。

### 3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。人類可能會影響地景，例如排水和耕種土地。但是，在地景模型作用過程係由人類所造成，但模型內不考慮人類形體構造及數量。
- (2) 水文模擬：不包含。人類可能會影響水文通量，例如阻塞水體或利用水井。然而，在水文模型作用過程係由人類所造成，但水文模型中沒有考慮人類形體構造影響及人類數量。
- (3) 生態系統特定參數：描述居住在受影響地區人類社區的參數被定義。例如，人數、不同食物和水的攝取率，及在污染土地上工作的時間。

#### 4.3.1.11.地質圈

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.11.1 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio01

#### 2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：地質圈不包括在生物圈的放射性核種傳輸模型中。
- (2) 劑量計算：地質圈不包括在生物圈的放射性核種模型中。然而，位於地質圈的水井用於生物圈的劑量計算。

### 3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：基岩作為模擬區域建模的邊界條件。
- (2) 水文模擬：水文模型包括深達 150 公尺的基岩。
- (3) 生態系統特定參數：不包含。

#### 4.3.1.12.外部條件

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.11.2 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio12

#### 2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：外部條件包括在放射性核種傳輸模型中，例如考慮不同氣候情境及不同氣候條件。在 SR-PSU 氣候報告（SKB TR-13-05）中定義用於模擬未來不同的氣候發展影響氣候情境案例，在 SKB TR-14-06 則應用氣候情境案例於生物圈模擬的處理。
- (2) 劑量計算：氣候影響人類的行為，因此也影響劑量計算。

### 3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：在地景建模中考慮氣候條件，並針對不同的氣候演變描述替代情境案例發展（參見 SKB TR-14-06 和 SKB R-13-27）。
- (2) 水文模擬：使用不同的氣候條件研究氣候對水文流量的影響。模擬相對於當前溫暖/潮濕的氣候和永久凍土條件。
- (3) 生態系統特定參數：許多使用的參數都和氣候有關。因此，替代參數值用於不同氣候條件下生物圈計算模擬應用。

### 4.3.2. 生物圈特徵與對應之模式發展建模作業

#### 4.3.2.1. 幾何

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.1 節; SKB FEP 數據庫：VarBio01。

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種模式中之模擬區域必須確認幾何形狀，包括生物圈系統的生物圈物體、水體和表土層的幾何形狀。另外，在參數化放射性核種輸運模式時需考慮不同生物圈組件的幾何形狀。
- (2) 劑量計算：劑量計算時需考慮幾何形狀，例如，生物圈物體中的人類居民的數量和來自生物圈物體的食物量取決於其幾何大小。包括在劑量評估中的非人類生物群係由形狀、體積和表面積所確定。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：隨時間演變的地貌地景元素的相關幾何形狀係由地景開發模式模擬定義。
- (2) 水文模擬：在 MIKE SHE 水流模擬中，每個時間段的地形、水深、表土分佈和深度都需要被計算出來。
- (3) 生態系統特定參數：生態系統特定的參數被用來定義表土層的厚度、初級生產者的數量和生物量等。生物的大小、形狀和表面積是用於特定的生態系統之非人類生物群的劑量計算。

#### 4.3.2.2. 材料組成

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.2 節; SKB FEP 數據庫：VarBio02。

## 2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：表土層和水域區塊的化學成分包括在放射性核種傳輸模擬中，例如有機質含量、溶解無機碳濃度和顆粒物質含量。

(2) 劑量計算：不包含。

## 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：根據地景中不同表土層的分佈來確定物理特性的組成。

(2) 水文模擬：在計算流量時，在水文建模中需使用表土層的粒徑大小和孔隙率。

(3) 生態系統特定參數：使用元素特定的固體/液體分配係數（Kd 值）和元素濃度比參數（CR）來計算土壤和顆粒物質的吸附以及生物的攝取。這些參數取決於表土層/水域區塊的化學成分，因此模式模擬應用 Kd 和 CR 值時需要間接使用到材料組成（化學組成物、礦物成分和營養物成分，物理特性如孔隙率、粒徑大小和孔隙水含量等）。表土（硬質土底或軟質土底、養分含量等）的物質組成可能會影響初級生產者的類型和數量。這些被假定為間接包括在放射性核種模式模擬之生物質和食物生產的參數中，因為這些參數是由於這些材料組成影響的現場數據，也包括孔隙率、粒徑大小和孔隙水含量參數。

### 4.3.2.3. 放射性核種總量

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.3 節; SKB FEP 數據庫：VarBio03。

## 2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種總量包含放射性核種傳輸模型的區塊內。

(2) 劑量計算：計算出的放射性核種總量用於估算對人類的劑量和對非人類生物群的劑量率。

## 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：不包含。

### 4.3.2.4. 演替階段

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.4 節; SKB FEP 數據庫：VarBio04。

## 2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：本演替階段之放射性核種模型中係指從水域生態到陸域生態系統過渡過程，並將該地區轉化為農田。

(2) 劑量計算：演替階段會影響人類的土地利用因此會影響有效曝露途徑，也會影響非人類生物群可用的棲息地類型，因此也會影響對非人類生物群的劑量率計算。

## 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景開發模式包括海洋盆地、湖泊和沼澤的開發。

(2) 水文模擬：水文模擬進行了三個時間步驟，以涵蓋從海洋經由湖泊演替至陸地的條件，因此包括演替階段。

(3) 生態系統特定參數：演替階段影響海洋生物、湖泊生物或陸地生物是否存在於生物圈物體。此外，它影響生物圈物體的幾何形狀，從而影響生物量、淨初級生產量和生物類型，包括濕地被人類排水後於農業使用狀態。演替階段也影響到該地區人口的數量和特徵。

