



行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之

國際資訊研析

子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸

審驗技術建立之資訊研析

計畫編號：104FCMA019

計畫主持人：董家鈞

子計畫四主持人：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 105 年 12 月

低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之
國際資訊研析

子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸
審驗技術建立之資訊研析

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫四主持人：李明旭、陳瑞昇

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 107.8 萬元(子計畫四經費)

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

中華民國 105 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

核種傳輸機制為放射性核種進入生物圈之主要途徑，而坑道處置為國內低放射性廢棄物處置之主要方式，因此本研究針對坑道處置之近場與遠場核種傳輸驗證技術進行探討與建置，國際上瑞典SKB針對SR-PSU site公開有一系列之技術支援報告，本研究在國際坑道處置核種傳輸驗證技術資訊研析，主要綜整SKB之TR-14-04：Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU與TR-14-05：Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-PSU二本技術報告。主要成果為提出工程障壁作用與障壁系統變數的互動矩陣，以及地質圈作用與地質圈系統變數的互動矩陣，來釐清處置設施安全評估將涉及那些關鍵作用與系統變數，可進一步利用此矩陣來檢核近場與遠場安全評估過程所考慮的作用與變數是否完整，提供安全評估成果審驗參考依據。在核種傳輸評估技術研發有二項，第一項為發展二維圓柱座標系統暫態傳輸模式與解析解技術，可應用於近場核種傳輸審驗；第二項技術研發為近岸環境坑道處置遠場傳輸數值模擬技術，採用HYDROGEOCHEM數值模擬工具，建立近岸坑道處置模擬案例，以國內近岸環境建議候選場址水文地質環境背景設計三維遠場核種傳輸與核衰變數值模擬案例，完成遠場地下水流場與核種傳輸案例模擬，採用相對濃度來模擬遠場核種傳輸的時空間分布，並分析核種到達陸域地表及進入海域的時間分布特性，也進一步考慮核衰變鏈進行案例模擬，此二項技術研發後續可進一步加以整合，將有利於建立國內近場與遠場安全評估之核種傳輸自主審驗技術能力。本研究在國際資訊綜整與解析模擬技術研發上皆有利於國內長期安全評估近場與遠場傳輸驗證之技術能力建立與提升。

Abstract

Radionuclide transport is the major pathway of radioactive waste reaching biosphere. Tunnel disposal is the selected disposal approach for domestic low level waste. It is necessary to investigate and develop required verification techniques for radionuclide transports in both near-field and far-field of tunnel disposal facilities. This study reviewed verification techniques of radionuclide transport in two technical reports of SKB SR-PSU site : Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU (TR-14-04, 2014) and Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-PSU (TR-14-05, 2014). The interaction matrix between processes and system variables for engineering barriers and geosphere were proposed after reviewing both reports. Key processes and system variables involved in safety assessment can be identified as linkages delineated in these matrices. They can be used to exam the completeness of processes and variables involved in the near-field and far-field safety assessments as checklists for reviewing safety assessment reports. Two techniques were developed in this study. The first one is to develop analytical solutions of transient radionuclide transports with decay chains for the two-dimensional axis-symmetric coordinate system to facilitate more realistic approach of near-field radionuclide transport with tunnel disposal. The second one is to develop numerical techniques of far-field radionuclide transports to facilitate hydrogeological characteristics and complicated boundary conditions under near-shore environments. The HYDROGEOCHEM model was used to simulate designed cases of near-shore tunnel disposal. The 3D far-field simulation domain was delineated according to hydrogeological characteristics of the near-shore potential site. Flow fields, radionuclide transports, radioactive decay chains were simulated in this study. Relative concentrations were used to depict far-field radionuclide transport in spatial and temporal domains. Breakthrough curves of radionuclides at selected locations of ground surface and ocean were depicted to demonstrate radionuclide transport characteristics in geosphere. Integrating both techniques developed in this study will promote domestic reviewing techniques on radionuclide transports in both near-field and far-field. Both reviews of international technical reports and developments of simulating radionuclide transport techniques achieved in this study will facilitate the development and promotion of long-term safety assessment techniques in both near-field and far-field investigations.

目錄

摘要.....	iii
Abstract.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
第一章 前言.....	1
第二章、國際坑道處置技術報告關於近場傳輸驗證技術.....	2
2.1 SKB SFR 坑道處置概念.....	2
2.2 BLA 處置窖.....	3
2.3 安全功能.....	4
2.3.1 工程障壁-水力障壁功能.....	4
2.3.2 溫度.....	4
2.3.3 工程障壁-化學障壁功能.....	4
2.4 作用與系統變數.....	5
2.5 近場安全評估.....	7
2.6 近場工程障壁關鍵議題.....	9
2.7 工程障壁演化.....	9
第三章、國際坑道處置技術報告關於遠場傳輸驗證技術.....	11
3.1 地質圈作用關鍵議題.....	11
3.2 遠場熱傳作用與地質圈系統變數互動矩陣.....	12
3.3 遠場水力作用與地質圈系統變數互動矩陣.....	12
3.4 遠場力學作用與地質圈系統變數互動矩陣.....	13
3.5 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣.....	14
3.6 遠場核種傳輸作用與地質圈系統變數互動矩陣.....	17
3.7 SR-PSU 安全評估架構與模式銜接.....	18
第四章、近場核種傳輸解析解技術研究.....	20
4.1 解析解方法.....	20
4.2 解析解結果與討論.....	27
4.2.1 收斂測試.....	27
4.2.2 解析解與數值解比對.....	31
4.2.3 衰變常數和分配係數之影響.....	34
4.2.4 通量計算.....	38
第五章、近岸環境坑道處置長期安全驗證之遠場模擬技術研究.....	39
5.1 台東達仁鄉水文地質環境介紹.....	39

5.2 三維案例數值解之遠場傳輸數值模擬	40
5.2.1 案例 1—穩態流場及穩態傳輸案例	42
5.2.2 案例 2—穩態流場及暫態傳輸案例	44
5.2.3 案例 3—核衰變案例	47
第六章、結論與建議.....	51
參考文獻.....	52
附件一.....	54

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).....	2
圖 2.2 SFR 處置場側視圖(灰色為現存 SFR1，藍色為新增 SFR3).....	3
圖 2.3 SFR 處置場封閉詳細示意圖.....	3
圖 2.4 SFR3 之 2-5BLA 運轉階段示意圖.....	4
圖 2.5 近場 3 維水文模擬幾何架構示意圖.....	8
圖 2.6 1BLA 水文模擬處置窖區塊分區(左)與水文模擬廢棄物包件控制體積(右)示意圖	8
圖 2.7 2-5BLA 水文模擬處置窖區塊分區與水文模擬廢棄物包件控制體積(藍色區塊) 示意圖.....	8
圖 2.8 SR-PSU 之 1BLA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖.....	9
圖 2.9 SR-PSU 之 2-5BLA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖.....	9
圖 2.10 水泥障壁層隨時間演化改變之礦物組成、孔隙率與 pH 值.....	10
圖 2.11 水穿透水泥障壁層形成裂隙核種傳輸示意圖.....	10
圖 3.1 SR-PSU 的安全評估資料與模式架構.....	18
圖 3.2 SR-PSU 模式銜接概念架構示意圖.....	19
圖 4.1 不同解析發展之流程.....	21
圖 4.2 處置區示意圖.....	22
圖 4.3 處置區之概念模型 (俯視).....	23
圖 4.4 衰變核種穩態解析解和長時間 LTFD 驗證 (A) 238U (B) 234U (C) 230Th (D) 226Ra.....	32
圖 4.5 衰變核種暫態解析解和 LTFD 互相驗證 (A) 238U (B) 234U (C) 230Th (D) 226Ra	33
圖 4.6 衰變核種暫態半解析解和 LTFD 互相驗證(A) 238U (B) 234U (C) 230 Th (D) 226Ra	34
圖 4.7 假設 $K_d=1.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ 時，不同衰變常數之濃度穿透曲線比較 (A)SP1, $\lambda=10^{-6} \text{ year}^{-1}$ (B) SP2, $\lambda=10^{-5} \text{ year}^{-1}$ (C) SP3, $\lambda=10^{-4} \text{ year}^{-1}$ (D) SP4, $\lambda=10^{-3} \text{ year}^{-1}$	35
圖 4.8 假設 $\lambda=10^{-4} \text{ year}^{-1}$ 時，不同分配係數之濃度穿透曲線比較 (A)SP1, $K_d=1.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ (B) SP2, $K_d=2.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ (C) SP3, $K_d=3.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ (D) SP4, $K_d=4.0 \text{ m}^3/\text{kg}$	36
圖 4.9 不同放射性之核種，四種解析解之濃度穿透曲線比較 (A) 238U (B) 234U (C) 230Th (D) 226Ra.....	37
圖 5.1 達仁河流域高程.....	39
圖 5.2 模擬網格俯瞰圖.....	41
圖 5.3 模擬網格剖面圖.....	41
圖 5.4 模擬網格與流場邊界條件.....	42
圖 5.5 模擬網格與傳輸邊界條件.....	42
圖 5.6 案例 1—壓力水頭分布圖.....	43

圖 5.7 案例 1—流場與總水頭圖.....	43
圖 5.8 案例 1—核種相對濃度分布圖.....	44
圖 5.9 案例 2—核種相對濃度分布圖(1 年).....	45
圖 5.10 案例 2—核種相對濃度分布圖(100 年).....	45
圖 5.11 案例 2—核種相對濃度分布圖(10,000 年).....	46
圖 5.12 案例 2—觀察點分布圖.....	46
圖 5.13 案例 2—觀察點濃度圖.....	47
圖 5.14 案例 3—觀察點分布圖.....	48
圖 5.15 案例 3—觀察點 A 濃度圖.....	48
圖 5.16 案例 3—觀察點 B 濃度圖.....	48
圖 5.17 案例 3—觀察點 C 濃度圖.....	49
圖 5.18 案例 3—觀察點 D 濃度圖.....	49
圖 5.19 案例 3—觀察點 E 濃度圖.....	49

表目錄

表 2.1 BLA 障壁系統變數.....	6
表 2.2 BLA 處置窖的近場機制與系統變數互動矩陣.....	7
表 3.1 SR-PSU 地質圈系統變數與定義.....	11
表 3.2 SR-PSU 遠場熱傳作用與地質圈系統變數互動矩陣.....	12
表 3.3 SR-PSU 遠場水力作用與地質圈系統變數互動矩陣.....	13
表 3.4 SR-PSU 遠場力學作用與地質圈系統變數互動矩陣(1/2).....	13
表 3.5 SR-PSU 遠場力學作用與地質圈系統變數互動矩陣(2/2).....	14
表 3.6 SR-PSU 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣(1/4).....	15
表 3.7 SR-PSU 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣(2/4).....	15
表 3.8 SR-PSU 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣(3/4).....	16
表 3.9 SR-PSU 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣(4/4).....	16
表 3.10 SR-PSU 遠場核種傳輸作用與地質圈系統變數互動矩陣.....	17
表 4.1 模擬條件和傳輸參數.....	28
表 4.2 擴散係數 $De=0.01\text{m}^2/\text{year}$ 與遲滯因子 $R=1.0$ ，不同累加次數 m 的收斂情形.....	29
表 4.3 擴散係數 $De=0.1\text{m}^2/\text{year}$ 與遲滯因子 $R=1.0$ ，不同累加次數 m 的收斂情形.....	30
表 4.4 擴散係數 $De=1.0\text{m}^2/\text{year}$ 與遲滯因子 $R=1.0$ ，不同累加次數 m 的收斂情形.....	31
表 4.5 不同核種在兩種擴散模式中的通量.....	38
表 5.1 達仁鄉水文地質參數.....	40
表 5.2 4 核種參數.....	47

第一章 前言

低放射性廢棄物的最終處置方式可略分為淺地表處置與坑道處置兩種，經濟部於民國101年7月3日核定公告「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建議候選場址。從場址特性而言，「台東縣達仁鄉」建議候選場址為近岸坑道處置，「金門縣烏坵鄉」建議候選場址為海床下坑道處置，因此坑道處置為目前國內低放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址的主要處置方式。而由於核種傳輸機制為放射性核種進入生物圈之主要途徑，因此有必要針對坑道處置之近場與遠場核種傳輸驗證技術進行探討。從安全評估角度而言，近場安全評估在確認坑道處置工程障壁之安全圍阻與遲滯功能，遠場部分則在評估處置場址所在水文地質環境之安全遲滯功能，以「台東縣達仁鄉」建議候選場址為例，遠場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。

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。李明旭、陳瑞昇，2015)等議題，國內研發能量已經逐漸成熟。

國際上在最終處置安全評估技術發展，在國際原子能總署(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案例與安全評估規範(IAEA, 2012)。美國原子能總署(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」為日本原子力発電環境整備機構(2011)針對低放坑道處置近場安全分析之重要技術報告，在前一年度計畫已針對所採用之方法、策略與參數設定等分析低放坑道處置所可能涉及關鍵議題。

本計畫今年度工作重點在坑道處置核種傳輸審驗技術之資訊研析、近場解析解與遠場數值解技術之建立。在國際資訊研析部分，主要綜整 SKB SR-PSU site 之坑道處置核種傳輸驗證技術資訊，包含 TR-14-04: Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU (2014) 與 TR-14-05: Geosphere Process Report for the Safety Assessment SR-PSU (2014) 二本技術報告。在傳輸驗證技術上則發展更符合實際傳輸機制的二維軸對稱圓柱座標系統的暫態核種傳輸方程式解析解，可應用於時變暫態核種衰變傳輸評估，在解析解技術發展上是一重要性突破。除此之外，針對近岸環境坑道處置長期安全驗證之遠場傳輸驗證技術研究，則發展近岸環境坑道處置長期安全驗證之遠場傳輸數值模擬技術，本研究在資訊綜整與技術研發上皆有利於國內長期安全評估近場與遠場傳輸驗證之技術能力建立與提升。

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，除彙整國外放射性廢棄物處置設施安全評估審查技術，也不斷發展驗證評估所需關鍵技術，協助解決國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與規劃精進對策。而在長程目標，則希望透過先進模式工具的整合發展來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、國際坑道處置技術報告關於近場傳輸驗證技術

本章主要綜整 SKB TR-14-04 (Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, 2014) 技術報告，本報告為瑞典 SFR 處置場工程障壁的技術支援報告，主要描述 FEP 處理過程所發現與處置設施長期安全相關的工程障壁作用，以及在長期安全評估中如何以系統變數連結與描述不同工程障壁作用，包含工程障壁的熱、水力、力學、化學與核種傳輸作用。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，因此該報告中安全分析之時間尺度採用 100,000 年。

2.1 SKB SFR 坑道處置概念

瑞典 SFR 處置場位於 Forsmark，自 1988 年開始運轉用以存放短半化期之低階與中階核廢料，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，由於展延目前運轉中核能設施之運轉年限，因此需要額外的處置容量以存放新的廢棄物。SFR3 為新增設施，位於海床下約 120 公尺處，SFR3 主要將用以存放未來核電廠除役廢棄物與處置設施運轉廢棄物。圖 2-2 為側視圖顯示地表、海平面與處置設施的相對位置。

SFR 處置場包含許多地底下處置窖與許多位於地面上的處置運轉所需設施，現存的 SFR1 包含 5 個處置窖，總處置容量大約為 63,000m³，擴充的 SFR3 將會大約有 108,000m³ 的處置容量，包含 5 個新的處置窖，與 1 個可存放 9 個沸水式反應爐壓力容器的處置窖。圖 2.1 與 2.2 中 Silo 與 1-2BMA 處置窖為用以存放中階廢棄物、1-2BTF 處置窖存放混凝土槽、1-5BLA 處置窖存放低階廢棄物、BRT 處置窖存放反應爐壓力容器。

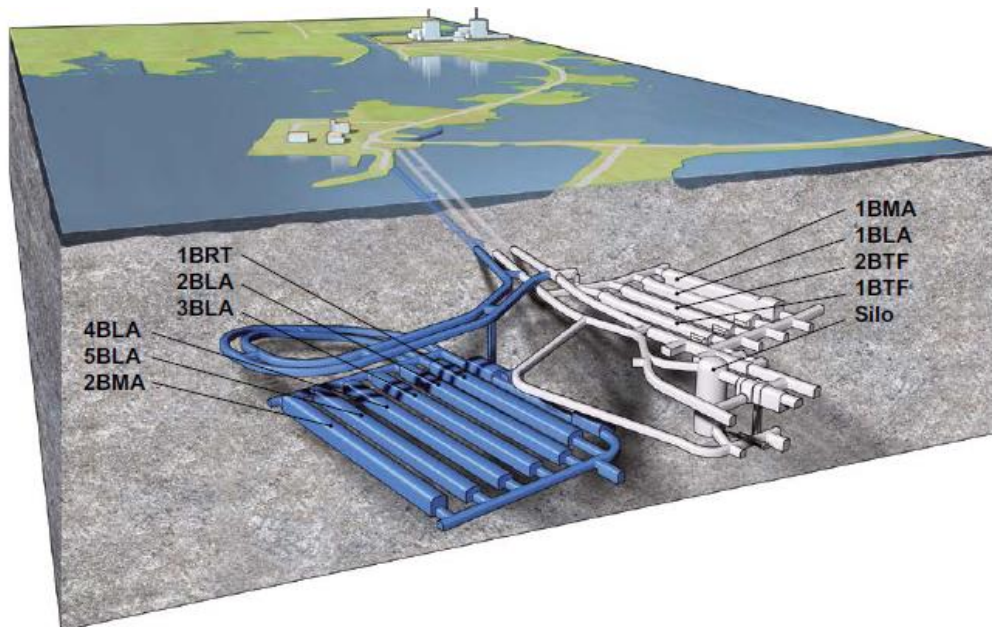


圖 2.1 SFR 處置場示意圖(灰色為現存 SFR1，藍色為新增 SFR3)

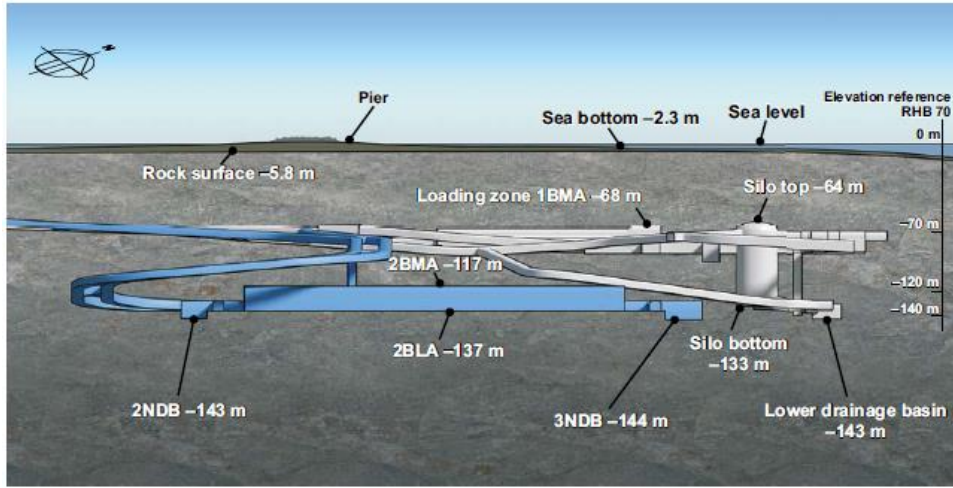


圖 2.2 SFR 處置場側視圖(灰色為現存 SFR1，藍色為新增 SFR3)

處置場的封閉如圖 2.3 所示，圖中 1 號代表進出通道的阻絕元件、2 號代表漸變材料、3 號代表以混凝土作為力學阻絕(mechanical constraint)、4 號代表以碎石回填、5 號代表以膨潤土作為水力密合(hydraulically tight)區塊、6 號代表進出隧道與主要隧道系統的回填材料、7 號代表未回填的開放區。因此設施的封閉包括在選定的位置安放回填材料與阻絕元件，主要目的為抑低水流經廢棄的可能與防止人類入侵。阻絕元件安置於進出隧道，用以連通豎井，且所有的隧道都以碎石回填，進出隧道的上部以岩塊回填，再以混凝土阻絕密封，最後地表將會恢復至與週遭景觀一致，此外所有 SFR 的鑽井都會密封以使週遭岩體的水流動不受影響。阻絕元件為以膨潤土達到水力密合與以混凝土達到力學限制以維持位置固定，不管就隧道的幾何尺寸或岩石的性質，須安置混凝土阻絕元件做為力學阻絕，如果有些地方是不適合安置混凝土阻絕元件的情形下，會以回填與漸變材料替代。漸變區材料主要是防止膨潤土由回填材料向外移動。回填材料包含碎石，與以 30/70 的膨潤土/粉碎岩塊混合而成的漸變材料，力學阻絕的回填與漸變材料及膨潤土密合的部份稱為土壩阻絕元件(earth dam plug)。

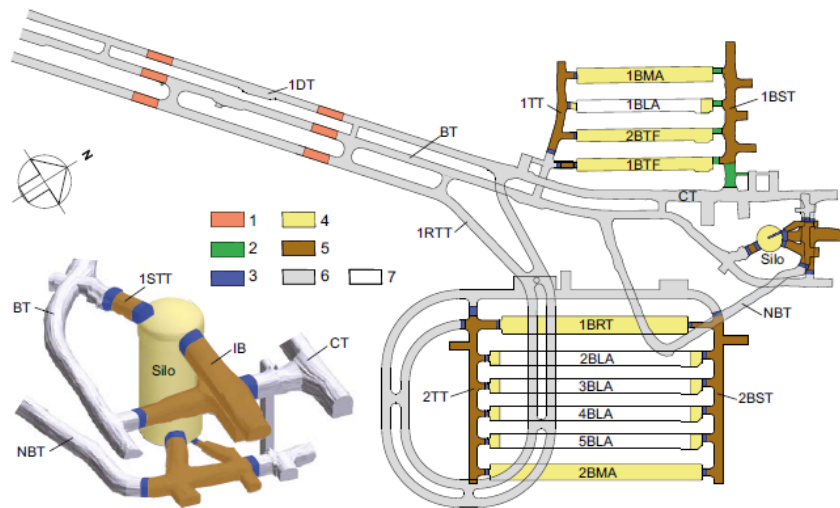


圖 2.3 SFR 處置場封閉詳細示意圖

2.2 BLA 處置窖

SFR 處置場共有 5 個 BLA 處置窖，1BLA 為 SFR1 現有，2-5BLA 為 SFR3 新增，圖 2.4 為 2-5BLA 運轉階段的示意圖，每一處置窖約為 18 公尺寬、14 公尺高與 275 公尺長，廢棄物會以 20 英尺 ISO 容器堆疊存放，堆疊方式為以 2 個容器橫向並排及 6 個容器縱向堆疊沿著坑道邊牆排放。

