



行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術  
建立之關鍵課題研析

子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗  
證方法研究

計畫編號：106FCMA011

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：張玉萍

受委託機關(構)：財團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月



低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術  
建立之關鍵課題研析

子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計  
驗證方法研究

受委託單位：財團法人中華民國大地工程學會

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：張玉璘

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 109 萬 5,600 元(子計畫二經費)

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)



## 摘要

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

為分析出坑道式處置設施設計審驗考量，本計畫以 SSR-5 處置安全概念之多重安全功能、圍阻功能、隔離功能、監測與控制功能為基礎，分析與彙整前述案例設計考量，研擬可適用於低放射性廢棄物坑道處置之 13 項「主要設計特徵」，作為處置設施設計審驗之主要項目。再以審查申請者設定之「設計準則」是否能適切反映「主要設計特徵」與「設計基準」之特徵，作為處置設計審查架構。進而研擬「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」第三章之精進建議。

# Abstract

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

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

# 目錄

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

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



## 表目錄

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

## 圖目錄

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

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

# 第一章 前言

## 1.1 計畫目的

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

「低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析」之執行方向針對處置坑道之場址特性、工程設計、長期穩定、生物圈劑量評估以及長期安全等，透過國際資訊研析、驗證方法研究、驗證評估研究、審查規範建立(修正)等四步驟推動，近程目標在於彙整國外放射性廢棄物坑道處置設施安全評估審查技術，研析國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與精進對策。長程目標可協助建立管制單位對於坑道處置安全審查及分析驗證之能力，以使國內處置管制技術能與國際接軌。此計畫為此四年期工作之第二年度，去年度低放計畫「低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之國際資訊研析」已針對場址特性、工程設計、安全評估等主要方向進行國際資訊研析，本年度計畫將根據去年研究之結果進一步提出審驗技術建立，分別依：(1)場址特性審驗技術建立；(2)工程設計審驗技術建立；(3)結構穩定性驗證方法；(4)長期安全分析審驗方法；(5)生物圈情節分析審查技術等 5 個主題進行研析。

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

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

## 1.2 工作項目

工作項目分別為：

- (1)國外低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法資訊蒐集與研析。
- (2)國際坑道處置放射性廢棄物分類特性與其工程障壁系統安全功能研析。
- (3)提出我國低放處置技術工程設計模式審驗方式。
- (4)「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」符合坑道處置概念精進建議。
- (5)成果報告撰寫。

### 1.3 工作進度

工作進度如表 1.3-1 所示。

表 1.3-1 工作進度表

工作項目	年月												備註
	106 1	106 2	106 3	106 4	106 5	106 6	106 7	106 8	106 9	106 10	106 11	106 12	
子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法之研究			※			※			※			※	
國外低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法資訊蒐集與研析													
國際坑道處置放射性廢棄物分類特性與其工程障壁系統安全功能研析													
研提我國低放處置技術工程設計模式審驗方式													
研提「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」之精進建議													
成果報告撰寫													
工作進度估計百分比 (累積數)	0 %	5 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	
預定查核點	第一季：應完成工項一 40% 研析內容。 第二季：應初步完成工項一，與工項二約 30% 研析內容，並提出期中報告 第三季：綜合分析工項一與工項二之研析內容，並就其成果初擬工項三與工項四之研究方向。 第四季：完成各工項要求與修訂建議，並完成撰寫研究成果報告。												
說明： 1. 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2. 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。 3. 每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。													

## 第二章 國外低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法

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

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

## 2.1 美國低放射性廢棄物處置法規蒐集與研析

### 2.1.1 美國處置安全管理概述

美國其低放射性廢棄物管理主要源於 1954 年頒布之原子能法(Atomic Energy Act of 1954)與低放射性廢棄物政策法修訂案(Low-Level Radioactive Waste Policy Amendments Act of 1985)，並由美國核能管制委員會 NRC(Nuclear Regulatory Commission)負責核能設施之運轉安全、申照許可的頒發與更新、核物料與放射性廢棄物安全管理等監督工作。10CFR61 法規(Licensing requirements for land disposal of radioactive waste)頒布於 1982 年，為美國低放射性廢棄物處置設施申照之重要法規。10CFR61 依其近地表處置設施概念，納入其 A 類、B 類與 C 類放射性廢棄物之處置管理。2009 年起，美國 NRC 考量耗乏鈾(depleted uranium)等長半化期廢棄物處置、風險告知與功能基準、以及過去執行經驗，開始推動大規模修法。惟迄今於 U.S. NRC 網站上公布之 2015 年 10CFR61 內容，仍與原版本條文內容相似。

至於美國之超 C 類廢棄物處置管理，依其 1985 年頒布之低放射性廢棄物政策法修訂案明定由聯邦政府負責執行超 C 類廢棄物處置工作，其後由聯邦政府指派其能源部 DOE(Department of Energy)負責推動。其處置設施之執照申請許可仍需通過美國核管會審核後頒發。美國能源部於 2016 年提出超 C 類放射性廢棄物最終處置環境衝擊影響評估報告，其中提出可能採用之 5 種處置型式，惟美國政府尚未決定其最終採行之型式。



## 2.1.2 NUREG-1200 之處置設計審查方式簡介

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

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

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

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

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

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

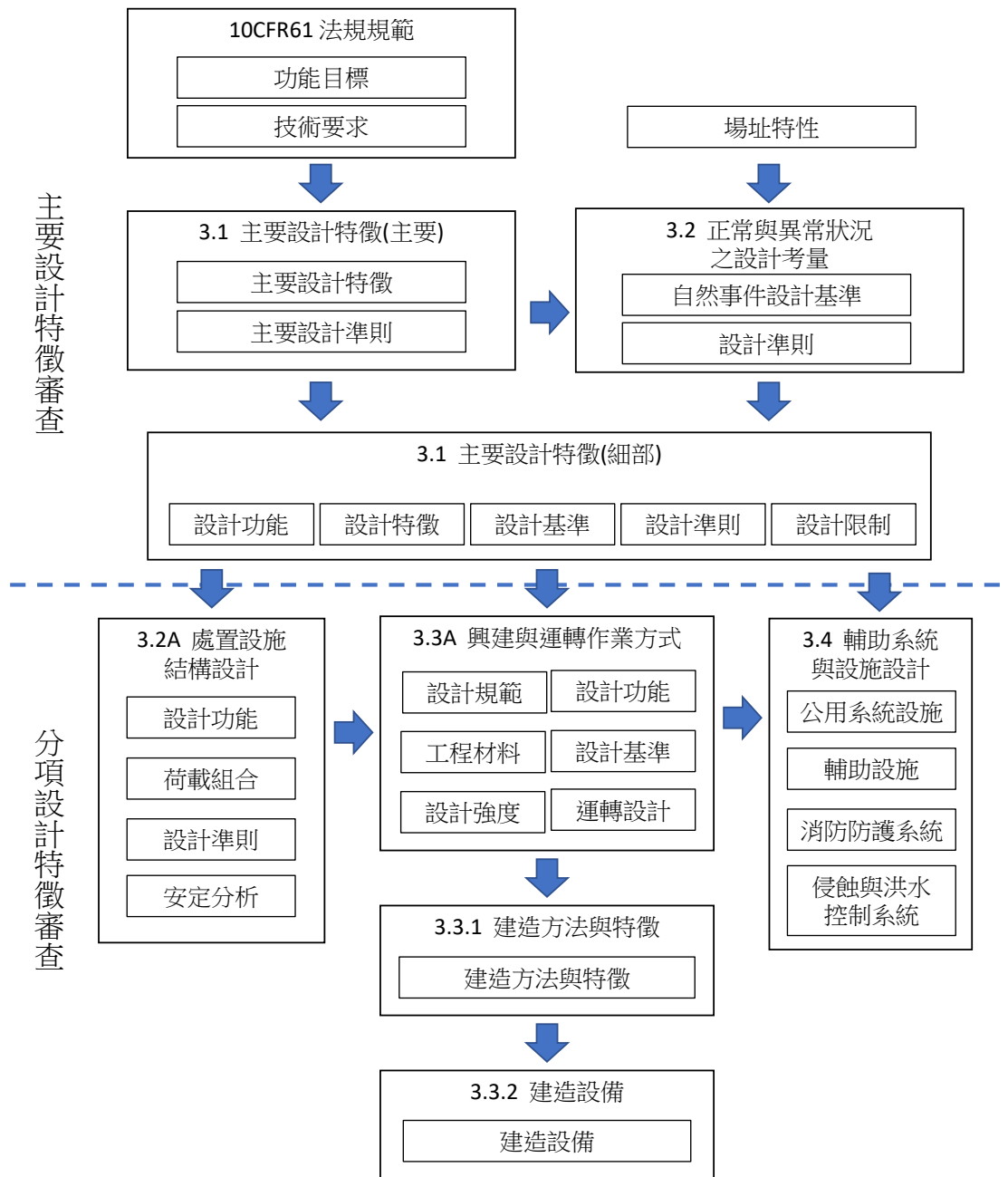
- (3)設計基準(Design Bases)：用於識別處置設施結構、系統或組件之具體功能，與設計控制參數依據之特定數值或數值範圍。
- (4)設計限制(Design Limit)：用於確保設計可符合主要設計特徵與設計基準之參數限值。
- (5)自然事件設計基準 (Design-Basis Natural Event)：設施設計時，會預期發生某些特定強度之自然事件，並評估這些自然事件對於設施造成之荷載或影響程度。依據自然事件訂定之荷載或影響程度，即稱為自然事件設計基準。所述自然事件可能包含地震、火山活動、颱風、洪水、海嘯等。設計時，通常會同時考量自然事件正常與異常發生之狀況，再根據其發生時期之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

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

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

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

彙整其處置設計審查架構如圖 2.1.2-1 所示。



備註：本計畫整理繪製。

圖 2.1.2-1 處置設計審查章節架構示意圖

### 2.1.3 「主要設計特徵」審查規範概述

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

#### (1) 審查範圍

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

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

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

10CFR61.51(a)主要規範近地表處置設施設計需符合：

1. 處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。

- 2.處置場設計必須能確保封閉後的穩定性，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。
- 3.適度改善或提升自然環境特徵，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。
- 4.近地表處置設施之覆蓋層設計須盡可能的降低入滲水量、引導地表水量或滲入水量遠離廢棄物、需可抵抗地表地質劣化過程與生物活動。
- 5.處置場地表特徵必須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護。
- 6.處置設施設計須在可行範圍內，儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸、處置期間的積水與廢棄物接觸、封閉後的滲水或積水與廢棄物接觸。

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

## (2)審查程序

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

## (3)接受準則

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

## 1.法規要求

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

### A.10CFR61.12 (b)~(e)要求：

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

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

(B).10CFR61.12(c)：需說明主要設計特徵與設計功能之關聯性。

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

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

### B.10CFR61.13(a)、(b)、(d)要求：

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

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

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

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

C.10CFR61.23(b)~(f)要求：

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

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

D.10CFR61.41~61.44 要求：

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

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

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

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

E.10CFR61.50 (7)與(8)要求：

10CFR61.50 為處置場址適宜性要求，主要規範處置場址之環境特徵。

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

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

F.10CFR61.51(a)之(1)~(6)要求：

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

(A).10CFR61.51(a)之(1)：處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。

(B).10CFR61.51(a)之(2)：處置場設計必須能確保封閉後的穩定性，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。

(C).10CFR61.51(a)之(3)：適度改善或提升自然環境特徵，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。

(D).10CFR61.51(a)之(4)：近地表處置設施之覆蓋層設計須盡可能的降低入滲水量、引導地表水量或滲入水量遠離廢棄物、需可抵抗地表地質劣化過程與生物活動。

(E).10CFR61.51(a)之(5)：處置場地表特徵必須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護。



(F).10CFR61.51(a)之(6)：處置設施設計須在可行範圍內，儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸、處置期間的積水與廢棄物接觸、封閉後的滲水或積水與廢棄物接觸。

G.10CFR61.52(a)之(1)~(10)要求：

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2.法規評估準則

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

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

## 2.1.4 「正常與異常狀況之設計考量」審查規範概述

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

### (1) 審查範圍

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

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

### (2) 審查程序

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

#### 1. 程序審查

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

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

## 2. 實質審查

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

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

### A. 穩定性考量

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

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

### B. 輻射曝露

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

## (3) 接受準則

### 1. 法規要求

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

A.10CFR61.12 (b)~(g)要求：

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

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

(B).10CFR61.12(c)：需說明主要設計特徵與設計功能之關聯性。

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

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

(E).10CFR61.12(f)：需說明處置場建造與運轉，至少需包含：處置單元建造方法、廢棄物堆置、廢棄物分區處置程序與區域、無意闖入者障壁類型、處置場交通與排水系統、調查管制計畫、廢棄物貯存方法與區域、控制地表水和地下水接觸廢棄物的方法。對於可能會影響功能目標符合性之作業，如處理與處置含有螯合劑或其他非放射性物質亦須加以說明

(F).10CFR61.12(g)：需說明處置場封閉計畫，需包括利於處置場封閉以及降低主動維護需求之設計特徵說明。

B.10CFR 61.13(a) ~ (d) 要求：

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

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

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

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

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

#### C.10CFR61.23(a) ~ (f) 要求：

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

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

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

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

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

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

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

D.10CFR61.40 ~ 10CFR 61.44 要求：

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

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

E.10CFR 61.51(a)要求：

10CFR61.51(a)為近地表處置場設計要求，摘述如下：

- (A).10CFR61.51(a)之(1)：處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。
- (B).10CFR61.51(a)之(2)：處置場設計必須能確保封閉後的穩定性，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。
- (C).10CFR61.51(a)之(3)：適度改善或提升自然環境特徵，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。
- (D).10CFR61.51(a)之(4)：近地表處置設施之覆蓋層設計須盡可能的降低入滲水量、引導地表水量或滲入水量遠離廢棄物、需可抵抗地表地質劣化過程與生物活動。

(E).10CFR61.51(a)之(5)：處置場地表特徵必須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護。

(F).10CFR61.51(a)之(6)：處置設施設計須在可行範圍內，儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸、處置期間的積水與廢棄物接觸、封閉後的滲水或積水與廢棄物接觸。

F.10CFR 61.52(a)要求：

10CFR61.52(a)為近地表處置場運轉與封閉要求，摘述如下：

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

## 2.法規評估準則

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

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

## 2.1.5 11 項設計功能之評估準則

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

### (1)降低處置單元水滲透

#### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

對主要設計特徵的描述至少須符合：1.10CFR61.51(a)(4)為盡可能的降低入滲水量、引導地表水量或滲入水量遠離廢棄物、需可抵抗地表地質劣化過程與生物活動而設計的覆蓋層。2.10 CFR61.51(a)(5)須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護之排水系統設計。

#### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

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

## (2)處置單元覆蓋層完整性

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於處置單元覆蓋層之主要設計特徵的描述至少須符合：1.10CFR61.51(a)之(1) 設計需朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。2.10CFR61.51(a)之(4) 近地表處置設施之覆蓋層設計須盡可能的降低入滲水量、引導地表水量或滲入水量遠離廢棄物、需可抵抗地表地質劣化過程與生物活動。

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

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

## (3)回填物、廢棄物及覆蓋物等構造物結構穩定

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

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

## 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

### (4)運轉期降低廢棄物與水接觸

#### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於運轉期降低廢棄物與水接觸之主要設計特徵描述，須符合10CFR61.51(a)之(6)須在可行範圍內，儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸、處置期間的積水與廢棄物接觸、封閉後的滲水或積水與廢棄物接觸。

#### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

### (5)運轉期及封閉期場區之排水功能

#### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於運轉期及封閉期場區之排水功能主要設計特徵描述，須符合：1.10CFR61.51(a)之(4)處置設施之覆蓋層設計須盡可能的降低入滲水量、引導地表水量

或滲入水量遠離廢棄物、需可抵抗地表地質劣化過程與生物活動。2.10CFR61.51(a)之(5)必須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護。

## 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

## (6)場址封閉與穩定性

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於場址封閉與穩定性之主要設計特徵描述，須符合：1.10CFR61.51(a)之(1)處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。2.10CFR61.51(a)之(2)設計必須能確保封閉後的穩定性，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。3.10CFR61.51(a)之(3)適度改善或提升自然環境特徵，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

## (7)減少長期維護需求

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

申請人對於減少長期維護需求之主要設計特徵描述，須符合：10CFR61.51(a)之(1)處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

## (8)具防止無意闖入處置場障壁

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

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

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

## (9)合理抑低職業曝露

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

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

### 2. 「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

## (10)合適的處置場監測規劃

### 1. 「主要設計特徵」之法規評估準則

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

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

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

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

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

## 2.「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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

## (11)提供適當監管與補救之緩衝區

### 1.「主要設計特徵」之法規評估準則

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

### 2.「正常與異常狀況之設計考量」之法規評估準則

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

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



## 2.1.6 處置概念之目標、功能、設計特徵與原則關聯性分析

### (1)處置概念與功能目標分析

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

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

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

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

## (2)處置概念與 IAEA 之安全功能關聯性分析

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

## (3)主要設計特徵功能要求、設計準則、設計基準等關聯性分析

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

表 2.1.6-1 主要設計特徵功能要求、設計準則、設計基準等關聯性分析表

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

主要設計特徵 功能要求	設計項目	主要設計準則	主要設計基準	設計要求(申請者提出)
4.運轉期降低廢棄物與水接觸	處置單元、覆蓋層、排水系統、暫貯區與臨時覆蓋物	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(6)須在可行範圍內，儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸、處置期間的積水與廢棄物接觸、封閉後的滲水或積水與廢棄物接觸。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>平均降雨量推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨</li> <li>地下水位</li> <li>場址環境滲水特性</li> <li>需考量運轉期間主動排水系統組件與封閉後被動排水系統組件意外失效事件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>處置單元設計滲水性要求(需小於覆蓋層)</li> <li>避免積水設計要求</li> <li>地下排水系統設計要求</li> <li>覆蓋層排水設計要求</li> <li>暫貯區之排水與臨時覆蓋物設計要求</li> </ul>
5.運轉期及封閉期場區之排水功能	覆蓋層、排水系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(4)處置設施之覆蓋層設計須盡可能的降低入滲水量、引導地表水量或滲入水量遠離廢棄物、需可抵抗地表地質劣化過程與生物活動。</li> <li>10CFR61.51(a)(5)必須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>平均降雨量推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨推估之入滲率</li> <li>最大可能降雨</li> <li>地下水位</li> <li>場址環境滲水特性</li> <li>需考量運轉期間主動排水系統組件與封閉後被動排水系統組件意外失效事件</li> <li>必要時考量上游潰壩或下游排水堵塞之意外狀況</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>覆蓋層排水設計要求</li> <li>場區排水設計要求</li> </ul>
6.場址封閉與穩定性	處置設施	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(1)處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。</li> <li>10CFR61.51(a)(2)設計必須能確保封閉後的穩定性，以符合處置功能目標要求(10CFR61 Subpart C)。</li> <li>10CFR61.51(a)(3)適度改善或提升自然環境特徵，以符合處置功能目標要求(10CFR61 Subpart C)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計載重與載重組合</li> <li>異常事件載重</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>主動維護要求</li> </ul>

