

核能安全委員會 委託研究計畫研究報告

114 年低放射性廢棄物近地表處置申照階段 安全評估案例研析 期末報告

委託單位：核能安全委員會
執行單位：臺灣地下水資源暨水文地質學會
計畫主持人：王士榮
計畫編號：NSC11311081L
報告日期：中華民國 114 年 12 月 08 日

114 年低放射性廢棄物近地表處置申照階段
安全評估案例研析
期末報告

受委託單位：臺灣地下水資源暨水文地質學會

研究主持人：王士榮

研究期程：中華民國 114 年 03 月至 114 年 12 月

研究經費：新臺幣 1,187,500 元

核能安全委員會 委託研究

中華民國 114 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)

114 年低放射性廢棄物近地表處置申照階段

安全評估案例研析

期末研究成果摘要報告

目 錄

一、 摘要(中、英文)	1
二、 計畫目標.....	2
三、 重要成果.....	3
四、 展望.....	6

計畫名稱：114 年低放射性廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析

一、摘要

(一) 中文摘要

本計畫針對近年推動或運轉之國際近地表處置設施進行案例研析，包括加拿大、比利時、南韓、中國與法國等國家，彙整其安全評估成果與相關處置技術，掌握國際發展趨勢及管制要求之變化。研究中亦深入研析加拿大白堊河 NSDF 處置設施之安全論證報告。該報告係依據 IAEA 所訂定之安全論證架構撰寫，內容涵蓋安全策略、安全評估、設計修正及不確定性管理等要素，並最終統整形成整體安全論點。此外，本計畫亦舉辦兩場專家技術討論會議，廣納我國相關領域專家學者之意見與建議，並將研究成果與專家回饋進行彙整，提出申照階段可供參採之安全評估審查重點與技術建議，作為主管機關推動審查制度建構之參考依據。

(二) Abstract

This project analyzes recent international cases of near-surface disposal facilities that have been developed or are currently operating, including those in Canada, Belgium, South Korea, China, and France. This project compiles their safety assessment results and related disposal technologies to identify global development trends and evolving regulatory requirements. This study also conducts an in-depth review of the safety case for Canada's Chalk River NSDF facility. The safety case, prepared in accordance with the IAEA safety case framework, covers safety strategy, safety assessment, design updates, and uncertainty management, and ultimately integrates these

elements into an overall safety argument. In addition, two technical expert meetings were convened to gather opinions and recommendations from domestic experts. This project consolidates research findings with expert feedback and proposes key safety assessment review points and technical recommendations applicable to the licensing stage, serving as a reference for competent authorities in strengthening regulatory review frameworks.

二、 計畫目標

本計畫旨在強化我國未來低放射性廢棄物近地表處置設施之安全評估與審驗技術的能力，使制度與技術作業得以與國際接軌。鑑於近地表處置為全球主流處置方式，各國已累積豐富的場址調查、工程設計及安全評估經驗。為提升我國審查效能與管制水準，本計畫首先彙整近年各國（包含加拿大、比利時、南韓、法國與中國等）於推動、申照及建造階段的近地表處置安全評估成果，掌握國際制度要求與最新發展動向。本計畫進一步以加拿大白堊河實驗室(Chalk River Laboratories, CRL)之近地表處置設施(Near Surface Disposal Facility, NSDF)為核心案例，深入研析其安全論證架構、法規依據與評估方法，解析其獲得主管機關許可的關鍵技術內容。同時，藉由兩場專家技術討論會，蒐集國內學者的意見，以提升研究成果的實務適用性。綜整相關分析，本計畫最終提出我國近地表處置申照階段之安全評估審查要項建議，內容涵蓋法規導則、評估架構、不確定性管理、氣候變遷考量及監測回饋等，作為主管機關未來制度強化、技術審查與政策規劃的重要參考。

三、重要成果

- (一) 本計畫彙整近年國際間推動、建造或申請許可的近地表處置設施案例，包括加拿大 NSDF 處置設施、比利時 Dessel 處置設施、南韓月城中低放射性廢棄物處置中心、中國龍和近地表處置場及法國 Cires 處置設施等，彙整各案例之預定存放廢棄物之類型、設施設計類型及監管年限等資訊（表 1）。
- (二) 研析 NSDF 環境影響評估報告及安全論證內容。前者聚焦於評估方法論、監管依據、公眾參與、環境影響及設施設計等面向；後者則根據 IAEA 建議之安全論證架構撰寫，針對 NSDF 處置設施之整體安全性進行系統性論證。
- (三) NSDF 安全論證之「安全論點整合」，確認其論證過程已統整所有相關證據，採用保守假設並運用國際認證之模擬工具，評估放射性與非放射性潛在影響。報告亦特別強調對不確定性的說明，透過封閉後安全評估(PostSA)，驗證設施在各種情節下的劑量與風險均遠低於法規標準。
- (四) NSDF 安全論證報告於「系統描述」章節中，涵蓋場址特性描述、設施設計、施工與運轉等內容；「限制、控制與條件」章節則提出設施在建造、運轉、封閉等階段之規定與限制，以及安全評估檢討方法與人員訓練等要求。NSDF 安全論證

架構中特別將「重複修正與設計優化」及「不確定性管理」獨立成章節。前者強調反覆修正，後者則為不確定性建立完善的管理流程，為安全論證的重要部分，與安全目標形成回饋循環。我國相關導則導則（如「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」及「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」）主要依循美國 10 CFR Part 61 作為架構基礎，「設計修正與優化」及「不確定性管理」之相關內容已包括但分散於各章節中（圖 1）。

(五) 本計畫於 114 年 7 月 22 日及 114 年 10 月 29 日各舉辦一場專家技術討論會，邀集國內專家學者以及台電公司代表共同參與，蒐集專業意見與技術建議。本計畫將專家建議分為三個部分，其一為針對國際間近地表處置案例之重點彙整與比較，其二為針對 NSDF 安全論證報告內容強化與國內對比，最後為長期性建議，已納入本研究未來研究方向，以持續支援制度發展與建置。

(六) 本計畫透過研析國際間近地表處置安全分析相關之報告，以及深入對加拿大 NSDF 安全論證報告作研析，研究成果邀集相關領域專家進行討論，並針對法規導則面向及專業技術面向，提出未來審查要項研擬之建議。

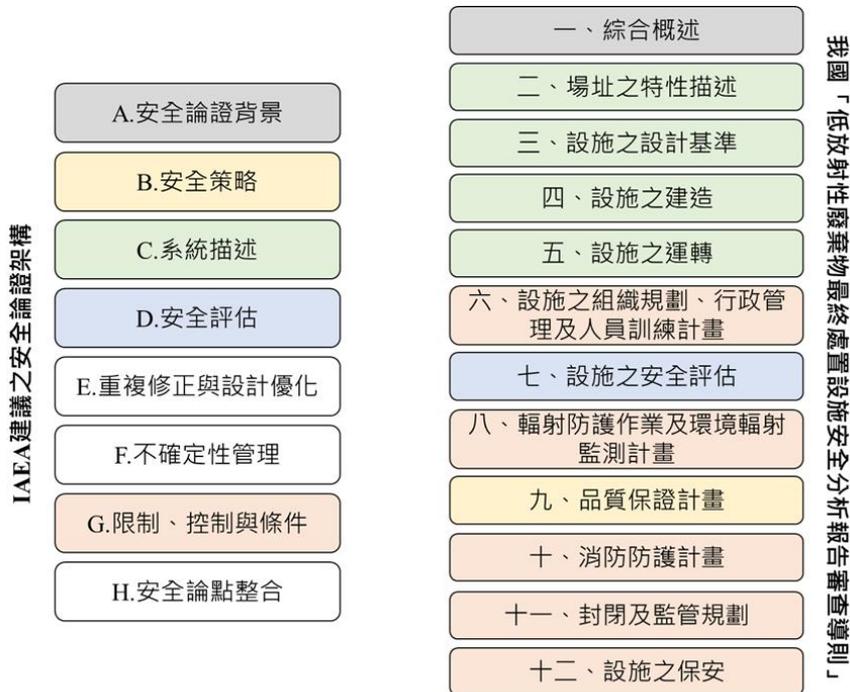
表 1、各國之處置廢棄物類型、工程設施及處置年限比較表

國家/設施	預定存放之廢棄物類型	設施設計類型	設計年限/監管時程
加拿大 (NSDF)	固體低放射性廢棄物(含除役、環境修復與少量場外來源)	ECM ¹ ，多重底襯與覆蓋層結構	營運期 50 年，設計年限 550 年，安全評估時間尺度延伸至 10,000 年。
比利時 (Dessel)	A 類低至中放射性、短半衰期廢棄物 (半衰期 <30 年)	近地表混凝土處置窖，多重工程障壁與模組化設計	營運期約 50 年，封閉後監測控制 250 年，總期程約 300 年以上。
中國 (龍和一期)	核電廠運轉產生之低放射性固體廢棄物 (水泥固化包件)	近地表混凝土處置窖式，多層防護結構	報告中初步規劃龍和近地表處置場封閉後之監管期為 300 年。
法國 (CSA) ²	短半衰期中-低放射性廢棄物	地表混凝土處置窖式與多重障壁設計為主	由法國放射性廢棄物專責機構 ANDRA 進行為期 300 年的主動監管。
南韓 (月城二期)	低放射性廢棄物及以下等級廢棄物	近地表混凝土處置窖式	未明確揭示。

資料來源：本計畫自製。

註 1：工程覆土堆式處置設施：Engineered Containment Mound (ECM)

註 2：法國 Centre de l'Aube 處置設施



資料來源：本計畫自製

註：左右底色相同的為關聯性較高的章節

圖 1、IAEA 安全論證架構與我國「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」之比較

四、 展望

本計畫透過研析加拿大 NSDF 安全論證報告，初步掌握場址敏感參數（如滲透係數或水力傳導係數）對安全評估之影響。未來建議深化地質與水文不確定性來源、模型建置與校正方法研究，作為我國評估模型與技術導則修訂之基礎。除此之外，各國多遵循 IAEA 安全論證原則，但因地質、氣候與監管制度差異，設計理念與安全評估架構仍不盡相同。建議後續擴大蒐集國際安全論證文件，進行跨案例比較，整理不同國家在場址特性、工程配置與評估方法之差異與優勢，以強化我國監管制度及申照審查要求。同時，建議檢視我國相關現行導則，評估其與國際方法（如 IAEA SSG-23）之差異，逐步納入或強化安全論證架構、氣候變遷評估與不確定性管理等要素，以健全制度之完整性並與國際趨勢接軌。

核能安全委員會
委託研究計畫研究報告

114 年低放射性廢棄物近地表處置
申照階段安全評估案例研析
期末報告

委託單位：核能安全委員會
執行單位：臺灣地下水資源暨水文地質學會
計畫主持人：王士榮
計畫編號：NSC11311081L
報告日期：中華民國 114 年 12 月 08 日

114 年低放射性廢棄物近地表處置申照階段
安全評估案例研析
期末報告

受委託單位：臺灣地下水資源暨水文地質學會

研究主持人：王士榮

研究期程：中華民國 114 年 03 月至 114 年 12 月

研究經費：新臺幣 1,187,500 元

核能安全委員會 委託研究

中華民國 114 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

截至目前，國際上已有逾百處低放射性廢棄物處置設施持續運轉，設施類型以近地表處置最為普遍，坑道處置次之，深層地質處置則屬少數類型，整體運轉情況穩定且安全。近地表處置技術於國際間已發展多年，累積豐富的實務經驗與運轉成果，近年如加拿大、比利時及中國等國皆有推動相關設施。於此類設施之規劃與推動過程中，安全評估扮演關鍵角色，隨著各國實務經驗的累積與處置技術的精進，相關法規與管制要求亦持續調整與強化。

為確保我國處置設施之安全評估作業與國際接軌，同時提升技術水準與審查能力，以支援主管機關強化安全審查能量，本計畫首先針對近年國際間推動、申照或運轉之近地表處置設施，蒐集並整理其安全評估成果與技術資料，以掌握國際發展趨勢與最新制度要求。本計畫蒐整並分析多國案例，包括：加拿大近地表處置設施(Near Surface Disposal Facility, NSDF)、比利時 Dessel 近地表處置設施、南韓月城中低放射性廢棄物處置中心二期處置設施、中國龍和近地表處置設施(第一期一階段)及法國 Cires 處置設施第三期極低放射性廢棄物處置設施等，並針對各設施之安全評估架構與評估成果進行比較分析。此外，本計畫進一步以加拿大白堊河實驗室(Chalk River Laboratories, CRL)近期成功取得申照之近地表處置設施(NSDF)為重點，深入研析其安全論證(Safety Case)報告。該報告依據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)建議之安全論證架構撰寫，內容涵蓋場址特徵、安全評估、反覆修正與設計最佳化、不確定性管理、限制條件，以及整體安全論點整合等要素，展現國際安全評估持續更新之應用架構。

在研析與整合相關成果後，本計畫於 2025 年 7 月 22 日及 2025 年 10 月 29 日分別舉辦一場專家技術討論會議。第一場以國際近地表處置設施之安全評估案例為主題，第二場則聚焦於加拿大 NSDF 安全論證報告之研討，邀集國內相關領域專家學者進行意見交流與技術指導。最終，本計畫彙整分析成果與專家建議，提出我國近地表處置申照階段安全評估之審查重點與要項建議，提供主管機關作為完善制度與技術審查之參考依據，期能強化我國之專業技術並接軌國際。

關鍵詞：低放射性廢棄物、近地表處置、申照階段、安全論證、專家技術討論會議。

Abstract

Globally, over a hundred facilities for low-level radioactive waste disposal are in operation, with near-surface disposal being the most common, followed by tunnel disposal, while deep geological disposal remains limited. Overall, these facilities demonstrate stable and safe performance, reflecting the maturity of near-surface disposal technology. In recent years, countries such as Canada, Belgium, and China have actively advanced such facilities, with safety assessment playing a central role and regulatory requirements being continually refined.

This study aims to align Taiwan's safety assessment and review practices for disposal facilities with international standards and to support the competent authority in strengthening regulatory capacity. The research compiled and analyzed recent international cases, including Canada's NSDF, Belgium's Dessel site, South Korea's Gyeongju facility (Phase II), China's Longhe facility (Phase I, Stage 1), and France's Cires facility (Phase III). Special emphasis was placed on Canada's NSDF Safety Case, developed under the IAEA framework, which integrates site characteristics, safety assessments, design optimization, uncertainty management, and overall safety argumentation.

Two expert technical workshops were held on July 22 and October 29, respectively, to facilitate exchanges among domestic experts and gather feedback. The study consolidates analytical results and expert recommendations to propose key review elements and technical considerations for safety assessment during the licensing stage of near-surface disposal in Taiwan, serving as a reference for future regulatory development.

Keywords: Low-level radioactive waste, near-surface disposal, licensing stage, safety case, expert technical workshop.

目錄

中文摘要	i
Abstract	ii
目錄	iii
圖目錄	v
表目錄	vii
第一章 前言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究重點及章節安排	1
第二章 國際間近地表處置安全評估案例蒐整及研析	5
2.1 國際間近期近地表處置案例	6
2.1.1 加拿大-近地表處置設施(NSDF)	6
2.1.2 比利時-Dessel 近地表處置設施	16
2.1.3 南韓-月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施	23
2.1.4 中國-龍和近地表處置場(第一期一階段)	26
2.1.5 法國-Cires 處置設施之 Acaci 計畫及第 3 處置區之興建	36
2.2 各國近地表處置安全評估案例重點	43
第三章 加拿大低放廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析	51
3.1 加拿大 NSDF 安全論證主體架構	52
3.2 系統描述	66
3.2.1 場址特徵	66
3.2.2 設施設計	81
3.2.3 設施施工	93
3.2.4 設施運轉	94
3.3 安全評估	94
3.4 反覆修正與設計最佳化	106
3.5 不確定性管理	110
3.6 限制、控制與條件	112
3.7 安全論點整合	115
3.8 綜合討論	116
第四章 近地表處置安全評估專家技術討論會議	121
4.1 會議說明	121
4.2 意見成果彙整	122

第五章 近地表處置申照階段安全評估審查要項建議.....	125
5.1 法規與導則建議.....	125
5.2 技術與評估面建議.....	126
第六章 結論及建議.....	128
6.1 重要成果.....	128
6.2 未來研究建議.....	129
第七章 參考文獻.....	130
附錄一.....	135

圖目錄

圖 2.1	加拿大近地表處置設施 NSDF 計畫推進歷程	8
圖 2.2	加拿大核子實驗室以及 NSDF 預定地之相對位置圖	9
圖 2.3	NSDF 各設施之配置圖(上)以及處置設施剖面圖(下).....	10
圖 2.4	比利時 Dessel 近地表處置設施計畫推進歷程	17
圖 2.5	比利時 Dessel 近地表處置設施示意圖	18
圖 2.6	比利時 Dessel 近地表處置設施安全論證第三層級及第四層級之報告結構.....	19
圖 2.7	比利時 Dessel 近地表處置設施安全報告中定義安全概念，包含的時間範圍、階段以及支持處置設施之安全功能.....	21
圖 2.8	比利時 Dessel 近地表處置設施安全報告中安全概念制定原則。包含不同安全功能(可參閱圖 2.6)於不同階段時，各個 SSC 所扮演主要或輔助的角色	21
圖 2.9	南韓-月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施計畫推進歷程	24
圖 2.10	南韓-月城中低放射性廢棄物處置中心相對位置圖，包含一期地下筒倉處置設施、二期近地表處置設施、三期掩埋處置設施及其支援設施。.....	25
圖 2.11	南韓-月城中低放射性廢棄物處置中心二期近地表處置設施之平面布置圖。.....	25
圖 2.12	南韓月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施設計剖面圖(左)及放置廢棄物桶的處置倉規格(右).....	26
圖 2.13	中國-龍和近地表處置場(第一期一階段)計畫推進歷程.....	27
圖 2.14	中國龍和近地表處置場相對位置圖.....	28
圖 2.15	法國 Cires 處置設施容量擴充計畫歷程	38
圖 2.16	法國 Cires 處置設施相對位置圖。紫色為廢棄物接收區；粉紅色、灰色及黃色分別為第 1 至第 3 TFA 處置區；藍色為蓄水設施；土方堆置區。.....	39
圖 2.17	本計畫整理各國之近地表處置設施從規劃至處置設施完工之歷時.....	43
圖 3.1	放射性廢棄物處置設施安全論證的主要組成.....	53
圖 3.2	NSDF 開發參考清單之迭代流程圖	59
圖 3.3	NSDF 依廢棄物類型預測的體積分配圖	61
圖 3.4	NSDF 中處置廢棄物之放射性核種隨時間衰減示意圖	64

