



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

子計畫三：低放射性廢棄物處置設施

安全評估審查規範精進之研究

期末報告

計畫編號：104FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：李明旭、陳瑞昇

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 104 年 12 月



## 摘要

安全分析模式在處置功能安全評估工作中扮演相當重要之地位，除了提供安全評估情節之量化模擬工作外，其模擬結果亦是後續處置工作精進之重要參考依據。子計畫三透過研析國際上低放坑道處置在近場功能評估所可能涉及之關鍵議題，研擬坑道處置近場安全分析要項，將可以提供銜接子計畫一場址特徵與子計畫二處置設施審查規範之工程障壁劣化探討。並以國內未來低放廢棄物處置所可能涉及近岸環境或離島環境之場址特徵，針對近岸環境探討海岸地區與近岸海域外釋所需考量之遠場安全分析要項；針對離島環境探討海床下處置對陸域與海域所需考量之遠場安全分析要項，將可以提供銜接子計畫四輻射劑量風險評估。此外由於氣候演化將改變近岸與離島環境的水文條件，進而影響遠場流場與核種傳輸，當近岸環境的地形梯度較大時，海平面變遷的影響相對較不顯著；而在離島環境的島嶼地形較平坦時，海平面變遷的影響則相對顯著。進一步以近岸環境坑道處置進行近場遠場整合安全分析架構研擬與評估，包含數值解與解析解的可能組合應用架構，並以遠場數值解評估海水面變動對流場與傳輸之可能影響；解析解部分發展近場圓柱座標解析解以較符合源項外釋特徵，再整合遠場解析解應用，以全解析解案例說明近場與遠場整合安全分析架構。所研提的近場遠場整合安全分析架構，未來將可以提供銜接子計畫四之輻射劑量風險評估以達全系統安全分析工作。最後將整合安全分析經驗回饋修訂「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則」，協助管制單位建立處置安全評估之獨立審查及分析能力。

## **Abstract**

Safety analysis models play the essential role on safety assessments (SA) of waste disposal sites because they not only provide quantitative simulations of FEPs but also support technical progresses of disposal works. Task 3 first studies main issues involved in the near-field SA of tunnel disposal applied in international cases and proposes key factors required in the near-field SA of tunnel disposal sites. This is expected to link with studies of Task 1 on site characterizations and Task 2 on engineering barrier degradations. On the part of far-field SA, we focus on main issues involved in potential nearshore site and offshore island site. On the nearshore site, possible radionuclide release into the coastal area and nearshore ocean should be considered by far-field SA. On the off-shore island site, potential radionuclide release into terrestrial and ocean should be considered by far-field SA due to location of site is under sea bed. These are expected to link with studies of Task 4 on dose risks. Climate change and evaluation will alter hydrological environments of both nearshore and offshore island sites and affect the flow fields and radionuclide migration. For the case of nearshore site with high surface elevation gradient, effect of sea level variations on radionuclide migration is insignificant. For the case of offshore island site with flat terrain, effect of sea level variations on radionuclide migration is significant. Options of integrating near-field and far-field SAs for tunnel disposal were proposed with discussions of advantages and disadvantages of different approaches. We perform a series of far-field numerical SAs for a hypothetical nearshore site with considerations of sea level variations. An analytical solution of near-field radionuclide release with cylindrical coordinates was developed which is more realistic to the source term characteristics. A hypothetical nearshore site was further investigated by total analytical approaches for both near-field and far-field SAs. Proposed options of integrating near-field and far-field SAs for tunnel disposal cases can be further applied for supporting dose risk analysis by Task 4 to achieve comprehensive and systematic SA. Technical achievements and suggestions of SAs developed in this were employed to modify the Review Guidelines on Safety Assessment of Low-Level Waste Disposal Repository. Our findings and technical progresses can be used to support the administration on building the capabilities of independent review and analysis of SAs.

## 目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
圖目錄.....	v
表目錄.....	viii
第一章、前言.....	1
第二章、低放射性廢棄物坑道處置之近場功能評估關鍵議題研析.....	3
2.1 SKB SFR 坑道處置概念.....	3
2.1.1 安全原則(Safety Principles).....	3
2.1.2 安全功能(Safety Functions).....	4
2.1.3 安全功能指標(Safety Function Indicators).....	4
2.1.4 近場安全評估.....	6
2.1.5 近場工程障壁關鍵議題.....	7
2.1.6 工程障壁演化.....	8
2.2 NUMO 坑道處置概念.....	9
2.3 坑道處置安全分析關鍵議題.....	14
第三章、近岸環境低放射性廢棄物坑道處置遠場安全分析要項研析.....	15
3.1 地質圈作用關鍵議題.....	15
3.2 近岸環境遠場安全分析關鍵議題.....	16
3.3 生物圈核種傳輸.....	18
3.4 模式銜接.....	20
第四章、離島環境低放射性廢棄物坑道處置遠場安全分析要項研析.....	22
4.1 離島環境遠場水力過程.....	22
4.2 離島環境遠場安全分析關鍵議題.....	25
第五章、低放射性廢棄物坑道處置近場與遠場整合安全分析研擬.....	27
5.1 多核種衰變鍊解析解數學模式.....	27
5.2 HYDROGEOCHEM4.5s 模式介紹.....	29
5.3 一維案例解析解與數值解之交互驗證比較.....	30

5.4 近岸坑道處置數值解整合安全分析架構應用案例.....	35
5.5 全解析解之近場遠場整合安全分析應用.....	44
5.5.1 本計畫模式與 Numo 模式之比較.....	52
5.5.2 結合近場與遠場的傳輸模式之計算.....	55
第六章、低放審查導則安全分析有關章節與條文內容修訂建議.....	57
第七章、結論與建議.....	58
參考文獻.....	60
附件一.....	63
附件二.....	103

## 圖目錄

圖 2-1 SFR 處置場示意圖(灰色為現存 SFR1，藍色為新增 SFR3).....	3
圖 2-2 SR-PSU 的安全評估資料與模式架構.....	6
圖 2-3 近場 3 維水文模擬處置坑道布置示意圖 .....	7
圖 2-4 水文模擬處置窖區塊分區(左)與廢棄物包件控制體積(右)示意圖 .....	7
圖 2-5 SR-PSU 之 1BMA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖.....	7
圖 2-6 水泥障壁層隨時間演化改變之礦物組成、孔隙率與 pH .....	9
圖 2-7 水穿透水泥障壁層形成裂隙核種傳輸示意圖 .....	9
圖 2-8 日本低放射性廢棄物處置核種傳輸路徑示意圖 .....	10
圖 2-9 日本低放射性廢棄物處置核種傳輸模型示意圖 .....	10
圖 2-10 近場安全分析解析示意圖 .....	12
圖 2-11 工程障壁的核種釋出率與開挖擾動區地下水流量關係 .....	14
圖 3-1 近岸環境處置遠場概念示意圖 .....	16
圖 3-2 海平面上升演化之地質環境模型圖 (NUMO TR-10-03).....	17
圖 3-3 近岸環境處置因海平面上升之遠場概念示意圖 .....	17
圖 3-4 水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖 .....	18
圖 3-5 農業生態系核種傳輸區塊示意圖 .....	19
圖 3-6 SR-PSU 模式銜接概念架構示意圖.....	21
圖 4-1 SR-PSU 氣候演化之海岸線高度相對變化(橫軸單位 ka 為 1000 年).....	22
圖 4-2 SR-PSU 氣候演化之海岸線高度相對變化與永凍層深度變化.....	23
圖 4-3 SR-PSU 區域地下水模擬與邊界條件設定.....	23
圖 4-4 離島環境海床下處置遠場概念示意圖 .....	25
圖 4-5 氣候演化海平面下降之離島環境海床下處置遠場概念示意圖 .....	26
圖 5-1 一維傳輸概念模型 .....	31
圖 5-2 $^{238}\text{Pu}$ 位置濃度曲線圖 .....	32

圖 5-3	$^{234}U$ 位置濃度曲線圖 .....	32
圖 5-4	$^{230}Th$ 位置濃度曲線圖 .....	33
圖 5-5	$^{226}Ra$ 位置濃度曲線圖 .....	33
圖 5-6	SP1-SP5 位置濃度曲線圖 .....	34
圖 5-7	SP6-SP10 位置濃度曲線圖 .....	34
圖 5-8	近場遠場整合安全分析架構 .....	35
圖 5-9	近岸環境處置設施平面位置示意圖 .....	36
圖 5-10	遠場地下水與傳輸模擬網格與邊界條件 .....	37
圖 5-11	案例 1-壓力水頭分布圖 .....	37
圖 5-12	案例 1-等水壓力面圖 .....	38
圖 5-13	案例 1-流場與總水頭圖 .....	38
圖 5-14	案例 1-核種相對濃度分布圖 .....	38
圖 5-15	案例 2-核種相對濃度分布圖 .....	39
圖 5-16	案例 3-網格與邊界條件設定 .....	39
圖 5-17	案例 3-壓力水頭分布圖 .....	40
圖 5-18	案例 3-等水壓力面圖 .....	40
圖 5-19	案例 3-流場與總水頭圖 .....	40
圖 5-20	案例 3-核種相對濃度分布圖 .....	41
圖 5-21	案例 4-網格與邊界條件設定 .....	41
圖 5-22	案例 4-壓力水頭分布圖 .....	42
圖 5-23	案例 4-等水壓力面圖 .....	42
圖 5-24	案例 4-流場與總水頭圖 .....	42
圖 5-25	案例 4-核種相對濃度分布圖 .....	43
圖 5-26	案例 1、3、4 地下水位面比較圖 .....	43
圖 5-27	核廢料處置之多重屏障 .....	44



圖 5-28 在直角座標(紅色)與圓柱座標(藍色)中核種遷移之比較.....	45
圖 5-29 核種在處置區中之遷移方向 .....	45
圖 5-30 不同物種比較圖 .....	54
圖 5-31 核廢料罐受到侵蝕後，廢料隨著地下水流出 .....	55
圖 5-32 核廢料通過緩衝區進入遠場之示意圖 .....	56
圖 5-33 $^{226}\text{Ra}$ 之距離濃度曲線圖，於 $y=300\text{m}$ , $z=300\text{m}$ 剖面.....	56

## 表目錄

表 2-1 長期安全評估與處置設施各元件安全功能之潛在議題.....	4
表 2-2 SR-PSU 之安全功能與安全指標.....	5
表 2-3 選址工作相關之安全功能與安全指標.....	6
表 2-4 近場安全評估與工程障壁相關之關鍵議題.....	8
表 2-5 NUMO 近場與遠場核種傳輸解析概念模型之內容.....	11
表 3-1 SR-PSU 地質圈作用變數與定義.....	15
表 3-2 生物圈核種傳輸區塊名稱與說明.....	20
表 4-1 SR-PSU 地下水模擬所考慮的地質圈作用變數處理方式.....	24
表 5-1 真實核種參數驗證 (Higashi, 1980).....	31
表 5-2 長衰變 10 物種鏈所使用驗證參數 (Chen, et al., 2012).....	31
表 5-3 緩衝區內之參數.....	53

## 第一章、前言

國內低放射性廢料處置工作之進展經濟部已於99年9月10日公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」等2處為低放射性廢棄物最終處置設施潛在場址，並於101年7月3日核定公告為建議候選場址。從場址特性而言，「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2處為建議候選場址分屬近岸坑道處置與海床下坑道處置，因此從安全評估角度而言，在近場安全評估要項則與坑道處置所涉及之近場安全分析有關，而遠場部分則與處置場址所在水文地質環境有關，以「台東縣達仁鄉」建議候選場址為例，則與海岸地區與近岸海域之遠場安全分析有關，而「金門縣烏坵鄉」建議候選場址則與海床下之海洋外釋遠場安全分析有關。因此子計畫三本年度工作重點將針對坑道處置之近場安全分析關鍵議題研析、近岸環境遠場安全分析、離島環境遠場安全分析、整合近場遠場坑道處置安全分析為研究主題。此外在低放射性廢棄物最終處置管制技術規範的研訂方面，物管局於101年度初步完成「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)」。目的在依安全管制需求，逐步建立低放射性廢棄物最終處置相關之管制技術規範及審查技術，使設施設計、安全評估及施工營運能確保安全(物管局，2012)。為提升管制技術及持續精進管制規範，子項計畫三擬就低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，透過釐清坑道處置近場與遠場安全分析關鍵議題與連結架構，以提升該項關鍵管制技術之技能與回饋審查規範的精進。

國內多年來在物管局科研經費支持下，針對低放射性廢棄物最終處置設施相關之隧道處置水文地質概念模式審查技術(董家鈞、陳瑞昇，2005)、隧道處置水文地質模擬技術發展現況與國內隧道工程水文地質模擬案例(董家鈞、陳瑞昇，2006)、低放射性廢棄物最終處置設施安全審查規範(李境和，2007)、坑道式最終處置設施安全評估審查要項研究(李境和，2010)、安全評估模式審查規範(任春平，2008)、低放射性廢棄物坑道處置技術審查要項(吳禮浩，2009)、坑道處置安全評估關鍵議題(張福麟，2011)、安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術(李明旭、董家鈞，2012)、低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究(李明旭、蔡世欽，2013；2014)等議題，雖已投入諸多人力與資源，但由於處置技術之發展除所涉及面向相當廣泛，涵蓋地球科學、水文、地質、工程等，所需之科研人力與資源相對於國外技術已純熟先進國家而言，國內之研發能量相對不足。

從國際上在處置設施安全評估之技術發展而言，國際原子能總署(IAEA)之相關技術報告中，針對近地表核廢料處置場安全評估方法即有相關技術報告(IAEA, 2004)，其附錄中即評比相關模式軟體、案例與所需輸入資料等。對於地表核廢料污染場址整治所需相關技術亦有論文集出版(IAEA, 2009)。最新發展為針對處置設施重新定義安全事例與安全評估規範(IAEA, 2012)。此外近年來由於模式發展突飛猛進，IAEA邀請國際知名學者針對安全分析模式研析相關技術報告(IAEA, 2013)，針對國際上現有應用於放射性污染場址相關之安全分析模式進行模式評比與檢視。而美國核能管制委員會(NRC)對低階核廢料處置場址之安全評估方法

建立相關技術導則(NRC, 2000)，針對情節、概念模式發展技巧、核種外釋機制以及相對應的數學評估模式進行探討。瑞典 SKB 在處置長期安全評估工作也有許多完整技術報告，如與 SR-PSU site 有關之一系列報告，因此本分項工作亦參考 SKB TR-14-01 (Safety analysis for SFR Long-term safety: Main report for the safety assessment SR-PSU, 2014)、TR-14-04 ( Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, 2014)、TR-14-05 (Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, 2014)等技術報告。而亞洲鄰近國家日本之「地層処分低レベル放射性廢棄物に関わる処分の技術と安全性」，TR-10-03 為日本原子力發電環境整備機構(2011)針對低放坑道處置近場安全分析之重要技術報告，針對所採用之方法、策略與參數設定可提供分析低放坑道處置所可能涉及關鍵議題。因此在近場與遠場安全分析相關議題將參考瑞典 SKB 與日本 NUMO 的低放安全評估技術報告，彙整與研析符合國內潛在處置場址之安全分析關鍵。

放射性廢棄物最終處置設施安全評估工作在處置作業中扮演相當重要之地位，為確保國內處置安全評估工作之效益，俾益未來整體處置安全評估工作，能通過國際同儕審查與符合國際水平，國內在此方面之技術上，需與國際接軌。因此本計畫近程目標，在於彙整國外放射性廢棄物處置設施安全評估審查技術，研析國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與精進對策。而在長程目標可協助管制單位對於處置安全評估建立獨立審查及分析之能力。

## 第二章、低放射性廢棄物坑道處置之近場功能評估關鍵議題研析

本章主要綜整 SKB TR-14-01 (Safety analysis for SFR Long-term safety: Main report for the safety assessment SR-PSU, 2014) 技術報告，以及以日本原子力發電環境整備機構(NUMO)「地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性」，TR-10-03，(2011) 技術報告中針對低放坑道處置近場安全分析所可能涉及關鍵議題進行研析。

### 2.1 SKB SFR 坑道處置概念

SFR 處置場自 1988 年開始運轉用以存放短半化期之低階與中階核廢料，為中低放處置場，安全分析時間尺度要求為 100,000 年，SFR 為海床下處置，位於波羅地海海床下，海床母岩為花崗岩，如圖 2-1 所示，SFR1 為現有設施，位於海床下約 60 公尺，SFR3 為新增設施，位於海床下約 120 公尺，TR-14-01 技術報告為因應新增之 SFR3 處置設施，SFR3 將存放核電廠除役廢棄物與處置設施運轉廢棄物，也將存放 9 個沸水式反應爐之壓力容器(pressure vessels)。

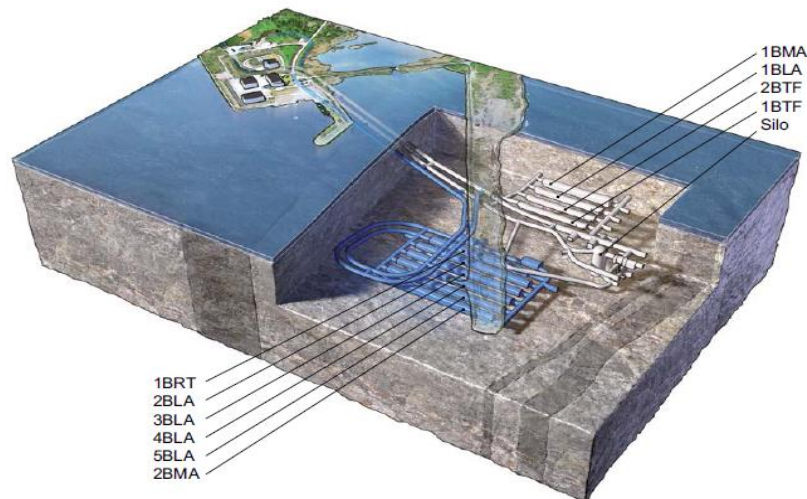


圖 2-1 SFR 處置場示意圖(灰色為現存 SFR1，藍色為新增 SFR3)

關於此報告中安全分析之時間尺度摘述如下，瑞典對安全評估時間尺度之管制規定為，除了用過核子燃料與長半化期核種外，處置設施之安全評估應至最大風險與環境衝擊出現，但不超過封閉後之 100,000 年，且封閉後之 1000 年內應有較詳細之評估。因此在 TR-14-01 報告中安全分析之時間尺度採用 100,000 年。

#### 2.1.1 安全原則(Safety Principles)

該報告所指之安全原則為處置場址封閉後應有之安全原則有二點；

1. 限制長半化期核種的活度 (limitation of the activity of long-lived radionuclides)：僅接受特定種類廢棄物以達成，且工程障壁的設計將影響各處置窖可接受之總活度。

2. 遲滯核種(retention of radionuclides)：藉由工程障壁功能與處置場址環境以達成，處置窖內之廢棄物特性、處置桶材質與工程障壁特性整合提供抑低之水流與合適之化學環境以支撐安全，母岩則提供穩定之化學與物理狀態以及有利的低地下水流條件。

### 2.1.2 安全功能(Safety Functions)

處置設施安全功能的界定為安全評估方法的重要論述，安全功能用以描述處置設施內各元件的長期功能也是協助情節設定的重要依據，也進一步設定安全功能指標，對應於前小節二個安全原則之安全功能摘述如下。

1. 對應於限制長半化期核種的活度之安全功能為限制活度量(limited quantity of activity)。
2. 對應於遲滯核種之安全功能為處置窖內低流量(low flow in waste vaults)、母岩內低流量(low flow in bedrock)、好的遲滯(good retention)、避免處置場周邊有水井(avoid wells in the direct vicinity of the repository)。

### 2.1.3 安全功能指標(Safety Function Indicators)

安全功能確認後便可進一步設定安全功能指標，長期安全評估所需考慮之處置設施主要元件的潛在議題如表 2-1 所示。

表 2-1 長期安全評估與處置設施各元件安全功能之潛在議題

元件	議題
廢棄物形式(Waste form)	活度 限制移流傳輸 力學穩定性 吸附 有利的化學條件
廢棄物包件(Waste packaging)	限制移流傳輸 力學穩定性 吸附 有利的化學條件
灌漿廢棄物包件 (Grouting surrounding waste packages)	限制移流傳輸 力學穩定性 吸附 有利的化學條件
混凝土結構(Concrete structures)	限制移流傳輸 力學穩定性 吸附 有利的化學條件

灌漿(Shotcrete)	力學穩定性 (運轉階段) 吸附 有利的化學條件
膨潤土與砂(Bentonite and sand/bentonite)	力學穩定性 限制移流傳輸 吸附
回填處置窖(Backfill in waste vaults (crushed rock/macadam))	力學穩定性 吸附
封閉元件與監測井(Plugs and other closure components (investigation boreholes))	處置設施的吸附功能下限制移流傳輸

進一步將安全功能與安全指標列表整理如表 2-2 所示。

表 2-2 SR-PSU 之安全功能與安全指標

安全功能	安全指標
1. 限制活度量	各處置窖之各核種活度
2.1 處置窖內低流量	水力反差 (hydraulic contrast) 水力傳導係數 氣體壓力
2.2 母岩內低流量	水力梯度 水力傳導係數
2.3 好的遲滯	pH 氧化潛能 (redox potential) 錯合劑濃度 (concentration of complexing agents) 可吸附面積 (available sorption surface area) 腐蝕速率(corrosion rate)
2.4 避免處置場周邊有水井	入侵井 處置場下游水井

此外安全功能與安全指標也可協助選址工作，與選址工作相關之安全功能與安全指標列表整理如表 2-3 所示。

表 2-3 選址工作相關之安全功能與安全指標

安全功能	安全指標
處置窖內低流量	低地震活動 低永凍土風險
母岩內低流量	低地震活動與低的區域變形 低水力梯度母岩 低水力傳導係數母岩
避免處置場周邊有水井	低鑿井風險 低採礦風險

### 2.1.4 近場安全評估

SR-PSU 的安全評估資料與模式架構如圖 2-2 所示，由水文地質概念模型提供遠場流場模擬，再提供遠場傳輸模擬所需與導引近場流場模擬，近場傳輸模擬後將提供遠場傳輸模擬，再銜接生物圈劑量模式最後得到劑量評估，從模式架構而言，最外圈是區域流場模擬，也就是遠場含整個處置場之流場模擬。所採用之模式為區塊模式(compartment model)。

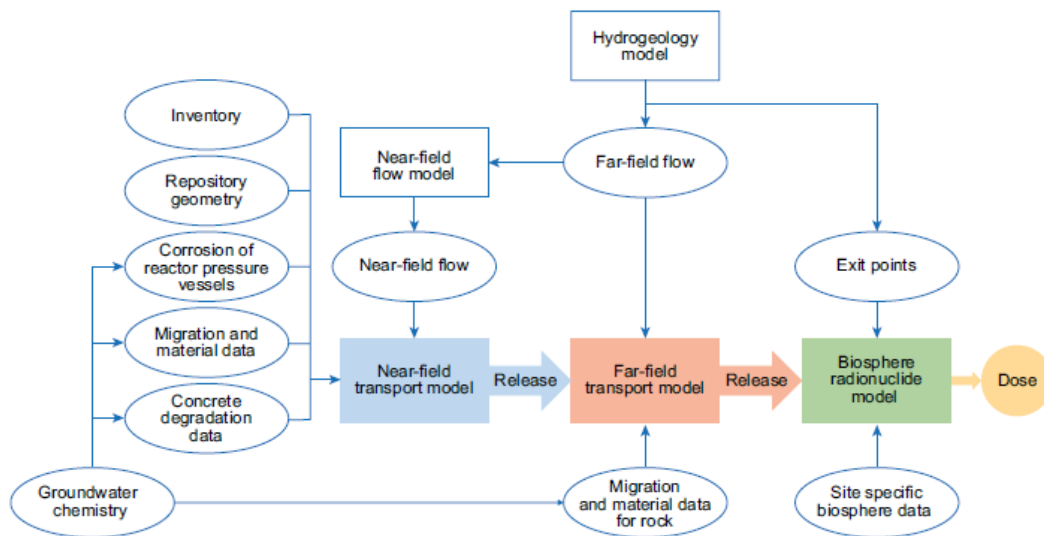


圖 2-2 SR-PSU 的安全評估資料與模式架構

在 SR-PSU 的安全分析中流場模擬與傳輸模擬是分別進行的，以近場安全分析為例，先進行近場水文模擬，採用 3 維模擬詳細描述處置設施空間分布，再提供近場傳輸模擬所需，如圖 2-3 所示(TR-14-01-Fig.8.3)。同樣採用區塊模式的概念進行模擬簡化，區塊模式為計算各控制體積區塊之質量平衡，而區塊交界面之通量為以不同參數化方式進行估算，且假設控制體積內為均勻流場，因此廢棄物包件會統整成一個區塊控制體積，如圖 2-4 所示(TR-14-01-Fig.8.4)，左圖為 1BMA 處置窖之區塊模擬分區，右圖為 1BMA 內某一控制體積剖面示意圖。



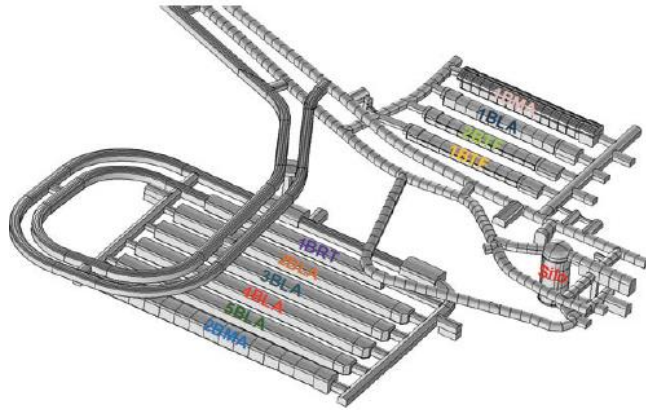


圖 2-3 近場 3 維水文模擬處置坑道布置示意圖

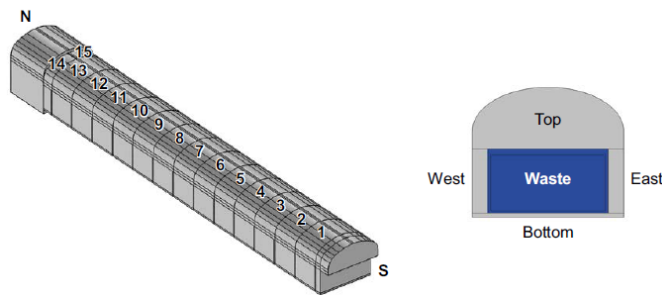


圖 2-4 水文模擬處置窖區塊分區(左)與廢棄物包件控制體積(右)示意圖

對應於 1BMA 處置窖之近場傳輸區塊模擬示意圖如圖 2-5 所示(TR-14-01-Fig.8.5)，處置窖內貯存中放廢棄物，工程障壁設計相較低放廢棄物處置窖較為嚴謹，最內圈不同顏色之方塊或圓圈分別代表不同形式之廢棄物包件，直線代表流場，曲線代表擴散機制。

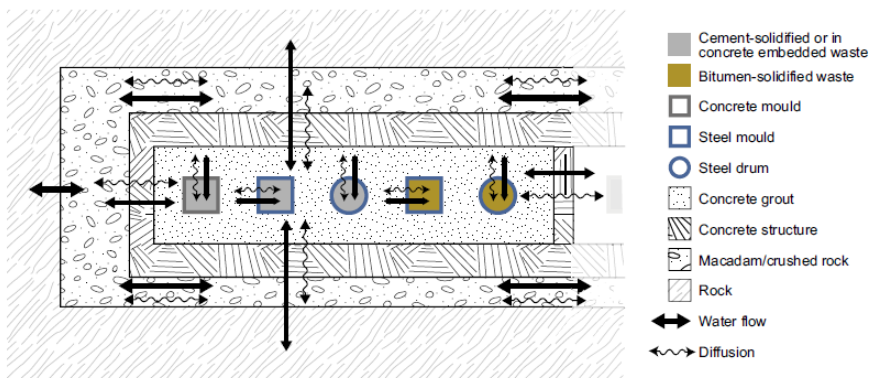


圖 2-5 SR-PSU 之 1BMA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖

### 2.1.5 近場工程障壁關鍵議題

近場工程障壁之安全功能可分為水力障壁功能與化學障壁功能。水力障壁功

能在有效抑低移流傳輸經過廢棄物；而化學障壁功能最主要在核種遲滯，此外也包含提供高 pH、還原環境、低錯合劑濃度、有利的吸附面積等有利於遲滯核種之化學環境。此外，雖然溫度來自外在環境變化，但冰期的低溫將可能衝擊混凝土與膨潤土之水力特性進而降低工程障壁功能，因此也是近場安全評估之關鍵議題。對於近場坑道處置安全評估關鍵議題，針對與工程障壁之安全功能相關部分可以整理如表 2-4 所示(SKB TR-14-04, 2014)。

表 2-4 近場安全評估與工程障壁相關之關鍵議題

關鍵議題	內容
幾何形貌	障壁之體積、尺寸 障壁之孔隙率與孔隙特徵
溫度	氣候演化之溫度變化
水文	流場方向、大小、分布 飽和度 壓力水頭 型態(冰或水)
力學	障壁之應力與應變
組成成分	障壁組成成分、數量與表面特徵 化學物種種類與總濃度 微生物可利用之有機化學物種與總量 微生物與細菌種類與數量
水成分	水的組成、核種所含的水組成 氧化還原、pH、離子強度、溶解物種濃度、膠體與顆粒、溶解氣體 密度與黏滯性 水中之微生物、細菌與生物量之種類與數量
氣體	氣體的組成、核種所含的氣體組成 體積、壓力與飽和度 氣體流動之大小、方向與分布

## 2.1.6 工程障壁演化

### 膨潤土演化

所考慮的工程障壁演化如膨潤土障壁層在接觸到水與高pH會逐漸演化，如約10,000年後膨潤土中的主要成分蒙脫石(montmorillonite)約有1/3的量會溶解(dissolved)、100,000年後大部分蒙脫石都將溶解，而矽酸鈣礦物(calcium silicate minerals)、沸石(zeolites)及黏土會在這些過程演化產生，這些新生成的礦物和原先的膨潤土有不同的孔隙率與較弱的膨脹能力(section 6.4.8 in TR-14-01)。

## 水泥演化

化學狀態的改變會逐漸造成礦物之溶解/沉澱，如圖2-6所示pH下降所造成之礦物組成改變與孔隙率上升的演化過程。另外一種可能為由局部的溶解演化成水穿透水泥塊體之裂隙如圖2-7所示，裂隙內之傳輸機制以移流傳輸為主，廢料區為已知濃度，右側回填區濃度為零。

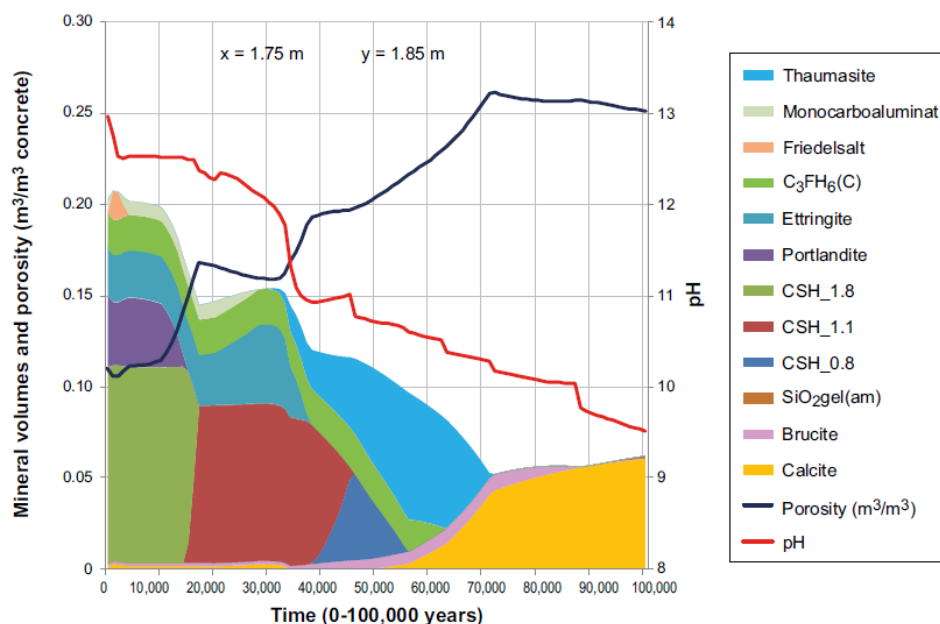


圖 2-6 水泥障壁層隨時間演化改變之礦物組成、孔隙率與 pH

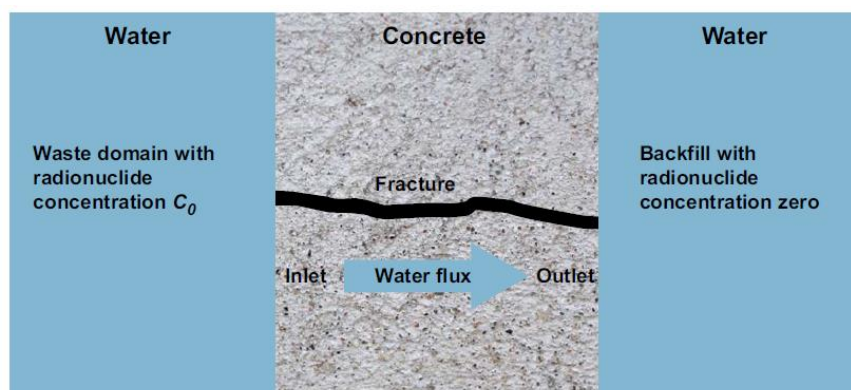


圖 2-7 水穿透水泥障壁層形成裂隙核種傳輸示意圖

## 2.2 NUMO 坑道處置概念

日本於 2007 年修訂「特定（高）放射性廢棄物最終處置法」，要求除了高放射性廢棄物須採用地質處置（深度 300~1000 公尺）外，NUMO TR-10-03 報告裡的 TRU 廢棄物（即國內法規所稱之超 C 類廢棄物，非經主管機關核准，不得於低放處置設施進行處置）也同樣需採地質處置的方式，而非日本低放處置場均