主要設計特徵 功能要求	設計項目	主要設計準則	主要設計基準	設計要求(申請者提出)
7.減少長期維護需求	處置設施	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.51(a)(1)處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>異常自然事件設計基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料耐久性要求</li> <li>侵蝕保護設計要求</li> <li>排水系統設計要求</li> <li>監控系統設計要求</li> <li>啟動長期維護作業之要求</li> </ul>
8.無意闖入者之防護功能	無意闖入者障壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.42 處置設施之設計、運轉、與封閉，於處置場址撤除主動監管後，需保證對無意闖入處置場址、占用場址或接觸廢棄物之個人提供保護。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>無意闖入者事件設計基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>無意闖入者障壁設計要求</li> <li>材料耐久性要求</li> </ul>
9.合理抑低職業曝露	處置設施、運轉作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.12(k)需說明管制與監測放射性排放之輻射安全管制計畫，以確保符合10CFR20「輻射防護標準」對於職業輻射曝露與人員、車輛、設備、建築物與處置場的污染管制。</li> <li>10CFR61.43 處置設施運轉除放射性釋出應遵照 10CFR61.41 之外，需符合10CFR20「輻射防護標準」要求，並遵循合理抑低原則。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>輻射防護設計標準</li> <li>可能導致職業人員輻射曝露量提高之意外事件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>輻射屏蔽設計要求</li> <li>輻射防護計畫要求</li> </ul>
10.合適的處置場監測規劃	監測系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>10CFR61.12(k)說明管制與監測放射性排放之輻射安全管制計畫，以確保符合10CFR20「輻射防護標準」對於職業輻射曝露與人員、車輛、設備、建築物與處置場的污染管制。</li> <li>10CFR61.12(i)需說明處置場規劃接收、貯存與處置之放射性廢棄物種類、總量、分類與規格。</li> <li>10CFR61.53「環境監測」要求</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>異常事件設計基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境監測計畫要求</li> <li>監測系統與設備設計要求</li> <li>監測系統設備與組件之設計年限</li> <li>監測設備失效之處理要求</li> <li>異常事件設計基準對監測系統之影響評估</li> </ul>

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

## 2.2 瑞典低放射性廢棄物坑道處置設施案例蒐集與研析

### 2.2.1 瑞典之處置安全管制概述

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

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

#### (1) 對人類健康之安全防護要求

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

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

#### (2) 環境保護

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

## 2.2.2 SFR 處置設施與安全原則考量概述

瑞典中低放射性廢棄物處置場(SFR)位於 Forsmark 核電廠附近，離岸約 1 公里的波羅的海海床下，如圖 2.6.2-1 所示。SFR 處置場可分為兩部分，分別為 1988 年完成並開始營運的 SFR-1，包含 4 條處置坑道，以及 1 座 70 公尺高的混凝土筒倉。以及未來將擴充的 SFR-3，預計擴建新增 6 條處置坑道。

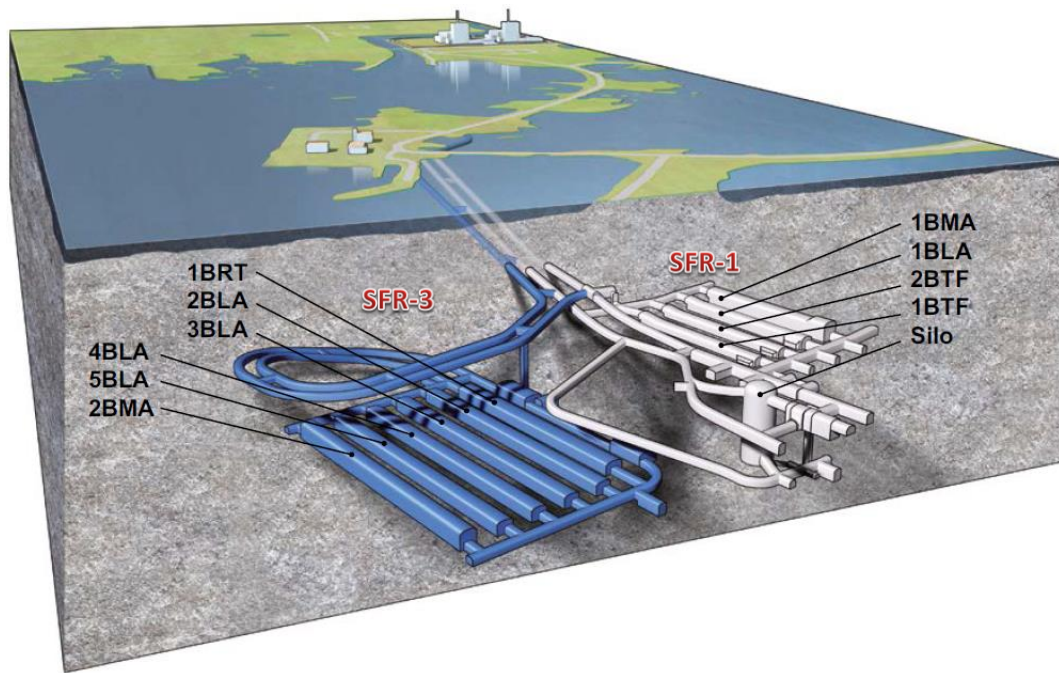


圖 2.6.2-1 SFR 處置場(SFR-1，白色部分)與擴建計畫(SFR-3，藍色部分)配置圖(SKB, 2014)

SFR-1 位於海床下約 60m 處，以結晶岩體作為天然屏障，設計處置容量為 63,000m<sup>3</sup>，主要處置電廠和其他核能設施產生的放射性廢棄物。1BLA 處置坑道用以處置低放射性廢棄物，1BTF 和 2BTF 處置坑道用以處置中放射性廢棄物和相對較低放射性的廢棄物，1BMA 處置坑道或筒倉則處置具有高活度的中放射性廢棄物。其中，放置於筒倉的廢棄物為處置場總活度之主要占比。

SFR-3 鄰近 SFR-1，位於海床下約 120 公尺處，設計處置容量為 108,000m<sup>3</sup>。主要處置電廠運轉廢棄物，以及電廠和其他核能設施的除役廢棄物。2~5BLA 處置坑道用以處置低放射性廢棄物，BRT 處置坑道用以處置沸水式反應爐壓力槽，2BMA 處置坑道則處置中放射性廢棄物。各處置坑道所處置的廢棄物數量與來源，如圖 2.6.2-2 所示。



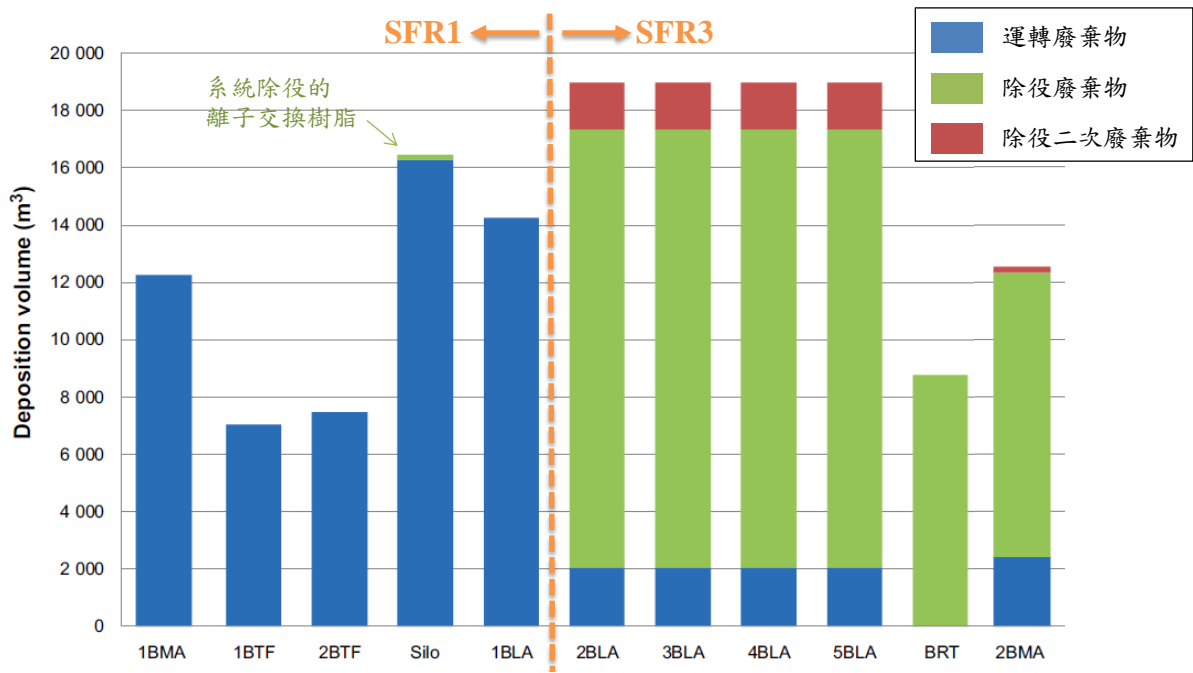


圖 2.6.2-2 各處置坑道之預估放射性廢棄物處置總量(SKB, 2014)

瑞典之低放處置設施其確保長期安全之安全原則為：1.限制處置場內長半化期核種活度，2.確保多重障壁系統之遲滯核種功能。依此安全原則建立其對應之安全功能要求，如表 2.6.2-1。

表 2.6.2-1 安全原則與其對應之安全功能(SKB, 2014)

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

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

### 2.2.3 確保多重障壁系統之遲滯核種功能

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

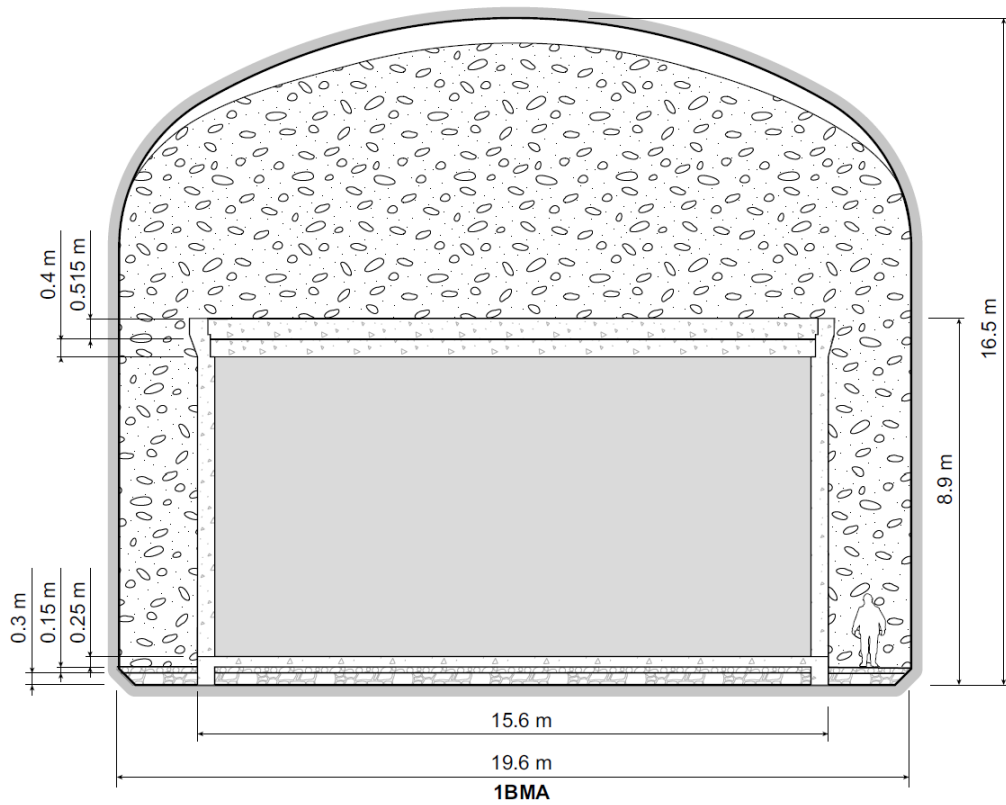
如表 2.6.2-1 所列，確保多重障壁系統之遲滯核種功能包含了：1.低流量、2.良好的遲滯功能、3.避免在處置場附近鑿井。除了避免在處置場附近鑿井之安全功能，屬處置管理手段外。其餘之低流量與良好的遲滯功能兩項安全功能，則屬於多重障壁系統設計考量。