圖 3.5	加拿大核能實驗室管理系統文件層級結構.....	66
圖 3.6	CRL 場址與周遭城鎮之相對位置圖	67
圖 3.7	CRL 場址中 NSDF 之相對位置圖.....	67
圖 3.8	CRL 場址之地值概況.....	71
圖 3.9	STF(上)和 GWMF(下)解釋的 CRL 場址破裂帶，包含 NSDF 的位置.....	73
圖 3.10	近地表處置設施安全評估區域(NSDF SSA)附近主要地質構造的平面圖	74
圖 3.11	近地表處置設施安全評估區(NSDF SSA)附近主要地質特徵的剖面圖.....	75
圖 3.12	CRL 流域分布圖.....	79
圖 3.13	平均地下水位高程圖.....	80
圖 3.14	NSDF 場址水文地質剖面圖	81
圖 3.15	NSDF 近地表處置設施與設計元素位置圖	83
圖 3.16	NSDF 剖面示意圖	88
圖 3.17	工程圍堵土墩處置單元佈局.....	88
圖 3.18	NSDF 底襯系統剖面圖	90
圖 3.19	NSDF 邊坡基層襯砌系統剖面圖	90
圖 3.20	NSDF 工程圍堰土墩周邊護堤剖面圖	91
圖 3.21	NSDF 最終覆蓋系統剖面圖	92
圖 3.22	NSDF 最終覆蓋層山脊-山谷幾何配置剖面圖	93
圖 3.23	封閉後安全評估所採用的方法流程.....	96
圖 3.24	因應考古評估之場址邊界變更.....	108
圖 3.25	NSDF 中 ECM 之覆蓋系統選項.....	109
圖 3.26	NSDF 中 ECM 之基礎襯墊系統選項.....	109
圖 3.27	IAEA 建議之安全論證架構與我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查 導則各章節之比較，左右底色相同的為關聯性較高的章節.....	119

表目錄

表 2.1	《環境影響報告書(EIS)》針對 NSDF 計畫進行環境影響評估結果整理.....	15
表 2.2	低放放射性廢棄物濃度上限值.....	29
表 2.3	中國龍和近地表處置場第一期第一階段之施工期與運轉期之廢棄物與污染物的產生、來源與相對應之處理.....	33
表 2.4	中國龍和近地表處置場第一期第一階段施工期間至封閉後管制期之環境影響評估結果.....	35
表 2.5	法國放射性廢棄物之分類及處置方式.....	37
表 2.6	各國可蒐整之文獻比較.....	45
表 2.7	各國之處置廢棄物類型、工程設施及處置年限比較表.....	48
表 3.1	NSDF 廢棄物中放射性核種濃度限值	60
表 3.2	國際間低放射性廢棄物處置設施的主動監管期彙整.....	65
表 3.3	CRL 場址由上而下之主要岩性單元，以及次要岩性單元表.....	71
表 3.4	比較用於開發模型和進行現地量測的水力傳導係數(K).....	77
表 3.5	NSDF 主要設計要素及結構、系統及組件	84
表 3.6	ECM 主動工程安全功能.....	86
表 3.7	NSDF 風險矩陣	102
表 3.8	風險等級解釋指引.....	102
表 3.9	頻率等級.....	102
表 3.10	嚴重性分級.....	103
表 3.11	IAEA 建議之安全論證架構與我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則各章節之主要內容簡述.....	120
表 4.1	專家技術討論會議程.....	121

第一章 前言

1.1 研究背景

目前國際上運轉中的低放射性廢棄物處置設施約有百餘處，其中以近地表處置為主要型式，坑道處置次之，僅少數採用深層地質處置。整體而言，全球各處置設施運轉情形普遍安全穩定。美國、法國、日本與西班牙等主要核能國家，多採用壕溝式或混凝土窖式近地表處置方式，並已累積豐富的場址調查、安全評估及營運管理經驗。近年來，加拿大、比利時及中國等國亦積極推動或成功取得近地表處置設施之設置許可，顯示該類型設施持續為國際主流發展趨勢。為推動處置設施核准之關鍵程序，其結果常作為設施是否可興建與營運的重要依據。隨著各國營運經驗的累積與技術進步，安全評估之管制重點亦隨國際標準的更新而持續調整，呈現出系統化、透明化及長期安全導向的發展趨勢。

為確保我國未來近地表處置設施之安全評估工作能與國際標準接軌，並提升審查與管制效能，核能安全委員會作為國內核能與輻射安全主管機關，推動「114 年低放射性廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析」研究計畫。計畫將執行幾項重要目標，包含：(1) 蒐整近期國際間近地表處置之安全評估相關資訊；(2) 針對加拿大白堊河實驗室(Chalk River Laboratories, CRL)之加拿大近地表處置設施(Near Surface Disposal Facility, NSDF)案例進行深入研析；(3) 辦理專家技術討論會，蒐集國內專家對安全評估與監管議題之意見；最後，(4) 整合本計畫之成果，提出近地表處置申照階段安全評估審查要項建議。透過本計畫，可借鑑國外經驗，強化我國近地表處置安全審查技術能力，並確保未來設施之設計與運作符合安全功能目標與管制原則。此外，考量我國現行低放射性廢棄物最終處置方式為坑道式，若未來政策方向調整或啟動新型態設施規劃，本計畫成果將可作為推動近地表處置之重要技術與政策參考依據。

1.2 研究重點及章節安排

本計畫聚焦於蒐集與研析近年國際間新建或申請許可中之近地表處置設施安全評估資料，

包含加拿大、比利時、法國、南韓與中國等案例(Golder Associates Inc., 2021; OECD/NEA, 2012; 中核清原公司, 2020)。並進一步針對 CRL 之近地表處置設施(NSDF)進行深入研析，分析其於申照過程中所提交之安全論證報告，從法規依據、導則參考、評估方法等重點進行系統性研析。此外，計畫亦舉辦兩場專家技術討論會，廣邀國內相關領域專家提供意見，強化研究成果之實務應用價值，並將所得成果回饋於我國低放射性廢棄物近地表處置策略，提出具體之管制與技術建議。各章節之說明如下：

第一章 前言

本章說明本計畫之背景與重要性，首先回顧全球低放射性廢棄物處置發展現況與趨勢，並闡述安全評估在處置設施申照與營運階段中的關鍵角色。隨著技術進步與國際標準演變，安全評估之內容與方法亦不斷調整。因此，本計畫成果可作為我國低放射性廢棄物近地表處置規劃及制度建構之重要參考。此外，本章亦說明研究之核心目標、重點工作與章節架構，並對各章內容進行整體概述。

第二章 國際間近地表處置安全評估案例蒐整及研析

本章主要目的在於彙整與研析國際間近期推動、申請許可或已進入建造階段之近地表處置設施案例，針對其安全評估成果與關鍵技術要點。案例涵蓋加拿大與比利時等具代表性國家，以掌握國際在近地表處置安全評估作業之最新發展趨勢與監管現況。例如，加拿 CRL 之 NSDF 計畫自 2016 年啟動審查，歷經公開聽證及多次技術審議，最終於 2024 年獲加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)核准建設。比利時 NIRAS/ONDRAF 於 2024 年啟動 Dessel 近地表處置設施之興建，預計 2027 年運作，由 Belgoprocess 負責處理短半衰期至中等放射性廢棄物。本章透過上述具代表性案例，探討各國在安全評估方法、技術內容與制度設計之異同，為我國未來推動近地表處置政策與技術導則修訂提供參考依據。

第三章 加拿大低放廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析

本章主要針對加拿大低放射性廢棄物近地表處置設施 NSDF 計畫之案例研析。該計畫自 2016 年啟動，2017 年提出環境影響評估報告書(Environmental Impact Statement, EIS)

草案，2019 年提交修正版，並於 2021 年完成最終版本(Golder Associates Inc., 2021)。EIS 報告旨在支持加拿大核能實驗室(Canadian Nuclear Laboratories, CNL)於 CRL 場址建造並營運 NSDF，作為低放射性固體廢棄物之最終處置設施。同年發布之《近地表處置設施安全論證報告(Near Surface Disposal Facility Safety Case)》(Kingsbury et al., 2021)整合安全策略、系統描述、安全評估與不確定性管理等要素，提出完整的安全論證與證據架構，以驗證設施之長期安全性。NSDF 計畫由聯邦國有機構加拿大原子能有限公司(Atomic Energy of Canada Limited, AECL)主導，並由受託之 CNL 負責場址營運與資產管理。本章彙整 NSDF 申照過程中的安全評估與安全論證報告，從法規依據、導則應用及評估方法等角度深入分析，作為我國未來推動低放射性廢棄物處置設施審查與管制作業之重要參考。

第四章 近地表處置安全評估專家技術討論會議

本章彙整兩場專家技術討論會議之成果。第一次會議於 2025 年 7 月 22 日舉辦，針對國際間近地表處置安全評估案例進行研討；第二次會議於 2025 年 10 月 29 日舉行，針對加拿大 NSDF 安全論證報告進行深入討論。透過專家技術會議，促進跨領域技術交流與意見整合，蒐集專家對近地表處置申照階段安全評估審查技術與安全管制的建議，作為後續制度研擬與技術指引制訂之依據。

第五章 近地表處置申照階段安全評估審查要項建議

本章依據國際案例研析及專家技術會議成果，提出我國近地表處置申照階段安全評估審查要項建議。內容涵蓋法規與導則修訂方向、反覆修正與設計最佳化機制、不確定性管理、氣候變遷考量，以及社會溝通與生態風險分析等層面，旨在建立具完整性與可行性之審查架構，作為主管機關推動安全評估制度化之參考。

第六章 計畫成果及未來研究建議

本章綜整研究成果與未來建議。本計畫彙整近年國際間推動或申照中的近地表處置設施案例，涵蓋加拿大、比利時、韓國、法國與中國，分析其安全評估成果與設計重點，以掌握全球發展趨勢與監管焦點。除此之外，針對加拿大 NSDF 處置設施的安全評估與

安全論證，從法規依據、導則應用及評估架構等面向，研析其獲許可的關鍵因素，供我國未來申照審查與導則修訂參考。綜合研究成果與專家建議，提出未來研究方向，包括導則與審查架構更新、評估技術在地化、氣候變遷與不確定性納入分析，以及社會溝通與風險治理強化，作為主管機關政策與制度規劃之參考。

第二章 國際間近地表處置安全評估案例蒐整及研析

本章彙整近期國際間推動、建造或申請許可中的近地表處置設施案例，涵蓋加拿大 NSDF、比利時 Dessel 處置設施、南韓月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施、中國龍和近地表處置場(第一期第一階段)，以及法國 Cires 處置設施第三期的極低放廢棄物處置單元。

加拿大 NSDF 計畫自 2016 年啟動，於 2024 年 1 月獲得 CNSC 批准修改 CRL 之許可證。核准決議基於三項主要結論：(1)在 CNL 所提防護措施與後續監測條件下，NSDF 計畫不太可能造成重大不利影響；(2)該設施的安全論證具可信度；及(3)設計年限可達 500 年以上，符合長期安全要求。比利時 Dessel 處置設施已取得建造與營運許可，於 2024 年動工，預計 2027 年啟用，主要處置短半衰期的低與中放射性廢棄物。其安全設計分為兩階段：前 1000 年以防止核種釋出為主，之後以限制釋出為重點，並藉由多種模擬情節驗證長期行為與整體安全性。南韓月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施，由韓國放射性廢棄物管理局(Korea Radioactive Waste Agency, KORAD)於 2015 年提出建造申請，歷經六年審查後於 2022 年獲准。審查過程納入地震影響，調整耐震設計並重新評估場址水文條件與不同情節下的安全分析。本計畫僅取得其審查摘要資料。中國龍和近地表處置場公開資訊有限，根據 2020 年環境影響報告，該計畫可追溯至 2017 年發布的酒泉核技術產業園規劃，並於 2020 年完成初步設計與安全分析，2022 年正式投入運轉。法國 Cires 處置設施第三期擴建計畫的相關安全評估資訊，來自法國國家放射性廢棄物管理局(Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, ANDRA)與環境管理局(Autorité Environnementale, AE)兩份官方文件，說明民眾參與過程、回饋意見處理及環評審查重點。

本章綜整上述已推動、申請許可或進入建造階段之近地表處置設施的安全評估成果，以掌握國際近地表處置最新的安全評估趨勢與可供借鑑的經驗。2.1 節彙整各國低放射性廢棄物處置設施之安全評估文獻與資料來源；2.2 節則依據前述文獻內容，歸納各國安全評估之重點方向與主要特點。

2.1 國際間近期近地表處置案例

本節彙整了國際間近期正在推動、建造或申請許可的近地表處置設施案例。本計畫所蒐集的案例包括：加拿大 NSDF 設施、比利時 Dessel 處置設施、南韓月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施、中國龍和近地表處置場(第一期第一階段)，以及法國 Cires 處置設施第三期的極低放射性廢棄物處置單元等。各案例之安全分析相關文獻，分別於第 2.1.1 節至第 2.1.5 節中說明。

2.1.1 加拿大-近地表處置設施(NSDF)

加拿大近地表處置設施 NSDF 為一項放射性廢棄物處置計畫，由聯邦國有公司 AECL 授權推動，CNL 負責建造與營運，並由 CNSC 進行監管。CNL 計畫於 CRL 場址設置 NSDF，以處理低放射性固體廢棄物，支援舊有設施的除役與拆除工作，促進場址整體再開發與永續利用。該設施的推動可有效降低低放射性廢棄物所帶來的環境與安全風險，並助益加拿大核能設施管理體系之整體完善。

NSDF 計畫依「2012 年加拿大環境評估法」進行審查，由 CNL 提出完整的《環境影響報告書(EIS)》。該報告內容涵蓋設施的建設、營運、封閉及封閉後各階段，並包含替代方案評估、公眾與原住民參與程序，以及潛在環境影響的詳細分析。EIS 全文共分為三冊：Volume 1 為摘要報告，Volume 2 為主體報告，Volume 3 為技術附錄。本節摘錄並整理 EIS 中與安全評估相關之重點內容，包括計畫推動歷程、處置設施基本資訊、替代方案分析、社會參與過程，以及環境影響評估的方法與結果。內容如下：

1. 推動歷程

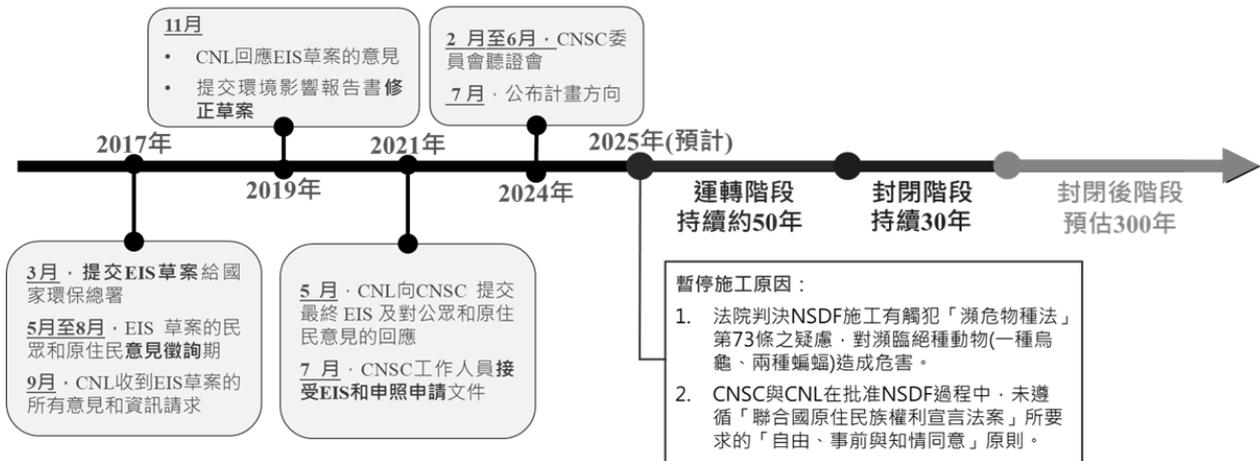
加拿大 NSDF 自提交 EIS 草案至封閉後階段的整體規劃歷程如圖 2.1 所示。2017 年 3 月，CNL 向加拿大環境評估署提交 EIS 草案，並於 2017 年 5 月至 8 月展開公眾及原住民族意見徵詢。2017 年至 9 月，CNL 收到所有意見與補充資料要求。2019 年 11 月，CNL 依據回饋意見完成修訂並提交修正版 EIS。2021 年 5 月，CNL 向 CNSC 提交最終版 EIS 及回應公眾與原住民族意見之文件。2021 年 7 月，CNSC 工作人員正式受理該文件與相

關申請資料。2022年2月至6月，CNSC委員會舉行多場聽證會。2023年7月，CNL提交聽證書面資料，2023年8月遞交最終書面回應並進行口頭簡報。最終，於2024年1月，CNSC委員會同意修改CRL許可證，授權建造NSDF。