須設置於地表下 800 公尺以上，然因坑道處置為我國低放處置概念之一，日本 NUMO TR-10-03 報告所提之工程設計、概念模型及分析模式等，仍亟具參考價值。報告中的核種傳輸路徑概念如圖 2-8 所示，假設處置方式為內陸平原深地層處置，水文地質環境條件母岩為結晶岩，且處置場外釋的放射性核種會流入平原的河川。進一步建構核種傳輸模型如圖 2-9 所示，模型化的範圍近場包括廢棄物包件區(含填充材料)、工程障壁區、瞬間混合區與天然障壁區(包含母岩與透水性斷層)。

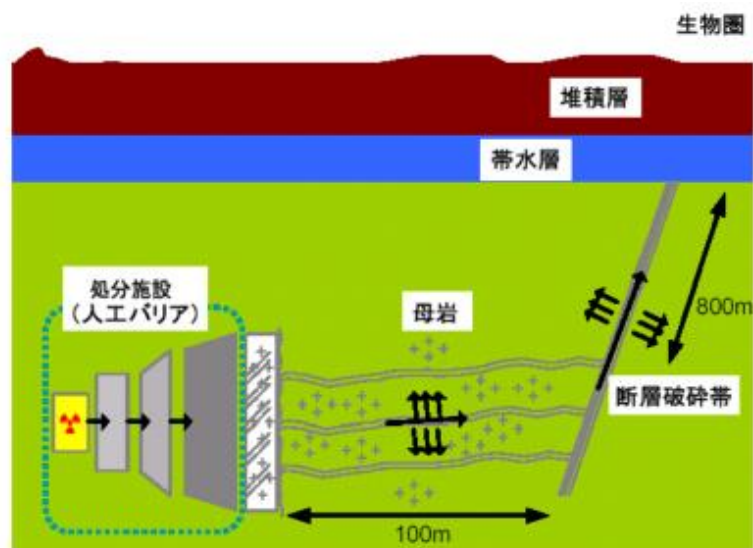


圖 2-8 日本低放射性廢棄物處置核種傳輸路徑示意圖

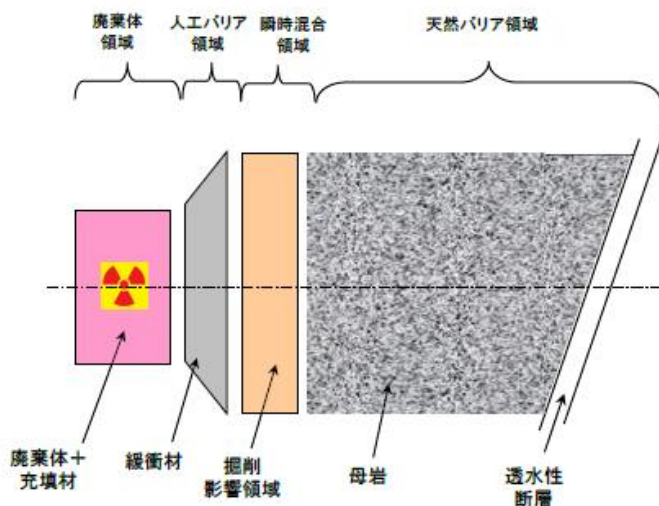


圖 2-9 日本低放射性廢棄物處置核種傳輸模型示意圖

NUMO 報告中核種傳輸主要採用一維直角座標解析解，近場包含廢棄物包件區(含填充材料)、工程障壁區、瞬間混合區，遠場(天然障壁)包含母岩與透水性斷層，採用之解析解模型所考慮作用與傳輸機制如表 2-5 所示(NUMO TR-10-03 Table 8.4.3-1)。

表 2-5 NUMO 近場與遠場核種傳輸解析概念模型之內容

近場			
分區	廢棄物包件區	工程障壁區	瞬間混合區
組成	廢棄物包件、填充材料	緩衝材料	開挖影響區
解析模型	一維直角座標、多孔隙介質		
作用	均勻核種濃度空間分布	核種傳輸	均勻核種濃度空間分布
機制	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射性衰變</li> <li>• 包件核種外釋</li> <li>• 擴散</li> <li>• 移流、延散</li> <li>• 平衡溶解沉澱</li> <li>• 平衡吸附</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射性衰變</li> <li>• 擴散</li> <li>• 移流、延散</li> <li>• 平衡吸附</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射性衰變</li> <li>• 擴散</li> <li>• 移流、延散</li> </ul>
遠場			
分區	母岩	透水性斷層	
模型	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 一維直角座標、多重平行平板裂隙疊加(參考案例)</li> <li>• 一維直角座標、單一平行平板裂隙(水理模型變更案例)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 一維直角座標、單一平行平板裂隙</li> </ul>	
作用	核種傳輸(不考慮裂隙及基質內核種濃度空間分布)		
機制	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射性衰變</li> <li>• 裂隙內的擴散</li> <li>• 裂隙內的移流、延散</li> <li>• 基質擴散</li> <li>• 基質內的平衡吸附</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 放射性衰變</li> <li>• 裂隙內的擴散</li> <li>• 裂隙內的移流、延散</li> <li>• 基質擴散</li> <li>• 基質內的平衡吸附</li> </ul>	

由表 2-5 的資料顯示 NUMO 的近場安全分析主要在工程障壁之緩衝材料是否可以提供足夠之核種圍阻與遲滯安全功能，而遠場安全分析主要為天然障壁母岩是否可以提供足夠之核種圍阻與遲滯安全功能。因此在 NUMO 報告中坑道處置安全評估的關鍵議題集中在工程障壁緩衝材料之安全功能相關，為了量化探討其安全功能，NUMO 採用的是一維直角座標之近似穩態解析解技術，分析各主要參數對從廢棄物包件外釋核種遷移的影響。針對天然障壁的核種遷移行為，利用裂隙介質的穩態解析解，考慮受延遲係數及地下水流速影響的核種遷移時間與核種半衰期，保守的探討地質環境對核種釋出率的抑制效果。

對低放射性廢棄物而言，影響輻射劑量大小的主要核種為如 I-129、C-14 等具溶解性但不易吸附之核種。由於天然障壁對如 I-129 等核種的吸附遲滯抑制效

果較差，因此考量安全評估的不確定性時，NUMO-TR-10-03 報告主要以工程障壁對核種釋出的抑制效能為主要探討對象。

近似解析解是計算在給定源項核種邊界條件，所能達到的最大穩態核種釋出率，此近似解析的估算結果將近似於非穩態計算的核種最大釋出率。該報告所謂的近似解析解，是因為忽略核種濃度最大值到達時間或到達穩態狀態的時間之核種衰變量。雖然如 Sr-90 等半衰期短或是遲滯係數較大的核種，近似解析解會高估核種釋出率，可視為較保守的評估，但此類核種對總曝露劑量的影響有限。

近場安全分析包括廢棄物包件區、填充材料區、緩衝材料區、開挖擾動區等四個分區如圖 2-10 所示。

- 圖 2-10 中， $I_0$  為初始核種總量(Bq)
- $W_f$  為達穩態時填充材料內之核種總量(Bq)
- $W_b$  為達穩態時緩衝材料內之核種總量(Bq)
- $W_m$  為達穩態時開挖擾動區之核種總量(Bq)
- $I_{LE}$  為假設廢棄物包件核種溶解率為定值之外釋核種總量(Bq)
- $F_L$  為由緩衝材料擴散外釋至開挖擾動區之核種釋出率(Bq/y)
- $F_d$  為由緩衝材料移流外釋至開挖擾動區之核種釋出率(Bq/y)
- $F_m$  為由開挖擾動區擴散外釋之核種釋出率(Bq/y)
- $Q$  為開挖擾動區的年地下水流量( $m^3/y$ )
- $C_L$  為開挖擾動區的液相濃度(=緩衝材料右側邊界( $X=L$ )濃度)，也就是假設開挖擾動區的液相核種為瞬間混合。

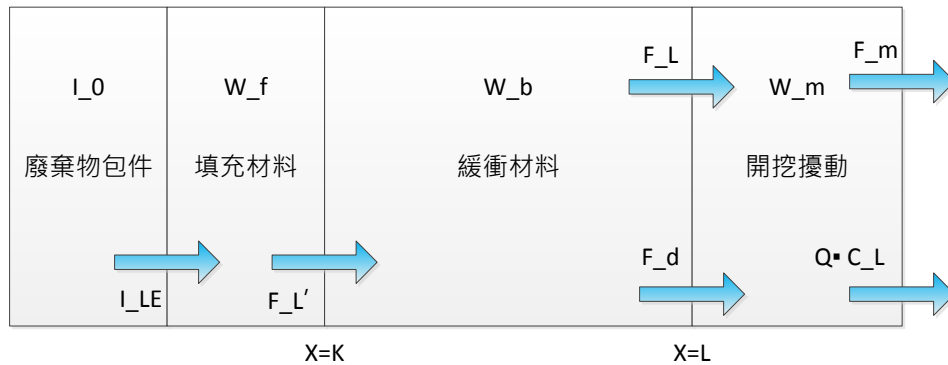


圖 2-10 近場安全分析解析示意圖

基本的控制方程式代表達穩態時之質量守恆與通量連續概念：

$$I \cong W_f + W_b + W_m \quad (2-1)$$

$$F_L + F_d = Q \cdot C_L + F_m + \lambda \cdot C_L \cdot \varepsilon_m \cdot Rd_m \cdot V_m \quad (2-2)$$

解析解的求解區域為緩衝材料區，考慮一維直角座標和衰變情況下，單核種之移流擴散方程式：

$$\left[\varepsilon+(1-\varepsilon)K_d\rho\right]\frac{\partial C}{\partial t}=De\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-\left[\varepsilon+(1-\varepsilon)K_d\rho\right]\lambda C \quad (2-3)$$

其中  $\varepsilon+(1-\varepsilon)K_d\rho$  是考慮孔隙間濃度以及吸附在顆粒表面的濃度變化。邊界條件的設定需搭配不同的核種外釋假設與開挖擾動區的地下水流量特性，從廢棄物包件核種外釋假設條件有瞬間溶出、固定溶解度、固定溶出率。報告中定義開挖擾動區的特性流量(Qth)可以由(2-4)式計算得到為適用於瞬間溶出與固定溶解度的假設下，(2-4)中左項為擴散介質外側邊界濃度為0時，從擴散介質釋出到開挖影響區的核種釋出率，右項為工程障壁內的濃度平均分布時，開挖影響區地下水帶出的核種釋出率。

$$\frac{I_0 Q_{th}}{(\varepsilon R_d V_d + \varepsilon_f R_d V_f + \varepsilon_m R_d V_m)} = \frac{E D e}{(L-K)} \frac{I_0}{(\varepsilon_f R_d V_f + \varepsilon R_d (\pi l)(L-K)K)} \quad (2-4)$$

當  $Q_{th} \ll Q$  時，工程障壁的核種釋出率不受地下水流量影響皆為定值；當  $Q \ll Q_{th}$  時，工程障壁的核種釋出率，將隨地下水流量  $Q$  而變化。若要使工程障壁的核種釋出率不受地下水流量多寡影響，皆可保持定值，其條件為開挖擾動區的地下水流所帶出的核種量，須大於由緩衝材料區所釋出的核種量。若開挖擾動區的地下水流帶出的核種量小於緩衝材料區所釋出的核種量，核種會蓄積在工程障壁(填充材、擴散介質、開挖影響區域)中，使工程障壁內的濃度平均分布而趨向定值。

當從廢棄物包件核種外釋為固定溶出率時，前述開挖擾動區的特性流量以  $Q_{th}'$  表示，可以計算如(2-5)式

$$Q_{th}' = \frac{F_{LE}}{F_{Lmax}} Q_{th} \quad (2-5)$$

在考慮瞬間溶出、固定溶解度、固定溶出率的源項核種外釋條件，解析解推導之工程障壁的核種釋出率  $F_L$  與開挖擾動區的流量  $Q$  的概念關係如圖 2-11 所示。因此在 NUMO 的解析策略下，影響核種自工程障壁釋出的關鍵因子整理如下：

1. 核種外釋機制：瞬間溶出、固定溶解度、固定溶出率。
2. 填充材料參數：幾何形狀(體積、孔隙率)、擴散係數、吸附分配係數。
3. 緩衝材料參數：幾何形狀(體積、孔隙率)、擴散係數、吸附分配係數。
4. 開挖擾動區參數：幾何形狀(體積、孔隙率)、擴散係數、吸附分配係數、地下水流量。

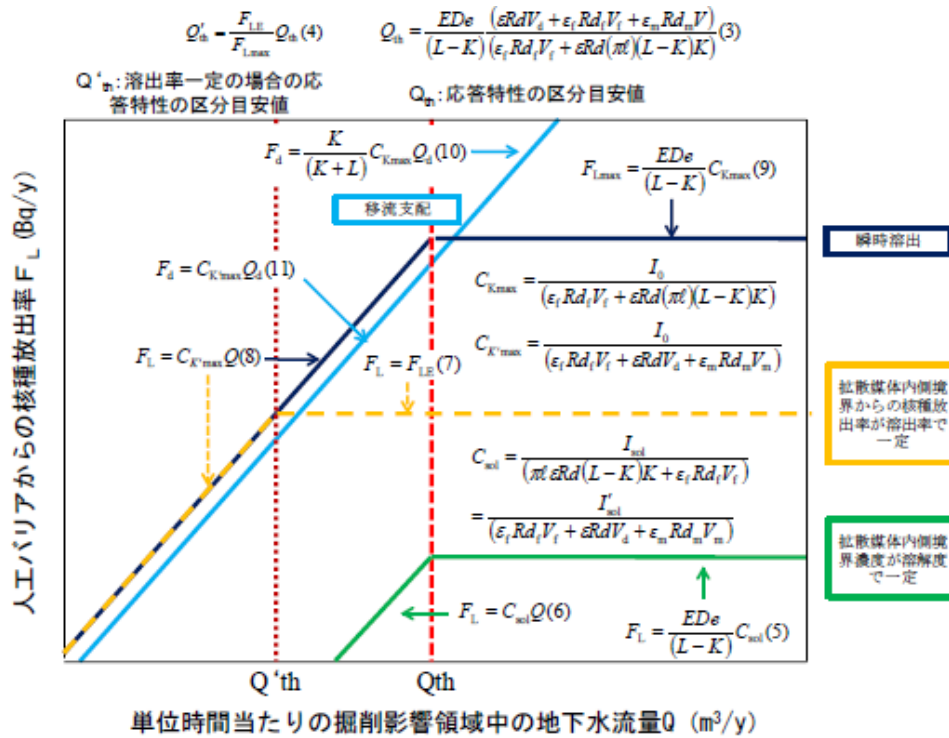


圖 2-11 工程障壁的核種釋出率與開挖擾動區地下水流量關係

### 2.3 坑道處置安全分析關鍵議題

綜合 2.1 節中 SKB SR-PSU 中近場關鍵議題與 2.2 節中 NUMO 近場近似解析解關鍵議題之比較，最主要差異有以下幾點：

1. SR-PSU 的近場分析所涉面向較為廣泛，在整體工程障壁功能安全評估；NUMO 則較為專注在緩衝材料的安全功能是否可以發揮。
2. SR-PSU 近場安全分析有 3 維流場模擬，NUMO 近場安全分析從廢棄物包件、填充材料到緩衝材料皆不考慮滲入，僅在開挖擾動區之地下水流需已知。
3. SR-PSU 近場安全分析有 3 維核種傳輸模擬；NUMO 僅有 1 維核種傳輸近似解析解應用。

因此近場安全分析的關鍵議題，若要採取較全面的系統性分析，所可能涉及之關鍵議題就如表 2-4 所示，從工程障壁幾何形貌、氣候演化之溫度、水文相關、力學相關、工程障壁組成成分、水體成分、氣體等。而若採取較簡化如 NUMO 之作法，關鍵之議題如 2.2 節所述，包含核種外釋機制、填充材料參數、緩衝材料參數、開挖擾動區參數。但須注意的是類似 NUMO 的做法代表的並不是過度簡化，而是可視為較保守的評估，主要是因為採用近似解析解，而忽略核種濃度最大值到達時間或到達穩態狀態的時間之核種衰變量，因此如 Sr-90 等半衰期短或是遲滯係數較大的核種，近似解析解會高估核種釋出率，可視為較保守的評估，但此類核種對總曝露劑量的貢獻有限。



### 第三章、近岸環境低放射性廢棄物坑道處置遠場安全分析要項研析

本章參考 SKB Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, TR14-05, (2014)技術報告，先整理地質圈作用之關鍵議題(變數)，再針對近岸環境遠場安全分析要項進行研析。

#### 3.1 地質圈作用關鍵議題

SKB TR-14-05 技術報告為說明 SR-PSU 安全評估所涉及之地質圈作用，也就是遠場安全分析所應考慮之要項，主要包含熱傳作用、水力作用、力學作用、化學作用、核種傳輸作用。並且以 13 個變數來描述地質圈作用之特性與狀態，摘述說明如表 3-1。

表 3-1 SR-PSU 地質圈作用變數與定義

變數	定義
母岩溫度	母岩溫度為時間與空間函數
地下水流	地質圈裂隙之地下水流為時間與空間函數
地下水壓力	地質圈裂隙之地下水壓力為時間與空間函數
氣相流體	地質圈裂隙之氣相流體為時間與空間函數
處置場幾何形貌	處置場內如坑道、豎井等任何開挖之幾何尺寸
裂隙與孔隙幾何形貌	母岩裂隙與微孔隙之幾何尺寸
母岩應力	母岩應力為時間與空間函數
母岩礦物	母岩礦物化學組成為時間與空間函數
裂隙礦物	裂隙構成之礦物化學組成為時間與空間函數，也應包含裂隙內物質組成
地下水組成	地下水化學組成為時間與空間函數，包含氧化還原、pH、離子強度、溶解物種濃度、膠體與顆粒、溶解氣體，以及密度與黏滯性
氣體組成	封閉時存在於地質圈之所有氣體之化學組成
結構與零星物質	灌漿與其他結構或零星物質之化學組成
飽和度	地質圈之水飽和度

該報告中進一步分析地質圈之熱傳作用、水力作用、力學作用、化學作用、核種傳輸作用等與這 13 個變數之相互關係，例如在地質圈水力作用主要為安全分析之遠場地下水模擬，說明如下：

- (1) 地下水流受母岩溫度、地下水壓力、氣相流體、處置場幾何形貌、裂隙與孔隙幾何形貌、地下水組成、結構與零星物質、飽和度等之直接影響。母岩應力與裂隙礦物會透過裂隙與孔隙幾何形貌間接影響力下水流。
- (2) 地下水流會直接影響母岩溫度、地下水壓力、氣相流體、地下水組成、飽和度。透過地下水組成與地下水壓力間接影響裂隙與孔隙幾何形貌、透過地下水壓力間接影響母岩應力、透過地下水組成間接影響母岩礦物與裂隙礦物。

### 3.2 近岸環境遠場安全分析關鍵議題

近岸環境廢棄物處置之核種外釋移棲潛在區域包含海岸地區淺地表水體與近岸海域之海洋外釋。而近岸環境之遠場關鍵作用為海水/淡水交界面所形成之密度流流場，如圖 3-1 所示，處置概念 A 之設施位於海平面上，核種外釋將透過淡水流場傳輸至海岸地區淺地表，在海淡水交界面因紊流作用，會由海水流場傳輸至近岸海域。而處置概念 B 之設施位於海平面下，但含水層仍為淡水，所以遠場核種傳輸與處置概念 A 相似，但因移棲路徑較遠，遠場遲滯效應較佳。

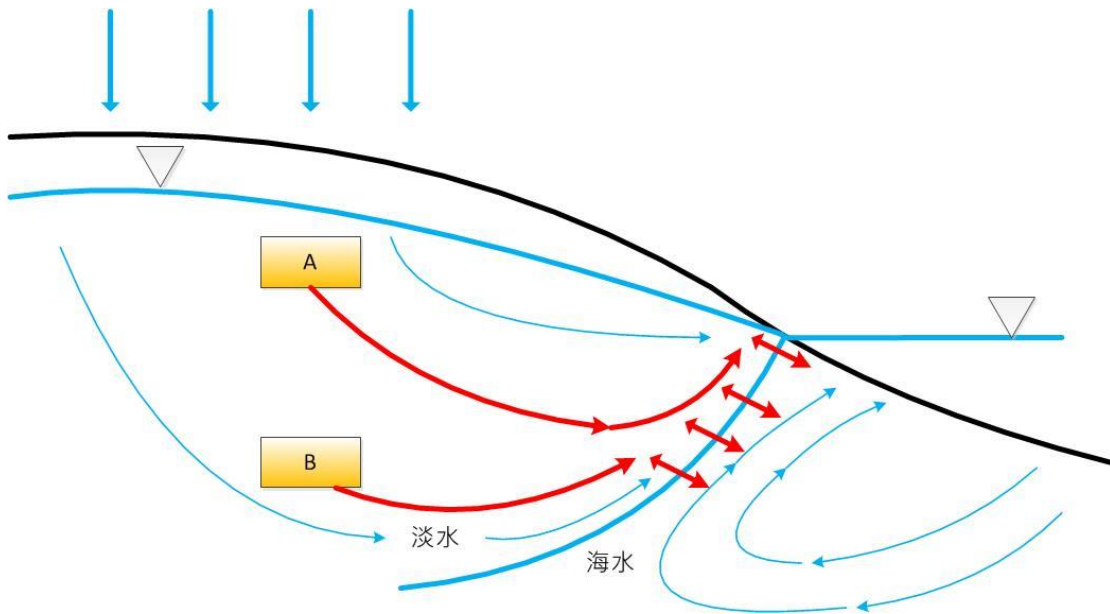
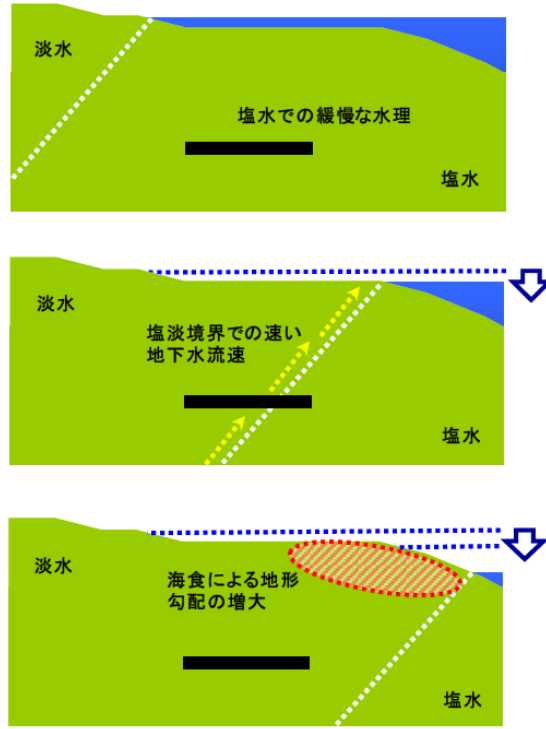


圖 3-1 近岸環境處置遠場概念示意圖

若進一步考慮海平面變化之演化情節，在 NUMO TR-10-3 技術報告中如圖 3-2 所示，當處置場位於近岸時，應考量海岸線及海水淡水交界面的移動造成之水文與水理環境變化外，以及核種釋出區的變化對生物圈的影響。圖 3-2 所示為因海平面下降將使處置設施所在含水層由海水變為淡水，核種外釋原先以近岸海域外釋為主，因為海平面下降使核種外釋包含透過淡水流場傳輸至海岸地區淺地表，及在海淡水交界面因紊流作用，會由海水流場傳輸至近岸海域。



(沿岸立地の場合)

圖 3-2 海平面上升演化之地質環境模型圖 (NUMO TR-10-03)

若海平面演化為上升，如圖 3-3 所示，考慮海平面上升之演化，處置概念 A 之設施所在含水層仍為淡水，核種外釋將透過淡水流場傳輸至海岸地區淺地表，在海淡水交界面因紊流作用，會由海水流場傳輸至近岸海域，但較前述基本情景因海平面上升使移棲路徑快速。處置概念 B 之設施因海平面上升，所在含水層由淡水轉為海水，因密度流作用，會由海水流場傳輸至近岸海域，且在移棲過程因海淡水交界面之紊流作用，會由淡水流場傳輸至海岸地區淺地表。

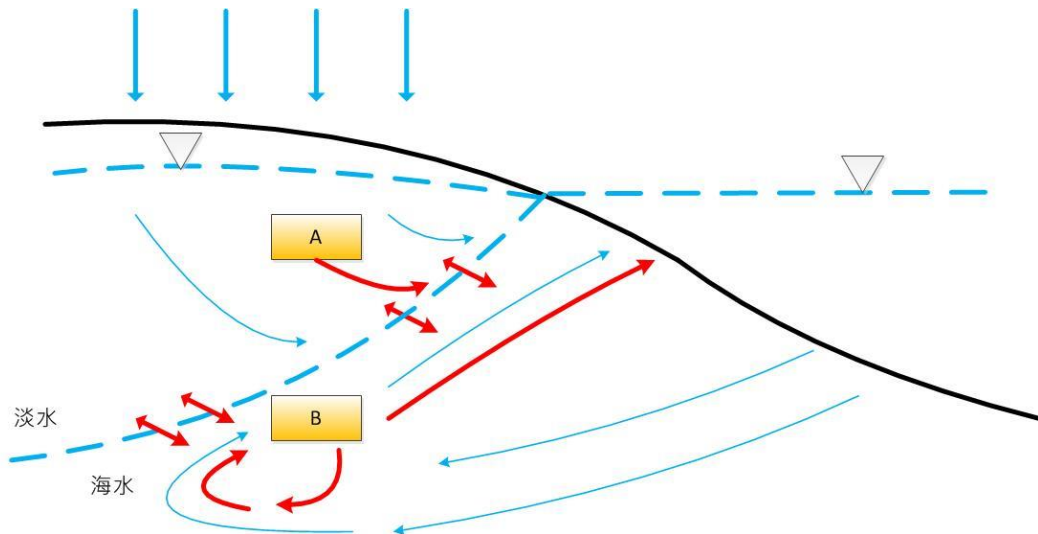


圖 3-3 近岸環境處置因海平面上升之遠場概念示意圖

綜合前述分析，近岸環境遠場安全分析關鍵議題整理如下：

1. 處置深度(設施設計相關)
  - 含水層為淡水或海水
2. 密度流流場(場址特徵相關)
  - 海水/淡水交界面、流場
3. 海平面上升/下降(演化情節)
  - 改變處置設施所在含水層特性
4. 水文地質 (場址特徵相關)
  - 海水/淡水之物種組成
  - 母岩礦物組成
  - 孔隙率、水力傳導係數、延散係數、擴散係數
  - 異質性、非等向性
  - 鄰近水井
5. 水文氣象(場址特徵相關)
  - 降雨、蒸發散、鄰近水系

### 3.3 生物圈核種傳輸

在 SR-PSU 的生物圈核種傳輸模擬同樣採用區塊模式，主要考慮 2 種生態系統，水域(如海洋、湖泊與河川)與陸域(如泥沼與農業生態系)接收與累積核種之外釋，其概念架構如圖 3-4 所示，圖中方塊代表不同物理區塊之核種存量，線條箭號方向代表核種傳輸方向，核種在區塊間之傳輸透過(1)氣體(淺藍色)、(2)水體(深藍色)、(3)固體物質(黑色)、(4)有機與無機型態之核種轉換(綠色)、(5)孔隙水擴散(橘色)、(6)濕地植物生長累積(灰色)，大氣為核種的源/匯。圖中各區塊名稱之說明如表 3-2 所示。

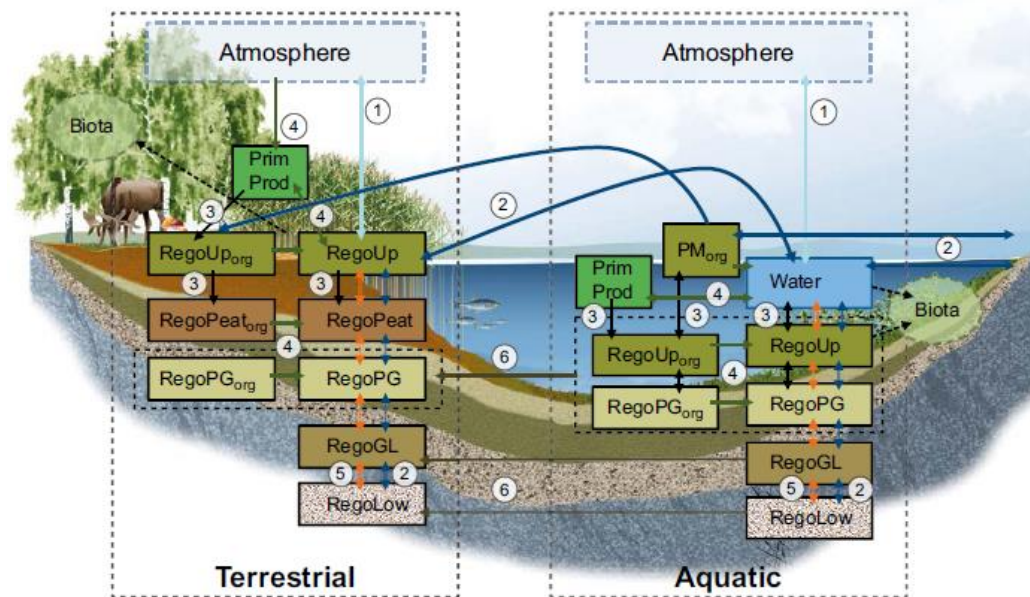


圖 3-4 水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖

農業生態系核種傳輸簡化架構如圖 3-5 所示，核種傳輸透過氣體(淺藍色)、水體(深藍色)、固體物質(黑色)、礦化作用(綠色)，核種來源有(1)灌溉、(2)施肥、(3)湖泊/泥沼的排水與開墾、(4)取用地下水，作物的活度濃度計算是假設平衡於土壤內與植被層大氣之核種，灌溉水內核種由植被截留，且不同土地利用會有不同之核種來源組成。而圖 3-4 與 3-5 中各區塊名稱之說明如表 3-2 所示。

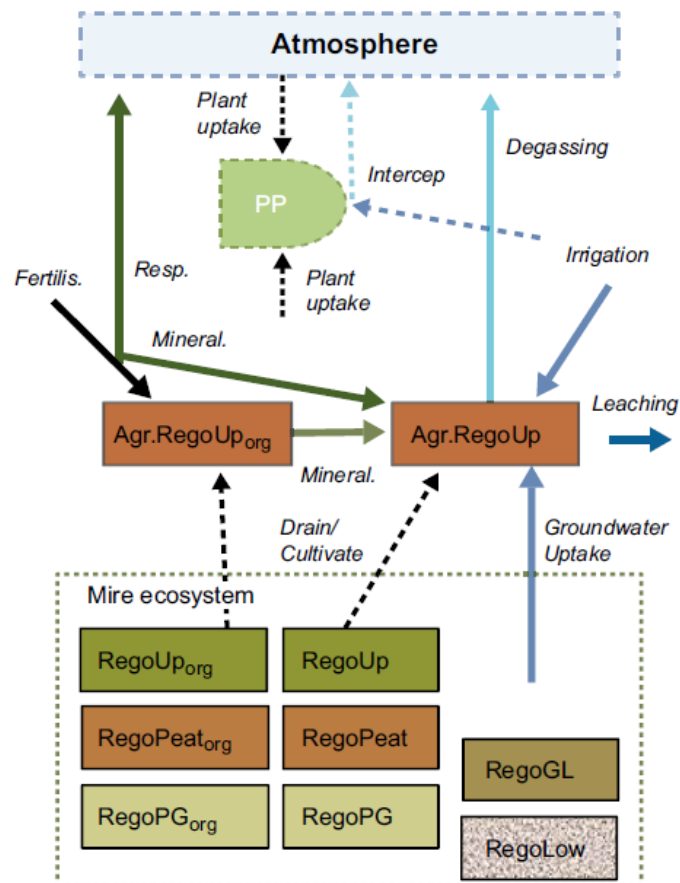


圖 3-5 農業生態系核種傳輸區塊示意圖

表 3-2 生物圈核種傳輸區塊名稱與說明

Model compartment	Description
Aquatic	
Water	Radionuclides in open water of sea basins, lakes and streams, including radionuclides dissolved in water and adsorbed to particular matter.
PM <sub>org</sub> <sup>1</sup>	Radionuclides stored in organic particulate matter suspended in the water column.
PrimProd	Radionuclides stored in aquatic primary producers, including radionuclides in pelagic, micro-benthic and macrobenthic primary producers.
RegoUp	Radionuclides in the upper oxic and biological active layer of aquatic sediments, including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoUp <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into organic particulate matter in the upper aerobic and biological active layer of aquatic sediments.
RegoPG	Radionuclides in post-glacial aquatic sediments (clay gyttja) below the biological active layer, including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoPG <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into organic particulate matter in post-glacial aquatic sediments (clay gyttja) below the biological active layer.
RegoGL	Radionuclides in glacial clay (typically overlaid by post-glacial deposits), including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoLow	Radionuclides in till (typically overlaid by glacial clay), including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
Terrestrial (mire)	
PrimProd	Radionuclides stored in mire vegetation biomass, including both above and below ground biomass of bryophytes, vascular plants, dwarf shrubs and trees.
RegoUp	Radionuclides in the upper oxic and biologically active layer of wetland peat (acrotelm peat), including radionuclides in pore water and adsorbed on peat.
RegoUp <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into organic matter in the upper aerobic and biological active layer of peat (acrotelm peat).
RegoPeat	Radionuclides in deep, permanently anoxic, wetland peat (catotelm peat), including radionuclides in pore water and adsorbed on peat.
RegoPeat <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into organic matter in the deep, permanently anoxic wetland peat (catotelm peat).
RegoPG	Radionuclides in post-glacial sediments (clay gyttja) overlaid by wetland peat, including radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoPG <sub>org</sub>	Radionuclides incorporated into particulate organic matter in post-glacial sediments (clay gyttja) overlaid by wetland peat.
RegoGL	Radionuclides in glacial clay buried under wetland peat and typically overlaid by post-glacial deposits. Inventory includes radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.
RegoLow	Radionuclides in till, buried under wetland peat and typically overlaid by glacial clay. Inventory includes radionuclides in pore water and adsorbed on sediment particles.

