



行政院原子能委員會
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之

國際資訊研析

子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置工程地質與

長期穩定審驗技術建立之資訊研析

計畫編號：104FCMA109-3

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：楊長義、李宏輝

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 105 年 12 月

低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之
國際資訊研析

子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置工程地質與
長期穩定審驗技術建立之資訊研析

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：楊長義、李宏輝

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 78.4 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 105 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

目前國際間核能處置先進國家針對已運轉或規劃中的低放射性廢棄物最終處置場多採近地表處置方式，也就是將廢棄物埋藏於地表或地下，可分為地表壕溝、混凝土窖與地下數十公尺深之坑道處置。另少數國家規劃採地質處置，將低放射性廢棄物放置於地下數百公尺的岩層中，使其隔離於人類生活圈。低放射性廢棄物處置方式的選擇，仍必須配合當地自然、社會、環境與廢棄物特性等進行通盤規劃，以致各國採取的作法不盡相同。考量低放射性處置設施工程規模龐大，且坑道處置為我國目前潛在之可能處置方式，在國內本土地質條件與國外處置先進國家不同之前提下，如何確保坑道處置之穩定性與長期安全，實有待相關審驗技術之建立與提升。

本計畫旨在針對坑道處置工程有關之地質與長期穩定評估技術，研析國際低放處置技術先進國家之相關資訊，包括處置窖設計與封閉規劃、工程地質與岩石力學特性初始狀態、安全功能指標與長期穩定評估項目等，期能作為未來強化我國坑道處置安全管制之參考，並逐步精進審查技術與完備相關法規，落實本土化之低放處置審查技術。

關鍵詞：低放射性廢棄物、坑道處置、審驗技術

Abstract

Near surface disposal repository has been selected as final disposal of low-level radioactive waste (LLRW) for most advanced countries of radioactive waste disposal. The near surface disposal can be divided into trench disposal, concrete vault and cavern disposal whose disposal depth is a few ten meters below the surface. Geological disposal are adopted by a few countries which the embedding depth of deep geological disposal is deeper to rock. The plan and implement of disposal repository are varied depend on the local natural condition, society, environment and characteristics of LLRW. Based on the considerations of complexity and engineering scale of LLRW disposal facility, and the tunnel disposal may be the potential option in Taiwan, it is necessary to establish and improve the verification technology about stability and long-term safety of disposal tunnel by reviewing the international experiences and considering the local geological condition.

This research aims to improve the verification techniques and propose recommendations to supplement the Guidelines on Safety Assessment of LLRW disposal repository by reviewing and learning the experiences of tunnel disposal from the abroad LLW/LIW waste final repository, including designs and closure plans of waste vaults, initial state of engineering geology and rock mechanics, safety function indexes and assessments of long-term stability, etc.

Keywords: Low Level Radioactive Waste, Tunnel Disposal, Verification Technique

目錄

摘要	I
Abstract	II
目錄	III
表目錄	VI
圖目錄	VIII
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.....	2
1.5 報告內容.....	3
第二章、國際低放坑道處置坑道封閉作法與長期安全評估方法	6
2.1 瑞典 SFR 中低放廢棄物處置場介紹.....	6
2.2 低放射性廢棄物處置場之初始狀態.....	8
2.2.1 SFR 的初始狀態介紹	8
2.2.2 檢查與控制(Inspection and control).....	9
2.3 廢棄物(Waste)種類	9
2.3.1 廢棄物來源.....	9
2.3.2 廢棄物分類.....	10
2.3.3 廢棄物包件(Waste packaging).....	10
2.3.4 SFR 處置窖分配的廢棄物存放體積	12
2.4 國際低放射性廢棄物坑道處置封閉作法.....	20
2.4.1 1BMA 中放廢棄物處置窖(1BMA, vault for intermediate-level waste).....	22
2.4.2 2BMA 中放處置窖(vault for intermediate-level waste).....	25
2.4.3 1BTF 與 2BTF 處置窖(1BTF and 2BTF, vaults for concrete tanks)	27

2.4.4	筒倉(Silo)	30
2.4.5	1BLA 低放處置窖(1BLA, vault for low-level waste)	34
2.4.6	2-5BLA 低放處置窖(2-5BLA, vault for low-level waste).....	37
2.4.7	BRT 處置窖(BRT, vault for reactor pressure vessels)	40
2.4.8	封塞與其他的封閉組件(Plugs and other closure components)	42
2.5	長期安全評估項目	45
2.5.1	安全功能為情境描述的基礎.....	46
2.5.2	選擇安全功能的方法	46
2.5.3	處置場系統組成及其功能	46
2.5.4	長半衰期放射性核種活度的限制.....	47
2.5.5	廢料的分配及在處置場中的分布	47
2.5.6	放射性核種的遲滯	49
2.5.7	安全功能與安全功能指標	53
2.6	小結.....	56
第三章	、國際坑道處置封閉前母岩之岩石力學初始狀態	59
3.1	地質條件概述.....	59
3.2	岩石類型暨岩石分區.....	59
3.3	地質變形區與岩石區域模型.....	62
3.4	處置母岩岩石力學特性.....	64
3.5	處置場岩體力學特性與岩盤穩定性.....	65
3.6	小結.....	68
第四章	、處置坑道穩定性與長期安全評估項目	69
4.1	坑道處置穩定性評估項目	69
4.1.1.	處置坑道與一般地下坑道在坑道穩定與功能需求之異同分析	69
4.1.2.	一般坑道結構服務性與安全性之影響因素	71
4.1.3.	處置坑道穩定性之影響因素.....	80
4.2	處置場封閉後之長期安全評估項目	85

4.3	小結.....	85
第五章、坑道處置穩定性與長期安全評估相關之工程地質與岩石力學特性參數		89
5.1	國內一般坑道規劃與建造經驗.....	89
5.1.1	地質條件	89
5.1.2	工程地質暨岩石力學特性	90
5.1.3	岩體分類與隧道斷面支撐工法	91
5.1.4	小結	
5.2	SFR 處置場工程地質暨岩石力學相關工程經驗.....	99
5.2.1	岩體分類劃分方法	99
5.2.2	岩體分類與行為	101
5.2.3	岩體支撐類別	105
5.2.4	灌漿類別	105
5.3	坑道處置長期安全評估相關之工程地質與岩石力學特性參數.....	106
第六章、低放審查導則(第 0 版)相關章節之精進建議.....		108
6.1	低放處置審查導則(第 0 版)與坑道處置工程地質與長期穩定有關之章節研析	108
6.2	低放處置審查導則(第 0 版)相關條文之修訂建議.....	110
第七章、結論		113
7.1.	國際低放坑道處置坑道封閉作法與長期安全評估方法.....	113
7.2.	國際坑道處置封閉前所處母岩之岩石力學初始條件.....	114
7.3.	處置坑道穩定性與長期安全評估項目	114
7.4.	坑道處置穩定性與長期安全評估相關之工程地質與岩石力學特性參數.....	115
7.5.	低放審查導則(第 0 版)相關章節之精進建議.....	116
參考文獻		117
附錄 1 期末審查意見回覆		120
附錄 2 地錨構造、性能、常見破壞與防蝕保護		123
附錄 3 中英文專有名詞對照表		130
附錄 4 期末審查簡報		136

表目錄

表 1.3-1	計畫工作項目與期程規劃.....	2
表 2.3-1	1-2BMA 處置窖內的廢棄物種類與數量	15
表 2.3-2	1-2BTF 處置窖內的廢棄物種類與數量	15
表 2.3-3	筒倉內的廢棄物種類與數量.....	16
表 2.3-4	1-5BLA 內的廢棄物種類與數量	16
表 2.3-5	BRT 內的廢棄物種類與數量	17
表 2.3-6	2075 年之最佳的放射性核種庫存估計值[BQ].....	18
表 2.3-7	經不確定性分析後之 2075 年放射性核種庫存估計值 [BQ]	19
表 2.5-1	安全原則與安全功能之內容.....	46
表 2.5-2	SFR 處置窖其組成要素之潛在長期安全評估項目	48
表 2.5-3	SR-PSU 闡述的安全功能暨安全功能指標	54
表 2.5-4	選址過程需注意的安全功能暨安全功能指標.....	55
表 3.4-1	岩石參數.....	64
表 3.4-2	單一裂面之力學參數.....	64
表 3.4-3	SFR 岩體的岩石力學參數.....	65
表 3.4-4	岩石應力變化估計值.....	65
表 3.5-1	SFR-1 處置場岩體力學特性評估值	66
表 4.1-1	一般坑道結構採用的支撐構件.....	72
表 4.1-2	處置坑道襯砌結構穩定性之檢監測項目	82
表 4.1-3	OLKILUOTO 處置場有關處置母岩岩石力學特性之監測項目	84
表 4.1-4	BLA 與 2-5BLA 處置窖封閉前安全評估項目	87
表 5.1-1	CSIR-RMR 岩體評分表.....	94
表 5.1-2	安朔隧道地質條件總表.....	95
表 5.1-3	台灣岩體分類與隧道支撐系統之岩體類別劃分基準.....	96
表 5.1-4	台灣 A、B 岩類之岩體分級標準表	96
表 5.1-5	台灣 C、D 岩類之岩體分級標準表	97
表 5.2-1	岩盤行為(GB)分類與相關的潛在行為描述	100

表 5.2-2	在 SFR 之岩體行為分類.....	102
表 5.2-3	在 SFR 之岩體分類.....	103
表 5.2-4	岩體支撐類別.....	105
表 5.2-5	灌漿類別.....	105
表 6.2-1	審查導則草案編修要點建議.....	110

圖目錄

圖 1.4-1	已蒐集之重要報告文獻封面.....	5
圖 2.1-1	瑞典 SFR 所處地理位置示意圖.....	6
圖 2.1-2	SFR 地下空間立體視圖.....	7
圖 2.1-3	整體 SFR 地下空間剖面圖.....	8
圖 2.3-1	SFR 目前或即將使用的廢棄物包件種類.....	11
圖 2.3-2	瑞典 SFR 不同處置窖分配的廢棄物存放體積.....	13
圖 2.4-1	SFR-1 與 SFR-3 的封閉規劃示意圖及筒倉的細部概觀.....	21
圖 2.4-2	SFR-1 之 1BMA 中放處置窖在運轉期間的示意圖.....	22
圖 2.4-3	1BMA 在封閉後的斷面圖.....	23
圖 2.4-4	1BMA 的封閉規劃與斷面示意圖.....	24
圖 2.4-5	規劃之 SFR-3 中放處置窖 2BMA.....	25
圖 2.4-6	2BMA 在封閉後的斷面圖.....	26
圖 2.4-7	2BMA 的封閉規劃與斷面示意圖.....	27
圖 2.4-8	位於 SFR-1 的 1BTF 處置窖.....	28
圖 2.4-9	位於 SFR-1 的 2BTF 處置窖其在運轉期間僅存放混凝土槽.....	28
圖 2.4-10	1BTF 與 2BTF 在封閉後的斷面圖.....	29
圖 2.4-11	1BTF 與 2BTF 的封閉規劃與斷面示意圖.....	29
圖 2.4-12	運轉期間之筒倉示意圖.....	31
圖 2.4-13	封閉後之筒倉縱斷面示意圖.....	32
圖 2.4-14	筒倉在封閉後的縱斷面示意圖.....	33
圖 2.4-15	運轉期間之 1BLA 處置窖示意圖.....	34
圖 2.4-16	封閉後之 1BLA 處置窖斷面圖.....	35
圖 2.4-17	1BLA 在封閉後的斷面示意圖.....	35
圖 2.4-18	運轉期間之 2-5BLA 處置窖示意圖.....	37
圖 2.4-19	封閉後之 2-5BLA 處置窖斷面圖.....	38
圖 2.4-20	2-5BLA 在封閉後的斷面示意圖.....	38

圖 2.4-21	運轉期間之 BRT 處置窖示意圖.....	41
圖 2.4-22	封閉後之 BRT 處置窖斷面圖.....	41
圖 2.4-23	BRT 封閉後的斷面示意圖.....	42
圖 2.4-24	處置窖與坑道間的封塞示意圖.....	43
圖 2.4-25	位於筒倉的三處封塞示意圖.....	44
圖 2.4-26	聯絡坑道的封塞設計參考圖.....	44
圖 3.1-1	SFR-1 處置場地質圖.....	60
圖 3.1-2	SFR-1 處置場地質破裂帶之空間分布圖.....	61
圖 3.2-1	SFR 地區岩石類區分佈之 3D 視圖.....	61
圖 3.3-1	SFR 變形區域圖.....	62
圖 3.3-2	SFR 岩石與變形區域圖.....	63
圖 3.3-3	SFR 變形分區圖.....	63
圖 3.5-1	處置窖所處位置之主要破裂帶分佈與坑道側壁不穩定岩塊之示意圖.....	66
圖 3.5-2	伸張計量測徑向潛變量變化.....	67
圖 4.1-1	一般坑道與處置坑道於時間與空間尺度上之差異.....	70
圖 4.1-2	「傳統工法」與「新奧工法」之比較.....	72
圖 4.1-3	MUSKÖ 與 Ä SPÖ HRL 坑道進行為期一年的岩栓腐蝕特性.....	78
圖 4.1-4	BOLTOMETER 法岩栓灌漿施工品質檢測器.....	79
圖 4.1-5	國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較.....	81
圖 5.1-1	台 9 線南迴公路拓寬改善後續計畫路線平、縱斷面圖.....	90
圖 5.1-2	南迴公路安朔至草埔段地質平、剖面圖.....	90
圖 5.1-3	安朔隧道支撐工法斷面圖.....	91
圖 5.1-4	安朔草埔隧道設計階段岩體分類.....	98
圖 5.1-5	安朔草埔隧道開挖支撐圖.....	98
圖 5.2-1	岩體種類示意圖.....	104

第一章、前言

1.1 計畫背景

我國「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」自2006年5月24日經總統公布後施行後，主辦機關(經濟部)已指定台電公司為最終處置設施之選址作業，並依條例規定成立場址選擇小組，進行低放射性廢棄物處置場選址作業。為確保低放處置選址工作能審慎進行，並對低放處置之安全性進行把關，行政院原子能委員會已發布「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」與「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」，作為低放射性廢棄物最終處置安全管制之規範，提供審查標準，確保設施設計、安全評估及施工營運之安全性。

目前國際間核能處置先進國家針對已運轉或規劃中的低放射性廢棄物最終處置場多採近地表處置方式，也就是將廢棄物埋藏於地表或地下，可分為地表壕溝、混凝土窖與地下數十公尺深之坑道處置。另少數國家規劃採地質處置，將低放射性廢棄物放置於地下數百公尺的岩層中，使其隔離於人類生活圈。

低放射性廢棄物處置方式的選擇，仍必須配合當地自然、社會、環境與廢棄物特性等進行通盤規劃，以致各國採取的作法不盡相同。考量低放射性處置設施工程規模龐大，且坑道處置為我國目前潛在之可能處置方式，在國內本土地質條件與國外處置先進國家不同之前提下，如何確保坑道處置之長期穩定與安全，實有待相關審驗技術之建立與提升。

1.2 計畫目的與重要性

本計畫旨在針對坑道處置工程有關之地質與長期穩定評估技術，針對國際低放處置技術先進國家之相關資訊進行研析，期能作為未來強化我國坑道處置安全管制之參考，並逐步精進審查技術與完善相關法規，落實本土化之低放處置審查技術。爰此，本計畫重要性評述於后：

- (1) 蒐整研析國外低放處置規劃經驗，瞭解其坑道處置的封閉規劃、及長期穩定評估項目等，以供未來發展坑道處置封閉暨長期穩定評估項目審驗技術之參考。
- (2) 處置場所處母岩對坑道處置的穩定性與長期安全有直接的影響，為決定開挖岩體支撐形式的重要依據，透過國際資訊研析處置母岩工程地質與岩石力學特性，提供後續發展處置坑道穩定性及長期安全評估審驗技術參考依據。
- (3) 蒐整國內其他公共建設營運過程中之母岩工程地質與岩石力學特性，分析比較國內、外處置母岩工程地質與岩石力學特性差異，進一步研析符合我國本土地質條件之處置坑道穩定性與長期安全評估審驗技術。

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	105 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工程地質與長期穩定審驗技術之資訊研析			※			※			※			※
國際低放射性廢棄物坑道處置封閉與長期穩定評估項目蒐整研析												
研析國際坑道處置技術報告有關坑道處置所處母岩之岩石力學初始條件												
研析國際坑道處置技術報告有關坑道處置長期穩定與封閉前之安全評估項目												
綜合研析坑道處置封閉與長期穩定評估要項												
提出低放審查導則(第0版)與處置坑道相關章節之精進建議												
工作進度估計百分比(累積數)	5%	10%	15%	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(SK B)提出之相關技術報告，研析內容主要為坑道處置方式之封閉規劃、長期穩定評估內容、處置母岩岩石力學特性、施工開挖、支撐方法與坑道支撐構材的穩定性等，已蒐整之主要技術文獻如下(報告封面如圖1.4-1所示)：

- (1) SKB報告編號TR-14-01
SKB於2014年整理長期安全評估報告。
- (2) SKB報告編號TR-14-0-2

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。

(3) SKB報告編號R-07-10

SKB於2007年整理SFR建造經驗，內容包括地下空間佈置規劃、開挖設備、岩體分類與支撐建議等。

(4) SKB報告編號 R-14-17

SKB於2014年整理SFR低放射性廢棄物的檢測及岩石工程經驗。

(5) SKB報告編號 TR-13-10

SKB於2013年整理的Äspö 硬岩實驗室年度報告，其內容提供了岩栓抗腐蝕相關試驗。

(6) SKB報告編號 R-13-40

SKB於2014年整理的技術報告，內容為BMA處置窖相關的混凝土障壁材料劣化影響研析。

1.5 報告內容

本研究之工作項目細分為「國際低放射性廢棄物坑道處置封閉前與長期穩定評估項目蒐整研析」、「研析國際坑道處置技術報告有關坑道處置封閉前所處母岩之岩石力學初始條件」、「研析國際坑道處置技術報告有關坑道處置長期穩定與封閉前之安全評估項目」、「綜合研析坑道處置封閉前與長期穩定評估要項考量」及「低放審查導則(第0版)與處置坑道相關章節之精進建議」等五項，各分項工作進度如表1.3-1所示，除本章前言外，依計畫擬定之工作項目內容題列各章標題，其內容分別如下列所述：

第二章 國際低放坑道處置坑道封閉作法與長期安全評估方法

針對坑道處置在封閉階段所採作法，包括處置坑道與聯絡坑道之間的封塞方式、回填材料的選定與堆置、及處置容器與坑道岩壁是否預留空間等，為執行封閉作業時需注意的課題；其次，根據SFR低放射廢棄物處置經驗，研析其在坑道處置的長期穩定評估項目。

第三章 國際坑道處置封閉前母岩之岩石力學初始狀態

參考SFR處置設施在建造期與運轉期的經驗，針對處置場的現地地質條件、母岩工程地質、與岩石力學特性進行整理與研析，以提供後續發展坑道處置長期穩定相關之安全評估審驗技術參考。

第四章 處置坑道穩定性與長期安全評估項目

為確保處置坑道在運轉期間的穩定性，使其在使用期限內能保有一定之服務性與功能性，本研究蒐整一般坑道及國外坑道處置相關技術報告，就影響坑道穩定之因素進行蒐整與研析，以作為處置坑道穩定性評估項目之參考。此外，亦

針對第二章有關SFR低放處置窖的封閉規劃提出綜合研析，以作為處置坑道封閉後之長期安全評估參考。

第五章 坑道處置穩定性與長期安全評估相關之工程地質與岩石力學特性參數

本章蒐整國內一般坑道相關之規劃與建造經驗，尤其是地質條件、工程地質暨岩石力學特性、攸關坑道結構穩定性之岩體分類與支撐工法等相關資訊，並與國外低放處置案例進行比較與討論，期由國內、外處置場母岩工程地質與岩石力學特性之綜合評析，在符合本土地質條件前提下，研擬我國未來發展坑道處置在運轉期與長期安全評估要項所需之工程地質與岩石力學特性參數。

第六章 低放審查導則(第0版)相關章節之精進建議

本章針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」與本研究有關之章節進行瞭解，同時總結前述各章成果，提出低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議。

第七章 結論

綜整本研究成果提出結論，供未來相關研究與應用之參考。

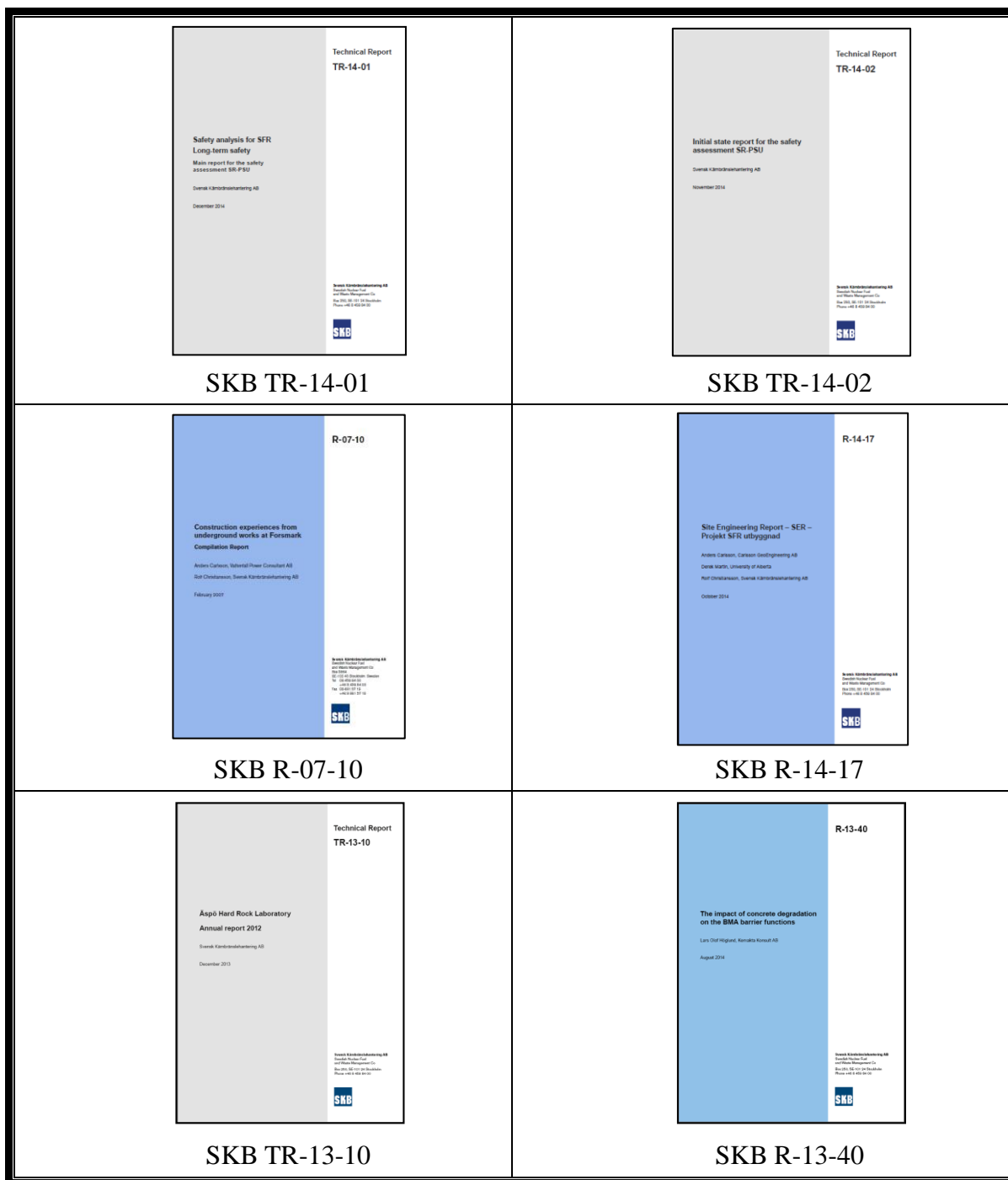


圖 1.4-1 已蒐集之重要報告文獻封面

第二章、國際低放坑道處置坑道封閉作法與長期安全評估方法

本章針對坑道處置在封閉階段所採作法，包括處置坑道與聯絡坑道之間的封塞方式、回填材料的選定與堆置、及處置容器與坑道岩壁是否預留空間等，為執行封閉作業時需注意的課題；其次，根據SFR低放射廢棄物處置經驗，研析其在坑道處置的長期穩定評估項目。

2.1 瑞典 SFR 中低放廢棄物處置場介紹

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處置場儲存容量可達63,000 m³，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(見圖2.1-2)，預計可儲存108,000 m³廢棄物。



圖2.1-1 瑞典SFR所處地理位置示意圖(SK B, 2008)

SFR-1處置場目前收納中放射性廢棄物與低放射性廢棄物，主要是醫療、工業及研究機構所產生的低放射性廢棄物(SK B, 2011a)。

SFR-1處置場位在海床的下方，故倚靠二條平行之隧道以連接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 m 處，筒倉底部位置更深達海平面下 130 m 處。SFR-1處置場的四條處置窖坑道，如圖2.1-2所示，長 160 m，寬介於 15 至 20 m、高介於10至17 m (IAEA, 2001b)，四條處置窖坑道可處置低放射性廢棄物與短半衰期中放射性廢棄物。

SFR-3的規劃六座新的廢棄物處置窖，其設施頂部約位處海平面下 120 m，表示SFR-3的處置窖的底部高程將低於SFR-1的筒倉底部高程，如圖2.1-3所示，其高程標示採瑞典地理座標高程系統(Swedish geographical height system) RHB 70。

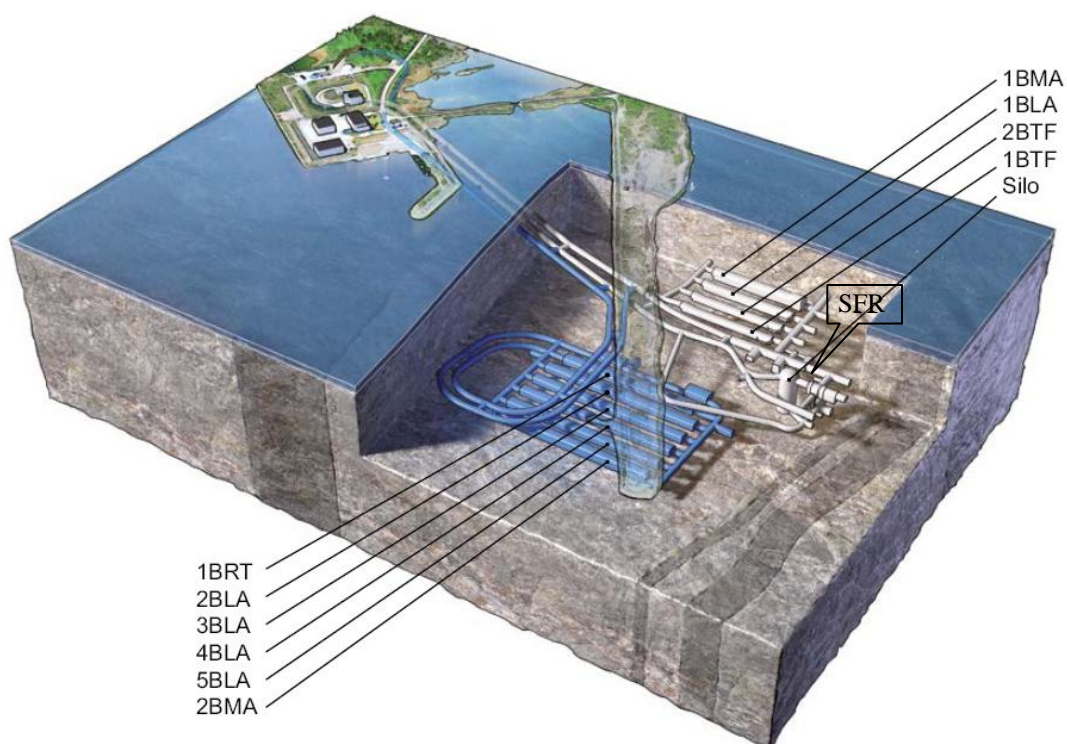


圖2.1-2 SFR 地下空間立體視圖。淺灰色部分為現有的SFR-1處置場、藍色部分為計畫擴建的SFR-3部分。處置窖包括了筒倉、1-2 BMA處置窖、1-5BLA處置窖、與BRT處置窖 (SKB, 2014a)

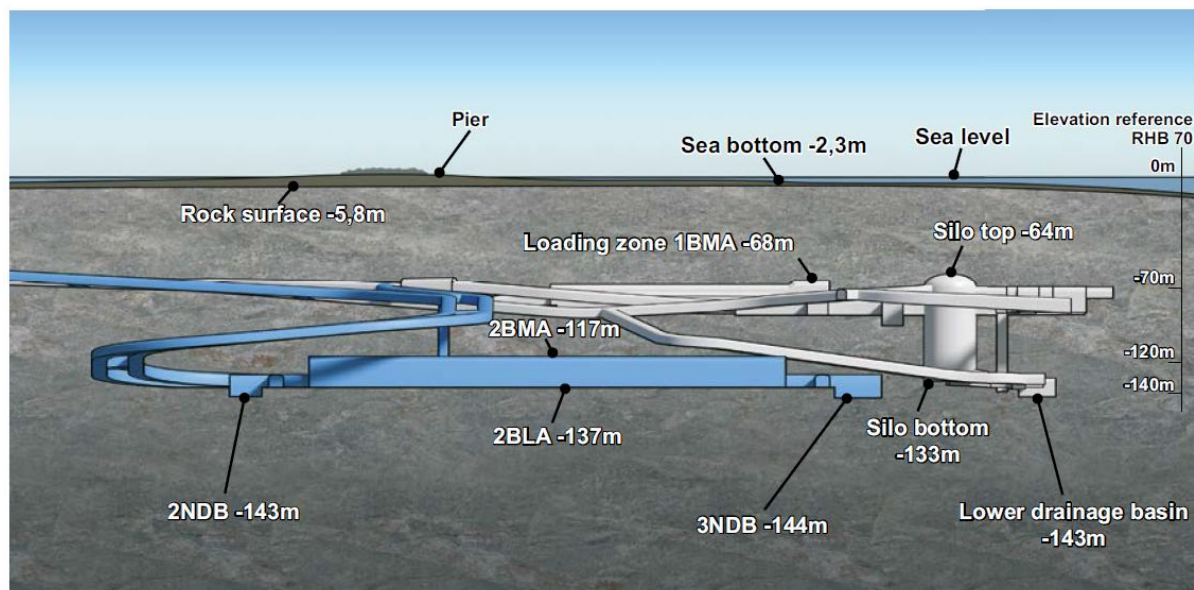


圖2.1-3 整體SFR 地下空間剖面圖。配合RHB 70 地理座標高程系統標示之SFR處置場。視角朝NW方向，幾乎與處置窖長軸向相互垂直。圖中淺灰色部分為SFR-1，藍色部分為SFR-3 (SKB, 2014a,b)

2.2 低放射性廢棄物處置場之初始狀態

2.2.1 SFR的初始狀態介紹

處置場的初始狀態(initial state)是針對處置場效能安全評估(safety of assessment)的起點，並提供後續步驟相關預期狀態(expected state)變化之資訊。SFR預計封閉日期是2075年，初始狀態區分二部分介紹：其一：為廢棄物與處置場的狀態，其二：為處置場所處周圍環境的狀態。目前，SFR-1屬於運轉階段，擴建SFR-3部分(見圖2.1-2與圖2.1-3)仍處規劃階段。在合理且保守的假設前提下，根據處置場在封閉後所處的可能條件，擘劃出廢棄物與處置場的初始狀態。

(1)對SFR-1而言，上述的假設條件是盡可能地建立在已受驗證與具證明文件的處置廢棄物與處置場相關特性。此外，額外廢棄物的預估，及截至處置場封閉前的任何可能變化評估均須納入考量。(2)而SFR-3的初始狀態，只能根據其參考設計及現階段對未來需處置廢棄物種類的預判。根據上述相關資訊及假設，擬定處置場初始狀態並整理於初始狀態報告(Initial state report)，內容包括：(i)一般性的描述、及(ii)處置場安全評估所需的相關參數(variables)之初始值。

處置場封閉後的周圍環境係假設與現在相同，並根據SFR進行的場址評估、場址描述模型(Site Descriptive Model)、生物圈綜合報告(Biosphere synthesis report)及氣候報告(Climate report)，擬定周圍環環的初始狀態，其內容包括了氣候、地表系統(surface system)、母岩(bedrock)、水文地質(hydrogeology)與地下水化學(groundwater chemistry)。

2.2.2 檢查與控制(Inspection and control)

SKB公司具有良好的品質管理系統(quality management system)，包括專案管理(project management)與安全審核(safety audit)之執行過程，上述過程已經提供了控制文件(control document)或品質保證系統(quality assurance system)，並用運在SFR-1與SFR-3相關的管控工作。所述品質管理系統均符合 ISO 9001:2000的要求。

有關SFR-1在建造、檢查與相關條件的量測等過程，均採計畫性管控，現有的控制計畫(control programme)包括了地下水入滲量量測(measurements of inflows of groundwater)、地下水化學(groundwater chemistry)與處置窖物理條件的檢查(inspection of the physical condition of the waste vaults)。此一控制計畫的目的，在於檢查系統的改變，例如筒倉沉陷量的持續變化，對於SFR擴建過程所採鑽炸施工的可能影響亦一併納入，至於筒倉因具有最先進的工程障蔽系統，其控制計畫採另行制定。

針對SFR-3在建造期間的測試與檢查(testing and inspection)，將會在設計階段進一步的發展與確認，其中因2BMA屬未加勁沉箱(unreinforced caisson)的新設計，因而可預期將有特別的控制計畫。

2.3 廢棄物(Waste)種類

本節內容描述SFR的廢棄物(waste)和廢棄物包件(waste packaging)於初始狀態報告的資訊概要說明。

2.3.1 廢棄物來源

A. 運轉廢棄物(Operational waste)

SFR-1存放的放射性廢棄物主要來自瑞典核電廠、Clink 瑞典用過燃料中期貯存與封包場，及其他來自工業活動、研究和醫療保健所產生的放射性廢棄物。

B. 除役廢棄物 (Decommissioning waste)

在除役核電廠的拆解過程中將產生大量的廢金屬(scrap metal)和混凝土。如同運轉廢棄物的情況，SFR被分配最大量的廢棄物主要是低放射性和中放射性廢棄物。接近反應爐或在爐心內的材料，如燃料棒或其他爐心元件，則被歸列為長半衰期(long-lived)活度廢棄物，並將分配到存放長半衰期廢棄物的SFL處置場。

沸水式反應器(The boiling water reactors, BWRs)有一個內部調節器(inner moderator tank)和外部反應器壓力槽(reactor pressure vessel, RPV)。反應器壓力槽具有較低的活度，可以在去污後送入SFR處置場。

除役期間，透過去污(decontamination)過程以清潔材料，而在去污過程產生的溶液(solution)係經由離子交換樹脂予以潔淨，也被分配到SFR處置場。

除前述運轉廢棄物與除役廢棄物外，廢棄物種類尚包括在除污過程中形成二次廢棄物(secondary waste)。

2.3.2 廢棄物分類

大部分的運轉廢棄物其放射性是來自不同的水淨化系統 (water cleanup system) 廢棄物。這些廢棄物包括珠狀樹脂(bead resin)、粉狀樹脂(powdered resin)、機械助濾劑(mechanical filter aid)和沉澱污泥(precipitation sludge)。數量較多的運轉廢棄物是由金屬組成，包括了碳鋼(carbon steel)和不銹鋼。在檢修停機(maintenance outages)期間，若有機具設備被丟棄、修改或翻新時，將會產生廢金屬(scrap metal)。

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

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

除役廢棄物主要包括金屬和混凝土。大量混凝土來自反應器壓力槽(RPVs)的生物輻射屏蔽(biological radiation shield)，也有其他金屬、氣體處理系統砂床中的砂、Studsvik AB核電廠過去的活動產生的污染瀝青、土壤、礫石和一些除役過程中產生的二次廢棄物，例如纖維素、塑料和金屬。

2.3.3 廢棄物包件(Waste packaging)

在SFR處置場的所有廢棄物，採用了不同形式的廢棄物包件，惟沸水式反應器內(BWRs)的反應器壓力槽(RPVs)無廢棄物包件處理，係因屬大型廢棄物故直接放置於BRT處置窖。在SFR-1和SFR-3所使用的不同類型的廢棄物包件如圖2.3-1所示，其中的不銹鋼槽(steel tank)僅使用在長半衰期放射性廢棄物(long-lived radioactive waste)之中間儲存器(intermediate storage)

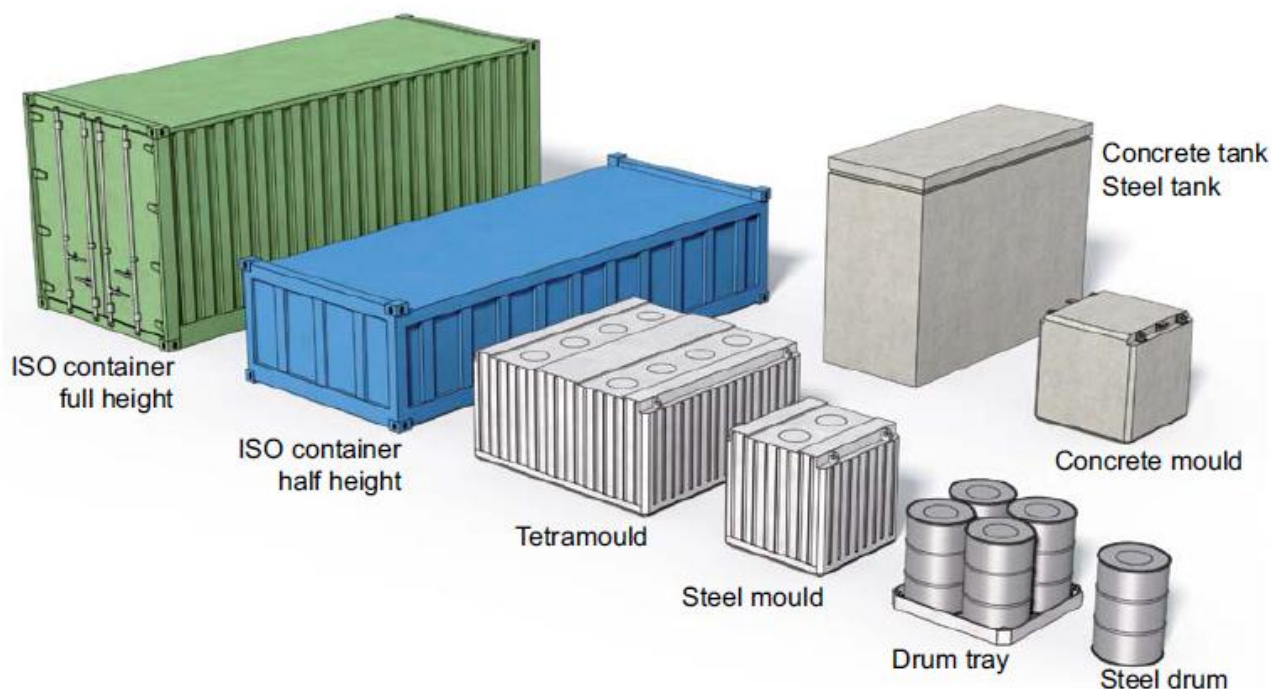


圖2.3-1 SFR目前或即將使用的廢棄物包件種類(SK B, 2014a,b)

A. 標準貨櫃(ISO container)

鋼板材質的標準貨櫃被用於存放運轉或除役的低放射性固體廢棄物(low-level solid waste)，且主要存放在BLA處置窖。在貨櫃內，廢棄物被裝在盒(boxes)、包(bales)、桶(drums)或直接在貨櫃中。貨櫃由碳鋼製成，尺寸分別為「20英尺全高或半高貨櫃」、「10英尺全高或稱半高的貨櫃」。一個20英尺的全高度貨櫃尺寸為6.1 m × 2.5 m × 2.6 m (長×寬×高)。

B. 四方體廢棄物箱(Tetramould)

SKB採用鋼板材質的四方體廢棄物箱以存放除役的中放射性除役廢棄物(intermediate-level decommissioning waste)，主要存放在2BMA處置窖。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。一個四方體廢棄物箱，外部尺寸是2.4 m × 2.4 m × 1.2 m (長×寬×高)，是鋼材廢棄物箱(steel mould)的四倍大。

C. 鋼材廢棄物箱(Steel mould)

鋼材廢棄物箱主要用於水泥基(cement-)和瀝青固化廢棄物(bitumen-solidified waste)(離子交換樹脂、過濾助劑、蒸發器濃縮物)(ion-exchange resins, filter aids, evaporator concentrates)或混凝土嵌入固體廢棄物(concrete-embedded solid waste)，將存放在筒

倉和1-2BMA窖。鋼材廢棄物箱由碳鋼製成，外部尺寸是1.2 m × 1.2 m × 1.2 m（長×寬×高）。

D. 鋼桶與托盤(Steel drum and drum tray)

鋼桶通常置放在托盤裡，主要用於水泥基(cement-)和瀝青固化廢棄物(bitumen-solidified waste)，將放置在筒倉和1-2BMA處置窖；若是焚化灰(ashes)則存放在1BTF處置窖。此外，在BLA處置窖中，鋼桶則是放置在標準貨櫃內，其由碳鋼製成，部分由不銹鋼製成，鋼桶的標準尺寸是直徑0.6 m及高度0.9 m。一個托盤外部尺寸為1.2 m × 1.2 m × 0.9 m（長×寬×高）可存放4個鋼桶。

E. 混凝土槽(Concrete tank)

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

F. 混凝土箱(Concrete mould)

混凝土箱主要用於固化廢棄物(solidified waste)，包括離子交換樹脂、過濾助劑與蒸發器濃縮物(ion-exchange resins, filter aids, evaporator concentrates)或混凝土嵌入固體廢棄物(concrete-embedded solid waste)，將存放在筒倉、及1-2BMA窖、1BTF窖。混凝土箱由鋼筋混凝土製成，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（長×寬×高）。

2.3.4 SFR處置窖分配的廢棄物存放體積

初始狀態報告提供各種廢棄物儲存的物料量，各種廢棄物型式的物料量和放射量是根據現階段的庫存報告(the inventory report)(SKB, 2013a)預測值進行計算，安全分析中可獲知纖維素(cellulose)與鋁/鋅(aluminium/zinc)的限制量。

SFR處置場不同處置窖所分配的廢棄物存放體積如圖2.3-2所示。廢棄物體積是根據現階段庫存報告(the inventory report)(SKB, 2013a)的預測值，在各處置窖所存放的廢棄物包件種類及數量則由初始狀態報告提供數據。二次除役廢棄物(secondary decommissioning waste)的體積(除役過程中產生的廢棄物，大多已進入分類區)是非常不確定的，需要單獨在圖中以紅色標示。

根據當前的預測，SFR-1配置的廢棄物體積是接近60,000 m³的運轉廢棄物和筒倉內少於200 m³的除役廢棄物；SFR-3配置的廢棄物體積是接近100,000 m³，約80%為除役廢棄物，約10%是運轉中廢棄物、和少於10%的二次除役廢棄物。各個處置窖與筒倉的廢棄物分述如后：

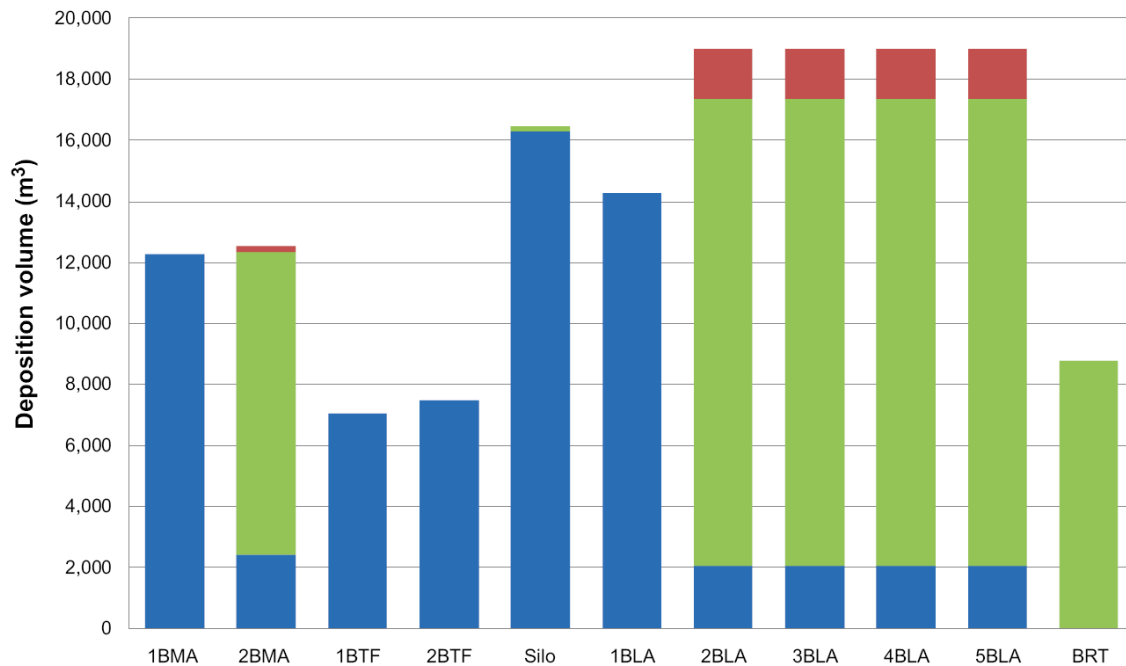


圖2.3-2 瑞典SFR不同處置窖分配的廢棄物存放體積(SKB, 2014a,b)。藍色代表運轉廢棄物、綠色代表除役廢棄物、紅色代表二次除役廢棄物。

A. 1-2BMA處置窖的廢棄物(Waste in 1-2BMA)

1-2BMA處置窖用於存放中放廢棄物。在1BMA窖存放的是運轉廢棄物，由約75%(體積)水泥基(cement-)或瀝青固化的廢棄物(bitumen-solidified waste)(離子交換樹脂、過濾助劑、蒸發器濃縮液、污泥)(ion-exchange resins, filter aids, evaporator concentrates, sludge)和大約25%(體積)的混凝土嵌入固體廢棄物(concrete-embedded waste)(垃圾和廢金屬)(trash and scrap metal)組成。在2BMA處置窖的廢棄物主要包括金屬或混凝土形式的除役廢棄物，以及與1BMA窖同類型但是體積較小的運轉廢棄物。廢棄物的包件、腐蝕表面積和空隙的物料數量如表2.3-1所列。

B. 1-2BTF處置窖的廢棄物(Waste in 1-2BTF)

在1-2 BTF處置窖的廢棄物主要是脫水的離子交換樹脂(dewatered ion-exchange resin)。焚化灰(ashes)和某些水泥固化的離子交換樹脂(cement-solidified ion-exchange resin)也儲存在1BTF處置窖。廢棄物的包件、腐蝕表面積和空隙的物料數量如表2.3-2所列。

C. 筒倉的廢棄物(Waste in silo)

筒倉是用來儲放中射性廢棄物。廢棄物包括大約85%(體積)水泥基(cement-)或瀝青固化的廢棄物(bitumen-solidified waste)(離子交換樹脂、過濾助劑、污泥)(ion-exchange resins, filter aids, sludge)和大約15%(體積)混凝土嵌入固體廢棄物

(concrete-embedded waste)(垃圾和廢金屬)(trash and scrap metal) 組成。廢棄物的包件、腐蝕表面積和空隙的物料數量如表2.3-3所列。

D. 1-5BLA處置窖的廢棄物(Waste in 1-5BLA)

BLA處置窖用於存放低階放廢棄物。廢棄物包括垃圾和廢金屬等運轉廢棄物，但約有5%(體積)的水泥基(cement-)或瀝青固化的廢棄物(bitumen-solidified waste)(離子交換樹脂，蒸發器濃縮物和污泥)(ion-exchange resins, evaporator concentrates and sludge)也放置在1BLA處置窖。

在2-5BLA處置窖內，廢棄物包括了少量的運轉廢棄物，例如垃圾和廢金屬，而大部分是除役廢棄物，包括混凝土，金屬，砂，瀝青等。廢棄物的包件、腐蝕表面積和空隙的物料數量如表2.3-4所列。

E. BRT處置窖的廢棄物(Waste in BRT)

BRT處置窖是用於存放沸水式反應器內的反應器壓力槽(RPVs)，反應器壓力槽及腐蝕表面區和空隙(反應器壓力槽內部空間)的物料數量如表2.3-5所列。

根據現階段庫存報告(the inventory report)(SKB, 2013a)的預測，在SFR封閉時各個處置窖所存放的廢棄物包件種類及數量如表2.3-6所列。

放射性核種庫存所包括的不確定性，已納入最佳存量估算及不同廢棄物的不確定性(SKB doc 427105)計算，見表2.3-7。不確定因素包括測量的不確定性(measurement uncertainties)、相關因素的不確定性(uncertainties in correlation factors)和計算方法的不確定性(uncertainties in other methods)，惟廢棄物的不確定性並未包括其中。此外，自AB SVAFO廠和Studsvik AB廠除役的廢棄物未納入放射性核種存量估算，其他未納入考量的不確定性，包括未來高燃爐或改變燃料物組合(higher burn-up or changed fuel composition)的可能性。

表2.3-1 1-2BMA處置窖內的廢棄物種類與數量(SKB, 2014a,b)

Material	Weight [kg]		
	1BMA	2BMA	Total in 1-2BMA
Aluminium/Zinc	$7.13 \cdot 10^3$	$2.06 \cdot 10^4$ a)	$2.77 \cdot 10^4$ a)
Ashes	0	$1.53 \cdot 10^5$	$1.53 \cdot 10^5$
Concrete	$8.52 \cdot 10^6$	$1.73 \cdot 10^7$	$2.58 \cdot 10^7$
Bitumen	$1.93 \cdot 10^6$	0	$1.93 \cdot 10^6$
Cellulose	$7.95 \cdot 10^4$	$7.06 \cdot 10^4$ a)	$1.50 \cdot 10^5$ a)
Cement	$4.39 \cdot 10^6$	$4.50 \cdot 10^5$	$4.84 \cdot 10^6$
Filter aids	$8.34 \cdot 10^4$	$1.63 \cdot 10^2$	$8.35 \cdot 10^4$
Evaporator concentrates	$2.99 \cdot 10^5$	$1.34 \cdot 10^5$	$4.34 \cdot 10^5$
Ion-exchange resins	$2.08 \cdot 10^6$	$4.76 \cdot 10^4$	$2.13 \cdot 10^6$
Iron/steel	$2.65 \cdot 10^6$	$9.48 \cdot 10^6$	$1.21 \cdot 10^7$
Sand	0	$1.06 \cdot 10^5$	$1.06 \cdot 10^5$
Sludge	$8.61 \cdot 10^4$	$1.73 \cdot 10^4$	$1.03 \cdot 10^5$
Other inorganic	$2.88 \cdot 10^4$	$8.77 \cdot 10^4$	$1.16 \cdot 10^5$
Other organic	$2.06 \cdot 10^5$	$1.49 \cdot 10^5$	$3.56 \cdot 10^5$
Aluminium/Zinc [m ²] a, b)	$1.01 \cdot 10^3$	$3.15 \cdot 10^3$	$4.16 \cdot 10^3$
Iron/steel [m ²] b)	$1.15 \cdot 10^5$	$4.38 \cdot 10^5$	$5.53 \cdot 10^5$
Void [m ³] c)	$1.83 \cdot 10^3$	$2.51 \cdot 10^3$	$4.33 \cdot 10^3$

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

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

c) Void, which is given in m³ in the above table, is empty space inside the waste packaging i.e. above and between wastes and does not include air-filled pores.