### 4.3.2.5. 溫度

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.5 節; SKB FEP 數據庫：VarBio05。

## 2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種模型中使用氣候情節案例來評估在地貌地景中不同溫度對放射性核種傳輸的影響。

(2) 劑量計算：劑量計算中考慮氣候因素，因為在冰緣條件下農業係假定為不能實施耕種。同樣，目前的生物群亦與氣候因素有關。

## 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景發展模式描述的地貌地景比現在氣候更加溫暖和寒冷的氣候條件。

(2) 水文模擬：氣溫數據用於水文模擬。

(3) 生態系統特定參數：溫度包含在氣體交換的計算中。一些特定生態系統參數的替代參數值用於冰緣和擴展的全球暖化條件。

### 4.3.2.6. 水組成成分

1. 來源對應：SKB R-13-43 第 5.6 節; SKB FEP 數據庫：VarBio06。



## 2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：水組成成分之濃度包括在放射性核種模型中參數值，應用顆粒物質含量和溶解的無機碳濃度參數值。
- (2) 劑量計算：水組成成分間接包括在人類和非人類生物群的劑量計算中。當水中含有核種時，水是一種曝露途徑。

## 3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。
- (2) 水文模擬：不包含。
- (3) 生態系統特定參數：生態系統特定的參數。水組成成分係根據溶解的無機碳和顆粒物質的濃度作為參數值。也可在計算其他參數，如 pH 和鹽度，以及計算空氣/水交界面的物質質量交換。特定元素的固體/液體分配係數(Kd 值)和濃度比(CR)被用來計算顆粒物質的吸附和水生生物的攝取取決於水隔室的化學成分。因此，水組成成分應用於 Kd 和 CR 值來進行模型參數化。

### 4.3.3. 生物圈作用與對應之模式發展建模作業

如表 23 所示生物圈作用分為以下幾類：(1)生物作用(2)與人類行為相關的作用(3)化學、力學和物理作用(4)傳輸作用(5)熱和輻射，共有 45 個作用與對應之模式發展建模作業分述如下：

#### 4.3.3.1. 生物擾動

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.1 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio01

## 2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：生物擾動係於放射性核種模式中用於農業生態系統的計算，當沼澤排水和湖泊沉積形成耕地時，來自於上層的表土層核種量，混合於生物活動耕地層內。生物擾動也用於水域生態系統計算放射性核種，由於水域環境底部之上層沉積物發生再懸浮作用，生物擾動使得氧氣前沿滲透進入底層沉積物，導致放射性核種從缺氧土層明顯遷移到上層、生物活動層、沉積層。

(2) 劑量計算：不包含。

## 3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。
- (2) 水文模擬：不包含。
- (3) 生態系統特定參數：定義水域生態系統中上土層的深度為上氧化層，即與生物擾動深度相同。犁耕田地深度定義為農田中的生物擾動區。

#### 4.3.3.2. 消耗

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio02
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：分解者消耗係在後面所述之分解作用描述，這裡所指的攝食消耗作用並非為放射性核種傳輸模式的一部分，但攝食消耗作用會影響從初級生產者（該作用包括在區塊之內）到表土層的有機物流量。從初級生產者到表土層有機物流量都包括在水域和陸域之放射性核種傳輸模式中，其中非礦化的淨初級生產量（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋出有關）都沉積在表土層上。
  - (2) 劑量計算：在劑量計算中考慮了人類的攝食消耗。從攝食家畜（奶牛）的消耗也納入人類劑量計算，在非人類生物群的劑量計算亦考慮攝食消耗。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：在淺海灣、湖泊地景模擬中需要考慮使用發生消耗作用現場數據資料，該消耗作用會影響生長（初級生產者的生物量受到消耗、死亡和分解的間接影響）。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：主要是草食動物的消耗對生態系統特定參數的影響。草食動物的消耗間接包括有機植物在表土層之生物量和淨初級生產量。牛和人類定義為消耗的參數，並作為劑量計算的輸入參數。

#### 4.3.3.3. 死亡

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio03
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：死亡導致落葉凋落並包括在放射性核種傳輸模式中。從初級生產者到表土層的流量包括在水域和陸域放射性核種傳輸模式，其中非礦化淨初級生產（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋出有關）都沉積在表土層上。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：在淺海灣、湖泊生長（初級生產者的生物量受到消耗、死亡和分解）在景觀開發模式中描述。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：有機體的死亡被認為是有機物從生物到表土層的轉移，其中部分的主要生產者在初始發生消耗和礦化作用之後，在不同環境介質中仍保留部分未分解的有機體。

#### 4.3.3.4. 分解

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.4 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio04

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：分解作用在所有生態系統放射性核種傳輸模式從有機物轉成表土層無機部分的風化層（明確地說包括作為礦化率）中被考慮。分解作用影響生物轉成表土層之有機物通量包括在放射性核種傳輸模式中。從初級生產者到表土層流量包括在水域和陸域放射性核種傳輸模式中，其中非礦化淨初級生產（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋出有關）都沉積在表土層上。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：泥炭在湖泊增加量係為初級生產者的死亡和分解的函數，有機物分解產生泥炭，當泥炭地排水時將產生沉陷包含在地景模擬中。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：對於不同物理組件（上部表土層、後冰期沉積物 and 水中顆粒物）由分解有機質之礦化率參數使用在核種模式中）。

#### 4.3.3.5. 排泄

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.5 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio05

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種傳輸模式中排泄是代表從生物到表土層的通

量，從初級生產者到表土層的流量包括在水域和陸域放射性核種傳輸模式中，其中非礦化淨初級生產（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋出有關）都沉積在表土層上。

(2) 劑量計算：不包含。

### 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：排泄是在放射性核種模型中從生物區到表土層之有機物的轉移，其中部分主要生產者最初的消耗和礦化作用之後，在不同的環境介質中仍然是未分解的有機物。元素的排泄也可能影響呼吸、以及大氣和水的組成。經使用現地特性資料，排泄作用假設間接地影響水化學參數值，例如，排泄或吸收 CO<sub>2</sub> 影響 pH 值。CR 值取決於攝取、排泄和吸附/脫附，CR 值係由現地特性資料數據所得，以上這些所有作用過程都間接包括在所有生態系統類型中，並作為生態系統特定參數。