<sup>1</sup> Compartment is also referred to as Water<sub>org</sub> in the technical model description (Saetre et al. 2013).

### 3.4 模式銜接

遠場、近場、核種傳輸、劑量評估間的架構如圖 3-6 所示(TR14-09-Fig.9.1)，主要使用模式在遠場流場模擬使用 DarcyTools 軟體、生物圈地表水文使用 Mike-She 軟體、近場流場模擬使用 Comsol-Multiphysics 軟體(為 3 維有限元素法架構)、近場與遠場核種傳輸模擬使用 Ecolego 軟體、生物圈核種傳輸與劑量評估也使用 Ecolego 軟體。

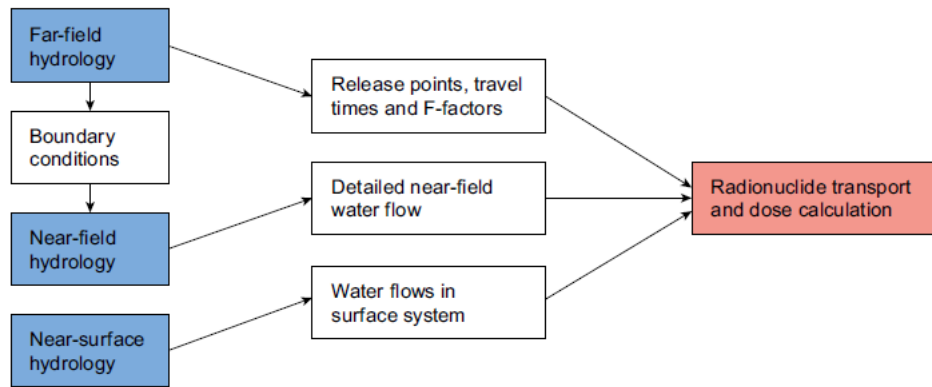


圖 3-6 SR-PSU 模式銜接概念架構示意圖

### 近場與遠場銜接

遠場的水文地質演化在 SR-PSU 的安全分析最主要為氣候演化與海岸演化，這都將影響遠場水文模擬(如地下水分區與流場)，而遠場的水文模擬為提供 3 維近場水文模擬的邊界條件來源。

遠場核種傳輸模擬的內邊界為自工程障壁外釋之水相核種濃度，為由近場核種傳輸模擬提供，而遠場核種傳輸的外邊界為地質圈與生物圈交界區，可以假設與遠場地下水流模擬的邊界相同。

### 遠場與生物圈銜接

遠場水文地質模擬結果顯示 80% 的 SFR1 與 SFR3 處置方式之潛在核種外釋會進入生物圈的 157\_2 目標區，在基本情節案例計算假設完全外釋進入 157\_2 目標區，再透過水體交換或擴散進入地表水體。

生物圈 157\_2 目標區位置(參見 TR-14-05 附錄 H 之位置圖)大約在處置場址向外海不遠處，現況是在海平面下(平均深度約 5.8 公尺，最大深度 13.5 公尺)，該目標區未來不會有湖泊，演化過程是由海域漸變成陸域生態系且不經歷湖泊生成，水文模擬顯示區內在海岸變遷演化過程，海水消退使得部分地區表層土壤有較高之水位形成濕地。

## 第四章、離島環境低放射性廢棄物坑道處置遠場安全分析要項研析

若採用離島環境低放射性廢棄物處置，可以參考的國際案例之一為瑞典 SR-PSU 之海床下處置，本報告第三章已初步整理 SR-PSU 安全評估模式的銜接概念，如圖 3-6 所示，遠場水力模擬為安全評估架構的最上游，不僅影響近場水力模擬為，更是影響核種傳輸的動力機制關鍵，因此本章主要參考 SKB Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, SKB TR-14-05 (2014) 技術報告中對遠場安全評估所涉及水力過程(hydraulic processes)之描述。

### 4.1 離島環境遠場水力過程

由於在 SR-PSU 的安全評估所採用的時間尺度達 100,000 年，因此影響遠場地下水流場的關鍵因素在氣候的演化，在 SKB Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-PSU, SKB TR-13-05 (2014)有完整的技術說明如何去模擬 SR-PSU 未來氣候的演化，主要的情境發展為未來冰期的發展將使冰川發展，地表將被冰原覆蓋，進而造成海岸線外擴與海平面下降，而處置場上方將發展成陸域環境取代原先的海域環境；而暖化的氣候環境將使冰原消失，造成海岸線退縮與海平面上升，如圖 4-1(引用 Fig. 2.7 in SKB TR-13-05) 所示在未來的 12 萬年期間，暖化將使海岸線下降(相對於目前的高度)，但考慮不同的冰期演化情節，又將有不同的海岸線高度上升。

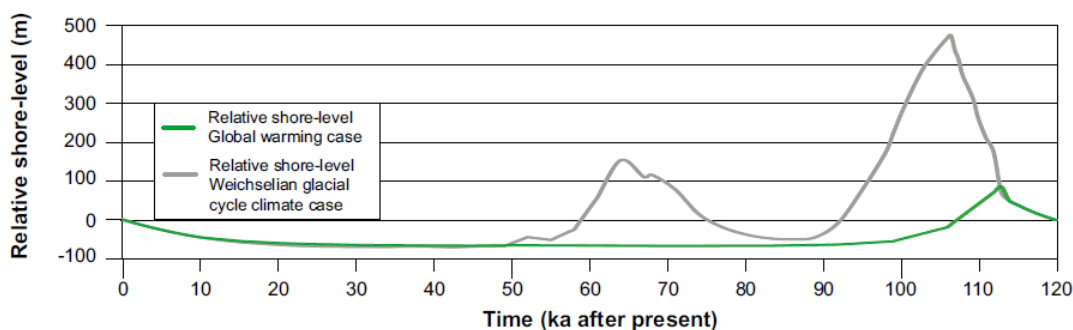


圖 4-1 SR-PSU 氣候演化之海岸線高度相對變化(橫軸單位 ka 為 1000 年)

因為氣候演化的環境改變最直接的影響在遠場地下水模擬時的邊界條件設定，尤其是上部的邊界條件設定，此外除水力邊界條件將改變外，冰期的發展也將使溫度邊界條件不同，如圖 4-2(引用 Fig. 4.3 in SKB TR-13-05)所示為隨著氣候演化，永凍層的深度( $0^{\circ}\text{C}$  等溫線的位置)可達-250 m。然而由於國內所面對的處置環境與 SR-PSU 為在不同的氣候帶，因此適用於國內環境的氣候演化情境仍需建立相關技術，才足以提供量化數據供演化模擬。

SR-PSU 的遠場地下水模擬設定如圖 4-3 所示(Fig. 3.4 in SKB TR-14-05)，側邊採用零流量邊界條件，上部海水覆蓋區域採用海水深度的靜水壓邊界條件，溫度邊界條件採用海水平均溫度，上部陸地覆蓋區域給定補注量，如有河川或湖泊



則依水深設為靜水壓邊界條件，溫度邊界條件採用地表平均溫度。由於溫暖氣候將涵蓋數千年之時間尺度，這也是處置場封閉後之重要階段，在溫暖氣候期間最重要之水文環境變遷為海岸線變遷取代陸域環境，因此此時期地下水模擬之關鍵邊界條件在地表條件的設定。

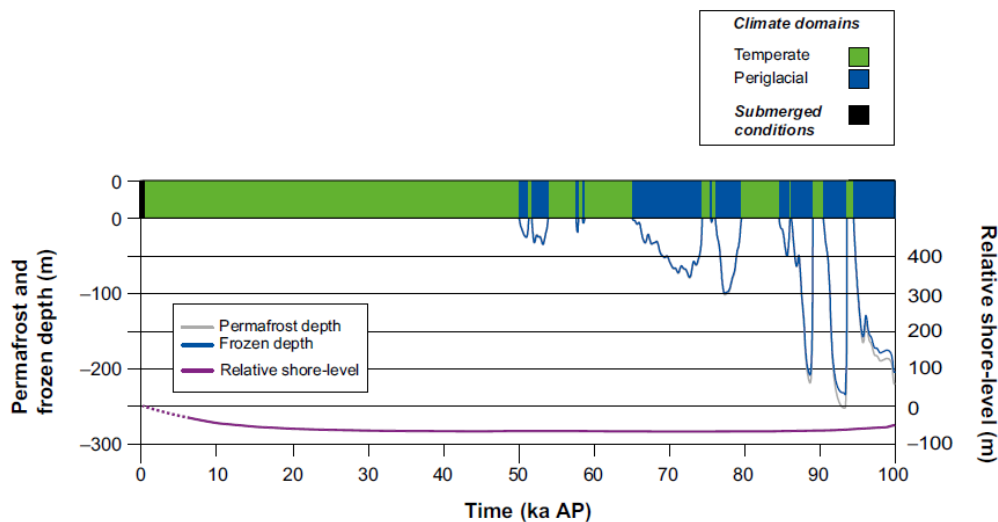


圖 4-2 SR-PSU 氣候演化之海岸線高度相對變化與永凍層深度變化

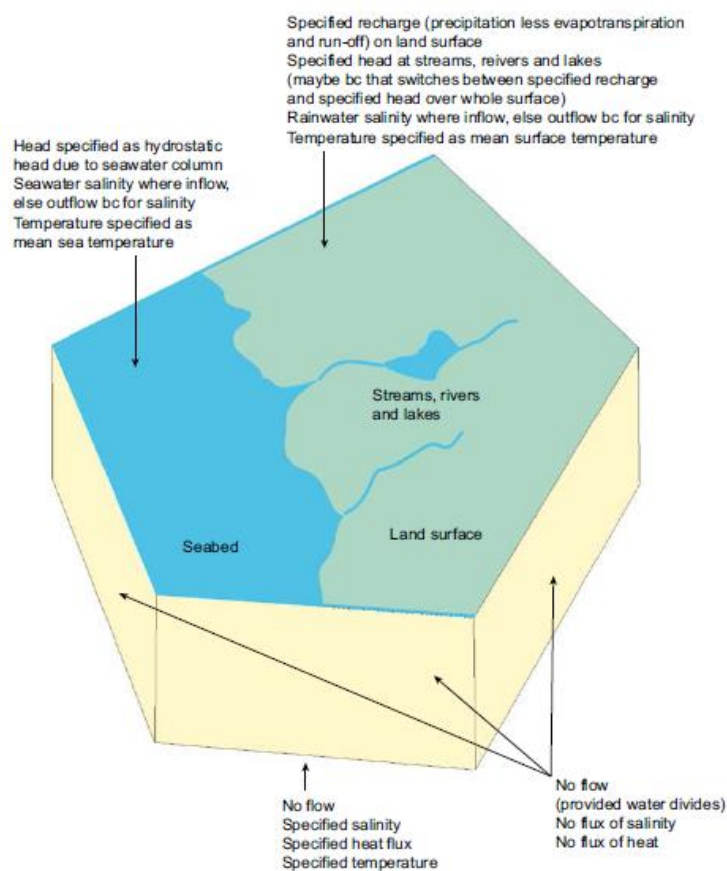


圖 4-3 SR-PSU 區域地下水模擬與邊界條件設定

由於安全評估的時間尺度較大，因此忽略極端事件、潮汐與季節變動等小尺度擾動對地下水模擬的影響，僅考慮至少年尺度以上的平均狀態改變。地質與氣候演化改變了地表高程與海平面高度，也影響核種在地質圈外釋的位置。在第三章的表 3-1 摘整了 SR-PSU 所考慮地質圈作用變數與定義，透過簡化假設這些變數並不直接納入地下水模擬考慮，表 4-1(Table 3-1 in SKB TR-14-05)整理 SR-PSU 地下水模擬所考慮的地質圈作用變數處理方式。

表 4-1 SR-PSU 地下水模擬所考慮的地質圈作用變數處理方式

變數	處理方式
母岩溫度	忽略溫度對地下水密度與黏滯性的影響。考慮地下水結冰。
地下水流	考慮地下水流
地下水壓力	壓力梯度影響水流
氣相流體	地下水模擬忽略
處置場幾何形貌	區域流場模擬考慮處置場佈置與特性。近場流場模擬考慮廢棄物包件特徵。
裂隙與孔隙幾何形貌	考慮裂隙區域與尺寸。不考慮模擬過程的裂隙演化，但不同情節可以有不同的裂隙特徵。不考慮地震對地下水模擬的影響。
母岩應力	地下水模擬不考慮
母岩礦物	地下水模擬不考慮
裂隙礦物	地下水模擬不考慮
地下水組成	地下水模擬忽略鹽度對地下水流的影響(忽略密度流效應)
氣體組成	地下水模擬不考慮
結構與零星物質	地下水模擬不考慮坑道灌漿的影響
飽和度	地下水模擬不考慮封閉後坑道的水飽和。假設母岩為全飽和。當地表高於海平面，考慮未飽和層影響。

## 4.2 離島環境遠場安全分析關鍵議題

若在離島環境選擇採用類似瑞典 SR-PSU 之海床下處置，核種外釋移棲潛在區域包含近岸海域之海洋外釋與離島海岸地區之陸域外釋。圖 4-4 為離島環境海床下處置遠場概念示意圖，矩形 A 為坑道處置設施所在位置，假設離島的主要構成為低透水母岩，僅在上部有淺層表土，處置深度為海床下之母岩，海床上有底泥沉積層。陸域降水在表土含水層的優勢流場為由陸域向海域，假設離島環境海水深度遠大於離島地形高度，使海床下母岩內的優勢流場為由海域向陸域。由於是海床下處置，可能的核種外釋移棲機制除緩慢的母岩擴散外，應是透過母岩裂隙與斷層破裂帶所構築而成的快速通道，如圖 4-4 所示，此外移棲至海床沉積層的外釋核種將由底泥擴散至近岸海域，由於潮汐與洋流的大量混合交換作用，主要的輻射風險評估區域為陸域。

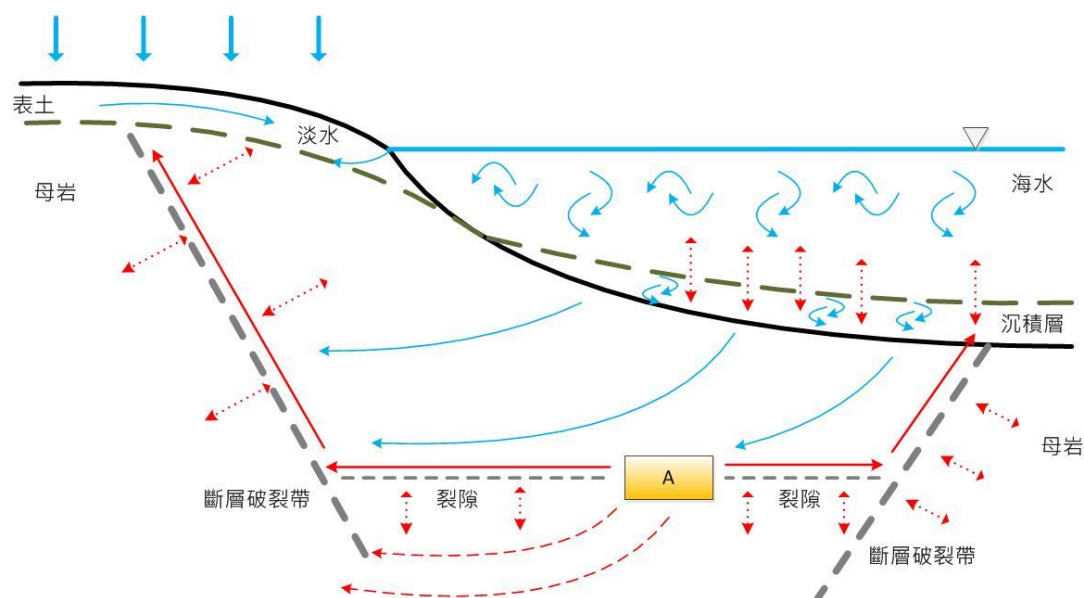


圖 4-4 離島環境海床下處置遠場概念示意圖

若考慮因氣候演化或板塊推擠抬升的海平面下降，原先圖 4-4 的遠場概念示意圖，則可以修正成如圖 4-5 的氣候演化海平面下降之離島環境海床下處置遠場概念示意圖，主要差異在海平面下降使原先的處置設施上部的海水退去，上部由海域變成陸域，對遠場的優勢流場主要由陸域流向海退的方向，可能的核種外釋移棲機制除較緩慢的母岩擴散外，為透過母岩裂隙與斷層破裂帶所構築而成的快速通道，如圖 4-5 所示，移棲至沉積層的外釋核種為主要輻射風險評估區域。

雖然母岩裂隙與斷層破裂帶為相對快速的核種外釋機制，但從長期穩定性擴散角度而言，母岩核種擴散機制仍應是評估遠場遲滯安全功能的關鍵議題，這不論是在圖 4-3 或 4-4 的遠場概念之安全分析皆需考慮。

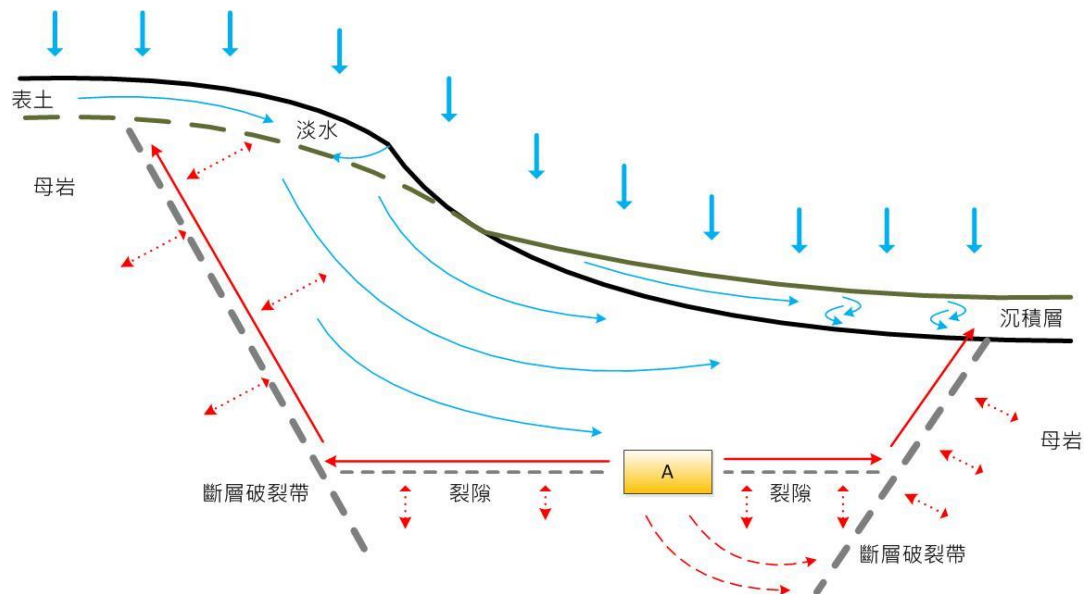


圖 4-5 氣候演化海平面下降之離島環境海床下處置遠場概念示意圖

綜合前述分析，離島環境遠場安全分析關鍵議題整理如下：

1. 處置深度與坑道布置(設施設計相關)
2. 密度流流場(場址特徵相關)
  - 海水/淡水交界面、流場
3. 海平面上升/下降(演化情節)
  - 影響流場特性
4. 水文地質 (場址特徵相關)
  - 裂隙與斷層破裂帶特徵
  - 海水/淡水之物種組成
  - 母岩礦物組成
  - 孔隙率、水力傳導係數、延散係數、擴散係數
  - 異質性、非等向性
  - 底泥沉積層特徵
  - 陸域鄰近水井
5. 水文氣象(場址特徵相關)
  - 降雨、蒸發散、潮汐、洋流

## 第五章、低放射性廢棄物坑道處置近場與遠場整合安全分析研擬

本章綜合前述三項工作成果，研擬近場遠場整合安全分析架構，包含核種衰變鏈傳輸解析解(Chen et al., 2012)應用與 HYDROGEOCHEM(Yeh, et al., 2004, 2009)數值解應用及可能近場與遠場的整合架構研擬，章節內容上 5.1 節為多核種衰變鏈解析解數學模式介紹，5.2 節為 HYDROGEOCHEM4.5s 模式介紹，5.3 節為一維案例解析解與數值解之交互驗證比較，5.4 節近岸坑道處置數值解整合安全分析架構應用案例，5.5 節為全採用解析解之近場遠場整合安全分析架構應用案例。本年度 5.4 節的案例成果僅先針對遠場地下水與傳輸模擬進行探討，近場部分採用類似 NUMO 的基本情節假設為處置坑道近場核種擴散釋出，採用相對濃度再去銜接遠場數值模擬來推估核種傳輸的空間分布，未來近場模擬可以銜接解析解或數值解之近場地下水與核種傳輸模擬。5.5 節的近場與遠場整合解析解應用，近場部分採用類似 NUMO 的解析解設定，但改良為圓柱座標系統解析解以較符合實際可能設計。

### 5.1 多核種衰變鏈解析解數學模式

進行處置場功能安全評估時，藉由數學模式模擬了解萬一發生洩漏，放射性核種在地下水系統中移動的情形，因此在模擬前須了解核種傳輸的現象，包含核種在地下水系統中隨時間增加所發生的衰變，以及母核種依序衰變成若干個子核種，所形成的衰變鏈，此外若廢料桶發生洩漏，污染物將隨地下水流移動的同時，在廢料桶內的核種也持續發生衰變，綜合源項衰變與移棲衰變效應在近場安全分析的應用。

數學模式本身能考慮的問題必須包含核種傳輸的現象，Chen, et al. (2012) 所發展的多核種衰變鏈傳輸解析模式的架構上，簡要說明數學模式其代表的物理意義，包含控制方程式、邊界與初始條件。而 HYDROGEOCHEM4.5s 部分，說明其污染傳輸控制方程式與可使用的邊界條件類型，經過一系列的假設與簡化的過程使兩模式的傳輸控制方程式一致，並進一步對模擬相同問題所得到的結果進行交互驗證。

Chen, et al. (2012) 所發展的多物種衰變鏈解析模式，其控制方程式如下：

$$D \frac{\partial^2 C_1(x,t)}{\partial x^2} - V \frac{\partial C_1(x,t)}{\partial x} - \mu_1 R_1 C_1(x,t) = R_1 \frac{\partial C_1(x,t)}{\partial t}$$
$$D \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2} - V \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} - \mu_i R_i C_i(x,t) + \mu_{i-1} R_{i-1} C_{i-1}(x,t)$$
$$= R_i \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} \quad i = 2 \dots N \quad (5-1)$$

$C_i(x,t)$  為  $i$  物種濃度 [ $ML^{-3}$ ]； $t$  為時間 [ $T$ ]； $D$  為擴散係數 [ $L^2T^{-1}$ ]

； $V$  為孔隙流速 [ $LT^{-1}$ ]； $\mu_i$  為第  $i$  物種一階衰減係數 [ $T^{-1}$ ]； $R_i$  為第  $i$  物種的遲滯因子 [-]； $N$  為總物種的個數 [-]

上述解析模式(5-1)中除了考慮污染傳輸所發生的移流、延散機制外，還包含本身物種衰變、吸附相衰變以及來自上一個物種衰變的影響，而一個完整的模擬必須包含初始條件與邊界條件，一開始模擬系統內初始濃度為零(5-2)式，而在入口邊界上使用 Cauchy-type (5-3)式之邊界條件，其中  $f_i(t)$  是建立在質量守恆架構下 Bateman-type 指數衰減的時變邊界(van Genuchten, 1985)，可同時考慮貯污罐滲出以及衰變的影響，而出口邊界為濃度梯度等於零(5-4)式。

$$C_i(x,t=0)=0 \quad i=1\dots N \quad (5-2)$$

$$-D \frac{\partial C_i(x=0,t)}{\partial x} + VC_i(x=0,t) = Vf_i(t) \quad i=1\dots N \quad (5-3)$$

$$\text{where } f_i(t) = \sum_{n=1}^i b_{i,n} e^{-\lambda_n t}, \quad \lambda_n = \gamma_n + \mu_n$$

$\mu_n$  為一階衰變係數 [ $T^{-1}$ ]； $\gamma_n$  微滲出速率 [ $T^{-1}$ ]

$$\frac{\partial C_i(x=L,t)}{\partial x} = 0 \quad (5-4)$$

Chen et al. (2012)利用 Laplace 轉換與通用型積分轉換求解(5-1)至(5-4)的控制方方程及其對應的初始與邊界條件，其解表示如下式：

$$C_i(x_D, t_D) = \sum_{n=1}^{n=i} b_{i,n} \cdot e^{-\overline{\lambda}_n t_D} + \sum_{l=1}^{\infty} \Phi(\psi_l, x_D) [-T_i(\psi_l, t_D) + P_i(\psi_l, t_D)] \quad (5-5)$$

此處  $x_D = \frac{x}{L}$ 、 $t_D = \frac{Vt}{L}$ 、 $Pe = \frac{VL}{D}$ 、 $\overline{\lambda}_n = \frac{\lambda_n L}{V}$ 、

$$\Phi(\psi_l, x_D) = e^{\frac{Pe}{2} x_D} p(\psi_l) \theta(\psi_l) \left[ \frac{Pe}{2} \sin(\psi_l x_D) + \psi_l \cos(\psi_l x_D) \right],$$

$$T_i(\psi_l, t_D) = \sum_{n=1}^{n=i} b_{i,n} \cdot e^{-\bar{\lambda}_n t_D} - \beta_i \sum_{n=1}^{n=i} b_{i,n} \frac{e^{-\bar{\lambda}_n t_D} - e^{-\alpha_i t_D}}{\alpha_i - \bar{\lambda}_n} ,$$

$$P_i(\psi_l, t_D) = \sum_{k=0}^{k=i-2} \left( \beta_{i-k-1} \prod_{j_2=0}^{j_2=k} \sigma_{i-j_2} \right) \sum_{j_1=0}^{j_1=k+1} \frac{\sum_{n=1}^{n=i-k-1} b_{i-k-1,n} \frac{e^{-\bar{\lambda}_n t_D} - e^{-\alpha_{i-j_1} t_D}}{\alpha_{i-j_1} - \bar{\lambda}_n}}{\prod_{m=i-k-1, m \neq i-j_1}^{m=i} (\alpha_m - \alpha_{i-j_1})} ,$$

$$\theta(\psi_l) = \frac{Pe \psi_l}{\frac{Pe^2}{4} + \psi_l^2} , \quad p(\psi_l) = \frac{2}{\frac{Pe^2}{4} + Pe + \psi_l^2} , \quad \alpha_i(\psi_l) = \frac{\bar{\mu}_i}{R_i} + \frac{\psi_l^2}{Pe R_i} + \frac{Pe}{4 R_i} ,$$

$$\beta_i(\psi_l) = \frac{\psi_l^2}{Pe R_i} + \frac{Pe}{4 R_i} , \quad \sigma_i = \frac{\bar{\mu}_{i-1}}{R_i} , \quad \bar{\mu}_i = \frac{\mu_i L}{V} , \quad \psi_l \quad \text{、 為滿足方程式}$$

$$\psi_l \cot \psi_l - \frac{\psi_l^2}{Pe} + \frac{Pe}{4} = 0 \text{ 之所有正的特徵值(eigenvalue) 。}$$

## 5.2 HYDROGEOCHEM4.5s 模式介紹

HYDROGEOCHEM4.5s 為 HYDROGEOCHEM4.5 的一個特化版本，專門用處理核種傳輸與含氯有機溶劑等衰變鏈污染物傳輸。HYDROGEOCHEM 4.5 為耦合水流、熱傳、溶質傳輸利用有限元素法的數值模式，主要用於地下介質的反應傳輸控制問題，程式內建功能可解決水文地球化學反應包含氧化／還源、沉澱／溶解、吸附／脫附、酸鹼、錯合等化學反應，也可根據不同使用者的需求自訂其化學反應的類型，在輸入方面包括幾何方法、反應機制、有限網格與節點的空間分布、初始與邊界條件、介質的特性；在輸出方面包括壓力水頭分布、總水頭、溫度、含水量、化學濃度隨時間變化，以及使用者指定節點為化學物種分布，對處理非穩態、非均質、非等向地質環境之複雜流場與反應傳輸較有彈性。

控制方程式

$$\begin{aligned} & \theta \frac{\partial (C_1 + S_1)}{\partial t} + \left( \theta \alpha' \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) C_1 \\ & = (L_A(C_1) - QC_1) + M_1 - \theta \lambda_1 (C_1 + S_1) - \theta (K_{w,1} C_1 + K_{s,1} S_1) \\ & \theta \frac{\partial (C_i + S_i)}{\partial t} + \left( \theta \alpha' \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) C_i = (L_A(C_i) - QC_i) + M_i \\ & + \theta \lambda_{i-1} (C_{i-1} + S_{i-1}) + \theta (K_{w,i-1} C_{i-1} + K_{s,i-1} S_{i-1}) - \theta \lambda_i (C_i + S_i) \\ & - \theta (K_{w,i} C_i + K_{s,i-1} S_{i-1}) - \theta \lambda_i (C_i + S_i) - \theta (K_{w,i} C_i + K_{s,i} S_i) , i \in \{2, M^{aq}\} \end{aligned} \quad (5-6)$$

where

$$L_A(C_1) = -V \cdot \nabla C_1 + \nabla \cdot (D \cdot \nabla C_1)$$

$V$  為速度向量； $D$  為延散張量； $\theta$  為有效含水量 [ $L^3/L^3$ ]； $h$  為壓力水頭 [ $L$ ]；

$t$  為時間 [ $T$ ]； $\alpha'$  為土壤基質改變壓縮 [ $L^{-1}$ ]； $Q$  為來自水流的源匯項； $M_i$  為第

$i$  物種額外單位體積的源匯項 [ $ML^{-3}T^{-1}$ ]； $\lambda_i$  為第  $i$  物種的衰減係數 [ $T^{-1}$ ]；