表2.3-2 1-2BTF處置窖內的廢棄物種類與數量(SKB, 2014 a,b)

Material	Weight [kg]		
	1BTF	2BTF	Total in 1-2BTF
Aluminium/Zinc	$5.28 \cdot 10^4$ a)	0	$5.28 \cdot 10^4$ a)
Ashes	$5.19 \cdot 10^5$	0	$5.19 \cdot 10^5$
Concrete	$6.52 \cdot 10^6$	$7.89 \cdot 10^6$	$1.44 \cdot 10^7$
Cellulose	$1.07 \cdot 10^3$	0	$1.07 \cdot 10^3$
Cement	$2.37 \cdot 10^5$	0	$2.37 \cdot 10^5$
Filter aids	$7.23 \cdot 10^4$	$1.32 \cdot 10^5$	$2.04 \cdot 10^5$
Ion-exchange resins	$4.39 \cdot 10^5$	$8.12 \cdot 10^5$	$1.25 \cdot 10^6$
Iron/steel	$1.32 \cdot 10^6$	$1.79 \cdot 10^6$	$3.11 \cdot 10^6$
Sludge	$2.53 \cdot 10^4$	$4.37 \cdot 10^4$	$6.90 \cdot 10^4$
Other organic	$4.77 \cdot 10^4$	$8.46 \cdot 10^4$	$1.32 \cdot 10^5$
Aluminium/Zinc [m ²] b)	$7.79 \cdot 10^3$ a)	0	$7.79 \cdot 10^3$ a)
Iron/steel [m ²] b)	$7.74 \cdot 10^4$	$3.94 \cdot 10^4$	$1.17 \cdot 10^5$
Void [m ³] c)	$5.23 \cdot 10^2$	$6.31 \cdot 10^2$	$1.15 \cdot 10^3$

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

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

c) Void, which is given in m³ in the above table, is empty space inside the waste packaging i.e. above and between wastes and does not include air-filled pores.

表2.3-3 筒倉內的廢棄物種類與數量(SKB, 2014 a,b)

Material	Weight [kg]
Aluminium/Zinc a)	$8.26 \cdot 10^3$
Concrete	$1.17 \cdot 10^7$
Bitumen	$1.06 \cdot 10^6$
Cellulose	$1.80 \cdot 10^4$
Cement	$1.22 \cdot 10^7$
Filter aids	$1.01 \cdot 10^4$
Ion-exchange resins	$3.31 \cdot 10^6$
Iron/steel	$4.94 \cdot 10^6$
Sludge	$3.53 \cdot 10^4$
Other inorganic	$1.07 \cdot 10^6$
Other organic	$5.31 \cdot 10^4$
Aluminium/Zinc [m ²] a,b)	$1.24 \cdot 10^3$
Iron/steel [m ²] b)	$2.21 \cdot 10^5$
Void [m ³] c)	$2.14 \cdot 10^3$

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

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

c) Void, which is given in m³ in the above table, is empty space inside the waste packaging i.e. above and between wastes and does not include air-filled pores.

表2.3-4 1-5BLA內的廢棄物種類與數量(SKB, 2014 a,b)

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

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

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

c) Void, which is given in m³ in the above table, is empty space inside the waste packaging i.e. above and between wastes and does not include air-filled pores.

表2.3-5 BRT內的廢棄物種類與數量(SKB, 2014 a,b)

Material	Weight [kg]
Iron/steel	$5.55 \cdot 10^6$
Iron/steel [m ²]	$7.24 \cdot 10^3$
Void [m ³]*	$4.67 \cdot 10^3$

表2.3-6 2075年之最佳的放射性核種庫存估計值[Bq](SKB, 2014 a,b)

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2.3-7 經不確定性分析後之2075年放射性核種庫存估計值 [Bq] (SKB, 2013 a,b)

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+09	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.

2.4 國際低放射性廢棄物坑道處置封閉作法

處置場的封閉工作包括回填材料的設置、並在選定的位置進行封塞(plug)，主要目的在降低水滲入廢棄物，並阻止人類的闖入。封塞主要設置在聯絡坑道(access tunnels)與聯絡井(connecting shafts)，且所有的坑道將以碎石(macadam)回填。聯絡坑道上部以石塊填滿，並以混凝土封塞(concrete plug)封閉；最後，地表面將復原並融入周邊自然景觀。所有SFR的鑽孔都將被封填，以確保其周遭母岩的地下水不受影響。

SFR(SR-PSU)長期安全評估是根據 2012年3月所定義的處置場擴建設計，即是配置(layout)版本 1.5。在實際應用上，安全評估工作是反覆進行且長期的過程，因此SFR擴建設計必須能配合安全評估工作而有即時的修改。除了長期安全評估，SFR擴建設計的各方面應用都已修訂在配置設計2.0版，配置版本1.5與2.0在設計上的主要差異在：

A. BRT的長度。

B. 2BMA的長度與寬度。

本節是根據配置版本2.0作介紹，在尺寸不同處則會同時列出兩個配置版本；[圖2.4-1](#)為處置場封閉後的整體圖。以膨潤土回填形成水力封塞斷面(hydraulically tight section)，再以機械束制方式(mechanical constraint)給以膨潤土適當的固定，並視坑道斷面的幾何形狀及母岩特性，採混凝土封塞(concrete plug)作為機械束制方式。然而，此種方式並不適當，後來改以填土與緩衝材料(transition material)組成的機械束制方式來代替，緩衝材料則由膨潤土及碎裂的岩石(crushed rock)以 30/70 的比例混合而成。

採用緩衝材料的目的，在於防止膨潤土自封塞斷面流失，同時可承受膨潤土的膨脹壓力。回填材料則是由碎石(macadam)與緩衝材料所組成。由回填土與緩衝材料所構成的機械束制配合膨潤土的密封斷面統一稱之土壩封塞(earth dam plug)。

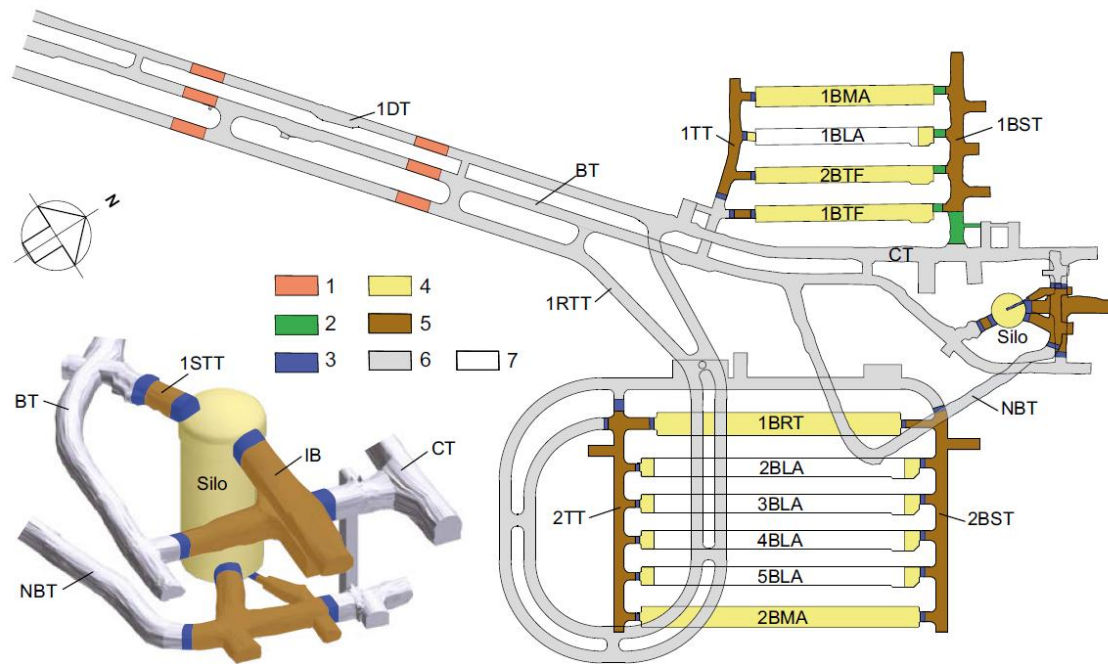


圖2.4-1 SFR-1與SFR-3的封閉規劃示意圖及筒倉的細部概觀(SKB, 2014 a,b)

(1)橘色為聯絡坑道的封塞；(2)綠色為緩衝材料；(3)藍色為混凝土封塞；(4)黃色為碎石材料回填；(5)棕色為膨潤土水力密封斷面；(7)白色為無回填區。本規劃示意圖是根據配置版本 2.0 所繪製，配置版本 1.5 則是用於 SR-PSU 之模型模擬，就本圖而言，此二版本唯一的差別在於 2.0 版的 BRT 長度相對較長

2.4.1 1BMA 中放廢棄物處置窖(1BMA, vault for intermediate-level waste)

1BMA處置窖(見圖2.4-2)：寬約 20 m，高 17 m，長 160 m，其內部為長 140 m 的混凝土結構物，其內部空間區分為13個大型的隔間(compartment)及2個較小的隔間。混凝土結構的承载力是建構在堅固的岩石上，地板以岩石碎塊為底層(base)，再舖以礫石後加以整平。地板與牆，均是場鑄的鋼筋混凝土結構，灌漿過程輔以鋼桿為固定件，確保地板與牆的外觀形式不因灌漿而有所改變；處置窖的側壁與頂拱，則是以噴凝土為其襯砌。

在處置窖隔間內部，其處置包件為混凝土箱(concrete mould)、鋼箱(steel mould)及鋼桶(steel drum)(放置在托盤上或置入桶盒)，在混凝土結構的牆壁上緣配置有橋式吊車(overhead crane) 如圖2.4-2，採遠端控制。混凝土箱或鋼箱採六層堆置，鋼桶則採八層堆置，當隔間裝滿後，將以輻射屏蔽(radiation-shielding)暫時性地覆蓋，輻射屏蔽是由混凝土元件預先組裝而成。每一個隔間都至少有兩列的混凝土箱，以作為混凝土製輻射屏蔽之支撐。

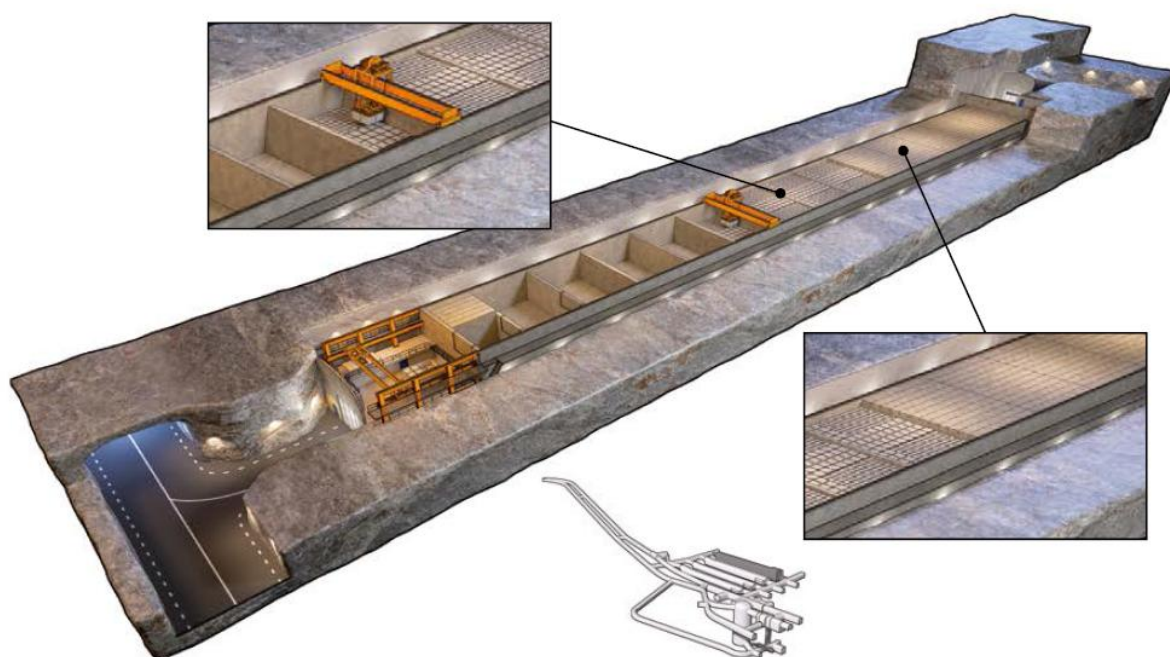


圖2.4-2 SFR-1之1BMA中放處置窖在運轉期間的示意圖(SKB, 2014 a,b)

A、處置窖封閉後之描述(Description of the vault after closure)

根據SR-PSU初始狀態分析報告，其提及混凝土的結構及力學特性之延伸計畫，已指出混凝土結構需有額外的修補(extensive repair)、與加強的方法(reinforcement measure)。為確保處置窖在封閉後的水力與力學特性符合預期，1BMA的封閉方法規劃可參考SFR封閉計畫(SKBdoc 1358612)。

在運轉完成後、封閉前之期間，隔間內所存放的廢棄物包件將以水泥漿(grout)填灌，經覆蓋輻射屏蔽後再灌鑄鋼筋混凝土製蓋板(lid)。當廢棄物包件放置完成，相關設備移出後，混凝土結構與周圍母岩所形成的空間將以碎石(macadam)回填，如圖2.4-3。

處置窖末端與橫向坑道(transverse tunnel, 1TT)聯通處設置混凝土封塞，如圖2.4-4，作為坑道中膨潤土水力密封的機械束制(mechanical constraint)，在處置窖與處置坑道(1BST)之間，並不設置混凝土封塞，而是在處置窖與處置坑道二側設置混凝土牆，牆內填入緩衝材料。

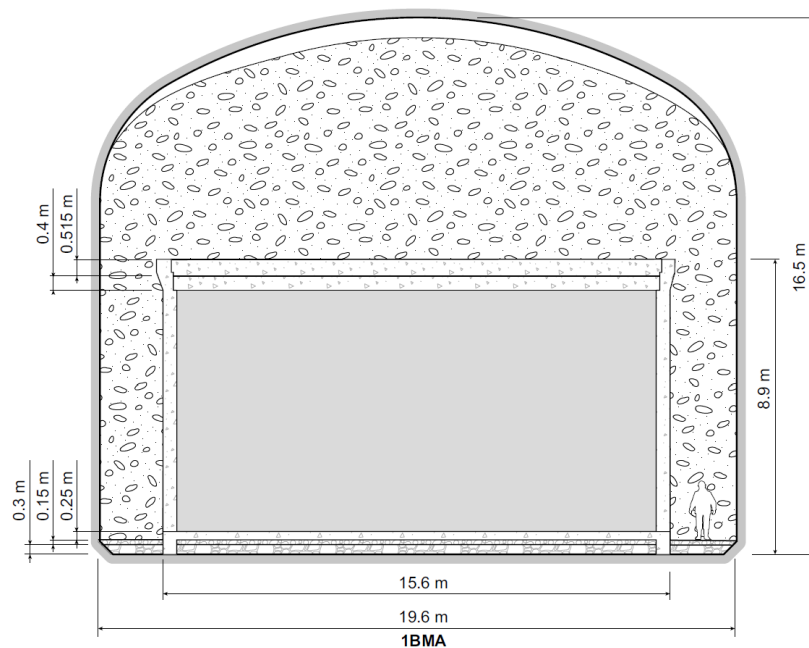


圖2.4-3 1BMA在封閉後的斷面圖(SKB, 2014 a,b)

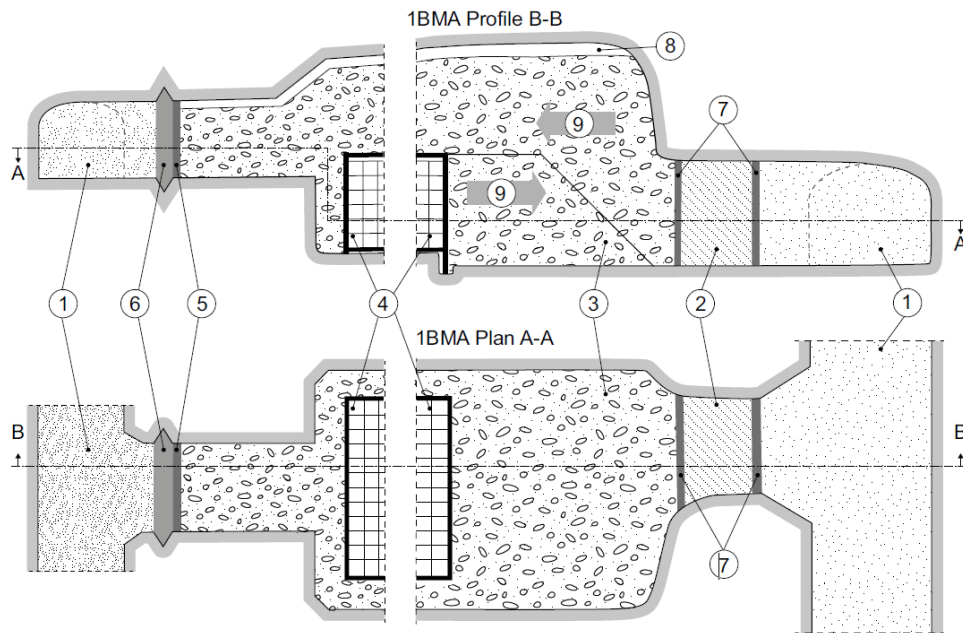


圖2.4-4 1BMA的封閉規劃與斷面示意圖(SKB, 2014 a,b)

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經灌漿處理的廢棄物包件⑤以混凝土澆置的束制壁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⑨處置窖回填工作方向

B、系統組成(system component)

受制約的放射性廢棄物周圍的組件包括：

- (1) 廢棄物包件。
- (2) 處置窖隔間內之灌漿。
- (3) 混凝土結構（例如鋼筋混凝土隔間牆與底部地板，及預先製作的混凝土元件及混凝土製蓋板。）
- (4) 碎石回填材。
- (5) 機械封塞。

1BMA處置窖所存放的廢棄物包件多屬混凝土或鋼板所製。鋼製包件在運轉期間可能開始產生材料的腐蝕(corrode)問題；混凝土包件也可能存在小裂縫(fracture)(寬度超過 0.1 mm)；混凝土結構牆內的鋼筋在運轉期間亦有腐蝕的問題。其他在處置窖封閉前置入的相關組件，則預期其狀態無太大的改變。為了確保混凝土結構能保有良好的狀況，已規劃了處置窖混凝土結構在封閉前的補強方法計畫(SKBdoc 1358612)。

2.4.2 2BMA 中放處置窖(vault for intermediate-level waste)

規劃於SFR-3新建的2BMA中放放射性廢棄物處置窖，是根據1BMA的使用經驗進行設計，處置窖寬約 20 m、高 16 m (配置1.5版為 16.8 m)、與長 275 m的中放廢棄物處置窖，區分14個獨立的混凝土沉箱(concrete caisson)，底面積 16 m × 16 m、高超過 8 m。混凝土沉箱，將建構在碎岩為底層、礫石為面層的基礎上，處置窖的側壁與頂拱施以噴凝土襯砌。

如前所述，2BMA的廢棄物包件為鋼箱與混凝土箱，透過遠端遙控的橋式吊車(overhead crane)進行安放作業，如圖2.4-5所示，橋式吊車則是放置在獨立的立柱系統上，而非如BMB架設在混凝土沉箱。處置窖運轉期間，廢棄物包件的灌漿作業將持續進行，每四個鋼箱(或混凝土箱)為一個堆置單元，所設計的沉箱尺寸將可確保每個堆置單元間可灌入水泥漿體，如此亦可確保箱體能發揮整體的承載能力。運轉期間，將視需要於沉箱上部放置預先製作的混凝土元件作為輻射屏蔽。

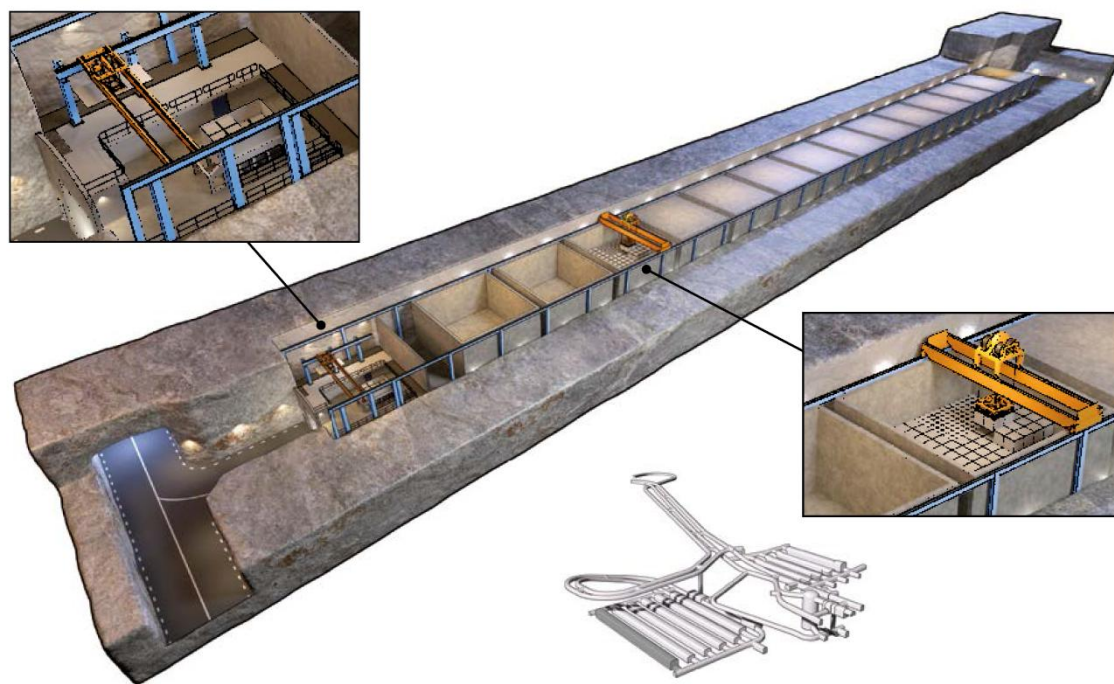


圖2.4-5 規劃之SFR-3中放處置窖2BMA(SKB, 2014 a,b)

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

2BMA處置窖的封閉方法可詳見SFR封閉計畫(SKBdoc 1358612)，進行封閉作業之前，預先製作的混凝土屏蔽元件將被移除，改以混凝土蓋板(unreinforced concrete lid)鋪設在已灌漿埋置的廢棄物包件上；由於混凝土的乾縮將在側壁與蓋板間形成間隙

，廢棄物包件金屬材料部分若因腐蝕而釋放出之氣體，上述間隙則提供了氣體流動的通道。

當廢棄物包件置放完成，相關設備移出後，介於沉箱之間、沉箱與岩壁之間的所有空間則以碎石(macadam)回填，如圖2.4-6。處置窖的兩端以混凝土封塞作為機械束制，處置窖兩側的聯絡坑道填入膨潤土，如圖2.4-7。

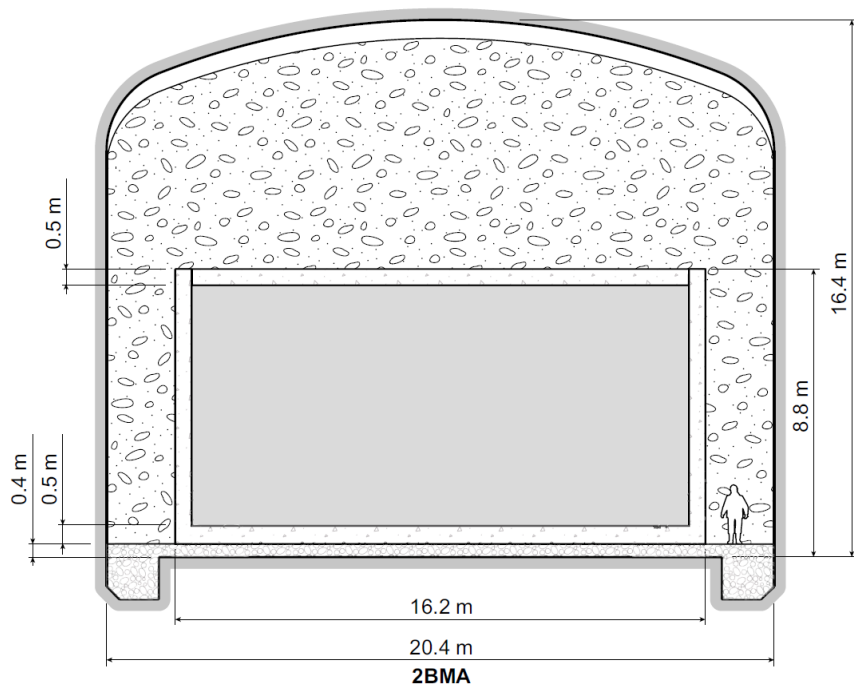


圖2.4-6 2BMA在封閉後的斷面圖(SKB, 2014 a,b)

此圖係根據配置版本 2.0 所繪製；配置版本 1.5 則用於 SR-PSU 模擬。圖中所示混凝土結構尺寸，配置版本 2.0 版與 1.5 版並無差異，但 1.5 版的處置窖寬度為 19.8 m，高度為 16.8 m

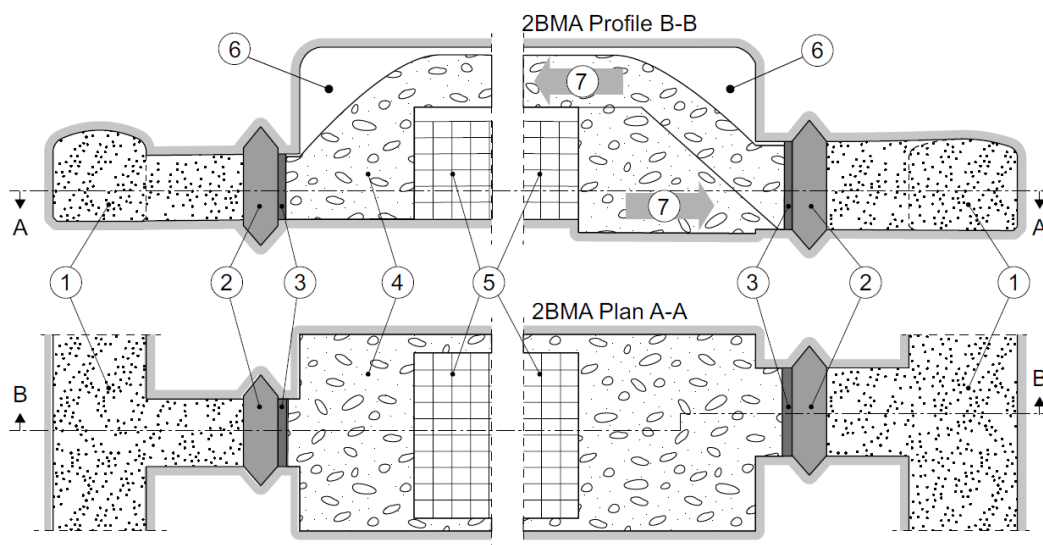


圖2.4-7 2BMA的封閉規劃與斷面示意圖(SKB, 2014 a,b)

①膨潤土②混凝土封塞③以混凝土澆置的束制壁④碎石⑤經灌漿處理的廢棄物包件⑥介於碎石回填面與處置窖頂部的間隙⑦處置窖回填工作方向

B. 系統組成(system component)

受制約的放射性廢棄物其周圍組件包括：

- (1) 廢棄物包件；
- (2) 處置窖隔間內之灌漿；
- (3) 無鋼筋混凝土沉箱的側壁與底部；
- (4) 無鋼筋混凝土的蓋板(lid)；
- (5) 碎石回填材；
- (6) 機械封塞。

2BMA處置窖，在運轉期間隨廢棄物包件的置入進行灌漿，因此，廢棄物包件無法進行後續相關的檢測(inspection)，鋼製廢棄物包件可能在運轉期間將產生材料的腐蝕(corrode)問題，混凝土廢棄物包件也可能一開始或是運轉期間存在小裂縫(fracture)(寬度超過 0.1 mm)，其他在處置窖封閉前置入的相關組件預期與置入時狀態相同。

2.4.3 1BTF 與2BTF處置窖(1BTF and 2BTF, vaults for concrete tanks)

1BTF與2BTF處置窖寬約 15 m、高約 9.5 m、長 160 m，計畫放置混凝土槽，其廢棄物種類為脫水的低階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 m高的護壁板(baseboard)，如圖2.4-8與圖2.4-9。為了簡化混凝土槽的灌漿作業，於護壁板澆置了數個混凝土立柱(pillar)。除了混凝土槽外，1BTF處置窖規劃存放鋼桶(steel drum)，存放物來自Studsvik核電廠燃燒的焚化灰(ashes)及各式各樣的廢棄物，例如核反應壓力槽的端部。1BTF處置窖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，如圖2.4-8，以低活度與低表面劑量率的混凝土箱(concrete mould)組成隔牆(partition wall)。在運轉期間，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，其堆置方式為一層排有四個混凝土槽，如圖2.4-9，一個工作面堆置二層，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。

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

1BTF與2BTF處置窖的封閉方法可詳見SFR封閉計畫(SKBDoc 1358612)，在處置窖第一階段的封閉作業時，混凝土槽與兩側岩壁之間的空間將填入水泥漿；2BTF處置窖

僅放置混凝土槽，混凝土層與層之間的縫隙灌漿作業則於第二階段進行，之後將預先組裝而成的混凝土元件(即混凝土版)覆蓋其上，藉以承載回填碎石的重量。

在1BTF處置窖部分，存放在內側的鋼桶，在運轉期進行堆置時即予灌漿，外側混凝土槽的灌漿作業則與2BTF處置窖的作法相同，完成灌漿後以混凝土版覆蓋，並回填碎石至頂拱處。

處置窖封塞的作法與1BMA相同，圖2.4-10與圖2.4-11為1BTF與2BTF在封閉後的示意圖，在圖2.4-11中的新岩石剖面⑩其目的在於增加回填碎石與周遭岩石的接觸面積，藉此讓封塞內部的緩衝材料能有較佳的力學支撐效果。

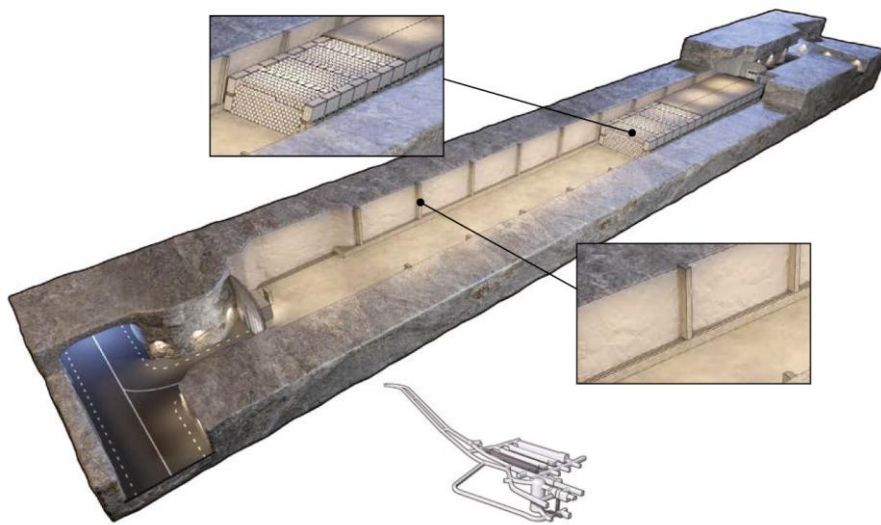


圖2.4-8 位於SFR-1的1BTF處置窖(SKB, 2014 a,b)

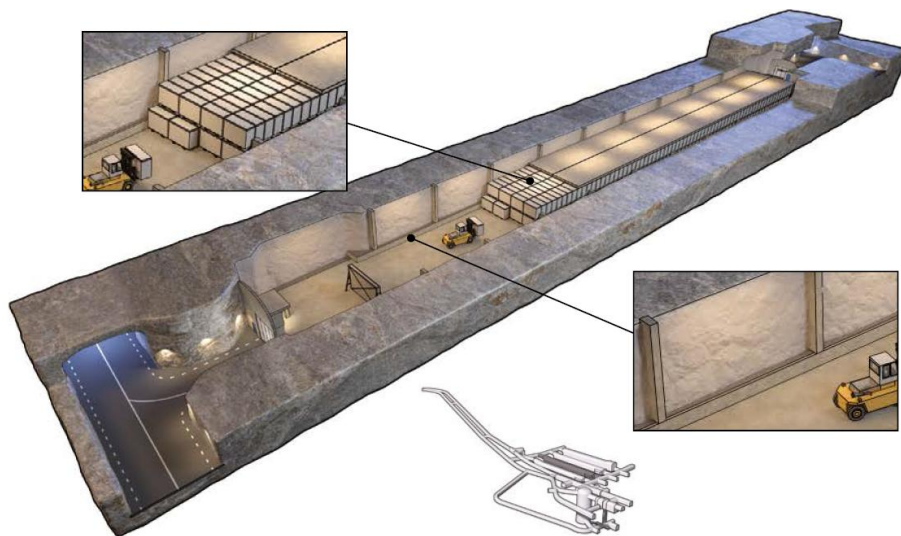


圖2.4-9 位於SFR-1的2BTF處置窖其在運轉期間僅存放混凝土槽(SKB, 2014 a,b)

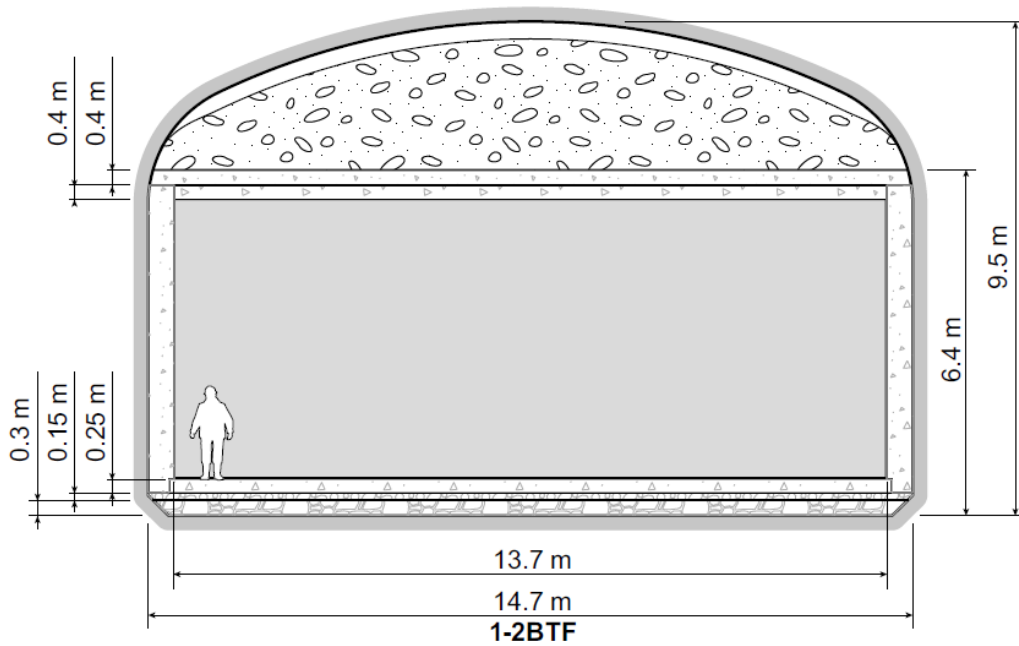


圖2.4-10 1BTF與2BTF在封閉後的斷面圖(SKB, 2014 a,b)

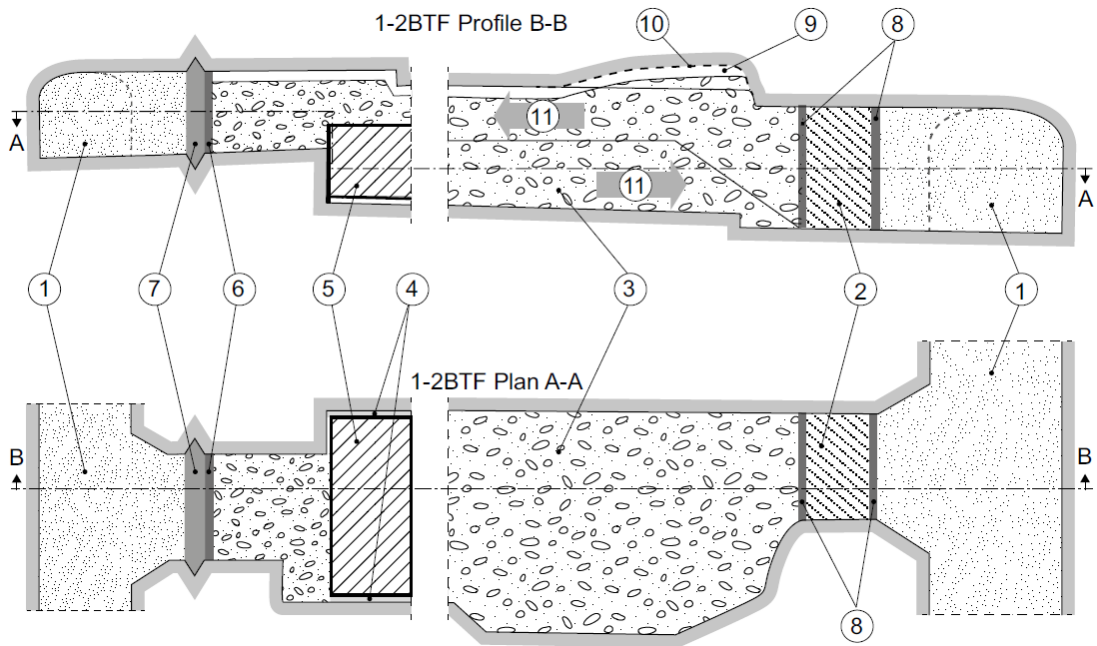


圖2.4-11 1BTF與2BTF的封閉規劃與斷面示意圖(SKB, 2014 a,b)

- 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經灌漿處理的廢棄物包件
- ⑥以混凝土澆置的束制壁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窖頂部的間隙⑩新岩石剖面⑪石處置窖回填工作方向
- ②

B. 1BTf處置窖的系統組成(system component)

受制約的放射性廢棄物其周圍組件包括：

- (1) 廢棄物包件。
- (2) 混凝土箱與混凝土槽堆置形成支撐牆。
- (3) 灌漿(廢棄物包件之間的間隙，即混凝土槽與沿壁之間的間隙)。
- (4) 預先組裝而成的混凝土元件(即混凝土版)與無鋼筋混凝土蓋板(lid)。
- (5) 碎石回填材。
- (6) 機械封塞。

1BTf的廢棄物包件(內容物為灰燼的鋼桶)在堆置時即予灌漿，廢棄物包件無法進行相關檢測(inspection)，鋼製的廢棄物包件在運轉期間將產生材料的腐蝕(corrode)問題，混凝土槽與混凝土箱也可能存在小裂縫(fracture)，其他在處置窖封閉前置入的相關組件則預期狀態不變。

C. 2BTf處置窖的系統組成(system component)

受制約的放射性廢棄物其周圍組件包括：

- (1) 廢棄物包件(以丁基橡膠為襯的混凝土槽)(concrete tank lined with butyl rubber)。
- (2) 灌漿(廢棄物包件之間的間隙，即混凝土槽與沿壁之間的間隙)。
- (3) 混凝土底板。
- (4) 預先組裝而成的混凝土元件(即混凝土版)與無鋼筋混凝土蓋板(lid)。
- (5) 碎石回填材。
- (6) 機械封塞。