#### 4.3.3.6. 食物供應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.6 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio06

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：食品供應不是直接在放射性核種傳輸模式中模擬，但係來自放射性核種傳輸模式模擬結果（例如：食物中的核種濃度可以由環境介質模擬計算得到）並用於劑量計算。

(2) 劑量計算：在劑量計算中考慮從放射性核種傳輸模式模擬之生物圈物體的食物供應，與人類劑量有關的食物供應之四種曝露途徑：狩獵與採集、內部-外地農場、排水及沼澤培育、住家菜園區。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：提供食物供應的生產地，如農田、沼澤和湖泊，都地景模擬中確定。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：利用植物和動物食用的產生量計算來自農田、湖泊和沼澤的食物供應。

#### 4.3.3.7. 生長

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.7 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio07
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：生長沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬，但是地景模擬及生態系統特定參數計算生長狀態和參數定義。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：蘆葦叢生長是湖泊和淺海灣陸域化的第一步並在地景模式中進行模擬。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：在生物群中生物群的生長可能會稀釋放射性核種的濃度。對於大多數計算情況，假定生物量處於穩定狀態，但是，需要參數化灌溉影響及主要生產者生長過程之元素（營養素）截取損失量。

#### 4.3.3.8. 棲息地供應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.8 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio08
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：棲息地供應沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬，但是地景模擬及生態系統特定參數計算棲息地供應和參數定義。
  - (2) 劑量計算：對於非人類生物的劑量計算，需要考慮生物的棲息地。對於人類的劑量計算，棲息地係定義為人類行為和曝露途徑。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：在地景發展過程中棲息地由地景模擬得到。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：生物圈物體內可用棲息地已納入水域生物量和生產參數計算，並於放射性核種模式使用（例如：考慮陽光照射區的面積和深度）。在沼澤和農業生態系統中的棲息地並沒有區別，但是這些生態系統之生物量被認為是同質且與生態系統的面積成比例。計算非人類生物劑量率，係利用生物體在不同棲息地中所佔的數量作為參數。

#### 4.3.3.9. 侵入

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.9 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio09
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：將井鑽入處置場或處置場下游區，可能導致核種釋出造成放射性核種濃度升高。已被列為放射性核種傳輸情節分析案例（BCC5，參見 SKB TR-14-06 第 7.4.5 節），井水作為飲用和灌溉住家菜園區。未來侵入行為將進一步在人類入侵報告分析（參見 SKB -14-08）。
  - (2) 劑量計算：劑量計算來自攝取井水和井水作為灌溉用水。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：定義井水攝取量和作為灌溉的水量參數以評估侵入井的影響。

#### 4.3.3.10. 材料供應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.10 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio10
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：材料供應沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬。
  - (2) 劑量計算：劑量來自使用材料（泥炭/木材、糞肥和海藻）係包括在人類的劑量計算，在生物圈物體中提供泥炭/木材的數量是否足以供應人類的數量需求（由地景模擬參數來完成）。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：地景模擬確定不同的表土層和水源、適合的林業地區、木材砍伐燃燒成泥炭區、畜牧區。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：泥炭、木材、糞肥和海藻的數量需要由人類行為決定（見材料使用），但供應量是由生物圈物體的生態系統所定義，與生態系統參數和地景參數有關。另對於農業生態系統所提供動物糞便的數量需要定義為參數。

#### 4.3.3.11. 顆粒釋放/捕集

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.12 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio12

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中從生物體到表土層的通量以顆粒釋放來代表。從初級生產者到表土層的流程包括在放射性核種傳輸模式的水域和陸域部分，其中非礦化淨初級生產（數量與消耗、死亡、分解、排泄和顆粒釋放有關）沉積在表土層上。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：從生物體到表土層之有機物轉移過程考慮了生物體的顆粒釋放，其中部分主要生產者最初的消耗和礦化作用之後，在不同的環境介質中仍然是未分解的有機物，所以形成顆粒物。地表水和大氣中的顆粒含量以參數表示在放射性核種傳輸模式中，這個作用隱含地受到生物捕集顆粒和從生物體釋放所影響。在放射性核種模式中有關於顆粒濃度的參數值是基於現場數據，所以顆粒捕集/釋放的影響是間接包含在參數值中。

#### 4.3.3.12. 初級生產

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.13 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio13

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種傳輸模式中碳的固定，係為放射性核種傳輸模式水域和陸域部分的植物吸收。淨初級生產也會造成落葉呼吸/釋放和落葉產生。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模式模擬湖泊中的泥炭向內生長是初級生產、死亡和分解的函數。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：參數化陸域和水域生態系統之初級生產，使用於放射性核種傳輸模式中。另外，主要生產可用於計算來自水域、陸域和農業系統的可食用食物的數量。

#### 4.3.3.13. 刺激/抑制

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.14 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio14

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：生物群落被視為處於平衡狀態隱含地考慮了刺激和抑制。

因此，刺激/抑制需要在不同分析模式詳細的表示，而未列入放射性核種傳輸模式。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：在地景模擬中考慮了刺激/抑制，藉由使用現地數據隱含地已經考慮了刺激/抑制作用，因此這個作用係間接包括在地景模擬內。例如：向內生長受到需要更深的深度所抑制，沉積受到深度所影響，表土層的養分與土壤深度有關，而且太淺的表土可能會抑制人類利用農業用地。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：刺激/抑制作用係間接含括在現地使用的數據參數內。

#### 4.3.3.14. 攝取

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.1.15 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio15

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在水域生態系統中植物從周圍的水份攝取溶解的放射性核種。在沼澤生態系統中植物從上部土壤層（根攝取）和樹冠層大氣（經由樹葉）攝取放射性核種。大氣乾沉降隱含在根系攝取放射性核種之濃度比參數 CR 經驗值（見下文）。