$K_{w,i}$  為第  $i$  物種溶解相生物降解速率 [ $T^{-1}$ ]； $K_{s,i}$  為第  $i$  物種吸附相生物降解

速率 [ $1/T$ ]； $S_i$  為第  $i$  物種容質吸附濃度 [ $M/M$ ]，其中吸附形態：

$$\text{線性吸附: } S_i = \frac{\rho_b K_d}{\theta} C_i \quad (5-7)$$

$K_d$  為分配係數； $C_i$  第  $i$  物種濃度

為使 HYDROGEOCHEM4.5s 的模擬能與 5.1 節的解析解進行模擬比較，控制方程式(5-6)的進一步假設有：(1)有效含水量為常數、(2)固相、液相生物衰減速率為零、(3)流場為均於  $x$  方向流場、(4)地層為等向、均質、(5)溶質無其他源匯項。

### 5.3 一維案例解析解與數值解之交互驗證比較

模擬案例假設為具有一維穩態均勻流場之均質孔隙介質，左側邊界為時變邊界源，忽略側向延散傳輸，上下邊界為不透水邊界，概念模式如圖 5-1，針對溶質傳輸移流、延散所造成的影響以及源衰變、核種衰變鏈等因素進行模擬驗證。

第一個模擬案例為四個長半衰期核種  $238\text{Pu} \rightarrow 234\text{U} \rightarrow 230\text{Th} \rightarrow 226\text{Ra}$  之模擬比較，所使用參數如表 5-1 所示，解析解與數值解的比較結果皆相當吻合(如圖 5-2 至圖 5-5)。第二個模擬案例為包含 10 個假設核種衰變鏈(Chen et al., 2012)之比較，使用參數如表 5-2 所示，數值解與解析解之驗證結果亦十分吻合，如圖 5-6、5-7 所示。



表 5-1 真實核種參數驗證 (Higashi, 1980)

物種	<sup>238</sup> Pu	<sup>234</sup> U	<sup>230</sup> Th	<sup>226</sup> Ra
模擬時間 [year]	1	1	1	1
長度 [m]	5	5	5	5
孔隙流速 [m/year]	100	100	100	100
縱向延散度 [m <sup>2</sup> /year]	4000	4000	4000	4000
遲滯因子 [-]	10000	14000	50000	500
源衰減係數 [1/year]	$8.9 \times 10^{-3}$	$1.028 \times 10^{-3}$	$1.087 \times 10^{-3}$	$1.43 \times 10^{-3}$
衰變係數 [1/year]	$7.9 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-4}$

表 5-2 長衰變 10 物種鏈所使用驗證參數 (Chen, et al., 2012)

參數	10 物種參數
模擬時間 [year]	20
長度 [m]	250
流速 [m /year]	5
延散係數 [m <sup>2</sup> /year]	50
遲滯因子 [-]	1.9,1,1.4,1,5,8,1.4,3.1,1,1
衰減係數 [1/year]	3,2,1.5,1.25,2.75,1,0.75,0.5,0.25,0.1
源衰減係數 [1/year]	0.1,0.75,0.5,0.25,0,0,0.3,1,0,0.65

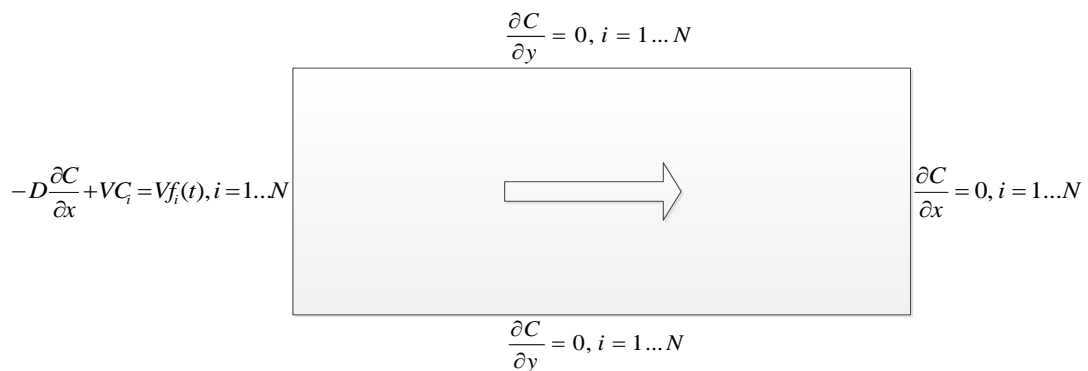


圖 5-1 一維傳輸概念模型

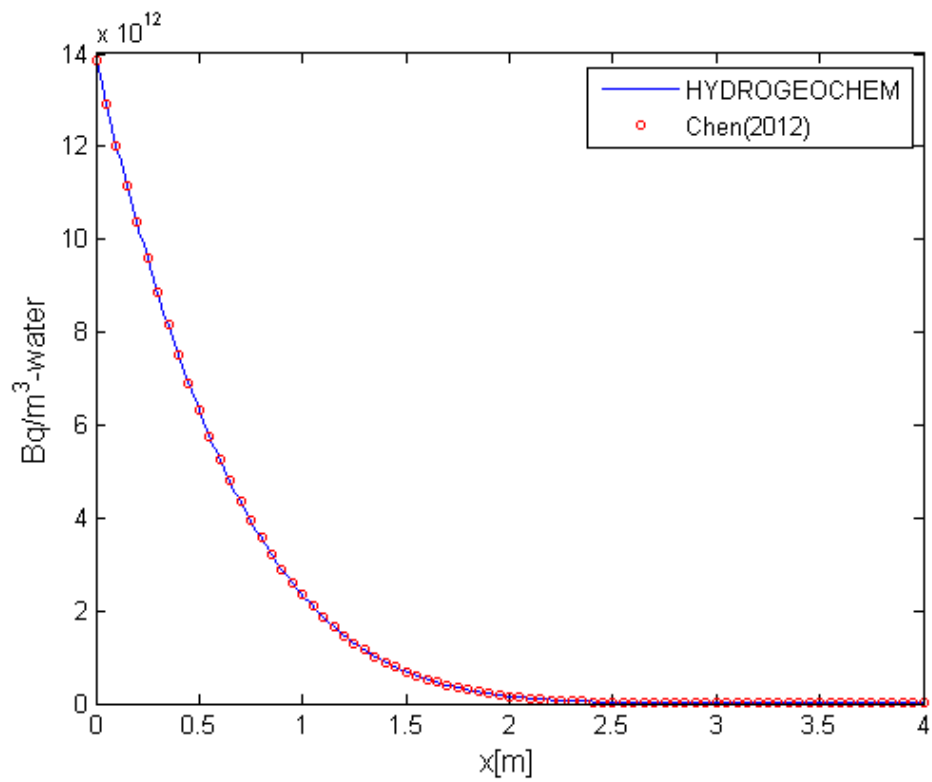


圖 5-2  $^{238}\text{Pu}$  位置濃度曲線圖

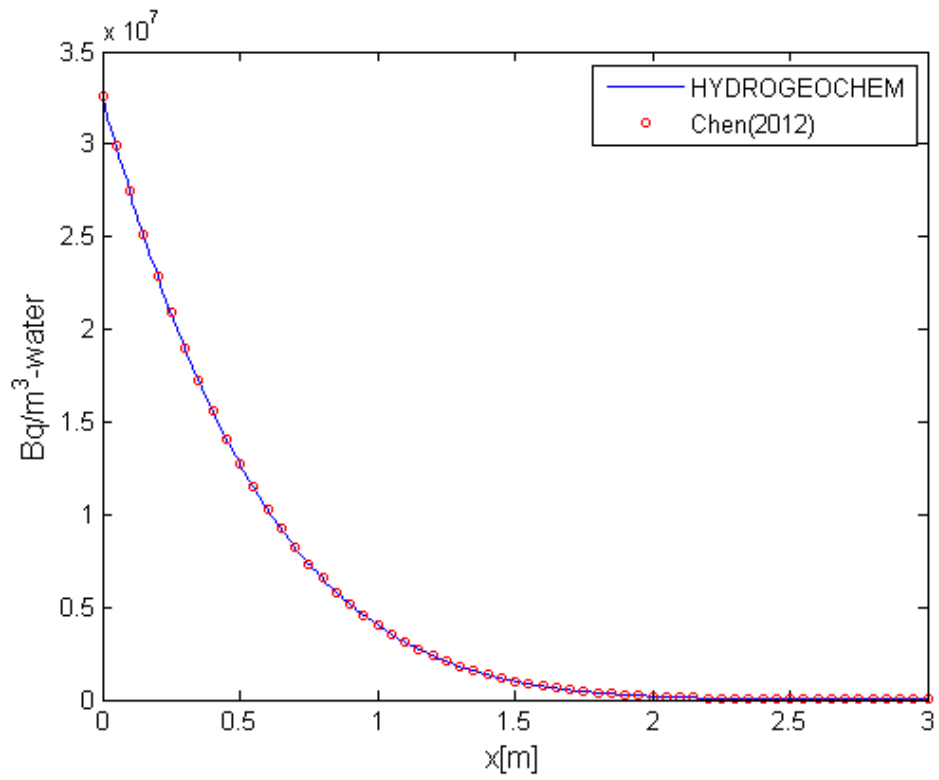


圖 5-3  $^{234}\text{U}$  位置濃度曲線圖

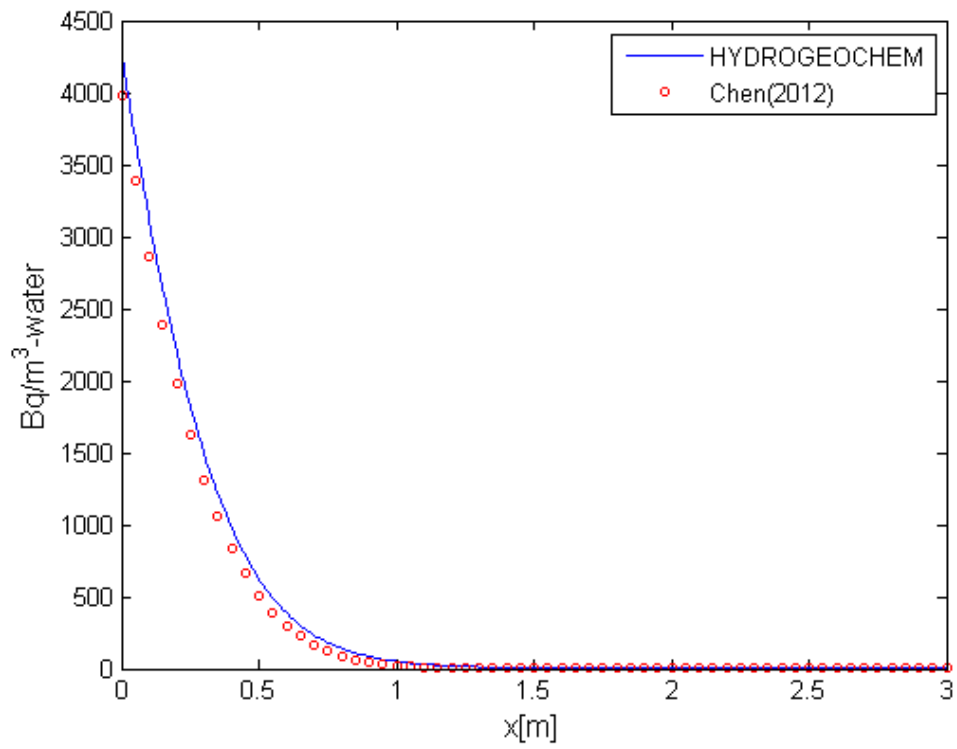


圖 5-4  $^{230}\text{Th}$  位置濃度曲線圖

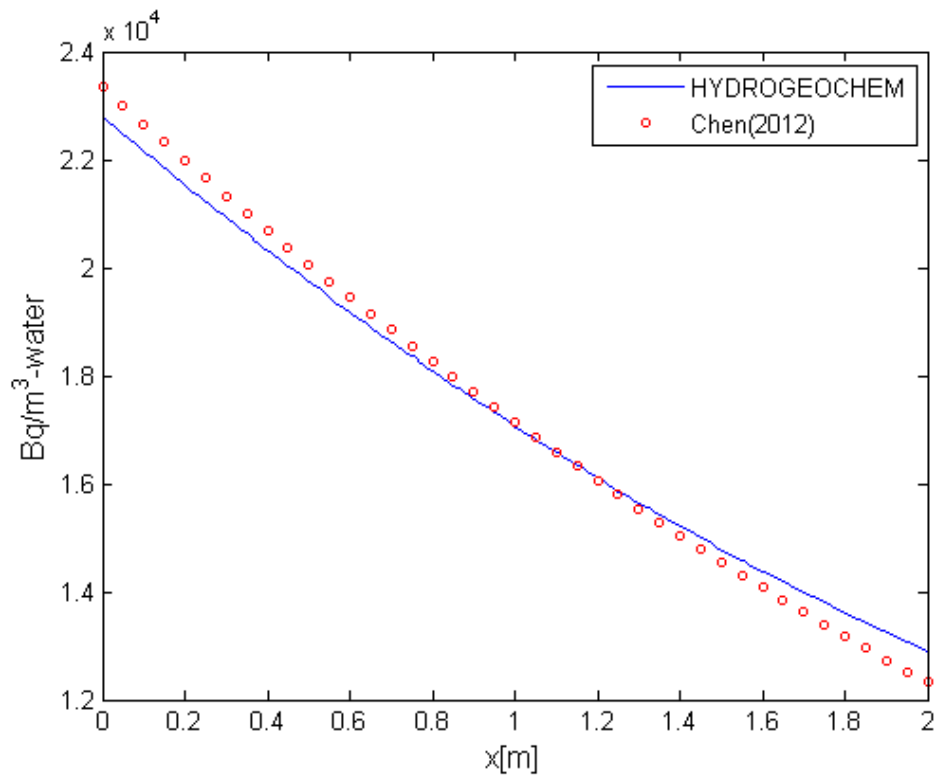


圖 5-5  $^{226}\text{Ra}$  位置濃度曲線圖

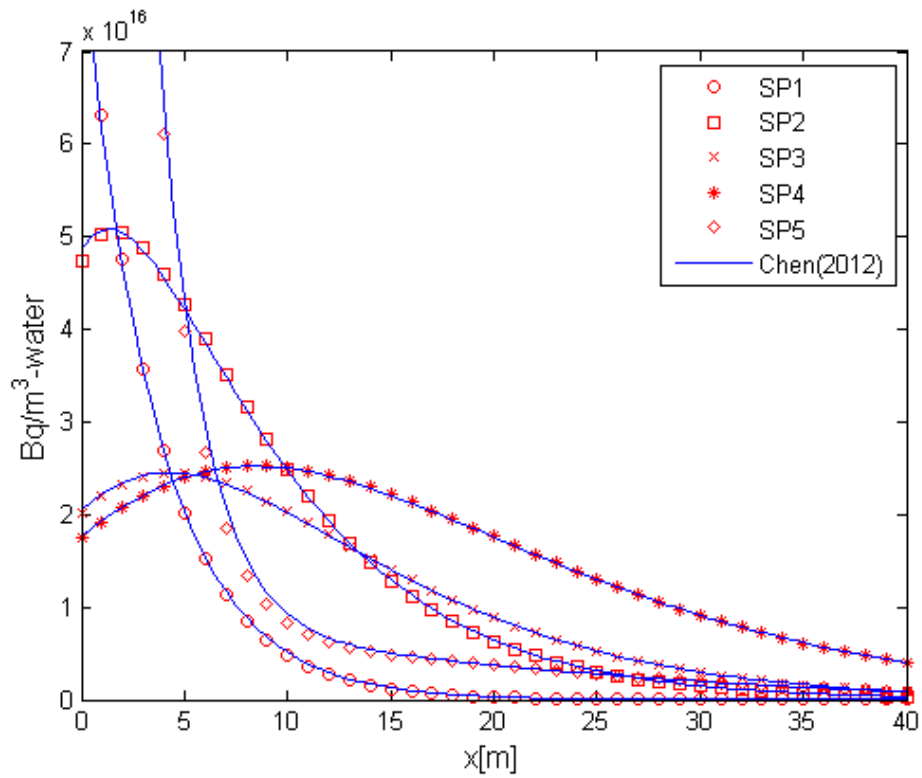


圖 5-6 SP1-SP5 位置濃度曲線圖

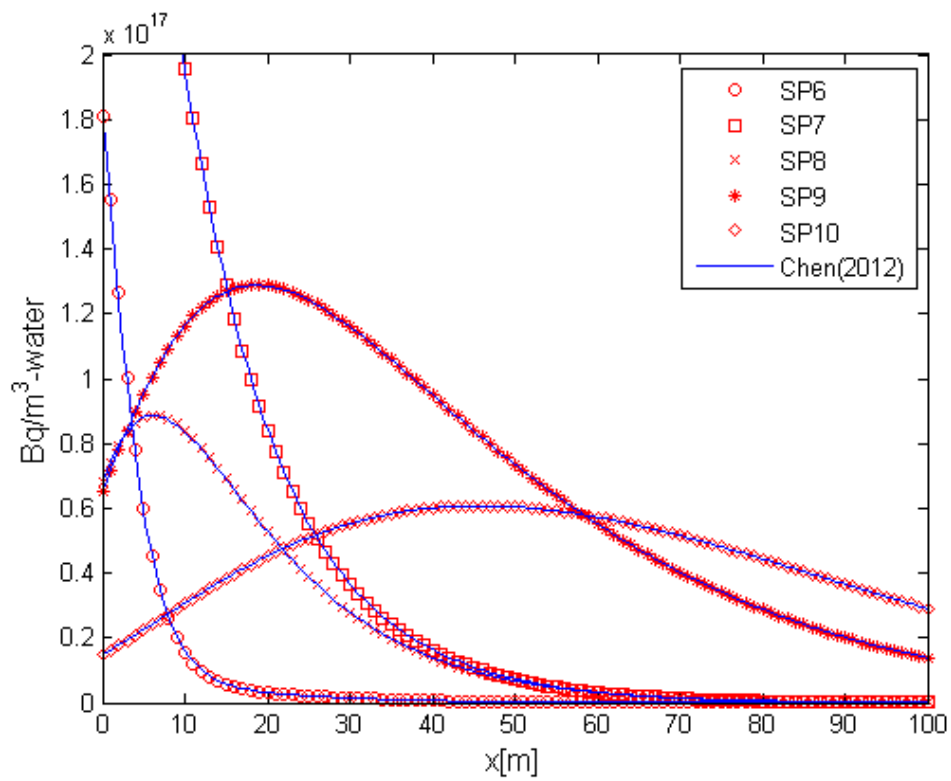


圖 5-7 SP6-SP10 位置濃度曲線圖

## 5.4 近岸坑道處置數值解整合安全分析架構應用案例

安全分析採用數值解的優勢為可以考慮複雜的設施設計、水文地質環境與傳輸機制，模擬的成果也較符合處置設施的人為條件與處置環境的自然特徵，但需要較複雜的數值模擬設定與演算時間。而解析解為透過合理簡化與考慮主要的水力與傳輸機制，因此採用解析解的優勢為可以快速提供解析成果，協助釐清處置設施的人為條件或處置環境的自然特徵對核種傳輸的主要影響，但對較複雜的設施設計、水文地質環境與傳輸機制則需要簡化。因此不論是數值解或解析解實各有其優缺點，適度的整合應用是可以提供安全分析的效益，尤其是協助釐清影響核種傳輸的水力或傳輸機制。圖 5-8 為近場遠場整合安全分析架構，概念上最需先釐清的是遠場流場，這是數值模擬的優勢，所以圖中的 3 種架構都是由數值模擬來提供遠場流場。採用全數值解的 2 種架構，差異在近場與遠場使否要同時模擬，同時模擬的優點在不需要去處理近場-遠場銜接的問題，但缺點在近場模擬相對於遠場模擬會需要較高解析的網格設定來擬真設施設計，因此近場-遠場同時模擬會需要較大的計算資源。若要簡化近場的特徵，則可以如 NUMO 的策略利用解析解來探討近場核種傳輸特性，則是如圖 5-8 的第 3 種整合架構。

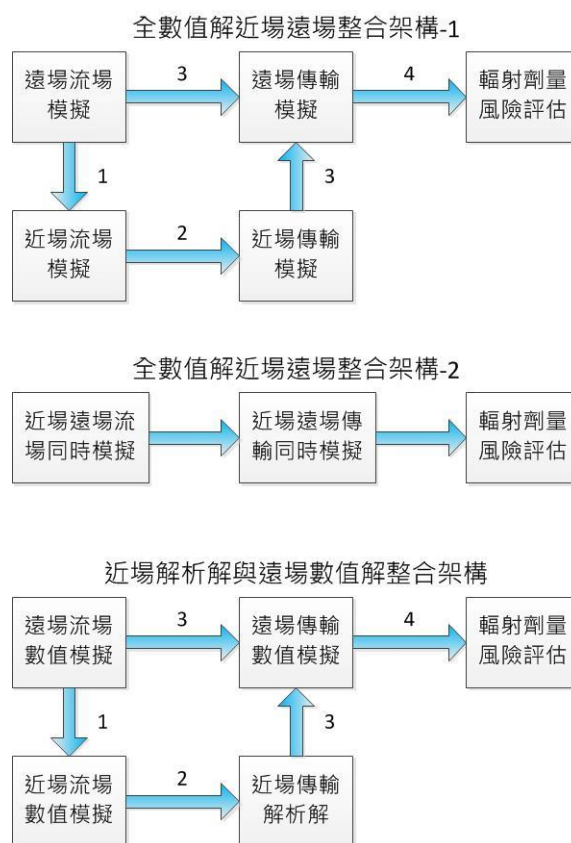


圖 5-8 近場遠場整合安全分析架構

本年度僅先針對遠場地下水與傳輸模擬進行探討，近場部分採用類似 NUMO 的基本情節假設為處置坑道近場核種透過擴散釋出，採用相對濃度再去

銜接遠場數值模擬來推估核種傳輸的空間分布。假設處置設施所在位置平面圖如圖 5-9 所示，場址位於近岸環境，所在高程為海平面以上 350 m、地表下 250 m，鄰近區域之最高高程為 600 m，地形高程沿著 AA' 剖面向海岸線遞減，具有多重處置坑道平面布置，坑道通行方向約略平行於海岸線，每一個處置坑道尺寸假設為寬 20 m、高 25 m，初步遠場地下水與傳輸模擬先針對單一坑道的核種外釋傳輸進行模擬。

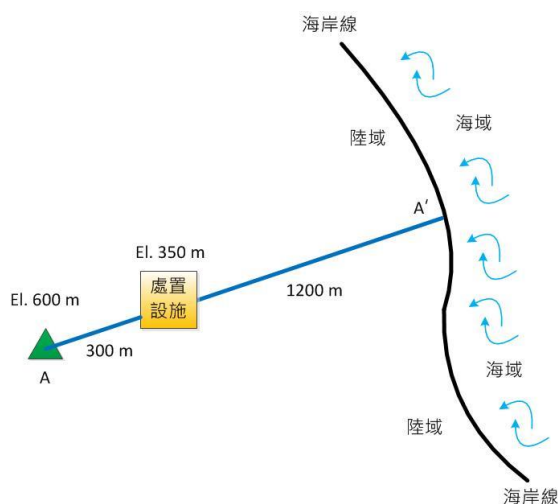


圖 5-9 近岸環境處置設施平面位置示意圖

將圖 5-9 中 AA' 剖面線依前述假設計分模擬網格如圖 5-10 所示，遠場地下水與傳輸模擬區域為高 600 m、長度 1500 m，內含一處置坑道寬 20 m、高 25 m 公尺，基本情節設定假設核種外釋的機制為擴散，因此處置坑道所在區域為內部邊界源，模擬區域孔隙率為 0.25，採用非等向性水力傳導係數  $K_x = 0.1 \text{ dm/day}$ 、 $K_z = 0.01 \text{ dm/day}$ 。地下水模擬部分，左側及下方邊界為零流量邊界設定，上方地形平坦處採降水入滲率為  $0.006 \text{ dm/day}$ ，斜坡處考慮逕流影響，入滲率調整為  $0.003 \text{ dm/day}$ ，右側流場邊界條件為定水頭。傳輸邊界條件，左側及下方邊界為零濃度梯度設定，入滲雨水與海水中的核種相對濃度皆為 0，處置坑道的核種外釋相對濃度定為 1，並加密處置窖周圍網格以得到更好的空間解析度。傳輸參數在縱向延散係數為  $1000 \text{ dm}$ 、側向延散係數為  $200 \text{ dm}$ 、擴散係數為  $0.066 \text{ dm}^2/\text{day}$ 。

共設計 4 個案例進行穩態模擬比較，說明如下：

- (1) 案例 1 為基本案例，因入滲雨水與海水中的核種相對濃度皆為 0，因此採用變動邊界條件(variable boundary condition)。若流場方向為由內部向外，則傳輸邊界條件為零濃度梯度邊界(zero concentration gradient)也就是內部濃度將隨流場帶出模擬區域；若流場方向為由外向內部，則邊界條件為通量邊界(flux type)，將由外部濃度(本案例為 0)乘上入流的流量為邊界條件，這是較正確的傳輸邊界條件設定方式。
- (2) 案例 2 與案例 1 大致相同，主要差異在上部與右側的傳輸邊界條件設為定濃度邊界條件，這是一種常被錯誤使用的邊界條件設定方式，透過模

擬來呈現相同的流場，但因為錯誤設定的傳輸邊界條件而造成的傳輸模擬誤差。

- (3) 案例 3 為假設海平面上升案例，考慮場址未來因氣候演化、海進或地形沉陷使海平面比現況上升，同案例 1 的設定，但將右方海平面拉高 50 公尺變為 150 公尺，地下水與傳輸模擬邊界條件設定也依假設變動。
- (4) 案例 4 海平面下降案例，考慮場址未來因氣候演化、海退或地形抬升使海平面比現況上升，同案例 1 的設定，但將右方海平面從原本 100 公尺降低為 50 公尺，地下水與傳輸模擬邊界條件設定也依假設變動。

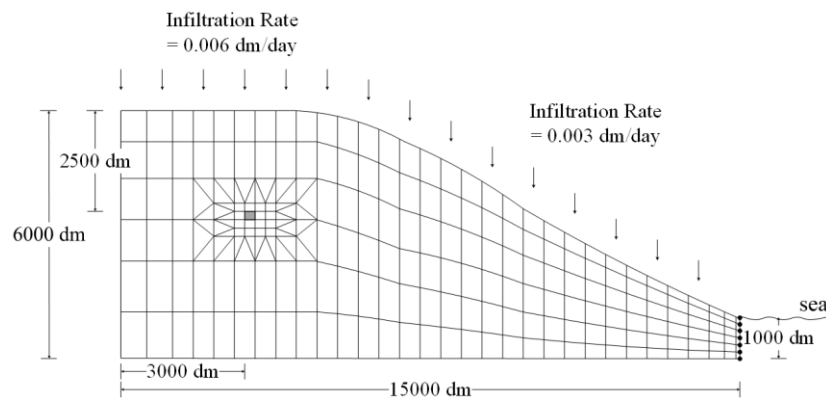


圖 5-10 遠場地下水與傳輸模擬網格與邊界條件

案例 1 為正常海水位設定，由於降雨入滲與地形，區域的優勢流場為由左側高地向右往海岸流動，圖 5-11 為壓力水頭分布，圖 5-12 為等水壓力面，圖中  $h=0$  的剖面為地下水位面位置，圖 5-13 為流場與總水頭圖， $h$  為總水頭，圖 5-14 為核種相對濃度分布圖。

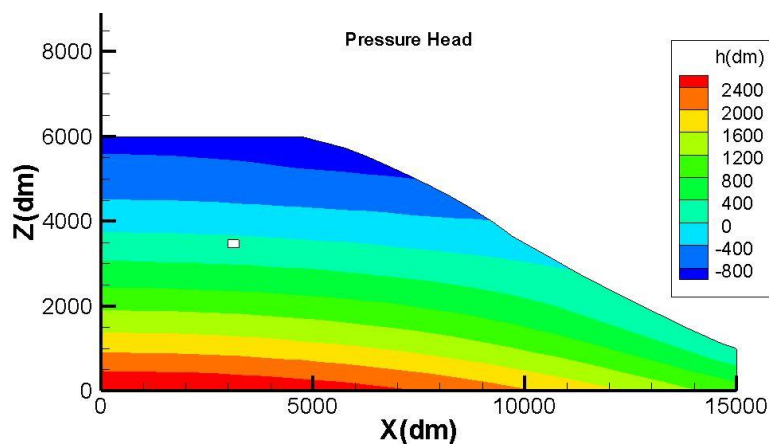


圖 5-11 案例 1-壓力水頭分布圖

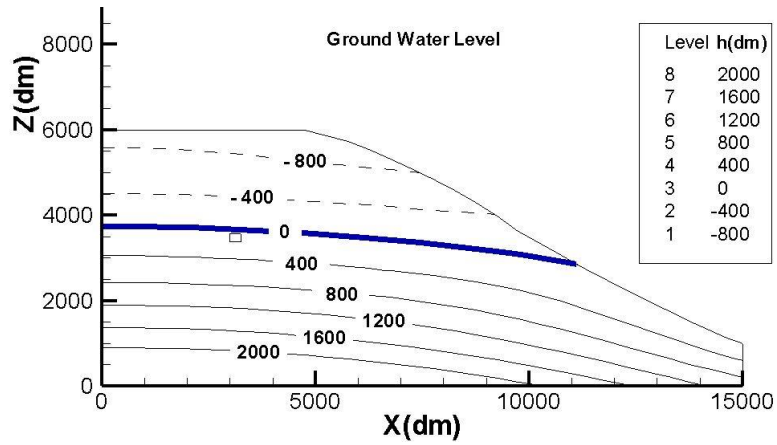


圖 5-12 案例 1-等水壓力面圖

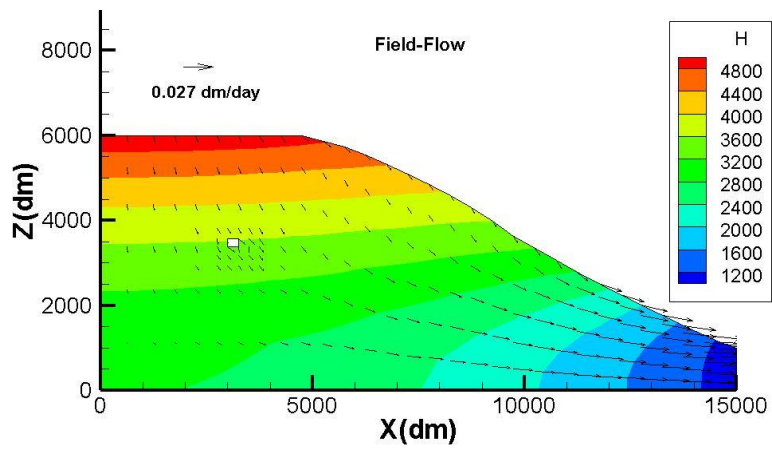


圖 5-13 案例 1-流場與總水頭圖

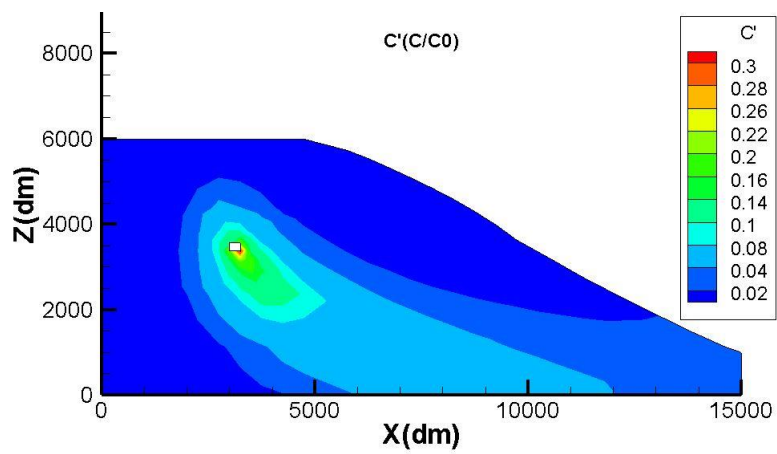


圖 5-14 案例 1-核種相對濃度分布圖



案例 2 為示範錯誤設定的傳輸邊界條件將產生的傳輸模擬錯誤結果，因為假設右側為定參考 0 濃度邊界，而無法反應核種傳輸至邊界的輸出，如圖 5-15 所示在  $X > 14000$  dm，相對濃度幾乎接近於 0，顯示因為錯誤設定的傳輸邊界條件和圖 5-14 有極大空間分布差異。