#### (1)實現低流量安全功能

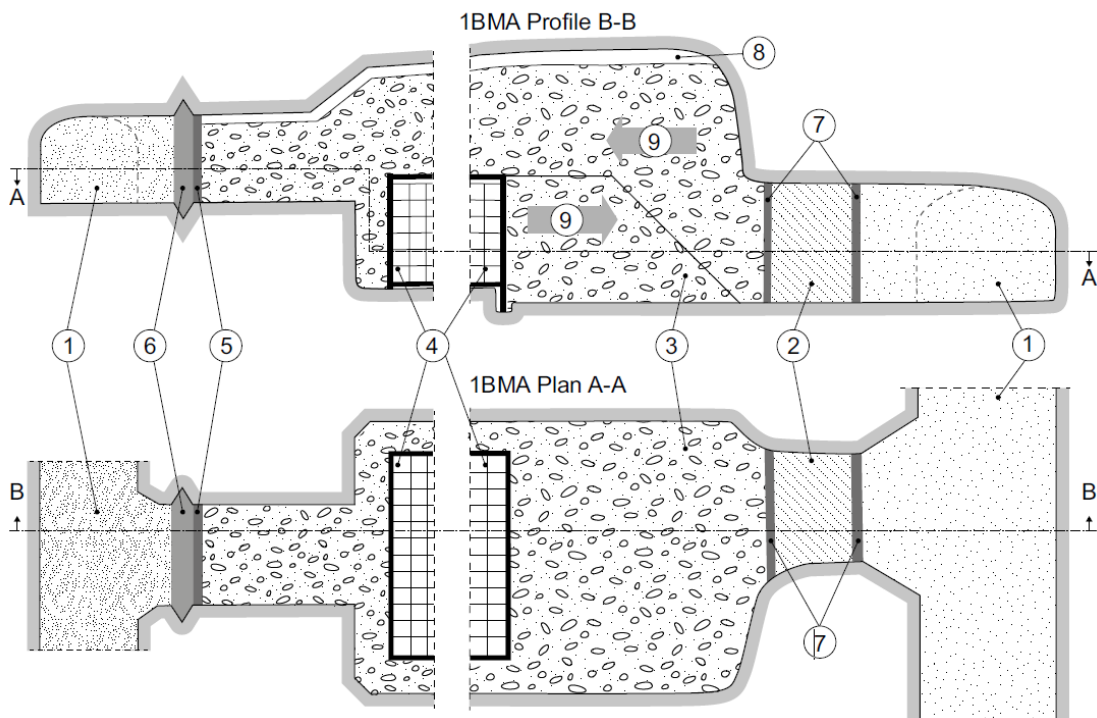
主要可將其區分為工程障壁系統與處置母岩環境之考量：

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

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



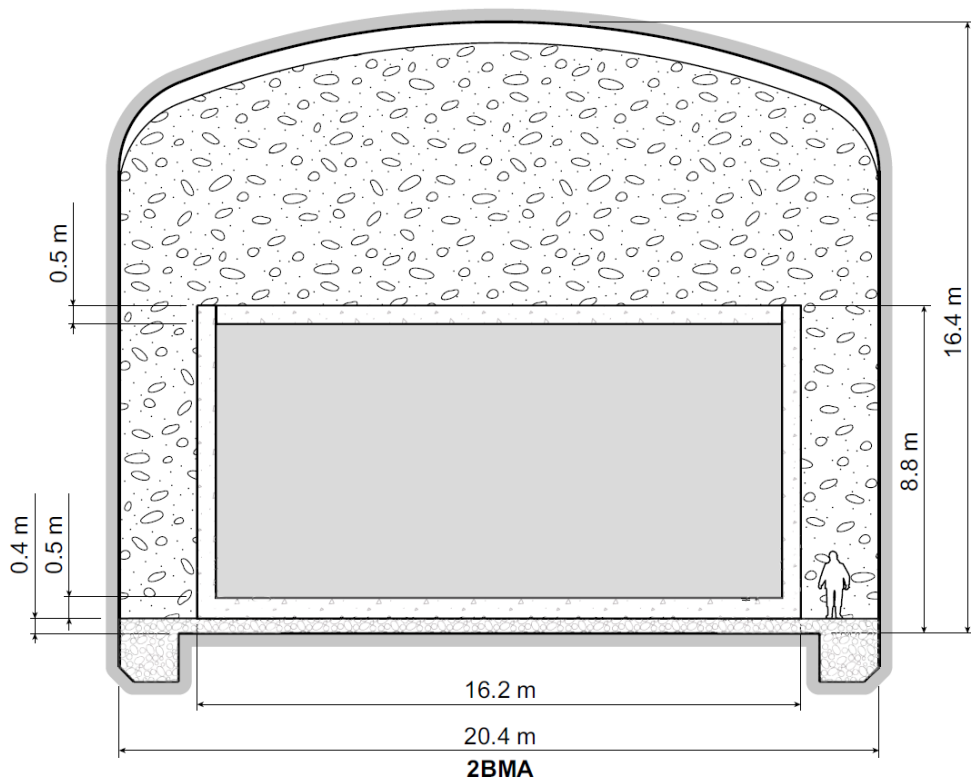
橫剖面



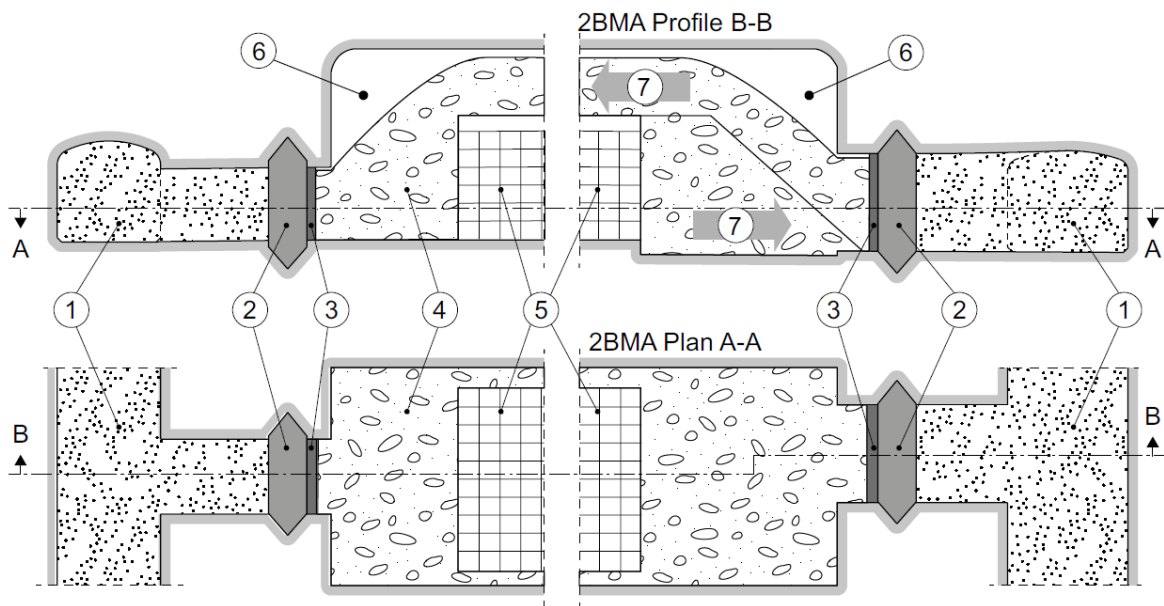
縱剖面

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

圖 2.6.3-1 1BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



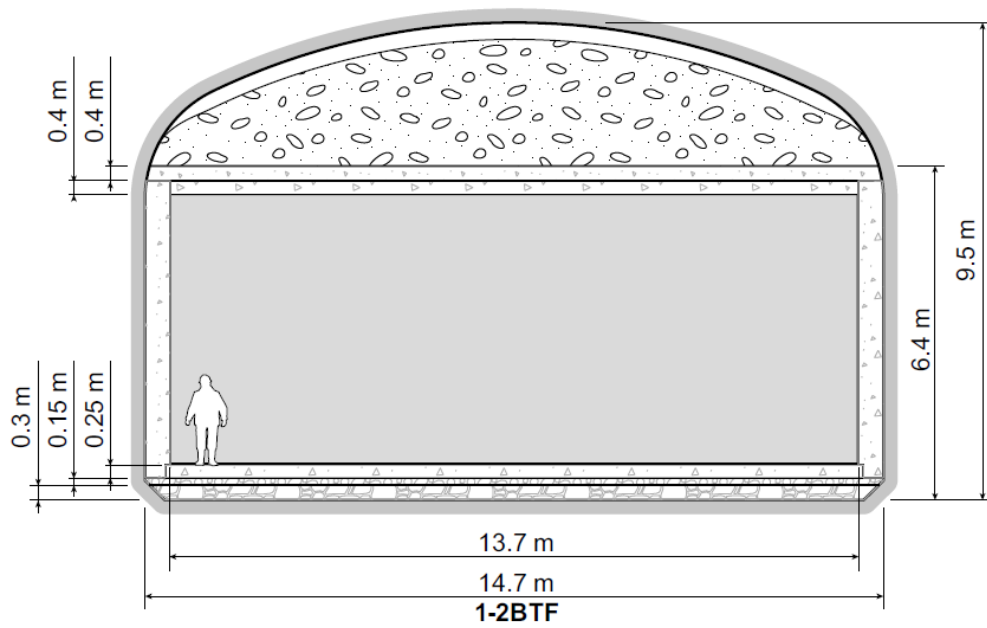
橫剖面



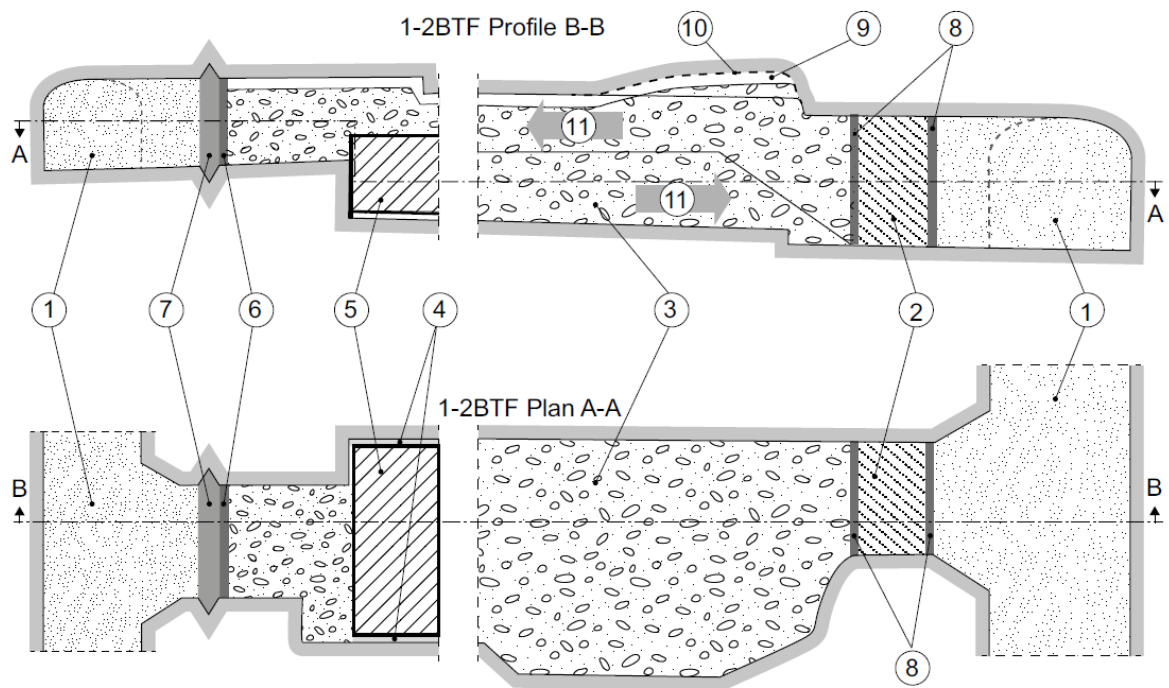
縱剖面

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

圖 2.6.3-2 2BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



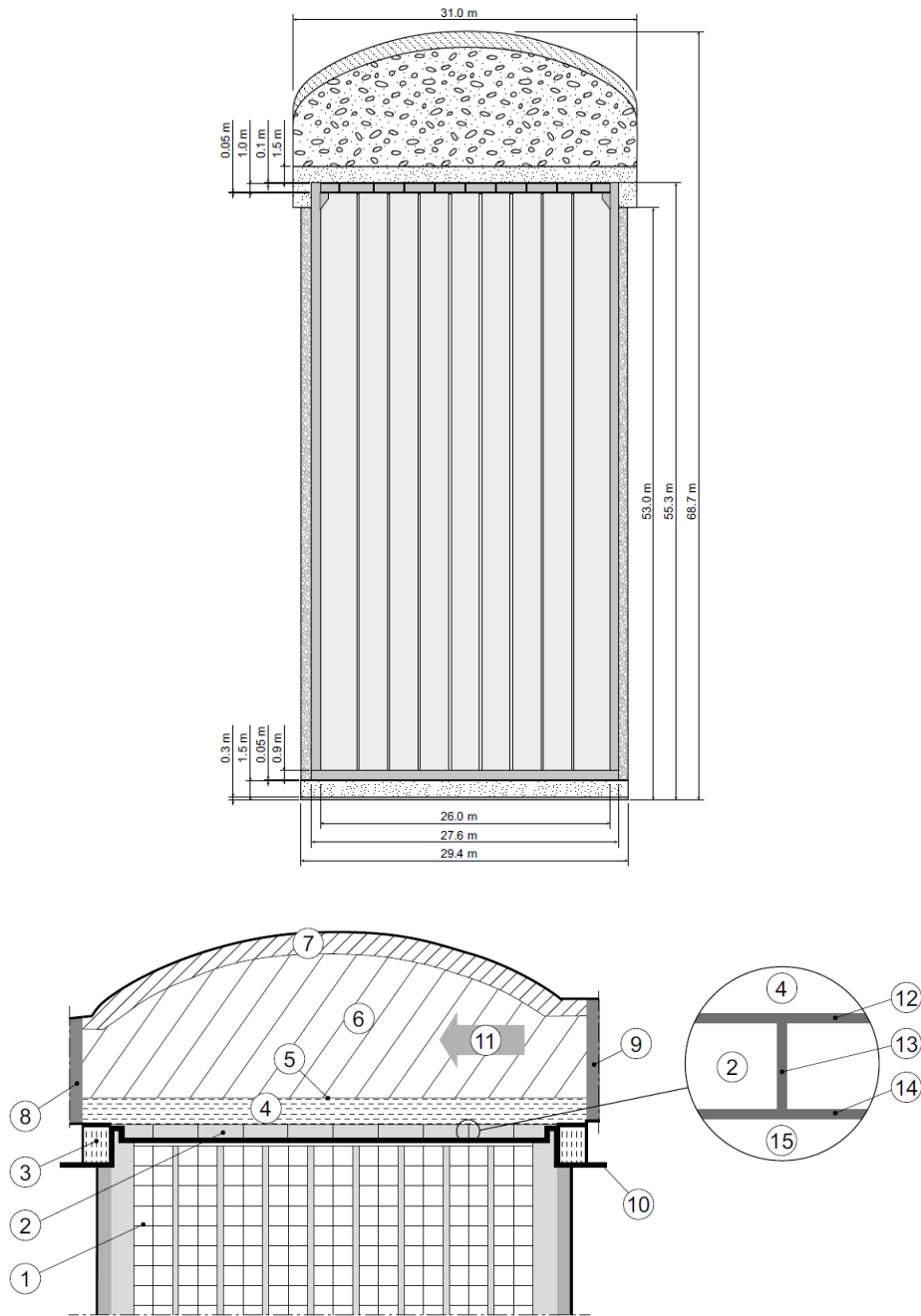
橫剖面



縱剖面

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

圖 2.6.3-3 1BTF 與 2BTF 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



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

圖 2.6.3-4 筒倉處置封閉設計示意圖(SKB, 2014)

## (2)實現良好的遲滯功能

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

### 1.限制平流傳輸

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

### 2.力學穩定性

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

### 3.限制溶解度

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

### 4.吸附能力

許多核種會被廢棄物包件內的固體材料吸附，其吸附能力取決於固體材料特性和孔隙水的化學特性。吸附能力將限制溶解於孔隙水中的核種濃度，溶解在孔隙水中的核種濃度較低，將有助於降低核種從廢棄物中釋出至環境的速度。原則上，不僅只有廢棄物體中的混凝土、水泥或瀝青可吸附核種，離子交換樹脂、灰燼、腐蝕產物以及廢棄物包件也可吸附核種。處置在筒倉、BMA 和 BTF 的廢棄物，其吸附特性取決於廢棄物的型式。但在安全分析中，瑞典只考慮廢棄物包件中水泥材料的吸附性。

吸附現象主要發生於固體表面。由於水泥的孔隙率相對較大，而水泥組成中有許多固相為非晶質故其比表面積大，此特性皆有利於吸附。只要水泥材料在化學上沒有明顯變化，如孔隙水的 pH 值高於 10.5，則有利於確保核種吸附。

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

故其設定「可吸附的表面積」作為吸附能力之安全功能指標。

## 5. 有利化學環境

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

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

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

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

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



## 2.3 日本低放射性廢棄物坑道處置設施規劃案例蒐集與研析

### 2.3.1 日本之處置安全管制概述

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

依日本第二種廢棄物處置事業有關核原料物質、核燃料物質及原子爐的規範法律(以下稱爐規法)，依其第 51 條之 2 規定將日本之放射性廢棄物處置事業區分為 3 類，其中相當於我國低放射性廢棄物處置之分類為「第二種廢棄物處置」。於同法第 51 條之 3 規定處置事業申請許可之基準為 1.申請者具有推動處置事業所需之足夠技術能力與財務基礎。2.放射性廢棄物處置設施或放射性廢棄物管理設施之位置、構造與設備，對於核子燃料或受核子燃料污染物可能導致災害之防護目標符合原子力規制委員會相關規範。

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

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

(1)基本情節：劑量限值為 10  $\mu$ Sv/yr。

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

(2)變異情節：劑量限值為 0.3 mSv/yr。

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

(3)人為或稀有事件情節：劑量限值定為 10~100 mSv/yr。

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

## 2.3.2 日本餘裕深度處置概念與基本考量

### (1)基本考量

依日本原子力委員會「超過現行政令劑量上限值的低放射性廢棄物處置基本考量方法」中，對於餘裕深度處置安全之基本考量如下：

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

### (2)規劃接受之廢棄物與盛裝容器

規劃處置之廢棄物如表 2.7.2-1。

表 2.7.2-1 餘裕深度處置的主要廢棄物種類

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

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

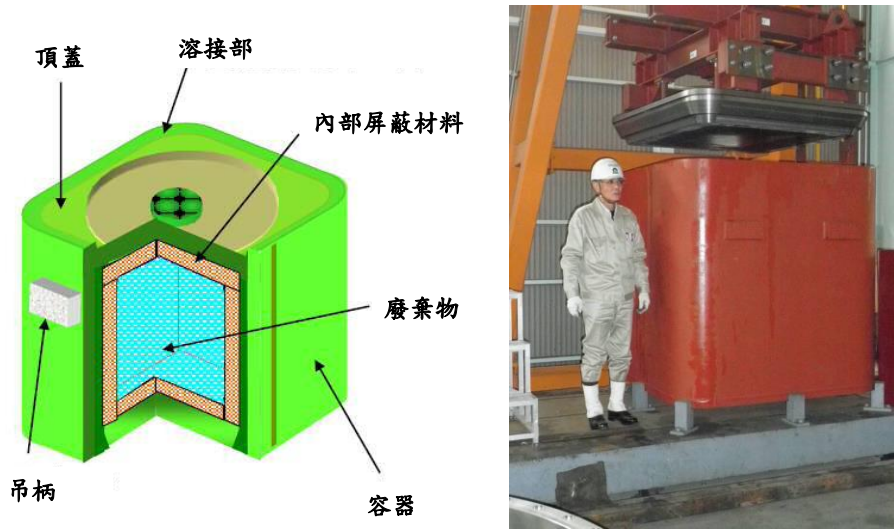


圖 2.7.2-1 餘裕深度處置盛裝容器概念示意圖(電氣事業聯合會，2011)

### (3)處置設施概念

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

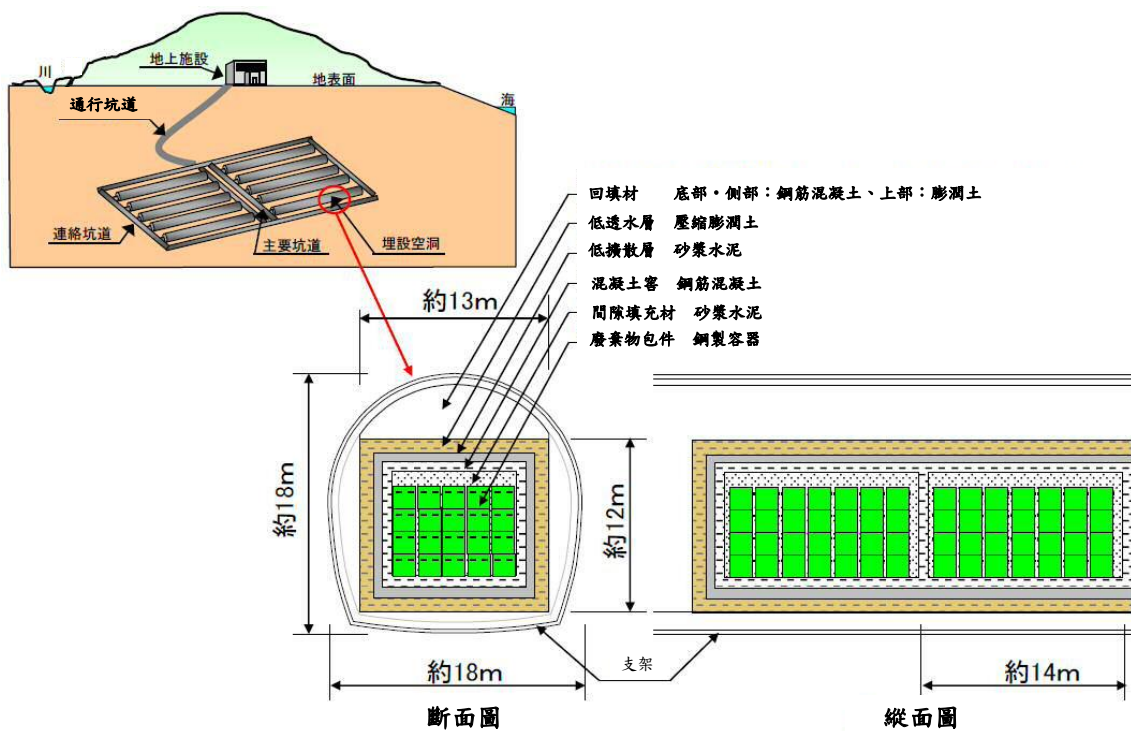


圖 2.7.2-2 餘裕深度處置設計概念示意圖

處置設施設計除了延續前述基本考量，另外增加考量如下：

- 1.選擇無天然資源的場所，且放射性核種抑制遷移機能高的地下數十公尺深之地層中，設置處置坑道。
- 2.於處置坑道中設置混凝土處置窖，用以定置廢棄物。
- 3.為了減少侵入至處置設施的地下水量，混凝土處置窖的周圍運用膨潤土設置低滲透層。
- 4.混凝土處置窖的內側或外側設置具抑制擴散效果的低擴散層水泥系材料。

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

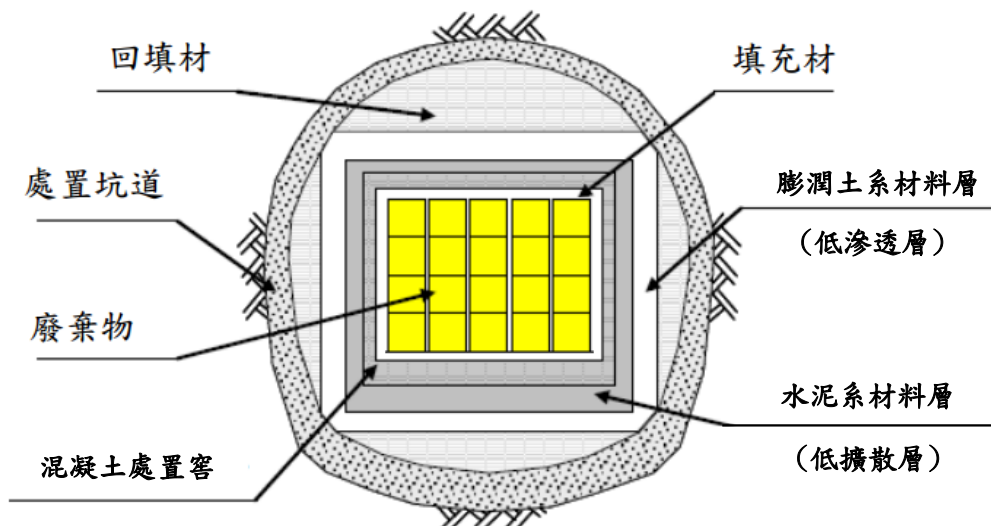


圖 2.7.2-3 餘裕深度處置坑道障壁系統斷面示意圖

### 2.3.3 第二種廢棄物處置事業相關之安全審查基本考量

依「第二種廢棄物處置事業相關之安全審查基本考量」(日本原子力安全委員會，2010)其基於「選擇抑制核種遷移機能較佳之地層」與「處置設施密閉機能需等同於或優於既有低放射性廢棄物處置設施之處置窖機能」之基本考量，進一步探討其可能之功能目標：

(1)「選擇抑制核種遷移機能較佳之地層」考量之天然障壁系功能目標：

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

(2)「處置設施需具備之密閉機能需等同於或優於既有低放射性廢棄物處置設施之處置窖機能」考量之工程障壁系統功能目標：

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

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

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

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

圖 2.7.3-1 餘裕深度處置各階段的基本安全機能

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

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

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

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

圖 2.7.3-2 餘裕深度處置地下設施單元與基本安全機能之關聯性

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

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

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

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

# 第三章 國際坑道處置放射性廢棄物分類特性與其工程障壁 系統安全功能

## 3.1 低放射性廢棄物分類特性

### 3.1.1 IAEA 的低放射性廢棄物分類特性

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

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



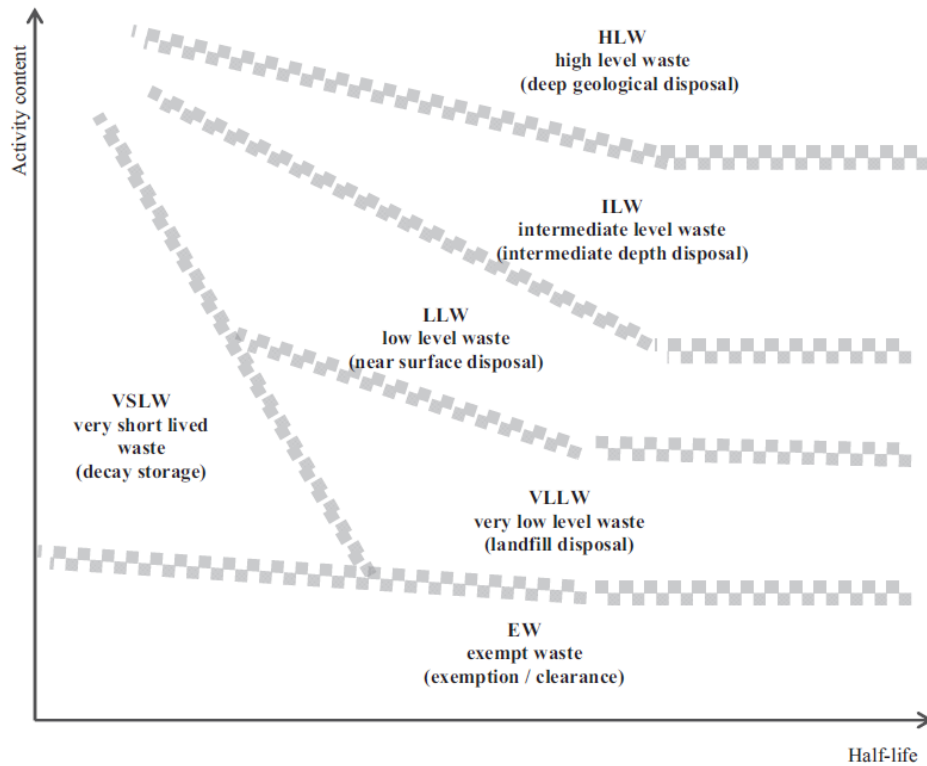


圖 3.1-1 IAEA 之放射性廢棄物分類概念(IAEA, 2009)

