

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

108 年低放射性廢棄物處置安全評估  
驗證技術研究  
期末總報告

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局  
執行單位：國立中央大學  
計畫主持人：董家鈞  
子項主持人：龔誠山、楊長義、李明旭、林文勝  
計畫編號：108FCMA002  
報告日期：中華民國 108 年 12 月 15 日



# 108 年低放射性廢棄物處置安全評估 驗證技術研究

受委託單位：國立中央大學

研究主持人：董家鈞

協同主持人：龔誠山、楊長義、李明旭、林文勝

研究期程：中華民國 108 年 1 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 4,950,000 元

放射性物料管理局 委託研究

中華民國 108 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)





# 目 錄

一、 摘要(中、英文) .....	1
二、 計畫目標.....	2
三、 重要成果.....	2
四、 展望.....	8
五、 附件.....	8
子計畫 1： 「低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術驗證評估 研究」期末報告.....	8
子計畫 2： 「低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證評估之研究」 期末報告.....	8
子計畫 3： 「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研 究」期末報告.....	8
子計畫 4： 「低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證評估之研究」 期末報告.....	8
子計畫 5： 「低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估審查技術之 研究」期末報告.....	8



## 計畫名稱：108 年低放射性廢棄物處置安全評估驗證技術研究

### 一、摘要

#### (一) 中文摘要

本研究旨在提升我國低放最終處置審驗技術能力與協助管制機關建立合宜的審驗技術規範。台電公司以經濟部核定公告建議候選場址為研究對象，提出「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」，本計畫就上述台電公司之評估報告，針對場址特性、工程障壁系統功能、處置坑道結構穩定性、設計情節核種傳輸與設計情節生物圈劑量評估等影響處置安全之技術課題，提出「108 年低放射性廢棄物處置安全評估驗證技術研究」，建立對應之安全驗證技術能力，協助管制單位強化處置安全評估審查能力，並提出低放處置安全分析報告審查規範建議。

#### (一) 英文摘要

The purpose of this project are to enhance our technical capacities on reviewing the final disposal plan and to support the development of review guidelines for the regulatory agency. Taiwan Power Company proposed the “Technical Evaluation Report on the Final Disposal of Low-level Radioactive Wastes” for the proposed candidate site announced by the Ministry of Economic Affairs. Based on the report of Taiwan Power Company, this project proposes "Research on safety assessment and verification technology for low-level radioactive waste disposal". The expected outcomes are to conduct parallel evaluation on the related safety topics in the report prepared by the Taiwan Power Company, to enhance domestic technical capacities on reviewing the final disposal plan, and to recommend review guidelines for the low-level waste final disposal plan for the regulatory agency.

## 二、計畫目標

低放射性廢棄物處置為我國必需面對之課題，經濟部與台電公司目前正積極推動低放射性廢棄物處置設施的選址作業，管制機關需確保其處置安全之職責，並提升審驗技術能力與建立合宜的技術規範。

為提升低放射性廢棄物處置安全評估成果的可信賴度，並提供放射性廢棄物安全管制機關足夠之管制技術，爰此，本計畫將因應台電公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台電公司，2016)，提出(1) 低放射性廢棄物近岸坑道處置之場址參數驗證技術研究；(2) 低放射性廢棄物坑道處置審查規範建立與工程障壁系統驗證技術研究；(3) 低放射性廢棄物近岸坑道處置之坑道結構穩定驗證技術研究；(4) 低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節核種傳輸驗證技術研究；(5) 低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節之生物圈劑量評估驗證技術研究等 5 個研究方向，分別由 5 個子計畫進行研析。本計畫另一個重點將針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」(原能會物管局，2012)之提出修訂建議，目標將提出可公告之審查導則與報告導則修訂版。

## 三、重要成果

### (一) 子計畫一：低放射性廢棄物近岸坑道處置之場址參數驗證技術研究

- 1、本研究蒐集我國近岸潛在處置場址及其周圍之岩體裂隙資料。研究發現，兩處雖相鄰，其裂隙特徵有相當程度之差異。
- 2、影響水力內寬之關鍵參數包含不連續面位態、不連續面之粗糙係數(*JRC*)及不連續面單壓強度(*JCS*)。研究發現，*JRC* 對於力學內寬之影響顯著，但轉換為水力內寬時，反而是 *JCS* 對於水力內寬影響最顯著。
- 3、本研究參考台灣電力公司(2016)及 Bandis 等人(1983)之研究，透過 Barton-Bandis Model 產生隨深度變化之水力內寬之資料，並使用不同模型進行分析。研究發現(表 1)，考慮越多

因素之模型，標準偏差能有效降低，進而降低其不確定性。

4、不同分析方法可能會影響結果之不確定性，前期研析瑞典 SKB 對於 Forsmark 場址之研究，以及本研究透過不同模型分析水力內寬皆發現類似現象。

5、本研究針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案」有關場址特性相關修訂內容進行最後整體檢視。

表 1 四種不同分析模型對於假設鑽井案例之分析結果比較

	Mean( $\mu$ m)	SD ( $\mu$ m)
<b>Depth-independent model</b>		
<b>Neglecting lithology</b>	42.43	29.50
<b>Considering lithology-Slate</b>	57.68	26.01
<b>Considering lithology-Sandstone</b>	27.18	24.48
<b>Depth-dependent model <math>x = Ae^{-By} + C</math></b>		
<b>Neglecting lithology</b> $x = 83.961e^{-0.009y} + 27.825$	43.57	22.26
<b>Considering lithology-Slate</b> $x = 68.966e^{-0.008y} + 42.968$	57.14	19.50
<b>Considering lithology-Sandstone</b> $x = 93.229e^{-0.010y} + 14.714$	30.33	15.42
<b>Multiple regression model (1) <math>x = Ay_1 + By_2 + Cy_3 + Dy_4 + E</math></b>		
<b>Neglecting lithology</b> $\hat{x} = -0.09depth + 0.67JCS + 3.04JRC - 0.07dip - 11.46$	42.43	12.43
<b>Considering lithology-Slate</b> $\hat{x} = -0.08depth + 0.75JCS + 2.46JRC - 0.09dip - 16.91$	57.68	11.21
<b>Considering lithology-Sandstone</b> $\hat{x} = -0.09depth + 0.48JCS + 3.36JRC - 0.06dip - 4.08$	27.18	12.75
<b>Multiple regression model (2) <math>x = Ae^{-By_1} + Cy_2 + Dy_3 + Ey_4 + F</math></b>		
<b>Neglecting lithology</b> $\hat{x} = 75.87e^{-0.009depth} + 0.67JCS + 3.08JRC - 0.07dip - 50.54$	42.43	7.98
<b>Considering lithology-Slate</b> $\hat{x} = 65.03e^{-0.008depth} + 0.75JCS + 2.90JRC - 0.08dip - 57.91$	57.68	7.42
<b>Considering lithology-Sandstone</b> $\hat{x} = 65.03e^{-0.008depth} + 0.75JCS + 2.90JRC - 0.08dip - 57.91$	27.18	6.43

(二) 子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置審查規範建立與工程障壁系統驗證技術研究

1、處置工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬技術審驗部分，透過相關研究成果與國內常用數值模式功能之回顧與分析，包含 MS-BLT、RASRED、HydroGeoChem 與 GoldSim 等。

2、依容器破壞機制、源項核種釋出機制、核種遷移機制、生物圈傳輸機制與模型彈性等 5 項模型建立或模擬機制進行討論，比較結果如表 2 所列。

- 3、就現階段之坑道式處置設施設計概念而言，處置窖設計為確保處置設施達成安全功能之重要障壁單元。經採用 HydroGeoChem 模式進行測試案例模擬與分析後發現，測試案例之處置窖設計以擴散係數對於核種傳輸特性之敏感性高於水力傳導係數。
- 4、安全分析報告審查導則總整工作，依主計畫執行規劃將導則章節區分為 3 階段進行總整，最後再預留 1 次總審閱之執行方式。配合主計畫執行 4 次專家委員審議會議，逐次審閱與修正各章節條文內容。

表 2 種核傳輸程式初步比較表

	BLT-MS	RESRAD	GOLDSIM	HGC
容器破壞機制	5000 個容器、20 組容器破壞參數	無 (初始瞬時破壞)	可自訂容器破壞機制	需自行前處理為濃度初始或邊界條件
核種釋出機制	20 組廢棄物體外釋參數、10 顆核種，有支援衰變鍊計算 可依計算式逐步釋出至計算單元、亦可瞬間釋出至廢棄物計算單元	瞬時釋出後，均勻分布於污染區	瞬時釋出至廢棄物體計算單元	瞬時釋出至廢棄物體計算單元
核種遷移機制	需設定二維流場 流量為定值、傳輸參數多為定值	1.須設定流場，屬一維解析解，適合較單純之流場。 2.僅適用於放射性廢棄物(污染物)位於未飽和含水層中之環境。	須設定流場(可時變)，一維水桶模式傳輸	同時解流場與污染傳輸
生物圈傳輸機制	無此功能，劑量需另外評估	內建生物圈傳輸機制	可自行建置	依版次有所差異

### (三) 子計畫三：低放射性廢棄物近岸坑道處置之坑道結構穩定驗證技術研究

- 1、蒐整國外文獻有關坑道結構之穩定分析技術現況，對於數值分析應採連續體或是不連續體分析之判別依據，建議可依岩體分類、裂隙分布密度與所考量的工程規模決定之。
- 2、蒐整國內隧道工程相關分析技術、規範與運用數值分析於隧道工程之相關文獻，另針對坑道「運轉階段」之結構穩定，建議可透過坑道襯砌異狀的檢測與分析技術掌握之。
- 3、蒐整、盤點及檢核數值模型建置所需資訊與參數，並根據我

國二處建議候選場址之地質概念模型，及可能採用的處置坑道型式，完成坑道結構穩定分析數值模型建置與初步分析。

4、依坑道結構之短期穩定性分析、長期穩定性分析與數值分析方法三個部分，提出低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析相關之研究課題與技術發展建議，詳如表 3；另依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(草案)」與本研究有關之章節提出相關條文修訂建議。

表 3 我國低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析技術發展建議

本土坑道之短期穩定性分析	本土坑道之長期穩定性分析	本土坑道之數值分析方法
<p>(i)坑道圍岩穩定性量化之風險管理架構 有鑑於坑道式處置須提供放射性廢棄物處置作業足夠的工作空間，但須兼顧圍岩之穩定性，故未來除透過既有的分析技術協助判釋圍岩穩定性外，亦可參考 SKB 引入定量化風險分析架構，作為圍岩穩定性的風險管理依據。</p> <p>(ii)坑道開挖引致之岩體損傷評估 由於坑道開挖將導致岩體之工程行為的變化，並影響圍岩之力學穩定性，實有必要針對本土潛在場址進行取樣與執行相關室內力學試驗，或實際透過地下實驗室之建置進行現地試驗，以瞭解不同開挖方式及現地應力與地質條件等因素對岩體損傷之影響。</p> <p>(iii)檢測與監測 有關處置坑道結構在建造與運轉階段之短期穩定性分析，其所需之檢測與監測項目與技術，可參考本子計畫前期研究「處置坑道結構長期穩定需求及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2015)，以確保坑道結構的穩定性。</p> <p>(iv)地震對處置坑道結構穩定性 根據本子計畫前期研究「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研究」(楊長義與李宏輝，2019)，有關地震活動對處置坑道結構穩定性的影響評估必須考慮下列幾點： a.必須根據場址特性及歷史地震紀錄的蒐整，提出合理的設計基準地震。 b.大地材料在考量地震力條件下的力學參數變化及其相關試驗項目。 c.進行處置坑道結構耐震分析時，必須根據坑道所處深度是否需考量慣性效應及鄰近變形帶的影響，選擇適當的分析方法(擬靜態分析法或動態歷時分析法)，惟針對不同覆蓋深度下之加速度反應，國內尚欠缺相關的紀錄。</p>	<p>坑道進入封閉階段後，處置場的長期安全功能主要是以圍阻與遲滯放射性核種的釋出，但仍可參酌瑞典 SFR 場址曾針對處置窖在沒有適當的回填，及10,000年的時間尺度條件下，曾透過 3DEC 數值工具評估了處置窖周圍岩盤可能因岩體風化、強度降低等長期效應而導致岩體鬆動，進而造成圍阻滲流特性之改變。有關處置坑道結構長期穩定分析，必須考量(i)岩體力學性質潛變特性與(ii)岩體力學性質劣化影響範圍。循此，建議未來仍應持續針對本土潛在場址，於「場址特性調查」階段進行相關大地材料之試驗與調查之外，亦須於「場址特性描述與參數評估項目」部分，加入岩性、岩相等受風化影響具顯著變異的評估因子，以提升坑道長期穩定性之安全評估技術(楊長義與李宏輝，2019)。</p>	<p>(i)有鑑於坑道結構穩定分析中，必須考量裂隙岩體經開挖擾動後所引致的應力重新分配、變形調整、及其造成水力參數的變化，因此所採取的數值分析方法須視需要，斟酌考慮並反映岩體裂隙的力學特性，包括強度、變形性與滲流特性。</p> <p>(ii)目前在坑道結構穩定分析課題所採用的數值分析方法，可區分為連續體分析、非連續體分析及連續體-非連續體混合分析等三大類，應視工程規模與裂隙分布密度，及是否考慮滲流問題，選定適當的數值分析方法。例如本研究根據表2.4-1所列坑道穩定分析所採用的數值方法與優點比較，另並整理於表5.1可做為數值方法選定之參考。</p> <p>(iii)坑道穩定性分析除上述數值分析方法選定之課題外，尚包括(i)洞口段、坑道交叉段、通行隧道與處置坑道之銜接段等三維分析、(ii)開挖擾動區之數值分析與評估、(iii)地震對處置坑道的影響評估與(iv)離散裂隙網絡 DFN 數值模型建構與分析等，均是未來值得進一步探討的課題。</p>

#### (四) 子計畫四：低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節核種傳輸驗證技術研究

1、LLWD2016 報告提出氣候演化、地表生態系統、力學作用演化、水文地質演化、地球化學演化及工程障壁演化 6 項評估項目，而 SR-PSU 則提出 9 項，主要差異為 LLWD2016 不考慮熱流演化之評估，且瑞典場址所在環境具有永凍土存在。

2、設計情節核種傳輸模擬技術，透過整合前一年度所建置之近場(處置設施)與近場(處置坑道)網格，以有效減少不同尺度網格模擬銜接次數，降低數值誤差產生。

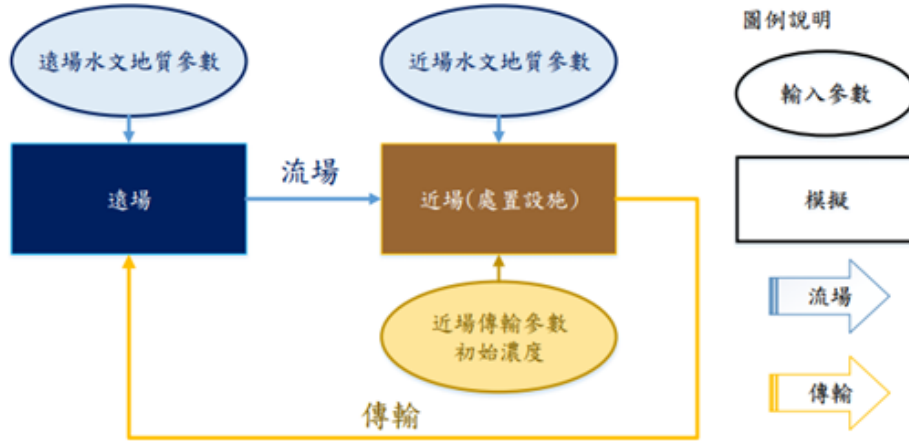


圖 1 本研究設計情節之核種傳輸模擬流程圖

3、本研究與 LLWD2016 之場址尺度流場模擬結果比較，在遠場地下水流速相差約 0~1 個數量級，而近場處置坑道之單位長度流量相差小於 1 個數量級。

4、本研究在核種傳輸模擬因源項金屬核種未採用外釋率控制因此差異較大；而在 LLWD2016 中核種傳輸採用遠場裂隙模擬，本研究核種峰值出現時間較 LLWD2016 晚，濃度峰值差異約在 0~1 數量級之間。

5、我國低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸模擬技術可透過源項模擬技術、海淡水交界面的影響、增進運算效率、資料品質保證等進行精進。

6、地球化學條件是影響核種傳輸遲滯參數的重要因素之一，審查導則在場址特性描述章節之地球化學部分也強調其重要性，故安全評估章節應增加考慮場址地球化學演化對核種傳輸遲滯參數影響之文字，以呼應場址描述章節要求要項。

(五) 子計畫五：低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節之生物圈劑量評估

1、蒐集低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估技術報告



(LLWD2016)，與瑞典 SR-PSU TR-14-09 技術報告有關關鍵核種之篩選程序及方法並進行研究，摘述 LLWD2016 有關關鍵核種篩選程序及結果，與國內外有關關鍵核種篩選比較，進行低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究。

- 2、探討 RESRAD 生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立。對於 LLWD2016 有關之設計情節，審驗生物圈劑量評估結果。
- 3、發現達仁溪流域下游之關鍵群體最大個人年有效劑量約為  $4.3 \times 10^{-4}$  mSv，發生時間為場址封閉後約 5,100 年之時間；塔瓦溪下游之最大個人年有效劑量約為  $5.0 \times 10^{-4}$  mSv，發生時間為場址封閉後約 5,200 年，主要劑量來源核種均為 C-14。烏坵關鍵群體最大個人年有效劑量約為  $4.2 \times 10^{-6}$  mSv，發生時間為場址封閉後約 18,000 年之時間，主要之劑量來源核種為 C-14，該最大個人年有效劑量均小於 0.25 mSv。蒐集 IAEA 有關 BIOMASS 生物圈劑量評估技術發展，提出我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議，與安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議。

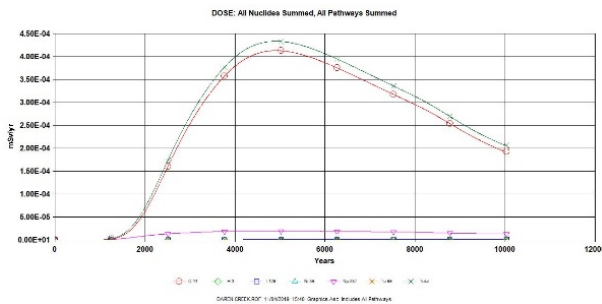


圖 2 設計情節下個人年有效劑量審驗(達仁溪流域)

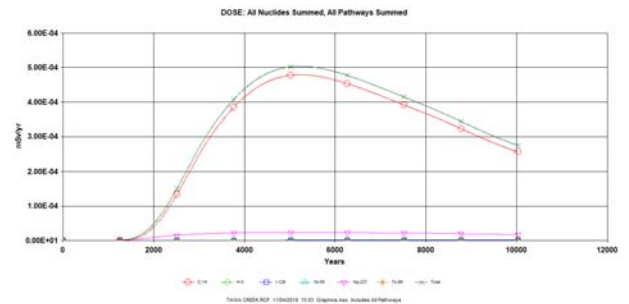


圖 3 設計情節下個人年有效劑量審驗(塔瓦溪流域)

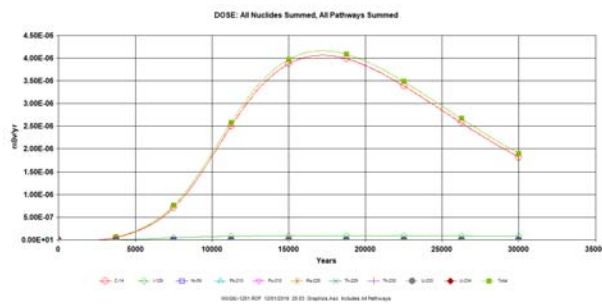


圖 4 設計情節下個人年有效劑量審驗(烏坵場址)

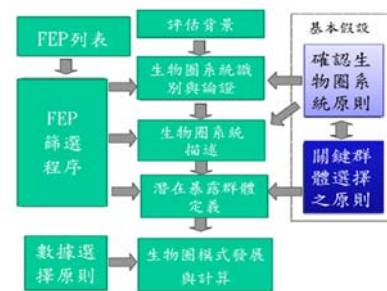


圖 5 BIOMASS 生物圈劑量評估技術發展的流程圖

#### 四、 展望

本年度計畫為 4 年期低放射性廢棄物處置計畫之最後一年研究，各項子計畫分別於場址特性、工程設計、坑道穩定性、長期穩定性以及生物圈劑量評估等重要課題已有豐碩的成果，研究成果提供我國低放處置技術精進之建議，並且回饋於「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案」之修定。然而，我國近期因蘭嶼貯存場遷場作業持續推動，以及除役廢棄物等相關問題，集中貯存場為暫時之應變方案。再者，我國之放射性廢棄物分類系統與管制法規多為參考美國，近期即將公布 10CFR61 法規之相關修定條文。因此，後續之研究可針對集中貯存之技術及相關法規之條文進行研究，並且與我國低放處置之環境進行比對，找出符合我國低放處置之最佳方案。另外，亦可針對本四年期之研究成果持續精進，場址特性方面可持續針對場址之現地應力與水力特性相關課題進行研究，工程設計方面，本年度研究發現擴散係數對於核種傳輸特性具相當之敏感性，且與混凝土有關之擴散功能設計並未包含於我國「混凝土工程施工規範與解說」及「施工綱要規範」等技術規範中，應持續發展其審驗技術。對於核種傳輸技術而言，應進一步研發源項核種衰變與外釋機制、海淡水交界面處理等模擬技術、高速運算技術應用與提升資料品質保證等。

#### 五、 附件

- 子計畫 1 「低放射性廢棄物近岸坑道處置之場址參數驗證技術研究」期末報告
- 子計畫 2 「低放射性廢棄物坑道處置審查規範建立與工程障壁系統驗證技術研究」期末報告
- 子計畫 3 「低放射性廢棄物近岸坑道處置之坑道結構穩定驗證技術研究」期末報告
- 子計畫 4 「低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節核種傳輸驗證技術研究」期末報告
- 子計畫 5 「低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節之生物圈劑量評估」期末報告



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

108 年低放射性廢棄物處置安全評估

驗證技術研究

子計畫一：低放射性廢棄物近岸坑道處置

之場址參數驗證技術研究

期末報告

計畫編號：108FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫一主持人：董家鈞

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 108 年 12 月



# 108 年低放射性廢棄物處置安全評估

## 驗證技術研究

### 子計畫一：低放射性廢棄物近岸坑道處置 之場址參數驗證技術研究

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫一主持人：董家鈞

研究期程：中華民國 108 年 1 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 136 萬元(子計畫一經費)

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 108 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)



## 中文摘要

本計畫為 4 年期低放射性廢棄物處置計畫最後一年，前期研究完成了國際資訊研析、審驗技術建立以及驗證評估研究，內容包含掌握場址初始狀態及其演變、國內候選場址之場址特性及可能遭遇之特殊地質、水力-力學參數不確定性評估和流場之敏感度分析、坑道水力-力學耦合流場分析探討，以及平行驗證方法測試等幾項重要成果。本年度進一步提出低放射性廢棄物近岸坑道處置之場址參數驗證技術研究，透過蒐集台灣電力公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司，2016)有關達仁建議候選場址之岩體裂隙特性以及鄰近地區之地質調查資料，研究發現兩處雖相鄰，但兩處之裂隙特徵有相當程度之差異，如欲進行分析，其分析結果之不確定性可能會非常高。前期研究指出，水力內寬對於裂隙岩體之水力特性影響顯著，因此，本年度進一步針對影響水力內寬之關鍵參數(例如：不連續面位態、不連續面之粗糙係數( $JRC$ )及不連續面單壓強度( $JCS$ ))進行分析。結果顯示， $JRC$  對於力學內寬的影響顯著，但透過轉換式得到水力內寬時，反而是  $JCS$  對於水力內寬影響最顯著。再者，以前述場址之裂隙特性資料為依據，並參考前人研究與裂隙岩體相關之參數，人工產生隨深度變化之水力內寬資料，並利用不同分析模型(例如：考慮岩性、深度、多變數)進行分析。研究發現，考慮越多因素的模型，水力內寬不確定性即越小。利用力學內寬轉換為水力內寬之轉換式推估水力內寬也會造成不確定性。另外，本研究協助子計畫二主導編修之「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案」，可提供管制機關法規精進之參考。

## **Abstract**

This study is the last year of the 4-year low-level radioactive waste disposal plan. Previous research completed important results including the initial state of the site and its evolution and the particularity of domestic geology, the uncertainty assessment of hydraulic-mechanical parameters and the sensitivity analysis of the flow field, and the analysis of the hydraulic-mechanical coupling flow field of the tunnel were discussed. This study further collects the technical report of Taiwan Power Company regarding the fracture characteristics of the rock mass at the disposal site and the geological survey data of the adjacent area. The study found that although the two sites are adjacent, the fracture characteristics of the two sites are different. Furthermore, artificially generate hydraulic aperture data as a function of depth. The study found that the more parameters used in the model can reduce uncertainty. The transformations equation used to evaluate the hydraulic aperture from mechanical aperture will induce uncertainty of hydraulic aperture, too. In addition, the study assisted in the preparation of the draft review guidelines with the goal of presenting an advertised version.





# 目錄

中文摘要.....	1
Abstract.....	2
目錄.....	4
圖目錄.....	6
表目錄.....	10
第一章 前言.....	11
第二章 近岸潛在場址之岩盤裂隙特性.....	14
2.1 達仁場址之地表地質調查結果.....	14
2.1.1 達仁場址之地體構造與地質環境.....	14
2.1.2 達仁場址之岩體裂隙特性.....	16
2.2 場址鄰近地區之調查結果.....	20
2.2.1 地表地質調查結果.....	21
2.2.2 隧道內地質觀察.....	23
2.3 綜合比較.....	24
第三章 岩盤等效水力傳導係數評估與不確定性分析.....	26
3.1 計算水力內寬.....	26
3.2 影響水力傳導係數之參數敏感性分析.....	29
第四章 等效水力傳導係數現地試驗方法資料解析.....	38
4.1 現地水力試驗優缺點及適合之條件.....	38
4.2 現地水力試驗參數轉換水力內寬.....	40
4.3 假設案例.....	42
4.4 未考慮深度分析.....	49
4.5 考慮深度.....	52
4.6 多變數分析.....	54
4.7 綜合深度與多變數之回歸分析.....	56

第五章 我國低放坑道處置地質特性技術發展建議.....	59
5.1 前期工作回顧.....	59
5.2 技術發展建議.....	62
第六章 我國低放處置安全報告審查規範有關地質特性精進建議.....	64
6.1 整體性建議.....	64
6.2 導則條文修訂建議.....	65
第七章 結論與建議.....	67
7.1 結論.....	67
7.2 建議.....	68
參考文獻.....	69

## 圖目錄

圖 2.1 達仁鄉建議候選場址區域地質圖(台灣電力公司，2016) .....	15
圖 2.2 達仁鄉建議候選場址地質環境模型示意圖(台灣電力公司，2016) .....	15
圖 2.3 達仁鄉建議候選場址層理位態統計成果圖(台灣電力公司，2016).....	16
圖 2.4 達仁鄉建議候選場址劈理位態統計成果圖(台灣電力公司，2016).....	17
圖 2.5 達仁鄉建議候選場址節理位態統計成果圖(台灣電力公司，2016).....	17
圖 2.6 規模大於 3(左)及規模大於 4(右)之震源機制所得應力分區(呂玉菟，2004).....	18
圖 2.7 規模大於 3 震源機制所得應力分區之 GEPHART(左)與 MICHAEL(右)應力反演結果(呂玉菟，2004) .....	19
圖 2.8 規模大於 4 震源機制所得應力分區之與 MICHAEL 應力反演結果(呂玉菟，2004).....	19
圖 2.9 台 9 線拓寬工程示意圖，紫色虛線為草埔隧道，紅色星號為工區相對位置(改自台 9 線南迴公路改善後續計畫網路資訊平台 <a href="https://pweb.ceci.com.tw/vison/intro.aspx">HTTPS://PWEB.CECL.COM.TW/VISION/INTRO.ASPX</a> ) .....	20
圖 2.10 菩安山背斜(紅色實線)及其周圍之地質圖(改自「台灣南迴鐵路沿線地區板岩系地層構造研究」(胡和詹，1984)).....	21
圖 2.11 草埔隧道工區周圍地表地質調查結果，包含(A)豎井周圍層理與葉理平均之平均位態 N35°W/70°NE；(B) 工區東側之不連續面位態 N40°W/14°N；(C) 工區西側之不連續面位態平均 N5°W/84°E .....	22
圖 2.12 隧道內葉理平均 N36°W/60°N 及 N5°W/75°N.....	23
圖 2.13 達仁鄉建議候選場址與草埔隧道工區之相對位置示意圖(改自台灣電力公司(2016)) .....	24
圖 2.14 草埔隧道工區豎井周圍、工區東、西側，以及隧道內之不連續面位態分布 .....	25
圖 2.15 達仁候選場址層理位態與草埔隧道工區不連續面位態之比較(改自台灣電力公司(2016)).....	25
圖 2.16 裂隙透過坑道開挖面周圍水力傳導係數增加通路與導水裂隙流動之原理：裂隙 D 與處置孔相交並作為地下水流動通路；A 為水主要活動的破碎帶；B 為因開炸和應力集中導致的水力傳導係數增加的區域；C 為廢棄物罐處置孔。摘自 PUSCH(1989).....	25
圖 3.1 影響水力內寬之參數.....	26
圖 3.2 節理座標系統之定義.....	27
圖 3.3 不連續面之粗糙係數(JRC)(左)及不連續面單壓強度(JCS)(右)對於水力內寬之敏感度(摘自原能會物管局(2017)).....	30

圖 3.4	不連續面之位態、 $JRC$ 、 $JCS$ 為定值之水力內寬隨深度變化	30
圖 3.5	$JRC$ 、 $JCS$ 為定值，改變不連續面位態(傾角=30°、45°、60°)之水力內寬隨深度變化	30
圖 3.6	不連續面位態、 $JCS$ 為定值，改變不連續面之粗糙係數( $JRC=5$ 、 $10$ 、 $15$ )之水力內寬隨深度變化	31
圖 3.7	不連續面位態、 $JRC$ 為定值，改變不連續面單壓強度( $JCS=50$ 、 $100$ 、 $150$ MPa)之水力內寬隨深度變化	31
圖 3.8	假設邊界應力等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時，不同 $JRC(5$ 、 $10$ 、 $15)$ 的情況下， $JCS_0$ 與初始開口寬 $T_0$ 之關係	32
圖 3.9	假設邊界應力等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時，不同 $JRC(5$ 、 $10$ 、 $15)$ 的情況下， $JCS_0$ 與初始正向勁度 $K_0$ 之關係	32
圖 3.10	假設邊界應力等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時，不同 $JRC(5$ 、 $10$ 、 $15)$ 的情況下， $JCS_0$ 與不連續面內寬最大閉合量 $bnm$ 之關係	33
圖 3.11	假設邊界應力等於 $JCS$ 時， $JCS=50$ MPa 時，力學內寬隨正向應力 $\Sigma_N$ 之結果	34
圖 3.12	假設邊界應力等於 $JCS$ 時， $JCS=100$ MPa 時，力學內寬隨正向應力 $\Sigma_N$ 之結果	34
圖 3.13	假設邊界應力等於 $JCS$ 時， $JCS=150$ MPa 時，力學內寬隨正向應力 $\Sigma_N$ 之結果	35
圖 3.14	假設邊界應力等於 $JCS$ 時，力學內寬隨正向應力 $\Sigma_N$ 之結果	35
圖 3.15	假設邊界應力等於 $JCS$ 時， $JCS=50$ MPa 時，水力內寬隨正向應力 $\Sigma_N$ 之結果	36
圖 3.16	假設邊界應力等於 $JCS$ 時， $JCS=100$ MPa 時，水力內寬隨正向應力 $\Sigma_N$ 之結果	36
圖 3.17	假設邊界應力等於 $JCS$ 時， $JCS=150$ MPa 時，水力內寬隨正向應力 $\Sigma_N$ 之結果	37
圖 3.18	假設邊界應力等於 $JCS$ 時，水力內寬隨正向應力 $\Sigma_N$ 之結果	37
圖 4.1	試驗區間的滲透率(左)；裂隙頻率(中)；各區間水力內寬值(右)(RUTQVIST，2015)	40
圖 4.2	不同時間段的注水速率與水頭差(QUINN，2011)	41
圖 4.3	根據 BANDIS 等人(1983)之研究，整理不同岩性之 $JRC$ 範圍	42
圖 4.4	BOREHOLE A 參考達仁場址第一組劈理平均位態產生 120 組常態分布裂隙	43
圖 4.5	BOREHOLE A 第一組劈理對應之 120 組隨深度變化之 $JRC_0$ 及 $JCS_0$	43
圖 4.6	BOREHOLE A 第一組劈理隨深度之 120 組水力內寬資料	43
圖 4.7	BOREHOLE A 參考達仁場址第三組劈理平均位態產生 120 組常態分布裂隙	44
圖 4.8	BOREHOLE A 第三組劈理對應之 120 組隨深度變化之 $JRC_0$ 及 $JCS_0$	44

圖 4.9 BOREHOLE A 第三組劈理隨深度之 120 組水力內寬資料.....	44
圖 4.10 BOREHOLE A 參考達仁場址第二組節理平均位態產生 120 組常態分布裂隙.....	45
圖 4.11 BOREHOLE A 第二組節理對應之 120 組隨深度變化之 $JRC_0$ 及 $JCS_0$ .....	45
圖 4.12 BOREHOLE A 第二組節理隨深度之 120 組水力內寬資料.....	45
圖 4.13 BOREHOLE B 參考達仁場址第二組劈理平均位態產生 120 組常態分布裂隙.....	46
圖 4.14 BOREHOLE B 第二組節理對應之 120 組隨深度變化之 $JRC_0$ 及 $JCS_0$ .....	46
圖 4.15 BOREHOLE B 第二組節理隨深度之 120 組水力內寬資料.....	46
圖 4.16 BOREHOLE B 參考達仁場址第一組節理平均位態產生 120 組常態分布裂隙.....	47
圖 4.17 BOREHOLE B 第一組節理對應之 120 組隨深度隨深度變化之 $JRC_0$ 及 $JCS_0$ .....	47
圖 4.18 BOREHOLE B 第一組節理隨深度之 120 組水力內寬資料.....	47
圖 4.19 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例之相關輸入參數.....	48
圖 4.20 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例產生水力內寬隨深度變化共 600 個資料 點之結果.....	48
圖 4.21 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例水力內寬分布圖.....	49
圖 4.22 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例依岩性區分之水力內寬隨深度之結果 .....	50
圖 4.23 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例之 600 個水力內寬資料點之平均及標準 偏差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	50
圖 4.24 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例，板岩水力內寬資料點之平均及標準偏 差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	51
圖 4.25 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例，砂岩水力內寬資料點之平均及標準偏 差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	51
圖 4.26 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例之 600 個水力內寬資料點考慮深度分 析之平均及標準偏差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	52
圖 4.27 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例，板岩水力內寬資料點考慮深度分析 之平均及標準偏差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	53
圖 4.28 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例，砂岩水力內寬資料點考慮深度分析之 平均及標準偏差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	53
圖 4.29 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例之 600 個水力內寬資料點以多變數分析 之結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	54

圖 4.30 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例，板岩水力內寬資料點以多變數分析之結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	55
圖 4.31 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例，砂岩水力內寬資料點以多變數分析之結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	55
圖 4.32 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例之 600 個水力內寬資料點以改良後之多變數分析結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	56
圖 4.33 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例，板岩水力內寬資料點以改良後之多變數分析結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	57
圖 4.34 BOREHOLE A 及 BOREHOLE B 兩個假設鑽井案例，砂岩水力內寬資料點以改良後之多變數分析結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左).....	57

## 表目錄

表 3.1 假設邊界應力等於 $JCS$ 時，計算力學內寬隨正向應力變化之輸入參數.....	34
表 4.1 單井水力試驗方法簡介及優缺點比較(摘自許世孟等人(2006)).....	39
表 4.2 單井水力試驗適合施作之地質條件(摘自許世孟等人(2006)) .....	39
表 4.3 四種不同分析模型對於假設鑽井案例之分析結果比較.....	58



## 第一章 前言

我國近年來積極推動低放射性廢棄物處置，亦是世界各國目前正積極發展之工作。國際間有關低放處置經驗之國家中，瑞典的中、低放射性廢棄物最終處置場 SFR(Swedish Final Repository)在 1983 年取得建造執照，於 1988 年完成第一期工程建造(SFR-1)並開始運轉，此處置場為世界第一個建於海床下之坑道式處置場。美國自 1962 年開始，陸續有多座最終處置場開始商業運轉，例如 Beatty 處置場、Richland 處置場、Barnwell 處置場等。其中，第一座 Beatty 處置場位於內華達州，運轉 31 年後於 1992 年關閉並進行長期監管。而有關我國低放處置，蘭嶼貯存場遷場作業持續推動。因此，我國應積極推動低放射性廢棄物處置之工作，並朝向坑道處置之方向進行技術發展。本計畫將持續協助政府不斷提升審驗技術，也持續協助管制單位建置適合國內處置低放射性廢棄物之規範。本計畫透過四年期程，針對處置坑道之場址特性、工程設計、長期穩定、生物圈劑量評估以及長期安全等主要方向，並逐年透過國際資訊研析、驗證方法研究、驗證評估研究、審查規範建立(修正)等四步驟推動，並將持續彙整國外低放射性廢棄物坑道處置設施安全評估審查技術，綜整及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。另外，透過本計畫之研究成果，期能協助管制單位建立坑道處置安全審查及分析驗證之能力，使國內處置管制技術能與國際接軌。

本年度計畫為此四年期工作最後一年，計畫第一年「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」進行國際資訊研析，計畫第二年「106 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析」進行審驗技術建立，去年度計畫「107 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之驗證評估研究」進行了驗證評估之研究，本年度計畫進一步提出「108 年低放射性廢棄物處置安全評估驗證技術研究」，以上四個年度之計畫透過場址特性、工程設計、結構穩定性、長期安全以及生物圈安全評估等研究主題進行研究，由五個子計畫針對上述之研究課題進行整體性之研究，並且於每個年度之計畫執行期間定期舉辦工作會議，讓不同領域之研究成果進行交流整合。本四年期計畫逐步達成以下目標：(1)處置設施場址特性相關量化資訊及關鍵課題釐清；(2)各項與場址特徵化相關處置技術驗證方法之建立；(3)提供適合於國內坑道場址特性相關處置技術與提升審驗能力；最後(4)回饋於國內「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則草案」場址特性相關章節之精進。

本研究於過去幾年針對低放射性廢棄物處置已有相當成果，以下說明與本計畫(子計畫一)

相關計畫過去執行成果。102 年度物管局計畫「低放射性廢棄物處置場址特性與設施設計審查規範精進之研究」(原能會物管局, 2013) 提供審查導則場址及設施設計相關條文之修訂方向建議, 103 年度物管局計畫「低放射性廢棄物處置場址特性審查規範精進之研究」(原能會物管局, 2014), 針對審查導則場址相關條文, 提出「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)之場址特性修訂草案」(以下簡稱審查導則之場址特性修訂草案), 並在 104 年度物管局計畫「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展」, 持續進行場址之特性描述審查規範精進之研究。自 105 年度開始, 針對坑道處置之場址特性進行研究, 透過國際資訊研析、審查要項研究、驗證方法評估、審查規範建立(修正)等四步驟逐年推動, 105 年度物管局計畫之子計畫一「低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術建立之資訊研析」(原能會物管局, 2016)彙整國外放射性廢棄物坑道處置設施安全評估審查技術, 研析國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與精進對策。106 年度「低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術之關鍵課題研究」(原能會物管局, 2017)提出場址特徵化工作需精進之關鍵議題, 內容包含場址初始狀態定量化, 並針對力學-水力耦合量化資訊之不確定性進行深入探討, 評估相關參數對地下水流經處置隧道流量之敏感度, 最後提出場址特徵化參數不確定性之評估結果。去年度提出「低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術驗證評估研究」(原能會物管局, 2018), 透過蒐集並研析國際間坑道處置攸關水力-力學耦合流場分析之相關技術文獻, 並進一步建立近場流場分析之平行驗證技術。另外, 主導共同研讀 NUREG-2175 技術報告(NRC, 2015), 並提出 NUREG-2175 技術報告之重點, 探討與國內處置環境之差異, 最後, 將過去三年之研究成果回饋至「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」(原能會物管局, 2012)。本年度計畫「低放射性廢棄物近岸坑道處置之場址參數驗證技術研究」則將以台灣電力公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司, 2016)為審驗對象, 首先蒐集我國近岸潛在處置場址之岩盤裂隙重要參數, 並透過這些重要參數進一步針對場址之岩盤於不同深度進行計算及評估, 探討各項參數之不確定性。再者, 透過前述蒐集到之場址特性參數, 人工假設於不同深度下之裂隙資料, 並使用不同模型進行分析, 期能透過不同分析方法降低水力內寬之不確定性。最後, 透過本四年期之研究成果, 針對國內低放處置技術提出與場址特性相關之建議。另外, 本四年期計畫於前期計畫執行期間, 各子計畫以及參與之審查委員針對「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則草案」陸續提供相關之修定建議, 本年度子計畫一還將協助子計畫二總整四年之修定成果, 針對「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則草案」進行最後整體檢視, 並於本年度計畫執行結束提供一個可公告之建

議修訂版本。

本報告第一章為計畫說明；第二章為蒐集並研析我國近岸建議候選處置場址及其鄰近地區之岩盤裂隙特性，主要參考資料包含台灣電力公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司，2016)有關達仁鄉建議候選場址，以及鄰近的南迴公路草埔隧道調查結果；第三章說明本研究之研究方法以及對於裂隙岩體有顯著影響參數之敏感性；第四章進一步透過前述建議候選場址之調查成果，人工假設出於不同深度之裂隙資料，計算其水力內寬，並透過不同的分析方法，降低其不確定性；第五章將彙整本計畫之四年成果，針對我國低放處置技術提供與場址特性相關之建議；第六章則針對「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則草案」總整本計畫四年期之相關修訂建議；最後，第七章提出本計畫之結論與建議。

## 第二章 近岸潛在場址之岩盤裂隙特性

前期研究成果指出，坑道處置設施周圍岩體之水力內寬對於水力傳導係數而言非常敏感。因此，有必要針對處置場址之岩盤裂隙特性進行研究，為掌握場址區域之岩盤裂隙特性，本章將蒐集並研析國內近岸建議候選場址以及其鄰近地區調查的結果，包含彙整台灣電力公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司，2016)有關達仁場址之地表地質調查結果(2.1 節)，以及鄰近地區之南迴公路安朔-草埔隧道工程(林衍丞等人，2015)之地質調查(2.2 節)，並重點針對其裂隙相關之資料進行研析及比較(2.3 節)，研析成果如下。

### 2.1 達仁場址之地表地質調查結果

#### 2.1.1 達仁場址之地體構造與地質環境

有關達仁鄉建議候選場址之岩盤裂隙特性，本研究彙整「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司，2016)有關達仁建議候選場址之地質調查結果。達仁鄉建議候選場址位於台灣島東南側，地質環境屬於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的聚合帶，由於菲律賓海板塊向西北方推擠，造成北北西走向的呂宋島弧與東北向的歐亞大陸邊緣產生斜碰撞。位於中央山脈南段的達仁鄉建議候選場址，屬於初期弧陸碰撞之構造環境，在南中國海岩石圈隱沒至菲律賓海板塊的作用下，形成了增積岩體及向西伸向的褶皺逆衝帶。另外，其他有關達仁建議候選場址之地質調查資料，參考宋國城(1991)的「五萬分之一臺灣地質圖及說明書—恆春半島」和林偉雄等人(1993)之「五萬分之一臺灣地質圖及說明書—大武」，達仁建議候選場址所在之區域的岩層以潮州層為主，其岩性主要為硬頁岩，間夾透鏡狀砂岩體砂岩，部分區域為板岩偶夾變質砂岩，地層年代為中期中新世。宋國城(1991)及 Chang 等人(2009)研究指出，此區域受到東西向的大地應力作用，場址區域因而形成一系列南北走向、向西延伸方向的複背斜構造(圖 2.1)。進一步以小比例尺之地質圖觀察此場址區，如圖 2.2 所示，圖中顯示處置母岩環境的岩性單純，除部分位於河川經過處以及沿海少部分區域為沖積層，大部分區域皆為潮州層。

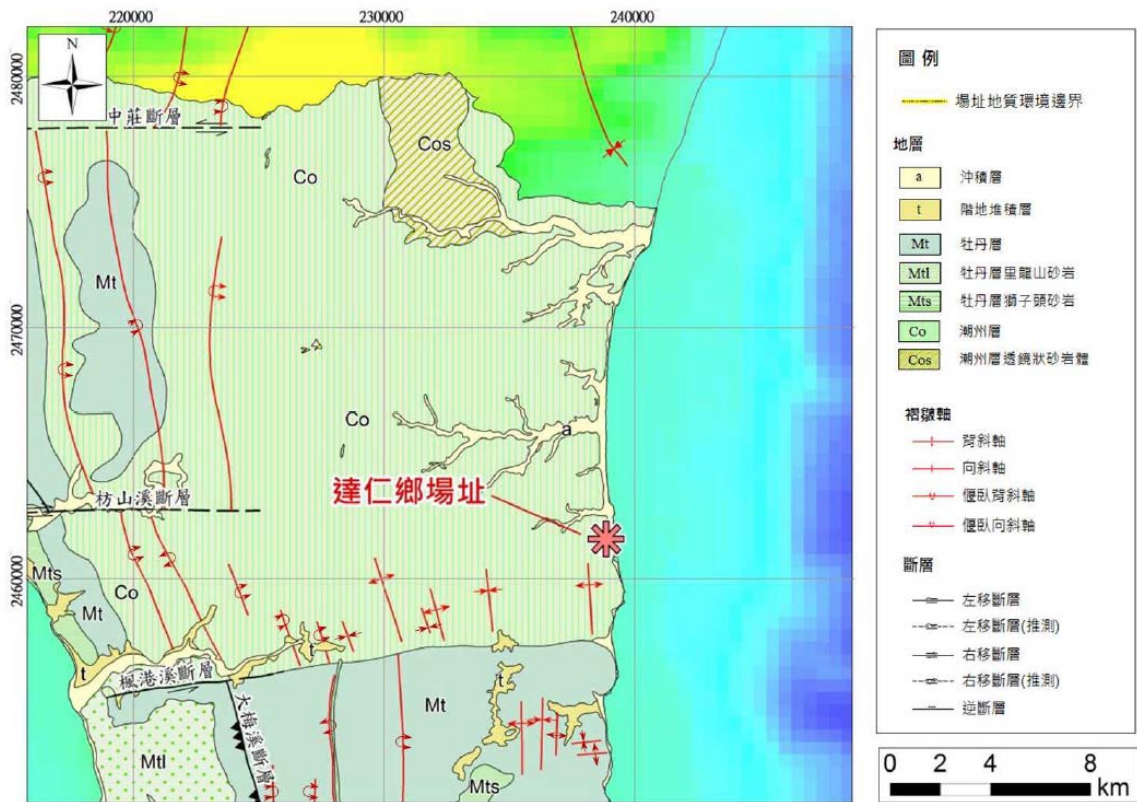


圖2.1 達仁鄉建議候選場址區域地質圖(台灣電力公司，2016)

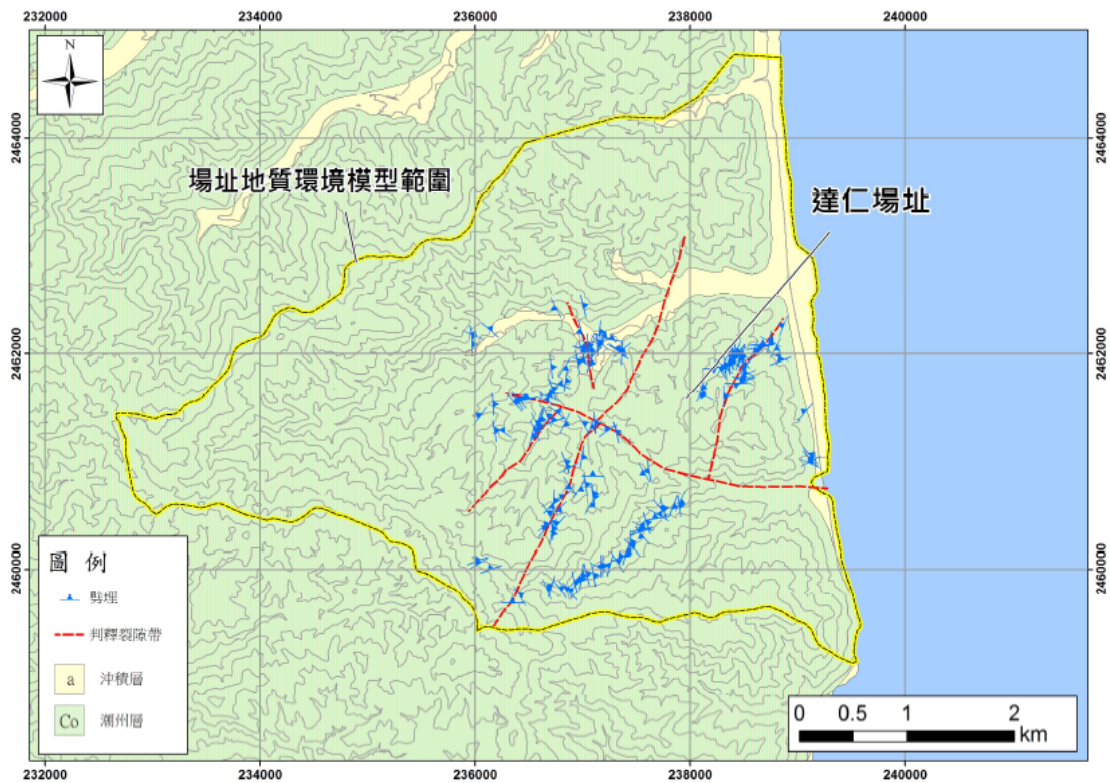


圖2.2 達仁鄉建議候選場址地質環境模型示意圖(台灣電力公司，2016)

## 2.1.2 達仁場址之岩體裂隙特性

### 1. 場址區域之不連續面

「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司, 2016)有關達仁建議候選場址之地表地質調查結果顯示, 場址區域主要地質弱面包含層理、劈理及節理。層理之位態調查成果如圖 2.3 所示, 全區共蒐集到 68 組層理面資料, 平均位態為  $N79^{\circ}E/20^{\circ}N$ ; 劈理之位態調查成果如圖 2.4, 共蒐集到 167 組劈理面資料, 由圖可知, 達仁場址之劈理位態分布變異度較層理高, 大致上可分為三組, 分別為  $N31^{\circ}W/29^{\circ}E$ 、 $N3^{\circ}E/36^{\circ}E$  及  $N16^{\circ}E/21^{\circ}E$ ; 節理之位態調查成果如圖 2.5, 總共取得最多之 206 組節理面資料, 為達仁場址位態分布變異度最大之不連續面, 其主要節理組可分為兩組, 包含  $N42^{\circ}W/85^{\circ}W$  與  $N82^{\circ}W/88^{\circ}S$ 。

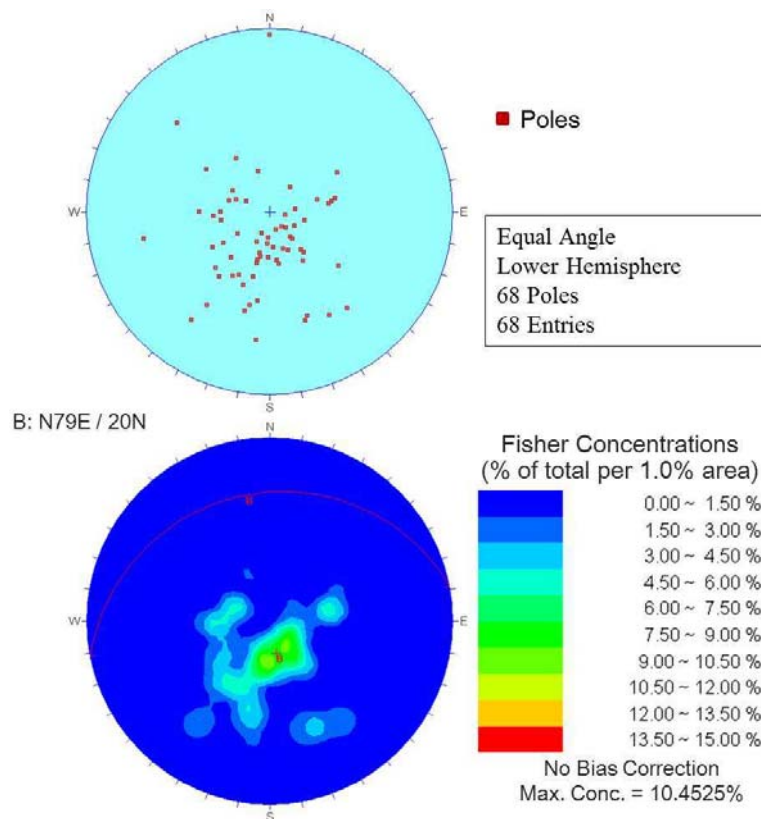


圖2.3達仁鄉建議候選場址層理位態統計成果圖(台灣電力公司, 2016)



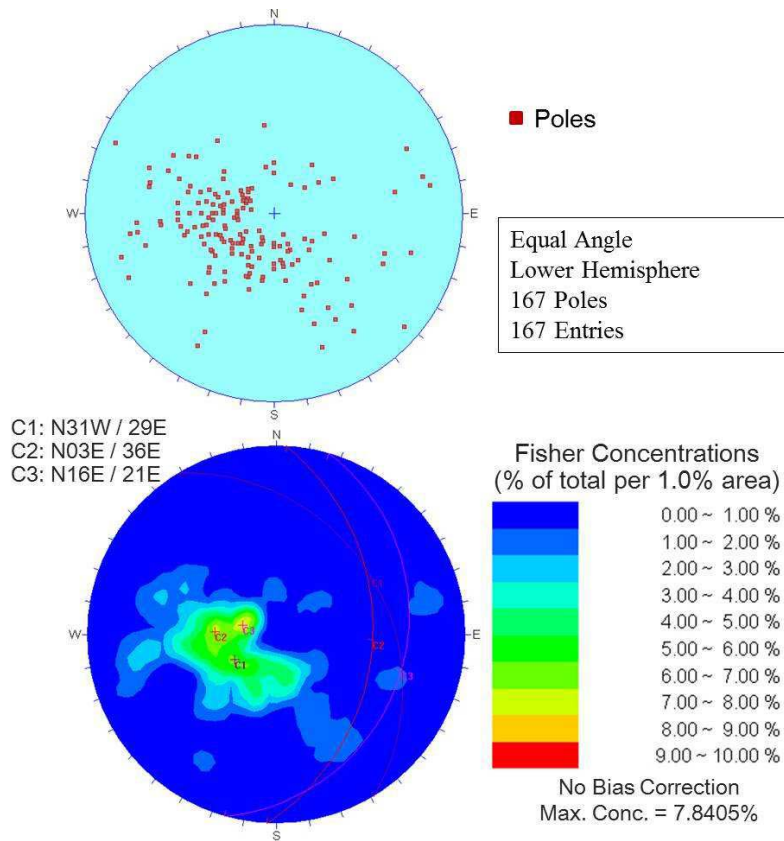


圖2.4達仁鄉建議候選場址劈理位態統計成果圖(台灣電力公司，2016)

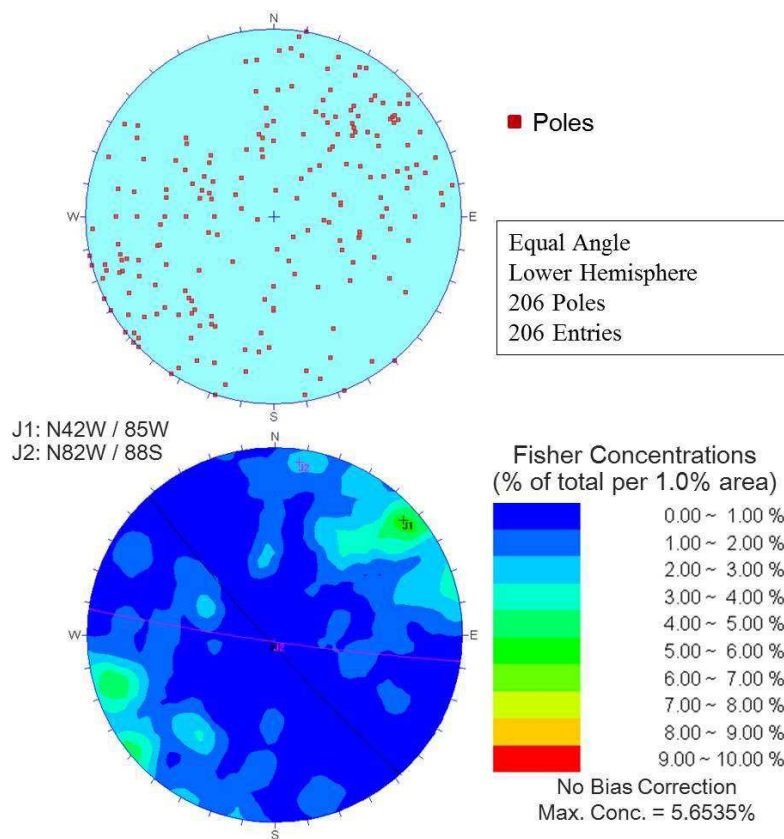


圖2.5達仁鄉建議候選場址節理位態統計成果圖(台灣電力公司，2016)

## 2. 場址區域之應力場

有關達仁建議候選場址之古應力場，Lu 等人(2001)之研究顯示，達仁建議候選場址所在區域之地層至少發生過三期主要的應力擠壓變形階段。其中，第一期為東西向的擠壓之應力，這個時期的應力造成向西伸向(west-vergent)的逆斷層作用，地層體積在逆衝作用中縮減，並在局部區域發生地層傾斜、崩移作用及褶皺現象；第二期為持續的東西向擠壓應力，此時其之應力造成了一系列向東伸向(east-vergent)的背衝斷層(back-thrust)與背衝褶皺(back-fold)，以及與前述兩種構造相關的等斜褶皺(isoclinal fold)；最後，第三期主要為橫移壓縮作用和東西向的地層體積縮減，持續造成逆斷層或褶皺，而且有一具穿透性的新期劈理出現。另外，Chang 等人(2009)之研究亦發現相似的成果。研究得知，中新世晚期至今，場址周邊地區至少經歷過三次主要應力變形期。

達仁建議候選場址區之現今應力場，呂玉菀(2004)針對全台灣之大地應力進行研究，透過震源機制資料進行 Gephart 逆推與 Michael 逆推，圖 2.6 為規模大於 3(左)及規模大於 4(右)之震源資料分區。其中，達仁場址所在之分區分別為 M3-5 及 M4-5。

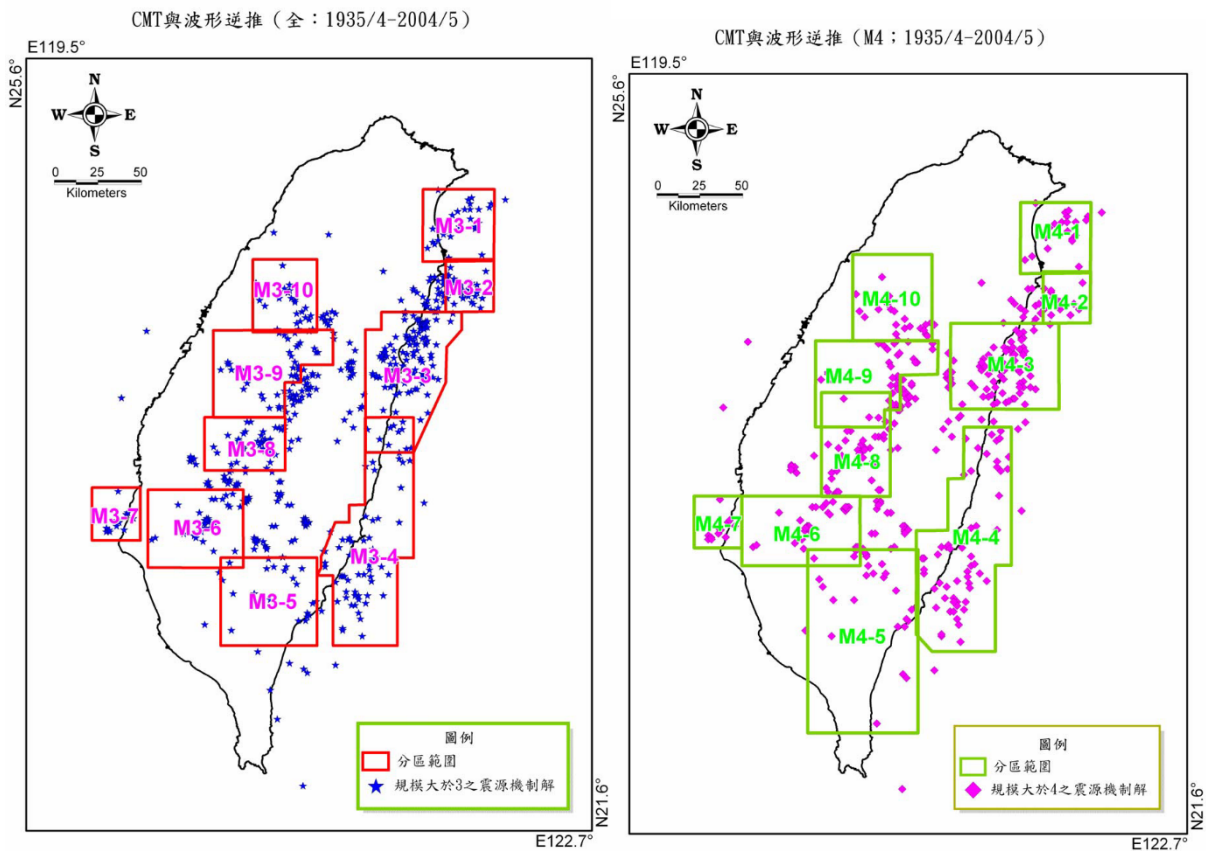


圖2.6規模大於3(左)及規模大於4(右)之震源機制所得應力分區(呂玉菀，2004)



研究結果得之，無論是使用規模大於3之地震事件進行 Gephart(圖 2.7(左))與 Michael 逆推(圖 2.7(右))，以及使用規模大於4之地震事件進行 Michael 逆推(圖 2.8)之結果，位於達仁場址附近兩個方法之逆推結果最大主應力軸方位  $\sigma_1$  皆為東—西向。

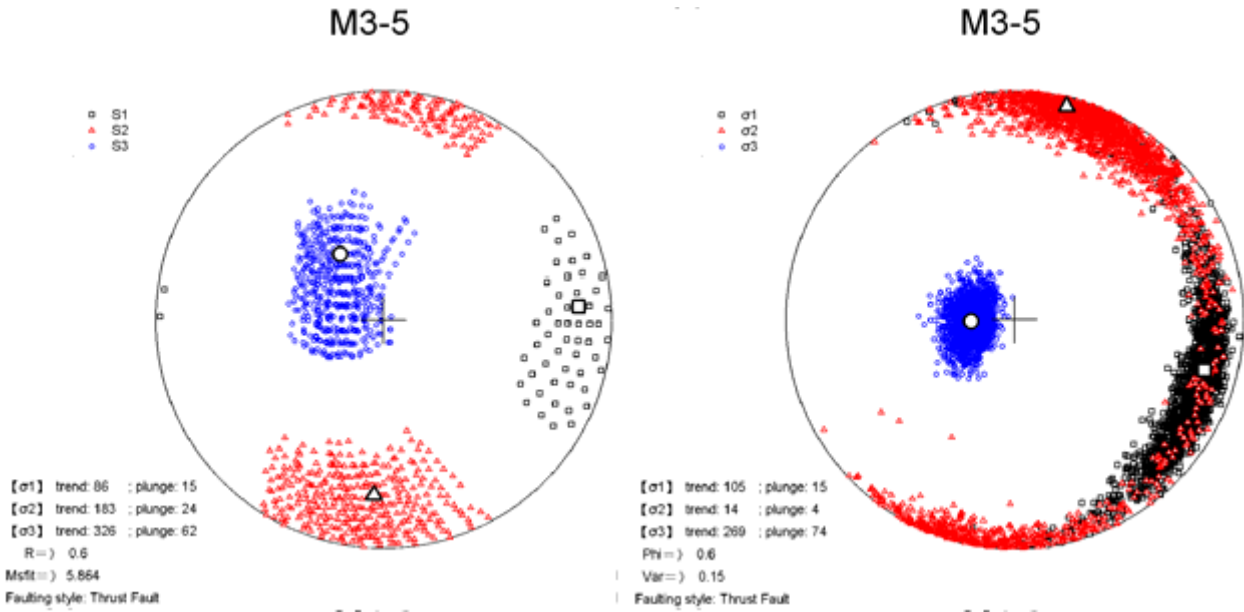


圖2.7規模大於3震源機制所得應力分區之Gephart(左)與Michael(右)應力反演結果(呂玉菀，2004)

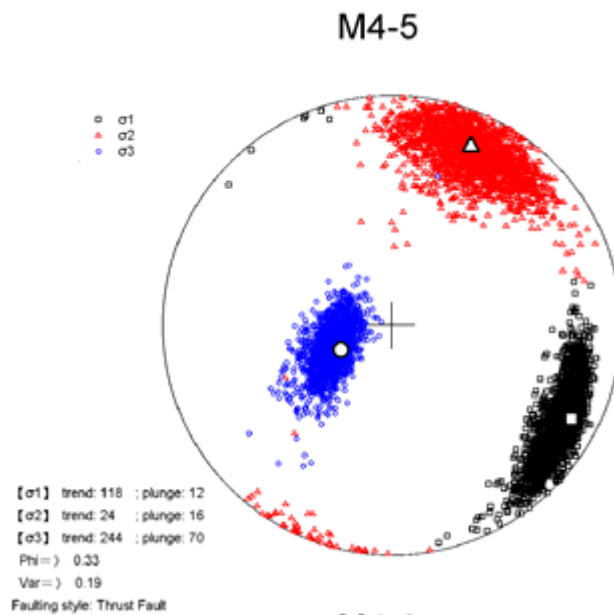


圖2.8規模大於4震源機制所得應力分區之與Michael應力反演結果(呂玉菀，2004)

## 2.2 場址鄰近地區之調查結果

本研究除了針對我國近岸建議候選處置場址進行岩盤裂隙特性調查蒐整外，亦蒐集了場址鄰近區域之資料，有關場址周圍的地質調查結果，林衍丞等人(2015)針對南迴公路草埔隧道進行地質模式之分析，研究區域如圖 2.9 所示，此隧道所在地層為中央山脈南端之潮州層，其豎井工區周圍岩性以硬頁岩為主，偶夾薄層石英砂岩或粉砂岩，地表硬頁岩風化解壓及崩解現象(slaking)較劇烈易形成鉛筆狀構造，砂岩質地堅硬呈脆性常發育有節理組。

草埔隧道所在之區域主要構造為菩安山背斜，如圖 2.10 所示，此背斜由數個背、向斜褶皺組成之一大倒轉背斜構造，東翼岩層大多以小角度向東傾斜，西翼岩層則多以高角度倒轉位態向東傾斜，整體背斜構造有向南傾沒之現象，劈理面則有向軸部漸漸發達之趨勢。隧道之工區位於該複背斜之東翼，局部有小褶皺構造發育。其中，地表地質調查結果及隧道內之地質觀察分別於 2.2.1 及 2.2.2 節中介紹。



圖2.9台9線拓寬工程示意圖，紫色虛線為草埔隧道，紅色星號為工區相對位置(改自台9線南迴公路改善後續計畫網路資訊平台<https://pweb.ceci.com.tw/vision/intro.aspx>)



圖2.10菩安山背斜(紅色實線)及其周圍之地質圖(改自「台灣南迴鐵路沿線地區板岩系地層構造研究」(胡和詹, 1984))

### 2.2.1地表地質調查結果

林衍丞等人(2015)之地質調查結果顯示，草埔隧道工區周圍岩性以厚層粉砂質硬頁岩為主，偶夾灰色細粒薄紋層石英砂岩或粉砂岩，岩層葉理發育密集，豎井周圍之層理位態與葉理位態一致，約為  $N20^{\circ}\sim 50^{\circ}W/60^{\circ}\sim 80^{\circ}NE$ 。豎井東北側出露一厚層泥質細粒砂岩，質地堅硬，其露頭位態為  $N50^{\circ}W/22^{\circ}N$ 。另外，工區東側區域為緩傾角，其位態為  $N40^{\circ}W/14^{\circ}N$ ，往西則為漸變為高傾角向東傾斜，位態約為  $N0^{\circ}\sim 10^{\circ}W/82^{\circ}\sim 86^{\circ}E$ 。本研究將以上不連續面之調查成果蒐整並繪製如圖 2.11。其中，豎井周圍層理與葉理位態將取其平均值  $N35^{\circ}W/70^{\circ}NE$ ，如圖 2.11(a)所示；圖 2.11(b)為工區東側  $N40^{\circ}W/14^{\circ}N$ ；為東區西側亦取其平均值  $N5^{\circ}W/84^{\circ}E$ ，如圖 2.11(c)所示。

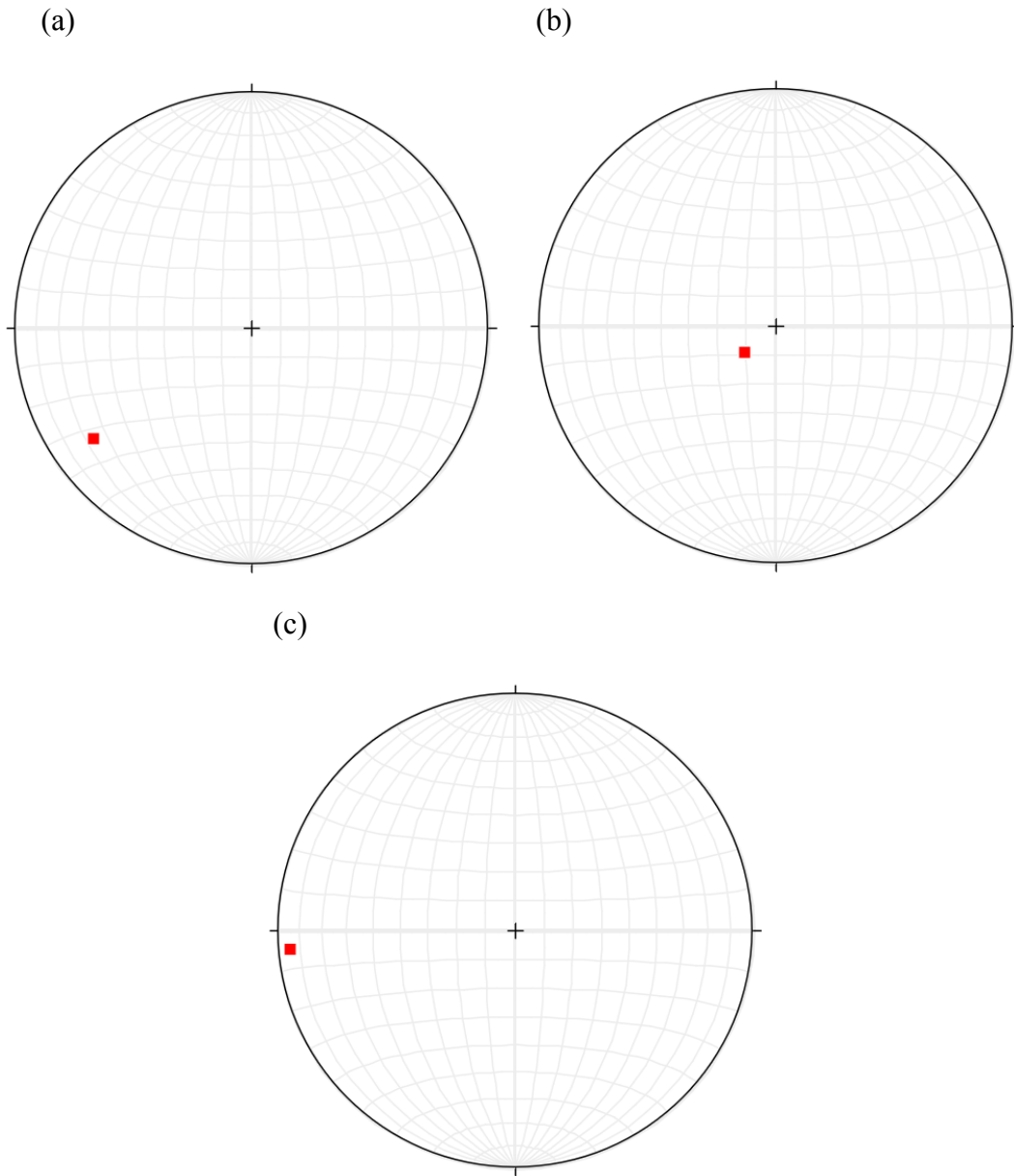


圖2.11 草埔隧道工區周圍地表地質調查結果，包含(a)豎井周圍層理與葉理平均之平均位態  $N35^{\circ}W/70^{\circ}NE$ ；(b)工區東側之不連續面位態  $N40^{\circ}W/14^{\circ}N$ ；(c)工區西側之不連續面位態平均  $N5^{\circ}W/84^{\circ}E$

## 2.2.2 隧道內地質觀察

草埔隧道進入橫坑隧道後內之岩性以硬頁岩為主偶夾粉砂岩，不連續面有葉理、層理及節理等，隧道內葉理位態主要為  $N20^{\circ}\sim 52^{\circ}W/50^{\circ}\sim 70^{\circ}N$  及  $N0^{\circ}\sim 10^{\circ}W/70^{\circ}\sim 80^{\circ}N$ ，因其常密集發育且多有夾泥情況，為控制岩體強度之主要弱面。本研究針對隧道內兩組葉理位態繪製如圖 2.12，並取其主要位態之平均，分別為  $N36^{\circ}W/60^{\circ}N$  及  $N5^{\circ}W/75^{\circ}N$ 。

另外，草埔隧道有一明顯之破碎帶，其中，於隧道內 6 號人行連絡道 T01 輪附近開挖面有一葉理極密集帶漸漸由右側出露，且隨著開挖輪進有向頂拱中央移動之趨勢，該葉理密集帶弱面間距小於 6 公分常張裂夾泥，且偶有薄層之破碎角礫夾泥間夾其中，該層於開挖初期自持力尚可，惟經開挖解壓、風化且有水之情況下，隨時間增長強度急劇下降，由地質錘即可輕易將其刮蝕，該葉理密集帶研判與剪裂帶有相當大的關係。然而，達仁建議候選場址之岩體裂隙特徵與成因與草埔隧道周圍並不全然相同，但亦須注意類似此小範圍之剪裂帶，未來在進行詳細之地質調查時，可能需要注意場址區域是否有類似之構造，在處置過程中，放射性核種很有機會從這種高水力傳導特性之破裂區傳至地表，進一步影響人類生活圈。

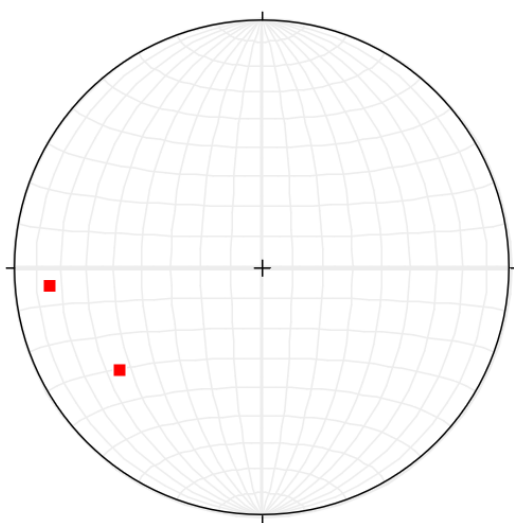


圖 2.12 隧道內葉理平均  $N36^{\circ}W/60^{\circ}N$  及  $N5^{\circ}W/75^{\circ}N$



## 2.3 綜合比較

達仁建議候選場址及草埔隧道工區相對位置示意圖如圖 2.13 所示，林衍丞等人(2015)之研究區域位於達仁場址之西側，兩處所在之地層皆為硬頁岩為主之潮州層，主要應力方向皆為東西向或近東西方向之應力場作用，並造成一系列南北走向之背斜構造。本研究將達仁場址不連續面位態資料(圖 2.3)以及草埔隧道工區之資料(圖 2.14)進行不連續面位態之比較，如圖 2.15 所示，由圖可知兩處之不連續面位態有明顯差異，主要原因可能是候選場址及其周圍區域之地質構造變化非常複雜，根據前人的研究，候選場址及其周邊之應力歷史至少就有 3 個時期的變化(Lu 等人，2001； Chang 等人，2009)，並且在此範圍造成許多褶皺。不同區域其葉理之位態分布與該區域之褶皺有非常大的關聯性。因此，達仁候選場址與草埔隧道雖相鄰，但兩處之裂隙特徵有相當程度之差異。再者，根據林衍丞等人(2015)對於坑道內之地質調查，未來欲進行處置場址之坑道開挖，也需要特別留意類似草埔隧道內之葉理密集帶以及剪裂帶，去年度計畫亦提到(圖 2.16)，水有可能透過破碎帶流至坑道壁附近，並沿著坑道軸向具有高水力傳導係數的區域流動，進一步流入與處置窖相連之裂隙，形成快速流動之通道。

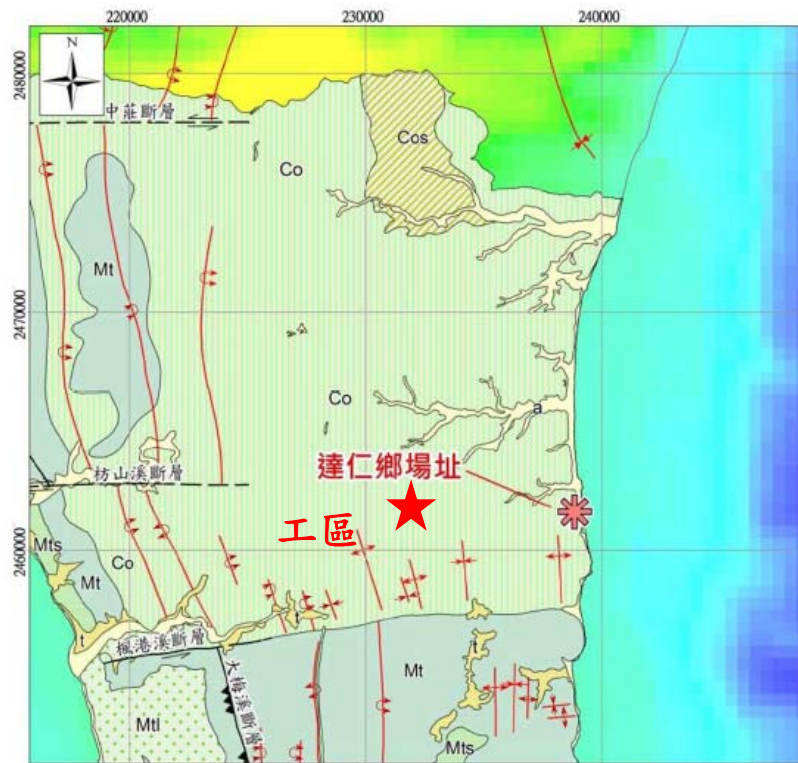


圖2.13達仁鄉建議候選場址與草埔隧道工區之相對位置示意圖(改自台灣電力公司(2016))

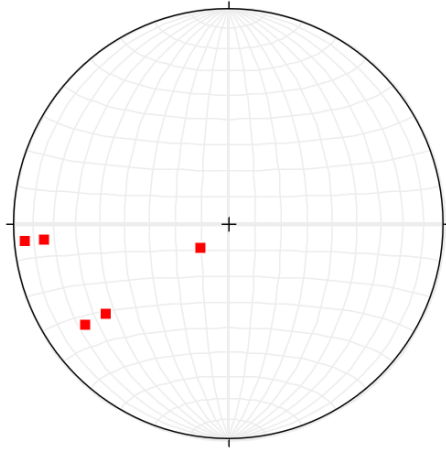


圖 2.14 草埔隧道工區豎井周圍、工區東、西側，以及隧道內之不連續面位態分布

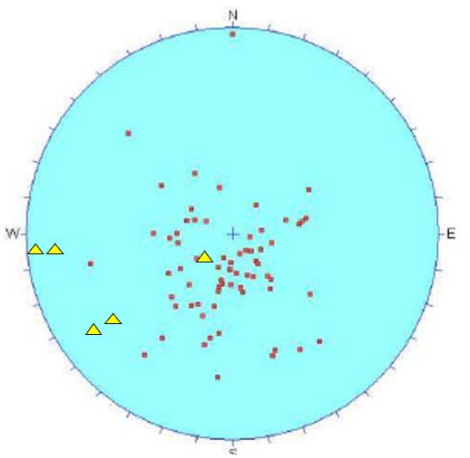


圖2.15 達仁候選場址層理位態與草埔隧道工區不連續面位態之比較(改自台灣電力公司 (2016))

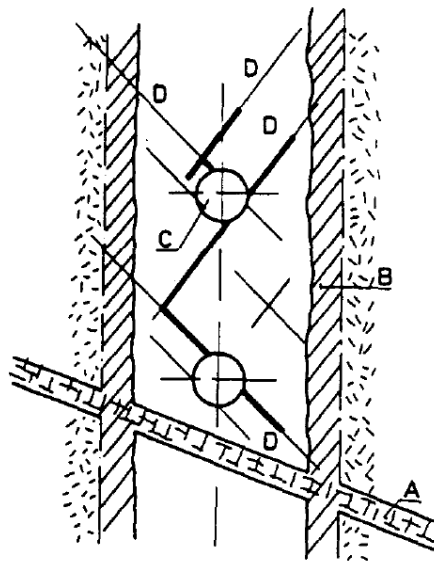


圖2.16 裂隙透過坑道開挖面周圍水力傳導係數增加通路與導水裂隙流動之原理：裂隙D與處置孔相交並作為地下水流動通路；A為水主要活動的破碎帶；B為因開炸和應力集中導致的水力傳導係數增加的區域；C為廢棄物罐處置孔。摘自Pusch (1989)

### 第三章 岩盤等效水力傳導係數評估與不確定性分析

處置窖內之放射性核種外釋至地表重要途徑之一為地下水，因此，岩體之水力傳導係數為重要之關鍵參數。前期研究發現，影響裂隙岩體水力傳導係數最鉅之參數為不連續面之水力內寬。其中，水力內寬又受到深度、不連續面之位態、不連續面之粗糙係數(*JRC*)以及不連續面單壓強度(*JCS*)等參數影響(如圖 3.1)。因此，掌握上述裂隙參數之不確定性甚為重要，尤其是對於處置設施設計與安全評估而言。本章首先介紹研究方法，包括如何透過上述影響水力內寬之參數針對場址之岩盤裂隙於不同深度條件下進行理論計算，並探討各項參數對水力內寬計算結果之敏感性。基於敏感度分析結果，第四章將設計人造場址裂隙岩體，並探討資料分析方法對降低水力內寬不確定性之效益。

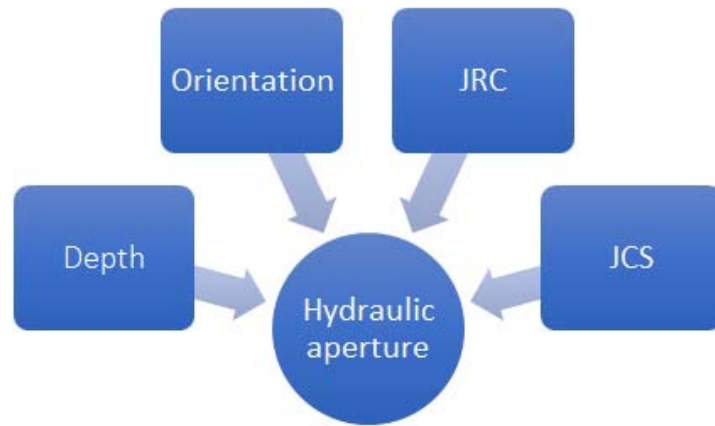


圖 3.1 本研究選擇探討影響水力內寬敏感度之參數

#### 3.1 計算水力內寬

在尚未進行詳細之場址調查之前，無法取得場址之真實水力內寬資料進行評估，因此，本研究擬於第四章透過人造案例進行水力內寬資料統計分析，並探討如何降低水力內寬之不確定性。在此之前，本章將先說明有關水力內寬之計算方式，並評估水力內寬受各參數影響之敏感度。本研究假設岩石有效單位重  $\gamma$  為  $15 \text{ kN/m}^3$ ，透過(3.1)式即可算出不同深度之垂直有效應力。再者，假設場址之垂直應力和水平應力之比值為 1.6，即可透過(3.1)及(3.2)式求得不同深度之水平有效應力。



$$\sigma_v = \gamma Z \quad (3.1)$$

$$\sigma_h = K\sigma_v \quad (3.2)$$

岩體承受之應力張量各分量可以(3.3)式表示，其中  $z$  為垂直方向， $x$  與  $y$  則位於水平面，最小與最大主應力方向位於垂直與水平方向，水平方向主應力相同：

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

不連續面上之空間分布通常以走向(strike) $\beta$  與傾角(dip) $\gamma$  表示，如圖 3.2 所示。其中，走向  $\beta$  表示某一不連續面與地平面交線與北之夾角，傾角  $\gamma$  則表示該不連續面在垂直走向方向之傾角。因此不連續面上的局部座標單位向量  $\tilde{n}$ 、 $\tilde{s}$  及  $\tilde{t}$ ，可表示為走向  $\beta$  及傾角  $\gamma$  兩者之函數如(3.4)式至(3.6)式：

$$\tilde{s} = \sin\beta\tilde{i} + \cos\beta\tilde{j} \quad (3.4)$$

$$\tilde{t} = \cos\beta\cos\gamma\tilde{i} - \sin\beta\cos\gamma\tilde{j} - \sin\gamma\tilde{k} \quad (3.5)$$

$$\tilde{n} = \tilde{s} \times \tilde{t} = -\cos\beta\sin\gamma\tilde{i} + \sin\beta\sin\gamma\tilde{j} - \cos\gamma\tilde{k} \quad (3.6)$$

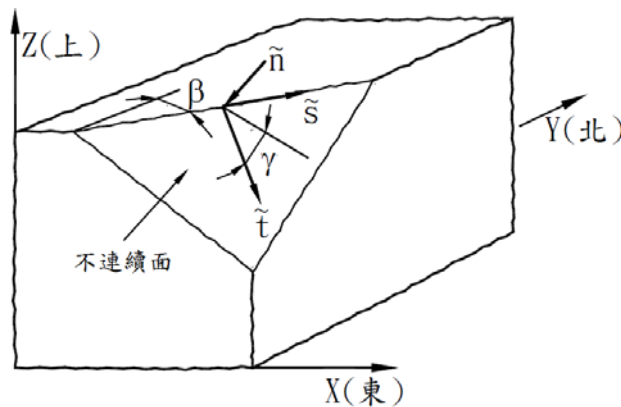


圖 3.2 不連續面座標系統之定義

透過(3.7)式可將大域座標轉換至局部座標，產生出不同深度不連續面之正向應力  $\sigma_n$  與兩組剪應力  $\tau_s$ 、 $\tau_t$ 。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_s \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(n,i) & \cos(n,j) & \cos(n,k) \\ \cos(s,i) & \cos(s,j) & \cos(s,k) \\ \cos(t,i) & \cos(t,j) & \cos(t,k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & n_y & 0 & n_z \\ 0 & n_y & 0 & n_x & n_z & 0 \\ 0 & 0 & n_z & 0 & n_y & n_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

由(3.7)式得到所有不連續面之正向應力與剪應力後，可透過 Barton-Bandis Model(式(3.8)至式(3.13))推估裂隙於不同應力條件下之力學內寬，公式之說明可參考原能會物管局(2017)第 4.1 節「分析方法」。

$$t_0 = \frac{JRC_0}{5} (0.2 \frac{\sigma_c}{JCS_0} - 0.1) \quad (3.8)$$

$$K_0 = 0.02 \left( \frac{JCS_0}{t_0} \right) + 2JRC_0 - 10 \quad (3.9)$$

$$b_n^m = -0.3 - 0.006JRC_0 + 2.24 \left( \frac{JCS_0}{t_0} \right)^{-0.25} \quad (3.10)$$

$$E = t_0 - \frac{A\sigma_n}{1+B\sigma_n} \quad (3.11)$$

$$A = \frac{1}{K_0} \quad (3.12)$$

$$B = \frac{A}{b_n^m} \quad (3.13)$$

其中， $t_0$  為初始開口寬、 $JRC_0$  為岩石之不連續面粗糙係數、 $JCS_0$  為不連續面單壓強度、 $\sigma_c$  為完整岩石單壓強度、 $K_0$  為初始正向勁度、 $b_n^m$  為不連續面內寬最大閉合量、 $E$  為力學內寬。

透過上述之公式求得力學內寬後，最後利用 Barton 建議之力學內寬與水力內寬轉換式(3.14)，即可求得每個裂隙於不同深度之水力內寬  $e$ 。

$$e = \frac{E^2}{JRC^{2.5}} \quad (3.14)$$

## 3.2 影響水力傳導係數之參數敏感性分析

前期研究成果發現(原能會物管局, 2017), 影響水力傳導係數之參數包含不連續面密度、裂隙長度以及水力內寬等。其中又以水力內寬對於水力傳導係數之敏感性最為顯著(水力傳導係數與水力內寬三次方成正比)。再者, 水力內寬受到深度、不連續面位態、不連續面之粗糙係數( $JRC$ )以及不連續面單壓強度( $JCS$ )等參數影響。為了要有效獲得場址之水力傳導係數, 必須能充分掌握水力內寬, 因此, 本節將針對影響水力內寬之相關參數進行分析及探討。

本節將透過 3.1 節之 Barton-Bandis Model 之方法, 推估裂隙於不同應力條件下之力學內寬, 再透過力學內寬與水力內寬之轉換式求得水力內寬。本研究之前期研究成果中, 已針對水力內寬之敏感度分析有初步成果(原能會物管局, 2017), 圖 3.3 分別為  $JRC$  及  $JCS$  對於水力內寬之敏感度, 由結果可知, 水力內寬受不連續面單壓強度影響之敏感度較高。

本研究首先假設影響水力內寬之三個參數為定值, 分別為不連續面位態、不連續面之粗糙係數( $JRC$ )以及不連續面單壓強度( $JCS$ ), 並根據(3.1)及(3.2)式以每 20 公尺為單位計算地表至地下 500 公尺之水平及垂直應力狀態, 求得水力內寬隨深度變化之關係, 其中不連續面位態之傾角為  $30^\circ$ , 不連續面之粗糙係數( $JRC$ )為 10, 不連續面單壓強度( $JCS$ )為 100 MPa, 結果如圖 3.4 所示。由圖可知, 水力內寬在近地表 100 公尺內變化較劇烈, 而深度超過 100 公尺後, 水力內寬變化趨緩。進一步改變參數組合, 圖 3.5 至圖 3.7 分別為不連續面位態(傾角分別為  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ )、不連續面之粗糙係數( $JRC=5$ 、 $10$ 、 $15$ )以及不連續面單壓強度( $JCS=50$ 、 $100$ 、 $150$  MPa)對不同深度裂隙之水力內寬影響。由結果可知, 不連續面之位態對於水力內寬影響最小, 而不連續面單壓強度( $JCS$ )對於水力內寬影響最大。因此, 我們進一步探討  $JCS$  影響水力內寬較明顯之原因。

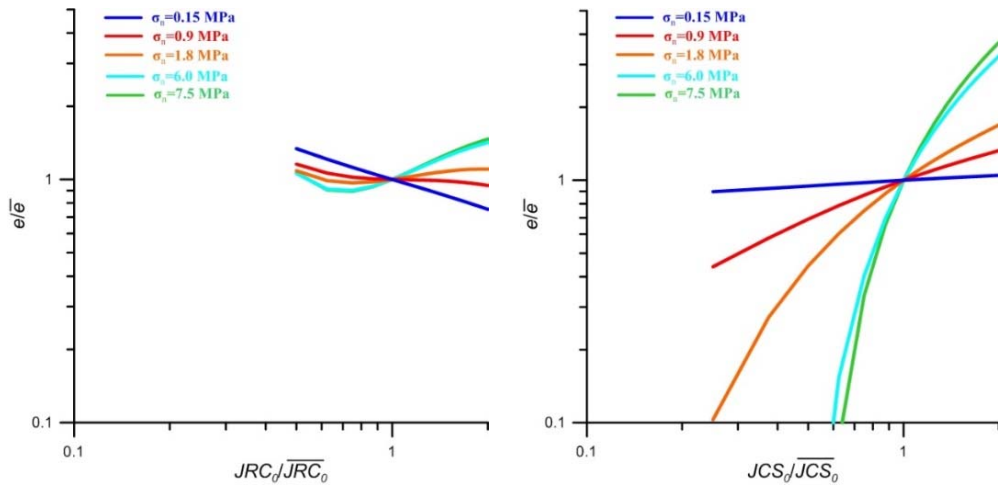


圖 3.3 不連續面之粗糙係數( $JRC$ )(左)及不連續面單壓強度( $JCS$ )(右)對於水力內寬之敏感度(摘自原能會物管局(2017))

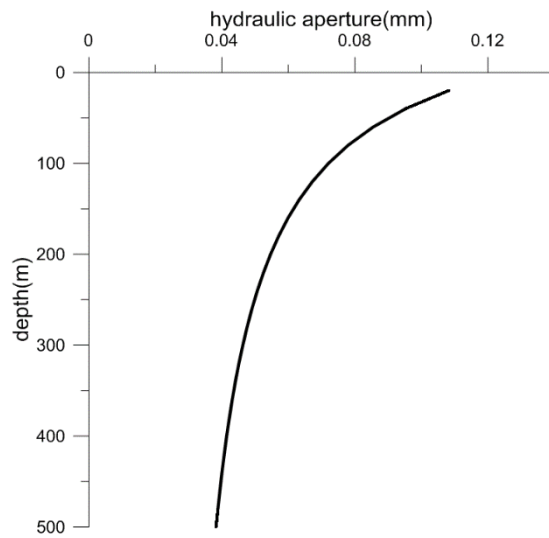


圖 3.4 不連續面之位態、 $JRC$ 、 $JCS$  為定值之水力內寬隨深度變化

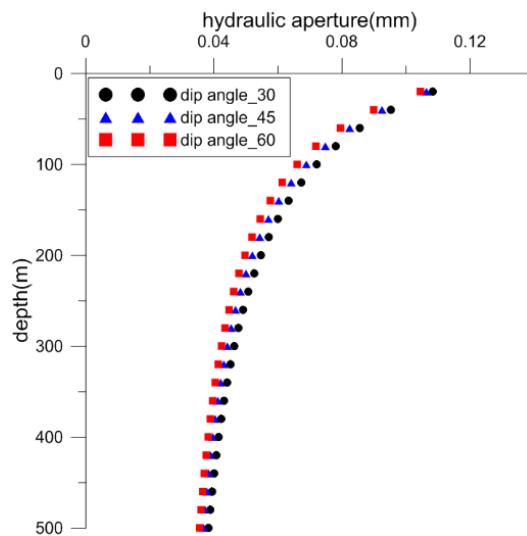


圖 3.5  $JRC$ 、 $JCS$  為定值，改變不連續面位態(傾角=30°、45°、60°)之水力內寬隨深度變化

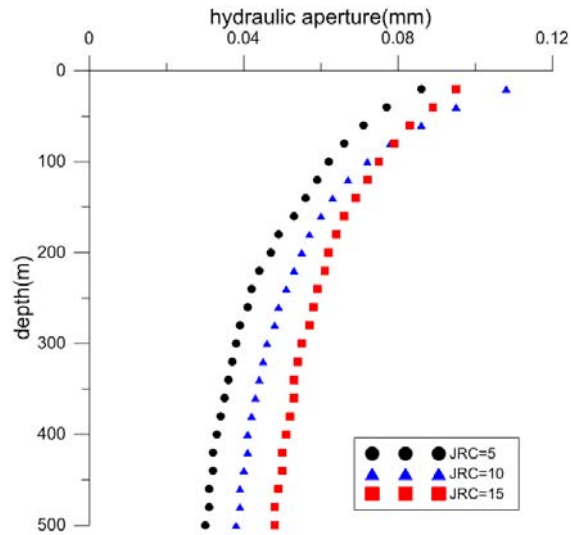


圖 3.6 不連續面位態、 $JCS$  為定值，改變不連續面之粗糙係數( $JRC=5$ 、 $10$ 、 $15$ )之水力內寬隨深度變化

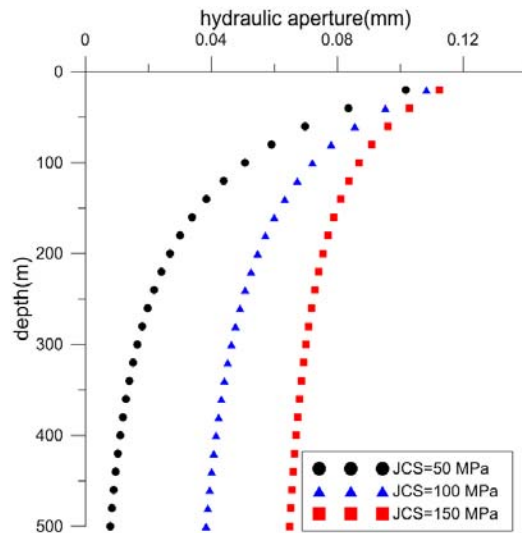


圖 3.7 不連續面位態、 $JRC$  為定值，改變不連續面單壓強度( $JCS=50$ 、 $100$ 、 $150$  MPa)之水力內寬隨深度變化

根據 3.1 節之方法，欲求得水力內寬，首先需透過 Barton-Bandis Model 計算力學內寬，再透過水力內寬與力學內寬之轉換式(式(3.14))求得水力內寬。因此，我們先探討不連續面之粗糙係數( $JRC$ )及不連續面單壓強度( $JCS$ )對於力學內寬之影響， $JRC$  及  $JCS$  之函數中，初始開口寬  $t_0$ 、初始正向勁度  $K_0$  及不連續面內寬最大閉合量  $b_n^m$ ，均為影響水力內寬之重要參數。首先，假設岩石單壓強度等於不連續面單壓強度( $JCS$ )，即  $\sigma_c = JCS$ ，並帶入(3.8)式，分別計算不連續面之粗糙係數( $JRC$ )等於  $5$ 、 $10$ 、 $15$  時，初始開口寬與不連續面單壓強度( $JCS$ )之關

係(圖 3.8)。由圖可知，當不連續面之單壓強度( $JCS$ )與岩石單壓強度相同時，初始開口寬與不連續面之粗糙係數( $JRC$ )成正比。得到初始開口寬後，將其結果分別帶入(3.9)式及(3.10)式，即可得到在不同不連續面之粗糙係數( $JRC$ )情況下， $JCS_0$ 與初始正向勁度  $K_0$ (圖 3.9)及不連續面內寬最大閉合量 $b_n^m$ (圖 3.10)之關係。由圖 3.9 可知，當  $JRC$  越小時，其斜率越大，即初始正向勁度易隨  $JCS_0$  增加而增加。不連續面內寬最大閉合量 $b_n^m$ 方面，其值隨  $JCS_0$  增加而下降。其中， $JRC$  越低，其最大閉合量越小。

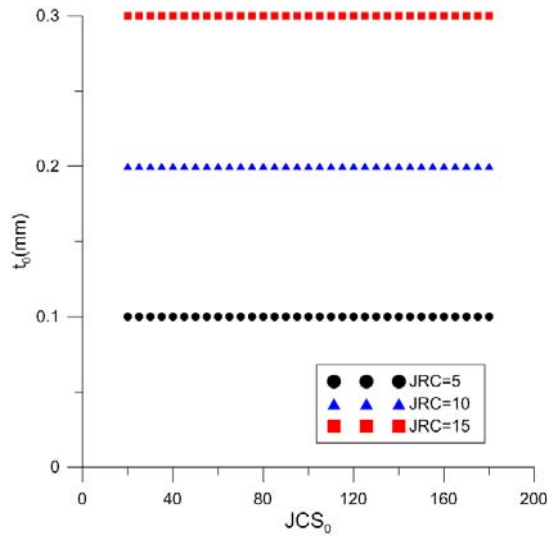


圖 3.8 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時，不同  $JRC(5、10、15)$  的情況下， $JCS_0$ 與初始開口寬  $t_0$ 之關係

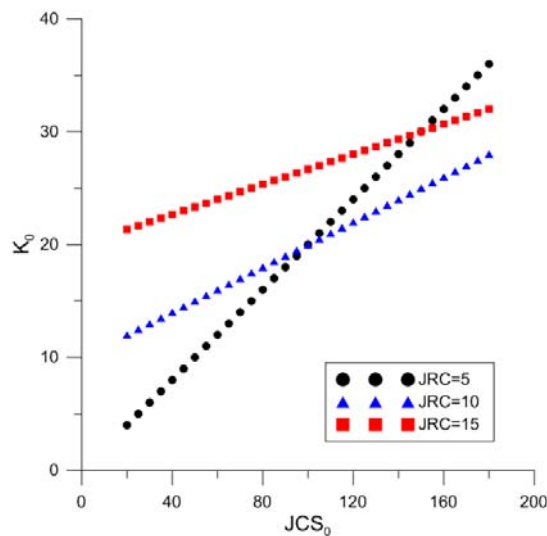


圖 3.9 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時，不同  $JRC(5、10、15)$  的情況下， $JCS_0$ 與初始正向勁度  $K_0$ 之關係

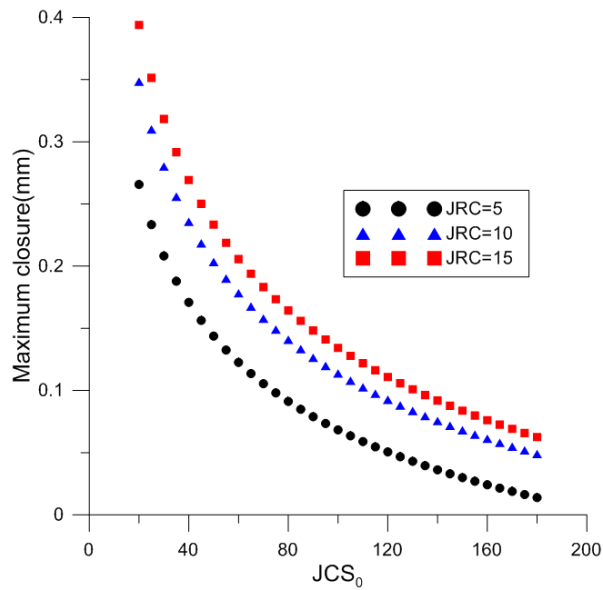


圖 3.10 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時，不同  $JRC$ (5、10、15)的情況下， $JCS_0$ 與不連續面內寬最大閉合量 $b_n^m$ 之關係

我們進一步將  $JRC$  及  $JCS$  分別設定為 5、10 及 15 和 50 MPa、100 MPa 及 150MPa，分別帶入 Barton-Bandis Model 求得初始開口寬  $t_0$ 、初始正向勁度  $K_0$  及不連續面內寬最大閉合量  $b_n^m$ ，如表 3.1 所列，並可透過這些參數進一步得到不同正向應力  $\sigma_n$  下之力學內寬之關係，如圖 3.11 至圖 3.14。由圖可知，在同深度下，力學內寬受到  $JRC$  大小所影響， $JRC$  越大，力學內寬也越大。而  $JCS$  影響不同深度下力學內寬變化之程度，以  $JRC=10$  為例，當正向應力  $\sigma_n$  接近為 0 時，力學內寬皆接近 0.2mm，當正向應力  $\sigma_n=10\text{MPa}$  時， $JCS=50\text{MPa}$  這個結果變化幅度較大，力學內寬已降至 0.05mm，而  $JCS=150\text{MPa}$  之力學內寬接近 0.15mm，可見對於力學內寬而言， $JRC$  影響較  $JCS$  大。求得力學內寬後，可透過(3.14)式將力學內寬轉換為水力內寬。圖 3.15 至圖 3.18 為力學內寬轉換至水力內寬之結果，由於受到轉換式之影響，使得  $JRC$  之影響下降，造成水力內寬受到  $JCS$  之影響較  $JRC$  大，這也說明了為何圖 3.6 及圖 3.7 之結果顯示  $JCS$  對於水力內寬之影響較  $JRC$  來的大。另外，由圖 3.18 可發現， $JRC$  對水力內寬之影響將受到  $JCS$  值大小所控制，當  $JCS$  愈大(由 50MPa 增加至 150MPa)， $JRC$  對水力內寬之影響將下降。

表 3.1 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時，計算力學內寬之輸入參數

	$JRC=5$	$JRC=10$	$JRC=15$
$JCS=50MPa$	$t_0=0.1\text{ mm}$ $K_0=10MPa/mm$ $b_n^m=0.144\text{ mm}$	$t_0=0.2\text{ mm}$ $K_0=15\text{ MPa/mm}$ $b_n^m=0.203\text{ mm}$	$t_0=0.3\text{ mm}$ $K_0=23.3\text{ MPa/mm}$ $b_n^m=0.233\text{ mm}$
$JCS=100MPa$	$t_0=0.1\text{ mm}$ $K_0=20\text{ MPa/mm}$ $b_n^m=0.068\text{ mm}$	$t_0=0.2\text{ mm}$ $K_0=20\text{ MPa/mm}$ $b_n^m=0.114\text{ mm}$	$t_0=0.3\text{ mm}$ $K_0=26.6\text{ MPa/mm}$ $b_n^m=0.134\text{ mm}$
$JCS=150MPa$	$t_0=0.1\text{ mm}$ $K_0=30\text{ MPa/mm}$ $b_n^m=0.030\text{ mm}$	$t_0=0.2\text{ mm}$ $K_0=25\text{ MPa/mm}$ $b_n^m=0.068\text{ mm}$	$t_0=0.3\text{ mm}$ $K_0=23.3\text{ MPa/mm}$ $b_n^m=0.084\text{ mm}$

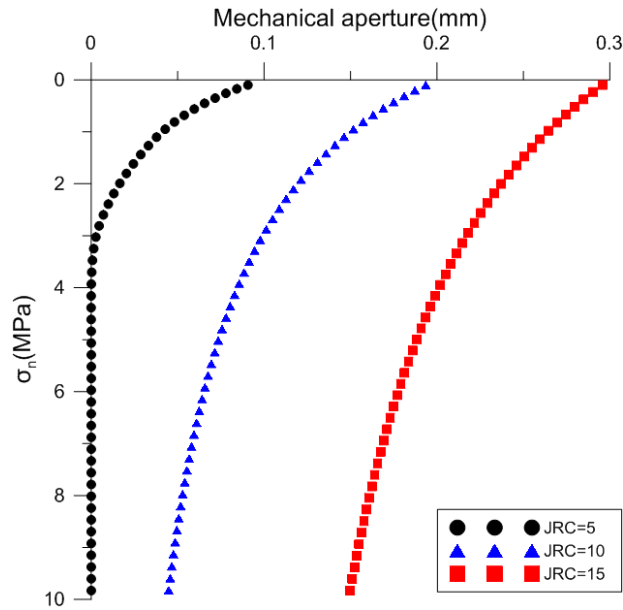


圖 3.11 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時， $JCS=50MPa$  時，力學內寬隨正向應力  $\sigma_n$  改變之結果

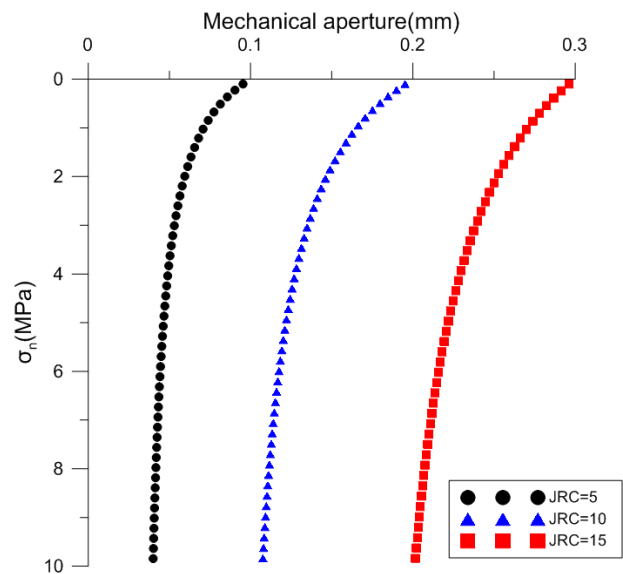


圖 3.12 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時， $JCS=100MPa$  時，力學內寬隨正向應力  $\sigma_n$  改變之結果



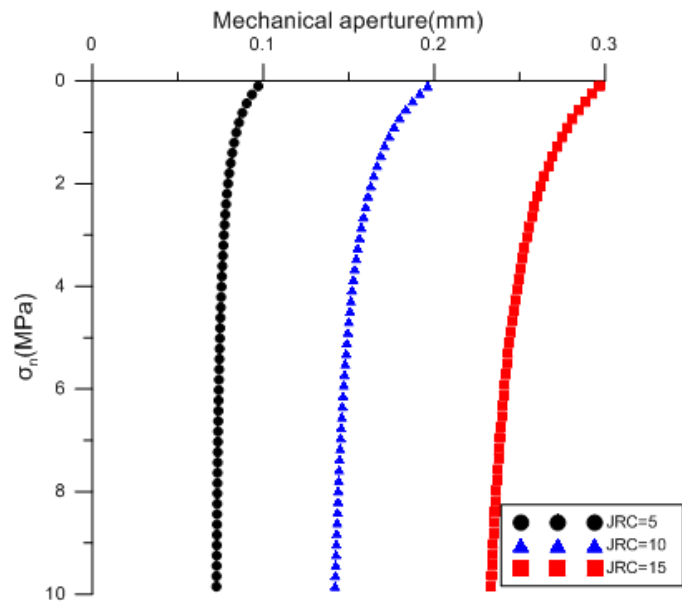


圖 3.13 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時,  $JCS=150\text{MPa}$ , 力學內寬隨正向應力  $\sigma_n$  改變之結果

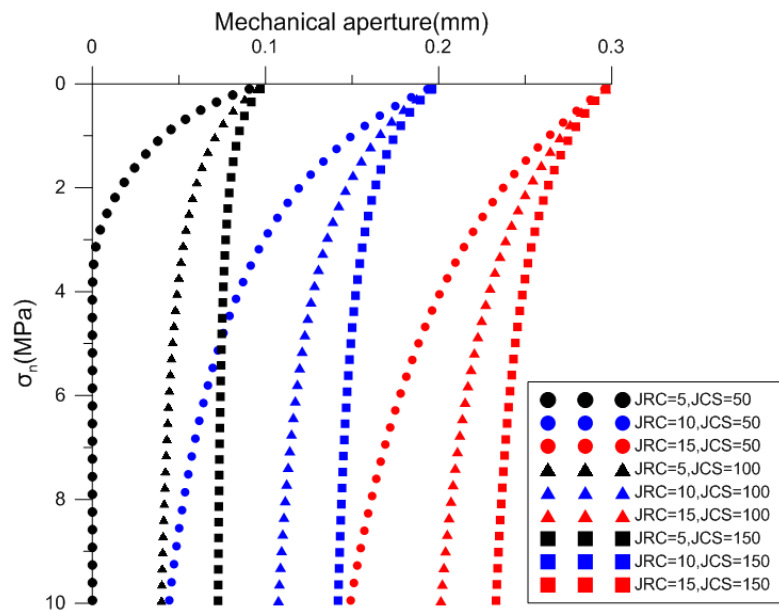


圖 3.14 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時, 力學內寬隨正向應力  $\sigma_n$  改變之結果

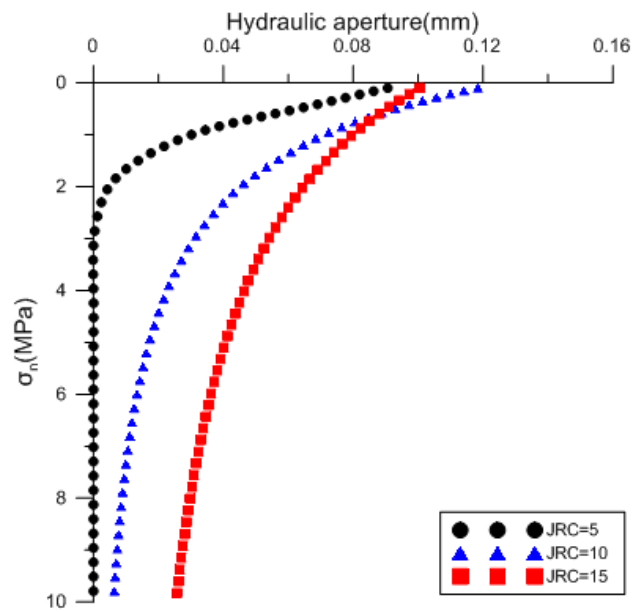


圖 3.15 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時， $JCS=50\text{MPa}$ ，水力內寬隨正向應力  $\sigma_n$  改變之結果

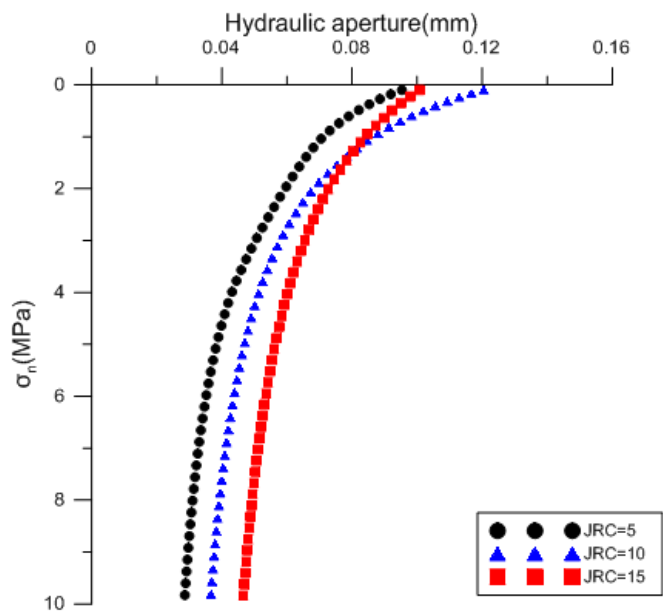


圖 3.16 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時， $JCS=100\text{MPa}$ ，水力內寬隨正向應力  $\sigma_n$  改變之結果

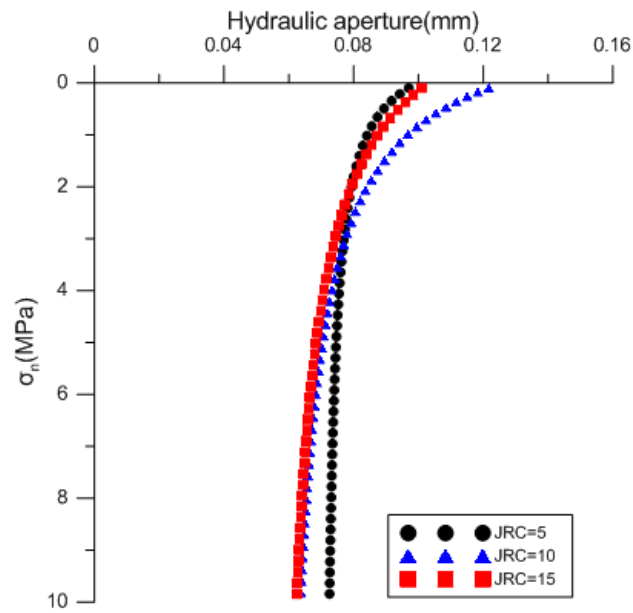


圖 3.17 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時， $JCS=150\text{MPa}$ ，水力內寬隨正向應力  $\sigma_n$  改變之結果

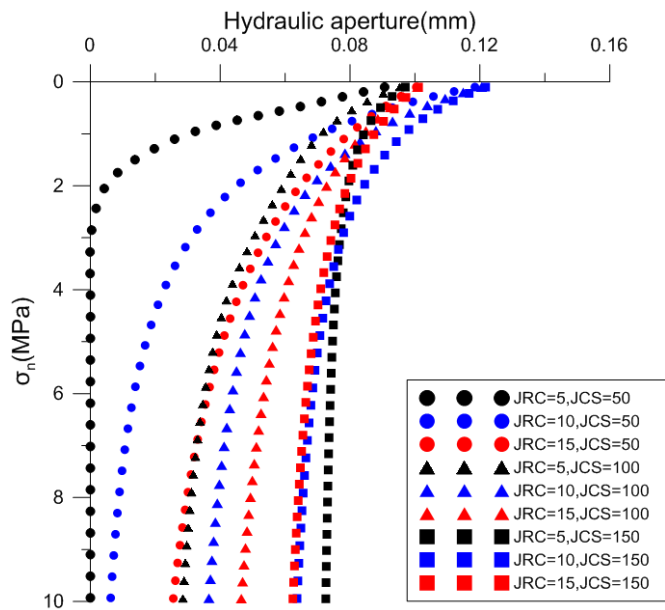


圖 3.18 假設岩石單壓強度( $\sigma_c$ )等於不連續面單壓強度( $JCS$ )時，水力內寬隨正向應力  $\sigma_n$  改變之結果

## 第四章 等效水力傳導係數現地試驗方法資料解析

現地試驗求取水力傳導係數、導水係數或水力內寬之結果，受到許多因素影響，使用不同的現地試驗方法得到之結果可能會有所差異，使用不同的分析分法也可能會影響結果。本章將以前兩章之研究成果為基礎，透過蒐集我國近岸建議候選處置場址之現地量測裂隙參數，並且配合 Barton-Bandis Model，人工假設出與處置場址岩體相仿之不同深度的多組裂隙資料，進一步得到大量水力內寬之資料。有了這些資料，透過不同資料分析統計方法(例如考慮深度，或使用多變數)，以評估各種分析方法對於降低水力內寬不確定性之效益。本章 4.1 節首先介紹影響水力參數之水力試驗方法；4.2 節介紹由水力試驗得到的參數進一步轉換成水力內寬之方法；4.3 節利用可取得之裂隙特性資料，人工產生裂隙組，並於 4.4 至 4.7 節中介紹利用不同模型進行分析。

### 4.1 現地水力試驗優缺點及適合之條件

處置單位在進行場址之地質探勘時，選擇使用不同的水力試驗方法將會影響所蒐集到之資料結果，進一步影響水力參數之不確定性。一般現地單孔水力試驗有四種試驗方法獲得裂隙岩體之水力參數，包含定流量試驗(constant-flow tests)、定水頭試驗(constant-head tests)、微水試驗(slug tests)以及壓力脈衝試驗(pressure pulse tests)等。上述之試驗方法各有其優缺點，例如定流量試驗係將抽水馬達置入試驗區段，在定量流下將水從試驗區抽出，所得到之透水係數可代表較大的水文地質區域性質，但此方法之缺點為需要知到抽水量，且在低滲透性岩體操作時實驗易失敗。因此，上述試驗方法之選擇通常依據幾項考量，包含試驗區段所期望的水力傳導能力(地質條件)、採樣的岩石體積、可支配時間(計畫費用考量)以及設備儀器，許世孟等人(2006)整理出針對此四種單井水力試驗方法之簡介，以及其優缺點比較，如表 4.1 所示。並且同時整理出此四種試驗適合施作的地質條件狀況，如表 4.2 所示。未來處置單位進行場址調查時，應慎重的選擇水力試驗之方法，也可供管制單位於審查時之參考依據。

表 4.1 單井水力試驗方法簡介及優缺點比較(摘自許世孟等人(2006))

方法種類	方法簡介	方法優缺點比較	
		優點	缺點
定流量試驗	將抽水馬達置入試驗區段，在定量流下將水從試驗區抽出。	所得透水係數可代表較大的水文地質區域性質。	(1)需知抽水量。 (2)在低滲透性岩體，實驗易失敗。
定水頭試驗	在固定水頭下，從測試區間注水。	井徑大小的效應不太影響試驗結果。	所得透水係數代表較小的試驗岩體。
微水試驗	快速的抬升或降低套管的水位，然後觀測水位之恢復行為直到水位到達平衡。	試驗時間短。	(1)所得透水係數代表較小的試驗岩體；(2)如低滲透性岩體及大管徑都導致試驗時間攏長。
壓力脈衝試驗	快速注入一定量水，並施加一額外水壓，然後觀測水位恢復直到水位到達平衡位置。	縮短試驗時間，取代微水試驗。	所得透水係數代表較小的試驗岩體。

表 4.2 單井水力試驗適合施作之地質條件(摘自許世孟等人(2006))

方法種類	水力試驗合適之地質狀況
定流量試驗	高滲透性含水層
定水頭試驗	最適低滲透性含水層，其它亦可
微水試驗	中及低滲透性含水層
壓力脈衝試驗	非常低滲透性的含水層

## 4.2 現地水力試驗參數轉換水力內寬

當要進行裂隙岩體之流場分析時，無論是使用 DFN 模型或是擬連續體模式，水力內寬都會是最重要之參數之一。要獲得現地裂隙岩體之水力內寬資料並非易事，主要為識別水流經之裂隙種類與數量困難，且其不確定性相當高。欲得到現地裂隙岩體之水力內寬，主要還是依據現地水力試驗。過去一些研究，由現地水力試驗資料轉換成水力內寬的方式，大致可分為兩類：(1)等效孔隙介質(Equivalent Porous Media, EPM)分析、與(2)平行板(parallel plate, PP)分析，前者利用試驗區段之水力傳導係數、後者利用試驗區段之導水係數(Transmissivity, T)，進一步計算水力內寬。

### 1. 等效孔隙介質(Equivalent Porous Media, EPM)

等效孔隙介質(Equivalent Porous Media, EPM)方法，主要乃根據 Snow (1968)所建議之水力內寬-滲透率與不連續面間距關係進行轉換，關係式如下(4.1)式：

$$2b = \sqrt[3]{6k\Delta} \quad (4.1)$$

其中， $k$ 為內在滲透係數( $L^2$ )； $\Delta$ 為間距( $L$ ) (=1/裂隙頻率)。以 Rutqvist(2015)為例(圖 4.1)說明，透過水力試驗中可得各試驗區間的滲透率(圖 4.1(左))，並且結合裂隙頻率資料(圖 4.1(中))，即可利用公式計算得各區間水力內寬值(圖 4.1(右))。

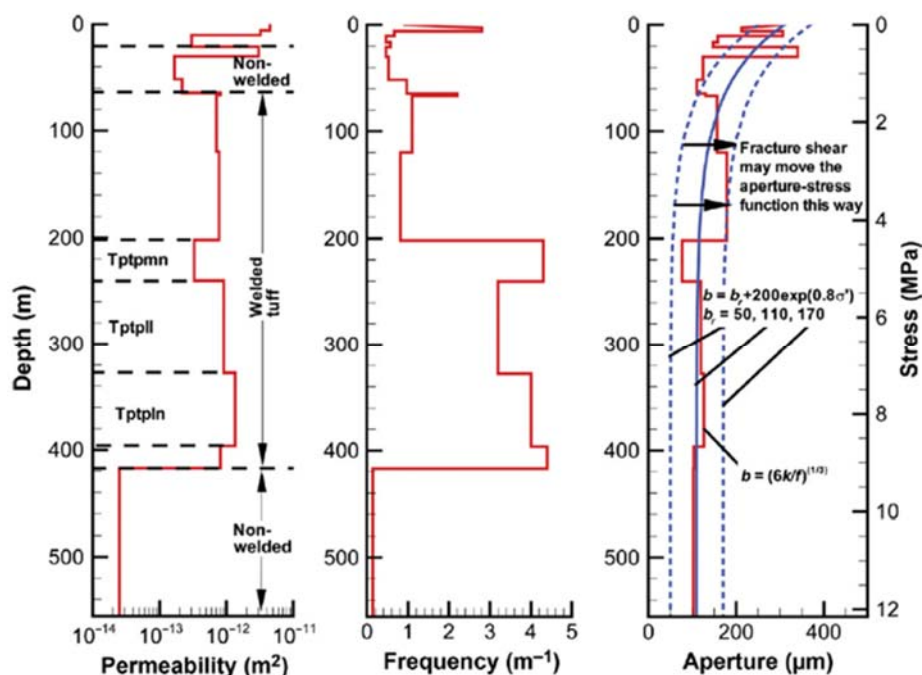


圖 4.1 試驗區間的滲透率(左)；裂隙頻率(中)；各區間水力內寬值(右)(Rutqvist, 2015)

## 2. 平行板(parallel plate, PP)

平行板(parallel plate, PP)分析方法，乃是依據鑽孔中某一區段進行水力試驗，測量區段內一條或數條裂隙之導水係數，並透過(4.2)式至(4.4)式與水力內寬相關之立方定律(cubic law)(Snow, 1965)進一步得到水力內寬。

$$T = KL = \frac{\rho g(2b)^3}{12\mu} (N) \quad (4.2)$$

$$T_f = \frac{T}{N} = K_f 2b = \frac{\rho g(2b)^3}{12\mu} \quad (4.3)$$

$$2b = \sqrt[3]{\frac{12\mu T_f}{\rho g}} \quad (4.4)$$

其中， $2b$  為假設平滑平行板( $L$ )之水力內寬； $\mu$ 是水的絕對黏度(M/LT)； $\rho$ 是水的密度(M/L<sup>3</sup>)； $N$ 是測試區段中水流經裂隙的數量； $g$ 為重力加速度(L/T<sup>2</sup>)； $K$ 為導水率(L/T)； $T$ 為導水係數(L<sup>2</sup>/T)。經由現地水力試驗，我們可得各試驗區間的導水係數  $T$ ，除以每段試驗區間內裂隙數目後得 $T_f$ ，並藉由立方定律關係式轉換為單一不連續面水力內寬值。

不同水力試驗方法有不同轉換公式，以 Quinn (2011)的階段式定水頭試驗為例，將不同時間段的注水速率與水頭差作圖連線後(圖 4.2)，取其斜率帶入 Thiem equation(4.5)式中，即可得到導水係數。

$$T = \frac{Q}{2\pi\Delta H} \ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right) \quad (4.5)$$

其中， $Q$ 為流量(L<sup>3</sup>/T)； $\Delta H$ 為水頭周圍之變化(L)； $r_0$ 為測試的影響半徑(L)； $r_w$ 為鑽井之半徑(L)。

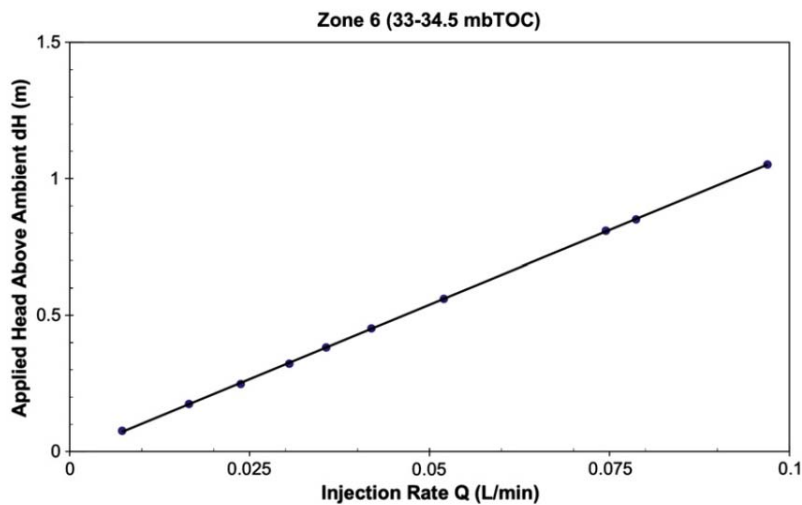


圖 4.2 不同時間段的注水速率與水頭差(Quinn, 2011)

### 4.3 假設案例

在實際的情況下，場址之地質調查將包括地下探查，並利用鑽井進行水力試驗已取得水力參數。在尚未能取得實際鑽井之水力參數資料前，本研究透過假設案例設計，以接近場址地質狀態之參數，透過既有經驗模式，計算產生不同岩性、不同組數不連續面、不同深度與參數條件下之不連續面之水力內寬資料。使用之參數以及研究方法如前兩章所述，本研究假設兩個深度 600 公尺之鑽井，兩口鑽井皆為板岩和砂岩交錯，Borehole A 由上而下分別為板岩-砂岩-板岩-砂岩，Borehole B 為砂岩-板岩-砂岩-板岩，各岩層厚度設定為 150 公尺，裂隙方位參考「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司，2016)有關達仁建議候選場址之調查成果，Borehole A 包含兩組劈理(C1:N31W/29E、C3:N16E/21E)及一組節理(J2:N82W/88S)，Borehole B 使用了一組劈理(C2:N3E/36E)及一組節理(J1:N42W/85W)。再者，岩石之不連續面粗糙係數(*JRC*)及不連續面單壓強度(*JCS*)參考 Bandis 等人(1983)研究中所提之不同岩性的範圍，岩石之不連續面粗糙係數(*JRC*)方面，砂岩為 5~15，板岩為 5~7，圖 4.3 為整理 Bandis 等人(1983)之不同岩性 *JRC* 範圍。砂岩之不連續面單壓強度(*JCS*)為 22~95 MPa，板岩則為 77~157 MPa。

透過以上之設定，圖 4.4 至圖 4.18 為依據達仁場址之調查成果及相關參考資料，每組不連續面之平均位態(包含三組劈理和兩組節理)產生 120 組裂隙，以及其對應之 *JRC* 及 *JCS*，並透過這些資料點求得不同深度之水力內寬，透過這五組不連續面總共產生 600 個資料點。圖 4.19 為兩個假設鑽井之相關參數，圖 4.20 為 Borehole A 及 Borehole B 兩個鑽井之水力內寬隨深度變化所產生的 600 個資料點，透過進一步統計，水力內寬出現的頻率如圖 4.21，由圖可知，水力內寬小於  $10\mu m$  約有 100 個資料點，水力內寬大部分的資料點坐落於  $10\sim 80\mu m$ 。

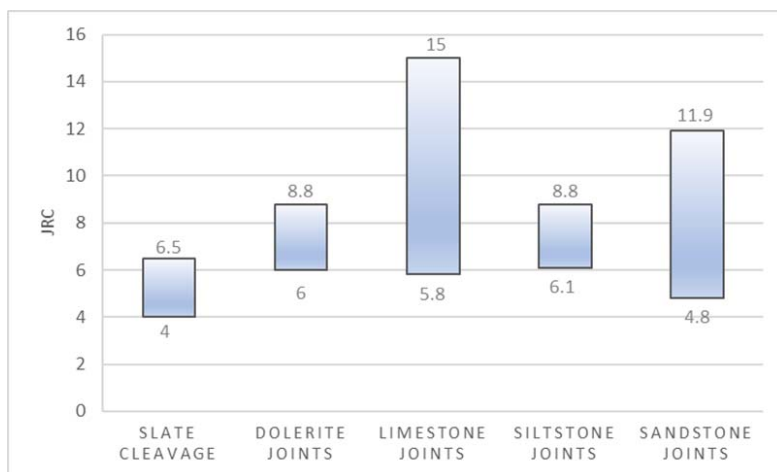


圖 4.3 根據 Bandis 等人(1983)之研究，整理不同岩性之 *JRC* 範圍



# Cleavage1

- 120 points

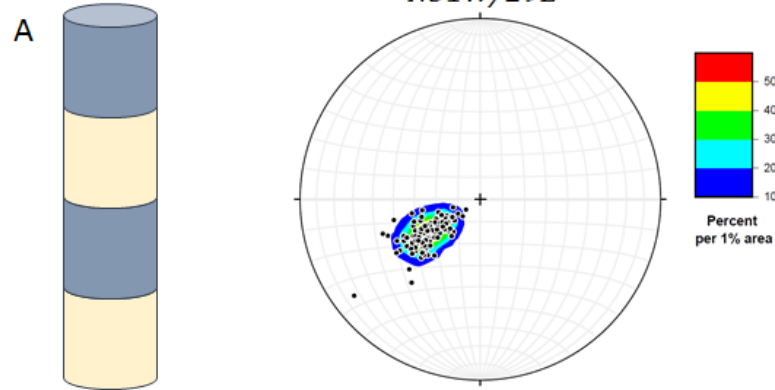


圖 4.4 Borehole A 參考達仁場址第一組劈理平均位態產生 120 組常態分布裂隙

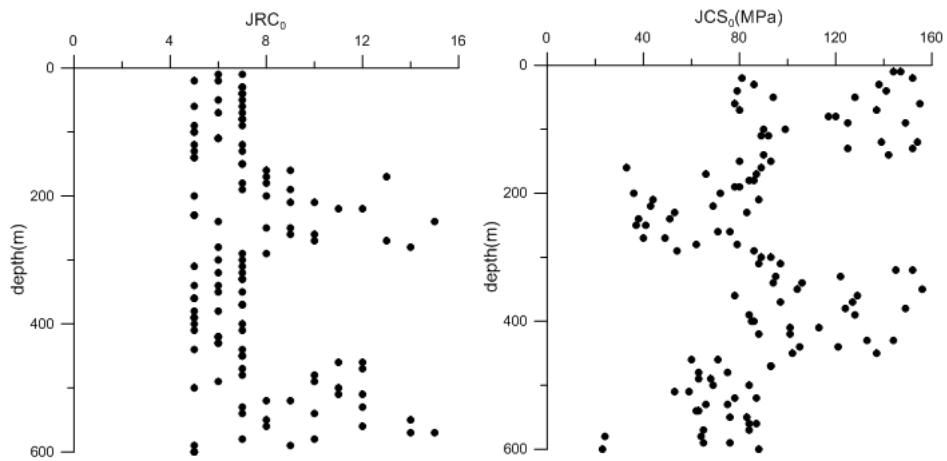


圖 4.5 Borehole A 第一組劈理對應之 120 組隨深度變化之  $JRC_0$  及  $JCS_0$

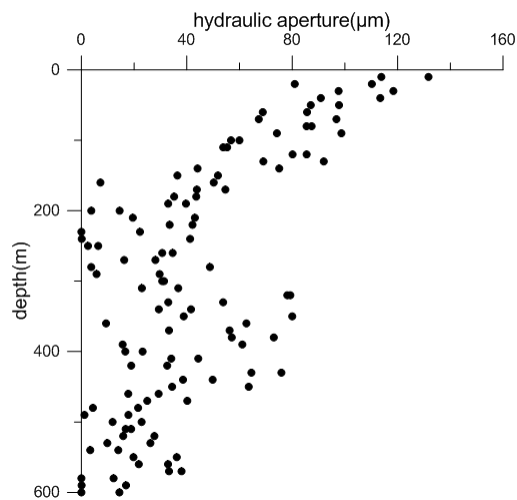


圖 4.6 Borehole A 第一組劈理隨深度之 120 組水力內寬資料

# Cleavage3

- 120 points

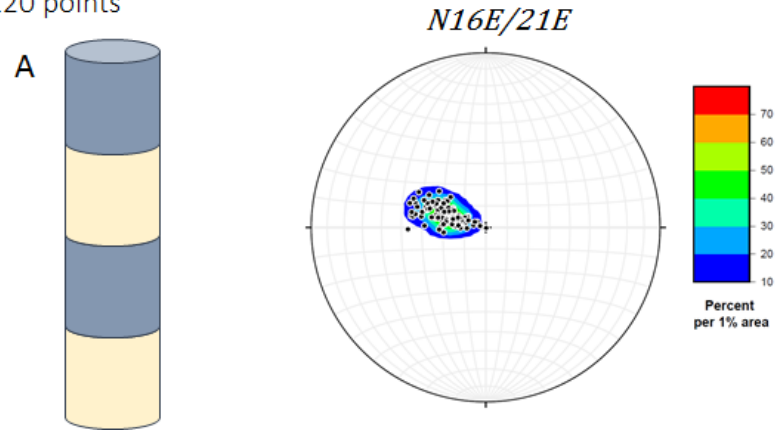


圖 4.7 Borehole A 參考達仁場址第三組劈理平均位態產生 120 組常態分布裂隙

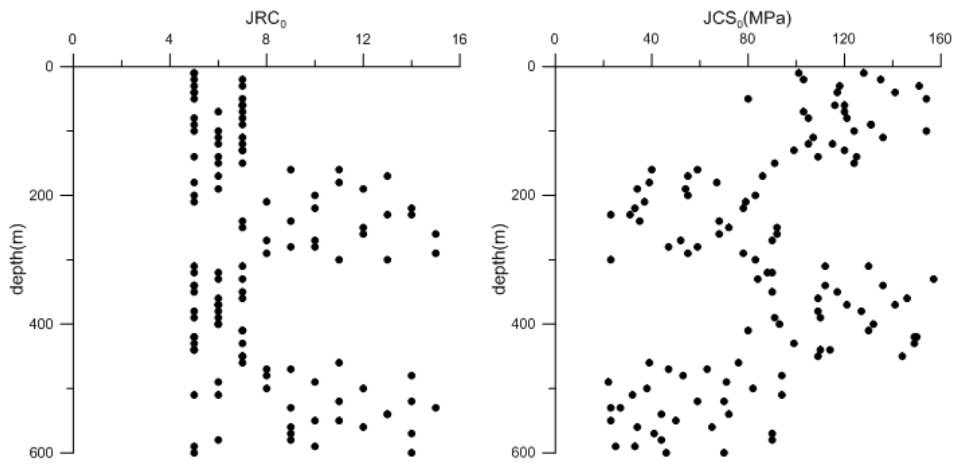


圖 4.8 Borehole A 第三組劈理對應之 120 組隨深度變化之  $JRC_0$  及  $JCS_0$

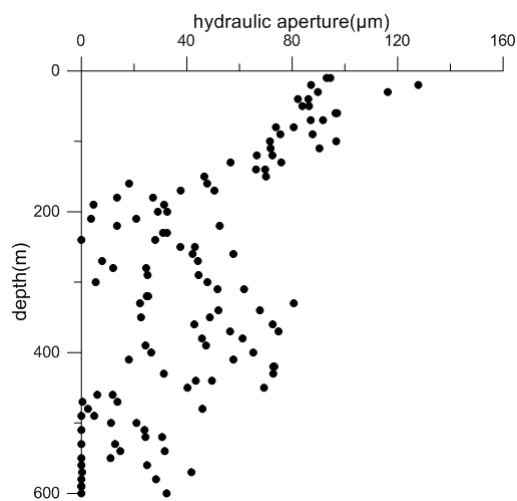


圖 4.9 Borehole A 第三組劈理隨深度之 120 組水力內寬資料

# Joint2

- 120 points

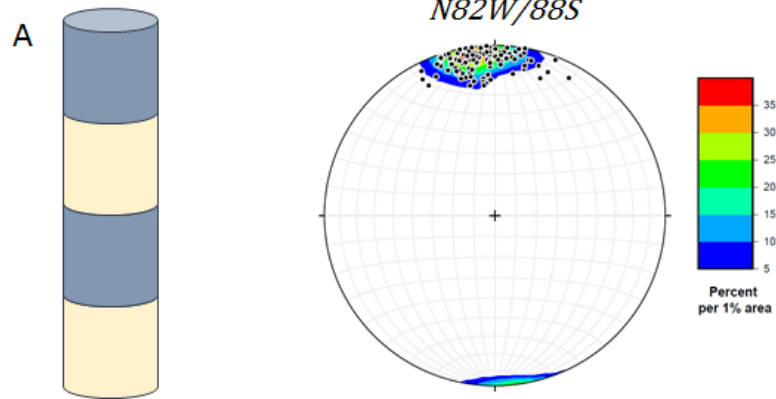


圖 4.10 Borehole A 參考達仁場址第二組節理平均位態產生 120 組常態分布裂隙

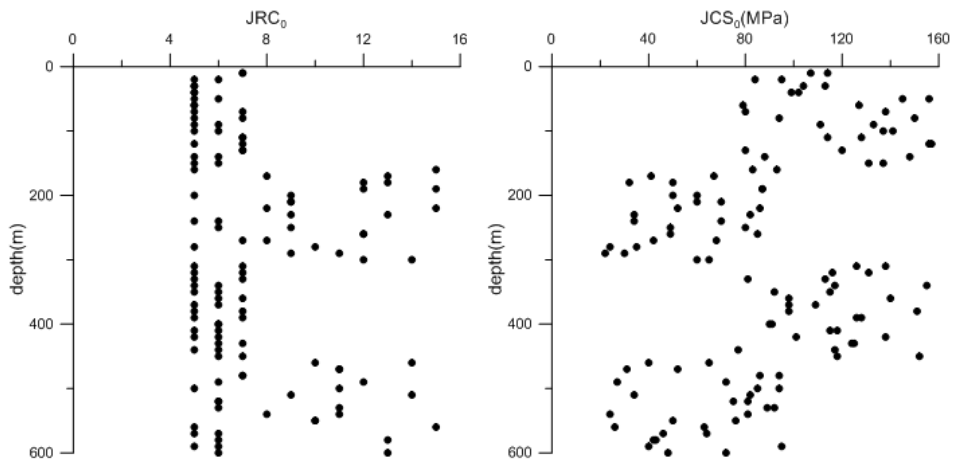


圖 4.11 Borehole A 第二組節理對應之 120 組隨深度變化之  $JRC_0$  及  $JCS_0$

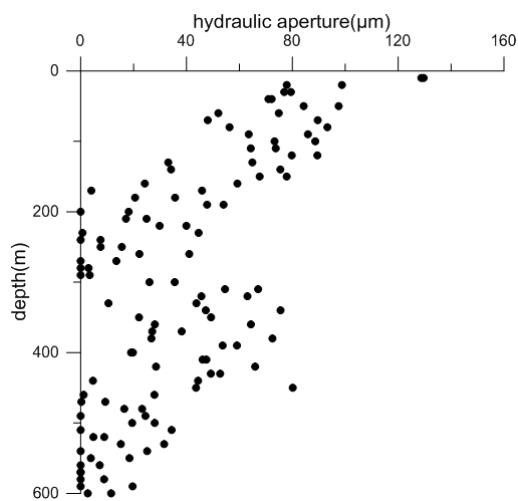


圖 4.12 Borehole A 第二組節理隨深度之 120 組水力內寬資料

# Cleavage2

- 120 points

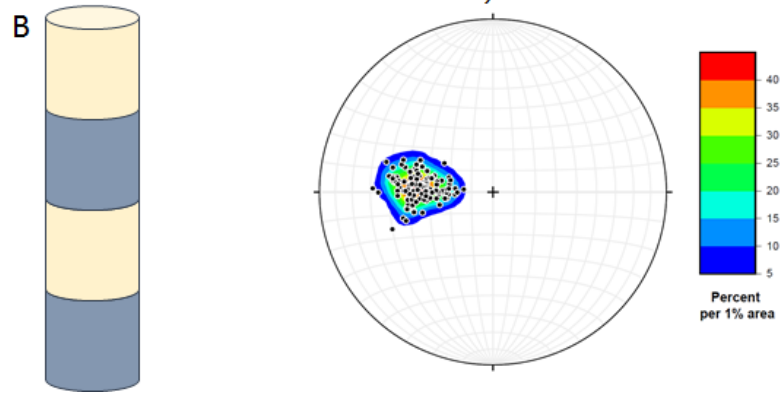


圖 4.13 Borehole B 參考達仁場址第二組劈理平均位態產生 120 組常態分布裂隙

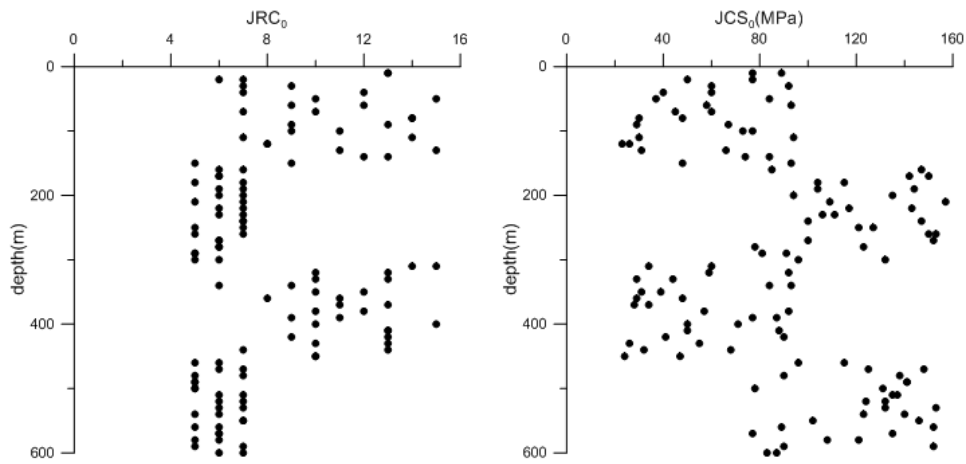


圖 4.14 Borehole B 第二組劈理對應之 120 組隨深度變化之  $JRC_0$  及  $JCS_0$

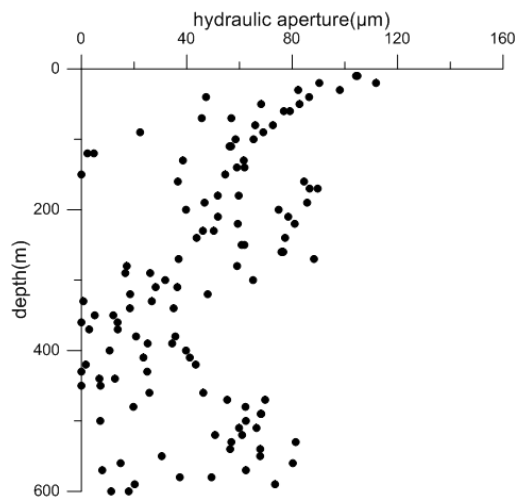


圖 4.15 Borehole B 第二組劈理隨深度之 120 組水力內寬資料

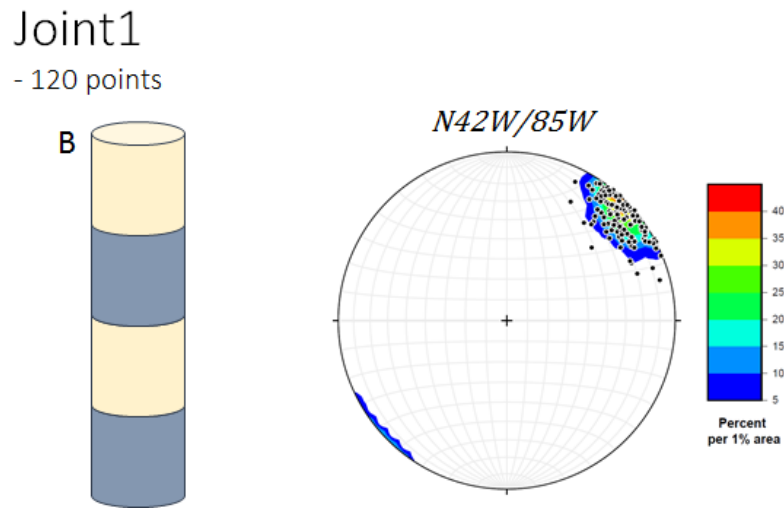


圖 4.16 Borehole B 參考達仁場址第一組節理平均位態產生 120 組常態分布裂隙

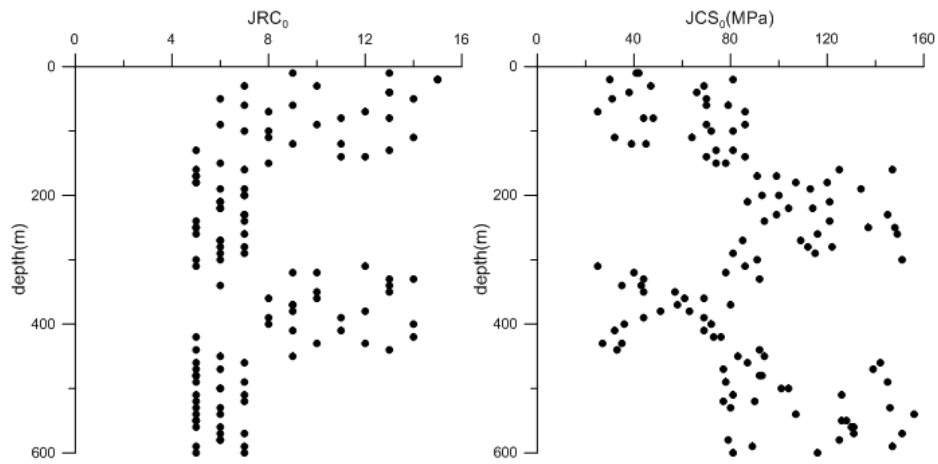


圖 4.17 Borehole B 第一組節理對應之 120 組隨深度隨深度變化之  $JRC_0$  及  $JCS_0$

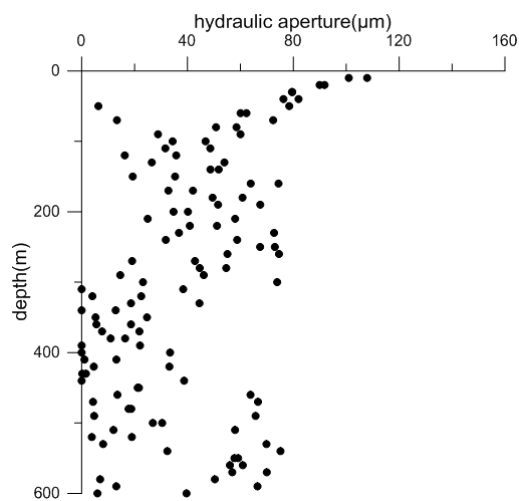


圖 4.18 Borehole B 第一組節理隨深度之 120 組水力內寬資料

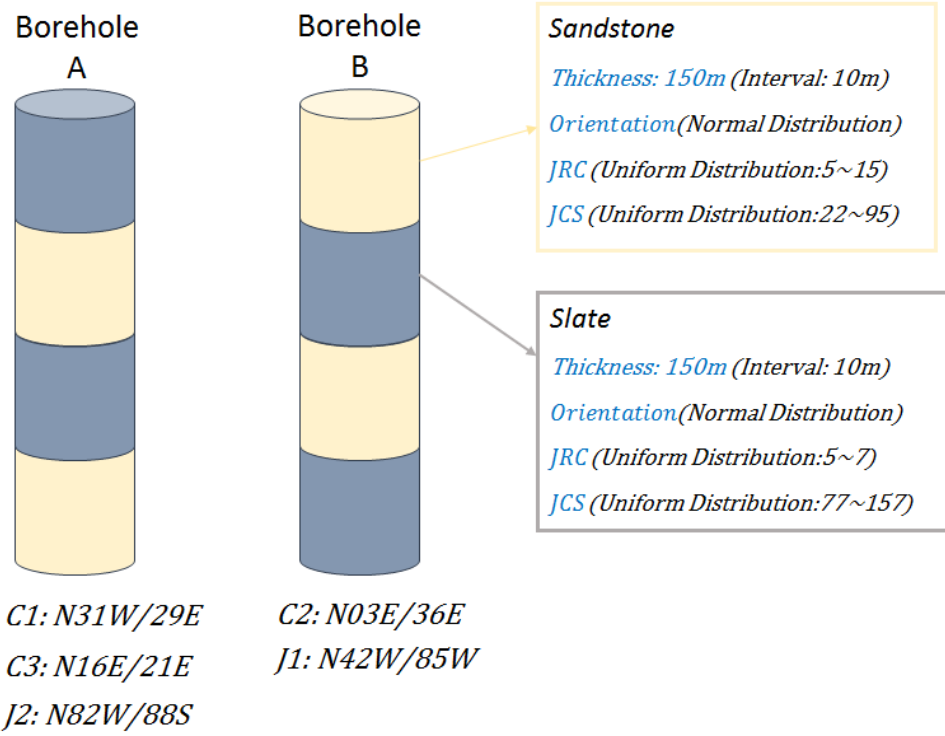


圖 4.19 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例之相關輸入參數

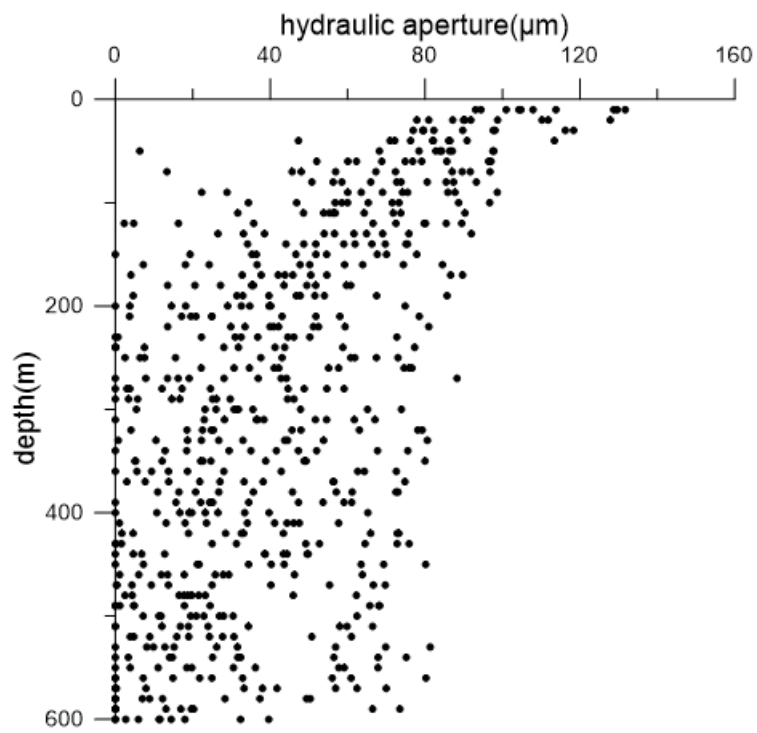


圖 4.20 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例產生水力內寬隨深度變化共 600 個資料點之結果

# Borehole A+B

600 data points

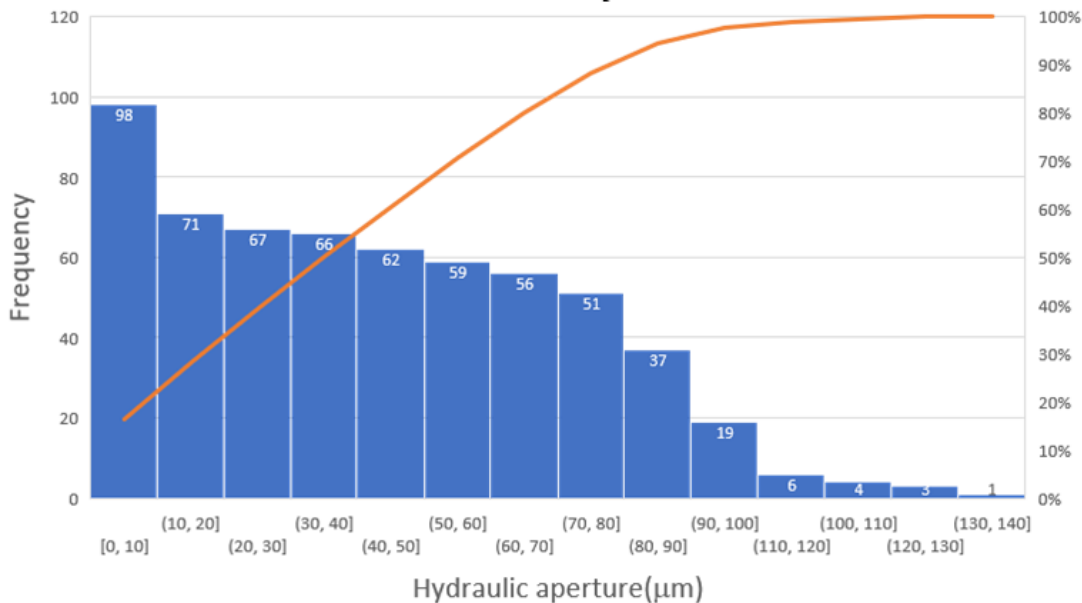


圖 4.21 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例水力內寬分布圖

## 4.4 未考慮深度進行水力內寬資料分析

本研究欲透過不同分析方法，進一步降低水力內寬之不確定性。首先，本小節依岩性區分觀察不同岩性之水力內寬，如圖 4.22 所示。由圖可發現，無論是砂岩或是板岩，深度小於 100 公尺之淺層的水力內寬範圍分布較廣，且水力內寬有快速的隨深度遞減之趨勢。深度大於 100 公尺時，水力內寬變化較趨緩，其中，砂岩之水力內寬幾乎所有值皆小於  $60\mu\text{m}$ ，板岩之水力內寬範圍分布較廣，約在  $100\mu\text{m}$  之內。

本研究進一步使用不同分析方法進行分析，前人研究多將水力內寬數據取平均值後，直接使用單一固定值進行模擬，故本研究首先以此方法為基礎，第一個模型採所有數據值相加，取其平均值及標準差。所有資料加總平均得到之水力內寬平均值為  $42.43\mu\text{m}$ ，標準偏差為  $29.50\mu\text{m}$ ，圖 4.23 的左圖為 600 個水力內寬資料點之平均及標準偏差，右圖為每個水力內寬資料點減去其平均值之殘差。再者，將所有的資料以岩性做為區隔分析，板岩之水力內寬平均值為  $57.68\mu\text{m}$ ，標準偏差為  $26.01\mu\text{m}$ ，如圖 4.24 所示。砂岩之水力內寬平均值為  $27.18\mu\text{m}$ ，標準偏差為  $24.48\mu\text{m}$ ，如圖 4.25 所示。由結果可發現，如果以岩性做為區隔進行分析，無論是砂岩或板岩之標準偏差皆小於全部資料之標準偏差。

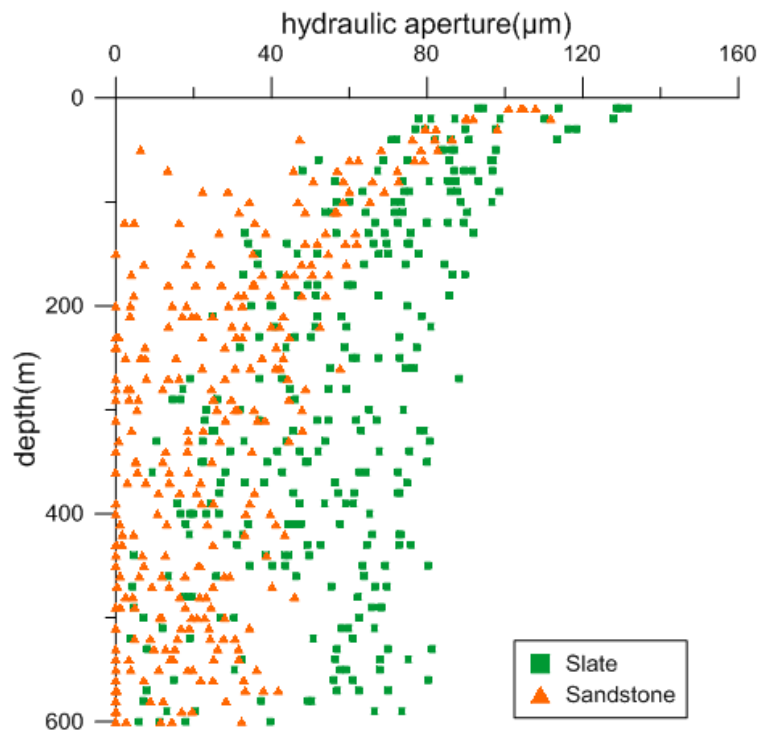


圖 4.22 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例依岩性區分之水力內寬隨深度之結果

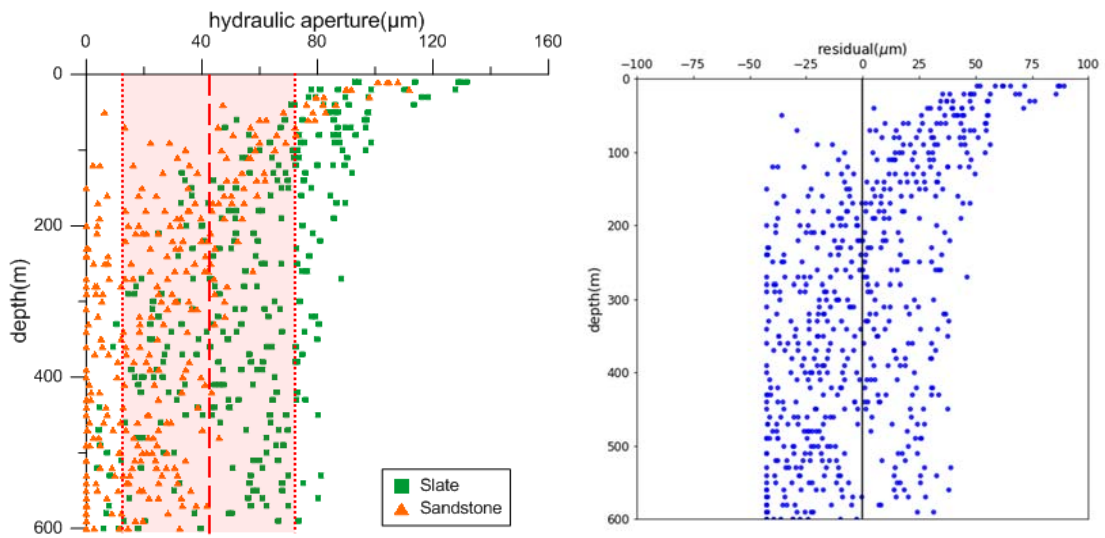


圖 4.23 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例之 600 個水力內寬資料點之平均及標準偏差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)



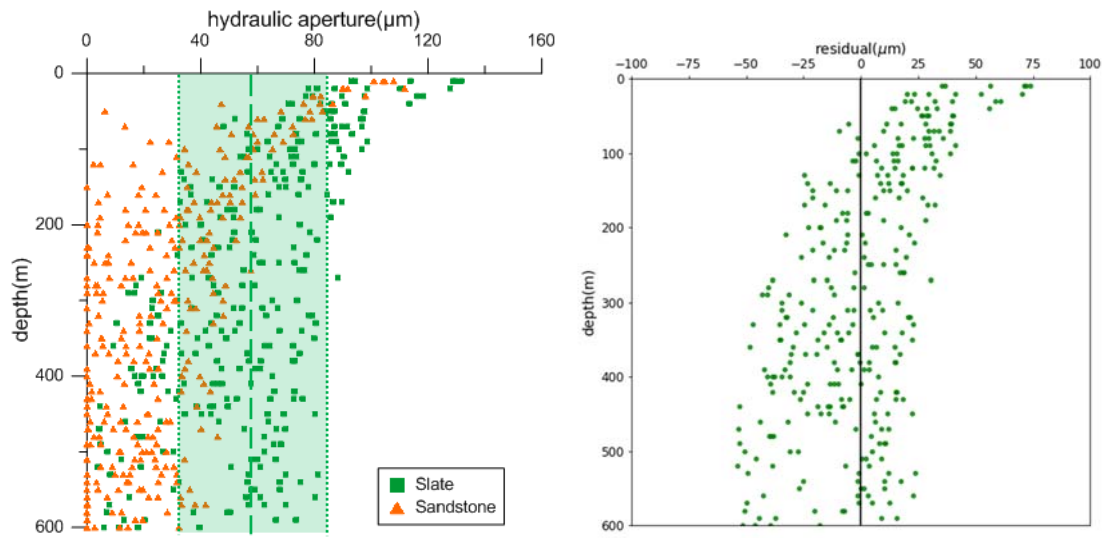


圖 4.24 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例，板岩水力內寬資料點之平均及標準偏差 (右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

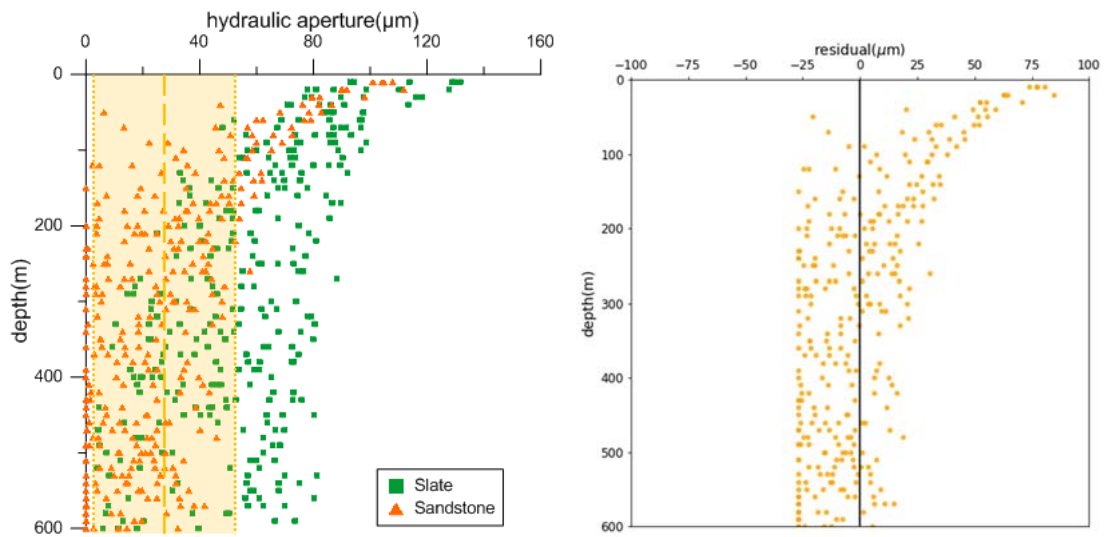
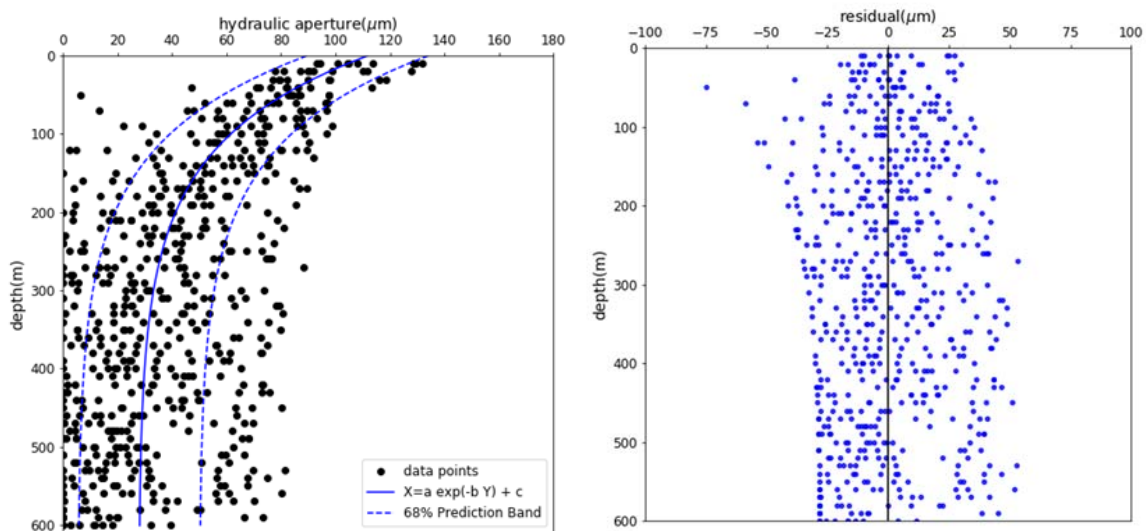


圖 4.25 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例，砂岩水力內寬資料點之平均及標準偏差 (右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

## 4.5 考慮深度進行水力內寬資料分析

Rutqvist(2003)之研究中提到，當裂隙內寬在只受應力作用時，其內寬值與有效應力間為自然指數關係，故本研究第二個模型採用(4.5)式之自然指數方程，以程式進行回歸，找出最佳回歸曲線與 68%預測區間(意指 68%資料點落於此區間內)，並以預測條帶作為左右各一倍標準差範圍。各深度皆有各自標準差大小，在此所提之「平均」標準差指每 10m 取一個標準差值，最後相加取平均。首先是不考慮岩性之結果，如圖 4.26 所示，平均水力內寬為 43.57  $\mu\text{m}$ ，標準偏差為 22.26  $\mu\text{m}$ ，以及各個資料點之殘差值。進一步以岩性做為區隔，板岩之水力內寬平均為 57.14  $\mu\text{m}$ (圖 4.27)，標準偏差為 19.50  $\mu\text{m}$ ，砂岩之水力內寬平均為 30.33  $\mu\text{m}$ (圖 4.28)，標準偏差為 15.42  $\mu\text{m}$ 。相較於上一節將所有資料進行平均，考慮深度所分析下之標準偏差縮小了約 7~8  $\mu\text{m}$ ，進一步考慮岩性下，由結果發現，考慮岩性之標準偏差又較未考慮岩性之結果更小。

$$b = b_r + b_{max}e^{-\alpha\sigma'_n} \quad (4.5)$$

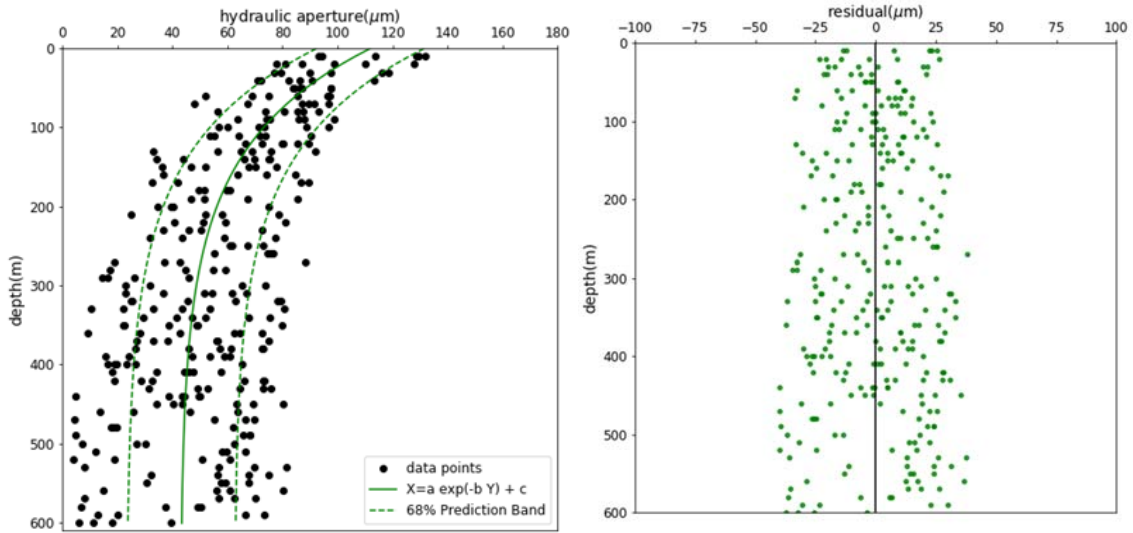


$$x = 83.961e^{-0.009y} + 27.825$$

$$R^2 = 0.4302$$

Average hydraulic aperture: 43.57  $\pm$  22.26  $\mu\text{m}$

圖 4.26 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例之 600 個水力內寬資料點考慮深度分析之平均及標準偏差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

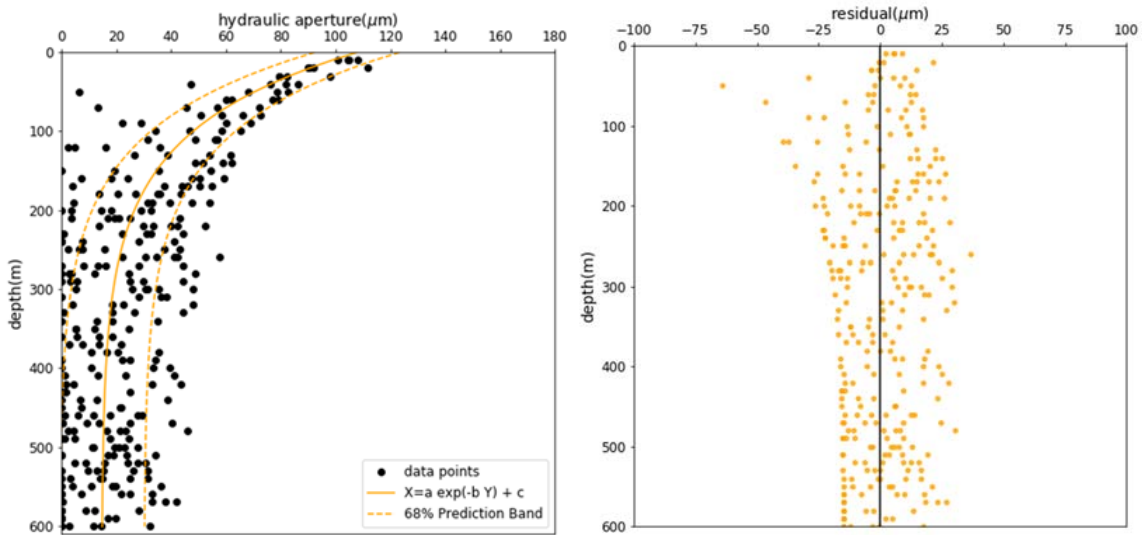


$$x = 68.966e^{-0.008y} + 42.968$$

$$R^2 = 0.4426$$

Average hydraulic aperture:  $57.14 \pm 19.50\mu\text{m}$

圖 4.27 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例，板岩水力內寬資料點考慮深度分析之平均及標準偏差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)



$$x = 93.229e^{-0.010y} + 14.714$$

$$R^2 = 0.6066$$

Average hydraulic aperture:  $30.33 \pm 15.42\mu\text{m}$

圖 4.28 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例，砂岩水力內寬資料點考慮深度分析之平均及標準偏差(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

## 4.6 多變數迴歸進行水力內寬資料分析

前文曾提到深度與水力內寬間呈自然指數關係，本小節將進一步考慮不同之變數，如(4.2)式，透過深度、*JRC*、*JCS*、傾角作為參數進行擬合，模型中每項參數與水力內寬之間為線性關係。首先是不考慮岩性之結果，水力內寬之平均值為  $42.43 \mu\text{m}$ ，標準偏差為  $12.43 \mu\text{m}$ ，圖 4.29 為所有資料進行多變數分析之結果(左)以及其殘差值(右)。進一步分岩性，板岩水力內寬之平均值為  $57.68 \mu\text{m}$ ，標準偏差為  $11.21 \mu\text{m}$ (圖 4.30)。砂岩之水力傳導係數為  $27.18 \mu\text{m}$ ，標準偏差為  $12.75 \mu\text{m}$ (圖 4.31)。由結果得知，考慮多變數之情況下，其標準偏差皆小於上述兩者，但分岩性後，在多變數的結果下，標準偏差已無太大的區別。

$$\hat{x} = A \text{ depth} + B JCS + C JRC - D \text{ dip} - E \quad (4.2)$$

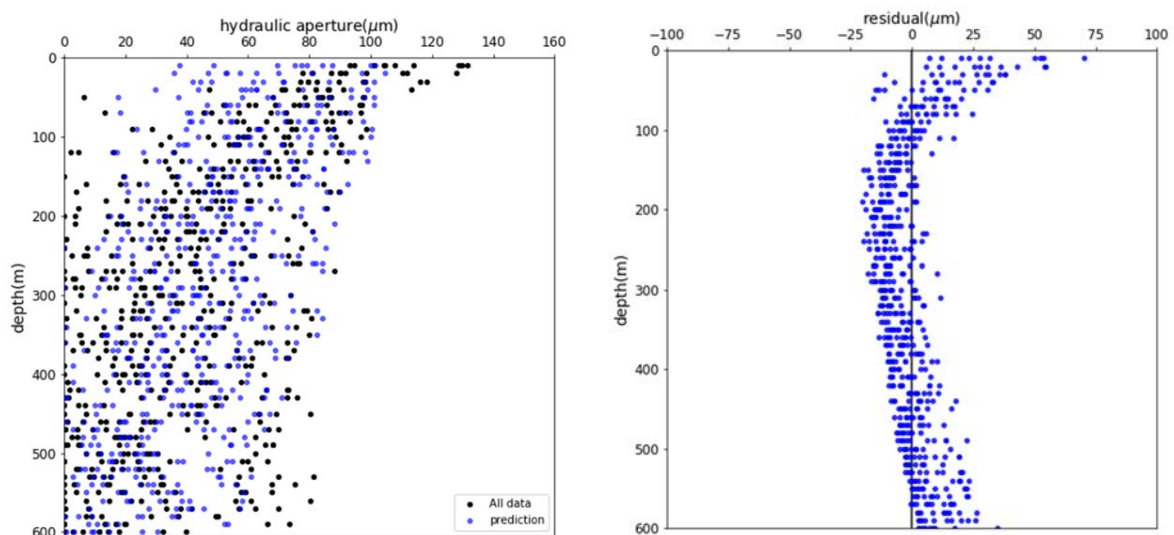


圖 4.29 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例之 600 個水力內寬資料點以多變數分析之結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

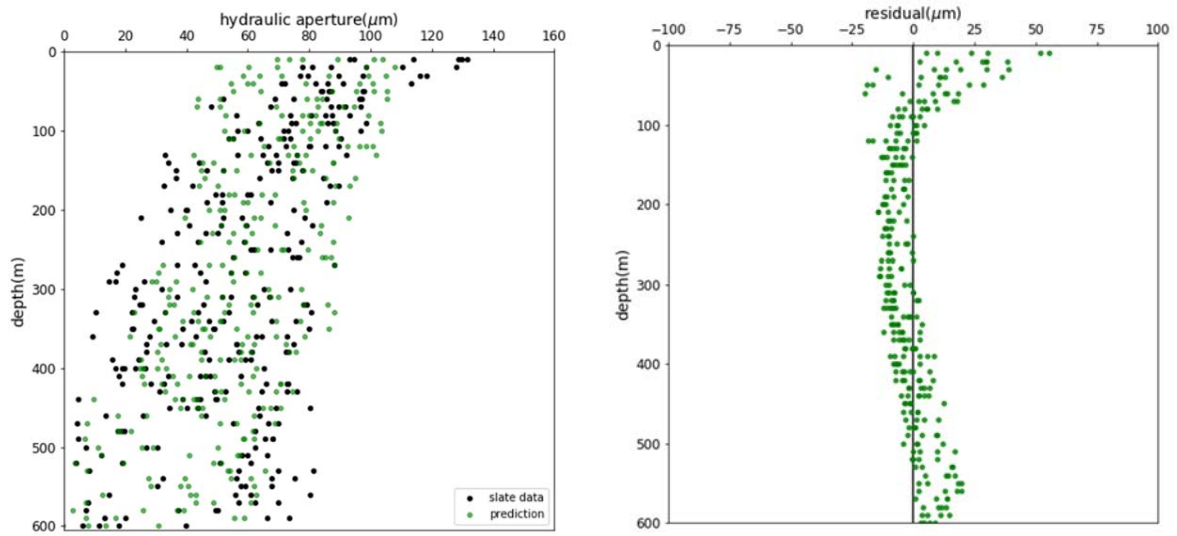


圖 4.30 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例，板岩水力內寬資料點以多變數分析之結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

