



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

低放射性廢棄物處置安全管制技術發展
子計畫五：處置坑道結構長期穩定需求及
監測方法之研究

成果報告

計畫編號：104FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：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 104 年 12 月

摘要

本研究旨在蒐整國外低放射性廢棄物處置場的規劃與興建經驗，以瞭解處置坑道在運轉期間的檢監測作法、與進入封閉階段前所進行的安全評估項目；同時，綜整國內外有關坑道襯砌異狀之檢監測技術與肇因判斷，並考量國內本土地質條件之特殊性，以確保處置坑道在本土地質環境下之結構長期穩定性。經由國外低放處置坑道的經驗，及國內一般隧道之檢監測與維護管理作法之整合研析，本研究提出處置坑道在封閉前之檢測與評估項目、及封閉後之監測對策建議，並針對「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)相關章節研擬修訂條文之參考依據與修訂方向

關鍵詞：低放射性廢棄物處置場，處置坑道，長期穩定，檢測與監測

Abstract

This research aims to learn the experiences of tunnel's inspections and measurements from the abroad LLW/ILW waste final repository. We focus on the experiences of the purposes, items and technologies of inspections and measurements for long-term stability. The measurement results and monitoring system adopted in these typical LLW/ILW repositories are studied. The special geological conditions of tunnel measurements in Taiwan are also considered. Finally, the recommendations are proposed to supplement the Guidelines on Safety Assessment of Low-Level Waste Disposal Repository.

Keywords: LLW final depository, deposition tunnel, long-term stability, inspections and measurements

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	1
1.4 國內外有關本計畫之執行情況	2
1.5 已蒐集之重要文獻	3
1.6 研究流程與報告內容	5
第二章、國外處置坑道之興建規劃與監測經驗	7
2.1 瑞典 SFR 處置設施	7
2.1.1 SFR 背景介紹	7
2.1.2 地質條件與母岩岩石力學特性	13
2.1.3 施工場址的準備	14
2.2 興建過程中與岩石力學相關之工程經驗	17
2.2.1 SFR 處置場興建經驗	17
2.2.2 Forsmark 反應器冷卻水排放隧道興建經驗	18
2.3 長期安全評估與處置窖設計理念暨考量因素	22
2.3.1 長期安全評估項目	22
2.3.2 處置窖設計理念暨考量因素	22
2.4 運轉階段的檢測與監測	28
2.4.1 岩石力學穩定性檢測	28
2.4.2 控制行動	29
2.4.3 營運期間的監測經驗	31

2.4.4	水文地質.....	36
2.5	小結.....	37
第三章、處置坑道運轉期間襯砌異狀與關鍵肇因之判斷		39
3.1	營運中隧道之襯砌異狀.....	39
3.2	營運中隧道之力學分析方法.....	44
3.3	隧道變形機制與變形特性.....	49
3.4	隧道異狀關鍵肇因研判.....	52
3.5	小結.....	57
第四章、襯砌異狀關鍵肇因與因應的檢監測方法		58
4.1	既有運轉中隧道檢監測技術.....	58
4.2	運轉中隧道變位分析-特徵模擬法	67
4.3	襯砌微變形監測與全斷面測量技術.....	69
4.3.1	襯砌微變形監測.....	69
4.3.2	全斷面測量技術.....	70
4.4	隧道詳細檢測作業-各項隧道詳細檢查項目與方法	73
4.4.1	隧道外調查與監測.....	74
4.4.2	裂縫進展性調查.....	75
4.4.3	襯砌背後狀態探查.....	76
4.5	小結.....	77
第五章、處置坑道封閉前之檢測與評估項目研析		80
5.1	處置設施在不同時期的監測.....	80
5.2	國外低放處置坑道檢監測之經驗回饋.....	82
5.2.1	建造期間之經驗回饋.....	82
5.2.2	運轉期間之監測項目	82
5.2.3	運轉期間的檢監測行動.....	83
5.3	處置坑道封閉前之檢測與評估項目	83
5.4	一般坑道在運轉期間的安檢管理準則.....	86
5.5	小結	91
第六章、處置坑道封閉後之監測對策		92

6.1	處置坑道封閉後之監測目標.....	92
6.1.1	處置坑道封閉後之監管計畫.....	92
6.1.2	低放處置設施安全評估項目.....	93
6.2	處置坑道封閉後之檢監測項目與對策.....	98
6.2.1	處置坑道封閉後之檢監測項目.....	98
6.2.2	低放處置坑道封閉後之監測對策.....	103
第七章、	低放審查導則(第0版)與處置坑道相關章節之精進建議.....	104
7.1	低放處置審查導則(第0版)與處置坑道長期穩定及監測方法有關之章節研析.....	104
7.2	低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議.....	105
第八章、	結論與建議.....	108
8.1	結論.....	108
8.2	建議.....	109
參考文獻	111
期末報告(初稿)審查意見與答覆說明	116

表目錄

表 1.3-1 計畫工作項目與期程規劃	2
表 2.1-1 SFR-1 處置場岩體力學特性評估值	14
表 2.2-1 SFR 使用的興建機具	17
表 2.2-2 SFR 使用的噴凝土支撐形式	18
表 2.2-3 SFR 使用的岩栓支撐形式	18
表 2.2-4 冷卻水排放隧道所處之地質條件與岩石等級	19
表 2.2-5 FORSMARK 1 號、2 號冷卻水排放隧道之支撐系統比例統計	20
表 2.2-6 FORSMARK 1 號、2 號冷卻水排放隧道所處地質之導水係數等條件	21
表 2.2-7 FORSMARK 3 號冷卻水排放隧道岩層採用支撐系統的比例統計	21
表 2.3-1 處置場之各系統元件應考慮的長期安全評估項目	23
表 2.3-2 1BLA 各組成元件尺寸	24
表 2.3-3 2-5BLA 各組成元件尺寸	28
表 2.4-1 控制行動與負責單位	29
表 2.4-2 年度岩石檢查項目	30
表 2.4-3 測試與調查項目	30
表 2.4-4 維護項目與實施週期	30
表 2.4-5 SINGÖ 變形帶之變形量測結果	31
表 2.4-6 筒倉(SILO)之變形量測結果	32
表 2.4-7 地下水入滲量測結果	34
表 2.4-8 岩體導水特性與岩體厚度	36
表 3.1-1 歐盟山岳隧道異狀種類分類表	40
表 3.1-2 瑞士公路隧道異狀種類分類表	41
表 3.1-3 中國隧道異狀種類分類	41
表 3.4-1 異狀影響因子與對應異狀類型	53
表 3.4-2 山岳隧道襯砌異狀案例之裂縫型態彙整表	55
表 4.1-1 ITA 有關非破壞性檢測技術應用於隧道安全檢測之檢討	64
表 4.1-2 各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測之比較	65

表 4.1-3 處置坑道在運轉階段與岩石力學、水文地質及襯砌結構有關的檢監測項目	66
表 4.3-1 不同量測尺度之比較	71
表 4.4-1 隧道安全檢測項目	73
表 4.4-2 隧道詳細檢測項目	74
表 4.5-1 處置坑道襯砌結構長期穩定之檢監測項目	78
表 5.2-1 SFR 低放處置設施之檢監測行動	84
表 5.3-1 瑞典 SFR 低放處置坑道封閉規劃	85
表 5.2-1 隧道檢查頻率	89
表 6.1-1 國際間低放處置設施安全評估項目	94
表 6.1-2 我國低放射性廢棄物安全評估考慮的關鍵議題	97
表 6.2-1 國際原子能總署針對地質處置設施在各階段的監測參數建議	99
表 7.1-1 審查導則草案有關處置坑道結構長期穩定需求及監測方法之編修要點建議 ..	106

圖目錄

圖 1.5-1 已蒐集之重要報告文獻封面	4
圖 1.6-1 研究計畫流程圖	6
圖 2.1-1 瑞典 SFR 所處地理位置示意圖	7
圖 2.1-2 SFR 現有處置場及擴建計畫配置圖	9
圖 2.1-3 SFR-1 處置場之處置窖與處置坑道空間配置圖	9
圖 2.1-4 BMA 中放射性廢棄物處置窖存放方式及結構	10
圖 2.1-5 BLA 低放射性廢棄物處置窖存放方式及結構	10
圖 2.1-6 BTF 處置窖存放方式及結構	10
圖 2.1-7 SFR 處置場採用的廢料置放方式	11
圖 2.1-8 SFR-1 處置場 BLA 處置窖堆置情況	11
圖 2.1-9 SFR-3 處置場 2BAM 處置窖規劃圖	12
圖 2.1-10 SFR-3 處置場 2-5BLA 處置窖規劃圖	12
圖 2.1-11 SFR-3 處置場 BRT 處置窖規劃圖	13
圖 2.1-12 SFR 處置場地質圖	15
圖 2.1-13 SFR 處置場地質破裂帶之空間分布圖	16
圖 2.2-1 於 FORSMARK 1 號、2 號冷卻水排放隧道開挖過程遭遇之含夾泥垂直節理	20
圖 2.3-1 1BLA 封閉後的各元件尺寸圖	24
圖 2.3-2 1BLA 封閉後的剖面圖、平面圖	25
圖 2.3-3 2-5 BLA 封閉後的各元件尺寸圖	27
圖 2.3-4 2-5BLA 封閉後的剖面圖、平面圖	27
圖 2.4-1 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	31
圖 2.4-2 伸張計量測徑向潛變量變化	33
圖 2.4-3 地下水量測位置示意圖	35
圖 2.4-4 1988 至 2006 年 SFR 處置設施之地下水滲流監測紀錄	37
圖 3.1-1 日本山岳隧道異狀種類分類法	39
圖 3.1-2 國內外 266 座隧道襯砌異狀種類統計圖	42
圖 3.1-3 國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較	43

圖 3.2-1 日本學者之室內隧道實驗	44
圖 3.2-2 遠域外力對應之變形特徵曲線	45
圖 3.2-3 鑽孔斷面變形方法(CBDM).....	45
圖 3.2-4 隧道斷面受力分為均勻壓縮與橢圓外力	46
圖 3.2-5 隧道斷面的平均變形張量	46
圖 3.2-6 以岩體依時弱化模式預測隧道變形	47
圖 3.2-7 隧道襯砌受集中荷重之模型試驗與數值模擬	47
圖 3.2-8 含鋼筋隧道模型試驗與數值模擬	48
圖 3.3-1 隧道斷面變形模式	49
圖 3.3-2 隧道斷面之特徵模態分析結果	50
圖 3.3-3 隧道斷面總變位量特徵模態分析結果	51
圖 3.3-4 隧道變形特性分區	52
圖 3.4-1 邊坡失穩過程隧道襯砌異狀的進展	53
圖 3.4-2 山岳隧道典型裂縫形態	54
圖 3.4-3 隧道異狀診斷流程	56
圖 4.1-1 TS360 系統	60
圖 4.1-2 透地雷達原理示意圖	61
圖 4.1-3 多相線性陣列電磁波雷達與傳統透地雷達比較	61
圖 4.1-4 多相線性陣列電磁波雷達檢測襯砌結果與鑽心結果比較	62
圖 4.2-1 運轉中隧道變形過程示意圖	67
圖 4.2-2 隧道位移與其組成的分量	68
圖 4.2-3 具 16 監測點隧道特徵模態之變位分量	68
圖 4.3-1 隧道襯砌微變監測方法內涵	70
圖 4.3-2 跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構	72
圖 4.4-1 隧道外異常現象之特徵	75
圖 4.4-2 各種裂縫進展性調查方式	76
圖 4.4-3 日本研發裂縫監測之導電塗料示意圖	76
圖 4.4-4 日本隧道內透地雷達測線布置方式與成果圖	77
圖 5.2-1 日本隧道維護管理作業流程圖	87

圖 5.2-2 隧道安全維護評估流程	88
圖 5.2-3 二次檢測所需的檢測項目	88
圖 5.2-4 隧道安全檢測、評估及維修補強流程	90
圖 6.1-1 放射性處置設施之生命週期	92

第一章、前言

1.1 計畫背景

我國低放射性廢棄物處置場刻正積極進行選址規劃作業，工作內容除了建造前期的場址調查、工程設計與施工規劃外，如何藉由必要的檢測與監測工作掌握處置坑道結構在運轉期間的穩定性，及封閉前的狀態是否符合相關安全評估需求，為發展低放射性廢棄物最終處置技術刻不容緩的重要課題。囿於放射性廢棄物處置場址工程規模龐大，國內工程地質條件不及相關處置技術先進國家的優勢，實有必要蒐整研析國外低放射性廢棄物處置的作法與經驗，同時考量國內本土地質條件與工程技術，作為發展本土化低放處置技術與審查規範之依據。

1.2 計畫目的與重要性

本計畫目的在於蒐整國外低放處置坑道經驗，與一般坑道在運轉期間常見的襯砌異狀與關鍵肇因判斷，並探討因應的檢監測作為，據此研析處置坑道封閉前之檢測與評估項目，及研擬處置坑道封閉後之監測對策，進而提出「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」與處置坑道相關章節之精進建議。爰此，本計畫重要性評述於后：

- (1) 透過國外低放處置坑道的檢監測規劃經驗與案例蒐集，瞭解運轉期間有關處置坑道結構穩定的檢監測作法，與進入封閉階段前所進行的安全評估項目。
- (2) 綜整國內外坑道有關襯砌影像掃描、異狀判釋與襯砌表面裂縫型態等相關研究與技術文獻，提出符合本土地質環境下坑道襯砌裂縫型態及其肇因關係之分析方法，及搭配的檢監測項目與技術。
- (3) 整合國外低放處置坑道的檢監測規劃與經驗，及國內本土地質條件下的坑道襯砌裂縫型態及關鍵肇因，提供更多的地質、地工參數，供處置坑道封閉前狀態評估及處置坑道封閉後之監測策略研析。

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	104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
子項計畫五-「處置坑道結構長期穩定需求及監測方法之研究」			※			※			※			※
處置坑道運轉期間襯砌異狀關鍵肇因判斷												
襯砌異狀關鍵肇因與因應的檢監測方法												
處置坑道封閉前之檢測與評估項目研析												
處置坑道封閉後之監測對策研析												
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%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

1.4 國內外有關本計畫之執行情況

國內在放射性物料的管理方面歷經法源訂定與技術研究多年的努力，管制技術逐漸與國際接軌，如 93 年發布之「放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法」。為求管制技術之進一步精進，管制規範以及作業程序亦陸續建立，已積極完成 NUREG-1199 與 NUREG-1200 的中文化作業，並對應我國低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則，已建立安全分析報告審查導則草案(第0版)。然因國內工程地質條件較國外處置技術先進國家複雜，於坑道之調查、規劃設計與施工、運轉及封閉期間，均應有充分的檢測與監測計畫，以獲知更多的地質資訊及相關的安全評估所需參數，供處置坑道環境影響及安全評估之參考，並予以增列於安全分析報告審查導則草案(第0版)中，提供相關處置設施經營者執行處置計畫以及審查人員之參考。

行政院原子能委員會放射性物料管理局在 99 年執行「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究」與在 100 年執行「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計審查要項建議以及天然障壁長期穩定潛在影響因子之探討」等計畫，依據我國工程與環境特性進行深入比較與探討，針對本土化審查導則暨管制技術規範編修要點提出了具體之建議；並就我國天然障壁與處置技術先進國家之相異處對坑道穩定影響進行案例蒐集，提出國內天然障壁地工特性及特有自然條件因素對坑道穩定

之影響，進而提出場址特性調查審查要項考量之初步建議。行政院原子能委員會核能研究所於 101 年接受委託執行「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」計畫，則依據既有坑道襯砌異狀歸納出坑道設施長期穩定性之影響因素，包括圍岩材料力學特性之依時變化、隧道長期荷載外力之變化、突發性外力事件如地震之作用等因素，並就處置坑道與一般坑道功能需求與穩定性之評估要項，指出應用既有坑道規範與準則應用於處置坑道之不足，仍須進一步針對影響長期穩定影響因素探討相關處置坑道設施之設計與穩定性評估所需參數，供處置設施經營者在執行處置計畫以及後續研修審查導則之參考。

爰此，行政院原子能委員會放射性物料管理局在 104 年執行「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展」研究計畫，其中的子項計畫五「處置坑道長期穩定強化及監測方法」針對處置坑道結構長期穩定之影響因素及對應的襯砌異狀與檢測項目進行統整，提出「處置坑道襯砌結構長期穩定之檢測項目」，其內容涵括了(i)外力因素(地震作用、邊坡運動與開挖擾動)、(ii)環境因素(風化作用引致岩石強度弱化及岩體依時變形)、與(iii)非力學因素(混凝土中性化等)所可能導致襯砌結構之可能異狀與因應的檢監測項目；並提出外力變化引致隧道異狀之分類，及因應的維修與補強方法建議，以作為未來探討處置坑道後續維修與補強課題之參考。

此外，考量我國地質條件的特殊性及坑道結構的高度靜不定，如何透過已埋設的感應器或是監測技術，進一步分析坑道結構的變形行為，掌握坑道結構襯砌異狀之關鍵肇因，據以研析因應的監測作為，包括監測項目、感測裝置數量、架設位置與資料擷取頻率等，確保相關監測工作足以反映處置坑道結構在運轉期間之穩定性，及進入封閉階段前滿足封閉條件，研析合理的檢測與評估項目實為進一步待釐清探討的課題。

1.5 已蒐集之重要文獻

本研究於計畫執行期間蒐集的國外處置坑道相關文獻計有下列6篇(報告封面如圖 1.5-1所示)，其內容依文獻年分概述如后：

(1) SKB 報告編號 R-03-30

SKB於2003年整理了SFR低放處置場址原岩地質條件、處置設施的設計準則與工程障壁相關監測項目暨結果。

(2) 歐洲原子能機構MoDeRn報告編號 D-1.2

歐洲原子能機構於 2013 年提出的監測相關架構報告中，針對監測計畫之設計提供清楚的流程脈絡。

(3) SKB 報告編號 R-07-10

SKB 於 2007 年整理SFR建造經驗，並說明其檢監測方法。

(4) SKB報告編號 TR-14-01

SKB於 2014 年整理長期安全評估報告。

(5) SKB 報告編號 TR-14-02

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、設計考量因素及檢監測項目。

(6) SKB 報告編號 R-14-17

SKB於 2014 年整理SFR-3擴建計畫之設計考量及理念。

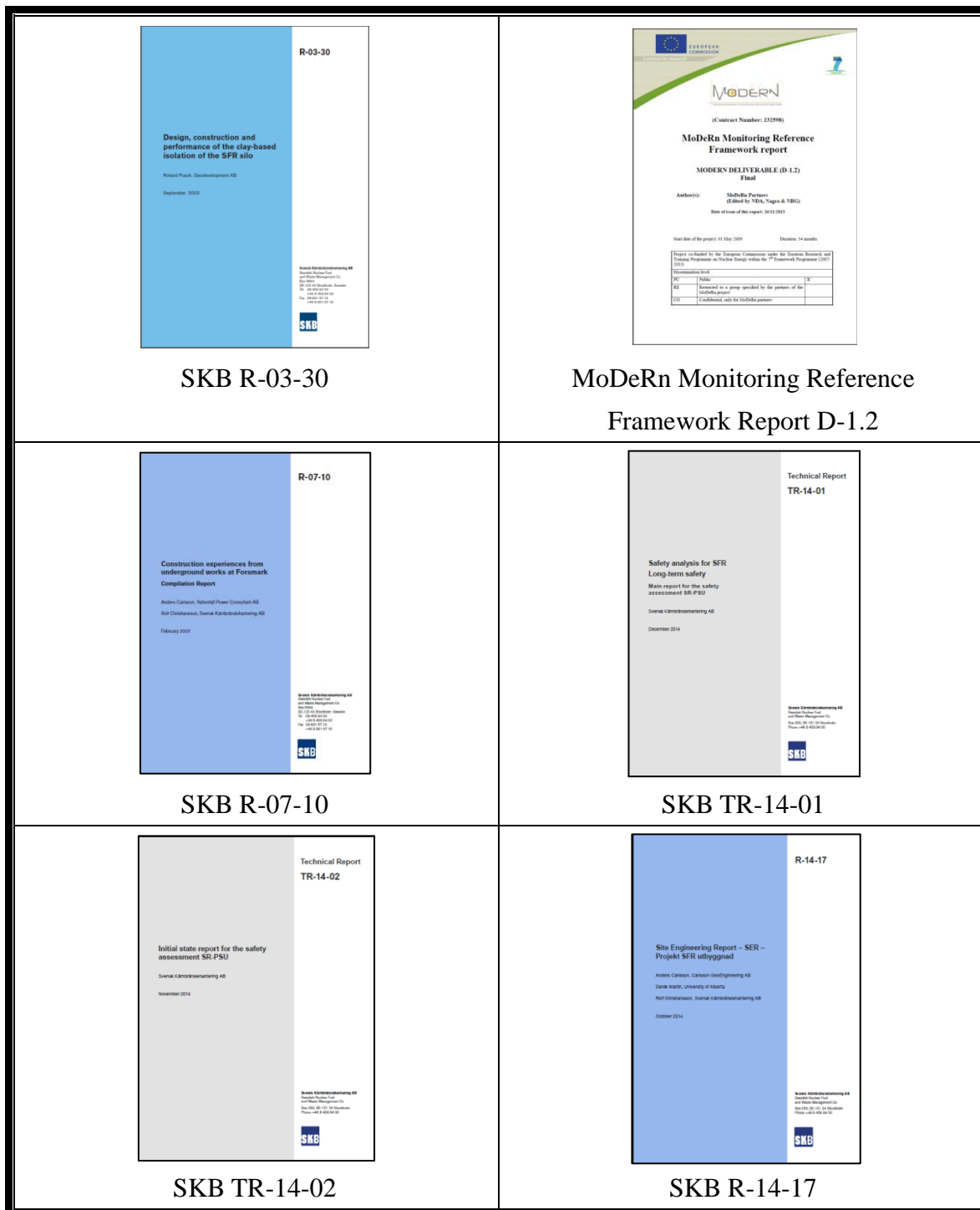


圖 1.5-1 已蒐集之重要報告文獻封面

1.6 研究流程與報告內容

本研究之工作項目分為「國外處置坑道之興建規劃與監測經驗」、「處置坑道運轉期間襯砌異狀關鍵肇因判斷」、「襯砌異狀關鍵肇因與因應的檢監測方法」、「處置坑道封閉前之檢測與評估項目研析」、「處置坑道封閉後之監測對策研析」及「提出低放處置審查導則(第0版)處置坑道相關章節與條文內容之修訂建議」等五項，各分項工作進度如表1.3-1所示，為執行所列工作項目擬定之研究流程則示如圖1.6-1，除本章前言外，依計畫擬定之工作項目內容題列各章標題，其內容分別如下列所述：

第二章 國外處置坑道之興建規劃與監測經驗

本章蒐整了瑞典SFR處置設施有關的興建規劃、地質條件、處置窖與處置坑道空間配置、現地應力與岩石力學特性、岩盤穩定性評估與水文地質觀測資料等，另外有關SFR-3擴建計畫的設計理念亦一併介紹。

第三章 處置坑道運轉期間襯砌異狀與關鍵肇因之判斷

本章主要彙整國內外坑道的襯砌異狀、運轉中坑道變形分析方法、機制與特性，藉以研判坑道異狀與關鍵肇因，提供處置坑道在運轉期間襯砌結構穩定性之檢監測工作參考。

第四章 襯砌異狀關鍵肇因與因應的檢監測方法

本章主要彙整國內外既有坑道的檢測與監測技術，針對可能的關鍵肇因提供處置坑道在運轉過程中，其襯砌結構檢監測方案之研擬與規劃參考。

第五章 處置坑道封閉前之檢測與評估項目研析

本章綜整前三章資料研析結果，包括瑞典SFR在低放處置坑道之經驗，與國內一般隧道在運轉期間的檢監測作法，作為發展處置坑道在運轉期間的檢監測項目與封閉前之檢測與評估項目技術之參考。

第六章 處置坑道封閉後之監測對策研析

綜整前述各節有關處置坑道封閉後之監測目標、我國與國際間低放處置設施之安全評估項目比較及國際原子能總署建議的地質處置設施在不同階段之監測參數，提出處置坑道封閉後之監測對策。

第七章 低放處置審查導則(第0版)與處置坑道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。

第八章 結論與建議

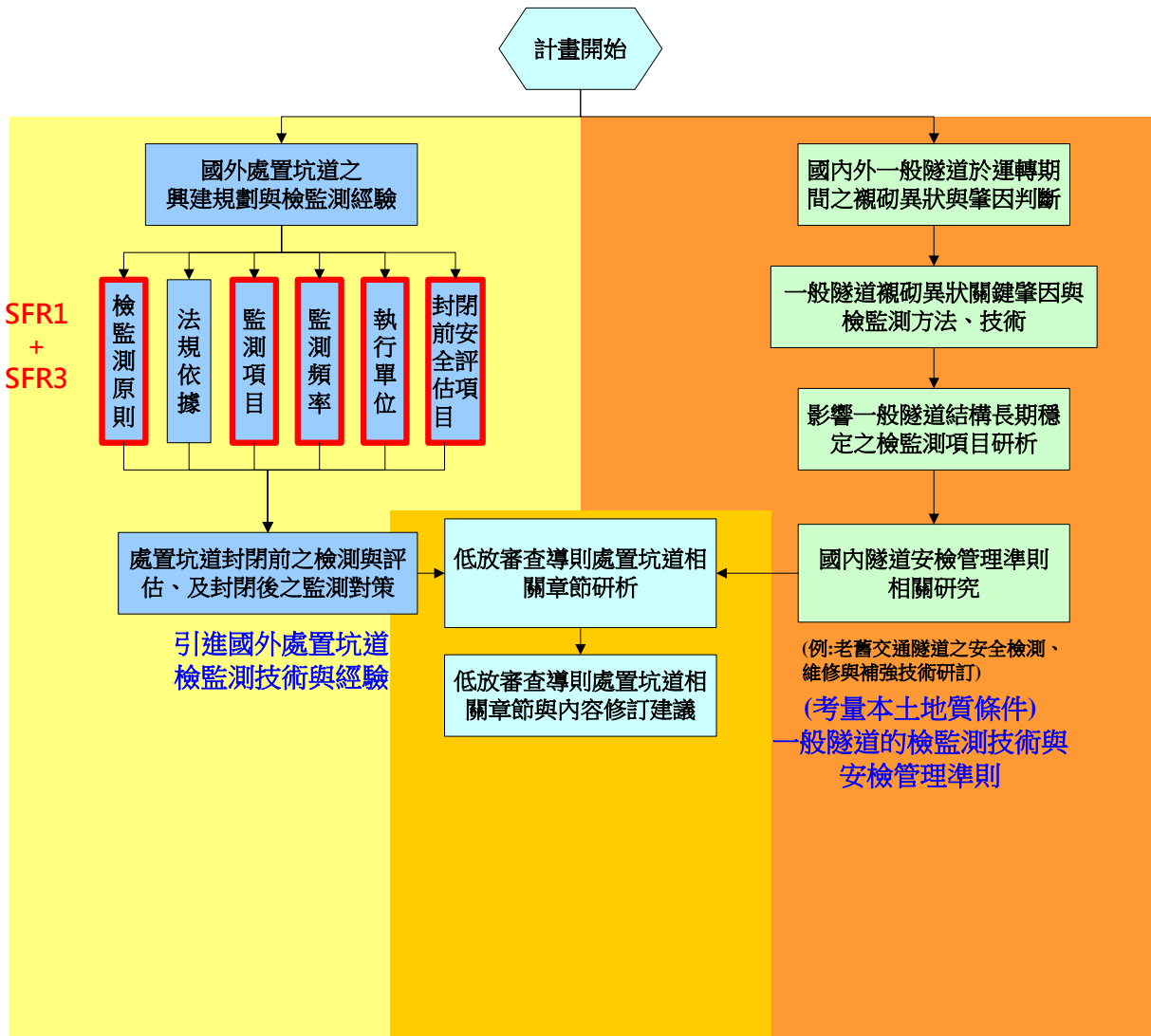


圖1.6-1 研究計畫流程圖

第二章、國外處置坑道之興建規劃與監測經驗

2.1 瑞典SFR處置設施

瑞典的中、低放射性廢棄物最終處置場SFR(Swedish Final Repository)位於Forsmark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)，總開挖量體約 1,200,000 m³，其中的 775,000 m³來自地下岩層開挖，隧道總長將近 11,000 m，開挖深度在海底 50-140 m，自1972年以來，其地下工程興建之寶貴經驗多次被各界引用討論，並著重於探討開挖、封閉及支撐系統，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，目前正規劃廢棄物處置場之擴建工程SFR-3(SFR-2為毗鄰SFR-1之反應爐零件處置計畫)，預計2020年完工。



圖2.1-1 瑞典SFR所處地理位置示意圖(SK B, 2008)

2.1.1 SFR背景介紹

SFR-1處置場目前為容納中、低放廢棄物(LILW)，每年處置醫療、工業及研究機構所產生的低放廢棄物約 10 至 20 m³ (SKB, 2011a)。SFR-1處置場係以處置40年的核電廠運轉廢棄物為目標，目前的建造容量為 61,700 m³，未來將擴建第二期到 150,000 m³以容納除役廢棄物。由於SFR-1處置場位在海床的下方，故倚靠二條平行之隧道連接Forsmark核電廠(NPP)。目前的SFR-1處置場及期擴建計畫如圖2.1-2所示，SFR-1處置場包含一個筒倉(Silo)與四條岩盤處置窖(Rock vault)。處置窖之岩盤開挖空間為高 70 m、直徑 30 m，內部的混凝土結構物高 50 m、直徑 26 m、厚度 0.8 m，底部基座為夯實的矽砂與膨潤土、側壁與母岩之間的縫隙以膨潤土回填厚度至少 1 m。處置窖內部隔成

2.55 × 2.55 m的豎坑，依序吊入混凝土製的方形處置容器後分層以水泥回填間隙，所有作業均採遙控操作方式進行(Lindberg, 2005)。

SFR-1 處置場的四條處置窖，如圖 2.1-3 所示，長 160 m，寬介於 15 至 20 m、高介於 10 至 17 m (IAEA, 2001b)，四條處置窖係用來處置低放射性廢棄物與短半衰期中放射性廢棄物。四條坑道尺寸、結構型式與用途分別為(Lindberg, 2005)：

- 一條BMA窖：尺寸長160 m，寬19.5 m，高16.5 m，以混凝土結構隔成15個處置室，遙控操作置放短半衰期中放射性廢棄物，如圖2.1-4；
- 一條BLA窖：尺寸長160 m，寬15 m，高12.5 m，處置標準貨櫃盛裝的低放射性廢棄物，如圖2.1-5；
- 二條BTF窖：尺寸長160 m，寬14.8 m，高9.5 m，處置混凝土箱盛裝的中放射性廢棄物，如圖2.1-6。

廢棄物會先在核電廠進行處理、壓縮與裝箱(如圖2.1-7所示，包括金屬模、混凝土模、金屬筒、混凝土櫃及標準貨櫃等)，低放射性廢棄物因為無需任何放射性屏障(Radiation Shielding)，故採圓筒、金屬容器或標準貨櫃裝箱，以一般的起重設備直接放入BLA處置窖，如圖2.1-8所示；BLA處置窖的設計相當簡單，處置標準貨櫃係直接放置在混凝土地板上。在處置場運轉期間，所有的廢棄物容器上方均架設防水隔板，以防地下水滴到廢棄物容器，上述隔板會在處置場封閉前予以拆除(Sweden, 2008)。

前述之標準貨櫃(ISO-containers)常見尺寸為6.1×2.5×1.3 m (20-foot half-height)或6.1×2.5×2.6 m (20-foot full-height)，其他可使用的尺寸如：3.0×2.4×2.6 m (10-foot full-height)或3.0×2.4×1.3 m (10-foot half-height)。標準貨櫃內可以容納已封閉的儲存桶或儲存箱，亦可以容納尚未封裝的零碎金屬(Scrap Metal)。

除了目前運轉中的SFR-1廢棄物處置場外，瑞典SKB公司亦開始著手規劃一處第二期工程稱為SFR-3的中、低放射性廢棄物處置場。規劃興建地點仍在Forsmark電廠附近岩層中的六條坑道，包含五條廢棄物處置窖及一條專為處理反應爐壓力槽之處置窖(BRT)，預計可儲存108,000 m³廢棄物，場區配置規劃詳圖2.1-2，白色區域為既有之處置場(SFR-1)，藍色區域為延伸計畫之處置場(SFR-3)。擴建計畫的六條坑道尺寸、結構型式與用途分別為(SK B, 2014)：

- 一條BMA窖：尺寸長 275 m，寬 20.4 m，高 16.4 m，以無筋混凝土結構隔成14個處置室，遙控操作置放短半衰期中放射性廢棄物，如圖2.1-9。
- 四條BLA窖：尺寸長 160 m，寬 14.7 m，高 12.7 m，處置標準貨櫃盛裝的低放射性廢棄物，如圖2.1-10。
- 一條BRT窖：尺寸長 240 m，寬 15 m，高 13 m，處置9個反應爐壓力槽，如圖2.1-11。

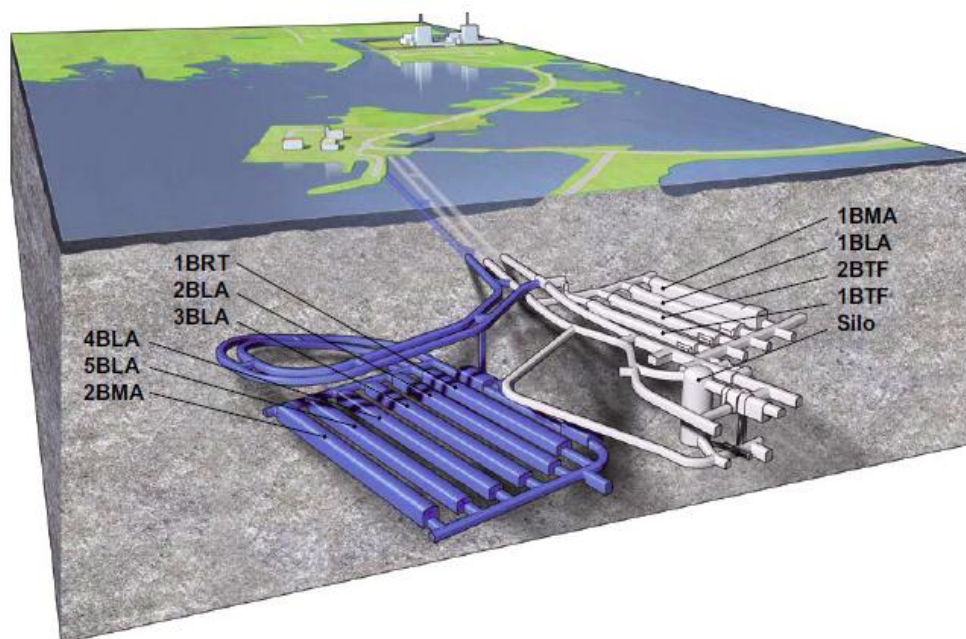


圖2.1-2 SFR現有處置場及擴建計畫配置圖(SKB, 2014)

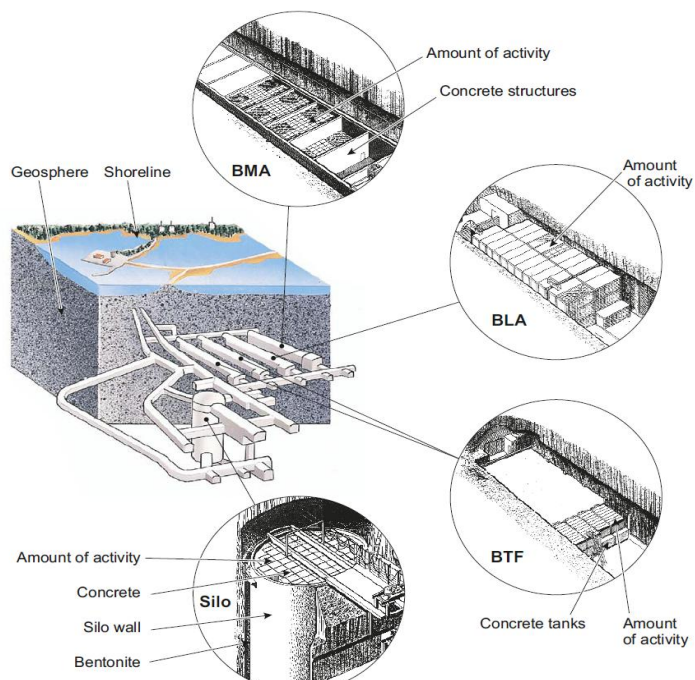


圖2.1-3 SFR-1處置場之處置窖與處置坑道空間配置圖(SKB, 2014)