原規劃NSDF於2025年啟用運轉，惟因2024至2025年間，原住民團體Kebaowek First Nation (KFN)向加拿大聯邦法院提起訴訟，使工程進度大幅延宕。首先，KFN主張聯邦政府核發的「瀕危物種法(Species at Risk Act, SARA)」第73條許可存在重大瑕疵。該許可允許在NSDF建設與營運期間，可能干擾或危害三種受保護物種，包括一種烏龜與兩種蝙蝠。2025年3月，聯邦法院認定政府在替代場址評估程序上確有錯誤，命令環境與氣候變遷部(Environment and Climate Change Canada, ECCC)重新審查相關許可。此裁決使NSDF工程必須暫停，待審查結果出爐後方能恢復。除此之外，KFN也指控加拿大核能安全委員會(CNSC)與加拿大核實驗室(CNL)在批准NSDF過程中，未遵循「聯合國原住民族權利宣言法案(UN Declaration on the Rights of Indigenous Peoples Act, UNDA)」所要求的「自由、事前與知情同意(Free, Prior and Informed Consent, FPIC)」原則。2025年2月，法院裁定KFN勝訴，命令CNSC與CNL必須恢復並完成實質性磋商，並以達成協議為目標，且該協議須於2026年秋季(9月30日前)完成。在磋商完成前，NSDF均不得推進任何實質建造程序。綜合上述兩起訴訟，NSDF的啟用時程因此延宕，目前處於因許可重審與原住民磋商義務未完成而全面暫停的狀態(Federal Court of Canada, 2025)。

依計畫，NSDF完工後將進入約50年之運轉階段，主要作業包括放射性廢棄物接收與安置、廢水收集與處理、設施維護及長期監測機制之建立與執行。運轉期結束後，將進入30年封閉階段，實施最終覆蓋層安裝、工程土丘封閉與相關基礎設施除役作業。封閉完成後，設施將進入封閉後監管階段，持續進行系統完整性檢查、監管追蹤與環境效能監測，以驗證實際成果是否符合環境評估預測與安全功能目標。

加拿大-近地表處置設施 (NSDF) 計畫推進歷程



資料來源：整理自 Golder Associates Inc. (2021)

圖 2.1 加拿大近地表處置設施 NSDF 計畫推進歷程

2. 處置設施基本資訊

加拿大預定建置的近地表處置設施 NSDF 位於安大略省倫弗魯郡(Renfrew County)的 CRL 場址內(圖 2.2)，鄰近渥太華河，位於渥太華市西北方約 200 公里處。CRL 場址總面積約 4,000 公頃，NSDF 占地約 37 公頃，僅約為整體場址的 1%。場址東北側鄰接渥太華河，西南側為勞倫森山市(Laurentian Hills)下的白堊河村(Chalk River Village)，周邊區域尚包括加拿大國防部轄下的佩塔瓦瓦(Petawawa)軍營。NSDF 為一座地表工程覆土堆式處置設施(Engineered Containment Mound, ECM)(圖 2.3)，專門用於處置短半衰期之低放射性廢棄物。廢棄物主要來源包括：(1) CRL 現有設施之營運、修復與除役所產生之廢棄物；(2) 未來核能相關活動所預期產生的低放射性廢棄物；及(3) 少量來自 AECL 管轄其他設施、醫院與大學等場外單位的低放射性廢棄物。處置設施預計營運約 50 年，並具有 550 年的設計年限。設計容量為 1,000,000 立方公尺。設施採兩階段興建，將設置 10 個廢棄物處置單元，每一單元均採用多層底襯與覆蓋系統，廢棄物填埋完成後將完全密封封蓋。整體處置作業採分階段進行：

- **第一階段**：總容量為 525,000 立方公尺，主要用於接收現有貯存廢棄物及未來 20

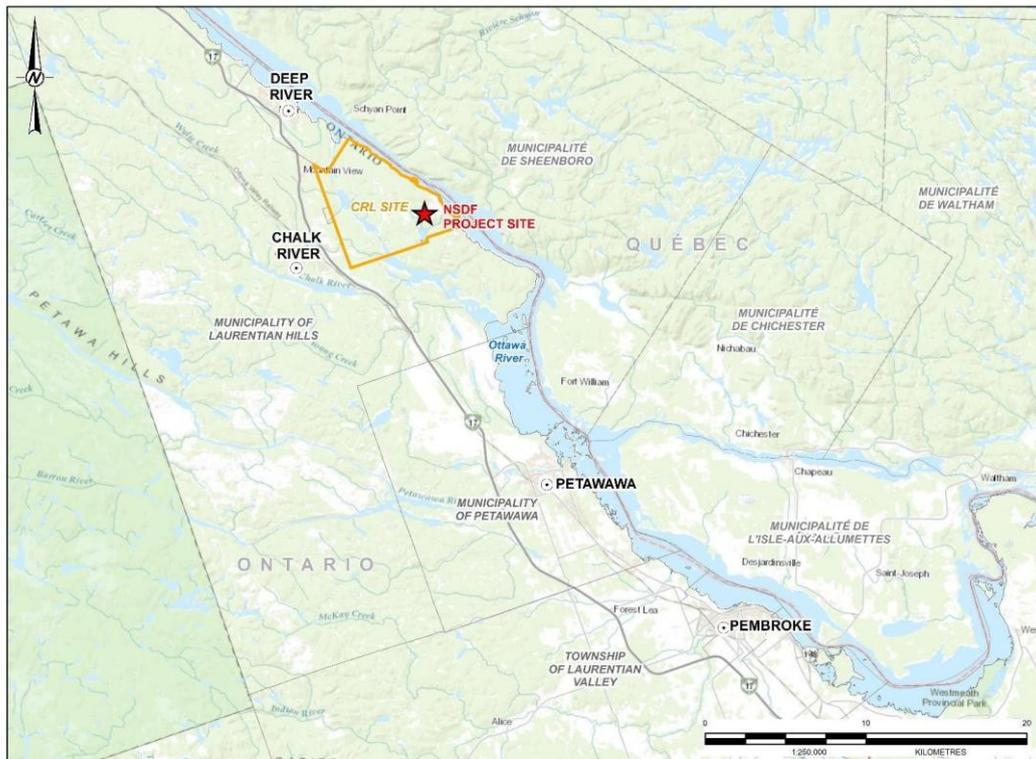
至 25 年內預期產生之廢棄物，以支援 AECL 場址整治及白堊河地區再開發。

- **第二階段：**擴充容量 475,000 立方公尺，使 ECM 總容量達 1,000,000 立方公尺，以處置後續產生之廢棄物。

NSDF 的安全功能主要依賴以下三項工程障壁系統：

- **基底襯墊系統：**用以容納廢棄物並限制污染物向地下水遷移。
- **最終覆蓋系統：**提供輻射屏蔽與物理隔離，防止降水滲入及外部侵擾。
- **周邊護堤：**強化結構穩定性，以降低地震、洪水等自然災害對設施的潛在影響。

雖然 NSDF 的設計概念與高標準危險廢棄物掩埋場類似，但其工程防護功能更為強化，安全標準亦更嚴格。設施之興建與營運須依「核能安全與控制法(Nuclear and Safety Control Act)」取得許可，並接受 CNSC 所制定之相關法規與獨立監管。此外，NSDF 採用分級地形設計，降低設施的視覺與環境衝擊，兼顧安全、景觀與社會接受度。



資料來源：Golder Associates Inc. (2021)

圖 2.2 加拿大核子實驗室以及 NSDF 預定地之相對位置圖



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 2.3 NSDF 各設施之配置圖(上)以及處置設施剖面圖(下)

3. 替代方案(Alternatives)分析

為滿足 NSDF 計畫需求，CNL 針對多項替代方案進行全面評估，內容涵蓋設施選址、處置類型、設計方案及廢水處理方式等面向，並綜合考量技術可行性、經濟成本與環境影響三大因素。在選址階段，CNL 於 CRL 試驗場內初步篩選出 15 處潛在地點，依據空間條件、水文特性、地質構造與生態敏感性進行比對分析後，進一步鎖定兩處具技術可行性的候選地點進行詳細比較。CRL 場址本身具備完善的基礎設施，包括電力、水源及熱能供應系統，無須額外興建，可顯著降低初期投資成本並減少施工期間的環境干擾。同時，該場址鄰近現有廢棄物貯存設施，超過九成的低放射性廢棄物已存放於 CRL 內部，若改於其他地點興建，將需動用約 45,000 輛次卡車運輸，勢必增加工程時間、經費支出及溫室氣體排放風險。

此外，CRL 場址累積逾六十年的地質與地下水研究資料，特別是在 Perch Creek 與 Perch Lake 流域進行的長期監測，提供豐富的水文與環境基線資料，有助於精確預測潛

在環境影響並規劃適當之緩解措施。該場址位於母岩山脊之上，地形自然向渥太華河排水，有利於提升工程圍堰與排水系統的防護功能，並有效控制污染物遷移路徑。綜合評估其技術可行性、環境安全性及現有資源條件，CRL 場址被確認為興建 NSDF 設施的最佳選擇。

4. 民眾與原住民參與

民眾參與是環境評估程序中的核心要素，不僅能提升社區對計畫的知情程度，更有助於與地方社區、原住民族及非政府組織建立長期且互信的合作關係。CNL 針對 NSDF 推動一項持續性的公共資訊計畫，向潛在受影響地區說明計畫內容，並傳達其對公眾、原住民族及環境可能產生的影響。該資訊計畫涵蓋安大略省與魁北克省的相關社區，並提供英語與法語版本，以強化資訊可近性與溝通成效。

民眾參與的形式多元，包含社區說明會、公開演講、設施參訪、通訊刊物、網站與圖文資料發布、社交媒體(如 Facebook、YouTube)應用，以及與傳統媒體合作舉辦的公開活動。因應 COVID-19 疫情，自 2020 年起相關活動轉為線上進行，舉辦虛擬研討會及線上簡報更新等活動，以持續維繫與社會大眾的互動與對話。

NSDF 計畫並設立定期召開的環境管理委員會，邀集地方政府代表、非政府組織與其他利害關係人參與，作為資訊交流與政策諮詢的平台。同時，CNL 透過官方網站主動公開並定期更新環境評估相關技術報告，以提高資訊透明度，使公眾更容易取得並理解相關內容。根據所蒐集的公眾意見，民眾普遍關注的議題包括：計畫的正當性與必要性、渥太華河之環境保護、廢棄物分類與管理方式、處置設施設計細節、長期監督與責任機制、替代方案與選址合理性，以及洪水與地震等潛在環境風險。上述意見均已納入《環境影響報告書(EIS)》中，作為調整計畫內容(如限縮可接收廢棄物種類與擴大評估範圍)的依據。CNL 亦依據聯邦與省級監管機關之審查建議，持續修訂並更新報告內容，以回應社會關切。

在原住民族參與方面，CNSC 協助 CNL 透過「原住民族與條約權利資訊系統(Aboriginal and Treaty Rights Information System, ATRIS)」，確認可能受 NSDF 計畫影響或具有關切之原住民族群，並據以展開溝通。ATRIS 為一套網頁式資訊系統，用以標示原住民族社群

位置，顯示其潛在或既有之原住民及條約權利資訊。使用者可透過文字或地點搜尋、互動地圖與圖層檢索進行查詢。除延續一般民眾參與模式外，CNL 另為原住民族設置專屬之溝通與合作機制，包括專題網路研討會、技術工作小組會議及社區資訊座談，並提供「參與能力資助金(Capacity Funding)」，以支持原住民族在環境評估程序中的實質參與。原住民族社群的主要關切涵蓋：渥太華河及其周邊自然環境的保護、傳統領域使用權可能受到的影響、文化與世代權益保障、參與長期環境監測的機會，以及對歷史土地占用與長期營運計畫不確定性的憂慮。CNL 對此表達高度尊重，並承諾以公開透明的方式提供資訊、回應關切，同時重視與原住民族建立長期夥伴關係的過程。此舉不僅符合加拿大政府推動的「原住民族和解」政策目標，也有助於提升環境決策的合法性與社會接受度。

5. 環境評估結果

(1) 環境評估方法

NSDF 計畫的環境評估依據「2012 年加拿大環境評估法」及 CNSC 所發布的「通用環境影響報告書導則」執行。評估首先界定範疇，並以空氣品質、地下水、水文地質、生物多樣性及人類健康等「有價生態系統成分」(Valued Ecosystem Components, VECs)為核心，進行篩選與影響辨識。

空間範圍分為三個層級：A. 場址研究區(處置設施與基礎建設)；B. 局部研究區(設施周邊直接影響區，如下游水體)；以及 C. 區域研究區(延伸至整個 CRL 場址)。時間範圍則涵蓋四個階段：建設期(2022 - 2024)、營運期(2025 - 2070)、封閉期(2070 - 2100)與封閉後期(2100 年以後)。

環評流程包括建立基線資料、辨識潛在影響、擬定緩解措施，並分析採取措施後仍可能存在的殘餘效應(Residual Effects)，如影響程度、範圍與持續時間，以判定顯著性。同時考量與其他開發活動的交互作用進行累積效應評估，並說明預測不確定性與可信度。最後提出監測計畫，以驗證預測結果與緩解措施效能，確保整體流程具科學性與透明度。

(2) 各項評估結果

「環境影響報告書」針對 NSDF 計畫進行了多面向的環境影響評估，涵蓋大氣、地質與水文地質、地表水、水生環境、陸域生態、環境輻射與生態健康、人類健康、土地與資源利用，以及社會經濟環境等層面。主要評估結果如下(詳見表 2.1)：

- A. **大氣評估結果：**CRL 位於濕潤的大陸性氣候區，空氣品質良好，污染物濃度普遍低於標準。施工與運轉期間將產生粉塵與廢氣，但透過粉塵管理、設備維護與限縮空轉等措施可有效控制。模擬顯示，極端情節下二氧化氮濃度可能短暫略高於標準，但發生機率極低。溫室氣體排放增加有限，對氣候影響可忽略。空氣監測將依加拿大標準協會(Canadian Standards Association, CSA)規範執行，以驗證緩解效果。
- B. **地質和水文地質評估結果：**CRL 位於加拿大地盾區，母岩多處露頭，表層為排水良好的冰河沉積物與砂質土。地下水位受季節影響明顯，流向鄰近濕地與渥太華河。NSDF 採雙層底襯與地表水管理系統以防止污染物擴散。施工與營運期間雖可能改變局部水文條件，但經監測與緩解措施可避免重大影響。地下水監測將持續至封閉後，以驗證防護成效。
- C. **地表水環境評估結果：**NSDF 距渥太華河約 1.1 公里，位於 Perch Creek 與 Perch Lake 流域。計畫可能導致局部水文與水質變化，CNL 已規劃地表水管理、侵蝕控制、廢水處理與排放監測。營運至封閉階段將持續監測水質，確保符合法規並降低對生態與健康的風險。
- D. **水生環境評估結果：**當地水生棲地集中於 Perch Lake 與 Perch Creek，自 1980 年代以來魚群組成穩定。NSDF 可能因水文改變與廢水排放影響魚類棲地，已採取限制施工時段、逕流控制及河岸植被復育等緩解措施。CNL 承諾持續監測水質與生態，以維持水生生物多樣性。
- E. **陸地環境評估結果：**CRL 含落葉林、針葉林及濕地生態系，是候鳥及瀕危物種(如加拿大鶯、蝙蝠與布蘭丁龜)之棲地。施工期若無妥善措施，植被破

壤與噪音恐干擾野生動物。現行策略包括避開繁殖期施工、推行永續林管及減少路殺。評估顯示經緩解後殘餘效應不顯著，建議持續監測保育成效。

- F. **環境輻射與生態健康評估結果：**CRL 長期監測水體、土壤、空氣與生物體放射性核種，辨識其是否受場址活動影響。NSDF 運轉與封閉階段可能產生粉塵、氣體排放或水質變化，但工程與管理措施可有效限制核種釋放。監測資料將納入既有計畫並定期審查，以確保生態風險可控。
- G. **人類健康評估結果：**加拿大環境背景輻射平均約 1.8 mSv/年，公眾與核能工作人員限值分別為 1 mSv 與 50 mSv。NSDF 透過廢水與空氣控制確保暴露遠低於限值，並以現場監測驗證緩解成效，維持人類健康風險在可接受範圍。
- H. **土地及資源利用評估結果：**NSDF 位於 CRL 管制區內，禁止公眾進入，預期不影響周邊休閒與漁業活動。考古調查未發現重大文化資產，施工期間將遵守文化資源管理規範。整體而言，對土地利用與資源無顯著不利影響。
- I. **社會經濟環境評估結果：**CRL 位於安大略省倫弗魯郡，距深河鎮約 12 公里。計畫預期創造就業機會並促進地方經濟，對原住民社區具潛在正面效益。雖可能在施工期間對住宿與交通造成短期壓力，但整體社會經濟影響不顯著。CNL 將持續監測並加強社區溝通。
- J. **事故和異常事件：**NSDF 於施工與營運階段採系統性方法識別潛在事故，如吊掛物掉落或設備火災導致污染物釋放。評估顯示所有情境下人員與公眾暴露劑量均符合監管標準。CNL 透過人員訓練、標準作業程序及監督管理降低事故風險，並建置應變與補救機制以確保安全。
- K. **極端環境對計畫評估結果的影響：**除評估 NSDF 對環境之影響外，報告亦分析氣候變遷、洪水、地震與龍捲風等自然事件之潛在衝擊。NSDF 設計納入防護措施，包括高效排水系統、地勢高於渥太華河約 50 公尺及耐震結構設計。冰河活動超出本計畫時程，未列入考量。CNL 並制定應急與補救計

畫，以確保設施與環境安全。

- L. **監測與後續計畫**：CNL 已制定概念性監測與後續計畫，用以驗證緩解措施效能與環境評估預測準確性。該計畫將隨環境評估進展逐步細化，並納入公眾、原住民與監管機關意見。若監測顯示環境影響超出預期，CNL 將重新評估並修訂緩解措施與管理策略，以確保持續符合法規與環境績效目標。