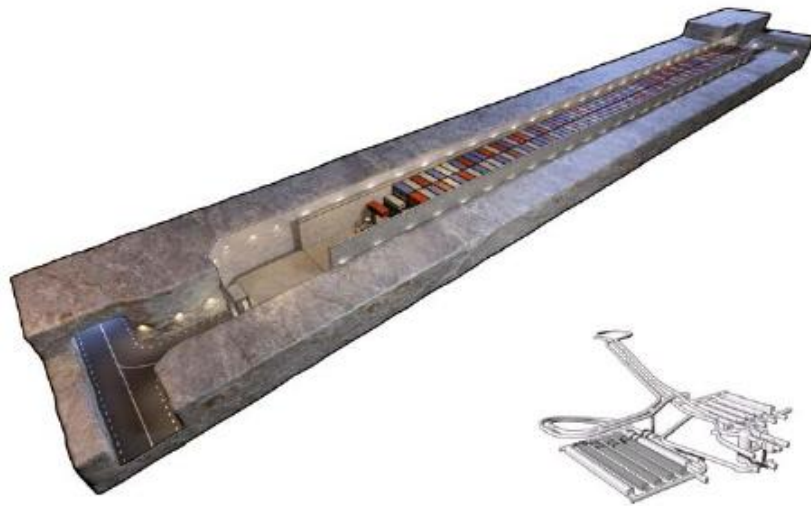


圖 2.4 SFR3 之 2-5BLA 運轉階段示意圖

2.3 安全功能

SR-PSU 場址安全評估方法論的核心為定義在一定時間內處置場系統須滿足一組安全功能。不同於 KBS-3 用過核燃料處置場採取完全的阻絕做為安全評估原則，SFR 主要為限制廢棄物活度量與透過工程障壁與地質圈遲滯外釋核種，遲滯會逐漸改變，所以很困難或根本不可能定義可接受的遲滯功能，因此 SFR 的安全評估也就沒有採用安全功能指標來訂定標準。安全功能指標的主要目的為指引情節的定義。

不同於 KBS-3 用過核燃料處置場，SFR1 不對整個處置場採用通用的安全功能。如 BLA 的安全功能為限制廢棄物活度；BRT 為限制廢棄物量與藉由低腐蝕率來控制放射性核種的外釋；BTF 為限制廢棄物量與採用具水力與化學障壁功能的混凝土桶。BMA 為限制廢棄物量與採用具水力與化學障壁功能的混凝土構造。筒倉為限制廢棄物量、採用具水力障壁功能的膨潤土筒倉障壁牆與化學障壁功能的混凝土構造。因此 TR-14-04 報告中的工程障壁功能可分為水力障壁功能與化學障壁功能，此外溫度也是影響處置功能的重要因素。

2.3.1 工程障壁-水力障壁功能

SFR 水力障壁的主要目的為抑制平流傳輸，可藉由低水力傳導性的障壁材料達成。BLA 的工程障壁並無未考慮此安全功能。

2.3.2 溫度

溫度為可能對 SFR 障壁的安全功能表現有影響的外部參數，混凝土與膨潤土的結冰對材料的水力傳導特性會有影響。

2.3.3 工程障壁-化學障壁功能

核種遲滯吸附為 SFR 最重要的安全功能，吸附可以發生在處置場內部不同的位置，不僅取決於處置場的設計，且是與廢棄物特性與地下水的化學組成有關。有利吸附的化學環境為具有較佳吸附的必要條件。

核種吸附會發生在處置場的任何位置與其週遭的母岩。但最具潛力的吸附會是在處置場的水泥元件。因此，安全功能的具有「好的吸附」可以定義為吸附在水泥漿材質，包含混凝土牆、水泥漿(grout)與廢棄物包件等。許多核種在膨潤土、岩塊與混凝土骨料都有很強的吸附特性。

(1) 高pH值

通常陽離子的吸附隨 pH 值增加而增加，陰離子則相反。另一方面，水泥漿材料的吸附量在 pH 值等於 11 時達到最大，且隨鹼度(alkalinity)上升而漸減。此外增加碳酸鹽與有機配位基水相錯合物的穩定性，在高 pH 值時會與核種吸附作用產生競爭。在水泥塊體的孔隙化學環境，高的 pH 值與高的鈣濃度意謂著低碳酸鹽濃度，吸附作用將降低，與鈣離子濃度有關。碳酸鹽為一強的錯合劑且會抑制許多核種的吸附。由於其獨特化學性質，混凝土中的水泥漿已被證明對減少各種抑制核種吸附的配位基濃度非常好。只要水泥塊體無嚴重劣化，孔隙中的 pH 值將大於 10.5，高的 pH 值表示 SFR 具有有利的吸附特性。

(2) 還原狀態

部份核種對還原態非常敏感，在氧化環境吸附明顯較弱，可藉由金屬鐵與有機材料維持在工程障壁中較低的氧化還原電位(redox potential)，鈾(uranium)、鈾(plutonium)與銻(neptunium)在氧化條件下吸附會明顯降低。

(3) 低濃度的錯合劑

部分有機錯合物會在核種(特別是纖維類)降解過程產生而與核種吸附競爭，因此這類錯合介質的濃度越低越好，但這也和廢棄物核種種類有關，此安全功能主要關注廢棄類型，障壁內預期不會有顯著錯合劑產生。

(4) 可吸附表面

吸附發生在固體的表面，水泥有相對較大的孔隙，且許多水泥包含非晶矽(amorphous)，具有較大的比表面積(specific surface area)，因此有利於核種吸附。但隨著處置時間增加，在水泥固體會慢慢轉變成結晶類物質，因此吸附能力的降低是可以預期。水泥的溶解劣化將減少孔隙率，也會降低對核種的吸附能力。

2.4 作用與系統變數

近場安全評估所需考慮的關鍵作用包含：熱作用、水力作用、力學作用、化學作用、核種傳輸作用等 5 大項。其中熱作用分成熱傳與相轉換/結冰二種作用；水力作用分成未飽和與飽和與飽和水流二種作用；如化學作用又分成平流與延散、水相核種形成與反應、微生物作用等三種作用；核種傳輸作用又分成核種種類形成與核種水相傳輸二種作用。這些作用又和所需考慮的場址關鍵變數有關，而各作用在不同條件(如飽和或未飽和與水流)下所需考慮的關鍵變數也不同，有些關鍵變數是會影響作用，有些作用會影響關鍵變數而關鍵變數和作用間有些雖會相互影響，但在實際安全評估作業由於影響有限是可以忽略。表 2.1 為 BLA 障壁系統變數與各變數所涵蓋內容。

表 2.1 BLA 障壁系統變數

系統變數	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 化學核種種類與總濃度 微生物可利用之有機化學核種與總量 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 值、離子強度、溶解核種濃度、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

表 2.2 綜整了 BLA 處置窖的近場機制與系統變數互動矩陣，可以提供坑道處置近場核種傳輸審驗技術建立之參考依據。以熱傳作用為例，當 SFR 無重要的熱源(低放射性廢棄物產生有限量的衰變熱)，溫度的變化將由邊界條件所控制，且由於溫度變化將發生在較長時間尺度，因此溫度被以作為邊界條件處理(參考氣候報告，TR-13-05)。

在單一流動通道(孔隙)，最大的速度通常在流動通道的中心，且在通道與礦物顆粒接觸處速度趨近於零。由於障壁料質有不同大小的通道(孔隙)，在每個通道速度的大小也會不同，大的通道會有較大的水流速度。障壁料質有不同的水力傳導性，當水流是平行於兩個不同材質邊界時，水流速度的分布將會正比於水力傳導係數，當流動的方向垂直材質邊界時，流速基本由最不透水的材料所控制，對延散過程的影響相對的小。

在溶質傳輸模式，延散傳輸通常數學上以一延散係數來表示，孔隙介質的延散作用可以用 Fickian approach (假設類似擴散行為，傳輸通量正比於溶質濃度梯度)描述，但是這樣的方式並非必然準確，因為並未考慮到延散的尺度效應，因此藉由簡化的移流-延散傳輸模式納入量化考慮延散通常會有概念的不確定性。

BLA 的處置窖設計並未包含具有障壁功能的工程結構，處置窖的凝土地板與噴漿內襯並未具有任何限制流動的物質，因此 BLA 障壁並不具任何抑制移流傳輸的安全功能。在 SR-PSU 的安全功能評估，在 BLA 處置窖空隙的水假設為完全混合，溶質的延散在此處置窖可視為瞬間完成，因此整個充滿水的孔隙體積內具有均一濃度，移流傳輸因此是計算進入與離開孔隙體積溶質傳輸的重要過程，受溶質濃度與地下水流場影響。

表 2.2 BLA 處置窖的近場機制與系統變數互動矩陣

作用 變數	熱作用		水力作用		力學作用		化學作用		核種傳輸	
	熱傳		未飽和水流				平流與延散		核種物種形成	
	相轉換/結冰		飽和水流				水相物種形成與反應		核種水相傳輸	
						微生物作用				
幾何形貌	V+	-	V-	-	V-	P-	-	-	-	-
	V+	P+	V+	-			V-	P-	V+	-
溫度	V+	P+	-	-	-	-	-	-	V+	-
	V+	P-	-	-			V+	P-	V-	-
水文變數	V+	P+	V-	-	V-	-	V+	-	-	-
	V+	P+	V+	P+			V+	-	V+	-
力學應力	V+	P+	-	-	V-	-	-	-	-	-
	V+	P+	-	-			-	-	-	-
材質組成	V+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	V+	-	-	-			V-	P-	V+	-
水組成	V+	-	V-	-	-	-	V+	P+	V+	P+
	V+	P-	V+	-			V+	V+	V+	P+
氣體變數	V+	P+	V-	P-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-			V-	P-	-	-

說明：變數有影響作用標示為 V，作用有影響變數標示為 P。有處理為+，未處理為-

2.5 近場安全評估

SR-PSU 的近場安全評估採用之模式為區塊模式(compartment model)。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 2.5 所示(TR-14-01-Fig.8.3)。傳輸模擬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 2.6 所示(TR-14-01-Fig.8.12)，左圖為 1BLA 處置窖之區塊模擬分區，右圖為 1BLA 內某一控制體積剖面示意圖。圖 2.7(TR-14-01-Fig.8.14)為 2BLA 處置窖之區塊模擬分區，採用更為簡化的區塊分區，只考慮廢棄物區塊與孔隙區塊二個分區，圖中藍色為廢棄物區塊，淺灰色為回填材料區塊，裝填區(深灰色)在傳輸模擬中不納入，假設裝填區只影響水流的傳輸，因此 2-5BLA 的近場傳輸機制不考慮核種吸附。

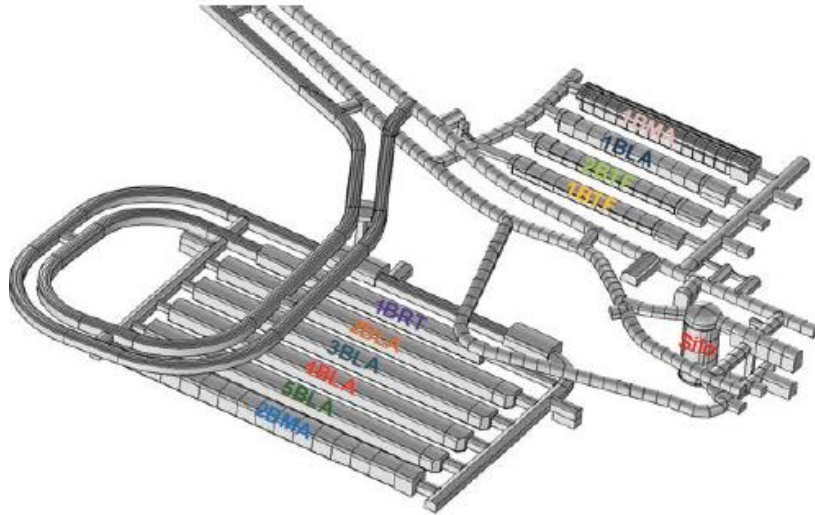


圖 2.5 近場 3 維水文模擬幾何架構示意圖

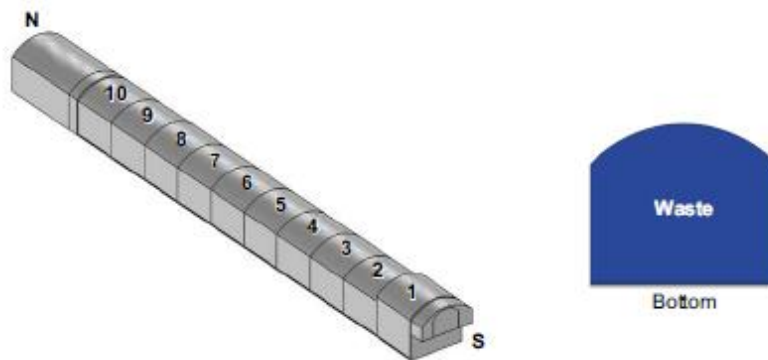


圖 2.6 1BLA 水文模擬處置窖區塊分區(左)與水文模擬廢棄物包件控制體積(右)示意圖

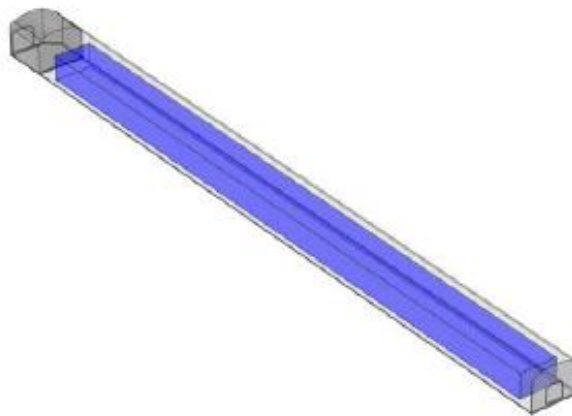


圖 2.7 2.5BLA 水文模擬處置窖區塊分區與水文模擬廢棄物包件控制體積(藍色區塊)示意圖

對應於 1BLA 處置窖之近場傳輸區塊模擬如圖 2.8 所示(TR-14-01-Fig.8.13)，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 2.9 為 2-5BLA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖(TR-14-01-Fig.8.15)。

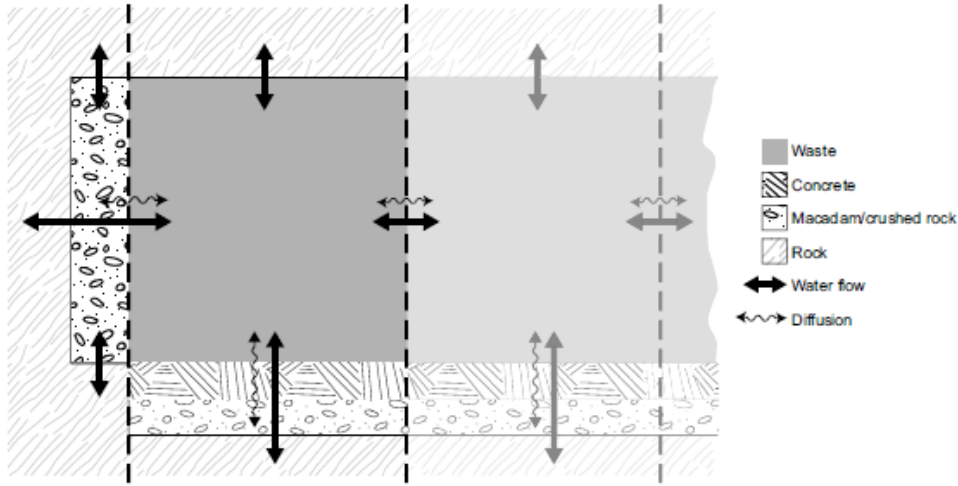


圖 2.8 SR-PSU 之 1BLA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖

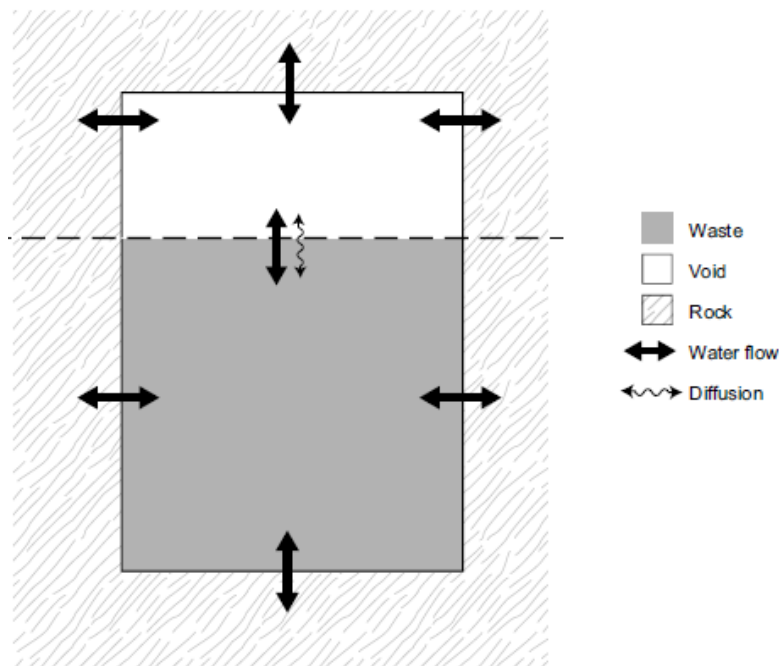


圖 2.9 SR-PSU 之 2-5BLA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖

2.6 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制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 值、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營造。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泥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。

2.7 工程障壁演化

膨潤土演化

工程障壁演化考慮如膨潤土障壁層在接觸到水與高 pH 值會逐漸演化，如約 10,000 年後約有 1/3 的膨潤土已溶解、100,000 年後大部分都溶解，而矽酸鈣礦物(calcium silicate minerals)、沸石(zeolites)及黏土會演化產生，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。

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 2.10 所示 pH 值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 2.11 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，右側回填區濃度假設為零。

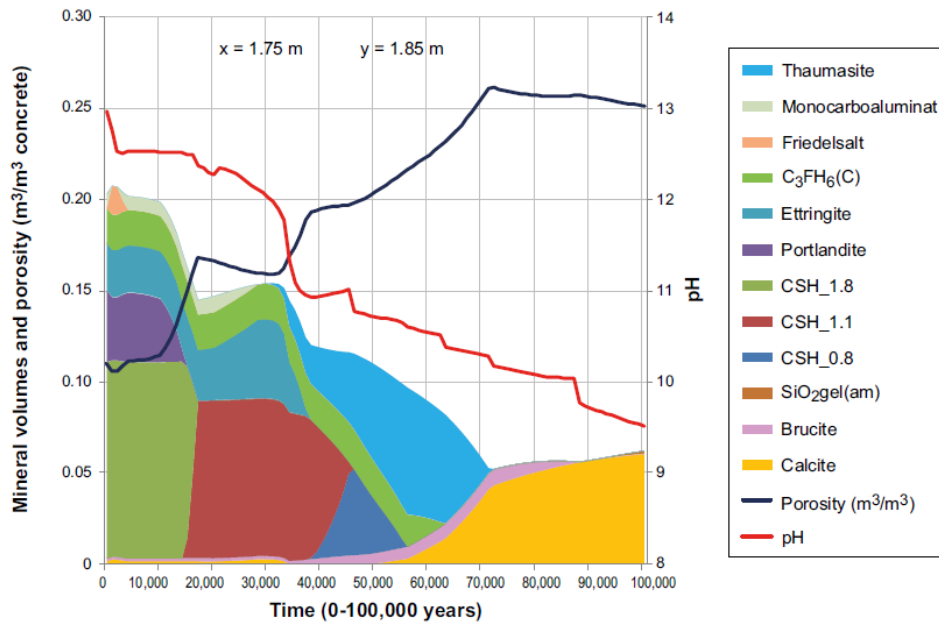


圖 2.10 水泥障壁層隨時間演化改變之礦物組成、孔隙率與 pH 值

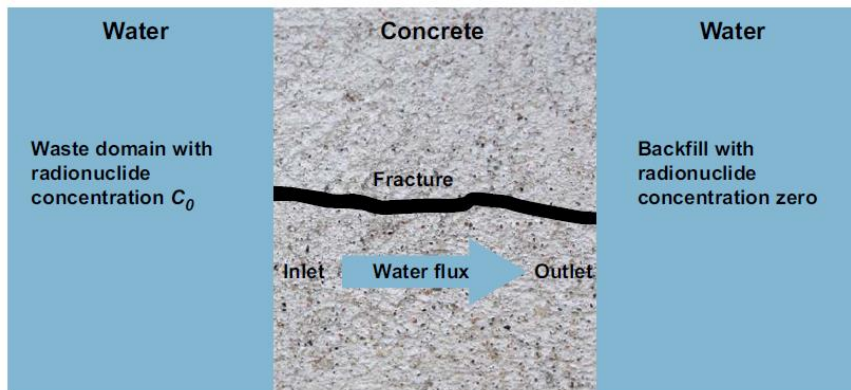


圖 2.11 水穿透水泥障壁層形成裂隙核種傳輸示意圖

利用所整理的近場工程障壁之系統變數與關鍵作用影響矩陣(表 2.2)，可以檢核哪些系統變數與作用在進行安全評估時是否有考慮。因此審查端在審驗時，就可以利用此矩陣來檢核近場安全評估成果是否完備，如：

- (1) 使用的模式使否可以模擬關鍵作用
- (2) 進行模擬的關鍵作用是否有考慮系統變數
- (3) 進行模擬的關鍵作用如何將系統變數納入模擬
- (4) 未模擬的關鍵作用，簡化是否合理
- (5) 未考慮的系統變數，簡化是否合理

第三章、國際坑道處置技術報告關於遠場傳輸驗證技術

本章以 SKB Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, TR14-05, (2014) 技術報告為主要研析內容進行初步綜整。

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 地質圈系統變數與定義

系統變數	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 值、離子強度、溶解核種濃度、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，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。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 遠場熱傳作用與地質圈系統變數互動矩陣