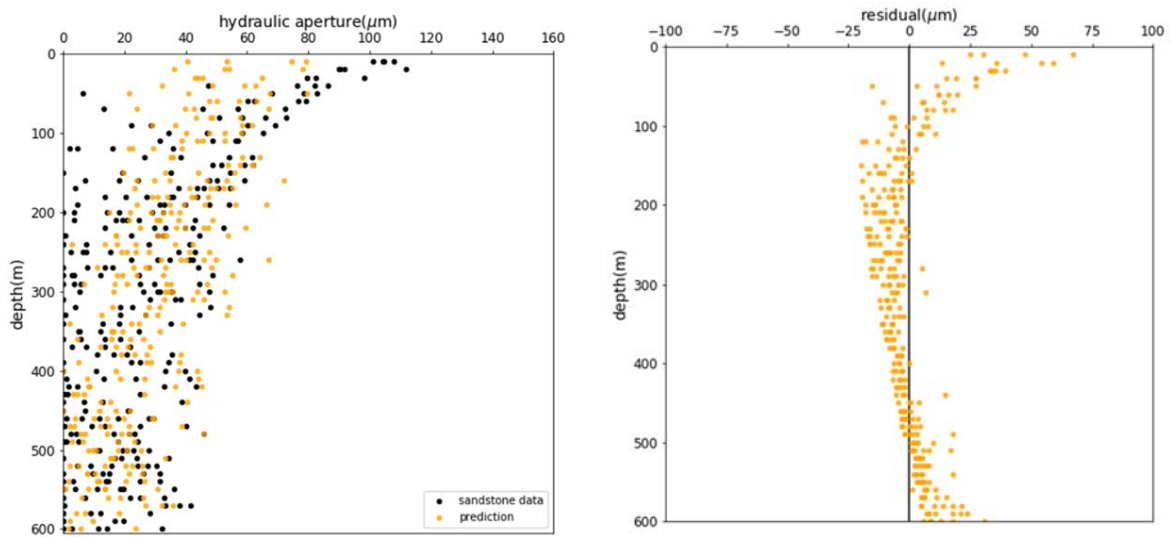


圖 4.31 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例，砂岩水力內寬資料點以多變數分析之結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)



## 4.7 綜合深度與多變數迴歸進行水力內寬資料分析

前一個小節之模型以考慮深度、*JRC*、*JCS*、傾角作為參數進行擬合，並有效地降低標準偏差。但此模型中每項參數與水力內寬之間為線性關係，造成深度與水力內寬間的擬合結果並不佳，本小節將進一步改良 4.6 節之模型，深度項由線性改為自然指數關係，再進行一次回歸。首先是不考慮岩性之結果，水力內寬之平均值為  $42.43 \mu\text{m}$ ，標準偏差為  $7.98 \mu\text{m}$ ，圖 4.32 為所有資料進行多變數分析之結果(左)以及其殘差值(右)。進一步分岩性，板岩水力內寬之平均值為  $57.68 \mu\text{m}$ ，標準偏差為  $7.42 \mu\text{m}$ (圖 4.33)。砂岩之水力傳導係數為  $27.18 \mu\text{m}$ ，標準偏差為  $6.43 \mu\text{m}$ (圖 4.34)。由結果得知，無論是不分岩性進行分析，或是依砂岩或板岩進行分析，平均水力傳導係數已無太大變化，但綜合深度與多變數之回歸分析之標準偏差又比前一小節之模型小，由圖 4.32 至圖 4.34 之右圖殘差可以發現，擬合結果之殘差分布更貼近 0 之左右兩側，因此將低了平均之標準偏差。表 4.3 為整理 4.4 至 4.7 節的 4 個模型，分別為不考慮深度、考慮深度、多變數分析以及改良之深度與多變數分析平均值及標準偏差之比較，由結果可知，當使用之模型考慮越多因素，其標準偏差值越低，不確定性也越低。

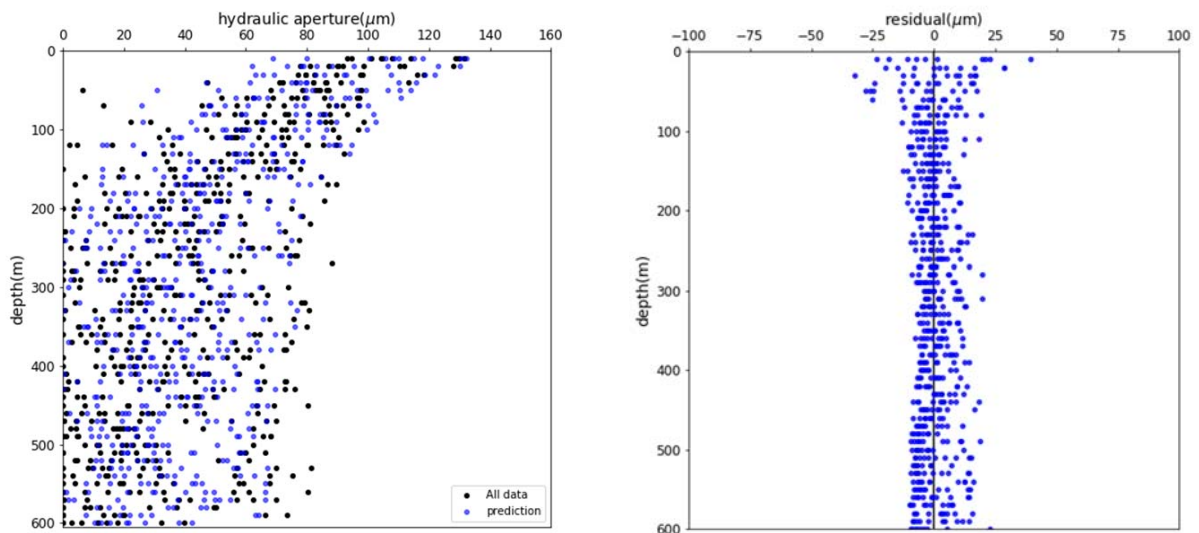


圖 4.32 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例之 600 個水力內寬資料點以改良後之多變數分析結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

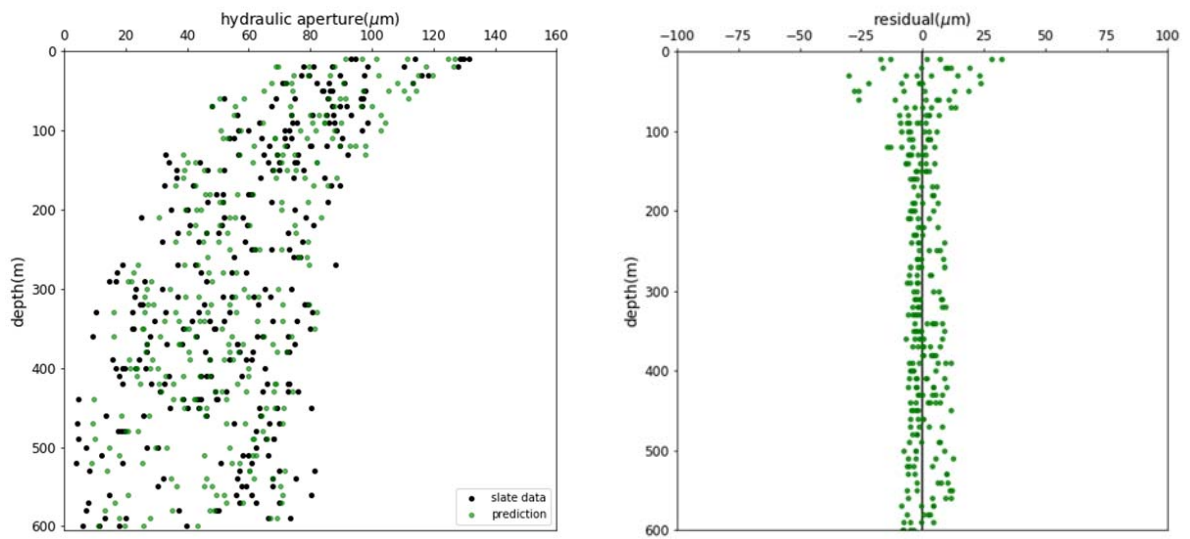


圖 4.33 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例，板岩水力內寬資料點以改良後之多變數分析結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

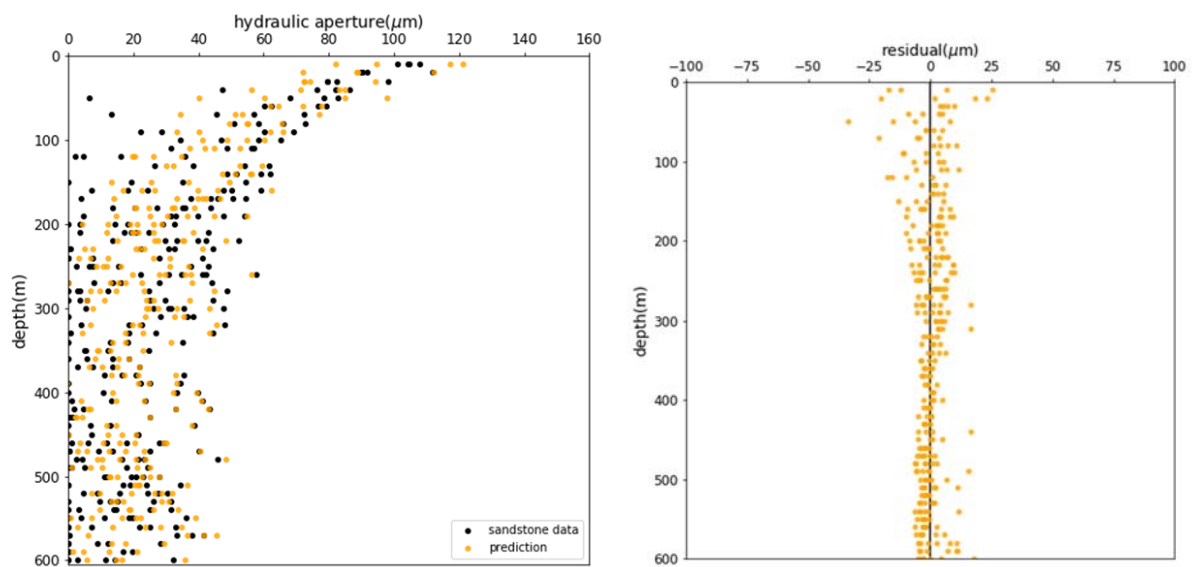


圖 4.34 Borehole A 及 Borehole B 兩個假設鑽井案例，砂岩水力內寬資料點以改良後之多變數分析結果(右)，以及水力內寬資料點與平均值相減之殘差(左)

表 4.3 四種不同分析模型對於假設鑽井案例之分析結果比較

	Mean( $\mu m$ )	SD ( $\mu m$ )
<b>Depth-independent model</b>		
<u>Neglecting lithology</u>	42.43	29.50
<u>Considering lithology-Slate</u>	57.68	26.01
<u>Considering lithology-Sandstone</u>	27.18	24.48
<b>Depth-dependent model <math>x = Ae^{-By} + C</math></b>		
<u>Neglecting lithology</u> $x = 83.961e^{-0.009y} + 27.825$	43.57	22.26
<u>Considering lithology-Slate</u> $x = 68.966e^{-0.008y} + 42.968$	57.14	19.50
<u>Considering lithology-Sandstone</u> $x = 93.229e^{-0.010y} + 14.714$	30.33	15.42
<b>Multiple regression model (1) <math>x = Ay_1 + By_2 + Cy_3 + Dy_4 + E</math></b>		
<u>Neglecting lithology</u> $\hat{x} = -0.09depth + 0.67JCS + 3.04JRC - 0.07dip - 11.46$	42.43	12.43
<u>Considering lithology-Slate</u> $\hat{x} = -0.08depth + 0.75JCS + 2.46JRC - 0.09dip - 16.91$	57.68	11.21
<u>Considering lithology-Sandstone</u> $\hat{x} = -0.09depth + 0.48JCS + 3.36JRC - 0.06dip - 4.08$	27.18	12.75
<b>Multiple regression model (2) <math>x = Ae^{-By_1} + Cy_2 + Dy_3 + Ey_4 + F</math></b>		
<u>Neglecting lithology</u> $\hat{x} = 75.87e^{-0.009depth} + 0.67JCS + 3.08JRC - 0.07dip - 50.54$	42.43	7.98
<u>Considering lithology-Slate</u> $\hat{x} = 65.03e^{-0.008depth} + 0.75JCS + 2.90JRC - 0.08dip - 57.91$	57.68	7.42
<u>Considering lithology-Sandstone</u> $\hat{x} = 65.03e^{-0.008depth} + 0.75JCS + 2.90JRC - 0.08dip - 57.91$	27.18	6.43



## 第五章 我國低放坑道處置地質特性技術發展建議

針對我國低放處置有關場址特性技術發展，本章將統整四年期計畫之研究成果，四年期計畫首年，研析我國潛在處置場址之相關調查成果及其可能遭遇之特殊地質，以及共同研讀瑞典 SKB 之技術報告 TR-14-01(SK B, 2014)，計畫第二年我們根據 Forsmark 場址所收集的數據，重點回顧了隧道處置場址關鍵參數的不確定性。再者，進一步針對隧道周圍岩體的水力耦合參數進行敏感性分析。利用 Oda 連續模型評估破裂面之特徵化(例如：密度、持續性、開口寬、粗糙度、強度、位態…等)對受不同邊界應力影響的隧道之水力傳導和流體流動的影響。去年，共同研析美國 NUREG-2175(NRC, 2015)，並針對水力-力學耦合流場分析進行探討，透過研析相關之研究成果，得知因隧道開挖造成應力重新分佈造成水力傳導係數變化，為導致隧道周圍之裂隙岩體水力-力學耦合效應之可能機制。再者，本計畫根據去年度水力-力學單向耦合之研究成果，進一步考慮孔隙水壓對於水力傳導係數的影響，並完成水力-力學雙向耦合之分析。本年度進一步透過蒐集現有之水力特性參數，試圖產生我國近岸之潛在處置場之處置岩層各深度之水力內寬分布假設案例，並透過一些分析方法降低參數的不確定性。透過以上之研究成果，提出我國低放處置之地質特性技術發展之建議。

### 5.1 前期工作回顧

本四年期計畫從 105 年至今，研究主題包含「放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術建立之資訊研析」(原能會物管局, 2016)、「低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術之關鍵課題研究」(原能會物管局, 2017)、「低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術驗證評估研究」(原能會物管局, 2016)以及本研究「低放射性廢棄物近岸坑道處置之場址參數驗證技術研究」，本節將回顧過去三年之研究重點。

#### 1. 國內外場址特性及我國特殊地質之資訊蒐整

四年期計畫第一年(原能會物管局, 2016)之研究工作包含由五個子計畫共同針對 TR-14-01: Safety analysis for SFR Long-term safety Main report for the safety assessment SR-PSU(SK B, 2014)進行研析，並針對國內潛在場址調查成果進行蒐整，配合台灣近岸

與離島可能之特殊地質、氣候與其因應之調查要項，審慎評估調查項目之充足性，與國外文獻比較調查項目之差異。重點包含：

- (1) TR-14-01 技術報告(SKB, 2014)有關場址的部分，SKB 針對 Forsmark 處置場址設施及場址周圍環境之初始狀態進行說明，並且針對不同的角度評估在正常狀況下，處置場週遭之演化，包含考慮了表面系統、熱流、力學、水文地質、近場水文循環、地球化學、廢棄物化學、工程障壁等演化情節進行說明。
- (2)對於我國低放處置進度的蒐整發現，台灣電力公司對於我國兩處潛在場址之場址特性調查相較於前期之報告有重大的進展。並且針對審查導則之要求，分別說明了 13 大項，173 個參數之調查成果。
- (3)對於我國潛在場址特殊地質環境，根據鄰近工程南迴公路相關研究報告顯示，台東縣達仁鄉應注意岩層破碎帶導致湧水及抽坍，以及對於海底山崩造成海嘯之可能性應審慎評估。金門縣烏坵鄉應注意中國閩粵地區之地震(例如：1604 年泉州地震)。

## 2. 場址初始狀態資訊蒐整及岩體水力-力學特性分析

四年期計畫第二年(原能會物管局, 2017)之工作包含蒐集瑞典 SKB 有關場址初始狀態定量化資訊，可進一步釐清不確定性。並且進行處置場址岩石的力學-水力特性的不確定性及敏感度分析，重點包含：

- (1)蒐集瑞典 SKB 技術報告有關處置場址初始狀態之定量化資訊，以及 SKB 所使用之相關模型，探討其對於參數之不確定性，根據結果顯示，超過 200 公尺之破裂面不納入計算的情況下，破裂面密度與滲透係數可能下降 0.66-0.9 倍；若依同一岩石區域進行分析，則破裂面密度之不確定性可減少約半個數量級；不考慮深度因素，會高估破裂面密度約 10%；破裂面位態對破裂面密度的不確定性主要來自於破裂面分組時的不確定性。
- (2)水力傳導係數與不連續面密度成一次方關係，與破裂面長度成平方關係，與水力內寬成三次方關係。不連續面粗糙係數對於流場之敏感度相對於不連續面單壓強

度而言，對於流場敏感度較低，流場對邊界應力(現地應力)非常敏感(特別在接近地表處)。

- (3)隧道周圍不連續面位態均向分佈，總水頭等值線由邊界向隧道呈同心圓狀遞減，流向皆指向隧道中心；不連續面位態呈非均向分佈，總水頭等值線呈扁橢圓狀向隧道遞減，流向不再指向隧道中心。

### 3. 平行驗證方法之建立

四年期計畫第三年(原能會物管局，2018)之工作包含水力-力學耦合流場分析之相關資訊蒐整，並進一步透過回顧前人之研究，尋求建立平行驗證方法。並且由五個子計畫共同研讀 NUREG-2175 技術報告(NRC，2015)，提出研讀重點及與我國之差異。重點包含：

- (1)NUREG-2175 技術報告主要目的提供低放處置之技術分析導引，證明符合 10 CFR Part61 法規之「放射性廢棄物地表處置的許可要求」。並分別針對一般技術分析、功能評估、無意闖入、場址穩定性分析、防護保證期分析、功能週期分析、深度防禦分析、廢棄物接受等課題進行闡述。有關場址穩定性分析的部分，我國低放處置已依 NUREG-2175 技術報告提出之評估流程進行，但各階段間之銜接與反饋尚有精進空間。國內需特別注意斷層、地震或火山活動對於場址之危害，另外，可參考場址穩定性評估之案例針對國內進行實際操作。最後，可針對我國建構「災害警示圖」。
- (2)隧道開挖導致接近隧道附近之應力重新分布，造成裂隙有不同程度之張開或閉合，可能導致近隧道壁處之縱向水力傳導係數大幅上升，而沿隧道徑向之水力傳導係數略為下降。另外，也須注意核種可能透過處置坑內之裂隙連接沿著坑道壁處之水力通道外洩至處置系統外。
- (3)裂隙水力傳導係數及流場平行驗證技術建立方面，坑道周圍岩盤水力-力學耦合，可基於雙向顯示耦合方法得到力學和水力解之間的交替，其中力學的計算受元素間的流體壓力影響(有效應力)，流體的計算受岩石不連續面的力學內寬變化(反映於岩體之水力傳導係數)影響。不論是均向、邊界應力異向性或是裂隙位態分布先

天異向性的測試案例，雙向耦合皆會獲得較單向耦合更高(高 50%-70%)之坑道入流量。當應力異向性變大時，靠近隧道壁面處之水力傳導係數也有明顯變大之趨勢；當裂隙先天異向性較大時，靠近隧道壁面處之水力傳導係數差異較小。

- (4)有關場址特性參數驗證部分，水力內寬對於水力傳導係數而言非常敏感，建議利用高圍壓孔隙率/滲透率量測系統(YOKO2)取得水力內寬及力學內寬，並與現場試驗結果進行比較。

## 5.2 技術發展建議

本四年期計畫過去三年已針對許多課題進行研究，包含共同研讀瑞典處置技術報告 TR-14-01(SKB, 2014)和美國 NUREG-2175 技術報告(NRC, 2015)，以及針對我國潛在處置場址之現有調查成果進行盤點整理，並針對坑道周圍之岩盤進行水力-力學耦合流場相關研究，探討其不確定性及參數之敏感性。本小節將總整過去三年之研究，以及本計畫今年之研究成果，針對我國低放射性廢棄物坑道處置提出相關建議，重點如下：

1. 針對本四年期所共同研讀之技術報告，美國 NUREG-2175 技術報告以及瑞典 TR-14-01 技術報告，兩者皆值得我國低放處置技術精進之參考依據，但須注意兩者處置方法的差異以及場址的地質環境，須依據我國處置方式及地質環境進行調整。美國低放處置方面傾向地表處置，且場址屬於沙漠環境，瑞典的處置方式較與我國相近，皆採坑道處置為主。另外，這些報告中提到的內容也有些值得國內參考，例如，針對我國建構「災害警示圖」。
2. 總整四年期之研究結果發現，水力傳導係數受到許多參數影響，包含不連續面密度、不連續面長度以及水力內寬。其中，又以水力內寬對於水力傳導係數影響最敏感。因此，進行安全評估時，需特別注意水力內寬對於場址安全評估的不確定性。
3. 如要精確的分析場址之水力特性，必須透過大量的現地資料進行分析。如果沒有大量的水力試驗取得水力內寬時，透過力學內寬推估水力內寬時必須非常謹慎，原因是力學內寬與水力內寬間之轉換式受到許多參數影響，必須謹慎的選擇所適

用之參數。前期研究利用高圍壓孔隙率/滲透率量測系統(YOKO2)取得水力內寬及力學內寬，並與現地試驗結果進行比較。另外，進行驗證時，現地試驗資料轉換水力內寬之方法也須謹慎選擇，本研究亦彙整了兩類現地抽水試驗資料轉換為水力內寬之方法，包括利用水力傳導係數與導水係數均能推估裂隙之水力內寬。

4. 不同水力內寬的分析方法其結果之不確定性有所差異，考慮越多因素之分析方式可以降低不確定性。本研究分別考慮岩性、深度、多變數進行分析，可有效降低水力內寬之不確定性。SKB 的研究也得到類似的結果，例如不考慮超過 200 公尺之破裂面，破裂面密度與滲透係數可能下降 0.66-0.9 倍，依同一岩性進行分析，破裂面密度之不確定性可減少約半個數量級；不考慮深度會高估破裂面密度約 10%。另外，不同的現地試驗方法也會影響水力特性之結果，處置單位必須謹慎的選擇資料取得之方法。
5. 進行處置坑道開挖時，坑道周圍之應力重新分布，一些因素也可能影響坑道周圍之流場。前期研究成果發現，應力的異向性和裂隙先天異向性皆會影響坑道周圍之流場。因此，未來處置單位進行評估時，須留意這些因素對於坑道開挖之影響。另外，也須留意處置場址之破碎帶，因為透過坑道周圍之裂隙與破碎帶相連，形成一個水力通道，進一步可能造成放射性核種透過水外釋至地表。

## 第六章 我國低放處置安全報告審查規範有關地質特性精進建議

對於場址特性而言，本計畫於過去幾年之研究中陸續提出一些與處置規範修定之相關建議，包含整體性之建議、有關場址特性之相關建議，以及一些文字之修訂。因此，本章將回顧過去三年及本年度之研究，總整並提出「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案」有關地質特性之建議，提供做為管制單位之參考。6.1 節總整四年期計畫針對「審查導則」之整體性建議，6.2 節則總整本四年期計畫針對「審查導則」條文修訂之建議。

### 6.1 整體性建議

本節將針對本計畫過去三年(原能會物管局，2016、2017、2018)，以及本年度計畫之研究成果回饋至我國低放處置審查規範精進之建議進行重點整理，相關建議如下：

1. 需考慮處置場址之地區性可能造成處置場危害之因素，例如台東縣達仁鄉候選場址之破碎帶及場址鄰近海域發生海底山崩造成區域性海嘯之影響；金門縣烏坵鄉則需注意閩粵地區地震帶之影響。
2. 台灣電力公司對於場址現地調查成果方面仍有待加強，待場址確定後方能補充現地調查成果，雖有場址未確定之限制條件，建議台灣電力公司仍能持續發展場址調查與場址特徵化技術。
3. 對於坑道處置之場址特徵化，審查單位應注意三項關鍵課題，包括：(1) 確認場址特徵化方法之適合性；(2) 確認場址特徵化成果已可供工程設計及安全評估所需；(3) 場址特徵化之不確定性。場址特徵化工作需要留意場址的複雜性，必須多方面分析及彙整對於處置場址安全至關重要之參數，這些特徵化之成果亦需對於工程規劃設計具有關聯性。再者，掌握這些參數之不確定性，提供做為後續工作之重要參考資料，避免造成超乎預期之結果。
4. 主應力方向除了攸關處置坑道配置規劃以外，候選場址主應力方向與主應力值均將影響裂隙岩盤之水力特性，不連續面特性分析及統計結果也是關鍵參數，場址特徵化審查宜注意此兩項之特徵化結果。

5. 進行場址之現地調查時，管制單位應注意處置單位使用之現地試驗方法是否符合當地之地質環境，使試驗方法之不確定性能控制在預期之內。另外，使用不同的分析方法也會影響參數之不確定性，管制單位也須審慎評估所使用之驗證方法，使分析方法之不確定性能控制在預期範圍內。

## 6.2 導則條文修訂建議

本章將整理本四年期計畫針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」之條文提出相關之修定建議，詳細修定成果請參考本計畫之子計畫二，修定建議如下：

1. 針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」第二章「場址特性描述」章節之「2.11 大地工程特性」，對於「2.工程地質與大地工程調查」之條文第三項「(3)若採坑道處置，需另提供坑道開挖所引致圍岩擾動範圍與圍岩大地工程特性變化之評估，及岩體評分之建議。」經本研究之前期研究成果發下，坑道開挖後始坑道周圍之應力改變，導致坑道周圍流場也隨之改變，可能進一步造成核種透過水力通到加速的傳遞至地表。因此，本段建議修正為「(3)若採坑道處置，需另提供坑道開挖所引致圍岩擾動範圍與圍岩大地工程特性變化之評估，及岩體評分之建議，其中，應特別注意開挖後應力重新分布導致流場改變。」。
2. 針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」第二章「場址特性描述」章節之「2.13 其他」，針對「1.說明其他足以影響處置設施設計及建造之場址特性因素(如火山活動、海嘯、地層下陷及泥火山等)。」條文中即提之海嘯因素，前期研究發現，除地震引致海嘯外，達仁建議候選場址之地質環境亦可能因海底山崩引致海嘯，進一步可能造成處置場之危害。因此，本條文建議補充為「1.說明其他足以影響處置設施設計及建造之場址特性因素(如火山活動、海嘯(包含海底山崩引發之海嘯)、地層下陷及泥火山等)。」
3. 針對本年度由子計畫二主導之「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案」修定，其中「二、場址特性描述」章節之「(四) 地質與地震」「2. 地震」之第一項條文「(1)地震特性：(a)必須評估所有可得之歷史數據，並詳列場址範圍 300 公里

以內地震規模大於或等於 3 的所有地震參數；(b)提出標示震央的地圖以顯示這些地震的分布，以大比例尺的地圖，標出場址 100 公里以內發生的地震，以及地震發生率高的區域；(c)必須列出地震發生的時間、震源深度、震央座標、最大震度、規模和與場址的距離、資料的來源；(d)其它與山崩、地表破裂和液化等相關之資料。」，其中，(b)、(c)及(d)項條文要求較不明確。因此，建議修正為「(1) 地震特性：(a)必須評估所有可得之歷史數據，並詳列場址範圍 300 公里以內地震規模大於或等於 3 的所有地震參數；(b)提出標示**前述震央分布與場址位置之地圖，以顯示這些地震的分布及識別地震發生率高的區域**；(c)必須列出**前述**地震發生的時間、震源深度、震央座標、最大震度、規模和與場址的距離、與資料來源；(d)其它各別地震事件造成山崩、地表破裂和**土壤液化**等相關之資料。」。

4. 同 3.之章節，第五項「(5) 場址效應：為了估算場址的地表震動特性，必須先了解震源至場址的地震波傳遞特性。此外，岩盤上覆材料對於地震波有放大或衰減的作用，故需加以描述。這些覆蓋材料及岩盤的壓力波速或剪力波速、統體密度以及剪力模數等資料，及計算使用的方法或數據來源皆須敘明。」，針對此條文對於場址效應之描述進行加強，建議修改為「(5) 場址效應：為了估算場址的地表震動特性，必須了解**震波從震源、傳遞路徑及場址之特性**。此外，岩盤上覆材料及**場址之特殊幾何地形對於地震波有放大或震波受地形限制而能量不易散失之現象**。因此，場址及其周圍地區之覆蓋材料及岩盤的壓力波速或剪力波速、統體密度以及剪力模數等資料，及計算使用的方法或數據來源皆需敘明。」。



## 第七章 結論與建議

本研究以台灣電力公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司, 2016) 為目標對象, 彙整達仁建議候選場址極其鄰近地區之現地調查成果, 並以這些結果為依據, 人工產生不連續面之水力內寬資料, 利用不同模型進行解析, 以降低其不確定性。另外, 也針對有關水力內寬之參數進行敏感性之討論。以下為本研究之結論及建議。

### 7.1 結論

1. 本研究蒐集「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司, 2016)以及林衍丞等人(2015)之岩體裂隙資料, 發現兩處雖相鄰, 但兩處之裂隙特徵有相當程度之差異。未來場址裂隙特性特徵化時, 應注意裂隙特性之空間變化與量測值之代表性。
2. 影響水力內寬之關鍵參數包含不連續面位態、不連續面之粗糙係數( $JRC$ )及不連續面單壓強度( $JCS$ ), 透過 Barton-Bandis Model 得到力學內寬, 再透過轉換式得到水力內寬。研究發現,  $JRC$  對於力學內寬之影響顯著, 但透過轉換式得到水力內寬時, 反而是  $JCS$  對於水力內寬影響最顯著。不過其敏感度仍與其他參數組合有關。
3. 本研究參考「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台灣電力公司, 2016) 有關岩體裂隙之調查成果, 以及參考 Bandis 等人(1983)有關不同岩性不連續面之粗糙係數 ( $JRC$ )及不連續面單壓強度( $JCS$ )之範圍, 透過 Barton-Bandis Model 產生隨深度變化之水力內寬之資料, 本研究使用不同模型進行分析, 包含不考慮深度、考慮深度、多變數, 以及改良之綜合深度及多變數回歸分析。研究發現, 考慮越多因素, 其標準偏差能有效降低, 進一步能降低水力內寬之不確定性。
4. 不同的分析方法可能會影響結果之不確定性, 前期成果之瑞典 SKB 對於 Forsmark 場址之研究結果指出, 不連續面長度的範圍、岩性或是深度皆會影響分析結果, 本研究透過不同模型分析水力內寬亦發現類似現象。

5. 本計畫彙整過去針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」有關場址特性之相關修訂建議，並且於今年針對導則進行整體檢視，提供可公告之「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案」進行最後之修訂。

## 7.2 建議

本四年期之計畫研究成果顯著，對於我國建議候選場址之場址特性之資訊，根據可取得之資料，已有可觀之成果。對於處置場址之裂隙岩盤之水力-力學特性及坑道周圍之水力-力學耦合流場分析，也提供了許多審驗技術之方法以及需注意之處。以上之成果期能提供給管制單位及處置單位之重要參考依據。

## 參考文獻

1. Bandis, S. C., Lumsden, A. C., & Barton, N. R.. 1983. Fundamentals of rock joint deformation. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 20, No. 6, pp. 249-268). Pergamon.
2. Chang, C.P., Angelier, J., Lu, C. Y., 2009, Polyphase deformation in a newly emerged accretionary prism: folding, faulting and rotation in the southern Taiwan mountain range, Tectonophysics, 466, p395.
3. Lu, C. Y., Chang, K. J., Malavieille, J., Chan, Y. C., Chang, C. P. and Lee, J. C. , 2001, Structural evolution of the southeastern Central Range, Taiwan. Western Pacific Earth Science 1, p213.
4. NRC, 2015. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “ Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61, Draft Report for Comment,” NUREG-2175.
5. Pusch, R., 1989. Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 26, No. 1, pp. 79-83).
6. Quinn, P. M., Parker, B. L., & Cherry, J. A., 2011. Using constant head step tests to determine hydraulic apertures in fractured rock. Journal of contaminant hydrology, 126(1-2), 85-99.
7. Rutqvist, J., & Tsang, C. F., 2003. Analysis of thermal – hydrologic – mechanical behavior near an emplacement drift at Yucca Mountain. Journal of Contaminant Hydrology, 62, 637-652.
8. Rutqvist, 2015, Fractured rock stress-permeability relationships from in situ data and effects of temperature and chemical-mechanical couplings. Geofluids, 15(1-2), 48-66.
9. SKB, 2014. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-01.
10. Snow, D. T., 1968. Rock fracture spacings, openings, and porosities. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.
11. Snow, D.T., 1965. A parallel plate model of fractured permeable media. PhD thesis, University of California Berkeley, Berkeley, CA.

12. 台灣電力公司，2016，低放射性廢棄物最終處置技術評估報告 (LLWD2016)。
13. 呂玉菟，2004，使用震源機制逆推台灣地區應力分區狀況，碩士論文。
14. 宋國城，1991，五萬分之一臺灣地質圖及說明書—恆春半島，中央地質調查所。
15. 林衍丞、蘇兆輝、周允文、賴明煌，2015，南迴公路硬頁岩隧道地質模式分析以豎井工區為例。
16. 林偉雄、林啟文、高銘健，1993，五萬分之一臺灣地質圖及說明書—大武，中央地質調查所。
17. 胡賢能、詹新甫，1984，台灣南迴鐵路沿線地區板岩系地層構造研究。
18. 原能會物管理局，2012，低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第0版)。
19. 原能會物管理局，2013，低放射性廢棄物處置場址特性與設施設計審查規範精進之研究，102FCMA009。
20. 原能會物管理局，2014，低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，103FCMA002。
21. 原能會物管理局，2016，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，104FCMA019。
22. 原能會物管理局，2017，106 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析，105FCMA011。
23. 原能會物管理局，2018，107 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之驗證評估研究，107FCMA002。
24. 許世孟，翁孟嘉，曾慶恩，顧承宇，譚志豪，2006，應用雙封塞水力試驗探討裂隙岩體之水力特性，2006 岩盤工程研討會論文集。



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

108 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術  
建立之關鍵課題研析  
子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置審查規範  
建立與工程障壁系統驗證技術研究

計畫編號：108FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：龔誠山

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 108 年 12 月



# 108 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術

## 建立之關鍵課題研析

### 子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置審查規範建立與工程障壁系統驗證技術研究

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：龔誠山

研究期程：中華民國 108 年 2 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 99 萬元(子計畫二經費)

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

中華民國 108 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)





# 目錄

第一章 前言 .....	1
1.1 計畫目的 .....	1
1.2 工作項目 .....	1
1.3 工作進度 .....	2
第二章 工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬技術回顧 .....	3
2.1 工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬技術回顧 .....	3
2.1.1 圍阻與遲滯功能研究回顧 .....	3
2.1.2 工程障壁系統之核種遷移評估技術 .....	6
2.2 「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」之工程障壁圍阻與 遲滯功能模擬回顧 .....	9
第三章 國內常用軟體之數值模型技術探討 .....	18
3.1 BLT-MS 介紹 .....	18
3.2 GoldSim 介紹 .....	23
3.3 RESRAD 介紹 .....	29
3.4 HydroGeoChem 介紹 .....	31
3.5 模式軟體用於工程障壁系統圍阻與遲滯分析之適用性探討 .....	36
第四章 工程障壁系統圍阻與遲滯功能之參數與功能關聯性分析 .....	39
4.1 測試案例之地下水流場模擬 .....	39
4.2 測試案例模擬結果 .....	43
4.3 工程障壁功能與遲滯效果比較 .....	60
第五章 我國低放射性廢棄物坑道處置工程障壁系統功能技術發展 建議 .....	63
5.1 對於 LLWD2016 報告之技術審驗與建議 .....	63
5.2 對於坑道處置工程障壁系統功能審驗技術發展建議 .....	63
5.3 對於低放處置工程障壁圍阻與遲滯功能之數值模式技術發展建 議 .....	64
第六章 總整「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導 則(第 0 版)」符合坑道處置精進建議 .....	66
參考文獻 .....	68

## 表目錄

表 1.3-1 工作進度表 .....	2
表 2.1.1-1 工程障壁之「圍阻」與「遲滯」功能及安全分析參數之關聯性.....	4
表 2.1.1-2 處置設施封閉後「廢棄物包件」須具備之功能考量.....	5
表 2.1.2-1 工程障壁圍阻與遲滯功能之核種傳輸模擬特徵與作用表..	7
表 2.2-1 達仁鄉建議候選場址工程障壁材料之參數設定(台電公司, 2017).....	11
表 2.2-2 烏坵鄉建議候選場址工程障壁材料之參數設定(台電公司, 2017).....	14
表 2.2-3 達仁鄉建議候選場址工程障壁正常劣化條件下之水力傳導係數比(台電公司, 2017).....	14
表 2.2-4 烏坵鄉建議候選場址工程障壁正常劣化條件下之水力傳導係數比(台電公司, 2017).....	15
表 2.2-5 核種在工程材料處於氧化環境與還原環境下之分配係數(台電公司, 2017).....	16
表 3.5-1 4 種核種傳輸程式初步比較表 .....	38

## 圖目錄

圖 2.1.1-1 評估地下水情節所需之核種遷移主要參數(日本土木學會, 2008).....	3
圖 2.1.2-1 廢棄物包件與工程障壁之核種遷移作用順序示意圖.....	7
圖 2.2-1 LLWD2016 報告場址尺度流場模擬成果示意圖(台電公司, 2017).....	11
圖 2.2-2 達仁鄉建議候選場址 A 類處置坑道工程障壁設計(台電公司, 2017).....	12
圖 2.2-3 達仁鄉建議候選場址 B、C 類處置坑道工程障壁設計(台電公司, 2017).....	12
圖 2.2-4 烏坵鄉建議候選場址 A 類處置坑道工程障壁設計(台電公司, 2017).....	13
圖 2.2-5 烏坵鄉建議候選場址 B、C 類處置坑道工程障壁設計(台電公司, 2017).....	13
圖 2.2-6 A 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台電公司, 2017).....	15
圖 2.2-7 B、C 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台電公司, 2017).....	16
圖 3.1-1 BLT-MS 模型建置流程示意圖(U.S.-NRC, 1996).....	18
圖 3.1-2 BLT-MS 程式主要模組耦合關聯性示意圖(U.S.-NRC, 1996).....	19
圖 3.1-3 BLT-MS 程式求解步驟之流程圖(U.S.-NRC, 1996).....	20
圖 3.2-1 GoldSim 傳輸路徑網路示意圖(GoldSim, 2018).....	24
圖 3.3-1 RESRAD OFFSITE 模組概念模式示意圖(U.S.NRC., 2015).....	29
圖 3.3-1 RESRAD 生物圈曝露途徑示意圖.....	31
圖 3.4-1 HGC 模式穩態分析流程圖(Yeh, G. T., 2008).....	34
圖 3.4-2 HGC 模式暫態分析流程圖(Yeh, G. T., 2008).....	35
圖 4.1-1 測試案例空間範圍示意圖.....	40
圖 4.1-2 測試案例模型網格示意圖.....	40
圖 4.1-3 測試案例邊界條件設定圖.....	41
圖 4.1-4 測試案例地下水壓力水頭分布圖.....	41
圖 4.1-5 測試案例地下水總水頭分布圖.....	42
圖 4.1-6 測試案例地下水速度分布與流線圖.....	42
圖 4.2-1 測試 1 Co-60 未考慮衰變模擬結果.....	45

圖 4.2-2	測試 2 Co-60 未考慮衰變模擬結果	45
圖 4.2-3	測試 3 Co-60 未考慮衰變模擬結果	46
圖 4.2-4	測試 4 Co-60 未考慮衰變模擬結果	46
圖 4.2-5	測試 5 Co-60 未考慮衰變模擬結果	47
圖 4.2-6	測試 6 Sr-90 未考慮衰變模擬結果	47
圖 4.2-7	測試 7 Sr-90 未考慮衰變模擬結果	48
圖 4.2-8	測試 8 Sr-90 未考慮衰變模擬結果	48
圖 4.2-9	測試 9 Sr-90 未考慮衰變模擬結果	49
圖 4.2-10	測試 10 Sr-90 未考慮衰變模擬結果	49
圖 4.2-11	測試 11 I-129 未考慮衰變模擬結果	50
圖 4.2-12	測試 12 I-129 未考慮衰變模擬結果	50
圖 4.2-13	測試 13 I-129 未考慮衰變模擬結果	51
圖 4.2-14	測試 14 I-129 未考慮衰變模擬結果	51
圖 4.2-15	測試 15 I-129 未考慮衰變模擬結果	52
圖 4.2-16	測試 16 Co-60 考慮衰變模擬結果	52
圖 4.2-17	測試 17 Co-60 考慮衰變模擬結果	53
圖 4.2-18	測試 18 Co-60 考慮衰變模擬結果	53
圖 4.2-19	測試 19 Co-60 考慮衰變模擬結果	54
圖 4.2-20	測試 20 Co-60 考慮衰變模擬結果	54
圖 4.2-21	測試 21 Sr-90 考慮衰變模擬結果	55
圖 4.2-22	測試 22 Sr-90 考慮衰變模擬結果	55
圖 4.2-23	測試 23 Sr-90 考慮衰變模擬結果	56
圖 4.2-24	測試 24 Sr-90 考慮衰變模擬結果	56
圖 4.2-25	測試 25 Sr-90 考慮衰變模擬結果	57
圖 4.2-26	測試 26 I-129 考慮衰變模擬結果	57
圖 4.2-27	測試 27 I-129 考慮衰變模擬結果	58
圖 4.2-28	測試 28 I-129 考慮衰變模擬結果	58
圖 4.2-29	測試 29 I-129 考慮衰變模擬結果	59
圖 4.2-30	測試 30 I-129 考慮衰變模擬結果	59
圖 4.3-1	案例 1~案例 3 之觀測點濃度歷線比較圖	60
圖 4.3-2	案例 2、案例 4 與案例 5 之觀測點濃度歷線比較圖	61
圖 4.3-3	案例 2、案例 7 與案例 12 之觀測點濃度歷線比較圖	62

## 摘要

本年度子計畫二略可分為兩大目標，其一為針對台電公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」之與處置工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬相關之技術進行審驗。另一目標為總整「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)」。

安全分析報告審查導則總整工作，依主計畫執行規劃將導則章節區分為3階段進行總整，最後再預留1次總審閱之執行方式。配合主計畫執行4次專家委員審議會議，逐次審閱與修正各章節條文內容。總整「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)」於第六章。

處置工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬技術審驗部分，透過相關研究成果與國內常用數值模式功能之回顧與分析，並採用 HydroGeoChem 模式進行測試案例模擬與分析，藉以了解處置設施設計參數與處置安全功能間之關聯性。就現階段之坑道式處置設施設計概念而言，處置窖設計為確保處置設施達成安全功能之重要障壁單元。經過測試案例分析後發現，測試案例之處置窖設計以擴散係數對於核種傳輸特性之敏感性高於水力傳導係數。

考量混凝土擴散功能或透水功能設計並未包含於我國「混凝土工程施工規範與解說」及「施工綱要規範」等技術規範中。而工程障壁系統之擴散係數及水力傳導係數之設計與實現性，與處置設施封閉後之遲滯功能具有直接之關聯性。建議應針對確認混凝土之水力傳導係數與擴散係數設計，以及處置窖完工後品質確認檢驗，持續發展其審驗技術。

# Abstract

The subproject 2 can be divided into two major goals this year. The first is to review the Taipower Company's "Technical Evaluation Report on the Final Disposal of Low-Level Radioactive Waste" which parts related to the simulation of the containment and retardation function of the disposal engineering barrier system. The other target is to organize the "Guidelines for the Review of the Safety Analysis Report for Final Disposal Facilities for Low-Level Radioactive Wastes (Version 0)".

According to the main project's implement planning, The organized working of Guidelines for the Review of the Safety Analysis Report is separated into 3 phases to discussion and organization. Following up is the general review of the draft contents In the final phase. Each phase had held an expert committee review meeting by the main project, to review and modify the content of each chapter. The "Guidelines for the Review of the Safety Analysis Report for Final Disposal Facilities for Low-Level Radioactive Wastes (Version 0)" described in Chapter 6.

The working of technical review of the containment and retardation function of the disposal engineering barrier system. Through the review of relevant research results and the commonly used numerical model functions, to select the HydroGeoChem as the simulation model. Test case simulations are used to understand the correlation between design parameters and safety functions of the disposal facility.

Based on the current concept design of the tunnel disposal facility, the disposal vault is one of the important barriers units which to ensure that the disposal facility can achieve safety functions. Based on the result of the testing case, the diffusion coefficient that is more sensitive to nuclear migration characteristics than hydraulic conductivity.

Because of the diffusion function or the permeable function design of the concrete are not included in the technical specifications such as "concrete

construction specification and explanation" and "construction outline specification".

The design and implementation of the diffusion coefficient and hydraulic conductivity of the engineering barrier system are directly related to the retardation function. It is recommended that the design of the hydraulic conductivity coefficient and diffusion coefficient of the concrete should be confirmed, as well as the confirmation test after the construct of the disposal, and the verification technology should be continuously developed.

# 第一章 前言

## 1.1 計畫目的

為提升低放射性廢棄物處置安全評估成果的可信賴度，並提供放射性廢棄物安全管置機關足夠之管制技術，主計畫「108 年低放射性廢棄物處置安全評估驗證技術研究」將因應台電公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(台電公司，2017)(以下簡稱 LLWD2016 報告)有關場址地質特性、工程障壁系統功能、處置坑道結構穩定性、設計情節核種傳輸與設計情節生物圈劑量評估進行實質技術驗證，並且協助管制單位強化處置安全評估獨立審查能力，研究成果將提供做為低放處置安全分析報告審查規範精進之建議，提升安全管制能量。

本年度以台電公司「LLWD2016 報告」為審驗對象，進一步提出(1) 低放射性廢棄物近岸坑道處置之場址參數驗證技術研究；(2) 低放射性廢棄物坑道處置審查規範建立與工程障壁系統驗證技術研究；(3) 低放射性廢棄物近岸坑道處置之坑道結構穩定驗證技術研究；(4) 低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節核種傳輸驗證技術研究；(5) 低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節之生物圈劑量評估驗證技術研究等 5 個研究方向進行研析。

子計畫二針對台電公司「LLWD2016 報告」之處置設施工程障壁系統概念設計，以及兩處建議候選場址設計情節與替代情節，依安全分析模擬技術之本項子計畫略可分為兩大目標，其一係針對台電公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」之處置設施工程障壁系統概念設計(6.2 節)，以及兩處建議候選場址設計情節與替代情節之安全分析模擬技術(8.2 節、8.3 節、8.5 節、8.6 節)之分析模式與參數設定(8.2.3 節、8.3.2 節、8.5.3 節、8.6.2 節)，與處置工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬相關之技術進行模擬驗證。另一目標為總整「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)」。

## 1.2 工作項目

工作項目分別為：(1).工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬技術回顧。(2).國內常用軟體之數值模型技術探討。(3).工程障壁系統圍阻與遲滯功能之參數與功能關聯性分析。(4).我國低放射性廢棄物坑道處置工程障壁系統功能技術發展建議。(5).總整「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」符合坑道處置精進建議。



### 1.3 工作進度

工作進度如表 1.3-1 所示。

表 1.3-1 工作進度表

工作項目	年月												備註
	108 1	108 2	108 3	108 4	108 5	108 6	108 7	108 8	108 9	108 10	108 11	108 12	
子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置審查規範建立與工程障壁系統驗證技術研究			※			※			※			※	
工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬技術回顧													
國內常用軟體之數值模型技術探討													
工程障壁系統圍阻與遲滯功能之參數與功能關聯性分析													
提出我國低放射性廢棄物坑道處置工程障壁系統功能技術發展建議													
總整「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」符合坑道處置精進建議													
撰寫成果報告													
工作進度估計百分比 ( 累 積 數 )	0%	10%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
預定查核點	<p>第一季：應完成工項一 60%與工項二約 20%研析內容。</p> <p>第二季：應初步完成工項一，工項二 60%與工項三約 20%研析內容，並提出期中報告。</p> <p>第三季：應初步完成工項一與工項二，工項三 60%與工項四約 20%研析內容，工項五應至少召開 1 次專家會議。</p> <p>第四季：完成各工項要求與修訂建議，並完成撰寫研究成果報告。</p>												
說明：	<p>1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。</p> <p>2.「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1)工作天數，(2)經費之分配，(3)工作量之比重，(4)擬達成目標之具體數字。</p> <p>3.每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。</p>												

## 第二章 工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬技術回顧

### 2.1 工程障壁系統之圍阻與遲滯功能模擬技術回顧

#### 2.1.1 圍阻與遲滯功能研究回顧

對於坑道式處置設施而言，其核種傳輸情節以地下水傳輸途徑最具代表性。針對地下水傳輸情節之核種傳輸分析，需考量天然障壁受到環境長期演化影響，以及工程障壁受到周邊地下水、地質與岩盤特性影響之長期狀態變化，據以進行安全分析作業，如圖 2.1.1-1 所示。

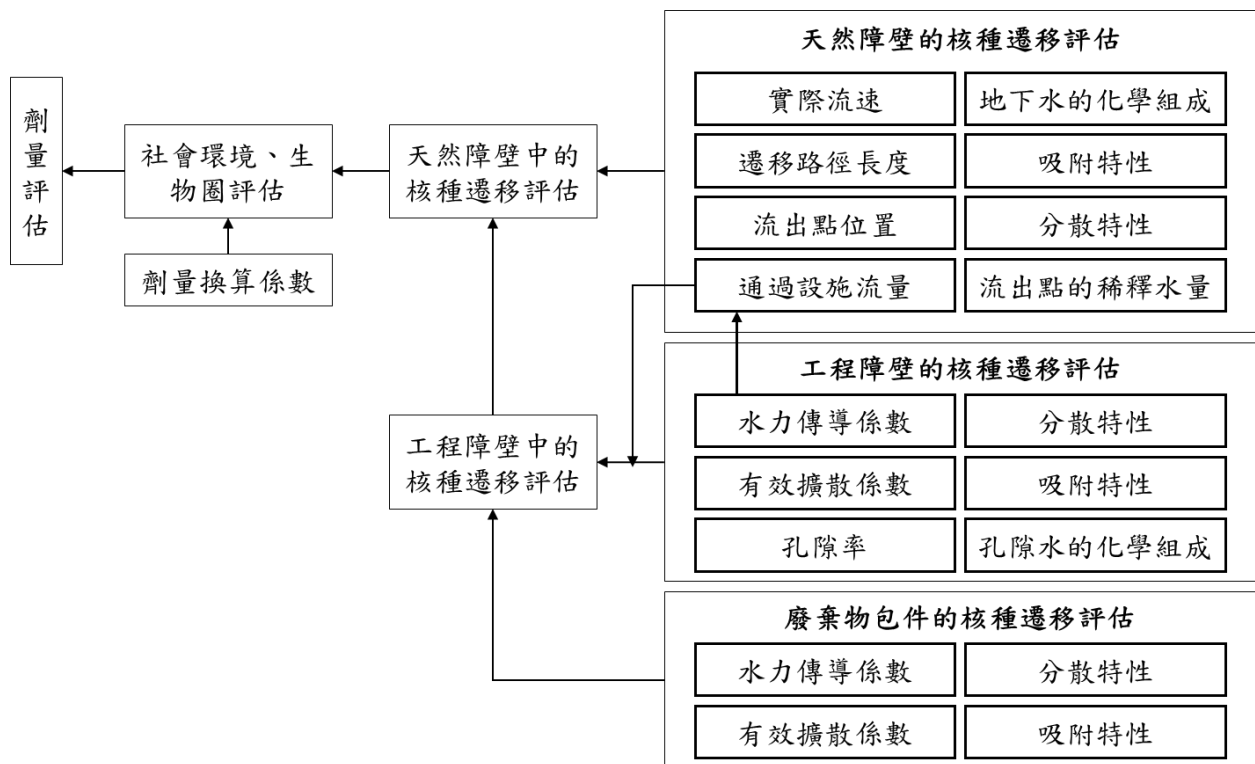


圖 2.1.1-1 評估地下水情節所需之核種遷移主要參數(日本土木學會，2008)

IAEA SSR-5 將處置設施主要安全功能區分為多重安全功能、圍阻功能、隔離功能、監測與控制等。其中，以「圍阻」與「隔離」之安全功能為主要考量。監測與控制考量則屬於輔助功能，藉以確認處置設施解除監管前之「圍阻」與「隔離」功能仍可發揮預期之功能。而多重安全功能則是利用多重障壁系統所含各障壁單元，實現各自獨立之安全功能，主要用於提升處置系統之安全可靠性。「圍阻」與「隔離」功能設計考量均包含「遲滯」功能考量，主要是利用其「遲滯」效應之作用對象進行區分。在工程障壁中之「遲滯」功能屬於「圍阻」功能之一部分，而在地質圈中之「遲滯」功能屬於「隔離」功能之一部分。彙整前期研究有關於

工程障壁系統「圍阻」與「遲滯」功能之主要考量如下：

- (1)「圍阻」功能(含遲滯功能)的要求為：於廢棄物可能導致的危害因衰變而有顯著降低之前，應確保圍阻功能。
- (2)「隔離」功能(含遲滯功能)的要求為：將放射性廢棄物與其可能導致的危害，隔離於可接近之生物圈環境以外
- (3)「圍阻」功能的要求目標：「避免與降低放射性核種釋出，用以圍阻放射性廢棄物所含核種於工程障壁系統中，自然衰變至其可能導致的危害有顯著降低時」。
- (4)「遲滯」功能的要求目標：「減緩放射性核種釋出至生物圈之時間與濃度，確保可將放射性廢棄物與其可能導致的危害，隔離於可接近之生物圈環境以外」。
- (5)工程障壁之「圍阻」與「遲滯」功能的主要設計特徵：「可實現圍阻與遲滯功能之各種物理或化學之特徵與作用，如：防滲性、抗腐蝕性、溶解作用、溶出率與溶解度、核種留存於設施內之數量與活度，以及核種遷移之平流、擴散與吸附等影響遲滯功能之特性」。

基於上述安全功能考量，欲了解工程障壁系統的「圍阻」與「遲滯」功能表現，可經由核種遷移評估模擬成果之核種自處置設施釋出的時間來判斷。當處置設施封閉後，越晚釋出核種之工程障壁系統設計，則具有越良好的圍阻功能。由圖 2.1.1-1 可知，與「遲滯」功能相關之核種遷移模擬主要包含兩部分，「工程障壁的核種遷移評估」與「廢棄物包件內的核種遷移評估」。其中，「工程障壁的核種遷移評估」可依前期研究成果，彙整出工程障壁之「圍阻」與「遲滯」功能及「安全分析參數」之關聯性如表 2.1.1-1 所列。可發現其重要之參數為「通過設施流量」、「有效擴散係數」與「吸附分配係數」。

表 2.1.1-1 工程障壁之「圍阻」與「遲滯」功能及安全分析參數之關聯性

設計對象	設計目標	工程設計項目	安全分析關鍵參數	相關之主要設計特徵
坑道設施	坑道內滲水量	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 坑道滲水控制</li> <li>• 阻水設計(不透水布、灌漿填縫等)</li> <li>• 排水設計(坑道外排水隧道)</li> </ul>	「通過設施流量」	降低處置單元水滲透
處置窖 (鋼筋混凝土)	維持擴散遷移特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 有效擴散係數</li> <li>• 材料尺寸</li> <li>• 裂縫開口面積</li> </ul>	「有效擴散係數」	工程障壁具良好遲滯功能

設計對象	設計目標	工程設計項目	安全分析關鍵參數	相關之主要設計特徵
		<ul style="list-style-type: none"> <li>礦物組成</li> </ul>		
	吸附放射性核種	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料尺寸</li> <li>水泥材料填充量</li> <li>礦物組成</li> </ul>	「吸附分配係數」	工程障壁具良好遲滯功能
回填 (混凝土)	形成高水力反差環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>回填材料之孔隙率</li> <li>水力傳導係數</li> </ul>	「通過設施流量」	降低處置單元水滲透
	吸附放射性核種	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料尺寸</li> <li>水泥材料填充量</li> <li>礦物組成</li> </ul>	「吸附分配係數」	工程障壁具良好遲滯功能
低透水層 (膨潤土)	降低通過低透水層的地下水量(限制平流傳輸)	<ul style="list-style-type: none"> <li>蒙脫石含量與礦物組成</li> <li>密度</li> <li>水力傳導係數</li> <li>材料尺寸</li> </ul>	「通過設施流量」 (膨潤土之膨脹壓與水力傳導係數關聯性)	降低處置單元水滲透 工程障壁具良好遲滯功能

廢棄物包件是指廢棄物體與其盛裝容器，回顧日本土木學會「低放射性廢棄物坑道處置核種遷移參數評估技術之研究」(日本土木學會，2008)中有關於「廢棄物包件」於處置設施封閉後須具備或考量之功能整理如表 2.1.1-2 所列。

表 2.1.1-2 處置設施封閉後「廢棄物包件」須具備之功能考量

功能	功能考量
確保力學安定性	各組成構件保持在要求的位置，沒有顯著變形。
抑制放射性核種釋出	降低放射性核種的釋出率，抑制核種遷移。
抑制地下水移動	抑制通過工程障壁的地下水流量。
確保化學安定性	避免處置環境與工程障壁間的相互作用導致劣化產生。

表 2.1.1-2 中所列之功能考量主要是透過盛裝容器與廢棄物體品質控制來達成。依我國「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之規定，僅有處置容器具有符合其第 4 條第 2 項設計使用年限至少能維持一百年結構完整功能，或同條第 3 項經主管機關核

准可維持三百年結構完整功能。其餘之盛裝容器並不具備結構完整功能。因此，廢棄物體品質的控制亦為達成廢棄物包件功能之重要考量。

依「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之第 5 條與第 6 條規定，低放處置設施最終處置之廢棄物，應符合：自由水之體積不得超過總體積之 0.005；在常溫常壓下不致引起爆炸；具耐火性；不得含有毒性、腐蝕性及感染性之物質；不得含有或產生危害人體之有毒氣體、蒸氣及煙霧。且低放射性廢棄物經均勻固化後，應符合：水泥或高溫熔融固化體機械強度以單軸抗壓強度測試，每平方公分應大於 15 公斤；瀝青固化體機械強度以針入度測試，應小於 100；溶出指數應大於六；通過耐水性測試、耐候性測試、耐輻射測試與耐菌性測試。因此，均勻固化的廢棄物體為經過安定化之物質，具有物理與化學性質穩定的特性。符合安全管理規則要求即已涵蓋「確保力學安定性(抗壓強度)」、「抑制放射性核種釋出(溶出指數)、抑制地下水移動(溶出指數)」與「確保化學安定性」等特性之基本功能。

## 2.1.2 工程障壁系統之核種遷移評估技術

低放處置設施封閉後的核種遷移評估涉及相當多的傳輸介質，包含：廢棄物、盛裝容器、填充材料、處置窖材料、緩衝材料、回填材料...等(工程障壁系統)，以及岩體、土壤、含水層、河川...等(地質圈)。核種傳輸的過程則是由：1.放射性核種開始溶於水中、2.放射性核種由廢棄物包件中釋出至工程障壁中、3.放射性核種隨著水流在工程障壁中遷移、4.放射性核種由處置設施中釋出至地質圈、5.放射性核種隨著水流在地質圈中遷移與分流，最後到達地質圈與生物圈的評估邊界。因此，核種遷移的過程將會受到地質圈水文地質特性、處置設施設計(含廢棄物包件)、水文環境、地球化學特徵與所處置之核種特性。因此，欲完整模擬如此複雜的過程，需要針對每一個欲模擬的特徵過程分別建立單獨之三維模式與模型，用以模擬與反應其各項特性。受限於資料精度與演算資源，實務上並無法採用此方式進行模擬，而是採用簡化模式的方式進行模擬。

雖然稱為簡化模式，該模式仍應考慮核種釋放與遷移的重要物理過程與參數，同時儘可能的保持其準確性。此外，模式應該儘可能的具有彈性，用以因應評估不同情節的需求。例如：可模擬流場時變特徵的模式比採用固定流場特徵的模式，對於模擬核種遷移受流場變化影響之反應，在模型與案例設計上均具有較佳之彈性。

針對本研究課題，液體傳輸情節之工程障壁系統圍阻與遲滯功能模擬技術，其涉及之核種遷移評估略可分為，「工程障壁的核種遷移評估」與「廢棄物包件的核種遷移評估」。

主要模擬的特徵與作用分別包含：容器破壞導致核種開始釋出、核種自廢棄物體傳輸至破損容器外、核種於工程障壁中遷移，以及容器破壞前後之流場特徵。彙整其模擬的特徵如表 2.1.2-1 與圖 2.1.2-1，並說明如下：

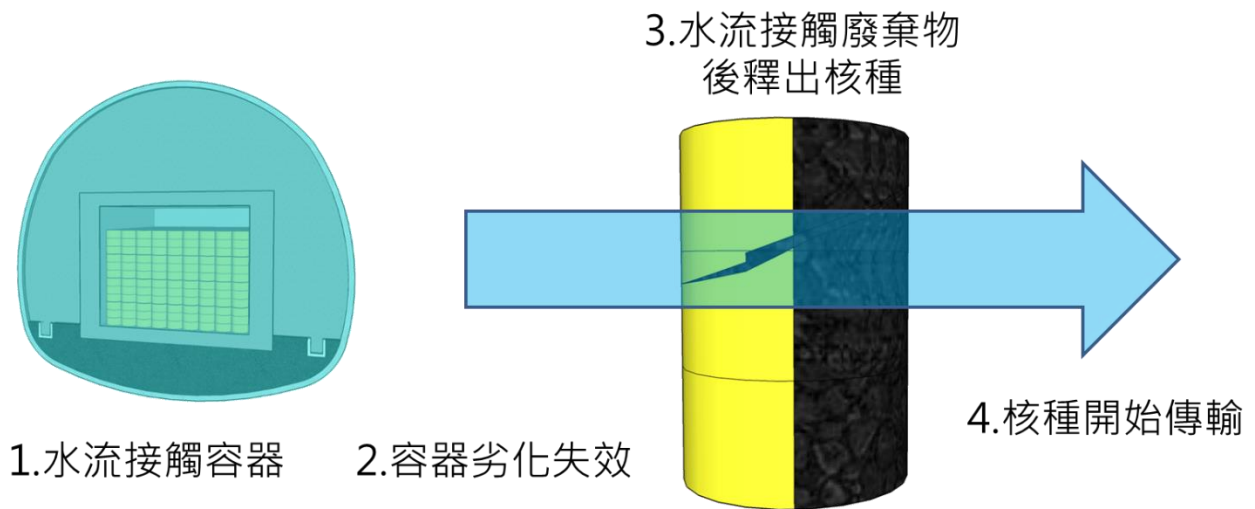


圖 2.1.2-1 廢棄物包件與工程障壁之核種遷移作用順序示意圖

表 2.1.2-1 工程障壁圍阻與遲滯功能之核種傳輸模擬特徵與作用表

主要模擬對象	模擬內容說明
容器破壞導致核種開始釋出	<p>特徵與作用影響說明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 依照環境與容器特性差異，有不同的破壞機制與時間。</li> <li>• 主要影響開始釋出的時間與可釋出總量。</li> </ul> <p>模擬特徵：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 發生破壞的時間與容器數量</li> <li>• 瞬時破壞或逐漸破壞</li> </ul>
核種自廢棄物體傳輸至破損容器外	<p>特徵與作用影響說明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 不同的廢棄物型態與流場特徵會有不同的釋出特性。</li> <li>• 主要影響釋放至代表廢棄物體之計算單元的核種釋放率。</li> <li>• 是否考量核種溶解限值亦會對核種釋放率產生影響。</li> </ul> <p>模擬特徵：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 表面淋洗</li> <li>• 擴散</li> <li>• 腐蝕溶出</li> <li>• 不同核種於水體中的溶解度限值</li> </ul>

<p>容器破壞前後之流場特徵</p>	<p>特徵與作用影響說明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 水流為液體傳輸情節核種傳輸之主要載體。</li> <li>• 流速快慢將會決定核種傳輸呈現平流主導特性或擴散主導特性。</li> </ul> <p>模擬特徵：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 不同維度之地下水流場模擬</li> <li>• 穩態與非穩態流場模擬</li> </ul>
<p>核種於工程障壁中之遷移特徵</p>	<p>特徵與作用影響說明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 模擬核種於工程障壁中的遷移特性。</li> <li>• 不同介質與流場特徵將會影響核種遷移速度與濃度分布。</li> <li>• 模擬結果可視為處置設施核種釋出率。</li> </ul> <p>模擬特徵：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 平流</li> <li>• 擴散</li> <li>• 吸附</li> <li>• 延散</li> </ul>

#### (1) 容器破壞導致核種開始釋出

低放射性廢棄物所含核種在接觸到水體後，才會因核種溶入水中後而開始遷移。基於處置設施設計功能考量，在運轉階段各類的作業程序中，均會避免產生水體接觸到廢棄物的現象與機會。而當處置設施封閉後，不論是近地表式處置或是坑道式處置均會利用多層的工程障壁系統來抑制水體過早接觸到廢棄物包件，或降低水體在障壁內的流量。因此，於處置設施封閉後，廢棄物包件開始有機會接觸到水體，其盛裝容器將會因腐蝕作用而產生劣化而破損，進而水體接觸到盛裝容器內的廢棄物體後，核種開始溶入水體而開始遷移。就核種遷移模擬的角度而言，其關鍵特徵為盛裝容器開始破壞的時間與破壞的數量。

#### (2) 核種自廢棄物體傳輸至破損容器外

核種由廢棄物體釋放至水體的特徵，取決於含有核種之廢棄物體物理與化學特性。低放射性廢棄物處置設施之廢棄物體類型大致可分為：固化體、活化金屬、壓縮金屬或灰渣，以及脫水樹脂等。而核種釋放至水體的機制與其核種存在的形式有關，以離子型式存在之放射性核種，在接觸到水體後將立即釋放。若此離子型態之放射性核種屬於均勻分布於廢棄物體之型態(例如：安定化之用過離子交換樹脂)，同樣在接觸到水體後瞬時溶出，但其傳輸至容器外的機制則受到廢棄物體型式的影響，(例如：呈擴散傳輸、廢棄物體吸附功能等)。而以表面污染型式存在之放射性核種，其釋放在考量上亦屬於瞬時釋出，但可能會受到核

種之溶解限值以及自物體表面脫離速率之影響。具有化學鍵結的放射性核種，則需先透過化學反應將放射性核種轉化為可溶解型式(例如：活化金屬在金屬基質腐蝕後，才會釋出放射性核種)。

就核種遷移模擬的角度而言，其關鍵特徵包含兩個部分：

- 1.核種溶解特性：主要之關鍵考量為核種溶解率與溶於水中的溶解限值。常見的溶解率模擬方式為瞬時溶解，以即隨金屬腐蝕率釋出後順時溶解。
- 2.核種於廢棄物體中之遷移特性：遷移模擬主要考量反應核種之平流、擴散與吸附等特性，其關鍵考量與(4)核種於工程障壁中之遷移特徵所述相同。

### (3) 容器破壞前後之流場特徵

容器破壞前之流場特徵用於判斷容器破壞特性，而容器破壞後之流場特性用於反應工程障壁系統內之流量分布特性，而流量分布特性為核種遷移呈現擴散主導或平流主導之關鍵。主要之關鍵考量為流量或流速之空間分布與時變特性，具關聯性之特徵考量包含：介質幾何形狀、孔隙率、水力傳導係數、場址水文地質特徵等。

### (4) 核種於工程障壁中之遷移特徵

核種於工程障壁中之遷移特性模擬，主要之關鍵考量為放射性核種自處置設施或各別工程障壁單元之釋出率，其為核種濃度隨時間變化之特徵。由於平流特性受流場特性影響，因此進行遷移特徵模擬前需先釐清流場特性，再進行核種遷移模擬。具關聯性之特徵考量包含：流場特徵、有效擴散係數、吸附特性、介質幾何形狀等。

## 2.2 「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」之工程障壁圍阻與遲滯功能模擬回顧

針對台電公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」(以下簡稱 LLWD2016 報告)之處置設施工程障壁系統概念設計，以及兩處建議候選場址設計情節與替代情節之安全分析模擬技術之分析模式與參數設定，摘述其圍阻與遲滯功能模擬時，所採用模式、參數與所模擬之特徵或作用，並依據前節所述之模擬技術對「LLWD2016 報告」之模擬技術進行回顧分析。



### (1) 容器破壞導致核種開始釋出

依「LLWD2016 報告」6.2 節所述，處置場在概念設計階段，廢棄物盛裝容器以 55 加侖桶為主，此外尚有 83 加侖桶、混凝土盛裝容器以及蘭嶼貯存場之 3x4 與 3x1 桶裝之重裝容器。未來處置場可接收之盛裝容器需符合「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」第 8 條及 9 條規定。於「LLWD2016 報告」8.2.3 節與 8.5.3 節中則是說明於核種遷移模擬時，僅以 A 類處置容裝填 1,500 桶 55 加侖桶、B/C 類處置容裝填 900 桶 55 加侖桶為其考量。分析起點設定為處置場封閉後，假設此時廢棄物體內孔隙充滿水，55 加侖桶內未利用之空間亦充滿水。

依其說明可知，該報告僅以 55 加侖桶作為評量代表，且處置設施全數盛裝容器假設於處置設施封閉時即已失效。換言之，盛裝容器於處置設施封閉後即喪失其圍阻功能，屬於保守假設。考量低放處置設施將可能接收具圍阻功能之處置容器，其容器破壞考量至少需包含可能採用之處置容器。

### (2) 核種自廢棄物體傳輸至破損容器外

依「LLWD2016 報告」6.2 節所述，該報告對於廢棄物體內之活化金屬核種，其釋出率參考 JAEA 文獻(2013)設定為每年  $3.3 \times 10^{-6}$ ；其他廢棄物核種則是保守假設處置設施封閉後核種即完全溶出。經釋出或溶出之核種，將完全溶解於廢棄物內之孔隙水。可知，該報告主要採用核種瞬時溶出至水體，另考慮核種清單中之活化金屬核種 C-14、Ni-63、Ni-59 與 Nb-94 採金屬腐蝕釋出率估算，以及不考慮核種溶於水之限值。於「LLWD2016 報告」8.2.3 節與 8.5.3 節中說明其以 0.6 m x 0.6 m x 0.9 m 作為每個 55 加侖桶之控制範圍，於桶間填充水泥砂漿，桶內未利用之空間則假設充滿水，故在進行 Cell 模組設定時，所考量之液體體積為 0.145 m<sup>3</sup>，水泥類材料重量為 526 kg。

依其說明可知，報告中已陳述核種溶解特徵須說明之溶解率考量與水中溶解限值考量，惟其金屬釋出率是參考日本文獻設定，並未說明是否適合本土環境。核種溶解至水中後則是採用 Goldsim 之區塊模式進行核種遷移模擬。

### (3) 容器破壞前後之流場特徵

依「LLWD2016 報告」8.2.3 節與 8.5.3 節說明，其各情節之處置設施與地質圈地下水流場分析均採用 HYDROGEOCHEM 模式模擬，再將其流量與流徑等成果，作為 GoldSim 使用之輸入參數。地下水流場分析依情節設定之降雨量、海水位升降、抬升與侵蝕率等設定，分別採用不同模型進行場址地下水流場模擬。近場之工程障壁劣化過程，亦使得處置

設施於不同時間有不同之水力傳導特性，模擬時亦分別採用不同模型進行參數設定後進行模擬，其場址尺度地下水模擬成果如圖 2.2-1 所示。

容器破壞後之流場特徵與設施劣化之推論有關。「LLWD2016 報告」於 6.2 節與 6.3 節說明了 2 處建議候選場址之工程障壁設計規劃，如圖 2.2-2~圖 2.2-5。工程障壁各構件之設定條件包括：飽和密度、孔隙率、水力傳導係數及擴散係數，詳表 2.2-1 及表 2.2-2 所列。

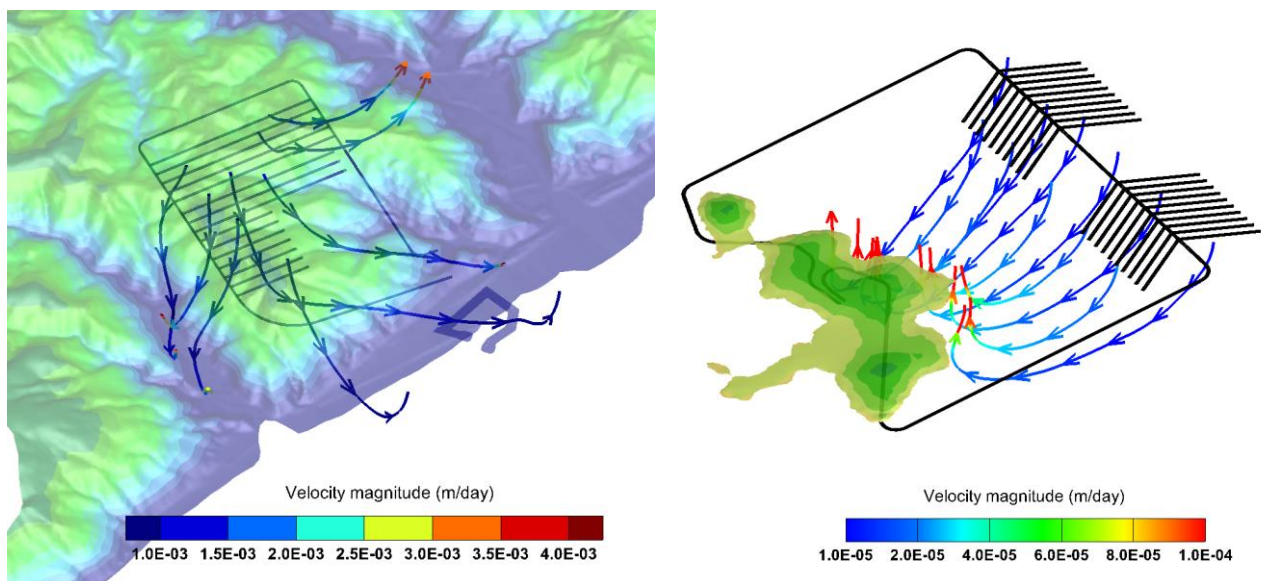


圖 2.2-1 LLWD2016 報告場址尺度流場模擬成果示意圖(台電公司, 2017)

表 2.2-1 達仁鄉建議候選場址工程障壁材料之參數設定(台電公司, 2017)

構件	飽和密度 (kg/m <sup>3</sup> )	孔隙率 (-)	水力傳導係數 (m/s)	擴散係數 (m <sup>2</sup> /s)
廢棄物體	1,900	0.35	2.0E-09	7.0E-10
填充材料	2,100	0.30	1.0E-09	4.0E-10
處置窖	2,400	0.20	1.0E-10	1.0E-12
緩衝材料	2,000	0.40	1.0E-12	2.0E-10
基礎層	2,400	0.20	1.0E-10	1.0E-12
回填材料	2,100	0.30	2.0E-10	1.0E-10
二次襯砌	2,200	0.25	1.0E-09	2.0E-09
開挖擾動區	2,300	0.25	1.0E-09	2.0E-09

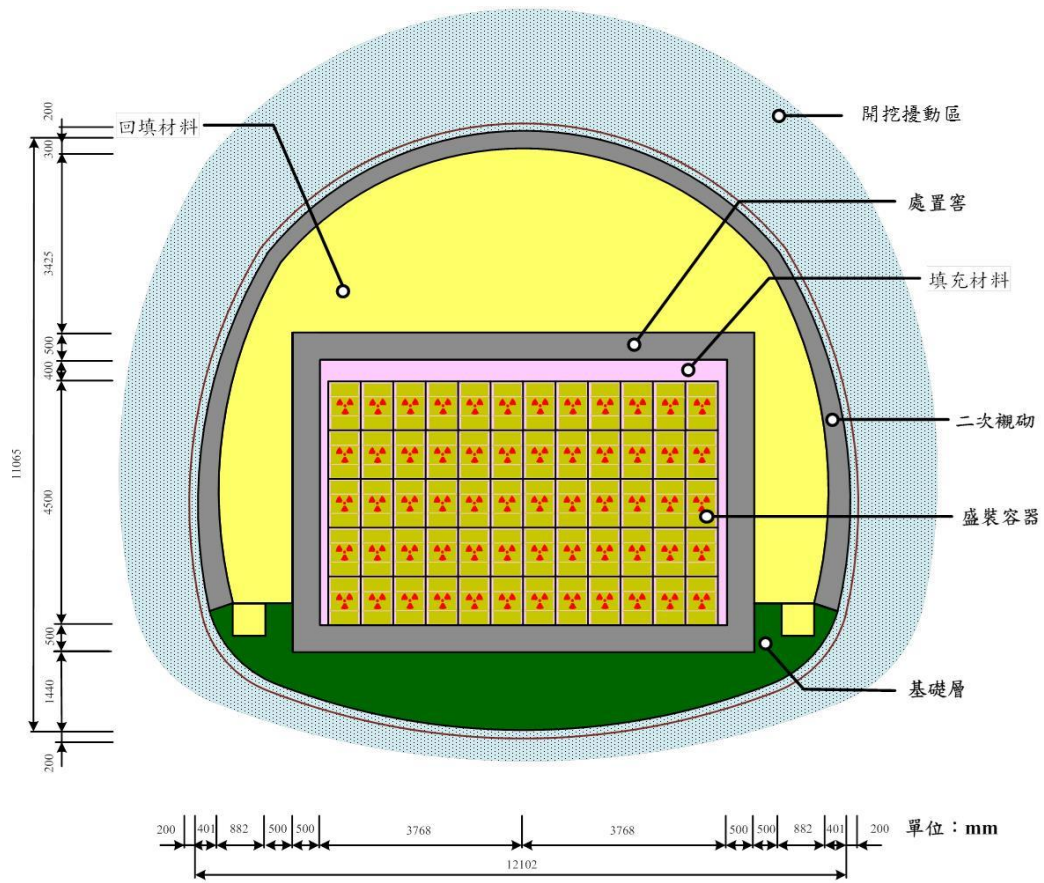


圖 2.2-2 達仁鄉建議候選場址 A 類處置坑道工程障壁設計(台電公司, 2017)

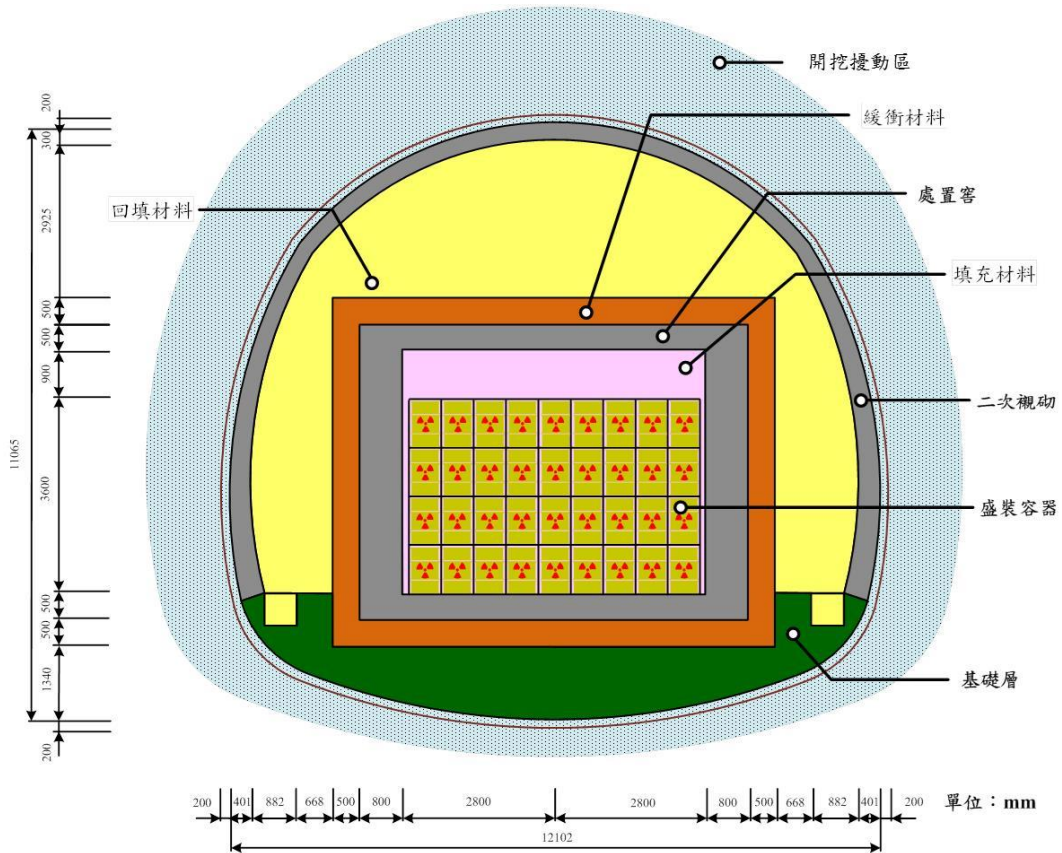


圖 2.2-3 達仁鄉建議候選場址 B、C 類處置坑道工程障壁設計(台電公司, 2017)



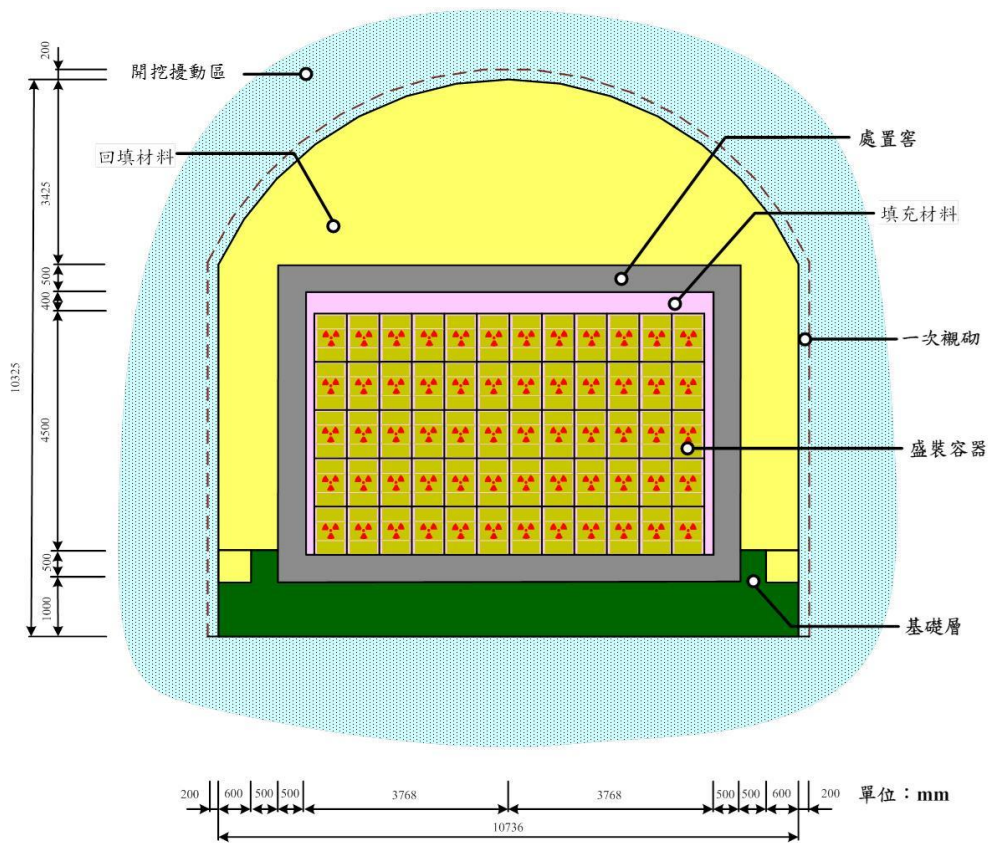


圖 2.2-4 烏坵鄉建議候選場址 A 類處置坑道工程障壁設計(台電公司, 2017)

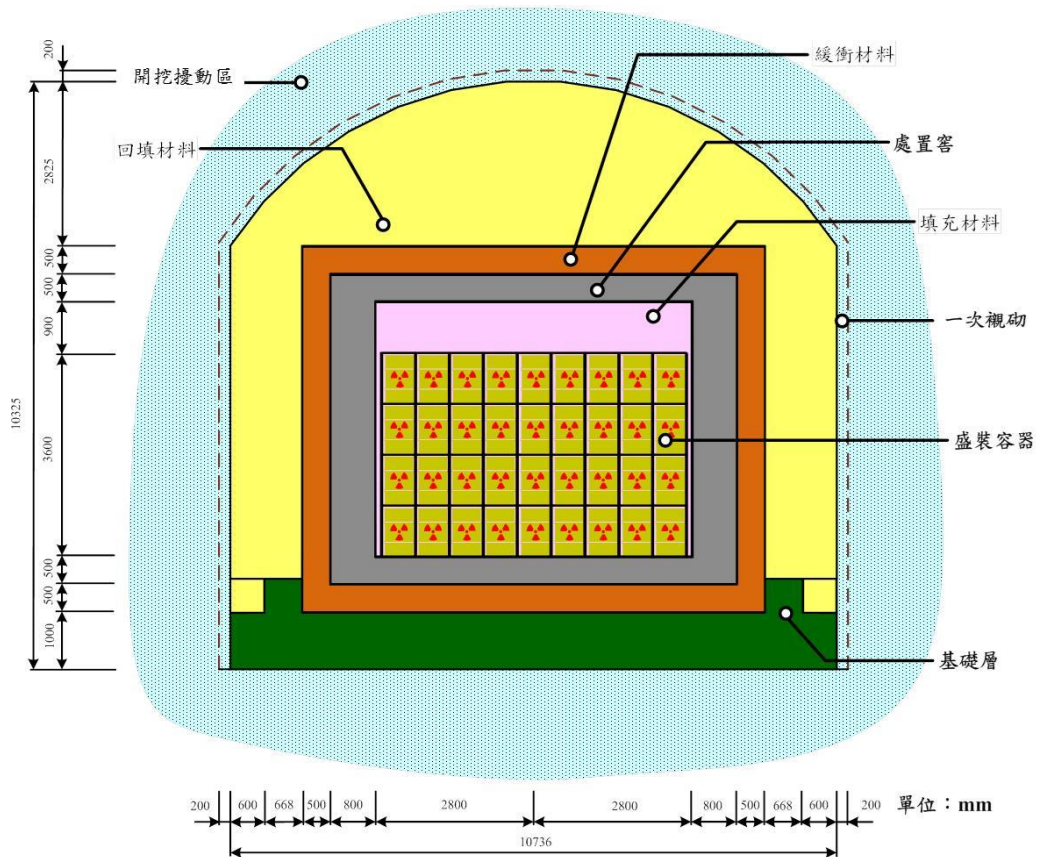


圖 2.2-5 烏坵鄉建議候選場址 B、C 類處置坑道工程障壁設計(台電公司, 2017)

表 2.2-2 烏坵鄉建議候選場址工程障壁材料之參數設定(台電公司, 2017)

構件	飽和密度 (kg/m <sup>3</sup> )	孔隙率 (-)	水力傳導係數 (m/s)	擴散係數 (m <sup>2</sup> /s)
廢棄物體	1,900	0.35	4.0E-09	7.0E-10
填充材料	2,100	0.30	2.0E-09	4.0E-10
處置窖	2,400	0.20	2.0E-10	1.0E-12
緩衝材料	2,000	0.40	1.0E-11	2.0E-10
基礎層	2,400	0.20	2.0E-10	1.0E-12
回填材料	2,100	0.30	4.0E-10	1.0E-10
開挖擾動區	2,300	0.25	2.0E-09	2.0E-09

備註：因烏坵鄉建議候選場址處於海水環境中，易使工程障壁劣化，故水力傳導係數較達仁鄉建議候選場址高。

「LLWD2016 報告」參考 SKB 於 2014 年發行之 R14-14 報告(SKB, 2014)，以調整回填材料水力傳導係數之方式，再配合不同時期下之流場條件，評估回填材料在不同劣化條件下的地下水流量。綜合考量處置場概念設計、材料特性、劣化等因子後，設定回填材料在不同時間下，因劣化造成水力傳導係數改變之比例，如表 2.2-3 與表 2.2-4 所列。

依其說明可知，其地下水流場模擬分為不同尺度、工程障壁劣化前、工程障壁劣化後等不同數值模型分別模擬。該報告參考 SKB 採調整水力傳導係數之方式模擬設施劣化之影響，惟其設施劣化之比例值設定，雖依參考演化進行研判但並無數值之明確依據。

表 2.2-3 達仁鄉建議候選場址工程障壁正常劣化條件下之水力傳導係數比(台電公司, 2017)

工程障壁 (A 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1.5	5	10
處置窖	1	1.5	5	10
回填材料	1	1.5	5	10
二次襯砌	1	2	8	10
開挖擾動區	1	2	8	10
工程障壁 (B、C 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1	1.5	2
處置窖	1	1	1.5	2

緩衝材料	1	1	1.5	2
回填材料	1	1.5	5	10
二次襯砌	1	2	8	10
開挖擾動區	1	2	8	10

表 2.2-4 烏坵鄉建議候選場址工程障壁正常劣化條件下之水力傳導係數比(台電公司, 2017)

工程障壁 (A 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	2	10	100
處置窖	1	2	10	100
回填材料	1	2	10	100
開挖擾動區	1	4	20	100
工程障壁 (B、C 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1	1.5	2
處置窖	1	1	1.5	2
緩衝材料	1	1	1.5	2
回填材料	1	2	10	100
開挖擾動區	1	4	20	100

(4) 核種於工程障壁中之遷移特徵

依「LLWD2016 報告」8.2.3 節與 8.5.3 節說明，其工程障壁系統所考量之傳輸機制包括平流及擴散。採用 Goldsim 做為模擬工具，每個工程障壁單元均內含數十個 Cell 模組，模組串聯方式如圖 2.2-6 與圖 2.2-7 所示。

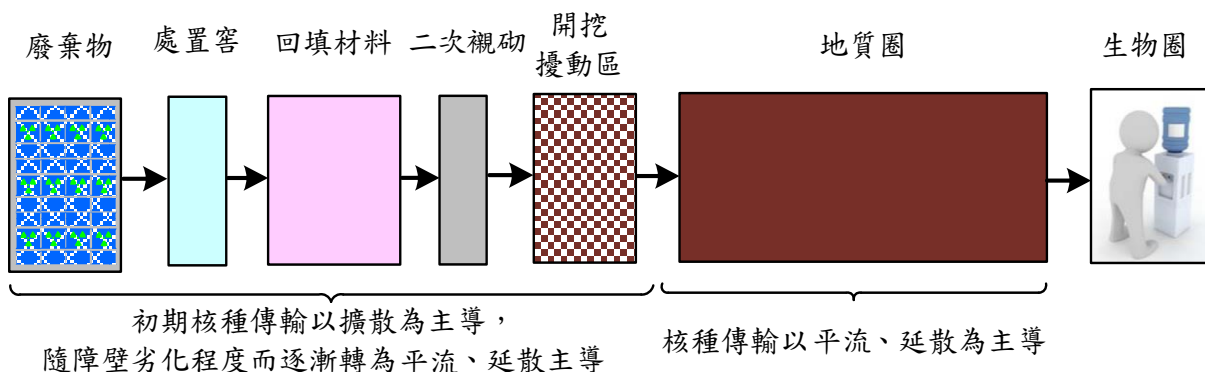


圖 2.2-6 A 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台電公司, 2017)

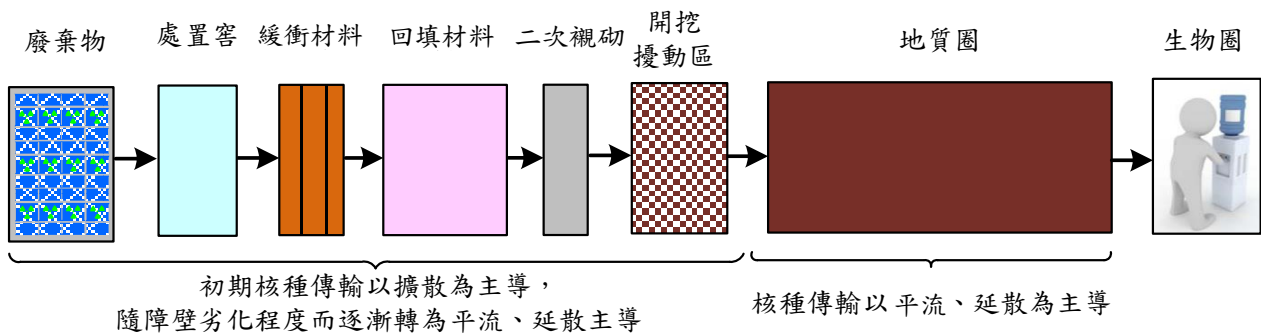


圖 2.2-7 B、C 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台電公司, 2017)

處置窖分析時以一個處置窖內堆放廢棄物之範圍為分析單元，對於平流傳輸截面積以處置窖縱剖面為考量，擴散面積則以處置窖周長面積(處置窖橫剖面周長×處置窖軸向長度)為考量。針對 A 類低放射性廢棄物處置窖，其平流傳輸截面積為 4.5 m × 15 m，擴散周長面積為 361 m<sup>2</sup>；針對 B、C 類低放射性廢棄物處置窖，其平流傳輸截面積為 3.6 m × 15 m，擴散周長面積為 276 m<sup>2</sup>。設施劣化對於流場之影響以改變水力傳導係數為主，如表 2.2-3 與表 2.2-4 所列。考量處置設施回填後，因再灌水或再飽和使地下水流動產生變化，處置設施周邊岩盤將回復為還原狀態。故該報告於分析時，處置窖的分配係數均以還原狀態為考量，各核種之分配係數則是參考 JAEA 之設定(JAEA, 2013)詳見表 2.2-5。另考量長時間尺度下，分配係數可能因長時間化學衰變作用而影響其功能，其參考 IAEA 案例設定工程障壁之吸附功能將在分析時間超過 500 年後，折減至原設定之 10%。該報告另假設當工程障壁於海水條件下將不考量吸附功能。

表 2.2-5 核種在工程材料處於氧化環境與還原環境下之分配係數(台電公司, 2017)

元素	還原態(ml/g)			氧化態(ml/g)		
	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
H	0	0	0	0	0	0
C	1	1	0.1	1	0	0.1
Cl	0	0	0	0	0	0
Co	12.5	50	10	12.5	50	10
Ni	12.5	50	10	12.5	50	10
Sr	1	1	200	1	1	200
Zr	2,500	1,000	100	2,500	1,000	100
Nb	0	100	100	0	100	100
Mo	0	0	0.1	0	0	0.1
Tc	0.3	0	0	0.000003	0	0

元素	還原態(ml/g)			氧化態(ml/g)		
	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
I	1.25	0	0.1	1.25	0	0.1
Cs	2	50	50	2	50	50
Ba	1	1	200	1	1	200
Pb	12.5	50	100	12.5	50	100
Po	0	0	0	0	0	0
Ra	1.25	1	500	1.25	1	500
Ac	250	1,000	5,000	250	1,000	5,000
Th	250	1,000	1,000	250	1,000	1,000
Pa	250	1,000	5	250	200	0.025
U	250	5	5	25	0.005	0.025
Np	250	5	5	250	0.005	0.025
Pu	250	5,000	50	25	5,000	2.5
Am	250	1,000	5,000	250	1,000	5,000
Cm	250	1,000	5,000	250	1,000	5,000

依其說明可知，該報告主要採用 Goldsim 作為核種傳輸模擬工具。不同時期之工程障壁劣化狀況對於傳輸機制會產生影響之參數，如：水力傳導係數、吸附分配係數等。則是依不同時期給予設定值，依該時期之工程障壁狀況進行地下水流場模擬後，再將流場資訊設定於 Goldsim 中進行模擬。



### 第三章 國內常用軟體之數值模型技術探討

為了解不同數值模式對於工程障壁圍阻與遲滯功能評估，於模型建置與模擬評估精度上之差異性，本研究蒐集國內常用軟體如 BLT、GoldSim、RESRAD 與 HydroGeoChem 等數值模式，作為本年度比較之對象。

#### 3.1 BLT-MS 介紹

BLT-MS(Breach, Leach, Transport - Multiple Species)軟體是由美國能源研究部門之 Brookhaven 國家實驗室開發，採用有限元素的分析方法，模擬低放射性廢棄物處置設施之核種外釋與液相核種傳輸評估。此程式主要使用之國家為美國，另於西元 2006 年時曾與核研所合作，利用此程式分析台灣低放射性廢棄物處置安全評估計畫。此程式所含模組包含：水流、盛裝容器劣化、廢棄物體遲滯功能、核種傳輸與核種衰變鍊等，屬於二維傳輸模擬模式，由於 BLT-MS 並未提供圖形化使用者介面，使用者再建立數值模型前需要先自行建立一概念模型作為建模參考，其模型建置流程如圖 3.1-1 所示。

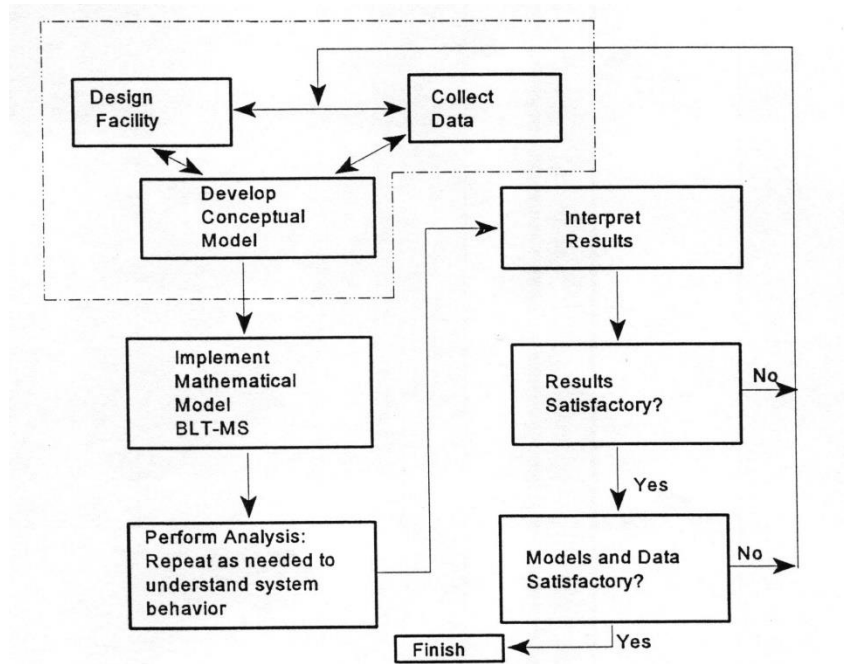


圖 3.1-1 BLT-MS 模型建置流程示意圖(U.S.-NRC, 1996)

如同第二章所述「工程障壁的核種遷移評估」與「廢棄物包件的核種遷移評估」包含了：容器破壞導致核種開始釋出、核種自廢棄物體傳輸至破損容器外、容器破壞前後之流場特徵，

以及核種於工程障壁中之遷移特徵等 4 類主要特徵。BLT-MS 所對應模組分別為：容器劣化模組、廢棄物體模組、水流模組、傳輸模組，4 類主要模式之耦合關聯性如圖 3.1-2 所示。

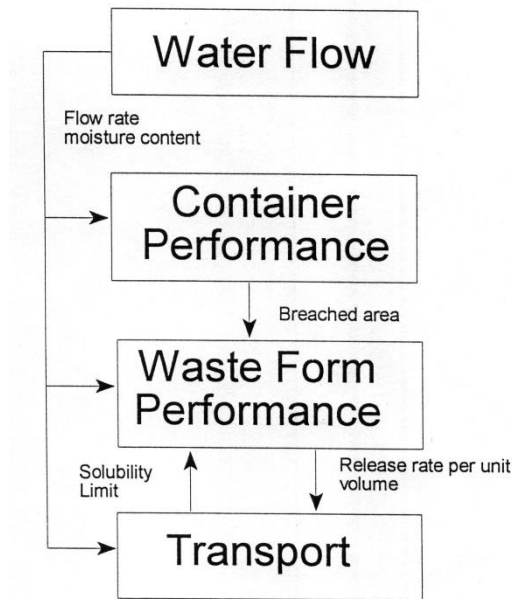


圖 3.1-2 BLT-MS 程式主要模組耦合關聯性示意圖(U.S.-NRC, 1996)

BLT-MS 於模擬長時間之核種遷移時，假設流速為一定值，故無法模擬事件型的水文狀態改變，如颱風或暴雨事件。由於水流模組之流場特徵為輸入值，故並無法由程式本身進行流場特徵改變的計算。例如容器劣化模組已發生容器破壞情境，因水流開始可以穿透廢棄物包件流動，應會改變其周圍流場特性。BLT-MS 求解步驟如圖 3.1-3 所示。BLT-MS 程式在運算過程中，每個時間步之執行程序包括：

- (1)可根據更新水流流速及含水量。
- (2)計算容器性能。
- (3)計算每個廢棄物本體之放射性核種生成及衰變。
- (4)倘若容器產生破壞，則計算每個容器之廢棄物本體外釋速率。
- (5)計算每個核種的傳輸特性。

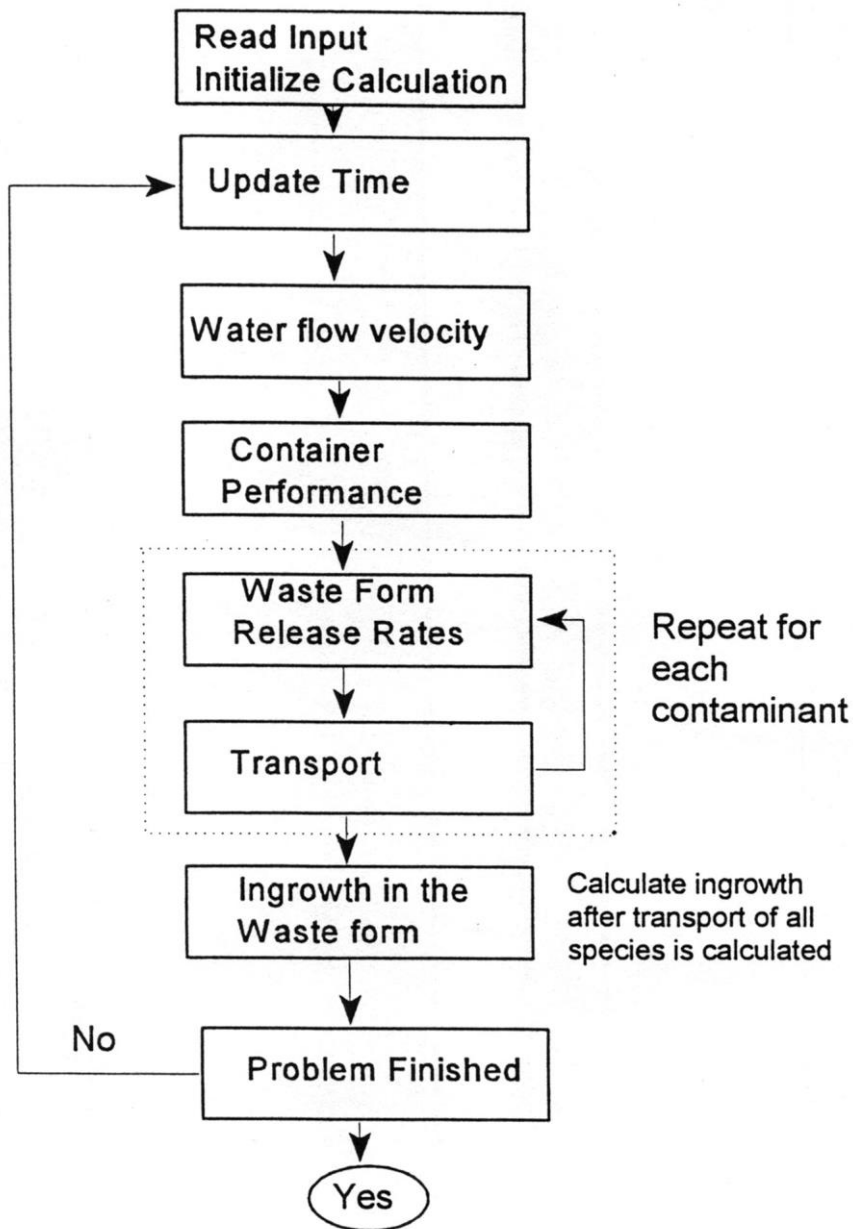


圖 3.1-3 BLT-MS 程式求解步驟之流程圖(U.S.-NRC, 1996)

由於水流模組主要用於讀取流場資料，利用達西公式轉換為模擬所需資訊，故以下針對其餘模組之控制方程式進行說明：

#### (1) 容器劣化模組

容器劣化模組提供 2 種劣化模擬方式，分別為全面劣化與局部劣化：

1. 全面劣化：模擬於特定時間全數容器均同時發生劣化，其控制方程式為

$$t_f = \frac{d}{g} \quad (1)$$

式中， $d$  為允許劣化厚度(L)  
 $g$  為劣化厚度速率(LT<sup>-1</sup>)

2.局部劣化：由孔蝕腐蝕深度經驗式與容器容許穿透厚度，判斷容器是否已發生腐蝕穿透與計算劣化面積。

$$A_b = N_p \pi (h^2 - d^2) \quad h > d \quad (2)$$

$$h = kt^n \quad (3)$$

式中， $A_b$  為容器劣化面積(L<sup>2</sup>)  
 $h$  為最大孔蝕腐蝕侵入深度(L)  
 $d$  為容器容許穿透厚度(L)  
 $N_p$  孔蝕腐蝕數量  
 $k, n$  為經驗腐蝕常數

## (2)廢棄物體模組

廢棄物體模組包含 4 種計算方式，分別為：淋洗分配、擴散、均勻劣化，及溶解度限制。說明如下：

1. 淋洗分配：假設核種與水體接觸時立即釋出，此模式之化學機制主要由吸附平衡及溶解度限度所主控，主要是進行質量分配計算。

$$M_{t,i} = M_{wf,i} + M_{a,i} + M_{p,i} \quad (4)$$

式中， $M_{t,i}$  為整個系統之總質量  
 $M_{wf,i}$  為廢棄物本體質量  
 $M_{a,i}$  為液相溶液中的質量  
 $M_{p,i}$  為吸附於孔隙介質的質量  
 $i$  為核種

2. 擴散：此模式適用於核種均勻分佈的固化廢棄物體，故以擴散機制為主控的外釋行為。模組內提供三種不同條件的解析解。但由於解析解無法正確的模擬核種的分裂滋生，欲模擬核種分裂滋生則需採用數值解。擴散外釋模式的控制方程式如下：

$$\frac{\partial C_i(x, t_f)}{\partial t_f} = D_{wf,i} \nabla^2 C_i(x, t_f) - \lambda_i C_i(x, t_f) \quad (5)$$

式中， $C_i(x, t_f)$  為廢棄物本體內的核種濃度  
 $D_{wf,i}$  為廢棄物本體之擴散係數

$\lambda_i$  為核種衰變常數  
 $x$  為空間位置向量  
 $t_f$  為容器破壞時間

3. 均勻劣化：假設廢棄物本體以一均勻速率釋出核種，其外釋率算式如下：

$$Q_{u,i} = \frac{u_i M_{o,i}}{V_e} e^{-\lambda_i t} \left[ 1 - \frac{C_i}{C_{sat,i}} \right] \quad (6)$$

式中， $u_i$  為核種外釋速率比例  
 $C_i$  為核種濃度  
 $C_{sat,i}$  為核種溶解度限值

4. 溶解度限制：計算方式是依設定之溶解度限值，作為傳輸方程式中每單位體積質量外釋率之上限。

### (3) 傳輸模組

當核種外釋至工程障壁後，其傳輸作用包括：平流、延散、擴散、核種生成及衰變、地化特性(溶解度、吸附)等。在 BLT-MS 程式完成廢棄物本體外釋計算後，使用二維有限元素法模擬地表下核種傳輸過程，依照 FEMWASTE-1 程式(Yeh, 1982)的有限元素求解標準流程進行，其控制方程式如下：

$$\theta R_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \nabla \cdot \theta D \nabla C_i + \nabla \cdot V_d C_i - \lambda_i \theta R_i C_i + \sum_{j=1-N}^{j \neq i} f_{ij} \lambda_j R_j C_j + S_i - X_i \theta C_i - \mu_i \rho K_{d,i} C_i \quad (7)$$

式中， $C_i$  為核種於液相中之濃度  
 $t$  為時間  
 $\theta$  為含水量  
 $R_i$  為核種之遲滯係數  $= 1 + \rho K_{d,i} / \theta$   
 $\rho$  為土壤體密度  
 $K_{d,i}$  為核種於孔隙介質的分配係數  
 $\theta D_{kl}$  為延散-擴散張量  
 $a_l$  為縱向延散係數  
 $a_t$  為橫向延散係數  
 $V_d$  為流經孔隙介質之達西流速  
 $\delta_{kl}$  為 Kronecker delta  
 $D_m$  為擴散係數  
 $\lambda_i$  為核種衰變常數  
 $f_{ij}$  為核種  $i$  衰變至核種  $j$  的比例

$N$  為模擬之核種數量  
 $X_i$  為一階液相劣化速率常數  
 $\mu_i$  為一階固相劣化速率常數  
 $S_i$  外來源項

程式允許不同材料區塊給定特定的傳輸性質，故擴散係數、延散係數、土壤體密度、孔隙率可隨材料性質而有所不同，而分配係數、液及固相劣化係數則可隨不同核種給定不同參數。

彙整 BLT-MS 主要之模擬限制包含：

- (1)分析計算單一廢棄物體之核種外釋與傳輸特性時，最多可選用 10 個放射性核種。
- (2)每次分析最多可設定 5000 個廢棄物包件。
- (3)可設定 20 組不同的盛裝容器破壞參數及 20 組不同的廢棄物體外釋參數。
- (4)內建 4 種廢棄物體外釋機制：1.表面淋洗、2.擴散、3.均勻劣化、4.溶解。
- (5)水流須由其他水文地質模式模擬結果匯入設定。
- (6)承上，容器性能及瀝濾過於程式演算並不會改變其流量，需另外自水流模組設定。
- (7) 時間步數限制 5000 步。此時間步數將會限制模擬之時間精度，例如：當模擬時間為 1 萬年時，受時間步數限制之因素，每一個時間步之時間長度需大於 2 年。

## 3.2 GoldSim 介紹

GoldSim 軟體是由美國 Golder Associates Inc.公司開發，用於高、低放射性核能廢棄物處置安全評估之模擬。由於具高度圖形視窗介面的軟體，使用者較容易上手，使該程式已被廣泛使用。在國際上，該程式應用於放射性廢棄物處置領域分析之國家與單位包含：美國 DOE Yucca mountain project、美國 DOE waste isolation pilot plant、美國 Nevada test site、美國 Los Alamos LLW sites、日本、法國、西班牙、匈牙利等。GoldSim 軟體中所提供的化學反應污染傳輸/一般污染傳輸模組(reactive transport/contaminant transport module)。此模組提供了放射性或一般核種於不同介質中的質量傳輸模擬，其可應用於複雜的工程或是天然環境下之污染傳輸模擬，因此可運用於低放射性廢棄物處置場功能/安全評估模擬。可搭配區塊元素(element)模擬平流、擴散與吸附作用，或搭配管流元素(pathway)進行管流傳輸模擬。

### (1)GoldSim 模擬污染物傳輸之基本概念

1. 污染物質：GoldSim 可以模擬環境系統中的物質傳輸，且物質數量上限不受模式本身限制，可進行複雜且由使用者定義的化學反應。物質可以獨立計算，也可以利用衰變鏈進行分析，或視為相同化學元素的同位素。
2. 模擬傳輸路徑：GoldSim 污染物傳輸模組利用傳輸元素模擬通過環境系統的質量傳輸。傳輸路徑代表可移動或儲存污染物質的物理組成，例如含水層、湖泊、沉積物、表面土體和大氣。各傳輸路徑均包含一種或多種環境介質，使用者可定義每種介質的一般屬性(例如：密度)以及每種介質中各個污染物質的屬性(例如：溶解度和分配係數)。使用者可藉由定義傳輸路徑網路建立環境系統，如圖 3.2-1 所示。

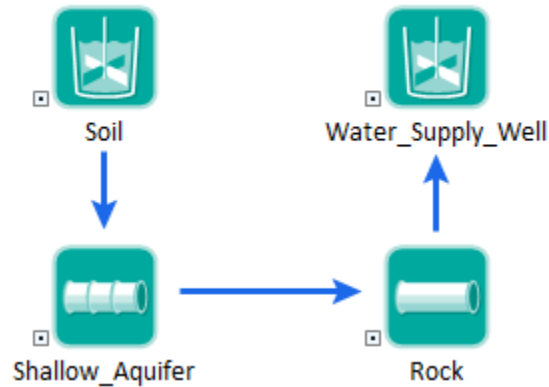


圖 3.2-1 GoldSim 傳輸路徑網路示意圖(GoldSim, 2018)

3. 質量通量鏈結：為了建立傳輸路徑網路，藉由質量通量鏈結連接各個路徑。質量通量鏈結定義了物質在路徑之間移動的機制，其代表物質的向量，因為每個模擬的物質有不同的通量，並且具有質量/時間的維度。GoldSim 中可以定義兩種主要類型的質量通量鏈結和三種特別的質量通量鏈結。在平流質量通量鏈結中，指定一定量的介質從一個路徑流到另一個路徑，攜帶溶解、吸附和/或懸浮的物質。在擴散質量通量鏈結中，物質根據濃度梯度在路徑之間擴散。三個特別的質量通量鏈結允許使用者模擬無法用平流或擴散表示的過程，在直接傳輸質量通量鏈結中，物質依據使用者指定的傳輸速率從一個路徑移動到另一個路徑。在移除沉澱物質量通量鏈結中，作為沉澱物存在的物質，依據給定的傳輸速率從一個路徑移動到另一個路徑。在處理質量通量鏈結中，物質被處理或過濾，並依據給定的處理效率(分率)從一個路徑移動到另一個路徑。根據每個路徑的屬性、每個路徑中的介

質、物質和指定的質量通量鏈結，GoldSim 計算每個路徑中介質隨時間變化的濃度，以及路徑之間的質量通量。因此，路徑元素的基本輸出是一系列向量，包括路徑中各物質的質量、路徑中每種環境介質內各物質的濃度、通過質量通量鏈結連接到每條路徑的質量通量。

4. 模擬污染物源項：在 GoldSim 中，源項代表的涵義完全由使用者決定，源項可代表整個垃圾掩埋場或單個掩埋的桶子、一組洩漏的地下儲罐或複雜的工程設施。關鍵點在於源項提供了路徑的質量輸入，然後通過系統傳輸質量。使用者定義的源項屬性包括(1)在物質釋出之前必須失效的障壁失效率；(2)在物質釋出前劣化的基質劣化速率。
5. 模擬對受體的影響：污染物傳輸研究的目的，不僅是計算環境中不同位置的污染物濃度或通量率，還要計算這些污染物對特定受體(例如人類、野生動物、植物)的影響。其計算方式為環境介質(例如水、土壤、空氣)中的污染物濃度，乘上使用者定義的影響轉換因子。影響轉換因子與物質和受體有關，並且具有單位濃度的影響的維度。GoldSim 允許使用者定義特定的受體，並將其與環境系統中的各種路徑連結。然後對受體的總影響計算方式，是將使受體曝露於污染物的每個路徑的相關影響進行加總(例如：飲用井水、吸入大氣中的粉塵、攝入土壤)。影響可以是污染物濃度與允許限值的比值(即危害指數)、健康(例如癌症)風險、輻射劑量等。

## (2)Cell 傳輸路徑

Cell 路徑可以明確地表示以下過程：

1. 分配：使用者可以將多種流體或固體介質(例如水、油、空氣、岩石、土壤)分配給 Cell，並定義不同介質之間的物質分配係數。假設污染物質在整個 Cell 中瞬間完全混合且達平衡，並且依據分配係數和不同介質的質量/體積將污染物分配給不同介質。
2. 溶解度限制：使用者可以針對 Cell 中存在於流體(通常為水)內的污染物，指定溶解度限值。Cell 中污染物的溶解濃度不能超過溶解度限制。如果使用者正在模擬同一元素的同位素，GoldSim 可確保所有同位素濃度的總和不超過溶解度限值。
3. 質量傳輸：使用者可以定義過程和屬性，控制質量在路徑之間移動的速率(例如：從一個 Cell 到另一個 Cell)。可以明確地表示平流和擴散傳輸機制。使用者必須指定平流傳輸的流速、擴散係數以及擴散傳輸的幾何因子。使用者還必須指定平流的介質(流體和固體都可以被平流)，以及發生擴散的介質(介質間的擴散，例如通過空氣-水界面)。此外，Cell 中



的固體可以指定為懸浮在 Cell 的流體介質中，這樣可以明確地模擬污染物在懸浮顆粒上的傳輸(通過平流或擴散)。對於特殊情況，使用者還可以模擬幾個不能被描述為平流或擴散(直接轉移、處理和移除沉澱物)的傳輸過程。

當多個 Cell 藉由平流和擴散機制連接在一起時，Cell 網路的行為在數學上用微分方程的耦合系統描述。實際上，Cell 的網路在數學上等同於節點的有限差分網路。GoldSim 以數值方式求解耦合方程組，以計算每個 Cell 中存在的污染物質質量(以及 Cell 之間的質量通量)作為時間的函數。Cell 通常用於模擬環境系統(例如池塘、湖泊、淺層土體或大氣)中的離散體。在某些情況下，Cell 網路也可能是模擬含水層和河流等特徵的最佳方式。

Cell 傳輸路徑為最適合用於描述核種於工程障壁系統中傳輸特性之計算元素，以下就其主要之方程式進行說明。Cell i 的基本質量平衡方程式如下：

$$m'_{is} = -m_{is}\lambda_s + \sum_{p=1}^{NP_s} m_{ip} \lambda_p f_{ps} R_{sp} \left( \frac{A_s}{A_p} \right) + \sum_{c=1}^{NF_i} f_{cs} + S_{is} \quad (8)$$

其中，

$m'_{is}$ =單元 i 中物質 S 的質量增加率(M/T)

$m_{is}$ =單元 i 中物質 S 的質量(M)

$\lambda_s$ =物質 S 的衰減率(T<sup>-1</sup>)

$NP_s$ =物質 s 的數量

$f_{ps}$ =衰減為物質 s 的比例

$R_{sp}$ =每莫爾物質 P 衰變所產生物質 S 的化學計算比率

$A_s$ =物質 S 的分子量(或原子)(M/mol)

$A_p$ =物質 P 的分子量(或原子)(M/mol)

$NF_i$ =來自/給予單元 i 的質量通量鏈接數

$f_{cs}$ =物質 S 通過質量通量鏈 c 的流入率(進入單元 i)(M/T)

$S_{is}$ =外部來源將質量 S 直接輸入至單元 i 的比率(M/T)

Cell 傳輸路徑單元間可建立對流質量通量鏈結，用於描述透過流體介質流動而產生之物質移動特徵。自傳輸路徑 i 往傳輸路徑 j 之對流質量通量其計算方式如下：

$$f_{s,i \rightarrow j} = C_{ims} q + \sum_{t=1}^{NPT_{im}} PF_t \cdot C_{its} \cdot v m_t \cdot c p_{imt} q_c \quad (9)$$

其中，

$q$ =對流速率在流體狀態下質量通量鏈為(L<sup>3</sup>/T)，在固體狀態下為(M/T)

$C_{ims}$ =單元 i 中介質 m 物質 s 總溶解量、吸收或沉澱濃度(如果 m 為流體則為 M/L<sup>3</sup>；

如果 m 為固體則為 M/M)。

$NPT_{im}$ =懸浮在單元 i 中介質 m 的固體介質數量

$NPT_{jn}$ =懸浮在單元 j 中介質 n 的固體介質數量

$PF_t$ =布林變數 (0 或 1)，其表示質量通量鏈是否允許固體 t 懸浮在對流流體中

$C_{its}$ =單元 i 中固體介質 t 中物質 s 的吸附濃度(M/M)

$vm_t$ =固體顆粒 t 的對流速度乘數

$cp_{imt}$ =單元 i 中流體 m 懸浮固體顆粒 t 的濃度(M/L<sup>3</sup>)

Cell 傳輸路徑單元間可建立擴散質量通量鏈結，用於描述透過分子擴散過程傳遞之停滯或緩慢流動之流體特徵，以及由濃度差驅動之傳輸。自傳輸路徑 i 往傳輸路徑 j 之擴散質量通量其計算方式如下：

$$f_{s,i \rightarrow j} = D_s \left( C_{ims} - \frac{C_{jns}}{K_{nms}} \right) + \sum_{t=1}^{NPT_{im}} PF_t \cdot D_t (C_{its} \cdot cp_{imt} - C_{jts} \cdot cp_{jnt}) \quad (10)$$

其中，

$D_s$ =質量通量鏈中物質 s 的擴散傳導度(L<sup>3</sup>/T)

$C_{ims}$ =單元 i 中介質物質 s 的溶解濃度(M/L<sup>3</sup>)

$C_{jns}$ =單元 j 中介質物質 s 的溶解濃度(M/L<sup>3</sup>)

$K_{nms}$ =物質 s 在流體介質 n(單元 j 中)和流體介質 m(單元 i 中)之間的分配係數(介質 m 為 L<sup>3</sup>/介質 n 為 L<sup>3</sup>)

$NPT_{im}$ =單元 i 中流體 m 的顆粒狀固體介質數量

$PF_t$ =布林變數 (0 或 1)，其表示質量通量鏈是否允許固體 t 懸浮在對流流體中

$D_t$ =質量通量鏈中顆粒 t 的擴散傳導度

$C_{its}$ =單元 i 中固體介質 t 中物質 s 的吸附濃度(M/M)

$cp_{imt}$ =單元 i 中流體 m 懸浮固體顆粒 t 的濃度(M/L<sup>3</sup>)

$C_{jts}$ =單元 j 中與固體 t 相關的物質 s 之吸附濃度(M/M)

$cp_{jnt}$ =單元 j 中流體 n 懸浮固體顆粒 t 的濃度(M/L<sup>3</sup>)

### (3) Pipe 路徑特徵

與 Cell 路徑不同，Pipe 路徑只能包含一種流體介質。然而，其可含有影響傳輸的固體介質。Pipe 使用拉普拉斯轉換法為廣泛的平流主導的傳輸問題提供解析解，包括一維平流、縱向擴散、遲滯，衰變和向內生長(ingrowth)，以及與固定儲存區域的交換(例如，基質擴散)。可以在 Pipe 路徑中表示兩種簡單的污染物遲滯過程，包括路徑中的流體與使用者指定的填充材料之間的平衡分配；路徑中的流體與使用者指定的管徑材料(在路徑的周邊周圍)之間的平衡分配。除了前述的線性遲滯機制之外，Pipe 還可以表示沿著路徑長度的兩種固定儲存區域的交換：1.基質擴散區，其中進出區域的傳輸速率與區域的濃度差異和擴散性質成比例；2.停滯分散區，進出區域的傳輸速率與濃度梯度和路徑中的流速成比例。

最後，可以指定懸浮固體(例如膠體)存在於 Pipe 中。假設這些固體沿 Pipe 平流和分散，但不受遲滯過程或與儲存區域的相互作用影響。分配到懸浮固體上的物質在其穿過 Pipe 時隨之傳輸。Pipe 路徑可用於模擬通過不飽和(滲流)區域的垂直傳輸、以及含水層、河流、渠道和管道中的水平傳輸等過程。Pipe 路徑之控制方程式如下：

$$Flux_s = (Q \cdot SV_s \cdot c_{m,s} - (A_m D_s + \alpha \cdot Q \cdot SV_s) \frac{\partial c_{m,s}}{\partial x})|_{x=L} \quad (11)$$

其中，

$Flux_s$ =物質 s 離開路徑的通量(M/T)

$Q$ =路徑中流體的體積流量(L<sup>3</sup>/T)

$SV_s$ =物質 s 懸浮固體速率的放大係數

$c_{m,s}$ =路徑的移動範圍中飽和孔隙空間物質 s 的平均移動濃度(M/L<sup>3</sup>)

$A_m$ =移動範圍的截面積(L<sup>2</sup>)

$D_s$ =物質 s 在移動範圍內的有效擴散率= $n_{m,s} t_m d_{m,r} d_{m,s}$

$n_{m,s}$ =物質 s 在移動範圍內多孔介質的可用孔隙率

$t_m$ =填充材料的彎曲度

$d_{m,r}$ =參考流體的參考擴散率

$d_{m,s}$ =參考流體中物質 s 的相對擴散率

$\alpha$ =路徑的分散性(L)

$L$ =路徑長度(L)

$x$ =進入路徑的距離

### (4) 容器失效模擬

GoldSim 可以指定源項質量存在於獨立的包件中，例如存在於 100 個單獨的容器。對於每個單獨的容器包件，可以設定兩層以內的圍阻障壁，例如容器和容器的內襯。在障壁失效前，質量不會從源項釋出。障壁失效速率可以利用函數進行描述。

### 3.3 RESRAD 介紹

美國 ARGONNE National Laboratory 開發 RESRAD 家族程式中，包括：RESRAD(ONSITE) 程式為評估受放射性核種污染土壤之輻射劑量與風險評估，以及 RESRAD-OFFSITE 程式為放射性核種於近場、遠場至生物圈全系統輻射劑量與風險評估，計算所有途徑之總劑量，與人類受體的輻射劑量及風險。RESRAD 程式為美國核能管制委員會 (U.S.NRC) 在核能電廠除役及低放射性廢棄物處置安全評估審查之工具。其中 RESRAD-OFFSITE 程式雖不是為了模擬工程障壁系統核種遷移而開發，但其傳輸途徑中亦含有工程障壁系統，加上程式已內建生物圈傳輸模組，在劑量評估上有其便利性，故本研究亦將其納入探討，其模組概念如圖 3.3-1 所示。

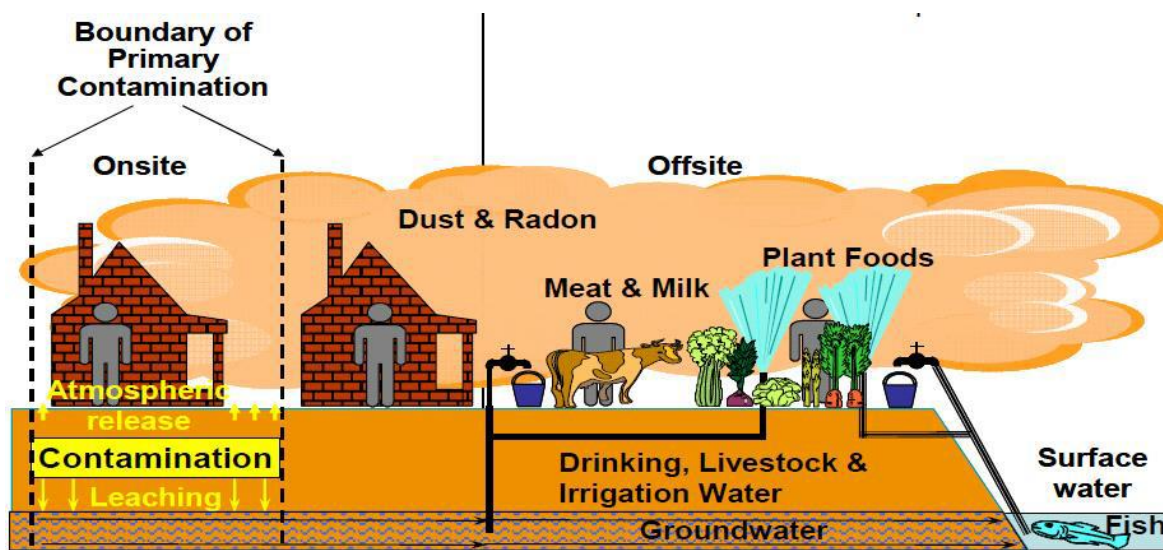


圖 3.3-1 RESRAD OFFSITE 模組概念模式示意圖(U.S.NRC., 2015)

RESRAD-OFFSITE 程式碼的開發，是由增加場址外土壤累積子模式(BIOMOV5 II 1995) 與基本的 RESRAD-ONSITE 程式碼開始。而後涵蓋移流-延散(advective-dispersive)，亦增加能接受自污染土壤釋放的時間序列。而後於多介質比較研究中，移流-延散地下水傳輸子模式進

行改良後，能較準確地預測核種於傳輸的過程中產生的子核種及該子核種的傳輸狀況。後續，RESRAD-OFFSITE 程式碼中再添入大氣傳輸子模式及表面水體累積子模式。RESRAD-OFFSITE 評估於主要污染區受到曝露的個體所接受的輻射劑量與過量癌症風險。主要污染區假定為一層土壤，此乃 RESRAD-OFFSITE 模擬過程中所有放射性核種(污染)釋放的來源。模式中考量到污染物由主污染釋放至大氣、表面徑流及地下水，程式對於污染物由主污染處移動至農地、牧場、居住區域、水井及表面水體、適當位置的污染物累積，以及對由地下水傳輸至陸地上污染物的貢獻建立數值模型，圖 3.3-1 所示。RESRAD-OFFSITE 考慮九種曝露路徑：直接曝露於土壤污染物、吸入顆粒、吸入氬氣、攝入植物（例：蔬菜、穀物和水果）、攝入肉類、攝入牛奶、攝入水產食物、攝入水及意外攝入土壤。

RESRAD 程式之污染傳輸情境為程式內建，使用者並無法更改其傳輸途徑概念，進能對於其相關參數進行調整。RESRAD 程式假設放射性廢棄物均勻散佈於同一土層之中，且此受污染土層於空間上具相同厚度，其上方另覆有表土層，表土層亦假定空間上之厚度相同。模式設定此表土層將隨著降雨或地表逕流等作用產生侵蝕現象，將隨時間逐漸減少其土層厚度，而逐漸失去其障壁作用。依其程式設定，放射性廢棄物所在之污染土層必然位於地下水位面之上，在極端狀況下可設定地下水位面恰位於污染土層最底部。換言之，其放射性廢棄物之污染土層將屬於未飽和狀態，而不會成為飽和層之地下水流動區域，通過其污染區域之地下水，將屬於降雨入滲過程之水流。此情境設定並不適用於我國目前規劃之坑道式處置設施。

RESRAD 程式之污染傳輸包含求解平流、擴散與吸附等傳輸特性，其質量平衡方程式如：

$$(\theta_t + \rho_b K_d) \frac{\partial c_{av}}{\partial t} = -\lambda(\theta_t + \rho_b K_d)c_{av} - V_m \theta_m \frac{\partial c_m}{\partial z} + D_z^m \theta_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2} \quad (12)$$

$\theta_t$ =總孔隙率。

$\rho_b$ =密度

$K_d$ =分佈係數( $[cm]^3 pCi g^{-1}$ );

$c_{av}$ =核種之平均濃度( $pCi m^{-3}$ )

$V_m$ =水流經有效孔隙之平均速度( $m year^{-1}$ )

$\theta_m$ =有效孔隙率，水體可以在孔隙中自由流動。

$c_m$ =有效孔隙中之核種濃度( $pCi m^{-3}$ )

$D_z^m$ =核種在有效孔隙中的擴散係數( $m^2 year^{-1}$ )

RESRAD 內建生物圈傳輸機制包含直接曝露於土壤污染物、吸入顆粒、吸入氫氣、攝入植物、攝入肉類、攝入牛奶、攝入水產食物、攝入水及意外攝入土壤等，且有內建適用於美國生物環境之參數建議值。RESRAD 之生物圈暴露途徑為程式內建，其途徑如圖所示。RESRAD 程式理論之計算式於「低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究」(林文勝，2013)已有完整論述，考量 RESRAD-OFFSITE 僅適用於淺地表土層掩埋式障壁，並未提供其他工程障壁系統型式，並不適用於討論工程障壁之圍阻與遲滯功能，故不針對其計算方式進行說明。



圖 3.3-1 RESRAD 生物圈曝露途徑示意圖

### 3.4 HydroGeoChem 介紹

Hydrogeochem 模式(以下簡稱 HGC 模式)為美國 University of Central Florida 的葉高次教授所發展，HGC 模式結合了飽和/非飽和多孔隙介質內流體流動、熱傳、物質傳輸以及生物化學反應模擬。HGC 模式可應用在求解地下水系統中物質反應傳輸問題上，包含了水相錯合、吸附-脫附、沉澱-溶解以及離子交換等反應。目前 HGC 模式最新發展版本為 4.5 及 5.5 版(Yeh and Fang 2008)，分別為二維及三維 HGC 模式。近年來，HGC 模式主要應用於執行台電公司之用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告平行驗證工作，以及低放射性廢棄物最終處置相關計畫。HGC 4.5 及 5.5 版包含了四個模組，分別為地下水流場模組、熱傳模組、以及生物地球化學反應傳輸模組。在地下水流場模組部分主要求解理查修正公式(modified Richards equation)，可考慮飽和及非飽和含水層下，計算空間分布與時變之含水量、壓力水頭、流場速

度。熱傳模組則是求解熱傳方程式，計算空間分布與時變之溫度場。化學傳輸以及生化傳輸模組則是疊代求解平流延散方程式以及地化反應式，計算空間分布與時變之物種濃度，包含了水相錯合、吸附-脫附、沉澱-溶解、離子交換以及生物等反應。

### (1) 地下水流場模擬

HGC 模式之地下水流場模擬主要求解理查修正公式，來描述地下水流場，理查修正公式可表示為

$$\frac{\rho}{\rho_0} F \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ K \cdot \left( \nabla h + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) \right] + \frac{\rho^*}{\rho_0} q \quad (13)$$

$\rho$ ：流體密度 (M/L<sup>3</sup>)

$\rho_0$ ：流體零濃度時之參考密度 (M/L<sup>3</sup>)

$\rho^*$ ：注入流體密度或抽取流體密度 (M/L<sup>3</sup>)

F：儲水係數 (1/L)

h：壓力水頭 (L)

t：時間 (T)

K：水力傳導係數 (L/T)

z：勢能水頭 (L)

q：源項或匯項 [(L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>)/T]

$$F = \alpha' \frac{\theta}{n_e} + \beta' \theta + n_e \frac{dS}{dh}$$

$\alpha'$ ：土壤壓縮係數(1/L)

$\beta'$ ：流體壓縮係數(1/L)

$\theta$ ：有效含水量 (L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>)

$n_e$ ：有效孔隙率 (L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>)

S：水的飽和度 (%)

$$K = \frac{(\rho/\rho_0)}{(\mu/\mu_0)} K_{so} k_r$$

$\mu$ ：流體黏滯性 (M/L/T)

$\mu_0$ ：流體零濃度時之參考黏滯性(M/L/T)

$K_{so}$ ：飽和水力傳導係數 (L/T)

$k_r$ ：相對水力傳導係數

配合適當之初始條件以及邊界條件，便可透過數值方法進行離散，並求解得到不同時間各個位置之壓力水頭、總水頭、含水量以及達西速度。HGC 模式提供四種不同邊界條件，分別為 Dirichlet、Cauchy、Neumann 以及 Variable 邊界條件可供選用。

## (2) 生物地化反應傳輸控制方程式

任何核種與物種的反應系統可以基於質量守恆定律以及化學反應進行推導其控制方程式，而其傳輸方程式則是基於連續方程式以及費克定率理論進行推導，而其主要傳輸過程包含了平流、延散、源/匯項以及生物地化反應，包含放射性衰變效應，其控制方程式可表示為

$$\frac{\partial(\theta C_i)}{\partial t} + \theta \alpha' \frac{\partial h}{\partial t} C_i = t_i L(C_i) + \theta r_i, i \in \{M\} \quad (14)$$

$$L(C_i) = -\nabla \cdot (VC_i) + \nabla \cdot [\theta D \cdot \nabla C_i] + M_{C_i}^{as} \quad (15)$$

$C_i$ ：第  $i$  個核種的濃度( $M/L^3$ )

$r_i$ ：第  $i$  個核種地化反應生成速率( $M/L^3/T$ )

$M$ ：核種數量

$D$ ：延散係數( $L^2/T$ )

$M_{C_i}^{as}$ ：第  $i$  個核種源/匯項影響之濃度變化率( $M/L^3/T$ )

模式同樣提供四種不同邊界條件，分別為 Dirichlet、Cauchy、Neumann 以及 Variable 邊界條件可供選用。

## (3) 模擬流程

圖 3.4-1 為 HGC 模式穩態分析流程圖，圖中說明 HGC 模式中同時求解所有模組，直到所有變數收斂。以下簡要說明穩態模擬流程。

1. 設定模擬區域內初始條件及邊界條件，並開始進行穩態模擬。
2. 求解流場控制方程式，模擬區域內之壓力水頭、溫度、核種濃度分布等，均由初始條件和前一次計算結果提供，完成計算可以得到一收斂的暫態流速及含水量分布。
3. 接著利用所求得的暫態流場資訊，進行熱傳計算。
4. 在更新模擬區域內的溫度場分布後，便可重新計算所有生物地化反應式的平衡常數。並開始計算生物地化反應傳輸，得到新的物種濃度分布。
5. 完成步驟 2.~4. 之後，便檢查模擬結果與上一步驟結果相比，是否已經收斂，假使還需要繼續疊代，便回到步驟 2. 重新計算一次，如果所有結果均已經收斂，便完成此次穩態模擬。



6. 模擬完成後，將依據使用者之設定輸出項目，輸出最終模擬結果，以進行後續模擬成果分析使用。

圖 3.4-2 為 HGC 暫態模擬分析流程圖，其與穩態模擬之主要差異，在於多了暫態迴圈。在第一個時間步，初始條件為預先輸入的或是讀取穩態結果當作初始條件。而第二個時間步之後，初始條件為上一個時間步的收斂結果。在每個時間步內的計算與穩態模擬相同，如果結果尚未收斂，則會繼續下一次的疊代，直到所有物理量及物種濃度均計算到全部收斂，接著進行下一個時間步之前，會先確認目前總共時間步數或是模擬時間是否已經達到預設目標，如果尚未達到預設目標，便繼續下一個時間步的演算，如果已經達到預設的時間步數或是模擬時間，模式便會自動終止運算，以及依據使用者的設定輸出成果資料。

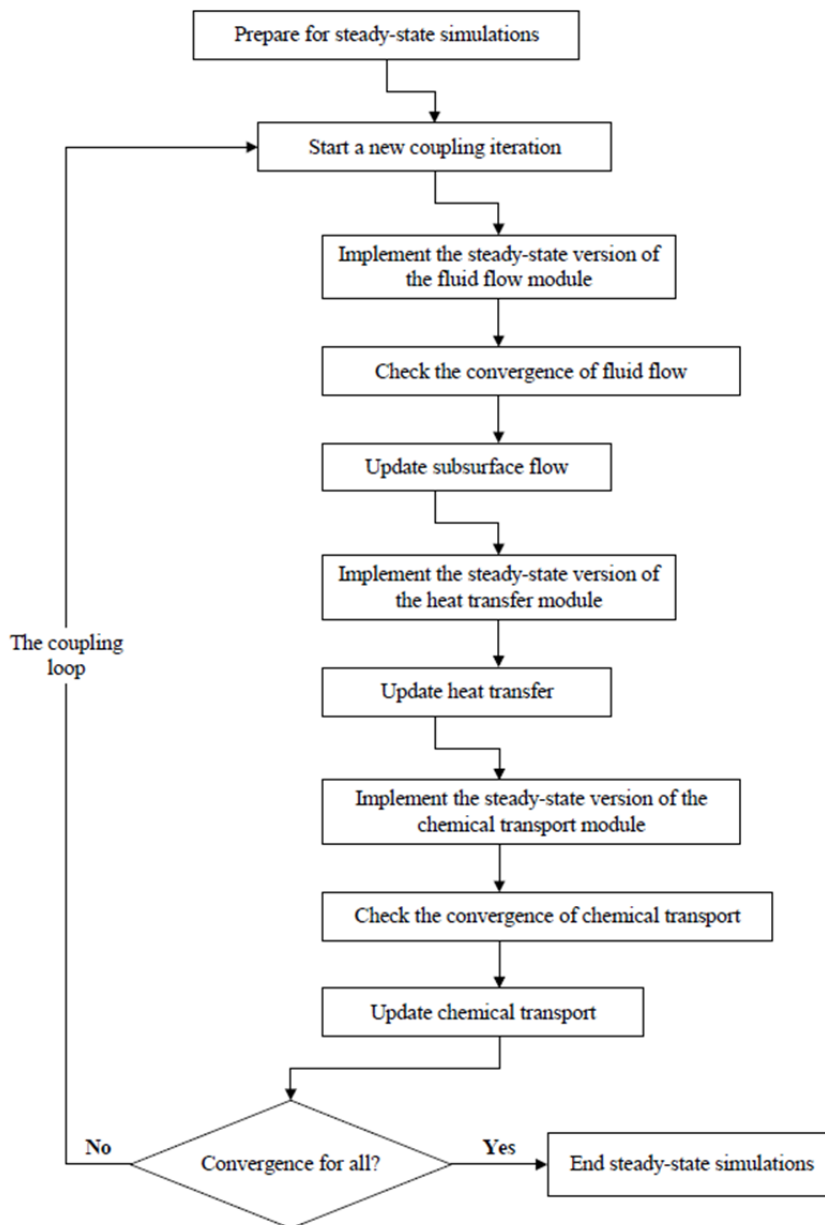


圖 3.4-1 HGC 模式穩態分析流程圖(Yeh, G. T., 2008)

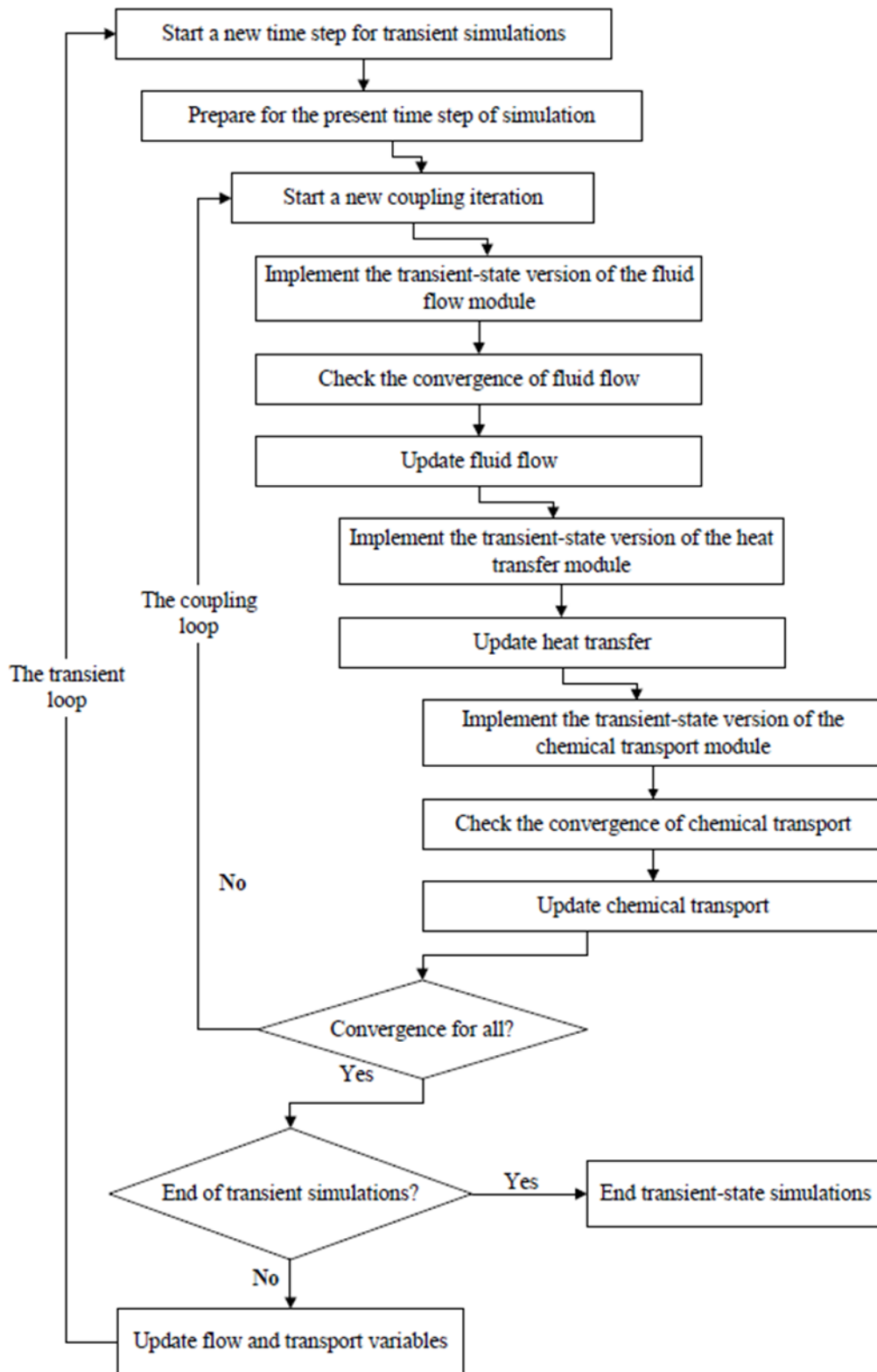


圖 3.4-2 HGC 模式暫態分析流程圖(Yeh, G. T., 2008)

### 3.5 模式軟體用於工程障壁系統圍阻與遲滯分析之適用性探討

依前述國內常用數值模式之程式設計概念，分別針對其分析圍阻或遲滯功能之適用性進行探討，主要可分為：容器破壞機制、源項核種釋出機制、核種遷移機制、生物圈傳輸機制與模型彈性等 5 項模型建立或模擬機制進行討論。

#### (1) 容器破壞機制

工程障壁圍阻功能主要控制於容器破壞機制，當盛裝放射性廢棄物之容器產生破壞，水體接觸到廢棄物體後，即可視為核種溶解至水中並開始傳輸。前述 4 個軟體程式中，RESRAD 並未提供相關設定功能。若欲考量圍阻功能之效益，例如封閉後經過特定時間容器產生破壞，需將模擬起始時間延後至該特定時間，並配合先將源項活度衰變至該時間輸入，且僅能假設同時全數容器完全失去圍阻功能，屬較為保守之評估方式。BLT-MS 的容器劣化模組提供 5000 個容器與 20 組容器破壞參數的輸入設計，可以依照所輸入參數控制不同時間有不同的容器數量產生破壞。HydroGeoChem 並未提供有關容器破壞機制的模擬機制，但可透過源項濃度的初始條件設定或具時變性的濃度邊界條件來反應容器隨時間破壞的效果。GoldSim 則是提供完整的容器破壞設定彈性，且可以利用容器失效函數來描述容器隨時間破壞的數量。綜觀 4 種軟體程式之模擬功能，容器破壞等同於容器功能完全失效，並未考量容器僅發生裂縫開口而會限制核種自此開口釋出之通量，在模擬概念上均屬保守模擬。若欲模擬容器本身之障壁功能，則需將容器視為外部障壁納入模式中分析，而無法利用程式提供之容器模擬功能進行分析。

#### (2) 源項核種釋出機制

源項核種釋出機制主要是描述核種釋放至後續進行核種傳輸計算單元之過程，其主要描述過程為核種自廢棄物體溶出至容器內廢棄物體之孔隙水中，核種將會因廢棄物體的孔隙結構、流場與吸附特性等，影響核種傳輸至容器外之傳輸行為。4 個軟體程式均具有將源項核種全部釋放至核種傳輸計算單元之設計，此時需將源項釋出所連結之核種傳輸計算單元特性設定為廢棄物體特性，藉以反應廢棄物體之遲滯效果。其中，BLT-MS 另有設計不同的源項釋出機制解析公式來反應核種自 55 加侖桶釋放至核種傳輸計算單元之模組。主要考量是 BLT-MS 考量單一核種傳輸計算單元中，可以連結多個不同破壞速率的容器設定，此時其核種傳輸計算單元概念類似於 RESRAD 污染區的概念，為廢棄物體、容器與周邊障壁或回填材料之混和體。以此方法進行模擬將使污染物濃度在一個體積相對大的計算單元中迅速平衡，將會導致核種快速擴散的模擬結果，此種做法主要是遷就當年計算機資

源與能力限制的因應方法，其效果相當於一維 RESRAD 之污染物均勻分布於污染區之效果。但 BLT-MS 為二維分析軟體，每一個計算單元都有其空間長度的意義。以此作法，將會產生核種在單一計算單元的快速移動，例如計算單元長度為 10 公尺，當核種自源項釋出至計算單元後會立刻充滿此 10 公尺的範圍，並非是逐漸擴散或平流之傳輸過程。綜合考量 4 個軟體程式之源項核種釋出機制，當 BLT-MS 不考慮採源項釋出模組計算時，4 個模式軟體均可以考量瞬間釋出與設定水中之溶解度上限，模擬機制上差異不大。

### (3) 核種遷移機制

雖然存在維度與解法上的差異，但 4 個模式軟體均能模擬平流、擴散與吸附等核種遷移機制。其中，GoldSim 採用一維水桶模式進行計算，在相似的模型設計下其計算結果將略保守於其他採用解析解與有限元素法計算之模式軟體。此外，BLT-MS 與 HydroGeoChem 之地下水流場與核種傳輸模擬為同一位開發者，因此這兩個程式在流場與傳輸機制的解法是相似的。主要差異來自於 BLT-MS 為 FORTRAN77 程式語言編撰，因為該版本並未支援浮動變數宣告，故會有計算步數、容器組數上限等限制。而 HydroGeoChem 已採用 FORTRAN90 程式語言重新編撰，故不會有變數矩陣宣告而衍生之限制。RESRAD 與 GoldSim 均未包含水流模擬模組，其流場設定均需採用其他的地下水流場模擬軟體求得地下水流場後，依其設定需求選定代表流速、流量或流徑等相關參數。此外，GoldSim 提供各項傳輸相關參數可採用依時變化方式輸入，如擴散參數與吸附參數。HydroGeoChem 則需透過耦合分析方式達成傳輸特性之時變效果。

### (4) 生物圈傳輸機制

4 個模式軟體中，RESRAD 已內建生物圈傳輸機制包含直接曝露於土壤污染物、吸入顆粒、吸入氬氣、攝入植物、攝入肉類、攝入牛奶、攝入水產食物、攝入水及意外攝入土壤等。且有內建適用於美國生物環境之參數建議值。由於生物圈傳輸機制多為解析解，因此 GoldSim 可透過函數單元建置，自行建構所需之生物圈傳輸機制，直接求解出關鍵群體所攝入之劑量。而 BLT-MS 與 HydroGeoChem 目前於市面上可取得之版本，並未包含生物圈傳輸機制的評估。

### (5) 模型彈性

- 1.就容器破壞機制模擬之彈性而言，GoldSim 與 HydroGeoChem 具有較佳之模型設計彈性，BLT-MS 雖有提供設定彈性，但受限於 5000 個容器與 20 組容器破壞參數的數量限制。而 RESRAD 則僅適用於全數容器在特定時間發生全面破壞的情境設定。

2.就源項核種釋出機制之彈性而言，4 個模式軟體均可以考量瞬間釋出與設定水中之溶解度上限，模擬機制上差異不大。

3.就核種遷移機制之彈性而言，4 個模式軟體均能模擬核種遷移之平流、擴散與吸附特性。當進行長時間模擬需考量障壁特性劣化影響時，GoldSim 可讓各相關參數採用時變方式輸入，而 HydroGeoChem 則需透過耦合分析方式達到時變傳輸特性的傳輸特模擬。

4.就生物圈傳輸機制之彈性而言，RESRAD 已內建 9 種不同暴露途徑之生物圈傳輸機制，已可包含生物圈傳輸過程中之主要劑量來源，為模擬生物圈傳輸最為方便之模式軟體。GoldSim 之生物圈傳輸機制式透過使用者自定義函數進行求解，最具傳輸途徑調整彈性，但使用者需自行建置所需之方程式與相關參數。而 BLT-MS 與 HydroGeoChem 目前於市面上可取得之版本，僅能求出污染物濃度，生物圈劑量需另外計算。

彙整前述 4 種模式比較結果如表 3.5-1 所列。

表 3.5-1 4 種核種傳輸程式初步比較表

	BLT-MS	RESRAD	GOLDSIM	HGC
容器破壞機制	5000 個容器、20 組容器破壞參數	無 (初始瞬時破壞)	可自訂容器破壞機制	需自行前處理為濃度初始或邊界條件
核種釋出機制	20 組廢棄物體外釋參數、10 顆核種，有支援衰變鏈計算可依計算式逐步釋出至計算單元、亦可瞬間釋出至廢棄物計算單元	瞬時釋出後，均勻分布於污染區	瞬時釋出至廢棄物體計算單元	瞬時釋出至廢棄物體計算單元
核種遷移機制	需設定二維流場流量為定值、傳輸參數多為定值	1.須設定流場，屬一維解析解，適合較單純之流場。 2.僅適用於放射性廢棄物(污染物)位於未飽和含水層中之環境。	須設定流場(可時變)，一維水桶模式傳輸	同時解流場與污染傳輸
生物圈傳輸機制	無此功能，劑量需另外評估	內建生物圈傳輸機制	可自行建置	依版次有所差異

## 第四章 工程障壁系統圍阻與遲滯功能之參數與功能關聯性 分析

為可同時進行設計案例之地下水流場模擬與污染傳輸模擬，本工作項目選用 HydroGeoChem 為評估工具，針對工程障壁圍阻與遲滯功能相關之參數在時間與數值變化特性，研擬測試案例。利用測試案例分析之參數改變對於安全功能模擬結果之影響。為較易於辨識不同參數設定與模型設計對於測試例成果之影響，源項核種將規劃依核種半化期與活度，分別以 Co-60、Sr-90 與 I-129 作為測試分析之代表核種，且不考量其子核種之影響。用以減少分析時需納入評量之變因，凸顯工程障壁系統圍阻與遲滯功能與其參數設定方式間之關聯性與敏感性，以利於執行相關分析。

### 4.1 測試案例之地下水流場模擬

地下水模擬測試案例研擬處置窖位於地下水位面以下約 85 公尺的位置，環境流場之水力坡降為 0.01。二維模型建立邊長為 130 公尺之矩形平面，計算域中分別設定為處置窖周圍岩體、回填材、處置窖與廢棄物等材料。模型中間 10 公尺×10 公尺的正方形區域設定為廢棄物體，設定廢棄物體處置於 1 公尺厚處置窖裝載，處置窖外再以 1 公尺厚之回填材料包覆，其餘模型區域為周圍岩體，如圖 4.1-1 所示。模型內採用矩形格網，每個網格為 1 平方公尺，模型中總共使用 17,161 個點與 16,900 個格網建立，如圖 4.1-2 所示。為符合水力坡降 0.01 之環境設定，地下水流場模擬採用定水頭邊界條件，設定於模型左右兩側。於左側邊界設定為 151.3 公尺水頭高，右側邊界則設定 150 公尺水頭高，如圖 4.1-3 所示。模擬穩態狀況下地下水流場分布，流場模擬結果壓力水頭分布由左向右遞減，並且在模型中間水力傳導係數較小的處置窖附近產生壓力變化，如圖 4.1-4 所示。總水頭分布由上往下遞增，並根據設定之水力坡降環境，每公尺向右遞減 0.01 公尺，總水頭並沒有於處置窖附近產生明顯變化，如圖 4.1-5 所示。流場速度分布在處置窖角落附近有較大的速度落差產生。根據流線方向所示，地下水主要由左向右流動，在處置窖左邊 40 公尺(X 軸方向 20 公尺)附近有速度落差的現象發生，並且越靠近處置窖速度落差越明顯增加。最明顯的速度變化出現在處置窖的四個角落。推測原因為地下水在接近處置窖時，由於處置窖之水力傳導係數比回填材與圍岩還要小。與圖 4.1-4 的壓力分佈比對，在 X 軸 50 公尺至 60 公尺之間的位置，水壓集中在 Y 軸 65 公尺附近，此現象使流線呈現繞過處置窖的流動行為。而通過處置窖的流線，該流動速度就相對小於處置窖外的速度，如圖 4.1-6 所示。

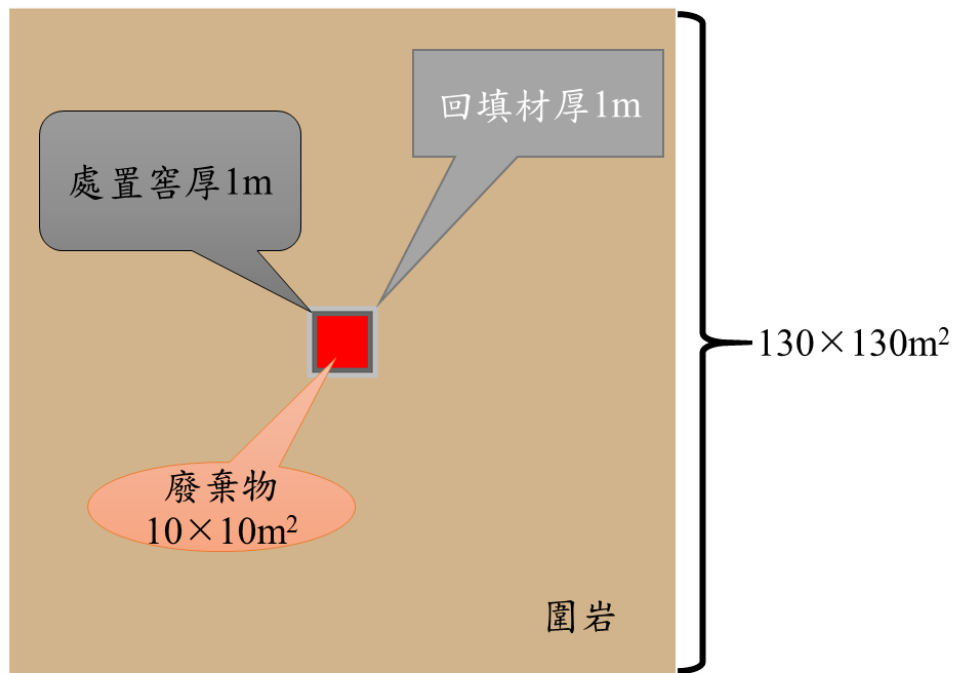


圖 4.1-1 測試案例空間範圍示意圖

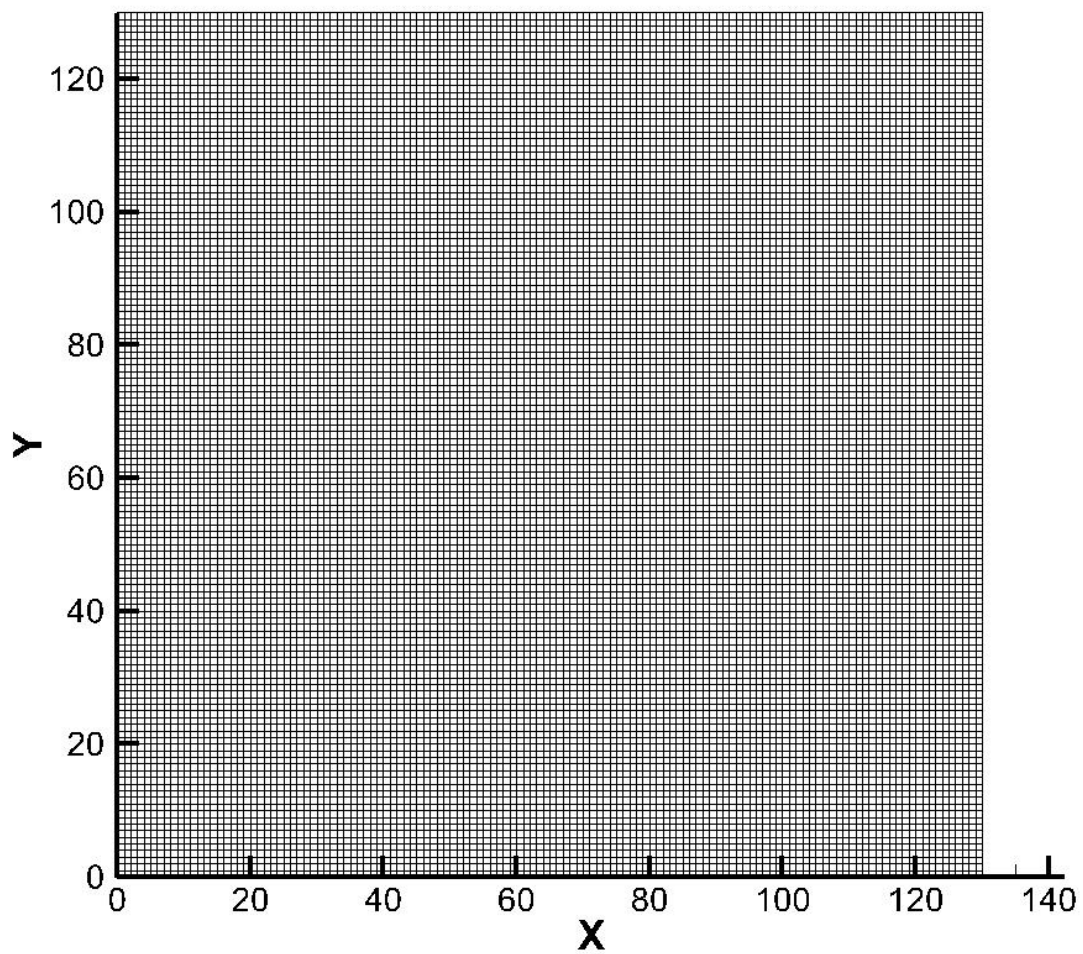


圖 4.1-2 測試案例模型網格示意圖



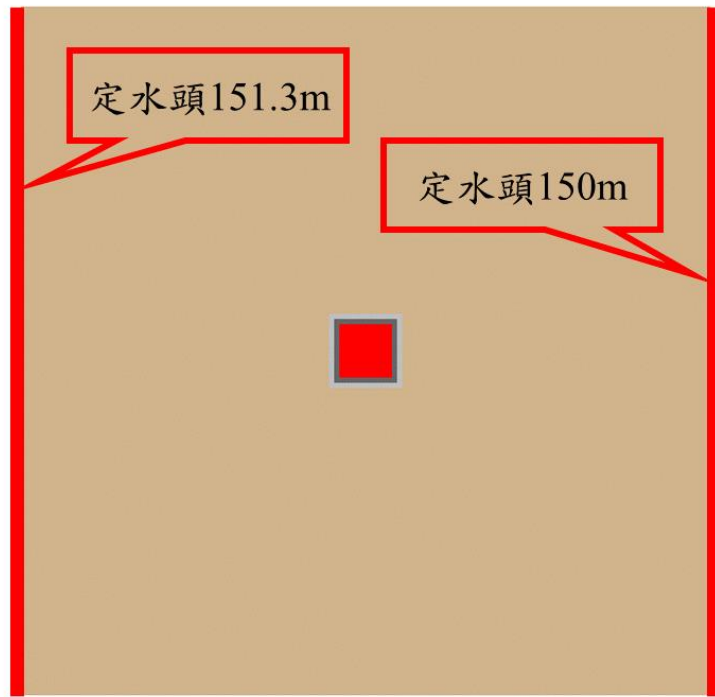


圖 4.1-3 測試案例邊界條件設定圖

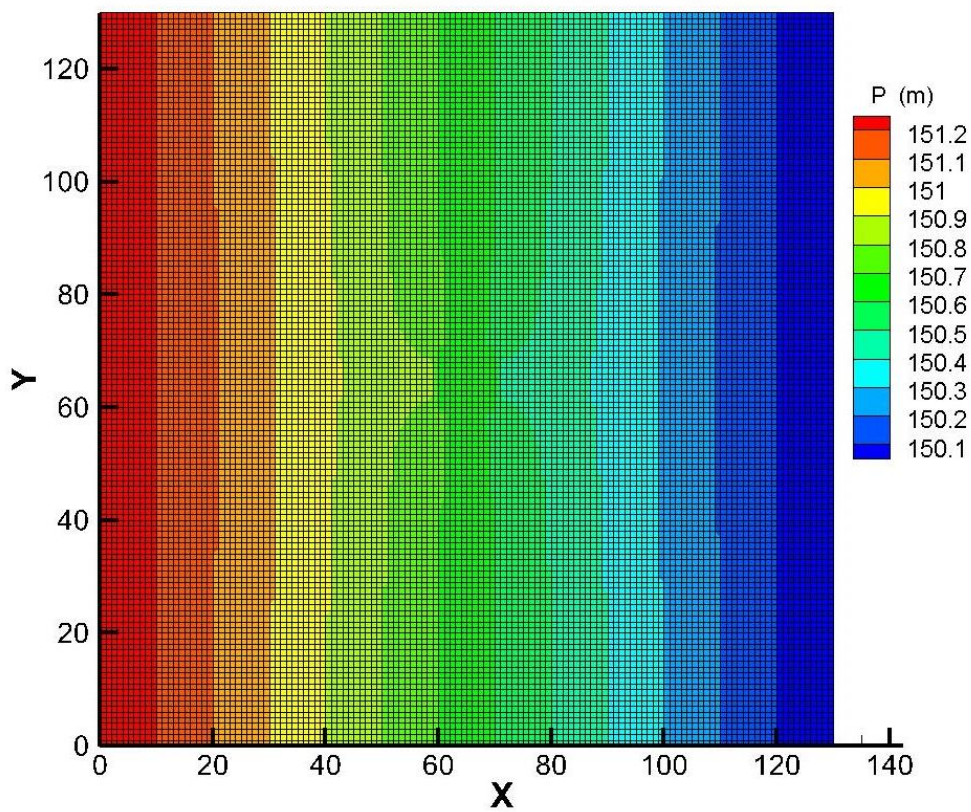


圖 4.1-4 測試案例地下水壓力水頭分布圖



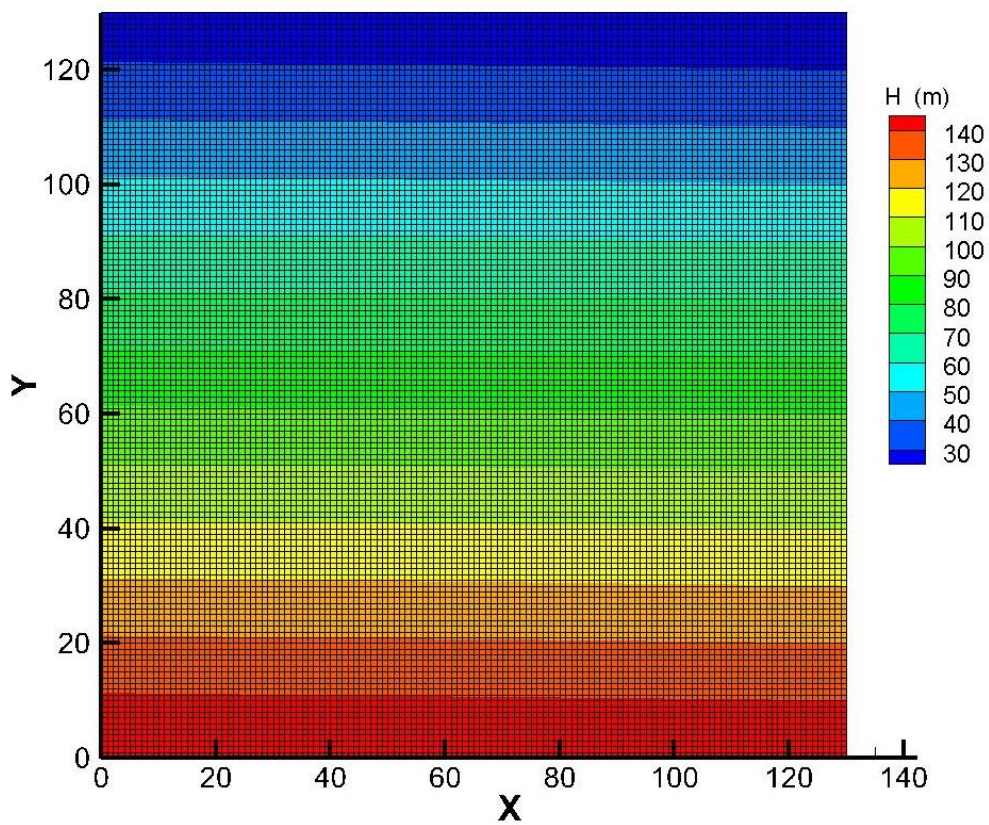


圖 4.1-5 測試案例地下水總水頭分布圖

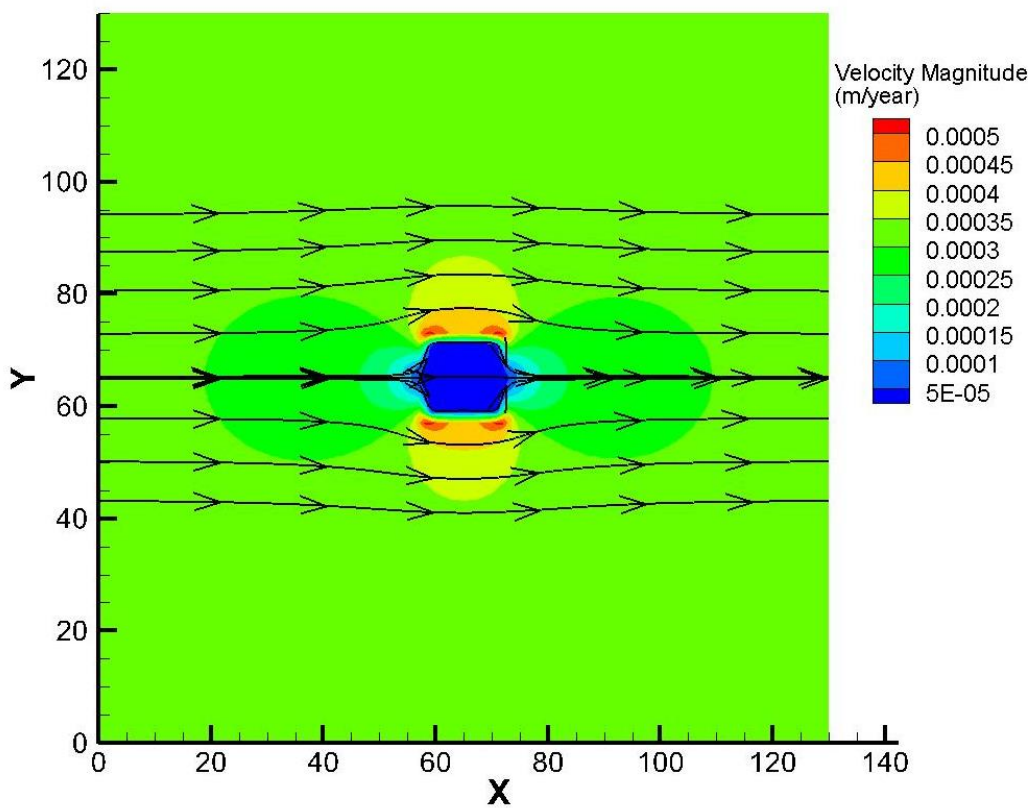


圖 4.1-6 測試案例地下水速度分布與流線圖

## 4.2 測試案例模擬結果

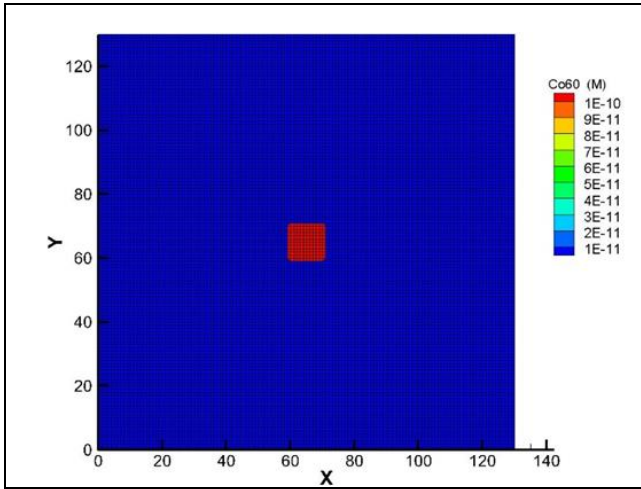
依照前節地下水流場模擬結果，當作污染物溶質傳輸模擬的地下水流場。溶質傳輸模擬中假設無延散效應，分別使用 Co-60、Sr-90 以及 I-129，於廢棄物範圍內分別設定其活度濃度為  $1.0 \times 10^{10} \text{ Bq/m}^3$ 、 $1.0 \times 10^7 \text{ Bq/m}^3$ 、 $1.0 \times 10^6 \text{ Bq/m}^3$ ，換算後為  $3.98 \times 10^{-9} \text{ mol/L}$ 、 $2.18 \times 10^{-11} \text{ mol/L}$  與  $1.18 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$  之初始濃度，模型左側設定為定濃度為 0 的邊界條件，右側為 NEUMANN 邊界條件。

測試案例之處置窖基準水力傳導係數(K)為  $6.31 \times 10^{-5} \text{ dm/year}$ ，擴散係數(D)為  $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ 。分別測試水力傳導係數與擴散係數往上調升與往下調降 1 個級數對與溶質傳輸之影響。為釐清障壁功能對遲滯功能之影響，再將測試案例區分為考量半衰期與不考慮半衰期兩類。時間間格設定 100 年，擷取初始年、500 年及 1000 年三個時間點之濃度分布模擬結果。測試案例設定如下：

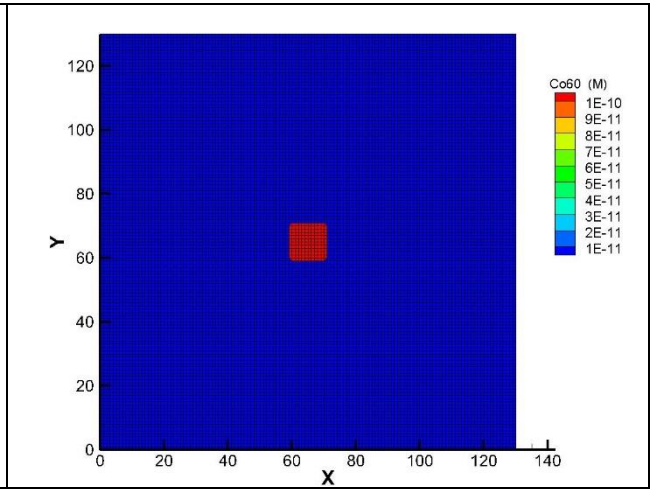
- (1)測試 1：K= $6.31 \times 10^{-4} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Co-60 未考慮衰變。
- (2)測試 2：K= $6.31 \times 10^{-5} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Co-60 未考慮衰變。
- (3)測試 3：K= $6.31 \times 10^{-6} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Co-60 未考慮衰變。
- (4)測試 4：K= $6.31 \times 10^{-5} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-2} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Co-60 未考慮衰變。
- (5)測試 5：K= $6.31 \times 10^{-5} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-4} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Co-60 未考慮衰變。
- (6)測試 6：K= $6.31 \times 10^{-4} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Sr-90 未考慮衰變。
- (7)測試 7：K= $6.31 \times 10^{-5} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Sr-90 未考慮衰變。
- (8)測試 8：K= $6.31 \times 10^{-6} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Sr-90 未考慮衰變。
- (9)測試 9：K= $6.31 \times 10^{-5} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-2} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Sr-90 未考慮衰變。
- (10)測試 10：K= $6.31 \times 10^{-5} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-4} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，Sr-90 未考慮衰變。
- (11)測試 11：K= $6.31 \times 10^{-4} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，I-129 未考慮衰變。
- (12)測試 12：K= $6.31 \times 10^{-5} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，I-129 未考慮衰變。
- (13)測試 13：K= $6.31 \times 10^{-6} \text{ dm/year}$  與 D= $6.31 \times 10^{-3} \text{ dm}^2/\text{year}$ ，I-129 未考慮衰變。

- (14)測試 14：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-2</sup> dm<sup>2</sup>/year，I-129 未考慮衰變。
- (15)測試 15：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-4</sup> dm<sup>2</sup>/year，I-129 未考慮衰變。
- (16)測試 16：K=6.31×10<sup>-4</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，Co-60 考慮衰變。
- (17)測試 17：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，Co-60 考慮衰變。
- (18)測試 18：K=6.31×10<sup>-6</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，Co-60 考慮衰變。
- (19)測試 19：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-2</sup> dm<sup>2</sup>/year，Co-60 考慮衰變。
- (20)測試 20：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-4</sup> dm<sup>2</sup>/year，Co-60 考慮衰變。
- (21)測試 21：K=6.31×10<sup>-4</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，Sr-90 考慮衰變。
- (22)測試 22：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，Sr-90 考慮衰變。
- (23)測試 23：K=6.31×10<sup>-6</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，Sr-90 考慮衰變。
- (24)測試 24：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-2</sup> dm<sup>2</sup>/year，Sr-90 考慮衰變。
- (25)測試 25：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-4</sup> dm<sup>2</sup>/year，Sr-90 考慮衰變。
- (26)測試 26：K=6.31×10<sup>-4</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，I-129 考慮衰變。
- (27)測試 27：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，I-129 考慮衰變。
- (28)測試 28：K=6.31×10<sup>-6</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-3</sup> dm<sup>2</sup>/year，I-129 考慮衰變。
- (29)測試 29：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-2</sup> dm<sup>2</sup>/year，I-129 考慮衰變。
- (30)測試 30：K=6.31×10<sup>-5</sup> dm/year 與 D=6.31×10<sup>-4</sup> dm<sup>2</sup>/year，I-129 考慮衰變。