混凝土槽可能存在小裂縫(fracture)，其他在處置窖封閉前置入的相關組件與預期狀態相同。

2.4.4 筒倉(Silo)

筒倉為混凝土澆置而成的圓柱狀的處置窖，其高約 70 m、直徑約 30 m、屬於場鑄之混凝土結構體，底部之基礎為90%的砂與10%的膨潤土調配混合材。此一混凝土圓柱體筒倉內可區分為數個垂直的豎井(shaft)，其與周圍岩體間所填入的膨潤土係取自希臘米洛斯島(Milos)，並透過鹼處理(soda treatment)將原本膨潤土的鈣型式(Ca-form)轉換為含鈉狀態(Na-state)，周圍岩壁則已施以噴凝土襯砌；岩石的排水系統是設置在膨潤土與岩體之間。經過一定程序處理後的中放廢棄物以混凝土箱、鋼箱及鋼桶(放置於托盤上或鋼盒內)存放於筒倉內，如圖2.4-12。隨著廢棄物包件堆置入筒倉內的豎井，逐一進行灌漿程序，運轉期間每一個豎井頂部均有設置一個輻射屏蔽，該屏蔽於封閉時須移除。



圖2.4-12 運轉期間之筒倉示意圖(SKB, 2014 a,b)

A. 筒倉封閉後之描述(Description of the vault after closure)

筒倉的封閉方法可詳見SFR封閉計畫(SKBdoc 1358612)，在初階段的封閉作業時，所有的每一豎井將以水泥漿澆置覆蓋至混凝土筒倉上緣，如此可在筒倉頂部形成輻射屏蔽，並簡化了需現場澆置混凝土蓋版(concrete lid)的程序，如圖2.4-13所示，混凝土蓋版是澆置在一層薄的砂土層上，並且預設提供氣體的流動管道。

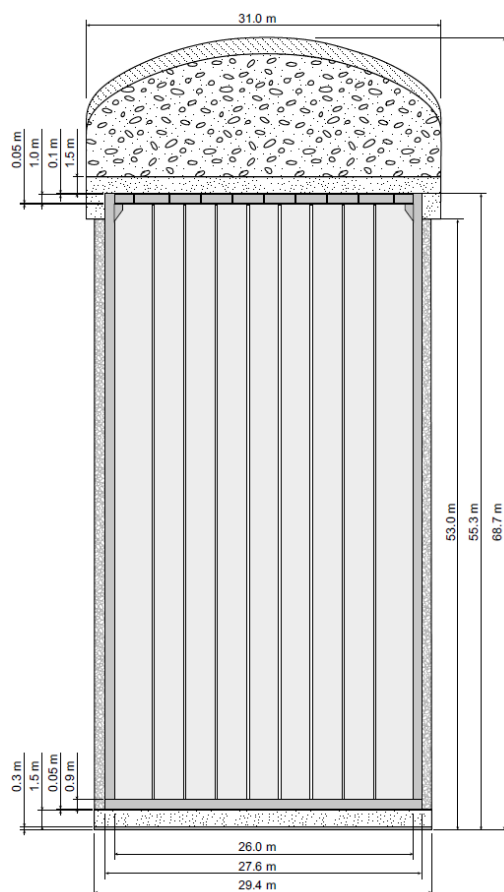


圖2.4-13 封閉後之筒倉縱斷面示意圖(SKB, 2014 a,b)

如前所述，筒倉與岩體之間隙係以膨潤土填入，因運轉期間位於筒倉頂部的膨潤土已受影響，故須更換新的膨潤土。在混凝土蓋版上部的筒倉頂部，則是回填不同厚度的回填材料，如圖2.4-14所示。由砂與膨潤土的混合料是置放在一層薄砂土之上，並鋪上一層薄的鋼筋混凝土版作為保護層，另以碎岩或碎石回填至保護層與岩壁之間隙後，再以具水泥膠結特性的砂(cement-stabilised sand)進行最後的鋪設。封塞(plug)設置在筒倉的底部，筒倉頂部亦有二處封塞束制牆。

B. 系統組成(system component)

受制約的放射性廢棄物其周圍組件包括：

- (1) 廢棄物包件；
- (2) 灌漿；
- (3) 豎井牆(Shaft walls)；
- (4) 筒倉之混凝土結構體；
- (5) 膨潤土或砂/膨潤土緩衝材；
- (6) 筒倉頂部的回填材料；
- (7) 機械封塞。

筒倉內的廢棄物包件在堆置時即予以灌漿，因此，廢棄物包件無法被進行相關的檢測(inspection)，鋼製的廢棄物包件可能產生材料的腐蝕(corrode)問題，混凝土槽與混凝土箱可能存在小裂縫(fracture)，其他在處置窖封閉前置入的相關組件則預期與置放時狀態相同。

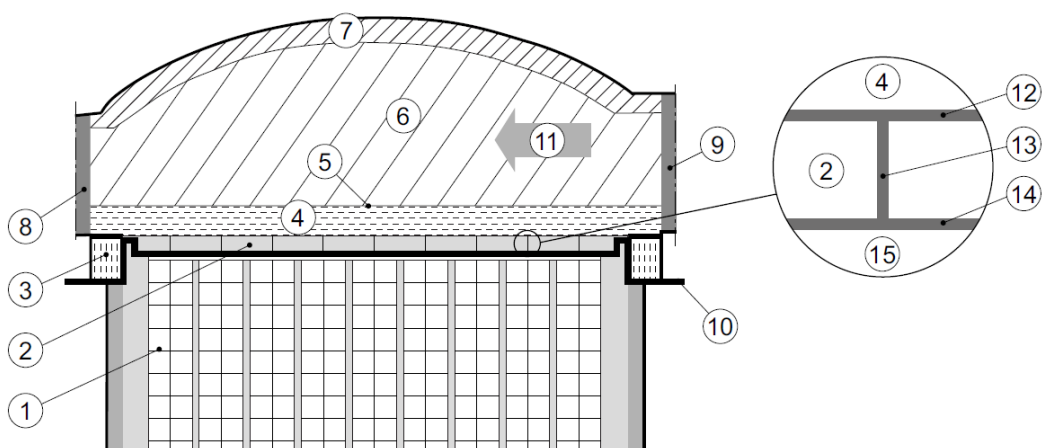


圖2.4-14 筒倉在封閉後的縱斷面示意圖(SKB, 2014 a,b)

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(1STT)之間所設置的混凝土束制牆⑨筒倉頂部緊鄰裝填設施(loading-in building)所設置的混凝土束制牆(1B)之間所設置的混凝土束制牆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(12)100 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

2.4.5 1BLA低放處置窖(1BLA, vault for low-level waste)

1BLA是用來存放標準貨櫃的低放處置窖，處置窖寬 15 m、高 13 m、長 160 m，使用起重機將貨櫃逐一堆疊儲存，貨櫃以兩排平行存放，如圖2.4-15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，處置窖地坪為澆置混凝土，岩壁則是施作噴凝土。以下僅就1BLA處置窖封閉後之描述、系統組成及設計考量介紹如后。

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

1BLA處置窖的封閉方法可詳見SFR封閉計畫(SKBdoc 1358612)，在處置窖末端靠近橫向聯絡坑道(1TT)處將建立一道混凝土牆，回填長度約 4 m的碎石後，現場澆置混凝土封塞。在處置窖另一端往處置坑道(1BST)方向，則是採用以回填材料構成的機械束制，以確保緩衝材料能及時的保存在土壩封塞(earth dam plug)內部，回填材料係以 10 m 高碎石回填於擋土牆後方，再以混凝土做最後的回填，混凝土澆置的高度必須高於碎石回填高程及聯絡坑道高程，如圖2.4-16所示。廢棄物貨櫃周遭不回填的原因之一是回填會造成貨櫃的損壞；其次，坑道的回填目的，在保護混凝土結構不會受到岩層崩坍的影響。另外，在回填作業進行過程中，標準貨櫃也可能因而受損。圖2.4-16與圖2.4-17為1BLA封閉後的示意圖。

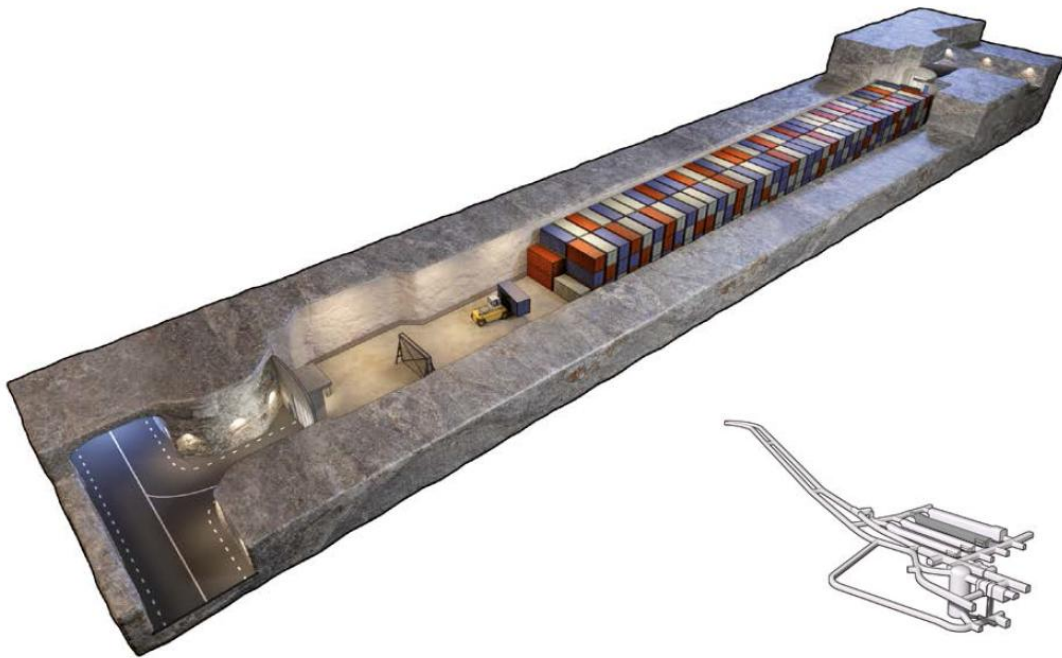


圖2.4-15 運轉期間之1BLA處置窖示意圖(SKB, 2014 a,b)

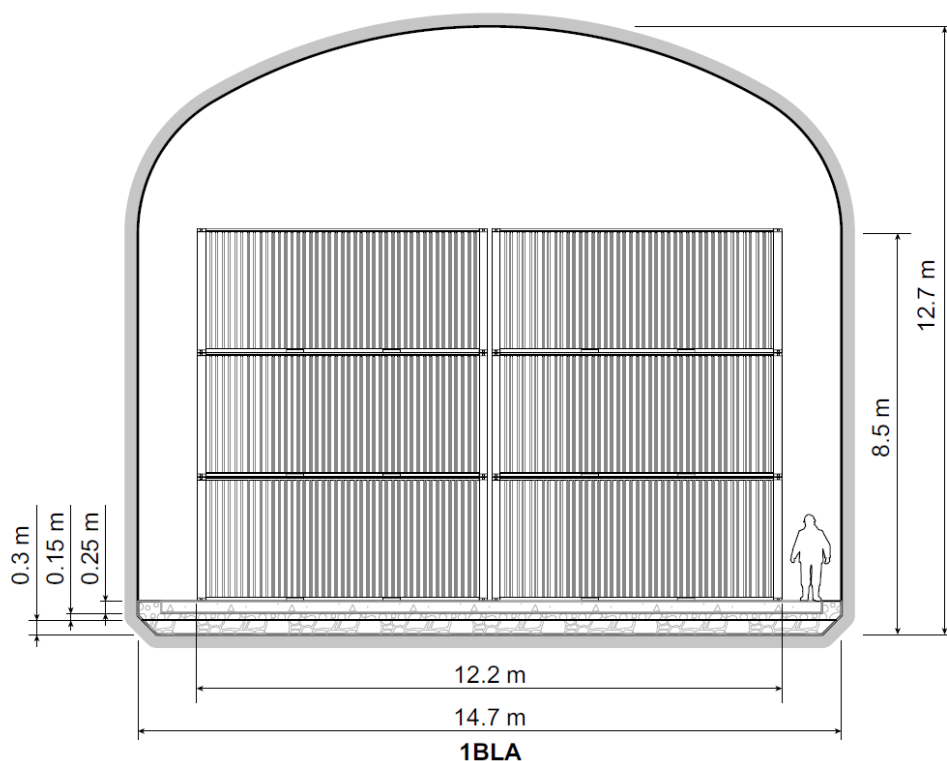


圖2.4-16 封閉後之1BLA處置窖斷面圖(SKB, 2014 a,b)

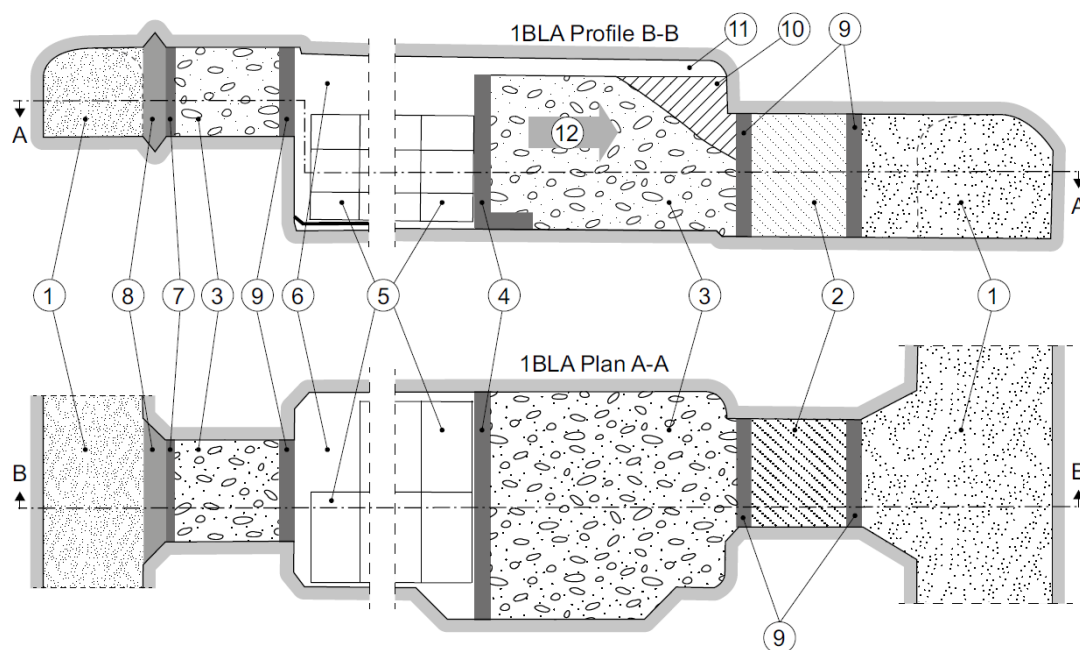


圖2.4-17 1BLA在封閉後的斷面示意圖(SKB, 2014 a,b)

- 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

B. 1BLA處置窖的系統組成(system component)

受制約放射性廢棄物其周圍組件包括：

- (1) 廢棄物包件(ISO標準貨櫃)。
- (2) 混凝土地板。
- (3) 機械封塞。
- (4) 1BLA的廢棄物包件為鋼製貨櫃，鋼製的廢棄物包件可能產生材料的腐蝕(corrode)問題，其他在處置窖封閉前置入的相關組件預期與置入時狀態相同。

C. 設計考量(Design considerations)

(1) 處置母岩之功能

1BLA處置窖其深度約70m，處置母岩力學穩定性佳，同時具備較低之地下水滲流與氧化還原條件。

(2) 安全功能

• 放射性(Level of radioactivity)

存放低階放廢棄物，主要是廢金屬類之運轉廢棄物，且廢棄物以ISO標準貨櫃進行封包。

• 有限的平流傳輸作用(Limited advective transport)

封閉作業進行時，1BLA處置窖與聯絡坑道銜接處將施以膨潤土回填，因膨潤土具有低滲透性，故能限制地下水滲入處置窖內，但是從處置窖內岩壁滲入之地下水應另行評估。此外，處置窖內的岩壁的噴凝土等水泥灌漿施作，也會降低地下水在運轉期間的滲入量。

• 力學穩定性(Mechanical stability)

在運轉階段，係藉由噴凝土來增加處置窖的穩定性；在處置窖封閉後，隨著時間愈久，廢棄物包件(標準貨櫃)及噴凝土對處置窖穩定性的影響將越來越小。

• 有限的溶解作用(Limited dissolution)

1BLA低放處置窖並不考慮放射性核種的釋出，及溶解作用對核種釋出的影響。

• 吸附作用(Sorption)

1BLA處置窖的吸附作用是極為有限的，但就如同其他的處置窖一樣，吸附作用發生在腐蝕產物(corrosion productions)、噴凝土及其他水泥膠結物質。

• 有利的水化學特性(Favorable water chemistry)

水化學作用的影響端視滲入處置窖內的地下水化學成分而定，但需額外考慮噴凝土與其他水泥膠結物質的淋溶作用(leaching)；此外，處置窖封閉後，因

金屬材料的腐蝕及微生物的降解作用(microbial degradation)，造成氧氣逐漸的耗盡，將降低水化學特性的可能影響。

D. 檢查與控制(Inspection and control)

- (1) 在處置窖建造期間，及對噴凝土、岩石加勁構件(rock reinforcement)與凝土地板進行檢查與控制。
- (2) 在處置窖運轉階段，尤其是放射性廢棄物的堆置作業進行期間，持續進行相關的檢查與控制。
- (3) 處置窖在進行封閉作業前，進行最終的檢查與控制。

2.4.6 2-5BLA低放處置窖(2-5BLA, vault for low-level waste)

SFR-3擴建計畫將建造四座低放處置窖，處置窖寬度約 18 m，高 14 m，長度 275 m，沿著處置窖長軸向靠近岩壁處建造側牆(Longitudinal Wall)，牆內堆置標準貨櫃，以雙排6層方式堆疊，支撐牆的作用在保持貨櫃堆疊的穩定，如圖2.4-18。

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

2-5BLA處置窖的封閉方法可詳見SFR封閉計畫(SKBDoc 1358612)，混凝土栓塞將設置在處置窖末端往處置坑道(2BST)的方向，沿著橫向聯絡坑道(2TT)設置的機械束制形成支撐，以避免混凝土栓塞未能保有其完整性。所述的機械束制係由回填材料以 10 m 高之碎石回填於擋土牆後方，再以混凝土做最後的回填，混凝土澆置的高度必須高於碎石回填高程及聯絡坑道高程，如圖2.4-19所示，廢棄物貨櫃周遭不回填的原因之一是回填會造成貨櫃的損壞；其次，坑道的回填目的在保護混凝土結構不會受到岩層崩坍的影響。另外，回填作業進行過程中，標準貨櫃也可能因而受損。圖2.4-19與圖2.4-20為1BLA封閉後的示意圖。

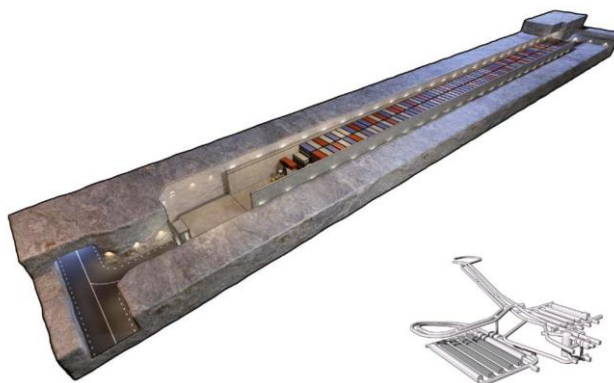


圖2.4-18 運轉期間之2-5BLA處置窖示意圖(SK B, 2014 a,b)

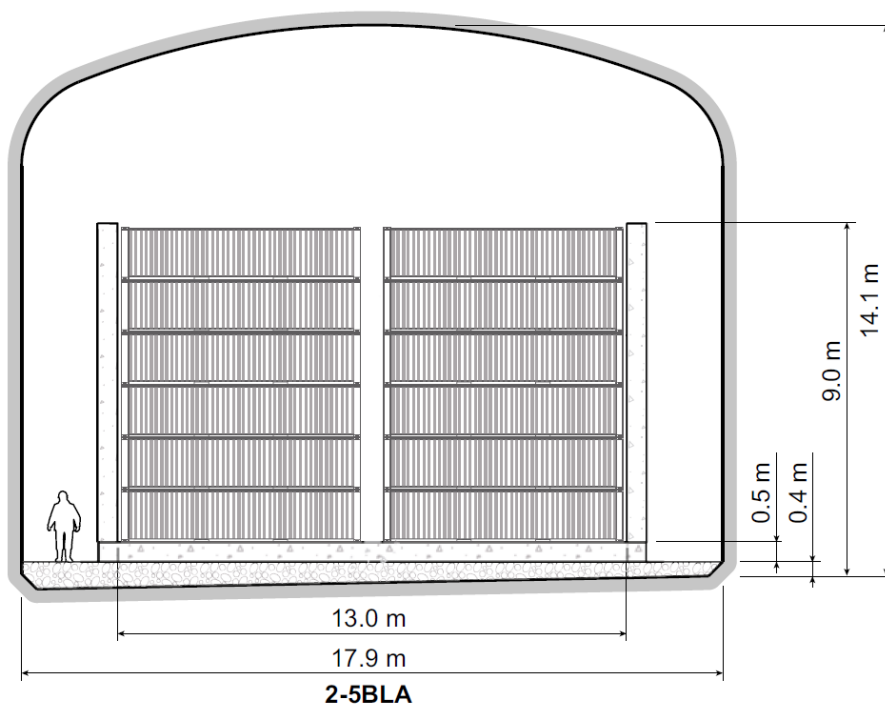


圖2.4-19 封閉後之2-5BLA處置窖斷面圖(SKB, 2014 a,b)

此圖係根據配置版本 2.0 所繪製；配置版本 1.5 則用於 SR-PSU 模擬。圖中所示混凝土牆在配置版本 1.5 版的牆高較高 0.5 m

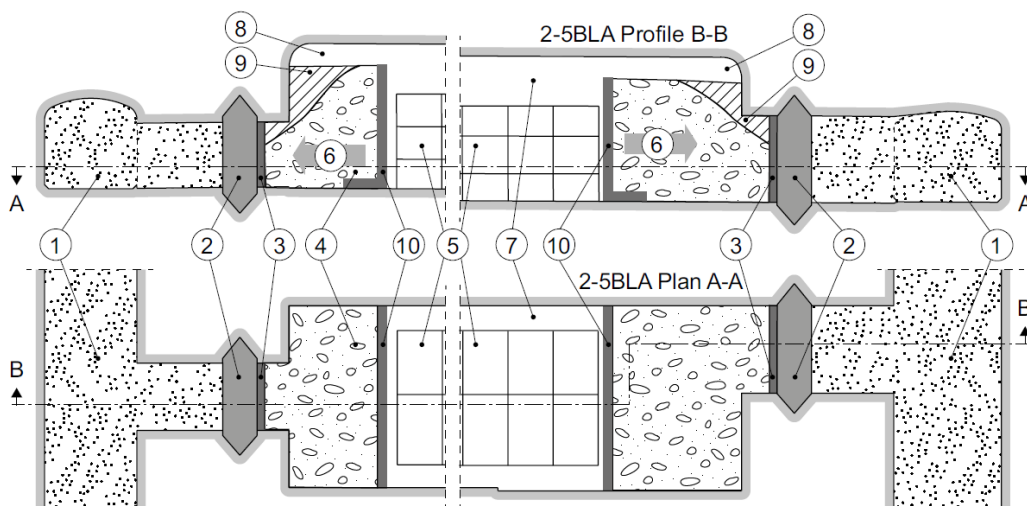


圖2.4-20 2-5BLA在封閉後的斷面示意圖(SKB, 2014 a,b)

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

B. 2-5BLA處置窖的系統組成(system component)

受制約放射性廢棄物其周圍組件包括：

- (1) 廢棄物包件(ISO標準貨櫃)。
- (2) 混凝土地板。
- (3) 機械封塞。

2-5BLA的廢棄物包件為鋼製貨櫃，鋼製的廢棄物包件可能在產生材料的腐蝕(corrode)問題，其他在處置窖封閉前置入的相關組件預期與置入時狀態相同。

C. 設計考量(Design considerations)

(1) 處置母岩之功能

2-5BLA處置窖其深度約120m，處置母岩力學穩定性佳，同時具備較低之地下水滲流條件。

(2) 安全功能

• 放射性(Level of radioactivity)

存放低階放廢棄物，主要是廢金屬類之運轉廢棄物，且廢棄物以ISO標準貨櫃進行封包。

• 有限的平流傳輸作用(Limited advective transport)

封閉作業進行時，2-5BLA處置窖與聯絡坑道銜接處將施以膨潤土回填，因膨潤土具有低滲透性，故能限制地下水滲入處置窖內，但是從處置窖內岩壁滲入之地下水應另行評估。此外，處置窖內的岩壁的噴凝土等水泥灌漿施作，也會降低地下水在運轉期間的滲入量。

• 力學穩定性(Mechanical stability)

在運轉階段，係藉由噴凝土來增加處置窖的穩定性；在處置窖封閉後，隨著時間愈久，廢棄物包件(標準貨櫃)及噴凝土對處置窖穩定性的影響將越來越小。

• 有限的溶解作用(Limited dissolution)

2-5BLA低放處置窖並不考慮放射性核種的釋出及溶解作用對核種釋出的影響。

• 吸附作用(Sorption)

2-5BLA處置窖的吸附作用是極為有限的，但是就如同其他的處置窖一樣，吸附作用發生在腐蝕產物(corrosion productions)、噴凝土及其他水泥膠結物質。

• 有利的水化學特性(Favorable water chemistry)

水化學作用的影響端視滲入處置窖內的地下水化學成分而定，但需額外考慮噴凝土與其他水泥膠結物質的淋溶作用(leaching)；此外，處置窖封閉後，因

金屬材料的腐蝕及微生物的降解作用(microbial degradation)，造成氧氣逐漸的耗盡，將降低水化學特性的可能影響。

D. 檢查與控制(Inspection and control)

- (1) 在處置窖建造期間與完工後，及對噴凝土、岩石加勁構件(rock reinforcement)與凝土地板進行檢查與控制；
- (2) 在處置窖運轉階段，尤其是放射性廢棄物的堆置作業進行期間，持續進行相關的檢查與控制；
- (3) 處置窖在進行封閉作業前，進行最終的檢查與控制。

2.4.7 BRT處置窖(BRT, vault for reactor pressure vessels)

SFR-3規劃的BRT處置窖係用來放置沸水式反應器(BWR)中的反應壓力容器(RPV)，總計有9個反應壓力容器採頭尾相接的方式放置於處置窖內。處置窖寬15 m，高13 m，長度240 m(配置版本1.5為210 m)，處置窖的側牆與頂拱採噴凝土襯砌，為能支撐RPVs的重量，於處置窖凝土地板上放置了特殊的凝土地基，如圖2.4-21。

A、處置窖封閉後之描述(Description of the vault after closure)

BRT處置窖的封閉方法可詳見SFR封閉計畫(SKBdoc 1358612)，當處置窖進行封閉作業時，所有的RPV都將置入水泥漿體內，以降低其腐蝕率。在前述作業進行前，每一個獨立的RPV都將填入凝土或水泥漿，以降低腐蝕率及避免RPV結構體的崩壞風險，亦確保RPV置入水泥漿體時不產生浮力，或在除污過程有任何易鬆脫的內含物因而脫離。RPV周圍的空間將填入碎石，凝土封塞設置在處置窖通往處置坑道(2BST)與橫向聯絡道(2TT)連接處，如圖2.4-22與圖2.4-23所示。

B、BRT處置窖的系統組成(system component)

受制約的RPVs放射性廢棄物其周圍組件包括：

- (1) 廢棄物包件(ISO標準貨櫃)；
- (2) 凝土填充物；
- (3) 凝土漿體；
- (4) 凝土地板；
- (5) 碎石回填；
- (6) 機械封塞。

BRT的廢棄物包件為BWR，RPV(reactor pressure vessels)可能在處置場運轉至封閉期間產生材料的腐蝕(corrode)問題，其他在處置窖封閉前置入的相關組件預期與置入時狀態相同。

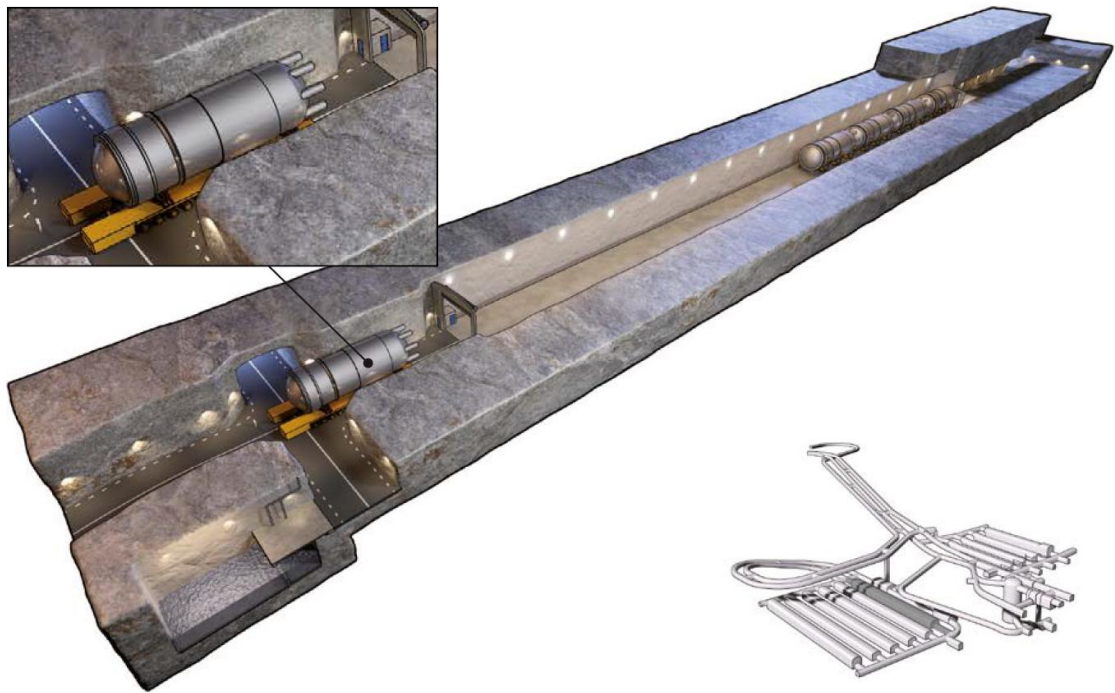


圖2.4-21 運轉期間之BRT處置窖示意圖(SKB, 2014 a,b)

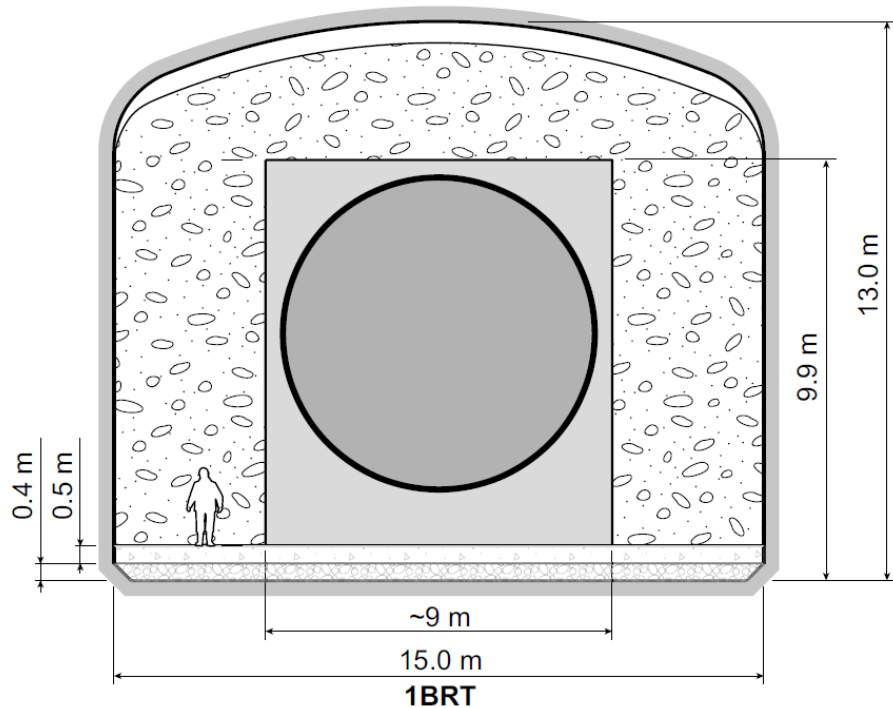


圖2.4-22 封閉後之BRT處置窖斷面圖(SKB, 2014 a,b)

此圖係根據配置版本 2.0 所繪製；配置版本 1.5 則用於 SR-PSU 模擬。圖中所示 RPV 埋置灌漿的高度，配置版本 2.0 為 13.0 m，但在 1.5 版為 12.9 m。

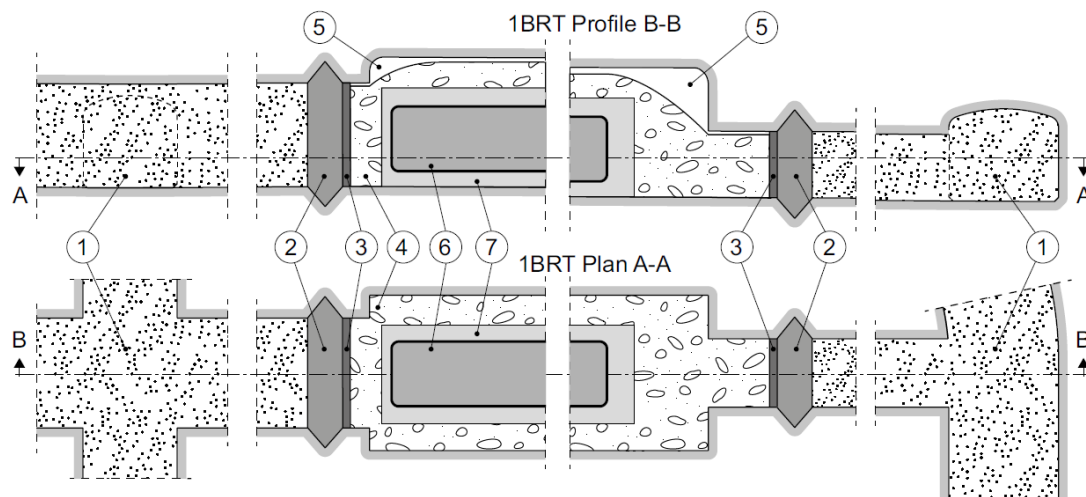


圖2.4-23 BRT封閉後的斷面示意圖(SKB, 2014a,b)

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

2.4.8 封塞與其他的封閉組件(Plugs and other closure components)

SFR的封閉方法可詳見SFR封閉計畫(SKBdoc 1358612)，SFR的封閉規劃如前所述，處置窖的封塞，與坑道、坑道系統及鑽孔的封閉作業分述如后：

【處置窖的封塞作業】(Plugs to waste vaults)

在SFR-1與SFR-3處置場將於五處(P1TT, P1BTF, P1BST, P2TT 與P2BST)進行處置窖封填(seal)，如圖2.4-24所示。封塞方式包括了(1)水力密封斷面(hydraulically tight section)與(2)機械束制(mechanical constraint)，大部分的封塞規劃是採用混凝土封塞方式藉以提供力學支撐。然而，在連接1BST的封塞斷面，因坑道幾何斷面特殊與現地地質條件的限制，導致混凝土封塞不易施作，取而代之的是採土壩封塞(earth dam plug)方式進行封塞，其優點在於土壩封塞方式並不需要岩壁提供力學上的支撐；由膨潤土填充所形成的斷面為水力式填充斷面，則是由封塞提供力學上的束制。

【筒倉的封塞】(Plugs to silo)

筒倉的封塞斷面計有三處，如圖2.4-25，包括筒倉底部封塞(NSP)、筒倉上部封塞(ÖSP)與筒倉底部封塞(STP)。封塞的設計有個重要的設計因素，即合適的坑道幾何斷面才能採用機械束制，如此才能及時地支撐膨潤土構成的水力密封斷面(hydraulically tight section)。

【聯絡坑道的封填】 (Sealing of access tunnels and tunnel system)

為盡可能減少地下水滲入坑道內，於聯絡坑道設置了碎石回填、混凝土與水力密封斷面進行封塞。封塞的設計如圖2.4-26所示，其中膨潤土的水力密封斷面長度為10 m；聯絡坑道與坑道系統之其他坑道空間則是填入碎石，採用碎石的目的是在於其可提供封塞材料所需要的力學支撐，且可防止人類的闖入。連接處置場各個不同部位的豎坑也將一併封閉與封塞。

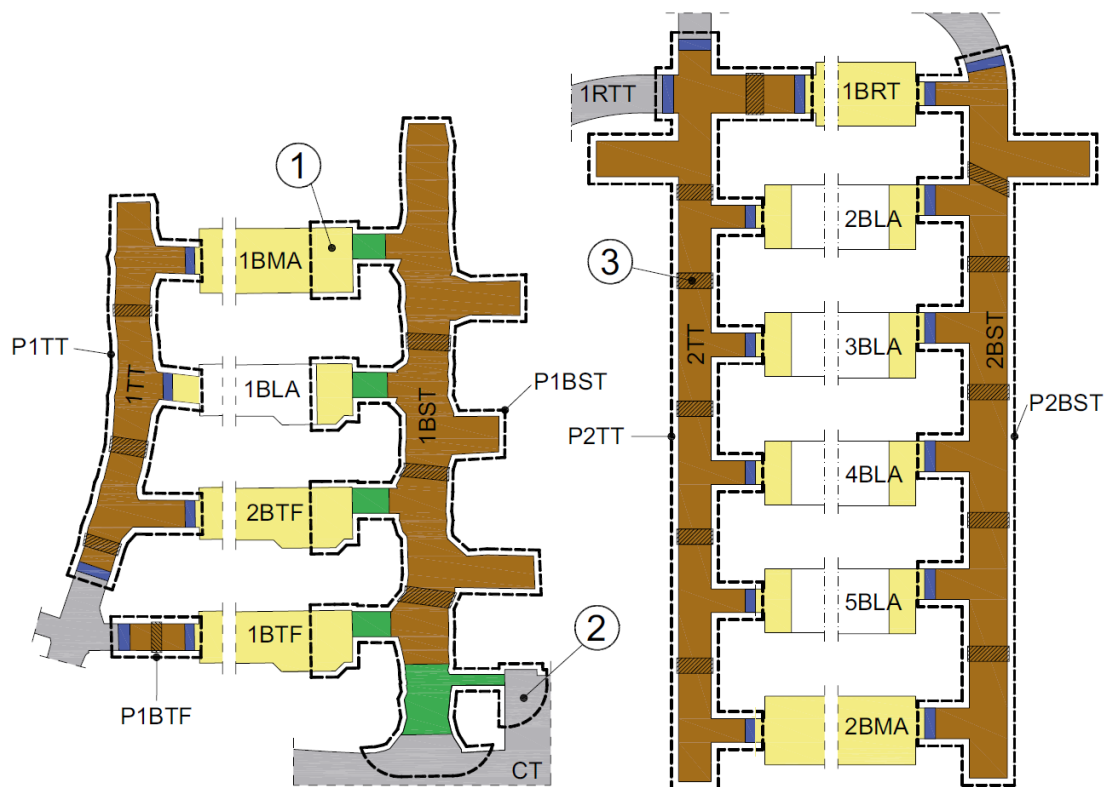


圖2.4-24 處置窖與坑道間的封塞示意圖(SKB, 2014 a,b)

虛線為處置窖緊鄰坑道處。①黃色區塊之封塞斷面，為岩石回填而成，其有如土壩封塞 (earth dam plug) 的作用、綠色區塊為緩衝材料、棕色區塊為水力密封材料 (hydraulically tight material)；②灰色區塊為為坑道系統的回填土封塞，其作用有如土壩封塞的作用；③有矩形方框□的區域為必須透過控制方法 (controlled methods) 加以移除的損傷區 (damaged zone)。

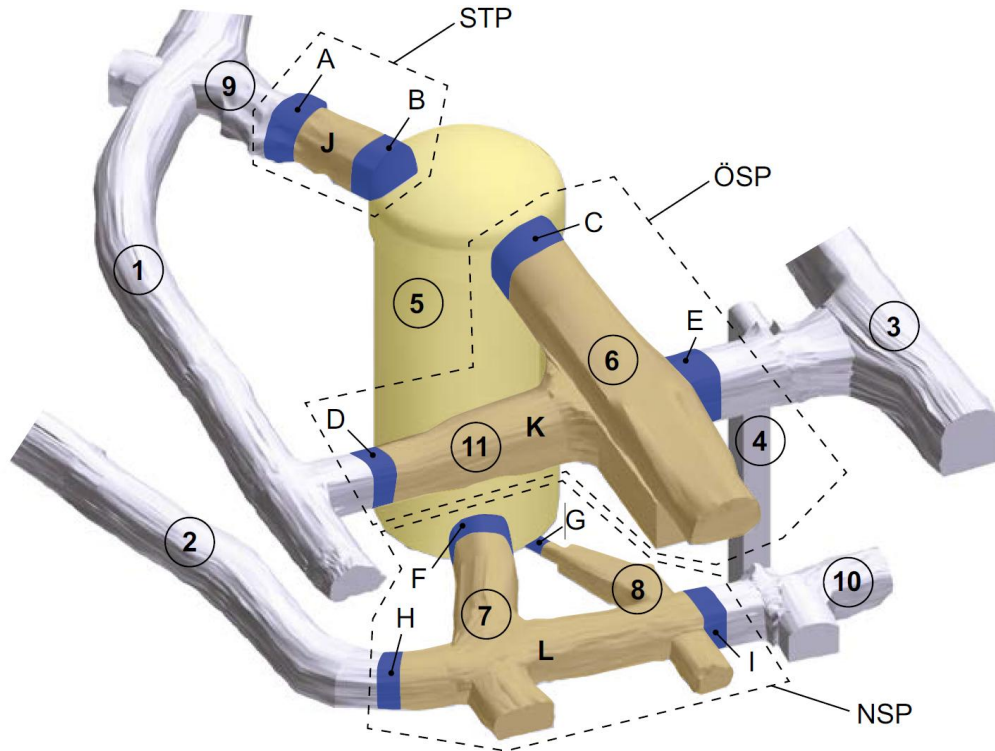


圖2.4-25 位於筒倉的三處封塞示意圖(NSP, Ö SP and STP) (SKB, 2014 a,b)

藍色區塊為混凝土封塞(A, B,...I)，棕色區塊為水力密封斷面(hydraulically tight section)。
①建設坑道(Construction tunnel) BT ②低處建設坑道(Lower construction tunnel) NBT ③中央坑道(Central tunnel) CT ④聯絡豎井⑤筒倉⑥裝填設施(loading-in building)⑦筒倉底部坑道⑧排水坑道⑨筒倉頂部坑道 1STT ⑩低處建設坑道終端部分(Terminal part of lower construction tunnel) (11)筒倉坑道(Silo tunnel)。坑道編號1, 2, 3, 4, 10屬於坑道系統(Tunnel systems)的一部分。

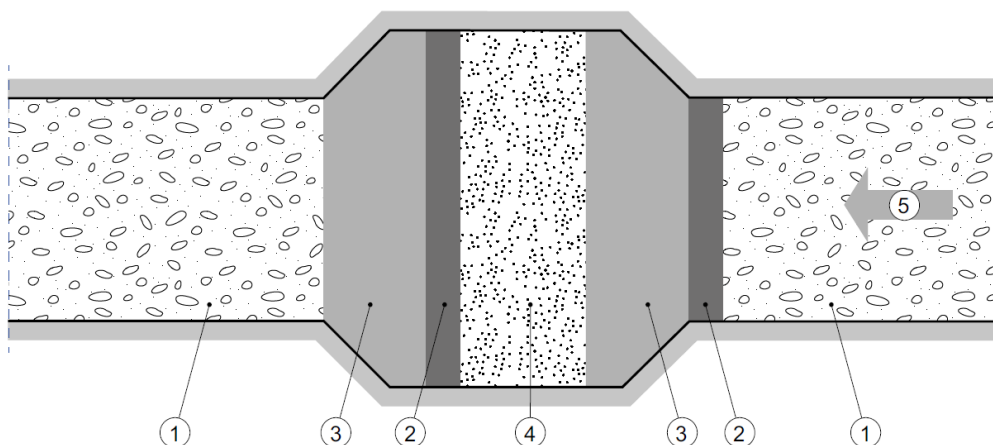


圖2.4-26 聯絡坑道的封塞設計參考圖(SKB, 2014 a,b)

① 碎石回填②束制牆③混凝土④膨潤土⑤回填工作方向。

②

【鑽孔的封填】(Sealing of boreholes)

此處所指的鑽孔(borehole)包括先期調查(preliminary investigation)所設置的鑽探孔及與地下設施相交或非常靠近的鑽孔，無論是在SFR-3開始建造前已封填或即將封填，或是SFR-3運轉之後才被封填者均屬之。當岩石具有低水力傳導度(hydraulic conductivity)，鑽孔封填也必須是低水力傳導度。若鑽孔位在高水力傳導度區域(例如破裂或變形帶)，只要求確認其力學穩定性。經過緊密夯實的膨潤土用於水力密封斷面，具水泥膠結特性的封塞(cement-stabilised plugs)則是用於經過破碎帶的鑽孔。

【系統組成】(Condition of the system component)