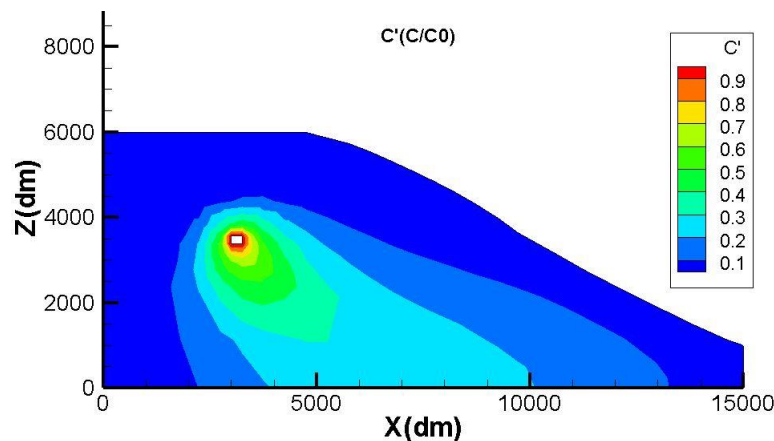


圖 5-15 案例 2-核種相對濃度分布圖

案例 3 為假設海平面上升案例，將右方海平面拉高 50 m 變為 150 m，地下水與傳輸模擬邊界條件設定也依假設變動，其餘參數使用與案例 1 相同，模擬結果如下，網格場與邊界條件設定如圖 5-16 所示，圖 5-17 為壓力水頭分布，圖 5-18 為等水壓力面，圖中  $h = 0$  的剖面為地下水位面位置，圖 5-19 為流場與總水頭圖， $h$  為總水頭，圖 5-20 為核種相對濃度分布圖，隨著右側海水面上升，與圖 5-15 比較可以發現，較高海平面使地下水位面較高，達穩態後之核種傳輸分布範圍較廣，相對濃度也較高。

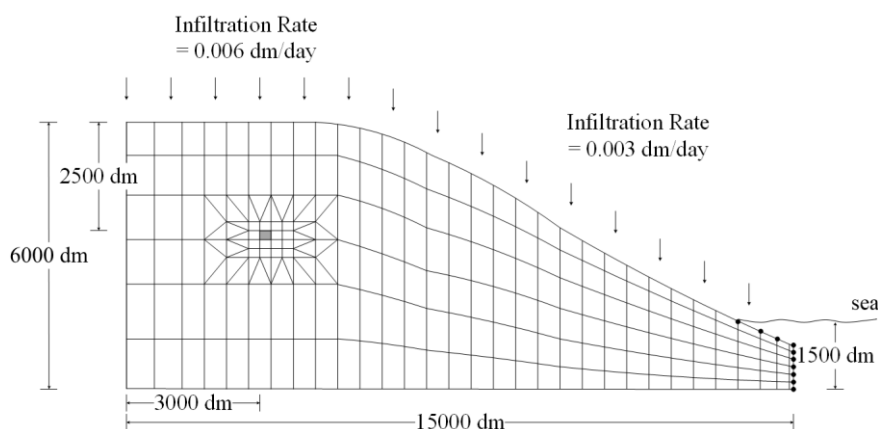


圖 5-16 案例 3-網格與邊界條件設定

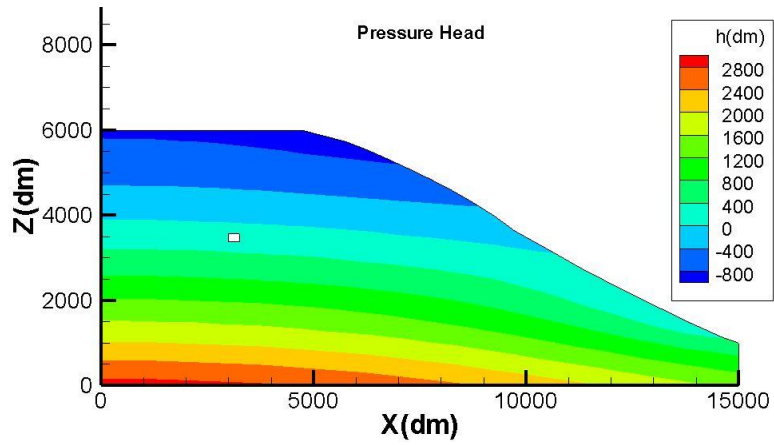


圖 5-17 案例 3-壓力水頭分布圖

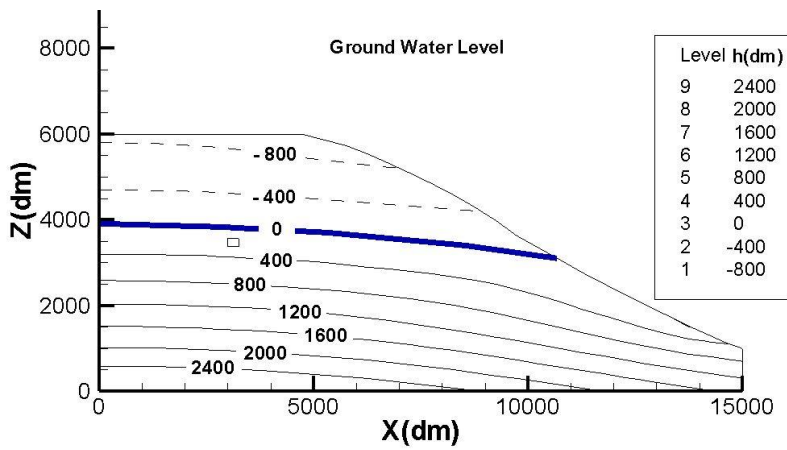


圖 5-18 案例 3-等水壓力面圖

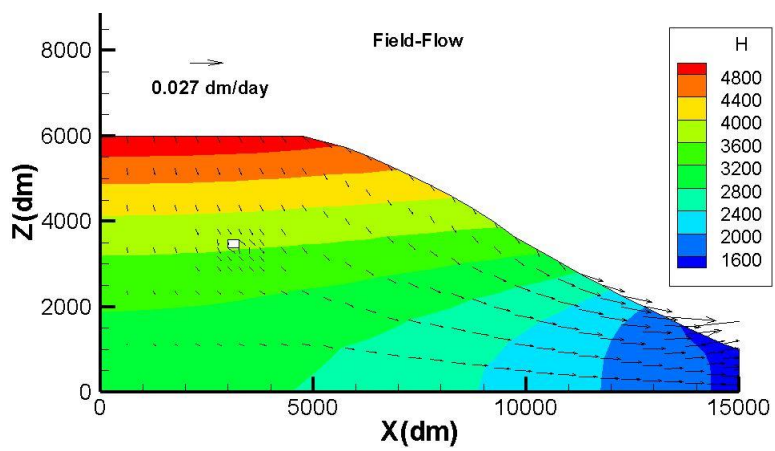


圖 5-19 案例 3-流場與總水頭圖

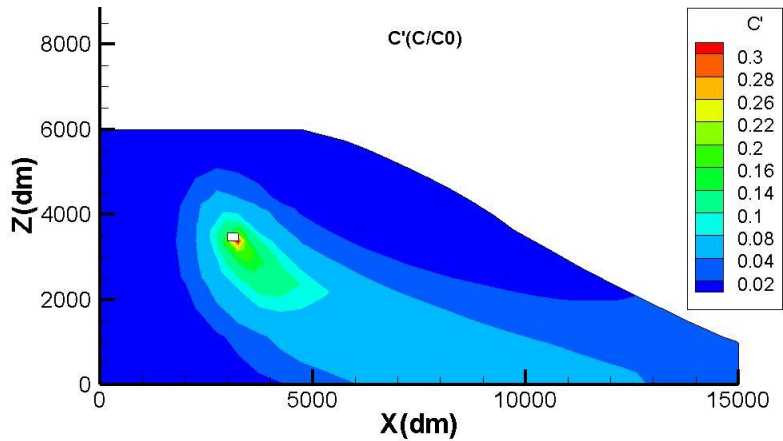


圖 5-20 案例 3-核種相對濃度分布圖

案例 4 為假設海平面下降案例，將右方海平面降低 50 m 變為 50 m，地下水與傳輸模擬邊界條件設定也依假設變動，其餘參數使用與案例 1 相同，模擬結果如下，網格場與邊界條件設定如圖 5-21 所示，圖 5-22 為壓力水頭分布，圖 5-23 為等水壓力面，圖中  $h = 0$  的剖面為地下水位面位置，圖 5-24 為流場與總水頭圖， $h$  為總水頭，圖 5-25 為核種相對濃度分布圖，隨著右側海水面下降，與圖 5-15 比較可以發現，較低的海平面使地下水位面較低，達穩態後之核種傳輸分布範圍較小，相對濃度也較低。圖 5-26 為案例 1、3、4 的地下水位面比較圖，隨著右側海水面變動而有不同地下水位面，但差異並不顯著，主要為目前的降雨入滲與地形設定為主要影響此案例優勢流場趨勢與水位面的主控因素，整體模擬高度有 600 公尺，右側水流定水頭邊界條件變動僅為 150 m、100m、50 m 的 +50 m 或 -50 m 的影響就不顯著。

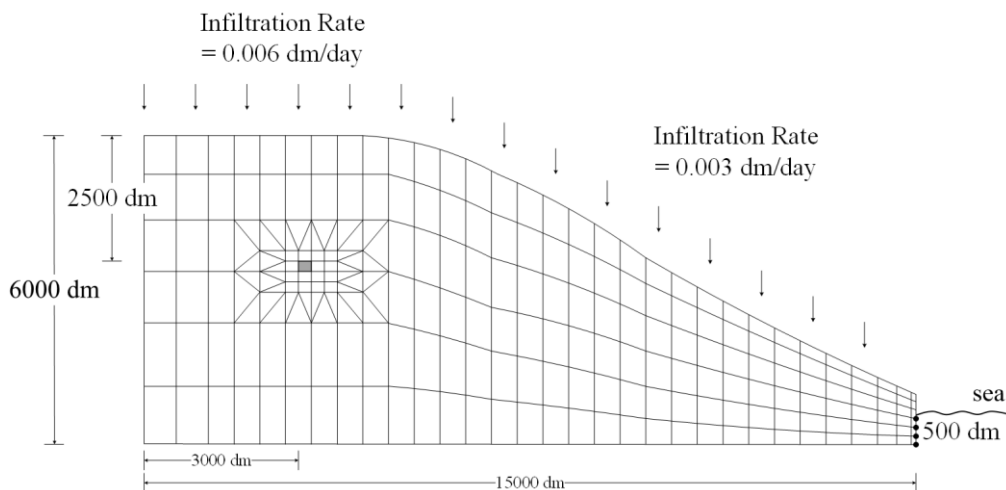


圖 5-21 案例 4-網格與邊界條件設定

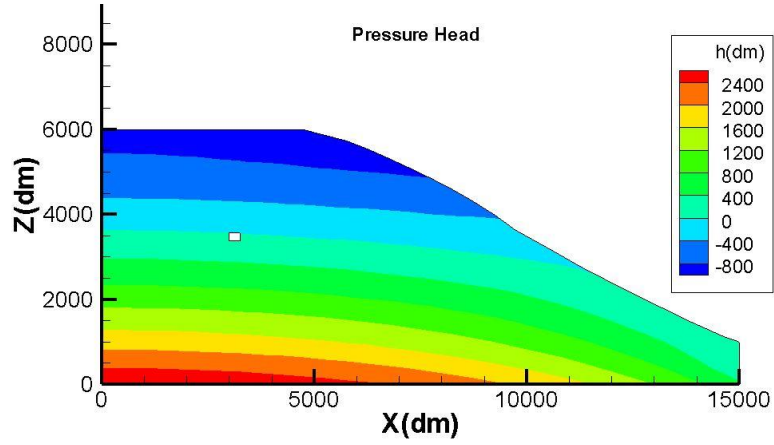


圖 5-22 案例 4-壓力水頭分布圖

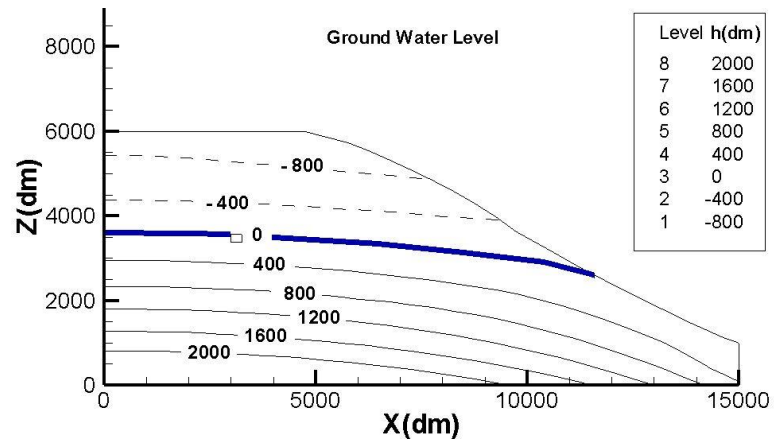


圖 5-23 案例 4-等水壓力面圖

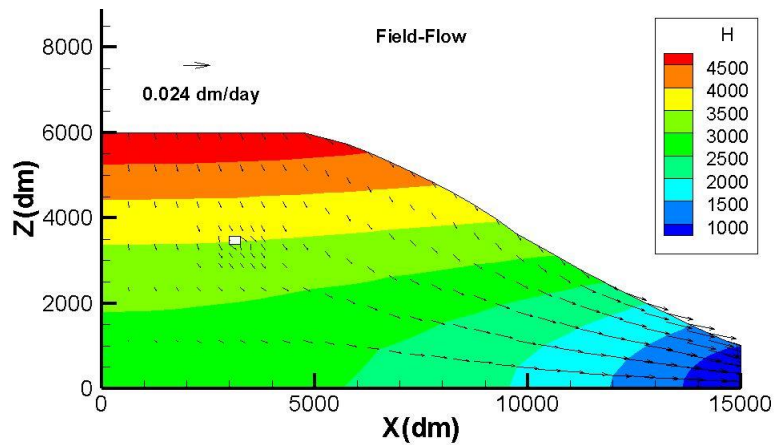


圖 5-24 案例 4-流場與總水頭圖

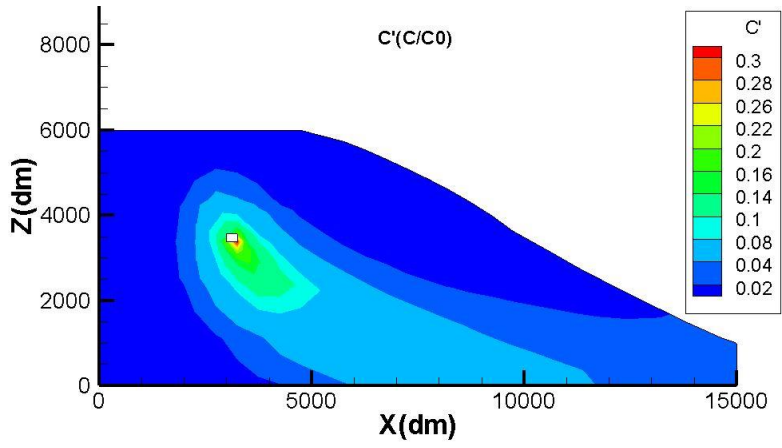


圖 5-25 案例 4-核種相對濃度分布圖

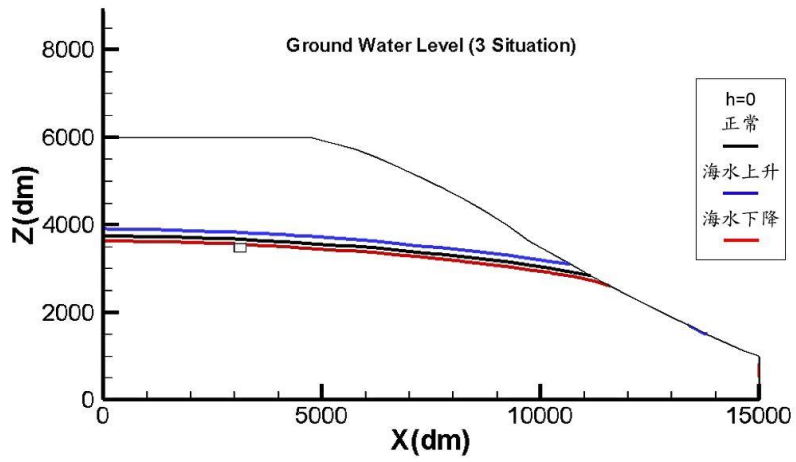


圖 5-26 案例 1、3、4 地下水位面比較圖

## 5.5 全解析解之近場遠場整合安全分析應用

本計畫擬利用解析解建立從廢料桶外釋進入近場進而至遠場之核種傳輸的模擬架構，因此解析解的模擬架構將包括近場與遠場兩個部份，近場模擬主要先參考日本 NUMO 的解析解建立過程並在本計畫中進行改進與修正，在遠場模擬的部份則採用於協同主持人於科技部計畫中所發展的暫態三維多子核種傳輸解析模式，最後將近場與遠場的傳輸模式連結建立整體的模擬架構。以下就相關架構進行說明。

### (1) 近場的解析解

近場的解析解主要是從 NUMO 的解析解改進著手，在 NUMO 的近場解析解發展主要以一維穩態(steady state)的直角座標系統的純擴散的傳輸方程式為基礎，在考慮核種的衰變反應下，配合不同的邊界條件求解。然而此解析解較為不合理的地方為只讓核種在單一方向擴散，在實際上擴散可能不只其所考慮的  $x$  方向，只要濃度梯度差， $y$  方向的核種傳輸也將會同時發生。解決這問題的方法就是在傳輸方程式裡把  $y$  方向的核種傳輸考慮，但如此將增加求解的困難度，因此本計畫考慮另外一種型式來納入考慮同時具  $x$  與  $y$  方向之二維傳輸，圖 5-27 為核廢料多重處置之多重屏障示意圖，考慮如圖 5-28 所示，將直角與圓柱座標系統的中心設於緩衝區的中心，在緩衝材料為均質假設下，可以合理的近似  $x$  與  $y$  方向有相同的擴散傳輸時，此時就方便以圓柱座標系統( $r$  與  $\theta$ )的傳輸方程式來描述二維的擴散傳輸，由於假設緩衝材料為均質，因此整個傳輸將以軸對稱的方式向外幅射傳輸，因此可忽略傳輸方程式  $\theta$  的微分項，而單純以  $r$  為變數來描述緩衝區的傳輸，核種遷移方向如圖 5-29 所示。

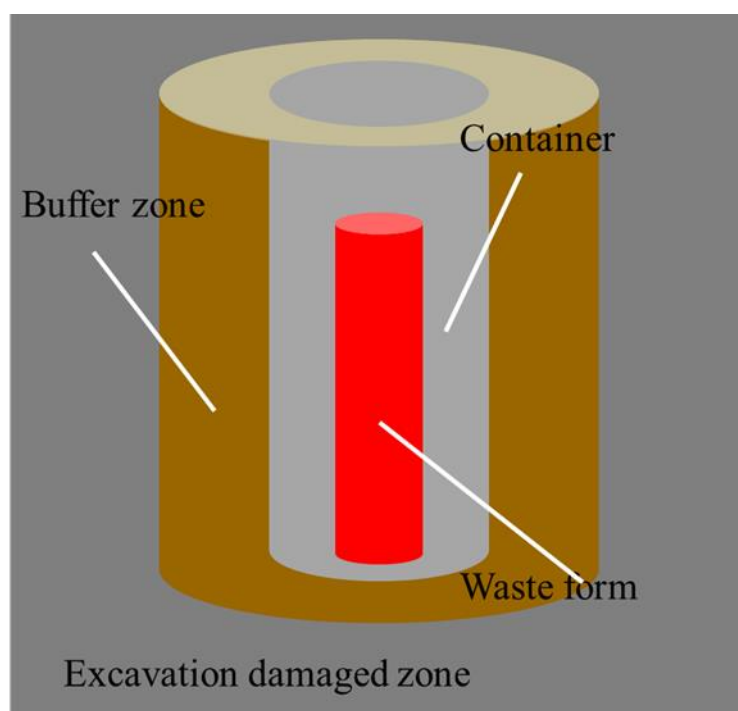


圖 5-27 核廢料處置之多重屏障

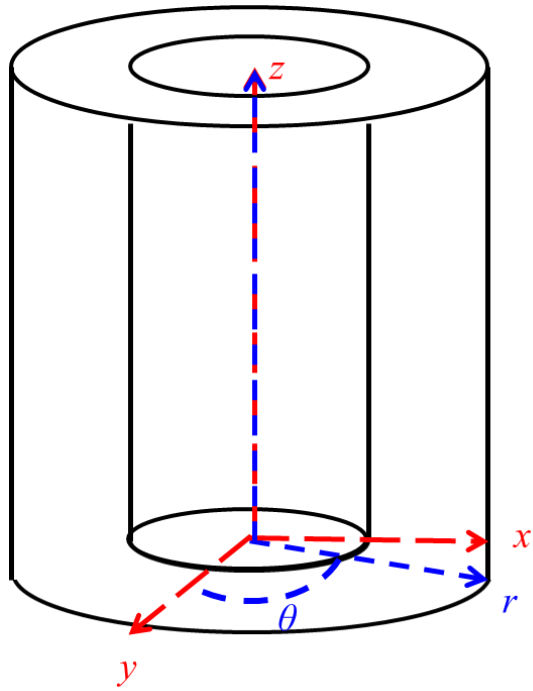


圖 5-28 在直角座標(紅色)與圓柱座標(藍色)中核種遷移之比較

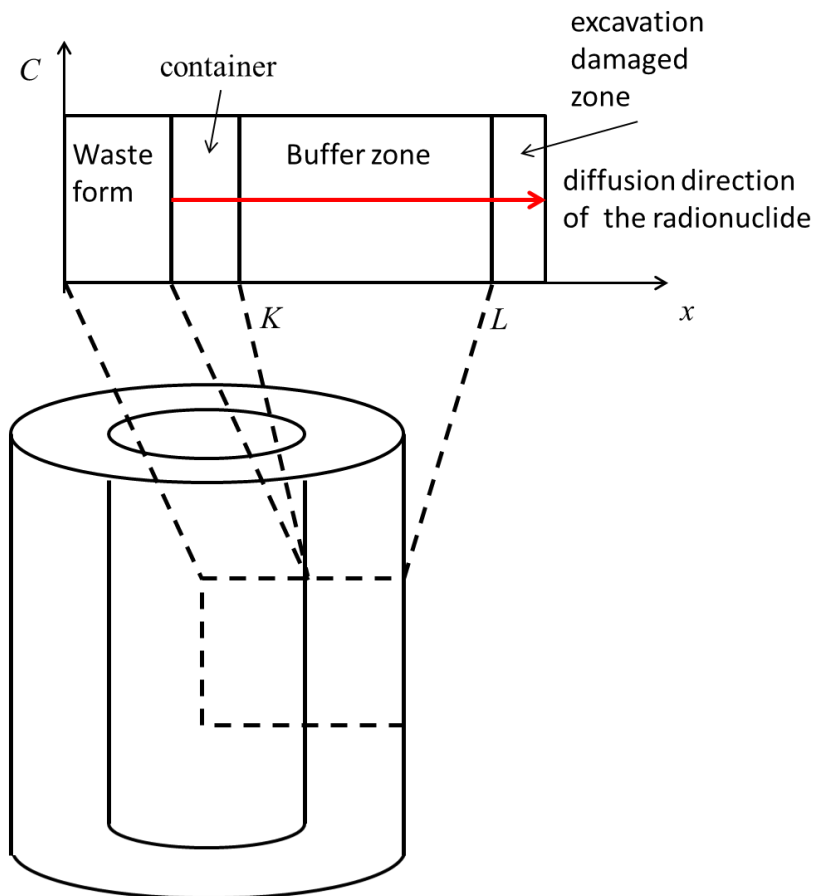


圖 5-29 核種在處置區中之遷移方向

(a) 一維直角座標系統的控制方程式與求解

考慮一維和衰變情況下，單核種之擴散方程式(5-8)：

$$\left[ \varepsilon + (1 - \varepsilon) K_d \rho \right] \frac{\partial C}{\partial t} = De \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \left[ \varepsilon + (1 - \varepsilon) K_d \rho \right] \lambda C \quad (5-8)$$

其中， $\varepsilon$  是緩衝區之孔隙率 (-)； $K_d$  是分配係數 (m<sup>3</sup>/kg)； $\rho$  是緩衝區之密度(kg/m<sup>3</sup>)； $C$  是緩衝區之濃度(kg/m<sup>3</sup>)； $t$  是時間 (year)； $De$  是緩衝區之擴散係數(kg/m<sup>2</sup>)； $x$  是距離 (m)； $\lambda$  是衰變常數(1/year)。

$\varepsilon + (1 - \varepsilon) K_d \rho$  是考慮孔隙間的濃度以及吸附在顆粒表面的濃度的變化。

假設已達穩態，引此內外之邊界條件為定值：

$$C(x = K, t) = C_K \quad (5-9)$$

$$C(x = L, t) = C_L \quad (5-10)$$

其中， $K$  是廢料罐中心到緩衝區內側之距離 (m)； $L$  是廢料罐中心到緩衝區外側之距離 (m)； $C_K$  是內側之濃度 (Bq/m<sup>3</sup>)； $C_L$  是外側之濃度 (Bq/m<sup>3</sup>)。

將式(5-8)同除  $\left[ \varepsilon + (1 - \varepsilon) K_d \rho \right]$ ：

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{De}{\left[ \varepsilon + (1 - \varepsilon) K_d \rho \right]} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \lambda C \\ &= \frac{De}{\varepsilon \left[ 1 + \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} K_d \rho \right]} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \lambda C \\ &= \frac{D_e}{\varepsilon R_d} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \lambda C \end{aligned} \quad (5-11)$$

假設穩態之直角座標，令  $D_a = \frac{D_e}{\varepsilon R_d}$

$$D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \lambda C = 0 \quad (5-12)$$

令  $C = \exp(fx)$  代入式(5-13)：



$$\begin{aligned}
D_a f^2 \exp(fx) - \lambda \exp(fx) &= 0 \\
\Rightarrow D_a f^2 - \lambda &= 0 \\
\Rightarrow f &= \pm \sqrt{\frac{\lambda}{D_a}}
\end{aligned} \tag{5-13}$$

得到通解；

$$C(x) = Ae^{\sqrt{ax}} + Be^{-\sqrt{ax}} \tag{5-14}$$

$$\text{其中， } a = \frac{\lambda \varepsilon R_d}{D_e} = \frac{\lambda}{D_a}$$

將邊界條件式(5-9)和式(5-10)代入式(5-15)：

$$C(K, t) = Ae^{\sqrt{aK}} + Be^{-\sqrt{aK}} = C_K \tag{5-15}$$

$$C(L, t) = Ae^{\sqrt{aL}} + Be^{-\sqrt{aL}} = C_L \tag{5-16}$$

式(5-15)和式(5-16)聯立求解，得到係數 A 和 B：

$$A = \frac{\frac{C_K}{e^{\sqrt{aL}}} - \frac{C_L}{e^{\sqrt{aK}}}}{\frac{e^{\sqrt{aL}}}{e^{\sqrt{aL}}} - \frac{e^{\sqrt{aK}}}{e^{\sqrt{aK}}}} = \frac{C_K \frac{1}{h_2} - C_L \frac{1}{h_1}}{\frac{h_1}{h_2} - \frac{h_2}{h_1}} \tag{5-17}$$

$$B = e^{\sqrt{aK}} e^{\sqrt{aL}} \frac{C_L e^{\sqrt{aK}} - C_K e^{\sqrt{aL}}}{\frac{e^{\sqrt{aK}}}{e^{\sqrt{aL}}} - \frac{e^{\sqrt{aL}}}{e^{\sqrt{aK}}}} = \frac{C_L h_1 - C_K h_2}{\frac{h_1}{h_2} - \frac{h_2}{h_1}} \tag{5-18}$$

$$\text{其中， } h_1 = e^{\sqrt{aK}}, \quad h_2 = e^{\sqrt{aL}}, \quad P_1 = \frac{h_1}{h_2} - \frac{h_2}{h_1}$$

將式(5-17)和式(5-18)代回式(5-12)：

$$C(x) = \frac{1}{P_1} \left[ \left( C_K \frac{1}{h_2} - C_L \frac{1}{h_1} \right) e^{\sqrt{ax}} - h_1 h_2 \left( C_K \frac{1}{h_1} - C_L \frac{1}{h_2} \right) e^{-\sqrt{ax}} \right] \tag{5-19}$$

(b) 二維圓柱座標系統的控制方程式與求解

將式(5-13)作圓柱座標並整理：

$$\begin{aligned}
 D_a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \lambda C &= 0 \\
 \Rightarrow D_a \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{D_a}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \lambda C &= 0 \quad (5-20) \\
 \Rightarrow r^2 \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + r \frac{\partial C}{\partial r} - r^2 \frac{\lambda}{D_a} C &= 0 \\
 \Rightarrow r^2 C'' + rC' - ar^2 C &= 0
 \end{aligned}$$

其邊界條件為：

$$C(r = K) = C_K \quad (5-21)$$

$$C(r = L) = C_L \quad (5-22)$$

根據 Modified Bessel Function of the First Kind：

$$x^2 y'' + xy' - (x^2 + v^2)y = 0$$

其解的形式為：

$$y(x) = AI_v(x) + BK_v(x)$$

因此得到式(5-20)之解為

$$C(r) = AI_0(\sqrt{ar}) + BK_0(\sqrt{ar}) \quad (5-23)$$

將邊界條件式(5-21)和式(5-22)代入式(5-23)：

$$C(K) = AI_0(\sqrt{aK}) + BK_0(\sqrt{aK}) = C_K \quad (5-24)$$

$$C(L) = AI_0(\sqrt{aL}) + BK_0(\sqrt{aL}) = C_L \quad (5-25)$$

式(5-24)和式(5-25)聯立求解，得到係數 A 和 B：

$$A = \frac{C_K K_0(\sqrt{aL}) - C_L K_0(\sqrt{aK})}{I_0(\sqrt{aK}) K_0(\sqrt{aL}) - I_0(\sqrt{aL}) K_0(\sqrt{aK})} \quad (5-26)$$

$$B = \frac{C_L I_0(\sqrt{aK}) - C_K I_0(\sqrt{aL})}{I_0(\sqrt{aK}) K_0(\sqrt{aL}) - I_0(\sqrt{aL}) K_0(\sqrt{aK})} \quad (5-27)$$

其中， $n_1 = I_0(\sqrt{aK})$ ， $n_2 = I_0(\sqrt{aL})$ ， $n_3 = K_0(\sqrt{aK})$ ， $n_4 = K_0(\sqrt{aL})$

將式(5-26)和式(5-27)代回式(5-23)：

$$\begin{aligned} C(r) &= A I_0(\sqrt{ar}) + B K_0(\sqrt{ar}) \\ &= \frac{C_K n_2 - C_L n_1}{n_3 n_2 - n_4 n_1} I_0(\sqrt{ar}) + \frac{C_K n_4 - C_L n_3}{n_3 n_2 - n_4 n_1} K_0(\sqrt{ar}) \end{aligned} \quad (5-28)$$

## (2) 遠場的解析解

遠場傳輸的解析解則採用於協同主持人科技部計畫中所發展的暫態三維多子核種傳輸模式，以下就控制方程式與解析解做簡單的描述。

考慮長寬高(L×W×H)的三維地下水系統，假設區域地水流為沿 x 方向均勻流(uniform flow)並達穩態(steady state)，主要傳輸機制將包括移流(advection)、縱向延散(longitudinal dispersion)、側向延散(transverse dispersion)、一階衰減反應(first-order decay reaction)與線性平衡吸附(linear adsorption)等，則任意長度衰變鏈核種傳輸方程式可表為：

$$\begin{aligned} D_x \frac{\partial^2 C_1(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_1(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_1(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial x} \\ - k_1 R_1 C_1(x, y, z, t) = R_1 \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (5-29)$$

$$\begin{aligned} D_x \frac{\partial^2 C_i(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_i(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_i(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_i(x, y, z, t)}{\partial x} \\ - k_i R_i C_i(x, y, z, t) + k_{i-1} R_{i-1} C_{i-1}(x, y, z, t) = R_i \frac{\partial C_i(x, y, z, t)}{\partial t} \end{aligned}$$

$$i = 2 \dots N. \quad (5-30)$$

此處  $C_i(x, y, z, t)$  為第 i 個物種物種濃度[ML<sup>-3</sup>]； $R_i$  表第 i 個物種遲滯因子 [dimensionless]； $D_x$  為縱向(水流方向)延散係數(longitudinal dispersion coefficient)[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]； $D_y$  與  $D_z$  為沿 y 方向與 z 方向之側向延散係數(transverse

dispersion coefficient) [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]； $v$  為孔隙水流速度(pore water velocity)； $k_i$  為第  $i$  個物種之一階衰減常數(first-order rate constant) [T<sup>-1</sup>]； $R_i$  為第  $i$  個物種之遲滯係數(retardation coefficient) [dimensionless]； $x$ 、 $y$ 、 $z$  為空間座標[L]； $t$  為時間[T]； $N$  為物種數量。