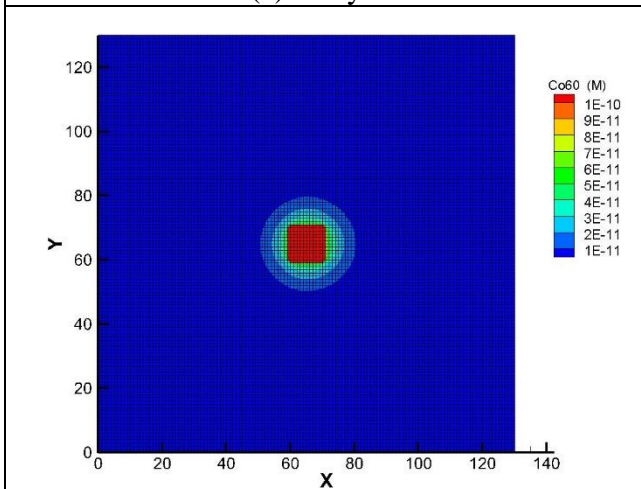
模擬結果如圖 4.2-1~圖 4.2-30 所示。



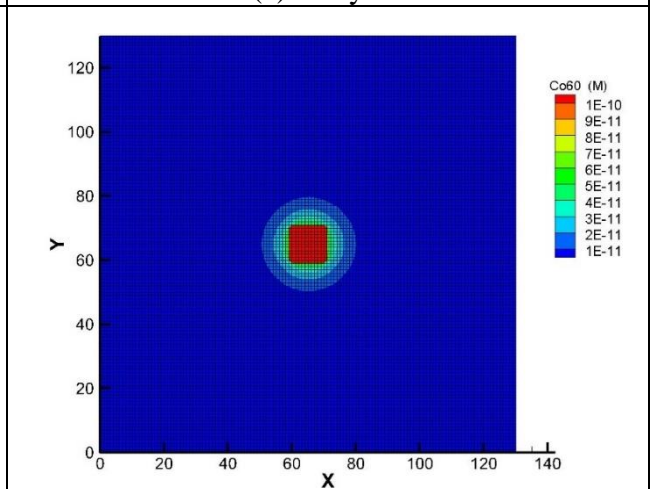
(a)T=0 year



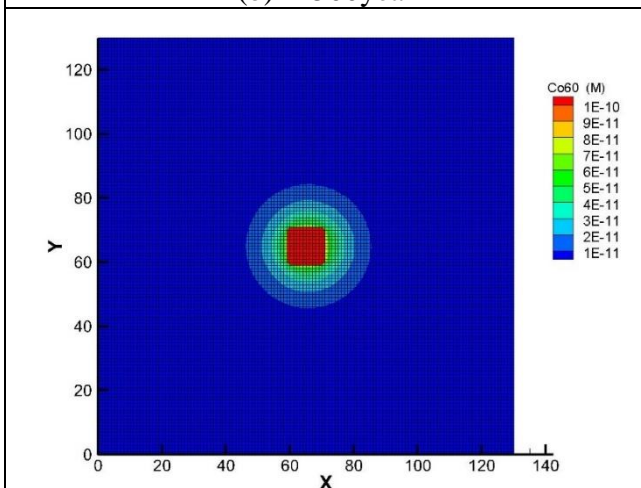
(a)T=0 year



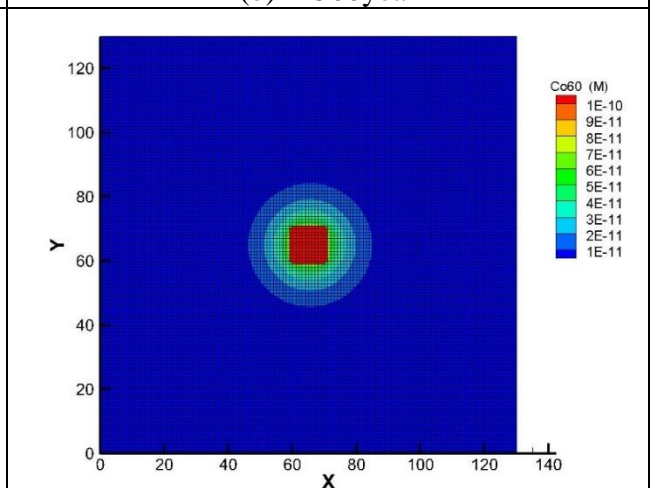
(b)T=500year



(b)T=500year



(c)T=1000year

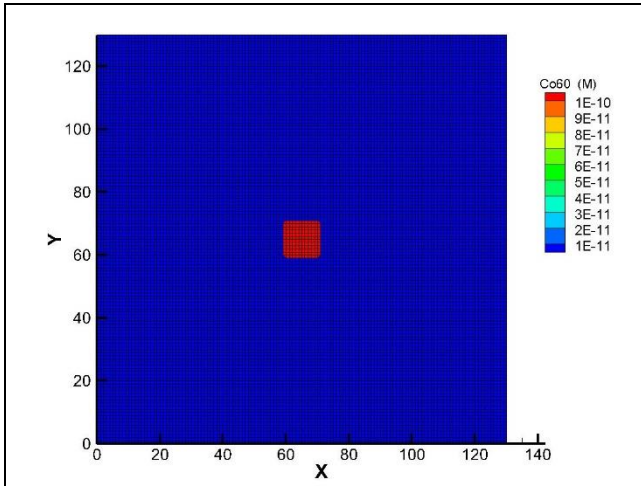


(c)T=1000year

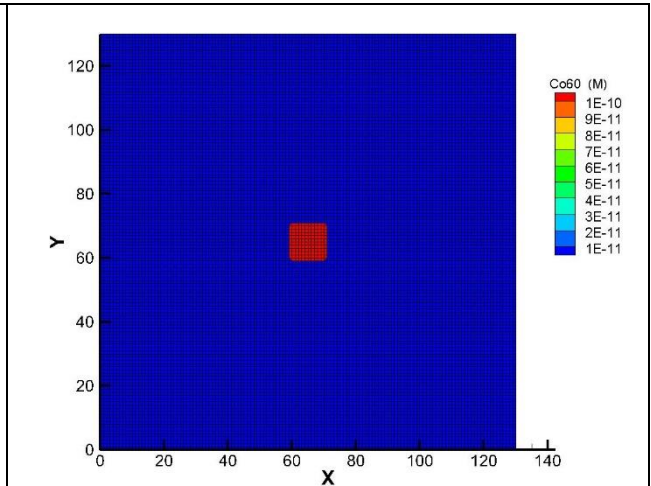
圖 4.2-1 測試 1 Co-60 未考慮衰變模擬結果

圖 4.2-2 測試 2 Co-60 未考慮衰變模擬結果

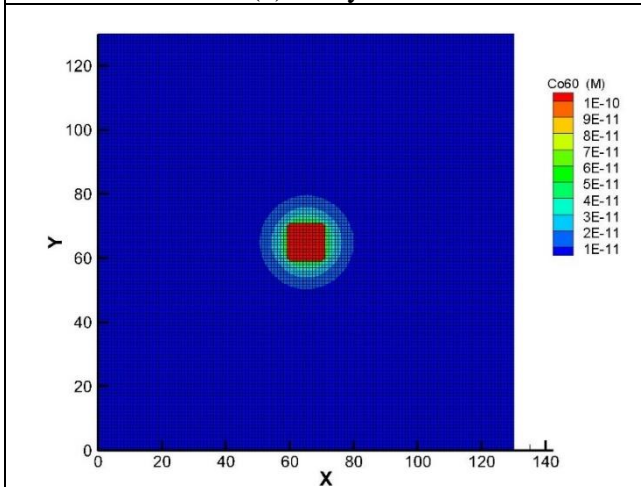




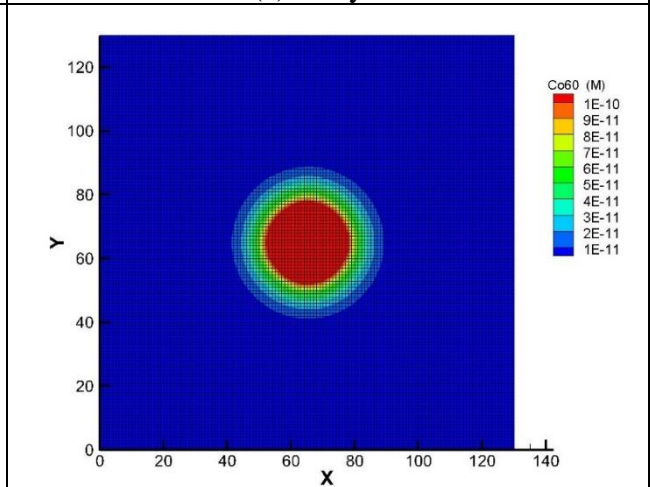
(a)T=0 year



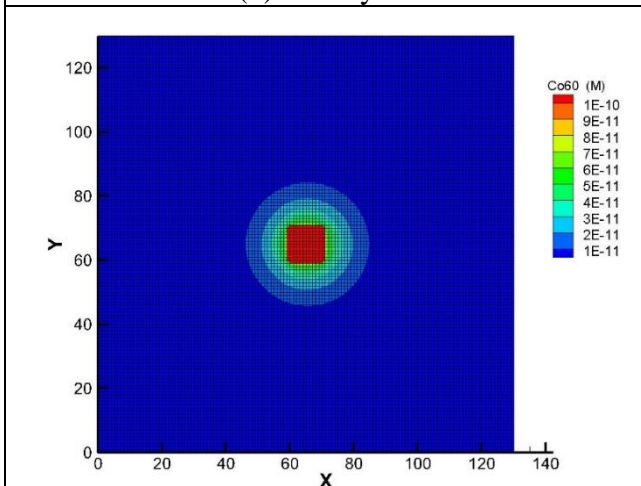
(a)T=0 year



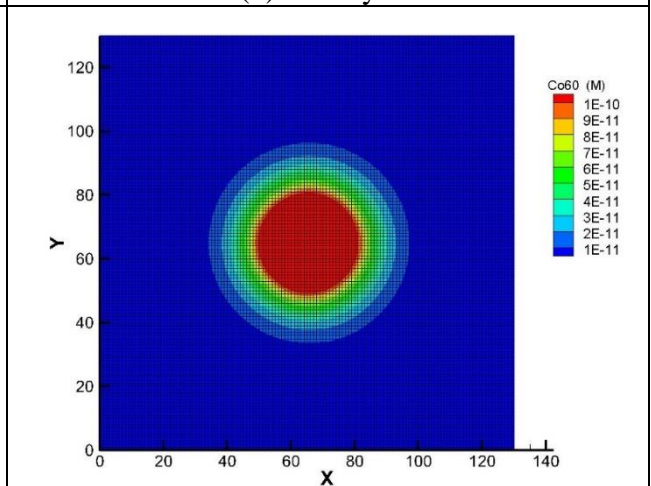
(b)T=500year



(b)T=500year



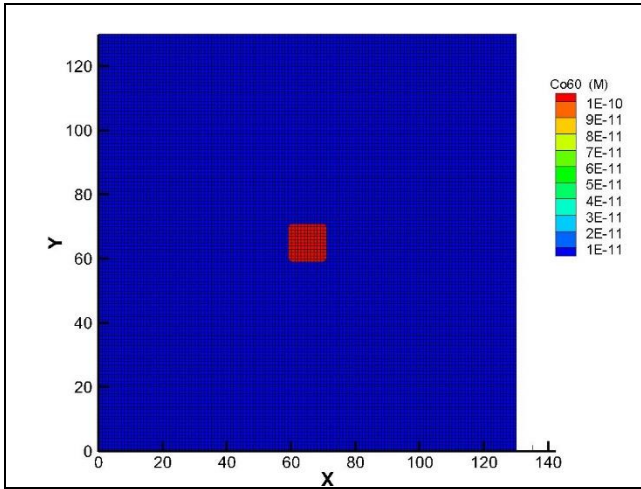
(c)T=1000year



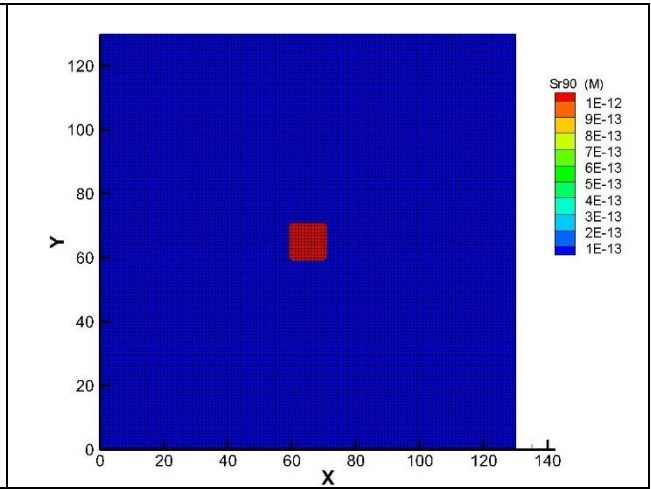
(c)T=1000year

圖 4.2-3 測試 3 Co-60 未考慮衰變模擬結果

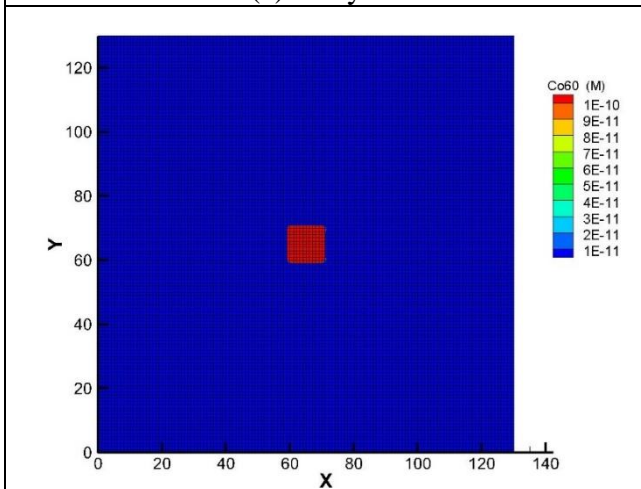
圖 4.2-4 測試 4 Co-60 未考慮衰變模擬結果



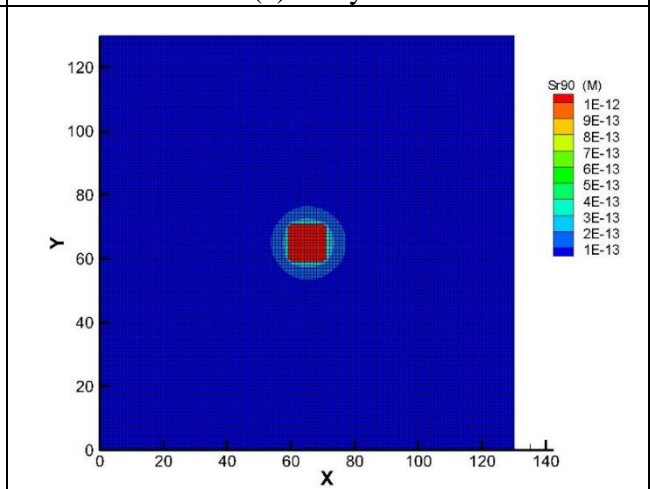
(a)T=0 year



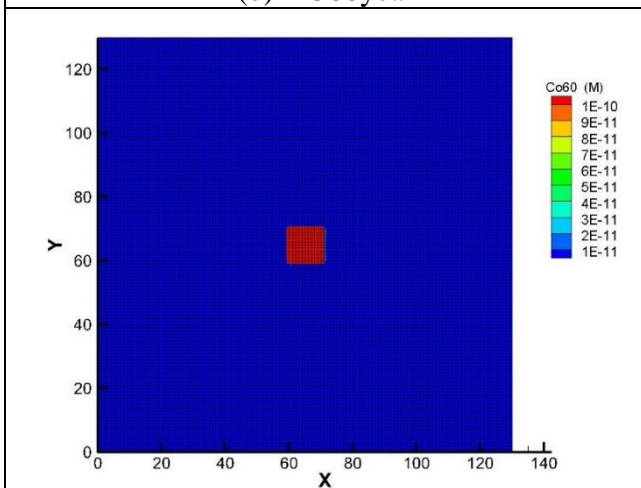
(a)T=0 year



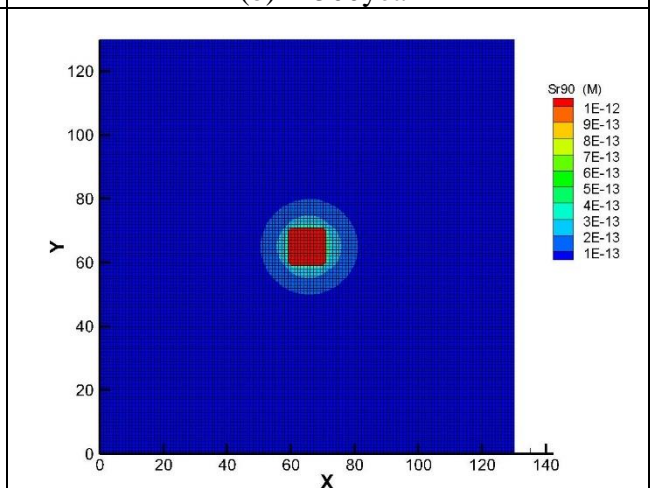
(b)T=500year



(b)T=500year



(c)T=1000year

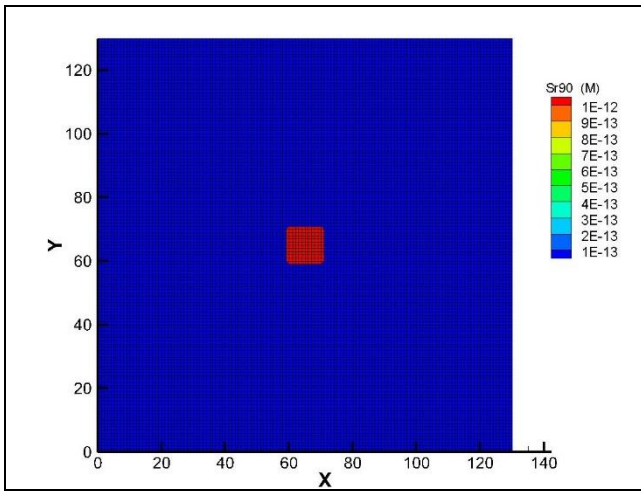


(c)T=1000year

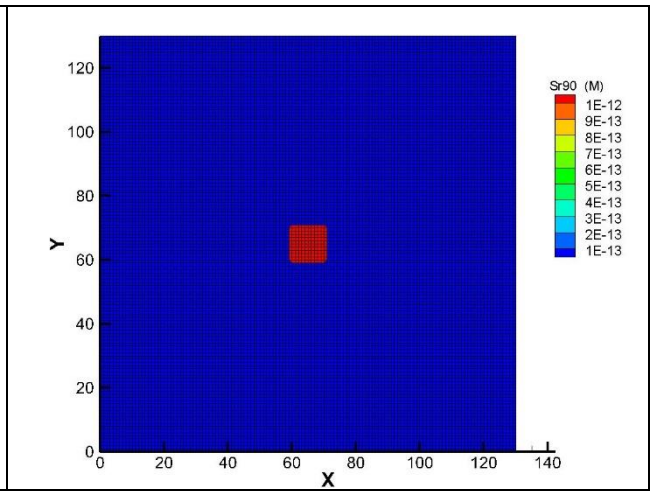
圖 4.2-5 測試 5 Co-60 未考慮衰變模擬結果

圖 4.2-6 測試 6 Sr-90 未考慮衰變模擬結果

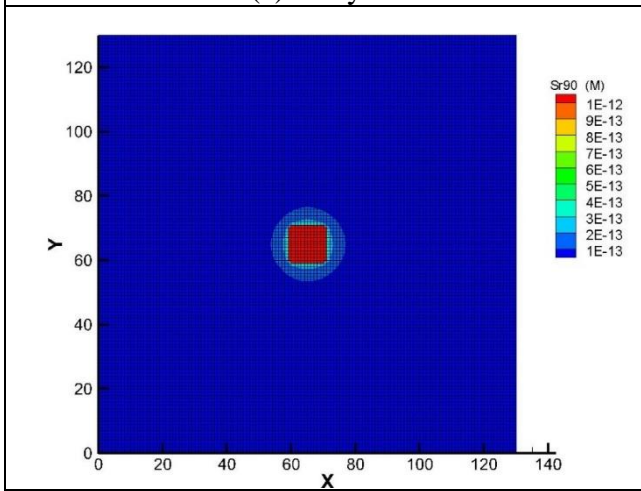




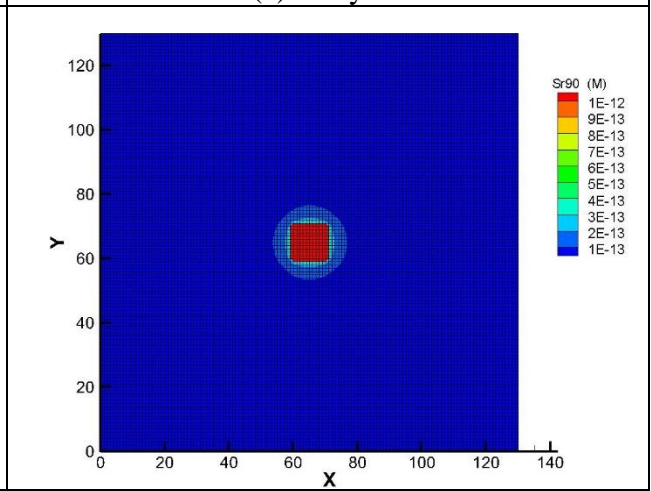
(a)T=0 year



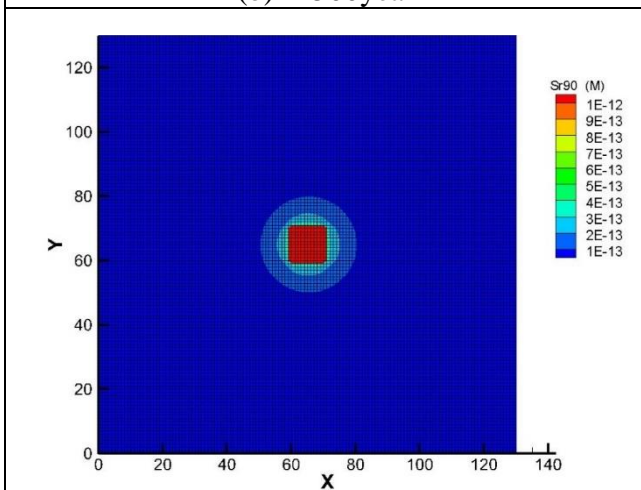
(a)T=0 year



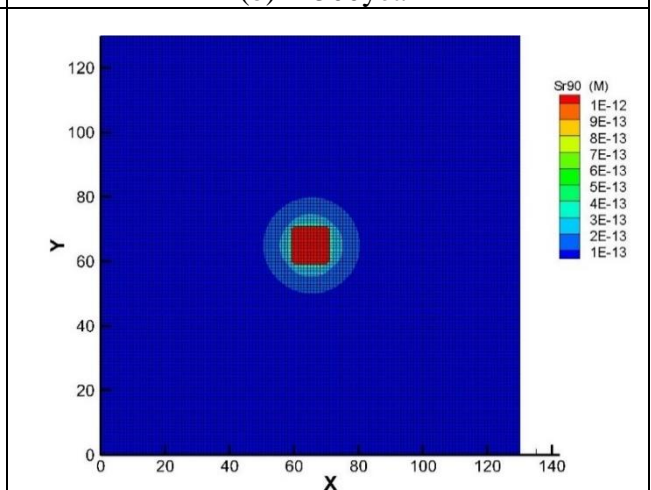
(b)T=500year



(b)T=500year



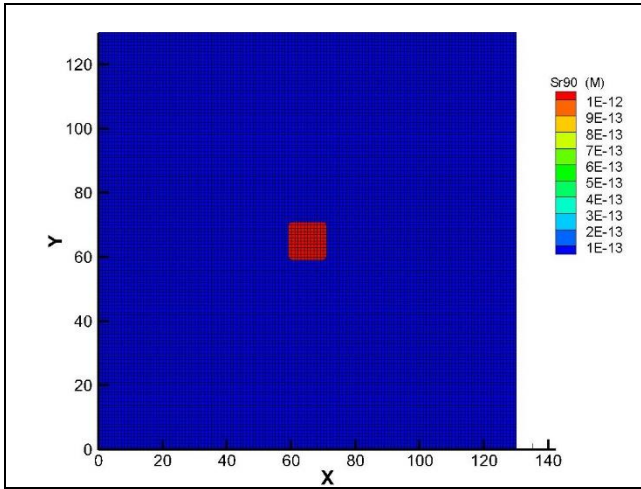
(c)T=1000year



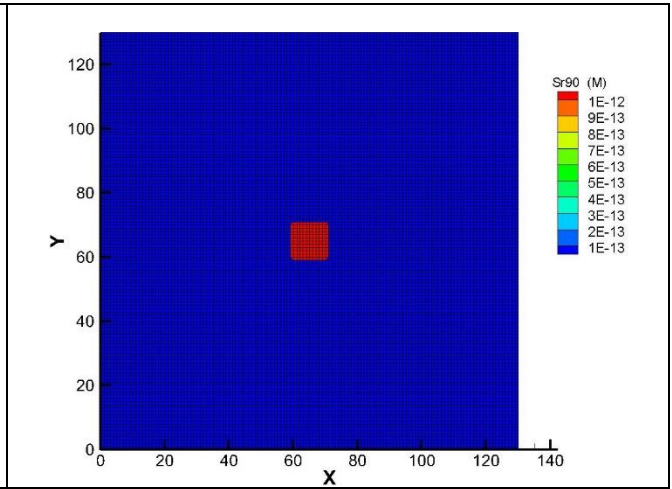
(c)T=1000year

圖 4.2-7 測試 7 Sr-90 未考慮衰變模擬結果

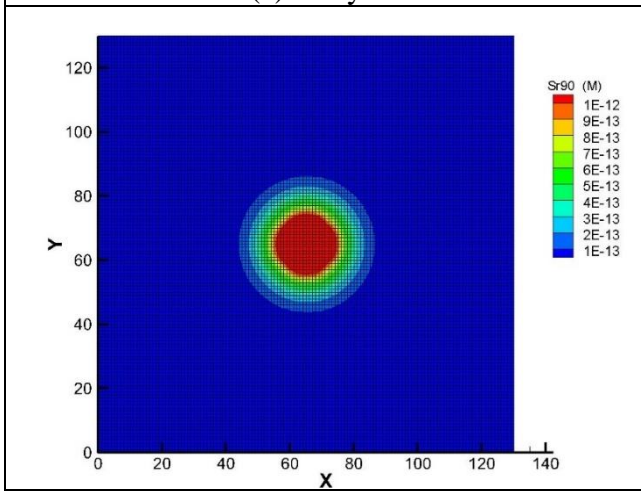
圖 4.2-8 測試 8 Sr-90 未考慮衰變模擬結果



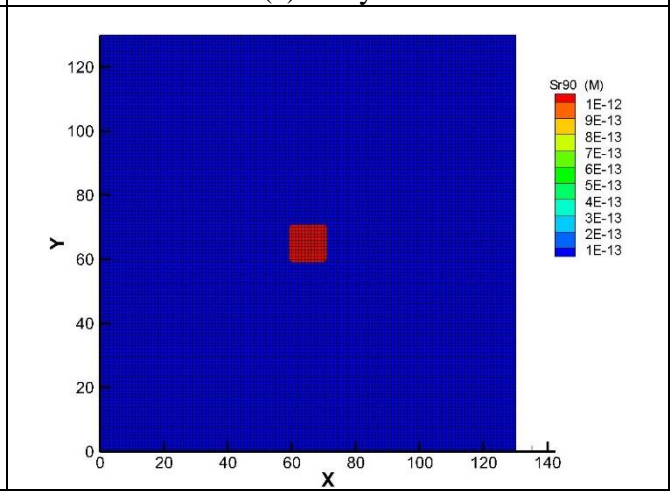
(a)T=0 year



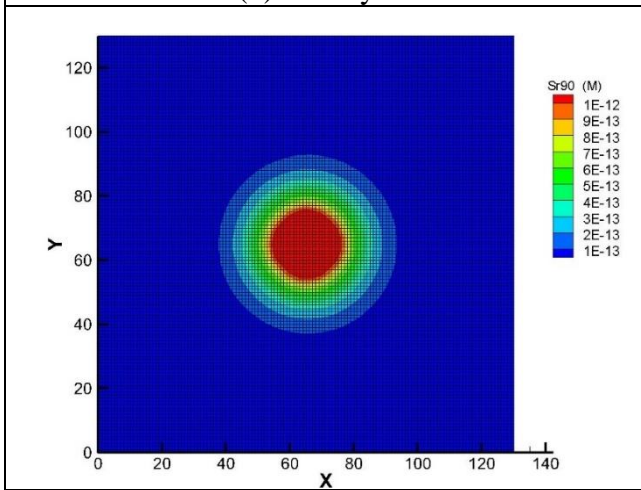
(a)T=0 year



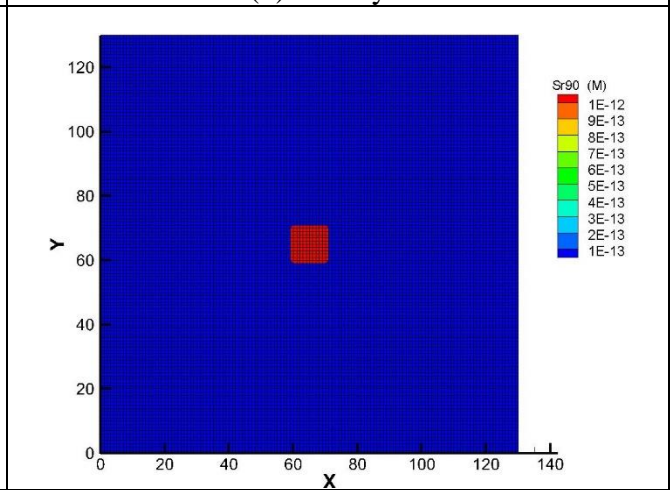
(b)T=500year



(b)T=500year



(c)T=1000year

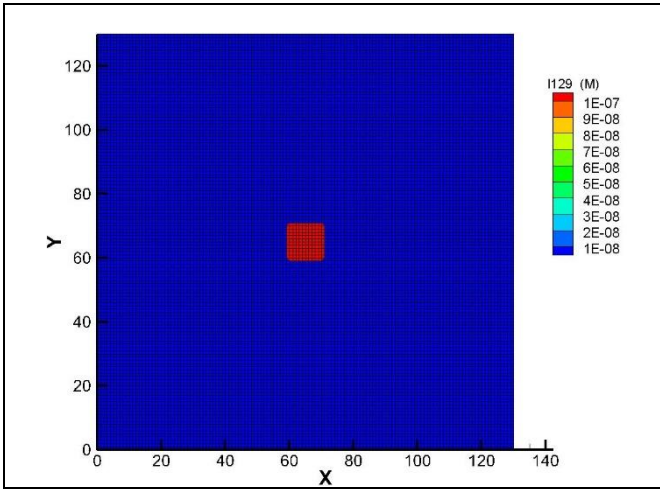


(c)T=1000year

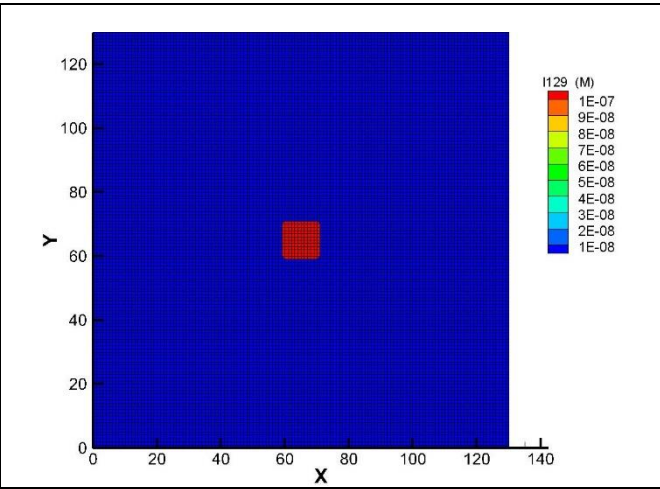
圖 4.2-9 測試 9 Sr-90 未考慮衰變模擬結果

圖 4.2-10 測試 10 Sr-90 未考慮衰變模擬結果

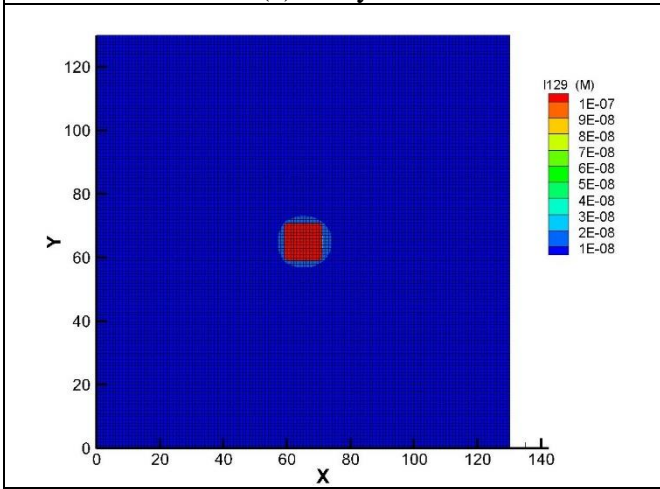




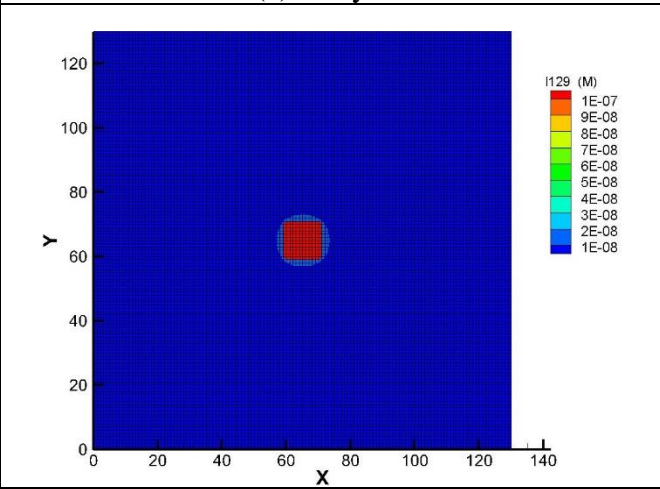
(a)T=0 year



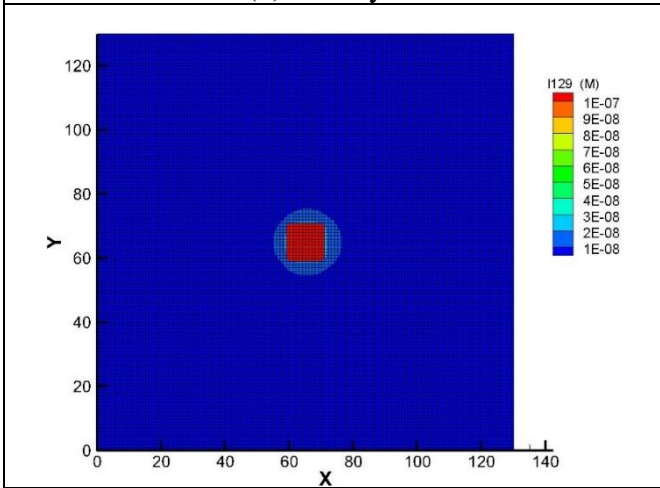
(a)T=0 year



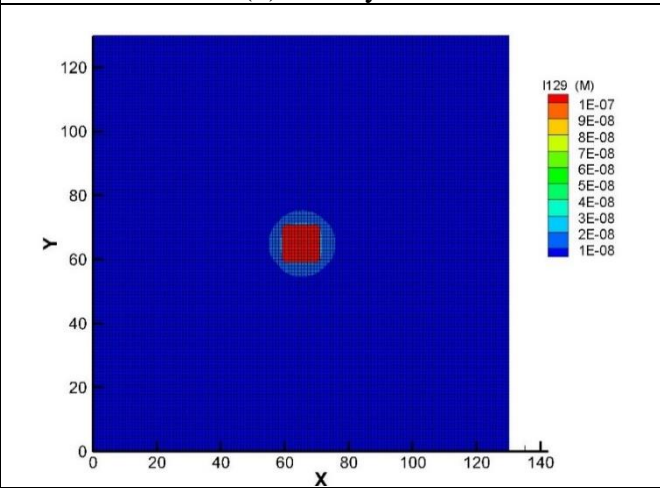
(b)T=500year



(b)T=500year



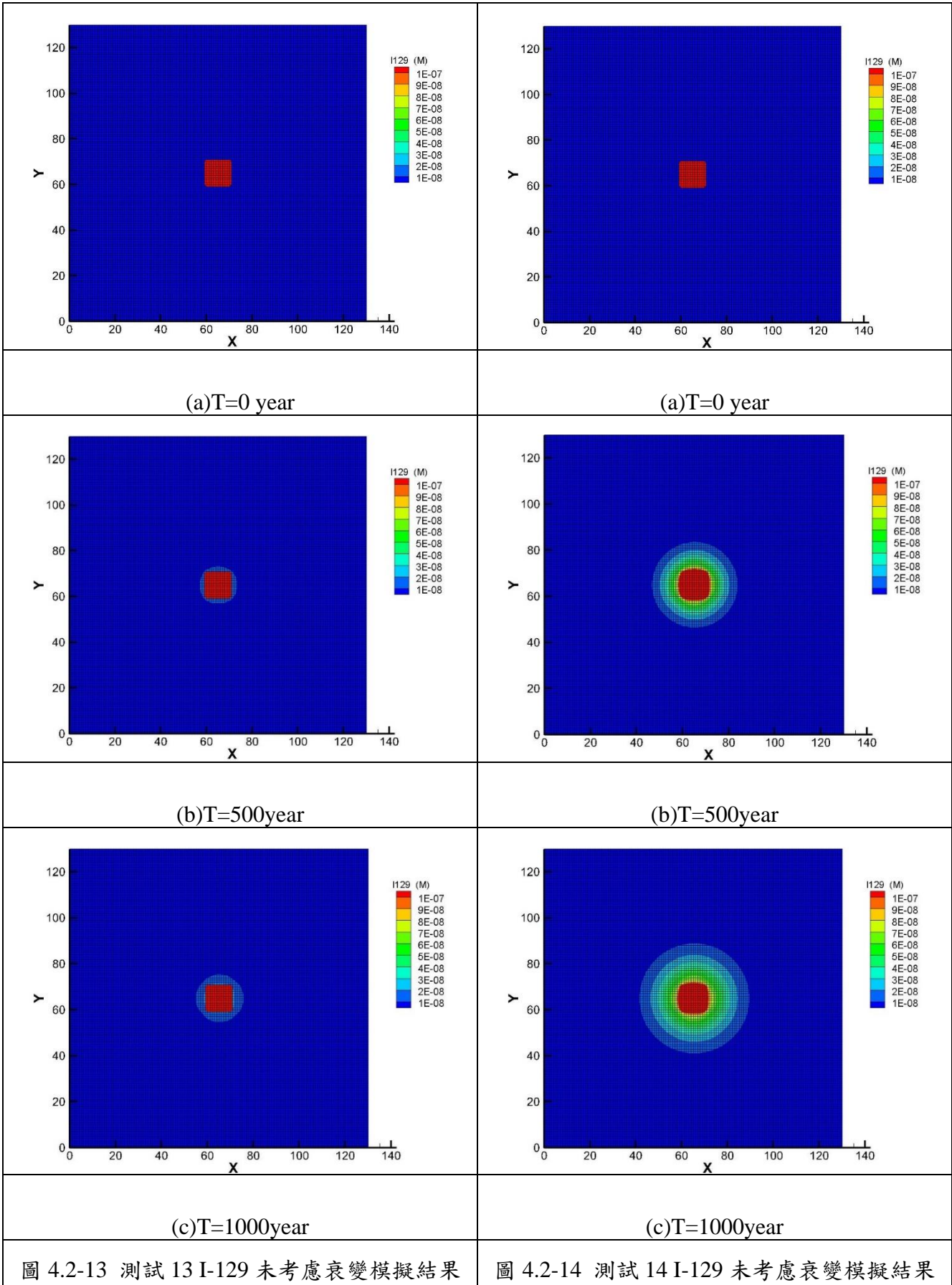
(c)T=1000year



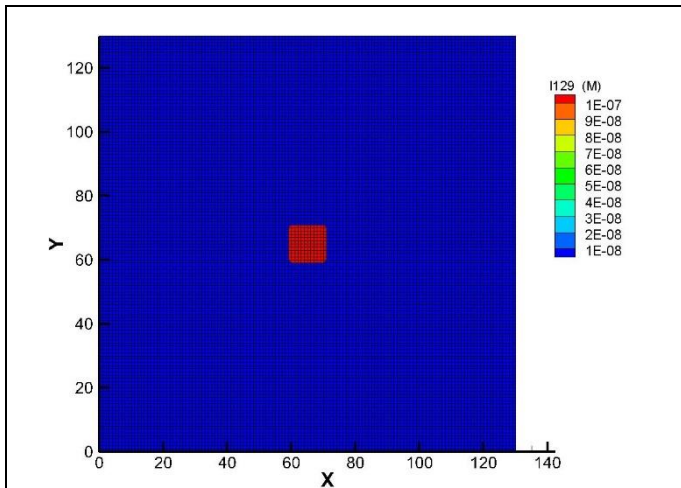
(c)T=1000year

圖 4.2-11 測試 11 I-129 未考慮衰變模擬結果

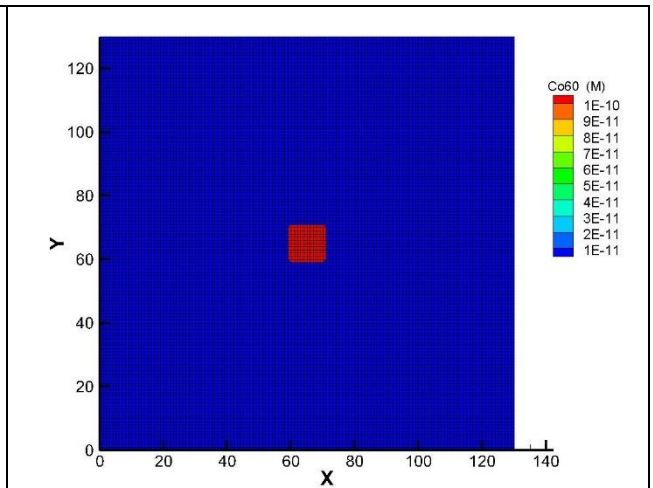
圖 4.2-12 測試 12 I-129 未考慮衰變模擬結果



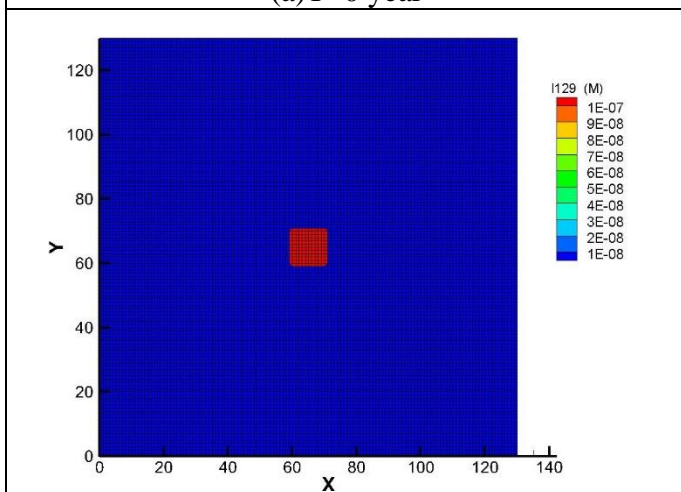




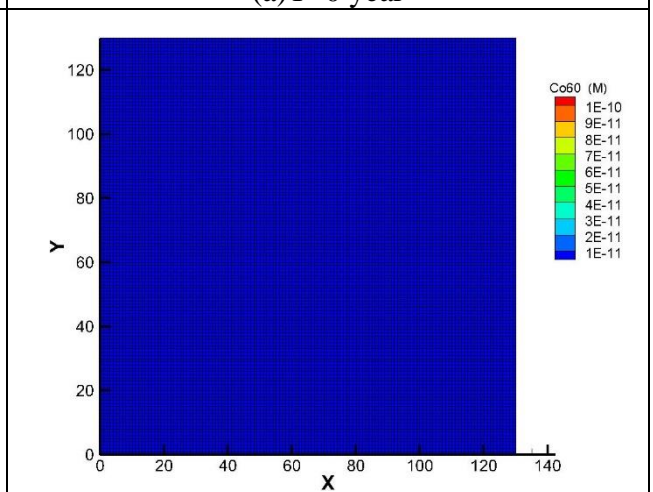
(a)T=0 year



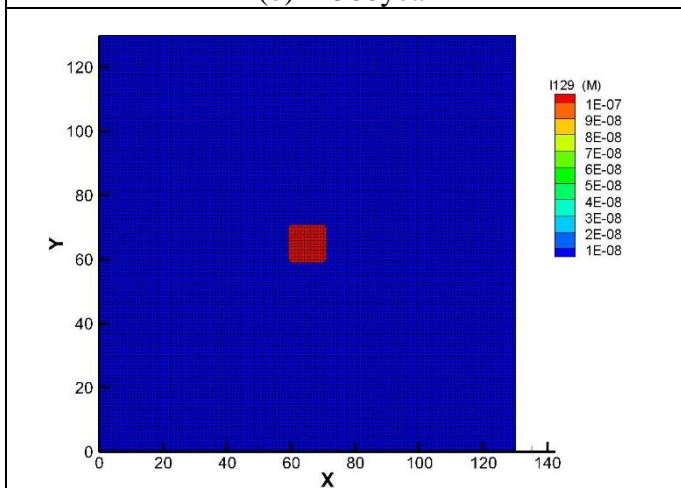
(a)T=0 year



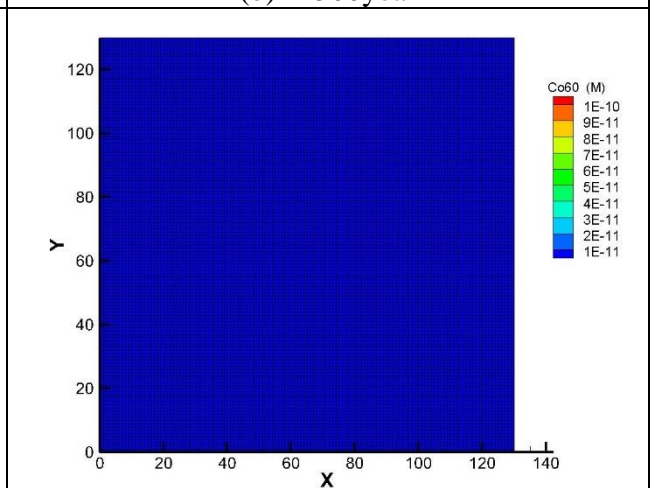
(b)T=500year



(b)T=500year



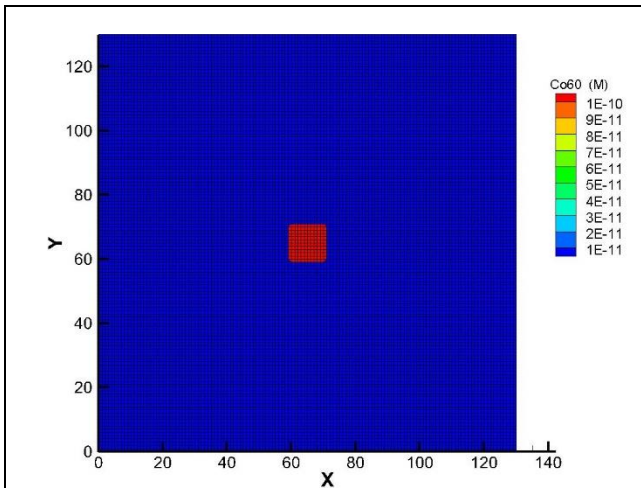
(c)T=1000year



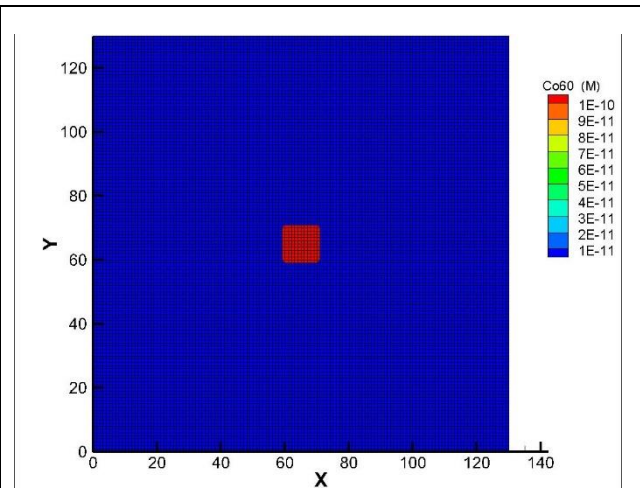
(c)T=1000year

圖 4.2-15 測試 15 I-129 未考慮衰變模擬結果

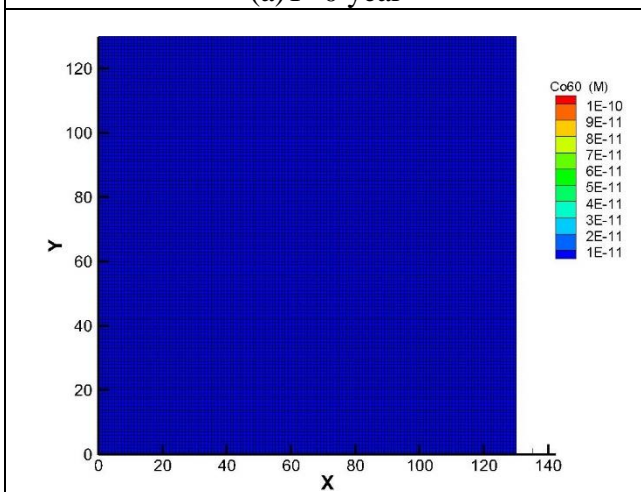
圖 4.2-16 測試 16 Co-60 考慮衰變模擬結果



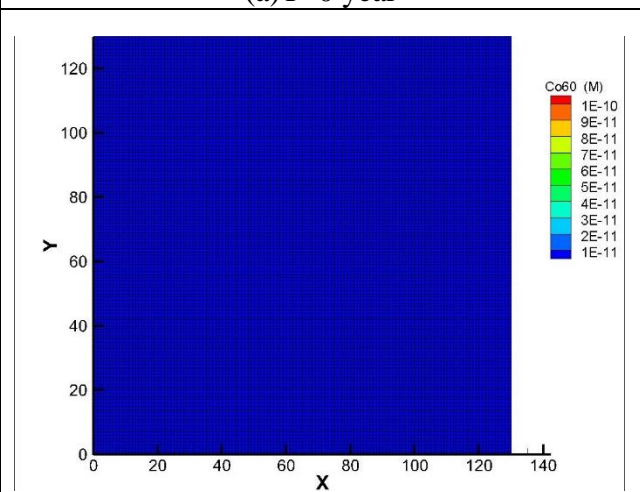
(a)T=0 year



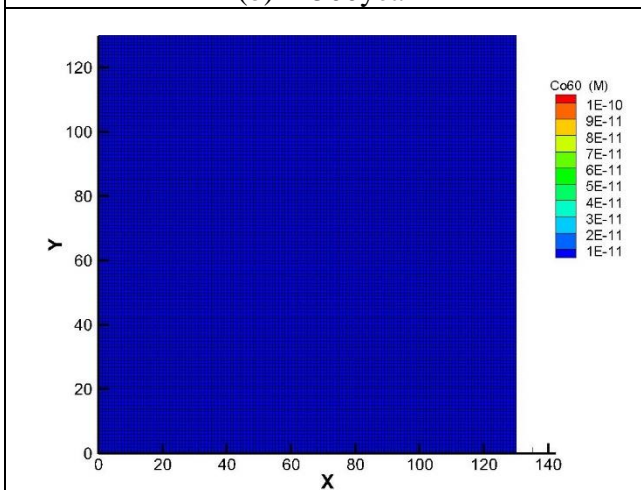
(a)T=0 year



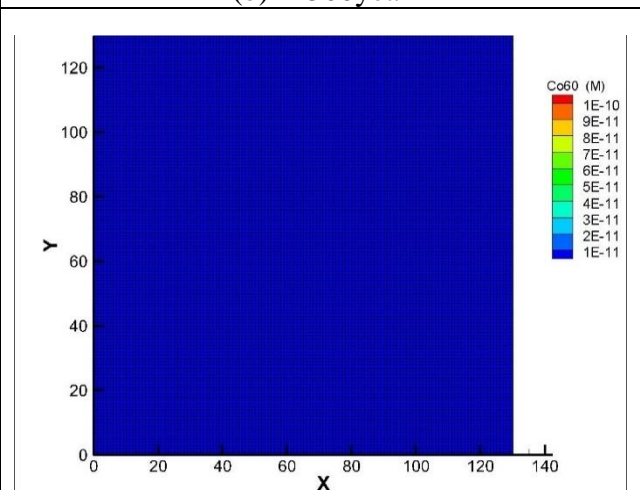
(b)T=500year



(b)T=500year



(c)T=1000year

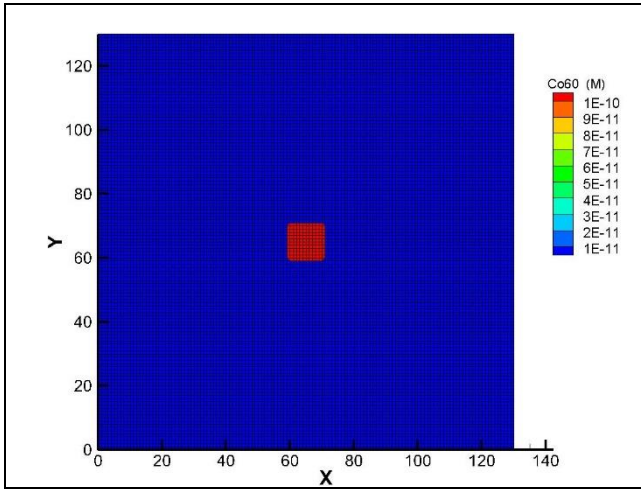


(c)T=1000year

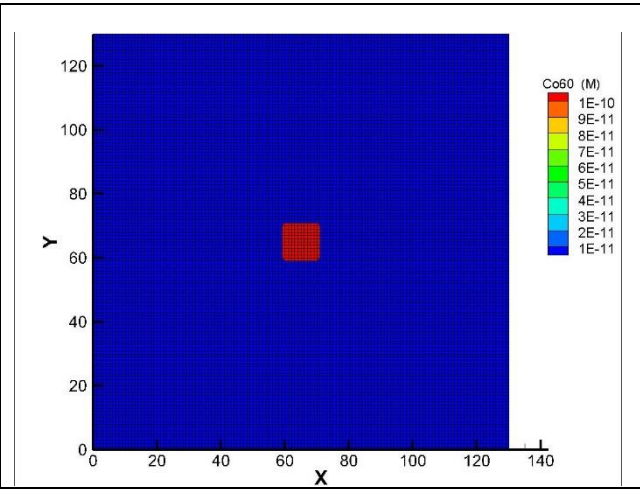
圖 4.2-17 測試 17 Co-60 考慮衰變模擬結果

圖 4.2-18 測試 18 Co-60 考慮衰變模擬結果

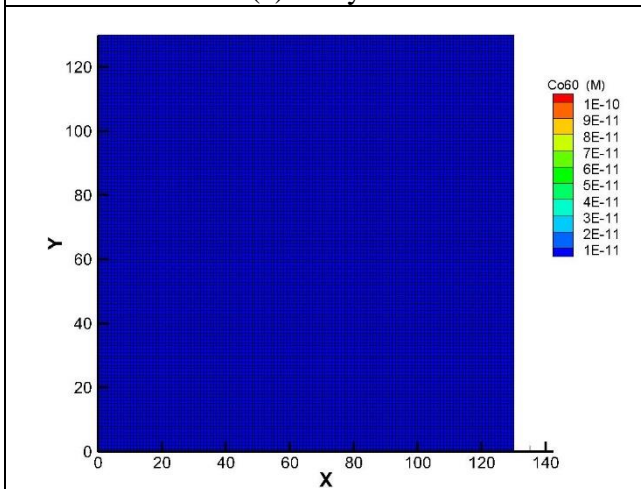




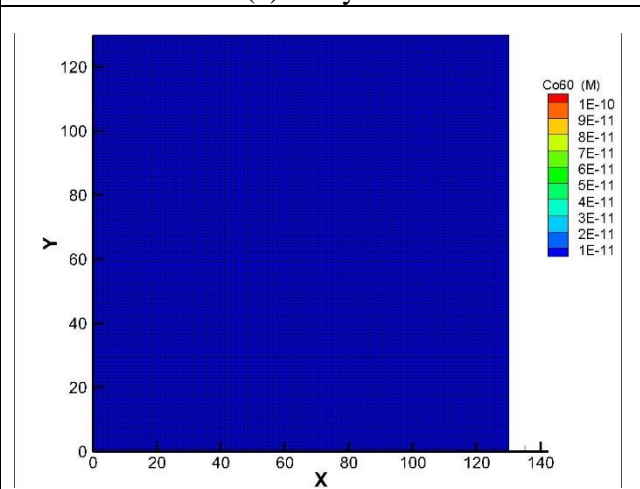
(a)T=0 year



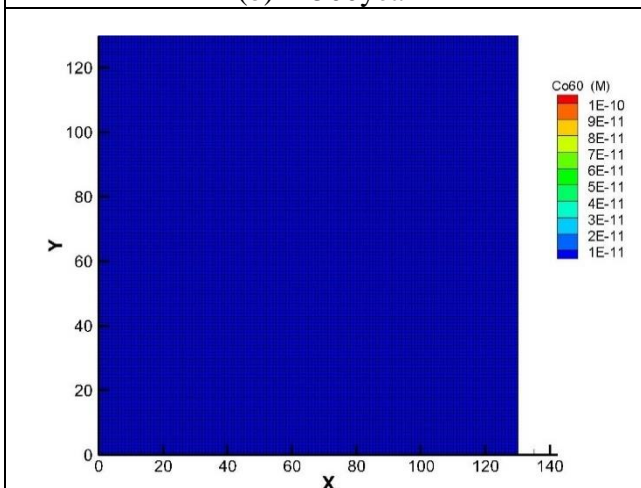
(a)T=0 year



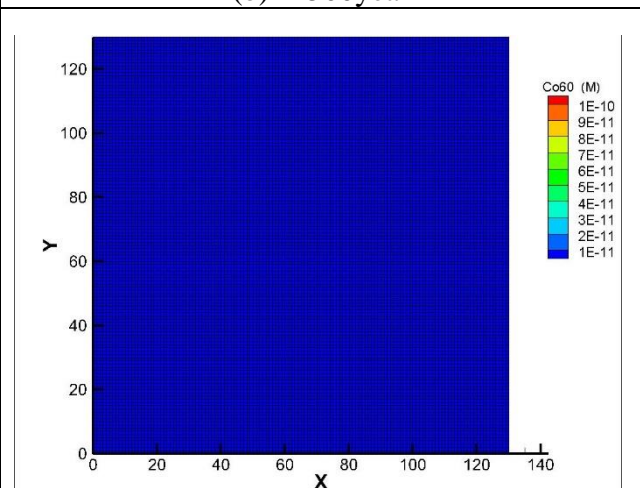
(b)T=500year



(b)T=500year



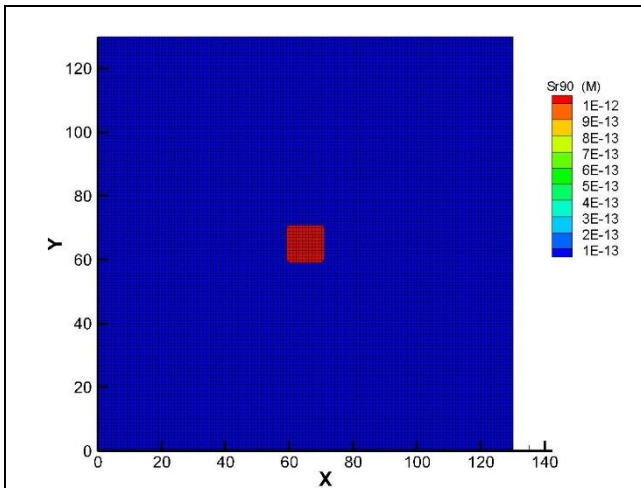
(c)T=1000year



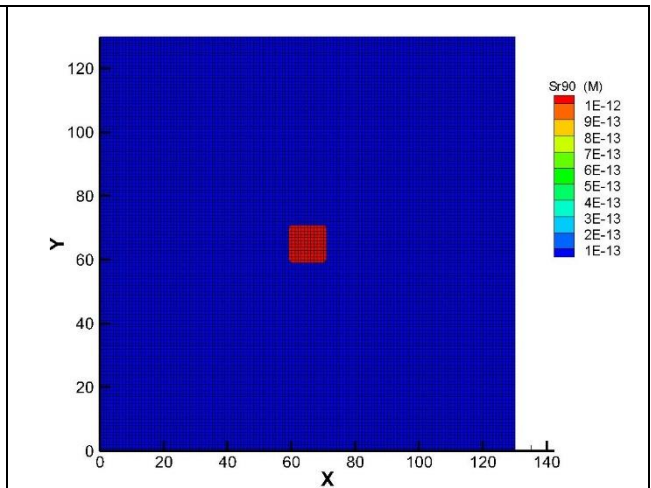
(c)T=1000year

圖 4.2-19 測試 19 Co-60 考慮衰變模擬結果

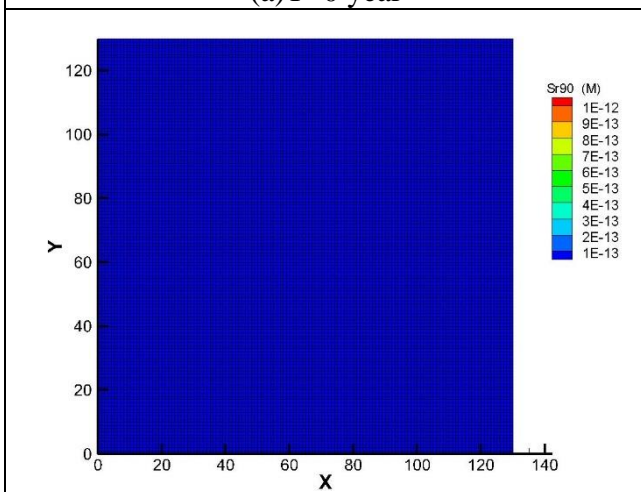
圖 4.2-20 測試 20 Co-60 考慮衰變模擬結果



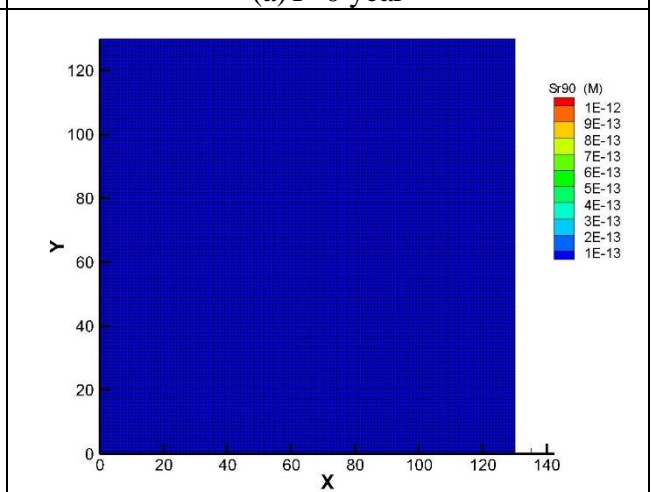
(a)T=0 year



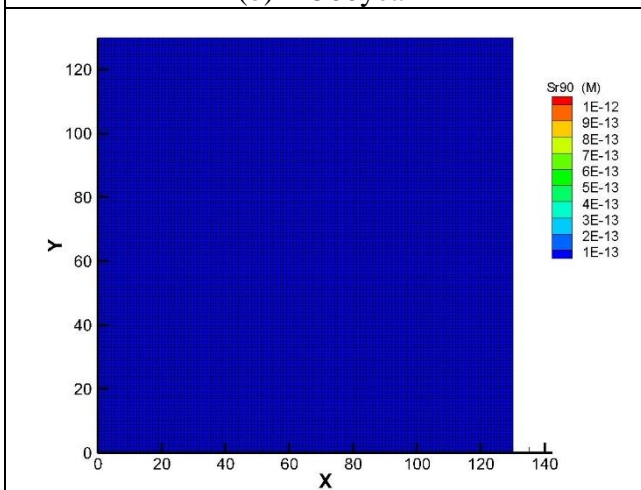
(a)T=0 year



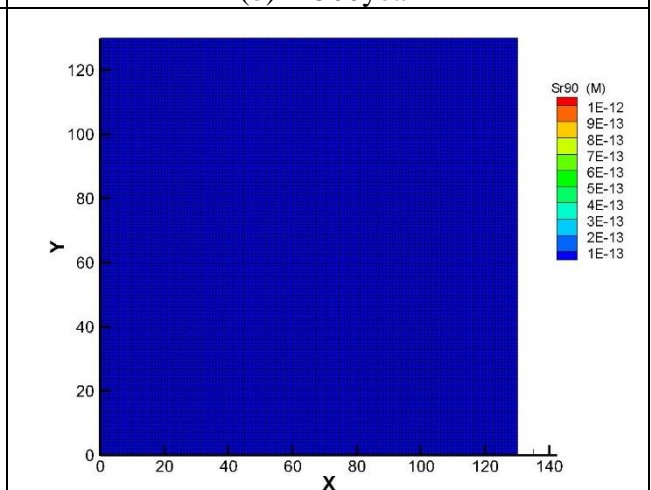
(b)T=500year



(b)T=500year



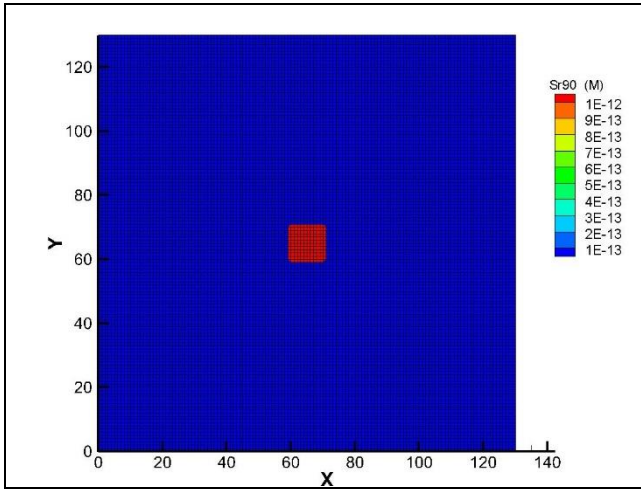
(c)T=1000year



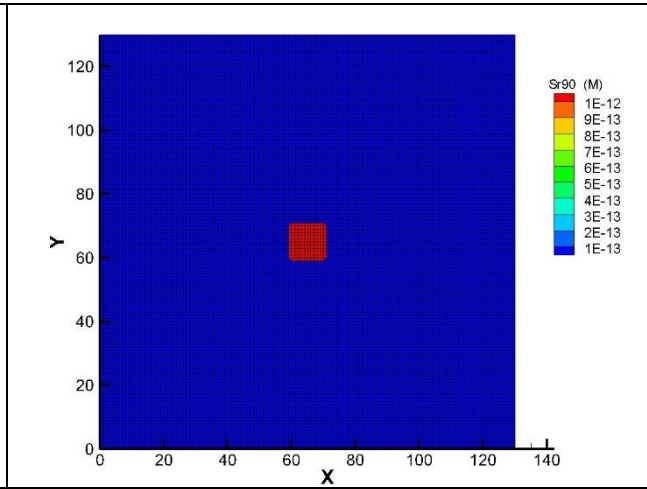
(c)T=1000year

圖 4.2-21 測試 21 Sr-90 考慮衰變模擬結果

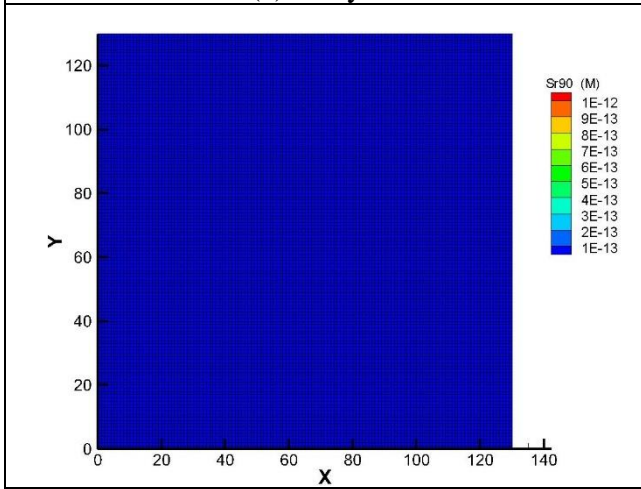
圖 4.2-22 測試 22 Sr-90 考慮衰變模擬結果



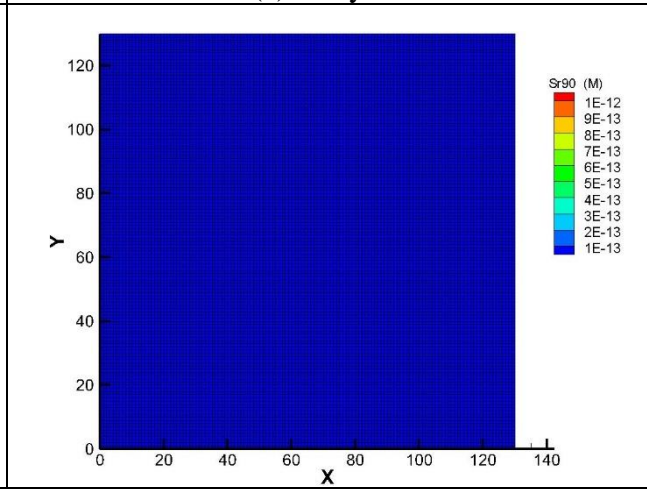
(a)T=0 year



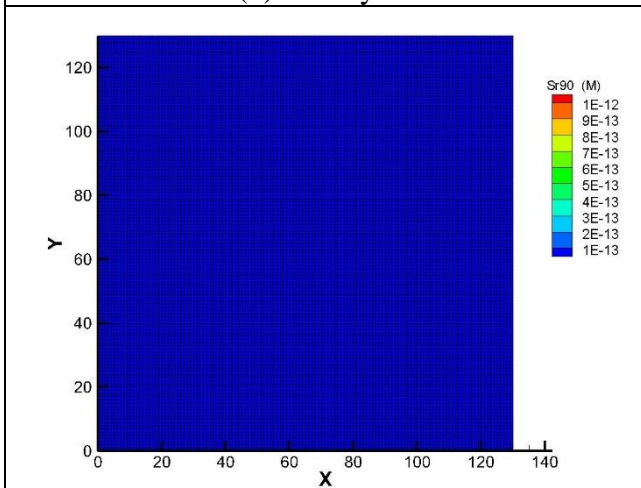
(a)T=0 year



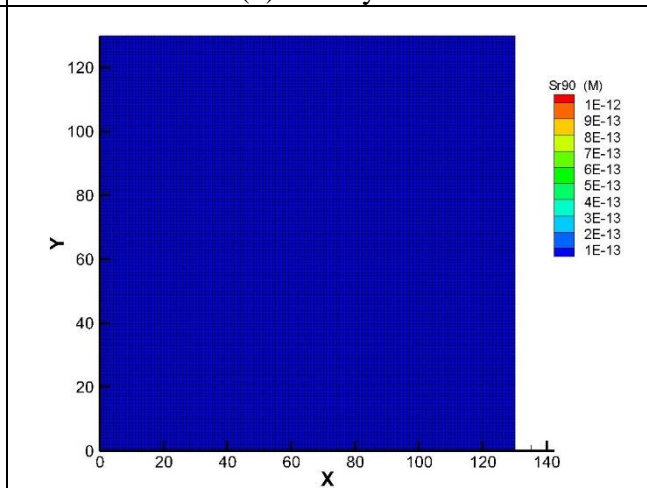
(b)T=500year



(b)T=500year



(c)T=1000year

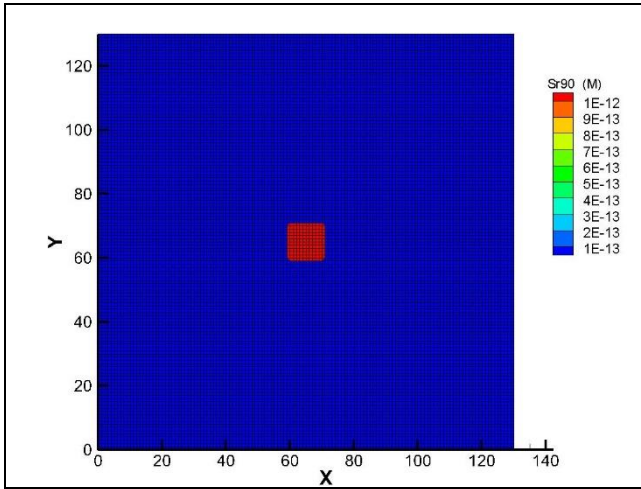


(c)T=1000year

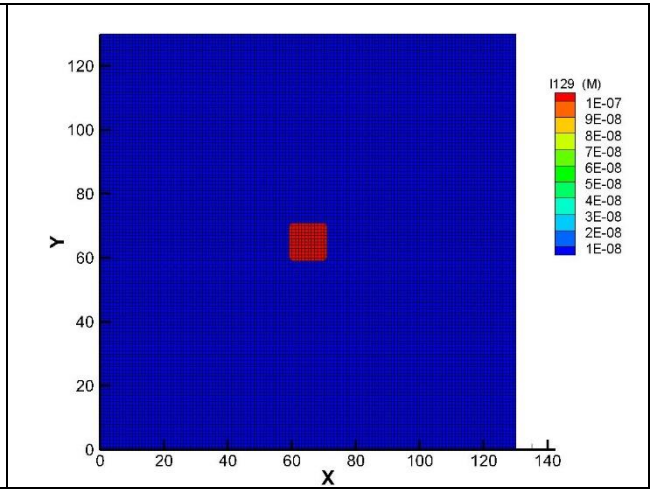
圖 4.2-23 測試 23 Sr-90 考慮衰變模擬結果

圖 4.2-24 測試 24 Sr-90 考慮衰變模擬結果

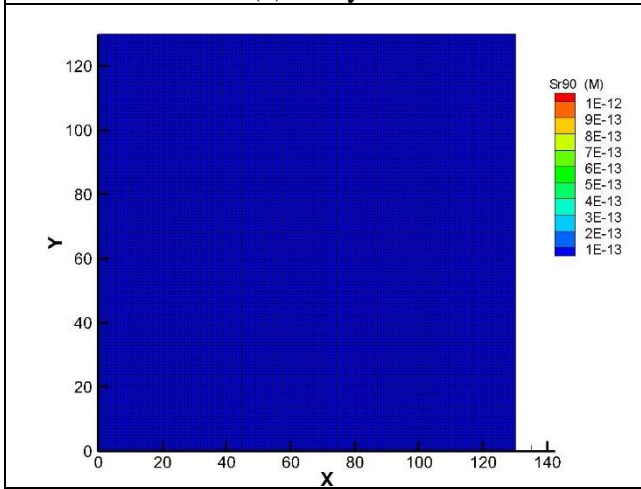




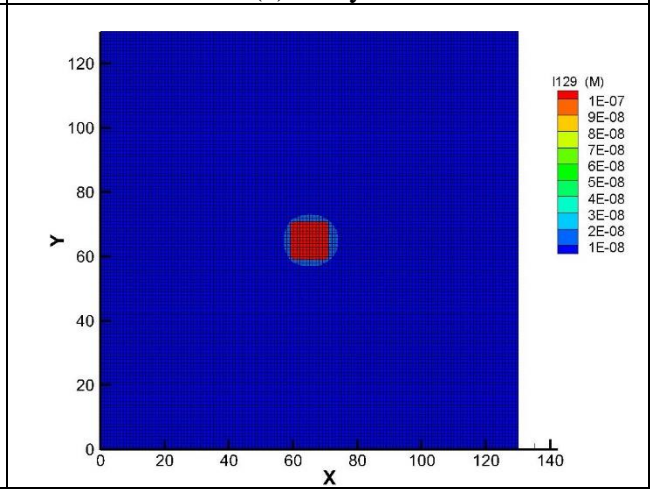
(a)T=0 year



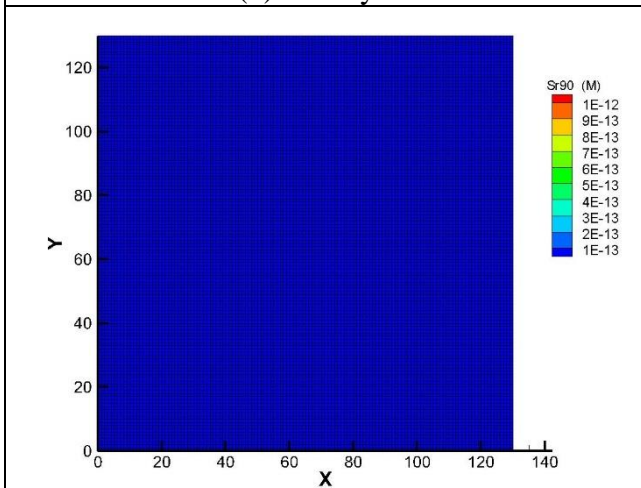
(a)T=0 year



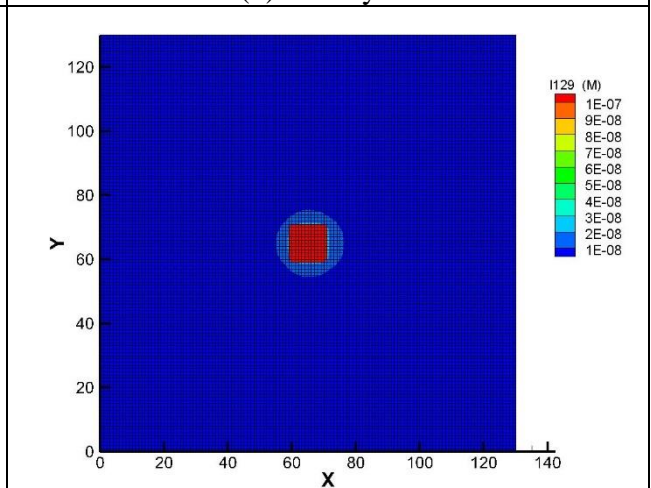
(b)T=500year



(b)T=500year



(c)T=1000year

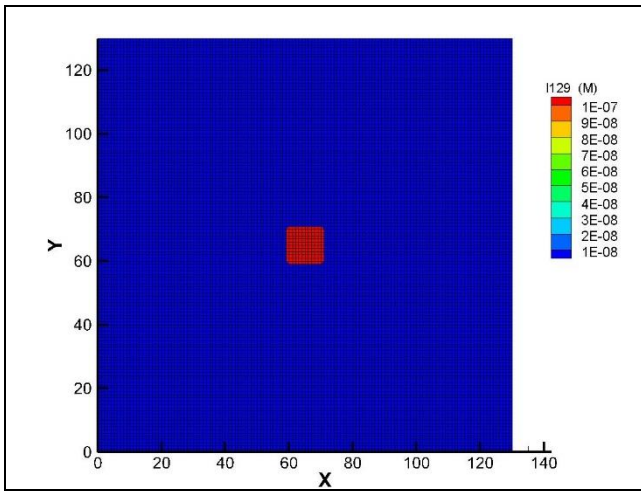


(c)T=1000year

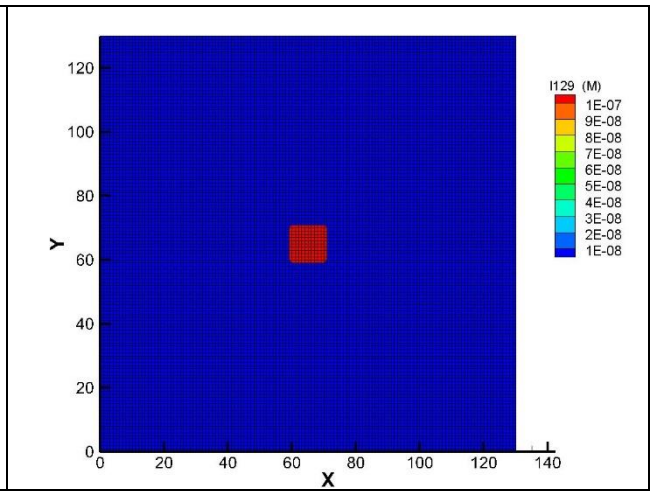
圖 4.2-25 測試 25 Sr-90 考慮衰變模擬結果

圖 4.2-26 測試 26 I-129 考慮衰變模擬結果

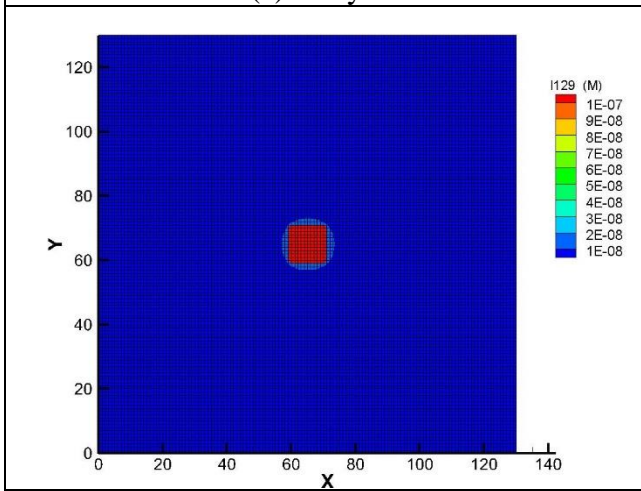




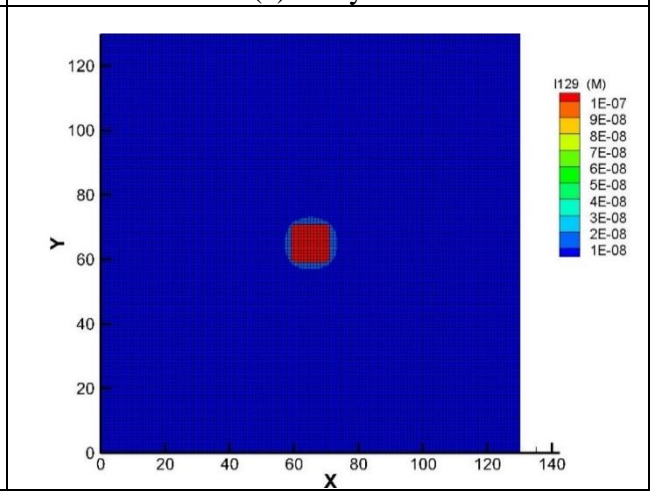
(a)T=0 year



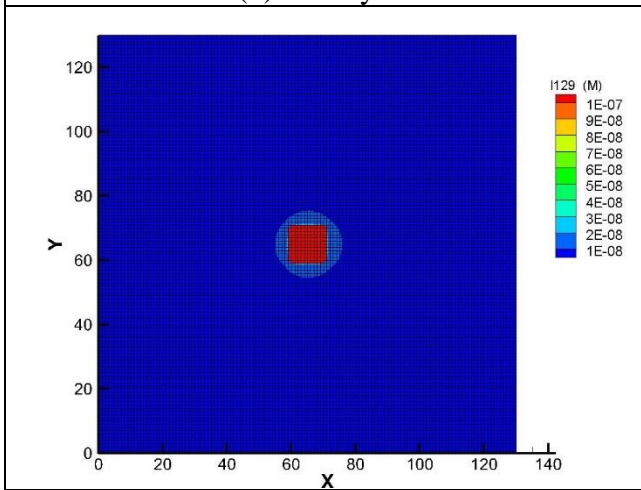
(a)T=0 year



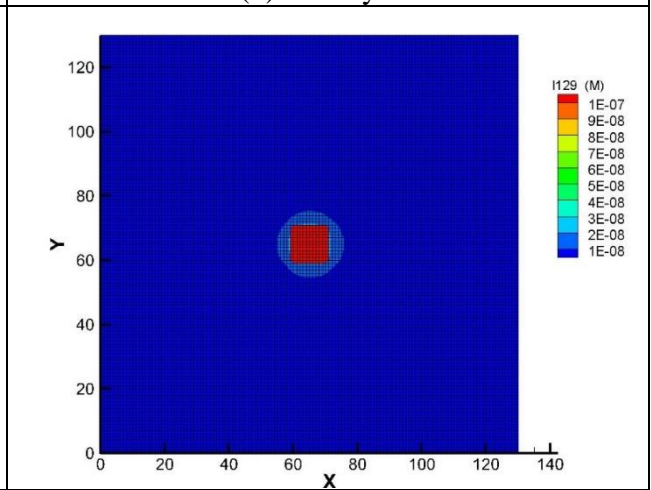
(b)T=500year



(b)T=500year



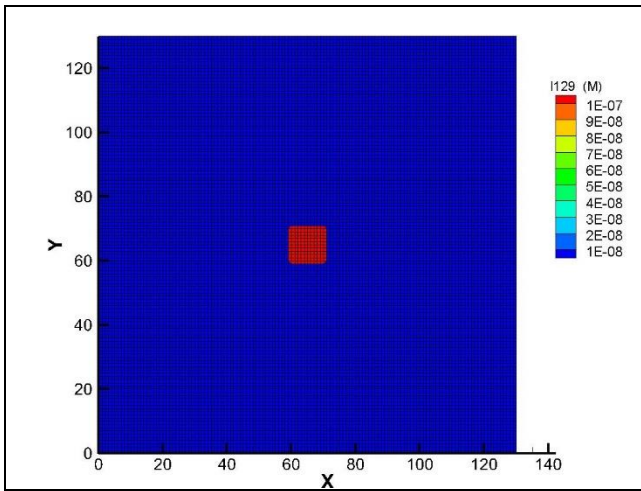
(c)T=1000year



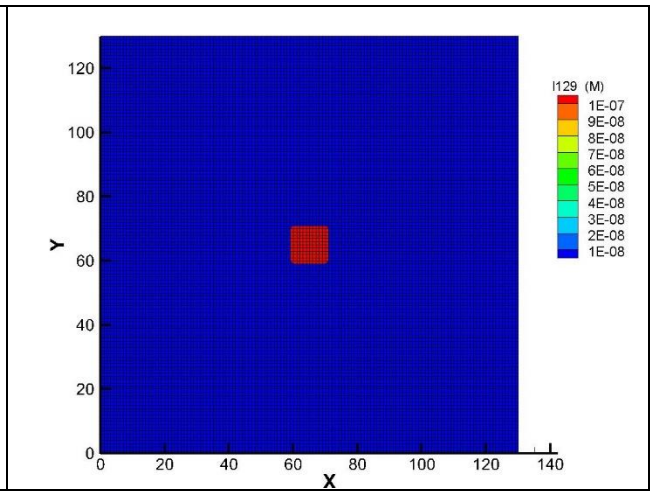
(c)T=1000year

圖 4.2-27 測試 27 I-129 考慮衰變模擬結果

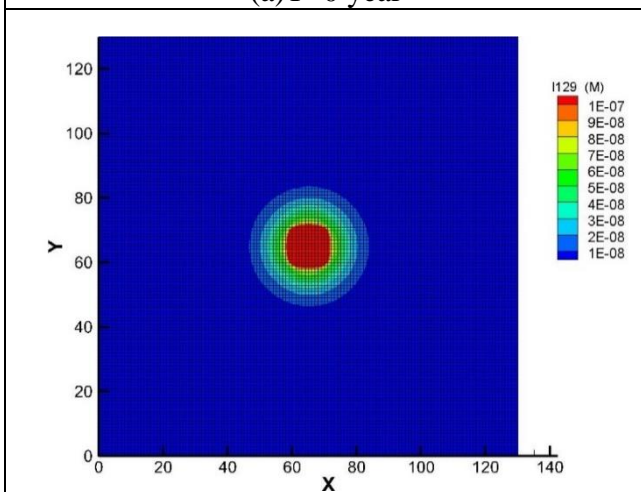
圖 4.2-28 測試 28 I-129 考慮衰變模擬結果



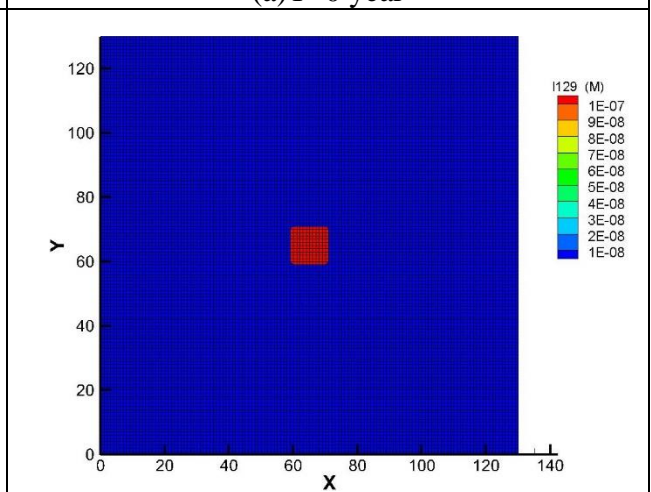
(a)T=0 year



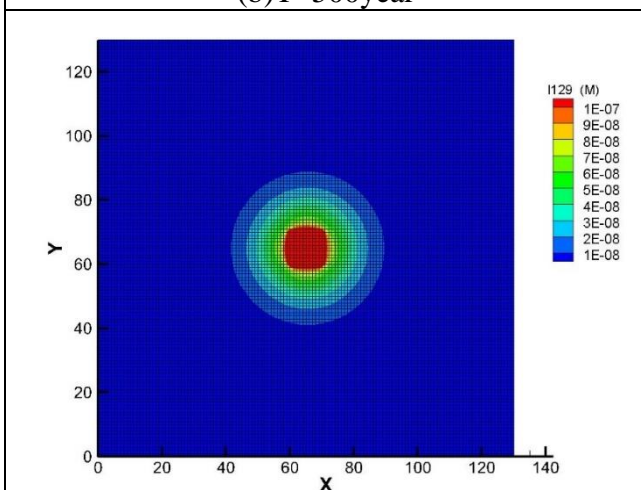
(a)T=0 year



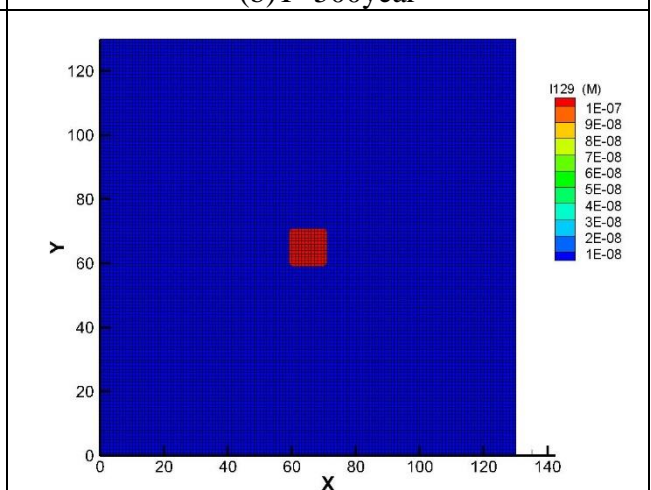
(b)T=500year



(b)T=500year



(c)T=1000year



(c)T=1000year

圖 4.2-29 測試 29 I-129 考慮衰變模擬結果

圖 4.2-30 測試 30 I-129 考慮衰變模擬結果

### 4.3 工程障壁功能與遲滯效果比較

首先針對工程障壁功能對遲滯效果之影響分析，為簡化比較變因，先避免核種衰變對於濃度之影響，取測試 1~測試 15 之濃度模擬結果進行比較。

#### (1) 處置窖水力傳導係數對遲滯功能影響

測試案例在僅考慮水力傳導係數改變對濃度之影響，分別比較案例 1~案例 3(圖 4.2-1、圖 4.2-2、圖 4.2-3)、案例 6~案例 8(圖 4.2-6、圖 4.2-7、圖 4.2-8)與案例 11~案例 13(圖 4.2-11、圖 4.2-12、圖 4.2-13)。可發現其不同案例在相同時間之濃度分布十分相似，顯示水力傳導係數改變 1 個級數的情況下，對於濃度分布之影響不大，換言之對遲滯功能的影響亦不明顯。

於計算網域縱向中心處取處置窖外 3 公尺處為觀察點，繪製案例 1~案例 3 之濃度歷線如圖 4.3-1 所示。測試 2 為基準案例，當測試 1 之水力傳導係數上升 1 個級數其濃度增加約 6%~8%，而測試 3 水力傳導係數下降 1 個級數其濃度僅下降約 1%。

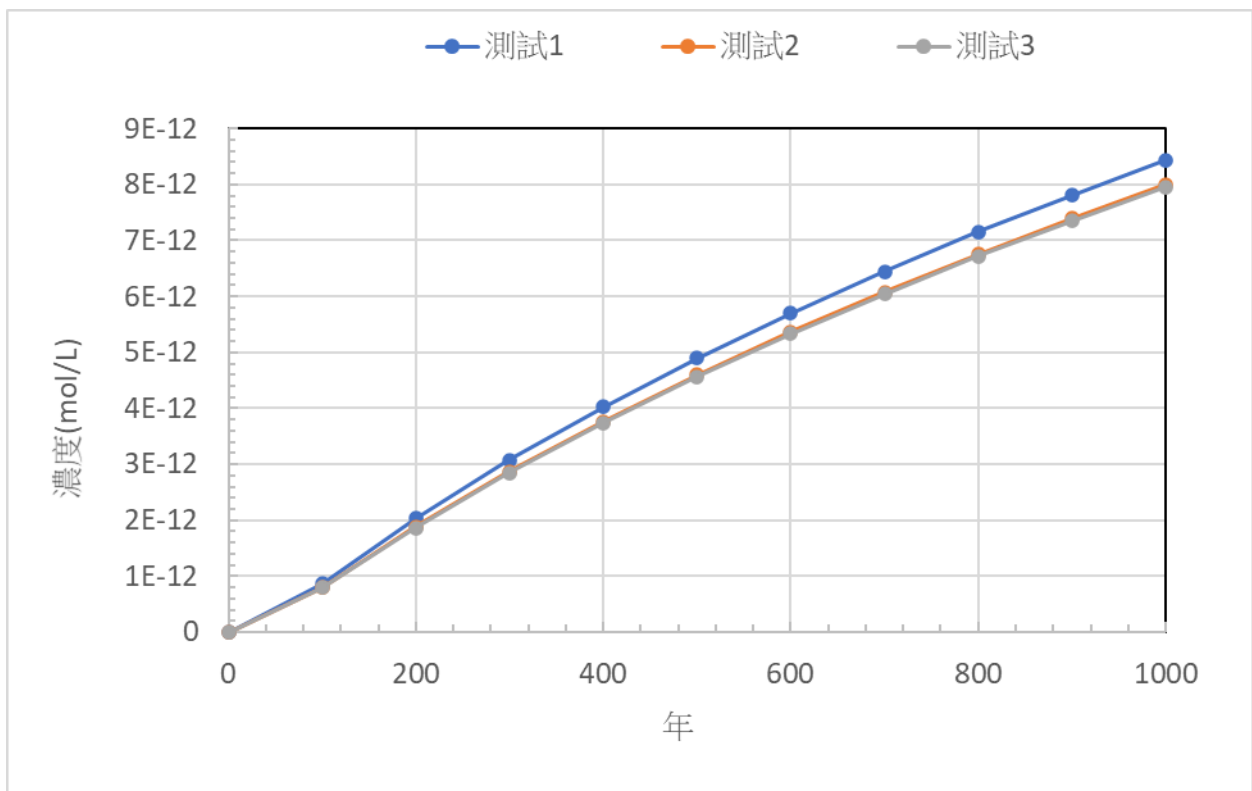


圖 4.3-1 案例 1~案例 3 之觀測點濃度歷線比較圖



## (2)處置窖擴散係數對遲滯功能影響

測試案例在僅考慮擴散係數改變對濃度之影響，分別比較案例 2、案例 4 與案例 5(圖 4.2-2、圖 4.2-4、圖 4.2-5)；案例 7、案例 9 與案例 10(圖 4.2-7、圖 4.2-9、圖 4.2-10)；案例 12、案例 14 與案例 15(圖 4.2-12、圖 4.2-14、圖 4.2-15)。可發現其不同案例在相同時間之濃度分布已有明顯差異。此系列之基準為案例 2、案例 7 與案例 12，可發現案例 5、案例 10 與案例 15 之濃度擴散範圍明顯小於其基準案例。而案例 4、案例 9 與案例 14(圖 4.2-4、圖 4.2-9、圖 4.2-14)其濃度分布範圍則是明顯高於基準案例。顯示水力傳導係數改變 1 個級數的情況下，對於濃度分布之影響已十分明顯，換言之對遲滯功能的影響相當顯著。

同樣於計算網域縱向中心處取處置窖外 3 公尺處為觀察點，繪製案例 2、案例 4 與案例 5 之濃度歷線如圖 4.3-2 所示。測試 2 為基準案例，當測試 5 之擴散係數上升 1 個級數其濃度增加約 560%~770%，而測試 4 擴散係數下降 1 個級數其濃度下降約 85%。

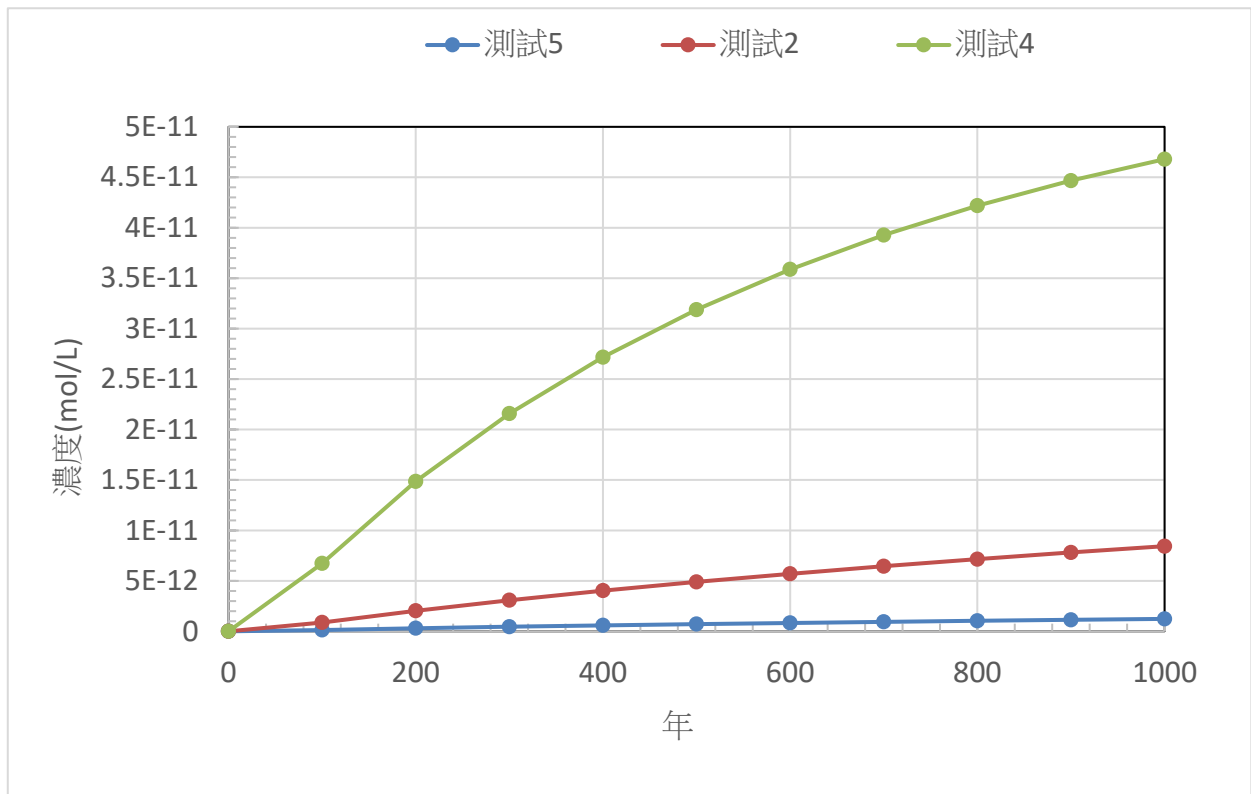


圖 4.3-2 案例 2、案例 4 與案例 5 之觀測點濃度歷線比較圖

## (3)不同初始濃度對遲滯功能影響

為比較當初始濃度具差異時是否會影響傳輸行為，取基準案例之案例 2、案例 7 與案例 12(圖 4.2-2、圖 4.2-7、圖 4.2-12)，同樣於計算網域縱向中心處取處置窖外 3 公尺處為觀察點，

繪製濃度歷線如圖 4.3-3 所示。由圖中可知，即使初始濃度有差異，在不考慮衰變特性的影響下，其傳輸特性並不會因此改變。

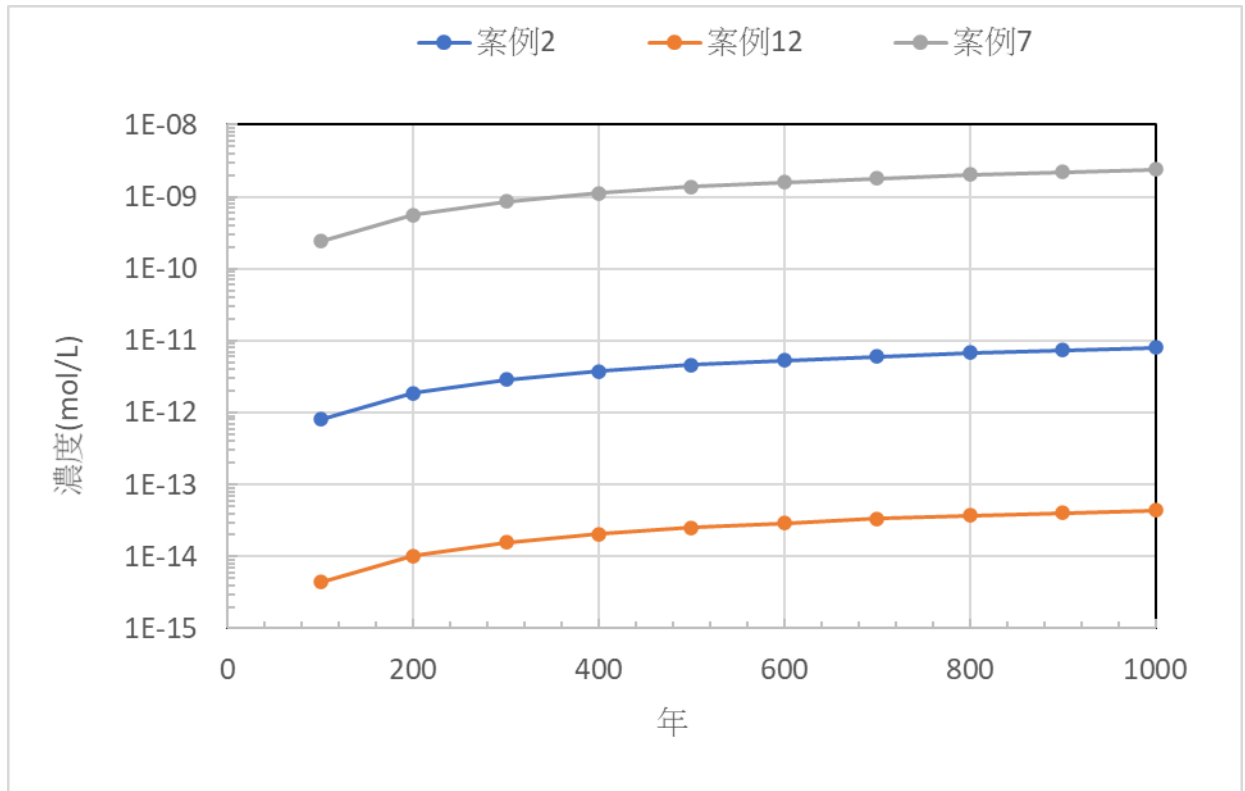


圖 4.3-3 案例 2、案例 7 與案例 12 之觀測點濃度歷線比較圖

#### (4)Co-60 案例考慮半衰期對遲滯功能影響

比較案例 16~案例 20 結果(圖 4.2-16~圖 4.2-20)，可發現如 Co-60(半衰期僅 5.27 年)這一類之短半化期核種，在 500 年時即已幾乎衰變殆盡。換言之，如欲了解處置障壁設計與遲滯功能間之關聯性，以短半化期核種為分析標的並不妥適。

#### (5)Sr-90 案例考慮半衰期對遲滯功能影響

比較案例 21~案例 25 結果(圖 4.2-21~圖 4.2-25)，可發現與 Co-60 案例 16~案例 20 相似的結果，雖然 Sr-90 半衰期約為 29.1 年，但在 500 年時同樣已幾乎衰變殆盡。

#### (6)I-129 案例考慮半衰期對遲滯功能影響

比較案例 26~案例 30 結果(圖 4.2-26~圖 4.2-30)與案例 11~案例 15 結果(圖 4.2-11~圖 4.2-15)，可發現個對應案例間之濃度分布並無明顯差異。主要原因為 I-129 具長達有 1570 萬年之半衰期，在千年尺度至萬年尺度之模擬範圍內，衰變對於其濃度之影響甚微。

# 第五章 我國低放射性廢棄物坑道處置工程障壁系統功能技術發展建議

## 5.1 對於 LLWD2016 報告之技術審驗與建議

依 2.2 節所摘述之台電公司「LLWD2016 報告」處置設施工程障壁系統概念設計，以及兩處建議候選場址設計情節與替代情節之安全分析模擬之分析模式與參數設定內容。LLWD2016 報告採用之 GoldSim 程式確實適用於探討工程障壁系統對於圍阻與遲滯功能之影響。此外，該報告亦有針對會影響遲滯功能之相關工程障壁單元水力傳導係數與擴散係數進行設定，亦有考量隨時間演進後之設施劣化而改變相關參數設定。基本已可說明其處置設施設計對於遲滯功能之效果。在圍阻功能考量，該報告設定處置設施封閉後盛裝容器即失去圍阻功能。因此，基本上並未將處置設施之圍阻功能納入分析，考量略為保守。

就遲滯功能論證上，該報告雖透過安全分析之設計情節與替代情節分析證明其設計可符合法規要求，但報告中並未論證各項處置設施與遲滯功能相關參數設定之合理性。雖有進行工程障壁系統參數敏感度分析，然其採用包含近場與遠場範圍之整體模擬方式，雖然參數調整仍會影響劑量結果，但無法直接反應出工程障壁系統設計對於控制擴散環境之敏感度。建議未來可單純針對近場環境進行敏感度分析，方可清楚說明其工程障壁系統設計與遲滯功能之關聯性，提供更完整之資訊予審查者。

在圍阻功能論證上，基於我國「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」規定，當採用處置容器進行處置時，該處置容器依其許可將具有 100 年或 300 年之圍阻功能。由 4.3 節的測試案例分析可知，如 Co-60 或 Sr-90 等短半化期核種，在處置容器可提供 100 年或 300 年圍阻功能之情況下，可能已衰變至對人類健康無害狀態。應可減輕工程障壁系統對於遲滯功能之設計需求，建議後續若有使用處置容器應考量其圍阻功能。

## 5.2 對於坑道處置工程障壁系統功能審驗技術發展建議

由第四章之分析結果可知，處置窖擴散特性設計與控制為實現處置安全之重要關鍵。低放處置設施中，有高達九成之低放射性廢棄物屬於 A 類廢棄物，依目前台電公司處置規劃成果，處置窖將為其重要的工程障壁單元之一。如何確認處置窖擴散特性的設計以及施工後的品質可達原預期要求，將可視為日後審查技術之發展重點。

我國之混凝土設計與檢驗規範可參考中國土木水利學會出版之「混凝土工程施工規範與解說」及公共工程委員會訂定之「施工綱要規範」。其規定包含：

- (1)材料管理：材料品質、計量值、單位重、高流動性混凝土的充填性、鋼筋直徑、強度、鋼筋加工尺寸、鋼筋直徑/數量、砂漿溫度。
- (2)工法管理：搬運方法、搬運時間、灌漿方法、模板、支保工與模板尺寸。
- (3)工法管理：養護方法、鋼筋續接固定的位置、長度、間隔、支撐架、間隔物、鋼筋支架的配置、鋼筋的固定程度、鋼筋續接的焊接外觀、澆置中襯板與最外層鋼筋的距離。
- (4)完工檢查：構件尺寸、裂縫開口面積、礦物組成、抗壓強度。

由於遲滯功能並非一般建築領域常見之設計考量，可發現前述規範內容未包含孔隙率、水力傳導係數、有效擴散係數或吸附分配係數之檢查與設計標準。混凝土之吸附分配係數或可利用施工當時所採用之材料進行試驗求得，而作為審驗之判斷標準。建議未來可就確認混凝土設計處置功能最關鍵之有效擴散係數與水力傳導係數之審驗技術進行發展。

### 5.3 對於低放處置工程障壁圍阻與遲滯功能之數值模式技術發展建議

經第三章之數值模型技術探討可發現，相關常用於模擬核種傳輸之數值模式僅能反應圍阻功能破壞後之影響，但無法模擬圍阻功能失效之過程。所討論之模式主要適用於遲滯功能的模擬評估，適合用於探討處置設施封閉後之長期處置安全功能。就5項模型建立或模擬機制討論之結果，並考量管制單位可能之需求，提出以下數值模式發展建議：

#### (1)容器破壞機制模擬

考量低放盛裝容器並不具備封閉後之處置安全功能，且容器材質耐久性亦不佳，故建議不需對盛裝容器破壞機制模擬技術建立數值模擬技術，採用封閉後即容器失效之保守假設即可。至於封閉後具處置功能之處置容器，可考量建立模擬處置容器圍阻功能失效過程之數值模擬技術，藉以反應其依時性處置功能變化。若可保守依處置容器核定之年限，直接認定圍阻功能失效，再銜接至遲滯功能分析。

#### (2)源項核種釋出機制、核種遷移機制與建模彈性



源項核種釋出機制與核種遷移機制為第三章相關軟體主要模擬部分，各模式均有其適用範圍，可依實際模擬精度與作業資源選擇合適之數值軟體進行模擬。考量數值模式操作需具備該領域相關課題之學識與實務經驗，管制單位可考慮將各單項獨立之特徵過程委由審查專家進行平行審查。可考慮採用如 RESRAD 之簡化概念，建立可簡單且快速取得核種傳輸結果之數值模式。雖然其模擬結果將偏向保守側，對於解讀業者所提模擬結果，或執行相關參數敏感度分析協助評估業者所提處置設施設計之適用性，仍具有相當之幫助。

### (3).生物圈傳輸機制

第三章相關軟體中，僅有 RESRAD 與 GoldSim 具有模擬生物圈傳輸機制之功能。由於 RESRAD 生物圈模式是以美國環境為案例進行設計，而 GoldSim 之生物圈模式需使用者自行建立。考量生物圈模型之控制方程式均屬解析解型式，並不需配合複雜之數直迭帶解法，建議可考量建立一套適用於我國管制單位使用的生物圈傳輸模式之可行性。

## 第六章 總整「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告 審查導則(第 0 版)」符合坑道處置精進建議

子計畫二配合主計畫執行「安全分析報告審查導則」修訂工作，分別召開四次專家審查會議，就安全分析報告審查導則修訂方向與條文內容修訂進行審議。修訂完成之「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」詳見另冊。

原編撰之「安全分析報告審查導則」，主要依循 NUREG-1200 的管理架構與編撰方式執行，因此撰寫為報告型式。為符合物管局要求，此次「安全分析報告審查導則」之修訂目標將針對不合時宜之內容進行修正，同時將原報告型式之導則內容改以法規條列型式進行編撰。法規條列型式編撰重點說明如下：

- (1)法規條列型式採「規定」與「說明」兩項編撰，於「規定」撰寫將對外公告之內容，修訂內容以原報告中「對象章節於報告中需說明之資料、分析、成果、精度、須符合之規範…等」內容，「說明」則需要說明前述內容之訂定精神、考量依據或法規遵循內容。
- (2)考量審查導則並不屬於法規命令或行政規則，因此導則內容條文不應具備等同於法規規範之強度，編撰過程中不應出現具強制要求之說明方式或用語，如「應」可改採「須」或「需」。
- (3)修訂過程須注意與其他法規用詞的統一，如：「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」採用「地表水」，於導則中則不宜採用「地面水」等其他名稱。亦如「緊急應變」在核能法規體系中屬專有名詞，是指核子事故之應變，因此於導則中所述之一般設施事故則可採用「意外事件應變」或其他名詞來形容，避免產生名詞混淆。

審查過程討論與文句重點說明如下：

- (1)需納入各子計畫歷年針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」所提出之建議修訂內容。
- (2)導則條文的說明部分，需儘量說明其訂定依據或參考之國際法規，或是自行訂定及其依據。
- (3)審查專家對審查導則中涉及確認各類分析結果所採用之劑量標準所適用的法規適宜性進行討論，確認其適法性。
- (4)審查專家亦對審查導則中，所需審查項目的章節安排順序進行討論與確認。

(5)專家審查會議分別於5月31日、7月4日、9月9日與10月29日，共召開四次專家審查會議進行修訂內容審查與討論，過程中共計提出95項修訂建議。

## 參考文獻

1. GoldSim, 2018, GoldsimContaminant Transport Module.
2. IAEA, 2011, DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE, SPECIFIC SAFETY REQUIREMENTS, No. SSR-5.
3. JAEA, 2013, Development of the assessment tool for groundwater scenario concerning sub-surface disposal, JAEA-Data Code 2013-015
4. SKB, 2014, Flow and transport modelling on the vault scale - Supporting calculations for the safety assessment SR-PSU, SKB R-14-14, Svensk Kärnbränslehantering AB
5. U.S. NRC, 1996, BLT-MS(Breach, Leach, and Transpory-Multiple Species) DATA INPUT GUIDE..
6. U.S. NRC, 2014, User's Guild for RESRAD-OFFSITE.
7. Yeh, G. T. and Fang, Y. L., 2008a, HYDROGEOCHEM 4.5: A Coupled Model of Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROCHEMical transport through variably saturated media version 4.5, University of Central Florida.
8. Yeh, G. T. and Fang, Y. L., 2008b, HYDROGEOCHEM 5.5: A three dimensional model of fluid flow, thermal transport, and HYDROCHEMical transport through variably saturated media version 5.5, University of Central Florida.
9. 台灣電力公司，2017，低放射性廢棄物最終處置技術評估報告。
10. 行政院原子能委員會物料管理局，2018，低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析，子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證評估之研究。
11. 社團法人土木學會能源委員會-低放射性廢棄物餘裕深度處置相關研究小委員會，2008，余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方。



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

108 年低放射性廢棄物處置安全評估  
驗證技術研究

子計畫三：低放射性廢棄物近岸坑道處置之坑  
道結構穩定驗證技術研究

期末報告

計畫編號：108FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：楊長義、李宏輝

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 108 年 12 月 1 日

# 108 年低放射性廢棄物處置安全評估

## 驗證技術研究

### 子計畫三：低放射性廢棄物近岸坑道處置之坑道結構穩定驗證技術研究

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：楊長義、李宏輝

研究期程：中華民國 108 年 1 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 78.4 萬元(子計畫三經費)

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(期末報告)

中華民國 108 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

我國的低放射性廢棄物最終處置策略，基於安全性之確保，及建議候選場址之地形與地表面積受限之前提下，係採坑道式最終處置概念，其設計原則與國際上常見之「多重障壁」觀念相同。由工程障壁與天然障壁組成的多重障壁，除可提供圍阻與遲滯功能，坑道處置設施亦提供優於地表處置設施之隔離效果。由於坑道式處置方式其在坑道結構設計、建造、運轉與封閉等各階段，所需工程技術遠較其他處置方式複雜，且深受場址特性影響，對於處置坑道設計與分析中所採用的數值方法、岩體參數、邊界條件、坑道斷面型式以及與坑道結構穩定性有關之課題，實有必要發展相對應的審驗評估技術。

為能持續發展與精進低放射性廢棄物坑道處置結構穩定之驗證評估技術，並具體落實我國低放處置審查技術之本土化目的，本子計畫蒐整國際間處置技術先進國家之技術報告，及研析國內工程界之隧道結構穩定分析技術，據以整理處置坑道結構穩定分析方法，並針對工程界採用的分析軟體進行比較，包括連續體與不連續體分析之優、缺點及採用不連續體分析之條件等。此外，本計畫根據「台東縣達仁鄉」與「金門縣烏坵鄉」二處建議候選場址之地質概念模型，及可能採用的處置坑道型式，透過 UDEC 數值分析工具建置坑道結構穩定分析模型，並就可能的邊界條件與岩體參數變化進行模擬，分析並討論坑道開挖引致的坑道斷面變形。以達仁建議候選場址為例，若屬第 III、V 類岩體之坑道開挖條件，模擬結果顯示襯砌結構對抑制坑道斷面變形有顯著效果；在烏坵鄉建議候選場址部分，因屬地質條件良好的結晶岩類地盤，即使屬無襯砌之坑道結構，其坑道斷面亦無顯著之變形量。

最後，本子計畫綜整各工作項目成果，依處置坑道結構穩定分析有關之研究課題與相對應之驗證評估技術，區分為本土坑道之短期穩定性分析、本土坑道之長期穩定性分析與本土坑道之數值分析方法三個部分，提出相關的技術發展建議；另依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(草案)」與本研究有關之章節提出低放處置審查導則相關條文修訂建議。

關鍵詞：低放射性廢棄物、處置坑道、數值分析技術、審驗評估技術



---

---

## Abstract

The tunnel disposal is assumed as the final disposal method for low-level radioactive waste (LLW) in Taiwan. Its design principle is the same as the “multiple barriers” that has been adopted in the advanced technology disposal countries. The multiple barriers consisting of engineering barriers and natural barriers provide the function of radionuclide containment and hysteresis. The tunnel disposal facilities also provide isolation function superior to surface disposal facilities. Due to the required engineering technology is far more complicated than other disposal methods in the states of design, construction, operation and closure of the disposal tunnel, and is deeply affected by the site characteristics. It is important to develop the corresponding verification and evaluation technology for the adopted numerical method, parameters, boundary conditions and tunnel section types.

In order to continuously develop and improve the assessment technology for the structural stability of the LLW disposal tunnel, and to implement the localization of Taiwan's LLW disposal review technology, this project searches for technical reports on internationally advanced technology countries, and collect the relative works in the domestic tunnel engineering field. In addition, according to the geological concept model of the proposed candidate site in Daren Township of Taitung County and Wuqiu Township of Jinmen County, and the possible disposal tunnel type, the tunnel structural stability analysis models are proposed by using UDEC commercial software.

Finally, some suggestions on the verification of the structural stability of the disposal tunnel are proposed according to the results of numerical analysis.

Keywords: low-level radioactive waste, disposal tunnel, numerical analysis, verification and evaluation technology

---

---

## 目錄

摘要 .....	I
Abstract .....	II
目錄 .....	III
表目錄 .....	V
圖目錄 .....	VI
第一章、前言 .....	1
1.1 計畫背景 .....	1
1.2 計畫目的與重要性 .....	2
1.3 計畫工作項目與期程規劃 .....	2
1.4 報告內容 .....	3
第二章、國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析 .....	5
2.1 從時間尺度看處置坑道結構穩定分析 .....	5
2.2 坑道結構短期穩定分析 .....	7
2.3 坑道結構長期穩定分析 .....	11
2.4 坑道結構穩定數值分析 .....	14
第三章、國內隧道結構穩定分析技術與現況 .....	22
3.1 設計階段 .....	22
3.2 運轉階段 .....	38
第四章、低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討 .....	42
4.1 低放處置建議候選場址概況與處置坑道型式 .....	42
4.2 低放處置建議候選場址現地應力特性 .....	47
4.3 低放處置建議候選場址地質與岩石力學特性 .....	51
4.4 UDEC 分析軟體介紹 .....	55
4.5 我國處置坑道數值模型之建置與坑道結構穩定性分析 .....	63
第五章、我國低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析技術發展建議 .....	78

---

---

---

第六章、我國低放處置安全報告審查規範有關處置坑道結構穩定分析之精進建議	81
第七章、結論	83
參考文獻	85

## 表目錄

表 1.3-1 計畫工作項目與期程規劃.....	2
表 2.1-1 工程障壁各構件之安全功能需求及評估指標.....	6
表 2.4-1 坑道穩定分析所採用的數值方法與優缺點比較.....	21
表 3.1-1 隧道開挖初期支撐考量因素.....	23
表 3.1-2 A、B 岩類之岩體分級標準表.....	24
表 3.1-3 C、D 岩類之岩體分級標準表.....	24
表 3.1-4 隧道深度大於 1.5(B+Ht)情形支撐上方岩盤荷重 $H_p$ .....	25
表 3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論.....	27
表 3.2-1 我國鐵路隧道維護管理準則與解說(草案)章節架構.....	41
表 4.1-1 我國低放處置設施建議候選場址之比較.....	47
表 4.3-1 安朔隧道地質條件與施工期間破壞型式總表.....	53
表 4.3-2 我國低放射性廢棄物潛在處置場址之現地應力與岩石力學參數.....	54
表 4.4-1 UDEC 材料組成模式.....	58
表 4.4-2 UDEC 節理組成模式.....	62
表 4.5-1 不同深度條件下之垂直應力與水平應力.....	66
表 4.5-2 不同的岩體分類結果及其對應的岩石力學參數.....	67
表 4.5-3 岩體分類及其岩石力學參數-莫爾庫倫塑性材料模式(達仁場址).....	71
表 4.5-4 UDEC 模擬所採一次襯砌之輸入參數.....	71
表 4.5-5 岩石力學參數-莫爾庫倫塑性材料模式(烏坵場址).....	76
表 5.1-1 連續體與不連續體數值分析方法之比較.....	80
表 6.1-1 本研究有關之章節提出低放處置審查導則相關條文修訂建議.....	81

## 圖目錄

圖 2.1-1 處置坑道工程全壽期.....	6
圖 2.2-1 無襯砌坑道主要的破壞模式.....	7
圖 2.2-2 加拿大標準局提出量化的風險分析架構.....	8
圖 2.2-3 無襯砌坑道結構穩定之風險評估.....	8
圖 2.2-4 開挖損傷區(EDZ)之相關影響因子.....	11
圖 2.3-1 變形塊體模型(models with deformable blocks).....	12
圖 2.3-2 剛體模型(models with rigid blocks).....	13
圖 2.3-3 逐次劣化影響範圍示意圖.....	13
圖 2.4-1 大地工程相關之 FLAC 數值模型.....	15
圖 2.4-2 PFC 分析之顆粒受力與位移關係.....	16
圖 2.4-3 以 3DEC 建構之 DFN 數值模型.....	17
圖 2.4-4 DEM/FEM 混合分析及其在介面之處理方式.....	18
圖 2.4-5 PFC 與 FLAC 建立離散體-連續體耦合模型.....	19
圖 2.4-6 各種數值分析方法採用的裂隙岩體分析模型.....	20
圖 2.4-7 依裂隙分布密度決定採連續體或不連續體分析之概念圖.....	20
圖 2.4-8 岩體分類及其對應的數值分析-連續體分析或不連續體分析.....	21
圖 3.2-1 隧道襯砌異狀判讀技術.....	39
圖 3.2-2 隧道雷射掃描 3D 點雲.....	40
圖 3.2-3 蘇花改工程技術論壇-「觀音隧道新建工程」運用透地雷達檢測.....	40
圖 4.1-1 台東縣達仁鄉建議候選場址接收港佈置示意圖.....	43
圖 4.1-2 台東縣達仁鄉低放處置設施建議候選場址.....	44
圖 4.1-3 金門縣烏坵鄉低放處置設施建議候選場址.....	46
圖 4.2-1 垂直應力與深度 Z 之關係圖.....	48
圖 4.2-2 側向壓力係數 k 與深度 Z 之關係圖.....	48
圖 4.2-3 台灣中部、東部地區之側向壓力係數 k 與深度 Z 之關係圖.....	49
圖 4.2-4 金門離島地區水平最大及最小主應力隨深度之分布狀況.....	50
圖 4.2-5 台東縣達仁鄉建議候選場址地質露頭.....	51

---

圖 4.4-1 UDEC 程式時階運算流程.....	56
圖 4.4-2 節理接觸方式:(a)角對邊接觸方式(b)角對角接觸方式.....	59
圖 4.4-3 UDEC 圓角化示意圖:(a)使用定量之邊長、(b)使用定量之半徑.....	60
圖 4.4-4 邊對邊接觸點之定義.....	61
圖 4.5-1 我國處置坑道 UDEC 數值模型之坑道斷面形狀與各部位尺寸.....	64
圖 4.5-2 達仁場址之 UDEC 數值模型尺寸與邊界條件.....	65
圖 4.5-3 烏坵場址之 UDEC 數值模型尺寸與邊界條件.....	65
圖 4.5-4 UDEC 數值模型初始應力狀態.....	66
圖 4.5-5 線彈性材料模式條件下之坑道開挖分析.....	68
圖 4.5-6 線彈性材料模式條件下之坑道開挖引致斷面變形.....	69
圖 4.5-7 達仁場址、無襯砌坑道之坑道開挖引致斷面變形.....	72
圖 4.5-8 達仁場址、襯砌坑道之坑道開挖引致斷面變形.....	73
圖 4.5-9 達仁場址 A 類處置坑道之圍岩塑性區範圍比較.....	74
圖 4.5-10 達仁場址之 A 類與 B、C 類處置坑道襯砌結構承受之軸力與彎矩比較.....	75
圖 4.5-11 烏坵場址、無襯砌坑道之坑道開挖引致斷面變形：(a)主應力分布圖與(b)位移 等高線圖.....	77
圖 4.5-12 烏坵場址、無襯砌坑道之坑道開挖引致斷面變形(莫爾-庫倫塑性材料模式). 77	

---

---

# 第一章、前言

## 1.1 計畫背景

據國際原子能總署放射性廢棄物分類安全導則(IAEA, 2009)針對放射性廢棄物之處置深度建議，可依廢棄物之核種半化期長短與活度大小，區分為近地表處置、深地質處置以及介於兩深度間之中等深度處置方式。此外，依國際間低放射性廢棄物處置技術先進國家的經驗，除了必須考慮處置深度外，亦須配合當地自然、社會、環境與廢棄物特性等進行通盤考量。我國的低放射性廢棄物最終處置策略，基於安全性之確保，及建議候選場址之地形與地表面積受限之前提下，係採坑道式最終處置概念，其設計原則與國際上常見之「多重障壁」觀念相同；由工程障壁與天然障壁組成的多重障壁，除可提供圍阻與遲滯功能，坑道處置設施亦提供優於地表處置設施之隔離功能。由於坑道式處置方式其在設計、建造、運轉與封閉等各階段，所需工程技術遠較其他處置方式複雜，且深受場址特性影響，對於岩體參數、邊界條件、坑道斷面型式及鄰近坑道對坑道結構穩定性之影響，及如何發展相對應的審驗評估技術，實為一重要的研析課題。

本子計畫於106年執行之「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究」(楊長義與李宏輝, 2017)與107年執行之「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研究」(楊長義與李宏輝, 2018)之計畫，已提出坑道處置結構穩定性分析流程，並根據(1)國際間有關處置坑道結構穩定分析之審驗評估項目與所需驗證技術，與(2)國內一般隧道設計方法與施工規範，提出(3)處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議與(4)我國低放坑道處置結構穩定審查重點及注意事項建議。為能持續發展與精進低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術，並具體落實我國低放處置審查技術之本土化，本子計畫除蒐整國際間處置技術先進國家之技術報告，及研析國內工程界之隧道結構穩定分析技術，據以整理處置坑道結構穩定分析方法與注意事項外，並針對工程界採用的分析軟體進行比較與討論。此外，亦將根據「台東縣達仁鄉」與「金門縣烏坵鄉」二處建議候選場址之地質概念模型(台灣電力公司, 2017)，及可能採用的處置坑道型式(達仁場址為有襯砌坑道，烏坵場址為無襯砌坑道)，透過合適的數值分析工具建置坑道結構穩定分析模型，並就可能的邊界條件與岩體參數進行模擬，依分析結果提出討論，據以提出處置坑道結構穩定模擬分析之審驗重點建議。



## 1.2 計畫目的與重要性

子計畫三將以國際間處置技術報告及國內隧道結構穩定分析技術為依據，整理處置坑道結構穩定分析方法與注意事項，並針對工程界採用的分析軟體進行比較與討論。此外，將根據台電公司「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」中所提出的兩處建議候選場址之地質概念模型，及可能採用的處置坑道型式，透過合適的數值分析工具建置坑道結構穩定分析模型，並對可能的邊界條件與岩體參數進行模擬，提出處置坑道結構穩定模擬分析之審驗重點建議。

## 1.3 計畫工作項目與期程規劃

本計畫之工作項目與期程規劃，彙整如表1.3-1。

表1.3-1 計畫工作項目與期程規劃

工作內容	108 年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
子計畫三-低放射性廢棄物近岸坑道處置之坑道結構穩定模擬技術審驗研究			※			※			※			※
國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析	■	■	■	■	■	■						
國內隧道結構穩定分析技術與現況				■	■	■						
低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討					■	■	■	■	■			
我國低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析技術發展建議								■	■	■	■	
提出我國低放處置安全報告審查規範有關處置坑道結構穩定分析之精進建議										■	■	■
成果報告撰寫										■	■	■
工作進度估計百分比(累積數)	0%	10%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

---

## 1.4 報告內容

本研究工作項目細分為「國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析」、「國內隧道結構穩定分析技術與現況」、「低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討」、「我國低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析技術發展建議」及「提出我國低放處置安全報告審查規範有關處置坑道結構穩定分析之精進建議」等五項，各分項工作進度如表1.3-1所示，除本章前言外，依計畫擬定之工作項目內容提列各章標題，其內容分述如下：

### 第二章 國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析

自國際間放射性廢棄物處置技術先進國家發表之技術報告、隧道工程與岩石力學等相關學術期刊，蒐整與坑道結構有關之穩定分析技術。例如SKB為瞭解SFR中、低放處置場在較長的時間尺度下，處置窖周圍岩體可能因岩體風化、強度降低而導致岩體鬆動，進而造成岩塊掉落的可能性，其研究採用了3DEC數值分析工具進行處置窖的長期穩定性分析。分析過程考慮了處置場之地質條件、岩石力學特性與處置窖幾何尺寸等，其分析經驗與成果可供本項工作參考。

### 第三章 國內隧道結構穩定分析技術與現況

為確保本子計畫發展之低放射性廢棄物處置坑道結構穩定模擬審驗技術能符合我國地質與所處環境條件，本項工作將針對國內一般隧道採用之分析方法、數值工具及研究課題進行蒐整與研析，例如岩體參數、岩覆深度、開挖方式、鄰近隧道之開挖及是否具有襯砌等條件對坑道結構穩定性之影響。

### 第四章 低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討

本子計畫先期研究—「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研究」(楊長義與李宏輝, 2018)已根據台電公司(2017)修訂第二版之「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」第四章處置設施概念設計與作業規劃，分別就達仁與烏坵二處低放處置設施建議候選場址之處置場型式、地質條件、坑道岩覆深度、坑道數與坑道總長度、坑道斷面尺寸及坑道間距等進行比較。據此，本項工作將採合適的數值分析工具建置坑道結構穩定分析模型，依可能的邊界條件與岩體參數進行模擬與研析，並就數值模型建置技術與注意事項進行討論。

---

## 第五章 我國低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析技術發展建議

根據前三項工作成果，依我國低放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址與處置坑道型式，分別就採取之分析方法、數值分析工具與數值模型建置，及處置坑道結構穩定分析有關之研究課題與相對應之驗證評估技術提出建議。

## 第六章 提出我國低放處置安全報告審查規範有關處置坑道結構穩定分析之精進建議

總結前述各項工作成果，提出符合我國地質與環境條件之低放處置坑道結構穩定分析之審查重點與注意事項，並依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」與本研究有關之章節進行研析與討論，提出低放處置設施安全分析報告審查導則相關條文修訂建議。

## 第七章 結論

總結前述各項工作成果並提出結論。

## 第二章、國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析

本章自國際間放射性廢棄物處置技術先進國家發表之技術報告、隧道工程與岩石力學等相關學術期刊，蒐整與坑道結構有關之穩定分析技術，並從時間尺度將處置坑道結構穩定分析區分為短期分析與長期分析。短期分析著重於圍岩應力狀態變化、地質構造、坑道開挖方法與坑道幾何斷面對坑道結構力學穩定性的影響，長期穩定分析則是考量圍岩可能因岩體風化、強度降低而導致岩體鬆動而造成岩塊掉落，影響處置窖的長期安全功能。

### 2.1 從時間尺度看處置坑道結構穩定分析

從處置坑道的工程全壽期角度可將之區分為四個階段，即開挖前的(1)初始階段( $t=t_0=0 \sim t_1=0^+$ )、(2)開挖後尚未施加襯砌階段( $t=t_1 \sim t_2$ )、(3)施加襯砌後的運轉階段( $t=t_2 \sim t_3$ )與(4)封閉階段( $t=t_3 \sim$ )，詳如圖2.1-1所示。上述各階段中，坑道因興建期間的工程施作，或是運轉期間圍岩的持續應力調整，將引致坑道斷面產生變形，若屬有襯砌的坑道結構，則需進一步分析開挖岩體與支撐結構間之互制行為，以確保坑道斷面變形趨於穩定且收斂。由於坑道斷面變形達到穩定且收斂所需的時間，相較於坑道整個工程壽期而言，其歷時相對較短，屬坑道結構之短期穩定分析(short term analysis)；相較之下，處置坑道進入封閉階段後，處置場的長期安全功能主要是以圍阻與遲滯放射性核種的釋出有關，坑道結構的力學穩定性雖非此階段分析重點，詳如表2.1-1，但值得注意的是瑞典SFR中、低放處置窖的長期安全評估技術報告中(SKB, 2014)，曾針對處置窖在沒有適當的回填，及10,000年的時間尺度條件，評估了處置窖周圍岩盤可能因岩體風化、強度降低而導致岩體鬆動，進而造成岩塊掉落的可能性。其目的在於瞭解在長時間條件下，處置窖周圍岩體的鬆動，可能造成混凝土處置窖結構之尺寸、幾何形狀和性質改變，進而引起滲流流量和滲流方向的變化，影響放射性核種傳輸。

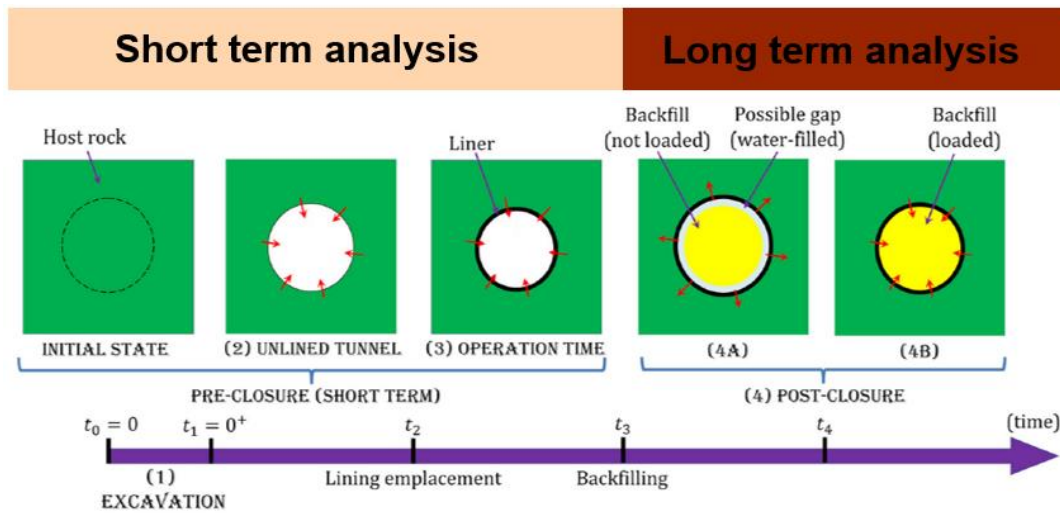


圖2.1-1 處置坑道工程全壽期四階段：(1)初始階段、(2)開挖後尚未施加襯砌階段、(3)施加襯砌後的運轉階段與(4)封閉階段，圖中綠色區域為岩體、黃色範圍為填充材料、藍色為襯砌、紅色箭頭代表圍岩變位方向(Deleruyelle 等人，2016)

表2.1-1 工程障壁各構件之安全功能需求及評估指標(台灣電力公司，2017)

階段	安全功能需求	評估指標	廢棄物體	盛裝容器	填充材料	處置窖	緩衝材料	回填材料	二次襯砌	基礎層	開挖擾動區	天然障壁
運轉期間	力學穩定	材料強度	●	●	●	●	-	-	●	●	●	●
		坑道幾何、配置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
	廢棄物定置	廢棄物定置與填充材料施工性	-	●	○	●	-	-	-	●	-	-
封閉後	防止污染擴大	防止核種釋出	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-
	限制平流傳輸	水力傳導係數	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●
	限制擴散傳輸	擴散係數	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●
	限制核種溶解	溶解度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	活化金屬核種溶出	核種釋出率	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	其他廢棄物核種溶出	溶出率	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	核種吸附	分配係數	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●
	工程障壁劣化	水力傳導係數比	-	-	●	●	●	●	●	●	●	-
防止人類入侵	設施材料強度、岩覆	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	

●：具有此安全功能，且列入設計考量。  
 ○：具有此安全功能，但不列入設計考量。  
 -：無此功能

## 2.2 坑道結構短期穩定分析

### 2.2.1 SKB 地下工程設計前提

根據SKB地下工程設計前提(SKB's Underground Design Premises)(SKB, 2004)，坑道式處置之設計，必須提供放射性廢棄物處置作業足夠的工作空間，然而實務上，將可能受限於圍岩的穩定性而限制了坑道斷面尺寸，所述圍岩穩定性即必須考量(i)重力引致之岩塊滑動破壞，屬地質構造主控之破壞(gravity-induced structurally controlled block movement)與(ii)應力引致之剝落破壞(stress-induced spalling)，如圖2.2-1所示。

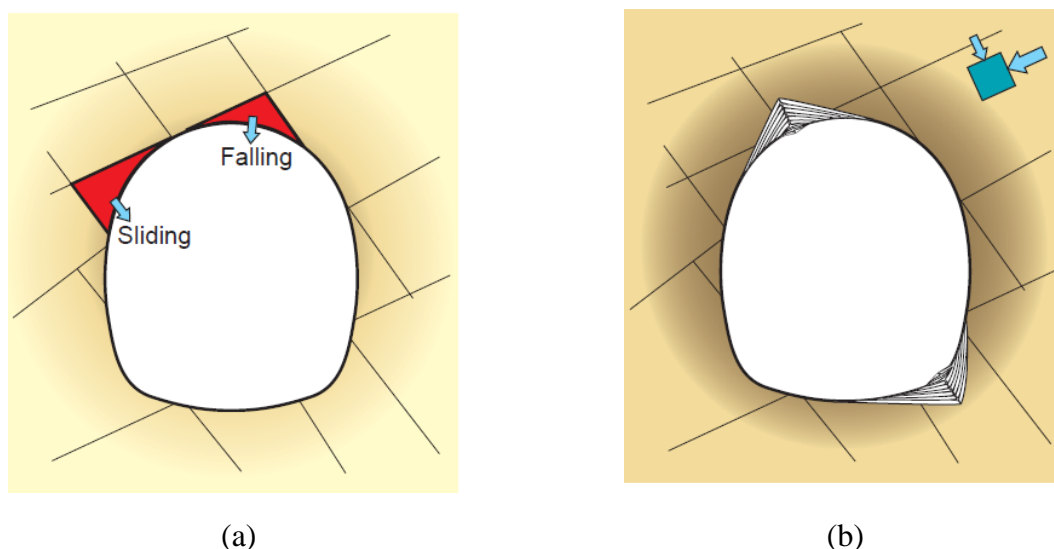


圖2.2-1 無襯砌坑道主要的破壞模式：(a)重力引致之岩塊滑動破壞與(b)應力引致之剝落(spalling)破壞(SKB, 2004)

針對坑道圍岩穩定性這一類與大地工程(geotechnical engineering)有關的問題，加拿大標準局(Canada standard association)提出量化的風險分析(quantitative risk analysis, QRA)架構，作為大地工程災害的風險管理依據，詳圖2.2-2。風險管理區分風險評估(risk assessment)與風險管控(risk control)兩大工作。在風險評估部分，包括了風險分析(risk analysis)與風險評量(risk evaluation)，其相關工作包括災害類型的辨識(hazard identification)、風險的估計(risk estimation)、風險的可接受度(risk acceptance)與風險的預測(risk estimation)，配合監測工作的進行，掌握災害潛勢，以作為風險管控的決策依據(decision-making)。



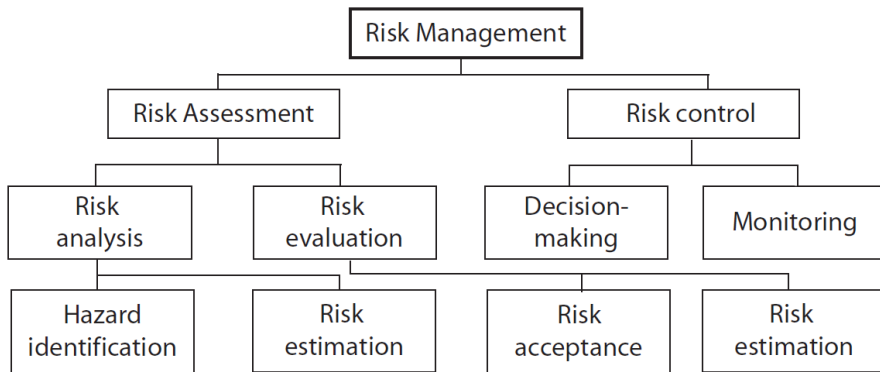


圖2.2-2 加拿大標準局提出量化的風險分析架構(SKB, 2005)

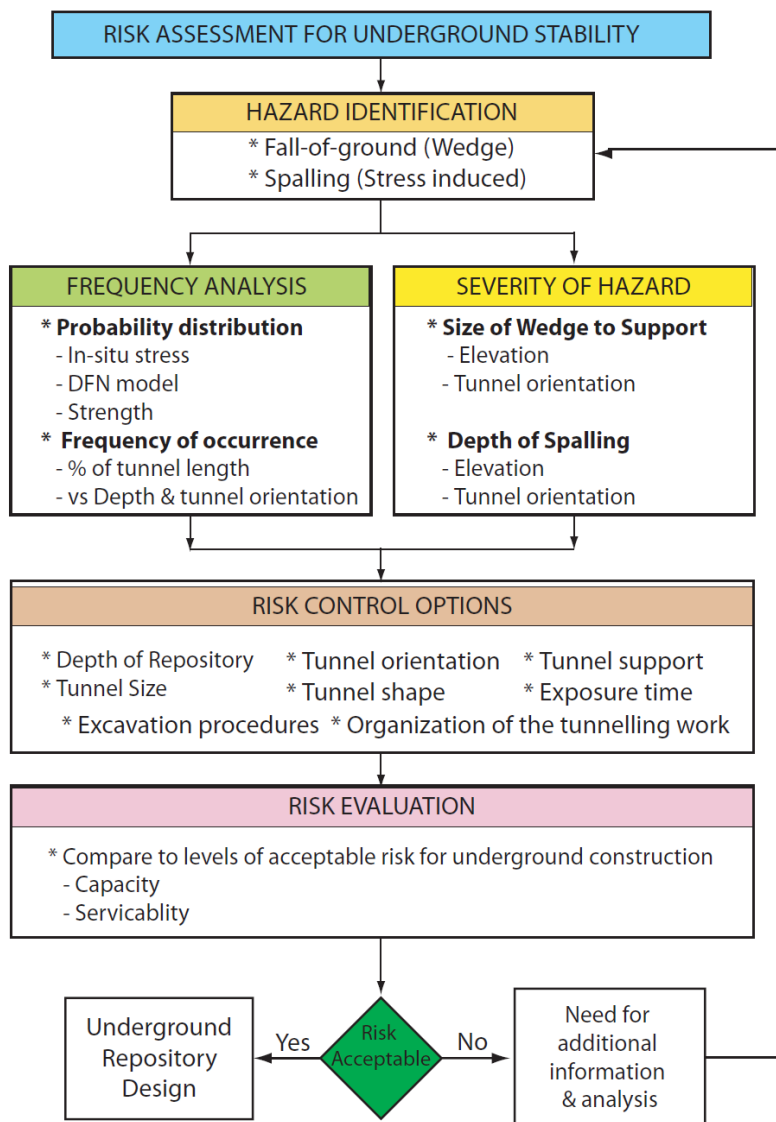


圖2.2-3 無襯砌坑道結構穩定之風險評估(SKB, 2005)



根據風險分析(QRA)架構發展的無襯砌坑道結構穩定風險評估流程，詳如圖2.2-3，其評估項目依序為：

- (1) 災害辨識(hazard identification)：此部分在於辨識圍岩可能的破壞是屬於重力引致之岩塊滑動破壞或是應力引致之剝落(spalling)破壞。
- (2) 發生頻率分析(frequency analysis)：需透過現地應力、離散裂隙網絡(Discrete Fracture Network, DFN)與岩體強度等資料建立災害機率分布，此外，根據坑道總長度、坑道深度與方位分析災害發生頻率。
- (3) 嚴重性分析(severity of hazard)：分別根據高程(elevation)與坑道方位(tunnel orientation)，評估需要支撐輔助之岩楔尺寸(size of wedge to support)及剝落深度(depth of spalling)。
- (4) 風險管控項目(risk control options)：根據處置場深度(depth of repository)、坑道方位(tunnel orientation)、支撐種類(tunnel support)、坑道斷面尺寸(tunnel size)、坑道斷面形狀(tunnel shape)、曝露時間(exposure time)、開挖程序(excavation procedures)與坑道開挖工作的組織運作(organization of the tunneling work)等項目進行風險控管。
- (5) 風險評量(risk evaluation)：根據處置坑道的設計強度或容量(capacity)及服務性(serviceability)建立可接受的風險等級(levels of acceptable risk)，據以進行風險評量。
- (6) 風險接受(Risk acceptable)：根據前述風險評估程序所獲得的結果，再與前項風險評量所訂定的可接受風險等級進行比較；若風險可接受，則進入坑道式處置設計階段(Underground Repository Design)，若屬不可接受，則必須收集額外的資訊並進行分析評估。

### 2.2.2 坑道開挖引致之岩體損傷

處置設施在建造過程中，因為坑道開挖引致坑道斷面周圍一定範圍內存在岩體損傷，稱為開挖損傷區(excavation damaged zone, EDZ)，亦或稱開挖擾動帶(excavation disturbed zone, EDZ)。EDZ的存在將導致岩體強度、變形性與滲透性等工程性質的改變，進而影響圍岩的力學穩定性，及阻絕與遲滯核種外洩與遷移的功能，故開挖引致圍岩的損傷評估，

一直是坑道式處置設施長期安全評估之重要課題。針對位處結晶岩盤(crystalline rock)的放射性廢棄物處置場的EDZ影響因素，Hudson(2009) 整理如圖2.2-4所示，並分述如后：

(1) 岩體反應(Rock mass response to tunneling)

即岩體因坑道開挖造成的工程行為變化，包括岩盤的位移、局部應力態與滲流性質的改變，所述工程行為變化屬不可逆且無法避免的，且又受下列因素的影響：

- a. 坑道斷面形狀：坑道斷面形狀將影響開挖面周圍應力之應力集中(stress concentration)程度，尤其在斷面形狀具尖銳角度變化處將存在較顯著的應力集中現象，坑道斷面尺寸則是影響EDZ分布的範圍。
- b. 現地應力條件：較高的現地應力條件，例如岩石覆蓋深度較深者，其沿著開挖面所產生的應力集中值較高，也更容易引至岩體損傷。
- c. 隧道方向：當隧道長軸向與最大主應力方向互為 $90^\circ$ 時，應力集中現象有最大值；若隧道長軸向與最大主應力方向互為平行時，應力集中現象有最小值。
- d. 完整岩石力學特性：軟岩(soft rock)或是具有擠壓/回脹(squeezing/swelling)特性的岩石，其變形性較為顯著。
- e. 岩體力學特性：若岩盤中存在裂隙(fractures)，將導致岩盤的強度與勁度降低，致坑道開挖面有顯著的變形。
- f. 地質構造：地質構造將影響圍岩的應力態、位移與滲流方向，進而影響EDZ的分布。

(2) 開挖方法(excavation method)：

除了前述岩體反應對EDZ造成之影響外，所採用的開挖方法亦會造成額外的EDZ影響，此部分又區分開挖方法係採爆破或是全斷面機械鑽掘機而有不同的影響因素：

- a. 岩體條件與爆破(rock conditions and blasting)
  - (a) 鑽孔的精度(drilling precision)
  - (b) 炸藥(explosive)
  - (c) 爆速(detonation velocity)
  - (d) 爆破初始設定條件(initiation)
  - (e) 裝藥與不耦合條件(charging and decoupling)
- b. 岩體條件與全斷面機械鑽掘機的使用(rock conditions and use of a TBM)
  - (a) 切削轉盤的設計(cutter head design)

(b) 切削轉盤對岩體的切削力量設定條件(cutter head forces)

(3) 特徵化方法(characterization method)：

坑道經開挖後，依據所選定的開挖方法進行開挖面調查，以直接或是間接評估岩體損傷程度，相關方法包括坑道調查作業(investigations in the tunnel)、超炸區的調查(survey of overbreaks)、周邊孔的觀察、裂隙的分布等。

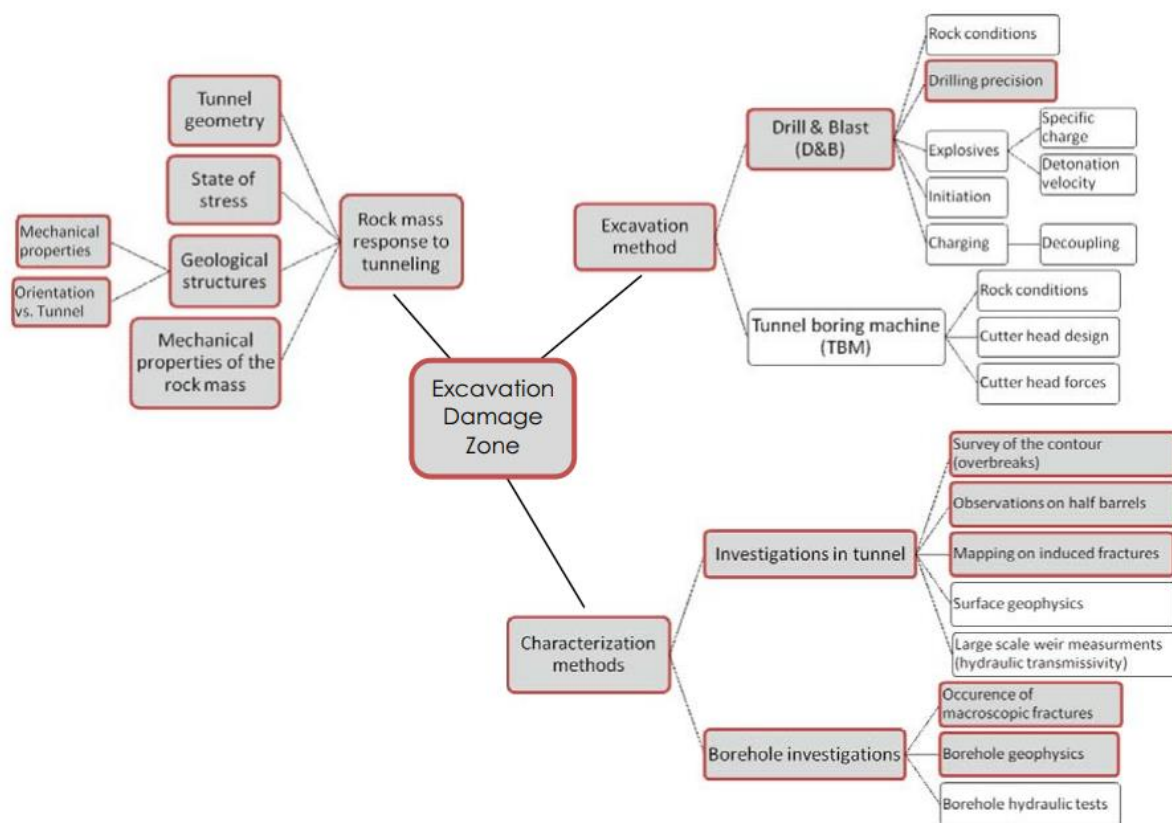


圖2.2-4 開挖損傷區(EDZ)之相關影響因子(Hudson 等人, 2008)

### 2.3 坑道結構長期穩定分析

瑞典SFR中、低放處置窖的長期安全評估技術報告中 (SKB, 2014)，曾針對處置窖在沒有適當的回填，及10,000年的時間尺度條件，評估了處置窖周圍岩壁可能因岩體風化、強度降低而導致岩體鬆動，進而造成岩塊掉落的可能性。採用的數值工具為ITASCA公司出版的3DEC三維離散體分析軟體，屬隧道工程與岩石邊坡工程等岩石力學相關領域所採用之數值工具。其所分析的場址地質條件、坑道型式、坑道斷面、岩體參數與裂隙分布，已詳列與本子計畫前期報告-「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研

究」(楊長義與李宏輝, 2017)中, 本節僅摘錄相關分析程序與數值模型等內容。根據SKB在1BMA與1BLA處置窖長期穩定性數值分析經驗, 分析程序為:

- (1) 輸入初始材料參數並選定彈性模式進行運算。
- (2) 完整岩石部分改採莫爾-庫倫材料模式(Mohr-Coulomb), 裂隙部分更改為庫倫滑移裂隙模式(Coulomb slip fracture mode), 並進行運算直到滿足平衡條件。
- (3) 處置窖開挖模擬。
- (4) 1BMA處置窖回填砂土與混凝土後之模擬分析。
- (5) 針對處置窖周圍岩體的強度參數進行折減與模擬。
- (6) 重複步驟(5), 直到(i)岩塊開始掉落(針對變形岩塊模型)至處置窖, 或(ii)處置窖填滿岩塊(針對剛體岩塊模型)。

上述步驟中, 項次(5)係藉著強度參數的折減以反映地質材料長期劣化的影響, SKB在此一部分提出的作法與經驗, 可作為我國未來在處置窖長期穩定分析之參考。

3DEC長期穩定分析模型考量了兩種分析模型(analyzed models), 分別是變形塊體模型(models with deformable blocks)與剛體模型(models with rigid blocks), 分別詳如圖2.3-1與圖2.3-2。

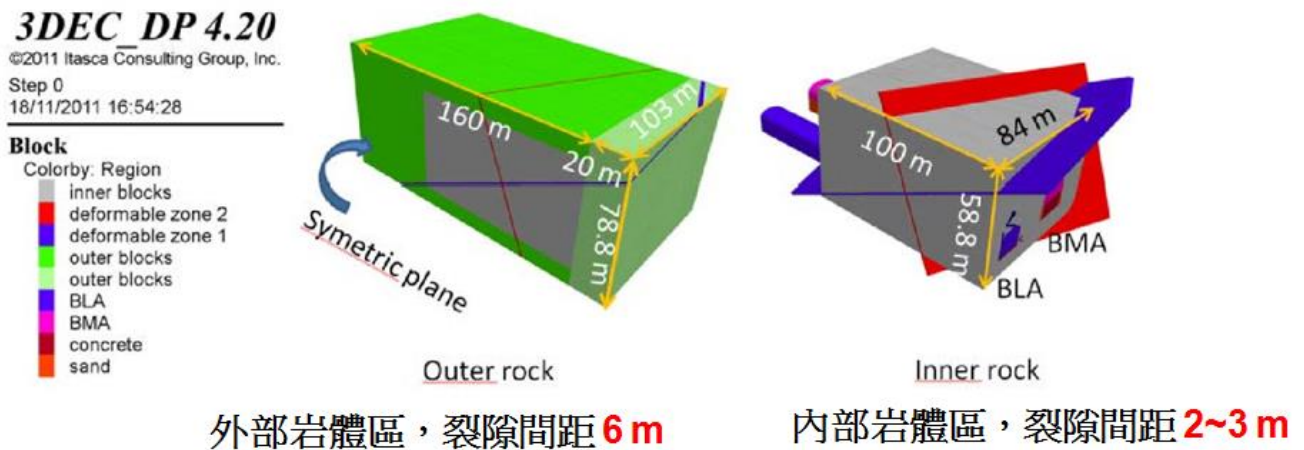


圖2.3-1 變形塊體模型(models with deformable blocks) (SKB, 2014)



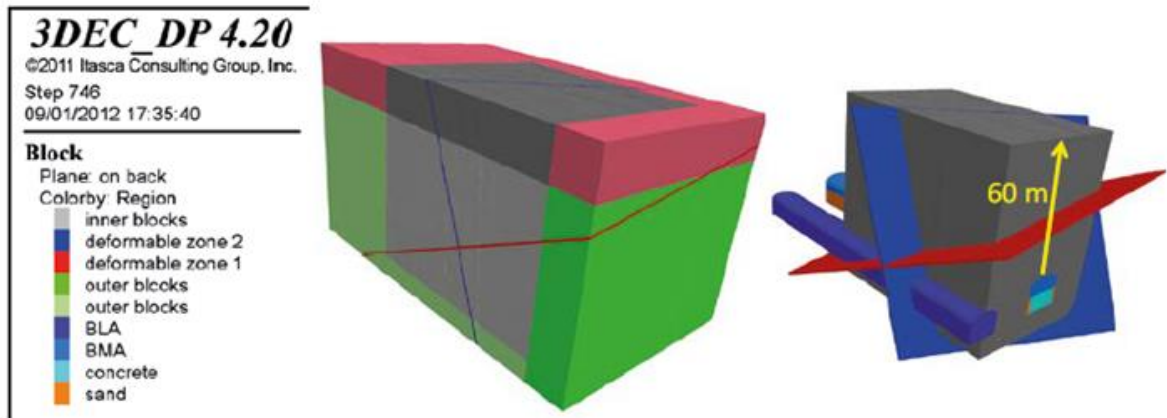


圖2.3-2 剛體模型(models with rigid blocks) (SKB, 2014)

為探討岩體力學性質可能因長期風化、材料劣化引致力學強度降低、變形性增加，造成處置坑道長期穩定性的影響，SKB在其 3DEC 分析模型中提出：(1) 假設劣化僅發生在裂隙，完整岩石的力學特性不變與(2)劣化影響範圍隨分析的進行而往外延伸，如圖 2.3-3所示，亦即隨著運算時間的增加，劣化影響範圍會愈來愈大，而在劣化影響範圍內的節理力學參數，包括剪力強度參數與勁度，亦會隨著運算時間而呈現衰減。

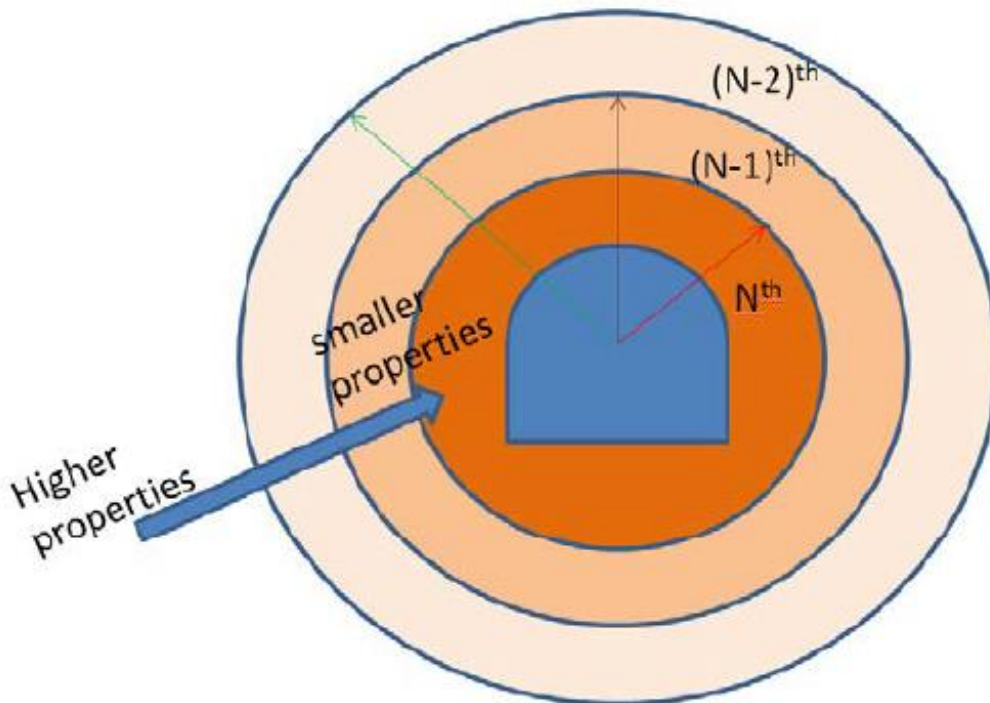


圖2.3-3 逐次劣化影響範圍示意圖 (SKB, 2014)

---

## 2.4 坑道結構穩定數值分析

由於坑道結構穩定分析必須考量裂隙岩體(fractured rock mass)經開挖擾動後引致的應力重新分配、變形調整及其造成水力參數的變化，因此所採取的數值分析方法須視需要，斟酌考慮並反映岩體裂隙的力學特性，包括強度、變形性與滲流特性。目前在此一課題所採用的數值分析方法可區分為連續體(continuous)分析、非連續體(discontinuous)分析及連續體-非連續體混合(hybrid)分析等三大類。連續體分析區分為有限差分法(Finite Difference Method, FDM)、有限元素法(Finite Element Method, FEM)與邊界元素法(Boundary Element Method, BEM)三大類，非連續體分析區分為離散元素法(Discrete Element Method, DEM)與離散裂隙網絡法(Discrete Fracture Network Method, DFN)。

### 2.4.1 連續體分析

#### (1) 有限差分法(FDM)

針對符合牛頓運動定律之微分方程式以數值方法求得近似解，須將連續體數值模型離散化後，配合邊界條件以泰勒級數展開式將原微分方程式轉換為代數問題求解。由於離散化後，數值模型內相鄰節點必須符合控制方程式的一致性，對於處置場數值模型須考量裂隙岩體具裂隙、節理等弱面特性，FDM並無法直接在連續體模型中反映上述問題，其替代作法係以等值之具裂隙特性連續體模型解決之。

以FDM為基礎所發展的工具軟體，例如FLAC2D與FLAC3D，常被採用於大地工程相關研究課題，例如邊坡穩定、基礎承載分析與隧道工程等，如圖2.4-1。

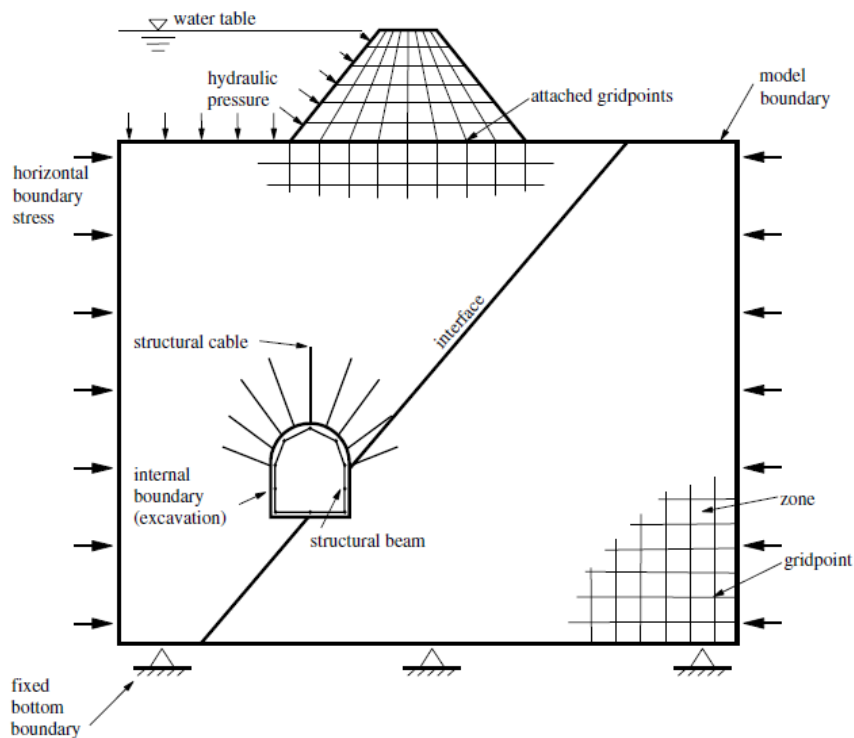


圖2.4-1 大地工程相關之FLAC數值模型 (ITSAC, 2016)

## (2) 有限元素法(FEM)

同樣係針對符合牛頓運動定律之微分方程式以數值方法求得近似解，其作法須先將數值模型切割、細分成若干有限的網格，稱為有限元素或有限元，並採用分段連續函數來描述模型內的應力場、位移場與滲流場的分布，相鄰的節點與元素須滿足連續條件之前提下，利用變分原理將偏微分方程轉換為代數方程式並求解。與前述FDM數值模型相同，FEM亦無法直接在連續體模型中反映裂隙岩體具裂隙、節理等弱面特性，其替代作法同FDM係以等值之具裂隙特性連續體模型解決之。

## (3) 邊界元素法(BEM)

相較於FDM與FEM的分析，BEM僅需針對模型邊界離散化即可進行運算，並係採用形狀函數(shape function)求得近似解。BEM一般可區分為直接邊界元素法及間接邊界元素法兩種。直接邊界元素法直接求取具物理意義之變數，例如應力與變形；間接邊界元素法則先求源(source)強度函數，再間接求取具物理意義之變數。BEM在裂隙岩體之應用分析，係以兩個相互平行的表面模擬裂隙所在處，對於裂隙尖端在受力作用後的裂隙發展問題，BEM採用特別的奇異元素(singular element)分析之。



## 2.4.2 不連續體分析

### (1) 離散元素法(DEM)

離散元素法最早由Cundall於1971年提出，用以模擬與分析岩石塊體漸進式破壞問題，隨後並運於堆積材料力學行為的模擬(Cundall, 1979)。此一方法有別於以傳統連續體力學觀念發展之數值方法，為針對顆粒材料、或是形體不連續的力學問題發展出的數值分析方法。在運算過程中，將紀錄並追蹤模型中每個組成元素的運動行為，並經由牛頓運動定律計算其平衡力量、位移與接觸力等分析量。根據Cundall等人(1989)對DEM的定義，其需具備下列功能：(i) 允許組成元素產生有限度之位移及旋轉，並允許元素之間完全分離；(ii) 計算過程中能自動偵測新產生的接觸點，並能消去分離之接觸點。根據Cundall與Hart(1989)的研究，將離散元素法區分為四類：

#### a. 個別元素法(Distinct Element Method)

採用外顯有限差分法處理塊體運動平衡方程式，塊體可為剛體或可變形體，但接觸屬軟接觸(soft contact)，具代表性的程式有 TRUBAL、UDEC、3DEC、PFC2D 與 PFC3D 等，以 PFC 為例，其組成元素區分為剛性顆粒與剛性牆，元素間的受力與位移關係可透過勁度彈簧來模擬，如圖 2.4-2。

#### b. 疊代模擬法(Modal Method)

模擬之塊體若為剛性體時，其分析過程同個別元素法；若屬可變形塊體，則使用疊代模擬(modal superposition)，具代表性的程式如 CICE。

#### c. 不連續變形分析(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)

本法為 Shi(1989)提出，係採用塊體剛性接觸，模擬之塊體可為剛體或是可變形體，但不允許貫穿行為發生，代表性程式為 DDA。

#### d. 動量交替法(Moment-Exchange Method)

本法採用之接觸與塊體皆屬剛性，其特色為塊體在碰撞接觸之同時，會產生能量調整。

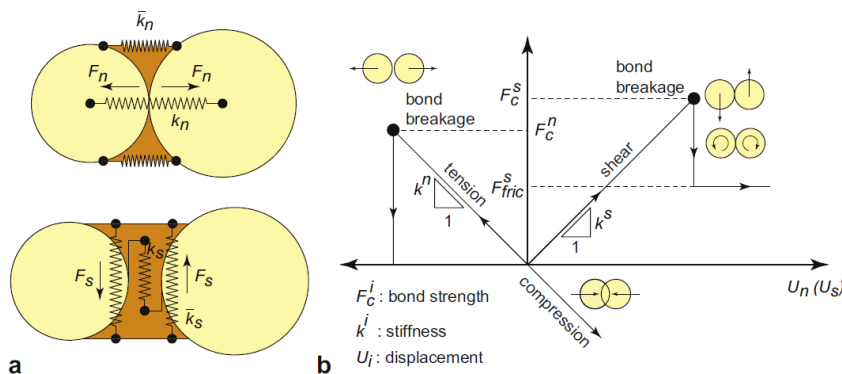


圖 2.4-2 PFC 分析之顆粒受力與位移關係

## (2) 離散裂隙網絡法(DFN)

於水文地質的研究領域中，DFN一般用於具裂隙介質的滲流與傳輸現象分析，如圖 2.4-3，此分析方法需考慮裂隙的幾何特性(fracture geometry)與傳輸特性(transmissivity)，例如淺層含裂隙覆蓋層(shallow fractured aquifer)中，裂隙對滲透特性的影響分析。

## (3) 岩塊理論(Block Theory)

岩塊理論(Block Theory)又稱為關鍵塊體理論(Key Block Theory)，為 Goodman 與 Shi(1985)所提出。在岩層中，岩體雖因不連續面而切割成各自獨立的塊體，但在開挖前會因為互相箝制而形成穩定平衡的狀態，經開挖後，因某些塊體的形狀、位置，會引致鄰塊之連鎖滑移，而引發一連串崩落，其最先破壞整體平衡的塊體，稱為「關鍵塊體」。因此，根據現地地質以及開挖面位態量測資料分析岩體內可能產生的不連續面塊體，找出關鍵塊體，進而強化工程結構物如地下廠房、隧道等之穩定性，是此方法最主要的運用。

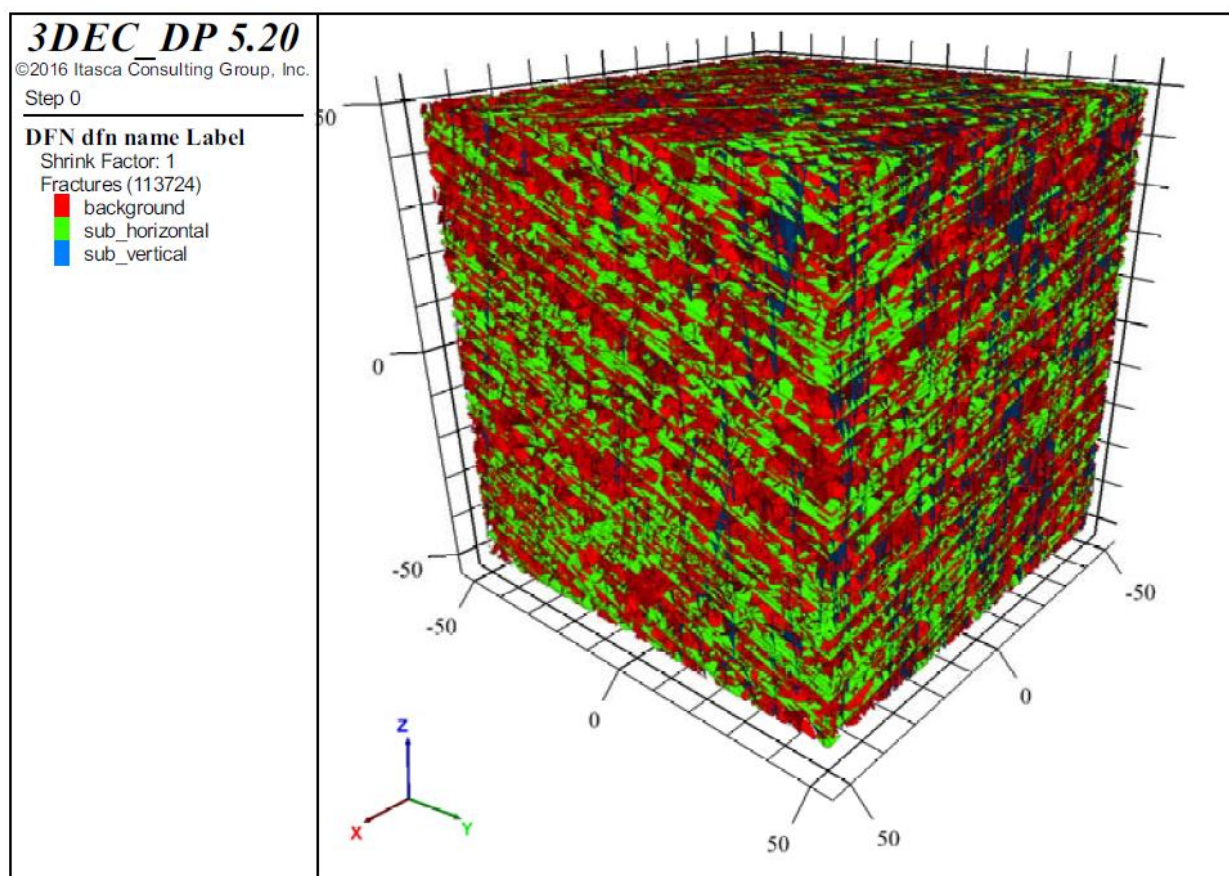


圖2.4-3 以3DEC建構之DFN數值模型(ITASCA, 2016)

### 2.4.3 連續體-非連續體混合分析(Hybrid Method)

混合分析係指數值分析過程同時結合兩種不同的分析方法，例如連續體分析與不連續體分析合併使用，如 DEM/FEM、DEM/FDM 與 DEM/BEM 等，有關 DEM/FEM 混合分析及其在介面之處理，如圖 2.4-4 所示，其應用在坑道開挖穩定模擬分析之案例，如圖 2.4-5，可參考 Potyondy and Cundall (2002)以 PFC 與 FLAC 分析工具建立離散體-連續體耦合模型，藉以探討應力引致之岩體損傷問題。

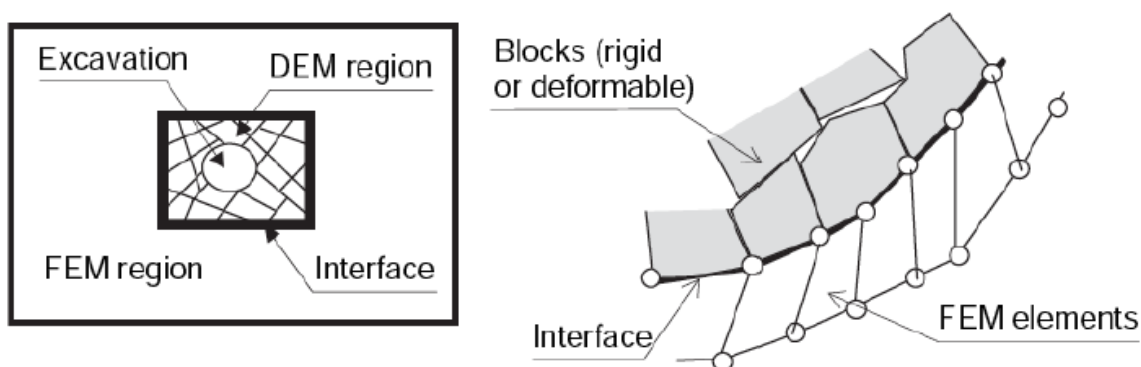


圖2.4-4 DEM/FEM混合分析及其在介面之處理方式(Jing and Stephanson, 2007)

FEM 與 FDM 適用在不具裂隙條件之近場連續體條件，如圖 2.4-6(a)；若數值模型範圍內的裂隙分布密度相當高，則可視為等值之連續體模型，此時 FEM 與 FDM 同樣適用，如圖 2.4-6 (d)；低裂隙分布密度之岩體可採用離散元素分析，或採具有裂隙元素之連續體分析，如圖 2.4-6(b)；對於中度裂隙分布之岩體，則以 DEM 分析較為適合，如圖 2.4-6(c)；以上基於裂隙分布密度，決定數值模型採連續體或不連續體分析之概念，如圖 2.4-7 所示。此外，Bandis(2004)提出的岩體分類，及其對應的數值分析-連續體分析或不連續體分析建議，亦可作為未來數值分析採連續體分析或是不連續體分析之參考，有關連續體與不連續體分析方法的優、缺點如表 2.4-1 所示。

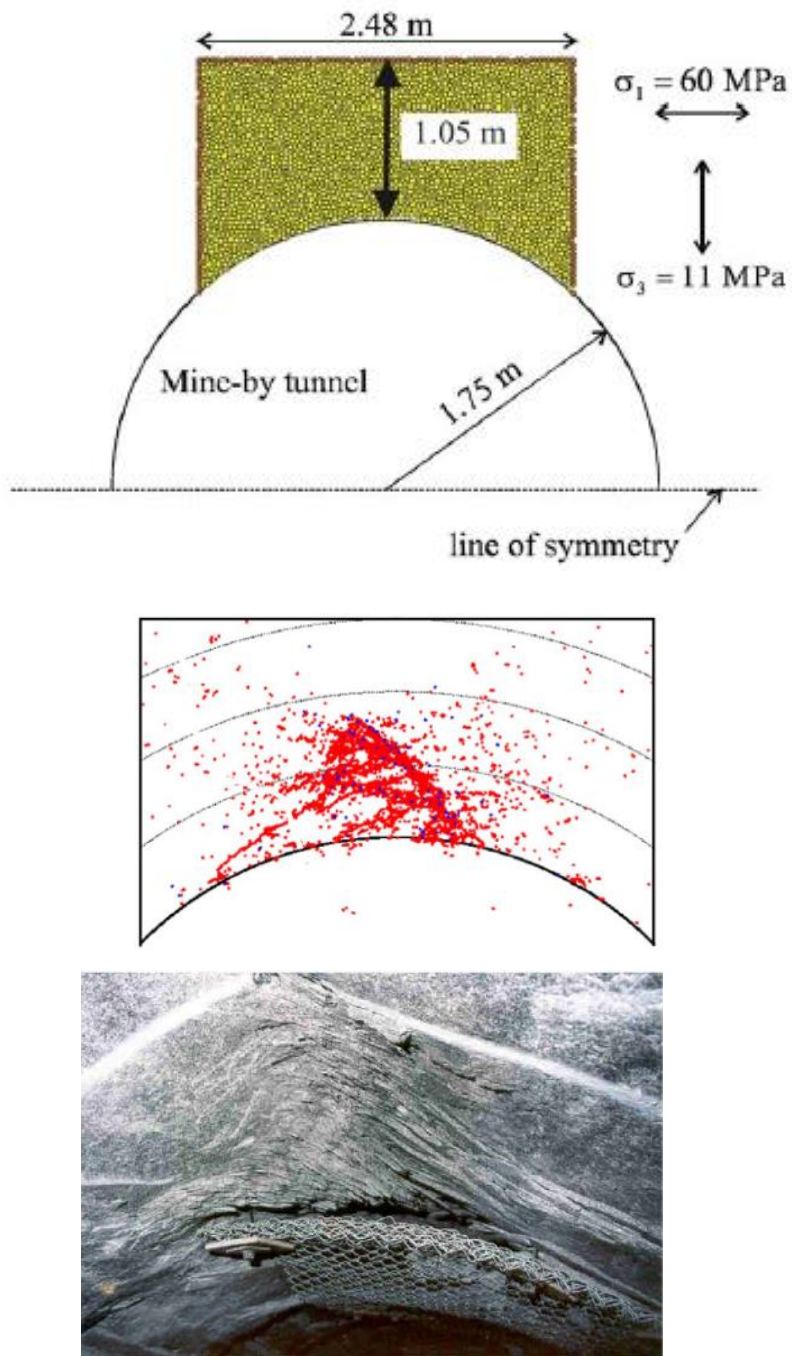


圖2.4-5 PFC與FLAC建立離散體-連續體耦合模型(Potyondy and Cundall, 2004)