所有的封塞(plug)與封閉組件(closure component)於接近封閉時完成設置，目前有關封塞的相關組件其在封閉時的狀況均視為良好的。

2.5 長期安全評估項目

安全功能(safety function)是描述處置場及其各組件的長期功能，也可輔助情境之規劃。安全評估(safety assessment)取決於未來演化的知識，可從以下三個領域進行說明：(1)初始狀態、(2)內部發展及(3)外在條件。由這些方面的知識，可定義一組安全功能以描述處置場各組件如何貢獻於長期的安全性。為了評估某一個安全功能是如何影響處置場的長期安全性，每個安全功能需跟一個或數個可測量或可計算的數值做連結，稱之為「安全功能指標(safety function indicators)」。

安全功能及其指標有助於評估安全性，但不足以表示某一可被接受的安全水準已經達到；同理，如果違反某一安全功能也不表示安全性必定被打折，而僅是表示需要更深入的分析來評估其安全性。無論是違反一個或幾個安全功能，其定量計算均需要配合顯示其風險性。

SFR的長期安全性之達成是藉由：(1)限制處置場內長半衰期放射性核種活度、及(2)確保放射性核種由廢料傳輸，經過工程障蔽及處置場周邊環境時是充分被遲滯。因此，SFR整體長期安全原則(safety principles)是建構在：「**限制長半衰期放射性核種活度、及遲滯放射性核種**」。因此，(1)長半衰期放射性核種的含量是受到限制的，故只接收處置某些廢料種類。(2)為達到減低放射性核種外釋，必須確保流經廢料、工程障蔽、各個處置窖及處置場之低地下水流、及遲滯放射性核種的傳輸。這種遲滯作用主要透過限制平流傳輸及確保有效的吸附作用來達成。

根據合適的方法論，安全性原則可被分割為廢料及處置場組成的安全功能規定。選擇安全功能時，會根據**初始狀態的報告**進行考慮。

安全功能及其安全功能指標被用來選擇及描述主要情境及少數可能情境，這些被用來分析評估處置場放射性核種的安全性。

安全功能被用於SFR的SAR-08前期安全評估(SKB 2008a)。由SAR-08的經驗可知，基於安全功能的方法論適當的利用是不錯的，這在SSM的安全評估審查中也被證實(SSM 2009)：“SKB在SAR-08之安全功能類似於SR-Can所採用。SSM相信這是個合適的方法論，因為它針對不同組件設計出清楚的性能需求、使其更易專注於評估安全關鍵問題。”

2.5.1 安全功能為情境描述的基礎

處置場及周圍地區的未來演化，對於處置場長期安全性評估至關重要。處置場重要區域長期安全性未來演化的不確定性，將透過替代情境的方式處理。少數可能情境是相對於主要情境的一個改變（基於參考系統演化），如此會有較低程度的安全性。情境描述包含起因(估計初始狀態、內部發展、及/或外在環境的不確定性)、事件發生的時段(時間週期)、以及參數值的改變(與主要情境的偏差值)。

處置場組件的性能通常在不分段改變，是會連續的變化，在個別障壁可接受及有缺陷的性能上沒有明確的區別。因此，本次評估將定義先前沒有準則的安全評估功能指標。安全功能指標的主要目的就是指引情境的選擇及確認，這已經和主要情境假設狀態的安全功能指標進行過比較，原則上，意味著替代情境一般代表安全功能指標已偏離主要情境。

2.5.2 選擇安全功能的方法

整體處置場封閉後之安全原則：(1) 限制長半衰期放射性核種活度、及(2) 遲滯放射性核種，可進一步被細分為如表2.5-1的一般安性全性功能。安全評估中安全功能是由長期安全的觀點，根據處置場各組件之特性進行判斷。

表2.5-1 安全原則與安全功能之內容(SKB, 2014a)

安全原則	安全功能
1 限制長半衰期放射性核種的活度	限制活度的數量
2 遲滯放射性核種遷移	低水流量 良好遲滯能力 避免處置場周圍有抽水井

2.5.3 處置場系統組成及其功能

在處置場系統障壁和組件的建造皆有明確的品質程序，以及嚴格的廢料驗收準則和相關類型廢料的描述，以減少處置場初始狀態的不確定性。初始狀態被視為封閉後處置場安全性評估的起始點。初始狀態報告書(initial state report)呈現了處置場封閉時的狀態描述，並根據長期安全性評估的需求建立其架構。報告中將廢料種類描述、處置場設計

及為了確保 閉後評估的起始點而建立的品質系統做連結。初始狀態報告書呈現了處置窖其組成要素之潛在長期安全分析項目，如表2.5-2。

某些組件功能是透過各種品質測量的方法進行保證，因此，**初始狀態報告**的目的是為了分析長期功能處置場中組件的重要性及情境的制定，不需要對**初始狀態報告**中提到的所有方面進行安全功能的確認。

為了處置場長期的安全性，內部流程的重要性在程序報告中呈現，這在SR-PSU中被提出(**廢料處理報告、障壁處理報告、岩石圈處理報告**)。根據特徵、事件及程序的系統性的分析，這對處理的選擇可能具一定的重要性(a FEP analysis: **FEP report**)。在程序報告中呈現的步驟，為處置場的長期功能決定了組件的重要性，並選擇對情境制定有幫助的部分。然而，評估程序的重要性不代表相對應的安全功能被確認。定義安全功能為處置場的長期功能闡明組件的重要性，並且對情境制定有幫助。舉例來說，放射性核種衰變需要考慮處置場長期安全性的評估，並包含推論運算的執行。然而，相比其他的不確定性(例如：庫存量)，臨界放射性核種衰變常數的不確定性較小，因此，未曾對衰變常數不確定性進行研究。

2.5.4 長半衰期放射性核種活度的限制

長半衰期放射性核種活度的整體安全準則限制，在SFR廢料儲存場的放射性含量需在規定且在先前確認的限制內。安全性原則考慮了一般SKB的任務，因此需要更廣闊的觀點，包括在廢料管理程序扮演的角色。

2.5.5 廢料的分配及在處置場中的分布

SFR內廢料的分配及分布係根據處置策略內描述的標準進行(SKBdoc 1434623)。在現有設備中，整體處置場及不同廢料處置窖的活度量，是經過先前管理機構發布的許可條件進行調控(SI 2003)。

SFR適當的處置廢料呈現在庫存量報告中(SKB 2013a)。庫存量報告是基於已經進行處理操作廢料的數據，評估未來廢料的操作及除役廢料。參考庫存量是基於最佳估計量計算，可能受先前庫存量報告的不確定性影響估計值。每個處置窖的參考庫存量偏差，會影響到處置場的長期安全性。

為了顯示長半衰期放射性核種活度限制的安全準則，安全功能限定活度量的定義是為了處置場的長期安全性強調特定核種庫存量的重要性。

表2.5-2 SFR處置窖其組成要素之潛在長期安全評估項目 (SKB, 2014a)

組成要素	項目
廢棄物形式	放射性程度
	平流傳輸的限制
	力學穩定性
	溶解作用限制
	吸附作用
	有利的水化學
廢棄物包件方式	平流傳輸的限制
	力學穩定性
	吸附作用
	有利的水化學
廢料包件周圍的灌漿	平流傳輸的限制
	力學穩定性
	吸附作用
	有利的水化學
混凝土結構	平流傳輸的限制
	力學穩定性
	吸附作用
	有利的水化學
噴凝土	力學穩定性(在運轉期，與岩栓一起評估)
	吸附作用
	有利的水化學
膨潤土及砂/膨潤土混合材	力學穩定性
	平流傳輸的限制
	吸附作用
處置窖回填材料 (破碎岩石/碎石)	力學穩定性
	吸附作用
封塞及其他封閉組件 (探查鑽孔)	限制處置場內的平流傳輸
	吸附作用

2.5.6 放射性核種的遲滯

放射性核種遲滯的整體安全性原則應用在廢料包件、廢料處置窖的工程障壁、填料及周圍岩石上。遲滯作用主要透過限制平流傳輸及確保有效的吸附達成。為限制放射性核種的釋放，以下將針對廢料及其包件、工程障壁、回填材料及其他閉合組件、岩石圈及地表系統在放射性核種遲滯的安全功能暨指標分別介紹如后：

A. 廢料和包件

在初始狀態報告中，廢料及廢料包件的定義是不同的。在安全功能的情況下，廢料及廢料包裝被合併在一起，視為廢料包件。廢料包件具有遲滯放射性核種的能力，係根據表2.5-2所列各系統構件的長期安全分析項目，以下分述如后：

(1) 有限的平流傳輸作用(Limited advective transport)

廢料包件的水力傳導係數低，它們的流體阻力結合周圍障壁的流體阻力，將限制水流。除了限制通過廢料包件的水流，也應該確保廢料包件中的放射性核種是緩慢的釋放。至於在BLA處置窖，沒有關於廢料包件水力特性的需求。BLA的安全評估分析沒有流體阻力，這和廢棄包料的特性有關。因此，BLA的平流傳輸限制是透過周圍障壁的流體阻力。

(2) 力學穩定性(Mechanical stability)

廢料包件的力學穩定性已經在廢料驗收準則及廢料類型的描述被考慮，並且在初始狀態報告中被進一步的描述。

(3) 有限的溶解作用(Limited dissolution)

對於某些物質，孔隙水的最大濃度可能是有限溶解度，例如，放射性核種的濃度可能受到碳14、鎳59及鎳63溶解度的限制。然而目前的安全評估並沒有考慮溶解度限制，也沒有定義安全功能。將溶解度限制排除是消極的方法，它的影響應該被單獨研究。誘發活度目前儲存在處置場的反應器壓力槽內，經由腐蝕進行釋放，而根據水化學，釋放速率由腐蝕速率控制。

(4) 吸附作用(Sorption)

很多放射性核種吸附於廢料包件的固體材料上，根據固體材料及孔隙水化學不同，吸附能力會產生變化。吸附作用限制了孔隙水中溶解的放射性核種濃度(見廢料處理報告)。在孔隙水中低濃度的溶解放射性核種，從廢料中促成緩慢的釋放，不管傳輸方法是透過擴散或平流。原則上，放射性核種不只能吸附在廢料固化體的混凝土、水泥或瀝青上，也能吸附於離子交換樹脂、飛灰、腐蝕生成物等以及廢料包件。在處置筒倉內的廢料吸附特性是預定的，BMA及BTF決定廢料如何調整。然而，安全性分析只使用吸附於廢料包件內凝膠材料上的部分。而在BLA的廢料包件只有少量的凝膠材料存在。吸附作用總是發生於固體表面。水泥相對來說擁有較大的孔隙率，而水泥的組成中許多固相是非晶質

的，因此有較大的比表面積這有利於吸附作用。隨著時間推移，水泥中大部分的固相成分將逐漸轉變為結晶物質，而吸附能力的衰減是可以預料的。只要凝膠材料沒有顯著的化學變化，孔隙水中的pH值將大於10.5，這有利於許多放射性核種的吸附。這在廢料處理報告中有詳細描述。

(5) 有利的水化學特性(Favorable water chemistry)

吸附和溶解作用主要依賴於孔隙水的組成(見廢料處理報告)。最重要的參數有(i) pH值、(ii) 氧化還原電位與(iii)錯化劑的濃度。只要凝膠材料沒有顯著的化學變化，孔隙水會具有高的pH值。這通常保證了有利於重要陽離子的吸附條件。而在整個相關的pH值範圍內，陰離子被假設為不利於吸附於凝膠材料上。氧化還原電位為吸附作用的一個重要參數，像SFR這樣的處置場，可以說較低的氧化還原電位導致了重要放射性核種的緩慢釋放。

廢料同時也包含了一定量的錯化劑(例如：乙二胺四乙酸、氨基三醋酸及檸檬酸)，並且廢料中有機質的衰退(特別是纖維素)有助於錯化劑的提升。這些藥劑可以藉由和溶解的放射性核種混合影響吸附能力，由於化學形式的改變將減少放射性核種的吸附能力。在溶解形式中，可以想像錯化劑和放射性核種相互爭取吸附至固體表面上。此外，在其他方面的溶解限制，錯化劑可和放射性核種黏結。因此錯化劑濃度需保持較低的狀態。反應壓力艙的腐蝕藉由高pH值及低的氧化還原電位限制。

(6) 廢料包件的安全功能暨指標

廢料包件的安全功能主要是針對放射性核種的吸附能力及遲滯能力，相關的安全功能指標包括了：

- 廢料包件中的pH值；
- 廢料包件中的氧化還原電位；
- 廢料包件中的錯化劑濃度；
- 廢料包件中可吸附的表面積；

針對放置於BRT處置窖的反應器壓力槽(RPVs)因屬大型廢棄物，因為採廢棄物包件處理，故以腐蝕速率為其安全功能指標。

B. 工程障壁

在初始狀態報告中分別介紹了工程障壁(混凝土結構及筒倉中的膨潤土)、灌漿埋置及噴凝土。其中，工程障壁在安全評估中可能被考慮的項目如表2.5-2所列。

(1) 平流傳輸限制

地下水在處置窖內部及廢料包件的流動，可透過下列方法予以限制：

- 利用回填於混凝土結構周圍的透水碎石及廢料包件環繞低透水性混凝土結構的對比液壓，驅使水流從混凝土結構通往較具透水性的周圍材料(即液壓升降室)。
- 筒倉周圍的膨潤土緩衝材有較低的水力傳導係數，可限制水流通過筒倉。然而，有極小的機率會在筒倉內形成氣體並形成壓力，反而造成筒倉內部的水份滲出。

(2) 力學穩定性

處置場的力學穩定性已經在設計處置場時被考慮，這在初始狀態報告中有描述。力學穩定性的缺失將導致裂隙的形成、造成水力傳導係數改變的結果。長期安全沒有特定的安全功能和力學穩定性有直接相關的。

(3) 吸附作用

廢料包件放射性核種的釋放，會受到廢料包件周圍混凝土灌漿吸附作用的阻礙，包含混凝土結構及混凝土結構外的碎石。除此之外，放射性核種釋放到連結隧道時會因為吸附於回填材料上而受到阻礙。

對放射性核種有最大吸附能力的是具膠結性的材料(混凝土牆、灌漿等)，這種材料有較大的比表面積有助於吸附。然而，需要注意的是在安全評估中，處置場其他材料的遲滯能力(像是膨潤土)在放射性核種傳輸計算時也會被採用。由於在1BLA及2-5BLA中的膠結材料是被限制的，因此，處置窖是假設未具有吸附能力。

(4) 有利的水化學

- 吸附能力和孔隙水的組成有很大的相關性。最重要的參數有：
- pH值；
- 氧化還原電位；
- 錯化劑的濃度。

只要凝膠材料沒有顯著的化學變化，孔隙中的pH值將大於10.5，有利於重要陽離子的吸附。而在整個相關的pH值範圍內，陰離子被假設為不利於吸附於凝膠材料上。

氧化還原電位為吸附作用的一個重要參數。SFR處置場中，較低的氧化還原電位可減緩重要放射性核種的釋放。

廢料中有機質的衰退(特別是纖維素)將導致錯化劑(例如：乙二胺四乙酸、氨基三醋酸及檸檬酸)的提升，進而影響障壁的吸附能力。

(5) 安全功能及安全功能指標的選擇

為了辨識放射性核種遲滯的安全準則，兩個安全功能將被定義。第一個是廢料處置窖的低流量，在處置場長期安全情形下，強調液壓對障壁的影響。相關安全功能指標為：

- 液壓對比(1-2BMA, 1-2BTF)；
- 膨潤土的水力傳導係數(筒倉)；
- 氣壓(筒倉)；

第二個安全功能為混凝土障壁的良好遲滯作用。這個安全功能最重要的貢獻在於吸附作用。相關安全功能指標為：

- 混凝土障壁的pH值(1-2BMA, 1-2BTF, 筒倉, BRT)；
- 混凝土障壁的氧化還原電位(1-2BMA, 1-2BTF, 筒倉, BRT)；
- 混凝土障壁的錯化劑濃度(1-2BMA, 1-2BTF, 筒倉)；
- 混凝土障壁可吸附的比表面積(1-2BMA, 1-2BTF, 筒倉, BRT)。

C. 回填材料及其他封閉組件

回填材料及其他封閉組件在安全評估中可能被考慮的項目如表2.5-2所列。回填材料會被放置在隧道系統的策略點，視為處置場閉合程序的一部分。回填材料會由混凝土及膨潤土組成。它們的主要功能是限制廢料處置窖內的水流，但是回填材料亦包含放射性核種可吸附的材料。儘管混凝土具有水力功用，但被視為膨潤土水力功用的附屬。處理過程中可能改變膨潤土的水力功用，這在障壁處理報告中有描述。

(1) 安全功能及安全功能指標的選擇

為了辨識放射性核種遲滯的安全準則，在廢料處置窖的低流量被定義為，在處置場長期安全的情況下，液壓對回填材料的影響。相關安全功能指標為：

(2) 膨潤土的水力傳導係數

D. 岩石圈

從長遠的觀點來看岩石圈具有許多功用。低水流量至廢料處置窖。放射性核種離開SFR緩慢運輸的先決條件為低水流量從基岩穿過廢料處置窖再回到基岩中。特別應用在沒有阻礙的放射性核種。低水流量至廢料處置窖也是氧化劑這類反應物質向內緩慢傳輸的先決條件。

和圍岩相比，就算廢料處置窖由碎石回填，廢料處置窖仍是較具透水性的。廢料處置窖的流量是可上升的，因此由圍岩的流量決定。筒倉是一個例外，筒倉周圍的膨潤土相比於圍岩有較低的水力傳導係數。穿過岩石圈的水流是依序由水力梯度和水力傳導係數決定。

(1) 有利的水化學

許多元素的吸附，像是鎘、銻、鈾、銻及硒，這在處置場中對氧化還原的條件是敏感的。在氧化條件下這些元素的吸附，和還原條件下是不同的。處置場中氧化還原的條件由流入地下水的組成及處置場內部材料的腐蝕決定。

(2) 安全功能及安全功能指標的選擇

為了辨識放射性核種遲滯的安全準則，定義了兩個安全功能。首先是確保處置母岩的低滲透性，強調岩石圈作為流體障壁的功能。相關安全功能指標為：

- 水力梯度；
- 基岩的水力傳導係數。

第二個安全功能有良好的遲滯特性，透過處置場還原條件的深度控制，相關安全功能指標為：

- 氧化還原電位。

E. 地表系統

SFR處置場位於波羅的海下方，是相當重要的安全特性，初始的1,000-2,000年，處置場表面是被海水覆蓋。除了有利的水力特性外，處置場海底位置的外部條件同時防止人類於處置場上方或順流進行井的定位。由於海岸線的移動，隨著時間推移表面的組成會發生變化，長期的安全性分析需納入考慮。

(1) 抽水井

使用於飲用水或農業目的的抽水井，將影響生物圈放射性核種的傳輸模式。由於抽水井的使用方式及位置，有風險性的影響，因此需要納入考慮。

(2) 安全功能及安全功能指標的選擇

為了辨識放射性核種遲滯的安全準則，定義安全功能為避免井直接位於處置場附近。相關安全功能指標為：

- 侵入井；
- 處置場井的洩降。

2.5.7 安全功能與安全功能指標

本章所述安全功能及安全功能指標，統整於表2.5-3，所指安全功能係指透過處置場組件提供處置場的安全，安全功能指標是處置場組件可量測或可計算的性質，可指示安全功能的落實程度。

安全功能及安全功能指標被用來選擇或描述主要情境及少數可能情境。然而，它們也可以被用在其他的目的，像是選址、幫助確定設計需求、進一步的科技發展或制定廢料驗收準則；已經完成應用於SFR擴展處置場的選址(表2.5-4)。

表2.5-3 SR-PSU闡述的安全功能暨安全功能指標(SK B, 2014 a)

安全功能	安全功能指標	組件
安全準則：長半衰期放射性核種活度限制		
活度數量的限制	在每一廢料處置窖各個放射性核種的活度	在 1BMA，2BMA，1BTF，2BTF，筒倉，1BLA，2-5BLA 和 BRT 的廢料
安全準則：放射性核種的遲滯		
廢料處置窖的低流量	液壓對比	1-2BMA，1-2BTF
	水利傳導係數 氣壓	在筒倉及回填材料的膨潤土 筒倉
基岩的低流量	水力梯度	岩石圈
	水力傳導係數	岩石圈
良好的遲滯作用	pH 值	廢料包件內的凝膠材料在 1-2BMA，1-2BTF，筒倉和 BRT 內的混凝土障壁
	氧化還原電位	廢料包件內的凝膠材料在 1-2BMA，1-2BTF，筒倉和 BRT 內的混凝土障壁 岩石圈
	錯化劑濃度	廢料包件內的凝膠材料在 1-2BMA，1-2BTF，筒倉和 BRT 內的混凝土障壁
	可吸附的表面積	廢料包件內的凝膠材料在 1-2BMA，1-2BTF，筒倉和 BRT 內的混凝土障壁
	腐蝕速率	BRT 反應壓力艙
避免處置場周圍設置抽水井	侵入井	表面
	處置場井的洩降	表面

表2.5-4 選址過程需注意的安全功能暨安全功能指標(SK B, 2014 a)

安全功能	安全功能指標	達成安全功能的方法
處置窖的低流量	低地震活動	選址(位置)
	變成永凍土的風險低	處置場設計(深度)
母岩內的低流量	低地震活動及避免位處 區域變質帶	選址(位置)
	具低水力梯度	選址(深度)
	具低水力傳導係數	選址(深度)
	避免不經意的干擾	設置鑽井的風險低
	潛在礦藏低	選址(位置)

2.6 小結

本章針對坑道處置在封閉階段所採作法，包括處置坑道與聯絡坑道之間的封塞方式、回填材料的選定與堆置、及處置包件與坑道岩壁是否預留空間等，為執行封閉作業時需注意的課題；其次，根據SFR低放射廢棄物處置經驗，研析其在坑道處置的長期穩定評估項目，茲將未來可進一步供作第六章「低放審查導則(第0版)與處置坑道相關章節之精進建議」之參考內容整理如下：

A. 低放處置坑道結構設計考量、檢監測與封閉計畫

(1) 坑道結構設計考量

SFR-1的1BLA、與SFR-3的2-5BLA均屬低放射性廢棄物處置窖，在1BLA處置窖部分，處置窖地坪為澆注混凝土，岩壁則是採噴凝土為其坑道支撐系統；在2-5BLA部分，處置窖地坪同樣為澆置混凝土，但是靠近兩側岩壁處建造側牆，其作用在於保持廢棄物包件(標準貨櫃)堆放之穩定性。

(2) 檢測與監測

處置場建造過程及運轉期間，針對處置窖之噴凝土及岩石穩定性進行檢測與監測；處置窖運轉期間，則對於處置窖的物理狀況進行持續性的檢測與監測；於處置窖進行封塞前，進行最終監測與檢測。

(3) 封閉計畫

- (a) 整個坑道予以封塞。
- (b) 廢棄物標準貨櫃周遭空間不回填，避免包件受損。
- (c) 坑道終端毗連其他隧道的位置將予以回填，以提供混凝土封塞的支撐力。
- (d) 封閉後，坑道結構的穩定性並無詳述。

茲將低放處置坑道結構設計考量、檢監測與封閉計畫等資訊，整理如表2.6-1。

B. 處置窖的封塞，與坑道、坑道系統及鑽孔的封閉作業

(1) 處置窖的封塞作業

規劃五個封塞斷面(P1TT, P1BTF, P1BST, P2TT 與P2BST)進行處置窖封填(seal)作業，封塞方式包括水力密封斷面(hydraulically tight section)與機械(力學)束制(mechanical constraint)。水力密封斷面係指由膨潤土填充所形成的斷面，形成低滲透性之阻水層；機械(力學)束制係指採用混凝土與土壩(earth dam plug)之封塞方式，且以混凝土封塞為主，但在坑道幾何斷面較特殊處，如連接1BST的封塞斷面，因混凝土封塞不易施作，故採用土壩封塞。

(2) 筒倉的封塞

筒倉的封塞斷面計有筒倉底部封塞(NSP)、筒倉上部封塞(ÖSP)與筒倉底部封塞(STP)等三處。封塞設計有個重要的設計因素，即合適的坑道幾何斷面才能採用機械(力學)束制，如此才能及時地支撐膨潤土構成的水力密封斷面。

(3) 聯絡坑道的封填

聯絡坑道的封填目的在於減少地下水滲入坑道內，於聯絡坑道設置了碎石回填、混凝土與水力密封斷面進行封塞，聯絡坑道與坑道系統之其他坑道空間則是填入碎石，採用碎石的目的是在於其可提供封塞材料所需要的力學支撐，且可防止人類的闖入。

(4) 鑽孔的封填

考量鑽孔所處位置的岩石水力傳導度進行鑽孔封填作業，若鑽孔周圍岩石具有較低水力傳導度時，鑽孔封填也必須採用低水力傳導度的封塞材料，若鑽孔位在高水力傳導度區域(例如破裂或變形帶)，鑽孔作業只要求其力學穩定性。

C. 長期安全評估項目

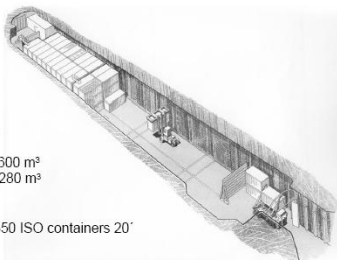
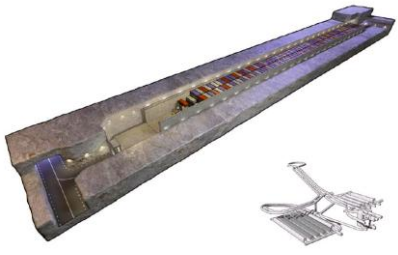
(1) 長期安全原則與安全功能

SFR對於處置場的長期安全要求，是藉由(1)限制處置場內長半衰期放射性核種活度、及(2)確保放射性核種由廢料傳輸，經過工程障蔽及處置場周邊環境時是充分被遲滯，據此提出長期安全原則(safety principles)：「**限制長半衰期放射性核種活度、及遲滯放射性核種**」。與長期安全原則相呼應的，是安全功能的訂定，例如，「**限制長半衰期放射性核種活度**」其安全功能是限制活度的數量，「**遲滯放射性核種**」其安全功能是(i)低水流量、(ii)良好遲滯能力及(iii)避免處置場周圍有抽水井，如表2.5-1。

(2) 長期安全評估項目

根據SR-PSU初始狀態安全評估報告書(TR-14-02)，分別就廢棄物型式、廢料包件、廢料包件周圍的灌漿、混凝土結構、噴凝土、膨潤土及砂/膨潤土混合材、處置窖回填材料、及封塞與其他封閉組件等，提出相關的潛在長期安全評估項目，如表2.5-2所示。

表 2.6-1 低放處置坑道結構設計考量、檢監測與封閉計畫

<p>SFR 低放處置坑道</p>	 <p>L ≈ 160 m W ≈ 15 m H ≈ 12.5 m</p> <p>$V_{tot} \approx 27,600 \text{ m}^3$ $V_{storage} \approx 14,280 \text{ m}^3$</p> <p>Capacity ≈ 350 ISO containers 20'</p> <p>SFR1-1BLA</p>	 <p>SFR3-2-5BLA</p>
<p>項目</p>	<p>處置窖深度</p> <ul style="list-style-type: none"> • 約 70m 	<ul style="list-style-type: none"> • 約 120m
<p>處置母岩功能</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 處置母岩力學穩定性佳，同時具備較低之地下水滲流條件 	
<p>與坑道結構穩定有關之設計考量</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 在運轉階段，係藉由噴凝土來增加處置窖的穩定性；在處置窖封閉後，隨著時間愈久，廢棄物包件(標準貨櫃)及噴凝土對處置窖穩定性的影響將越來越小 	
<p>檢測與監測</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 在處置窖建造期間，及對噴凝土、岩石加勁構件與混凝土地板進行檢查與控制 • 在處置窖運轉階段，尤其是放射性廢棄物的堆置作業進行期間，持續進行相關的檢查與控制 • 於處置窖進行封塞前，進行最終監測與檢測 	
<p>低放處置窖封閉計畫</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 廢棄物標準貨櫃周遭空間不回填，避免容器受損 • 坑道終端毗連其他隧道的位置將予以回填，以提供混凝土封塞的支撐力 • 封閉後，坑道結構的穩定性並無詳述 	

第三章、國際坑道處置封閉前母岩之岩石力學初始狀態

本章參考SFR處置設施在建造期與運轉期的經驗，針對處置場的現地地質條件、母岩工程地質、與岩石力學特性進行整理與研析，以提供後續發展坑道處置長期穩定相關之安全評估審驗技術參考。

3.1 地質條件概述

SFR的母岩種類有三種(Bodén and Lundin, 2007 ; SKB, 2006)，包括長英質(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)，如圖3.1-1所示。長英質至中等變質火山岩類形成於Svecofennian造山運動，為該地區最古老的岩床，主控了SFR-1對外聯絡坑道所處位置的地質特性；近花崗岩類其葉理分布不一，主控了處置場北半部與鄰近陸地之地質特性；粗顆粒狀之偉晶岩類為至少二種不同生成年代之侵入岩，生成年代較古老者主控對外聯絡坑道至處置場南側區域的地質特性。

在地質破裂帶(Fracture zones)部分，Forsmark區域的原岩多呈現塊狀形態(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, 2003)。SFR-1處置場地質破裂帶之空間分布圖如圖3.1-2。

在初始狀態下，處置場和岩石的儲存層的溫度與目前岩盤溫度相似，即約5-7°C。當處置場封閉時，近地面氣溫預計上升約1-2°C。然而，由於大氣溫度上的幅度的不確定性，初始狀態需參照1961-1990年的正規週期確認。

3.2 岩石類型暨岩石分區

SFR地區依具有相似岩性的條件劃分為四個區域(RFR01-RFR04)：(1)、RFR01區之岩性由偉晶岩以至偉晶花崗岩為主(SKB岩石類型代碼101061)。(2)、RFR02區的岩性較RFR01區更不均質，大多數區域局部包含細粒到中粒的變質花崗岩-以至花崗閃長岩(101057)，常與此區域最普遍的岩性-長英質以至中度變質火山岩(103076)難以區別；該區域還含有24%的偉晶岩及偉晶花崗岩。SFR-1和SFR-3大部分座落在RFR02區域，而銜接隧道則位於RFR01區域，見圖3.2-1。(3)、RFR03區目前缺乏鑽探岩心或隧道資料，但是，由地磁測量結果顯示該區域的變形區內含有氧化的岩石，組成以偉晶岩為主。(4)、RFR04區目前也缺乏資料，但是評估其岩性類似RFR02區。RFR03和RFR04區的岩石類型因資料不足而具不確定性，但是這些區域位於處置場的外圍地帶，不確定性相對較不重要。

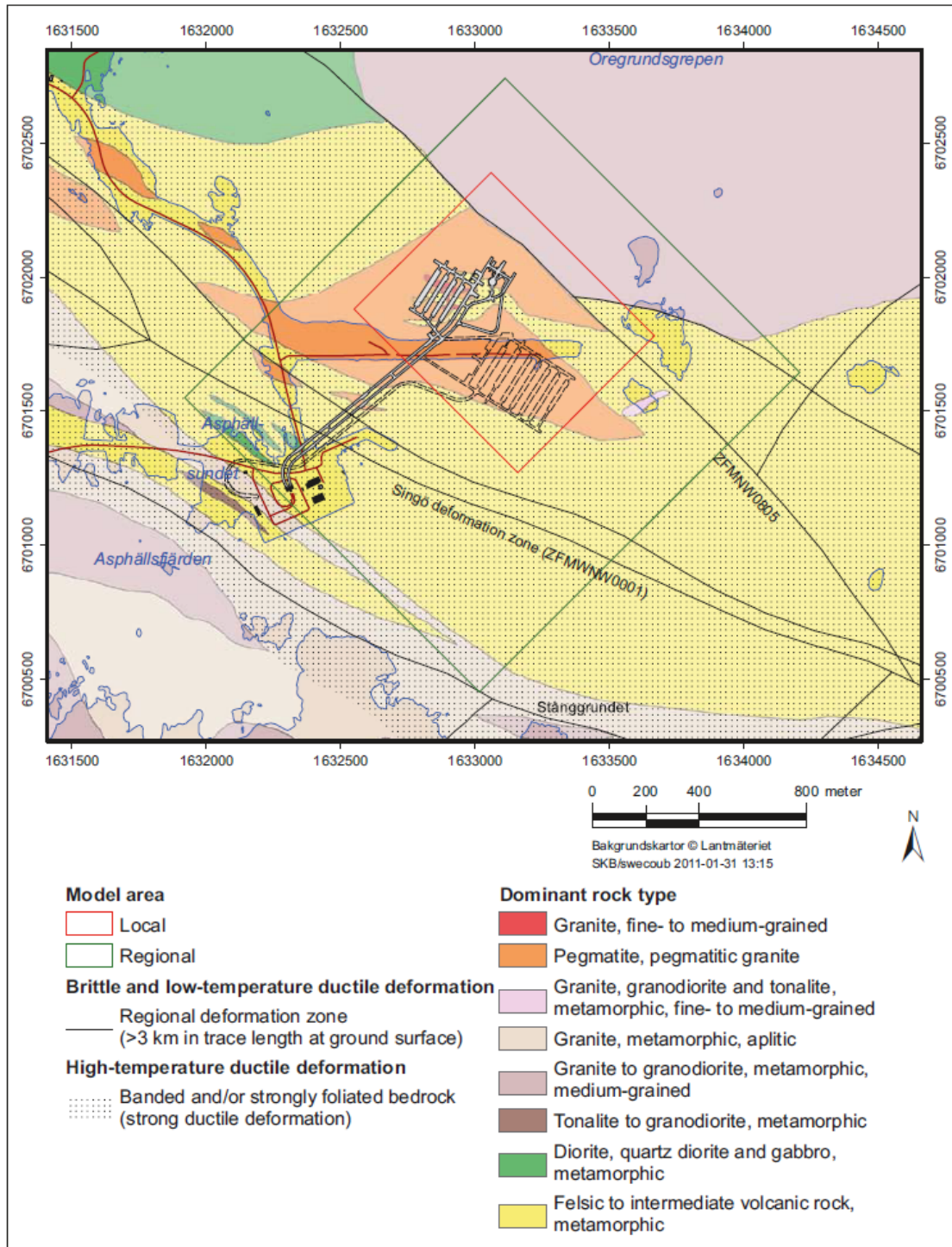


圖3.1-1 SFR-1處置場地質圖(SKB, 2011a)

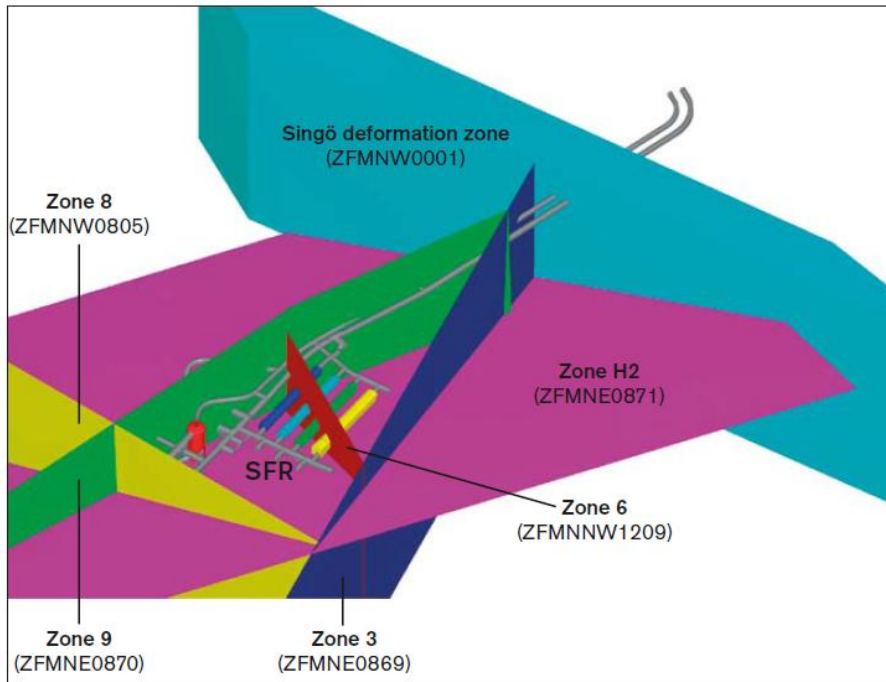


圖3.1-2 SFR-1處置場地質破裂帶之空間分布圖(SKB, 2011b)

區分為 H2 區(紫色)、Zone 3(深藍色)、Zone 6(深紅色)、Zone 8(黃色)、Zone 9(綠色)、Singö Zone(淺綠色)。坑道部分：聯絡坑道(灰色)、處置窖(紅色)、1BTF(深藍色)、2BTF(淺藍色)、BLA(綠色)與 BMA(紅色)。

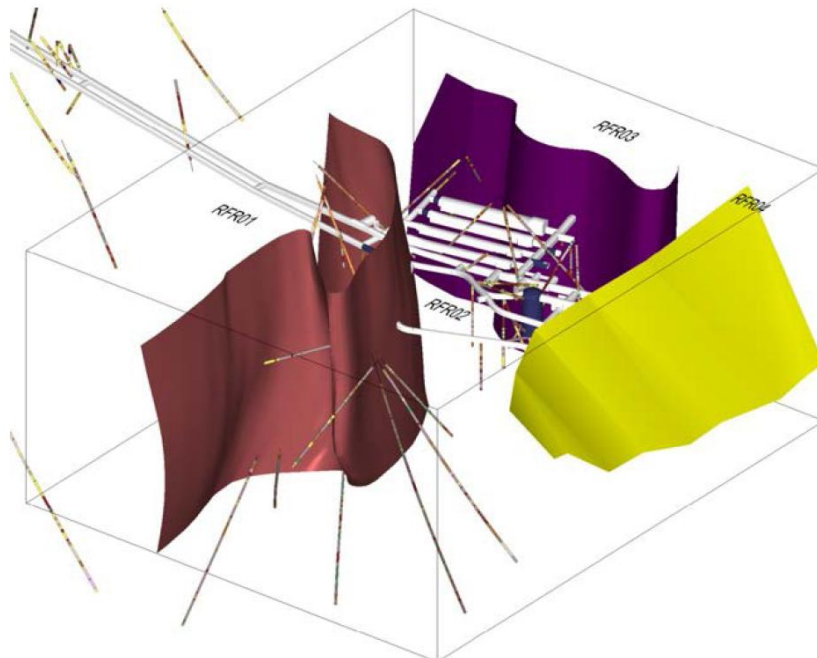


圖3.2-1 SFR地區岩石類區分佈之3D視圖(SKB, 2014)

3.3 地質變形區與岩石區域模型

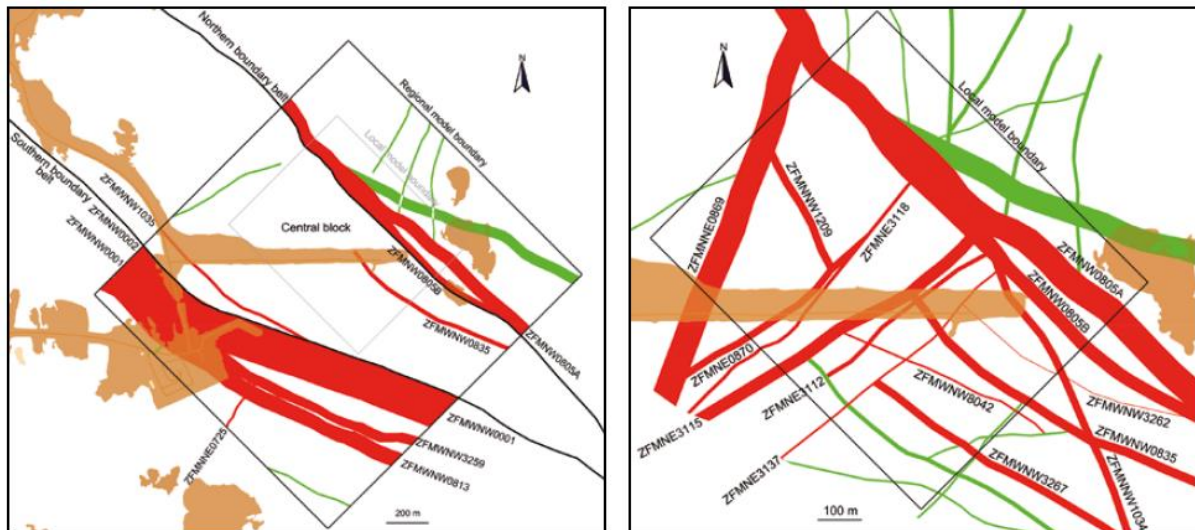
根據可靠的資訊建立模型，用以顯示變形區如圖3.3-1和圖3.3-2。變形區被分成多個區域，分別為不同的群體（見圖3.3-3）：

- A. 垂直陡傾於西北西向到西北向的區域。本區包含中央六個區塊，其部分區塊預期將與SFR-3計畫的岩體相交。
- B. 垂直陡傾於北北東到東北東向。此區較第1區的範圍短，由七個區域組成，其中一個區域位在中央區塊。
- C. 垂直陡傾於西南到北北西向。此區的終端屬於前述兩區，包括兩個區域與中央區塊相交的位置。
- D. 中度至緩傾（ $\leq 45^\circ$ ）的區域。此區共有三個區塊，其中一個位於中央區塊。

除了這些變形區，近水平的表層結構更具有含水層。經過觀察，這些表層岩石結構可能是因為解除應力而形成，可能與其他水平破碎帶或變形帶連結。

SFR的地質尚存顯著的不確定性，屬於近地表岩盤的水平結構會發生的事件、規模和特性（SKB2013e）。

圖3.3-3是3D視圖，結合變形區跟岩石區域的模型，可顯示岩石組成類型。該圖標示SFR-1的位置。SFR-3預計設置於SFR-1更深層的位置，由中央區塊至SFR-1的東南側。



a) Regional model area, trace lengths $\geq 1,000$ m

b) Local model area, trace lengths ≥ 300 m

圖3.3-1 SFR變形區域圖 (SKB, 2014a)

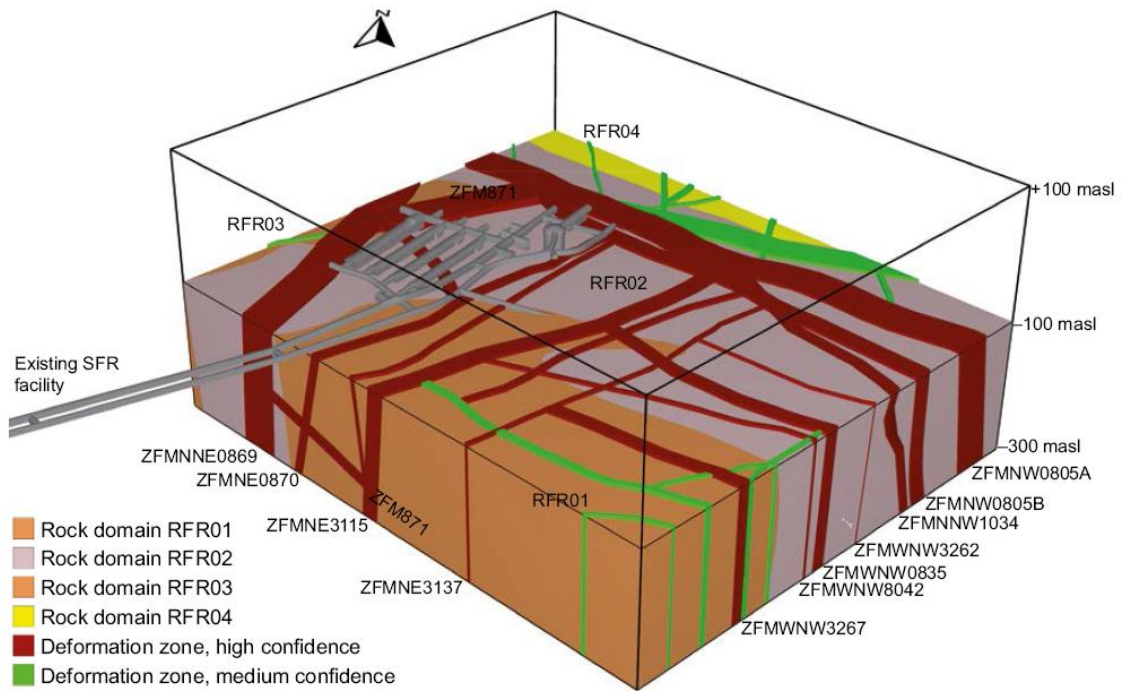


圖3.3-2 SFR岩石與變形區域圖(SKB, 2014a)

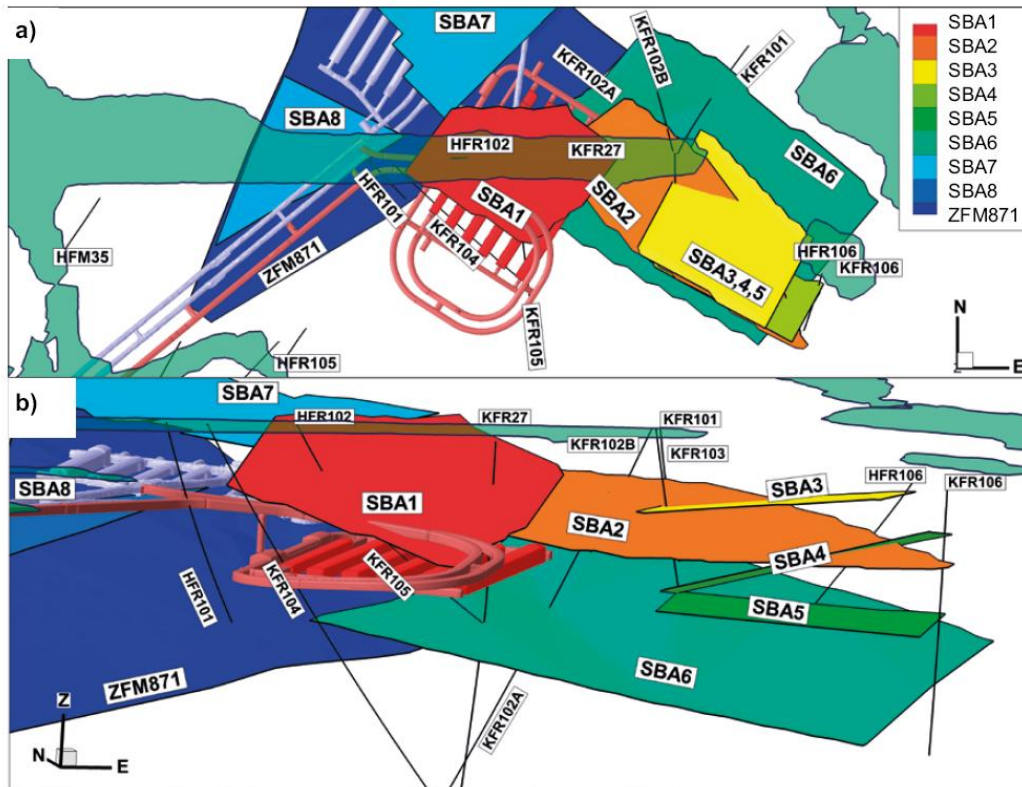


圖3.3-3 SFR變形分區圖(SKB, 2014a)