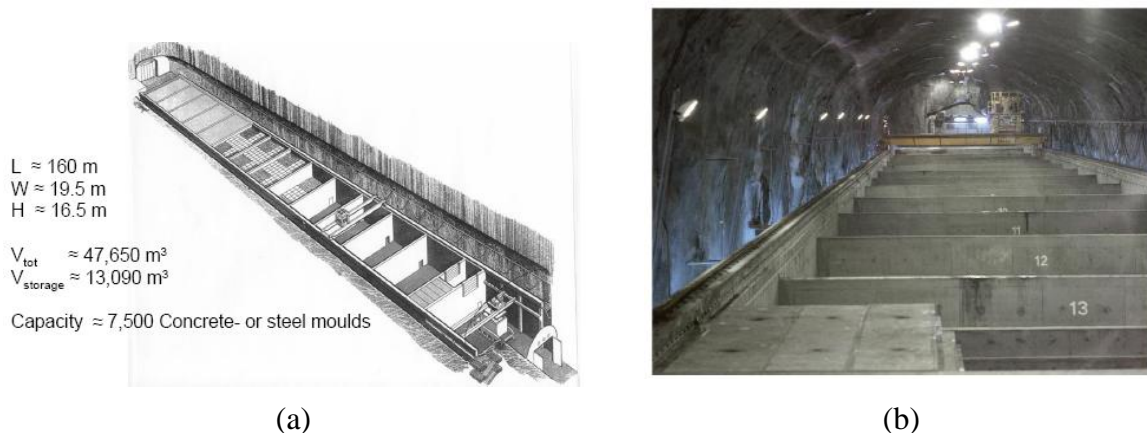


圖2.1-4 BMA中放射性廢棄物處置窖存放方式及結構(SKB, 2014)



圖2.1-5 BLA低放射性廢棄物處置窖存放方式及結構(SKB, 2014)

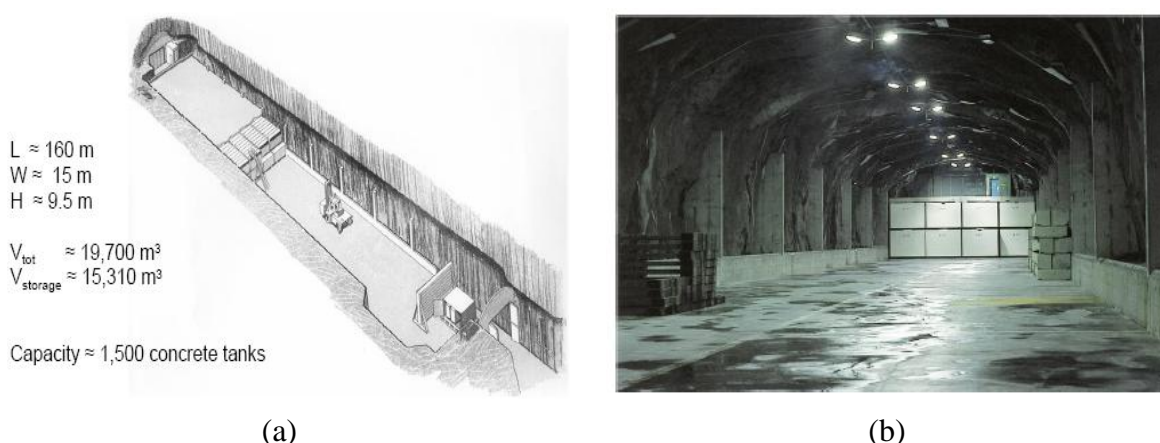


圖2.1-6 BTF處置窖存放方式及結構(SKB, 2014)

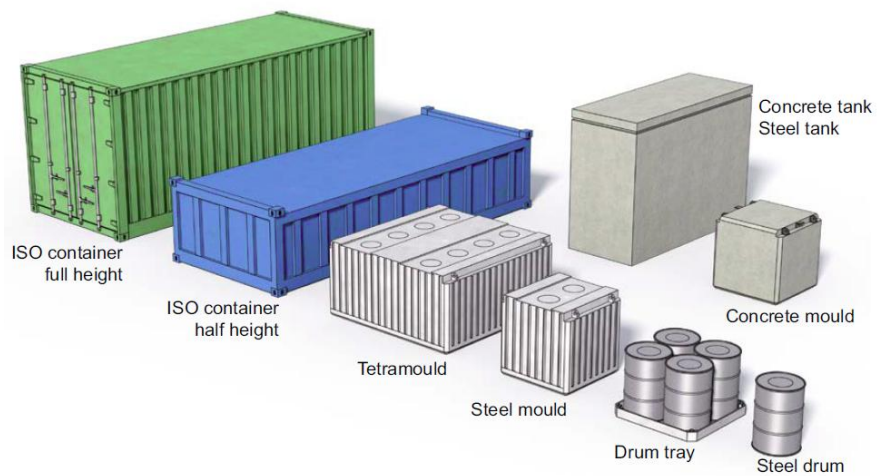


圖2.1-7 SFR處置場採用的廢料置放方式(SKB, 2014)

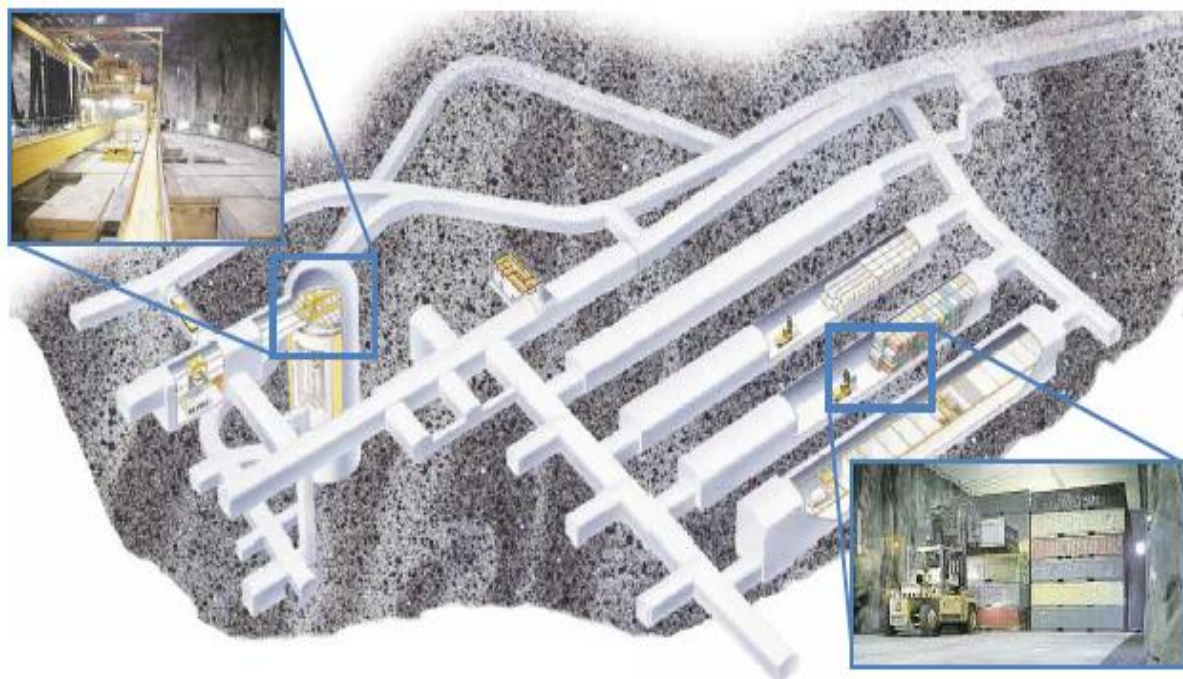


圖2.1-8 SFR-1處置場BLA處置窖堆置情況(SKB, 2006)

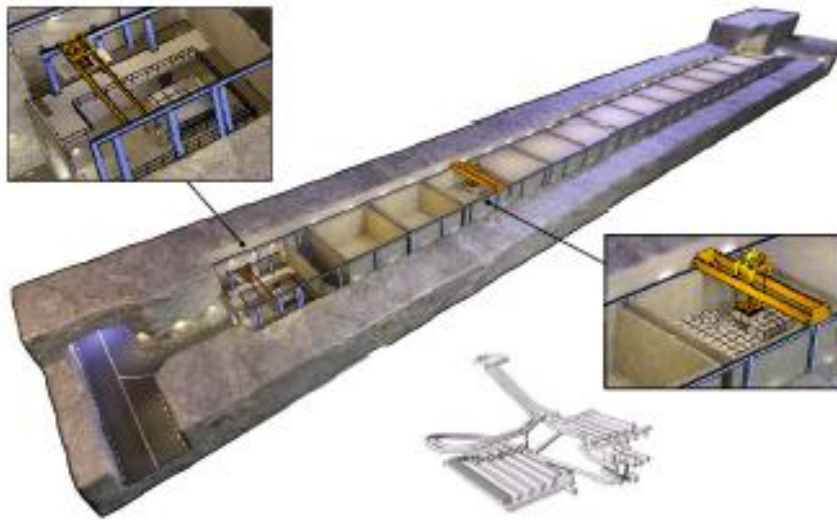


圖2.1-9 SFR-3處置場2BAM處置窖規劃圖(SKB, 2014)

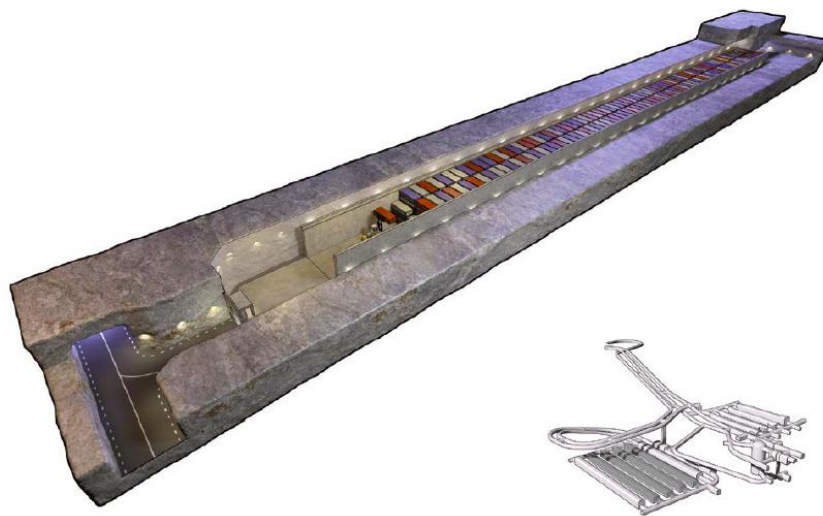


圖2.1-10 SFR-3處置場2-5BLA處置窖規劃圖(SKB, 2014)

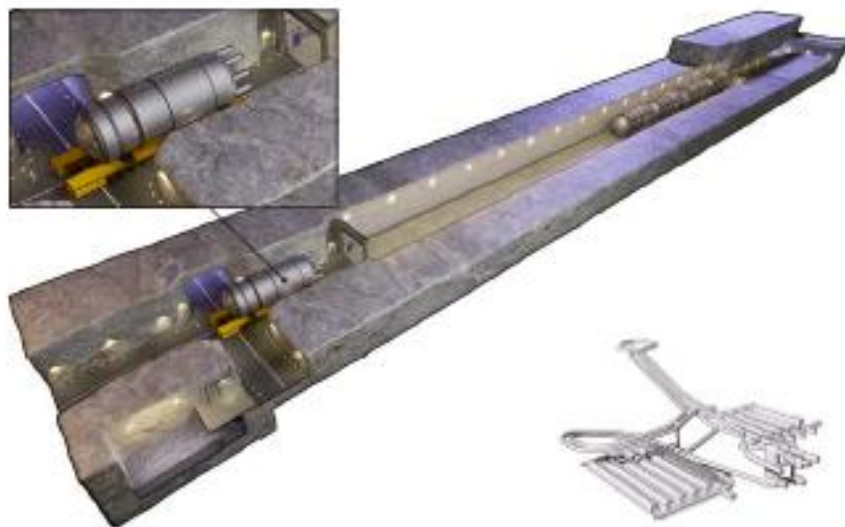


圖2.1-11 SFR-3處置場BRT處置窖規劃圖(SKB, 2014)

2.1.2 地質條件與母岩岩石力學特性

SFR的母岩種類含括了三種不同的岩石種類(Bodén and Lundin, 2007 ; SKB, 2006) , 如圖2.1-12所示, 分別是:

- (1) 長英質中度變質火山岩類: 屬Svecofennian生成年代之近花崗岩類。長英質中度變質火山岩類形成於Svecofennian造山運動, 為該地區最古老的岩床, 並且主控了SFR對外聯絡坑道所處位置的地質特性。
- (2) 近花崗岩類: 其葉理分布不一, 其主控了處置場北半部與鄰近陸地之地質特性。
- (3) 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, 主控了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區域的原岩條件多呈現塊狀形態(block-like pattern)的破裂, 變形特性明顯的區域為地質破裂帶, 依規模大小區分為二, 破裂區範圍超過10公里者屬區域性破裂區(regional zones), 範圍低於10公里者屬局部破裂區(local zones)(Andersson, 2003)。SFR處置場地質破裂帶空間分布圖如圖2.1-13所示。另外, 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。

經透過震測法、地質鑽探與現地應力量測等方法掌握SFR母岩力學相關特性, 分析了聯絡坑道附近的岩體力學特性(Stille et al., 1985), 其結果如表2.1-1, 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), 垂直應力 3 MPa為最小主應力。岩體張力強度為 10 MPa, 變形模數為 20 GPa, 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。

表2.1-1 SFR-1處置場岩體力學特性評估值(Stille et al., 1985)

評估參數	評估值(MPa)
最大水平應力	10
最小水平應力	5
岩體張力強度	10
岩體變形模數	20,000

2.1.3 施工場址的準備

基於處置容量與穩定性的考量，處置窖所處空間約 50,000 m³。此外，根據岩石力學的穩定性分析，指出坑道直徑不超過 25 至 30 m 為原則，開挖空間高約 50 m，最後選定的坑道直徑為 29 m，靠近側牆的開挖空間高 50 m，穹頂部分為 65 m，整個開挖空間為一橢圓形狀。坑道採用傳統的鑽炸工法，因此在開挖面四周存在數公尺不等的開挖擾動帶。

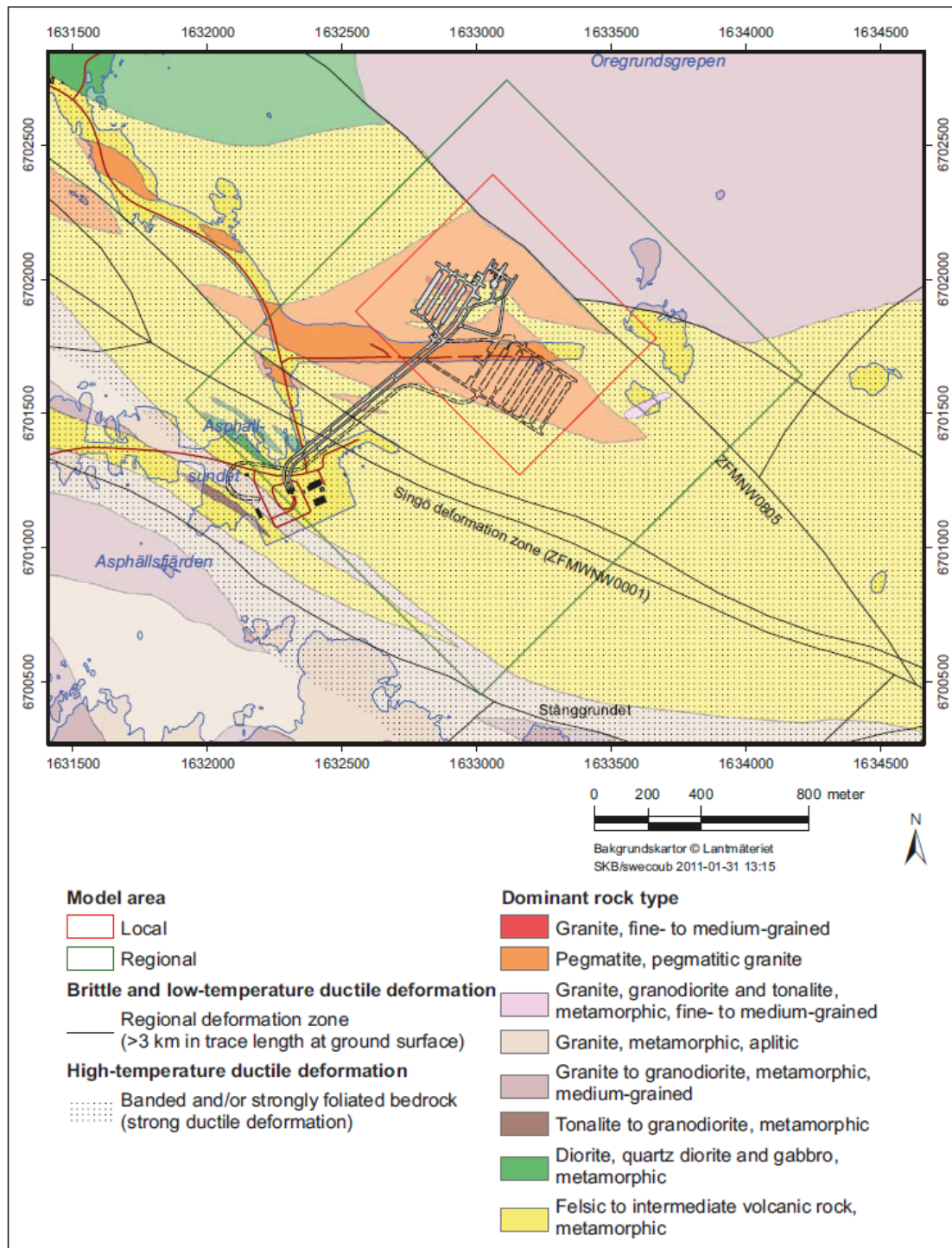


圖2.1-12 SFR處置場地質圖(SKB, 2011a)

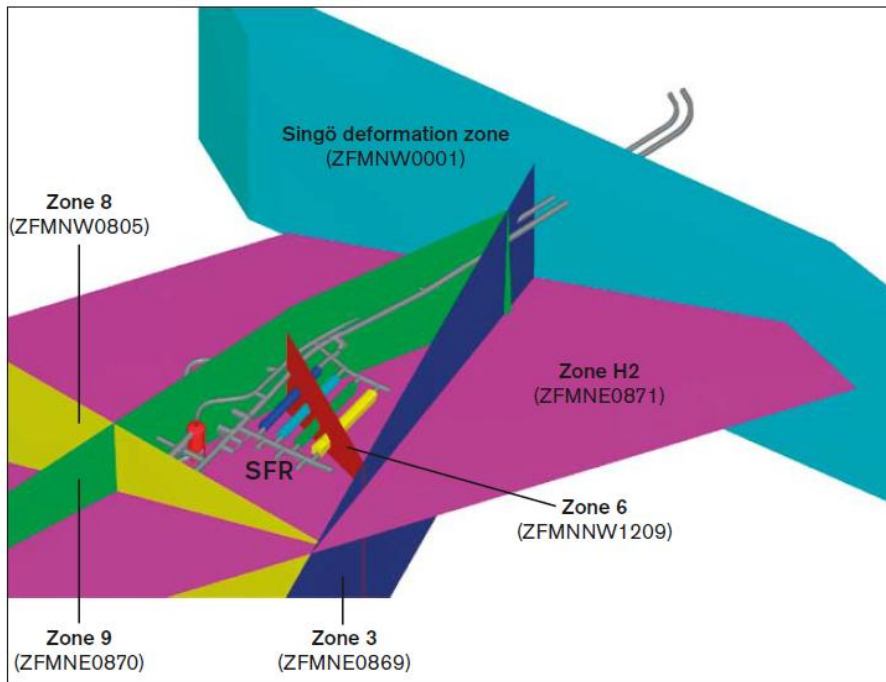


圖2.1-13 SFR處置場地質破裂帶之空間分布圖(SKB, 2011b)

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)。

2.2 興建過程中與岩石力學相關之工程經驗

2.2.1 SFR處置場興建經驗

第一階段的SFR設施共耗費7年規劃設計及興建，1988年取得營運與可，其興建成本中，75%用於土木工程(岩石挖掘24%、其他土木工程26%、設備費29%、管理及監造費21%)。SFR施作過程中所採用的設備機具如表2.2-1。

SFR興建過程所使用的岩石支撐是依循Forsmark隧道挖掘所發展的支撐系統，主要以噴凝土與填漿錨定(Grouted dowels)的搭配施作，至於場鑄混凝土拱這種特殊的支撐形式被認為是沒有效率或不適當的。根據SKB R-07-10技術報告(SK B, 2007)，SFR在岩石支撐的圖說並沒有明確指示適用於哪種岩層狀況，僅以「品質良好岩石」(good rock)、「高度破碎岩石」(high fracture frequency)或「塊狀岩體」(blocky rock mass)等進行岩石分類，而不是採用一般岩石工程所使用的Q法或RMR岩石分類法。SFR採用之各種噴凝土與岩栓的施作型態如表2.2-2與表2.2-3所示。

表2.2-1 SFR使用的興建機具(SK B, 2007)

Construction activity	Type of construction equipment
Drilling	Three Atlas Copco TH531 equipped with 4 BUT35 booms fitted with 18-ft feed and fitted with a charging cradle on a hydraulic boom for 5 m advance.
Mucking Out	Two electrical powered Bröyt X4 excavators with 2.0–2.5 m ³ bucket capacity. One Cat 988 A wheel-mounted loader with 4.5 m ³ bucket capacity. One Cat 966 C wheel-mounted loader with 2.3 m ³ bucket capacity.
Scaling	One Liebherr 941 A hydraulic excavator and one Åkerman H12 diesel hydraulic excavator both equipped with Montabert BRH125 hydraulic scaling rod.
Rock Haulage	Two Kiruna trucks, 35 tons. One Kiruna truck, 50 tons Four to seven Engsson 666B. A number of Cat trucks on stand-by.
Rock Support	One Atlas Copco Boltec 540/22 mechanized rock bolting equipment. One “Furuholmen – Forsmark” remote-controlled shotcreting system. One mobile unit fitted with a working platform and equipment for simultaneous borehole grouting (the unit was developed on site). Grout holes and drilling of holes for the Atlas Copco drilling rigs drilled expander bolts. The shotcrete was mixed at the concrete plant, originally erected for the concrete works for Forsmark 1.
Ventilation	Two 1.6 m diameter coated fabric tubes. Two 75 kW axial fans AMF 1,520 at the collaring, and two fans at a distance of 450 m from the collaring.

表2.2-2 SFR使用的噴凝土支撐形式(SKB, 2007)

岩石支撐形式 噴凝土分類	描述
S1	無鋼筋噴凝土，厚度：30 mm (單層)
S2	無鋼筋噴凝土，厚度：50 mm (雙層)
S3	纖維噴泥土，厚度：50 mm，type EE 18 mm，體積含量 75 kg/m ³
S4	纖維噴泥土，厚度：80 mm，type EE 18 mm，體積含量 75 kg/m ³
S5	掛網噴凝土，厚度：100 mm，# ϕ 6.5 c 150， 或 Bars # KS 40S ϕ 8 c 200
S6	噴凝土拱(shotcrete arch)，厚度：200 mm，包含岩栓
S7	噴凝土拱(shotcrete arch)，厚度：300 mm，包含岩栓

表2.2-3 SFR使用的岩栓支撐形式(SKB, 2007)

岩栓形式	描述
Bx	Spot bolting; grouted deformed bars, ϕ 25, L: 3.8
B1	Pattern bolting; 1 bolt/4 m ² , grouted deformed bars, ϕ 25, L: 3.8
B2	Pattern bolting; 1 bolt/2 m ² , grouted deformed bars, ϕ 25, L: 3.8
B3	Pre-bolting; c/c 1 m

2.2.2 Forsmark反應器冷卻水排放隧道興建經驗

Forsmark 1號、2號反應器的冷卻水排放隧道總長 2,300 m，斷面積約 80 m²，隧道的最大深度在海平面下方 75 m，自1974年興建，1976年完工。Forsmark 3號反應器的冷卻水排放管總長 3,000 m，斷面積約 55 m²，隧道的最大深度在海平面下方 70 m，自1980年興建，1982年完工。前述兩個排水隧道的距離約 400 - 700 m。

於Forsmark 1號、2號反應器冷卻水排放隧道開挖期間，將所處的地質條件區分為A~K 10個岩石等級，如表2.2-4。隧道的擾動主要會發生在B、G、I這三類岩石的開挖過程，但是皆可以採傳統的隧道工程支撐技術克服，例如岩栓、點焊鋼絲網、噴凝土等配合施作，而噴凝土是最常採用的方法，厚度在 80 - 200 mm，取決於是否搭配鋼絲網施作。B、G、I這三類岩石常遇到的問題概述如下：

- **Class B**：水平破碎帶及地下水入滲，可藉由岩栓、鋼筋混凝土拱頂解決。
- **Class G**：岩石破裂及地下水入滲，及為數不多的含夾泥垂直節理，裂面最大開口寬度約 500 mm (如圖2.2-1)，其處理方式先將夾泥清除並填入噴凝土，最後用點焊鋼

絲網配合噴凝土予以穩固。

- **Class I**：交叉破裂造成岩石崩落及頂拱有輕微的拱起現象，可採點焊鋼絲網配合噴凝土或岩栓處理。

綜觀考量岩層性質及水文條件下，Forsmark 1號、2號反應器的冷卻水排放隧道岩層總長 1,921 m，未採用支撐系統的比例達65%，採用支撐系統的比例如表2.2-5。整體而言，冷卻水隧道總長度的 13% 係位於地質變形帶，平均每 1 公尺隧道長度的地下水入滲量約為 0.03 l/s，其中 60% 的入滲量來自地質變形帶，根據現地鑽孔試驗得到詳細的水力傳導係數如表2.2-6所示。

表2.2-4 冷卻水排放隧道所處之地質條件與岩石等級(SKB, 2007)

Class	Main rock type – structure of the rock mass	Joint sets	Estimated RQD	Max compressive stresses in the horizontal plane. Magnitude and direction	Leak intensity L/min m
A	Metagranite – Massive	N80°W; 80°S Horizontal	75		0.5
B	Metagranite – Slaty	E-W; 300 S Horizontal	45		3.2
C	Metagranite – Massive	N80°W; 80°S E-W; 10°S	100	15 MPa; N24°W	1.9
D	Metagranite – Blocky	N80°W; 70°S N80°E; 50°W Horizontal	25		8.3
E	Metagranite – Massive	N80°W; 70°S Horizontal	80	13 MPa; N60°W	0.4
F	Metagranite – Massive	N70°W; 80°S N80°W; 40°S	80	14 MPa; N45°W	0.5
G	Brecciated metagranite	Brecciated	30		3.9
H	Paragneiss – Slaty	E-W; 70°S	95	9 Mpa; N24°W	1.0
I	Paragneiss – Blocky	E-W; 60°S N20°E; 80°N	30		3.5
K	Paragneiss – Slaty	N45°W; 70°S	100		0.4

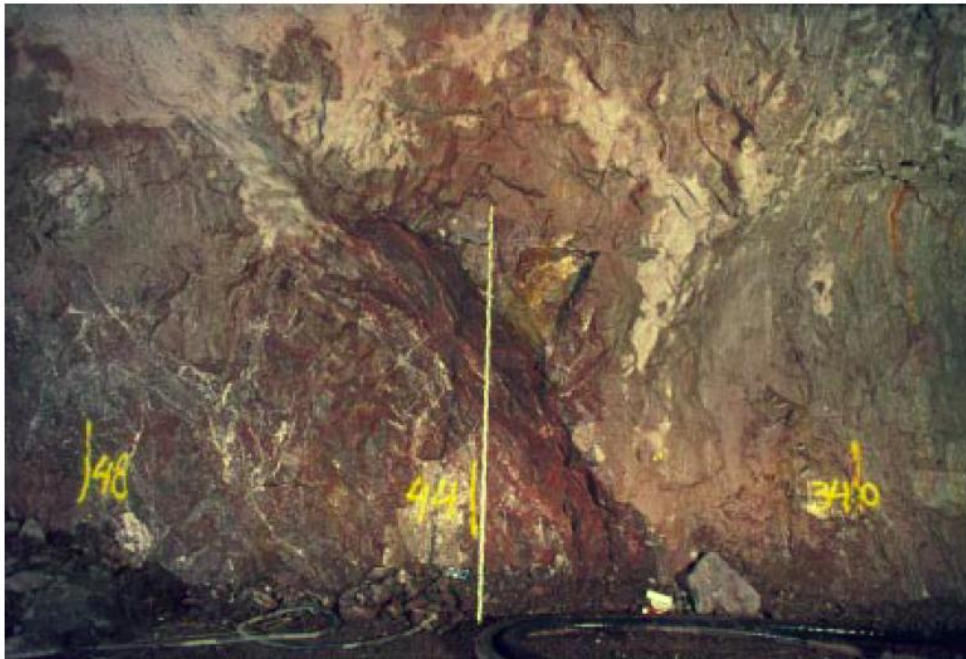


圖2.2-1 於Forsmark 1號、2號冷卻水排放隧道開挖過程遭遇之含夾泥垂直節理 (SKB, 2007)

表2.2-5 Forsmark 1號、2號冷卻水排放隧道之支撐系統比例統計 (SKB, 2007)

岩層支撐系統	厚度 (mm)	鋼筋	百分比(%)
無鋼筋噴凝土	50 — 60		1
含鋼筋噴凝土	80 — 90	# φ 6 c 150	23
含鋼筋噴凝土	150	# φ 6 c 150	8
		# φ 6 c 150	
含鋼筋噴凝土	200 — 300	# φ 8 c 200	3
		# φ 12 c 150	
總佔百分比			35

註：暫時性與永久性的岩栓未納入統計。永久性岩栓之鋼筋型式：填漿錨定 (grouted dowels) · φ 25 KS40S, L: 4-4.4.8 m。岩栓佈設：1 bolt/5 m² — 1 bolt/3 m²，共有 16,000 個永久性岩栓與 12,00 個暫時性岩栓。

表2.2-6 Forsmark 1號、2號冷卻水排放隧道所處地質之導水係數等條件(SKB, 2007)

Borehole No.	Mean values, whole borehole		Mean values, excl. surface rock		Rock excavation classes penetrated by the borings
	Hydraulic conductivity m/s	Calculated leak intensity, l/min m	Hydraulic conductivity m/s	Calculated leak intensity, l/min m	
D61	1.36×10 ⁻⁶	2.53	6.1×10 ⁻⁷	1.13	D-E
D 62 A	2.13×10 ⁻⁷	0.40	2.28×10 ⁻⁷	0.42	K
D 63	5.02×10 ⁻⁷	0.93	5.11×10 ⁻⁷	0.95	G
D 64	6.50×10 ⁻⁷	1.21	2.48×10 ⁻⁷	0.45	E
D 66	3.38×10 ⁻⁷	0.63	3.38×10 ⁻⁷	0.63	F-G
D 67	1.06×10 ⁻⁶	1.98	1.06×10 ⁻⁶	1.98	H-I
D 68	5.5×10 ⁻⁷	1.02	7.69×10 ⁻⁸	0.14	E
Mean values	6.68×10 ⁻⁷	1.24	4.4×10 ⁻⁷	0.81	

在Forsmark 1號、2號反應器冷卻水排放隧道在進行地質調查的時候，由地質工程師與設計者共同完成詳細調查，有助於後續Forsmark 3號冷卻水排放隧道的興建，這樣的地質調查經驗也用於SFR處置場興建過程。

Forsmark 3號冷卻水排放隧道鄰近海岸，隧道之興建時，先建立了先導鑽孔(Pilot hole)，總計施作 1,290 m 衝擊孔(Percussion hole)和 320 m 鑽心孔(Coring hole)，撞擊孔的挖掘方向與隧道底部平行，鑽心孔以 5 種向上挖掘的角度級距進行挖掘。

支撐系統方面，總共施作 7,268 支永久岩栓，搭配點焊鋼絲網與噴凝土設施，未採用支撐系統的比例為 58 %，採用支撐形式的比例如表2.2-7。Forsmark 3號雖然通過Singö 變形帶，但是施作過程中未遇到嚴重的落石坍塌；原本評估 3.5個月完成的隧道鑽掘，提早於3個月完成(長度 140 m)，平均每月可挖掘長度為 50 m。

表2.2-7 Forsmark 3號冷卻水排放隧道岩層採用支撐系統的比例統計(SKB, 2007)

岩層支撐系統	厚度 (mm)	鋼筋	百分比(%)
A. 無鋼筋噴凝土	80 — 90		13
B. 含鋼筋噴凝土	80 — 90	# φ 6 c 150	10
C. 無鋼筋噴凝土	100 — 200		3
D. 含鋼筋噴凝土	100 — 200	# φ 6 c 150	9
E. 含鋼筋噴凝土		# φ 6 c 150 # φ 12 c 150	5
F. 場鑄混凝土拱結構			2
總佔百分比			42

註：暫時性與永久性的岩栓未納入統計。永久性岩栓之鋼筋型式：填漿錨定(grouted dowels)，φ 25 KS40S, L: 4 - 4.5 m.

2.3 長期安全評估與處置窖設計理念暨考量因素

2.3.1 長期安全評估項目

SFR整理其在低放射廢棄物處置經驗，考量處置窖內的廢棄物可藉由設施的系統元件達成放射性衰減，處置場之各系統元件應考慮的長期安全評估項目，包含：(1)廢棄物形式、(2)廢棄物包件方式、(3)包圍廢料包件的灌漿、(4)混凝土結構、(5)噴凝土、(6)膨潤土與砂之混合物/膨潤土、(7)處置窖的回填材料(碎石)、(8)封塞及其他封閉的元件(調查鑽孔)等，彙整如表2.3-1。

SKB公司為SFR處置場建立一套品質管理系統，包含了專案管理的處理過程及安全稽核，均發展為SFR-1、SFR-3管控文件與品質系統的基本架構，並通過ISO 9001:2000認證。處置場興建的過程就必須進行控制作業，SKB公司將各種狀況的檢測與監測資料都納入文件記錄，例如：地下水入滲之化學性質監測、廢棄物處置窖的物理條件檢測等，控制作業之目的在診斷系統的持續改變狀況，如土壤沉陷及SFR擴建所造成的影響。

2.3.2 處置窖設計理念暨考量因素

低放射線廢棄物現儲存於SFR-1內的 1BLA處置窖，及SFR-3擴建計畫的 2-5BLA處置窖亦規劃存放低放射現廢棄物，其設計理念與考量因素如下：

(4) 1BLA

a. 基本介紹

1BLA處置窖地面澆鑄混凝土，岩壁及屋頂則是施作噴凝土，廢棄物以標準貨櫃(ISO-containers)盛裝，使用起重機將貨櫃逐一堆疊儲存，貨櫃以兩排平行存放，依貨櫃的尺寸(視貨櫃為full-height或half-height)每排堆疊 3 至 6 層。1BLA的組成尺寸、剖面圖、立面圖詳圖2.3-1、圖2.3-2及表2.3-2。

處置窖在封閉階段將終止或廢除既有系統，如：通風、電力設施。SFR的封閉計畫描述了如何監測廢棄物處置窖，整個坑道會予以封塞，但是廢棄物的標準貨櫃周遭空間不會回填。橫向隧道(transverse tunnel, 1TT)的終端將建立一道混凝土牆，混凝土澆置後以約 4 m的碎石回填。廢棄物處置窖的隧道(waste vault tunnel, 1BST)終端需要回填以利將廢棄物約束在土堤內，係以 10 m碎石回填於擋土牆後方，再以混凝土做最後的回填。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。

表2.3-1 處置場之各系統元件應考慮的長期安全評估項目 (SKB, 2014)

系統元件	評估項目
廢棄物形式(Wave form)	放射性等級 最小平流傳輸 力學穩定 最小溶解度 吸附作用 有利的化學性質
廢料包件方式 (Waste packaging)	最小平流傳輸 力學穩定 吸附作用 有利的化學性質
包圍廢料包件的灌漿 (Grouting surrounding waste packages)	最小平流傳輸 力學穩定 吸附作用 有利的化學性質
混凝土結構(Concrete structures)	最小平流傳輸 力學穩定 吸附作用 有利的化學性質
噴凝土(Shotcrete)	力學穩定(營運階段與岩栓共同評估) 吸附作用 有利的化學性質
膨潤土與砂之混合物/膨潤土 (Bentonite and sand/bentonite)	力學穩定 最小平流傳輸 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 吸附作用
封塞及其他封閉的元件(調查鑽孔)(Plugs and other closure components)	處置場的最小平流傳輸 吸附作用

表2.3-2 1BLA各組成元件尺寸(SKB, 2014)

1BLA property	Value	Comment*
Excavated rock cavity		
Total length [m]	160	Calculated from values (120 + 40) given in drawing 1411-10020780
Width [m]	14.7	Value given in drawing 1411-10020780
Height (max) [m]	12.7	Value given in drawing 1411-10020780
Height (average) [m]	11.8	Calculated (173/14.7)
Vertical cross-sectional area [m ²]	173	Value given in Closure plan for SFR (SKBdoc 1358612)
Excavated volume [m ³]	27,680	Calculated 173·160
Shotcrete thickness [m]	0.05	From Carlsson and Christiansson 2007, Table 6-2 Un-reinforced 1 or 2 layers: 0.03 or 0.05 m Fibre reinforced: 0.05 or 0.08 m
Inner zone (at tunnel TT)		
Length [m]	3.7	Value given in drawing 1411-10020780
Waste disposal area		
Length where waste can be stored [m]	146.3	146.3 m Max length (160-3.7(TT)-10 (plug support at BST))
Width outer (2 ISO-containers) [m]	12.2	Calculated from ISO standard 6.06 m and emplacement of containers with 0.1 m spacing (2·6.06+0.1), see Sections 3.6.5 and 3.7.7
Height outer (3 ISO-containers full height) [m]	7.8	Calculated from ISO standard 2.59 m and emplacement of 3 containers without spacing (3·2.59), see Sections 3.6.5 and 3.7.7
Bottom		
Concrete floor (reinforced) [m]	0.25	Value given in drawing 1462-10153140
Concrete floor width [m]	13.7	Value given in drawing 1460-10021930
Macadam thickness [m]	0.15	Value given in drawing 1462-10153140
Rock fill thickness [m]	0.3	Value assumed from drawing 1462-10153140
Reloading zone (at tunnel BST)		
Length [m]	10	Required length for plug support given in Closure plan for SFR (SKBdoc 1358612)

* Drawing numbers in column "Comment" refer to SKB's internal documents.