式(5-29)、(5-30)須在適當的初始與邊界條件求解，初始條件：

$$C_i(x, y, z, t = 0) = 0 \quad i = 1 \dots N \quad (5-31)$$

邊界條件：

考慮位於入流處第  $i$  個物種來源，此處將分別考慮入流處常見的兩種邊界條件(Dirichlet 與 Cauchy)，且邊界條件可隨時間任意變化，Cauchy 條件會滿足質量守恆，Dirichlet 條件則否，Cauchy 條件可表為

$$-D_L \frac{\partial C_i(x=0, y, z, t)}{\partial x} + v C_i(x=0, y, z, t) = \begin{cases} v f_i(t) & y_1 \leq y \leq y_2, z_1 \leq z \leq z_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-32)$$

$$i = 1 \dots N$$

此處  $f_i(t)$  為入流邊界源的時間分布，且來源為位於  $y_1 \leq y \leq y_2, z_1 \leq z \leq z_2$  之面源。

出流邊界條件表為

$$\frac{\partial C_i(x=L, y, z, t)}{\partial x} = 0 \quad i = 1 \dots N \quad (5-33)$$

此處  $L$  為  $x$  方向的長度。

$y$  與  $z$  邊界為溶質通量為零，表為

$$\frac{\partial C_i(x, y=0, z, t)}{\partial y} = 0 \quad i = 1 \dots N \quad (5-34)$$

$$\frac{\partial C_i(x, y=W, t)}{\partial y} = 0 \quad i = 1 \dots N \quad (5-35)$$

$$\frac{\partial C_i(x, y, z=0, t)}{\partial z} = 0 \quad i = 1 \dots N \quad (5-36)$$

$$\frac{\partial C_i(x, y, z=H, t)}{\partial z} = 0 \quad i = 1 \dots N \quad (5-37)$$

此處  $W$  為  $y$  方向的寬度；此處  $H$  為  $z$  方向的高度。

依循 Chen et al. (2012a; 2012b; 2015)可適用衰變鏈任意子物種的簡潔數學表示式之解析解為下式

$$C_i(X, Y, Z, T) = U_i(X, m=0, Z, T) + 2 \sum_{m=1}^{m=\infty} U_i(X, m, Z, T) \cos(m\pi Y) \quad (5-38a)$$

$$U_i(X, m, Z, s) = V_i(X, m, n=0, s) + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} V_i(X, m, n, s) \cos(n\pi Z) \quad (5-38b)$$

$$V_i(X, m, n, T) = f_i(T) \Phi_y(m) \Phi_z(n) + e^{\frac{Pe_x}{2} X} \sum_{l=1}^{\infty} N(\xi_l) K(\xi_l, X) [p_i(\xi_l, m, n, T) + q_i(\xi_l, m, n, T)] \Phi_y(m) \Phi_z(n) \Theta(\xi_l) \quad (5-38c)$$

$$p_i(\xi_l, m, n, T) = f_i(T) - \beta_i e^{-\alpha_i T} \int_0^T f_i(\tau) e^{\alpha_i \tau} d\tau \quad (5-38d)$$

$$q_i(\xi_l, m, n, T) = \sum_{j_1=0}^{j_1=i-2} \beta_{i-j_1-1} \prod_{j_2=0}^{j_2=j_1} \sigma_{i-j_2} \sum_{j_3=0}^{j_3=j_1+1} \frac{e^{-\alpha_{i-j_3} T} \int_0^T e^{\alpha_{i-j_3} \tau} f_{i-j_1-1}(\tau) d\tau}{\prod_{j_4=i}^{j_4=i} (\alpha_{j_4} - \alpha_{i-j_3})} \quad (5-38e)$$

此處  $X = \frac{x}{L}$ 、 $Y = \frac{y}{W}$ 、 $Z = \frac{z}{H}$ 、 $Y_1 = \frac{y_1}{W}$ 、 $Y_2 = \frac{y_2}{W}$ 、 $Z_1 = \frac{z_1}{H}$ 、 $Z_2 = \frac{z_2}{H}$ 、 $T = \frac{vt}{L}$ 、

$$Pe_x = \frac{vL}{D_x}$$
、 $Pe_y = \frac{vL}{D_y}$ 、 $Pe_z = \frac{vL}{D_z}$ 、 $\rho_Y = \frac{L}{W}$ 、 $\rho_Z = \frac{L}{H}$ 、 $\kappa_i = \frac{k_i R_i L}{v}$ 、

$$\alpha_i(\xi_l, m, n) = \frac{\lambda_i}{R_i} + \frac{\rho_y^2 m^2 \pi^2}{Pe_y R_i} + \frac{\rho_z^2 n^2 \pi^2}{Pe_z R_i} + \frac{Pe_x}{4R_i} + \frac{\xi_l^2}{Pe_L R_i}$$
、 $\beta_i(\xi_l) = \frac{Pe_x}{4R_i} + \frac{\xi_l^2}{Pe_L R_i}$ 、

$$\sigma_i = \frac{\lambda_{i-1}}{R_i}$$
、 $\Theta(\xi_l) = \frac{Pe_L \xi_l}{\frac{Pe_L^2}{4} + \xi_l^2}$ 、 $N(\xi_l) = \frac{2}{\frac{Pe_x^2}{4} + Pe_x + \xi_l^2}$ 、

$$\Phi_y(m) = \begin{cases} Y_2 - Y_1 & m=0 \\ \frac{\sin(m\pi Y_2) - \sin(m\pi Y_1)}{m\pi} & m=1,2,3\dots \end{cases}$$
、

$$\Phi_z(n) = \begin{cases} Z_2 - Z_1 & n = 0 \\ \frac{\sin(n\pi Z_2) - \sin(n\pi Z_1)}{n\pi} & n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} .$$

### (3) 近場與遠場的傳輸模式連結

近場與遠場的傳輸模式連結方式為，由近場所得的濃度空間變化可以計算離開近場的濃度通量  $F_r$ ，將濃度通量  $F_r$  乘上其通過的面積 ( $2\pi r_L H$ ) 可得單位時間從近場釋放的總核種量，考慮為近場釋放的總核種量為遠場解析傳輸模式的面邊界源如圖 5-28 所示，此面邊界源的尺寸可以近似考慮為  $2RH$ ，因此面邊界源

通量為  $\pi F_r$ ，因此可令式(5-32)的通量  $\nu f(t) = \pi F_r$ ，此時可得  $f(t) = \frac{\pi F_r}{\nu}$ ，將  $f(t) = \frac{\pi F_r}{\nu}$  代入式(5-38a)至(5-38e)之解析解可計算在任意位置之濃度  $C(x, y, z, t)$ 。

此處須特別注意的是在近場與遠場目前解析模式發展的複雜度並不一致，在近場目前為穩態單一子核種的傳輸，而遠場則已發展至暫態多子核種的傳輸。因此進一步將可發展近場穩態單一子核種為多子核種的傳輸的傳輸模式，使整個模擬架構可應用的條件更為寬廣。

#### 5.5.1 本計畫模式與 Numo 模式之比較

本計畫改進的圓柱座標系統軸對稱二維傳輸模式與 Numo 的直角座標一維傳輸模式之比較，可以釐清 Numo 的直角座標一維傳輸模式。

在圖 5-29 中(參考表 5-3)，比較衰變常數( $\lambda$ )以及擴散係數( $D_a$ )之比值( $a$ )的不同，進而瞭解直角座標和圓柱座標之間的差異性大小之變化。然而，擴散係數的變化較不明顯，因此我們是針對衰變常數進行探討。當  $\lambda$  值較大時，二者之間的差異性比較不明顯(圖 5-30b)。；反之，當  $\lambda$  值較小時，則二者之間的差異性比較明顯(圖 5-30a, 5-30c, 5-30d)。我們可以比較式(5-12)和式(5-20)，二式中的常數項是一樣，不同的地方是二階微分項。比較二階微分項與常數項對方程式之影響，常數項會有比較大的影響。因此，當  $\lambda$  值較大時，可以忽略二次微分項的影響，差異性較小。當  $\lambda$  值較小時，則要考慮二次微分項的影響，差異性較大。

進一步來說，衰變常數與物種的半衰期有關，呈現反比的變化。當  $\lambda$  值較大時，也就是半衰期較短的物種，其差異性較小；當  $\lambda$  值較小時，也就是半衰期較大的物種，其差異性則較大。

表 5-3 緩衝區內之參數

Parameter	Values
Inner concentration $C_K$ (Bq/m <sup>3</sup> )	10
Outer concentration $C_L$ (Bq/m <sup>3</sup> )	0.01
Distance from inner boundary $K$ (m)	1
Distance from outer boundary $L$ (m)	10
Porosity $E$ (-)	0.5
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1800
Distribution coefficient $Kd$ (m <sup>3</sup> /kg)	$1.0 \times 10^{-3}$
Diffusion coefficient $De$ (m <sup>2</sup> /year)	$1.87 \times 10^{-2}$
Decay constant of Pu-238 $\lambda$ (1/year)	$7.92 \times 10^{-3}$
Decay constant of U-234 $\lambda$ (1/year)	8.8
Decay constant of Th-230 $\lambda$ (1/year)	$9.15 \times 10^{-6}$
Decay constant of Ra-226 $\lambda$ (1/year)	$4.26 \times 10^{-3}$

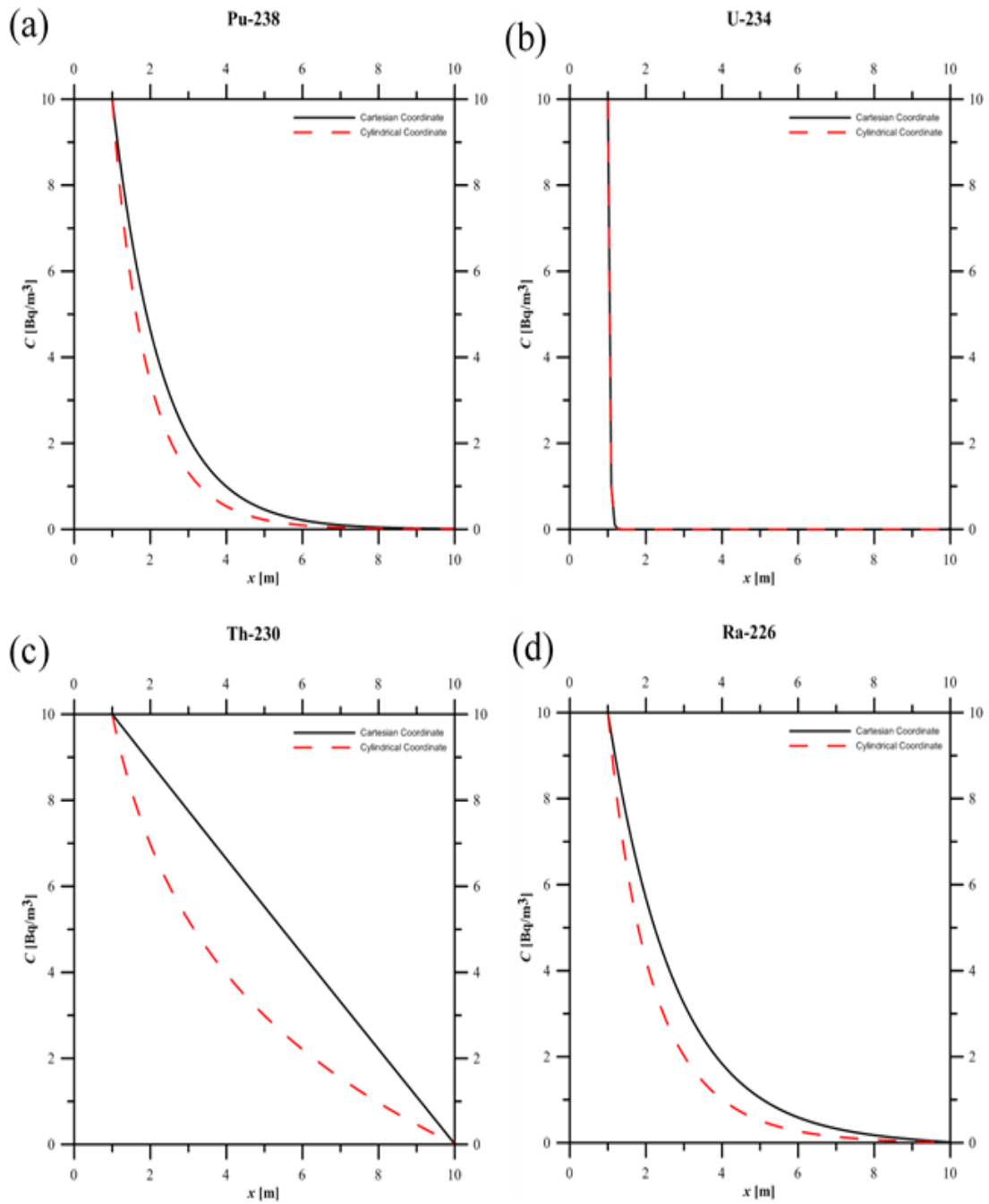


圖 5-30 不同物種比較圖

比較不同的物種，在直角座標與圓柱座標鐘，距離  $r$  為 1-10m 之濃度的差異性，其中衰變常數為 (a)  $\lambda = 7.92 \times 10^{-3}$  1/year (b)  $\lambda = 8.8$  1/year (c)  $\lambda = 9.15 \times 10^{-6}$  1/year (d)  $\lambda = 4.26 \times 10^{-3}$  1/year。



### 5.5.2 結合近場與遠場的傳輸模式之計算

廢料罐受侵蝕之後，罐中核廢料會隨著地下水流被帶出(見圖 5-31)，考慮區域地下水流  $v$  為  $0.511\text{m/year}$ ，假設縱向延散度(dispersivity)為  $a_L = \frac{L}{10}$ ，而側向與垂直向延散係數為縱向延散係數的十分之一，此處考慮  $L=1,200\text{m}$ ， $W=600\text{m}$ ， $H=600\text{m}$ ，面邊界源的大小為  $20 \times 25\text{m}^2$ ，藉由計算出的通量帶入面邊界源作為遠場的邊界條件，位於  $y=300\text{m}$ ， $z=300\text{m}$  處且沿著水流方向觀察濃度變化，其概念模式見圖 5-32，以物種  $^{226}\text{Ra}$  為例，模擬時間  $t=100000\text{year}$ ，得出濃度距離曲線圖(見圖 5-33)，位於  $y=300\text{m}$ ， $z=300\text{m}$  剖面上觀測  $x$  座標上濃度空間變化，從圖中可以觀察到濃度空間分佈大略呈指數衰減曲線，且在  $x=400\text{m}$  處濃度  $2.73 \times 10^4\text{Bq/m}^3$ ，已是邊界濃度的  $1/33$  倍，可以得知此溶質的傳輸行為是非常緩慢的，傳遞到  $x=1200\text{m}$  處時，濃度僅為  $5.55 \times 10^3\text{Bq/m}^3$ 。

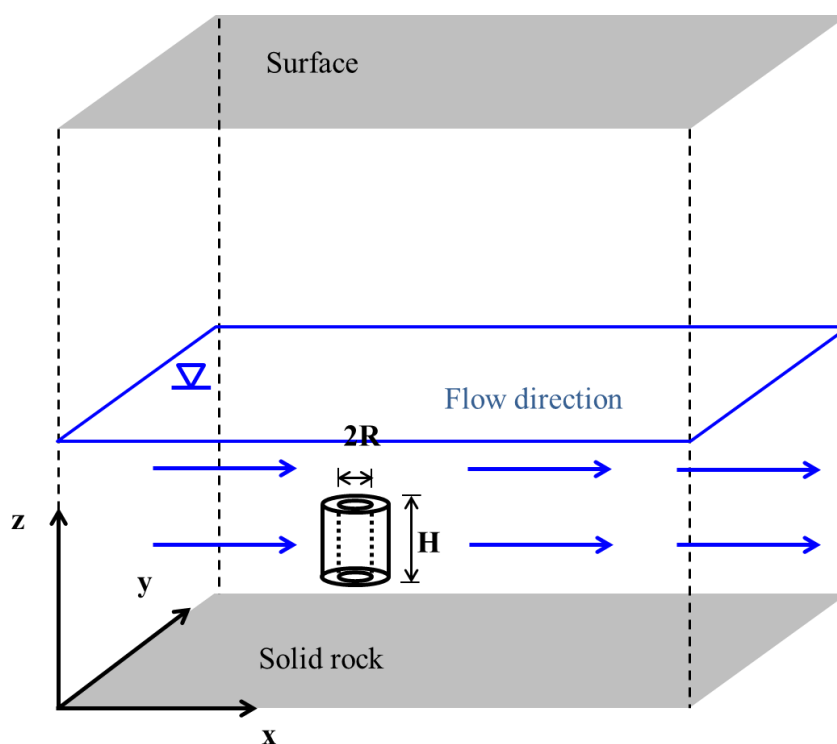


圖 5-31 核廢料罐受到侵蝕後，廢料隨著地下水流

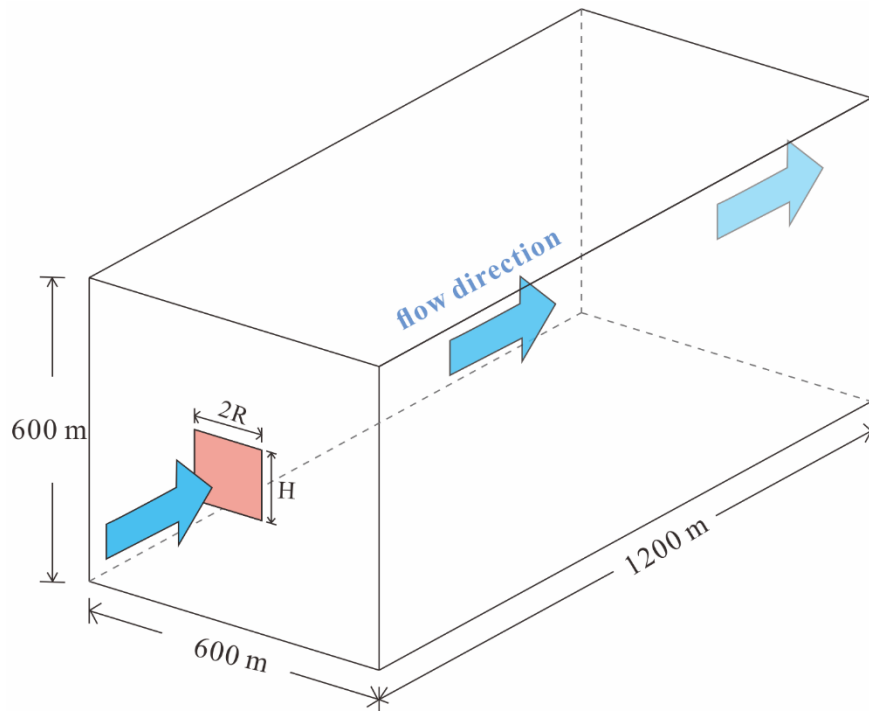


圖 5-32 核廢料通過緩衝區進入遠場之示意圖

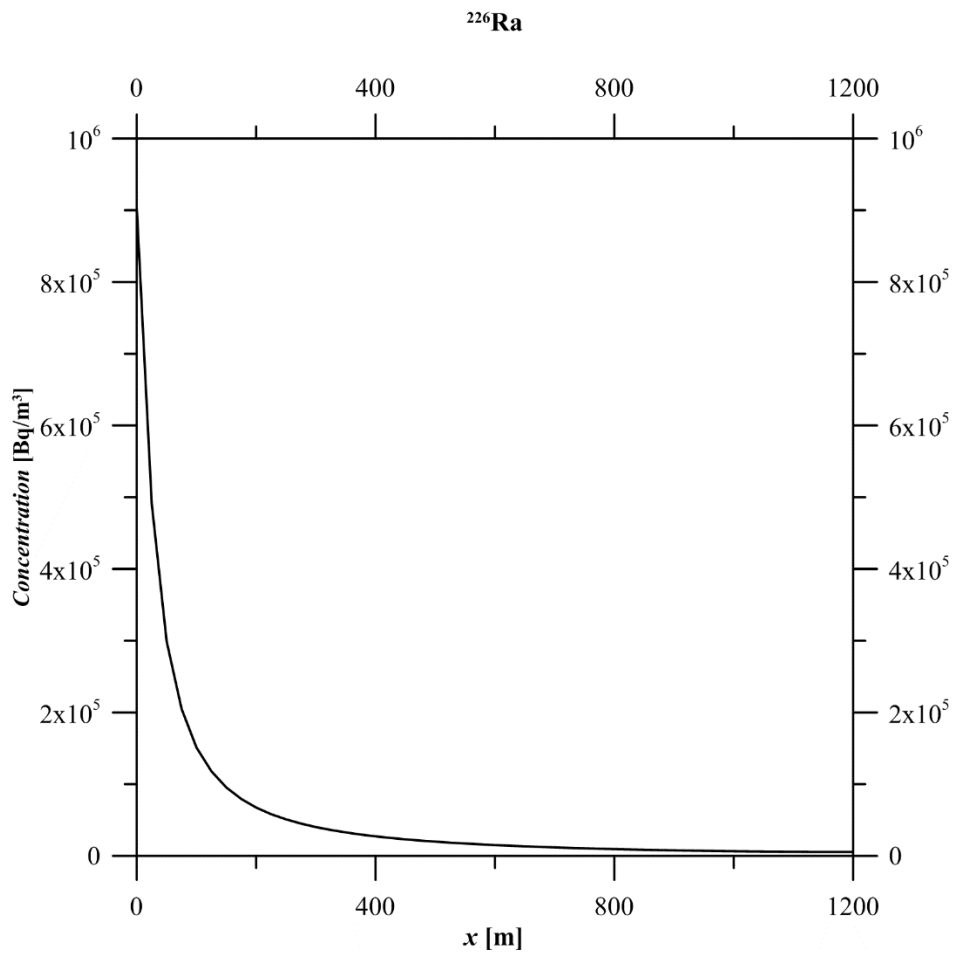


圖 5-33  $^{226}\text{Ra}$  之距離濃度曲線圖，於  $y=300\text{m}$ ,  $z=300\text{m}$  剖面

## 第六章、低放審查導則安全分析有關章節與條文內容修訂建議

本章綜合分析前述研析成果與我國現行技術規範，研擬「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」處置設施安全評估相關章節之精進建議。於2015年5月19日已配合總計畫招開審查導則第七章修訂專家會議，2015年6月17日台電公司之意見，本子計畫綜整專家會議與台電公司建議並逐條審視確認條文，針對第七章處置設施之安全評估進行修訂，後經物管局2015年8月12日確認進一步修改內容，於2015年9月8日總計畫招開之審查導則修訂專家會議再次確認修改文字，如附件一所示。

## 第七章、結論與建議

1. 坑道處置之近場功能評估關鍵議題研析工作，主要綜整 SKB SR-PSU 近場安全分析相關技術報告(TR-14-01、TR-14-04、TR-14-09)與 NUMO「地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性」，TR-10-03 技術報告中，主要發現為：(1)SR-PSU 的近場分析較 NUMO 完整，NUMO 報告專注在緩衝材料的安全功能；(2)SR-PSU 近場安全分析有 3 維流場模擬，NUMO 僅在開挖擾動區有地下水流需已知；(3)SR-PSU 近場安全分析有 3 維核種傳輸模擬，NUMO 為 1 維核種傳輸近似解析解。
2. 近場安全分析的關鍵議題，若要採取較全面的系統性分析，所可能涉及之關鍵議題包含工程障壁幾何形貌、氣候演化之溫度、水文相關、力學相關、工程障壁組成成分、水體成分、氣體等。而若採取較簡化如 NUMO 之作法，關鍵因子包含核種外釋機制、填充材料參數、緩衝材料參數、開挖擾動區參數等。
3. 近岸環境廢棄物處置之核種外釋移棲潛在區域包含海岸地區淺地表水體與近岸海域之海洋外釋，而近岸環境之遠場關鍵作用為海水/淡水交界面所形成之密度流流場。參考 SKB TR-14-05 與 NUMO TR-10-03 等技術報告中與近岸環境遠場安全分析相關關鍵議題整理如：(1)處置深度(設施設計相關)，所在含水層為淡水或海水；(2)密度流流場(場址特徵相關)，包含海水/淡水交界面、流場；(3)海平面上升/下降(演化情節)，將改變處置設施所在含水層特性；(4)水文地質(場址特徵相關)，如海水/淡水之物種組成、母岩礦物組成、孔隙率、水力傳導係數、延散係數、擴散係數、異質性、非等向性、是否有鄰近水井等；(5)水文氣象(場址特徵相關)，如降雨、蒸發散、鄰近水系等。
4. 離島環境海床下處置核種移棲主要機制為母岩擴散，但若存在裂隙與斷層破裂帶將加速核種在母岩之移棲與對生物圈的影響，在正常水位情境下，移棲至海床沉積層的外釋核種將由底泥擴散至近岸海域，由於潮汐與洋流的大量混合交換作用，因此主要的安全分析關注區域應是由海域向陸域的優勢流場傳輸機制。因此離島環境遠場安全分析相關關鍵議題有：(1)處置深度與坑道布置(設施設計相關)；(2)密度流流場(場址特徵相關)，包含海水/淡水交界面、流場；(3)海平面上升/下降(演化情節)，將影響優勢流場特性；(4)水文地質(場址特徵相關)，包含裂隙與斷層破裂帶特徵、海水/淡水之物種組成、母岩礦物組成、孔隙率、水力傳導係數、延散係數、擴散係數、異質性、非等向性、底泥沉積層特徵、陸域是否有鄰近水井等；(5)水文氣象(場址特徵相關)，包含降雨、蒸發散、潮汐、洋流等。
5. 氣候演化將改變近岸與離島環境的水文條件，最主要的影響在遠場流場與傳輸，近岸環境的地形梯度較大時，海平面變遷的影響相對較不顯著；而在離島環境的島嶼地形較平坦時，海平面變遷的影響相對顯著。

6. 低放射性廢棄物坑道處置近場與遠場整合安全分析研擬，研提多種整合應用策略架構，例如可採用國內研發的先進多核種衰變練解析解進行近場-遠場整合安全分析；也可以將解析解與數值解(如 HYDROGEOCHEM)進行近場-遠場整合安全分析應用；或是採用全數值解進行近場-遠場整合安全分析應用。不同的整合應用各有其優勢與需考量因子，因此如何整合應用，對場址特徵化與關鍵因子的掌握就相對重要。
7. 坑道處置近場-遠場整合安全分析案例，以 HYDROGEOCHEM 模擬遠場流場與傳輸在三種不同水面下由近場坑道外釋之相對核種濃度空間分布，由於地形高程遠大於海平面變動高程，因此相對核種濃度空間分布差異並不顯著。在近場-遠場全解析解整合應用部分，近場部分主要成果為改進 NUMO 近場解析解直角座標技術發展圓柱座標解析解以較符合源項外釋特徵，再整合遠場解析解應用。
8. 氣候演化將改變處置環境的水文特徵，然而由於國內所面對的處置環境與 SR-PSU 為在不同的氣候帶，因此適用於國內環境的氣候演化情境與如何改變近岸或離島的水文環境應建立相關技術。
9. 低放審查導則安全分析有關章節與條文內容修訂建議，配合總計畫專家會議期程，本年度共進行三次專家會議討論(2015 年 5 月 19 日、6 月 17 日、9 月 8 日)，也包含討論物管局與台電公司建議修改事項的討論，於 2015 年 9 月 8 日確認條文修改內容如附件一所示。

## 參考文獻

1. 經濟部，2011，低放射性廢棄物最終處置設施場址擇小組-建議候選場址遴選報告。
2. 董家鈞、陳瑞昇，2005，低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查技術之建立，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，942005FCMA002。
3. 董家鈞、陳瑞昇，2006，低放射性廢棄物隧道處置水文地質模擬技術發展現況與國內隧道工程水文地質模擬案例研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，952006FCMA002。
4. 行政院原子能委員會放射性物料管理局，低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第0版)，中華民國101年2月。
5. 任春平，2008，低放射性廢棄物最終處置功能安全評估模式審查技術之建立，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，97FCMA006。
6. 吳禮浩，2009，低放射性廢棄物坑道處置技術審查要項研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，98FCMA001。
7. 李境和，2007，低放射性廢棄物最終處置設施安全審查規劃研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，96FCMA001。
8. 李境和，2010，坑道式最終處置設施安全評估審查要項研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫。
9. 張福麟，2011，低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫，100FCMA007。
10. 李明旭、董家鈞，2012，放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，101FCMA008。
11. 李明旭、蔡世欽，2013，低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，102FCMA008。
12. 李明旭、蔡世欽，2014，低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫三：低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，103FCMA002
13. 中興工程顧問股份有限公司，2013，低放射性廢棄物最終處置技術可行性評估報告。
14. Chen, J.S., C.W. Liu, C.P. Liang, K.H. Lai, 2012, Generalized analytical solutions to sequentially coupled multi-species advective-dispersive transport equations in a finite domain subject to an arbitrary time-dependent source boundary condition, *Journal of Hydrology*, 456–457(16), 101-109.

15. Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 3: Safety Assessment of the Geological Disposal System, JNC-TN1410 2000-04, 458 pp.
16. IAEA, 2004, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities.
17. IAEA, 2009, Remediation of Land Affected by Radioactive Residues, Proceedings of an International Conference on the Remediation of Land Affected by Radioactive Residues Organized by the IAEA, Hosted by the Government of Kazakhstan and held in Astana, 18-22 May 2009.
18. IAEA, 2012, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards.
19. IAEA, 2013, Mathematical Models for Assessing Remediation of Radioactively Contaminated Sites (draft), edited by R. Avila, H. Monken-Fernandes, D. Jacques, B. Newman, J. Simunek, G. Yeh, C. Yu, M. Zhu.
20. IAEA, 2014, Planning and Design Considerations for Geological Repository Programmes of Radioactive Waste, IAEA TECDOC Series, IAEA-TECDOC-1755.
21. NRC, 2000, A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities, NUREG- 1573, Division of Waste Management, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001.
22. NUMO, 2011, 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, TR-10-03, 日本原子力発電環境整備機構。
23. SKB, Safety analysis for SFR Long-term safety: Main report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-01, 2014.
24. SKB, 2014, Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, TR-14-04.
25. SKB, 2014, Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-05.
26. Yeh, G. T., J. T. Sun, P. M. Jardine, W. D. Burger, Y. L. Fang, M. H. Li, and M. D. Siegel, 2004a. HYDROGEOCHEM 4.0: HYDROGEOCHEM 4.0: A Coupled Model of Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Saturated-Unsaturated Media: Version 4.0. ORNL/TM-2004/103, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831.
27. Yeh, G. T., J. T. Sun, P. M. Jardine, W. D. Burger, Y. L. Fang, M. H. Li, and M. D. Siegel, 2004b. HYDROGEOCHEM 5.0: A Three-Dimensional Model of Coupled Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Variably Saturated Conditions - Version 5.0. ORNL/TM-2004/107, Oak Ridge

National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831.

28. Yeh, G. T., J. T. Sun, P. M. Jardine, W. D. Burger, Y. L. Fang, M. H. Li, and M. D. Siegel, 2009. HYDROGEOCHEM 5.5: A Three Dimensional Model of Coupled Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Variably Saturated Conditions Version 5.5. Dept. of Civil and Environ. Engineering, University of Central Florida, 4000 Central Florid Blvd, Orlando, FL 32816.