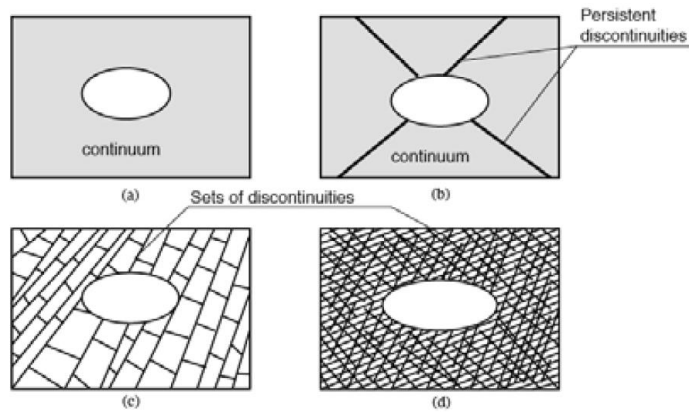


圖2.4-6 各種數值分析方法採用的裂隙岩體分析模型：(a) 連續體分析、(b) 離散元素分析，或採具有裂隙元素之連續體分析、(c) 離散元素分析與(d) 等值連續體分析 (Jing, 2003)

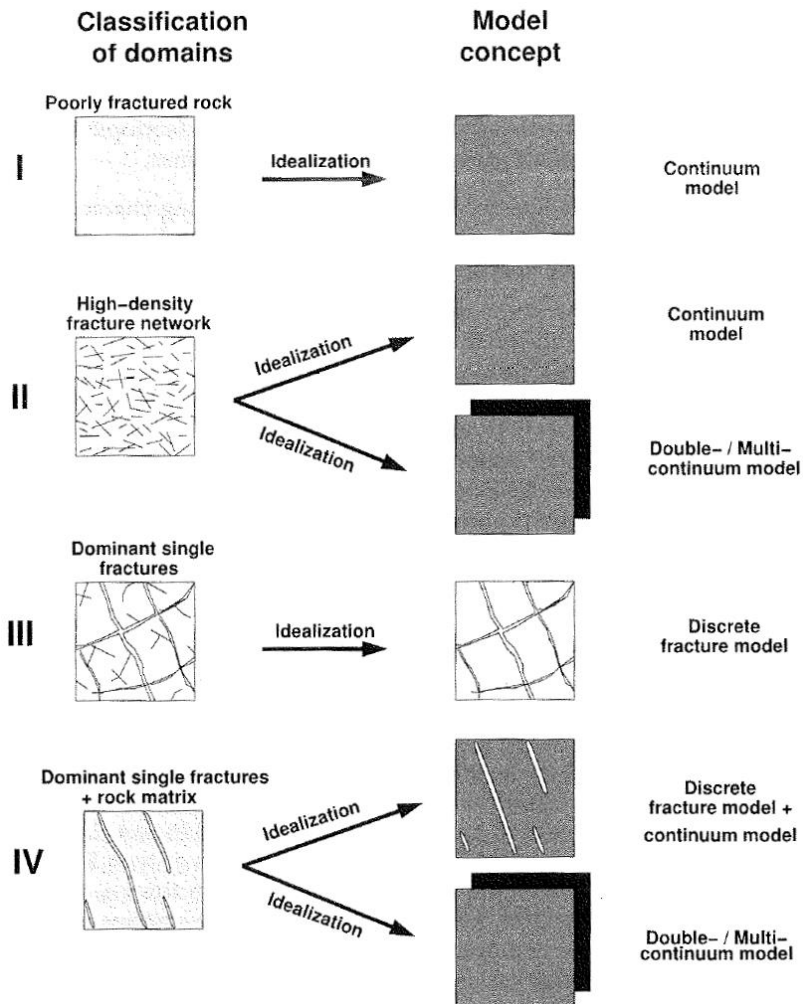


圖2.4-7 依裂隙分布密度決定採連續體或不連續體分析之概念圖 (Dietrich et al., 2005)

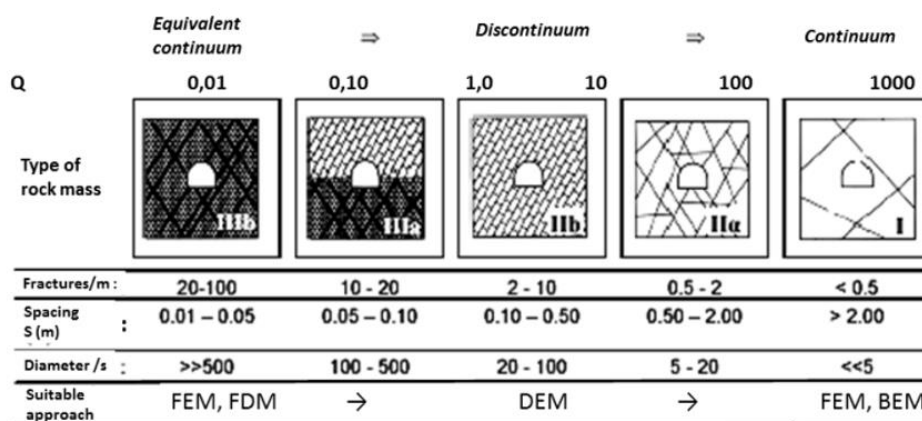


圖2.4-8 岩體分類及其對應的數值分析-連續體分析或不連續體分析(Bandis, 2004)

表2.4-1 坑道穩定分析所採用的數值方法與優缺點比較(Jalali and Dusseault, 2012)

Numerical Method		Advantages	Disadvantages
Continuous	FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Easy to formulate.</li> <li>• No local trial (interpolation) functions required to approximate PDEs.</li> <li>• The most direct and intuitive technique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cannot handle complex geometries, material inhomogeneities.</li> <li>• Neumann boundary condition can be only approximated, not exactly enforced.</li> <li>• Inflexible in dealing with explicit fractures, due to the necessity of continuity of functions between neighboring grid points.</li> </ul>
	FEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexible in handling material inhomogeneity and anisotropy.</li> <li>• No coordinate transformation is required for complex geometries.</li> <li>• Can handle complex boundary conditions.</li> <li>• Suitable for dynamic problems.</li> <li>• Neumann boundary conditions are enforced exactly.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large-scale opening, sliding and complete detachment are not permitted due to continuum assumptions.</li> <li>• Numerical ill-conditioning will occur due to large aspect ratios of fracture elements in the explicit representation of a large number of fractures.</li> <li>• Cannot be used for fracture growth, however there are some special algorithms to overcome this problem, e.g., enriched FEM.</li> </ul>
	BEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Discretization of the boundary only (reduction of model dimension by one).</li> <li>• Simplified pre-processing.</li> <li>• Improved accuracy in stress concentration problems.</li> <li>• Simple and accurate modeling of problems involving infinite and semi-infinite domains.</li> <li>• Simplified treatment of symmetrical problems (no discretization needed in the plane of symmetry).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non-symmetric, fully populated system of equations in collocation BEM.</li> <li>• Treatment of inhomogeneous and non-linear problems is extremely difficult.</li> <li>• Requires the knowledge of a suitable fundamental solution, hence usually an elastic solution.</li> <li>• Practical application relatively recent, not as well-known as FEM among users.</li> </ul>
Discontinuous	DEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explicit representation of fractures.</li> <li>• Flexible to handle large amount of fractures.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lack of knowledge of the geometry of fractures.</li> <li>• Large amount of computation required.</li> <li>• Matrix-fracture flow interaction cannot handled adequately.</li> </ul>
	DFN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requires fewer degrees of freedom in comparison with FEM.</li> <li>• Suitable for generic quantitative studies of fracture impacts.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lack of knowledge of the geometry of fractures and hydraulic properties of fractures.</li> <li>• Large amount of computation required.</li> <li>• Can't handle heat flow and mechanical process.</li> </ul>
Hybrid Methods		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benefits from both continuous and discrete methods.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large amount of computation required.</li> <li>• Displacement continuity and stress equilibrium at the interface is a big concern.</li> </ul>

## 第三章、國內隧道結構穩定分析技術與現況

穩定的隧道結構為保障隧道正常運轉之關鍵，端視支撐設計之良窳。隧道在設計階段需考量許多因素，其中包括地盤特性、斷面形狀、地震、特殊荷重、施工方法與順序、地下水與地表水之影響等，由於上述部分因素具有依時性，故支撐設計應滿足施工階段及運轉階段等不同階段之使用需求。而運轉中的隧道，主要以透過觀察襯砌裂縫形式，判讀隧道結構受力型態，配合非破壞性監測手段，對隧道進行結構穩定安全分析。本章將依設計階段與運轉階段，說明國內隧道結構穩定分析技術與現況，茲敘述如后。

### 3.1 設計階段

#### 3.1.1 國內隧道設計規範

近年來，交通部邀集國內專家學者，以歷年隧道維護檢修經驗為回饋，分別於民國106年及107年頒布了「鐵路明挖覆蓋隧道設計規範」及「公路隧道設計規範」。前者主要應用於淺覆蓋邊坡或地下化工程，先以明挖方式施作隧道空間，再將上層大地材料覆蓋復原。後者自92年頒布后，經彙整臺灣過去十餘年所累積之隧道實務經驗及國內產、官、學各界隧道專家意見，檢討並更新現有規範內容，以及修訂不合時宜部份，使之與時俱進，於107年完成修頒。其涵蓋設計範圍廣泛、完整，主要以深層岩覆下之隧道進行結構安全分析，亦包含邊坡出口段(淺覆蓋區)之探討。因此，本小節將以「公路隧道設計規範」中支撐設計概念與作法進行說明。

隧道工程主體設計主要包含(1)隧道開挖之初期支撐、(2)二次支撐(襯砌)。初期支撐其目的係容許隧道開挖時四周圍岩可承受一定容許變形量而不產生崩塌行為，其中設計方法又區分經驗設計法和分析設計法等兩種，主要因應地盤特性、施工方法、支撐架設時間、支撐系統特性等不同條件，選擇較適合的設計方法；而二次支撐，目的在於提供隧道長期的使用安全為目標，其大多由混凝土或鋼筋混凝土所構成。由此可知，初期支撐為結構穩定安全設計之關鍵。

在初期支撐設計中，經驗設計法係引用以往工程經驗之方法，視地盤良窳分級，依據隧道之功能，評析斷面形狀與尺寸、覆蓋深淺、大地應力、開挖方法等，以及參考以往案例，設計各級地盤之支撐系統；而分析設計法係利用數學解析或數值分析等方式，求得隧道開挖面周圍之應力與變形等數據，並根據分析結果所設計之支撐方法。初期支



撐由於地質條件之變異性，故設計方法之選定應考量地盤特性、施工方法、支撐架設時間、支撐系統特性等，詳如表3.1-1。

### 3.1.1.1 經驗設計法

藉由以往工程經驗與岩體分類所歸納出之經驗法則，提供後續隧道工程參考比較，據以設計初期支撐岩體分類系統之種類相當多，包括南非之RMR系統、挪威之Q系統以及公共工程委員會「臺灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR系統)」所建議之岩體分類系統等，如表3.1-2及表3.1-3所示。

### 3.1.1.2 分析設計法

隧道工程中複雜的三維問題(如交叉段支撐)，已無法由經驗設計法作為參考基準，岩體破壞機制相當複雜，另考量地質參數變異性，故藉由分析模式與設計參數以求安全適切之支撐設計。其中，分析設計法依其性質可概分為3大類：

(1)解析解法(analytical analysis)：又稱公式解法，如岩盤—支撐互制曲線法等。

(2)岩盤荷重法(rock load analysis)：如Terzaghi之岩盤荷重法，如表3.1-4。

(3)數值分析法(numerical analysis)：本法需利用套裝電腦程式進行分析，可分為連續體分析與不連續體分析；前者包括有限元素法(FEM)、邊界元素法(BEM)與有限差分法(FDM)等；後者則包括離散元素法(DEM)、岩塊理論法(block theory)與不連續變形分析(DDA)等。

表3.1-1 隧道開挖初期支撐考量因素(公路隧道設計規範，2018)

考量因素	內容
地盤特性	隧道沿線地盤特性決定初期支撐所受荷重，亦影響初期支撐之適用性。
施工方法	施工方法不同，隧道周圍岩盤之擾動程度亦有所差異，此將影響初期支撐所受荷重。鑽炸法之擾動程度較大，為避免擾動破碎區域過大致對初期支撐產生額外荷重，宜採用勻滑開炸。機械開挖對周圍岩盤之擾動較小，支撐所受荷重將小於鑽炸法。

表 3.1-1 隧道開挖初期支撐考量因素(公路隧道設計規範，2018)(續)

支撐架設時間	初期支撐須在岩體自立時間(stand-up time)內架設完成，以避免岩體持續鬆動破壞而導致額外之地盤荷重。岩體自立時間是指隧道開挖後，岩體不需支撐而能保持穩定之時間，期間周圍岩體將逐漸向內鬆弛變形至形成一穩定之地拱為止。
支撐系統特性	初期支撐應允許岩體產生適當之變形以形成地拱，同時也須具備足夠之強度以支撐地拱所無法承受之荷重，並阻止隧道持續向內變形。
前進支撐	隧道變形為三維空間型態，除二維徑向支撐輔助圍岩形成地拱外，亦應考量前進支撐以有效抑制隧道之變形量。

表3.1-2 A、B岩類之岩體分級標準表(公路隧道設計規範，2018)

岩體級別	A 岩類 RMR 值範圍	B 岩類 RMR 值範圍	岩體級別
<b>A<sub>I</sub></b>	≥81	----	----
<b>A<sub>II</sub></b>	61~80	≥81	<b>B<sub>II</sub></b>
<b>A<sub>III</sub></b>	41~60	61~80	<b>B<sub>III</sub></b>
<b>A<sub>IV</sub></b>	21~40	41~60	<b>B<sub>IV</sub></b>
<b>A<sub>V</sub></b>	11~20	21~40	<b>B<sub>V</sub></b>
<b>A<sub>VI</sub></b>	≤10	≤20	<b>B<sub>VI</sub></b>

表3.1-3 C、D岩類之岩體分級標準表(公路隧道設計規範，2018)

岩體級別		分級標準	
		膠結程度	地質材料組成
C 岩類	C <sub>I(C)</sub>	膠結程度良好或尚可 (大拇指無法壓出凹痕)	沉泥、黏土含量>50%
	C <sub>I(MIX)</sub>		砂、沉泥、黏土、礫石交雜 個別含量均未超過 50%
	C <sub>I(S)</sub>		砂含量>50%
	C <sub>II(C)</sub>	膠結程度不佳或疏鬆 (大拇指可壓出凹痕)	沉泥、黏土含量>50%
	C <sub>II(MIX)</sub>		砂、沉泥、黏土、礫石交雜 個別含量均未超過 50%
	C <sub>II(S)</sub>		砂含量>50%

表 3.1-3 C、D 岩類之岩體分級標準表(公路隧道設計規範，2018)(續)

D 岩類	D <sub>I(G)</sub>	膠結程度極佳 (需以地質錘用力敲方能將塊石或礫石敲落)	塊石、粗顆粒(大於 4 號篩)之含量>75%或相互接觸
	D <sub>I(M)</sub>		塊石、粗顆粒(大於 4 號篩)之含量 50%~75%或相互不接觸
	D <sub>II(G)</sub>	膠結程度良好或尚可 (需以地質錘方能將塊石或礫石敲落)	塊石、粗顆粒(大於 4 號篩)之含量>75%或相互接觸
	D <sub>II(M)</sub>		塊石、粗顆粒(大於 4 號篩)之含量 50%~75%或相互不接觸
	D <sub>III(G)</sub>	膠結程度不佳或疏鬆 (以手即可將塊石或礫石剝落)	塊石、粗顆粒(大於 4 號篩)之含量>75%或相互接觸
	D <sub>III(M)</sub>		塊石、粗顆粒(大於 4 號篩)之含量 50%~75%或相互不接觸

表3.1-4 隧道深度大於1.5(B+Ht)情形支撐上方岩盤荷重Hp(以開挖寬度B與高度Ht表示)  
(公路隧道設計規範，2018)

項次	岩盤狀況	岩盤載重Hp(m)	附註
1	硬與完整	0	如發生剝落或爆脫，僅需輕度襯砌
2	硬層狀或片狀	0至0.5B	輕度支撐，主要為防護剝落
3	渾厚、中度節理	0至0.25B	不同位置之荷重可能急遽變化
4	中度塊狀與夾薄層	0.25 B至0.35(B+Ht)	無側壓
5	高度塊狀與夾薄層	(0.35至1.10)(B+Ht)	少許或無側壓
6	完全破碎 但化學性質未變	1.10(B+Ht)	有相當之側壓，滲水對隧道底部之軟化作用導致鋼支撐下部需要連續支撐或採用圓形支撐
7	擠壓岩盤，中度深度	(1.10至2.10)(B+Ht)	高度側壓，需要仰拱支撐。建議採圓形支撐
8	擠壓岩盤、大深度	(2.10至4.50)(B+Ht)	
9	膨脹岩盤	至76m 與(B+Ht)值無關	需要圓形支撐、極端情形使用可縮短之支撐

註：1.隧道拱頂在地下水位以下之荷重。如拱頂永遠在地下水位以上，則岩盤狀況4至6所給之數字可減少50%。

2.部分常見之岩層常夾有頁岩。未風化之真頁岩不比其他層狀岩層差，惟「頁岩」一詞常指不具岩石性質之夯實緊密之粘土沉積物，此類所謂「頁岩」在隧道內行為有如擠壓甚或膨脹岩層。如岩層中含一系列之水平層狀砂岩或石灰岩與未成岩頁岩，則隧道開挖常使兩側岩層逐漸受壓而使拱頂下陷。再者，由於所謂之「頁岩」與岩層界面上抗滑阻力較低，有大量減少拱部岩層架橋能力之趨勢，因此在此種岩層中，拱頂壓力或許與高度塊狀及夾薄層之岩盤相同。

---

### 3.1.2 數值分析方法

目前國內在隧道結構穩定性分析方面，以數值分析方法應用最為廣泛，包含有限元素法(FEM)、有限差分法(FDM)、邊界元素法(BEM)、離散元素法(DEM)、不連續變形分析(DDA)，及以幾何概念發展的岩塊理論(block theory)，屬較為學界與工程界採用的工具軟體同前述2.4節所整理的內容。

### 3.1.3 國內有關數值分析於隧道工程之論文研究

國內外許多學者採用各種不同的數值分析工具，如有限元素法、有限差分法及邊界元素法，模擬潛盾工法、新奧工法及 TBM 工法之施工過程，探討各種隧道工法施工對周圍地盤沉陷之影響，各學者之研究內容及主要結論整理於表3.1-5。

表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
方永壽(1988) 陳秋宗(1988) 蘇啟鑫(1991)	有限元素法 PLANET 程式	1.彈塑性模式 2.莫爾-庫倫破壞準則	1.將現地應力反向加至開挖邊界,消除開挖面上的應力以模擬開挖 2.模擬盾尾孔隙閉合 3.模擬門型灌漿對地盤沉陷之影響	1.隧道越深,沉陷影響範圍越大,但沉陷量越小 2.盾尾孔隙越大,地表沉陷越大,影響範圍越大 3.地下土層沉陷量隨著深度而增加,頂拱處土壤沉陷約為地表的1.6倍 4.由現場觀測資料迴歸得: $i/R=1.06(H/2R)^{0.94}$
陳卓然等人 (1993)	有限元素法	1.彈塑性模式 2.莫爾-庫倫破壞準則	1.模擬盾尾孔隙閉合	1.同樣深度的隧道,隧道直徑越大,地表沉陷越大 2.隧道埋設越深,地表沉陷越小 3.盾尾孔隙越大,地表沉陷越大
陳堯中等人 (1997)	有限差分法 FLAC程式	1.彈塑性模式 2.莫爾-庫倫破壞準則	1.縱斷面平面應變模擬潛盾推進,求得對橫斷面土壤的推擠力 2.模擬盾尾孔隙及襯砌	1.分析之孔隙水壓與監測資料相當一致 2.分析之土壤壓密沉陷與監測之地表沉陷資料大致吻合 3.推進壓力越大,前方地表隆起量越高,盾尾孔隙引起的沉陷量越小,但後期之壓密沉陷較大
蔡榮禎(1997)	有限元素法 ABAQUS程式	1.彈塑性模式 2.Drucker-Prager破壞準則	1.先行隧道土壤軟化30% 2.開挖先行隧道及裝置襯砌 3.後行隧道土壤軟化30% 4.開挖後行隧道及裝置襯砌	1.相同襯砌厚度下,襯砌軸力和彎矩隨覆土厚度而增加 2.襯砌厚度增加,環向軸力略增,彎矩則增加甚鉅 3.兩隧道越靠近,中間區域環向軸力增加,襯砌較薄者更明顯,覆土厚度對襯砌受力改變不多 4.兩隧道越靠近,中間區域起拱線處彎矩明顯減少,襯砌較薄者較明顯,覆土厚度對襯砌應力影響不大
程日晟(1991) Ou(1995)	有限元素法 JFEST程式	1.雙曲線模式	1.估計推進壓力,轉換成二維隆起壓力,計算地表隆起量 2.移動隧道邊界,模擬盾尾孔隙閉合,計算地盤沉陷 3.將等值節點荷重加於襯砌元素,計算襯砌變形及地盤沉陷	1.透過推進壓力和隆起壓力的關係,將三維分析轉換成二維平面應變分析 2.推進壓力可由現地側向土壓或潛盾施工計測之土壓力及推力直接估算 3.適當的隆起壓力對地盤產生擠壓,有壓密的作用,可減少地表沉陷 4.採用滿足閉合潛能的邊界位移方式,可合理地模擬盾尾孔隙閉合,並可確保閉合後襯砌仍保持合理的形狀



表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
賴韋中(1995)	有限元素法 JFEST程式	1.雙曲線模式	同上	1.單隧道沉陷槽與常態機率曲線趨勢一致，雙隧道沉陷槽呈雙尖峰曲線 2.將單隧道沉陷槽疊加，形狀與監測結果相似(雙尖峰曲線)，但沉陷值較小 3.單、雙隧道監測之沉陷均較程式計算所得小，可能是背填灌漿發揮作用或3D拱行為所致
賴慶和等人(1993)	有限差分法 FLAC程式		1.模擬盾尾孔隙閉合1	1.雙隧道 $i'$ =單隧道 $i$ +0.2d(d為兩隧道中心距離) 2.雙隧道引致之最大沉陷量可由單隧道之最大沉陷量、兩隧道間距及隧道直徑求得
鄭建志(1999) 彭德俊(2000)	有限元素法 SPECTROM 32程式	1.彈塑性模式 2.莫爾-庫倫破壞準則	1.模擬未襯砌單、雙隧道開挖，在隧道面施加向內均佈位移 2.具襯砌隧道，同樣採位移加載方式，至預定盾尾孔隙量閉合後放入襯砌元素，模擬先行隧道盾尾孔隙閉合及後行隧道盾尾孔隙閉合對先行隧道之影響	1.隧道解壓變形的過程中，計算所得地表沉陷量略大於離心模型試驗結果，沉陷槽寬度亦較大 2.隧道深徑比越大，臨界超載係數越大，隧道開挖較安全。相同深徑比下，雙隧道之臨界超載係數比單隧道小 3.先行隧道襯砌彎矩受後行隧道之影響，在拱肩(45度)處正彎矩隨著盾尾孔隙閉合而增加，在起拱線處負彎矩也增加。計算所得彎矩均大於試驗值 4.當兩隧道中心距離大於4倍直徑時，後行隧道對先行隧道襯砌彎矩之影響已不明顯；間距大於6倍直徑時，已幾乎無互制之影響
吳淑媛(2001)	有限差分 FLAC程式	1.彈塑性模式 2.莫爾-庫倫破壞準則	1.模擬未襯砌隧道開挖 2.具襯砌隧道，模擬盾尾孔隙閉合	1.未襯砌隧道開挖，深徑比越大，臨界超載係數越大 2.盾尾孔隙閉合後，深層隧道周圍土壓力及襯砌彎矩分布較為均勻 3.隧道周圍最大徑向土壓力出現在頂拱左右30~60度 4.過壓密比越大，襯砌彎矩、軸力和剪力分布越均勻
Akagi(1997)	有限元素法	1.彈塑性模式	1.以開挖元素模擬潛盾機前方被擾動土壤 2.施加推進力於潛盾機尾部節點 3.將潛盾機修正至正確開挖位置	1.開挖元素和反覆的重整程序成功地模擬潛盾機推進的過程 2.三維分析所得地盤垂直位移剖面 and 有效應力路徑和監測資料一致 3.潛盾開挖對既存隧道土壓力變化的影響成功地模擬出來

表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
Bernat et al. (1998) (1999)	有限元素法 CESAR- LCPC程式	1.彈塑性CJS模式	1.以釋放因數模擬隧道解壓 2.模擬土壤和襯砌之互制 3.未襯砌隧道應力路徑及塑性區發展分析	1.開挖路線有上下坡或轉彎時，背填灌漿引起的隆起相對於TBM通過前後造成之沉陷而言，較不重要可忽略，故一次應力釋放程序已足夠 2.開挖路線只在水平且線性時，灌漿造成的隆起不可忽略。採用解壓-再壓程序配合釋放因數，可得到合理的結果
El-Nahhas (1997)	有限元素法		1.以收斂-限制法進行開羅污水隧道開挖模擬 2.以間隙參數分析開羅捷運TBM隧道	1.開羅污水隧道，計算所得沉陷槽分布和監測值非常接近 2.開羅捷運隧道，計算所得最大沉陷量和監測值也很接近，惟略高估沉陷槽寬度，折減係數約為0.75到0.95
Clough(1985) Finno(1985) Ou(1995)	有限元素法	1.彈性雙曲線模式 2.修正Cam-Clay模式 3.Prevost模式	1.由縱斷面有限元素分析潛盾推進造成橫斷面的隆起壓力 2.橫斷面分析，施加隆起壓力 3.模擬盾尾孔隙閉合 4.架設襯砌 5.長期壓密沉陷	1.由縱斷面和橫斷面兩個二維有限元素模型分析三維隧道開挖問題 2.擬彈性土壤模式會高估隆起量，不適用於潛盾推進分析 3.非均勻盾尾孔隙閉合方式允許頂拱位移大於其他地方，無論採用何種土壤模式，可產生較合理的水平及垂直位移 4.CamClay或Prevost模式都可合理描述土壤行為，但以Prevost模式預測細部反應較佳 5.潛盾推進產生小量的隆起，可減少開挖引起的地表沉陷，但超額孔隙水壓消散之後，壓密使沉陷也增加了 6.相較於地表有較硬土層覆蓋，均勻黏土地盤較易產生隆起；即使具有相同初始隆起量，均勻黏土層仍會產生較大沉陷
Ezzeldine (1999)	有限元素法 PISA程式	1.雙曲線模式	1.消除隧道內元素、加作用力於開挖面、於盾尾加縱向作用力(代表襯砌壓力)及灌漿壓力 2.潛盾推進，架設襯砌，模擬盾尾孔隙閉合	1.計算所得沉陷比實測值小，可視為下陷值。可能是有限元素分析，不論採用何種土壤組成律，均視地盤為一完整實體 2.所採用的灌漿比並未考慮到漿體灌入土壤後壓力的損失量，若將灌漿比由100%降為75%，計算之地表沉陷會和實測值更接近
Hashimoto (1999)	有限元素法		1.配合應力解除比，模擬潛盾通過前後、盾尾孔隙閉合及背填灌漿等過程 2.分析擾動區域的長期壓密沉陷	1.運用應力解除比，分析潛盾推進造成的隆起與擾動、潛盾通過後盾尾孔隙閉合產生的沉陷、背填灌漿引起的隆起及長期壓密沉陷 2.應力解除比由軸對稱彈性有限元素分析獲得，考慮盾尾孔隙和開挖面土壓 3.隧道頂拱附近土壤的長期沉陷，可由液限指數求得



表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
Hisatake (1987)	邊界元素法		1.配合無因次特徵曲線及依時位移關係分析單、雙隧道引起的地表沉陷 2.考慮多層土壤狀況	1.以三維邊界元素分析兩個潛盾隧道引起的地盤沉陷，考慮了隧道施工順序、隧道開挖面位置、開挖速度、盾尾孔隙、支撐氣壓及地盤依時行為 2.分析方法包含了地盤沉陷特徵曲線及黏彈性沉陷關係 3.由計算結果和量測資料之比較，顯示分析方法可得到合理結果
Hoyaux et al. (1970)	有限元素法	1.彈塑性模式	1.二維平面應變，考慮土壤為均質等向受重力作用的介質 2.以擬彈性模數遞迴法求得彈塑性解	1.以有限元素分析位於不同深度之未襯砌隧道在重力作用下，周圍地盤的應力分布與隧道變形，考慮敏感性及非敏感性黏土在彈性及彈塑性下的行為 2.隧道位於較深處，應力和位移場趨於穩定收斂。淺層隧道的解則趨於發散，隧道上方土壤產生塑性流，其解可由一般塑性力學理論獲得。
Mair (1981)	有限元素法 CRISTINA 程式	1.彈塑性模式 2.修正Cam-Clay 模式	1.模擬支撐氣壓的解除	1.由有限元素分析和離心模型試驗結果，所定義的載重因子比單純的穩定係數更能和土壤漏失有良好的相關性 2.不同深徑比隧道，有限元素和離心模型所得載重因子和土壤漏失的關係曲線均落在相當小的帶寬內，二者結果大致吻合 3.由土壤漏失量可推估隧道上方地表沉陷
Seneviratne (1985)	有限元素法 CRISTINA 程式	1.彈塑性模式 2.修正Cam-Clay 模式	1.模擬未襯砌隧道周圍土壤的長期壓密行為 2.採用Biot理論，允許孔隙水壓消散與流動，滿足達西定律	1.主壓密階段，有限元素分析和離心模型試驗所得頂拱沉陷依時行為為很接近，有限元素所得之地表壓密沉陷則比試驗量測值低約30% 2.單向度正常壓密黏土孔隙水的非等向性流動可能導致壓密速率的低估 3.修正Cam-Clay模式不適用於預測二次壓密行為
Ohta(1985)	有限元素法	1.彈塑性模式	1.初步分析以縱向加上橫向平面應變分析和軸對稱分析結果比較，在盾尾頂拱施加強制位移模擬盾尾孔隙閉合 2.以縱向加上橫向平面應變模型做案例分析。盾尾孔隙為不均勻分布，根據潛盾機到分析斷面的距離逐步增加強制位移量	1.經由縱向加上橫向平面應變分析和軸對稱分析結果之比較，考慮潛盾機到分析斷面的距離，決定橫斷面分析時隧道斷面各點的強制位移量，模擬盾尾孔隙閉合 2.隧道上方到地表各深度土壤的計算垂直位移和觀測值大致接近 3.經由觀察，下方先行隧道所造成的鬆動區域大致與隧道起拱線夾60度，上方後行隧道之鬆動區域夾45度，鬆動區域內之垂直位移遠大於區域外之垂直位移 4.水平位移方面，計算值高估觀測值許多，顯示採用強制位移之橫向平面應變模型分析三維問題或許仍有其限制

表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
Samarasekera (1992)	有限元素法	1. 雙曲線模式 2. 三維 Henkel 孔隙水壓模式	1. 以無因次化及正規化程序模擬開挖引起孔隙水壓之激發及消散	1. 當 $S_u/\sigma_{1c}$ 值 ( $\sigma_{1c}$ 為主壓密應力) 大於 0.4 時, 孔隙水壓的變化對此值的變化不敏感, $E_i/\sigma_{1c}$ ( $E_i$ 為初始楊氏模數) 值的變化對孔隙水壓激發的影響亦不大 2. 孔隙水壓隨著參數 $a$ 而增加, 隨著 $K_0$ 而減少 3. 孔隙水壓變化速率幾乎和隧道直徑無關, 但是和隧道深度有關 4. 有效勁度比 (ESR) 代表襯砌和土壤的相對勁度 (ESR=0 為無支撐隧道), 增加 ESR 可降低初始孔隙水壓大小且使最大值往隧道中心移動 5. 無支撐隧道開挖使正常壓密黏土孔隙水壓增加, 過壓密黏土孔隙水壓減少
Wanninger (1979)	有限元素法	1. 雙曲線模式 2. 莫爾-庫倫破壞準則	1. 模擬新奧工法分段開挖及架設支撐 2. 模擬併行雙隧道及先後行隧道	1. 在一般螺栓錨定使用數目內, 螺栓數目對減少沉陷的貢獻有限 2. 先後行隧道比並行雙隧道產生較大的地表沉陷, 但頂拱沉陷較小 3. 兩隧道位於同高程, 併行或先後行隧道對等垂直位移線之分布影響不大
Parreira (1992)	有限元素法 ANLOG 程式	1. 彈塑性模式 2. Lade 破壞準則	1. 模擬新奧工法, 以 $K_0$ 狀態進行自重平衡, 求得隧道面節點力 2. 模擬開挖到達計測斷面前所造成的沉陷, 在隧道橫斷面施加若干百分比的上述節點力 3. 模擬隧道開挖造成之應力釋放移除隧道內元素, 繼續在隧道面施加若干百分比的節點力 4. 模擬架設襯砌	1. 經由參數研究發現, 土壤初始應力狀態 ( $K_0$ 值) 對新奧工法所造成的水平及垂直位移有很大的影響, 襯砌勁度對位移的影響不大。 2. 評估不同土壤模式的預測成效, Lade 彈塑性模式比線彈性、彈性-理想塑性模式更接近量測結果

表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
Wang et al. (1992)	有限差分法 FLAC程式	1.彈塑性模式 2.莫爾-庫倫破壞準則	1.模擬下方先行隧道及上方後行隧道盾尾孔隙閉合，架設襯砌，分析地表沉陷及襯砌應力 2.考慮土壤軟化，調整土壤參數	1.沉陷槽形狀非常近似於常態機率曲線 2.後行隧道的推進，造成頂拱往上位移60mm，地表隆起15mm 3.後行隧道對地盤的推擠力，使下方先行隧道襯砌雖有輔助內支撐，卻仍產生明顯變形而趨於扁平化。後行隧道通過後，襯砌變形有所復原 4.先行隧道輔助內支撐拆除後，襯砌變形更加回復而趨於圓形 5.先行隧道襯砌於後行隧道推進時產生最大彎矩
Yamaguchi et al.(1998)	有限元素法	1.彈性模式	1.模擬不同高程的四個先後行潛盾隧道施工 2.考慮自重，求得等效外力 3.以應力解除因數乘上等效外力作用於隧道面，模擬開挖及架設襯砌所造成的應力釋放	1.後行隧道推進及開挖均對既存隧道襯砌彎矩及作用土壓力產生明顯影響呈現不對稱分布；當潛盾通過後，襯砌彎矩及土壓力則回復對稱分布 2.後行隧道對先行隧道之長期影響，當兩隧道為上下排列(後行在上)時，先行隧道頂拱附近土壓力減少，側壁土壓力增加；兩隧道左右排列時，各處土壓力均增加，側壁增加更明顯 3.量測所得潛盾推進、開挖及通過後造成的土壓力變化和彈性解有相同趨勢
Yi et al. (1993)	有限元素法	1.黏塑性模式 2.降伏方程考慮塑性流及應變硬化	1.在隧道面施加表面壓力使地表隆起至現場觀測值 2.使隧道變形至盾尾孔隙閉合	1.計算所得沉陷槽形狀近似常態機率曲線，其寬度隨時間而變窄 2.最大超額孔隙水壓發生在隧道仰拱，計算和量測孔隙水壓依時變化一致 3.降低隧道附近土壤的強度參數以模擬開挖造成的擾動，使最大沉陷量增加30%、最大水平位移增加42%，孔隙水壓也明顯增加 4.鏡面壓力比靜止側向土壓大10%可減少開挖引起的垂直位移
吳秉儒 (2002)	有限差分法 FLAC程式	1.彈塑性模式 2.莫爾-庫倫破壞準則	在隧道內施加支撐氣壓以維持隧道初始的穩定，然後逐步解除支撐氣壓來模擬開挖的過程	1.由單隧道之土壤漏失量可預測單隧道和雙隧道開挖引致之地表沉陷 2.建立單隧道和雙隧道穩定分析之方法 3.數值程式因網格形狀不良而中斷時大致就是隧道破壞時機 4.提出了考慮隧道深徑比之單隧道和雙隧道地拱效應應力傳遞範圍 5.疊加法預測雙隧道沉陷槽之適用性

表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
褚炳麟等人 (2004)	邊界元素法	Hoek & Brown 之 岩石破壞準則	1.先決定欲開挖岩盤之初始 應力大小 2.計算隧道開挖之邊界值問 題，並求出周圍岩體之誘發 應力 3.將誘發應力加上初始應力 即可求得隧道周圍岩體之總 應力大小	1.層狀介質之模數比愈大，隧道發生破壞所需之初始應力愈大 2.K0愈接近1，則圍岩應力及變位分布愈對稱 3.在雙層介質情況下，隧道所處地層上方如覆蓋一層硬質岩時，將 有助於穩定頂拱之沉陷，但須注意仰拱之隆起 4.當最大主應力方向平行於隧道排列方向時，對水平地層中之隧道 之穩定性較佳
寶勇華(1999)	有限元素法 ABAQUS 程 式	1.完全彈塑性模 式	1.為先建立三維隧道網格，施 以大地應力 2.逐步降低岩體之楊氏模數， 使隧道先有部份變形 3.接著移除開挖面元素，施加 支撐元素承受土壤或岩盤荷 重	1.不同側向壓力之平面應變隧道頂拱沉陷對E值下降曲線在正規化 後有重合之一致性 2.在頂拱沉陷量是無法正確模擬實際隧道大量擠壓變形之情況，但 頂拱變形曲線趨勢與現地監測資料吻合
Karakus and Fowell (2003)	有限元素法 ABAQUS 程 式	1.彈塑性模式 2.Drucker-Prager 破壞準則	1.在進行大地應力後，移除開 挖部分之網格，加入襯砌元 素且降低其E值 2.待平衡後，將襯砌元素之E 值改為原來之值 3.重複以上步驟直到整各段 面開挖完成	1.利用數值分析模擬多階開挖的分析時不能使用簡化為單一階段開 挖 2.全斷面開挖和兩階開挖模擬顯示在軟土中支撐環必須在較早的步 驟中完成，太慢支撐會造成大量的變形和沉陷 3.E值折減之比例根據土壤強度、開挖區域的形狀和大小還有開挖 的階數有關
林建良(1999)	有限差分程 式FLAC	1.平面應變分析 2.採用完全彈塑 性模式 3.莫爾-庫倫破壞 準則	控制隧道斷面在無支撐的狀 態下，隨自重及開挖解壓而 變形	1.以FLAC模擬單隧道盾尾間隙閉合模型試驗，在襯砌彎矩分布上 試驗值低 2.由雙隧道互制試驗結果顯示因新挖隧道的盾尾間隙閉合，土層應 力重新分布影響既存隧道周圍土壓力，要成在兩隧道間的彎矩增大 3.新挖隧道在開挖後，形成之地拱在傳遞過程中會作用在既存隧道 之襯砌上，造成既存隧道周圍土壓力分布不再均勻對稱



表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
陳翰平(2001)	有限元素程式ABAQUS	1.平面應變分析 2.採用完全彈塑性模式 3.莫爾-庫倫破壞準則	1.利用均勻位移加載達成單隧道盾尾間隙閉合 2.以位移加載方式控制新挖隧道之隧道面往逕向達到指定位移	1.在相同超載係數下，深徑比愈大，兩隧道間之地表沉陷愈小 2.當新挖隧道盾尾間隙閉合後，既存隧道有傾向兩隧道中間的趨勢，且襯砌的水平測向變形皆大於垂直變形
李金芳(2002)	有限元素程式ABAQUS	1.平面應變分析 2.採用完全彈塑性模式 3.莫爾-庫倫破壞準則	1.隧道閉合之前，先對土壤元素施加初始覆土壓力 2.利用均勻位移加載達成單隧道盾尾間隙閉合 3.以位移加載方式控制新挖隧道之隧道面往逕向達到指定位移	1.當新挖隧道盾尾間隙閉合過程中遭遇既存隧道時，盾尾間隙閉合所造成之地表沉陷，主要集中在新挖隧道上方及新隧道周圍附近 2.由塑性區分布範圍可知，盾尾間隙閉合時，所影響的範圍皆在靠近新隧道之一側及其下方附近。且當隧道越靠近地表時，將會影響隧道頂拱上方之土壤
張軒誌(2003)	有限元素程式ABAQUS	1.平面應變分析 2.採用完全彈塑性模式 3.莫爾-庫倫破壞準則	1.土壤單位重，產生初始覆土壓力，為使在此階段中未襯砌段不產生變形，故將未襯砌段隧道面之所有節點加以束制 2.在未襯砌段隧道面給予位移載重，使隧道面向隧道中心均勻閉合，直至完全閉合為止	1.隧道上半部之塑性區分布範圍與下半部相近，甚至較小。此現象與離心模型試驗之結果有所出入，主要是因為採均勻位移加載，因此隧道下半部之位移量比離心模型試驗大所導致 2.隨著隧道的閉合，亦即隨著超載係數OF之增加，襯砌彎矩的正負及大小會有所改變，並且逐漸趨向於一固定趨勢
葉進賢(2004)	有限元素程式ABAQUS	1.平面應變分析 2.採用完全彈塑性模式 3.莫爾-庫倫破壞準則	1.前置施工開挖完成一段6m之隧道，且考慮大地應力所形成之初始應力場。 2.藉由計算分析所得固定端之反力得知隧道面支撐力。 3.降低隧道面支撐力以完成潛盾機之推進	1.用數值分析模擬潛盾機向前推進2m，對於橫向斷面與縱向斷面之沉陷情形，其趨勢皆是由隧道頂端往地表變小，而在縱向斷面推進2m段間，沉陷有變大，但值很小 2.潛盾機推進2m時，對隧道側向變形情形，由數值分析結果，對於已完成隧道會造成往內擠壓情形

表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
林宜亭(2004)	有限元素程式ABAQUS	1.平面應變分析	在初始應力平衡後，先進行單隧道開挖模擬，探討單隧道在不同土壤漏失量時的地盤變位及對襯砌之影響。再利用單隧道作為既存隧道，繼續進行新挖隧道開挖之模擬。探討不同深徑比、寬徑比及當既存隧道在不同土壤漏失量時加入襯砌後，新挖隧道開挖對既存隧道之襯砌所產生之影響及探討既存隧道的位移。	1.在相同土壤漏失量時，深徑比愈大，則地表沉陷槽愈寬，且其襯砌彎矩值、軸力值及剪力值均隨著深徑比愈大而愈大 2.新挖隧道對既存隧道的影響之數值模擬分析結果顯示，當隧道間距愈小時，既存隧道之襯砌彎矩會愈大，且負彎矩最大值會產生在兩隧道最接近的位置。襯砌軸力的最大值均出現在頂拱的位置，但隧道間距的大小對於襯砌的軸力影響不大 3.新隧道開挖時，地表沉陷槽漸漸往新挖隧道的上方移動，且當兩隧道間距愈小時，最大地表沉陷量愈大 4.利用數值分析結果與離心模行試驗結果進行比較，可得知新挖隧道對既存隧道之襯砌彎矩發生變化的趨勢大致相同。
杜東岳(2009)	有限元素程式ABAQUS		以數值模擬分析動力夯實與打設PC樁施工之暫態波地盤振動模式，並與現地實測值比較討論，且探討淺層槽溝之效用，分析與建立施工引致地盤振動量之預測模式	經由適當地選擇振源模式、邊界條件、網格建構、材料參數與土壤阻尼之模式，則可相當程度地反應現地施工之地盤振動行為
張晉豪(2010)	有限元素程式MIDAS GTS		利用數值模擬結果與現場監測資料進行比對，來探究隧道施工時所可能產生之地盤變位大小和影響範圍問題。	在邊界條件假設上，若採用3D分析，且隧道開挖長度為20m，邊界條件應向最終開挖面前方多延伸40~50 m之範圍，方可合理模擬施工中隧道行為。此外，分析時若土壤勁度下降時，會得到較大之沉陷。最後，因受到拱效應的影響，可有效地抑制圓形豎井開挖引起之地盤變位
楊尉成(2011)	有限元素程式Plaxis 3D Tunnel		以三向度分析模型來模擬實際之雙圓型潛盾隧道開挖情形	以PLAXIS數值分析7處監測斷面之地表沉陷量，繪出地表沉陷之縱向變形量曲線及找出開挖面前方之先期變形曲線關係，並與現場監測沉陷觀測資料及經驗公式進行地表沉陷槽相互比較，由分析成果驗證Plaxis 3D Tunnel應用於雙圓型潛盾隧道施工引致地表沉陷分析之適用性，能供後續雙圓型潛盾隧道工程應用參考

表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
何金益(2017)	有限元素程式(ABAQUS)		分析三層岩層受簡諧S波垂直向上入射之行為，紀錄各高程監測點位之力時最大位移及震波作功，以比較不同入射頻率、軟層厚度、阻抗比之影響。確定三層岩層受震行為後，於軟層加入隧道進行分析，比較不同軟層厚度、阻抗比及隧道位置對於隧道襯砌應力增量的影響。	三層岩層不含隧道受震後之行為可分為兩類，當震波時間與波長乘積小於該層厚度時，考慮與上下層之阻抗比及層厚的影響；當震波時間與波長乘積大於該層厚度時，波之折射與反射行為較為複雜，岩層厚度的影響較大。隧道襯砌軸應力增量受阻抗比之影響與三層岩層受震反應一致，因此可以三層岩層受震反應預測隧道襯砌軸應力之趨勢；而隧道襯砌剪應力與撓曲應力受下層與中層間阻抗比( $\alpha_1$ )影響甚大，其增量值皆隨 $\alpha_1$ 上升而下降
楊浚旻(2018)	顆粒流分析程式PFC2D		選定四種不同覆岩深度(H=300、400、500、600 m)之圓形及馬蹄形隧道，於無節理岩盤中模擬隧道全斷面開挖且無支撐架設，在三種不同初始應力(K=0.5、1、2)作用下，開挖引致之力學行為探討	馬蹄形主隧道開挖，K=1之鍵結拉力、鍵結壓力及顆粒合位移分布，受開挖面幾何形狀影響；K=0.5、2其分布主要受K值影響，其次為開挖面之幾何線型。其中最需要注意(危險)的是H=600、K=2之馬蹄形主隧道頂拱周遭，處置孔開挖使頂拱周遭之裂縫持續增加，其次為處置孔第二次降挖之底板周遭，裂縫垂直於最小主應力方向發展，形成三角形之破壞區
李俊秀(2018)	有限元素分析(FEM)和外顯分析(EAM)		採用收斂約束法理論中之約束損失方式，經由有限元素分析(FEM)和外顯分析(EAM)模擬不同側向應力比有支撐隧道在彈塑性圍岩位變之結果	1.在側向應力比介於 $0.4 \leq K_0 \leq 2.0$ 之間，隧道前進開挖引致圍岩收斂位移之結果比較，驗證在同一隧道斷面上不同位置處之徑向位移，經由平移計算與作正規化處理，可獲得單一化的約束損失值 2.經由迴歸分析可得知有支撐隧道 $\lambda_d=4$ 與 $\lambda_d=0.7$ 彈塑性圍岩，在側向應力比介於 $0.4 \leq K_0 \leq 2.0$ 之間，其隧道掘進效應函數之參數 $\eta$ 分別為 1.023 與 0.6115 3.二維有限元素分析(FEM)模擬有支撐隧道 $\lambda_d=4$ 與 $\lambda_d=0.7$ 彈塑性圍岩收斂位移之結果，經由平移計算、正規化處理、迴歸分析參數和約束損失之預估，可建立不受隧道斷面位置與側向應力比影響之單一化約束損失曲線，此分析程序可適用在實際隧道工程上



表3.1-5 數值分析相關研究內容及主要結論(部分整理自吳秉儒(2002)及林宜亭(2004))(續)

作者	分析工具	組成率	模擬方式	主要結論
Do et al. (2014) (2015) (2016)	有限差分程 式FLAC3D		建立兩條隧道，其中第一條隧道的工作面後面以滯後距離 $L_f$ 開挖第二條隧道，進行開挖分析	1.新建隧道對現有隧道的影響很大 2.通常與大的滯後距離開挖的雙隧道相比，雙隧道的同時開挖引起的結構力和襯砌位移較小。但同時開挖雙隧道可能導致兩條隧道上方更高的沉降
Nematollahi and Dias(2020)	有限差分程 式FLAC3D	Cap-Yield (CYsoil)	建立高50 m，寬116 m，長70 m的土壤，其中包含2條隧道及地下停車場空間	1.在現有雙隧道上方建造地下停車場的情況下，由於牆的向內運動，使得擋土牆後面的水平位移增加。地下停車場的施工在停車場的底部造成了沉重的起伏，並在牆壁下方向下移動。另一方面，地下停車場會引起隧道襯砌的向上運動，同時會降低隧道襯砌中引起的軸向力和彎矩 2.在地下停車場下開挖雙隧道的情況下，可以觀察到該隧道對停車場底部的中心起伏有輕微影響，但在擋土牆下引起相當大的向下沉降。穿過地下停車場下方的雙隧道會在停車場下方產生額外的向下位移，從而導致牆后土壤的向內運動增加。在前後壁上，掘進方向使傾斜於隧道前進的停車牆周圍的土壤產生明顯的橫向位移，從而導致牆體永久變形，

## 3.2 運轉階段

### 3.2.1 襯砌異狀與影響因素探討之相關研究

黃燦輝等人自1997年起歷經10餘年時間，展開一系列之研究計畫，如「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I、II)」(1997)(1998)、「震後隧道結構快速診斷手冊之建立與震後隧道結構快速補強手段」(1999)、「橋梁隧道材料腐蝕劣化原因之探討及防治對策(二)— 隧道篇」(2000)、「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發」(2008)及「隧道補強技術與材料之開發」總結報告書 (2009)等報告，對我國山岳隧道結構安全檢測提供了相當重要的參考資料。

隨後，王泰典等人(2007)以我國隧道為背景，蒐集整理 1990-2006 年間安全檢測作業調查所得的異狀，探討採用磚(石)砌、混凝土與鋼筋混凝土等不同的襯砌材料、以及不同構築方式之隧道所發生的異狀形態。李佳翰等人(2008)則探討鐵路隧道結構安全檢測作業，歸納出襯砌常見的異狀包含：(1) 裂縫或開裂；(2) 剝離或剝落；(3) 滲漏水；(4) 白華；(5) 鋼筋鏽蝕；(6) 變形入侵；(7) 襯砌不良；(8) 空洞等。

對於隧道變形機制與長期穩定等議題，國內也展開一系列的研究，包括「隧道長期穩定影響因素之研究」(王泰典，2010)、「隧道襯砌影像判釋與異狀特徵化技術暨安檢資料庫之開發」(林信宏，2010)、「隧道襯砌異狀肇因診斷與安全評估技術之研究」(王泰典，2013)、「山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究」(李佳翰，2013)以及「營運中隧道變位模態解析與高精度監測技術之研究」(邱雅筑，2014)等。

而李佳翰(2013)以彙整國內外266 個隧道安全檢測與維修補強案例，探討襯砌異狀特性及其肇因的關聯性，提出因應的診斷技術，可以有效地診斷8種肇因引致的襯砌異狀(圖3.2-1)。邱雅筑等人(2012)提出襯砌微變位監測技術，突破山岳隧道精密監測的技術瓶頸。邱雅筑(2014)、Chiu等人(2014)接續提出特徵矩陣法，可以將複雜多變的隧道變位解析為簡單基本變位模態的組合，包括不同方向的平移、旋轉以及不同週期的變形等，提供診斷異狀肇因十分有利的基礎。另外，陳正勳(2011)、陳正勳等人(2011)提出隧道覆蓋與岩體特性的組合強化了震波受地表自由面反射與隧道周壁散射的效應，導致襯砌受震引致應力大幅增加而造成破壞。而襯砌縱向裂縫、環向裂縫或環向施工縫錯動、環狀剝落以及斜向裂縫與剝落等 4 種不同的裂縫顯著類型，主要受到 P波、S 波、R 波與 Love 波自不同方向入射、地盤互層的應變差異以及隧道襯砌結構勁度特性所影響。

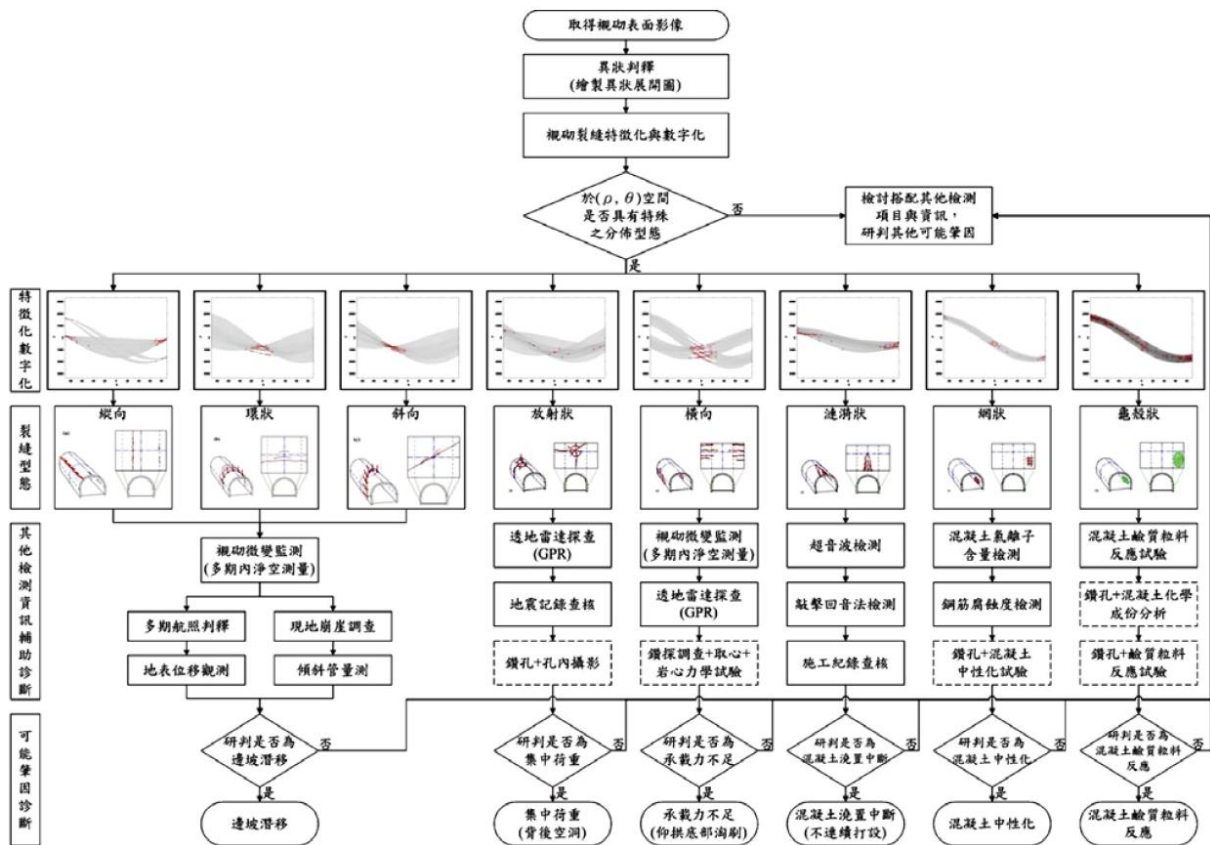


圖3.2-1 隧道襯砌異狀判讀技術(李佳翰, 2013)

### 3.2.2 襯砌結構安全分析技術發展現況

隧道的安全檢測有多種不同的對策與配套的技術，目前以非破壞性檢測技術應用最多。而非破壞性檢測技術依其應用的原理，可分為光學技術(如LiDAR)、導電與電子技術(如超音波、透地雷達與多相線性陣列電磁波雷達)、物理波動技術(敲擊回音法)與放射性技術等類別。

就技術面而言，應用光學原理的檢測技術適用於三維面狀的檢測，在襯砌表面的檢測作業最為適用，可快速獲得隧道全斷面的影像，有效掌握異狀在隧道中的位置，因此為檢查與初期標準檢測的利器。如邱顯晉及林金成(2015)為瞭解營運中隧道整體空間是否滿足電氣化要求及檢測襯砌異狀範圍等課題，應用高解析且快速之主動式3D雷射掃描(GRP5000)探討隧道內空間資訊、襯砌掃描影像判釋等實務技術(如圖3.2-2)，並運用Google Earth 整合應用隧道掃描影像及隧道淨空三維圖資，據以瞭解影響電車線架設之分布區域。

應用物理波動原理、導電與電子學原理的檢測技術，大多數適用於線狀的調查，應用在隧道襯砌三維全面的調查，必須安排縱橫交錯的綿密測線，因難度甚高，且全斷面調查的作業效率遠不及光學技術類的檢測技術，故其勝場在於襯砌完整性以及背後空洞的檢測。應用物理波動技術的敲擊回音法可有效調查襯砌結構內的面狀裂縫、裂隙，而應用導電與電子原理的超音波、透地雷達與多相線性陣列電磁波雷達，則可檢測出襯砌結構內的異狀分布位置。此類檢測若配合測量作業精確的定位施測位置，可有效掌握異狀在隧道中的幾何分布、襯砌結構完整性，有利於後續安全評估作業。蘇兆輝(2014)在其觀音及谷風隧道施工案例中，經由透地雷達探測地下水反應區(如圖3.2-3)，作為隧道導排水之參據，也顯示出透地雷達對隧道結構安全檢測的重要性。



圖3.2-2 隧道雷射掃描3D點雲  
(邱顯晉及林金成，2015)



圖3.2-3 蘇花改工程技術論壇-「觀音隧道  
新建工程」運用透地雷達檢測  
(蘇兆輝，2014)

此外，王泰典等人(2013)針對我國安全檢測與維修補強經驗相對較多的傳統鐵路隧道，基於國內外現行檢測技術、作業規範以及檢測報告，參考最新的研究成果，考量我國地形與地質特性、以及隧道施工方法等，並納入有關公共工程設施維護策略以及全生命週期維護管理等新觀念，研訂鐵路隧道維護管理準則與解說草案，共七章26條，並列舉重要的國內外實際案例與相關技術於20個附錄中，可供參考運用。(該準則章節架構與條文概述如表3.2-1所示)



表3.2-1 我國鐵路隧道維護管理準則與解說(草案)章節架構(王泰典等人, 2013)

章節架構	條文概述	
第一章 總則	1.1 目的	隧道維護管理之首要目的在於確保隧道應有之使用功能，並藉初次檢測、檢查以及檢測等調查方式，充分掌握影響隧道結構安全性與耐久性之異狀，並適時採取適當之處理對策。
	1.2 適用範圍	(1) 本準則為鐵路隧道維護管理之準則與解說，僅適用於鐵路隧道，其他功能隧道不完全適用。 (2) 本準則係以鐵路隧道之使用功能、結構安全與耐久性等需求綜合考量所制定，有關其他設施之功能需求、服務標準、維護管理作業等項目之詳細或特定要求，應視個案隧道之狀況與需求，另行訂定。
	1.3 名詞定義	略。
	1.4 各維護階段定義	鐵路隧道維護管理可概分為初次檢測、檢查與檢測三大階段辦理與執行。
第二章 基本準則	2.1 維護管理原則	(1) 隧道維護管理原則係先考量隧道之功能需求後，再進行維護管理計畫之規劃。 (2) 營運過程中，除定期進行檢查作業外，應視其需要另進行更加詳細之檢測作業。 (3) 依據隧道結構物檢查的結果與安全等級，採取必要的處理對策。 (4) 檢查的結果與處理對策等，應視隧道維護管理之需求項目，採適當的方法進行記錄，做為後續維護管理之依據。
	2.2 維護管理計畫	考慮隧道的維護管理需求，規劃推動隧道檢查作業及對策方法等維護管理計畫。
	2.3 性能要求	就隧道的維護管理需求而言，鐵路隧道需考慮三大性能要求，分別是(1)使用功能性；(2)結構安全性；(3)結構耐久性；後續安全評估之依據亦必須從這三方面來進行安全等級判定。
第三章 初次檢測	3.1 一般說明	「初次檢測」係指隧道結構物開始使用前所進行的檢測作業。對於老舊隧道或已實施維修補強作業的隧道，第一次檢測作業亦可視為初次檢測。
	3.2 檢測項目	「初次檢測」之首要目的在於建立隧道維護作業所需之基本資料庫，包含資料與文獻調查、環境與氣象調查、結構物調查、地形與地質調查等四大類。
	3.3 檢測方法	各項「初次檢測」項目應採用適當的設備與方法進行。其中結構物調查除採用目視方法檢測外，有關視砌及結構體表面初始狀況之檢測作業，得採用光學技術類之隧道視砌影像掃描設備與技術為之，建立隧道全線視砌表面初始影像，以利後續隧道維護、檢查與檢測作業之依據。
第四章 檢查作業	4.1 一般說明	「檢查」之目的在於早期發現隧道異狀，可依據初次檢測成果比對研判。並於發現異狀存在時，概略地評估異狀之影響程度，進而判斷有無實施進一步檢測及修復處理措施之必要性。
	4.2 檢查項目	檢查作業主要針對軌道面、視砌表面、完整性、背面狀態等對象，檢查隧道結構物是否出現異常狀況。
	4.3 檢查方法	主要由檢查員採目視方式，針對檢查項目進行檢查作業，並記錄發現之異狀。
	4.4 等級判定	依據目視檢查結果進行先期安全等級判定，並決定處理對策。
第五章 檢測作業	5.1 一般說明	「檢測作業」之目的在於進一步詳細掌握檢查階段所發現之異狀資訊，判定處理對策之必要性及緊急性，並取得修復設計與施工所需之資料。
	5.2 檢測項目	檢測項目選擇以達成「檢測作業」之目的為原則，除掌握隧道整體狀況外，取得成果應足以進一步探討異狀的原因，研判異狀可能的進展性，提供安全評估及後續維修補強設計等需求。
	5.3 檢測方法	同一檢測項目常可由數種不同方法與技術進行檢測。檢測方法與技術應視「檢測作業」之目的、需求與隧道現場狀況謹慎選擇。
	5.4 安全評估	隧道安全性之要求視隧道種類不同而異，惟皆須滿足 2.3 節有關使用功能性、結構安全性及結構耐久性之要求。安全評估應以「視砌預鑄環片」或「每次混凝土澆置隧道軸向長度」為最小單元，並依據整座隧道評估結果綜合評述。
第六章 建議對策	6.1 一般說明	(1) 「建議對策」為考量隧道構造物的安全等級、重要性及列車運行需求所建議之對策方法與其實施時機。對策的目的在於減緩隧道構造物的性能下降速度，防範事故與災害的發生。 (2) 建議對策包括：緊急措施、長期監測、維修補強、擴挖或改建。或是同時採用多種對策適當地組合。
	6.2 緊急措施	經由 4.4 節檢查作業被評定為第 III 級，或經由 5.4 節檢測作業被判定為 AA 等級的隧道需實施緊急措施處理。
	6.3 長期監測	「長期監測」係基於可為掌握構造物之異狀變異性、發展性並確保隧道安全等目的而建議實施的對策。
	6.4 維修補強	維修補強以維持、回復或提升隧道構造物的性能為目的，需考量隧道檢測作業成果以及構造物的重要性、施工性、施工時期等，規劃實施。
	6.5 擴挖或改建	隧道維修補強對策或營運功能需求若無法符合淨空要求時，則可考量修挖視砌或以擴挖隧道之方式進行維修補強作業。若維修補強已無法使隧道恢復原有結構安全與使用需求時，則必須考量隧道改建方案。
第七章 記錄	7.1 一般說明	隧道初次檢測、檢查作業、檢測作業及相關之維修補強資訊，皆應做適當的記錄並保存，以利永續維護管理作業。
	7.2 記錄項目	需記錄與保存之項目計包括：(1) 檢查及檢測作業結果；(2) 相關安全評估與建議對策；(3) 其他有關構造物維護管理所需項目。
	7.3 紀錄保存	檢查、檢測作業以及建議對策等紀錄，應利用適當的方法保存。

## 第四章、低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討

本章根據台電公司(2017)「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」修訂第二版之第四章「處置設施概念設計與作業規劃」，整理出我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道的型式，並根據國內土木工程與放射性處置建議候選場址調查報告等相關文獻資料，以蒐整數值模型建模所需之大地工程參數。

### 4.1 低放處置建議候選場址概況與處置坑道型式

我國於 101 年 7 月依「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」公告台東縣達仁鄉與金門縣烏坵鄉二處建議候選場址，經濟部與台電公司雖基於政治、社會、環境及輿情等因素，尚未進一步推動選址公投作業，但為了能就我國低放射性廢棄物可能場址條件與坑道型式有所瞭解，藉以提供管制單位後續有關之坑道結構穩定審查重點，故仍先假設以此二處建議候選場址進行分析與比較。

#### 4.1.1 台東縣達仁鄉建議候選場址

根據經濟部低放射性廢棄物最終處置設施場址選擇小組提出的「建議候選場址遴選報告」(經濟部, 2011)，東縣達仁鄉建議候選場址位於達仁溪及塔瓦溪間，為丘陵地地形，地勢由東側海岸逐漸往西部陸地升高，地形坡度約為 30 ~ 80%。其中坡度大於 55% 的區域約佔場址面積 60%；而坡度小於 30% 的區域約佔場址面積的 20%。場址屬丘陵地地形，陵線標高約為 125 公尺至 225 公尺間，為降低對環境衝擊，不會進行大規模開挖整地，並配合洞口臨近海岸之特性，處置場型式採用淺地層坑道式佈置於地下為宜，並於鄰近場址處設置專用接收碼頭，如圖4.1-1所示。

在處置設施的空間配置與重力排水規劃部分，如圖4.1-2(a)所示。處置坑道位於高程 EL 30 m~EL 31.2 m 之間，計 13 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 2 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,938 m。A 類低放射性廢棄物處置坑道岩覆深度大於 62.2 m；B、C 類低放射性廢棄物處置坑道岩覆深度大於 76.4 m。

達仁鄉建議候選場址輔助區，規劃於進出通行隧道之出入口處，需藉由開挖、回填及整地等以達到需求之面積。有關之山坡開挖、回填、擋土、護坡、排水及設置滯洪沉砂池等設施，除需符合水文、降雨強度及道路標準等相關規定外，亦須符合水土保持技術規範之規定。

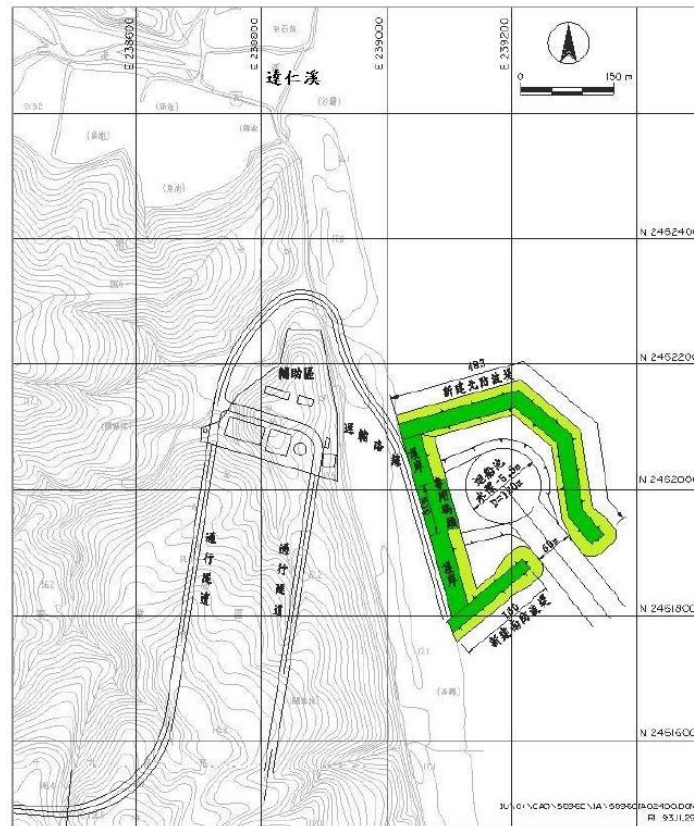


圖4.1-1 台東縣達仁鄉建議候選場址接收港佈置示意圖(經濟部，2011)

在工程障壁部分，考量台東縣達仁鄉建議候選場址為硬頁岩，內含許多地質弱面，為提升坑道與圍岩之安定，整體輪廓將以近似圓形設計。坑道內空斷面則考量到工程障壁之尺寸，以及運轉期間之維護、裝載設備、排水設施所需預留之空間，處置設施所需之淨寬度至少 12.1 m。另依照「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，分別針對 A 類低放射性廢棄物和 B、C 類低放射性廢棄物，設計對應之「多重障壁」系統，如圖4.1-2(b)(c)所示。



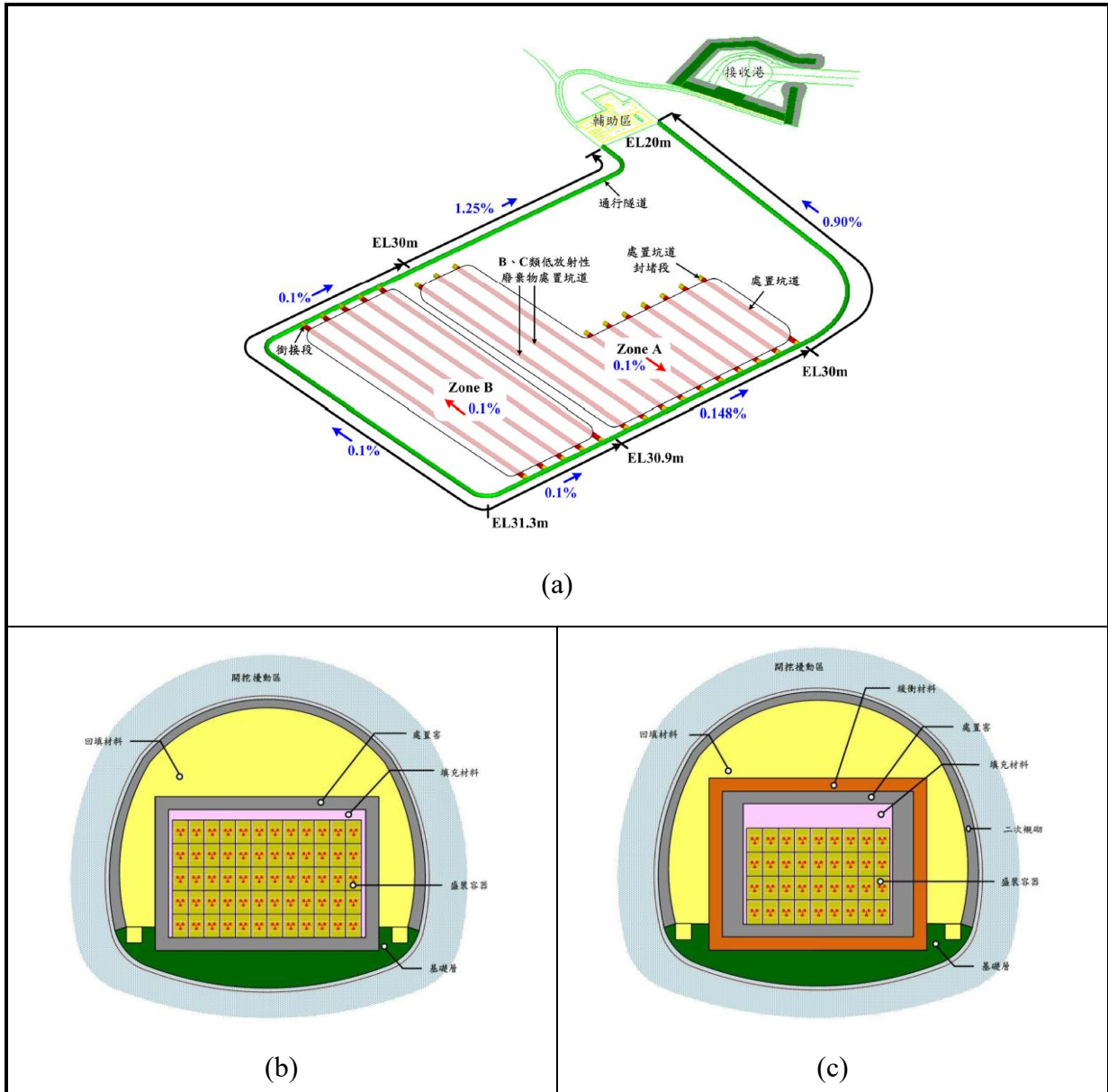


圖4.1-2 台東縣達仁鄉低放處置設施建議候選場址：(a)設施空間配置與重力排水規劃示意圖、(b) A類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計、(c) B、C類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計(台電公司，2017)

#### 4.1.2 金門縣烏坵鄉建議候選場址

在考量小坵場址的島嶼面積、地形、海象、地質及水文等特性，以及廢棄物處置容量、擴充性、施工性、處置場的運轉及封閉等因素後，處置方式採用海床下坑道式處置，處置場的總體佈置概分為處置區、港灣區與輔助區三部分，處置設施的相關空間配置參見圖4.1-3(a)。處置坑道位於高程 EL-99.7 m 至 EL-100 m 之間，共有 34 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 6 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,800 m。處置坑道上方岩覆為 58.8 m~59.0 m。烏坵鄉建議候選場址輔助區規劃於進出通行隧道之出入口附近，需藉由開挖、回填及整地等以達到需求之面積。有關之回填、擋土、護坡、排水及設置滯洪沉砂池等設施，除需符合水文、降雨強度及道路標準等相關規定外，亦須符合水土保持技術規範之規定。

烏坵鄉建議候選場址母岩屬岩性堅實之花崗岩，故坑道斷面採倒 D 型(馬蹄形)設計。坑道內空斷面則考量到工程障壁之尺寸，以及運轉期間之維護、裝載設備、排水設施所需預留之空間，處置設施所需之淨寬度至少 10.7 m。此外，針對 A 類低放射性廢棄物和 B、C 類低放射性廢棄物，設計對應之「多重障壁」系統，如圖4.1-3(b)(c)。其中，針對 B、C 類低放射性廢棄物，因其廢棄物活度較高，故加厚處置窖之厚度，並另外配置緩衝材料，以確保處置設施內，核種傳輸特性可長期維持擴散主導，降低核種藉由平流傳輸而快速釋出之可能性。

依前述整理之處置場型式、地質條件、坑道岩覆深度、坑道數與坑道總長度、坑道斷面及尺寸、坑道間距等資料，綜整達仁與烏坵二處低放處置設施建議候選場址之比較表，詳如表4.1-1所示。

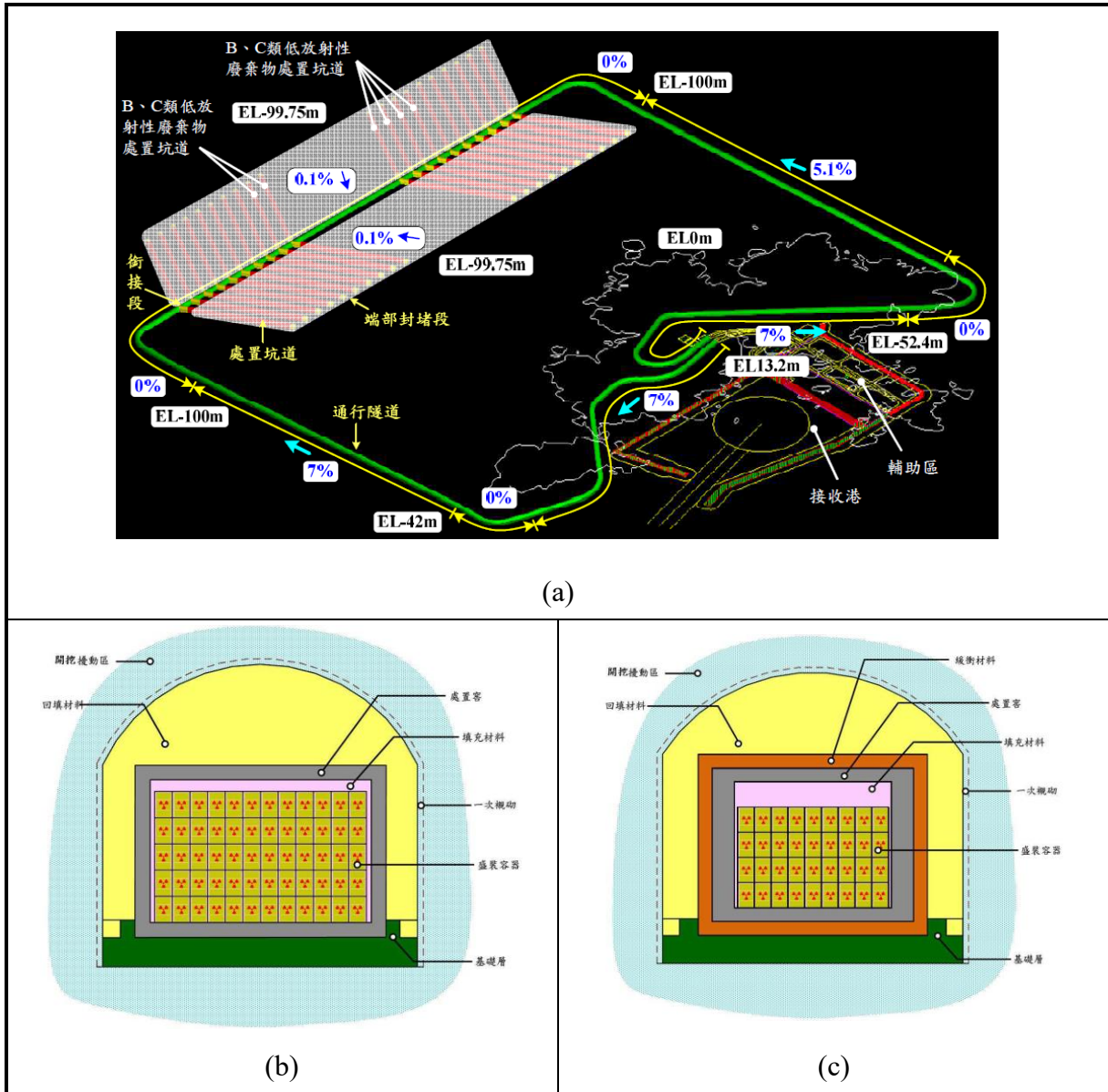


圖4.1-3 金門縣烏坵鄉低放處置設施建議候選場址：(a)設施空間配置與重力排水規劃示意圖、(b) A 類低放射性廢棄物、(c) B、C 類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計 (台電公司，2017)

表4.1-1 我國低放處置設施建議候選場址之比較

設施空間配置示意圖	達仁鄉低放處置設施建議候選場址	烏坵鄉低放處置設施建議候選場址
處置場型式	陸地坑道處置	水下岩床坑道處置
地質條件	硬頁岩，內含許多地質弱面	堅實花崗岩(岩體有偉晶岩脈與基性岩入侵有兩組剪力節理、一組解壓節理)
坑道岩覆深度	A類處置坑道深度 > 62.2 m B、C類處置坑道深度 > 76.4 m	處置坑道上方岩覆為 58.8 m ~ 59.0 m
坑道數與坑道總長度	13 條A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 2 條B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,938 m。	34 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 6 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,800 m。
坑道斷面及尺寸	坑道斷面採圓形設計，寬 8.5 m，高 5.9 m	坑道斷面採倒 D 型(馬蹄形)設計，寬 8.5 m，高 5.9 m
坑道間距	處置設施所需之淨寬度至少 12.1 m	處置設施所需之淨寬度至少 10.7 m

#### 4.2 低放處置建議候選場址現地應力特性

處置坑道位處天然岩體中，進行數值建模時，必須根據現地應力條件，包括垂直應力與水平應力建立其初始應力條件。初始應力主要來自岩體自重及其黏彈性性質、大地應力、地形及地質構造、殘餘應力即水壓力等(黃燦輝，1985)。岩體自重形成坑道垂直應力，大地應力則因地質構造區域特性不同而異，可能使岩體水平壓力大於垂直壓力。大致上，可假設垂直正向應力等於岩覆壓力(Goodman, 1989)，即：

$$\sigma_v = \gamma Z \quad (4.2-1)$$

此外，Brown 與 Hoek (1978)根據採礦與土木工程等現地量測資料，建立深度與垂直應力之回歸關係，分別如圖4.2-1與式(4.2-2)所示，其中  $Z$  為深度(m)，亦即每增加 100 m 岩層覆蓋深度，垂直應力將增加 2.7 MPa。



$$\sigma_v = 0.027Z \text{ (MPa)} \tag{4.2-2}$$

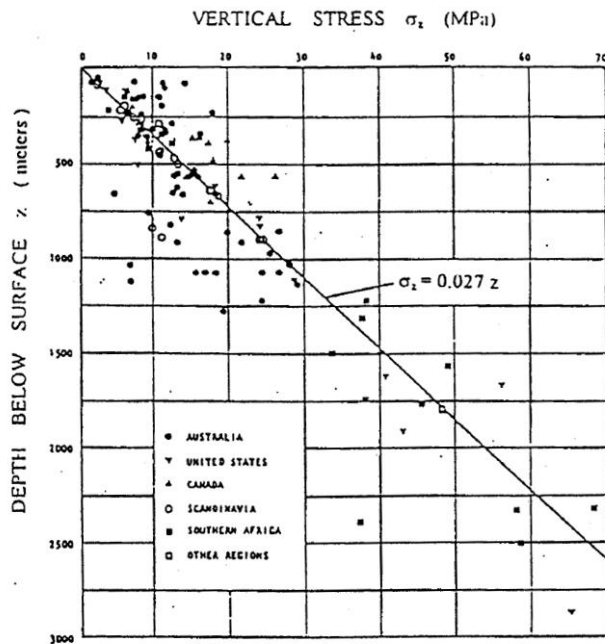


圖4.2-1 垂直應力與深度Z之關係圖(Hoek and Brown, 1980)

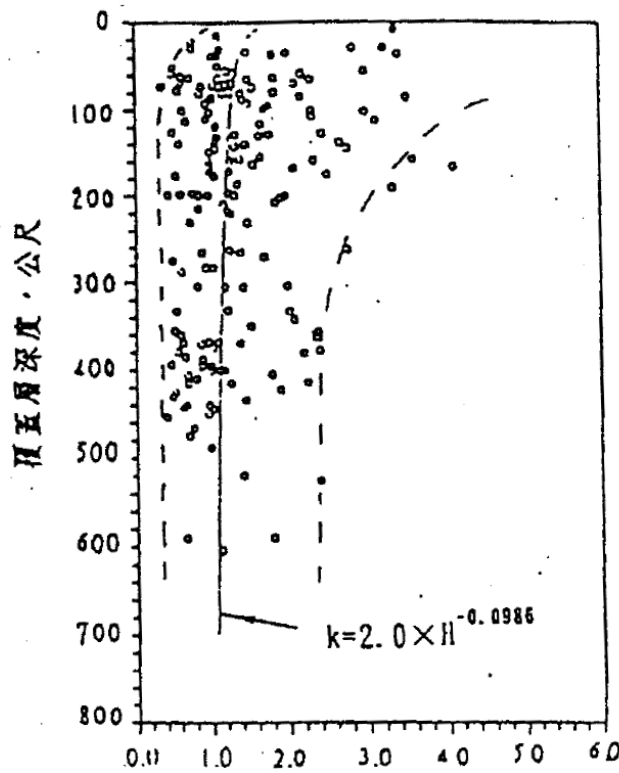


圖4.2-2 側向壓力係數k與深度Z之關係圖(Hoek and Brown, 1978)

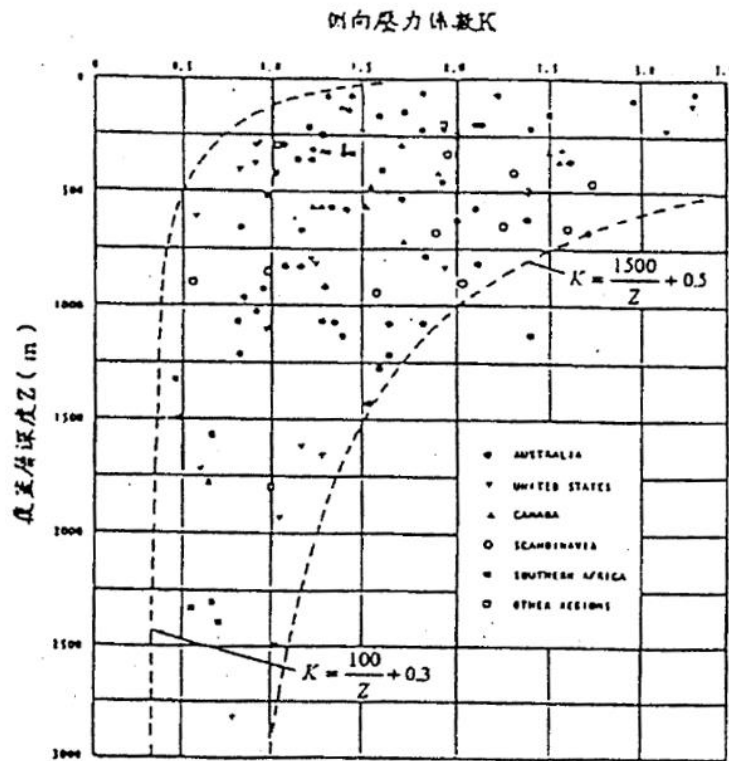


圖4.2-3 台灣中部、東部地區之側向壓力係數k與深度Z之關係圖(鄭寶山等人，1993)

在水平應力部分，其與垂直應力之間存在一比例關係，如式(4.2-3)所示，並將係數 k 定義為水平側壓力係數。有關 k 值的合理範圍，Hoek and Brown (1978) 根據實際量測的現地應力值進行水平側壓力係數與深度 Z 的統計與迴歸分析結果，如圖4.2-2，可得水平側壓力係數 k 與深度的關係如式(4.2-4)所示。

$$\sigma_h = k\sigma_v \quad (4.2-3)$$

$$k = 2.0 \times Z^{-0.0986} \quad (4.2-4)$$

此外，根據鄭寶山(1993)曾針對台灣中部及東部180處隧道的監測資料，整理迴歸出側向壓力係數 k 與深度 Z 關係，如圖4.2-3，可得台灣中部與東部的水平側壓力係數 k 與深度 Z 的關係如式(4.2-5)所示。

$$\frac{100}{Z} + 0.3 \leq k \leq \frac{1500}{Z} + 0.5 \quad (4.2-5)$$



至於台灣離島的現地應力資料部分，楊長義(2015)參考了台電研究報告 SNFD2009 資料，以台電在金門地區深度 157 ~ 430 m 之間四個深度處、採用水力破裂法(hydraulic fracturing)所量測得之四組現地應力值與方向之試驗資料，得知其最大主應力的方向大約位在西北-東南向。並進一步整理最大水平應力( $\sigma_H$ )值之深度(Z)分布，如圖 4.2-4 得知水平向最大主應力 $\sigma_H$ 值(MPa)與深度 Z(m)之關係式約為：

$$\sigma_H = 0.035Z \quad (4.2-6)$$

表示在處置場址，在 Z=157 ~ 430 m 這區間內，深度每往下深 100 m，則其所受水平最大主應力( $\sigma_H$ )約增加 3.5 MPa，即應力梯度為 3.5 MPa / 100 m，另一方面可得知水平向最小主應力( $\sigma_h$ )值(MPa)與深度 Z(m)之關係式約為：

$$\sigma_h = 0.021Z \quad (4.2-7)$$

表示處置場的深度每往下深 100 m，則其所受水平最小主應力( $\sigma_h$ )約增加 2.1 MPa(應力梯度 2.1 MPa / 100 m)。

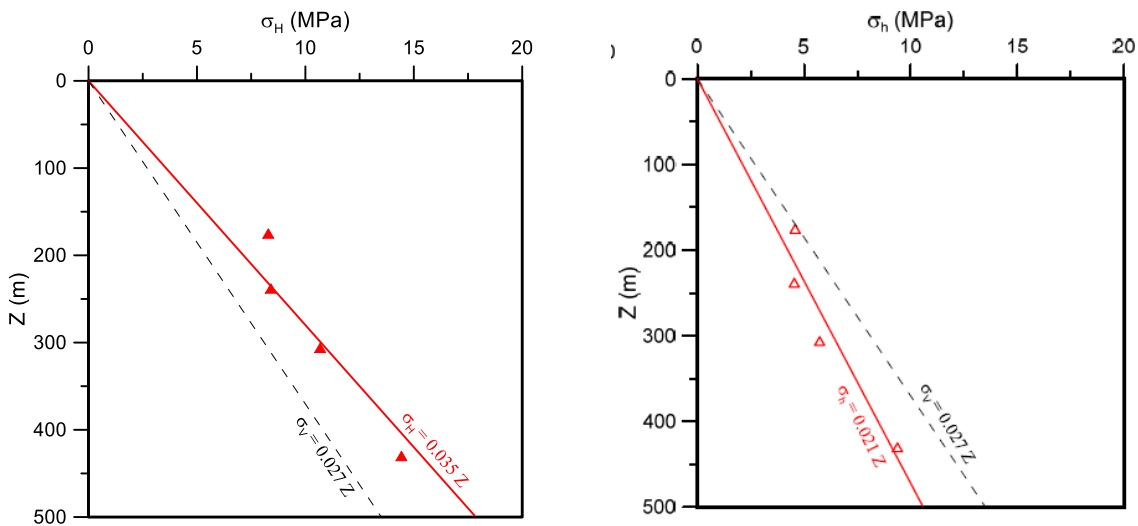


圖4.2-4 金門離島地區水平最大及最小主應力隨深度之分布狀況(楊長義，2015)

根據表 4.1-1，可知達仁鄉低放處置設施建議候選場址之坑道岩覆深度為：(i) A 類處置坑道深度 > 62.2 m；(ii) B、C 類處置坑道深度 > 76.4 m；在烏坵鄉低放處置設施建議候選場址部分，已知處置坑道上方岩覆為 58.8 m ~ 59.0 m。基於後續建立 UDEC 數值

模型所需，初步考量達仁鄉與烏坵鄉二處之坑道岩覆深度分別為 80 m 與 60 m，若根據式(4.2-2)，其垂直應力分別為 2.16 MPa 與 1.62 MPa。

在側向壓力係數部分，達仁鄉低放處置設施位處台灣東部，若依據 Hoek and Brown (1978) 的側向壓力係數  $k$  與深度關係，如式(4.2-4)，可得達仁鄉( $Z = 80$  m) 的側向壓力係數為 1.30；若採鄭寶山(1993)提出之關係式(4.2-5)，其最小值為 1.59；至於烏坵鄉( $Z = 60$  m)，則參考式(4.2-7)，得側向壓力係數至少為 1.26。本子計畫初步僅針對上述二處場址進行初步之開挖模擬分析，故側向壓力係數部分均採 1.3。

### 4.3 低放處置建議候選場址地質與岩石力學特性

#### 4.3.1 台東縣達仁鄉建議候選場址

台東縣達仁鄉建議候選場址係歸屬於中央山脈西翼地質區之脊樑山脈帶，其組成岩石主要是岩性單調的板岩、硬頁岩和千枚岩所成的巨厚岩系。根據地調所五萬分之一之大武(1993年)及恆春(1991年)圖幅，場址區域內出露的岩層為潮州層，其岩性主要由厚塊狀硬頁岩或板岩所組成，僅有少許變質砂岩夾雜其中。硬頁岩由暗灰色或深灰色粉砂質泥岩經輕微變質而來，其內偶夾有薄紋狀細粒砂岩，質地堅緻，有劈理面發育，新鮮時呈灰黑色、塊狀、緻密，風化後表面受鐵銹染成灰褐色，也常出現洋蔥狀剝理構造，如圖 4.2-5(a)。



(a)

(b)

圖4.2-5 台東縣達仁鄉建議候選場址地質露頭：(a)灰黑色硬頁岩偶夾薄層輕變質砂岩露頭與(b)小規模褶皺構造(經濟部，2011)

由於板岩帶內的泥質沉積物有較高的可圍性，而且比較軟弱，經過地殼變動後多形成剪力褶沓，再破裂成一個複雜的斷塊系統。許多複雜的褶皺構造因而出現，如圖 4.2-5(b)，同時亦產生岩石的流動和板劈理，亦造成區域內岩層位態及劈理傾角變化頗為複雜。

經濟部低放射性廢棄物最終處置設施場址選擇小組根據建議候選場址鄰近地區之工程案例資料(經濟部，2011)，已知硬頁岩新鮮岩心的單壓強度範圍平均落在每平方公分 200 至 500 公斤之間，即 19.6 MPa 至 49 MPa 之間，大致屬於中硬岩類。處置場規劃採用坑道掩埋方式，處置場岩覆應多在 100 公尺以上，惟山體北斜面侵蝕溝較發達，研判多沿節理及劈理面隨機發育，局部侵蝕溝發達地點覆蓋可能低於 40 公尺(北通行隧道近尾端)。

南迴鐵路之中央隧道距離台東縣達仁鄉建議候選場址約 6.7 公里，因此可利用南迴鐵路隧道實際工程經驗，推估該場址之地下工程地質特性。本子計畫前期研究「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究」(楊長義與李宏輝，2017)成果報告中，曾根據交通部台灣鐵路管理局「南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告」(交通部台灣鐵路管理局，2008)進行之七座隧道檢測紀錄，整理摘錄安朔隧道之檢測資料，如表 4.3-1 所示，安朔隧道岩性以硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之，里程 36K+419-36K+672.4 公尺處為斷層破碎帶，按 CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類，岩體強度約為 10 至 50 MPa，地下水狀況為輕微滲水至嚴重湧水，主要不連續面為劈理與節理，三組節理位態為 J1=N37°~47°W/89°NE、J2=N69°~84°E/85°SE 及 J3=N33°~43°E/86°SE，二組劈理位態為 C1=N20°E/48°SE 與 C2=N26°W/38°NE。施工期間隧道破壞型式以岩塊墜落、岩塊翻倒與岩層之材料破壞為主。

表4.3-1 安朔隧道地質條件與施工期間破壞型式總表(交通部台灣鐵路管理局，2008)

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
安朔	32k+167~ 32k+262	—	—	—	—	—	—
	32k+262~ 32k+654	硬頁岩為主，少 部分變質砂岩	破碎帶	III~V	20~40	輕微滲水	—
	32k+654~ 33k+848	硬頁岩	—	IV~V	20~50	輕度~ 中度湧水	岩塊墜落 岩塊翻倒 材料破壞
	33k+848~ 34k+033	硬頁岩	—	IV~V	25~40	輕度~ 嚴重湧水	岩塊墜落
	34k+033~ 36k+419	硬頁岩及硬頁岩 與變質砂岩之互 層為主	破碎帶	IV~V	20~40	輕微滲水~ 中度以上湧水	岩塊墜落 材料破壞
	36k+419~ 36k+672.4	斷層泥為主	斷層 破碎帶	III~V	10~40	輕度滲水	岩塊墜落
	36k+672.4~ 37k+650	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國 81 年)

#### 4.3.2 金門縣烏坵鄉建議候選場址

小坵嶼位於長樂南澳斷裂帶東側，構造分區屬平潭—東山變質帶，此變質帶介於平潭島與東山島之間，呈東北—西南向分布，長約 500 公里，寬約 40 ~ 60 公里，馬祖及金門亦皆屬之。本變質帶中出露的花崗岩大多為燕山晚期花崗岩岩漿活動的產物。燕山晚期花崗岩侵入活動多集中在白堊紀，大約在一億二千五百萬年至九千萬年間(125 Ma ~ 90 Ma)，並以淺位侵入的方式，使大量的花崗岩岩基及岩株分布在本變質帶，造成此區受到明顯的熱事件影響，許多花崗岩侵入體周圍，會呈現局部的接觸圈混合岩化現象。小坵嶼基盤以花崗岩岩體為主，其間出露多道中性及基性之侵入岩脈，岩脈之寬度不一，多以高傾角侵入基盤岩中。此外，島上之低地及海岸峽灣處，沉積厚度不大之近代礫石與砂的堆積層，地表局部區域有薄土壤層發育。

小坵嶼地表岩層的分布以花崗岩為主體，閃長岩脈以西北至西北西走向垂直穿插於其間，東龍王南側及一線天東側出露少量南北走向及東北走向之閃長岩脈，中嶼北側閃長岩脈的走向較不規則。閃長岩脈的寬度厚薄不一，小至數公分，大至近 30 公尺，其分布除東龍王及南澳附近較稀疏外，其餘閃長岩脈分布皆密集且平均，岩脈之間距在約 10



至 40 公尺之間。閃長岩類新鮮岩心的單壓強度平均每平方公分 2,139 公斤(209.62 MPa)，花崗岩類平均每平方公分 1,646 公斤(161.3 MPa)。

#### 4.3.3 低放處置建議候選場址處置坑道數值模型之現地應力與岩石力學參數

本節根據前述台東達仁鄉與金門烏坵鄉低放射性廢棄物潛在處置場址之地質與岩石力學特性，依岩覆深度、垂直與水平應力、岩石與岩體力學參數等資料整理於表4.3-2，以作為後續建立我國低放射性廢棄物處置坑道數值模型之參考。

在達仁鄉建議候選場址部分，係考慮岩覆深度 80 m，並參考自「南迴線金崙等七座隧道安全檢查評估報告」(交通部台灣鐵路管理局，2008)，假設岩體分類分別為III、IV、V類條件下，根據岩體評分計算岩體變形模數(Em)。在烏坵鄉建議候選場址部分，則考慮岩覆深度 60 m，並根據「建議候選場址遴選報告」(經濟部，2011)與「模擬裂隙損傷區對母岩受熱應力與外力作用之耦合效應研究(I)」(楊長義，2014)，以單壓強度及彈性模數平均值分別為 138.13 MPa 與 51 GPa，為後續數值分析所需材料參數。

表4.3-2 我國低放射性廢棄物潛在處置場址之現地應力與岩石力學參數

	達仁場址	烏坵場址
岩覆深度(m)	80	60
垂直應力(MPa)	2.16	1.62
水平應力(MPa)	2.80	1.26~2.10
側向壓力係數 k	1.30	1.26~2.10
UCS(MPa)	19.6 ~ 49 <sup>註1</sup>	209.62(閃長岩類) <sup>註1</sup> 161.3(花崗岩類) <sup>註1</sup> 平均值138.13 <sup>註2</sup>
E(GPa)	-	平均值51 <sup>註2</sup>
岩體分類	III、IV、V <sup>註3</sup>	-
岩體力學參數參考依據	Em (GPa) = 2RMR-100 (RMR > 55) Em (GPa) = 10(RMR-10)/40 (10 < RMR < 50)	-

註1：參考自「建議候選場址遴選報告」(經濟部，2011)

註2：參考自「模擬裂隙損傷區對母岩受熱應力與外力作用之耦合效應研究(I)」(楊長義，2014)

註3：參考自「南迴線金崙等七座隧道安全檢查評估報告」(交通部台灣鐵路管理局，2008)

## 4.4 UDEC 分析軟體介紹

### 4.4.1 UDEC發展沿革

UDEC程式起源於美國ITASCA Consulting Group Inc.於1980年研發，主要針對岩盤工程需求所研發之數值分析軟體，其應用範圍包含地下開挖、邊坡岩層的破壞、節理或其他不連續面之工程影響與評估行為之研究。UDEC是根據分離元素法(distinct element method)及Lagrangian calculation scheme 所撰寫而成的數值分析軟體。其中分離元素法是為解決不連續問題而發展出來的數值分析法，適合分析具有不連續面材料之力學行為。

Cundall(1989)為離散元素法定義以下條件：

- 允許塊體產生有限位移及旋轉，包含各塊體間完全分離。
- 程式於運算過程中，能自動辨別新的接觸點，並能消去分離之接觸點。

以 UDEC 離散元素分析軟體為例，程式將岩體視為許多完整岩塊所組成，完整岩塊間之接觸面為邊界；岩體中完整岩塊的材料可被模擬成剛性體(rigid body)及可變形體(deformable body)。模擬可變形完整岩塊時，完整岩塊被分割成許多有限差分網格，每個網格配合所選用的材料組成率計算完整岩塊的受力後應力分布情形。節理之模擬主要是根據力—位移之定律(force-displacement law)，計算完整岩塊於節理面上之正向應力與剪向應力，作為模擬過程中完整岩塊之邊界條件，因此可模擬完整岩塊的大量位移及轉動情形。綜上，以 UDEC 離散元素分析軟體進行數值分析時，需注意幾件事項：

- (1) 離散元素法係指藉由節理面切割成許多岩塊所組成之完整岩體，各岩塊具有處於靜態或動態條件下均能產生有限的位移及旋轉，包含各塊體間完全分離之運算。
- (2) 岩塊的材料可模擬成剛性體(rigid body)及可變形體(deformable body)。
- (3) 模擬可變形體時，各岩塊將被分割成許多有限差分網格，每個網格配合所選用的材料組成律計算受力後應力分布情形。
- (4) 節理行為之模擬主要是根據力—位移之定律(force-displacement law)，計算岩塊四週於節理面上之正向應力與剪應力，透過公式推算新的邊界力值；其接觸行為可區分為剛性接觸或軟性接觸兩種，軟性接觸考慮能量在個體間傳遞消耗，允許個體變形，其接觸方式以接觸勁度來表示力與位移之關係，剛性接觸則假設個體本身為剛性體，且運動期間無能量之損耗。



#### 4.4.2 UDEC程式理論

UDEC運算原理是以接觸之力—位移定律(Force - Displacement Law)與牛頓第二運動定律(Newton's Second Law)交替應用而成。由已知作用力透過牛頓第二定律推算塊體運動速度與位移，再由力—位移定律計算不連續面之新的接觸力做為下一時階(Time Step)塊體邊界外力。就剛性塊體而言，時階的大小由塊體的質量與不連續面之勁度推算；而可變形塊體，則採用區域尺寸及完整岩石模數與接觸勁度之系統勁度來決定。時階運算流程如圖4.4-1所示。

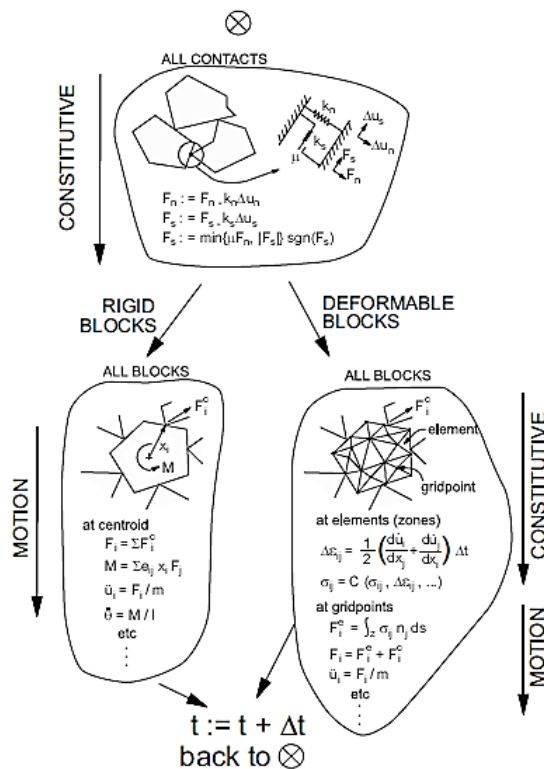


圖4.4-1 UDEC程式時階運算流程(ITASCA, 2014)

#### 4.4.3 UDEC岩體材料行為及組成律

UDEC程式模擬岩體材料可區分為剛性體或可變形體，在低應力狀況下，岩體破壞主要是由滑動或轉動所造成，此時可選擇剛性之完整岩塊材料模式；高應力的狀況下，可選擇可變形體材料模式來分析。岩體材料行為與不同之組成模式分述如下：

(1) 岩體材料行為

- a. 剛性塊體：由輸入之外力值計算剛性中心點之合力與合力矩，再依據運動定律求出剛性塊體之加速度與旋轉加速度，如此即可決定下一時階中剛體之運動行為。
- b. 可變形塊體：由輸入之塊體外力值，依 UDEC 內部系統設定之三角形固定應變有限

差分區間(Zone) 以及給定之塊體組合率，即可求得新的應力—應變行為，接著求得新的應力—應變行為下塊體的合力與加速度，即可決定下一時階中可變形塊體之運動行為。

(2) 常用之可變形塊體材料組成模式摘述如下(可用模式詳如表4.4-1)

- a. 零效(Null)模式：此指令可以將特定區間設定為零效材料，表示此區間之材料應力自動設為零，可模擬開挖行為，亦可由後續的指令設定不同的模式，以模擬回填行為。
- b. 彈性等向性(Elastic isotropic)模式：此模式為最簡單的材料行為，只適用在均質、均向且為連續體之材料其應力—應變行為在加載與解壓過程中均為線性關係。應變增量與應力增量是依據線性的虎克定律。
- c. Drucker-Prager 塑性模式：此模式為一般材料組合律常見之破壞準則，是由兩個函數所組成。包括降伏準則和塑性流準則。
- d. Mohr-Coulomb 塑性模式：此為傳統土壤力學和岩石力學所使用之塑性模式，僅代表材料受剪降伏之謂。這模式中的降伏應力只考慮到最大主應力與最小主應力的組合，並無考慮到中間主應力的影響。
- e. 應變軟化/硬化模式(Strain softening/hardening model)：此模式可模擬任何非線性材料之軟化或硬化行為。
- f. 遍佈節理模式(Ubiquitous joint model)：此模式為異向塑性模式，具有一系列的滑動平面夾雜在實體中。降伏可能發生在實體部分，亦可能沿著滑動面產生。
- g. 雙重降伏模式(Double-yield model)：此模式除了參考 Mohr-Coulomb 準則外，並提供了第二個降伏準則，以考慮輕微膠結之顆粒材料的體積壓縮不可回復性。

此七種塊體組合模式之適用代表性材料及可能之應用範圍。彈性塊體模式適用於當滑動明顯沿著不連續面發生時，而完整岩體之破壞分析可採用 Mohr-Coulomb 模式，其所需之參數 $C$ 、 $\phi$ 值，相對於其他模式之參數而言，是最普遍也是最易取得者。在所有 UDEC 提供之塑性模式中，以 Mohr-Coulomb 模式在運算上最有效率，其他模式可能需要較長的執行時間或較大的記憶體空間。

表4.4-1 UDEC材料組成模式(ITASCA, 2014)

模式	適用材料	應用範圍
Null	沒有材料存在之孔隙、孔洞	模擬孔洞與開挖問題，可在往後階段重新填入材料
Elastic	均質、等向性連續體；線性應力-應變行為	節理岩體中，當塊體強度遠高於節理強度時；可計算安全係數
Transversely isotropic elastic	薄層壓實材料 (laminated material)，例如板岩(slate)	未超過極限強度之薄層壓實材料
Drucker-Prager plasticity	應用有限；低摩擦角之軟弱黏土	常見於有限元素分析軟體之材料模式
Mohr-Coulomb plasticity	疏鬆及膠結粒狀材料；土壤、岩石、混凝土	一般土壤、岩石之行為機制(如邊坡穩定分析或地下開挖)
Strain – hardening/softening Mohr-Coulomb	具非線性應變硬化或軟化之粒狀材料	材料峰後行為之研究，例如漸進式破壞、礦柱降伏分析
Ubiquitous-joint	薄層壓實且具強度異向性之材料，例如頁岩	在密集成層材料中開挖
Bilinear strain-hardening/softening ubiquitous-joint	具非線性應變硬化或軟化之薄層壓實材料	薄層壓實材料之峰後行為
Double - yield	因壓力而造成永久體積縮小之輕微膠結粒狀材料	水力填築與土壩回填土石之評估
Modified Cam-clay	變形性與剪力強度與體積變化有關之材料	於黏土層中進行大地工程相關建設
Hoek-Brown plasticity	等向性岩石材料	於岩層中進行大地工程相關建設
Modified Hoek-Brown plasticity	等向性岩石材料	於岩層中進行大地工程相關建設，且可計算安全係數
Cysoil (cap-yield)	勁度隨著塑性變形的發展而呈現遞減之土壤	於軟弱土層中進行大地工程相關建設
Chsoil	Cysoil之簡化模式，用以模擬具雙曲線之應力應變行為	於軟弱土層中進行大地工程相關建設

#### 4.4.4 UDEC節理面之力學行為及組成律

UDEC程式對於節理面力學行為是假設兩個完整岩塊間的接觸面上存有許多接觸點 (Contact Point)，其接觸方式可區分為剛性體及可變形體兩種，剛性體是採用角對邊 (Corner to Edge) 或角對角 (Corner to Corner) 的接觸方式，如圖4.4-2(a)、(b)所示；可變形體則為接觸邊上所有的網格點 (Gridpoints) 作為接觸點，網格越小時接觸點越多。

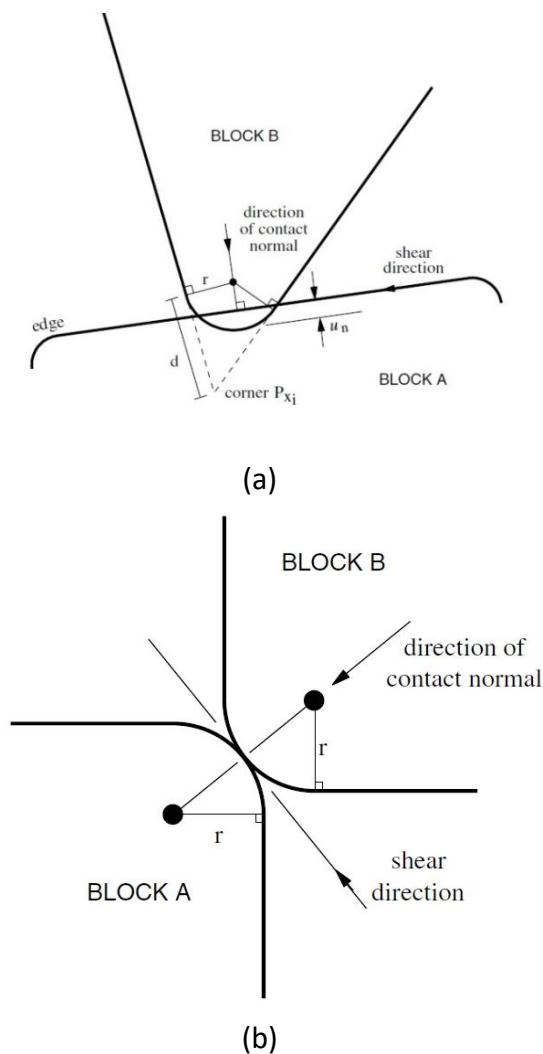
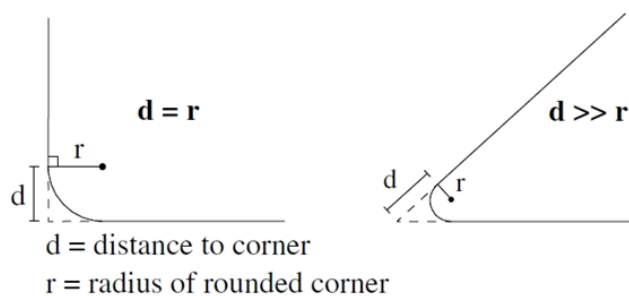


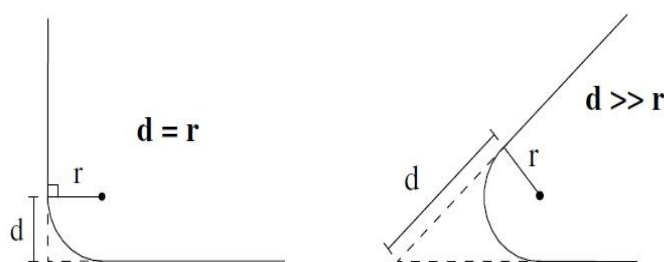
圖4.4-2 節理接觸方式:(a)角對邊接觸方式(b)角對角接觸方式(ITASCA, 2014)

節理面彼此間的接觸狀態直接影響其力學行為，因此UDEEC程式對節理面作了下列三種假設：

- (1) 由於UDEEC 程式模擬完整岩塊時，常因為岩塊角隅過於尖銳而在角隅發生應力集中現象，因此UDEEC 程式採用圓角方式以改正此現象，使岩塊能平順的滑過另一岩塊，其圓角方式如圖4.4-3(a)、(b)所示，以一定量邊長為修角基準，其圓角化之數值大小會影響計算的精確度及計算所花時間，通常取岩塊平均邊長的1%。
- (2) 岩塊滑動時，當接觸面上之網格點相對剪切位移量超過圓角化長度的兩倍，UDEEC程式將自動更新接觸點以利模擬完整岩塊滑動情形，此方法將有助於動態的分析及模擬，其更新的方式是當完整岩塊滑動時，3DEC程式更新功能自動產生新接觸點，刪除舊接觸點，並將舊接觸點上所存放資料完全轉移一新接觸點上。
- (3) 3DEC程式於接觸面上之正向應力及剪應力計算方式是以網格點彼此間一半長度作為計算數值，如圖4.4-4所示。



(a)



(b)

圖4.4-3 UDEEC圓角化示意圖:(a)使用定量之邊長、(b)使用定量之半徑  
(ITASCA, 2014)

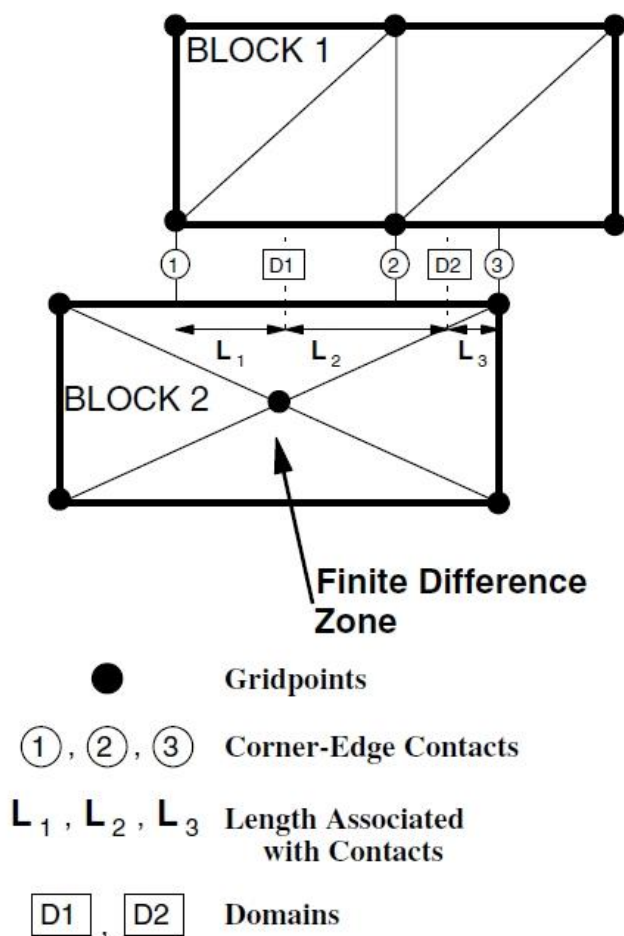


圖4.4-4 邊對邊接觸點之定義(ITASCA, 2014)

UDEC 程式共有五種節理材料組成模式，其中大部分是依據庫倫滑動定律(Coulomb Slip Law)發展而成，以下介紹這些模式基本假設及其特性：

(1) 點接觸庫倫滑動模式(Joint point contact model)：

用於當兩塊體接觸面積遠小於塊體面積時所使用之模式；適用於模擬顆粒材料、不規則形狀岩塊組成之岩體模型。

(2) 面接觸庫倫滑動模式(Joint area contact model)：

用於塊體與塊體為面接觸且緊密結合時，並依據岩石節理之彈性勁度、摩擦角、凝聚力及張力強度等參數，再配合膨脹特性提供一線性節理勁度及降伏極限之行為；適用於觀察模擬存有節理面、斷層及層面之岩體模型。

(3) 面接觸位移弱化模式(Area contact with displacement-weakening model)：



用於當節理面發生剪力或張裂破壞時，將失去凝聚力及張力強度之情況；適用於觀察節理面具有明顯之尖峰強度及殘餘強度時。

(4) 連續降伏模式(Continuously-yielding model)：

用於模擬節理達到尖峰剪力強度後之持續軟化行為；適用於節理面具有逐漸破壞及遲滯行為時。

(5) 非線性之節理行為模式(Barton-Bandis model)

由於此五種模式中Barton-Bandis 模式及持續降伏模式均須要進行多種岩石力學試驗後，取得詳細的節理面資料方能進行，因此簡易庫倫滑動模式較常被使用，此五種模式所適用之地質材料及研究範圍如表4.3-2 所示。

表4.4-2 UDEC節理組成模式(ITASCA, 2014)

模式	適用材料	應用範圍
Point contact	應用有限；顆粒狀材料、疏鬆壓實之不規則塊體	高度擾動、破碎之岩石邊坡穩定分析
Area contact	存在於岩石中的節理、斷層與層面	一般的岩石力學問題，例如地下開挖工程
Area contact with displacement weakening	具不同的尖峰與殘餘剪力強度之岩石節理面	一般的岩石力學問題
Continuously yield	具漸進式損傷與遲滯行為(hysteretic behavior)之岩石節理面	具主要滯後迴圈(predominant hysteretic loop)現象之循環載重與更迭載重(load reversal)、動態分析之問題
Barton-Bandis	Barton-Bandis 之節理力學模式之岩石節理面	水利內寬(hydraulic apertures)之分析與評估

## 4.5 我國處置坑道數值模型之建置與坑道結構穩定性分析

為盤點及檢核前述蒐整之數值模型相關資訊與參數，與潛在處置場址之岩石力學性質對處置坑道開挖，及坑道結構穩定性之影響能有一初步瞭解，本節分別針對達仁場址及烏坵場址進行處置坑道開挖模擬與分析。於達仁場址部分，分別考慮了第III、IV、V類岩體分類，及是否具一次襯砌(初期支撐)之坑道結構條件；烏坵場址部分，僅根據台灣電力公司用過核子燃料最終處置計畫書(SNFD, 2014)所列k區岩石力學特性，及「模擬裂隙損傷區對母岩受熱應力與外力作用之耦合效應研究(I)」(楊長義, 2014)蒐整之岩石力學特性，並在不考慮裂隙與地質弱面條件下進行初步的模擬分析。

### 4.5.1 UDEC 數值模型建置與初始應力狀態檢核

依表4.1-1整理之坑道岩覆深度、坑道斷面形狀及尺寸等資訊，分別建立達仁鄉與烏坵鄉建議候選場址之低放射性廢棄物處置坑道 UDEC 數值模型。所採用的坑道斷面形狀與尺寸詳如圖4.5-1，數值尺寸與邊界條件詳如圖4.5-2與圖4.5-3，茲分項說明如后：

- (1) 模型建置與分析程序，區分(i)設定邊界幾何條件與預設坑道斷面形狀與尺寸、(ii)設定網格，並依選定的材料模式給定材料參數、(iii)設定邊界條件、(iv)大地應力平衡並檢核初始應力狀態、(v)開挖模擬分析。
- (2) 屬A類低放射性處置窖之坑道斷面尺寸為寬約 8.5 m、高約 5.9 m，屬B、C類低放射性處置窖之坑道斷面尺寸為寬約 7.2 m、高約 5.5 m。
- (3) 達仁鄉建議候選場址之坑道斷面形狀為近似圓形，於 UDEC 數值模型中採具不同展開弧度之四心圓構成坑道斷面，且為有一次襯砌(初期支撐)之坑道結構；烏坵鄉建議候選場址之坑道斷面形狀為倒D形(馬蹄形)，於 UDEC 數值模型中採半圓與矩形幾何形狀構成坑道斷面，且為無襯砌之坑道結構。
- (4) 在 UDEC 數值模型尺寸與邊界條件部分，所採數值模型尺寸為 100 m × 100 m，模擬之坑道斷面中心點位於模型中央，其距離邊界至少為坑道半徑之 10 倍以上，以避免邊界條件影響分析結果。在岩覆深度部分，達仁鄉與烏坵鄉建議候選場址之坑道岩覆深度分別為 80 m 與 60 m，並假設岩石單位重為 2700 kg/m<sup>3</sup>，側向壓力係數為 1.3 之條件下，計算 UDEC 數值模型中所需施加垂直向與水平向應力，詳如圖4.5-2與圖4.5-3所示。

(5) 經大地應力平衡後，根據表4.5-1所列不同深度條件下之垂直應力與水平應力，檢核數值模型之初始應力狀態，詳圖4.5-4，均符合表4.5-1所列數值。

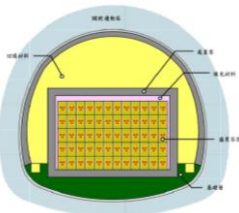
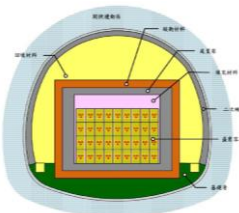
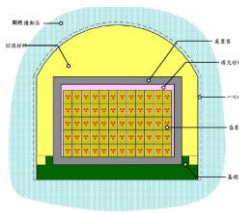
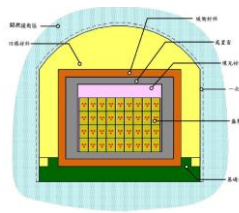
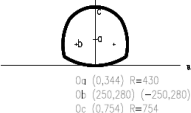
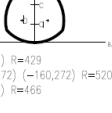
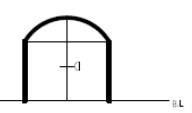
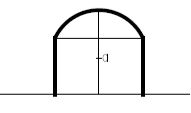
	達仁場址 A 類處置坑道	達仁場址 B、C 類處置坑道	烏坵場址 A 類處置坑道	烏坵場址 B、C 類處置坑道
坑道 斷面 形狀 與 尺寸	 <p>寬約為 8.5 m                      高約為 5.9 m                      深度為 16 m</p>	 <p>寬約為 7.2 m                      高約為 5.5 m                      深度為 16 m</p>	 <p>寬約為 8.5 m                      高約為 5.9 m                      深度為 16 m</p>	 <p>寬約為 7.2 m                      高約為 5.5 m                      深度為 16 m</p>
U D E C 數 值 模 型 之 坑 道 斷 面 形 狀 與 尺 寸	 <p> <math>D_a(0,344) R=430</math>  <math>D_b(250,280) (-250,280) R=675</math>  <math>D_c(0,754) R=794</math> </p> <p> <math>105^\circ(342.8,603.79)</math> 半徑 430.0000                      傾角 傾角 37.25                      縱向 縱向 142.75                      橫向 橫向 791.7410                 </p> <p> <math>105^\circ(342.8,603.79)</math> 半徑 675.0000                      傾角 傾角 346.14                      縱向 縱向 28.66                      橫向 橫向 500.9664                 </p> <p> <math>42.5^\circ(250,280)</math> 半徑 675.0000                      傾角 傾角 151.34                      縱向 縱向 193.86                      橫向 橫向 500.9664                 </p> <p> <math>65.2^\circ(0,753.5)</math> 半徑 753.5000                      傾角 傾角 237.36                      縱向 縱向 202.64                      橫向 橫向 858.5169                 </p>	 <p> <math>O_a(0,232) R=429</math>  <math>O_b(160,272) (-160,272) R=520</math>  <math>O_c(0,466) R=466</math> </p> <p> <math>71.9^\circ(269.85,565.71)</math> 半徑 428.9700                      傾角 傾角 51.02                      縱向 縱向 128.98                      橫向 橫向 583.7025                 </p> <p> <math>147^\circ(346.5,154.55)</math> 半徑 520.0000                      傾角 傾角 346.92                      縱向 縱向 34.49                      橫向 橫向 431.7897                 </p> <p> <math>147^\circ(346.5,154.55)</math> 半徑 520.0000                      傾角 傾角 145.51                      縱向 縱向 193.08                      橫向 橫向 431.7897                 </p> <p> <math>147^\circ(460,272.25)</math> 半徑 520.0000                      傾角 傾角 460.27225                      縱向 縱向 193.08                      橫向 橫向 431.7897                 </p> <p> <math>36.1^\circ(0,465.71)</math> 半徑 465.7100                      傾角 傾角 221.92                      縱向 縱向 318.06                      橫向 橫向 781.5443                 </p>	 <p> <math>O_a(0,296) R=420</math> </p> <p> <math>118^\circ(360,512.26)</math> 半徑 420.0000                      傾角 傾角 31.00                      縱向 縱向 149.00                      橫向 橫向 864.9453                 </p>	 <p> <math>O_a(0,352) R=470</math> </p> <p> <math>36.9^\circ(425.7,551)</math> 半徑 470.0000                      傾角 傾角 25.08                      縱向 縱向 154.92                      橫向 橫向 1065.1392                 </p>

圖4.5-1 我國處置坑道 UDEC 數值模型之坑道斷面形狀與各部位尺寸

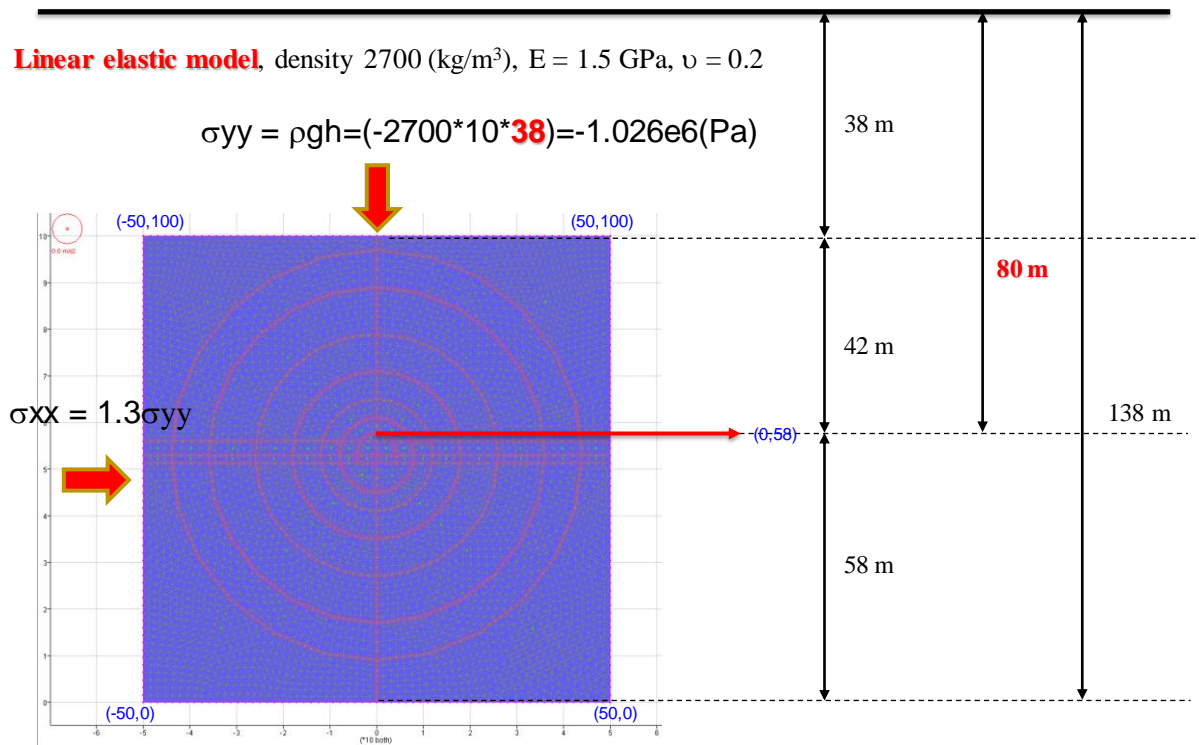


圖4.5-2 達仁場址之UDEC數值模型尺寸與邊界條件

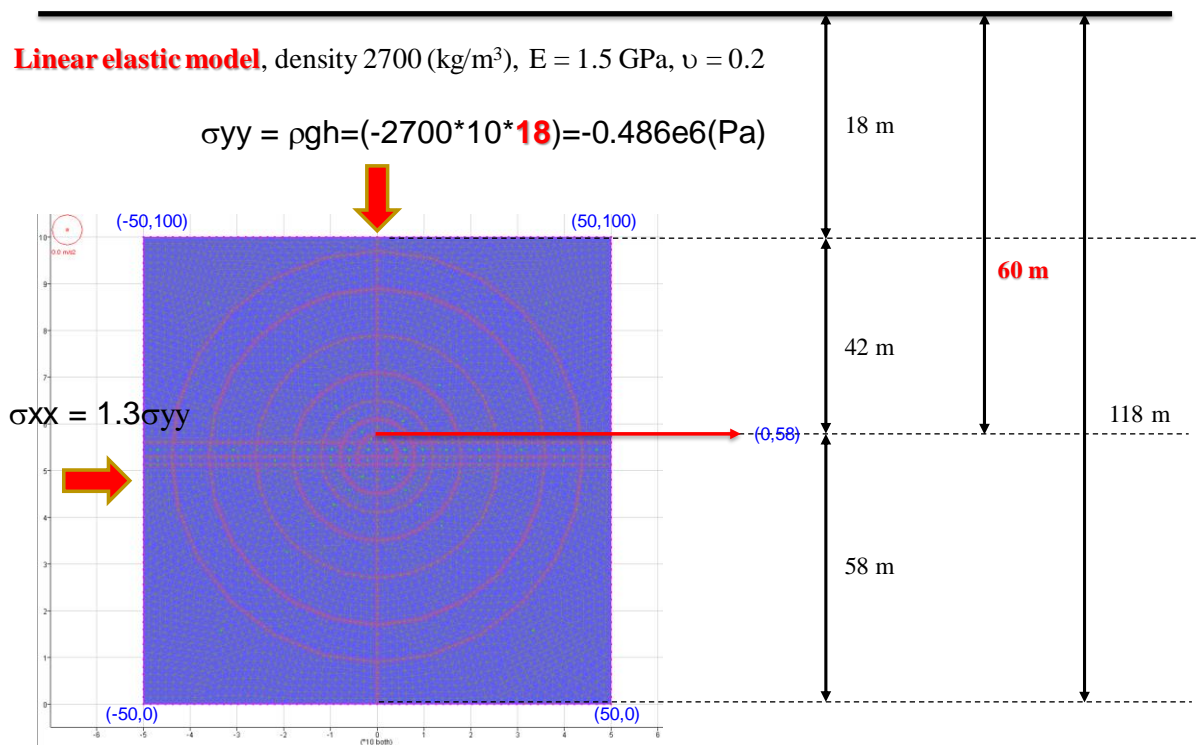
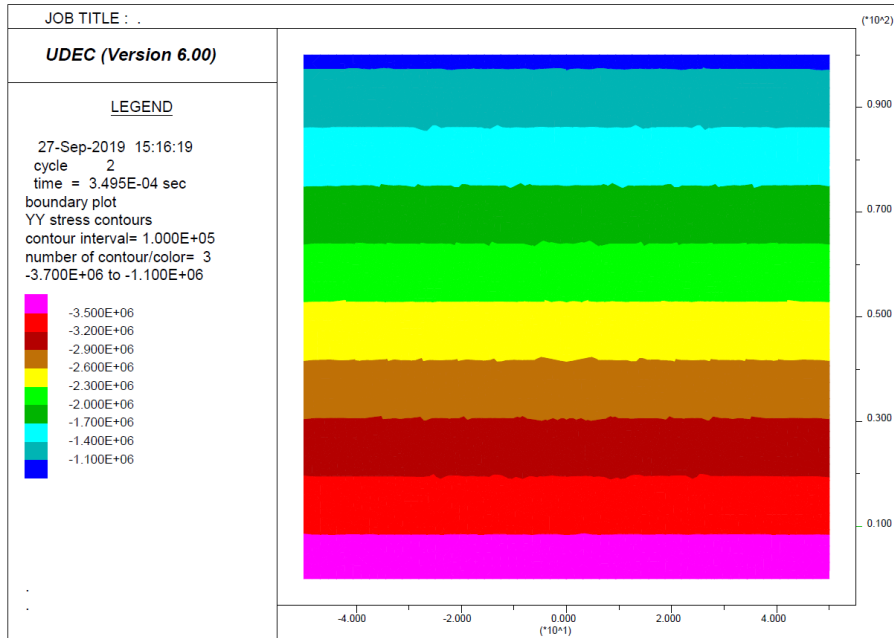


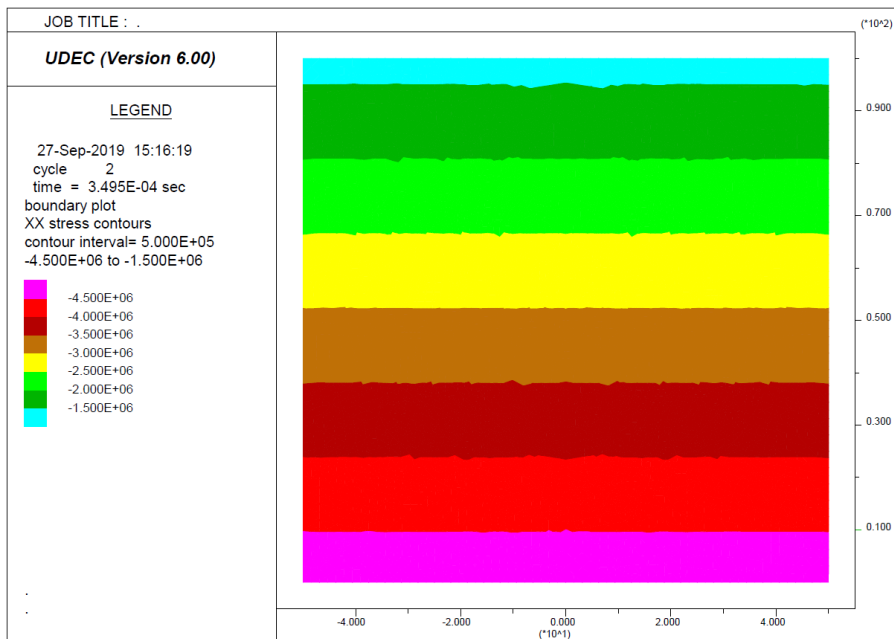
圖4.5-3 烏坵場址之UDEC數值模型尺寸與邊界條件

表4.5-1 不同深度條件下之垂直應力與水平應力

Depth(m)	$\sigma_v(\text{Pa})$	k	$\sigma_h(\text{Pa})$
38	1.03E+06	1.3	1.33E+06
80	2.16E+06	1.3	2.81E+06
138	3.73E+06	1.3	4.84E+06



(a)



(b)

圖4.5-4 UDEC數值模型初始應力狀態：(a)垂直應力與(b)水平應力等高線分布圖

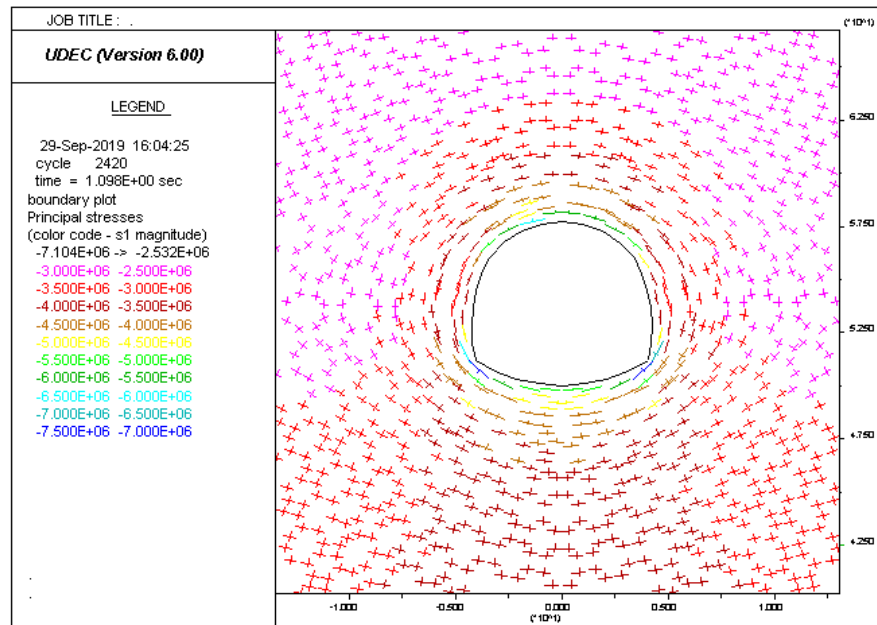


### 4.5.2 線彈性材料模式條件下之坑道開挖分析

為能瞭解不同的岩體分類結果及其對應的岩石力學參數(詳如表4.5-2)，對坑道開挖之應力分布與斷面變形之影響，本研究初步以達仁場址之 A 類低放射性廢棄物處置窖，假定在 RMR 岩體評分第 V 類岩體參數之條件下進行線彈性模式開挖分析，其主應力分布、水平向位移等高線與垂直向位移等高線之模擬結果詳圖4.5-5，坑道開挖引致斷面變形，包括頂拱、仰拱與側壁之變位，則詳圖4.5-6。

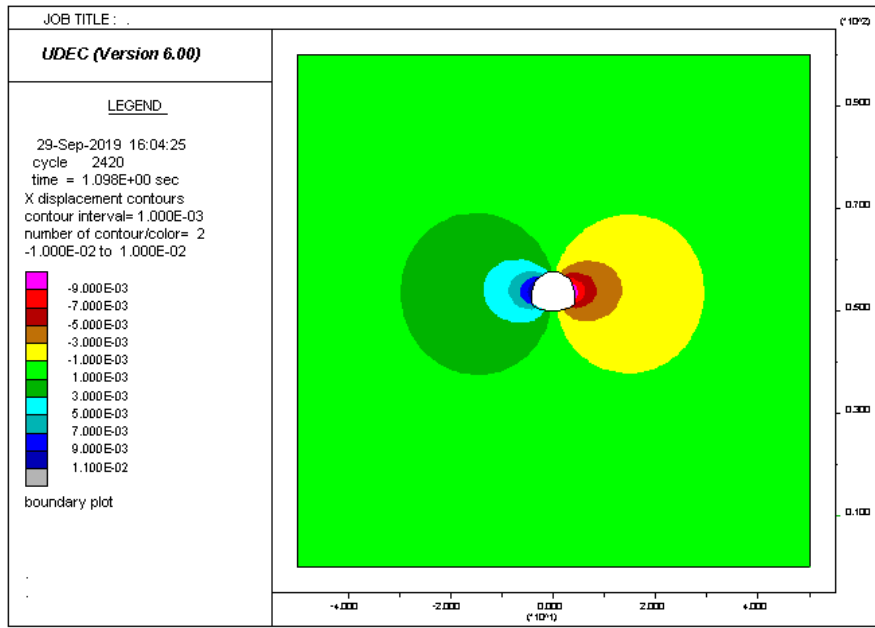
表4.5-2 不同的岩體分類結果及其對應的岩石力學參數

Q	RMR	RMR 分類	Em(GPa)	$\nu$
0.05	17.04	V	1.50	0.20
0.1	23.28	IV	2.15	0.20
1	44.00	III	7.08	0.20
10	64.72	II	29.45	0.20
100	85.45	I	70.89	0.20
1000	106.17	I	112.34	0.20

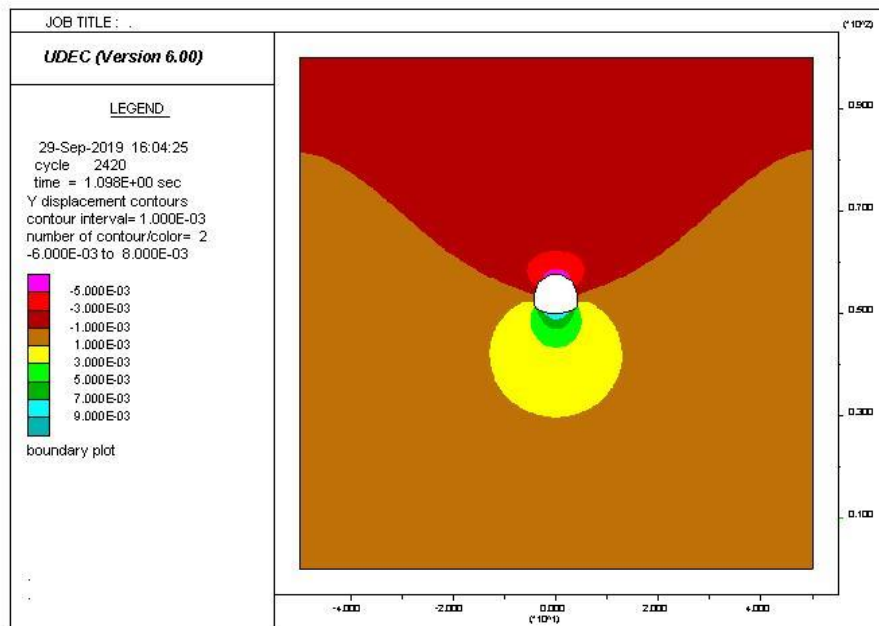


(a)



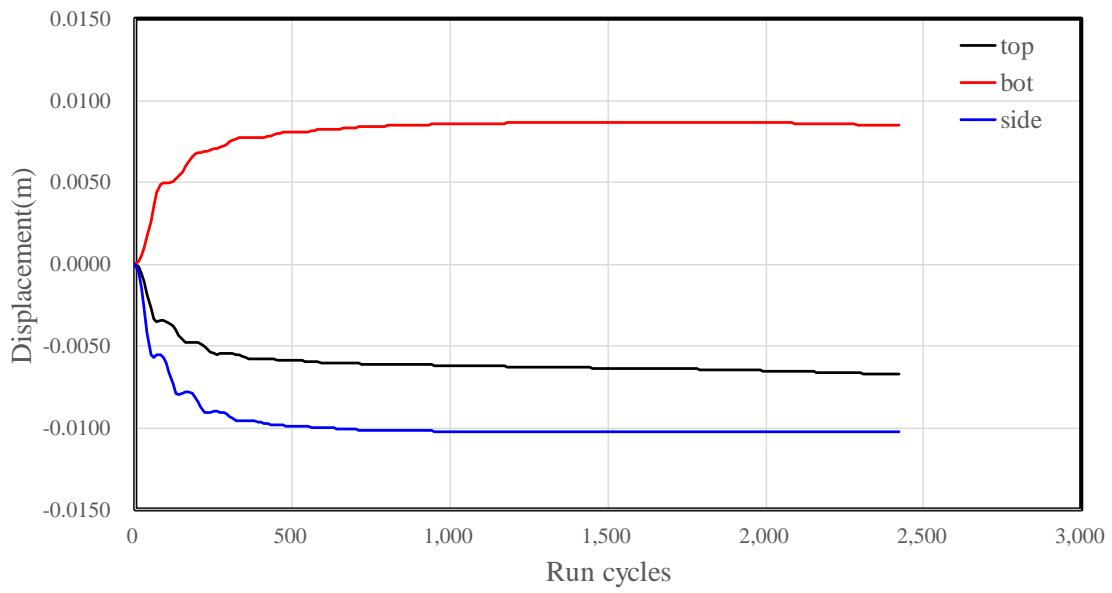


(b)

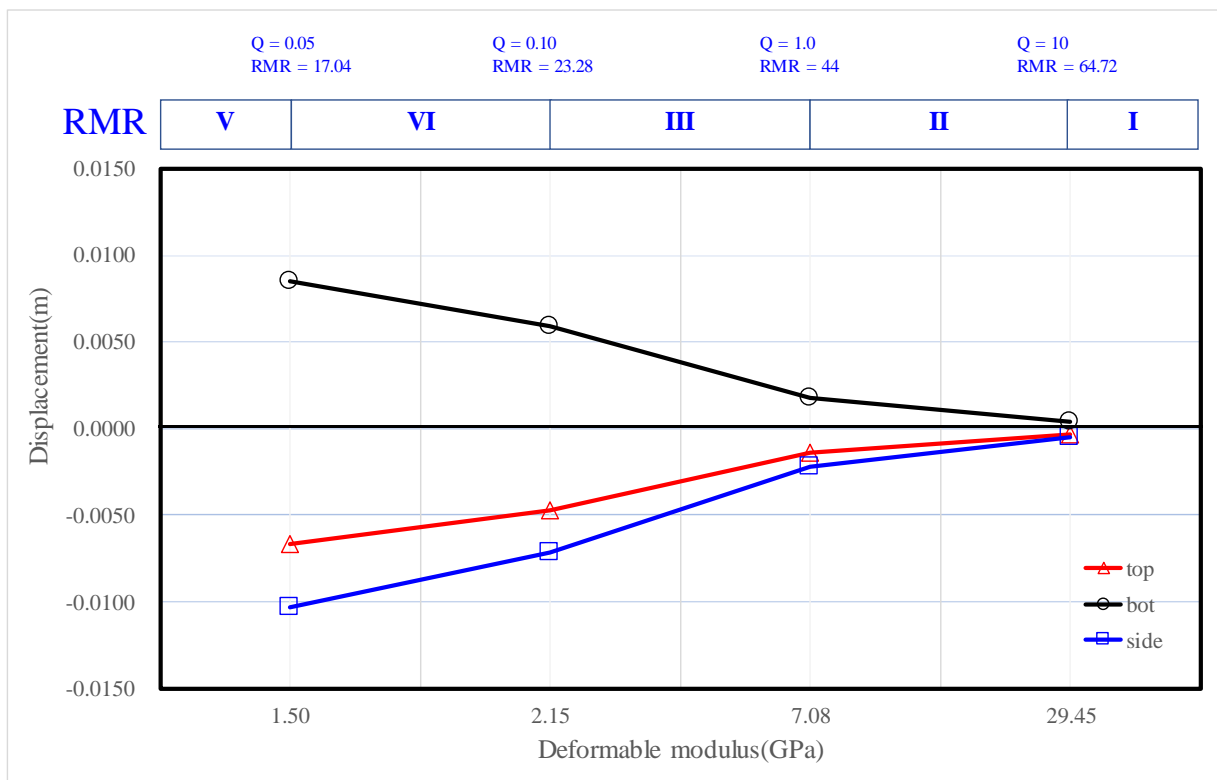


(c)

圖4.5-5 線彈性材料模式條件下之坑道開挖分析：(a)主應力分布圖、(b)水平向位移等高線圖與(c)垂直向位移等高線圖



(a)



(b)

圖4.5-6 線彈性材料模式條件下之坑道開挖引致斷面變形：(a)第V類岩體參數條件、(b)不同岩體類別之參數條件

同理，若考量不同的岩體分類結果，可根據表4.3-2所列變形模數( $E_m$ )與 RMR 之經驗公式獲得對應的岩石力學參數詳表4.5-2，據此分析各岩體分類條件下之線彈性開挖模擬分析，結果詳圖4.5-5(b)所示。其中，若是工程性質相對較差之第 V 類岩體其坑道斷面變形量相對較大，且以側壁的位移量較為顯著，但是隨著岩體類別提高到第 III 類，則因岩石力學特性相對較佳，坑道斷面變形量明顯降低。

#### 4.5.3 莫爾-庫倫塑性材料模式條件下之坑道開挖分析

本節進一步以達仁鄉建議候選場址之 A 類低放射性廢棄物處置坑道，在 RMR 岩體分類分別為第 III、IV、V 類條件下，以莫爾庫倫塑性材料模式進行坑道開挖分析，所採參數詳如表4.5-3。為能瞭解一次襯砌(初期支撐)對穩定坑道開挖面之效果，本研究分別針對(i)無襯砌與(ii)有襯砌條件之分析結果，整理坑道頂拱、仰拱與側壁之位移量，詳圖4.5-7與圖4.5-8，及坑道圍岩塑性區範圍，詳圖4.5-9。綜整相關分析結果分述如后：

- (1) 在無襯砌條件下，若為第 V 類與第 IV 類岩體，詳圖4.5-7(a)(b)，以頂拱處的位移量相對較大，仰拱次之，側壁最小；若為第 III 類岩體，詳圖4.5-7(c)，以仰拱處有較大的位移量。在有襯砌條件下，無論岩體條件為何，詳圖4.5-8，均以仰拱處有較大的位移量，且頂拱與側壁的位移量相當接近。
- (2) 若以第 V 類岩體開挖分析為例，探討一次襯砌(初期支撐)抑制坑道斷面變形效果，相關輸入參數詳如表4.5-4：若為無襯砌坑道，變形量詳圖4.5-7(a)，頂拱最大位移量為 210 cm，仰拱為 91.8 cm，側壁為 105 cm；若為襯砌坑道，變形量詳圖4.5-8(a)，頂拱最大位移量為 1.14 cm，仰拱為 2.72 cm，側壁為 1.62 cm，顯見襯砌結構對抑制斷面變形有顯著的效果。
- (3) 因坑道開挖引致坑道圍岩應力調整，而有部分區域進入塑性區，其範圍詳圖4.5-9，以第 V 類岩體為例，於無襯砌結構條件下，其塑性區範圍約 3 至 6 倍的坑道寬度(W)，而在襯砌結構條件下，塑性區範圍約 0.4 至 0.7 倍的坑道寬度(W)。

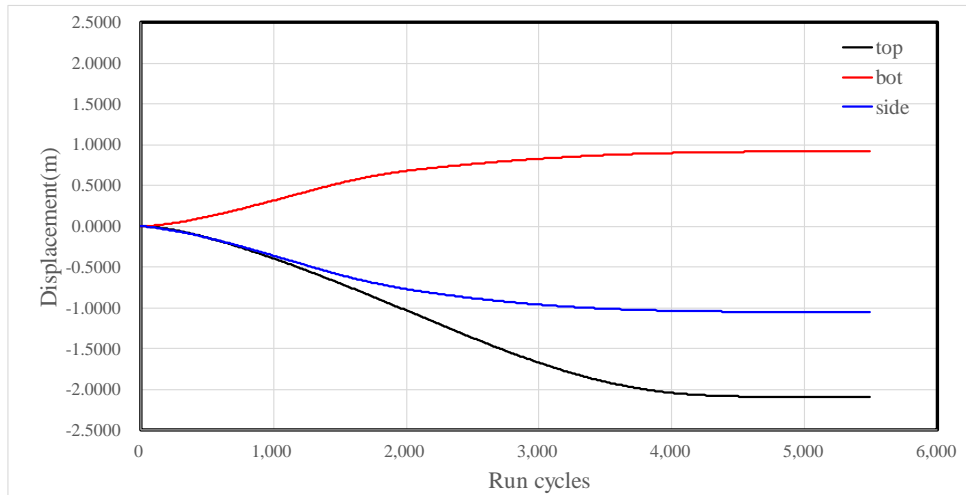
本研究亦以達仁候選場址之 A 類，與 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，在 RMR 岩體分類為第 III、IV、V 類，且具襯砌結構條件下，以莫爾庫倫塑性材料模式進行坑道開挖分析，並整理襯砌結構承受之軸力與彎矩分布，詳圖4.5-10，可知無論岩體條件為何，襯砌結構承受之軸力與彎矩，A 類坑道均高於 B、C 類，與坑道斷面大小有關。

表4.5-3 岩體分類及其岩石力學參數-莫爾庫倫塑性材料模式(達仁場址)

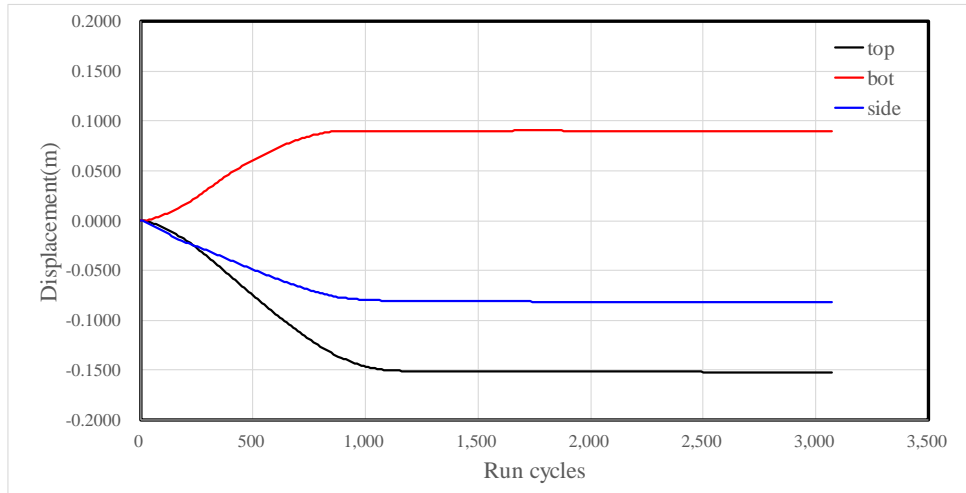
Q	RMR	Rock Class	Em (GPa)	$\nu$	C (Pa)	$\phi$ (°)	UCS (MPa)	TNS (MPa)
0.05	17.04	V	1.50	0.20	100000	15	20	2
0.1	23.28	IV	2.15	0.20	200000	25	30	3
1	44.00	III	7.08	0.20	300000	35	40	4

表4.5-4 UDEC模擬所採一次襯砌之輸入參數

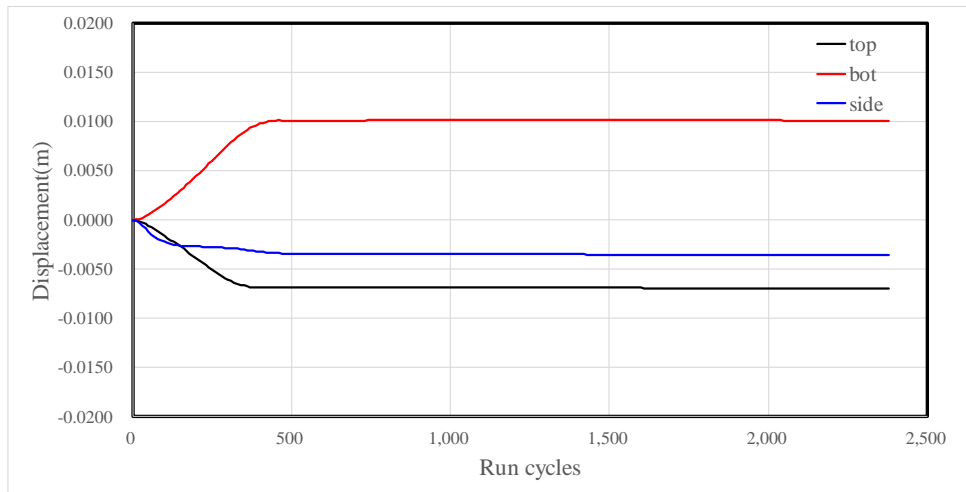
Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	$\nu$	c (Pa)	$\phi$ (°)	kn (MPa/m)	ks (MPa/m)	UCS (MPa)
2100	24	0.2	0.2	35	100	10	20



(a) 第 V 類岩體

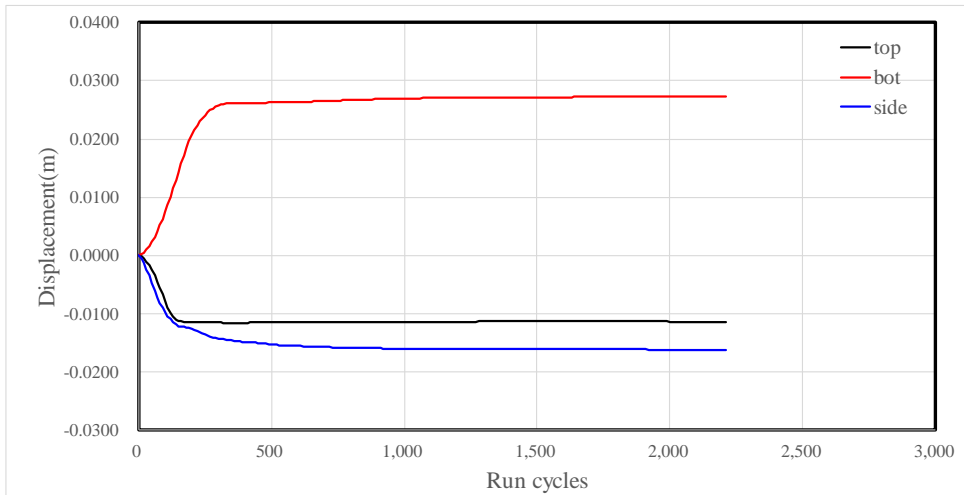


(b) 第 IV 類岩體

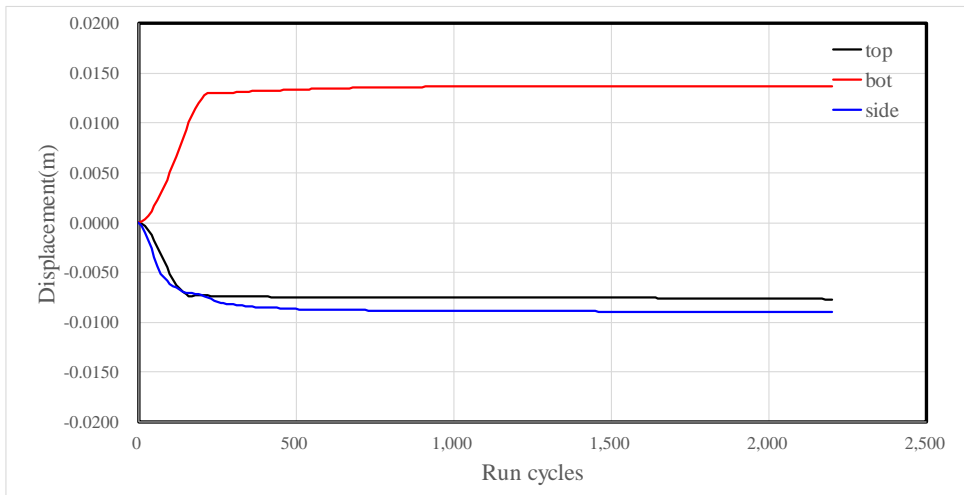


(c) 第 III 類岩體

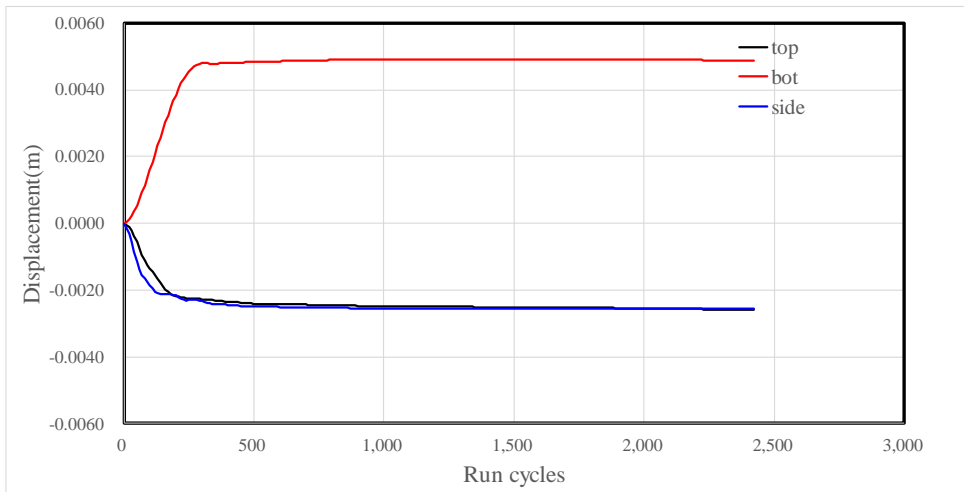
圖4.5-7 達仁場址、無襯砌坑道之坑道開挖引致斷面變形(莫爾-庫倫塑性材料模式)



(a) 第 V 類岩體



(b) 第 IV 類岩體



(c) 第 III 類岩體

圖4.5-8 達仁場址、襯砌坑道之坑道開挖引致斷面變形(莫爾-庫倫塑性材料模式)



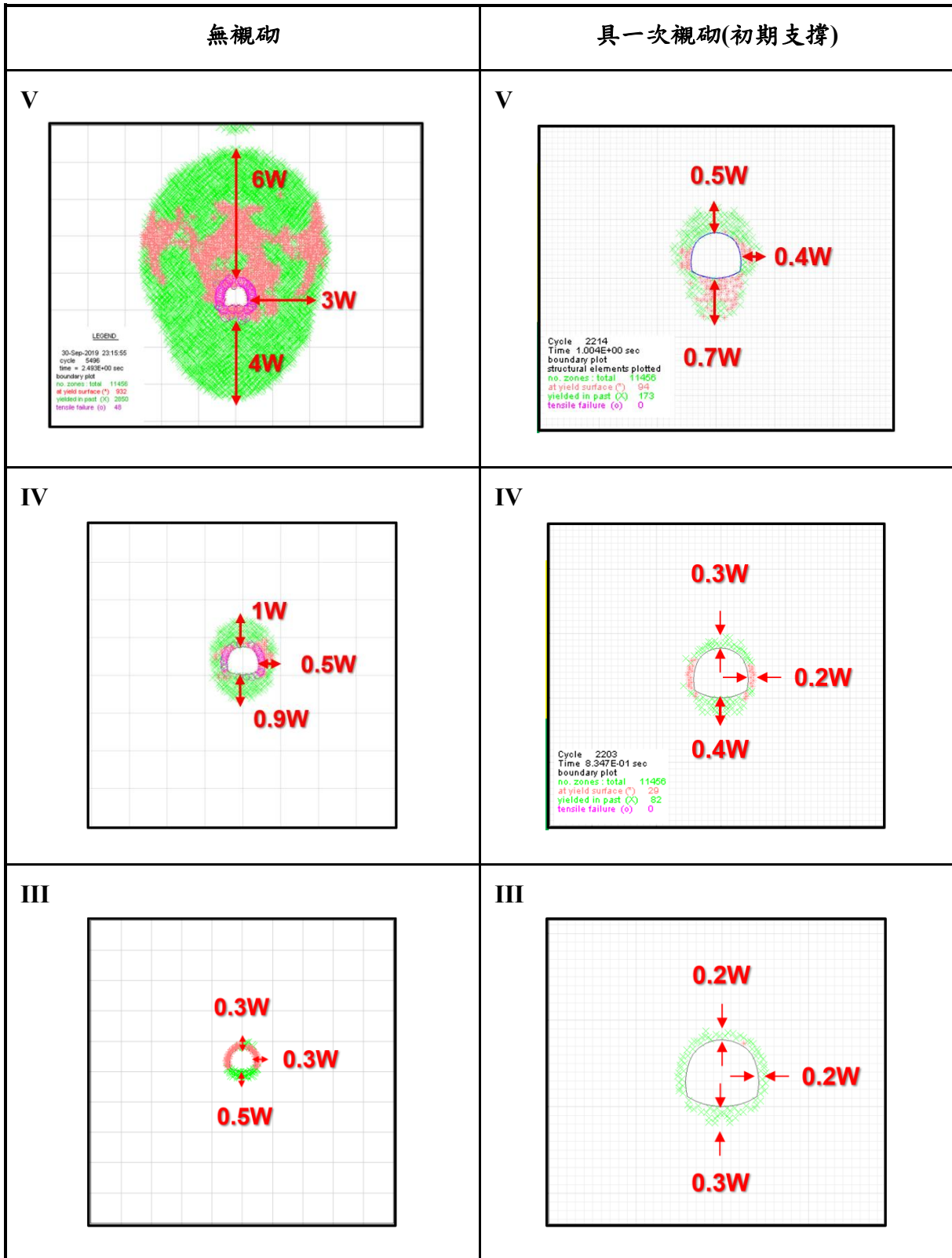


圖4.5-9 達仁場址A類處置坑道之圍岩塑性區範圍比較(W為坑道寬度)

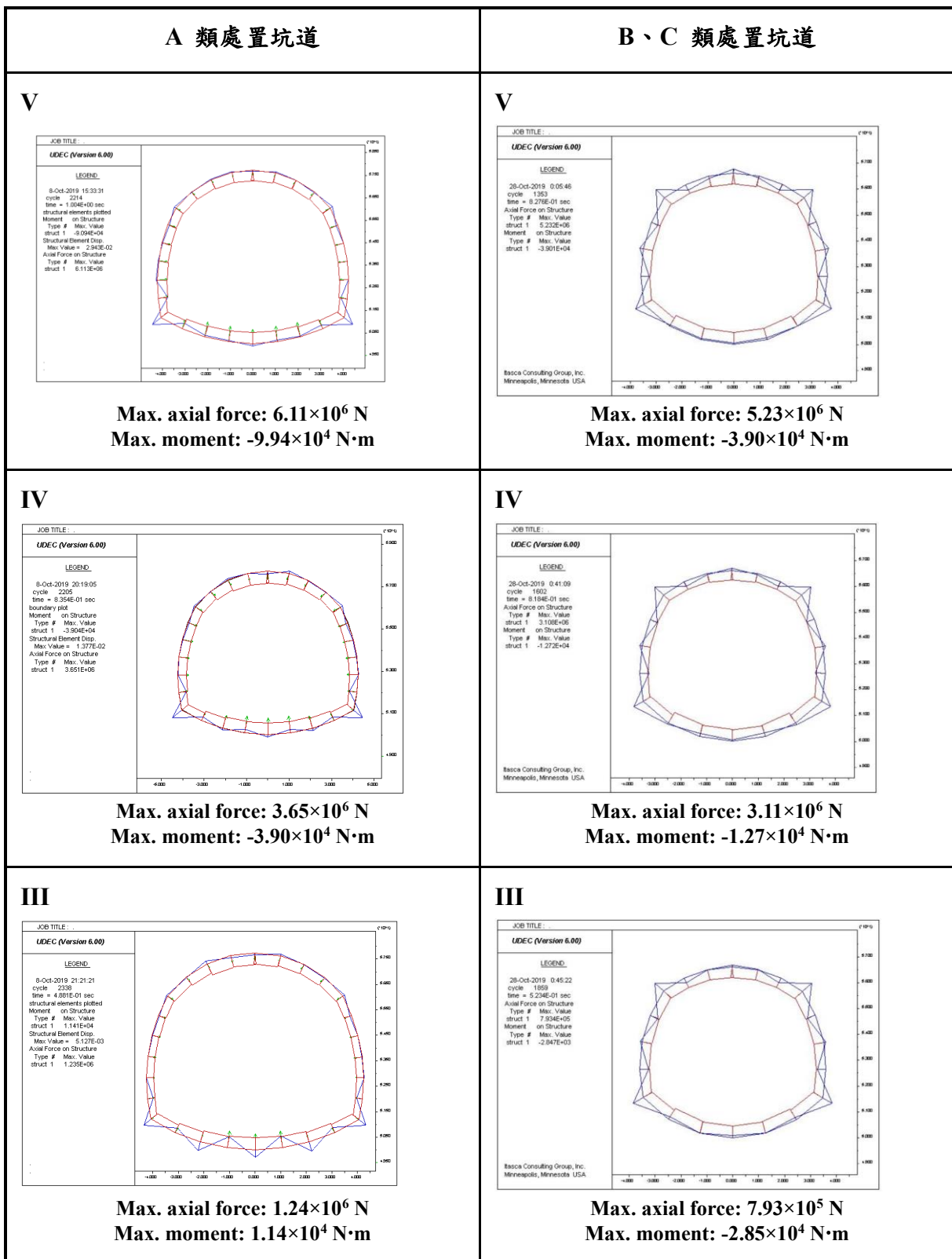


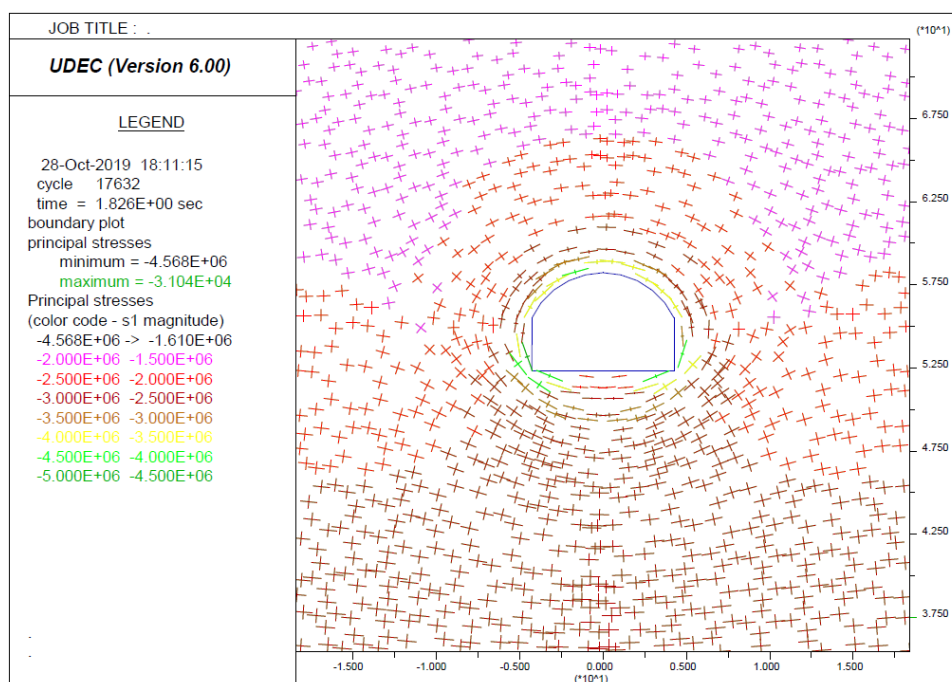
圖4.5-10 達仁場址之A類與B、C類處置坑道襯砌結構承受之軸力與彎矩比較

除了達仁候選場址之 A 類與 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道之開挖模擬分析，亦針對烏坵鄉建議候選場址 A 類低放射性廢棄物處置窖進行 UDEC 數值模型開挖分析，選用之參數詳表 4.5-5，模擬之主應力分布、位移等高線詳圖 4.5-11，坑道開挖引致斷面變形，包括頂拱、仰拱與側壁之變位，詳圖 4.5-12。茲整理相關分析結果分述如后：

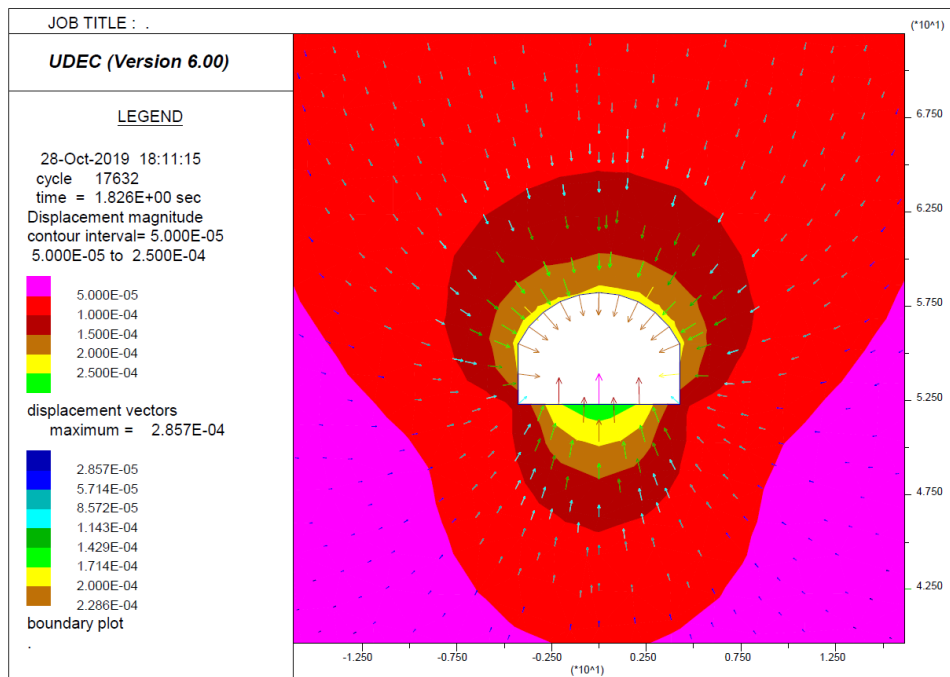
- (1) 經開挖模擬後，數值模型內無塑性區。
- (2) 在應力分布部分，以仰拱至兩側側壁銜接處有較大應力值，詳圖 4.5-11(a)；在坑道斷面變形部分，頂拱最大位移量為 0.0206 cm，仰拱為 0.0289 cm，側壁為 0.0194 cm，以仰拱處的位移量相對較大，詳圖 4.5-11(b)與圖 4.5-12。

表 4.5-5 岩石力學參數-莫爾庫倫塑性材料模式(烏坵場址)

E(GPa)	$\nu$	c(Pa)	$\phi$	UCS(MPa)	TNS(MPa)
42	0.15	$20 \times 10^6$	50	125	9.73



(a)



(b)

圖4.5-11 烏坵場址、無襯砌坑道之坑道開挖引致斷面變形(莫爾-庫倫塑性材料模式)：  
 (a)主應力分布圖與(b)位移等高線圖

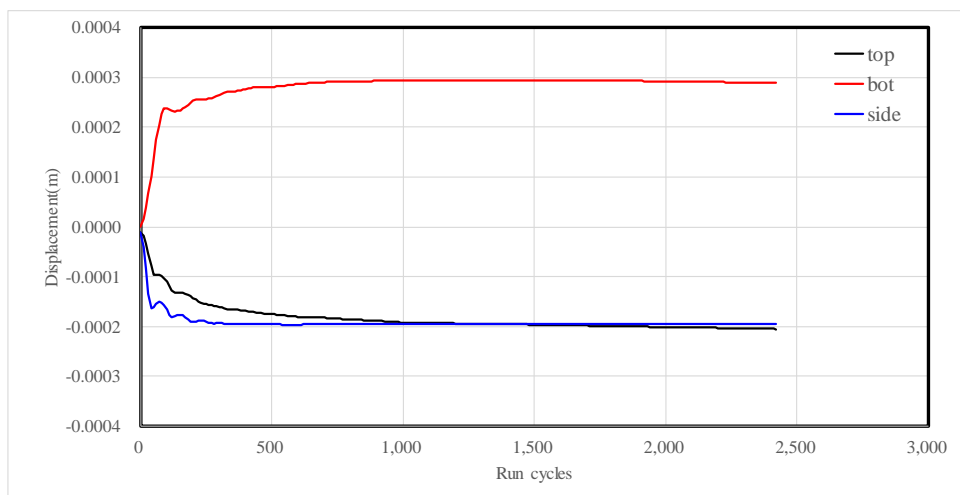


圖4.5-12 烏坵場址、無襯砌坑道之坑道開挖引致斷面變形(莫爾-庫倫塑性材料模式)

## 第五章、我國低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析技術發展建議

本章根據前三章工作成果，包括「國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析」、「國內隧道結構穩定分析技術與現況」與「低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討」，依處置坑道結構穩定分析有關之研究課題與相對應之驗證評估技術，區分為(1)本土坑道之短期穩定性分析、(2)本土坑道之長期穩定性分析與(3)本土坑道之數值分析方法三個部分，提出相關的技術發展建議，其中，亦結合前期計畫成果部分建議項目，以使本章建議更完整，茲分述如后。

### (1) 本土坑道之短期穩定性分析

#### (i) 坑道圍岩穩定性定量化之風險管理架構

有鑑於坑道式處置須提供放射性廢棄物處置作業足夠的工作空間，但須兼顧圍岩之穩定性，故未來除透過既有的分析技術協助判釋圍岩穩定性外，亦可參考 SKB 引入定量化風險分析架構，作為圍岩穩定性的風險管理依據。

#### (ii) 坑道開挖引致之岩體損傷評估

由於坑道開挖將導致岩體之工程行為的變化，並影響圍岩之力學穩定性，實有必要針對本土建議候選場址進行取樣與執行相關室內力學試驗，或實際透過地下實驗室之建置進行現地試驗，以瞭解不同開挖方式及現地應力與地質條件等因素對岩體損傷之影響。

#### (iii) 檢測與監測

有關處置坑道結構在建造與運轉階段之短期穩定性分析，其所需之檢測與監測項目與技術，可參考本子計畫前期研究「處置坑道結構長期穩定需求及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2015)，以確保坑道結構的穩定性。

#### (iv) 地震對處置坑道結構穩定性

根據本子計畫前期研究「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研究」(楊長義與李宏輝，2019)，有關地震活動對處置坑道結構穩定性的影響評估必須考慮下列幾點：

- (i) 必須根據場址特性及歷史地震紀錄的蒐整，提出合理的設計基準地震。
- (ii) 大地材料在考量地震力條件下的力學參數變化及其相關試驗項目。



- (v) 進行處置坑道結構耐震分析時，必須根據坑道所處深度是否需考量慣性效應及鄰近變形帶的影響，選擇適當的分析方法(擬靜態分析法或動態歷時分析法)，惟針對不同覆蓋深度下之加速度反應，國內尚欠缺相關的紀錄。

## (2) 本土坑道之長期穩定性分析

坑道進入封閉階段後，處置場的長期安全功能主要是以圍阻與遲滯放射性核種的釋出，但仍可參酌瑞典 SFR 場址曾針對處置窖在沒有適當的回填，及10,000年的時間尺度條件下，曾透過 3DEC 數值工具評估了處置窖周圍岩盤可能因岩體風化、強度降低等長期效應而導致岩體鬆動，進而造成圍阻體滲流特性之改變。有關處置坑道結構長期穩定分析，必須考量(i)岩體力學性質潛變特性與(ii)岩體力學性質劣化影響範圍。循此，建議未來仍應持續針對本土建議候選場址，於「場址特性調查」階段進行相關大地材料之試驗與調查之外，亦須於「場址特性描述與參數評估項目」部分，加入岩性、岩相等受風化影響具顯著變異的評估因子，以提升坑道長期穩定性之安全評估技術(楊長義與李宏輝，2019)。

## (3) 本土坑道之數值分析方法

- (i) 有鑑於坑道結構穩定分析中，必須考量裂隙岩體經開挖擾動後所引致的應力重新分配、變形調整、及其造成水力參數的變化，因此所採取的數值分析方法須視需要，斟酌考慮並反映岩體裂隙的力學特性，包括強度、變形性與滲流特性。
- (ii) 目前在坑道結構穩定分析課題所採用的數值分析方法，可區分為連續體分析、非連續體分析及連續體-非連續體混合分析等三大類，應視工程規模與裂隙分布密度，及是否考慮滲流問題，選定適當的數值分析方法。例如本研究根據表2.4-1所列坑道穩定分析所採用的數值方法與優缺點比較，另並整理於表5.1可做為數值方法選定之參考。
- (iii) 坑道穩定性分析除上述數值分析方法選定之課題外，尚包括(i)洞口段、坑道交叉段、通行隧道與處置坑道之銜接段等三維分析、(ii)開挖擾動區之數值分析與評估、(iii)地震對處置坑道的影響評估與(iv)離散裂隙網絡 DFN 數值模型建構與分析等，均是未來值得進一步探討的課題。



表5.1-1 連續體與不連續體數值分析方法之比較

數值方法		優點	缺點
連續體	FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 較易公式化(formulate)</li> <li>• 無需使用試探函式(trial function)來求解偏微分方程問題之近似解</li> <li>• 直接且直觀的數值分析技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 無法處理複雜的幾何形狀與材料不均勻性</li> <li>• 針對諾伊曼邊界條件(Neuman boundary condition)問題，只能求得近似解</li> <li>• 不適合處理具明顯破裂的問題</li> </ul>
	FEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可適用於非均質與異向性材料</li> <li>• 不需要座標轉換即可處理複雜的幾何形狀問題</li> <li>• 可以處理複雜的邊界條件</li> <li>• 適用於動態問題</li> <li>• 可處理諾伊曼邊界條件問題</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 基於連續性的假設前提，不允許元素有明顯的開裂、滑移和分離</li> <li>• 若以顯式表示(explicit representation)處理大量裂縫的問題，當裂縫元素的長寬比(aspect ratio)過大，會影響數值求解</li> <li>• 不適用於處理裂縫增長之問題，但有些特殊的數值技術可提供解決方案，例如強化有限元素法(enforced FEM)</li> </ul>
	BEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 僅需將邊界離散化</li> <li>• 具簡化的前處理</li> <li>• 改善應力集中問題的準確性</li> <li>• 對涉及無限和半無限域的問題，可進行簡單且準確的建模</li> <li>• 簡化對稱問題的處理(無需在對稱平面上離散化)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 非均質和非線性問題的處理非常困難</li> <li>• 需具備合適基本解的知識，因此通常需要彈性解</li> <li>• 相較於 FEM，BEM 屬較為新穎的技術，在實務的應用案例較少</li> </ul>
不連續體	DEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可明確顯示裂縫發生處</li> <li>• 可處理大量裂縫的問題</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 缺乏對裂縫幾何形狀的了解</li> <li>• 需要大量的計算資源</li> <li>• 裂隙網絡中的滲流與相互作用無法得到適當處理</li> </ul>
	DFN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 相較於 FEM，DFN 需要更少的自由度</li> <li>• 適用於裂隙問題的定量研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 缺乏對裂隙幾何形狀和水力特性的瞭解</li> <li>• 需要大量的計算資源</li> <li>• 無法處理熱流和力學的問題</li> </ul>
混合方法		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 兼具連續體和不連續體分析方法的優點</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 要大量的計算資源</li> <li>• 需處理連續體與不連續體在界面處的位移連續性和應力平衡</li> </ul>

## 第六章、我國低放處置安全報告審查規範有關處置坑道結構穩定 分析之精進建議

本章總結前述各章內容，依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(草案)」與本研究有關之章節提出低放處置審查導則相關條文修訂建議，詳表6.1-1。

表6.1-1 本研究有關之章節提出低放處置審查導則相關條文修訂建議

原文	修訂條文
<p>七、設施之安全評估</p> <p>(四)長期穩定性：</p> <p>1.說明處置設施之侵蝕防護設計與評估，至少須包含：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、洪水侵蝕的地形變遷、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量、設計洪水量、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、侵蝕防護的耐久性等。</p>	<p>七、設施之安全評估</p> <p>(四)長期穩定性：</p> <p>1.說明處置設施之侵蝕防護設計與評估，至少須包含：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、洪水侵蝕的地形變遷、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量、設計洪水量、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、隧道洞口段上方邊坡的侵蝕防護、侵蝕防護的耐久性等。</p>
<p>2.說明處置場各類邊坡設計與穩定性評估，至少需包括：</p> <p>(1)場址地質對於穩定性可能的影響、場址調查使用之大地工程與地球物理技術、邊坡穩定性材料與土壤參數、邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、邊坡使用借土材料的特性、夯實工作與夯實後材料的強度、邊坡所採用之土壤與岩石參數、邊坡靜態穩定性分析、地震及地層移動的邊</p>	<p>2.說明處置場各類邊坡設計與穩定性評估，至少需包括：</p> <p>(1)場址地質對於穩定性可能的影響、場址調查使用之大地工程與地球物理技術、<u>材料與地質構造特性</u>、<u>區域的地下水位面位置</u>以及變動範圍、使用的借土材料的特性、<u>夯實工作與夯實後材料的特性</u>、<u>土壤與岩石參數</u>、<u>邊坡靜態穩定性分析</u>、地震及地層移動的邊坡動態穩定性分析、場址下方土壤液化分析。</p>

<p>坡動態穩定性分析、場址下方土壤液化分析。</p>	
<p>5.說明處置場各類坑道設計與穩定性評估，至少須包含：                  (1)坑道沿線地層分布、不連續面與地質破裂帶的調查方法與評估結果、開挖擾動範圍之圍岩特性與參數變異程度、岩石強度弱化與岩體依時變形特性評估、坑道支撐材料的特性與強度、坑道穩定性分析之靜態與動態分析。</p>	<p>5.說明處置場各類坑道設計與穩定性評估，至少須包含：                  (1)坑道沿線地層分布、不連續面與地質破裂帶的調查方法與評估結果、開挖擾動範圍之岩石特性與參數變異程度、岩石強度弱化與岩體依時變形特性評估、坑道支撐材料的特性、坑道穩定性分析之靜態與動態分析。</p>

---

## 第七章、結論

本計畫透過蒐整並研析(1)國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析，與(2)國內隧道結構穩定分析技術與現況，繼而進行(3)低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討，並提出(4)我國低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析技術發展建議與(5)我國低放處置安全報告審查規範有關處置坑道結構穩定分析之精進建議。本計畫依約所完成之各項工作成果，綜整如下：

### (1) 國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析

本項工作區分「從時間尺度看處置坑道結構穩定分析」、「坑道結構短期穩定分析」、「坑道結構長期穩定分析」與「坑道結構穩定數值分析」四個部分進行國際資訊蒐整與研析。其中，在「坑道結構穩定數值分析」部分，蒐整了此一研究課題所採用的數值方法，包括連續體、不連續體與連續體-非連續體混合分析等方法，對於數值分析應採連續體或是不連續體分析之判別依據，可根據裂隙分布密度與所考量的工程規模決定之，或是根據岩體分類作為數值分析採應連續體分析或是不連續體分析之參考。

### (2) 國內隧道結構穩定分析技術與現況

本項工作依「設計階段」與「運轉階段」，說明國內隧道結構穩定分析技術與現況。在「設計階段」部分，分別就國內隧道設計規範、數值分析方法與國內有關數值分析於隧道工程之論文研究加以蒐整；在「運轉階段」部分，主要是針對坑道在運轉期間，可從坑道襯砌異狀的檢測與分析，並配合各種非破壞性檢測技術，作為分析坑道結構穩定之輔助。

### (3) 低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討

本項工作主要是蒐整、盤點及檢核數值模型建置所需資訊與參數，並對建議候選場址之岩石力學性質，及其對處置坑道開挖與坑道結構穩定性之影響能有一初步瞭解，工作項目區分「我國低放射性廢棄物建議候選場址與處置坑道型式」、「現地應力」、「建議候選場址地質與岩石力學特性」、「UDEC分析軟體介紹」與「我國處置坑道數值模型之建置與坑道結構穩定性分析」等五個部分。其中，在「我國處置坑道數值模型之建置與坑道結構穩定性分析」部分，係根據「台東縣達仁鄉」與「金門縣烏坵鄉」二處建議候選場址之地質概念模型，及可能採用的處置坑道型式，透過 UDEC 數值分析工具建置坑道結構穩定分析模型，並就可能的邊界條件與岩體參數之變化進行模擬，分析其對坑道開挖引致的坑道斷面變形與襯砌結構受力狀況提出討論。

---

#### (4) 我國低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析技術發展建議

本章根據前三章工作成果，包括「國際間有關坑道結構穩定分析技術蒐整與研析」、「國內隧道結構穩定分析技術與現況」與「低放處置坑道結構穩定分析之模型建置技術探討」，依低放射性廢棄物處置坑道結構穩定分析有關之研究課題與相對應之驗證評估技術，區分為(1)本土坑道之短期穩定性分析、(2)本土坑道之長期穩定性分析與(3)本土坑道之數值分析方法三個部分，提出相關的技術發展建議。

#### (5) 我國低放處置安全報告審查規範有關處置坑道結構穩定分析之精進建議

本章總結前述各章內容，依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(草案)」與本研究有關之章節提出低放處置審查導則相關條文修訂建議，詳表6.1-1。

---

## 參考文獻

- [1] Bandis, S.C., Numerical modelling of discrete materials in rock mechanics: Developments and engineering applications. In H. Konietzky (ed.), Numerical Modelling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering, Civil Engineering and Earth Sciences; Proceedings of the First International UDEC/3DEC Symposium, Bochum, 29 Sep-tember-1 October 2004. Oxford: Taylor & Francis.
- [2] Cundall, P. A. and Strack, O. D. L., A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*, 29, 47- 65, 1979.
- [3] Cundall, P. A., Numerical experiments on localization in frictional materials, *Archive of Applied Mechanics*, vol. 59, 1989.
- [4] Cundall, P. A. and Hard R. D., Numerical Modeling of Discontinua, Analysis and Design Methods, 1993.
- [5] Frédéric Deleruyelle, Tuan Anh Bui, Henry Wong, Nathalie Dufour, Duc Kien Tran, X.S. Zhang, Analytical study of the post-closure behaviour of a deep tunnel in a porous creeping rock mass, *Comptes Rendus Mecanique*, 344, 2016.
- [6] Goodman R.E., Shi G. H., Block Theory and its application to rock engineering, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1985.
- [7] Hudson J. A., Bäckström A., Rutqvist J., Jing L., Backers T., Chijimatsu M., Feng X. T., Kobayashi A., Koyama T., Lee H. S., Pan P. Z., Rinne M., Shen B., Final Report of DECOVALEX-THMC Task B. EDZ Guidance Document - Characterising and Modelling the Excavation Damaged Zone (EDZ) in Crystalline Rock in the Context of Radioactive Waste Disposal. SKI report. 68, 2008.
- [8] IAEA(International Atomic Energy Agency), 2009, Classification of radioactive waste, General Safety Guide No. GSG-1, IAEA, Vienna.
- [9] ITSAC, 3DEC user guide manual, 2016.
- [10] ITSAC, FLAC user guide manual, 2016.
- [11] Jalali M. R. and Dusseault M. B., Coupling Geomechanics and Transport in Naturally Fractured Reservoirs, *Int. J. Min. & Geo-Eng. (IJMGE)*, Vol. 46, No. 2, Dec. 2012.