(2) 劑量計算：劑量包括農作物和家畜攝取核種及人類直接攝食核種。在非人類生物的劑量計算中也考慮生物攝取溶解的放射性核種。

3. 支持核種模式建模作業

(4) 地景模擬：不包含。

(5) 水文模擬：不包含。

(6) 生態系統特定參數：非人類生物對放射性核種的攝取，係由多個作用影響的濃度比參數 CR 值模擬得到，放射性核種之濃度比參數 CR 值間接含括在現地數據內，



人類需水量是劑量計算的輸入參數。另外，攝取化學物質是重要影響因子，例如：  
攝取二氧化碳影響 pH 值。

#### 4.3.3.15. 人為排放

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.2.1 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio16

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在農業生態系統放射性核種的釋出係由於施肥肥料含有已污染的濕地乾草和受污染灌溉水，並已納入放射性核種傳輸模式模擬。前者的施肥是屬於內部-外地農業之耕地作物種植和畜牧的自給農業（內部）及作為飼料和有機肥的濕地乾草農業（外地）的曝露途徑，後者是屬於住家菜園區挖掘水井或地表水灌溉的曝露途徑。

(2) 劑量計算：由施肥造成人為排放引起的劑量，泥炭和木材燃燒及灌溉都包含在對人體的劑量計算中。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：參數化含有放射性核種灌溉水及參數化含有放射性核種的糞肥和海藻的施肥，以及泥炭和木材的燃燒被用來評估人為排放。

#### 4.3.3.16. 材料使用

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.2.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio17

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式模擬有關含有核種糞肥和海藻的施肥情況。

(2) 劑量計算：利用泥炭和木材燃燒已納入劑量計算。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：參數化泥炭和木材燃燒和參數化農業土壤施肥以納入核種模

式建模作業。

#### 4.3.3.17.物種引入/消滅

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.2.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio18
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：生物群落被視為處於平衡狀態，物種引進和（或）滅絕的建模需要長期性具代表性的群落結構，但開放的邊界允許生物從更廣泛的生態範圍進入，即大規模的詳細完整模擬。因此，物種引入或滅絕會需要在不同分析模式詳細的表示，而未列入放射性核種傳輸模式。
  - (2) 劑量計算：在劑量計算中考慮物種引入，當沼澤轉化為農地，農作物是屬於被引入到生物圈物體，且也假設引入小龍蝦至人類生態系統，以謹慎完整地考慮來自水域生態系統對於人類所有可能的曝露途徑。對於非人類生物劑量計算，目前 Forsmark 不考慮物種引進和滅絕的作用。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：不要低估未來可能的食物來源，所以估計來自該區域其他存在小龍蝦地點，假設小龍蝦可引入至人類生態系統，參數化小龍蝦的生物量和產量作為生態系統特定參數，參數化作物生物量和產量作為農地生態系統特定參數。

#### 4.3.3.18.用水

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.2.4 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio19
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：灌溉已納入放射性核種模式中作為住家菜園區挖掘水井或地表水用水灌溉的曝露途徑。
  - (2) 劑量計算：灌溉的影響被考慮為住家菜園區曝露途徑。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：參數化社區未來的用水型式和用水率。

#### 4.3.3.19. 壓密

1. 來源對應：SKB R-13-43 4.1 節； SKB FEP 資料庫編號: CompBio03

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在沼澤排水過程中表土層的壓實已納入放射性核種傳輸模式中。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：農業系統表土層中泥炭的壓實，定義為參數值以作為生態系統特定參數。

#### 4.3.3.20. 元素供應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio22

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：假設釋出到生物圈的放射性核種的數量相對於天然存在的元素的蘊藏量而言，釋出放射性核種量為小，且沒有對元素（營養素）供應產生影響。物質組成物（元素供應）中的營養素可利用性可能限制初級生產者的生產，從而影響放射性核種向生物群的傳輸。因此，元素供應需要在不同分析模式詳細的表示，而未列入放射性核種傳輸模式。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模式可以鑑定各種有特定性質生態系統的位置，影響著元素（營養素）供應，所以元素供應取決地景模式的模擬結果。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：元素供應對有機體生產力非常重要，經使用現地資料或來自類比地點的資料（例如附近地區的其他湖泊或類似的濕地類型），以預測同一地點

在未來發生的情況，所以元素（營養素）供應狀態間接影響在環境條件下生物量。對於水域生物，在冬季和水域生態系統的最小深度，氧氣供應成為限制條件，對魚類和小龍蝦種群存在數量有所影響，元素供應也影響特定地點的 Kd 和 CR 值，該種群存在數量作為劑量計算的輸入參數。

#### 4.3.3.21. 相變

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.5 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio24
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：當模擬地表水（包括孔隙水）和大氣之間的氣體交換，在沼澤、農業和水域生態系統中需要考慮相變的影響。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：相變在水文模擬作用過程，包括：蒸散和冰覆蓋的作用。
  - (3) 生態系統特定參數：生態系統特定的參數被用來模擬相變的影響。碳可以在溶解相和氣相之間交換，與風場有關的活塞速度(Piston velocity)是用來量化這種氣體交換過程。在湖泊的冰覆蓋期間，從固態冰相變成液態水的過程，相變影響納入在沼澤、農業和水域生態系統計算。

#### 4.3.3.22. 物理性質變化

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.6 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio25
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種傳輸模式考慮，當沼澤土層已排水並形成耕地時土壤性質（孔隙率和密度）發生變化，與當海洋盆地變成湖泊時沉積物的性質發生變化。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：在水文模擬中，不同的表土層有不同的孔隙率。

- (3) 生態系統特定參數：參數化不同的表土層經由排水產生壓實的土層特徵。粘滯度和鹽度的變化包括在生態系統參數。例如，在海洋湖泊階段之間，粘滯度和鹽度的變化會影響與風場有關的活塞速度。