表 2.1 《環境影響報告書(EIS)》針對 NSDF 計畫進行環境影響評估結果整理

評估項目	評估結果
大氣	經過完整評估與模型預測。透過預防性管理與持續監測，已確認對環境影響可控且不顯著。
地質和水文地質	透過設計與緩解措施，有效控制地質與水文地質方面的影響，預期不會對周圍環境與人類健康造成重大不利影響。
地表水環境	透過設計與管理計畫，預測這些變化不會對環境或公共健康構成顯著影響。
水生環境	在實施全面緩解與設計措施下，預期不會對水生棲息地或魚類多樣性造成重大影響。
陸地環境	在採取嚴格的緩解與監控措施下，預期對陸地生態整體影響可控且不顯著。
環境輻射與生態健康	經完善工程設計與多層防護，環境輻射與生態健康的殘留風險低、影響可控、不具顯著性。
人類健康	透過工程設計、排放控制與嚴格監測，對民眾與工人的輻射暴露風險極低，其對人類健康影響不顯著。
土地及資源利用	<ul style="list-style-type: none"> • 預計不會對土地和資源使用產生影響。 • 對考古資源無顯著影響，已完成預防性處置。
社會經濟環境	<ul style="list-style-type: none"> • 具有正面影響，特別是就業與經濟發展方面。 • 負面影響在緩解措施實施後預計不顯著。 • 將持續透過監測與溝通機制來管理影響。
事故和異常事件	風險管理系統能有效控制並回應潛在事故，確保工人安全、環境保護及公眾健康不受重大影響。
極端環境對計畫的影響評估	極端環境條件下，設施功能與環境保護機制仍將持續有效，風險「不顯著」。
監測與後續計畫	動態、應變性強的系統設計，確保在各階段持續符合環境保護與社會責任標準。

資料來源：Golder Associates Inc. (2021)

2.1.2 比利時-Dessel 近地表處置設施

關於比利時 Dessel 近地表處置設施相關之資訊，本計畫蒐整到三份文獻，包括：

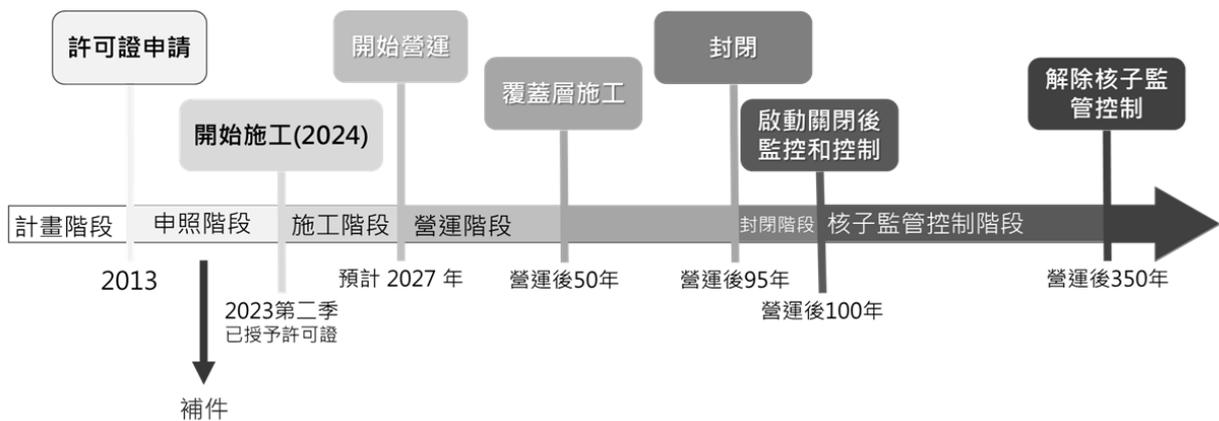
- 「The safety case in support of the license application of the surface repository of low-level waste in Dessel, Belgium」(Wacquier and Cool, 2014)：說明許可申請背景、安全論證架構、整體安全策略、評估模型設計與執行過程中所面臨的挑戰。
- 比利時核能管制機構的許可文件「Federale Overheidsdienst Binnenlandse Zaken, and Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle. FANC Nr. AB-0304008.」(FANC, 2023)：該份文件為政府頒布正式核發設施建造與營運許可。
- 「The Long-term Radiological Safety of a Surface Disposal Facility for Low-level Waste in Belgium: An International Peer Review of Key Aspects of ONDRAF/NIRAS' Safety Report of November 2011 in Preparation for the License Application.」(OECD/ NEA, 2012)：本報告為國際專家團隊進行之同儕審查，針對安全策略、設計理念、技術工具與長期安全預測進行綜合評估。

本計畫重點整理 Wacquier and Cool (2014)所撰寫之安全論證報告內容，涵蓋許可審查程序、安全策略與關鍵評估成果，系統性地呈現先進國家近地表處置設施之安全管理實務，對我國未來類似設施的規劃與監管作業提供重要參考依據。

1. 推動歷程

比利時 Dessel 近地表處置設施計畫推動歷程如圖 2.4 所示。比利時放射性廢棄物管理機構 ONDRAF/NIRAS 自 2013 年啟動許可申請，根據 World Nuclear News (WNN)的報導，比利時聯邦核能監管局(Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle, FANC)認為初次申請文件內容不完整，並針對安全論證、場址與環境資料、設計細節、監測與管理等面向提出約 300 項技術及程序性問題。ONDRAF/NIRAS 於 2017 年底前完成逐項回覆，並於 2018 至 2019 年間將修正內容整合入申請文件。最終版本於 2019 年再次送交審查，並於 2023 年 5 月 16 日獲得正式營運許可，隨後於 2024 年展開施工。申請中最重要的部分

是安全論證報告，這份文件超過 20,000 頁，詳述了各項技術與科學論據，以證明該設施在短期與長期的安全性。監管過程顯示 FANC 對安全論證之深度與證據基礎要求極為嚴格。該設施預計 2027 年投入營運，營運期長達 50 年，並將同步進行覆蓋層建置作業。營運結束後，預計在第 95 年執行最終封閉，隨即展開為期約 250 年的長期監測階段，最終達成場址解除核子監管，確保設施達到穩定且安全的狀態。



資料來源：整理自 Nuclear Engineering International 網站

圖 2.4 比利時 Dessel 近地表處置設施計畫推進歷程

2. 處置設施基本資訊

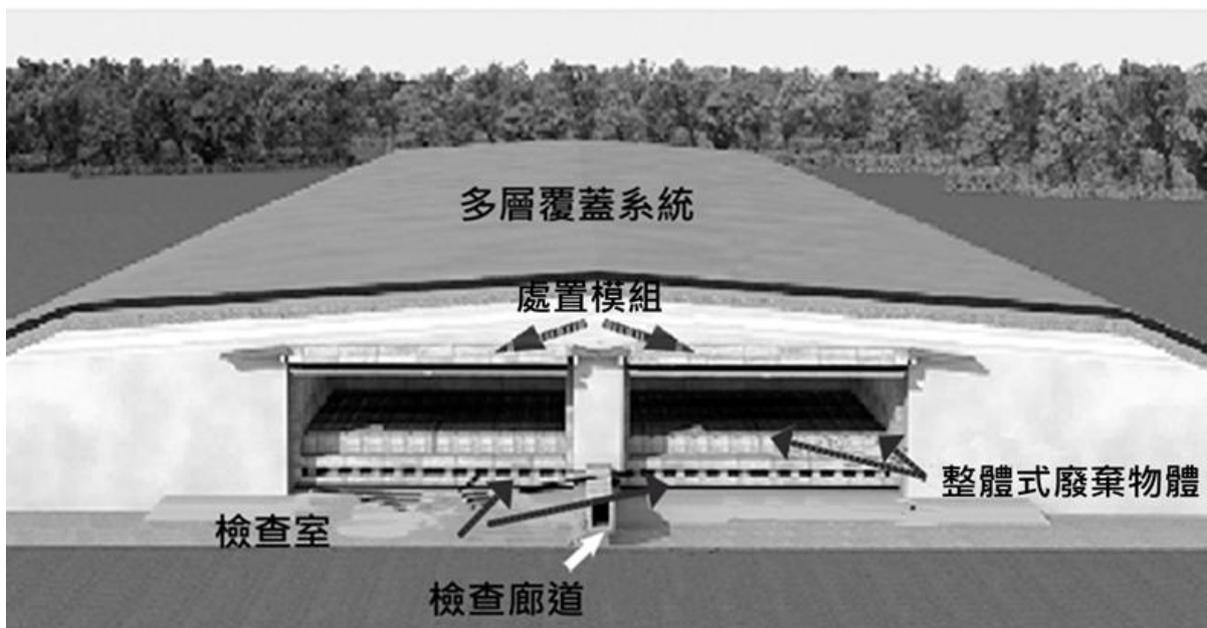
(1) 接收之廢棄物要求

比利時將放射性廢棄物分為三種類別：A 類為低至中等放射性、短半衰期廢棄物，主要含有半衰期少於 30 年之放射性核種；B 類為低至中等放射性、長半衰期廢棄物，半衰期超過 30 年；C 類則為高放射性、長半衰期廢棄物。位於 Dessel 的近地表處置設施主要用於處置 A 類廢棄物，其安全論證與工程設計均以此類廢棄物之放射性特性與長期衰變行為為核心考量，確保設施在運轉與封閉後階段均能維持足夠之安全餘裕。

(2) 設施之處置單元設計

Dessel 處置設施為一座高度工程化的地上型混凝土處置窖處置設施，其設計理

念與目前兩座現代化、獲完全許可運轉的低放射性廢棄物處置設施相似，分別為法國 Centre de l' Aube 處置設施(CSA)與西班牙 El Cabril。其處置概念採用多重工程障壁(圖 2.5)，主要結構為鋼筋混凝土坑室(caissons)，廢棄物填入後以水泥基灌漿封固，形成整體式廢棄物體(monoliths)；這些整體廢棄物體隨後被安置於鋼筋混凝土製的處置模組(modules)內，並覆以多層覆蓋系統，提供長期防護。此外，模組下方設有檢查通道室(inspection rooms)，側邊設有檢查廊道(inspection gallery)，以利監測與維護。整體處置系統建置於包含約 2 公尺厚砂水泥基礎(sand-cement foundation)之上，以確保穩定性與防滲功能。



資料來源：翻譯自(OECD/ NEA, 2012)

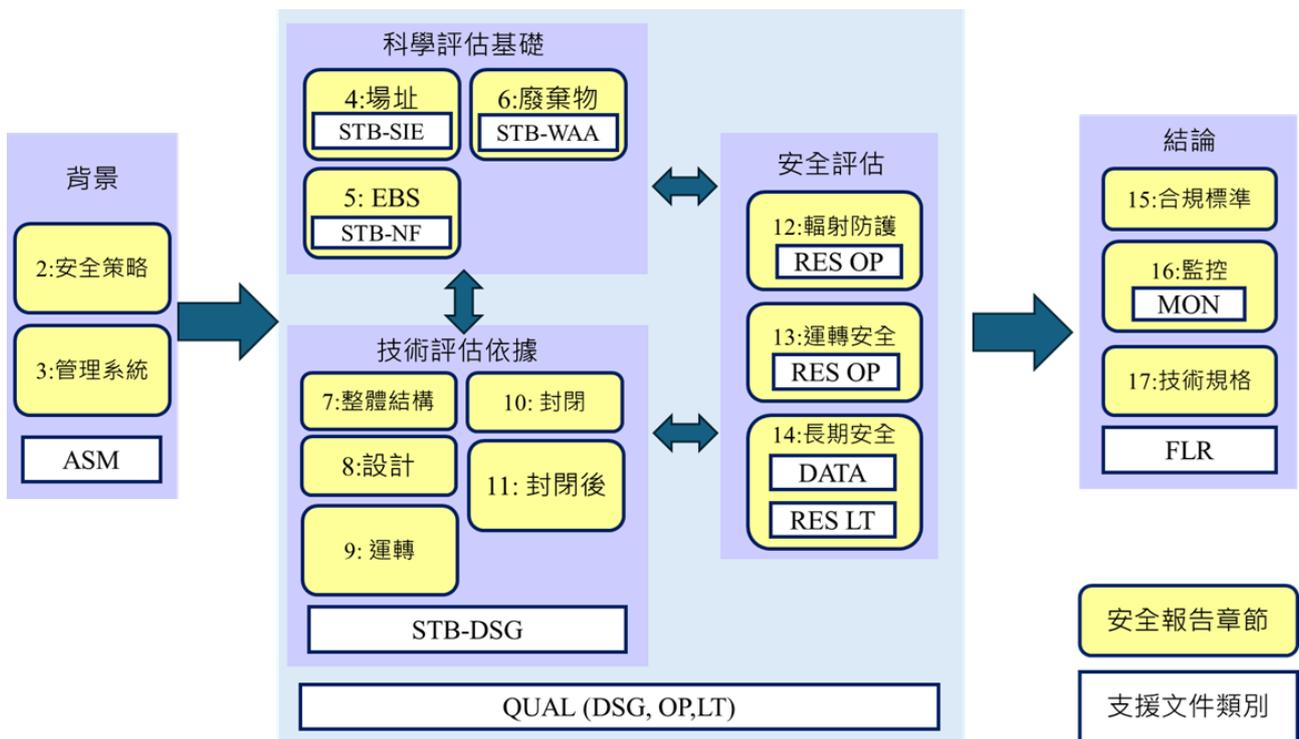
圖 2.5 比利時 Dessel 近地表處置設施示意圖

3. 安全論證架構與審查程序

比利時 Dessel 處置設施之安全論證架構分為四層級：第一層為面向公眾的非技術性綜述，概述安全論證與技術摘要，旨在以淺顯方式傳達核心資訊；第二層為安全報告，含 17 個技術章節，提供專業人員參考，內容涵蓋詳細且系統化的安全分析；第三層為技術報告，闡述安全論證所依據的科學原理、設計成果與評估方法；第四層為支援性報告，

包含資料來源、模型與程式驗證、監測計畫及補充性分析，以確保論證的完整性與嚴謹性。在許可申請過程中，所有報告均須經多層次的內外部審查，其中包括 OECD/NEA 國際專家之同儕審查。依審查意見修訂後，方能提交最終版本，以確保內容具備充分的科學性與公信力。

為確保第四層級報告與前三層級間具備明確的可追溯性與一致性，其內容依論證領域劃分為數個類別(圖 2.6)，包括：科學與技術基礎(STB)，涵蓋場址與環境(STB-SIE)、近場區域(STB-NF)、A 類廢棄物接受標準(STB-WAA)、設計開發與組件描述(STB-DSG)；資料來源(DATA)；模型與程式資格驗證(QUAL)，包含設計開發(QUAL-DSG)、操作階段(QUAL-OP)及長期安全評估(QUAL-LT)；評估結果(RES)，分為操作階段(RES-OP)與長期安全評估(RES-LT)；監測計畫(MON)；以及進一步推理分析(FLR)，涵蓋特徵、事件與作用(FEPs)管理及不確定性管理。第三與第四層級報告主要供深入研究安全論證架構與科學依據之技術專家使用，亦可作為方法論研究與相關技術領域專業人員之參考資料。



資料來源：修改自 Wacquier and Cool (2014)

圖 2.6 比利時 Dessel 近地表處置設施安全論證第三層級及第四層級之報告結構

4. 安全策略

在放射性廢棄物處置設施的規劃與開發過程中，安全策略扮演關鍵角色，為整體安全論證奠定基礎。安全策略提供一套嚴謹且具整體性的原則與方法，用以指導設計、營運與評估流程，確保最終達成長期安全處置目標。透過科學依據、設計準則與安全評估的整合，初步設計需符合基本安全要求，作為後續設施優化與發展的基礎。為因應場址條件變化與技術進步，處置設施採行迭代式設計與安全論證方法，持續進行更新與優化。此方法能將最新資料與科學知識納入重大決策，並透過定期審查與回饋機制，不斷提升設施安全性，確保長期防護功能之穩定與可靠。

近地表處置設施之長期安全依賴多重且互補的防護機制，主要涵蓋四項核心要素。首先，工程障壁提供多重物理屏障，實現被動式包覆與隔離，限制放射性物質的遷移與擴散；其次，優先選擇地質穩定、水文條件良好且具天然屏障能力之地區，以確保廢棄物之長期封存；第三，廢棄物限制措施透過分類與活度控管，對含長半衰期核種之廢棄物實施嚴格限制，確保放射性強度維持於安全範圍內；最後，監測與控制系統持續掌握設施運作與環境變化，確保必要之管理與防護，防止人為或自然干擾。

在安全策略的指導下，安全功能與安全概念構成安全論證的核心。安全功能係指由設施之系統、結構與組件(System, Structure, and Components, SSCs)所提供的保護機制，例如障壁完整性、防腐蝕功能及液體遷移抑制等。安全概念則整合各項安全功能與 SSCs 的配置，並考量其隨時間之演化與交互作用，形成一套整體且穩健的處置系統設計理念，以確保設施能長期穩定運作。圖 2.7 說明了此一安全概念。

舉例來說，在圖 2.7 所示的第 III 階段中，預期可透過控制與監管措施有效防止人為入侵，同時維持核監管及出入管制機制。即使進入第 IV 階段後人為控制終止，處置設施所採用之多重物理障壁系統仍可降低人為無意入侵的可能性，並減輕潛在輻射風險。安全概念進一步透過圖 2.8 所示之表格具體化，該表列出各 SSCs 在不同時間階段中應達成的主要安全功能，並依其在安全功能實現中的重要性區分為「主要(M)」或「輔助(C)」：

- 「主要(M)」：必須經驗證可在正常條件下確實實現指定的長期安全功能；

- 「輔助(C)」：對特定安全功能提供次要或支持性貢獻。

因此，整體安全概念係由具備「主要」與「輔助」角色之 SSCs 及其對應之安全功能共同構成，透過多重防護層次確保處置設施於長期內之安全穩定與防護效能。



資料來源：翻譯自 Wacquier and Cool (2014)

圖 2.7 比利時 Dessel 近地表處置設施安全報告中定義安全概念，包含的時間範圍、階段以及支持處置設施之安全功能

	長期安全功能1			長期安全功能2			...
	階段III	階段IV	階段V	階段III	階段IV	階段V	
SSC1	M	M	C	M	M	C	
SSC2	M			M			
...							

