



行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物處置安全管制技術發展  
子計畫二：低放射性廢棄物處置設施設計  
審查規範精進之研究

正式報告

計畫編號：103FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：林伯聰

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 103 年 12 月



## 目錄

第一章	前言.....	1
1.1	計畫目的.....	1
1.2	服務項目及工作範圍.....	1
1.3	工作進度.....	2
第二章	日本、瑞典與我國低放處置工程障壁系統設計與參數.....	3
2.1	日本低放處置工程障壁系統之設計與參數.....	3
2.1.1	低放處置工程障壁系統之設計.....	3
2.1.2	工程障壁系統之安全分析參數.....	5
2.2	瑞典低放處置工程障壁系統之設計與參數.....	16
2.2.1	低放處置工程障壁系統之設計.....	16
	一、筒倉(Silo).....	17
	二、BMA 處置坑道.....	17
	三、BLA 處置坑道.....	19
	四、BTF 處置坑道.....	19
	2.2.2 工程障壁系統之安全分析參數.....	20
	一、模式概述.....	21
	(一)筒倉.....	22
	(二)BMA 處置坑道.....	23
	二、選用參數.....	27
	(一)物理與化學數據資料.....	27
	2.3 我國低放處置工程障壁系統之設計與參數.....	31
	2.3.1 台東縣達仁鄉建議候選場址.....	31
	一、場址佈置規劃.....	31
	二、工程障壁設施.....	34
	三、工程障壁之核種傳輸.....	39
	2.3.2 金門縣烏坵鄉建議候選場址.....	41
第三章	工程障壁系統安全評估之解析方法與參數設定研析.....	46
3.1	工程障壁系統之安全評估解析方法.....	46
3.2	工程障壁系統之安全評估參數設定.....	55
	一、水力傳導係數.....	55
	二、擴散係數.....	62
	三、吸附分配係數.....	68
第四章	工程障壁設計特性參數敏感度測試案例研析.....	72
4.1	一維解析之測試案例設定.....	73
4.2	一維解析之分析結果.....	73

第五章 工程障壁最適化設計之研析.....	80
5.1 GoldSim 解析之測試案例設定.....	80
5.2 GoldSim 解析方法.....	84
5.3 GoldSim 解析之分析結果.....	89
一、A 類廢棄物.....	89
二、B 類/C 類廢棄物.....	90
第六章 低放審查導則(第 0 版)修訂建議.....	96
第七章 結論與建議.....	128
參考文獻.....	130
放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估安全審查技術建置期末報告(初稿)審查 意見與答復說明.....	131

## 表目錄

表 2.1.2-1	工程障壁的材料特性 .....	11
表 2.1.2-2	還原性環境下的吸附分配係數 .....	12
表 2.1.2-3	氧化性環境下的吸附分配係數 .....	13
表 2.1.2-4	地下水流速隨時間的變化 .....	14
表 2.1.2-5	設施通過水量隨時間的變化 .....	14
表 2.1.2-6	各案例的情節概要 .....	15
表 2.2.2-1	障壁材料特性 .....	28
表 2.2.2-2	吸附分配係數， $K_d(m^3/kg)$ .....	28
表 2.2.2-3	受化學作用影響吸附分配係數， $K_d(m^3/kg)$ .....	29
表 2.2.2-4	流經各處置設施構件的總水流率 .....	30
表 2.2.2-5	劣化時流經各處置設施構件的總水流率 .....	30
表 2.3.1-1	相關參數設定一覽表 .....	40
表 2.3.2-1	烏坵場址計算近場核種傳輸之重要參數設定 .....	45
表 2.3.2-2	烏坵場址分析時主要核種的混凝土吸附分配係數 .....	45
表 3.2-1	各國水泥材料之水力傳導係數 .....	57
表 3.2-2	各國膨潤土材料之水力傳導係數 .....	61
表 3.2-3	我國對日興膨潤土之水力傳導係數試驗結果 .....	62
表 3.2-4	水泥材料之擴散係數 .....	64
表 3.2-5	膨潤土材料之擴散係數 .....	67
表 3.2-6	各國於安全評估時的核種吸附分配係數(水泥材料) .....	69
表 3.2-7	各國於安全評估時的核種吸附分配係數(膨潤土材料) .....	70
表 4.1-1	測試案例參數表 .....	73
表 4.2-1	水泥材料內之移流擴散傳輸距離 .....	78
表 4.2-2	膨潤土材料內之移流擴散傳輸距離 .....	79
表 5.1-1	每桶廢棄物所含核種之半衰期與初始濃度設定值 .....	81
表 5.1-2	水泥材料的測試案例參數 .....	82
表 5.1-3	膨潤土材料的測試案例參數 .....	83
表 5.2-1	分析時使用之「Container」、「Element」與「Pathway」 .....	85
表 5.3-1	A 類廢棄物的混凝土障壁最小尺寸(移流+擴散) .....	89
表 5.3-2	A 類廢棄物的混凝土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附) .....	90
表 5.3-3	B 類/C 類廢棄物的混凝土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附) .....	91
表 5.3-4	B 類/C 類廢棄物的膨潤土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附、地下水流場 梯度 0.001) .....	92
表 5.3-5	B 類/C 類廢棄物的膨潤土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附、地下水流場 梯度 0.01) .....	93

表 5.3-6 B 類/C 類廢棄物的膨潤土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附、地下水流場 梯度 0.05).....	94
表 6-1 「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第 0 版)第四 章處置設施之設計修正草案對照表.....	97

## 圖目錄

圖 2.1.1-1	日本低放射性廢棄物坑道處置之工程障壁概念示意圖 .....	3
圖 2.1.1-2	調查坑道概念示意圖 .....	4
圖 2.1.1-3	試驗坑道 .....	5
圖 2.1.2-1	核種傳輸評估之概念模式 .....	6
圖 2.1.2-2	處置設施的設計 .....	11
圖 2.2.1-1	瑞典 SFR 處置場配置圖 .....	16
圖 2.2.1-2	SFR 處置場之筒倉(Silo)構造示意圖 .....	18
圖 2.2.1-3	BMA 處置坑道之概念示意圖 .....	18
圖 2.2.1-4	BLA 處置坑道之概念示意圖 .....	19
圖 2.2.1-5	BTF 處置坑道之概念示意圖 .....	20
圖 2.2.2-1	筒倉內的核種傳輸路徑 .....	22
圖 2.2.2-2	BMA 處置坑道內的核種傳輸路徑 .....	24
圖 2.2.2-3	BLA 處置坑道內的核種傳輸路徑 .....	25
圖 2.2.2-4	1BTF 處置坑道內的核種傳輸路徑 .....	26
圖 2.2.2-5	2BTF 處置坑道內的核種傳輸路徑 .....	27
圖 2.3.1-1	達仁鄉建議候選場址平面佈置示意圖 .....	33
圖 2.3.1-2	處置窖斷面示意圖 .....	35
圖 2.3.1-3	坑道式處置封閉結構安全設計概念示意圖 .....	36
圖 2.3.1-4	55 加侖桶之坑道式處置窖示意圖(A 類) .....	37
圖 2.3.1-4	55 加侖桶之坑道式處置窖示意圖(B 類、C 類) .....	38
圖 2.3.1-5	3×4 重裝容器之坑道式處置窖示意圖(A 類) .....	38
圖 2.3.1-5	3×4 重裝容器之坑道式處置窖示意圖(B 類、C 類) .....	39
圖 2.3.2-1	金門縣烏坵鄉建議候選場址規劃佈置圖 .....	41
圖 2.3.2-2	烏坵場址的廢棄物桶處置坑道斷面示意圖 .....	42
圖 2.3.2-3	烏坵場址的重裝容器處置坑道斷面示意圖 .....	43
圖 3.1-1	空間中控制體積內之質量平衡示意圖 .....	47
圖 3.2-1	日本不同配比水泥之孔隙率與水力傳導係數分布圖 .....	56
圖 3.2-2	日本水泥砂漿與水泥漿體之孔隙率與水力傳導係數分布圖 .....	56
圖 3.2-3	水泥材料水力傳導係數與孔隙率之關係 .....	57
圖 3.2-4	國內對水泥材料之水力傳導係數與水灰比關係之研究 .....	58
圖 3.2-5	日本 kunigel V1 膨潤土的乾密度與水力傳導係數分布圖 .....	59
圖 3.2-6	日本 kunigel GX 膨潤土的有效黏土密度與水力傳導係數分布圖 .....	59
圖 3.2-7	日本膨潤土的有效蒙脫石密度與水力傳導係數分布圖 .....	60
圖 3.2-8	膨潤土材料之水力傳導係數與乾密度之關係 .....	61
圖 3.2-9	日本添加飛灰之水泥孔隙率與擴散係數分布圖 .....	63

圖 3.2-10	日本不同配比之低熱波特蘭水泥孔隙率與擴散係數分布圖 .....	64
圖 3.2-11	水泥材料之擴散係數與孔隙率之關係 .....	65
圖 3.2-12	Na 型膨潤土與 Ca 型化膨潤土，其有效黏土密度與 H-3 的有效擴散係數之關係.....	66
圖 3.2-13	各種離子的有效擴散係數與乾密度之關係 .....	66
圖 3.2-14	各國膨潤土材料之擴散係數與乾密度之關係 .....	67
圖 4-1	工作流程圖 .....	72
圖 4.2-1	水泥材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.001)	74
圖 4.2-2	水泥材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.01)	75
圖 4.2-3	水泥材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.05)	75
圖 4.2-4	膨潤土材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.001) .....	76
圖 4.2-5	膨潤土材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.01) .....	76
圖 4.2-6	膨潤土材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.05) .....	77
圖 5.1-1	以 GoldSim 進行案例分析之流程.....	80
圖 5.2-1	工程障壁中的核種遷移概念模型 .....	84
圖 5.2-2	在 GoldSim 平台上建立分析案例.....	85
圖 5.2-3	「Parameter」資料夾中的參數設定.....	87
圖 5.2-4	「Material」資料夾中的參數設定.....	87
圖 5.2-5	「EBS_Concrete」資料夾中建立核種在混凝土障壁的遷移路徑 .....	88
圖 5.2-6	「Dos」資料夾中關鍵群體的曝露計算.....	88



# 第一章 前言

## 1.1 計畫目的

為確保低放射性廢棄物最終處置設施可滿足安全需求，行政院原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)於 100 年度初步完成「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」，做為後續低放射性廢棄物處置作業推動之管制規範。考量核種遷移評估為確保處置設施安全之重要關鍵因素之一，在多重障壁系統的處置概念下，天然障壁受限於場址地質特性，須於場址確定並取得相關地質參數資料後才能進行完善的安全分析，工程障壁在安全分析上則受到材料組成、材料特性及工程設計等可控制條件影響，故今(103)年度擬就工程障壁系統之設計與核種遷移參數之關連性進行研析，建立安全功能、設計參數與最小設計尺寸之關係，供日後於審查安全分析報告時之參考，並藉以提升國內低放處置關鍵管制技術及精進相關管制規範。

## 1.2 服務項目及工作範圍

1. 蒐集日本、瑞典與我國低放處置設施之工程障壁系統設計或概念設計資料，以及工程障壁系統於安全分析時所採用之相關參數資料。
2. 依所蒐集相關資料，分析其工程障壁系統於安全分析時所採用之解析方法與參數設定方式，以及其安全功能目標，據以設計本研究計畫之工程障壁系統解析方法與相關測試例之參數設定。
3. 在不同測試例的情境下，分析不同工程設計特性參數之變動，對於設施欲達成其安全功能目標所需之最小設計尺寸。
4. 綜合分析前述參數與最小設計尺寸之關聯性研析成果，考量我國目前一般之工程技術能力，建立安全功能、設計參數與

最小設計尺寸之關聯性對照，做為「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)」之技術資料，供日後於審查安全分析報告時之參考。

5. 撰寫研究計畫成果報告。

1.3 工作進度

工作項目	年月											
	103 2	103 3	103 4	103 5	103 6	103 7	103 8	103 9	103 10	103 11	103 12	
日本、瑞典與我國低放處置工程障壁系統設計與參數蒐集	■	■										
工程障壁系統安全評估之解析方法與參數設定研析		■	■	■								
工程障壁設計特性參數敏感度測試案例研析				■	■	■	■					
工程障壁最適化設計之研析							■	■	■			
提出低放審查導則(第0版)設計有關章節與條文內容修訂建議									■	■		
工作進度估計百分比 (累積數)	5 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	
工作執行進度百分比	5 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	

## 第二章 日本、瑞典與我國低放處置工程障壁系統設計與參數

### 2.1 日本低放處置工程障壁系統之設計與參數

#### 2.1.1 低放處置工程障壁系統之設計

日本核燃料公司依據日本原子能委員會之低放射性廢棄物處置需求，於日本青森縣六所村之地表下 50m~100m 規劃一座中放射性廢棄物坑道處置場，以天然障壁及工程障壁組合而成的多重障壁系統，遲滯放射性核種遷移，確保處置之安全性，如圖 2.1.1-1 所示。

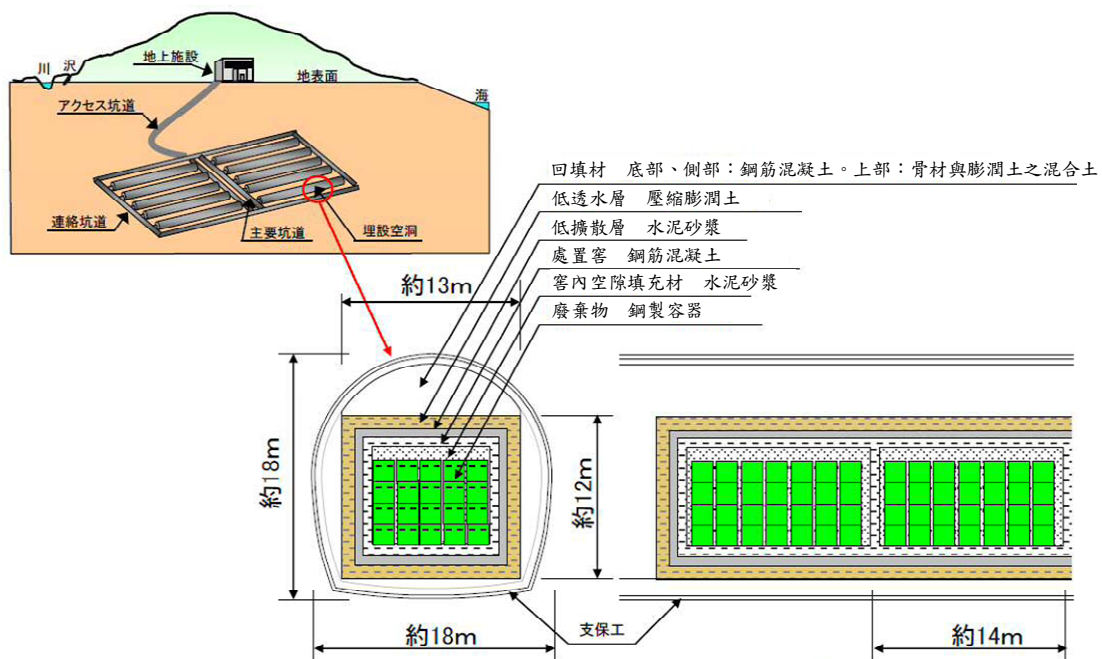


圖 2.1.1-1 日本低放射性廢棄物坑道處置之工程障壁概念示意圖

坑道處置設施主要包含低放射性廢棄物接收設施、埋設低放射性廢棄物之處置坑道、處置坑道之聯絡坑道，以及包含處置坑道之工程障壁系統。工程障壁系統大致可概分成使用水泥類材料的工程障壁、使用膨潤土類材料的工程障壁及與處置坑道相關之

支保工等。使用水泥類材料的工程障壁包括處置窖、填充於廢棄物與處置窖間空隙的填充材及包覆於處置窖外層的低擴散層。使用膨潤土類材料的工程障壁則包括包覆於低擴散層外層的低透水層及填充於坑道與低透水層間空隙的回填材。

為評估坑道處置之可行性，日本於 2001 年開始進行地質、水文、化學、地球物理等量測與試驗，初步評估此區之地質狀況為凝灰岩、砂岩及泥岩，岩體裂隙少透水性差，且強度足以進行坑道開挖。並於 2002 年開始進行細部調查工作，同時開挖一條長約 1,100m 的調查坑道(寬 7m、高 5m)，以進行地質觀察、物理試驗、透水試驗、地下水壓量測等確保坑道安定性之調查試驗。此外，為配合處置設施之多重障壁系統概念，在調查坑道末端擴挖成斷面寬 18m、高 16m 及長度 70m 之試驗坑道，如圖 2.1.1-2 及圖 2.1.1-3 所示。此試驗坑道位於高程-90m 處，可進行工程障壁相關試驗與研究。而在開挖試驗坑道前，先於其周邊開挖 3 條觀測坑道，以監測岩盤變位及孔隙水壓等參數之變化。

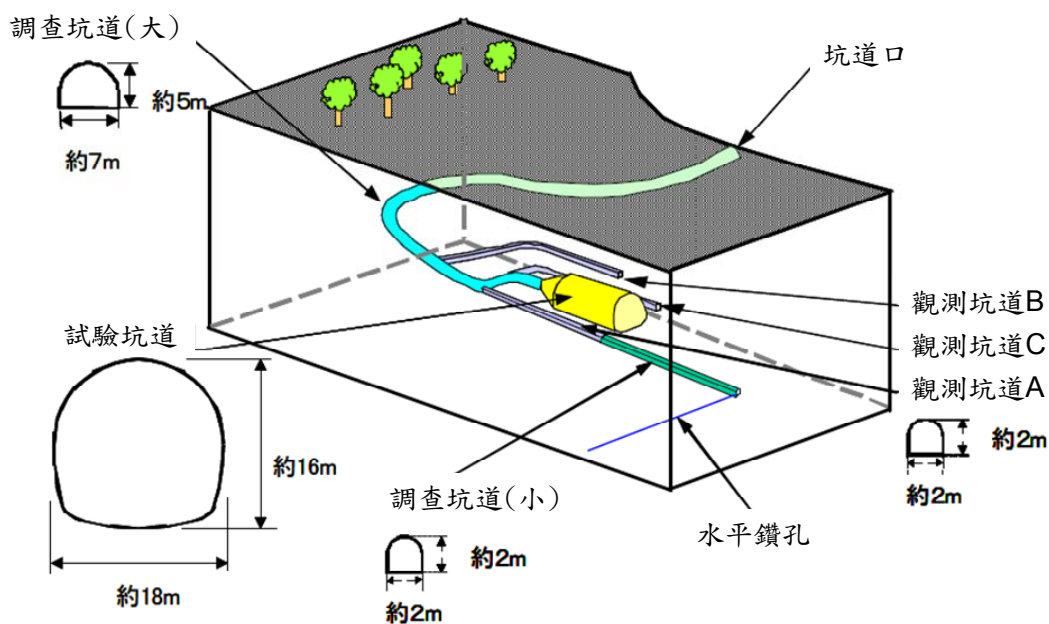


圖 2.1.1-2 調查坑道概念示意圖

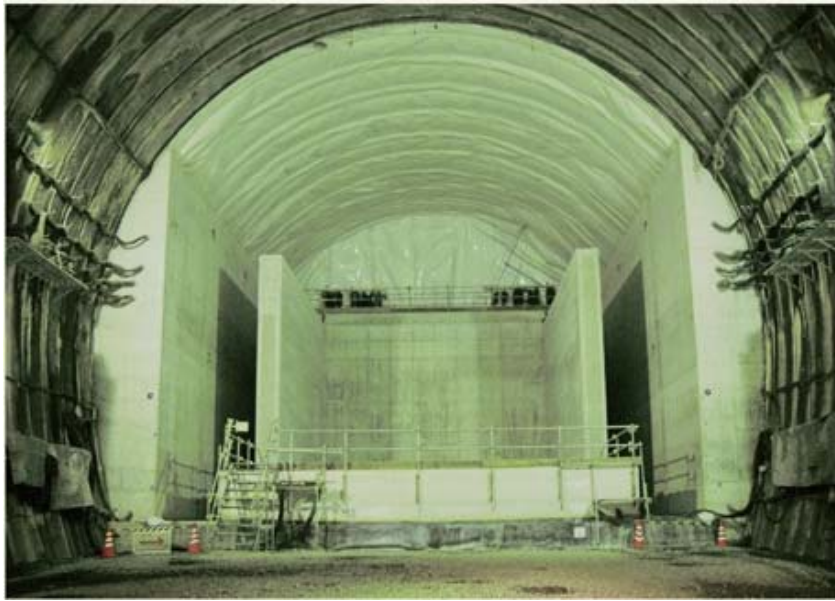


圖 2.1.1-3 試驗坑道

## 2.1.2 工程障壁系統之安全分析參數

日本低放射性廢棄物坑道處置於評估核種在工程障壁的地下水傳輸時，假設廢棄物包件內的核種於運轉期結束後開始釋出，並藉由吸附、擴散、移流等作用，自處置窖、低擴散層、低透水層、緩衝材料傳輸至天然障壁。

### 一、模式概述

進行安全分析時，由於廢料包件依其特性有不同的分類，各分類廢棄物各以 1 條遷移路徑(坑道)為代表，並依此將其模型化及設定相關參數。在工程障壁部分，主要分成廢料包件、窖內填充材料、處置窖、低擴散層、膨潤土類材料層等區塊，其傳輸概念評估模式如圖 2.1.2-1 所示。核種由廢料包件釋出後，部分在輻射金屬中的核種會隨金屬的腐蝕速度持續釋出，而在其他廢棄物內的核種則會瞬間釋出。核種釋出後，在水泥材料構成的窖內填充材中與地下水混合達到吸附平衡，而

在處置窖內，核種則主要藉由吸附、擴散、移流等作用傳輸至低擴散層。在低擴散層內，考量因外力作用造成的連續裂縫而形成遷移路徑的可能性，將低擴散層分為未劣化區與劣化區兩部分，未劣化區主要為擴散與吸附作用，劣化區則以移流及擴散作用為主，並以劣化面積的比例決定此兩區的範圍大小。核種傳輸至膨潤土材料層後，主要受到吸附、擴散、移流等作用影響，而後在開挖擾動區(EDZ)內混合，並傳輸至地質圈。

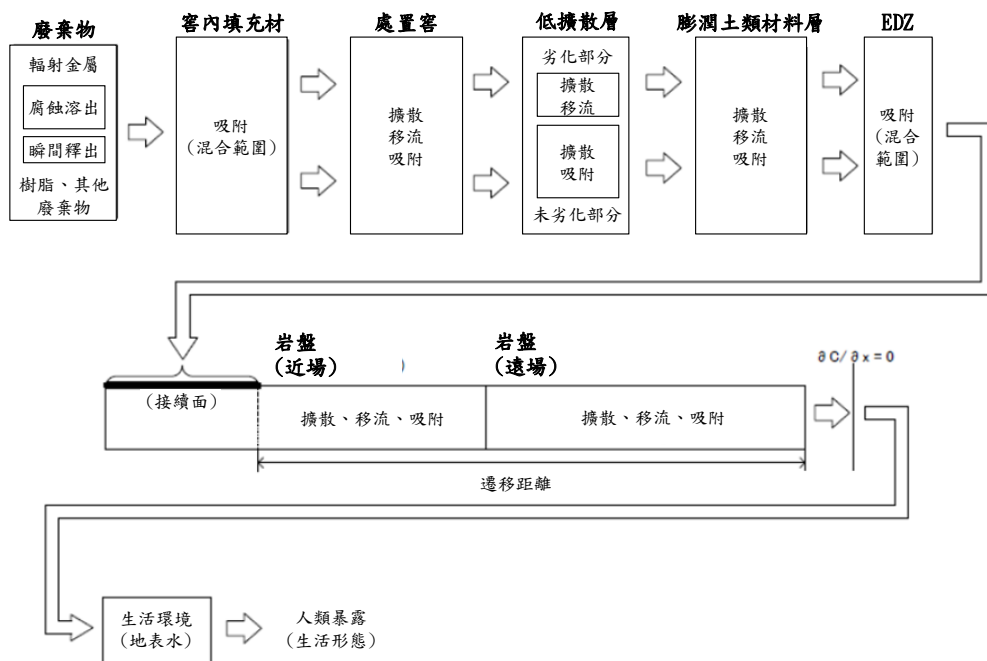


圖 2.1.2-1 核種傳輸評估之概念模式

完成工程障壁的概念化模式後，以廣用的商業模擬軟體 GoldSim 為工具，加上設定的一維遷移分散評估方程式，進行核種遷移分析。各區塊之一維遷移分散評估方程式詳列如下：

(一) 輻射金屬產生的核種溶出量

$$R_{WM}(t, i) = \sum_n A_{WMn0} \cdot \eta_n(t) \cdot \exp\{-(\lambda(i) + \eta_n(t)) \cdot t\}$$

其中，

$R_{WM}(t, i)$ ：在  $t$  時間內，放射性核種  $i$  的溶出量(Bq/y)

$A_{WMn0}$ ：在輻射金屬  $n$  中，放射性核種  $i$  的初始濃度(Bq)

$\eta_n(t)$ ：在  $t$  時間內，輻射金屬  $n$  的溶出量(1/y)

$\lambda(i)$ ：放射性核種  $i$  的衰變常數(1/y)

(二) 窖內填充材的放射性核種濃度

$$\begin{aligned} \varepsilon_{WA} \cdot V_{WA} \cdot R_{fWA}(i) \frac{dC_{WA}(t, i)}{dt} \\ = S_{CP} De_{CP} \left. \frac{\partial C_{CP}(x, t, i)}{\partial x} \right|_{x=0} - Q_{EB} \cdot C_{WA}(t, i) - \lambda(i) \\ \cdot \varepsilon_{WA} \cdot R_{fWA}(i) \cdot V_{WA} \cdot C_{WA}(t, i) + \lambda(i-1) \cdot \varepsilon_{WA} \\ \cdot R_{fWA}(i-1) \cdot V_{WA} \cdot C_{WA}(t, i-1) + R(t, i) \\ R_{fWA}(i) = 1 + \frac{1 - \varepsilon_{WA}}{\varepsilon_{WA}} \cdot \rho_{WA} \cdot Kd_{WA}(i) \end{aligned}$$

其中，

$C_{WA}(t, i)$ ：在  $t$  時間內，窖內填充材內孔隙水之核種  $i$  的濃度(Bq/m<sup>3</sup>)

$C_{CP}(x, t, i)$ ：在  $t$  時間內，處置窖範圍  $x$  中，孔隙水之核種  $i$  的濃度(Bq/m<sup>3</sup>)

$S_{CP}$ ：處置窖的斷面積(m<sup>2</sup>)

$De_{CP}$ ：處置窖中的有效擴散係數(m<sup>2</sup>/y)

$V_{WA}$ ：窖內填充材的體積(m<sup>3</sup>)

$\varepsilon_{WA}$ ：窖內填充材的孔隙率(-)

$\rho_{WA}$ ：窖內填充材的真密度 (True density) (kg/m<sup>3</sup>)

$R_{fWA}(i)$ ：窖內填充材中放射性核種  $i$  的延遲係數(-)

$Kd_{WA}(i)$ ：窖內填充材中放射性核種  $i$  的吸附分配係數(m<sup>3</sup>/kg)

$\lambda(i)$ ：放射性核種  $i$  的衰變常數(1/y)

$Q_{EB}$ ：設施內的地下水通過流量(m<sup>3</sup>/y)

$R(t, i)$ ：在  $t$  時間內，放射性核種  $i$  的溶出量(Bq/y)

### (三)處置窖內的放射性核種濃度

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{CP} \cdot R_{fCP}(i) \cdot \frac{\partial C_{CP}(x, t, i)}{\partial t} \\ & = De_{CP} \frac{\partial^2 C_{CP}(x, t, i)}{\partial x^2} - \frac{Q_{EB}}{S_{CP}} \frac{\partial C_{CP}(x, t, i)}{\partial x} - \lambda(i) \cdot \varepsilon_{CP} \\ & \quad \cdot R_{fCP}(i) \cdot C_{CP}(t, i) + \lambda(i-1) \cdot \varepsilon_{CP} \cdot R_{fCP}(i-1) \\ & \quad \cdot C_{CP}(t, i-1) \\ R_{fCP}(i) & = 1 + \frac{1 - \varepsilon_{CP}}{\varepsilon_{CP}} \cdot \rho_{CP} \cdot Kd_{CP}(i) \end{aligned}$$

其中，

$C_{CP}(x, t, i)$ ：在  $t$  時間內，處置窖範圍  $x$  中，孔隙水之核種  $i$  的濃度( $Bq/m^3$ )

$De_{CP}$ ：處置窖中的有效擴散係數( $m^2/y$ )

$\varepsilon_{CP}$ ：處置窖的孔隙率(-)

$\rho_{CP}$ ：處置窖的真密度 (True density) ( $kg/m^3$ )

$R_{fCP}(i)$ ：處置窖中放射性核種  $i$  的延遲係數(-)

$Kd_{CP}(i)$ ：處置窖中放射性核種  $i$  的吸附分配係數( $m^3/kg$ )

$\lambda(i)$ ：放射性核種  $i$  的衰變常數( $1/y$ )

$Q_{EB}$ ：設施內的地下水通過流量( $m^3/y$ )

$S_{CP}$ ：處置窖的斷面積( $m^2$ )

### (四)低擴散層的放射性核種濃度

#### 1.未劣化區

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{MBu} \cdot R_{fMBu}(i) \cdot \frac{\partial C_{MBu}(x, t, i)}{\partial t} \\ & = De_{MBu} \frac{\partial^2 C_{MBu}(x, t, i)}{\partial x^2} - \lambda(i) \cdot \varepsilon_{MBu} \cdot R_{fMBu}(i) \\ & \quad \cdot C_{MBu}(t, i) + \lambda(i-1) \cdot \varepsilon_{MBu} \cdot R_{fMBu}(i-1) \\ & \quad \cdot C_{MBu}(t, i-1) \\ R_{fMBu}(i) & = 1 + \frac{1 - \varepsilon_{MBu}}{\varepsilon_{MBu}} \cdot \rho_{MBu} \cdot Kd_{MBu}(i) \end{aligned}$$

#### 2.劣化區



$$\begin{aligned} & \varepsilon_{MBd} \cdot \frac{\partial C_{MBd}(x, t, i)}{\partial t} \\ &= De_{MBd} \frac{\partial^2 C_{MBd}(x, t, i)}{\partial x^2} - \frac{Q_{EB}}{S_{MBd}} \frac{\partial C_{MBd}(x, t, i)}{\partial x} \\ & \quad - \lambda(i) \cdot \varepsilon_{MBd} \cdot C_{MBd}(t, i) + \lambda(i-1) \cdot \varepsilon_{MBd} \\ & \quad \cdot C_{MBd}(t, i-1) \end{aligned}$$

其中，

$C_{MBu}$ ：在 t 時間內，低擴散層(未劣化區)範圍 x 中，孔隙水之核種 i 的濃度(Bq/m<sup>3</sup>)

$C_{MBd}$ ：在 t 時間內，低擴散層(劣化區)範圍 x 中，孔隙水之核種 i 的濃度(Bq/m<sup>3</sup>)

$De_{MBu}$ ：低擴散層(未劣化區)中的有效擴散係數(m<sup>2</sup>/y)

$De_{MBd}$ ：低擴散層(劣化區)中的有效擴散係數(m<sup>2</sup>/y)

$\varepsilon_{MBu}$ ：低擴散層(未劣化區)的孔隙率(-)

$\varepsilon_{MBd}$ ：低擴散層(劣化區)的孔隙率(-)

$\rho_{MBu}$ ：低擴散層(未劣化區)的真密度 ( True density ) (kg/m<sup>3</sup>)

$R_{fMBu}(i)$ ：低擴散層(未劣化區)中放射性核種 i 的延遲係數 (-)

$Kd_{MBu}(i)$ ：低擴散層(未劣化區)中放射性核種 i 的吸附分配係數(m<sup>3</sup>/kg)

$\lambda(i)$ ：放射性核種 i 的衰變常數(1/y)

$Q_{EB}$ ：設施內的地下水通過流量(m<sup>3</sup>/y)

$S_{MBd}$ ：低擴散層(劣化區)的斷面積(m<sup>2</sup>)

#### (五)膨潤土類材料的放射性核種濃度

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{BE} \cdot R_{fBE}(i) \cdot \frac{\partial C_{BE}(x, t, i)}{\partial t} \\ &= De_{BE} \frac{\partial^2 C_{BE}(x, t, i)}{\partial x^2} - \frac{Q_{EB}}{S_{BE}} \frac{\partial C_{BE}(x, t, i)}{\partial x} - \lambda(i) \\ & \quad \cdot \varepsilon_{BE} \cdot R_{fBE}(i) \cdot C_{BE}(t, i) + \lambda(i-1) \cdot \varepsilon_{BE} \\ & \quad \cdot R_{fBE}(i-1) \cdot C_{BE}(t, i-1) \end{aligned}$$

$$R_{fBE}(i) = 1 + \frac{1 - \varepsilon_{BE}}{\varepsilon_{BE}} \cdot \rho_{BE} \cdot Kd_{BE}(i)$$

其中，

$C_{BE}(x, t, i)$ ：在 t 時間內，膨潤土類材料範圍 x 中，孔隙水之核種 i 的濃度(Bq/m<sup>3</sup>)

$De_{BE}$ ：膨潤土類材料中的有效擴散係數(m<sup>2</sup>/y)

- $\varepsilon_{BE}$ ：膨潤土類材料的孔隙率(-)  
 $\rho_{BE}$ ：膨潤土類材料的真密度 ( True density ) (kg/m<sup>3</sup>)  
 $R_{fBE}(i)$ ：膨潤土類材料中放射性核種 i 的延遲係數(-)  
 $Kd_{BE}(i)$ ：膨潤土類材料中放射性核種 i 的吸附分配係數 (m<sup>3</sup>/kg)  
 $\lambda(i)$ ：放射性核種 i 的衰變常數(1/y)  
 $Q_{EB}$ ：設施內的地下水通過流量(m<sup>3</sup>/y)  
 $S_{BE}$ ：膨潤土類材料的斷面積(m<sup>2</sup>)

## 二、選用參數

基於前述工程障壁的傳輸概念下，核種遷移所需參數包括工程障壁尺寸、材料特性、吸附分配係數、地下水流速、設施通過水量等，彙整如圖 2.1.2-2 及表 2.1.2-1~表 2.1.2-5。其中，吸附分配係數分為還原性環境與氧化性環境兩種，這是假設處置設施設置初期的環境屬於還原性環境，但受到隆起與侵蝕的影響，處置設施逐漸接近地表，周遭環境轉為氧化性環境，吸附分配係數也跟著改變。

而地下水流速及通過設施水量的參數值，其隨時間的變化則因分析情節有不同的考量，大致可以氣候寒冷化、氣候溫暖化及地形隆起與侵蝕做區分，其下可再細分為提早發生及變化加劇兩種情況，各情節之說明彙整如表 2.1.2-6 所示。若未來的氣候環境趨向寒冷化，將會使降雨量減少、地下水流速降低，故假設地下水流速於評估的時間結束時會降到初始值的 1/10 或 1/100。同樣地，考量了氣候溫暖化或隆起與侵蝕影響的案例，地下水流速隨時間遞增，地下水流速於評估的時間結束時會增加到初始值的 10 倍或 100 倍。此外，處置設施亦會隨著時間產生變質劣化，造成通過設施的水量增加。

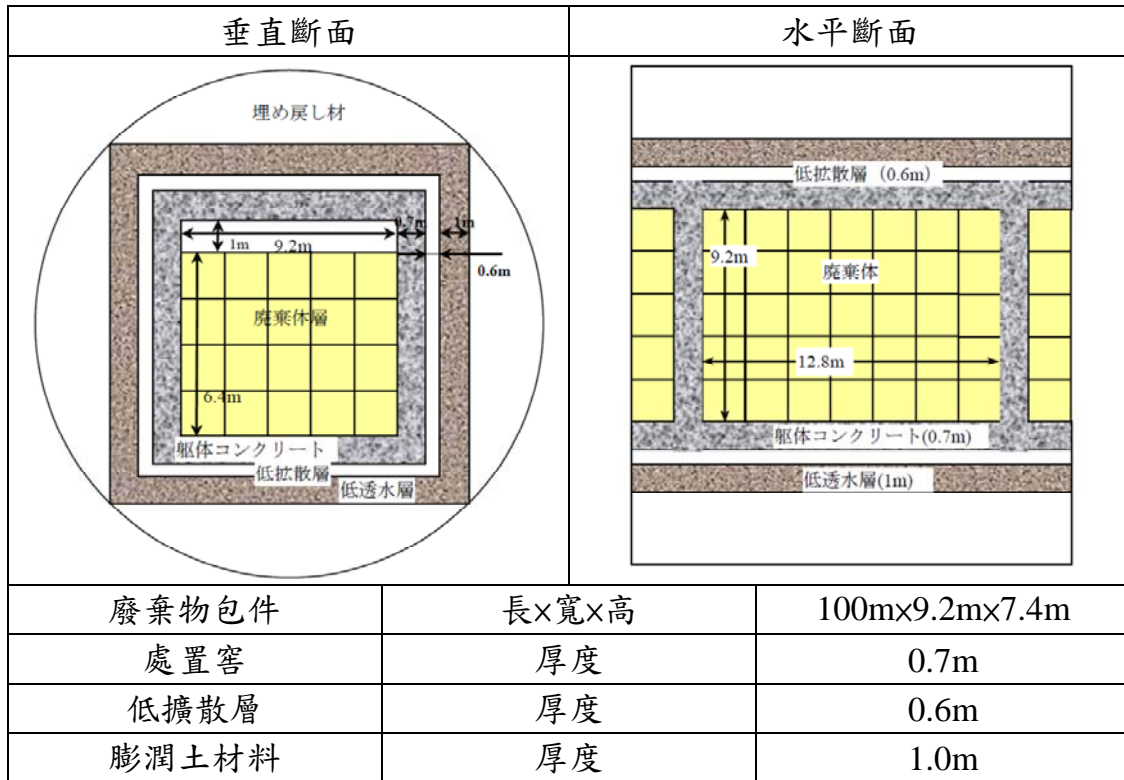


圖 2.1.2-2 處置設施的設計

表 2.1.2-1 工程障壁的材料特性

處置設施		孔隙率	密度(g/cm <sup>3</sup> )	擴散係數 (m <sup>2</sup> /s)
廢棄物包件		0.35	2.5	7.0×10 <sup>-10</sup>
處置窖		0.2	2.6	4.0×10 <sup>-10</sup>
低擴散層	劣化	1	-	2.0×10 <sup>-9</sup>
	未劣化	0.2	2.6	1.0×10 <sup>-12</sup>
膨潤土層		0.4	2.7	2.0×10 <sup>-10</sup>