遠場熱傳作用考慮熱傳輸與結冰(冰原氣候與冰期氣候條件下)，此二作用與地質圈系統變數的互動矩陣如表 3.2 所示，表中變數有影響作用標示為 V，作用有影響變數標示為 P。有處理為+，未處理為-。

表 3.2 SR-PSU 遠場熱傳作用與地質圈系統變數互動矩陣

細部作用 變數	熱傳輸		結冰 (冰緣氣候與冰期氣候)	
	母岩溫度	V+	P+	V+
地下水流	V+	-	V+	P+
地下水壓力	-	-	V+	P+
氣相流體	V-	-	V+	P+
處置場幾何形貌	V-	-	-	-
裂隙與孔隙幾何形貌	-	-	V-	P-
母岩應力	-	-	-	-
母岩礦物	V+	-	V+	-
裂隙礦物	V-	-	V-	-
地下水組成	V-	P-	V+	P+
氣體組成	V-	P-	V-	P-
結構與零星物質	V-	P-	-	P-
飽和度	-	P-	V-	P-

3.3 遠場水力作用與地質圈系統變數互動矩陣

遠場水力作用考慮地下水流與氣體流動/溶解，此二作用與地質圈系統變數的互動矩陣如表 3.3 所示，表中變數有影響作用標示為 V，作用有影響變數標示為 P。有處理為+，未處理為-。

表 3.3 SR-PSU 遠場水力作用與地質圈系統變數互動矩陣

細部作用 變數	地下水流		氣體流動與溶解	
	母岩溫度	V+	P-	V+
地下水流	-	-	V-	P-
地下水壓力	V+	P+	V+	P-
氣相流體	V+	P-	-	-
處置場幾何形貌	V+	-	V+	-
裂隙與孔隙幾何形貌	V+	-	V+	P-
母岩應力	-	-	-	P-
母岩礦物	-	-	-	-
裂隙礦物	-	-	-	-
地下水組成	V-	P+	V+	P-
氣體組成	-	-	V+	P+
結構與零星物質	V-	-	V-	-
飽和度	V+	P+	V+	P-

3.4 遠場力學作用與地質圈系統變數互動矩陣

遠場水力作用考慮完整岩體的變形、現存裂隙的位移、裂隙產生、裂隙內的侵蝕與沉積等四種作用，此四作用與地質圈系統變數的互動矩陣如表 3.4、3.5 所示，表中變數有影響作用標示為 V，作用有影響變數標示為 P。有處理為+，未處理為-。

表 3.4 SR-PSU 遠場力學作用與地質圈系統變數互動矩陣(1/2)

細部作用 變數	完整岩體的變形		現存裂隙的位移	
	母岩溫度	V-	-	-
地下水流	-	-	-	-
地下水壓力	-	-	V-	-
氣相流體	-	-	-	-
處置場幾何形貌	V+	-	V+	P+
裂隙與孔隙幾何形貌	-	P-	V+	P-
母岩應力	V+	P+	V+	P-
母岩礦物	V+	-	V+	-
裂隙礦物	-	-	V+	-
地下水組成	-	-	-	-
氣體組成	-	-	-	-
結構與零星物質	-	P-	V-	P-
飽和度	-	-	-	-

表 3.5 SR-PSU 遠場力學作用與地質圈系統變數互動矩陣(2/2)

細部作用 變數	裂隙產生		裂隙內的侵蝕與沉積	
母岩溫度	-	-	-	-
地下水流	-	-	V-	-
地下水壓力	V-	-	-	-
氣相流體	-	-	V-	-
處置場幾何形貌	V-	P-	-	-
裂隙與孔隙幾何形貌	V-	P-	V-	P-
母岩應力	V-	P-	-	-
母岩礦物	V+	-	V-	-
裂隙礦物	-	-	V-	P-
地下水組成	-	-	-	-
氣體組成	-	-	-	-
結構與零星物質	V-	P-	V-	-
飽和度	-	-	V-	-

3.5 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣

遠場水力作用考慮平流傳輸/溶解相混合、母岩擴散傳輸、吸附、地下水/母岩反應、裂隙礦物的溶解/沉澱、微生物作用、裂隙灌漿的剝蝕(改變孔隙水 pH 值)、膠體作用、甲烷水合物形成(冰原氣候與冰期氣候條件下)、脫鹽作用(冰原氣候與冰期氣候條件下)、地電流等 11 種作用，此 11 作用與地質圈系統變數的互動矩陣如表 3.6~3.9 所示，表中變數有影響作用標示為 V，作用有影響變數標示為 P。有處理為+，未處理為-。

表 3.6 SR-PSU 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣(1/4)

細部作用 變數	平流傳輸/溶解相物種混合		母岩擴散傳輸	
	母岩溫度	-	-	V+
地下水流	V+	-	-	-
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	-	-	V+	-
母岩應力	-	-	-	-
母岩礦物	-	-	V+	-
裂隙礦物	-	-	V-	-
地下水組成	V+	P+	V+	P+
氣體組成	-	-	-	-
結構與零星物質	-	-	-	P+
飽和度	-	-	-	-

表 3.7 SR-PSU 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣(2/4)

細部作用 變數	吸附		地下水/母岩反應		裂隙礦物的溶解/沉澱	
	母岩溫度	V-	-	V+	P-	V-
地下水流	-	-	-	-	-	-
地下水壓力	-	-	V-	-	V-	-
氣相流體	-	-	-	-	-	-
處置場幾何形貌	-	-	-	-	-	-
裂隙與孔隙幾何形貌	V+	-	-	P-	-	P-
母岩應力	-	-	-	-	-	-
母岩礦物	V+	-	V+	P-	-	-
裂隙礦物	V+	-	-	-	V+	P+
地下水組成	V+	P-	V+	P+	V+	P+
氣體組成	-	-	-	-	-	-
結構與零星物質	V-	-	-	-	-	-
飽和度	V+	-	V+	P-	V+	-

表 3.8 SR-PSU 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣(3/4)

細部作用 變數	微生物作用		裂隙灌漿的剝蝕 (改變孔隙水pH)		膠體作用	
母岩溫度	V-	-	V-	P-	V-	-
地下水流	-	-	V-	P-	V-	-
地下水壓力	-	-	V-	P-	-	-
氣相流體	-	-	V-	P-	V-	-
處置場幾何形貌	V-	-	-	-	-	-
裂隙與孔隙幾何形貌	V-	P-	-	P-	V-	P-
母岩應力	-	-	V-	P-	V-	-
母岩礦物	-	-	-	-	-	-
裂隙礦物	V-	P-	-	-	V-	P-
地下水組成	V+	P-	V-	P-	V+	P-
氣體組成	-	-	-	-	-	-
結構與零星物質	-	P-	V-	P-	V-	P-
飽和度	V+	-	V+	-	V-	-

表 3.9 SR-PSU 遠場化學作用與地質圈系統變數互動矩陣(4/4)

細部作用 變數	甲烷水合物形成 (冰緣氣候與冰期氣候)		脫鹽作用 (冰緣氣候與冰期氣候)		地電流	
母岩溫度	V+	P-	V+	-	V-	-
地下水流	-	P-	-	P-	-	-
地下水壓力	V+	P-	V+	P-	-	-
氣相流體	V-	P-	-	-	-	-
處置場幾何形貌	-	-	-	-	V-	-
裂隙與孔隙幾何形貌	V-	P-	V+	-	V+	-
母岩應力	-	P-	-	-	-	-
母岩礦物	-	-	-	-	V-	-
裂隙礦物	-	-	-	-	-	-
地下水組成	V-	P-	V+	P+	V+	P-
氣體組成	V-	P-	-	-	-	-
結構與零星物質	-	P-	-	-	V-	P-
飽和度	V+	-	V+	-	V+	-

3.6 遠場核種傳輸作用與地質圈系統變數互動矩陣

遠場核種傳輸作用考慮核種種類分布、水相核種傳輸、氣相核種傳輸等 3 種作用，此 3 作用與地質圈系統變數的互動矩陣如表 3.10 所示，表中變數有影響作用標示為 V，作用有影響變數標示為 P。有處理為+，未處理為-。

表 3.10 SR-PSU 遠場核種傳輸作用與地質圈系統變數互動矩陣

細部作用 變數	核種物種分布		水相核種傳輸		氣相核種傳輸	
母岩溫度	V+	-	V+	-	V+	-
地下水流	-	-	V+	-	-	-
地下水壓力	V-	-	-	-	-	-
氣相流體	-	-	-	-	V+	-
處置場幾何形貌	V-	-	V+	-	-	-
裂隙與孔隙幾何形貌	-	-	V+	-	-	-
母岩應力	-	-	-	-	-	-
母岩礦物	-	-	V+	-	-	-
裂隙礦物	-	-	V+	-	-	-
地下水組成	V+	-	V+	P+	-	P+
氣體組成	-	-	-	P+	V+	P-
結構與零星物質	-	-	V+	-	-	-
飽和度	-	-	-	-	-	-

綜整 SR-PSU 遠場安全評估地質圈作用，共檢討 22 種地質圈作用，安全評估過程的處理方式整理如下：

- (1) 熱傳作用：永凍土層的發展模型考慮來自深地質圈的熱通量。
- (2) 結冰作用：透過耦合氣候與 2D 永凍土層模型處理。也考慮在核種傳輸計算。
- (3) 地下水流：模擬飽和含水層。假設均質地下水密度。
- (4) 氣體流動/溶解：忽略氣體溶解。忽略來自深地質圈的天然地熱氣體。考慮氣體傳輸。
- (5) 完整岩體的變形：忽略冰緣期與冰期時可能的熱傳—力學作用的影響。
- (6) 現存裂隙的位移：地下水模擬時不考慮此作用。忽略對裂隙幾何的影響(相對於裂隙網絡簡化的不確定性)
- (7) 裂隙產生：忽略。假設母岩為彈性材質。假設現存裂隙主導地下水流場。
- (8) 裂隙內的侵蝕與沉積：相對於冰期，在暖化期與冰緣期較不重要。
- (9) 平流傳輸/溶解相核種混合：考慮在核種傳輸方程式。透過地下水流線也與地下水組成的演化有關。
- (10) 母岩擴散傳輸：透過方程式模擬流動水體與鄰近靜止水體的擴散交換。
- (11) 吸附：Kd 模型並考慮此參數不確定性。不同核種有不同 Kd 值，選用較保守數值。
- (12) 地下水/母岩反應：並不對母岩孔隙率與礦物產生明顯影響。在溶質傳輸時考慮平衡的地下水組成。忽略母岩礦物的礦化作用。
- (13) 裂隙礦物的溶解/沉澱：核種傳輸模擬時不考慮。在地下水組成的熱力學計算時有考慮。
- (14) 微生物作用：處置場封閉後因微生物作用產生厭氧，而在厭氧狀態微生物作用將被抑制，忽略此作用對核種傳輸的影響。

- (15) 裂隙灌漿的剝蝕：改變地下水 pH 值，但廢棄物包件與障壁系統的水泥量遠大裂隙灌漿的量，因此影響有限。
- (16) 膠體作用：預期會有低濃度膠體，在基本情節中忽略膠體對核種傳輸的影響。
- (17) 甲烷水合物形成：忽略，無有利形成甲烷水合物條件。
- (18) 脫鹽：忽略，因不考慮密度流與 200m 深度內之低鹽度。
- (19) 地(面)電流：忽略。
- (20) 核種種類分布：保守挑選參數與敏感度分析。
- (21) 水相核種傳輸：以核種傳輸模型模擬。
- (22) 氣相核種傳輸：廢棄物包件鋼材腐蝕造成氣體由地質圈逸散，不考慮衰變或造成破壞。

綜合前述主要作用與地質圈系統變數的互動矩陣整理，SKB 的作法是先將任何可能影響地質圈安全功能的作用與系統變數整理探討，這也是依據 FEP 篩選過程所得到的經驗與建議，但對應到安全評估工作，則需要進一步檢驗那些作用是需要納入安全評估工作？那些是可以透過簡化處理？那些地質圈作用會改變地質圈系統變數？那些系統變數會影響地質圈作用？因此利用所整理的遠場地質圈系統變數與關鍵作用影響矩陣(表 3.2~3.10)，可以檢核哪些系統變數與作用在進行安全評估時是否有考慮。因此審查端在審驗時，就可以利用此矩陣來檢核遠場安全評估成果是否完備。

3.7 SR-PSU 安全評估架構與模式銜接

SR-PSU 的安全評估資料與模式架構如圖 3.1 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)。

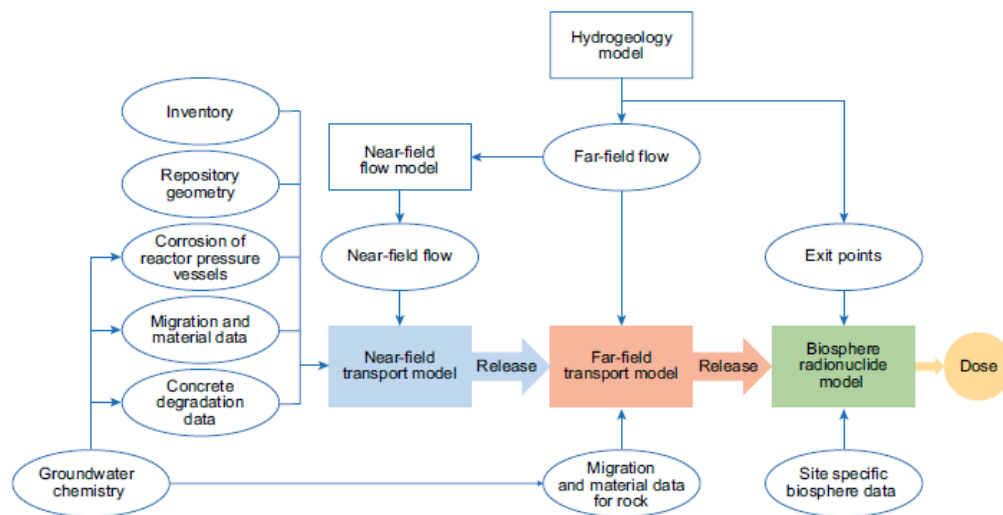


圖 3.1 SR-PSU 的安全評估資料與模式架構

遠場、近場、核種傳輸、劑量評估間的架構如圖 3.2 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。

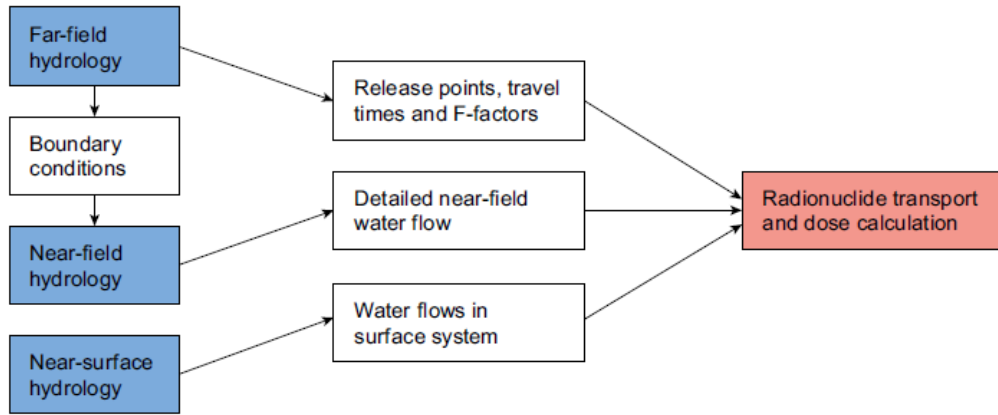


圖 3.2 SR-PSU 模式銜接概念架構示意圖

近場與遠場安全評估銜接作法，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。

第四章、近場核種傳輸解析解技術研究

本研究在核種傳輸審驗技術研發要項之一，為建立二維軸對稱圓柱座標系統之放射性核種擴散傳輸之解析解，模擬核種在緩衝區內的傳輸行為。過去研究多假設核種的擴散是單向，然而此假設與實際情況不符合。由於核種外釋可以視為以廢料罐為中心，從各個方向向外擴散，若假設緩衝區介質是均質性和均向性，則擴散是以軸對稱方式呈現。所發展的解析解以通量計算核種的流出量，進而和前人的模式比較外釋至緩衝區的核種量的濃度分布差異。

4.1 解析解方法

本研究探討當放射性核種外洩時，不同核種的在緩衝區中的遷移情況。在傳輸過程中，可以透過假設來化簡問題：

- (1) 地下水在緩衝區中只以擴散遷移。
- (2) 假設廢料罐中的放射性核種是全部瞬時溶出，因此不考慮溶解度。
- (3) 只考慮水平擴散，不考慮垂直擴散。
- (4) 單一核種傳輸。

根據上述假設，建立移為圓柱座標系統之擴散衰變方程式，並依照情況設定初始條件和邊界條件。對於穩態情況，可以直接解 Bessel function 形式的微分方程式直接求得解；而對於暫態情況，進行 Laplace 轉換消除時間微分項，在進行 Hankel 轉換消除空間微分項，求解代數方程式後，在進行一系列逆轉換求得真正的解。流程如圖 4.1 所示。

本研究中，解析解分為穩態和暫態。穩態是指濃度已達到平衡，不會隨時間改變；暫態是指濃度尚未達到平衡而會隨時間改變，而當時間夠長時，暫態解析解會趨近於穩態解析解。暫態解析解又分為二種，全解析解完全可以用任意數學函數描述傳輸現象；半解析不能完全以數學函數描述，需要用數值逆轉換求得近似值。本研究中使用的 Laplace 數值逆轉換是 de Hoog 法，是屬於傅立葉級數法(Fourier-series method)的改良版。Dubner 和 Abate(1968) 首先提出對 Laplace 數值逆轉換的傅立葉級數法，如式(4.1)所示：

$$\tilde{f}(t) = \frac{2e^{\alpha_f t}}{T} \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{Re} [F(\alpha_f)] + \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{Re} \left[F \left(\alpha_f + \frac{j\pi i}{T} \right) \right] \cos \left(\frac{j\pi t}{T} \right) \right\} \right\} \quad (4.1)$$

其中， α_f 是任意常數的參數，而它必須大於 Laplace 收斂橫坐標 σ_0 ，也就是 $F(s)$ 實數部分中最大值的任意奇異點； T 是表示第 j 項時間間距，並假設每個間距都是連續； Re 表示複數函數中的實數部分。

Durbin 將式(4.1)改良，如式(4.2)所示：

$$\tilde{f}(t) = \frac{2e^{\alpha_f t}}{T} \left\{ -\frac{1}{2} \operatorname{Re} [F(\alpha_f)] + \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{Re} \left[F \left(\alpha_f + \frac{j\pi i}{T} \right) \right] \cos \left(\frac{j\pi t}{T} \right) - \operatorname{Im} \left[F \left(\alpha_f + \frac{j\pi i}{T} \right) \right] \sin \left(\frac{j\pi t}{T} \right) \right\} \right\} \quad (4.2)$$

Im 表示複數函數中的虛數部分。雖然傅立葉級數法可以直接計算，但是收斂較慢的缺點，甚至有時會需要計算數千項去達到準確性。為加速收斂速度，Euler 求和公式，如式(4.3)：

$$\tilde{f}(t) = \frac{e^{\alpha_f t}}{t} \left\{ \frac{1}{2} F(\alpha_f) + \operatorname{Re} \sum_{j=1}^N F \left(\alpha_f + i \frac{j\pi}{t} \right) (-1)^j \right\} \quad (4.3)$$

α_f 和 N 是任意的參數。與式(1)和式(2)比較，式(3)收斂非常快，原因是它沒有造成震盪的 Sin 函數和 Cos 函數。

在 Wang 和 Zhan (2015) 研究中提到，由於目前沒有解析解可以驗證這些數值逆轉換的準確性，因此使用有限元素數值解當作驗證的基準，進一步探討不同的 Laplace 數值逆轉換方法，在不同流場情形，對於 Peclet number 值大小的收斂性與準確度。結果顯示出 de Hoog 法相較於其他數值逆轉換方法，對於徑向流、均勻流、Peclet number 大和小，都具有良好的收斂性、準確性和計算速度快等優點。

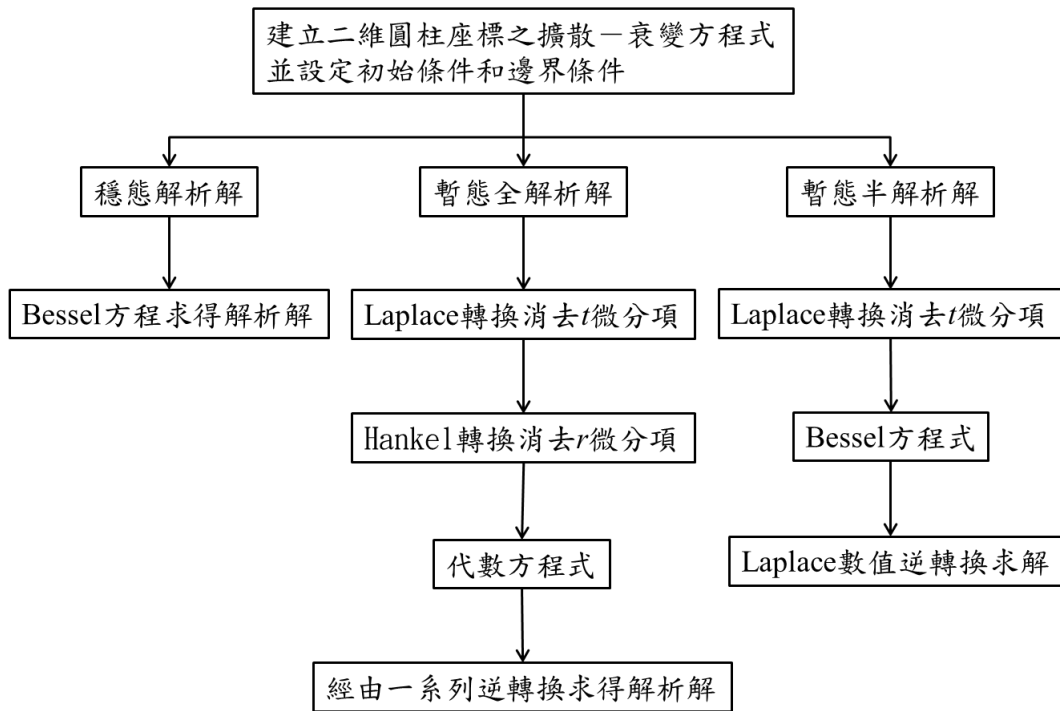


圖 4.1 不同解析解發展之流程

參考 NUMO-TR-10-1(大井貴夫, 2011)報告中的控制方程式進行改良，該方程式是以考慮擴散、衰變和吸附現象的一維直角座標傳輸方程式，該方程中較不合理的部分是，擴散只有單一方向，但實際的擴散方向應該是多個方向。因此將控制方程式以圓柱座標系改寫，假設擴散中心是在廢料罐，緩衝區的材料是均質性和均向性，核種的傳輸將會呈現軸對稱向外擴散，此時可以忽略 θ 方向的變化，只以 r 方向來模擬緩衝區內的濃度變化。處置區如圖 4.2、4.3 所示，分為四層。假設厚度相同且擴散只有水平方向，沒有垂直方向的概念模式。其控制方程式為：

$$\left[\varepsilon + (1 - \varepsilon) K_d \rho \right] \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_e \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \left[\varepsilon + (1 - \varepsilon) K_d \rho \right] \lambda C \quad (4.4)$$