- 
- [12] Jing L., A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, 2003.
- [13] NA Do, D Dias, P Oreste, I Djeran-Maigre, Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern, *Acta Geotech.* 9, 673–694, 2014.
- [14] NA Do, D Dias, P Oreste, I Djeran-Maigre, 3D numerical investigation on the interaction between mechanized twin tunnels in soft ground. *Environ Earth Sci* 73, 2101–2113, 2015
- [15] NA Do, D Dias, P Oreste, 3D numerical investigation of mechanized twin tunnels in soft ground–Influence of lagging distance between two tunnel faces, *Engineering Structures*, 109, 117-125, 2016.
- [16] Nematollahi and Dias, Interaction between an underground parking and twin tunnels – Case of the Shiraz subway line, *Tunnelling and Underground Space Technology*, V95, 2020.
- [17] Potyondy D. O. and Cundall P. A., A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8), 2004.
- [18] Shi G. H., Block system modeling by discontinuous deformation analysis, Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng., 1989.
- [19] SKB, Deep repository Underground design premises, R-04-60, 2004.
- [20] SKB, Preliminary assessment of potential underground stability (wedge and spalling) at Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites, R-05-71, 2005.
- [21] SKB, Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark, R-13-53, 2014.
- [22] SKB, Safety analysis for SFR Long-term safety, main report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-01, 2015.
- [23] 王泰典、黃燦輝、鄭富書、薛文城、傅子仁，台灣隧道襯砌異狀類別之探討，*隧道建設*，第27卷，增刊，87-92，2007。
- [24] 王泰典，*隧道襯砌異狀肇因診斷安全評估技術之研究*，國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告，2013。
-

- 
- [25] 王泰典、劉曉樺、邱文峰、陳俊樺、周永川、何泰源、黃燦輝，鐵路隧道結構長期穩定影響因素探討暨與維護管理準則與解說研訂考慮，隧道建設，第34卷，增刊，63-70，2014。
- [26] 台灣電力公司，低放射性廢棄物最終處置技術評估報告，2017。
- [27] 交通部，鐵路明挖覆蓋隧道設計規範，2017
- [28] 交通部，公路隧道設計規範，2018。
- [29] 李佳翰、王泰典、秦德，鐵路隧道結構安全檢測之探討，2008岩盤工程研討會論文集，台北，579-588，2008。
- [30] 李佳翰，山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究，博士論文，國立臺北科技大學工程科技研究所，2013。
- [31] 李俊秀，辛奕賢，李煜舫，隧道掘進效應與圍岩收斂關係之探討，2018岩盤工程研討會，111-116，2018。
- [32] 林宜亭，既存隧道襯砌受鄰近新挖隧道影響之數值分析，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，2004。
- [33] 林信宏，隧道襯砌影像判釋與異狀特徵化技術暨安檢資料庫之開發，碩士論文，國立臺北科技大學資源工程研究所，2010。
- [34] 何金益，軟岩夾層中隧道受簡諧S波入射作用數值模擬，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，2017。
- [35] 杜東岳，施工地盤振動特性與數值模擬，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，2009。
- [36] 邱雅筑、陳正勳、王泰典、鄭富書、黃燦輝，襯砌剖面變形特徵曲線與微變監測技術應用於營運中隧道荷載變化之評估，中國土木水利工程學刊，第24卷，第2期，101-109，2012。
- [37] 邱雅筑，營運中隧道變位模態解析與高精度監測技術之研究，博士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，台北，2014。
- [38] 邱顯晉、林金成，3D 雷射掃描應用於鐵路隧道空間資訊與檢測之案例探討，2015電子計算機於土木水利工程應用研討會，741-750，2015。
- [39] 吳秉儒，黏性土層中隧道開挖引致之地盤沉陷與破壞機制，博士論文，國立中央大學土木工程研究所，2002。
-

- 
- [40] 黃燦輝、鄭富書，老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I)，交通部，1997。
- [41] 黃燦輝、鄭富書，老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(II)，交通部，1998。
- [42] 黃燦輝、何泰源、張吉佐、姚錫齡，震後隧道結構快速診斷手冊之建立與震後隧道結構快速補強手段，行政院公共工程委員會委託研究報告，1999。
- [43] 黃燦輝、林銘郎、王泰典，隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發，交通部鐵路改建工程局東部工程處委託研究計畫報告，2008。
- [44] 黃燦輝、鄭富書、王泰典、李維峰，隧道補強技術與材料之開發，交通部鐵路改建工程局東部工程處委託研究計畫報告，2009。
- [45] 張晉豪，三維數值模擬在都會區隧道工程上之應用，碩士論文，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，2010。
- [46] 楊尉成，雙圓型潛盾隧道地表沉陷之三維數值模擬分析-以機場捷運線臺北三重段為例，碩士論文，國立臺北科技大學土木與防災研究所，2011。
- [47] 楊長義、李宏輝，低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究，行政院原子能委員會核能研究所，2017。
- [48] 楊長義、李宏輝，低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研究，行政院原子能委員會核能研究所，2018。
- [49] 楊浚旻，圓形隧道與馬蹄形隧道於完整岩體中開挖引致之裂縫發展探討，碩士論文，國立臺灣科技大學營建工程系，2018。
- [50] 陳正勳，岩石隧道受震行為及破壞機制之研究，博士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，2011。
- [51] 陳正勳、王泰典、黃燦輝，山嶺隧道受震損害類型與原因之案例研究，岩石力學與工程學報，第30卷，第1期，45-57，2011。
- [52] 蘇兆輝，觀音及谷風隧道施工案例探討案例，第一屆蘇花改工程技術論壇論文集，83-104，2014。
-



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

108 年低放射性廢棄物處置安全評估驗證  
技術研究

子計畫四：低放射性廢棄物近岸坑道處置  
設計情節核種傳輸驗證技術研究

期末報告

計畫編號：108FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫四主持人：李明旭

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 108 年 12 月



# 108 年低放射性廢棄物處置安全評估驗證

## 技術研究

### 子計畫四：低放射性廢棄物近岸坑道處置

#### 設計情節核種傳輸驗證技術研究

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

研究期程：中華民國 108 年 1 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 98 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 108 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

低放射性廢棄物最終處置安全評估時間尺度通常長達十萬年，評估過程涉及封閉初始狀態、封閉後處置設施內部與外部條件演化過程、未來氣候演化等複雜程度。為釐清可能影響處置設施功能之關鍵因子與路徑，國際上透過特徵、事件、作用建立矩陣分析後發展各種情節。本計畫研析瑞典 SR-PSU 主報告 TR-14-01 中參考演化及主要情節相關資訊，與國內「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告(LLWD 2016)」之參考演化與設計情節內容比較。兩報告皆參考過去氣候演化趨勢為基礎建立未來氣候演化，加入人為溫室氣體排放為推演變因，而最大相異為瑞典因處高緯度形成永凍土，因此考慮熱流演化及地下水結凍等與台灣差異甚大的氣候條件。情節挑選部分，瑞典將情節分為主要情節、機率較低情節與剩餘情節，而 LLWD 2016 報告則將除設計情節外之各項情節設置為替代情節，兩報告於主要情節與設計情節間差異不大，整體而言國內報告情節挑選相較於瑞典 SKB 評估項目少，例如未有針對吸附功能探討情節。

除前述工作外，本年度整合前三年度所發展之核種傳輸數值模擬技術，將原有之近場(處置設施)網格與近場(處置坑道)網格統整成近場網格，以降低模擬銜接過程數值誤差，利用 HYDROGEOCHEM\_5.6 模式進行設計情節核種傳輸模擬。並與 LLWD 2016 設計情節之核種傳輸結果進行比較。於流場模擬方面，本研究與 LLWD2016 在場址尺度之地質圈地下水流速相差約 0~1 個數量級，而近場處置坑道之單位長度流量差異則小於 1 個數量級；在核種傳輸模擬方面，由於 LLWD2016 之地質圈核種傳輸採用導水構造裂隙模擬及源項金屬核種外釋率控制，因此本報告之核種濃度峰值出現時間較晚且金屬核種濃度較高。對於國內低放坑道處置核種傳輸技術未來發展建議，應研發源項核種衰變與外釋機制、海淡水交界面處理等模擬技術、高速運算技術應用與提升資料品質保證等。在安全分析報告導則審查建議部分，因地球化學在場址特性描述章節有規範，建議在安全評估章節應增加地球化學對核種傳輸相關參數的影響。本年度成果主要完成設計情節核種傳輸平行驗證工作架構與初步成果，現階段比較的重點在核種濃度趨勢及數量級差異較大成因的合理推論。建議未來平行驗證工作仍需有專業團隊持續精進模擬技術，使國內安全評估技術更落實在本土技術建立。

# Abstract

The time scale for performing the safety assessment of low-level radioactive waste disposal often simulates to hundreds of thousands of years. The safety of the disposal site may be affected by initial conditions, internal conditions, external conditions and future climate evolution after closure. In order to understand the impact of future climate evolution on the functioning of disposal facilities, assessments are carried out via FEPs and setting scenarios. This study reviews the reference evolution and main scenarios in the Swedish SR-PSU main report TR-14-01 and compares with domestic low-level radioactive waste final disposal technology assessment report (LLWD 2016) for key factors affecting radionuclide transport. The reference evolutions in both reports are based on climate trends over the past climate and considering effects of anthropogenic greenhouse gas emissions. The major difference is that the latitude of Sweden is high enough to have permafrost. Evolution of thermal flows and frozen in groundwater were considered in SR-PSU report. On selection of scenarios, main scenarios, less probable scenarios and residual scenarios were selected in SR-PSU, while domestic reports contain design scenarios and substitute scenarios. Two reports are similar between main scenario and design scenario. Overall, less scenario settings were adopted in LLWRD 2016, such as no scenario for adsorption function.

Based on radionuclide transport simulation technology has been developed for past three years, a new simulation grid was developed by combining the near-field (disposal facility) grid and the near-field (disposal tunnel) grid built in the past for simulations by the HYDROGEOCHEM-5.6 numerical model to reduce numerical errors during transferring simulated results between different levels of grid. Simulated results of design scenario were compared with those presented in LLWD 2016 report. On the flow simulations, differences in groundwater flow velocities were in a range of 0~1 order in geosphere environments and less than 1 order around near-field disposal tunnels. On the radionuclide transport simulations, since structural fractures with fast flow velocities in geosphere and limited release rate for metal radionuclides were considered in LLWRD 2016, the slower peak concentrations time and much higher concentrations of metal radionuclides were observed in our results. For future developments on simulating radionuclide transports, release of radionuclides from source term, interactions of seawater and fresh water over coastal environments, high

performance computing techniques, permuting data quality assurance are recommended. On review guidelines on sifter report, how geochemistry evolution will affect parameters used in radionuclide transport simulations should be added since geochemistry issues are regulated in sections of site characterization and not mentioned in section of safety assessment. The framework of parallel verification on radionuclide transport were developed and conducted primarily simulations with explanations on major differences in trends and orders of simulated results between our studies and the LLWD 2016 report. It suggested that parallel verifications may involve many details of how input data, simulating setting, and data transfer that require a technical work force to continually develop simulation techniques for promoting establishments of simulation capacities for our local needs.

# 目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	x
第一章 前言.....	1
第二章 設計情節與參考演化影響核種傳輸之關鍵資訊研究.....	3
2.1 參考演化.....	3
2.1.1 外部條件.....	3
2.1.2 參考演化對場址之影響.....	7
2.2 情節分析.....	27
2.2.1 主要情節.....	28
2.2.2 替代情節.....	37
2.2.3 其他情節.....	40
2.2.4 剩餘情節.....	43
2.2.5 組合情節.....	47
2.3 LLWD 2016 之參考演化與設計情節分析.....	48
2.3.1 LLWD 2016 之參考演化.....	48
2.3.2 LLWD 2016 之設計情節.....	51
2.3.3 LLWD2016 分析模式與參數設定.....	55
2.4 LLWD 2016 與 SKB SR-PSU 之參考演化及設計情節差異比較.....	59
2.4.1 LLWD 2016 與 SKB SR-PSU 參考演化之差異.....	60
2.4.2 LLWD 2016 與 SKB SR-PSU 情節挑選差異.....	63
第三章 設計情節之核種傳輸驗證技術研析.....	67
3.1 網格設置與水文地質參數.....	67
3.1.1 遠場.....	68
3.1.2 近場(處置設施).....	69
3.2 模擬銜接流程.....	71

3.2.1 流場模擬銜接方法 .....	72
3.2.2 傳輸模擬銜接方法 .....	73
3.3 核種傳輸模擬參數 .....	75
3.4 核種傳輸模擬結果 .....	81
3.4.1 流場模擬結果 .....	81
3.4.2 多子核種傳輸模擬結果 .....	83
第四章 設計情節之核種傳輸結果驗證 .....	91
4.1 設計情節之機制與參數選用 .....	91
4.1.1 LLWD2016 設計情節之機制與參數選用 .....	91
4.1.2 本研究設計情節之機制與參數選用 .....	96
4.2 設計情節之核種傳輸結果驗證 .....	99
4.2.1 LLWD2016 之設計情節核種傳輸結果 .....	99
4.2.2 設計情節之核種傳輸結果比較 .....	104
第五章 我國低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸技術發展建議 .....	110
第六章 提出我國低放處置安全報告審查規範有關核種傳輸驗證精進建議	
.....	113
第七章 結論與建議 .....	125
參考文獻 .....	128
附件一 期末報告審查意見與答覆說明 .....	133



## 圖目錄

圖 2.1 Forsmark 早期冰緣氣候案例環境條件隨時間之變化(TR-14-01 Fig 6-2)....5	5
圖 2.2 Forsmark 全球暖化氣候案例環境條件隨時間之變化(TR-14-01 Fig 6-1)....5	5
圖 2.3 Forsmark 延伸全球暖化氣候案例環境條件隨時間之變化(TR-14-01 Fig 6-3).....6	6
圖 2.4 全球暖化氣候案例中 Forsmark 地區於西元 3,000 年之植被與土地利用模型分布圖(TR-14-01 Fig 6-4).....8	8
圖 2.5 西元 5,000 年及西元 12,000 年 Forsmark 地區於全球暖化氣候案例中之植被及土地利用分布圖(TR-14-01 Fig 6-16)..... 10	10
圖 2.6 西元 5,000 年 Forsmark 地區植被及土地利用狀況 (TR-14-01 Fig 6-17) 11	11
圖 2.7 Forsmark 地區西元 40,000 年之植被及土地利用分布圖(TR-14-01 Fig 6-18) ..... 12	12
圖 2.8 西元 20,000 年 Forsmark 地區冰緣氣候植被及土地利用分布圖(TR-14-01 Fig 6-28)..... 12	12
圖 2.9 西元 2,000 年至 2,500 年 SFR1(a、c，粉紅色位置)、SFR3(b、d，粉紅色位置)粒子(右下圖例)排放區位置圖(TR-14-01 Fig 6-5)..... 15	15
圖 2.10 西元 3,000 年 SFR1(a，粉紅色位置)、SFR3(b，粉紅色位置)粒子(右下圖例)排放區位置圖(TR-14-01 Fig 6-6)..... 16	16
圖 2.11 西元 5,000 年至 9,000 年 SFR1(a、c，粉紅色位置)、SFR3(b、d，粉紅色位置)粒子(右下圖例)排放區位置圖(TR-14-01 Fig 6-19)..... 16	16
圖 2.12 SFR1 及 SFR3 粒子排放出口示意圖(TR-14-01 Fig 6-30)..... 17	17
圖 2.13 SFR1 及 SFR3 處置窖隨海岸線演化之流量示意圖(TR-14-01 Fig 6-30)... 18	18
圖 2.14 蒙脫石於鹼性溶液中的變化(TR-14-01) ..... 25	25
圖 2.15 混凝土障壁的孔隙結構(TR-14-01 Fig 6-13)..... 26	26
圖 2.16 不同處置窖之傳輸阻力(Fr)平均值，a)SFR1 處置窖 b)SFR3 處置窖 (Odén et al. 2014) ..... 30	30
圖 2.17 不同處置窖之平流行經時間平均值，a)SFR1 處置窖 b)SFR3 處置窖 (Odén et al. 2014) ..... 31	31
圖 2.18 不同處置窖之路徑長度(Lr)平均值，a)SFR1 處置窖 b)SFR3 處置窖	

(Odén et al. 2014) .....	31
圖 2.19 處置窖工程障壁劣化程度(TR-14-01, Fig 7-9).....	33
圖 2.20 放射性核種傳輸至人體的曝露路徑(TR-14-01, Fig7-8).....	35
圖 2.21 核種存量常態分布圖(TR-14-01, Fig 7-12).....	41
圖 2.22 陸域生活型態之生物圈核種傳輸示意(台灣電力公司，2017a).....	54
圖 2.23 A 類放射性廢棄物處置坑道核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台灣電力 公司，2017a) .....	56
圖 2.24 B、C 類放射性廢棄物處置坑道核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台灣電 力公司，2017a) .....	56
圖 2.25 GoldSim 整體評估數值分析模型(台灣電力公司，2017a).....	57
圖 2.26 達仁鄉建議候選場址粒子追蹤監測點說明(台灣電力公司，2017a)...	59
圖 2.27 參考演化項目對應圖 .....	62
圖 2.28 設計情節項目對應圖 .....	65
圖 3.1 達仁溪集水區高程 .....	67
圖 3.2 遠場網格俯視圖 .....	68
圖 3.3 遠場網格剖面圖 .....	68
圖 3.4 處置設施俯視圖(台灣電力公司，2017a).....	70
圖 3.5 近場處置設施網格配置圖 .....	70
圖 3.6 流場模擬及傳輸模擬銜接流程圖 .....	72
圖 3.7 遠場流場邊界 .....	73
圖 3.8 近場(處置設施)流場邊界 .....	73
圖 3.9 近場(處置設施)廢棄物放置區 .....	74
圖 3.10 近場(處置設施)可變動邊界 .....	74
圖 3.11 遠場傳輸模擬邊界 .....	75
圖 3.12 遠場總水頭與流場分布圖 .....	81
圖 3.13 遠場地下水位線分布圖 .....	82
圖 3.14 近場處置設施總水頭與流場分布圖 .....	82
圖 3.15 近場處置設施壓力水頭分布圖 .....	83
圖 3.16 近場處置設施之觀測點位示意圖 .....	84

圖 3.17 近場處置設施觀測點 A 之濃度曲線 .....	84
圖 3.18 近場處置設施觀測點 B 之濃度曲線 .....	85
圖 3.19 近場處置設施 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(1 年) .....	85
圖 3.20 近場處置設施 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(100 年) .....	86
圖 3.21 近場處置設施 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(1,000 年) .....	86
圖 3.22 近場處置設施 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(10,000 年) .....	87
圖 3.23 近場處置設施 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(100,000 年) .....	87
圖 3.24 遠場距處置設施 400 公尺之觀測點位示意圖 .....	88
圖 3.25 遠場 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(100 年) .....	89
圖 3.26 遠場 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(1,000 年) .....	89
圖 3.27 遠場 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(10,000 年) .....	90
圖 3.28 遠場 $^{14}\text{C}$ 核種外釋濃度分布圖(100,000 年) .....	90
圖 4.1 區域尺度水文地質模型之水文地質單元(台灣電力公司，2017a) .....	94
圖 4.2 達仁鄉建議候選場址三維數值模型示意圖(a)區域尺度(b)場址尺度(台灣電力公司，2017a) .....	94
圖 4.3 場址尺度水文地質分界示意圖(台灣電力公司，2017a) .....	95
圖 4.4 區域尺度地下水模擬地下水頭流場向量分布圖(單位：m)(台灣電力公司，2017a) .....	100
圖 4.5 場址尺度地下水模擬流場示意圖(台灣電力公司，2017a) .....	100
圖 4.6 達仁溪流域關鍵群體之核種濃度歷線圖(台灣電力公司，2017a) .....	102
圖 4.7 塔瓦溪流域關鍵群體之核種濃度歷線圖(台灣電力公司，2017a) .....	102
圖 4.8 達仁溪流域設計情節下個人年有效劑量分析結果(台灣電力公司，2017a) .....	103
圖 4.9 塔瓦溪流域設計情節下個人年有效劑量分析結果(台灣電力公司，2017a) .....	103
圖 4.10 距處置設施一公里之點位示意圖 .....	105
圖 4.11 相異之水力傳導係數下 $^{14}\text{C}$ 核種的濃度曲線 .....	108
圖 4.12 相異之水力傳導係數下 $^{129}\text{I}$ 核種的濃度曲線 .....	108
圖 4.13 距處置設施 1km 之點位示意圖 .....	109

圖 5.1 近岸環境處置遠場概念示意圖(李明旭、陳瑞昇，2015).....	111
圖 5.2 近岸環境處置因海平面上升之遠場概念示意圖(李明旭、陳瑞昇，2015) .....	111

## 表目錄

表 2.1 波羅的海沿岸 Forsmark 地區之氣候(SKB, 2014a) .....	4
表 2.2 溫帶氣候及冰緣氣候之地下水組成表(TR-14-01 Table 6-8).....	19
表 2.3 處置場化學演化的重要項目(SKB, 2014a) .....	20
表 2.4 溫帶氣候前 1,000 年齡淡水地下水成分表(Gimeno et al., 2011, Nilsson et al., 2011, Auqué et al., 2013).....	22
表 2.5 水泥孔隙水成分(mg/L) (TR-14-01 Table 6-4).....	22
表 2.6 工程障壁演化的評估要項(SKB, 2014a) .....	24
表 2.7 各情節發生之機率(TR-14-01 Table 7-8).....	28
表 2.8 替代情節之不確定性(SKB, 2014a) .....	37
表 2.9 其他情節對應之安全功能(TR-14-01, Fig 7-2).....	41
表 2.10 組合情節之不確定性 (TR-14-01 Table 7-7).....	47
表 2.11 參考演化情節之差異(台灣電力公司, 2017a).....	48
表 2.12 處置設施氧化還原狀態(台灣電力公司, 2017a).....	50
表 2.13 工程障壁於正常劣化條件下之水力傳導係數比(台灣電力公司, 2017a) .....	51
表 2.14 達仁鄉建議候選場址之情節設置(台灣電力公司, 2017a).....	52
表 2.15 工程障壁於加劇劣化條件下之水力傳導係數比(台灣電力公司, 2017a) .....	55
表 2.16 工程障壁在地震情節下水力傳導係數比(台灣電力公司, 2017a).....	55
表 2.17 參考演化案例 .....	62
表 2.18 LLWD 2016 報告與 SKB SR-PSU 報告之參考演化項目比較.....	63
表 2.19 LLWD 2016 設計情節與 SKB SR-PSU 主要情節項目比較.....	65
表 2.20 LLWD2016 報告替代情節與 SKB SR-PSU 替代、其他與剩餘情節比較..	66
表 3.1 台東達仁鄉遠場模擬設置(台灣電力公司, 2017a).....	69
表 3.2 近場處置設施模擬設置(台灣電力公司, 2017a).....	71
表 3.3 達仁鄉建議候選場址最大處置容量 .....	76
表 3.4 單一長半化期核種濃度值(台灣電力公司, 2017a).....	77
表 3.5 單一短半化期核種濃度值 (台灣電力公司, 2017a).....	77

表 3.6	55 加侖桶內含之母核種及活度(台灣電力公司，2017a).....	78
表 3.7	第 1 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA，2013) .....	78
表 3.8	第 2 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA，2013) .....	79
表 3.9	第 3 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA，2013) .....	79
表 3.10	第 4-10 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA，2013) .....	79
表 3.11	第 11 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA，2013) .....	80
表 3.12	低放射性廢棄物關鍵核種(台灣電力公司，2017a).....	80
表 3.13	距場址 400 公尺點位之核種濃度占比 .....	88
表 4.1	55 加侖桶內含之母核種及活度(台灣電力公司，2017a).....	92
表 4.2	區域尺度水文地質單元參數特性(台灣電力公司，2017a).....	93
表 4.3	場址尺度水文地質單元參數特性(台灣電力公司，2017a).....	93
表 4.4	工程障壁於正常劣化條件下之水力傳導係數比(達仁鄉建議候選場址) (台灣電力公司，2017a).....	97
表 4.5	近場最大倍率之水力傳導係數 .....	98
表 4.6	<sup>94</sup> Nb 衰變鏈之分配係數(台灣電力公司，2017a).....	98
表 4.7	達仁河流域關鍵核種外釋濃度占比(台灣電力公司，2017a).....	101
表 4.8	塔瓦河流域關鍵核種外釋濃度占比(台灣電力公司，2017a).....	101
表 4.9	本研究與 LLWD2016 報告之場址區域流場模擬結果比較 .....	104
表 4.10	達仁河流域之關鍵核種外釋濃度占比 .....	105
表 4.11	塔瓦河流域之關鍵核種外釋濃度占比 .....	106
表 4.12	比較濃度峰值出現時間差異—達仁溪.....	107
表 4.13	比較濃度峰值出現時間差異—塔瓦溪.....	107
表 4.14	<sup>14</sup> C 核種距處置設施 1km 位置之各點位濃度占比.....	109

# 第一章 前言

放射性廢棄物最終處置場之長期安全係經由各項安全功能評估佐證，為確保處置場於長期氣候演化影響後依然能保有其安全性，參考演化及設計情節被視為長期評估之要項，其評估之要點含括初始狀態、內部作用及外部條件對核種外釋傳輸途徑及機制所造成之不確定性影響。因此國際先進國家利用過去氣候演化趨勢，透過預測人為溫室氣體排放量及日照變化，推估未來可能發生之氣候演化，提出參考演化及設計情節，藉此確保安全評估之不確定性屬可包容範圍。其中瑞典 SKB 已建立一系列安全評估技術報告，並涵蓋參考演化與設計情節之相關內容，本研究研析 SR-PSU 主報告 TR-14-01(Safety analysis for SFR Longterm safety: Main report for the safety assessment SR-PSU) 之參考演化與設計情節，分析參考演化與設計情節影響核種傳輸之關鍵資訊，並比較國內「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告(LLWD 2016)」(台灣電力公司，2017a)與 TR-14-01 報告之差異，審視兩者間關鍵資訊及採用之假設與數據的相異點，藉此精進國內最終處置技術，提升國內處置場長期安全評估技術能力。

台灣經濟部於 101 年 7 月 3 日核定公告兩處建議候選場址，處置方式皆以坑道處置為主，分別為「台東縣達仁鄉」近岸處置及「金門縣烏坵鄉」海床下坑道處置，兩者因應環境與氣候的差別，場址特性亦有所差異，近岸坑道處置與所在區域水文地質環境是否具備足夠之遲滯功能為要點，著重於海岸地區與近岸海域之遠場分析，而金門海床下坑道處置則以海床下之海洋外釋為主。本計畫選定台東縣達仁鄉建議候選場址，延續過去三年度參考瑞典 SKB SR-PSU 技術報告，所建置之技術成果（李明旭與陳瑞昇，2016；李明旭，2017，2018），改進使用 HYDROGEOCHE 系列模式所發展之近岸環境坑道處置多子核種傳輸驗證技術之網格與模擬策略，發展設計情節之核種傳輸模擬架構，以台東縣達仁鄉處置場址為研究案例，參考 LLWD 2016 設計情節核種傳輸模擬結果，參考該報告設施設計與參數進行設計情節之核種傳輸平行驗證模擬，並說明模擬結果相異性與主要差異成因。

本子計畫團隊為發展低放射性廢棄物坑道處置之多子核種傳輸驗證技術，歷年來已研析多本瑞典 SR-PSU 技術報告，如 TR-14-01、TR-14-04(Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU)、TR-14-05(Geosphere



Process Report for the Safety Assessment SR-PSU)、TR-14-09(Radionuclide Transport and Dose Calculations for the Safety Assessment SR-PSU)等，並於過去三年度建置近岸環境之多子核種傳輸遠場數值模擬技術、多子核種傳輸近場數值模擬技術，以及近岸坑道處置多子核種傳輸模擬技術，本年度主要建置設計情節多子核種傳輸模擬技術，基於歷年技術建置經驗與國際報告研析心得綜整後，提出相關技術發展建議精進我國核種傳輸模擬技術。

我國低放射性廢棄物處置技術之安全分析報告審查相關技術，在物管局投入多年資源與學者專家努力下，大致涵蓋水文、地質、地球科學、工程技術等各領域，期間提出之報告書如：低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式之審查技術(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)、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(李明旭、陳瑞昇，2016)、低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證技術研究(李明旭，2017)、低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證評估之研究(李明旭，2018)。本年度更子計畫四針對核種傳輸驗證技術成果，將源項、處置設施設計、水文地質、情節設計、未來演化等進行比較分析，探討安全報告審查規範中核種傳輸驗證部分是否充足，並提出我國合適之低放射性廢棄物坑道處置場址安全報告審查規範中關於核種傳輸驗證之精進建議。

民眾對最終處置計畫信心之重要關鍵在於場址安全評估之可信賴度，其完整性及正確性可確保最終處置場址之長期安全性，為使國內處置場安全評估內容符合國際水準，國內集結各領域專家研析國外報告提取精華，積極精進技術與國際接軌。本子計畫之目標除發展放射性核種傳輸模擬技術，與國內報告進行相關驗證外，亦期待透過先進模式模擬工具技術發展協助管制單位得以建立獨立之安全評估模擬審驗技術，精進審查端之規範及技術，使安全評估成果更具公信力。

## 第二章 設計情節與參考演化影響核種傳輸之關鍵資訊

### 研究

放射性廢棄物處置場之核種外釋傳輸途徑與機制受到初始狀態、內部作用、及外部條件的影響，為避免未來外部條件演化的不確定性造成風險，研析瑞典 SR-PSU 主報告 TR-14-01 之參考演化與設計情節，釐清長期演化影響核種傳輸之關鍵資訊，並了解國際上情節設計考量要素，並於 2.4 小節比較國內 LLWD 2016 報告與 TR-14-01 報告之差異，探討兩者處理核種傳輸相異處、採用之假設與數據的差異性。

#### 2.1 參考演化

處置場封閉後之長期安全性受封閉時的初始狀態、封閉後的外部條件、處置設施內部演化過程等影響，而外部條件中之氣候演化影響涵蓋甚廣，如海岸線變遷、海水入侵、處置設施工程障壁腐蝕等皆與氣候演化直接或間接有關，為瞭解處置場封閉後的可能演化，並藉此減少氣候演化影響處置安全之不確定性，安全評估中考慮一系列未來氣候演化以釐清影響處置設施長期安全之外部變因。本節研析瑞典 TR-14-01 報告參考演化內容，提出可能發生之氣候演化案例，並依照下列項目逐項說明氣候演化造成之影響，以瞭解國際對未來氣候演化之推估方法及氣候演化影響核種傳輸之關鍵資訊。

1. 地表系統的演化 (Evolution of the surface systems)。
2. 熱流演化 (Thermal evolution)。
3. 力學演化 (Mechanical evolution)。
4. 水文地質演化 (Hydrogeological evolution)。
5. 近場水文循環演化 (Near-field hydrological evolution)。
6. 地球化學演化 (Geochemical evolution)。
7. 廢棄物的化學演化 (Chemical evolution of the waste)。
8. 工程障壁的演化 (Evolution of engineered barriers)。

##### 2.1.1 外部條件

影響處置場安全之外部條件涵蓋各項因氣候演化繁衍之不確定性因素，先說

明 SKB 各項演化推估依據，並簡介氣候之定義。瑞典 SKB 既有報告 SAP-08 (中低放射性廢棄物處置場) 及 SR-Site (核燃料廢棄物處置場) 依據目前科學對氣候演化之認知，認為人為溫室氣體排放量以及未來日照長度演化，將造成未來 10 萬年之氣候發展與過去既有之氣候演變趨勢相異，報告中以過往 12 萬年間之氣候演化趨勢作為基底加入人為溫室氣體排放量及日照微小變化作為變因模擬重建，提出兩種可供選擇之未來氣候發展趨勢。

為盡力涵蓋所有可能之氣候發展情況，將人為溫室氣體排放量未來變化趨勢分為低、中、高三種程度，並提出三種參考案例，分別為早期冰緣氣候案例、全球暖化氣候案例以及延伸全球暖化氣候案例，如表 2.1 為波羅的海沿岸 Forsmark 地區之不同氣候演化說明，而各氣候案例演化情形之詳細內容如後說明，圖 2.1、圖 2.2、圖 2.3 為 Forsmark 氣候案例隨時間演化情形，圖中涵蓋永凍土、凍結深度以及海岸線高度之相對變化等細節，時間軸 0 ka AP 則對應於西元 2,000 年。

表 2.1 波羅的海沿岸 Forsmark 地區之氣候(SKB, 2014a)

名稱	溫帶氣候 (The temperate climate)	冰緣氣候 (The periglacial climate)	冰河氣候 (The glacial climate)
溫暖程度	高	中	低
降雨	降雨	降雨/雪	降雪
永凍土及冰層	無	有永凍土存在，無冰層	長年覆蓋冰層/冰河

1. 早期冰緣氣候案例 (Early periglacial climate case) :

此案例中假設低人為溫室氣體排放，假設低度人類碳排放量及大氣中二氧化碳濃度下降趨勢較快，屬不確定性範圍之下限。西元 17,500 至 20,500 年間，大氣中二氧化碳濃度快速降低，導致 Forsmark 夏季太陽輻射降低時期有利永凍土發展條件，而西元 20,500 至 52,000 年間 Forsmark 回暖成為溫帶氣候，並於西元 52,000 年開始，以現有之全球暖化氣候條件假設大氣中二氧化碳濃度降低促使冰河時期開始發展，於評估後期約一萬年間則出現週期性之冰緣氣候，如圖 2.1。

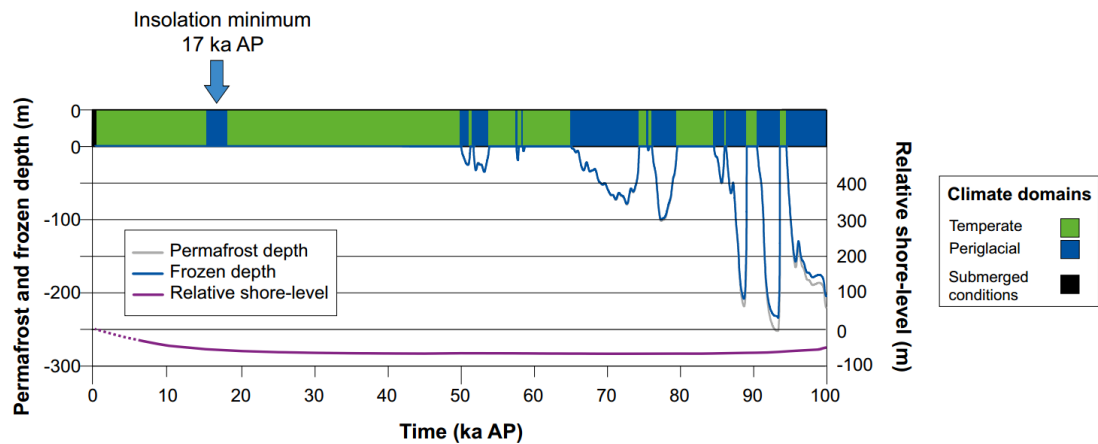


圖 2.1 Forsmark 早期冰緣氣候案例環境條件隨時間之變化(TR-14-01 Fig 6-2)

2. 全球暖化氣候案例 (Global warming climate case) :

此案例中人為溫室氣體排放量為中等，聯合國政府間氣候變遷小組(IPCC, 2013)依據現有之全球暖化氣候條件以本世紀及下一個世紀之人為碳排放量皆為中等作為設定進行演化推估。西元 52,000 年開始，大氣中二氧化碳濃度緩慢下降，致使北半球冰層開始發展，而西元 52,000 至 102,000 年間則假設全球氣候逐漸降溫，北半球間歇性冰層堆積，並參考 Weichselian 冰河循環(Weichselian glacial cycle)，假設後期長達一個世紀至一萬年不等之氣候演化以週期性冰緣氣候為主 (Climate report, 2014)，如圖 2.2。

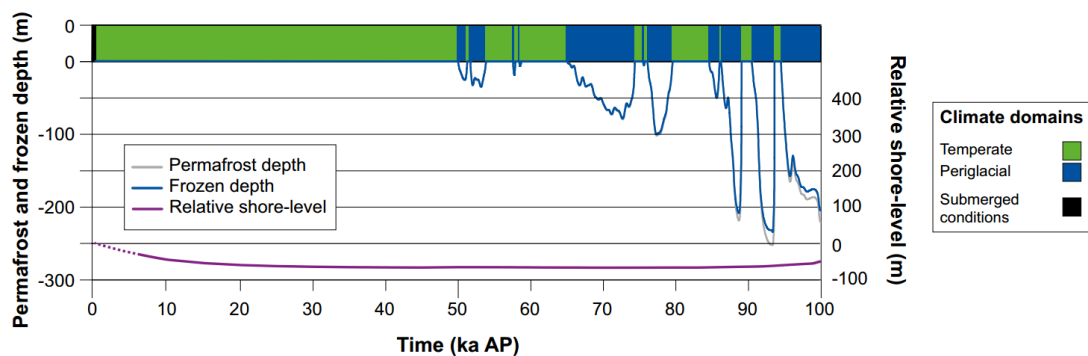


圖 2.2 Forsmark 全球暖化氣候案例環境條件隨時間之變化(TR-14-01 Fig 6-1)

3. 延伸全球暖化氣候案例 (Extended global warming climate case) :

此案例為高度人為溫室氣體排放，聯合國政府間氣候變遷小組(IPCC, 2013)推估倘若未來本世紀及下一個世紀大氣中之二氧化碳濃度遠高於工業化之前，北半球之冰河時期將延遲至西元 102,000 年左右才會開始發展，如圖 2.3。

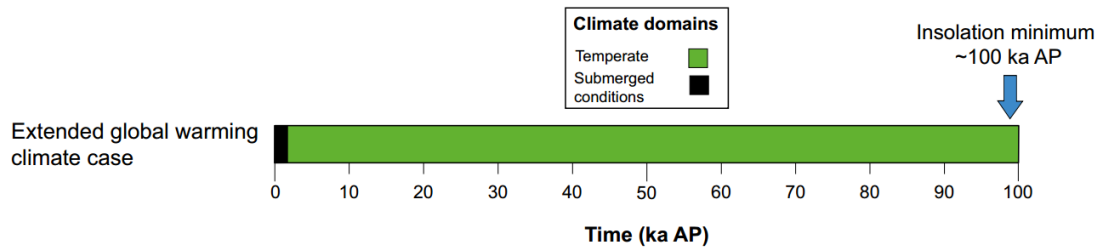


圖 2.3 Forsmark 延伸全球暖化氣候案例環境條件隨時間之變化(TR-14-01 Fig 6-3)

因應各氣候案例冰河發展時期相異，且氣候生成時間皆有所不同，為探討影響處置場安全性之關鍵要素「海平面演化」，將全球暖化案例作為海平面演化之下限，且以最晚發展冰河之延伸全球暖化案例作為上限，涵蓋所有未來海平面演化不確定性範圍，而早期冰緣氣候案例之氣候與全球暖化案例較為相似，故兩者海平面演化情形相似。海平面之演化主要受到兩項因子影響，其一為地殼均衡 (isostasy)，係指由冰河作用或冰河消融所引起的地殼垂直變動，而海平面升降 (eustatic) 則受到平均海洋體積變化控制。

瑞典 Forsmark 地區 SFR 處置場受到波羅的海覆蓋，現今之最大水深高於 SFR1 設施 7.2m，SFR3 設施 5.3m。此地域之海平面演化需自西元前 8,800 年最後一次冰河消融結束開始推估，當時此區域約被 150 公尺深之冰湖水淹沒，最接近之海岸線則位於 Forsmark 以西約 100 公里處(Climate report, 2014)，伴隨時間增加，地殼均衡回彈效用持續降低，估計約於西元 30,000 年地殼均衡之影響將可忽略，目前冰河均衡回彈(glacial isostatic rebound, GIA)約為 8 mm/yr(Climate report, 2014)，且依據熱膨脹及冰河/冰層融化作用，推估未來海平面將會緩慢上升持續數千年。

全球暖化氣候案例中，經由 GIA 模擬得知，未來 1,000 年內格陵蘭冰層將完全融化，預計導致全球海平面總共增加 7m，但因重力效應(gravitational effects)的存在，Forsmark 地區不會出現海平面上升現象，藉此推測，未來之海平面演化將不會高於現今之海平面高度，且處置場上方區域形成陸地化需約 1,000 年，SFR1 及 SFR3 設施上方則需 1,200 年方能完全成為陸域，(Climate report, 2014)。而在延伸全球暖化案例中，預估未來 1,000 年間全球海平面總高度將增加約 10m (Climate report, 2014)，當海平面上升趨勢超過地殼均衡回彈作用，將導致冰層消融結束，初期產生約 1,200 年之淹沒期，淹沒期和冰層消融期總共 2,200 年的時長，導致此案例中 SFR1 及 SFR3 設施上方陸地化較全球暖化案例遲 1,000 年。

## 2.1.2 參考演化對場址之影響

氣候變遷及各項長時間尺度之場址演化影響範圍甚廣，為探討場址長期安全性，將外部作用及場址演化所產生之影響概分為 8 項說明，又因應氣候之類型不只一種，將概分為場址封閉後 1,000 年間、封閉 1,000 年後之溫帶氣候、封閉 1,000 年後之冰緣氣候個別進行探討。

### 1. 地表系統的演化 (Evolution of surface systems) :

Forsmark 地區之地表系統演化受到氣候變化及海平面演化兩項主要變因控制，兩項變因之結合直接影響到生態系統的發展，倘若未加以評估，核種傳輸途徑之不確定性可能造成風險。

#### (1) 場址封閉後 1,000 年間(封閉初期) :

Forsmark 地區建模顯示如圖 2.4，西元 1,000 年前第一個從海洋浮現之島嶼需花費約 3,000 年的時間方能從淹沒區轉移，並且在西元 11,000 年時海洋轉變為湖泊耗時約 9,000 年。根據恆定 6 mm/yr 的海岸水平變化率，在封閉後 1,000 年間海岸線之垂直分量預估會增加 6m，藉此判定西元 3,000 年時海平面高度將達到 SFR 處置場上方。於高海平面期間，大部分的湖泊將轉變為濕地，伴隨海平面之演化，淺水區域中曝露在海洋波浪底部之表面將會受到侵蝕，預計在 1,000 年間鹽度將略為降低至 4.8% 左右。經由人類行為推估得知，過去曾為海洋或湖泊之新生土地因富含沉積物，將具有耕種潛力，供水來源短時間內將保持不變，待處置場南方區域鹽度下降，即可作為淡水水庫使用。

以上關於場址封閉後 1,000 年間之演化推估皆適用於全球暖化及早期冰緣氣候案例，而延伸全球暖化案例則受到海平面上升程度之不確定性影響，會有海平面上升及海侵的現象，但於西元 3,000 年時地殼均衡回彈作用已抵銷海平面上升，促使海岸線位置與現況大致相同。

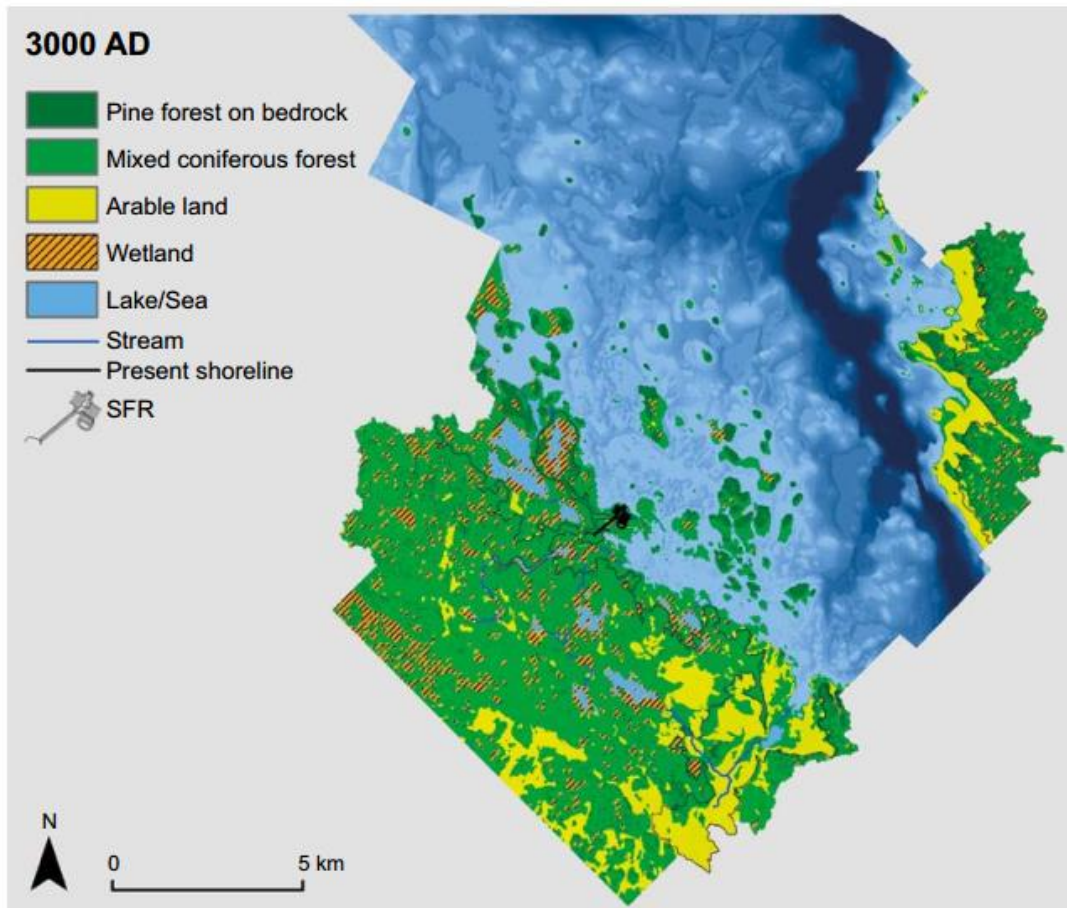


圖 2.4 全球暖化氣候案例中 Forsmark 地區於西元 3,000 年之植被與土地利用模型分布圖(TR-14-01 Fig 6-4)

(2) 封閉 1,000 年後之溫帶氣候：

西元 3,000 年至 12,000 年間，假設海岸線持續下降，並於前期擁有 1,000 年 1 公里的水平移動量，以 Öregrundsgrepen 海灣為例，受此影響的海灣逐漸縮小成為峽灣，並於西元 12,000 年形成湖泊，預計在 2,000 至 6,000 年間湖泊將被填充轉化為沼澤（Brydsten and Strömrgren, 2010；Biosphere synthesis report, 2014），而 SFR 處置場亦受到影響成為內陸環境，如圖 2.5。其它演變如西元 6,000 年左右之海洋盆地鹽度，預計下降 3-4%，導致海洋物種豐富度降低，淡水物種增多，與北方 Kvark 地區的生態系統類似，其含鈣沉積物的影響將逐漸降低(Andersson, 2010)。

為推估人類行為對地表演化之影響，圖 2.5、2.6 為推估西元 5,000 年時 Forsmark 地區全球暖化案例中有無人為干擾之植被及土地利用分布，圖 2.6 中，上圖為未受人為干擾之全球暖化案例，而下圖模擬係以現今土



地利用狀況進行推估之延伸全球暖化案例，相較之下得知地貌並不會受到人為因素干擾，如將圖 2.5 上圖與圖 2.6 下圖相互比較，可發現圖 2.5 上圖之可耕地面積較多，差異原因為不同之海平面演化及未來植被發展，例如延伸全球暖化案例圖中仍有大片海洋，而橡樹及落葉林分別取代全球暖化案例之松樹及混合針葉林。

剩餘的評估期如圖 2.7，西元 40,000 年之地表景觀示意圖說明在未來溫帶條件下，森林及沼澤為主要地貌之陸地生態系統，農業將出現在擁有沉積物或有機土壤之區域，高海拔地區將被松樹覆蓋。

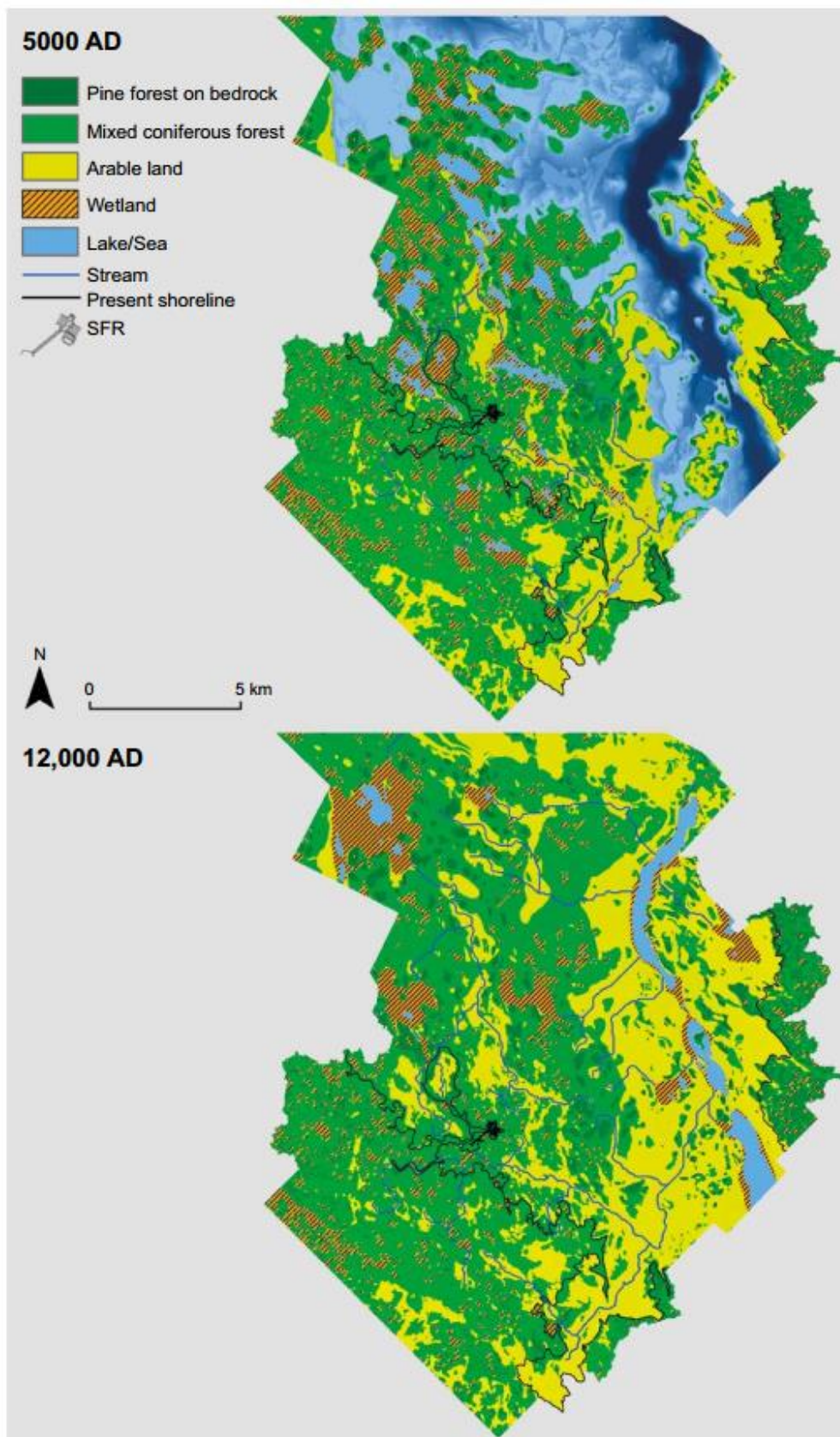


圖 2.5 西元 5,000 年及西元 12,000 年 Forsmark 地區於全球暖化氣候案例中之植被及土地利用分布圖(TR-14-01 Fig 6-16)

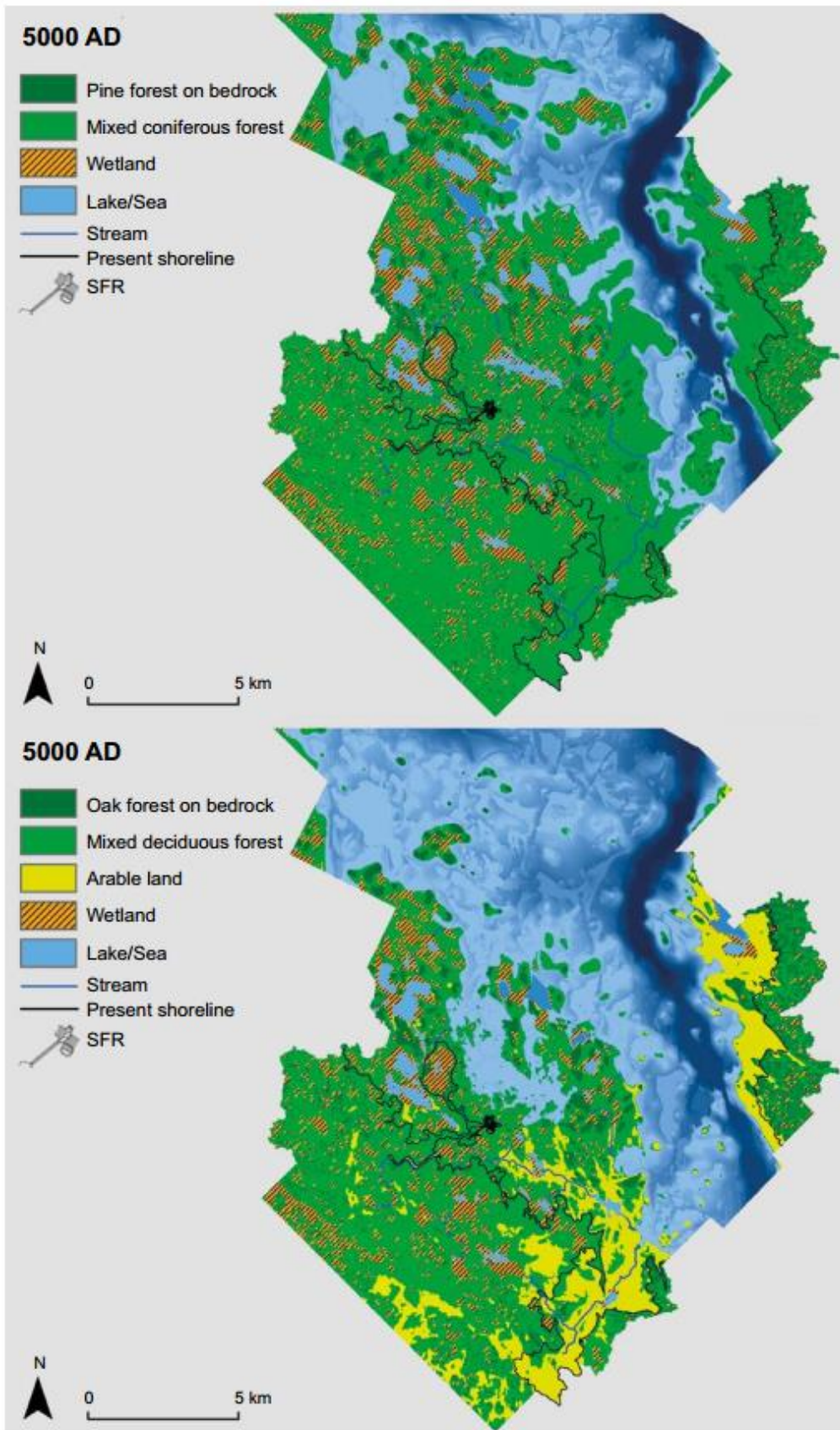


圖 2.6 西元 5,000 年 Forsmark 地區植被及土地利用狀況 (TR-14-01 Fig 6-17)



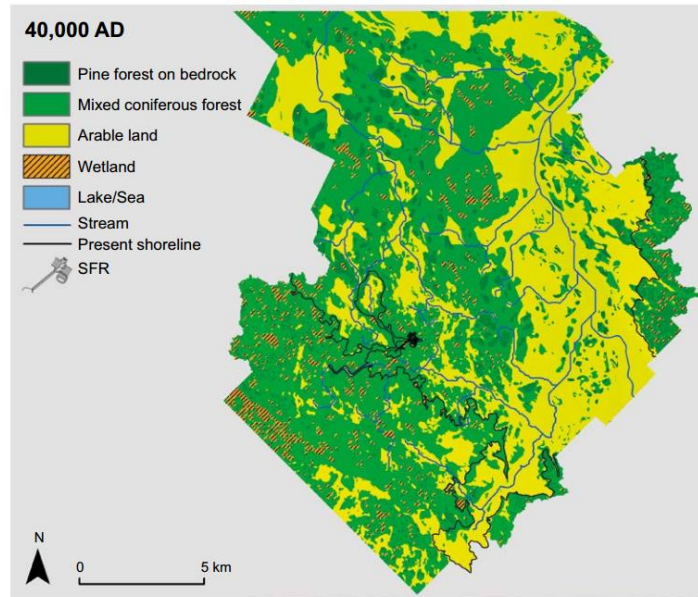


圖 2.7 Forsmark 地區西元 40,000 年之植被及土地利用分布圖(TR-14-01 Fig 6-18)

(3) 封閉 1,000 年後之冰緣氣候：

圖 2.8 為西元 20,000 年左右冰緣氣候下之植被及土地利用分布，陸地上植被由莎草科、草本植物及灌木組成，而裸露區域可區分為乾燥或潮濕區域，乾燥區域植被多為地衣，而潮濕表面則以苔蘚居多，蒸散量低導致溼地範圍甚廣。其他未結凍的地區為凍土融區（taliks），通常位於湖泊或河流下方，為冰緣氣候放射性核種傳輸至生物圈之唯一途徑。

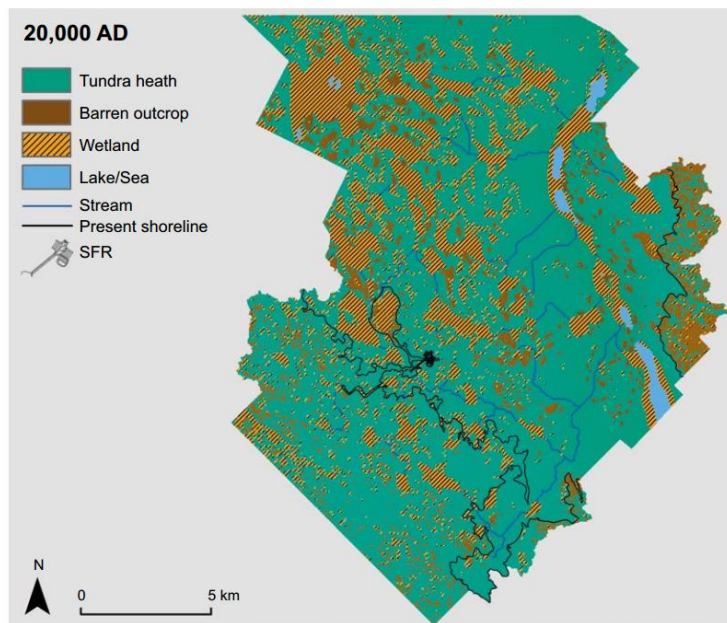


圖 2.8 西元 20,000 年 Forsmark 地區冰緣氣候植被及土地利用分布圖(TR-14-01 Fig 6-28)

## 2. 熱流演化 (Thermal evolution) :

場址封閉後 1,000 年間(封閉初期)與封閉 1,000 年後之溫帶氣候擁有相似之熱流演化，能量傳輸通過熱傳導進行，故處置場溫度受到周圍岩石與地下水的熱交換作用影響，而傳輸速度則受到處置場材料的熱傳導係數及比熱控制。SFR 處置場中並無明顯熱源，且於封閉後 1,000 年間氣候變化並不會導致處置場結冰，因此溫度對處置場的影響甚微。

封閉 1,000 年後之冰緣氣候溫度可能足以使整座處置場結冰，故西元 17,500 至 20,500 年間不排除產生凍土，溫度將低於 0°C，而西元 52,000 年永凍土產生期間，處置場溫度約為-3°C 或更低。

## 3. 力學演化 (Mechanical evolution) :

### (1) 場址封閉後 1,000 年間(封閉初期)與封閉 1,000 年後溫帶氣候 :

力學演化係探討邊界條件變化的結果，例如冰期凍土導致地面隆起、挖掘爆破導致應力重新分布等。另外，SFR 處置場之結構及設備皆會直接或間接的與母岩接觸，以膨潤土為例，其膨脹壓力來自結構的荷重，故兩者交界處的岩壁可能產生裂隙，而溫帶氣候環境初期，岩壁會持續劣化，將加大岩洞周圍局部應力的改變(Geosphere process, 2014)。

BMA 及 BLA 設施之長期穩定性針對兩項主要研究議題，首先為分析上方岩石鬆動之風險，其次為處置窖間支柱不穩定之風險。模擬結果顯示，岩石崩落進處置窖之空隙，並將其填滿，此時鬆散的岩體形成穩定拱型，高度停止於頂壁上方 34 公尺處，並在任何風險分析情況下皆不會與海底連通。實驗結果亦顯示，BMA 及 BLA 處置窖間之支柱結構具足夠穩定性(Mas Ivars et al., 2014)。

考慮經長時間演化後岩壁鬆動掉落於膨潤土回填材料，可能降低膨潤土膨脹壓力、擴散遲滯層變薄或岩壁中產生開放性空隙，經由模擬分析得知，岩石表面可能大量產生位移，導致膨潤土受到壓密作用，並且回脹壓力增加直到膨潤土工程障壁厚度趨於穩定(Börgesson et al., 2014)。

地震可直接影響處置場之結構穩定性，目前 Fennoscandian 地盾的地震活動非常低，但不排除 10,000 年間可能產生板塊內部型地震，由於無法預測發生時間及強度，可利用替代情節進行處理。

(2) 封閉 1,000 年後之冰緣氣候：

此氣候之地下溫度較低且地下水結凍，而溫度變化及結凍過程將導致岩石變形、生成裂縫、擴大既有裂縫 (Geosphere process report, 2014)。

4. 水文地質演化 (Hydrogeological evolution)：

水文地質模型是以天然水文邊界條件(集水區邊界)加上海平面演化(外部邊界)做為邊界條件，銜接遠場水文地質模型及近場水文地質模型，輸入參數包含處置場周圍岩體、破碎帶及處置設施之各項結構。水文地質系統的長期演化受到氣候演化及海平面演化所控制，海平面的演化將造成地下水邊界條件改變，而流動於裂隙間之地下水可視為放射性核種自處置窖離開之主要途徑。

(1) 場址封閉後 1,000 年間(封閉初期)：

場址封閉後 1,000 年間可區分為初始的淹沒狀態 (Submerged conditions)及將近 1,000 年時的海濱狀態(Shore conditions)。淹沒狀態之地下水流動的主要因素為海平面演化，當區域由湖泊變為旱地時，地下水流量將隨著梯度增加而變化，在此期間通過處置窖之地下水將於海底排放 (Odén et al., 2014)。如圖 2.9 所示，海岸線的遷移迫使地下水排放區向處置場之北北東及西北方向移動，水流初期為向上流動而後期則為水平移動。地下水排放區的追蹤粒子密度(particles/surface unit)與變形區(黑線及白色區域)密切相關，其中白色區域變形區寬度為地表區域之厚度。西元 2,000 至 2,500 年間 SFR 1 粒子主要釋出途徑為 ZFMNNW1209 變形區，而 SFR3 的粒子釋出位置早期位於 SFR 南邊及北邊的兩個碼頭，後期排放區向北遷移(ZFMNW0805A)。封閉後 1,000 年時海岸線位於處置場上方，故稱海濱狀態，如圖 2.10，地下水流動狀態與地形平行，粒子依然於海底排出。

(2) 封閉 1,000 年後之溫帶氣候：

當海岸線遠離處置場後，演化為陸域環境，並於西元 5,000 年時擁有穩定流場。研究顯示，西元 9,000 年的狀態可代表評估期間之溫帶氣候 (Odén et al., 2014)，如圖 2.11 所示，在此狀態下 SFR1 設施的粒子聚集於 ZFMNNE0869 和 ZFMNW0805A，而 SFR3 早期排放區位於碼頭北部及南部，後期隨地形往北部凹陷處移動，少數排放到湖泊或溪流中。另外，未來人類可能因鑿井抽取地下水而改變鑽孔區域附近之流場，倘若鑿井於變形區，

鑿井造成之影響將加大，如處置場位於影響區域範圍內，而地下水流量將受到抽水量影響。

(3) 封閉 1,000 年後之冰緣氣候：

在永久凍土期間，部分區域被凍結，形成不透水表面，限制大氣降水、入滲及地下水補注等，促使地下水流動於更深層的位置，而未凍結區可能存在潛在梯度。在此氣候環境下，流量相關之傳輸阻力增加(途徑及時間增長)，圖 2.12 顯示，超過 99%的粒子由無凍土融區(taliks)向東北方排放，而放射性核種因此期間地下水為低水力傳導係數，故無法釋放至生物圈。

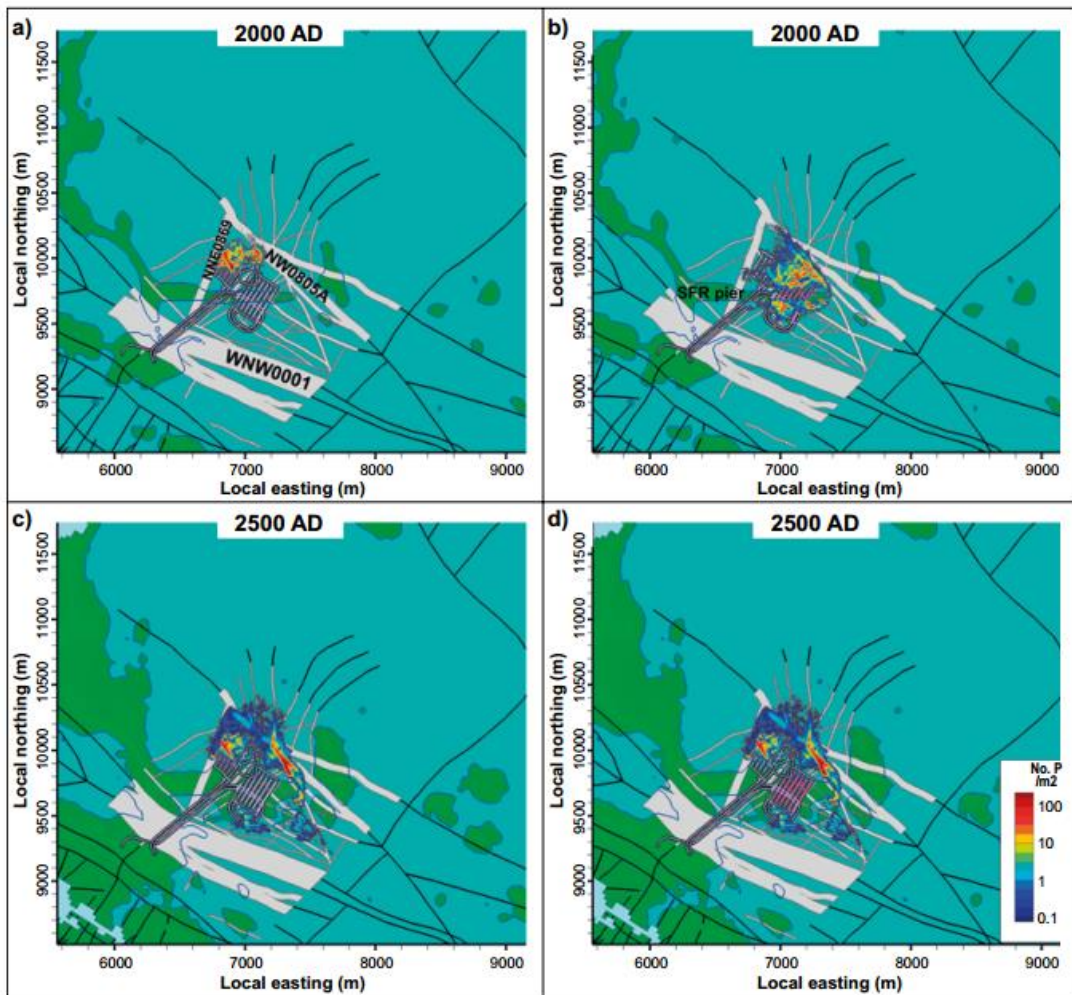


圖 2.9 西元 2,000 年至 2,500 年 SFR1(a、c，粉紅色位置)、SFR3(b、d，粉紅色位置)粒子(右下圖例)排放區位置圖(TR-14-01 Fig 6-5)



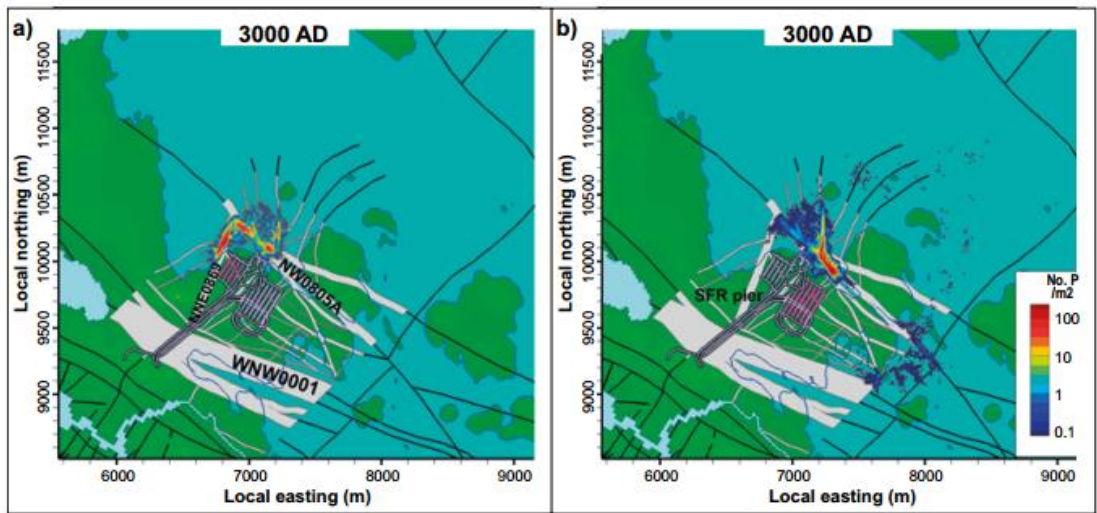


圖 2.10 西元 3,000 年 SFR1(a, 粉紅色位置)、SFR3(b, 粉紅色位置)粒子(右下圖例)排放區位置圖(TR-14-01 Fig 6-6)

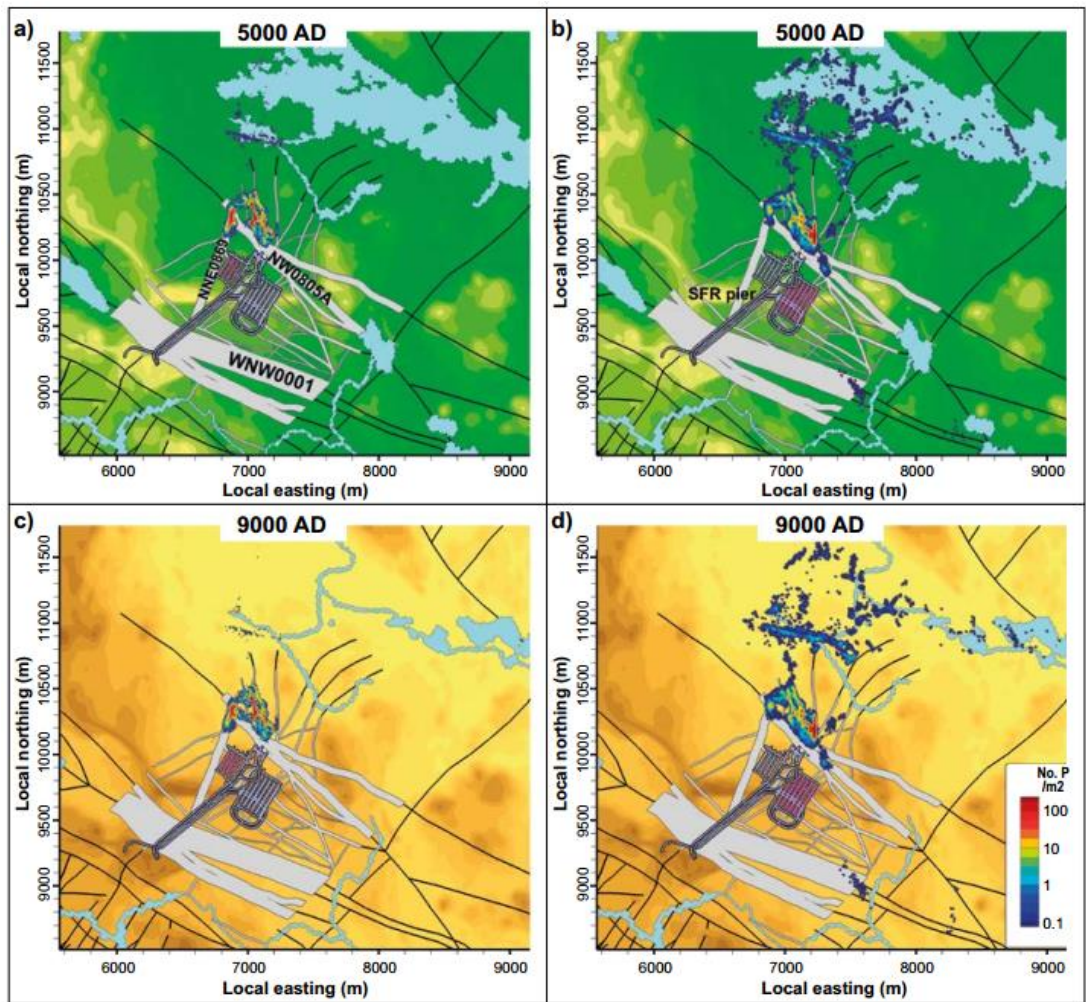


圖 2.11 西元 5,000 年至 9,000 年 SFR1(a、c, 粉紅色位置)、SFR3(b、d, 粉紅色位置)粒子(右下圖例)排放區位置圖(TR-14-01 Fig 6-19)

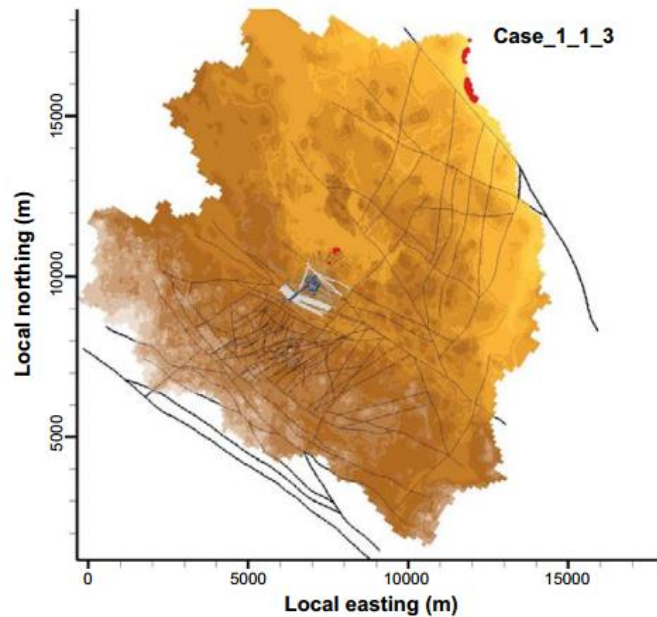


圖 2.12 SFR1 及 SFR3 粒子排放出口示意圖(TR-14-01 Fig 6-30)

#### 5. 近場水文循環演化 (Near-field hydrological evolution) :

水文地質模擬結果顯示，SFR3 的存在對 SFR1 的地下水流量影響甚微 (Öhman et al., 2014)，圖 2.13 顯示地下水流過 SFR1 與 SFR3 處置窖之總流量 ( $\text{m}^3/\text{yr}$ )，海退時梯度壓力將會增加，且處置窖流量從淹沒期(Shoreline position 1)到海濱狀態(Shoreline position 2)相差 2 個數量級，而海濱狀態(Shoreline position 2)到陸域狀態(Shoreline position 3)期間，SFR1 與 SFR3 處置窖之總流量大約增加 50-100%，一旦維持為陸域狀態，地下水流量將趨於穩定。

冰緣氣候期間，當永久凍土前緣位於處置窖上方深度 59m 處，因母岩滲透率降低，通過處置場結構之流量平均減少 80%，倘若永久凍土達到處置窖及其結構之位置，地下水將停止流動，但解凍時水飽和混凝土因凍結產生之裂隙將導致母岩結構性質改變而無法做為有效障壁。

##### (1) 混凝土劣化對近場水文循環演化之影響：

處置場封閉初期，混凝土劣化對於通過處置場的地下水流量影響甚微，在封閉超過 1,000 年後，隨著混凝土劣化持續，水流通過處置窖的比例增加，1BTF 和 2BTF 處置窖從初始狀態到混凝土無法限制水流動的狀態，流量增大約一個數量級，而劣化作用亦影響通過處置窖之流場縱向分布。初始狀態下，局部流經處置窖之地下水與岩石變形區有明顯相關性，中等劣

化環境下，流量增加但縱向分布保持不變，隨著劣化作用持續，處置窖流量增加，而流場分布更顯均勻。

(2) 膨潤土劣化對近場水文循環演化之影響：

處置場封閉後 1,000 年內，膨潤土障壁的水文特性將不會改變。膨潤土劣化可分為力學封塞退化及力學封塞完好兩種情況，力學封塞退化導致膨潤土膨脹空間增加，降低內部膨脹壓力並增加水力傳導係數，密封程度受水流帶走材料(侵蝕，erosion)並在黏土中形成通道(管狀滲蝕，piping)影響，而化學過程的改變可能降低其膨脹能力，膨潤土中等劣化對流場幾乎沒有影響，完全劣化的狀態下，將不再構成流動障壁，流量增加數倍。當力學封塞完好時水流主要通過岩石變形區到達 SFR1 處置窖，而膨潤土的劣化將導致流場重新分配，優先路徑為滲透性高之回填材料，即使膨潤土完全退化，對通過處置窖之流場影響亦為可控範圍，而膨潤土退化之流場伴隨坡道的存在影響逐漸下降，處置窖流量與初始狀態相比增加約 3 倍。

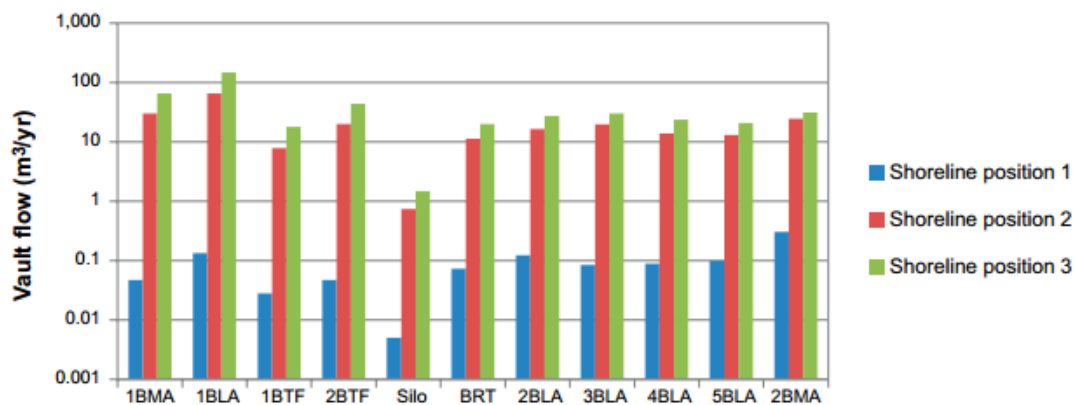


圖 2.13 SFR1 及 SFR3 處置窖隨海岸線演化之流量示意圖(TR-14-01 Fig 6-30)

6. 地球化學演化 (Geochemical evolution)：

地球化學演化與氣候演化、海岸線演變、水文地質演化擁有密切的關聯，各項演化中岩石與水的交互作用以及地下水流動演變皆可影響地球化學演化，如地殼均衡導致地下水流動路徑和流動條件變化，可間接影響水流速度及水流與岩石表面裂隙之接觸時間進而影響地球化學過程。

(1) 場址封閉後 1,000 年間(封閉初期)：

過去之地球化學演化將影響目前及未來之地下水組成，最後一次冰期前 Forsmark 地區僅存在大氣降水成份，冰期後該水與冰河融水進行混和，

此時岩層中裂隙的傳導性增加，後期在 Littorina 海階段，高密度之鹼淡水滲入變形區與原有之地下水混和/置換，伴隨時間增長，岩石中更多的鹽水地下水殘餘物與原有地下水混和/擴散，導致原有之鹼淡水地下水逐漸稀釋，最稀的微鹼地下水深度可達 100 公尺(Nilsson et al., 2011)。為考慮所有可能之範圍，地下水將被分為 4 種主要類型，波羅的海水型、Littorina 海水型(含冰河成份)、微鹼冰河水類型、混和微鹼冰河水類型(過渡期)。處置場附近及下游區域，高 pH 條件源於工程障壁劣化作用，在此假設裂縫之幾何形狀不受溶解及沉降等化學過程影響，因此地下水之流動路徑並不會有顯著改變(Geosphere process report, 2014)。

(2) 封閉 1,000 年後之溫帶氣候：

溫帶氣候期間，裂隙中礦物的溶解及沉澱將影響地下水成份並成為氧化還原條件的緩衝劑，地下水最初成份與鹼淡水相似，近而逐漸稀釋(表 2.2)。

(3) 封閉 1,000 年後之冰緣氣候：

冰緣氣候與溫帶氣候之地下水域相似，且此時處置場並未被海洋覆蓋，當裂隙中的水被凍結，水將不會與岩石基質進行擴散交換，且凍結後將增加液相的鹽度，但此作用並不會對水中的鹽度分布產生任何重大影響。

表 2.2 溫帶氣候及冰緣氣候之地下水組成表(TR-14-01 Table 6-8)

	參考組成	範圍	
		40,000 年前	40,000 年後
pH	7.4	6.6~8.3	6.6~8.3
Eh (mV)	-210	-135~-300	-135~-300
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	190	16~503	5~357
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	50	25~163	17~110
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	300	300~500	120~324
Na <sup>+</sup> (mg/L)	180	65~400	38~250
K <sup>+</sup> (mg/L)	5	5~15	2~5.3
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	50	24~105	7~48
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	12	7~24	2~13
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	12	2~21	12~31

7. 廢棄物的化學演化 (Chemical evolution of the waste)：



廢棄物在此被定義為廢棄物容器周圍所使用的材料、放射性核種、廢棄物固化、廢棄物包件及灌漿等。本項目探討廢棄物的化學演化重要事件及過程，詳列如表 2.3。

表 2.3 處置場化學演化的重要項目(SKB, 2014a)

分類	要項
廢棄物組成/ 包件 (Waste form and packaging)	鋼包件(Steel packaging) 混凝土包件及水泥基質(Concrete packaging and cement matrices) 瀝青廢棄物基質(Waste matrices of bitumen) 離子交換樹脂及助濾劑(Ion-exchange resins and filter aids) 蒸發器濃縮液(Evaporator concentrate) 垃圾及廢金屬(Trash and scrap metal)
水組成 (Water composition)	水泥障壁的孔隙水(Cement barrier porewater) 廢棄物/廢棄物包件的滲濾液(Waste/waste packaging leachate) 含水物種的通量(Fluxes of aqueous species) 膠體(Colloids) 瀝青膠體(Bitumen colloids)
氧化還原 (Redox)	放射性核種的型態(Radionuclide speciation) 金屬腐蝕(Metal corrosion) 有機錯合劑(Organic complexing agents) 洗滌劑(Detergents) 纖維素(Cellulose) 水泥添加劑(Cement additives) 對吸附的影響(Influence upon sorption) 纖維素降解產物(Cellulose degradation products (ISA)) 微生物(Microbiology)
氣體形成 (Gas formation)	腐蝕形成氣體(Gas formation due to corrosion) 微生物活動形成氣體(Gas formation due to microbial activity) 輻射分解形成氣體(Gas formation due to radiolysis) 計算氣體含量(Calculated gas quantities) 存在氣體的影響(Impact of gas formation) 氣體傳輸(Gas transport)

(1) 場址封閉後 1,000 年間(封閉初期)：

I. 廢棄物組成/包件(Waste form and packaging)：

SFR 處置場中廢棄物被水泥或瀝青固化後封裝在鋼/混凝土的包件中，其中鋼包件因腐蝕作用的存在，不視為核種傳輸障壁，但其腐蝕後

產出的鐵氧化物及氫氧化鐵可作為良好的吸附劑。另外，混凝土包件及水泥基質在封閉後的 1,000 年間，經計算證明水泥成份無產生嚴重溶出作用，但倘若鋼筋腐蝕導致體積增加，可能促使鋼筋周圍的混凝土出現裂隙。處置場中的瀝青用於固化中階或低階的廢棄物，是一種膠體，主要由高分子脂肪族和芳香族碳氫化合物組成，而沉積在處置場之瀝青廢棄物主要由離子交換樹脂和相對少量的蒸發鹽組成(Pettersson and Elert, 2001)，當離子交換樹脂和蒸發的濃縮物吸收水份時體積將會膨脹，其膨脹程度主要取決於瀝青的力學性能、廢棄物負載(waste loading)、廢棄物組成的均質性(homogeneity)。

SFR 處置場中最多的有機材料為各種形式之離子交換樹脂，其大多數存在於 1BMA 及處置倉(Silo)，經由各種實驗發現，離子交換樹脂在 SFR 處置場中相對穩定且幾乎不會降解，與其相反之助濾劑(filter aid)則為不穩定狀態，在不到兩個月內可降解約 15%。除此之外，蒸發器濃縮液中含有高度可溶的鹽，而鹽中的硫酸鈉被釋放後將形成可膨脹之鈣礬石(ettringite)礦物，藉此影響水泥廢棄物基質及混凝土包件。

處置場之初始環境為好氧環境，處置設施中的金屬材質在此時期發生有氧腐蝕消耗氧氣，直到無氧時期時轉變為厭氧腐蝕，SKB 假設處置場封閉後五年內氧氣將消耗殆盡。

## II. 水組成(Water composition)：

流入處置場的地下水 pH 值約為 6.6-8.0 其中含有大量  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ，如表 2.4。當地下水流經近場區域時轉變為水泥孔隙水，其組成成分如表 2.5 所示，其中水泥孔隙水的氧化還原電位(Eh)因微生物呼吸及金屬腐蝕消耗氧氣，於處置場封閉後立即降低(Duro et al., 2012)。另外，水泥廢棄物的滲濾液主要由水泥中的可溶性物質決定，pH 值會受到廢棄物和水泥含量影響。膠體、瀝青膠體及含水物種等存在對處置場影響甚小，膠體因含量少並受到抑制；瀝青膠體則因與核種錯合程度較低(Bruno et al., 2013)；含水物種因水泥的存在而不與混凝土障壁進行反應。

表 2.4 溫帶氣候前 1,000 年齡淡水地下水成分表(Gimeno et al., 2011, Nilsson et al., 2011, Auqué et al., 2013)

	組成	範圍
pH	7.3	6.6~8.0
Eh (mV)	-225	-100~-350
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	3,500	2,590~5,380
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	350	74~557.2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	90	40~157
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1,500	850~1,920
K <sup>+</sup> (mg/L)	20	3.8~60
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	600	87~1,220
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	150	79~290
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	11	2.6~17.2

表 2.5 水泥孔隙水成分(mg/L) (TR-14-01 Table 6-4)

	水泥孔隙水	溶出後的水泥孔隙水
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.84	1.92
Cl <sup>-</sup>	2.13	71
Na <sup>+</sup>	644	69
K <sup>+</sup>	3,237	3.9
Ca <sup>2+</sup>	36	800
Si 與 SiO <sub>2</sub> (aq)	22.4	0.084
Al <sub>tot</sub>	1.08	0.054
OH <sup>-</sup>	1,938	612
pH	>13	12.5
離子強度 (M)	0.12	0.061

### III. 氧化還原(Redox)：

處置場中存在鋼材及各種金屬材料，其中鋁、鋅為最快發生腐蝕的金屬，其次為鐵，而材料的腐蝕可促使場址長時間處於還原狀態。在處置場封閉後，以微生物為媒介的有機物氧化迅速，將處置場內氧氣耗盡，而鋼材透過缺氧腐蝕產生氫氣，在封閉的 5 年後，處置場已從氧化狀態變為高度還原狀態。有機錯合劑、洗條劑、纖維素皆可能通過物理、化學、放射性及微生物等進行降解，因此皆可能對處置場的安全功能產生影響，其中，異糖精酸 (isosaccharinic acid, ISA) 為纖維素的降解產物，被證明可以吸附水泥降低水溶液的濃度(Van Loon and Glaus, 1998)，亦可能影響核種的吸附能力。



#### IV. 氣體形成(Gas formation)：

處置場中氣體的形成本源自於廢棄物中的金屬腐蝕、廢棄物包件和混凝土結構中的鋼筋腐蝕、有機質受到微生物降解產生以及廢棄物接觸水，輻射產生氣體，氣體的形成將導致受污染水被排出到混凝土結構周圍的緩衝層，最終進入處置窖周圍岩石的裂隙間，排出的水量取決於氣體產生的壓力，除非氣體壓力足以克服周圍介質的毛細作用壓力，否則氣體不會逸出，為使處置場中的氣體可散逸，必須在處置場中建造導氣通道。

##### (2) 封閉 1,000 年後之溫帶氣候：

封閉 1,000 年後之溫帶氣候化學演化與封閉初期 1,000 年內之演化類似。除 1BLA 外，初期之水泥孔隙水 pH 值約保持在 12.5，且在 SFR1 中延續至 100,000 年。1BLA 中由於缺乏混凝土結構，pH 值將逐漸降低，約於西元 19,000 年其值與地下水相似。1BMA 廢棄物周圍之混凝土障壁 pH 值逐漸降低，瀝青廢棄物區域及水泥廢棄物區域 pH 值分別於西元 48,000 年、56,000 年後降至 11.5(Cronstrand, 2014)，在此期間處置場中的 pH 值依然不適合微生物生存，但與地下水相同之 pH 值係微生物活躍的環境。纖維素預估於封閉後 5,000 年內降解完畢，因此有機物錯合產生的吸附作用亦變得不需重視。鐵的厭氧腐蝕將成為處置場中氣體產生的主要來源。

##### (3) 封閉 1,000 年後之冰緣氣候：

處置場於冰緣氣候時期水將被凍結，因此所有化學過程將變得非常緩慢，直至凍結冰再次變為液體後才繼續進行，而水與混凝土間的分配係數則不會受到混凝土凍結的影響，因此仍然考慮放射性核種的吸附作用。

#### 8. 工程障壁的演化 (Evolution of engineered barriers)：

處置場之工程障壁長期安全性受到內部過程及外部作用影響，如上述地表系統演化中氣候變化及海平面演化皆可對地下水流量產生影響，而地下水流量將影響工程障壁之內部過程，其評估要項如表 2.6 所示。

表 2.6 工程障壁演化的評估要項(SKB, 2014a)

分類	要項
膨潤土障壁 (Bentonite barriers)	蒙脫石的變化(Montmorillonite transformation) 膠結作用(Cementation) 膨潤土膠體構造(Bentonite colloid formation) 膠體的流動性(Mobility of colloids) 蒙脫石與鐵的交互作用(Montmorillonite-iron interaction) 混凝土處置倉周圍膨潤土的管狀滲蝕及腐蝕(Piping and erosion in the bentonite surrounding the concrete silo) 處置倉膨潤土的力學過程(Mechanical processes in the silo bentonite) 氣體對處置倉周圍膨潤土障壁的影響(The impact of gas on the silo bentonite barrier)
混凝土障壁 (Concrete barriers)	混凝土的溶出作用(Leaching of concrete) 混凝土與地下水的化學交互作用及從廢棄物中溶出的物質 (Chemical interactions with groundwater and substances leached from the waste) 廢棄物壓力造成的破裂(Fracturing due to pressure from the waste) 鋼筋及其他鋼構件的腐蝕(Corrosion of reinforcement and other steel components) 地下水中的化學物質與廢棄物溶質的溶解作用(Intrusion of chemicals dissolved in the groundwater and solutes from the waste) 局部混凝土劣化(Local concrete degradation)
回填材料 (Backfill material)	溶質傳輸(Transport of solutes)

(1) 場址封閉後 1,000 年間(封閉初期)：

1. 膨潤土障壁(Bentonite barriers)：

膨潤土主要由蒙脫石構成，而蒙脫石是一種具有可塑性及高離子交換能力的黏土礦物，作為最終處置場址的工程障壁之一，其主要特性為利用膨脹功能降低水力傳導係數並填充周圍空隙，倘若將蒙脫石置於正常地下水環境，其擁有穩定的膨脹特性，但是膨潤土設置於混凝土構件和岩壁之間，材料與地下水交互作用下，地下水組成更趨向鹼性，且擁

有較高的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  以及  $\text{K}^+$ 。因此，當蒙脫石曝露於鹼性溶液(低濃度鉀)中，將發生如圖 2.14 所示的變化，相較於原始蒙脫石，鋁膨潤石缺乏膨潤土的膨脹特性，因此不排除障壁功能降低。

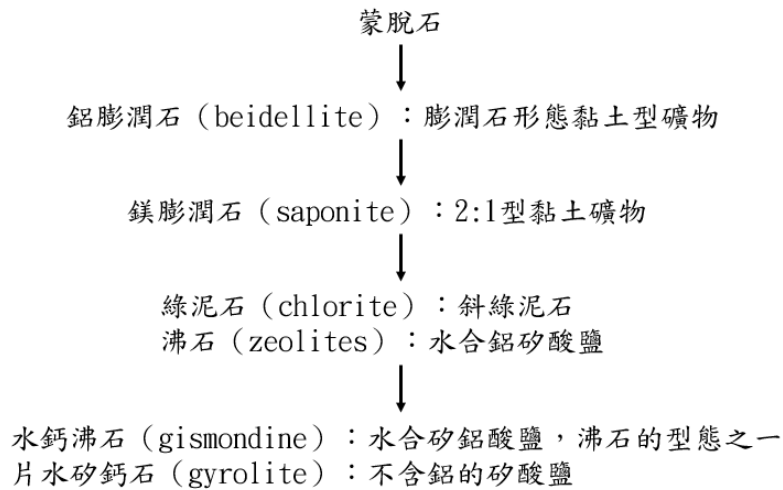


圖 2.14 蒙脫石於鹼性溶液中的變化(TR-14-01)

膨潤土孔隙中石膏/硬石膏、方解石以及各種矽酸鹽礦物沉澱將引起膠結作用，其主要影響包括水力傳導係數的增加、膨脹能力的降低、可塑性的降低。處置場封閉的前 1,000 年經研究顯示，膨潤土與噴凝土 (Shotcrete) 交界處之  $\text{Ca}^{2+}$  濃度足以避免黏土分散形成黏土膠結體 (Birgersson et al., 2010, 2011 ; Gaucher et al., 2005)。而 1BMA 中穩定的膠體可通過裂縫及障礙物的孔隙與地下水一起移動，其傳輸途徑取決於流速、流動路徑與膠體的物理性質，對大多數的膠體而言，水力傳導係數低且孔徑小的膨潤土障壁是難以藉由平流通過的，且膠體通常無法經由擴散作用傳輸，因此膠體的傳輸在膨潤土可忽略不計。

處置場封閉後排水系統不再運作，但其管道的存在導致水壓逐漸上升，當水壓大於膨潤土膨脹壓力時，將發生管狀滲蝕作用或產生封閉空間，研究顯示，管狀滲蝕及腐蝕作用皆無法對膨潤土障壁性能產生重大影響，故不予考慮。而膨潤土吸水達到飽和時預期膨脹壓力約為 100kPa，伴隨離子交換將鈉型膨潤土轉變為鈣型膨潤土，其膨脹壓力降低約五倍 (Börgeresson et al., 2014)。且處置場中氣體壓力低於膨潤土壓力時，擴散為氣體唯一傳輸途徑，應注意當氣體壓力高於膨潤土壓力時，氣體將傳輸

至處置倉底部並藉由膨潤土或砂的混和物區域逸出。

## II. 混凝土障壁(Concrete barriers)：

放射性核種的傳輸主要透過裂隙及混凝土孔隙結構在水相中發生，由於混凝土具有高比表面積的吸附能力，因此放射性核種的遷移速率受到吸附限制。而流場方面，混凝土障壁功能受到擴大現有裂縫、形成新的裂縫/網絡、水泥礦物質的流失、礦物沉澱堵塞裂隙等過程對其水力障壁功能造成影響，其中，混凝土障壁最初的總孔隙率約為 10%，孔隙結構由連通孔隙和非連通孔隙組成，如圖 2.15 中的孔隙結構：A)連通孔隙，可影響混凝土的傳輸性能，例如水力傳導係數和擴散性，B)水泥與其他物質的交界面產生的裂隙，例如鋼筋腐蝕作用所產生的氣體超過抗拉強度形成裂隙(Höglund, 2014)，C)體積變化引起的裂隙，如水泥漿水化過程中的收縮及礦物吸水後的膨脹壓力皆可能產生裂隙(Höglund 2014)。隨時間增長，混凝土傳輸性能可能因各種化學作用而產生改變，如混凝土與地下水之間的交互作用係由水泥漿溶出高可溶鹼性金屬氫氧化物開始，其次溶解出  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，最後當  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  皆被溶出，矽酸鈣水合物(CSH)開始出現不一致的溶解，此作用的過程將導致混凝土孔隙水中的 pH 值逐漸下降。

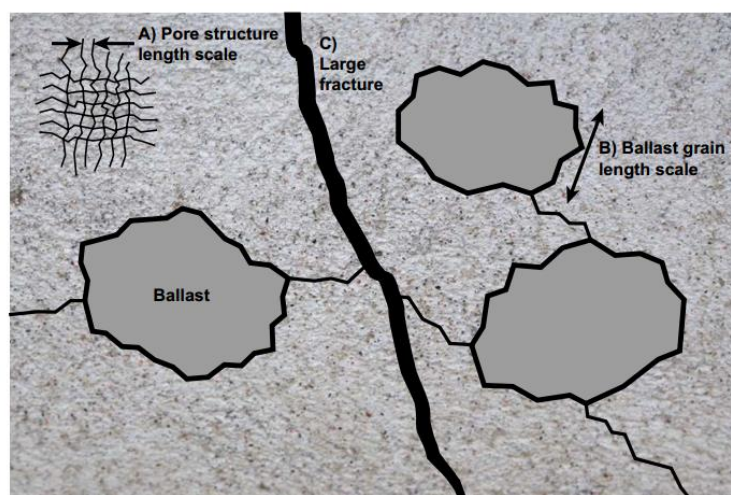


圖 2.15 混凝土障壁的孔隙結構(TR-14-01 Fig 6-13)

## III. 回填材料(Backfill material)：

處置場封閉時，1BMA 和 2BMA 之混凝土障壁外部的空隙利用碎石進行回填，假設回填材料以砂及純石英組成，回填區域將含有低含量的

二氧化碳，而其與混凝土障壁中的鹼性孔隙水進行反應並不會對處置場的安全性造成影響。

(2) 封閉 1,000 年後之溫帶氣候：

處置場封閉後的 10,000 年後，膨潤土中的蒙脫石含量僅剩總量的三分之二，100,000 年後僅剩一小部分，不能排除膨潤土障壁可能在此期間失去其膨脹功能。而混凝土孔隙率於封閉後 10,000 年由初始之 11% 增長至 11.5%，且因氫氧化鉀的耗盡，大量氫氧鈣石溶出致使 15,000 年時孔隙率持續增加至 14%，而 15,000 年至 19,000 年期間 CHS\_1.8 轉換為 CHS\_1.1 導致孔隙率持續增加至 17%，但 19,000 年至 31,000 年間則因單碳鋁酸鹽轉變為鈣礬石降低直至 16%，並在 31,000 年之後孔隙率因 CHS\_1.1 及鈣礬石的轉化持續增加，直到 72,000 年時達到最大值 26%。

(3) 封閉 1,000 年後之冰緣氣候：

當處置場處於冰緣氣候時期，膨潤土及混凝土中的孔隙水皆有可能凍結，而孔隙水的凍結可能使排水通道阻塞並導致裂隙產生，進而致使混凝土結構退化，使其喪失作為障壁的功能，但混凝土本身仍保有吸附功能，並具有一定程度的平流阻擋能力，因此處置場於冰緣氣候時期，放射性核種之遷移近乎停止。

## 2.2 情節分析

SFR 場址之長期安全性受到各項外部條件、內部條件、地質圈演化以及人類活動影響，SSM 的法規指出，應使用情節描述未來處置場可能潛在之演化，其描述方式可利用處置場設計之初始條件作為基礎，分析外部條件及內部條件之各種組合及未來人類活動對處置場長期演化等影響，一般建議描述四種類型之情節，其定義如下，而各情節發生不確定性之機率如表 2.7 所示。

1. 主要情節：最可能發生之情節，其選擇之外部條件、內部條件等皆為最大概率，而氣候演化則參考全球暖化氣候案例及早期冰緣氣候案例。
2. 替代情節：此情節涵蓋設計情節之外部條件、內部條件等各項不確定性，並加入未來人類活動對處置場之影響，選擇可能對處置場造成影響之條

件進行推估，藉此得知事件發生之機率。

3. 其他情節與剩餘情節：這兩種情節涵蓋未包含在設計情節中的各項條件，用以提出工程障壁功能的重要性、人類入侵對處置場造成之影響以及未監控處置場之後果等。

表 2.7 各情節發生之機率(TR-14-01 Table 7-8)

情節	機率	種類
全球暖化氣候 早期冰緣氣候	1 1	主要情節
高存量情節 母岩位於高流量環境 快速的混凝土劣化 膨潤土劣化 地震 高濃度的錯合劑 水井位於處置窖下游處 鑽井侵入處置倉(Silo) 鑽井侵入 SFR1 的處置窖 鑽井侵入 SFR3 的處置窖	<0.05 <0.1 <0.1 <0.1 $10^{-6}/\text{年}$ <0.1 0.13 $2 * 10^{-4}$ $8 * 10^{-4}$ $3 * 10^{-4}$	其他情節
工程障壁喪失吸附功能 母岩中的吸附功能喪失 高流量的處置場導致工程障壁功能喪失 SFR 1 處置場的氧化還原條件改變 長期的全球暖化 處置場未封閉的情節 未來人類活動 冰河期和推遲的冰河期	未知	剩餘情節
情節組合 1 情節組合 2	<0.1*0.1 <0.1*0.1	情節組合

### 2.2.1 主要情節

SKB 之主要情節係根據全球暖化氣候案例及早期冰緣氣候案例建構，情節之描述由外部條件、地質圈、處置場、地表系統及人類與非人類群族的曝露分項進行說明，最後提出關於處置場之安全功能假設。

#### 1. 外部條件

設計情節所選用之兩種氣候演化皆已於 2.1 節進行詳細描述，以下將概要說明兩種氣候演化之設計情節及海平面演化情形，並以此作為放射性核種傳輸模型

之輸入條件，藉由各種模擬進行未來之水文地質條件推估，得知地表系統未來之發展，作為放射性核種傳輸計算的條件。

(1) 全球暖化氣候演化之主要情節：

全球暖化氣候演化係依照中等碳排放量及低幅度之日照變化進行推估，此氣候條件下，大氣中二氧化碳濃度緩慢下降，而冰緣氣候則出現於西元 52,000 年，此時不排除處置場深度之母岩溫度可能降至 $-3^{\circ}\text{C}$  或更低，因此假定混凝土結構凍結，完整之演化推估詳如圖 2.2。

(2) 早期冰緣氣候演化之主要情節：

早期冰緣氣候演化係依照低等碳排放量及低幅度之日照變化進行推估，此氣候條件下，大氣中二氧化碳濃度快速下降，導致西元 17,500 至 20,500 年最小日照量期間，Forsmark 地區為冰緣氣候，並擁有永久凍土，但此期間處置場深度之母岩溫度難以低於 $-3^{\circ}\text{C}$ ，詳細氣候推估詳見圖 2.1。

(3) 海平面演化：

海平面的演化可控制地下水流量及核種於岩石間的滯留期，間接控制放射性核種從處置場到地表之排放速率。現今之處置場建造於地下 60 到 120 公尺，每年海岸線變化高度約為 6 mm/yr，經模擬顯示，SFR 處置場成為陸地約需 1000 年的時間，未來形成陸地後處置場將產生新的地球化學及水文條件。

## 2. 地質圈

SFR 場址受到海岸線演化影響，流向自向上轉為平行，且最後平行於地形梯度並在處置場成為陸域後趨於穩定，此時約為西元 5,000 年，而受到冰緣氣候影響，滲透性降低並且平流受到限制，湖泊轉變為沼澤並可能形成凍土融區，且主要情節的評估期間將假定 SFR 處置場母岩僅受些微力學演化影響，並不會改變處置場基本條件，而地震於 Forsmark 地區並不顯著，因此於主要情節不予考慮。

(1) 放射性核種傳輸模擬：

放射性核種傳輸與地質圈相關之因子包括放射性核種的衰變、平流、延散、擴散、吸附等。SKB 利用核種的衰變常數及分支率(branching ratios)對核種衰變進行參數化，而延散的計算方式則利用拉克勒數(Peclet number)量化平流及延散間之傳輸比率，擴散則代表核種隨濃度梯度影響離開母岩



之作用，其中有效擴散率為水中擴散係數之乘積，吸附相關之分配係數(Kd)則以線性平衡方程式作為依據，進行模擬。

(2) 模擬參數：

地下水中的放射性核種利用平流於地質圈中進行傳輸，而核種的遲滯則透過母岩之擴散及吸附作用控制，在 SFR 處置場中與流場相關之傳輸阻力、流經時間、路徑長度如圖 2.16 至 2.18 所示，圖中各點之全距代表母岩中不同的流量，而中流量適用於主要情節之溫帶氣候，中、高流量則可應用於替代情節，在主要情節之冰緣氣候中，因應凍土情況不一，大致分為三種計算方式，分別為涵蓋凍土融區之不連續淺層永凍土、湖泊等較大水體解凍之淺層永凍土、僅有大型湖泊解凍且永久凍土到達 SFR1 深度 (60m)，第一項涵蓋凍土融區之不連續淺層永凍土流場結果與圖 2.16 至 2.18 中西元 9,000 年時情況相同，而早期冰緣氣候之冰緣氣候時期(西元 17,500 至 20,500 年) 流場亦應用此結果，相較於淺層永凍土，冰河氣候之永久凍土產生大面積凍結區域，致使核種無傳輸至地表的可能。

吸附為遲滯放射性核種之重要功能，SFR 處置場模擬所設置之分配係數係選擇各核種之最小值，並且須符合可應用於 pH 值小於 10 之環境，如分配係數之數值於不同氧化還原環境相異，因處置場於封閉五年後還原條件將佔有優勢，選擇還原狀態之數值作為參數。

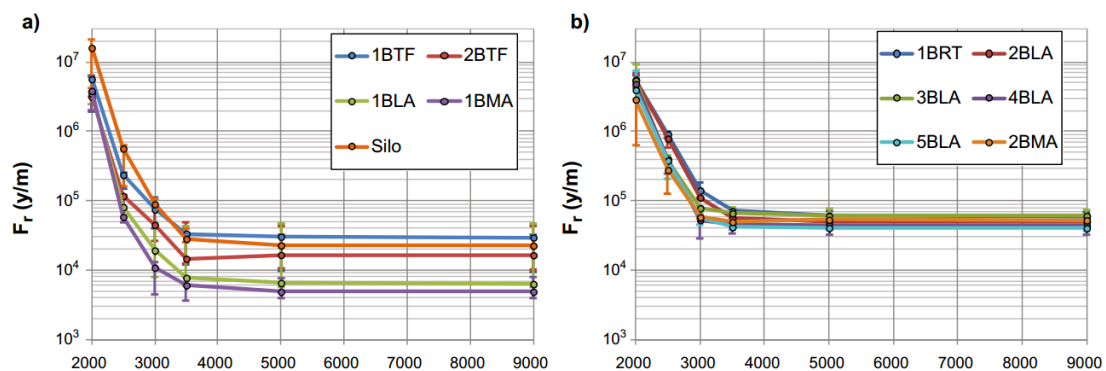


圖 2.16 不同處置窖之傳輸阻力( $F_r$ )平均值，a)SFR1 處置窖 b)SFR3 處置窖(Odén et al. 2014)

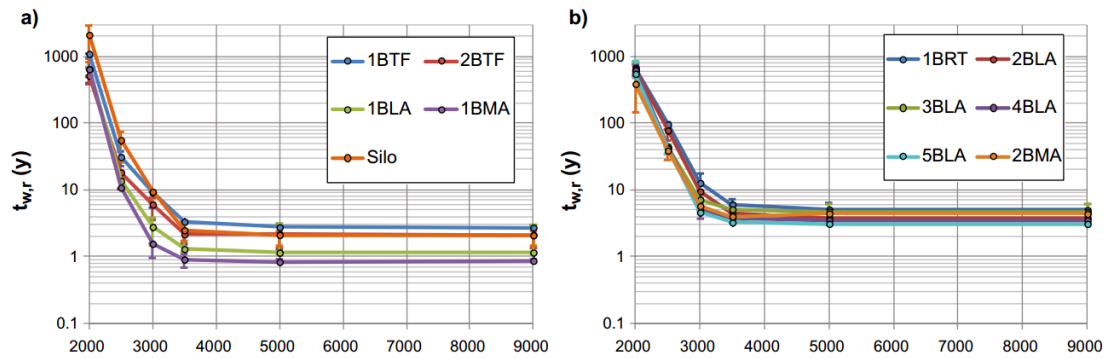


圖 2.17 不同處置窖之平流行經時間平均值，a)SFR1 處置窖 b)SFR3 處置窖(Odén et al. 2014)

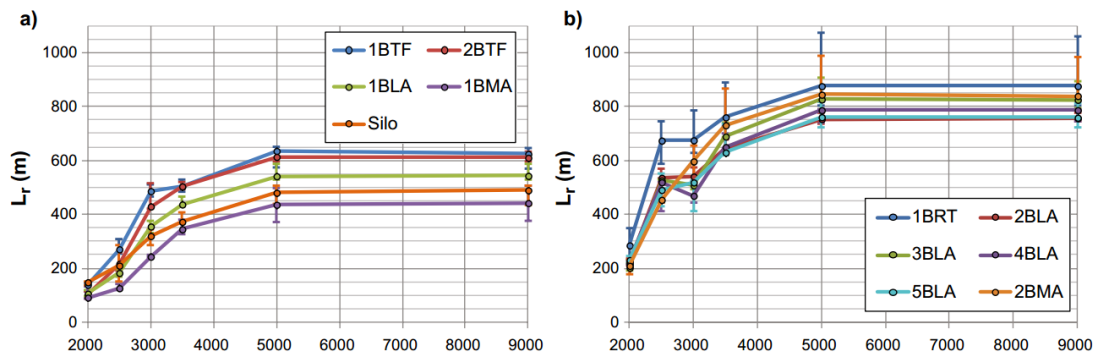


圖 2.18 不同處置窖之路徑長度(Lr)平均值，a)SFR1 處置窖 b)SFR3 處置窖(Odén et al. 2014)

### 3. 處置場

氣候演化等外部條件之海平面演化、永久凍土發展將干擾流經處置場之流場，且流場演化亦可間接影響處置場內部之化學性質，處置場中影響核種傳輸之幾項重要因素，分別為水文條件、廢棄物包件與工程障壁、水泥材質之劣化。水文條件與流場演化息息相關，SFR 處置場中流量受到海平面演化及永久凍土發展影響，而處置窖之不同區域間水流大小、分布、方向等，亦取決於各部件工程障壁之水力特性，在溫帶氣候條件下，當處置場成為陸域時，流場將趨於穩定，而水流造成之劣化將影響處置窖內部材質之水力特性，並改變流場分布，其內部材質於模擬中定義為均質之多孔隙介質，模擬中利用水力傳導係數之改變概括裂隙存在問題。處置場中廢棄物包件與工程障壁的耐久度受外部條件及內部過程影響，詳細介紹見 2.1 節。水泥材質之劣化可概分為物理性劣化和化學性劣化，物理性劣化包括壓裂、孔隙結構改變等，經由推估得知，水力傳導係數、孔隙率、擴散等變化係物理性劣化影響核種傳輸之主要因素，而化學性劣化主要透過改變放射

性核種之吸附功能進行影響，如環境之 pH 值、氧化還原條件，亦或與核種形成可溶性錯合物之有機配體(organic ligands)，然而化學性劣化相較物理性劣化速度緩慢，因此吸附功能長時間存在於處置場。

(1) 放射性核種傳輸模擬：

放射性核種傳輸於處置場之相關因子包括放射性核種的衰變與增長(Radioactive decay and in-growth)、平流(Advection)、擴散(Diffusion)、延散(Dispersion)、吸附(Sorption)、溶解度限制(Solubility limitation)、物種分析(Speciation)、腐蝕(Corrosion)等。SKB 利用核種的衰變常數及分支率對核種的衰變與增長進行參數化，而平流則由所建置之三維水文模擬取得，其所輸出之控制體積間的水通量可作為放射性核種傳輸模擬之輸入參數，由於水通量的計算包含各種劣化作用參數，因此在核種傳輸模擬中隱密的涵蓋工程障壁隨時間之劣化情形。擴散作用亦涵蓋於模擬當中，其計算方法考慮材質特定的有效擴散係數及廢棄物包件與阻隔物之幾何形狀(傳輸長度及面積)，伴隨時間的增加，有效擴散係數亦會增加，藉此描述各種障礙物之退化。另外，核種傳輸模擬系統之延散則來自區塊(compartmental)模擬中因空間解析度較大產生之數值延散效應。模擬中之吸附功能使用線性方程式進行計算，各核種之溶解度於模擬中並無限制，而物種分析係與吸附功能之分配係數相關，受腐蝕作用影響，廢棄物包件之核種將假設於鋼腐蝕時開始釋放，並且不考慮腐蝕產物的滯留。

(2) 模擬參數：

SFR 處置場之廢棄物包件數量及核種清單皆有詳細報告進行說明，而模擬中水文條件的輸入參數取自水力傳導係數與海平面演化之演算結果。其中，場址之水力傳導係數隨時間變化係取決於凝膠材質的降解速率，當工程障壁劣化後流量將發生改變，圖 2.19 顯示工程障壁劣化程度，顏色越淺劣化越嚴重。處置場之分配係數需考慮水合水泥漿(hydrated cement paste)的降解、凝膠材質中水合水泥漿的含量、錯合劑的影響等，且因地下水組成之不同可能有相異的分配係數，模擬中利用膨潤土之分配係數值代表鹽水或非鹽水之地下水，而碎石(macadam/crushed rock)之分配係數為考慮處置場安全性問題，選擇 pH 值大於 10 環境中之分配係數，其擁有最低的吸附功能。另外，砂和膨潤土混合物的分配係數因實驗數據有限，於模

擬中係利用碎石和膨潤土的 Kd 值進行加權平均後取得參數。處置場中廢棄物包件的腐蝕速率由 pH 值決定，核種傳輸模擬設置其初始腐蝕率為  $0.05 \mu\text{m/yr}$ ，而西元 22,000 年後將增加為  $2.8 \mu\text{m/yr}$ 。

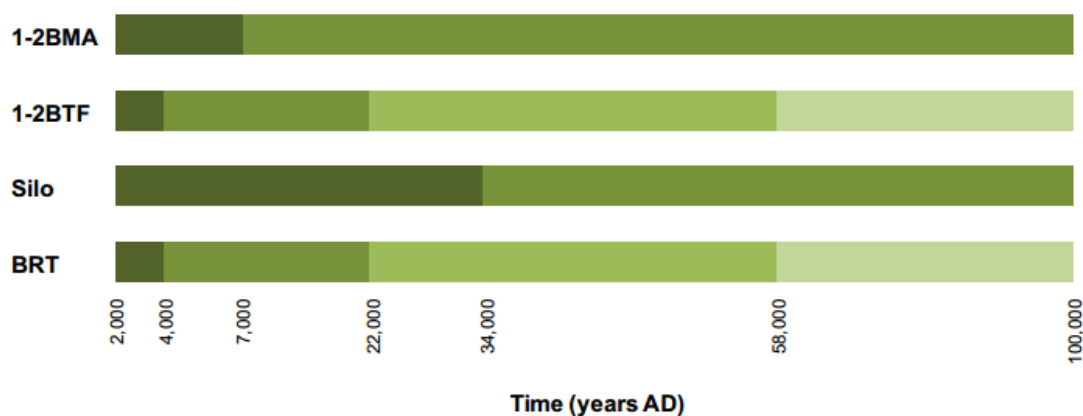


圖 2.19 處置窖工程障壁劣化程度(TR-14-01, Fig 7-9)

#### 4. 地表系統

Forsmark 地區之地表系統演化與海平面演化及氣候演化息息相關，當海岸線持續回歸，地表環境將由海洋逐漸演變為湖泊/溼地生態系統，而 SFR 場址高於海平面時，將可避免鹽水入侵處置場，但其地表可能出現人類耕種等活動，放射性核種初始釋出途徑假定由連接的海盆(sea basins)或地表水流排放。相較於溫帶氣候條件，冰緣氣候中地表系統之水文條件將發生變化，核種傳輸僅發生於凍土融區，因此核種傳輸模擬於西元 17,000 至 20,500 間以凍土融區進行水文通量模擬(Werner et al. 2013)。

##### (1) 放射性核種傳輸模擬：

SFR 處置場之放射性核種傳輸模擬中核種透過排放區的地下水流外釋，其中，地表系統之傳輸與水的通量、擴散、固體物質通量以及氣體等相關，並受到排放區域之地形特徵與氣候控制。

##### (2) 模擬參數：

放射性核種傳輸模擬中生態系統的分布係重要之輸入參數，涵蓋水通量、風化區域分布、分配係數、生態系統的特定參數(如生產、分解、有機物礦化)、生物群的吸收(濃度比率，Concentration Ratios)等。

## 5. 人類與非人類群族的曝露

SFR 處置場安全評估在計算人類有效劑量與非人類生物群劑量時，使用土壤、水、空氣和生物體中的放射性核種濃度進行計算，其曝露方式可分為外部曝露(地面、空氣、水的輻射)及吸/攝入(食物、水)兩種。

### (1) 人類的曝露：

人類的劑量取決於生活習慣及飲食，安全分析中總共有 17 種曝露途徑，故 SKB 定義 4 種不同的土地利用方式將其包含在內，藉此涵蓋未來人類可能之一系列曝露途徑，如圖 2.20 所示，紅色箭頭表示放射性核種透過地下水從處置場外釋至生物圈；橙色箭頭表示透過自然環境或深層土壤風化物傳輸；藍色箭頭為生物圈內透過水傳輸的放射性核種；黑色箭頭表示曝露路徑。

- I. 獵人和採集者：主要曝露途徑來自採集地表資源(釣魚、狩獵、採集漿果和磨菇)、飲用地表水體(溪流、湖泊)。
- II. 耕地-外地農民：非本地之農民可能因收割溼地牧草等原因受輻射影響，主要曝露途徑來自吃過濕地牧草之動物肉品、動物排泄物應用於農地施肥、飲用受污染之井水或地表水。
- III. 排水-泥沼農民：將濕地排乾進行種植或生產之農民，主要曝露途徑來自受污染土地生長之作物及飲用受污染之地表水、井水。
- IV. 小規模種植戶：主要曝露途徑來自使用受污染水灌溉之蔬菜作物及飲用受污染之地表水、井水。

### (2) 非人類群族的曝露：

植物及動物受輻射污染之量值推估受限於未知的生物類型及數量，而研究顯示，可利用 Forsmark 地區代表物種及參考生物代表進行推估，藉此得知不同生態系統中獲得最高劑量之生物類型(Beresford et al., 2008)。非人類群族的曝露分析涵蓋海洋、湖泊/溪流、泥沼等生態系統，而農業被認為與其並無相關，故將養殖動物排除於分析之外。

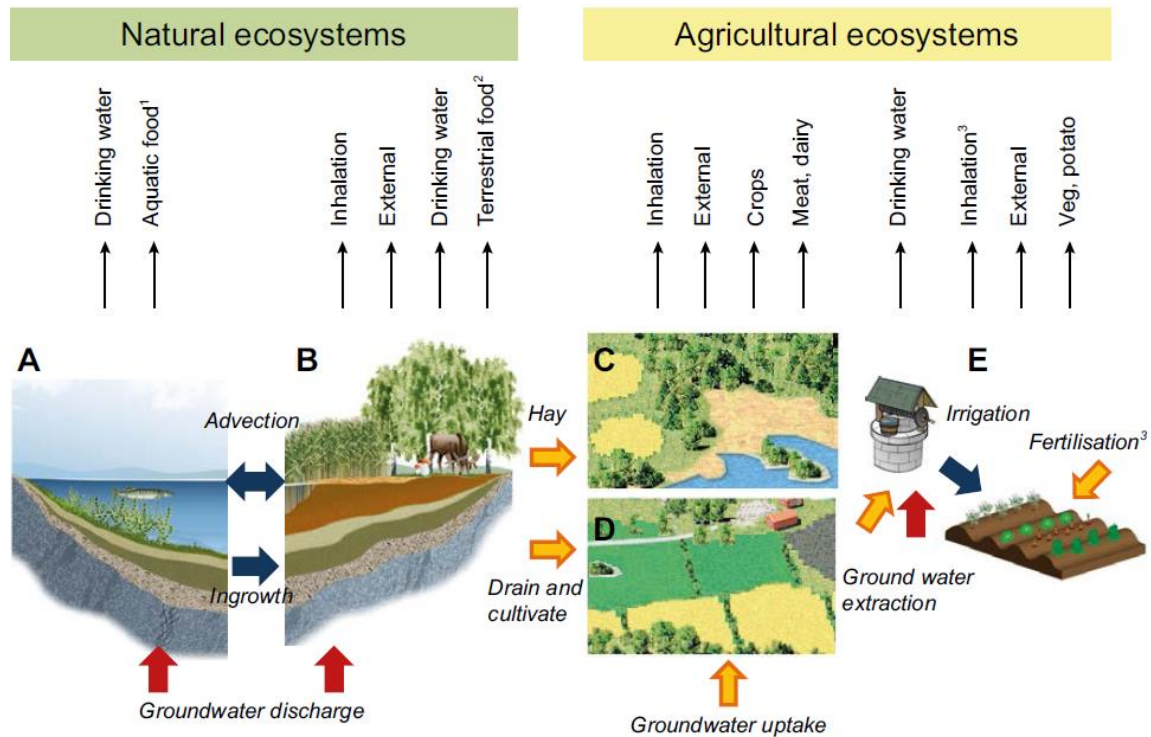


圖 2.20 放射性核種傳輸至人體的曝露路徑(TR-14-01, Fig7-8)

6. 主要情節之安全功能：

安全功能主要用於描述處置場各項設施及所在環境等係如何確保生物圈之長期安全性，包含以下五項安全功能，並說明主要情節何以實現安全功能。

- (1) 有限的活度：管制處置窖中的每一種放射性核種的活度，以確保其符合安全功能。
- (2) 低流量的母岩：此安全功能係利用母岩中的水力傳導係數及水力梯度等安全指標，確保母岩中的流量符合安全功能要求。
  - I. 水力傳導係數：設計情節中母岩的水力傳導係數受力學及化學過程影響，但並無顯著變化，因此假定 SFR 場址周遭母岩之水力傳導係數於評估期間為恆定。
  - II. 水力梯度：水力梯度受到海岸線演化影響於西元 5,000 年內顯著增加，當處置場上方為陸域時，剩餘評估期間假設具穩定水力梯度為。
- (3) 低流量的處置窖：藉由液壓比、水力傳導係數、氣體壓力等安全功能指標，對安全功能中處置窖之流量進行評估，而因應 SFR 處置場中各處置窖設計相異，故不同處置窖中流量亦有所不同，且於處置場封閉後 1,000 年內，水



力梯度變化對流量影響大於水力對比。

- I. 液壓比：混凝土與回填材料間的液壓比受到混凝土的劣化作用、壓應力的破壞及凍結影響，而青銅礦的溶出係劣化作用之一，當廢棄物斷面中含有足夠的水泥，其釋放之硫酸鹽會在斷面中形成鈣礬石，伴隨時間增長，接近硫酸鹽之混凝土障壁可能受到局部影響，液壓比將持續降低。另外，大量氫氧鈣石的溶出與持續的劣化作用將導致孔隙率及水力傳導係數發生顯著變化，降低液壓比。而主要情節之冰緣氣候條件係藉由凍結混凝土障壁影響液壓比，但 SFR 場址凍結方式為近似垂直的熱梯度，故水流將經由下方排出，影響並不明顯。
- II. 水力傳導係數：水力傳導係數受到混凝土處置窖及封塞中的膨潤土影響，膨潤土擁有較高之膨脹能力係良好水力阻隔材質，而水中的高 pH 值環境可將膨潤土轉變為蒙脫石，將使其膨脹性能降低，水力傳導係數增加。於主要情節之安全評估期間，將假設其膨脹特性保持不變，處置倉下方之水力傳導係數為  $9 * 10^{-12} m/s$ ，而上方為  $9 * 10^{-11} m/s$ ，封塞中水力傳導係數為  $1 * 10^{-12} m/s$ 。
- III. 氣體壓力：處置場中僅有處置倉區域需評估氣體壓力，而處置倉中之混凝土構造僅需微量的氣壓就能進行氣體輸送，SKB 於 SFR 之處置倉建造氣體排出管並於頂部設立砂/膨潤土障壁以利氣體排出，預期於主要情節評估期間之化學反應無法對砂/膨潤土障壁造成顯著變化。

#### (4) 良好的遲滯：

良好的遲滯的安全功能可利用 pH 值、氧化還原電位、錯合劑濃度、可吸附表面積、腐蝕速率等安全功能指標證明。

- I. pH 值：SFR 處置場封閉初期，當水流通過水泥材質時氫氧化鈉和氫氧化鉀將環境之 pH 值調整至 12.5 以上，於設計情節之評估期間，處置倉的 pH 值約於 12.5-13 的範圍間，而根據混凝土的劣化作用，pH 值於 1-BTF 及 1-BLA 處置窖中，持續下降。
- II. 氧化還原電位：當處置場封閉且達到飽和，所有處置窖皆迅速成為高還原環境，而廢棄物包件中鐵的腐蝕亦促使還原環境產生，預計於評估期間還原能力將耗盡，而處置場結凍期間鐵的腐蝕亦將停止。
- III. 錯合劑的濃度：錯合劑的水溶液濃度將受到沉積在廢棄物中的錯合劑



影響，在大多數處置窖中因環境之 pH 值為 12.5-13 之間，纖維素將降解為異糖精(isosaccharinate, ISA)，經實驗證實，有機水泥添加劑較其他複合物影響更小，當處置場為永凍土期間，纖維素的降解將停止而 ISA 形成的複合物亦停止遷移。

- IV. 可吸附表面積：混凝土較大之表面積有利於吸附作用的進行，而混凝土的劣化將導致可吸附表面積的減少，除非水力障壁消失，否則混凝土的吸附功能依然有效，另外，當處置場為永凍土時期，吸附表面積不會產生改變，但冰溶解後混凝土的裂隙將改變可吸附表面積。
- V. 腐蝕速率：腐蝕速率由 pH 值及氧化還原條件決定，當處置場中的水完全凍結，因放射性核種的傳輸及腐蝕作用皆須使用液態水，故腐蝕作用將無法進行。

(5) 避免處置場周圍出現水井：

處置場的侵入井及下游井為實現避免處置場周圍出現水井的安全功能指標。於主要情節中，井主要出現在農業用地，而適宜之農業用地應位於海拔 1 公尺或以上(Werner et al. 2013)，故假設處置場周圍不存在水井，且處置場上、下游區域為地質風化區亦不適宜農耕(Sohlenius et al. 2013a)，因此在主要情節中處置場周圍並無水井出現。

### 2.2.2 替代情節

替代情節是由各個可能違反安全功能之可能途徑構成，例如評估初始狀態、內部過程和外部條件的不確定性，將可能降低處置場安全性之特徵、事件與作用涵蓋其中如表 2.8 所示。

表 2.8 替代情節之不確定性(SKB, 2014a)

安全功能	初始狀態	內部過程	外部條件
有限的活度	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 放射性核種的存量</li> </ul>	-	-
低流量的母岩	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 水力傳導係數</li> <li>· 水力梯度</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 海岸線演化</li> <li>· 冰緣條件</li> <li>· 地震</li> <li>· 冰層動力學(Ice-sheet dynamics)</li> </ul>

低流量的處置窖	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 混凝土和碎石的液壓比</li> <li>· 膨潤土的水力傳導係數</li> <li>· 氣體壓力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 混凝土的劣化</li> <li>· 膨潤土的劣化</li> <li>· 氣體的形成</li> <li>· 水的流動/水的傳輸</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 間接影響：冰緣條件、地震、冰層動力學 (Ice-sheet dynamics)</li> </ul>
良好的遲滯	<ul style="list-style-type: none"> <li>· pH 值</li> <li>· 氧化還原電位</li> <li>· 可吸附的表面積</li> <li>· 腐蝕速率</li> <li>· 錯合劑及維生素的總量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 混凝土的劣化 (pH 值、可吸附的表面積、腐蝕速率)</li> <li>· 金屬腐蝕 (氧化還原電位)</li> <li>· 纖維素的降解速率 (錯合劑的濃度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 間接影響：冰河氣候</li> </ul>
避免處置場周圍出現水井	-	-	-

1. 違反有限的活度之可能途徑：

有限活度的安全指標係計算每個放射核種在處置窖中的活度量進行評估。

(1) 初始狀態：放射性核種存量。

主要情節中使用的放射性核種存量是基於預估未來運轉產量及廢棄物除役量來進行預判，而廢棄物的形態是否符合接收標準則經由處置方式及程序來判斷，因此，放射性核種存量的偏差僅可能存在廢棄物沉積的不確定性，此不確定性可於其他情節中假設高存量進行模擬。

(2) 內部過程和外部條件：

沒有任何一個內部過程或外部條件可能造成放射性核種存量與主要情節存量相異。

2. 違反低流量的母岩之可能途徑：

此安全功能需藉助水力傳導係數與水力梯度兩項安全功能指標進行評估。

(1) 初始狀態：水力傳導係數、水力梯度。

低流量母岩的不確定性存在於水文地質流場模擬，而水文地質流場模擬之不確定性來自於處置窖中變形區的變異性以及變形區參數化產生之概念不確定性，其可能導致母岩中流量高於主要情節。

(2) 內部過程：

內部過程影響之地下水流量無法超過主要情節設置之數值。

(3) 外部條件：海岸線位移、冰緣條件、地震以及冰層動力學。

海岸線位移的不確定性來自於延伸全球暖化氣候案例，而冰緣氣候發生時間的不確定性已包含在主要情節中，但地震及冰層動力學並無在主要情節中被考慮，因此兩者產生之環境及流量變化於其他情節、剩餘情節進行討論。

### 3. 違反低流量的處置窖之可能途徑：

此安全功能需藉助液壓比、水力傳導係數、氣體壓力三項安全功能指標進行評估。

#### (1) 初始狀態:混凝土和碎石的液壓比、膨潤土的水力傳導係數、氣體壓力。

由於內部過程和外部條件的影響，初始水力傳導係數和氣體壓力的不確定性被認為是造成水力傳導係數和氣體壓力演化的次要因素。

#### (2) 內部過程:混凝土的劣化、膨潤土的劣化、氣體組成、水的流量/水的傳輸。

膨潤土劣化情節係為研究膨潤土結凍之不確定性及評估劣化過程之不確定性。假設處置倉中氣體累積之影響甚小(Moreno and Neretnieks, 2013)，故此情節無評估處置倉關於氣體壓力之不確定性。處置窖之流量受制於母岩中地下水流量大小，因此設定處置窖為高流量進行評估。

#### (3) 外部條件:

冰緣條件可能導致冰晶體生長，倘若結合膨潤土膨脹特性之不確定性，可能導致膨潤土之水力傳導係數增加。而經由主要情節中的兩種氣候案例(全球暖化氣候案例、早期冰緣氣候案例)得知，混凝土於西元 52,000 年才開始發生凍結，而早於凍結前發生之物理/力學劣化作用造成之影響大於凍結作用產生之影響。另外，地震的存在可能導致處置場中水力傳導係數增加，故於其他情節進行模擬。處置窖之流量亦受到冰層動力的影響，其導致處置場及周遭環境景觀變化，直接影響處置窖之流場，故於剩餘情節中進行探討。

### 4. 違反良好的遲滯之可能途徑：

安全功能中良好遲滯之不確定性在 2.2.1 節中被指出，而良好遲滯的安全功能係建立在以下幾項安全功能指標之評估:酸鹼值、氧化還原電位、錯合劑濃度、可吸附的表面積與腐蝕速率。

#### (1) 初始狀態: pH 值、氧化還原電位、可吸附的表面積、腐蝕速率、錯合劑與纖維素的總量。

pH 值、氧化還原電位、可吸附的表面積和腐蝕速率之不確定性相較於錯合劑與纖維素總量之不確定性影響性較小。錯合劑之不確定性與兩項因素相關，首先為化合物溶解的水量，其次為 SFR 場址中沉積之錯合劑與纖維素的總量，為此其他情節中將設置高濃度錯合劑情節以便推估高濃度之錯合劑與纖維素可能造成的影響，另外，孔隙水中之高離子強度導致可遲滯核種之膠體濃度減少，此不確定性亦包含於高濃度錯合劑情節中探討。

(2) 內部過程:混凝土的劣化作用(pH 值、可吸附的表面積、腐蝕速率)、金屬腐蝕(氧化還原電位)、纖維素的降解速率(錯合劑的濃度)。

主要情節中已充分探討混凝土化學降解後之吸附能力，因此剩餘情節中僅討論失去障壁功能之混凝土。而處置窖中金屬腐蝕之影響在設計情節並沒做全面性的探討，故將於剩餘情節中討論氧化條件造成之影響。另外，纖維素的降解速率之不確定性，受到峰值到達時間的影響，於主要情節中已進行完整評估。

(3) 外部條件:

冰河氣候之環境下處置窖受到含氧水的入侵可能導致其氧化還原狀態改變。

## 5. 違反避免處置場周圍出現水井之可能途徑：

此安全功能需藉助入侵井及處置場下游的水井這兩項安全功能指標進行評估。處置場位置係經由一系列之審驗提出，故出現入侵井或下游出現水井之概率甚低，且選址前之地質調查顯示此區域無任何適合石油勘探的地質條件，處置場關閉後的前 1000 年，基於避免無意人為侵入之安全功能完好之狀態下，根據 GIA 模擬中全球暖化案例和早期冰緣氣候案例，得知 600 年間 75% 的區域位於海平面以上，而處置場以上成為陸地則需約 1200 年，且土地的出現有效避免鑽探的發生，另外，因處置場上方區域不適合做為農業用途，故無出現農業用井之可能性。但於其他情節中亦將設置處置場周圍出現水井之影響情節、處置場下游出現水井之情節以及出現入侵井的情節進行極端情節探討。

### 2.2.3 其他情節

其他情節的存在係為列出不確定性中可能性較小之情節，其對應各項安全功能如表 2.9。

表 2.9 其他情節對應之安全功能(TR-14-01, Fig 7-2)

安全功能					情節
有限的活度	低流量母岩	低流量處置窖	良好的遲滯	避免處置場周圍出現水井	
○					高存量情節
	○				高流量母岩情節
		○			混凝土快速劣化情節
		○			膨潤土劣化情節
	○	○			地震情節
			○		高濃度錯合劑情節
				○	處置場下游出現水井情節
				○	入侵井情節

1. 高存量情節：

高存量情節的選擇係為避免初始存量之不確定性(量測不確定性、相關性不確定性及存量推估之不確定性)，而相關性之不確定性可利用常態分布圖(圖 2.21)得知，處置場存量高於第 95 百分位置的概率遠小於 5%，故處置場中各核種的第 95 百分位值可代表高庫存之情節。

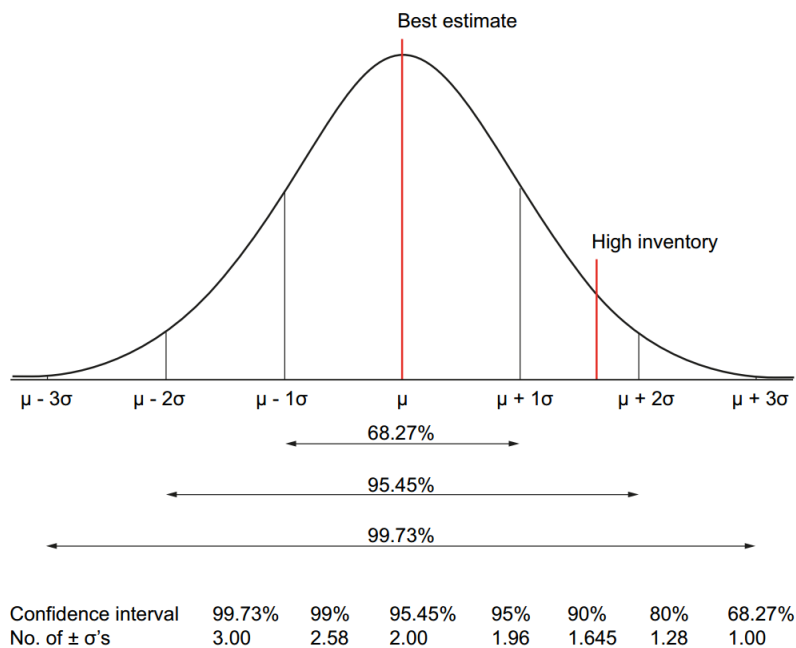


圖 2.21 核種存量常態分布圖(TR-14-01, Fig 7-12)

## 2. 高流量母岩情節：

高流量母岩情節的設置係為避免水文地質模擬中岩石資料存在不確定性，其流量資料透過縮放設計情節中處置窖之流量獲得，而情節中其他設置皆與主要情節相同，假設混凝土工程障壁之化學劣化並無加速，故分配係數並無變化，此情節發生之概率遠小於 10%。

## 3. 混凝土快速劣化情節：

混凝土快速劣化情節的設置係為避免混凝土劣化過程中產生不確定性，參考演化中因應各種相異之劣化過程進行結構評估，且綜合模擬結果得知混凝土障壁各種劣化程度之水力傳導係數以及劣化作用之演變(Höglund 2014)。混凝土快速劣化情節中，處置窖流量提前增加，混凝土障壁之擴散係數及孔隙率亦提前增加，且增加之時間點與水力傳導係數增加時間點相同，而其他參數與主要情節一致，此情節發生之概率假設遠小於 10%。

## 4. 膨潤土劣化情節：

膨潤土劣化情節的設置係為推估冰緣氣候結合膨潤土封阻特性所存在之不確定性，此情節亦可視為膨潤土劣化過程不確定性之代表。由 2.1 節參考演化得知，永凍土發生期間處置倉中的膨潤土可能存在冰晶體(ice-lens)，故膨潤土劣化情節將假設早期冰緣氣候案例中第一個永久凍土期(西元 17,500-20,500 年)產生之冰晶體大小足以永久增加膨潤土的水力傳導係數，為計算冰晶體對處置窖流量之影響，Abarca 等人於 2013 年建立專門的模型進行模擬，其結果顯示劣化區域中流量增加一個數量級，而處置窖中流量並無大量增加，依舊可限制滲透到廢棄物之水量(Abarca et al., 2013)。

## 5. 地震情節：

主要情節中並未評估地震可能造成之不確定性風險，為考慮地震造成之工程障壁損壞，Georgiev 分析處置窖受到地震力學作用後之影響，藉此得知處置窖混凝土結構產生損壞之概率為  $10^{-6}/\text{yr}$ (Georgiev 2013)。流場方面，倘若混凝土工程障壁損壞，通過處置窖的流量亦受到膨潤土障壁阻隔，其數值約為  $1\text{m}^2/\text{yr}$  (Holmén and Stigsson, 2001)，因此情節並未量化地質圈之不確定性，為避免存在低估問題，將假設地質圈中放射性核種傳輸無受到延遲。

## 6. 高濃度錯合劑情節：

高濃度錯合劑情節的設置係為評估初始條件中纖維素預估量值之不確定性，

並利用此情節代表遲滯功能的不確定性。錯合劑除來源於處置設施中的廢棄物亦可從纖維素的降解獲得，SFR 場址既有錯合劑含量經由 Keith-Roach 等人進行計算取得(Keith-Roach et al., 2014)，而 2010 年後 SKB 開始限制錯合劑的使用，下列之強有機錯合劑將無法使用：N-羧化二胺(EDTA)、N-羧化三胺(DTPA)、N-羧化胺基酸(NTA)、三羧酸(檸檬酸)、 $\alpha$ -羥基羧酸(葡萄糖)，藉由此限制將有效減少未來廢棄物中錯合劑相關之不確定性，故高濃度錯合劑情節透過將混凝土吸附減少因子提高 10 倍代表處置場中錯合劑及纖維素總量之不確定性，根據推估結果，沉積之錯合劑及纖維素的總量不超過設計情節的 10 倍。

#### 7. 處置場下游出現水井情節：

處置場下游出現水井情節的設置係為考慮未來人類行為之不確定性，藉由提出水井交互作用區域評估下游區域出現水井之影響，此交互作用區域位於現今海平面下 10 至 80m 的深度區間，假設高密度放射性核種傳輸途徑由此處經過，Werner 估計水井可吸收約 10%之處置場放射性核種排放量，而飲用水可透過到達水井之放射性核種量除以井中取出之水量進行計算(Werner et al. 2013)。鑿井概率的計算係經由每單位表面積的井數量乘以水井交互作用區域面積取得，Forsmark 區域每平方公里約設置 0.5 口水井，而水井交互作用區域面積約 0.26 平方公里，故該區域供水井的概率估計為 13%。

#### 8. 入侵井情節：

入侵井情節的設置係為考慮未來人類行為之不確定性，依據現有鑽探技術，井深可能達到地下 100 到 200 公尺之間，因此入侵井的情節有設置的必要性，倘若發生入侵井，除鑽探期間無意帶出之廢棄物，核種亦可經由供水外釋。入侵井發生之概率可經由每單位表面積鑿井數量與處置窖的占地面積相乘進行估算，故處置場之入侵概率為  $4.0E-4$ ，而其餘處置窖約為  $1.5E-3$ ，並將此數值與井深統計資料結合，可得知井入侵 SFR1 及 SFR3 的概率分別為 50%與 20%，最後取得井入侵處置倉(Slio)、SFR1、SFR3 的機率分別為： $2.0E-4$ 、 $8.0E-4$ 、 $3.0E-4$ 。

### 2.2.4 剩餘情節

剩餘情節係為研究障壁之個別功能，說明不同障壁對處置場之保護能力，因此並不考慮其發生概率。



1. 喪失障壁功能情節—處置場中無吸附：

此情節之基本設置與全球暖化氣候的設計情節皆相同，除處置場中各材質之分配係數，將其設置為零代表處置場中無吸附作用。

2. 喪失障壁功能情節—母岩中無吸附：

此情節之基本設置與全球暖化氣候的設計情節皆相同，藉由將母岩中分配係數設為零代表母岩中無吸附功能。

3. 喪失障壁功能情節—處置場中的高流量：

此情節主要說明工程障壁限制流量之重要性，將處置窖中所有混凝土與膨潤土的水力傳導係數設置為  $1.0E-03$  m/s，藉此代表處置場中的高流量，而其餘設置皆與主要情節相同。

4. SFR1 氧化還原條件變化情節：

此情節主要顯示維持處置場中還原條件對長期安全之重要性，操作方式為利用吸附功能對氧化還原條件敏感之核種，將其分配係數置換為氧化態的最低值，而此情節之處置場模型、地質圈模型及生物圈模型中各項輸入資料設置與主要情節相同。

5. 延伸全球暖化情節：

此情節描述未來高碳排放量及低日照輻射之影響，此情節中間歇性冰期將延長至 10 萬年後，導致 Forsmark 區域於 10 萬年間皆為溫帶氣候，而 SR-PSU 團隊分析表示，在處置場封閉後的幾千年間將擁有最溫暖與最潮濕的環境，此外，亦在評估初期擁有最長淹沒期。由於氣候條件的改變，預估此情節之年平均溫度將達到  $10.7^{\circ}\text{C}$ ，當地樹種將被橡樹、榆樹等落葉樹種取代，農作物生產力亦有所提高。

6. 未封閉處置場的情節：

此情節描述中處置場未受監控，且受某種原因導致沒有關閉/密封，並停止抽取地下水，其中假設廢棄物皆已完成灌漿處理。伴隨時間流逝，混凝土障壁和廢棄物包件將逐漸劣化，放射性核種將被釋放並溶解於水中，因吸附功能依然存在且 Forsmark 區域的流量較低，故預期放射性核種將遲滯於處置場中。

7. 未來人類活動情節：

未來人類活動可能影響到處置場的長期安全性，故應基於當前人類的活動及習慣進行推估，不能排除人類可能因鑽鑿調查地質而接觸廢棄物。所有未來人類

可能行為可以在 FHA(future human actions)報告中查詢，本情節為涵蓋可能損害處置場性能或導致嚴重放射性污染之人類活動潛在後果，選擇三種不同的 FHA 案例：鑽鑿處置場、水管理、地下建築。

(1) FHA 情節—鑽鑿處置場：

鑽鑿處置場的情節主要假設鑽孔直接與處置場接觸並將受污染物質帶到地面，而鑽井碎屑將隨意遺棄至周遭垃圾掩埋場，故此場景最將人類潛在劑量最大化，而鑽孔穿透廢棄物之假設於其他情節中的入侵井情節被探討。

(2) FHA 情節—水管理：

水管理可能導致處置場深度的水文地質通量發生改變，影響局部水力梯度，此情節中將探討 SFR 碼頭的拆除或修改後碼頭地下水位對流場產生之影響。碼頭由高滲透性的材質(砂、礫石等)構成，建立於天然山脊地形，因現階段沒有資料顯示 SFR 碼頭未來的地下水位應顯著高於海平面或天然山脊，故碼頭的高滲透性填充材質拆除或修改將不會對 SFR 的局部流場造成影響。SFR 碼頭高或低於碼頭之地下水位造成的影響，透過兩種水文模型得知，兩者流場差異有限，故此影響透過假設母岩中的高流量於其他情節被探討。

(3) FHA 情節—地下建築：

地下建築的存在可能導致處置場周圍水文通量的改變、影響水力梯度，並產生潛在傳輸核種途徑，在此將討論兩種建築：處置場附近的道路或隧道、處置場附近出現礦產。

- I. 處置場附近的道路或隧道：道路或隧道對處置場之影響取決於隧道位置、深度及大小，倘若出現在 Singö 變形區以西，將不會對處置場產生負面影響，如出現在其他方位將導致通過處置窖之流量增加，此情節可透過母岩中的高流量於其他情節進行探討。
- II. 處置場附近出現礦產：處置場與潛在礦區之距離約為 3 公里，因此可以假設潛在礦區的存在無法對處置場造成影響。

8. 冰河作用和冰期後的狀況：

目前的科學認知為下一次冰期的開始約於 5 萬年後，甚至可能 10 萬年內都不會發生，但不排除瑞典中南部於 10 萬年評估期間的後期可能會發生冰河作用。

(1) 外部條件：

Weichselian 冰河循環氣候案例被用於重建未來 120,000 年間氣候條件，假設未來 10 萬年的評估期間可能出現冰河氣候，評估期間之不確定性評估包括了兩個可能出現冰河氣候的時期，首次發生於西元 59,600-68,200 年間持續約 8,600 年，而冰河氣候結束後則為連續 8,100 年之淹沒期(西元 68,200-76,300 年)，評估包括處置場受到冰河作用產生之影響及其於冰河期過後之環境變化，在冰河期的前半段，處置場上方冰層較寒冷，而在冰河期的後半段，處置場上方冰層逐漸暖化，環境則由冰河氣候向溫帶氣候演變，過渡期間假設原凍結之母岩緩慢解凍，直至西元 68,200 年。

(2) 水文地質條件：

當 SFR 上方的表面成為陸地時，可能對人類產生影響之潛在劑量僅考慮處置場及處置場周圍之放射性核種，而評估期間首次冰河氣候存在時間較短，並且其溶解之冰層對地下水流量增加的比例較下一次冰河時期少，故僅有少量放射性核種傳輸至波羅的海。

Vidstrand 等人為探討冰河期對地下水流量產生的變化建置模擬進行評估，模擬結果顯示，地下水流量可分為三個部分：西元 63,900-66,200 年間，當冰層邊緣遠離 Forsmark 區域時，處置場深度的地下水流量和溫帶氣候陸域環境相似；西元 66,200-67,200 期間，當冰層邊緣接近 Forsmark 區域時，處置場深度的地下水流量約為溫帶氣候陸域環境的 2 倍；西元 67,200-68,200 年期間，當冰層邊緣籠罩在 Forsmark 區域時，處置場深度的地下水流量約為溫帶氣候陸域環境的 3 倍，且當冰緣超過 SFR 處置場時，該區域會被淹沒，地下水流量約為溫帶氣候陸域環境的 0.2 倍 (Vidstrand et al., 2010, 2013, 2014)。

(3) 處置場的演化及放射性核種的傳輸：

此情節假設處置窖結構受到冰河作用影響失去水力障壁功能，設置方法與處置場中的高流量情節相同，在這個情節的一開始，謹慎假設處置場於冰河時期出現前並無外釋，當冰河期的後半段母岩開始解凍時，放射性核種從 SFR 處置場傳輸至波羅的海，假定其於波羅的海大量擴散，而冰河期過後，Forsmark 區域開始為期約 8,000 年的淹沒期，雖然波羅的海因地殼均衡緩慢回彈，導致水深降低，但在淹沒期間從 SFR 場址遷移至波羅的

海的放射性核種被認為積累在 SFR 場址上方的沉積物中。

## 2.2.5 組合情節

除了不太可能的情節之外，低可能性情節的組合顯然是可能發生的，然而，考慮到可能性較小的情節之間存在不同的潛在不確定性，組合情節發生的概率等於所結合之情節概率的乘積，並且考慮情節間相互獨立，自然發生的可能性低於各情節單獨出現的機率，下述情節組合如表 2.10 所示。

### 1. 情節組合 1：

將母岩中的高流量情節與加速混凝土劣化情節相結合。母岩中的高流量情節是用於描述水文地質流量模型中岩石資料的不確定性，然而加速混凝土劣化情節是用於描述混凝土劣化過程中速率的不確定性。雖然混凝土劣化過程可能和水流的不確定性相結合，但仍存在其他不確定性，如 2.1 節中所述，因此，產生這兩種情節的不確定性被認為是獨立的。

### 2. 情節組合 2：

將母岩中的高流量與高濃度的錯合劑情節相結合。母岩中的高流量情節代表水文地質流量模型中岩石的資料的不確定性，然而高濃度錯合劑情節代表處置場中錯合劑和纖維素數量的不確定性。產生這兩種情節的不確定性被認為是獨立的。

表 2.10 組合情節之不確定性 (TR-14-01 Table 7-7)

情節	不確定性	情節組合	
		組合 1	組合 2
高廢棄物存量	初始廢棄物存量的誤差 (初始狀態)		
母岩位於高流量環境	水文地質模型中岩石資料的誤差(初始狀態)	○	○
快速混凝土劣化	主要是混凝土的劣化速率誤差 (內部作用)	○	
膨潤土劣化	冰緣氣候出現時間的不確定性 (外部條件) 及膨潤土的封阻誤差 (內部作用)		
地震	未來可能發生地震 (外部條件)		
高濃度的錯合劑	處置場中錯合劑濃度及纖維素總量的估計誤差 (初始狀態)		○
水井位於處置場下游	未來人類行為的不確定性 (外部條件)		
鑽井	未來人類行為的不確定性 (外部條件)		

## 2.3 LLWD 2016 之參考演化與設計情節分析

本節主要整理國內 LLWD 2016 報告之參考演化與設計情節(TR-14-01 稱為主要情節)，了解國內目前在參考演化與設計情節所考慮影響核種傳輸資訊，2.3.1 說明報告中參考演化發展及考量要素，而 2.3.2 節則說明報告之設計情節選定依據及其設置方式。

### 2.3.1 LLWD 2016 之參考演化

LLWD2016 之參考演化外部情節遵循 SKB 提出之延伸全球暖化氣候案例及早期冰緣氣候案例對未來碳排放量的兩種假設，參考演化一考量未來高碳排放，冰期循環因全球暖化推遲 100,000 年，參考演化二則假設溫室效應影響有限，處置設施封閉後立即進入冰期循環，並依照預測的可靠度將演化發展切割為兩部分，分別為封閉後 1,000 年內與 1,000 至 100,000 年間，表 2.11 則簡易呈現兩種演化情節之差異性，詳細內容本小節將依照：氣候演化、地表生態系統演化、力學作用演化、水文地質演化、地球化學演化、工程障壁演化，逐項說明外部條件造成之影響。

表 2.11 參考演化情節之差異(台灣電力公司，2017a)

參考演化	參考演化一 冰期循環推遲十萬年	參考演化二 處置設施封閉後進入冰期循環
氣候演化	降雨量增加 10%	海平面下降至 EL-61m 後回升
地表生態系統演化	同現況 (一級產業為主)	海平面下降些微地表露出 (一級產業為主)
水文地質演化	受板塊運動影響，以 8~9 cm/yr 的速率向西北方推擠	
力學作用演化	地下水水力梯度 微幅增加	受到海平面下降影響，地下水 流速持續增加
地球化學演化	處置設施內部最終成為還原狀態	
工程障壁演化	正常劣化	

#### 1. 氣候演化

##### (1) 參考演化一(冰期循環推遲 100,000 年)

此演化情節根據 IPCC(2013)評估未來將呈現高碳排放量做為趨勢，加入 SKB(SKB, 2014a)經由推估表示未來大氣中二氧化碳濃度無法有效降低，

導致冰期循環推遲至十萬年後開始，藉此推測十萬年內氣候將不會進入冰期循環。而海平面演化則參考行政院原子能委員會放射性物料管理局(2013)，以過去 15 萬年海水面變化趨勢為基底，得知達仁鄉海水面將維持現況，假設平均潮位高程(EL0.193m)。雨量推估則依據「場址特性參數評估報告-台東縣達仁鄉」之月平均降雨量統計結果進行計算(台灣電力公司，2017a)，推估月雨量等於平均月雨量乘上(1+月增率)，其中之月增率引用自台灣氣候變遷科學報告(國家災害防救科技中心，2011)預測未來世界可能發展情境(A1B 情境)，經計算得知，達仁鄉建議候選場址之年平均降雨量增加率約為 9%。

#### (2) 參考演化二(處置設施封閉後立即進入冰期循環)

此情節假設溫室效應影響有限，處置設施封閉後立即進入冰期循環，海平面將在設施封閉後持續下降，直至封閉後五千年達到 EL-61m 再回升。而降雨量特性則假設維持現狀。

### 2. 地表生態系統演化

#### (1) 參考演化一(冰期循環推遲 100,000 年)

此外部條件下，氣候及海岸線皆無發生明顯變動，藉此推測地表生態系統無發生明顯變化，產業發展以一級產業為主。

#### (2) 參考演化二(處置設施封閉後立即進入冰期循環)

此外部條件下，東部海岸線受海平面下降影響將往東側移動，但因處置場東部海底地形陡峭，僅些微地表面積露出，故對地表生態系統影響有限，產業發展仍以一級產業為主。

### 3. 力學作用演化

參考演化一及參考演化二兩情節之力學作用皆來自於構造運動。台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的聚合帶，當菲律賓海板塊以 8 至 9cm/yr 的速率持續向西北方推擠(Yu et al., 1997)，將造成北北西向的呂宋島弧與東北向的歐亞大陸邊緣產生碰撞，對處置場產生力學作用。

### 4. 水文地質演化

#### (1) 參考演化一(冰期循環推遲 100,000 年)

海平面高度於此情節維持現況，且場址之地下水流場邊界範圍內並無活動斷層，利用抬升與剝蝕率設定分析得知，場址所在區域的地形地貌無

發生明顯改變，因此假設場址的水文地質特性僅受降雨量增加影響。

(2) 參考演化二(處置設施封閉後立即進入冰期循環)

此案例之海平面將於設施封閉後持續下降，直到 5,000 年後達到最低點 EL-61m 後緩慢回升，於 10,000 年後回升至 EL-10m 左右。而此區域之地下水流速隨海平面上升而趨緩，故於 5,000 年時擁有最快之地下水流速。另外，場址之地下水流場邊界範圍內並無活動斷層，利用抬升與剝蝕率設定分析得知，場址所在區域的地形地貌無發生明顯改變。

5. 地球化學演化

參考演化一及參考演化二中處置母岩於開挖前皆屬還原狀態，開挖後與空氣接觸導致氧化範圍增加，當處置設施回填封閉後，周圍之地下水補注及鐵製材料腐蝕作用，致使處置設施周邊處置母岩回復為還原狀態。故處置場之地球化學條件改變發生於建造至封閉後 1,000 年間，如表 2.12，而 1,000 至 10,000 年間則維持還原狀態。

表 2.12 處置設施氧化還原狀態(台灣電力公司，2017a)

階段	工程障壁		開挖擾動區母岩		非開挖擾動區母岩	
	低於地下水水面	高於地下水水面	低於地下水水面	高於地下水水面	低於地下水水面	高於地下水水面
設施興建前	-	-	-	-		
興建運轉階段	氧化態	氧化態	淡水、氧化態	氧化態	淡水、還原態	氧化態
設施回填後	還原態	氧化態	淡水、還原態			
設施回填經過一段時間後	淡水、氧化態	氧化態	淡水、還原態			

6. 工程障壁演化

由於處置場位於熱帶地區，進入冰期循環並不會產生永凍土現象，故參考演化一及參考演化二情節中之工程障壁劣化過程相似，如表 2.13 所示。處置設施中的混凝土材料與周圍岩體、土壤、地下水中之硫酸鹽、氯離子、鎂離子交互作用而逐漸劣化。達仁鄉建議候選場址於封閉後 1,000 年內主要劣化原因為，地下水中的硫酸鹽長時間與混凝土材料反應，造成混凝土產生裂縫。而封閉後 1,000 至 10,000 年間硫酸鹽造成之影響持續擴大(SKB，2014c)，且因混凝土中的鹼性



物質易溶於水產生溶出失鈣效應，導致處置場呈現高 pH 值環境，進階促使蒙脫石溶解降低回脹性能(Savage & Benbow, 2007)。封閉後 10,000 至 100,000 年間，硫酸鹽造成之影響逐漸降低，但混凝土障壁依然受到失鈣效應的影響，將水泥化合物、矽酸鈣水合物(CSH)溶於水中，導致混凝土孔隙增加，而水泥化合物、矽酸鈣水合物(CSH)溶於水產生之鈣離子亦藉由離子交換作用影響鄰近的膨潤土障壁，使之鈣型化，回脹功能亦因此降低。封閉 100,000 年後，蒙脫石將因長期溶出失鈣而幾乎完全溶解，致使膨潤土工程障壁失去應有性能(SKB, 2014a)。

表 2.13 工程障壁於正常劣化條件下之水力傳導係數比(台灣電力公司，2017a)

工程障壁 (A 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1.5	5	10
處置窖	1	1.5	5	10
回填材料	1	1.5	5	10
二次襯砌	1	2	8	10
開挖擾動區	1	2	8	10
工程障壁 (B、C 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1	1.5	2
處置窖	1	1	1.5	2
緩衝材料	1	1	1.5	2
回填材料	1	1.5	5	10
二次襯砌	1	2	8	10
開挖擾動區	1	2	8	10

### 2.3.2 LLWD 2016 之設計情節

LLWD 2016 報告中，達仁鄉建議候選場址之情節設計如表 2.14，其中設計情節係考量參考演化一(冰期循環推遲 100,000 年)進行建構，而替代情節則將參考演化一及參考演化二皆納入其中，且設置內容涵蓋設計情節以外之各項變因。兩者詳細方法描述亦有所不同，設計情節中首先以外部條件進行基本說明，然後依序為：地質圈、處置設施、地表生態系統，而替代情節因考量變因較多，故描述方式以表格陳列為主。

表 2.14 達仁鄉建議候選場址之情節設置(台灣電力公司，2017a)

情節		氣候演化	降雨量設定	障壁劣化程度
設計情節	維持氣候暖化情節	參考演化一	增加10%	正常劣化
替代情節	維持氣候暖化且工程障壁劣化加劇情節	參考演化一	增加10%	劣化加劇
	進入冰期循環情節	參考演化二	同現況	正常劣化
	進入冰期循環且工程障壁劣化加劇情節	參考演化二	同現況	劣化加劇
	地震後嚴重劣化情節	參考演化一	增加10%	地震後嚴重劣化

1. 設計情節：

(1) 外部條件

I. 氣候演化

參考演化一之氣候演化受溫室氣體影響，冰期循環延遲至 100,000 年後才開始，即意指未來 100,000 年內之氣候形態並無劇烈變化，但降雨量增加 10%。

II. 海水位變化

依循參考演化一之氣候預測，海平面上升程度對達仁鄉建議候選場址並無明顯影響，故地下水流場及平均潮位高程皆維持現況。

III. 地層抬升及地表侵蝕

地層抬升及地表侵蝕皆會影響處置設施周圍之地表與地下水文狀態，LLWD 2016 藉由場址特徵化結果，假設地層平均抬升率為 2.6mm/yr、平均剝蝕率為 2.5 mm/yr，故地貌特徵將與現況相同。

(2) 地質圈

I. 地下水流場特性

由外部條件得知處置設施周圍之地形、地貌及海平面高程等皆與現況相似，僅年平均降雨量增加 10%，故地下水流速之流向、流徑等皆與初始狀態相似，而流速將微幅增加。

II. 地球化學

地球化學演化由地下水組成控制，由於場址屬淡水環境條件，故分析期間處置設施周圍均為淡水地下水。另外，依參考演化一之地球化學

演化推測，場址內長期屬於還原狀態，因此在分析之時間範圍內，地質圈之地球化學條件維持與現狀相同。

### III. 力學作用

由於場址為坑道式處置，並於選址時避開活動斷層直接影響區域，故假設地震對地質圈之影響僅位於分析邊界以外之區域。在此假設工程障壁之施工品質良好，地震對處置設施影響有限，故於設計情節中不予考慮地震對地質圈之影響，並另於替代情節中描述。

### IV. 核種傳輸

設計情節之核種傳輸機制涵蓋核種衰變、吸附，以及平流、延散、擴散等。

#### (3) 處置設施

在此針對設計情節中處置設施內之水文條件、工程障壁演化進行說明。

##### I. 水文條件

受年平均降雨量提高 10% 影響，分析期間地質圈之地下水流速將微幅提升，而處置設施因採回填方式封閉，故回填範圍水力傳導特性受到影響，地下水流速增幅少於地質圈。

##### II. 工程障壁

工程障壁材料將概分為混凝土材料及膨潤土材料進行說明：

- a. 混凝土材料之劣化以增加孔隙率及裂隙為主，藉此提高水力傳導度、孔隙率及擴散係數，但吸附功能仍可長時間維持。
- b. 鈉形膨潤土因周遭混凝土材料溶出失鈣現象而導致其蒙脫石成份溶解逐漸轉為鈣型，故膨潤土之滲透係數增加、回脹性降低，進而逐步降低其遲滯功能。

##### III. 核種傳輸

傳輸過程將考量：核種衰變、吸附、金屬放射性廢棄物釋出率、非金屬放射性廢棄物核種溶解度、延散、平流與擴散等，空間中影響濃度分布之各種機制。在此更保守考量非金屬放射性廢棄物核種遇水時溶解，且無溶解上限。

#### (4) 地表生態系統

本設計情節於封閉後 100,000 年內氣候形態與現況相似，故推測產業

發展同樣以一級產業為主，且生物圈為陸域生活型態，圖 2.22 代表人類可能接觸放射性核種之各種曝露途徑，依達仁鄉之生活模式推估，因其生活環境屬無沖積層之山區地形，地下岩盤難以鑽鑿水井，故飲用水及農業用水多取自山泉水或野溪水，不考慮攝取井水的情形。

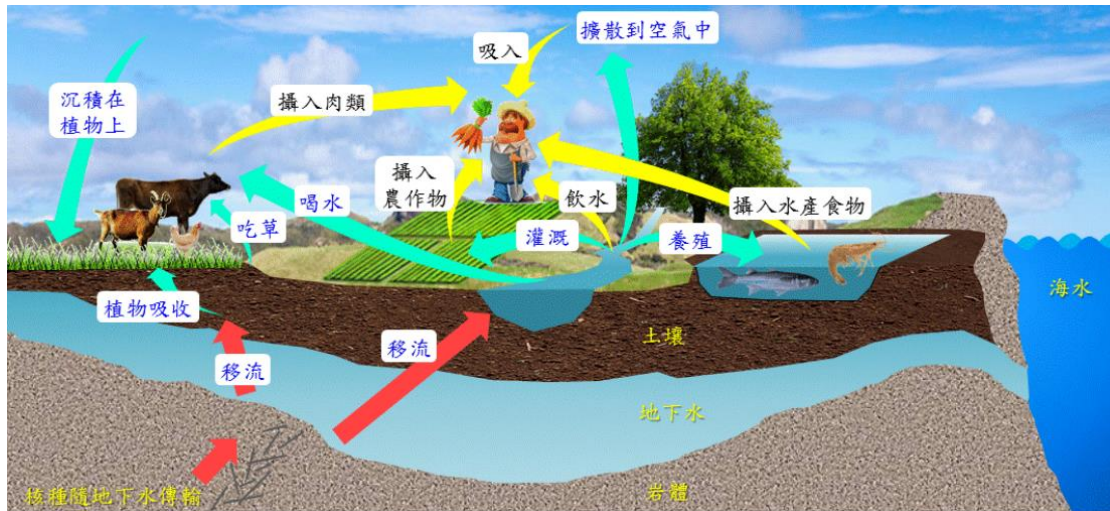


圖 2.22 陸域生活型態之生物圈核種傳輸示意(台灣電力公司，2017a)

## 2. 替代情節：

### (1) 參考演化一

參考演化一之基本條件已成為設計情節之基本設置，於替代情節中主要考量工程障壁劣化程度加劇及處置場址於封閉後 300 年時遭受多次強烈地震所造成之影響。參數條件設置分別如表 2.15、表 2.16。

### (2) 參考演化二

參考演化二與參考演化一最大條件差異為海平面高度，當海平面高度降低時，地下水流速受梯度影響增加，進而加速核種釋出。為考量對處置場址影響最嚴重之情節，將參考演化二海平面降低以水力傳導係數做代表，設定降雨量增加 10%，並加入地震影響，提出地震後嚴重裂化之情。

表 2.15 工程障壁於加劇劣化條件下之水力傳導係數比(台灣電力公司，2017a)