表 2.1.2-2 還原性環境下的吸附分配係數

元素	還原性環境的吸附分配係數 Kd[ml/g]			
	廢棄物	處置窖	擴散層	膨潤土
H	0	0	0	0
Be	0	0	0	0
C	1	1	1	1
Cl	0	0	0	0
Ca	1	1	1	1
Co	12.5	12.5	12.5	50
Ni	12.5	12.5	12.5	50
Se	0	0	0	0
Sr	1	1	1	1
Zr	2500	2500	2500	1000
Nb	0	0	0	100
Mo	0	0	0	0
Tc	0.3	0.3	0.3	0
Pd	12.5	12.5	12.5	50
Ag	1	1	1	0
Sn	2500	2500	2500	1000
I	1.25	1.25	1.25	0
Cs	2	2	2	50
Ba	1	1	1	1
La	10	10	10	1000
Sm	10	10	10	1000
Tb	10	10	10	1000
Ho	10	10	10	1000
Hf	12.5	12.5	12.5	50
Pt	12.5	12.5	12.5	50
Pb	12.5	12.5	12.5	50
Po	0	0	0	0
Ra	1.25	1.25	1.25	1
Ac	250	250	250	1000
Th	250	250	250	1000
Pa	250	250	250	1000
U	250	250	250	5
Np	250	250	250	5
Pu	250	250	250	5000
Am	250	250	250	1000
Cm	250	250	250	1000

表 2.1.2-3 氧化性環境下的吸附分配係數

元素	氧化性環境下的吸附分配係數 Kd[ml/g]			
	廢棄物	處置窖	擴散層	膨潤土
H	0	0	0	0
Be	0	0	0	0
C	1	1	1	0
Cl	0	0	0	0
Ca	1	1	1	1
Co	12.5	12.5	12.5	50
Ni	12.5	12.5	12.5	50
Se	0	0	0	0
Sr	1	1	1	1
Zr	2500	2500	2500	1000
Nb	0	0	0	100
Mo	0	0	0	0
Tc	3E-6	3E-6	3E-6	0
Pd	12.5	12.5	12.5	50
Ag	0	0	0	0
Sn	2500	2500	2500	1000
I	1.25	1.25	1.25	0
Cs	2	2	2	50
Ba	1	1	1	1
La	1	1	1	5
Sm	10	10	10	1000
Tb	1	1	1	5
Ho	10	10	10	1000
Hf	12.5	12.5	12.5	50
Pt	12.5	12.5	12.5	50
Pb	12.5	12.5	12.5	50
Po	0	0	0	0
Ra	1.25	1.25	1.25	1
Ac	250	250	250	1000
Th	250	250	250	1000
Pa	250	250	250	200
U	25	25	25	0.005
Np	250	250	250	0.005
Pu	25	25	25	5000
Am	250	250	250	1000
Cm	250	250	250	1000

表 2.1.2-4 地下水流速隨時間的變化

分析 案例	地下水流速隨時間的變化[m/y]							
	初期	1.0×10 <sup>4</sup>	2.5×10 <sup>4</sup>	4.0×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>5</sup>	2.5×10 <sup>5</sup>	4.0×10 <sup>5</sup>	1.0×10 <sup>6</sup>
case1	0.1	-----	-----	-----	-----	-----▶	0.01	0.01
case2	0.1	-----	-----	-----	-----	-----▶	1.0	1.0
case3	0.1	-----	-----	-----	-----	-----▶	1.0	1.0
case4	0.1	-----	-----	-----	-----	-----▶	0.001	0.001
case5	0.1	-----	-----	-----	-----	-----▶	10	10
case6	0.1	-----	-----▶	0.01	無變化			0.01
case7	0.1	-----	-----▶	1.0	無變化			1.0
case8	0.1	-----	-----▶	1.0	無變化			1.0

表 2.1.2-5 設施通過水量隨時間的變化

分析 案例	設施通過水量隨時間的變化[m <sup>3</sup> /y]							
	初期	1.0×10 <sup>4</sup>	2.5×10 <sup>4</sup>	4.0×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>5</sup>	2.5×10 <sup>5</sup>	4.0×10 <sup>5</sup>	1.0×10 <sup>6</sup>
case1	0.018	0.06	-----	-----▶	0.18	無變化		0.18
case2	0.018	1.8	無變化					1.8
case3	0.018	0.06	-----	-----▶	0.18	無變化		0.18
case4	0.018	0.06	-----	-----▶	0.18	無變化		0.18
case5	0.018	0.06	-----	-----▶	0.18	無變化		0.18
case6	0.018	0.06	-----	-----▶	0.18	無變化		0.18
case7	0.018	1.8	無變化					1.8
case8	0.018	1.8	無變化					1.8

表 2.1.2-6 各案例的情節概要

	情節分類	概要
case1	<p>&lt;寒冷化&gt; 假設地球環境趨向寒冷化。推測寒冷化會使降雨量減少，而降雨供給量減少使地下水流速降低。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速隨時間變小。</li> <li>• 遷移路徑的化學環境沒有變化。</li> </ul>
case2	<p>&lt;溫暖化&gt; 假設地球環境趨向溫暖化。推測溫暖化會使降雨量增加，而降雨供給量增加使地下水流速變大。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速隨時間變大。</li> <li>• 遷移路徑的化學環境沒有變化。</li> </ul>
case 3	<p>&lt;隆起侵蝕&gt; 假設隆起與侵蝕作用，使處置設施接近地表。因含氧量較多的降雨使化學環境氧化，加上接近地表會受到較多的地表影響(降雨、風化)，因此推測地下水流速會變大。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速隨時間變大。</li> <li>• 遷移路徑的化學環境，其氧化環境值會隨時間改變。</li> </ul>
case 4	<p>&lt;寒冷化(變化大)&gt; 假設地下水流速遠低於 case1。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速隨時間大幅降低。</li> <li>• 遷移路徑的化學環境沒有變化。</li> </ul>
case 5	<p>&lt;溫暖化(變化大)&gt; 假設地下水流速遠高於 case2。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速隨時間大幅上昇。</li> <li>• 遷移路徑的化學環境沒有變化。</li> </ul>
case 6	<p>&lt;寒冷化(提早發生)&gt; 假設會比 case1 更早發生變化。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速隨時間變小，流速將會比 case1 更早開始降低。</li> <li>• 遷移路徑的化學環境沒有變化。</li> </ul>
case 7	<p>&lt;溫暖化(提早發生)&gt; 假設將會比 case2 更早發生變化。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速隨時間變大，流速將會比 case2 更早開始上昇。</li> <li>• 遷移路徑的化學環境沒有變化。</li> </ul>
case 8	<p>&lt;隆起侵蝕(提早發生)&gt; 假設會比 case3 更早發生變化。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水流速隨時間變大，流速將會比 case3 更早開始上昇。</li> <li>• 遷移路徑的化學環境，其氧化環境值會隨時間變化。</li> </ul>

## 2.2 瑞典低放處置工程障壁系統之設計與參數

### 2.2.1 低放處置工程障壁系統之設計

瑞典低放射性廢棄物處置場(SFR)位於斯德歌爾摩北方約 160 公里之歐納馬鎮東邊的 Forsmark 核電廠場址內，為世界上第一座建於海床下之坑道式低放射性廢棄物處置場。處置場於 1983 年開始建造，並在 1988 年開始接收低放射性廢棄物。SFR 處置場為避免處置場在運轉期間及封閉後對人類及環境造成傷害，以結晶岩床為天然屏障，將放射性廢棄物放置在海床下 50 公尺處的岩床內，上層的海水深度約 5 公尺，並利用工程障壁包圍著廢棄物。

SFR 之設計容量為 60,000 立方公尺，由四個岩窖(rock vault)及一個筒倉(silo)所組成，彼此以隧道相連，其佈置如圖 2.2.1-1 所示，並預留擴充空間，總容量最多可達 200,000 立方公尺。有關筒倉及岩窖之設計特性，分別說明如下：

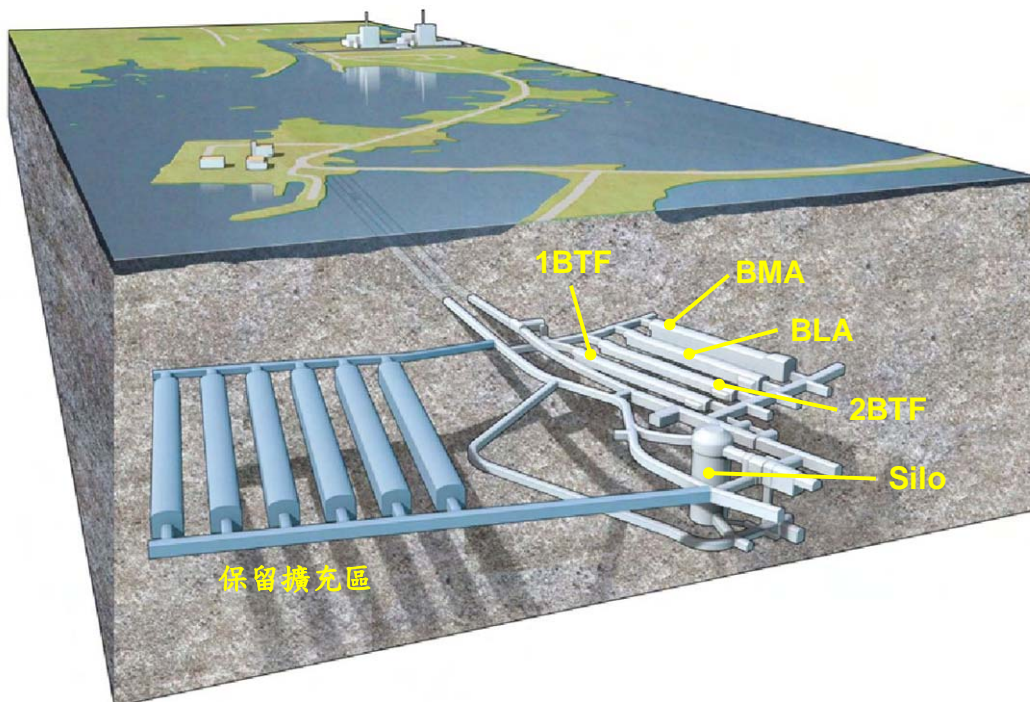


圖 2.2.1-1 瑞典 SFR 處置場配置圖



## 一、筒倉(Silo)

SFR 所處置的放射性廢棄物中，大部份活度均集中在筒倉裡，約佔整個處置設施之 90%。廢棄物主要以瀝青或水泥固化之廢離子交換樹脂為主，亦有少量的廢金屬，並將廢棄物封裝在混凝土製廢棄物箱、鋼製廢棄物箱或是鋼製廢棄物桶內。筒倉設計可貯存 18,500 立方公尺的廢棄物，其構造如圖 2.2.1-2 所示。

岩窖的高度約 70 公尺、直徑約 30 公尺，岩窖內的筒倉(Silo)是以厚度 0.8 公尺的鋼筋混凝土所構成的圓柱型建築，筒倉(Silo)的高度約 50 公尺、內徑約 25 公尺。在筒倉的混凝土壁與岩石間，回填 1.2 公尺厚的膨潤土，而筒倉(Silo)底部 1 公尺厚的鋼筋混凝土底板下方，則有 1.5 公尺厚的砂/膨潤土混合層(混合比例 90/10)。筒倉內部以 0.2 公尺厚的鋼筋混凝土牆隔成截面積 2.5 公尺×2.5 公尺的垂直處置區，每一個垂直處置區可堆疊 4 箱大型的廢棄物包件或 16 桶廢棄物，最後再以多孔性混凝土回填於廢棄物包件間之空隙。處置完成後，筒倉頂部會覆蓋 1 公尺厚的混凝土蓋，然後其上方再依序覆蓋一層薄砂、一層 1.5 公尺厚的砂/膨潤土混合層(混合比例 90/10)，若有其它空間則填充砂、礫石或砂與水泥之混合體。

## 二、BMA 處置坑道

BMA 處置坑道內的廢棄物主要以水泥或瀝青固化後，再封裝於混凝土製廢棄物箱、鋼製廢棄物箱或是鋼製廢棄物桶內進行處置。BMA 處置坑道設計可貯存 13,400 立方公尺的廢棄物，開挖出的岩石體積約 48,000 立方公尺。處置坑道長約 160 公尺、寬約 19.6 公尺、高約 16.5 公尺，並以 0.4 公尺厚的鋼筋混凝土牆分隔成 15 個處置室，每個處置室的底層皆有 0.3 公尺厚的混凝土底板，並在其上堆疊廢棄物箱，當

處置室堆置滿了以後，在上面放置一塊 0.4 公尺厚的預鑄混凝土蓋，此混凝土蓋乃是利用最後放置的廢棄物箱來支撐。最後，利用砂回填於處置室混凝土牆及岩壁間的 2 公尺空間，處置室上方的空間則不回填。BMA 處置坑道之概念如圖 2.2.1-3 所示。

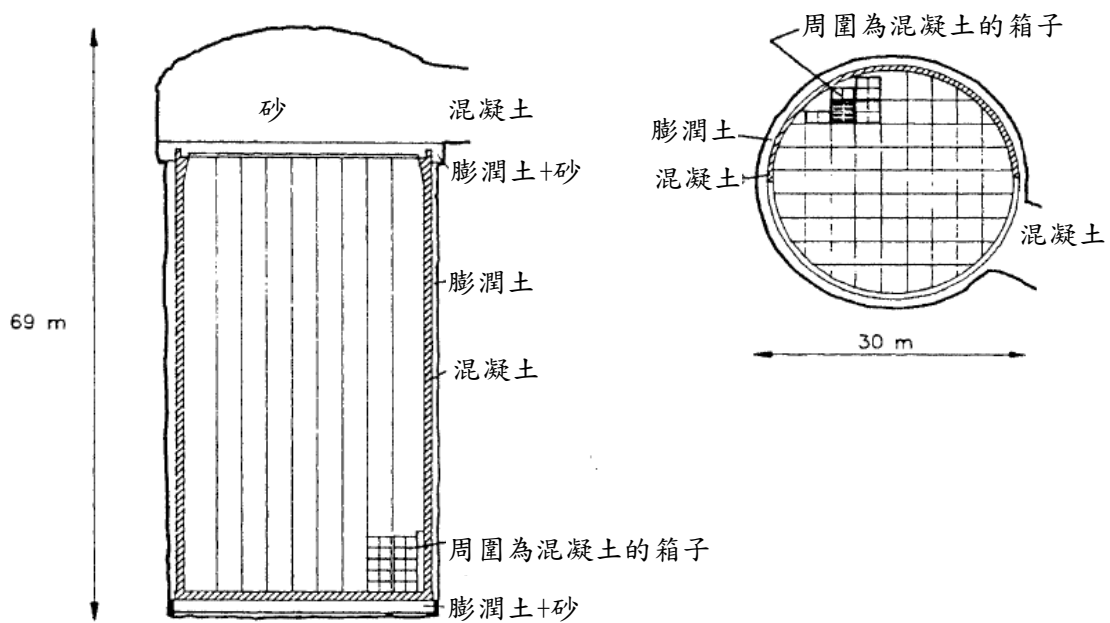


圖 2.2.1-2 SFR 處置場之筒倉(Silo)構造示意圖

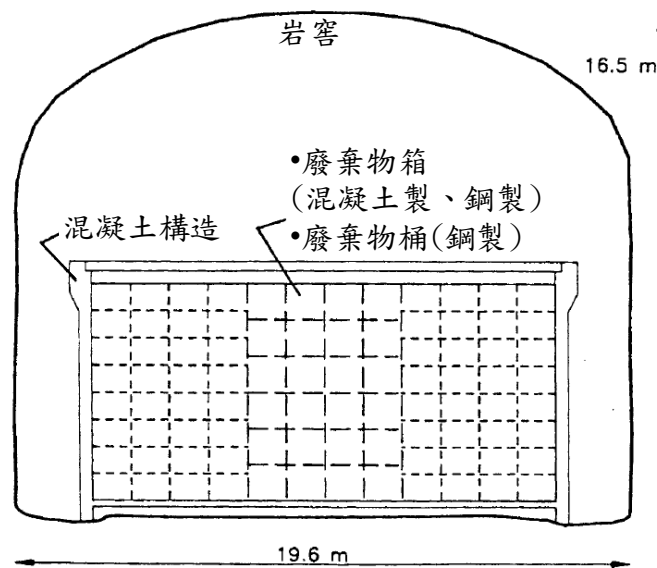


圖 2.2.1-3 BMA 處置坑道之概念示意圖

### 三、BLA 處置坑道

BLA 處置坑道的低放射性非固化廢棄物，主要以 ISO 標準容器封裝後再處置。處置坑道設計可貯存 11,500 立方公尺的廢棄物，總開挖岩石體積約 17,000 立方公尺。處置坑道長約 160 公尺、寬約 14.7 公尺、高約 12.7 公尺，坑道岩壁上有 5~10 公分厚的噴漿混凝土。廢棄物堆置在 0.3 公尺厚的混凝土底板上，每一排放置兩個容器，並可堆疊三層。堆置完成後僅以封塞填住坑道口，坑道內並沒有設置其他工程障壁或回填材料。BLA 處置坑道之概念如圖 2.2.1-4 所示。

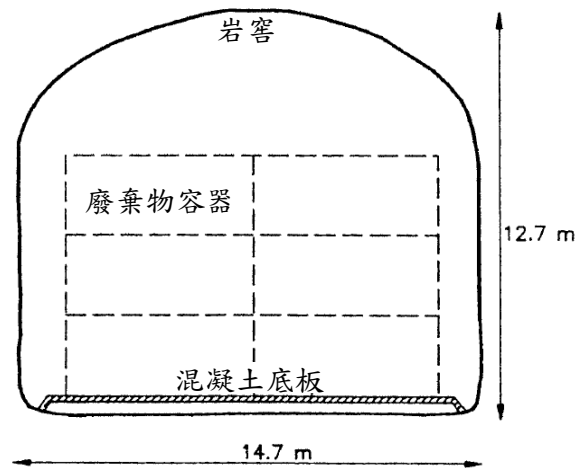


圖 2.2.1-4 BLA 處置坑道之概念示意圖

### 四、BTF 處置坑道

BTF 處置坑道主要處置裝有脫水離子交換樹脂的混凝土櫃，以及少量裝有灰燼的鋼製廢棄物桶。BTF 處置坑道共有兩條，分別為 1BTF 及 2BTF，每條坑道設計可貯存 7,900 立方公尺的廢棄物，其開挖岩石體積共約為 20,000 立方公尺。每條 BTF 處置坑道長約 160 公尺、寬約 14.7 公尺、高約 9.5 公尺，坑道岩壁上有 5~10 公分厚的噴漿混凝土。廢棄物堆置在 0.3 公尺厚的混凝土底板上，每一排放置四個混凝土櫃，並可堆疊兩層。混凝土櫃間的空隙以混凝土填充，混凝土櫃

與岩壁間則回填水泥砂漿，最後在頂部放置一個混凝土蓋以作為輻射防護之用。混凝土蓋上方的空間並未回填任何材料，僅在坑道口以封塞封住。BTF 處置坑道之概念如圖 2.2.1-5 所示。

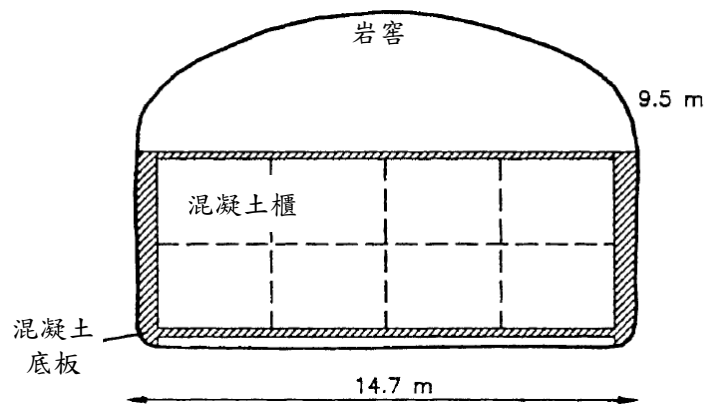


圖 2.2.1-5 BTF 處置坑道之概念示意圖

## 2.2.2 工程障壁系統之安全分析參數

瑞典 SFR 處置場安全分析的地下水基本傳輸情節中，假設處置場封閉時，處置設施的各個構造功能依然完整，混凝土或水泥製的各構件沒有大型裂縫存在，但有少許因應力造成的微小裂縫；筒倉內的膨潤土及砂/膨潤土混合層皆為均質材料；鋼製廢棄物包件可能封裝良好，亦可能在營運期間因腐蝕而部分損壞，因此在分析時不將鋼製廢棄物包件視為工程障壁的一部分。處置場封閉後，地下水即開始流入處置設施，整個處置設施被水填滿約需花費數年~10 年左右的時間，其對整個安全分析的時間尺度而言相對較短，故在分析時直接假設處置場封閉後地下水便完全充滿整個處置設施。廢棄物與地下水接觸後，核種溶解在水中，並藉由擴散作用在工程障壁間傳輸，但會受到工程障壁材料的吸附作用影響而延緩核種釋出。因此，從處置設施釋出的核種數量，

將受到核種在水中的濃度、工程障壁材料的擴散與吸附特性、工程障壁中的水流大小與分布狀況等因素影響。

### 一、模式概述

為了模擬工程障壁系統的核種傳輸，瑞典 SFR 處置場採用多路徑模式 NUCFLOW，計算工程障壁內的擴散與移流傳輸、衰變鏈及吸附。NUCFLOW 將工程障壁系統分成不同區塊並利用有限差分法進行計算，溶解在水中的單一核種在不同區塊間的平衡可表示為式 2.2.2-1，等號左邊為計算核種在水中的累積與吸附，等號右邊為計算區塊間的擴散傳輸、移流傳輸及核種衰變，而區塊則是由體積、擴散長度、擴散時採用的截面積和材料數據(例如孔隙率、密度、擴散性等)所定義：

$$V_i K_i \frac{dc_i}{dt} = \sum_{j \neq i} \left( \frac{AD_e}{d} \right)_{ij} (c_j - c_i) + \sum_{j \neq i} (q_{j,i} c_j) - \sum_{j \neq i} (q_{i,j} c_i) - V_i K_i \lambda c_i \quad (2.2.2-1)$$

其中，

$V_i$ ：區塊 i 的體積(m<sup>3</sup>)

$V_i K_i$ ：區塊的容量， $K = \varepsilon + (1 - \varepsilon)K_d \rho_s$

$\varepsilon$ ：區塊材料的孔隙率(-)

$K_d$ ：分配係數(m<sup>3</sup>/kg)

$\rho_s$ ：固體密度(kg/m<sup>3</sup>)

$c_i, c_j$ ：區塊 i 和區塊 j 中的濃度(mol/m<sup>3</sup>)

t：時間(s)

A：擴散面積(m<sup>2</sup>)

$D_e$ ：有效擴散係數(m<sup>2</sup>/s)

d：擴散距離(m)

q：水流(m<sup>3</sup>/s)

$\lambda$ ：衰變常數(s<sup>-1</sup>)

由於 SFR 處置場內有筒倉與坑道等處置型式，各處置區的核種遷移概念模型分述如下：

### (一)筒倉

筒倉的概念模型可分為徑向和垂直向兩種，如圖 2.2.2-1 所示。徑向模型中較內側的廢棄物主要為瀝青固化廢棄物，約佔筒倉內廢棄物的 20%，較外側的廢棄物則主要以水泥固化廢棄物為主。垂直向模型則概分為三區後，再依材料特性分成 94 個區塊。

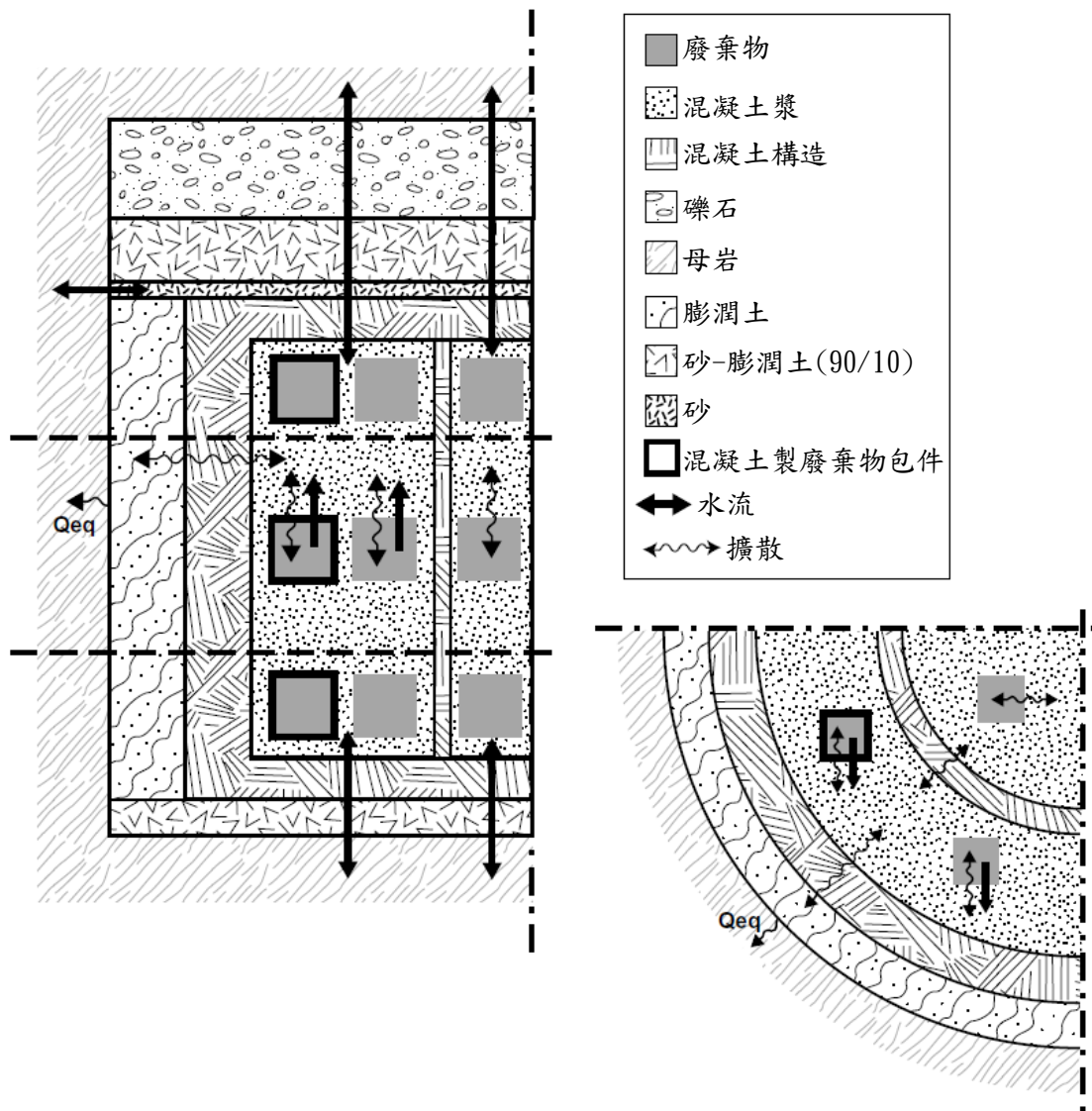


圖 2.2.2-1 筒倉內的核種傳輸路徑

廢棄物中的放射性核種主要藉由擴散和移流作用傳輸至廢棄物包件外，並假設水流是在廢棄物包件中的微小裂縫

中流動，因此不考慮包件的吸附作用。由於筒倉的混凝土構造與膨潤土障壁的水力傳導係數較小，相對其水流率也較低。處置場封閉後的第一個一千年期間，通過廢棄物的水流方向主要為垂直向上，而後才開始向下。在此模型中，筒倉內於水平方向上的移流傳輸忽略不計，僅考慮擴散傳輸；但筒倉的上部與底部，垂直方向與水平方向皆有移流與擴散傳輸。另外，筒倉內的障壁皆須考量吸附作用。

## (二)BMA 處置坑道

為了描述 BMA 處置坑道的核種傳輸，延著處置坑道的軸向將處置坑道分為五區再加上坑道兩端的礫石回填。各區內包含數個處置室，例如第一區內有處置室 1~4、第二區內有處置室 5~9 等以此類推，每一區再依材料特性分成不同的區塊，整個 BMA 處置坑道模型共有 161 個區塊。BMA 處置坑道內貯存的廢棄物型式包括內含水泥固化廢棄物的混凝土製廢棄物包件、內含水泥固化廢棄物的鋼製容器、內含水泥固化廢棄物的鋼桶、內含瀝青固化廢棄物的鋼製容器、內含瀝青固化廢棄物的鋼桶等五種，故假設每一區內皆有此五種廢棄物存在，如圖 2.2.2-2 所示。

此外，假設處置窖內沒有被廢棄物填滿的空間並沒有回填，廢棄物包件周圍的空間與廢棄物包件的水力傳導形成高度對比，通過廢棄物包件的水流將受到限制，故廢棄物中的核種主要藉由擴散作用傳輸到包件外。核種溶解到水中後，再利用擴散與移流於障壁間傳輸。

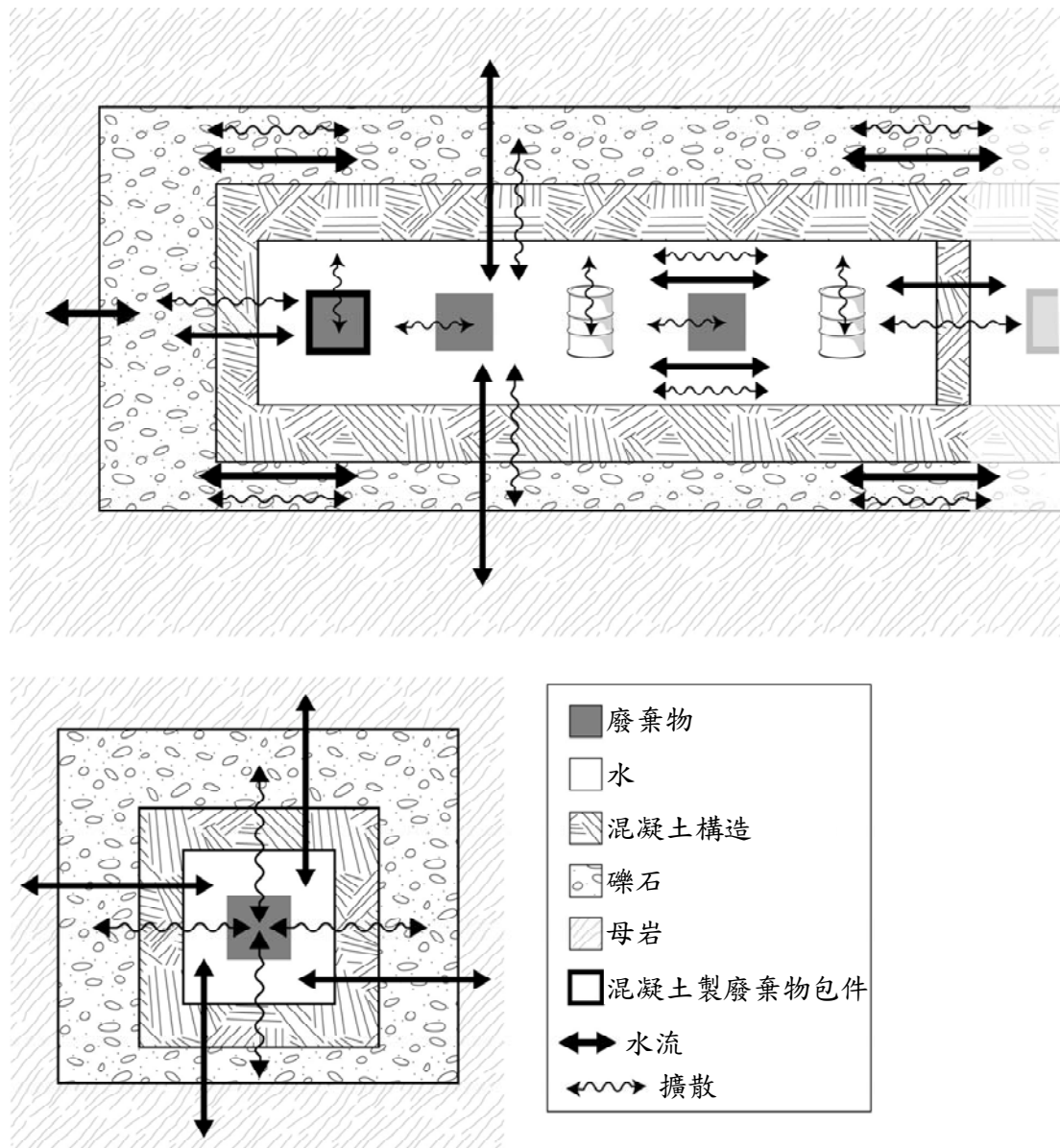


圖 2.2.2-2 BMA 處置坑道內的核種傳輸路徑

### (三)BLA 處置坑道

由於 BLA 處置坑道內的工程障壁極少，計算時不考慮障壁的存在，核種隨著水流傳輸到母岩。BLA 處置坑道的概念模型延著坑道軸向將坑道內分成五個區以及坑道前後僅有水的兩個區，如圖 2.2.2-3 所示，可把模型視為攪拌槽，亦即核種初始釋出率高。



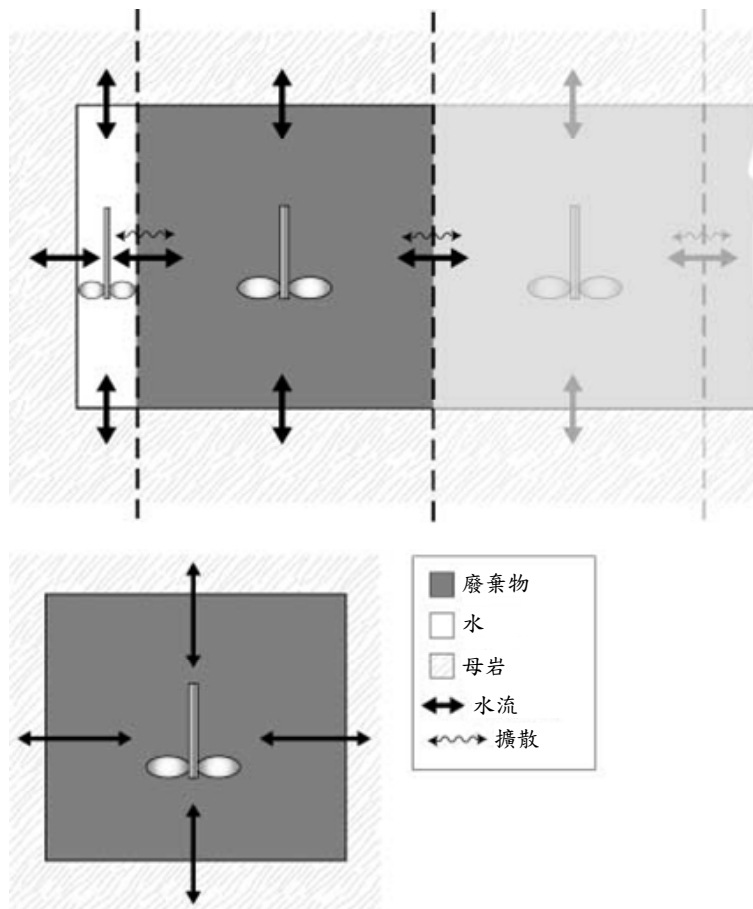


圖 2.2.2-3 BLA 處置坑道內的核種傳輸路徑

#### (四)1BTF 處置坑道與 2BTF 處置坑道

為了描述 1BTF 與 2BTF 處置坑道的核種傳輸，延著處置坑道的軸向將處置坑道分為五區再加上坑道兩端的礫石回填。1BTF 處置坑道第一區內的廢棄物包括含有灰燼的鋼桶、混凝土櫃、混凝土製廢棄物包件等三種，在此模型中假設此三種廢棄物相互平行，且廢棄物周圍有混凝土灌漿填充，如圖 2.2.2-4 所示。剩下四區內的廢棄物則以混凝土櫃為主，每一區再依材料特性分成不同的區塊，整個 1BTF 處置坑道模型共有 195 個區塊。2BTF 處置坑道每一區的廢棄物皆為放置於混凝土櫃中的離子交換樹脂，故廢棄物活度假設為均勻分布，如圖 2.2.2-5 所示。每一區則可再依材料特性分成不同的區塊，整個 2BTF 處置坑道模型共有 191 個區塊。

1BTF 與 2BTF 處置坑道的水流主要在礫石障壁流動，流過廢棄物包件及其周圍混凝土灌漿的水流相對較小。但廢棄物包件與混凝土灌漿的水力傳導度差異不大，因此通過廢棄物包件的水流不能被忽略。