3.4 處置母岩岩石力學特性

SFR處置場所處母岩，其未擾動岩石力學性質可由岩石力學參數描述。表3.4-1提供三種常見參數，包括單軸抗壓強度、間接張力強度和楊氏模數。岩石可以採用國際岩石力學學會強度等級(Brown, 1981)歸類為R 5(非常強)至R 6(極度強)。

表3.4-1 岩石參數(SK B, 2014a)

Parameter	101057 – Granite to granodiorite	101061 – Pegmatite, pegmatitic granite	111058 – Fine- to medium-grained granite	103076 – Felsic to intermediate metavolcanic rock	102017 – Amphibolite
Uniaxial compressive strength (MPa)	226/50 126–326	183/45 90–270	280/45 210–350	139/45 100–200	142/45 60–230
Indirect tensile strength (Brazilian test) (MPa)	13/2 10–18	12/3 8–16	16/2 12–20	9/2 5–13	9/2 5–13
Young's modulus (GPa)	75/3 69–81	74/4 66–82	74/2.5 70–79	99/3 93–105	81/4 73–89

進行力學特性評估時，近水平表層破裂帶(0-50m)已於分類性質描述，其性質預期與其他破裂帶不同(傾斜度/傾角和深度)。表3.1-2提供單一裂面的力學參數近似值。

表3.4-2 單一裂面之力學參數(SK B, 2014a)

Parameter	Subhorizontal (dip 0–20°) fractures with a depth z = 0–50 m, σ_n' = effective normal stress	Other fractures with a depth z = 0–150 m and Subhorizontal fractures where z > 50 m, σ_n' = effective normal stress
Normal stiffness, K_n [MPa/mm]	$K_n = 10 \times \sigma_n'$	$K_n = 10 \times \sigma_n'$
Shear stiffness, K_s [MPa/mm]	$K = K_n / 3$	$K = K_n / 20$
Friction angle, ϕ_1 [°] for normal stress range 0–0.5 MPa	66°	48°
Friction angle, ϕ_2 [°] for normal stress range 0.5–1.5 MPa	32°	35°
Apparent cohesion for normal stress range 0.5–1.5 MPa	0.4	0.4
Dilatancy	15°	15°

常用的岩體特徵描述方法，包含以莫爾-庫倫材料模型估算強度特性及彈性參數估算變形特性。表3.4-3提供SFR的岩體的岩石力學參數，包含了岩石區域(正常的破裂岩石)與變形區域。儘管評估多數次要區域沒有明顯的岩心，變形區內的岩心和其他部分具有不同的性質。SFR-3預計新建的位置缺少直接的岩石強度量測數據，因此，評估岩石應力是困難的工作。儘管如此，最表層的岩石預期會具有較大的岩石應力變化特性，表3.1-4提供了估計值的狀況。

鄰近挖掘隧道和處置窖，應力將被重新分配，使其與前述現地應力有所不同。隧道壁外的爆破預期將造成開挖損傷區(EDZ)，開挖損傷區的破裂頻率將明顯高於其他周遭岩體，開挖損傷區的延伸非常有限，評估小於0.3m的範圍。

表3.4-3 SFR岩體的岩石力學參數 (SKB, 2014a)

	Friction angle, M-C (0–5 MPa)	Cohesion, M-C (0–5 (MPa))	Deformation modulus for the rock mass, Em	Poisson's ratio
Rock domain	50–60°	13 MPa	50 GPa	0.34
Outer part of deformation zone	51°	2 MPa	13 GPa	0.35
Core of deformation zone	37°	2 MPa	2.6 GPa	0.45

表3.4-4 岩石應力變化估計值(SKB, 2014a)

All rock domains	Major horizontal stress	Minor horizontal stress	Vertical stress
Magnitude (MPa)	$\sigma_H = 5 + 0.07z$	$\sigma_n = 0.07z$	$\sigma_v = 0.065z$
Orientation (trend from north)	142°	52°	Vertical

3.5 處置場岩體力學特性與岩盤穩定性

A. 處置場岩體力學特性

透過震測法、地質鑽探與現地應力量測等方法掌握母岩力學特性，進一步分析聯絡坑道附近的岩體力學特性(Stille et al., 1985)，其結果如表3.5-1，顯示最大與中間主應力值(方向)分別為10 MPa(NW/SE)與5 MPa(NE/SW)，最小主應力為垂直應力3 MPa。岩體張力強度為10 MPa，變形模數為20 GPa，前述資料顯示場址所處岩體力學特性尚屬良好(good quality)，處置坑道與聯絡坑道以岩栓(rock bolts)與鋼纖維噴凝土(fiber-reinforced shotcrete)為其斷面支撐方式。根據地質鑽探資料顯示，地質破裂帶大多夾雜方解石(calcite)、綠泥石(chlorite)與濁沸石(laumontite)等礦物之含泥物質。

表3.5-1 SFR-1處置場岩體力學特性評估值(Stille et al., 1985)

Parameter	Estimated value MPa
Maximum horizontal stress	10
Minimum horizontal stress	5
Tensile strength of rock mass	10
Deformation module of rock mass	20,000

B. 岩盤穩定性

由於處置場位處岩體破裂區，為瞭解場址內聯絡坑道與處置坑道的岩盤穩定性，曾進行岩楔穩定分析及落盤可能性評估，評估項目包括針對坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性進行破壞風險評估及坑道斷面的潛變(creep)監測。

(1) 坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性

針對坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性進行破壞風險評估，以掌握岩盤的穩定性，所考慮引致破壞的機制為過應力區(overstressing)與岩體潛變(creep)的兩種因素。圖3.5-1顯示主要破裂帶分佈的空間分布，及坑道開挖面形成的不穩定岩塊的狀況。

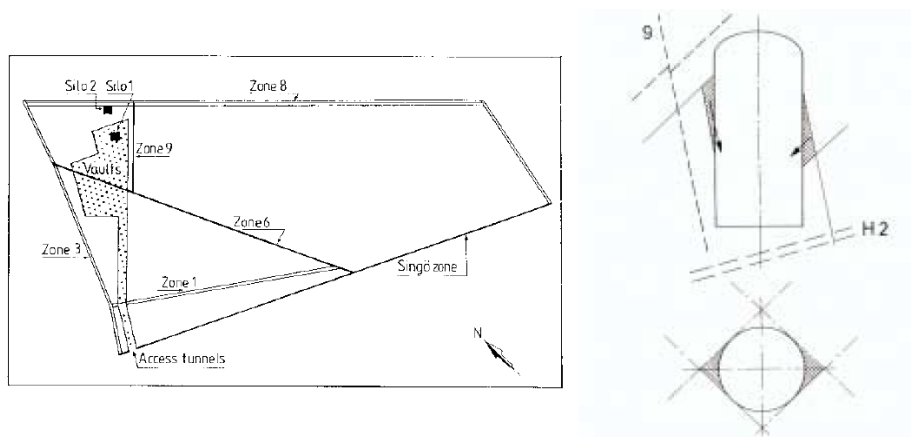


圖3.5-1 處置窖所處位置之主要破裂帶分佈與坑道側壁不穩定岩塊之示意圖(SKB, 2003)

(2) 潛變量測

SFR-1採用伸張儀(Extensometers)固定在岩壁上以量測岩體的依時變形，量測位置分別在頂拱與垂直側壁上上部邊緣位置。透過潛變量測可以掌握坑道斷面的收

斂行為(convergence of the cavern)、膨潤土(bentonite)的側向壓縮、坑道底部與處置窖的隆起等資訊。

Harald Hökmark(1993)利用勁度彈簧與阻尼盤串聯的Kelvin model來評估坑道斷面的潛變收斂行為，但其採用的參數具有諸多不確定性，例如楊氏模數取104 MPa、剪力模數取 4×10^3 MPa、阻尼係數取1012 MPa，僅能約略的估算出岩體因坑道開挖所引致的最大潛變量約 1 cm (發生在坑道頂部)，且95%的潛變變形量會在150年後才完成。潛變影響的區域則影響到坑道邊緣15m範圍的岩體內，因此，岩體潛變將造成坑道頂拱處的岩栓與處置窖頂部間的距離有所變化或影響處置窖的穩定性。

Vattenfall Hydropower(1993)提出1985至1993年間的坑道徑向潛變量之量測報告，顯示在開始的數月有明顯的3-4 mm的快速潛變量，如圖3.5-2所示，此點符合Kelvin model描述的材料變形特性，顯示以Kelvin model描述潛變形為之可行性；其測值與Harald Hökmark(1993)理論值計算結果相差不大；然而，因本項量測工作係在開挖完成後的數月才開始，非於初始狀態即進行量測，因此坑道斷面因開挖引致的實際潛變量應該高於目前此一量測值(3mm~4mm)。

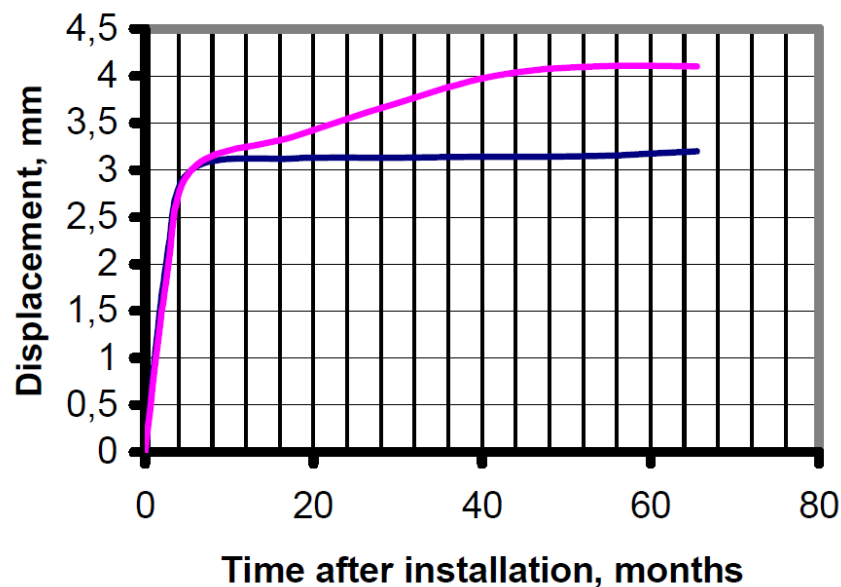


圖3.5-2 伸張計量測徑向潛變量變化(Bodén, 1993)
(紅色與深藍色曲線分別為編號E4與E7伸張計之長度變化量)

3.6 小結

本章蒐整之瑞典SFR處置場所處地質條件、工程地質暨岩石力學特性等資訊，未來可進一步供作第五章「坑道處置封閉前與長期穩定評估要項之綜合研析」及第六章「低放審查導則(第0版)與處置坑道相關章節之精進建議」之參考內容整理如下：

A. SFR處置場地質特性

SFR的母岩種類計有火山岩類、花崗岩類與偉晶岩類，就處置場整體之配置而言，SFR-1對外聯絡坑道所處位置屬長英質至中等變質火山岩，屬該地區最古老的岩床，處置場北半部與鄰近陸地屬崗岩類，對外聯絡坑道至處置場南側區域屬偉晶岩類。此外，其地質破裂帶(Fracture zones)區分為：破裂區範圍超過10公里者之區域性破裂區，及範圍低於10公里之局部破裂區。

B. 工程地質暨岩石力學特性

- (1) SFR處置場所處母岩之岩石力學特性，包括單軸抗壓強度、間接張力強度和楊氏模數，如表3.4-1，按國際岩石力學學會強度等級，可歸類為R 5(非常強)至R 6(極度強)；單一裂面之力學參數，包括正向勁度、切向勁度、摩擦角與凝聚力等弱面力學參數，如表3.4-2；岩體的岩石力學參數，如表3.4-3所示。
- (2) 透過震測法、地質鑽探與現地應力量測等方法掌握母岩力學特性，進一步分析聯絡坑道附近的岩體力學特性及現地應力，顯示最大與中間主應力值(方向)分別為10 MPa(NW/SE)與5 MPa(NE/SW)，最小主應力為垂直應力3 MPa，場址所處岩體力學特性尚屬良好。

C. 開挖損傷區評估

因隧道採鑽炸工法開挖導致鄰近開挖面形成開挖損傷區(EDZ)，其延伸經評估小於0.3 m 的範圍。

D. 岩盤穩定性與坑道結構支撐方式

有鑑於處置場位處地質破裂帶，SFR為瞭解場址內聯絡坑道與處置坑道的岩盤穩定性，遂進行岩楔穩定分析及落磐可能性評估，評估項目包括針對坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性進行破壞風險評估及坑道斷面的潛變(creep)監測。此外，處置坑道與聯絡坑道以岩栓與鋼纖維噴凝土為其斷面支撐方式。

第四章、處置坑道穩定性與長期安全評估項目

有鑑於坑道處置已成為為國內低放最終處置之發展目標，其概念為利用既有之地表下方一定深度內的坑道或是於山區開挖處置坑道，並採鋼筋混凝土窖、回填材料等工程障壁，將廢棄物桶貯存於內，藉由周遭地質圍完整母岩的緻密性及低滲透性，有效隔離或遲滯核種遷移(張福麟，2011)。為確保處置坑道在運轉期間的穩定性，使其在使用期限內能保有一定之服務性與功能性，本研究蒐整一般坑道及國外坑道處置相關技術報告，就影響坑道穩定之因素進行蒐整與研析，以作為處置坑道穩定性評估項目之參考。此外，亦針對第二章有關SFR低放處置窖的封閉規劃提出綜合研析，以作為處置坑道封閉後之長期安全評估參考。

4.1 坑道處置穩定性評估項目

4.1.1. 處置坑道與一般地下坑道在坑道穩定與功能需求之異同分析

根據一般坑道的建造經驗，其在開挖期間圍岩與一次支撐(包括噴凝土、鋼絲網與岩栓等)即已達成力平衡狀態，圍岩變形穩定或趨於緩和後才設置的二次混凝土襯砌，基本上為美觀坑道結構與加強防護之設計，受力大小理論上應遠小於襯砌材料之強度。然國內外營運中隧道檢測與維護經驗顯示，坑道襯砌表面常發現裂縫、滲水、龜裂等異狀，顯示坑道建造完成後並非全然穩定(王泰典等人，2012)。

根據行政院原子能委員會核能研究所2013年委託研究報告「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術服務」(王泰典等人，2012)，指出既有一般坑道設計方法與規範，於工址調查的選線、設計階段，其調查項目主要包括地形調查、地質調查、以及環境調查等，施工階段著重在開挖中坑道內圍岩變形量監測，及其他地質災害之調查與預防，施工後著重在施工完成後對整體環境的影響調查。換言之，既有一般坑道的調查理念著眼於評估工程地質如地形、地質、水文地質等條件，對整體工程施工過程安全性與穩定性之考量，於竣工後環境參數的變異、外力作用對未來坑道穩定性的影響調查與評估並未多作著墨，主要係一般坑道營運年限多數以百年作為設計基準，且一般坑道穩定性僅涉及坑道功能的維持，其影響的空間亦僅限區域尺度，不若處置坑道長期穩定性與否牽涉污染物傳輸的影響範圍甚廣。

相較之下，處置坑道因嚴謹的場址特性調查項目，對場址的特性掌握高於一般坑道工程，除需格外重視開挖及營運階段之安全性外，亦需考量處置設施穩定性之影響項目。在處置坑道穩定性考量前提下，其與一般坑道場址特性調查項目的差異，主要有下列二點：

A. 時間與空間尺度上的差異：

黃燦輝(2013)指出一般坑道與處置坑道在時間與空間尺度上之差異，如圖4.1-1，一般坑道工程時間上考量為百年，空間上考量尺度為百公尺，處置坑道在時間與空間尺度上的考量較一般坑道工程嚴謹，如何獲得具代表性的場址特性參數，為處置坑道長期穩定性考量的關鍵課題。爰此，考量各種獲得場址特性參數方法的尺度，可明確看出以既有一般坑道的全尺度試驗，佐以地質演化過程的考量，應為獲取處置坑道場址特性參數的可行性作法。

B. 場址特性調查參數之差異：

在場址特性調查參數部分，需考量水力-應力-化學因素相互耦合效應的影響，並比較既有一般坑道與處置坑道於設計目標、調查項目等規範之差異，處置坑道調查項目亦考量地質演化過程包括風化、侵蝕、以及邊坡滑動等相關課題對處置坑道的影響，以確保處置坑道之長期穩定。

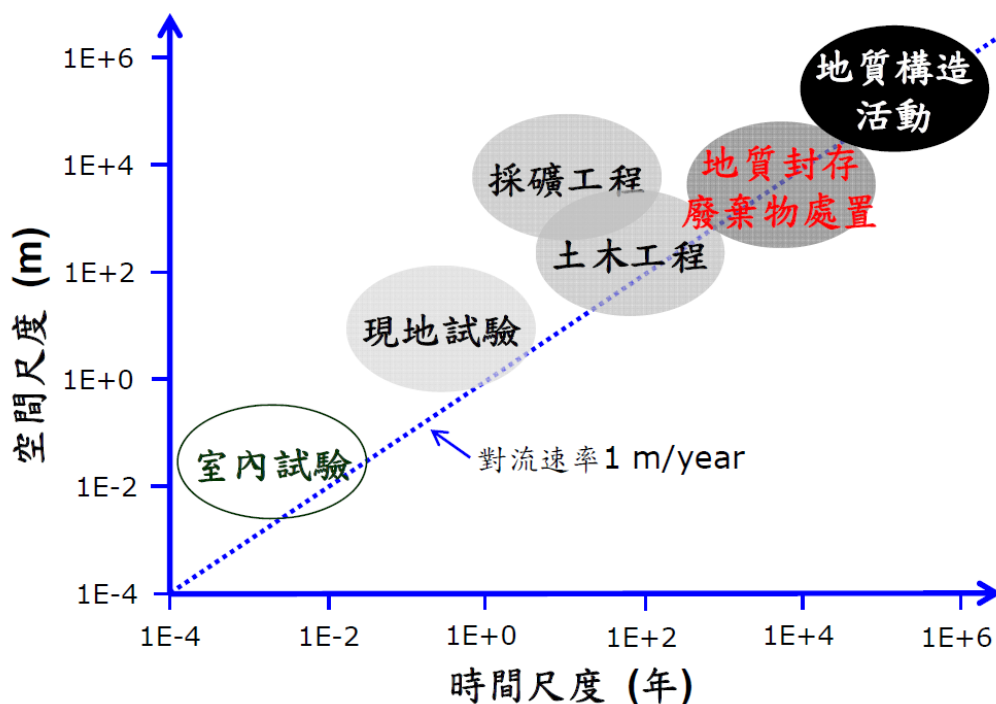


圖4.1-1 一般坑道與處置坑道於時間與空間尺度上之差異(黃燦輝，2013)

4.1.2. 一般坑道結構服務性與安全性之影響因素

A. 影響坑道服務性與結構安全性之關鍵因子

根據國際隧道協會(International Tunnelling Association, ITA)提出之隧道設計準則(Guidelines for the Design of Tunnels)(ITA, 1988)，述及地下結構物可能因下列幾種因素失去其原本應有的服務性(serviceability)與結構安全性(structural safety)：

- (1) 坑道結構喪失水密性(watertightness)；
- (2) 變形超出容忍值；
- (3) 在坑道使用年限內，其結構耐久性不足；
- (4) 因結構元件(structural element)材料強度局部喪失(exhausted locally)，致經常性維修；
- (5) 支撐技術(support technique)失敗或受損；
- (6) 材料強度喪失導致坑道結構破壞或變形；
- (7) 因整體結構不穩定導致坑道結構倒塌(collapse)。

考量處置坑道其在坑道服務性與結構安全性應較一般坑道要求為高，因此，上述各項因子對處置坑道長期穩定性之影響應一併納入考量。

B. 一般坑道結構之支撐系統

有鑑於坑道結構之安全性與坑道支撐系統有關，如何確保坑道結構安全無虞，且能保持原設計之功能性與服務性，實屬重要課題。有關坑道結構支撐系統之發展，實與Terzaghi所提出的岩壓理論有關，在1950年代後期至1970年代之間，隧道支撐構件已逐漸由鋼支保取代木支保，以抵抗隧道頂拱可能產生之岩石荷重，支撐設計上屬於剛性支撐之觀念，即利用尺寸較大、剛度較強的構件，如重型鋼支保配合矢板、楔塊，以確保隧道穩定。此一支撐設計法又稱美國鋼支保工法(ASSM)，相較於現今的支撐技術，亦稱為「傳統工法」。

於自1970年代後期迄今，隧道施工的主流已由傳統工法所代表的剛性支撐，逐漸蛻變成新奧工法所倡導的半剛性支撐。西元1982年東線鐵路拓寬工程之自強隧道，為台灣首次全面採用此一支撐系統之案例。所謂半剛性支撐系統係以噴凝土、輕型鋼支保與岩栓作為主要支撐構件；其中，噴凝土扮演著關鍵性的角色，此元件能在開挖初期迅速地噴附於開挖面，並於短時間內形成一薄殼狀結構，配合後續施工的輕型鋼支保與岩栓等構件，形成一完整而具有基本約束力的承載拱圈，使岩盤本身在經過適當變形後，得以在支撐系統與岩盤自持力間尋求一穩定之平衡點，以確保隧道安全。有關前述「傳統工法」與「新奧工法」之比較，如圖4.1-2所示，此外，針對新奧工法所採用的支撐構件種類、規範與規格、優缺點等，如表4.1-1所示。

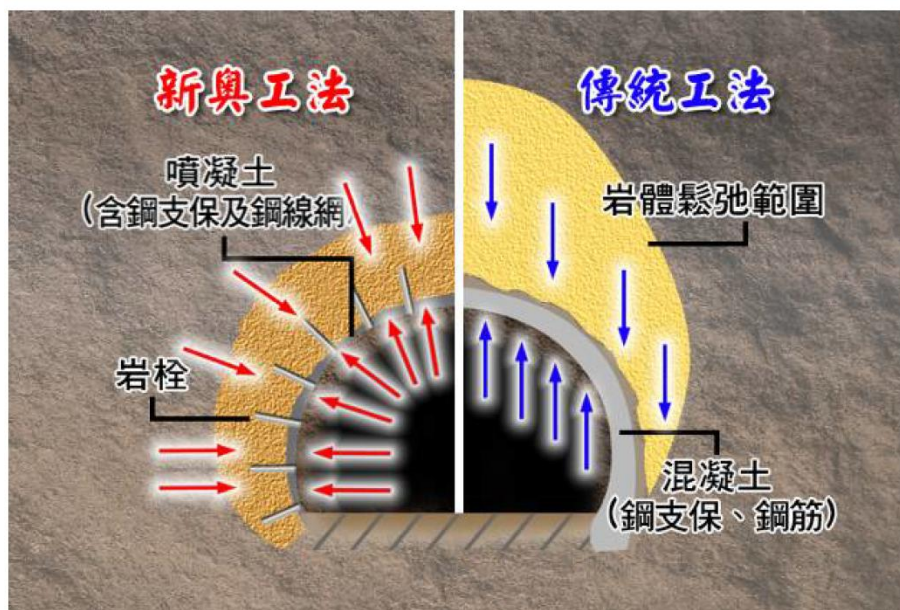


圖4.1-2 「傳統工法」與「新奧工法」之比較(張吉佐等人，2007)

表4.1-1 一般坑道結構採用的支撐構件 (Hoek and Wood, 1987)

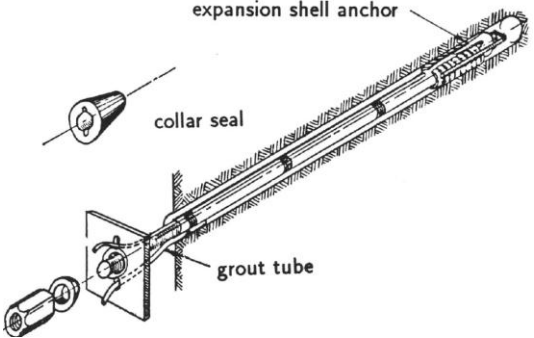
支撐構件類別	說明
 <p style="text-align: center;">岩錨 (Mechanically anchored, tensioned rock bolt)</p>	<p>規範與規格</p> <ul style="list-style-type: none"> Steel designation : ASTM A 615 (Grade 60) or ASTM A 722 (Grade 150) Yield stress: 414 MPa or 1034 MPa Steel diameter: 19 mm to 35 mm Hole diameter: 41 mm to 63 mm Length: variable <p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> 安裝後即可採用氣動扳手 (impact wrench)、扭力扳手 (torque wrench) 或油壓千斤頂施加預力，之後再進行灌漿 在品質良好的岩體內可提供可靠的錨定效果 屬永久性支撐，於土木工程相關領域所廣泛採用 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> 安裝過程宜由技術人員進行 安裝過程容易造成灌漿管破損

表 4.1-1 一般坑道結構採用的支撐構件(續) (Hoek and Wood, 1987)

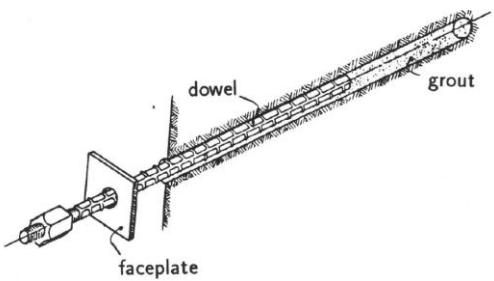
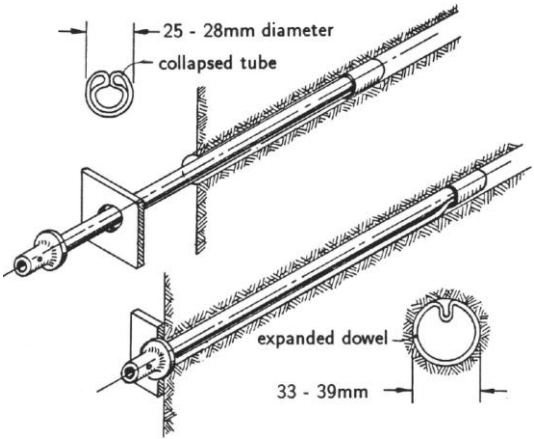
支撐構件類別	說明
 <p style="text-align: center;">岩釘 (Untensioned grouted dowel)</p>	<p>規範與規格</p> <ul style="list-style-type: none"> Steel designation : ASTM A 615 (Grade 60) Yield stress: 414 MPa Steel diameter: 19 mm to 25 mm Hole diameter: 35 mm to 38mm Length: variable <p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> 安裝容易，成本較低 可使用樹脂膠囊黏住整支岩釘藉以增加與岩石的鍵結力 廣泛應用於採礦工程 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> 無法施加預力 樹脂效期有限
 <p style="text-align: center;">摩擦式岩錨 (Friction anchored rock bolt)</p>	<p>規範與規格</p> <ul style="list-style-type: none"> Yield load: 130 kN Tube diameter: 26 mm Hole diameter: 33 mm to 39 mm Length: Up to 8 m Inflation pressure: 20 Mpa <p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> 安裝容易且快速、鑽孔深度無需過深 安裝後可即刻提供支撐 適用於不同的岩體條件 適用於中長期的支撐條件，大多用於採礦工程，目前在隧道工程已漸被採用 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> 安裝過程需配合唧筒 避免安裝過程產生剝落，部分岩盤條件需使用套筒

表 4.1-1 一般坑道結構採用的支撐構件(續) (Hoek and Wood, 1987)

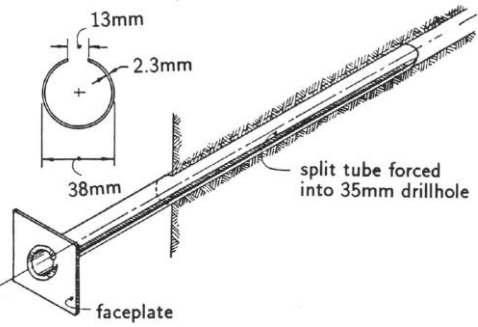
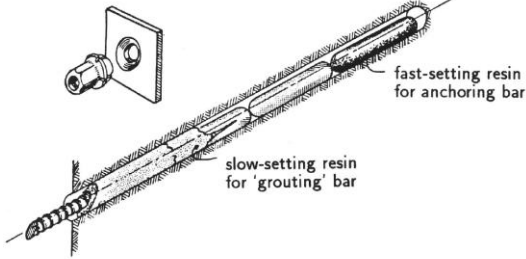
支撐構件類別	說明
 <p style="text-align: center;">摩擦型錨桿 (Friction anchor or split set)</p>	<p>規範與規格</p> <ul style="list-style-type: none"> • Yield load: 90 kN • Tube diameter: 33 mm, 39 mm and 46 mm • Hole diameter: 32 mm, 35 mm and 41 mm • Length: variable <p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 安裝容易且快速，成本較低(比岩釘價廉) • 適用於持續移動中的岩體及開炸面的穩定 • 適用於輕量、短期的支撐條件，大多用於採礦工程，目前在土木工程有些許的應用 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 無法施加預力 • 容易因鑽孔孔徑過大或太小而導致安裝失敗 • 容易因銹蝕問題影響其長期支撐效果
 <p style="text-align: center;">樹脂灌漿張力錨桿 (Resin grouted, tensioned threaded bar)</p>	<p>範與規格</p> <ul style="list-style-type: none"> • Steel designation : ASTM A 615 (Grade 60) or ASTM A 722 (Grade 150) • Yield stress: 414 MPa or 1034 MPa • Steel diameter: 19 mm to 35 mm • Hole diameter: 41 mm to 63 mm • Length: variable <p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 安裝容易且快速，短期內可提供非常高的錨定效果，適用在品質較差的岩體條件 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 樹脂附著(凝聚)力有賴於樹脂的有效混合，其品質取決於生產過程的管控 • 材料成本較高，且效期有限，特別在高溫環境下其效期折減顯著

表 4.1-1 一般坑道結構採用的支撐構件(續) (Hoek and Wood, 1987)

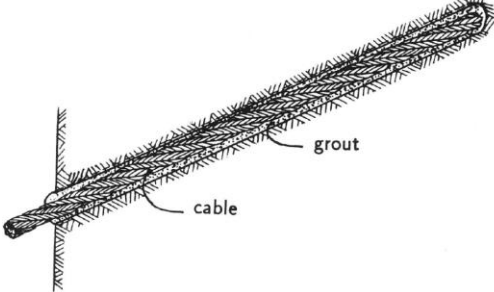
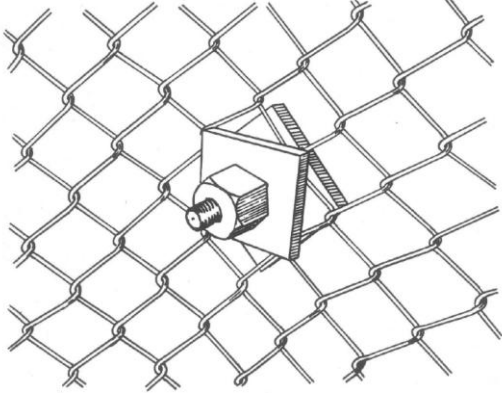
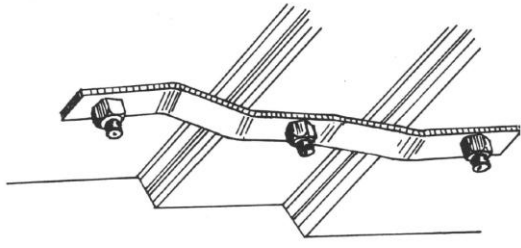
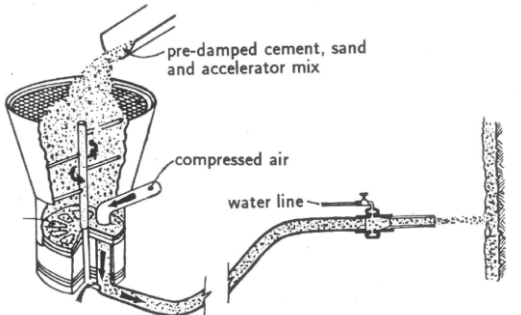
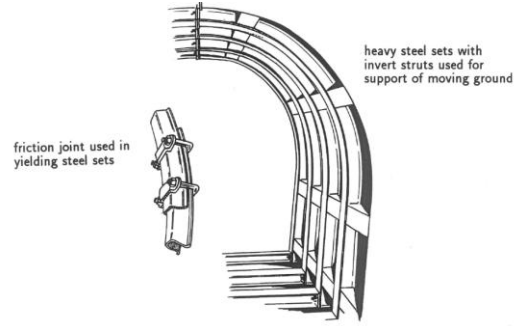
支撐構件類別	說明
 <p style="text-align: center;">灌漿錨索 (Grouted cable bolt)</p>	<p>範與規格</p> <ul style="list-style-type: none"> • Yield stress: 1770 MPa • Yield load: 500 kN • Cable diameter: 20 mm • Hole diameter: 35 mm • Lengths: any length required <p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 成本較低，且任何錨定長度或較小孔徑的鑽孔均適用 • 若能適當地安裝，將可提供足夠且耐久的加勁效果 • 適用各種不同的岩體條件，且抗腐蝕能力佳 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 配合適當的安裝過程，可施加預力 • 錨索加載前，需確定水泥漿已經過足夠的養護時間材料成本較高，且效期有限，特別在高溫環境下其效期折減顯著
 <p style="text-align: center;">鋼絲網 (Mesh)</p>	<p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 應用於穩定體積較小的鬆動岩塊，或防止岩塊掉落 • 區分鋼絲網柵欄(chainlink mesh)與點焊鋼絲網(wire mesh) • 成本較低且可快速安裝，配合面板與螺帽的使用，可用於頂拱鬆動岩塊的穩定 • 一般配合噴凝土使用，但有被鋼纖維噴凝土所取代之趨勢 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 無法提供其他較大岩塊的載重 • 容易因鄰近開炸作業形成的拋石而受損

表 4.1-1 一般坑道結構採用的支撐構件(續) (Hoek and Wood, 1987)

支撐構件類別	說明
 <p style="text-align: center;">繫條 (Strap)</p>	<p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 廣泛應用在採礦工程與土木工程 • 岩體因弱面分佈易形成往開挖面之剝落破壞，此時可採用繫條連接各個岩栓以加強開挖面穩定性 • 對於中等體積且厚度較薄的板狀岩塊，單獨採用岩栓或岩釘無法提供穩定支撐時，可配合繫條使用 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 對於存在多組弱面、形成塊狀鬆動之岩盤，此法並不適用
 <p style="text-align: center;">噴凝土 (Typical dry-mix shotcrete operation)</p>	<p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 廣泛應用在採礦工程與土木工程 • 岩體因弱面分佈易形成往開挖面之剝落破壞，此時可採用繫條連接各個岩栓以加強開挖面穩定性 • 對於中等體積且厚度較薄的板狀岩塊，單獨採用岩栓或岩釘無法提供穩定支撐時，可配合繫條使用 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 不適用於多組弱面、形成塊狀鬆動之岩盤
 <p style="text-align: center;">支堡 (Steel arches)</p>	<p>優點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 應用於穩定體積較小的鬆動岩塊，或防止岩塊掉落 • 區分鋼絲網柵欄(chainlink mesh)與點焊鋼絲網(wire mesh) • 成本較低且可快速安裝，配合面板與螺帽的使用，可用於頂拱鬆動岩塊的穩定 • 一般配合噴凝土使用，但有被鋼纖維噴凝土所取代之趨勢 <p>缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> • 無法提供其他較大岩塊的載重 • 容易因鄰近開炸作業形成的拋石而受損

根據表4.1-1所列一般坑道結構採用的支撐構件，本研究針對岩錨、岩釘、錨桿與錨索等支撐構件之長、中、短期支撐效果，整理如下，以供處置坑道若僅採一次支撐作為其坑道結構支撐系統之評估參考：

(1) 長期支撐：

- 岩錨(Mechanically anchored, tensioned rock bolt)，尤其在品質相對良好的岩體其效果更佳；
- 灌漿錨索(Grouted cable bolt)，適用在各種岩體條件，且抗腐蝕能力佳。

(2) 中期支撐

摩擦式岩錨(Friction anchored rock bolt)，銹蝕問題影響其長期支撐效果。

(3) 短期支撐

- 岩釘(Untensioned grouted dowel)，因受限於樹脂效期；
- 摩擦型錨桿(Friction anchor or split set)，適用於輕量載重，銹蝕問題影響其長期支撐效果；
- 樹脂灌漿張力錨桿(Resin grouted, tensioned threaded bar)，短期內可提供非常高的錨定效果，但成本較高。

C. 岩栓抗腐蝕性試驗

為了解不同材質種類的岩栓其長期支撐效果及抗腐蝕性，本研究蒐整了Ä spö硬岩實驗室2013年(TR-13-10)(SKB, 2013)與2014年(TR-14-10) (SKB, 2014)之年度報告中，針對碳鋼岩栓、不銹鋼岩栓、熱浸鍍鋅岩栓與樹脂岩栓進行為期一年之岩栓腐蝕特性(corrosion property)試驗，如圖4.1-3所示，茲將試驗結果分述如后：

(1) 碳鋼岩栓

- 裸露部分有腐蝕，埋置部分則無。
- 岩栓腐蝕率：
在Muskö坑道部分，岩栓腐蝕率約 2.3 至 3.5 mm/year，金屬表面最大腐蝕深度為217 mm；在Ä spö HRL坑道部分，約 2.6 至 3.2 mm/year，金屬表面最大腐蝕深度為183 mm。
- 經塗抹濃度 3% 的NaCl：
Muskö坑道約 4.3 至 5.3 mm/year，金屬表面最大腐蝕深度為433 mm；Ä spö HRL坑道：約 4.3 至 5.9 mm/year，金屬表面最大腐蝕深度為 465 mm。

(2) 不鏽鋼岩栓

裸露與埋置部分均無腐蝕現象

(3) 熱浸鍍鋅岩栓

- 熱浸鍍鋅岩栓，其鍍鋅塗層厚度為 45 μm ，且分別就岩栓裸露部分，及埋至於水泥漿部分進行為期2年的觀察。

- 岩栓腐蝕率：
Muskö坑道約 6.1 至 7.2 mm/year，Ä spö HRL坑道約 5.8 至 6.9 mm/year。
 - 經塗抹濃度 3% 的NaCl：
Muskö坑道約 6.1 至 7.2 mm/year，Ä spö HRL坑道約 5.8 至 6.9 mm/year。
- 除了在裸露部分有白鏽(white rust)現象，在埋置段亦有白鏽現象，腐蝕速率為 20 mm/year，針對鍍鋅材質略高的腐蝕速率，高於施測單位預期。

(4) 樹脂岩栓

在裸露部分並無水泡(blistering)、裂縫與脫皮(peeling)等損傷現象。



圖4.1-3 Muskö與Ä spö HRL坑道進行為期一年的岩栓腐蝕特性(SKB, 2013)

Ä spö硬岩實驗室依針對岩栓腐蝕特性場址進行地下水環境pH值監測，其發現在鑽孔注入波特蘭水泥的第一年，其周圍地下水環境的pH值增加，但兩年後 pH值開始遞減並回復至未灌漿時的條件；此外，2014年度報告(TR-14-17)指出在含氯離子之環境條件下，不銹鋼岩栓與具塗覆環氧樹脂的鍍鋅岩栓不應視為具極長期之技術服務效能(very long technical service)。

另外，SFR自 1984 年起，採用 Boltometer法測試岩栓的安全狀況，Boltometer法採用電子儀器，是一種現場的非破壞試驗法(Thurner 1979, Bergman et al. 1983)，為瑞

典 Geodynamik 公司於 1980 年研發的非破壞性檢測器，如圖 4.1-4，專門用於檢測岩栓灌漿施工品質，目前廣泛應用於歐美地區。該試驗方法類似敲擊回音法，透過試驗資料分析並推估岩栓長度與周圍漿液包覆狀態，若漿液材料為聚脂樹脂(polyester resin)時，可檢測岩釘長度約 10 m；若為水泥砂漿材料，可測長度為 1 m (水灰比 0.28) 至 5 m (水灰比 0.5)，環氧樹脂(epoxy)可測長度為 1 m。

Class	Boltometer signal	Estimated bolt condition
A	No reflection	Optimum
B	Small flexural wave reflection	Reduced
C	Large flexural wave reflection	Insufficient
D	Compression wave echo and very large flexural wave reflection	Very poor or non existant *)



圖 4.1-4 Boltometer 法岩栓灌漿施工品質檢測器

1984-1986 年的興建期間，計有 316 支水泥灌注的岩栓進行測試，但前述岩栓均隨著施工作業以噴凝土覆蓋，無法再進行測試。因此，1987 年於現場施作了 42 支參考岩栓(reference rock bolts, Ks 40 ϕ 25, L = 3.65)及 3 支生產螺栓(production bolts, Ks 40 ϕ 25, L = 3.65)，為了長期的測試，2004 年又施作了 12 支參考岩栓(reference bolts, Ks 500ST ϕ 25, L = 3.6)。岩栓的測試重點是不能有任何的腐蝕狀況，以確保岩栓沒有受到地下水入滲的侵蝕；SFR 在營運階段埋設的測試岩栓均未有腐蝕狀況，顯示施工階段的防水措施良好。

根據上述國外經驗，如何增進岩栓防蝕並掌握其可能的腐蝕狀況，為處置坑道穩定性評估之重點。此外，根據本計畫前期研究，國內隧道發生裂縫與滲漏水的比例分別高達 92% 與 72%，較高於國外的 79% 與 23%。國內發生高比例滲漏水的原因，可能與國內早期隧道施工並無鋪設防水層，亦可能因國內隧道所處水文地質環境具充沛的地下水滲流條件、或岩體破裂較嚴重其裂隙聯通程度高於國外所致(楊長義等人，2015)。循此，針對岩栓此種地錨構造之防蝕保護，本文一併整理如附錄 2，供未來相關研究與應用參考

4.1.3. 處置坑道穩定性之影響因素

依據物料管理局2012年度委託研究計畫報告「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發」(王泰典等人, 2012), 及2014年度委託研究計畫報告「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)之研究, 藉由整理一般坑道在營運期間所產的襯砌裂縫、滲水與龜裂等異狀及肇因, 同時考量我國本土隧道案例顯示之滲漏水問題, 如圖4.1-5, 及其可能加速襯砌材料劣化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外力因素、環境因素與非外力因素。

A. 外力因素

主要係指坑道整體結構(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, 進而造成坑道襯砌產生破壞, 主要原因包括地震作用、邊坡運動與開挖擾動之影響。

B. 環境因素

係指因國內特殊之地質與氣候環境影響與發育所致, 使土壤與岩石之「大地工程特性」除一般之強度、變形性與滲透性相異於國外其他國家外, 尚具有:(1)風化作用強烈, 使岩石弱軟化迅速;(2)岩石長期依時行為明顯, 強度與變形性依時變化大。

C. 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。

上述影響坑道結構長期穩定項目、肇因、異狀與檢監測項目, 如表4.1-2所示。

此外, 前述坑道處置係利用地表下方一定深度內的坑道或是於山區開挖處置坑道, 坑道的長期穩定性與所處母岩岩石力學特性有關。根據Positive(2012)針對Olkiluoto處置場長期安全之考量, 建議其在運轉前能就所處母岩岩石力學特性提下相關之監測項目, 包括了(i)應力重新分佈、(ii)既有裂隙的在活動/新裂隙的產生、(iii)剝落、(iv)熱力影響、(v)構造基岩的位移及(vi)地震事件的影響, 如表4.1-3所示。

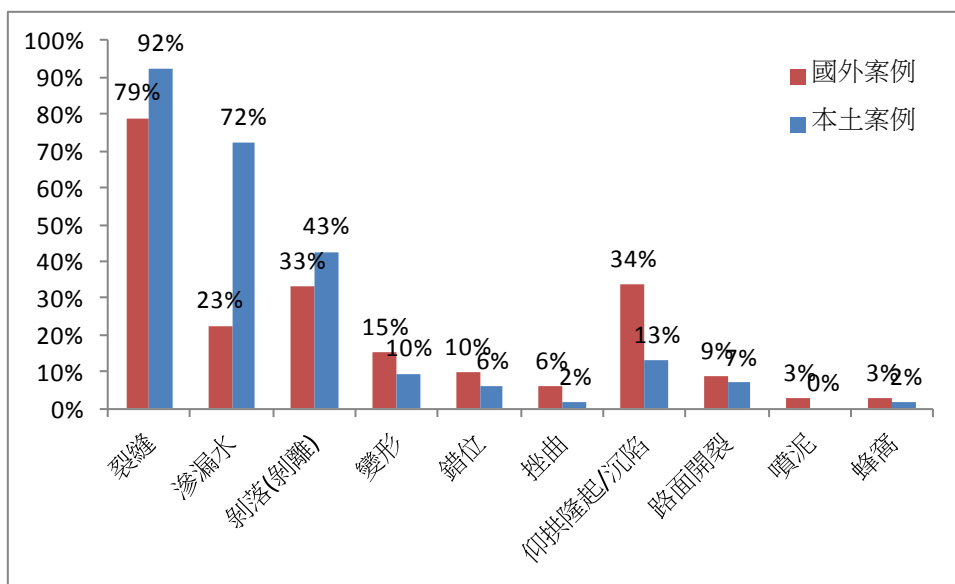


圖4.1-5 國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較(楊長義與李宏輝，2014)