其中， ε 是緩衝區之孔隙率(-)； K_d 是核種的分配係數(m^3/kg)， ρ 是緩衝區的密度(kg/m^3)； C 是核種濃度(Bq/m^3)， t 是時間(year)； r 是距離(m)； D_e 是核種在緩衝區中的擴散係數(m^2/year)； λ 是核種的衰變常數($1/\text{year}$)。 $\varepsilon + (1 - \varepsilon) K_d \rho$ 表示核種濃度在介質孔隙中與吸附在介質表面的變化。將 ε 提出來，可以得到 $1 + \frac{(1 - \varepsilon) K_d \rho}{\varepsilon}$ ，是遲滯因子的表示式，則令 Rd 為新變數

$$Rd = 1 + \frac{(1 - \varepsilon) K_d \rho}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

Rd 是核種的遲滯因子[-]，其意義為核種在傳輸的過程中，因為與介質表面產生物理或是化學作用，核種從水中轉移至固體表面，而造成核種傳輸的速率降低。通常放射性核種的遲滯因子都很高，尤其是黏土質的介質中特別明顯，因此在傳輸的過程中也是一個考慮的重要因素。將式(4.5)代入式(4.4)得到

$$\varepsilon Rd \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_e \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \varepsilon Rd \lambda C \quad (4.6)$$

在放射性廢料罐外洩前，緩衝區內不會有任何核種存在，因此可以表示如下

$$C(r, t = 0) = 0 \quad (4.7)$$

緩衝區內部為廢料罐，在 $r = r_K$ 邊界條件表示如下

$$C(r = r_K, t) = C_K \quad (4.8)$$

緩衝區外部為開挖影響區，在 $r = r_L$ 邊界條件表示如下

$$C(r = r_L, t) = C_L \quad (4.9)$$

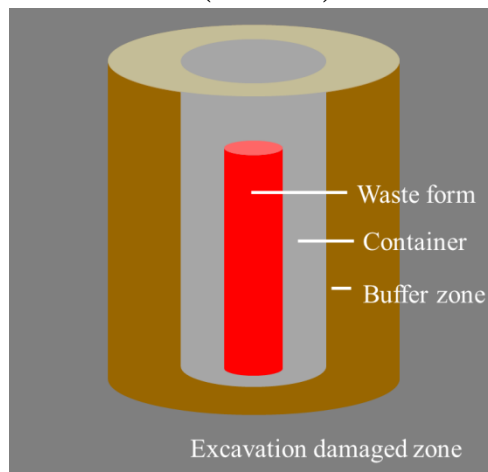


圖 4.2 處置區示意圖

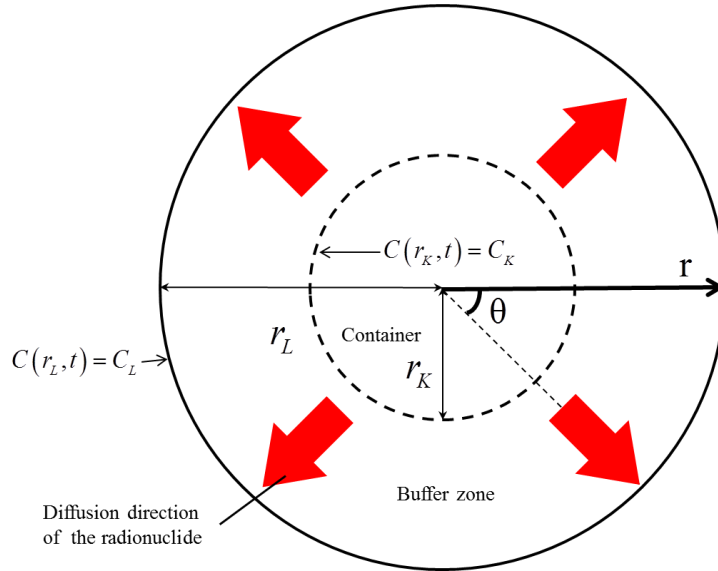


圖 4.3 處置區之概念模型 (俯視)

(1) 穩態解析解

由於穩態時，濃度不會隨時間變化，因此令時間微分項為零，式(4.6)變為

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r De \frac{dC}{dr} \right) - \varepsilon R d \lambda C = 0 \quad (4.10)$$

將式(4.10)同除 De ，得到

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dC}{dr} \right) - \frac{\varepsilon R d \lambda}{De} C = 0 \quad (4.11)$$

將式(4.11)展開，得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dC}{dr} \right) - \frac{\varepsilon R d \lambda}{De} C &= 0 \\ \Rightarrow \frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dC}{dr} - \frac{\varepsilon R d \lambda}{De} C &= 0 \\ \Rightarrow r^2 \frac{d^2 C}{dr^2} + r \frac{dC}{dr} - r^2 \frac{\varepsilon R d \lambda}{De} C &= 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

此方程式為 Bessel function 之形式，得到解為

$$C(r) = AI_0(\sqrt{ar}) + BK_0(\sqrt{ar}) \quad (4.13)$$

其中，令 $a = \frac{\varepsilon R d \lambda}{De}$

將邊界條件式(4.8)和式(4.9)代入，得到

$$C(r = r_K) = AI_0(\sqrt{ar_K}) + BK_0(\sqrt{ar_K}) = C_K \quad (4.14)$$

$$C(r = r_L) = AI_0(\sqrt{ar_L}) + BK_0(\sqrt{ar_L}) = C_L \quad (4.15)$$

聯立式(4.14)和式(4.15)，使用克拉瑪公式求解，得到

$$\Delta = \begin{vmatrix} I_0(\sqrt{ar_K}) & K_0(\sqrt{ar_K}) \\ I_0(\sqrt{ar_L}) & K_0(\sqrt{ar_L}) \end{vmatrix}, \quad \Delta A = \begin{vmatrix} C_K & K_0(\sqrt{ar_K}) \\ C_L & K_0(\sqrt{ar_L}) \end{vmatrix}, \quad \Delta B = \begin{vmatrix} I_0(\sqrt{ar_K}) & C_K \\ I_0(\sqrt{ar_L}) & C_L \end{vmatrix}$$

$$A = \frac{\Delta A}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} C_K K_0(\sqrt{ar_K}) \\ C_L K_0(\sqrt{ar_L}) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} I_0(\sqrt{ar_K}) K_0(\sqrt{ar_K}) \\ I_0(\sqrt{ar_L}) K_0(\sqrt{ar_L}) \end{vmatrix}} = \frac{C_K K_0(\sqrt{ar_L}) - C_L K_0(\sqrt{ar_K})}{I_0(\sqrt{ar_K}) K_0(\sqrt{ar_L}) - I_0(\sqrt{ar_L}) K_0(\sqrt{ar_K})} \quad (4.16)$$

$$B = \frac{\Delta B}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} I_0(\sqrt{ar_K}) C_K \\ I_0(\sqrt{ar_L}) C_L \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} I_0(\sqrt{ar_K}) K_0(\sqrt{ar_K}) \\ I_0(\sqrt{ar_L}) K_0(\sqrt{ar_L}) \end{vmatrix}} = \frac{C_L I_0(\sqrt{ar_K}) - C_K I_0(\sqrt{ar_L})}{I_0(\sqrt{ar_K}) K_0(\sqrt{ar_L}) - I_0(\sqrt{ar_L}) K_0(\sqrt{ar_K})} \quad (4.17)$$

將式(4.16)和式(4.17)的結果代回式(4.10)，得到

$$C(r) = \frac{C_K K_0(\sqrt{ar_L}) - C_L K_0(\sqrt{ar_K})}{I_0(\sqrt{ar_K}) K_0(\sqrt{ar_L}) - I_0(\sqrt{ar_L}) K_0(\sqrt{ar_K})} I_0(\sqrt{ar}) + \frac{C_L I_0(\sqrt{ar_K}) - C_K I_0(\sqrt{ar_L})}{I_0(\sqrt{ar_K}) K_0(\sqrt{ar_L}) - I_0(\sqrt{ar_L}) K_0(\sqrt{ar_K})} K_0(\sqrt{ar}) \quad (4.18)$$

(2) 暫態解析解(全解析解)

將式(4.6)化簡，得到

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rDa \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \lambda C = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4.19)$$

其中， $Da = \frac{De}{\varepsilon R d}$

將式(4.19)進行 Laplace 轉換，消除時間微分項

令 $\bar{C}(r, s) = L[C(r, t)]$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rDa \frac{d\bar{C}}{dr} \right) - \lambda \bar{C} = \bar{C}s \quad (4.20)$$

邊界條件 Laplace 轉換

$$\bar{C}(r = r_K, s) = \frac{C_K}{s} \quad (4.21)$$

$$\bar{C}(r = r_L, s) = \frac{C_L}{s} \quad (4.22)$$

將式(4.20)進行 Hankel 轉換，消除空間微分項，將微分方程式轉換成代數方程式，求得解後再進行逆轉換得到真正的解析解。執行 Hankel 轉換時，需要選擇特徵值問題和邊界條件，

求出特徵函數 $R_0(\beta_m, r)$ 和特徵值 β_m ，而根據式(4.20)、式(4.21)和式(4.22)，其特徵函數為：

$$R_0(\beta_m, r) = J_0(\beta_m r) Y_0(\beta_m r_K) - J_0(\beta_m r_K) Y_0(\beta_m r) \quad (4.23)$$

特徵值 β_m 為特徵方程式的解，而特徵方程式如下：

$$J_0(\beta_m r_L)Y_0(\beta_m r_K) - J_0(\beta_m r_K)Y_0(\beta_m r_L) = 0 \quad (4.24)$$

Hankel 轉換

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_a \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right) \right] = D_a \left[\frac{2J_0(\beta_m r_K) C_L}{\pi J_0(\beta_m r_L) s} - \frac{2 C_K}{\pi s} - \beta_m^2 H(\beta, s) \right] \quad (4.25)$$

將式(4.25)代回式(4.20)，得到

$$D_a \frac{2J_0(\beta_m r_K) C_L}{\pi J_0(\beta_m r_L) s} - D_a \frac{2 C_K}{\pi s} - D_a \beta_m^2 H - (\lambda + s)H = 0 \quad (4.26)$$

將式(4.26)進行代數計算，得到

$$\begin{aligned} -D_a \beta_m^2 H - (\lambda + s)H &= -D_a \frac{2J_0(\beta_m r_K) C_L}{\pi J_0(\beta_m r_L) s} + D_a \frac{2 C_K}{\pi s} \\ \Rightarrow -(D_a \beta_m^2 + \lambda + s)H &= -D_a \frac{2J_0(\beta_m r_K) C_L}{\pi J_0(\beta_m r_L) s} + D_a \frac{2 C_K}{\pi s} \\ H &= \frac{D_a}{s(D_a \beta_m^2 + \lambda + s)} \frac{2}{\pi} \left(\frac{J_0(\beta_m r_K)}{J_0(\beta_m r_L)} C_L - C_K \right) \end{aligned} \quad (4.27)$$

將式(4.27)進行 Hankel 逆轉換

$$\begin{aligned} \bar{C}(r, s) &= \frac{1}{2} \pi^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\beta_m^2 J_0^2(\beta_m r_L)}{J_0^2(\beta_m r_K) - J_0^2(\beta_m r_L)} H(\beta, s) R_0(\beta, r) \\ &= \frac{1}{2} \pi^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\beta_m^2 J_0^2(\beta_m r_L)}{J_0^2(\beta_m r_K) - J_0^2(\beta_m r_L)} \frac{D_a}{s(D_a \beta_m^2 + \lambda + s)} \frac{2}{\pi} \left(\frac{J_0(\beta_m r_K)}{J_0(\beta_m r_L)} C_L - C_K \right) R_0(\beta, r) \\ &= D_a \pi \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\beta_m^2 J_0^2(\beta_m r_L)}{J_0^2(\beta_m r_K) - J_0^2(\beta_m r_L)} \frac{1}{s(D_a \beta_m^2 + \lambda + s)} \left(\frac{J_0(\beta_m r_K)}{J_0(\beta_m r_L)} C_L - C_K \right) R_0(\beta, r) \end{aligned} \quad (4.28)$$

將式(4.28)中 Laplace domain 的部分作 Laplace 逆轉換，得到

$$\begin{aligned} L^{-1} \left[\frac{1}{s(\beta_m^2 D_a + \lambda + s)} \right] \\ &= \frac{1}{\beta_m^2 D_a + \lambda} L^{-1} \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \beta_m^2 D_a + \lambda} \right] \\ &= \frac{1}{\beta_m^2 D_a + \lambda} \left(1 - e^{-(\beta_m^2 D_a + \lambda)t} \right) \end{aligned} \quad (4.29)$$

將式(4.29)結果代回式將式(4.28)，得到

$$\begin{aligned} C(r, t) \\ &= \pi \sum_{m=1}^{\infty} \frac{D_a \beta_m^2 J_0^2(\beta_m r_L)}{J_0^2(\beta_m r_K) - J_0^2(\beta_m r_L)} \frac{1}{\beta_m^2 D_a + \lambda} \\ &\quad \left(1 - e^{-(\beta_m^2 D_a + \lambda)t} \right) \left(\frac{J_0(\beta_m r_K)}{J_0(\beta_m r_L)} C_L - C_K \right) R_0(\beta, r) \end{aligned} \quad (4.30)$$

(3) 暫態(半解析解)

將式(4.19)展開

$$D_a \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + D_a \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \lambda C = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4.31)$$

將式(4.31)進行 Laplace 轉換，消除時間微分項，得到

$$\text{令 } \bar{C}(r, s) = L[C(r, t)]$$

$$D_a \frac{d^2 \bar{C}}{dr^2} + D_a \frac{1}{r} \frac{d\bar{C}}{dr} - \lambda \bar{C} = s\bar{C} \quad (4.32)$$

邊界條件 Laplace 轉換

$$\bar{C}(r = r_K, s) = \frac{C_K}{s} \quad (4.33)$$

$$\bar{C}(r = r_L, s) = \frac{C_L}{s} \quad (4.34)$$

將式(4.29)整理後，得到

$$\frac{d^2 \bar{C}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\bar{C}}{dr} - \left(\frac{\lambda + s}{D_a} \right) \bar{C} = 0 \quad (4.35)$$

此方程式為 Bessel function 之形式，得到解為

$$C(r, s) = AI_0(\sqrt{br}) + BK_0(\sqrt{br}) \quad (4.36)$$

$$\text{其中， } b = \frac{\lambda + s}{D_a}$$

將邊界條件式(4.33)和式(4.34)代入，得到

$$C(r_K) = AI_0(\sqrt{br_K}) + BK_0(\sqrt{br_K}) = \frac{C_K}{s} \quad (4.37)$$

$$C(r_L) = AI_0(\sqrt{br_L}) + BK_0(\sqrt{br_L}) = \frac{C_L}{s} \quad (4.38)$$

聯立式(4.37)和式(4.38)，使用克拉瑪公式求解，得到

$$\Delta = \begin{vmatrix} I_0(\sqrt{br_K}) & K_0(\sqrt{br_K}) \\ I_0(\sqrt{br_L}) & K_0(\sqrt{br_L}) \end{vmatrix}, \quad \Delta A = \begin{vmatrix} \frac{C_K}{s} & K_0(\sqrt{br_K}) \\ \frac{C_L}{s} & K_0(\sqrt{br_L}) \end{vmatrix}, \quad \Delta B = \begin{vmatrix} I_0(\sqrt{br_K}) & \frac{C_K}{s} \\ I_0(\sqrt{br_L}) & \frac{C_L}{s} \end{vmatrix}$$

$$A = \frac{\Delta A}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} \frac{C_K}{s} & K_0(\sqrt{br_K}) \\ \frac{C_L}{s} & K_0(\sqrt{br_L}) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} I_0(\sqrt{br_K}) & K_0(\sqrt{br_K}) \\ I_0(\sqrt{br_L}) & K_0(\sqrt{br_L}) \end{vmatrix}} = \frac{C_K K_0(\sqrt{br_L}) - C_L K_0(\sqrt{br_K})}{s [I_0(\sqrt{br_K}) K_0(\sqrt{br_L}) - I_0(\sqrt{br_L}) K_0(\sqrt{br_K})]} \quad (4.39)$$

$$B = \frac{\Delta B}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} I(\sqrt{br_K}) \frac{C_K}{s} \\ I_0(\sqrt{br_L}) \frac{C_L}{s} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} I_0(\sqrt{br_K}) K_0(\sqrt{br_K}) \\ I_0(\sqrt{br_L}) K_0(\sqrt{br_L}) \end{vmatrix}} = \frac{C_L I(\sqrt{br_K}) - C_K I_0(\sqrt{br_L})}{s [I_0(\sqrt{br_K}) K_0(\sqrt{br_L}) - I_0(\sqrt{br_L}) K_0(\sqrt{br_K})]} \quad (4.40)$$

將式(4.39)和式(4.40)代回式(4.36)，得到

$$C(r,s) = \frac{C_K K_0(\sqrt{br_L}) - C_L K_0(\sqrt{br_K})}{s [I_0(\sqrt{br_K}) K_0(\sqrt{br_L}) - I_0(\sqrt{br_L}) K_0(\sqrt{br_K})]} I_0(\sqrt{br}) \quad (4.41)$$

$$+ \frac{C_L I(\sqrt{br_K}) - C_K I_0(\sqrt{br_L})}{s [I_0(\sqrt{br_K}) K_0(\sqrt{br_L}) - I_0(\sqrt{br_L}) K_0(\sqrt{br_K})]} K_0(\sqrt{br})$$

4.2 解析解結果與討論

本研究中所發展的穩態解析解、暫態解析解和暫態半解析解技術，三者皆需要驗證後才能正確地進行模擬放射性核種的傳輸。穩態解使用 LTFD (Laplace transform finite difference, Laplace 轉換有限差分法) 驗證；而暫態解包含一項無窮級數，需要測試其收斂性後再與 LTFD 做驗證。結果發現，累加次數要非常大才能夠達到收斂，因此改用半解析解。而半解析解沒有無窮級數，只需要和 LTFD 驗證即可。

4.2.1 收斂測試

暫態方程式求解過程經由 Hankel 逆轉換與 Laplace 逆轉換得到解析解，其中包含一項無窮級數，此無窮級數可以直接計算，但必須要測試不同的累加次數讓數值達到收斂性，因此累加項數與收斂性是需要討論分析。驗證中的參數是參考表 4.1。在 $R=1.0$ ，時間 $t=10,000$ 年時，對於不同擴散係數時，累加項數對於解析解的影響性。表 4.2、表 4.3、表 4.4 顯示出，擴散係數對於收斂性沒有很大的影響，但是距離遠近對收斂次數有影響，0.216m 至 0.265m 的濃度尚未達收斂，數值仍然在浮動；0.315m 至 0.915m 的濃度則是達收斂不再變動。當累加次數達到 4,000,000 時，距離較近的濃度仍然在一定範圍的浮動而尚未收斂，但浮動的範圍慢慢減少。若是將累加次數繼續增加，或許可達到數值收斂，但是在計算的速度會較慢，因此改為使用半解析解。

表 4.1 模擬條件和傳輸參數

參數	值
內部距離 r_K (m) (H12, 2000)	0.215
外部距離 r_L (m) (H12, 2000)	0.915
內部濃度 C_K (TBq/m ³)	10 ⁵
外部濃度 C_L (TBq/m ³)	0
孔隙率 ϵ (-)	0.3
密度 ρ (kg/m ³) (Moridis and Roddell, 1991)	1800
擴散係數 De (m ² /year) (H12, 2000)	1.89×10 ⁻²
²³⁸ U 之分配係數 K_d (m ³ /kg)	1.6
²³⁴ U 之分配係數 K_d (m ³ /kg)	1.6
²³⁰ Th 之分配係數 K_d (m ³ /kg)	5.8
²²⁶ Ra 之分配係數 K_d (m ³ /kg)	9.1
²³⁸ U 之衰變常數 λ (1/year)	1.55×10 ⁻¹⁰
²³⁴ U 之衰變常數 λ (1/year)	2.82×10 ⁻⁶
²³⁰ Th 之衰變常數 λ (1/year)	9.19×10 ⁻⁶
²²⁶ Ra 之衰變常數 λ (1/year)	4.33×10 ⁻⁴
²³⁸ U 之半衰期 $t_{1/2}$ (year)	
²³⁴ U 之半衰期 $t_{1/2}$ (year)	
²³⁰ Th 之半衰期 $t_{1/2}$ (year)	
²²⁶ Ra 之半衰期 $t_{1/2}$ (year)	