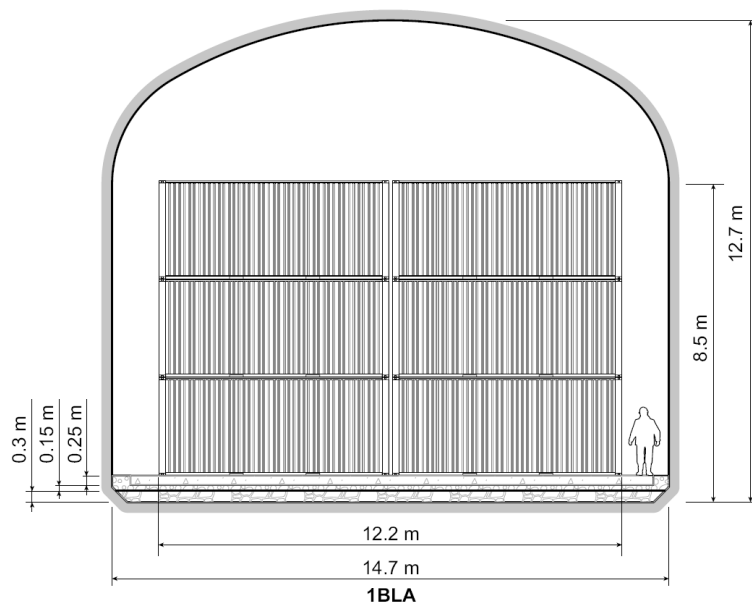


圖2.3-1 1BLA封閉後的各元件尺寸圖(SKB, 2014)

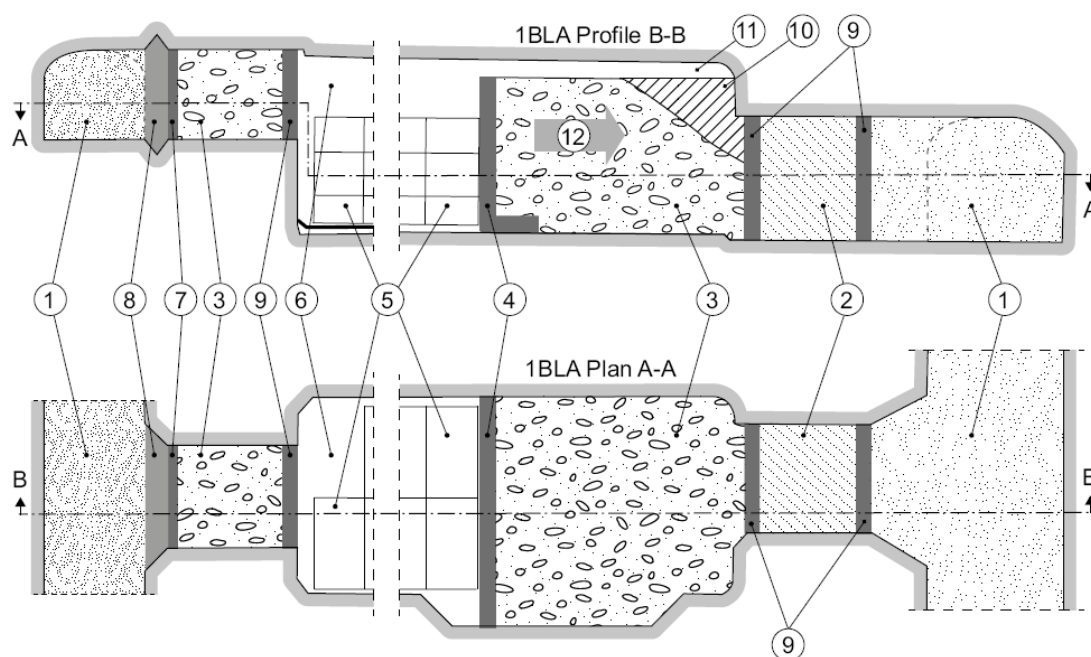


圖2.3-2 1BLA封閉後的剖面圖、平面圖(SKB, 2014)

(1)黏土、(2)過渡材料(如30/70混合的黏土與碎岩)、(3)碎石、(4)擋土牆、(5)廢棄物、(6)開放的廢棄物處置窖、(7)約束壁(constraining wall and concrete form)、(8)混凝土機械栓、(9)過渡材料的混凝土約束壁、(10)混凝土、(11)屋頂縫、(12)處置窖回填過程的施作方向

b. 設計考量

深度約 70 公尺的1BLA坑道，設計上要考慮結構力學的穩定性、較低的地下水位及較少的氧化還原反應。各系統組成元件的設計考量：

- 儲存物的輻射性：1BLA存放低放射性廢棄物及破碎金屬，應依其輻射性作設計限制考量。
- 水流限制：營運期間必須注意回填層的防水措施，因為坑道內缺少防水措施，坑道封閉後的外部防水亦為重要。
- 結構穩定：營運期間，岩壁上的噴凝土將增加廢棄物處置窖的結構穩定。然而，處置窖封閉後，噴凝土及儲存物對結構穩定的影響極小。
- 吸附作用：吸附作用對1BLA坑道的影響極小。然而，對其他廢棄物處置窖而言，吸附作用將造成物品、噴凝土及水泥材料的腐蝕。
- 水的化學性質：廢棄物處置窖內水的化學性質決定於入滲水的化學組成，並受到噴凝土或其他水泥材料的影響；在坑道封閉後，因為氧氣的消耗及微生物的減少，前述水的影響將迅速降低。

c. 檢測與監測

- 興建過程及完工後，監測、檢測廢棄物處置窖之噴凝土及岩石。

- 廢棄物放置的營運階段，監測、檢測廢棄物處置窖的物理狀況。
- 廢棄物處置窖進行封塞前，進行最終監測、檢測。

(5) 2-5BLA

a. 基本介紹

2-5BLA這四條廢棄物處置窖與1 BLA處置窖相似，主要的差異在其坑道斷面積較大，並於儲存區興建長向支撐牆(Longitudinal Wall)。坑道的地面澆鑄混凝土，岩壁及屋頂則是施作噴凝土，廢棄物以標準貨櫃(ISO-containers) 盛裝，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，然而，營運階段仍需進行設施之檢測與維護。2-5BLA的組成尺寸、剖面圖、立面圖詳圖2.3.3、圖2.3-4及表2.3-3。

處置窖封閉階段將終止或廢除既有系統，如：通風、電力設施。SFR的封閉計畫描述了如何監測廢棄物處置窖，廢棄物處置窖內不會回填，而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。擋土牆後方將回填約 10 m 碎石，因為坑道最頂端的碎石回填困難，所以頂端將以混凝土填滿。

b. 設計考量

2-5BLA設計考量與1BLA相似，主要差異為儲存空間設置的長向支撐牆，其為營運階段的安全考量因素。深度約120公尺的2-5BLA坑道，設計上要考慮結構力學的穩定性，需設置在較低的地下水位。各系統組成元件的設計考量：

- 儲存物的輻射性：2-5BLA主要存放低放射性廢棄物及破碎金屬，依其輻射性作為設計限制。
- 水流限制：隧道封閉栓可阻絕地下水的入滲，因此，坑道內的水主要來自廢棄物處置窖周遭的岩石。營運階段，岩石周遭的漿體可限制水的入滲。因為坑道內缺少防水措施，因此，坑道封閉後的外部防水亦為重要。
- 結構穩定：運轉期間，岩壁上的噴凝土將增加廢棄物處置窖的結構穩定，而坑道封閉後，支撐牆、噴凝土及儲存物對結構穩定的影響極小。
- 終止限制：不須考慮廢棄物的輻射釋放造成的限制。
- 吸附作用：吸附作用對2-5BLA坑道的影響極小，然而，對其他廢棄物處置窖而言，吸附作用將造成物品、噴凝土及水泥材料的腐蝕。
- 適合的水的化學性質：廢棄物處置窖內水的化學性質決定於入侵的水的化學組成，並受到噴凝土或其他水泥材料的影響；在坑道封閉後，因為氧氣的消耗及微生物的減少，前述水的影響將迅速降低。

c. 檢測與監測

- 興建過程及完工後，監測、檢測廢棄物處置窖之噴凝土及岩石。
- 廢棄物放置的營運階段，監測、檢測廢棄物處置窖的物理狀況。
- 廢棄物處置窖進行碎石回填及封塞前，進行最終監測、檢測。

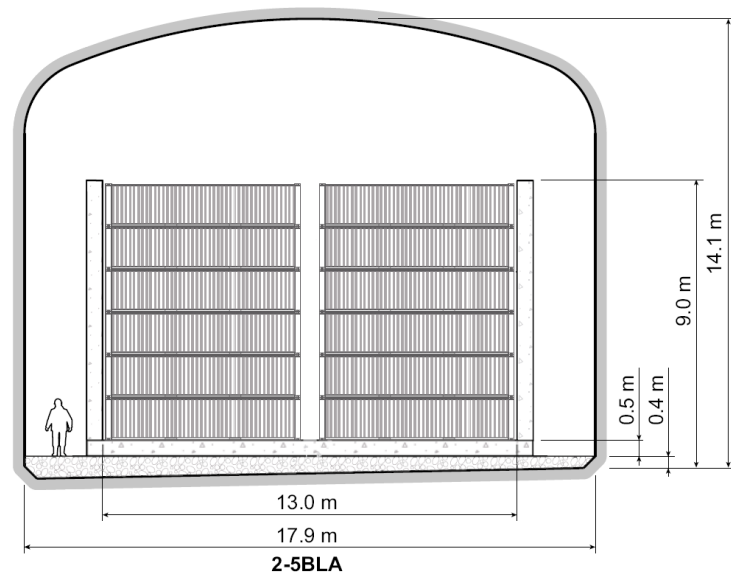


圖2.3-3 2-5 BLA封閉後的各元件尺寸圖(SKB, 2014)

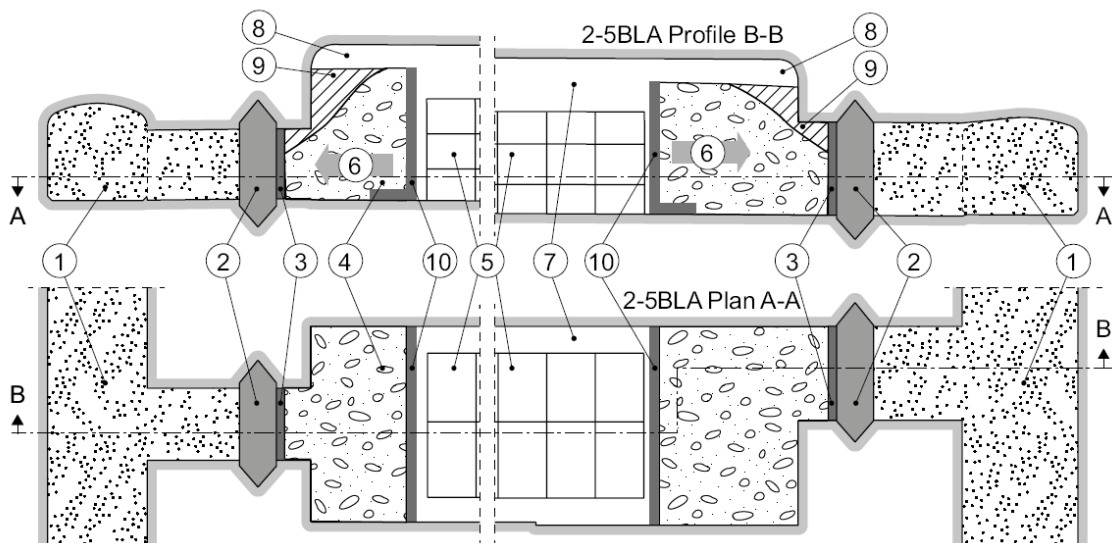


圖2.3-4 2-5BLA封閉後的剖面圖、平面圖(SKB, 2014)

(1)黏土、(2) 混凝土機械栓、(3)約束壁(4)碎石、(5)廢棄物、(6)處置窖回填過程的施作方向、(7)開放的廢棄物處置窖、(8)屋頂縫、(9)混凝土、(10)擋土牆

表2.3-3 2-5BLA各組成元件尺寸(SKB, 2014)

2-5BLA property	Value (Layout 1.5)	Value (Layout 2.0)	Comment*
Excavated rock cavity			
Total length [m]	275	275	Value given in drawing SKBdoc 1391454
Width [m]	17.9	17.9	Calculated from values (0.3+17.3+0.3) given in drawing SKBdoc 1391456 ver. 1.0
Height max [m]	14.1	14.1	Calculated from values (0.4+13.4+0.3) given in drawing SKBdoc 1391456 ver. 1.0
Height average [m]	13.5	13.5	Calculated (242/17.9)
Vertical cross-sectional area [m ²]	242	242	Value given in drawing SKBdoc 1391456 ver. 1.0
Excavated volume [m ³] (per vault)	66,550	66,550	Calculated 275·242
Shotcrete thickness [m]	0.05	0.05	From Carlsson and Christiansson 2007, Table 6-2 Un-reinforced 1 or 2 layers: 0.03 or 0.05 m Fibre reinforced: 0.05 or 0.08 m
Inner zone (at tunnel 2TT)			
Length [m]	8	8	Calculated from values (270,550–27,670) m given in drawing SKBdoc1391792,1391794 and 24 m given in drawing SKBdoc1391454 and tunnel length 275 m
Waste disposal area			
Length where waste can be stored [m]	243	243	Calculated from values (270,550–27,670) m given in drawing SKBdoc1391792 and 1391794 1,080 containers (20-fots half-height) given in SKBdoc 1389672 gives 90 containers in length (90·2.5+60·0.1+29·0.4) = 243
Width outer (2 ISO-containers) [m]	12.2	12.2	Calculated from ISO standard 6.06 m and emplacement of containers with 0.1 spacing (2·6.06+0.1), see Sections 3.6.5 and 3.7.8
Height outer (3 ISO-containers full height) [m]	7.8	7.8	Calculated from ISO standard 2.59 m and emplacement of 3 containers without spacing (3·2.59), see Sections 3.6.5 and 3.7.8
Thickness longitudinal walls [m]	0.5	0.5	Value given in drawing SKBdoc 1391456 ver. 1.0
Height longitudinal walls [m]	8.64	8.1	Layout 1.5, calculated from values (9.14–0.5). Layout 2.0, calculated from values (8.6–0.5) given in drawing SKBdoc 1391456 ver.1.0
Bottom			
Concrete floor (reinforced) [m]	0.5	0.5	Value given in drawing SKBdoc 1391456 ver. 1.0
Concrete floor width [m]	14	14	Value given in drawing SKBdoc 1391456 ver. 1.0
Macadam/Rock fill thickness [m]	0.4	0.4	Value given in drawing SKBdoc 1391456 ver. 1.0
Reloading zone (at tunnel 2BST)			
Length [m]	24	24	Value given in drawing SKBdoc 1391454

* Drawing numbers in column "Comment" refer to SKB's internal documents.

2.4 運轉階段的檢測與監測

2.4.1 岩石力學穩定性檢測(Rock inspections)

為掌握處置坑道在運轉期間的岩石力學穩定性，以確保處置設施與人員安全，SFR在運轉階段採週期性地檢測岩石品質與支撐構件狀況。SFR在1988年發表檢測導則，並且在2003年完成修訂，導則中描述了檢測工作的責任分配以，並說明岩石表面與支撐的檢測方法、維護方式，地下設施的安全評估，主要就是建立在地下水滲流、岩石變形、噴凝土與岩栓等之檢測基礎上。

在瑞典，所有的隧道、洞穴工程都必須遵守瑞典主管機關制定的檢測法規 (Arbetsmiljöverket)，SFR當然亦需遵守相關法令規範；依據瑞典法規的指導方針，營運階段的檢測不能少於營運前。目前，SFR每五年進行一次大型檢測(Large Inspection)，這樣的檢測頻率是經由瑞典主管機關認可的。

為了檢測工作的推行，SKB特別編成了檢測團隊，成員來自總公司、SFR-1廠區、岩石工程專家以及混凝土專家，如果有需要，將邀集相關專家成立岩石檢測團隊(Rock Inspection Group)，額外進行年度的檢測報告。

2.4.2 控制行動(Control actions)

檢測的實際行動包含了(1)目視檢查、(2)量測及讀數；維護工作包含了：(1)保障員工安全的修正措施，及(2)保證各種不同的岩石支撐系統所提供的岩盤穩定效果。SFR的各種控制行動與負責之單位如表2.4-1，依檢測規模區分為(1)內部檢核、(2)年度岩石檢查、(3)測試與調查、(4)維護、與(5)大型檢測等五類，茲分述如后。

表2.4-1 控制行動與負責單位(SKB, 2007)

控制行動	負責單位
內部檢核(internal check-up)	SFR 組織
年度岩石檢測(Yearly rock inspection)	岩石檢測團隊
測試與調查(Testing and investigations)	岩石檢測團隊
維護(Maintenance)	SFR 組織
大型檢測(Large inspection)	檢測團隊

(1) 內部檢核(internal check-up)

SFR組織負責內部檢核，主要的檢核方式是每月讀取地下水壓報表及岩石維護摘要。若有異常的狀況，如：坑道牆面或地面的岩石鬆動，及支撐系統被偵測到功能減損等狀況，SFR組織將通知岩石檢測團隊(Rock Inspection Group)進行進一步的控制行動。

(2) 年度岩石檢查(Yearly rock inspection)

每年乙次的岩石檢查內容如表2.4-2。

(3) 測試與調查(Testing and investigations)

除了前項所述之年度岩石檢查外，另配合如表2.4-3所列各種不同的測試與調查項目。

(4) 維護(Maintenance)

有效的維護對於隧道的支撐系統及排水系統相當重要，各種維護的項目與頻率，如表2.4-4。

(5) 大型檢測(Large inspection)

每五年進行一次的大型檢測(Large inspection)，需要彙整、評估及總結這段期間內之各種檢測、維護與處置措施，並針對下一次的大型檢測提出是否需要改善檢測方式。

表2.4-2 年度岩石檢查項目(SKB, 2007)

檢測項目 (Activity)	量測方式	證明文件
變形量測 (Deformation measurements)	紀錄與判讀 (Reading-Compilation of result)	報告編號
地下水入滲量 (Measurement of groundwater inflow)	紀錄與判讀 (Reading-Compilation of result)	年度報告
岩體品質與支撐 (Rock mass quality and rock support)	目視檢查 (General visual inspection)	年度報告

表2.4-3 測試與調查項目(SKB, 2007)

測試與調查項目	實施週期
1.地下水入滲量 (Evaluation of groundwater inflow)	每 5 年
2.岩錨的測試 (Testin og rock anchors)	
(1)岩栓檢測 (Boltometer testing)	每 6 年
(2)目視檢查 (Visual inspection)	每 6 年
(3)腐蝕情況調查 (Corrosion investigation)	每 15 年
(4)噴凝土的調查與測試 (Investigation and testing-shotcrete)	每 10 年

表2.4-4 維護項目與實施週期(SKB, 2007)

維護項目	量測	文件類型(Document)	實施週期
岩體表面	剝落量體 (scaling)	報告(protocols)，內容為評估 剝落岩體體積	每 5 年
噴凝土	剝落量體 (scaling)	報告(protocols)，內容為評估 剝落噴凝土體積	每 10 年

2.4.3 營運期間的監測經驗

SFR的地下開挖工作在1986年完成，岩石支撐系統已運作將近30年，經過不斷地檢測、監測、維護，迄今未有異常變形或支撐破壞等狀況。

(1) 變形量測

在岩體變形監測部分，SFR-1透過採用伸張儀(Extensometers)固定在岩壁上以量測岩體的依時變形，量測位置則分別架設在頂拱、與側壁上部位置。針對坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性評估，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2.4-1案例為顯示了破裂帶Zone 9的地層位態與坑道開挖面形成的岩楔可能沿著層面滑動的狀況。

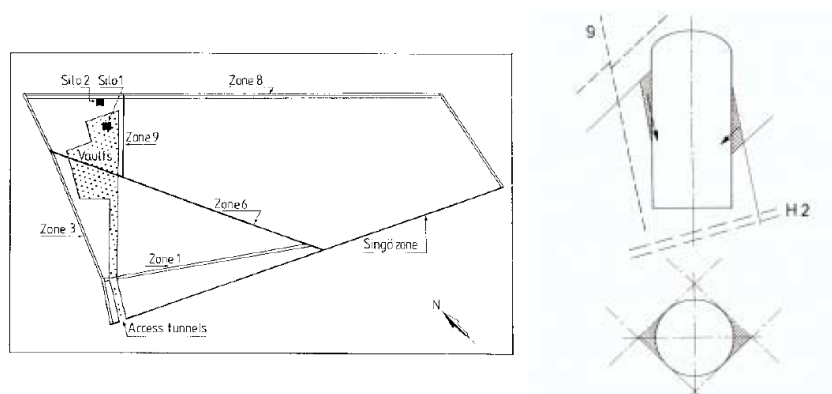


圖2.4-1 處置窖所處位置之主要破裂帶分佈與坑道側壁不穩定岩塊之示意圖(SKB, 2003)

SFR共裝設18組伸張儀量測變形狀況，1997年以後，所有的變形量測都是採用電子讀取，表2.4-5及表2.4-6分別呈現Singö變形帶及筒倉(Silo)1997-2006年與2005-2006年兩段區間的變形量測狀況。M009-M014是為了因應電子量測作業，於1997年增設的伸張儀，E1-E5是1989年裝設，E7-E9是1988年裝設。量測儀器的精準度為 0.02 mm。由量測結果可以知道，SFR營運以來，其變形量相當小。

表2.4-5 Singö變形帶之變形量測結果(SKB, 2014)

伸張儀編號	2005-2006 變形量(mm)	1997-2006 變形量(mm)
Ext. 1	+0.02	+0.03
Ext. 2	+0.03	+0.17
Ext. 3	-0.01	+0.01
Ext. 4	±0	-0.04
Ext.5	±0	+0.03

伸張儀精度 0.02 mm

表2.4-6 筒倉(Silo)之變形量測結果(SK B, 2014)

伸張儀編號	2005-2006 變形量(mm)	1997-2006 變形量(mm)	總變形量(mm)
M009	±0	+0.01	
M010	-0.01	-0.02	
M011	±0	-0.01	
M014	±0	+0.01	
Ext. 1	0.00	±0	±0 since 1989
Ext. 2	-0.02	-0.30	-1.06 since 1989
Ext. 3	0.00	-0.02	-0.01 since 1989
Ext. 4	±0	±0	-0.01 since 1989
Ext.5	-0.01	+0.18	+0.11 since 1989
Ext.6	±0	±0	-0.12 since 1989
Ext.7	±0	+0.07	+0.15
Ext.8	-0.01	+0.02	+0.09
Ext.9	±0	+0.01	+0.03

伸張儀精度 0.02 mm

(2) 坑道斷面潛變量測與評估

透過潛變量測目的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。

a. 應變理論值(Theoretical strain)

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，但其採用的參數實際有諸多不確定性，例如楊氏模數取 10^4 MPa、剪力模數取 4×10^3 MPa、阻尼係數取 10^{12} MPa，故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 15 m範圍的岩體內，也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。

b. 實際的潛應變(Actual creep strain)

如圖2.4-2所示，Vattenfall Hydropower(1993)提 1985 至 1993 年間的坑道徑向潛變量之量測報告，顯示了潛變速率在開始的數月有明顯的 3 - 4 mm的快速潛變量，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；其實測值與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(3 mm ~ 4 mm)。

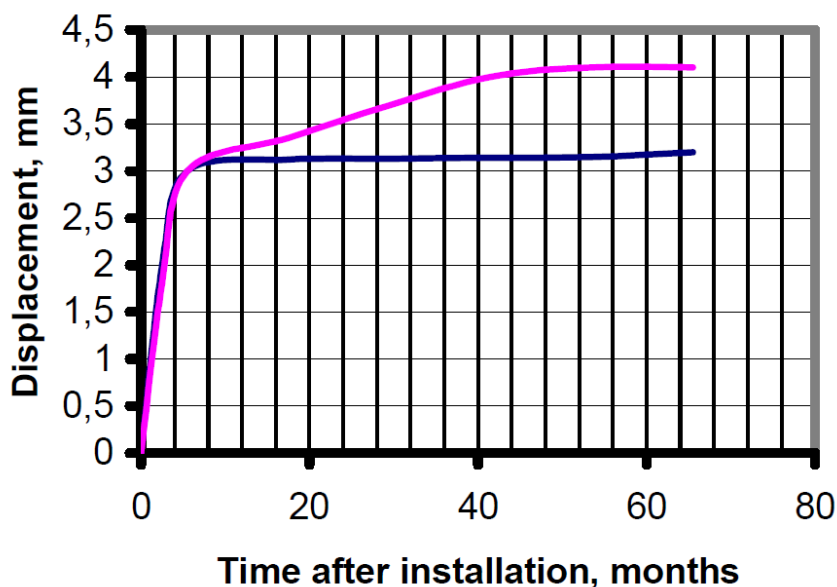


圖2.4-2 伸張計量測徑向潛變量變化(Bodén, 1993)
 (紅色與深藍色曲線分別為編號E4與E7伸張計之長度變化量)

(3) 岩栓測試

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)。

1984-1986年的興建期間，計有 316 支水泥灌注的岩栓進行測試，然而，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。

(4) 地下水量測

SFR自1988年起定期量測地下水入滲狀況，以驗證水流量的變化，表2.4-7顯示了2006年的量測結果，量測位置示意圖如圖2.4-3。

表2.4-7 地下水入滲量測結果(SKB, 2007)

量測位置	入滲量	量測的誤差	洩漏百分比	備註說明
BMA	5 l/min	± 1 l/min	<2%	
1BLA	0 l/min	± 1 l/min	0%	2003年設置，量測位置可能無法涵括所有入滲量
2BTF	9 l/min	± 1 l/min	<3%	2003年設置，量測位置可能無法涵括所有入滲量
1BTF	3 l/min	± 1 l/min	<1%	2003年設置，量測位置可能無法涵括所有入滲量
抽水井	75 l/min	± 1 l	~20%	水通過虹吸至最低抽水井(NDB)以水位計(1996年設置)量測。
聯絡坑道	200 l/min	± 10 l/min	~70%	集水壩於1992年設置，1996年更改量測規則，1997年完成校準及更新均衡方程式
筒倉頂部 (Silo top)	0.1 l/min	± 0.1 l	<1%	水位計常因為鐵的沉積造成故障
筒倉側牆及 底部	0.8 l/min	< ± 0.1 l/min	<1%	
抽水井	280 l/min	± 10 l/min	~80%	非營運區域的水。在地表位置以水位計(1996年設置)量測，水位計設置之前，僅量測打氣泵的導航台水位上升狀況。1999年重新設置水位計，2005年校準水位

刻度

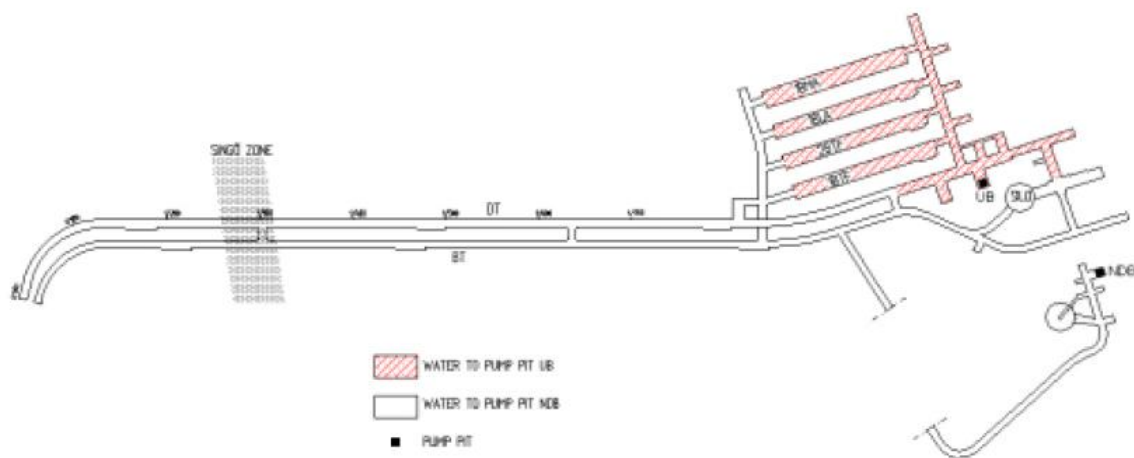


圖2.4-3 地下水量測位置示意圖(SKB, 2007)

2.4.4 水文地質(Hydrogeology)

在水文地質調查部分，包含了近地表地下水條件、岩石導水性與地下水流入量，茲分別說明如后：

(1) 近地表地下水條件

SFR所在位置的Forsmark地區其 75 %的地表面面積覆蓋了冰磧土(till)，地質年代屬第四紀之沉積物(Quaternary deposit)，亦常看到礫石(boulder)的分布。根據岩石導水特性的調查，近地表面有較高的水力導水係數(hydraulic conductivity)，其值約 10^{-5} 至 10^{-4} m/s，比出水量(specific yield)介於 10 至 20 %，孔隙率約 30 至 40 %。在地表冰磧土下方土層的水力導水係數為 1.2×10^{-6} m/s，比出水量為 2 至 5 %，孔隙率為 20 至 30 %，介於冰磧土與岩層交界的水力導水係數約為 1.3×10^{-5} m/s。

Forsmark地區的地下水主要來自於降雨，但是在夏季，湖水為其周邊含水層地下水來源，然而，因冰磧土底部的垂直導水特性較低，導致地下水交換(water exchange)並不顯著。此外，在高水位面時期，波羅的海(Baltic Sea)亦提供了地下水交換的來源。此一地區並無明顯的地形起伏，因此，地下水流系統的形成主要取決於不同深度土層的水力導水特性。

(2) 岩體導水特性

SFR所在位置之母岩為富含裂隙的結晶岩類，岩體裂隙形成地下水流通的管道，因此，水力傳導特性取決於岩體裂隙的連通狀況，且具尺度依存性(scale-dependent)。為掌握岩體導水特性，於H2(如圖2.4-4)區的坑道四周進行了20組雙封填塞(straddle-packer tests)導水試驗，另外於其他各區進行了 2 至 5 組的試驗。表2.4-8為岩體導水特性試驗與岩體厚度調查結果，顯示Zone 3的導水性最佳，其水力導水係數為 2.9×10^{-6} m/s。

表2.4-8 岩體導水特性與岩體厚度(Holmén and Stigsson, 2001)

區域	水力傳導係數(m/s)	區域近似厚度(m)	試驗組數
H2	3.4×10^{-7}	6	20
3	2.9×10^{-6}	6	3
6	2.1×10^{-7}	2	2
8	5.1×10^{-7}	9	5
9	9.8×10^{-9}	3	4

具代表性的岩體導水特性必須考慮岩體尺度與地下水流方向，不同的地質破裂帶其間岩體導水特性端視地質破裂帶所定義的區域；此外，透過導水隧道(drained tunnel)研究處置坑道系統的地下水滲入量時，是有機會評估隧道徑向(radial flow)地下水流的等值導水特性。

(3) 地下水入滲(Groundwater inflow)

SFR-1處置設施透過長期的監測計畫以量測20年期間地下水滲流進入的情況，量測資料如圖2.4-4所示。在1988年的地下水每小時總滲入量為 44 m³/h，之後滲流量呈現遞減趨勢，至2006年仍有 20 m³/h，顯示20年後每一小時仍有 20 m³的地下水入滲量。

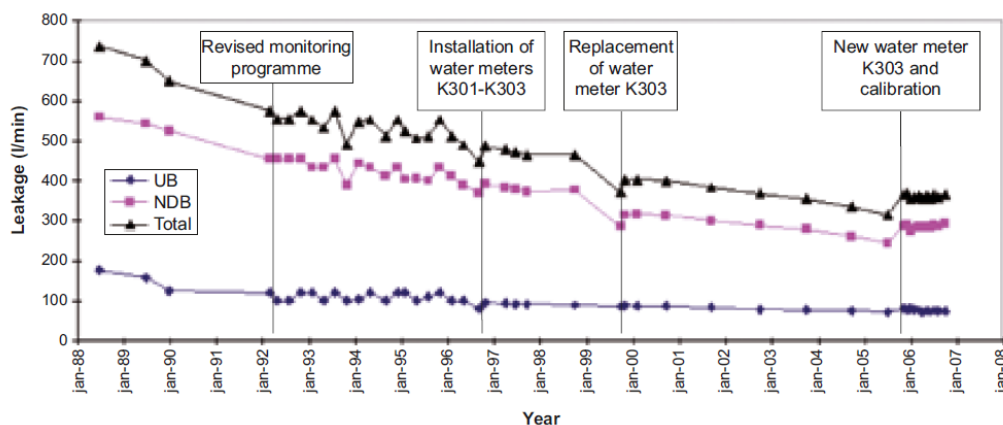


圖2.4-4 1988至2006年SFR處置設施之地下水滲流監測紀錄(Bodén and Lundin, 2007)
 (UB = maintenance building, NDB = lower drainage basin)

2.5 小結

本章蒐整瑞典SFR處置窖之興建規劃、長期安全評估項目、及SFR3處置窖之設計考量、運轉期間的檢監測規劃與結果。其中，與本研究相關且可供作第五章「處置坑道封閉前之檢測與評估項目研析」與第六章「處置坑道封閉後之監測對策研析」之參考內容整理如下：

(1) 處置坑道建造期間

SFR在處置坑道建造期間，岩石分類僅區分「品質良好岩石」(good rock)、「高度破碎岩石」(high fracture frequency)或「塊狀岩體」(blocky rock mass)，採用的支撐型式屬一次支撐的噴凝土與岩栓為主。在Forsmark冷卻水隧道開挖時，則是將所處的地質條件區分為 10 個岩石等級，即便是通過地質擾動帶，仍僅採傳統的隧道工程支撐技術克服(岩栓、點焊鋼絲網與噴凝土等配合施作)。有關SFR使用的噴凝土與岩栓支撐形式，分別整理如表2.2-2與表2.2-3，冷卻水排放隧道的地質條件與岩石等級綜整如表2.2-4，採用的支撐系統比例統計綜整如表2.2-5與表2.2-7。

(2) 運轉期間的檢監測

a. 實際的檢測控制行動

SFR的檢測控制行動依規模區分為(1)內部檢核、(2)年度岩石檢查、(3)測試與調查、(4)維護、與(5)大型檢測等五類，其負責單位包括SFR組織、岩石檢測團隊與獨立的檢測團隊，綜整如表2.4-1。

b. 檢監測與維護項目

SFR在運轉階段，係每年針對岩石的變形、岩體品質暨支撐狀況與地下水的入滲採週期性的檢監測作業，其量測方式包括儀器讀數的紀錄與目視檢查，藉以掌握處置坑道在運轉期間的岩石力學穩定性，其每年檢查項目綜整如表2.4-2。另外，針對地下水入滲與岩栓檢測(含目視檢查)則採5年與6年實施一次，支撐系統腐蝕情況調查與噴凝土的調查測試則分別是15年與10年進行一次，相關資料綜整如表2.4-3，至於針對岩體表面與噴凝土所實施的維護工作，則是每5年與10年進行一次，如表2.4-4所示。

c. 實際的監測結果

SFR共裝設18組伸張儀量測，以分別量測Singö變形帶(5組)及筒倉(13組)的變形狀況。量測儀器於1997年以後採電子式自動讀取，儀器的精準度為0.02 mm，分別如表2.4-5及表2.4-6所示。其次，針對岩體的依時變形特性，則是透過坑道徑向潛變量測與模式評估；根據1985至1993年將近10年期間的坑道徑向潛變量之量測報告，顯示潛變速率在開始的數月有明顯的3至4 mm的快速潛變量，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，如圖2.4-2。另外，分別於1987年與2004年施作了參考岩栓，藉以確保岩栓沒有受到地下水入滲的侵蝕。1988至2006年間的地下水入滲量量測結果，顯示地下水入滲量有逐年呈現遞減的趨勢，如圖2.4-4所示；此外，從表2.4-7獲知低放射性廢棄物處置窖(1BLA)的入滲量為0.1 l/min，但在聯絡坑道處有較高的地下水入滲量200 l/min。

(3) 長期安全評估項目

處置場各系統元件應考慮的長期安全評估項目，包括了(1)廢棄物形式、(2)廢棄物包件方式、(3)包圍廢料包件的灌漿、(4)混凝土結構、(5)噴凝土、(6)膨潤土與砂之混合物/膨潤土、(7)處置窖的回填材料(碎石)、(8)封塞及其他封閉的元件(調查鑽孔)等，彙整如表2.3-1。其中，與處置坑道結構有關者，包括了混凝土結構與噴凝土等二項，其在運轉期間之安全評估項目均包括了(a)力學穩定性、(b)吸附效果、與(c)有利的化學性質等，在混凝土結構項則須額外考量了最小平流傳輸之能力。