資料來源：翻譯自 Wacquier and Cool (2014)

圖 2.8 比利時 Dessel 近地表處置設施安全報告中安全概念制定原則。包含不同安全功能(可參閱圖 2.6)於不同階段時，各個 SSC 所扮演主要或輔助的角色

5. 安全論證的成功與挑戰

在 A 類廢棄物處置設施的發展過程中，安全論證始終扮演核心角色。其成效不僅取決於堅實的技術基礎與嚴謹的科學方法，更依賴社會參與與制度整合的有效運作。安全論證可從「成功關鍵」與「主要挑戰」兩方面說明其角色與實務困境，概要如下：

(1) 成功關鍵

安全論證的推動建立於多層次支撐要素。首先，工程技術與社會參與機制的整合為決策合理性與社會接受度奠定基礎。完善的管理系統確保論證具透明與可追溯性，提升決策的公信力與科學正當性。安全策略與安全概念共同構成邏輯一致的論證架構。透過持續累積與應用科學知識，安全論證涵蓋設施設計、建造、營運與封閉各階段的可行性與安全性評估。藉由實證資料與模擬分析，驗證設施能達成安全目標並符合法規標準。同時，持續推動相關研發以強化對系統長期行為的理解，降低評估不確定性，提升論證說服力，並為後續設計優化與監測規劃提供依據。

(2) 主要挑戰

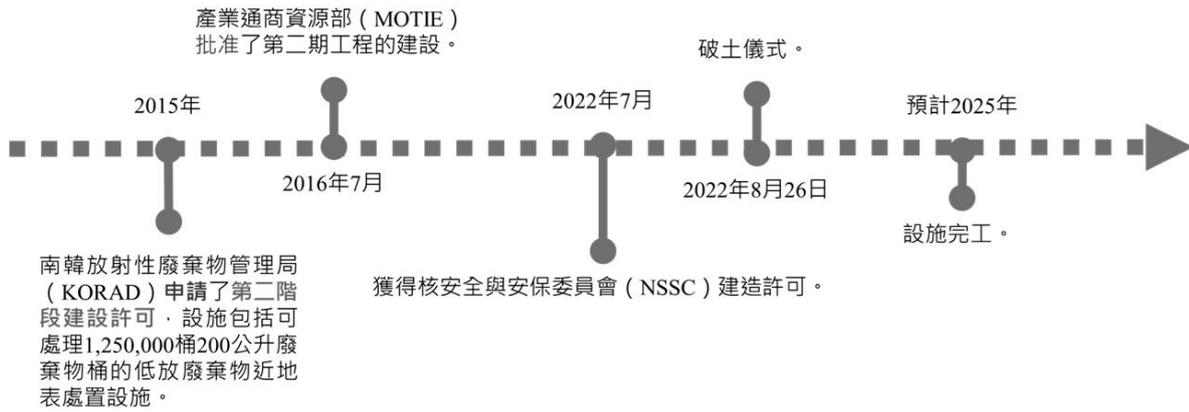
儘管安全論證已獲重要進展，仍面臨多項挑戰。首先，工程障壁作為處置系統的第一道安全防線，其設計、建造與功能驗證必須具備高度可靠性，並能在長期運作期間維持穩定功能，避免功能衰退。其次，廢棄物本身即為源項風險的主要來源，因此，放射性活度的接受限值與合格標準必須嚴謹制定與嚴格執行，以確保處置設施能持續有效隔離放射性物質，避免對人類與環境造成影響。此外，水泥材料在障壁系統中扮演關鍵角色，但其長期物理與化學行為仍存在不確定性。針對此一挑戰，需採取保守的分析原則，並結合多種情節模擬評估，例如基準情節(Reference Scenario, RS)、替代基準情節(Alternative Reference Scenarios, ARSs)、預期演化情節(Expected Evolution Scenario, EES)、替代演化情節(Alternative Evolution Scenarios, AES)以及最不利情節(Penalising Scenarios, PS)，並採廣泛性與保守評估策略等精神，確保在各種合理假設條件下，系統均具備充足的安全裕度，以實現長期安全目標。

2.1.3 南韓-月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施

有關韓國近地表處置設施之研究，本計畫蒐集到一篇與南韓月城中低放射性廢棄物處置中心安全評估相關的文獻，為 Kim et al. (2022)發表之「Review of Licensing Process of the 2nd Phase Low Level Radioactive Waste Disposal Facility in Gyeongju」。該文主要說明韓國監管機構針對第二期處置設施建造與營運許可之審查程序，並分享審查過程中之經驗與教訓，作為後續第三期設施審查的參考。由於授權限制，本計畫僅能取得該文之摘要內容。儘管如此，本計畫仍蒐集到部分相關資訊，包括 KORAD 於 2023 年發布之公開報告，內容涵蓋韓國高、低放射性廢棄物之管理現況與政策發展。此外，亦取得一篇以數值模擬工具進行近地表處置設施放射性安全評估之研究，可作為補充參考。以下針對可取得之資訊進行整理與說明。

1. 推動歷程

2. 月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施之推動時程如圖 2.9。KORAD 於 2015 年 12 月 24 日向核能安全與保安委員會(Nuclear Safety and Security Commission, NSSC)提出申請，請求核准在慶州月城地區建造並營運第二期處置設施。NSSC 與韓國核能安全研究所(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)隨後對 KORAD 所提之《安全分析報告》、《放射性環境報告》及「安全管理規則」等文件進行初審。修訂後之申請文件自 2016 年 11 月 29 日起進入詳細技術審查階段。審查過程中，監管機關共提出 856 項技術質疑與補充資料要求，審查作業持續至 2021 年 11 月 16 日。在此過程中，因應 2016 年慶州地震與 2017 年浦項地震，NSSC 要求調整設施之耐震設計標準，將處置區與地下廊道的設計基準加速度由 0.2 g 提高至 0.3 g，以符合更新後的地震風險評估。同時，鑑於地震可能誘發斷層活動，監管機關亦要求重新評估場址之地下水動態與水文條件。針對正常運轉、異常狀況及人為入侵等多種情節之封閉後安全分析，也依據更新後的場址參數與設計條件重新執行模擬。最終，NSSC 依據「核能安全法」於 2022 年 7 月核發第二期處置設施之建造與營運許可，並預計於 2025 年完工。



資料來源：整理自 KORAD (2023)

圖 2.9 南韓-月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施計畫推進歷程

3. 處置設施基本資訊

根據韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD, 2023)之報告，月城中低放射性廢棄物處置中心位於慶尚北道慶州市文武大王面東海岸路，其整體配置如圖 2.10 所示。該處置設施共劃分為四個主要區域，分別為：

- **地下筒倉處置設施(第一期)**：主要用於處置中放射性廢棄物及以下等級之廢棄物；
- **近地表處置設施(第二期)**：主要用於低放射性廢棄物及以下等級之廢棄物；
- **掩埋處置設施(第三期)**：主要處理極低放射性廢棄物；
- **相關支援與附屬設施**：包含營運、監測與維修設施。

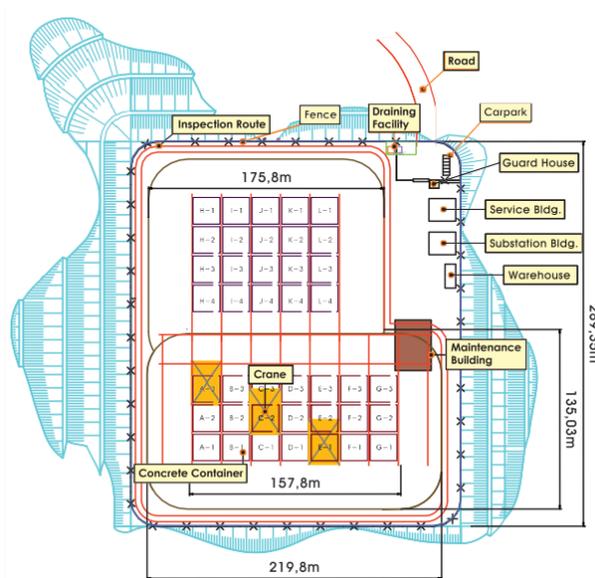
其中，第二期近地表處置設施採用鋼筋混凝土結構，平面布置圖如圖 2.11 所示，屬典型的近地表型多重障壁系統(見圖 2.12(左))。其設計包含五層防護構造，最內層為放射性廢棄物桶。這些廢棄物桶被安置於長 20 公尺、寬 20 公尺、高 10.9 公尺的處置倉(disposal silo)中(見圖 2.12(右))。廢棄物桶安置完成後，內部空隙將以灌漿方式進行固化處理，外部則由母岩及覆蓋層形成天然屏障，以進一步強化防護效果。該設施佔地約 120,000 平方公尺(總場址面積為 2,060,000 平方公尺)，設計容量為 125,000 桶，總處置容量達 80 萬桶(每桶 200 公升)。主要用來處置低放射性及更低等級之放射性廢棄物，並依據韓國「放

射性廢棄物管理法」及「中低放射性廢棄物處置設施託管地區支援特別法」等相關法規進行規劃與營運。



資料來源：KORAD (2023)

圖 2.10 南韓-月城中低放射性廢棄物處置中心相對位置圖，包含一期地下筒倉處置設施、二期近地表處置設施、三期掩埋處置設施及其支援設施。



資料來源：KORAD (2023)

圖 2.11 南韓-月城中低放射性廢棄物處置中心二期近地表處置設施之平面布置圖。



資料來源：KORAD (2023)

圖 2.12 南韓月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施設計剖面圖(左)及放置廢棄物桶的處置倉規格(右)

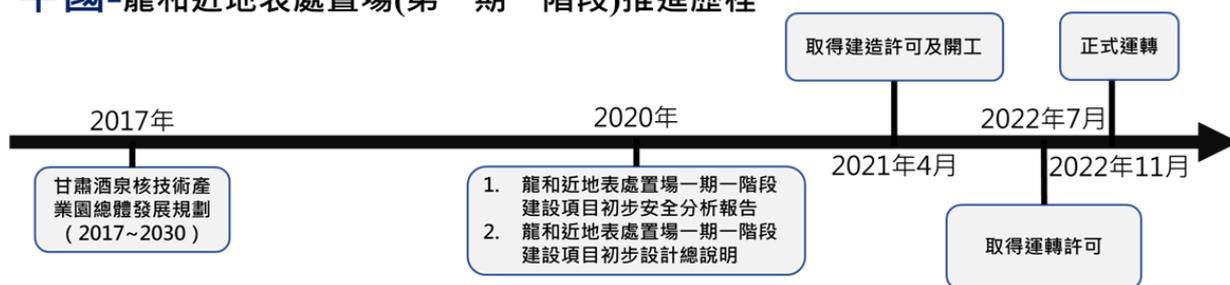
2.1.4 中國-龍和近地表處置場(第一期一階段)

有關中國龍和近地表處置場(第一期一階段)計畫之推動資訊，目前公開資料有限。本計畫主要參考《龍和近地表處置場一期一階段建設項目環境影響報告書(申請建造階段)》(中核清原公司，2020)之內容，本節將根據相關報告內容，摘要並整理其重點。

1. 推動歷程

龍和近地表處置場的推動可追溯至多項階段性政策與規劃文件。2017年，中國政府發布《甘肅酒泉核技術產業園總體發展規劃(2017-2030)》，為當地核技術產業及放射性廢棄物管理提供長期發展藍圖。隨後，於2020年完成《龍和近地表處置場一期一階段初步安全分析報告》及《龍和近地表處置場一期一階段初步設計總說明》，作為建設推動之技術依據與設計基礎。根據中國官方與媒體報導，龍和近地表處置場於2021年4月取得建造許可並正式開工，在完成設施建造後，於年7月取得運轉許可，並於2022年11月正式投入運轉，開始接收廢棄物。其主要推動歷程如圖2.13所示。

中國-龍和近地表處置場(第一期一階段)推進歷程



資料來源：整理自中核清原公司(2020)

圖 2.13 中國-龍和近地表處置場(第一期一階段)計畫推進歷程

2. 處置場基本資訊

中國龍和近地表處置場之建設背景，根據中核清原公司(2020)報告指出，主要係因中國核電廠放射性廢棄物管理進度相對滯後，面臨暫存設施容量不足與法規要求不符之挑戰。多數暫存設施已接近或超過設計容量，且未能符合「放射性廢棄物安全管理條例」中「暫存期不得超過五年」的規定，導致長期風險逐步累積。同時，沿海地區預定之處置場開發進度遲緩，迫使中國必須尋求替代方案以因應實際處置需求。另一方面，源自核技術應用及醫療領域的非核電低放射性廢棄物量亦持續增加，使整體處置壓力日益嚴峻。在此背景下，中國啟動龍和近地表處置場之建設，以作為因應上述挑戰的替代方案。其中，申照單位為中核清原環境技術工程有限責任公司，營運單位則為甘肅龍和環保科技有限公司。龍和近地表處置場位於甘肅省酒泉市核技術產業園區，中心座標為東經 98°34'49.78"、北緯 40°19'30.31"，距金塔縣西壩鄉西北約 29 公里，南距嘉峪關市約 63 公里，與酒泉市相距約 66 公里，東南距金塔縣城約 50 公里，西距玉門市約 99 公里，西南距昌馬水庫約 150 公里。場址位置如圖 2.14 所示。



資料來源：改自中核清原公司(2020)

圖 2.14 中國龍和近地表處置場相對位置圖

(1) 接收之廢棄物要求

龍和近地表處置場所接收之低放射性固體廢棄物包件，須符合「中國低、中水平放射性固體廢棄物近地表處置安全規定」及「低、中水平放射性固體廢棄物包安全標準」之相關要求。該處置場僅接收核電廠運轉過程中所產生之低放射性固體廢棄物，其廢棄物放射性濃度接收上限值如表 2.2 所示。廢棄物體之形式須為合格之水泥固化體或經固定之廢棄物包。對於特殊類型廢棄物，只要其放射性核種種類與活度水準符合接收標準，經適當整備與包裝後，報經中國國家監護(管)部門核准，即可接收並進行處置。低放射性固體廢棄物包件劑量率上限為 30 mSv/h，其中大部分包件劑量率低於 2 mSv/h，僅有少部分介於 2 mSv/h-30 mSv/h 之間。

表 2.2 低放放射性廢棄物濃度上限值

放射性核種	核種濃度(Bq/kg)
C-14	10^7
Ni-63	10^9
Sr-90	4.9×10^8
Tc-99	1.4×10^7
I-129	10^5
Cs-137	10^8

資料來源：中核清原公司(2020)

(2) 設施之處置單元設計

龍和近地表處置場採取分期推進的建設模式。全場總規劃處置容量為 100 萬立方公尺，分為五期：第一期 24 萬立方公尺、第二期 24 萬、第三期 20 萬、第四期 18 萬，以及第五期 14 萬立方公尺。其中，第一期再細分為多個階段，第一階段的處置容量為 4 萬立方公尺，設置 20 個處置單元。年處置能力為 4,000 立方公尺，預計運轉期為 10 年。每個處置單元為半地下式鋼筋混凝土結構，由地表向下開挖至-4.9 m，隨後澆置 0.9 m 厚的鋼筋混凝土底板，使單元內部底部標高為-4 m，側牆頂標高為+6 m。單元內部尺寸暫定為長寬高為 20 m×20 m×10 m。裝填完成後，於頂部澆築水泥至+6 m，並進行封頂作業，再加設厚約 0.5 m 的混凝土頂板，以完成最終封閉。

(3) 處置場封閉後的控制措施

依據中國「低、中階放射性固體廢棄物近地表處置安全規定」之要求，為確保處置場障壁的完整性，應於封閉前制定監護(管)計畫，內容包括監測、監督及設施維護，並定期更新。處置場封閉後監護(管)之持續期間，依處置場類型及所容納廢棄物之性質加以確定。監護(管)期可分為主動監護(管)(如監測、監督與設施維護)及被動監護(管)(如限制土地使用)。初步規劃龍和近地表處置場封閉後之監護期為 300 年，以確保長期安全與環境防護目標之達成。

3. 安全分析

中核清原公司(2020)針對中國龍和近地表處置場的安全分析報告，主要內容包括：安全性原則分析、情節(Scenario)分析、運轉階段安全分析、封閉活動安全分析，以及與其他設施相互影響之分析。各項重點說明如下：

(1) 安全性原則分析

龍和近地表處置場的安全論證以明確安全原則為基礎，目標為確保全處置期內之輻射防護與風險控制。場址選擇依「放射性廢棄物近地表處置場選址」進行地震、地質構造及工程地質評估。設計採多重障壁與縱深防禦概念，透過多層隔離與延遲核種遷移，降低對環境與人員的潛在風險。依廢棄物特性訂定接收與分類標準，並設定各階段輻射劑量限值，以確保作業人員與公眾安全。系統設計強調結構穩固、容錯與縱深防護，即使部分障壁失效，整體仍具功能冗餘防止核種釋出。設計亦重視被動安全，優先採用天然障壁與無需外部能源之系統，以提升長期穩定性。該報告發布當下，由於初期場址資料尚不完整，計畫特別著重不確定性管理，依據「低、中水平放射性固體廢棄物近地表處置安全規定」進行保守評估與敏感度分析，以驗證系統穩健性並降低不確定性對安全判斷的影響。

(2) 情節分析

為評估處置系統於各階段運作下的潛在風險，本計畫透過情節開發，系統性辨識可能影響設施安全功能的特徵、事件與作用(Features, Events, and Processes，簡稱FEPs)。參考國內外實務經驗及國際原子能總署技術報告(IAEA-TECDOC-1380)之建議，建立涵蓋正常與非正常運作的情節組合。運轉階段情節包括放射性氣體逸散、包件墜落、設施火災與傾倒等事故；封閉階段則分析核種遷移與釋放、氣體積聚與逸散、人為入侵等潛在風險。藉由模擬不同情節，可檢驗系統於多種假設條件下的安全邊界與韌性。

(3) 運轉階段安全分析

運轉階段分析著重於日常營運對作業人員與環境的潛在影響。評估內容包括作

業人員年劑量控制、自然災害(如地震與洪水)對結構之影響，以及意外事件(如廢棄物包件掉落)造成的輻射風險。設計中納入防護措施與事故應變計畫，並建立廢水與次級廢棄物處理程序，以降低環境污染。結果顯示，在正常運轉下，作業人員與公眾劑量均遠低於法規限值，風險維持於可接受範圍。