### 3.1.2 我國低放射性廢棄物分類特性

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

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

表 3.1.2-1 單一長半化期核種濃度值

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

表 3.1.2-2 單一短半化期核種濃度值

核種	濃度值 (TBq/m <sup>3</sup> )		
	第一行	第二行	第三行
半化期小於 5 年之所有核種總和	26	註一	註一
H-3	1.5	註一	註一
Co-60	26	註一	註一
Ni-63	0.13	2.6	26
Ni-63 (活化金屬內)	1.3	26	260
Sr-90	0.0015	5.6	260
Cs-137	0.037	1.6	170

註一：B類廢棄物及C類廢棄物並無此核種濃度值之限制。可從實際執行運送、吊卸與最終處置作業時，考量體外輻射與衰變熱，而限制這些核種之濃度。除非由本表內其他核種決定廢棄物歸於C類廢棄物，否則應歸於B類廢棄物。

註二：多核種之分類：

若低放射性廢棄物中含有多核種時，其分類應按下式判斷。

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

式中，

$C_i$ ：第  $i$  個核種之濃度。

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

$n$ ：所含核種的數目。

若滿足上式，則可歸為第 0 類廢棄物。

此外，根據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第四條規定，

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

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

根據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第五條規定：

低放處置設施最終處置之廢棄物，應符合下列規定：

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

根據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第六條規定：

低放射性廢棄物經均勻固化後，應符合下列規定：

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

3.經耐水性測試後，應符合第一款之規定。

4.經耐候性測試後，應符合第一款之規定。

5.經耐輻射測試後，應符合第一款之規定。

6.經耐菌性測試後，應符合第一款之規定。

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

表 3.1.2-3 低放射性廢棄物均勻固化體測試項目、方法及標準

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

### 3.1.3 美國低放射性廢棄物分類

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

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

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

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

### 3.1.4 瑞典之低放射性廢棄物分類特性

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

表 3.1.4-1 瑞典 SKB 放射性廢棄物分類標準

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

### 3.1.5 日本之低放射性廢棄物分類特性

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

表 3.1.5-1 日本放射性廢棄物分類與處置概念

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

### 3.1.6 加拿大之低放射性廢棄物分類特性

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

表 3.1.6-1 加拿大放射性廢棄物分類標準(CNSC, 2016)

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

## 3.2 瑞典處置案例之廢棄物分類與處置概念分析

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

### 3.2.1 核種存量與盛裝容器

#### (1) 處置坑道核種存量

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

#### (2) 盛裝容器簡介

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

##### 1. 標準貨櫃(ISO container)

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

##### 2. 鋼模組(Steel mould)

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

##### 3. 四倍鋼模組(Tetra mould)

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



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

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

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

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

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

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

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

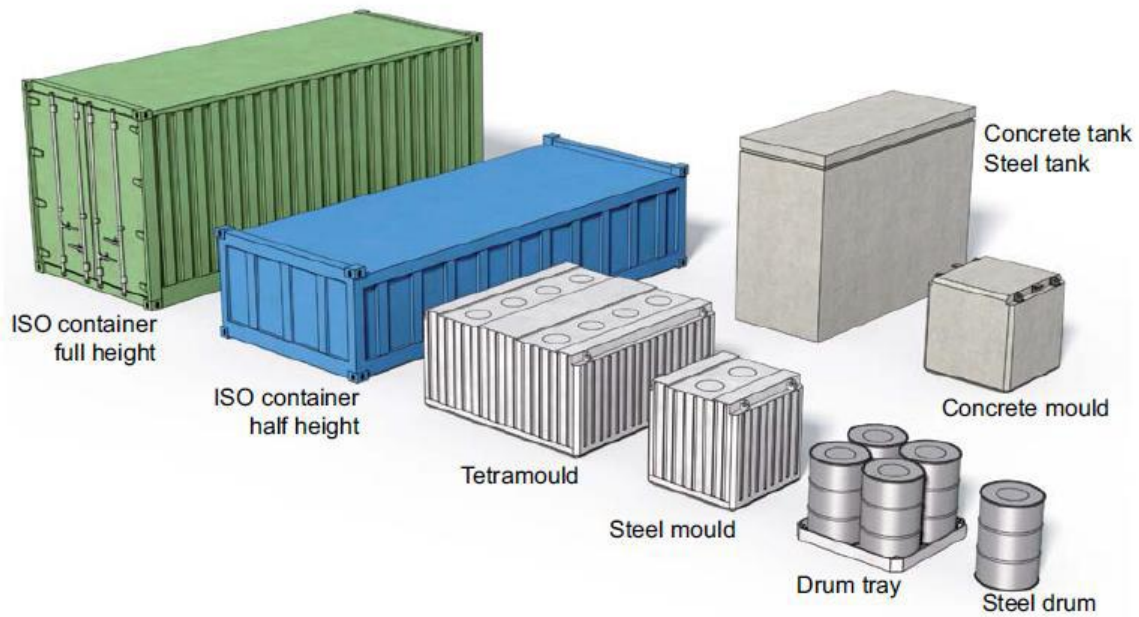


圖 3.2.1-1 SFR 處置場規畫使用之盛裝容器示意圖(SKB, 2014)

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

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

#### 5. 混凝土箱(Concrete tank)

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

#### 6. 混凝土模組(Concrete mould)

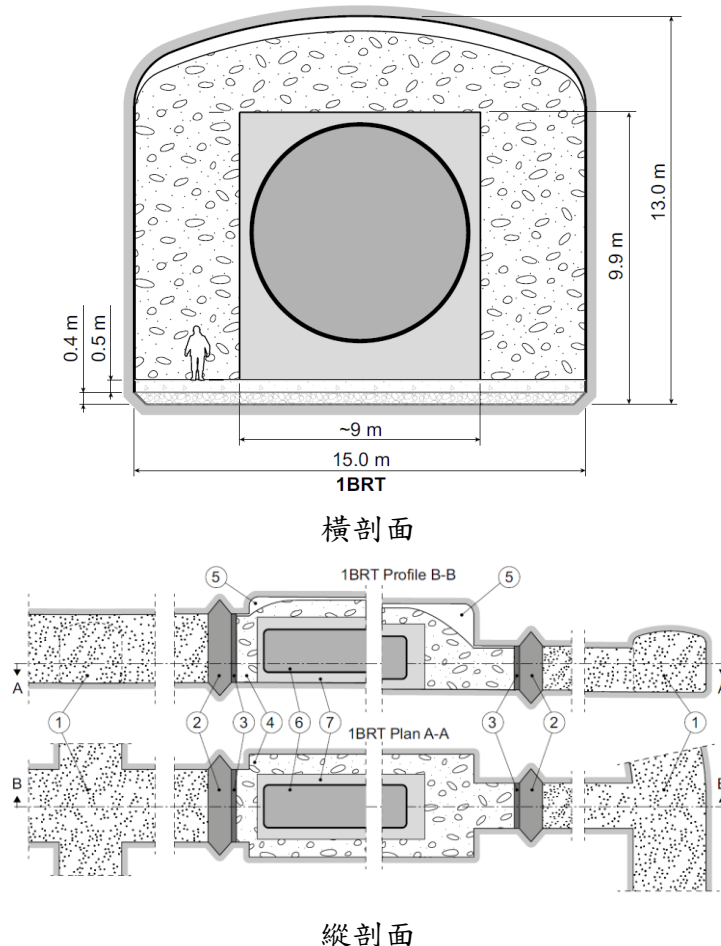
混凝土模組主要用於盛裝固化廢棄物，包括離子交換樹脂、過濾助劑與蒸發器濃縮物或混凝土固化之金屬廢棄物。混凝土模組為鋼筋混凝土製品，壁厚通常為 10 cm，但有時更厚，外部尺寸是 1.2 m × 1.2 m × 1.2m。

### 3.2.2 廢棄物分類與處置工程障壁設計關聯性分析

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

#### (1)反應爐壓力容器處置系統：BRT 處置坑道

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



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

圖 3.2.2-1 BRT 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)

## (2)筒倉處置系統：筒倉

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

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

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

### 1. 1BMA 與 2BMA 處置坑道

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

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

### 2. 1BTF 與 2BTF 處置坑道

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

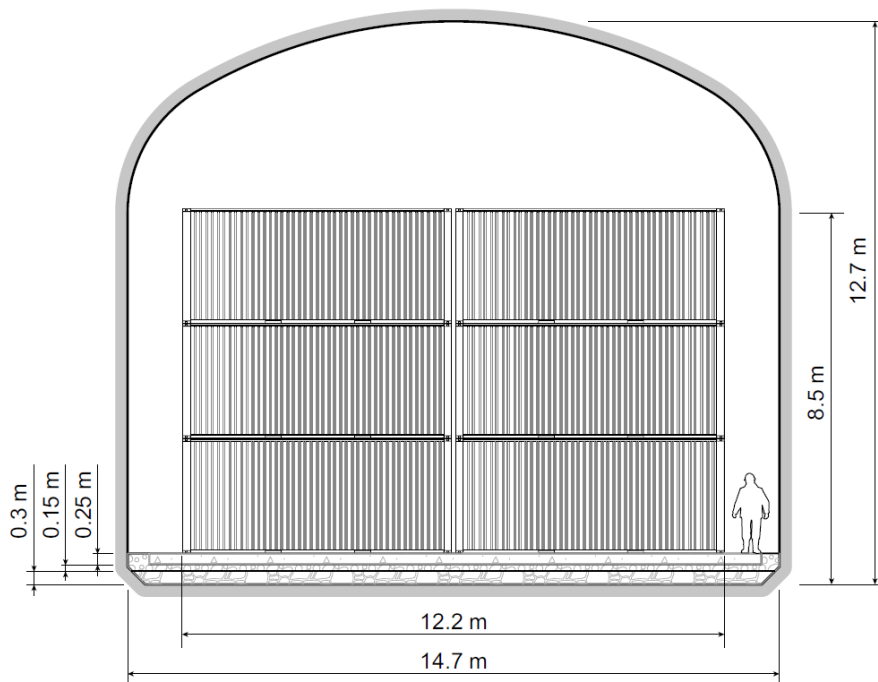
分析其工程障壁設計概念，主要利用處置窖與坑道間碎石與處置窖之滲水特性差異形成水力反差，進而降低流經廢棄物之流量。透過填充水泥漿，混凝土牆與混凝土盛裝