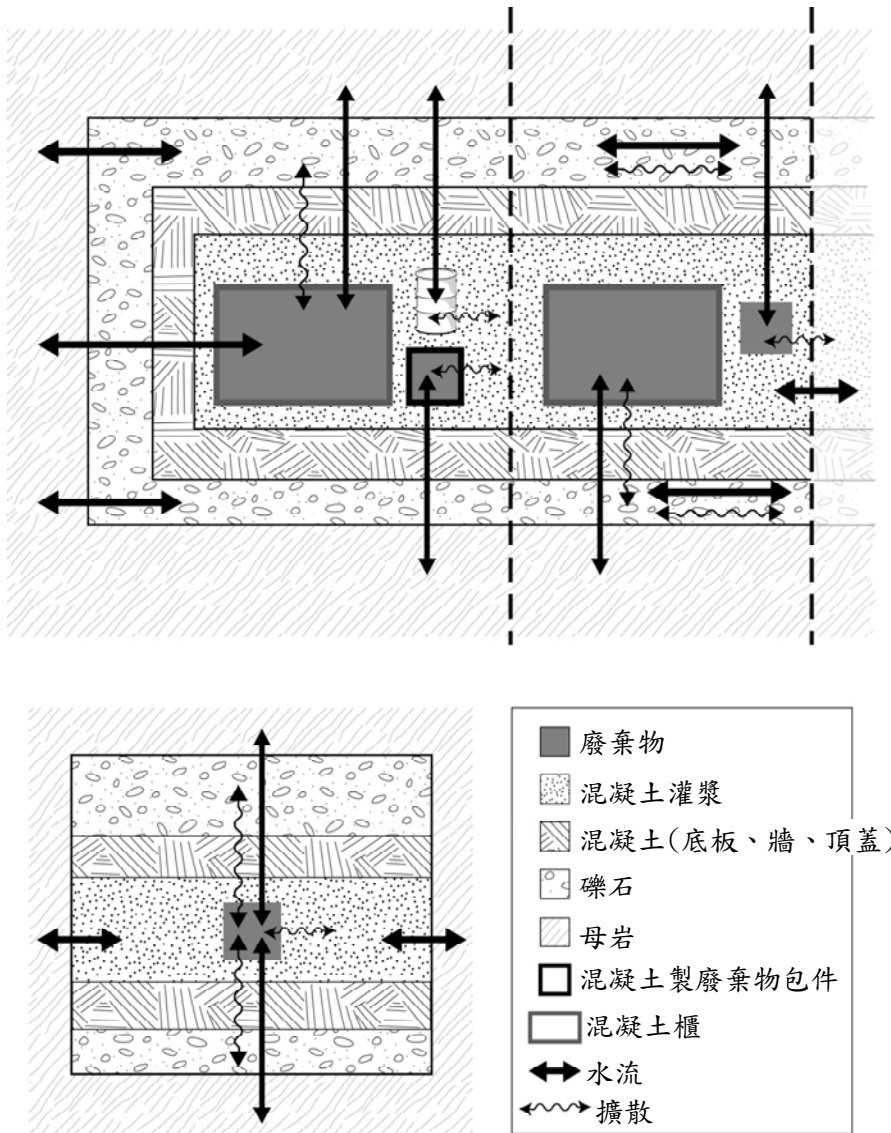


圖 2.2.2-4 1BTF 處置坑道內的核種傳輸路徑

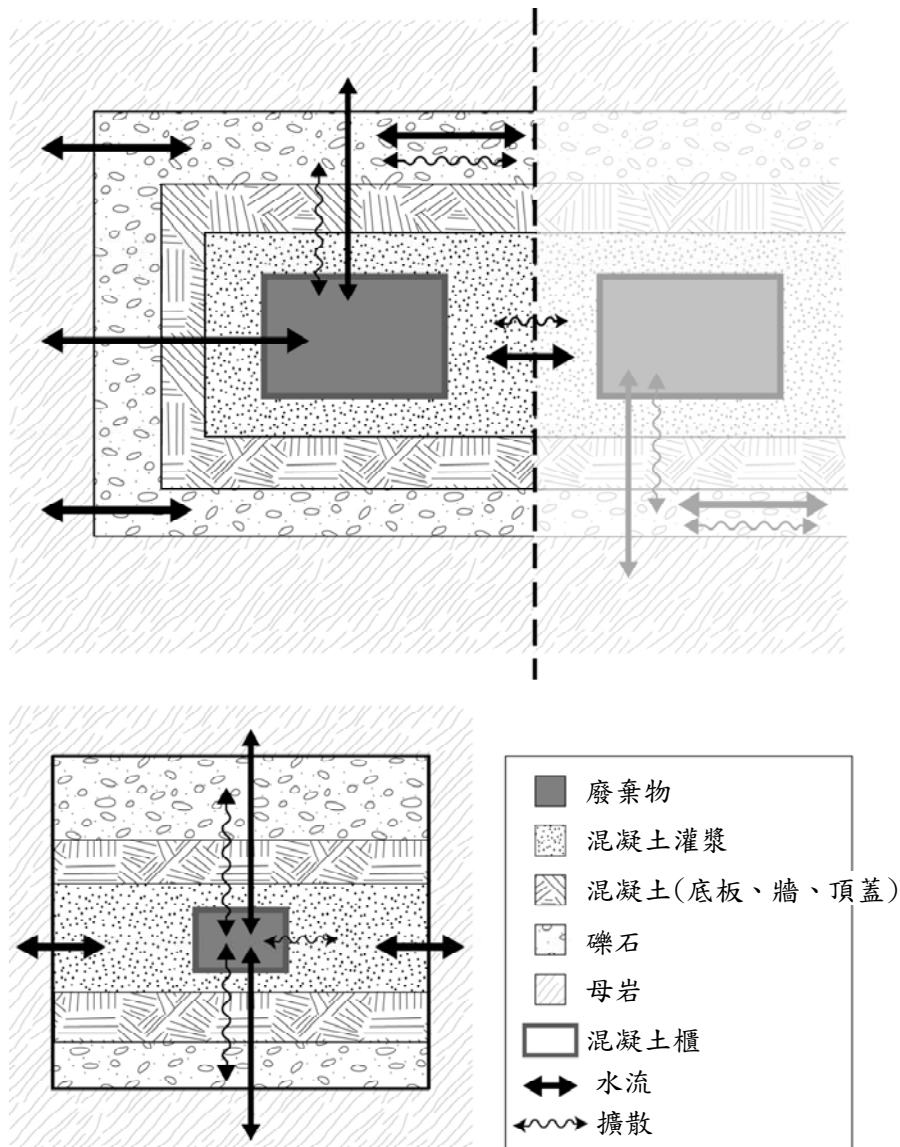


圖 2.2.2-5 2BTF 處置坑道內的核種傳輸路徑

## 二、選用參數

基於前述工程障壁的傳輸概念下，核種遷移所需參數可分為物理與化學數據資料及水文數據資料兩大類。

### (一)物理與化學數據資料

物理與化學數據資料主要包括障壁材料的密度、有效擴散係數與孔隙率等特性，以及不受化學作用影響與受化學作用影響的吸附分配係數，詳如表 2.2.2-1~表 2.2.2-3 所列。

表 2.2.2-1 障壁材料特性

材料	固體密度 (kg/m <sup>3</sup> )	有效擴散係 數(m <sup>2</sup> /s)	孔隙率 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
混凝土構造	2,529	1×10 <sup>-11</sup>	0.15
筒倉內的混凝土灌漿	2,429	1×10 <sup>-10</sup>	0.30
1BTF 與 2BTF 處置坑道內的混凝土灌漿	2,625	1×10 <sup>-10</sup>	0.20
礫石與砂	2,700	6×10 <sup>-10</sup>	0.30
廢棄物包件中的水泥固化體	2,250	1×10 <sup>-10</sup>	0.20
膨潤土	2,692	1×10 <sup>-10</sup>	0.61
砂/膨潤土(90/10)	2,667	1×10 <sup>-10</sup>	0.25
瀝青	1,030	-	0.00
水	1,000	2×10 <sup>-09</sup>	1.00

表 2.2.2-2 吸附分配係數，Kd(m<sup>3</sup>/kg)

元素	混凝土與水泥	礫石與砂	膨潤土	砂/膨潤土(90/10)
H	0	0	0	0
C(無機)	0.2	0.0005	0	0.0005
C(有機)	0	0	0	0
Cl	0.006	0	0	0
Co	0.04	0.01	0.02	0.01
Ni	0.04	0.01	0.02	0.01
Se	0.006	0.0005	0.001	0.0002
Sr	0.001	0.0001	0.001	0.0002
Zr	0.5	0.5	0.05	0.5
Nb	0.5	0.5	0	0.5
Mo	0.006	0	0	0
Tc	0.5	0.3	0.01	0.3
Pd	0.04	0.001	0	0.009
Ag	0.001	0.01	0	0.009
Cd	0.04	0.01	0.02	0.01
Sn	0.5	0	0.01	0.001
I	0.003	0	0	0
Cs	0.001	0.01	0.005	0.01
Sm	5	1	0.2	0.9
Eu	5	1	0.2	0.9
Ho	5	1	0.2	0.9
U	5	1	0.01	0.9
Np	5	1	0.1	0.9
Pu	5	1	1	1
Am	1	1	1	1
Cm	1	1	1	1

表 2.2.2-3 受化學作用影響吸附分配係數， $K_d(m^3/kg)$

元素	混凝土與水泥	礫石與砂	膨潤土	砂/膨潤土(90/10)
H	0	0	0	0
C(無機)	0.2	0.0005	0	0.0005
C(有機)	0	0	0	0
Cl	0.006	0	0	0
Co	0.004	0.001	0.002	0.001
Ni	0.004	0.001	0.002	0.001
Se	0.006	0.0005	0	0.0005
Sr	0.001	0.0001	0.001	0.0002
Zr	0.005	0.005	0.0005	0.005
Nb	0.005	0.005	0	0.005
Mo	0.006	0	0	0
Tc	0.005	0.003	0.0001	0.003
Pd	0.004	0.0001	0	0.00009
Ag	0.001	0.01	0	0.009
Cd	0.004	0.001	0.002	0.001
Sn	0.005	0	0.0001	0.00001
I	0.003	0	0	0
Cs	0.001	0.01	0.005	0.01
Sm	0.5	0.1	0.02	0.09
Eu	0.5	0.1	0.02	0.09
Ho	0.5	0.1	0.02	0.09
U	0.05	0.01	0.0001	0.009
Np	0.05	0.01	0.001	0.009
Pu	0.05	0.01	0.01	0.01
Am	0.1	0.1	0.1	0.1
Cm	0.1	0.1	0.1	0.1

## (二)水文數據資料

各處置設施的總水流率是先經由詳細的水文地質評估後，再根據所使用的遷移模型進行離散化調整，調整後的水流大小與方向便做為遷移模型的輸入資料。各處置設施的水流率詳如表 2.2.2-4~表 2.2.2-5 所列。

表 2.2.2-4 流經各處置設施構件的總水流率

處置設施構件	總水流率(m <sup>3</sup> /yr)			
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD
1BTF：廢棄物部分	2.4	2.7	6.8	7.8
1BTF：整個坑道	7.5	19.4	26.4	30.7
2BTF：廢棄物部分	2.4	3.0	6.0	6.8
2BTF：整個坑道	6.7	17.6	27.7	29.6
BLA：廢棄物部分	9.6	19.4	35.0	38.4
BLA：整個坑道	13.6	33.1	50.2	54.2
BMA：包件	0.07	0.13	0.26	0.28
BMA：整個坑道	8.7	36.7	52.7	54.7
Silo：包件	0.23	0.22	0.16	0.23
Silo：上部填充	0.53	1.4	2.2	2.2

表 2.2.2-5 劣化時流經各處置設施構件的總水流率

處置設施構件	總水流率(m <sup>3</sup> /yr)			
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD
1BTF：廢棄物部分				
• 完好部分	1.2	1.9	4.0	4.7
• 劣化部分	12.0	15.1	30.7	33.9
1BTF：整個坑道	14.5	24.1	45.0	50.2
2BTF	同 1BTF			
BMA：包件				
• 完好部分	0.04	0.16	0.29	0.30
• 劣化部分	2.4	3.7	9.2	10.1
BMA：整個坑道	8.7	36.6	52.6	54.6
Silo：包件	0.66	1.1	1.5	1.5
Silo：上部填充	0.81	1.8	2.6	2.5

## 2.3 我國低放處置工程障壁系統之設計與參數

我國低放射性廢棄物最終處置場仍處於選址程序中，現階段台電公司已配合經濟部依據場址設置條例進行選址作業，由經濟部於 101 年 7 月 3 日核定公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2 處建議候選場址，由於兩處場址之場址特性不同，規劃有不同的處置概念，分別說明如后。

### 2.3.1 台東縣達仁鄉建議候選場址

台東縣達仁鄉建議候選場址位於達仁溪及塔瓦溪間，為丘陵地地形，地勢由東側海岸逐漸往西部陸地升高，地形坡度約為 30~80%。其中坡度大於 55% 的區域約佔場址面積 60%；而坡度小於 30% 的區域約佔場址面積的 20%。依據建築技術規則建築設計施工編第 262 條，場址坵塊圖上平均坡度超過 55% 者，不得計入法定空地面積；平均坡度超過 30% 未逾 55% 者，得作為法定空地或開放空間使用，但不得配置建築物。因此，除非對現有地形進行大規模之開挖整地，依據建築技術規則規定無法採用地表處置方式進行規劃。因地貌大規模變動將對當地環境與生態產生衝擊，考量配合場址地形特性，台東縣達仁鄉建議候選場址採用坑道式處置進行規劃。

台東縣達仁鄉建議候選場址地層屬中新世中期的潮州層，岩性主要由厚塊狀硬頁岩或板岩所組成，褶皺構造為本區之主要地質構造，且褶皺軸走向頗具變化，場址位置為丘陵地地形，並具有臨近海岸之特性，採用坑道處置方式，初步規劃處置坑道之高程介於 EL.+20 m~EL.+40 m 間。

#### 一、場址佈置規劃

處置區平面佈置詳見圖 2.3.1-1，相關說明如下。

- (一) 考量未來可能進入處置區的包覆容器，以 55 加侖桶為主，另有蘭嶼貯存場之 3x4 重裝容器(長 2,847mm×寬 2,197mm

×高 1,090mm)、3×1 重裝容器(長 2,010mm×寬 730mm×高 1,000mm)，以及少量之 83 加侖桶。全處置場規劃設置 24 條處置坑道，其中 20 條處置坑道放置 A 類廢棄物之 55 加侖桶共 86 萬桶，2 條坑道放置 A 類廢棄物之 3×4 重裝容器共 6,272 個，剩餘之 A 類廢棄物則與 B、C 類一同放置於最內側 2 條處置坑道。

(二)規劃場址隧道洞口高程 EL.+20 m，處置區坑道及環繞其周邊之通行隧道將以佈置於二山谷間之稜線下方，進出之通行隧道採用+1%之上坡坡度，以避免處置坑道裡的處置窖與地下水接觸，當處置坑道進行回填，通行隧道並不會進行回填，一旦地下水進入通行隧道，即順沿坡度儘速排離處置場，降低地下水由通行隧道流至處置坑道的可能性。此外，處置坑道作為運輸車輛停放之入口空間亦會進行回填，地下水由處置窖橫向流動至通行隧道將會比藉由重力直接往處置坑道下部擾動岩層流動要困難。

(三)隧道位置避開地質破碎帶，處置坑道採相互平行佈設，通行隧道銜接處置坑道頭尾端。

(四)處置坑道及通行隧道之地下滲水分別處理，處置坑道滲水於坑道內集中後進行檢測，確認無核種或輻射污染，或經除污達規範標準後排出。

(五)處置場區與專用港口間規劃建構專用高架道路，因必須跨越既有台 26 線上方，採取往北迂迴路線以降低高架道路縱坡坡度，增加行駛安全性以及符合規範需求。

(六)處置場的聯外道路方面，規劃於處置場區與專用港口間專用高架道路北端，另建匝道入口與台 26 線相連接，匝道同樣採用高架橋樑形式，並設置出入口管制站。

(七)輔助區建築設置於處置隧道出入口前方，其主要建物包含行政大樓、工安大樓、準備大樓、第一實驗室、污水處理



場、通風機室與空調室、輔助設備大樓、第二實驗室、運轉大樓、維護工廠等，並以實體道路區隔輻射防護區及非輻射防護區，作為處置作業先期配合作業之區域。

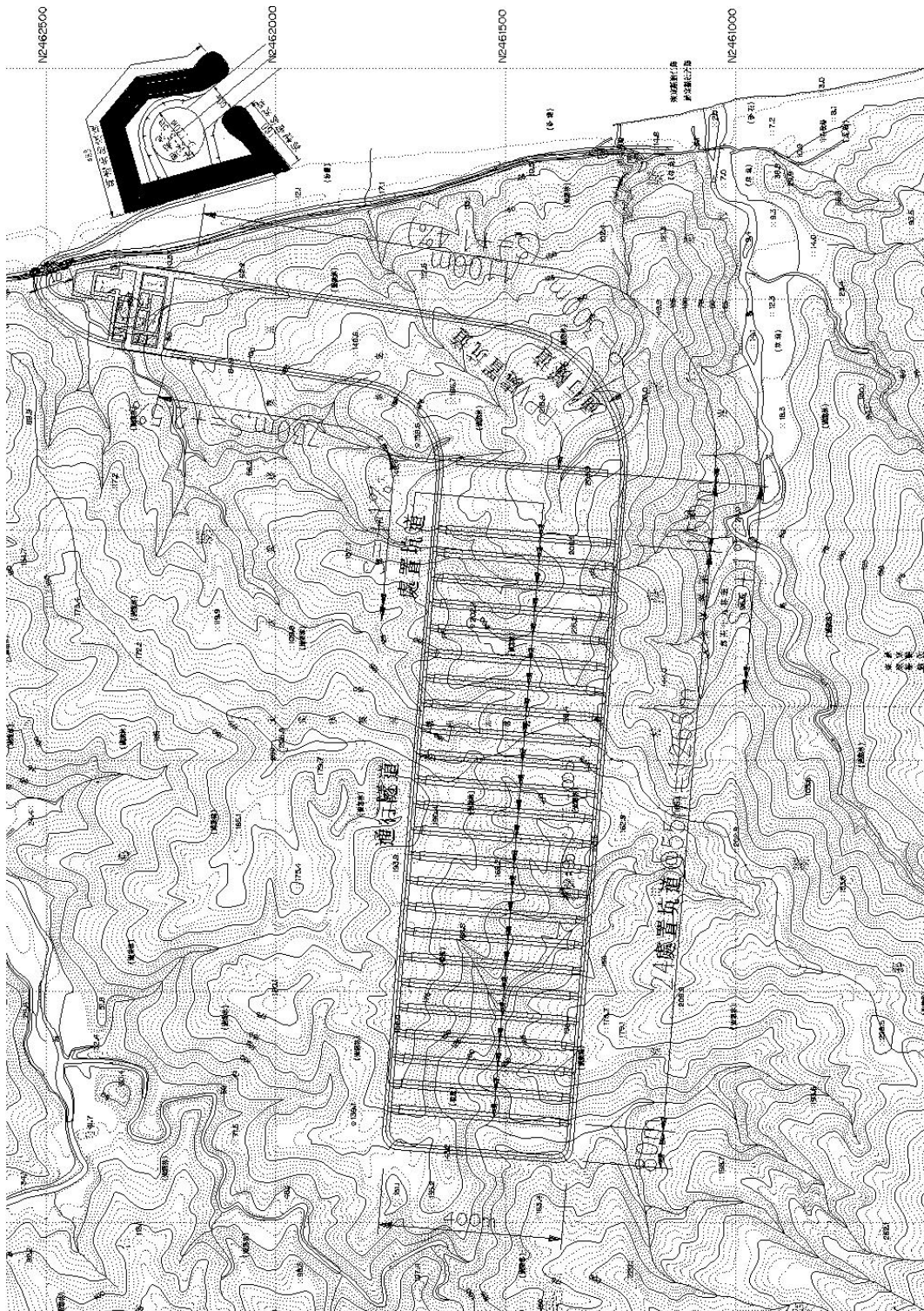


圖 2.3.1-1 達仁鄉建議候選場址平面佈置示意圖

## 二、工程障壁設施

多重工程障壁設施的項目，由近而遠依序包含廢棄物體、55 加侖桶、3×1 或 3×4 重裝容器(視情況使用)、膨潤土混和材料、混凝土處置窖、回填渣料、隧道襯砌等，在隧道襯砌以外則屬於天然障壁範圍，有關工程障壁設施之說明如下。

### (一)廢棄物包件

55 加侖桶、3×1 或 3×4 重裝容器在國內外均有其特定設計需求或規範，以台電公司既有設計規範為例，容器側板、底板、頂板之鋼材品質應符合 ASTM-A36 規範或同等品，供鍍浴使用之鍍需符合 CNS-9(H3004)五號鍍以上或同等品，墊環材質為工業用橡膠墊物材料(Neoprene)，品質符合 CNS-3550，其種類為 A 型且符合不需耐油性的 A-605 型規定，目前正作為廢棄物裝載及運送容器，未來將視實際需求向主管機關申請作為最終處置容器選項。對於不適合固化或固化品質未達標準之 B、C 類廢棄物，考慮採用高完整性盛裝容器(High Integrity Container, HIC)進行盛裝，並配合調整處置窖內擺放方式進行處置。

### (二)處置窖

處置窖頂蓋為厚度 0.8m~1m 之混凝土版，底板為厚度 1m 之混凝土版，兩側為厚度 0.5m 之混凝土版與厚度 0.5m 之膨潤土與砂混和材料，中間為厚度 0.15m 混凝土處置窖隔板，處置窖之斷面如圖 2.3.1-2 所示。處置窖內部空間共分為二階段放置，每一階段放置高度等同於四個 55 加侖桶高度，放置完成後採用混凝土澆注填充桶間空隙，並同時澆注第二階段處置混凝土底板(厚度約 15cm)，完成後再進行第二階段放置，直到儲滿後再度進行混凝土澆注，將窖內空間完全填充封閉。若為置放 3×4 重裝容器之處置窖，其處置窖結構設計與置放 55 加侖桶之處置窖大致上相同，但中

間不加混凝土處置窖隔板，每個處置斷面可處置 28 個 3x4 重裝容器。

混凝土處置窖所採用之混凝土構材，需考量材料耐久特性滿足處置設施需求，以目前混凝土技術考量，可能採用的混凝土材料包含近年來新研發活性粉混凝土 RPC (Reactive Powder Concrete)、高性能混凝土 HPC(High Performance Concrete)以及普通混凝土等，最後採用材料需視安全分析結果以及現地材料特性試驗結果而定。活性粉混凝土根據國內外研究成果所述，可提供比一般混凝土較高之強度韌性、抗磨損、抗腐蝕等特性，進而推估具有較長的生命週期，但考量本產品問世不久，現場技術層面尚未成熟以及相關特性尚待更進一步試驗研究等因素，不排除其他混凝土產品的設計使用可能性，其中包含技術純熟之混凝土高完整性盛裝容器(HIC)，作為處置窖的選項之一。

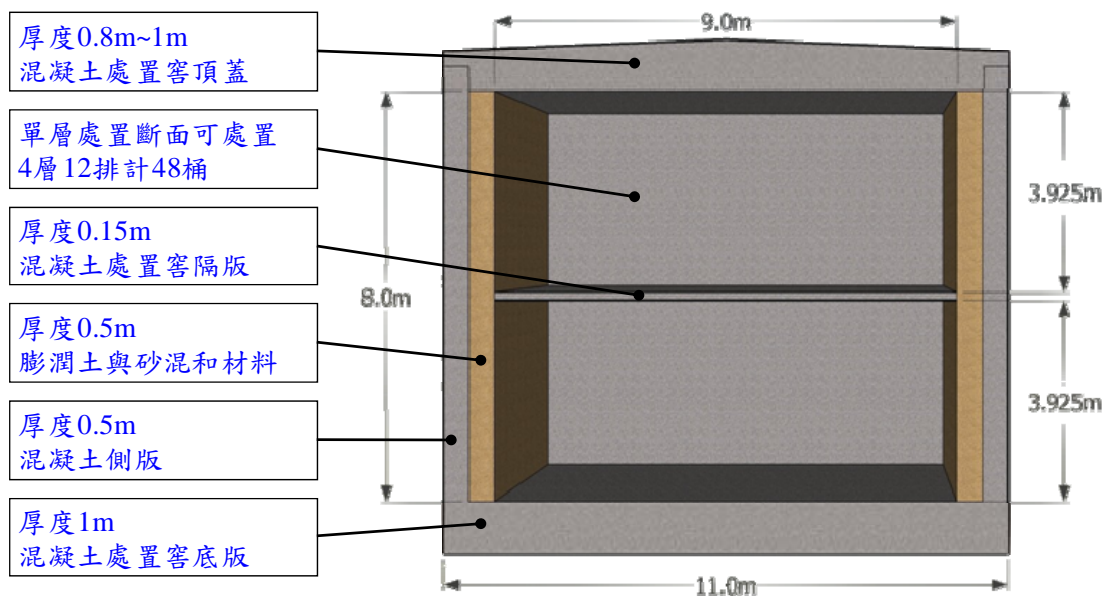


圖 2.3.1-2 處置窖斷面示意圖

### (三)處置坑道封閉與回填

考量防阻地下水滲透需要，處置坑道之混凝土襯砌厚度暫訂 0.6 至 0.8m 間，混凝土襯砌以雙層 PE 防水膜包覆，處置窖側向周圍壁體規劃採用 50 公分膨潤土混和材料、50cm 混凝土以及 20cm 膨潤土混和材料作為包覆，防止核種外釋，處置窖底版規劃為 100cm 厚度之混凝土，處置窖頂面採用 80cm 厚度頂蓋、膨潤土混和材料等多層障壁，避免地下水滲入與處置窖內部接觸，待處置窖內之廢棄物堆置與處置窖頂封閉完成後，再於以開挖運出材料配合水泥砂漿或一般混凝土固結之回填材料，填充於處置窖與坑道襯砌間，其安全概念如圖 2.3.1-3 所示。

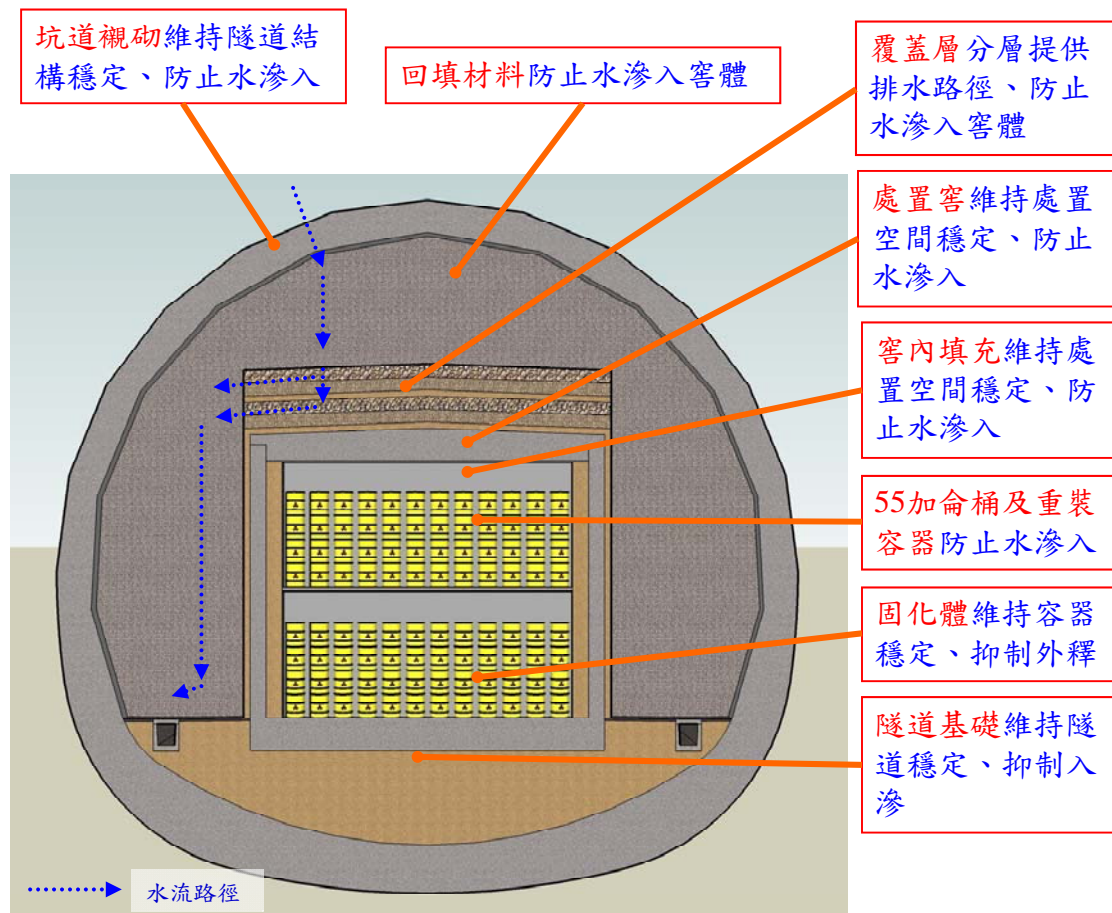


圖 2.3.1-3 坑道式處置封閉結構安全設計概念示意圖

由於 A 類廢棄物與 B、C 類廢棄物之特性不同，對於 A 類廢棄物坑道式處置窖與 B、C 類廢棄物坑道式處置窖的安全概念上，二者於隧道內均設置混凝土包覆層，於處置窖堆置完成亦均於其頂部及外圍加置礫石層、砂層、砂與膨潤土混合物等覆蓋層及包圍層，以防止水滲入窖內。其二者之不同點在於 B 類及 C 類坑道式處置窖之牆內側增設砂與膨潤土層，以防止水入滲窖內之可能，如圖 2.3.1-4 所示。而置放 3×4 重裝容器之坑道式處置窖與置放 55 加侖桶之坑道式處置窖之差別，僅只於堆積方式不同，對於封閉處置窖及坑道所採用之概念及方法則完全相同，如圖 2.3.1-5 所示。

此外，處置坑道的封閉時機宜越早越有利，最好時機為各坑道處置單元置放廢棄物包件完畢後隨即回填，於封閉階段亦可考慮於處置坑道洞口作特殊封塞(Plug)設計，減少通行隧道成為核種傳輸捷徑的可能。

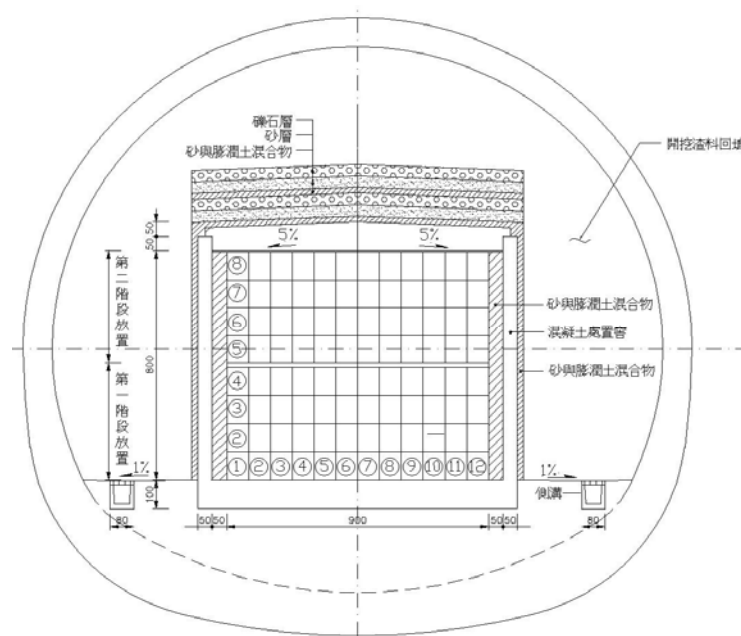


圖 2.3.1-4 55 加侖桶之坑道式處置窖示意圖(A 類)

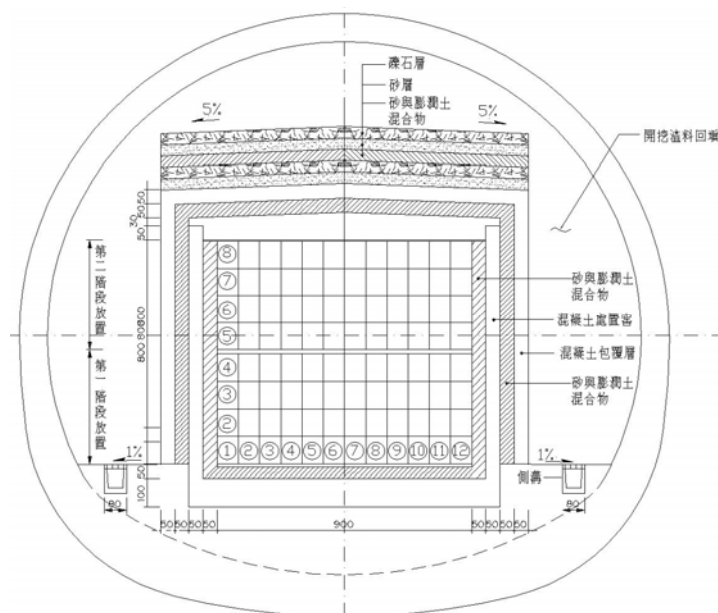


圖 2.3.1-4 55 加侖桶之坑道式處置窖示意圖(B 類、C 類)

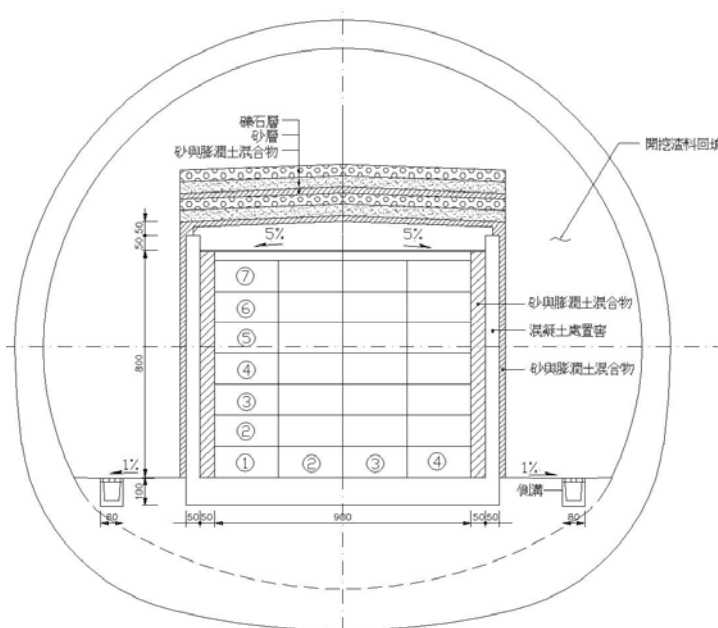


圖 2.3.1-5 3x4 重裝容器之坑道式處置窖示意圖(A 類)

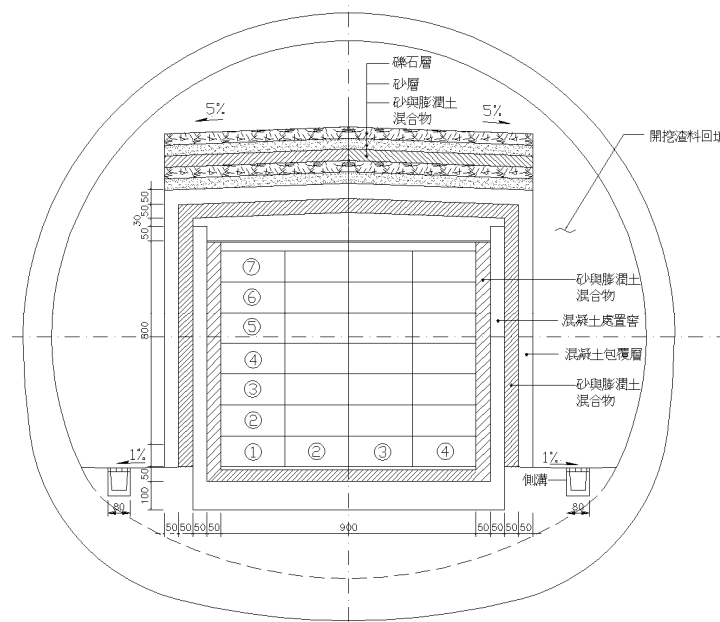


圖 2.3.1-5 3x4 重裝容器之坑道式處置窖示意圖(B 類、C 類)

### 三、工程障壁之核種傳輸

假設一開始未受污染的降水由未飽和層進入，經重力入滲至坑道主體，滲漏水穿過坑道之後，依序流經回填渣料及包覆層而到達處置窖上方，待處置窖混凝土劣化之後，其上方滲漏水便有機會進入處置窖中腐蝕填充物以及盛裝容器，進而直接接觸至廢棄物本體，溶解放射性核種，地下水流順勢帶出核種而藉液體傳輸。

當處置坑道與處置窖已因滲漏水而呈現滿水狀態時，此時盛裝容器失效，核種溶解於水中，但工程結構體之完整性尚未完全失效，故坑道與處置窖內可視為以擴散作用主導核種外釋傳輸。另外藉水體傳輸的核種，利用擴散作用通過處置窖下方以及坑道主體，外釋至坑道下方之飽和含水層，而核種即藉地下水之傳流、延散與擴散等作用，在地下介質中、河川或往海洋流動，或經由井水，接觸到場址附近的生物圈。

台東縣達仁鄉建議候選場址之近場核種傳輸利用 GoldSim 軟體建立近場概念模擬模型並進行相關分析，分析

時以來源項(source term)模擬廢棄物盛裝容器(55 加侖桶)，並假設廢棄物為混凝土固化體，以 55 加侖桶幾何條件為設計混凝土固化體之參考依據，保守設定 55 加侖桶於模擬開始時(即處置場封閉後)即失去障壁功能，造成混凝土固化體孔隙充滿水，核種即可藉由擴散作用開始傳輸。分別模擬混凝土處置窖、混凝土基礎以及基礎以下飽和含水層等三個模擬網格，核種於網格之間的傳輸行為則由擴散作用主導。模擬時間設定為最少模擬 10,000 年，若至 10,000 年尚未出現該核種濃度峰值，則必需至少模擬至核種濃度的峰值出現。分析時使用的相關參數主要參考 SKB 報告(R-01-18)以及游離輻射防護與偵檢(許彬杰，翁寶山，2005)，彙整如表 2.3.1-1 所示。