附件一

說明：本草案依據為 2015 年 5 月 19 日專家會議及 2015 年 6 月 17 日台電公司修訂意見後之再修訂版本。

「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)

第七章處置設施之安全評估修訂草案對照表

修正條文	現行條文	說明
<p>7.1 輻射劑量評估：說明廢棄物性質與場區之可能核種傳輸路徑及特性，並分別評估運轉期(廢棄物接收、暫存、吊卸、處理、處置、除汙排水)及封閉後正常與異常狀況下對工作人員及民眾輻射劑量之影響，並與現行法規做比較。</p> <p>一、廢棄物描述： <del>包括總數量、總活度、廢棄物特性基本假設等。</del> 廢棄物為處置設施安全評估的重要資料，應提供充足資料供審查，以確保處置安全。為妥善描述處置的低放射性廢棄物，本節內容應提供下列資料，若在其他章節已提出可免提供，但請說明出處。</p> <p>(一)提供資料 1. 申請處置設施前，國內各設施已產生的低放射性廢棄物：<del>內容包括廢</del></p>	<p>7.1 輻射劑量評估：說明廢棄物性質與場區之可能核種傳輸路徑及特性，並分別評估運轉期(廢棄物接收、暫存、吊卸、處理、處置、除汙排水)及封閉後正常與異常狀況下對工作人員及民眾輻射劑量之影響，並與現行法規做比較。</p> <p>一、廢棄物描述： 包括總數量、總活度、廢棄物特性基本假設等。 廢棄物為處置設施安全評估的重要資料，應提供充足資料供審查，以確保處置安全。為妥善描述處置的低放射性廢棄物，本節內容應提供下列資料，若在其他章節已提出可免提供，但請說明出處。</p> <p>(一)提供資料 1. 申請處置設施前，國內各設施已產生的低放射性廢棄物：內容包括廢</p>	<p>刪除與後續提供資料重覆文字。</p> <p>文字修訂。</p>

<p><del>棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置。</del></p> <p>2. 國內已存在或可能新增設施，預估可能產生的低放射性廢棄物<del>及其未來趨勢：內容包括廢棄物種類、數量、特性及活度。</del></p> <p>3. 廢棄物種類資料，包括廢棄物的來源、處理方式、固化劑、螯合劑成分、盛裝容器(是否為高完整性盛裝容器)、及其分類。</p> <p>4. 廢棄物數量資料，包括廢棄物處理後的體積、重量及包裝後的數量。</p> <p>5. 廢棄物特性資料，包括廢棄物的組成及其物理與化學特性、自由水含量、抗壓強度、瀝濾指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。</p> <p>6. 廢棄物活度資料，包括主要核種(含難測核種)的名稱、半衰期、推估處置時之活度及平均濃度。</p> <p><del>7. 處置設施內的廢棄物之處置相關規劃。</del></p> <p><del>8. 處置設施運轉期間，接收、貯存及處置廢棄物之規劃。</del></p> <p><del>9. 處置設施封閉時所產生之廢棄物規劃。</del></p>	<p>棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置。</p> <p>2. 國內已存在或可能新增設施，預估可能產生的低放射性廢棄物及其未來趨勢：內容包括廢棄物種類、數量、特性及活度。</p> <p>3. 廢棄物種類資料，包括廢棄物的來源、處理方式、固化劑、螯合劑成分、盛裝容器(是否為高完整性容器)、及其分類。</p> <p>4. 廢棄物數量資料，包括廢棄物處理後的體積、重量及包裝後的數量。</p> <p>5. 廢棄物特性資料，包括廢棄物的組成及其物理與化學特性、自由水含量、抗壓強度、瀝濾指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。</p> <p>6. 廢棄物活度資料，包括主要核種(含難測核種)的名稱、半衰期、推估處置時之活度及平均濃度。</p> <p>7. 處置設施內的廢棄物之處置相關規劃。</p> <p>8. 處置設施運轉期間，接收、貯存及處置廢棄物之規劃。</p> <p>9. 處置設施封閉時所產生之廢棄物規劃。</p>	<p>文字修訂。</p> <p>有關7、8、9部分，因非廢棄物特性描述，且： 7 已於第2章說明 8 已於第6章說明 9 已於第11章說明 故建議刪除此3項。</p>
---	--	---

<p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. <del>提供資料中廢棄物種類、數量、特性、活度之預估資料應符合本導則 2.5 節廢棄物來源與特性之規範，是否合理？是否足夠用於設施之安全評估？應合理且足供設施安全評估使用。</del></li> <li>3. <del>已產生的廢棄物資料，是否足以判斷運轉期間預期接收低放射性廢棄物規劃之適當性？</del></li> <li>4. <del>場址內特定核種之總存量(如 C-14、H-3、Tc-99 或 I-129)或某些 A 類廢棄物之結構穩定性之要求，可列入處置設施之運轉執照內之限制條件。</del></li> <li>5. <del>處置設施場址封閉時所產生之廢棄物之種類、型態及數量等資訊，應至少足以判斷封閉計畫的合理性。</del></li> </ol> <p>二、核種傳輸特性： 評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，<del>因地下水滲漏流</del>及核種擴散、延散與遲滯吸</p>	<p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 提供資料中廢棄物種類、數量、特性、活度之預估資料，是否合理？是否足夠用於設施之安全評估？</li> <li>3. 已產生的廢棄物資料，是否足以判斷運轉期間預期接收低放射性廢棄物規劃之適當性？</li> <li>4. 場址內特定核種之總存量(如 C-14、H-3、Tc-99 或 I-129)或某些 A 類廢棄物之結構穩定性之要求，可列入處置設施之運轉執照內之限制條件。</li> <li>5. 處置設施場址封閉時所產生之廢棄物之種類、型態及數量等資訊，應至少足以判斷封閉計畫的合理性。</li> </ol> <p>二、核種傳輸特性： 評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，地下水滲流、擴散、延散與遲滯吸附等特性參</p>	<p>文字修訂，並以正面肯定敘述文字說明。依物管局 8/12/2015 建議，修正有關廢棄物描述規範可見於第 2 章第 5 節。</p> <p>本節主要針對廢棄物描述之規範，無需要另針對 3 之運轉期規劃、5 之封閉計畫相關與 4 之特定核種總量另外說明，建議可以刪除。</p> <p>物管局 8/12/2015 回應：本章屬處置設施之安全評估，而本節有關廢棄物描述之規範，已訂於第 2 章第 5 節中，於本章節可說明出處，直接引用做為分析基礎，無需重複說明，同意刪除。</p> <p>物管局 08/12/2015 回應： 第一段文字為報告導則文字，惟於審查導則對應章節中，皆有直接引用報告</p>
---	---	---

<p>附等特性機制影響參數，以模擬分析地下水滲漏流機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。</p> <p>核種藉水與空氣介質的傳輸，外釋到人類的活動範圍。水是核種外釋到生物圈的重要傳輸介質是重要的傳輸機制，所以須提供評估模式所需特性參數與資料，如：水與核種在工程障壁與天然障壁間的滲漏流場與流量等資料，核種擴散、延散、遲滯吸附等特性參數及其流場與流量等資料；對處置場的安全評估甚為重要，至少應提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置場址附近至少連續一年的水文與的氣象資訊：水從處置設施覆蓋層(或坑道壁上層)的地表滲漏到處置單元之滲漏分析數據與滲漏分析方式。</p> <p>(1) 滲漏分析數據：包含地質統計技術、近似值、處理、數據產生及/或消</p>	<p>數，以模擬分析地下水滲流機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。</p> <p>核種藉水與空氣介質的傳輸，外釋到人類的活動範圍。水介質是重要的傳輸機制，所以須提供水與核種在工程障壁與天然障壁間的滲流、擴散、延散等特性，及其流場與流量等資料；對處置場的安全評估甚為重要，至少應提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置場址附近的氣象資訊：水從處置設施覆蓋層(或坑道壁上層)的地表滲漏到處置單元之滲漏分析數據與滲漏分析方式。</p> <p>(1) 滲漏分析數據：包含地質統計技術、近似值、處理、數據產生及/或消</p>	<p>導則文字進行初始說明，故建議保留，惟有關語意不通順部分，請提出修訂建議，可一併做為後續報告導則修訂參考。</p> <p>滲流改用滲漏以和後續資料提供相符，並建議修正文字。</p> <p>本節資料提供之說明皆無空氣傳輸相關，刪除空氣介質文字。修正文字敘述以和前段文字相符。滲流改用滲漏。</p> <p>TPC 建議「...須提供評估模式所需的特性參數」。修正條文改為「...須提供評估模式所需特性參數與資料」，以資料涵蓋較廣</p> <p>除氣象資訊外，應還需包含「水文資訊」；於「低放射性廢棄物最終處置場址之環境安全因子審查技術規範研議」研究報告中，建議至少要有一年連續紀錄的長期性氣象資料內容較完整。刪除不必要文辭。</p> <p>於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正</p>
--	--	--

<p>去、保守估計、以及為達到較佳模擬結果而將現地資訊或實驗室數據所做之最佳化調整<u>與不確定性分析</u>。</p> <p>(2) 滲漏分析方式：<u>其描述</u>包含<u>資料文件</u>、<u>假設</u>、<u>模式</u>、驗證及校正。</p>	<p>去、保守估計、以及為達到較佳模擬結果而將現地資訊或實驗室數據所做之最佳化調整。</p> <p>(2) 滲漏分析方式：<u>其描述</u>包含文件、假設、驗證及校正。</p>	<p>建議，除了最佳化調整外，應還需包含「不確定性分析」較為適當。</p> <p>於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告 4.2 節建議，使用名詞「資料」較為適當，並其描述應還需包含「模式」較為完整。</p>
<p>2. 提出滲漏時進入處置單元之水流體積以及滲漏之時間與空間分佈之預測。包括最大<u>可能降雨量</u>、可能<u>降雨</u>之時間分佈。</p>	<p>2. 提出滲漏時進入處置單元之水流體積以及滲漏之時間與空間分佈之預測。包括最大降雨量、可能降雨之時間分佈。</p>	<p>文字修訂</p>
<p>3. 評估工程<u>障壁覆蓋層(或坑道壁上層)</u>材料的侵蝕、穴居動物、植物生態對滲漏之影響。</p>	<p>3. 評估工程覆蓋層(或坑道壁上層)材料的侵蝕、穴居動物、植物生態對滲漏之影響。</p>	<p>文字修訂</p>
<p>4. <u>工程障壁覆蓋層(或坑道壁上層)</u>之工程設計：包含厚度、橫向延伸、材料粒徑、邊坡、總孔隙度與有效孔隙度、水力傳導係數以及含水量與毛細勢能與水力傳導係數之關係。</p>	<p>4. 覆蓋層(或坑道壁上層)之工程設計：包含厚度、橫向延伸、材料粒徑、邊坡、總孔隙度與有效孔隙度、水力傳導係數以及含水量與毛細勢能與水力傳導係數之關係。</p>	<p>文字修訂</p>
<p>5. 工程障壁材料與天然障壁對地下水之擴散與延散參數值。</p>	<p>5. 工程障壁材料與天然障壁對地下水之擴散與延散參數值。</p>	
<p>6. 工程障壁材料與天然障壁對<u>關鍵重要</u>核種的遲滯吸附參數值。</p>	<p>6. 工程障壁材料與天然障壁對重要核種的遲滯吸附參數值。</p>	<p>「重要」修改為「關鍵」。</p>

<p><del>7. 預估滲漏引起的地層下陷。</del></p> <p>(二) 審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 用於估算場址滲漏量之數據及分析技術是否合理，驗證<u>工程障壁覆蓋層</u>系統之物理特性並確認其數值足夠保守或真實。</li> <li>3. <u>工程障壁覆蓋層(或坑道壁上層)</u>是否具降低滲漏及導引滲漏水流遠離廢棄物之能力。</li> <li>4. 擴散、延散與遲滯吸附參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較，<u>並估計其可信賴度</u>。</li> <li>5. <del>水流透過覆蓋層(或坑道壁上層)系統導致之下陷效應預估是否合理。</del></li> </ol> <p>三、正常狀況之輻射劑量：</p>	<p>7. 預估滲漏引起的地層下陷。</p> <p>(二) 審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 用於估算場址滲漏量之數據及分析技術是否合理，驗證覆蓋層系統之物理特性並確認其數值足夠保守或真實。</li> <li>3. 覆蓋層(或坑道壁上層)是否具降低滲漏及導引滲漏水流遠離廢棄物之能力。</li> <li>4. 擴散、延散與遲滯吸附參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</li> <li>5. 水流透過覆蓋層(或坑道壁上層)系統導致之下陷效應預估是否合理。</li> </ol> <p>三、正常狀況之輻射劑量：</p>	<p>與 7.4 節長期穩定內容重複</p> <p>文字修訂</p> <p>文字修訂</p> <p>應考慮參數的可信賴度。</p> <p>與 7.4 節長期穩定內容重複</p>
---	---	--

<p>評估處置設施運轉期間及封閉後在正常狀況之輻射劑量，包括傳輸機制說明、情節分析、<u>概念模式說明、評估模式及程式說明</u>、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及<u>使用之評估程式</u>。</p> <p><u>處置設施核准運轉後，包含五個時期，分別為運轉期、封閉期、觀察及監測期、主動監管期(或稱監管期)及被動監管期(或稱被動期)。</u></p> <p>運轉期間，將接收廢棄物進行處置，對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。曝露途徑有地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物等途徑。</p> <p>場址封閉期時，對場址內土地除污及/或結構拆除，仍會產生一些放射性廢棄物並須處置。對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。</p> <p>為降低對民眾與工作人員之輻射劑量，所以處置場須採多重障壁的防護措施。須評估處置設施運轉期間及封閉後在正常狀況下對民眾與工作人員之輻射劑量，為使輻射劑量評</p>	<p>評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之輻射劑量，包括傳輸機制說明、情節分析、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。</p> <p>處置設施核准運轉後，包含五個時期，分別為運轉期，封閉期，觀察及監測期，主動監管期(或稱監管期)及被動監管期(或稱被動期)。</p> <p>運轉期間，將接收廢棄物進行處置，對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。曝露途徑有地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物等途徑。</p> <p>場址封閉期時，對場址內土地除污及/或結構拆除，仍會產生一些放射性廢棄物並須處置。對場外民眾有直接曝露的風險；對場內工作人員，可能造成體內曝露與體外曝露。</p> <p>為降低對民眾與工作人員之輻射劑量，所以處置場須採多重障壁的防護措施。須評估處置設施運轉期及封閉後在正常狀況下對民眾與工作人員之輻射劑量，為使輻射劑量評估</p>	<p><b>TPC 建議運轉期改為運轉期間。</b></p> <p>增加概念模式、評估模式及程式驗證及確認之審查條文。 刪除修改後之重複用字。</p> <p><b>TPC 建議我國法規未明確定義處置設施核准運轉後將包含五個時期，故建議刪除時期定義，改為狀態描述以維持原意。</b></p> <p><b>TPC 建議運轉期改為運轉期間。</b></p>
--	---	---

<p>估合理及保守，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制說明：包含地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物及其他傳輸機制。</p> <p>(1) 地下水：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉地下水外釋之排放點、(b)考慮螯合劑之影響或其他可能提高放射性核種遷移之化學媒介時，所使用的放射性核種外釋模型及參數值、(c)滲漏進入處置單元之水量、<u>自處置單元向天然障壁流出之水量及其與放射性核種外釋之關係</u>資料。</p> <p>(2) 空氣：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉空氣外釋之排放點與排放區域、(b)廢棄物分解產生的放射性氣體、處置單元或集水坑積水之蒸發氣體、(c)場址污染土壤、地表、與建築物之釋出空浮<u>放射</u></p>	<p>合理及保守，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 處置設施運轉期及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制說明：包含地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物及其他傳輸機制。</p> <p>(1) 地下水：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉地下水外釋之排放點、(b)考慮螯合劑之影響或其他可能提高放射性核種遷移之化學媒介時，所使用的放射性核種外釋模型及參數值、(c)滲漏進入處置單元之水量與放射性核種外釋之關係資料。</p> <p>(2) 空氣：(a)定義並量化處置單元中重要核種藉空氣外釋之排放點與排放區域、(b)廢棄物分解產生的放射性氣體、處置單元或集水坑積水之蒸發氣體、(c)場址污染土壤、地表、與建築物之釋出空浮、(d)</p>	<p>處置設施於運轉期及封閉後，在正常狀況下，工程障壁仍保有其功能，滲漏進入處置單元之水地下水，可能受到工程障壁阻絕而減少流出之水量，進而降低放射性核種的外釋量，因此須考慮自處置單元向天然障壁流出之水量。</p> <p><u>文字修訂。</u> <u>與生物有關移至(5)生物小節。</u></p>
---	--	---



<p><del>性物質、(d) 植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成污染</del>物之空浮、<del>(e)</del>封閉作業時，建築物除污或拆除作業造成之空浮<u>污染物</u>。</p> <p>(3) 地表水：(a)處置單元中的排水、排水層或集水坑以及有可能接觸到廢棄物之地表水、(b)場址污染土壤、地表、與建築物透過地表水傳輸之污染物、(c)<del>植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘之</del>污染物經地表水的傳輸、<del>(d)</del>封閉作業時，建築物除污或拆除作業透過地表水傳輸之污染物。</p> <p>(4) 直接輻射：(a)廢棄物運送車輛之加馬輻射、(b) 部分場址運轉時之加馬輻射、(c) 主動監管期間，處置單元上衰減之加馬輻射與場址污染地表或建物之加馬輻射。</p> <p>(5) 生物：定義並定量直接經由生物途徑將污染物外釋及傳輸至場址外，如(a)穴居動物由場址帶</p>	<p>植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成污染物之空浮、(e)封閉作業時，建築物除污或拆除作業造成污染物之空浮。</p> <p>(3) 地表水：(a)處置單元中的排水、排水層或集水坑以及有可能接觸到廢棄物之地表水、(b)場址污染土壤、地表、與建築物透過地表水傳輸之污染物、(c)植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘之污染物經地表水的傳輸、(d)封閉作業時，建築物除污或拆除作業透過地表水傳輸之污染物。</p> <p>(4) 直接輻射：(a)廢棄物運送車輛之加馬輻射、(b) 部分場址運轉時之加馬輻射、(c) 主動監管期間，處置單元上衰減之加馬輻射與場址污染地表或建物之加馬輻射。</p> <p>(5) 生物：定義並定量直接經由生物途徑將污染物外釋及傳輸至場址外，如穴居動物由場址帶走</p>	<p>與生物有關移至(5)生物小節。</p> <p>文字新增由空氣與地表水中與生物有關之傳輸。</p>
--	---	---

<p>走污染物後，被獵人宰食、(b) 植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘造成之空浮污染物、(c) 植物根部或穴居動物或昆蟲挖掘之污染物經地表水的傳輸。</p> <p>2. 正常情節(或稱設計情節)分析：</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、事件及作用過程(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家就處置場的氣候與水文地質特性、周圍環境及處置場設計，從國際常用的 FEP 通用表篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，並記錄任何 FEP 被排除的原因。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等)，分析並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件經常發生及緩慢發生的事件、各重</p>	<p>污染物後，被獵人宰食。</p> <p>2. 正常情節(或稱設計情節)分析：</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵事件過程(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家就處置場的氣候與地質特性、周圍環境及處置場設計，從國際常用的 FEP 通用表篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，並記錄任何 FEP 被排除的原因。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等)，分析並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件經常發生及緩慢發生的事件、各重</p>	<p>於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出情節(Scenario)是對影響處置場功能之可能未來的描述，包含特徵(Feature)、事件(Event)及作用(Process)等的組合，即為 FEP。</p> <p>文字修訂。</p>
--	--	---

<p>要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 因放射性核種在各重要組件內傳輸可分為氣體、液體與固體的形態；考量選出的 FEPs，以合理的邏輯方法，繪出放射性核種傳輸的路徑，並建構出氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節。</p> <p><u>3. 應根據場址資訊與合理性研擬正常狀況下之概念模式，說明如何根據其結果建構與選用評估模式。</u></p> <p><u>4. 選用之程式需經過專業之驗證及確認後方能使用於評估報告。</u></p> <p>5. 提出正常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料與輸出資料。</p> <p>6. 對正常情節輻射劑量評估程式的參數，進行敏感度分析。</p> <p>7. 對敏感度高的參數，考量參數的分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>8. 民眾與工作人員之輻射劑量評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p>	<p>要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 因放射性核種在各重要組件內傳輸可分為氣體、液體與固體的形態；考量選出的 FEPs，以合理的邏輯方法，繪出放射性核種傳輸的路徑，並建構出氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節。</p> <p>3. 提出正常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料與輸出資料。</p> <p>4. 對正常情節輻射劑量評估程式的參數，進行敏感度分析。</p> <p>5. 對敏感度高的參數，考量參數的分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。</p> <p>6. 民眾與工作人員之輻射劑量評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p>	<p>增加概念模式、評估模式及程式驗證及確認之提供資料條文。且參酌 TPC 建議，新增第 3、4 點建議於(一)提供資料內(原建議在審查作業內，和四、異常狀況內之新增在提供資料不一致)。新增在提供資料較合適。</p> <p>原 3~6 改為 5~8。</p>
---	---	---

<p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 正常狀況之核種傳輸機制說明：</p> <p>(1) 提供的核種傳輸機制(地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物)資料是否足以供進行獨立的安全評估。</p> <p>(2) 放射性核種傳輸機制是否合理且保守。</p> <p>3. 正常情節分析：</p> <p>(1) 篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，是否經由專家學者所確認：被排除的 FEPs 之原因是否合理。</p> <p>(2) 處置設施重要組件的 <b>FEPs 特徵事件與過程</b> 是否已充分考量。</p> <p>(3) 氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節是否合理。</p> <p>4. 正常情節輻射劑量評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</p>	<p>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>2. 正常狀況之核種傳輸機制說明：</p> <p>(1) 提供的核種傳輸機制(地下水、空氣、地表水、直接輻射、生物)資料是否足以供進行獨立的安全評估。</p> <p>(2) 放射性核種傳輸機制是否合理且保守。</p> <p>3. 正常情節分析：</p> <p>(1) 篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，是否經由專家學者所確認：被排除的 FEPs 之原因是否合理。</p> <p>(2) 處置設施重要組件的特徵事件與過程是否已充分考量。</p> <p>(3) 氣體傳輸正常情節、液體傳輸正常情節、固體傳輸正常情節是否合理。</p> <p>4. 正常情節輻射劑量評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</p>	<p>文字修訂。</p>
--	--	--------------

<p>5. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</p> <p><b>四、異常狀況之輻射劑量：</b></p> <p>評估處置設施運轉期<del>間</del>及封閉後在意外事故或異常狀況下之輻射劑量，包括傳輸機制說明、意外事故或異常狀況之發生頻率、情節分析、<u>概念模式說明、評估模式及程式說明</u>、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。</p> <p>處置設施<del>在運轉期、封閉期、觀察及監測期、主動監管期及被動監管期</del>，可能發生人為或天然的意外事件。這些人為或天然的意外事件，通常發生的機率都很低，若其發生所產生的後果影響輕微，則可忽略不計；若發生所產生的後果影響嚴重，則應評估其影響。故此處的異常狀況之輻射劑量，係針對發生機率低後果影響嚴重的人為或天然意外事件，對民眾與工作人之輻射劑量評估。</p> <p>(一)提供資料</p>	<p>5. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</p> <p><b>四、異常狀況之輻射劑量：</b></p> <p>評估處置設施運轉期及封閉後在意外事故或異常狀況下之輻射劑量，包括傳輸機制說明、意外事故或異常狀況之發生頻率、情節分析、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。</p> <p>處置設施在運轉期，封閉期，觀察及監測期，主動監管期及被動監管期，可能發生人為或天然的意外事件。這些人為或天然的意外事件，通常發生的機率都很低，若其發生所產生的後果影響輕微，則可忽略不計；若發生所產生的後果影響嚴重，則應評估其影響。故此處的異常狀況之輻射劑量，係針對發生機率低後果影響嚴重的人為或天然意外事件，對民眾與工作人之輻射劑量評估。</p> <p>(一)提供資料</p>	<p>TPC 建議運轉期改為運轉期間。</p> <p>增加概念模式、評估模式及程式驗證及確認之審查條文。</p> <p>TPC 建議我國法規未明確定義處置設施核准運轉後將包含五個時期，故建議刪除時期定義，改為狀態描述以維持原意。</p> <p>TPC 建議運轉期改為運轉期間。</p>
--	---	--

<p>1. 處置設施運轉期<del>間</del>及封閉後，意外事故或異常狀況之預測：包括事故種類(如<del>運轉時</del>廢棄物包件從吊車墜落；<del>封閉後發生有害、地震、海水淹沒處置場海嘯、暴潮、人類無意入侵處置場、豎井或調查井發生回填失效</del>)及發生頻率。</p> <p>2. 處置設施運轉期<del>間</del>及封閉後，依事故種類說明意外事故或異常狀況之核種傳輸機制。</p> <p>3. 異常情節(或稱替代情節)分析：處置設施運轉期<del>間</del>及封閉後，意外事故或異常狀況之處置情節。</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、<del>事件過程及作用</del>(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家從國際常用的 FEP 通用表篩選出與該處置場異常情況相關的 FEPs。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等)，分析並說明</p>	<p>1. 處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之預測：包括事故種類(如運轉時廢棄物從吊車墜落；封閉後發生有害地震、海水淹沒處置場、人類無意入侵處置場)及發生頻率。</p> <p>2. 處置設施運轉期及封閉後，依事故種類說明意外事故或異常狀況之核種傳輸機制。</p> <p>3. 異常情節(或稱替代情節)分析：處置設施運轉期及封閉後，意外事故或異常狀況之處置情節。</p> <p>(1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵事件過程(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)。</p> <p>(2) 經學者專家從國際常用的 FEP 通用表篩選出與該處置場異常情況相關的 FEPs。</p> <p>(3) 選出處置系統的重要組件(如廢棄物體、各種工程障壁(近場)、天然障壁(遠場)、生物圈等)，分析並說明</p>	<p>增加海嘯、暴潮。於「低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討」研究報告中，指出在處置場封閉後，出現破壞情節的狀況包含：因人類無意的入侵行為、豎井或調查井發生回填失效等因素。</p> <p>TPC 建議運轉期改為運轉期間。</p> <p>TPC 建議運轉期改為運轉期間。</p> <p>中文翻譯文字修訂。</p>
--	--	---

<p>重要組件的特徵、異常情況下重要組件發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 考量選出的異常情況相關的 FEPs 及各重要組件與其間的特徵與作用過程，以合理的邏輯方法，繪出放射性核種傳輸的路徑，並建構出異常情節。</p> <p>4. <u>應根據場址資訊與合理性研擬異常狀況下之概念模式，說明如何根據其結果建構與選用評估模式。</u></p> <p>5. <u>選用之程式需經過專業之驗證及確認後方能使用於評估報告。</u></p> <p>6. 提出異常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料及其輸出資料。</p> <p>7. 對異常情節輻射劑量評估程式的參數，進行敏感度分析。(若正常情節已分析過的參數，可不必再進行敏感度分析)</p> <p>8. 對敏感度高的參數，考量參數的分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。</p>	<p>重要組件的特徵、異常情況下重要組件發生的事件、各重要組件間的互相作用過程。</p> <p>(4) 考量選出的異常情況相關的 FEPs 及各重要組件與其間的特徵與作用過程，以合理的邏輯方法，繪出放射性核種傳輸的路徑，並建構出異常情節。</p> <p>4. 提出異常情節輻射劑量評估程式及其輸入資料及其輸出資料。</p> <p>5. 對異常情節輻射劑量評估程式的參數，進行敏感度分析。(若正常情節已分析過的參數，可不必再進行敏感度分析)</p> <p>6. 對敏感度高的參數，考量參數的分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。</p>	<p>增加概念模式、評估模式及程式驗證及確認之審查條文，新增第 4 點與第 5 點，原第 4 點至第 7 點改成第 6 點至第 9 點。</p>
---	---	--

<p>9. 考量事件發生的機率，提出民眾與工作人員之輻射劑量(風險)評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 事故種類與發生頻率之預測是否可考量場址特性及水文氣象條件，其參考文獻及假設是否合理。</li> <li>3. 異常狀況之核種傳輸機制是否合理且保守。</li> <li>4. 異常情節建構是否經由專家學者所確認、意外事故或異常狀況之重要組件 <b>FEPs 特徵事件與過程</b> 是否已充分考量、異常情節建構是否合理。</li> <li>5. 異常情節輻射劑量風險評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</li> <li>6. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</li> </ol> <p><b>五、核種外釋到達人類活動範圍生物圈之傳輸機制：</b></p>	<p>7. 考量事件發生的機率，提出民眾與工作人員之輻射劑量(風險)評估結果。</p> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 若提供資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</li> <li>2. 事故種類與發生頻率之預測是否可考量場址特性及氣象條件，其參考文獻及假設是否合理。</li> <li>3. 異常狀況之核種傳輸機制是否合理且保守。</li> <li>4. 異常情節建構是否經由專家學者所確認、意外事故或異常狀況之重要組件特徵事件與過程是否已充分考量、異常情節建構是否合理。</li> <li>5. 異常情節輻射劑量風險評估程式的輸入資料是否符合場址資訊與合理性，其輸出資料是否合理。</li> <li>6. 是否進行參數敏感度分析與不確定分析，分析結果是否合理。</li> </ol> <p><b>五、核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制：</b> 包括地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制，及直</p>	<p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p> <p>因核種外釋不僅會影響人類活動，也會影響到生態而間接影響到人類，故以生物圈描述較為合理</p>
--	--	---



<p>包括地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數。</p> <p>地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制概念模式、數學模式及分析所需之參數的正確性，影響處置設施之輻射劑量安全評估，故請提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) <u>依場址地質及水文地質特性所建構之水文地質模型與假設。</u></p> <p>(2) <u>依所建構水文地質模型描述潛在的核種遷移地下水途徑。</u></p> <p>(3) <u>地下水之流場(流速與流向之分布與數值)。</u></p> <p>(4) <u>核種藉地下水之水流與核種傳輸模式。</u></p> <p>(5) <u>人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種濃度。核種由地下水傳輸外釋至生物圈之位置、濃度與地下水流量。</u></p>	<p>接輻射與向天輻射對個人之曝露，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數。</p> <p>地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制概念模式、數學模式及分析所需之參數的正確性，影響處置設施之輻射劑量安全評估，故請提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 依場址地質及水文地質特性，描述潛在的核種遷移地下水途徑。</p> <p>(2) 地下水之流場、流速與流向之分布與數值。</p> <p>(3) 核種藉地下水之傳輸模式。</p> <p>(4) 人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種濃度。</p>	<p>應先建構水文地質模型與假設，再描述潛在的核種遷移地下水途徑較為適當。將(1)修改為(1)、(2)，原(2)~(4)點改為第(3)~(5)點。</p> <p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p>
---	--	--

<p>(6) <u>說明長期變動現象(例如地質環境演化、氣候變遷、海平面變化與地形變化等)對地下水流之影響。</u></p>		<p>增加第(6)點，長期環境變動現象可能會使地下水流場或地下水的組成產生改變，進而影響核種遷移的過程。</p>
<p>2. 空氣</p>	<p>2. 空氣</p>	
<p>(1) 估算大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣之延散，所使用的<u>大氣</u>模式、<u>電腦</u>程式與計算方式。</p>	<p>(1) 估算大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣之延散，所使用的模式、電腦程式與計算方式。</p>	<p>文字修訂。</p>
<p>(2) 大氣傳輸及擴散模式應包括：(a)放射性核種釋出之時間與頻率變化之計算方式，(b)放射性核種釋出高度，(c)放射性污染源<u>分布</u>之幾何形狀，(d)<u>再懸浮放</u>射源之排放率及基準，(e)考量<u>放</u>射源與監測點間之地形及<u>結構物</u>之影響，(f)關鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度，(g)放射性污染雲煙(plume)濃度的計算方式，(h)以處置場址為中心，十六個 22.5 徑度扇形區域中，每個區域之人口分佈，(i)空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速</p>	<p>(2) 大氣傳輸及擴散模式應包括：(a)放射性核種釋出之時間與頻率變化之計算方式，(b)放射性核種釋出高度，(c)放射性污染源之幾何形狀，(d)再懸浮射源之排放率及基準，(e)考量射源與監測點間之地形及結構之影響，(f)關鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度，(g)放射性污染雲煙(plume)濃度的計算方式，(h)以處置場址為中心，十六個 22.5 徑度扇形區域中，每個區域之人口分佈，(i)空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率，(j)用於量化移除機</p>	<p>文字修訂。</p>