第三章、處置坑道運轉期間襯砌異狀與關鍵肇因之判斷

處置坑道建置於地表下，其長期穩定性與否受地質因素所控制。坑道建造初期經過充分的地質調查與試驗，獲得足夠的參數加以設計，並於施工期間監測圍岩的行為以確保圍岩的穩定性。然而，有別於國外處置技術先進的國家，其地質穩定性高，處置坑道建成後，襯砌大多提供優化置放環境的功能，甚至有些完全不需要澆注襯砌，如前章介紹的瑞典 SFR 處置設施即為一例，鮮少有處置坑道襯砌異狀的產生供深入探討。所幸，國內因地形環境特殊，建造了許多的一般坑道，其襯砌的異狀經蒐集彙整後，可供作為國內坑道提升長期穩定性需求的本土資料庫。爰此，本章主要彙整國內外坑道的襯砌異狀、營運中坑道變形分析方法、機制與特性，藉以研判坑道異狀的肇因，提供處置坑道運轉期間襯砌檢監測工作之參考。

3.1 營運中隧道之襯砌異狀

坑道襯砌異狀，係指坑道完工後，因外力、環境、材料、設計、施工等因素，造成襯砌等變形、裂縫、剝落、漏水現象等，影響原先之使用功能。若任由異狀自由發展，可能會影響坑道之正常營運功能，並存在坑道長期穩定性之風險。本節蒐集彙整國內外所歸納坑道襯砌之異狀種類，作為坑道檢監測技術研發之參考。

(1) 日本

日本地質條件與國內相似，且大量深入的隧道檢測與維護管理經驗均可作為國內之借鏡。日本土木學會(2003)之研究指出，山岳隧道異狀可依其異狀出現位置：(a)襯砌；(b)路基；(c)洞口；(d)地盤予以分類，如圖 3.1-1 所示。其中出現於襯砌之異狀可細分為：(a)裂縫；(b)接縫開裂；(c)錯位；(d)剝離或剝落；(e)變形；(f)側壁下陷；(g)漏水；(h)土砂流入；(i)冰柱或側冰；(j)材料劣化等，共 10 種。

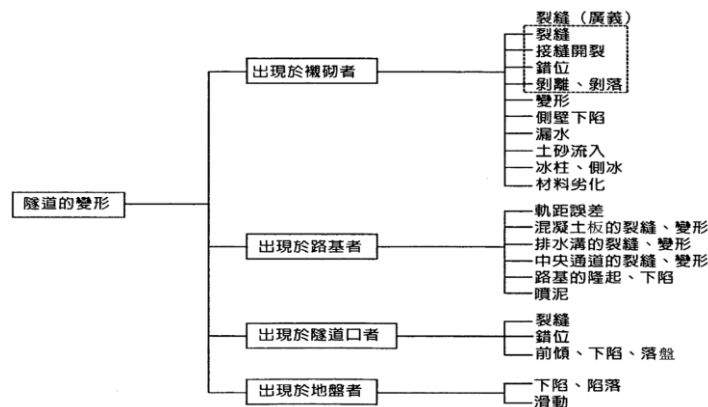


圖3.1-1 日本山岳隧道異狀種類分類法(譯自日本土木學會，2003)

(2) 美國

美國聯邦公路管理局 2005 年出版之「Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual」中，有關隧道襯砌異狀種類，係先依襯砌材質：(a)混凝土結構；(b)鋼結構；(c)磚造結構；(d)木造結構等劃分。其中為數最多之混凝土結構的異狀種類，參考美國混凝土學會 ACI 201.1R-92 之定義，將其歸納為：(a)Scaling(魚鱗狀剝離)；(b)Cracking(裂縫)；(c)Spalling(剝落)；(d)Joint Spall(接縫剝落)；(e)Pop-Outs(爆開)；(f)Mudballs(泥孔)；(g)Efflorescence(白華)；(h)Staining(鏽染)；(i)Hollow Area(空洞)；(j)Honeycomb(蜂窩)；(k)Leakage(滲漏水)等，共 11 種。

(3) 歐洲

歐盟 TUNCONSTRUCT 於 2006 年出版之「Report for Structural Integrity of Tunnels Frame for an European data base」研究報告，將山岳隧道異狀種類分為：(a)原有缺陷；(b)物理或化學變化；(c)裂縫；(d)變形；(e)不穩定；(f)水的問題；(i) 排水或集水問題，如表 3.1-1 所示。

表3.1-1 歐盟山岳隧道異狀種類分類表(TUNCONSTRUCT，2006)

Class	Defect family	Definition	Examples	Parameters
1	Original defects	Appearance defects existing from tunnel construction; Imperfections usually visible, punctual or systematic, affecting a part of the tunnel; result from construction method or the poor quality of original material	Changes in color at lining surface; efflorescence, unframing root traces, hollow sounding zones, local deformation of the formwork, map cracking, gravel nests, exudation, cavities, fresh concrete fractures (shrinkage unconsidered)	Localization, extent, intensity, density
2	Physical or chemical alteration	Progressive degradation of material due to physical or chemical phenomena	Sulfate and alkaliaggregate reaction; steel corrosion; freezing related defects	Extent, depth
3	Cracks	Linear discontinuities resulting from the material failure; a movement of crack edges can be observed or not	Longitudinal, transversal, oblique cracks or cracks due to shrinkage	Opening, backwards movement with respect to lining surface, lateral movement
4	Deformations	Deformation of the section on the whole or local deformation	Pinching, flattening or bulging	Profilometry (permanent or circumspect) or convergence measurements (invar wire or optical method) in one or several sections
5	Instabilities	Any mass likely to break from the vault, that may reach a vehicle, can harm or kill a user in its fall	Concrete block remained in place after a concrete chip, rubble stones or bricks, blocks or stone slabs	Sounding, localization relatively to traffic position, estimation of the unitary volumes, of the overall volume
6	Problems due to water	Infiltrations; water can be liquid or solid during freezing times; only relates to the vault and platform	Humid areas; seepage, pressurized water...	Flow, pressure, temperature, extent (m ²), downstream carrying of fine particles or mud
7	Drainage or water collection network problems	Malfunction of drainage network	Sealing	—

(4) 瑞士

Sandrone 與 Labiouse (2011) 蒐集瑞士境內 168 座公路隧道之檢測資料，歸納公路隧道之異狀種類有：(a)滲漏水、潮濕；(b)白華(硫酸鹽)；(c)銹染、鈣淋洗效應、鈣質結核、蜂窩；(d)混凝土剝落、混凝土剝離(由於鋼筋腐蝕)；(e)純混凝土的腐蝕、混凝土魚鱗狀剝落(除冰鹽的影響)；(f)鋼筋腐蝕(鋼筋混凝土)；(g)襯砌背後的空洞；(h)裂縫、裂紋；(i)局部變形(頂拱)；(j)局部變形(側壁)；(k)排水系統中的顆粒傳輸；(l)冰的形成；(m)混凝土襯砌搖搖欲墜—局部破壞、碎片落下；(n)Track scaling；(o)仰拱隆起；(p)衝擊損害；(q)鈣質結晶阻塞排水系統等，共 17 種，如表 3.1-2 所示。

表3.1-2 瑞士公路隧道異狀種類分類表(Sandrone與Labiouse，2011)

Type	Disorder	Number of records	Number of affected tunnels
[1]	Water leakage, moisture	75	57
[2]	Efflorescence (sulphates)	19	16
[3]	Staining, calcium leaching effects, calcareous concretion, honeycomb	29	25
[4]	Concrete spalling, delaminated concrete (due to corrosion of reinforcements)	34	28
[5]	Plain concrete corrosion, concrete scaling (de-icing salts attack)	15	14
[6]	Corrosion of steel bars (reinforced concrete)	76	52
[7]	Voids behind the lining	-	-
[8]	Cracks, fissures	131	80
[9]	Local deformation (crown)	1	1
[10]	Local deformation (walls)	-	-
[11]	Fines transport in the drainage system	10	8
[12]	Ice formation	15	15
[13]	Concrete lining crumbling - local failure, fragments fall	6	5
[14]	Track scaling	10	8
[15]	Invert heave up	15	12
[16]	Impact damages	12	10
[17]	Drainage system obstruction by calcareous concretion	33	30

(5) 中國

中國同濟大學 Yuan 等(2012)則認為隧道異狀種類可依材料、組成要素、結構三大項劃分，其中材料又可分為混凝土與鋼材二類，而混凝土之異狀則可再細分為：(a)滲透；(b)裂縫；(c)結殼；(d)剝落；(e)空洞；(f)分層；(g)剝離等，共 7 種，如表 3.1-3 所示。

表3.1-3 中國隧道異狀種類分類表(Yuan等，2012)

Material	Component	Structure
Concrete	Member	Lining ring
Permeating	Tilting	Convergence
Map cracking	Deflection	Breakage
Incrustation	Cracking	Portion of lining
Spalling	Damage	Settlement or Lift
Void	Seepage	Fracture
Delaminating	Connection	
De-bonding	Twisting	
Steel	Wrapping	
Rust	Bulking	
Pitty	Joint	
Scaring	Opening	
Fissuring	Stagger	
	Loose	
	Leakage	

(6) 台灣

王泰典等(2007a；2008；2010)以台灣坑道為背景，蒐集整理 1990 年代以來安全檢測作業調查所得的襯砌異狀，已有一定的成果，可詳閱相關的報告中(王泰典，2012 與 2013；董家鈞，2014)。李佳翰(2013)蒐集國內外 266 座坑道檢測案例，亦提供足夠的案例基礎，提供國內外坑道襯砌異狀現象差異之研析，根據其蒐集之案例進一步分析，可知國內外隧道襯砌異狀比例最高之前四項均是：裂縫、滲漏水、剝落與仰拱隆起或沉陷，國內外均以裂縫所佔比例最高，但國內隧道發生裂縫的比例高達 92%，遠高於國外的 79%，顯示國內隧道襯砌幾乎都會出現裂縫問題。此外，根據前項資料，楊長義等人(2015)在有關「處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(2015)報告中指出，在坑道襯砌異狀比例最高之前四項中，國內隧道襯砌之滲漏水問題是次高，其比例高達 72%，遠遠高於國外的 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。

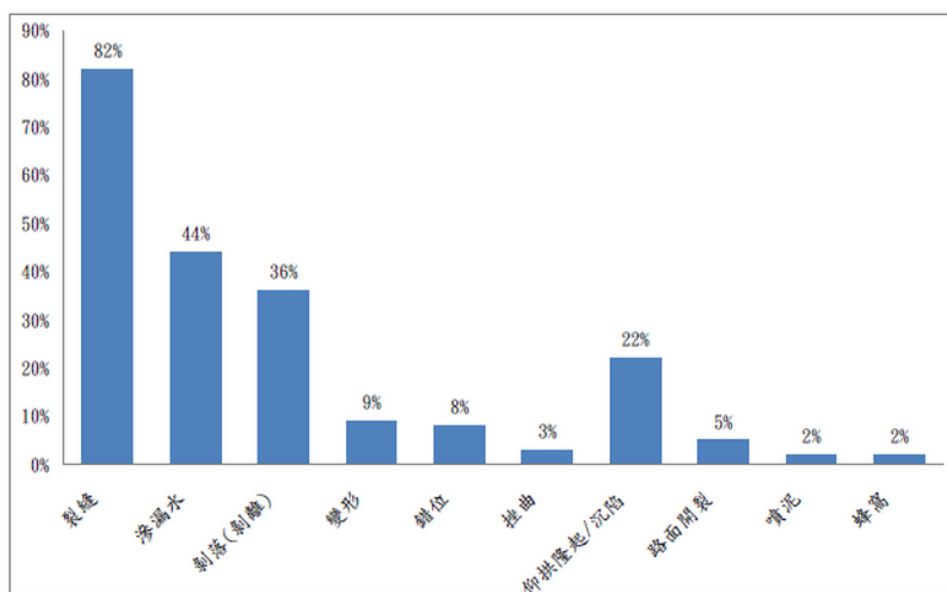


圖3.1-2 國內外266座隧道襯砌異狀種類統計圖(李佳翰，2013)

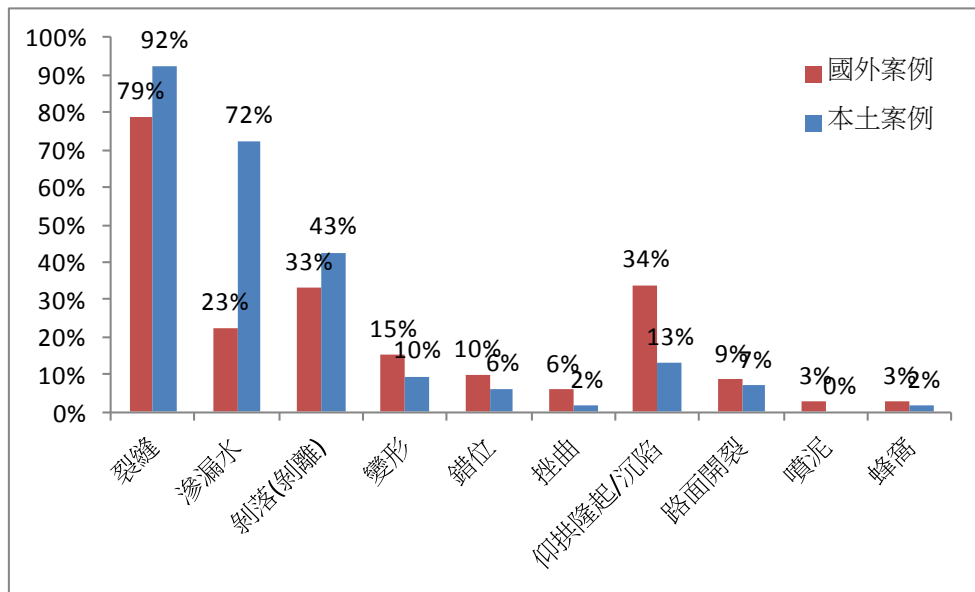


圖3.1-3 國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較

3.2 營運中隧道之力學分析方法

營運中隧道之變形，較開挖階段隧道變形複雜許多。開挖階段隧道的變形，與圍岩力學特性、現地應力狀態、開挖斷面形狀等因子相關，自 Kirsch(1898)提出無襯砌圓形隧道開挖後周圍應力之解析解以來，發展蓬勃且相關應用已臻成熟。營運中的隧道，在圍岩與隧道本體間，有著噴凝土、岩栓與澆注混凝土等支撐構件與結構，且圍岩本身受開挖擾動影響，其力學特性之改變亦難以掌握，因此，營運中隧道之變形分析，仍存在著許多的難度亟需克服。目前，國內外營運中隧道變形之分析方法，常假定隧道肇因形態，以數值模擬、室內襯砌模型試驗等方式探討如岩體弱化、不同載重形態、結構弱化等已知肇因對隧道的影響，分別詳述於后。

(1) 室內襯砌模型試驗

朝倉俊弘等(1994)進行縮小尺寸 1/30 的純混凝土襯砌試驗，探討載重型態、特定襯砌肇因對襯砌型態之影響。野城一榮等(2004)延續朝倉俊弘等(1994)之雙線隧道襯砌模型(圖 3.2-1a)，探討隧道襯砌受集中荷重作用時的荷重—位移關係。小島芳之等(2006)設計引致隧道襯砌異狀之外力型態—集中荷重、偏壓與塑性壓之試驗，探討隧道襯砌受不同外力型態作用時的荷重—位移關係。佐野信夫等(2006)建立實驗過程中襯砌剛性與裂縫進展的關係，藉觀察裂縫發展評估襯砌現有之剛性。Kojima 與 Yashiro(2005)為了解鄰近施工對隧道可能的影響，建立如圖 3.2-1b 之實驗模型，於地表反覆進行開挖與回填，獲得加卸載過程隧道襯砌受力的變化。

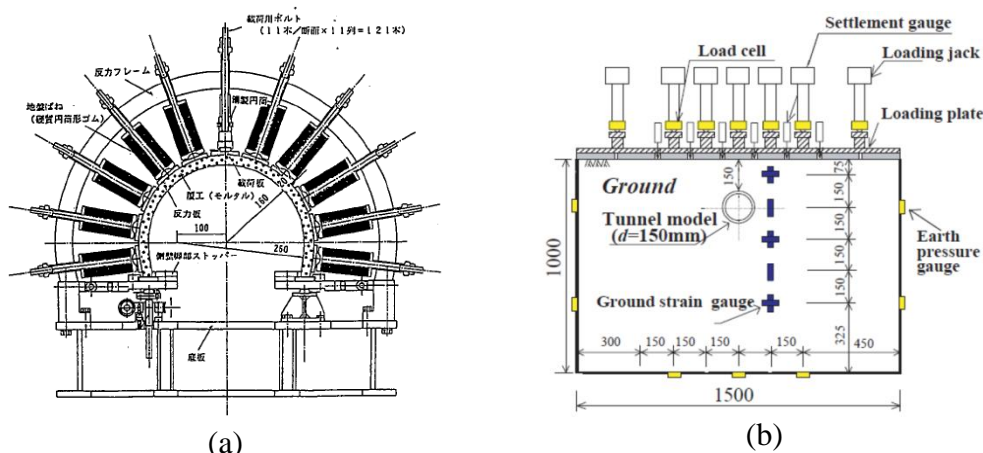


圖3.2-1 日本學者之室內隧道實驗(a)純混凝土雙線隧道模型試驗(朝倉俊弘等，1994) (b)反覆加卸載隧道模型(Kojima and Yashiro, 2005)

(2) 數值模擬

a. 建立隧道斷面變形與外力增量之關聯：

邱雅筑等(2012)將隧道斷面變位分解為斷面整體平移、旋轉，以及斷面變形，認為平移和旋轉係剛體運動，隧道斷面不受力，故取其中惟一造成隧道形狀變化之純變形量，定義 I_d 指數描述斷面變形行為，並定義10種外力增量形態(圖3.2-2a)及對

應的變形特徵曲線(圖3.2-2b)。若比對發現隧道之 I_d 曲線與變形特徵曲線相同，即可得知其外力增量形態。Obara等(2011)開發鑽孔斷面變形方法，利用儀器掃描變形前後的圓形鑽孔斷面後，對量測到的位移以橢圓形最佳化，藉岩體楊氏模數求岩體最大和最小主應力(圖3.2-3)。Mohamad等(2012)以光纖量測隧道受新建隧道施工的應變，提出兩種分析與解釋隧道變形的模式(圖3.2-4)。Stiros與Kontogianni(2009)系統化Terzaghi(1942)提出的隧道斷面變形之作法(圖3.2-5a)，假定圓形斷面變形後形成橢圓形，則斷面上每個位置的變形可以透過橢圓形擬合獲得平均變形張量，如圖3.2-5b。該法用於希臘Acheloois分流隧道的收斂變形監測結果，可解析出斷面主要為側向受壓，變形隨時間逐漸增加(圖3.2-5c)。

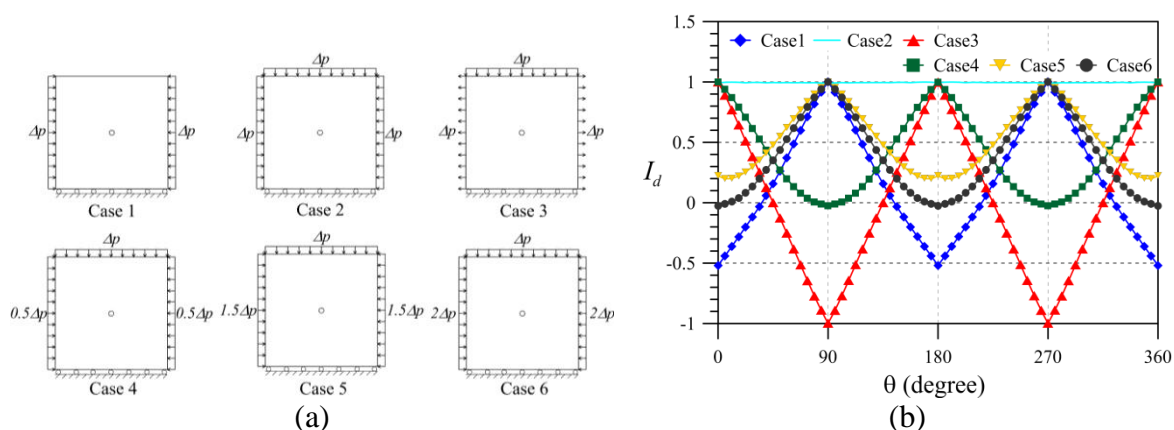


圖3.2-2 遠域外力對應之變形特徵曲線(邱雅筑等，2012)

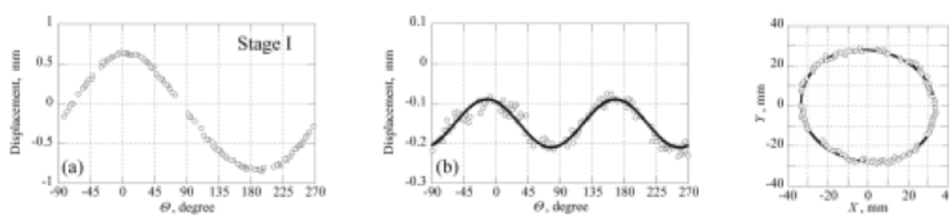


圖3.2-3 鑽孔斷面變形方法(CBDM) (a)量測結果 (b)經最佳化後的量測結果與(c)斷面純變形示意圖(Obara等，2011)

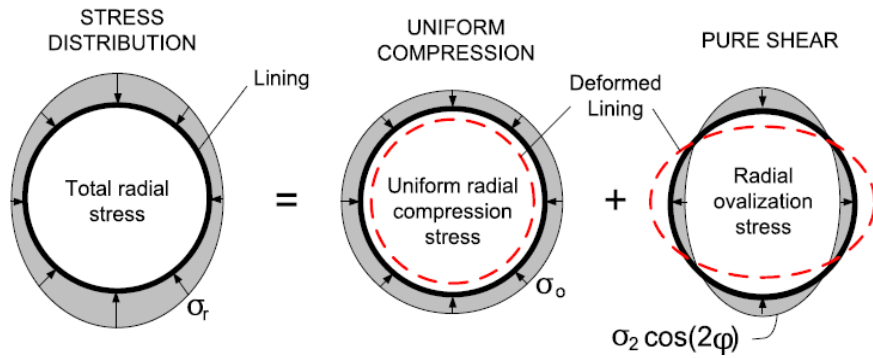


圖3.2-4 隧道斷面受力分為均勻壓縮與橢圓外力(Mohamad等，2012)

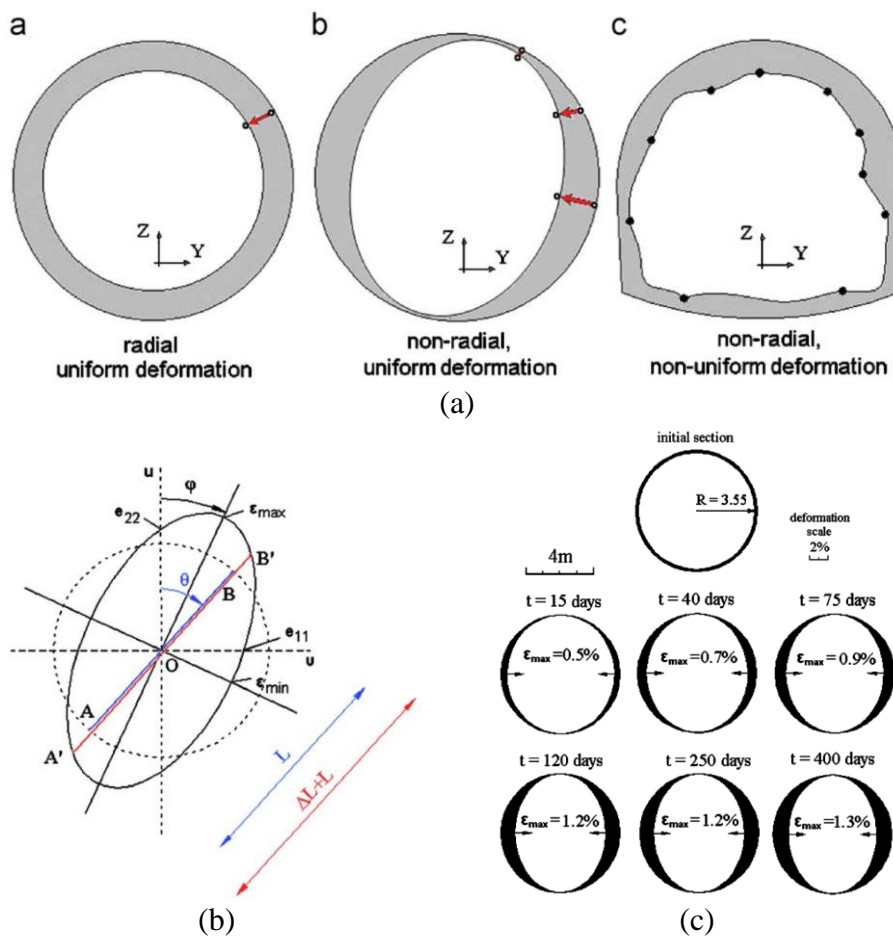


圖3.2-5 隧道斷面的平均變形張量

(a)不同種類的隧道變形(Stiros and Kontogianni, 2009 簡化自 Terzaghi, 1942) (b)平均變形張量計算原理 (c)希臘 Acheloos 分流隧道的變形(Stiros and Kontogianni, 2009)

b. 考慮特定肇因的數值模式：

中國黃山市境內的富溪雙連拱隧道在導坑開挖時，於洞口段出現嚴重變形，R. Q. Huang與Xiao(2010)基於地質調查、隧道內應力與變形監測結果，以二維和三維數

值模擬探討隧道應力變化、偏壓以及隧道上方破碎覆蓋層的特性，得知頂拱勁度為控制洞口變形的關鍵。[Shimamoto等\(2009\)](#)提出線性、指數、對數三種岩體弱化模式，建立Tagokura隧道(圖3.2-6a)之數值模型(圖3.2-6b)，探討隧道襯砌破壞歷程與肇因(圖3.2-6c)

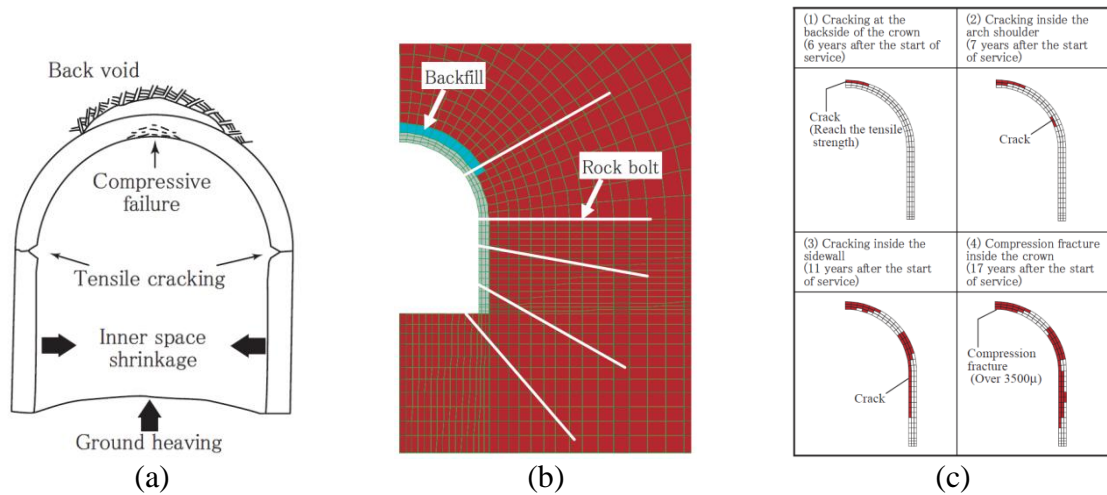


圖3.2-6 以岩體依時弱化模式預測隧道變形

(a)Tagokura 隧道斷面示意圖 (b)數值模型 (c)隧道破壞模擬過程 ([Shimamoto 等，2009](#))

c. 整合襯砌模型實驗與數值模式：

[He等\(2009\)](#)建立縮小至1/30尺寸之隧道模型的有限元素模型，並進行集中荷重試驗模擬，與實際進行的試驗結果比對後，提出一系列間距角度更密集的載重方向、不同混凝土強度等因子對應之隧道強度、剪力模數與勁度結果(圖3.2-7a與圖3.2-7b)。[Aruga等\(2007\)](#)製作含鋼筋與純混凝土的襯砌模型(圖3.2-8a)，於頂拱施加集中荷重(圖3.2-8b)，比較兩種襯砌的受力行為，並建立襯砌行為之數值模型以分析襯砌受力過程之荷載—位移曲線(圖3.2-8c)。

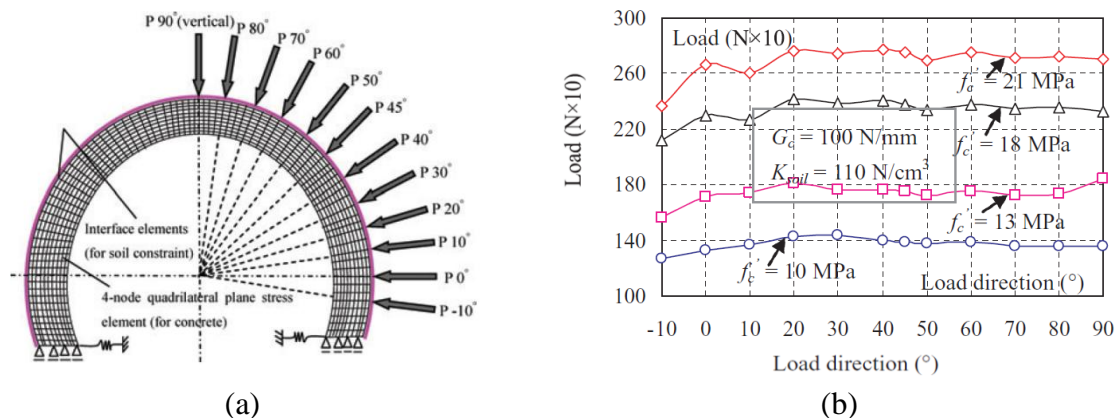


圖3.2-7 隧道襯砌受集中荷重之模型試驗與數值模擬

(a)數值模型與外力條件 (b)各種荷載方向對應之隧道強度([He 等，2009](#))

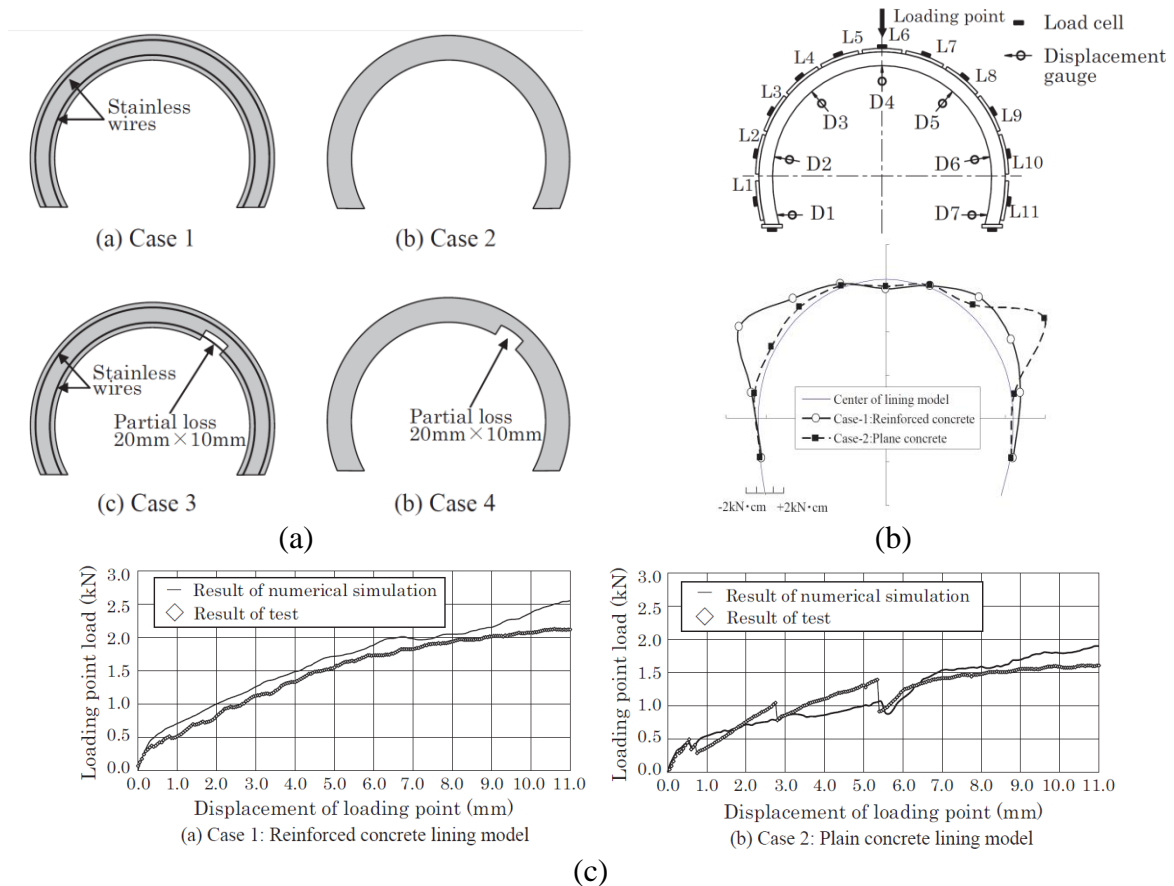


圖3.2-8 含鋼筋隧道模型試驗與數值模擬

(a)設計案例(b)外力條件與試驗結果(c)數值模擬和試驗之比對 (Aruga 等, 2007)

3.3 隧道變形機制與變形特性

Mohamad 等(2010)為了解鄰近的倫敦地鐵施工對既有疊砌隧道 Thameslink 隧道可能之影響，在施工期間裝設光纖(Brillouin Optical Timedomain Reflectometry, BOTDR)量測，後提出三種圓形隧道變形模式(圖 3.3-1)來解釋 Thameslink 隧道(馬蹄形斷面)的變形與受力方向。邱雅筑(2014)以台灣東南部某公路隧道為案例，可針對不同斷面間之隧道變形特徵模態進行比較(圖 3.3-2、3.3-3)，並利用不同檢監測技術，探討整體隧道的變形特性(圖 3.3-4)。

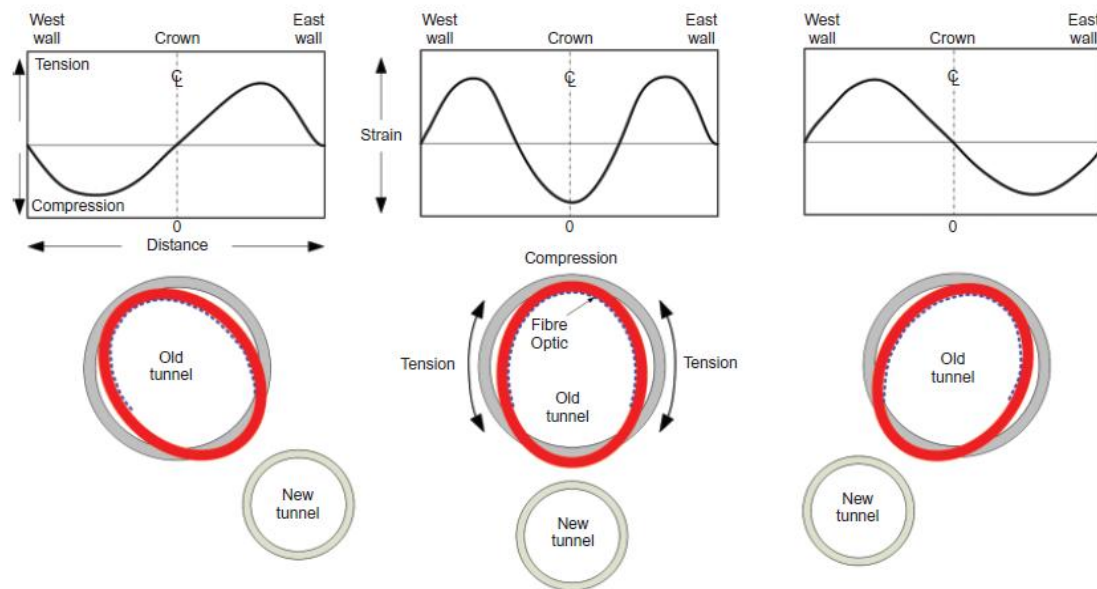


圖3.3-1 隧道斷面變形模式(Mohamad等，2010)