表 4.2 擴散係數 $De=0.01\text{m}^2/\text{year}$ 與遲滯因子 $R=1.0$ ，不同累加次數 m 的收斂情形

r (m)	Concentration (TBq/m ³)			
	$m=500,000$	$m=1,000,000$	$m=1,500,000$	$m=2,000,000$
0.216	9.9476×10^4	9.9496×10^4	9.9501×10^4	9.9500×10^4
0.230	9.2363×10^4	9.2638×10^4	9.2638×10^4	9.2638×10^4
0.250	8.3561×10^4	8.3562×10^4	8.3562×10^4	8.3562×10^4
0.265	7.7258×10^4	7.7259×10^4	7.7259×10^4	7.7259×10^4
0.315	5.8959×10^4	5.8959×10^4	5.8959×10^4	5.8959×10^4
0.415	3.2515×10^4	3.2515×10^4	3.2515×10^4	3.2515×10^4
0.515	1.6367×10^4	1.6368×10^4	1.6368×10^4	1.6368×10^4
0.615	7.4057×10^3	7.4057×10^3	7.4057×10^3	7.4057×10^3
0.715	2.9618×10^3	2.9617×10^3	2.9618×10^3	2.9618×10^3
0.815	9.6352×10^2	9.6356×10^2	9.6356×10^3	9.6355×10^3
0.915	3.8344×10^{-7}	3.9010×10^{-7}	3.9414×10^{-7}	4.0608×10^{-7}

r (m)	Concentration (TBq/m ³)			
	$m=2,500,000$	$m=3,000,000$	$m=3,500,000$	$m=4,000,000$
0.216	9.9495×10^4	9.9495×10^4	9.9490×10^4	9.9491×10^4
0.230	9.2638×10^4	9.2638×10^4	9.2638×10^4	9.2637×10^4
0.250	8.3562×10^4	8.3562×10^4	8.3561×10^4	8.3561×10^4
0.265	7.7268×10^4	7.7288×10^4	7.7314×10^4	7.7345×10^4
0.315	5.8959×10^4	5.8959×10^4	5.8959×10^4	5.8959×10^4
0.415	3.2515×10^4	3.2515×10^4	3.2515×10^4	3.2515×10^4
0.515	1.6368×10^4	1.6368×10^4	1.6368×10^4	1.6368×10^4
0.615	7.4057×10^3	7.4057×10^3	7.4057×10^3	7.4057×10^3
0.715	2.9618×10^3	2.9618×10^3	2.9618×10^3	2.9618×10^3
0.815	9.6355×10^3	9.6355×10^3	9.6355×10^3	9.6355×10^3
0.915	8.3953×10^{-7}	1.6527×10^{-6}	2.4709×10^{-6}	3.3570×10^{-7}

表 4.3 擴散係數 $De=0.1\text{m}^2/\text{year}$ 與遲滯因子 $R=1.0$ ，不同累加次數 m 的收斂情形

r (m)	Concentration (TBq/m ³)			
	$m=500,000$	$m=1,000,000$	$m=1,500,000$	$m=2,000,000$
0.216	9.9661×10^4	9.9682×10^4	9.9687×10^4	9.9685×10^4
0.230	9.5334×10^4	9.5336×10^4	9.5336×10^4	9.5336×10^4
0.250	8.9568×10^4	8.9568×10^4	8.9568×10^4	8.9568×10^4
0.265	8.5538×10^4	8.5538×10^4	8.5539×10^4	8.5539×10^4
0.315	7.3585×10^4	7.3585×10^4	7.3585×10^4	7.3585×10^4
0.415	5.4525×10^4	5.4525×10^4	5.4525×10^4	5.4525×10^4
0.515	3.9611×10^4	3.9611×10^4	3.9611×10^4	3.9611×10^4
0.615	2.7365×10^4	2.7365×10^4	2.7365×10^4	2.7365×10^4
0.715	1.6980×10^4	1.6980×10^4	1.6980×10^4	1.6980×10^4
0.815	7.9654×10^3	7.9655×10^3	7.9655×10^3	7.9655×10^3
0.915	1.9236×10^{-7}	1.9902×10^{-7}	2.0306×10^{-7}	2.1500×10^{-7}

r (m)	Concentration (TBq/m ³)			
	$m=2,500,000$	$m=3,000,000$	$m=3,500,000$	$m=4,000,000$
0.216	9.9681×10^4	9.9677×10^4	9.9676×10^4	9.9677×10^4
0.230	9.5336×10^4	9.5336×10^4	9.5336×10^4	9.5336×10^4
0.250	8.9568×10^4	8.9568×10^4	8.9568×10^4	8.9568×10^4
0.265	8.5548×10^4	8.5569×10^4	8.5594×10^4	8.5625×10^4
0.315	7.3585×10^4	7.3585×10^4	7.3585×10^4	7.3585×10^4
0.415	5.4525×10^4	5.4525×10^4	5.4525×10^4	5.4525×10^4
0.515	3.9611×10^4	3.9611×10^4	3.9611×10^4	3.9611×10^4
0.615	2.7365×10^4	2.7365×10^4	2.7365×10^4	2.7365×10^4
0.715	1.6980×10^4	1.6980×10^4	1.6980×10^4	1.6980×10^4
0.815	7.9655×10^3	7.9655×10^3	7.9655×10^3	7.9655×10^3
0.915	6.4845×10^{-7}	1.4616×10^{-7}	2.2798×10^{-7}	3.1659×10^{-7}

表 4.4 擴散係數 $De=1.0\text{m}^2/\text{year}$ 與遲滯因子 $R=1.0$ ，不同累加次數 m 的收斂情形

r (m)	Concentration (TBq/m ³)			
	$m=500,000$	$m=1,000,000$	$m=1,500,000$	$m=2,000,000$
0.216	9.9662×10^4	9.9683×10^4	9.9688×10^4	9.9686×10^4
0.230	9.5342×10^4	9.5344×10^4	9.5344×10^4	9.5344×10^4
0.250	8.9585×10^4	8.9586×10^4	8.9586×10^4	8.9586×10^4
0.265	8.5562×10^4	8.5563×10^4	8.5563×10^4	8.5563×10^4
0.315	7.3628×10^4	7.3628×10^4	7.3628×10^4	7.3628×10^4
0.415	5.4592×10^4	5.4591×10^4	5.4592×10^4	5.4592×10^4
0.515	3.9685×10^4	3.9685×10^4	3.9685×10^4	3.9685×10^4
0.615	2.7432×10^4	2.7432×10^4	2.7432×10^4	2.7432×10^4
0.715	1.7030×10^4	1.7030×10^4	1.7030×10^4	1.7030×10^4
0.815	7.9911×10^3	7.9912×10^3	7.9912×10^3	7.9911×10^3
0.915	1.9168×10^{-7}	1.9834×10^{-7}	2.0238×10^{-7}	2.1432×10^{-7}

r (m)	Concentration (TBq/m ³)			
	$m=2,500,000$	$m=3,000,000$	$m=3,500,000$	$m=4,000,000$
0.216	9.9681×10^4	9.9677×10^4	9.9676×10^4	9.9678×10^4
0.230	9.5343×10^4	9.5344×10^4	9.5344×10^4	9.5343×10^4
0.250	8.9586×10^4	8.9585×10^4	8.9585×10^4	8.9586×10^4
0.265	8.5572×10^4	8.5593×10^4	8.5618×10^4	8.5649×10^4
0.315	7.3628×10^4	7.3628×10^4	7.3628×10^4	7.3628×10^4
0.415	5.4591×10^4	5.4592×10^4	5.4591×10^4	5.4592×10^4
0.515	3.9685×10^4	3.9685×10^4	3.9685×10^4	3.9685×10^4
0.615	2.7432×10^4	2.7432×10^4	2.7432×10^4	2.7432×10^4
0.715	1.7030×10^4	1.7030×10^4	1.7030×10^4	1.7030×10^4
0.815	7.9911×10^3	7.9912×10^3	7.9911×10^3	7.9911×10^3
0.915	6.4776×10^{-7}	1.4609×10^{-6}	2.2792×10^{-6}	3.1653×10^{-6}

4.2.2 解析解與數值解比對

本研究發展之解析解模式與其他解析解或數值解驗證。LTFD (Sidicky, 1989 ; Moridis and Reddel, 1991)跟傳統有限差分相比，它可以減少使用時間離散方式造成的誤差，而且時間域上為連續，可以求得任意時間的解而不需經過迭代計算。因此，使用 LTFD 計算二維圓柱座標系統擴散—衰變之方程式，所求得的解可以和本研究中的數學模式作驗證。LTFD 可以同時對穩態解和暫態解做相關驗證，因為當時間很大時，暫態解的答案會趨近於穩態解。圖 4.4 顯示穩態解和長時間 LTFD 互相驗證，結果二者非常吻合；圖 4.5 顯示不同核種在不同時間下，暫態全解析解和 LTFD 結果互相吻合；圖 4.6 顯示不同時間，暫態半解析解和 LTFD 結果互相吻合。

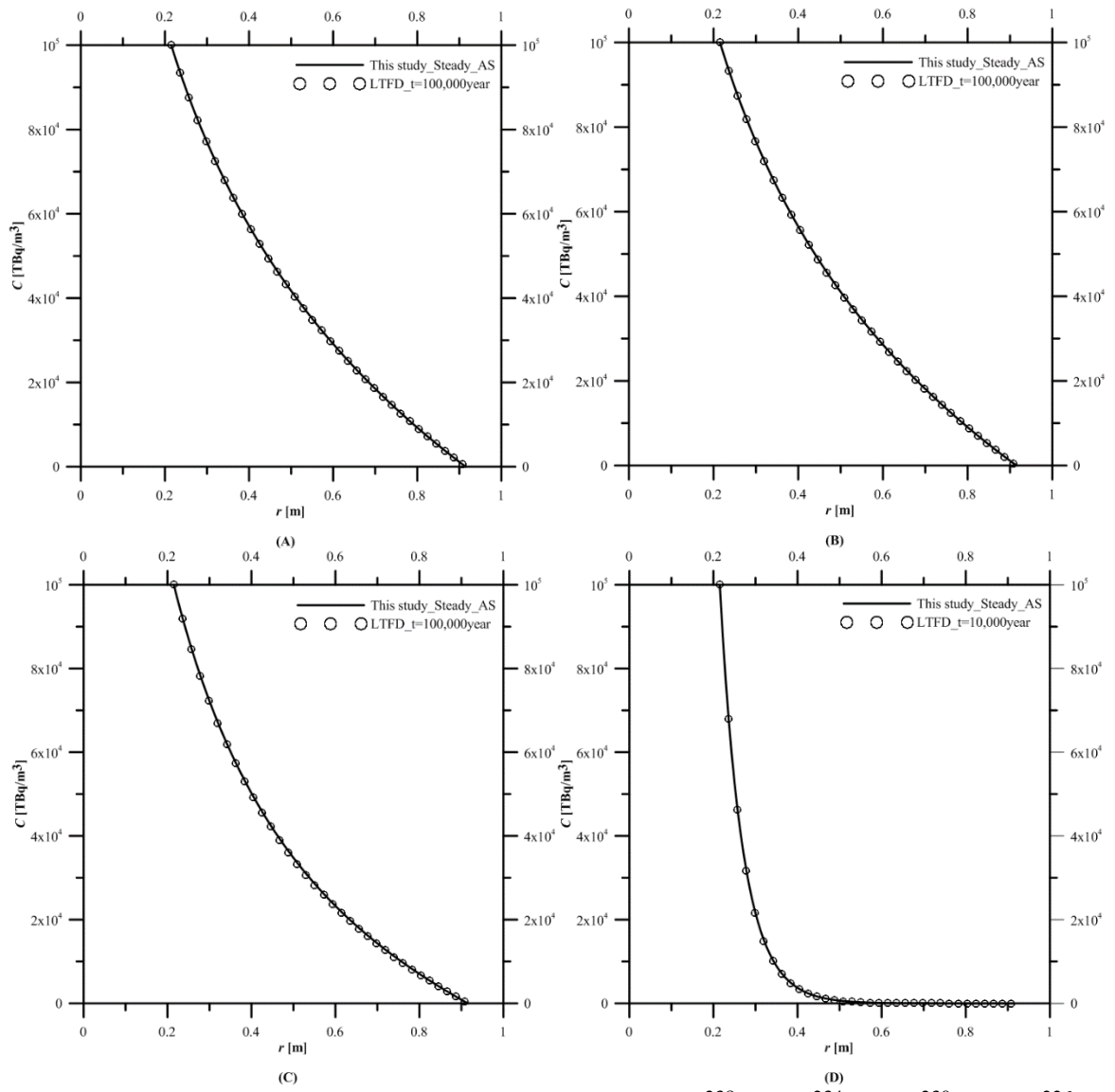


圖 4.4 衰變核種穩態解析解和長時間 LTFD 驗證 (A) ^{238}U (B) ^{234}U (C) ^{230}Th (D) ^{226}Ra

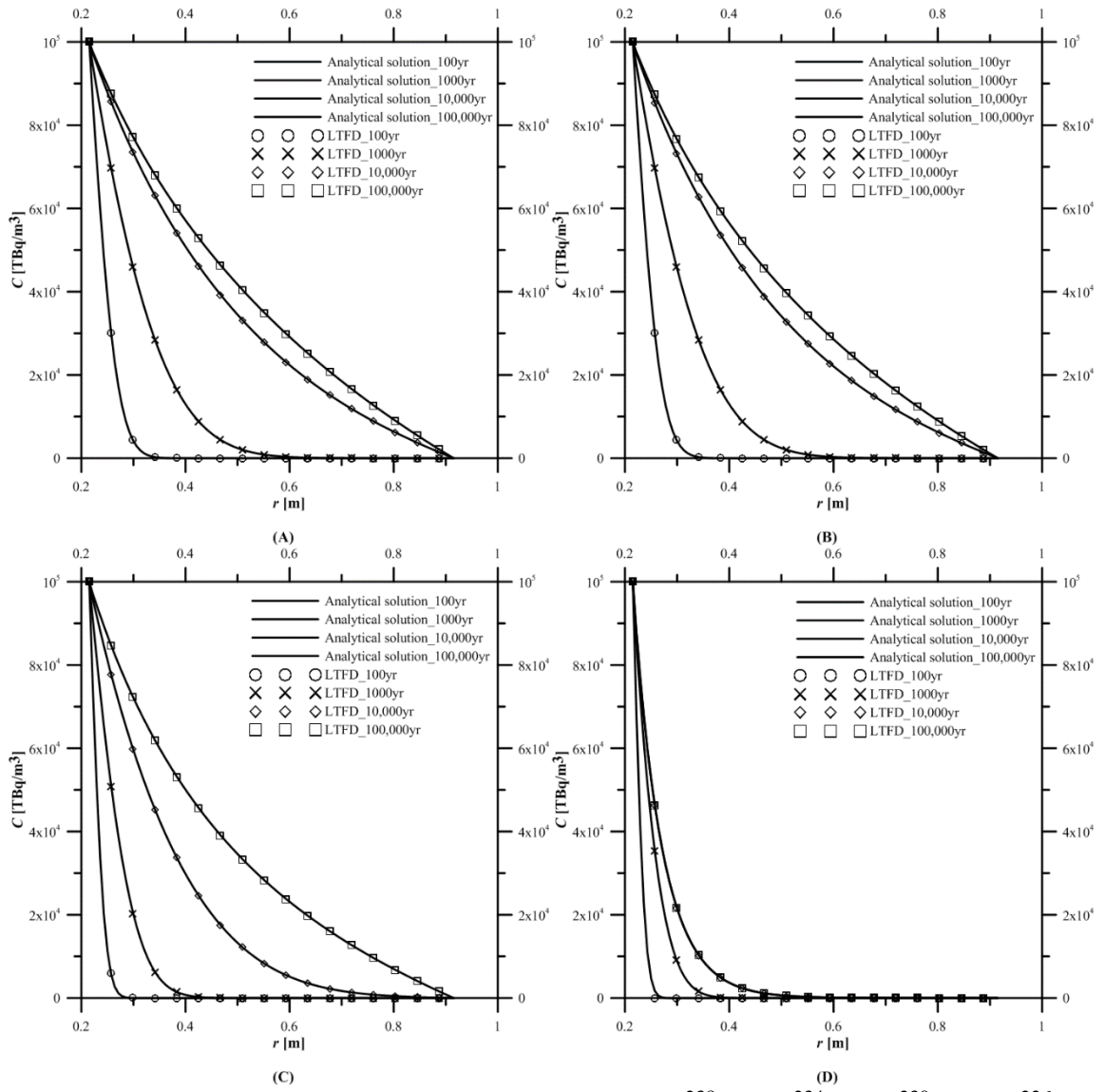


圖 4.5 衰變核種暫態解析解和 LTFD 互相驗證 (A) ^{238}U (B) ^{234}U (C) ^{230}Th (D) ^{226}Ra

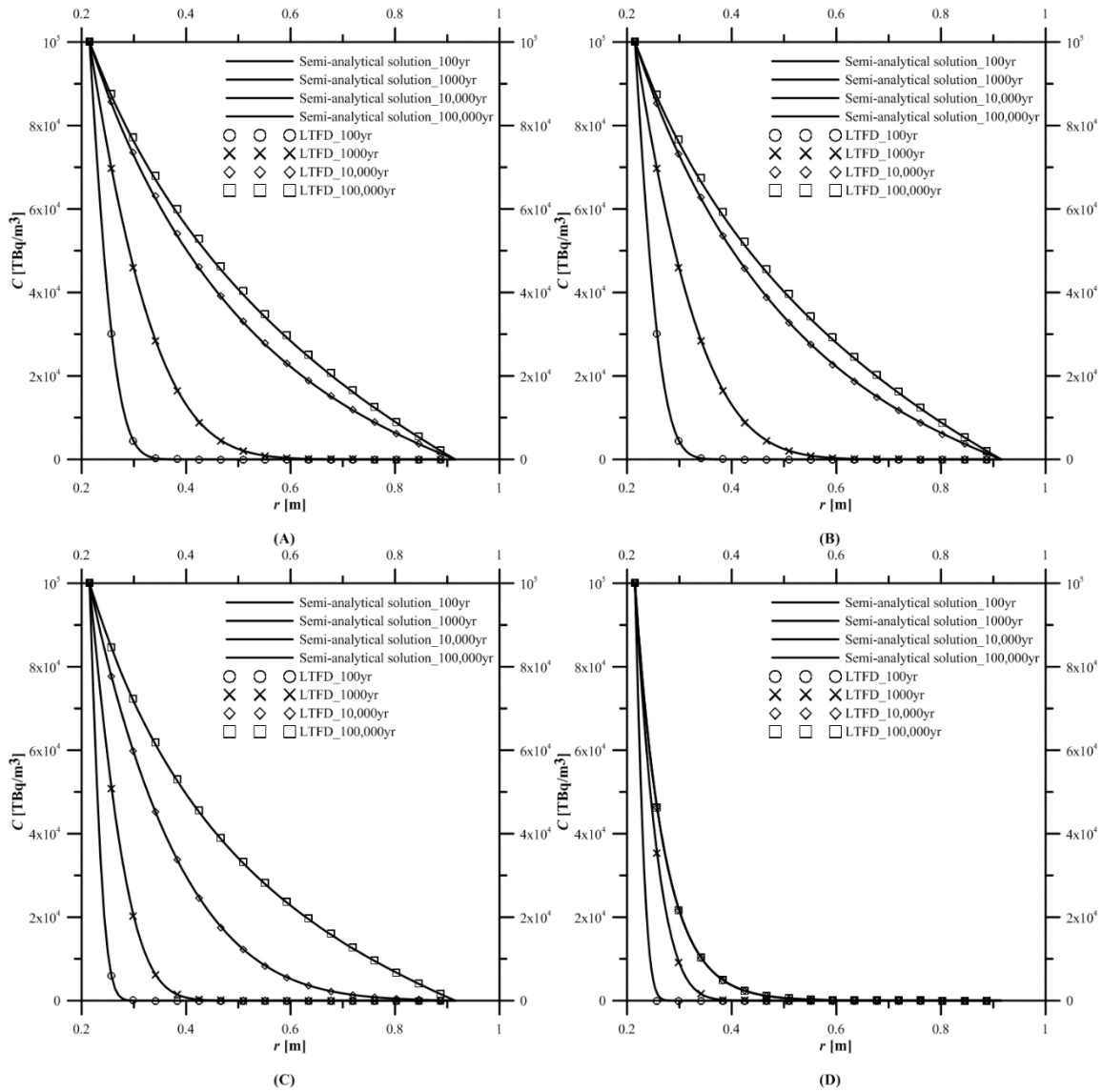


圖 4.6 衰變核種暫態半解析解和 LTFD 互相驗證(A) ^{238}U (B) ^{234}U (C) ^{230}Th (D) ^{226}Ra

4.2.3 衰變常數和分配係數之影響

在傳輸過程中，影響不同放射性核種的遷移距離不同，主要因素為衰變和吸附。放射性核種會隨著時間衰變成新的核種，而造成原來核種的濃度降低。當濃度降為初始濃度的一半所需時間，稱之為半衰期(half-life)。在傳輸的過程中，核種的半衰期越長，濃度降低速率較慢；核種的半衰期越短，濃度降低速率較快。吸附是地下水中的核種，從水中轉移至固體的表面。而對於吸附量的大小，使用分配係數表示，其意義為在固態與液態之間的核種濃度比。當分配係數越大時，表示容易吸附在固體表，而使核種不易遷移。比較本研究穩態和 NUMO 穩態解兩種模式的差異。圖 4.7 為不同衰變常數時的核種濃度穿透曲線，顯示衰變常數越大時，兩種模式的濃度差越小。推測為衰變是會隨著核種量變化，當衰變量大時，核種量減少量也多，造成兩種模式中的濃度差較小，反之亦然。圖 4.8 為不同分配係數時的核種濃度穿透曲線，當分配係數增加時，兩種模式的濃度差也是越小，但是變化沒有衰變常數明顯。圖 4.9 比較本研究的三種解析解和 NUMO 穩態解析解模式，不同放射性核種濃度穿透曲線之差異，核種使用的參數參考表。結果顯示出衰變常數和分配係數較小的核種，像是 ^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{230}Th ，濃度差就會較大；衰變常數和分配係數較大的核種，像是 ^{226}Ra ，濃度差就會較小。