工程障壁 (A 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	3	10	20
處置窖	1	3	10	20
回填材料	1	3	10	20
二次襯砌	1	4	16	20
開挖擾動區	1	4	16	20
工程障壁 (B、C 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	2	3	4
處置窖	1	2	3	4
緩衝材料	1	2	3	4
回填材料	1	3	10	20
二次襯砌	1	4	16	20
開挖擾動區	1	4	16	20

表 2.16 工程障壁在地震情節下水力傳導係數比(台灣電力公司，2017a)

工程障壁 (A 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1.5	100	100
處置窖	1	1.5	100	100
回填材料	1	1.5	100	100
二次襯砌	1	2	100	100
開挖擾動區	1	2	100	100
工程障壁 (B、C 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1	4	4
處置窖	1	1	4	4
緩衝材料	1	1	4	4
回填材料	1	1.5	100	100
二次襯砌	1	2	100	100
開挖擾動區	1	2	100	100

### 2.3.3 LLWD2016 分析模式與參數設定

LLWD2016 報告中情節設計之安全評估模擬係利用 GoldSim 程式進行建置，

此程式可模擬放射性核種與一般核種於相異介質中的質量傳輸。圖 2.23、圖 2.24 係針對台東縣達仁鄉建議候選場址所規劃之一維概念模型，而圖 2.25 則為 GoldSim 軟體建置之數值分析模型，其內可輸入核種資料、材料基本參數，以及輸入參數。於 LLWD2016 報告中，近場傳輸機制考量平流及擴散，而遠場則考量平流及延散。鑒於替代情節之參數設置與設計情節相似，唯有水力傳導係數及降雨量、海退等變化，故以下將以設計情節為主分別說明：廢棄物、處置窖、緩衝材料、回填材料、二次襯砌、開挖擾動區、地質圈、生物圈，以及處置設施與地質圈地下水流場之設置。

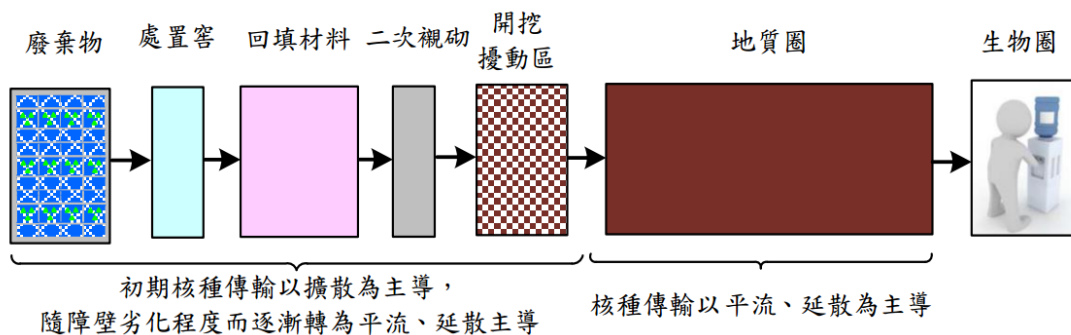


圖 2.23 A 類放射性廢棄物處置坑道核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台灣電力公司，2017a)

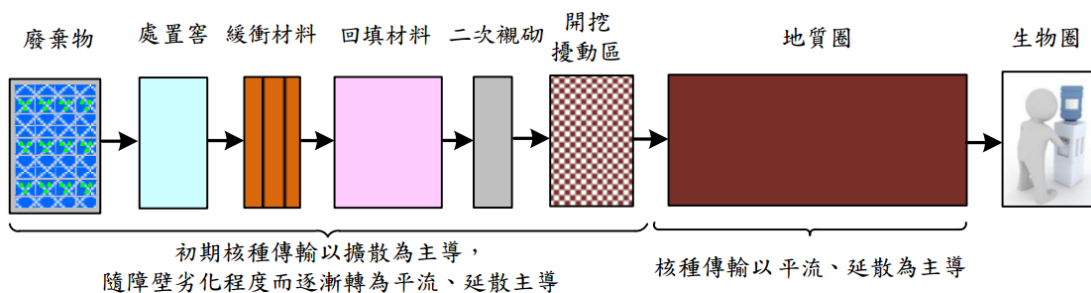


圖 2.24 B、C 類放射性廢棄物處置坑道核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台灣電力公司，2017a)

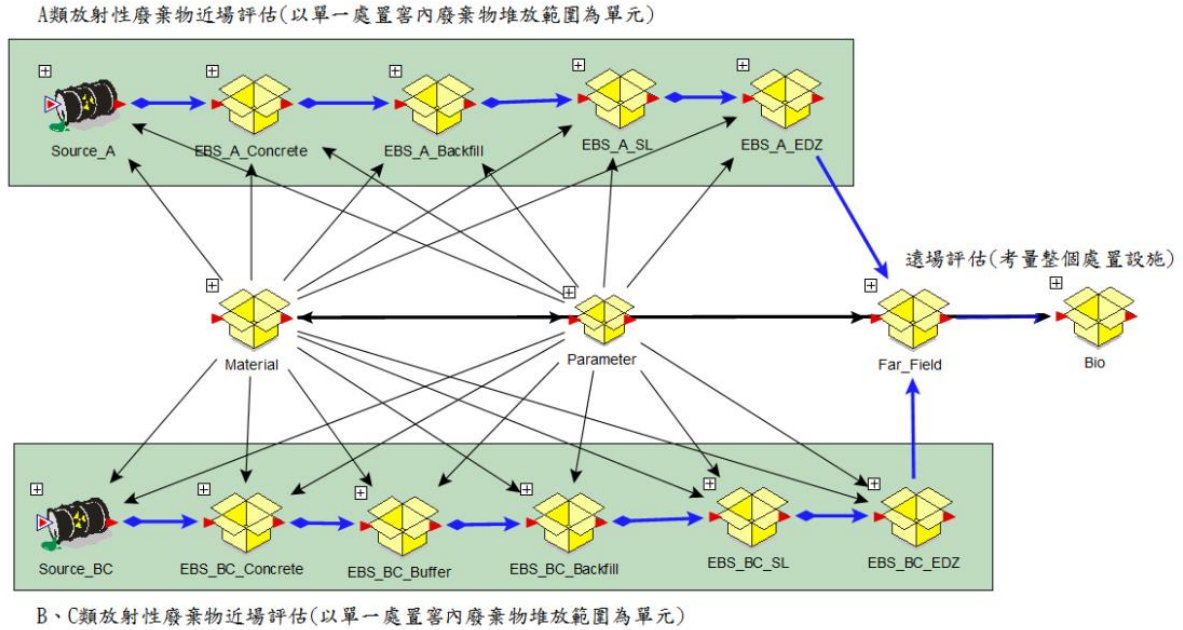


圖 2.25 GoldSim 整體評估數值分析模型(台灣電力公司，2017a)

### 1. 廢棄物

安全評估假設各類廢棄物皆以 55 加侖桶盛裝，而活度則依法規母核種上限值進行設定，亦考量母核種衰變為子核種之過程。分析過程假設非金屬廢棄物溶解於孔隙水中，而金屬廢棄物則設定  $3.3E-06 \text{ yr}^{-1}$  的釋出率。

### 2. 處置窖

處置窖之平流傳輸係以處置窖之縱剖面進行計算，而擴散作用則以處置窖之周長面積作考量，其中地下水的氯離子可能藉由擴散作用入侵混凝土鋼筋表面，造成鋼筋腐蝕(羅欣蕙，2011)，為評估處置窖劣化造成之影響，LLWD2016 調整水力傳導係數並配合流場條件，評估不同劣化條件下之滲入流量，而分配係數則考量長時間化學衰變作用下，功能可能發生變化，因此參考 IAEA 之案例，設定處置窖封閉後 500 年，吸附功能將降低至原設定值之 10%。處置場封閉初期，擴散作用為核種傳輸之主要機制，伴隨時間增加，將轉為平流與延散效應主導。

### 3. 緩衝材料

我國處置設施位於熱帶氣候，因此化學反應之影響十分緩慢(SKB, 2008)，且無孔隙水結凍之可能，故將忽略膨潤土對水力傳導係數造成之影響，但膨潤土周圍具有混凝土材料，當混凝土發生溶出失鈣現象時，膨潤土之遲滯功能將受到影響。針對緩衝材料之劣化，LLWD2016 參考 SKB R-14-14 報告(SKB, 2014e)，以



調整水力傳導係數及流場條件之方式評估不同劣化情況之入滲流量，而分配係數則與處置窖之設置考量相同。處置設施封閉初期，核種傳輸機制受到擴散作用主導，當緩衝材料逐漸劣化後，則轉為平流與延散效應主導。

#### 4. 回填材料

回填材料主要成份為混凝土材料，當回填材料逐漸劣化時，LLWD2016 依據 SKB R-14-14 報告(SK B, 2014e)，以調整水力傳導係數及流場條件之方式進行評估入滲流量，並考量處置場設計概念、材料特性、劣化等，在不同時間改變水力傳導係數的比例，而分配係數之考量與處置窖相同。處置設施封閉初期，核種傳輸機制受到擴散作用主導，當回填材料逐漸劣化後，則轉為平流與延散效應主導。

#### 5. 二次襯切

二次襯切之主要成份為鋼筋混凝土材料，LLWD2016 依據 SKB R-14-14 報告(SK B, 2014e)，將二次襯切之劣化以不同水力傳導係數比例之方式進行評估，而分配係數之考量則與處置窖相同。

#### 6. 開挖擾動區

開挖擾動區係以混凝土材料進行固結灌漿，LLWD2016 依據 SKB R-14-14 報告(SK B, 2014e)，以調整水力傳導係數及流場條件之方式評估劣化後之入滲流量，並考量處置場設計概念、材料特性、劣化等，在不同時間改變水力傳導係數的比例，而分配係數之考量與處置窖相同。

#### 7. 地質圈

核種外釋進入遠場地質圈後，核種傳輸作用主要為平流及延散，由地下水流進行傳輸，藉此進入生物圈，而分配係數之考量與處置窖相同。LLWD2016 依照設定之粒子外釋途徑將處置設施劃分為三個區域，如圖 2.26，紅、綠、藍三色圓點將分別流至達仁溪流域、太平洋，以及塔瓦溪流域，而其中太平洋區域因流出位置接近海水，地下水與海水混合後鹽度較高將無法飲用，且海水具有快速稀釋之特性，因此生物圈分析時將僅考量達仁溪流域、塔瓦溪流域之關鍵群體。

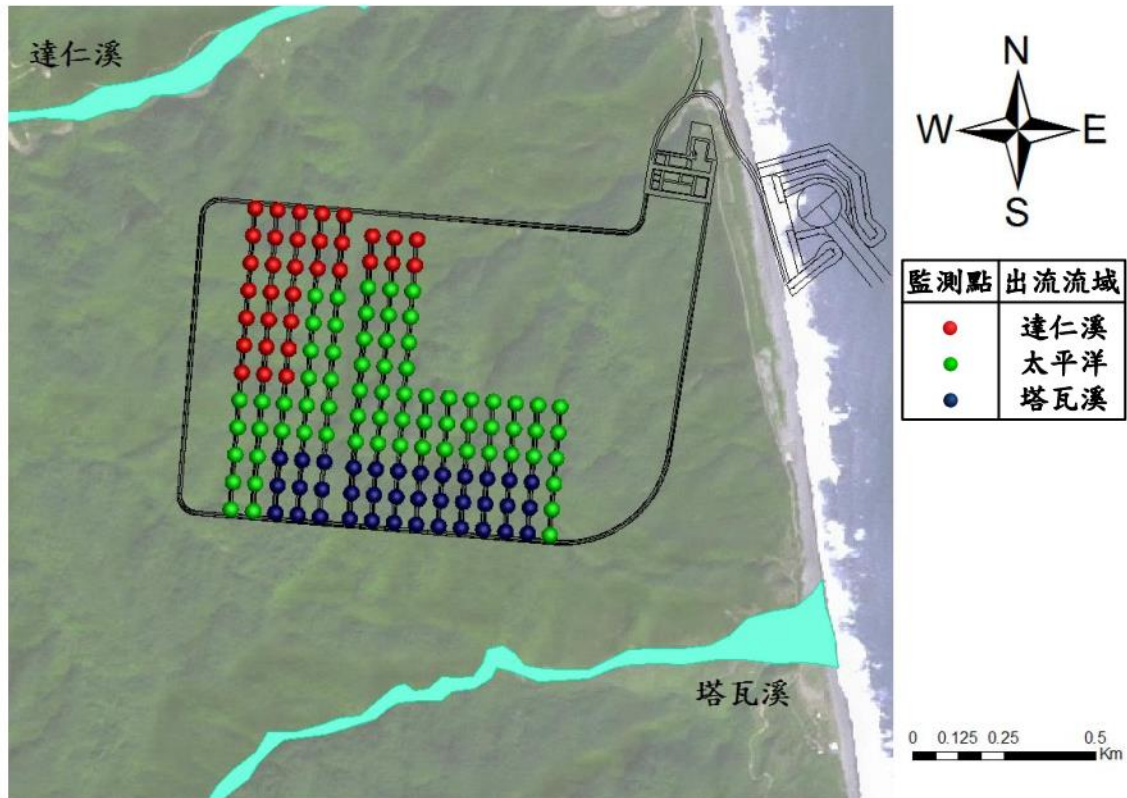


圖 2.26 達仁鄉建議候選場址粒子追蹤監測點說明(台灣電力公司，2017a)

## 8. 生物圈

關鍵群體的輻射曝露劑量計算途徑包括：飲水、攝取各項農作物及水產、吸入粉塵、農耕時體外曝露等，而其中養殖漁業使用水源 LLWD2016 保守假設均已受污染。另外，因關鍵群體所在流域並無實測之流量資料，將參考台灣水文年報(2015.06)(經濟部水利署，2015)之知本溪年流量，採用比面積法進行計算，其公式為：年流量=(集水區單位面積×年平均流量)×(集水區面積)×(平均年雨量比值)。

## 9. 處置設施與地質圈之地下水流場

LLWD2016 之地質圈地下水流場係採用 HYDROGEOCHEM 模式進行模擬，並將模擬結果作為 GoldSim 軟體之輸入參數。

## 2.4 LLWD 2016 與 SKB SR-PSU 之參考演化及設計情節差異比較

瑞典 SR-PSU 主報告 TR-14-01 之參考演化內容以溫室氣體排放量及日照微小變化作為變因，利用過往 12 萬年之氣候演化趨勢作基底，衍生三種氣候案例，而國內 LLWD 2016 之參考演化情節則根據 IPCC(2013)評估未來將呈現高碳排放

量作為趨勢，提出參考演化一及參考演化二兩種案例，分別代表高碳排放量及低碳排放量，詳細之差異比較內容將於 2.4.1 節進行說明。設計情節方面，瑞典 SR-PSU 主報告 TR-14-01 遵循 SSM 法規建議，為描述未來場址可能潛在之演化，設計四種類型之情節，分別為設計情節、替代情節、其他情節與剩餘情節，以場址設計之初始條件為基礎，分析內部過程及外部條件可能因參考演化衍生之各項風險，而 LLWD 2016 之情節設計主要分為設計情節及替代情節兩種，以參考演化一作為設計情節基底，將可能發生之不確定性案例用替代情節進行分析評估，盡力涵蓋台灣環境可能發生之長期演化變因。

### 2.4.1 LLWD 2016 與 SKB SR-PSU 參考演化之差異

以溫室氣體排放量作為比較基準，表 2.17 比較國內 LLWD 2016 與瑞典 SKB SR-PSU 主報告 TR-14-01 之演化案例，為減少不確定性風險，對未來氣候之演化推估皆有採納最高碳排放量及最低碳排放量，而瑞典更依照現有碳排放量提出全球暖化氣候案例。為研析參考演化影響核種傳輸之關鍵資訊，圖 2.27 比較演化案例考慮之項目並將其相互對應，國內未考慮熱流演化係因國內低放處置之低放射性廢棄物並無熱源釋放，且無永凍土存在。以下以國內報告探討之演化項目為主，比較與瑞典 SFR 場址評估項目之差異性，並列表比較如表 2.18。

#### 1. 地表生態系統：

地表生態系統容易受到氣候變化及海岸線演化兩項主要變因控制。LLWD 2016 於此項目簡易說明氣候變化、海岸線演化及產業發展假設，而瑞典則詳述氣候及海岸線演化過程、說明有無人為干擾之植被及土地利用情形。兩者主要差異處為 LLWD 2016 是以產業發展進行說明，而瑞典是以植被及土地利用情形作為呈現，推測係因評估之土地大小範圍差異，故以不同方式進行呈現。

#### 2. 力學作用演化：

力學作用演化可能導致應力重新分布或交界處岩壁產生裂隙。台灣因位於板塊聚合帶，提出地質構造運動為主要力學作用影響因子，而瑞典 SFR 場址則提出挖掘爆破、結構荷重、冰期凍土、地下水結凍、地震等皆會影響處置設施之力學作用。LLWD 2016 視地質構造運動為主要影響因子因此沒有評估瑞典所評估之各細項，但除冰期凍土、地下水結凍外，瑞典所提出之項目皆為可能造成影響

之項目。

### 3. 水文地質演化：

水文地質演化長期受到氣候演化與海岸線演變控制，其中海岸線的變化將造成地下水流場變動，而流經處置窖之地下水則為放射性核種遷移之主要途徑。LLWD 2016 於此項目評估降雨量、海平面高度及地下水流場邊界內之活動斷層，並利用抬升與剝蝕率得知地形地貌演化情形，而瑞典 SR-PSU 將此項目分為水文地質演化與近場水文循環演化，其中，水文地質演化以遠場水文地質模型進行區域模擬，外部邊界以考慮海岸線演變之天然水文邊界進行設置，而近場水文循環演化則以遠場水文地質模型銜接近場水文地質模型，藉此得知地下水流量、流速等演化過程，並於近場水文循環演化中評估膨潤土障壁與混凝土障壁劣化可能造成之影響。兩者於此項目之評估內容差異處為，LLWD 2016 多考慮降雨量及地貌演化，瑞典 SR-PSU 則多考慮工程障壁劣化造成的影響。

### 4. 地球化學演化：

地球化學演化與氣候演化、海岸線演變、水文地質演化皆擁有密切的關聯，例如，岩石與水的交互作用、地下水流動演變等，皆可影響地球化學演化。LLWD 2016 兩案例之地球化學演化皆考慮處置設施內部之氧化還原狀態，說明處置場自開挖到回復為還原狀態的過程，而 SR-PSU 則將廢棄物的化學演化與地球化學演化做區隔，地球化學演化主要探討地下水組成，而廢棄物的化學演化則討論廢棄物的組成及其包件、水組成、氧化還原、氣體形成。此項目評估主要差異在於 LLWD 2016 著重於氧化還原狀態，而 SR-PSU 則考慮氣體形成、水組成等，各種細節項目。

### 5. 工程障壁演化：

工程障壁之長期安全性受到內部過程及外部條件影響。LLWD 2016 之工程障壁演化著重於說明混凝土障壁及膨潤土障壁劣化原因，混凝土障壁係與硫酸鹽、氯離子、鎂離子進行交互作用而劣化，而膨潤土障壁則因鈣離子經由離子交換使之鈣型化，並提出兩者之劣化時程，而 SR-PSU 之工程障壁則增加回填材料一項，評估其組成是否影響溶質傳輸，並於膨潤土工程障壁評估：蒙脫石的變化、膠結作用、膨潤土膠體構造與其流動性、蒙脫石與鐵的交互作用、周圍混凝土的腐蝕，以及氣體的存在等；混凝土障壁評估：混凝土的溶出作用、鋼構件的腐蝕、混凝土

局部劣化、混凝土與地下水的化學交互作用，以及從廢棄物中溶出的物質等。兩報告主要差異在於 SR-PSU 於膨潤土障壁討論膠結作用、膠體的流動性、蒙脫石與鐵的交互作用、氣體存在，並於混凝土障壁討論鋼構件的腐蝕、廢棄物壓力造成的破裂等影響較細微之項目。

表 2.17 參考演化案例

報告名稱 碳排放量	LLWD 2016	SKB SR-PSU
高碳排放量	參考演化一	延伸全球暖化氣候案例
中等碳排放量	×	全球暖化氣候案例
低碳排放量	參考演化二	早期冰緣氣候案例

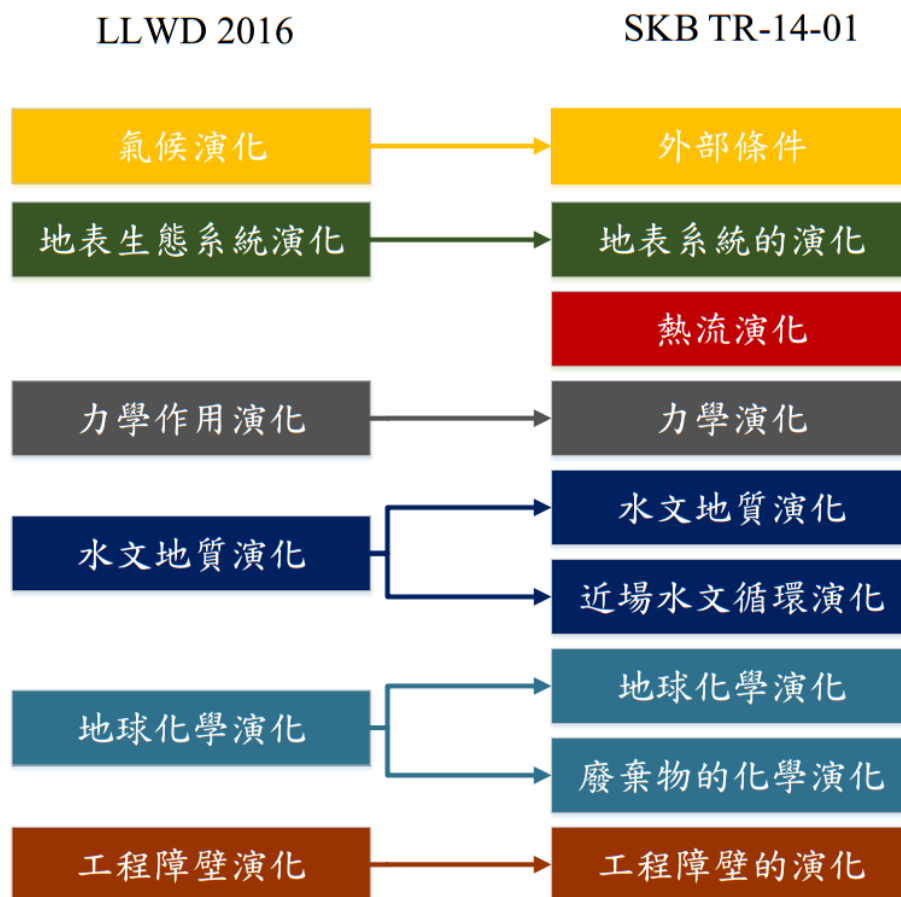


圖 2.27 參考演化項目對應圖

表 2.18 LLWD 2016 報告與 SKB SR-PSU 報告之參考演化項目比較

LLWD 2016		SKB SR-PSU	
氣候演化	-溫室氣體排放量 -海岸線演化 <u>-降雨量</u>	外部條件	-溫室氣體排放量 <u>-日照長度</u> <u>-永凍土、凍結深度</u> -海岸線演化
地表生態系統演化	-氣候變化 -海岸線演化 -產業發展	地表系統的演化	-氣候變化 -海岸線演化 -植被及土地利用情形
		熱流演化	<u>-冰期時間</u>
力學作用演化	-地質構造運動	力學演化	- <u>挖掘爆破</u> <u>-結構荷重</u> <u>-冰期凍土</u> <u>-地下水結凍</u> -地震
水文地質演化	<u>-降雨量</u> -海岸線演化 <u>-地形地貌演化</u> -地下水流場	水文地質演化	-氣候演化 -海岸線演變 -地下水流場
		近場水文循環演化	-地下水流場 <u>-膨潤土障壁劣化</u> <u>-混凝土障壁劣化</u>
地球化學演化	-氧化還原狀態	地球化學演化	<u>-地下水組成</u>
		廢棄物的化學演化	- <u>廢棄物的組成及其包件</u> <u>-水組成</u> -氧化還原 <u>-氣體形成</u>
工程障壁演化	-混凝土障壁 -膨潤土障壁	工程障壁的演化	-混凝土障壁 -膨潤土障壁 <u>-回填材料</u>

\*斜體底線標註為相異處

## 2.4.2 LLWD 2016 與 SKB SR-PSU 情節挑選差異

本節比較國內 LLWD 2016 情節與瑞典 SKB TR-14-01 情節設定差異。首先為設計(主要)情節之差異比較，LLWD 2016 設計情節與瑞典主要情節描述項目相異，圖 2.28 為兩報告所有描述項目並將其相互對應，以下以 LLWD 2016 報告項目為主，逐一說明與瑞典 SFR 場設計情節差異，並統整如表 2.19。以兩者描述方式而言，最大相異處在於 LLWD 2016 為條列式項目呈現，將模擬設置整理

後依材質差異進行討論，而瑞典 SR-PSU 則以核種傳輸模擬說明方式呈現，將其拆解於各項目中。

#### 1. 外部條件：

外部條件主要描述氣候演化情形及所選用之案例為何，進行情節之概要陳述。LLWD 2016 報告於此項目說明未來氣候演化、海水位變化、地層抬升及地表侵蝕之設置，而 SKB SR-PSU 則概要說明兩種氣候演化之設計情節及海岸線演化。

#### 2. 地質圈：

核種於地質圈中的傳輸可能受到地下水流場、化學反應、力學作用等影響，因此 LLWD 2016 於此項目主要闡述地下水流場特性、地球化學演化(地下水組成、氧化還原狀態)、力學作用及所考慮之核種傳輸機制(核種衰變、吸附、平流、延散、擴散)，SR-PSU 則說明海岸線演化、力學作用影響以及與核種傳輸相關之各項因子(核種衰變、平流、延散、擴散、吸附)的取得方法。兩者於此項目之評估內容大同小異，並無特別突出之相異點。

#### 3. 處置設施：

處置設施中含有工程障壁及廢棄物等存在，故其影響核種傳輸之關鍵資訊與地質圈相異。於 LLWD 2016 報告中主要針對水文條件(降雨量、地下水流速)、工程障壁(混凝土材料、鈉型膨潤土材料)，而核種傳輸機制考慮核種衰變、吸附、金屬放射性廢棄物釋出率、非金屬放射性廢棄物核種溶解度、延散、平流、擴散等，瑞典 SR-PSU 報告則以水文條件、廢棄物包件、工程障壁與水泥材質之劣化作為處置設施影響核種傳輸之重要因素，其核種傳輸之相關因子則為核種的衰變與增長、平流、擴散、延散、吸附、溶解度限制、物種分析、腐蝕等 8 項。處置設施之評估項目主要相異處為瑞典 SR-PSU 方面將廢棄物包件作為評估內容，而核種傳輸相關因子中，LLWD 2016 較 SR-PSU 多出金屬放射性廢棄物釋出率，SR-PSU 則多考量物種分析及腐蝕。

#### 4. 地表生態系統：

地表生態系統演化與海岸線演變及氣候演化息息相關。LLWD 2016 報告於此評估項目主要說明氣候形態、產業發展及人類之曝露途徑，SR-PSU 技術報告中則說明 Forsmark 區域之海岸線演變及氣候演化，提出地表系統之核種傳輸受到水的通量、擴散、固體物質通量、氣體等影響，並於另一項目陳述人類與非人類群族的曝露，及其考慮途徑。兩報告書於地表生態系統之主要相異處為 SR-PSU



詳細描述地表生態系統中核種的主要傳輸途徑，而 LLWD 2016 未對此多加著墨。

瑞典 SKB SR-PSU 技術報告中，除主要情節外，依不確定性發生之機率分別以替代情節、剩餘情節與其他情節進行評估，如表 2.7，而國內 LLWD 2016 以替代情節將降雨量、工程障壁劣化及地震等三項要素進行組合評估，如表 2.14。經由比較表 2.20 得知，瑞典 SR-PSU 技術報告中設計情節以外之情節設置有相對嚴謹之架構，且評估內容相對細緻，涵蓋範圍較廣，而 LLWD 2016 則以大方向之要項進行組合評估，雖評估情節數量少於瑞典 SR-PSU，但項目內容應可涵蓋處置場因未來演化所發生之風險。

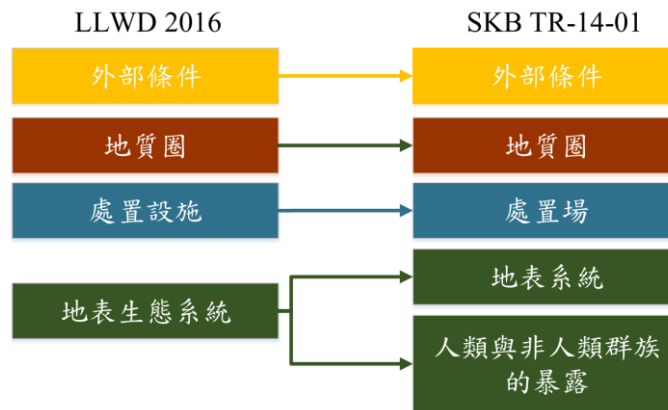


圖 2.28 設計情節項目對應圖

表 2.19 LLWD 2016 設計情節與 SKB SR-PSU 主要情節項目比較

LLWD 2016		SKB SR-PSU	
外部條件	-氣候演化 -海水位變化 <u>-地層抬升及地表侵蝕之設置</u>	外部條件	-氣候演化 -海岸線演化
地質圈	-地下水流場特性 <u>-地球化學演化</u> -力學作用 -核種傳輸(核種衰變、吸附、平流、延散、擴散)	地質圈	-地下水流場特性 -力學作用 -核種傳輸(核種衰變、吸附、平流、延散、擴散)
處置設施	-水文條件 -工程障壁 -核種傳輸(核種衰變、吸附、 <u>金屬放射性廢棄物釋出率</u> 、非金屬放射性廢棄物核種溶解度、延散、平流、擴散)	處置場	-水文條件 <u>-廢棄物包件與工程障壁</u> <u>-水泥材質之劣化</u> -地下水流場特性 -核種傳輸(核種的衰變與增長、平流、擴散、延散、吸附、溶解度限制、 <u>物種分析</u> 、 <u>腐蝕</u> )

地表生態系統	-氣候演化 <u>-產業發展</u> -人類之曝露途徑	地表系統	- <u>海岸線演化</u> -氣候演化 -地下水流場特性 <u>-核種傳輸(水的通量、擴散、固體物質通量、氣體)</u>
		人類與非人類群族的曝露	-人類土地利用方式與曝露途徑 <u>-生物類型、數量及曝露途徑</u>

\*斜體底線標註代表相異處

表 2.20 LLWD2016 報告替代情節與 SKB SR-PSU 替代、其他與剩餘情節比較

LLWD 2016		SKB SR-PSU	
替代情節	-維持氣候暖化且工程障壁劣化加劇情節 -進入冰期循環情節 -進入冰期循環且工程障壁劣化加劇情節 -地震後嚴重劣化情節	替代情節	- <u>違反有限的活度之可能途徑</u> - <u>違反低流量的母岩之可能途徑</u> - <u>違反低流量的處置窖之可能途徑</u> - <u>違反良好的遲滯之可能途徑</u> - <u>違反避免處置場周圍出現水井之可能途徑</u>
		其他情節	- <u>高存量情節</u> -母岩位於高流量環境 -快速的混凝土劣化 -膨潤土劣化 -地震 - <u>高濃度的錯合劑</u> - <u>水井位於處置窖下游處</u> - <u>鑽井侵入處置窖</u> - <u>鑽井侵入 SFR1 的處置窖</u> - <u>鑽井侵入 SFR3 的處置窖</u>
		剩餘情節	- <u>工程障壁喪失吸附功能</u> - <u>母岩中的吸附功能喪失</u> -高流量的處置場導致工程障壁功能喪失 - <u>SFR1 處置場的氧化還原條件改變</u> -長期的全球暖化 - <u>處置場未封閉的情節</u> -未來人類活動 -冰河期和推遲的冰河期

\*斜體底線標註代表相異處

### 第三章 設計情節之核種傳輸驗證技術研析

設計情節係未來氣候演化下發生概率最高之情況，而替代情節評估亦可減免未來氣候演化造成之風險，故設計情節之核種傳輸驗證技術有助於增進民眾對處置設施於未來氣候下長期安全性之信心。本章延續前三年所完成之近岸環境坑道處置遠場傳輸模擬技術、近場核種傳輸模擬技術，以及參考瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-09，建置坑道處置多子核種傳輸模擬技術，藉由 HYDROGEOCHEM 系列模式，發展設計情節之核種傳輸驗證模擬技術。3.1 節將介紹近場、遠場之網格設置與水文地質參數，而 3.2 節則說明模擬網格之銜接方法，3.3 節將詳細介紹模擬參數設置，並於 3.4 節呈現核種傳輸模擬結果。

#### 3.1 網格設置與水文地質參數

台東縣達仁鄉建議候選場址屬近岸環境，位於達仁溪集水區範圍，此區域主要地勢高程由西方山區向東方沿岸遞減，最高高程為 493.25m，平均高程在 100 m 至 200m 之間 (經濟部，2011)，如圖 3.1 所示。為有效遲滯核種外釋，最終處置場址設計採用一系列工程障壁，以期發揮其圍阻及吸附功能，有效杜絕放射性核種外釋。有鑒於運算資源有限，處置場之各項細節與近岸環境之地形密度將建置兩相異網格分別模擬，其中處置設施之規劃則參照過去研究成果。

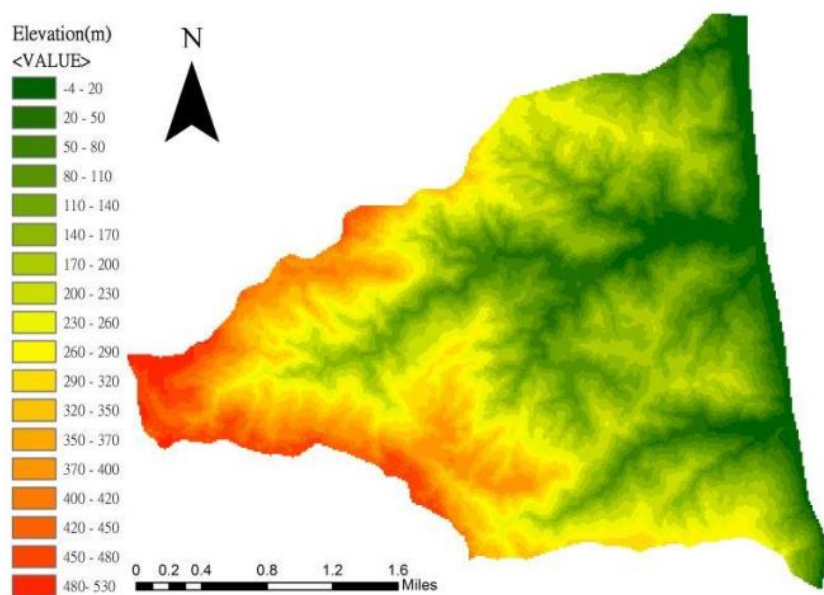


圖 3.1 達仁溪集水區高程

### 3.1.1 遠場

遠場模擬網格涵蓋達仁溪集水區，如圖 3.2 俯視圖與圖 3.3 剖面圖所示，總長度 8400m、深度達 EL-400m，元素設置則詳列於表 3.1。此區域之降雨量採用最接近之水利署壽卡雨量站資料，平均年降雨量為 3396 mm，因應此區域地勢起伏較大，有逕流存在可能，假設降雨入滲率為 0.0003(m/day)，而其餘遠場水文地質參數設定與前一年度之坑道處置多子核種傳輸模擬遠場參數相同，並詳列於表 3.1。

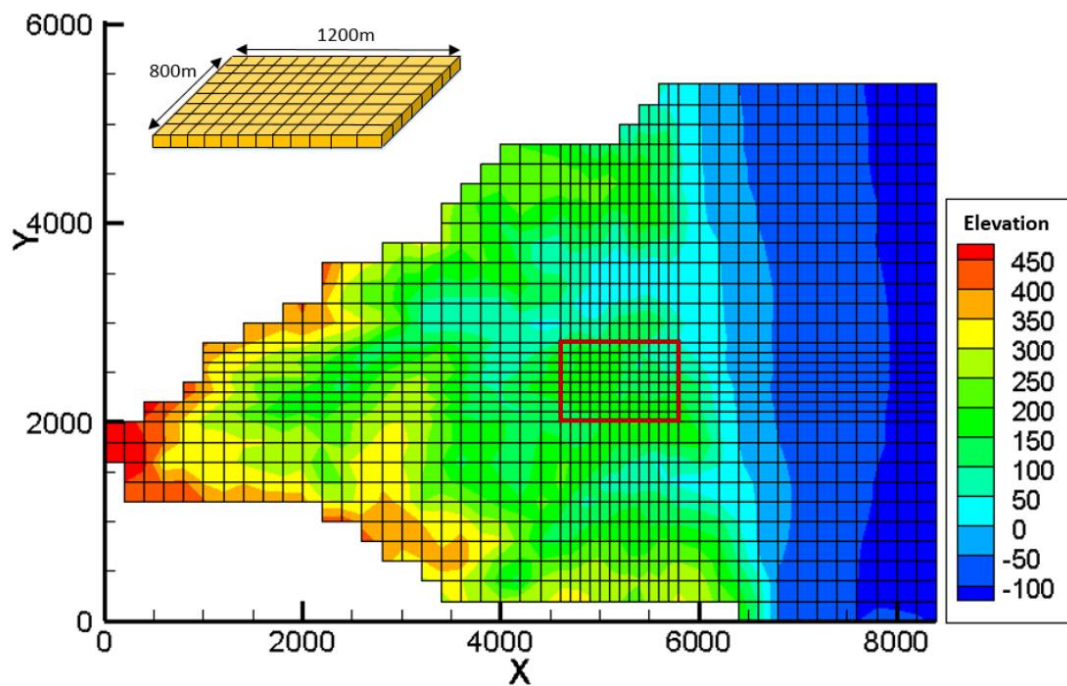


圖 3.2 遠場網格俯視圖

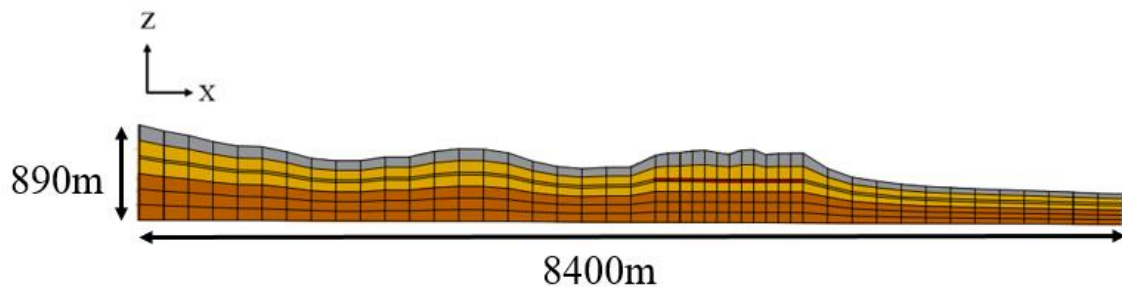


圖 3.3 遠場網格剖面圖

表 3.1 台東達仁鄉遠場模擬設置(台灣電力公司，2017a)

模擬設置				
垂直分層	7	高度	20~90(m)	
水平網格	1189	長*寬	200(m)*200(m) 100(m)*100(m)	
總節點數	9512			
總元素數	7763			
流場參數		Layer1	Layer2	Layer3
	kx=ky	$3 \times 10^{-2}(\text{m/day})$	$3 \times 10^{-2}(\text{m/day})$	$3 \times 10^{-5}(\text{m/day})$
	kz	$8.9 \times 10^{-2}(\text{m/day})$	$8.9 \times 10^{-3}(\text{m/day})$	$3 \times 10^{-5}(\text{m/day})$
	孔隙率	0.3		
	入滲率	0.0003(m/day)		
傳輸參數	縱向延散係數	800(m)		
	橫向延散係數	200(m)		
	擴散係數	$10^{-4}(\text{m}^2/\text{day})$		

### 3.1.2 近場(處置設施)

處置設施俯視圖如圖 3.4 所示，處置設施內部一共有 15 條處置坑道，其中 13 條屬 A 類廢棄物處置坑道(藍色)，2 條屬 BC 類廢棄物處置坑道(黃色)，而內部之廢棄物分別以 A 類粉色、BC 類橘色做標示，如圖 3.5，為整合前三年度所發展之核種傳輸數值模擬技術，將原有之近場(處置設施)網格與近場(處置坑道)網格統整成近場網格，目的在降低模擬銜接過程可能的數值誤差，設施整體長寬高為 1225m\*852m\*20m，採用之水文地質參數則詳列於表 3.2，其中水文地質參數係參照 LLWD2016 報告，工程障壁相關參數則利用各材質所占體積比例進行計算取得。

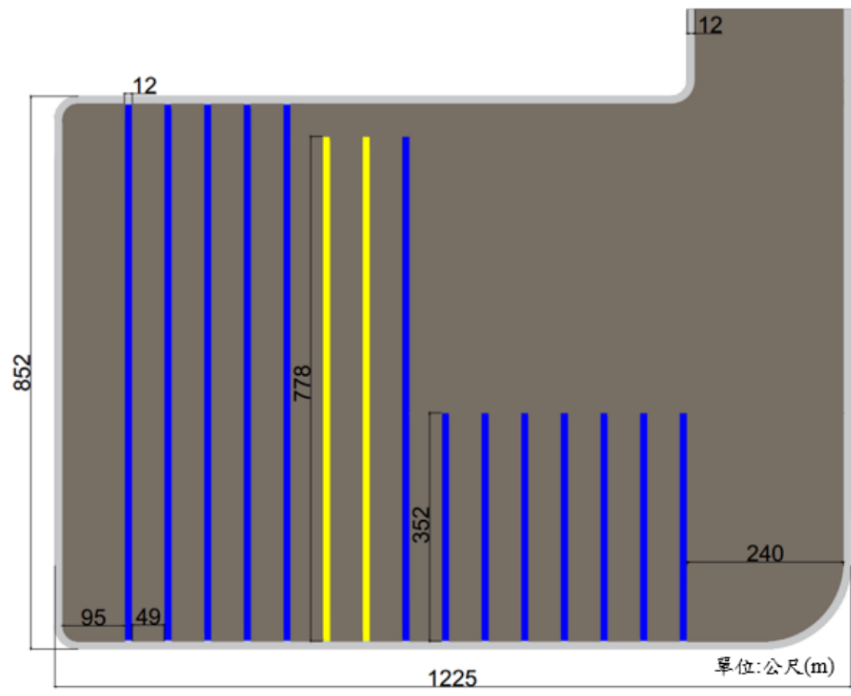


圖 3.4 處置設施俯視圖(台灣電力公司，2017a)

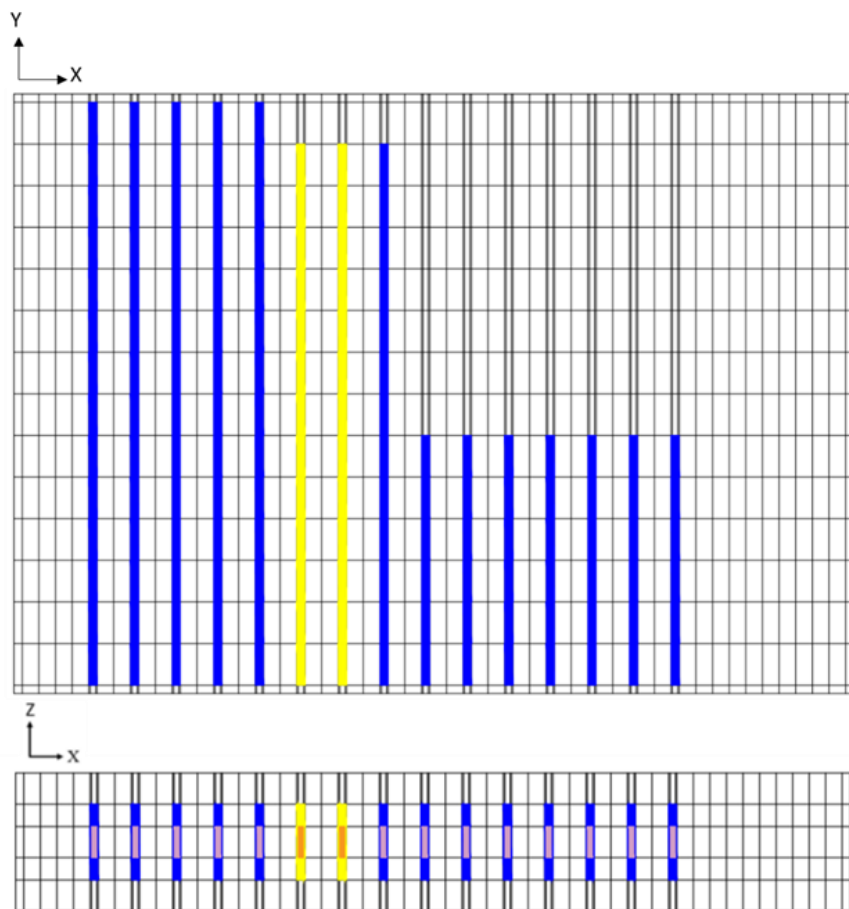


圖 3.5 近場處置設施網格配置圖

表 3.2 近場處置設施模擬設置(台灣電力公司，2017a)

模擬設置					
垂直分層	5	高度	3.25~4.5(m)		
水平網格	1530	長*寬	12(m)~60(m)*2.25(m)~24(m)		
總節點數	9180				
總元素數	7120				
材質	流場參數		傳輸參數		
	$k_x=k_y=k_z$	孔隙率	縱向延散係數	橫向延散係數	擴散係數
Rock	$8.64*10^{-5}$ (m/day)	0.25	8(m)	2(m)	$1.73*10^{-4}$ ( $m^2/day$ )
Type A 工程障壁	$2.66*10^{-5}$ (m/day)	0.27			$1.87*10^{-5}$ ( $m^2/day$ )
Type BC 工程障壁	$2.43*10^{-5}$ (m/day)	0.29			$1.85*10^{-5}$ ( $m^2/day$ )
Type A 廢棄物	$1.73*10^{-4}$ (m/day)	0.35			$6.05*10^{-5}$ ( $m^2/day$ )
Type BC 廢棄物	$1.73*10^{-4}$ (m/day)	0.35			$6.05*10^{-5}$ ( $m^2/day$ )

### 3.2 模擬銜接流程

近岸核種傳輸模擬可區分為流場模擬以及傳輸模擬兩部分。流場模擬方面，以遠場流場作基底銜接近場處置設施，而傳輸模擬則相反，於近場處置設施內部設置源項後銜接至遠場近岸環境，藉此呈現核種傳輸途徑及影響範圍，完整之銜接次序為遠場-近場(處置設施)-遠場，共進行三次模擬，如圖 3.6。



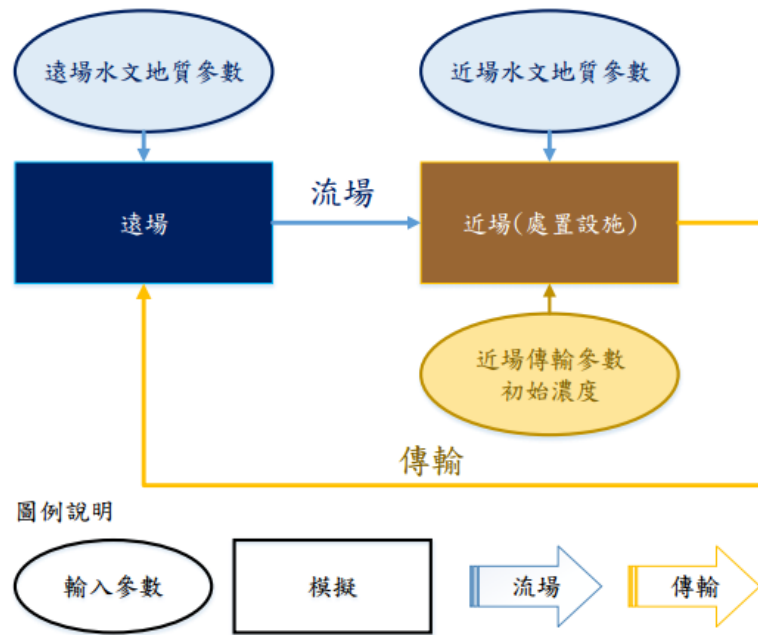


圖 3.6 流場模擬及傳輸模擬銜接流程圖

### 3.2.1 流場模擬銜接方法

流場模擬銜接由近岸環境遠場作為起始，其次為近場(處置設施)，如圖 3.6。遠場流場模擬係將地表區域以柯西邊界方式設定降雨入滲率，而海域則利用定水頭邊界固定海平面高度，邊界設定如圖 3.7 所示，最後輸入表 3.1 之近岸環境水文地質參數進行穩態流場模擬。而近場(處置設施)之流場邊界條件係由遠場流場模擬結果提供，計算其處置設施位置(圖 3.7 粉色區域)的總水頭梯度以判斷流向，得知 Z 軸方向總水頭梯度低於 X 軸、Y 軸方向 10 倍以上，且 X 軸方向為主要流場方向，故將處置設施頂部與底部設為零流量邊界，而周圍流場邊界以時變定水頭邊界方式，將遠場處置設施位置之總水頭值以有限元素法提升尺度後置於近場處置設施四周圍，如圖 3.8。

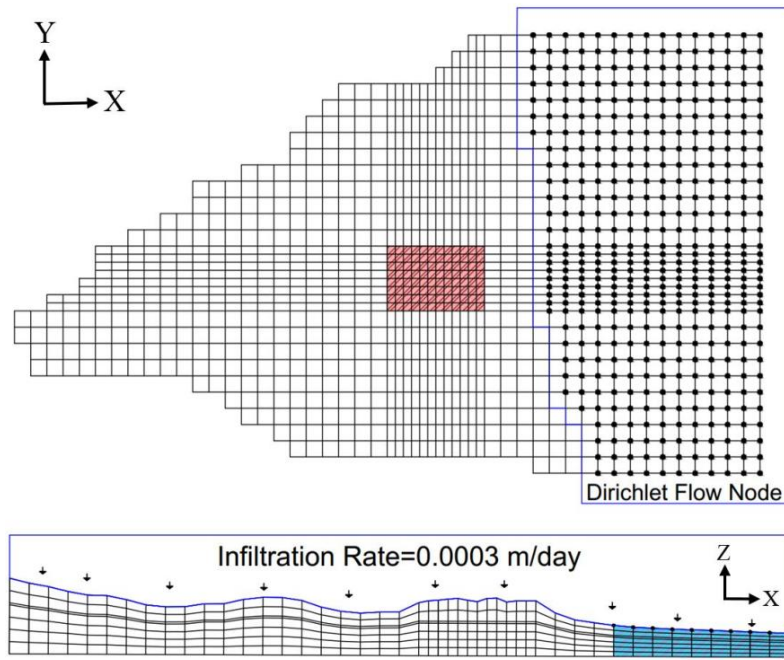


圖 3.7 遠場流場邊界

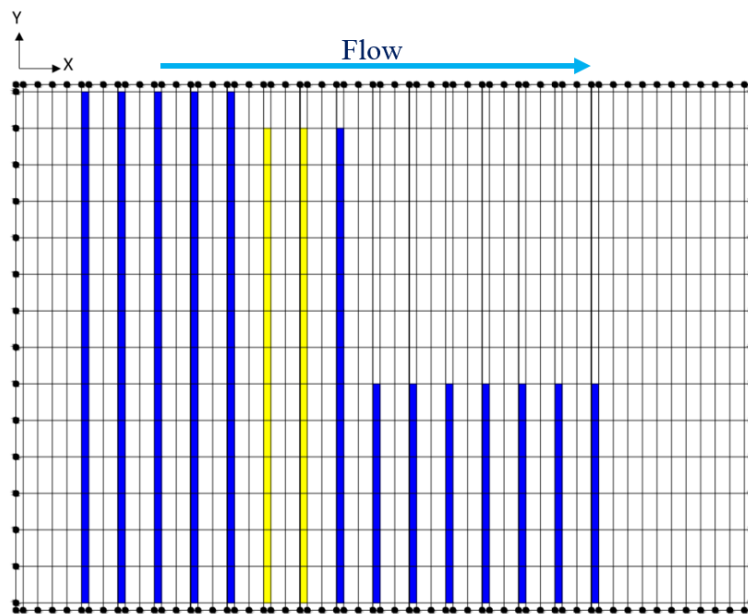


圖 3.8 近場(處置設施)流場邊界

### 3.2.2 傳輸模擬銜接方法

傳輸模擬銜接由近場(處置設施)模擬設置源項作為初始濃度，再將外釋濃度值銜接至近岸環境遠場進行模擬，如圖 3.6 之黃色箭號標示。近場處置設施每條坑道中皆設有廢棄物區域，在此設置核種濃度作為源項之初始條件，假設處置設

施外圍邊界無濃度流入，將設置可變動邊界包覆處置設施，如圖 3.10 紅色框線，當外部流場流入處置設施時可變動邊界將視為通量邊界，以外部濃度乘以入流量作為計算方法，另外，當外部無濃度值通量為零時，濃度以梯度方式進行傳輸，隨流場釋出。而遠場之傳輸模擬濃度係取自近場處置設施的模擬結果，計算圖 3.10 中紅色框線邊界之外釋濃度量，以質量守恆方式進行換算後，如圖 3.11 以柯西邊界條件將濃度通量置入遠場處置設施點位，鑒於遠場傳輸模擬外部並無濃度流入，於陸域及海域設置可變動邊界，外部濃度條件皆為零濃度。

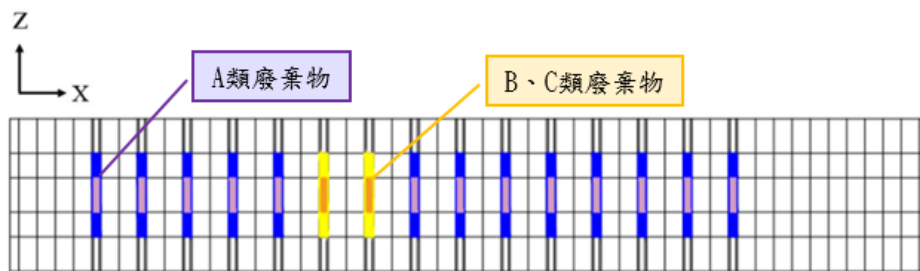


圖 3.9 近場(處置設施)廢棄物放置區

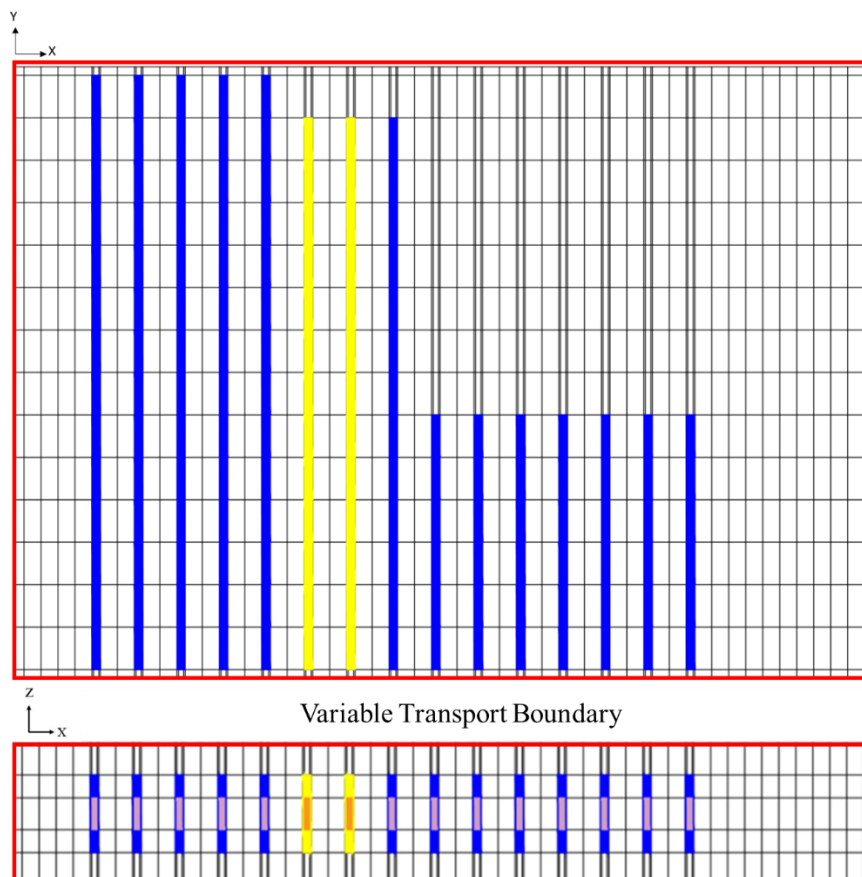


圖 3.10 近場(處置設施)可變動邊界

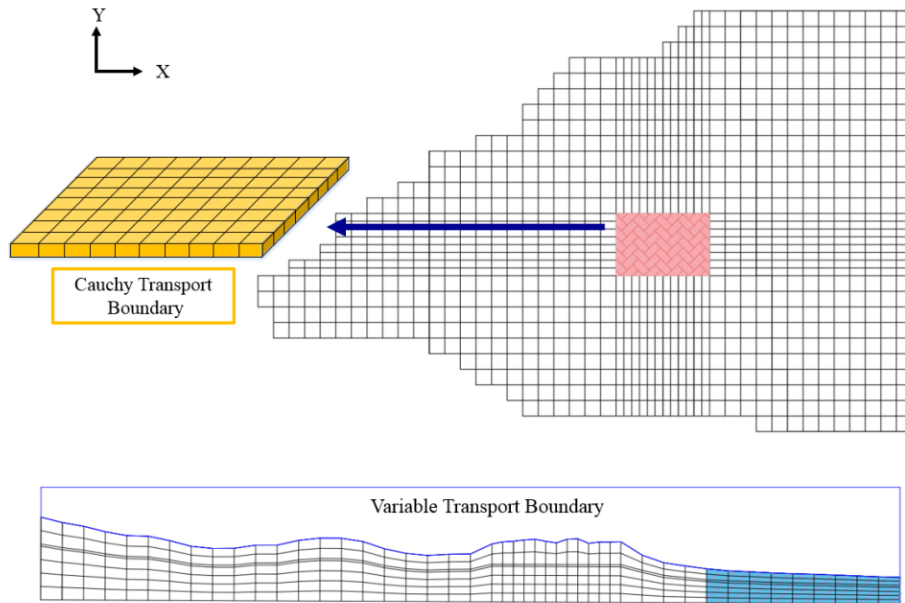


圖 3.11 遠場傳輸模擬邊界

### 3.3 核種傳輸模擬參數

核種傳輸模擬輸入參數中，源項之低放射性廢棄物處置容量，以台東縣達仁鄉建議候選場址之最大處置容量進行估算，如表 3.3(台灣電力公司，2017a)。其廢棄物分類係依照「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」(表 3.4、表 3.5)進行分配，除超 C 類不得於低放射性廢棄物最終處置場處置外，A 類及 B、C 類廢棄物將分別處置於達仁鄉建議候選場址所設計之 A 類及 B、C 類處置坑道。所含之廢棄物活度則採計台灣電力公司以法規限值估算之 55 加侖桶內含活度，如表 3.6，每個 55 加侖桶體積皆為 0.227 立方公尺，桶高 0.884 公尺，可填充 0.2 立方公尺體積之廢棄物(台灣電力公司，2017a)。傳輸之吸附參數來源則參考日本 JAEA(JAEA，2013)研究成果，取得工程障壁、天然障壁之分配係數，且因本模擬是以處置窖封閉作為起始時間，當分配係數於氧化態及還原態有所不同時，將選取還原態之數值，而個別欠缺材質分配係數之核種，將保守假設核種於此材質不具備吸附功能，分配係數為零，如表 3.7、表 3.8、表 3.9、表 3.10、表 3.11 所示。另外，模擬選用之 11 條多子核種衰變鏈，將涵蓋台灣電力公司所提出之 12 種低放射性廢棄物關鍵核種(表 3.12)，並於以下詳列衰變鏈之各項細節，包括半化期、衰變形式。

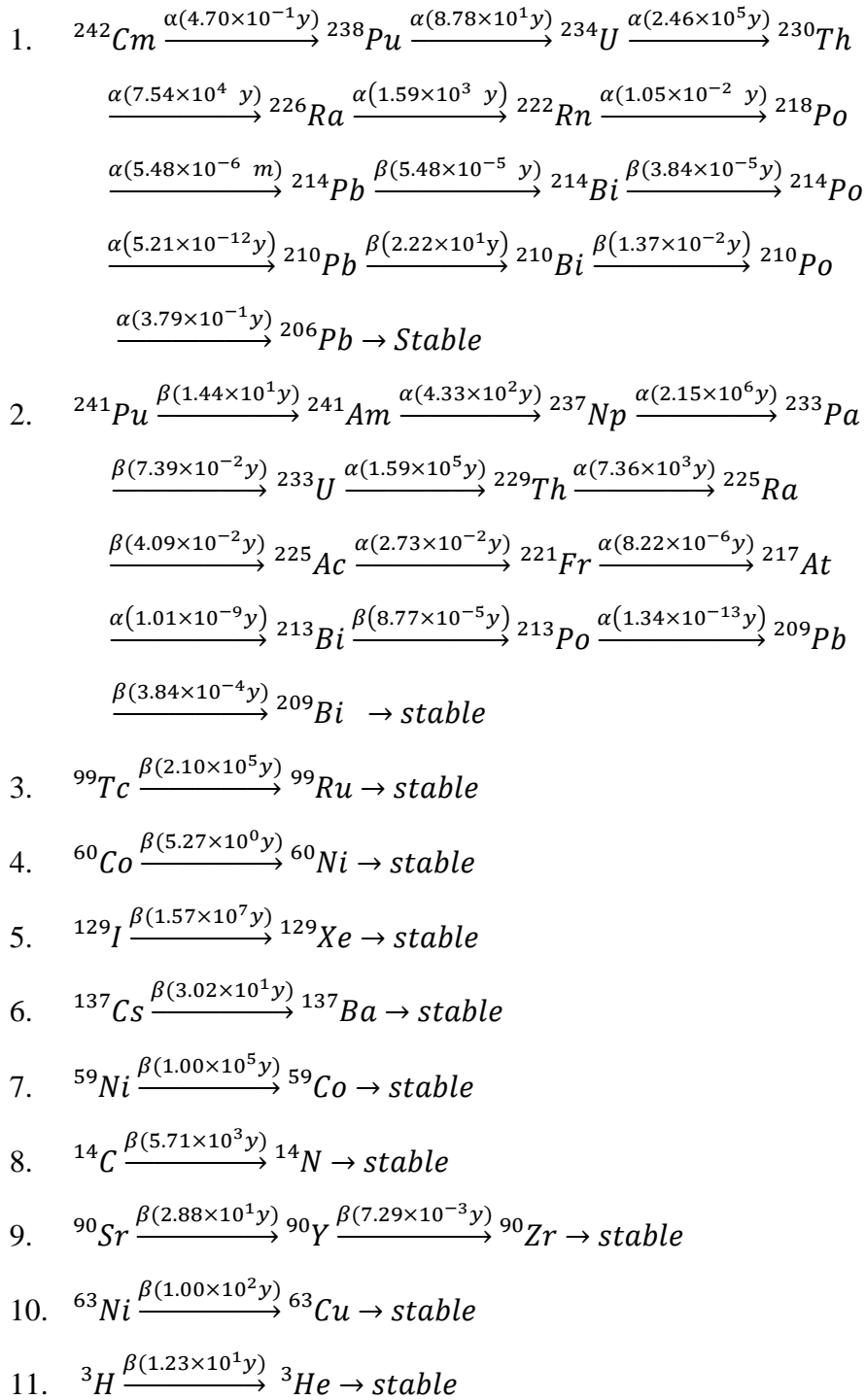


表 3.3 達仁鄉建議候選場址最大處置容量

坑道長度 (m)	坑道數量 (條)	單一坑道 處置窖數(個)	處置窖總 數(個)	廢棄物種類	廢棄物容 量(桶)
778	1	49	49	A	73,500
778	2	49	98	B、C	88,200
828	5	53	265	A	397,500
352	7	22	154	A	231,000
小計			566	-	790,200

表 3.4 單一長半化期核種濃度值(台灣電力公司，2017a)

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

表 3.5 單一短半化期核種濃度值 (台灣電力公司，2017a)

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

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

註二：多核種之分類：

若低放射性廢棄物中含有多核種時，其分類應按下式判斷。

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

式中

$C_i$ ：第  $i$  個核種之濃度。

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

$n$ ：所含核種之數目。

若滿足上式，則可歸為第 0 ( 0=A,B,C ) 類廢棄物。

表 3.6 55 加侖桶內含之母核種及活度(台灣電力公司，2017a)

Nuclide	A 類低放射性廢棄物		B、C 類低放射性廢棄物	
	TBq	Bq	TBq	Bq
C <sup>14</sup>	6.00E-03	6.00E+09	6.00E-02	6.00E+10
Tc <sup>99</sup>	2.20E-03	2.20E+09	2.20E-02	2.20E+10
I <sup>129</sup>	6.00E-05	6.00E+07	6.00E-04	6.00E+08
Pu <sup>238</sup>	1.48E-04	1.48E+08	1.48E-03	1.48E+09
Pu <sup>241</sup>	5.20E-03	5.20E+09	5.20E-02	5.20E+10
Cm <sup>242</sup>	2.96E-02	2.96E+10	2.96E-01	2.96E+11
H <sup>3</sup>	3.00E-01	3.00E+11	1.98E+00	1.98E+12
Co <sup>60</sup>	5.20E+00	5.20E+12	5.41E+01	5.41E+13
Ni <sup>63</sup>	2.60E-01	2.60E+11	5.20E+00	5.20E+12
Sr <sup>90</sup>	3.00E-04	3.00E+08	5.20E+01	5.20E+13
Cs <sup>137</sup>	7.40E-03	7.40E+09	3.40E+01	3.40E+13
C <sup>14</sup> <sub>metal</sub>	6.00E-02	6.00E+10	6.00E-01	6.00E+11
Ni <sup>59</sup> <sub>metal</sub>	1.62E-01	1.62E+11	1.62E+00	1.62E+12
Ni <sup>63</sup> <sub>metal</sub>	2.60E-01	2.60E+11	5.20E+01	5.20E+13

表 3.7 第 1 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA, 2013)

第 1 條	分配係數 Kd (ml/g)		
	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
<sup>242</sup> Cm	250	1000	5000
<sup>238</sup> Pu	250	5000	50
<sup>234</sup> U	250	5	5
<sup>230</sup> Th	250	1000	1000
<sup>226</sup> Ra	1.25	1	500
<sup>222</sup> Rn	0	0	0
<sup>218</sup> Po	0	0	0
<sup>214</sup> Pb	12.5	50	100
<sup>214</sup> Bi	0	0	0
<sup>214</sup> Po	0	0	0
<sup>210</sup> Pb	12.5	50	100
<sup>210</sup> Bi	0	0	0
<sup>210</sup> Po	0	0	0
<sup>206</sup> Pb	12.5	50	100



表 3.8 第 2 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA, 2013)

第 2 條	分配係數 Kd (ml/g)		
	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
<sup>241</sup> Pu	250	5000	50
<sup>241</sup> Am	250	1000	5000
<sup>237</sup> Np	250	5	5
<sup>233</sup> Pa	250	1000	5
<sup>233</sup> U	250	5	5
<sup>229</sup> Th	250	1000	1000
<sup>225</sup> Ra	1.25	1	500
<sup>225</sup> Ac	250	1000	5000
<sup>221</sup> Fr	0	0	0
<sup>217</sup> At	0	0	0
<sup>213</sup> Bi	0	0	0
<sup>213</sup> Po	0	0	0
<sup>209</sup> Pb	12.5	50	100
<sup>209</sup> Bi	0	0	0

表 3.9 第 3 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA, 2013)

第 3 條	分配係數 Kd (ml/g)		
	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
<sup>99</sup> Tc	0.3	0	0
<sup>99</sup> Ru	0	0	0

表 3.10 第 4-10 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA, 2013)

第 4 條	分配係數 Kd (ml/g)		
	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
<sup>60</sup> Co	12.5	50	10
<sup>60</sup> Ni	12.5	50	10
第 5 條			
<sup>129</sup> I	1.25	0	0.1
<sup>129</sup> Xe	0	0	0
第 6 條			
<sup>137</sup> Cs	2	50	50
<sup>137</sup> Ba	1	1	200
第 7 條			

$^{59}\text{Ni}$	12.5	50	10
$^{59}\text{Co}$	12.5	50	10
第 8 條			
$^{14}\text{C}$	1	1	0.1
$^{14}\text{N}$	0	0	0
第 9 條			
$^{90}\text{Sr}$	1	1	200
$^{90}\text{Y}$	0	0	0
$^{90}\text{Zr}$	2500	1000	100
第 10 條			
$^{63}\text{Ni}$	12.5	50	10
$^{63}\text{Cu}$	0	0	0

表 3.11 第 11 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數 (JAEA, 2013)

第 11 條	分配係數 Kd (ml/g)		
	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
$^3\text{H}$	0	0	0
$^3\text{He}$	0	0	0

表 3.12 低放射性廢棄物關鍵核種(台灣電力公司, 2017a)

關鍵核種	備註
$\text{C}^{14}$	法規核種
$\text{C}^{14}_{\text{metal}}$	法規核種
$\text{Ni}^{59}_{\text{metal}}$	法規核種
$\text{Co}^{60}$	法規核種
$\text{Ni}^{63}_{\text{metal}}$	法規核種
$\text{Sr}^{90}/\text{Y}^{90}$	法規核種/子核種
$\text{Tc}^{99}$	法規核種
$\text{I}^{129}$	法規核種
$\text{Cs}^{137}$	法規核種
$\text{Pu}^{238}$	TRU核種
$\text{Am}^{241}$	TRU核種

### 3.4 核種傳輸模擬結果

本節利用上述參數條件設置，進行完整核種傳輸數值模擬，包含遠場與近場處置設施兩種不同尺度模擬網格之流場與多子核種傳輸模擬。流場模擬呈現優勢流場走向及水文環境樣貌，而多子核種傳輸模擬結果將呈現由近場處置設施至遠場(地質圈)核種外釋之模擬結果。

#### 3.4.1 流場模擬結果

近岸環境遠場流場模擬採用  $0.0003(\text{m}/\text{day})$  之降雨入滲率，將海平面以定水頭邊界條件設置於高程 400 公尺處，流場考量地形、降雨入滲、水文地質參數等影響。遠場流場模擬結果顯示，地形為影響優勢流場之主要條件，使其由西方山區上游向東部海岸下游地區流動，地下水流速約為  $1.4\text{E}-03\sim 2.4\text{E}-03(\text{m}/\text{day})$ ，如圖 3.12 所示，圖 3.13 則呈現地下水位。

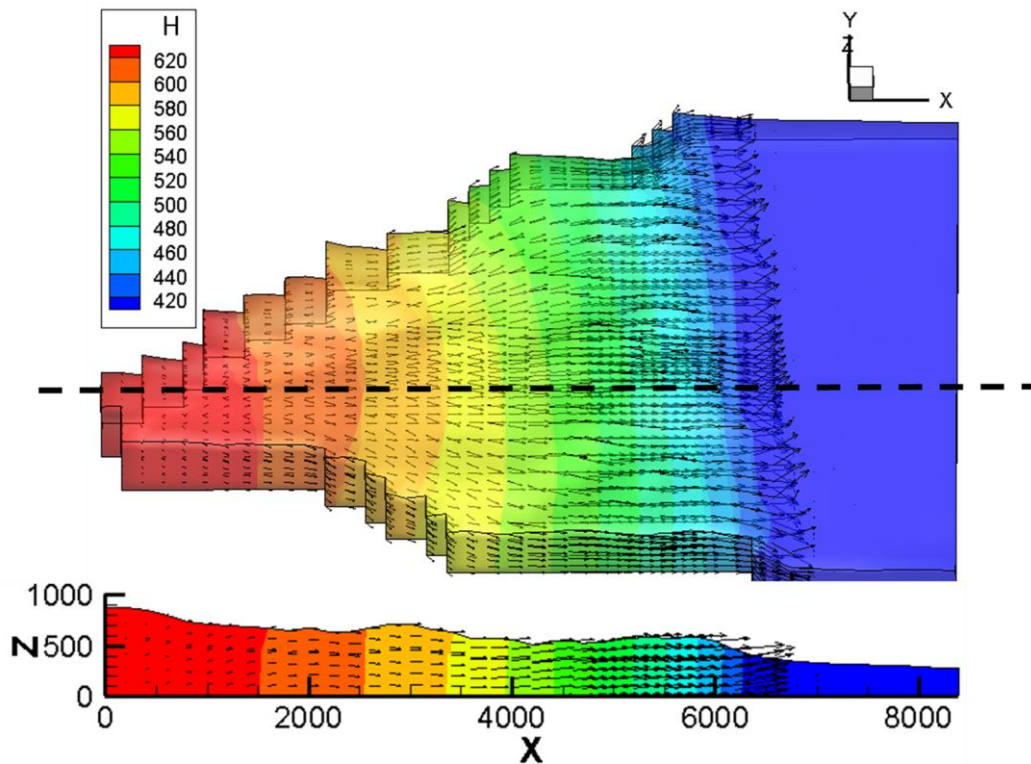


圖 3.12 遠場總水頭與流場分布圖

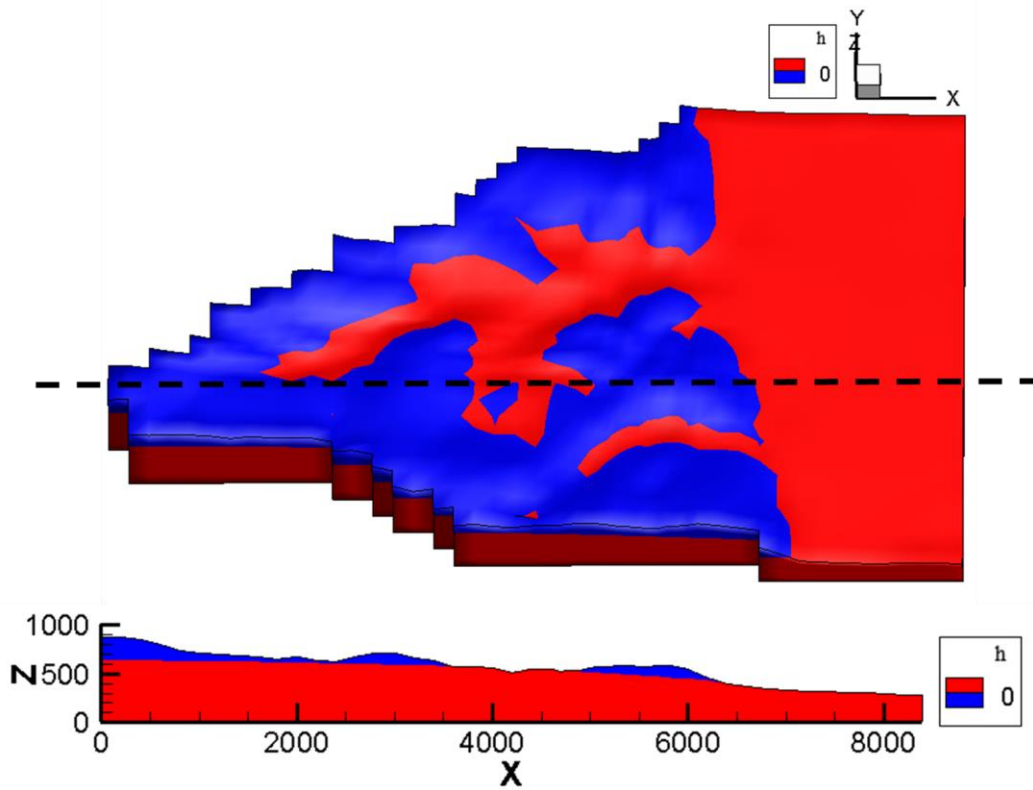


圖 3.13 遠場地下水位線分布圖

近場(處置設施)流場模擬邊界條件取自遠場流場模擬結果，將遠場處置設施位置之總水頭數值設置為近場處置設施之邊界條件，故近場處置設施所呈現之優勢流場方向與遠場流場模擬結果相同，皆由上游往下游流動，如圖 3.14 所示，地下水流速約  $1.4E-06 \sim 7.53E-06$  (m/day)，圖 3.15 為近場處置設施壓力水頭分布圖。

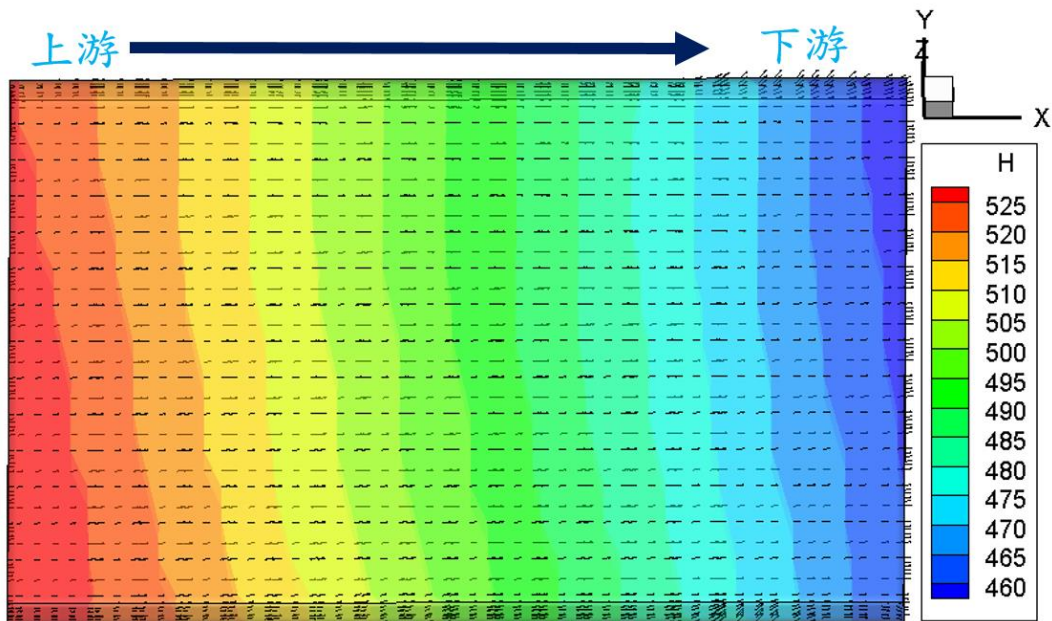


圖 3.14 近場處置設施總水頭與流場分布圖

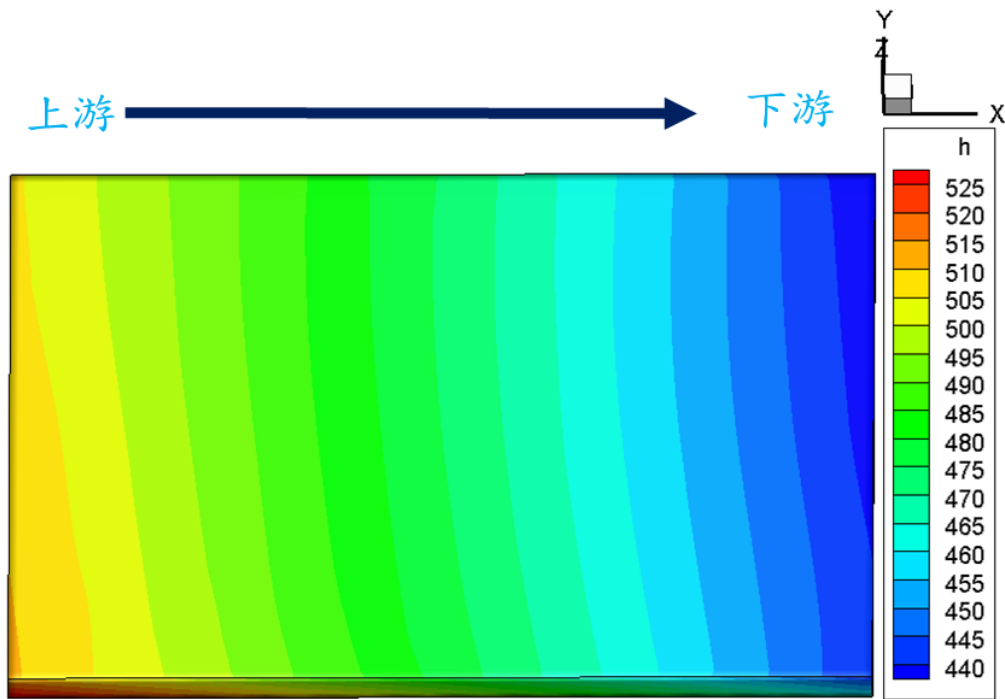


圖 3.15 近場處置設施壓力水頭分布圖

### 3.4.2 多子核種傳輸模擬結果

多子核種傳輸模擬係由近場處置設施之廢棄物區域作為起源，以邊界條件銜接遠場(地質圈)之處置設施，再進行遠場傳輸模擬，其考量之傳輸機制涵蓋半衰期、吸附係數、延散作用、擴散作用、平流等。而近場處置設施之多子核種傳輸模擬結果，可透過圖 3.16 中位於處置設施上、下游之 A、B 觀測點位，分別呈現處置設施上游及下游之關鍵核種濃度曲線，如圖 3.17、圖 3.18，藉上游之 A 觀測點悉知  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{14}\text{C}$  在上游處擁有較高濃度，而藉下游之 B 觀測點位僅剩  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{129}\text{I}$  四核種，推測半衰期較短及吸附功能較好之核種外釋至地質圈之濃度遠低於  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{129}\text{I}$ ，故擁有長半衰期之  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{129}\text{I}$  及工程障壁對其吸附功能較差之  $^{14}\text{C}$  為近場處置設施外釋濃度最高的核種。

另以濃度分布圖之方式呈現近場處置設施之傳輸模擬結果，以關鍵核種  $^{14}\text{C}$  為例，顯示處置設施封閉後 1 年、100 年、1,000 年、10,000 年、100,000 年之濃度分布如圖 3.19 至圖 3.23，模擬結果顯示，10,000 年以內外釋核種濃度僅分布於處置坑道周圍，約於 10,000 年後濃度團才隨流場趨勢逐漸向下游遷移，是以近場之核種濃度外釋方式以擴散為主、平流為輔，且因 B、C 類廢棄物之初始濃度高於 A 類廢棄物之初始濃度，導致  $^{14}\text{C}$  核種於 B、C 類坑道之外釋濃度高於 A 類處置坑道。

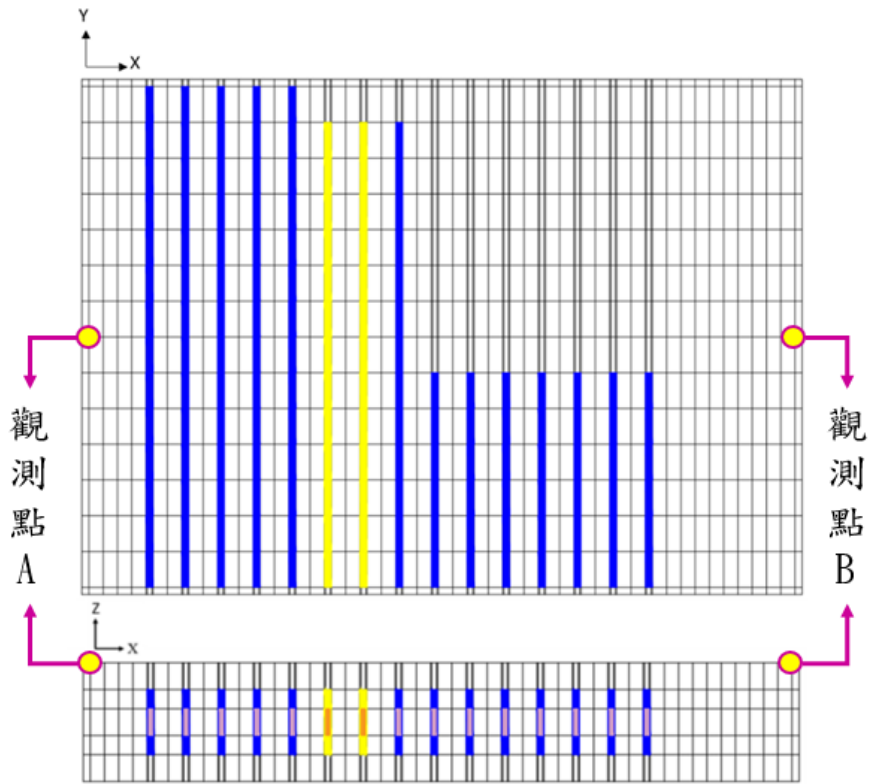


圖 3.16 近場處置設施之觀測點位示意圖

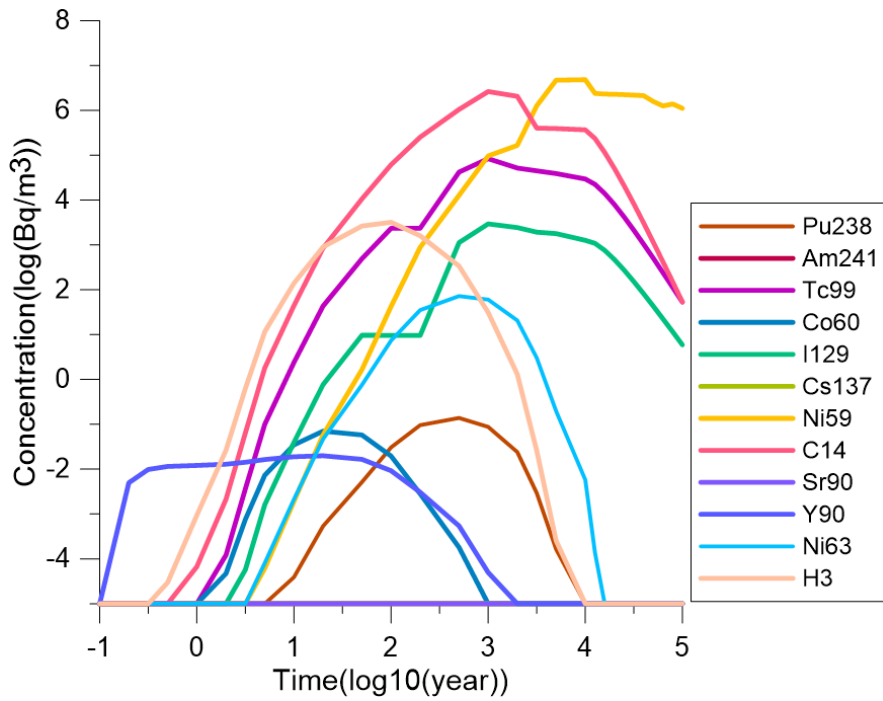


圖 3.17 近場處置設施觀測點 A 之濃度曲線

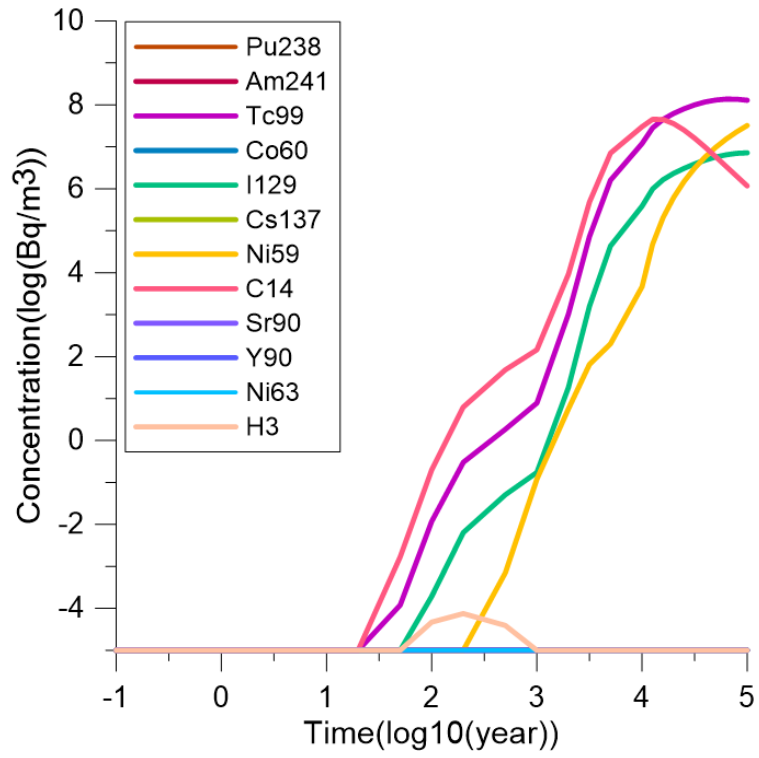


圖 3.18 近場處置設施觀測點 B 之濃度曲線

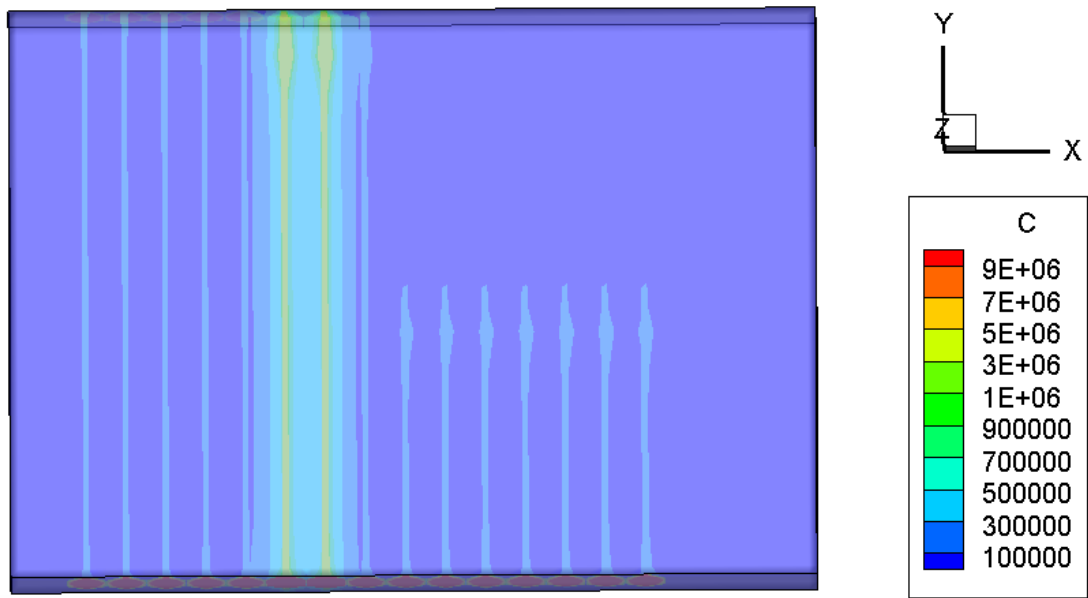


圖 3.19 近場處置設施  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(1 年)



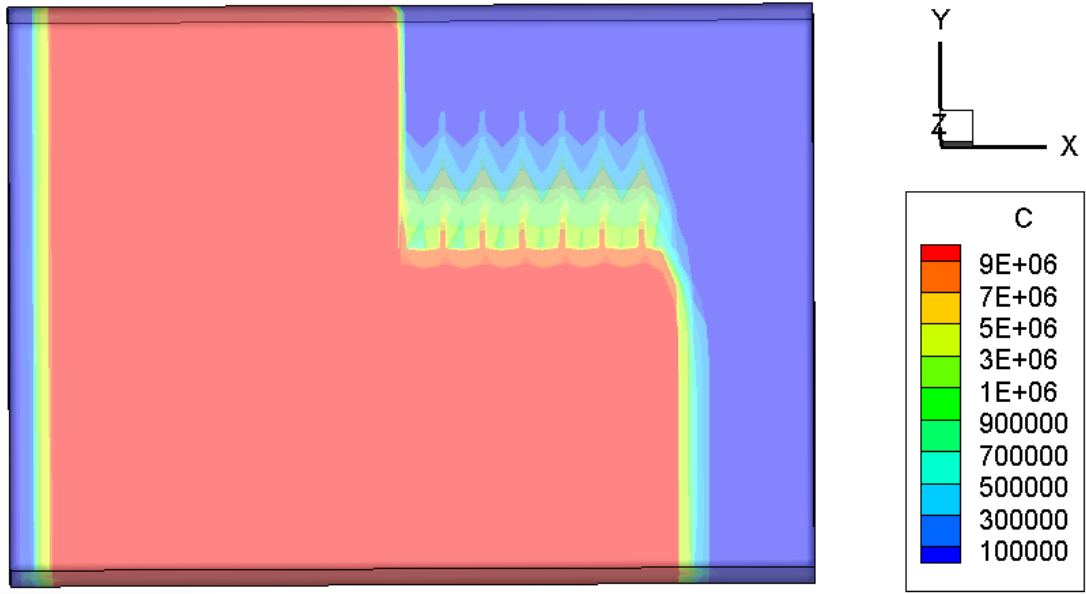


圖 3.20 近場處置設施  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(100 年)

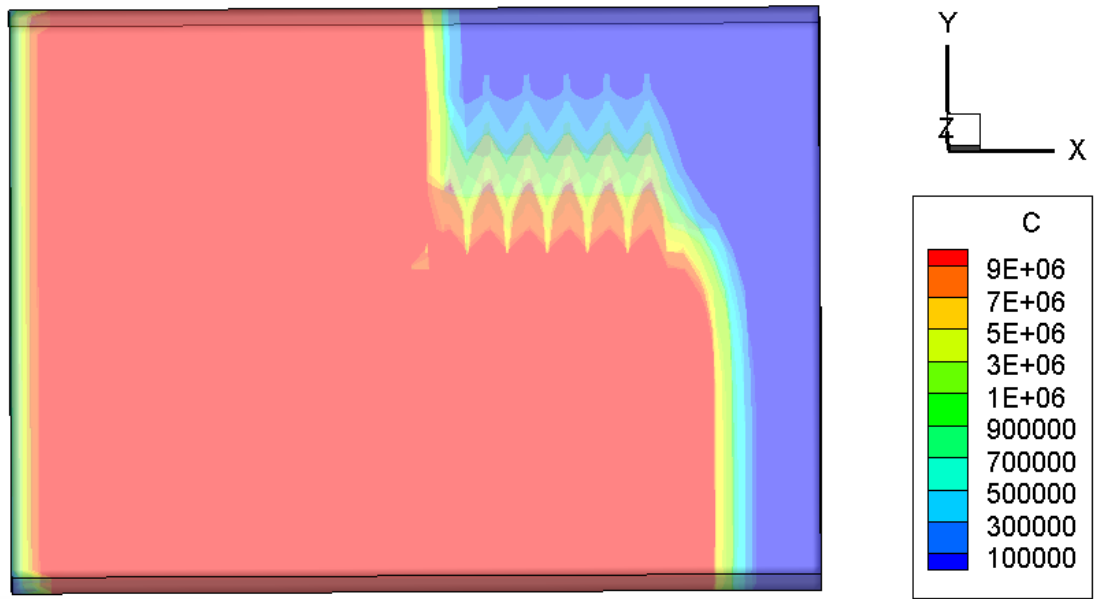


圖 3.21 近場處置設施  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(1,000 年)

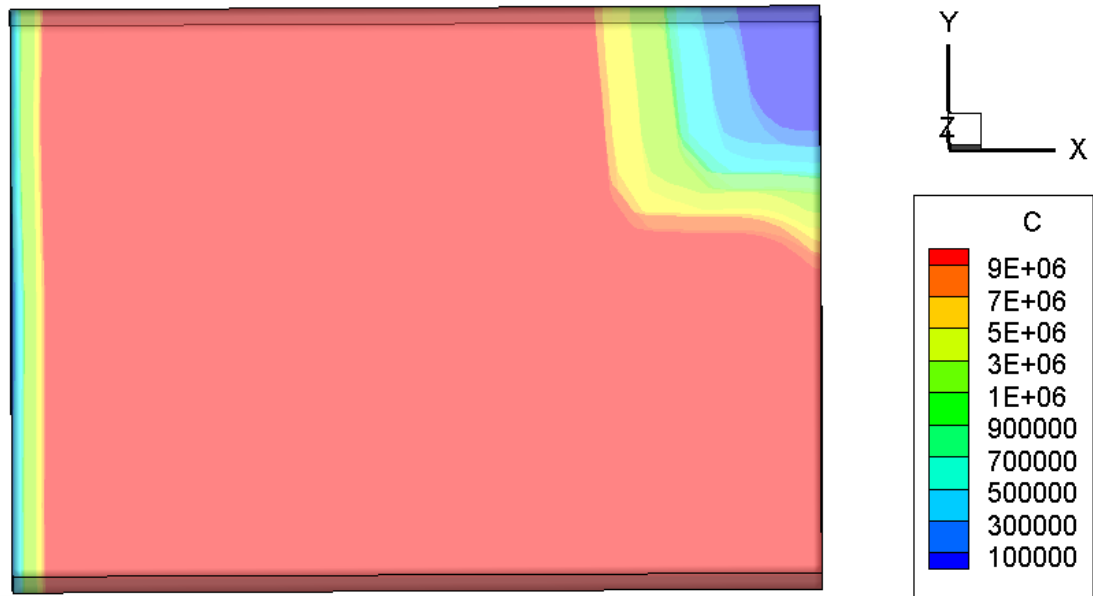


圖 3.22 近場處置設施  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(10,000 年)

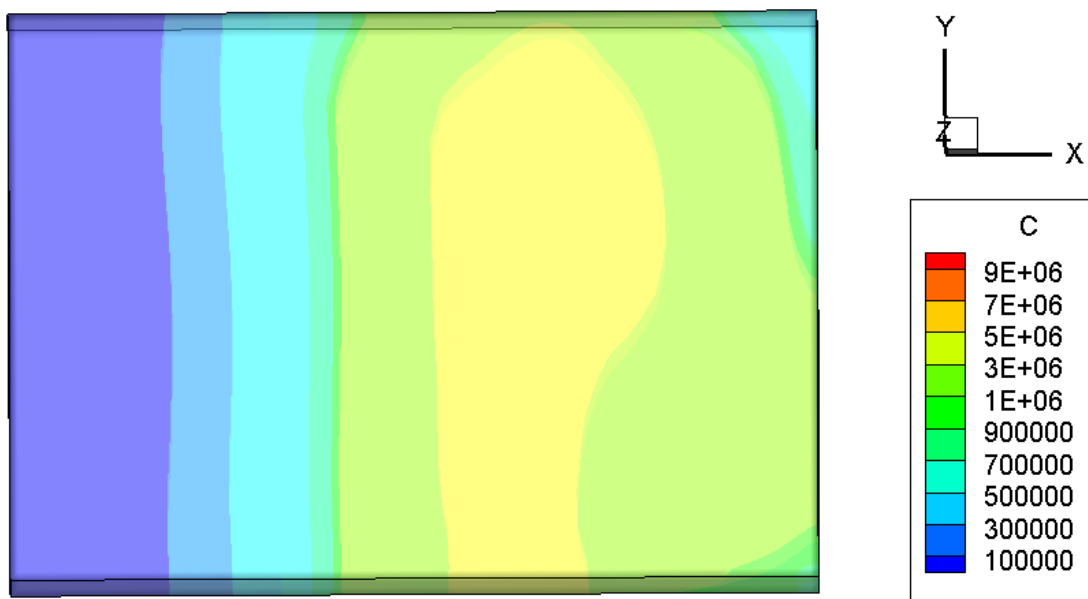


圖 3.23 近場處置設施  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(100,000 年)

遠場多子核種傳輸模擬涵蓋完整集水區及流域，汲取近場處置設施之邊界濃度作為遠場地質圈之源項，進行暫態傳輸模擬，藉此評估低放射性廢棄物關鍵核種受平流、延散、擴散、遲滯等機制影響後，離開處置設施在地質圈之傳輸外釋途徑。首先以距場址 400 公尺之近岸觀測點位(圖 3.24)呈現各核種之濃度占比如表 3.13，藉此得知關鍵核種中  $^{14}\text{C}$  核種於處置設施封閉後 100 年至 1,000 年時擁

有最高濃度占比， $^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$  則於 10,000 年至 100,000 年占最高濃度外釋比，剩餘之關鍵核種中則以  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{14}\text{C}$  擁有最高濃度占比。另透過  $^{14}\text{C}$  核種呈現遠場地質圈之外釋濃度分布情形，圖 3.25 至圖 3.29 分別為 100 年、1,000 年、10,000 年、100,000 年之核種濃度分布圖。

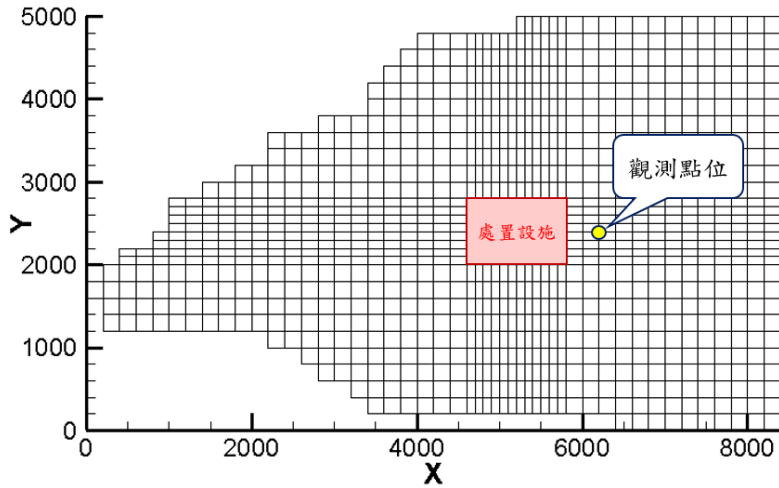


圖 3.24 遠場距處置設施 400 公尺之觀測點位示意圖

表 3.13 距場址 400 公尺點位之核種濃度占比

核種 \ TIME	100 年	1,000 年	10,000 年	100,000 年
$^{238}\text{Pu}$	0.03	0.00	0.00	0.00
$^{241}\text{Am}$	0.00	0.00	0.00	0.00
$^{99}\text{Tc}$	4.01	3.42	1.33	3.20
$^{60}\text{Co}$	0.00	0.00	0.00	0.00
$^{129}\text{I}$	0.06	0.01	0.00	0.00
$^{137}\text{Cs}$	0.00	0.00	0.00	0.00
$^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$	0.38	3.41	82.03	96.76
$^{14}\text{C}$	93.24	93.14	16.64	0.04
$^{90}\text{Sr}$	0.00	0.00	0.00	0.00
$^{90}\text{Y}$	0.00	0.00	0.00	0.00
$^{63}\text{Ni}$	1.07	0.02	0.00	0.00
$^3\text{H}$	1.21	0.00	0.00	0.00

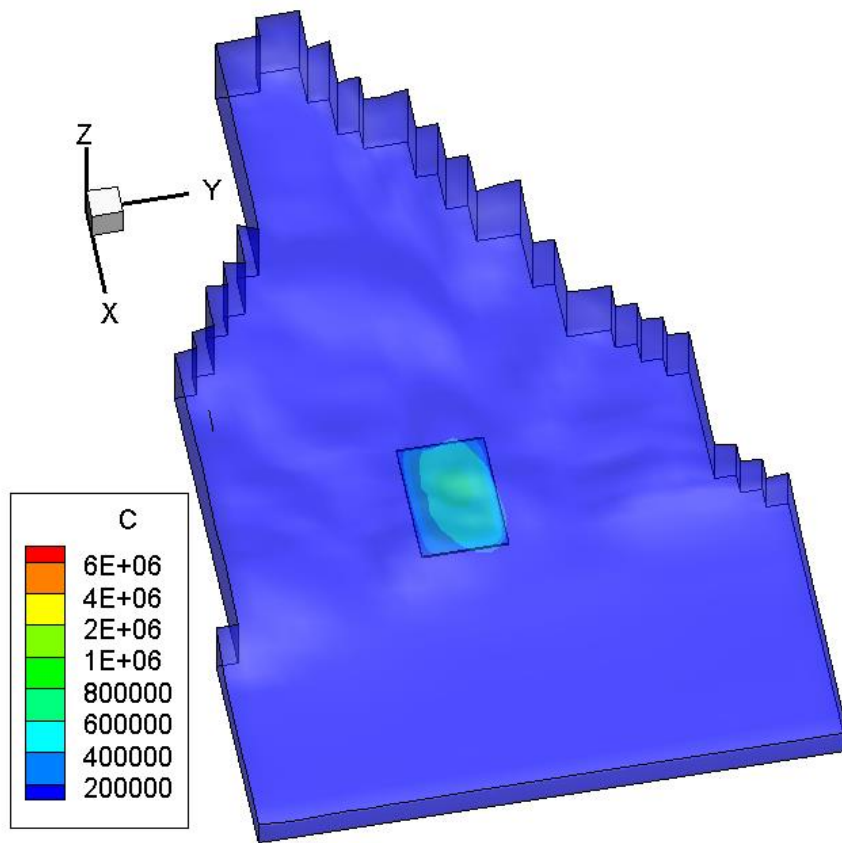


圖 3.25 遠場  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(100 年)

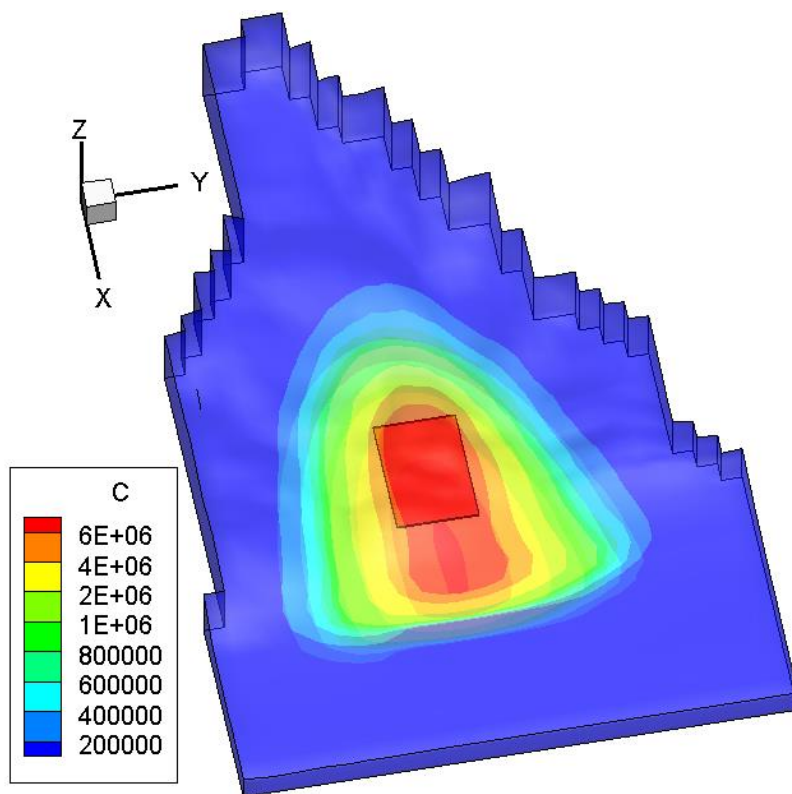


圖 3.26 遠場  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(1,000 年)

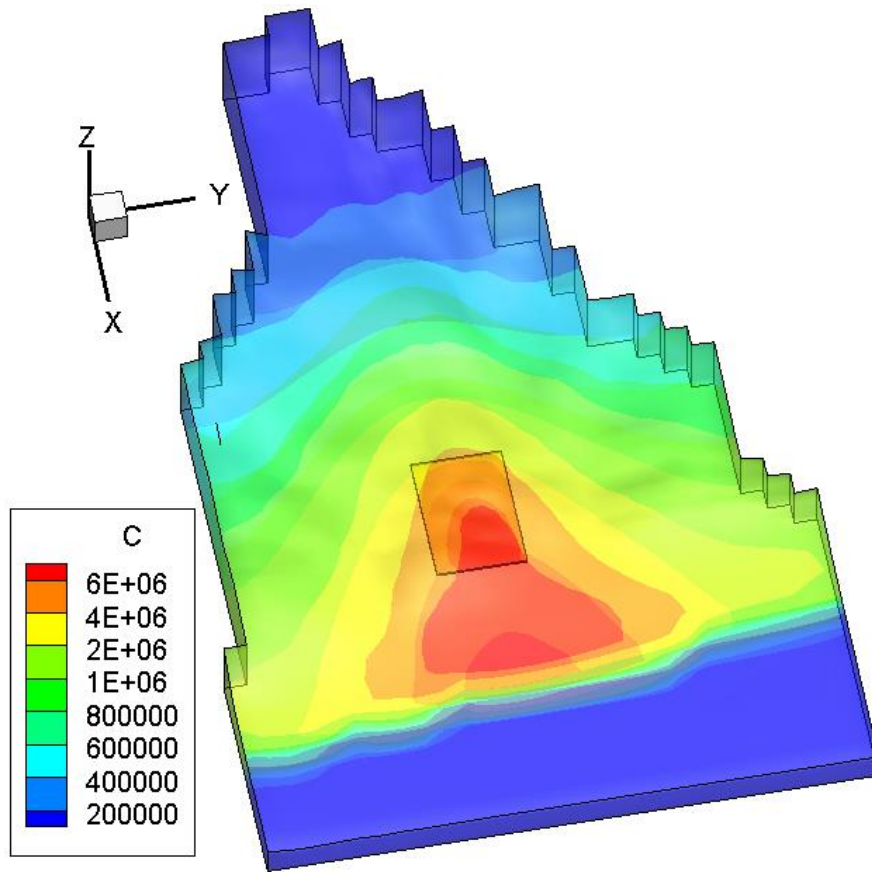


圖 3.27 遠場  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(10,000 年)

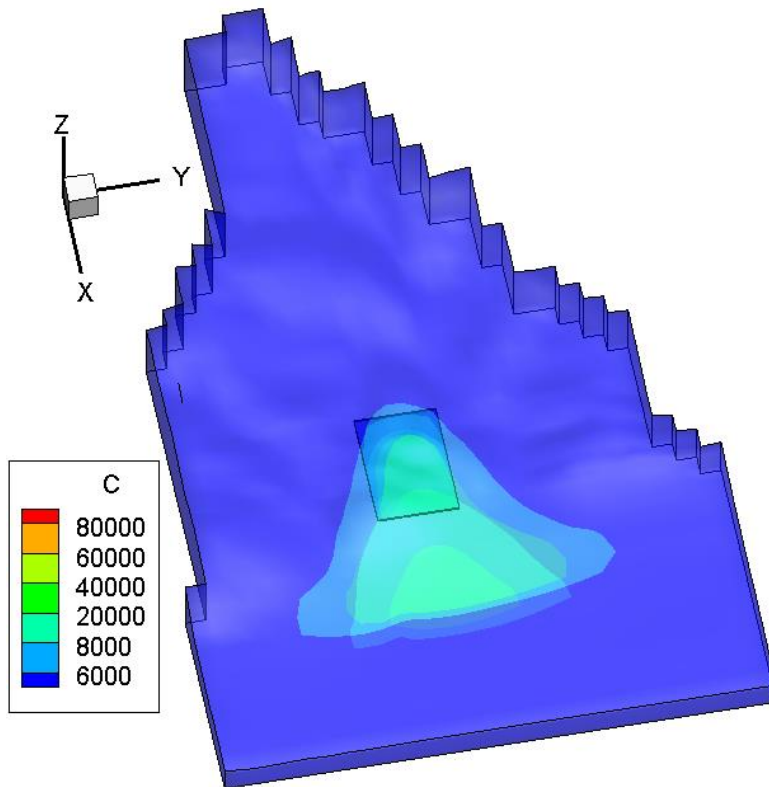


圖 3.28 遠場  $^{14}\text{C}$  核種外釋濃度分布圖(100,000 年)

## 第四章 設計情節之核種傳輸結果驗證

設計情節核種傳輸結果驗證將比較台灣電力公司 LLWD2016 報告中之設計情節核種傳輸結果，利用第三章所發展的核種傳輸模擬驗證技術，進行設計情節核種傳輸案例驗證，比較核種傳輸模擬結果差異，並探討 LLWD2016 報告與本報告模擬結果之主要差異與成因。

### 4.1 設計情節之機制與參數選用

設計情節係依據參考演化所推測出最可能之外部條件輔以現實或保守的內部條件，藉此假設出最有可能發生的情節，而情節之各項機制及參數設定皆有可能影響核種自廢棄物外釋之濃度值及遷移途徑等，為便於後續核種傳輸模擬之差異性探討，故在此個別說明 LLWD2016 及本研究之機制與參數選用。

#### 4.1.1 LLWD2016 設計情節之機制與參數選用

LLWD2016 為評估設計情節下台東縣達仁鄉建議候選場址之安全功能，將模擬分為傳輸模擬及水文模擬兩種，傳輸方面使用 GoldSim 軟體進行近場、遠場模擬。GoldSim 係美國 Golder Associates Inc. 公司針對高、低放射性廢棄物處置安全評估開發之軟體，其應用化學反應汙染/一般污染傳輸模組，解析放射性核種於相異介質之質量傳輸模擬。而水文方面則應用 MODFLOW 及 HYDROGEOCHEM 模式，進行兩種尺度之流場模擬，MODFLOW 係建置跨越恆春半島東西兩岸之區域尺度水文地質模型，進行大範圍地下水流場分析，而 HYDROGEOCHEM 模式則進行場址尺度之水文地質模擬(台灣電力公司，2017a)，以下將詳列模擬設置之各項參數。

##### 1. 源項參數設置：

傳輸模擬將處置窖內堆放之廢棄物範圍設置為源項，每個處置窖皆可堆放 55 加侖之 A 類放射性廢棄物 1500 桶，或 55 加侖之 B、C 類低放射性廢棄物 900 桶，為確保處置設施之安全性，填裝於 55 加侖桶之廢棄物母核種活度依據法規限值進行設置，如表 4.1，並於模擬設置中考量放射性核種之源項衰變，將金屬廢棄物與非金屬廢棄物之溶解釋出率進行區隔，金屬廢棄物參考日本 JAEA 之建議(JAEA，2013，P48)，假設核種釋出率為  $3.3E-06 \text{ yr}^{-1}$ ，而非金屬廢棄物則假設

核種完全溶解於空隙水後直接釋出。模組設定則依據處置規劃之 55 加侖桶堆放間距與影響範圍,Cell 模組中之 55 加侖桶內皆已充滿水,其內之液體體積為 0.145 m<sup>3</sup>,而各桶之堆放間隙皆以水泥砂漿進行填充,其水泥類材料重量為 526kg(台灣電力公司,2017a)。

表 4.1 55 加侖桶內含之母核種及活度(台灣電力公司,2017a)

Nuclide	A 類低放射性廢棄物		B、C 類低放射性廢棄物	
	TBq	Bq	TBq	Bq
<sup>14</sup> C	6.00E-03	6.00E+09	6.00E-02	6.00E+10
<sup>99</sup> Tc	2.20E-03	2.20E+09	2.20E-02	2.20E+10
<sup>129</sup> I	6.00E-05	6.00E+07	6.00E-04	6.00E+08
<sup>238</sup> Pu	1.48E-04	1.48E+08	1.48E-03	1.48E+09
<sup>241</sup> Pu	5.20E-03	5.20E+09	5.20E-02	5.20E+10
<sup>242</sup> Cm	2.96E-02	2.96E+10	2.96E-01	2.96E+11
<sup>3</sup> H	3.00E-01	3.00E+11	1.98E+00	1.98E+12
<sup>60</sup> Co	5.20E+00	5.20E+12	5.41E+01	5.41E+13
<sup>63</sup> Ni	2.60E-01	2.60E+11	5.20E+00	5.20E+12
<sup>90</sup> Sr	3.00E-04	3.00E+08	5.20E+01	5.20E+13
<sup>137</sup> Cs	7.40E-03	7.40E+09	3.40E+01	3.40E+13
<sup>14</sup> C <sub>metal</sub>	6.00E-02	6.00E+10	6.00E-01	6.00E+11
<sup>59</sup> Ni <sub>metal</sub>	1.62E-01	1.62E+11	1.62E+00	1.62E+12
<sup>94</sup> Nb <sub>metal</sub>	1.48E-04	1.48E+08	1.48E-03	1.48E+09
<sup>63</sup> Ni <sub>metal</sub>	2.60E-01	2.60E+11	5.20E+01	5.20E+13

## 2. 水文地質參數設置：

台東縣達仁鄉建議候選場址所在區域屬近岸環境,考量沿岸之水位變動,LLWD2016 採用東海岸之大武站與西海岸之東港站(中央氣象局)沿岸潮位資料,取得其自西元 2003 年至西元 2014 年之平均潮位變化,將東海岸及西海岸之潮位分別設定為 0.193m 與 0.288m,而地表入滲量之設置則採用場址所在區域之壽卡雨量站平均降雨量 3,396.2mm(經濟部水利署,2014),假設平均降雨量的十分之一為地表降雨之入滲量。而 LLWD2016 之水文地質模擬可分為區域/場址尺度模擬,首先介紹 MODFLOW 模式所建置之區域尺度水文地質模型,如圖 4.2(a)所示,數值網格長寬均為 250m,涵蓋地表至 EL-2,000m 之完整三維流場,此模型



之東、西側邊界以定水頭邊界條件將平均潮位輸入，南、北側邊界以集水區作為分界，而模擬範圍中之河川流域則將邊界線設為無通量邊界條件，參數輸入方面，模型中共分為三個水文地質單元如圖 4.1，各水文地質單元參數特性係參考相關文獻及既有調查資料進行設定(表 4.2)。HYDROGEOCHEM 所模擬之場址尺度水文地質模型以達仁溪與塔瓦溪流域作為邊界，將水文地質單元分為兩種，分界位置如圖 4.3 所示，參數設置則呈現於表 4.3，而模擬之網格建置採用三維非結構化網格(圖 4.2(b))，模擬深度至 EL-600，涵蓋 31,994 點位數，總計有 148,112 個網格數(台灣電力公司，2017a)。

表 4.2 區域尺度水文地質單元參數特性(台灣電力公司，2017a)

水文地質單元ID	水文地質單元描述	水文地質單元厚度分布	Kh(m/s)	Kh/Kv	Sy	孔隙率
CH1	硬頁岩組成之裂隙岩體	地表至地表下 200 m	3.47E-07	1	0.25	0.30
CH2	硬頁岩組成之緻密岩體	CH1 底部至 EL-2,000 m	3.47E-10	1	0.042	0.05
M	由輕微至中度風化的沉積岩組成，主要為頁岩與薄砂頁岩互層，夾有厚層的砂礫岩凸透鏡體	>500 m，至模擬深度EL-2,000 m 處	4.51E-09	1	0.06	0.11

表 4.3 場址尺度水文地質單元參數特性(台灣電力公司，2017a)

水文地質單元ID	水文地質單元描述	水文地質單元深度分布	Kx(m/s)	Ky(m/s)	Kz(m/s)	Sy	孔隙率
PCZ	硬頁岩組成之可能導水構造帶	地表至模擬深度EL-600 m 處	1.736E-05	1.736E-05	5.208E-05	0.30	0.40
AZ1	可能導水構造帶以外的硬頁岩	地表至200 m	3.472E-07	3.472E-07	1.042E-06	0.25	0.30
AZ2		AZ1 以下至200 m	3.472E-08	3.472E-08	1.042E-07	0.25	0.30
AZ3		AZ2 以下，至模擬深度EL-600 m 處	3.472E-10	3.472E-10	3.472E-10	0.02	0.05

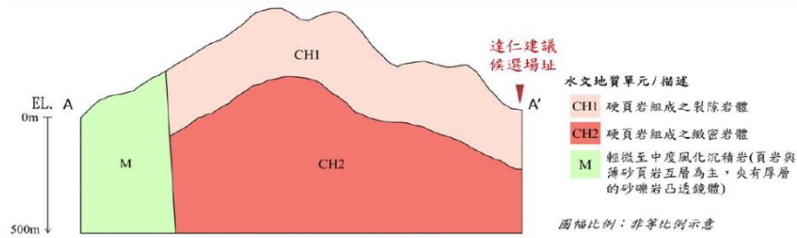
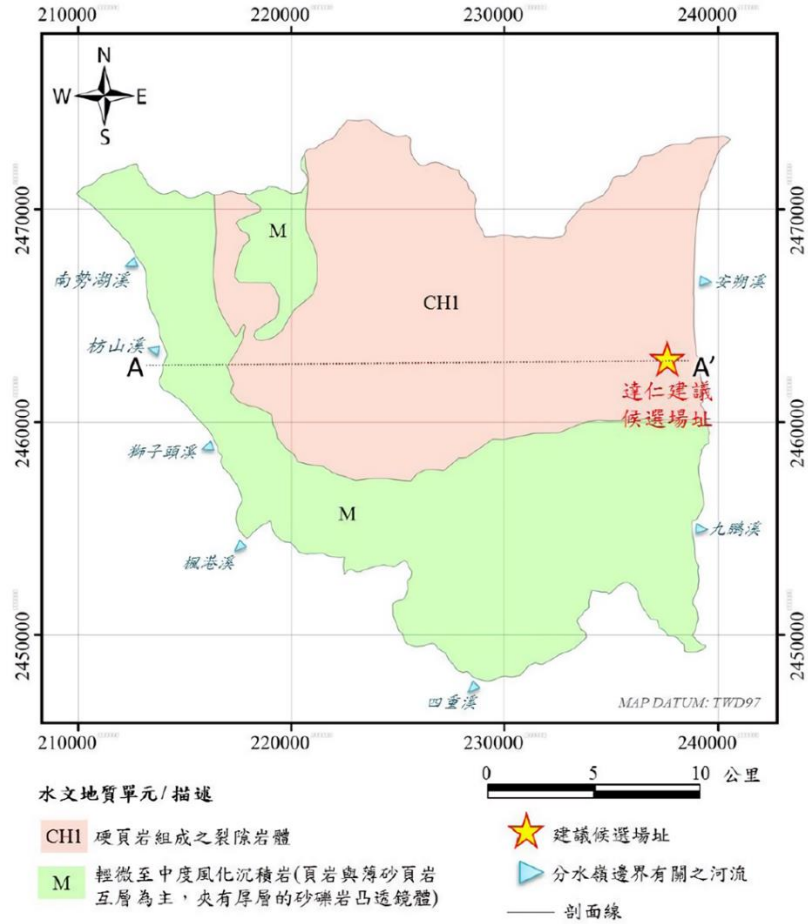


圖 4.1 區域尺度水文地質模型之水文地質單元(台灣電力公司，2017a)

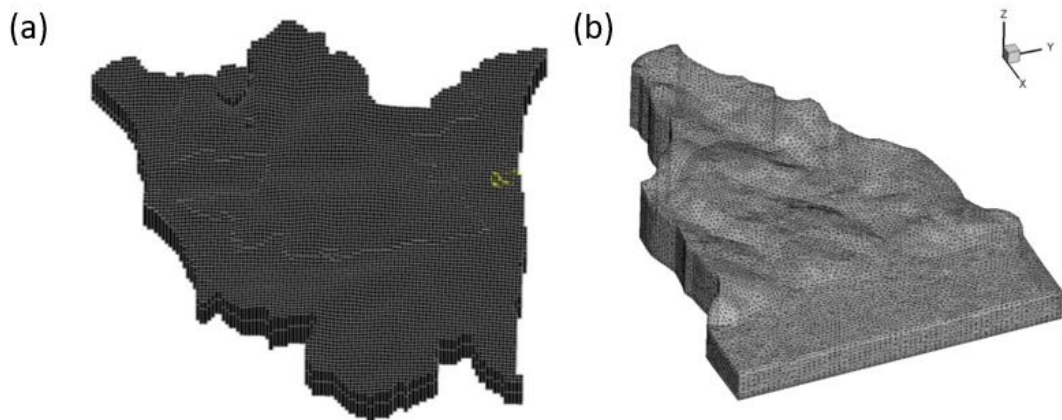


圖 4.2 達仁鄉建議候選場址三維數值模型示意圖(a)區域尺度(b)場址尺度(台灣電力公司，2017a)

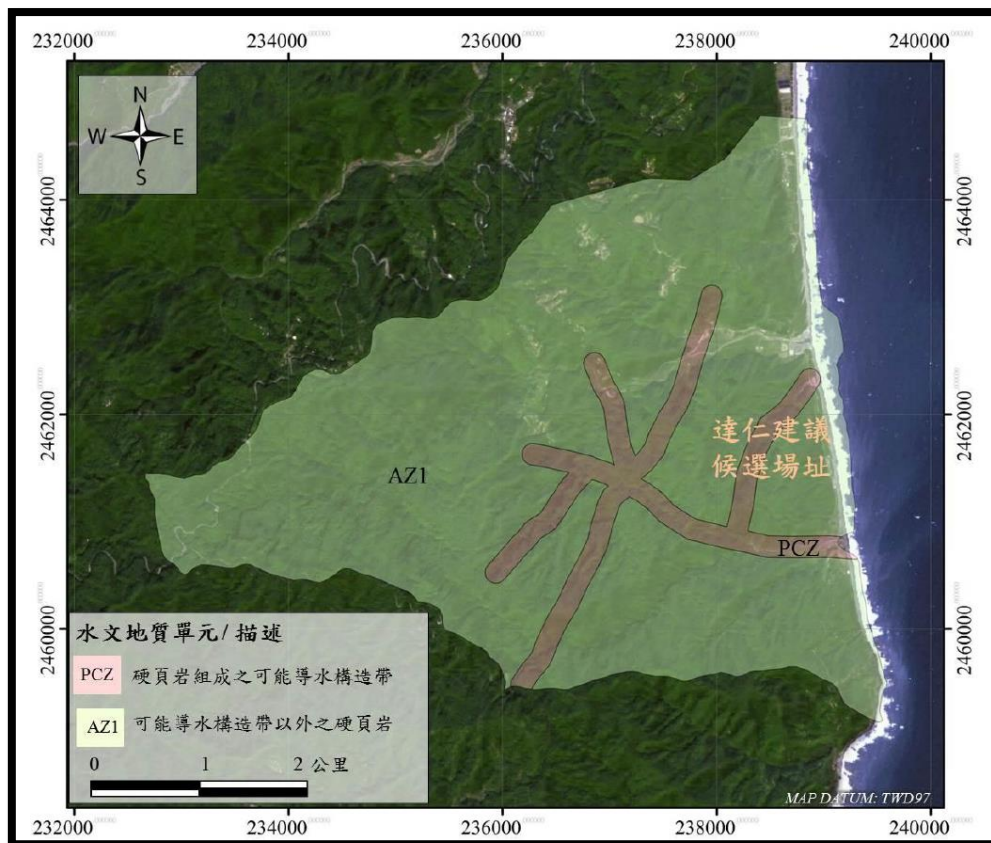


圖 4.3 場址尺度水文地質分界示意圖(台灣電力公司，2017a)

### 3. 傳輸參數設置：

GoldSim 程式之數值分析模型(圖 2.25)係根據 LLWD2016 針對台東縣達仁鄉建議候選場址所規劃之 A 類及 B、C 類處置坑道核種液體傳輸外釋途徑概念圖(圖 2.23、2.24)所建置。模擬中設有各種單元，每種單元皆可代表不同性質之工程障壁，為合理模擬擴散機制之功能，各工程障壁單元皆有設置數十個 Cell 模組，而遠場評估(Far\_Field)中，模型以數十個 Pipe 模組代表處置坑道各區域流至生物圈之途徑，每個 Pipe 均代表數個處置窖(台灣電力公司，2017a)。近場核種傳輸係透過平流及擴散兩種方式進行外釋，在 LLWD2016 之設置中，處置窖平流傳輸截面積係為處置窖的縱剖面，而處置窖之擴散面積則為處置窖之周長面積，於 A 類放射性廢棄物處置窖之平流傳輸截面積及擴散周長面積分別為  $4.5\text{m} \times 15\text{m}$ 、 $361\text{m}^2$ ，而 B、C 類放射性廢棄物處置窖之平流傳輸截面積及擴散周長面積分別為  $3.6\text{m} \times 15\text{m}$ 、 $276\text{m}^2$ ，在近場模擬中，廢棄物、處置窖、緩衝材料、回填材料、二次襯砌及開挖擾動區等單元中，核種外釋方式皆屬以擴散為主、平流為輔，但伴隨時間流逝，

工程障壁逐漸劣化，轉為平流及延散為主，而遠場之核種遷移機制則以平流及延散為主，受到地下水流場驅動而進入生物圈，並於分析時將每個分析單元依面積比等比放大 Pipe 模組起始點之濃度。

#### 4.1.2 本研究設計情節之機制與參數選用

HYDROGEOCHEM\_5.6 係專為多子核種衰變鏈開發之特殊版本，在流場方面，水文變量可由使用者輸入或求解 Richard's Equation，其基本假設涵蓋：流體的連續性、固體的連續性、達西定律、介質壓密、水的壓縮性，並可以邊界條件方式置入降雨入滲量、海平面位置等，亦可選擇穩態/暫態，而傳輸則考量半衰期、吸附係數、平流、延散、擴散、源/匯項等機制，同樣可選擇傳輸模擬為穩態/暫態(Yeh, 2009)。為對照 LLWD2016 之設計情節，本研究使用 HYDROGEOCHEM\_5.6 版數值模式進行近、遠場模擬，並將近場模擬之工程障壁水力傳導係數區分為原參數值及最大倍率兩種，以便涵蓋工程障壁正常劣化後之演化情形，而模式之各項參數值設定如下所列：

##### 1. 源項參數設置：

本研究所建置之傳輸模擬係三維網格數值模擬，此模擬之源項設置於近場處置設施中廢棄物區域點位，並不考慮源項衰變，假設廢棄物區域內之低階放射性廢棄物皆係以 55 加侖桶盛裝，且完全溶解於水中，其內母核種活度則以法規限值進行考量，利用程式中初始條件設置輸入表 4.1 中，以各母核種於 A 類及 B、C 類廢棄物中所含之初始活度進行近場模擬。

##### 2. 水文地質參數設置：

台東縣達仁鄉近岸環境之建議候選場址流場模擬依網格細緻度可分為遠場地質圈流場模擬及近場處置設施流場模擬，銜接方式係將降雨入滲量、模擬之邊界條件等輸入遠場，進行穩態流場模擬，再取得遠場中處置設施位置之總水頭，作為近場處置設施穩態流場模擬之定水頭邊界條件。三維遠場數值模擬係以達仁溪、塔瓦溪作為分界，涵蓋完整集水區區域，並以定水頭邊界條件之方式設置海平面位置，而陸域之降雨入滲量則參考水利署壽卡雨量站之平均年降雨量 3396mm，考慮因地勢所產生的逕流，假設入滲量為年

降雨量的十分之一，採用柯西邊界條件方式置入降雨入滲量 0.0003(m/day)，而遠場之水力傳導係數、孔隙率等水文地質參數設置係參考 LLWD2016「達仁鄉建議候選場址區域尺度之水文地質模型參數表」(台灣電力公司，2017a)之參數值進行設定，如表 3.1。三維近場處置設施數值模擬為考量工程障壁材質及廢棄物之存在，設置處置坑道、廢棄物等區域，採用 LLWD2016「達仁鄉建議候選場址工程障壁材料之參數設定」(台灣電力公司，2017a)之工程障壁材質參數，以面積作為權重進行算數平均計算，取得近場水文地質參數如表 3.2，另為涵蓋工程障壁正常劣化之情形，參照 LLWD2016 報告中表 4.4 工程障壁正常劣化條件之水力傳導係數比(台灣電力公司，2017a)，選取大於 700 年時之水力傳導係數比，將各材質水力傳導係數增長 2 倍至 10 倍不等，並同樣以算數平均之方式取得最大倍率水力傳導係數之近場模擬參數，詳如表 4.5。

表 4.4 工程障壁於正常劣化條件下之水力傳導係數比(達仁鄉建議候選場址)(台灣電力公司，2017a)

工程障壁 (A 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1.5	5	10
處置窖	1	1.5	5	10
回填材料	1	1.5	5	10
二次襯砌	1	2	8	10
開挖擾動區	1	2	8	10
工程障壁 (B、C 類處置坑道)	封閉後時間			
	0 年	50 年	300 年	>700 年
	水力傳導係數比(劣化後/初始狀態)			
廢棄物	1	1	1.5	2
處置窖	1	1	1.5	2
緩衝材料	1	1	1.5	2
回填材料	1	1.5	5	10
二次襯砌	1	2	8	10
開挖擾動區	1	2	8	10

表 4.5 近場最大倍率之水力傳導係數

材質	$k_x=k_y=k_z$
Rock	$8.64 \times 10^{-4}$ (m/day)
Type A 工程障壁	$2.66 \times 10^{-4}$ (m/day)
Type BC 工程障壁	$1.65 \times 10^{-4}$ (m/day)
Type A 廢棄物	$1.73 \times 10^{-3}$ (m/day)
Type BC 廢棄物	$3.46 \times 10^{-4}$ (m/day)

3. 傳輸參數設置：

HYDROGEOCHEM\_5.6 數值傳輸模擬，係由近場處置設施銜接遠場地質圈而成，近場處置設施之核種傳輸模擬將廢棄物區域設置為源項，而四周邊界則設置為可變動邊界，藉由近場暫態傳輸模擬取得處置設施四周之濃度值，再以柯西邊界條件通量之方式，將其置於遠場傳輸模擬之處置設施區域作為源項，進行地質圈暫態傳輸模擬。傳輸機制方面，考量處置設施於封閉後環境即逐漸由氧化轉為還原，故各工程障壁對各核種之吸附功能皆採用還原狀態下之分配係數，並將未知分配係數之核種分配係數設置為零，而核種之主要遷移方式係透過地下流場經由平流、延散、擴散等機制進行外釋，其中近場處置設施區域之核種外釋方式係以擴散為主，平流及延散為輔，此區域之擴散係數設置參照 LLWD2016 報告中之工程障壁材料參數 (台灣電力公司，2017a)，依面積權重進行算術平均計算後輸入程式，如表 3.2 所示，而近場之縱向及橫向延散係數則設置為 8(m)及 2(m)，遠場地質圈之外釋以平流、延散為主，擴散為輔，假定地質圈擴散係數為  $1.0 \times 10^{-4}$  (m<sup>2</sup>/day)，延散係數為近場處置設施之 100 倍，如表 3.1 所示。除此之外，設計情節之多子核種傳輸模擬總共使用 12 條衰變鏈，較第三章之 11 條衰變鏈增加 1 條以 <sup>94</sup>Nb 為母核種 <sup>94</sup>Mo 為子核種，衰變形式係β，且半衰期為 20,300 年之衰變鏈，並將此衰變鏈之分配係數增列於表 4.6。

表 4.6 <sup>94</sup>Nb 衰變鏈之分配係數(台灣電力公司，2017a)

<sup>94</sup> Nb 衰變鏈	分配係數 Kd (ml/g)		
	水泥類材料	膨潤土材料	岩盤
<sup>94</sup> Nb	0	100	100
<sup>94</sup> Mo	0	0	0.1

## 4.2 設計情節之核種傳輸結果驗證

LLWD2016 之設計情節視生物圈中達仁溪及塔瓦溪之沿岸居民為台東縣達仁鄉建議候選場址之放射性核種外釋的主要觀察對象，而太平洋沿岸區域之居民則推測因海洋的存在，外釋核種流至海洋後將受到大量海水快速稀釋，將不予討論(台灣電力公司，2017a)，故 LLWD2016 的設計情節之核種傳輸結果，僅呈現距處置設施一公里之達仁溪區域及塔瓦溪區域，核種自地質圈傳輸至地表水體稀釋後之外釋濃度，而生物圈之輻射曝露劑量則透過達仁溪流域、塔瓦溪流域之關鍵群體，依據飲水、攝取畜產品、攝取養殖水產品、攝取農作物、農耕時吸入粉塵、農耕時體外暴露等途徑進行計算(台灣電力公司，2017a)。本研究設計情節核種傳輸結果為核種抵達地質圈濃度，為與 LLWD2016 設計情節核種傳輸結果在達仁溪與塔瓦溪水核種濃度進行比較，因此將本研究所計算之地質圈核種濃度依質量守恆轉換成鄰近地表水體核種濃度，詳情參照附錄一。

### 4.2.1 LLWD2016 之設計情節核種傳輸結果

台東縣達仁鄉建議候選場址之地下水流場係影響核種外釋之主要途徑，LLWD2016 利用 MODFLOW 模式及 HYDROGEOCHEM 模式進行相異尺度之水文地質模擬，在區域尺度下，MODFLOW 模式地下水流場模擬結果顯示如圖 4.4，地下水流場以中央山脈為界分別往西邊、東邊海岸流動，自中央山脈發源之地下水流動深度約達 EL-700m，僅影響深地層之地下水流場，而台東縣達仁鄉建議候選場址所在區域(約 EL-50m)屬淺層地下水，將不受干擾。除此之外，LLWD2016 藉 HYDROGEOCHEM 模擬之場址尺度地下水流場結果得知(圖 4.5)，此區域地下水流速約為  $1.0E-03\text{m/day}$ ~ $4.0E-03\text{m/day}$ ，且流往場址兩側之地下水徑線(pathline)深度較淺，並根據「低放射性廢棄物最終處置功能模擬評估報告(台東縣達仁鄉)」之流場分析結果，配合現有之設計概念，在工程障壁無發生劣化情形之條件下，得知滲入 A 類低放射性廢棄物處置坑道及 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道之單位長度流量分別約為  $1.33E-02\text{ m}^2/\text{yr}$  及  $4.6E-03\text{ m}^2/\text{yr}$ (台灣電力公司，2017a)。



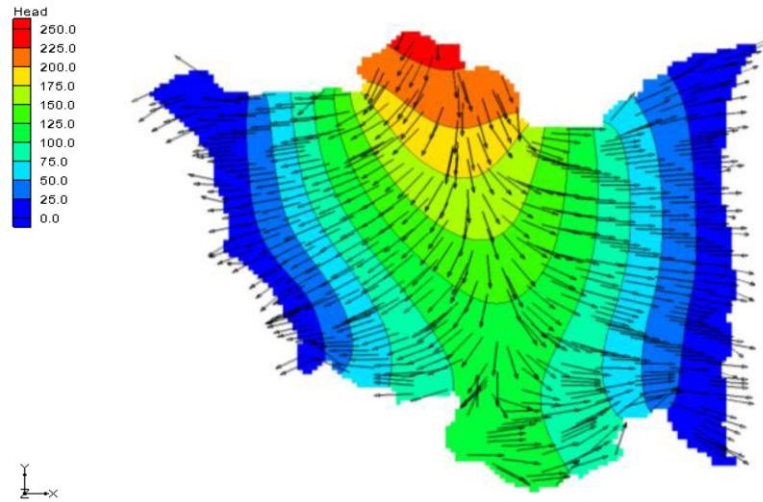


圖 4.4 區域尺度地下水模擬地下水頭流場向量分布圖(單位：m)(台灣電力公司，2017a)

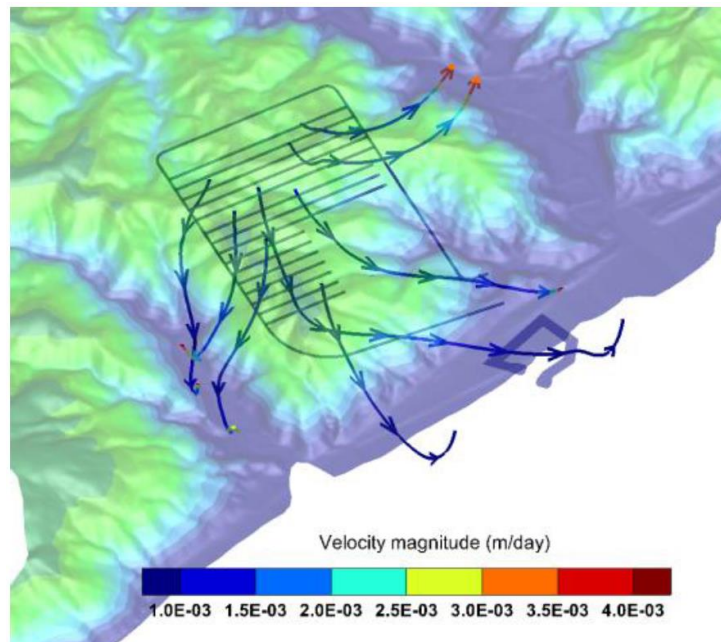


圖 4.5 場址尺度地下水模擬流場示意圖(台灣電力公司，2017a)

GoldSim 設計情節之核種傳輸結果，首先呈現設計情節中達仁溪流域與塔瓦溪流域關鍵群體所在區域濃度較高之核種濃度歷線圖，如圖 4.6、圖 4.7 所示，達仁溪流域及塔瓦溪流域外釋量較高之核種皆為  $^{129}\text{I}$  與  $^{99}\text{Tc}$ ，其中各核種外釋濃度占比如表 4.7、表 4.8 所示。而關鍵群體之劑量估算中，關鍵傳輸途徑為飲用受污染河水，倘若關鍵群體位於達仁溪流域，其水源來自於達仁溪，而關鍵群體如位於塔瓦溪流域，其水源則來自於塔瓦溪流域，圖 4.8、圖 4.9 呈現不同流域對劑量影響較明顯之主要核種，LLWD2016 之分析結果顯示，達仁溪下游區域之

關鍵群體在設計情節設置下，於場址封閉後 5,110 年出現最大個人年有效劑量 2.59E-04 mSv，而塔瓦溪下游區域關鍵群體在場址封閉後 5,440 年出現最大個人年有效劑量 1.02E-03 mSv，兩者皆低於法規要求之 0.25 mSv，且主要劑量來源核種皆為  $^{14}\text{C}$ (台灣電力公司，2017a)。

表 4.7 達仁溪流域關鍵核種外釋濃度占比(台灣電力公司，2017a)

TIME (year)	$^{14}\text{C}$	$^{99}\text{Tc}$	$^{129}\text{I}$	$^3\text{H}$	$^{14}\text{C}_{\text{metal}}$	$^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
270	0.00	0.06	0.00	0.94	0.00	0.00
540	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1080	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
3000	0.40	0.58	0.00	0.00	0.01	0.00
5000	0.50	0.46	0.01	0.00	0.04	0.00
8000	0.44	0.47	0.01	0.00	0.07	0.00
10000	0.39	0.51	0.01	0.00	0.09	0.00

表 4.8 塔瓦溪流域關鍵核種外釋濃度占比(台灣電力公司，2017a)

TIME (year)	$^{14}\text{C}$	$^{99}\text{Tc}$	$^{129}\text{I}$	$^3\text{H}$	$^{14}\text{C}_{\text{metal}}$	$^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
270	0.00	0.06	0.00	0.94	0.00	0.00
540	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1080	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
3000	0.40	0.58	0.00	0.00	0.01	0.00
5000	0.50	0.46	0.01	0.00	0.04	0.00
8000	0.44	0.47	0.01	0.00	0.07	0.00
10000	0.39	0.51	0.01	0.00	0.09	0.00

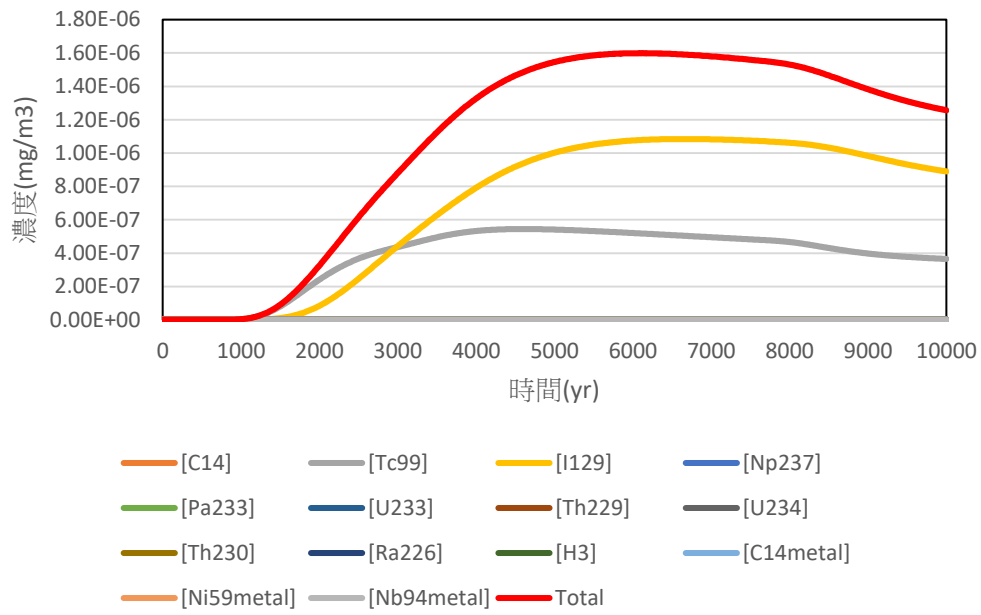


圖 4.6 達仁溪流流域關鍵群體之核種濃度歷線圖(台灣電力公司，2017a)

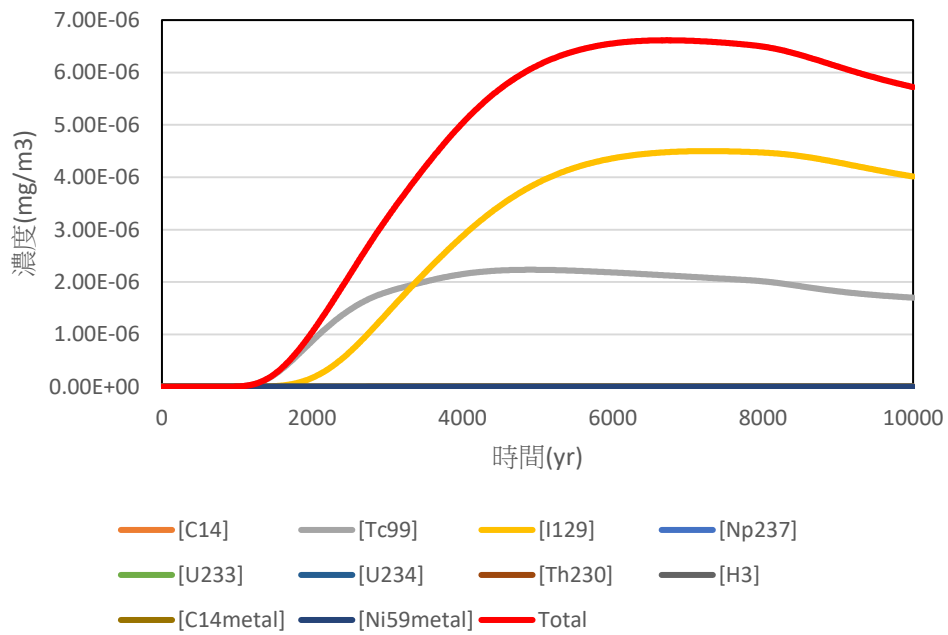


圖 4.7 塔瓦溪流流域關鍵群體之核種濃度歷線圖(台灣電力公司，2017a)

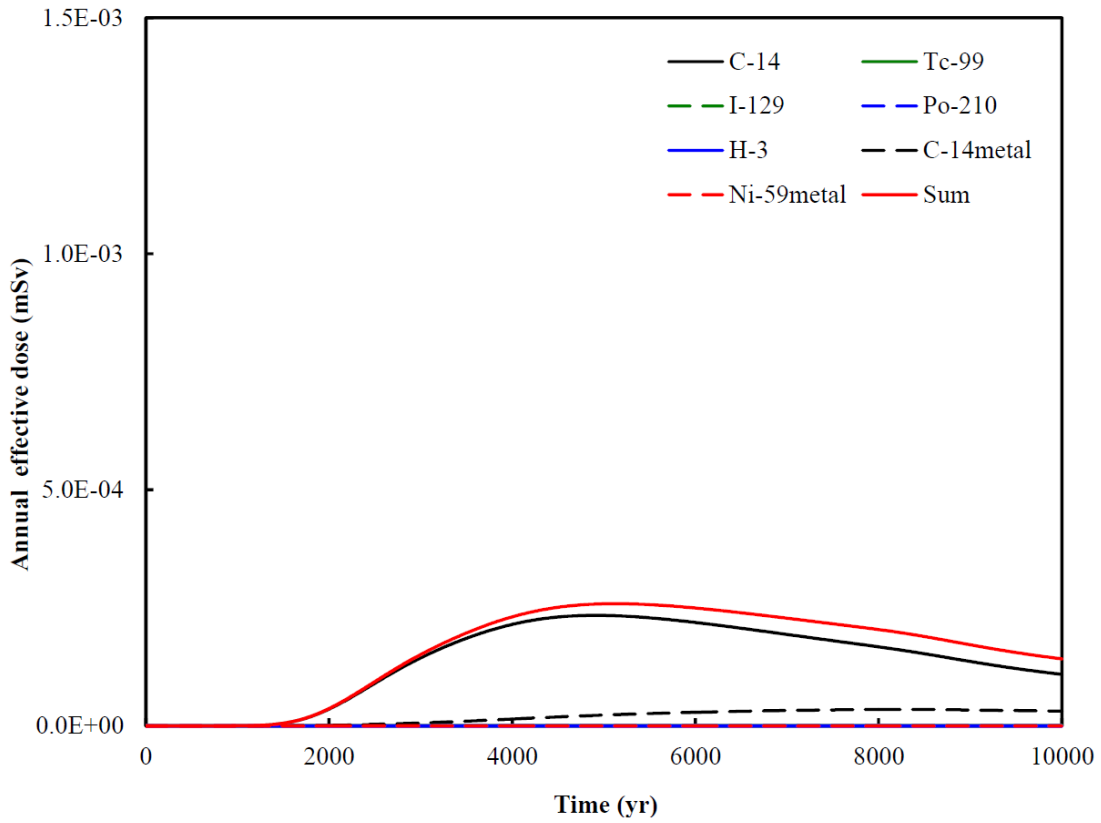


圖 4.8 達仁溪流域設計情節下個人年有效劑量分析結果(台灣電力公司，2017a)

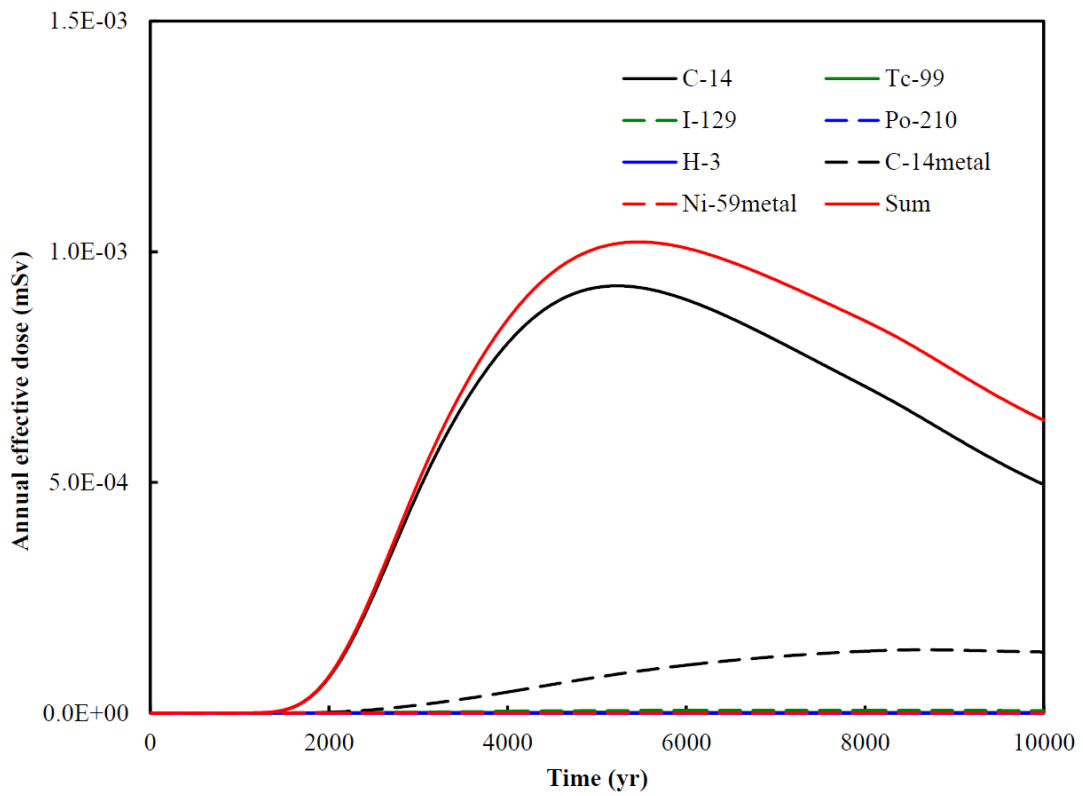


圖 4.9 塔瓦溪流域設計情節下個人年有效劑量分析結果(台灣電力公司，2017a)

## 4.2.2 設計情節之核種傳輸結果比較

針對設計情節，本研究與 LLWD2016 報告在核種傳輸結果比較部分，由於流場為核種由處置設施外釋自人類生活圈之主要路徑，因此先比較流場模擬結果後，再進行傳輸結果比較。在設計情節下台東縣達仁鄉建議候選場址之流場驗證部分，因本研究並無進行大尺度區域流場模擬，僅比較包含達仁溪與塔瓦溪集水區流場，由 HYDROGEOCHEM 流場模擬結果顯示，水流方向係由西方山區向東方沿岸流動，地下水流速約為  $3.89\text{E-}03\text{m/d}$  ~  $2.79\text{E-}04\text{m/d}$ ，總水頭及流場分布如圖 3.12 所示。在近場處置設施流場模擬，設計情節條件下工程障壁並無發生劣化情況時，A 類低放射性廢棄物處置坑道之單位長度流量約為  $3.02\text{E-}02\text{m}^2/\text{yr}$ ；B、C 類低放射性廢棄物處置坑道之單位長度流量約為  $5.62\text{E-}03\text{m}^2/\text{yr}$ ，處置設施之總水流與流場分布則呈現於圖 3.14，本研究結果與 LLWD2016 報告之場址區域流場模擬結果趨勢相似，差異約為 0~1 個數量級，如表 4.9 所示。

表 4.9 本研究與 LLWD2016 報告之場址區域流場模擬結果比較

流場	LLWD2016	本研究	Order(差異)
地下水流速	$1.0\text{E-}03\text{m/day}$ ~ $4.0\text{E-}03\text{m/day}$	$3.89\text{E-}03\text{m/day}$ ~ $2.79\text{E-}04\text{m/day}$	0~1
A 類低放射性廢棄物處置坑道單位長度流量	$1.33\text{E-}02\text{m}^2/\text{yr}$	$3.02\text{E-}02\text{m}^2/\text{yr}$	0
B、C 類低放射性廢棄物處置坑道單位長度流量	$4.6\text{E-}03\text{m}^2/\text{yr}$	$5.62\text{E-}03\text{m}^2/\text{yr}$	0

核種傳輸模擬結果比較部分，本研究選取距處置設施一公里處之達仁溪流域、塔瓦溪流域出海口處作為觀測點，如圖 4.10 所示。表 4.10 與表 4.11 分別為達仁溪與塔瓦溪觀測點之關鍵核種外釋濃度占比。由表 4.10 顯示達仁溪在處置設施封閉後約 20 年間，達仁溪流域下游環境中最高濃度占比之核種為  $^3\text{H}$ ，而 30 年~5,000 年間占比最高之核種為  $^{14}\text{C}_{\text{metal}}$ ， $^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$  為 8,000 年~10,000 年間占比最高之核種；表 4.11 顯示塔瓦溪在處置設施封閉後 5,000 年間， $^{14}\text{C}_{\text{metal}}$  擁有最高濃度占比，8,000 年~10,000 年間最高濃度占比為  $^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$  核種。與 LLWD2016 之表 4.7、表 4.8 的占比比較，由於金屬核種在本研究未採用釋出率控制，在不考慮金屬核種濃度占比條件下，本研究與 LLWD2016 在 5000 年時皆以  $^{14}\text{C}$  與  $^{99}\text{Tc}$  占比最高。

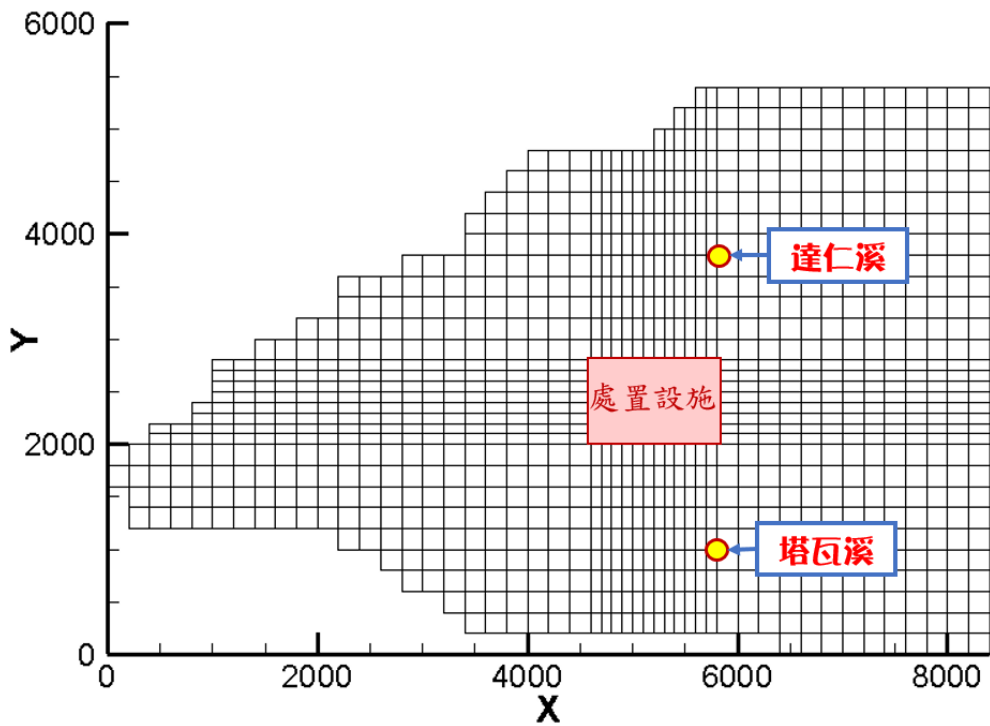


圖 4.10 距處置設施一公里之點位示意圖

表 4.10 達仁河流域之關鍵核種外釋濃度占比

TIME (year)	$^{14}\text{C}$	$^{99}\text{Tc}$	$^{129}\text{I}$	$^3\text{H}$	$^{14}\text{C}_{\text{metal}}$	$^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$
10	0.02	0.01	0.00	0.78	0.19	0.00
20	0.02	0.00	0.01	0.75	0.21	0.00
30	0.08	0.06	0.01	0.00	0.85	0.00
60	0.08	0.05	0.01	0.00	0.86	0.00
130	0.09	0.05	0.01	0.00	0.86	0.00
270	0.09	0.04	0.00	0.00	0.87	0.00
540	0.09	0.04	0.00	0.00	0.87	0.00
1080	0.08	0.04	0.00	0.00	0.86	0.02
3000	0.08	0.04	0.00	0.00	0.78	0.10
5000	0.06	0.04	0.00	0.00	0.56	0.34
8000	0.03	0.03	0.00	0.00	0.25	0.69
10000	0.01	0.02	0.00	0.00	0.10	0.87

表 4.11 塔瓦河流域之關鍵核種外釋濃度占比

TIME (year)	<sup>14</sup> C	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I	<sup>3</sup> H	<sup>14</sup> C <sub>metal</sub>	<sup>59</sup> Ni <sub>metal</sub>
10	0.03	0.06	0.00	0.44	0.47	0.00
20	0.04	0.07	0.00	0.27	0.61	0.00
30	0.07	0.10	0.03	0.12	0.67	0.01
60	0.08	0.07	0.01	0.00	0.84	0.00
130	0.08	0.05	0.01	0.00	0.86	0.00
270	0.09	0.05	0.00	0.00	0.86	0.00
540	0.09	0.04	0.00	0.00	0.87	0.00
1080	0.09	0.04	0.00	0.00	0.86	0.01
3000	0.08	0.04	0.00	0.00	0.80	0.08
5000	0.06	0.04	0.00	0.00	0.60	0.30
8000	0.03	0.03	0.00	0.00	0.28	0.66
10000	0.01	0.02	0.00	0.00	0.12	0.85

由於本研究與 LLWD2016 報告在核種傳輸模擬係分別以不同架構與模式進行模擬，為進行分析表較所取得的 LLWD2016 報告核種濃度值為河川水體之核種濃度，由於本研究之核種濃度值為地下水體核種濃度，因此將地下水體核種濃度分別以達仁溪、塔瓦溪之地表水體體積及流量進行質量守恆計算，藉此取得本研究對應於河川水體之核種濃度。計算方式如下式 4.1，其中  $C_g$  為地下水核種濃度( $Bq/m^3$ )， $C_r$  為河川水體濃度( $Bq/m^3$ )， $M_{total}$  為總質量， $Q$  為地下水流量( $m/day$ )；由鄰近達仁溪、塔瓦溪之地下水流速、斷面積、孔隙率計算)， $V(m^3)$  為達仁溪/塔瓦溪之地表水體體積，達仁溪:  $54,932,456m^3$ ；塔瓦溪:  $16,120,072 m^3$ (台灣電力公司，2017a)。

$$Q * C_g = M_{total} = V * C_r \quad (4.1)$$

表 4.12 與表 4.13 為 LLWD2016 與本研究觀測點(圖 4.10)分別在達仁溪與塔瓦溪濃度峰值出現時間及峰值濃度比較，本研究部分核種峰值濃度明顯較高，例如金屬核種在本研究因未採用外釋率控制，<sup>14</sup>C<sub>metal</sub>(5710 年)、<sup>59</sup>Ni<sub>metal</sub>(10 萬年)濃度模擬結果比 LLWD2016 模擬結果為高，其中 <sup>59</sup>Ni<sub>metal</sub> 濃度差異較大原因為其半化期較長，且本研究峰值出現在 50000 年，而 LLWD2016 因只模擬到 10000 年，因此峰值尚未出現。而 <sup>3</sup>H(12.3yr)因半化期極短，本研究峰值出現時間較短，使



峰值差異較明顯，但與 LLWD2016 模擬結果二者濃度皆低。其他核種如  $^{99}\text{Tc}$ (21 萬年)、 $^{129}\text{I}$ (1570 萬年)，因半化期皆較長，本研究峰值出現時間較晚，濃度較低，但與 LLWD2016 模擬結果差異不大，主要差異成因為 LLWD2016 採用 GoldSim 進行遠場裂隙核種傳輸模擬，因此傳輸速率較快(即峰值出現時間較短且濃度較高)。

表 4.12 比較濃度峰值出現時間差異—達仁溪

關鍵核種	達仁溪濃度峰值出現時間		峰值濃度		濃度差異 (order)
	LLWD2016	本研究	LLWD2016	本研究	
$^{14}\text{C}$	5330	5000	1.54E+00	2.35E-01	0
$^{99}\text{Tc}$	5330	8000	1.40E+00	1.62E-01	0
$^{129}\text{I}$	7600	8000	2.92E-02	9.08E-03	0
$^3\text{H}$	280	60	6.13E-12	3.09E-08	4
$^{14}\text{C}_{\text{metal}}$	8370	5000	2.03E-01	2.38E+00	1
$^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$	10000	50000	9.90E-09	9.86E+00	9

表 4.13 比較濃度峰值出現時間差異—塔瓦溪

關鍵核種	塔瓦溪濃度峰值出現時間		峰值濃度		濃度差異 (order)
	LLWD2016	本研究	LLWD2016	本研究	
$^{14}\text{C}$	5250	5000	1.53E+00	3.22E-01	0
$^{99}\text{Tc}$	4970	8000	1.40E+00	2.49E-02	1
$^{129}\text{I}$	7330	8000	2.92E-02	1.38E-03	0
$^3\text{H}$	280	130	6.13E-12	3.36E-08	4
$^{14}\text{C}_{\text{metal}}$	7120	5000	2.03E-01	3.26E+00	0
$^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$	10000	50000	9.90E-09	1.43E+01	9

在 LLWD2016 設計情節，工程障壁之劣化過程係以水力傳導係數反應，且使用漸進的方式逐年增加水力傳導係數倍率，如表 4.4 所示，本研究以對照模擬比較，其一為設計情節條件下工程障壁未劣化之模擬，假設水力傳導係數 K 值為原倍率，第二種則假設設計情節條件下工程障壁於處置設施封閉後立即劣化，K 值訂定為 LLWD2016 設計情節之工程障壁正常劣化下水力傳導係數變動表 4.4 之最大值。以  $^{14}\text{C}$ 、 $^{129}\text{I}$  核種為例，圖 4.11 及圖 4.12 分別為  $^{14}\text{C}$  與  $^{129}\text{I}$  在圖 4.10 中觀測位置之濃度曲線與 LLWD2016 結果比較，其中 K=1 代表水力傳導係數為原倍率之模擬結果，而 K=10 則代表工程障壁最劣狀況下之模擬結果，由於

LLWD2016 報告之水力傳導係數為時變放大，故不論達仁溪位置或塔瓦溪位置之濃度曲線皆介於本研究二組模擬結果區間。

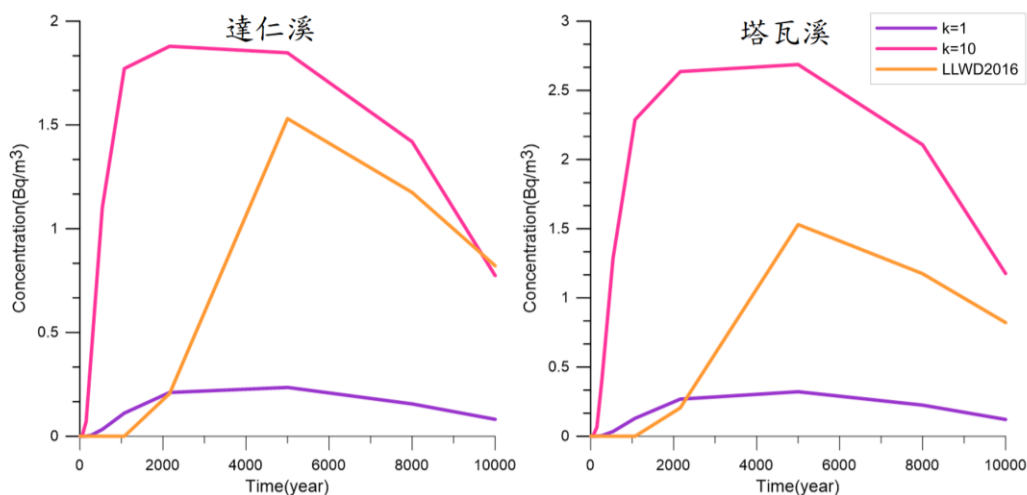


圖 4.11 相異之水力傳導係數下  $^{14}\text{C}$  核種的濃度曲線

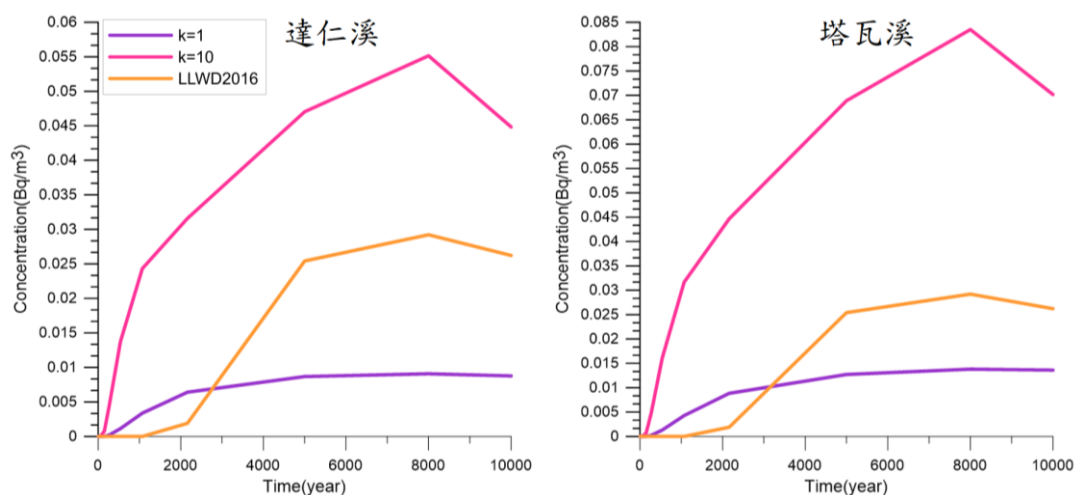


圖 4.12 相異之水力傳導係數下  $^{129}\text{I}$  核種的濃度曲線

依 LLWD2016 報告內容，關鍵群體位於距處置設施 1km 之位置，為探討距處置設施 1km 之點位外釋濃度差異，選取距處置設施下游區域 1km 之 5 觀測點，分別位於處置設施：北邊(Point 1)、東北邊海岸(Point 2)、東側太平洋(Point 3)、東南邊海岸(Point 4)、南邊 (Point 5)，如圖 4.13，並藉由各點位濃度占比表 4.13 得知，東側點位因於遠場主要流場方向下游因此有最高濃度值，其次則依序為 Point 2、Point 4、Point 1、Point 5。

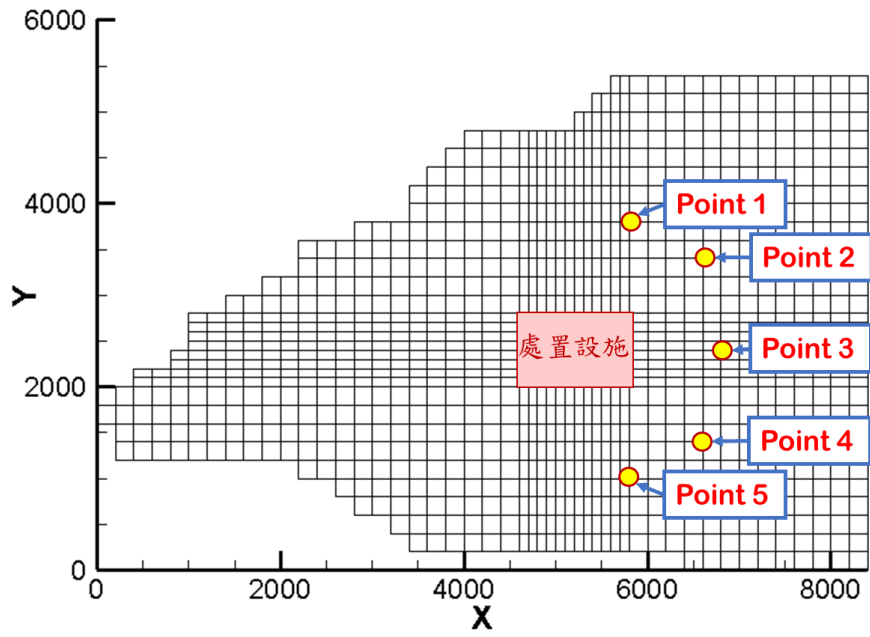


圖 4.13 距處置設施 1km 之點位示意圖

表 4.14  $^{14}\text{C}$  核種距處置設施 1km 位置之各點位濃度占比

Point \ Time (yr)	1	10	100	1,000	5,000	10,000
Point 1	0	2	4	6	8	11
Point 2	0	10	42	30	27	26
Point 3	77	69	30	43	42	34
Point 4	22	15	22	17	17	20
Point 5	1	4	1	4	6	9

# 第五章 我國低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸技術發展建議

低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸技術係評估低放射性廢棄物處置設施長期安全之重要技術項目，過去三年本團隊已陸續發展與核種傳輸模擬相關技術，例如：近岸環境坑道處置遠場傳輸數值模擬技術、近場核種傳輸模擬技術，以及坑道處置多子核種傳輸驗證技術，並研析諸多與坑道處置相關之國際研究技術報告，本章彙整上述所發展技術與研析報告結果，提出下列我國低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸技術之發展建議。

## 1. 源項

處置設計、地質圈、初始條件、邊界條件、氣候演化為影響核種傳輸重要變因，但因受到知識及科技發展之侷限，現階段之核種傳輸模擬機制中各項設定尚有精進空間，以初始條件為例，源項核種衰變、金屬與非金屬核種的釋出率差異，與所採用的情節設定有關，也與所使用數值模式的處理設定有關，而源項處理是核種外釋的主要來源，因此需發展合理可信賴的源項機制模擬技術。此外放射性核種衰變鏈中母核種若存在多子核種分支，即可能同時具有 $\alpha$ 衰變子核種及 $\beta$ 衰變子核種，應發展合理的模擬技術，或評估僅選取單一子核種對模擬結果的誤差。另外，廢棄物包件局部鏽蝕在模擬技術上如何細部進行處理，亦為現階段模擬技術尚未考慮的部分。

## 2. 海淡水交界面與地球化學

台東縣達仁鄉建議候選場址屬近岸環境坑道處置設施，核種外釋潛在區域涵蓋海岸地區的淺地表水體，以及沿岸海域之海洋外釋，而海水與淡水之交界面所形成之密度流流場，可能產生紊流作用，致使核種外釋至海水流場後反向傳輸至近岸海域；又若考慮未來海平面演化，核種外釋路徑將如圖 5.1、5.2 所示，此現象將可能導致核種於沿海區域滯留，因此海淡水交界面的密度流現象對核種傳輸有重要影響。此外，海水的化學組成與陸域地下水有極大差異，部份核種的吸脫附在海水環境有很大差異，因此考慮海淡水交界在近岸環境的核種傳輸模擬技術

應建立。

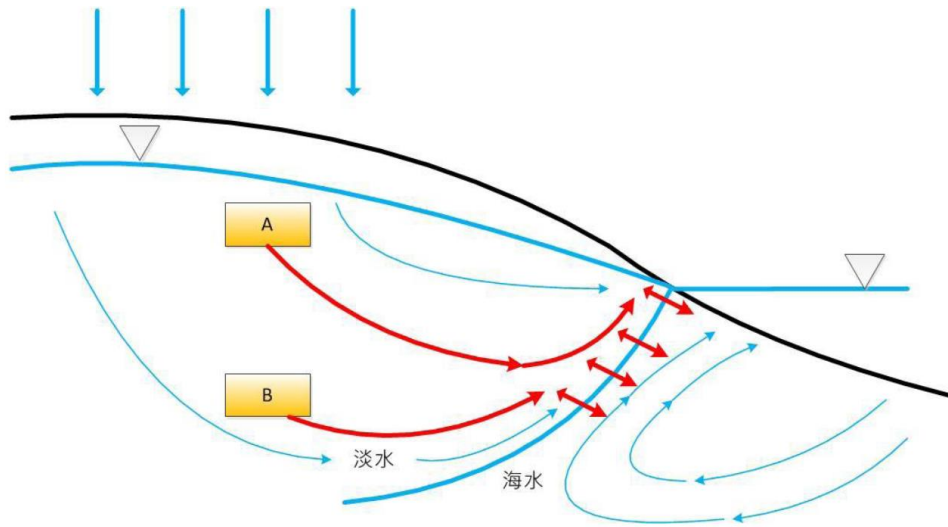


圖 5.1 近岸環境處置遠場概念示意圖(李明旭、陳瑞昇，2015)

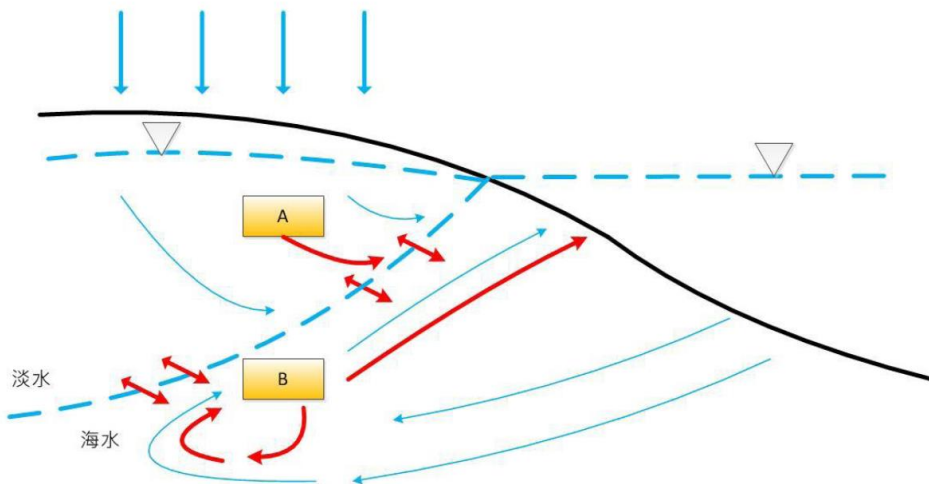


圖 5.2 近岸環境處置因海平面上升之遠場概念示意圖(李明旭、陳瑞昇，2015)

### 3. 高速計算技術與局部加密網格技巧

低放射性核種傳輸模擬容易受到運算資源之限制，以模擬網格為例，現階段本研究將核種傳輸模擬拆分為近場網格及遠場網格，近場網格包含廢棄物、工程障壁等處置設施，但如要完整呈現近場之複雜處置構造，如通行隧道、水力封塞、力學封塞以及各項工程障壁等，且又要同時合併在地質圈遠場網格，則三維模擬網格數目將非常可觀，透過高速平行運算技術搭配局部加密網格技巧才有可能達成使近遠場模擬工作可在同一個網格架構下進行，降低不同尺度網格運算結果銜接可能的數值誤差，並提高模擬效率。

#### 4. 提升資料品質

核種傳輸模擬涉及許多參數設定，所使用的資料品質與管理是確保模擬結果信賴度與可重現性的關鍵。現階段國內低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸模擬之輸入資料尚未建立資料品質審驗技術，建議積極建立資料品質審驗與管理平台強化知識與數據管理。

## 第六章 提出我國低放處置安全報告審查規範有關核種 傳輸驗證精進建議

下表為整理本年度歷次參與「安全分析報告審查導則」審查會議本計畫及各委員所提出之部分修正建議，針對安全評估有關核種傳輸另提出以下建議：

「輻射劑量評估之核種傳輸特性，審查需評估處置設施工程障壁與天然障壁系統，於處置設施運轉及封閉後之地下水滲流、核種平流、擴散、延散與遲滯吸附等特性參數，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。」本條文內容著重在水流與傳輸機制對核種傳輸特性之影響，其他章節(如設施設計與場址特性)內與核種傳輸特性之相關內容審查重點是否一致，應加以修正比對。例如在審查導則第二章、場址之特性描述之地球化學中說明可能影響場址安全及核種遷移之水化學、土壤與岩石之分類組成、地球化學特性，以及相關之地化模擬資料，「土壤與岩石之分類組成及地球化學特性資料包括主要與微量元素地球化學組成與礦物成份(含原生礦物與次生礦物)離子交換能力，重要放射性核種在土壤與岩石分配係數、遲滯因子、離子交換能力、放射性核種之溶解度及可能的溶解度範圍與化學型態、價數與性質。」，而地球化學是影響核種傳輸的重要因素，建議應修正為「輻射劑量評估之核種傳輸特性，審查需評估處置設施工程障壁與天然障壁系統，於處置設施運轉及封閉後之地下水滲流、核種平流、擴散、延散與遲滯吸附等特性參數與受地球化學特性影響之變動範圍，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。」