表4.1-2 處置坑道襯砌結構穩定性之檢監測項目(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	檢監測項目
外力因素	地震作用	<ol style="list-style-type: none"> 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 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 襯砌目視檢查 2. 襯砌影像掃描 3. 襯砌裂縫擴展性 4. 內空變位量測 5. 隧道中線量測 6. 洞口段邊坡災害調查
	邊坡運動	<p>襯砌裂縫具偏壓特徵，例如：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 襯砌肩部產生開口性張力裂縫 ● 裂縫可能呈現縱向、環向與斜向型態 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 襯砌目視檢查 2. 襯砌影像掃描 3. 現地崩崖調查 4. 現地監測(地表位移、傾斜管、地滑計) 5. 隧道內監測(襯砌裂縫進展性、三維絕對座標內空量測、維修補強材劣化)
	開挖擾動	<ol style="list-style-type: none"> 1. 襯砌裂縫具塑性壓特徵： <ol style="list-style-type: none"> (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： <ol style="list-style-type: none"> (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 	<ul style="list-style-type: none"> ● 襯砌目視檢查 ● 襯砌影像掃描 ● 襯砌裂縫擴展性

		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	<ul style="list-style-type: none"> ● 襯砌目視檢查 ● 襯砌影像掃描 ● 襯砌裂縫擴展性
	依時性變形特性		
非力學因素	混凝土中性化	網狀裂縫	混凝土中性化試驗
	鋼筋保護層厚度不足	條狀裂縫	透地雷達探測
	鹼值粒料反應	龜殼狀裂縫	混凝土強度試驗
	混凝土澆置中斷(冷縫)	連漪狀裂縫	襯砌目視檢查
	襯砌背後空洞或厚度不足		透地雷達探測

表4.1-3 Olkiluoto處置場有關處置母岩岩石力學特性之監測項目 (Posiva, 2012)

Objectives						Process	Targets	Overlap, comments
1: Long-term safety (site)	2: Site characterisation and modelling	3: Environmental impact	4: Feedback for constructors and design	5: EBS performance	6: Compulsory radiological monitoring			
X	X		X			Stress redistribution	Rock displacements Visual observations Microseismic activity	
							Microseismic activity	
X	X					Reactivation of existing fractures / zones, formation of new fractures	Displacement measurements in fractures/fracture zones	Changes in fracture aperture and observed fracture slips possibly affect hydraulic properties
							Visual observations	
	X		X			Rock creep	Rock displacements Visual observations Loads in rock bolts	
X	X		X			Spalling	Visual observations MS-monitoring	
X	X	X		X		Thermal evolution	In-situ temperature measurements Temperature monitoring	Flow log measurements and geophysics give also such data
X	X	X				Isostatic uplift/bedrock stability	Rate of regional land uplift Relative uplift within Olkiluoto	
X	X					Tectonic bedrock movements	Horizontal displacements	
X	X					Seismicity	Magnitudes, locations, slips and source radii of seismic events	

4.2 處置場封閉後之長期安全評估項目

根據第二章蒐整瑞典SFR有關處置場封閉後之長期安全考量，係根據SFR整體長期安全原則：「**限制長半衰期放射性核種活度、及遲滯放射性核種**」之前提，依處置窖組成要素分別提出潛在長期安全分析項目，其中處置場之組成要素包括廢棄物形式、廢棄物包件方式、廢料包件周圍的灌漿、混凝土結構、噴凝土、膨潤土及砂/膨潤土混合材、處置窖回填材料(破碎岩石/碎石)與封塞及其他封閉組件(調查鑽孔)等，各個組成要素需考量之潛在項目各有不同，如表2.5-2所示，例如在廢棄物形式部分，需考量放射性程度、平流傳輸的限制、力學穩定性、溶解作用限制、吸附作用與有利的水化學。

處置坑道結構有關之噴凝土，其需考量之長期安全分析項目包括力學穩定性(在運轉期，與岩栓一起評估)、吸附作用及有利的水化學。

此外，根據SFR初始狀態安全評估報告SR-PSU(SKB, 2014b)，有關低放處置窖1BLA與2-5BLA在封閉時之安全功能評估項目，包括了放射性、有限的平流傳輸作用、力學穩定性、有限的溶解作用、吸附作用及有利的化學特性等，如2.4.5節與2.4.6節所述。其中，與坑道結構有關者，SR-PSU僅指出噴凝土具增加處置窖穩定性之功能，並說明隨著時間愈久，噴凝土對處置窖穩定性的影響將越來越小。

此外，同樣在SFR初始狀態安全評估報告SR-PSU(SKB, 2014b)中，第12章闡述了處置窖在封閉時，其組成各部之特性與條件可藉由其定義的8項參數來描述。本研究僅針對低放處置窖1BLA與2-5BLA進行蒐整。

就長期安全評估而言，處置窖1BLA與2-5BLA僅具些許的工程障壁功能，其所採用的廢棄物包件(ISO 標準貨櫃)雖具有阻絕地下水流入廢棄物的功能，但並不視為工程障壁。在噴凝土與混凝土地板部分，其在長期安全評估上僅考慮其水泥成分的溶解對提高環境pH值的影響。

在處置窖2-5BLA部分，其沿著兩側岩壁設置了 9 m高的混凝土牆，有助於在運轉期間保護與維護廢棄物及其包件，但是就長期安全評估而言，所述之混凝土牆並不視為阻水障壁，僅考慮其水泥成分的溶解對提高環境pH值的影響，茲將處置窖1BLA與2-5BLA其在處置窖封閉時的特性描述參數整理如表 4.1-3。

綜整SFR處置場的規劃與經驗，其根據長期安全原則：「**限制長半衰期放射性核種活度、及遲滯放射性核種**」進一步提出處置場組成各部在封閉時(初始狀態)之安全功能，包括了放射性核種的滯留、降低水流流速、提升滯留能力與避免處置場周圍設置井設施，並無強調處置窖坑道結構的長期穩定性。

4.3 小結

本章蒐整研析國際資訊與國內相關主題之研究，期能就處置坑道與一般地下坑道在坑道穩定性與功能需求異同、一般坑道結構服務性與安全性之影響因素、SFR處置坑道

在長期安全上之考量及處置坑道(結構)長期穩定項目等，研擬(i) 處置坑道運轉期之穩定性與(ii)封閉後之長期安全評估項目，茲就蒐整之資訊研析結果，依上述二項整理如后：

A. 處置坑道運轉期之穩定性評估項目

- (1) 根據過去有關一般坑道在營運期間所產的襯砌裂縫、滲水與龜裂等異狀及肇因，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對處置坑道結構長期穩定之負面影響，可分別就外力因素、環境因素與非外力因素，及表4.1-1所列項目，作為訂定處置坑道(結構)長期穩定安全評估項目之參考。
- (2) 根據國際隧道協會(ITA)提出之隧道設計準則，闡述了影響地下結構服務性與結構安全性的關鍵因素計有八項，包括坑道結構喪失水密性、變形性超出容忍值、結構耐久性不足、結構元件材料強度局部喪失、支撐方法失敗或受損、材料強度喪失與整體結構不穩定等，如4.1.2節所述，上述因素肇因與可能影響之坑道結構異狀，已包括在表4.1-1所列項目。
- (3) 針對處置坑道(結構)支撐系統，包括岩栓、噴凝土與混凝土襯砌，應考慮其在處置坑道所處環境及使用年限內之材料強度與抗腐蝕特性之可能變化，以岩栓為例，可根據我國潛在之低放處置所處環境，同時參考Äspö硬岩實驗室之經驗，進行相關之岩栓抗腐蝕性試驗，或是未來在處置場建造與運轉期間，持續進行上述坑道結構支撐構件之檢測與監測。

B. 處置坑道封閉後之長期安全評估項目

- (1) 參考SFR低放處置窖1BLA與2-5BLA其在封閉前建議考量之安全評估項目，包括幾何參數、溫度、水文地質參數、應力、材料組成、地下水組成性質與氣體參數等。
- (2) 就處置坑道結構部分，坑道結構穩定性與支撐系統的安全評估並未納入。

表4.1-4 BLA與2-5BLA處置窖封閉前安全評估項目(SKB, 2014b)

參數(Variable)	1BLA(SFR1)與 2-5BLA(SFR3)	封塞(plugs)與其他封閉元件
幾何參數(Geometry)	<ul style="list-style-type: none"> 於建造階段用於加強岩壁穩定性的噴凝土，需評估水泥礦物的溶解作用造成環境 pH 值提高的影響 處置窖的凝土地板亦需評估 pH 值的變化 建造凝土 (construction concrete) 的孔隙率介於 9-15%，基於長期安全評估所需參數，建造凝土的孔隙率採 15%，噴凝土與水泥漿為 30%，碎石(macadam)亦採 30% 建造階段產生的凝土裂隙寬度不超過 0.1 mm 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
放射性強度 (Radiation intensity)	<ul style="list-style-type: none"> 低放處置窖不考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 不考慮
溫度(Temperature)	<ul style="list-style-type: none"> 溫度與周圍岩盤溫度相同，約 5-7°C 	<ul style="list-style-type: none"> 溫度與周圍岩盤溫度相同，約 5-7°C
水文地質參數 (Hydrological variables)	<ul style="list-style-type: none"> 相關的參數與 BMA 處置窖相同，包括凝土水力傳導係數與碎石水力傳導係數($>10^{-2}$ m/s) 水壓力等同靜水壓力 	<ul style="list-style-type: none"> 封塞採用凝土者，其水力傳導係數與 BMA 處置窖相同 碎石水力傳導係數$>10^{-2}$ (m/s) 用於聯絡坑道的膨潤土其水力傳導係數 $<10^{-10}$ (m/s)
應力(Mechanical stresses)	<ul style="list-style-type: none"> 凝土地板的作用應力來自廢棄物及其容器 2-5BLA 長軸向側牆承受地下水與回填土應力 	<ul style="list-style-type: none"> 膨潤土的回脹壓力由凝土結構承受
放射性核種 (Radionuclide)	<ul style="list-style-type: none"> 存放於各處置窖、筒倉的放射性核種採低濃度存放，其溶解度均 	<ul style="list-style-type: none"> 不考慮

inventory)	視為不出過上限值	
材料組成(Material composition)	<ul style="list-style-type: none"> • 混凝土材料組成參考 BMA 處置窖 	<ul style="list-style-type: none"> • 緩衝材料則由膨潤土及碎裂的岩石(crushed rock)以 30/70 的比例混合而成 • 混凝土封塞採用標準混凝土 • 品質良好之膨潤土
地下水組成性質 (Water composition)	<ul style="list-style-type: none"> • BLA 處置窖未來將充滿地下水，地下水組成對混凝土的影響討論可參考 BMA 處置窖 	<ul style="list-style-type: none"> • 同左
氣體參數(Gas variables)	<ul style="list-style-type: none"> • 當處置窖與聯絡坑道充滿地下水後，將留有部分殘存的氣體 	<ul style="list-style-type: none"> • 同左

第五章、坑道處置穩定性與長期安全評估相關之工程地質與岩石力學特性參數

本章蒐整國內一般坑道相關之規劃與建造經驗，尤其是地質條件、工程地質暨岩石力學特性、攸關坑道結構穩定性之岩體分類與支撐工法等相關資訊，並與國外低放處置案例進行比較與討論，期由國內、外處置場母岩工程地質與岩石力學特性之綜合評析，在符合本土地質條件前提下，研擬我國未來發展坑道處置在運轉期之穩定性與封閉後長期安全評估要項所需之工程地質與岩石力學特性參數。

5.1 國內一般坑道規劃與建造經驗

考量「台東縣達仁鄉」可能為我國未來低放射性廢棄物候選場址之一，且「坑道處置」已為國內有關低放最終處置之發展目標(經濟部，2001)，故為瞭解潛在候選場址之地質條件、工程地質暨岩石力學特性，及影響未來處置坑道建造及坑道結構長期穩定性有關之岩體分類與隧道斷面支撐工法，本研究參考前期研究(楊長義與李宏輝，2014)已蒐整之「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)安朔隧道檢測評估資料，及本案新增蒐集「台9線南迴公路拓寬改善後續計畫(安朔至草埔段)新闢四車道工程」之相關工程規劃資訊(藍維恭等人，2015)，依前述地質條件、工程地質暨岩石力學特性與岩體分類與隧道斷面支撐工法等方面分別介紹。

5.1.1 地質條件

根據中央地質調查所五萬分之一之大武(1993年)及恆春(1991年)圖幅，潛在可能場址區域內出露的岩層為潮州層，其岩性主要由厚塊狀硬頁岩或板岩所組成，僅有少許變質砂岩夾雜其中。由於板岩帶內的泥質沉積物有較高的可塑性，而且比較軟弱，經過地殼變動後多形成剪力褶曲，再破裂成一個複雜的斷塊系統。許多複雜的褶皺構造因而出現，同時亦產生岩石的流動和板劈理，區域內岩層位態及劈理傾角變化頗為複雜(經濟部，2001)。

另根據「台9線南迴公路拓寬改善後續計畫」於自台東縣達仁鄉安朔村至屏東縣獅子鄉草埔村新闢四車道公路工程，其中的重要工程之一為安朔草埔隧道，隧道長度約4.6公里，如圖5.1-1，採雙孔單向車道設計，主隧道之行車淨空高為4.6公尺，每車道寬為3.5公尺。該計畫區域之地層主要為潮州層、河階堆積層及現代沖積層，如圖5.1-2。潮州層岩性單調，主要以板岩及硬頁岩為主，偶夾砂岩。計畫路線範圍內並無活動斷層構造通過，主要之地質構造型態為褶皺；沿線緊密拖曳褶皺構造相當普遍，沿板岩劈理面之剪裂帶發育亦相當常見，地層較為破碎。根據岩層位態變化，該路線主要地質構造包括草埔背斜等。(藍維恭等人，2015)

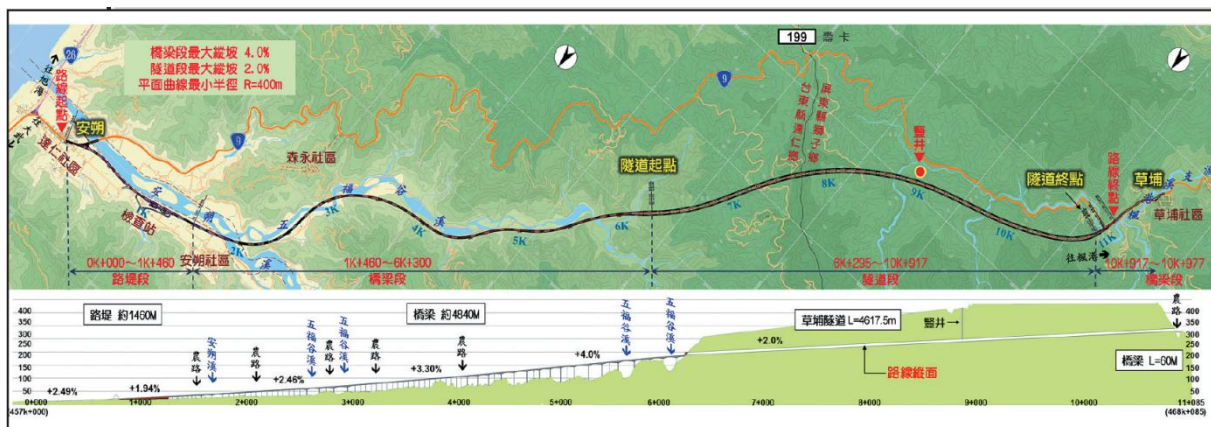


圖5.1-1 台9線南迴公路拓寬改善後續計畫路線平、縱斷面圖(藍維恭等人, 2015)

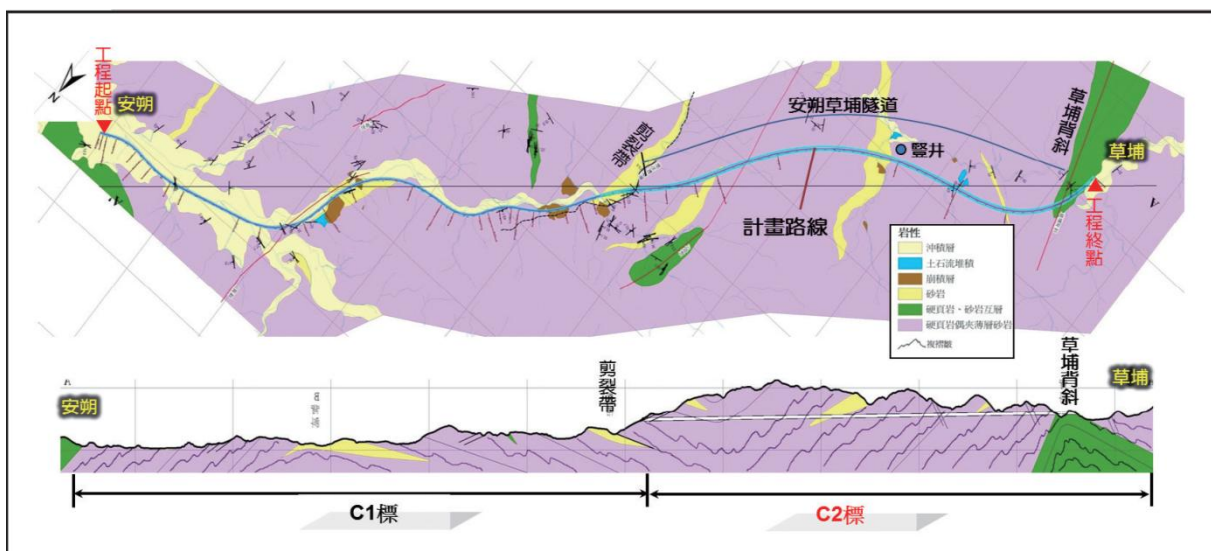


圖5.1-2 南迴公路安朔至草埔段地質平、剖面圖(藍維恭等人, 2015)

5.1.2 工程地質暨岩石力學特性

根據經濟部2001年提出之建議候選場址遴選報告(經濟部, 2001), 藉由「台東縣達仁鄉」鄰近地區之工程案例資料蒐整研析, 顯示該區所屬硬頁岩新鮮岩心的單壓強度平均範圍落在 200 kg/cm^2 至 500 kg/cm^2 (即 19.61 MPa 至 49 MPa), 大致屬於中硬岩類。若處置場規劃採用淺地表坑道式處置方式, 處置場岩覆應多在100公尺以上, 山體北斜面侵蝕溝較發達, 研判多沿節理及劈理面隨機發育, 局部侵蝕溝發達地點覆蓋可能低於40公尺。

此外, 根據「台9線南迴公路拓寬改善後續計畫」之地質探查成果, 由地球物理探測成果顯示在豎井處附近淺層(深度 $< 50 \text{ m}$)為較風化或破碎之硬頁岩, 深度大於 50 m

後之地層為劈理或裂隙略發達之砂岩/硬頁岩層段，地下水位高且豐沛(藍維恭等人，2015)。

5.1.3 岩體分類與隧道斷面支撐工法

根據「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)，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+719-36K+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，CSIR之地質力學分類法(Geomechanics Classification System) 主要根據六項因素分別評分，其總和即為岩體評分(Rock Mass Rating，簡稱RMR)，其評分細節如表5.1-1 所示。

根據南迴線安朔隧道施工經驗，其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=N37~47W/89NE、J2=N69~84E/85SE 及 J3=N33~43E/86SE，二組劈理位態為C1=N20E.48SE與C2=N26W/38NE，破壞型式以岩塊墜落、岩塊翻倒與材料破壞為主，如表5.1-2所示。

在隧道斷面支撐工法部分，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5.1-3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。

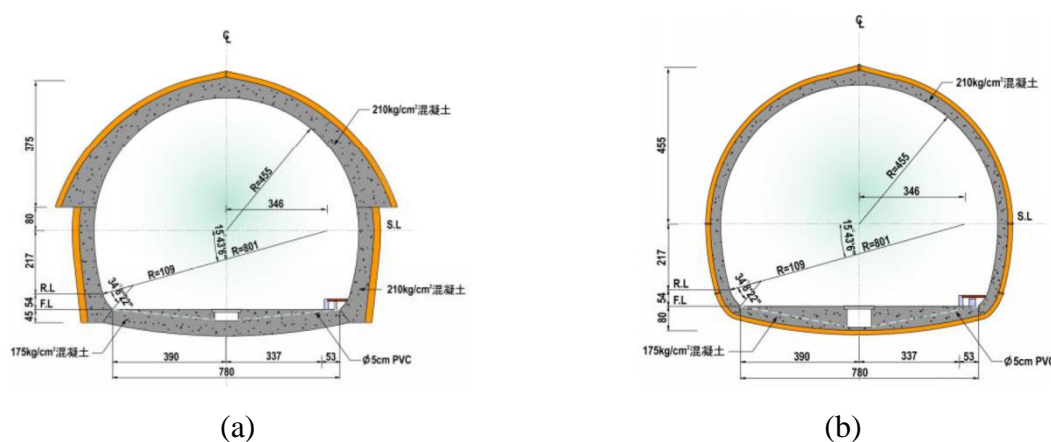


圖5.1-3 安朔隧道支撐工法斷面圖：(a)雙線隧道美國鋼支堡工法標準斷面圖；(b) 雙線隧道新奧工法標準斷面圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

而台9線南迴公路安朔草埔隧道沿線採用之岩體分類法，係依共工程委員會建置之「臺灣岩體分類與隧道支撐系統—PCCR系統」(參考自公共工程施工綱要規範第02403章)為其分類依據，並進一步針對各種地質狀況對應之岩體分類系統提出隧道支撐建議。PCCR岩體分類系統依據地質材料特性、岩體相關強度特性、岩體對水的敏感性，並參考岩層地質年代辦理岩盤類別劃分，將台灣全區之地層劃分為A、B、C、D四種岩盤類別，如表5.1-3至表5.1-5所示，依據各類岩盤工程特性，以適當之定量或定性岩體評級標

準辦理岩體分級。據此，隧道沿線地質主要為脊樑山脈之變質岩及亞變質岩，除洞口段及特殊地質段外，歸屬A岩類，隧道沿線之岩體依岩性、地質構造及地下水等工程特性，如圖5.1-4。

依隧道地質條件、長度、斷面大小、使用機械種類與施工方式等來選擇可行之開挖方式，同時為減少對圍岩之擾動及超挖量，故採「鑽炸為主、機械修挖為輔」。在隧道初期支撐設計部分，主要是噴凝土、鋼絲網(或鋼纖維混凝土)、岩栓(灌漿式岩栓與自鑽式岩栓)與鋼支保支撐，隧道開挖支撐規劃如圖5.1-5所示。隧道採二向度分析，主隧道、橫坑、通風管道及豎井等複雜地下交叉段則依需要採用簡化二向度分析或三向度分析。

在二次襯砌部分，隧道開挖後採用半剛性支撐，岩盤已達新的平衡應力，惟隧道尚有：(i) 部分地下水壓、(ii) 岩體長期岩壓、(iii) 岩栓老化、及其(iv)它無法預知之因素等，故為顧及隧道安全與增進通風效果，並為維持較佳觀瞻等需要，全線均設鋼筋混凝土襯砌，混凝土強度並由 245 kg/cm^2 提高至 280 kg/cm^2 ，另視地質及附屬設施等需要配筋補強。

有關褶皺密集地質施工考量部分，該區主要受褶皺作用，其軸部易形成破碎帶(背斜軸)或蓄積地下水(向斜軸)，隧道施工時易遭遇湧水及抽坍等現象。目前處理對策考量如下(藍維恭等人，2015)：

A. 湧水之對策工法

路線可能遭遇之地下水問題，施工時藉助排水鑽孔來預先掌握地下水情況。湧水處理之對策可分為湧水之排除與阻止兩方式，以工程豎井開挖遭遇湧水為例，其處理工法採用化學灌漿工法克服。

B. 剪裂破碎帶之對策工法

隧道施工遭遇剪裂破碎帶，可能發生因地下水沿破碎帶湧出，或者造成隧道開挖後變形程度過大之情形。隧道開挖前採用長距離前進探查孔、隧道震波探測(TSP)等，確認隧道開挖面前方斷層破碎帶位置與影響範圍及滲水潛能；並以排水工法、阻水工法(化學灌漿、水泥系灌漿或兩法併用)預先減輕或避免湧水之影響，再搭配管幕工法或地盤改良等措施因應。

5.1.4 小結

本節依我國未來低放射性廢棄物候選可能場址，蒐整鄰近場址相關公共工程資訊，包括運轉中之台鐵南迴線安朔隧道、及建造中之台9線南迴公路安朔草埔隧道等經驗，茲將相關成果依地質條件、工程地質暨岩石力學特性、岩體分類與隧道斷面支撐工法等綜整如后：

A. 地質條件

潛在可能場址區域內出露的岩層為潮州層，其岩性主要由厚塊狀硬頁岩或板岩所組成，僅有少許變質砂岩夾雜其中，經過地殼變動後多形成剪力褶曲，區域內岩層位態及劈理傾角較多變(經濟部，2001)。

B. 工程地質暨岩石力學特性

該區所屬硬頁岩新鮮岩心的單壓強度平均值介於 19.61 MPa 至 49 MPa 之間，大致屬於中硬岩類。若處置場規劃採用坑道掩埋方式，處置場岩覆應多在100公尺以上，山體北斜面侵蝕溝較發達，研判多沿節理及劈理面隨機發育，局部侵蝕溝發達地點覆蓋可能低於 40公尺(經濟部，2001)。根據「台9線南迴公路拓寬改善後續計畫」之地質探查成果，距地表深度 50公尺以內為較風化或破碎之硬頁岩，深度大於 50公尺以下之地層為劈理或裂隙略發達之砂岩/硬頁岩層段，地下水位高且豐沛(藍維恭等人，2015)。

C. 岩體分類與隧道斷面支撐工法

(1) 台鐵南迴線安朔隧道

岩性以硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之，按CSIR岩體分類為第III至V類；隧道斷面採雙線馬蹄型設計，施工方法視現地岩覆深度、地質條件、隧道斷面尺寸則分別採用(i)明挖覆蓋工法、(ii)美國鋼支保支撐工法(傳統工法)、與(iii)新奧工法。

(2) 台9線南迴公路安朔草埔隧道

隧道沿線地質主要為脊樑山脈之變質岩及亞變質岩，依據台灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR系統)之岩體分類，隧道沿線除洞口段及特殊地質段外，其餘均屬A岩類。(i)開挖工法採「鑽炸為主、機械修挖為輔」，初期支撐設計部分，主要是噴凝土、鋼絲網(或鋼纖維混凝土)、岩栓(灌漿式岩栓與自鑽式岩栓)與鋼支保支撐。(ii)在二次襯砌部分，考量地下水壓、岩體長期岩壓、岩栓之老化及其它無法預知之因素等，全線均設鋼筋混凝土襯砌，混凝土強度並由 245 kg/cm² 提高至 280kg/cm²，並視地質及附屬設施等需要配筋補強。

表5.1-1 CSIR-RMR岩體評分表(行政院公共工程委員會)

A.分類項目與評分

(1)	岩石強度	點荷重指數 kg/cm ²	>100	40~100	20~40	10~20	此強度範圍內 以單壓強度為準		
		單壓強度 kg/cm ²	>2,500	1,000~2,500	500~1,000	250~500	50~250	10~50	<10
	評 分		+15	+12	+7	+4	+2	+1	0
(2)	RQD %		90~100	75~90	50~75	25~50	<25		
	評 分		+20	+17	+13	+8	+3		
(3)	弱 面 間 距		>2m	0.6~2m	200~600mm	60~200mm	<60mm		
	評 分		+20	+15	+10	+8	+5		
(4)	弱 面 狀 況		不連續，開口 緊閉，岩壁甚 粗糙，新鮮	開口<1mm 岩壁略粗糙， 輕度風化	開口<1mm 岩壁略粗糙， 高度風化	連續，具擦痕 或含泥<5mm 或開口1-5mm	連續，含泥>5mm 或開口>5mm		
	評 分		+30	+25	+20	+10	0		
(5)	地下 水 情 況	10m長隧道之 流量(l/min)	0 或	<10 l/min 或	10~25 l/min 或	25~125 l/min 或	>125 l/min 或		
		弱面水壓/ 主應力	0 或	<0.1 或	0.1~0.2 或	0.2~0.5 或	>0.5 或		
	一般滲水情況		全乾	潮	濕	滴水	流水		
	評 分		+15	+10	+7	+4	0		

B.評分調整

弱 面 方 位 (走向、傾角)		很有利	有利	可	不利	很不利	
(6)	評 分	隧 道	0	-2	-5	-10	-12
		基 礎	0	-2	-7	-15	-25
		岩 坡	0	-5	-25	-50	-60

C.弱面方向對評分之影響

弱面走向垂直隧道軸向				弱面走向平行隧道軸向		任何弱面走向
隧道開挖方向與 弱面傾向相同		隧道開挖方向與 弱面傾向相反				
弱 面 傾 角						
45°~90°	20°~45°	45°~90°	20°~45°	45°~90°	20°~45°	0°~20°
很有利	有利	可	不利	很不利	可	不利*


<p>RMR 值=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)=</p> <p>支撐型式:</p> <p>備註:</p>	<p>地質描繪</p> 
---	---

表5.1-2 安朔隧道地質條件總表(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 隧 道	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)

表5.1-3 「台灣岩體分類與隧道支撐系統（簡稱PCCR系統）」之岩體類別劃分基準(行政院公共工程委員會)

岩盤類別	劃分基準
A 岩類	包括台灣地區所有的變質岩類及亞變質岩類、火成岩類中除火山角礫岩的岩層、沉積岩類中具高強度者。大致可以岩心單壓強度高於 25 MPa 為劃分參考基準。
B 岩類	泛指西部麓山帶西緣丘陵區沉積岩中，強度較低之已固結岩層。大致可以岩心單壓強度介於 5 ~ 25 MPa 為劃分參考基準。
C 岩類	包括中南部西部麓山帶晚上新統至更新統、東部海岸山脈帶膠結不佳之沉積岩或混同層。大致可以單壓強度小於 5 MPa 為劃分參考基準。此外，亦涵蓋所有粗顆粒含量少於 50%，力學行為受控於細粒料之複合材料地層。
D 岩類	泛指粗顆粒含量超過 50%，膠結程度不拘之複合地質材料；包含一般所謂之礫石層岩體、火山角礫岩、火山集塊岩等等。弱面多寡以及含水量高低對於整個岩體強度所造成的影響程度大小，係隨個案而異。

表5.1-4 台灣A、B岩類之岩體分級標準表(行政院公共工程委員會)

岩體級別	A 岩類 RMR 值範圍	B 岩類 RMR 值範圍	岩體級別
A _I	RMR ≥ 81	----	----
A _{II}	RMR 80 ~ 61	RMR ≥ 81	B _{II}
A _{III}	RMR 60 ~ 41	RMR 80 ~ 61	B _{III}
A _{IV}	RMR 40 ~ 21	RMR 60 ~ 41	B _{IV}
A _V	RMR 20 ~ 11	RMR 40 ~ 21	B _V
A _{VI}	RMR ≤ 10	RMR ≤ 20	B _{VI}

附註：RMR(Rock Mass Rating)值：南非 Bieniawski 所發展之岩體分類值。

表5.1-5 台灣C、D岩類之岩體分級標準表(行政院公共工程委員會)

岩體級別		分級標準	
		膠結程度	地質材料組成
C 岩類	C _{I(C)}	膠結程度良好或尚可 (大拇指無法壓出凹痕)	沉泥、黏土含量>50%
	C _{I(MIX)}		砂、沉泥、黏土、礫石交雜 個別含量均未超過 50%
	C _{I(S)}		砂含量>50%
	C _{II(C)}	膠結程度不佳或疏鬆 (大拇指可壓出凹痕)	沉泥、黏土含量>50%
	C _{II(MIX)}		砂、沉泥、黏土、礫石交雜 個別含量均未超過 50%
	C _{II(S)}		砂含量>50%
D 岩類	D _{I(G)}	膠結程度極佳 (需以地質錘用力敲方能將塊石 或礫石敲落)	塊石、粗顆粒(大於 4 號篩) 之含量>75%或相互接觸
	D _{I(M)}		塊石、粗顆粒(大於 4 號篩) 之含量 50% ~ 75%或相互不 接觸
	D _{II(G)}	膠結程度良好或尚可 (需以地質錘方能將塊石或礫石 敲落)	塊石、粗顆粒(大於 4 號篩) 之含量>75%或相互接觸
	D _{II(M)}		塊石、粗顆粒(大於 4 號篩) 之含量 50% ~ 75%或相互不 接觸
	D _{III(G)}	膠結程度不佳或疏鬆 (以手即可將塊石或礫石剝落)	塊石、粗顆粒(大於 4 號篩) 之含量>75%或相互接觸
	D _{III(M)}		塊石、粗顆粒(大於 4 號篩) 之含量 50% ~ 75%或相互不 接觸

附註：鑑於含水之多寡對 C、D 兩岩類之工程施工影響甚鉅，故本 C、D 岩類岩體分級標準表需在地下水已預先排除至可施工之前提下才能使用。

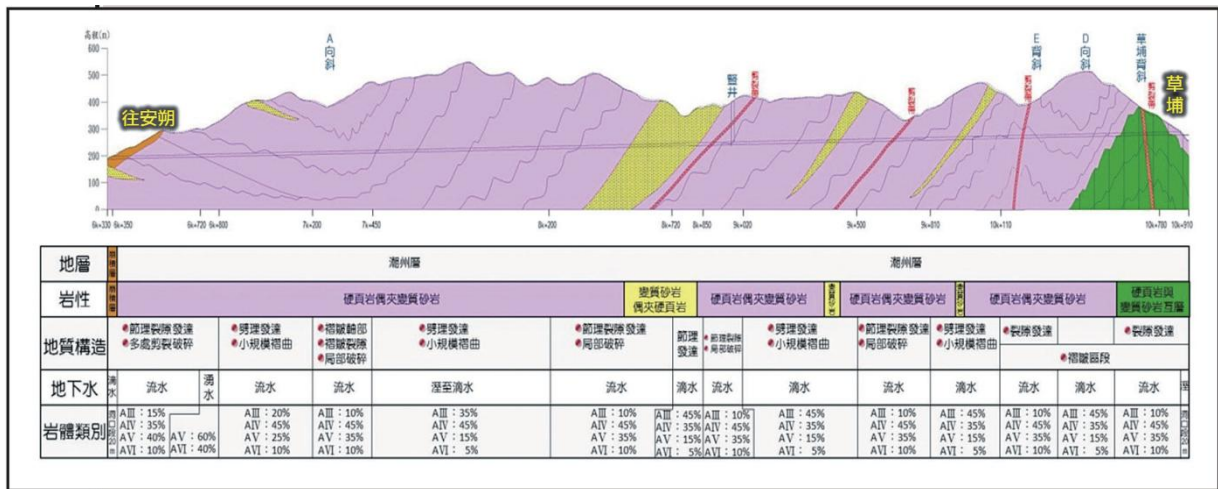


圖5.1-4 安朔草埔隧道設計階段岩體分類(藍維恭等人，2015)

岩體分類	I	II	III	IV	V	VI 斷層破碎帶	洞口段
開挖步驟							
岩體評分 (RMR)	91~100	61~80	41~60	21~40	11~20	0~10	洞口段不列入岩體評分
上半斷面	≤4.0m	≤3.0m	≤2.5m	≤2.0m	≤1.5m	≤1.0m	≤1.2m
噴凝土+鋼線網或鋼纖維噴凝土	鋼纖維噴凝土，ds=4cm (T·B) (視需要)	鋼纖維噴凝土，ds=8cm (T·B)	鋼纖維噴凝土，ds=12cm (T·B)	鋼纖維噴凝土，ds=16cm	鋼纖維噴凝土，ds=20cm	噴凝土ds=30cm + 2層鋼線網 5x100x100mm 或鋼纖維噴凝土ds=24cm	鋼纖維噴凝土，ds=20cm
鋼支保	-	-	桁型鋼支保G100 或 H型鋼支保H100x100	桁型鋼支保G100 或 H型鋼支保H100x100	桁型鋼支保G125 或 H型鋼支保H125x125	H型鋼支保H150x150	H型鋼支保H150x150
岩柱	灌漿岩柱 (預力，25mm φ，L=4m) 局部，視需要	灌漿岩柱 (預力，25mm φ，L=4m)	灌漿岩柱 (預力，25mm φ，L=4m)	灌漿岩柱 (非預力，25mm φ，L=4m)	灌漿岩柱 (非預力，25mm φ，L=4m/6m)	自鑽式岩柱(32mm φ) 或灌漿岩柱(非預力，25mm φ，L=6m/8m)	灌漿岩柱 (非預力，25mm φ，L=4m/6m)
仰拱	-	-	-	設仰拱，視需要	設仰拱	設仰拱	設仰拱，視需要
先撐鋼管或管幕鋼管	-	-	-	φ32mm先撐鋼管，L=3m@40cm~50cm，視需要	φ32mm先撐鋼管，L=3m@30cm~40cm	先撐管幕灌漿φ100mm，L=12m@30cm~40cm或φ32mm先撐鋼管，L=3m@30cm~40cm或其他經工程司核可之適當工法	φ32mm先撐鋼管，L=3m@30cm~40cm 或先撐管幕灌漿φ100mm，L=12m@30cm~40cm

註：封面噴凝土、封面岩柱、排水鑽孔、迂迴坑、止水灌漿、地盤改良、岩錨、導坑工法、臨時仰拱及擴大基腳等，皆視需要辦理

圖5.1-5 安朔草埔隧道開挖支撐圖(藍維恭等人，2015)

5.2 SFR 處置場工程地質暨岩石力學相關工程經驗

根據第三章有關「坑道處置封閉前所處母岩之岩石力學初始條件」相關章節內容，已整理了SFR處置場所處地質條件、工程地質暨岩石力學特性等資訊，為進一步了解SFR處置場有關岩體，本研究蒐整了SFR場址工程報告(Site Engineering Report)(SKB, 2014d)有關岩體分類、支撐與灌漿等與坑道結構有關資訊，以作為後續進行地質與長期穩定評估與審驗技術研析之參考。

5.2.1 岩體分類劃分方法

有鑑於岩體的行為攸關坑道開挖的穩定性，對所處場址的母岩岩體行為實有必要進行瞭解，並作為後續開挖方法與支撐設計之依據。據此，SFR根據 Schubert 等人(2001)提出的設計步驟進行岩體分類：

- Step 1:** 根據岩石學(lithology)、室內試驗與現地試觀察資料辨別岩盤(岩體)種類。
- Step 2:** 依岩體種類，分別判別岩盤的潛在行為，如表5.2-1，與當地環境的潛在影響因素，包括了現地應力、不連續面的位態(相對於坑道長軸方向)、地下水、開挖斷面尺寸與形狀，所述岩盤行為是指在不考慮任何支撐輔助與開挖方法等條件下，隧道開挖面之自然反應。
- Step 3:** 根據該岩體種類，評估開挖、灌漿與支撐方法，不同的開挖方法與支撐方式亦可納入考量。整個坑道系統的行為，是開挖面岩體、開挖方法與支撐方式的互制反應。

SFR特別針對岩盤(岩體)種類(Ground Type, GT)、岩盤行為(Ground Behaviour, GB)、行為種類(Behaviour Type, BT)與系統行為(System Behaviour, SB)提出了相關的定義：

- A. 岩盤(岩體)種類(Ground Type, GT)**，為岩盤具有相近的力學與水力特性；
- B. 岩盤行為(Ground Behaviour, GB)**，指全斷面開挖時，在不考慮持續性的開挖及支撐系統作用下之岩盤反應；
- C. 行為種類(Behaviour Type, BT)**，根據破壞模式或其他破壞特徵進行的岩盤行為分類；
- D. 系統行為(System Behaviour, SB)**，係指岩盤、開挖面與支撐構件交互作用所產生的行為。

表5.2-1 岩盤行為(GB)分類與相關的潛在行為描述(SK B, 2014d)

Behaviour Type		Ground Behaviour: Description of potential failure modes/mechanisms during excavation of the unsupported rock mass
1	Stable	Stable rock mass
Gravity induced Ground Behaviour		
2	Discontinuity controlled block fall	Discontinuity controlled, gravity induced falling and sliding of blocks
3	Collapse	Sudden near face collapse of large volume of blocky ground, usually has zero stand-up time
4	Running ground	Potential for excessive over-break with the development of chimney type failure.
Stress-induced Ground Behaviour		
5	Buckling failure	Buckling of rock slabs into tunnel with a narrowly spaced discontinuity set
6	Spalling	Thin slabs form in regions of boundary hoop stress concentration. Usually found in sparsely fractured rock
7	Strain/Rock burst	Sudden and violent failure of the rock mass, caused by highly stressed brittle rocks and the rapid release of accumulated strain energy
8	Squeezing	Time dependent deformation, essentially associated with creep caused by overstressing. Deformations may terminate during construction or continue over a long period
Water influenced Ground Behaviour		
9	Slaking ground	Ground breaks into flakes/pieces after being exposed to moisture
10	Flowing ground	Flow of intensely fractured rocks or soil with high water content
11	Swelling	Time dependent volume increase of the rock mass caused by physical-chemical reaction of rock and water in combination with stress relief, leading to inward movement of the tunnel perimeter
12	Frequently changing behaviour	Rapid variations of stresses and deformations, caused by heterogeneous rock mass conditions or block-in-matrix rock situation of a tectonic melange (brittle fault zone)

5.2.2 岩體分類與行為

根據地質學與場址特性模型(Site Descriptive Model, SDM)提供的地質材料分布及參數、過去SFR相關設施的建造經驗與工程人員的判斷，將SFR場址所處母岩區分為GT1、GT2、GT3與GT4四類岩體，如表5.2-2所示，各岩體類別對應的行為如表5.2-3，並整理概述如后：

A. GT1

(1) 岩體特性描述

具少許至中等分布之含裂隙塊岩(blocky rock)，具支配性的裂隙組或許存在，但具關鍵且叢聚性高的裂隙組並不常見。偉晶岩(pegmatite)為此區常見之岩石種類，其若為於坑道頂拱處，則此類岩體往往存在較多的裂隙，此原因係偉晶岩屬淺層火成岩，其礦物顆粒較為顯著，對開挖引致岩體損傷的反應較為敏感。偉晶岩可能以垂直與為平緩的偉晶岩脈出現。此類岩體的裂隙經常填充有沉積物，在岩體表面可觀察到滴水(dripping water)與水氣形成的小水點(spots of moisture)。

(2) 岩體行為

此類岩體行為屬弱面主控、重力驅動之岩塊破壞，在坑道頂拱與側壁處可能因開挖過程引致既有岩塊的掉落。

B. GT2

(1) 岩體特性描述

裂隙叢聚性較高，且近乎水平或平緩分布的含裂隙塊岩，此類叢聚性較高的裂隙，其不連續性就好比次要變形帶(minor deformation zone)，在近乎水平與較為平緩的裂隙之間，常有局部的垂直裂隙組出現，如此也常造成局部岩體略顯破碎及較高的導水性(transmissivity)。

(2) 岩體行為

同GT2，此類岩體行亦屬弱面主控、重力驅動之岩塊破壞，在坑道頂拱與側壁處可能因開挖過程引致既有岩塊的掉落。此外，地下水入滲也是引致此類岩體破壞的原因，主要是因弱面剪力強度遇水弱化所致，尤以含泥裂隙更為顯著。

C. GT3

(1) 岩體特性描述

具高角度裂隙之含裂隙塊岩，偶爾會形成次變形帶(minor deformation zone)，在SFR場址，NE傾向之裂隙經常形成此類高角度之裂隙組，其中裂隙常被方解石(calcite)與濁沸石(laumontite)所填充；另外，沿著SFR坑道與處置窖長軸向常可觀察此裂隙組，其延伸之長度一般約100m。同樣地，NW傾向的裂隙也經常形成此類具高角度之裂隙組，但在Singö變形帶區域外則較少見，反而是帶有

方解石結晶的片麻岩較常見。此區典型的次變形帶其寬度約 0.5 至 1.5 m。一般而言，此類岩體滲透性相當低，偶有水氣形成的小水點及滴水狀況，但岩體略顯破碎的狀況對坑道開挖與後續的穩定支撐工程具挑戰性。

(2) 岩體行為

此類岩體具異質特性(heterogeneous)，導致岩體應力與變形特性有顯著的變異性(variation)。GT3岩體在工程設計上，會特別考量地下水壓的影響。

D. GT4

(1) 岩體特性描述

即Singö變形帶(Singö Deformation Zone.)，為SFR處置場主要的變形帶，是由數個具不同地質特徵、岩體強度與滲透性的岩體所組成。

(2) 岩體行為

此類岩體可能發生應力引致之剝落破壞(spalling)，根據既有的SFR相關工程經驗，偶爾可在偉晶岩觀察到剝落破壞。

上述四類岩體種類其裂隙分布與相關的支撐工法示意圖，如圖5.2-1。

表5.2-2 在SFR之岩體行為分類 (SKB, 2014d)

Ground Behaviour	Description
GB1	Gravity driven, mostly discontinuity controlled failures (block falls), where pre-existing blocks in the roof and sidewalls become free to move once the excavation is made.
GB2	Gravity driven, mostly discontinuity controlled failures (block falls), where pre-existing blocks in the roof and sidewalls become free to move once the excavation is made. Water may also influence block falls, as it may lower the shear strength of unfavourable fracture surfaces, especially those with a soft filling or coating.
GB3	Frequently changing behaviour Rapid variations of stresses and deformations, caused by heterogeneous rock mass conditions, such as brittle fault zones like Singö Water pressure is an important load to consider in design especially in heterogeneous rock conditions
GB4	Stress-induced Spalling. Should spalling occur the energy associated with it will be very minor. Experience from the existing SFR indicates this behaviour was occasionally observed in the pegmatite.