(4) 封閉活動安全分析

封閉階段重點在於長期穩定性與障壁完整性。封閉前將進行障壁設計審查與功能驗證，確保封閉後可維持核種隔離與防護功能。施工期間將嚴格執行安全管理、輻射監測與暴露控制，確保作業安全並符合法規標準。

(5) 與其他設施相互影響分析

安全評估除自身系統外，亦納入周邊設施與區域性影響分析。評估土地利用、設施間功能重疊與風險傳遞途徑，並採取區域性安全設計原則以減少潛在交互影響。同時提出緊急應變、資源調度及公眾風險管理策略，以提升龍和近地表處置場與鄰近設施整體安全性與計畫可行性。

4. 廢棄物的產生及處理

龍和近地表處置設施於施工與運轉期間將產生多類廢棄物。為維護環境品質並確保作業安全，必須採取適當的管理與處置措施。以下分別說明施工期與運轉期廢棄物的產生特性與處理方式：

(1) 施工期廢棄物的產生與處理

施工期間主要污染來源包括廢氣、廢水、固體廢棄物與噪音。廢氣來源為土石方開挖及建材運輸揚塵，以及施工機具與車輛(如挖掘機、推土機、壓路機)柴油燃燒排放的氮氧化物與碳氫化合物。排放總量有限，對環境影響範圍較小。廢水分為工程廢水與生活污水。工程廢水來源包含混凝土養護、建材保濕、場地與車輛清洗等，主要污染物為泥沙、懸浮固體及少量石油類化合物，其中部分可回收再用於灑水抑塵。生活污水則來自施工人員日常活動，依每日每人 0.06 立方公尺估算，約 150 名施工人員每日產生 9 立方公尺污水，經臨時旱廁收集後定期清運處理。固體廢棄物

包含土石方、建築垃圾與生活垃圾。工程將開挖約 6.8 萬立方公尺、填方 3 萬立方公尺，其中處置單元基坑約占 5 萬立方公尺。多餘土方暫存於場區南側，後續用於覆蓋工程。建築垃圾約 300 噸，優先分類回收，無法再利用者委外處理；生活垃圾每日約 0.075 噸，集中收運至垃圾場。噪音污染主要來自施工機具與車輛運行，具多源、高強度與變動性特徵。將採低噪設備與加裝隔音罩等措施降低對周邊環境之干擾。相關重點彙整如表 2.3 所示。

(2) 運轉期主要污染物的產生與處理

運轉階段主要污染物為廢水、廢氣與固體廢棄物。廢水分為具放射性風險與一般生活排水兩類。前者來自衛生通道、洗衣間與車庫等。集中檢測後，合格者送入污水處理站，不合格者以水泥固化處理。生活排水每日約 17.7 立方公尺，經處理後回用於場區綠化。系統設計容量為每日 24 立方公尺，足以應付運轉需求。廢氣主要產生於低表面污染封裝廢棄物(如廢棄物桶)處理過程，污染須符合 $\alpha \leq 0.4 \text{ Bq/cm}^2$ 、 $\beta \leq 4 \text{ Bq/cm}^2$ 標準。正常運轉下排放量極低，對環境影響可忽略不計。固體廢棄物包含擦拭紙、手套、工作服等作業性廢棄物。雖量少但需經放射性檢測，超標者封存於 200 公升桶內，依其放射性等級送往相應設施處置。生活垃圾則集中收集並委託合格單位處理，以防環境污染。相關重點亦整理於表 2.3。

表 2.3 中國龍和近地表處置場第一期第一階段之施工期與運轉期之廢棄物與污染物的產生、來源與相對應之處理

		施工期廢棄物產生與處理	運轉期污染物產生與處理
廢氣	來源	機械與車輛廢氣(NO _x 、HC 等)。	處理廢棄物多為已整備的桶裝/箱裝廢棄物，正常情況下無明顯放射性廢氣排放，對周邊影響極小。
	處理	排放量不大，影響範圍有限。	
廢水	來源	泥沙、懸浮固體(SS)、少量石油類化合物。	1. 處理潛在或實際含放射性的工業廢水或實驗室用水 2. 生活污水與非作業區廢水
	處理	施工廢水回用於場地噴灑降塵。	1. 合格：進入污水處理站；不合格：就地進行水泥固化處理。 2. 收集後統一處理，用於場區綠化
固體廢棄物	來源	1. 土石方 2. 建築垃圾 3. 生活垃圾	1. 擦拭紙、手套、工作服、難去污設備 2. 超標廢棄物
	處理	1. 場區南側臨時堆放，後續用於覆蓋 2. 能回用的回收，不可用的妥善堆放並清理 3. 收集後送垃圾場處理	1. 統一收集後集中處理 2. 裝入 200 L 桶集中收集、檢測、整備後按分類送至填埋場或處置場
噪音	來源	施工設備、作業與車輛	
	處理	選擇低噪設備、加裝隔音罩等。	

資料來源：整理自中核清原公司(2020)

5. 環境影響

龍和近地表處置設施於施工、運轉及封閉後各階段，雖不可避免對環境產生影響，但整體風險可透過妥善管理維持於可接受範圍內，確保公眾與環境安全。施工階段主要影響包括揚塵、廢水、固體廢棄物及噪音等，屬短期且區域性特徵，影響程度取決於現場管理與環保意識。經有效污染防治與監督機制，可大幅降低衝擊，並於工程完工後迅速消退。

報告中評估採主動監護(管)期結束(封閉後 300 年)為主要時間尺度，並以封閉後第 500 年為對比時點，以評估處置系統之長期穩定性。放射性核種釋放模擬採保守假設，模擬時間達 100,000 年；而公眾暴露劑量評估則延伸至 1,000,000 年，以掌握長期風險變化。

模擬結果顯示，運轉階段環境影響極小，放射性廢氣釋放量極低。最大年個人劑量為 5.87 $\mu\text{Sv/a}$ ，遠低於設施劑量約束值 0.01 mSv/a。即使發生包件掉落等事故，亦不會造成顯著放射性釋放。封閉後階段的長期安全評估結果顯示，第一期設施對公眾的最大年有效劑量為 3.27×10^{-4} mSv/a，遠低於 0.01 mSv/a 限值。其關鍵核種為 Tc-99，暴露途徑為食入引起之內照射，影響高峰預估發生於封閉後第 6700 年。

針對潛在闖入行為亦進行模擬，包括開鑿飲用水井、鑽探及岩心散落等情節。結果顯示，封閉後第 6600 年進行打井行為，年劑量為 3.30×10^{-4} mSv/a；封閉後第 300 年鑽探的單次劑量為 1.10×10^{-2} mSv/次，岩心散落造成的年劑量為 3.58×10^{-2} mSv/a，皆低於控制值。主要暴露核種為 Tc-99、Ni-63、Cs-137，途徑涵蓋內照射與外照射。若於封閉後第 300 年於處置單元上方建屋居住，年劑量為 0.742 mSv/a；即使在封閉後 5 萬年風化導致廢棄物裸露的極端情境下，建屋暴露年劑量仍僅 0.424 mSv/a，均低於 1 mSv/a 控制限值，關鍵核種為 Cs-137 與 I-129，途徑為外照射與食入受污染物質。

綜上所述，透過整個處置週期之風險管理與階段性安全評估，龍和近地表處置場於各階段皆展現良好環境相容性與長期安全性，重點彙整如表 2.4 所示。

表 2.4 中國龍和近地表處置場第一期第一階段施工期間至封閉後管制期之環境影響評估結果

		主要發生時期	劑量	關鍵核種	途徑
施工期間的環境影響		主要影響來源為揚塵、施工廢水、固體廢棄物、噪音。多為短期、局部性影響，透過污染防治與現場管理，可將影響降至最低；施工結束後清理場地，影響可於短期內消失。			
運轉期間的環境輻射影響		<ul style="list-style-type: none"> 放射性廢氣排放量極低，對周圍環境影響可忽略。 廢棄物包件掉落事故，不會對周圍環境造成明顯影響。 			
處置場封閉後的長期影響 (正常狀況)		封閉後 6700 年	3.27×10^{-4} mSv/a， 遠低於劑量約束值 0.01 mSv/a。	Tc-99	食入造成內照射
闖入情節模擬與評估	打井情節	封閉後 6600 年	3.30×10^{-4} mSv/a， 小於 1 mSv/a	Tc-99	食入造成內照射
	鑽探情節	封閉後 300 年	1.10×10^{-2} mSv/次， 小於 5 mSv/次	Ni-63	吸入造成內照射
	鑽探後岩心撒落情節		3.58×10^{-2} mSv/a， 小於 1 mSv/a	Cs-137	受污染物質沉積造成外照射
	建房居住情節	封閉後 300 年	0.742 mSv/a， 小於 1 mSv/a	Cs-137	外照射
	風化導致廢棄物裸露並建房居住情節	封閉後 5 萬年	0.424 mSv/a， 小於 1 mSv/a	I-129	食入受污染物質造成內照射

資料來源：整理自中核清原公司(2020)

2.1.5 法國-Cires 處置設施之 Acaci 計畫及第 3 處置區之興建

針對法國 Cires 處置設施第三期極低放射性廢棄物(Very Low-Level Waste, VLLW)處置計畫，本計畫參考兩份主要文獻進行整理與分析。第一份為 ANDRA 發佈的報告《Augmentation de la capacité autorisée du CIRES : enseignements et suites données par l'Andra à la concertation préalable》(ANDRA, 2021)。該報告針對 Cires 處置設施核准貯存容量提升計畫(Augmentation de la Capacité du Cires, Acaci)進行說明，該計畫於 2021 年 5 月 5 日至 6 月 9 日進行前期公開協商。協商由 ANDRA 主導，並由法國國家公共辯論委員會(Commission nationale du débat public, CNDP)指派的兩位保證人監督執行。依循其對話與公開參與的政策，ANDRA 在計畫早期即主動展開協商，以向公眾說明計畫目標、主要特性、土方處理方案，以及與環境監測與場址最終用途相關的公眾關切。第二份為法國環境評估主管機關 AE 發佈的《Avis délibéré n° 2023-85 sur l'augmentation de la capacité de stockage du Cires situé sur les communes de Morvilliers et La Chaise (10)》(AE, 2023)。內容為 AE 就該擴建計畫提出的審查意見與技術建議。本節依據上述兩份文件，歸納法國 Cires 處置設施在安全評估與容量擴增方面的重點內容。

1. 推動歷程

Cires 處置設施除負責放射性廢棄物的貯存外，亦處理來自非核能活動所產生的廢棄物。根據 ANDRA 於 2018 年發布的全國廢棄物清單，核設施拆除產生的極低放射性廢棄物(Très Faible Activité, TFA)總量估計約為 210 至 230 萬立方公尺，其分類與縮寫可參照核能安全委員會報告(核能安全委員會, 2024)之表 2.5。Cires 處置設施目前已建置兩處置區，每年接收約 25,000 立方公尺廢棄物。截至 2021 年底，已使用約三分之二的核准容量，預估僅能持續營運至 2029 - 2030 年。為因應容量不足問題，法國於《2022 - 2026 年放射性物質與廢棄物管理計畫(Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs, PNGMDR)》中提出 Cires 處置設施容量擴充計畫(Acaci)，並要求 ANDRA 於 2022 年底前提交申請。2024 年 7 月，Acaci 計畫已獲得正式授權，擴大 Cires 的處置容量。相關申請時程如圖 2.15 所示。第 3 處置區(tranche 3)預定於 2033 年啟用，運轉期為

30 年。隨處置容量擴增，運轉期將延長 15 年。營運結束後，計畫將進入至少 30 年的運轉後監測階段，期間將完成堆置區最終覆蓋與土地復育作業。若未來鄰近地區設置新的 TFA 處置設施，現有物流與處理設施可持續使用，以提升整體運作效能。此外，處置區將進入長期監測階段。由於 Cires 處置設施鄰近 CSA 處置設施，ANDRA 將持續駐守該地，進行為期 300 年的監測，以偵測潛在異常並於必要時採取修復措施。

表 2.5 法國放射性廢棄物之分類及處置方式

放射性半衰期 活度	極短半衰期(VSL) (半衰期<100 天)	短半衰期(SL) (半衰期≤31 年)	長半衰期(LL) (半衰期>31 年)
極低放射性廢棄物 (VLLW) < 100 Bq/g	 透過放射性衰變 進行管理	 地表處置 (用於分組、處置及處置的工業設施)	
低放射性廢棄物(LLW) 幾百 Bq/g 至一百萬 Bq/g 之間		 地表處置設施 (CSA 及 CSM 處 置設施)	 正在研究的淺地 表處置設施
中放射性廢棄物(ILW) 在一百萬到十億 Bq/g 之 間			 正在開發的深層 地質處置設施 (Cigeo 計畫)
高放射性廢棄物(HLW) 數十億 Bq/g 數量級	-	 正在開發的深層地質處置設施 (Cigeo 專案)	

HA：高放射性廢棄物

MA-VL：長半衰期中放射性廢棄物

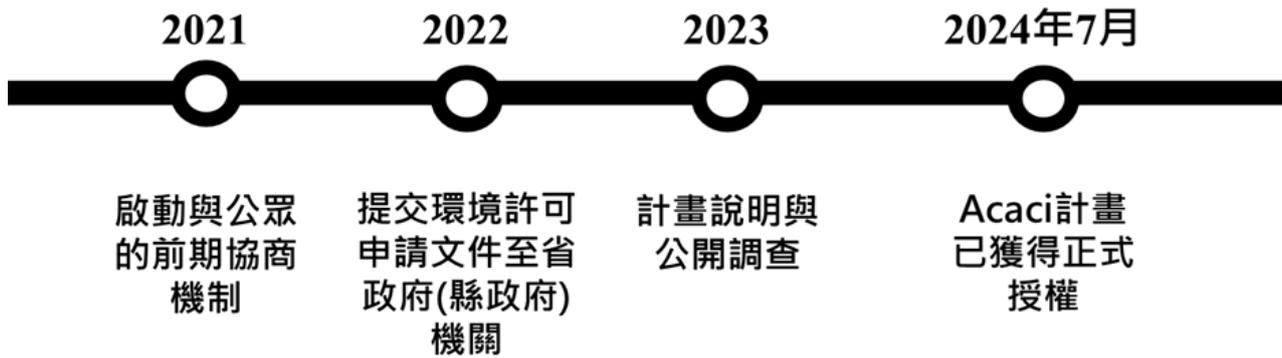
FA-VL：長半衰期之低放射性廢棄物

FMA-VC：短半衰期之低放與中放射性廢棄物

TFA：極低放射性廢棄物

VTC：極短半衰期廢棄物

資料來源：核能安全委員會(2024)



資料來源：改自 ANDRA (2021)

圖 2.15 法國 Cires 處置設施容量擴充計畫歷程

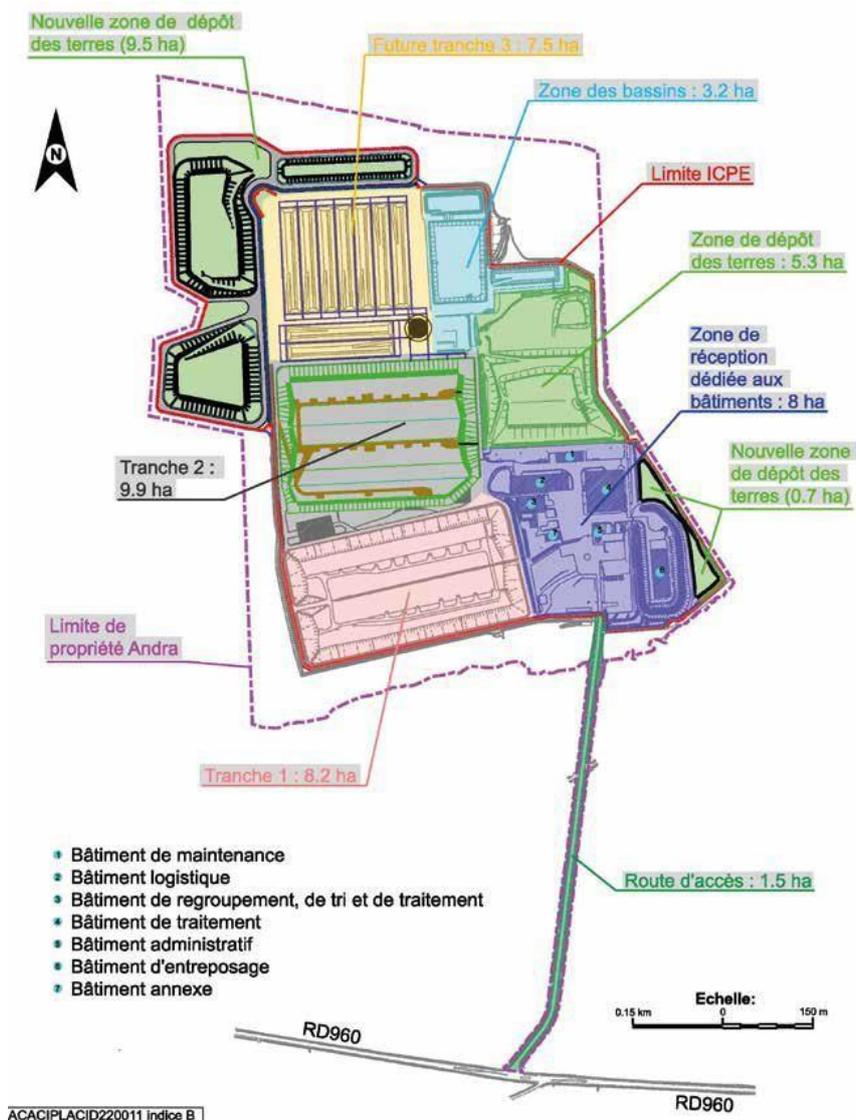
2. 處置設施基本資訊

Cires 處置設施位於法國大東部大區奧布省(Aube)，於 Morvilliers 與 La Chaise 兩市鎮之間，總面積約為 72 公頃，座落於森林地帶。其中，44.3 公頃為運轉區域，25.6 公頃用於處置高達 90 萬立方公尺的 TFA 廢棄物。Cires 處置設施劃分為多個功能區，如圖 2.16 所示：