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

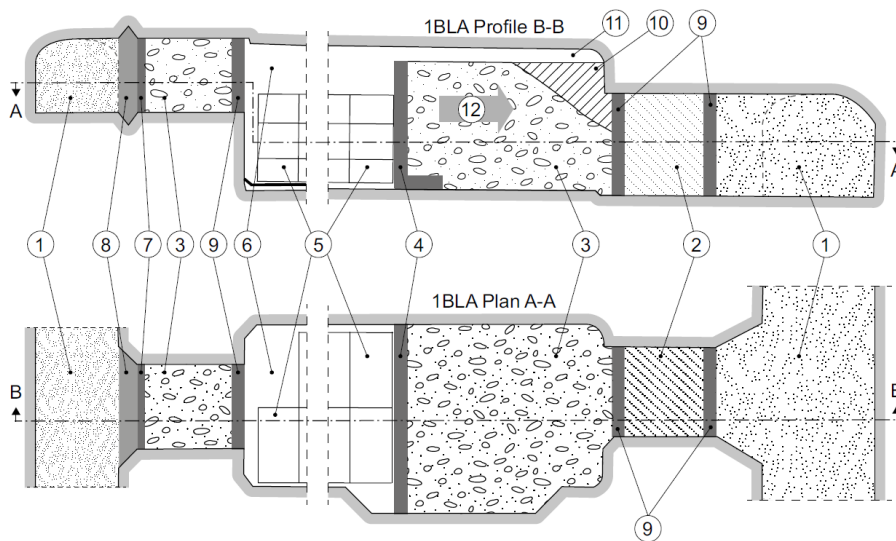
#### (4)未回填之處置坑道系統：1-5BLA 處置坑道

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

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



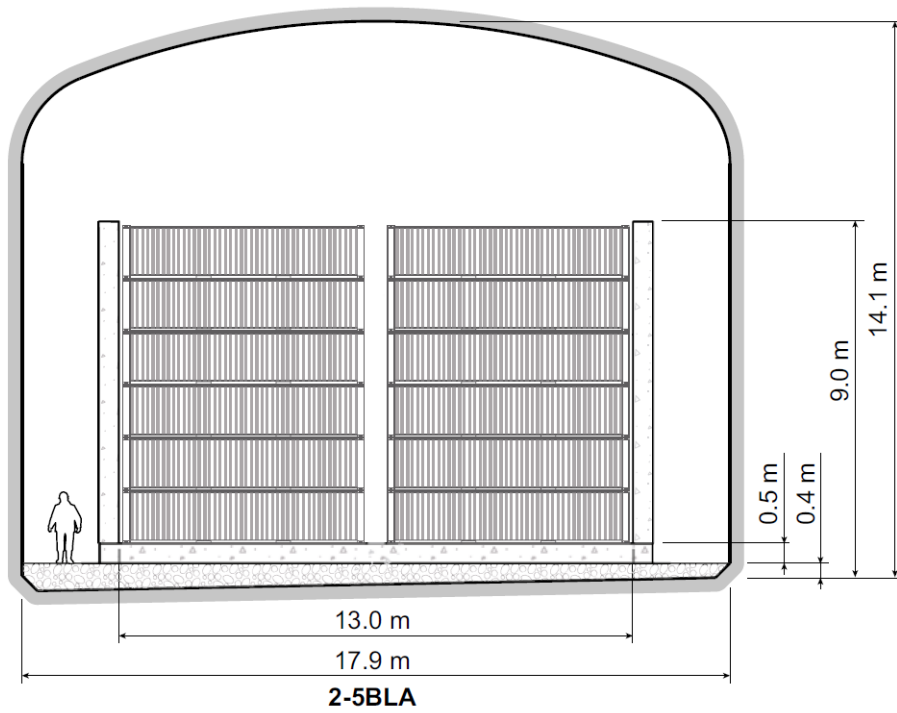
1BLA  
橫剖面



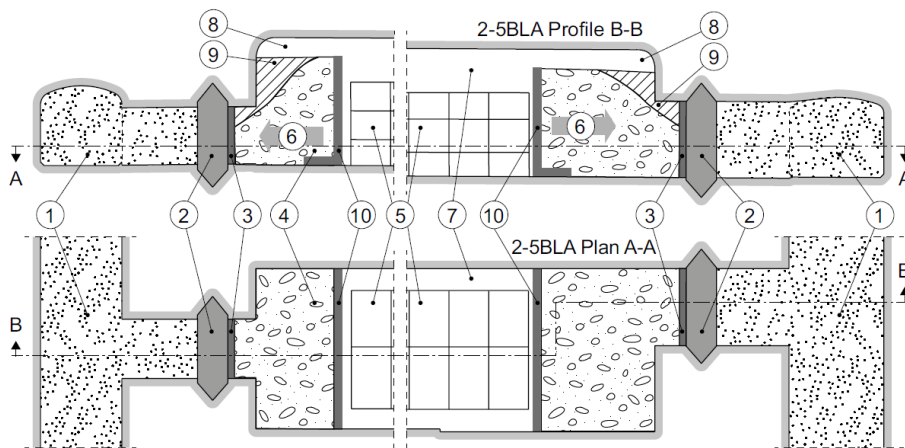
縱剖面

- ①膨潤土②緩衝材料③碎石④擋土牆⑤廢棄物包件⑥處置窖⑦混凝土束制牆⑧混凝土封塞⑨  
緊鄰緩衝材料之混凝擋土牆⑩混凝土(11)頂拱間隙(12)回填工作方向

圖 3.2.2-2 1BLA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



橫剖面



縱剖面

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

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



### 3.2.3 案例探討

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

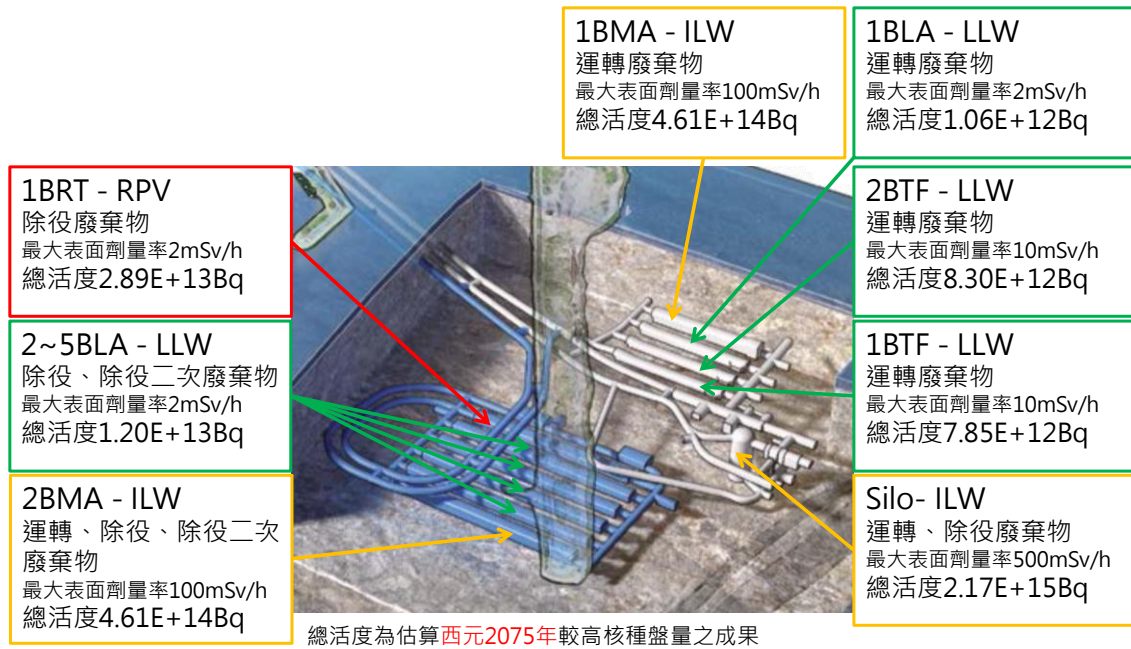


圖 3.2.3-1 瑞典案例之處置坑道廢棄物特性示意圖

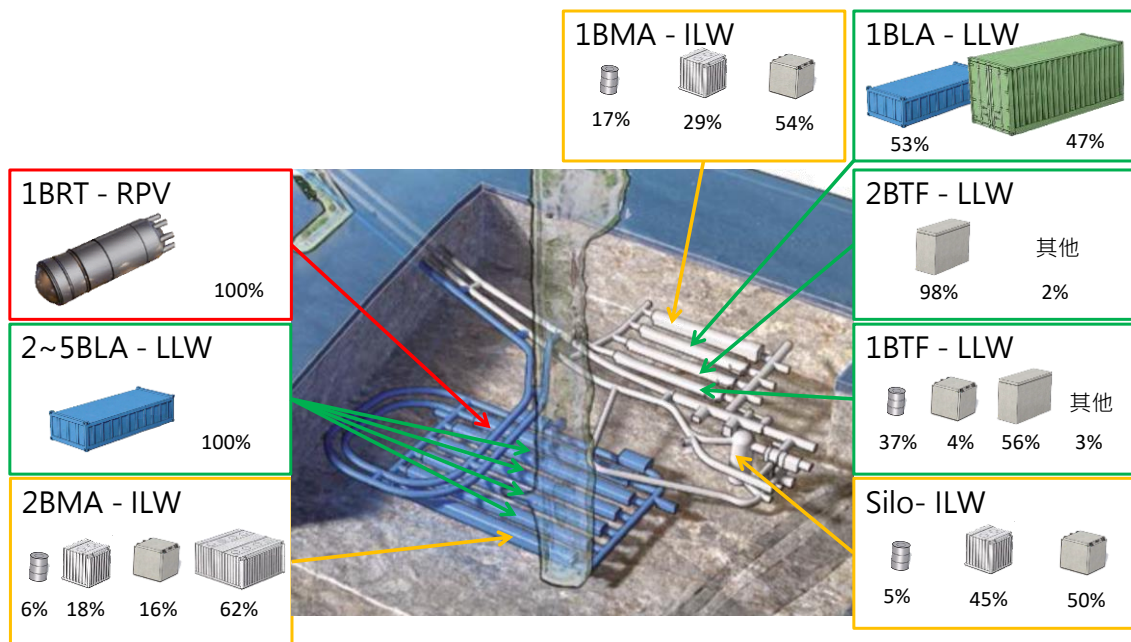


圖 3.2.3-2 瑞典案例之盛裝容器與工程障壁示意圖

表 3.2.3-1 瑞典案例之處置坑道工程障壁系統主要安全功能

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

### 3.3 加拿大處置案例之廢棄物分類與處置概念分析

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

#### 3.3.1 DGR 處置設施規劃與安全特徵概述

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

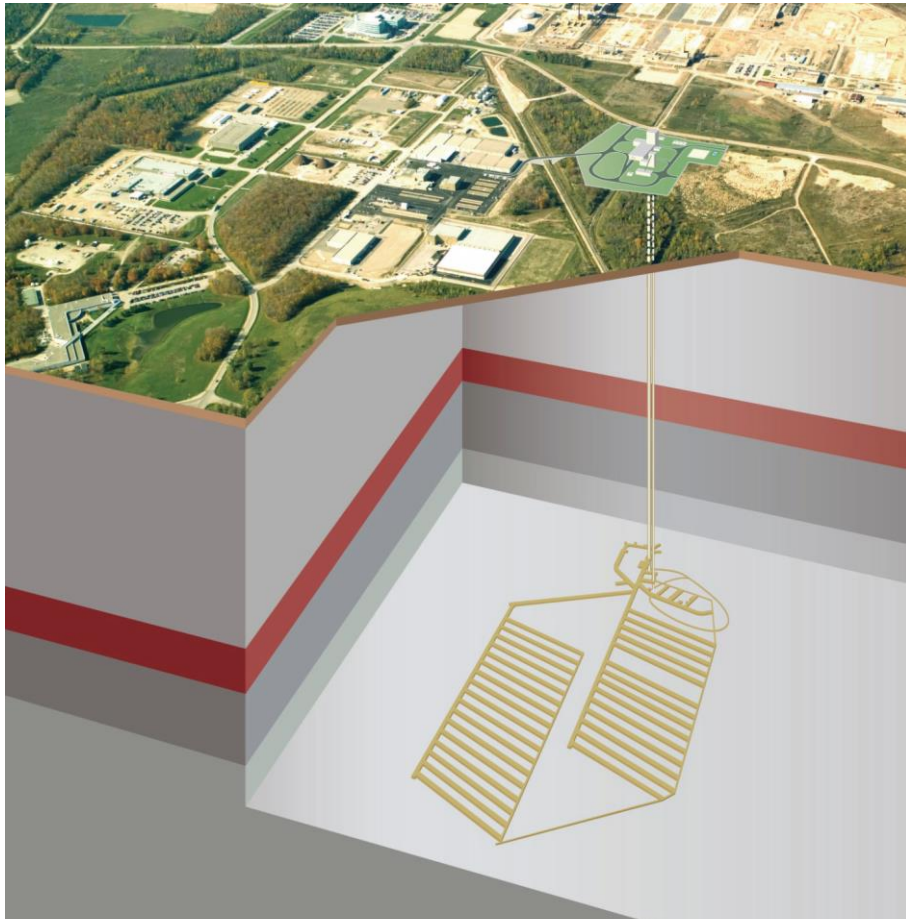


圖 3.3.1-1 DGR 處置場概念示意圖(NWMO, 2011a)

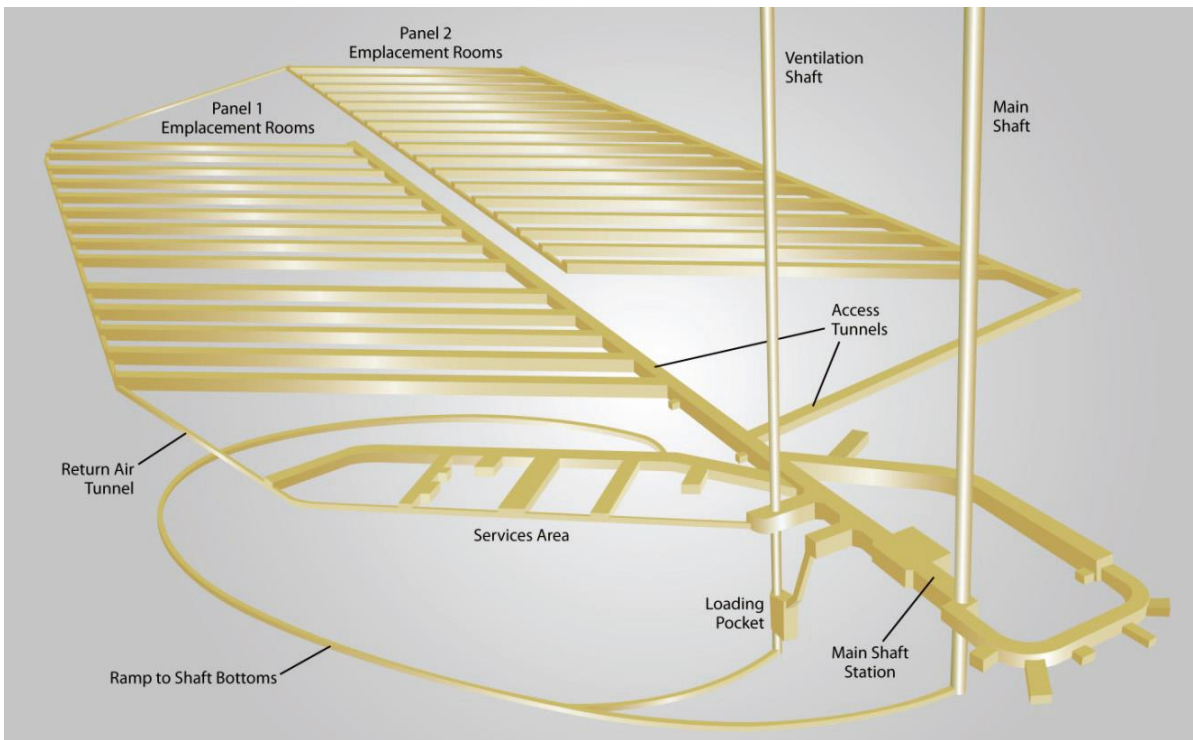


圖 3.3.1-2 DGR 處置設置規劃示意圖(NWMO, 2011a)

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

#### (1)DGR 處置場的安全目標

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

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

#### (2)處置設施的設計準則

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

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

7.處置設施應符合所有法規要求。

8.DGR 的地下設施應與深鑽孔維持至少 100m 的距離。

### (3)確保封閉後安全的處置設施安全特徵

DGR 處置場為確保封閉後的長期安全，針對廢棄物和處置設施說明其安全特徵。

#### 1.廢棄物

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

#### 2.處置坑道

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

#### 3.處置坑道封閉牆

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

#### 4.混凝土封塞體(concrete monolith)

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

#### 5.膨潤土/砂混合物

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

#### 6.瀝青砂膠混合物(asphalt mastic mix)

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

#### 7.混凝土擋牆(concrete bulkheads)

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

### 3.3.2 低放與中放廢棄物與盛裝容器特性

#### (1)廢棄物分類

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

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

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

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

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

## (2)廢棄物包件特性

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

### 1.A 型-箱式廢棄物(Bin-Type Waste)

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

表 3.3.2-3 低放射性廢棄物包件型式(HATCH, 2010)

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

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

表 3.3.2-4 中放射性廢棄物包件型式(HATCH, 2010)

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

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



表 3.3.2-5 A 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

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

## 2.B 型-重型非堆高機(Heavy Non-Forklift)

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

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

表 3.3.2-6 B 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

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

\* Mass of loaded container complete with shielding.

### 3.C 型-輕型中放射性廢棄物(Light ILW)

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

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

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

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

表 3.3.2-7 C 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

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

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

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

表 3.3.2-8 D 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

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

#### 5.E 型-新鮮樹脂襯套(Fresh Resin Liners)

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

表 3.3.2-9 E 型廢棄物包件的規格和數量(HATCH, 2010)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3.3 處置坑道設計

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

表 3.3.3-1 坑道設計限制與因應措施(HATCH, 2010)

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

表 3.3.3-2 處置坑道斷面尺寸(HATCH, 2010)

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

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

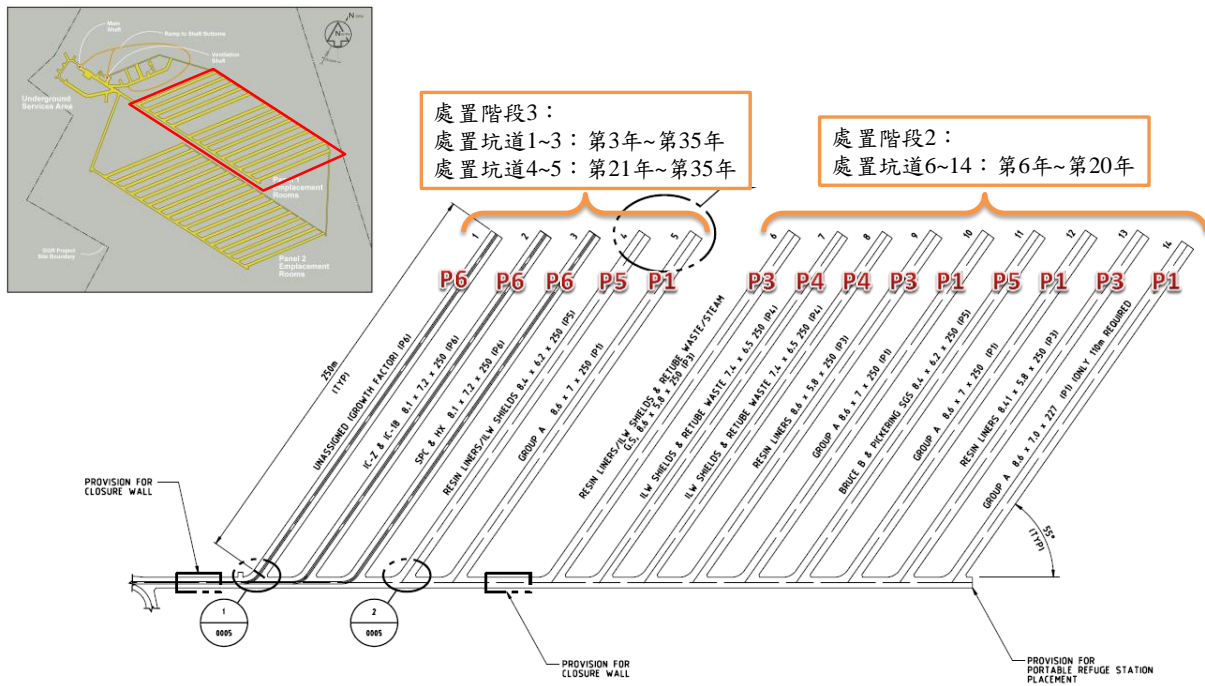


圖 3.3.3-1 panel 1 處置區的處置坑道規劃(HATCH, 2010)

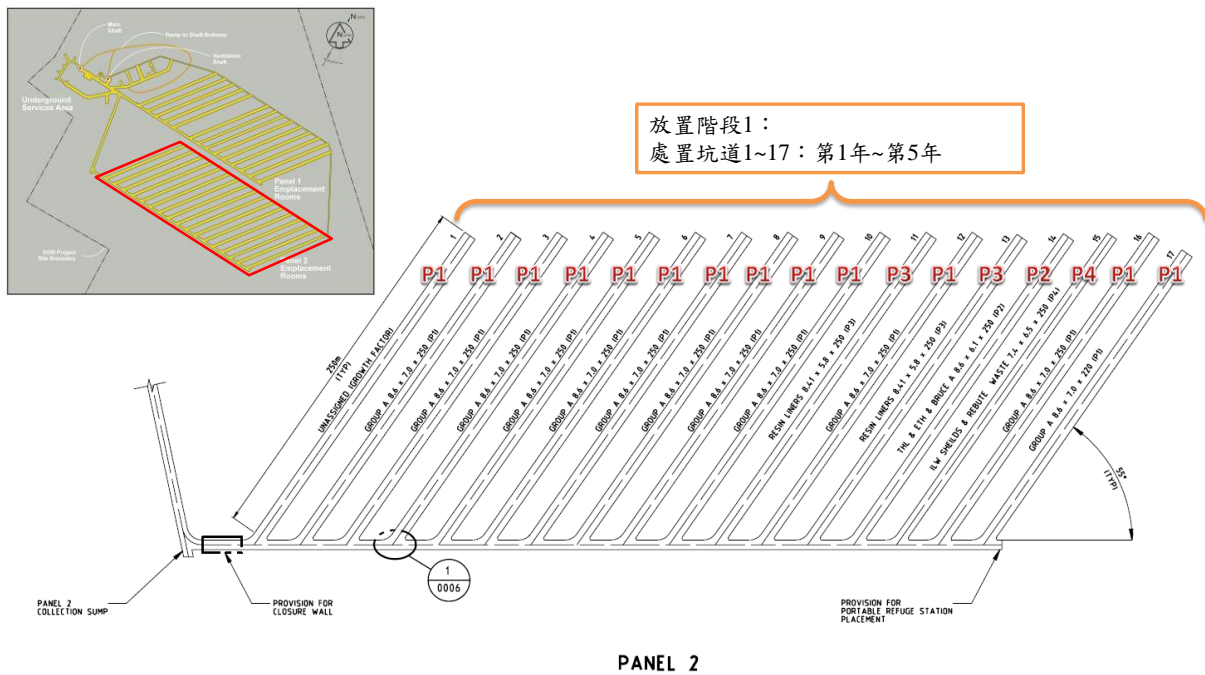


圖 3.3.3-2 panel 2 處置區的處置坑道規劃(HATCH, 2010)

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

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

(3)熱交換器(B2)、封裝磁磚孔(F4)、蒸氣反應爐切段(F1、F2、F3)、屏蔽封塞盛裝容器(B1)等廢棄物包件可混合放在同一個處置坑道內。

(4)可藉混合排放較低和較高劑量率的同類型廢棄物包件，以管理處置坑道內的整體劑量率。

(5)處置坑道容量已考量容量增加因子，確保有足夠的空間可處置所有體積的廢棄物包件。

(6)處置 IC-2 Liners(D1)和 IC-18 T-H-E(D2)的處置坑道內，由於處置機具特殊，坑道口至少需留有 48m 的操作空間。

(7)為使工作人員的劑量率降至最低，將從與主豎井相隔最遠的處置坑道開始堆置，以減少工作人員開車經過含有廢棄物包件處置坑道的時間。

以下將分別說明各坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式。

(1)P1 坑道斷面：P1 坑道斷面僅放置 A 型廢棄物包件，皆為低放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-3 所示。由於 A 型廢棄物包件數量最多，故 P1 坑道斷面的處置坑道數量亦最多。另外，此類型坑道因採用 1 個圓形通風管道的設計，故部分 A 型廢棄物包件堆疊時，最上層角落的位置無法堆置包件。

(2)P2 坑道斷面：P2 坑道斷面放置 C 型、E 型和 F 型廢棄物包件，內含低放射性和中放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-4 所示。處置場開始運轉後第 1 年~第 5 年，需要一條 P2 坑道斷面的處置坑道，以放置高度最高的廢棄物包件。此類型坑道為保留較高的空間放置廢棄物包件，採用 2 個圓形通風管道的設計。

(3)P3 坑道斷面：P3 坑道斷面放置 C 型、E 型和 F 型廢棄物包件，皆為中放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-5 所示。P3 坑道斷面的處置坑道，專門用來處置樹脂襯套，不論是否使用屏蔽的樹脂襯套，都可放在此類處置坑道。

(4)P4 坑道斷面：P4 坑道斷面放置 C 型和 F 型廢棄物包件，皆為中放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-6 所示。

(5)P5 坑道斷面：P5 坑道斷面放置 F 型廢棄物包件，皆為低放射性廢棄物，其堆疊方式如圖 3.3.3-7 所示。

(6)P6 坑道斷面：P6 坑道斷面的處置坑道共有 3 條，1 條專門用來放置低放射性的 B 型廢棄物包件，1 條專門用來放置中放射性的 D 型廢棄物包件，另 1 條則為備用坑道，其堆疊方