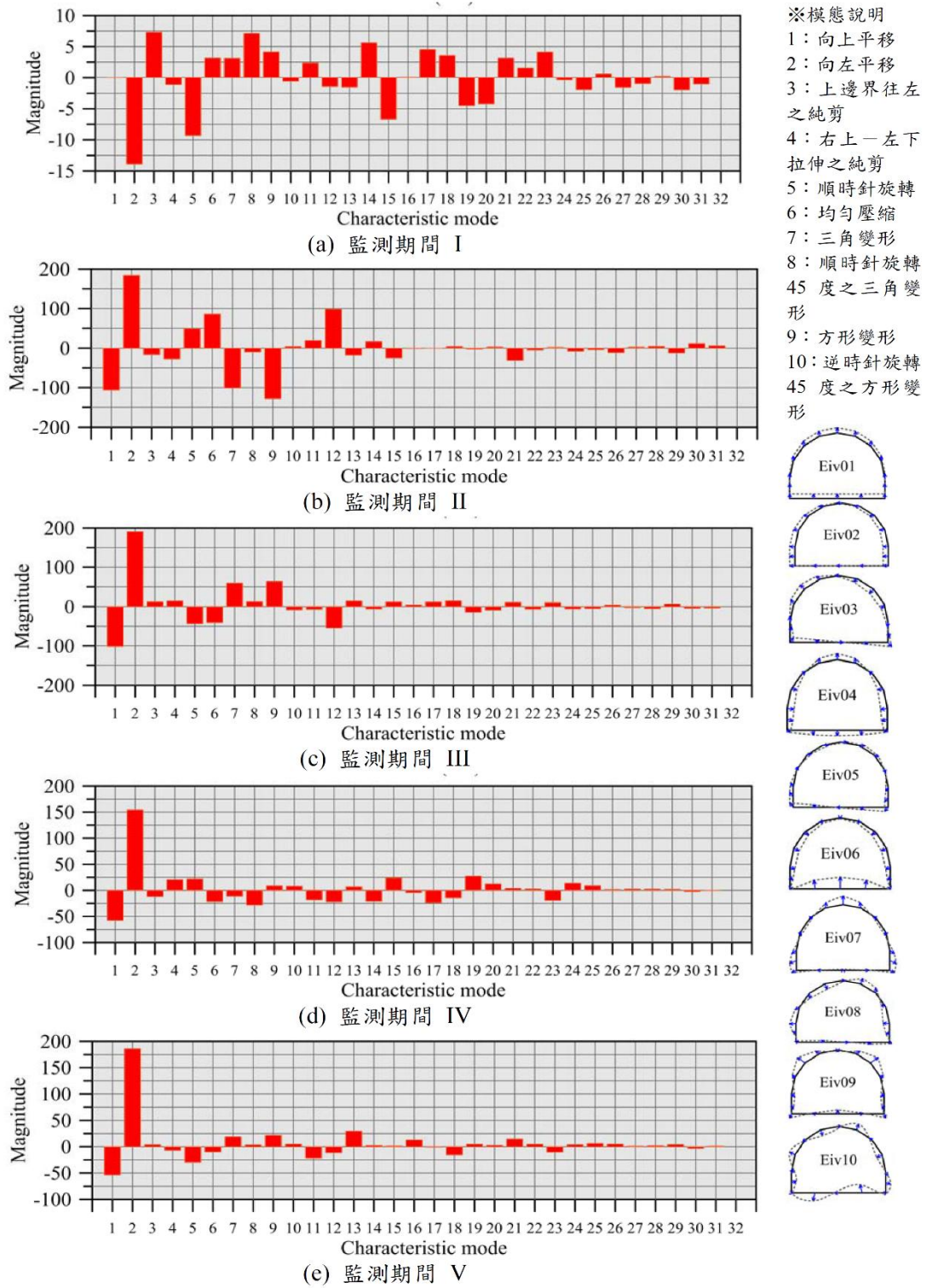
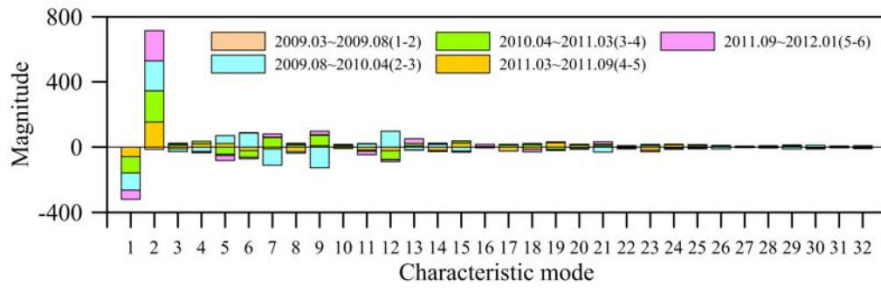
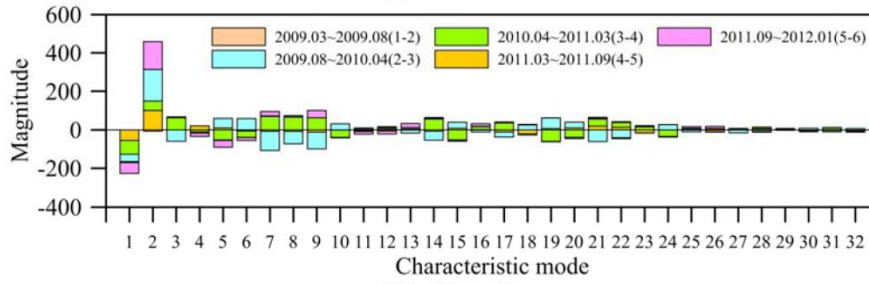


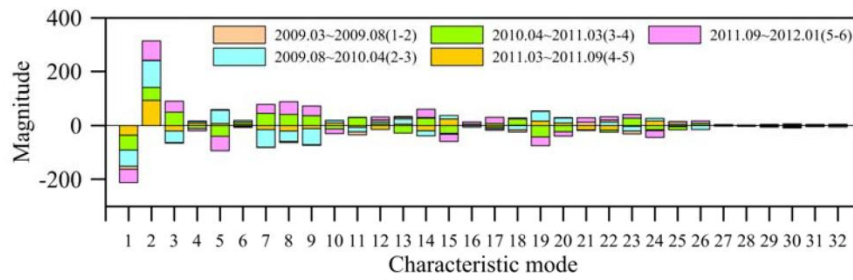
圖3.3-2 隧道斷面之特徵模態分析結果(邱雅筑，2014)



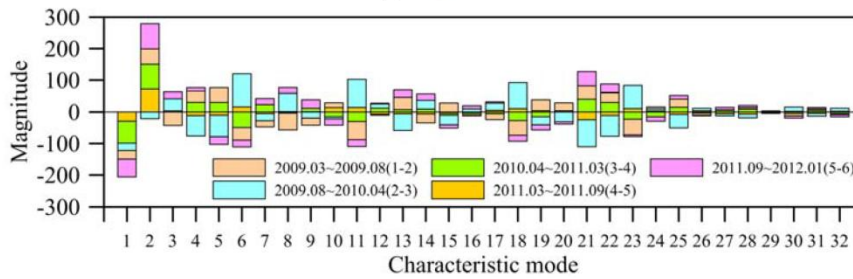
(a) 斷面 A



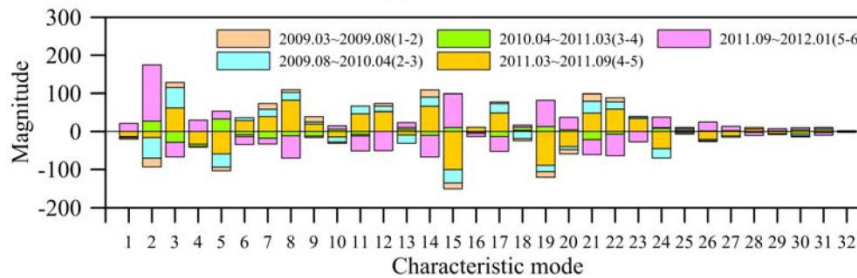
(b) 斷面 B



(c) 斷面 C



(d) 斷面 D



(e) 斷面 E

圖3.3-3 隧道斷面總變位量特徵模態分析結果(邱雅筑, 2014)

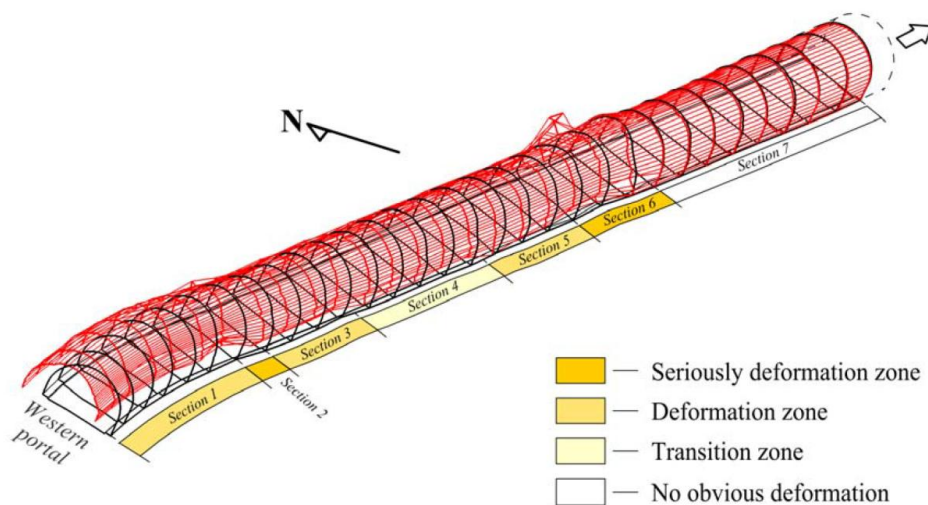


圖3.3-4 隧道變形特性分區(邱雅筑，2014)

3.4 隧道異狀關鍵肇因研判

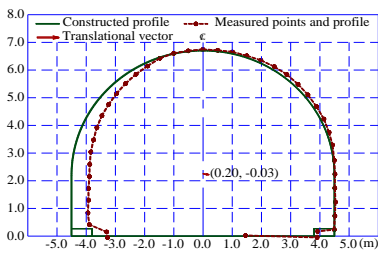
經蒐集整理多筆隧道襯砌異狀或變位資料，透過檢測資料研判隧道案例的異狀肇因，以統計、歸納等方法彙整提出異狀與肇因之間的關聯性。Wang (2010)針對受邊坡失穩引致的隧道剪力變形，提出邊坡運動方向與隧道軸向平行、垂直與斜交時的典型裂縫形態，並說明邊坡失穩過程隧道襯砌的進展(圖 3.4-1)。Sandrone 與 Labiouse(2011)將瑞士公路隧道案例透過各種方式研判異狀肇因後，以統計條件機率方法提出每種異狀在不同影響因子作用下的發生機率(表 3.4-1)。李佳翰(2013)基於 266 個國內外山岳隧道襯砌異狀案例的結果，歸納出縱向裂縫、環狀裂縫、斜向裂縫、放射狀裂縫、橫向裂縫、漣漪狀裂縫、網狀裂縫與龜殼狀裂縫等 8 種典型的裂縫形態與對應肇因(圖 3.4-2)，並將其特徵化與數字化，提出山岳隧道襯砌異狀診斷流程。

李佳翰(2013)綜合彙整各種力學因素與非力學因素肇因，如表 3.4-2 顯示：除襯砌背後空洞或襯砌厚度不足肇因外，絕大部分山岳隧道襯砌異狀之肇因於襯砌表面均具有特殊之裂縫型態(產狀)，故未來進行襯砌異狀肇因診斷時，可先藉由襯砌表面之裂縫型態(產狀)進行初步判斷，再輔以其他詳細檢測資訊綜合判斷可能之肇因，以為後續隧道安全等級評估與加固補強設計之依據。惟裂縫型態與肇因並非具有一對一之唯一性，例如：縱向裂縫有可能係邊坡潛移所致，也有可能因為該區段位於擠壓性地盤所致，故襯砌異狀肇因診斷除從襯砌表面裂縫型態初步判斷外，仍須搭配其他檢測項目、技術與資訊綜合診斷。李佳翰(2013)提出隧道異狀診斷流程，首先蒐集襯砌表面影像及異狀展開圖，其次特徵化異狀以量化裂隙型態，最後佐以其他安全檢測資訊如透地雷達、微變監測等資料，判別隧道襯砌異狀的肇因(圖 3.4-3)。

表3.4-1 異狀影響因子與對應異狀類型(Sandrone與Labiose, 2011)

Influence factor	Modality	Significant influence														
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[8]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	
Age	A								17	41	14	17				
	B								2	5	2	5				
	C								7	-	-	7				
Traffic ^a	L		6		38	-	69									
	M				12	12	22									
	H		18		9	14	50				18			9		
	VH		14		50	36	86							43		
Ventilation ^a	Lo		18	20			16				4					
	Na		10	20			12				6					
	Tra		-	-			-				-					
	S-ra		-	-			-				-					
Geology/hydrogeology	LG	40		20	20				40						10	
	Cry	64	32	32					21	18	16				14	
	Sc&Ph	36	14	29						7			14		21	
	C&M	42	20	17					20				24		42	
	Ca	46	-	5						19			10		27	
Depth	Ev	40		40							20				40	
	LO	45							77			6	11			
	MO	48							58			4	6			
Waterproofing ^a	HO	47							53			29	18			
	No	86		43	29	14	-	29		43	57	29			43	
	Pe	50		25	13	13	75									
	Pm	46	13	14	17	16	45		4	14	4				35	
	I	100			75	25	100									
	Te															
Waterproofing ^a	Tm	54	23	8	46	15	31		15						15	

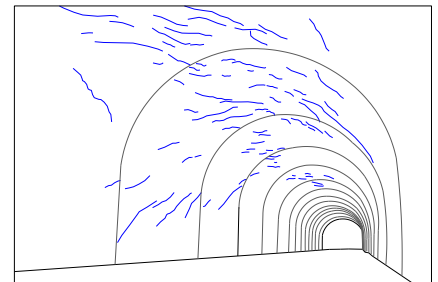
※LG = loose ground; Ev = evaporites; Cry = crystalline rocks; Sc&Ph = schists and phyllites; C&M = Clays and Marls; Ca = calcareous rocks; No = no waterproofing system; Tm = total in the middle; I = intrados; Pm = partial in the middle; Pe = partial extrados; Te = total extrados



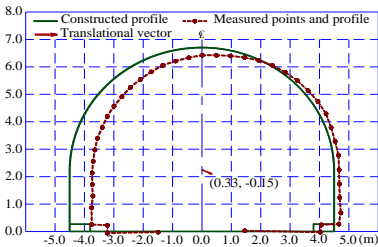
(a) 異狀發展初期剖面位移(m)



(b) 異狀發展初期之襯砌影像



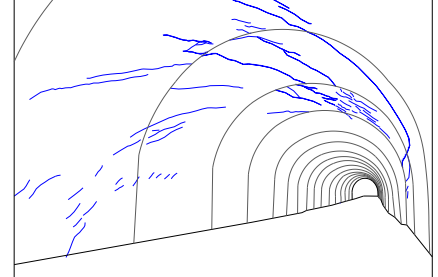
(c) 異狀發展初期之裂縫分佈



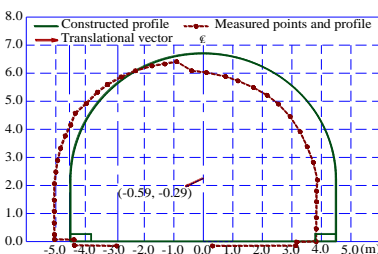
(d) 異狀發展過程剖面位移(m)



(e) 異狀發展過程之襯砌影像



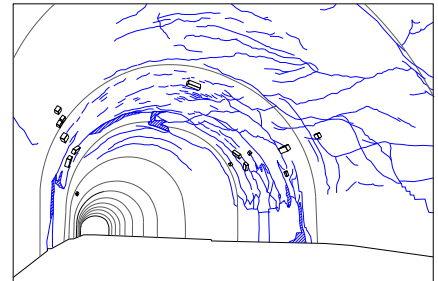
(f) 異狀發展過程之裂縫分佈



(g) 異狀程度嚴重之剖面位移(m)



(h) 異狀程度嚴重之襯砌影像



(i) 異狀程度嚴重之裂縫分佈

圖3.4-1 邊坡失穩過程隧道襯砌異狀的進展(Wang, 2010)

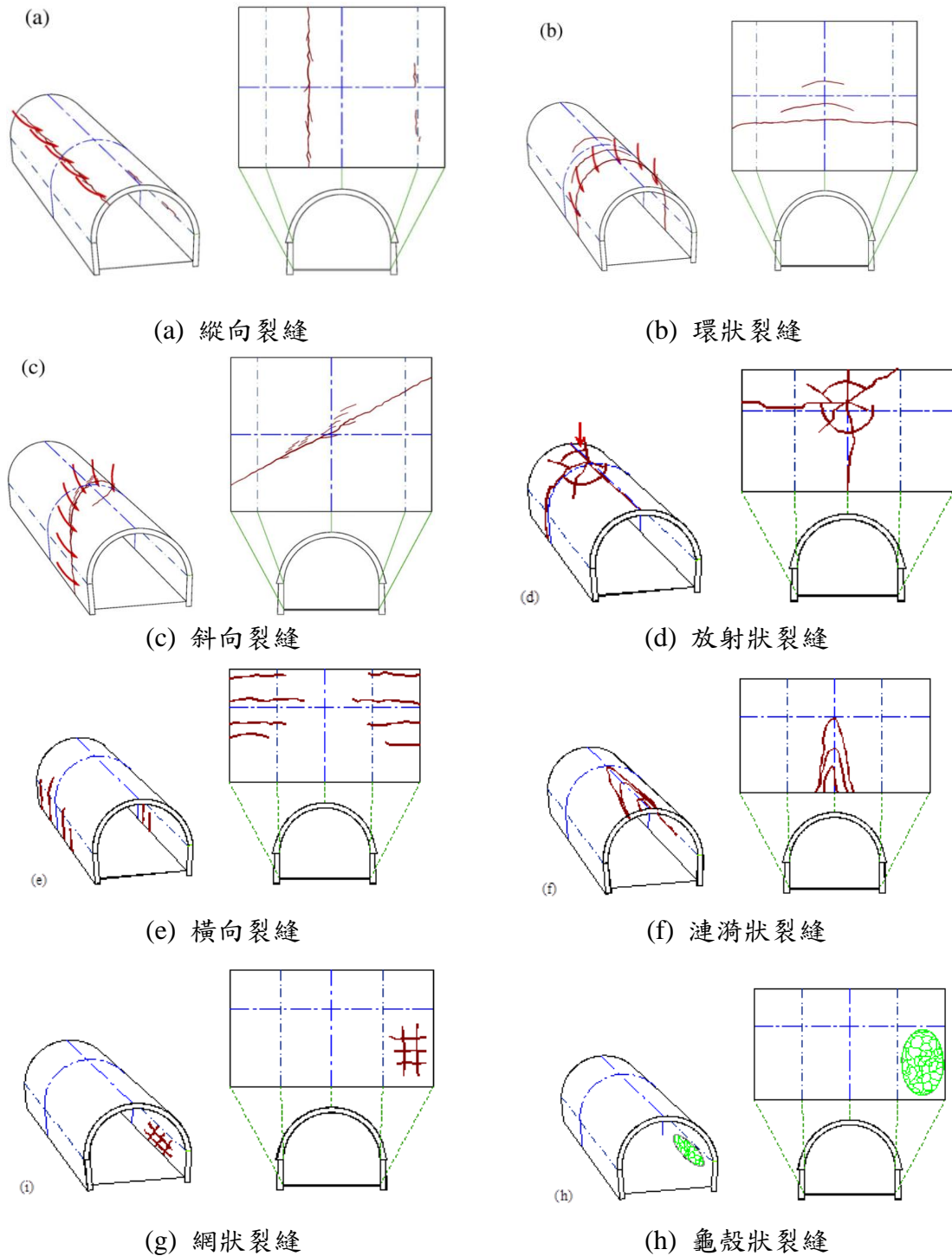


圖3.4-2 山岳隧道典型裂縫形態(李佳翰，2013)

表3.4-2 山岳隧道襯砌異狀案例之裂縫型態彙整表(李佳翰，2013)

分類	肇因	裂縫型態
力學因素	邊坡潛移	縱向
		環狀
		斜向
	地震	放射狀
	擠壓	縱向
	斷層活動	羽狀
	地下水壓	仰拱橫向
非力學因素	承载力不足	側壁橫向 (由下往上)
	中性化	網狀
	鋼筋保護層厚度不足	條狀
	鹼質粒料反應 (鹼骨材反應)	龜殼狀
	混凝土澆置中斷 (冷縫)	連漪狀
	襯砌背後空洞或厚度不足	—

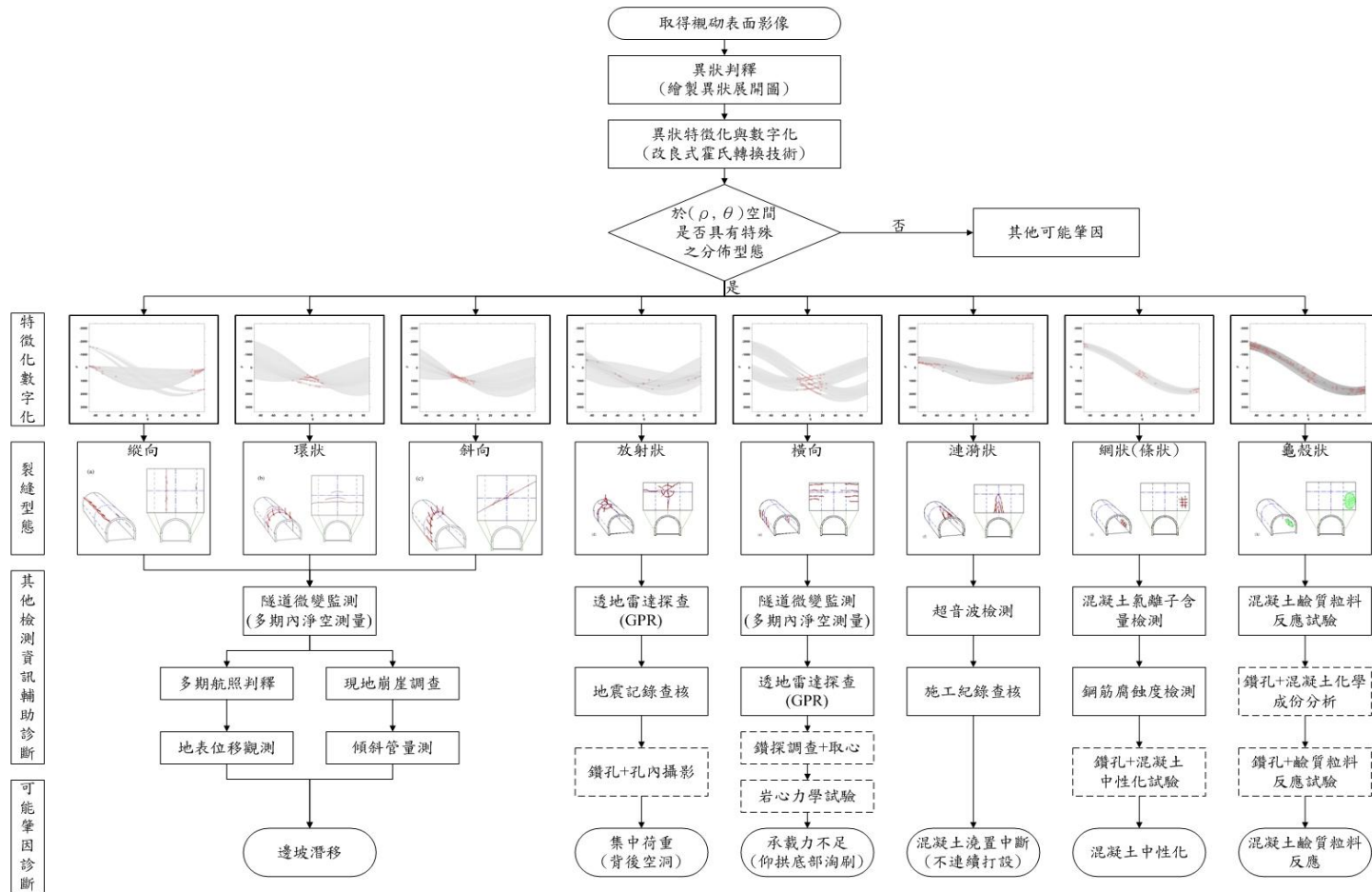


圖3.4-3 隧道異狀診斷流程(李佳翰, 2013)

3.5 小結

本章彙整國內外坑道的襯砌異狀，及營運中坑道變形分析方法、機制與特性，藉以研判坑道異狀的肇因，提供處置坑道運轉期間襯砌檢監測工作之參考，茲將相關成果整理如下：

(1) 營運中隧道之襯砌異狀

常見的坑道襯砌異狀包括襯砌變形、裂縫、剝落與漏水等現象，由國內外隧道襯砌異狀之綜整研究，可知發生比例最高之前四項均是裂縫、滲漏水、剝落與仰拱隆起或沉陷，如圖 3.1-3 所示。其中，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。

(2) 營運中隧道之力學分析方法

興建完成的隧道在圍岩與隧道本體間，有著噴凝土、岩栓與澆注混凝土等支撐構件，且圍岩本身受開挖擾動影響，導致營運中的隧道其力學特性實難掌握。目前，國內外營運中隧道變形之分析方法，常假定隧道肇因形態，以室內襯砌模型試驗、數值模擬或整合模型試驗及數值模擬等方式，探討如岩體弱化、不同載重形態與結構弱化等已知肇因對隧道的影響。

(3) 隧道變形機制與變形特性

由國外的經驗，可在隧道建造期間埋設光纖量測設備，作為未來運轉期間隧道變形的分析依據；若是已興建完成且在運轉中的隧道，可透過各種不同的檢監測技術將隧道斷面變形特徵化，作為隧道受力引致變形的分析依據。

(4) 隧道異狀關鍵肇因研判

絕大部分山岳隧道襯砌異狀之肇因於襯砌表面均具有特殊之裂縫型態(產狀)，如表 3.4-2 所示，故未來可先藉由襯砌表面之裂縫型態(產狀)進行初步判斷，再輔以其他詳細檢測資訊綜合判斷可能之肇因。而在諸多可能的襯砌異狀肇因中，未來可考量處置坑道的實際深度及地質條件，先行排除可能的肇因，例如邊坡潛移肇因主要發生在洞口段，或參考瑞典 SFR 的做法，確實掌握地質變形帶的空間分佈，輔以工程手段予以強化並持續進行監測等。

第四章、襯砌異狀關鍵肇因與因應的檢監測方法

初步研判襯砌異狀關鍵肇因後，建構對應的檢測與監測方法，除可進一步確認與驗證關鍵影響因素外，亦助於探查異狀隨時間的變異程度，並提供對應的襯砌補強或結構安全強化的工程策略，以達對症下藥之效，並可持續監控異狀發展，降低異狀對坑道結構與長期穩定性之風險。本章主要。

4.1 既有運轉中隧道檢監測技術

1990年以後，坑道營運中的安全檢測問題即開始受到重視，國際隧道協會(International Tunnelling Association, ITA)於1996年成立隧道營運維護小組針對隧道營運安全檢測及維修工程加以研究，以及從事文獻資料收集、相關規範制訂等建議(ITA-Working Group Maintenance and Repair 1997)。截至今日，各國在既有坑道營運中的安全愈發重視後，一系列的檢監測技術變伴隨而生，國外亦多有因應各國境內坑道狀況而制定的檢測技術報告(Benford, 1983；Miyaguchi, 1986；日本土木學會，2002、2003)。國內部分，亦有相關的技術報告可供參閱(黃燦輝，1997；黃燦輝，2008)。本研究引用部分前期報告之成果，整理目前既有營運中坑道廣泛使用的檢監測技術。

(1) 光學技術類

a. 目視、攝影與(或)錄影檢測

目視檢測(visual inspection)簡稱VI，顧名思義是利用眼睛的視覺或加上輔助工具、儀器等，應用光學技術來進行直接或間接的偵查及檢視待測物體表面瑕疵的一種非破壞檢測方法，如觀察待測物體表面的龜裂、滲漏、腐蝕、焊接補強高度、表面處理等。目視檢測係最方便、最經濟的非破壞性檢測技術，也是在進行所有檢測作業之前、中、後經常必須進行的檢測方法。應用在隧道襯砌檢測時，目視檢測通常針對異狀種類、發生位置與分佈形態等予以測繪、並輔以照相或攝影記錄。

b. 隧道淨空測量

測量係使用儀器觀測測站與測點的角度、距離、高差，計算其相關位置，並以圖示法繪製成圖的作業技術。隧道淨空測量則係應用測量原理、使用測量儀器，依據已知的方位觀測斷面距離、角度及高程數據，經計算求得隧道淨空斷面的位置、面積或體積。測量基本原點係透過已知點與未知點之間的水平角、垂直角、水平距、斜距及高程差等關係，計算其相關位置及座標。依據測量已知點與未知點的方式，測量方法又可進一步細分，如前方交會法與後方交會法等。由於隧道內空間狹隘，單純使用前方交會法或後方交會法，測量精度受到限制，因此進行淨空測量時，有時利用較多已知座標的控制點，推算求點的座標。

c. 襯砌影像掃描

襯砌表面裂縫、滲水、剝落及配置等現況，可以用照像或攝影的方式記錄其表

面的影像。由於使用中的隧道可供檢查的時間較短，必須採用高解析度、且能定位的設備，因此高解析度雷射掃描器因應而生。藉由影像掃描快速的將隧道壁的狀態記錄下來，再辨識襯砌表面裂縫、滲水、剝落等狀況，以供隧道改善之規劃與設計之參考。襯砌影像掃描的裝置，目前主要可分為：

■ TS360系統

TS360隧道全斷面掃描系統係由：(i)雷射影像掃描儀(TS360B)；(ii)紅外線熱像掃描儀(TS360BT)；以及(iii)雷射淨空掃描儀(TS360BP)等三大部份組成，如圖4.1-1所示。操作時，將該系統放置於沿隧道前進之軌道車或工作架上，雷射光、紅外線等藉由360°旋轉的稜鏡反射功能，將掃描器的射線偏轉，在工作車輛行駛穿越受測隧道的斷面時，受測隧道襯砌表面的狀況即可被以360°螺旋管狀的形式，一次且迅速地對受測隧道作全斷面掃描調查，可獲得隧道全斷面的灰階影像、溫度分佈影像以及淨空剖面。

■ DIBIT三維隧道影像掃描儀

DIBIT三維隧道影像掃描儀(DIBIT tunnel scanner,簡稱DIBIT系統)為可攜式隧道影像記錄器。DIBIT系統模擬航空照相之原理，對相同目標攝取重疊影像，藉以取得隧道表面之影像像素點(Pixel)立體座標。對一般公路隧道規模而言，隧道斷面需分別攝取重疊影像，進而組合構成全斷面。

■ 熱紅外線掃瞄

透過紅外線熱影像儀器進行電磁波偵測，並將偵訊所得訊號轉換成可供人類視覺辨識的影像圖形，可進一步計算出溫度分布值。由於隧道內溫度變化可能與襯砌背後孔洞、內部缺陷、含水狀況或裂縫等有關，藉由測得溫度分佈，配合影像等資料，可以推測得到襯砌表面乾濕、剝落、不同材料之熱傳導係數之變化及內部空洞等資訊。

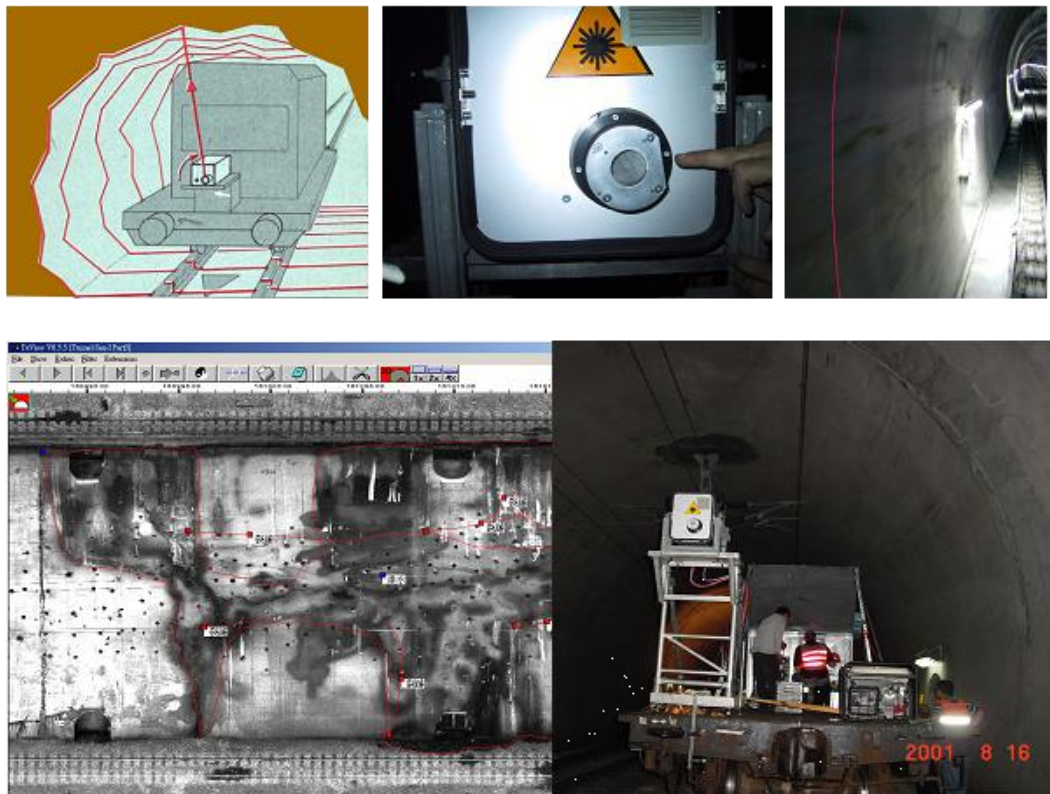


圖4.1-1 TS360系統

(2) 導電與電子技術類

a. 透地雷達

透地雷達是一種反射電磁波探測法，以高壓線圈為探測源，產生高頻電磁波射入探測區域介質內，在行經電磁特性如導電率或介電常數變化的界面或異常體時，透過反射能量強度的差異與連續歷時紀錄形成雷達波剖面，分析反射波的走時、強度及相位，即可獲得探測區域介質電磁特性異常的幾何位置，進而推估相關的地質構造及結構體的完整性，如圖4.1-2示意。透地雷達探查整體施測速度受作業環境影響，在配合條件如高空作業車、檢測台車等良好情況下，線狀施測速度可達每分鐘十至數十公尺，惟其檢測資料需大量的內業處理，包括垂直頻率濾波、水平頻率濾波、解迴旋、移位處理以及速度分析等。

透地雷達使用的電磁波頻率通常介於80MHz~2.5GHz，頻率越高解析度越高，但穿透能力越低；相反地，頻率越低解析度越低，而穿透能力越高。一般探測深度從幾公分至30公尺左右，因此廣泛應用於極淺層之地層調查、管線鋼筋調查、空洞廢礦坑調查、廢棄物場址調查、古蹟調查、道碴調查、道路鋪設調查、混凝土完整性調查、襯砌完整性與厚度調查以及其背後之狀況調查等。

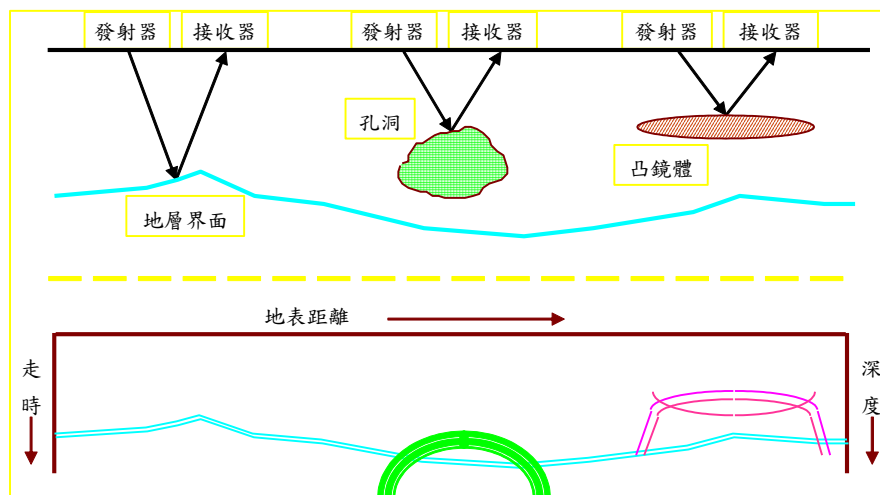


圖4.1-2 透地雷達原理示意圖

b. 多相線性陣列電磁波雷達

多相線性陣列電磁波雷達(multipath linear array electromagnetic wave radar)的原理類似透地雷達，係由多個雷達線性排列組合而成，透過不同位置雷達對電磁波訊號的解析，可解析出襯砌背後缺陷的三維空間分佈。多相線性陣列電磁波雷達與電磁波雷達(即傳統透地雷達)比較如圖4.1-3所示。日本東鐵道公司曾針對隧道檢測車的檢測精度進行試驗，驗證可有效檢測出襯砌背後的裂縫、冷縫、空洞與蜂窩等各種缺陷，如圖4.1-4所示。