#### 4.3.3.23. 反應

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.7 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio26
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中，反應導致放射性核種從一種介質轉移到另一種介質。核種在固相和液相的反應由分配係數（Kd）來代表，在生物體及其周圍介質之間的濃度由濃度比參數（CR）來代表。在放射性核種傳輸模式中亦模擬空氣-水交界面上產生二氧化碳平衡濃度的反應。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：生物圈內有很多反應間接包含在參數化的現地數據中。例如，參數涉及到二氧化碳的平衡。大量的反應用經驗 Kd 和 CR 值來表示。

#### 4.3.3.24. 吸附/脫附

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.8 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio27
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中，吸附/脫附反應導致放射性核種從一種介質轉移到另一種介質。吸附/脫附作用由分配係數（Kd）來代表。
  - (2) 劑量計算：在人體的劑量計算中考慮吸附/脫附（例如吸附到皮膚），非人類生物群則使用生物體及其周圍介質之間的濃度比參數（CR）來考慮放射性核種吸附。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：核種在固相和液相的反應由分配係數（Kd）用於模擬吸附/脫

附。用於模擬生物群吸收的濃度比（CR）也取決於吸附/脫附。Kd 和 CR 值都盡可能基於現場數據，其中吸附/脫附作用已包含在實驗量測。

#### 4.3.3.25. 供水

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.9 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio28
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：供水沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬，但是劑量計算模擬供水中放射性核種的濃度和利用。
  - (2) 劑量計算：在劑量計算中要考慮實際用水量，在地景模式考慮不同曝露人群（例如一些人群的鑽井取水，但其他人只有使用地表水源）用水型態。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：地景模擬確認潛在的海灣、湖泊和河流位置並可作為人類的水源，藉由用水型態不同以模擬實際用水量。
  - (2) 水文模擬：使用水文地質性質數據及水文模擬來估算未來地下水和地表水的水量。
  - (3) 生態系統特定參數：對於生態系統不同的曝露變化和地景用水需求，參數化人類用水需求（攝取和用水）。

#### 4.3.3.26. 風化

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.10 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio29
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：風化作用並未建模，而是模擬風化作用對於經驗參數值的影響，例如 Kd 值。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：放射性核種從沼澤排水中之滲漏可以是一種風化類型。沼澤和表土層中的溶解無機碳濃度（放射性核種遷移模式作為參數）係為碳酸鈣溶解的結果。風化會影響吸附/脫附過程，這些影響都包含在 Kd 值中。

#### 4.3.3.27.風應力

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.3.11 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio30
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：風應力沒有包括在放射性核種傳輸模式中，但是間接使用在地景模擬和生態系統參數。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：地景模擬中，由風應力決定在何處發生冰川和冰後期粘土的堆積。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：風應力係對於水-空氣交界面上的氣體交換重要因子，其作用係以速度參數納入在放射性核種傳輸模式中進行核種傳輸模擬。

#### 4.3.3.28.加速度

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.1 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio31
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：加速度沒有包括在放射性核種傳輸模式中模擬，但是間接在水文模擬作用過程使用的參數。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：模擬在海洋盆地內加速度影響水柱的混合和停留時間（對流）以及人類和其他生物的生活條件，並藉由不同的測深的速度變化以計算海洋盆地停留時間。
  - (3) 生態系統特定參數：不包含。

#### 4.3.3.29.對流

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio32
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：在海盆與下游平流水間的水交換，放射性核種傳輸模擬包括地下水垂向平流、孔隙水擴散和脫氣。對流作用已包含在大氣平衡濃度的表達

式中。揮發性放射性核種也適用於大氣傳輸。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：暴露途徑分析的係起於地下水從處置場釋出污染物到達地表環境。粒子跟踪是用於估計岩石和風化層的地下水中的流動時間。模擬在表土層內地下水水平流傳輸水流。水文模式亦模擬海盆之間的水交換。

(3) 生態系統特定參數：利用水文參數（由水文模式得到）在放射性核種傳輸模式進行模擬建模。然而，在不同的生態系統內空氣-水交界面的氣體交換係使用速度參數化進行模擬。

#### 4.3.3.30. 覆蓋

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio33

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸在湖泊轉換到沼澤環境（向內生長）模擬覆蓋作用造成核種傳輸。模擬考慮冰覆蓋情況下之覆蓋作用影響脫氣和氣體吸收之生態系統參數值。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模擬蘆葦湖的生長擴張。

(2) 水文模擬：水文模式模擬湖泊和海洋灣的冰蓋。

(3) 生態系統特定參數：冰覆蓋物影響水-空氣交界面上的氣體交換。在設定參數值時考慮湖泊和海洋盆地的冰期覆蓋以計算空氣-水交界面的氣體交換。

#### 4.3.3.31. 沉積

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.4 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio34

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸於水域生態系統中模擬沉積物沉積作用造成核種傳輸，在沼澤系統中為落葉產生通量。降雨過程則在水文模式中模擬。



(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(4) 地景模擬：地景模擬有機和無機物質沉積在海洋和湖泊底部。

(5) 水文模擬：水文模式模擬降水過程。

(6) 生態系統特定參數：死亡的有機物沒有立即被降解作為沉積物，此過程已參數化在水域和沼澤生態系統中。

#### 4.3.3.32. 流出

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.5 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio35

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中之流出作用，係指與水和氣體流動有關的放射性核種流出通量，包括：沉積物流出海洋盆地、水從生物圈物體流出至下游區與土壤水滲漏和脫氣有關的放射性核種通量。濃度很低之稀釋核種經由固相物質帶離或生物群體移動至模擬區域外，可以在放射性核種傳輸模式中忽略。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模擬計算沉積物流出海洋盆地。

(2) 水文模擬：水文模擬生物圈物體的徑流流出。

(3) 生態系統特定參數：不包含。

#### 4.3.3.33. 流入

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.6 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio36