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

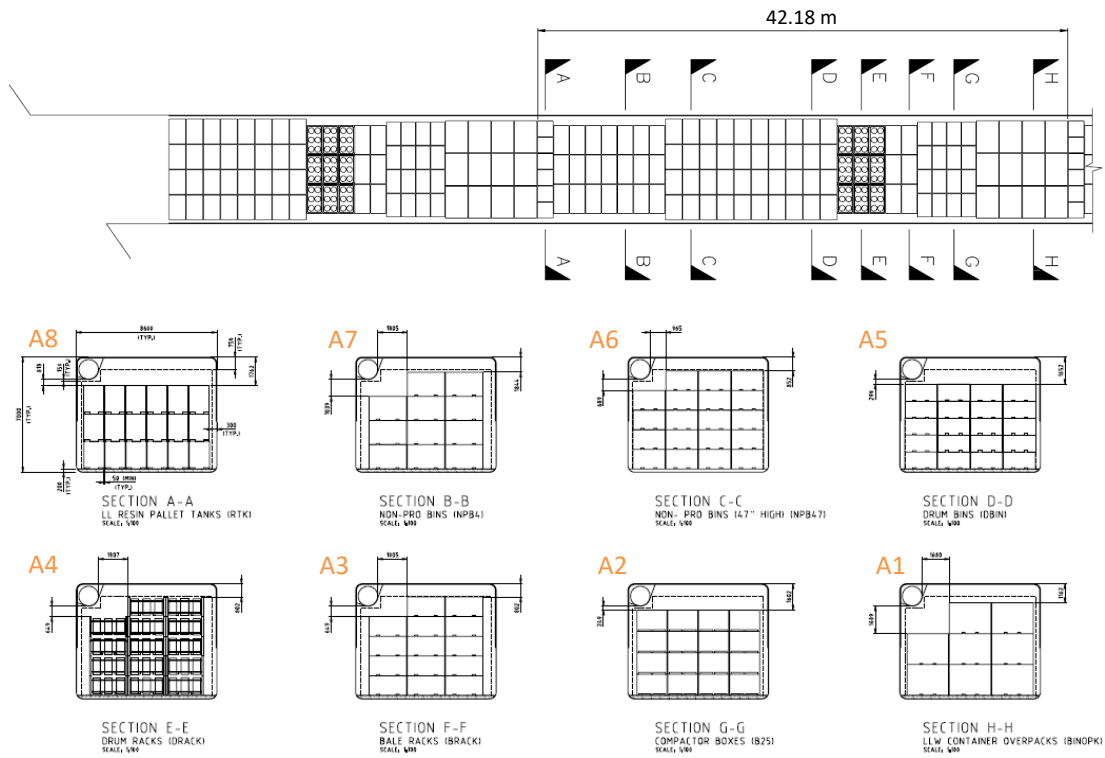


圖 3.3.3-3 P1 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

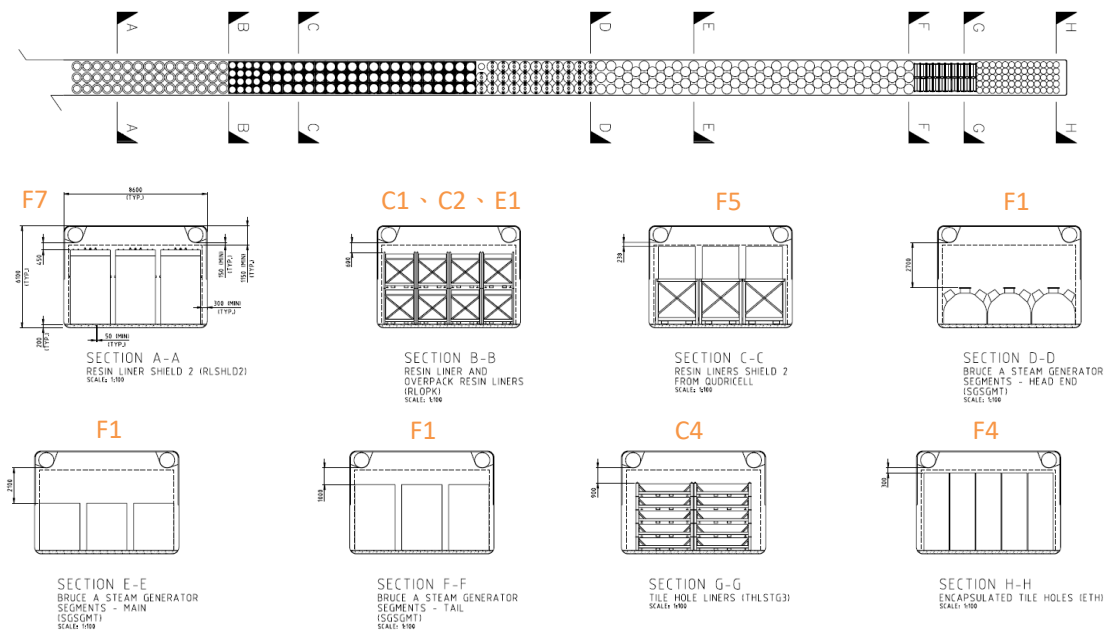


圖 3.3.3-4 P2 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

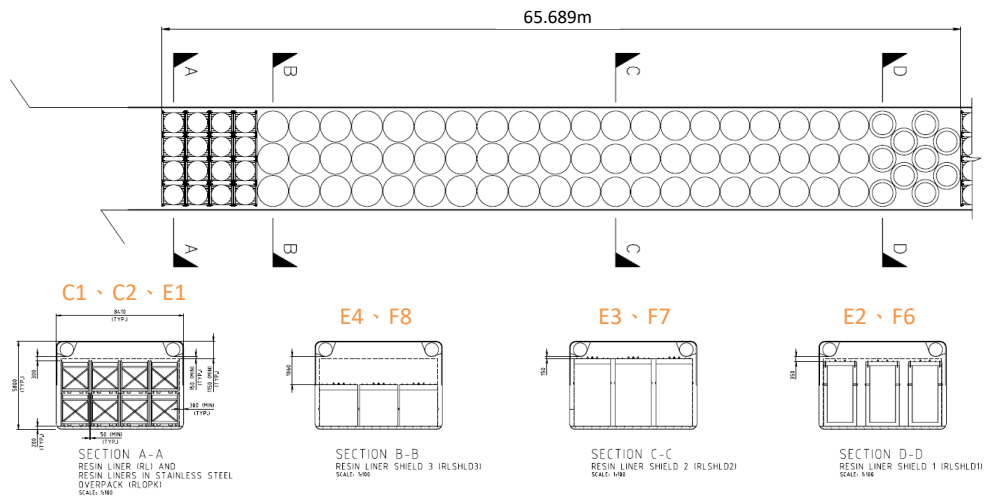


圖 3.3.3-5 P3 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

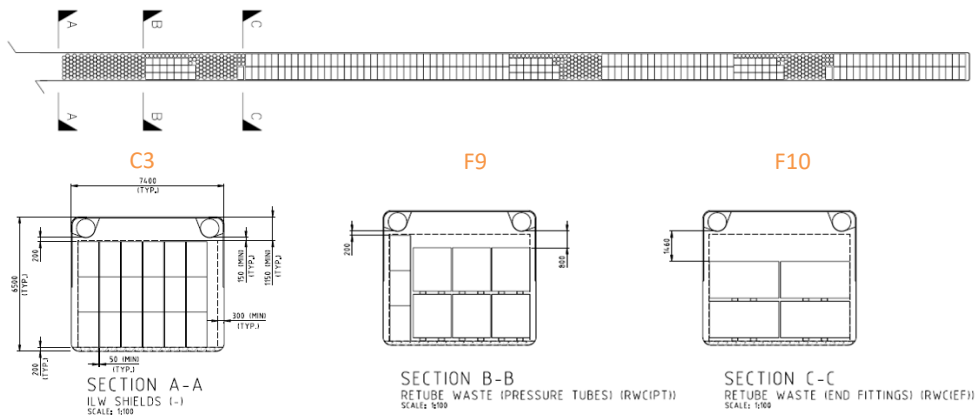


圖 3.3.3-6 P4 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

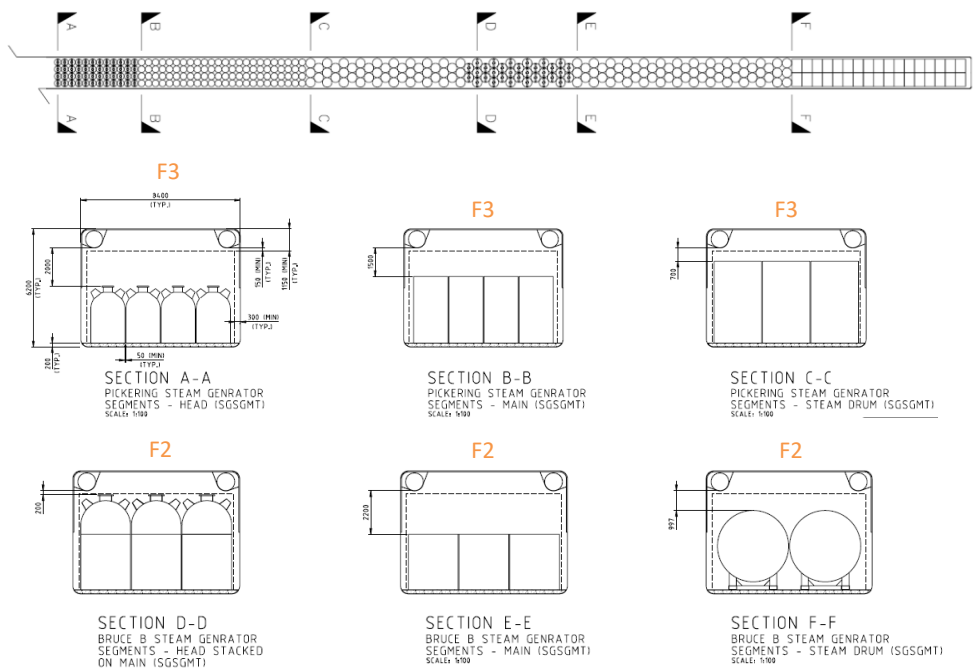


圖 3.3.3-7 P5 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

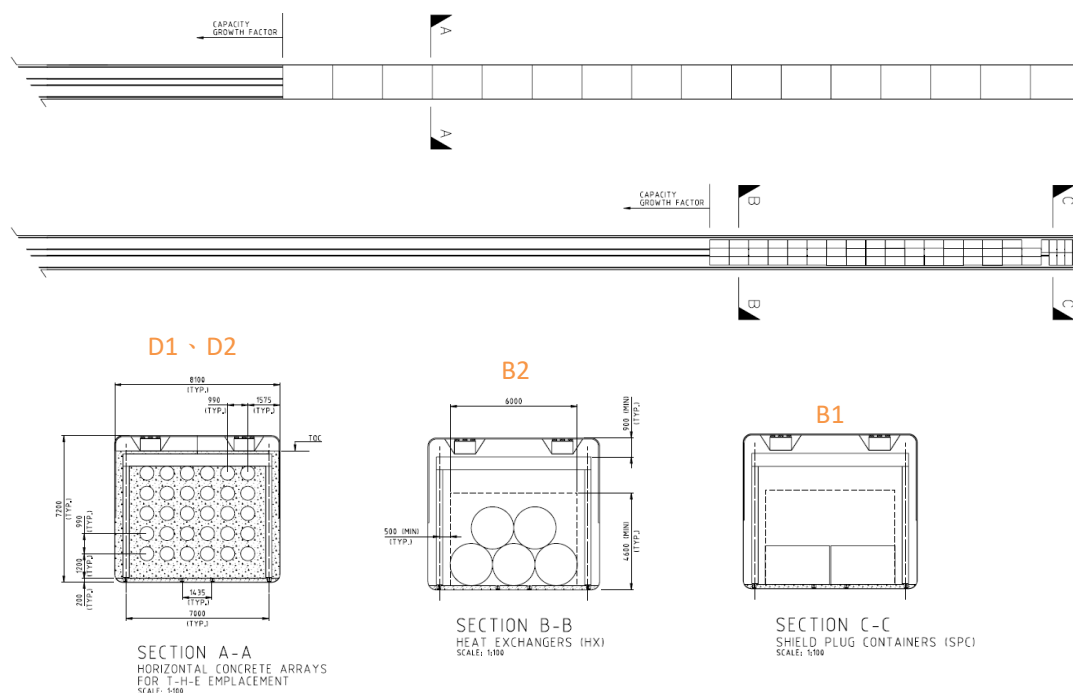


圖 3.3.3-8 P6 坑道斷面的廢棄物包件堆疊方式(HATCH, 2010)

### 3.3.4 案例探討

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

#### (1) 封閉豎井

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

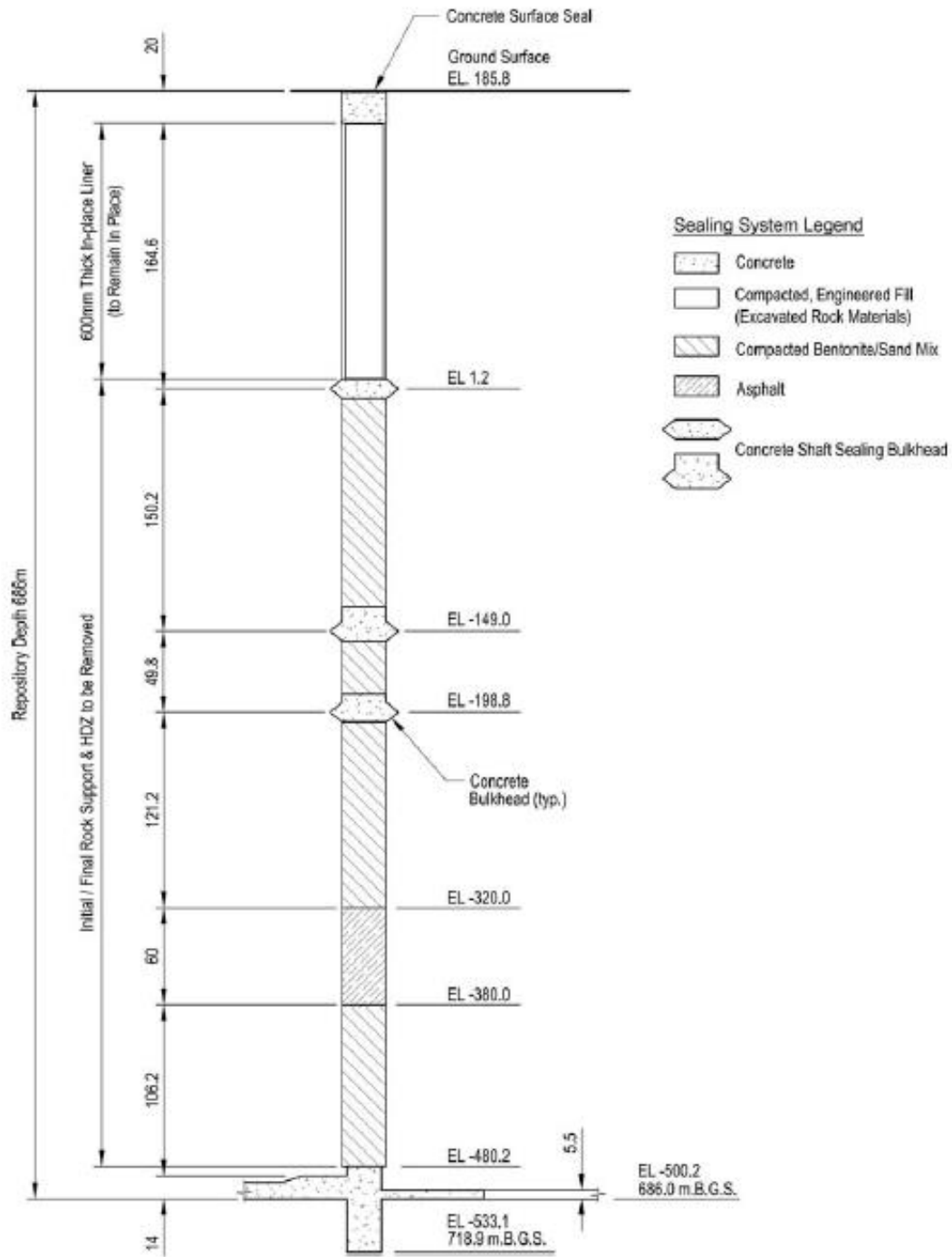


圖 3.3.4-1 豎井封閉設計示意圖(HATCH, 2010)

## (2) 設置封閉牆

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

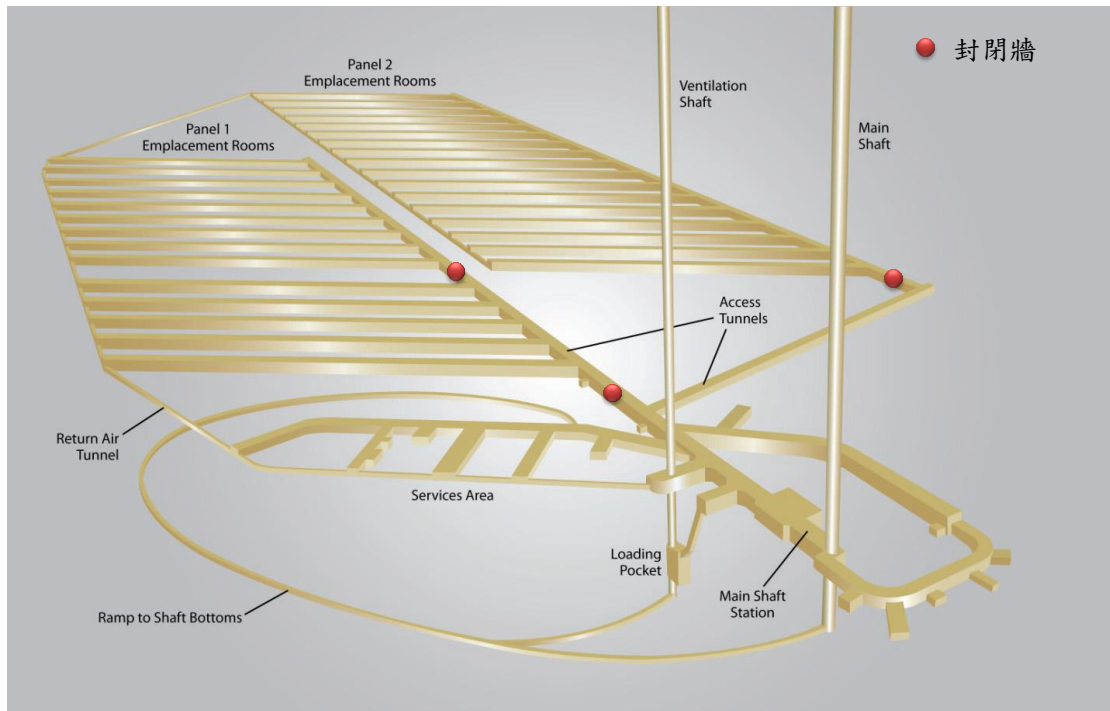


圖 3.3.4-2 封閉牆位置分布圖(HATCH, 2010)

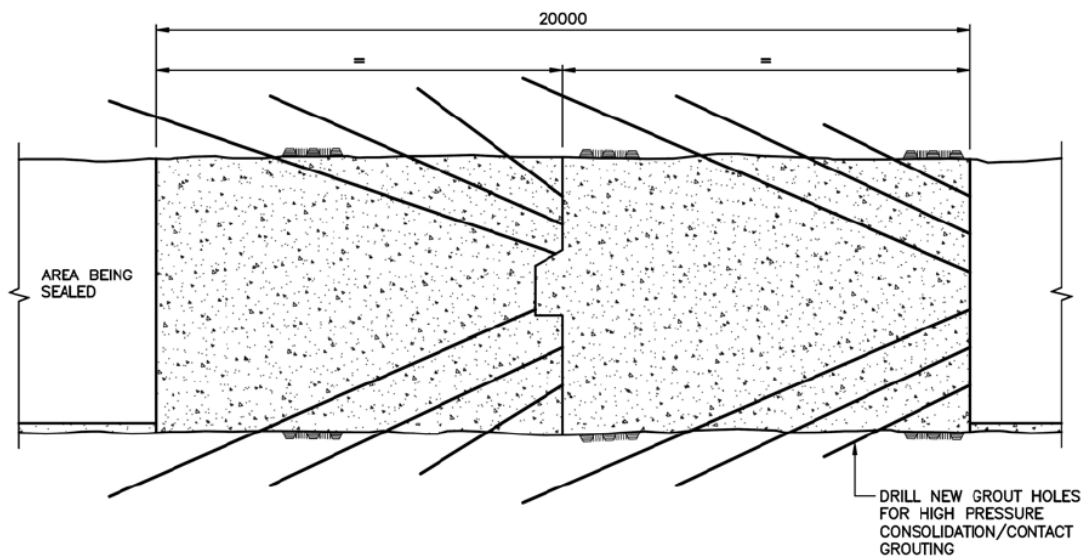


圖 3.3.4-3 封閉牆的設計概念示意圖(HATCH, 2010)