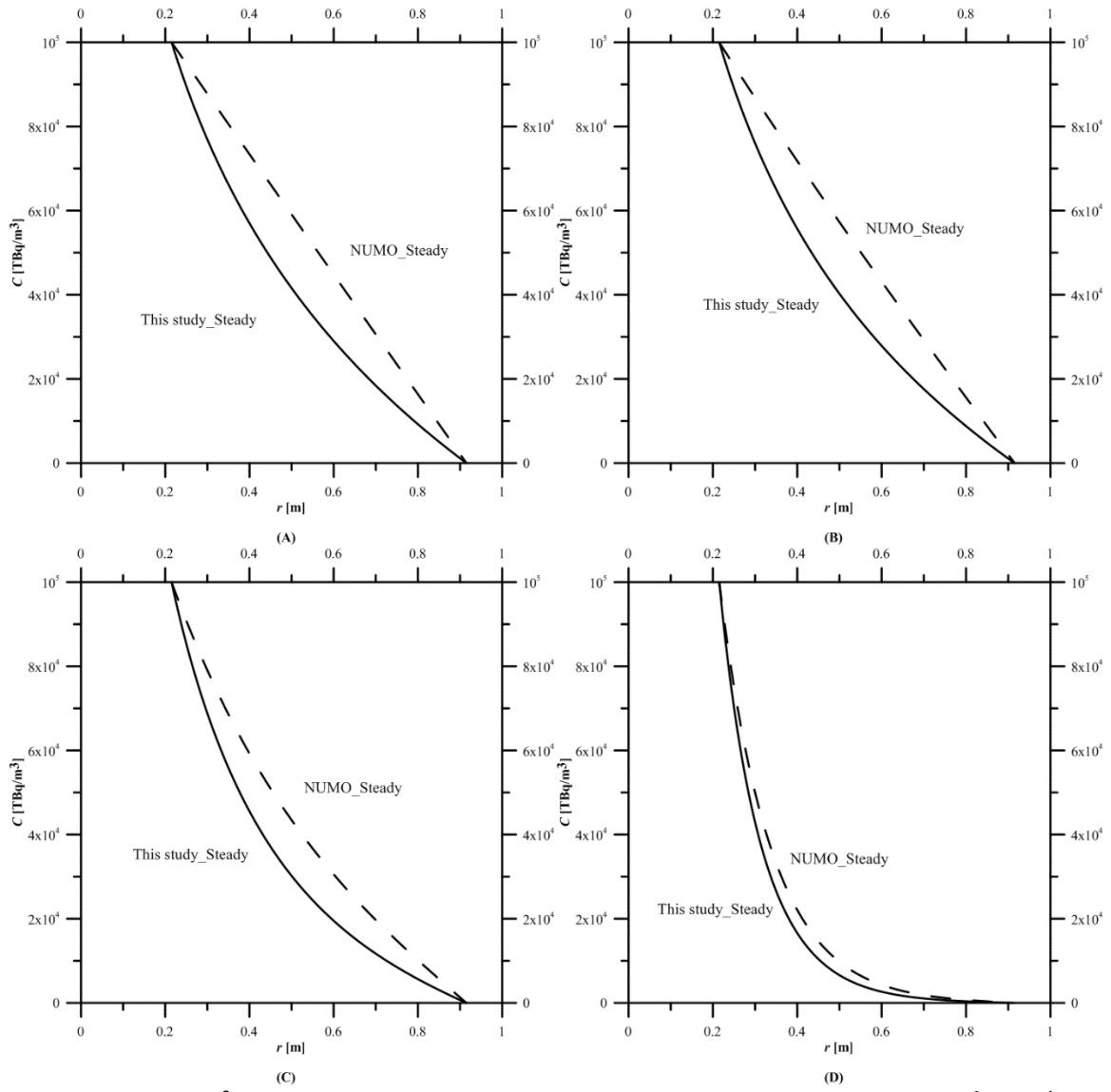


圖 4.7 假設 $K_d=1.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ 時, 不同衰變常數之濃度穿透曲線比較 (A)SP1, $\lambda=10^{-6} \text{ year}^{-1}$ (B) SP2, $\lambda=10^{-5} \text{ year}^{-1}$ (C) SP3, $\lambda=10^{-4} \text{ year}^{-1}$ (D) SP4, $\lambda=10^{-3} \text{ year}^{-1}$

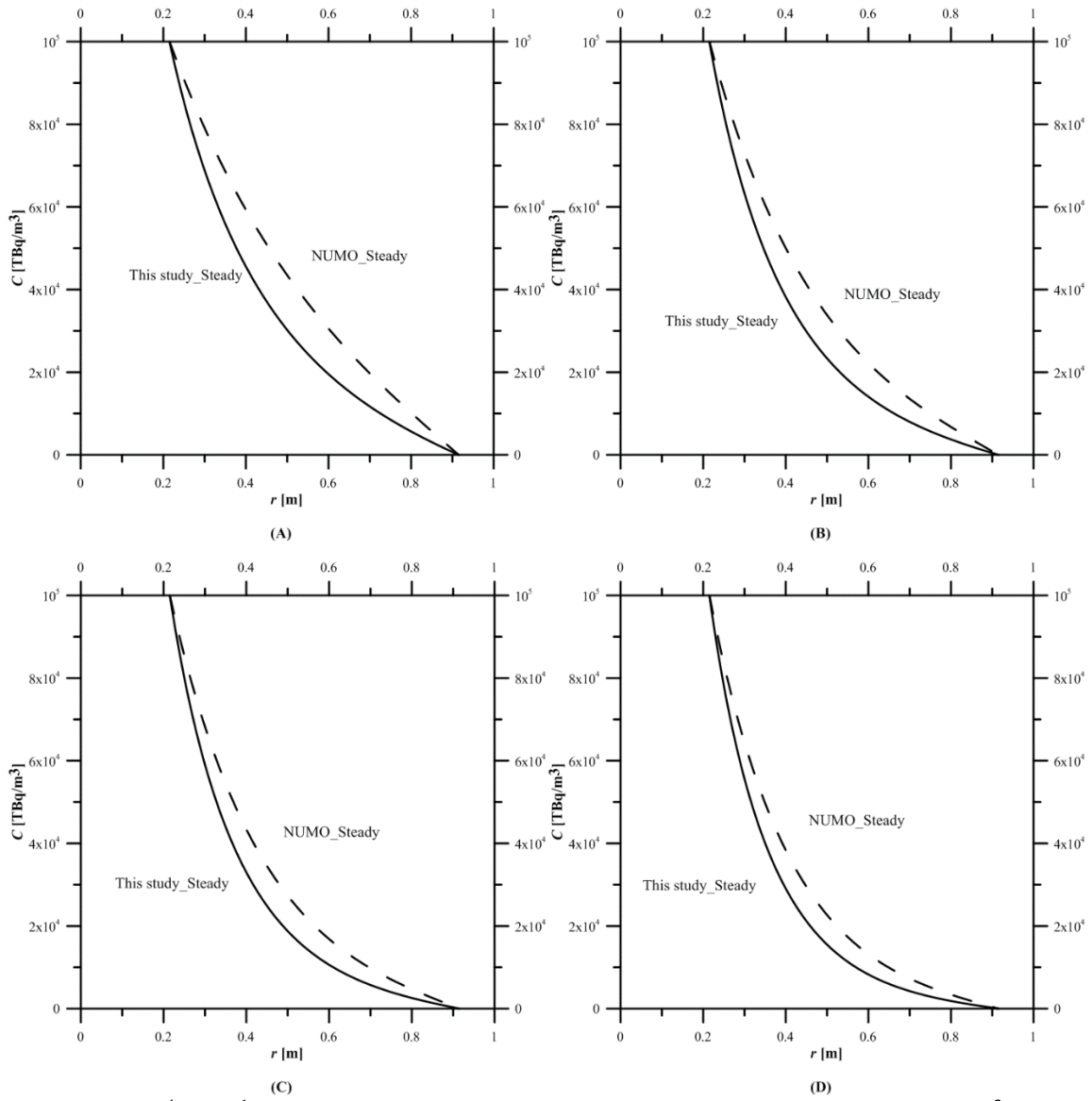


圖 4.8 假設 $\lambda=10^{-4} \text{ year}^{-1}$ 時，不同分配係數之濃度穿透曲線比較 (A) SP1, $K_d=1.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ (B) SP2, $K_d=2.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ (C) SP3, $K_d=3.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ (D) SP4, $K_d=4.0 \text{ m}^3/\text{kg}$

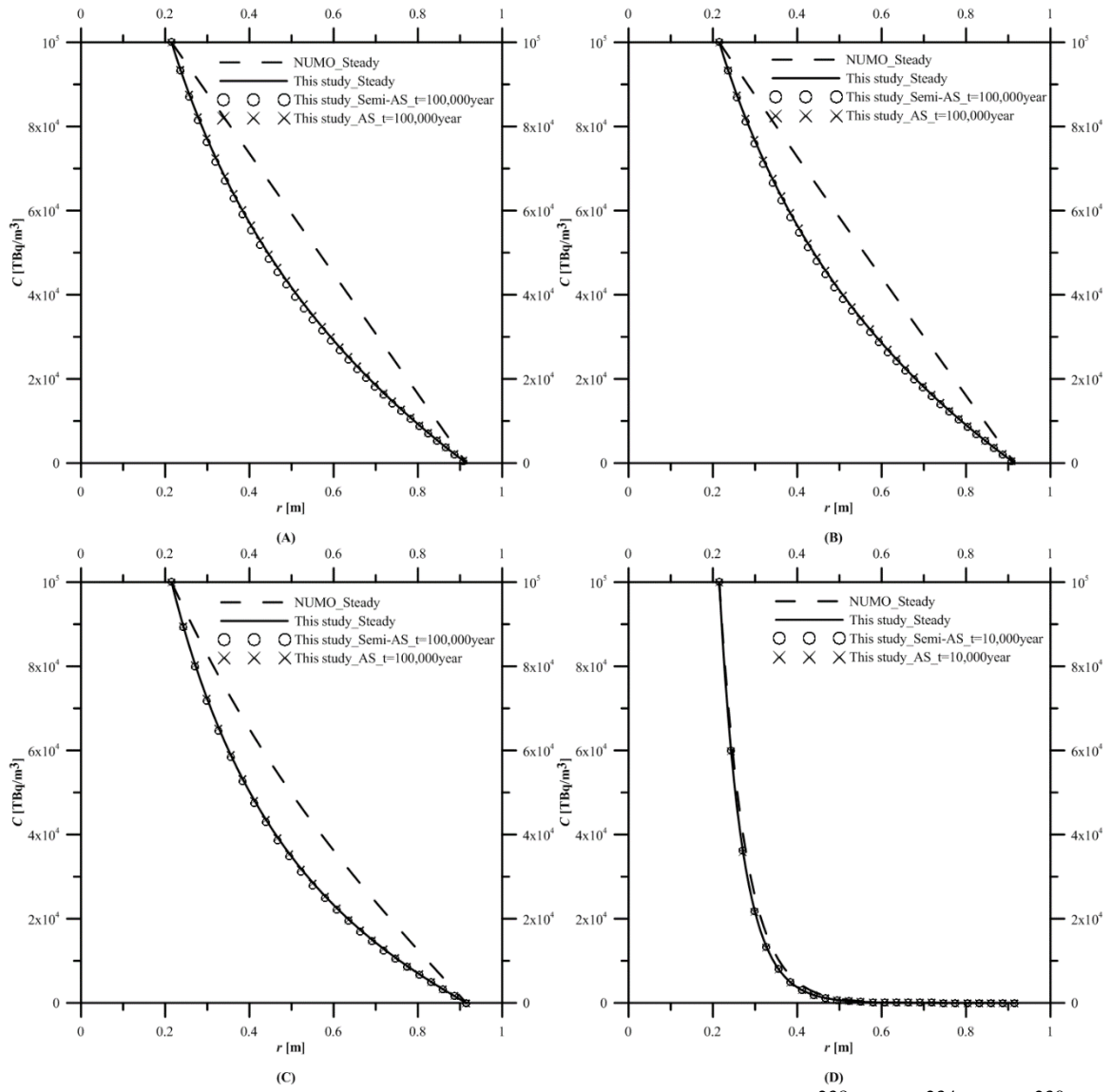


圖 4.9 不同放射性之核種，四種解析解之濃度穿透曲線比較 (A) ²³⁸U (B) ²³⁴U (C) ²³⁰Th (D) ²²⁶Ra

4.2.4 通量計算

透過濃度的穿透曲線，只能了解濃度在緩衝區的分布，但無法知道實際外洩的核種量。由於核種的濃度梯度造成分子擴散，而分子擴散通量可以用 Fick's law 描述。通量是指單位時間內，通過單位面積的量。而通過緩衝區的核種量之通量計算公式如下：

$$J = -De \left. \frac{dC}{dr} \right|_{r=L}$$

廢料罐直徑約為 0.43 公尺，高約為 1.3 公尺、厚度約 0.05 公尺，側面積為 $2 \times \pi \times \left(\frac{0.43}{2} - 0.05 \right) \times 1.3 \approx 1.348 \text{ m}^2$ ，側面積和通量相乘後，得到實際外洩的核種量。計算結果如表 4.5，顯示出單向擴散模式之通量大約是軸對稱擴散模式之通量兩倍。

表 4.5 不同核種在兩種擴散模式中的通量

核種	²³⁸ U	²³⁴ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra
NUMO 解之通量 (TBq/m ² /year)	142,856.95	139,406.73	108,508.56	38.32
本研究之通量 (TBq/m ² /year)	75,461.24	73,580.76	56,855.62	19.01
NUMO 解之核種量 (TBq/year)	192,571.17	187,920.27	146,269.54	51.66
本研究之核種量 (TBq/year)	101,721.76	99,186.87	76,641.37	25.63
比值	1.893	1.895	1.908	2.016

第五章、近岸環境坑道處置長期安全驗證之遠場模擬技術研究

本章針對近岸環境發展長期安全驗證之遠場傳輸數值模擬技術，採用 HYDROGEOCHEM 系列(Yeh, 2009)的數值模擬工具，建立近岸坑道處置模擬案例，進行核種傳輸遠場案例模擬，章節內容上 5.1 節為台東達仁鄉水文地質環境介紹，5.2 節為以台東達仁鄉為水文地質環境背景設計之三維近岸坑道數值解之遠場傳輸數值模擬案例。主要成果包含遠場地下水流場與傳輸模擬，採用相對濃度來模擬核種傳輸的時空分布，再進一步分析核種到達陸域地表及進入海域的時間分布特性，接著考慮核衰變鍊進行核種傳輸案例模擬，透過設計案例模擬發展近岸環境坑道處置長期安全驗證之遠場傳輸數值模擬技術。

5.1 台東達仁鄉水文地質環境介紹

達仁鄉位於台灣台東縣南端，北臨金峰鄉，東鄰大武鄉，南接屏東縣牡丹鄉，東南濱太平洋，行政劃分由北至南可分為台坂村、土坂村、新化村、安朔村、森永村、南田村；達仁鄉屬於矮丘陵地形，高程由西南側最高處牡丹溪山 410 m 向東遞減，平均高程介於 100 m~200 m。根據經濟部 98 年建議候選場址遴選報告：處置設施位於南田村達仁溪一帶，達仁溪屬於急流河川，河床分布大小不均礫石，上流位於南田村、森永村之間的壽峠東北側，先向東北東再轉東流，經舊南田後於南田村東南側注入太平洋，達仁河流域範圍與數值地型高程如圖 5.1 所示。

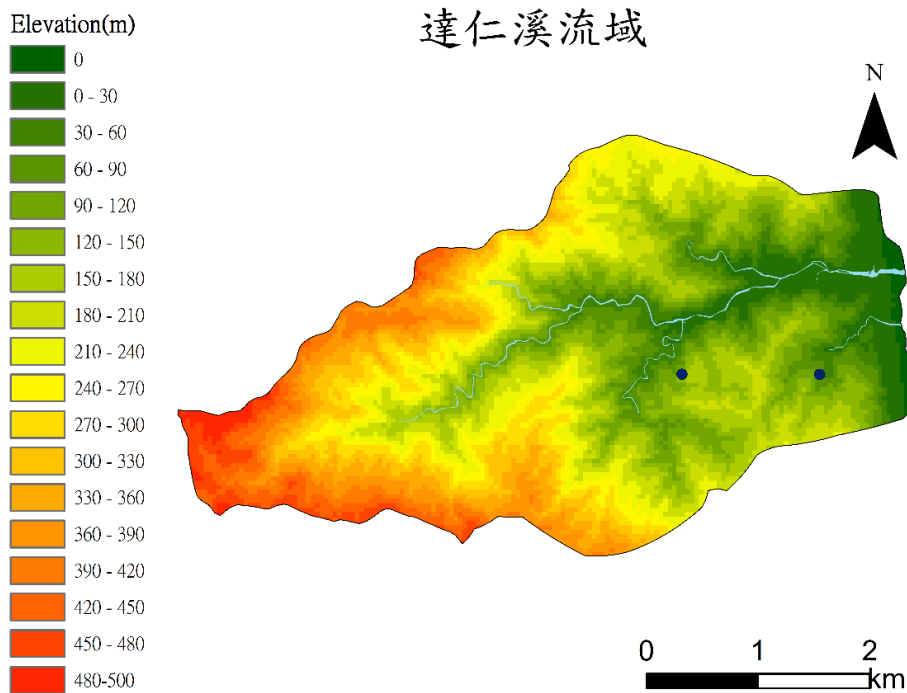


圖 5.1 達仁溪流域高程

降雨量採用水利署雨量站資料，挑選鄰近建議候選場址之壽卡雨量站，年降雨量為 3396 mm，由於達仁溪流域地形較陡，考慮逕流影響，降水入滲率採用 0.0003 (m/day)。水文地質參數設定參照過去研究成果(中興工程顧問股份有限公司, 2013)，遠場部分區域孔隙率為 0.08，採用非等向性水力傳導係數 $K_x = 0.2$ dm/day、 $K_y = 0.2$ dm/day、 $K_z = 0.1$ dm/day，縱向延散係數為 800 dm、側向延散係數為 200 dm、擴散係數為 0.0001 dm²/day，並考慮到近場部分處置窖之材質特性與遠場不同，其遲滯能力遠高於遠場材質，因此水力傳導係數、延散係數及擴散係數相對於遠場值小，詳細參數於表 5.1。

表 5.1 達仁鄉水文地質參數

遠場		
流場參數	K_x	0.2(m/day)
	K_y	0.2(m/day)
	K_z	0.1(m/day)
	孔隙率	0.08
	入滲率	0.0003(m/day)
傳輸參數	縱向延散	800(m)
	側向延散	200(m)
	擴散係數	10^{-4} (m ² /day)
近場		
流場參數	K_x	0.002(m/day)
	K_y	0.002(m/day)
	K_z	0.001(m/day)
	孔隙率	0.08
	入滲率	0.0003(m/day)
傳輸參數	縱向延散	8(m)
	側向延散	2(m)
	擴散係數	10^{-6} (m ² /day)

5.2 三維案例數值解之遠場傳輸數值模擬

模擬案例以台東達仁鄉做為背景，建立符合場址高程及水文地質條件之三維網格場，針對遠場地下水與傳輸模擬進行探討，模式採用 HYDROGEOCHEM 5.6 版進行模擬。遠場地下水與傳輸模擬區域為最大高度 850 m、最大長度 8600 m、最大寬度 3800 m 內含處置設施，處置設施所在位置俯視圖及剖面圖如圖 5.2、圖 5.3 所示，灰色塊為處置設施，處置坑道高程為地表下 250 m~120 m，鄰近區域之最高高程為 400 m，地形高程由東南側的牡丹溪山向海岸線遞減，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 400 m、高 25 m，所有處置坑道所構成之處置設施總長度 1200 m、寬度 400 m、高 25 m，遠場模擬將整個處置設施視為一核種外釋源進行核種傳輸模擬。

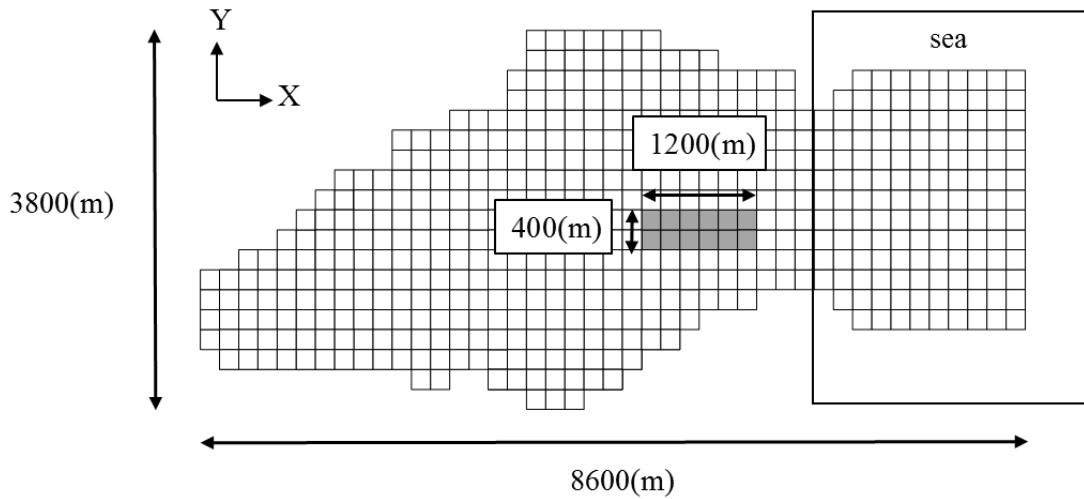


圖 5.2 模擬網格俯瞰圖

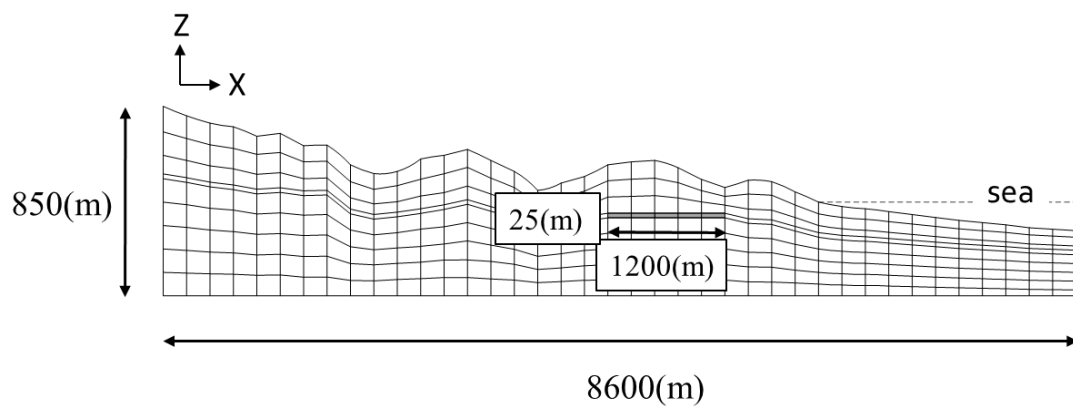


圖 5.3 模擬網格剖面圖

基本情節設定假設處置坑道所在區域為內部邊界源，核種外釋採用定濃度設定，模擬區域的孔隙率、水力傳導係數及入滲率等流場參數見表 5.1。地下水模擬部分，陸域部分的側邊及下方邊界設定為零流量邊界，右側海域部分側邊及上方流場邊界條件為定水頭，如圖 5.4 所示。傳輸邊界條件，陸域部分側邊及下方邊界設定為零濃度梯度，入滲雨水與海水中的核種相對濃度皆為 0，採用變動邊界條件(variable boundary condition)，所謂傳輸的變動邊界條件在 HYDROGEOCHEM 中的運算過程為，當流場方向為由模擬場域內部向外，則傳輸邊界條件採用零濃度梯度邊界(zero concentration gradient)也就是內部濃度將隨流場帶出模擬區域，而當流場方向為由外部流向內部模擬區域，則邊界條件自動設定為通量邊界(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。在處置坑道的核種外釋相對濃度定為 1，採用定濃度外釋邊界條件(Dirichlet boundary condition)。設定如圖 5.5 所示，所採用傳輸參數包含縱向延散係數、側向延散係數、擴散係數參見表 5.1。