- 廢棄物接收區(紫色)：用於廢棄物的接收、分揀、中繼轉運與重新包裝作業；
- TFA 處置區：
 - 第 1 處置區(tranche 1)：圖 2.16 中粉紅色區域，由 15 個處置單元組成，於 2003 年至 2015 年間營運，處置容量為 300,000 立方公尺(Acaci 計畫擴充前容量)；該區段已完成最終覆蓋，目前為草地狀態；
 - 第 2 處置區(tranche 2)：圖 2.16 中灰色區域，目前仍在營運中，共設有 11 個處置單元，每個處置單元長 175 公尺、深 8 公尺、寬 26 公尺，預計總處置容量為 342,000 立方公尺(Acaci 計畫擴充前容量)；
 - 第 3 處置區(tranche 3)：圖 2.16 中黃色區域，目前作為土壤堆置區，亦為本次擴建申請的範圍，預估處置容量介於 250,000 至 300,000 立方公尺之間。
- 蓄水設施(藍色)：包括暴雨蓄洪池與沉澱池；

- **土方堆置區(綠色)：**用以堆置上述處置單元施工過程中產生的土方。

在第三期工程中，將建造 9 個新處置單元，每個處置單元尺寸為長 176 公尺、寬 26 公尺、高 6 公尺。處置單元結構包含防滲膜、至少 30 公分厚的排水層與滲出液收集系統，並設有保護層。廢棄物填滿後，將依序覆蓋風化土、防滲膜與保護層。最終覆蓋系統包括以下構造層：草皮土層、排水層、黏土層、填土層、礫石層，以及至少 30 公分厚的草坪土層，用以防止侵蝕並促進水分蒸散，整體設計與施工依據相關規範執行。



資料來源：Autorité environnementale (AE) (2023)

圖 2.16 法國 Cires 處置設施相對位置圖。紫色為廢棄物接收區；粉紅色、灰色及黃色分別為第 1 至第 3 TFA 處置區；藍色為蓄水設施；土方堆置區。

3. Acaci 計畫

根據前述推動歷程之說明，為因應處置場容量不足問題，法國提出 Acaci 計畫，該計畫包含以下內容：

- 為達成容量提升，Cires 處置設施中 TFA 廢棄物的處置容量由原先第 1 處置區(tranche 1)及第 2 處置區(tranche 2)共約 650,000 立方公尺提升至 950,000 立方公尺。並啟動了早在 2003 年即納入整體規劃、但尚未建設的第 3 處置區(tranche 3)，藉由其投入運轉，使整體設施的預期營運期間得以延長約 15 年；
- 修改部分廢棄物的接納規則，包含：
 - 納入最新的科學知識，確保能因應處置設施長期演變的相關議題；
 - 在逐案技術分析並取得核可的前提下，開放接收具有腐蝕性的廢棄物；
 - 允許在處置坑室中直接以包覆方式(encoquage)進行穩定化的技術，擴大適用於危險性廢棄物；
 - 維持接收核能產業所產生廢棄物的可能性；
- 進行滯洪池週期性清淤及防滲密封檢查等作業。

第 3 處置區(tranche 3)包含興建 9 個新的處置單元，每個單元長 176 公尺、寬 26 公尺，高度為 6 公尺。這些處置單元開挖於 Aptien 地層的黏土中，並配備：一層土工止水膜、至少 30 公分厚且連接至滲出污水收集井的排水層、一層確保重力排水的土工織布隔離層，以及一層碎石層。在填滿廢棄物後，臨時覆蓋層會使用沙土或砂質黏土加強固定，外覆止水膜，止水膜由土工織布隔離層包覆，並與處置單元底部的下層止水膜相連。最終覆蓋層包括：未壓實的風化層、一層排水層、一層黏土層、保護覆蓋的填土、新一層排水礫石，以及至少 30 公分的草坪土壤層，用以減少地表侵蝕並促進蒸散。

4. 影響評估分析

由於 Acaci 計畫相較於前一次核發之運轉許可構成重大變更，ANDRA 必須重新提

出新的運轉許可申請，其範圍涵蓋所有現有及未來規劃之設施，內容包括：

- 續辦 Cires 現有配置之運轉許可(原許可至 2033 年到期)，並延長 15 年至 2048 年；
- 提升 Cires 的處置容量；
- 開發 Cires 的第 3 處置區(tranche 3)及新的土方堆置區；
- 將設施範圍由 44.3 公頃擴大至 53.8 公頃。

此計畫亦須依據歐盟「鳥類指引(Birds Directive)」及「棲息地指引(Habitats Directive)」兩項指引所建構之「Natura 2000」保育網絡之要求，進行環境與生態影響評估，並於申請文件中附上專門的影響評估研究。該評估報告涵蓋多個面向，並分為多卷冊，方便獨立閱讀。報告將研究範圍劃分為三個層級：場址範圍涵蓋 Cires 處置設施、未來堆置區及道路兩側 300 公尺範圍；近距範圍為以場址為中心，半徑 5 公里的區域；以及遠距範圍延伸至半徑 10 公里的區域。

(1) 自然環境

該區域的自然環境狀況整體良好。空氣品質良好，且未檢測到人工放射性核種，其放射性活度與自然背景水準相符。土壤主要用於林業與農業，污染跡象極少，放射性亦符合自然背景標準，且場址選擇於低滲透性且均質的白堊紀黏土層之上，有利於環境安全。地表水主要來自降雨及逕流，流量較小且常有乾涸現象，Cires 處置設施設有兩處排水口，水質與沉積物的放射性濃度偏低，與歷史資料相符。地下水分布於多個含水層，主要為較不易受污染的深層黏土下方含水層，區域內多處抽水點的監測結果均顯示水質良好。在生態方面，該區域屬於生態豐富的「濕潤香檳地區(Champagne humide)」森林核心，涵蓋多處保護區和高保育價值棲地，Soulaines 森林為區域內重要的生態連結帶。2021 年的植物調查共發現 323 種植物，雖無受保護物種，但其中有兩種被列入受威脅或瀕危物種的區域紅色名錄(Regional Red List)。動物多樣性豐富，包含多種受歐盟與國家保護的物種，例如蝙蝠、鳥類及兩棲類。

(2) 地貌與場址

場址無文化資產或視覺敏感點，位於封閉林地內，視線遮蔽良好。場址與拉謝茲城堡保護區保持距離，並由林地阻隔。

(3) 社會經濟

近距範圍內主要工業設施包括 CSA 處置設施、Cires 處置設施及 Grands Usages，涉及核能工程與建材製造。約三成土地為農業用地，產品多經認證。林地廣闊，屬國家森林局管理，部分林區將依規劃進行伐木作業。

(4) 技術風險與運輸

主要風險來自危險物質運輸，特別是沿 D960 省道的運輸活動。Cires 處置設施屬於 ICPE 設施，鄰近 2 公里外的 CSA 處置設施為核設施。周邊公路網絡完善，RD960 為主要進場道路，日均車流量約 800 至 1000 輛，其中重型車佔約 14%。

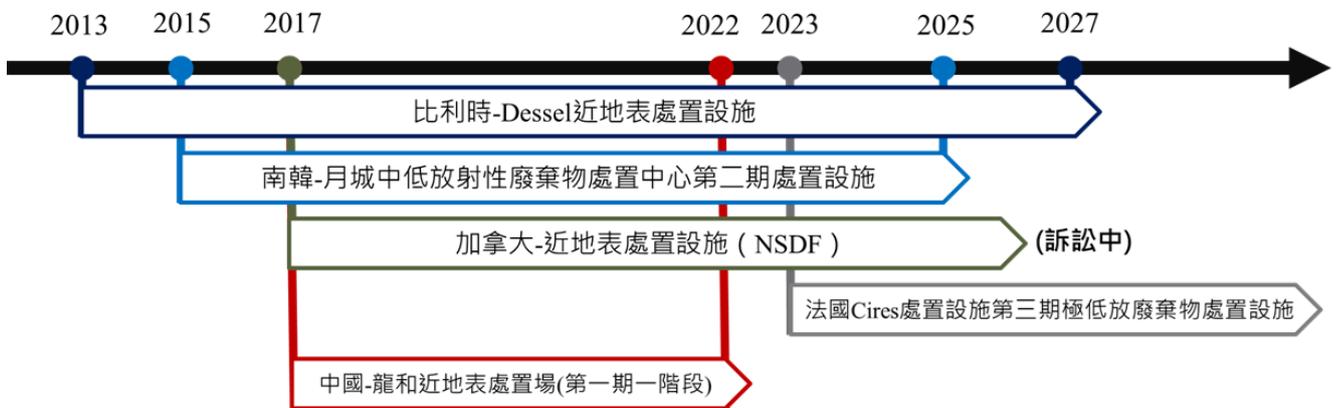
(5) 氣候

報告列出高溫、強降雨、嚴寒、雷擊及森林火災等氣候風險，但未與 Cires 處置設施活動直接相關。評估單位建議，應將氣候變遷預測納入設施運作及封存期的整合評估，至少延伸至停運後 30 年。

2.2 各國近地表處置安全評估案例重點

為掌握國際間近地表處置設施於申請許可階段之安全評估作業實務與最新發展趨勢，本節彙整加拿大、比利時、南韓、中國及法國等國近期推動、建造或申請許可的代表性近地表處置案例，整理其在安全評估層面的重點作法與技術特性，本計畫將蒐整到之國際案例，依其規劃至完工之間的工作歷時，分別整理於 2.1 節圖 2.1、圖 2.4、圖 2.9、圖 2.13 及圖 2.15 中，並以圖 2.17 呈現其概況。各案例均依循不同國家法規與導則，採用符合國際標準的方法論，並考量場址特性、放射性廢棄物類型及長期安全需求，發展具國別特色的安全評估體系。分析內容涵蓋環境影響預測、長期安全模擬、設施設計與工程防護策略、不確定性處理，以及人為入侵與極端事件模擬等。透過蒐集整理這些國際資訊，歸納並研析其重點，提供我國未來推動近地表處置設施時，在法規研擬、技術準則及審查實務方面的參考依據。

各國近地表處置設施申請至開始營運時間線



資料來源：本計畫自製

圖 2.17 本計畫整理各國之近地表處置設施從規劃至處置設施完工之歷時

1. 各國可蒐整之文獻比較

本計畫彙整了各國關於近地表處置安全分析的相關報告。然而，由於各國公開資訊的完整性與可得性不一，所蒐集到的資料可能因報告目的與導向不同而有所差異，相關比較如表 2.6。加拿大 NSDF 計畫的環境影響評估報告涵蓋多個面向，包括環境影響分階段分析、設施設計審查、替代方案比較、社會參與及監測計畫等，此外亦針對原住民族參與、劑量評估與事故風險情節整合等議題進行深入探討，並依據 IAEA 建議架構撰寫安全論證。比利時 Dessel 處置設施則以其多層級安全論證架構著稱，報告區分為四個層級。從技術至非技術、工程面到制度面，構成一套完整的論證體系。該論證亦經由 OECD/NEA 組織的國際專家審閱，重點包括工程障壁設計、長期穩定性評估及多情節模擬分析等。此外，在安全概念與功能角色劃分方面，比利時亦提出清晰的「主要」與「輔助」功能標記制度，作為後續評估依據。中國龍和近地表處置場雖目前公開資訊有限，但其建設規劃與安全評估顯示出分期實施、設計審查與運轉驗證等標準化流程，且亦參考 IAEA 相關導則進行評估，顯示中國正逐步邁向符合國際低放處置的安全管理體系。法國方面，ANDRA 於 2021 年發布的協商成果報告，說明地方溝通與回饋機制的具體內容，並針對民眾關切(如設施位置、交通風險與生態保護)提出後續應對與改進措施。2023 年，法國環境主管機關 AE 發布審查意見報告，針對選址合理性、替代方案分析、容量需求預測及潛在環境影響等進行技術審查，並建議強化對氣候變遷風險與生態修復議題的應對。

表 2.6 各國可蒐整之文獻比較

國家	文獻與分析重點
加拿大 (NSDF)	<ul style="list-style-type: none"> • 環境影響報告書涵蓋分階段環境分析、設施設計、替代方案、事故風險等 • 原住民族參與社會溝通納入評估流程 • 安全論證依 IAEA 建議撰寫，結構完整 • 考量氣候變遷對處置系統之影響
比利時 (Dessel)	<ul style="list-style-type: none"> • 安全論證依受眾對象分層級架構，橫跨技術與制度面 • 各階段明確區分「主要」與「輔助」安全功能 • 強調工程障壁設計、多情節模擬與長期穩定性分析 • 經 OECD/NEA 國際專家同儕審查
中國(龍和)	<ul style="list-style-type: none"> • 公開資訊較少，但顯示出遵循 IAEA 導則 • 展現中國逐步與國際標準接軌之趨勢
法國(Cires)	<ul style="list-style-type: none"> • 強調地方參與、民眾溝通與回饋機制 • 回應關切面向：設址合理性、交通風險、生態保護 • 審查意見建議納入氣候變遷與生態修復評估
南韓(月城)	<ul style="list-style-type: none"> • 可蒐整之資訊較少，處置設施採地下、近地表及掩埋場之綜合規劃

資料來源：本計畫自製

2. 安全評估技術架構比較

各國近地表處置設施的安全評估案例，雖普遍採用 IAEA 建議的評估基本架構，但在實際應用上，仍因應各自的法規體系、處置設施類型及場址條件，展現出具體差異與共通特點。以共同點來說，多數國家的安全評估均涵蓋「設施設計階段」、「運轉階段」與「封閉後長期安全階段」，並進行情節模擬，涵蓋正常演化情節、人為入侵情節及極端低機率假設情節等。此外，各國均強調「多重障壁」原則，並透過敏感度分析與不確定性管理，以提升評估結果的可信度與健全性。

在差異方面，加拿大的環境影響評估較著重於法規遵循、公眾參與、不確定性管理，以及設施設計的可調整性；比利時 Dessel 設施的安全論證強調報告的分層結構與模組化管理機制，並建立功能矩陣與角色分類系統；中國龍和近地表處置場的環境影響評估報告著重於長期核種遷移與極端條件(如風化、鑽井)下的劑量模擬，並提出相應的控制標準；法國則將設施擴建計畫納入 2022 - 2026 年國家低放射性廢棄物管理計畫的整體規劃中。

整體而言，儘管各國在方法架構上大致相似，實際作法仍依據國內制度與地理條件進行調整，顯示出在遵循 IAEA 原則的共同基礎下，各國保有實務操作的彈性與應變能力，對我國未來建構審查制度與技術指引具有重要的參考價值。

3. 安全評估時間尺度比較

有關各國近地表處置設施之安全評估尺度：

- (1) 本章綜整之加拿大 EIS 中，對於安全評估尺度的說明較為有限。然而，在本計畫的第三章中，將進一步研析「安全評估報告—近地表處置設施安全論證(NSDF)」(Kingsbury et al., 2021)，該報告中清楚說明了其安全評估所依據的主要準則及其他綜合性考量。例如，報告參考了 CNSC 「REGDOC 2.11.1」指引，規定針對放射性廢棄物可能引發的未來影響，其評估應涵蓋預計最大影響發生的時間段；另亦參考 IAEA 的「SSG-23」導則，指出即使發生機率較低或程度較輕微的情況(如侵蝕或人為侵入)亦不可排除，因其可能對設施完整性造成影響。因此，幾千年的建模期間仍被視為合理範圍。綜合導則規範與報告內部考量，加拿大最終採用 10,000 年作為其安全評估時間框架；
- (2) 本計畫所蒐集的資料皆為同儕審查報告或政府發布的正式文件，雖未明確指出安全評估所採用的時間尺度，但可透過報告內容進行推敲。例如，比利時針對 Dessel 處置設施之安全報告中定義安全概念(圖 2.7)，說明了封閉階段中各時期的安全要求，包括封閉後 100 年、350 年、800 年以及數千年等不同比例的時間尺度；
- (3) 韓國可蒐整到的資料有限，僅蒐整到處置設施許可程序審查的摘要，以及對民眾公開之年度報告，內容未涉及到安全評估之內容；
- (4) 中國龍和近地表處置場環境影響報告書中並未明確說明其安全評估之尺度，但依其第六章「環境影響」章節中，評估內容包含地下水途徑影響及闖入情節影響之結果顯示，針對核種從處置單元釋放進行 10,000 年的模擬，各核種所導致公眾攝取到的劑量進行 100,000 年的模擬；
- (5) 最後，法國 Cires 處置設施第三期極低放廢棄物處置設施之相關資訊，本計畫僅

蒐整到兩份文件，其一為審查報告，另一份為對民眾開放之報告，內容主要針對此擴建計畫進行說明。兩份報告皆未提及安全評估相關之內容。

4. 評估假設情節

針對評估情節的假設，各國在架構上大致上依循國際原子能總署建議之安全評估框架，但在具體執行層面，仍存在部分差異與共同趨勢。舉例來說，各案例均考量不同的時間尺度與不確定性來源，並透過多種評估情節進行模擬分析，包括：

- 正常演變情節：模擬處置設施正常運轉期間，以及場址因自然作用發生的長期變遷；
- 替代演變情節：模擬偏離預期之環境或設施變異，例如覆蓋層劣化或極端氣候事件等情況等；
- 人為入侵情節：評估未來人類活動對處置設施可能造成的潛在干擾與影響；
- 極端低機率假設情節：針對在最保守條件下，系統安全功能失效或不足的情況進行分析，以測試系統的極限。

5. 處置設施設計年限要求

各國對近地表處置設施的設計年限規定不一，反映其在法規制度、技術能力及場址條件等方面的差異。廢棄物的類型與放射性特性亦直接影響設計年限與監管要求。廢棄物活度與核種組成決定廢棄物接收標準(Waste Acceptance Criteria, WAC)、工程底襯與覆蓋層設計，以及監測期限長度。

表 2.7 為本計畫蒐集到的國家中，其預定處置廢棄物類型、設施設計及監管年限之比較。多數先進國家採「多重工程障壁與天然障壁並用」的概念，常見設計形式包括混凝土窖與 ECM，亦有地下筒倉或壕溝型式。不同國家在設計年限及安全評估模擬時程上差異顯著：部分國家以數百年(如比利時、法國)作為主動監管或設計參考；加拿大 NSDF 則明確提出約 550 年的設計年限，並在安全評估中延伸模擬至數千年至一萬年，以涵蓋極端與長期情節。