### (3)中放廢棄物盛裝容器與障壁

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

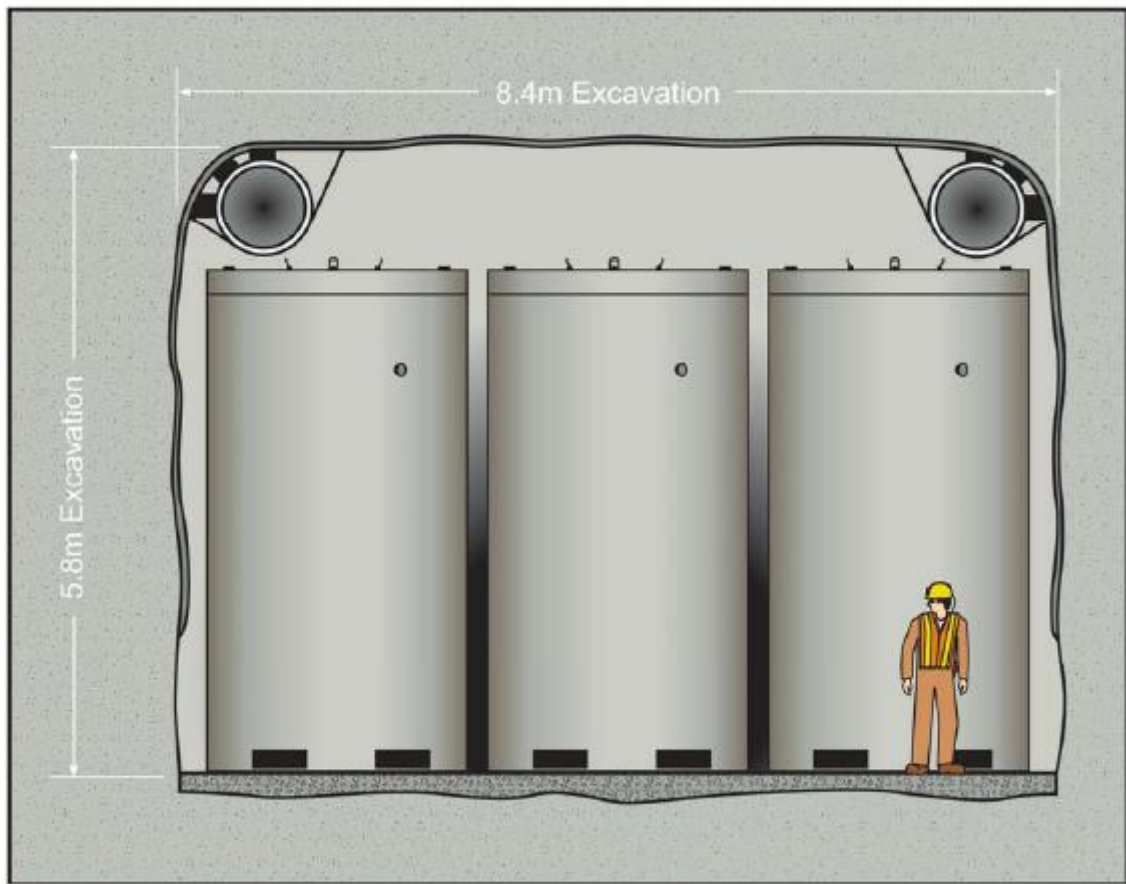


圖 3.3.4-4 F 型廢棄物包件(F5、F6、F7、F8)示意圖(HATCH, 2010)

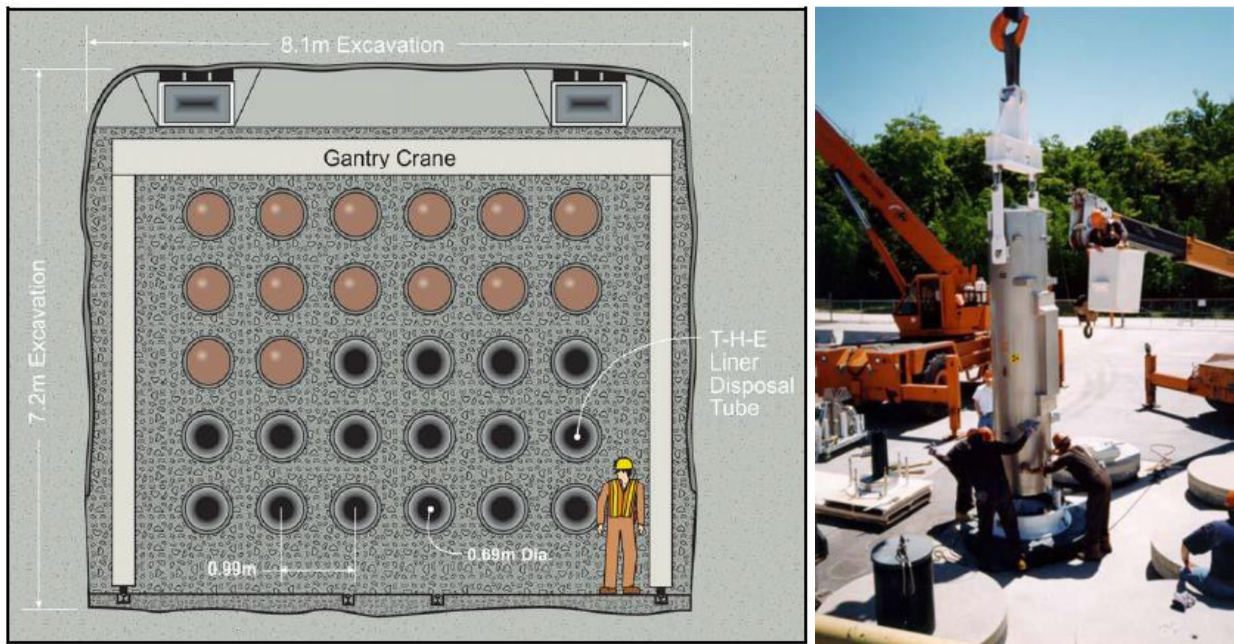


圖 3.3.4-5 D 型廢棄物包件與混凝土基座示意圖(HATCH, 2010)

## 第四章 我國低放處置技術工程設計模式審驗方式

### 4.1 處置工程設計特徵功能與安全功能分析

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

#### 4.1.1 放射性廢棄物處置特定安全要求

依據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)「放射性廢棄物處置特定安全要求」(NO. SSR-5)所述之安全要求，與處置工程設計相關之安全要求包含：

##### (1).處置安全設計概念之多重安全功能的要求(要求 7)：

為能藉由多重安全功能確保處置安全，應選擇合適母岩環境、應設計適當之工程障壁與處置設施運轉方式。應由實體障壁系統之多重安全功能實現圍阻與隔離廢棄物功能。實體障壁系統之功能應由各種物理作用、化學作用與運轉控制共同實現。應確認各障壁與控制及整體處置系統之能力，確實可達成安全論證中所設定之功能。且處置系統整體功能應不可過度依賴某項單一安全功能。

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

##### (2).圍阻放射性廢棄物功能的要求(要求 8)：

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

圍阻功能之目的，在於避免與降低放射性核種釋出，藉以圍阻放射性廢棄物所含核種於工程障壁系統中衰變。就低放射性廢棄物而言，其大部分短半化期核種衰變至無害之時間約為幾百年。如果在應實現圍阻功能期間，因放射性廢棄物活度過高而超過對無意入侵者之保護考量，則需考量替代處置方案。若為再處理之玻璃固化體與用過核子燃料等具高活度之廢棄物，則亦須考量廢棄物體之耐久性。

(3). 隔離放射性廢棄物功能的要求(要求 9)：

處置設施應以將放射性廢棄物隔離於公眾與可接近之生物圈環境為特徵目標，進行選址、設計與運轉。此特徵應隔離短半化期核種達數百年，而對於中與高放廢棄物則須隔離至少數千年。為此，應同時考量處置系統受自然演化與事件所造成之影響。

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

(4). 被動安全特徵的監測與控制功能的要求(要求 10)：

應利用適當程度的監測與管制作為，用以保護與維持被動安全特徵，以使被動安全特徵能確實達成安全論證中所設定之功能。

監測與監測之目的並不是測量放射性數值，而是確保可以實現其安全功能。例如：監測實體障壁狀況是否符合要求(檢查劣化狀況)、搭配保留合適的維護能力、限制處置核種總活度與長半化期核種種類與活度等。

(5). 處置設施設計的要求(要求 16)：

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



## 4.1.2 工程設計特徵功能與安全功能之關聯分析

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

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

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

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

- (1) 確認每一個設計特徵可以如安全論證所述內容發揮其功能。
- (2) 確保當任一元件無法完整發揮預期功能時，仍保有充足之安全餘裕
- (3) 如果設施所在環境會受地質作用抬升或侵蝕，而無法確保處置設施與生物圈隔離之可靠性，則須評估人類無意入侵之可能性與後果。
- (4) 如果在應實現圍阻功能期間，因放射性廢棄物活度過高而超過對無意入侵者之保護考量，則需考量替代處置方案。

表 4.1.2-1 低放處置安全功能與處置設計考量關聯分析表(1/2)

安全功能	設計功能要求
多重安全	應選擇合適母岩環境、應設計適當之工程障壁與處置設施運轉方式。
	處置系統整體功能應不可過度依賴某單項障壁單一安全功能。
圍阻	於廢棄物可能導致的危害因衰變而有顯著降低之前，應確保圍阻功能。
隔離	處置設施之選址、設計與運轉，應以將放射性廢棄物隔離於公眾與可接近之生物圈環境為特徵目標。
	此特徵應隔離短半化期核種達幾百年，而對於中高放廢棄物則須隔離至少數千年。應同時考量處置系統受自然演化與事件所造成影響。
監測與控制	應利用適當程度的監測與管制作為，用以保護與維持被動安全特徵。
安全功能	設計功能目標
多重安全	應由實體障壁系統之多重安全功能實現圍阻與隔離廢棄物功能。
	確保當任一元件無法完整發揮預期功能時，仍保有充足之安全餘裕。
圍阻	避免與降低放射性核種釋出，用以圍阻放射性廢棄物所含核種於工程障壁系統中，自然衰變至其可能導致的危害有顯著降低時。
隔離	透過設計，將放射性廢棄物與其可能導致的危害，隔絕於可接近之生物圈環境以外。
	使可能減損處置設施完整性的影響降至最低。
	透過運轉控制與制度管理來提供隔離功能。
監測與控制	保護與維持被動安全特徵
安全功能	主要設計特徵考量
多重安全	同圍阻、隔離、監測與控制功能
圍阻	可實現圍阻功能之各種物理或化學之特徵與作用，如：防滲性、抗腐蝕性、溶解作用、溶出率與溶解度、核種留存於設施內之數量與活度，以及核種遷移之遲滯特性。
隔離	可實現隔離功能之各種物理或化學之特徵與作用。
	選址之隔離功能考量，如：選址時避免選擇高水力傳導特性區域、提升接近廢棄物的困難度、藉由穩定的地質環境避免處置設施受地質作用侵蝕影響、處置設施遠離已知重要資源降低處置設施被無意影響的機率。
	設計之隔離功能考量，如：提升接近廢棄物的困難度、遲滯放射性核種自處置設施外釋之遷移速度、地層岩覆及抬升與侵蝕等之綜合特徵(適用地質處置)。
	運轉之隔離功能考量，如：利用保安設施避免無意闖入、監測與控制維持運轉安全、封閉與監管制度確保長期安全。
監測與控制	確保可以實現處置系統安全功能。如：監測實體障壁狀況是否符合要求(檢查劣化狀況)、搭配保留合適的維護能力、限制處置核種總活度與長半化期核種種類與活度等。

表 4.1.2-1 低放處置安全功能與處置設計考量關聯分析表(2/2)

安全功能	關鍵作用時期考量
多重安全	同圍阻、隔離、監測與控制功能
圍阻	圍阻功能時間特徵：核種衰變至危害有顯著降低。
	至低放射性廢棄物可能的危害有顯著降低前之主要考量對象：無意入侵者、公眾
	就低放射性廢棄物而言，其大部分短半化期核種衰變至無害之時間約為幾百年內。
隔離	隔離功能時間特徵：將放射性廢棄物與其可能導致的危害，隔離於可接近之生物圈環境以外。
	至低放射性廢棄物無明顯危害前之主要考量對象：公眾、無意入侵者(坑道處置需評量岩覆之設計特性)
	此特徵應隔離短半化期核種達數百年，而對於中與高放廢棄物則須隔離至少數千年。應同時考量處置系統受自然演化與事件所造成之影響。
監測與控制	運轉與監管階段：確保可以實現處置系統安全功能 解除監管後：保護與維持被動安全特徵。
	至低放射性廢棄物可能的危害有顯著降低前之主要考量對象：工作人員、無意入侵者、公眾

## 4.2 低放處置技術工程設計模式審驗方式

分析 2.1 節至 2.5 節所述之處置設計審查考量與方式，區分為 1.提出執照申請者之設計內容、2.設計時須遵循之法規或場址特性限制、3.審查作業考量三大區塊，說明處置技術工程設計審驗方式，其架構略如圖 4.2-1 所示。

對處置設施設計者而言，需先敘明處置設施之處置安全概念，以及處置系統如何實現其安全功能，進而達成法規規範對於處置安全之要求。而「主要設計特徵」即為與處置安全功能直接關聯之設計特徵。美國於 10CFR61 法規中已明確定義其近地表處置設施之環境與處置系統特徵概念，並將與實現安全功能相關之處置設施設計項目明列為「主要設計特徵」。用以規範申請者須清楚說明所有主要設計特性徵與其相互關係，以利確認處置系統設計是否已完整考量。申請者進行「主要設計特徵」設計時，需基於場址所在環境特性訂定「設計基準」，說明該處置設施在正常情節與異常情節下可能會面臨之環境特徵，並據以訂定處置設施設計對於環境之基本考量，如：最大可能降雨、洪水與地震之規模等。再根據「設計基準」與「主要設計特徵」訂定其「設計準則」並執行其設計工作。

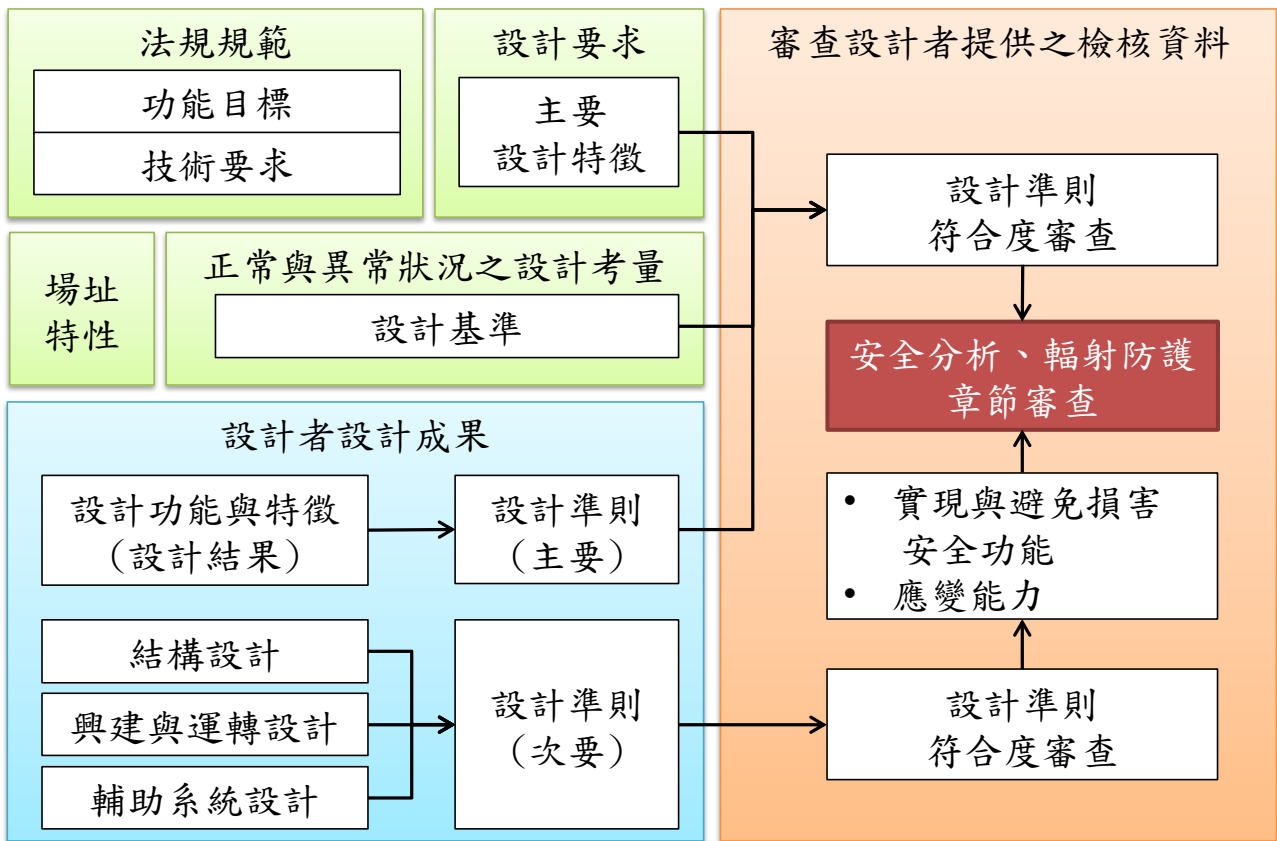


圖 4.2-1 處置設計審查考量架構示意圖

設計準則研擬方式與設計成果是否符合設計準則之驗證方式，主要遵循設計規範或行業標準，並不會一定會直接反應至安全功能的評量上，例如：結構安定分析、沉陷分析等。因此，處置設施設計審查將會先對申請者訂定之「設計準則」符合度進行評量，如：設計準則是否正確考量其正常與異常情節對應之設計基準、設計準則是否符合其設計規範或行業標準、設計限制值或控制參數是否合理等。其次則是依申請者提供之設計驗證資料，評量申請者之設計成果是否均符合其設計準則。而對於安全功能的達成程度，則需透過安全分析章節或輻射防護章節審查成果進行確認。此外，監測與控制安全功能之相關設計、興建與運轉設計、以及輔助系統設計等，主要審查其可實現性、避免損害安全功能與應變能力。因此，可利用「主要設計特徵」來規範申請者須說明主要設計特徵與安全功能之關係。參考 NUREG-1200 所訂定之 11 項主要設計特徵，以及所蒐集坑道處置案例之安全功能考量，研擬坑道處置工程設計驗證需考量之「主要設計特徵」12 項，據以審視申請者所提出之「主要設計特徵」與「正常與異常狀況之設計考量」是否適切。「主要設計特徵」分別為：1.降低處置單元水滲透、2.工程障壁結構完整性、3.工程障壁具良好遲滯功能、4.運轉期降低廢棄物與水接觸、5.運轉期及封閉期場區之排水功能、6.地面設施之封閉後保

安設計、7.坑道處置設施之無意闖入者防護功能、8.場址封閉與穩定性、9.合適的廢棄物管控規劃、10.合適的處置場監測規劃、11.減少長期維護需求、12.提供適當監管與補救之緩衝區、13.合理抑低職業曝露。並整理其安全功能與主要考量時期考量如表 4.2-1 所列。