表 2.3.1-1 相關參數設定一覽表

關鍵核種	半衰期 $\lambda$ (yr)	擴散係數 D (m <sup>2</sup> /sec)	溶解度 S (g/cm <sup>3</sup> )	分配係數 Kd (m <sup>3</sup> /kg)
<sup>14</sup> C	5730	3.00×10 <sup>-2</sup>	1	0.2
<sup>59</sup> Ni	7.6×10 <sup>4</sup>	1.00	5.90×10 <sup>-4</sup>	4.00×10 <sup>-2</sup>
<sup>63</sup> Ni	100	1.00	6.30×10 <sup>-4</sup>	4.00×10 <sup>-2</sup>
<sup>90</sup> Sr	28.9	5.00×10 <sup>-1</sup>	3.60×10 <sup>-3</sup>	1.00×10 <sup>-3</sup>
<sup>93</sup> Mo	3.5×10 <sup>3</sup>	*	*	0.006
<sup>94</sup> Nb	2×10 <sup>4</sup>	5.00×10 <sup>-1</sup>	3.80×10 <sup>-3</sup>	5.00×10 <sup>-1</sup>
<sup>99</sup> Tc	2.13×10 <sup>5</sup>	5.00×10 <sup>-1</sup>	5.00×10 <sup>-9</sup>	5.00×10 <sup>-1</sup>
<sup>129</sup> I	1.57×10 <sup>7</sup>	3.00×10 <sup>-3</sup>	1	0.003
<sup>137</sup> Cs	30	6.00×10 <sup>-1</sup>	1	0.001
<sup>237</sup> Np	2.14×10 <sup>6</sup>	1.00	4.74×10 <sup>-8</sup>	5
<sup>238</sup> Pu	86.4	3.00×10 <sup>-1</sup>	7.14×10 <sup>-7</sup>	5
<sup>239</sup> Pu	2.4×10 <sup>4</sup>	3.00×10 <sup>-1</sup>	7.17×10 <sup>-7</sup>	5
<sup>240</sup> Pu	6,580	3.00×10 <sup>-1</sup>	7.2×10 <sup>-7</sup>	5
<sup>241</sup> Am	432.2	7.00×10 <sup>-2</sup>	1.69×10 <sup>-6</sup>	1

\*表示該核種設定值以所有核種該參數保守值設定，假設其全部溶解與擴散。  
參考文獻：SKB 報告(R-01-18)、游離輻射防護與偵檢(許杰彬，翁寶山，2005)



### 2.3.2 金門縣烏坵鄉建議候選場址

金門縣烏坵鄉建議候選場址由小坵嶼、無人島、南礁及若干無人礁岩組成，若以小坵陸地為中心，則半徑 10 公里範圍內除了大坵外並無其它島嶼。在場址規劃上，除將小坵全島作為處置場相關用地外，考量地表整地與開發、處置容量及初步功能評估等因素，處置場將設在小坵與北方海域之海床下，採用海床下坑道方式處置低放射性廢棄物，其規劃佈置如圖 2.3.2-1 所示。

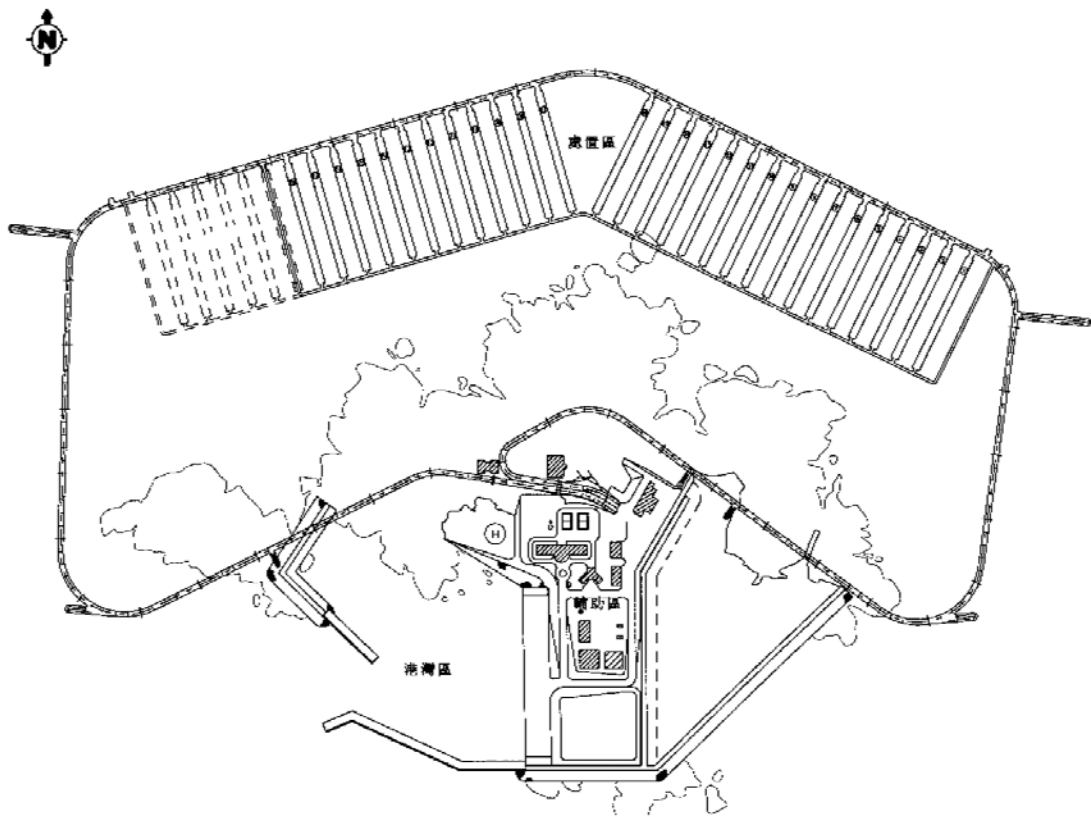


圖 2.3.2-1 金門縣烏坵鄉建議候選場址規劃佈置圖

處置場主要可分為處置區(如隧道進出口、通行隧道、處置坑道及通風隧道等)、港灣區(如碼頭、堤防、航道及港池等)及輔助設施區(如柴油發電機房、運轉大樓、行政大樓及油槽等)等三大區。處置坑道共配置 28 座，每一座坑道長 192 公尺、寬 12 公尺、高 12 公尺，坑道與坑道間的淨距離為 24 公尺，坑道斷



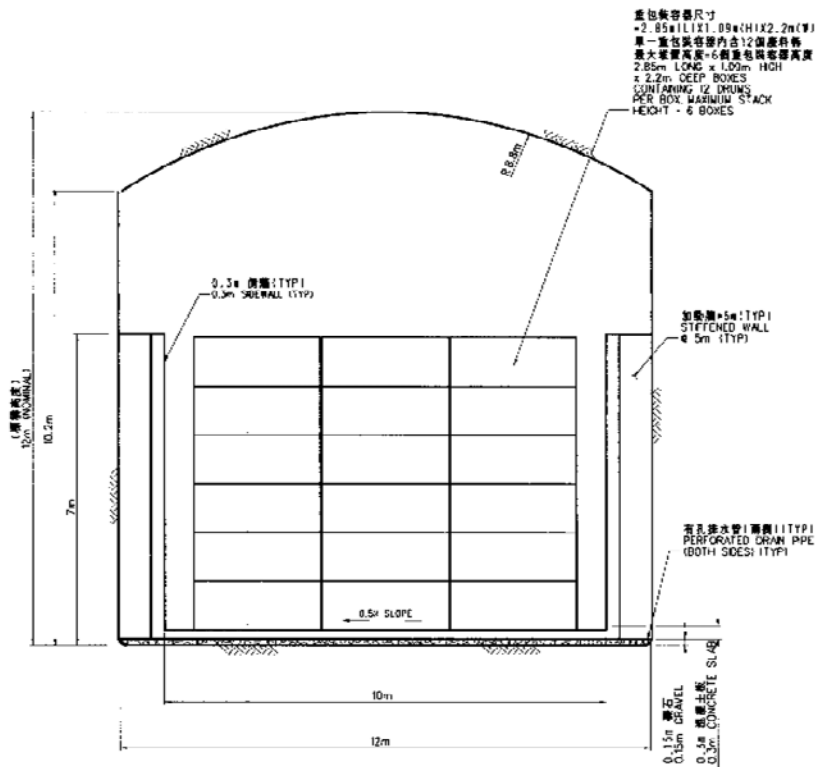


圖 2.3.2-3 烏坵場址的重裝容器處置坑道斷面示意圖

烏坵場址在進行近場的安全評估時，假設處置設施封閉後，廢棄物所含核種均完全溶解於廢棄物內的孔隙水中，且廢棄物包件在封閉後就達全飽和狀態，亦即假設廢棄物內孔隙完全為水所充滿。孔隙水所含的核種濃度計算公式如下：

$$C_s = \frac{I_0}{V_{waste}n_{waste} + V_{grout}n_{grout} + V_{crosswall}n_{crosswall}}$$

其中，

$C_s$ ：處置單元內孔隙水所含核種濃度

$I_0$ ：廢棄物核種初始活度

$V_{waste}$ ：廢棄物總體積

$V_{grout}$ ：廢棄物桶間灌漿的總體積

$V_{crosswall}$ ：處置坑道內，隔間牆總體積

$n_{waste}$ ：廢棄物平均孔隙率

$n_{grout}$ ：灌漿體孔隙率

$n_{crosswall}$ ：混凝土隔間牆孔隙率

溶解於孔隙水中的核種，在工程障壁內的傳輸機制，因受到工程障壁低水力傳導係數的影響，主要為擴散作用，但為保守考量，評估時仍考慮移流、擴散、吸附及衰變等效應，假設模式為一維情況，在混凝土底板正下方的核種濃度可以下列公式表示：

$$C(t) = \frac{1}{2} e^{-\lambda t} C_s \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{Rx - vt}{\sqrt{RDt}} \right) + e^{\frac{xv}{D}} \operatorname{erfc} \left( \frac{Rx + vt}{\sqrt{RDt}} \right) \right]$$

其中，

$\lambda$ ：核種衰變常數

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

$t_{1/2}$ ：核種半衰期

$t$ ：時間

$C_s$ ：處置單元內孔隙水所含核種濃度

$\operatorname{erfc}$ ：補償誤差函數

$$R = 1 + \frac{K_d \rho_b}{n_c}$$

$K_d$ ：混凝土吸附分配係數

$\rho_b$ ：混凝土密度

$n_c$ ：混凝土孔隙率

$x$ ：距離

$v$ ：混凝土內滲流速度，由局部水力梯度及混凝土水力傳導係數及孔隙率求得

$D$ ：擴散係數

利用上述計算公式評估近場的核種傳輸時，所使用的重要參數彙整如表 2.3.2-1、表 2.3.2-2 所示，主要包括體積、孔隙率、密度、擴散係數、水力傳導係數及吸附分配係數等。

表 2.3.2-1 烏坵場址計算近場核種傳輸之重要參數設定

參數		值
水力傳導係數	灌漿後的廢棄物	$10^{-6}$ m/s
	混凝土牆	$10^{-10}$ m/s
體積	廢棄物	216,000m <sup>3</sup>
	廢棄物桶間灌漿	218,000m <sup>3</sup>
	處置坑道內隔間牆	4,400m <sup>3</sup>
孔隙率	廢棄物(平均)	0.335
	灌漿體	0.7
	混凝土隔間牆	0.1
混凝土密度		2.385g/cc
擴散係數		$9.49 \times 10^{-9}$ m <sup>2</sup> /y

表 2.3.2-2 烏坵場址分析時主要核種的混凝土吸附分配係數

核種	Kd(ml/g)	核種	Kd(ml/g)
Am-241	1	Pu-239	50
C-14	100	Pu-240	50
Cs-137	1	Pu-241	50
H-3	0	Sr-90	1
I-129	0.01	Tc-99	0
K-40	0.1	Th-227	5000
Nb-94	0.1	Th-230	5000
Ni-59	10	Th-231	5000
Ni-63	10	Th-234	5000
Np-237	1	U-233	20
Pa-231	20	U-234	20
Pa-233	20	U-235	20
Pa-234	20	U-235m	20
Pa234m	20	U-236	20
Pu-238	50	U-238	20

## 第三章 工程障壁系統安全評估之解析方法與參數設定研析

### 3.1 工程障壁系統之安全評估解析方法

模擬近場工程障壁的核種傳輸時，地下水流的擴散作用、移流作用及材料對核種的吸附作用，是為相當重要的作用過程。

#### 一、地下水流的擴散作用

模擬近場工程障壁內受污染水流的特徵時，假設污染物只能以擴散作用從處置窖下方穿透覆蓋層與坑道等工程障壁，所以，考慮在較小尺度上面，其傳輸作用則是由分子間之擴散作用所主導。從微觀的角度來看，分子與分子之間是持續不停地在運動。而擴散作用則是因為分子之間之運動所造成污染物之傳輸，其中，隨機的分子運動會形成濃度坡降，而此現象則會造成濃度高區域的分子往濃度低的區域進行淨擴散運動。根據 Fick's 定律，若是一維介質當中，其擴散物質通量如式(3-1)：

$$J_{dif} = -n_i D_s \frac{dC}{dx} \quad (3-1)$$

其中

$J_{dif}$  為擴散核種通量 ( $\text{Bq (m}^2 \text{ yr)}^{-1}$ )

$D_s$  為分子擴散係數 ( $\text{m}^2 \text{ yr}^{-1}$ )

$-dC/dx$  則為濃度梯度 ( $\text{Bq m}^{-4}$ )

$n_i$  為介質的孔隙率 (-)

若考慮一控制體積，如圖 3.1-1，其有  $x$ 、 $y$  與  $z$  三個方向，則進入此一控制體積的污染物可表示為式(3-2)：

$$J_x dzdy + J_y dzdx + J_z dxdy \quad (3-2)$$

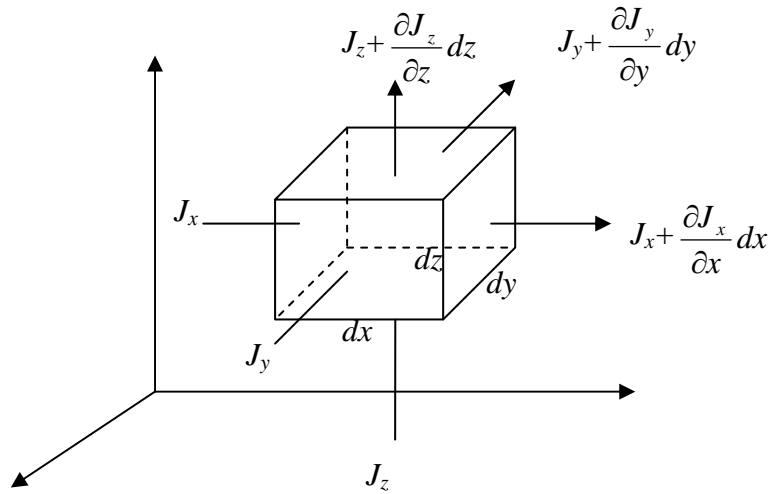


圖 3.1-1 空間中控制體積內之質量平衡示意圖

而離開此一控制體積之污染物總量則可表示為式(3-3)：

$$\left( J_x + \frac{\partial J_x}{\partial x} dx \right) dzdy + \left( J_y + \frac{\partial J_y}{\partial y} dy \right) dzdx + \left( J_z + \frac{\partial J_z}{\partial z} dz \right) dxdy \quad (3-3)$$

由式(3-2)與式(3-3)可以得到控制體積中的進來與出去的  
污染物總量差值為式(3-4)：

$$\left( \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \right) dxdydz \quad (3-4)$$

又於控制體積內的總量改變可以表示為式(3-5)：

$$-n_t \frac{\partial C}{\partial t} dxdydz \quad (3-5)$$

由式(3-4)與(3-5)可得式(3-6)：

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = -n_t \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3-6)$$

將式(3-1)代入式(3-6)則可以替換成(3-7)式：

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_s \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3-7)$$

若只考慮一維  $y$  方向往下的污染傳輸，並加入核種的衰退作用，式(3-7)則可以改寫成(3-8)式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \lambda C(y,t) \quad y \in (\Omega), \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (3-8)$$

式(3-8)即為擴散作用之地下水傳輸控制方程式，其起始條件與邊界條件為：

$$\text{I.C. : } C(y,0) = g_0(y) \quad (3-9)$$

$$\text{B.C. : } C(y,t)|_{(\Gamma_1)} = g_1(y,t) \quad (3-10)$$

$$n_t(D_s \nabla C) \cdot n|_{(\Gamma_2)} = g_2(y,t) \quad (3-11)$$

其中

$(\Omega)$  為水流區域

$(\Gamma) = (\Gamma_1) \cup (\Gamma_2)$  是為邊界

$g_0$ 、 $g_1$  和  $g_2$  則是已知函數

$n$  為  $\Gamma_2$  的單位法線向量

$t_f$  為模擬最終時間

當  $D$  值為已知輸入值，則利用數值方法求解式(3-8)～式(3-11)，可計算出污染物濃度於時間與空間上之分佈。

若受污染的地下水傳輸通過了近場工程障壁，到達遠場地質圈，即接觸處置場址下方飽和地下水含水層，則放射性核種便隨著地下水流，有機會傳輸至生物圈，對人類造成影響與衝擊。地下水水流方程式可分為穩定流(定量流 steady state flow)以及不穩定流(變量流 transient state flow)兩種。



穩定地下水流之方程式可導自達西定律(Darcy's Law)，如下式(3-12)：

$$v = -K \frac{\partial h}{\partial L} \quad (3-12)$$

其中

$v$  為地下水流流速( $\text{m yr}^{-1}$ )

$\partial h$  為流路上兩不同位置之水頭差(m)

$\partial L$  為流路上兩不同位置之距離(m)

$K$  為滲透係數( $\text{m yr}^{-1}$ )

假設為飽和層內之地下水流動， $\frac{\partial h}{\partial L}$  即為水力坡降。其各個主方向之流速可表示為式(3-13)：

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad , \quad v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad , \quad v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3-13)$$

另外，連續方程式是質量守恆物理定律的數學式。將達西公式與連續方程式整合，再加以定義適當的邊界與初始條件，則可提供合理的數學架構以求解含水層中水頭與流速相對於空間與時間上的關係。流體力學中的連續方程式主要是指在一任意的控制體積當中，質量在該體積中的累積率加上離開此控制體積的物質淨流通量必須等於在此體積中物質的產生率。假設水有不可壓縮性，所以其密度為一常數，則質量守恆的定律則可以用水的體積守恆來取代，如下式(3-14)：

$$\text{(體積貯量的增加率)} + \text{(體積的淨流出率)} = \text{(體積的源頭強度)} \quad (3-14)$$

於穩定流狀態之下，控制體積內之淨流出量與體積的源頭強度皆視為零；又一控制體積內之體積的變化可以流速的變化來代表，則地下水流動之連續方程式為：

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3-15)$$

以式(3-13)代入式(3-15)可得式(3-16)：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3-16)$$

式(3-16)為等向性介質中穩定流之一般公式。

而在不穩定流狀態方面，一般利用比儲水係數  $S_s$  (specific storage, 1/m) 來表示因含水層壓力改變所造成之水位變化，如式(3-17)所示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3-17)$$

若考慮二維侷限含水層，且含水層厚度為一常數  $b$ ，則不穩定流之連續方程式可表示如式(3-18)：

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (3-18)$$

其中

$S$  為儲水係數(Storage coefficient)(-)，是為  $S_s \times b$

$T$  為流通係數(aquifer transmissivity)( $m^2 yr^{-1}$ )，是為  $K \times b$

然而若只考慮地下水流於二維侷限含水層，並且考量流入(sink)或流出(source)項，則上式(3-18)可以改寫成較為完整的控制方程式如式(3-19)：

$$S \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{T} \nabla h) - Q \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) = 0 \quad (x, y) \in (\Omega), 0 \leq t \leq t_f \quad (3-19)$$

其起始條件與邊界條件為：

$$h(x, y, 0) = f_0(x, y), \quad (x, y) \in (\Omega) \quad (3-20)$$

$$h|_{(\Gamma_1)} = f_1(t), \quad \mathbf{T}\nabla h \cdot \mathbf{n}|_{(\Gamma_2)} = f_2(t), \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (3-21)$$

其中

$T$  為流通係數( $m^2 yr^{-1}$ )視為一向量

$Q$  為流入與流出項( $m yr^{-1}$ )，是為體積的源頭強度( $kg/s$ )  
除以平均密度( $kg/m^3$ )

$\delta$  則是為 Dirac function( $m^{-1}$ )，包括抽水量為正以及補注  
量為負，其中下標  $i$  則為  $i$  處流入流出項

$(\Omega)$  為水流區域

$(\Gamma) = (\Gamma_1) \cup (\Gamma_2)$  表示為邊界

$f_0$ 、 $f_1$ 、 $f_2$  則視為已知函數

$n$  為  $\Gamma_2$  的單位法線向量

$t_f$  為模擬最終時間

若  $S$ 、 $T$  與  $Q$  為已知項，則利用數值方法求解式(3-19)  
~(3-21)可以得到飽和含水層中不同時間不同位置的水頭  $h$ ，  
也可以描繪出地下水流場與流速。

若對於未飽和含水層，水力水頭則表示為壓力水頭與高  
度水頭總和，如式(3-22)：

$$H = h + z \quad (3-22)$$

其中

$h$  為壓力水頭(m)

$z$  為高度水頭(m)

而未飽和含水層地下水控制方程式則表示為式(3-23)：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K' \frac{\partial}{\partial z} (h + z) \right] \quad (3-23)$$

其初始條件與邊界條件為：

$$h(z, t=0) = h_0, \quad \text{即 } \theta(z, t=0) = \theta_0 \quad (3-24)$$

$$h \Big|_{z=0} = h_1, \quad K' \frac{\partial}{\partial z} (h+z) \Big|_{z=L} = q_1 \quad (3-25)$$

其中

$\theta$  為土壤含水量(-)

$K'(h)$  為未飽和水力傳導係數( $\text{m yr}^{-1}$ )，亦可表示為  $K(\theta)$

$t$  為時間

$z=L$  與  $z=0$  分別為上、下邊界

$h_0$  為當時間  $t=0$  時，各深度的初始水位(m)

$h_1$  為下邊界  $z=0$  的定水頭(m)

$q_1$  為上邊界  $z=L$  的定流量( $\text{m}^3 \text{yr}^{-1}$ )

另外，採用 Van Genuchten-Mualem (VGM)模式的土壤水份經驗關係式，可將(3-23)式中的土壤水份含量  $\theta$  和未飽和水力傳導係數  $K'$  表示如式(3-26)與式(3-27)：

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (3-26)$$

$$K'(h) = K S^{0.5} \left[ 1 - \left( 1 - S^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (3-27)$$

其中

$\theta_s$  為飽和條件下含水量(-)

$\theta_r$  為殘餘含水量(-)

$K$  為飽和水力傳導係數( $\text{m yr}^{-1}$ )

$\alpha$ 、 $n$ 、 $m$  為經驗曲線的回歸參數，且  $m=1-1/n$

$S$  為  $(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$

當  $\alpha$ 、 $n$ 、 $K_s$  已知，則可以利用數值方法推求未飽合含水層的地下水流流場，以及不同時間不同位置的壓力水頭  $h$ 。

如此，地質圈中飽和或未飽和含水層的地下水流流場，皆可以藉由地下水模型利用數值方法求解。而溶於地下水的放射性核種在進入含水層之後，相對於擴散作用是近場工程

障壁主要的傳輸作用，地質圈中地下水污染傳輸過程的主要機制有對流、擴散以及延散作用等三種。

## 二、地下水流的移流作用

移流作用主要的傳輸機制是藉由地下水之流動，影響污染物傳輸，也就是水流的體積通量或是達西流速會造成污染物的傳輸，如式(3-28)

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{\partial h}{\partial L} = -KI \quad (3-28)$$

其中

Q 是流量( $\text{m}^3 \text{ yr}^{-1}$ )

A 為截面積( $\text{m}^2$ )

I 為水力坡降(-)

另外，地下水水流則會受到介質孔隙的影響，所以實際的移動速率稱為滲流流速(seepage velocity,  $u$ )，滲流流速與達西流速之關係如下式(3-29)：

$$u = \frac{v}{n_e} = \frac{v}{\theta} \quad (3-29)$$

就飽和含水層來說， $n_e$  為有效孔隙率(effective porosity)；對非飽和含水層來說，以土壤水份含量( $\theta$ )代換  $n_e$ 。而大部份之土壤，多假設  $n_e$  約等於總孔隙率( $n_t$ )，除了黏土層或是黏土阻水層之有效孔隙率與總孔隙率有極大的差異。

若假設污染物為溶質，其濃度為  $C$ ，則通過單位截面積之對流流通量  $J_{adv}$  為：

$$J_{adv} = u n_t C \quad (3-30)$$

從(3-28)式～(3-30)式可得知，經由對流作用，其污染物的傳輸量為  $KIC$ ，即污染物的傳輸量與介質的水力傳導係數成正比，亦與水力坡降或濃度成正比。

### 三、核種吸附作用

吸附作用包括藉由凡得瓦力或靜電吸引力達成之吸附，吸附力較弱且可為多層吸附，沒有特定吸附位置，吸附速率非常快；另外藉由類似化學鍵引力的吸附，為單層吸附且有特定吸附位置，吸附速率慢。假設污染物與固體材料的關係為瞬間平衡吸附，故污染物與固體材料的吸附行為以簡單的線性等溫吸附(linear adsorption isotherm)來描述，其每單位黏土材料質量所吸附之溶質量  $S$  可表為：

$$S = K_d \times C$$

其中， $K_d$  為分配係數(distribution coefficient)( $m^3/kg$ )，代表溶質在固相與液相中體積濃度之比值。

### 3.2 工程障壁系統之安全評估參數設定

工程障壁內的主要核種傳輸機制如前節所述，主要包括移流、擴散與吸附等作用，而影響這些機制的參數則有水力傳導係數、擴散係數、吸附分配係數、地下水流速等。其中，水力傳導係數、擴散係數、吸附分配係數等參數會因工程設計所採用的材料不同而改變，地下水流速則與整個場址環境有關。為了解工程設計的材料參數對核種遷移之影響，以下根據國外低放射性廢棄物處置場於功能評估時採用的參數，提出適當的參數值，做為後續參數敏感度分析之參考。

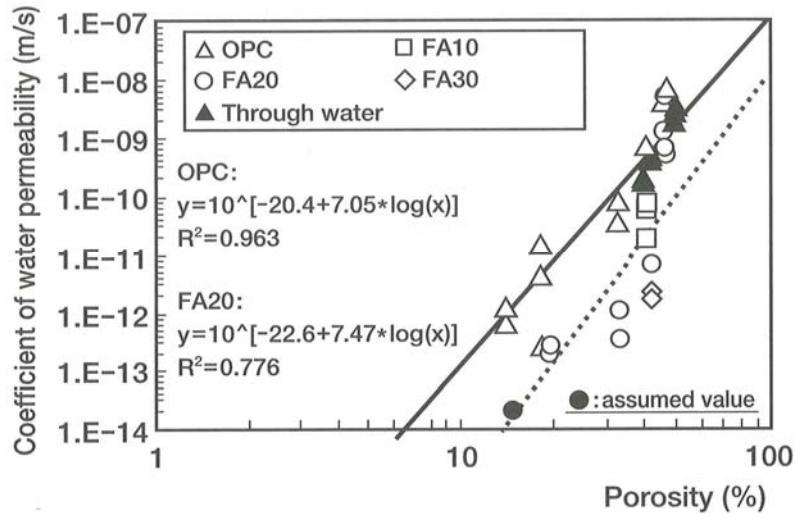
#### 一、水力傳導係數

##### (一)水泥材料

水泥材料的水力傳導係數會受到孔隙率、孔隙徑分布、孔隙連結度及孔隙彎曲度(tortuosity)等孔隙構造影響，可以孔隙率作為評估孔隙構造之代表指標，並分析其對水力傳導係數之影響。日本利用不同配比的水泥試體，量測其孔隙率與水力傳導係數，如圖 3.2-1 及圖 3.2-2 所示。由實驗結果可知，水力傳導係數具有隨著孔隙率增加而變大的趨勢，但圖 3.2-1 中，對孔隙率相同但配比不同的試體而言，普通波特蘭水泥試體的水力傳導係數大於添加飛灰的水泥試體，造成此種差異的原因，可能是因為材料的孔隙徑分布等孔隙構造不同，使水力傳導係數有不同的分布。

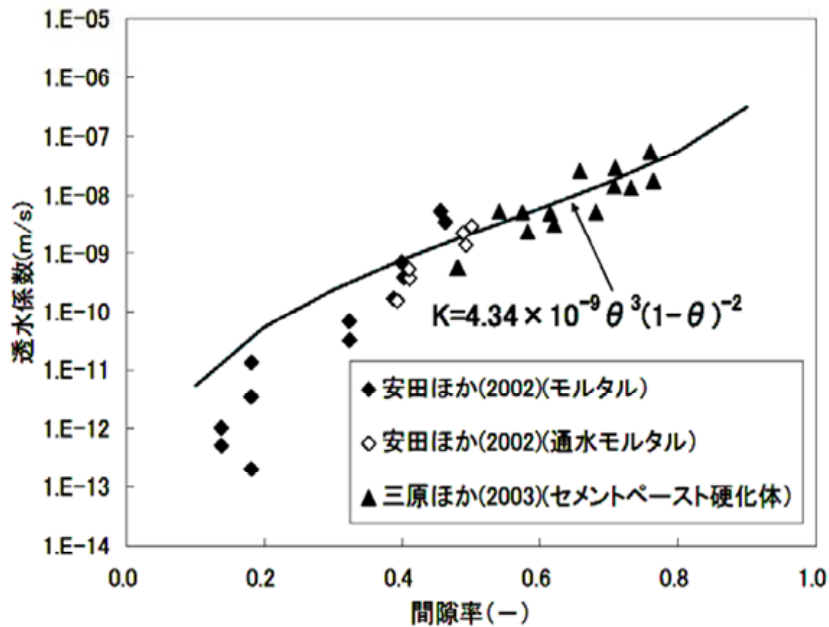
彙整日本、瑞典及加拿大等國家進行安全評估時採用的水力傳導係數與孔隙率，以及日本的實驗結果，如表 3.2-1 及圖 3.2-3 所示。各國安全評估時採用的水力傳導係數約介於  $1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-8} \text{m/s}$  之間，孔隙率則在 5%~25% 的範圍內。其中，日本設定之水力傳導係數比瑞典或加拿大至少低 2 個數量級(order)，此可能是日本的地質環境條件沒有歐洲或

美洲國家好，故在工程可及的能力範圍內，盡量達到較好的品質要求。



資料來源：土木学会(2008)，余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方。

圖 3.2-1 日本不同配比水泥之孔隙率與水力傳導係數分布圖



資料來源：独立行政法人日本原子力研究開発機構(2012)，セメント材料影響評価技術高度化開発報告書。

圖 3.2-2 日本水泥砂漿與水泥漿體之孔隙率與水力傳導係數分布圖



表 3.2-1 各國水泥材料之水力傳導係數

國家	分類	材料	孔隙率(%)	水力傳導係數(m/s)
日本	安全評估	低擴散層(水泥砂漿)	15	$3 \times 10^{-13}$
		處置窖(鋼筋混凝土)	13	$3 \times 10^{-13}$
		窖內填充材(水泥砂漿)	20	$3 \times 10^{-13}$
	實驗	普通波特蘭水泥(圖 3.2-1)	$K = 10^{-20.4+7.05 \times \log(n)}$	
		普通波特蘭水泥添加 20% 飛灰(圖 3.2-1)	$K = 10^{-22.6+7.47 \times \log(n)}$	
		砂漿、水泥漿體(圖 3.2-2)	$K = 4.34 \times 10^{-9} \times n^3 \times (1 - n)^{-2}$	
瑞典	安全評估	混凝土構造	15	$8.3 \times 10^{-10}$
		BTF 中的混凝土灌漿、包件中的固化水泥	20	$8.3 \times 10^{-9}$
加拿大	安全評估	結構混凝土(未劣化)	11	$1 \times 10^{-10}$
		低熱高性能水泥 LHHPC(未劣化)	5	$2 \times 10^{-12}$
		結構混凝土(劣化)	25	$1 \times 10^{-8}$
		低熱高性能水泥 LHHPC(劣化)	10	$1 \times 10^{-10}$

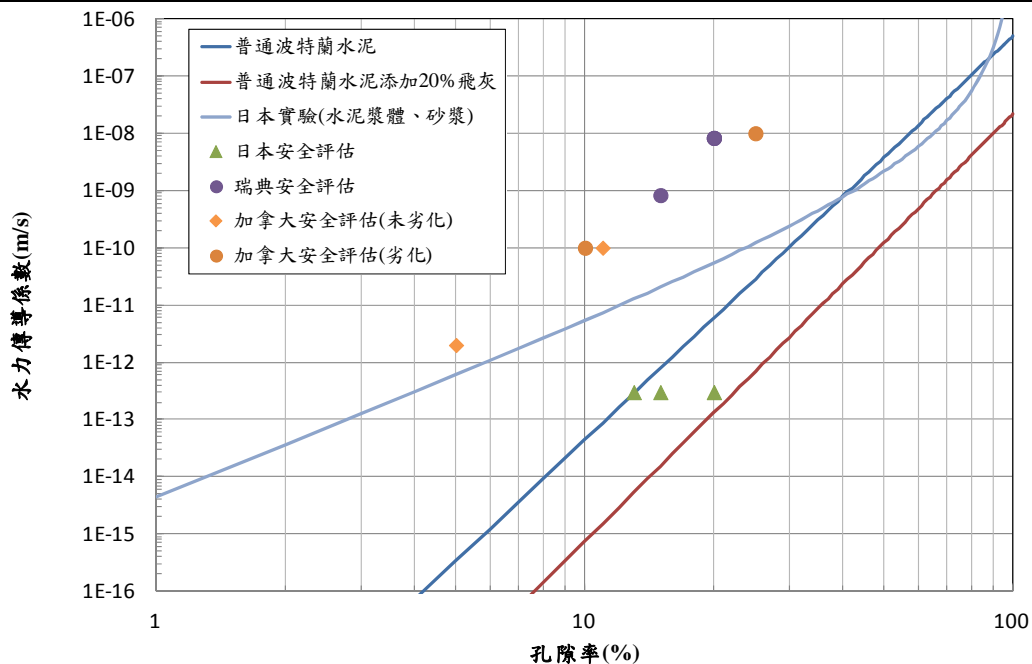
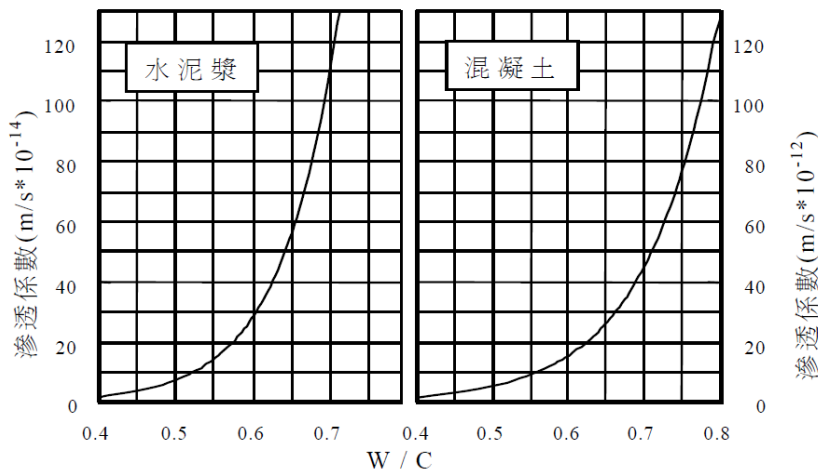


圖 3.2-3 水泥材料水力傳導係數與孔隙率之關係

另外，我國對於水泥材料的水力傳導係數研究，如圖 3.2-4 所示，水泥材料的水力傳導係數約在  $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-10} \text{m/s}$  之間，且混凝土的水力傳導係數約為水泥漿之 100 倍。綜合上述國內外之研究成果，較可能的水力傳導係數設定範圍為  $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ，在此範圍內取  $1 \times 10^{-12}$ 、 $1 \times 10^{-10}$ 、 $1 \times 10^{-8}$  等三種參數，分別代表高品質或高性能的優良水泥材料、一般水泥材料以及施工不佳或性能較差的水泥材料，以利後續分析案例之設定。