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種傳輸模式中之流入作用，包括：放射性核種經由地下水流出(釋出)或抽取地下水、海水交換、來自上游地表水和吸收氣體等方式，進入生物圈物體。有關農業生態系統的流入來源係為的人為排放作用。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模擬計算沉積物流入海洋盆地。

(2) 水文模擬：水文模擬計算地表水流經模擬區域邊界變化。

(3) 生態系統特定參數：不包含。

#### 4.3.3.34. 截獲

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.7 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio37

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：經由灌溉過程截獲放射性核種的影響包含在住家菜園區蔬菜葉片持留模擬。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：不包含。

(2) 水文模擬：截獲作用是經由水文模式計算的。

(3) 生態系統特定參數：參數在描述由於風、降雨和植物增長的影響，隨著時間的變化蔬菜葉片由灌溉所截獲的核種活性濃度減少，包含在放射性核種模式中。

#### 4.3.3.35. 搬遷

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.8 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio38

2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：核種伴隨著有機物的搬遷經由施肥過程(糞便肥料和海藻)在內部(耕地自給農業)-外地(作為飼料和有機肥的溼地芻草)農業中是曝露的源項。從地景模式中模擬冰期和後期期沉積物侵蝕的參數值間接包含在放射性核種傳輸模式中。

(2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模式模擬冰期和後期期沉積物侵蝕作用。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：糞便肥料和海藻的施肥參數。

#### 4.3.3.36. 再懸浮

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.9 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio39

## 2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：上層沉積物的放射性核種再懸浮作用包含在放射性核種傳輸模式模擬。

(2) 劑量計算：塵土中細顆粒物的再懸浮作用在曝露劑量納入計算。

## 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：再懸浮作用納入沈積物厚度變化的計算。

(2) 水文模擬：不包含。

(3) 生態系統特定參數：定義水域生態系統再重懸率參數使用於放射性核種模式中。

### 4.3.3.37.飽和度

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.4.10 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio40

## 2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：在放射性核種模式中沒有對飽和度進行模擬，但是由水文模式模擬得到之飽和度作用納入核種傳輸模擬歷程。

(2) 劑量計算：不包含。

## 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：在生物圈物體識別中考慮飽和度。

(2) 水文模擬：水文模式計算表土層的含水飽和度。

(3) 生態系統特定參數：海洋、湖泊和沼澤生態系統內的土層屬於飽和狀態，飽和度之定義係指土壤孔隙中的含水量，該參數使用於放射性核種傳輸模式農業耕地土壤。

### 4.3.3.38.放射性衰變

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.1 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio41

## 2. 放射性核種模式：

(1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種總量的放射性衰變正比於其盤存量，而衰變所增加子核種與母核種的盤存量成正比。

(2) 劑量計算：子核種半衰期遠小於母核種半衰期並處於永久平衡(secular equilibrium)，短半衰期放射性核種之子核種劑量包含在母核種劑量係數的劑量計算中，以此方式考慮放射性核種衰變鏈之組合效應。對於長半衰期的放射性核種，衰變鏈的子

核種須在劑量計算納入計算處理。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。
- (2) 水文模擬：不包含。
- (3) 生態系統特定參數：半衰期用來模擬放射性核種的放射性衰變。

4.3.3.39. 曝露

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio42

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：不包含。
- (2) 劑量計算：從放射性核種濃度在食物和環境中計算內部和外部曝露，對人類和非人類生物群都是如此方法。曝露途徑分析已確認利用四種不同土地使用方式及使用已限定的情境，以評估人類最大曝露劑量和非人類生物群的劑量率。

3. 支持核種模式建模作業

- (1) 地景模擬：不包含。
- (2) 水文模擬：不包含。
- (3) 生態系統特定參數：幾種劑量係數已被參數化，例如：攝食、吸入和非人類生物體吸收。

4.3.3.40. 熱儲存

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio43

2. 放射性核種模式：

- (1) 放射性核種傳輸模擬：熱儲存不包含在放射性核種傳輸模式，但是對於特定生態系統參數在各個階段需要考慮水的儲熱能力，如下所述。

- (2) 劑量計算：不包含。

3. 支持核種模式建模作業

- (4) 地景模擬：不包含。
- (5) 水文模擬：不包含。
- (6) 生態系統特定參數：在水域和沼澤生態系統中，水的儲熱會影響水體生物的豐度

和類型，即水的儲熱抑制氣溫變化大所造成的影響。在使用生物豐度和類型的現場數據時，儲熱作用是間接包含在放射性核種傳輸模式所使用的生物質參數值中。而溫度是直接包含在放射性核種傳輸模式中每個核種溶解度係數和熱流速度之計算。

#### 4.3.3.41. 光相關作用

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.5 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio45
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：不包括在內，但所利用的生態系統參數則間接考慮這個作用。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：在放射性核種傳輸模式使用初級生產者的計算參數，當使用現地資料時，光相關作用需要被考慮（且由此展現在不同生態系統初級生產者之光相關作用條件）。

#### 4.3.3.42. 放射性核種釋出

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.5.7 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio47
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：放射性核種從處置場釋出係為源項，並用於放射性核種模式中。另請參閱前述的流入和人為排放。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：不包含。
  - (2) 水文模擬：不包含。
  - (3) 生態系統特定參數：不包含。

#### 4.3.3.43. 岩石表面位置變化

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.6.1 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio48
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：計算土地劇變對區域幾何形狀、表土深度和相關作用的影響，以用於幾個與時間有關的地景和水文參數，但該影響作用並沒有在放射性核種傳輸模式進行建模。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：岩石表面位置的變化由地景模式中的海岸線位移來描述。
  - (2) 水文模擬：計算岩石表面高程隨時間的變化以用於水文模擬。
  - (3) 生態系統特定參數：不包含。