<p>率，(j)用於量化移除機制、乾濕沉積速率及單位面積沉積量之計算模式。</p> <p>(3) 可代表場址環境並用於大氣傳輸與擴散分析之氣象數據。</p> <p>(4) 預估空浮的表面沉積濃度與場址外個人的<u>暴露</u>劑量。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 核種遷移的所有可能的地表水概念模式。</p> <p>(2) 用於分析場址下游適當位置核種濃度之具有空間與時間分佈的地表水<u>水流與</u>傳輸模式。</p> <p>(3) 地表水<u>水流與</u>傳輸模式之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率、與地下水界面之源/<u>匯</u>項。</p> <p>(4) <u>經地表水水流與傳輸模式</u>計算所得的核種濃度。</p> <p>4. 其他傳輸機制：包括直接輻射、向天輻射與生物傳輸。</p> <p>(1) 加馬輻射的曝露模式(含<u>電腦</u>程式、污染源、接受者的模型建構)。</p> <p>(2) 在運轉期間，場外個人的曝露。主要</p>	<p>制、乾濕沉積速率及單位面積沉積量之計算模式。</p> <p>(3) 可代表場址環境並用於大氣傳輸與擴散分析之氣象數據。</p> <p>(4) 預估空浮的表面沉積濃度與場址外個人的劑量。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 核種遷移的所有可能的地表水概念模式。</p> <p>(2) 用於分析場址下游適當位置核種濃度之具有空間與時間分佈的地表水傳輸模式。</p> <p>(3) 地表水傳輸模式之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率、與地下水界面之源項。</p> <p>(4) 經地表水傳輸模式計算所得的核種濃度。</p> <p>4. 其他傳輸機制：包括直接輻射、向天輻射與生物傳輸。</p> <p>(1) 加馬輻射的曝露模式(含電腦程式、污染源、接受者的模型建構)。</p> <p>(2) 在運轉期間，場外個人的曝露。主要</p>	<p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p>
--	---	--

<p>考量的情節有二：</p> <p>(a)廢棄物運送至場區的載運車輛停車曝露，(b)吊掛作業所可能產生之曝露。</p> <p>(3) 在<u>主動</u>監管期間，工作人員的劑量分析，主要途徑來自場址土壤的直接輻射；場外個人的劑量分析，除來自場址土壤的直接輻射外，亦須考量向天輻射。</p> <p>(4) 在<u>被動</u>監管期間，須考量<u>發生</u>人員無意闖入的<u>時間並進行劑量分析</u>，<u>包括農耕、居住、鑽井或其他合理可預見的活動，並提供防止闖入者障壁系統的有效性時間</u>。</p> <p>(5) 生物傳輸機制分析，包含由處置設施遷移出去的受污染生物，成為食物鏈的一環。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 若提供地下水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定</p>	<p>考量的情節有二：</p> <p>(a)廢棄物運送至場區的載運車輛停車曝露，(b)吊掛作業所可能產生之曝露。</p> <p>(3) 在主動監管期間，工作人員的劑量分析，主要途徑來自場址土壤的直接輻射；場外個人的劑量分析，除來自場址土壤的直接輻射外，亦須考量向天輻射。</p> <p>(4) 在被動監管期間，須考量人員無意闖入的劑量分析。</p> <p>(5) 生物傳輸機制分析，包含由處置設施遷移出去的受污染生物，成為食物鏈的一環。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 地下水</p> <p>(1) 若提供地下水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定</p>	<p>TPC 我國法規未明確定義處置設施之主動/被動監管期，故建議改為狀態描述以維持原意。</p> <p>TPC 我國法規未明確定義處置設施之主動/被動監管期，故建議改為狀態描述以維持原意。</p> <p>參照 10 CFR 61.13(b)</p>
--	---	---

<p>接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 是否完整並清楚定義核種傳輸之所有可能的地下水途徑。</p> <p>(3) 地下水概念模式中之水文地質、地質及地球化學資訊是否與安全分析報告中場址特性之數據一致。</p> <p>(4) 地下水模式之輸入參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若輸入參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</p> <p>(5) 確認地下水模式之程式符合物理、化學及數學原則(並經過驗證)，且正確地使用程式。</p>	<p>接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 是否完整並清楚定義核種傳輸之所有可能的地下水途徑。</p> <p>(3) 地下水概念模式中之水文地質、地質及地球化學資訊是否與安全分析報告中場址特性之數據一致。</p> <p>(4) 地下水模式之輸入參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若輸入參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。</p> <p>(5) 確認地下水模式之程式符合物理、化學及數學原則(並經過驗證)，且正確地使用程式。</p>	
<p>2. 空氣</p> <p>(1) 空氣<del>傳輸路途</del>途徑分析資料是否完整。</p> <p>(2) 大氣傳輸<del>及延散</del>所使用之模式與計算方式之描述是否正確。</p>	<p>2. 空氣</p> <p>(1) 空氣途徑分析資料是否完整。</p> <p>(2) 大氣傳輸及延散所使用之模式與計算方式之描述是否正確。</p>	<p>文字修訂。</p> <p>以大氣傳輸涵蓋所有大氣傳輸之各種機制即可，文字修訂。</p>

<p>(3) 模式是否可模擬由射源至監測位置之大氣傳輸及<u>延散</u>。</p> <p>(4) 大氣傳輸模式內參數的靈敏度分析，確保可有效預估其傳輸行為。</p> <p>(5) 地表釋出與通風口有效釋出、不同幾何污染源，以及模擬長短時間之計算方式是否可被接受。</p> <p>(6) 量化移除機制、乾濕沉積速率、面沉積及雲煙<u>傳輸</u>之數學方法(須考慮核種釋出的類型、場址降水<u>等氣象</u>資料、污染源到接受點的距離、空氣穩定度分析)。</p> <p>(7) 由乾濕沉積導致表面污染之計算方式(須考慮核種<u>種類</u>特性、場址氣象<u>條件情況</u>與地理環境)。</p> <p>(8) 空氣傳輸與擴散模式中使用的氣象資訊是否合理且足夠。</p> <p>(9) 模式<u>中一</u>所使用之場址及其環境之</p>	<p>(3) 模式是否可模擬由射源至監測位置之大氣傳輸及延散。</p> <p>(4) 大氣傳輸模式內參數的靈敏度分析，確保可有效預估其傳輸行為。</p> <p>(5) 地表釋出與通風口有效釋出、不同幾何污染源，以及模擬長短時間之計算方式是否可被接受。</p> <p>(6) 量化移除機制、乾濕沉積速率、面沉積及雲煙之數學方法(須考慮核種釋出的類型、場址降水資料、污染源到接受點的距離、空氣穩定度分級)。</p> <p>(7) 由乾濕沉積導致表面污染之計算方式(須考慮核種種類特性、場址氣象情況與地理環境)。</p> <p>(8) 空氣傳輸與擴散模式中使用的氣象資訊是否合理且足夠。</p> <p>(9) 模式中，場址及其環境之氣象數據是否具代表性。</p>	<p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p>
--	--	---

<p>氣象數據是否具有代表性。</p> <p>(10) 風速與風向之量測時間及間隔是否合理。</p> <p>(11) <u>用於計算空氣傳播及擴散之延散參數及空氣穩定度等級分析</u>是否正確。</p> <p>(12) 大氣傳輸及擴散模式應符合下列要求：(a)模式中<del>使用</del>之場址輸入數據具代表性；(b)模式已考慮場址之物理特性，如結構物、不規則地形、乾濕沉積，(c)模式已考慮釋出放射性核種之物理及化學特性。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 若提供地表水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) <u>係數選擇與參數選擇與</u>使用是否採用保守原則，未來所有可能的地表水改變(降水量變化或已知未來建造水井、水庫、取水口</p>	<p>(10) 風速與風向之量測時間及間隔是否合理。</p> <p>(11) 用於計算空氣傳播及擴散之延散參數及空氣穩定度等級是否正確。</p> <p>(12) 大氣傳輸及擴散模式應符合下列要求：(a)模式中<del>使用</del>之場址輸入數據具代表性；(b)模式已考慮場址之物理特性，如結構、不規則地形、乾濕沉積，(c)模式已考慮釋出放射性核種之物理及化學特性。</p> <p>3. 地表水</p> <p>(1) 若提供地表水資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 係數選擇與參數使用是否採用保守原則，未來所有可能的地表水改變(降水量變化或已知未來建造水井、水庫、取水口等)是</p>	<p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p> <p>文字修訂。</p>
--	---	--

<p>等)是否能於計算中反應。</p> <p>(3) <b>核種</b>藉地表水<b>核種</b>遷移分析是否包括：(a)描述延散特性及在正常與<b>意外異常</b>情形下於現存或未來使用者位置之<b>地表水環境</b>的稀釋能力，(b)提供現存或未來使用者位置在正常與<b>意外異常</b>情形下，年平均與最大濃度(<b>意外時異常情形</b>)估計與基準，(c)定義可能污染地表水使用者之途徑，與(d)描述<b>引用</b>數據之參考來源。</p> <p>4. 其他傳輸機制</p> <p>(1) 若提供加馬輻射與經由生物途徑的傳輸的描述及資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 加馬輻射的傳輸機制中屏蔽增建因子與其數學模式，體外曝露模式，射源模式，輸入參數是否正確。</p>	<p>否能於計算中反應。</p> <p>(3) 藉地表水核種遷移分析是否包括：(a)描述延散特性及在正常與意外情形下於現存或未來使用者位置地表水環境的稀釋能力，(b)提供現存或未來使用者位置在正常與意外情形下，年平均與最大濃度(意外時)估計與基準，(c)定義可能污染地表水使用者之途徑，與(d)描述數據之參考來源。</p> <p>4. 其他傳輸機制</p> <p>(1) 若提供加馬輻射與經由生物途徑的傳輸的描述及資料不當或不足，應要求申照者補足資料或提出解釋。等待資料補齊後，決定接受或退回申請文件。</p> <p>(2) 加馬輻射的傳輸機制中屏蔽增建因子與其數學模式，體外曝露模式，射源模式，輸入參數是否正確。</p>	<p>文字修訂。</p>
--	---	--------------



<p>(3) 加馬輻射與生物傳輸之相關假設，是否保守。</p> <p>六、述明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值，提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 彙整 7.1 中一至<u>六五</u>節之分析結果。確認最大個人劑量位置，主要放射性曝露介質，主要攝入途徑<u>與不確定性分析結果</u>。</p> <p>2. 劑量評估分為(1)運轉期<u>間</u>與封閉後正常情節最大個人劑量，(2)運轉期<u>間</u>與封閉後異常情節最大輻射劑量(風險)。</p> <p>3. <u>評估結果應說明尖峰劑量發生的時間。並說明評估時間尺度之合理性。</u></p>	<p>(3) 加馬輻射與生物傳輸之相關假設，是否保守。</p> <p>六、述明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值，提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 彙整 7.1 中一至六節之分析結果。確認最大個人劑量位置，主要放射性曝露介質，主要攝入途徑。</p> <p>2. 劑量評估分為(1)運轉期與封閉後正常情節最大個人劑量，(2)運轉期與封閉後異常情節最大輻射劑量(風險)。</p>	<p>誤植更正「五」。</p> <p>應包含提供「不確定性分析結果」資料，以供審查是否符合法規限值。</p> <p><b>TPC 建議我國法規未明確定義處置設施運轉期，故建議改為狀態描述以維持原意。</b></p> <p>1. 根據 IAEA-SSG 29 第 5.25 節規定，新增本項要求。</p> <p>2.建議參考美國法規 10 CFR 61.2，請主管機關考量是否修訂安全分析報告導則第七章一(六)為”述明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值。且處置設施封閉後，評估之時間尺度應達一萬年。”(若依此修訂後，則審查導則，則同步刪除”並說明評估時間尺度</p>
--	---	---

<p>(二)審查作業</p> <p>1. 運轉期間正常情節工作人員最大個人劑量，須小於游離輻射防護安全標準之職業輻射年有效劑量。</p> <p>2. 運轉期間與封閉後正常情節場外一般民眾最大個人劑量，須小於低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則中第八條之規定，場外一般民眾年有效劑量，不得超過 0.25 毫西弗。</p>	<p>(二)審查作業</p> <p>1. 運轉期間正常情節工作人員最大個人劑量，須小於游離輻射防護安全標準之職業輻射年有效劑量。</p> <p>2. 運轉期間與封閉後正常情節場外一般民眾最大個人劑量，須小於低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則中第八條之規定，場外一般民眾年有效劑量，不得超過 0.25 毫西弗。</p>	<p>之合理性。”之字句)</p> <p>TPC 建議我國法規未明確定義處置設施運轉期，故建議改為狀態描述以維持原意。</p> <p>TPC 建議我國法規未明確定義處置設施運轉期，故建議改為狀態描述以維持原意。</p>
--	--	---

修正條文	現行條文	說明
<p><b>7.2 設備操作：依據處置設施之設備特性及操作程序，評估運轉期設備操作之安全性。</b></p> <p>處置設施內重要設備之良好特性、正確地使用操作，涉及處置場運轉安全，所以要求評估運轉期設備操作之安全性，故應提供下列資料供審查：</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 說明廢棄物桶暫存與處置之吊升或堆貯設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>2. 說明填充廢棄物桶間隙之填充機設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>3. 說明處置設施內<b>公用基礎</b>系統與輔助系統中電力、供水、廢水收集等設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>4. 說明並表列處置設施內重要設備之已完成的操作與維護程序書。</li> <li>5. 評估處置設施內重要設備之使用壽命，並說明更換作業之方法。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p>	<p><b>7.2 設備操作：依據處置設施之設備特性及操作程序，評估運轉期設備操作之安全性。</b></p> <p>處置設施內重要設備之良好特性、正確地使用操作，涉及處置場運轉安全，所以要求評估運轉期設備操作之安全性，故應提供下列資料供審查：</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 說明廢棄物桶暫存與處置之吊升或堆貯設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>2. 說明填充廢棄物桶間隙之填充機設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>3. 說明處置設施內公用系統與輔助系統中電力、供水、廢水收集等設備的特性、功能與使用方法。</li> <li>4. 說明並表列處置設施內重要設備之已完成的操作與維護程序書。</li> <li>5. 評估處置設施內重要設備之使用壽命，並說明更換作業之方法。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p>	<p>公用應是翻譯自utility，建議改成基礎</p>

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置設施內重要設備的特性與功能，是否考量場址特性與要求，足以符合設計目的與安全目標。</li> <li>2. 檢視重要設備之操作與維護程序書，是否具有合理的保證，運轉作業不會中斷，及不允許因為重要與必要設備缺乏或故障，而發生不安全的狀況。</li> <li>3. 重要設備使用壽命之評估是否合理。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置設施內重要設備的特性與功能，是否考量場址特性與要求，足以符合設計目的與安全目標。</li> <li>2. 檢視重要設備之操作與維護程序書，是否具有合理的保證，運轉作業不會中斷，及不允許因為重要與必要設備缺乏或故障，而發生不安全的狀況。</li> <li>3. 重要設備使用壽命之評估是否合理。</li> </ol>	
---	---	--

修正條文	現行條文	說明
<p>7.3 闖入者防護：描述在處置設施<u>營運運轉</u>中、封閉後，防止<u>無意</u>闖入者接近廢棄物所採行之<u>防護設計及措施障壁系統</u>，並評估其功能。</p> <p>在處置設施<u>營運運轉</u>中，只要有堅固的場界圍籬與標示，即可防止<u>無意</u>闖入者接近廢棄物；在處置設施封閉後，則須提供合理的<u>防護措施障壁系統</u>，才能防範非刻意之入侵行為。因此須提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質與方法。</li> <li>2. <u>C類廢棄物</u>處置位置與深度之規劃。</li> <li>3. <u>C類廢棄物防止闖入者障壁系統障壁</u>的材質、設計與施工方法</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質、維護與設置方法，是否能夠堅固保存至處置場免於監管期，並能確保其功能。</li> <li>2. <del>坑道處置，C類廢棄物須處置在坑道最內部，不易接觸的位置；淺地處置，C類廢棄物須處置在覆蓋層頂部下方至</del></li> </ol>	<p>7.3 闖入者防護：描述在處置設施營運中、封閉後，防止無意闖入者接近廢棄物所採行之防護設計及措施，並評估其功能。</p> <p>在處置設施營運中，只要有堅固的場界圍籬與標示，即可防止無意闖入者接近廢棄物；在處置設施封閉後，則須提供合理的防護措施，才能防範非刻意之入侵行為。因此須提供下列資料，供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質與方法。</li> <li>2. C類廢棄物處置位置與深度之規劃。</li> <li>3. C類廢棄物障壁的材質、設計與施工方法。</li> </ol> <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 處置場界圍籬與標示的材質、維護與設置方法，是否能夠堅固保存至處置場免於監管期，並能確保其功能。</li> <li>2. 坑道處置，C類廢棄物須處置在坑道最內部，不易接觸的位置；淺地處置，C類廢棄物須處置在覆蓋層頂部下方至</li> </ol>	<p>導則既有名詞能統一，根據行政院原子能委員會放射性物料管理局「放射性廢料辭彙」，其施工建造完成後至封閉期之期間應稱為運轉期。</p> <p>廢棄物可分為A類、B類及C類，在處置時應全盤考量，故刪除C類用詞。</p> <p>刪除部分語意重複文字</p>

<p><del>少 5 公尺以上。在 C 類廢棄物處置區應有防止闖入者障壁系統是否建造防止入侵者障壁系統，妥善區隔，達到防護之目的。</del></p> <p><del>3. 入侵者工程障壁在場址封閉後是否能保持 500 年的功能性與完整性，是否能滿足需求。並檢視所有使用的數據與假設及計算方法之適用性，以及分析結果之合理性。</del></p>	<p>少 5 公尺以上。在 C 類廢棄物處置區是否建造防止入侵者障壁系統，妥善區隔，達到防護之目的。</p> <p>3. 入侵者工程障壁在場址封閉後是否能保持 500 年的功能性與完整性，是否能滿足需求。並檢視所有使用的數據與假設及計算方法之適用性，以及分析結果之合理性。</p>	<p>刪除</p>
---	--	-----------

修正條文	現行條文	說明
<p><b>7.4 長期穩定性：評估並分析處置設施於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性。分析時應說明分析方法、輸入參數、假設狀況、適用範圍、模式分析結果及不確定性等。</b></p> <p>安全分析報告提出可能影響處置設施長期穩定性與安全性的事件，應審查每一事件評估與分析是否符合長期穩定性的安全要求。影響處置設施長期穩定性的因素有：水的侵蝕、邊坡穩定性、<b>坑道穩定性分析</b>、地層沉陷與下陷、<b>地層抬升、海平面上升或下降、地球化學環境等</b>，因此須提供下列資料供審查，以確保處置場封閉後之長期穩定性與安全性。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 處置場可能洪水之預估分析：包括：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、<del>不穩定性地形的類型</del><b>洪水侵蝕的地形變遷</b>、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量(probable</p>	<p><b>7.4 長期穩定性：評估並分析處置設施於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性。分析時應說明分析方法、輸入參數、假設狀況、適用範圍、模式分析結果及不確定性等。</b></p> <p>安全分析報告提出可能影響處置設施長期穩定性與安全性的事件，應審查每一事件評估與分析是否符合長期穩定性的安全要求。影響處置設施長期穩定性的因素有：水的侵蝕、邊坡穩定性、地層沉陷與下陷，因此須提供下列資料供審查，以確保處置場封閉後之長期穩定性與安全性。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 處置場可能洪水之預估分析：包括：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、不穩定性地形的類型、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量(probable maximum flood,</p>	<p>長期穩定性應包含監測計畫與項目審查。(建議未來修訂)</p> <p>於「低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」研究報告中，建議影響處置設施長期穩定性的因素，應包含「地層抬升、海平面上升、地球化學環境」方面資料較為完整。 <b>增列3坑道穩定性，以因應外來可能採坑道處置方式。</b></p> <p>於「低放射性廢棄物坑道處置技術審查要項研究」研究報告中，指出可能的地形變遷造成場址受到洪水與侵蝕的影響，包括： (i)不穩定性地形的類型； (ii)地形變化對洪水與洪水流速的影響； (iii)降低或控制地形不穩定性的改善程序，故應將「不穩定性地形的類型」更改為「洪水侵蝕的地形變遷」。</p>

<p>maximum flood, PMF)、設計洪水量與降低或控制地形不穩定性的改善<u>工程或措施程序</u>。</p> <p>(2) 上游若有水庫，提供水庫的位置與大小、<u>水庫潰壩機率分析、潰壩尖峰流量估算與對處置設施之影響</u><u>水庫瞬間損壞提出尖峰流量、分析水庫損壞的影響。</u></p> <p>(3) 侵蝕防護設計：包括附近溪流洪水的侵蝕防護、排水渠道的侵蝕防護、壕溝與覆蓋層邊坡的侵蝕防護、隧道上層的侵蝕防護、侵蝕防護的耐久性。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：(a)場址地質對於穩定性可能的影響、(b)場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、(c)邊坡穩定性材料與土壤參數、(d)邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、(e)邊坡使用借土材料的特性、(f) 夯實工作與夯實後材料的強度。</p>	<p>PMF)、設計洪水量與降低或控制地形不穩定性的改善程序。</p> <p>(2) 上游若有水庫，提供水庫的位置與大小、水庫瞬間損壞提出尖峰流量、分析水庫損壞的影響。</p> <p>(3) 侵蝕防護設計：包括附近溪流洪水的侵蝕防護、排水渠道的侵蝕防護、壕溝與覆蓋層邊坡的侵蝕防護、隧道上層的侵蝕防護、侵蝕防護的耐久性。</p> <p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：(a)場址地質對於穩定性可能的影響、(b)場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、(c)邊坡穩定性材料與土壤參數、(d)邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、(e)邊坡使用借土材料的特性、(f) 夯實工作與夯實後材料的強度。</p>	<p>文字修訂。</p> <p>水庫潰壩取代水庫瞬間損壞，強調潰壩對處置設施之影響及潰壩機率分析。</p> <p>維持邊坡穩定性較適合淺地表處置所需，未來應針對坑道處置增列條文。</p> <p>為因應台灣未來可能採坑道處置，建議未來應增列第3點為處置坑道穩定性以進步說明。</p>
---	--	--



<p>(2) 邊坡穩定性：(a)邊坡所採用之有關土壤與岩石之參數、(b)邊坡靜態穩定性分析、(c)地震及地層移動的邊坡動態穩定性分析、(d)場址下方土壤液化分析。</p> <p>3. 坑道穩定性</p> <p>(1) 影響坑道長期穩定性之地質與大地工程特性，包括地質破裂帶、岩石強度弱化與岩體依時變形之特性等，及其相關的調查方法、試驗與評估模式。</p> <p>(2) 建造期間，坑道開挖過程的變化監測記錄、滲水位置與水量記錄。</p> <p>(3) 坑道開挖引致圍岩擾動範圍，及擾動區內圍岩大地工程特性變化量測與評估。</p> <p>(4) 坑道支撐材料的特性與強度。</p> <p>(5) 坑道穩定性分析之靜、動態分析。</p> <p>(6) 運轉期間與坑道結構穩定性有關之檢監測紀錄與強化計畫。</p> <p>4. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 場址特性、處置場建造、運轉以及處</p>	<p>(2) 邊坡穩定性：(a)邊坡所採用之有關土壤與岩石之參數、(b)邊坡靜態穩定性分析、(c)地震及地層移動的邊坡動態穩定性分析、(d)場址下方土壤液化分析。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 場址特性、處置場建造、運轉以及處置單元開挖相關資訊。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬與分析。</p> <p>(3) 沉陷之監控與改善計畫。</p>	<p>文字修訂。</p>
--	---	--------------

<p>置單元開挖相關資訊。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬與分析。</p> <p>(3) 沉陷之監控與改善計畫。</p> <p>5. <u>地層抬升與沉降</u></p> <p>(1) <u>場址特性、處置場建造、運轉以及處置單元開挖相關資訊。</u></p> <p>(2) <u>長期可能發生抬升與沉降區域之模擬與分析。</u></p> <p>6. <u>海平面上升或下降</u></p> <p>(1) <u>鄰近海岸地區之處置場址應提供海平面上升或下降速率之推估。</u></p> <p>7. <u>地球化學環境</u></p> <p>(1) <u>處置設施建設前的地球化學環境背景資料。</u></p> <p>(2) <u>處置場封閉後的地球化學環境監測計畫。</u></p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 設計洪水量須大於 PMF；若設計洪水量低於 PMF，則應審查設計洪水量的合理性，另外，<u>排水設施與區域設置</u>也應一併考量。</p>	<p>(二) 審查作業</p> <p>1. 水的侵蝕</p> <p>(1) 設計洪水量須大於 PMF；若設計洪水量低於 PMF，則應審查設計洪水量的合理性，另外，排水區域也應一併考量。</p>	<p>增加第 5、6、7 點，於「低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究」研究報告中，修正建議影響處置設施長期穩定性的因素中，所需提供資料，應包含「地層抬升、海平面上升、地球化學環境」方面資料較為完整。如何模擬與分析亦需說明。</p> <p>於「放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究」研究報告中，4.2 節修正建議，應包含「排水設施與區域設置」較為完整。</p>
---	--	--

<p>(2) 上游水庫潰壩尖峰流量</p> <p>的影響，必須是在處置場洪水設計可容許範圍內。</p> <p>(3) 資料是否足以在洪水以及侵蝕議題上提供足夠的安全證據。侵蝕設計應能合理確保處置場封閉的長期穩定，免於主動維護的需求。</p> <p>(4) 為了防範風蝕與水的侵蝕，壕溝覆蓋層之設計應審慎考量，包括坡度與厚度等。</p>	<p>(2) 上游水庫的影響，必須是在處置場洪水設計可容許範圍內。</p> <p>(3) 資料是否足以在洪水以及侵蝕議題上提供足夠的安全證據。侵蝕設計應能合理確保處置場封閉的長期穩定，免於主動維護的需求。</p> <p>(4) 為了防範風蝕與水的侵蝕，壕溝覆蓋層之設計應審慎考量，包括坡度與厚度等。</p>	<p>文字修訂。</p>
<p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：(a)是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。(b)是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應有清楚的描述並繪製成圖，剖面圖展現邊坡的地層。(c)邊坡穩定性材料與土壤參數之測試，是否符合相關大地工程專業規範。(d)是否充分考慮地下水</p>	<p>2. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：(a)是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。(b)是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應有清楚的描述並繪製成圖，剖面圖展現邊坡的地層。(c)邊坡穩定性材料與土壤參數之測試，是否符合相關大地工程專業規範。(d)是否充分考慮地下水</p>	<p>文字修訂。</p>

<p>對邊坡穩定性設計的影響。(e) 借土材料穩定性與強度參數，是否經過適當的材料樣品測試。(f) 材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> <p>(2) 邊坡穩定性：(a) 邊坡土壤是否經具有靜態與動態性質與岩石組成之說明，分析參數是考量實驗室或現地實驗資料。(b) 邊坡靜態穩定性分析，是否包括不同的土壤介質以及作用力之邊界與材料特性、預期荷重條件下的最小安全係數。(c) 動態穩定性分析，是否包括地震所引發之加速度與震波速度之分析。(d) 場址下方土壤液化分析是否經現地或實驗室測試。</p> <p>(3) 確認天然與人為邊坡之長期穩定。</p> <p>(4) 邊坡分析符合保守原則，且引用數據確實可用。</p> <p>(5) 邊坡坡度、受力等分析應合理且保守，對於可能引發</p>	<p>對邊坡穩定性設計的影響。(e) 借土材料穩定性與強度參數，是否經過適當的材料樣品測試。(f) 材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> <p>(2) 邊坡穩定性：(a) 邊坡土壤是否經具有靜態與動態性質與岩石組成之說明，分析參數是考量實驗室或現地實驗資料。(b) 邊坡靜態穩定性分析，是否包括不同的土壤介質以及作用力之邊界與材料特性、預期荷重條件下的最小安全係數。(c) 動態穩定性分析，是否包括地震所引發之加速度與震波速度之分析。(d) 場址下方土壤液化分析是否經現地或實驗室測試。</p> <p>(3) 確認天然與人為邊坡之長期穩定。</p> <p>(4) 邊坡分析符合保守原則，且引用數據確實可用。</p> <p>(5) 邊坡坡度、受力等分析應合理且保守，對於可能引發</p>	
--	--	--

<p>之負面效應，有足夠安全係數。</p> <p>(6) 借土材料之選用、開挖、夯實等有適當之品管計畫。</p> <p>3. 坑道穩定性</p> <p>(1) 坑道開挖過程中的地質紀錄是否詳實？其結果能否反映坑道沿線地層、不連續面與地質破裂帶之分布狀況？提出的岩石強度弱化與岩體依時變形特性評估模式，是否經過合理的驗證？</p> <p>(2) 開挖期間是否有詳細的監測紀錄？其內容足以反映圍岩變位量、坑道沿線滲水位置與滲水量，可作為圍岩力學特性與水力學特性之相互驗證依據？</p> <p>(3) 是否充分考慮圍岩開挖擾動後，擾動範圍造成圍岩特性及參數的變異程度？並且經過適當的現地檢測或室內試驗資料佐證。</p> <p>(4) 是否充分考慮坑道支撐材料特性</p>	<p>之負面效應，有足夠安全係數。</p> <p>(6) 借土材料之選用、開挖、夯實等有適當之品管計畫。</p> <p>3. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 開挖相關資訊是否足夠供審查者進行沉陷與下陷相關事項審查。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬，是否合理且保守、是否考量其不確定性。</p> <p>(3) 岩層中是否有潛在溶解洞穴可能造成下陷？</p> <p>(4) 防止沉陷與下陷之材料是否已經過詳細與合理的實驗與分析？所提供之數據是否足以支持相關之設計？</p>	
--	--	--

<p>與圍岩牆度弱化的變異程度？並且具備足夠的試驗資料佐證。</p> <p>(5) 坑道穩定性分析之靜、動態分析，是否考慮圍岩與工程材料參數可能因開挖擾動與時間所引致的變異程度？</p> <p>(6) 運轉期間之坑道檢監測記錄是否足以反映並提供坑道長期穩定評估所需數據？坑道結構強化項目與做法是否具體可行。</p> <p>4. 地層沉陷與下陷</p> <p>(1) 開挖相關資訊是否足夠供審查者進行沉陷與下陷相關事項審查。</p> <p>(2) 長期可能發生沉陷區域之模擬，是否合理且保守、是否考量其不確定性。</p> <p>(3) 岩層中是否有潛在溶解洞穴可能造成下陷？</p> <p>(4) 防止沉陷與下陷之材料是否已經過詳細與合理的實驗與分析？所提供之數據是否足以支持相關之設計？</p> <p>5. 地層抬升與沉降</p>		<p>同前述提供資料之文字修訂。</p>
---	--	----------------------

<p>(1) <u>相關資訊是否足夠供審查者進行地層抬升與沉降相關事項審查。</u></p> <p>(2) <u>長期可能發生抬升區域之模擬，是否合理且保守、是否考量其不確定性。</u></p> <p>6. <u>海平面上升或下降</u></p> <p>(1) <u>鄰近海岸地區之處置場址應考慮海平面上升或下降之影響</u></p> <p>7. <u>地球化學環境</u></p> <p>(1) <u>應考慮地球化學環境可能對工程障壁之長期影響分析</u></p> <p>(2) <u>處置場封閉後的地球化學環境監測計畫應足以提供長期穩定性分析之評估模式驗證所需。</u></p>		<p>增加第 7 點，處置設施的建造可能對周遭環境造成地球化學環境上的改變，例如設施周邊岩盤的飽和與未飽和的狀態變化、因飽和與未飽和變化造成的氧化還原狀態改變、深層地下水沿著水路上昇所造成的水質變化等，而影響工程障壁的狀態。由於利用地下水流動解析預測設施周邊岩盤的地球化學環境變化時，因地球化學環境會隨著處置設施的建設逐漸變化，較難以坑道開挖前的資料驗證模型的正確性。因此，需於設施建設後，持續監測孔隙水壓、飽和度等地球化學環境變化，並將監測結果反饋至地球化學環境變化之預測模式中。</p>
---	--	---

		增加第(2)小點呼應前述資料提供對監測計畫之要求。
--	--	---------------------------



附件二

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
子計畫三：低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究		
1	第1頁倒數第9行，建議將“仍在起步階段”刪除，避免讀者認為我國低放處置相關技術剛起步、發展。	已依審查意見刪除。
2	第7頁圖2-3，圖名為水文模擬“幾何架構”示意圖與該圖似不相符，建議修正圖名。	圖 2-3 已依審查意見修正圖名為“近場 3 維水文模擬處置坑道布置示意圖”
3	第24頁表4-1，地下水流處理方式為“模擬”，語意似未完整，請修正。	已依審查意見修正為“考慮地下水流”。
4	第36頁第8行，處置坑道高度應為25公尺，請確認後修正。	確認後已依審查意見修正處置坑道高度為 25 公尺。
5	第39頁， $X > 1400 \text{ dm}$ ，相對濃度幾乎接近於0，描述似與圖5-15不相符，請確認後修正。	確認後已依審查意見修正為“ $X > 14000 \text{ dm}$ ”
6	文字修訂建議	已依審查意見修訂更正錯誤文字部分。