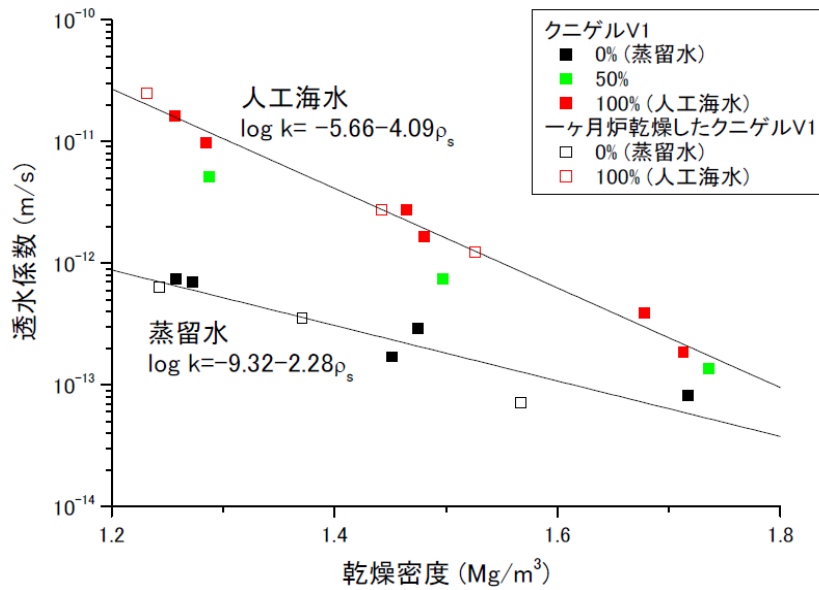


資料來源：黃兆龍(2008)，放射性廢棄物設施混凝土結構長期安全規範之研究。

圖 3.2-4 國內對水泥材料之水力傳導係數與水灰比關係之研究

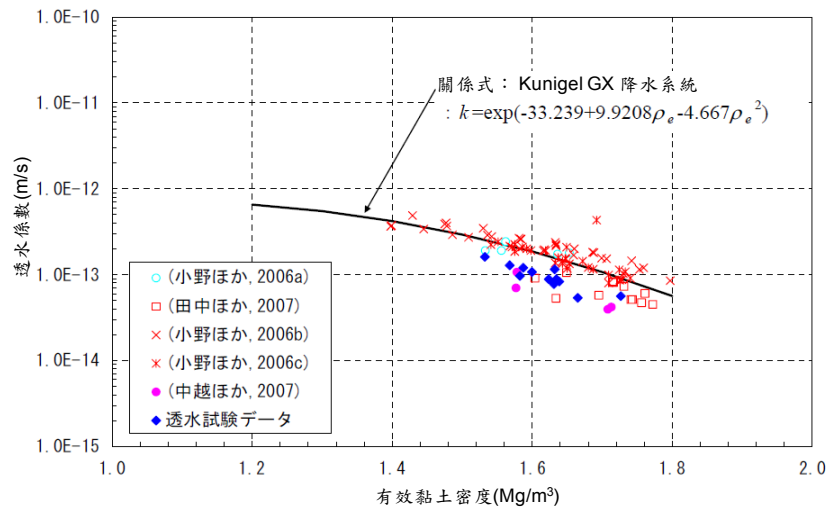
## (二)膨潤土材料

膨潤土的水力傳導係數受其材料特性與密度分布影響，可以乾密度、有效黏土密度或有效高嶺石密度做為評估指標。日本以不同的膨潤土壓縮試體為對象，量測其密度與水力傳導係數，如圖 3.2-5~圖 3.2-7 所示。由實驗結果可知，水力傳導係數具有隨著密度增加而變小的趨勢，圖中有部分試驗數據資料分布不在趨勢線的主軸帶上，此種不一致性，可能是因為試體內的密度分布不均或是量測方法不同所造成之差異。



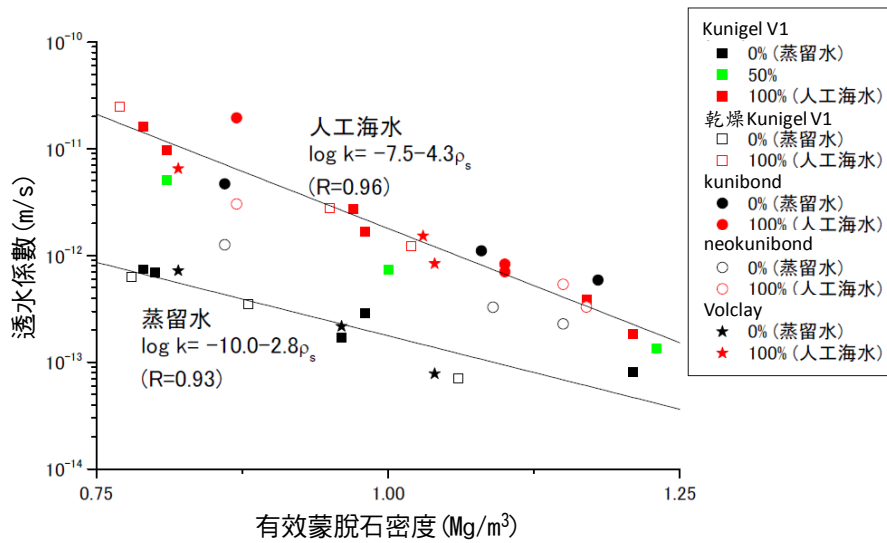
資料來源：財団法人電力中央研究所(2004)，ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響。

圖 3.2-5 日本 kunigel V1 膨潤土的乾密度與水力傳導係數分布圖



資料來源：土木学会(2009)，余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方。

圖 3.2-6 日本 kunigel GX 膨潤土的有效黏土密度與水力傳導係數分布圖



資料來源：土木学会(2009)，余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考  
え方。

圖 3.2-7 日本膨潤土的有效蒙脫石密度與水力傳導係數分布圖

彙整日本、瑞典及加拿大等國家進行安全評估時採用的水力傳導係數與乾密度，以及日本的實驗結果，如表 3.2-2 及圖 3.2-8 所示。各國安全評估時採用的水力傳導係數約介於  $7 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-9} m/s$  之間，乾密度則在  $1 \sim 2 Mg/m^3$  的範圍內。其中，對於純膨潤土或混入砂的膨潤土而言，日本及加拿大於安全評估之水力傳導係數設定值，都較瑞典低 2 個數量級(order)。

另外，我國亦針對不同配比之台東樟原地區之日興膨潤土與美國懷俄明膨潤土 BH，以乾密度  $1.655 \sim 1.754 Mg/m^3$  之試塊進行試驗，其結果彙整如表 3.2-3 所示，由表中資料可知，日興膨潤土的水力傳導係數介於  $4.98 \times 10^{-12} \sim 3.08 \times 10^{-11} m/s$  間，BH 膨潤土在 30%~50% 取代量下之水力傳導係數介於  $4 \times 10^{-12} \sim 1.86 \times 10^{-12} m/s$  間，水力傳導係數隨膨潤土含量與夯實能量而變化。

綜合上述國內外之研究成果，較可能的水力傳導係數設定範圍為  $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-9} m/s$ ，在此範圍內取  $1 \times 10^{-13}$ 、 $1 \times 10^{-11}$ 、

$1 \times 10^{-9}$  等三種參數，分別代表不同的膨潤土含量或壓密度，以利後續分析案例之設定。

表 3.2-2 各國膨潤土材料之水力傳導係數

國家	分類	材料	乾密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	水力傳導係數 (m/s)
日本	安全評估	低透水層(膨潤土)	1.6	$7.00 \times 10^{-13}$
		回填材(膨潤土/砂)	1.5	$4.00 \times 10^{-11}$
	實驗 (圖 3.2-5)	膨潤土(海水)	$K = 10^{(-5.66 - 4.09\rho_d)}$	
		膨潤土(蒸餾水)	$K = 10^{(-9.32 - 2.28\rho_d)}$	
瑞典	安全評估	膨潤土	1.05	$2.00 \times 10^{-11}$
		膨潤土/砂之混合土(10/90)	2.0	$1.00 \times 10^{-9}$
加拿大	安全評估	膨潤土/砂(70/30)	1.6	$1.00 \times 10^{-11}$

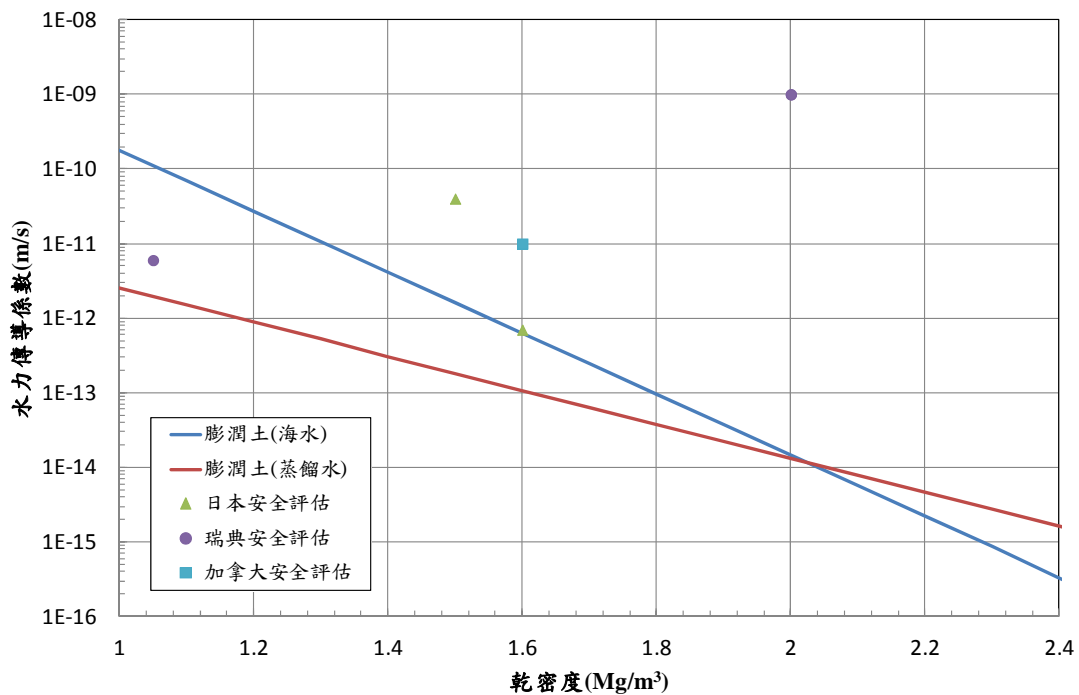


圖 3.2-8 膨潤土材料之水力傳導係數與乾密度之關係

表 3.2-3 我國對日興膨潤土之水力傳導係數試驗結果

膨潤土來源	膨潤土含量 (%)	混合砂來源	夯實應力 (Pa)	水力傳導係數 (m/s)
日興膨潤土	100	-	$1 \times 10^6$	$2.65 \times 10^{-11}$
			$5 \times 10^6$	$6.12 \times 10^{-12}$
			$10 \times 10^6$	$4.98 \times 10^{-12}$
	75	金門花崗岩	$1 \times 10^6$	$3.08 \times 10^{-11}$
			$5 \times 10^6$	$1.67 \times 10^{-11}$
			$10 \times 10^6$	$6.54 \times 10^{-12}$
	75	台東達仁硬頁岩	$1 \times 10^6$	$2.78 \times 10^{-11}$
			$5 \times 10^6$	$8.35 \times 10^{-12}$
			$10 \times 10^6$	$5.87 \times 10^{-12}$
BH 膨潤土	30	金門花崗岩	$500 \times 10^3$	$4.87 \times 10^{-12}$
			$1 \times 10^6$	$3.88 \times 10^{-12}$
			$5 \times 10^6$	$3.01 \times 10^{-12}$
		台東達仁硬頁岩	$500 \times 10^3$	$4.87 \times 10^{-12}$
			$1 \times 10^6$	$3.62 \times 10^{-12}$
			$5 \times 10^6$	$3.12 \times 10^{-12}$
	50	金門花崗岩	$500 \times 10^3$	$2.87 \times 10^{-12}$
			$1 \times 10^6$	$2.66 \times 10^{-12}$
			$5 \times 10^6$	$1.95 \times 10^{-12}$
		台東達仁硬頁岩	$500 \times 10^3$	$2.67 \times 10^{-12}$
			$1 \times 10^6$	$2.68 \times 10^{-12}$
			$5 \times 10^6$	$1.86 \times 10^{-12}$

資料來源：台電公司(2014)，低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調查評估技術。

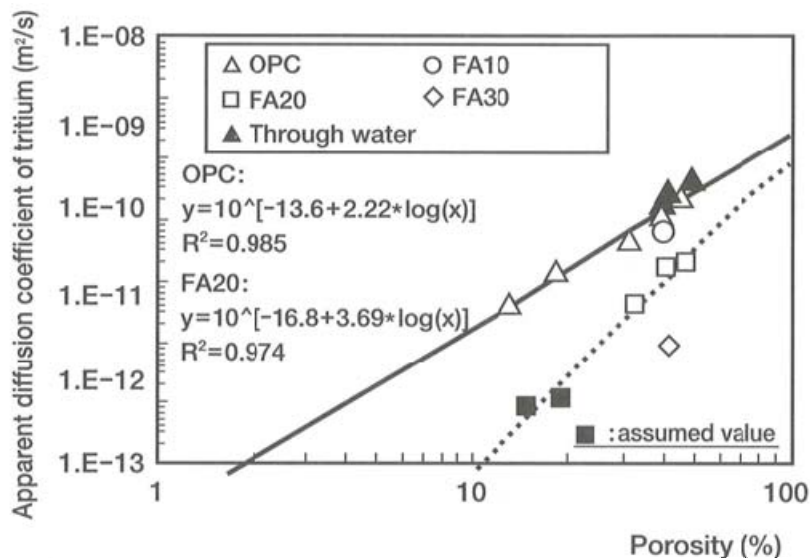
## 二、擴散係數

### (一)水泥材料

水泥材料的擴散係數受到材料的孔隙或裂縫多寡影響，而孔隙率或裂縫則受限於水泥種類、添加劑、配比設計、施工品質等組合條件。日本將普通波特蘭水泥、添加飛灰的普通波特蘭水泥或是不同配比的低熱波特蘭水泥漿試體投入氚水中，量測其擴散係數與孔隙率，試驗結果如圖 3.2-9~圖 3.2-10 所示。由實驗結果可知，擴散係數有隨著孔隙率增加而變大的趨勢，但在相同的孔隙率下，添加飛灰的水泥

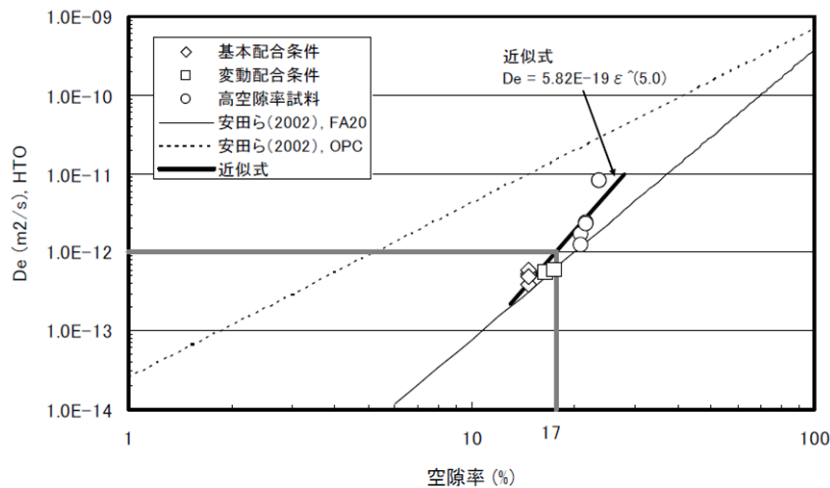
漿試體之擴散係數較小，主要是因為水泥添加飛灰後可提升水泥緻密度，也可減少因水化熱造成的裂縫生成，進而降低擴散係數。

彙整日本、瑞典及加拿大等國家進行安全評估時採用的擴散係數與孔隙率，以及日本的實驗結果，如表 3.2-4 及圖 3.2-11 所示。各國安全評估時採用的擴散係數約介於  $3 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  之間，但主要集中在  $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  的範圍內，孔隙率則同樣在 5%~25%。綜合上述之研究成果，較可能的擴散係數設定範圍為  $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ，在此範圍內取  $1 \times 10^{-12}$ 、 $1 \times 10^{-11}$ 、 $1 \times 10^{-10}$  等三種參數，分別代表高品質或高性能的優良水泥材料、一般水泥材料以及施工不佳或性能較差的水泥材料，以利後續分析案例之設定。



資料來源：土木学会(2008)，余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方。

圖 3.2-9 日本添加飛灰之水泥孔隙率與擴散係數分布圖



資料來源：土木学会第 62 回年次学術講演会(2007)・拡散抑制を期待されるセメント系材料の品質管理方法に関する研究

圖 3.2-10 日本不同配比之低熱波特蘭水泥孔隙率與擴散係數分布圖

表 3.2-4 水泥材料之擴散係數

國家	分類	材料	孔隙率(%)	擴散係數(m <sup>2</sup> /s)
日本	安全評估	低擴散層(水泥砂漿)	15	3×10 <sup>-12</sup>
		處置窖(鋼筋混凝土)	13	2.6×10 <sup>-12</sup>
		窖內填充材(水泥砂漿)	20	4×10 <sup>-12</sup>
	實驗	普通波特蘭水泥(圖 3.2-9)	$D_e = 10^{-13.6+2.22 \times \log(n)}$	
普通波特蘭水泥添加 20% 飛灰(圖 3.2-9)		$D_e = 10^{-16.8+3.69 \times \log(n)}$		
低熱波特蘭水泥(圖 3.2-10)		$D_e = 5.82 \times 10^{-19} \times n^5$		
瑞典	安全評估	混凝土構造	15	1×10 <sup>-11</sup>
		BTF 中的混凝土灌漿、包件中的固化水泥	20	1×10 <sup>-10</sup>
加拿大	安全評估	結構混凝土(未劣化)	11	2.5×10 <sup>-12</sup>
		低熱高性能水泥 LHHPC(未劣化)	5	3×10 <sup>-13</sup>
		結構混凝土(劣化)	25	1.25×10 <sup>-10</sup>
		低熱高性能水泥 LHHPC(劣化)	10	1.25×10 <sup>-10</sup>



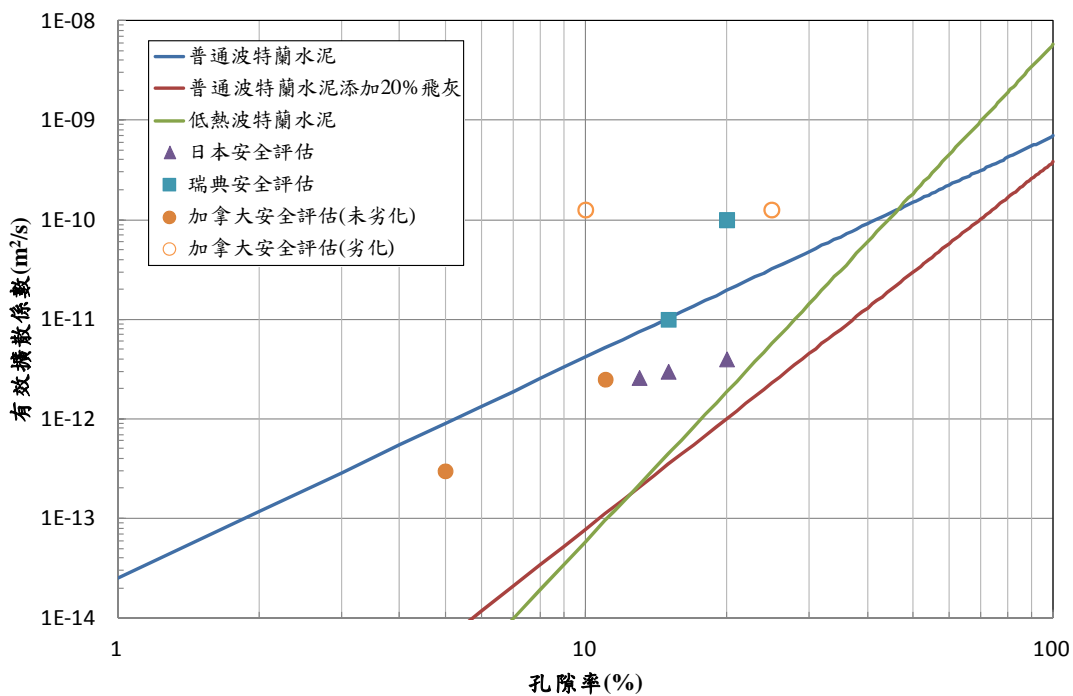
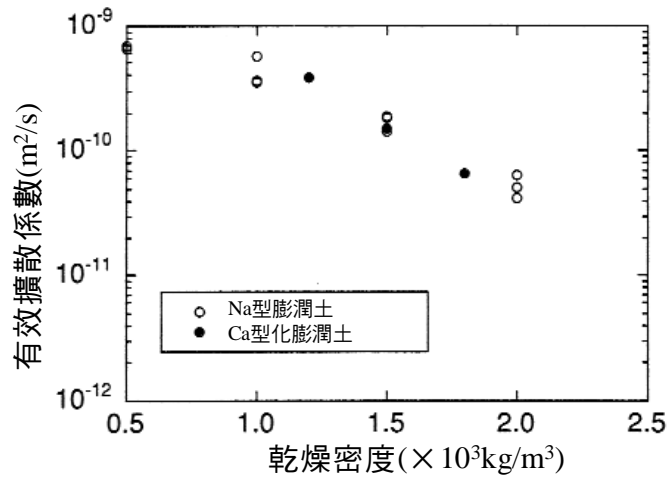


圖 3.2-11 水泥材料之擴散係數與孔隙率之關係

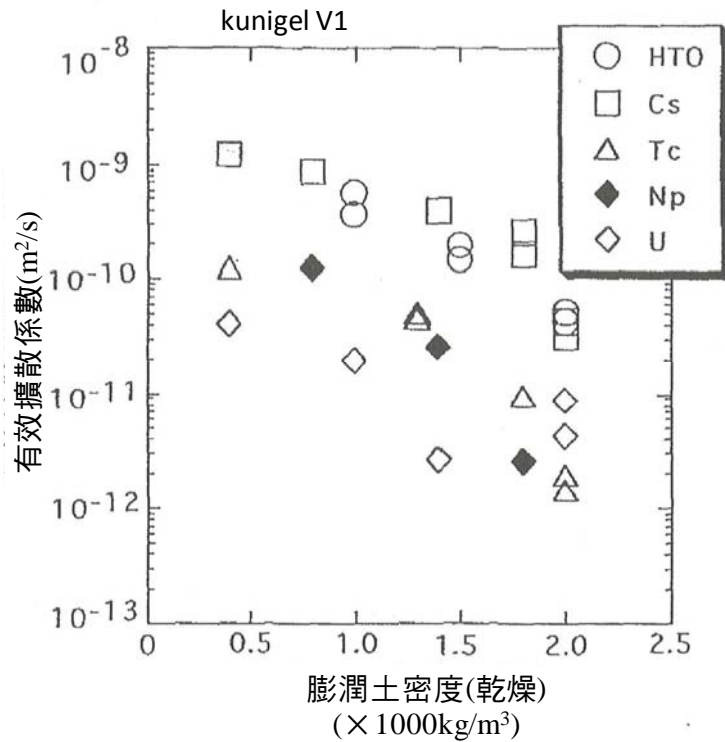
## (二)膨潤土材料

膨潤土的擴散係數主要還是受到膨潤土密度影響，日本對 kunigel V1 膨潤土(Na 型膨潤土)以鹽化鈣強制進行陽離子交換，取得 Ca 型化膨潤土的有效擴散係數，並與 Na 型膨潤土過去的實驗結果相互比較，如圖 3.2-12 所示。圖中為氚(H-3)的有效擴散係數與乾密度之關係，當乾密度越大，則有效擴散係數越小，但 Ca 型化卻不會對有效擴散係數造成影響。此外，日本亦以 kunigel V1 膨潤土對不同離子的擴散進行試驗，結果如圖 3.2-13 所示，同樣都有乾密度越大則擴散係數越小的趨勢。



資料來源：土木学会(2008)，余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方。

圖 3.2-12 Na 型膨潤土與 Ca 型化膨潤土，其有效黏土密度與 H-3 的有效擴散係數之關係



資料來源：土木学会(2008)，余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方。

圖 3.2-13 各種離子的有效擴散係數與乾密度之關係

彙整日本、瑞典及加拿大等國家進行安全評估時採用的擴散係數與乾密度，如表 3.2-5 及圖 3.2-14 所示。各國安

全評估時採用的擴散係數約介於  $1 \times 10^{-10} \sim 7.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  之間，擴散係數之差異不大，乾密度則在  $1.05 \sim 2 \text{ Mg}/\text{m}^3$  的範圍內。另外，根據「最終處置場黏土障壁材料之傳輸行為研究」(鄒蕙如, 2005)，當日興膨潤土的乾密度為  $1.6 \sim 2 \text{ Mg}/\text{m}^3$  時，其在  $\text{Sr}^{2+}$  溶液、 $\text{Cs}^+$  溶液中之擴散係數約介於  $4 \times 10^{-12} \sim 1.02 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  之間。

綜合上述國內外之研究成果，較可能的擴散係數設定範圍為  $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ，在此範圍內取  $1 \times 10^{-11}$ 、 $1 \times 10^{-10}$ 、 $1 \times 10^{-9}$  等三種參數，分別代表不同的膨潤土含量或壓密度，以利後續分析案例之設定。

表 3.2-5 膨潤土材料之擴散係數

國家	分類	材料	乾密度( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )	擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )
日本	安全評估	低透水層(膨潤土)	1.6	$2.50 \times 10^{-10}$
		回填材(膨潤土/砂)	1.5	$7.60 \times 10^{-10}$
瑞典	安全評估	膨潤土	1.05	$1.00 \times 10^{-10}$
		膨潤土/砂之混合土(10/90)	2.0	$1.00 \times 10^{-10}$
加拿大	安全評估	膨潤土/砂(70/30)	1.6	$3.00 \times 10^{-10}$

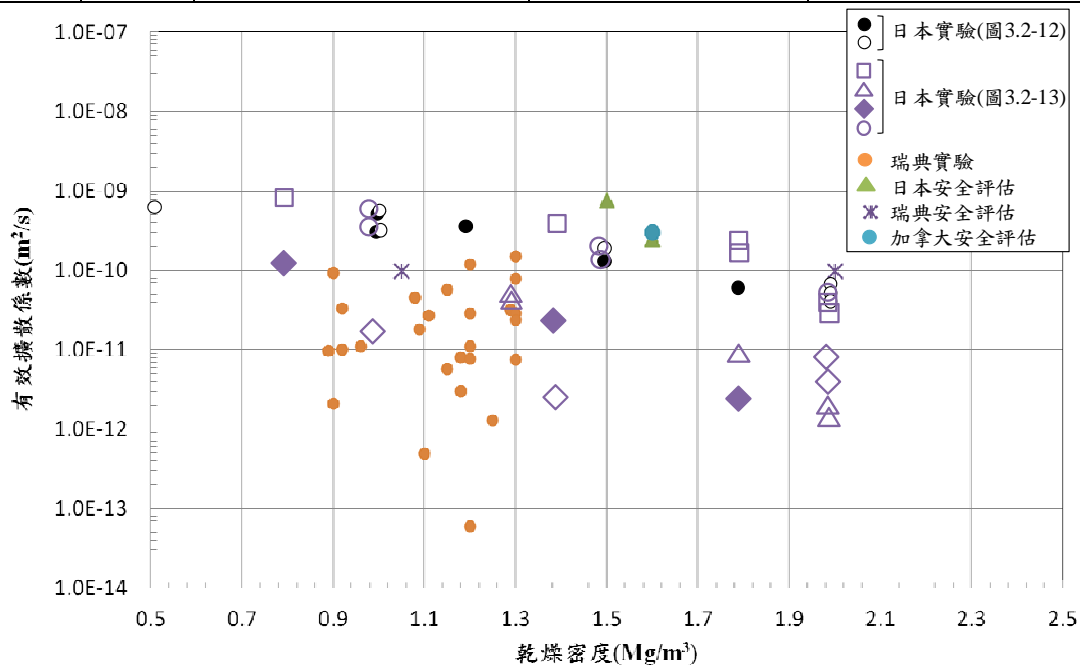


圖 3.2-14 各國膨潤土材料之擴散係數與乾密度之關係

### 三、吸附分配係數

吸附分配係數會受材料的組成、液相的化學成分、核種的種類等因素影響，因此須針對不同核種及其傳輸過程中接觸之障壁材料特性，進行實驗以取得相關參數。彙整日本、瑞典與加拿大等國家於安全分析時，針對不同材料、不同核種所採用的吸附分配係數，如表 3.2-6 及表 3.2-7 所示。由於各國處置之放射性廢棄物特性與數量不同，因此考慮的核種亦有很大的差異。

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 3 條，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 類等四種類廢棄物。其考量的核種主要包括 C-14、Ni-59、Nb-94、Tc-99、I-129、Pu-241、Cm-242、H-3、Co-60、Ni-63、Sr-90、Cs-137。由於日本的地質環境與工程設計上，與我國相似度較大，核種的重複性亦較高，故後續分析時，主要以日本安全評估在還原性環境下的吸附分配係數，做為輸入參數的依據。

表 3.2-6 各國於安全評估時的核種吸附分配係數(水泥材料)

單位：m<sup>3</sup>/kg

元素	國家		日本(還原性環境)			日本(氧化性環境)		
	瑞典 混凝土 與水泥	加拿大 結構 混凝土	廢棄物	處置窖	低擴散層	廢棄物	處置窖	低擴散層
H-3	0	-	0	0	0	0	0	0
C-14(無機)	0.2	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
C-14(有機)	0	-	-	-	-	-	-	-
Cl-36	0.006	-	0	0	0	0	0	0
Co-60	0.04	-	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
Ni-59	0.04	0.01	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
Ni-63	0.04	0.01	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
Se-79	0.006	-	0	0	0	0	0	0
Sr-90	0.001	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Zr-93	0.5	1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Nb-94	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0
Mo-93	0.006	-	0	0	0	0	0	0
Tc-99	0.5	-	0.0003	0.0003	0.0003	3.00E-09	3.00E-09	3.00E-09
Pd-107	0.04	-	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
Ag-108m	0.001	-	0.001	0.001	0.001	0	0	0
Cd-104	0.04	-	-	-	-	-	-	-
Sn-121m	0.5	-	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Sn-126	0.5	-	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
I-129	0.003	-	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Cs-135	0.001	-	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Cs-137	0.001	-	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Sm-151	5	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Eu-145	5	-	-	-	-	-	-	-
Ho-166m	5	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
U-232	5	1	0.25	0.25	0.25	0.025	0.025	0.025
U-233	5	1	0.25	0.25	0.25	0.025	0.025	0.025
U-234	5	1	0.25	0.25	0.25	0.025	0.025	0.025
U-235	5	1	0.25	0.25	0.25	0.025	0.025	0.025
U-238	5	1	0.25	0.25	0.25	0.025	0.025	0.025
Np-237	5	1	0.25	0.25	0.25	0.025	0.025	0.025
Pu-238	5	-	0.25	0.25	0.25	0.025	0.025	0.025
Am-241	1	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Am-242m	1	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Am-243	1	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cm-242	1	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cm-244	1	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cm-245	1	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Be-10	-	-	0	0	0	0	0	0
Ca-41	-	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ba-133	-	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
La-137	-	-	0.01	0.01	0.01	0.001	0.001	0.001
Tb-157	-	-	0.01	0.01	0.01	0.001	0.001	0.001
Hf-182	-	-	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
Pt-193	-	-	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125

國家 元素	瑞典	加拿大	日本(還原性環境)			日本(氧化性環境)		
	混凝土 與水泥	結構 混凝土	廢棄物	處置窖	低擴散層	廢棄物	處置窖	低擴散層
Pb-210	-	-	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
Po-210	-	-	0	0	0	0	0	0
Ra-226	-	-	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Ra-228	-	-	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Ac-227	-	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Th-228	-	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Th-229	-	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Th-230	-	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Th-232	-	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Pa-231	-	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Pa-233	-	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

備註 1：“-”代表該國不考慮此核種。

備註 2：“ ”代表我國「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」所列之核種。

表 3.2-7 各國於安全評估時的核種吸附分配係數(膨潤土材料)

單位：m<sup>3</sup>/kg

國家 元素	瑞典		加拿大	日本 (還原性環境)	日本 (氧化性環境)
	膨潤土	砂/膨潤土 (90/10)	膨潤土/砂	膨潤土	膨潤土
H-3	0	0	-	0	0
C-14(無機)	0	0.0005	0	0.001	0
C-14(有機)	0	0	-	-	-
Cl-36	0	0	-	0	0
Co-60	0.02	0.01	-	0.05	0.05
Ni-59	0.02	0.01	0.1	0.05	0.05
Ni-63	0.02	0.01	0.1	0.05	0.05
Se-79	0.001	0.0002	-	0	0
Sr-90	0.001	0.0002	-	0.001	0.001
Zr-93	0.05	0.5	0.1	1	1
Nb-94	0	0.5	0.1	0.1	0.1
Mo-93	0	0	-	0	0
Tc-99	0.01	0.3	-	0	0
Pd-107	0	0.009	-	0.05	0.05
Ag-108m	0	0.009	-	0	0
Cd-104	0.02	0.01	-	-	-
Sn-121m	0.01	0.001	-	1	1
Sn-126	0.01	0.001	-	1	1
I-129	0	0	-	0	0
Cs-135	0.005	0.01	-	0.05	0.05
Cs-137	0.005	0.01	-	0.05	0.05
Sm-151	0.2	0.9	-	1	1
Eu-145	0.2	0.9	-	-	-
Ho-166m	0.2	0.9	-	1	1
U-232	0.01	0.9	0.5	0.005	5×10 <sup>-6</sup>

國家 元素	瑞典		加拿大	日本 (還原性環境)	日本 (氧化性環境)
	膨潤土	砂/膨潤土 (90/10)	膨潤土/砂	膨潤土	膨潤土
U-233	0.01	0.9	0.5	0.005	5×10 <sup>-6</sup>
U-234	0.01	0.9	0.5	0.005	5×10 <sup>-6</sup>
U-235	0.01	0.9	0.5	0.005	5×10 <sup>-6</sup>
U-238	0.01	0.9	0.5	0.005	5×10 <sup>-6</sup>
Np-237	0.1	0.9	0.5	0.005	5×10 <sup>-6</sup>
Pu-238	1	1	0.5	5	5
Am-241	1	1	-	1	1
Am-242	1	1	-	1	1
Am-243	1	1	-	1	1
Cm-242	1	1	-	1	1
Cm-244	1	1	-	1	1
Cm-245	1	1	-	1	1
Be-10	-	-	-	0	0
Ca-41	-	-	-	0.001	0.001
Ba-133	-	-	-	0.001	0.001
La-137	-	-	-	1	0.005
Tb-157	-	-	-	1	0.005
Hf-182	-	-	-	0.05	0.05
Pt-193	-	-	-	0.05	0.05
Pb-210	-	-	-	0.05	0.05
Po-210	-	-	-	0	0
Ra-226	-	-	-	0.001	0.001
Ra-228	-	-	-	0.001	0.001
Ac-227	-	-	-	1	1
Th-228	-	-	-	1	1
Th-229	-	-	-	1	1
Th-230	-	-	-	1	1
Th-232	-	-	-	1	1
Pa-231	-	-	-	1	0.2
Pa-233	-	-	-	1	0.2

備註 1：“-”代表該國不考慮此核種。

備註 2：“█”代表我國考慮之關鍵核種。

## 第四章 工程障壁設計特性參數敏感度測試案例研析

工程障壁設計特性參數敏感度測試案例研析之工作流程如圖 4-1 所示，根據蒐集所得之日本、瑞典、加拿大之安全分析參數與實驗數據，彙整出水力傳導係數、擴散係數、吸附分配係數之可能分布範圍，依此範圍決定測試案例採用之參數設定。考量核種在工程障壁內的傳輸機制，先以一維解析方法評估移流作用以及移流擴散作用對核種傳輸之敏感度。再利用 GoldSim 軟體將核種吸附作用與核種衰變之影響納入考量，以決定最小設計尺寸。

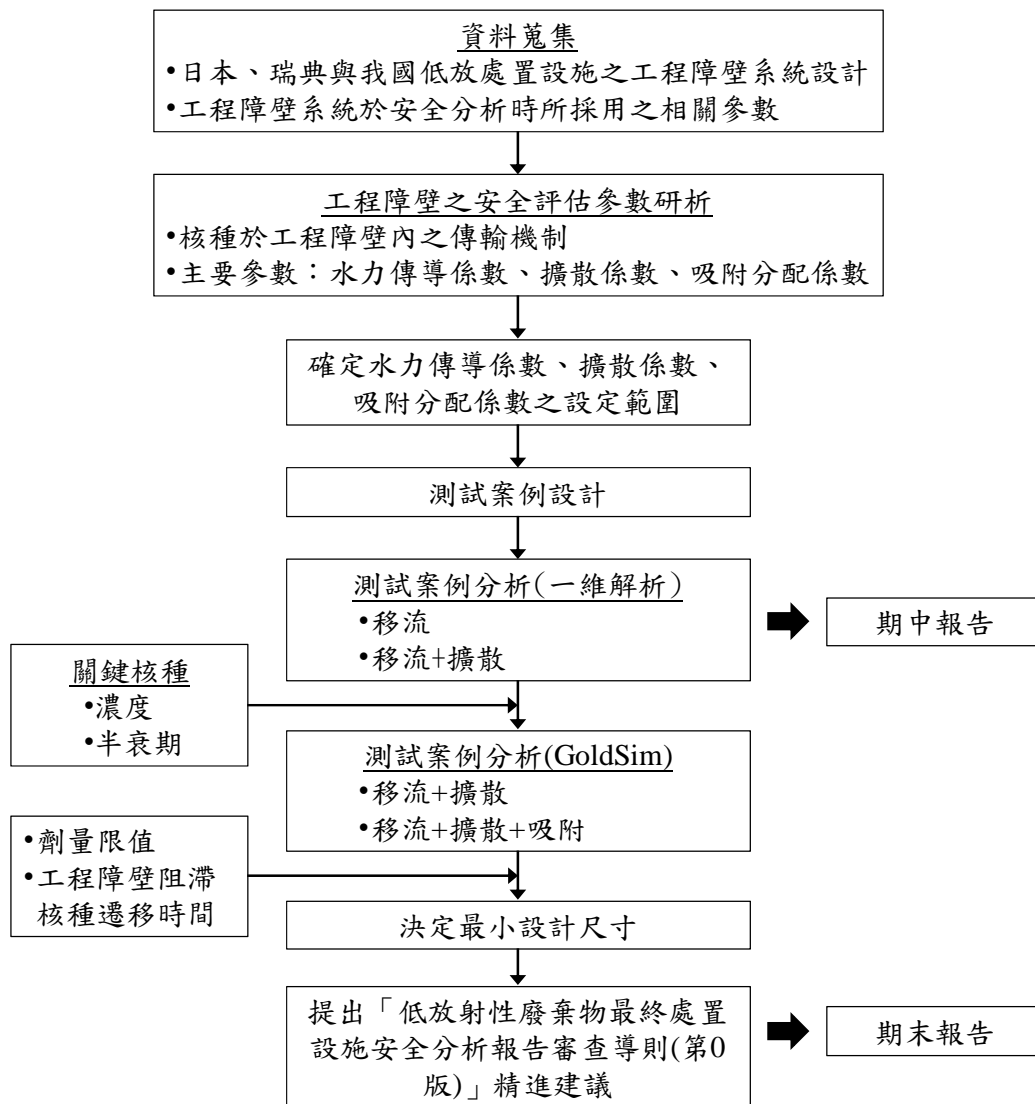


圖 4-1 工作流程圖



#### 4.1 一維解析之測試案例設定

根據前述參數分析結果，分別選出三組水泥材料以及三組膨潤土材料的參數，做為一維解析的測試案例。並考量我國建議候選場址之地下水特性，較可能發生的地下水流場梯度為 0.001 或 0.01，另增加一組地下水流速較快的情況，假設其地下水流場梯度為 0.05，各案例之相關參數彙整如表 4.1-1 所示。