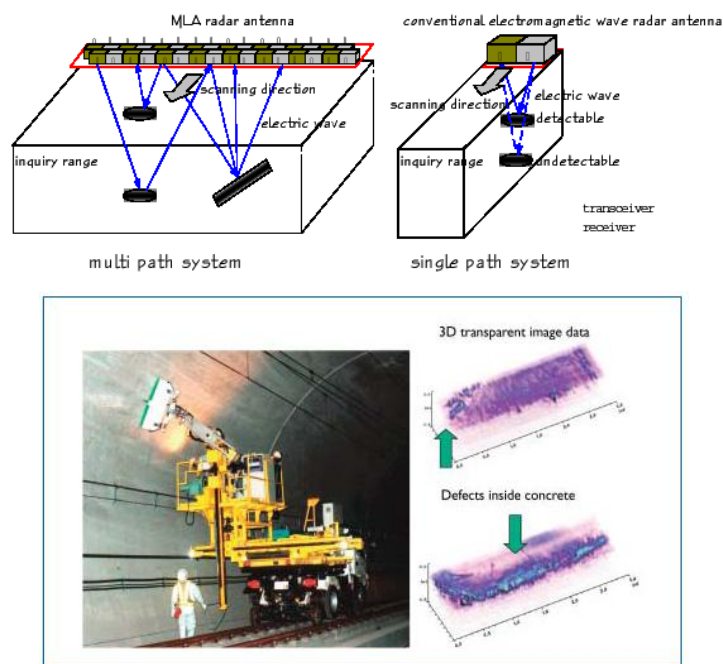


圖4.1-3 多相線性陣列電磁波雷達與傳統透地雷達比較

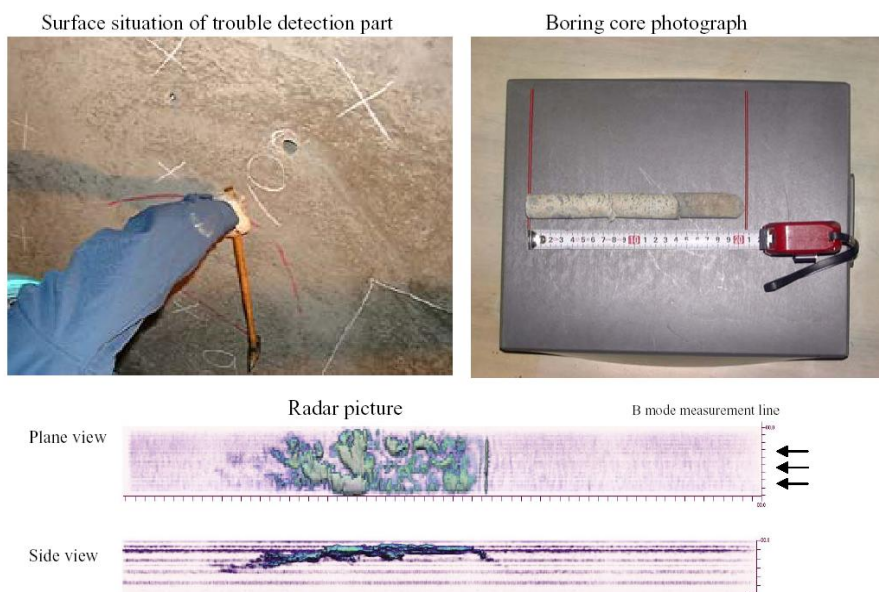


圖4.1-4 多相線性陣列電磁波雷達檢測襯砌結果與鑽心結果比較

c. 自然電位法探測鋼筋腐蝕

結構物中之鋼筋腐蝕，因時間或其他因素造成一電化學的反應，而有如電池一般，代表一通電，即可產生電流，因此，混凝土內腐蝕與未腐蝕之鋼筋間產生某種程度的電位差，故藉著鑽孔將探測器放入，接觸鋼筋，而造成一電流迴路，如此可於混凝土表面測得範圍內(約2 m×2 m)之鋼筋電位差，經比對即可瞭解鋼筋之腐蝕程度，而可據以評估結構體之強度。惟於此之前，將擇重要具代表性(如強度劣化區、滲漏水處、中性化區等)處，利用鋼筋位置探測儀探測壁面內鋼筋位置，再鑽孔接通電流迴路，進行鋼筋腐蝕探測。

d. 電阻法探測鋼筋腐蝕

當人工電場加諸於鋼筋混凝土結構物等，因混凝土及鋼筋等介質電導性的不同，使得結構物之電位產生不均勻的分佈，此時若量測其電阻變化狀況，可據此做定性或定量的解析。電阻法係以電阻儀器在現場量測鋼筋混凝土的電阻，根據量測結果判定鋼筋腐蝕的可能性。

(3) 物理波動技術類

a. 敲擊回音法

敲擊回音法(impact-echo method)是探查裂縫深度的一種方法，利用機械性敲擊產生暫態應力波動並導入待測物體內，應力波遇到內部的孔隙或瑕疵時，形成反射波反射回待測物表面，藉由接收器的序時訊號接收及分析，並不斷地移動敲擊及接收的位置，可以估計出孔隙或瑕疵的位置或形狀。敲擊回音法目前已廣泛應用在鋼筋混凝土、預力混凝土結構物中之瑕疵的探測，如垂直裂縫、斷層、孔隙、以及蜂窩之深度、位置與範圍，並可精確量測混凝土樓版或橋面版之厚度以及介面接合程

度，如新修補混凝土與舊混凝土、瀝青路面與鋼筋混凝土橋版、涵管坑道與岩壁或土壁等。此技術已納入美國國家標準試驗局ASTM的規範中。

b. 超音波檢測

超音波檢測是指「以低能量高頻率的超音波，對物件(內部)瑕疵加以檢測」。藉由換能器發射出超音波，再經由接觸媒質傳入試件中，在試件中超音波會有或多或少的衰減，當傳至介面時，超音波可能反射或透射，藉由偵檢、分析反射或透射訊號，則可檢測出瑕疵，並可定出檢測位置。

c. 打擊聽音法

襯砌內既存之微小裂縫從發生開始即少量地、逐年地持續發展，直至形成三維閉合型態裂縫，即可能導致剝落現象之發生。尤其列車行駛通過時所產生之空氣壓力與列車振動往往造成襯砌混凝土表面振動速度提高，而反覆拉張既存的裂縫，持續造成裂縫之進展與惡化，而形成潛藏危害。此種三維閉合型態的裂縫藉由敲擊方式所產生之回音，將有異於尚無裂縫生成的襯砌狀況，故透過敲擊襯砌表面之聽音方式，將可辨識襯砌內部是否存在三維閉合型態的裂縫。近年來日本已廣泛的應用打擊聽音法，如2000年日本在山陽新幹線曾採用此種方法進行襯砌表面全面檢測，間隔0.5 m敲擊一處，檢測面積達590萬m²。

(4) 其他類

混凝土強度的探測方法有許多，如史密特錘法，測試槍法，拉拔試驗、貫入阻力法等。其中史密特錘與測試槍法，只能測得混凝土表面之強度指標，惟因其施作簡便，因此常使用現場之簡易測試。進行試驗前應對材料表面進行適當處理，可獲得更具代表性之結果。史密特錘法係選擇疑似混凝土劣化區或任何位置配合進行史密特強度測定，以確實測出隧道結構體之強度分佈狀況。測試槍則利用一把特製的手槍，發射出探針，衝擊混凝土表面，根據探針在混凝土表面所遺留下的凹痕深度推估混凝土的強度。

表 4.1-1 整理 ITA 有關非破壞性檢測技術應用於隧道安全檢測之檢討，表 4.1-2 則比較本章節所提出，各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測的特性，包括檢測方式、空間定位精度、檢測速度以及所需的配合設備及相關作業等。

此外，在行政院原子能委員會放射性物料管理局103年委託研究計畫「處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義等人，2014)中，已根據國外中、低放處置坑道及國內營運中一般坑道之經驗，提出處置坑道在運轉期之檢監測項目建議，包括了岩盤穩定性監測、坑道斷面監測、襯砌裂縫、裂縫擴展、襯砌受力與變形及水文地質相關參數監測等，表4.1-3僅列出處置坑道在運轉階段與岩石力學、水文地質及襯砌結構有關的檢監測項目。

表4.1-1 ITA有關非破壞性檢測技術應用於隧道安全檢測之檢討(ITA, 1997)

非破壞性檢測技術		主要應用範圍	隧道檢測適用性	問題點	優點
物理波動技術	結構振動法	橋梁、地表結構物	甚低	襯砌厚度不一、岩層非均質性、地下水位變異	無
	震波折射法	地質調查(探求地層厚度)	低	檢測精度與速度	襯砌背後存在大空洞時有效
	微振動與音射分析	煤礦、室內試驗	甚低	重現性、檢測精度	構造自身裂隙生成過程
	超音波折射法	鋼結構物、輸油管線	甚低	可能與測試地層背景偶合、地層非均質、粒料造成漫射、檢測精度	無
放射性技術	珈瑪射線背散射法	路工結構物	甚低	檢測速度、貫入深度	無
	中子背散射法	地層密度與含水量	低	檢測速度、貫入深度	可測出各點的含水量
導電與電子技術	旋電流法	材料導電度、輸油管裂縫檢測、鋼筋檢測	低	檢測速度、非導電性材料不適用、貫入深度	可檢測鋼筋
	透地雷達	橋梁、隧道、路工	高	檢測速度、評估不易、材料包覆折射	貫入深度佳
	電位法	鋼筋腐蝕檢測	低	檢測速度、貫入深度	可檢測鋼筋腐蝕
光學技術	熱紅外線掃描與目視判視	隔熱度檢查、隧道	甚高	隧道氣候條件必須變異不大、評估不易、設備釋放熱源	有效檢測空洞、含水量、裂縫、檢測速度快
	多光譜分析法	遺址、結構物、隧道	高	檢測速度、振動、需強光源、評估不易、貫入深度	可有效檢測出裂隙、乾裂縫

表4.1-2 各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測之比較(黃燦輝，2007)

非破壞性檢測技術		檢測方式	空間定位精度	檢測速度	配合設備/作業
光學技術類	目視/攝影/錄影檢測	三維面狀	低	視異狀程度、隧道照明而定，0.2~1.5km/人時	
	隧道淨空測量	三維點狀	甚高	單一斷面施作迅速	需設測量控制點、內業處理
	隧道影像掃描(TS360系統)	三維面狀	高	2~5km/hr	需工作車配合及內業處理
	隧道影像掃描(DIBIT系統)	三維面狀	高	0.01~0.1m/hr	需測量定位配合及內業處理
	熱紅外線掃描	三維面狀	高	2~5km/hr	需測量定位配合及內業處理
導電與電子技術類	透地雷達	二維線狀	視配合作業而定	0.5~1.5km/hr	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架、需內業處理
	多相線性陣列電磁波雷達	二維線狀	視配合作業而定	0.2~0.3km/hr	
	自然電位法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架
	電阻法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	
物理波動技術類	敲擊回音法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架、需內業處理
	超音波檢測	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	
	打擊聽音法	局部點狀	視配合作業而定	單點極快，全面性施作需大量人力	
其他類	混凝土強度錘	局部點狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架
	測試槍	局部點狀	視配合作業而定	單點施作迅速	

表4.1-3 處置坑道在運轉階段與岩石力學、水文地質及襯砌結構有關的檢監測項目
(楊長義與李宏輝，2014)

	檢監測項目	技術或儀器	
岩石力學	岩盤穩定性	位移量測/伸張計 應力量測/計測岩栓	
	單一潛在滑動岩塊	位移量測/裂縫計	
	坑道斷面收斂	位移量測/伸張計、捲尺收斂計	
	內空變位	3D光學量測系統	
	襯砌裂縫分佈與擴展	隧道影像掃描、裂縫位移計	
	襯砌變形		襯砌微變監測技術
			跨尺度多時序監測整合技術
			襯砌黏貼應變計
	坑道環片受力與變形	於環片組立時埋設光纖感測器	
坑道襯砌的位移及受力後的反應、頂拱的沉陷量	斷面收斂量測系統(襯砌表面感測器、溫度感測器、傾斜感測器及裂縫量測)		
水文地質	地下水位	水文地質鑽孔	
	岩體導水特性	雙封填塞導水試驗	
	地下水滲流量	觀測站設置流量計	
	地下水滲流壓力	水壓計	
坑道襯砌	混凝土中性化	混凝土中性化檢測	
	鋼筋保護層厚度不足	透地雷達探測	
	襯砌背後孔洞	透地雷達、熱紅外線掃描	
	襯砌裂縫寬度與深度	超音波試驗	
	混凝土劣化	史密特錘試驗、鑽孔取樣進行單壓試驗	

4.2 運轉中隧道變位分析-特徵模擬法

邱雅筑(2014)針對外因中外力變化引致的隧道異狀，提出若隧道在某段時間內空間位置發生改變，則代表此監測期間未知的外力造成岩體和襯砌之應力狀態發生變化，使襯砌應力狀態改變乃產生變形或平移(圖4.2-1)。邱雅筑等(2012)定義隧道斷面在某個監測期間內的空間位置差為隧道斷面位移，隧道斷面位移分為包含旋轉(rotation)、平移(translation)的斷面整體運動(或稱剛體運動，rigid body motion)，以及斷面變形(deformation)(圖4.2-2)。將隧道斷面位移扣除整體運動，提出一描述斷面變形的指數 I_d ，探討 I_d 與外力增量形態的關係，經比對營運中隧道的 I_d 曲線與變形特徵曲線，研判造成隧道斷面變形的的外力增量形態。邱雅筑(2014)進一步提出特徵模態法，藉以解析隧道斷面變位型態。透過對包含斷面整體運動與變形的監測資料直接處理結果做分析，由任意物體位移可分為變形及剛體運動之概念出發，假設隧道斷面變位可藉由數個變位模態(displacement mode)來解釋，而這些變位模態代表隧道斷面在受特定外力增量之後的反應。也就是說，在隧道的基本條件如斷面尺寸、襯砌材料、岩體材料、邊界條件...等皆已知的前提下，隧道斷面所受的任意外力增量可以分解為幾種特殊外力增量之和，同理隧道斷面變位亦能視為特殊變形模態的組合。藉由隧道斷面形狀、監測點的數量，可決定隧道變形的的基本特徵型態及其變位分量(圖4.2-3)。

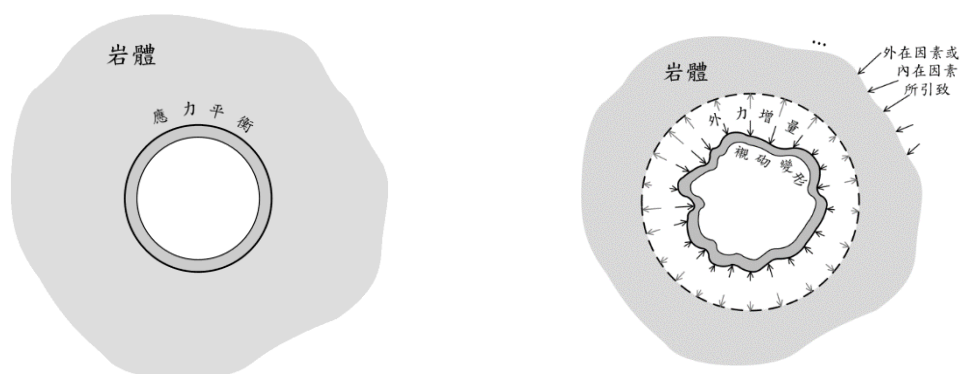


圖4.2-1 運轉中隧道變形過程示意圖(邱雅筑，2014)

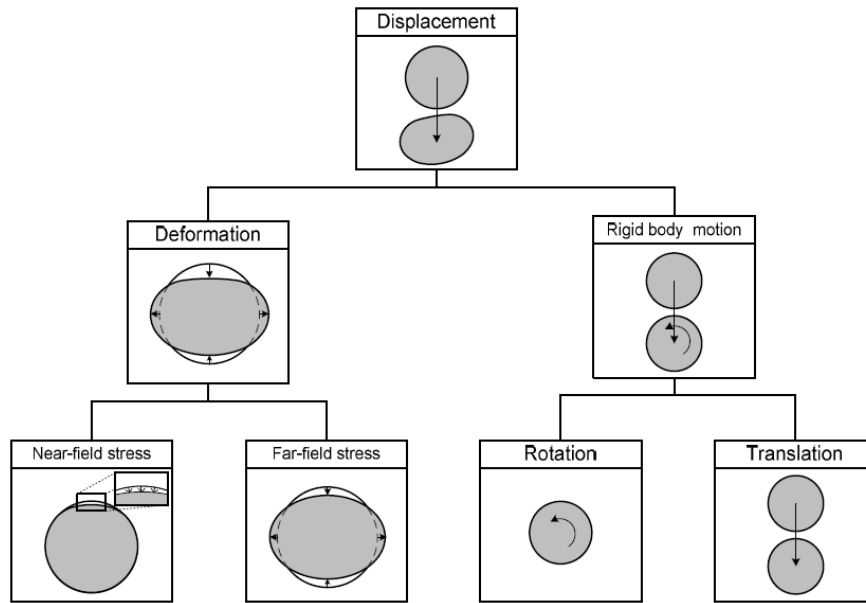


圖4.2-2 隧道位移與其組成的分量(邱雅筑等，2012)

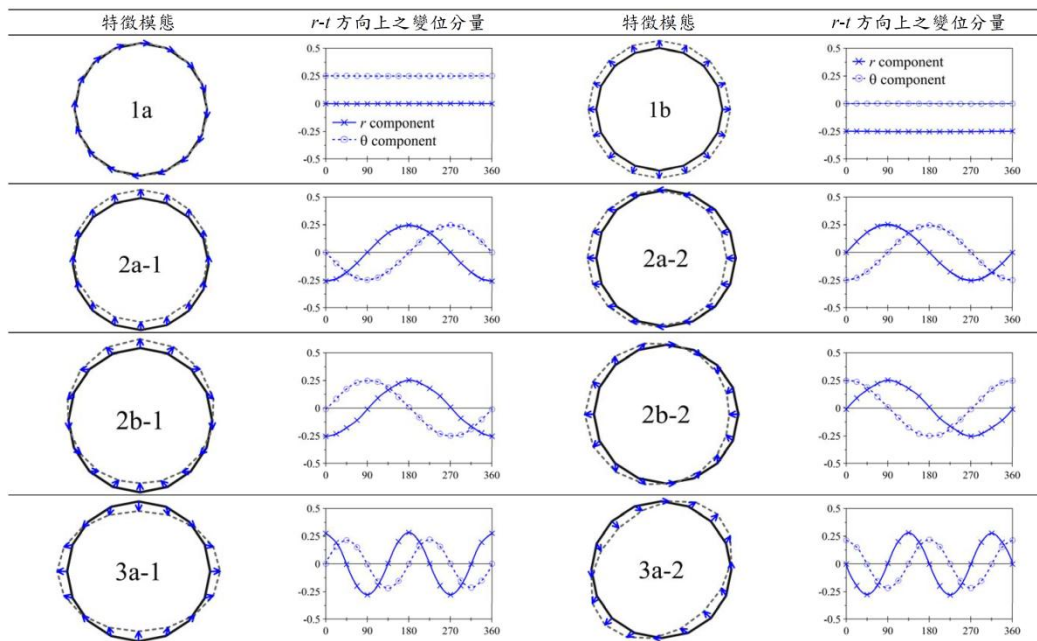


圖4.2-3 具16監測點隧道特徵模態之變位分量(邱雅筑等，2014)

4.3 襯砌微變形監測與全斷面測量技術

掌握人工結構在生命週期中行為變化之不二法門為持續獲取結構狀態資料，並將該資料轉化為定義結構安全性指標的資訊。根據現今常用隧道變位監測技術實際應用上遭遇之困難，邱雅筑(2014)提出包含既有測量技術以及新型量測儀器之高精度整合型技術—「隧道襯砌微變監測技術」，可量測運轉中隧道數毫米等級的微小變位，大幅提升隧道變位監測水準及應用價值。

隧道施工過程的監測作業通常針對數個測點或數條測線進行相對變位或絕對變位的量測，藉以做為施工安全的研判依據，或進一步透過反算分析求得岩體參數進行回饋設計等作業。由於隧道開挖引致的應力調整幅度大，施工初期開挖面附近監測作業量測所得的變位明顯，一般可達十數毫米以上，現有工程測量技術足以提供隧道施工安全監測所需的精度(陳堯中等，1997)，透過反算分析通常亦可求得數量等於或小於測點及測線數量總和的岩體力學特性參數(Hisatake與Hieda，2008; Sakurai等，2003; 王泰典等，1994)。對運轉中隧道而言，開挖引致應力調整所造成的變形早已趨穩定，隧道襯砌勁度更遠大於施工初期尚未完全發揮的支撐勁度，襯砌的位移變化通常很小，屬於精度甚高的微量位移量測。

4.3.1 襯砌微變形監測

隧道襯砌微變監測技術作業包括1.GPS控制測量；2.導線控制測量；3.路線測量暨回歸計算；以及4.襯砌三維絕對坐標全斷面測量等主要項目(圖4.3-1)，內容說明如后。

GPS控制測量之目的係為建立微變監測使用的基準坐標系統。隧道兩洞口附近設立至少4點以上的GPS控制點，採用差分衛星定位技術(Differential Global Positioning System, DGPS)與已知三維絕對坐標的衛星追蹤站同步聯測後，解算GPS控制點坐標，再設置引測至隧道兩洞口之導線點，採傳統工程測量程序校核GPS控制點與導線點精度。若精度符於要求，可繼續設置隧道路線測量以及全斷面測量所需的加密點；若未達要求，則需重新進行差分衛星定位測量與導線測量，並視需求決定是否設置導線加密點。我國板塊運動活躍，全島每年以數公分等級持續變形，因此隧道洞口GPS控制點本身之位置亦在變動中。有鑑於此，此技術要求導線控制測量以下程序均以GPS控制網形心為基準，利用形心誤差最小之特性將可能偏差降至最低。海平面1,000 m以上的山區，台灣採用此方法所得的閉合導線精度一般可優於1/20,000，達基本控制測量二等導線之精度。

路線測量暨回歸計算係重建隧道及洞口附近路段的沿線地形資料，並求得重要的線形測量參數，可以做為未來微變監測點位的基本資料，亦可建立微變監測與其他隧道內安全檢測項目以及洞外檢監測資料的空間關係。襯砌三維絕對坐標全斷面測量係針對待測剖面實施，原則上點位的間距應滿足後續隧道變形分析如 I_d 曲線(邱雅筑等，2012)和特徵模態法的需求，一般小於0.5 m。精度方面為反映隧道變形特性，每一斷面應實施2測回以上，取多測回平均為剖面坐標值，測量結果隧道斷面任意點坐標值不得大於 ± 5 mm

。待測剖面的間距，在第一次實施微變監測的隧道可以內襯砌施工縫的間距為參考值，並將待測剖面佈置於兩施工縫中間，再視微變監測成果增減監測剖面數量並調整其位置。

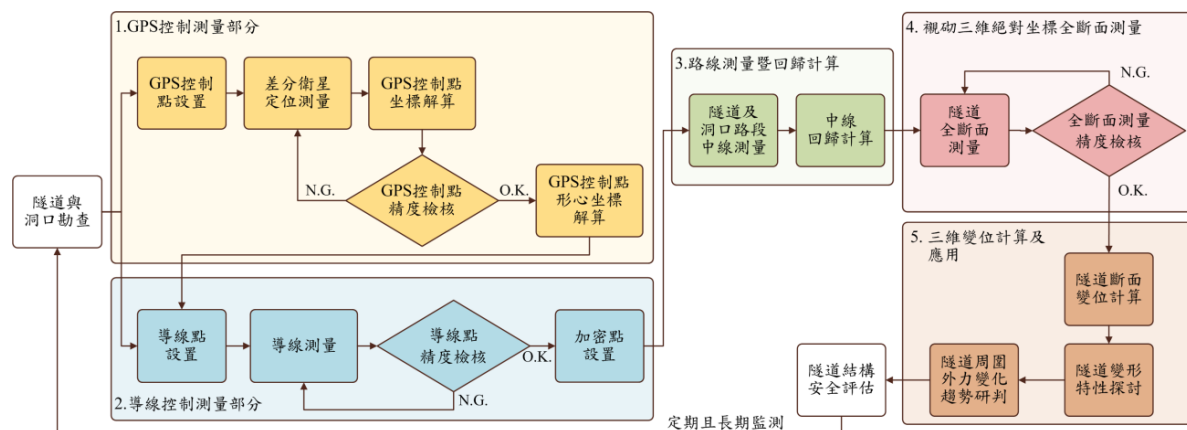


圖4.3-1 隧道襯砌微變監測方法內涵

路線測量暨回歸計算係重建隧道及洞口附近路段的沿線地形資料，並求得重要的線形測量參數，可以做為未來微變監測點位的基本資料，亦可建立微變監測與其他隧道內安全檢測項目以及洞外檢監測資料的空間關係。襯砌三維絕對坐標全斷面測量係針對待測剖面實施，原則上點位的間距應滿足後續隧道變形分析如 I_d 曲線(邱雅筑等, 2012)和特徵模態法的需求，一般小於0.5 m。精度方面為反映隧道變形特性，每一斷面應實施2測回以上，取多測回平均為剖面坐標值，測量結果隧道斷面任意點坐標值不得大於±5 mm。待測剖面的間距，在第一次實施微變監測的隧道可以內襯砌施工縫的間距為參考值，並將待測剖面佈置於兩施工縫中間，再視微變監測成果增減監測剖面數量並調整其位置。

4.3.2 全斷面測量技術

全斷面測量係求得隧道襯砌待測剖面的絕對坐標值。基於繪製剖面變形曲線的目的，測量點(線)需達到足以繪製剖面的數量與精度。傳統採用光學測量儀器如全測站照準反射稜鏡或反光貼片的測量方式，必須在隧道襯砌表面設置大量的監測點位，實務上僅能在少數已露異狀徵兆的待測剖面實施，難以滿足現代化隧道維護管理亟需全面檢測建立資料庫以達早期預警的功效。賴彥儒(2013)採用新型全測站之自動目標識別與照準(Automatic Target Recognition, ATR)功能，基於路線測量暨回歸計算求得的隧道線形參數，經內業計算求得待測剖面上待測點位的三維絕對坐標值後，以無稜鏡測量模式於隧道內採用放樣(set out, mark)功能，照準測站前後加密點或導線點後施行斷面待測點位放樣，並計讀點位坐標，以求得待測剖面的絕對坐標值。並根據常見的工程測量與監測作業及其選用的座標特性，劃分了三個不同尺度的測量作業，分別是全域尺度、介觀尺度與

局部尺度，表4.3-1為不同的尺度的定義、特性、座標系統與應用情況。此外，為能對待測區域實施多時期測量，必須針對變形參數進行統計檢定測試以確定變形是否確實存在而非受到測量誤差的影響，賴彥儒(2013)經由一系列的測試研究，驗證其分析方法可將不同時期的監測資訊轉至絕對座標系統下，並得到絕對量測精度；同時，根據王泰典等人(2009)與邱雅筑等人(2012)提出的襯砌微變監測技術作業架構，將全域尺度下的GPS測量作業、介觀尺度下的測量作業及局部尺度下的測量作業相結合，提出了跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構，如圖4.3-2。

簡言之，賴彥儒(2013)提出跨尺度多時序監測整合技術，包括全域尺度、介觀尺度與局部尺度，及建立對應的監測作業流程，並將監測資訊整合至政府公告的絕對坐標系內評估其絕對精度，可作為掌握監測體三維變形特性之基礎。

表4.3-1 不同量測尺度之比較(賴彥儒，2013)

不同尺度 比較項目	全域尺度 Macro-scale	介觀尺度 Meso-scale	局部尺度 Micro-scale
坐標系統	國家絕對坐標系 TWD97、 TWVD2001	國家絕對坐標系 TWD97、 TWVD2001	測站單元之 測站坐標系
施測方式	GPS 靜態測量 水準測量	加密控制測量	單站自由測站法
已知點	衛星控制點 一、二等水準點	隧道控制點 Meso-scale Control	測站中心
待測點	隧道控制點 Meso-scale Control	加密控制網 Meso-Network	監測剖面點 Tunnel Profile 局部加密控制網 Meso-Network(net#)

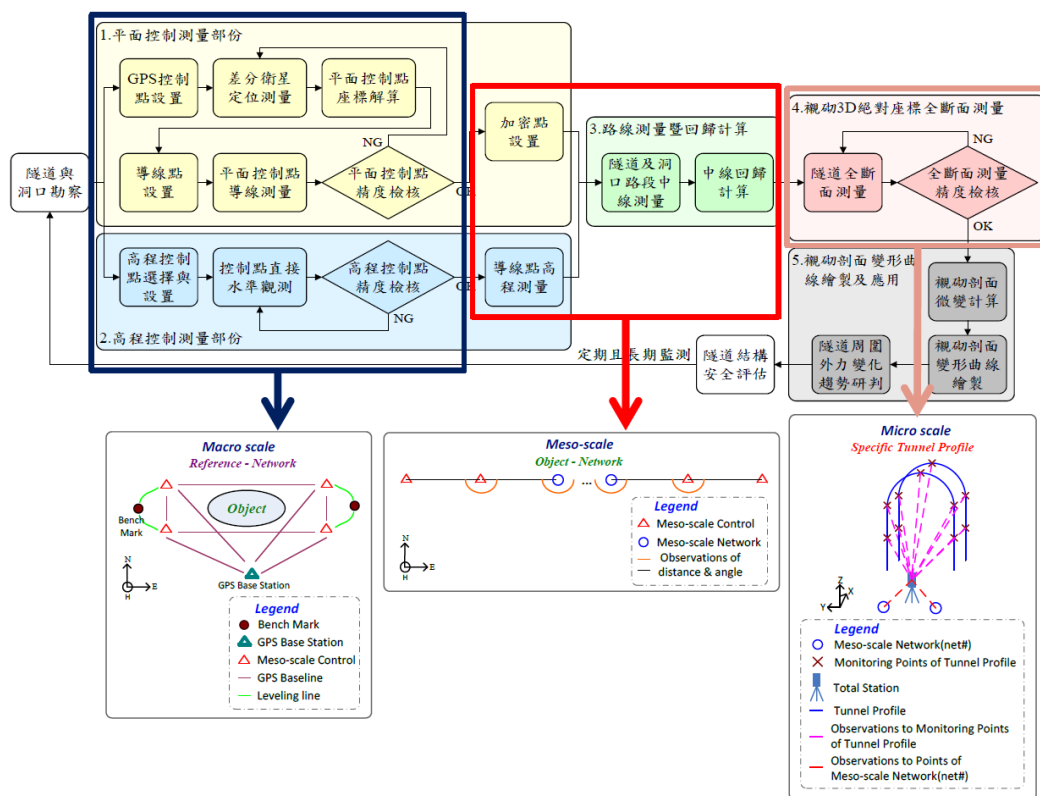


圖4.3-2 跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構(賴彥儒，2013)

4.4 隧道詳細檢測作業-各項隧道詳細檢查項目與方法

取得隧道襯砌表面影像並完成異狀判釋後，可依異狀種類、範圍、嚴重程度與外在環境因素等，選擇或補充(追加)合適之詳細檢測項目，並妥善規劃各檢測項目之施測位置。李佳翰(2013)即建議隧道詳細檢測項目、方法與儀器設備，如表4.4-1與表4.4-2所示。

表4.4-1 隧道安全檢測項目(李佳翰，2008)

檢測種類	作業項目
資料蒐集彙整	<ul style="list-style-type: none"> ● 地形、地質、水文、地震等基本環境資料 ● 原始設計圖 ● 隧道開挖施工紀錄(含地質及災變) ● 竣工圖/報告 ● 歷年檢查/檢測資料 ● 歷年維修補強資料
環境調查	<ul style="list-style-type: none"> ● 地表地質調查 ● 水文調查 ● 植生調查 ● 隧道洞口檢查
隧道襯砌檢測	<ul style="list-style-type: none"> ● 隧道內淨空 ● 襯砌表面 ● 襯砌完整性 ● 襯砌背後狀態 ● 滲漏水水質
附屬設施調查	<ul style="list-style-type: none"> ● 軌道或鋪面 ● 照明 ● 通風 ● 消防 ● 排水 ● 號誌

表4.4-2 隧道詳細檢測項目(李佳翰, 2008; Lee與Wang, 2008)

檢測項目	檢測方法	檢測儀器	備註	
隧道內淨空	三維雷射測距法	雷射經緯儀/測距儀	人工	
	隧道影像掃描法	隧道影像掃描儀	自動化	
襯砌表面	裂隙寬度	直接量測法	裂縫尺、裂縫放大鏡	非破壞性
	裂隙深度	超音波法	超音波儀	非破壞性
		敲擊回音法	敲擊回音儀	非破壞性
襯砌厚度		敲擊回音法	敲擊回音儀	非破壞性
		透地雷達法	透地雷達	非破壞性
襯砌強度		混凝土鑽心取樣	手提式鑽機	破壞性
		反彈錘試驗	反彈錘	非破壞性
		拉拔試驗	拉拔試驗儀	非破壞性
		室內抗壓強度試驗	抗壓強度試驗儀	破壞性
襯砌完整性	混凝土中性化試驗	混凝土中性化試驗	酚酞溶液指示劑	破壞性
	混凝土氯離子含量	酸溶法	硝酸溶液	破壞性
鋼筋鏽蝕檢測	檢測	儀器間接檢測法	混凝土氯含量測定儀	破壞性
		儀器直接檢測法	鋼筋腐蝕探測儀	破壞性
襯砌背後狀態		儀器間接檢測法	靜電流脈衝式檢測儀	非破壞性
		透地雷達法	透地雷達	非破壞性
		熱紅外線影像法	熱紅外線影像儀	非破壞性
滲漏水水質		孔內攝影法	孔內攝影儀	破壞性
		物理性試驗	水溫量測儀、酸鹼度測定儀、電導測定儀等	現地
		化學性試驗	水質主要陰、陽離子含量檢測	室內

除表4.4-1、4.4-2列示的隧道安全檢測項目、所需資料與方法外, 李佳翰(2013)另建議應視需要增加以下之詳細檢測項目與內容:

4.4.1 隧道外調查與監測

一般隧道安全檢測作業僅著重於隧道內之調查項目, 而卻忽略掉隧道外部的特殊徵兆, 例如: 植生物種之改變、地表張力裂縫或差異沉陷(圖4.4-1(a))、混凝土平台溝或洩水溝之開裂、洞口邊坡灌漿錨筋鬆脫(圖4.4-1(b))或地錨鏽蝕、洞門或側抱牆之開裂或傾斜(圖4.4-1(c))、下邊坡擋土牆開裂或傾斜(圖4.4-1(d))等, 這些隧道外之徵兆往往可提供隧道異狀肇因診斷最直接有力之證據。



圖4.4-1 隧道外異常現象之特徵

4.4.2 裂縫進展性調查

日本道路協會(1993)建議針對隧道因外力變化產生異狀之安全等級判定,必須依襯砌裂縫有無進展性分開考量,黃燦輝與鄭富書(1997)亦採納相同之建議,故裂縫之進展性為隧道肇因診斷與安全等級評估之一重要性指標。目前較簡易之裂縫進展性調查方式有:(1)現地標記法;(2)(毛)玻璃貼片法等。其中現地標記法係指於首次檢測時於裂縫尖(末)端標記日期,俟下次檢測時便可藉由觀察裂縫長度延伸與否確認裂縫有無進展性(圖4.4-2(a));而(毛)玻璃貼片法則指於裂縫中央位置黏貼(毛)玻璃片,當裂縫寬度變寬時,則(毛)玻璃片將因兩側之拉力而開裂(圖4.4-2(b))。

而目前較常使用之檢測方式為:(1)壓克力式裂縫計(圖4.4-2(c));或(2)電子式裂縫計(圖4.4-2(d)),二者優點為可直接量測裂縫寬度變化,以提供後續隧道安全等級評估之量化依據。惟電子式裂縫計可能因隧道內潮濕環境因素而影響其量測數值之精確度,較不適用於水利隧道、自來水及污水下水道。此外,近年來日本已研發於裂縫位置塗抹導電塗料(圖4.4-3),當裂縫有變化時,因裂縫兩側之電位(電阻)差感應,透過光纖等無線傳輸技術回傳至管理中心或行控中心,亦可提供未來參考選用。



圖4.4-2 各種裂縫進展性調查方式

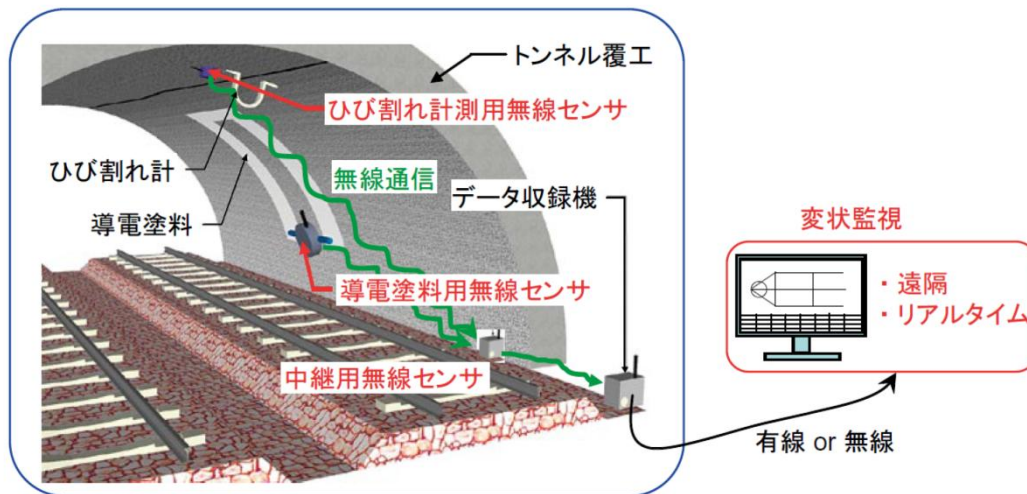


圖4.4-3 日本研發裂縫監測之導電塗料示意圖(津野究，2009)

4.4.3 襯砌背後狀態探查

依據本研究蒐集日本隧道安全檢測案例發現，隧道襯砌背後空洞現象最可能發生位置為頂拱，故日本隧道安全檢測之透地雷達測線均布置於隧道頂拱，沿隧道縱向全線施測；若經費許可，則增加頂拱測線數量至3條測線(圖4.4-4(a))，以利確認隧道頂拱空洞範圍。此施測方式的優點為：無需施測環向之透地雷達，可加快現場之檢測作業速度。