遠場核種傳輸共進行三個案例的模擬，案例 1 與案例 2 的核種外釋設定，假設水不流經過處置窖，處置窖為內部源，核種以擴散外釋至處置窖外部，採用在處置窖以相對濃度為 1.0 的定濃度模擬，案例 1 為穩態流場及穩態傳輸模擬，案例 2 為穩態流場及暫態傳輸模擬。案例 3 為核種衰變鍊之穩態流場及暫態傳輸模擬，容許地下水流通過處置窖，假設在初始狀態僅母核種在處置窖有相對濃度為 1.0 的定濃度，暫態傳輸模擬初始狀態在處置窖的母核種，因核種衰變鍊與遠場傳輸機制交互影響的核種衰變鍊相對濃度時空分布。

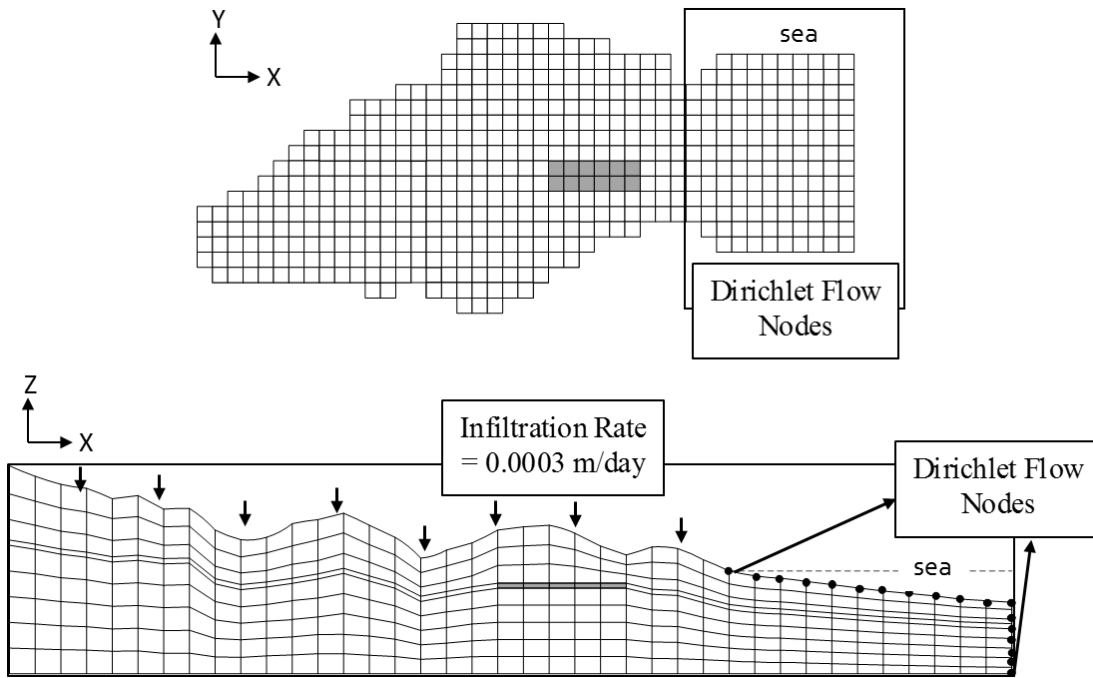


圖 5.4 模擬網格與流場邊界條件

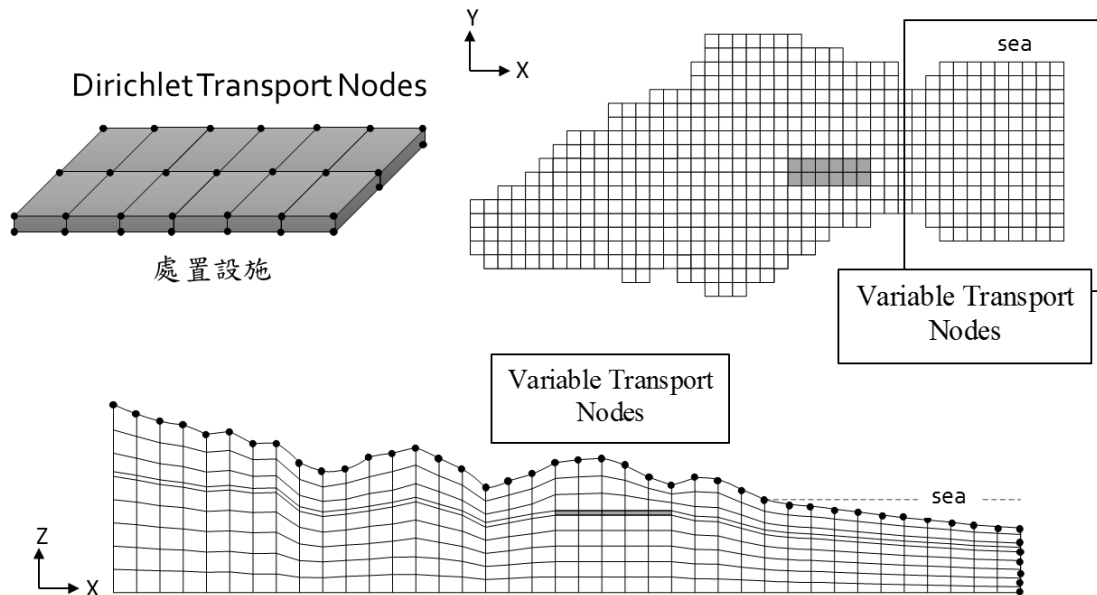


圖 5.5 模擬網格與傳輸邊界條件

5.2.1 案例 1—穩態流場及穩態傳輸案例

藉由穩態流場及穩態傳輸模擬觀察穩態下流場特性及核種傳輸的分布情形，由於降雨入滲與地形，區域的優勢流場為由西南側高地向東往海岸流動，圖 5.6 為壓力水頭分布，圖 5.7 為流場與總水頭圖， h 為總水頭，剖面圖為以處置設施為中心之 x - z 軸圖，圖 5.8 為核種相對濃度分布圖。

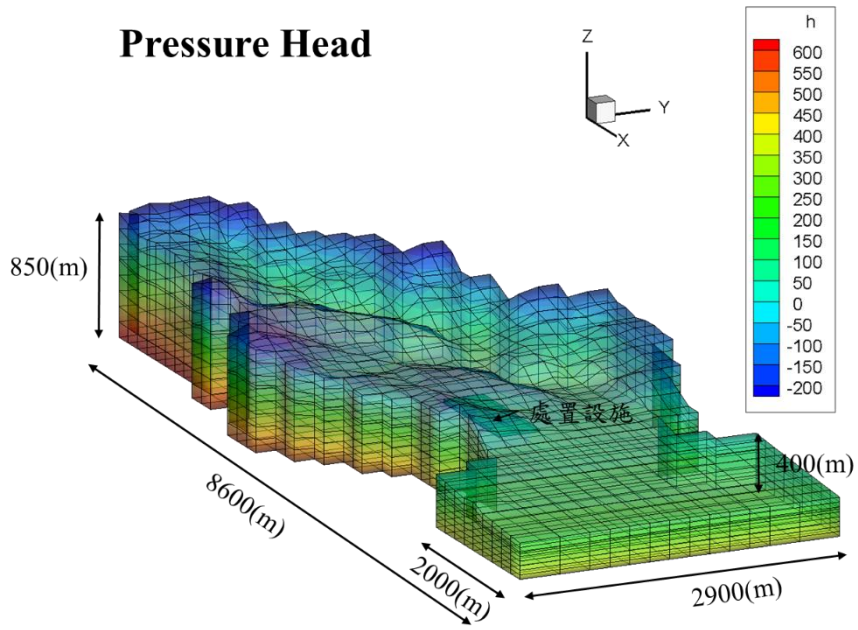


圖 5.6 案例 1—壓力水頭分布圖

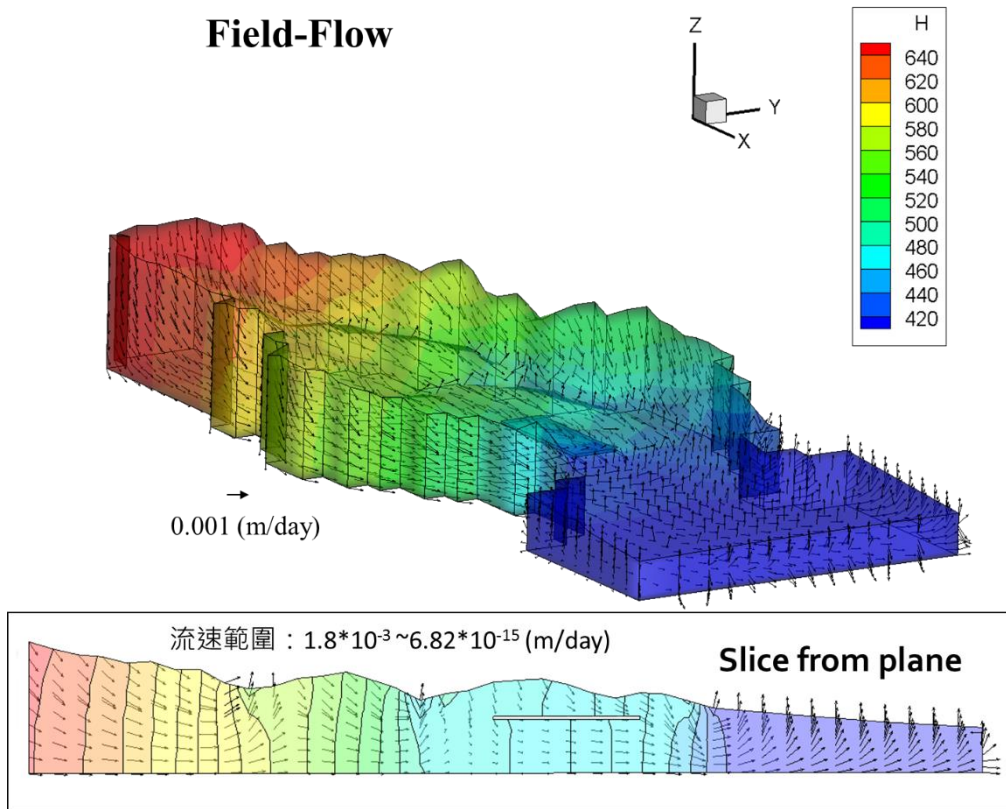


圖 5.7 案例 1—流場與總水頭圖

Steady transport

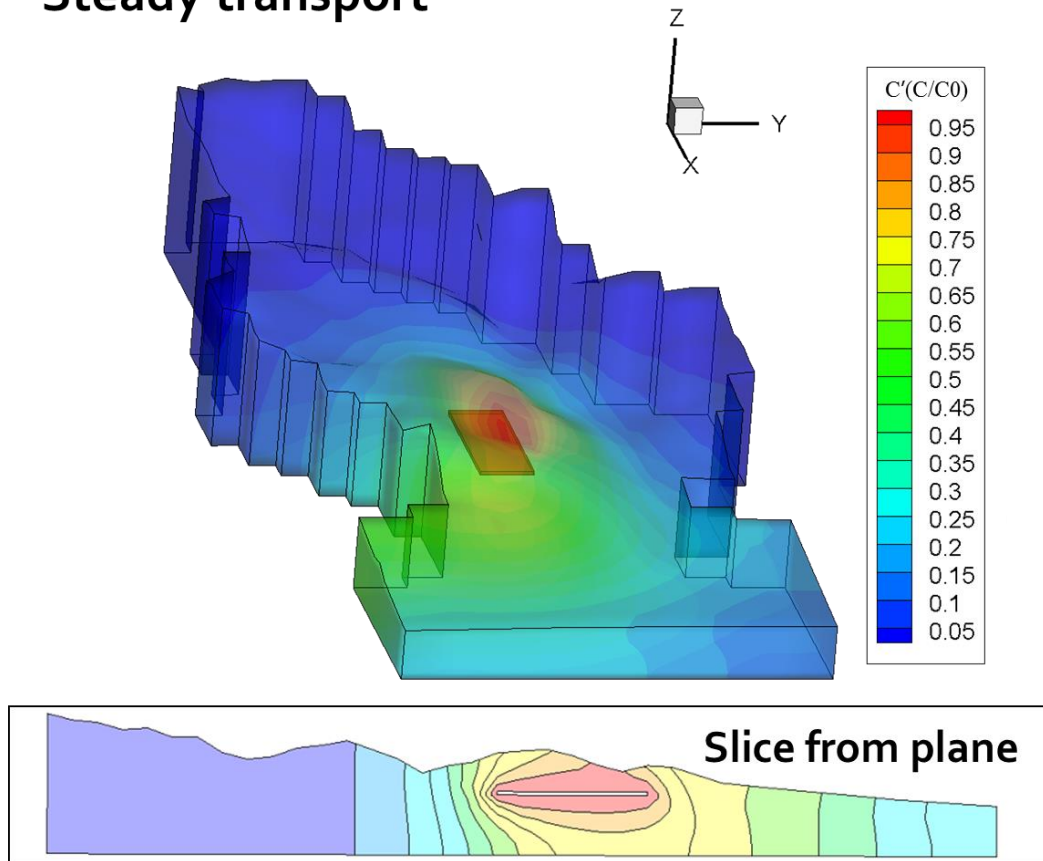


圖 5.8 案例 1—核種相對濃度分布圖

5.2.2 案例 2—穩態流場及暫態傳輸案例

由案例 1 流場模擬結果發現在地形為凹地及沿海一帶，流場會有向上的情形發生，並且觀察到處置設施上方陸地濃度相當高，為了得知處置設施上方地表及出海口地區其濃度隨時間的變化情形，因此設計案例 2，圖 5.9、圖 5.10、圖 5.11 分別為模擬 1 年、100 年、10,000 年後濃度分布情形，並設定三個觀察點，觀察其濃度變化與穩態傳輸比較結果，點 A 位在海岸地表，點 B 位在處置設施上部地表，點 C 位在處置設施上游地表。觀察點位置及濃度如圖 5.12、圖 5.13 所示。

Transient transport

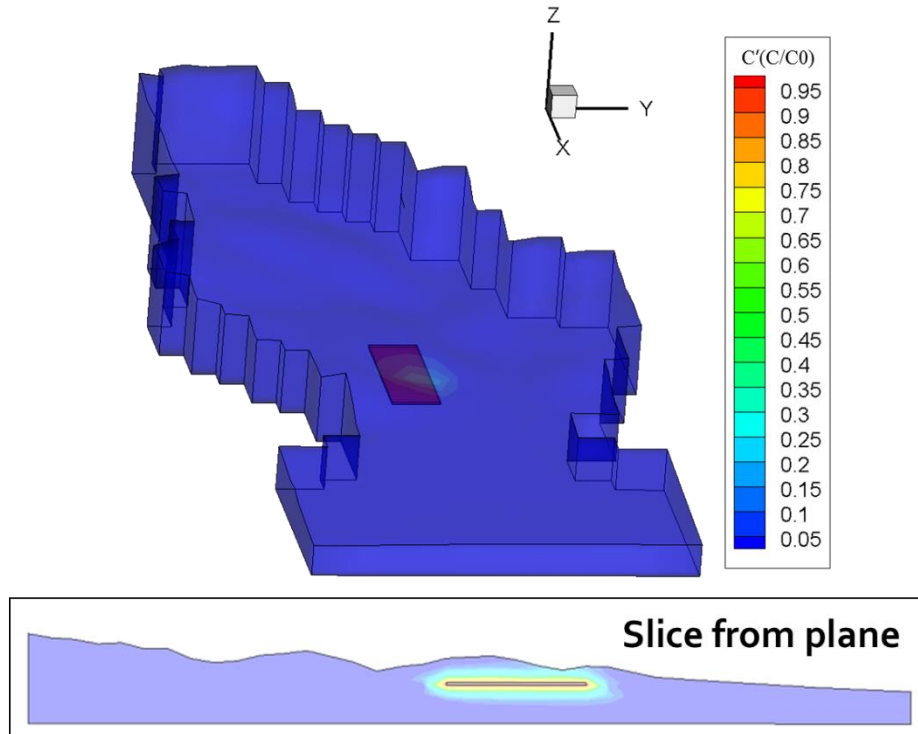


圖 5.9 案例 2—核種相對濃度分布圖(1 年)

Transient transport

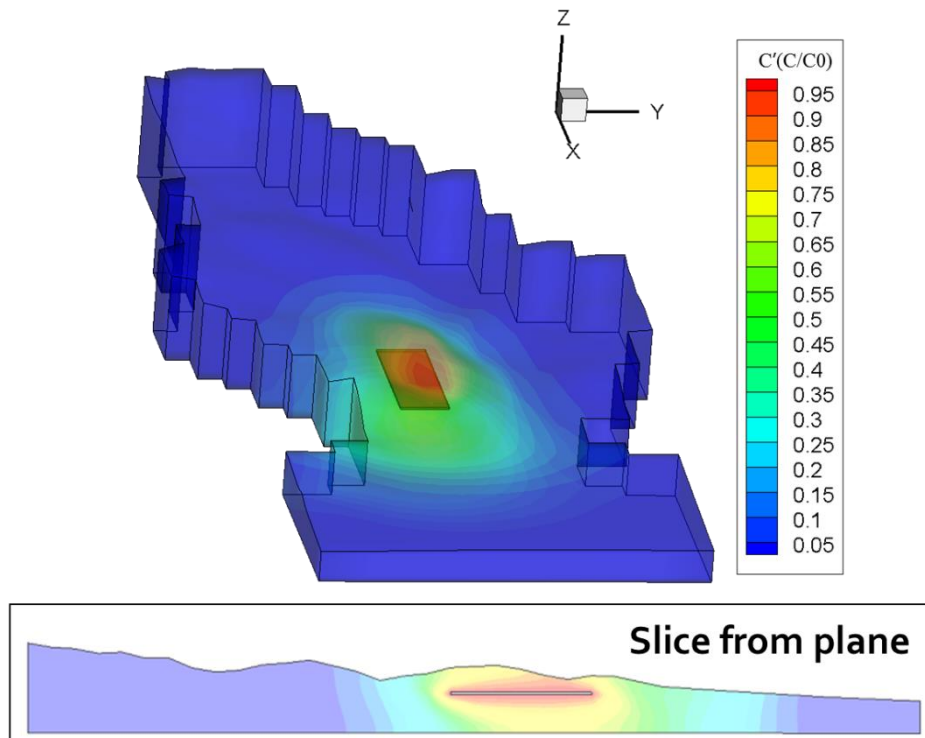


圖 5.10 案例 2—核種相對濃度分布圖(100 年)

Transient transport

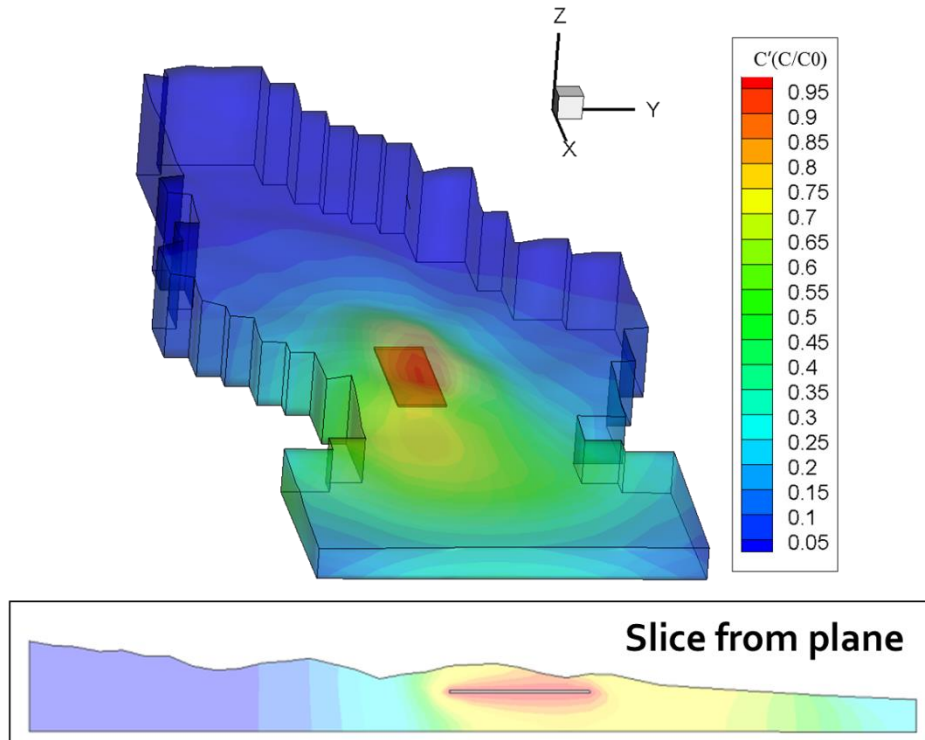


圖 5.11 案例 2—核種相對濃度分布圖(10,000 年)