表 4.2-1 坑道處置工程設計之建議主要設計特徵與考量

主要設計特徵	主要安全功能	主要考量時期
降低處置單元水滲透	圍阻	封閉後
工程障壁結構完整性	圍阻	封閉後
工程障壁具良好遲滯功能	圍阻(遲滯)	封閉後
運轉期降低廢棄物與水接觸	圍阻	運轉
運轉期及封閉期場區之排水功能	圍阻	運轉
地面設施之封閉後保安設計	隔離	解除監管前
坑道處置設施之無意闖入者防護功能	隔離	封閉後
場址封閉與穩定性	隔離(遲滯)	封閉後
合適的廢棄物管控規劃	監測與控制	運轉
合適的處置場監測規劃	監測與控制	封閉後
減少長期維護需求	監測與控制	封閉後
提供適當監管與補救之緩衝區	監測與控制	封閉後
合理抑低職業曝露	輻射防護	運轉

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

## 第五章 「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」精進建議

本計畫參考 NUREG-1200 之內容與架構，依審查範圍、程序審查、審查要點與接受基準、審查發現、相關法規及技術規範之架構，重新整理第三章設施之設計基準，詳如附錄一。本章僅節錄考量 4.2 節低放處置技術工程設計模式審驗方式中，建議調整或新增之「主要設計特徵」關聯內容。主要為「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」之 3.3.1 節內容。說明如下：

最終處置設施設計目標與功能需求，係提供廢棄物的長期隔離、降低處置設施接收與處置放射性廢棄物之輻射劑量、降低封閉後維護工作量以及改進場址自然環境，以保護公眾的健康與安全。為達成設計目標與功能，須提供下列資料供審查：

- (1)說明降低處置單元水滲透之設計基準、設計要項及設計規格。
- (2)說明工程障壁系統結構完整性之設計基準、設計要項及設計規格。
- (3)說明工程障壁具良好遲滯功能之設計基準、設計要項及設計規格。
- (4)說明運轉期降低廢棄物與水接觸之設計基準、設計要項及設計規格。
- (5)說明運轉期及封閉期場區排水之設計基準、設計要項及設計規格。
- (6)說明地面設施之封閉後保安設計之設計基準、設計要項及設計規格。
- (7)說明坑道處置設施之無意闖入者防護功能之設計基準、設計要項及設計規格。
- (8)說明場址封閉與長期穩定之設計基準、設計要項及設計規格。
- (9)說明合適的廢棄物管控規劃之設計基準、設計要項及設計規格。
- (10)說明合適的處置場監測規劃之設計基準、設計要項及設計規格。
- (11)減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。
- (12)提供適當監管與補救之緩衝區，其設計基準、設計要項及設計規格。
- (13)合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。

上述供審查作業所提供資料中，各分項審查要點包含如下。

(1)降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明：

- 1.導引場區逕流或坑道滲水離開處置單元。
- 2.導引場外逕流流入排水系統及導引地下水或坑道滲水離開處置單元。

導引場區逕流、坑道滲水與地下水離開處置單元的主要設計準則，必須說明其排水系統可以控制逕流流速和地下水位。此最低流速與地下水位必須根據：

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

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

- 1.達成預期使用時間。
- 2.避免連續性維護需求。
- 3.可抵抗場址環境特徵的損害作用，如:大地應力、風化作用等。
- 4.達成結構穩定性要求

工程障壁系統結構完整性的主要設計準則至少應說明：

- 1.廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量。
- 2.評估整體性與差異性沉陷以及預估廢棄物與填充材料的密度增加狀況。
- 3.預估工程障壁材料在掩埋廢棄物可能受災時的強度與耐受性。
- 4.設計基準異常事件對於結構穩定性的效應。
- 5.相關於最大地震的異常地表震動。

若為地表式處置單元工程障壁系統，則侵蝕保護之主要設計準則至少應說明：

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

(3)工程障壁具良好遲滯功能之設計，是否清楚說明：

1.工程障壁單元達成遲滯功能之設計特徵，如:高水力反差、吸附能力、化學環境控制等。

2.工程障壁單元可達成之遲滯能力。

主要設計準則至少應說明：

1.障壁材料達成遲滯能力之設計特徵要求，如：膨脹能力、蒙脫石含量、空隙率等。

2.障壁單元依時性之遲滯能力。

3.設計基準異常事件對於障壁單元遲滯能力的影響。

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

1.說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元。

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

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

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

(5)處置場運轉期及封閉期之場區排水設計，是否說明達成下列排水功能之方法：

1.引導逕流、坑道滲水或地下水遠離廢棄物之方法。

2.控制排水系統流出處置單元之方法。

主要設計準則至少應說明：

1.運轉期及封閉期場址表土或坑道的排水狀況。

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



(6)地面設施之封閉後保安設計，是否清楚說明設施封閉後之保安設施或措施，以避免個人不經意的侵入處置設施。主要設計準則必須說明標示物、障壁材料，障壁退化比率的可能範圍。

(7)坑道處置設施無意闖入者防護之設計，是否清楚說明其岩覆厚度考量，並避開可能誘發地下資源開採之資源。障壁主要設計準則必須說明地質抬升、地表剝蝕與侵蝕對於岩覆厚度之影響範圍。

(8)場址封閉與長期穩定之設計，是否清楚說明其措施，可達下列需求：

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

場址封閉及長期穩定之主要設計準則應至少說明：

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

(9)廢棄物管控規劃之設計，是否清楚說明其廢棄物採分類分區處置，並依工程障壁系統特性管控其處置單元之處置核種種類與活度。主要設計準則必須訂定與預測：

- 1.處置單元可處置之核種總活度、長半化期核種種類與活度等。
- 2.預測解除監管後對於保護無意闖入者之被動安全功能。

(10)現場監測之設計，是否清楚說明處置場運轉中及運轉後的環境監測計畫。現場監測系統之主要設計準則必須說明：

- 1.監測系統設備與組件的已知使用壽命。
- 2.退化的可能速率和監測設備失效的可能事件的處理方法。

(11)減少長期維護需求之設計，是否清楚說明處置場封閉後，如何避免長期維護之需求。主要設計準則必須預測：

- 1.材料之耐用性。
- 2.侵蝕作用。

3.障壁系統退化的效應。

4.監控系統的退化。

(12)緩衝區之設計，是否清楚說明外圍處置單元與場界間緩衝區之特性。緩衝區之主要設計準則必須說明：

1.監測所需的空間尺寸。

2.採取應變措施所需時間。

(13)合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明：

1.接收、檢查、管控、貯存、處置和封閉作業之輻射合理抑低措施。

2.對已知較高活度廢棄物之屏蔽設計。

3.處置非穩定性廢棄物或裝載意外破損廢棄物的預備方案。

## 第六章 結論與建議

- (1)本計畫依 IAEA 「放射性廢棄物處置特定安全要求」(NO. SSR-5)所述之處置安全功能與要求為基礎，彙整所蒐集之國際處置工程設計案例，藉以整合各國不同環境特性與不同處置設計之考量。
- (2)處置設施設計以實體工程障壁系統實現多重安全功能，並搭配監測與控制設計確保其安全功能。工程障壁系統之安全功能以圍阻與隔離功能為核心，當處置場址特徵非屬乾燥環境，則工程障壁設計增加考量遲滯功能。
- (3)就安全功能實現程度而言，由廢棄物體、盛裝容器、填充材料、處置窖或覆蓋層、回填層所組成之工程障壁系統為實現圍阻功能之主體。而隔離功能設計，則較側重依場址環境特性搭配場保安系統軟硬體設施共同達成功能要求。
- (4)基於低放射性廢棄物以短半化期核種為主之特性，於處置系統設計時首重圍阻功能。依低放射性廢棄物所含長半化期核種與活度作為區分基礎，長半化期核種活度越高則其搭配之工程障壁圍阻功能要求越高，且優先提高廢棄物體與盛裝容器要求。反之較低者，配合其環境特徵亦可採用遲滯設計來達到圍阻功能。
- (5)由於處置系統安全功能屬於整體考量，故以安全論證作為審查對象。也因此，處置工程設計審驗時，主要審查其設計準則是否符合安全功能考量，以及設計準則是否合理考量正常與異常情節。主要之審查對象為反映安全功能之「主要設計特徵」、反映場址與情節特性作用之「設計基準」、申請者規範其具體設施設計要求之「設計準則」，其審查架構如圖 4.2-1 所示。
- (6)經本計畫分析，建議坑道處置設計審驗可利用「主要設計特徵」作為審查主體，基於實現圍阻與隔離功能考量，建議主要設計特徵為：1.降低處置單元水滲透、2.工程障壁結構完整性、3.工程障壁具良好遲滯功能、4.運轉期降低廢棄物與水接觸、5.運轉期及封閉期場區之排水功能、6.地面設施之封閉後保安設計、7.坑道處置設施之無意闖入者防護功能、8.場址封閉與穩定性、9.合適的廢棄物管控規劃、10.合適的處置場監測規劃、11.減少長期維護需求、12.提供適當監管與補救之緩衝區、13.合理抑低職業曝露。
- (7)由於處置設施設計審查時，將先審視訂定之設計準則是否可實現安全功能。其後，主要以設計規範與行業標準作為審驗基準，評量申請者所提出設計成果是否符合設計準則，而安

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

## 參考文獻

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

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

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

## 3.1 審查範圍

審查人員參考低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則，審查本章的範圍包括：一、設計目標與功能需求；二、設施設計；三、結構設計；四、處置單元設計；五、輻射安全設計；六、輔助設施或系統之設計；七、公共設施或系統之設計；八、設計成果。

## 3.2 程序審查

審查人員應查核安全分析報告內容是否符合上述審查範圍所規定之基本要求，並決定資料的詳細程度是否能足以讓審查人員進行細節技術審查。審查人員應確認本章內容包含以下資訊：

- (1)處置設施設計基準、設計要項及設計規格。
- (2)處置設施主要結構物、使用需求規劃及其配置。
- (3)處置設施主要結構物結構分類、設計荷重及其組合。
- (4)處置設施主要結構物工程材質、屏蔽材料特性與設計標準（包括其覆蓋、回填等）、地表防洪及地下排水系統之設計。
- (5)輻射安全設計
  - 1.說明輻射防護分區規劃，並說明各區之輻射安全限值。
  - 2.說明處置設施輻射屏蔽結構體構造強度、比重、厚度等有關資料。
  - 3.說明廢棄物含有核種之活度、比活度、分布情形，並說明各區於正常運轉期間之廢棄物存量安排。
  - 4.說明使用的輻射屏蔽分析軟體與屏蔽參數設定資料。
  - 5.說明設施正常運轉期間，合理抑低工作人員輻射劑量所採行之設計或措施，至少包括下列各項：
    - A.輻射監測區域規劃、輻射管制區劃分及輻射防護設備之使用等。

B.廢棄物接收、暫貯、檢整、搬運、處置及控制中心等作業區職業曝露合理抑低之設計。

C.對較高活度廢棄物之屏蔽設計。

- (1)廢棄物暫貯區、檢整或處理系統、粉塵與廢水收集排放處理系統、廢棄物傳送系統、分析或偵測系統等之設計(包含各系統失效時之補救措施)。
- (2)通訊、電力、供水、供氣、照明、一般事業廢棄物處理、通風等系統之設計(包含各系統失效時之補救措施)。
- (3)設計成果適當比例尺之詳細圖說，以及設計細部資料。

### 3.3 審查要點與接受基準

安全分析報告內本章的內容應符合以下各節所述要求。

#### 3.3.1 設計目標與功能需求

最終處置設施設計目標與功能需求，係提供廢棄物的長期隔離、降低處置設施接收與處置放射性廢棄物之輻射劑量、降低封閉後維護工作量以及改進場址自然環境，以保護公眾的健康與安全。為達成設計目標與功能，須提供下列資料供審查：

- (1)說明降低處置單元水滲透之設計基準、設計要項及設計規格。
- (2)說明工程障壁系統結構完整性之設計基準、設計要項及設計規格。
- (3)說明工程障壁具良好遲滯功能之設計基準、設計要項及設計規格。
- (4)說明運轉期降低廢棄物與水接觸之設計基準、設計要項及設計規格。
- (5)說明運轉期及封閉期場區排水之設計基準、設計要項及設計規格。
- (6)說明地面設施之封閉後保安設計之設計基準、設計要項及設計規格。
- (7)說明坑道處置設施之無意闖入者防護功能之設計基準、設計要項及設計規格。
- (8)說明場址封閉與長期穩定之設計基準、設計要項及設計規格。
- (9)說明合適的廢棄物管控規劃之設計基準、設計要項及設計規格。
- (10)說明合適的處置場監測規劃之設計基準、設計要項及設計規格。



- (11)減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。
- (12)提供適當監管與補救之緩衝區，其設計基準、設計要項及設計規格。
- (13)合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。

上述供審查作業所提供資料中，各分項審查要點包含如下。

(1)降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明：

- 1.導引場區逕流或坑道滲水離開處置單元。
- 2.導引場外逕流流入排水系統及導引地下水或坑道滲水離開處置單元。

導引場區逕流、坑道滲水與地下水離開處置單元的主要設計準則，必須說明其排水系統可以控制逕流流速和地下水位。此最低流速與地下水位必須根據：

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

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

- 1.達成預期使用時間。
- 2.避免連續性維護需求。
- 3.可抵抗場址環境特徵的損害作用，如:大地應力、風化作用等。
- 4.達成結構穩定性要求

工程障壁系統結構完整性的主要設計準則至少應說明：

- 1.廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量。
- 2.評估整體性與差異性沉陷以及預估廢棄物與填充材料的密度增加狀況。
- 3.預估工程障壁材料在掩埋廢棄物可能受災時的強度與耐受性。
- 4.設計基準異常事件對於結構穩定性的效應。
- 5.相關於最大地震的異常地表震動。

若為地表式處置單元工程障壁系統，則侵蝕保護之主要設計準則至少應說明：

1.一般運作狀況時的地表水和風速。

2.異常性地表水與風速以及正常水位。

(3) 工程障壁具良好遲滯功能之設計，是否清楚說明：

1.工程障壁單元達成遲滯功能之設計特徵，如：高水力反差、吸附能力、化學環境控制等。

2.工程障壁單元可達成之遲滯能力。

主要設計準則至少應說明：

1.障壁材料達成遲滯能力之設計特徵要求，如：膨脹能力、蒙脫石含量、空隙率等。

2.障壁單元依時性之遲滯能力。

3.設計基準異常事件對於障壁單元遲滯能力的影響。

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

1.說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元。

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

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

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

(5)處置場運轉期及封閉期之場區排水設計，是否說明達成下列排水功能之方法：

1.引導逕流、坑道滲水或地下水遠離廢棄物之方法。

2.控制排水系統流出處置單元之方法。

主要設計準則至少應說明：

1.運轉期及封閉期場址表土或坑道的排水狀況。

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

(6)地面設施之封閉後保安設計，是否清楚說明設施封閉後之無意闖入者防護設施或措施，以避免個人不經意的侵入處置設施。障壁主要設計準則必須說明標示物、障壁材料，障壁退化比率的可能範圍。

(7)坑道處置設施無意闖入者防護之設計，是否清楚說明其岩覆厚度考量，並避開可能誘發地下資源開採之資源。障壁主要設計準則必須說明地質抬升、地表剝蝕與侵蝕對於岩覆厚度之影響範圍。

(8)場址封閉與長期穩定之設計，是否清楚說明其措施，可達下列需求：

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

場址封閉及長期穩定之主要設計準則應至少說明：

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

(9)廢棄物管控規劃之設計，是否清楚說明其廢棄物採分類分區處置，並依工程障壁系統特性管控其處置單元之處置核種種類與活度。主要設計準則必須訂定與預測：

- 1.處置單元可處置之核種總活度、長半化期核種種類與活度等。
- 2.預測解除監管後對於保護無意闖入者之被動安全功能。

(10)現場監測之設計，是否清楚說明處置場運轉中及運轉後的環境監測計畫。現場監測系統之主要設計準則必須說明：

- 1.監測系統設備與組件的已知使用壽命。
- 2.退化的可能速率和監測設備失效的可能事件的處理方法。

(11)減少長期維護需求之設計，是否清楚說明處置場封閉後，如何避免長期維護之需求。主要設計準則必須預測：

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

(12)緩衝區之設計，是否清楚說明外圍處置單元與場界間緩衝區之特性。緩衝區之主要設計準則必須說明：

- 1.監測所需的空間尺寸。
- 2.採取應變措施所需時間。

(13)合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明：

- 1.接收、檢查、管控、貯存、處置和封閉作業之輻射合理抑低措施。
- 2.對已知較高活度廢棄物之屏蔽設計。
- 3.處置非穩定性廢棄物或裝載意外破損廢棄物的預備方案。

### 3.3.2 設施設計

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

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

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

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

### 3.3.3 結構設計

說明處置設施主要結構物之結構分類、設計荷重及其組合等。為促進處置設施各類重要結構物的安全，在結構設計方面，須提供下列資料供審查。

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

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

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

### 3.3.4 處置安全設計

說明處置設施主要結構物之工程材質、屏蔽材料之特性與設計標準（包括處置設施及其覆蓋、回填等）、地表防洪及地下排水系統之設計。為促進處置設施安全，應慎選工程材質與屏蔽材料，並須考量處置設施覆蓋與回填、地表防洪、地下排水系統及、護坡工程或處置坑道工程等，在處置設施長期安全設計方面，須提供下列資料供審查。

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

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

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

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

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

(5)所引用的法規、標準或規範是否適切。

### 3.3.5 輻射安全設計

(1)申請者須詳實說明各輻射防護區之劃分原則、條件與輻射劑量限值：

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

(2)輻射屏蔽結構與屏蔽分析

- 1.說明輻射屏蔽結構之構造強度、比重、厚度、材料等有關資訊，並說明輻射屏蔽結構是否一併考慮在建築物結構體內。
- 2.針對暫時性之輻射屏蔽，須說明暫時性輻射屏蔽之材料、厚度等有關資訊，並說明使用條件。
- 3.說明正常運轉期間，各區最大廢棄物存量設計、核種活度、比活度，以及廢棄物堆置規劃。
- 4.說明輻射屏蔽計算程式、設定參數與假設條件，並將上述(一)至(三)之設計條件納入分析，計算各區域之輻射劑量率。
- 5.提供設施配置圖，配置圖上須標示屏蔽牆厚度。

(3)職業曝露合理抑低

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

### 3.3.6 輔助設施或系統之設計

說明廢棄物暫貯區、廢棄物檢整或處理系統、粉塵與廢水收集排放處理系統、廢棄物傳送系統、分析或偵測系統等之設計，並說明各系統失效時之補救措施。其設計應能達成：

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



上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

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

### 3.3.7 公共設施或系統之設計

說明通訊、電力、供水、供氣、照明、一般事業廢棄物處理、通風等系統之設計，並說明各系統失效時之補救措施。為確保每一公用系統能有效協助處置設施運轉並維護工作人員安全，須提供下列資料供審查。

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

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

(8)消防系統之設計：

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

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

(1)通訊系統之設計與安裝：

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

(2)電力系統之設計與安裝：是否可對處置設施安全運轉，提供充足的電力。

(3)供水系統之設計與建造：

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

(4)供氣系統之設計與安裝：

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

(5)照明系統之設計與安裝：

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

(6)一般事業廢棄物處理系統之設計與建造：

- 1.是否符合國家環保法規。
- 2.是否會與設施的設計或運轉相抵觸。

(7)通風系統之設計與安裝：

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

(8)消防系統之設計與安裝：

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

### 3.3.8 設計成果

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

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

上述供審查作業所提供資料中，審查要點包含如下。

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

### 3.4 審查發現

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

### 3.5 相關法規與技術規範

- (1) 低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則。
- (2) 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。
- (3) 放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法。
- (4) 放射性物質安全運送規則。
- (5) 游離輻射防護法。
- (6) 游離輻射防護法施行細則。
- (7) 游離輻射防護安全標準。