#### 4.3.3.44. 海平面變化

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.6.2 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio49
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：自然擾動（例如：由於風暴的頻率和大小）引起的海平面變化明確沒有包括在放射性核種傳輸模式中。但是有包括影響海平面變化的地景參數閾值，用來描述湖泊由海洋區隔出來的開始和結束狀態。
  - (2) 劑量計算：不包含。
3. 支持核種模式建模作業
  - (1) 地景模擬：海平面變化由地景模式中的海岸線位移來描述。由地景幾何參數定義海平面模型區域並使用於放射性核種傳輸模式。
  - (2) 水文模擬：計算海平面隨時間的變化以用於水文模擬。
  - (3) 生態系統特定參數：不包含。

#### 4.3.3.45. 閾值

1. 來源對應：SKB R-13-43 6.6.3 節； SKB FEP 資料庫編號: Bio50
2. 放射性核種模式：
  - (1) 放射性核種傳輸模擬：閾值並未在放射性核種傳輸中進行模擬，但是係為界定海洋盆地和湖泊位置的地景參數。

(2) 劑量計算：不包含。

### 3. 支持核種模式建模作業

(1) 地景模擬：地景模式中定義地景狀態的閾值，閾值對於鑑別海灣和湖泊係為一重要因子。

(2) 水文模擬：計算每個時間段的湖泊閾值（湖泊和海洋之間的設置邊界）以用於水文模擬。

(3) 生態系統特定參數：不包含。

#### 4.3.4. 生物圈核種傳輸之模式發展建議

綜合本章有關生物圈核種傳輸之模式發展建模作業，需先建立生物圈基本假設及核種傳輸建模主題，針對放射性核種傳輸至生物圈模型的之生物圈特徵、事件及作用進行分析，瞭解生物圈的特徵、事件與作用與核種在環境中遷移及累積狀態。所以需要建立交互作用矩陣系統方法，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，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。生物圈交互作用矩陣中，包括：10 物理組件(及 2 個邊界組件)、6 個特徵變量和篩選出 45 個作用歷程，建議對於生物圈模式發展，應針對前述生物圈的組件、特徵與作用，發展生物圈放射性核種模式，包括：放射性核種傳輸模擬及劑量計算，並發展支持核種模式建模作業之地景模擬（即：對於地面地景隨時間演變，注意冰期循環以來的水域及陸地生態系統的環境演替之地景模擬）、水文模擬（即：評估水文循環過程，模擬水流變化）和生態系統特定參數（即：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）和劑量係數等提供放射性核種傳輸模擬和劑量計算的參數）。

## 5. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項

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。本計畫針對瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場之 SR-PSU 安全評估計畫成果，蒐集 SR-PSU 針對核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告及低放坑道處置生物圈情節分析，提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項。

### 5.1. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點

審查重點一：

對於目前低放坑道處置生物圈情節分析，推測生物圈系統為陸域生活型態，包括人類可能藉由嚥入、吸入及曝露放射性核種之途徑。由於核種劑量評估為各種傳輸途徑的組合，所以生物圈核種傳輸途徑之審查重點，除了考慮湖泊地面水外，需再考慮鑿井飲水或鑿井取水灌溉的情節分析。

審查重點二：

對於目前低放坑道處置，放射性核種會隨著地下水的流動或擴散作用，從處置場內部遷移到處置場外部的地下水含水層，進而接觸生物圈。對於模式模擬過程，母核種衰變成子核種是否有考慮，子核種傳輸模擬及劑量是否有包括，並將子核種納入生物圈劑量評估計算。

審查重點三：

低放坑道處置生物圈情節分析之設計情節，需考慮不同位置關鍵群體的差別，生物圈之傳輸途徑，生物圈群體之取用水源，情節分析過程有無鑿井取水等。

### 5.2. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查注意事項

#### 5.2.1. 生物圈建模作業是否完整進行審查



本計畫分析 SR-PSU 生物圈情節分析方法瞭解，欲進行生物圈情節分析審查需根據建模作業之評估模式流程圖 (AMF;如圖 8)。該生物圈建模作業之情節分析審查需分別針對下列建模作業是否完整進行審查。

1. 放射性核種傳輸模擬：放射性核種在環境介質進行遷移隨著時間傳輸和濃度累積。
2. 劑量計算：利用遠場模擬得到之放射性核種傳輸至生物圈濃度，計算於人類或非人類生物群之劑量。
3. 地景模擬：地面地景係隨著時間而演變，古氣候之演變與地景模擬極為重要，應注意冰期循環以來的水域及陸地生態系統的環境演替。
4. 水文模擬：利用水文模擬評估水文循環，可掌握水流帶動放射性核種傳輸遷移過程。
5. 生態系統特定參數：根據 SR-PSU 生物圈情節分析方法，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，支持放射性核種傳輸模擬和劑量計算所提供的參數。

#### 5.2.2. 生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查

本計畫瞭解 SR-PSU 已建立生物圈基本假設及核種傳輸建模主題，完成放射性核種傳輸至生物圈模型的之生物圈特徵、事件及作用與模式發展建議，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。由於生物圈的特徵、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。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。所以生物圈評估需建構交互作用矩陣(Interaction Matrix,IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。依據 SR-PSU 在生物圈作用矩陣中，包括：10 物理組件(及 2 個邊界組件)、6 個變量和 50 個作用歷程。所以生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查：

1. 定義物理組件、變量和作用歷程是否完整。
2. 對於坑道處置有關之生物圈組件、生物圈特徵、生物圈作用過程，研析生物圈模型發展假設與曝露途徑情節是否完整。
3. 評估各種曝露途徑核種傳輸至受影響最大的人類群體之輻射劑量之方法是否完整。