表5.2-3 在SFR之岩體分類(SK B, 2014d)

Ground Type	Description
GT1	Sparsely to moderately fractured blocky rock. All dominant fracture sets may occur, but seldom as significant clusters. If pegmatite is frequent, especially in the roof, the rock mass may appear to be more fractured. This is commonly due to the coarse-grained rock being more sensitive to the excavation-induced damage. The pegmatite can occur both as vertical and gentle dipping dykes. The fractures are well sealed with precipitation. Dripping water and spots of moisture are observed. A simplified illustration of Ground type GT1 is shown in Figure 5-1.
GT2	Clusters of sub-horizontal to gently dipping fractures. The fractures occur often as clusters as discrete minor deformation zones. The frequency of vertical fracture sets seems to locally increase across the clusters of sub-horizontal to gently dipping fractures. Locally, the intersection of high frequency of vertical and gently dipping fracture give the appearance of crushed rock. This rock class has locally a high transmissivity, especially within gently dipping fractures and fracture zones. A simplified illustration of Ground type GT2 is shown in Figure 5-2.
GT3	Clusters of steeply dipping fractures occasionally form minor deformation zones. The NE trending fracture set usually formed these cluster and dominated this type of fractured zones. The fractures are relatively well sealed with calcite and laumontite. Crystals of calcite together with asphaltite were observed. Also the NW trending, steeply dipping fracture set occasionally formed minor deformation zones, but less frequent outside the area of the Singö Deformation Zone and the more gneissic part of the rock mass where the ductile deformations are significant. The N – S trending, altered amphibolitic dykes sometimes appear as minor deformation zones and hence may present similar engineering challenges as the minor deformation zones formed by the clusters of NE and NW trending steeply dipping fractures. Along the minor deformation zones formed by the clusters of NE and NW trending steeply dipping fractures other fracture sets can occasionally be found with increased frequency. Typical widths of these minor deformation zones are 0.5–1.5 m, and less than 0.5 m width for the minor deformation zones formed by altered amphibolitic dykes. The length of the NE trending minor deformation zones was frequently observed along the tunnels and caverns of the SFR, because the layout had the main underground openings aligned approximately parallel to that fracture set. More or less continuous length of up to approximately 100 m was observed for the NE trending, steeply dipping minor deformation zones. In caverns with high walls oriented at a small angle to the strike of NE fracture set commonly resulted in local overbreaks. The transmissivity is normally rather low. Spots of moisture and occasionally dripping water are sparsely distributed. However, more discrete channelling has been observed. A simplified illustration of Ground type GT3 is shown in Figure 5-3.
GT4	Singö Deformation Zone. This major deformation zone is composed of several sectors that exhibited different geological characteristics and large heterogeneity in terms of rock mass strength and hydraulic transmissivity. The appearance of the zone differs somewhat between the tunnels, but transition zones, zones of intense fracturing and core zones, the latter characterized by clay alteration and crushed rock, with cubic blocks; 2–20 cm in size were encountered in all four existing tunnels (including the discharge tunnels for Unit 1–2 and 3). The core zone was the most consistent part and intersected in all of the tunnels. It was characterised by a 2–12 m wide zone of crushed rock, showing high degree of alteration and disintegration. Matrix consists of silty, sandy and gravely material. On one or both sides of the crushed rock, several clay filled fractures were found, with a thickness of a few cm to approximately 1 metre. The clay resulted from rock alteration. The number, order of occurrence and thickness of these elements varied between the tunnels. Illustration of rock support in Ground type GT4 is shown in Figure 5-4.

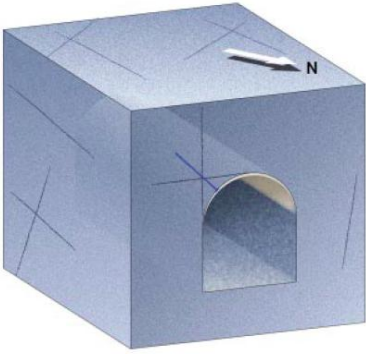
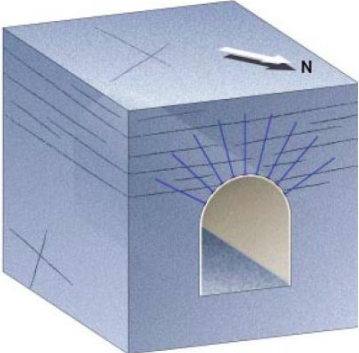
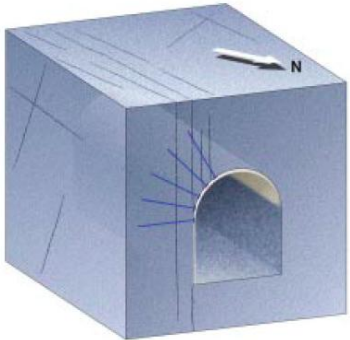

	<p>Ground Type : GT1</p> <ul style="list-style-type: none"> • 塊岩尺寸：10×10×10 m • 具少許至中等分布之含裂隙塊岩 (blocky rock)，具支配性的裂隙組或許存在，但具關鍵且叢聚性高的裂隙組並不常見
	<p>Ground Type : GT2</p> <ul style="list-style-type: none"> • 塊岩尺寸：10×10×10 m • 裂隙叢聚性較高，且近乎水平或平緩分布的含裂隙塊岩，此類叢聚性較高的裂隙，其不連續性就好比次變形帶 (minor deformation zone)，在近乎水平與較為平緩的裂隙之間，常有局部的垂直裂隙組出現
	<p>Ground Type : GT3</p> <ul style="list-style-type: none"> • 塊岩尺寸：10×10×10 m • 具高角度裂隙之含裂隙塊岩，偶爾會形成次變形帶 (minor deformation zone) • 此類岩體滲透性相當低，偶有水氣形成的小水點及滴水狀況，但岩體略顯破碎的狀況實據挑戰性。
	<p>Ground Type : GT4</p> <ul style="list-style-type: none"> • 即 Singö 變形帶 (Singö Deformation Zone.)，為SFR處置場主要的變形帶，是由數個具不同地質特徵、岩體強度與滲透性的岩體所組成

圖5.2-1 岩體種類示意圖(SKB, 2014d)

5.2.3 岩體支撐類別

根據過去在Forsmark地區累積的地下工程施工經驗，SFR定義了四種岩體支撐類別 (support type, ST)，如表5.2-4所示，其中，ST1、ST2與ST3屬坑道支撐型式，STC屬坑室(窖)支撐型式，基於讓工程設計得以通盤考量工程需求與相關影響因子，故表中並未詳列岩栓種類、岩栓間距與長度與噴凝土厚度。

表5.2-4 岩體支撐類別(SKB, 2014d)

支撐類別 (Support type)	內容描述	使用範例
ST1	系統性岩栓(systematic bolting)	<ul style="list-style-type: none"> • GT1與GT2 • GB2
ST2	系統性岩栓加纖維噴凝土	<ul style="list-style-type: none"> • GT1、GT2與GT3 • GB1與GB2
ST3	鋼支保，如桁架式鋼支堡(lattice girder)	<ul style="list-style-type: none"> • GT4 • GB3
STC Caverns	系統性岩栓加纖維噴凝土	<ul style="list-style-type: none"> • GB1與GB2

5.2.4 灌漿類別

同樣根據過去在Forsmark地區累積的地下工程施工經驗，SFR定義了三種灌漿類別 (grouting type, GRT)，如表5.2-5所示。有鑒於處置場所處母岩可能是完整岩石(intact rock)，也可能是具定水頭條件之破碎開裂岩體，因此，灌漿工程視岩體的水力特性(hydraulic properties)而有顯著的不同需求。表5.2-5所列灌漿類別，其施作時的鑽孔數、間距、分段施工規劃及灌漿材料等各有不同，基於讓工程設計得以通盤考量實際的灌漿工程需求與現場條件，包括岩體滲透性(transmissivities)與水力水頭(hydraulic head)，故表中並未明列上述項目所需細節。

表5.2-5 灌漿類別(SKB, 2014d)

灌漿類別 (Grouting type)	內容描述
GRT1	破碎裂隙固結灌漿(discrete fracture grouting)
GRT2	系統性隧道灌漿(systematic tunnel grouting)
GRT3	地下水入滲灌漿(control of large inflows)

5.3 坑道處置長期安全評估相關之工程地質與岩石力學特性參數

本章針對國內一般坑道與國外低放處置坑道相關之規劃與建造經驗，蒐整研析地質條件、工程地質暨岩石力學特性、攸關坑道結構穩定性之岩體分類與支撐工法等相關資訊。國內一般坑道部分，分別參考了台鐵南迴線安朔隧道與台9線南迴公路安朔草埔隧道，國外低放處置坑道主要是針對SFR場址工程報告中有關岩體分類、支撐與灌漿等與坑道結構有關資訊。除本章蒐整之國內外資訊外，同時綜整前述各章節，提出下列幾點供我國未來發展處置坑道穩定性與長期安全評估要項所需之工程地質與岩石力學特性參數。

A. 處置坑道穩定性及長期安全評估所需之場址特性參數

- (1) 根據4.1.1節「處置坑道與一般地下坑道在坑道長期穩定與功能需求異同分析」，已知處置坑道在空間尺度涵括範圍較廣，必須透過現地調查與試驗，包含地質與地層、斷層及裂隙分布、及地震活動性等調查，與岩石力學相關試驗，方能建構符合現地特性的地質概念模型。
- (2) 前項地質概念模型中，針對地質演化過程，及可能影響坑道設計、建造與坑道結構穩定性及長期安全之場址特性參數，包括地質構造、剪裂帶、地下水分布、地質材料種類及其依時特性與抗侵蝕特性等，是地質概念模型及其場址特性參數需納入參考者。

B. 工程地質暨岩石力學特性

- (1) 有關處置場母岩之岩石力學特性(包括單軸抗壓強度、間接張力強度和楊氏模數)，及弱面力學參數(包括正向勁度、切向勁度、摩擦角與凝聚力等)，不僅為設計階段所需之重要參數，亦為後續處置坑道結構穩定性與長期安全評估之重要依據，例如，完整岩石與含弱面岩體長時期之強度與變形特性依時弱化評估等。
- (2) 根據台9線南迴公路安朔草埔隧道施工經驗，褶皺密集地質帶於其軸部易形成破碎帶(背斜軸)或蓄積地下水(向斜軸)，隧道施工時易遭遇湧水及抽坍等現象，或者造成隧道開挖後變形過大之情形，如上所述地質構造形成破碎帶，其地下水分布、岩體滲透性與變形特性，對處置坑道之建造與坑道結構穩定性的影響一併納入。

C. 岩體分類

- (1) 我國目前所採用的台灣岩體分類與隧道支撐系統，A、B類岩體分類仍沿用CSIR-RMR岩體評分表，惟其在岩體級別與RMR值範圍的定義依岩類而有所不同，而RMR的評分項目包括岩石強度、RQD、弱面間距、弱面狀況、地下水

情況與弱面方位等六項，以安朔草埔隧道為例，其沿線岩體類別大致為Am至Avi類。

- (2) 相較於前項我國所採分類方法，SFR根據岩石學(lithology)、室內試驗與現地試驗觀察資料辨別岩體種類，並區分GT1至GT4四類岩體，如5.2.2節，其在各類岩體之特性描述上，尤其重視裂隙的分佈，而SFR處置場主要的變形帶—Singö變形帶，考慮其影響範圍且地質材料組成較為複雜，故單獨列為GT4岩體。
- (3) 綜合上述(1)(2)二項，SFR在岩體分類上著重岩石學(lithology)、室內試驗與現地試驗觀察，並將SFR處置場主要的變形帶(Singö變形帶)單獨列為一類。同時，針對各類岩體提出其岩體行為，藉以描述岩體可能的破壞模式是屬於弱面抑或應力主控、易受重力驅動或是滲流引致破壞、及含泥裂隙遇水弱化的影響等。透過岩體行為之描述，除可初步掌握岩體可能的破壞模式外，亦有助於支撐工法的選定及掌握岩體穩定性之可能因素。

D. 開挖與支撐工法的影響

- (1) 有鑑於鑽炸工法容易造成開挖損傷區(EDZ)，按台9線南迴公路安朔草埔隧道規劃經驗，係採「鑽炸為主、機械修挖為輔」，以減少對圍岩之擾動及超挖量；此外，考量到(i) 部分地下水壓、(ii) 岩體長期岩壓、(iii) 岩栓老化及其(iv) 它無法預知之因素等，全線均設鋼筋混凝土襯砌，混凝土強度由 245 kg/cm^2 提高至 280 kg/cm^2 ，並視地質及附屬設施等需要配筋補強。
- (2) 根據SFR的建造經驗，開挖損傷區的破裂頻率將明顯高於其他周遭岩體，但開挖損傷區的延伸非常有限，評估小於0.3m的範圍。此外，其採用的岩體支撐類別主要區分為四種岩體支撐類別，如表5.2-3，對於岩栓種類、岩栓間距與長度與噴凝土厚度等設計參數，則授予工程設計單位視工程需求與相關影響因子予以彈性訂定。
- (3) 針對開挖與支撐工法對於處置坑道結構穩定性與長期安全評估之影響整理出下列重點：
 - (i) 坑道開挖應以減少對圍岩之擾動及降低超挖量為原則。
 - (ii) 基於坑道結構穩定性要求，坑道全線均設鋼筋混凝土襯砌，惟為降低坑道斷面及減少混凝土襯砌厚度，可考慮提高混凝土強度，或採用鋼纖維混凝土等。
 - (iii) 岩栓、噴凝土與混凝土襯砌，應考慮注意其在運轉期處置坑道所處環境及使用年限內之材料強度與抗腐蝕特性之可能變化。

第六章、低放審查導則(第0版)相關章節之精進建議

本章針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」與本研究有關之章節進行瞭解，同時總結前述各章成果，提出修訂低放處置審查導則(第0版)相關條文之建議。

6.1 低放處置審查導則(第0版)與坑道處置工程地質與長期穩定有關之章節研析

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，與本計畫有關之章節包括「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」與「第七章 處置設施之安全評估」，茲將上述章節內容及與「坑道處置工程地質與長期穩定」有關之導則修訂方向建議整理如下列幾點：

A. 場址特性描述

章節標題與內容：

導則原第三章內容在於說明場址所處之社會與經濟、地形與地貌、氣象、地質與地震、地表水、地下水、地球化學、天然資源、生態、輻射背景偵測、大地工程特性、交通狀況及其他等有關場址特性描述之資料。

修(增)訂條文之參考依據與方向：

1. 根據本研究3.3節與3.5節得知，SFR處置場位處地質破裂帶，部分地區的處置母岩具明顯變形特性，基於坑道服務性與長期穩定之考量，自建造期即進行坑道側壁與頂拱岩塊穩定性的長期監測，部分坑道的斷面支撐方式則採岩栓與鋼纖維噴凝土以確保其穩定性。
2. 根據本研究3.4節與5.2節得知，SFR的場址地質條件、地值概念模型、岩石力學特性、過去SFR相關設施的建造經驗與工程人員的判斷，是作為岩體分類(GT)之訂定依據，且有助於掌握岩盤行為(GB)、裂隙分佈、岩體導水性及支撐系統的設計。
3. 岩石力學特性，包括完整岩石力學試驗與弱面調查成果，亦可提供開挖損傷區(EDZ)之評估。
4. 根據本研究5.1節「國內一般坑道規劃與建造經驗」得知：透過現地調查與地球物理探測等技術掌握場址地質構造、破碎帶與水文地質概況，將有助於擬定坑道施工方法、施工可能遭遇問題與因應策略之研擬、坑道斷面尺寸與支撐構建材料之選定。
5. 根據本研究5.3節得知，針對地質演化過程，及可能影響坑道設計、建造與坑道結構長期穩定之場址特性參數，應該包括地質構造、剪裂帶、地下水分布、地

質材料種類及其依時特性與抗侵蝕特性等，將可提供處置坑道長期穩定評估之參考。

B. 處置設施之設計.

章節標題與內容：

導則原第四章內容在於說明處置設施的設計目標與功能需求、建築、結構、土木、輻射安全、輔助設計或系統、公用設施或系統之設計，及上述設計與系統之詳細圖說與細部資料。

修(增)訂條文之參考依據與方向：

1. 根據本研究4.1.2節得知，國際隧道協會(ITA)指出地下結構物可能因下列幾種因素失去其原本應有的服務性(serviceability)與結構安全性(structural safety)，例如坑道結構水密性、變形性、結構耐久性、材料強度喪失或整體結構穩定性不足等。
2. 考量處置坑道其在坑道服務性與結構安全性應較一般坑道要求為高，故坑道處置在設計上，應詳加考慮上述項次(1)各因子對處置坑道長期穩定之影響，並提出因應之設計，例如在處置坑道全線採鋼筋混凝土襯砌、提高混凝土強度以降低襯砌厚度、視地質及附屬設施等需要配筋補強。
3. 岩栓、噴凝土與混凝土襯砌，應考慮注意其在處置坑道所處環境及使用年限內之材料強度與抗腐蝕特性之可能變化。

C. 處置設施之建造

章節標題與內容：

導則原第五章內容在於說明施工特性與施工計畫。

修(增)訂條文之參考依據與方向：

1. 施工計畫應根據「場址特性描述」所提供的場址地質構造與水文地質概況，針對可能遭遇問題，研擬因應策略，例如湧水與剪裂破碎帶之對策工法等。
2. 根據本研究5.3節，建造期間進行開挖作業，開挖工法之選定應以減少對圍岩之擾動及造成超挖量為原則。

D. 處置設施之安全評估

章節標題與內容：

導則原第七章節內容係說明處置設施輻射劑量評估、設備操作、闖入者防護與長期穩定性，其中長期穩定性部分在於評估分析處置設施於運轉期及封閉後之長期穩定性與安全性。

修(增)訂條文之參考依據與方向：

1. 針對處置坑道運轉期間之長期穩定與安全，可根據本研究4.1.4節與本計畫之先期研究成果(楊長義與李宏輝，2014)，建議在處置坑道運轉期間執行坑道結構之檢監測作業，並且根據在運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與襯砌影像資料，做為檢監測結果之比較對照依據。
2. 針對處置坑道封閉後之長期穩定性與安全性，可根據本研究4.2節得知：，依SFR處置場的規劃與經驗，按其長期安全原則：「**限制長半衰期放射性核種活度、及遲滯放射性核種**」，進一步所擬定處置場組成各部在封閉時之安全功能，相關項目包括放射性核種的遲滯、降低水流流速、提升遲滯能力、與避免處置場周圍設置井設施等；惟處置坑道封閉後，並無強調坑道結構對低放處置場長期穩定性的影響。

6.2 低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議

根據6.1節之章節研析內容，本計畫分別就：場址特性描述、處置設施之設計、處置設施之建造、與處置設施之安全評估等四項，整理審查導則草案中有關「處置坑道坑道處置工程地質與長期穩定」之編修要點建議，如下表6.2-1所示。

表6.2-1 審查導則草案編修要點建議

因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議
場址特性描述	場址特性描述中，與大地工程特性有關之工程質地與岩石力學特性參數，可供處置坑道在設計、建造及運轉期間長期安全評估之依據。	<p><u>提供要項部分</u>：</p> <p>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><u>審查作業部分</u>：</p> <p>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>

處置設施之設計	<p>考量處置坑道其在坑道服務性與結構安全性較一般坑道要求之標準為高，故坑道處置在設計上，應考慮處置坑道長期穩定需求。</p>	<p><u>提供要項部分：</u> 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><u>審查作業部分：</u> 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>
處置設施之建造	<p>為減少對圍岩之擾動及降低超挖量，應根據所處地質條件、工程地質暨岩石力學特性，提出妥切的坑道開挖工法與支撐方式。</p>	<p><u>提供要項部分：</u> 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><u>審查作業部分：</u> 所提開挖工法與支撐方式是否確實考量場址地質構造、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>
處置設施之安全評估	<p>說明處置坑道在運轉期間，因外力因素(地震作用、邊坡運動與開挖擾動引致之塑性壓與鬆弛土壓問題)、環境因素(風化引致岩石強度弱化及岩體依時變形)及非力學因素對處置坑道結構長期穩定之可能影響，而實施的檢監測項目、方法與技術。</p>	<p><u>提供要項部分：</u> 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襯砌影像資料、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><u>審查作業部分：</u> 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襯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>說明處置坑道封閉時，在「限制長半衰期放射性核種活度、及遲滯放射性核種遷移」的長期安全原則下，處置坑道其系統組成各元件是否滿足各自的安全功能。</p>	<p><u>提供要項部分：</u> 應充分說明處置坑道封閉時必須遵循的長期安全原則，及處置坑道系統各個組成，包括廢棄物形式、包件、包件周圍的灌漿材料、處置窖的混凝土結構、噴凝土、回填材料及相關封塞/封閉組件等，其在限制長半衰期放射性核種活度，與遲滯放射性核種遷移的安全功能評估項目。</p> <p><u>審查作業部分：</u> 所提處置坑道系統組成是否完整無漏項？安全功能評估項目是否足以反映系統組成其在限制長半衰期放射性核種活度，與遲滯放射性核種遷移之功能。</p>
---	--

第七章、結論

7.1. 國際低放坑道處置坑道封閉作法與長期安全評估方法

A. 低放處置坑道結構設計考量、檢監測與封閉計畫

針對SFR-1之1BLA，與SFR-3之2-5BLA低放處置窖之結構設計考量、檢監測與封閉計畫等資訊，研析結果整理如表2.6-1。

B. 處置窖與坑道、坑道系統及鑽孔的封閉作業

(1) 處置窖的封塞

規劃五處(P1TT, P1BTF, P1BST, P2TT 與P2BST)進行處置窖封填作業，封塞方式包括水力密封斷面與機械(力學)束制。水力密封斷面係指由膨潤土填充所形成的斷面，形成低滲透性之阻水層；機械(力學)束制則係指採用混凝土與土壩之封塞方式，且以混凝土封塞為主，但在坑道幾何斷面較特殊處，如連接1BST的封塞斷面，因混凝土封塞不易施作，故採用土壩封塞。

(2) 筒倉的封塞

筒倉的封塞斷面計有筒倉底部封塞(NSP)、筒倉上部封塞(ÖSP)與筒倉底部封塞(STP)等三處。封塞設計有個重要的設計因素，即合適的坑道幾何斷面才能採用機械(力學)束制，如此才能及時地支撐膨潤土構成的水力密封斷面。

(3) 聯絡坑道的封填

聯絡坑道的封填目的在於減少地下水滲入坑道內，於聯絡坑道設置了碎石回填、混凝土與水力密封斷面進行封塞，聯絡坑道與坑道系統之其他坑道空間則是填入碎石，採用碎石的目的是在於其可提供封塞材料所需要的力學支撐，且可防止人類的闖入。

(4) 鑽孔的封填

考量鑽孔所處位置的岩石水力傳導度進行鑽孔封填作業，若鑽孔周圍岩石具有較低水力傳導度時，鑽孔封填也必須採用低水力傳導度的封塞材料，若鑽孔位在高水力傳導度區域(例如破裂或變形帶)，鑽孔作業只要求其力學穩定性。

C. 長期安全評估項目

(1) 長期安全原則與安全功能

SFR對於處置場的長期安全要求，是藉由(i)限制處置場內長半衰期放射性核種活度、及(ii)確保放射性核種由廢料傳輸經過工程障蔽及處置場周邊環境時是充分被遲滯，據此提出長期「安全原則」為：「限制長半衰期放射性核種活度、及遲滯放射性核種」。再訂定與長期安全原則相呼應的「安全功能」，例如，「限制長半衰期放射性核種活度」其安全功能是限制活度的數量；「遲滯放射性核

種」其安全功能是(i)低水流量、(ii)具良好遲滯能力、及(iii)避免處置場周圍有抽水井，本文整理如表2.5-1。

(2) 長期安全評估項目

根據研析SR-PSU初始狀態安全評估報告書(TR-14-02)，，是分別就廢棄物型式、廢料包件、廢料包件周圍的灌漿、混凝土結構、噴凝土、膨潤土及砂/膨潤土混合材、處置窖回填材料、及封塞與其他封閉組件等提出相關的潛在長期安全評估項目，見本文表2.5-2所示。

7.2. 國際坑道處置封閉前所處母岩之岩石力學初始條件

A. 工程地質暨岩石力學特性

- (1) SFR處置場所處母岩之岩石力學特性，包括單軸抗壓強度、間接張力強度和楊氏模數，如表3.4-1，按國際岩石力學學會強度等級，可歸類為R 5(非常強)至R 6(極度強)；單一裂面之力學參數，包括正向勁度、切向勁度、摩擦角與凝聚力等弱面力學參數，如表3.4-2；岩體的岩石力學參數，如表3.4-3所示。
- (2) 透過震測法、地質鑽探與現地應力量測等方法掌握母岩力學特性，進一步分析聯絡坑道附近的岩體力學特性及現地應力，顯示最大與中間主應力值(方向)分別為10 MPa(NW/SE)與5 MPa(NE/SW)，垂直應力是最小主應力，其值為3 MPa，場址所處岩體力學特性尚屬良好。

B. 開挖損傷區評估

因隧道採鑽炸工法開挖導致鄰近開挖面形成開挖損傷區(EDZ)，經評估其延伸範圍小於0.3 m。

C. 岩盤穩定性與坑道結構支撐方式

有鑑於處置場位處地質破裂帶，SFR為瞭解場址內聯絡坑道與處置坑道的岩盤穩定性，遂進行岩楔穩定分析及落盤可能性評估，評估項目包括針對坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性進行破壞風險評估及坑道斷面的潛變監測。此外，處置坑道與聯絡坑道是以岩栓與鋼纖維噴凝土為其斷面支撐方式。

7.3. 處置坑道穩定性與長期安全評估項目

A. 運轉期處置坑道穩定性之影響因素

- (1) 參考一般坑道在運轉期所產的襯砌裂縫、滲水與龜裂等異狀及肇因，及我國本土隧道案例顯示之滲漏水問題，與其他可能加速襯砌材料劣化之因素，本案前期研究所提之置坑道襯砌結構長期穩定之檢監測項目，如表4.1-1所列，可作為訂定運轉期處置坑道結構穩定性評估項目之參考。

- (2) 針對處置坑道(結構)支撐系統，包括岩栓、噴凝土與混凝土襯砌，應考慮其在運轉期處置坑道所處環境及使用年限內之材料強度劣化與抗腐蝕特性之可能變化。

B. 處置坑道封閉後之長期安全評估項目

- (1) 參考SFR低放處置窖1BLA與2-5BLA其在封閉前建議應考量之安全評估項目，包括：幾何參數、溫度、水文地質參數、應力、材料組成、地下水組成性質與氣體參數等。
- (2) 坑道結構穩定性並未納入SFR處置坑道封閉前所須之長期安全評估項目。

7.4. 坑道處置穩定性與長期安全評估相關之工程地質與岩石力學特性參數

A. 處置坑道穩定性及長期安全評估所需之場址特性參數

- (1) 有鑑於處置坑道在空間尺度涵括範圍較廣，必須透過現地調查與試驗，包含地質與地層、斷層及裂隙分布、及地震活動性等調查，與岩石力學相關試驗，以建構符合現地特性的地質概念模型。
- (2) 前項地質概念模型中，針對地質演化過程，及可能影響坑道設計、建造與坑道結構穩定性及長期安全之場址特性參數，包括地質構造、剪裂帶、地下水分布、地質材料種類及其依時特性與抗侵蝕特性等，是地質概念模型及其場址特性參數需納入參考者。

B. 工程地質暨岩石力學特性

- (1) 有關處置場母岩之岩石力學特性(包括單軸抗壓強度、間接張力強度和楊氏模數)，及弱面力學參數(包括正向勁度、切向勁度、摩擦角與凝聚力等)，不僅為設計階段所需之重要參數，亦為後續處置坑道結構穩定性與長期安全評估之重要依據，例如，完整岩石與含弱面岩體長時期之強度與變形特性依時弱化評估等。
- (2) 可能引致隧道施工遭遇之湧水及抽坍，或者開挖後變形過大之地質條件，其地下水分布、岩體滲透性與變形特性，對處置坑道之建造與坑道結構穩定性的影響一併納入。

C. 岩體分類

- (1) SFR在岩體分類上著重岩石學、室內試驗與現地試驗觀察，並將SFR處置場主要的變形帶(Singö變形帶)單獨列為一類。同時，針對各類岩體提出其岩體行為，藉以描述岩體可能的破壞模式是屬於弱面抑或應力主控、易受重力驅動或是滲流引致破壞、及含泥裂隙遇水弱化的影響等。

- (2) 透過岩體行為之描述，除可初步掌握岩體可能的破壞模式外，亦有助於支撐工法的選定及掌握岩體穩定性之可能因素。

D. 開挖與支撐工法

- (1) 有鑑於鑽炸工法容易造成開挖損傷區(EDZ)，可參考台9線南迴公路安朔草埔隧道規劃經驗，採「鑽炸為主、機械修挖為輔」，以減少對圍岩之擾動及超挖量；此外，考量到(i) 部分地下水壓、(ii) 岩體長期岩壓、(iii) 岩栓老化及其(iv) 它無法預知之因素等，全線均設鋼筋混凝土襯砌，混凝土強度由 245 kg/cm^2 提高至 280 kg/cm^2 ，並視地質及附屬設施等需要配筋補強。
- (2) 根據SFR的建造經驗，開挖損傷區的破裂頻率將明顯高於其他周遭岩體，但開挖損傷區的延伸非常有限，評估小於0.3m的範圍。此外，其採用的岩體支撐類別主要區分為四種岩體支撐類別，如表5.2-3，對於岩栓種類、岩栓間距與長度與噴凝土厚度等設計參數，則授予工程設計單位視工程需求與相關影響因子予以彈性訂定。
- (3) 針對開挖與支撐工法對於處置坑道結構穩定性與長期安全評估之影響整理出下列重點：
 - (i) 坑道開挖應以減少對圍岩之擾動及降低超挖量為原則。
 - (ii) 基於坑道結構長期安全需求，坑道全線均設鋼筋混凝土襯砌，惟為降低坑道斷面及減少混凝土襯砌厚度，可考慮提高混凝土強度，或採用鋼纖維混凝土等。
 - (iii) 岩栓、噴凝土與混凝土襯砌，應考慮注意其在運轉期處置坑道所處環境及使用年限內之材料強度與抗腐蝕特性之可能變化。

7.5. 低放審查導則(第0版)相關章節之精進建議

總結本計畫各章成果，針對我國「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)」相關章節，包括「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」與「第七章 處置設施之安全評估」，提出低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議，示如表6.2-1。

參考文獻

- [1] Bodén A, 1993. SFR Kontrollprogram Bergkontroll. Besiktningsgruppens årsrapport 1993.
- [2] Bodén A, Lundin J, 2007. SFR kontrollprogram, Bergkontroll-Bergkontrollgruppens årsrapport 2006, Huvudrapport. Doknr 2448900-001, Vattenfall Power Consultant AB, 2007-03-05.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Hjerpe, T., Ikonen, A.T.K., and Broed, R. 2010. Biosphere Assessment Report 2009. Posiva Report 2010-03.
- [6] Hoel, E. and Wood, D.F., Support in underground hard rock mines, *Underground Support Systems*, 35, 1987.
- [7] Hökmark H, 1993. Numerical analysis of time-dependent deformations in the rock surrounding the SFR repository. Clay Technology AB, Lund, Internal report.
- [8] Holmén J G, Stigsson M, 2001. Modelling of Future Hydrogeological Conditions at SFR.
- [9] Forsmark. SKB R-01-02, Modelling of future hydrogeological conditions at SFR.
- [10] IAEA. 2001. Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. IAEA -TECDOC-1208.
- [11] IAEA, 2014, Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, Specific Safety Guide No. SSG-31, Vienna.
- [12] Kasa, S. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2009 – Foreign materials. Posiva Working Report 2010-46.
- [13] Lahti, M. (ed.) and Siren, T. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2010 – Rock Mechanics. Posiva Working Report 2011-47.
- [14] 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.

-
- [15] MoDeRn. 2013. MoDeRn Monitoring Reference Framework report. MODERN DELIVERABLE (D-1.2).
- [16] MoDeRn. 2013. State of Art Report on Monitoring Technology DELIVERABLE. MODERN DELIVERABLE (D-N:2.2.2).
- [17] NRC. 1991, Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev. 2, 1991)
- [18] 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)
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Posiva. 2002. The observational method applied to engineering and construction of the access to the ONKALO facility. Posiva Report 2002-48.
- [22] Posiva. 2003. Programme of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of the ONKALO. Posiva Report 2003-05.
- [23] Posiva. 2012. Monitoring at Olkiluoto – a Programme for the Period Before Repository Operation. Posiva Report 2012-01.
- [24] Posiva. 2013. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2012, Rock Mechanics. Posiva Report 2013-47.
- [25] RWMC. 2005. Monitoring of Geological Disposal – Current Status and Technical Possibilities. RWMC Technical Report RWMC-TRE-04004.
- [26] 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.
- [27] SKB. 2003. Design, construction and performance of the clay-based isolation of the SFR silo. SKB R-03-30.
- [28] SKB, 2004. Preliminary site description Forsmark area – version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [29] SKB. 2007. Construction experiences from underground works at Forsmark. SKB R-07-10.
- [30] SKB. 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase, SKB Report TR-08-05.
-

-
- [31] SKB. 2011a. International perspective on repositories for low level waste. SKB R-11-16.
- [32] SKB. 2011b. Site investigation SFR Bedrock geology. SKB R-10-49.
- [33] SKB. 2013. Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2012. SKB TR-13-10.
- [34] SKB. 2014a. Safety analysis for SFR Long-term safety. SKB TR-14-01.
- [35] SKB. 2014b. Initial state report for the safety assessment. SKB TR-14-02.
- [36] SKB. 2014c. The impact of concrete degradation on the BMA barrier functions. SKB R-13-40.
- [37] SKB. 2014d. Site Engineering Report – SER – Projekt SFR utbyggnad. SKB R-14-17.
- [38] 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.
- [39] 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。
- [40] 王泰典等人，2012，坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究，行政院原子能委員會核能研究所委託研究計畫研究報告。
- [41] 周鼎等人，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核能研究所委託研究計畫研究報告。
- [42] 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。
- [43] 張吉佐、劉弘祥，2001，山岳隧道工程設計與實例手冊。
- [44] 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1 期末審查意見回覆

編號	頁碼	審查意見	回復說明
1	-	報告內容符合契約要求。	感謝審查委員意見。
2	-	請於成果報告光碟中檢附參考文獻電子檔。	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。
3	-	本報告如涉及處置坑道興建與運轉階段之穩定功能說明，建議採用「處置坑道穩定性」一詞，如為討論封閉後之安全分析，則建議採用「長期安全評估」一詞，以免誤解，如 4.1 標題可修正為「坑道處置穩定性評估項目」；4.1.1 標題可修正為「處置坑道與一般地下坑道在坑道穩定性與功能需求異同分析」；4.1.4. 標題可修正為「處置坑道穩定性評估項目」；表 4.1-1 標題可修正為「處置坑道襯砌結構穩定性之檢監測項目」；2.5 標題可修正為「長期安全評估項目」..等，再請檢視修正。	已依委員意見，於相關章節標題與內文進行修訂，例如： (1) 2.5 標題修訂為「 長期安全評估項目 」 (2) 第四章標題修訂為「 處置坑道穩定性與長期安全評估項目 」 (3) 4.1 標題修訂為「 坑道處置穩定性評估項目 」 (4) 4.1.1 標題修訂為「 處置坑道與一般地下坑道在坑道穩定性與功能需求之異同分析 」 (5) 原 4.1.3 節併入 4.2 (6) 4.1.4 標題修訂為「 處置坑道穩定性之影響因素 」
4	1	摘要與第 1 頁計畫背景說明有關「2012 年訂定了「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)」，以作為放射性廢棄物最終	中、英文摘要，及 1.1「計畫背景」相關內容已依委員意見完成修訂。

		處置安全管制之規範…」與「..地質處置，則是將廢棄物放置於較深的岩層中，包括坑道處置及海床下處置..」，易造成誤解，請修正。	
5	6	有關「..SFR-1 處置場目前收納中放射性廢棄物與低放射性廢棄物，每年處置醫療、工業及研究機構所產生的低放射性廢棄物約 10~20 m ³ ..」，易造成誤解為只處置小產源廢棄物，請增加說明。	感謝委員意見，原文字 "10~20 m ³ ." 應屬誤植，修訂後已刪除該段文字。
6	19	「表 2.3-72075 年之高放射性核種庫存估計值」，有關高放射性核種一詞易造成誤解，請修正。	感謝委員建議，已修改為「經不確定性分析後之 2075 年放射性核種庫存估計值」。
7	58	有關表 2.6-1，其 SFR1-1BLA 與 SFR3-2-5BLA 其評估內容大多一致，建議合併討論。	已依委員意見合併討論。
8	59	3.2 節岩石類型暨岩石分區，部分用詞較難理解，如偉晶岩到偉晶花崗岩、細到中粒變花崗岩-花崗閃長岩、長英到中間變質岩、氧化岩石..等，請檢討修正。	已依委員意見完成修訂： SFR 地區依具有相似岩性的條件劃分為四個區域 (RFR01-RFR04)：(1)、RFR01 區之岩性由偉晶岩以至偉晶花崗岩為主 (SKB 岩石類型代碼 101061)。(2)、RFR02 區的岩性較 RFR01 區更不均質，大多數區域局部包含細粒到中粒的變質花崗岩-以至花崗閃長岩 (101057)，常與此區域最普遍的岩性 長英質以至中度變質火山岩 (103076) 難以區別；該區域還含有 24% 的偉晶岩及偉晶花崗岩。SFR-1 和 SFR-3 大部分座落在 RFR02 區域，而銜接隧道則位於 RFR01 區

			域，見圖 3.2-1。(3)、RFR03 區目前缺乏鑽探岩心或隧道資料，但是，由地磁測量結果顯示該區域的變形區內含有氧化的岩石，組成以偉晶岩為主。
9	70	有關「..在場址特性調查參數部分，需考量熱力-水力-應力-化學因素相互耦合效應的影響..」與圖 4.1-2 提及有關處置之熱力因素，因本案屬低放射性廢棄物，不涉及產熱之放射性廢棄物，建議刪除以免誤解。	感謝委員意見，圖 4.1-2 已刪除，相關內文亦已修訂。

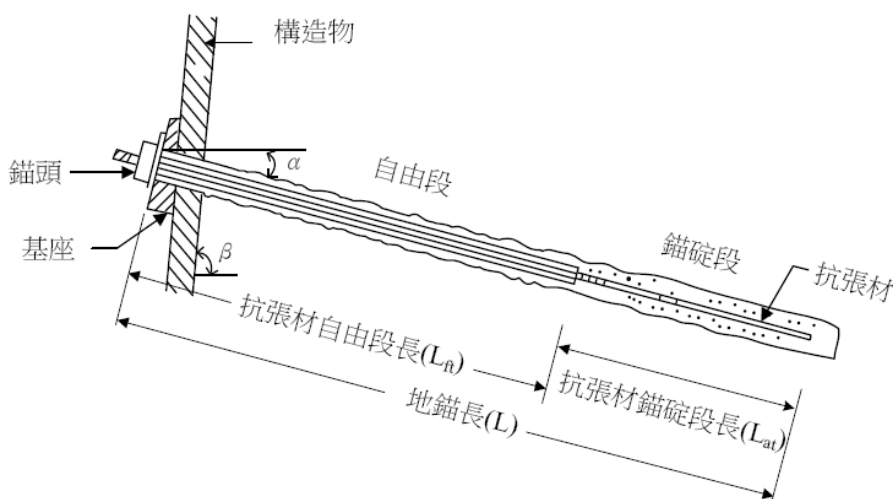
附錄2 地錨構造、性能、常見破壞與防蝕保護

1. 地錨種類與構造

岩栓屬地錨之一種，為可將拉力傳遞至特定地層之裝置，其構造區分為三大部分：(1)錨碇段提供錨碇力之部份；(2)自由段為抗張材受拉伸張及傳遞錨碇力至錨頭之部份；(3)錨頭係承受鎖定抗張材及傳遞錨碇力至承壓結構體之部份，錨頭包括鎖定器與承壓板，如附錄圖2-1，按其錨碇段所在地層類別，始細分為錨碇於土層中之土錨以及錨碇於岩層中之岩錨。

地錨依其設計使用目的、錨碇體與地盤間之錨碇行為機制、錨碇段抗張材之應力傳佈方式、錨碇體之施工方式、錨頭之裝置以及抗張材之回收方式等之不同，可區分為數種不同型式及類別之地錨，如附錄表2-1所示。

一般而言，使用於施工期間之構造物上，完工後即解除者屬臨時性地錨；設置於長久構造物上，例如長期擋土結構物施設者，屬永久性地錨。臨時性地錨之使用期限，參考日、美、歐等國家相關規範多訂為2年，惟若環境鏽蝕危害度較高且危及公共安全甚巨時，則仍須做用永久性考量，進行設計、施工及維護管理之適當作為。所謂永久性地錨係指設置地錨所在之結構其需求性能應做永久性考量者而言，即其使用年限必須與其保護或支撐之結構物一致，維持其原有設計預期的性能，不致因環境侵蝕、施工品質不良、構件鏽蝕老化等影響造成破壞或喪失其應有性能的需求，而非指其使用壽命可達永久不朽(鄭清江等人，2012)。



附錄圖 2-1 地錨之基本構造示意圖(交通部臺灣區國道新建工程局，2014)

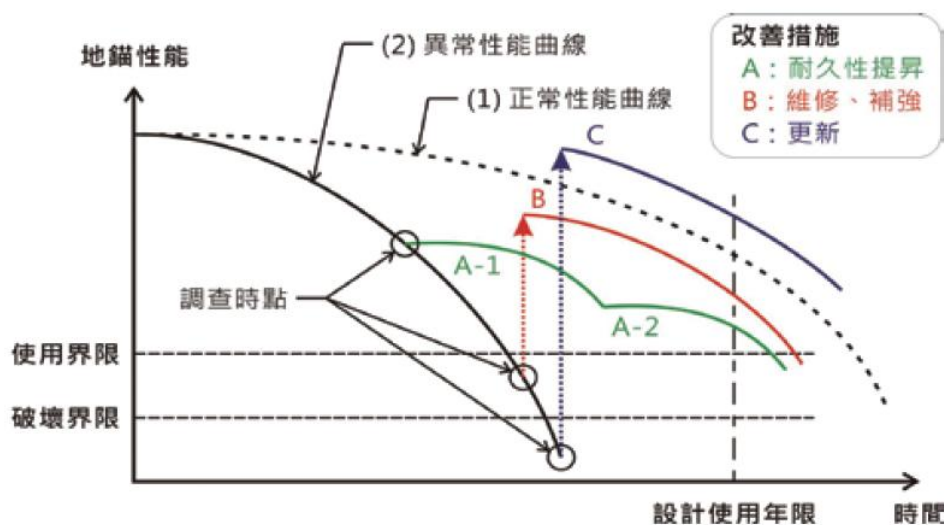
附錄表 2-1 地錨之種類(交通部臺灣區國道新建工程局，2014)

項目	地錨種類
使用目的	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 臨時性 ➢ 長久性
錨碇體之錨碇行為機制	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 摩擦阻抗型 ➢ 承載阻抗型 ➢ 複合(摩擦+承載)型
抗張材之應力傳佈分式	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 承拉式 ➢ 承壓式 ➢ 多段承壓式 ➢ 承拉、承壓併用式
錨碇體之施工方式	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 無加壓式 ➢ 低加壓式(灌漿壓力小於 10 kgf/cm²) ➢ 高加壓式(灌漿壓力大於 20 kgf/cm²) ➢ 擴孔式(單一擴孔或多段擴孔)
錨頭之裝置	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 楔塊(夾片)鎖定式 ➢ 螺帽鎖定式 ➢ 複合(楔塊+螺帽)鎖定式
抗張材回收	<ul style="list-style-type: none"> ➢ (部份)可回收式 ➢ 不可回收式

2. 地錨性能

地錨設計預期之性能，大致包括提供預力、控制變形，及其系統之防蝕能力等，由於一般工程均有其設計年限，故所謂永久性地錨即須在使用的服務生命週期內，定期做必要之檢測與修護，若發現預力衰減或材料腐蝕等情況，則須進行複拉或補強動作以提升地錨功能，若已無法維修則須重新施作之。

根據鄭清江等人(2012)整理了日本土木研究所(2008)所提之地錨性能與使用時間關係，如附錄圖2-2，可知地錨在長期使用下，其性能有逐漸遞減情形，為確保其服務性能，僅需確保於設計使用年限內，遞減後之地錨性能仍維持在使用需求之界限以上即可。此外，前述永久性地錨使用界限若須精確定義，可能需依據實際之統計數據資料，倘若無實際統計之資料，可利用殘餘荷重控制，酒井等人(2010年)提出地錨殘餘荷重不同增減程度所對應之地錨健全性狀態及處理對策之粗略關係概念，如附錄表2-2，大致以地錨殘餘荷重介於0.8倍錨碇荷重～設計荷重，評估地錨屬於健全狀態。



附錄圖 2-2 地錨性能與使用時間之關係 (鄭清江等人改繪自日本土木研究所，2012)