而透地雷達天線頻率應視檢測目的與欲檢測隧道襯砌厚度選用，若檢測目的為襯砌背後空洞或狀態探查，則可採用頻率較低(400~900 MHz)之天線；若檢測目的為襯砌本身完整性與厚度探查，則可採用頻率較高(800~1000 MHz)之天線，以提高檢測精度。此外，透地雷達之成果圖除標示襯砌與外支撐界面、外支撐與圍岩界面以及空洞或疏鬆範圍外，應利用雷達波對鋼支保介電常數差異之繞射圖，標示鋼支保位置(圖4.4-4(b))，上述經驗均十分值得未來國內隧道檢測作業借鏡與參考。

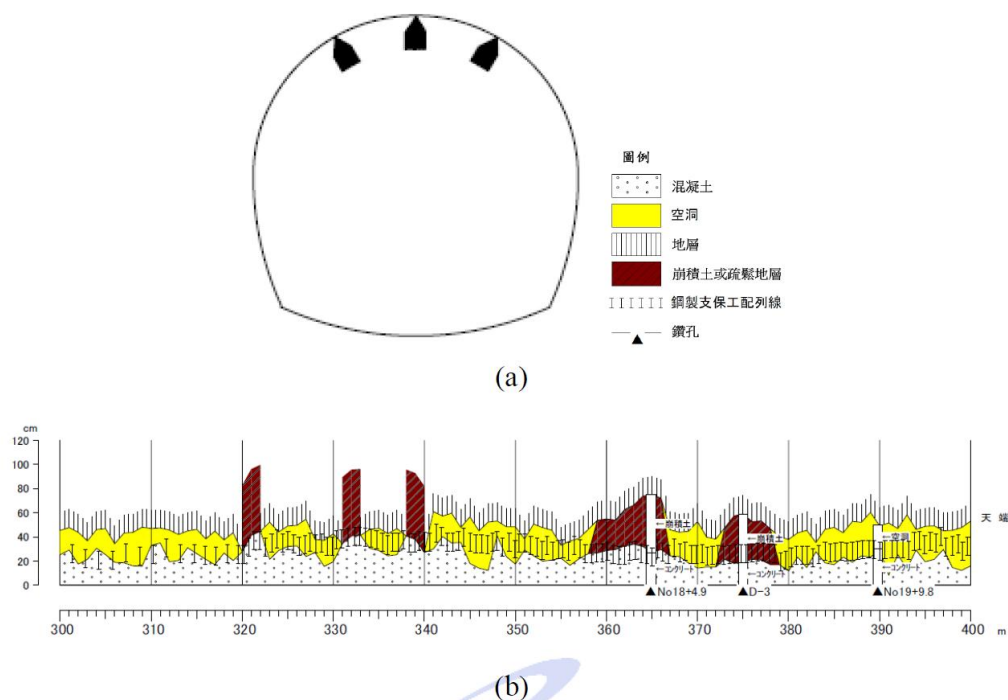


圖4.4-4 日本隧道內透地雷達測線布置方式與成果圖(日本Walnut公司提供)

4.5 小結

本章彙整國內外既有坑道的檢測與監測技術，提供未來處置坑道在運轉期間，襯砌結構出現異狀時的檢監測方法與肇因判斷參考，茲就本章研析之重點及未來相關之應用整理如下列幾點：

- (1) 現行的隧道檢監測種類與目的各有不同，未來在應用上應考量施作的難易度、成本與環境配合條件，選擇適當的檢測技術，例如在鐵路隧道施作的襯砌影像掃描技術(包括TS360隧道全斷面掃描系統與DIBIT三維隧道影像掃描儀)，其可架設在即有的鐵軌上施測，若未來應用在處置窖時，則需考量處置窖型式及放置廢棄物容器後施測空間可能受影響等。
- (2) 初步的襯砌結構異狀檢測，仍需藉由檢測人員以目視方式進行，若是具可疑處或已有顯著裂縫或滲水等異狀，再進一步以其他更精確的檢測技術進行調查與確認。

(3) 針對處置坑道可能因為開挖擾動、環境因素及非力學因素所引起的襯砌或其他坑道結構之異狀，本計畫前期研究已根據處置坑道結構長期穩定之影響因素，及對應的襯砌異狀與檢監測項目統整於表4.5-1，未來若能先確定處置坑道所處深度、位置或掌握地質變形帶的空間分佈，除可協助襯砌異狀主要肇因研判外，亦可作為檢監測項目之選定參考。

表4.5-1 處置坑道襯砌結構長期穩定之檢監測項目

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	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	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	襯砌裂縫具偏壓特徵，例如： ● 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	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	● 襯砌目視檢查 ● 襯砌影像掃描 ● 襯砌裂縫擴展性

		<p>(5) 仰拱隆起</p> <p>2. 襯砌裂縫具鬆弛土壓特徵：</p> <p>(1) 頂拱產生開口性裂縫</p> <p>(2) 側壁產生壓縮裂縫或剪力裂縫</p> <p>(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</p>	
環境因素	風化作用引致岩石強度弱軟化	<p>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</p> <p>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</p>	<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)	漣漪狀裂縫	襯砌目視檢查
	襯砌背後空洞或厚度不足		透地雷達探測

第五章、處置坑道封閉前之檢測與評估項目研析

本章綜整前述第二章至第四章資料研析結果，包括瑞典SFR在低放處置坑道之經驗，與國內一般隧道在運轉期間的檢監測作法，作為發展為本研究處置坑道在運轉期間的檢監測項目與封閉前之檢測與評估項目技術之參考。

5.1 處置設施在不同時期的監測

根據本計畫之前期研究(楊長義與李宏輝，2014)，已蒐整國際原子能總署(IAEA)在對地質處置場址安全導則(Specific Safety Guide)中有關處置設施監測與監管 (Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities)之專書中，如圖5.1-1所示，提到了處置設施在選址、建造、運轉、封存與封閉後各個階段的監測工作目的與意義(IAEA, 2014)。

(1) 基準監測 (Baseline monitoring)

目的為收集資料以支持場址之評估過程及確認首度安全評估之重要特色及論證。

(2) 設施建造中之監測 (Monitoring of the as-built facility)

係指工程施作期間需同步掌握的相關資訊以支持工程作業的進行，及發展後續程序之安全項目。因應工程的進行，有許多額外的監測工作將於此階段進行。

(3) 設施運轉中之監測 (Monitoring of the operating facility)

目的為評估符合規範要求與支持後續安全性之提出申請。

(4) 封閉監測 (Monitoring for closure)

為評估滿足規範要求，以支持封閉之工作與封閉後之監測。新的監測可在這階段加入，有些監測則可停止。

(5) 封閉後處置設施性能之監測 (Monitoring of the post-closure performance of the disposal facility)

在於確保處置設施於封閉後，其與環境安全的相關參數是否符合監管規範之要求，並且作為後續監管期程與解除監管決策之參考。

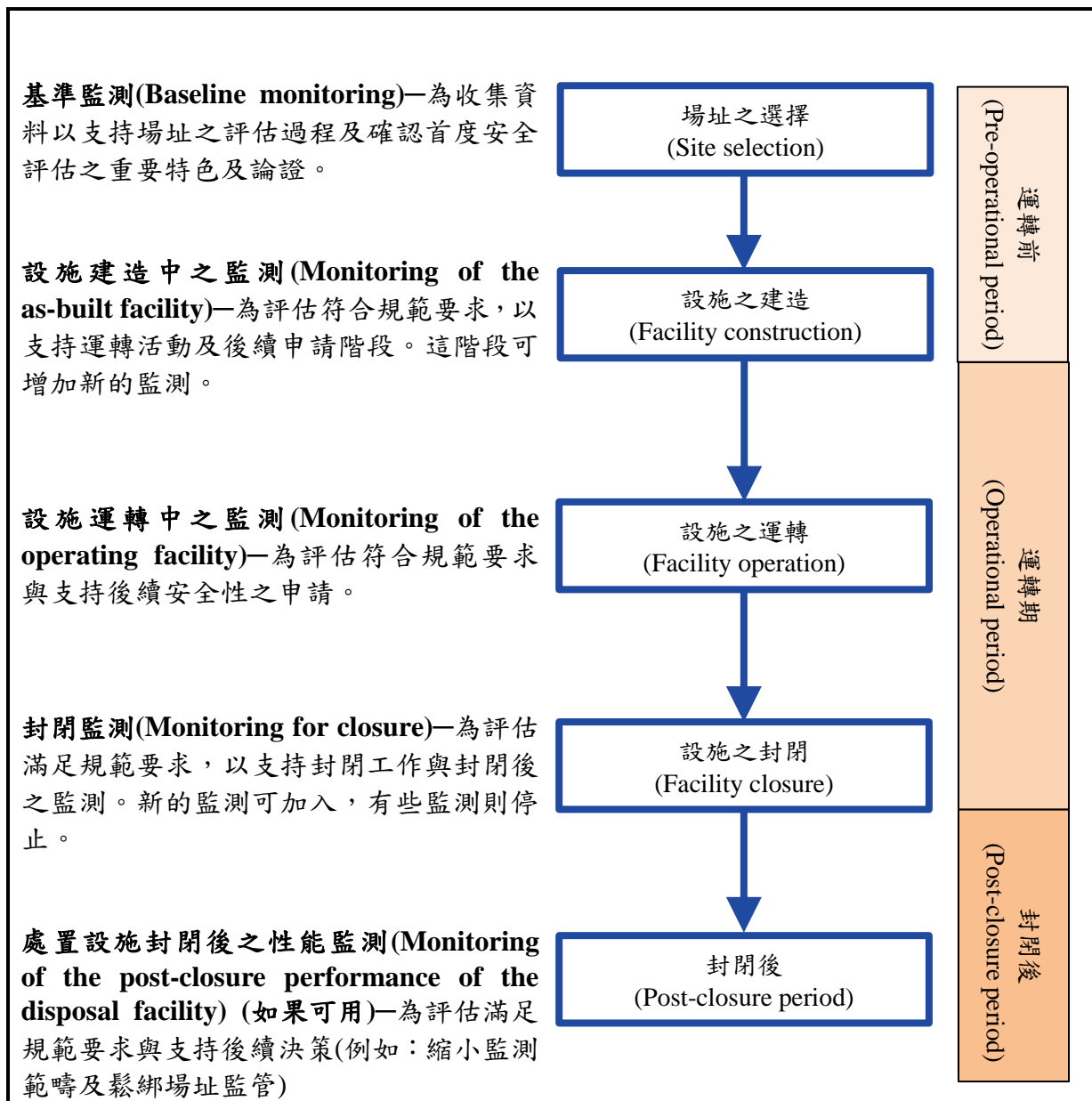


圖5.1-1 處置場址生命週期各階段所執行的監測作業(IAEA, 2014)

5.2 國外低放處置坑道檢監測之經驗回饋

根據第二章「國外處置坑道之興建規劃與監測經驗」，綜整SFR在其興建期間有關的岩石工程經驗、與運轉期間之檢監測項目與作法，整理如下列重點：

5.2.1 建造期間之經驗回饋

(1) 岩體分類

SFR 在建造期間，其對處置母岩的岩體分類不是採用一般岩石工程所常使用的 Q 法或 RMR 岩石分類法，僅以「品質良好岩石」(good rock)、「高度破碎岩石」(high fracture frequency)或「塊狀岩體」(blocky rock mass)等類型進行岩石分類，採用的支撐方式則以岩栓、噴凝土或掛網噴凝土等方式提供開挖岩盤的穩定，有關噴凝土與岩栓支撐形式，綜整於第二章表 2.2-2 與表 2.2-3。

(2) 岩體支撐工法

Forsmark 1 號與 2 號反應器冷卻水排放隧道總長 1,921 m，隧道沿線採用支撐系統的比例僅佔 35%，雖然隧道總長度的 13% 經過 Singö 地質變形帶，但是皆可以採傳統的隧道工程支撐技術克服，例如利用岩栓、點焊鋼絲網、噴凝土等配合施作。此外，得知平均每 1 公尺隧道長度的地下水入滲量約為 0.03 l/s，其中 60% 的入滲量來自地質變形帶。而於 Forsmark 3 號反應器冷卻水排放隧道沿線採用支撐系統的比例佔 42%，所採用的支撐方式仍是利用岩栓、噴凝土或掛網噴凝土等之一次支撐方式，所述冷卻水排放隧道的地質條件與岩石等級，已綜整於第二章表 2.2-4，採用的支撐系統比例統計綜整於表 2.2-5 與表 2.2-7。

5.2.2 運轉期間之監測項目

(1) 岩體變形監測

岩體的變形監測係針對位處主要破裂帶之處置窖及處置坑道，其側壁具不穩定岩塊者，SFR-1 係透過採用伸張儀量測岩體的依時變形，量測儀器的精準度為 0.02 mm；架設的數量與重點分別是位在 Singö 地質變形帶計 18 組，位在筒倉計 13 組，如第二章表 2.4-5 及表 2.4-6 所示。

(2) 岩栓抗腐蝕性監測

針對岩栓抗腐蝕性監測，在 1987 年與 2004 年分別施作參考岩栓與場鑄栓共 57 支，其監測重點在於確保岩栓沒有受到地下水入滲而引致侵蝕。監測結果，亦顯示 SFR 在營運階段埋設的測試岩栓均未有腐蝕狀況，顯示依 SFR 建議方法於建造施工階段的防水措施良好。

(3) 地下水入滲量

SFR-1 處置設施對地下水入滲之監控，透過長期的監測計畫，以量測 20 年期間地下水滲流進入的情況：在 1988 年的地下水每小時總滲入量為 44 m³/h，之後滲流量呈現遞減趨勢；至 2006 年仍有 20 m³/h，顯示依 SFR 設施經驗在 20 年後每一小時仍存有 20m³

的地下水入滲量，相關的入滲量紀錄綜整於第二章圖 2.4-4 與表 2.4-7。

5.2.3 運轉期間的檢監測行動

在運轉階段，SFR係針對(1)岩體變形、(2)岩體品質暨支撐狀況、與(3)地下水入滲採週期性的檢監測作業。茲將SFR低放處置設施之檢監測行動與作法，整理如表5.2-1所示，並摘要說明如后：

- (1) 主要檢測項目為岩體變形、岩體品質暨支撐狀況、與地下水入滲。
- (2) 在瑞典，所有的隧道、洞穴工程首先都必須遵守當地瑞典主管機關制定的檢測法規。例如，依據瑞典法規的指導方針，營運階段的檢測項目與次數不能少於營運前。
- (3) 檢測週期，以每個月實施一次的「內部檢核」為基本單位；其次為1年實施一次的「年度檢測」，與5年實施一次的「大型檢測」。其中，內部檢核與年度檢測係分別由SFR內部組成之人員，或由各方面專家組成的岩石檢測團隊(SKB總公司、SFR-1廠區、岩石工程專家及混凝土專家等)負責。
- (4) 針對岩體與噴凝土的穩定性，分別是規劃在每5年與每10年實施維護工作。

5.3 處置坑道封閉前之檢測與評估項目

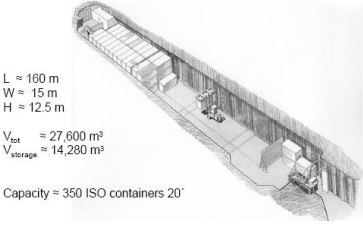
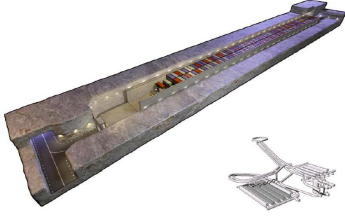
根據本報告第二章整理了SKB技術報告TR-14-02中有SFR低放處置坑道封存規劃(SK B, 2014)，如表5.3-1所示，僅指出處置坑道在封存前將執行最終的檢監測作業，雖並未詳細述及檢監測作業內容，但5.3.2節所述「運轉期間的檢監測行動」內容中，大致可將(1)岩體變形、(2)岩體品質暨支撐狀況、與(3)地下水入滲之檢測延伸作為封閉前(運轉期間)需進行的檢測項目，並根據檢測結果，執行封閉前的維護與補強計畫。

根據第二章2.3.2節「處置窖設計理念暨考量因素」之內容，處置窖內的放射性廢棄物可藉由設施的系統元件阻止或是延緩放射性何種的外洩與擴散，表2.3-1所列處置場之各系統元件應考慮的長期安全評估項目，包括廢(1)廢棄物形式、(2)廢棄物包件方式、(3)包圍廢料包件的灌漿、(4)混凝土結構、(5)噴凝土、(6)膨潤土與砂之混合物/膨潤土、(7)處置窖的回填材料(碎石)、(8)封塞及其他封閉的元件(調查鑽孔)等，應可作為低放處置坑道封閉前之評估項目參考。

表5.2-1 SFR低放處置設施之檢監測行動

	實施週期	項目或實施目的	檢監測方法	執行單位
內部檢核 (Internal check-up)	1 month	1. 坑道牆面或地面的岩石鬆動 2. 支撐系統功能是否異常	1. 讀取地下水壓 2. 岩體變形量	SFR組織
年度檢測 (Yearly rock inspection)	1 year	1. 岩體變形量測 2. 岩體品質與支撐 3. 地下水入滲	1. 目視檢查 2. 伸張儀	SFR組織 岩石檢測團隊
大型檢測 (Large inspection)	5 years	1. 彙整、評估及總結這段期間內之各種檢測、維護與處置措施 2. 針對下一次的大型檢測提出是否需要改善檢測方式	屬檢測實施期間之檢測、維護與處置措施策進檢討	檢測團隊
測試與調查 (Testing and investigations)	5 years 6 years 6 years 15 years 15 years	針對地下水入滲量測與岩體支撐構件進行檢測	文獻中未述及實際作法	岩石檢測團隊
維護 (Maintenance)	5 years 10 years	確保隧道支撐系統及排水系統的正常運作	文獻中未述及實際維護作法	SFR組織

表5.3-1 瑞典SFR低放處置坑道封閉規劃

<p>SFR 低放 處置坑道</p> <p>規劃項目</p>	<p>SFR1 1BLA</p> 	<p>SFR3 2-5BLA</p> 
<p>與坑道結構 穩定有關之 設計考量</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 運轉期間，岩壁上的噴凝土將增加廢棄物處置窖的結構穩定 ■ 窖封閉後，噴凝土及儲存物對結構穩定的影響極小 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 運轉期間，岩壁上的噴凝土將增加廢棄物處置窖的結構穩定 ■ 封閉後，支撐牆、噴凝土及儲存物對結構穩定的影響極小
<p>檢測與監測</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 興建過程及完工後，監測、檢測廢棄物處置窖之噴凝土及岩石 ■ 置放廢棄物放置的運轉階段，針對處置窖的物理狀況進行檢監測 ■ 於處置窖進行封塞前，進行最終監測與檢測 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 興建過程及完工後，監測、檢測廢棄物處置窖之噴凝土及岩石。 ■ 置放廢棄物放置的營運階段，監測、檢測廢棄物處置窖的物理狀況。 ■ 於處置窖進行碎石回填及封塞前，進行最終監測、檢測。
<p>封閉計畫</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 整個坑道予以封塞 ■ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 整個坑道予以封塞 ■ 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

5.4 一般坑道在運轉期間的安檢管理準則

本節整理一般坑道在運轉期間有關之管理維護作業流程、檢查頻率、執行單位與維修補強流程等，以供後續探討低放處置坑道在運轉期間、封閉前的檢監測與評估項目研析之參考。

(1) 歐美

歐美的隧道安檢管理準則，在歐洲方面多數直接委託專業單位辦理，因此大都採個案處理較多，制式化的管理準則仍不多見。美國則有聯邦公路總署(Federal Highway Administration, FHWA)和聯邦運輸總署(Federal Transportation Administration, FTA)研訂的安檢管理準則可遵循。

(2) 日本

日本道路公團乃於1989年委託財團法人日本隧道技術協會，設置老朽化對策特別委員會開始進行檢討。1990年整理日本各單位機關有關襯砌異常狀況判定基準與評估資料，建議日本道路公團所維護管理的高速道路隧道之檢測、調查與安全度判定等基本法則，如圖5.2-1所示。建議將隧道管理維護作業流程區分為三個階段：

第一階段：係由道路管理者(業主)負責，執行的業務包含日常檢查、臨時檢查和定期檢查等三大類。

第二階段：當業主執行檢查過程發現的異常狀態牽涉隧道檢測專業技術與判斷技巧時，應委由第二階專門技術者或專業顧問公司執行，執行的業務則包括：標準調查和詳細調查兩大類。

第三階段：若第二階段執行檢測過程中有少許的特殊異常狀態，需長期持續監視方能加以檢討並解決時，則需進一步委由第三學術機關或研究單位來執行。

2003年東京大學對於隧道襯砌檢測，亦建議了一套評估流程(Toshihiro Asakura, 2003)，如圖5.2-2所示。其維護流程主要分為兩部分：(1)主要檢測(Primary Inspection)與二次檢測(Secondary Inspection)；主要檢測為利用目視檢測或以鐵鎚敲打隧道襯砌表面為主，通常施以影像處理之非破壞檢測系統，如雷射光束(laser beams)、層析攝影 slit cameras)、CCD等，其檢測週期每兩年一次。而(2)二次檢測乃依據主要檢測結果，針對隧道沿線重要的劣化情形做一詳細的分析，包含非破壞檢測、非接觸(non-contact)檢測技術的應用。此階段所需檢測與調查的項目如圖5.2-3所示。在進行上述檢測之後所得的結果，最後進行評估與診斷，包含：(a)大地應力(earth stress)、(b)老劣化(deterioration)、(c)滲漏水(water leakage)、(d)凍害(frost damage)以及(e)表面剝落(spalling)等五大方面評估診斷。

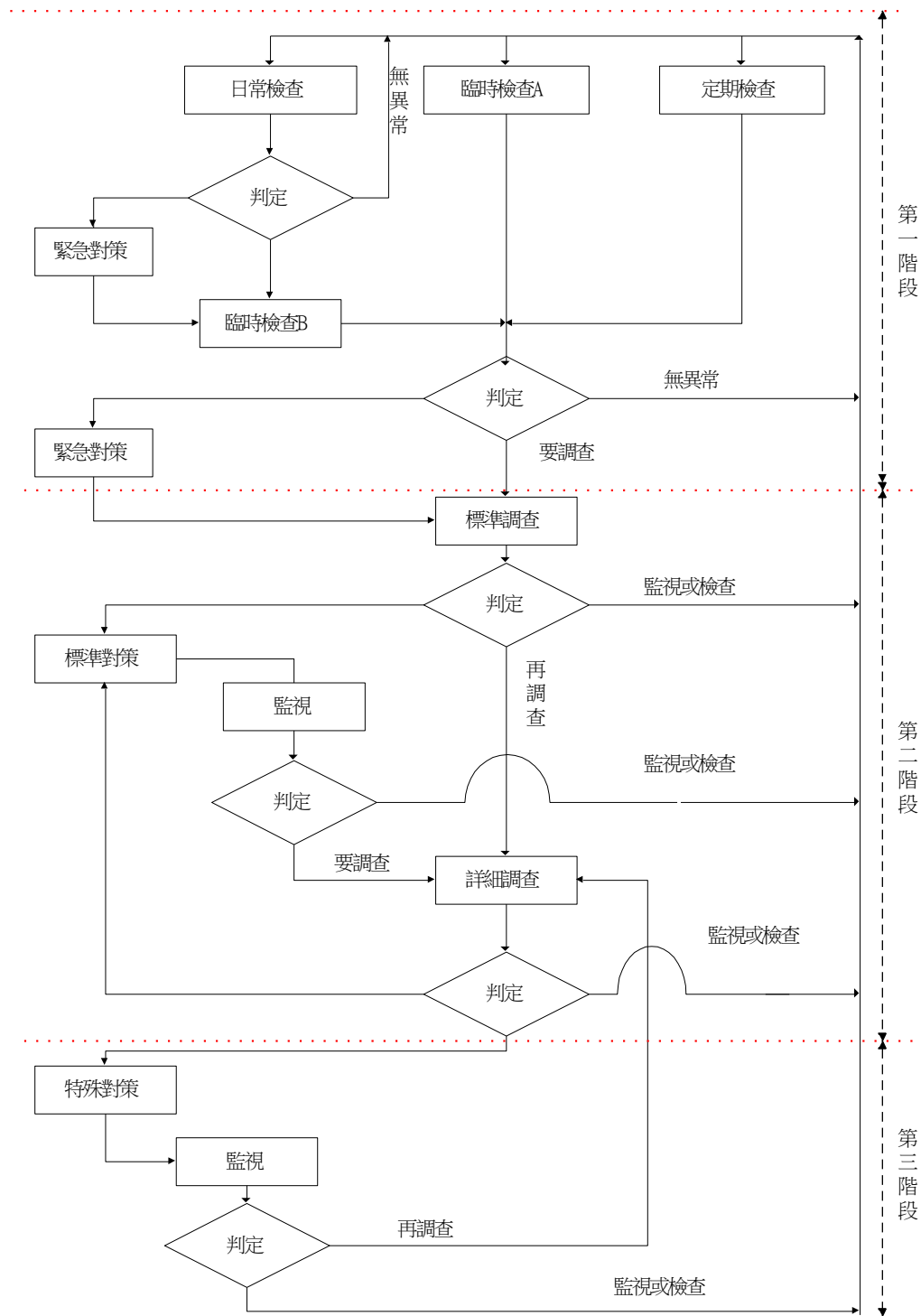


圖5.2-1 日本隧道維護管理作業流程圖(日本隧道技術協會，1992)

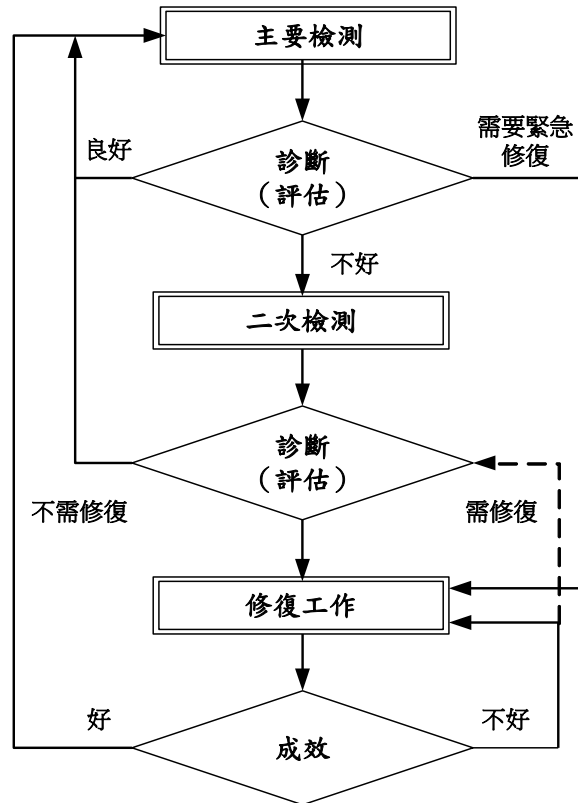


圖5.2-2 隧道安全維護評估流程(譯自Toshihiro Asakura, 2003)

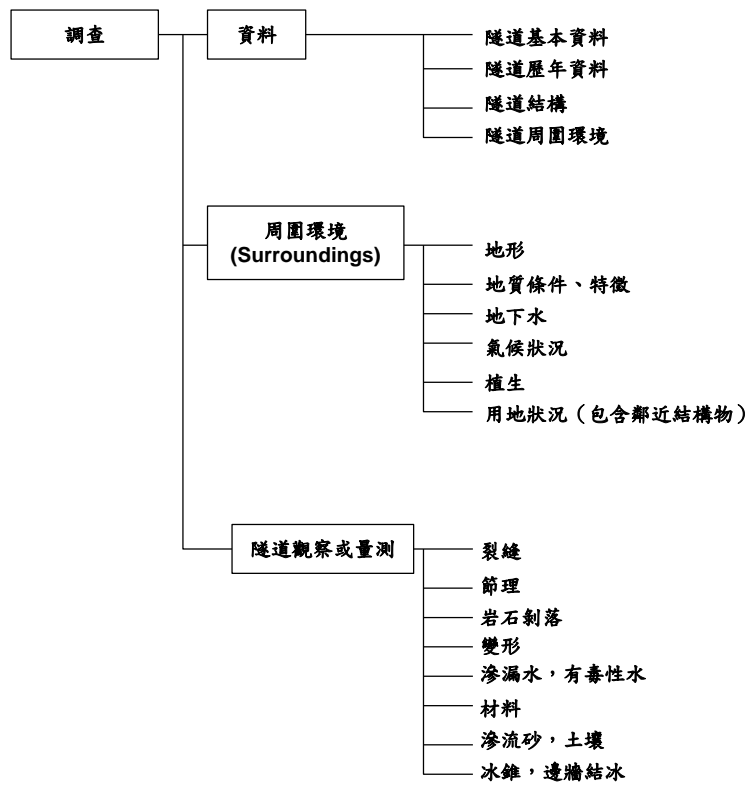


圖5.2-3 二次檢測所需的檢測項目(譯自Toshihiro Asakura, 2003)

(3) 我國

鑑於國內交通隧道老劣化問題難以避免，交通部乃於1996年委託國立台灣大學土木工程學系進行「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂」(黃燦輝、鄭富書等，1997、1998)，針對台灣老舊交通隧道之安全檢測，建議區分為檢查與安全檢測兩階段的制度：(1)檢查階段，可由隧道管理單位自行辦理或委託專業顧問公司辦理，區分為平時檢查、定期檢查與臨時檢查，其頻率及執行單位如表5.2-1所示。(2)安全檢測階段，則通常由具專業性的顧問公司辦理，其內容包括隧道基本資料調查、隧道環境狀況調查、相關之地形、地質及地下水條件之調查等，相關之安全檢測、評估及維修補強之流程圖5.2-1所示。

表5.2-1 隧道檢查頻率(黃燦輝與鄭富書，1997)

檢查類別	隧道狀況	檢查頻率	執行單位
平時檢查	任一隧道	1次/日~1次/週	業主自辦
定期檢查	新完工隧道	1次/月~1次/半年	業主自辦 或 委託專業公司辦理
	一般隧道	1次/年~1次/5年	
	重要隧道	1次/月~1次/半年	
	30年以上隧道	1次/半年~1次/2年	
臨時檢查	已出現異狀隧道	1次/週~1次/年	委託專業公司辦理
	一般隧道	平時檢查時發現可能之異狀時 大量豪雨期間或之後 地震之後 隧道內發生事故時 隧道已出現異狀需持續追蹤異狀之發展時 其他特殊狀況(如鄰近隧道興建工程時)	業主自辦

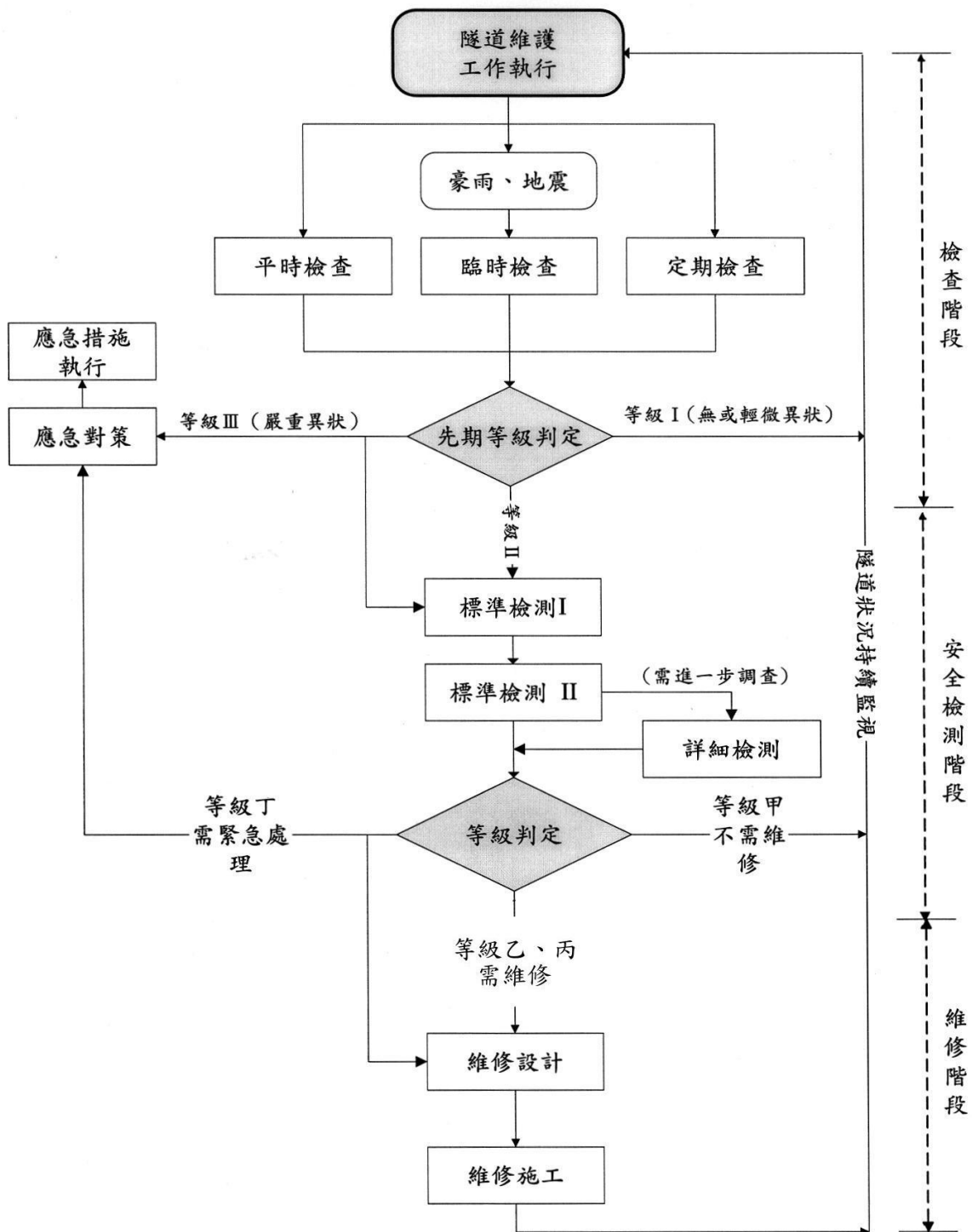


圖5.2-4 隧道安全檢測、評估及維修補強流程(黃燦輝與鄭富書，1997)

5.5 小結

- (1) 由瑞典SFR在建造期間的岩石力學工程經驗，其對經過地質變形帶的坑道支撐仍僅採岩栓、噴凝土或掛網噴凝土等一次支撐方式為主；及至於後續運轉期間的監測工作，主要係針對地質變形帶與筒倉兩者之**(a)岩體變形特性**、**(b)岩體品質暨支撐狀況**、與**(c)地下水入滲量**等方面進行監測。
- (2) 於運轉期間，對SFR低放處置坑道的檢監測行動，依檢測規模而有不同的檢測週期與其施測團隊，且針對**岩體的穩定性與支撐系統(噴凝土)**規範了維護的週期。綜合比較我國一般隧道在運轉期間的安檢管理作法，二者在檢測內容、施測週期、與施測團隊之作法與經驗，均可供作未來發展處置坑道有關檢監測相關審查技術之參考。
- (3) SFR在封閉前的檢測規劃，應是針對**(a)廢棄物形式**、**(b)廢棄物包件方式**、**(c)包圍廢料包件的灌漿**、**(d)混凝土結構**、**(e)噴凝土**、**(f)膨潤土與砂之混合物/膨潤土**、**(g)處置窖的回填材料(碎石)**、**(g)塞及其他封閉的元件(調查鑽孔)**等進行相關的評估作業，例如評估混凝土結構與噴凝土之力學穩定性，及其可能影響到放射性核種遷移效果的吸附作用與平流傳輸特性等之改變。

第六章、處置坑道封閉後之監測對策

6.1 處置坑道封閉後之監測目標

從圖6.1-1所示IAEA之放射性處置設施的生命週期，可知處置設施封閉後即進入(1)「觀察期」，之後主管機關可藉由各種機制組成制度化監管行動，這些監管方式可分為(2)「主動監管」與(3)「被動監管」二類：主動監管包括監測、檢查、改善及場址圍阻設施等；被動監管包括了土地使用限制、警示標誌與文件記錄等(IAEA, 2001)。處置坑道封閉後的監測目標，可以彙整成下列兩點(IAEA, 2001)：

- (1) 取得量測資料藉以測試、證明是否達到對管理機關的承諾，並且符合保護人類健康與環境發展的法規需求。
- (2) 取得足夠資訊作為撤出「主動監管」行動的決策參考。