表 4.1-1 測試案例參數表

參數 \ 案例編號	水泥材料			膨潤土材料		
	C-1	C-2	C-3	B-1	B-2	B-3
孔隙率(%)	15%	20%	25%	25%	35%	45%
乾密度(Mg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	2.00	1.75	1.50
擴散係數(m <sup>2</sup> /s)	1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-9</sup>
水力傳導係數 (m/s)	1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-8</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-9</sup>
地下水流場梯度 (水流通量)	0.001、0.01、0.05					

#### 4.2 一維解析之分析結果

分析時分別針對水泥材料與膨潤土材料，評估移流作用以及移流擴散作用，對核種傳輸之影響。

##### 一、移流作用

分析時依照前述案例設定，假設處置場封閉後核種即開始釋出，並利用滲流流速與達西流速之關係式，求得污染物在材料內的傳輸距離與時間，其結果如圖 4.2-1~圖 4.2-6 所示。當地下水流場梯度為 0.01、材料之水力傳導係數最大的情況下，處置場封閉後經過 300 年，核種在水泥材料內因移

流作用的傳輸距離最遠可達 3.78m，而在膨潤土材料內的傳輸距離最遠可達 0.21m；當處置場封閉後經過 1000 年，核種在水泥材料內因移流作用的傳輸距離最遠可達 12.61m，而在膨潤土材料內的傳輸距離最遠可達 0.7m。

若以烏坵場址的工程障壁為例，混凝土牆的厚度為 0.3m，水力傳導係數為  $1 \times 10^{-10}$  m/s，假設地下水流場梯度為 0.01 時，核種從廢棄物包件釋出後，傳輸至混凝土牆外所需時間超過 1000 年。

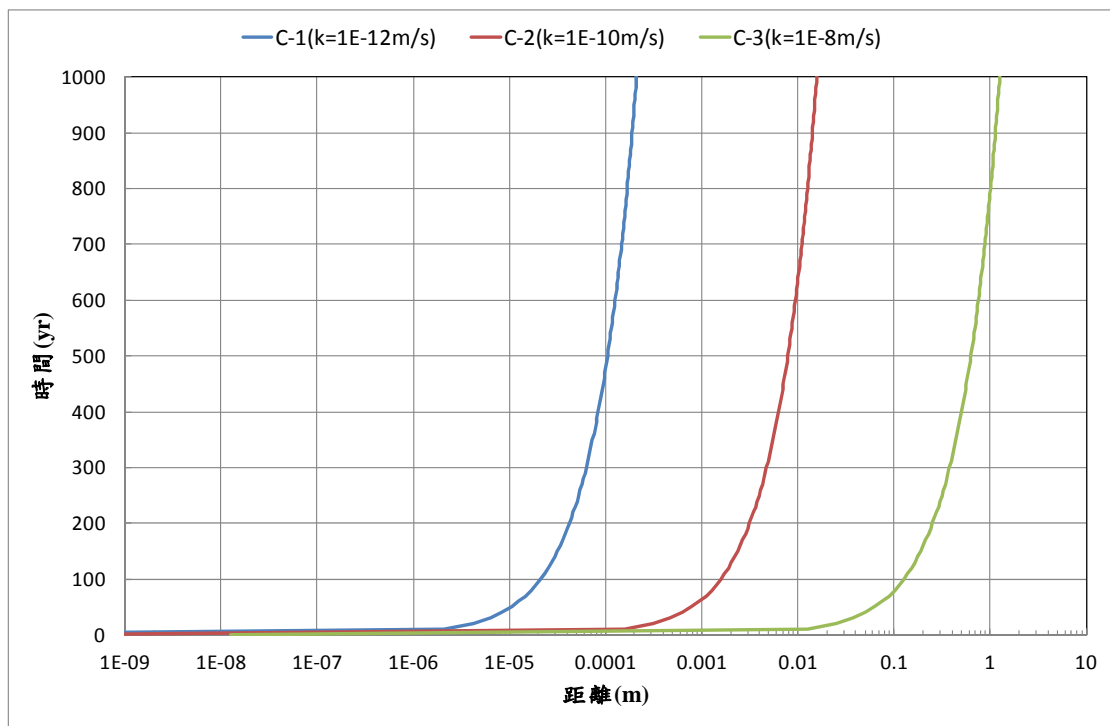


圖 4.2-1 水泥材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.001)

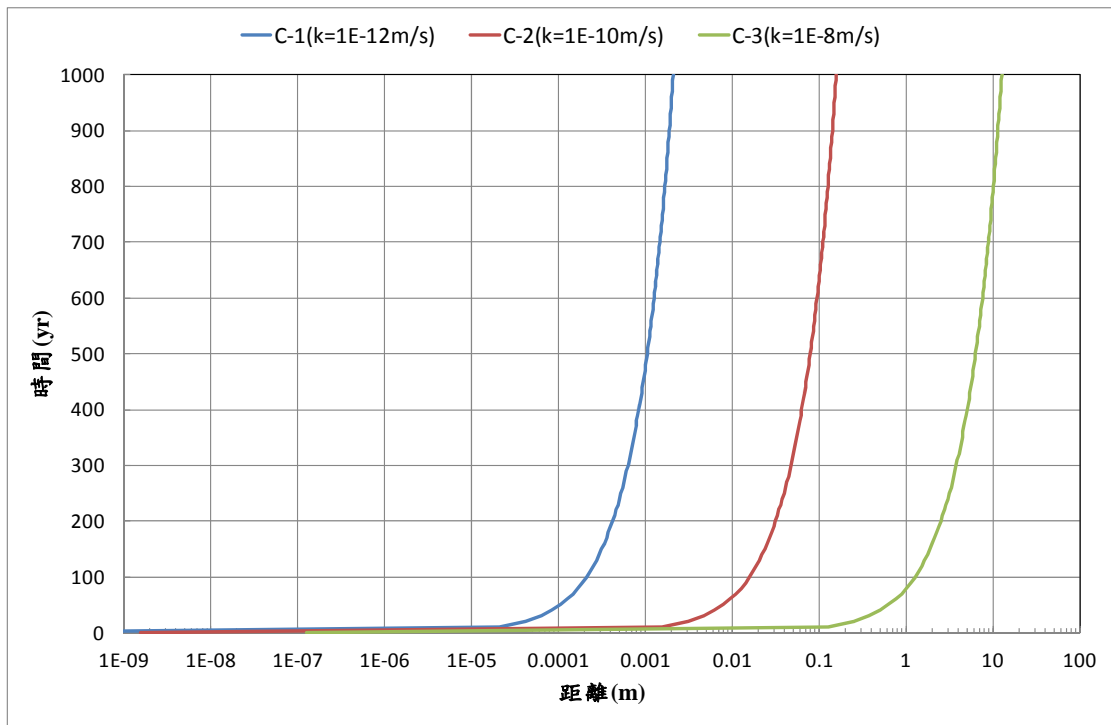


圖 4.2-2 水泥材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場  
梯度 0.01)

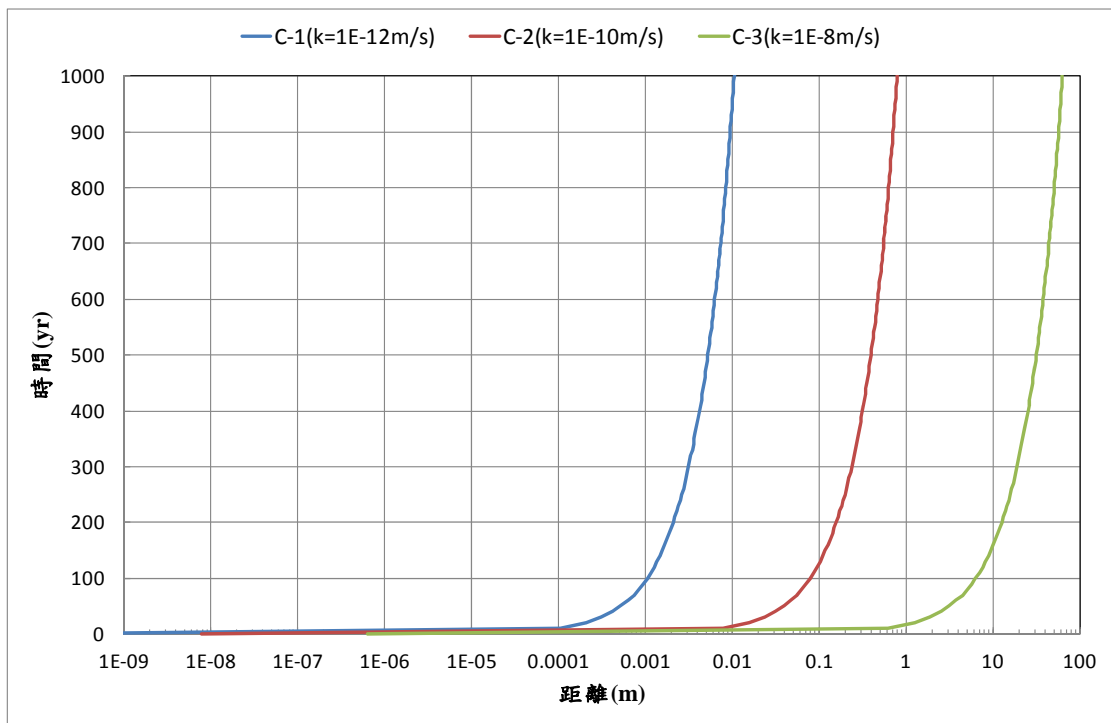


圖 4.2-3 水泥材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場  
梯度 0.05)

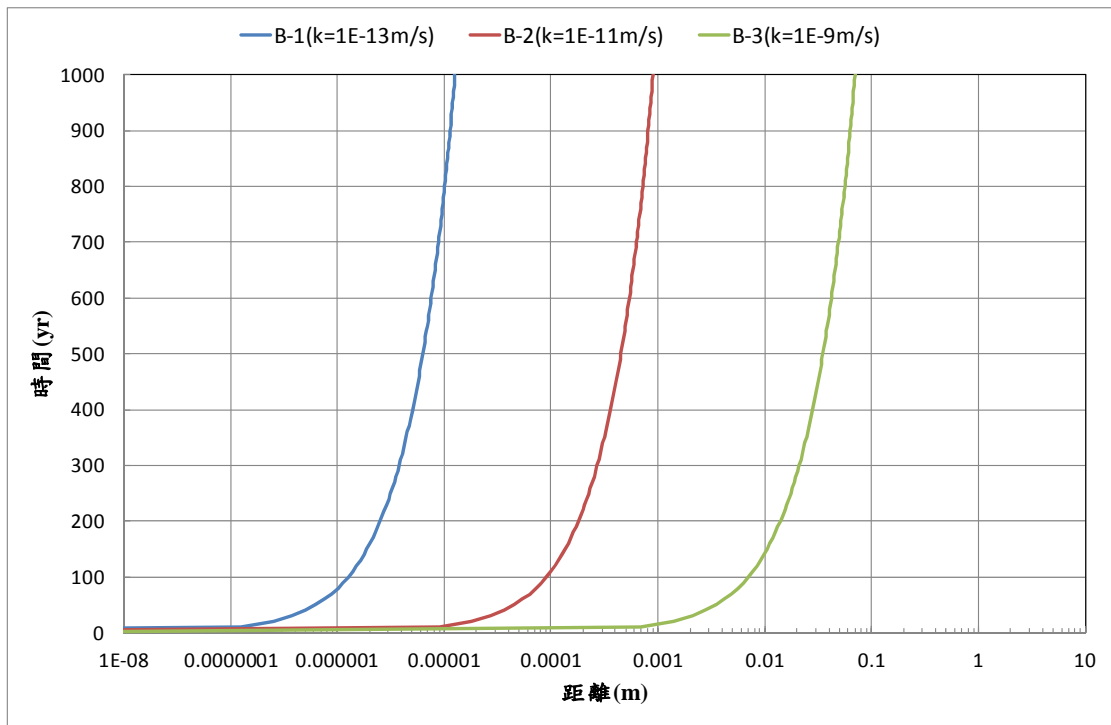


圖 4.2-4 膨潤土材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.001)

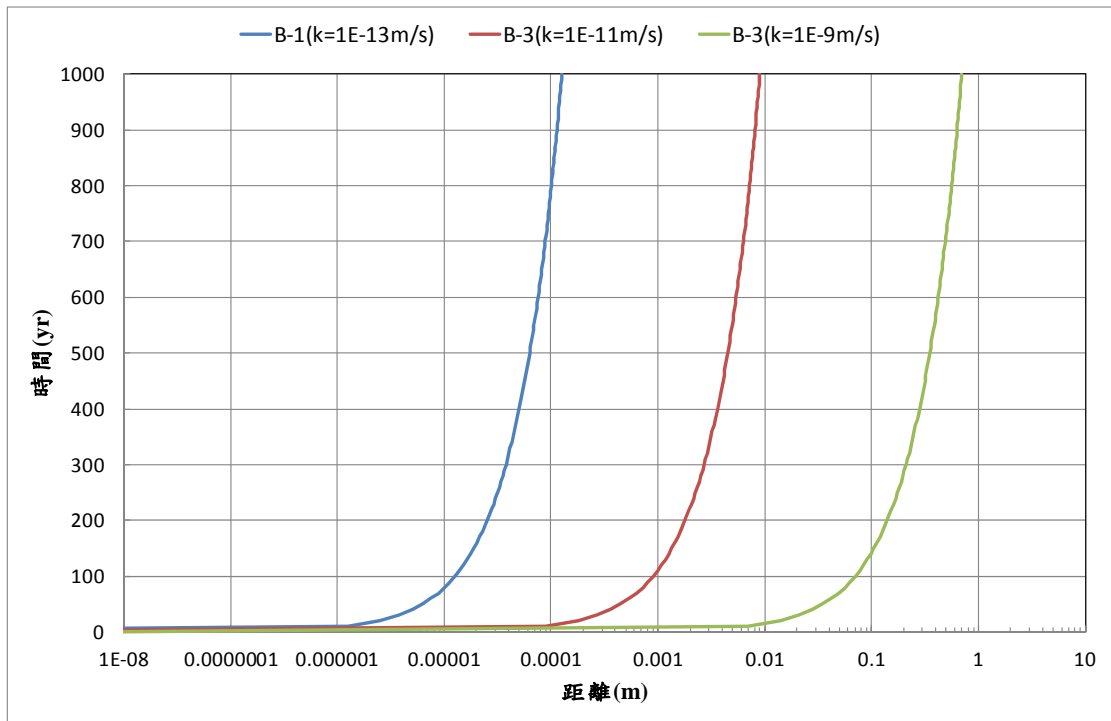


圖 4.2-5 膨潤土材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.01)

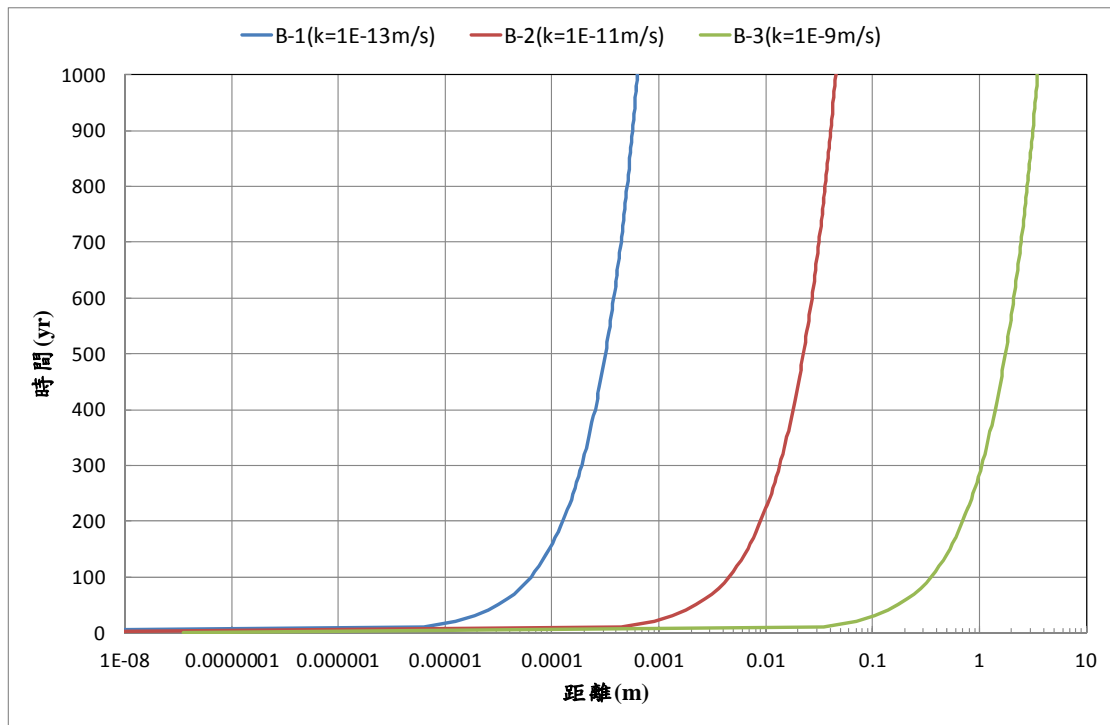


圖 4.2-6 膨潤土材料內的移流傳輸距離與時間之關係圖(地下水流場梯度 0.05)

## 二、移流擴散作用

在核種傳輸的機制中，除了移流作用外，擴散作用亦會影響核種的遷移。分析時同樣依照前述案例設定，假設處置場封閉後核種即開始釋出，其初始濃度為 100Bq，利用一維移流擴散解析控制方程式，求得污染物濃度達到初始濃度的 10% 時之傳輸距離與時間，如表 4.2-1~表 4.2-2 所示。根據分析結果，在相同的材料參數下，地下水流場梯度的改變對傳輸距離的影響較不顯著。此外，對移流擴散傳輸機制而言，擴散係數的影響遠大於水力傳導係數。

當地下水流場梯度為 0.01、材料之水力傳導係數與擴散係數最大的情況下，當處置場封閉後經過 300 年，核種在水泥材料內因移流擴散作用的傳輸距離最遠可達 5.725m，而在膨潤土材料內的傳輸距離最遠可達 7.324m；當處置場封閉後

經過 1000 年，核種在水泥材料內因移流擴散作用的傳輸距離最遠可達 15.83m，而在膨潤土材料內的傳輸距離最遠可達 13.62m。

表 4.2-1 水泥材料內之移流擴散傳輸距離

單位：m

地下水流場梯度 時間(yr)	0.001	0.01	0.05
C-1			
100	0.1306	0.1308	0.1314
200	0.1848	0.1851	0.1864
300	0.226	0.2267	0.2288
400	0.261	0.2619	0.2646
600	0.32	0.321	0.325
800	0.3696	0.3708	0.3762
1000	0.413	0.4148	0.4215
C-2			
100	0.414	0.4258	0.4779
200	0.586	0.609	0.715
300	0.719	0.753	0.913
400	0.831	0.877	1.092
600	1.019	1.088	1.413
800	1.178	1.271	1.708
1000	1.319	1.434	1.986
C-3			
100	1.408	2.423	7.325
200	2.053	4.128	14.054
300	2.57	5.725	20.684
400	3.028	7.267	27.264
600	3.826	10.06	>30
800	4.53	12.97	>30
1000	5.18	15.83	>30

表 4.2-2 膨潤土材料內之移流擴散傳輸距離

單位：m

地下水流場梯度 時間(yr)	0.001	0.01	0.05
B-1			
100	0.413	0.413	0.413
200	0.584	0.584	0.584
300	0.715	0.715	0.715
400	0.826	0.826	0.826
600	1.012	1.012	1.012
800	1.168	1.168	1.168
1000	1.306	1.306	1.307
B-2			
100	1.306	1.307	1.31
200	1.847	1.849	1.854
300	2.263	2.265	2.273
400	2.613	2.615	2.627
600	3.2	3.204	3.221
800	3.695	3.701	3.724
1000	4.132	4.138	4.167
B-3			
100	4.137	4.187	4.415
200	5.854	5.955	6.413
300	7.172	7.324	8.01
400	8.285	8.487	9.41
600	10.153	10.45	11.85
800	11.73	12.13	14
1000	13.12	13.62	15.96

## 第五章 工程障壁最適化設計之研析

### 5.1 GoldSim 解析之測試案例設定

為考量核種衰變與吸附作用之影響，利用 GoldSim 進行分析，其流程如圖 5.1-1 所示。在源項的設定上，先參考「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」對 A 類、B 類以及 C 類廢棄物之分類規定，並考量到未來最終處置場可能對不同類的廢棄物採用分區處置的概念，故將源項廢棄物分為 A 類及 B 類/C 類兩種。假設每桶廢棄物內都具有法規用來判斷廢棄物分類之核種，包括 C-14、Ni-59、Nb-94、Tc-99、I-129、Pu-241、Cm-242、H-3、Co-60、Ni-63、Sr-90、Cs-137 等核種，各核種的濃度則以 A 類廢棄物與 C 類廢棄物的限值為代表，做為源項之輸入參數，如表 5.1-1 所示。

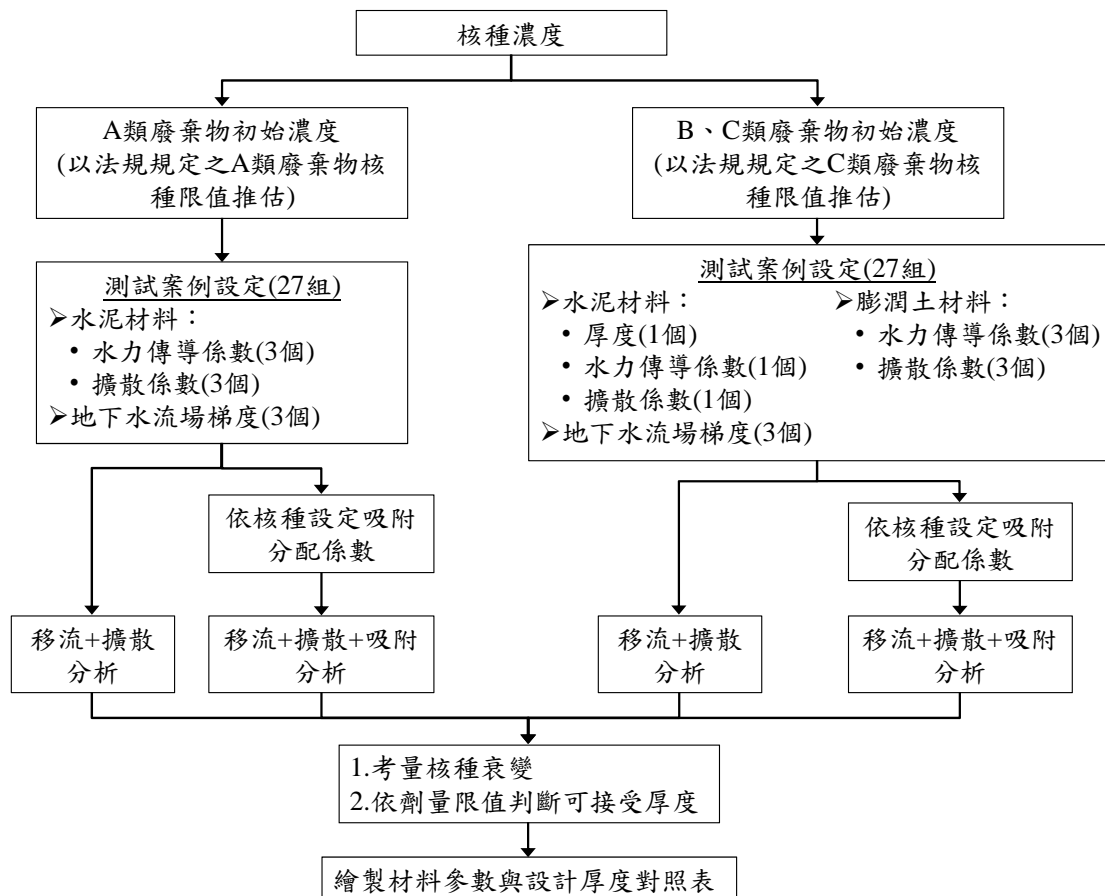


圖 5.1-1 以 GoldSim 進行案例分析之流程



表 5.1-1 每桶廢棄物所含核種之半衰期與初始濃度設定值

核種	半衰期(年)	初始濃度設定值	
		A 類	B 類/C 類
$^{14}\text{C}$	$5.73 \times 10^3$	$0.030 \text{ TBq/m}^3$	$0.3 \text{ TBq/m}^3$
$^{14}\text{C}$ (活化金屬內)	$5.73 \times 10^3$	$0.30 \text{ TBq/m}^3$	$3 \text{ TBq/m}^3$
$^{59}\text{Ni}$ (活化金屬內)	$8.00 \times 10^4$	$0.81 \text{ TBq/m}^3$	$8.1 \text{ TBq/m}^3$
$^{94}\text{Nb}$ (活化金屬內)	$2.03 \times 10^4$	$0.00074 \text{ TBq/m}^3$	$0.0074 \text{ TBq/m}^3$
$^{99}\text{Tc}$	$2.11 \times 10^5$	$0.011 \text{ TBq/m}^3$	$0.11 \text{ TBq/m}^3$
$^{129}\text{I}$	$1.57 \times 10^7$	$0.00030 \text{ TBq/m}^3$	$0.0030 \text{ TBq/m}^3$
$^{241}\text{Pu}$	$1.44 \times 10^1$	$13 \text{ kBq/g}$	$130 \text{ kBq/g}$
$^{242}\text{Cm}$	$0.45 \times 10^0$	$74 \text{ kBq/g}$	$740 \text{ kBq/g}$
$^3\text{H}$	$1.23 \times 10^1$	$1.5 \text{ TBq/m}^3$	$15 \text{ TBq/m}^3$
$^{60}\text{Co}$	$5.27 \times 10^0$	$26 \text{ TBq/m}^3$	$260 \text{ TBq/m}^3$
$^{63}\text{Ni}$	$1.00 \times 10^2$	$0.13 \text{ TBq/m}^3$	$26 \text{ TBq/m}^3$
$^{63}\text{Ni}$ (活化金屬內)	$1.00 \times 10^2$	$1.3 \text{ TBq/m}^3$	$260 \text{ TBq/m}^3$
$^{90}\text{Sr}$	$2.88 \times 10^1$	$0.0015 \text{ TBq/m}^3$	$260 \text{ TBq/m}^3$
$^{137}\text{Cs}$	$3.01 \times 10^1$	$0.037 \text{ TBq/m}^3$	$170 \text{ TBq/m}^3$

對 A 類廢棄物而言，假設工程障壁以水泥材料為主，考慮 3 種水力傳導係數( $1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ 、 $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 、 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ )、3 種擴散係數( $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ )與 3 種地下水流場梯度(0.001、0.01、0.05)之組合，共設計出 27 組測試案例，彙整如表 5.1-2 所示。

對 B 類/C 類廢棄物而言，先針對只有水泥材料做為工程障壁的情況，同樣設計 27 組測試案例，各測試案例之設定與 A 類廢棄物相同，詳如表 5.1-2 所列。接著針對以水泥材料與膨潤土材料組成的工程障壁系統，考量坑道斷面大小、可處置廢棄物的空間、工程經濟性等因素，假設混凝土障壁的厚度為 1m，水力傳導係數與擴散係數則在一般範圍內，分別為  $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  與  $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ，以此混凝土障壁搭配不同的膨潤土障壁測試案例，進行分析。膨潤土材料亦設計 27 組測試案例，包括 3 種水力傳導係數

( $1 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 、 $1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 、 $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ )、3種擴散係數( $1 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ )與3種地下水流場梯度(0.001、0.01、0.05)之組合，彙整如表 5.1-3 所示。

表 5.1-2 水泥材料的測試案例參數

案例編號	水力傳導係數(m/s)	有效擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )	孔隙率	乾密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	水力梯度
1	1.00E-12	1.00E-12	0.15	2600	0.001
2	1.00E-12	1.00E-12	0.15	2600	0.01
3	1.00E-12	1.00E-12	0.15	2600	0.05
4	1.00E-12	1.00E-11	0.15	2600	0.001
5	1.00E-12	1.00E-11	0.15	2600	0.01
6	1.00E-12	1.00E-11	0.15	2600	0.05
7	1.00E-12	1.00E-10	0.15	2600	0.001
8	1.00E-12	1.00E-10	0.15	2600	0.01
9	1.00E-12	1.00E-10	0.15	2600	0.05
10	1.00E-10	1.00E-12	0.2	2600	0.001
11	1.00E-10	1.00E-12	0.2	2600	0.01
12	1.00E-10	1.00E-12	0.2	2600	0.05
13	1.00E-10	1.00E-11	0.2	2600	0.001
14	1.00E-10	1.00E-11	0.2	2600	0.01
15	1.00E-10	1.00E-11	0.2	2600	0.05
16	1.00E-10	1.00E-10	0.2	2600	0.001
17	1.00E-10	1.00E-10	0.2	2600	0.01
18	1.00E-10	1.00E-10	0.2	2600	0.05
19	1.00E-08	1.00E-12	0.25	2600	0.001
20	1.00E-08	1.00E-12	0.25	2600	0.01
21	1.00E-08	1.00E-12	0.25	2600	0.05
22	1.00E-08	1.00E-11	0.25	2600	0.001
23	1.00E-08	1.00E-11	0.25	2600	0.01
24	1.00E-08	1.00E-11	0.25	2600	0.05
25	1.00E-08	1.00E-10	0.25	2600	0.001
26	1.00E-08	1.00E-10	0.25	2600	0.01
27	1.00E-08	1.00E-10	0.25	2600	0.05

表 5.1-3 膨潤土材料的測試案例參數

案例編號	水力傳導係數(m/s)	有效擴散係數(m <sup>2</sup> /s)	孔隙率	乾密度(kg/m <sup>3</sup> )	水力梯度
1	1.00E-13	1.00E-11	0.25	2000	0.001
2	1.00E-13	1.00E-11	0.25	2000	0.01
3	1.00E-13	1.00E-11	0.25	2000	0.05
4	1.00E-13	1.00E-10	0.25	2000	0.001
5	1.00E-13	1.00E-10	0.25	2000	0.01
6	1.00E-13	1.00E-10	0.25	2000	0.05
7	1.00E-13	1.00E-09	0.25	2000	0.001
8	1.00E-13	1.00E-09	0.25	2000	0.01
9	1.00E-13	1.00E-09	0.25	2000	0.05
10	1.00E-11	1.00E-11	0.35	1750	0.001
11	1.00E-11	1.00E-11	0.35	1750	0.01
12	1.00E-11	1.00E-11	0.35	1750	0.05
13	1.00E-11	1.00E-10	0.35	1750	0.001
14	1.00E-11	1.00E-10	0.35	1750	0.01
15	1.00E-11	1.00E-10	0.35	1750	0.05
16	1.00E-11	1.00E-09	0.35	1750	0.001
17	1.00E-11	1.00E-09	0.35	1750	0.01
18	1.00E-11	1.00E-09	0.35	1750	0.05
19	1.00E-09	1.00E-11	0.45	1500	0.001
20	1.00E-09	1.00E-11	0.45	1500	0.01
21	1.00E-09	1.00E-11	0.45	1500	0.05
22	1.00E-09	1.00E-10	0.45	1500	0.001
23	1.00E-09	1.00E-10	0.45	1500	0.01
24	1.00E-09	1.00E-10	0.45	1500	0.05
25	1.00E-09	1.00E-09	0.45	1500	0.001
26	1.00E-09	1.00E-09	0.45	1500	0.01
27	1.00E-09	1.00E-09	0.45	1500	0.05

## 5.2 GoldSim 解析方法

利用 GoldSim 進行工程障壁中的核種遷移傳輸分析時，為了解障壁厚度與個人年有效等效劑量間的關係，假設核種自廢棄物包件釋出，並隨著孔隙水在混凝土障壁與膨潤土障壁中傳輸，當含有核種的孔隙水流出工程障壁後，隨即被人類飲用，並以此飲水情節計算個人年有效等效劑量，找出可使個人年有效等效劑量低於  $0.25\text{mSv/y}$  的障壁尺寸設計值，其概念模型如圖 5.2-1 所示。廢棄物體層由廢棄物與填充於廢棄物桶間的水泥填充材料組成，假設廢棄物體層為  $10\text{m}\times 10\text{m}\times 10\text{m}$  的立方體，內含 1,960 桶的廢棄物，廢棄物處置 100 年後，核種瞬間釋出，並以移流、擴散等方式在障壁間傳輸，另還須考慮障壁材料對各核種的吸附作用以及核種自身衰變等影響。分析時分別將混凝土障壁與膨潤土障壁切割成 10 個單元(cell)，每個單元的厚度則視分析案例有不同的設定值。最後在飲水情節的情況下，關鍵群體的飲水來源為廢棄物桶內之孔隙水，每人每年攝入 1,100 公升之水量，依此計算各核種對人體產生之有效劑量。

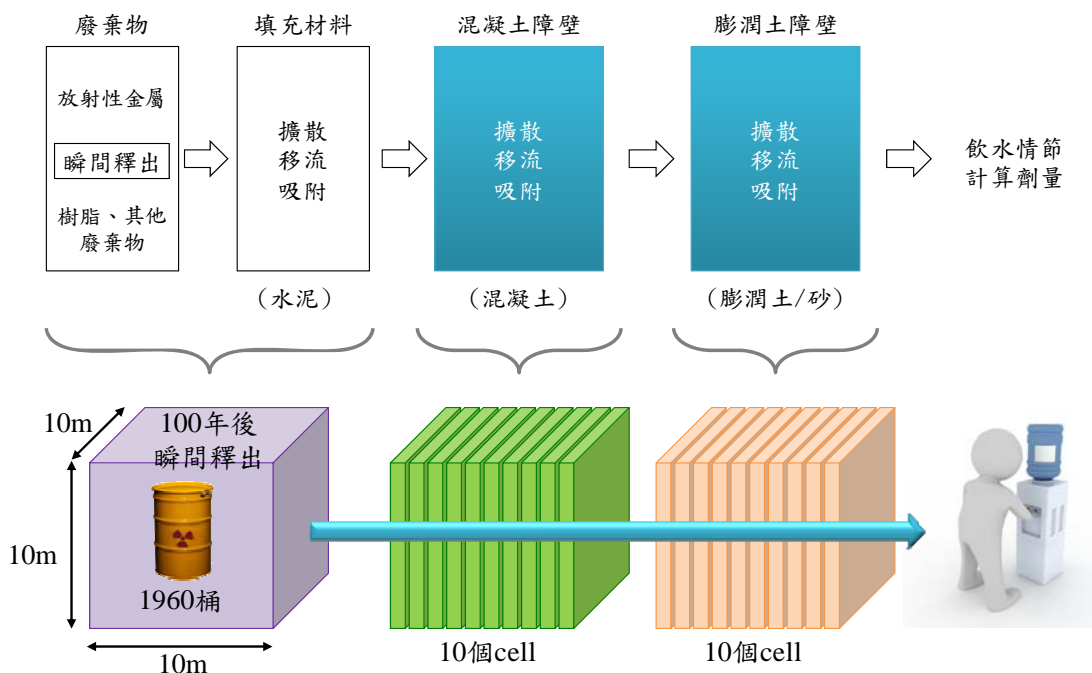


圖 5.2-1 工程障壁中的核種遷移概念模型

GoldSim 是一個高圖解之視窗化程式，可用於工程、科學與商業決策管理過程中，複雜系統的動態與機率模擬。本次分析是在 GoldSim 平台上，建立以一維移流擴散方程式為基礎的核種遷移解析評估模式，如圖 5.2-2 所示。GoldSim 平台可依不同參數種類、特性與傳輸途徑，利用「Container」、「Element」與「Pathway」等功能，以資料夾方式進行分類管理，相關功能之說明詳如表 5.2-1。