附錄表 2-2 地錨殘餘荷重及健全度之概略判斷標準(鄭清江等人改繪自酒井等人，2012)

殘餘荷重範圍	健全度	狀態	處理方式例
0.9 T_{ys} (降伏荷重)	E	有斷裂之疑慮	實施緊急對策
	D	有處於危險狀態之疑慮	實施對策
1.1 T_a	C	超越容許值	
容許荷重(T_a)	B		觀察其變化狀態，以檢討對策之必要性
設計荷重(T_d)	A	健全	
錨碇荷重(P_t)	A	健全	
0.8 P_t	B		觀察其變化狀態，以檢討對策之必要性
0.5 P_t	C	機能大幅降低	實施對策
0.1 P_t	D	無法提供機能	

3. 地錨常見之破壞

國內常見的地錨破壞或功能減損之現象，可歸納為三類：(1)錨頭破壞、(2)構件異常及材料銹蝕老化及(3)殘餘荷重損失或增大等異常現象(鄭清江等人，2012)。錨頭破壞包括了錨頭保護塊剝離或開裂、鋼腱射出、錨頭分離或旋轉等，及承壓結構破裂及下方表土淘空，或錨頭附近有白華現象或地下水滲出等。在構件異常及材料銹蝕老化部分，常見之問題及破壞型態包括地錨折角、鋼腱內縮、錨頭及夾片鏽蝕、自由端未滿漿及鋼腱鏽蝕、斷裂等。殘餘荷重異常現象，可能因因潛變、夾片咬合不良或邊坡滑動等因素而減少或增加，一般預期地錨之殘餘荷重應介於0.8~1.2倍設

計荷重間，以維持其正常功能狀態；惟可能由於地錨之設計或施工未盡周延、地層潛變、鋼腱腐蝕及承載地層沖蝕流失等因素，導致地錨產生預力損失，亦或邊坡持續滑動、長期性地下水壓增加（排水管堵塞、地下水位異常升高）或地層屬回脹性材料等情況，造成地錨預力增加。

4. 地錨之防蝕保護

為釐清地錨可能因銹蝕老化引致其功能折減之疑慮，SFR曾根據岩栓的抗腐蝕特性進行長期之非破壞性檢測，詳如本文第四章4.1.2節，以確保岩栓沒有受到地下水入滲的侵蝕。此外，根據本計畫前期研究，國內隧道發生裂縫與滲漏水的比例分別高達92%與72%，較高於國外的79%與23%。國內發生高比例滲漏水的原因，可能與國內早期隧道施工並無鋪設防水層，亦可能因國內隧道所處水文地質環境具充沛的地下水滲流條件、或岩體破裂較嚴重其裂隙聯通程度高於國外所致(楊長義等人，2015)。

有鑑於地錨在受力後，水泥漿可能會因局部受到高拉應力而產生裂縫，導致抗張材暴露；抗張材之中心固定器設計或安裝不良；或者封漿器設計及安裝不良，而無法提供充分之保護層等問題，故地錨防蝕材料之選擇除應符合防蝕需求外，應考慮其耐久性、穩定性和下列原則進行防蝕設計(林三賢等人，2014)。

(1) 地錨防蝕分級

依PTI(2004)之地錨防蝕保護分類，大致可分為雙重防蝕保護(I級)和單重防蝕保護(II級)兩類型，設計工程師可依地錨設計年限、腐蝕環境條件、地錨損壞後果和造價…等，選擇適當的防蝕保護方法，決策流程可參考附錄圖2-3。在台灣，長久性地錨原則上建議採用雙重防蝕，參附錄圖2-4，但若經調查結果，確認地錨設置環境沒有腐蝕之虞時，雖允許採用單重防蝕保護，參附錄圖2-5，但因氣候潮濕多雨，仍不建議使用。對於臨時性地錨因使用期間較短，可採用簡易防蝕保護方式。

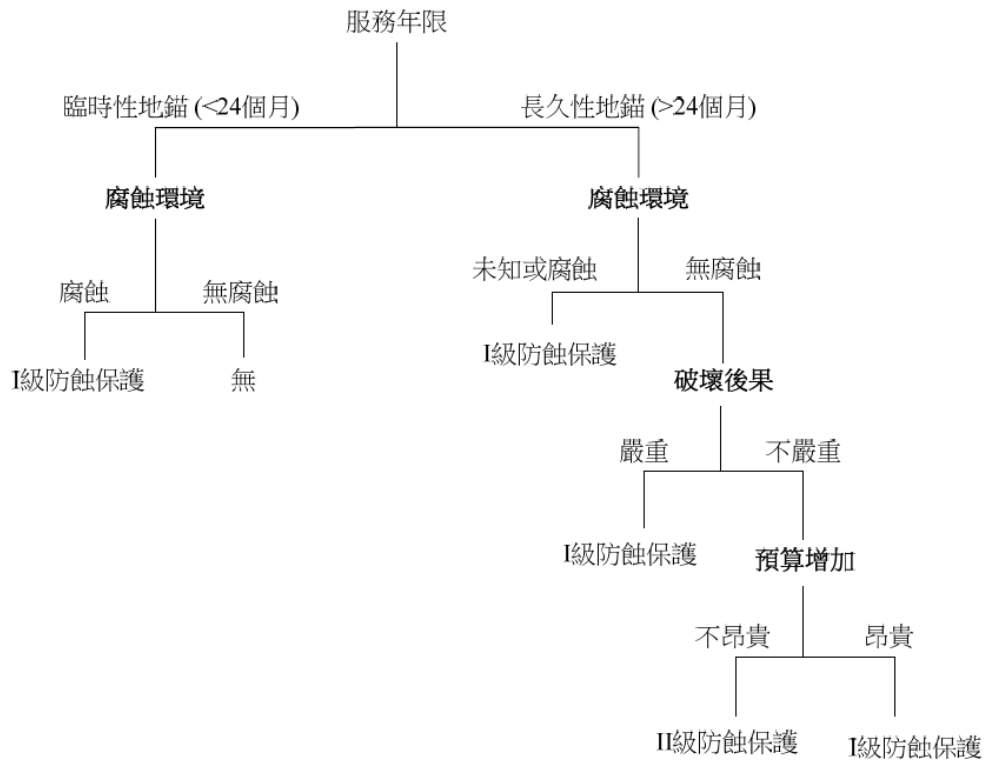
(2) 自由段防蝕保護

- A. 長久性地錨自由段之每束抗張材須加自由段小口徑護管，並以防蝕材料填充或包覆，以達到與腐蝕環境完全隔離的效果。
- B. 使用期間需再復拉之地錨，其防蝕材料不得妨礙抗張材之自由伸張。
- C. 長久性地錨自由段護管的強度應能承受灌漿壓力而不破損。
- D. 自由段和錨碇段的界面常易腐蝕，必須特別注意防蝕保護。
- E. 在環境條件不良有腐蝕之虞時，臨時性地錨應採用適當的防蝕措施。
- F. 臨時性地錨之自由段抗張材應加護管或包覆防蝕材料，以達防蝕效果。

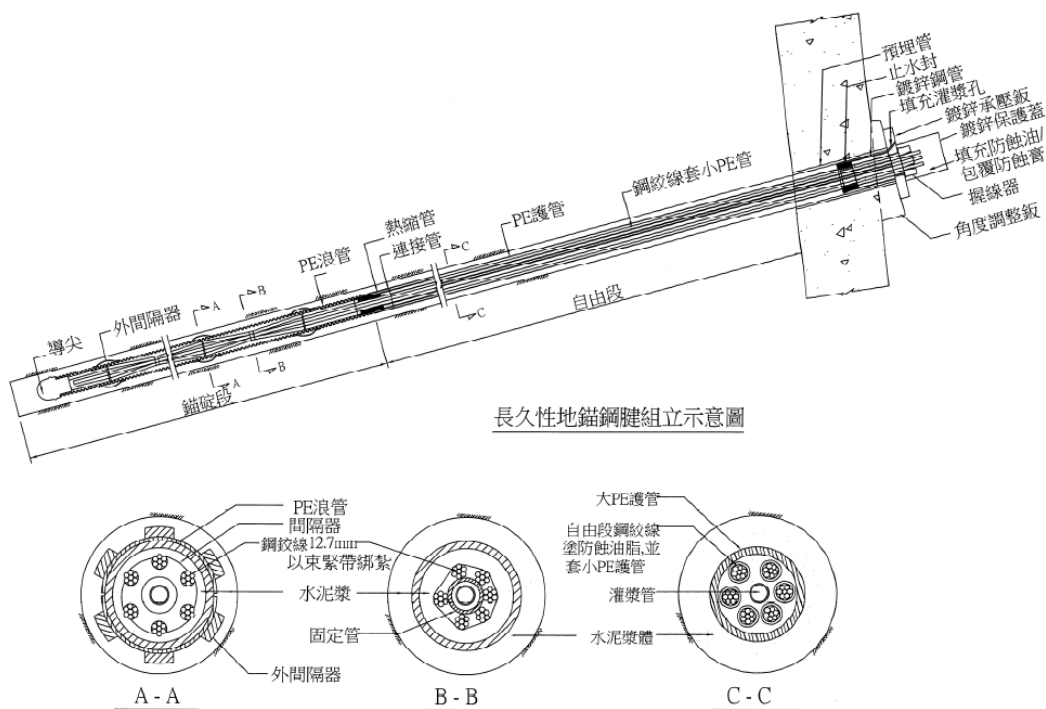
(3) 錨碇段防蝕保護

- A. 長久性地錨之錨碇段抗張材應以錨碇段護管(浪管)包覆，護管(浪管)內部以水泥漿或樹脂漿充填。護管外部應有適當厚度之保護層和水泥漿。

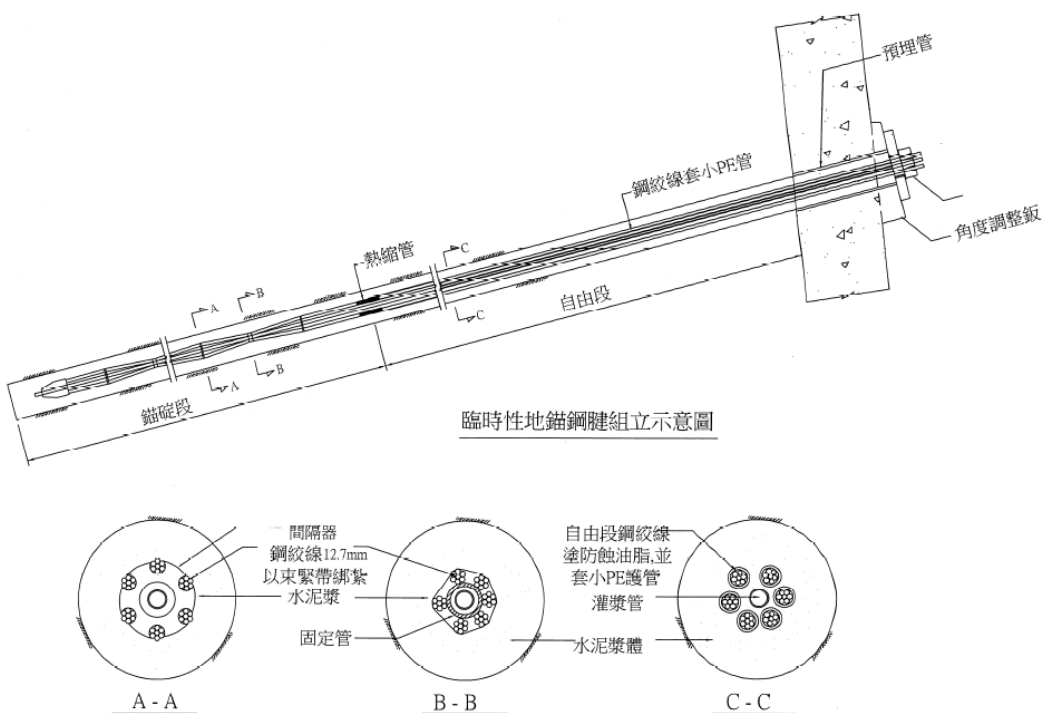
B. 臨時性地錨錨碇段在以水泥漿填充的情況下，其錨碇段之抗張材與孔壁間應有 10 mm 以上之覆蓋。抗張材在環境條件有腐蝕之虞時，臨時性地錨應採用適當的防蝕措施。



附錄圖2-3 地錨防蝕保護方法選擇之決策流程圖(林三賢等人改繪自PTI，2014)



附錄圖2-4 地錨雙重防蝕保護(I級)示意圖(林三賢等人, 2014)



附錄圖2-5 地錨單重防蝕保護(II級)示意圖(林三賢等人, 2014)

(4) 錨頭防蝕保護

- A. 錨頭及其下方之地錨構件容易銹蝕，尤其是承壓板下方與自由段護管頂端之間，更是防蝕保護必須特別注意之處。
- B. 需再複拉之地錨錨頭及自由段護管頂端應選擇適當的防蝕方式。
- C. 在環境條件有腐蝕之虞時，臨時性地錨之錨頭應採用適當的防蝕措施。

附錄文獻

- [1] 鄭清江等人，2012，臺灣地錨設計與施工問題探討，中華技術，no.93.
- [2] 林三賢等人，2014，地錨應用於邊坡工程設計與施工規範(草案)，交通部臺灣區國道新建工程局。
- [3] 林三賢等人，2014，公路邊坡及地錨相關設施設計、施工與維護管理規範(草案)之研究，交通部臺灣區國道新建工程局。
- [4] 楊長義等人，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核能研究所委託研究計畫研究報告。

附錄3 中英文專有名詞對照表

原文	翻譯	備註
access tunnel	聯絡坑道	
activation	活化	
activation of substances	活化物質	
active system	活性系統	
activity content	活性內容	
activity quantities	活性量	
additional waste	額外的廢棄物	
air filter	空氣濾芯	
aluminium	鋁	
americium	錒	
ashes	焚化灰	
base	底層	
baseboard	護壁板	
bead resin	珠狀樹脂	
biological radiation shield	生物輻射屏蔽	
Biosphere synthesis report	生物圈綜合報告	
bitumen-solidified waste	瀝青固化廢棄物	
blasting	鑽炸工法	
blasting sand	噴砂	
boiling water reactor , BWR	沸水式反應器	
carbon steel	碳鋼	
cellulose	纖維素	
cement-	水泥基	
cement-solidified ion-exchange resin	水泥固化的離子交換樹脂	
cement-stabilised plug	具水泥膠結特性的封塞	
cement-stabilised sand	具水泥膠結特性的砂	
central tunnel, CT	中央坑道	
Clab(Central interim storage for spent fuel)	瑞典用過燃料集中貯存設施)	

原文	翻譯	備註
Climate report	氣候報告	
Clink(Central interim storage and encapsulation plant for spent fuel)	瑞典用過燃料中期貯存與包封廠	
closed	關閉	
closure	封閉	
closure component	封閉組件	
closure measure	封閉量測	
combustible solid waste	可燃固體廢棄物	
compartment	隔間	
concrete caisson	混凝土沉箱	
concrete mould	混凝土箱	
concrete plug	混凝土封塞	
concrete tank	混凝土槽	
concrete tank lined with butyl rubber	丁基橡膠為襯的混凝土槽	
concrete-embedded solid waste	混凝土嵌入固體廢棄物	
concrete-embedded waste	混凝土封包廢棄物	
construction tunnel, BT	建設坑道	
contaminated	污染	
control document	控制文件	
control programme	控制計畫	
controlled method	控制方法	
corrode	腐蝕	
crud	渣滓	
crushed rock	碎岩	
damaged zone	損傷區	
decommissioning waste	除役廢棄物	
decontaminated	除污	
decontamination	去污	
demolished	拆除	
demolition	拆除	
dewatered ion-exchange resin	脫水的離子交換樹脂	
dewatered low-level ion-exchange	低階放射性離子交換樹脂	


原文	翻譯	備註
resin		
discarded	丟棄	
dismantling	廢除	
dispersed	消散	
disposed waste	處置廢棄物	
dissolved	溶解	
drum tray	托盤	
earth dam plug	土壩封塞	
environs	周圍環境	
equipment containing radiation source	設備輻射源	
evaporator concentrate	蒸發器濃縮物	
exchange	交換	
expected state	預期狀態	
extensive repair	修復	
filter resin	過濾樹脂	
finely dispersed	細微分解	
fission	裂變	
fission of uranium	鈾核分裂	
fission product	分裂產物	
fracture	裂縫	
groundwater chemistry	地下水化學	
groundwater chemistry	地下水化學	
grout	水泥漿	
higher burn-up or changed fuel composition	更高燃爐或改變燃料物組合	
hydraulic conductivity	水力傳導度	
hydraulically tight section	液壓密封斷面	
hydrogeology	水文地質	
induced activity	誘發放射性	
Initial state report	初始狀態報告	
inner moderator tank	調節器	
inspection	檢測	

原文	翻譯	備註
inspection of the physical condition of the waste vaults	處置窖物理條件的檢查	
intermediate storage	中間儲存器	
intermediate-level decommissioning waste	中放射性除役廢棄物	
ion-exchange resin	離子交換樹脂	
lid	蓋板	
loading-in building	裝填設施	
Longitudinal Wall	長軸向支撐牆	
long-lived radioactive waste	長壽命放射性廢棄物	
low and intermediate-level waste	低放和中放廢棄物	
macadam	碎石	
maintenance outages	檢修停機	
measurement uncertainties	測量的不確定性	
measurements of inflows of groundwater	地下水入滲量量測	
mechanical constraint	機械束制、力學束制	
mechanical filter aid	機械助濾劑	
mechanical filter resin	機械過濾樹脂	
mineral wool	石棉	
mishap	不幸事件	
nuclear facility	核設施	
operational waste	營運廢棄物	
organic polymer	有機聚合物	
overhead crane	吊車	
partition wall	隔牆	
pillar	立柱	
plug	封塞	
plutonium	鈾	
polyethylene	聚乙烯	
polypropylene	聚丙烯	
polystyrene	聚苯乙烯	
powdered resin	粉狀樹脂	


原文	翻譯	備註
precipitation sludge	沉澱污泥	
project management	專案管理	
quality assurance systems	品質保證系統	
quality management system	品質管理系統	
radiation-shielding	輻射屏蔽	
radioactively contaminated material and radioactive chemical	放射性污染物質和放射性化學廢料	
radionuclide	放射性核種	
radionuclide inventory	輻射存量	
reactor pressure vessels , RPVs	反應器壓力槽	
reactor water	反應器水	
reinforcement measure	加強的量測	
repository	處置場	
repository barriers	處置障蔽	
retain	保留	
sabotage	破壞活動	
safety audit	安全審核	
safety of assessment	安全評估	
scrap metal	廢金屬	
secondary waste	二次廢棄物	
shaft	豎井	
shutdown	停機	
Site Descriptive Model	場址描述模型	
sludge	污泥	
soda treatment	鹼處理	
solidified waste	固化廢棄物	
solution	溶液	
spent fuel	用過燃料	
spent radiation source	輻射源	
stainless steel	不銹鋼	
steel drum	鋼桶	
steel mould	鋼材廢棄物箱	
storage pool	儲存槽	

原文	翻譯	備註
surface dose rate	表面劑量率	
surface system	地表系統	
Swedish geographical height system RHB70	瑞典地理座標高程系統	
testing and inspection	試驗與檢查	
tetramould	四方廢棄物箱	
the inventory report	庫存報告	
transition material	緩衝材料	
transuranic element	超鈾元素	
transverse tunnel , TT	橫向坑道	
turbine	渦輪機	
uncertainties in correlation factors	相關因素的不確定性	
uncertainties in other methods	計算方法的不確定性	
unreinforced concrete lid	混凝土蓋板	
waste	廢棄物	
waste from radiotherapy unit	放射治療器材廢棄物	
waste packaging	廢棄物包件	
water cleanup system	水淨化系統	
zinc	鋅	
access tunnel	聯絡坑道	

附錄4 期末審查簡報




行政院原子能委員會
放射性物料管理局



國立中央大學
National Central University


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工程地質與長期 穩定審驗技術建立之資訊研析



期末審查簡報

受委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局
計畫主持人：淡江大學 楊長義 教授
國防大學理工學院 李宏輝 教授
中華民國 105 年 12 月 15 日



簡報綱要

- 計畫目的
- 工作內容與期程規劃
- (預定)完成的工作項目
- 執行現況說明
- 審查導則草案編修要點建議

計畫目的

1. 蒐整研析國外低放處置規劃經驗，瞭解其坑道處置的封閉規劃及長期安全評估項目。
2. 處置場所處母岩對處置坑道的穩定性與長期安全有直接的影響，為決定開挖岩體支撐形式的重要依據，透過國際資訊研析處置母岩工程地質與岩石力學特性，提供後續發展處置坑道穩定性及長期安全評估審驗技術參考依據。
3. 蒐整國內其他公共建設營運過程中之母岩工程地質與岩石力學特性，比較國內、外處置母岩工程地質與岩石力學特性差異，進一步研析符合我國本土地質條件之處置坑道穩定性與長期安全評估審驗技術。

3

工作內容與期程規劃

工作內容	105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工程地質與長期穩定審驗技術之資訊研析			※			※			※			※
國際低放射性廢棄物坑道處置封閉與長期穩定評估項目蒐整研析												
研析國際坑道處置技術報告有關坑道處置所處母岩之岩石力學初始條件												
研析國際坑道處置技術報告有關坑道處置長期穩定與封閉前之安全評估項目												
綜合研析坑道處置封閉與長期穩定評估要項												
提出低放審查準則(第0版)與處置坑道相關章節之精進建議												
工作進度估計百分比(累積數)	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

4

(預定)完成的工作項目

Ch2 國際低放坑道處置坑道①封閉作法與②長期安全評估項目

- 蒐整SFR有關坑道處置在封閉階段所採作法，及坑道處置之長期安全評估項目。

Ch3 國際坑道處置封閉前母岩之岩石力學初始狀態

- 參考SFR在建造期與運轉期之相關經驗，蒐整研析處置場的現地地質條件、母岩工程地質、與岩石力學特性。

Ch4 處置坑道①穩定性與②長期安全評估項目

- 蒐整一般坑道及國外坑道處置相關技術報告，研析坑道穩定性之影響因素，亦針對第二章有關SFR低放處置窖的封閉規劃提出綜合研析，以作為處置坑道封閉前之長期安全評估參考。

Ch5 處置坑道穩定性與長期安全評估相關之工程地質與岩石力學特性參數

- 蒐整國內一般坑道相關之規劃與建造經驗，尤其是地質條件、工程地質暨岩石力學特性、攸關坑道結構穩定性與長期安全評估之岩體分類與支撐工法等相關資訊，並與國外低放處置案例進行比較與討論。

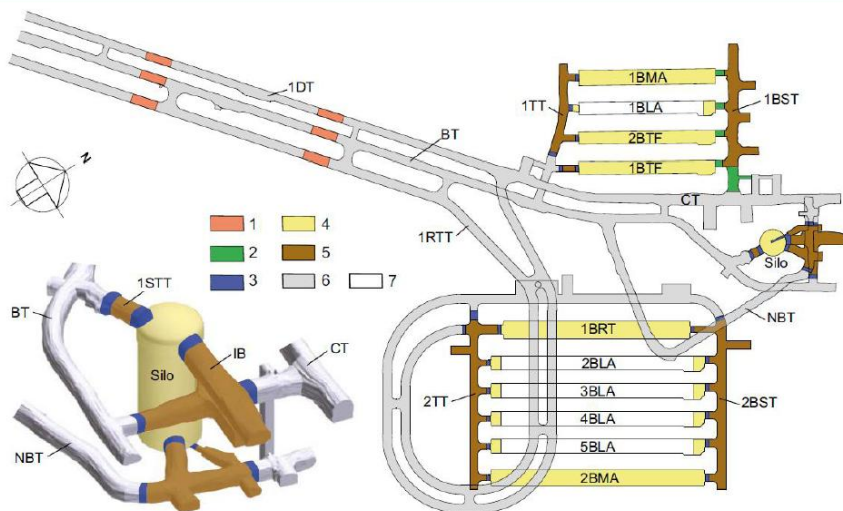
Ch6 低放審查導則(第0版)相關章節之精進建議

- 綜整前述資料及國內外建議的監測參數，提出提出修訂低放處置審查導則(第0版)相關條文之建議。

5

國際低放坑道處置坑道封閉作法(1/3) SFR1 與 SFR3 的封閉規劃示意圖

執行現況說明(01/17)

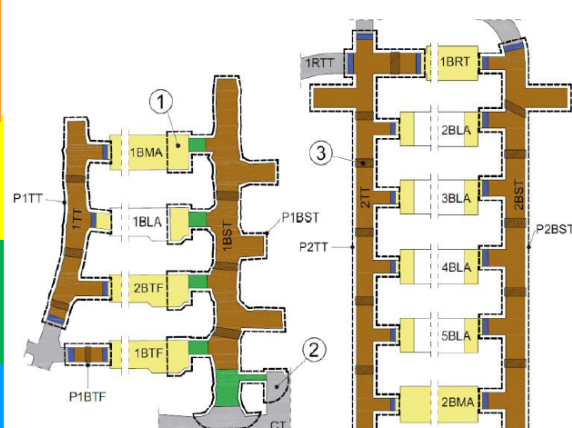


(1) 橘色為聯絡坑道的封塞；(2) 綠色為緩衝材料；(3) 藍色為混凝土封塞；(4) 黃色為碎石材料回填；(5) 棕色為蒙脫土液壓密封斷面；(7) 白色為無回填區。(SKB, 2014 a,b)

6

國際低放坑道處置坑道封閉作法(2/3) 處置窖的封塞作業(Plugs to waste vaults)

執行現況說明(02/17)



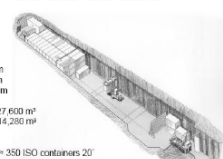
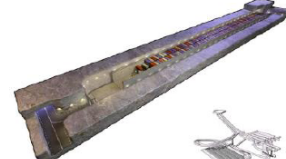
- 在 SFR1 與 SFR3 將設置五個封塞斷面 (P1TT, P1BTF, P1BST, P2TT 與 P2BST) 設置。
- 封塞方式包括了液壓密封斷面 (hydraulically tight section) 與機械束制 (mechanical constraint), 大部分的封塞規劃是採用混凝土封塞方式藉以提供力學支撐。在連接 1BST 的封塞斷面, 因坑道幾何斷面與現地地質條件的限制, 導致混凝土封塞不易施作, 取而代之的是採土壩 (earth dam plug) 方式進行封塞, 其優點在於土壩封塞方式並不需要岩壁提供力學上的支撐; 由蒙脫土填充所形成的斷面為水壓式填充斷面, 由封塞提供力學上的束制。

處置窖與坑道間的封塞示意圖, 虛線為處置窖緊鄰坑道處。①黃色區塊之封塞斷面, 為岩石回填而成, 其有如土壩封塞 (earth dam plug) 的作用、綠色區塊為緩衝材料、棕色區塊為液壓密封材料 (hydraulically tight material); ②灰色區塊為為坑道系統的回填土封塞, 其作用有如土壩封塞的作用; ③有矩形方框□的區域為必須透過控制方法 (controlled methods) 加以移除的損傷區 (damaged zone)。 (SKB, 2014 a,b)

7

國際低放坑道處置坑道封閉作法(3/3) SFR 低放處置坑道結構設計考量、檢監測與封閉計畫

執行現況說明(03/17)

SFR 低放處置坑道	SFR1-1BLA	SFR3- 2-5BLA
規劃項目	 <p>L = 160 m W = 15 m H = 12.5 m V_{use} ≈ 27,600 m³ V_{storage} ≈ 14,280 m³ Capacity = 350 ISO containers 20'</p>	
處置窖深度	■ 約 70 m	■ 約 120 m
處置母岩功能	■ 處置母岩力學穩定性佳, 同時具備較低之地下水滲流條件	
與坑道結構穩定有關之設計考量	■ 運轉期間, 岩壁上的噴凝土將增加處置窖的結構穩定 ■ 窖封閉後, 噴凝土對處置窖的結構穩定影響極小	
檢測與監測	■ 興建過程及完工後, 監測、檢測處置窖之噴凝土及岩石 ■ 置放廢棄物放置的運轉階段, 監測、檢測處置窖的物理狀況 ■ 於處置窖進行封塞前, 進行最終監測與檢測	
封閉計畫	■ 廢棄物標準貨櫃周遭空間不回填, 避免容器受損 ■ 坑道終端毗連其他隧道的位罝將予以回填, 以提供混凝土封塞的支撐力	

8

安全原則		安全功能
1.限制長半衰期放射性核種的活度	限制活度的數量	
2.遲滯放射性核種遷移	(1)低水流量 (2)良好遲滯能力 (3)避免處置場周圍有抽水井	

安全功能暨安全功能指標 (SKB, 2014 a)

安全功能	安全功能指標	達成安全功能的方法
處置窖的低流量	低地震活動 變成永凍土的風險低	選址(位置) 處置場設計(深度)
母岩內的低流量	低地震活動及避免位處區域變質帶 具低水力梯度 具低水力傳導係數	選址(位置) 選址(深度) 選址(深度)
避免不經意的干擾	設置鑽井的風險低 礦藏潛在性低	處置場設計(深度) 選址(位置)

9

組成要素	項目
廢棄物形式(Wave form)	放射性程度 平流傳輸的限制 力學穩定性 溶解作用限制 吸附作用 有利的水化學
廢料包件方式 (Waste packaging)	平流傳輸的限制 力學穩定性 吸附作用 有利的水化學
廢料包件周圍的灌漿(Grouting surrounding waste packages)	平流傳輸的限制 力學穩定性 吸附作用 有利的水化學
混凝土結構(Concrete structures)	平流傳輸的限制 力學穩定性 吸附作用 有利的水化學
噴凝土(Shotcrete)	力學穩定性(營運階段與岩栓共同評估) 平流傳輸的限制 吸附作用
膨潤土與砂之混合物/膨潤土(Bentonite and sand/bentonite)	力學穩定性 平流傳輸的限制 吸附作用
處置窖的回填材料(碎石) (Backfill in waste vaults(crushed rock/macadam))	力學穩定性 吸附作用
封塞及其他封閉組件 (探查鑽孔)(Plugs and other closure components)	限制處置場內的平流傳輸 吸附作用

10

執行現況說明(06/17)

坑道處置封閉前母岩之岩石力學初始狀態

SFR處置場所處母岩之未擾動岩石力學參數(SKB, 2014a)

Parameter	101057 – Granite to granodiorite	101061 – Pegmatite, pegmatitic granite	111058 – Fine- to medium-grained granite	103076 – Felsic to intermediate metavolcanic rock	102017 – Amphibolite
Uniaxial compressive strength (MPa)	226/50 126–326	183/45 90–270	280/45 210–350	139/45 100–200	142/45 60–230
Indirect tensile strength (Brazilian test) (MPa)	13/2 10–18	12/3 8–16	16/2 12–20	9/2 5–13	9/2 5–13
Young's modulus (GPa)	75/3 69–81	74/4 66–82	74/2.5 70–79	99/3 93–105	81/4 73–89

破裂帶的節理力學參數(SKB, 2014a)

Parameter	Subhorizontal (dip 0–20°) fractures with a depth z = 0–50 m, σ_n = effective normal stress	Other fractures with a depth z = 0–150 m and Subhorizontal fractures where z > 50 m, σ_n = effective normal stress
Normal stiffness, K_n [MPa/mm]	$K_n = 10 \times \sigma_n$	$K_n = 10 \times \sigma_n$
Shear stiffness, K_s [MPa/mm]	$K = K_n / 3$	$K = K_n / 20$
Friction angle, ϕ_1 [°] for normal stress range 0–0.5 MPa	66°	48°
Friction angle, ϕ_2 [°] for normal stress range 0.5–1.5 MPa	32°	35°
Apparent cohesion for normal stress range 0.5–1.5 MPa	0.4	0.4
Dilatancy	15°	15°

破裂帶的節理力學參數，包括：

- 正向勁度
- 切向勁度
- 摩擦角(考量不同的岩覆深度)
- 視凝聚力
- 膨脹角

11

執行現況說明(07/17)

處置坑道穩定性與長期安全評估項目(1/3)

處置坑道襯砌結構穩定性之檢監測項目(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	檢監測項目
1. 外力因素	地震作用	1. 襯砌目視檢查 2. 襯砌影像掃描 3. 襯砌裂縫擴展性 4. 內空變位置量測 5. 隧道中線量測 6. 洞口段邊坡災害調查
	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 1. 襯砌目視檢查 2. 襯砌影像掃描 3. 現地崩崖調查 4. 現地監測(地表位移、傾斜管、地滑計) 5. 隧道內監測(襯砌裂縫進展性、三維絕對座標內空量測、維修補強材劣化)
	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 1. 襯砌目視檢查 2. 襯砌影像掃描 3. 襯砌裂縫擴展性

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	檢監測項目
2. 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	1. 襯砌目視檢查 2. 襯砌影像掃描 3. 襯砌裂縫擴展性
	依時性變形特性		
3. 非力學因素	混凝土中性化	網狀裂縫	混凝土中性化試驗
	鋼筋保護層厚度不足	條狀裂縫	透地雷達探測
	鹼值粒料反應	龜殼狀裂縫	混凝土強度試驗
	混凝土澆置中斷(冷縫)	漣漪狀裂縫	襯砌目視檢查
	襯砌背後空洞或厚度不足	無法以目視判斷	透地雷達探測

13

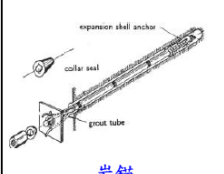
Variable	1BLA(SFR1)與2-5BLA(SFR3)	封塞(plugs)與其他封閉元件(SFR3)
幾何參數(Geometry)	<ul style="list-style-type: none"> 於建造階段用於加強岩壁穩定性的噴凝土，需評估水泥礦物的溶解作用導致 pH 值的提高 處置室的混凝土地板亦需評估 pH 值的變化 建造混凝土(construction concrete)的孔隙率介於 9-15%，基於長期安全評估，建造混凝土的孔隙率採15%，噴凝土與水泥漿為30%，碎石(macadam)亦採30% 建造階段產生的混凝土裂隙寬度不超過 0.1 mm 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
放射性強度(Radiation intensity)	<ul style="list-style-type: none"> 低放處置室不考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 不考慮
溫度(Temperature)	<ul style="list-style-type: none"> 溫度與周圍岩盤溫度相同，約5-7°C 	<ul style="list-style-type: none"> 溫度與周圍岩盤溫度相同，約5-7°C
水文地質參數(Hydrological variables)	<ul style="list-style-type: none"> 相關的參數與BMA處置室相同，包括混凝土水力傳導係數與碎石水力傳導係數(>10⁻² m/s) 水壓力等同靜水壓力 	<ul style="list-style-type: none"> 封塞採用混凝土者，其水力傳導係數與BMA處置室相同 碎石水力傳導係數>10⁻² (m/s) 用於聯絡坑道的膨潤土其水力傳導係數 < 10⁻¹⁰ (m/s)
應力(Mechanical stresses)	<ul style="list-style-type: none"> 混凝土地板的作用應力來自廢棄物及其容器 2-5BLA長軸向側牆承受地下水與回填土應力 	<ul style="list-style-type: none"> 膨潤土的回脹壓力由混凝土結構承受
放射性核種(Radionuclide inventory)	<ul style="list-style-type: none"> 存放於各處置室、筒倉的放射性核種 採低濃度存放，其溶解度均視為不出過上限值 	<ul style="list-style-type: none"> 不考慮
材料組成(Material composition)	<ul style="list-style-type: none"> 混凝土材料組成參考 BMA處置室 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材料則由膨潤土及碎裂的岩石(crushed rock)以 30/70 的比例混合而成 混凝土封塞採用標準混凝土 品質良好之膨潤土
地下水組成性質(Water composition)	<ul style="list-style-type: none"> BLA處置室未來將充滿地下水，地下水組成對混凝土的影響討論可參考 12.3.6 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
氣體參數(Gas variables)	<ul style="list-style-type: none"> 當處置室與聯絡坑道充滿地下水後，將留有部分殘存的氣體 	<ul style="list-style-type: none"> 同左

執行現況說明(10/17)

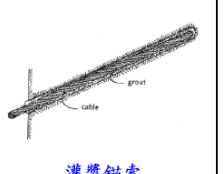
坑道支撐構件特性

坑道支撐構件之長、中、短期支撐效果


- 長期支撐
 - 岩錨(Mechanically anchored, tensioned rock bolt), 尤其在品質相對良好的岩體其效果更佳
 - 灌漿錨索(Grouted cable bolt), 適用在各種不同的岩體條件, 且抗腐蝕能力佳
- 中期支撐
 - 摩擦式岩錨(Friction anchored rock bolt), 銹蝕問題影響其長期支撐效果
- 短期支撐
 - 岩釘(Untensioned grouted dowel), 因受限於樹脂效期
 - 摩擦型錨桿(Friction anchor or split set), 適用於輕量載重, 銹蝕問題影響其長期支撐效果
 - 樹脂灌漿張力錨桿(Resin grouted, tensioned threaded bar), 短期內可提供非常高的錨定效果, 但成本較高



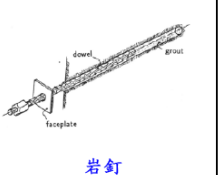
岩錨



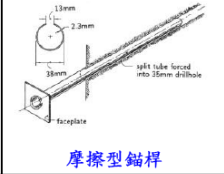
灌漿錨索



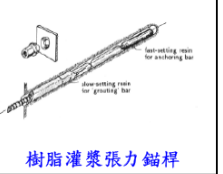
摩擦式岩錨



岩釘



摩擦型錨桿



樹脂灌漿張力錨桿

Hoek and Wood (1987)


15

執行現況說明(11/17)

坑道支撐構件特性

SFR 岩栓檢測經驗

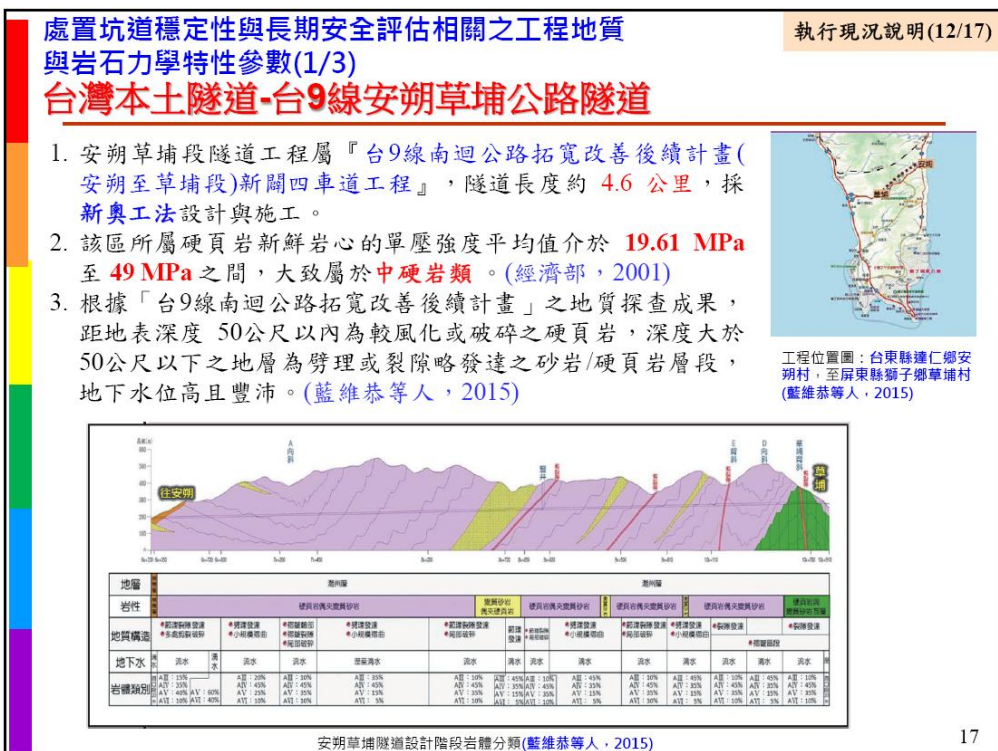
- SFR 於建造期間(1984-1986)設置之316根岩栓, 於1987年進行非破壞性檢測, 檢測分為二步驟:
 - 灌漿後的33~34小時進行第一次檢測
 - 灌漿後的第34天進行第二次檢測
 - 檢測結果
 - Optimal performance : 73 %
 - Reduced performance : 21 %
 - Insufficient performance : 5 %
 - Very poor or non-existent performance : 1 %
- 於1999取49根參考岩栓進行非破壞性檢測, 結果顯示49根岩栓均為 Optimal performance, 相同的岩栓另於2006年施測, 結果同為Optimal performance。
- 腐蝕特性試驗
 - 於2004年進行岩栓腐蝕性試驗, 分別在地下水入滲區(位於Singö 變形區)、潮濕區與乾燥區各取一根岩栓進行試驗, 為確認岩栓埋置段是否腐蝕, 以孔徑130 mm鑽孔取出岩栓。
 - 結果顯示, 岩栓埋置段金屬部分良好, 無腐蝕現象, 岩栓與岩壁之間被水泥充分包覆, 水泥有些許孔隙但無地下水滲入。



Class	Boltometer signal	Estimated bolt condition
A	No reflection	Optimum
B	Small flexural wave reflection	Reduced
C	Large flexural wave reflection	Insufficient
D	Compression wave echo and very large flexural wave reflection	Very poor or non-existent *)

岩栓非破壞性檢測器(Boltometer) 及檢測結果分級

16



處置坑道穩定性與長期安全評估相關之工程地質 與岩石力學特性參數(3/3)		執行現況說明(14/17)															
國內潛在場址與國外處置場母岩工程地質、岩體分類與支撐系統																	
	安朔草埔公路隧道	SFR 處置場															
地質條件	<ul style="list-style-type: none"> 板岩及硬頁岩 無活動斷層經過 主要地質構造為褶皺，沿板岩劈理面之剪裂帶發育亦相當常見，地層較為破碎 	<ul style="list-style-type: none"> RFR01區之岩性由偉晶岩以至偉晶花崗岩為主(聯絡隧道位於本區) RFR02區域主要為細粒到中粒的變質花崗岩-以至花崗閃長岩(SFR1和SFR3大部分座落在RFR02區域) 具地質破裂帶 															
岩體分類	<ul style="list-style-type: none"> 依台灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR系統)，屬A類岩體 	<table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>岩種</td> <td>B1-B1</td> <td>B1-B2</td> <td>B1-B2</td> <td>B1-B3</td> </tr> <tr> <td>等級</td> <td>S2</td> <td>S2-S4</td> <td>S2-S4</td> <td>S4 + additional rock anchoring</td> </tr> </table>						岩種	B1-B1	B1-B2	B1-B2	B1-B3	等級	S2	S2-S4	S2-S4	S4 + additional rock anchoring
岩種	B1-B1	B1-B2	B1-B2	B1-B3													
等級	S2	S2-S4	S2-S4	S4 + additional rock anchoring													
開挖工法	<ul style="list-style-type: none"> 鑽炸為主、機械修挖為輔 	<ul style="list-style-type: none"> 鑽炸工法為主 															
支撐系統	<ul style="list-style-type: none"> (初期)支撐系統，包括噴凝土+鋼絲網(或鋼纖維混凝土)、岩栓、鋼支保支撐 二次襯砌部分，全線採鋼筋混凝土襯砌，混凝土強度並由 245 kg/cm² 提高至 280 kg/cm² 考慮二次襯砌之防水 	<ul style="list-style-type: none"> 支撐系統，包括噴凝土+鋼絲網(或鋼纖維混凝土)、岩栓、鋼支保支撐 															

19

審查導則草案編修要點建議(1/3)		執行現況說明(15/17)
因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議
第三章 場址特性 描述	<p>場址特性描述中，與大地工程特性有關之工程地質與岩石力學特性參數，可供處置坑道在設計、建造及運轉期間長期安全評估之依據。</p>	<p>提供要項部分： 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>審查作業部分： 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>
第四章 處置設施 之設計	<p>考量處置坑道其在坑道服務性與結構安全性較一般坑道要求之標準為高，故坑道處置在設計上，應考慮處置坑道長期穩定需求。</p>	<p>提供要項部分： 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>審查作業部分： 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>

20

執行現況說明(16/17)

審查導則草案編修要點建議(2/3)

因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議
第五章 處置設施 之建造	為減少對圍岩之擾動及降低超挖量，應根據所處地質條件、工程地質暨岩石力學特性，提出妥切的坑道開挖工法與支撐方式。	提供要項部分： 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。 審查作業部分： 所提開挖工法與支撐方式是否確實考量場址地質構造、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？
第七章 處置設施 之安全評估	說明處置坑道在運轉期間，因外力因素(地震作用、邊坡運動與開挖擾動引致之塑性壓與鬆弛土壓問題)、環境因素(風化引致岩石強度弱化及岩體依時變形)及非力學因素對處置坑道結構長期穩定之可能影響，而實施的檢監測項目、方法與技術。	提供要項部分： 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。 審查作業部分： 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？

21

執行現況說明(17/17)

審查導則草案編修要點建議(3/3)

因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議
第七章 處置設施 之安全評估	說明處置坑道封閉時，在「限制長半衰期放射性核種活度、及遲滯放射性核種遷移」的長期安全原則下，處置坑道其系統組成各元件是否滿足各自的安全功能。	提供要項部分： 應充分說明處置坑道封閉時必須遵循的長期安全原則，及處置坑道系統各個組成，包括廢棄物形式、包件、包件周圍的灌漿材料、處置室的混凝土結構、噴凝土、回填材料及相關封塞/封閉組件等，其在限制長半衰期放射性核種活度，與遲滯放射性核種遷移的安全功能評估項目。 審查作業部分： 所提處置坑道系統組成是否完整無漏項？安全功能評估項目是否足以反映系統組成其在限制長半衰期放射性核種活度，與遲滯放射性核種遷移之功能。

22