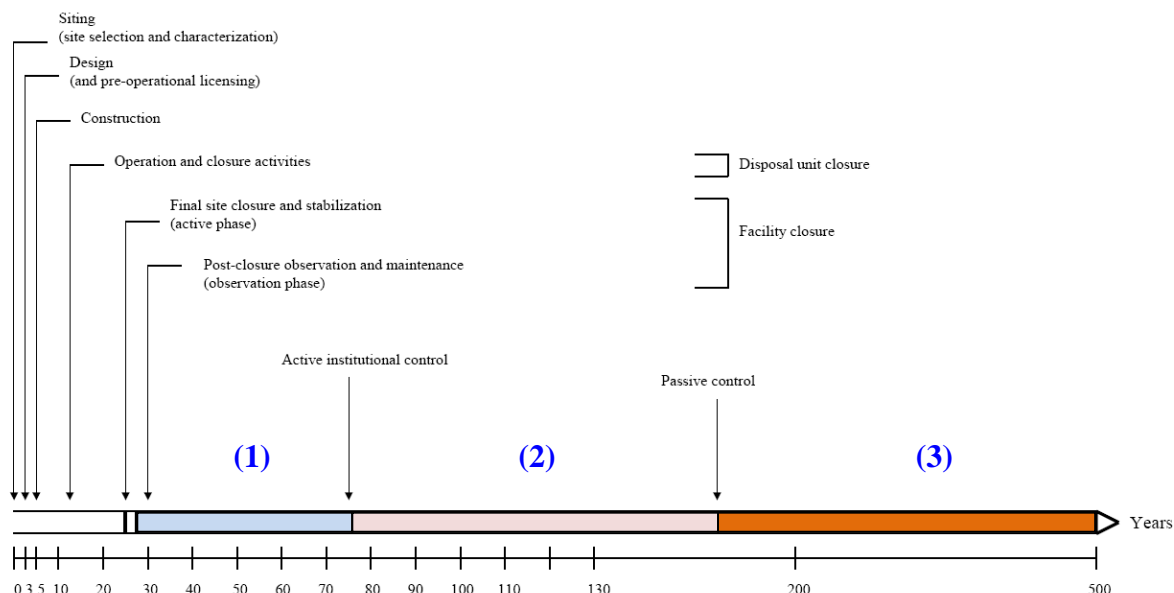


圖6.1-1 放射性處置設施之生命週期(IAEA, 2001)

6.1.1 處置坑道封閉後之監管計畫

處置坑道封閉後(Post-Closure Phase)的監管計畫，是在運轉階段即進行相關規劃與討論，處置設施由適當的機關執行封閉作業，該機關掌管封閉後的一切責任。監管計畫必須交由主管機關審核同意，該計畫的安全評估設計考量包括：(1)人體健康、(2)經過一段適當期間後的環境狀況。前述適當期間的決定，可由營運者提出佐證說明，經由主管機關審核認可；營運者應提出各種情境假設的處理狀況，包括：民眾入侵事件、工程結構的損壞及環境變遷的發展等。

監管計畫中，有關當地狀況的紀錄內容、設施的特徵、土地限制與監測、檢查的需

求等均應符合法規的規定，主管機關有權撤銷許可證或者要求改善，並且應公開各種文件。依照封閉後階段的監測計畫，處置設施的各種保護元件將定期接受檢查，包括：處置設施的覆蓋元件、排水和滲水收集系統、圍欄和警示標誌的完整性、土地使用限制的維護之驗證等。

若監測結果顯示可能導致當地水文、水文地質學或地球化學等性質的改變，就必須重新評估放射性監測計畫是否適當。如果監測結果顯示所關注的放射性濃度大於設定參考值，應進行相關調查，以重複或更廣泛的方式進行抽樣，並將擴展到其它潛在污染物的調查。調查必須持續進行，直至負責單位和監管機構都滿意調查結果對前述事件所闡述的解釋；如果監測結果顯示處置設施的當前性能或長期性能不如預期或不符合規定，就必須執行補救行動，該行動涉及修訂引用的安全評估計畫及監測計畫。當地環境的長期變化(如：氣候變遷)可能導致潛在汙染事件的發生，所以必須周期性地調查當地水文、水文地質學或地球化學等性質，並據以檢討原本的監測機制是否依然恰當，適時予以正確地調整。

隨著科技的發展，監測的技術也將不斷發展和提高靈敏度、效率及可靠度，負責單位應定期調查監測技術的發展狀況，檢討是否需隨著科技發展而改變現行監測方式，以提高監測階段的量測效率和正確性 (IAEA, 2004)。

6.1.2 低放處置設施安全評估項目

有鑑於處置坑道封閉後的監測目標必須符合處置設施安全評估項目，且須滿足保護人類健康與環境發展的法規需求，如表6.1-1，本研究蒐整國際間低放處置設施安全評估項目(SKB, 2011)，及如表6.1-2，我國低放射性廢棄物安全評估考慮的關鍵議題(張福麟，2011)；茲將上述二表所列項目中，與本章有關的課題整理比較，以作為後續我國研析低放處置設施在封閉後監測策略之參考：

- (1) 一般低放射性廢棄物在封閉後之監管期為100年至300年。
- (2) 安全評估項目中，放射性核種的傳播路徑考量為空氣傳播與地下水傳輸兩種。
- (3) 我國低放射性廢棄物安全評估所考慮的關鍵議題中，與我國地質條件之特殊性有關的開挖擾動帶、地質概念模型與地下傳輸等議題應納入考量。

表6.1-1 國際間低放處置設施安全評估項目


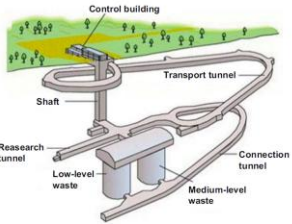
國家/處置場名稱 (計畫儲存容量, m ³)	安全評估項目 (Safety assessments)	備註
<p>瑞典/SFR (原 63,000, 計畫擴充後為 203,000)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 封閉後，每年可容忍的集體劑量約每年 0.1 毫人-西弗(m man-Sv) ● 對生物影響的說明 ● 入侵事件的後果 ● 封閉後 1000 年的詳細評估 ● 10,000 年放射性釋放的前 1,000 年劑量的收集、整合 	<ul style="list-style-type: none"> ● SFR 設計時，就考量封存的量測計畫 ● 每 10 年需進行 1 次安全事證
<p>芬蘭/VLJ Repository (8,000)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 容許值：每年 0.1 毫西弗 ● 參考情境方案(reference scenario)提供一個上限值，確保人的活動於曝露在一個容許的放射濃度 ● 真實情境方案(realistic scenario)使用較少的封閉資料(pessimistic data) ● 干擾演化的情境方案(disturbed evolution scenario)是評估意外發生的可能事故與後果 	<ul style="list-style-type: none"> ● 處置場的下部將由碎石回填，岩石和混凝土筒倉之間的間隙由碎石和膨潤土混合物填充 ● 隧道和豎井係在地面處用混凝土封閉 ● 處置場封閉後，無須進行監管作業

表 6.1-1 國際間低放處置設施安全評估項目(續)

國家/處置場名稱 (計畫儲存容量, m ³)	安全評估項目 (Safety assessments)	備註
<p>西班牙/El Cabrilin (36,000)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 容許值：每年 1 毫西弗 ● 安全評估是考量經由地下水造成的放射性核種遷移、產生的氣體造成放射性核種擴散及侵入者的輻射劑量 	<ul style="list-style-type: none"> ● 以土壤與黏土層覆蓋掩埋，避免放射性廢棄物與生物圈接觸 ● 監管期不高過 300 年
<p>法國/L'Aube (1,000,000)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 容許值：每年 0.25 毫西佛 ● 監管結束後，不再依賴人為安全障礙 ● 考量水與空氣傳輸的影響 	<ul style="list-style-type: none"> ● 場址覆蓋黏土層，上方再予覆蓋植被，以避免受外部影響 ● 監管期不高過 300 年
<p>英國/LLWR (1,800,000)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 參考瑞典提出「安全事證(safety case)報告」，每年可容忍的風險機率為 10⁻⁶ ● 處置場未來的輻射影響，包括場址特性、廢棄物存量、廢棄物型態、設施設計、營運經費、安全評估、監測措施與品質保證等多項審查主題 	<ul style="list-style-type: none"> ● 頂蓋封閉工程，期間保持資料蒐集與安全管理，保障場址邊界不會造成周遭的汙染 ● 監管期至少 100 年

表 6.1-1 國際間低放處置設施安全評估項目(續)


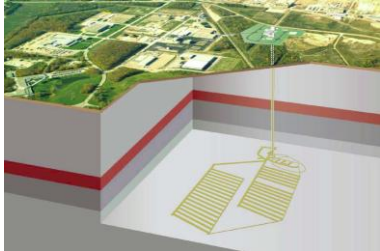
國家/處置場名稱 (計畫儲存容量, m ³)	安全評估項目 (Safety assessments)	備註
<p>日本/Rokkasho (600,000)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 容許值：每年 0.01 毫西弗 ● 第一階段：10-15 年，直到完成安置覆蓋土壤。[維持設施工程屏障的良好性] ● 第二階段：30 年，直到覆蓋土壤穩定。[屏障的安全保證] ● 第三階段：300 年，特殊活動的規定與禁止 ● 封閉後階段：超過 300 年，人類可以進入該區域活動 	<ul style="list-style-type: none"> ● 廢棄放置後的混凝土處置窖由膨潤土和砂的混合物包覆，最後覆蓋一層壓實土壤，其滲透率比周圍土壤低，地下水位將高於混凝土窖和膨潤土/砂層 ● 監管期至少 300 年
<p>加拿大/Bruce (200,000)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 容許值：每年 0.3 毫西弗 ● 考量在天然背景輻射下，每個人可接收各種可能暴露來源的輻射劑量總和 ● 評估涵蓋範圍超過 100 萬年，考量層面包括廢棄物和儲存容器的分解、氣體(氫和碳-14)的產生和落石、地震及冰川週期等各種影響因素 	<ul style="list-style-type: none"> ● 混凝土塊石將置於豎井的基底，豎井則會由各種材料填滿，包括膨潤土、砂、瀝青、混凝土及岩石等 ● 監管期至少 300 年

表6.1-2 我國低放射性廢棄物安全評估考慮的關鍵議題(張福麟等人, 2011)

關鍵議題	考量之優先順序		
	最優先	優先	次優先
議題一、存量估算時間 t_t	√		
議題二、初始活度與濃度		√	
議題三、半化期與衰變常數			√
議題四、衰變鏈特性(母核種及子核種)			√
議題五、廢棄物容器形狀與材質		√	
議題六、豎井與坑道回填材料特性		√	
議題七、開挖擾動帶特性			√
議題八、地質概念模型	√		
議題九、地下傳輸	√		
議題十、氣體產生、傳輸、及評估程式			√
議題十一、情節演化與建構		√	
議題十二、評估程式的適用、串聯與精進	√		
議題十三、參數不確定性與變異性		√	

6.2 處置坑道封閉後之檢監測項目與對策

6.2.1 處置坑道封閉後之檢監測項目

針對地質處置設施(geological disposal facility)，國際原子能總署(IAEA, 2014)在地質處置場址安全導則(Specific Safety Guide No. SSG-31)有關處置設施監測與監管(Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities)專書中，建議了地質處置設施在運轉前、運轉中與封閉階段之監測參數，如表6.1-2所示，其主要項目包括：

- (1) 基準值(初始值)的建立
- (2) 基準值的持續監測
- (3) 廢棄物封裝的完整性
- (4) 處置設施結構與工程屏障
- (5) 處置設施產生的擾動(工程興建、廢棄物置放及工程屏障)
- (6) 放射性核種釋放的監測
- (7) 環境背景資訊的發展

雖然其中多數建議項目屬高放射性廢棄物深層處置之監測參數，但仍可做為我國未來發展低放射性廢棄物處置場在封閉後監測項目之參酌。

表6.2-1 國際原子能總署針對地質處置設施在各階段的監測參數建議(IAEA, 2014)

監測參數/過程	運轉前階段 (選址、興建)	運轉階段 (含封閉)	封閉後階段
1.基準值(初始值)			
1-1 母岩與地層的地下水流域			
— 地下水壓分布			
— 水位梯度			
— 流向			
— 滲透性			
— 補注、排放的位置			
1-2 地下水的地質化學特性			
— 氧化還原反應	✓		
— 含鹽量	✓		
— 主要的微量元素濃度	✓		
— 天然放射核種成分/背景活性	✓		
1-3 構成部分處置設施的母岩礦物組成	✓		
1-4 影響處置設施結構穩定性的母岩地質化學特性	✓		
1-5 構成部分處置設施的滯留(retention)和母岩的水力特性	✓		
1-6 構成部分處置設施的母岩不連續面(包含破裂)特性	✓		
1-7 地下水、地表水、空氣、土壤、沉積物、動物和植物生活的背景放射核種等級	✓		
1-8 地質圈和大氣圈的環境物理、化學變化	✓		
1-9 氣象和氣候的條件	✓		
1-10 地表水系統的水文學，包括排水型態、滲透率	✓		
1-11 自然棲息地的生態學	✓	✓	
1-12 處置設施的力學性質		✓	
1-13 工程屏障的力學性質		✓	
1-14 工程屏障的滯留和水力特性		✓	

表 6.1-2 國際原子能總署針對地質處置設施在各階段的監測參數建議(IAEA, 2014)(續)

監測參數/過程	運轉前階段 (選址、興建)	運轉階段 (含封閉)	封閉後階段
2.基準值的持續監測		√	√
3.廢棄物封裝的完整性			
3-1 可直接量測參數			
— 腐蝕		√	(√)
— 應變			
— 廢棄物封裝的壓力(黏土所受的膨脹壓力)			
3-2 環境參數			
— 溫度			
— 濕度		√	(√)
— 再飽和度			
— 廢棄物產生的氣體特性			
4. 處置設施結構與工程屏障			
4-1 處置設施結構與工程屏障的結構穩定性			
— 力學性質			
— 應力			
— 應變			
— 傳統方式觀察地下工程相關設施		√	(√)
● 岩石應力			
● 岩石支撐的變形和載重			
● 牆和內襯的變形			
● 破裂			
4-2 工程屏障的行為(背填和密封)			
— 再飽和率			
— 以下各方面的變化			
● 水力性質		√	(√)
● 力學性質(包含膨脹)			
● 化學性質			
● 熱力性質			
4-3 避免水進入、滲透處置設施的保護措施		√	(√)

表 6.1-2 國際原子能總署針對地質處置設施在各階段的監測參數建議(IAEA, 2014)(續)

監測參數/過程	運轉前階段 (選址、興建)	運轉階段 (含封閉)	封閉後階段
5. 處置設施產生的擾動(工程興建、廢棄物放置及工程屏障)			
5-1 母岩的力學擾動			
— 應力場	√	√	(√)
— 變形			
— 破裂			
5-2 地質化學擾動			
— 土壤組成(水和礦物質)			
— pH值	√	√	(√)
— 氧化還原反應			
— 滯留特性			
— 生物改變			
5-3 水力擾動			
— 滲透性	√	√	(√)
— 水壓			
— 飽和度			
5-4 熱力擾動			
— 溫度分布		√	(√)
— 熱力傳導			

表 6.1-2 國際原子能總署針對地質處置設施在各階段的監測參數建議(IAEA, 2014)(續)

監測參數/過程	運轉前階段 (選址、興建)	運轉階段 (含封閉)	封閉後階段
6. 放射性核種釋放的監測			
6-1 淋溶液等級(leachate level)		√	(√)
6-2 地下水濃度活性		√	√
6-3 浸汗帶的延伸		√	√
6-4 浸汗帶的水位梯度、流速、流向		√	√
6-5 地下水位		√	√
6-6 含水層的補充與釋放		√	√
6-7 水的化學組成		√	√
6-8 地層的變化			
6-9 力學性質			
— 應力		√	√
— 應變			
— 破裂			
6-10 水力特性			
— 地下水壓			√
6-11 化學特性			
— 溶解化學性質			
— 礦物性質		√	√
6-12 熱力性質			
— 溫度		√	√
7. 環境背景資訊的發展			
氣象學	√	√	√
水力學，包括排水、用水效率與水質	√	√	√
不同環境區隔的放射性濃度及其他污染， 包括生物相、沉澱物跟水	√	√	√
當地生態	√	√	√
地形學過程，如剝蝕作用、當地侵蝕跟演 化	√	√	√
地殼活性，如垂直、水平的移動率、地震 事件跟地熱流	√	√	√
環境區域的土地使用	√	√	√

(√) 自運轉階段延續至封閉後階段，因部分參數對長期穩定性不具影響，故可調整減少監測工作之項目
 (Parameters measured during the operational period may continue to be monitored during the post-closure period
 but to a lesser extent, as long as it will not affect long term safety. This is denoted by (√).)

6.2.2 低放處置坑道封閉後之監測對策

綜整前述各節有關處置坑道封閉後之監測目標、我國與國際間低放處置設施之安全評估項目比較，以及國際原子能總署建議的地質處置設施在不同階段之監測參數，本文提出下列之研析對策：

- (1) 為提供低放處置設施在各階段監測值之比對標準，須於運轉前的選址與興建階段建立相關的量測基準值，例如地下水、地表水、空氣、土壤、沉積物、動物和植物的背景放射核種等級。
- (2) 封閉後的監測，在於確認多重障壁系統能有效阻絕放射性核種透過空氣與地下水傳遞至生物圈等問題，故針對空氣與地下水傳輸路徑的持續性監測為封閉後之重點。
- (3) 監測的結果，除了驗證多重障壁的阻絕效果，同時亦提供主管機關決定「主動監管」停止、「被動監管」開始的時間參考。
- (4) 根據我國低放射性廢棄物安全評估考慮的關鍵議題，有關開挖擾動帶、地質概念模型與地下傳輸等對地下水傳輸路徑之影響，本文建議應特別考量。
- (5) 監測技術與方式應保有彈性，以因應科技發展而提高監測技術的靈敏度、效率與可靠度。

第七章、低放審查導則(第0版)與處置坑道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。

7.1 低放處置審查導則(第0版)與處置坑道長期穩定及監測方法有關之章節研析

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，目前所列之章節，並未述及與處置坑道長期穩定及檢監測有關之條文。基於坑道處置方式可能為我國未來低放射性廢棄物處置方式之一，同時考量我國地質條件不若國外處置場之場址所具備良好天然屏障優勢，實有必要輔以相關的處置坑道檢監測作法以確保坑道結構的長期穩定要求。經檢視目前的「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第0版)，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」、「第六章 處置設施之運轉」與「第七章 處置設施之安全評估」，茲將上述章節標題及與處置坑道檢監測有關之導則修訂方向建議整理如下列幾點：

(1) 場址特性描述

章節標題與內容：

原章節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：

根據第三章「處置坑道運轉期間襯砌異狀與關鍵肇因之判斷」與第四章「襯砌異狀關鍵肇因與因應的檢監測方法」，可知處置坑道長期穩定性與所處地質環境及開挖過程引致的圍岩擾動有關，坑道建造期間若能有充分的地質調查與試驗，所獲得的地工參數可作為建造期與後續運轉期間有關圍岩行為之評估與分析依據。

(2) 處置設施之設計

章節標題與內容：

原章節內容在於說明處置設施的建築、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：

根據5.1節有關處置設施在不同時期的監測，述及按照國際原子能總署(IAEA)之建議，並考量監測工作之完整性與延續性，應從處置設施生命週期之觀點提出監測計畫設計流程，並述明處置設施在設計、建造、封閉各時期的監測目的、監測項目、資料判讀與分析之執行單位。

(3) 處置設施之運轉

章節標題與內容：

原章節內容僅說明廢棄物接收、廢棄物處理與暫存及處置作業。

修(增)訂條文之參考依據與方向：

根據2.4節整理的SFR運轉階段的檢測與監測經驗，SFR的檢測作業依規模區分為每個月實施一次的「內部檢核」、1年實施一次的「年度檢測」，與5年實施一次的「大型檢測」，對岩體與噴凝土的穩定性，分別是規劃在每5年與每10年實施維護工作。

(4) 處置設施之安全評估

章節標題與內容：

原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包括地表排水與侵蝕防護、及邊坡穩定性。

修(增)訂條文之參考依據與方向：

根據本計畫前期研究成果(楊長義等與李宏輝，2014)，及4.5節綜整坑道結構出現異狀時的檢監測方法與肇因判斷，有關處置坑道結構長期穩定特性之影響項目，應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。

7.2 低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議

根據7.1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、處置設施之運轉、與處置設施之安全評估等四項因子，整理審查導則草案中有關處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之編修要點建議，如下表7.1-1所示。

表7.1-1 審查導則草案有關處置坑道結構長期穩定需求及監測方法之編修要點建議

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	處置坑道長期穩定性與所處地質環境及開挖過程引致的圍岩擾動有關，坑道建造期間若有充分的地質調查與試驗，所獲得的地工參數可作為建造期與後續運轉期間有關圍岩行為之評估與分析依據。	<p><u>提供要項部分</u>：</p> <p>場址地區土壤岩石的工程地質與大地工程特性，特別是岩盤不連續面調查成果；若採坑道處置，需另提供坑道開挖所引致圍岩擾動範圍與圍岩大地工程特性變化之評估，及岩體評分之建議。</p> <p><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？調查成果是否足以描述場址水文地質特性並足以合理建構3.6節所述之水文地質概念模式？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>
處置設施設計	監測工作係針對工程環境或是放射性參數所進行之持續或周期性的觀察或量測，有助於評估處置設施各組成部分的運轉情況，及處置場址對環境的影響，並作為執行後續各階段工作之決策參考。	<p><u>提供要項部分</u>：</p> <p>從處置設施生命週期觀點提出監測計畫，並說明處置設施在設計、建造與封閉等各時期的監測目的、監測項目、資料判讀與分析執行單位。</p> <p><u>審查作業部分</u>：</p> <p>所提出的監測目的是否具體反映處置設施在設計、建造與封閉等各時期的工作需求？監測項目是否合理？監測資料之蒐集與判讀如何執行？</p>
處置設施	參考SFR在運轉階段的檢測經驗，及一般坑道之管理維護作業流程，建議增列處置坑道運轉期間之管理與維護，以確保岩石的變	<p><u>提供要項部分</u>：</p> <p>說明處置設施在運轉期間，針對岩體穩定性、坑道支撐結構與地下水入滲狀況所實施的檢測項目、檢測方法與頻率、檢測執行單位與組</p>

<p>之 運 轉</p>	<p>形、地下水的入滲與岩體品質暨支撐狀況均屬正常。</p>	<p>成人員。 <u>審查作業部分：</u> 檢測項目是否足以反映岩體穩定性、坑道支撐結構與地下水入滲之實際狀況？檢測方法是否具體可行？檢測頻率是否合適？檢測執行單位與組人成人員是否具備執行檢測工作與數據判讀之能力。</p>
<p>處 置 設 施 之 安 全 評 估</p>	<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。 <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>

第八章、結論與建議

本計畫透過國外低放處置坑道的檢監測規劃經驗與案例蒐集，與一般坑道之檢監測技術與方法研析，完成了：(1)瞭解運轉期間有關處置坑道結構穩定的檢監測作法，與進入封閉階段前所進行的安全評估項目；(2)綜整國內外坑道有關襯砌影像掃描、異狀判釋與襯砌表面裂縫型態等相關研究與技術文獻；(3)整合國外低放處置坑道的檢監測規劃與經驗，及國內本土地質條件下的坑道襯砌裂縫型態及關鍵肇因，提供更多的地質、土工參數，供處置坑道封閉前狀態評估及處置坑道封閉後之監測策略研析。本計畫依約所完成之各項工作成果，綜整於8.1節；另就未來待研究與精進之項目則建議於8.2節。

8.1 結論

(1) 處置坑道運轉期間襯砌異狀關鍵肇因判斷

彙整了國內外坑道的襯砌異狀，及營運中坑道變形分析方法、機制與特性，藉以研判坑道異狀的肇因。其中，在國內外坑道的襯砌異狀差異部分，國內隧道發生裂縫與滲漏水的比例分別為 92% 與 72%，較高於國外的 79% 與 23%。國內發生較高比例滲漏水的原因，可能是早期國內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、或岩體破裂其裂隙聯通程度高於國外所致。此外，在襯砌異狀關鍵肇因判斷部分，未來可考量處置坑道的實際深度及地質條件，先行確認可能的肇因，或參考瑞典SFR的做法，確實掌握地質變形帶的空間分佈，輔以工程手段予以強化並持續監測等。

(2) 襯砌異狀關鍵肇因與因應的檢監測方法

彙整國內外既有坑道的檢測與監測技術，提供未來處置坑道在運轉期間，襯砌結構出現異狀時的檢監測方法與肇因判斷參考。針對現行一般隧道檢監測技術的應用，因檢監測種類與目的各有不同，未來在應用上應考量施作的難易度、成本與環境配合條件，選擇適當的檢測技術。此外，針對處置坑道可能因為開挖擾動、環境因素及非力學因素所引起的襯砌或其他坑道結構之異狀，本計畫前期研究(楊長義與李宏輝，2014)已根據處置坑道結構長期穩定之影響因素，及對應的襯砌異狀與檢監測項目統整於表4.5-1，未來若先確定處置坑道所處的深度、位置或掌握地質變形帶的空間分佈，除可協助確認襯砌異狀主要肇因研判外，亦可作為我國低放處置坑道結構檢監測項目之選定參考。

(3) 處置坑道運轉期間(封閉前)之監測、檢測與評估項目研析

由瑞典SFR在建造期間的岩石力學之工程經驗，其對經過地質變形帶的坑道支撐仍僅採傳統的隧道工程支撐技術克服(岩栓、點焊鋼絲網與噴凝土等配合施作)，以至於後續運轉期間的監測工作，主要係針對地質變形帶與筒倉的(1)岩體變形特性、(2)岩體品質暨支撐狀況、與(3)地下水入滲採週期性的檢監測作業。

SFR在運轉期間的檢測控制行動，依規模區分為(1)內部檢核、(2)年度岩石檢查、(3)測試與調查、(4)維護、與(5)大型檢測等五類，其負責單位包括SFR組織、岩石檢測團隊與獨立的檢測團隊；此外，依檢測性質而有不同的檢測週期與施測團隊，且針對岩體的穩定性與支撐系統規範了維護週期，比較一般隧道在運轉期間的安檢管理作法，二者在檢測內容、施測週期與施測團隊之作法與經驗，可供作我國未來發展低放處置坑道有關檢監測相關審查技術之參考。

在長期安全評估項目部分，包括了(1)廢棄物形式、(2)廢棄物包件方式、(3)包圍廢料包件的灌漿、(4)混凝土結構、(5)噴凝土、(6)膨潤土與砂之混合物/膨潤土、(7)處置窖的回填材料(碎石)、(8)封塞及其他封閉的元件(調查鑽孔)等。其中，與處置坑道結構有關者，包括了混凝土結構與噴凝土等二項，其在運轉期間之安全評估項目均包括了(a)力學穩定性、(b)吸附效果、與(c)有利的化學性質等，在混凝土結構項則須額外考量了最小平流傳輸之能力。

(4) 處置坑道封閉後之監測對策研析

綜整前述各節有關處置坑道封閉後之監測目標、我國與國際間低放處置設施之安全評估項目比較、及國際原子能總署建議的地質處置設施在不同階段之監測參數，提出下列之研析對策：(1)為能提供低放處置設施在各階段監測值之比對標準，須於運轉前的選址與興建階段建立相關的量測基準值；(2)封閉後的監測，在於確保多重障壁系統能有效阻絕放射性核種透過空氣與地下水傳遞至生物圈，故針對空氣與地下水傳輸路徑的持續性監測為本階段之重點；(3)監測的結果，除了可驗證多重障壁的阻絕效果，同時亦可提供主管機關決定「主動監管」停止、「被動監管」開始的時間、(4)根據我國低放射性廢棄物安全評估考慮的關鍵議題，有關開挖擾動帶、地質概念模型與地下傳輸等對於地下水傳輸路徑之影響建議應特別考量；(5)監測技術與方式應保有彈性，以因應科技發展而提高監測技術的靈敏度、效率與提升可靠度。

(5) 審查導則與處置坑道相關章節條文內容修訂建議

本研究研析目前的「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第0版)，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」、「第六章 處置設施之運轉」與「第七章 處置設施之安全評估」，本文分別針對上述四章之原章節內容進行研析，並提出修訂條文之參考依據與修訂方向，經統整後完成增列審查導則草案有關處置坑道結構長期穩定需求及監測方法之編修要點，建議如表7.1-1所列。

8.2 建議

本研究雖已蒐整國外低放處置坑道之經驗，及一般坑道常見的襯砌異狀、肇因與因應的檢監測方法及技術；並在處置坑道結構長期穩定需求之前提下，研析處置坑道封閉

前之檢測與評估項目、與處置坑道封閉後之監測對策。未來，針對處置坑道在封閉前的評估與處置設施長期穩定的要求標準等主題下，仍須持續且廣泛蒐集國際案例與經驗；此外，對於近岸與離島之坑道式處置設施封閉前與其長期穩定之影響因素，亦屬未來我國需進一步探討之關鍵課題。

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] Hökmark H, 1993. Numerical analysis of time-dependent deformations in the rock surrounding the SFR repository. Clay Technology AB, Lund, Internal report.
- [7] Holmén J G, Stigsson M, 2001. Modelling of Future Hydrogeological Conditions at SFR.
- [8] IAEA. 2001. Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste. IAEA-TECDOC-1260.
- [9] IAEA, 2014, Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, Specific Safety Guide No. SSG-31, Vienna.
- [10] Kasa, S. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2009 – Foreign materials. Posiva Working Report 2010-46.
- [11] Lahti, M. (ed.) and Siren, T. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2010 – Rock Mechanics. Posiva Working Report 2011-47.
- [12] 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.
- [13] MoDeRn. 2013. State of Art Report on Monitoring Technology DELIVERABLE. MODERN DELIVERABLE (D-N:2.2.2).
- [14] NRC. 1991, Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev. 2, 1991)

-
- [15] 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)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Posiva. 2002. The observational method applied to engineering and construction of the access to the ONKALO facility. Posiva Report 2002-48.
- [19] Posiva. 2003. Programme of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of the ONKALO. Posiva Report 2003-05.
- [20] Posiva. 2012. Monitoring at Olkiluoto – a Programme for the Period Before Repository Operation. Posiva Report 2012-01.
- [21] Posiva. 2013. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2012, Rock Mechanics. Posiva Report 2013-47.
- [22] RWMC. 2005. Monitoring of Geological Disposal – Current Status and Technical Possibilities. RWMC Technical Report RWMC-TRE-04004.
- [23] 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.
- [24] SKB, 2003, R-03-30: Design, construction and performance of the clay-based isolation of the SFR silo.
- [25] SKB, 2004, R-04-15: Preliminary site description Forsmark area – version 1.1.
- [26] SKB, 2007, R-07-10: Construction experiences from underground works at Forsmark Compilation Report.
- [27] SKB, 2008, R-08-130: Safety analysis SFR 1.
- [28] SKB, 2011a, R-11-16: International perspective on repositories for low level waste.
- [29] SKB, 2011b, R-10-49: Site investigation SFR Bedrock geology.
- [30] SKB, 2011c, R-11-16: International perspective on repositories for low level waste.
- [31] SKB, 2014a, TR-14-01: Safety analysis for SFR Long-term safety - Main report for the safety assessment SR-PSU.
- [32] SKB, 2014b, TR-14-02: Initial state report for the safety assessment SR-PSU.
- [33] SKB, 2014c, R-14-17: Site Engineering Report – SER – Projekt SFR utbyggnad.
- [34] Stille H, Fredriksson A, Widing E, Åhrling G, 1985. Bergmekaniska beräkningar.
-

- FEManalys av silo med anslutande tunnlar. Arbetsrapport SFR 85-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [35] MoDeRn, 2013, MODERN DELIVERABLE (D-1.2): MoDeRn Monitoring Reference Framework report.
- [36] Vaittinen, T., Ahokas, H., Klockars, J., Nummela, J., Pentti, E., Penttinen, T., Pöllänen, J., Karvonen, T., and Lindgren, S. 2012. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2010 – Hydrology. Posiva Working Report 2011-43.
- [37] 中國土木水利工程學會(1999), 隧道工程設計準則與解說, 科技圖書。
- [38] 行政院原子能委員會放射性物料管理局, 2009, 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(98FCMA001B), 台北。
- [39] 行政院原子能委員會放射性物料管理局, 2009, 低放射性廢棄物最終處置設施場址特性參數與設計建造管制技術之研究(98FCMA003), 台北。
- [40] 交通部(1997): 老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I), 黃燦輝、鄭富書等, 台灣台北。
- [41] 交通部(1998): 老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(II), 黃燦輝、鄭富書等, 台灣台北。
- [42] 交通部台灣鐵路管理局(2008), 南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告。
- [43] 王文禮、蘇灼謹 (1999), 「隧道監測與回饋」, 山岳隧道工程設計與實例手冊, 中華民國隧道協會系列叢書, 科技圖書。
- [44] 王文禮、王泰典、蘇灼謹、林峻弘、譚家瑞、黃燦輝(2000): 台灣中部山岳隧道之震害與修復, 地工技術, 81, 85-96。
- [45] 王泰典、黃燦輝、鄭富書、薛文城、傅子仁(2007): 台灣隧道襯砌異狀類別之探討, 隧道建設, 第27卷(增刊: 第六屆海峽兩岸隧道與地下工程學術及技術研討會論文集, 8月20~21日, 昆明), 87-92。
- [46] 王泰典(2008): 探討襯砌異狀之類別與診斷, 營建知訊, 304, 22-31。
- [47] 王泰典、董家鈞、顧承宇、李宏輝(2010): 低放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究, 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫(99FCMA002), 台北。
- [48] 王泰典、李宏輝(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(NL1010476), 桃園。
- [49] 田能全、莊文壽(2007): 候選替代場址初步長期功能評估, 低放射性廢棄物最終處置場可行性安全評估計畫期末報告。
- [50] 朱晃葵(2009): 大地材料依時變形對隧道收斂特性之影響, 國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [51] 何泰源、黃燦輝、鄭富書(1999): 隧道之維護管理方式—調查、安全評估及維修方

- 式之探討，財團法人台灣營建研究所，台灣台北。
- [52] 李佳翰、王泰典、秦德(2008)：鐵路隧道結構安全檢測之探討，2008 岩盤工程研討會論文集，10 月30-31 日，台北，579-588。
- [53] 李佳翰(2013)：山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究，國立台北科技大學工程科技研究所博士論文。
- [54] 李民政、張博翔、黃筱卿(2011)：雪山隧道營運中長期監測成果分析与評估，隧道建設，第31卷，增刊1，第87-95頁。
- [55] 林宏勳(2001)：木山層砂岩之潛變行為研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [56] 林正陽(2003)：全方位隧道監控系統，三聯技術，46，8-16。
- [57] 邱雅筑、陳正勳、王泰典、鄭富書、黃燦輝(2012)：襯砌剖面變形特徵曲線與微變形監測技術應用於營運中隧道荷載變化之評估，中國土木水利工程學刊，第24卷，第2期，第101-109頁。
- [58] 邱雅筑(2014)：營運中隧道變位模態解析與高精度監測技術之研究，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
- [59] 許金華 (2006) 「從岩石風化速率探討南橫山崩—以敏督莉颱風為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- [60] 黃燦輝、何泰源、張吉佐、姚錫齡(1999)：震後隧道結構快速診斷與補強手冊，財團法人台灣營建研究所，台灣台北。
- [61] 張福麟(2011)：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(100FCMA007)，台北。
- [62] 楊長義、李宏輝(2014)：處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局(103FCMA002)，台北。
- [63] 詹佩臻(2009)：海岸山脈邊坡穩定特性之探討—以水璉礫岩邊坡為例，國立台北科技大學資源工程研究所碩士論文。
- [64] 詹尚書、劉曉樺、王泰典、秦德、蕭富元(2012)：岩體依時變形特性之隧道變位計測結果案例探討，第十一屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集，11月1-2 日，台灣溪頭，A10-1~9。
- [65] 賴彥儒(2013)：場址變位跨尺度多時序量測整合技術-以隧道工程為例，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [66] 日本土木學會，トンネルの変状メカニズム，東京：日本土木學會，2003。
- [67] 日本鐵道綜合技術研究所，変状トンネル対策工設計マニュアル，東京：日本財團法人鐵道綜合技術研究所，1998。
- [68] 日本鐵道綜合技術研究所，鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル，東京：日本財團法人鐵道綜合技術研究所，2007。

- [69] 朝倉俊弘等(1998)，變狀隧道對策工設計導則(日文)，日本鐵道總合技術研究所。
- [70] 西村和夫等(2002)，山岳隧道襯砌的現狀與對策(日文)，日本土木學會
- [71] 朝倉俊弘等(2003)，隧道變狀機制(日文)，日本土木學會。

期末報告(初稿)審查意見與答覆說明

子計畫五：處置坑道結構長期穩定需求及 監測方法之研究		
項次	審查意見	委辦單位答覆說明
1	整體進度符合契約要求。	感謝審查委員意見。
2	本案相關引用文獻應列於參考文獻中，如隧道施工規範，並請提供電子檔資料。	已依委員意見修訂，並提供下列相關文獻資料電子檔與期末報告定稿時一併寄送： 1. 交通部(1997):老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I)，黃燦輝、鄭富書等，台灣台北。 2. 交通部(1998):老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(II)，黃燦輝、鄭富書等，台灣台北。 3. 交通部台灣鐵路管理局(2008)，南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告。 4. 山岳隧道工程設計與實例手冊，中華民國隧道協會系列叢書，科技圖書。
3	研究計畫流程圖(圖 1.6-1)中之工作要項應於報告中有相關內容說明，惟「國內隧道有關監測之既有規範」與「處置坑道檢監測計畫審查導則草案研析」部份，未見安排於報告章節內容，應檢討修正流程圖或報告章節架構。	已根據審查意見修訂流程圖(圖 1.6-1)。
4	第 18 頁“Forsmark1 號、2 號”，建議修正為“Forsmark1 號反應器、2 號反應器”。	已根據審查意見修訂。
5	引用相關文獻之圖表應註明出處來源。	已根據審查意見註明圖表出處。