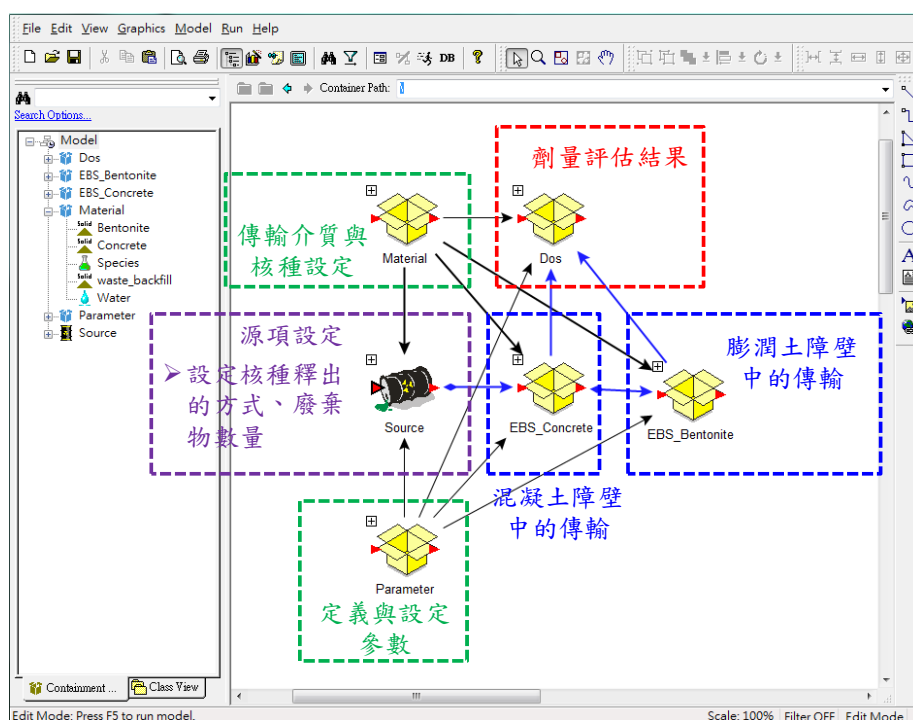


圖 5.2-2 在 GoldSim 平台上建立分析案例

表 5.2-1 分析時使用之「Container」、「Element」與「Pathway」

功能名稱	圖例	功能說明
Container		將 Element、Pathway 作階層的管理，相當於 Windows 的資料夾。
Element		定義評估對象，包括核種名稱、原子量、半衰期(或衰變常數)、子核種及各子核種的分岐比等相關設定。
		定義廢棄物包件特性，包括汙染物質的存量及釋出方式之設定。

功能名稱		圖例	功能說明
	Fluid		定義液相介質及其擴散係數與溶解度。
	Solid		定義固相介質，並設定其乾密度、孔隙率、屈曲度(Tortuosity)與分配係數。
	Data		定義數據資料值，可以是純量、向量、矩陣等型式。
	Expression		使用數學式或理論式，編輯輸入的數據資料。
	Time History		將計算結果以時間序列(數據資料隨時間變化)表示。
Pathway	Cell Pathway		<p>主要用於計算擴散或移流所造成的物質遷移。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 可處理衰變/生成。</li> <li>• 可定義多個液相與固相介質，以及各相介值的分配係數。</li> <li>• 假設瞬間混合平衡。</li> <li>• 可因應溶解度限制及同位素存在比例設定溶解度。</li> <li>• 對於物質遷移過程，除擴散與移流外，也可定義遷移係數。</li> <li>• 可處理參數隨時間的變化。</li> </ul>

評估計算時的必要參數，皆在「Parameter」中定義與設定，包括核種特性、劑量轉換因子、地下水流量、填充材的材料參數、混凝土障壁的材料參數、膨潤土障壁的材料參數等，如圖 5.2-3 所示。與源項相關的核種釋出方式、廢棄物數量則在「Source」中設定。「Material」資料夾中用來設定傳輸介質與核種特性，主要包含「Species」、「Fluid」、「Solid」等 3 個 element，如圖 5.2-4 所示，其中，液相介質主要是指地下水，設定的參數包括擴散係數與溶解度，固相介質則是指填充材、混凝土障壁與膨潤土障壁，設定的參數包括乾密度、孔隙率、區曲度、分配係數等。根據前述假設的條件，建立核種在廢棄物體層、混凝土障壁層和

膨潤土障壁層之間的遷移路徑，如圖 5.2-5 所示。再依飲水情節，計算曝露劑量，如圖 5.2-6 所示。

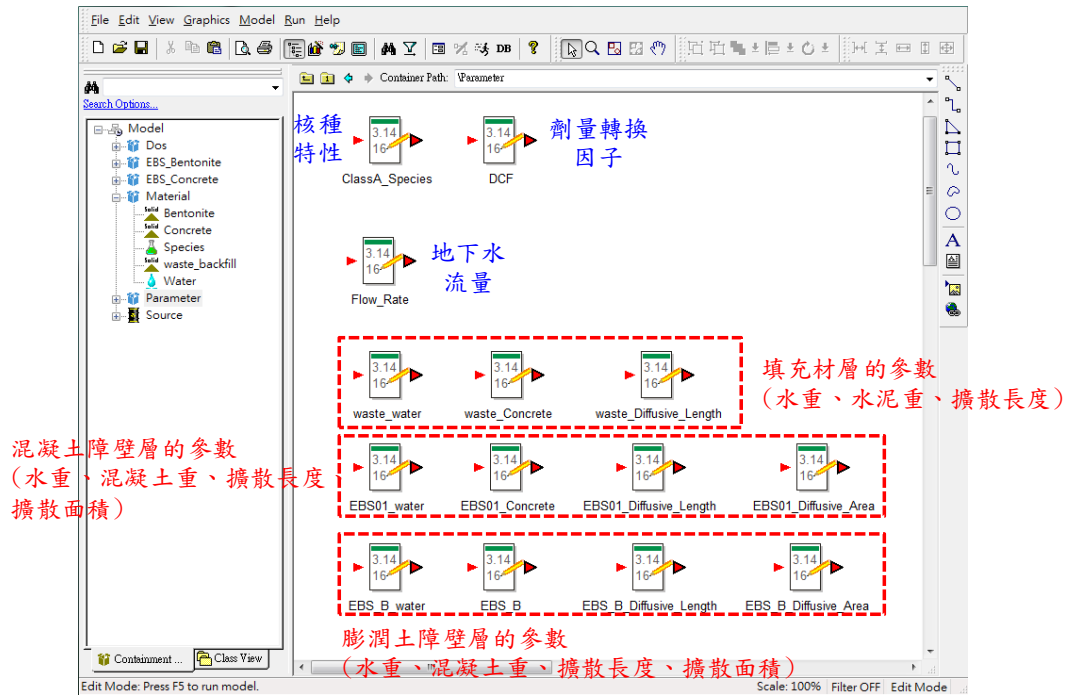


圖 5.2-3 「Parameter」資料夾中的參數設定

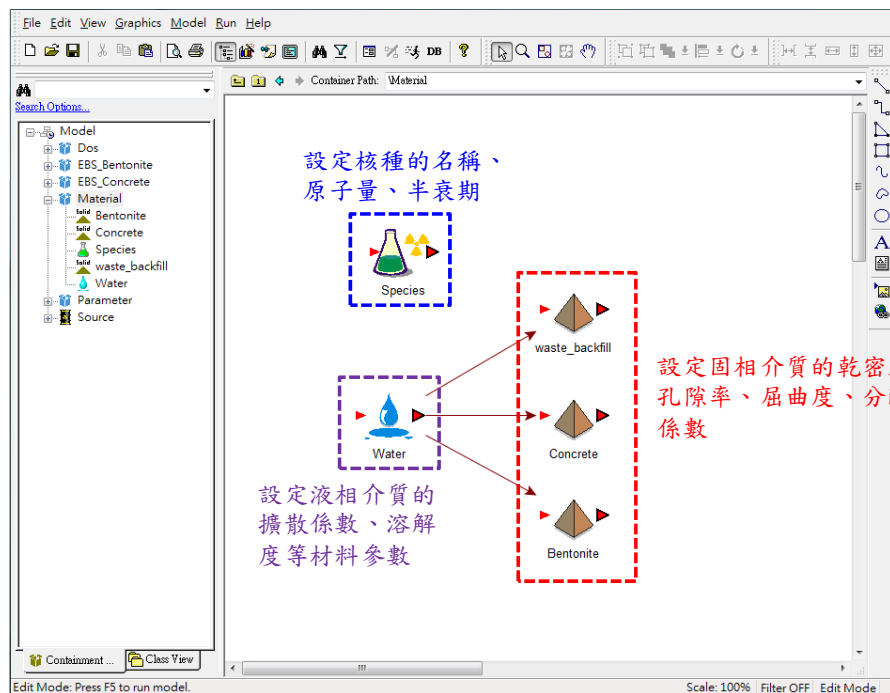
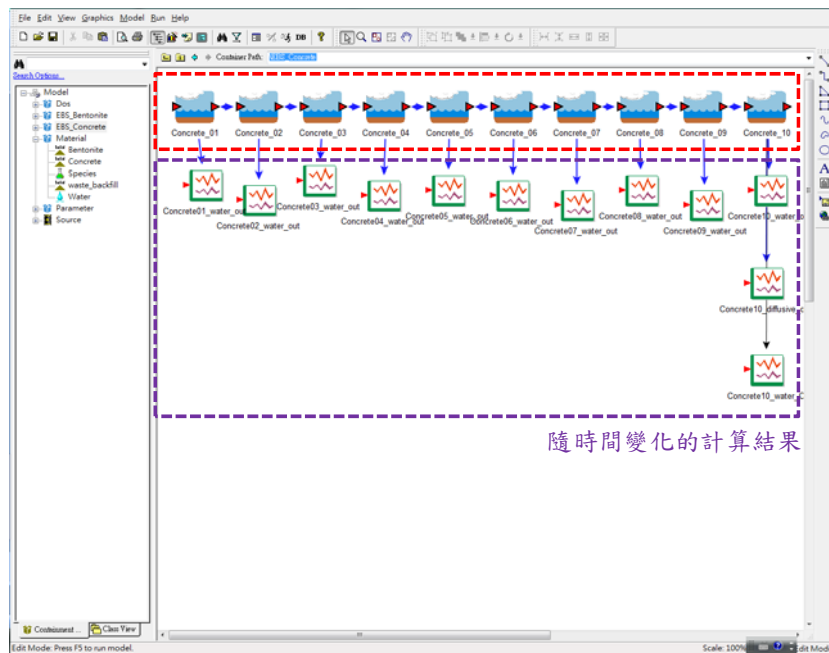


圖 5.2-4 「Material」資料夾中的參數設定



- 物質的擴散、移流計算
- 可處理衰變問題
  - 可定義多重液相與固相中，各相的分配係數
  - 假設瞬間混合、平衡
  - 不僅是移流、擴散等物質遷移過程，也可定義遷移係數

圖 5.2-5 「EBS\_Concrete」資料夾中建立核種在混凝土障壁的遷移路徑

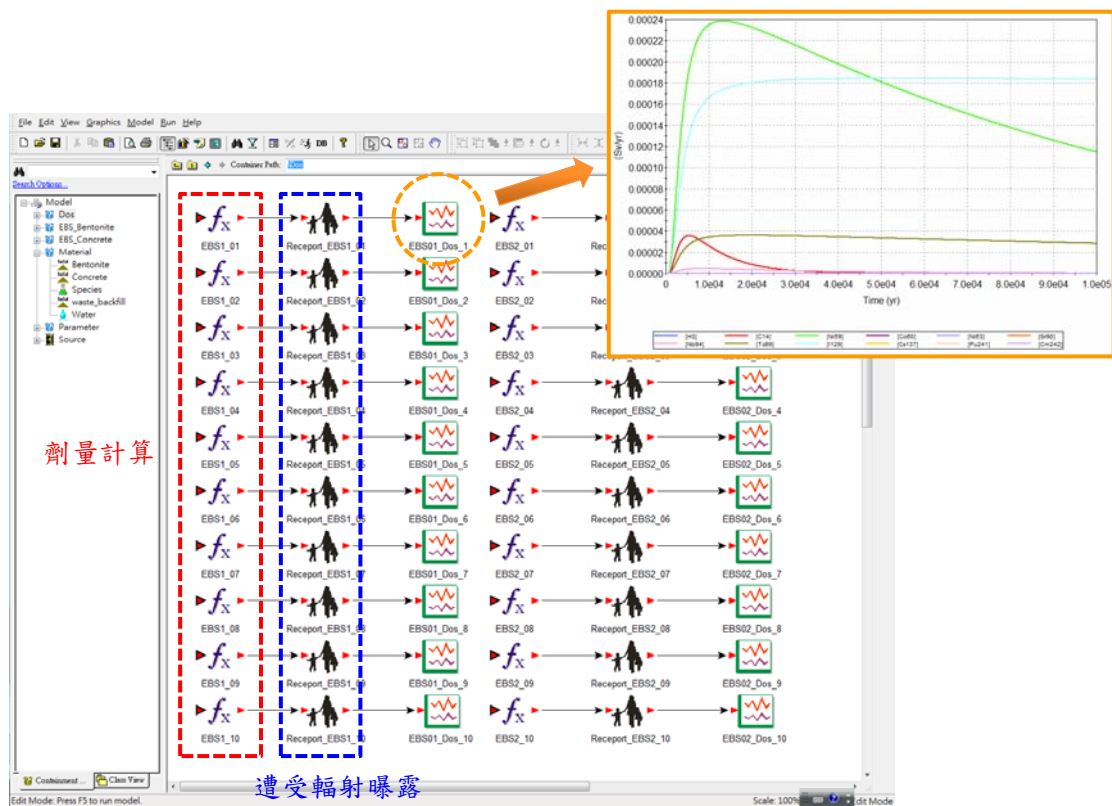


圖 5.2-6 「Dos」資料夾中關鍵群體的曝露計算



### 5.3 GoldSim 解析之分析結果

依據前述測試案例設定與分析方法，分別針對 A 類廢棄物與 B 類/C 類廢棄物，評估移流、擴散以及吸附作用對核種傳輸之影響，並找出可使個人年有效等效劑量低於 0.25mSv/y 的障壁尺寸設計值，相關分析結果說明如后。

#### 一、A 類廢棄物

假設 A 類廢棄物的工程障壁僅設置混凝土障壁，且核種的遷移機制為移流與擴散時，為了解吸附作用對遲滯核種遷移的效果以及對工程障壁厚度的影響，分析時利用吸附分配係數的參數設定控制吸附作用。當不考慮吸附作用及劣化作用時，分析結果如表 5.3-1 所示，水泥材料的水力傳導係數須小於  $1 \times 10^{-10}$  m/s、擴散係數須小於  $1 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s，則混凝土障壁所需厚度約介於 0.2m~0.8m 之間，屬於工程可接受範圍。若測試結果其所需障壁厚度大於 1m，則視為超過工程合理範圍。

表 5.3-1 A 類廢棄物的混凝土障壁最小尺寸(移流+擴散)

水力梯度：0.001		擴散係數(m <sup>2</sup> /s)		
		1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-10</sup>
水力傳導係數 (m/s)	1×10 <sup>-12</sup>	0.2m	0.6m	超過工程合理範圍
	1×10 <sup>-10</sup>	0.2m	0.6m	超過工程合理範圍
	1×10 <sup>-08</sup>	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍
水力梯度：0.01		擴散係數(m <sup>2</sup> /s)		
		1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-10</sup>
水力傳導係數 (m/s)	1×10 <sup>-12</sup>	0.2m	0.6m	超過工程合理範圍
	1×10 <sup>-10</sup>	0.2m	0.6m	超過工程合理範圍
	1×10 <sup>-08</sup>	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍
水力梯度：0.05		擴散係數(m <sup>2</sup> /s)		
		1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-10</sup>
水力傳導係數 (m/s)	1×10 <sup>-12</sup>	0.2m	0.6m	超過工程合理範圍
	1×10 <sup>-10</sup>	0.2m	0.8m	超過工程合理範圍
	1×10 <sup>-08</sup>	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍

當考慮吸附作用但不考慮劣化作用時，分析結果如表 5.3-2 所示，在地下水流場梯度為 0.001 的情況下，水泥材料的水力傳導係數須小於  $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 、擴散係數須小於  $1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ ，則混凝土障壁所需厚度約介於 0.1m~0.6m 之間。而在地下水流場梯度為 0.01 與 0.05 的情況下，水泥材料的水力傳導係數須小於  $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 、擴散係數須小於  $1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ ，則混凝土障壁所需厚度約介於 0.1m~0.6m 之間。若測試結果其所需障壁厚度大於 1m，則視為超過工程合理範圍。

表 5.3-2 A 類廢棄物的混凝土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附)

水力梯度：0.001		擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )		
		$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-10}$
水力傳導係數 ( $\text{m/s}$ )	$1 \times 10^{-12}$	0.1m	0.2m	0.6m
	$1 \times 10^{-10}$	0.1m	0.2m	0.6m
	$1 \times 10^{-08}$	0.4m	0.4m	0.6m
水力梯度：0.01		擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )		
		$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-10}$
水力傳導係數 ( $\text{m/s}$ )	$1 \times 10^{-12}$	0.1m	0.2m	0.6m
	$1 \times 10^{-10}$	0.1m	0.2m	0.6m
	$1 \times 10^{-08}$	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍
水力梯度：0.05		擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )		
		$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-10}$
水力傳導係數 ( $\text{m/s}$ )	$1 \times 10^{-12}$	0.1m	0.2m	0.6m
	$1 \times 10^{-10}$	0.1m	0.2m	0.6m
	$1 \times 10^{-08}$	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍

## 二、B 類/C 類廢棄物

若 B 類/C 類廢棄物的工程障壁僅設置混凝土障壁，且核種的遷移機制為移流與擴散時，在地下水流速緩慢且工程障壁材料性能極佳的情況下，亦即地下水流場梯度為 0.001，

水泥材料的水力傳導係數為  $1 \times 10^{-12} \text{m/s}$ 、擴散係數為  $1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ，其厚度囿於坑道斷面尺寸與處置容量之限制而較不符合效益，必須考量障壁材料對核種的吸附作用，以及增設低透水性的膨潤土障壁，以提高阻滯核種遷移的效果。因此，先考慮混凝土障壁材料的吸附作用對核種遷移之影響，但不考慮劣化作用，其分析結果如表 5.3-3 所示。根據分析結果，水泥材料的水力傳導係數須小於  $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 、擴散係數須小於  $1 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ ，則混凝土障壁所需厚度約介於 0.6m~0.8m 之間，屬於工程可接受範圍。若測試結果其所需障壁厚度大於 1m，則視為超過工程合理範圍。

表 5.3-3 B 類/C 類廢棄物的混凝土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附)

水力梯度：0.001		擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )		
		$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-10}$
水力傳導係數 (m/s)	$1 \times 10^{-12}$	0.6m	0.8m	超過工程合理範圍
	$1 \times 10^{-10}$	0.6m	0.8m	超過工程合理範圍
	$1 \times 10^{-08}$	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍
水力梯度：0.01		擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )		
		$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-10}$
水力傳導係數 (m/s)	$1 \times 10^{-12}$	0.6m	0.8m	超過工程合理範圍
	$1 \times 10^{-10}$	0.6m	0.8m	超過工程合理範圍
	$1 \times 10^{-08}$	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍
水力梯度：0.05		擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )		
		$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-10}$
水力傳導係數 (m/s)	$1 \times 10^{-12}$	0.6m	0.8m	超過工程合理範圍
	$1 \times 10^{-10}$	0.6m	0.8m	超過工程合理範圍
	$1 \times 10^{-08}$	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍

對於水力傳導係數大於  $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$  或擴散係數大於  $1 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$  的混凝土障壁，建議搭配膨潤土障壁，以降低通過處置設施的流速與流量。為了解混凝土障壁與膨潤土障壁

組成的雙重障壁對核種遷移之影響，假設混凝土障壁的厚度固定為 1m，分析膨潤土障壁所需厚度，其結果如表 5.3-4~表 5.3-6 所示。根據分析結果，以 1m 的混凝土障壁搭配 0.2m~0.6m 的膨潤土障壁，可抑制大部分的核種使其劑量低於 0.25mSv/yr，但對於 I-129、Tc-99 等半衰期較長的核種，則須控制膨潤土障壁的有效擴散係數小於  $1 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ ，方可阻滯核種遷移。

表 5.3-4 B類/C類廢棄物的膨潤土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附、地下水流場梯度 0.001)

混凝土障壁 1m		膨潤土障壁			
水力傳導係數(m/s)	有效擴散係數(m <sup>2</sup> /s)	水力傳導係數(m/s)	有效擴散係數(m <sup>2</sup> /s)		
			$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-9}$
$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-13}$	0.2m	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍
		$1 \times 10^{-11}$	0.2m		
		$1 \times 10^{-9}$	0.4m		
$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-13}$	0.2m		
		$1 \times 10^{-11}$	0.2m		
		$1 \times 10^{-9}$	0.4m		
$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-13}$	0.2m		
		$1 \times 10^{-11}$	0.4m		
		$1 \times 10^{-9}$	超過工程合理範圍		
	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-13}$	0.2m	
			$1 \times 10^{-11}$	0.4m	
			$1 \times 10^{-9}$	超過工程合理範圍	
		$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-13}$	0.4m	
			$1 \times 10^{-11}$	0.6m	
			$1 \times 10^{-9}$	超過工程合理範圍	

表 5.3-5 B類/C類廢棄物的膨潤土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附、  
地下水流場梯度 0.01)

混凝土障壁 1m		膨潤土障壁			
水力傳導係數(m/s)	有效擴散係數(m <sup>2</sup> /s)	水力傳導係數(m/s)	有效擴散係數(m <sup>2</sup> /s)		
			1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-09</sup>
1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.2m	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍
		1×10 <sup>-11</sup>	0.2m		
		1×10 <sup>-9</sup>	0.4m		
1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.2m		
		1×10 <sup>-11</sup>	0.4m		
		1×10 <sup>-9</sup>	0.6m		
1×10 <sup>-08</sup>	1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.2m		
		1×10 <sup>-11</sup>	0.4m		
		1×10 <sup>-9</sup>	超過工程合理範圍		
	1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.2m		
		1×10 <sup>-11</sup>	0.4m		
		1×10 <sup>-9</sup>	超過工程合理範圍		
	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.4m		
		1×10 <sup>-11</sup>	0.6m		
		1×10 <sup>-9</sup>	超過工程合理範圍		

表 5.3-6 B類/C類廢棄物的膨潤土障壁最小尺寸(移流+擴散+吸附、  
地下水流場梯度 0.05)

混凝土障壁 1m		膨潤土障壁			
水力傳導係數(m/s)	有效擴散係數(m <sup>2</sup> /s)	水力傳導係數(m/s)	有效擴散係數(m <sup>2</sup> /s)		
			1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-09</sup>
1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.2m	超過工程合理範圍	超過工程合理範圍
		1×10 <sup>-11</sup>	0.2m		
		1×10 <sup>-9</sup>	0.4m		
1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.2m		
		1×10 <sup>-11</sup>	0.4m		
		1×10 <sup>-9</sup>	超過工程合理範圍		
1×10 <sup>-08</sup>	1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.2m		
		1×10 <sup>-11</sup>	0.4m		
		1×10 <sup>-9</sup>	超過工程合理範圍		
	1×10 <sup>-11</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.2m		
		1×10 <sup>-11</sup>	0.4m		
		1×10 <sup>-9</sup>	超過工程合理範圍		
	1×10 <sup>-10</sup>	1×10 <sup>-13</sup>	0.4m		
		1×10 <sup>-11</sup>	0.6m		
		1×10 <sup>-9</sup>	超過工程合理範圍		

綜合以上對 A 類廢棄物與 B 類/C 類廢棄物的分析，在不考慮工程障壁劣化之情況下，A 類廢棄物採用國際常用之混凝土設計(水力傳導係數約 10<sup>-10</sup>m/s、擴散係數約 10<sup>-11</sup>m<sup>2</sup>/s)，即使其環境之地下水水力梯度較大，可利用合適厚度的混凝土障壁設計即可抑制核種傳輸。此外，在不同地下水流梯度環境下，混凝土設計參數以有效擴散係數對於設計厚度之敏感性較高。由測試例中可知，

擴散係數  $10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$  約須 0.1m，擴散係數  $10^{-11}\text{m}^2/\text{s}$  約須 0.2m，  
擴散係數  $10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$  約須 0.6m。

對於 B/C 類廢棄物案例，在考量可能發生施工不當或設施隨時間發生劣化影響，而使水力傳導係數提升至  $1\times 10^{-8}\text{m}/\text{s}$ ，則必須加設膨潤土障壁系統方可有效抑制核種傳輸，以測試例之混凝土障壁設計所需加設之膨潤土厚度約介於 0.2~0.6m 之間。

## 第六章 低放審查導則(第 0 版)修訂建議

「審查導則(第 0 版)」第四章「處置設施之設計」章節修訂方向建議重點如下，詳細修訂細節詳如表 6-1 所列：

- 一、處置設施之設計審查重點非工程設計本身，工程設計本身應符合工程相關規範與常規。此處相關章節重點為提供安全評估所需資訊，審查重點也應該回歸安全評估本身。建議於 4.1 節最前面先行敘明。
- 二、前四節之標題與內容並不十分貼切，但大幅度修改有其實質上之困難，建議將第二節「建築設計」標題改為「設施配置」。
- 三、第 4.1 節設計目標與功能需求前言文字有必要加以調整，以充分反映第四章整體審查概念。
- 四、建議於第四章納入坑道處置之審查要項。舉例而言，可於 4.1 節(一)增列 12.若採坑道處置時，應包括坑道之長期穩定性與支護之耐久性，4.2 節亦應增列相對應之審查作業要項。
- 五、建議將第四章前言修訂為「低放處置設施應依廢棄物分類特性分區處置並採多重障壁設計，需針對處置設施營運操作、長期穩定、抑制核種遷移、輻射屏蔽、防範無意闖入與設施監管等，確保長期處置安全之相關設計，說明其設計功能、設計準則、設計基準與限制。」



表 6-1 「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第 0 版) 第四章處置設施之設計修正草案對照表

修正條文	現行條文	說明
4.1 設計目標與功能需求：說明處置設施之設計基準、設計要項及設計規格等。	4.1 設計目標與功能需求：說明處置設施之設計基準、設計要項及設計規格等。	
處置設施設計目標與功能，係為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、降低處置場關閉後維護工作量以及改進場址自然環境，以保護群眾的健康與安全。為達成設計目標與功能，故須提供下列資料供審查。	處置設施設計目標與功能，係為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、降低處置場關閉後維護工作量以及改進場址自然環境，以保護群眾的健康與安全。為達成設計目標與功能，故須提供下列資料供審查。	
(一)提供資料	(一)提供資料	<p>一、提供資料修訂方向建議：應涵蓋處置設施長期穩定考量下之設計目標、設計基準與功能需求以及對應引用法規、報告或函文之依據(此項規定於 4.8)，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等，各項設計成果應說明採用的比例尺與包括之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等(此項規定於 4.8)。</p> <p>二、若要達到長期隔離之目的，處置設施內的各個構造都需發揮其既有功用。因此在考量構造的穩定性時，除了填充材、廢棄物及覆蓋物外，處置單元亦應納入考量。</p>

修正條文	現行條文	說明
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。	1. 說明降低處置單元水滲透之設計基準、設計要項及設計規格。	
2. 說明處置單元 <u>工程障壁系統</u> 完整性之設計基準、設計要項及設計規格。	2. 說明處置單元覆蓋完整性之設計基準、設計要項及設計規格。	工程障壁系統可完整含括地表設施覆蓋與坑道式回填之各工程單元設計。
3. 說明回填物、廢棄物及覆蓋物構造穩定性之設計基準、設計要項及設計規格。	3. 說明回填物、廢棄物及覆蓋物構造穩定性之設計基準、設計要項及設計規格。	
4. 說明 <u>運轉期</u> 降低廢棄物與 <u>積水</u> 接觸之設計基準、設計要項及設計規格。	4. 說明降低廢棄物與積水接觸之設計基準、設計要項及設計規格。	
5. 說明運轉及封閉期場區排水之設計基準、設計要項及設計規格。	5. 說明運轉及封閉期場區排水之設計基準、設計要項及設計規格。	
6. 說明場址封閉與穩定化之設計基準、設計要項及設計規格。	6. 說明場址封閉與穩定化之設計基準、設計要項及設計規格。	
7. 減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。	7. 減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。	
8. 防止 <u>無意闖入</u> 處置場障壁之設計基準、設計要項及設計規格。	8. 防止非故意侵入處置場障壁之設計基準、設計要項及設計規格。	
9. 合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。	9. 合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。	
10. 現場監測之設計基準、設計要項及設計規格。	10. 現場監測之設計基準、設計要項及設計規格。	
11. 可適當監管與補救緩衝區之設計基準、設計要項及設計規格。	11. 可適當監管與補救緩衝區之設計基準、設計要項及設計規格。	
(二) 審查作業	(二) 審查作業	三、審查作業修訂方向建議：應檢核處置設施長期穩

修正條文	現行條文	說明
		定考量下之設計目標、確認設計基準與功能需求是否完整，引用法規、報告或函文之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，是否需實施處置設施穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。
對降低水滲透、處置單元工程障壁系統完整性、構造穩定性、降低廢棄物與積水接觸、運轉及封閉期場區排水、場址封閉與穩定化、減少長期維護需求、防止無意闖入、合理抑低職業曝露、現場監測、緩衝區等資料，提供審查作業須注意的事項。	對降低水滲透、處置單元覆蓋完整性、構造穩定性、降低廢棄物與積水接觸、運轉及封閉期場區排水、場址封閉與穩定化、減少長期維護需求、防止非故意侵入、合理抑低職業曝露、現場監測、緩衝區等資料，提供審查作業須注意的事項。	工程障壁系統可完整含括地表設施覆蓋與坑道式回填之各工程單元設計。
1. 降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明： (1) 導引場區逕流降水離開處置單元。 (2) 導引場外逕流降水流入排水系統及導引地下水離開處置單元。 導引場區逕流降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降水流速和地下水位。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。	1. 降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明： (1) 導引場區降水離開處置單元、(2) 導引場外降水流入排水系統及導引地下水離開處置單元。導引場區降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降水流速和地下水位。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堵塞。	導則概有名詞修訂

修正條文	現行條文	說明
(2)因意外狀況所產生之堵塞。		
<p>2. 處置單元<b>工程障壁系統</b>完整性之設計，是否清楚說明其採取的方法可使<b>工程障壁系統</b>：</p> <p>(1)達成預期使用<b>時間</b>。</p> <p>(2)避免連續性維護需求。</p> <p>(3)可抵抗地表地質與生物活動之削夷作用。</p> <p>地表式處置單元<b>工程障壁系統</b>侵蝕保護之主要設計準則至少應說明：</p> <p>(1)一般運作狀況時的地表水和風速。</p> <p>(2)異常性地表水與風速以及正常水位。</p> <p>處置單元<b>工程障壁系統</b>完整性的主要設計準則至少應說明：</p> <p>(1)評估整體性與差異性沉陷以及預估廢棄物與填充材料的密度增加狀況。</p> <p>(2)預估覆蓋物材料在掩埋廢棄物可能受災時的強度與耐受性。</p> <p>(3)相關於最大地震的異常地表震動。</p>	<p>2. 處置單元覆蓋完整性之設計，是否清楚說明：採取的方法可使覆蓋物(1)達成預期使用時期、(2)避免連續性維護需求、(3)可抵抗地表地質與生物活動之削夷作用。處置單元覆蓋物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。處置單元覆蓋物完整性的主要設計準則至少應說明(1)評估整體性與差異性沉陷以及預估廢棄物與填充材料的密度增加狀況；(2)預估覆蓋物材料在掩埋廢棄物可能受災時的強度與耐受性；(3)相關於最大地震的異常地表震動。</p>	<p>工程障壁系統可完整含括地表設施覆蓋與坑道式回填之各工程單元設計。</p>
<p>3. 構造穩定性之設計，是否清楚說明廢棄物可長期隔離及避免經常維護、<b>並包括長期穩定性以及構造物失穩之影響</b>。確保填充材、廢棄物和廢棄物覆蓋物的結構穩定性之主要設計準則至少應說明：</p>	<p>3. 構造穩定性之設計，是否清楚說明廢棄物可長期隔離及避免經常維護。確保填充材、廢棄物和廢棄物覆蓋物的結構穩定性之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</p>	<p>四、若要達到長期隔離之目的，處置設施內的各個構造都需發揮其既有功用。因此在考量構造的穩定性時，除了填充材、廢棄物及覆蓋物外，處置單元亦應納入考量。</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>(1)廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量。</p> <p>(2)因運作而產生的空隙效應。</p> <p>(3)設計基準異常事件對於結構穩定性的效應。</p> <p>(4)在廢棄物有害時期，因地質化學環境使填充材、廢棄物形態和廢棄物覆蓋材料的剝蝕。</p>	<p>隙容量；(2)因運作而產生的空隙效應；(3)設計基準異常事件對於結構穩定性的效應；和(4)在廢棄物有害時期，因地質化學環境使填充材、廢棄物形態和廢棄物覆蓋材料的剝蝕。</p>	
<p>4. 降低廢棄物與<u>積水</u>接觸之設計，是否清楚說明使用方法可使廢棄物在暫時貯存、處置場運轉中、場區關閉期間，降低與<u>積水</u>的接觸。主要設計準則至少應： (1)清楚說明；<del>(2)說明</del>廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元。 (2)<u>處置設施採近地表型式時</u>，說明處置單元覆蓋物表土下與表土的排水和暫存區域。 (3)<u>處置設施採近地表型式時</u>，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，<u>處置設施採坑道型式時</u>，<u>描述回填材料及坑道口封堵材料間之滲透性</u>。 (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</p>	<p>4. 降低廢棄物與積水接觸之設計，是否清楚說明使用方法可使廢棄物在暫時貯存、處置場運轉中、場區關閉期間，降低與積水的接觸。主要設計準則至少應(1)清楚說明；(2)說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元；(3)說明處置單元覆蓋物表土下與表土的排水和暫存區域；(4)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；和(5)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。</p>	<p>五、近地表及坑道兩種不同型式之處置設施，其封閉回填之方式亦有所差異。近地表處置設施是於處置單元周圍回填混合黏土之回填土石材料，並加以壓密夯實成為低透水區域，低透水區上設置一濾層做為降雨入滲排除之用，而後於其上覆土植生；坑道處置設施的封閉回填則是以土石料混製成滲透性極低之回填材料，夯實填充於處置單元與坑道內襯砌之空間。因此，對於降低廢棄物與積水接觸之機制或是排水設計，亦會受到處置設施的不同而影響，應予以區隔。</p>

修正條文	現行條文	說明
統組件被破壞之設計準則。		
<p>5. 處置場運轉中與封閉期場區排水之設計，是否清楚說明使用方法可將：</p> <p>(1) <u>引導</u>地表水或<u>地下水</u>引導遠離廢棄物。</p> <p>(2) 以<u>流速</u>與<u>斜坡</u>度的方法控制排水系統流出處置單元。</p> <p>主要設計準則至少應：<del>(1)</del>清楚說明：</p> <p>(1) 說明運轉期和封閉後場址表土或<u>坑道</u>的排水狀況。</p> <p>(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。</p>	<p>5. 處置場運轉中與封閉期場區排水之設計，是否清楚說明使用方法可將(1)地表水引導遠離廢棄物，(2)以速度與斜度的方法控制排水系統流出處置單元。主要設計準則至少應(1)清楚說明；(2)說明運轉期和封閉後場址表土排水狀況；(3)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。</p>	增加坑道式處置排水設計審查說明。
<p>6. 場址封閉與穩定化之設計，是否清楚說明其措施，可<u>達下列需求</u>：</p> <p>(1) 提供廢棄物長期隔離的功能與避免經常性維護之需求。</p> <p>(2) 提供場址關閉與穩定計劃，並可<u>應</u>改善場區自然環境特性。</p> <p>場址關閉及穩定化之主要設計準則應至少說明：</p> <p>(1) 設計時應提出場址封閉計劃的相關項目。</p> <p>(2) 封閉與可能主動維護的設計基準。</p>	<p>6. 場址封閉與穩定化之設計，是否清楚說明其措施，可(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)提供場址關閉與穩定計劃，並可應改善場區自然環境特性。</p> <p>場址關閉及穩定化之主要設計準則應至少說明(1)設計時應提出場址封閉計劃的相關項目；(2)封閉與可能主動維護的設計基準。</p>	
<p>7. 減少長期維護需求之設計，是否清楚說明處置場關閉後，如何避免長期維護之</p>	<p>7. 減少長期維護需求之設計，是否清楚說明處置場關閉後，如何避免長期維</p>	

修正條文	現行條文	說明
需求。主要設計準則必須預測： (1)材料之耐用度。 (2)侵蝕作用。 (3)排水系統退化的效應。 (4)監控系統的退化。	護之需求。主要設計準則必須預測 (1)材料之耐用度；(2)侵蝕作用，(3)排水系統退化的效應；和(4)監控系統的退化。	
8. 防止無意闖入處置場障壁之設計，是否清楚說明設立之障壁，以避免個人不經意的侵入處置設施。障壁主要設計準則必須說明標示物、障壁材料，障壁退化比率的可能範圍。	8. 防止非故意侵入處置場障壁之設計，是否清楚說明設立之障壁，以避免個人不經意的侵入處置設施。障壁主要設計準則必須說明標示物、障壁材料，障壁退化比率的可能範圍。	
9. 合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明： (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)對已知較高活性廢棄物之屏蔽設計。和 (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。	9. 合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明(1)接收、檢查、管控、貯存和處置作業之輻射合理抑低措施；(2)對已知較高活性廢棄物之屏蔽設計；和(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。	六、封閉作業施工時，依據施工方法之不同，可能會有施工人員進入到處置窖上方，因此對於施工人員的輻射抑低措施，亦應加以考量。
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	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。	

修正條文	現行條文	說明
理方法。		
11. 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)可供監測所需的空間尺寸。 (2)不可接受的輻射發生時可採取正確措施所需的空間尺寸。	11. 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)可供監測所需的空間尺寸；(2)不可接受的輻射發生時可採取正確措施所需的空間尺寸。	
4.2 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。	4.2 建築設計：說明處置設施主要結構物、使用需求規劃及其配置。	原規範意指場區各項建築物設計，且包含排水系統設計，建議修改為涵蓋性質較廣的設施設計。
為促進處置設施達到妥善規劃與配置，在 <u>設施設計</u> 方面，須提供下列資料供審查。	為促進處置設施達到妥善規劃與配置，在 <u>建築設計</u> 方面，須提供下列資料供查。	
(一)提供資料	(一)提供資料	一、提供資料修訂方向建議：應涵蓋處置設施主要結構物長期穩定考量下之建築設計目標、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；並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等，各項設計成果應說明採用的比例尺與所包含之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。
1. 說明處置設施主要結構物之 <u>建築</u> 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	1. 說明處置設施主要結構物之建築設計目標、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	