原文	修訂條文
七、設施之安全評估 (一)輻射劑量評估： 1. 廢棄物描述：廢棄物為處置設施安全評估之重要資料，至少需說明下列項目：	七、設施之安全評估 (一)輻射劑量評估： 1. 廢棄物描述：廢棄物為處置設施安全評估之重要資料，至少需說明下列項目：
(1) 擬申請處置的低放射性廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置，含現有與未來預估產生者。	(1) 擬申請處置的低放射性廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置，含現有與未來預估產生者。



原文	修訂條文
(2) 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、盛裝容器或處置盛裝容器、及其分類。	(2) 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、盛裝容器或處置盛裝容器、及其分類。
(3) 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。	(3) 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。
(4) 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、滲濾指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。	(4) 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、 <b>溶出</b> 指數、耐火性、耐水性、耐候性、耐輻射、耐菌性等資料。
(5) 廢棄物活度資料，包括主要核種與難測核種的名稱、半衰期、推估處置時之活度、平均濃度與標準差。	(5) 廢棄物活度資料，包括主要核種與難測核種的名稱、半 <b>化</b> 期、推估處置時之活度、平均濃度與標準差。
(6) 處置設施內廢棄物之處置相關規劃，包含處置設施運轉期間、接收、貯存及處置廢棄物之規劃，以及處置設施封閉時所產生之廢棄物規劃。	(6) 處置設施內廢棄物之處置相關規劃，包含處置設施運轉期間、接收、貯存及處置廢棄物之規劃，以及處置設施封閉時所產生之廢棄物規劃。
2. 核種傳輸特性：需評估處置設施工程障壁與場址天然障壁系統，於處置設施運轉與封閉後之地下水滲流、核種平流、擴散、延散與吸附等特性參數，以模擬地下水滲流機制與核種傳輸特性，至少需說明下列項目：	2. 核種傳輸特性：需評估處置設施工程障壁與場址天然障壁系統，於處置設施運轉與封閉後之地下水滲流、核種平流、擴散、延散、 <b>與受地球化學特性影響之變動範圍</b> ，以模擬地下水滲流機制與核種傳輸特性，至少需說明下列項目：
(1) 說明處置場址附近至少連續一年的水文與氣象資	(1) 說明處置場址附近至少連續一年的水文與氣象資

原文	修訂條文
<p>訊、處置設施採用之滲流分析數據及不確定性，與滲流分析模型之驗證及校正資訊。</p>	<p>訊、處置設施採用之滲流分析數據及不確定性。</p>
<p>(2) 說明工程障壁設計及天然障壁系統，與核種傳輸特性相關之參數選用。</p>	<p>(2) 說明工程障壁設計及天然障壁系統之<u>水文地質特性</u>，與核種傳輸特性相關參數之選用<u>依據</u>。</p>
	<p>(3) <u>說明採用模式之理論與程式的適當性，以及滲流模擬的率定及驗證資訊。</u></p>
<p>(3) 說明處置單元滲流量之時間與空間分布預測評估結果。</p>	<p>(4) 說明處置單元滲流與核種傳輸之時間與空間分布預測評估結果，以及不確定性。</p>
<p>(4) 評估工程障壁材料的劣化、穴居動物活動與植物生態，對於滲流特性之可能影響。</p>	<p>(5) 評估工程障壁材料的劣化、穴居動物活動與植物生態，對於滲流與核種<u>傳輸</u>特性之可能影響。</p>
<p>3. 正常狀況之輻射劑量：說明處置設施運轉及封閉後在正常狀況之輻射劑量評估結果，內容需包括：傳輸機制、情節分析、概念模式、評估模式與程式、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>3. 正常狀況之輻射劑量：說明處置設施運轉及封閉後在正常狀況之輻射劑量評估結果，內容需包括：傳輸機制、情節分析、概念模式、評估模式與程式、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>(1) 正常情節(或稱設計情節)分析需選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、事件及作用等組合(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)，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</p>	<p>(1) 正常情節(或稱設計情節)分析需選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、事件及作用(<u>FEPs</u>)等組合通用表，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 FEPs 通用表篩選出與該處置場正常情</p>

原文	修訂條文
<p>出與該處置場正常情況相關的 FEP，並記錄任何 FEP 被排除的原因。</p>	<p>況相關的 FEPs，並記錄任何 FEPs 被排除的原因。</p>
<p>(2) 分析出處置系統的重要組件，並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件將經常與緩慢發生的事件、及各重要組件間的互相作用過程。</p>	<p>(2) 分析出處置系統的重要組件，並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件將經常與緩慢發生的事件、及各重要組件間的互相作用過程，<u>及其對於降低處置單元水滲透與工程障壁遲滯功能等，於三、(一) 設計目標與功能需求所述處置系統功能之影響。</u></p>
<p>(3) 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) 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>(4) 處置設施運轉及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制，包含地下水、空氣、地表水、生物及其他傳輸機制。各傳輸機制均需說明，處置單元中重要核種藉由環境介質外釋之位置與量化特性、核種於環境介質中之傳輸特性、環境介質於處置障壁系統之通量分布特性、核種外釋至生物圈之位置與傳輸特性、植物、生物或人類活</p>	<p>(4) 處置設施運轉及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制，包含地下水、空氣、地表水、生物及其他傳輸機制。各傳輸機制均需說明，處置單元中重要核種藉由環境介質外釋之位置與量化特性、核種於環境介質中之傳輸特性、環境介質於處置障壁系統之通量分布特性、核種外釋至生物圈之位置與傳輸特性、植物、生物或人類活</p>

原文	修訂條文
動對於核種傳輸機制與途徑之可能影響。	動對於核種傳輸機制與途徑之可能影響。
(5) 處置設施運轉及封閉後在正常狀況之直接輻射評估需包含：廢棄物運送車輛之加馬輻射、場址運轉時之加馬輻射、主動監管期間處置單元之加馬輻射、及場址地表或建物之加馬輻射。	(5) 處置設施運轉及封閉後在正常狀況之直接輻射評估需包含：廢棄物運送車輛之加馬輻射、場址運轉時之加馬輻射、主動監管期間處置單元之加馬輻射、及場址地表或建物之加馬輻射。
(6) 如有預期將發生生物活動導致核種傳輸，需定義並定量直接經由生物途徑將核種外釋及傳輸至場址外，如穴居動物由場址帶走污染物後，被獵人宰食。	(6) 如有預期將發生生物活動導致核種傳輸，需 <u>說明其</u> 生物活動特性，及其核種外釋量與傳輸至場址外之 <u>傳輸途徑與輻射強度</u> 。
(7) 說明正常情節輻射劑量評估程式、輸入資料、輸出資料、輻射劑量評估結果。	(7) 說明正常情節輻射劑量評估程式、輸入資料、輸出資料、輻射劑量評估結果。
(8) 對正常情節輻射劑量評估程式的參數進行敏感度分析，依參數分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。	(8) 對正常情節輻射劑量評估程式的參數進行敏感度分析，依參數分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。
4. 異常狀況之輻射劑量：說明處置設施運轉及封閉後在異常狀況之輻射劑量評估結果，內容需包括：傳輸機制、情節分析、概念模式、評估模式與程式、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。	4. 異常狀況之輻射劑量：說明處置設施運轉及封閉後在異常狀況之輻射劑量評估結果，內容需包括：傳輸機制、情節分析、概念模式、評估模式與程式、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。
(1) 異常情節(或稱替代情節)分析需選用國際常用的低放	(1) 異常情節(或稱替代情節)分析需選用國際常用的低放

原文	修訂條文
<p>射性廢棄物處置的特徵、事件及作用等組合(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)，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 FEP，並記錄任何 FEP 被排除的原因。</p>	<p>射性廢棄物處置的特徵、事件及作用等組合(FEP<sub>s</sub>)通用表(如 IAEA 或國際組織)，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<sub>s</sub>通用表篩選出與該處置場正常情況相關的 FEP<sub>s</sub>，並記錄任何 FEP<sub>s</sub>被排除的原因。</p>
<p>(2) 分析出處置系統的重要組件，並說明重要組件的特徵、異常情況下重要組件將發生的事件、及各重要組件間的互相作用過程。</p>	<p>(2) 分析出處置系統的重要組件，並說明重要組件的特徵、異常情況下重要組件將發生的事件、及各重要組件間的互相作用過程，<u>及其對於降低處置單元水滲透與工程障壁遲滯功能等，於三、(一) 設計目標與功能需求所述處置系統功能之影響。</u></p>
<p>(3) 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，分析出放射性核種傳輸的路徑，並建構異常情節。</p>	<p>(3) 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，分析出放射性核種傳輸的路徑，並建構異常情節。</p>
<p>(4) 處置設施運轉期及封閉後之意外事故或異常狀況預測，需包括事故或事件種類及發生頻率，並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>(4) 處置設施運轉期及封閉後之意外事故或異常狀況預測，需包括事故或事件種類及發生頻率，並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>(5) 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分析模式與選用之電腦程式，該程式需經過專</p>	<p>(5) 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分析模式與選用之電腦程式，該程式需經過專</p>

原文	修訂條文
業之驗證及確認後方能使用於此評估報告。	業之驗證及確認後方能使用於此評估報告。
(6) 說明異常情節輻射劑量評估程式、輸入與輸出資料，考量事件發生的機率，提出民眾與工作人員之輻射劑量評估結果。	(6) 說明異常情節輻射劑量評估程式、輸入與輸出資料，考量事件發生的機率，提出民眾與工作人員之輻射劑量評估結果。
(7) 對異常情節輻射劑量評估程式的參數進行敏感度分析，依參數分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。	(7) 對異常情節輻射劑量評估程式的參數進行敏感度分析，依參數分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。
5. 核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制：核種外釋之傳輸機制可能包括地下水、空氣、地表水或其他途徑，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，所需說明項目至少包含：	5. 核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制：核種外釋之傳輸機制可能包括地下水、空氣、地表水或其他途徑，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，所需說明項目至少包含：
(1) 核種藉地下水傳輸之模式與評估：說明所建構之水文地質模型與假設、地下水之流場、流速與流向分布與數值、長期氣候變動現象對地下水流之影響、潛在的核種遷移地下水途徑、人類或生物圈可能接觸到地下水位置與核種濃度、場界位置之核種濃度、及可能稀釋地下水的地表水流量。	(1) 核種藉地下水傳輸之模式與評估：說明所建構之水文地質模型與假設、地下水之流場、流速與流向分布與數值、長期氣候變動現象對地下水流之影響、潛在的核種於地下水之遷移途徑、人類或生物圈可能接觸到地下水位置與核種濃度、場界位置之核種濃度、及可能稀釋地下水的地表水流量。
(2) 核種藉空氣傳輸之模式與評估：說明評估大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣所使用的概念模式、程式、參數與評估結果，包含：放射性核種釋出之時	(2) 核種藉空氣傳輸之模式與評估：說明評估大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣所使用的概念模式、程式、參數與評估結果，包含：放射性核種釋出之時

原文	修訂條文
<p>間與頻率變化、放射性核種釋出高度、放射性污染源之幾何形狀、再懸浮射源之排放率及基準、考量射源與監測點間之地形及結構之影響、鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度、放射性污染雲煙濃度的計算方式、處置場址中心十六個 22.5 徑度扇形區域中之各區域人口分佈、空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率、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、空浮的表面沉積濃度與場址外的個人劑量。</p>	<p>間與頻率變化、放射性核種釋出高度、放射性污染源之幾何形狀、再懸浮射源之排放率及基準、考量射源與監測點間之地形及結構之影響、<b>關</b>鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度、放射性污染雲煙濃度的計算方式、處置場址中心十六個 22.5 徑度扇形區域中之各區域人口分<b>布</b>、空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率、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、空浮的表面沉積濃度與場址外的個人劑量。</p>
<p>(3) 核種藉地表水傳輸之模式與評估：說明評估地表水所有可能核種遷移途徑之概念模式、程式、參數與評估結果，包含：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水流與傳輸模式、地表水水流與傳輸模式、與地下水界面之源/匯項、地表水之核種釋出速率、經地表水水流與傳輸模式計算所得劑量評估結果。</p>	<p>(3) 核種藉地表水傳輸之模式與評估：說明評估地表水所有可能核種遷移途徑之概念模式、程式、參數與評估結果，包含：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水流與傳輸模式、與地下水界面之源/匯項、地表水之核種釋出速率、經地表水水流與傳輸模式計算所得劑量評估結果。</p>
<p>(4) 其他傳輸機制之模式與評估：說明評估直接輻射、向天輻射與生物傳輸之概念模式、程式、參數與評估結果，包含：加馬輻射的曝露模式、運轉期間場</p>	<p>(4) 其他傳輸機制之模式與評估：說明評估直接輻射、向天輻射與生物傳輸之概念模式、程式、參數與評估結果，包含：加馬輻射的曝露模式、運轉期間場</p>



原文	修訂條文
<p>外的個人曝露、主動監管期間來自場址土壤的直接輻射、被動監管期間須考量人員無意闖入的劑量分析，可包括農耕、居住、鑽井或其他合理可預見的活動。</p>	<p>外的個人曝露、主動監管期間來自場址土壤的直接輻射、被動監管期間須考量人員無意闖入的劑量分析，可包括農耕、居住、鑽井或其他合理可預見的活動。</p>
<p>6. 述明各種傳輸機制評估結果，於運轉期間正常情節工作人員最大個人劑量，需小於游離輻射防護安全標準之職業輻射年有效劑量。於運轉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>6. 述明各種傳輸機制評估結果，於運轉期間正常情節工作人員最大個人劑量，<b>不得超過</b>游離輻射防護安全標準之職業輻射年有效劑量。於運轉與封閉後正常情節場外一般民眾最大個人劑量，<b>不得超過</b>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，<b>設施</b>外一般民眾年有效劑量，不得超過 0.25 毫西弗。</p>
<p>(二)設備操作：</p> <p>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。</p>	<p>(二)設備操作：</p> <p>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。</p>
<p>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。</p>	<p>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。</p>
<p>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。</p>	<p>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。</p>
<p>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。</p>	<p>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。</p>

原文	修訂條文
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。	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。
<p>(三)闖入者防護：</p> <p>描述處置設施營運中、封閉後，防止無意闖入者接近廢棄物所採行之防護設計、措施與功能，需包含：</p>	<p>(三)闖入者防護：</p> <p>描述處置設施營運中、封閉後，防止無意闖入者接近廢棄物所採行之防護設計、措施與功能，需包含：</p>
1. 說明處置場界圍籬與標示的材質、維護、設置方法，及確保其功能可維持至處置場免於監管之方法。	1. 說明處置場界圍籬與標示的材質、維護、設置方法，及確保其功能可維持至處置場免於監管之方法。
2. C類廢棄物處置位置、深度、障壁材質、設計、施工方法，及評估防止入侵者障壁系統在場址封閉後可保持 500 年功能性。	2. C類廢棄物處置位置、深度、障壁材質、設計、施工方法，及評估防止入侵者障壁系統在場址封閉後之功能性。
<p>(四)長期穩定性：</p> <p>1. 說明處置設施之侵蝕防護設計與評估，至少需包含：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、洪水侵蝕的地形變遷、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量、設計洪水量、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、侵蝕防護的耐久性等。</p>	<p>(四)長期穩定性：</p> <p>1. 說明處置設施之侵蝕防護設計與評估，至少需包含：降水量、降水損失、逕流反應特性、渠道洪水聚積、洪水侵蝕的地形變遷、水位分析、流速分析、處置場的最大可能洪水量、設計洪水量、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、隧道洞口段上方邊坡的侵蝕防護、侵蝕防護的耐久性等。</p>
2. 說明處置場各類邊坡設計與穩定性評估，至少需包含：	2. 說明處置場各類邊坡設計與穩定性評估，至少需包含：

原文	修訂條文
<p>(1) 場址地質對於穩定性可能的影響、場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、邊坡穩定性材料與土壤參數、邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、邊坡使用借土材料的特性、夯實工作與夯實後材料的強度、邊坡所採用之土壤與岩石參數、邊坡靜態穩定性分析、地震及地層移動的邊坡動態穩定性分析、場址下方土壤液化分析。</p>	<p>(1) 場址地質對於穩定性可能的影響、場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、<u>材料與地質構造特性</u>、區域的地下水位面位置以及變動範圍、使用的借土材料特性、<u>夯實工作與夯實後的材料特性</u>、<u>土壤與岩石參數</u>、邊坡靜態穩定性分析、地震及地層移動的邊坡動態穩定性分析、場址下方土壤液化分析。</p>
<p>(2) 需說明場址調查所遵循之大地工程專業規範、借土材料選用、開挖與夯實等施工作業之施工規範與品管計畫。</p>	<p>(2) 需說明場址調查所遵循之大地工程專業規範、借土材料選用、開挖與夯實等施工作業之施工規範與品管計畫。</p>
<p>3. 說明處置場之地層沉陷與下陷評估，至少需包含：場址地層特性、處置場各時期之開挖作業相關資訊、長期可能發生沉陷區域之模擬與分析、沉陷監控與改善計畫。</p>	<p>3. 說明處置場之地層沉陷評估，至少需包含：場址地層特性、處置場各時期之開挖作業相關資訊、長期可能發生沉陷區域之模擬與分析、沉陷監控與改善計畫。</p>
<p>4. 說明處置場長期環境演變對處置設施穩定性之影響評估，至少需包含：場址地層特性、場址地球化學環境特性、處置場各時期之開挖作業相關資訊、海平面上升或下降速率推估、長期可能發生抬升區域之模擬與分析、海平面升降對處置設施穩定性之影響評估、地</p>	<p>4. 說明處置場長期環境演變對處置設施穩定性之影響評估，至少需包含：場址地層特性、場址地球化學環境特性、處置場各時期之開挖作業相關資訊、海平面上升或下降速率推估、長期可能發生抬升區域之模擬與分析、海平面升降對處置設施穩定性之影響評估、地</p>

原文	修訂條文
<p>球化學環境可能對工程障壁之長期影響分析。</p>	<p>球化學環境可能對工程障壁之長期影響分析。</p>
<p>5. 說明處置場各類坑道設計與穩定性評估，至少需包含：</p> <p>(1) 坑道沿線地層分布、不連續面與地質破裂帶的調查方法與評估結果、開挖擾動範圍之圍岩特性與參數變異程度、岩石強度弱化與岩體依時變形特性評估、坑道支撐材料的特性與強度、坑道穩定性分析之靜態與動態分析。</p>	<p>5. 說明處置場各類坑道設計與穩定性評估，至少需包含：</p> <p>(1) 坑道沿線地層分布、不連續面與地質破裂帶的調查方法與評估結果、開挖擾動範圍之圍岩特性與參數變異程度、岩石強度弱化與岩體依時變形特性評估、<u>坑道支撐材料的特性、坑道穩定性分析之靜態與動態分析。</u></p>
<p>(2) 說明坑道開挖期間之圍岩變位監測與滲水監測規劃、運轉期間坑道結構穩定性監測與坑道結構強化改善規劃，及前述監測與維護紀錄可供未來處置設施封閉時，圍岩力學特性與水力學特性相互驗證依據之作業規劃。</p>	<p>(2) 說明坑道開挖期間之圍岩變位監測與滲水監測規劃、運轉期間坑道結構穩定性監測與坑道結構強化改善規劃，及前述監測與維護紀錄可供未來處置設施封閉時，圍岩力學特性與水力特性相互驗證依據之作業規劃。</p>
<p>6. 說明工程障壁系統設計與穩定性評估，至少需包含：</p> <p>(1) 場址環境特性對於工程障壁系統穩定性可能的影響、工程障壁各單元之設計強度與材料特性、所採用之工程設計參數、靜態與動態穩定性分析、材料劣化分析等，述明綜合考量之工程障壁穩定性評估結果。</p>	<p>6. 說明工程障壁系統設計與穩定性評估，至少需包含：</p> <p>(1) 場址環境特性對於工程障壁系統穩定性可能的影響、工程障壁各單元之設計強度與材料特性、所採用之工程設計參數、靜態與動態穩定性分析、材料劣化分析等，述明綜合考量之工程障壁穩定性評估結果。</p>
<p>(2) 需說明工程材料選用與施工作業之施工規範與品管計畫。</p>	<p>(2) 需說明工程材料選用與施工作業之施工規範與品管計畫。</p>

## 第七章 結論與建議

1. 比較瑞典 SR-PSU 場址技術報告 TR-14-01 與國內「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告(LLWD 2016)」之參考演化案例，溫室氣體排放量為未來氣候演化之重要指標，為減少未來氣候演化之不確定性，瑞典 SR-PSU 報告提出延伸全球暖化氣候案例、全球暖化氣候案例及早期冰緣氣候案例三種假設，而 LLWD2016 報告則提出參考演化一及參考演化二兩種假設案例。基本上 LLWD2016 報告中之參考演化一案例的溫室氣體排放量與 SR-PSU 報告中延伸全球暖化氣候案例相似，而參考演化二則可對應於早期冰緣氣候案例。為詳細探討參考演化對核種傳輸之關鍵資訊，LLWD2016 報告提出氣候演化、地表生態系統、力學作用演化、水文地質演化、地球化學演化及工程障壁演化 6 項評估項目，而 SR-PSU 則提出 9 項，將相似項目互相對應後，LLWD2016 不考慮熱流演化之評估。
2. 瑞典 SR-PSU 報告與 LLWD2016 報告參考演化最大差異在於瑞典場址所在環境具有永凍土存在，而台灣地區則因緯度較低無永凍土議題，故凍結深度、地下水結凍等，LLWD2016 報告中並無探討。此外，SR-PSU 報告於力學演化中提及之挖掘爆破、結構荷重等評估，於 LLWD2016 報告中並未提及，詳細比較如表 2.18 所示。整體而言，LLWD2016 報告的評估雖有提及台灣環境應注意之要項，但仍有精進空間。
3. 瑞典 SR-PSU 場址技術報告包含設計情節、替代情節、其他情節與剩餘情節，並於組合情節探討情節同時發生之概率，將違反安全功能之可能途徑、可能性較小之不確定性、不同障壁對處置場之保護能力等皆詳細探討，而 LLWD2016 報告中除設計情節外，將可能發生之不確定性因素以海平面演化、水力傳導係數改變，以及降雨量變化等進行組合，設為替代情節。相較於 LLWD2016，SR-PSU 報告含有較多樣化之情節設置，例如：高存量情節、高濃度錯合劑情節、處置場未封閉情節、氧化還原條件改變情節、吸附功能喪失之情節，以及各種鑽井存在之情節等，對未來演化情節探討亦更加全面。

4. 比較 SR-PSU 場址技術報告 TR-14-01 主要情節與 LLWD 2016 設計情節，在外部條件假設中，LLWD2016 報告因地制宜考慮地層抬升及地表侵蝕，其餘則與 SR-PSU 一致。而地質圈評估中，SR-PSU 報告與 LLWD2016 報告之相異處在於 LLWD2016 有評估地球化學演化，而 SR-PSU 僅評估地下水流場特性及力學作用。地表生態系統方面，SR-PSU 報告將人類與非人類群族的曝露個別提出探討，定義四種人類土地之利用方式，並詳細說明非人類之生物類型及數量參數來源，分析海洋、湖泊、溪流等生態系統之曝露，而 LLWD2016 報告中僅探討發展一級產業的人類可能曝露之途徑。
5. 本年度所完成的設計情節之核種傳輸模擬技術，係根據去年度所建置之近岸坑道處置多子核種長期安全驗證之近場與遠場整合數值模擬技術進行改良，透過合併近場(處置設施)與近場(處置坑道)的方式，降低不同尺度網格銜接次數，減免數值誤差產生，並藉由其流場模擬得知，近場地下水流速約為  $1.4E-06 \sim 7.53E-06$  (m/day)，與去年度模擬之近場地下水流速屬相同數量級，多子核種傳輸模擬結果則顯示，工程障壁吸附功能較佳且半衰期較短之核種，自近場處置設施外釋至地質圈之濃度遠低於  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{129}\text{I}$ ，而遠場地質圈之多子核種傳輸模擬結果則顯示， $^{14}\text{C}$  核種在處置設施封閉後 100 年至 1,000 年間擁有最高濃度占比，而  $^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$  則於 10,000 年~100,000 年間占有最高濃度外釋比。
6. 設計情節核種傳輸驗證比較本研究與 LLWD2016 之場址尺度流場模擬結果，如表 4.9 所示，本研究地質圈地下水流速與 LLWD2016 相差約 0~1 個數量級，而近場處置設施流場則比較處置坑道之單位長度流量，本研究處置坑道單位長度流量與 LLWD2016 單位長度流量相差小於 1 個數量級，流場模擬趨勢相符。
7. 核種傳輸模擬驗證則採用關鍵核種濃度占比進行比較，本報告與 LLWD2016 之差異主要為源項金屬核種外釋率控制的有無，如不考慮金屬核種濃度占比本研究與 LLWD2016 在 5,000 年時皆以  $^{14}\text{C}$  與  $^{99}\text{Tc}$  最高，而外釋核種濃度比較中，本研究之金屬核種因未採用外釋率控制，故濃度較高，且  $^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$  因半衰期較長導致差異較大， $^3\text{H}$  則因半衰期極短，於本研究中峰值出現時

間較短，致使與 LLWD2016 差異較明顯，但濃度皆偏低，而其餘核種峰值出現時間較 LLWD2016 晚且濃度較低，濃度峰值差異約在 0~1 數量級之間。

8. 我國低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸模擬技術可透過考慮源項之細節(源項核種的衰變、金屬核種的釋出率、衰變鏈之完整性、廢棄物包件之局部鏽蝕)、海淡水交界面的影響、增進運算技術、資料品質之保證等進行精進。
9. 地球化學條件是影響核種傳輸遲滯參數的重要因素之一，審查導則在場址特性描述章節之地球化學部分也強調其重要性，因此在安全評估章節應增加考慮場址地球化學演化對核種傳輸遲滯參數影響之文字，以呼應場址描述章節要求要項。



## 參考文獻

1. 台灣電力公司，2017a，LLWD1-SC-2016-02-V06-低放射性廢棄物最終處置技術評估報告。
2. 台灣電力公司，2017b，關鍵核種篩選報告(106年版)。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
9. 李明旭、陳瑞昇，2016，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，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，104FCMA019。
10. 李明旭，2017，低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關建課題研析子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證技術研究，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，105FCMA011。
11. 李明旭，2018，低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之驗證評估研究

- 子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證評估之研究，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，107FCMA002。
12. 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。
  13. 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研究報告，99FCMA003。
  14. 國家災害防救科技中心，2011，台灣氣候變遷科學報告 2011。
  15. 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研究報告，100FCMA007。
  16. 經濟部，2011，低放射性廢棄物最終處置設施場址選擇小組-建議候選場址遴選報告。
  17. 經濟部水利署，2015，中華民國 103 年台灣水文年報第二部分—河川水位及流量。
  18. 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。
  19. 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。
  20. 羅欣蕙，2011，低放射性廢棄物障壁混凝土受氯離子入侵之劣化及預估研究，碩士論文，國立中央大學。
  21. Abarca E, Idiart A, de Vries L M, Silva O, Molinero J, von Schenck H, 2013. Flow modelling on the repository scale for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  22. Andersson E (ed), 2010. The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SKB TR-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  23. Archer D, Eby M, Brovkin V, Ridgwell A, Cao L, Mikolajewicz U, Caldeira K, Matsumoto K, Munhoven G, Montenegro A, Tokos K, 2009. Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 37.
  24. Beresford N A, Barnett C L, Howard B J, Scott W A, Brown J E, Copplestone D, 2008. Derivation of transfer parameters for use within the ERICA Tool and the

- default concentration ratios for terrestrial biota. *Journal of Environmental Radioactivity* 99.
25. Biosphere synthesis report, 2014. Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  26. Birgersson M, Hedström M, Karnland O, 2011. Sol formation ability of Ca/Na-montmorillonite at low ionic strength. *Physics and Chemistry of the Earth*.
  27. Birgersson M, Karnland O, Nilsson U, 2010. Freezing of bentonite. Experimental studies and theoretical considerations. SKB TR-10-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  28. Börgesson L, Åkesson M, Kristensson O, Malmberg D, Birgersson M, Hernelind J, 2014. Modelling of critical H-M processes in the engineered barriers of SFR. SKB TR-14-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  29. Bruno J, Alexander R, Van Loon L, Thorne M, 2013. The potential radionuclide migration role of bitumen colloids at SFR. SKB P-13-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  30. Brydsten L, Strömberg M, 2010. A coupled regolith-lake development model applied to the Forsmark site. SKB TR-10-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  31. Climate report, 2014. Climate and climate related issues for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  32. Cronstrand P, 2014. Evolution of pH in SFR 1. SKB R-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  33. Duro L, Grivé M, Domènech C, Román-Ross G, Bruno J, 2012. Assessment of the evolution of the redox conditions in SFR 1. SKB TR-12-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  34. Georgiev G, 2013. A seismic evaluation of SFR. Analysis of the Silo structure for earthquake load. SKB R-13-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  35. Geosphere process report, 2014. Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  36. Höglund L O, 2014. The impact of concrete degradation on the BMA barrier functions. SKB R-13-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  37. Holmén J G, Stigsson M, 2001. Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  38. IPCC, 2013. Climate change 2013: the physical science basis: summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of

- the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: <http://www.ipcc.ch>.
39. JAEA, 2013, Development of the Assessment Tool for Groundwater Scenario concerning Sub-surface Disposal.
  40. Keith-Roach M, Lindgren M, Källström K, 2014. Assessment of complexing agent concentrations in SFR. SKB R-14-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  41. Mas Ivars D, Ríos M V, Shiu W, Johansson F, Fredriksson A, 2014. Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark. SKB R-13-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  42. Moreno L, Neretnieks I, 2013. Impact of gas generation on radionuclide release – comparison between results for new and old data. SKB P-13-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  43. Odén M, Follin S, Öhman J, Vidstrand P, 2014. SR-PSU Bedrock hydrogeology. Groundwater flow modelling methodology, setup and results. SKB R-13-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  44. Öhman J, Follin S, Odén M, 2014. SR-PSU Hydrogeological modelling. TD11 – Temperate climate conditions. SKB P-14-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  45. Pettersson M, Elert M, 2001. Characterisation of bituminised waste in SFR 1. SKB R-01-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  46. Savage D., and Benbow S., 2007, Low-pH Cements, SKI Report 2007:32, Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI).
  47. SKB, 2008, Safety analysis SFR 1: Long-term safety, SKB R-08-130, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  48. SKB, 2014a. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  49. SKB, 2014b, Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, TR-14-04.
  50. SKB, 2014c, Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-05.
  51. SKB, 2014d, Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU, TR-14-09.
  52. SKB, 2014e, Flow and transport modelling on the vault scale -Supporting calculations for the safety assessment SR-PSU, SKB R-14-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  53. Sohlenius G, Strömberg M, Hartz F, 2013. Depth and stratigraphy of regolith at

- Forsmark. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
54. Van Loon L R, Glaus M A, 1998. Experimental and theoretical studies on alkaline degradation of cellulose and its impact on the sorption of radionuclides. PSI Bericht 98-07, Paul Scherrer Institute, Switzerland. Also published as Nagra Technical Report NTB 97-04, Nagra, Switzerland.
  55. Vidstrand P, Follin S, Selroos J-O, Näslund J-O, 2014. Groundwater flow modeling of periods with periglacial and glacial climate conditions for the safety assessment of the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden. *Hydrogeology Journal* 22.
  56. Vidstrand P, Follin S, Selroos J-O, Näslund J-O, Rhén I, 2013. Modeling of groundwater flow at depth in crystalline rock beneath a moving ice-sheet margin, exemplified by the Fennoscandian Shield, Sweden. *Hydrogeology Journal* 21.
  57. Vidstrand P, Follin S, Zucec N, 2010. Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Forsmark. SKB R-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  58. Werner K, Sassner M, Johansson E, 2013. Hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark – synthesis for the SR-PSU project. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  59. 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.
  60. Yu, S.B., Chen, H.Y., Kuo, L.C., 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*.

## 附件一 期末報告審查意見與答覆說明

108 年低放射性廢棄物處置安全評估驗證技術研究		
子計畫四：低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節核種傳輸驗證技術研究		
項次	審查意見	委辦單位答覆說明
1	整體進度符合契約要求。	感謝委員肯定。
2	相關參考文獻如有電子檔部分，請於成果報告光碟中一併提供。	謹遵辦理。
3	在 10,000 至 100,000 年間外釋比最高者為 $^{59}\text{Ni}_{\text{metal}}$ ，但依表 3.13，在此期間內，剩餘之關鍵核種 $^{99}\text{Tc}$ 並非全程皆擁有最高濃度。請修正相關描述。	感謝委員糾正，已將內容修訂為「剩餘之關鍵核種中則以 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{14}\text{C}$ 擁有最高濃度占比。」
4	請修正「悲觀的」為「保守的」。	感謝委員意見，已修正為「設計情節係依據參考演化所推測出最可能之外部條件輔以現實或保守的內部條件」。
5	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 第 109 頁第 7 行，請修正「本章節」為「本章」。</li> <li>2. 第 109 頁第 17 行，本行最末句描述不完整，請補充修正。</li> <li>3. 第 110 頁第 4 行，「具現化」似非正確描述，請修正。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員意見，已修正為「本章彙整上述所發展技術與研析報告結果」。</li> <li>2. 感謝委員指正，已補充說明為「廢棄物包件局部鏽蝕在模擬技術上如何細部進行處理，亦為現階段模擬技術尚未考慮的部分」。</li> <li>3. 感謝委員意見，已修正為「但如要完整呈現近場之複雜處置構造」。</li> </ol>
6	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本章表格修正條文之修正內容均請加底線。</li> <li>2. 第 112 頁本文最末段之修</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員意見，已將條文之修正內容加底線。</li> <li>2. 感謝委員意見，第 112 頁本文最末段</li> </ol>

	<p>正，與第 113 頁表格之修正修文內容不符，請確認並修正。</p>	<p>之建議，修正後為「需評估處置設施工程障壁與場址天然障壁系統，於處置設施運轉與封閉後之地下水滲流、核種平流、擴散、延散、吸附及化學反應等特性參數，以模擬地下水滲流機制與核種傳輸特性，至少需說明下列項目：」。</p>
7	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 結論與建議 5.中之近場地下水流速係如何得出？在本報告各章節無法找到數字來源，請確認及修正。</li> <li>2. 第 126 頁之最末句語焉不詳，請修正。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 結論與建議 5.中之近場地下水流速係參照 3.4.1 流場模擬結果中第 82 頁第 4 行之內文「地下水流速約 1.4E-06 ~7.53E-06 (m/day)」。</li> <li>2. 感謝委員意見，修改為「9. 地球化學條件是影響核種傳輸遲滯參數的重要因素之一，審查導則在場址特性描述章節之地球化學部分也強調其重要性，因此在安全評估章節應增加考慮場址地球化學演化對核種傳輸遲滯參數影響之文字，以呼應場址描述章節要求要項。」</li> </ol>





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

108 年低放射性廢棄物處置安全評估  
驗證技術研究  
子計畫五：低放射性廢棄物近岸坑道處置設  
計情節之生物圈劑量評估驗證技術研究  
期末報告

計畫編號：108FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：林文勝

受委託機關(構)：中央大學

報告日期：中華民國 108 年 12 月

# 108 年低放射性廢棄物處置安全評估

## 驗證技術研究

### 子計畫五：低放射性廢棄物近岸坑道處置設計情節之生物圈劑量評估驗證技術研究

受委託單位：中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：林文勝

研究期程：中華民國 108 年 1 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 833,000 元(子計畫五經費)

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 108 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)

# 目 錄

摘要 .....	X
ABSTRACT .....	XI
1.前言 .....	1
1.1. 研究背景與目的.....	1
1.2. 低放射性廢棄物最終處置技術評估計畫 .....	2
2.低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究.....	7
2.1. 瑞典 SR-PSU 有關關鍵核種之篩選程序及方法.....	7
2.1.1. 放射性核種的篩選和劑量計算.....	7
2.1.2. 初始狀態報告與安全有關的核種.....	7
2.1.3. 與安全有關的子核種.....	9
2.1.4. 選定的放射性核種.....	10
2.1.5. 與以前的 SFR 評估所篩選核種進行比較 .....	10
2.1.6. 核種盤存量和輻射劑量隨著時間的變化.....	12
2.2. LLWD2016 有關關鍵核種篩選程序及結果.....	15
2.2.1. 低放射性廢棄物分類特性.....	17
2.2.2. 低放射性廢棄物處置關鍵核種.....	17
2.3. 國內外有關關鍵核種之篩選.....	21
2.3.1. 美國核能管制委員會所列之具代表性核種.....	21
2.3.2. 愛達荷國家工程與環境實驗室所列之具代表性核種 .....	22
2.3.3. 美國能源部低放射性廢棄物處置設施容量的報告所列之 具代表性核種.....	23
2.3.4. SKB 於 SAFE 計畫中篩選出重要核種 .....	23
2.3.5. 日本原子力安全委員會於 2006 年篩選關鍵核種 .....	24
2.3.6. 國內過去相關計畫篩選出重要核種.....	25
2.4. 本章小結.....	27
3.生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立.....	32
3.1. RESRAD 模式介紹.....	32
3.1.1. RESRAD 程式發展歷程.....	32
3.1.2. RESRAD 程式 (ONSITE 及 OFFSITE 模組) 介紹.....	33
3.1.3. RESRAD 程式理論 .....	35
3.1.4. 對人體之輻射劑量.....	36
3.1.5. 曝露途徑與曝露情境.....	38
3.2. RESRAD 生物圈劑量評估程式參數需求.....	48
3.2.1. RESRAD 程式參數需求.....	48
3.2.2. RESRAD 程式參數統計分布設定.....	82

3.2.3. RESRAD 參數資料調查使用手冊.....	83
3.3. LLWD2016 有關生物圈評估程式與參數.....	87
4.設計情節之生物圈劑量評估結果審驗.....	95
4.1. 遠場傳輸模式與 RESRAD-OFFSITE 模式串接 .....	95
4.2. 設計情節之生物圈劑量評估 .....	96
4.2.1. 達仁場址設計情節劑量.....	96
4.2.2. 烏坵場址設計情節劑量 .....	100
4.3. 設計情節之生物圈劑量審驗結果分析 .....	104
4.3.1. 達仁場址生物圈劑量審驗結果分析.....	104
4.3.2. 烏坵場址生物圈劑量審驗結果分析.....	106
5.低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議.....	109
6.低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議.....	117
7.結論與建議.....	122
8.參考文獻.....	125

## 圖目錄

圖 1	美國 NRC 提出輻射劑量評估安全審查模式種類.....	5
圖 2	放射性核種的初始輻射劑量與半化期的關係(SKB, 2014F).....	8
圖 3	核種(含子核種)最大輻射劑量和初始輻射劑量間的差值(SKB, 2014F) .....	9
圖 4	在 SR-PSU 放射性核種傳輸計算中考慮的放射性核種衰變鏈(SKB, 2014F) .11	
圖 5	各個處置窖活度對總活度百分比隨時間變化(SKB, 2014F).....	13
圖 6	主要放射性核種活度對總活度百分比隨時間變化(SKB, 2014F).....	13
圖 7	各個處置窖劑量對總劑量百分比隨時間變化(SKB, 2014F).....	14
圖 8	主要放射性核種劑量對總劑量百分比隨時間變化(SKB, 2014F).....	14
圖 9	關鍵核種篩選條件與步驟.....	26
圖 10	RESRAD 程式近 30 年來發展示意圖 .....	33
圖 11	RESRAD 程式場址區域範圍設定輸入視窗 .....	48
圖 12	RESRAD 程式主要污染位置與遠場生物圈位置設定概念示意圖 .....	49
圖 13	RESRAD 程式地圖介面之主要污染、場外居住、井、表面水體、農田、地 下水流方向及指北針設定輸入視窗 .....	50
圖 14	RESRAD 資料庫中的核種列表及關鍵核種初始濃度設定輸入視窗 .....	51
圖 15	核種源項釋出至地下水釋出率與大氣沉降速度設定輸入視窗.....	52
圖 16	核種於九個區域(1.污染區域 2.未飽和區域 3.飽和區域 4.表面水體沉積物 5.水果、穀物、非菜葉類區域 6.菜葉類區域 7.牧草、青貯飼料種植區 8.牲 畜飼料餵養區 9.居住區)之分佈係數設定輸入視窗 .....	52
圖 17	核種劑量轉換及斜率因子設定輸入視窗 .....	53
圖 18	氫的劑量轉換因子及斜率因子設定輸入視窗 .....	54
圖 19	核種從土壤到植物的轉移因子設定輸入視窗 .....	55
圖 20	設定釋出途徑.....	56
圖 21	模式設定輸出顯示時間點輸入視窗 .....	57
圖 22	核種傳輸至食物或水被攝取、食用前之停留儲蓄時間輸入視窗.....	57
圖 23	降雨、風速及四個子區域之表單(污染區、農業區、牲畜飼養區、場外居住 區) 輸入視窗 .....	58
圖 24	主要污染區域之物理及水文資料設定輸入視窗 .....	59

圖 25	農業區與牲畜飼養區域之物理及水文資料設定輸入視窗 .....	62
圖 26	場外住宅區域之物理及水文資料設定輸入視窗 .....	63
圖 27	大氣傳輸參數設定輸入視窗 .....	64
圖 28	未飽和含水層參數設定輸入視窗 .....	66
圖 29	飽和含水層參數設定輸入視窗 .....	68
圖 30	水利用量參數設定輸入視窗 .....	69
圖 31	地表水參數設定輸入視窗 .....	70
圖 32	地下水參數設定輸入視窗 .....	71
圖 33	飲用水及食物攝取率參數設定與牲畜、牲畜飼養及植物因子輸入視窗 ....	73
圖 34	牲畜攝取設定輸入視窗 .....	74
圖 35	飼養因子設定輸入視窗 .....	75
圖 36	植物因子設定輸入視窗 .....	75
圖 37	吸入及外部伽馬設定輸入視窗 .....	76
圖 38	外部輻射形狀及面積因子設定輸入視窗 .....	77
圖 39	外部輻射形狀及面積因子設定改變主要污染形狀之輸入視窗 .....	78
圖 40	在處置場址主要污染區、場外住宅區與農地、牧場時間比例設定輸入視窗 .....	79
圖 41	氫資料設定輸入視窗 .....	80
圖 42	碳-14 資料設定輸入視窗 .....	81
圖 43	碳-12 資料設定輸入視窗 .....	81
圖 44	氫資料設定輸入視窗 .....	82
圖 45	A 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台電公司，2017B)...	88
圖 46	B、C 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台電公司，2017B) .....	88
圖 47	GOLDSIM 整體評估數值分析模型(台電公司，2017B).....	88
圖 48	近場、遠場與生物圈核種傳輸計算之模式與資料關聯圖 .....	95
圖 49	核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化(達仁河流域)(台電公司，2017B)	99
圖 50	核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化(塔瓦河流域)(台電公司，2017B)	99
圖 51	陸域生活型態之生物圈核種傳輸示意(台電公司，2017B).....	100
圖 52	設計情節下之個人年有效劑量評估結果(達仁河流域)(台電公司，2017B)	

.....	100
圖 53 設計情節下之個人年有效劑量評估結果(塔瓦溪流域)(台電公司，2017B)	100
.....	100
圖 54 核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化(烏坵)(台電公司，2017B).....	103
圖 55 島嶼型地表生態系統核種傳輸示意(台電公司，2017B).....	103
圖 56 設計情節下之劑量評估結果(烏坵場址)(台電公司，2017B).....	104
圖 57 設計情節下之個人年有效劑量審驗(達仁溪流域).....	105
圖 58 設計情節下之個人年有效劑量審驗(塔瓦溪流域).....	105
圖 59 設計情節下之之個人年有效劑量審驗 (烏坵場址).....	107
圖 60 BIOMASS 生物圈劑量評估技術發展的流程圖.....	111
圖 61 BIOMASS 生物圈劑量評估方法路徑圖.....	116



## 表目錄

表 1	用於放射性核種傳輸模擬計算之篩選核種(SKB, 2014F) .....	10
表 2	SFR 評估過程之放射性核種選取比較(包括：SAFE, SAR-08 和 SR-PSU) (SKB, 2014F).....	12
表 3	低放射性廢棄物分類數量估算 .....	15
表 4	A 類與 B、C 類低放廢棄物之核種濃度初始值設定表 .....	16
表 5	A 類低放廢棄物各核種於不同時期下之劑量比排序(台電公司，2017B).....	19
表 6	B、C 類低放廢棄物各核種於不同時期下之劑量比排序(台電公司，2017B)..	20
表 7	低放射性廢棄物關鍵核種(台電公司，2017B).....	21
表 8	單一長半化期核種濃度值 .....	21
表 9	單一短半化期核種濃度值 .....	22
表 10	美國 INEEL 篩選之關鍵核種列表.....	22
表 11	美國 DOE 報告於 2000 年篩選之關鍵核種列表.....	23
表 12	瑞典 SKB 報告篩選之關鍵核種列表.....	24
表 13	日本原子力安全委員會篩選之關鍵核種列表.....	25
表 14	國內過去相關計畫篩選之關鍵核種列表.....	25
表 15	不同來源之低放廢棄物關鍵核種列表.....	26
表 16	比較國內外關鍵核種篩選結果.....	29
表 17	RESRAD 劑量轉換因子(DCFs).....	42
表 18	RESRAD 劑量轉換因子(表 15 續).....	43
表 19	RESRAD 劑量轉換因子 .....	44
表 20	RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子 .....	45
表 21	RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子(表 18 續).....	46
表 22	RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子(表 18 續).....	47
表 23	RESRAD 程式之地圖介面圖示 .....	50
表 24	機率密度函數之參數設定 .....	83
表 25	RESRAD 模組參數輸入及詳細說明之章節編號位置.....	85
表 26	劑量轉換因子(台電公司，2017B).....	89
表 27	農作物和畜產品的遷移因子(台電公司，2017B).....	90

表 28	水產品的濃縮係數(台電公司，2017B).....	91
表 29	生物圈相關參數(台電公司，2017B).....	92
表 30	RESRAD-OFFSITE 輸入檔特性描述.....	96
表 31	RESRAD-OFFSITE 模式模擬烏坵場址之 Ni-59 及 U-233 劑量 .....	106
表 32	烏坵場址有關核種釋出至生物圈之衰變後子核種.....	108

## 摘要

本計畫蒐集低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估技術報告(LLWD2016)，與瑞典 SR-PSU TR-14-09 技術報告有關關鍵核種之篩選程序及方法並進行研究，摘述 LLWD2016 有關關鍵核種篩選程序及結果，與國內外有關關鍵核種篩選比較，進行低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究。探討 RESRAD 生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立。對於 LLWD2016 有關之設計情節，於生物圈劑量評估結果進行審驗。最後並提出我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議，與提出我國低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議。研究結果綜合比較國內外關鍵核種篩選結果，建議可針對 SR-PSU 作業方法，根據放射性核種的半化期為 10 年或更長，並且在處置場封閉時核種對於人類的輻射劑量超過 10 mSv 之兩個標準，進行放射性核種篩選。本研究再進行 RESRAD 生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立，及進行 LLWD2016 有關之設計情節審驗工作，結果顯示達仁溪流域下游之關鍵群體最大個人年有效劑量約為  $4.3 \times 10^{-4}$  mSv，發生時間為場址封閉後約 5,100 年之時間；塔瓦溪下游之最大個人年有效劑量約為  $5.0 \times 10^{-4}$  mSv，發生時間為場址封閉後約 5,200 年，主要之劑量來源核種均為 C-14。烏坵關鍵群體之最大個人年有效劑量約為  $4.2 \times 10^{-6}$  mSv，發生時間為場址封閉後約 18,000 年之時間，主要之劑量來源核種為 C-14，前述之最大個人年有效劑量均小於 0.25 mSv。建議採取 BIOMASS 生物圈劑量評估步驟，建立放射性核種釋出數值模型，依據水文條件及生物圈之地景及氣候演變發展，建立生物圈安全評估之步驟及流程。

## ABSTRACT

This project collects and studies the biosphere safety assessment technical report (LLWD2016) of low-level radioactive waste in tunnel disposal, and the screening procedures and methods of key nuclides related to SR-PSU TR-14-09 technical report in Sweden, summarizes the screening procedures and results of key nuclides related to LLWD 2016, and compares with the screening of key nuclides in domestic and foreign results to conduct the dose of key nuclides for the safety assessment of low-level radioactive waste in tunnel disposal. To explore the numerical model technology and parameter establishment of RESRAD biosphere dose assessment code. For the design scenario related to LLWD2016, the biosphere dose assessment results were reviewed. Finally, suggestions on the development of biosphere dose assessment technology for low-level radioactive waste in tunnel disposal are put forward, and suggestions on biosphere dose assessment in terms of safety report review standards for low-level radioactive waste disposal are also put forward. The results of the study are compared with the screening results of key nuclides in domestic and foreign results. It is suggested that the SR-PSU method can be used as a reference for screening radionuclides according to the two standards: the half-life of radionuclides is 10 years or longer, and the dose of radionuclides for human exceeds 10 mSv when the disposal site is closed. The results show that the maximum individual annual effective dose of key groups in the lower reaches of Daren river basin is about  $4.3 \times 10^{-4}$  mSv, which occurs about 5100 years after the site is closed; the maximum individual annual effective dose in the lower reaches of Tawa river is about  $5.0 \times 10^{-4}$  mSv and occurred about 5200 years after the site is closed. The main source of dose was C-14. The maximum individual annual effective dose of key groups in Wuqiu is about  $4.2 \times 10^{-6}$  mSv, and the occurrence time is about 18000 years after the site is closed. The main source of dose is nuclide C-14. The above-mentioned maximum individual annual effective dose is less than 0.25 mSv. It is suggested that the biosphere dose assessment step of BIOMASS should be taken, the numerical model of radionuclide release should be established, and the biosphere safety assessment step and process should be established according to the hydrological conditions, the biosphere landscape and the climate evolution and development.

# 1. 前言

## 1.1. 研究背景與目的

低放射性廢棄物最終處置場，係篩選適當地質條件且社會大眾能接受的地區進行掩埋處置，以工程與天然地層母岩(Rock matrix)之材質所形成的多重障壁，來圍隔與遲滯核種的外釋與遷移，將低放射性廢棄物與人類生活環境之生物圈隔離起來，確保在足夠時間內使放射性核種的強度衰變減弱至對人類無害之劑量，防止重返及污染人類之生活環境。低放射性廢棄物最終處置場之多重障壁，係從廢棄物的固化桶開始，經由封裝的容器、固化桶包封模組、低滲透性高吸附性填充物、混凝土、回填材料等處置設施達到穩定阻滯核種的目的。經濟部已於 101 年 7 月 3 日核定公告「台東縣達仁鄉」南田村及「金門縣烏坵鄉」小坵村為建議候選場址，該部後續選址工作將進行地方溝通宣導、公投取得地方同意、地質探勘調查與辦理環境影響評估等作業。針對低放射性廢棄物處置場址輻射劑量評估安全審查，係為審照作業重要之程序過程。

為增進放射性廢棄物最終處置安全，近年來重要技術發展方向，依安全管制需求，須逐步建立相關安全管制技術規範及技術，使設施設計、安全評估及施工營運，能確保安全無虞。基此，在低放射性廢棄物最終處置安全管制技術規範的編訂方面，原能會物管局於 100 年度初步完成「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」。

為提升管制技術及持續精進管制規範，已於 102 年度起就低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究，透過蒐集、研析國際重要文獻及技術研發重點彙整，開始逐步建立 RESRAD 程式輻射劑量評估審查技術，再於 103 年度完成 RESRAD 程式參數需求研析、低放處置輻射劑量與風險評估技術文獻資訊研析、潛在處置場址輻射劑量與風險評估關鍵審查技術與方法研析、輻射劑量與風險評估整合管制技術研議。104 年度針對近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析、低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析、研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場及遠場全系統安全評估架構，相關成果回饋於「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」安全評估章節之精進建議。105 年度以瑞典 SR-PSU 安全評估計畫報告為基礎，針對國外放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術蒐集及彙整、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈劑量評估要項、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要項、提出低放射性

廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議。106 年度蒐集瑞典 SR-PSU 有關低放射性廢棄物坑道處置生物圈情節分析安全評估技術報告，以 R13-18 及 R14-02 報告，針對放射性核種於生物圈之特徵、事件與作用(FEPs)及生物圈情節分析審查技術進行研析。進行研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用、研析國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術、研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用(FEPs)與模式發展建議。107 年度以瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-06 所採用之生物圈安全評估整合分析技術為研析基礎，研析國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項(SKB, 2014a-g)，研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術，國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性探討，並對於我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項提出建議。本 108 年度以進行低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究、生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立、設計情節之生物圈劑量評估結果審驗，並提出我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議，與提出我國低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議。以提供物管局低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查之應用，以適時提升該項管制技術議題之技能與規範的精進。

## 1.2. 低放射性廢棄物最終處置技術評估計畫

台電公司於 106 年完成「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(106 年度)」及「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告(LLWD2016)」，已針對我國低放射性廢棄物最終處置之廢棄物特性、場址特徵化、處置設施概念設計、設施運轉、封閉監管與安全分析等處置相關工作，說明我國設置低放射性廢棄物最終處置設施所需之各項技術能力。完成「低放射性廢棄物最終處置技術評估」報告，並藉由國際同儕審查，提升處置技術評估之公信力，強化民眾與各界對於我國建置低放射性廢棄物最終處置設施之信心。(台電公司，2017a, 2017b)

其中有關技術建置計畫內容，包括：第一章簡介計畫背景，第二章「研究發展目標與架構」說明低放處置安全技術架構、各階段作業與確保安全目標、各階段作業技術開發目標與所需技術，第三章「準備階段工作與既有成果概述」說明準備階段低放處置工作推動架構以及既有與進行之低放處置技術建置成果，第四章「場址特性調查與特徵化技術」，第五章「處置設施工程設計技術」，第六章「安全分析技術」均依序就各該領

域技術面向說明 準備階段與調查階段所需技術項目以及關鍵技術建置路徑、工作 規劃、關鍵技術建置現況等，第七章「技術建置規劃」先就現階段技術狀況進行評估，包含「低放處置技術評估」計畫述及之不確定性評估與該報告國際同儕審查結論與建議。接續說明準備、調查與申照 3 階段處置技術關聯性，以及目前之技術建置執行狀況。說明現階段技術建置推動規劃。第八章為報告結論。(台電公司，2017a)

低放處置技術建置計畫之目的，在於確保低放處置各階段作業均可達成其確保安全之目標。低放處置初期階段之主要工作為 選定處置場址，其確保安全之首要考量為避開如活動斷層、火山 活動等自然現象明顯影響區域。進入場址調查階段後，透過調查與試驗分析等場址特徵化技術，進一步掌握環境現況與長期演化特性，據以執行處置設施設計與安全分析等工作。待確認整體安 全性並取得建造執照申請後，逐步進行設施興建、運轉、封閉與監管等各階段作業，並持續依所取得之最新資料檢核處置長期安全性。(台電公司，2017a)

同時期，台電公司亦已完成 LLWD2016，該報告透過處置場場址特徵化、工程概念設計與安全分析模擬技術之執行成果，說明目前之處置設施多重障壁系統設計概念，具有圍阻核種外釋與遲滯核種傳輸之安全功能，可盡量延長核種傳輸至生活圈的時間，並利用放射性活度隨時間遞減之特性，使放射性物質遷移到人類生活圈時，已衰變至對人類無害之程度。以「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2 處建議候選場址為分析對象，分別說明場址特徵化、處置設施概念設計與安全分析等作業之現階段做法與成果。(台電公司，2017b)

該 LLWD2016 亦針對我國低放射性廢棄物種類與特性進行說明，針對關鍵核種之篩選，以對人類健康潛在影響程度作為考量，其評估指標為對人類可能造成之年有效劑量(以下均指個人年有效劑量)。由於各核種活度將隨著衰變作用而遞減，不同時間點下，各核種對於年有效劑量之佔比亦有所不同。該報告依據核種源項特性，以及低放射性廢棄物分類特性之分析條件，假設處置場封閉後，處置窖內為充滿水的飽和情況，人類鑿井至處置深度，並直接飲用井水，以此情節評估不同類型低放廢棄物，於各不同時間下之核種劑量佔比排序。此外，處置設施封閉初期，關鍵核種清單包含初始活度較高且半化期短之核種，例如 Co-60。這些短半化期核種因衰變作用而隨時間逐漸減少，故隨著處置設施封閉後之時間增長，核種清單之短半化期核種將逐漸被長半化期核種取代。該報告依此原則篩選關鍵核種，以個人年有效劑量佔比超過 1%之核種聯集作為關鍵核種。



選出關鍵核種共 12 個，其中包括 2 個 TRU 核種，以及 1 個子核種。(台電公司，2017b)

該 LLWD2016 已建置設計情節，該情節發展需考量地質及氣候之作用與影響、處置設施的長期演化以及未來人類的活動，以未來較可能發生之條件進行假設。其中，在推演處置設施長期演化時，以處置設施的初始設計條件為基礎，評估其劣化狀況。並已對地表生態系統進行設計情節假設如下：

處置場封閉後 100,000 年內之氣候形態與現況差異不大，推估未來地表生態系統與現況相差不大，產業發展多以一級產業為主。故推測其生物圈為陸域生活型態，人類可能嚥入、吸入及曝露放射性核種之途徑。達仁鄉建議候選場址之關鍵群體生活模式推估，主要參考東部地區山區居民生活方式加以推演，其生活環境屬於無沖積層之山區地形，由於岩盤難以鑿井，故在自來水管網系統未達之地，多以簡易取水設施取用山泉水或野溪水。由於關鍵群體是推估將居住於溪流出口地區，其地勢較為平緩且適於農耕與養殖，故其生活用水、農業用水和養殖用水皆來自河水，不考量關鍵群體鑿井取水的情況。(台電公司，2017b)

在此氣候演化狀況下，氣候與海岸線並未劇烈變化，推估地表生態系統演化仍與現況相差不大，小坵島上居民僅在住家附近貧脊土地種植蔬菜自用，或是採集紫菜、釣魚、拾取風螺、抓螃蟹和小章魚等，作為日常食物來源。(台電公司，2017b)

低放射性廢棄物處置關鍵核種之篩選，關係到安全評估分析之源項核種之決定，及假設核種外釋設計情節之安全評估分析，更與生物圈劑量評估結果相關。由於核種活度將隨著衰變作用而遞減，不同時間點下，各核種對於年有效劑量之佔比亦有所不同。所以將針對低放射性廢棄物分類數量估算，核種源項特性進行瞭解，針對分析「低放射性廢棄物分類特性」，對於低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估進行研究。

目前經濟部已公布「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2 處建議候選場址，對於核種於生物圈之劑量評估，需對核種自處置設施外釋流經地質圈後，流至區域含水層，再依據飲水、攝取農作物、攝取畜產品、攝取養殖水產品、農耕時吸入粉塵、農耕時體外曝露等不同的曝露途徑，計算關鍵群體的輻射曝露劑量。本研究將分階段進行該 2 處建議候選場址於坑道處置之設計情節下生物圈劑量評估驗證技術，本年度將以「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2 處建議候選場址於設計情節之生物圈劑量評估驗證技術研究。

根據美國核能管制委員會於 2013 年 2 月 25 至 3 月 1 日在美國鳳凰城舉行之 Waste

Management 2013 研討會星期四上午舉辦之「Panel: Recent Developments and Trends in Integrated Risk Assessment Methods, Tools and Decision Analysis Support」。提出低放射性廢棄物最終處置輻射劑量評估安全審查模式主要為：GOLDSIM、RESRAD(ONSITE) 6.5 and RESRAD-OFFSITE、FRAMES and GENII 及 AMBER 模式，如圖 1 所示。將利用該劑量評估安全審查模式(如 RESRAD-OFFSITE)進行生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立、設計情節之生物圈劑量評估結果審驗，並提出我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議，與提出我國低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議。依據前述說明，子項計畫五將採用下列方法與工作項目推動今年度工作：

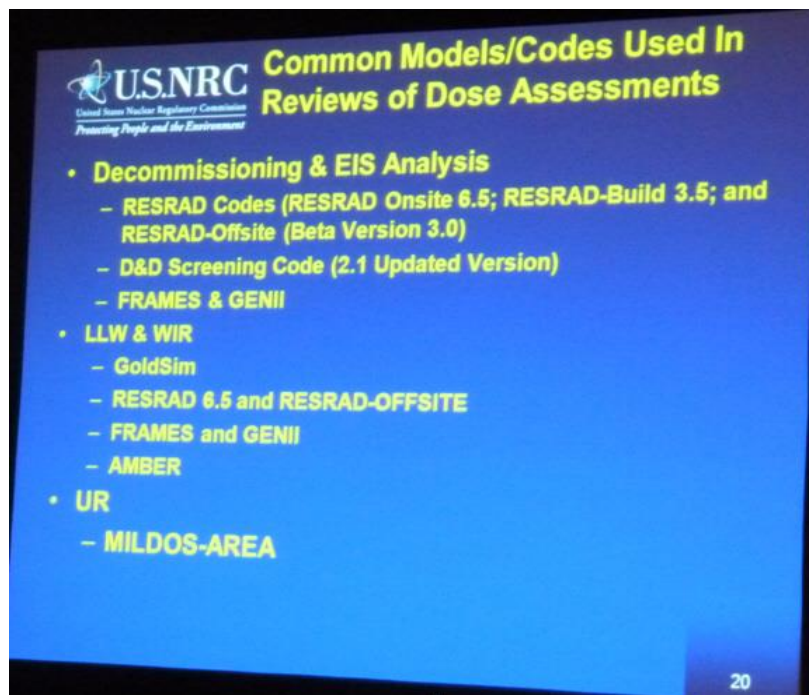


圖 1 美國 NRC 提出輻射劑量評估安全審查模式種類  
 (資源來源：於研討會現場 USNRC 簡報時拍攝) 其中 (WIR :  
 Waste materials incidental to reprocessing ; EIS :  
 Environmental impact statement)

1. 低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究

本項工作將針對低放射性廢棄物分類數量估算及核種源項特性進行瞭解，分析「低放射性廢棄物分類特性」，對低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估進行研究。

2. 生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立

本項工作將篩選生物圈劑量評估程式(RESRAD-OFFSITE)進行生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立，以進行低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑

量評估研究。

### 3. 設計情節之生物圈劑量評估結果審驗

核種自處置設施外釋流經地質圈之地下含水層後，將再遷移傳輸至生物圈。依據飲水、攝取農作物、攝取畜產品、攝取養殖水產品、農耕時吸入粉塵、農耕時體外曝露等不同的曝露途徑，可計算關鍵群體的輻射曝露劑量。建立設計情節下處置場封閉後人類可能嚥入、吸入及曝露放射性核種之途徑之生物圈劑量評估結果審驗技術。

### 4. 我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議

為確認最終處置場多重障壁設計阻滯放射性核種的遷移，確保不致對於環境與人類造成不良之影響，必須建立低放處置輻射劑量與風險評估技術，必須針對核種遷移之環境途徑、曝露途徑先行確立，然後利用生物圈劑量評估程式計算其輻射劑量與風險。本項工作將依據生物圈劑量評估程式提出我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議。

### 5. 提出我國低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議

本項工作將針對本計畫研究成果，對國內低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項，依據生物圈安全評估合乎監管要求，藉此了解處置場系統的安全功能是否合乎安全標準之方向，提出我國低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議。

## 2. 低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究

低放射性廢棄物處置關鍵核種篩選，關係到安全評估分析源項核種決定，假設核種外釋設計情節安全評估分析，更與生物圈劑量評估結果相關。由於核種活度將隨著衰變作用而遞減，不同時間點下，各核種對於年有效劑量之佔比亦有所不同。

本計畫蒐集瑞典 SR-PSU TR-14-09 技術報告有關關鍵核種之篩選程序及方法 (SKB, 2014f)。並摘述台電公司 LLWD2016 有關關鍵核種篩選程序及結果。並與國內外有關關鍵核種之篩選進行比較。

### 2.1. 瑞典 SR-PSU 有關關鍵核種之篩選程序及方法

#### 2.1.1. 放射性核種的篩選和劑量計算

放射性核種盤存量在初始狀態報告中給定。從長期安全角度來看，並非廢棄物中的所有放射性核種都是相關的，因此有些核種不需要將其納入放射性核種傳輸和劑量計算。考慮到不確定性，包括放射性核種的篩選標準，基本上是不能排除其具有不可忽略的放射性影響。相關放射性核種的選擇是以一致的方式進行的，並基於盤存、半化期和處置場關閉後可能開始潛在曝露的（最短）時間，同時考慮到評估背景。關於放射性核種在長期安全評估中的相關性篩選是基於輻射劑量的概念，這有助於以簡化的方式量化和比較放射性影響。(SKB, 2014f)

放射性核種盤存量的輻射劑量在此定義為處置核種盤存量乘以劑量轉換因子：

$$Rt^n(t) = DCC_{ing}^n A^n(t)$$

其中：

$Rt^n(t)$  是核種編號  $n$  在時間  $t$  的放射劑量，[Sv]，

$A^n(t)$  是核種編號  $n$  在時間  $t$  的盤存量，

$DCC_{ing}^n$  是核種編號  $n$  及其子核種的劑量轉換因子 [Sv / Bq]。

換句話說，輻射劑量是經由攝取整個核種量所得到的有效劑量來衡量的。

#### 2.1.2. 初始狀態報告與安全有關的核種

根據以下兩個標準，篩選放射性核種進行放射性核種傳輸計算：(SKB, 2014f)

1.放射性核種的半化期為 10 年或更長；

2.在處置場封閉時攝入放射性核種量的輻射劑量超過 10 mSv。

根據第一個標準，處置場封閉後 100 年內，半化期 10 年以下之核種至少會經歷 10 個半化期，從而半化期低於 10 年的放射性核種庫存將減少 3 個數量級以上。第二個標準是一個相當低的篩選限制，以刪除放射性影響可忽略不計的放射性核種，相較之下，放射性更相關的放射性核種可見圖 2。左邊 10 年的垂直虛線顯示了基於半化期的選擇標準的限制。0.01 Sv 處的水平線顯示了由於輻射劑量而選擇標準的限制。根據標準選擇的放射性核種出現在垂直虛線的右側和水平虛線的上方。放射性核種標記的不同顏色和形狀僅用於提高可讀性。(SKB, 2014f)

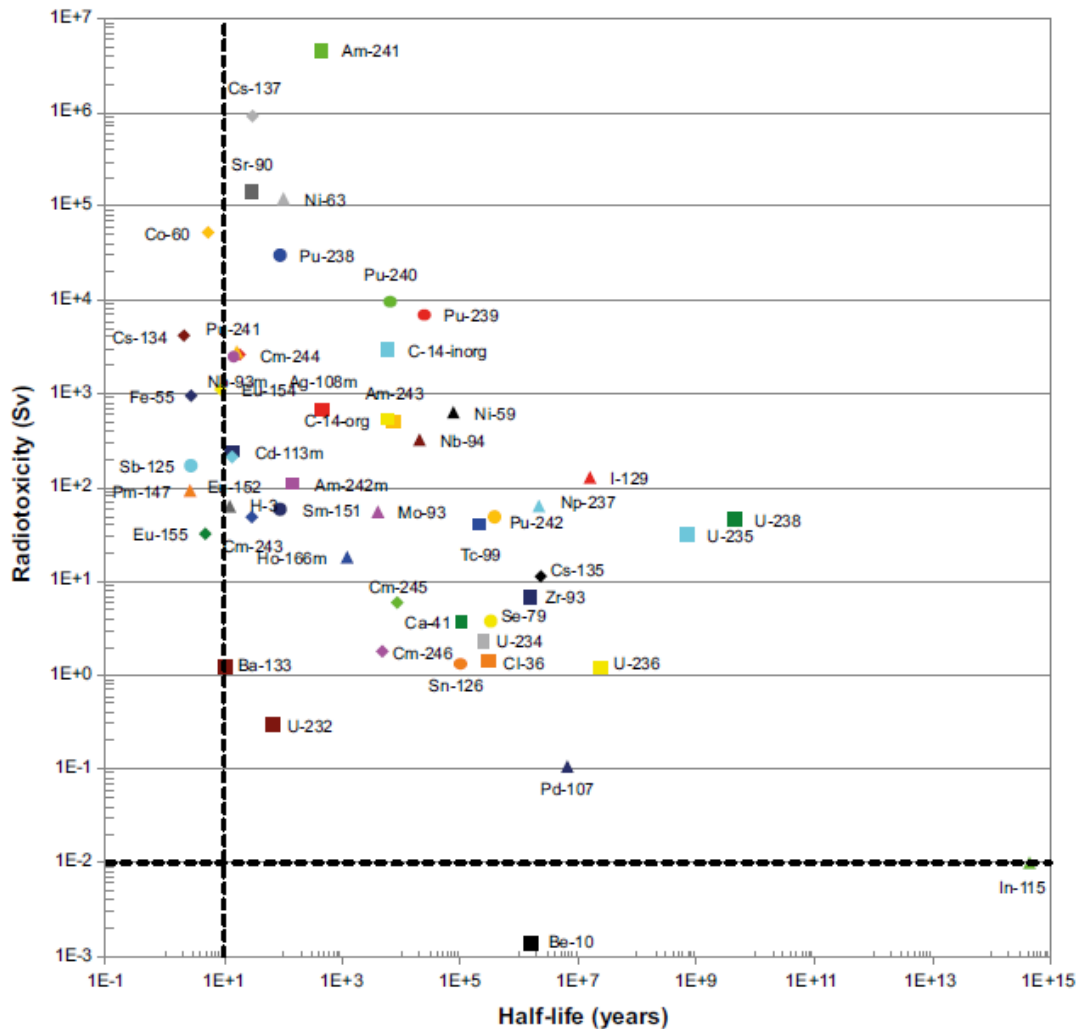


圖 2 放射性核種的初始輻射劑量與半化期的關係(SKB, 2014f)

圖 2 顯示了每種放射性核種的初始輻射劑量和半化期，以及指示上述兩個選擇

標準的垂直和水平線。根據第二個標準，又篩選出兩種放射性核種。儘管這兩種核種的盤存量在 100,000 年內不會顯著減少，但 Be-10 (初始輻射劑量僅為 2 毫西弗) 和 In-115 (初始輻射劑量略低於 10 毫西弗) 可排除在外。因此，在圖 2 中水平虛線下方繪製的放射性核種對於潛在的放射性影響可能不那麼重要。圖 2 虛線上方和垂直線右側的放射性核種包括在根據上述兩個標準進行的放射性核種傳輸計算，此外，由於其相對較高的輻射劑量，還包括半化期約為 5 年的 Co-60。(SKB, 2014f)

### 2.1.3. 與安全有關的子核種

無論初始盤存量如何，子核種也必須考慮其安全相關性。這種“二次放射性核種”的存量只來自於母核種。該盤存清單相對應的輻射劑量來自母核種及其衰變鏈對應之子核種。在最終達到峰值之前，由於放射性衰變，輻射劑量可能會隨著時間的增加而增加。當衰變鏈的子核種劑量影響低於母核種衰變後之劑量時，該核種之輻射劑量將降低。(SKB, 2014f)

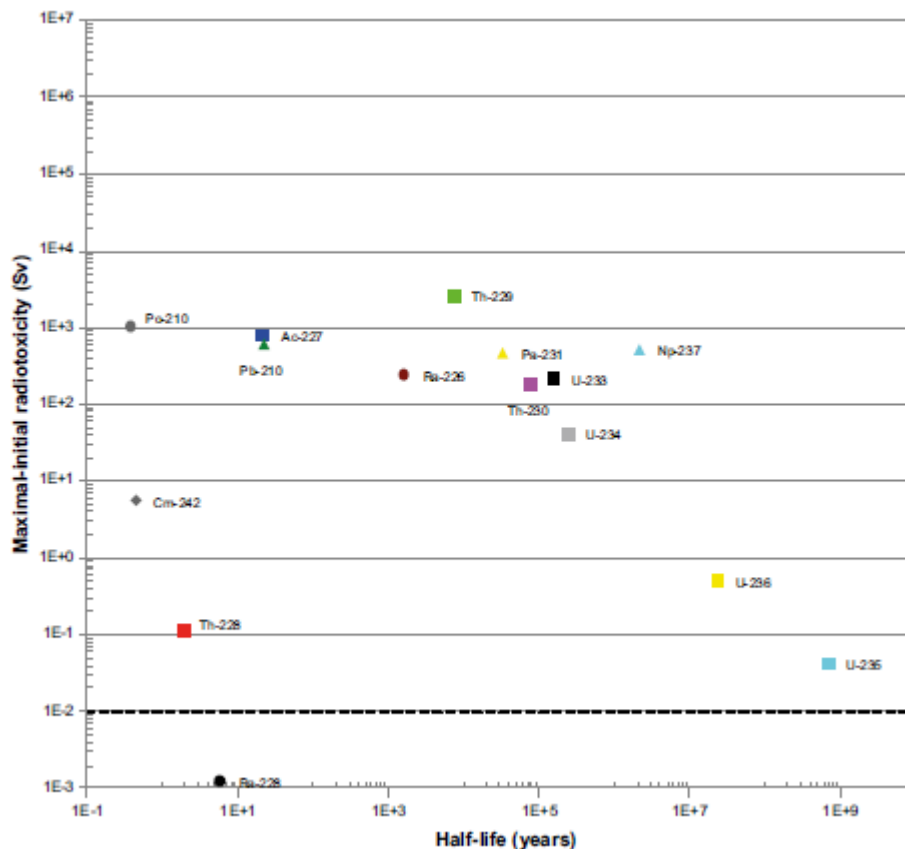


圖 3 核種(含子核種)最大輻射劑量和初始輻射劑量間的差值(SKB, 2014f)

放射性核種傳輸計算明確考慮二級放射性核種的標準是半化期超過 100 天。半

化期小於 100 天的子核種在傳輸計算中沒有明確建模，但在劑量計算中通過計算劑量係數來考慮，並假設它們與母核種在環境中處於長期平衡狀態。圖 3 所示為核種(含子核種)最大輻射劑量和初始輻射劑量間的差值。0.01Sv 處的水平虛線表示，虛線以下為母核種的輻射劑量較低，屬於可排除的限值。該放射性核種標記不同顏色和形狀，僅用於提高可讀性。

#### 2.1.4. 選定的放射性核種

根據前述篩選方法，可以確定明確或隱式包含在建模中的放射性核種。建模中包含的放射性核種衰變鏈如圖 4 所示，篩選 17 個放射性核種傳輸計算中之放射性核種，所篩選的核種非屬於衰變鏈的放射性核種，見表 1。其中，In-115（初始輻射劑量略低於 10 毫西弗）可排除。

表 1 用於放射性核種傳輸模擬計算之篩選核種(SKB, 2014f)

H-3	Tc-99
C-14	Pd-107
Cl-36	Cd-113m
Ca-41	I-129
Ni-59	Ba-133
Ni-63	Cs-135
Co-60	Sm-151
Se-79	Ho-166m
Nb-94	-

#### 2.1.5. 與以前的 SFR 評估所篩選核種進行比較

SFR 封閉後安全評估計畫已執行多次，在當前背景下對盤存量和安全性評估是基於這些執行經驗。SR-PSU 評估核種盤存量清單中考慮放射性核種類似於 SAR-08 評估中所考慮的放射性核種。現在只排除 Ru-106，而 Ca-41 和 In-115 則是目前列入，其為除役廢棄物的核種盤存量。將先前評估的核種盤存清單相互比較顯示，並沒有 U-233 或 SAR-08 中的任何鈷同位素及其子核種之核種盤存清單，這些是在先前的 SAFE 評估中完成的。

表 2 放射性核種在 SFR 評估中的相關性比較(包括:SAFE, SAR-08 和 SR-PSU)，其中，SAFE (Lindgren et al. 2001) and SAR-08(Thomson et al. 2008b)是針對 SFR 1，



而 SR-PSU 是針對 SFR 1 and SFR 3。SAFE 和 SAR-08 評估中，其關鍵核種數量明顯較少。

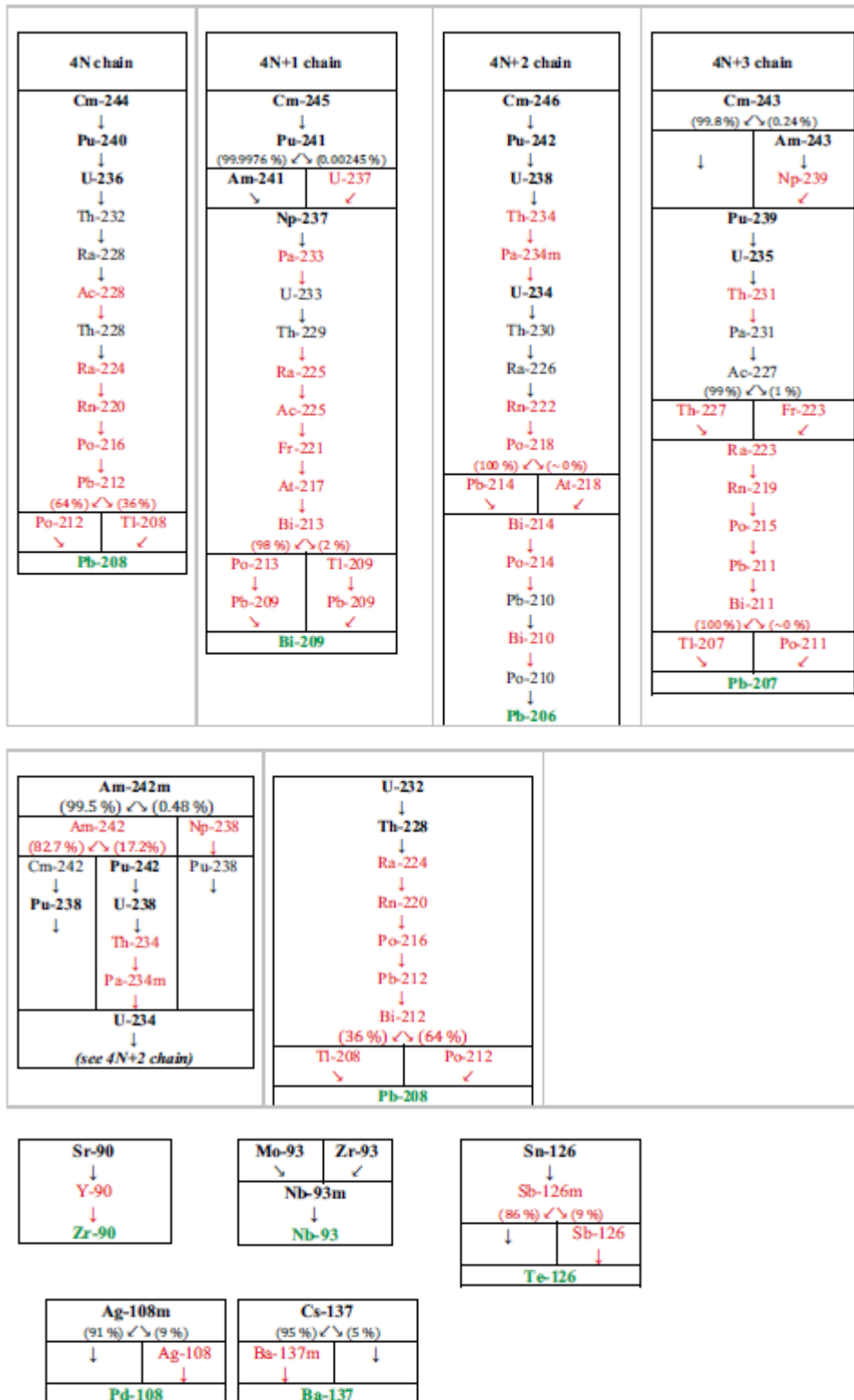







圖 4 在 SR-PSU 放射性核種傳輸計算中考慮的放射性核種衰變鏈(SKB, 2014f)  
 黑色粗體：初始盤存核種，屬於建模的放射性核種。黑色：非初始盤存核種，屬於建模的放射性核種，但假設內部衰變產生。暗紅色：未明確建模短半化期核種，假

設長期平衡，藉由將其劑量係數與母放射性核種的劑量係數相加而納入劑量計算。綠色穩定同位素。

表 2 SFR 評估過程之放射性核種選取比較(包括：SAFE, SAR-08 和 SR-PSU) (SKB, 2014f)

核種	SAFE	SAR-08	SR-PSU	核種	SAFE	SAR-08	SR-PSU
H-3	包含	包含	包含	Pb-210	隱式包含	不包含	包含
Be-10	包含	包含	包含	Po-210	不包含	不包含	包含
C-14	包含	包含	包含	Ra-226	包含	不包含	包含
Cl-36	包含	包含	包含	Ra-228	不包含	不包含	包含
Ca-41	不包含	不包含	包含	Ac-227	包含	不包含	包含
Fe-55	包含	包含	包含	Th-228	不包含	不包含	包含
Co-60	包含	包含	包含	Th-229	包含	不包含	包含
Ni-59	包含	包含	包含	Th-230	包含	不包含	包含
Ni-63	包含	包含	包含	Th-232	不包含	不包含	包含
Se-79	包含	包含	包含	Pa-231	不包含	不包含	包含
Sr-90	包含	包含	包含	U-232	包含	包含	包含
Zr-93	包含	包含	包含	U-233	包含	不包含	包含
Nb-93m	包含	包含	包含	U-234	隱式包含	包含	包含
Nb-94	包含	包含	包含	U-235	隱式包含	包含	包含
Mo-93	包含	包含	包含	U-236	隱式包含	包含	包含
Tc-99	包含	包含	包含	U-238	隱式包含	包含	包含
Ru-106	包含	包含	不包含	Np-237	隱式包含	包含	包含
Pd-107	包含	包含	包含	Pu-238	包含	包含	包含
Ag-108m	包含	包含	包含	Pu-239	包含	包含	包含
Cd-113m	包含	包含	包含	Pu-240	包含	包含	包含
In-115	不包含	不包含	包含	Pu-241	隱式包含	包含	包含
Sn-126	包含	包含	包含	Pu-242	隱式包含	包含	包含
Sb-125	包含	包含	包含	Pu-244	隱式包含	包含	不包含
I-129	包含	包含	包含	Am-241	包含	包含	包含
Cs-134	包含	包含	包含	Am-242m	隱式包含	包含	包含
Cs-135	包含	包含	包含	Am-243	包含	包含	包含
Cs-137	包含	包含	包含	Cm-242	不包含	不包含	包含
Ba-133	包含	包含	包含	Cm-243	隱式包含	包含	包含
Pm-147	包含	包含	包含	Cm-244	隱式包含	包含	包含
Sm-151	包含	包含	包含	Cm-245	隱式包含	包含	包含
Eu-152	包含	包含	包含	Cm-246	隱式包含	包含	包含
Ho-166m	包含	包含	包含				

-  不包含在盤存量核種核單中
-  包含在核種盤存清單中，但不包括在評估中
-  隱式包含（盤存量被添加到子核種盤存清單內）
-  包含
-  包含(屬於子核種)

### 2.1.6. 核種盤存量和輻射劑量隨著時間的變化

圖 5 說明各個處置窖活度對總活度百分比隨時間變化，圖 6 說明主要放射性核種活度對總活度百分比隨時間變化。SFR 的活度主要位於筒倉和兩個 BMA 廢棄物處置窖中。SFR 中的大多數放射性核種盤存量是短半化期，活度將在 1000 年內衰減到不到初始活度的 2.5%。最初的時期完全由 Ni-63 為主要活度來源。從大約 1000

年到 10 萬年的評估期結束，活度則以 Ni-59 為主要。(SKB, 2014f)

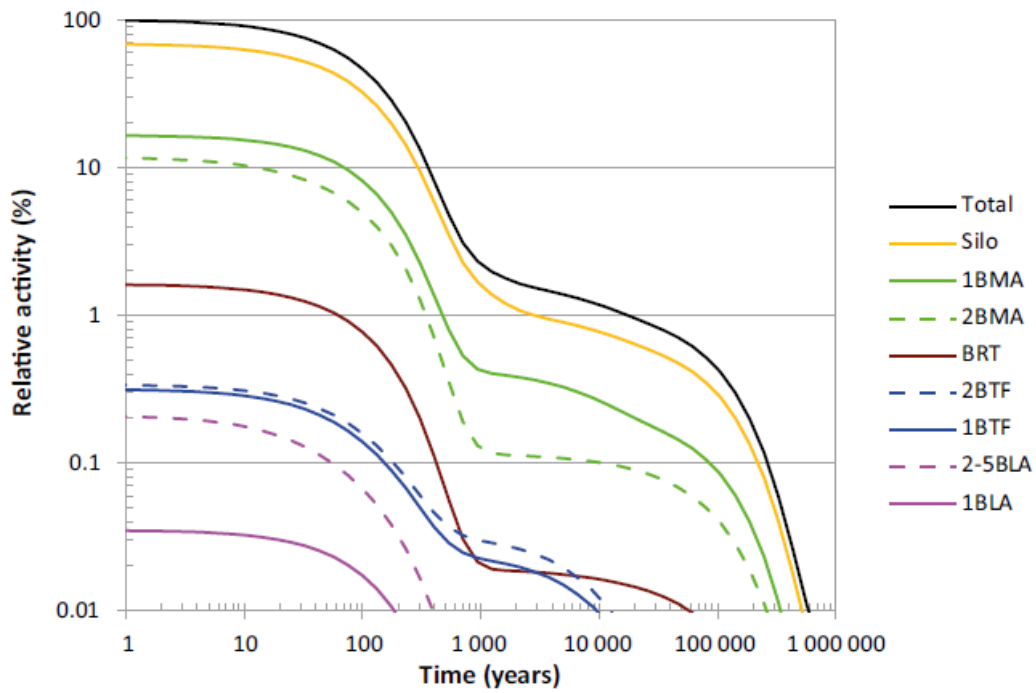


圖 5 各個處置窖活度對總活度百分比隨時間變化(SKB, 2014f)

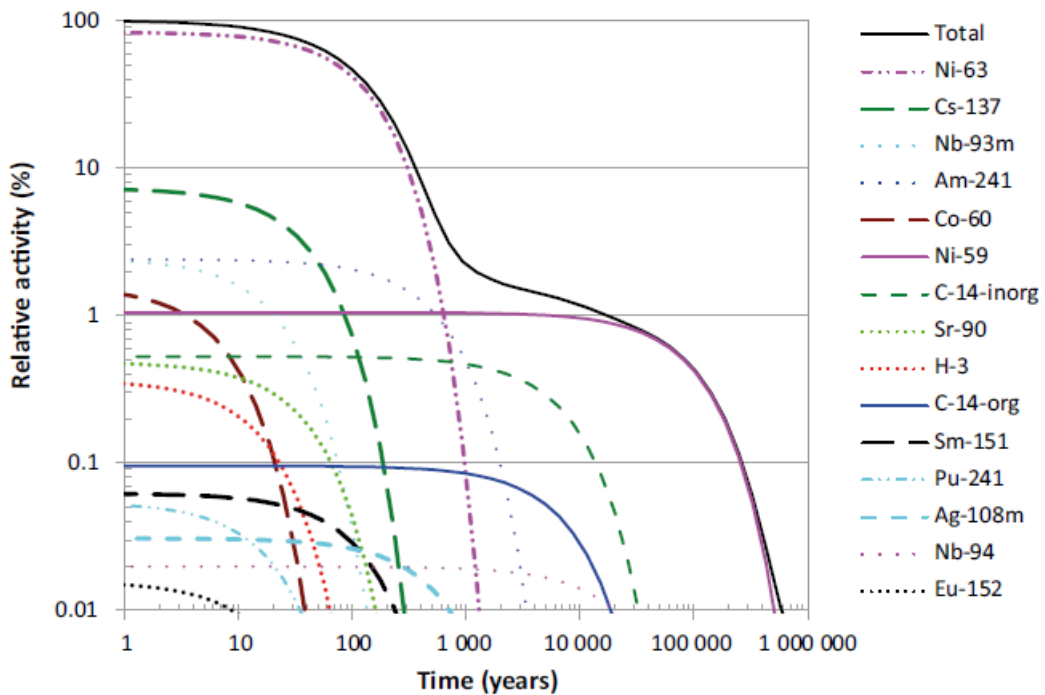


圖 6 主要放射性核種活度對總活度百分比隨時間變化(SKB, 2014f)

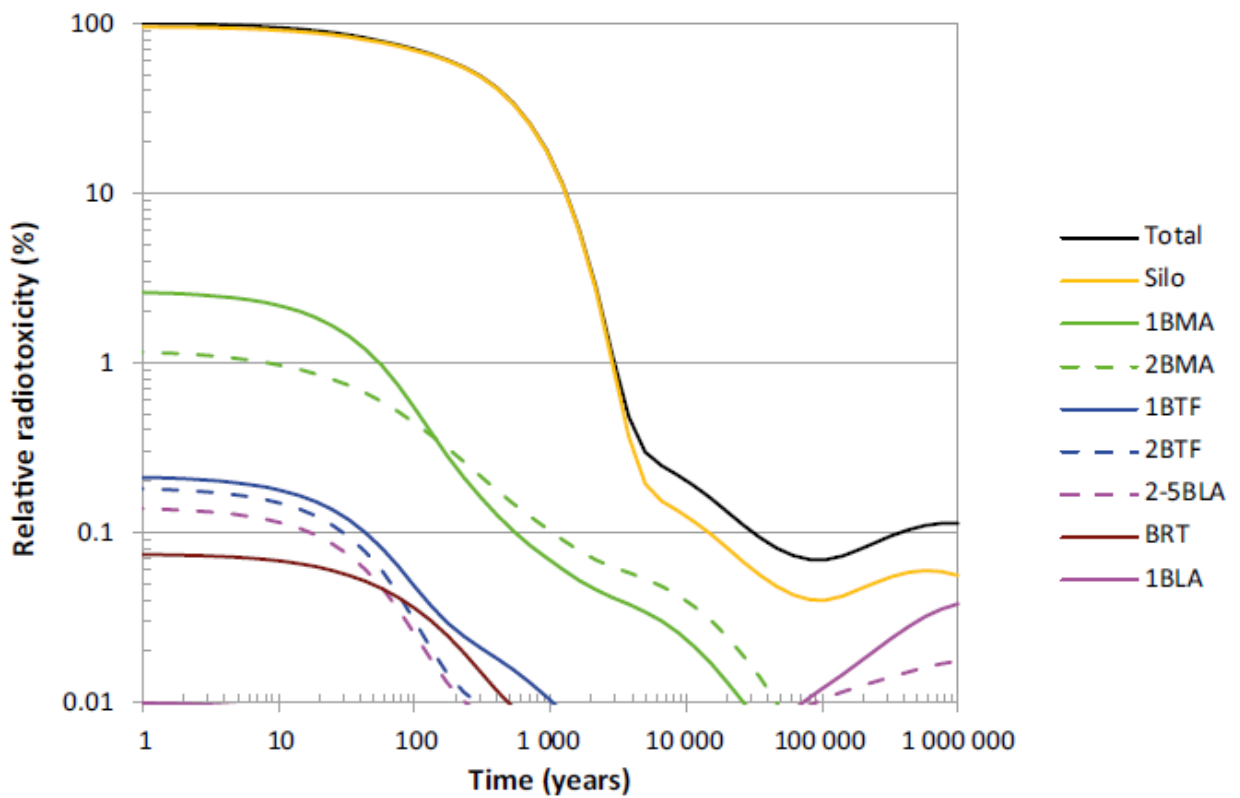


圖 7 各個處置窖劑量對總劑量百分比隨時間變化(SKB, 2014f)

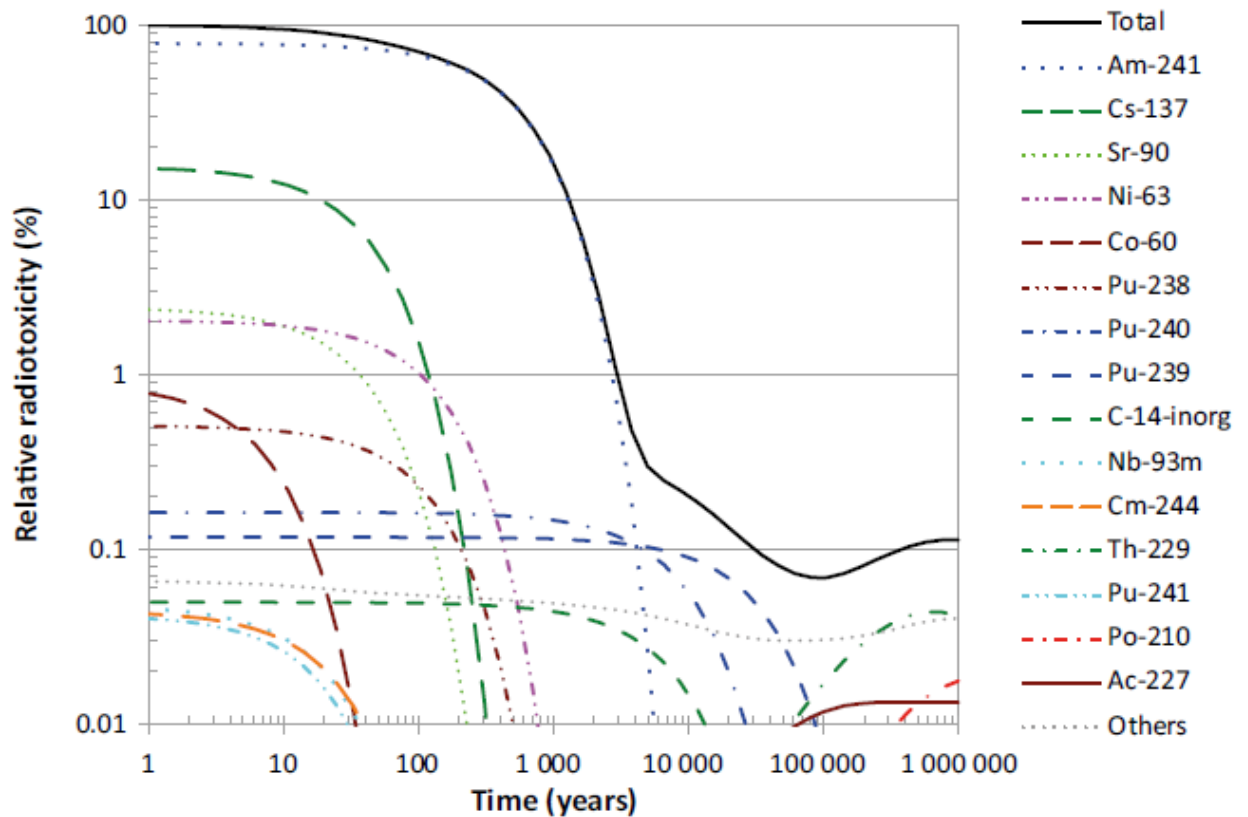


圖 8 主要放射性核種劑量對總劑量百分比隨時間變化(SKB, 2014f)

圖 7 顯示各個處置容劑量對總劑量百分比隨時間變化，圖 8 顯示主要放射性核種劑量對總劑量百分比隨時間變化。在最初的 4000 年中，筒倉核種盤存量幾乎佔總輻射劑量的 100%，這是由於儲存在筒倉中的 Am-241 的量。輻射劑量主要由錒系元素 (Am-241, 前 4,000 年)、Pu-239 (4,000 至約 75,000 年) 和 Th-229 (75,000 年後))，最初 1000 年的總活度減緩速度緩慢，但在 1 萬年後下降到初始值約 0.3%。輻射劑量減少最主要係由於 Am-241 在關閉後約 1,000 至 5,000 年之間衰變的影響。(SKB, 2014f)

## 2.2. LLWD2016 有關關鍵核種篩選程序及結果

低放射性廢棄物分類數量估算，主要依據台電公司低放射性廢棄物處置分類資料庫、核一廠除役計畫、美國核管會 NUREG/CR-0130 為特性分類基礎，再乘上不同來源廢棄物之總量而得。A 類、B 類、C 類低放射性廢棄物之分類數量結果詳如表 3 所示。安全分析時保守考量以處置場可容納的最大處置容量 79 萬桶，作為後續分析與計算的基準。因 2 處建議候選場址規劃的坑道長度與配置不同，以及不同類廢棄物需分區處置，造成 2 處候選場址在分類處置的數量上有些微差異。其中，達仁鄉建議候選場址的 2 條 B、C 類處置坑道可處置 8.8 萬桶 B、C 類廢棄物，剩餘坑道可處置 70.2 萬桶 A 類廢棄物。烏坵鄉建議候選場址的 6 條 B、C 類處置坑道可處置 7.6 萬桶 B、C 類廢棄物，剩餘坑道可處置 71.4 萬桶 A 類廢棄物。(台電公司，2017b)

表 3 低放射性廢棄物分類數量估算

單位：桶

(資料來源：台電公司，2017b)

廢棄物分類		A 類	B 類	C 類	超 C 類	總計	總計 (不含超 C 類)
運轉廢棄物	核一廠	46,993	1,106	630	584	49,313	48,729
	核二廠	62,255	481	840	59	63,635	63,576
	核三廠	10,416	75	62	0	10,553	10,553
	蘭嶼貯存場	94,969	811	4,359	138	100,277	100,139
	核研所小產源	18,432	153	843	32	19,460	19,428
	小計	233,065	2,626	6,734	813	243,238	242,425
除役	核一廠	55,471	3,906	2,100	314	61,791	61,477
	核二廠	85,910	6,049	3,252	486	95,697	95,211
	核三廠	141,661	1,735	144	1,012	144,552	143,540
	蘭嶼貯存場	11,000	0	0	0	11,000	11,000

廢棄物分類		A 類	B 類	C 類	超 C 類	總計	總計 (不含超 C 類)
廢棄物	核研所、清大	31,627	479	258	39	32,403	32,364
	減容中心	1,106	0	0	0	1,106	1,106
	小計	326,775	12,169	5,754	1,851	346,549	344,698
總計		559,840	14,795	12,488	2,664	589,787	587,123

低放射性廢棄物中，運轉廢棄物約佔 40%，除役廢棄物約佔 60%，但既有資料庫僅針對運轉廢棄物進行統計，無法以此代表全部的低放射性廢棄物分類活度。因此，低放射性廢棄物分類活度估算，保守採用「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第 3 條的低放射性廢棄物分類標準，以核種濃度法規限值作為分析依據。(台電公司，2017b)

由於廢棄物須依其分類分區處置，故將處置坑道分為 A 類廢棄物處置坑道和 B、C 類廢棄物處置坑道兩種。在此前提下，保守假設 A 類廢棄物處置坑道內的每桶廢棄物，皆為法規用來判斷是否為 A 類廢棄物的核種濃度上限值。B、C 類廢棄物處置坑道內的每桶廢棄物，則皆為法規用來判斷是否為 C 類廢棄物的核種濃度上限值，其中，因前述法規並未規範 C 類低放射性廢棄物中的 H-3 和 Co-60 核種分類限值，故以蘭嶼貯存場核種資料庫之 A 類和 C 類低放射性廢棄物核種平均濃度為參考依據，計算出 C 類低放射性廢棄物中的 H-3 和 Co-60 核種濃度，分別為 A 類低放射性廢棄物的 6.6 倍和 10.4 倍。再利用此倍率乘上 H-3 和 Co-60 核種的 A 類低放射性廢棄物法規限值，即可得 B、C 類低放射性廢棄物中 H-3 和 Co-60 核種的初始濃度設定值，分別為 9.9 TBq/m<sup>3</sup> 和 270.4 TBq/m<sup>3</sup>。有關 A 類廢棄物與 B、C 類廢棄物之核種濃度初始值，如表 4 所列。(台電公司，2017b)

表 4 A 類與 B、C 類低放廢棄物之核種濃度初始值設定表

核種	濃度值(TBq/m <sup>3</sup> )	
	A 類低放射性廢棄物	B、C 類低放射性廢棄物
C-14	0.03	0.3
C-14 (活化金屬內)	0.3	3
Ni-59 (活化金屬內)	0.81	8.1
Nb-94 (活化金屬內)	0.00074	0.0074
Tc-99	0.011	0.11
I-129	0.0003	0.003

核種		濃度值(TBq/m <sup>3</sup> )	
		A 類低放射性廢棄物	B、C 類低放射性廢棄物
TRU (半化期於 5 年之 超鈾 $\alpha$ 放射核種)	以 Pu-238 為代表核種	0.37 kBq/g	3.7 kBq/g
Pu-241		13 kBq/g	130 kBq/g
Cm-242		74 kBq/g	740 kBq/g
H-3		1.5	9.9
Co-60		26	270.4
Ni-63		0.13	26
Ni-63 (活化金屬內)		1.3	260
Sr-90		0.0015	260
Cs-137		0.037	170

### 2.2.1. 低放射性廢棄物分類特性

為瞭解低放射性廢棄物分類特性，以前述核種濃度初始值設定，考量核種全數溶於水中，並考量核種衰變鏈，評估其飲水攝入之有效劑量與時間關聯性。藉此評估低放射性廢棄物在無平流、擴散與吸附等傳輸機制影響的情況下，有效劑量因核種衰變而降低之特性。A 類低放射性廢棄物因所含短半化期核種濃度較高，其總劑量在時間超過 100 年後，即下降至初始值之 3.3%。B、C 類低放射性廢棄物因所含長半化期核種濃度較高，其總劑量在時間超過 100 年後，則下降至初始值之 12.6%。(台電公司，2017b)

### 2.2.2. 低放射性廢棄物處置關鍵核種

LLWD2016 針對關鍵核種之篩選，係以對人類健康潛在影響程度作為考量，其評估指標為對人類可能造成之年有效劑量(以下均指個人年有效劑量)。由於各核種活度將隨著衰變作用而遞減，不同時間點下，各核種對於年有效劑量之佔比亦有所不同。針對所設定之核種源項特性，以及低放射性廢棄物分類特性之分析條件，假設處置場封閉後以下條件：處置窖內為充滿水的飽和情況；人類鑿井至處置深度，並直接飲用井水。以上述情節評估不同類型低放廢棄物，於各不同時間下之核種劑量佔比排序，如表 5 及表 6 所示。LLWD2016 指出表中各時期之劑量佔比總和均達 99.8%以上，顯示所列核種具有代表性。(台電公司，2017b)

處置設施封閉初期，關鍵核種清單包含初始活度較高且半化期短之核種，例如 Co-60。這些短半化期核種因衰變作用而隨時間逐漸減少，故隨著處置設施封閉後之



時間增長，核種清單之短半化期核種將逐漸被長半化期核種取代。針對關鍵核種之篩選，LLWD2016 指出，以個人年有效劑量佔比超過 1%之核種聯集作為關鍵核種。依上述原則所選出之關鍵核種共 12 個，其中包括 2 個 TRU 核種，以及 1 個子核種。所有關鍵核種如表 7 所列。(台電公司，2017b)

表 5 A 類低放廢棄物各核種於不同時期下之劑量比排序(台電公司，2017b)

設施封閉後之時間																	
10 年			100 年			300 年			500 年			1,000 年			10,000 年		
核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)
Co-60	96.313	2.71E+01	Pu-238	33.336	1.54E-01	Am-241	52.138	1.09E-01	Am-241	54.779	7.92E-02	Am-241	39.038	3.56E-02	I-129	68.230	3.25E-02
Cs-137	1.316	3.70E-01	Am-241	32.202	1.49E-01	I-129	15.548	3.25E-02	I-129	22.498	3.25E-02	I-129	35.692	3.25E-02	Tc-99	14.096	6.72E-03
Pu-238	1.098	3.09E-01	Cs-137	10.627	4.90E-02	Pu-238	15.363	3.22E-02	C-14	11.165	1.62E-02	C-14	16.673	1.52E-02	C-14	10.736	5.12E-03
Ni-63	0.316	8.88E-02	Ni-63	10.108	4.66E-02	C-14	7.905	1.65E-02	Tc-99	4.792	6.93E-03	Tc-99	7.590	6.92E-03	C-14 <sub>metal</sub>	3.483	1.66E-03
Pu-241	0.267	7.51E-02	I-129	7.057	3.25E-02	Ni-63	5.323	1.11E-02	Pu-238	4.650	6.73E-03	C-14 <sub>metal</sub>	0.547	4.98E-04	Ni-59 <sub>metal</sub>	3.122	1.49E-03
Am-241	0.234	6.57E-02	C-14	3.676	1.70E-02	Tc-99	3.314	6.94E-03	Ni-63	1.841	2.66E-03	Ni-59 <sub>metal</sub>	0.179	1.63E-04	Po-210	0.086	4.11E-05
Sr-90/Y-90	0.125	3.52E-02	Tc-99	1.505	6.94E-03	Cs-137	0.262	5.49E-04	C-14 <sub>metal</sub>	0.182	2.64E-04	Pu-238	0.148	1.35E-04	Nb-94 <sub>metal</sub>	0.060	2.86E-05
I-129	0.116	3.25E-02	Sr-90/Y-90	0.952	4.39E-03	C-14 <sub>metal</sub>	0.077	1.61E-04	Ni-59 <sub>metal</sub>	0.057	8.18E-05	Ni-63	0.082	7.44E-05	U-234	0.053	2.52E-05
Cm-242	0.076	2.12E-02	Pu-241	0.273	1.26E-03	Ni-59 <sub>metal</sub>	0.023	4.88E-05	U-234	0.018	2.53E-05	U-234	0.028	2.58E-05	Pb-210	0.050	2.36E-05
C-14	0.061	1.71E-02	Co-60	0.212	9.74E-04	Sr-90/Y-90	0.021	4.31E-05	Np-237	0.007	1.02E-05	Np-237	0.016	1.50E-05	Np-237	0.040	1.89E-05
H-3	0.054	1.51E-02	H-3	0.029	3.14E-04	U-234	0.011	2.34E-05	Ni-63 <sub>metal</sub>	0.006	8.69E-06	Nb-94 <sub>metal</sub>	0.004	3.93E-06	Ra-226	0.020	9.63E-06
Tc-99	0.025	6.94E-03	C-14 <sub>metal</sub>	0.012	5.31E-05	Ni-63 <sub>metal</sub>	0.010	2.17E-05	Cs-137	0.004	6.14E-06	Th-230	0.001	8.68E-07	Th-230	0.019	9.30E-06

表 6 B、C 類低放廢棄物各核種於不同時期下之劑量比排序(台電公司，2017b)

設施封閉後之時間																	
10 年			100 年			300 年			500 年			1,000 年			10,000 年		
核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)	核種	劑量佔比 (%)	年有效劑量 (Sv/yr)
Sr-90/Y-90	75.385	1.02E+04	Sr-90/Y-90	76.740	1.27E+03	Sr-90/Y-90	60.141	1.24E+01	Am-241	48.629	1.32E+00	Am-241	38.939	5.93E-01	I-129	68.229	5.42E-01
Cs-137	21.022	2.83E+03	Cs-137	22.708	3.75E+02	Cs-137	20.308	4.20E+00	I-129	19.973	5.42E-01	I-129	35.601	5.42E-01	Tc-99	14.096	1.12E-01
Co-60	3.482	4.69E+02	Ni-63	0.188	3.11E+00	Am-241	8.793	1.82E+00	C-14	9.912	2.69E-01	C-14	16.631	2.53E-01	C-14	10.736	8.53E-02
Ni-63	0.044	5.92E+00	Pu-238	0.155	2.56E+00	Ni-63	3.591	7.43E-01	Ni-63	6.538	1.78E-01	Tc-99	7.571	1.15E-01	C-14 <sub>metal</sub>	3.484	2.77E-02
Pu-238	0.038	5.15E+00	Am-241	0.150	2.48E+00	I-129	2.622	5.42E-01	Tc-99	4.254	1.16E-01	C-14 <sub>metal</sub>	0.545	8.31E-03	Ni-59 <sub>metal</sub>	3.122	2.48E-02
Pu-241	0.009	1.25E+00	I-129	0.033	5.42E-01	Pu-238	2.591	5.36E-01	Pu-238	4.128	1.12E-01	Ni-63	0.326	4.96E-03	Po-210	0.086	6.85E-04
Am-241	0.008	1.10E+00	C-14	0.017	2.83E-01	C-14	1.333	2.76E-01	Sr-90/Y-90	4.494	1.217E-01	Ni-59 <sub>metal</sub>	0.179	2.72E-03	Nb-94 <sub>metal</sub>	0.060	4.77E-04
I-129	0.004	5.42E-01	Tc-99	0.007	1.16E-01	Tc-99	0.559	1.16E-01	Cs-137	1.731	4.70E-02	Pu-238	0.147	2.24E-03	U-234	0.053	4.19E-04
H-3	0.003	3.54E-01	Pu-241	0.001	2.09E-02	Ni-63 <sub>metal</sub>	0.035	7.23E-03	C-14 <sub>metal</sub>	0.162	4.39E-03	U-234	0.028	4.30E-04	Pb-210	0.050	3.94E-04
Cm-242	0.003	3.54E-01	Co-60	0.001	1.69E-02	C-14 <sub>metal</sub>	0.013	2.68E-03	Ni-63 <sub>metal</sub>	0.107	2.90E-03	Np-237	0.016	2.50E-04	Np-237	0.040	3.15E-04
C-14	0.002	2.86E-01	Ni-63 <sub>metal</sub>	0.001	9.74E-03	Ni-59 <sub>metal</sub>	0.004	8.14E-04	Ni-59 <sub>metal</sub>	0.050	1.36E-03	Ni-63 <sub>metal</sub>	0.011	1.63E-04	Ra-226	0.020	1.61E-04
Tc-99	0.001	1.16E-01	H-3	0.000	1.47E-03	U-234	0.002	3.90E-04	U-234	0.016	4.22E-04	Nb-94 <sub>metal</sub>	0.004	6.55E-05	Th-230	0.020	1.55E-04

表 7 低放射性廢棄物關鍵核種(台電公司，2017b)

關鍵核種	備註
C-14	法規核種
C-14metal	法規核種
Ni-59metal	法規核種
Co-60	法規核種
Ni-63	法規核種
Sr-90/Y-90	法規核種/子核種
Tc-99	法規核種
I-129	法規核種
Cs-137	法規核種
Pu-238	TRU 核種
Am-241	TRU 核種

### 2.3. 國內外有關關鍵核種之篩選

蒐集過去有關關鍵核種篩選報告(台電公司，2010)，摘述關鍵核種篩選方法，篩選設定情況與條件如下：

#### 2.3.1. 美國核能管制委員會所列之具代表性核種

美國核能管制委員會(U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC)於 10 CFR 61 裡即針對低放射性廢棄物進行評估(US NRC, 1998)，依照廢棄物所含特定的重要核種濃度高低進行分類，將廢棄物分成 A 類、B 類、C 類與超 C 類四種，可參考表 8 與表 9 所示，而表中所列之核種，可參考為重要且具代表性之核種。我國之分類亦參考美國 10 CFR 61 之 A 類、B 類、C 類與超 C 類之分類作法，並已明訂於原子能委員會公告之低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則之第三條內。

表 8 單一長半化期核種濃度值

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

表 9 單一短半化期核種濃度值

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

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

註二：多核種之分類：

若低放射性廢棄物中含有多核種時，其分類應按下式判斷。

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

式中

$C_i$ ：第  $i$  個核種之濃度。

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

$n$ ：所含核種之數目。

若滿足上式，則可歸為第 0(0=A,B,C)類廢棄物。

### 2.3.2. 愛達荷國家工程與環境實驗室所列之具代表性核種

位於美國愛達荷州的愛達荷國家工程與環境實驗室(Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL)所執行的國家低放射性廢棄物管理計畫(National Low-Level Waste Management Program, NLLWMP)，其整理 10 CFR 61.55 所列核種 H-3、C-14、Ni-59、Co-60、Ni-63、Sr-90、Nb-94、Tc-99、I-129、Cs-137、Pu-241 與 Cm-242，更進一步考量半化期、移動性與輻射型態等因子，將 Np-237、U-238、Pu-239 與 Am-241 四種核種納入考慮，提出進行低放射性廢棄物處置場評估之重要核種共 16 種，如表 10 所示。

表 10 美國 INEEL 篩選之關鍵核種列表

核種	半化期(yr)	核種	半化期(yr)
H-3	12.33	I-129	1.57E7
C-14	5730	Cs-137	30
Ni-59	7.6E4	Np-237	2.14E6
Co-60	5.27	U-238	4.47E9
Ni-63	100	Pu-239	2.4E4
Sr-90	28.9	Pu-241	14.4
Nb-94	2E4	Am-241	432.2
Tc-99	2.13E5	Cm-242	0.45

### 2.3.3. 美國能源部低放射性廢棄物處置設施容量的報告所列之具代表性核種

美國能源部 (U.S. Department of Energy, DOE)於 2000 年評估低放射性廢棄物處置設施容量的報告 (Low-Level Waste Disposal Capacity Report Revision 2) 中 (James et al., 1999)，依照下列條件篩選重要的核種：(i)核種半化期超過 5 年，(ii)透過地下水、大氣或人員無意入侵事件，會對人體產生有效劑量影響之核種，(iii)不考慮衰變後的產物核種，(iv)考慮活性金屬中的 C-14 和 Ni-63，評估關鍵核種對放射性廢棄物處置場之衝擊，其篩選之關鍵核種共 49 種，如表 11 所示。

表 11 美國 DOE 報告於 2000 年篩選之關鍵核種列表

核種	半化期(yr)	核種	半化期(yr)
H-3	12.33	Ra-226	1602
C-14 & C-14*	5730	Ra-228	6.7
Al-26	7.4E5	Th-229	7340
Cl-36	3.1E5	Th-230	8E4
K-40	1.29E9	Th-232	1.4E10
Ni-59	7.6E4	Pa-231	3.25E4
Co-60	5.27	U-232	72
Ni-63 & Ni-63*	100	U-233	1.62E5
Se-79	6.5E4	U-234	2.47E5
Sr-90	28.9	U-235	7.1E8
Zr-93	1.5E6	U-236	2.39E7
Nb-93m	13.6	U-238	4.47E9
Nb-94	2E4	Np-237	2.14E6
Tc-99	2.13E5	Pu-238	86.4
Cd-113**	13.6	Pu-239	2.4E4
Sn-121**	76	Pu-240	6580
Sn-126	1E5	Pu-241	14.4
I-129	1.57E7	Pu-242	3.79E5
Cs-135	3E6	Pu-244	8.26E7
Cs-137	30	Am-241	432.2
Ba-133	7.2	Am-243	7.38E3
Sm-151	87	Cm-243	28.5
Eu-152	12	Cm-244	18.1
Eu-154	16	*:Activated Metal; **:Metastable	

### 2.3.4. SKB 於 SAFE 計畫中篩選出重要核種

瑞典核子燃料及廢棄物管理公司 (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB) 於 SAFE 計畫中評選出重要核種進行安全評估 (Compilation of data for radionuclide transport analysis, R-01-14; Radionuclide release and dose from the SFR repository, R-01-18) (SKB, 2002a, 2002b)，並於報告中提到並非所有核種都是貢獻主要劑量的核種，並以飲用井水情節

(Drinking Well Scenario)進行關鍵核種篩選。首先假設處置場封閉後，所有核種存量皆全部釋放至井水中，並假設每人每年飲用水量為 600 公升，每人每年有效劑量的標準為 0.01mSv/yr，透過關鍵群體抽水飲用，計算 100 年後(西元 2130 年)的核種活度，用以評選超出關鍵群體有效劑量標準之放射性核種，進行後續處置場之功能/安全分析評估；除藉由上述飲用井水情節進行關鍵核種篩選，更考量對總有效劑量貢獻顯著之核種，視其為關鍵核種。經由上述篩選規則所選出來的關鍵核種共 30 種，如表 12 所示。

表 12 瑞典 SKB 報告篩選之關鍵核種列表

核種	半化期(yr)	核種	半化期(yr)
H-3	12.33	Cd-113m	13.6
C-14 <sup>inorg</sup> & C-14 <sup>org</sup>	5730	Sn-126	1E5
Cl-36	3.1E5	I-129	1.57E7
Ni-59	7.6E4	Cs-135	3E6
Co-60	5.27	Cs-137	30
Ni-63	100	Sm-151	87
Se-79	6.5E4	Eu-152	12
Sr-90	28.9	Eu-154	16
Zr-93	1.5E6	Ho-166m	1.2E3
Nb-93m	13.6	Pu-238	86.4
Nb-94	2E4	Pu-239	2.4E4
Mo-93	3.5E3	Pu-240	6580
Tc-99	2.13E5	Pu-242	3.79E5
Pd-107	6.5E6	Am-241	432.2
Ag-108m	127		

### 2.3.5. 日本原子力安全委員會於 2006 年篩選關鍵核種

日本原子力安全委員會(2006)提出重要核種選定與濃度上限值相關報告，應用核種濃度大小及曝露劑量評估進行重要放射性核種選擇。日本原子力安全委員會根據《反應爐管理法》修訂案提出“放射性濃度上限值”，並於 2007 年 5 月宣佈低放射性廢棄物放射性濃度的新標準值，即“關於處置低放射性廢棄物的放射性濃度上限值”。依據放射性濃度上限值作為關鍵核種之選擇，該放射性濃度上限值之決定係依據下列方式：

- (1) 放射性限制：為確保安全，對廢料體、坑道等設計皆有安全要求，同時規定淺地層處置放射性廢棄物的放射性標準，即放射性濃度需要設置一個上限。
- (2) 放射性濃度上限和曝露劑量評估：“濃度上限”是依據特定處置地點的自然條件資料（從地質、水文、地形、氣候等方面的實際測量和觀測獲得的資料）進行計算，根據計畫的處置方法、處置量、管理期限等，及某些安全評估的概念，計算處置廢棄物



的放射性核種引起的曝露劑量，並評估處置是否安全。在“監管期”內，對每個階段的預期曝露途徑進行生物圈劑量評估，並確認評估結果沒有超過目前法規限值，該曝露劑量可基於必須合理抑低其輻射劑量概念，盡可能減少。

對於放射性濃度上限值計算，由核反應爐設施產生廢棄物所含放射性核種組成變化不大。另外，從輻射防護的觀點，定義重要典型核種，並計算篩選出 19 種關鍵核種，如表 13 所示。

表 13 日本原子力安全委員會篩選之關鍵核種列表

核種	半衰期(yr)	核種	半衰期(yr)
H-3	12.33	U-235	7.1E8
C-14	5730	Np-237	2.14E6
Cl-36	3.1E5	U-238	4.47E9
Co-60	5.27	Pu-238	86.4
Ni-63	100	Pu-239	2.4E4
Sr-90	28.9	Pu-240	6580
Tc-99	2.13E5	Pu-241	14.4
I-129	1.57E7	Am-241	432.2
Cs-137	30	Am-242m	152
U-234	2.47E5		

### 2.3.6. 國內過去相關計畫篩選出重要核種

郭明傳等(2007)提出模式評估前，先行刪除較不重要的核種，以節省模式評估之人力與時間，其刪選原則為：(i)刪除半化期比氫(H-3)短的核種，因為此類核種半化期短，其數量/活度很快衰變到可忽略的程度；(ii)刪除 300、1,000 及 100,000 年時輻射劑量不及總劑量 0.01%的核種，(iii)參考其它國家相關報告，篩選出重要且具代表性之核種，並利用具代表性之核種進行低放射性廢棄物近地表處置之全系統評估，關鍵核種則如表 14 所示。

表 14 國內過去相關計畫篩選之關鍵核種列表

核種	半化期(yr)	核種	半化期(yr)
H-3	12.33	Nb-94	2E4
C-14	5730	Tc-99	2.13E5
Ni-59	7.6E4	I-129	1.57E7
Ni-63	100	Cs-137	30
Sr-90	28.9	Am-241	432.2

台電公司曾於 2010(台電公司，2010)提出之關鍵核種篩選及分析方法，該關鍵核種篩

選條件與步驟，如圖 9：

- 一、考慮不同來源的低放射性廢棄物所含核種及總活度及核能電廠運轉廢棄物所含核種及總活度、其他運轉廢棄物所含核種及總活度、除役廢棄物所含核種及總活度，假設不同來源廢棄物的核種總活度均勻分配於不同數量的盛裝容器(此處設定為 55 加侖桶)。
- 二、刪除半化期小於 5 年之核種。
- 三、假定處置場封閉後，桶內混凝土固化體均為充滿水的飽和情況，其孔隙率為 0.15，含水體積為  $0.03\text{m}^3$ 。
- 四、假設 55 加侖桶內僅為單一之水溶劑且無吸附作用產生，各核種於水中溶解度參考 SKB R-01-18 報告所列，若無溶解度資料時則假設其為無限溶解。
- 五、依前述條件計算單桶核種濃度，並假設關鍵群體直接攝入 1,095 公升/年之水量(游離輻射防護安全標準附表四~二)，並計算各核種對人體產生之有效劑量。
- 六、依運轉與除役廢棄物來源進行分析，並選取高於  $0.25\text{mSv/yr}$  法規限代之核種。
- 七、為完整分析各廢棄物來源之關鍵核種，取其聯集做為最終處置場規劃分析時所需考量之關鍵核種，共計 14 種，如表 15 所示。

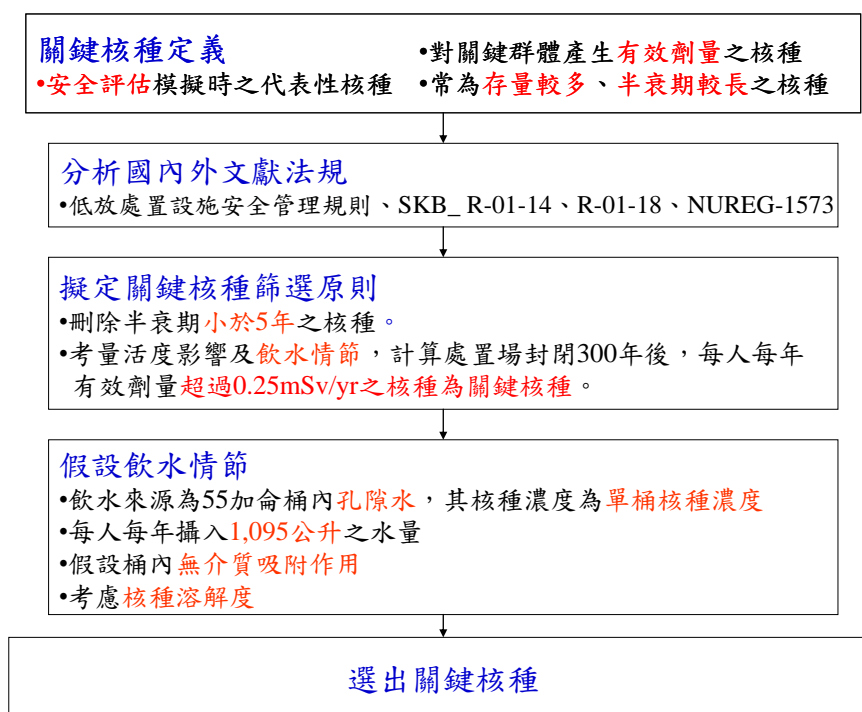


圖 9 關鍵核種篩選條件與步驟

表 15 不同來源之低放廢棄物關鍵核種列表

最終處置場廢棄物		電廠運轉廢棄物 28 萬桶		其他運轉廢棄物 33,000 桶		除役廢棄物 68.4 萬桶	
關鍵核種(14 種)		關鍵核種(11 種)		關鍵核種(9 種)		關鍵核種(7 種)	
核種	半化期 (yr)	核種	半化期 (yr)	核種	半化期 (yr)	核種	半化期 (yr)
C-14	5730	C-14	5730			C-14	5730
Ni-59	7.6E4	Ni-59	7.6E4			Ni-59	7.6E4
Ni-63	100	Ni-63	100			Ni-63	100
Sr-90	28.9	Sr-90	28.9	Sr-90	28.9	Sr-90	28.9
Mo-93	3.5E3					Mo-93	3.5E3
Nb-94	2E4			Nb-94	2E4	Nb-94	2E4
Tc-99	2.13E5	Tc-99	2.13E5				
I-129	1.57E7	I-129	1.57E7	I-129	1.57E7		
Cs-137	30	Cs-137	30	Cs-137	30	Cs-137	30
Np-237	2.14E6			Np-237	2.14E6		
Pu-238	86.4	Pu-238	86.4	Pu-238	86.4		
Pu-239	2.4E4	Pu-239	2.4E4	Pu-239	2.4E4		
Pu-240	6580	Pu-240	6580	Pu-240	6580		
Am-241	432.2	Am-241	432.2	Am-241	432.2		

## 2.4. 本章小結

本章蒐集瑞典 SR-PSU TR-14-09 技術報告有關關鍵核種之篩選程序及方法。摘述台電公司 LLWD2016 有關關鍵核種篩選程序及結果。並與國內外有關關鍵核種之篩選進行比較，本章列出國內外關鍵核種篩選結果列表比較如表 16。由於 LLWD2016 選擇核種之方式，係以對人類健康潛在影響程度作為考量，作為關鍵核種篩選標準，並計算核種對人類可能造成之年有效劑量(以下均指個人年有效劑量)。所選出之關鍵核種共 12 個，其中包括 2 個 TRU 核種，以及 1 個子核種。由於該方法於各不同時間下之核種劑量佔比排序，如表 5 及表 6 所示。LLWD2016 指出表中各時期之劑量佔比總和均達 99.8%以上，最後以個人年有效劑量佔比超過 1%之核種聯集作為關鍵核種，該方法假設處置場封閉後，處置窖內為充滿水的飽和情況，人類鑿井至處置深度並直接飲用井水，考慮人類曝露劑量為最後篩選考量，該 LLWD2016 關鍵核種篩選方法尚屬保守，該方法基本上可行。惟 LLWD2016 該方法對於 Nb-94 則未篩選出，表 14 列出 Nb-94 於台電 2010 年及郭明傳等(2007)皆有篩選。另 Np-237 於台電 2010 年亦有篩選，但 LLWD2016 卻未篩選出 Np-237。Nb-94 及 Np-237 兩個核種仍需了解其篩選結果之有效劑量佔比。

本研究發現 SR-PSU 作業方法，係根據兩個標準(1.放射性核種的半化期為 10 年或更

長，2.在處置場封閉時攝入放射性核種的輻射劑量超過 10 mSv)，篩選放射性核種進行放射性核種傳輸計算，該方法具有更嚴苛篩選條件的篩選標選及限制條件，建議可針對 SR-PSU 作業方法，利用核種盤存量資料參考該方法進行放射性核種傳輸計算及評比，以比較不同篩選條件的核種篩選結果。

由於國內場址位置仍未確定，未來若場址確定可應用放射性濃度上限和曝露劑量評估方式，考量特定處置地地點自然條件的資料（從地質、水文、地形、氣候等方面的實際測量和觀測獲得的資料）定義“濃度上限”，並再根據計畫的處置方法、處置容量、管理期限等，根據安全評估的概念，計算由處置廢棄物的放射性核種外釋後之核種傳輸及引起的曝露劑量，將可進一步更確立所選取核種以生物圈環境之核種傳輸模擬得到曝露劑量，根據曝露劑量結果進行核種篩選。

表 16 比較國內外關鍵核種篩選結果

核種	半化期 (年)	LLWD2016	SR-PSU (2014)	台電 2010 年	郭明傳等 (2007)	SKB SAFE 計畫 (2001)	日本原子 力安全委 員會(2006)	美國 INEEL (1999)	美國 DOE(2000)	美國 NRC 10 CFR 61 (1998)
H-3	12.33		V		V	V	V	V	V	V
C-14 & C-14*	5730	V	V	V	V	V	V	V	V	V
Al-26	7.4E5								V	
Cl-36	3.1E5		V			V	V		V	
K-40	1.29E9								V	
Ca-41	1.03E5		V							
Ni-59	7.6E4	V	V	V	V	V		V	V	V
Co-60	5.27	V	V			V	V	V	V	V
Ni-63 & Ni-63*	100	V	V	V	V	V	V	V	V	V
Se-79	6.5E4		V			V			V	
Sr-90	28.9	V		V	V	V	V	V	V	V
Y-90 Sr-90 子核種	0.007317	V								
Zr-93	1.5E6					V			V	
Mo-93	3.5E3		V			V				
Nb-93m	13.6					V			V	
Nb-94	2E4		V	V	V	V		V	V	V
Tc-99	2.13E5	V	V	V	V	V	V	V	V	V
Pd-107	13.6		V			V				
Ag-108m	127					V				
Cd-113**	13.6		V			V			V	
Sn-121**	76								V	

核種	半化期 (年)	LLWD2016	SR-PSU (2014)	台電 2010 年	郭明傳等 (2007)	SKB SAFE 計畫 (2001)	日本原子 力安全委 員會(2006)	美國 INEEL (1999)	美國 DOE(2000)	美國 NRC 10 CFR 61 (1998)
Sn-126	1E5					V			V	
I-129	1.57E7	V	V	V	V	V	V	V	V	V
Ba-133	7.2		V						V	
Cs-135	3E6		V			V			V	
Cs-137	30	V		V	V	V	V	V	V	V
Sm-151	87		V			V			V	
Eu-152	12					V			V	
Eu-154	16					V			V	
Ho-166m	1.2E3		V			V				
Ra-226	1602								V	
Ra-228	6.7								V	
Th-229	7340								V	
Th-230	8E4								V	
Th-232	1.4E10								V	
Pa-231	3.25E4								V	
U-232	72								V	
U-233	1.62E5								V	
U-234	2.47E5						V		V	
U-235	7.1E8						V		V	
U-236	2.39E7								V	
U-238	4.47E9						V	V	V	
Np-237	2.14E6			V			V	V	V	
Pu-238	86.4	V		V		V	V		V	

核種	半化期 (年)	LLWD2016	SR-PSU (2014)	台電 2010 年	郭明傳等 (2007)	SKB SAFE 計畫 (2001)	日本原子 力安全委 員會(2006)	美國 INEEL (1999)	美國 DOE(2000)	美國 NRC 10 CFR 61 (1998)
Pu-239	2.4E4			V		V	V	V	V	
Pu-240	6580			V		V	V		V	
Pu-241	14.4						V	V	V	V
Pu-242	3.79E5					V			V	
Pu-244	8.26E7								V	
Am-241	432.2	V		V	V	V	V	V	V	
Am-242m	152						V			
Am-243	7.38E3								V	
Cm-242	0.45							V		V
Cm-243	28.5								V	
Cm-244	18.1								V	

說明：「V」表示篩選到橫列上之核種



### 3. 生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立

本計畫利用該生物圈劑量評估安全審查模式，RESRAD-OFFSITE 進行生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立，設計情節之生物圈劑量評估結果審驗。以下介紹之，詳細可參考 102 年度完成之低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究及 103 年度完成低放射性廢棄物處置輻射劑量報告，底下摘錄有關內容說明如下，並對於 LLWD2016 提出之生物圈劑量評估參數說明如後：

#### 3.1. RESRAD 模式介紹

##### 3.1.1. RESRAD 程式發展歷程

美國 ARGONNE National Laboratory 為有效評估核種在場內與場外傳輸之曝露劑量與風險，開發 RESRAD 家族程式，RESRAD(onsite)程式最初在 1980 年代初期發展出來，為適應各種需求，包括：核場址除役後廠區土壤之輻射劑量與風險評估，為應用於低放射性廢棄物處置之核種於近場、遠場及生物圈全部傳輸途徑之輻射劑量與風險評估，由於不同狀況、需求、以及使用者之要求，因此在過去 30 年間陸續開發了包括不同模組功能之程式。此整套程式即被稱為 RESRAD 家族程式，過去 30 餘年發展如圖 10 所示。其中 RESRAD(ONSITE)為最初發展之程式模組，可應用於低放射性廢棄物處置則為 RESRAD (OFFSITE) 模組。RESRAD 家族程式已經被保健物理學家和輻防工程師作為輻射風險評估的工具，程式計算場址特有之殘餘放射性物質之法規限值、輻射劑量和現場居民之癌症風險。目前 RESRAD 程式已經被廣泛地使用在美國和世界各國，並已獲聯邦和州政府核准，包括美國能源部 (DOE) 和美國核管會 (NRC)。許多新功能增加到 RESRAD 家族程式；包括結合 ICRP-38 超過 830 核種的核種資料庫，提升機率分析的功能。(Yu, 2000, 2001, 2003, 2007)

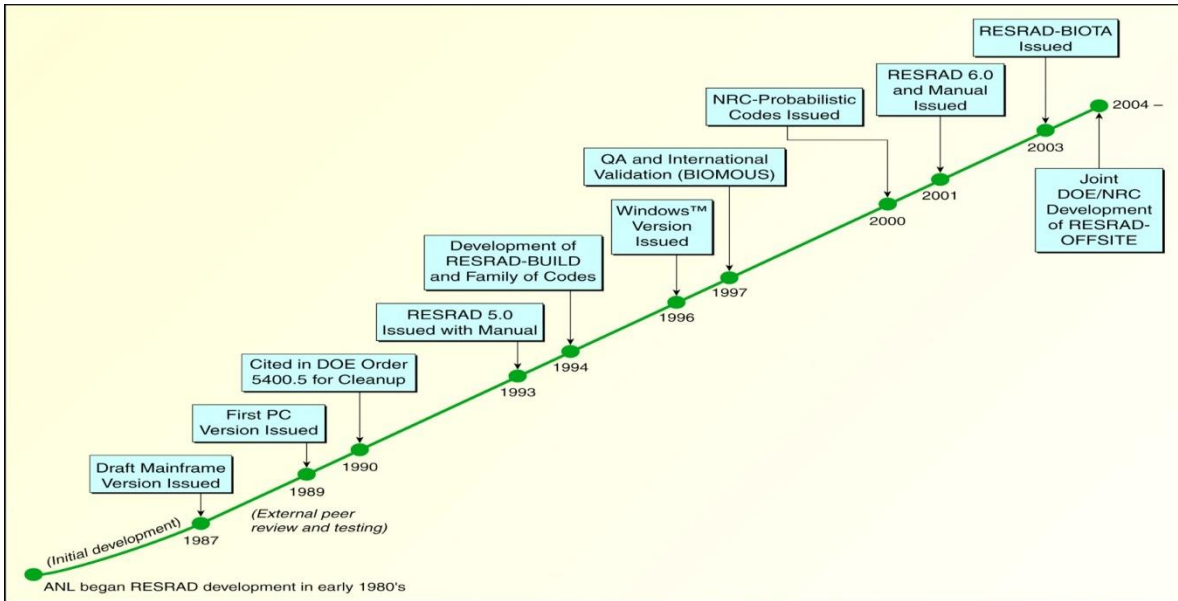


圖 10 RESRAD 程式近 30 年來發展示意圖

### 3.1.2. RESRAD 程式 (ONSITE 及 OFFSITE 模組) 介紹

RESRAD(ONSITE)程式係假設初始污染均勻散佈於同一土層，該土層厚度相同，其上再由厚度一致之表土覆蓋。當表土經由地表逕流侵蝕，其厚度逐漸減少後，將開始影響受污染土層。通常受污染土層位於地下水位面之上、或剛好與地下水位面接觸、或形成 5 種未飽和土層(ONSITE 模組於未飽和土層數目最高可設為 5 層，所以以最多層狀態描述)。主要污染之概念化形狀會隨著曝露及傳輸模式改變。大氣與地下水傳輸模組之假設形狀為四邊形，但是兩個傳輸模式使用之形狀不需一致；而外在曝露模組假設主要污染區形狀為圓形或多邊形。RESRAD-OFFSITE 目前版本使用流量控制模式計算地下水釋出。根據流量控制模式，核種經由主要污染區釋出(滲漏)至地下水，此釋出效應將影響主要污染區濃度，但不會改變其物理尺度。當污染從上層逐漸移除，平衡控制(溶解或吸附)地下水釋出模式將在土層中產生非均一濃度剖面。

RESRAD (OFFSITE 模組) 使用手冊特別針對下列 8 項詳細介紹說明。1.使用手冊目的；2.安裝 (包括：硬體需求、從 RASRAD 網頁安裝、使用光碟安裝、解除安裝)；3.導覽 (包括：目錄與工具欄、RESRAD-DOS 模擬器、圖像導引視窗、連結輸入格式)；4.輸入表單 (包括：名稱、初步輸入、場址規劃、地圖介面、點源、點源釋出與沉降速度、分佈係數、劑量換算與斜率因子、轉移因子、設定途徑、報告時間、儲存時間、物理及水文參數、主要污染：物理及水文資料、農業區與牲畜飼養區-物理

及水文資料、遠場居住區-物理及水文資料、大氣傳輸參數、未飽和含水層、飽和含水層、水利用、地表水體、地下水傳輸參數、攝取率、牲畜攝入量、牲畜飼養因子及植物因子、吸入及外部伽瑪、外部輻射形狀及面積因子、居住因子、氫資料、碳-14 資料、氙資料)；5.結果(包括：報告檢視器、圖表檢視器)；6.強化(包括：每次單一因子敏感性分析、不確定性及概率分析：參數分佈標籤、取樣規範標籤、輸入等級相關標籤、輸出規範標籤、分析步驟標籤、後續迴歸標籤、多因子敏感性分析)；7.協助(包括：應用協助、訊息記錄、網頁、執行時間回饋表單)；8.文獻。

RESRAD(ONSITE 模組)使用手冊特別針對下列 6 項詳細介紹說明。1.RESRAD-ONSITE 模組介紹；2.安裝(包括：硬體需求、作業系統-微軟 95 之後的版本、CPU-奔騰處理器、記憶體 16MB 以上、硬碟空間 16MB、印表機驅動程式、使用光碟安裝、從網頁安裝、解除安裝)；3.導覽(RESRAD-DOS 模擬器、圖像導引視窗、目錄、工具欄)；4.輸入視窗(包括：核種名稱、主要核種之初始濃度、核種傳輸因子、計算參數、污染區域參數、地表覆蓋與污染區之水文數據、飽和層水文資料、無污染未飽和層參數、吸入及外在伽瑪資料、外在輻射面積因子、攝取途徑、植物因子、氫資料、碳 14 資料、劑量轉換因子、劑量因子、氫之風險劑量因子)；5.輸出視窗；6.強化及協助(敏感性分析、不確定性分析、土壤圖層回饋、一般協助、參數描述、圖示協助、網頁、資料蒐集手冊、訊息紀錄)(Yu, 2000, 2001, 2003, 2007)

RESRAD-OFFSITE 與 RESRAD-ONSITE 相同及相異之處。

### 1.地下水釋出子模式

地下水釋出為 RESRAD-ONSITE 惟一的釋出模式，此為一階釋出模式，所以核種釋出到地下水的濃度與核種於土壤中的濃度等比率。在 RESRAD-OFFSITE 程式中也有相同的模式，但是核種濃度會隨著表土混合子模式調整而改變。

### 2.表土混合子模式

RESRAD-ONSITE 中的表土混合子模式忽略污染物被初始混合層侵蝕之可能。由於程式並未強調表土至遠場之機制，所以 RESRAD-ONSITE 較 RESRAD-OFFSITE 適合使用此模式。相對的，RESRAD-OFFSITE 探討風化物質累積於地表水體。

### 3.塵土釋出子模式

雖然 RESRAD-ONSITE 沒有大氣釋出模式，但卻以質量附載因子表現塵土釋出效應(吸入、落葉沉積)；在 RESRAD-OFFSITE 中，質量附載因子則延伸至大氣傳輸模式。

#### 4.曝露模式

RESRAD-OFFSITE 保留所有 RESRAD-ONSITE 的曝露模式(直接外在輻射、塵土及氣吸入以及蔬菜、肉、奶、水產食物及土壤攝取)，並進行些微修改。RESRAD-OFFSITE 中，應用於更多位置及污染途徑，由於灌溉與沉積土壤的污染，可能對主要污染區、農業、農場用地造成影響。RESRAD-OFFSITE 程式中，針對曝露途徑進行些微調整，以符合程式之數值性質，並便於遠場地區應用。

#### 5.地下水移流傳輸模式

RESRAD-ONSITE 之地下水傳輸模式考量子核種間不同的傳輸速率；在 RESRAD-OFFSITE 除了延用此移流傳輸模式，並增加延散傳輸效應。儘管移流與延散的程式基本概念相似，但是其建置過程仍有不同。RESRAD-ONSITE 以數值方式評估核種在井中與地表水之濃度，並以解析解分析方式表示。在 RESRAD-OFFSITE 程式中，核種傳輸經由分層模擬(未飽和含水層、飽和含水層)，數值計算各分層流通量隨時間改變之變化量。

#### 6.RESRAD-OFFSITE 整合模組

RESRAD-OFFSITE 程式共整合：主要污染源之計算模組、大氣傳輸、地下水傳輸、遠場累積與曝露、由使用者介面處理資訊之輸入模組、單一參數敏感性分析之管理、產生文字報告模組、概率/不確定性分析模組。

### 3.1.3. RESRAD 程式理論

#### 1.受污染區域

假設初始污染均勻散佈於同一土層，該土層厚度相同，其上再由厚度一致之表土覆蓋。當表土經由地表逕流侵蝕，其厚度逐漸減少後，將開始影響受污染土層。通常受污染土層位於地下水位面之上、或剛好與地下水位面接觸、或形成 5 種部分飽和土層，以上敘述係針對主要污染之概念化形狀會隨著曝露及傳輸模式改變。大氣與地下水傳輸模組之假設形狀為四邊形，但是兩個傳輸模式使用之形狀不需一致；而外在曝

露模組假設主要污染區形狀為圓形或多邊形。

RESRAD-OFFSITE 是使用通量控制模型計算污染物釋出至地下水。根據流量控制模式，核種經由主要污染區釋出(滲漏)至地下水，此釋出效應將影響主要污染區濃度，但不會改變其物理尺度。當污染從上層逐漸移除，平衡控制(溶解度或吸附)地下水釋出模式將在土層中產生非均勻濃度剖面。

塵土釋出至大氣、污染土壤釋出至地表逕流，發生於主要污染上方之表土層。因此釋出將減少主要污染區域之核種數量，但不會降低地表水下的主要污染濃度。藉由侵蝕作用造成 H-3 與 C-14 的釋出，會發生在所有污染深度內。在 RESRAD-OFFSITE 程式中，此現象可在污染區所有深度統一表示，並影響主要污染區濃度，而非影響其物理尺度。

## 2. 地下水傳輸模式

地下水途徑之概念化模式包含零到五個水平含水層及一個非侷限飽和含水層。部分飽和含水層之水流方向為垂直方向。程式包含：對流及延散傳輸之方向與水流方向相同、延散傳輸方向與水流方向垂直。主要污染之平面檢視(水平面之形狀)假設為四邊形，其中一對邊與地下水流方向水平。由於在部分飽和層之傳輸方向為垂直方向，所以在部分飽和層之污染團仍然維持矩形。

在建構概念化程式前，須先將模式轉換成數學式表示，在概念化模式中，每一個部分飽和層都為視為長方體，離開污染區域的核種通量以時間函數表示，此通量穿越部分飽和層上方的最上層邊界，而地下水傳輸模式計算穿越部分飽和層下界之通量。

當大量核種穿越傳輸層，有些核種會經歷衰變，最終以子核種之形態離開傳輸層，剩餘未經歷衰變之核種，以原本之形態離開傳輸層。考量到核種在同層傳輸之縱向擴散效應，本章節推導之方程式將輸出通量以輸入通量的函數表示。子核種之傳輸共有兩個方案，其一為考慮核種經過衰變鏈產生子核種之分佈係數，並忽略縱向擴散效應；其二為考量縱向擴散效應，忽略分佈係數效應。

### 3.1.4. 對人體之輻射劑量

考慮空氣，土壤和水傳輸途徑，藉由各種評估模式分析廢料體、近場、遠場之核種傳輸，然後模擬得到進入生物圈的核種濃度，再利用核種劑量係數(劑量轉換因子)

(Dose coefficient) 與食物攝取率等參數計算對於人體輻射劑量。曝露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝取水、攝取食物、外部曝露和吸入等四部分：

$$Dose_{total} = Dose_{ing,water} + Dose_{ing,food} + Dose_{ext} + Dose_{inh} \quad (3.1)$$

其中：

- $Dose_{ing,water}$  : 攝取水途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{ing,food}$  : 攝取食物途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{ext}$  : 外部曝露途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]
- $Dose_{inh}$  : 吸入途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]

攝取水的單一核種劑量取決於用水量[m<sup>3</sup> y<sup>-1</sup>]和所消耗水中核種濃度[Bq m<sup>-3</sup>]，

如下式：

$$Dose_{ing,water} = AC_{ing,water} \text{ingRate}_{water} \text{doseCoef}_{ing,water} \quad (3.2)$$

其中：

- $AC_{ing,water}$  : 飲用水所含核種活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]
- $\text{ingRate}_{water}$  : 每年飲用水攝取率 [m<sup>3</sup> y<sup>-1</sup>]
- $\text{doseCoef}_{ing,water}$  : 攝取飲用水中核種的劑量係數(劑量轉換因子)[Sv Bq<sup>-1</sup>]

由於食物攝取途徑單一核種所造成的內在曝露取決於食物中活度濃度、食物消耗量、與飲食所有食物量，攝取食物途徑的核種劑量為

$$Dose_{ing,food} = \text{ingRate}_c \text{doseCoef}_{ing,food} \sum AC_{food,i} f_{cont,food,i}, \quad \sum f_{cont,food,i} \leq 1 \quad (3.3)$$

其中：

- $\text{ingRate}_c$  : 成年人每年能量需求量[kgC y<sup>-1</sup>](以碳單位表示)
- $AC_{food,i}$  : 某食物 i 含核種活度濃度[Bq kgC<sup>-1</sup>],
- $f_{cont,food,i}$  : 飲食中攝取某食物 i 的比率[kgC kgC<sup>-1</sup>]
- $\text{doseCoef}_{ing,food}$  : 劑量係數(劑量轉換因子)[Sv Bq<sup>-1</sup>]

外部曝露由表土土壤的核種活度濃度、上層土壤的密度、於地表停留時間與外在接觸的劑量參數所決定，外部曝露途徑的核種劑量為：

$$Dose_{ext} = AC_{ground} \text{dens}_{ground} \text{texposure} \text{doseCoef}_{ext} \quad (3.4)$$

其中：

- $AC_{ground}$  : 表土土壤的核種活度濃度[Bq kg<sub>DW</sub><sup>-1</sup>]  
 $dens_{ground}$  : 上層土壤的密度[kg<sub>DW</sub> m<sup>-3</sup>]  
 $t_{exposure}$  : 於地表停留時間[h y<sup>-1</sup>]  
 $doseCoef_{ext}$  : 外在接觸途徑的劑量參數[(Sv h<sup>-1</sup>)/(Bq m<sup>-3</sup>)]

吸入途徑的核種劑量由空氣中核種活度濃度、吸入率與吸入途徑的核種劑量參數(劑量轉換因子)所決定，吸入途徑的核種劑量為：

$$Dose_{inh} = AC_{air} inhRate t_{exposure} doseCoef_{inh} \quad (3.5)$$

其中：

- $AC_{air}$  : 空氣中核種活度濃度[Bq m<sup>-3</sup>]  
 $inhRate$  : 吸入率[m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>]  
 $doseCoef_{inh}$  : 吸入途徑的核種劑量參數[Sv Bq<sup>-1</sup>]

### 3.1.5. 曝露途徑與曝露情境

RESRAD-OFFSITE 計算曝露途徑之通則與 RESRAD-ONSITE(Yu et al. 2001)相同。兩程式主要之差別在於，RESRAD-OFFSITE 使用曝露之介質濃度，而 RESRAD-ONSITE 使用環境轉換因子。本計畫將針對 RESRAD 程式主要污染與其釋出之顆粒與氣體之劑量、風險，另外也亦說明主要污染釋出致地表逕流與地下水之劑量、風險。

#### 1. 土壤污染之外在輻射

針對污染土壤之外在輻射，程式模擬以下狀況：

- 當居住處所之室內、外位於現場，位於主要污染上方，曝露於主要污染之輻射。
- 當居住處所之室內、外位於遠場，不在主要污染區，曝露於主要污染之輻射。
- 當居住處所之室內、外位於遠場，並在遠場居住區曝露於累積土壤之輻射。
- 當農業區位於遠場，並曝露於農業區累積土壤之輻射。

以上四個情況之曝露結果於 RESRAD 模擬結果報告。

如同 RESRAD-ONSITE 使用者手冊之附錄 A(Yu et al. 2001)介紹，以下參數之乘積為上述四個情況之計算結果：

- 對於一無限厚度或面積之體積源項，可於劑量因子之函式庫選擇外部輻射之劑量轉換因子、斜率因子([mrem yr<sup>-1</sup>]/[pCi g<sup>-1</sup>] 或 [risk yr<sup>-1</sup>]/[pCi g<sup>-1</sup>])。(如表 17 至表 22)



- 土壤之核種濃度( $\text{pCi g}^{-1}$ )
- 地區遮蔽因子的時間及室內建築物遮蔽
- 覆蓋與深度因子解釋污染物之有限厚度以及污染物與受體間之乾淨隔絕。
- 區域形狀因子解釋污染土壤之有限面積形狀，及受體位置跟污染物之關係。

遮蔽因子與核種有關，主要污染的形狀可分為圓形或多邊形。程式可設頂遠場或現場之居住地位置與污染物位置之關係，其中居住及農業區的遠場位置假設為圓形，當計算外在輻射之曝露途徑時，受體位於圓心。

## 2.吸入污染塵土

程式根據以下狀況模擬污染顆粒吸入之效應。

- 當現場居住區之室內、外位於主要污染上方，吸入從主要污染釋出之污染顆粒。
- 當遠場居住區之室內、外位於主要污染外側，吸入從主要污染釋出及大氣傳輸至遠場住宅區之污染顆粒。
- 位於遠場農業區，吸入從主要污染釋出及大氣傳輸至遠場農區之污染顆粒。

以上四個情況之曝露結果於 RESRAD 模擬結果報告。

如同 RESRAD-ONSITE 使用者手冊之附錄 B (Yu et al. 2001)介紹，以下參數之乘積為上述四個情況之計算結果：

- 從劑量因子之函式庫選擇核種之劑量轉換因子(如表 17 至表 19)、斜率因子( $[\text{mrem pCi}^{-1}]$  或  $[\text{risk pCi}^{-1}]$ ) (如表 20 至表 22)
- 地區遮蔽因子的時間及室內建築之塵土過濾
- 吸入率( $\text{m}^3 \text{ yr}^{-1}$ )
- 曝露位置之空氣核種濃度( $\text{pCi m}^{-3}$ )

下列因子乘積為現地位置之核種濃度：

- 主要污染濃度( $\text{pCi g}^{-1}$ )
- 表土體積混合因子
- 主要污染密度與混合區密度之比值
- 主要污染上方，空氣中吸入塵土顆粒濃度( $\text{g m}^{-3}$ )
- 面積因子可解釋從主要污染處釋放至無污染處之稀釋(Chang et al. 1998)。

以下參數之乘積為遠場之空氣濃度

- 遠場位置之大氣傳輸因子( $\text{Chi}/\text{Q}$ )( $\text{s m}^{-3}$ )。
- 核種大氣釋出率( $\text{pCi yr}^{-1}$ )。
- 秒/年之轉移因子

程式會計算吸入 C-14 氣體( $\text{CO}_2$ )及 H-3 蒸氣形式( $\text{H}_2\text{O}$ )，並列於曝露途徑報告。因此 C-14 之曝露報告包含顆粒及氣體形式，而 C-14 之顆粒及氣體形式有不同的劑量轉移因子。H-3 的吸入途徑報告為蒸氣形式，其中有 50%的  $^3\text{HHO}$  經由皮膚吸收，其吸收率為呼吸率的一半(ICRP 1979–1982)。

### 3.吸入氬及短週期子核種

RESRAD-OFFSITE 根據以下四種狀況模擬氬及短週期子核種之吸入效應：

- 吸入從居住區(現場、遠場居住區)污染水釋放之氬及短週期子核種。
- 吸入在現場居住區(室內及室外)之主要污染及子核種所釋放之氬及短週期子核種。
- 吸入在遠場居住區(室內及室外)之主要污染及經由大氣傳輸至遠場居住區所產生之子核種所釋放之氬。
- 吸入在農業區(室外)之主要污染及經由大氣傳輸至農業區所產生之子核種所釋放之氬。

其中前兩項所使用之方法詳見 RESRAD-ONSITE 使用者手冊之附錄 C (Yu et al. 2001)，最後兩項模擬氬及其子核種在各位置濃度。程式根據從主要污染釋出之氬通量，以及氬與子核種之衰變調整因子( $\text{Chi}/\text{Q}$ )，從大氣傳輸模式計算濃度。

### 4.攝取水、植物、奶類、肉類、水生食物以及參雜之土壤

水、植物、奶類、肉類、水生食物之曝露乃根據以下之因子計算：

- 從選擇的劑量因子之函式庫決定核種及食物之劑量轉換因子、斜率因子( $[\text{mrem pCi}^{-1}]$  或  $[\text{risk pCi}^{-1}]$ )
- 攝取率( $\text{kg yr}^{-1}$  或  $1 \text{ yr}^{-1}$ )
- 由污染區域獲得之食物比例
- 食物的核種濃度( $\text{pCi} [\text{kg}]^{-1}$ ,  $\text{pCi L}^{-1}$ )

程式根據現場、遠場之因子計算參雜在食物中的土壤之曝露量：

- 從選擇的劑量因子之函式庫決定核種之劑量轉換因子（如表 17 至表 19）、斜率因子([mrem pCi<sup>-1</sup>] 或 [risk pCi<sup>-1</sup>])（如表 20 至表 22）
- 土壤攝取率(g yr<sup>-1</sup>)
- 位於現場或遠場之時間比例
- 土壤在現場或遠場之核種濃度(pCi g<sup>-1</sup>)

表 17 RESRAD 劑量轉換因子(DCFs)

核種 <sup>b</sup>	外在 DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class <sup>c</sup>	吸入 DCFs (mrem/pCi)	f <sub>1</sub> <sup>d</sup>	攝食 DCF (mrem/pCi)
Ac-227	2.01E+00	D	6.72	1.00E-03	1.48E-02
Ag-108m+D	9.65E+00	Y	2.83E-04	5.00E-02	7.62E-06
Ag-110m+D	1.72E+01	Y	8.03E-05	5.00E-02	1.08E-05
Al-26	1.74E+01	D	7.96E-06	1.00E-02	1.46E-05
Am-241	4.37E-02	W	4.44E-01	1.00E-03	3.64E-03
Am-243+D	8.95E-01	W	4.40E-01	1.00E-03	3.63E-03
Au-195	2.07E-01	Y	1.30E-05	1.00E-01	1.06E-06
Ba-133	1.98E+00	D	7.86E-06	1.00E-01	3.40E-06
Be-7	2.88E-01	Y	3.21E-07	5.00E-03	1.28E-07
Bi-207	9.38E+00	W	2.00E-05	5.00E-02	5.48E-06
C-14	1.34E-05	(ORGANIC)	2.09E-06	1	2.09E-06
Ca-41	0.00E+00	W	1.35E-06	3.00E-01	1.27E-06
Ca-45	6.26E-05	W	6.62E-06	3.00E-01	3.16E-06
Cd-109	1.47E-02	D	1.14E-04	5.00E-02	1.31E-05
Ce-141	3.18E-01	Y	8.95E-06	3.00E-04	2.90E-06
Ce-144+D	3.24E-01	Y	3.74E-04	3.00E-04	2.11E-05
Cf-252	1.76E-04	W	1.57E-01	1.00E-03	1.08E-03
Cl-36	2.39E-03	W	2.19E-05	1	3.03E-06
Cm-243	5.83E-01	W	3.07E-01	1.00E-03	2.51E-03
Cm-244	1.26E-04	W	2.48E-01	1.00E-03	2.02E-03
Cm-245	3.40E-01	W	4.55E-01	1.00E-03	3.74E-03
Cm-246	1.16E-04	W	4.51E-01	1.00E-03	3.70E-03
Cm-247	1.86E+00	W	4.14E-01	1.00E-03	3.42E-03
Cm-248	8.78E-05	W	1.65	1.00E-03	1.36E-02
Co-57	5.01E-01	Y	9.07E-06	3.00E-01	1.18E-06
Co-60	1.62E+01	Y	2.19E-04	3.00E-01	2.69E-05
Cr-51	1.74E-01	Y	3.34E-07	1.00E-01	1.47E-01
Cs-134	9.47E+00	D	4.63E-05	1	7.33E-05
Cs-135	3.83E-05	D	4.55E-06	1	7.07E-06
Cs-137+D	3.41E+00	D	3.19E-05	1	5.00E-05
Eu-152	7.01E+00	W	2.21E-04	1.00E-03	6.48E-06
Eu-154	7.68E+00	W	2.86E-04	1.00E-03	9.55E-06
Eu-155	1.82E-01	W	4.14E-05	1.00E-03	1.53E-06
Fe-55	0.00E+00	D	2.69E-06	1.00E-01	6.07E-07
Fe-59	7.64E+00	D	1.48E-05	1.00E-01	6.70E-06
Gd-152	0.00E+00	D	2.43E-01	3.00E-04	1.61E-04
Gd-153	2.45E-01	D	2.38E-05	3.00E-04	1.17E-06
Ge-68+D	5.62E+00	W	5.19E-05	1	1.41E-06
H-3	0.00E+00	(H <sub>2</sub> O)	6.40E-08	1	6.40E-08
I-125	1.66E-02	D	2.42E-05	1	3.85E-05
I-129	1.29E-02	D	1.74E-04	1	2.76E-04
I-131	2.17E+00	D	3.29E-05	1	5.33E-05
In-111	1.96E+00	W	8.40E-7	2.00E-02	1.33E-06
Ir-192	4.61E+00	Y	2.82E-05	1.00E-02	5.74E-06
K-40	1.04E+00	D	1.24E-05	1	1.86E-05

表18 RESRAD劑量轉換因子(表15續)

核種 <sup>b</sup>	外在 DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class <sup>c</sup>	吸入		攝食
			DCFs (mrem/pCi)	f <sub>1</sub> <sup>d</sup>	DCF (mrem/pCi)
La-138	7.96E+00	D	1.37E-03	1.00E-03	5.88E-06
Mn-54	5.16E+00	W	6.70E-06	1.00E-01	2.77E-06
Na-22	1.37E+01	D	7.66E-06	1	1.15E-05
Nb-93m	1.04E-04	Y	2.92E-05	1.00E-02	5.21E-07
Nb-94	9.68E+00	Y	4.14E-04	1.00E-02	7.14E-06
Nb-95	4.69E+00	Y	5.81E-06	1.00E-02	2.57E-06
Ni-59	0.00E+00	(VAPOR)	2.70E-06	5.00E-02	2.10E-07
Ni-63	0.00E+00	(VAPOR)	6.29E-06	5.00E-02	5.77E-07
Np-237+D	1.10E+00	W	5.40E-01	1.00E-03	4.44E-03
Pa-231	1.91E-01	W	1.28	1.00E-03	1.06E-02
Pb-210+D	6.05E-03	D	1.38E-02	2.00E-01	5.37E-03
Pm-147	5.01E-05	Y	3.92E-05	3.00E-04	1.05E-06
Po-210	5.23E-05	W	9.40E-03	1.00E-01	1.90E-03
Pu-238	1.51E-04	W	3.92E-01	1.00E-03	3.20E-03
Pu-239	2.95E-04	W	4.29E-01	1.00E-03	3.54E-03
Pu-240	1.47E-04	W	4.29E-01	1.00E-03	3.54E-03
Pu-241+D	1.89E-05	W	8.25E-03	1.00E-03	6.85E-05
Pu-242	1.28E-04	W	4.11E-01	1.00E-03	3.36E-03
Pu-244+D	7.73E+00	W	4.03E-01	1.00E-03	3.32E-03
Ra-226+D	1.12E+01	W	8.60E-03	2.00E-01	1.33E-03
Ra-228+D	5.98E+00	W	5.08E-03	2.00E-01	1.44E-03
Ru-106+D	1.29E+00	Y	4.77E-04	5.00E-02	2.74E-05
S-35	1.49E-05	W	2.48E-06	8.00E-01	7.33E-06
Sb-124	1.17E+01	W	2.52E-05	1.00E-02	1.01E-05
Sb-125	2.45E+00	W	1.22E-05	1.00E-01	2.81E-06
Sc-46	1.27E+01	Y	2.96E-05	1.00E-04	6.40E-06
Se-75	1.98E+00	W	8.47E-06	8.00E-01	9.62E-06
Se-79	1.86E-05	W	9.84E-06	8.00E-01	8.70E-06
Sm-147	0.00E+00	W	7.47E-02	3.00E-04	1.85E-04
Sm-151	9.84E-07	W	3.00E-05	3.00E-04	3.89E-07
Sm-153	1.58E-01	W	1.96E-06	3.00E-04	2.99E-06
Sn-113+D	1.46E+00	W	1.07E-05	2.00E-02	3.19E-06
Sn-126	1.18E+01	W	1.01E-04	2.00E-02	2.11E-05
Sr-85	2.97E+00	Y	5.03E-06	3.00E-01	1.98E-06
Sr-89	9.08E-03	Y	4.14E-05	1.00E-02	9.25E-06
Sr-90+D	2.46E-02	Y	1.31E-03	3.00E-01	1.53E-04
Ta-182	7.94E+00	Y	4.48E-05	1.00E-03	6.51E-06
Tc-99	1.26E-04	W	8.33E-06	8.00E-01	1.46E-06
Tc-99m	5.51E-01	D	3.26E-08	8.00E-01	6.22E-08
Te-125m	1.51E-02	W	7.29E-06	2.00E-01	3.67E-06
Th-228+D	1.02E+01	Y	3.45E-01	2.00E-04	8.08E-04
Th-229+D	1.60E+00	W	2.16	2.00E-04	4.03E-03
Th-230	1.21E-03	W	3.26E-01	2.00E-04	5.48E-04
Th-232	5.21E-04	W	1.64	2.00E-04	2.73E-03
Tl-201	2.76E-01	D	2.35E-07	1	3.00E-07
Tl-202	2.50E+00	D	9.84E-07	1	1.47E-06

表 19 RESRAD 劑量轉換因子

核種 <sup>b</sup>	外在 DCFs (mrem/yr)/(pCi/g)	Class <sup>c</sup>	吸入 DCFs (mrem/pCi)	f <sub>1</sub> <sup>d</sup>	攝食 DCF (mrem/pCi)
Tl-204	4.05E-03	D	2.41E-06	1	3.36E-06
U-232	9.02E-04	Y	6.59E-01	5.00E-02	1.31E-03
U-233	1.40E-03	Y	1.35E-01	5.00E-02	2.89E-04
U-234	4.02E-04	Y	1.32E-01	5.00E-02	2.83E-04
U-235+D	7.57E-01	Y	1.23E-01	5.00E-02	2.67E-04
U-236	2.15E-04	Y	1.25E-01	5.00E-02	2.69E-04
U-238+D	1.52E-01	Y	1.18E-01	5.00E-02	2.69E-04
Xe-131m	2.26E-02	D	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Zn-65	3.70E+00	Y	2.04E-05	5.00E-01	1.44E-05
Zr-93	0.00E+00	D	3.21E-04	2.00E-03	1.66E-06
Zr-95+D	4.52E+00	D	2.36E-05	2.00E-03	3.79E-06

- a External dose conversion factors taken from Eckerman and Ryman (1993), and inhalation and ingestion dose conversion factors are from Eckerman et al. (1988).
- b +D indicates that the dose conversion factors of associated radionuclides (half-life less than 30 days) are included along with the principal radionuclide.
- c The three inhalation classes D, W, and Y correspond to retention half-times of less than 10 days, 10 to 100 days, and greater than 100 days, respectively. (H<sub>2</sub>O) indicates water; (ORGANIC) indicates an organic material; and (VAPOR) indicates a gaseous material.
- d Fraction of a stable element entering the GI tract that reaches body fluids.

表 20 RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子

核種	外在曝露 (Risk/yr)/(pCi/g)	吸入 (Risk/pCi)	食物攝食 (Risk/pCi)	水攝食 (Risk/pCi)	土壤攝食 (Risk/pCi)
Ac-227+D	1.47E-06	2.13E-07	6.51E-10	4.85E-10	6.51E-10
Ag-108m+D	7.19E-06	1.04E-10	1.12E-11	8.14E-12	1.12E-11
Ag-110m+D	1.30E-05	4.51E-11	1.37E-11	9.88E-12	1.37E-11
Al-26	1.33E-05	2.90E-10	2.49E-11	1.73E-11	2.49E-11
Am-241	2.76E-08	3.77E-08	1.34E-10	1.04E-10	1.34E-10
Am-243+D	6.35E-07	3.70E-08	1.41E-10	1.08E-10	1.41E-10
Au-195	1.38E-07	6.48E-12	2.19E-12	1.50E-12	2.19E-12
Ba-133	1.44E-06	3.25E-11	9.44E-12	6.81E-12	9.44E-12
Be-7	2.13E-07	2.13E-13	1.20E-13	8.66E-14	1.20E-13
Bi-207	7.08E-06	1.10E-10	8.14E-12	5.66E-12	8.14E-12
C-14	7.83E-12	1.69E-11	2.00E-12	1.55E-12	2.00E-12
Ca-41	0.00E+00	5.07E-13	4.37E-13	3.53E-13	4.37E-13
Ca-45	3.96E-11	1.28E-11	3.37E-12	2.47E-12	3.37E-12
Cd-109	8.73E-09	2.19E-11	6.70E-12	5.00E-12	6.70E-12
Ce-141	2.27E-07	1.35E-11	6.77E-12	4.63E-12	6.77E-12
Ce-144+D	2.41E-07	1.80E-10	5.19E-11	3.53E-11	5.19E-11
Cf-252	1.80E-11	2.60E-08	1.80E-10	1.80E-10	1.80E-10
Cl-36	1.74E-09	1.01E-10	4.44E-12	3.30E-12	4.44E-12
Cm-243	4.19E-07	3.67E-08	1.23E-10	9.47E-11	1.23E-10
Cm-244	4.85E-11	3.56E-08	1.08E-10	8.36E-11	1.08E-10
Cm-245	2.38E-07	3.81E-08	1.35E-10	1.04E-10	1.35E-10
Cm-246	4.57E-11	3.77E-08	1.31E-10	1.02E-10	1.31E-10
Cm-247+D	1.36E-06	3.49E-08	1.30E-10	1.00E-10	1.30E-10
Cm-248	1.50E-11	1.50E-07	1.30E-09	1.30E-09	1.30E-09
Co-57	3.55E-07	3.74E-12	1.49E-12	1.04E-12	1.49E-12
Co-60	1.24E-05	1.01E-10	2.23E-11	1.57E-11	2.23E-11
Cr-51	1.27E-07	1.67E-13	2.66E-13	1.85E-13	2.66E-13
Cs-134	7.10E-06	6.99E-11	5.14E-11	4.22E-11	5.14E-11
Cs-135	2.36E-11	2.49E-11	5.88E-12	4.74E-12	5.88E-12
Cs-137+D	2.55E-06	1.12E-10	3.74E-11	3.04E-11	3.74E-11
Eu-152	5.30E-06	1.90E-10	8.70E-12	6.07E-12	8.70E-12
Eu-154	5.83E-06	2.11E-10	1.49E-11	1.03E-11	1.49E-11
Eu-155	1.24E-07	1.91E-11	2.77E-12	1.90E-12	2.77E-12
Fe-55	0.00E+00	1.48E-12	1.16E-12	8.62E-13	1.16E-12
Fe-59	5.83E-06	1.47E-11	1.11E-11	7.88E-12	1.11E-11
Gd-152	0.00E+00	9.10E-09	3.85E-11	2.97E-11	3.85E-11
Gd-153	1.62E-07	8.58E-12	2.22E-12	1.52E-12	2.22E-12
Ge-68+D	4.17E-06	1.08E-10	1.03E-11	7.24E-12	1.03E-11
H-3	0.00E+00	8.51E-13	1.44E-13	1.12E-13	1.44E-13
I-125	7.24E-09	2.77E-11	6.29E-11	2.54E-11	6.29E-11
I-129 (vapor)	6.09E-09	1.60E-10	3.22E-10	1.48E-10	3.22E-10
I-131	1.59E-06	5.03E-11	1.34E-10	4.55E-11	1.34E-10
In-111	1.42E-06	8.58E-13	1.85E-12	1.29E-12	1.85E-12
Ir-192	3.40E-06	2.41E-11	1.07E-11	7.36E-12	1.07E-11
K-40	7.97E-07	2.22E-10	3.43E-11	2.47E-11	3.43E-11



表 21 RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子(表 18 續)

核種	外在曝露 (Risk/yr)/(pCi/g)	吸入 (Risk/pCi)	食物攝食 (Risk/pCi)	水攝食 (Risk/pCi)	土壤攝食 (Risk/pCi)
La-138	6.07E-06	3.05E-10	4.96E-12	3.53E-12	4.96E-12
Mn-54	3.89E-06	1.21E-11	3.11E-12	2.28E-12	3.11E-12
Na-22	1.03E-05	9.73E-11	1.26E-11	9.62E-12	1.26E-11
Nb-93m	3.83E-11	5.66E-12	1.17E-12	8.03E-13	1.17E-12
Nb-94	7.29E-06	1.35E-10	1.11E-11	7.77E-12	1.11E-11
Nb-95	3.53E-06	6.44E-12	3.50E-12	2.45E-12	3.50E-12
Ni-59	0.00E+00	1.27E-12	3.89E-13	2.74E-13	3.89E-13
Ni-63	0.00E+00	3.74E-12	9.51E-13	6.70E-13	9.51E-13
Np-237+D	7.96E-07	2.87E-08	9.10E-11	6.73E-11	9.10E-11
Pa-231	1.39E-07	7.62E-08	2.26E-10	1.73E-10	2.26E-10
Pb-210+D	4.17E-09	2.80E-08	1.19E-09	8.88E-10	1.19E-09
Pm-147	3.21E-11	1.61E-11	2.48E-12	1.69E-12	2.48E-12
Po-210	3.95E-11	1.45E-08	2.25E-09	1.77E-09	2.25E-09
Pu-238	7.22E-11	5.22E-08	1.69E-10	1.31E-10	1.69E-10
Pu-239	2.00E-10	5.51E-08	1.74E-10	1.35E-10	1.74E-10
Pu-240	6.98E-11	5.55E-08	1.74E-10	1.35E-10	1.74E-10
Pu-241+D	1.33E-11	8.66E-10	2.28E-12	1.77E-12	2.28E-12
Pu-242	6.25E-11	5.25E-08	1.65E-10	1.28E-10	1.65E-10
Pu-244	2.70E-08	2.70E-08	3.20E-10	3.20E-10	3.20E-10
Ra-226+D	8.49E-06	2.82E-08	5.14E-10	3.85E-10	5.14E-10
Ra-228+D	4.53E-06	4.37E-08	1.43E-09	1.04E-09	1.43E-09
Ru-106+D	9.66E-07	2.23E-10	6.11E-11	4.22E-11	6.11E-11
S-35	8.77E-12	6.55E-12	3.70E-12	2.72E-12	3.70E-12
Sb-124	8.89E-06	3.20E-11	1.85E-11	1.29E-11	1.85E-11
Sb-125	1.81E-06	4.00E-11	6.14E-12	4.37E-12	6.14E-12
Sb-126	1.28E-05	1.29E-11	1.59E-11	1.11E-11	1.59E-11
Sb-126m	6.94E-06	3.32E-14	9.21E-14	6.66E-14	9.21E-14
Sc-46	9.63E-06	2.47E-11	8.88E-12	6.22E-12	8.88E-12
Se-75	1.45E-06	5.00E-12	1.08E-11	8.14E-12	1.08E-11
Se-79	1.10E-11	1.99E-11	9.69E-12	7.29E-12	9.69E-12
Sm-147	0.00E+00	1.26E-08	4.77E-11	3.74E-11	4.77E-11
Sm-151	3.60E-13	9.18E-12	8.07E-13	5.55E-13	8.07E-13
Sm-153	1.06E-07	3.19E-12	7.10E-12	4.85E-12	7.10E-12
Sn-113	2.02E-08	1.45E-11	6.33E-12	4.33E-12	6.33E-12
Sn-126	8.83E-06	4.13E-11	3.92E-11	2.72E-11	3.92E-11
Sr-85	2.20E-06	3.23E-12	3.11E-12	2.26E-12	3.11E-12
Sr-89	7.19E-09	3.02E-11	1.84E-11	1.28E-11	1.84E-11
Sr-90+D	1.96E-08	4.34E-10	9.55E-11	7.40E-11	9.55E-11
Ta-182	6.04E-06	3.74E-11	1.15E-11	7.96E-12	1.15E-11
Tc-99	8.14E-11	3.81E-11	4.00E-12	2.75E-12	4.00E-12
Tc-99m	3.93E-07	6.07E-14	1.14E-13	7.96E-14	1.14E-13
Te-125m	6.98E-09	1.45E-11	4.70E-12	3.33E-12	4.70E-12
Th-228+D	7.79E-06	1.44E-07	4.22E-10	3.00E-10	4.22E-10
Th-229+D	1.17E-06	2.30E-07	7.14E-10	5.29E-10	7.14E-10
Th-230	8.18E-10	3.40E-08	1.19E-10	9.10E-11	1.19E-10
Th-232	3.42E-10	4.33E-08	1.33E-10	1.01E-10	1.33E-10

表 22 RESRAD 程式核種風險評估之斜率因子(表 18 續)

核種	外在曝露 (Risk/yr)/(pCi/g)	吸入 (Risk/pCi)	食物攝食 (Risk/pCi)	水攝食 (Risk/pCi)	土壤攝食 (Risk/pCi)
Tl-201	1.88E-07	6.85E-13	5.00E-13	3.61E-13	5.00E-13
Tl-202	1.83E-06	1.34E-12	2.01E-12	1.49E-12	2.01E-12
Tl-204	2.76E-09	6.07E-11	8.25E-12	5.85E-12	8.25E-12
U-232	5.98E-10	9.25E-08	3.85E-10	2.92E-10	3.85E-10
U-233	9.82E-10	2.83E-08	9.69E-11	7.18E-11	9.69E-11
U-234	2.52E-10	2.78E-08	9.55E-11	7.07E-11	9.55E-11
U-235+D	5.43E-07	2.51E-08	9.73E-11	7.18E-11	9.73E-11
U-236	1.25E-10	2.58E-08	9.03E-11	6.70E-11	9.03E-11
U-238+D	8.66E-08	2.37E-08	1.20E-10	8.73E-11	1.20E-10
Xe-131m	1.41E-08	0	0	0	0
Zn-65	2.81E-06	7.59E-12	1.54E-11	1.17E-11	1.54E-11
Zr-93	0.00E+00	1.52E-11	1.44E-12	1.11E-12	1.44E-12
Zr-95	3.40E-06	2.11E-11	6.59E-12	4.59E-12	6.59E-12

<sup>a</sup> Values for slope factors were taken from FGR-13 (Eckerman et al. 1999) except for Cf-252, Cm-248, and Pu-244. These radionuclide values were obtained from Yu et al. (2001).