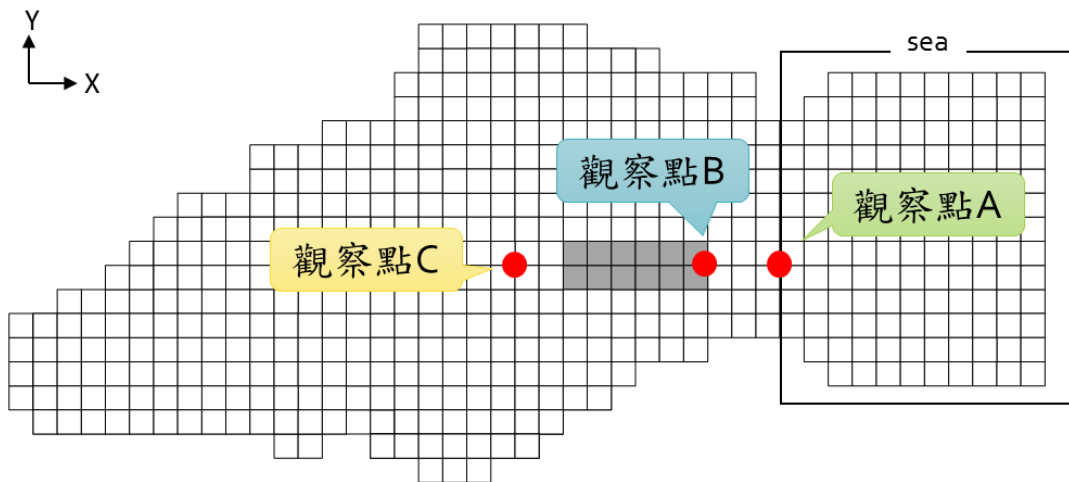


圖 5.12 案例 2—觀察點分布圖

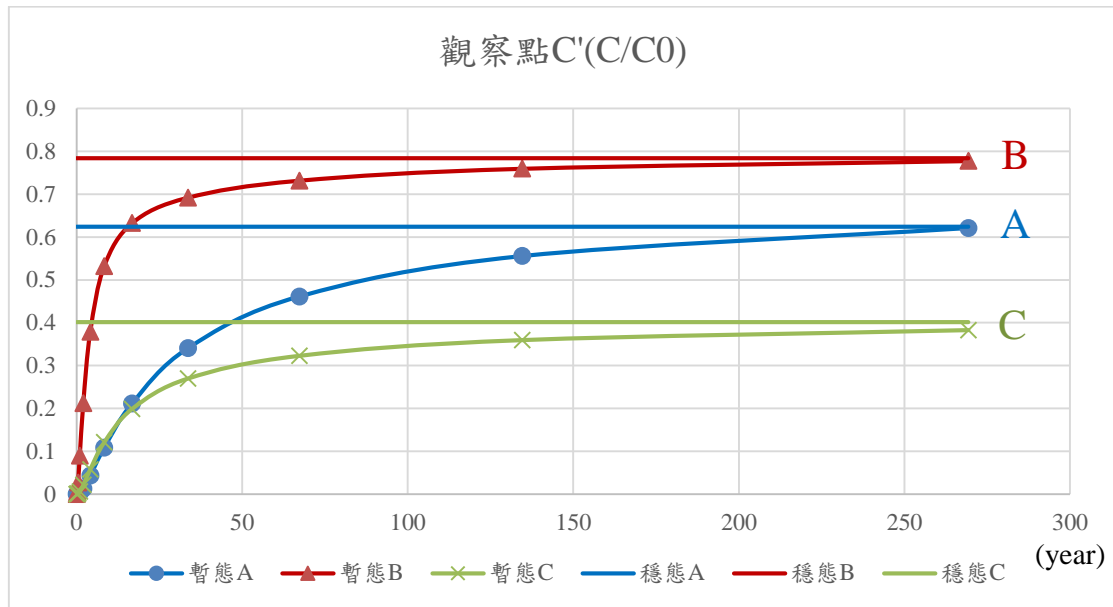


圖 5.13 案例 2—觀察點濃度圖

由圖 5.13 結果呈現觀察點 B 位於處置設施上方由於流場與擴散作用，濃度很快就逼近穩態濃度，而觀察點 A 出海口距離處置設施較遠，但由於傳輸與流場方向一致，因此比起觀察點 C 也較快逼近穩態濃度，而觀察點 C 比起觀察點 A 雖然離處置設施較近，但與流場方向不同，因此較晚逼近穩態濃度。

5.2.3 案例 3—核衰變案例

案例 3 進行核種核衰變模擬，選用 4N+2 長半衰期核種之衰變鍊 $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra}$ ，4 核種之衰變係數及吸附因子如表 5.2，採用穩態流場與暫態傳輸，假設處置窖為釋放源，初始 ^{238}Pu 相對濃度為 1，其餘 3 子核種初始相對濃度為 0，邊界條件設定與先前案例設定相同，並設定 5 個觀察點，觀察 4 核種傳輸至觀察點的隨時間與空間的濃度變化情形，5 個觀察點如圖 5.14 所示，觀察點 A~觀察點 E 的 4 核種濃度隨時間變化分佈圖如圖 5.15~圖 5.19 所示。

表 5.2 核種衰變鍊參數

物種	^{238}Pu	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra
遲滯因子 [-]	10000	14000	50000	500
衰變係數 [1/year]	7.9×10^{-3}	2.8×10^{-6}	8.7×10^{-6}	4.3×10^{-4}

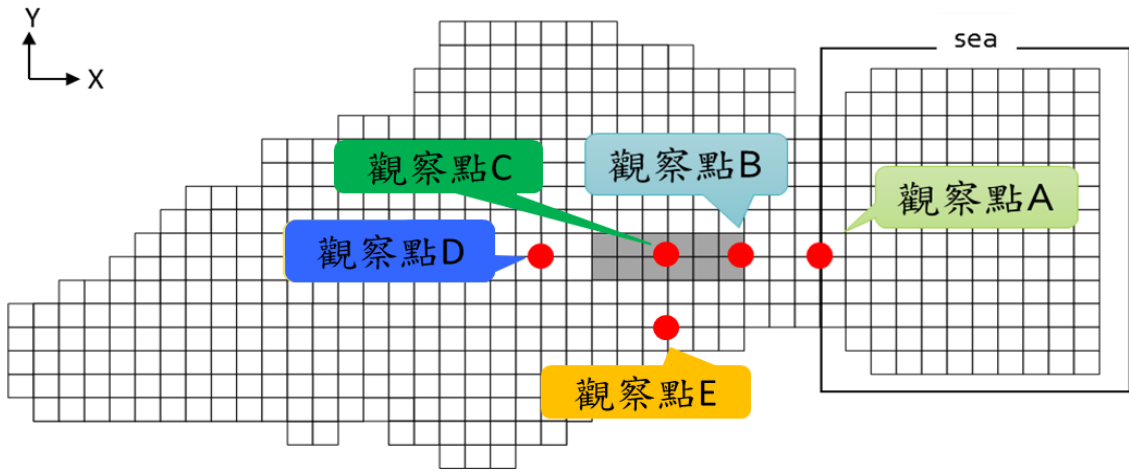


圖 5.14 案例 3—觀察點分布圖

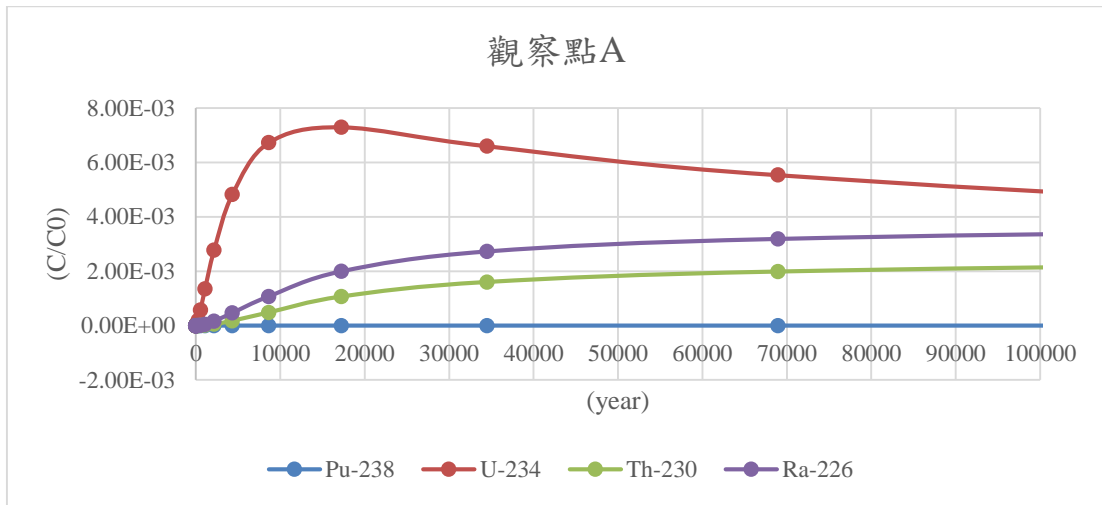


圖 5.15 案例 3—觀察點 A 濃度圖

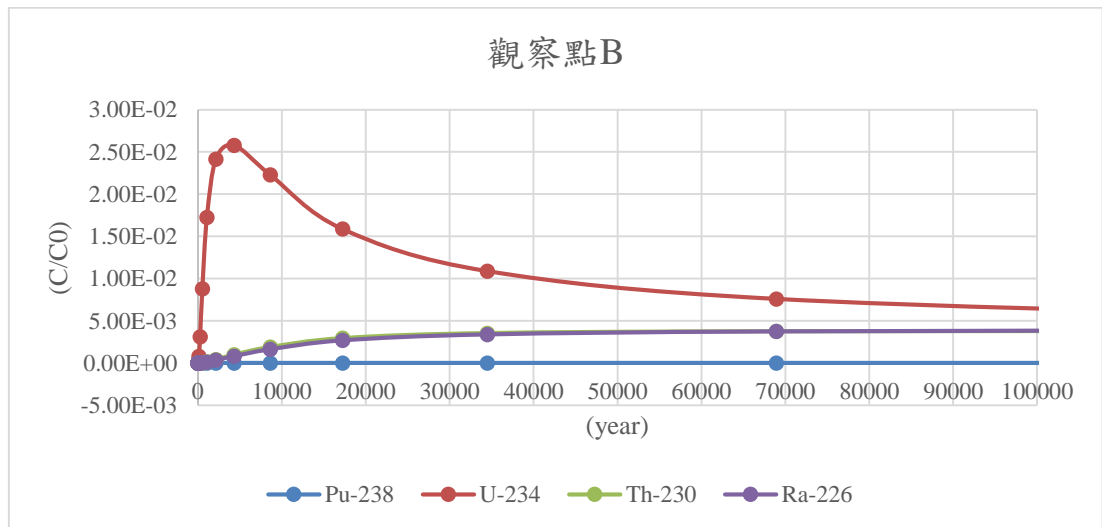


圖 5.16 案例 3—觀察點 B 濃度圖

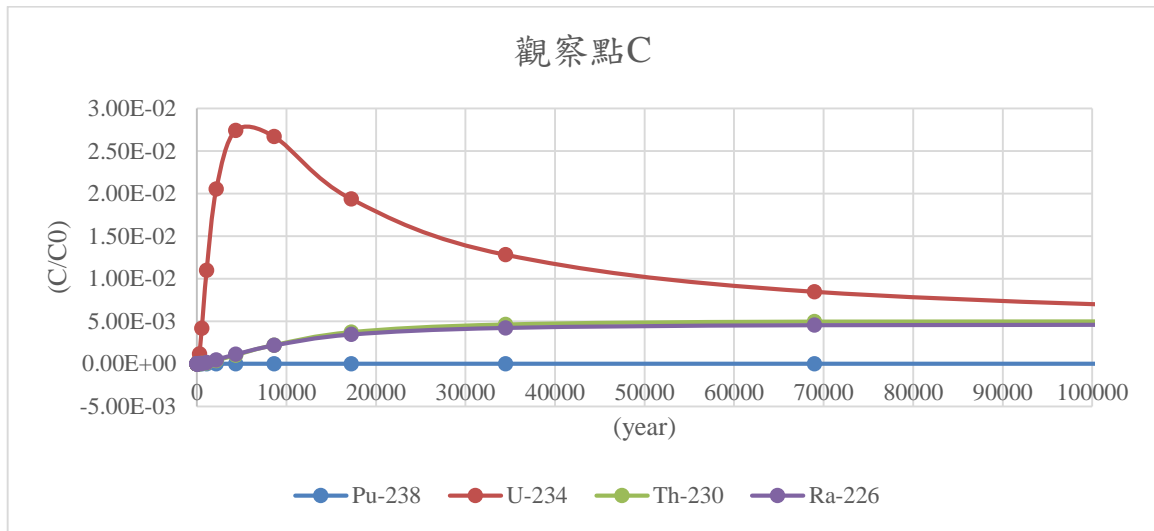


圖 5.17 案例 3—觀察點 C 濃度圖

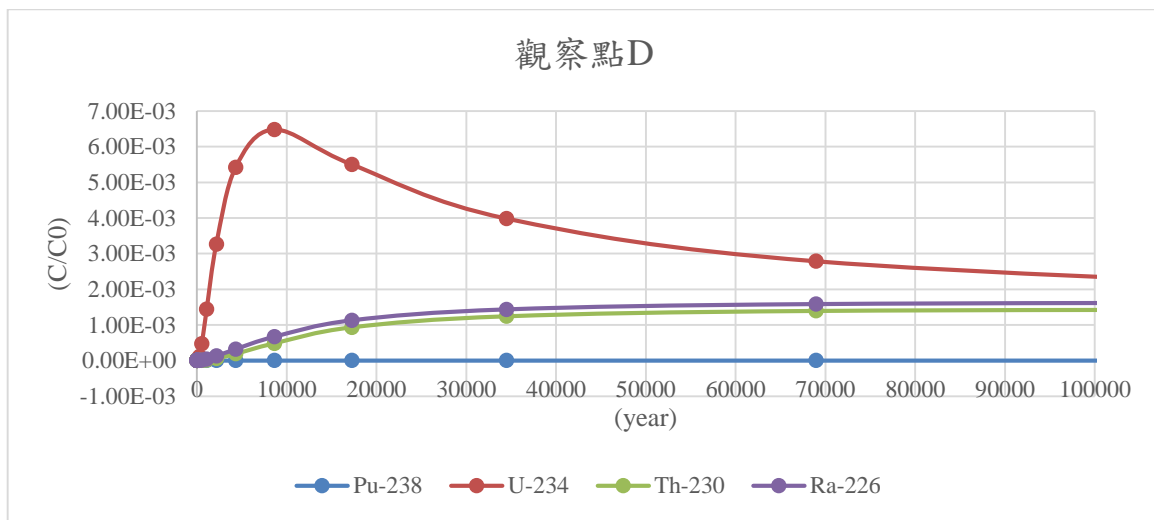


圖 5.18 案例 3—觀察點 D 濃度圖

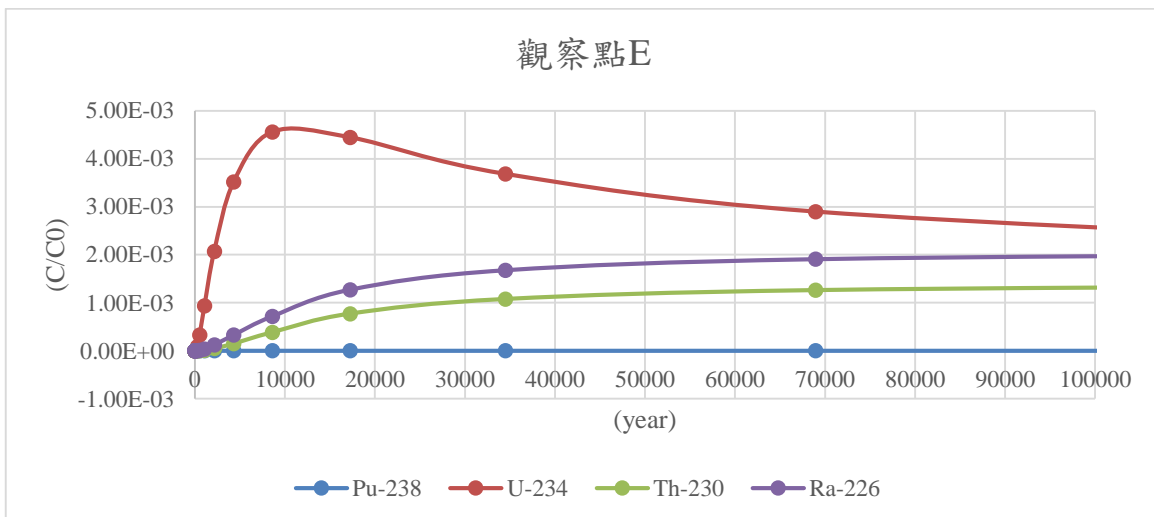


圖 5.19 案例 3—觀察點 E 濃度圖

由圖 5.15~圖 5.19 的模擬結果分析發現，雖然 U-234 初始濃度為 0，但由於 PU-238 半衰期較短的因素，U-234 於各觀察點皆有最大之核種濃度，並在 10,000 年左右達到最高值，而又以處置窖上方的 C 點濃度最大，其次為觀察點 B，而觀察點 A 與觀察點 E 濃度相近，其結

果是由於整個近場與遠場遲滯因素影響導致平流效應較低，主要傳輸機制為擴散，因此觀察點 E 雖然與流場方向相反，但濃度確與流場方向上的觀察點 A 相近。

第六章、結論與建議

1. 坑道處置之近場與遠場功能評估關鍵議題研析，主要綜整 SKB SR-PSU 近場安全分析工程障壁作用(TR-14-04)與地質圈作用(TR-14-05)二本技術報告，透過整理工程障壁作用與障壁系統變數的互動矩陣，以及地質圈作用與地質圈系統變數的互動矩陣，來釐清處置設施安全評估將涉及那些關鍵作用與系統變數。
2. 近場與遠場安全評估關鍵機制在 SKB 的作法，是先將任何可能影響工程障壁與地質圈安全功能的作用與系統變數整理成關聯表格說明，主要是依據 FEP 篩選過程提出建議，本研究進一步建立所有作用與系統變數之對應矩陣分析，利用所整理的系統變數與關鍵作用影響矩陣，可以協助檢核哪些系統變數與作用在進行安全評估時是否需考慮。因此審查端在審驗時，就可以利用此矩陣來檢核近場與遠場安全評估過程所考慮的作用與變數是否完整，可以提供安全評估成果審議參考依據。
3. 本年度在核種傳輸評估技術研發有二項，第一項為發展二維圓柱座標系統暫態傳輸模式與解析解技術，可應用於近場核種傳輸審驗，所發展的解析解計算結果與 LTFD 結果驗證吻合。由於暫態解析解需要非常高的計算項累加 才可達到收斂結果，因此也發展半解析解技術以提高運算效率，全解析解與半解析解技術皆已初步完成。
4. 本年度在核種傳輸評估技術另一技術研發要項為近岸環境坑道處置遠場傳輸數值模擬技術，採用 HYDROGEOCHEM 數值模擬工具，建立近岸坑道處置模擬案例，進行長期核種傳輸案例模擬，水文地質環境背景以國內近岸環境建議候選場址設計三維遠場核種傳輸與核衰變數值模擬案例。本年度完成遠場地下水流場與核種傳輸案例模擬，採用相對濃度來模擬遠場核種傳輸的時空間分布，並分析核種到達陸域地表及進入海域的時間分布特性；也進一步考慮核衰變鍊進行案例模擬。本項技術研發在建立近岸環境坑道處置長期安全驗證之遠場核種傳輸數值模擬技術，未來可進一步整合近場解析解技術，建立國內近場與遠場安全評估之核種傳輸自主審驗技術能力。
5. 未來可以利用本研究所整理之核種傳輸作用與關鍵變數對應矩陣，來檢視低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則在核種傳輸審驗要項是否有可強化之審查要點，後續也可據以建立審查表格，協助檢視安全分析報告在核種傳輸所考慮的作用與變數是否完備。
6. 未來可進一步依據處置設施規劃存放之廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置等，以供計算源項核種總濃度與設計源項核種外釋模擬情境。
7. 未來可進一步將近、遠場核種傳輸模擬技術連結生物圈劑量評估技術，建立完整之安全評估審驗系統架構，提供審驗端來檢視外釋至生物圈之模擬輻射劑量是否符合法規限值。

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. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
9. 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。
10. 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。
11. 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。
12. 李明旭、陳瑞昇，2015，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，104FCMA002。
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. 大井貴夫，2011.放射性廢棄物地層処分的人工バリアシステムの応答特性を把するた 1 めの近似解析解の導出，NUMO-TR-10-06.
15. Dubner, H., Abate, J., 1968. Numerical inversion of Laplace transforms by relating them to the finite Fourier cosine transform. *Journal of the ACM (JACM)*, 15(1), 115-123.
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. 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.
20. Moridis, G.J., D.L. Reddell, 1991. The Laplace transform finite difference method for simulation of flow through porous media. *Water Resources Research*, 27(8), 1873-1884.
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, Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-PSU, TR-13-05, 2014.
24. SKB, Safety analysis for SFR Long-term safety: Main report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-01, 2014.
25. SKB, 2014, Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, TR-14-04.
26. SKB, 2014, Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-05.
27. Sudicky, E.A., 1989. The Laplace Transform Galerkin Technique: A time-continuous finite element theory and application to mass transport in groundwater. *Water Resources Research*, 25(8), 1833-1846.
28. Wang, Q., Zhan, H., 2015. On different numerical inverse Laplace methods for solute transport problems. *Advances in Water Resources*, 75, 80-92.
29. 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.
30. 2000. H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology, Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC). JNC TN1410 2000-003.

附件一

低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸審驗技術建立之資訊研析 期末報告審查意見與答覆說明

編號	頁碼	審查意見	回復說明
1	-	報告內容符合契約要求。	感謝委員肯定。
2	-	請於成果報告光碟中檢附參考文獻電子檔。	謹遵辦理。
3	-	「建議候選場址」及「候選場址」均為「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」所定義之法定名詞，兩者不可混淆。準此，請將摘要倒數第6行、第1頁第1段第5行、第六章結論與建議4.等處之「候選場址」修正為「建議候選場址」。	已依審查意見修正為“建議候選場址”。
4	51	因多種放射性物料或放射性廢棄物設施均定有安全分析報告審查導則，第六章結論與建議5.，請將「安全分析報告審查導則」修正為「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」。	已依審查意見修正為“低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則”。
5	-	各專有名詞之中譯請再行檢視，並一致化。	謹遵辦理。