修正條文	現行條文	說明
據。包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等。	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的正視圖、通過重要系統的參個軸向剖面圖及細部設計。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。	2. 處置設施主要結構物的正視圖、通過重要系統的參個軸向剖面圖及細部設計。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. 各種處置單元覆蓋物、 <del>處置單元設施</del> 內外的排水與集水系統的剖面圖及細部設計。	3. 各種處置單元覆蓋物、處置單元內外的排水與集水系統的剖面圖及細部設計。	將「處置單元覆蓋物、處置單元」，修改為涵蓋性質較廣的「處置設施」。
(二) 審查作業	(二) 審查作業	二、審查作業修訂方向建議：應檢核處置設施主要結構物長期穩定考量下之建築設計目標、確認使用需求規劃及其配置是否滿足，相關的設計基準與功能需求是否完整，引用法規與報告之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，是否需實施處置設施建築設計穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。
1. 應檢核處置設施主要結構物之 <del>建築</del> 設計目標、確認使用需求規劃及其配置是否滿足？ 相關的設計基準	1. 應檢核處置設施主要結構物之建築設計目標、確認使用需求規劃及其配置是否滿足？ 相關的設計	

修正條文	現行條文	說明
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？	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。	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. 各種處置單元覆蓋物、 <del>處置單元設施</del> 內外的排水與集水系統的剖面圖是否可顯示出其功能？	3. 各種處置單元覆蓋物、處置單元內外的排水與集水系統的剖面圖是否可顯示出其功能？	將「處置單元覆蓋物、處置單元」，修改為涵蓋性質較廣的「處置設施」。
4.3 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。	4.3 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，須提供下列資料供查。	為促進處置設施各類重要結構物的安全，在結構設計方面，須提供下列資料供查。	
(一)提供資料	(一)提供資料	一、提供資料修訂方向建議：應涵蓋處置設施主要結構物長期穩定考量下工程材質以及屏蔽材料之設計目標、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；並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等。 二、坑道型處置設施的處置單元，可能會採用透水性低的膨脹材料，故須考慮膨脹

修正條文	現行條文	說明
		材料因周邊地下水浸潤狀況不同，使其產生的膨脹壓並非均一的作用力，故須加以評估其對處置單元之影響。
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 <del>(D)</del> 和活負載 <del>(L)</del> 、偶發液態水平和垂直壓力之負載 <del>(F)</del> 、土壤壓力之負載 <del>(H)</del> 、溫度差之熱負載 <del>(T)</del> 、風壓力之負載 <del>(W)</del> ，地震之負載 <del>(E)</del> ， <b>膨脹壓力之負載(B)</b> 。	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(D)和活負載(L)、偶發液態水平和垂直壓力之負載(F)、土壤壓力之負載(H)、溫度差之熱負載(T)、風壓力之負載(W)，地震之負載(E)。	若採膨潤土設計則需考量膨脹壓力。 審查人員多為專家，因此導則不需要說明的太細
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。	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。	3. 適用之法規、標準和規範。	
4. 設計與分析步驟 <del>之</del> 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。	4. 設計與分析步驟：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. <del>場址之衝擊因素</del> ：結構設	5. 場址之衝擊因素：結構	

修正條文	現行條文	說明
計 <u>對應考量</u> 場址特性之影響(地質、地震、氣象、氣候、水文和大地工程與地質化學特性)之衝擊，說明如何被列入考量。	設計對場址特性(地質、地震、氣象、氣候、水文和大地工程與地質化學特性)之衝擊，說明如何被列入考量。	
(二)審查作業	(二)審查作業	三、審查作業修訂方向建議：應檢核處置設施主要結構物長期穩定考量下之工程材質、屏蔽材料設計目標、使用需求規劃及其配置是否滿足，相關的設計基準與功能需求是否完整，引用法規與報告之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，材料試驗規範與試驗方法之適當性，是否需實施平行驗證審查等。
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？	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. 混凝土結構之強度(U)設計，必須大於最大的負載組合。鋼構結構物之設計， <u>可使用彈性應力方法</u> ，其設計方法須符合相關規範，強度(S)設計必須大於最大的負載組合。	2. 混凝土結構之強度(U)設計，必須大於最大的負載組合。鋼構結構物之設計，可使用彈性應力方法，強度(S)設計必須大於最大的負載組合。	建議不限定申請者可採用之分析方法。
3. 所引用的法規、標準或規範是否適切？	3. 所引用的法規、標準或規範是否適切？	建議提出相關法規，以保留彈性
4. 設計與分析步驟：結構分析與設計 <u>和</u> 結構系統與構	4. 設計與分析步驟：結構分析與設計和結構系統與	

修正條文	現行條文	說明
<p>件之資料，<del>與所</del>使用之設計、分析方法和結果，<del>均是</del> <del>否保守且為優良工程設計</del> <del>之代表。其安全性是否符合</del> <del>相關規範之要求。</del></p>	<p>構件之資料，與所使用之設計、分析方法和結果，均是否保守且為優良工程設計之代表。</p>	
<p>5. <del>若場址之</del>衝擊因素：是否已清楚定義與評估可能之衝擊。<del>；該場址因素是否將不會被結構物設計造成有害的影響。</del></p>	<p>5. 若場址之衝擊因素：是否已清楚定義與評估可能之衝擊；該場址因素是否將不會被結構物設計造成有害的影響。</p>	
<p>4.4 <del>土木設計處置設施長期安全設計</del>：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。</p>	<p>4.4 土木設計：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。</p>	<p>1. 原規範所指土木設計之對象，為地表式處置覆蓋系統設計、處置單元抵抗洪水沖刷設計、與增加覆蓋系統安全之排水設計。推測因設計項目均屬土木工程而稱之。建議修改為「處置設施長期安全設計」較為直觀。 2. 配合 4.2 節將「處置單元覆蓋物、處置單元」，修改總合為涵蓋性質較廣的「處置設施」。</p>

修正條文	現行條文	說明
<p>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<u>處置設施</u>覆蓋與回填、地表防洪、地下排水系統及、<u>護坡工程或處置坑道工程</u>等，在<u>土木設計處置設施長期安全設計</u>方面，須提供下列資料供查。</p>	<p>為促進處置設施安全，應慎選工程材質與屏蔽材料，並須考量置設施覆蓋與回填、地表防洪、地下排水系統及護坡工程等，在土木設計方面，須提供下列資料供查。</p>	
<p>(一)提供資料</p>	<p>(一)提供資料</p>	<p>一、提供資料修訂方向建議：應涵蓋處置設施主要結構物長期穩定考量下工程材質以及屏蔽材料之設計目標、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；並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等。土木設計應包括處置設施及其覆蓋、回填、地表防洪及地下排水系統、護坡工程等或處置坑道工程等。</p> <p>二、低放射性廢棄物的處置概念是將低放射性廢棄物處置於適當深度的地質環境中，利用工程障壁層層阻絕，延長核種遷移時間，使之在長期的遷移過程中，逐漸衰變至無害之程度。故在處置設施回填封閉後，建議增加考量工程材料之核種吸附性及擴散性，前者可使廢棄物與外部滲流水接觸後，放射性核種仍會被工程材料緊密的吸附住，而不會受地下水遷移影響，後者則</p>

修正條文	現行條文	說明
		可降低核種擴散之速率，抑制核種的擴散遷移。
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、 <u>核種吸附性</u> 等特性及其設計標準。	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、滲水性等特性及其設計標準。	增列與長期安全相關之核種吸附性，使其說明可適用於地表與坑道處置。
2. 地表防洪的材料特性、設計標準、排水功能。	2. 地表防洪的材料特性、設計標準、排水功能。	雖然地表防洪並非坑道處置設施長期安全考量項目，但仍有助維持營運階段安全，建議保留，並規定地表與坑道處置均需說明此項目。
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。	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。	4. 護坡工程的材料特性、設計標準、應力監測等。	1. 台電針對第 4 點提出以下建議：一般大地監測，主要為先得到變位的資訊，再透過變位來了解應力關係，一般在土工領域使用「穩定監測」來泛指此類監測，建議修正。 修訂說明：同意台電修改建議。 2. 增加「處置坑道工程」，以適用坑道處置。 3. 增列「處置設施在建造、運轉與封閉等各個階段」之文字，係分別針對建造、運轉與封閉等階段應漸次提出或修正檢視與確保工程穩定之監測規劃。
5. 適用之法規、標準和規範。	5. 適用之法規、標準和規範。	

修正條文	現行條文	說明
(二)審查作業	(二)審查作業	審查作業修訂方向建議:應檢核處置設施主要結構物長期穩定考量下之工程材質、屏蔽材料設計目標、使用需求規劃及其配置是否滿足,相關的設計基準與功能需求是否完整,引用法規與報告之適當性與代表性,設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性,圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性,材料試驗規範與試驗方法之適當性,是否需實施平行驗證審查等。
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?	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。	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?	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?	台電針對第 3 點提出以下建議:增加「排水檢測過濾」等字眼,使得地下排水系統體系較完備,以避免受污染地下水進入生物圈。 修訂說明:排水檢測過濾為營運階段的監測行為,並不屬於多重障壁系統設計的一環,應於第六章處置運轉設施說明。
4. 護坡工程或處置坑道工程的材料特性、設計標準、	4. 護坡工程的材料特性、設計標準、應力監測等是	1. 增加「處置坑道工程」,以適用坑道處置。



修正條文	現行條文	說明
<p><u>穩定監測規劃</u>等是否適當？是否具長期穩定的特性？<u>穩定監測規劃，必須說明在處置設施建造、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：</u></p> <p>(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。</p>	<p>否適當？是否具長期穩定的特性？</p>	<p>2. 建議本項「應力監測等」文字刪除，並增列說明「穩定監測」。</p>
<p>5. 所引用的法規、標準或規範是否適切？</p>	<p>5. 所引用的法規、標準或規範是否適切？</p>	
<p>4.5 輻射安全設計 (一) 安全限值：說明設施內外之輻射限值與輻射防護分區規劃。</p>	<p>4.5 輻射安全設計 (一) 安全限值：說明設施內外之輻射限值與輻射防護分區規劃。</p>	
<p>(二) 處置設施結構之輻射屏蔽分析：說明處置設施輻射屏蔽結構體構造強度、比重、厚度等有關資料，針對處置廢棄物含有核種之活度、比活度及分布情形，進行輻射屏蔽分析評估。</p>	<p>(二) 處置設施結構之輻射屏蔽分析：說明處置設施輻射屏蔽結構體構造強度、比重、厚度等有關資料，針對處置廢棄物含有核種之活度、比活度及分布情形，進行輻射屏蔽分析評估。</p>	
<p>(三) 職業曝露合理抑低：說明設施正常運轉期間，合理抑低工作人員輻射劑量所採行之設計或措施，至少應包括下列各項：(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</p>	<p>(三) 職業曝露合理抑低：說明設施正常運轉期間，合理抑低工作人員輻射劑量所採行之設計或措施，至少應包括下列各項：(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)</p>	

修正條文	現行條文	說明
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。	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。	
輻射安全設計不但要確保工作人員與一般民眾的輻射劑量在法規限值內，也應依輻射防護之要求，使工作人員與一般民眾的輻射劑量合理抑低。須提出下列資料供審查。	輻射安全設計不但要確保工作人員與一般民眾的輻射劑量在法規限值內，也應依輻射防護之要求，使工作人員與一般民眾的輻射劑量合理抑低。須提出下列資料供審查。	
(一)提供資料 1.安全限值：訂定各輻射區之安全限值，可促進各輻射屏蔽之設計，並管制人員之進出，以確保工作人員知之輻射安全。	(一)提供資料 1.安全限值：訂定各輻射區之安全限值，可促進各輻射屏蔽之設計，並管制人員之進出，以確保工作人員知輻射安全。	台電針對第1點第(1)項提出以下建議：增列「不考慮背景輻射」用詞。 修訂說明：實際劑量評估雖不考慮背景輻射，但此依「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」條文原文規定，故不擬修訂。
(1)提出設計概念，包括設計基礎與準則。	(1)提出設計概念，包括設計基礎與準則。	
(2)為使工作人員劑量合理抑低，輻射管制區再細分為不同之輻射區，並定出各輻射區之最大輻射劑量率。	(2)為使工作人員劑量合理抑低，輻射管制區再細分為不同之輻射區，並定出各輻射區之最大輻射劑量率。	
2.處置設施結構之輻射屏蔽分析：輻射屏蔽設計與分析，涉及未來是否能安全運轉，所以須提相關資料供審查。	2.處置設施結構之輻射屏蔽分析：輻射屏蔽設計與分析，涉及未來是否能安全運轉，所以須提相關資料供審查。	
(1)屏蔽之設計準則。	(1)屏蔽之設計準則。	
(2)各輻射管制區內廢棄物	(2)各輻射管制區內廢棄物	

修正條文	現行條文	說明
所含各核種之活度、比活度及分布情形。	所含各核種之活度、比活度及分布情形。	
(3)各輻射管制區輻射屏蔽結構體之構造強度、比重、厚度等有關資料。	(3)各輻射管制區輻射屏蔽結構體之構造強度、比重、厚度等有關資料。	
(4)屏蔽參數與計算程式。	(4)屏蔽參數與計算程式。	
3.職業曝露合理抑低：輻射防護除須確保工作人員與一般民眾之輻射劑量低於游離輻射防護安全標準之限值外，也必須使劑量合理抑低。為使職業曝露合理抑低，須考量設施設計與管制作業，採取合理抑低措施。	3.職業曝露合理抑低：輻射防護除須確保工作人員與一般民眾之輻射劑量低於游離輻射防護安全標準之限值外，也必須使劑量合理抑低。為使職業曝露合理抑低，須考量設施設計與管制作業，採取合理抑低措施。	
(1)輻射監測區域規劃、輻射管制區劃分及輻射防護設備之使用等。	(1)輻射監測區域規劃、輻射管制區劃分及輻射防護設備之使用等。	
(2)廢棄物接收、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。	(2)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。	
(3)對較高活度廢棄物之屏蔽設計。	(3)對較高活度廢棄物之屏蔽設計。	台電針對第3點第(3)項提出以下建議：「詳列較高活度之定義，例如C類或活度」。 修訂說明：較高活度廢棄物雖無法規明定，但本導則認為有提出並視個案要求的必要。其基本精神在於符合「游離輻射防護安全標準」相關規定，設施經營者於規劃、設計及進行輻射作業

修正條文	現行條文	說明
		時，對輻射工作人員與一般人造成之劑量有超過法定限值之虞時，屏蔽設計為合理抑低措施之一。由於並不一定是 C 類廢棄物且屏蔽也非唯一手段(例如可另採用遙控作業)，因此不擬給予類別或活度的硬性規定，以保留彈性。故建議不增訂較高活度之定義。
4.人員污染防護之設計。設施之輻射防護設計，必須避免工作人員遭受到體內與體外之放射性物質之污染。	4.人員污染防護之設計。設施之輻射防護設計，必須避免工作人員遭受到體內與體外之放射性物質之污染。	
5.人員、物料進出設計。為防範放射性物質污染外界環境，必須有完善的人員、物料進出設計。	5.人員、物料進出設計。為防範放射性物質污染外界環境，必須有完善的人員、物料進出設計。	
(二)審查作業 1.安全限值： (1)處置場輻射安全設計：在場區外，民眾的年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗(不考慮背景輻射)；在場區內，是否考量輻射源(加馬輻射與空浮)、工作環境、及占用時間，將輻射管制區分區管制，並訂定工作人員的輻射劑量行政管制值；該輻射劑量行政管制值，是否符合合理抑低。	(二)審查作業 1.安全限值： (1)處置場輻射安全設計：在場區外，民眾的年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗(不考慮背景輻射)；在場區內，是否考量輻射源(加馬輻射與空浮)、工作環境、及占用時間，將輻射管制區分區管制，並訂定工作人員的輻射劑量行政管制值；該輻射劑量行政管制值，是否符合合理抑低。	無相關法規依據不宜明訂
(2)是否考量各輻射管制區內工作人員之占用時間與人數，及合理抑低原則，訂定其劑量率限值。並對該管	(2)是否考量各輻射管制區內工作人員之占用時間與人數，及合理抑低原則，訂定其劑量率限值。並對該管	

修正條文	現行條文	說明
制區之屏蔽與通風設計,是否考量合理抑低。	該管制區之屏蔽與通風設計,是否考量合理抑低。	
2.處置設施結構之輻射屏蔽分析 (1)屏蔽之設計準則:各輻射管制區之屏蔽設計,是否考量合理抑低;該區之計算最大輻射劑量率,是否小於其限值。	2.處置設施結構之輻射屏蔽分析 (1)屏蔽之設計準則:各輻射管制區之屏蔽設計,是否考量合理抑低;該區之計算最大輻射劑量率,是否小於其限值。	
(2)各輻射管制區內廢棄物所含各核種之活度、比活度及分布情形:是否考量運轉期間各廢棄物接收區、暫存區、再處理包裝區之最大廢棄物量,及可能的最大活度與比活度。	(2)各輻射管制區內廢棄物所含各核種之活度、比活度及分布情形:是否考量運轉期間各廢棄物接收區、暫存區、再處理包裝區之最大廢棄物量,及可能的最大活度與比活度。	
(3)各輻射管制區輻射屏蔽結構體之構造強度、比重、厚度等有關資料:輻射屏蔽結構體之構造強度與比重,是否一併被考慮在建築物結構體。	(3)各輻射管制區輻射屏蔽結構體之構造強度、比重、厚度等有關資料:輻射屏蔽結構體之構造強度與比重,是否一併被考慮在建築物結構體。	
(4)屏蔽參數與計算程式:輻射屏蔽厚度之計算,是否利用可接受的屏蔽計算程式,其屏蔽參數之假設是否合理,並計算各輻射管制區之輻射劑量率。	(4)屏蔽參數與計算程式:輻射屏蔽厚度之計算,是否利用可接受的屏蔽計算程式,其屏蔽參數之假設是否合理,並計算各輻射管制區之輻射劑量率。	
3.職業曝露合理抑低 (1)輻射監測區域規劃:輻射監測區域之規劃內的劑量率是否都小於0.5微西弗/小時符合輻射防護法規之要求。	3.職業曝露合理抑低 (1)輻射監測區域規劃:輻射監測區域內的劑量率是否都小於0.5微西弗/小時。	無相關法規依據不宜明訂

修正條文	現行條文	說明
<p>(2)輻射管制區，是否依輻射劑量率的狀況，再加以細分；每一種輻射管制區內，是否裝設區域輻射監測器與空浮監測器；監測器安裝位置，是否為人員經常到達的地方；監測器之刻度，是否涵蓋預期事故之最大劑率值；各監測器讀值看板，是否裝設在進入管制區之入口明顯處。各輻射管制區的通風，是由低空浮區流向高空浮區，且高空浮區在排放口需裝設過濾器與空浮連續監測器。高空浮區排放口，在測到超過排放限值時，是否有警報，是否可自動關閉排放並停止作業。</p>	<p>(2)輻射管制區，是否依輻射劑量率的狀況，再加以細分；每一種輻射管制區內，是否裝設區域輻射監測器與空浮監測器；監測器安裝位置，是否為人員經常到達的地方；監測器之刻度，是否涵蓋預期事故之最大劑率值；各監測器讀值看板，是否裝設在進入管制區之入口明顯處。各輻射管制區的通風，是由低空浮區流向高空浮區，且高空浮區在排放口需裝設過濾器與空浮連續監測器。高空浮區排放口，在測到超過排放限值時，是否有警報，是否可自動關閉排放並停止作業。</p>	
<p>(3)進入管制區，是否經過輻射防護管制站；管制站是否備妥合適的防護衣、防護手套、防護鞋套、防護面具、及各種人員劑量偵測儀器；在出管制站前，是否裝設全身污染偵測設備，及洗滌、沐浴設備。</p>	<p>(3)進入管制區，是否經過輻射防護管制站；管制站是否備妥合適的防護衣、防護手套、防護鞋套、防護面具、及各種人員劑量偵測儀器；在出管制站前，是否裝設全身污染偵測設備，及洗滌、沐浴設備。</p>	
<p>(4)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；各作業區是否考量其方便性、減少污染、減少停留時間、避免接觸廢棄物的設計。</p>	<p>(4)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；各作業區是否考量其方便性、減少污染、減少停留時間、避免接觸廢棄物的設計。</p>	

修正條文	現行條文	說明
(5)對較高活度廢棄物之屏蔽設計：經屏蔽後之高輻射區，是否允許人員進入與維修相關設備；是否有利用遙控操作高輻射源的設計。	(5)對較高活度廢棄物之屏蔽設計：經屏蔽後之高輻射區，是否允許人員進入與維修相關設備；是否有利用遙控操作高輻射源的設計。	
4.人員污染防護之設計：輻射作業環境是否有污染管制限值？空浮管制限值？防範體外污染與體內污染之裝備是否足夠？	4.人員污染防護之設計：輻射作業環境是否有污染管制限值？空浮管制限值？防範體外污染與體內污染之裝備是否足夠？	
5.人員、物料進出設計：是否有足夠的偵檢設備與洗滌設備？是否可避免污染擴散到外面環境？	5.人員、物料進出設計：是否有足夠的偵檢設備與洗滌設備？是否可避免污染擴散到外面環境？	
4.6 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。	4.6 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。	

修正條文	現行條文	說明
<p>低放廢棄物處置場的輔助設施或系統，包括廢棄物暫貯區、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、分析或偵測系統等輔助性建物及道路，其設計應能達成：</p> <p>(1)協助處置設施之運轉，維護工作人員安全。</p> <p>(2)協助處置設施建造需求。</p> <p>(3)對處置場封閉措施不會產生負面影響。</p> <p>須提供下列資料供審查。</p>	<p>低放廢棄物處置場的輔助設施或系統，包括廢棄物暫貯區、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、分析或偵測系統等輔助性建物及道路，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)對處置場封閉措施不會產生負面影響。須提供下列資料供審查。</p>	
<p>(一)提供資料</p> <p>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。</p>	<p>(一)提供資料</p> <p>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。</p>	<p>一、提供資料修訂方向建議：</p> <p>第 1 點建議增列設計計算書、工期安排、經費估算、施工規範等。</p> <p>施工相關事宜已於第五章有相關規定，故建議不增列。</p>
<p><b>2.引用最新核定建築法規及工業標準。適用之法規、標準和規範。</b></p>	<p>2.引用建築法規及工業標準。</p>	<p>第 2 點應採最新核定版本。應明確說明相關法規。</p>
<p>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。</p>	<p>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。</p>	<p>第 3 點年限、週期數據依據為何？</p>
<p>4.各種輔助設施對處置場建造、運轉與封閉的影響。</p>	<p>4.各種輔助設施對處置場建造、運轉與封閉的影響。</p>	<p>第 4 點建議評估最壞狀況下對安全性之影響。</p>
<p><b>5.總體處置場所屬</b>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。</p>	<p>5.總體交通系統的設計：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。</p>	<p>第 5 點建議增列運送計劃(包含如運送路線失效時是否有替代方案等)。</p> <p>應指場區內道路系統，故未做修改。</p>



修正條文	現行條文	說明
		總體交通似會涉及場區之海運與陸運系統，應屬運輸計畫審查範圍，建議修改「總體」為「處置場所屬」，以限定其交通系統僅包含處置場所管轄範圍(可包含專用接收港至處置場專用道路)
<b>6.各輔助設施或系統失效時之補救措施。</b>		呼應 4.6 之要求內容。
(二)審查作業 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？	(二)審查作業 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？	二、審查作業修訂方向建議： 第 1 點應考慮操作人員/民眾可安全疏散逃生。
2.所引用的 <u>建築</u> 法規、 <u>及工業標準和規範</u> 是否適切？	2.引用的建築法規及工業標準是否適切？	第 2 點應採最新核定版本。審查時，檢查是否採用最新核定版本法規與標準應屬適切之研判範圍，故未增列。
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？ <u>是否提供雙備援或多重備援？</u>	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？	第 3 點各重要設備宜採雙備援或多重備援。
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？	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？	第 4 點情境想定宜愈完整愈好。

修正條文	現行條文	說明
5. <u>總體處置場所屬</u> 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。	5. 總體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。	第 5 點建議應進行衝擊評估，以考量各系統失效時之補救措施、監控監視、緊急應變、管理維修、設施巡查檢測作業程序等。  總體交通似會涉及場區之海運與陸運系統，應屬運輸計畫審查範圍，建議修改「總體」為「處置場所屬」，以限定其交通系統僅包含處置場所管轄範圍(可包含專用接收港至處置場專用道路)
6. <u>各輔助設施或系統失效時之補救措施是否適切。</u>		呼應 4.6 之要求內容。
4.7 公用設施或系統之設計：說明通訊、電力、供水、供氣、照明、 <u>一般事業廢棄物處理、通風</u> 等系統之設計，並說明各系統失效時之補救措施。  公用設施或系統涵蓋通訊、電力、供水、供氣、照明、 <u>一般事業廢棄物處理、通風</u> 、與消防等系統。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。	4.7 公用設施或系統之設計：說明通訊、電力、供水、供氣、照明、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。  公用設施或系統涵蓋通訊、電力、供水、供氣、照明、廢棄物處理、通風、與消防等系統。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。	廢棄物處理前增列一般事業用詞與內文呼應
(一)提供資料 1. 通訊系統之設計與安裝： <u>說明處置作業期間，各作業區與廠區(控制中心)</u>	(一)提供資料 1. 通訊系統之設計與安裝	依審查作業之審查意見增列對於提供資料之要求。

修正條文	現行條文	說明
<u>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。</u>		
2. <u>電力系統之設計與安裝：說明可提供處置場安全運轉所需之電力需求與電力系統與設備。</u>	2. 電力系統之設計與安裝	依審查作業之審查意見增列對於提供資料之要求。
3. <u>供水系統之設計與建造：說明於處置場建造、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。</u>	3. 供水系統之設計與建造	依審查作業之審查意見增列對於提供資料之要求。
4. <u>供氣系統之設計與安裝：說明於處置場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。</u>	4. 供氣系統之設計與安裝	依審查作業之審查意見增列對於提供資料之要求。
5. <u>照明系統之設計與安裝：說明處置場建造、運轉之照明設計與緊急照明設計。</u>	5. 照明系統之設計與安裝	依審查作業之審查意見增列對於提供資料之要求。
6. <u>一般廢棄物處理之設計與建造：說明依國家環保法規規範設計之一般事業廢棄處理設計。</u>	6. 一般廢棄物處理之設計與建造	依審查作業之審查意見增列對於提供資料之要求。
7. <u>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</u>	7. 通風系統之設計與安裝	依審查作業之審查意見增列對於提供資料之要求。

修正條文	現行條文	說明
<u>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。</u>		
8.消防系統之設計與安裝： <u>(1)說明消防邏輯系統與應變計畫之消防規劃邏輯、消防程序緊急應變計畫標準作業程序、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大眾免於輻射與火警災害。</u> <u>(2)說明預防輻射與火災防護計畫。</u> <u>(3)說明工作人員之火災防護演訓計畫。</u>	8.消防系統之設計與安裝	依審查作業之審查意見增列對於提供資料之要求。
(二)審查作業 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，列舉出各公用系統之審查要項。	(二)審查作業 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，列舉出各公用系統之審查要項。	一、審查作業修訂方向建議：應細分各子系統所要求之準據。
1.通訊系統之設計與安裝： <u>(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廠區的人員？</u>	1.通訊系統之設計與安裝： <u>(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廠區的人員？</u>	第1點第(1)項目前常見視訊對講機，應加以考慮。
<u>(2)是否可與廠區外官方單位維持可靠的聯繫，特別是在緊急應變的時期？</u>	<u>(2)是否可與廠區外官方單位維持可靠的聯繫，特別是在緊急應變的時期？</u>	第1點第(2)項建議明列網路、衛星電話、無線電、市內電話、民營大哥大等聯繫方法。

修正條文	現行條文	說明
(3)是否會與設施的設計或運作相抵觸？	(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：是否可對處置場安全運轉，提供充足的電力？	2.電力系統之設計與安裝：是否可對處置場安全運轉，提供充足的電力？	第2點建議明列市電採雙迴路以上安定電源、發電機、UPS、ATS。
3.供水系統之設計與建造： (1)對處置場建造、運轉及消防，是否皆可提供足夠的水量？	3.供水系統之設計與建造： (1)對處置場建造、運轉及消防，是否皆可提供足夠的水量？	第3點第(1)項另可考慮增列以下項目： 場區空間可燃物之火載量規模？消防隊位置？其汲水取水位置為何？消防隊灌救時間？俾據以提供消防蓄水量計算書？ 應屬第十章第三條規定範圍，故未增列。
(2)是否可提供工作人員足夠的飲用水？	(2)是否可提供工作人員足夠的飲用水？	第3點第(2)項估算工作人員人數、應隔離之時間？
(3)是否可提供工作人員除污用的溫水？	(3)是否可提供工作人員除污用的溫水？	第3點第(3)項估算工作人員人數、除污之耗費時間？
4.供氣系統之設計與安裝： (1)對處置場建造與運轉，是否可提供足夠且適當氣體，以利作業之進行？	4.供氣系統之設計與安裝： (1)對處置場建造與運轉，是否可提供足夠且適當氣體，以利作業之進行？	第4點第(1)項會有那些作業、提供需用之氣體與量體設計計算書。 增列於提供資料要求。
(2)是否可提供場區必須的燃料氣體？	(2)是否可提供場區必須的燃料氣體？	第4點第(2)項會有那些作業？如銲接作業等、提供需用之氣體種類與量體設計計算書。 增列於提供資料要求。
5.照明系統之設計與安裝： (1)對處置場建造與運轉，是否可提供充足的照明。	5.照明系統之設計與安裝： (1)對處置場建造與運轉，是否可提供充足的照明。	第5點第(1)項“建造與運轉”建議改為“施工階段、營運階段、維修階段、重要設備汰舊換新階段之全工程生命週期”。

修正條文	現行條文	說明
		第五章與第六章分採建造與運轉作為階段工作之描述，故建議不修改。
(2)對於可預期的意外狀況，是否可提供緊急照明。	(2)對於可預期的意外狀況，是否可提供緊急照明。	第5點第(2)項建議明列市電採雙迴路以上安定電源、發電機、UPS、ATS。
6.一般 <b>事業</b> 廢棄物處理之設計與建造： (1)是否符合國家環保法規	6.一般廢棄物處理之設計與建造： (1)是否符合國家環保法規？	第6點第(1)項低放廢棄物之處置理應涵蓋與檢視是否應考慮特殊不成文之習慣或常規。
(2)是否會與設施的設計或運轉相抵觸。	(2)是否會與設施的設計或運轉相抵觸	應考慮先進國家之要求。第6點第(2)項運轉流程為何？應進行訪談並一一確認設計需求。
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？	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？	第7點第(1)項建議提供通風區間正壓/負壓，俾作有效隔離。 增列於提供資料要求。
(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？ <b>設備之點檢與維修規劃是否合宜。</b>	(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？	第7點第(2)項過濾器如何維修或定期更換？偵測器如何之點檢與維修？ 增列於提供資料要求。
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大眾免於輻射與火警災害？	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大眾免於輻射與火警災害？	第8點第(1)項應考慮消防程序緊急應變計畫 SOP、消防邏輯係採主動式消防或被動式消防？是否設置避難室？疏散逃生？設置偵測預警設施？ 增列於提供資料要求。
(2)是否備有預防輻射與火災災害的計劃？	(2)是否備有預防輻射與火災災害的計劃？	第8點第(2)項是否具定期之災害防護演訓計畫？

修正條文	現行條文	說明
		增列於提供資料要求。
(3)是否備有工作人員如何應變與預防火災發生的訓練計劃？	(3)是否備有工作人員如何應變與預防火災發生的訓練計劃？	第8點第(3)項(同(2)另相關人員均須定期參與演訓，尚可細分預警與不預警。) 增列於提供資料要求。
<b>4.8 設計成果：應附適當比例尺之詳細圖說，設計細部資料得列報告附冊備查。</b>  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。	<b>4.8 設計成果：應附適當比例尺之詳細圖說，設計細部資料得列報告附冊備查。</b>  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。	
(一)提供資料 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。	(一)提供資料 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。	
(二)審查作業 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？	(二)審查作業 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？	

## 第七章 結論與建議

工程障壁系統確保安全之功能，受到源項核種種類與活度、場址地下水流場特性與工程障壁設計等三大因素之交互影響，為瞭解三者間關聯性，本研究嘗試設計不同源項與環境參數組合之案例，利用 GoldSim 進行有效劑量模擬，協助掌握工程障壁安全功能之設計考量，並適時精進審查導則，以協助建立管制單位對於處置場設施設計獨立審查及分析之能力。本計畫研究重要成果與具體貢獻之建議總結如下：

- 一、由前述分析發現可知，在不考慮材料劣化的影響下，A 類廢棄物的混凝土障壁設計在水力傳導係數 $<1\times 10^{-10}$  m/s、擴散係數介於 $1\times 10^{-12}\sim 1\times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s 之間，且設計厚度約 1m 內，可抑制核種傳輸。B/C 類廢棄物若混凝土設計與施工得宜，可將水力傳導係數控制於 $1\times 10^{-12}\sim 1\times 10^{-10}$  m/s 之間且有效擴散係數控制於 $1\times 10^{-12}\sim 1\times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s 之間，在不考慮材料劣化的影響下亦能達到抑制核種的目的。但若施工不當或發生劣化而使水力傳導係數提升至 $1\times 10^{-8}$  m/s 則必須加設膨潤土障壁系統方可有效抑制核種傳輸。此外，在測試例所設計之流場環境與混凝土設計下，加設之膨潤土障壁約介於 0.2~0.6m 之間。
- 二、根據分析結果，工程障壁系統組合與厚度設計明顯受到源項活度與地下水流場特性影響，若場址環境之水力梯度過高，將必須採用較厚之工程設計，或採多重障壁組合。因此，選擇水力梯度較平緩之場址環境，將可以有效降低工程設計要求，並提高其安全功能之可靠性。
- 三、A 類廢棄物由於其核種活度限值較低，在合適的場址環境下，採常用之混凝土設計，工程障壁可發揮其確保安全功能。B/C 類廢棄物因源項活度較高，測試案例中較佳之混凝土參數設



計亦可直接達成其安全要求，但代表較差工程設計之案例均無法在合理的厚度設計下達成安全要求。因此，建議可採用混凝土搭配膨潤土之障壁組合較為確保安全，可做為安全審查研判參考。

四、基於源項、場址流場特性與工程設計間之關聯性分析成果，於進行安全審查作業時，可依下列關聯特性研判其工程設計之合理性。

(一)廢棄物分區處置之工程障壁系統型式，需因應其源項特性而有所不同。

(二)B/C類廢棄物處置區之工程障壁系統宜採多重障壁系統設計，且需注意其安全分析之設施劣化分析合理性，以提升確保安全之信心。

五、近場核種傳輸與工程設計參數之擴散係數關聯性最高，可發展確保低擴散係數之工程材料配比、施工、品管與檢驗方法，藉以提高確保安全之信心。

## 參考文獻

- [1] 游離輻射防護與偵檢(2005)，許彬杰，翁寶山。
- [2] SKB, 2001, Project SAFE. Radionuclide release and dose from the SFR repository , R-01-18.
- [3] 獨立行政法人日本原子力研究開發機構(2012)，セメント材料影響評価技術高度化開発報告書。
- [4] 黃兆龍(2008)，放射性廢棄物設施混凝土結構長期安全規範之研究。
- [5] 財団法人電力中央研究所(2004)，ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響。
- [6] 土木学会(2009)，余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方。
- [7] 台電公司(2014)，低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調査評估技術。
- [8] 土木学会(2008)，余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方。
- [9] 土木学会第 62 回年次學術講演会(2007)，拡散抑制を期待されるセメント系材料の品質管理方法に関する研究。
- [10] 鄒蕙如(2005)，最終處置場黏土障壁材料之傳輸行為研究。

## 放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估安全審查技術 建置期末報告(初稿)審查意見與答復說明

項次	審查意見	委辦單位答復說明
子計畫二：低放射性廢棄物處置設施設計審查規範精進之研究項		
1	有關低放處置審查導則，除 P.1 第 5 行，100 年度完成之版本維持原名稱外，其餘請全數更正為「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)」。P.96 第 2 行，「審查導則草案」請修正為「審查導則(第 0 版)」。	已依委員意見修正。
2	P.19 倒數第 3 至 4 行，請清楚註明 BTF 處置坑道之尺寸，係指每條處置坑道之尺寸或兩條處置坑道共計之尺寸。	此處之 BTF 坑道尺寸係指每條坑道之尺寸，已於報告中修正相關文字說明。
3	請確認全報告中「混凝土漿」一詞是否正確，如有誤請更正。	經確認參考文獻之原文為 concrete grout，故將報告中的「混凝土漿」一詞修正為「混凝土灌漿」。
4	現行建築技術規則共分總則編(第 1~7 條)、建築構造編(第 1~540 條)、建築設備編(第 1~144 條)、建築設計施工編(第 1~323 條)，並無 P.31 所提之第 2612 條，請確認後更正。	感謝委員指正，已修正為建築技術規則建築設計施工編第 262 條。
5	本報告中「吸附係數」、「吸附分配係數」、「分布係數」名詞請一致化。	感謝委員指正，已統一修正為「吸附分配係數」。
6	全報告中之 order，請統稱為「數量級」。	感謝委員指正，已統一修正為「數量級」。
7	P.80 圖 5.1-1，請確認 B、C 類廢棄物初始濃度，是否為法規規定之 C 類廢棄物核種限值推估？如無誤請於圖中敘明。	B、C 類廢棄物初始濃度係採用法規規定之 C 類廢棄物核種限值進行推估，已修正圖 5.1-1 中的相關說明。
8	請再次校稿訂正本報告之錯別字。	感謝委員指正，已依委員意見修正。