### 3.2. RESRAD 生物圈劑量評估程式參數需求

#### 3.2.1. RESRAD 程式參數需求

國內放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估安全審查技術發展所面臨問題，主要是模式選擇與參數選用。RESRAD-OFFSITE 模式輸入條件，需要：場址區域範圍及地圖介面、核種源項濃度、核種源項釋出率與沉降速度、分佈係數、劑量換算與斜率因子、轉移因子、設定釋出途徑、報告及儲存時間、水文物理因子、主要污染區域、農業區域、牲畜飼養區域、遠場住宅區、大氣傳輸、非飽和含水層、飽和含水層、水利用量、地表水、地下水傳輸、攝取率、牲畜攝取飼養因子、植物因子、吸入及外部伽馬、外部輻射的形狀及面積因子、居住率、氦、碳 14、碳 12 質量分率、氫等，該參數核種劑量換算與致癌風險斜率因子已建立於 RESRAD 資料庫內，且 RESRAD 已建立參數使用參考手冊。底下分別針對上述參數說明：

##### 1. 場址區域範圍及地圖介面

用於使用者已有特定之測量或計算長度；而地圖介面適用在當地圖中的可見特徵被用來定義於各個區域。

Location	Smaller X Coordinate	Larger X Coordinate	Smaller Y Coordinate	Larger Y Coordinate	meters
Fruit, grain, non-leafy vegetables plot	34.375	65.625	234	266	meters
Leafy vegetables plot	34.375	65.625	268	300	meters
Pasture, Silage growing area	0	100	450	550	meters
Grain fields	0	100	300	400	meters
Dwelling site	34.375	65.625	134	166	meters
Surface- water body	-100	200	550	850	meters

圖 11 RESRAD 程式場址區域範圍設定輸入視窗

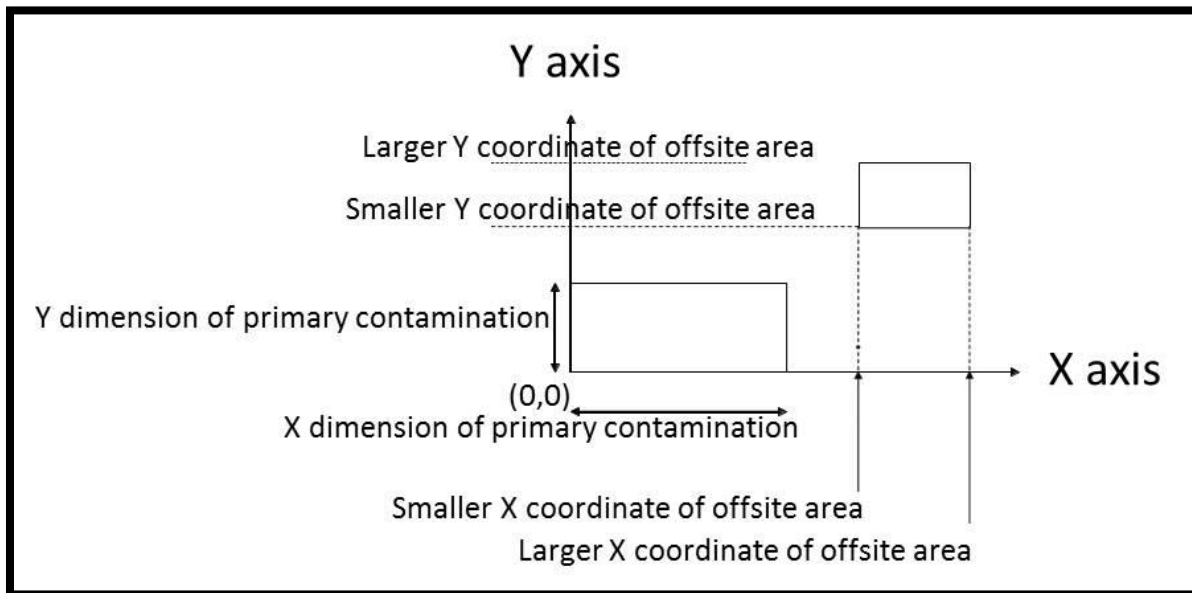


圖 12 RESRAD 程式主要污染位置與遠場生物圈位置設定概念示意圖

本輸入參數設定主要污染區域及遠場生物圈位置（如圖 11），並可再作為 RESRAD-OFFSITE 之大氣傳輸程式主要污染區域及遠場位置之範圍。主要污染區域（可當成近場放射性廢棄物處置場址）之左下角所夾的兩邊即為座標系統軸。遠場位置之範圍即由四個座標點定義。（如圖 12 所示）

X 軸軸承：從北邊到 X 軸正值的順時鐘角度。

X 方向主要污染：此為主要污染源平行於 X 軸的下邊長度。

Y 方向主要污染：此為主要污染源平行於 Y 軸的下邊長度。

遠場之 X 座標：此為遠場四邊形平行於 Y 軸的其中兩邊之 X 座標。

遠場之 Y 座標：此為遠場四邊形平行於 X 軸的其中兩邊之 Y 座標。

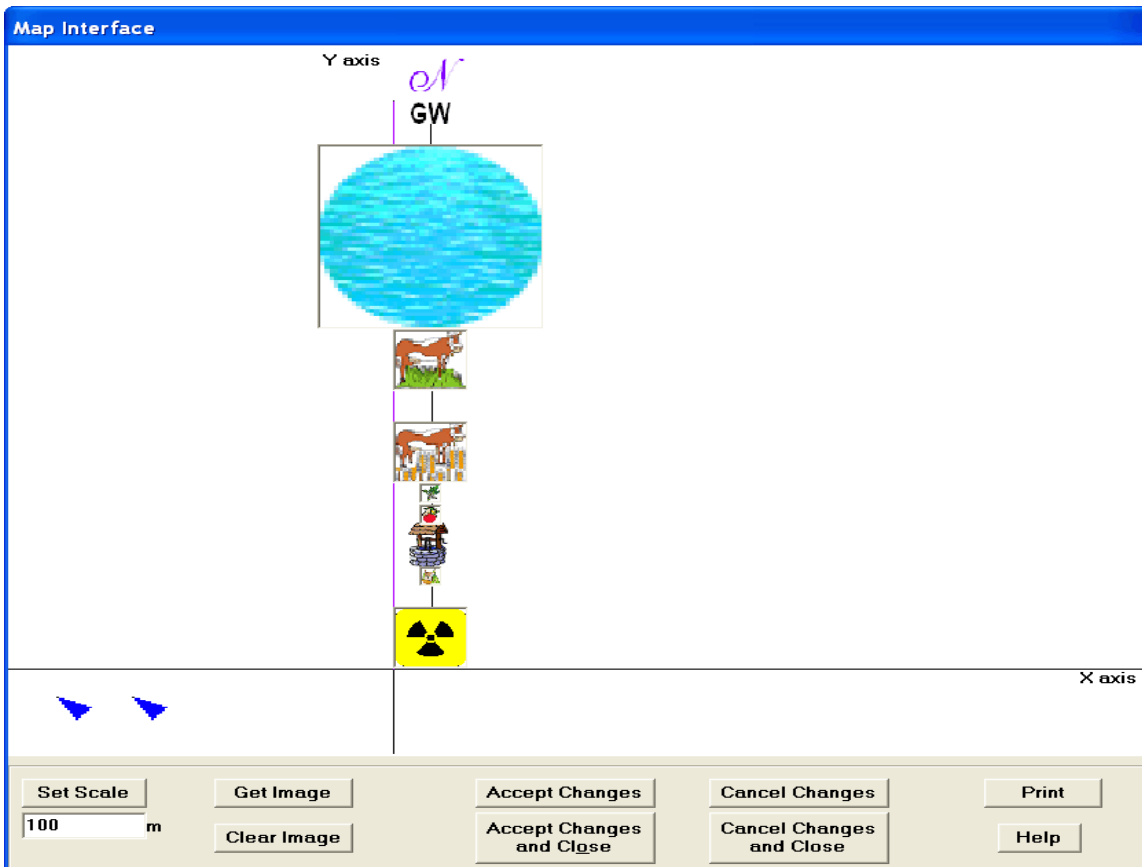


圖 13 RESRAD 程式地圖介面之主要污染、場外居住、井、表面水體、農田、地下水流方向及指北針設定輸入視窗

地圖介面可放置物件、調整物件大小及相對位置，物件包含主要污染、場外居住、井、表面水體、農田、地下水流方向及指北針，如圖 13 所示，其圖示意義如表 23。

表 23 RESRAD 程式之地圖介面圖示

圖示	表單
N	指北針，場址配置
輻射 (Radioactivity)	主要污染物
牛 (Cow)	牲畜生長區
葉子、水果 (Leaf or fruits)	農業區
房子 (House)	場外住宅區
井 (Well)	飽和水文區
藍圓圈/橢圓 (Blue circle/ellipse)	地表水體
地下水 (GW)	地下水傳輸

## 2. 核種源項濃度

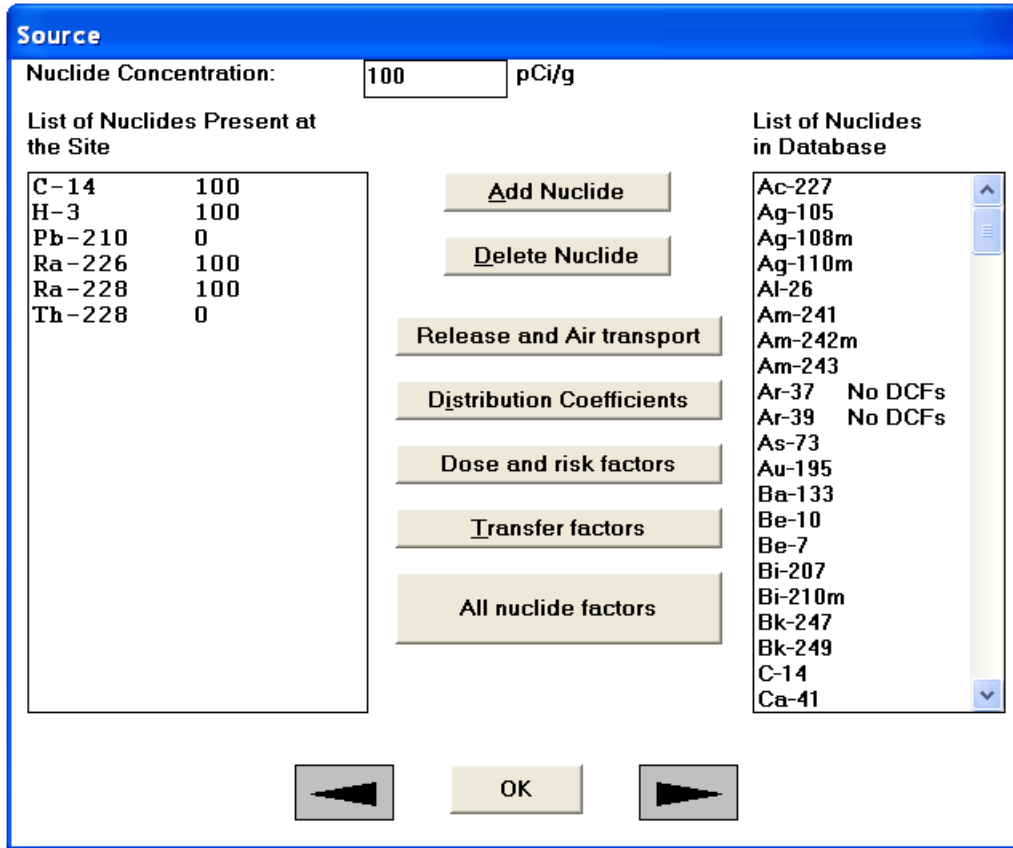


圖 14 RESRAD 資料庫中的核種列表及關鍵核種初始濃度設定輸入視窗

低放場址固化桶內關鍵核種初始濃度可由本視窗介面進行輸入，如圖 14 所示，RESRAD 資料庫已建立約 209 個核種資料庫。若核種沒有劑量因子或斜率因子的資料，此列表將顯示「No DCFs」。這也提醒使用者，在一般情況下，不能選用顯示「No DCFs」的核種。程式沒有直接模擬子核種的宿命及傳輸，但將藉由衰變鏈反應之的關係，計算子核種劑量，評估子核種的風險與劑量。該輸入視窗亦進入設定存有釋出與空氣傳輸、分佈係數、劑量與風險因子和轉移因子。

### 3. 核種源項釋出率與大氣沉降速度

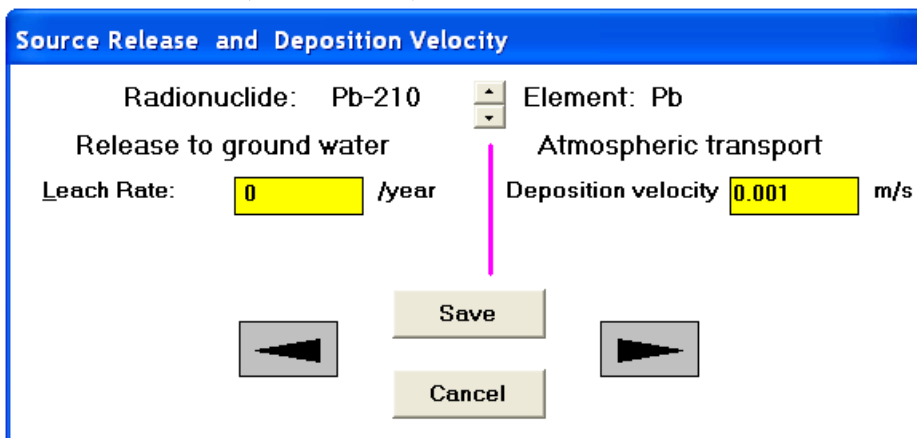


圖 15 核種源項釋出至地下水釋出率與大氣沉降速度設定輸入視窗

圖 15 是核種源項釋出至地下水釋出率與大氣沉降速度設定輸入視窗。當核種釋出速率不為零時，為一階釋出率模式用於計算處置場址固化桶核種釋出至地下水釋出率。當釋出速率為零時，程式將根據平衡狀態及雨水入滲率推估可能之核種釋出速率。

大氣沈降速度參數輸入後，程式將根據大氣傳輸，計算遠場地區核種沉降速率。

#### 4. 分佈係數

**Distribution Coefficients**

Radionuclide: H-3

**Distribution coefficient (cm<sup>3</sup>/g) in:-**

Contaminated Zone:	0	Sediment in surface water body	0
Unsaturated Zone 1:	0	Fruit, grain, nonleafy fields	0
Saturated Zone:	0	Leafy vegetable fields	0
Number of Unsaturated Zones: set in preliminary inputs form	1	Pasture, silage growing areas	0
		Livestock feed grain fields	0
		Dwelling site	0

Save Cancel

圖 16 核種於九個區域（1.污染區域 2.未飽和區域 3.飽和區域 4.表面水體沉積物 5.水果、穀物、非菜葉類區域 6.菜葉類區域 7.牧草、青貯飼料種植區 8.牲畜飼料餵養區 9.居住區）之分佈係數設定輸入視窗

圖 16 是核種於九個區域（1.污染區域 2.未飽和區域 3.飽和區域 4.表面水體沉積物 5.水果、穀物、非菜葉類區域 6.菜葉類區域 7.牧草、青貯飼料種植區 8.牲畜飼料餵養區 9.居住區）之分佈係數設定輸入視窗。分佈係數是核種吸附於土壤質量對溶質於溶液中質量之比值。各核種都有預設之分佈係數，但是由於分佈係數受地化環境、土壤型態、pH 值、氧化還原電位及離子影響，其值可能變動範圍可達數個數量級。

#### 5. 劑量換算與斜率因子



**Dose Conversion and Slope Factors**

Radionuclide: C-14

Slope Factor Library: FGR 13 Morbidity

External Slope factor	7.83E-12	(risk/year) / (pCi/g)
Food Ingestion Slope factor	2.E-12	risk/pCi
Water Ingestion Slope factor	1.55E-12	risk/pCi
Soil Ingestion Slope factor	2.E-12	risk/pCi
Inhalation Slope factor	1.69E-11	risk/pCi
Gaseous Inhalation Slope factor	1.99E-14	risk/pCi

Dose Factor Libraries: FGR 12, FGR 11

External Dose conversion factor	1.35E-5	mrem/year) / (pCi/g)
Ingestion Dose conversion factor	2.09E-6	mrem/pCi
Inhalation Dose conversion factor	2.09E-6	mrem/pCi
Gaseous Inhalation Dose conversion factor	2.35E-8	mrem/pCi

Launch Dose and Slope Factors Editor

Save

Cancel

圖 17 核種劑量轉換及斜率因子設定輸入視窗

RESRAD 模式「風險評估之斜率因子程式庫」和「輻射劑量之劑量轉換因子程式庫」如圖 17 所示。斜率因子與曝露於外在輻射、土壤或攝取食物、水有關；劑量轉換因子與曝露於外在輻射、吸入或攝取相關。

斜率因子程式庫：斜率因子程式庫將會運用於模式分析。斜率因子程式庫可從 RESRAD 劑量轉換因子編輯器中設定。RESRAD 劑量轉換因子編輯器是一個獨立的應用程式，通用於所有的 RESRAD 程式。斜率因子程式庫儲存於資料庫中。下拉選單中，所有的斜率因子程式庫包含：FGR13(Federal Guidance Report No. 13) morbidity (Eckerman et al. 1999)、HEAST morbidity libraries (EPA 2001)或使用者自創的程式庫。(單位：Risk/pCi)

劑量轉換因子程式庫：劑量轉換因子程式庫將會運用於模式分析。劑量轉換因子程式

庫可從 RESRAD 劑量轉換因子編輯器設定，RESRAD 劑量轉換因子編輯器是一個獨立的應用程式，通用於所有的 RESRAD 程式。劑量轉換因子程式庫儲存於資料庫中。下拉選單中，所有的劑量轉換因子程式庫包含：FGR11 (Eckerman et al. 1988)、age-dependant ICRP72 (ICRP 1996)或使用者自創的程式庫。(單位： mrem/pCi or mSv/Bq)

## 6. 氡的劑量轉換因子及斜率因子

**Dose Conversion and Slope Factors**

Radionuclide: Ra-226 Radon Dose and Slope Factors

Slope Factor Library: FGR 13 Morbidity

External Slope factor: 2.29E-8 (risk/year) / (pCi/g)

Food Ingestion Slope factor: 5.14E-10 risk/pCi

Water Ingestion Slope factor: 3.85E-10 risk/pCi

Soil Ingestion Slope factor: 5.14E-10 risk/pCi

Inhalation Slope factor: 2.82E-8 risk/pCi

Dose Factor Libraries: FGR 12, FGR 11

External Dose conversion factor: 0.0318 mrem/year) / (pCi/g)

Ingestion Dose conversion factor: 0.00132 mrem/pCi

Inhalation Dose conversion factor: 0.00858 mrem/pCi

Launch Dose and Slope Factors Editor

Save Cancel

---

**Risk and Dose Factors for Radon**

**Radon Progeny Slope Factors**

Parent	Progeny	Slope Factor risk/pCi
Ra-226	Rn-222	1.8E-12
	Po-218	3.7E-12
	Pb-214	6.2E-12
	Bi-214	1.5E-11
Th-228	Rn-220	1.9E-13
	Po-216	3.E-15
	Pb-212	3.9E-11
	Bi-212	3.7E-11

Save Cancel

---

**Radon Dose Conversion Factors**

	Indoor	Outdoor	
Rn-222	760.	570.	mrem/WLM
Rn-220:	150.	250.	mrem/WLM

圖 18 氡的劑量轉換因子及斜率因子設定輸入視窗

若使用者選取氡的前趨物(Ra-226、Th-228)並啟用氡途徑選項，即可從 RESRAD 程式劑量轉換及斜率因子表單開啟氡的同位素及其短半化期子核種的表單。如圖 18 所示

## 7. 轉移因子

Transfer Factors		
Radionuclide: Th-228		Element: Th
Soil to plant transfer factor		
Fruit, grain, nonleafy vegetables	0.001	(pCi/kg)/(pCi/kg)
Leafy vegetables:	0.001	(pCi/kg)/(pCi/kg)
Pasture, silage:	0.001	(pCi/kg)/(pCi/kg)
Livestock feed grain:	0.001	(pCi/kg)/(pCi/kg)
Intake to animal product transfer factor		
Meat:	0.0001	(pCi/kg)/(pCi/d)
Milk:	0.000005	(pCi/L)/(pCi/d)
Water to Aquatic food transfer factor		
Fish:	100	(pCi/kg)/(pCi/L)
Crustacea:	500	(pCi/kg)/(pCi/L)
<input type="button" value="Save"/> <input type="button" value="Cancel"/>		

圖 19 核種從土壤到植物的轉移因子設定輸入視窗

本參數係為放射性核種在場址不同介質間傳輸之轉換因子，轉移因子與核種元素有關。當使用者修改任何同位素的轉移因子，將套用至該元素之所有同位素設定。如圖 19 所示。其土壤至植物之傳輸因子、動物攝取量至動物產品之轉移因子、水至水生食物之轉移因子。

土壤至植物之傳輸因子：此為根部攝取轉移因子，其定義為食用植物之污染濃度比土壤污染濃度。RESRAD 資料庫對於每一個元素只有一組傳輸因子預設值。土壤及植物之傳輸因子在特定場址設定表單中共有四個輸入欄位。其中由於 H-3 與 C-14 之傳輸因子由程式計算，所以無法由此表單顯示。

動物攝取量至動物產品之轉移因子：此為放射性核種在燕麥、牛奶等產品與動物攝取量之比值，由於 H-3 與 C-14 之傳輸因子由程式計算，所以無法由此表單顯示。

水至水生食物之轉移因子：此為水生食物之放射性核種濃度與其生長水域之射性核種濃度的比值。

## 8. 設定釋出途徑



圖 20 設定釋出途徑

在預設情況下，只有氦途徑不能使用，其他途徑皆可使用。使用者可選取氦的前趨物後，再開啟氦途徑。如圖 20 所示。

## 9. 報告及儲存時間

輸出顯示時間點：使用者可設定不同時間點，而文字報告將根據時間點的設置，顯示各時間點的放射資料。常用的時間尺度為 1,000 年，但是使用者也可設定較長的模擬時間，以瞭解在大的時間尺度下，是否有任何潛在因子(地下水或其他因子)因為延遲效應，而發生任何變化。預測的時間尺度為最後報告時間及曝露時間的總合。計算及報告中的時間單位皆為年。如圖 21 所示。

此報告根據各個中繼時間點的計算結果，再內插算出各輸出顯示時間點的計算結果，輸出報告。

儲存時間：使用者可點擊「儲存時間」進入儲存時間表單。或是下一個表單就是儲存時間表單，所以使用者也可點選「下一步」按鍵進入。如圖 21 所示。

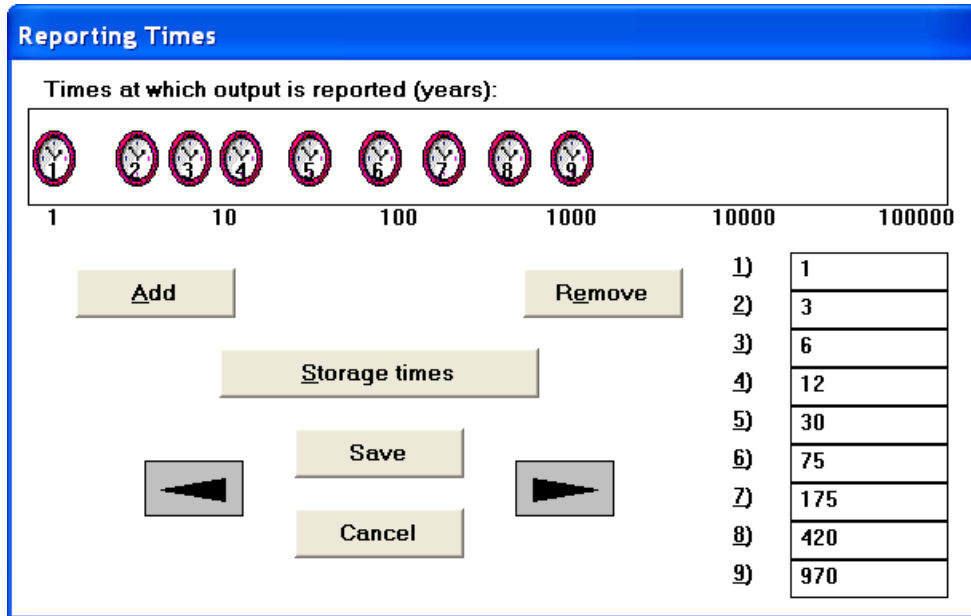


圖 21 模式設定輸出顯示時間點輸入視窗

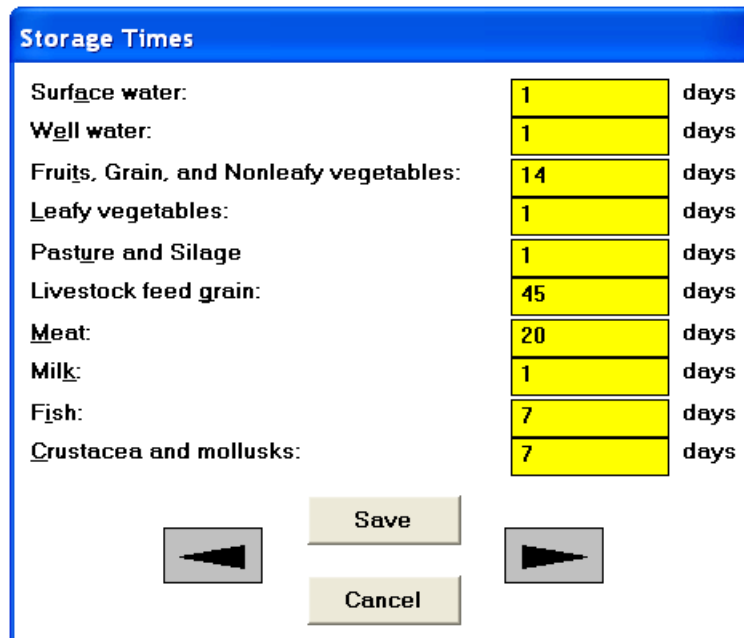


圖 22 核種傳輸至食物或水被攝取、食用前之停留儲蓄時間輸入視窗

此為食物或水被攝取、食用前，儲存的時間。因此食物或水中的核種濃度將藉由此參數調整。如圖 22 所示。

## 10. 水文物理因子

圖 23 降雨、風速及四個子區域之表單(污染區、農業區、牲畜飼養區、場外居住區) 輸入視窗

水文物理因子，包括：降雨、風速及四個子區域之表單(污染區、農業區、牲畜飼養區、場外居住區)之參數輸入，如圖 23 所示。

降雨：場址之年均降雨量，程式以此計算非飽和含水層入滲率、所有地區的滲出率及氙的蒸發散量。滲出率用來計算主要污染區域、農地、牧場與住宅區的土壤污染濃度。而入滲率會影響非飽和層的傳輸速率。

風速：年均風速可用來計算區域的吸入因子及落葉沉積因子，也可用於計算氙途徑及氙、碳 14 之模式。

四個子區域之表單(污染區、農業區、牲畜飼養區、場外居住區)。使用者可由此點擊指令進入四個子區域之表單設定物理水文資料。

## 11. 主要污染區域





且其方向與水流方向平行。

土壤混合層深度：在主要污染區表土之土壤混合層深度。其中土壤混合層就是經過長時間的人為或物理作用所形成的均勻土層。本參數就用來計算表土之污染濃度。

塵土沉降速率：此參數為主要污染區域中，具代表性的塵土沉降速率。程式假設場址內顆粒淨沉積為零時，利用塵土沉降速率來計算大氣中核種釋出量。

接下來的三個參數與降雨率將用來計算滲透率及氘於主要污染區域中的蒸發散率。

這些參數將影響污染釋出以及在未飽和含水層的傳輸。

每年灌溉應用：此為每年單位面積的灌溉水量。不同於生長季的灌溉水量，此設定之時間單位為年，而非灌溉季節。

蒸發散係數：蒸發散係數就是在地表的灌溉水及降雨量與其在大氣或植被蒸發溢散的比例。

逕流係數：此為降雨量與地表逕流量之比值，其中灌溉水與地表逕流之損失無關。

接下來的六個參數將用來計算侵蝕率，侵蝕率並非用來輸入 RESRAD-OFFSITE 程式，而是一個參考資訊。

降雨及逕流指數：降雨及逕流指數是用來評估降雨能量，可用來計算侵蝕率。

坡長陡度係數：地形剖面的侵蝕率。

地表覆蓋與管理因子：此因子與土地利用、植被及管理的侵蝕率有關，以前稱為種植管理因素。

水土保持措施因子：此因子為實施水土保持對侵蝕率的影響，以前稱為保護措施因子。

乾容積密度(污染區土壤或無污染之地表覆蓋區)：此為不同土層之單位體積的土壤固體重量。本參數將用於計算侵蝕率及外在輻射曝露。而污染區的乾容積密度也會用來計算核種釋出至地下水後，主要污染區的核種濃度。

土壤可蝕性因子：此因子用來衡量土壤侵蝕的敏感性。

厚度(污染區土壤)：此為土壤污染區(濃度大於背景值 2 個標準差)的上界至下界之距離(公尺)。

厚度(無污染之地表覆蓋區)：此為地表至污染土層上界(無污染土層)之距離上界(公尺)。

總孔隙率(污染區土壤或無污染之地表覆蓋區)：此為污染區土壤或無污染之地表覆蓋

區中，土壤及其中之水、孔隙之體積比率。

田間含水量(污染區)：田間含水量即土壤中可容納之最大含水量。

b 參數(污染區)：b 參數為特定土壤指數，與不同土壤含水情況下之水力傳導係數有關。

水力傳導係數(污染區)：水力傳導係數即單位水力梯度之水流速度。

水體積含量(無污染之地表覆蓋區)：土壤與水分之體積比例。

## 12. 農業區域與牲畜飼養區域

農業區與牲畜飼養區域之物理及水文資料，如圖 25 所示。

面積：此為植物栽種面積及供牲畜放牧的牧場面積。本欄位不需數入數據，程式將根據場址規劃表單之設定，進一步計算面積。

與主要污染區重疊之比例：此為農田或牧場位於主要污染區之比例。若農田或牧場位於主要污染上，則此比例為 1；若農田或牧場不在主要污染上，則此比例為 0。此比例與牧草、作物直接吸收主要污染區的污染物有關。

每年灌溉應用：此為每年單位面積的灌溉水量。不同於生長季的灌溉水量，此設定之時間單位為年。

蒸發散係數：蒸發散係數就是在地表的灌溉水及降雨量與其在大氣或植被蒸發溢散的比例。

逕流係數：此為降雨量與地表逕流量之比值。灌溉水與地表逕流之損失無關。

耕犁層/土壤混合層之深度：土壤表層經過長時間的人為或物理作用所形成的均勻厚度。此係數將用來計算場外累積量。

總水土壤孔隙率：此為土壤體積比率。

乾容積密度：單位體積的土壤固體重量。

Agricultural Areas			
Crops	Fruit, grain, non-leafy	Leafy vegetables	
<i>Area (square meters):</i>	1000	1000	
Fraction of area directly over primary contamination:	0	0	
Irrigation applied per year (meters/year):	.2	.2	
Evapotranspiration coefficient:	.5	.5	
Runoff coefficient:	.2	.2	
Depth of soil Mixing layer or Plow layer (meters):	.15	.15	
Volumetric water content:	.3	.3	
<i>Erosion rate (meters/year):</i>	1.147E-5	1.147E-5	
Dry bulk density of soil (grams/cm <sup>3</sup> ):	1.5	1.5	
Soil erodibility factor (tons/acre):	.4	.4	
Slope-length-steepness factor:	.4	.4	
Cover and management factor:	.003	.003	
Support practice factor:	1	1	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">▶</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Save</div> <div style="border: 1px solid gray; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">▶</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Cancel</div> </div>			

Livestock Feed Growing Areas			
Crops	Pasture, Silage	Grain	
<i>Area (square meters):</i>	10000	10000	
Fraction of area directly over primary contamination:	0	0	
Irrigation applied per year (meters/year):	.2	.2	
Evapotranspiration coefficient:	.5	.5	
Runoff coefficient:	.2	.2	
Depth of soil Mixing layer or Plow layer (meters):	.15	.15	
Volumetric water content:	.3	.3	
<i>Erosion rate (meters/year):</i>	1.147E-5	1.147E-5	
Dry bulk density of soil (grams/cm <sup>3</sup> ):	1.5	1.5	
Soil erodibility factor (tons/acre):	.4	.4	
Slope-length-steepness factor:	.4	.4	
Cover and management factor:	.003	.003	
Support practice factor:	1	1	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">▶</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Save</div> <div style="border: 1px solid gray; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">▶</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Cancel</div> </div>			

圖 25 農業區與牲畜飼養區域之物理及水文資料設定輸入視窗

土壤可蝕性因子：此因子用來衡量土壤侵蝕的敏感性。

坡長陡度係數：地形剖面的侵蝕率。

地表覆蓋與管理因子：此因子與土地利用、植被及管理的侵蝕率有關，以前稱為種植管理因素。

水土保持措施因子：此因子為實施水土保持對侵蝕率的影響，以前稱為保護措施因子。

### 13. 場外住宅區

Building location	Offsite Dwelling
<i>Area (square meters):</i>	1000
Irrigation applied per year (meters/year):	.2
Evapotranspiration coefficient:	.5
Runoff coefficient:	.2
Depth of soil Mixing layer or Plow layer (meters):	.15
Volumetric water content:	.3
<i>Erosion rate (meters/year):</i>	0
Dry bulk density of soil (grams/cm <sup>3</sup> ):	1.5
Soil erodibility factor (tons/acre):	0
Slope-length-steepness factor:	.4
Cover and management factor:	.003
Support practice factor:	1

圖 26 場外住宅區域之物理及水文資料設定輸入視窗

場外住宅區域之物理及水文資料，如圖 26 所示，包括面積、每年灌溉應用、蒸發散係數、逕流係數、耕犁層/土壤混合層之深度、總水土壤孔隙率、乾容積密度、土壤可蝕性因子、坡長陡度係數、地表覆蓋與管理因子、水土保持措施因子。

面積：此為場外居住區域之面積。本欄位不需數入數據，程式將根據場址規劃表單之設定，進一步計算面積。

每年灌溉應用：此為每年單位面積的灌溉草皮、家庭花園水量。

蒸發散係數、逕流係數、耕犁層/土壤混合層之深度、總水土壤孔隙率、乾容積密度、土壤可蝕性因子、坡長陡度係數、地表覆蓋與管理因子、水土保持措施因子：此處敘述內容與農業區與牲畜飼養區一致。

### 14. 大氣傳輸

**Atmospheric Transport**

Release height: 1 meters  
 Release heat flux: 0 cal/s  
 Anemometer height: 10 meters  
 Ambient temperature: 285 Kelvin  
 AM atmospheric mixing height: 400 meters  
 PM atmospheric mixing height: 1600 meters

Dispersion Model Coefficients:  
 Pasquill-Gifford Coefficients  
 Briggs Rural Coefficients  
 Briggs Urban Coefficients

Windspeed Terrain:  
 Rural  
 Urban

Offsite location: Fruit, grain, non-leafy vegetables plot; Leafy vegetables plot; Pasture, silage growing area; Grain fields; Dwelling site; Surface water body

Elevation of offsite location, relative to ground level at primary contamination: 0 0 0 0 0 0 m

Grid spacing for areal integration: 10 m

Read Meteorological STAR file

modify joint frequency data read from STAR file for CHICAGO MIDWAY, IL

Wind speed: 0.89 2.46 4.47 6.93 9.61 12.52 m/s

Stability class: Joint frequency of wind speed and stability class for wind from S to N

A	0	0	0	0	0	0
B	0.00104	0.00206	0.0024	0	0	0
C	0.0009	0.00343	0.01016	0.00206	0.00023	0
D	0.00041	0.00605	0.01587	0.02284	0.00514	0.00103
E	0.00112	0.00251	0.0193	0.02032	0.00308	0.00057
F	0	0.01096	0.01599	0	0	0

Save  
 Cancel

圖 27 大氣傳輸參數設定輸入視窗

大氣傳輸參數設定，如圖 27 所示。包括釋出高度、釋出熱通量、風速計高度、環境溫度、AM/PM 大氣混合高度、延散係數模式、風速地形、場外高程(與主要污染之地表的相對高程)、區域整合網格間距、讀取氣象 STAR 檔案、風速、聯合頻率(風速、風向及穩定等級)等。

釋出高度：此為污染物從地表上釋出之高度。

釋出熱通量：此為污染物釋出伴隨的熱能釋放。此係數將用來計算污染團上升。

風速計高度：此為測量風速之高度。

環境溫度：此為釋出位置之溫度。

AM/PM 大氣混合高度：大氣混合高度即為地表至穩定氣流之間的高度，污染物擴散將受限於混合層中。其中 AM/PM 即為上午與下午。

延散係數模式：此處可選取大氣傳輸模式中用於計算延散係數之方程式。

風速地形：選取場址地形，以決定風速與其高度之關係。

場外高程(與主要污染之地表的相對高程)：當場外地表之高程大於主要污染區地表之高程，程式將以此調整偏移之風向。這與場外的污染累積位置至污染區地表之高程差不同。

區域整合網格間距：當模式計算時，場外區域及主要污染區域都假設為四邊形(詳見 4.3 節)。一般情況之污染傳輸途徑為污染區域的中心點至場外區域的中心點，本程式將場外區域及主要污染區域切割成數個小區域，並計算所有子區域之傳輸途徑。使用此方法可得到較精確之大氣傳輸途徑，但是耗時較久。此參數即為子區域之最大尺寸。

讀取氣象 STAR 檔案：點擊此按鍵，就可選取 STAR 格式之文件，此文件包含風速之聯合次數分佈。

從 STAR 檔案修改聯合頻率資料：為避免誤觸檔案內容，一般並不能直接修改 STAR 檔案內容。如欲修改 STAR 檔案，請於讀取後勾選此選項。

風速：此為平均風速。

聯合頻率(風速、風向及穩定等級)：聯合頻率分佈包括：風速、風向及穩定等級。其中有 6 個穩定等級、6 段風速、16 個風向。聯合頻率之風向展示於下拉選單，由此可選擇欲查看之風向資訊。為避免造成混淆，風向之順序為風之來源至風之吹向；習慣上，風的方向判別就是風之來源至風之吹向(如：北風即從北方吹的風)。

## 15. 非飽和含水層

未飽和含水層參數設定如圖 28 所示，包括：未飽和含水區數目、厚度、土壤容積密度、總孔隙率、有效孔隙率、田間含水量、水力傳導係數、b 參數、縱向延散度。

未飽和含水區數目：飽和含水層與主要污染區之間的未飽和含水層數目。此參數只能於初步輸入表單設定，最高可設定至五層。點擊此按鍵可前往初步輸入表單進行設定，此設定與分佈係數有關，所以分佈係數表單也會同時開啟。

厚度：特定未飽和含水層之厚度。

土壤容積密度：特定未飽和含水層之單位體積內的土壤質量。

總孔隙率：土壤中液體及氣體所佔的總體積。

有效孔隙率：土壤中可用於水體流動的孔隙與土壤之體積比率。

田間含水量：土壤中重力水已排出，剩餘在土壤中的含水量；不考慮蒸發散情況下，田間含水量就是未飽和層的最低含水量。

水力傳導係數：水流在單位水力梯度引導下流經污染區的速度。

b 參數：特定土壤指數 b 參數與未飽和層之含水量及其水力傳導係數有關。

縱向延散度：此為縱向延散係數與孔隙水速度之比值。縱向延散度之單位為長度，參數變化與含水層厚度有關，其變動範圍級數約為含水層厚度的 0.01~1 倍。

Unsaturated Zone Hydrology	
Number of Unsaturated Zones: 1 set in preliminary inputs form	
Unsaturated Zone Number: 1:	
Thickness (meters)	4
Dry Bulk Density (grams/cm**3)	1.5
Total Porosity	.4
Effective Porosity	.2
Field Capacity	.3
Hydraulic Conductivity (meters/year)	10
b Parameter	5.3
Longitudinal Dispersivity (meters)	.1

圖 28 未飽和含水層參數設定輸入視窗

## 16. 飽和含水層

飽和含水層參數設定如圖 29 所示，包括：飽和含水層厚度、飽和含水層之容積密度、飽和含水層之總孔隙率、飽和含水層之有效孔隙率、飽和含水層之水力傳導係數、飽和含水層之水力梯度、含水層深度、飽和含水層之縱向延散度、飽和含水層之水平側向延散度、垂直延散、飽和含水層之垂直延散度、灌溉率、蒸發散係數、地表逕流係數等。

飽和含水層厚度：本參數將用於計算飽和含水層中之垂直延散。程式也可用此檢視地下水流量。

飽和含水層之容積密度：特定含水層之單位體積內的土壤質量。

飽和含水層之總孔隙率：土壤中液體及氣體所佔的總體積。

飽和含水層之有效孔隙率：土壤中可用於水體流動的孔隙與土壤之體積比率。

飽和含水層之水力傳導係數：水流在單位水力梯度引導下流經污染區的速度。

以下參數分為兩欄，其中一欄為主要污染傳輸至地下水井，另一欄為傳輸至地表水體。

飽和含水層之水力梯度：水面之斜率。

含水層深度貢獻：含水層中各深度的地下水都有可能流至地下水井或地表水體，程式



將根據此參數計算地下水流至地下水井或地表水體的污染濃度。

飽和含水層之縱向延散度：此為縱向延散係數與孔隙水速度之比值。縱向延散度之單位為長度，參數變化與飽和含水層的長度範圍有關。

飽和含水層之水平側向延散度：此為側向延散係數與孔隙水速度之比值。側向延散度之單位為長度。

垂直延散：使用者可選擇(1)使用污染物在飽和層垂直延散效果，並忽略污染物在含水層中過濾淨化的效果；或(2) 使用污染物在含水層中過濾淨化的效果，而忽略污染物在飽和層垂直延散效果。

飽和含水層之垂直延散度：此為垂直側向延散係數與孔隙水速度之比值。垂直側向延散度之單位為長度。

灌溉率：此參數為年度灌溉水量，單位為公尺/年，灌溉率應用於飽和層中的污染傳輸至上方土地之水體。灌溉率為一年之灌溉水量，而非一生長季的灌溉水量。本參數只有當使用含水層中過濾淨化的效果時，才需要設定。

蒸發散係數：本參數之定義為當污染傳輸至地表水體，其在飽和含水層上方土地的整體蒸發散係數。而蒸發散係數就是表土中的降雨、灌溉水量與從植被蒸發散至大氣水量之比值。本參數只有當使用含水層中過濾淨化的效果時，才需要設定。

地表逕流係數：本參數之定義為當污染傳輸至地表水體，其在飽和含水層上方土地的整體地表逕流係數。地表逕流係數就是降雨量與地表逕流量之比值，且假設地表逕流量不用於灌溉水。本參數只有當使用含水層中過濾淨化的效果時，才需要設定。

Saturated Zone Hydrology			
Thickness of saturated zone:	100		meters
Dry Bulk Density of saturated zone:	1.5		grams/cm <sup>3</sup>
Total porosity of saturated zone:	.4		
Effective porosity of saturated zone:	.2		
Hydraulic Conductivity of saturated zone:	100		meters/year
	to well	to surface waterbody	
Hydraulic Gradient of saturated zone:	.02	.02	
Depth of aquifer contributing	10	10	meters below water table
Longitudinal Dispersivity of saturated zone:	3	10	meters
Horizontal lateral Dispersivity of saturated zone:	.4	1	meters
<input checked="" type="radio"/> Disperse Vertically			
Vertical lateral Dispersivity of saturated zone:	.02	.06	meters
<input type="radio"/> Do Not Disperse Vertically			
Value Averaged over length of saturated zone	to well	to surface waterbody	
Irrigation applied per a year:	2	2	meter/year
Evapotranspiration coefficient:	.5	.5	
Runoff coefficient:	.2	.2	
	Save		
	Cancel		

圖 29 飽和含水層參數設定輸入視窗

## 17. 水利用量

水利用量參數設定如圖 30 所示。以下詳述之：

本表單之重點為水的標的利用，其中第一欄為人類、牲畜對水的需求及用於灌溉的水。其他表單可能也有水利用參數的輸入欄位，使用者可從不同表單改變參數，而程式也將於全部表單更新修正內容。

Water Use						
Description of Usage:- Water for .	Quantity		Fraction of water from		Number of individuals	
			Surface body	Well		
Consumption by humans	510	Liters/year	0	1		
Use indoors of dwelling	225	Liters/day	0	1		4
Beef cattle	50	Liters/day	0	1		2
Dairy cows	160	Liters/day	0	1		2
Irrigation applied per year:-						Area of Plot (square meters)
Fruit, grain, non-leafy vegetables	.2	meters/year	0	1		1000
Leafy vegetables	.2	meters/year	0	1		1000
Pasture, Silage	.2	meters/year	0	1		10000
Livestock feed Grain	.2	meters/year	0	1		10000
Offsite Dwelling site	.2	meters/year	0	1		1000
Well pumping rate:			5100	cubic meters/year		
Well pumping rate needed to support specified Water use:			5084.17	cubic meters/year		
<input type="button" value="Save"/> <input type="button" value="Cancel"/>						

圖 30 水利用量參數設定輸入視窗

本表單之重點為水的標的利用，其中第一欄為人類、牲畜對水的需求及用於灌溉的水。其他表單可能也有水利用參數的輸入欄位，使用者可從不同表單改變參數，而程式也將於全部表單更新修正內容。

第二欄及第三欄為水的來源，即取自地表水體或井水的比例。若情境設定為，另外使用未受污染的水，則第二欄及第三欄之總和將小於 1。本表單之個體數量不可用作敏感性分析及不確定性分析，其餘可修改之參數皆可進行敏感性分析或不確定性分析。另外使用者須注意，當利用第二欄及第三欄進行不可用作敏感性分析或不確定性分析時，每組比例總合不可大於 1。

人類使用水量：個人使用水量，此水量包含飲食。

居家使用水量：居家使用水量，此水量包含清理、盥洗。本參數將用於計算水氣之劑量。

家牛使用水量：每隻家牛(供作肉品食用)飼養所需水量。

乳牛使用水量：每隻乳牛(提供乳製品)飼養所需水量。

個體數量：設定人類或牲畜之數量。此設定將只用來計算最小井抽水率，不會用於其他運算程式中，因次不可用來做不確定性分析。

每年灌溉水量：此參數為單位土地面積之年度灌溉水量。灌溉率為一年之灌溉水量，而非一生長季的灌溉水量。

供給特定水需求之井水抽取率：此參數為本表單需求之抽水量，程式將自動計算供給特定水需求之井水抽取率，使用者可根據此參考數據，設定井水抽取率。

井水抽取率：使用者可根據程式計算之供給特定水需求之井水抽取率，來設定井水抽取率。由於井水抽取率不可低於表單設定之需求，所以本參數設定值不可低於供給特定水需求之井水抽取率，且執行不確定性分析時也應符合此原則。

## 18. 地表水

Surface Water Body		
Sediment delivery ratio:	1	
Volume of surface water body:	150000	cubic meters
Mean residence time of water in surface water body:	1	years
Surface area of water in surface water body:	30000	square meters

Navigation: [Left Arrow] [Save] [Right Arrow]

Buttons: [Cancel]

圖 31 地表水參數設定輸入視窗

地表水參數設定如圖 31 所示，以下詳述之。

沉積傳輸比：此為受污染之土壤移動至地表水體之比率。本參數將用於計算表面侵蝕率之污染通量。

地表水體積：地表水之體積。

水於地表水之平均滯留時間：此為水在地表水體中的平均滯留時間，計算公式為每年地表區域水體積與流入該區域水體積之比值。

地表水面積：此為地表水所佔面積，程式將根據場址輸出表單之設定計算面積。本參數將用來計算來自大氣沉積的污染通量。

## 19. 地下水傳輸

**Groundwater Transport**

Sub Screens

Distance in the direction parallel to aquifer flow from downgradient edge of contamination to

well:  meters  
 surface water body:  meters

Distance in the direction perpendicular to aquifer flow from center of contamination to

well:  meters  
 right edge of surface water body:  meters  
 left edge of surface water body:  meters

Convergence criterion (fractional accuracy desired):

Number of sub zones (to model dispersion of progeny produced in transit):

Main sub zones in saturated zone   
 Main sub zones in each partially saturated zone

nuclide specific retardation in all sub zones, longitudinal dispersion in all but the sub zone of transformation  
 longitudinal dispersion in all sub zones, nuclide specific retardation in all but the sub zone of transformation, parent retardation in zone of transformation  
 longitudinal dispersion in all sub zones, nuclide specific retardation in all but the sub zone of transformation, progeny retardation in zone of transformation

圖 32 地下水參數設定輸入視窗

地下水參數設定如圖 32 所示，以下詳述之。

子視窗(前往其他相關表單)：使用者可由此按鍵進入四個不同表單。使用者若已利用下方的下一步按鍵，前往這四個表單，則不需再重新設定。

未飽和含水層、飽和含水層、水利用及地表水：使用者可由此按鍵進入四個不同表單進行設定，此時原本的表單將不會關閉，而是隱藏在後，直到這些表單設定完後，原本表單將重新出現。

本表單之距離參數可用於執行不確定性分析及敏感性分析，而子區域之參數可用於進行一次性參數敏感性分析。

從主要污染至地下水井之平行於含水層水流距離：此為地下水流從主要污染處(高濃度)至地下水井(低濃度)之距離，單位為公尺。本參數用於計算從飽和含水層至地下水井之

污染傳輸。若本參數設定為負，代表地下水井之污染濃度高於主要污染處之濃度。當本參數為負值，或地下水從主要污染至地下水井之流動途徑與污染劑量沒有關係，程式將略過井水污染計算。

從主要污染至地表水體之平行於含水層水流距離：此為地下水流從主要污染處(高濃度)至地表水(低濃度)之距離，單位為公尺。本參數用於計算從飽和含水層至地表水之污染傳輸。若本參數設定為負，代表地表水之污染濃度高於主要污染處之濃度。當本參數為負值，或地下水從主要污染至地表水之流動途徑與污染劑量沒有關係，程式將略過地表水污染計算。

從主要污染至地下水井之垂直於含水層水流距離：此為通過主要污染與通過地下水井之兩地下水流其間的垂直距離，單位為公尺。本參數將計算污染物因擴散而稀釋之情形，主要應用於從井中抽水之情況。

從主要污染至地表水近邊之垂直於含水層水流距離：此為通過主要污染與通過地表水近邊之兩地下水流其間的垂直距離，單位為公尺。本參數將計算從地下水到地表水體之污染通量。

從主要污染至地表水遠邊之垂直於含水層水流距離：此為通過主要污染與通過地表水遠邊之兩地下水流其間的垂直距離，單位為公尺。本參數將計算從地下水到地表水體之污染通量。

收斂性判定：利用 Romberg 積分時，需要利用分數精度來計算地下水污染濃度，越小的數值，所需的點位越多，所花的計算時間也越久。因此如果收斂性判定值設的太低，程式運算時間將會過久，甚至仍無法達成收斂，此時程式會將運算失敗輸入至 QRFAIL.LOG 檔案中，此時程式將使用之前預估的 32,769 點位積分。如果收斂性判定值設為零，程式將根據 Simpson 法，使用 32 段區間積分。

#### 模擬傳輸中產生之子核種傳輸

RESRAD-OFFSITE 有兩個地下水傳輸演算法，其一模擬母核種與子核種在土壤及地下水中之交互作用，其二模擬縱向擴散。當其中一種模擬方式具優勢時，使用者可選擇適當之演算法，模擬傳輸中產生之子核種傳輸。若兩種模擬方式都相對重要時，使用者可將傳輸區域分成數個子區域，再進行模擬傳輸中產生之子核種傳輸；使用這個方法將會模擬

所有傳輸途徑，因此將會增加運算時間。

飽和層之子區域：為增加模擬的準確度，程式將飽和層分成數個子區域。

部分飽和層之子區域：為增加模擬的準確度，程式將部份飽和層分成數個子區域。

模擬特定子核種之延滯或擴散

使用這兩個地下水傳輸演算法，將會有三個選擇選項。這些選項將影響特定原子在區域的傳輸結果。選項如下：

- 模擬區域中的特定子核種分佈係數之效應，並忽略縱向擴散之效應。
- 模擬區域中縱向擴散效應以及母核種對子核種的分佈係數。
- 模擬區域中縱向擴散效應以及子核種的分佈係數。

## 20. 攝取率

	Consumption rate		Fraction from affected area
Drinking water	510	Liters/year	1
Fish	5.4	kg/year	.5
Crustacea and mollusks	.9	kg/year	.5
Fruit, grain, non-leafy vegetables	160	kg/year	.5
Leafy vegetables	14	kg/year	.5
Meat	63	kg/year	1
Milk	92	Liters/year	1
Soil (incidental)	36.5	grams/year	

Livestock Factors

Livestock Feed Factors

Plant Factors

Save

Cancel

圖 33 飲用水及食物攝取率參數設定與牲畜、牲畜飼養及植物因子輸入視窗

飲用水及食物攝取率參數設定與牲畜、牲畜飼養及植物因子參數如圖 33 所示，以下詳述之。

消耗率：此為國家平均值，但是會隨著所在場址不同而有變動，因此使用者可以隨著區域變化調整此數值。

來自污染區域之比例：此為消耗物質來自污染區域之比例。飲用水則為來自受污染的



地表水體或地下水之比例，點擊飲用水之按鍵將會開啟水利用表單，使用者可由此調整比例。

前往其他表單

點擊下方按鍵可前往其他表單，或者可以點擊下一部按鍵，即可依序前往以下表單。

牲畜因子（如圖 34 所示）、牲畜飼養因子及植物因子：進入這些表單時，原本的表單將隱藏在後，直到牲畜因子、牲畜飼養因子及植物因子之設定結束後，原本的表單將重新出現。

## 21. 牲畜攝取及飼養因子

	Beef Cattle	Dairy Cows
Water (liters/day)	50	160
Pasture, and Silage (kg/day)	14	44
Grain (kg/day)	54	11
Soil from Pasture and Silage (kg/day)	.1	.4
Soil from grain (kg/day)	.4	.1

圖 34 牲畜攝取設定輸入視窗

## 22. 牲畜飼養因子

如圖 35 所示，此為國家平均值，但是會隨著所在場址不同而有變動，因此使用者可以隨著區域之飼育方式不同，調整此數值，其中第一欄為肉牛、第二欄為乳牛的所需攝取率。在攝食穀物、牧草、青貯時所吸收的土壤攝取率必需要另外計算，因為土壤中的污染濃度與植物不同。本表單之參數可用於不確定性分析及敏感性分析。

**Livestock Feed Factors**

	Crops	Pasture, Silage	Grain
Wet weight crop yield (kg/m <sup>2</sup> )	1.1		.7
Duration of Growing season (years)	.08		.17
Foliage to Food Transfer coefficient	1		.1
Weathering Removal constant (1/year)	20		20
Foliar interception factor for irrigation	.25		.25
Foliar interception factor for dust	.25		.25
Root Depth (meters)	.9		1.2

圖 35 飼養因子設定輸入視窗

### 23. 植物因子

**Plant Factors**

	Crops	Fruit, grain, non-leafy	Leafy vegetables
Wet weight crop yield (kg/m <sup>2</sup> )		.7	1.5
Duration of Growing season (years)		.17	.25
Foliage to Food Transfer coefficient		.1	1
Weathering Removal constant (1/year)		20	20
Foliar interception factor for irrigation		.25	.25
Foliar interception factor for dust		.25	.25
Root Depth (meters)		1.2	.9

圖 36 植物因子設定輸入視窗

如圖 36 所示，植物(蔬菜與家畜飼料)因子與生長及污染轉移相關，因此本表單之數值跟穀物混合及栽種方式有關。本表單之參數可用於不確定性分析及敏感性分析。

### 24. 吸入及外部伽馬

Parameter	Value	Unit
Inhalation rate:	8400	m <sup>3</sup> /year
Mass loading for inhalation:	.0001	grams/m <sup>3</sup>
Mean Onsite mass loading:	.0001	grams/m <sup>3</sup>
Indoor to outdoor dust concentration ratio:	.4	
External gamma penetration factor:	.7	

Shape of Primary Contamination

Occupancy Factors

Save

Cancel

圖 37 吸入及外部伽馬設定輸入視窗

本表單之參數可用於不確定性分析及敏感性分析。

吸入之質量加載：此為人類所在場址，空氣中吸入粒子單位體積之平均質量。本參數將用於來計算吸入途徑。

場址平均質量加載：此為主要污染區域上，空氣中含有污染的土壤粒子之平均質量。本參數將用於來計算污染釋放至大氣的速率。

室內至室外之塵土濃度比：本參數代表室內污染塵土濃度在建築物內的影響。此為室內與室外污染塵土濃度之比值。

外部伽瑪穿透因子：本參數代表室內伽瑪輻射濃度在建築物內的影響。此為穿透至室內的伽瑪輻射與室外伽瑪輻射濃度之比值。

前往其他表單：點擊下方按鍵可前往其他表單，或者可以點擊下一部按鍵，即可依序前往以下表單。

- 主要污染形狀、居住因子：點擊這些指令，可分別進入其設定表單。進入這些表單時，原本的表單將隱藏在後，直到主要污染形狀、居住因子之設定結束後，原本的表單將重新出現。

## 25. 外部輻射的形狀及面積因子

	Radius: (m)	Fraction:
1	13.25	0
2	26.5	0
3	39.75	0
4	53	.022
5	66.25	.19
6	79.5	.24
7	92.75	.2
8	106	.17
9	119.25	.15
10	132.5	.13
11	145.75	.12
12	159	.055

圖 38 外部輻射形狀及面積因子設定輸入視窗

如圖 38 所示。在表單左上角之圖示，其中黑色區域代表主要污染；若使用者點擊表單右側中間之按鍵「計算半徑及比例」，則此時黑色區塊將變為粉紅色。

主要污染平面形狀：根據預設值，程式將根據場址規劃及地圖介面的設定，計算主要污染的形狀與場外住宅區的中心，並以此計算外部輻射形狀及面積因子。現地住宅區之位置設定在主要污染中央。本表單可用於設定各住宅區的位置，並定義主要污染區多邊形的範圍。

#### 改變住宅位置

如果主要污染區沒有完全顯示於表單圖示中，使用者可修改尺度欄(Scale)之數值(表單中間下方)，使主要污染區完全顯示於表單圖示中。在右上角選取標籤(場外/現地標籤)，可選取相關之住宅區，使用者亦可輸入住宅區座標或從圖表區點選住宅區。請使用者務必依序從現地/場外標籤執行，輸入位置座標，再點擊「計算半徑及比例」，以計算面積比例。游標的座標位置將顯示於表單中間上方欄位，此功能將幫助使用者快速找到住宅區位置。

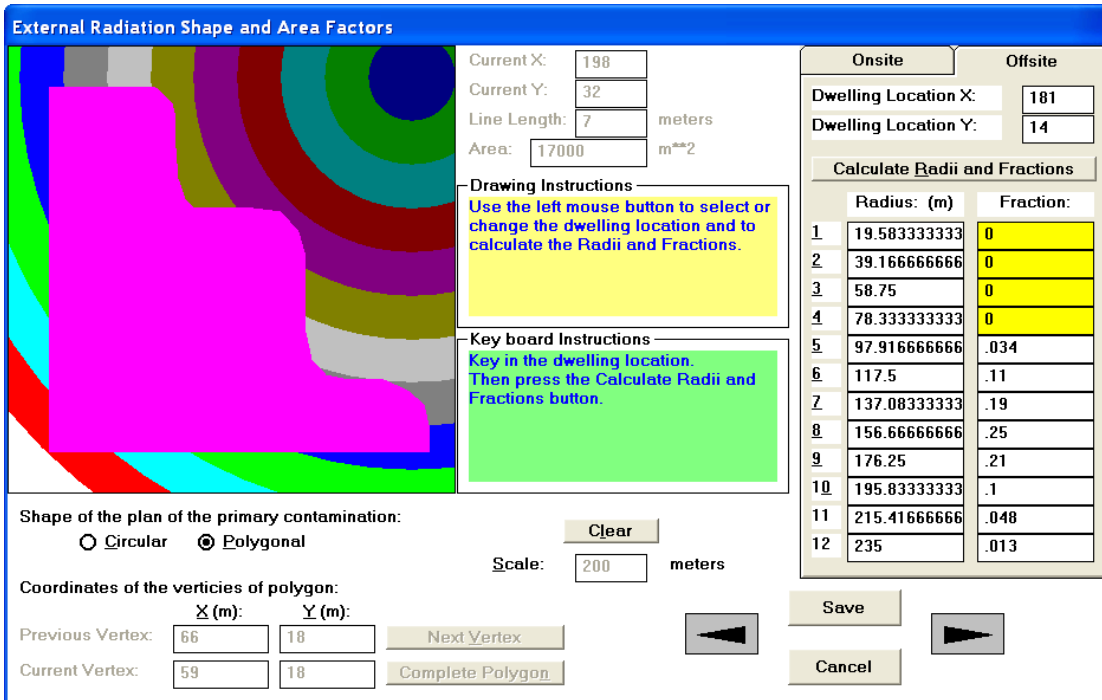


圖 39 外部輻射形狀及面積因子設定改變主要污染形狀之輸入視窗

### 改變主要污染形狀

使用者可修改尺度欄(Scale)之數值(表單中間下方),使主要污染區及兩個住宅區完全顯示於表單圖示中。從表單左下方選取多邊形選項後,使用者可以利用表單中間黃色區塊的畫圖指示,使用滑鼠在圖示中畫出多邊形。或者用者可以利用表單中間綠色區塊的鍵盤指示,使用鍵盤在表單左下角輸入多邊形頂點座標。多邊形繪製完後,需指定場外/現地住宅區位置(根據改變住宅區位置之指示)。當程式計算半徑與比例時,也會同時計算多邊形面積,並將面積數值標示於表單中間上方之欄位。由於程式根據圖示介面計算每個環狀受污染的區域比例,因此本表單的參數不可用作不確定性分析及敏感性分析。如圖 39 所示。

## 26. 居住率

在處置場址主要污染區、場外住宅區與農地、牧場時間居住率如圖 40 所示。在主要污染區的時間比例

- 戶內：此為受體待在主要污染區上,位於戶內的時間比例。
- 戶內：此為受體待在主要污染區上,位於戶外的時間比例。如有任何農地、牧場位於主要污染區上,則此受體待在此區域的時間比率應列於戶外。

### 在場外住宅區的時間比例

- 戶內：此為受體待在主要污染區外,位於戶內的時間比例。

- 戶外：此為受體待在主要污染區外，位於戶外的時間比例。

在農地的時間比例：當農地、牧場受到污染的灌溉水及大氣沉積物影響，而此參數即為受體待在農地、牧場的時間比例。如果農地位於主要污染區上，則須同時設定在主要污染區的時間比例及在農地的時間比例。

[注意：在主要污染區、場外住宅區的戶內及戶外時間比例總合不可超過 1。由於定義的關係，若再加上在農地時間比例，則時間比例總合不可超過 2 (當受體整天都待在位於主要污染區上的農地)。

本表單之參數可用於不確定性分析及敏感性分析，但須注意不可抵觸上一段之限制]

Occupancy	
<b>Fraction of Time spent on PRIMARY CONTAMINATION (whether cultivated or not)</b>	
Indoors	0
Outdoors	0
<b>Fraction of Time spent in OFFSITE DWELLING SITE</b>	
Indoors	.5
Outdoors	.1
<b>Fraction of Time spent in FARMED AREAS (including Primary and Secondary contaminated areas)</b>	
Fruit, grain, and Nonleafy fields	.1
Leafy vegetable fields	.1
Pasture and silage fields	.1
Livestock grain fields	.1
If part of a farmed area lies on the Primary Contamination, the time fraction spent in that part of the area should be included in both the farmed area occupancy and the primary contamination occupancy.	
<span>◀</span> <span>Save</span> <span>▶</span>	
<span>Cancel</span>	

圖 40 在處置場址主要污染區、場外住宅區與農地、牧場時間比例設定輸入視窗

## 27. 氬

Radon		
Effective radon diffusion coefficient of Cover:	.000002	m**2/s
Effective radon diffusion coefficient of Contaminated zone:	.000002	m**2/s
Effective radon diffusion coefficient of Floor:	.0000003	m**2/s
Thickness of floor and foundation:	.15	meters
Density of floor and foundation:	2.4	g/cm**3
Total porosity of floor and foundation:	.1	
Volumetric water content of floor and foundation:	.03	
Depth of Foundation below ground level:	-1	meters
Onsite vertical dimension of mixing:	2	meters
Building room height:	2.5	meters
Building air exchange rate:	.5	1/hr
Building indoor area factor:	0	
Rn-222 emanation coefficient:	.25	
Rn-220 emanation coefficient:	.15	

圖 41 氡資料設定輸入視窗

如圖 41 所示。而欲進行氡參數設定，使用者須先開啟氡途徑選項。而只有污染物含有氡-222 或氡-220 時，才可開啟氡途徑選項。其中風速可於物理水文表單設定，水體積含量可於主要污染表單設定，這些都與氡劑量計算有關。

地基在地下水下方之深度：此為地下水面至地基下方的距離。預設值為-1，代表地基位於地下水上方。

現地混合垂直方向：本參數將用來計算混合體積，程式將以此計算氡、碳-14、氫-3 之現地濃度。

建築物室內面積因子：此為建築物位於污染區域之比率。若此參數大於 1，則代表牆壁穿透污染區。此參數之預設值為 0，代表這個隨時間變化的因子，其地板為 100m<sup>2</sup>，而該建築物之牆體延伸至污染區。

## 28. 碳 14



**Carbon-14**

Thickness of evasion layer for C-14 in soil:	.3	meters
C-14 evasion flux rate from soil:	.0000007	1/sec
C-12 evasion flux rate from soil:	1E-10	1/sec
Fraction of vegetation carbon absorbed from soil:	.02	
Fraction of vegetation carbon absorbed from air:	.98	

Mass fractions of C-12

Save

Cancel

圖 42 碳-14 資料設定輸入視窗

**Mass Fractions of Carbon-12**

Contaminated soil:	.03	g/g
Local water:	.00002	g/cm <sup>3</sup>
Fruit, grain, non-leafy vegetables:	.4	
Leafy vegetables:	.09	
Pasture and Silage	.09	
Livestock Feed Grain	.4	
Meat	.24	
Milk	.07	

Save

Cancel

圖 43 碳-12 資料設定輸入視窗

如圖 42 及圖 43 所示。在 RESRAD-OFFSITE 原文手冊的附錄 L 中，有關於碳-14 及其模式的介紹。在氫資料表單的現地垂直方向混合參數也可用於碳-14 及氫-3 之現地濃度。

## 29. 氫等

在 RESRAD-OFFSITE 手冊的附錄 L 中，有關於氫及其模式的介紹。在氫資料表單的現地垂直方向混合參數也可用於碳-14 及氫之現地濃度。如圖 44 所示。

Category	Value
Humidity in air:	8 grams/m**3
Mass fraction of water in:-	
Fruit, grain, non-leafy vegetables:	.8
Leafy vegetables:	.8
Pasture and Silage	.8
Livestock Feed Grain	.8
Meat	.6
Milk	.88

圖 44 氚資料設定輸入視窗

### 3.2.2. RESRAD 程式參數統計分布設定

RESRAD-OFFSITE 耦合大氣延散模式、地下水傳輸模式和遠場累積模式。對於不同的土地利用型態及慢性曝露於輻射情形下，RESRAD-OFFITE 可計算其輻射劑量和過量終身致癌風險 (excess lifetime cancer risk)。本模組主要專注於計算土壤、空氣、水和生物作為媒介之受體受放射性汙染情況。於 RESRAD-OFFITE 有 9 種曝露方式：直接接觸、吸入性顆粒物和氬、攝取蔬菜、肉類、牛奶、水生食物、水和土壤。

RESRAD-OFFSITE 採用路徑分析法而此種方法計算來源與受體在一段時間的環境介質中的濃度。這些濃度用於計算曝露程度，劑量高低，過量致癌風險。放射性核種的輻射劑量、健康風險、土壤指引以及放射性核種的介質濃度，在程式使用者指定的一系列時間進行計算。放射性衰變和子核種質量變化、水滲流、地表侵蝕和前述各種機制混合。使用者可建立抑制曝露途徑和調整輸入參數來建構曝露情境。

#### 1. 參數分類

RESRAD-OFFSITE 模組之參數使用分為三類：物理性 (physical)、行為 (behavioral) 或代謝性 (metabolic) 皆於附錄 A 所示。

(1) 物理性參數：不同受體下任何參數值均不改變稱為物理性參數。物理性參數的決定由來源位置和場址地質特性。

(2) 行為參數：受不同受體之行為和情境改變而改變之參數稱為行為參數。以相同之受體而言，情境改變其參數隨之改變。

(3) 代謝參數：參數代表受體之代謝特性並且不受情境影響即可歸類為代謝參數。

## 2. 參數統計分布設定

參數的選擇依據 RESRAD ONSITE 的參數分布之準則 (Yu et al., 2000) 所制定。但是，優先考慮 RESRAD-OFFSITE 使用那些新參數，在 RESRAD-OFFSITE 程式中的使用方式（例如，在不同的田地，種植不同植物），收集一些參數的附加資料（例如，植物的根系深度和核種轉移因子）。

參數的選擇其功能如表 24 所示。根據不同之使用曝露情況可分為四大類：土壤與水文、大氣、農業和受體。每一參數分布意義包含單位、分布型態及輸入資料。對現有數據進行討論與說明來確定參數分布選用。詳細描述分布函數如該報告所示。

表 24 機率密度函數之參數設定

參數	型態 <sup>a</sup>	使用分布型態	詳見使用手冊章節
體積含水量	P	線性	2.1
延散係數	P	線性	2.2
降雨沖蝕指數	P	線性	2.3
土壤沖蝕指數	P	線性	2.4
坡長及坡度因子	P	線性	2.5
覆蓋與管理因子	P, B	線性	2.6
P值	P, B	線性	2.7
土壤混和層深度	P, B	三角形	2.8
蒸發散係數	P	均勻	2.9
荷重	P, B	線性, 截斷常態分佈	3.1
沉降速度	P	對數常態分佈	3.2
風速	P	有界對數常態分布	3.3
生長期	P	三角形	4.1
根系深度	P	均勻	4.2
植物轉移因子	P	截斷對數常態分布	4.3
家庭用水量	B, M	線性	5.1
戶外時間比	B	線性	5.2

<sup>a</sup> P = 物理性參數, B = 行為參數, M = 代謝參數

### 3.2.3. RESRAD 參數資料調查使用手冊

美國能源部已開發 RESRAD 模式進行殘留放射性物質路徑分析並寫成使用手冊。不

僅水文地質、氣象、地球化學及地理幾何參數(長度、寬度及深度)；土壤相關參數皆考慮於 RESRAD 模式中。本手冊探討參數中的定義、種類、變異程度、量測方法論及地下水水位及抽水井深度位置。雖然本手冊發展主要為 RESRAD 模組所使用，內容所提及的也適用於其他模組。本報告已將該手冊翻譯，詳細可參考 103 年度完成低放射性廢棄物處置輻射劑量報告。並簡介說明如下。

為了支持美國能源部 (DOE) 建立殘留放射性物質準則 (DOE 5400.5 的命令)，阿貢國家實驗室 (ANL) 開發了一種名為 RESRAD 的計算機程序 (Gilbert 等, 1989)。RESRAD 最初是在 1980 年代初期開始於 DOE 工作範圍內所開發，涉及到大多數國家實驗室和 DOE 計劃辦公室。DOE 和其他機構及其承包商使用 RESRAD 計畫及其手冊來得出清理標準和劑量計算。自 1989 年 6 月首次發布以來，RESRAD 程式中增加了許多新功能和曝露途徑。DOE 環境指導和環境修復辦公室定期對規範和手冊的重大變更提供指導。資料收集手冊目的為引導 RESRAD 的使用者對模組參數設定及結果分析方面建立一個正確的評估方法。

RESRAD 模組是一個易於使用和多管道分析方法的程式。其主要功能為計算輻射劑量和輻射風險評估，當核子事故發生時的輻射擴散範圍內之災害受損程度皆可模擬預估。

1991 年在 ANL 進行了 RESRAD 參數的敏感度性分析。RESRAD 參數敏感度分析 (Cheng 等, 1991) 中介紹了一般運行的結果。一般來說，在地下水污染團流至土壤或地下水含水層的突破時間(breakthrough time)之前，與覆蓋物或污染區域有關的參數，較非飽和土壤或飽和地下水含水層相關的參數，影響更大。然而，這些參數的影響在突破時間之後發生了變化。

RESRAD 模組已建立參數敏感性分析其中，幫助使用者簡單的操作參數敏感度分析。同時使用者可以參考 RESRAD Manual for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines (Yu et al., 1993)和 RESRAD Parameter Sensitivity Analysis (Cheng et al., 1991)進行修改以加強 RESRAD 模組功能。

本 RESRAD 手冊已有 51 種參數，如表 25 所示。

REARAD 手冊提供參數定義、種類及預設值，至於其他相關之參數本手冊也提供量測方法。RESRAD 模組針對參數值的範圍進行設定。本手冊內容提供使用者更可進一步解讀

參數的使用範圍、類型及參數變異性。

表 25 RESRAD 模組參數輸入及詳細說明之章節編號位置

輸入畫面	參數描述	參數表示	詳見使用手冊章節編號
R011	汙染區域面積 (m <sup>2</sup> )	AREA	30
R011	汙然區厚度 (m)	THICKO	39
R011	平行含水層內之流動長度 (m)	LCZPAQ	16
R011	放射線劑量限制 (mrem/yr)	BRDL	40
R011	物質放置時間 (yr)	TI	49
R011	計算時間 (yr)	T(t), 2 ≤ t ≤ 10	a
R012	主要放射線初始濃度 i(pCi/g)	S(i)	51
R012	放射線濃度於地下水 i(pCi/L)	W(i)	33
R013	覆蓋深度 (m)	COVERO	31
R013	覆蓋物質密度 (g/cm <sup>3</sup> )	DENSCV	2
R013	覆蓋深度侵蝕率 (m/yr)	VCV	14
R013	汙染區密度 (g/cm <sup>3</sup> )	DENSCZ	2
R013	汙染區侵蝕率 (m/yr)	VCZ	14
R013	汙染區孔隙率	TPCZ	3
R013	汙染區有效孔隙	EPCZ	4
R013	汙然區水力傳導係數 (m/yr)	HCCZ	5
R013	汙染區參數 <i>b</i>	BCZ	13
R013	蒸發散係數	EVAPTR	12
R013	降水 (m/yr)	PRECIP	9
R013	灌溉率 (m/yr)	RI	11
R013	灌溉模式	IDITCH	b
R013	逕流係數	RUNOFF	10
R013	流域面積 (m <sup>2</sup> )	WAREA	17
R013	土壤與水之正確性計算	EPS	a
R014	飽和區密度 (g/cm <sup>3</sup> )	DENSAQ	2
R014	飽和區孔隙率	TPSZ	3
R014	飽和區有效孔隙	EPSZ	4
R014	飽和區水力傳導係數(m/yr)	HCSZ	5
R014	飽和區水力梯度	HGWT	15
R014	飽和區參數 <i>b</i>	BSZ	13
R014	水位洩降速率(m/yr)	VWT	18
R014	抽水井低於地下水位之深度(m)	DWIBWT	19
R014	模式: 非沿散 (ND) 或質量守恆 (MB)	MODEL	c
R014	地下水使用率 (m <sup>3</sup> /yr)	UW	c
R015	非飽和區分層數	NS ≤ 5,	25
R015	非飽和區厚度 (m)	H(z), 1 ≤ z ≤ NS	25
R015	非飽和區土壤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	DENSUZ(z)	2

R015	非飽和區孔隙率	TPUZ(z)	3
R015	非飽和區有效孔隙	EPUZ(z)	4
R015	非飽和區土壤比參數 $b$	BUZ(z)	13
R015	非飽和區水力傳導係數 (m/yr)	HCUZ(z)	5
R016	放射性核種擴散係數 $i$		
R016	於汙染區 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	DCACTC(i)	32
R016	於非飽和地下水區 $z$ ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	DCACTU(i,z)	32
R016	於飽和地下水區 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	DCACTS(i)	32
R016	滲漏率 (L/yr)	RLEACH(i)	34
R017	吸入率 ( $\text{m}^3/\text{yr}$ )	INHALR	43
R017	輻射吸入量 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	MLINH	35
R017	空氣灰塵稀釋長度 (m)	LM	d
R017	曝露時間	ED	a,e
R017	吸入屏蔽係數	SHF3	36
R017	戶外屏蔽係數	SHF1	48
R017	廠址上室內滯留時間比	FIND	28,e
R017	廠址上戶外滯留時間比	FOTD	29,e
R017	形狀因子	FS1	50
R017	對區域內的環形區分數	FRACA(r)	50
		$1 \leq r \leq 12$	
R018	水果、蔬菜及穀物的消費量 (kg/yr)	DIET(1)	42
R018	有葉蔬菜消費量 (kg/yr)	DIET(2)	44
R018	牛奶消費 (L/yr)	DIET(3)	47
R018	家禽肉類的消費 (kg/yr)	DIET(4)	46
R018	魚類消費 (kg/yr)	DIET(5)	41
R018	其他海鮮消費 (kg/yr)	DIET(6)	41
R018	土壤吸收率 (g/yr)	SOIL	38
R018	飲用水吸收率 (L/yr)	DWI	52
R018	受廠址汙染之飲用水	FDW	a
R018	受廠址汙染之水產	FR9	a
R019	家畜飼料吸收生的肉 (kg/d)	LFI5	b
R019	家畜飼料吸收生的牛奶 (kg/d)	LFI6	b
R019	家畜攝取水後產生的肉 (L/d)	LWI5	45
R019	家畜攝取水後產生的牛奶 (L/d)	LWI6	45
R019	葉面殘留量 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	MLFD	b,f
R019	土壤混合層深度 (m)	DM	35,f
R019	植物根部深度 (m)	DROOT	37
R019	地下飲用水比例	FGWDW	b, c
R019	地下家畜飲用水比例	FGWLW	b, c
R019	地下灌溉水比例	FGWIR	b, c
R021	建築物地基深度 (m)	FLOOR	26
R021	建築物地基體積密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	DENSFL	2
R021	覆蓋物之總孔隙率	TPCV	3
R021	建物地基總孔隙率	TPFL	3

R021	覆蓋物水體積含水量	PH2OCV	6
R021	地積水體積含水量	PH2OFL	6
R021	氬氣擴散係數 (m <sup>2</sup> /s)		
R021	於覆蓋表層之物質	DIFCV	7
R021	於地基處之物質	DIFFL	7
R021	於受汙染區	DIFCZ	7
R021	氬氣垂直混合維度 (m)	HMIX	20
R021	平均風速 (m/s)	WIND	21
R021	平均建物改變風速率 (1/h)	REXG	22
R021	建物高度 (m)	HRM	23
R021	建物內部面積因子	FAI	24
R021	建物地基深度 (m)	DMFL	27
R021	場址逸散氬氣-222	EMANA(1)	8
R021	場址逸散氬氣-220	EMANA(2)	8

來源: <sup>a</sup> Yu et al. (1993), Section 4; <sup>b</sup> Yu et al. (1993), Appendix D; <sup>c</sup> Yu et al. (1993), Appendix E; <sup>d</sup> Yu et al. (1993), Appendix B; <sup>e</sup> EPA (1990a), Part I; and <sup>f</sup> Gilbert et al. (1983)

### 3.3. LLWD2016 有關生物圈評估程式與參數

LLWD2016 對於溶於水的放射性核種，會隨著地下水的流動或擴散作用，從處置場內部外釋到處置場外部的含水層，進而傳輸至生物圈。LLWD2016 利用 GoldSim 軟體進行此場址的安全評估模擬。LLWD2016 指出該程式為 IAEA 所推薦之整合性評估程式，其評估結果在國際上深具公信力，已廣泛運用於美國、日本、法國、西班牙、匈牙利等國。GoldSim 軟體是由美國 Golder Associates Inc. 公司為因應高、低放射性核能廢棄物處置安全評估之模擬所開發之軟體。GoldSim 程式內的 RT 模組可應用於低放射性廢棄物處置場功能/安全評估模擬，此模組提了放射性或一般核種於不同介質中的質量傳輸模擬，其可應用於複雜的工程或是天然環境下之污染傳輸模擬。(台電公司，2017b)

LLWD2016 針對台東縣達仁鄉建議候選場址所規劃之一維整體分析概念模擬模型，如圖 45 及圖 46。圖 47 則是根據上述概念模型，於 GoldSim 程式建置之數值分析模型。圖中 Material 及 Parameter 內含核種資料、各類材料之基本參數及輸入參數。Source\_A、EBS\_Concrete、EBS\_A\_Backfill、EBS\_A\_SL 及 EBS\_A\_EDZ 為單一處置窖 A 類低放射性廢棄物之近場分析模式，所考量之 A 類低放射性廢棄物為 1,500 桶 55 加侖桶；Source\_BC、EBS\_BC\_Concrete、EBS\_BC\_Buffer、EBS\_BC\_Backfill、EBS\_BC\_SL 及 EBS\_BC\_EDZ 為單一處置窖 B、C 類低放射性廢棄物之近場分析模式，所考量之 B、C 類低放射性廢棄物為 900 桶 55 加侖桶。近場所考量之傳輸機制包括平流及擴散，為合理模



擬擴散機制，每個工程障壁單元均內含數十個 Cell 模組。圖中 Far\_Field 內包括數十個 Pipe 模組，分別代表處置坑道不同位置流至生物圈之流徑。需注意的是，為了節省計算時間，本評估任一 Pipe 模組均代表數個處置窖。因此，每一個 Pipe 模組之進口核種濃度應依比例放大。遠場所考量之傳輸機制包括平流及延散。生物圈各項參數設定說明如後：(台電公司，2017b)

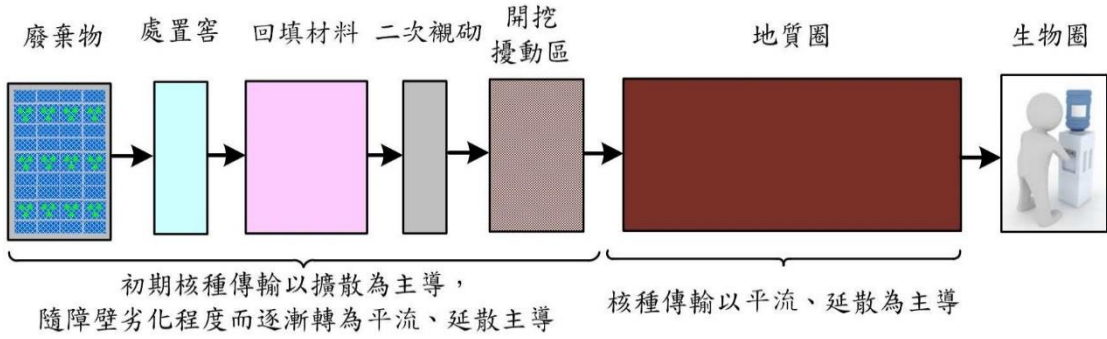


圖 45 A 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台電公司，2017b)

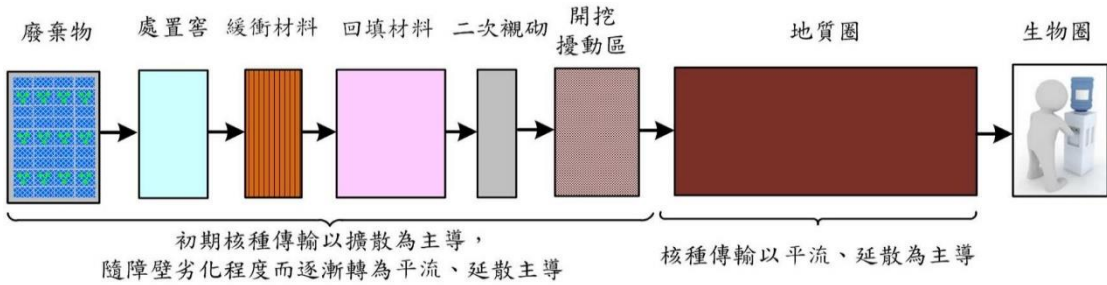


圖 46 B、C 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖(台電公司，2017b)

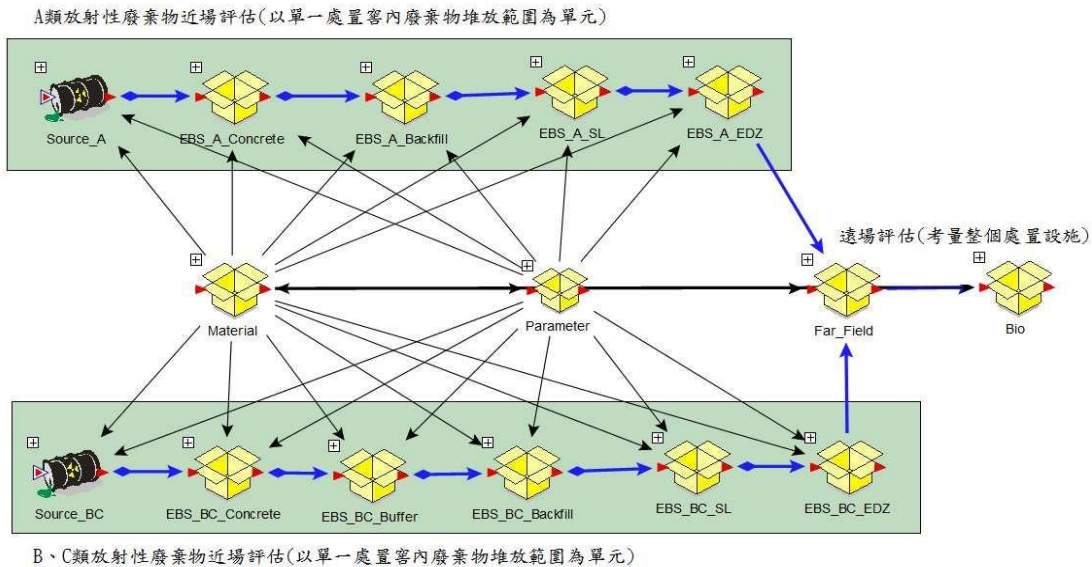


圖 47 GoldSim 整體評估數值分析模型(台電公司，2017b)

根據 LLWD2016 對於生物圈之描述及該報告內生物圈參數，說明如下：

## 1.達仁場址

核種自處置設施外釋流經地質圈後，將流至區域含水層，再依據飲水、攝取農作物、攝取畜產品、攝取養殖水產品、農耕時吸入粉塵、農耕時體外曝露等不同的曝露途徑，計算關鍵群體的輻射曝露劑量。其中，達仁鄉建議候選場址的養殖漁業現況雖採用海淡水混合之水體，但因海水中核種濃度較低，且海淡水混合比例無法確定，故在分析中，保守假設養殖漁業所使用水源均為受污染之淡水。劑量評估時採用的劑量轉換因子、農作物和畜產品的遷移因子、水產品的濃縮係數以及其他生物圈相關參數，彙整如表 26 至

表 29。針對達仁鄉建議候選場址，處置坑道內核種將外釋至場址北側之達仁溪流域、南側之塔瓦溪流域或是東側之太平洋。由於太平洋之水量龐大，核種流至海洋後將快速稀釋，為節省計算時間，本評估僅針對達仁溪流域以及塔瓦溪流域之關鍵群體進行評估。由於達仁溪及塔瓦溪之流量無實測資料，台電公司係應用水文學方法推估達仁溪、塔瓦溪流域年流量，參考「中華民國 103 年台灣水文年報 (2015.06)」之知本溪年流量 15.66cms，採用比面積法(即知本溪集水面積 165.96 平方公里、達仁溪集水面積 13.04 平方公里、塔瓦溪集水面積 4.07 平方公里)，再考慮各集水區平均年降雨量之比值(達仁溪流域 1.42、塔瓦溪流域 1.33)，推估達仁溪年流量為 5.49E07 m<sup>3</sup>，塔瓦溪年流量則為 1.61E07 m<sup>3</sup>。計算公式如下：(台電公司，2017b)。

$$\text{年流量}=(\text{集水區單位面積}\times\text{年平均流量})\times(\text{集水區面積})\times(\text{平均年雨量比值})。$$

表 26 劑量轉換因子(台電公司，2017b)

核種	劑量轉換因子(DCF)		
	攝取[Sv/Bq]	吸入[Sv/Bq]	體外輻射[(Sv/s)/(Bq/m <sup>3</sup> )]
C-14	5.80E-10	5.80E-09	5.88E-23
Tc-99	6.40E-10	1.30E-08	5.80E-22
I-129	1.10E-07	3.60E-08	5.11E-20
Np-237	1.10E-07	5.00E-05	3.72E-19
Pa-233	8.70E-10	3.90E-09	5.04E-18
U-233	5.10E-08	9.60E-06	6.77E-21
Th-229	4.90E-07	2.40E-04	1.55E-18
Ra-225	9.90E-08	7.70E-06	4.61E-20
Ac-225	2.40E-08	8.50E-06	3.09E-19
Fr-221	0.00E+00	0.00E+00	7.56E-19
At-217	0.00E+00	0.00E+00	8.86E-21
Bi-213	2.00E-10	3.00E-08	3.84E-18
Po-213	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

核種	劑量轉換因子(DCF)		
	攝取[Sv/Bq]	吸入[Sv/Bq]	體外輻射[(Sv/s)/(Bq/m <sup>3</sup> )]
Pb-209	5.70E-11	6.10E-11	4.03E-21
Tl-209	0.00E+00	0.00E+00	6.56E-17
Pu-238	2.30E-07	1.10E-04	6.24E-22
U-234	4.90E-08	9.40E-06	1.84E-21
Th-230	2.10E-07	1.00E-04	5.73E-21
Ra-226	2.80E-07	9.50E-06	1.56E-19
Rn-222	0.00E+00	0.00E+00	1.17E-20
Po-218	0.00E+00	0.00E+00	2.85E-22
Pb-214	1.40E-10	1.50E-08	6.65E-18
Bi-214	1.10E-10	1.40E-08	5.00E-17
Po-214	0.00E+00	0.00E+00	2.59E-21
Pb-210	6.90E-07	5.60E-06	1.06E-20
Bi-210	1.30E-09	9.30E-08	2.92E-20
Po-210	1.20E-06	4.30E-06	2.64E-22
Tl-210	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
At-218	0.00E+00	0.00E+00	2.61E-20
Am-241	2.00E-07	9.60E-05	1.99E-19
Pu-241	4.80E-09	2.30E-06	2.84E-23
U-237	7.60E-10	1.90E-09	2.58E-18
Cm-242	1.20E-08	5.90E-06	6.88E-22
H-3	1.80E-11	2.60E-10	0.00E+00
Co-60	3.40E-09	3.10E-08	8.25E-17
Ni-63	1.50E-10	1.30E-09	0.00E+00
Sr-90	2.80E-08	1.60E-07	2.46E-21
Y-90	2.70E-09	1.50E-09	2.15E-19
Cs-137	1.30E-08	3.90E-08	4.47E-21
Ba-137m	0.00E+00	0.00E+00	1.81E-17
Rn-218	0.00E+00	0.00E+00	2.28E-20
Hg-206	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Tl-206	0.00E+00	0.00E+00	6.76E-20

表 27 農作物和畜產品的遷移因子(台電公司，2017b)

核種	土壤與農作物間的遷移因子	畜產品的遷移因子		
	農作物[(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry soil)]	羊[d/kg]	豬[d/kg]	雞[d/kg]
C-14	5.50E+00	1.70E+00	1.70E-01	3.70E+00
Tc-99	5.00E+00	4.70E-03	1.50E-04	3.00E-02
I-129	2.00E-02	3.00E-02	3.30E-03	1.00E-02
Pa-233	1.00E-02	0.00E+00	1.00E-02	4.10E-03
U-233	2.50E-03	7.40E-03	6.20E-02	1.00E+00
Th-229	1.00E-03	1.30E-02	1.00E-02	1.80E-01
Ra-225	4.00E-02	8.60E-03	3.50E-02	4.80E-01
Ac-225	2.50E-03	1.30E-02	1.00E-02	6.60E-03
Fr-221	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
At-217	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

核種	土壤與農作物間的遷移因子	畜產品的遷移因子		
	農作物[(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry soil)]	羊[d/kg]	豬[d/kg]	雞[d/kg]
Bi-213	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Po-213	1.00E-03	9.10E-01	3.10E-02	1.20E+00
Pb-209	1.00E-02	1.30E-02	3.10E-02	1.20E+00
Tl-209	2.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Pu-238	1.00E-03	5.30E-05	8.00E-05	3.00E-03
U-234	2.50E-03	7.40E-03	6.20E-02	1.00E+00
Th-230	1.00E-03	1.30E-02	1.00E-02	1.80E-01
Ra-226	4.00E-02	8.60E-03	3.50E-02	4.80E-01
Rn-222	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Po-218	1.00E-03	9.10E-01	3.10E-02	1.20E+00
Pb-214	1.00E-02	1.30E-02	3.10E-02	1.20E+00
Bi-214	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Po-214	1.00E-03	9.10E-01	3.10E-02	1.20E+00
Pb-210	1.00E-02	1.30E-02	3.10E-02	1.20E+00
Bi-210	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Po-210	1.00E-03	9.10E-01	3.10E-02	1.20E+00
Tl-210	2.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
At-218	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Am-241	1.00E-03	1.10E-04	1.70E-04	6.00E-03
Pu-241	1.00E-03	5.30E-05	8.00E-05	3.00E-03
U-237	2.50E-03	7.40E-03	6.20E-02	1.00E+00
Cm-242	1.00E-03	4.00E-04	1.00E-02	4.00E-03
H-3	4.80E+00	0.00E+00	8.00E-02	2.50E+00
Co-60	8.00E-02	1.20E-02	2.00E-03	2.00E+00
Ni-63	5.00E-02	4.60E-02	4.10E-02	1.70E+00
Sr-90	3.00E-01	1.50E-03	4.00E-02	8.00E-02
Y-90	2.50E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Cs-137	4.00E-02	1.90E-01	2.40E-01	1.00E+01
Ba-137m	5.00E-03	0.00E+00	1.00E-02	9.00E-03
Rn-218	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Hg-206	3.80E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Tl-206	2.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

資料來源：

1. 土壤與農作物間的遷移因子：US DOE, 2001, User's Manual for RESRAD Version 6, p.D-11.
2. 羊的遷移因子：IAEA, 2010, Technical Reports Series No. 472, p94；Quintessa Ltd. et al., 2011, p149~p150.
3. 豬、雞的遷移因子：JAEA, 2013, GoldSim による余裕深度処分を対象とした地下水シナリオ評価ツールの作成, p59.

表 28 水產品的濃縮係數(台電公司, 2017b)

核種	水產品的濃縮係數	
	魚[L/kg]	甲殼動物、軟體動物[L/kg]
C-14	5.00E+04	9.10E+03
Tc-99	2.00E+01	5.00E+00
I-129	4.00E+01	5.00E+00
Np-237	3.00E+01	4.00E+02
Pa-233	1.00E+01	1.10E+02
U-233	1.00E+01	6.00E+01
Th-229	1.00E+02	5.00E+02
Ra-225	5.00E+01	2.50E+02
Ac-225	1.50E+01	1.00E+03
Fr-221	0.00E+00	0.00E+00
At-217	0.00E+00	0.00E+00
Bi-213	1.50E+01	1.00E+01
Po-213	1.00E+02	2.00E+04
Pb-209	3.00E+02	1.00E+02
Tl-209	1.00E+04	1.50E+04
Pu-238	3.00E+01	1.00E+02
U-234	1.00E+01	6.00E+01
Th-230	1.00E+02	5.00E+02
Ra-226	5.00E+01	2.50E+02
Rn-222	0.00E+00	0.00E+00
Po-218	1.00E+02	2.00E+04
Pb-214	3.00E+02	1.00E+02
Bi-214	1.50E+01	1.00E+01
Po-214	1.00E+02	2.00E+04
Pb-210	3.00E+02	1.00E+02
Bi-210	1.50E+01	1.00E+01
Po-210	1.00E+02	2.00E+04
Tl-210	1.00E+04	1.50E+04
At-218	0.00E+00	0.00E+00
Am-241	3.00E+01	1.00E+03
Pu-241	3.00E+01	1.00E+02
Cm-242	3.00E+01	1.00E+03
H-3	1.00E+00	1.00E+00
Co-60	3.00E+02	2.00E+02
Ni-63	1.00E+02	1.00E+02
Sr-90	6.00E+01	1.00E+02
Y-90	3.00E+01	1.00E+03
Cs-137	2.00E+03	1.00E+02
Ba-137m	4.00E+00	2.00E+02
Rn-218	0.00E+00	0.00E+00
Hg-206	1.00E+03	2.00E+04
Tl-206	1.00E+04	1.50E+04

資料來源：US DOE, 2001, User's Manual for RESRAD Version 6, p.D-19

表 29 生物圈相關參數(台電公司，2017b)

參數	單位	設定值	資料來源	
飲水量	m <sup>3</sup> /yr	1.1	國家網路醫院網站 <a href="http://hospital.kingnet.com.tw/essay/essay.html?pid=24138">http://hospital.kingnet.com.tw/essay/essay.html?pid=24138</a>	
戶外活動時的粉塵濃度	g/m <sup>3</sup>	5.00E-04	JAEA, 2013, GoldSim による余裕深度処分を対象とした地F水シナリオ評価ツールの作成, p58	
呼吸量	m <sup>3</sup> /h	0.6	(1) 國家網路醫院網站 <a href="http://hospital.kingnet.com.tw/service.php?mob=modload&amp;name=diyonline&amp;file=3-2">http://hospital.kingnet.com.tw/service.php?mob=modload&amp;name=diyonline&amp;file=3-2</a> (2) 台北榮民總醫院網站 <a href="http://www.tyvh.gov.tw/index.php?mo=HealthInfo&amp;ac=health1_print&amp;sn=113">http://www.tyvh.gov.tw/index.php?mo=HealthInfo&amp;ac=health1_print&amp;sn=113</a>	
戶外活動時的遮蔽係數	-	1	JAEA, 2013, GoldSim による余裕深度処分を対象とした地F水シナリオ評価ツールの作成, p58	
戶外活動的時間	h/yr	500	JAEA, 2013, GoldSim による余裕深度処分を対象とした地F水シナリオ評価ツールの作成, p58	
畜產品的年攝取量	羊肉	kg/yr	1	行政院農委會糧食供需年報(102年), p40
	豬肉	kg/yr	36.4	
	雞肉	kg/yr	30.6	
禽畜的每日飲水量	羊	L/d	12	行政院農業委員會網站 <a href="http://kmweb.coa.gov.tw/subject/ct.asp?xItem=170471&amp;ctNode=4927&amp;mp=108&amp;kpi=0&amp;hashid=">http://kmweb.coa.gov.tw/subject/ct.asp?xItem=170471&amp;ctNode=4927&amp;mp=108&amp;kpi=0&amp;hashid=</a>
	豬	L/d	10	JAEA, 2013, GoldSim による余裕深度処分を対象とした地F水シナリオ評価ツールの作成, p58
	雞	L/d	0.3	
水產品的年攝取量	魚	kg/yr	17.9	行政院農委會糧食供需年報(102年), p40
	蝦、蟹	kg/yr	4.1	
農作物(穀類、薯類、蔬菜類、果品類)的年攝取量	kg/yr	337.3	行政院農委會糧食供需年報(102年), p40	
市場稀釋係數	-	1	JAEA, 2013, GoldSim による余裕深度処分を対象とした地F水シナリオ評価ツールの作成, p58	

## 2. 烏坵場址

本場址因處置設施位於海水位以下，故核種自地質圈出流後，將直接與海水接觸而稀釋，再依據不同的曝露途徑，計算關鍵群體的輻射曝露劑量，劑量評估時採用的劑量轉換因子、農作物和畜產品的遷移因子、水產品的濃縮係數以及其他生物圈相關參數，詳見表 26 至表 29。在海底任一高度之核種平均濃度  $C_d$  之計算如下所示：(台電公司，2017b)

$$C_d = \frac{l\dot{M}}{dU_d}$$

其中：

$l$ ：核種外釋區域(與海流平行)長度，依顆粒追蹤結果取750

$\dot{M}$ ：單位面積核種質量通率( $\text{g s}^{-1}\text{m}^{-2}$ )

$U_d$ ：海底到 $d$  厚度間之平均流速，保守取0.01 m/s

$d$ ：計算位置與海底距離，取魚類主要棲息高度 5 m



#### 4. 設計情節之生物圈劑量評估結果審驗

情節發展需考量地質及氣候之作用與影響、處置設施的長期演化以及未來人類的活動，以未來較可能發生之條件進行假設。其中，在推演處置設施長期演化時，是以處置設施的初始設計條件為基礎，評估其劣化狀況。承前所述，本設計情節所考量為參考演化一(冰期循環推遲 100,000 年)，處置設施之初始設計條件則詳見 LLWD2016 (台電公司，2017b)第 6 章，與設計情節之描述，包括外部條件包括氣候演化、海水位變化及地層抬升及地表侵蝕進行說明，然後再分別描述地質圈、處置設施及地表生態系統。(台電公司，2017b)

由於 RESRAD-OFFSITE 模式係假設初始污染均勻散佈於同一土層，即場址工程障壁位置，位於地下水位面之上、或剛好與地下水位面接觸。因該部分非飽和土壤水流動與坑道處置方式略有差異。可以利用遠場傳輸模式模擬核種釋出至生物圈通量作為生物圈傳輸模式進行劑量評估分析。其概念示意圖如圖 48。

##### 4.1. 遠場傳輸模式與 RESRAD-OFFSITE 模式串接

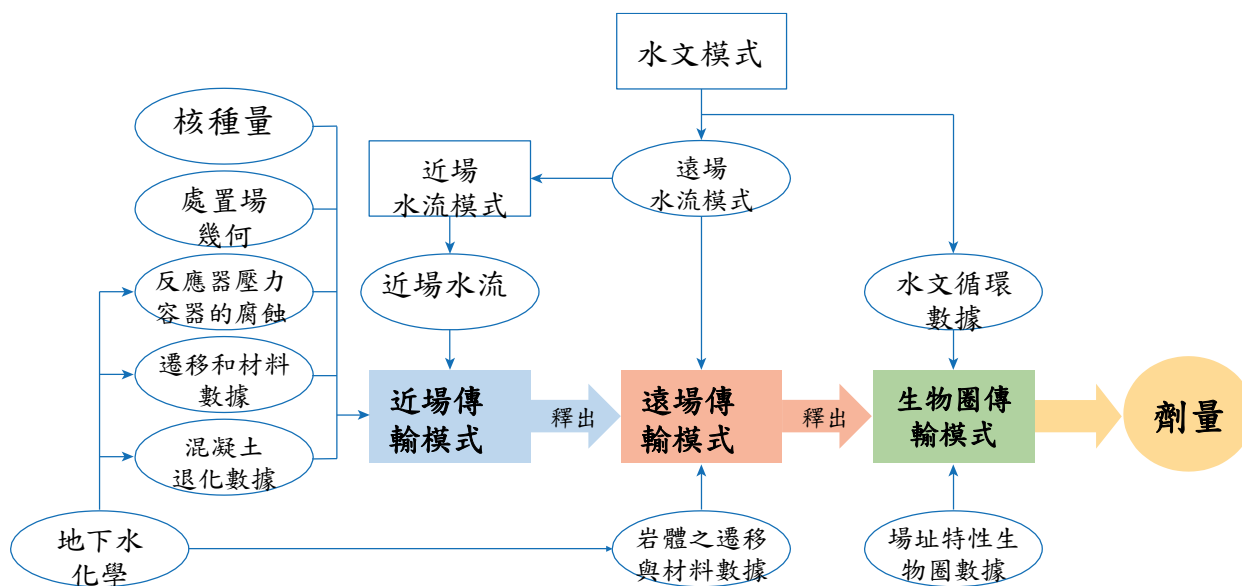


圖 48 近場、遠場與生物圈核種傳輸計算之模式與資料關聯圖

整合外掛程式及 RESRAD 模式，可利用 RESRAD-OFFSITE 模式建立輻射曝露情節與劑量評估程序。RESRAD 模式原始碼係為 FORTRAN 語言所撰寫，並以 Visual Basic 建立互動的視覺介面，依程式設計選取應用程式所需的物件，規劃其位置、大小、設定其相關屬性，完成與使用者互動的視窗化介面。該視窗化介面即是輻射曝露情節與劑量評估程序，可與使用者產生友善化的操作環境。然 RESRAD-OFFSITE 模式當初設計時，已預先規劃

完成與其他程式相連結之設定方法，如表 30，RESRAD-OFFSITE 輸入檔特性描述。該 AQFLUXIN.DAT 為核種及子核種傳輸至地下水之通量，將可利用通量交換與外掛程式進行整合連結。

表 30 RESRAD-OFFSITE 輸入檔特性描述

檔名	描述
AQFLUXIN.DAT	核種及子核種傳輸至地下水之通量(Flux) 單位：pCi/year
SWFLUXIN.DAT	核種及子核種傳輸至地面水之通量(Flux) 單位：pCi/year
AIFLUXIN.DAT	核種及子核種傳輸至空氣之通量(Flux) 單位：pCi/year

一般污染物傳輸模式，對於核種使用的單位係為容積莫耳濃度，對於地下水通量可藉由並將經由方程式(4-1)進行容積莫爾濃度與活度單位之轉換，並配合孔隙率及含水量適當修正後，可將 mol/l/year 單位轉換成 Bq/year 或 pCi/year 單位，所以將其他程式模擬得到濃度單位轉換通量成 Bq/year 或 pCi/year 後，並再將輸出通量設定為 AQFLUXIN.DAT 檔之格式；對於地面水通量可將 mg/m<sup>3</sup>，配合每年的地面水水量轉換為 Bq/year，並再將地面水輸出通量設定為 SWFLUXIN.DAT 檔之格式，所以可由其他程式模擬近場或遠場之核種釋出通量，再串接 RESRAD-OFFSITE 進行輻射曝露情節與劑量評估及風險分析。有關核種質量與活度之轉換公式如下：

$$A = \frac{\lambda MN^0}{W} \quad (4-1)$$

其中：A 活度 (Activity (Bq))；λ 衰變常數 (decay constant)；M 核種質量 (Mass of radionuclide)；N<sup>0</sup> Avogadro's 數 (6.02×10<sup>23</sup>)；W 為核種原子量

## 4.2. 設計情節之生物圈劑量評估

### 4.2.1. 達仁場址設計情節劑量

依據 LLWD2016 設計情節條件如下(台電公司，2017b)：

#### (一)外部條件

##### 1.氣候演化

參考演化一之氣候演化，預期冰期循環受溫室氣體影響，將推遲至處置設施封閉後 100,000 年後才開始。亦即在未來 100,000 年內氣候形態大致與現在相似，但受溫室氣體

影響推估降雨量可能增加 10%。

## 2. 海水位變化

在本設計情節下，依參考演化一之氣候演化推測，海水面上升程度對於達仁鄉建議候選場址之地下水流場影響並不明顯，故海水位均假設維持於現況平均潮位高程 EL0.193m。

## 3. 地層抬升及地表侵蝕

地層抬升及地表侵蝕將影響處置設施周圍地表與地下水文狀態。依 5.2.2 節之場址特徵化成果，假設地層平均抬升率為 2.6mm/yr，平均剝蝕率為 2.5 mm/yr。目前依資料精度採用平均抬升與剝蝕率方式推估，故地表地貌特徵將與現況相同。

### (二) 處置設施

針對處置設施內之水文條件，以及工程障壁在設計情節下之演化說明如下：

#### 1. 水文條件

由於地形、地貌與海平面高程均與現況相似，僅年平均降雨量提高 10%，故推測於分析期間內之地質圈受補注量增加影響，地下水流速將會微幅提升，其餘地下水流場特性如：流向與流徑等，將與初始狀態相似。而處置設施將採回填方式封閉，受設施回填範圍之水力傳導特性設計影響，推估處置設施之地下水流速增幅將少於地質圈增幅。

#### 2. 工程障壁

工程障壁材料可概分為混凝土材料及膨潤土材料，茲就其劣化考量說明如下：

- (1) 混凝土材料劣化將產生裂縫及增加孔隙，進而提高水力傳導度、孔隙率及擴散係數，而吸附功能仍可長時間維持。
- (2) 鈉型膨潤土會因為其周圍混凝土材料之溶出失鈣現象而導致蒙脫石溶解並鈣型化，使其滲透係數增加且降低其回脹性，進而降低其遲滯功能。

#### 3. 核種傳輸

核種傳輸過程將考量之機制包括核種衰變、非金屬放射性廢棄物核種溶解度、金屬放射性廢棄物核種釋出率、平流、延散、擴散及吸附等，影響空間中核種濃度分布之機制。其中，保守考量非金屬放射性廢棄物核種於遇水時瞬時溶解且無溶解度上限。

### (三) 地質圈

#### 1. 地下水流場特性

由於地形、地貌與海平面高程均與現況相似，僅年平均降雨量提高 10%，故推測於分析期間內之受補注量增加影響，地下水流速將會微幅提升，其餘地下水流場特性如：流向與流徑等，將與初始狀態相似。

## 2.地球化學

地球化學條件與地下水組成密切相關，由於本場址長期處於淡水環境條件，故於分析期間內，處置設施周圍之地下水均為淡水，依參考演化一之地球化學演化推測均屬還原狀態。因此，在整個分析之時間尺度下，地質圈之地球化學條件將維持與初始狀態相近。

## 3.力學作用

本場址為坑道式處置，由於選址時已避開活動斷層直接影響區域，故推測地震對於地質圈之影響，主要位於分析邊界以外之區域。在工程障壁具有良好施工品質的前提下，地震對於工程障壁系統之影響有限，故於設計情節中不考慮地震對於地質圈之影響。

然由於處置時間尺度較長，整個處置場設施可能遭受多次強地動作用，而減損工程障壁安全功能。考量發生足以對處置窖產生嚴重破壞之地震事件發生機率較低，故另於替代情節中考量地震作用加速處置設施安全功能劣化之影響。

## 4.核種傳輸

核種傳輸過程將考量之機制包括核種衰變，以及平流、延散、擴散及吸附等，影響空間中核種濃度分布之機制。

## 5.核種釋出至生物圈之濃度

核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化，達仁溪及塔瓦溪流域分別如圖 49 及圖 50。

### (四)地表生態系統

在本設計情節下，處置場封閉後 100,000 年內之氣候形態與現況差異不大，推估未來地表生態系統與現況相差不大，產業發展多以一級產業為主。故推測其生物圈為陸域生活型態，人類可能嚥入、吸入及曝露放射性核種之途徑如圖 51。達仁鄉建議候選場址之關鍵群體生活模式推估，主要參考東部地區山區居民生活方式加以推演，其生活環境屬於無沖積層之山區地形，由於岩盤難以鑿井，故在自來水管網系統未達之地，多以簡易取水設施取用山泉水或野溪水。由於關鍵群體是推估將居住於溪流出口地區，其地勢較為平緩且適於農耕與養殖，故其生活用水、農業用水和養殖用水皆來自河水，不考量關鍵群體鑿井取

水的情況。(台電公司，2017b)

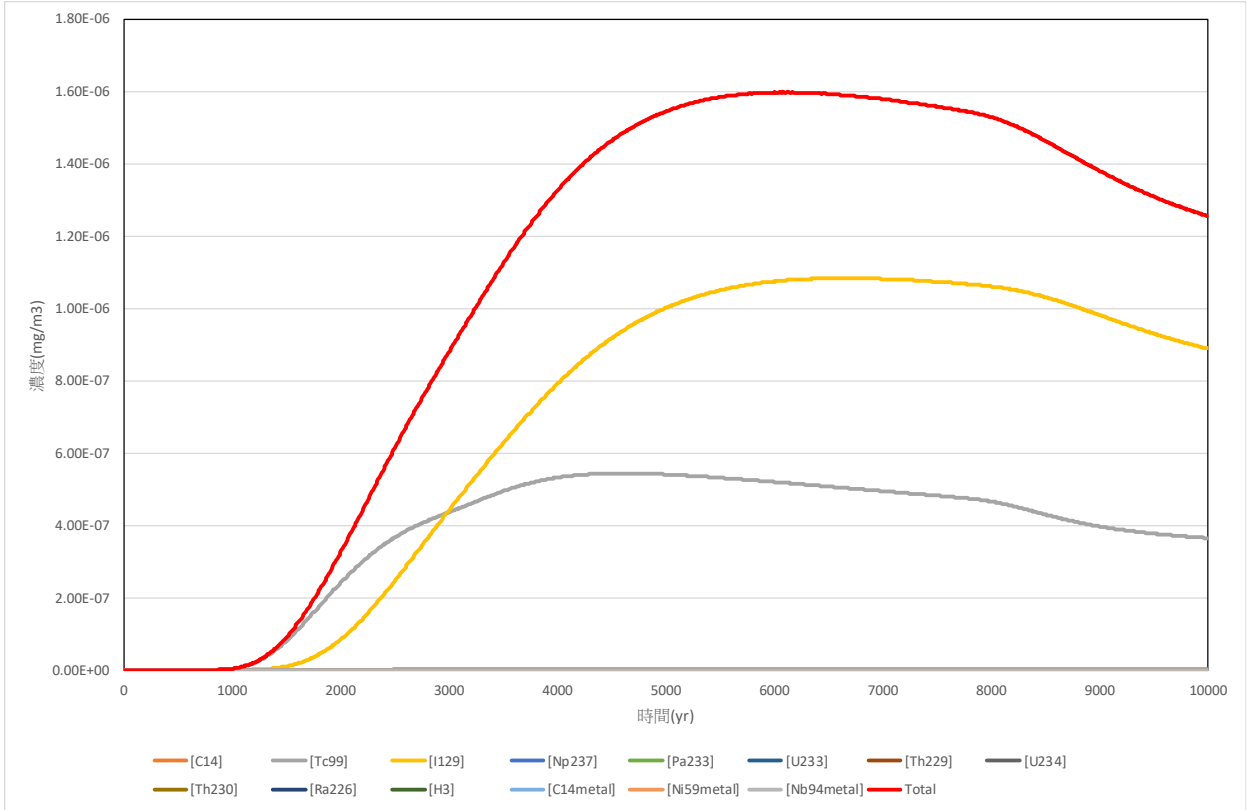


圖 49 核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化(達仁溪流域) (台電公司，2017b)

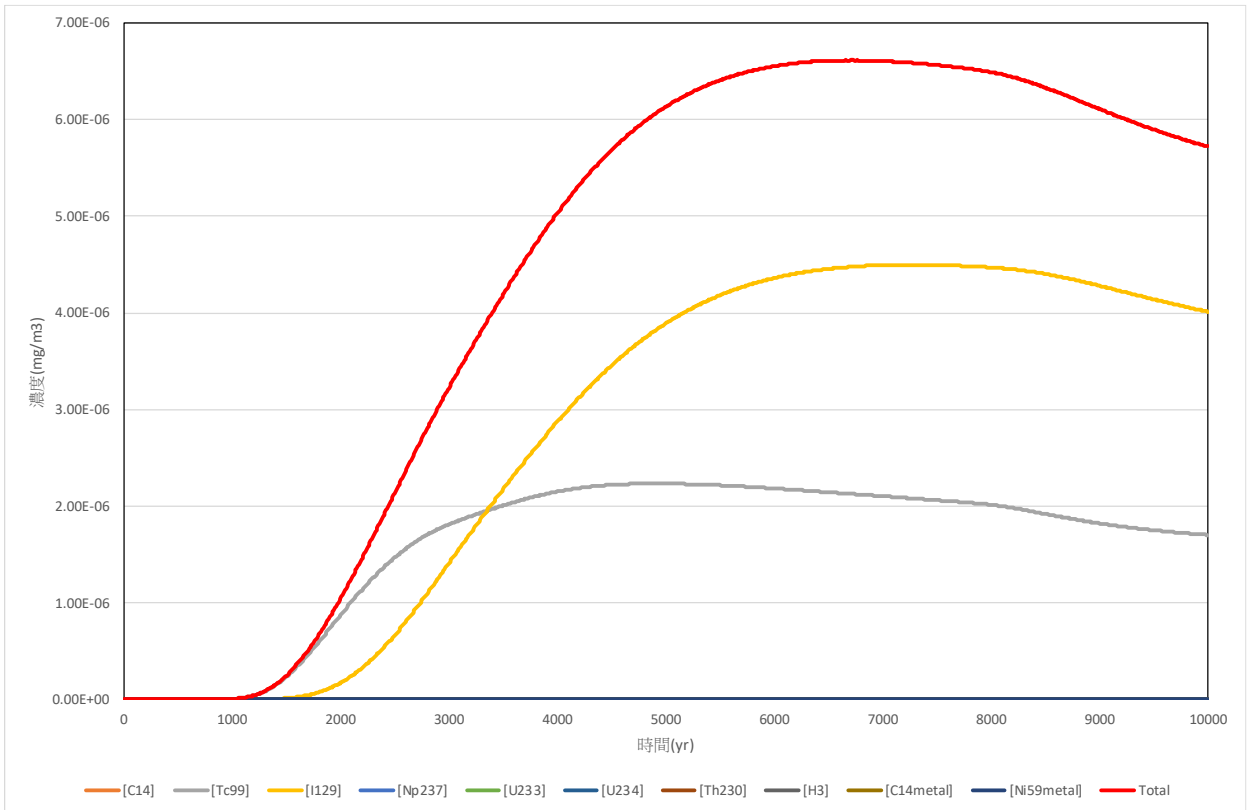


圖 50 核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化(塔瓦溪流域) (台電公司，2017b)



圖 51 陸域生活型態之生物圈核種傳輸示意(台電公司，2017b)

#### (五)設計情節劑量

設計情節依核種釋出至達仁溪流域或塔瓦溪流域之區別，分別考量關鍵群體之劑量估算，若關鍵群體位於達仁溪流域，則其水源來自達仁溪，若關鍵群體位於塔瓦溪流域，則其水源來自塔瓦溪。主要的關鍵傳輸途徑皆為飲用受污染的河水。不同流域下各核種之劑量分析結果如圖 52 及圖 53 所示。達仁溪下游之關鍵群體在此情節下最大個人年有效劑量為  $2.59\text{E-}04$  mSv，發生時間為場址封閉後 5,110 年；塔瓦溪下游之關鍵群體在此情節下最大個人年有效劑量則為  $1.02\text{E-}03$  mSv，發生時間為場址封閉後 5,440 年。主要之劑量來源核種均為 C-14。(台電公司，2017b)

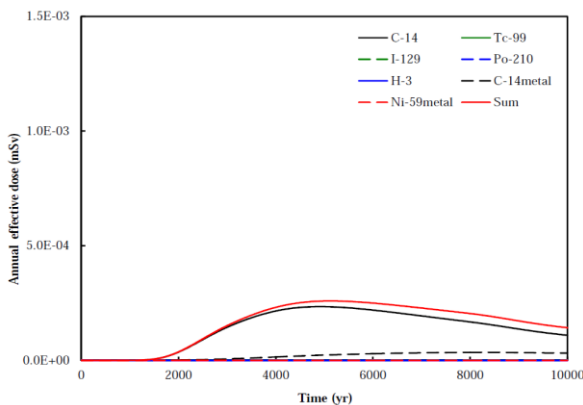


圖 52 設計情節下之個人年有效劑量評估結果(達仁溪流域)(台電公司，2017b)

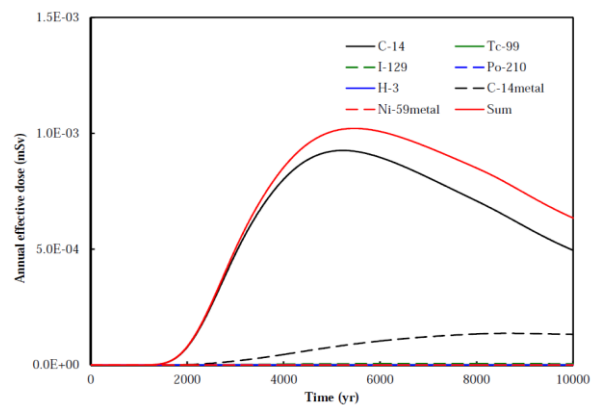


圖 53 設計情節下之個人年有效劑量評估結果(塔瓦溪流域)(台電公司，2017b)

#### 4.2.2. 烏坵場址設計情節劑量

依據 LLWD2016 設計情節條件如下(台電公司，2017b)：

## (一)外部條件

### 1. 氣候演化

參考演化一之氣候演化，預期冰期循環受溫室氣體影響，將推遲至處置設施封閉後 100,000 年後才開始。亦即在未來 100,000 年內氣候形態大致與現在相似，但受溫室氣體影響推估降雨量可能增加 10%。

### 2. 海水位變化

在本設計情節下，依參考演化一之氣候演化推測，海水面上升程度對於烏坵鄉建議候選場址之地下水流場影響並不明顯，故海水位均假設維持於於 EL0m。

### 3. 地層抬升及地表侵蝕

地層抬升及地表侵蝕將影響處置設施周圍地表與地下水文狀態。依場址特徵化成果，假設地層平均抬升率為 0.48mm/yr，平均剝蝕率為 0.1 mm/yr。目前依資料精度採用平均抬升與剝蝕率方式推估，故地表地貌特徵將與現況相同。

## (二)處置設施

針對處置設施內之水文條件，以及工程障壁在設計情節下之演化說明如下：

### 1. 水文條件

由於地形、地貌與海平面高程均與現況相似，僅年平均降雨量提高 10%，故推測於分析期間內之地質圈受補注量增加影響，地下水流速將會微幅提升，但僅限於小坵島內之淡水系統地下水流場。處置設施周圍之地下水流場與初始狀態相似，處置設施將採回填方式封閉，受設施回填範圍之水力傳導特性設計影響，推估處置設施之地下水流場特性於分析期間內，仍將與初始狀態相似。

### 2. 工程障壁

工程障壁材料可概分為混凝土材料及膨潤土材料，茲就其劣化考量說明如下：

(1)本場址位於海床下，氯離子對於混凝土鋼筋材料之影響將較顯著。混凝土中鋼筋材料將因氯離子之影響而開始鏽蝕，導致鋼筋體積膨脹，並使混凝土劣化將產生裂縫及增加孔隙，進而提高水力傳導度、孔隙率及擴散係數。

根據「參考演化一」，處置周圍地球化學環境在封閉後數年內即轉回還原態，故在整個處置考量上，地球化學環境主要以還原態為主。依據 SKB(2014a, p217)，即使混

凝土材料已嚴重物理劣化，其吸附功能仍可長時間維持。

- (2) 鈉型膨潤土會因為其周圍混凝土材料之溶出失鈣現象而導致蒙脫石溶解並鈣型化，使其滲透係數增加且降低其回脹性，進而降低其遲滯功能。

### 3. 核種傳輸

核種傳輸過程將考量之機制包括核種衰變、非金屬放射性廢棄物的核種溶解度、金屬放射性廢棄物之核種釋出率、平流、延散、擴散及吸附等，影響空間中核種濃度分布之機制。其中，保守考量非金屬放射性廢棄物的核種於遇水時瞬時溶解且無溶解度上限。

## (三)地質圈

### 1. 地下水流場特性

由於地形、地貌與海平面高程均與現況相似，僅年平均降雨量提高 10%，故推測於分析期間內之受補注量增加影響，島內地下水流速將會微幅提升，其餘地下水流場特性如：流向與流徑等，將與初始狀態相似。而設施所在位置地下水流場受海水位控制，其地下水流場特性應與初始狀態相似。

### 2. 地球化學

地球化學條件與地下水組成密切相關，由於本場址長期處於海水環境條件，故於分析期間內，處置設施周圍之地下水均為海水，依參考演化一之地球化學演化推測均屬還原狀態。因此，在整個分析之時間尺度下，地質圈之地球化學條件將維持與初始狀態相近。

### 3. 力學作用

本場址為坑道式處置，由於選址時已避開活動斷層直接影響區域，故推測地震對於地質圈之影響，主要位於分析邊界以外之區域。在工程障壁具有良好施工品質的前提下，地震對於工程障壁系統之影響有限，故於設計情節中不考慮地震對於地質圈之影響。

### 4. 核種傳輸

核種傳輸過程將考量之機制包括核種衰變，以及平流、延散、擴散及吸附等，影響空間中核種濃度分布之機制。

### 5. 核種釋出至生物圈之濃度

核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化，如圖 54。

## (四)地表生態系統



在本設計情節下，處置場封閉後 100,000 年內之氣候形態與現況差異不大，推估未來地表生態系統與現況相差不大，產業發展多以一級產業為主。有關放射性核種在地表生態系統之傳輸，將依核種外釋位置之生態系統，以及附近居民之生活形態進行評估。針對本島嶼型態之場址，人類可能攝入放射性核種之途徑如圖 55。

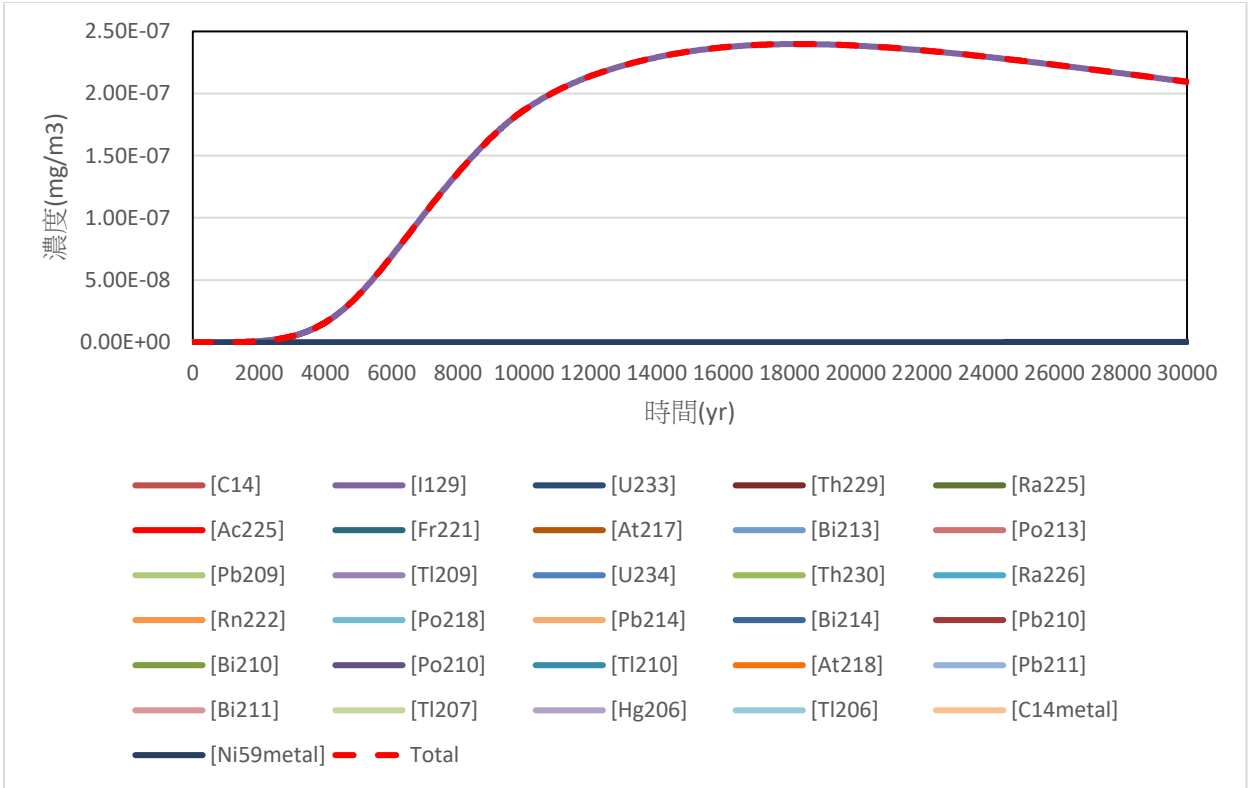


圖 54 核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化(烏坵)(台電公司，2017b)



圖 55 島嶼型地表生態系統核種傳輸示意(台電公司，2017b)

(五)設計情節劑量

在本情節考量因全球暖化而冰期推遲 100,000 年，因此場址降雨量假設較現況增加 10%，工程障壁劣化過程則是以正常劣化之考量進行設定。由於此情節之海水位沒有明顯下降，因此關鍵群體均以島嶼型生活形態為考量，並據以評估其年有效劑量。各核種之劑量分析結果如圖 56 所示，關鍵群體在此情節下最大個人年有效劑量為  $5.30E-06$ mSv，發生時間為場址封閉後 18,050 年，主要劑量來源核種為 C-14。(台電公司，2017b)

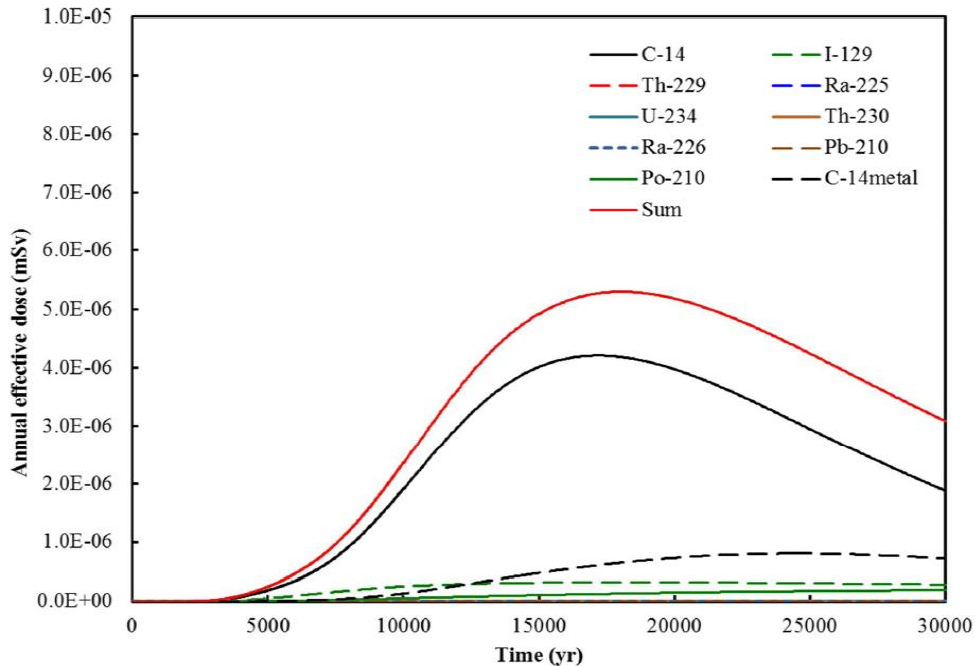


圖 56 設計情節下之劑量評估結果(烏坵場址)(台電公司，2017b)

### 4.3. 設計情節之生物圈劑量審驗結果分析

#### 4.3.1. 達仁場址生物圈劑量審驗結果分析

本計畫利用台電公司提供之核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化，依前述整合其他程式及 RESRAD-OFFSITE 模式進行模擬分析，利用 RESRAD-OFFSITE 輻射曝露情節與劑量評估之方法，與圖 49 及圖 50 之核種釋出至生物圈濃度隨時間的變化，進行設計情節劑量評估結果審驗。達仁溪流域之各核種劑量分析結果如圖 57，塔瓦溪下游之關鍵群體之各核種劑量分析結果圖 58 所示。達仁溪下游之關鍵群體在此情節下最大個人年有效劑量約為  $4.3E-04$  mSv，發生時間為場址封閉後約 5,100 年之時間；塔瓦溪下游之最大個人年有效劑量約為  $5.0E-04$  mSv，發生時間為場址封閉後約 5,200 年。主要之劑量來源核種均為 C-14。該二流域之最大個人年有效劑量均小於 0.25 mSv。

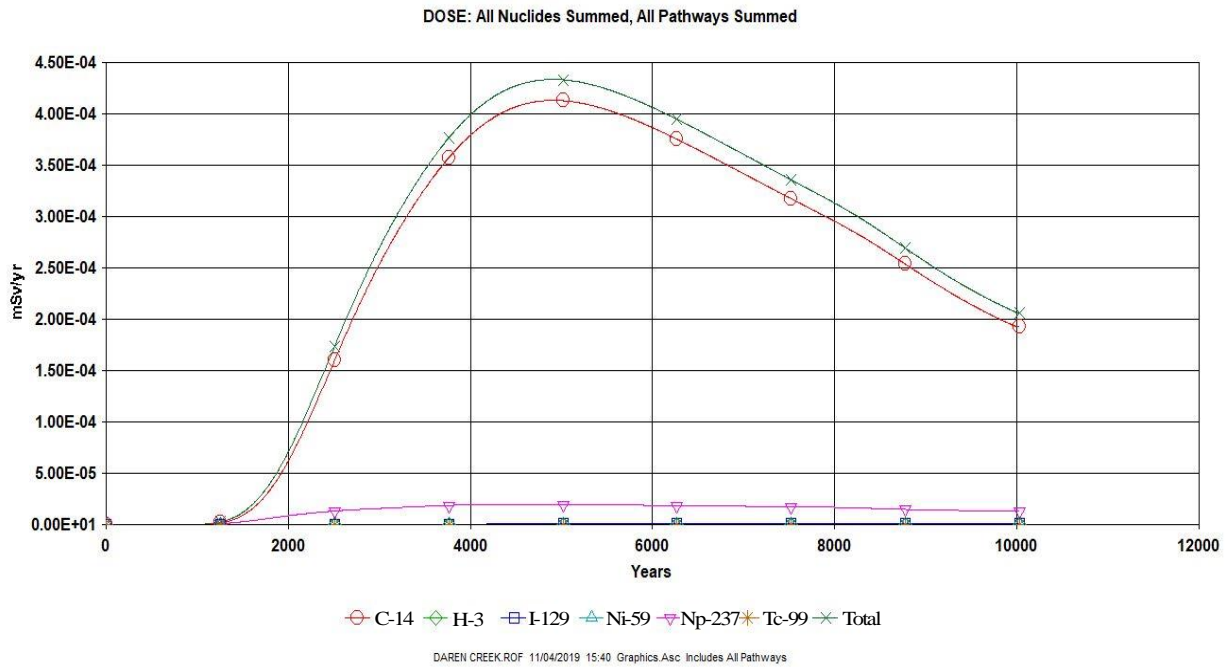


圖 57 設計情節下之個人年有效劑量審驗(達仁溪流域)

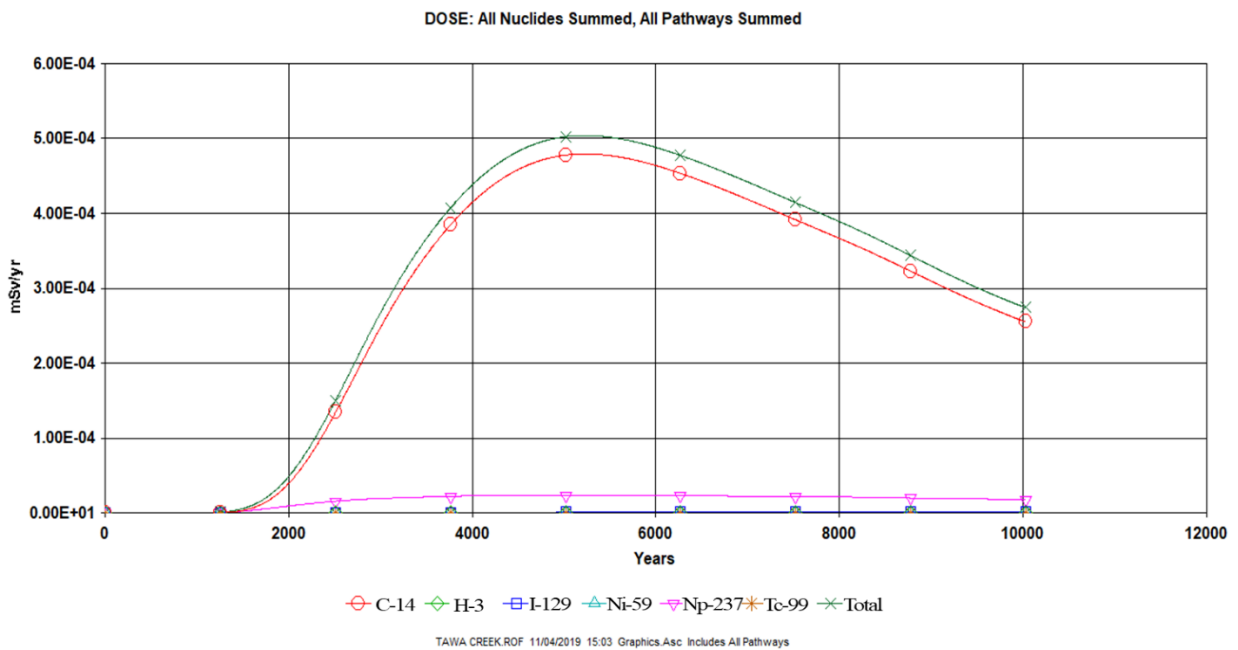


圖 58 設計情節下之個人年有效劑量審驗(塔瓦溪流域)

對於達仁場址於圖 52 及圖 53，LLWD2016 劑量評估結果列出 Po-210(半化期 138 天)子核種，由於 RESRAD-OFFSITE 模式中核種濃度曝露時間超過一年，方能在劑量評估圖中顯示，因為 Po-210 半化期小，且非為主要劑量核種，所以於圖 57 及圖 58 皆未顯示。第二章列出 LLWD2016 篩選之關鍵核種並未包含 Np-237，但台電公司提供之核種釋出至生物圈，該核種亦包含 Np-237，所以本研究利用 RESRAD-OFFSITE 模式進行劑量評估結果發現，亦屬主要核種之劑量，所以台電公司仍需注意，對於 Np-237 之核種篩選及進行 Np-

237 之劑量評估。另外 C-14metal 與 C-14 於 RESRAD-OFFSITE 中視為同一種核種物質，所以並無區分 C-14metal 與 C-14 兩種核種。C-14metal 或 Ni-59metal 無法於 RESRAD-OFFSITE 列出。RESRAD OFFSITE 對於 C-14metal、Ni-59metal 係視為 C-14、Ni-59 核種。

#### 4.3.2. 烏坵場址生物圈劑量審驗結果分析

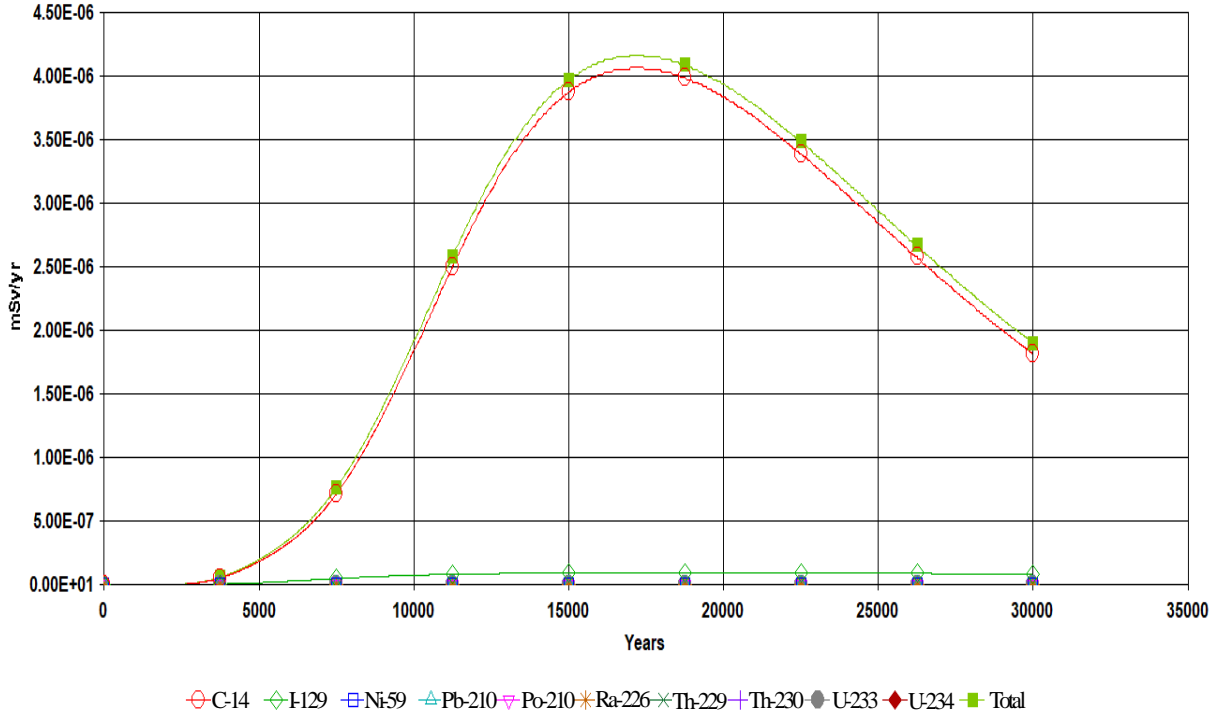
利用 RESRAD-OFFSITE 輻射曝露情節與劑量評估之方法，由圖 54 之核種釋出至生物圈濃度隨時間的變化，進行設計情節劑量評估結果審驗。烏坵關鍵群體之各核種劑量分析結果圖 59 所示，此情節下最大個人年有效劑量約為  $4.2E-06$  mSv，發生時間為場址封閉後約 18,000 年之時間。主要之劑量來源核種為 C-14，該最大個人年有效劑量小於 0.25 mSv。

對於烏坵場址台電報告列出 Ra-225(半化期 14.9 天)子核種，於 RESRAD 程式評估中因半化期小，且非為主要劑量核種，前已說明 RESRAD-OFFSITE 模式中核種濃度曝露時間超過一年，方能在劑量評估圖中顯示，因為 Ra-225 半化期小，且非為主要劑量核種，所以於圖 59 未顯示。且 RESRAD OFFSITE 對於 C-14metal、Ni-59metal 係視為 C-14、Ni-59 核種。第二章列出 LLWD2016 篩選之關鍵核種，包括 Ni-59metal，台電公司提供之核種釋出至生物圈(如圖 54)，亦包含 Ni-59metal，且亦有 U-233 核種。但本研究利用 RESRAD-OFFSITE 模式進行劑量評估結果發現，Ni-59 及 U-233 亦屬主要核種之劑量，但劑量仍低，Ni-59 及 U-233 之劑量如表 31 所示，其中 30000 年時分別達到劑量評估之年有效劑量最大值为  $1.9E-14$  mSv 及  $4.4E-12$  mSv。但台電公司仍需注意，對於 Ni-59 及 U-233 之劑量評估。

表 31 RESRAD-OFFSITE 模式模擬烏坵場址之 Ni-59 及 U-233 劑量 (單位:mSv/year)

時間 核種	500 年	1000 年	2500 年	5000 年	10000 年	15000 年	30000 年
Ni-59	0	$3.8E-29$	$7.4E-28$	$2.5E-25$	$6.2E-19$	$7.8E-17$	$1.9E-14$
U-233	$5.7E-25$	$1.9E-19$	$6.7E-16$	$3.4E-14$	$6.0E-13$	$1.5E-12$	$4.4E-12$

DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed



WUQU-1201.R0F 12/01/2019 20:03 Graphics Asc Includes All Pathways

圖 59 設計情節下之個人年有效劑量審驗 (烏坵場址)

另外對於圖 54 有關烏坵場址之核種釋出至生物圈，圖 54 列出甚多衰變後之子核種，有甚多核種半化期僅甚小(以秒、分、天為單位)，如

表 32，依台電設計情節案例於 RESRAD-OFFSITE 模式選取核種，這些短半化期核種並未出現於 RESRAD-OFFSITE 模式核種選取清單內，於 RESRAD-OFFSITE 模式選取台電設計情節案例之核種，經模擬後之輸出檔並未出現該短半化期之子核種。所以 RESRAD-OFFSITE 模式選取核種清單無

表 32 核種，且模擬結果亦非屬於子核種。且 RESRAD-OFFSITE 模式中核種濃度曝露時間最小設定值為 1 年，

表 32 所列核種 RESRAD-OFFSITE 模式皆屬於不考慮或無模擬劑量結果之核種。所以於圖 54 烏坵場址釋出至生物圈之

表 32 所列子核種皆不考慮其劑量。

表 32 烏坵場址有關核種釋出至生物圈之衰變後子核種

核種	[Ra225]	[Ac225]	[Fr221]	[At217]	[Bi213]	[Po213]	[Pb209]
半化期	14.9 days	10.0 days	4.9min	32.3 msec	45.58 min	3.72 $\mu$ s	3.252 h
核種	[Tl209]	[Rn222]	[Po218]	[Pb214]	[Bi214]	[Bi210]	[Tl210]
半化期	2.2 min	3.82 days	3.098 min	26.83 min	19.9 min	5.011 days	1.3 min
核種	[At218]	[Pb211]	[Bi211]	[Tl207]	[Hg206]	[Tl206]	
半化期	1.5 sec	36.166 min	2.14 min	4.766 min	8.32 min	4.202 min	

## 5. 低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議

針對低放射性廢棄物處置場址安全輻射劑量評估安全審查，係為審照作業重要之程序過程。藉由評估瞭解有多少的核種濃度可由近場釋出並遷移至生物圈，與釋出的核種濃度有多少的輻射劑量對於人體有影響，將可判定低放處置設施安全功能及處置環境是否能滿足處置要求。因此，低放處置設施必須被妥適管理，確保處置設施對人體及環境不會造成危害，0.25 mSv/year 是目前的所規定一般個人有效劑量限值，並應合理抑低。對國內低放坑道處置生物圈劑量評估技術發展，需針對生物圈安全評估是否合乎監管要求，藉此了解處置場系統的安全功能是否合乎安全標準，依據該目標提出低放處置生物圈劑量評估技術發展建議。

本研究蒐集瑞典生物圈評估國際合作的背景、進行之國際合作計畫和相關研究、SR-PSU 應用 BIOMASS 方法，並建議國內可參考瑞典經驗及 IAEA 之 BIOMASS 進行生物圈劑量評估技術發展。

### 1. 生物圈評估國際合作的背景

瑞典從 1984 年開始就針對其安全評估方法的各種觀點進行同儕評審，包括：國際原子能總署 IAEA、NEA-OECD、AECL 技術諮詢委員會（加拿大）、法國核安全及保護研究所，國家輻射防護原子能研究機構（英國），國家放射防護委員會（英國），美國國家科學院和英國地質調查局。審查項目特別涵蓋生物圈考慮項目。在同儕評審過程不久之後，瑞典輻射防護研究所（SSI，後來成為瑞典輻射安全局 SSM）成立 BIOMOVs 的國際合作計畫，其主要目標是：

- 測試選定污染物和曝露情節之環境評估模型預測的準確性。
- 解釋由於模型架構缺陷、無效假設和/或所選輸入數據的差異而產生的模型預測差異。
- 建議未來研究的重點，以提高模型預測的準確性。

該方案除其他情況外還考慮由於處置場放射性廢棄物之核種釋出到環境中之長期安全評估。該工作側重於科學問題和數據的最佳使用，允許專家進行探索和發展與長期情況相關的評估方法。

參與者包括來自 14 個國家的 22 個組織之專家。其中 BIOPATH 模型工具應用於模型



測試練習，該生物圈模型工具於 1983 年對於 KBS-3 研究及對 SFR 的第一次安全評估，該評估於 1984 年（瑞典工業部 1984 年）進行審查。後續合作計畫從 1985 年至 1990 年，針對各種曝露情況進行評估，並於 1993 年發表 BIOMOVS 技術報告並開始第二階段之 BIOMOVS II。

BIOMOVS II 的計畫範圍與之前相似，也有眾多國際參與者。考慮關鍵特徵、事件和作用（FEPs）的識別，以及對應的相關模型特徵和數據要求。定量分析模型的結果相互比較，以確定哪些作用在哪些過程中可能是重要的曝露的情節，以及替代方案可能會產生什麼影響作用。SKB 當時使用的 BIOPATH 模型，測試十個模型並進行比較，結果於 1996 年發表 BIOMOVS II 技術報告。

此外，BIOMOVS II 還考慮參考生物圈的發展。最初想法是為確定一些關鍵的生物圈情況（參考生物圈）和評估在這些情況下釋出放射性核種之影響，並將結果作為基準或參考值，用來比較替代的處置系統功能。然而，有限的條件或參考生物圈並無法解決不同國家所出現的不同評估背景範圍。除了地理位置以及不同地點的其他物理條件，專家們認為處置場作業的發展階段，決定後續生物圈安全評估所有必要和適當的細節水平。並認為對於特定的處置場址，應該在國際制定共同方法，找出能證明長期環境條件和人類行為的適當假設。發展摘要大綱方法論後，並一起提供相對應之 FEPs 清單和精進方法建議。

為解決 BIOMOVS II 建議，國際原子能總署在 BIOMASS 國際合作研究計畫成立「參考生物圈」計畫，並於 2003 年完成 BIOMASS 技術報告。該計畫工作共有六個任務分組，在 1996 年至 2001 年期間完成及建立在 SKB 進行之建模和評估結果，以及國際輻射防護協會放射性廢棄物處置演變之建議。

## 2. 生物圈評估國際合作計畫和相關研究

目前已經有為數眾多已完成或正在進行中的國際研究計畫致力於放射性廢棄物處置功能評估之生物圈安全評估作業。該研究計畫有共同特點係為針對特定場址評估，該特性反應處置場發展之進展，有關特定場址的開發進展。

BIOPROTA 計畫是最重要的國際合作項目之一。該計畫開始於 2002 年，目前仍持續進行中，涉及廣泛的營運開發者，包括北美、歐洲和亞洲的監管機構、技術支持組織和研究機構。其目的在支持解決生物圈方面的關鍵問題評估與管理放射性廢棄物有關的污染物



排放之長期影響。

SKB 關注科學評估，並參與該項目的科學和現場調查工作，環境安全情節及相關安全評估工作。例如，SKB 參與地質圈及生物圈相互作用有關的項目 (GBIZ 計畫)，和在環境和非人類生物群體評估 C-14 的行為。SKB 還參加國際原子能總署有關輻射安全環境模擬 EMRAS II 計畫，貢獻其研發能量在環境劑量對環境影響之研究。並繼續參加在輻射影響評估之模擬和數據處理之 MODARIA 計畫，特別在第 6 工作組內進行放射性廢棄物處置長期安全評估之環境變化，特別關注於氣候變化及其影響後果。

### 3. 建議我國參考應用 BIOMASS 方法

建議國內參考 IAEA 之 BIOMASS 生物圈劑量評估技術發展，該 BIOMASS 方法為評估生物圈發展之標準作業程序。評估生物圈的定義是：

- (1) 需要就未來生物圈系統和潛在接觸群體的定義，製定一套一致和合理的假設和假定；
- (2) 需要建立一個邏輯和全面的框架，將這些假設和假定與相關的科學理解結合起來，以便能夠計算輻射影響。

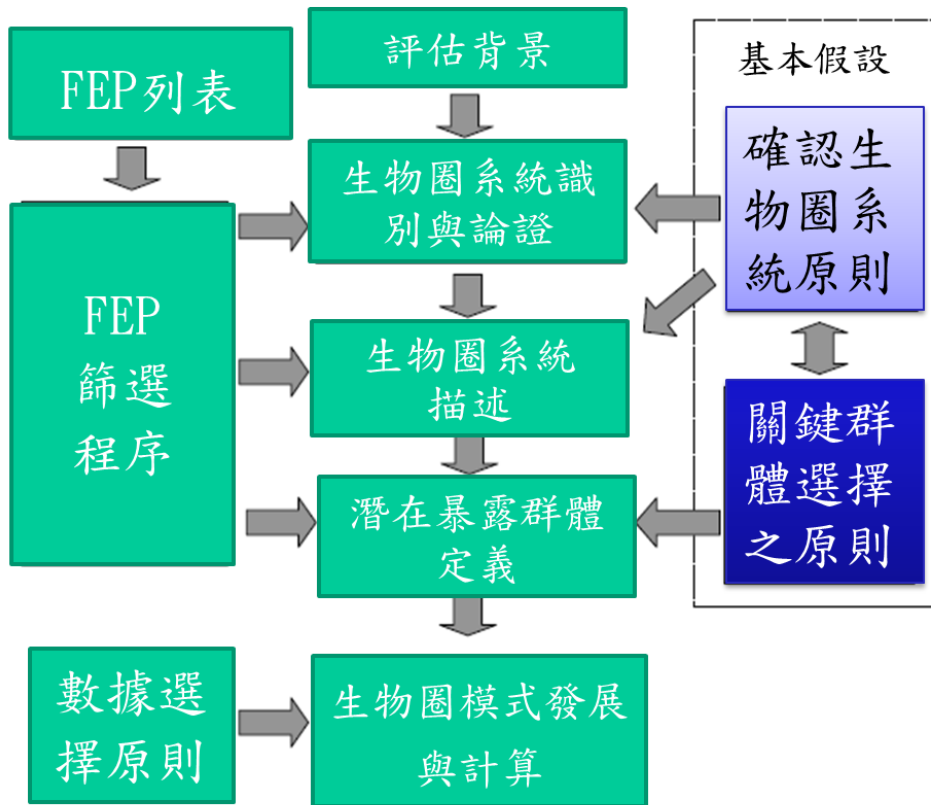


圖 60 BIOMASS 生物圈劑量評估技術發展的流程圖

BIOMASS 生物圈劑量評估技術發展的流程圖如圖 60，並將步驟說明如下：

- 定義評估內容
- 確定並證明待評估的生物圈系統
- 生物圈系統描述
- 考慮潛在的曝露群體
- 模式發展
- 計算
- 迭代

以下介紹前四步驟的程序內容。有關

#### (1) 定義評估內容

SR-PSU 生物圈的評估背景及總體目標：

- 列出要評估的內容以及為什麼要評估
- 列出要提供評估內容的邊界條件之初始假定
- 定義評估內容，例如目的、評估終點和社會行為假設
- 提供每個計算目的之完整記錄。

本步驟之流程內容說明如圖 61 之 BIOMASS 生物圈劑量評估方法路線圖。

#### (2) 確定並證明待評估的生物圈系統

確定生物圈系統隨時間而變化之關鍵問題。SKB 非常重視這個關鍵問題，因為擬定的場址受到環境變化影響，這些變化已得到監管部門明確認可。該環境變化主要由氣候變化和海平面變化所引起。這些變化資訊對於評估生物圈終點之問題具有實質性影響關聯，且影響各種生物圈重要性作用和潛在相關曝露途徑，及鑑定水流流出區域與隨時間之演變，和模式假設及考慮到以前評估經驗等。

本步驟之流程內容說明如圖 61 之 BIOMASS 生物圈劑量評估方法路線圖。

#### (3) 生物圈系統描述

國際原子能總署於 2003 年提供有關構建生物圈系統描述之建議，SKB 已經制定福斯

馬克地區之場址以及因環境變化之預期演變發展。針對生物圈系統描述，SKB 完整收集場址有關之資料，深入了解生態系統。

本步驟之流程內容說明如圖 61 之 BIOMASS 生物圈劑量評估方法路線圖。

#### (4)考慮潛在的曝露群體

到目前為止，無法可靠地預測未來的人類行為以論證安全。國際原子能總署於 2003 年提出以下方法：

- 審查感興趣的生態系統內之曝露模式和相關途徑
- 一致地確定和描述這些生態系統內的人類活動，
- 將人類活動和曝露模式結合起來，找出最有可能導致事件之最高劑量。

SKB 已採用這種方法，曝露途徑分析已經完成，且已納入對於曝露群體之潛在重要的曝露途徑，並將幾個曝露區域當作生物圈邊界情節案例，以確保能計算最大曝露群體之劑量。本步驟之流程內容說明如圖 61 之 BIOMASS 生物圈劑量評估方法路線圖。

#### (5)模式發展

國際原子能總署在 2003 年建議在模式發展採取以下步驟：

- 識別概念模型對象，不同環境介質潛在影響可能曝露群體之輻射劑量。
- 藉由所考慮概念模型對象之間的交互作用來構建概念模型。
- 省略沒有潛在影響之重要特徵、事件和作用（FEPs）的概念模型。
- 識別數據來源，定義可用數據來源和獲得科學理解之數學模型，並根據實驗調查和假設之數據指導計畫得到相關參數值。
- 合併曝露群組資料。

本步驟之流程內容說明如圖 61 之 BIOMASS 生物圈劑量評估方法路線圖。建議我國應採取 BIOMASS 生物圈劑量評估之步驟，對於可能的核種釋出至生物圈位置及生物圈系統單元之核種，進行生物圈之特徵事件作用之交互作用矩陣分析，以瞭解存在生態系統需要關注的情節，並利用系統方法檢查潛在的 FEPs 是否需要包含或合理排除。對於模式發展模型利用兩個階段，第一，進行地景模擬，以確認處置場潛在的地下水流出區域；第二，模擬放射性核種在不斷演變之生物圈系統內遷移。未來對於我國生物圈安全評估應針對處置

場內放射性核種可能釋出後建立數值模型，依據水文條件及生物圈之地景氣候演變進行建構。生物圈評估之計算步驟包括對於數學模式之適當數據選擇和應用，並對數據選擇和數據品質保證進行論述，該方法應參考國際原子能總署 2003 年出版 BIOMASS 之參數選擇規則。

### A. 定義評估內容

- 列出要評估的內容和原因。
  - 列出初始狀態。
  - 列出背景說明（內容構成要件），如目的、探究目標等，並提出一些替代方案。
  - 明確記錄計算目的。
- 評估內容將有助於建立適當品質水準的文件，以提供必要的可追溯性和清晰度。

**輸出：明確說明了計算的基本前提（正在計算的內容和原因）。**

### B. 確定並證明待評估的生物圈系統

- 審查評估背景。
- 使用系列的表 I（見 IAEA-BIOMASS-6 報告之 B 部分，附件 BI）(IAEA, 2003)，選擇需要瞭解的主要組成，然後選擇初始生物圈系統的主要組成成分類型，並證明選擇的合理性（如果超過一個系統，則重複進行其他系統）。
- 採用三步驟流程來考慮生物圈變化的需求（詳見 IAEA-BIOMASS-6 報告 B 部分 B3.1 節）。根據需求重複上要點中的步驟。

**輸出：單一生物圈系統或一系列生物圈系統，由主要組成成分類型來確定，如氣候類型、地形分類等。**

### C. 生物圈系統描述

請注意，以下每個步驟可能需要多次反覆運算。

- 步驟 1：使用系列表 II（見 IAEA-BIOMASS-6 報告之 B 部分，附件 BI）(IAEA, 2003)確定主要組成成分類型與哪些特徵相關（即進出生物圈系統的特徵）此外，人類未來活動表 HIIB（見 IAEA-BIOMASS-6 報告之 B 部分，附件 BI）用於確定潛在的接觸途徑。
- 步驟 2：建立生物圈系統主要組成類型之間的相互關係。（根據評估背景，可能不需要此步驟）。在適當的情況下使用交互作用矩陣。
- 步驟 3：製作生物圈系統的文字說明及示意圖，藉由計算過程，例如利用水平衡計算，來檢查生物圈系統內的一致性。這些程序需要使用數據參數及並依據參數資料說明程序手冊進行。

**輸出 1：生物圈系統示意圖及計算結果圖示，提供生物圈系統的定性描述，並在適當的情況下提供定量描述。**

**輸出 2：潛在曝露途徑的描述。**

(接下頁)

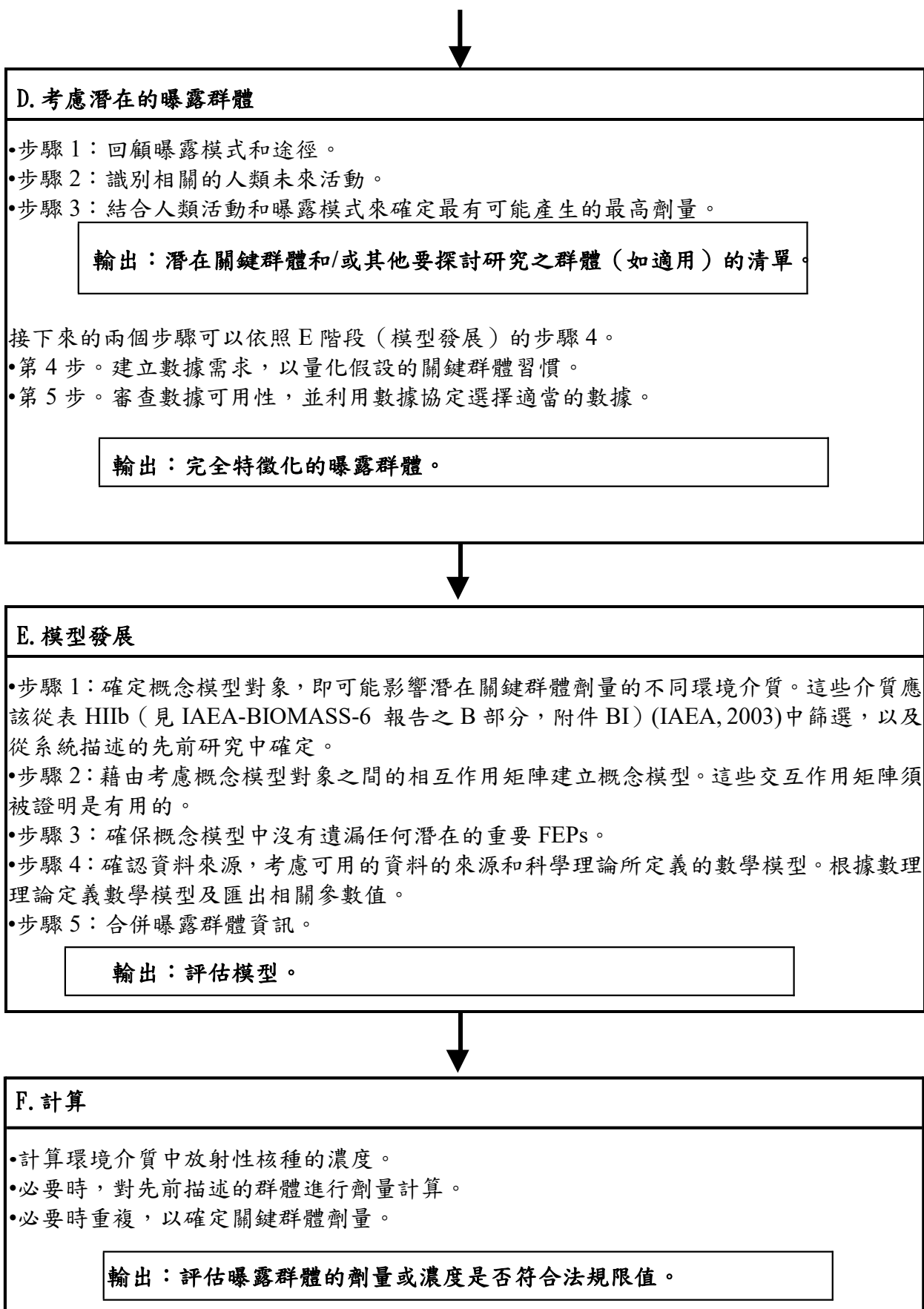


圖 61 BIOMASS 生物圈劑量評估方法路徑圖

## 6. 低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議

本計畫對於低放處置安全分析報告審查導則有關生物圈安全評估相關建議，已參加本計畫工作團隊安全分析報告審查導則相關會議，包括：第一次會議於 108 年 3 月 7 日(星期四)上午 9：30 在物管局舉行、第二次會議於 108 年 7 月 5 日(星期五)上午 11：00 在中央大學舉行、第三次會議於 108 年 9 月 9 日(星期一)上午 10：00 在物管局舉行、第四次會議於 108 年 10 月 29 日(星期二)下午 13：00 在中央大學舉行。並已提出相關修正建議，相關建議如下：

原文	修訂條文
3. 正常狀況之輻射劑量：說明處置設施運轉及封閉後在正常狀況之輻射劑量評估結果，內容需包括：傳輸機制、情節分析、概念模式、評估模式與程式、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。	3. 正常狀況之輻射劑量：說明處置設施運轉及封閉後在正常狀況之輻射劑量評估結果，內容需包括：傳輸機制、情節分析、概念模式、評估模式與程式、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與模式驗證。
(1). 正常情節(或稱設計情節)分析需選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、事件及作用等組合(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)，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 FEP，並記錄任何 FEP 被排除的原因。	(1). 正常情節(或稱設計情節)分析需選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、事件及作用(FEPs)等組合通用表，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 FEPs 通用表篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，並記錄任何 FEPs 被排除的原因。
(2). 分析出處置系統的重要組件，並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件將經常與緩慢發生的事件、及各重要組件間的互相作用過程。	(2). 分析出處置系統的重要組件，並說明重要組件的特徵、正常情況下重要組件將經常與緩慢發生的事件、及各重要組件間的互相作用過程，及其對於

原 文	修訂條文
	<p>降低處置單元水滲透與工程障壁遲滯功能等，於三、(一) 設計目標與功能需求所述處置系統功能之影響。</p>
<p>(3).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).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>(4). 處置設施運轉及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制，包含地下水、空氣、地表水、生物及其他傳輸機制。各傳輸機制均需說明，處置單元中重要核種藉由環境介質外釋之位置與量化特性、核種於環境介質中之傳輸特性、環境介質於處置障壁系統之通量分布特性、核種外釋至生物圈之位置與傳輸特性、植物、生物或人類活動對於核種傳輸機制與途徑之可能影響。</p>	<p>(4). 處置設施運轉及封閉後在正常狀況之核種傳輸機制，包含地下水、空氣、地表水、生物及其他傳輸機制。各傳輸機制均需說明，處置單元中重要核種藉由環境介質外釋之位置與量化特性，核種於環境介質中之傳輸特性，環境介質於處置障壁系統之通量分布特性，核種外釋至生物圈之位置與傳輸特性，人類或生物活動對於核種傳輸機制與途徑之可能影響。</p>
<p>(5). 處置設施運轉及封閉後在正常狀況之直接輻射評估需包含：廢棄物運送車輛之加馬輻射、場址運轉時之加馬輻射、主動監管期間處置單元之加馬輻射、及場址地表或建物之加馬輻射。</p>	<p>(5). 處置設施運轉及封閉後在正常狀況之直接輻射評估需包含：廢棄物運送車輛之加馬輻射、場址運轉時之加馬輻射、主動監管期間處置單元之加馬輻射、及場址地表或建物之加馬輻射。</p>
<p>(6). 如有預期將發生生物活動導致核種傳輸，需定義並定量直接經由生物途徑將核種外釋及傳輸至場址外，如穴居</p>	<p>(6). 如有預期將發生生物活動導致核種傳輸，需說明其生物活動特性，及其核種外釋量與傳輸至場址外之傳輸途徑與輻射強度。</p>



原文	修訂條文
動物由場址帶走污染物後，被獵人宰食。	
(7). 說明正常情節輻射劑量評估程式、輸入資料、輸出資料、輻射劑量評估結果。	(7). 說明正常情節輻射劑量評估程式、輸入資料、輸出資料、輻射劑量評估結果。
(8). 對正常情節輻射劑量評估程式的參數進行敏感度分析，依參數分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。	(8). 對正常情節輻射劑量評估程式的參數進行敏感度分析，依參數分布狀況，進行個人有效劑量的不確定性分析。
4. 異常狀況之輻射劑量：說明處置設施運轉及封閉後在異常狀況之輻射劑量評估結果，內容需包括：傳輸機制、情節分析、概念模式、評估模式與程式、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。	4. 異常狀況之輻射劑量：說明處置設施運轉及封閉後在異常狀況之輻射劑量評估結果，內容需包括：傳輸機制、情節分析、概念模式、評估模式與程式、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。
(1). 異常情節(或稱替代情節)分析需選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、事件及作用等組合(FEP)通用表(如IAEA 或國際組織)，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 FEP，並記錄任何 FEP 被排除的原因。	(1). 異常情節(或稱替代情節)分析需選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、事件及作用等組合(FEPs)通用表(如 IAEA 或國際組織)，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 FEPs 通用表篩選出與該處置場正常情況相關的 FEPs，並記錄任何 FEPs 被排除的原因。
5. 核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制：核種外釋之傳輸機制可能包括地下水、空氣、地表水或其他途徑，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，所需說明項目至少包含：	5. 核種外釋到達人類活動範圍之傳輸機制：核種外釋之傳輸機制可能包括地下水、空氣、地表水或其他途徑，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，所需說明項目至少包含：
(1). 核種藉地下水傳輸之模式與評估：說明所建構之水文地質模型與假設、地	(1). 核種藉地下水傳輸之模式與評估：說明所建構之水文地質模型與假設、地

原文	修訂條文
<p>下水之流場、流速與流向分布與數值、長期氣候變動現象對地下水流之影響、潛在的核種遷移地下水途徑、人類或生物圈可能接觸到地下水位置與核種濃度、場界位置之核種濃度、及可能稀釋地下水的地表水流量。</p>	<p>下水之流場、流速與流向分布與數值、長期氣候變動現象對地下水流之影響、潛在的核種地下水遷移途徑、人類或生物圈可能接觸到地下水位置與核種濃度、場界位置之核種濃度、及可能稀釋地下水的地表水流量。</p>
<p>(2). 核種藉空氣傳輸之模式與評估：說明評估大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣所使用的概念模式、程式、參數與評估結果，包含：放射性核種釋出之時間與頻率變化、放射性核種釋出高度、放射性污染源之幾何形狀、再懸浮射源之排放率及基準、考量射源與監測點間之地形及結構之影響、鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度、放射性污染雲煙濃度的計算方式、處置場址中心十六個 22.5 徑度扇形區域中之各區域人口分佈、空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率、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、空浮的表面沉積濃度與場址外的個人劑量。</p>	<p>(2). 核種藉空氣傳輸之模式與評估：說明評估大氣傳輸及放射性核種外釋到大氣所使用的概念模式、程式、參數與評估結果，包含：放射性核種釋出之時間與頻率變化、放射性核種釋出高度、放射性污染源之幾何形狀、再懸浮射源之排放率及基準、考量射源與監測點間之地形及結構之影響、關鍵群體與鄰近場址外監測點之位置及高度、放射性污染雲煙濃度的計算方式、處置場址中心十六個 22.5 徑度扇形區域中之各區域人口分布、空氣傳輸與擴散模擬之移除機制與微粒沉積速率、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、空浮的表面沉積濃度與場址外的個人劑量。</p>
<p>(3). 核種藉地表水傳輸之模式與評估：說明評估地表水所有可能核種遷移途徑之概念模式、程式、參數與評估結果，包含：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水</p>	<p>(3). 核種藉地表水傳輸之模式與評估：說明評估地表水所有可能核種遷移途徑之概念模式、程式、參數與評估結果，包含：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水</p>

原 文	修訂條文
<p>流與傳輸模式、地表水水流與傳輸模式、與地下水界面之源/匯項、地表水之核種釋出速率、經地表水水流與傳輸模式計算所得劑量評估結果。</p>	<p>流與傳輸模式、與地下水界面之源/匯項、地表水之核種釋出速率、經地表水水流與傳輸模式計算所得劑量評估結果。</p>
<p>(4). 其他傳輸機制之模式與評估：說明評估直接輻射、向天輻射與生物傳輸之概念模式、程式、參數與評估結果，包含：加馬輻射的曝露模式、運轉期間場外的個人曝露、主動監管期間來自場址土壤的直接輻射、被動監管期間須考量人員無意闖入的劑量分析，可包括農耕、居住、鑽井或其他合理可預見的活動。</p>	<p>(4). 其他傳輸機制之模式與評估：說明評估直接輻射、向天輻射與生物傳輸之概念模式、程式、參數與評估結果，包含：加馬輻射的曝露模式、運轉期間場外的個人曝露、主動監管期間來自場址土壤的直接輻射、被動監管期間須考量人員無意闖入的劑量分析，可包括農耕、居住、鑽井或其他合理可預見的活動。</p>
<p>(二) 環境輻射偵測計畫：</p> <p>1. 需詳實說明足供輻射監測作業規劃所需之低放射性廢棄物最終處置設施周邊及場址附近地區環境特性及背景輻射監測資料。</p>	<p>(二) 環境輻射偵測計畫：</p> <p>1. 需詳實說明足供輻射監測作業規劃所需之低放射性廢棄物最終處置設施周邊及場址附近地區環境特性及背景輻射監測資料。</p>
<p>2. 需詳實說明低放射性廢棄物最終處置設施輻射外釋途徑與情節分析及監測考量，確認監測作業能提供異常及意外事故之即時監測資料。</p>	<p>2. 需詳實說明低放射性廢棄物最終處置設施核種外釋途徑與情節分析及監測考量，確認監測作業能提供異常及意外事故之即時監測資料。</p>

## 7. 結論與建議

目前經濟部已公布「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2處建議候選場址，對於核種於生物圈之劑量評估，需對核種自處置設施外釋流經地質圈後，流至區域含水層，再依據飲水、攝取農作物、攝取畜產品、攝取養殖水產品、農耕時吸入粉塵、農耕時體外曝露等不同的曝露途徑，計算關鍵群體的輻射曝露劑量。目前對於達仁鄉建議候選場址之關鍵群體生活模式推估，主要參考東部地區山區居民生活方式加以推演，其生活環境屬於無沖積層之山區地形，關鍵群體推估居住於溪流出口地區，其地勢較為平緩且適於農耕與養殖，故其生活用水、農業用水和養殖用水皆來自河水，不考量關鍵群體鑿井取水的情況。小坵島氣候演化狀況下，氣候與海岸線並未劇烈變化，推估地表生態系統演化仍與現況相差不大，上居民僅在住家附近貧脊土地種植蔬菜自用，或是採集紫菜、釣魚、拾取風螺、抓螃蟹和小章魚等，作為日常食物來源。本研究分階段進行該2處建議候選場址於坑道處置之設計情節下生物圈劑量評估驗證技術。利用劑量評估安全審查模式(RESRAD-OFFSITE)進行低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究、生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立、設計情節之生物圈劑量評估結果審驗，並提出我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議，與提出我國低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議。本計畫報告完成下列工作：

### 1. 低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究。

本項工作將針對低放射性廢棄物分類數量估算及核種源項特性進行瞭解，分析「低放射性廢棄物分類特性」，對低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估進行研究。

### 2. 生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立。

本項工作篩選生物圈劑量評估程式(如RESRAD-OFFSITE)進行生物圈劑量評估程式之數值模型技術探討與參數建立，以進行低放射性廢棄物坑道處置關鍵核種劑量評估研究。

### 3. 設計情節之生物圈劑量評估結果審驗。

建立整合外掛程式及RESRAD模式，利用RESRAD-OFFSITE模式建立輻射曝露情節與劑量評估程序。並已蒐集LLWD2016(台電公司，2017b)，有關核種釋出至生物圈之濃度隨時間的變化，包括達仁溪及塔瓦河流域，與烏坵場址核種釋出至生物圈濃度

隨時間的變化，利用RESRAD-OFFSITE輻射曝露情節與劑量評估之方法，由圖49及圖50之核種釋出至生物圈濃度隨時間的變化，及烏坵場址核種釋出至生物圈濃度隨時間的變化(圖54)，進行設計情節劑量評估結果審驗測試，審驗結果發現，達仁溪流域下游之關鍵群體最大個人年有效劑量約為 $4.3E-04$  mSv，發生時間為場址封閉後約5,100年之時間；塔瓦溪下游之最大個人年有效劑量約為 $5.0E-04$  mSv，發生時間為場址封閉後約5,200年，主要之劑量來源核種均為C-14，該二流域之最大個人年有效劑量均小於0.25 mSv。烏坵關鍵群體之最大個人年有效劑量約為 $4.2E-06$  mSv，發生時間為場址封閉後約18,000年之時間，主要之劑量來源核種為C-14，該最大個人年有效劑量小於0.25 mSv。

4. 我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展建議。

本項工作依據生物圈劑量評估程式審驗，建議國內參考IAEA之BIOMASS生物圈劑量評估技術發展，該BIOMASS方法為評估生物圈發展之標準作業程序。建議我國低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術發展應參考IAEA之BIOMASS生物圈劑量評估技術進行發展。

5. 提出我國低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議。

針對本計畫研究成果，對國內低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項，係依據生物圈安全評估是否合乎監管要求，藉此了解處置場系統的安全功能是否合乎安全標準之方向。本計畫參與低放處置安全分析報告審查導則，並提出有關生物圈安全評估相關建議，參加本計畫工作團隊安全分析報告審查導則相關會議，提出我國低放處置安全報告審查規範有關生物圈劑量評估精進建議。

建議國內參考IAEA之BIOMASS生物圈劑量評估技術發展，該BIOMASS方法為評估生物圈發展之標準作業程序。評估生物圈的定義是：

- (1) 需要就未來生物圈系統和潛在接觸群體的定義，製定一套一致和合理的假設和假定；
- (2) 需要建立一個邏輯和全面的框架，將這些假設和假定與相關的科學理解結合起來，以便能夠計算輻射影響。

建議我國應採取BIOMASS生物圈劑量評估之步驟，對於可能的核種釋出至生物圈位置及生物圈系統單元之核種，進行生物圈之特徵事件作用之交互作用矩陣分析，以瞭解存

在生態系統需要關注的情節，並利用系統方法檢查潛在的 FEPs 是否需要包含或合理排除。對於模式發展模型利用兩個階段，第一，進行地景模擬，以確認處置場潛在的地下水流出區域；第二，模擬放射性核種在不斷演變之生物圈系統內遷移。未來對於我國生物圈安全評估應針對處置場內放射性核種可能釋出後建立數值模型，依據水文條件及生物圈之地景氣候演變進行模型建構。生物圈評估之計算步驟包括對於數學模式之適當數據選擇和應用，並對數據選擇和數據品質保證進行論證，該方法應參考國際原子能總署 2003 年出版 BIOMASS 之參數選擇規則。

## 8. 參考文獻

- 台電公司，2010，低放射性廢棄物處置關鍵核種篩選報告（A版），台灣電力公司。
- 台電公司，2017a，低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(106年度)，台灣電力公司。
- 台電公司，2017b，低放射性廢棄物最終處置技術評估報告，台灣電力公司。
- 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輻射劑量評估安全審查模式之研究」研究報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013，P297
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，參加美國德州安德魯低放射性廢棄物處置場審照研討會報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局，2011，P42
- 原子力安全委員會，低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値の見直しについて(重要核種の選定と濃度上限値)，2006
- 郭明傳、田能全、盧俊鼎，低放射性廢棄物淺地層處置之安全評估案例探討，台電核能月刊(6月)，p16-p33，2007
- Altmann, S., 2008. 'Geo'chemical research: A key building block for nuclear waste disposal safety cases, *Journal of Contaminant Hydrology* 102, p174–179.
- Chang, Y.-S., et al., 1998, Evaluation of the Area Factor Used in the RESRAD Code for the Estimation of Airborne Contaminant Concentrations of Finite Area Sources, ANL/EAD/TM-82, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., July.
- Eckerman, K.F., and J.C. Ryman, 1993, External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, Exposure to Dose Coefficients for General Application, Based on the 1987 Federal Radiation Protection Guidance, EPA 402-R-93-076, Federal Guidance Report No. 12, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation and Indoor Air, Washington, D.C.
- Eckerman, K.F., et al., 1988, Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion, EPA-520/1-88-020, Federal Guidance Report No. 11, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.
- Eckerman, K.F., et al., 1999, Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides, EPA-402-R-99-001, Federal Guidance Report No. 13, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2001, "Risk Assessment, Radionuclide Table Slope Factors Download Area," April 16. Available at <http://www.epa.gov/radiation/heat/download.htm>.
- Hull, L.C., Schafer A.L., 2008. Accelerated transport of <sup>90</sup>Sr following a release of high ionic strength solution in vadose zone sediments, *Journal of Contaminant Hydrology* 97, p135–157.

- IAEA, 2003, "Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal, IAEA-BIOMASS-6 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, July 2003, Vienna, Austria.
- ICRP(International Commission on Radiological Protection), 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 26; Annals of the ICRP 1)
- ICRP, 1979–1982, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30, Part 1 (and Supplement), Part 2 (and Supplement), Part 3 (and Supplements A and B), and Index, a report by Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection, adopted by the Commission in July 1978, Annals of the ICRP, Pergamon Press, New York, N.Y.
- ICRP, 1983, Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emissions, ICRP Publication 38, Annals of the ICRP, Vols. 11–13, Pergamon Press, New York, N.Y.
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 60; Annals of the ICRP 21)
- ICRP, 1996, Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 – Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 72, Annals of the ICRP, Vol. 26(1), Pergamon Press, New York, N.Y.
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Elsevier. (ICRP Publication 103; Annals of the ICRP 37(2-4)).
- James P. Adams, Michael L. Carboneau and William E. Allred, National Low-Level Waste Management Program Radionuclide Report Series, WM'99 CONFERENCE, FEBRUARY 28 - MARCH 4, (1999)
- SKB Project SAFE, Radionuclide release and dose from the SFR repository, SKB report R-01-18, Swedish Nuclear and Fuel Waste Management Co, Stockholm, Sweden.(2001)
- SKB, 2013a. Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU. SKB R-13-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013b. Components, features, processes and interactions in the biosphere. SKB R-13-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013c. The biosphere model for radionuclide transport and dose assessment in SR-PSU. SKB R-13-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014a. Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014b. Climate and climate related issues for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.



- SKB, 2014c. FEP report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014d. Handling of future human actions in the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014e. Handling of biosphere FEPs and recommendations for model development in SR-PSU, SKB R-14-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014f. Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014g. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB. Compilation of data for radionuclide transport analysis, Sweden. Technical Report R-01-14.(2001)
- SSMFS 2008:1. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in nuclear facilities. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority).
- SSMFS 2008:21. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority).
- SSMFS 2008:37. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning the protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority).
- U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, The Current and Planned Low-Level Waste Disposal Capacity Report, Revision 2, (2000)
- USNRC, 10 CFR 61, Licensing Requirement for Land Disposal of Radioactive Waste. Title 10 Code of Federal Regulations, Part 61, Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste, last revision January 1, (1998).
- Werner K, Sassner M, Johansson E, 2014. Hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark – synthesis for the SR-PSU project. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.