### 5.2.3. 生物圈評估情節分析之曝露途徑是否完整進行審查

SSM (2008) 提出生物圈條件和環境的保護指導方針：1.對人類和環境變化計算需與未來生物圈條件的假設氣候狀態一致。目前場址生物圈條件和周圍環境應進行評估，包括：農業用地，森林，濕地（沼澤），湖，海或其他相關的生態系統等。亦須考慮土地隆起（或沉陷）等可預見的變化。2.風險分析包括有限選擇的曝露途徑，但這些選擇，應根據的目前瑞典環境中所發生的人類使用和自然資源的多樣性的分析。需考慮不同的生態系統之間的曝露途徑的組合。所以根據前述生物圈條件和環境的保護指導方針原則進行情節分析之曝露途徑審查。

根據本計畫瞭解生物圈輻射劑量曝露途徑評估的目標，是為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？所以曝露途徑審查可針對下列五個要素進行審查，以利確認是否完整。

- 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.核種傳輸和宿命：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。

## 6. 結論與建議

本報告分析瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場之 SR-PSU 安全評估計畫。瑞典 Forsmark 擴建 SFR 中低放處置場已完成 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，蒐集 SR-PSU 計畫作為 SFR 的擴建的使用執照申請文件。蒐集報告包括以 R13-43 (生物圈中組件間的特徵、作用和交互作用)、R14-02 (SR-PSU 生物圈特徵、事件及作用與模式發展建議) 為主。進行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)研析與模式發展建議，提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項。本計畫報告完成下列工作：

### 1. 研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用

本項工作完成 R13-43 報告研析。針對 SKB 對於坑道處置有關之生物圈組件、生物圈特徵、生物圈作用過程，與生物圈內交互作用過程進行研析，對於生物圈組件物交互作用矩陣 (IM) 背景和歷史、IM 的概念與其發展所採用的方法進行研析，並再對 SKB 定義生物圈的物理組件，該生物圈的物理組件屬於生物圈的一部分，與其他物理特性是不同的(如初級生產者，表土層或地表水)，與研析影響生物圈的發生、速度以及過程(例如幾何形狀、溫度)的特徵(變量)。

### 2. 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

本項工作完成 R14-02 報告研析。對於曝露途徑情節分析與劑量評估技術。依據前述 R13-43 這份報告，在生物圈作用矩陣中，定義出 10 物理組件(2 個邊界組件)、6 個變量和 50 個作用歷程，針對 SKB 對於坑道處置有關之生物圈組件、生物圈特徵、生物圈作用過程，研析生物圈模型發展假設與曝露途徑情節，評估各種曝露途徑核種傳輸至受影響最大的人類群體之輻射劑量。

### 3. 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

本項工作完成 R14-02 報告研析。SKB 對於生物圈安全評估提出 50 個作用歷程，評估後刪去 5 個，包括：Bio11 (動物在地表水系統移動)、Bio20 (地面上空氣或水之壓力改變)、Bio23 (由材料重量引起影響底層岩石之荷重)、Bio44 (生物圈物體曝露於電離輻射和吸收能量的作用)、Bio46 (放射性核種衰變能量引致分子分解引起)，針對該提出 45 個

特徵、事件及作用 (FEPs) 進行說明。提出生物圈組件、變量和 FEPs 對應到 SR-PSU 生物圈中的不同的建模活動。對於生物圈安全評估之特徵、事件與作用的作用矩陣，與對人類和非人類生物群的曝露計算列表進一步說明。

SR-PSU 所有建模作業都詳列在評估模式流程圖，完成生物圈建模作業描述，包括：放射性核種傳輸模擬、劑量計算、地景模擬、水文模擬、生態系統特定參數。生物圈建模作業都詳列在評估模式流程圖 (AMF) 內。

生物圈有共有 10 個組件代表不同的環境媒介 (表土層、表土層水、地表水、氣體和當地大氣) 和生物群體 (初級生產者、分解者、濾食性動物、草食動物、肉食動物、人類)，另外還有 2 個邊界組件 (地質圈和外部條件)。生物圈 6 個重要特徵：幾何、材料組成、放射性核種總量、演替階段、溫度和水組成。完成該對應之模式發展建議，包括：放射性核種傳輸模擬、劑量計算、地景模擬、水文模擬、生態系統特定參數。

#### 4. 提出我國低放坑道處置生物圈情節分析審查重點或注意事項

本計畫研究人員參與低放射性廢棄物最終處置技術評估報告審查，提出有關生物圈情節分析審查重點。提出我國低放坑道處置生物圈情節分析注意事項，包括：

- (1) 生物圈建模作業是否完整進行審查：本計畫分析 SR-PSU 生物圈情節分析方法瞭解，欲進行生物圈情節分析審查需根據建模作業之評估模式流程圖。該生物圈建模作業之情節分析審查需針對建模作業是否完整進行審查。
- (2) 生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查：本計畫瞭解生物圈評估需建構作用矩陣，確認可能影響核種累積及曝露的各種組件及途徑。所以生物圈評估建構交互作用矩陣之系統方法是否完整進行審查：定義物理組件、變量和作用歷程；對於坑道處置有關之生物圈組件、生物圈特徵、生物圈作用過程，研析生物圈模型發展假設與曝露途徑情節；評估各種曝露途徑核種傳輸至受影響最大的人類群體之輻射劑量。
- (3) 生物圈評估情節分析之曝露途徑是否完整進行審查：SSM (2008) 提出生物圈條件和環境的保護指導方針原則 (對人類和環境變化計算需與未來生物圈條件的假設氣候狀態一致；風險分析包括有限選擇的曝露途徑) 進行情節分析之曝露途徑審查。本計畫瞭解生物圈輻射劑量曝露途徑評估的目標，是為確定可能的位點特

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？所以曝露途徑審查可針對五個要素（核種污染源或釋出狀態、核種傳輸和宿命、曝露點或區域、曝露途徑、潛在曝露的人群）進行審查，以利確認是否完整。

## 7.參考文獻

- 台電公司，2010，低放射性廢棄物處置關鍵核種篩選報告（A版），台灣電力公司。
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，「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，2013，P297
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，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，2011，P42
- 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  $^{90}\text{Sr}$  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 Forsmark – 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).