具體而言，加拿大 NSDF 處置設施設計年限為 550 年，封閉後須實施長期監測與管理，以確保封閉後監管階段之安全功能持續發揮作用。比利時 Dessel 處置設施除 50 年營運期外，封閉後將持續至少 250 年的監測與控制，整體時間尺度超過 300 年。法國 Cires 處置設施未明確揭示設計年限，但同屬法國的 Centre de l' Aube 處置設施(CSA)則以 300 年作為主動監管期的設計標準。相較之下，韓國與中國案例的公開文件對設計年限的具體揭露較為有限。中國龍和近地表處置場(第一期第一階段)在申照文件中提及封閉後環境影響評估，初步規劃龍和近地表處置場封閉後之監護期為 300 年。韓國月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施雖未明載設計年限，但審查過程中強調其耐震設計與地下水防護功能。

表 2.7 各國之處置廢棄物類型、工程設施及處置年限比較表

國家/設施	預定存放之廢棄物類型	設施設計類型	設計年限/監管時程
加拿大 (NSDF)	固體低放射性廢棄物(含除役、環境修復與少量場外來源)	ECM 多重底襯與覆蓋層結構	營運期 50 年，設計年限 550 年，安全評估時間尺度延伸至 10,000 年。
比利時 (Dessel)	A 類低至中放射性、短半衰期廢棄物(半衰期 <30 年)	地上混凝土處置窖 重工程障壁與模組化設計	營運期約 50 年，封閉後監測控制 250 年，總期程約 300 年以上。
中國 (龍和一期)	核電廠運轉產生之低放射性固體廢棄物(水泥固化包件)	混凝土處置窖 多層防護結構	報告中初步規劃龍和近地表處置場封閉後之監護期為 300 年。
法國 (CSA)	短半衰期中-低放射性廢棄物	以混凝土窖式與多重障壁設計為主	由 ANDRA 駐守，並進行為期 300 年的主動監管。
南韓 (月城二期)	低放射性廢棄物及以下等級廢棄物	近地表混凝土處置設施	未明確揭示。

資料來源：本計畫自製

6. 我國低放處置可參考之重點

我國低放射性廢棄物目前雖以坑道處置作為推進方向，但為因應未來可能之政策變動，本計畫綜整各國近期近地表處置安全評估相關文獻。透過分析這些國際間的近地表處置實務經驗，可為我國未來政策推動及處置技術提供參考，包含：

- (1) 針對安全論證的分層架構與模組化建構方式，以比利時 Dessel 處置設施為例，其安全論證採用四層級報告架構，依據讀者對象與技術深度進行分層撰寫，並透過模組化設計，系統性整合安全功能與場址特性。此作法有助於提升安全論證的透明度與可追溯性，對我國未來進入近地表處置設施申照階段時撰寫安全報告，具重要參考價值。
- (2) 關於分階段設施規劃與處置容量設計，研析加拿大 NSDF 處置設施、法國 Cires 處置設施、中國龍和近地表處置場及南韓月城中低放射性廢棄物處置中心等案例可發現，多數處置設施皆採分階段開發策略。例如，加拿大 NSDF 設施以兩階段建置共計 1,000,000 立方公尺的處置容量，並評估其設計年限達 550 年以上。透過嚴謹的工程與地質評估進行長期安全模擬，展現其涵蓋設計、運轉與封閉後階段的整體規劃邏輯。此種規劃模式對於我國未來設施之容量設計與處置年限管理提供具體參考架構。
- (3) 多情節分析與不確定性管理方法，如比利時、韓國、加拿大與中國等案例，皆針對不同情節進行模擬分析，透過情節評估預測放射性核種與有毒污染物之潛在劑量暴露。此類風險導向評估模式有助於提升我國未來安全評估之韌性與包容性，亦有助於回應不同未來不確定狀況。
- (4) 強化原住民與公眾參與機制。以加拿大 NSDF 為例，透過多語言平台、能力建構資金支持與早期互動機制，有效深化原住民族參與，並提升環境影響評估及整體社會接受度。對臺灣而言，未來處置設施如涉及地方溝通與原住民族議題，建議應建立制度化、前瞻性的參與機制，作為政策落實之關鍵。
- (5) 各國在安全評估尺度的設定上雖略有差異，但大多仍以 IAEA 所訂定之規範為基

礎，並配合各自之法規體系進行評估。其評估的時間範圍通常涵蓋數千年至十萬年不等。我國未來若納入近地表處置概念，亦可參酌此類國際作法作為政策推動之依據。

- (6) 在長期安全評估中，法國特別強調將「氣候變遷」納入評估架構。其監管機關 ASN 要求，並由 ANDRA 於安全論證中將氣溫、降雨與地下水位變化列為重要不確定性因子，並模擬其對屏障與水文條件的長期影響。比利時與加拿大亦考量氣候變化影響，前者模擬降雨與地下水變化，後者評估凍融與降雨對覆土層穩定性的作用。我國位處熱帶與副熱帶季風氣候區，常受強降雨與颱風影響，未來安全評估可參考上述作法，將氣候變遷納入長期不確定性分析，以提升評估之完整性。

第三章 加拿大低放廢棄物近地表處置申照階段安全評估案 例研析

NSDF 計畫由加拿大原子能有限公司(Atomic Energy of Canada Limited, AECL)授權執行。AECL 為加拿大聯邦政府所屬國營機構，負責國內放射性廢棄物管理與核設施除役等任務。加拿大核能實驗室(Canadian Nuclear Laboratories, CNL)則為一家依合約負責 AECL 轄下核能場址、設施與資產之管理與營運的私營公司。放射性廢棄物的產生者與持有者，須承擔處置設施相關資金的提供責任，並負責設施的組織、管理與營運。NSDF 計畫旨在加拿大白堊河實驗室(Chalk River Laboratories, CRL)場址內建立一座新設施，以確保公眾與環境安全為前提，對現有及未來產生的低放射性廢棄物進行永久處置，並接收少量來自場外的廢棄物。

依據加拿大相關法規(如「加拿大環境評估法」)與國際標準(如國際原子能總署「SF-1」(IAEA, 2006))，處置單位須就 NSDF 計畫辦理安全論證，以符合加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)之許可與環境評估要求，並確保對人類健康與環境的長期安全性。CNL 於 2021 年依據上述法規與指引發布「安全評估報告—近地表處置設施安全論證(NSDF)」(Safety Assessment Report – Near Surface Disposal Facility Safety Case – Near Surface Disposal Facility (NSDF), Revision 2)(Kingsbury et al., 2021)。根據「專案活動指定法規」第 37(b)條(Regulations Designating Project Activities 37(b))，NSDF 計畫被歸類為「指定專案計畫」。依 2012 年版「加拿大環境評估法」(Canadian Environmental Assessment Act)第 15 條規定，CNSC 為該專案之主管機關。其監管審查程序核心之一，即為依「加拿大環境評估法」實施完整環境評估，並以「環境影響評估報告書(Environmental Impact Statement, EIS)」(Golder Associates Inc., 2021)呈現其成果。

因此，本章以「安全評估報告—近地表處置設施安全論證(NSDF)」(Kingsbury et al., 2021)為主軸，並輔以前一章所介紹之 EIS 報告書(Golder Associates Inc., 2021)，研析與統整 CRL 場址 NSDF 設施與處置安全相關之重要議題，例如探討其所依循之法規依據、參考導則、評估方法及流程，並歸納其對我國審查重點與管制要項可供參照之處。

3.1 加拿大 NSDF 安全論證主體架構

本節針對「安全評估報告—近地表處置設施安全論證(NSDF)」(Kingsbury et al., 2021)報告書為對象，其預計之處置廢棄物類型、評估方法、時間架構及管理系統相關架構等資訊進行說明。內容如下所述：

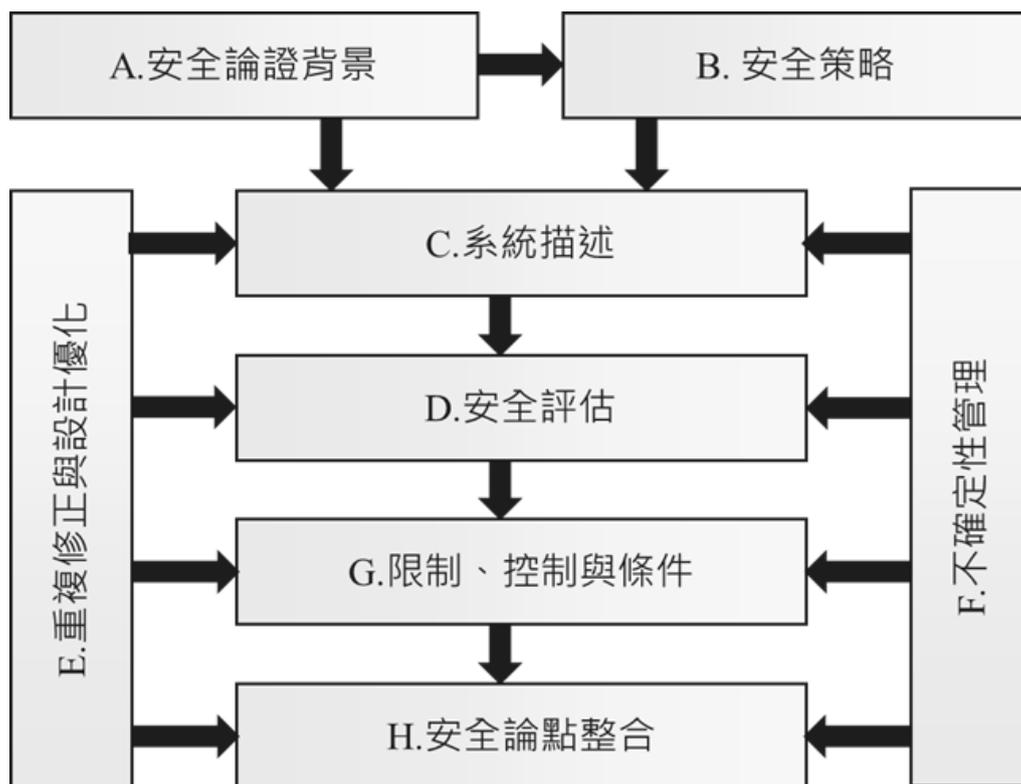
1. 報告主要架構

「安全評估報告-近地表處置設施安全論證(NSDF)」的目的在提出一套整合性的安全論證及其支撐證據，證明 NSDF 設施在各階段運作中具備可接受的安全性。該報告架構係參照國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)所建議的安全論證架構撰寫，如圖 3.1 所示，內容共分為八個章節：

- 「第一章 前言」：說明計畫總覽、目的、安全目標與原則、法規背景、設施於全處置期間的規劃、報告架構，以及縮寫與名詞定義等內容；
- 「第二章 安全策略」：概述支撐安全論證所採用的方法與策略，並說明與放射性及非放射性危害相關的法規要求與可接受標準；
- 「第三章 系統描述」：說明場址特性、各階段(建造、營運與封閉)之計畫內容，以及確保安全所需的管理制度與設施安全功能；
- 「第四章 安全評估」：總結設施於營運前與營運後階段的安全評估成果，這些成果構成安全論證的科學與技術基礎。評估結果與第二章及第三章中所述的接受標準與安全原則進行對比分析；
- 「第五章 反覆修正與設計最佳化」：說明 NSDF 設計的最佳化過程與其合理性。雖然其他章節已呈現最新設計成果，本章則著重於相關設計決策背後的依據與演進過程；
- 「第六章 不確定性的管理」：針對安全論證中的不確定性進行分類與評估，依其來源、性質與影響程度進行分析，所採方法包括定量分析、專業判斷，或兩者併用；

- 「第七章 限制、控制與條件」：列出適用於整個處置期間所有與安全相關工作的限制、控制措施與條件，包括針對可接受廢棄物類型所制定的技術與操作要求；
- 「第八章 安全論證的整合」：統整前述章節之安全論證成果。由於安全論證本質上為一項整合性程序，本章亦說明現階段證據與分析的限制，並指出未來可能的修訂與優化方向。

「安全評估報告-近地表處置設施安全論證(NSDF)」(Kingsbury et al., 2021)涵蓋設施的預封閉期與後封閉期，並預定於整個處置期間內根據需要持續更新。截至報告出版時，NSDF 所處階段為向 CNSC 提出建造許可申請。該安全論證報告為 CNSC 許可申請文件中的重要組成部分。



資料來源：翻譯自 IAEA (2024)

圖 3.1 放射性廢棄物處置設施安全論證的主要組成

2. 相關導則及法規

NSDF 計畫之監管法源由加拿大國會立法授權，主要透過「核子安全與管制法」與「加拿大環境評估法」實施，CNSC 為該計畫之主管機關。NSDF 被列為「加拿大環境評估法」指定需進行環評的開發計畫，依該法進行環境評估。雖然該法已於 2019 年由「影響評估法」計畫於法規更替前即已啟動，其環評程序可依原法完成，並已獲 CNSC 確認。

CNSC 與 NSDF 計畫申請單位訂有行政協議，明訂環境評估與許可審查程序、資料提交流程及主要審查里程碑。申請建造許可的主體為 CNL，該設施預定用於處置低放射性廢棄物。環評及建造許可最終將由 CNSC 委員會審查與核准。CNSC 就放射性廢棄物管理訂有六項監管原則，包含：(1) 儘量減少廢棄物產生；(2) 管理方式應依廢棄物潛在危害(如放射性或化學性質)而定；(3) 安全評估應涵蓋預測最大風險之時期；(4) 預測影響不得超出監管標準規定；(5) 須及早規劃、經費投入並實施預防性管理措施；以及(6) 不得對他國造成超過國內可接受範圍之跨境影響。NSDF 計畫的安全論證與監管程序係依據加拿大國內及國際相關法規與導則，確保設計、建造與長期營運皆符合國家規定與國際安全標準。

(1) 加拿大國內相關導則

CNSC 頒布之「REGDOC-2.11：加拿大放射性廢棄物管理與除役框架」(CNSC, 2018a)概述加拿大放射性廢棄物治理之監管架構。針對長期安全評估，另有「REGDOC-2.11.1：放射性廢棄物管理，第 III 冊：長期安全評估」(CNSC, 2018b)，目的在協助新申請者或許可延展案執行設施之長期安全評估。該導則訂有三項長期安全管理基本原則：

- 廢棄物管理之適切性應考量其潛在放射性、化學與生物危害對人類健康、環境與國家安全之影響；
- 應對健康與環境潛在影響進行評估，並涵蓋預測最大風險期間；
- 所有預測影響皆不得超出當時監管標準之容許範圍。

加拿大監管體系高度重視技術標準，特別是由加拿大標準協會(Canadian

Standards Association, CSA)制定之共識標準，作為「核子安全與管制法」及其相關法規與許可條件的補充依據，規範設施設計與功能要求，並供 CNSC 評估申請人技術能力之參考。相關法源依據包括：

- 「核子安全與管制法(Nuclear Safety and Control Act)」(Government of Canada, 2017a)
- 「一般核子安全與管制法規(General Nuclear Safety and Control Regulations)」(Government of Canada, 2015a)
- 「輻射防護法規(Radiation Protection Regulations)」(Government of Canada, 2021)
- 「第一類核設施法規(Class I Nuclear Facilities Regulations)」(Government of Canada, 2017b)
- 「核物質與輻射設備法規(Nuclear Substances and Radiation Devices Regulations)」(Government of Canada, 2015b)

除 CNSC 所屬法規外，NSDF 計畫亦需遵守其他聯邦機關制定之相關法令，包括：

- 「加拿大環境評估法(Canadian Environmental Assessment Act (Government of Canada, 2012)」；
- 加拿大環境部(Environment Canada)：「加拿大環境保護法(Canadian Environmental Protection Act, 1999)」；(Government of Canada, 1999)
- 加拿大環境部：「候鳥公約法(Migratory Birds Convention Act, 1994)」(Government of Canada, 1994)；
- 加拿大環境部：「瀕危物種法(Species at Risk Act, 2002)」(Government of Canada, 2002)；
- 加拿大環境部：「多氯聯苯(PCBs)法規(Polychlorinated Biphenyls (PCBs)

Regulations, 2008)」（Government of Canada, 2008）；

- 加拿大環境部：「漁業法(Fisheries Act, 1985)」（Government of Canada, 1985）；
- 「加拿大勞動法典(Canada Labour Code)」和「加拿大職業健康與安全法規(Canada Occupational Health and Safety Regulations)」（Government of Canada, 2009）。

此外，NSDF 計畫亦須符合安大略省相關法規與技術標準，包括：

- 「安大略省職業健康與安全法(Ontario Occupational Health & Safety Act)」及其「建設計畫法規(Regulations for Construction Projects)」（Government of Ontario, 1990）；
- 「安大略省法規232/98：2011年掩埋場規定(Ontario Regulation 232/98, 2011 Land-filling Sites)」（Government of Ontario, 2011）；
- 「掩埋場標準(Landfill Standards, 2012)」（Government of Ontario, 2012）；
- 「技術標準與安全法(Technical Standards and Safety Act, 2000)」（Government of Ontario, 2000）；
- 「雨水管理規劃與設計手冊(Stormwater Management Planning and Design Manual, 2003)」（Government of Ontario, 2003）。

(2) 國際導則參考

NSDF 計畫亦參考多項國際原子能機構發布的安全導則與技術報告，以確保符合國際最佳實務與安全標準，涵蓋如下：

- SSG-23 「放射性廢棄物處置的安全論證與安全評估(The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste)」（IAEA, 2012）
- SSG-29 「放射性廢棄物近地表處置設施(Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste)」（IAEA, 2014a）

- SSR-5 「放射性廢棄物的處置(Disposal of Radioactive Waste)」 (IAEA, 2011)
- SSG-31 「放射性廢棄物處置設施的監測與監視(Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities)」 (IAEA, 2014b)
- TECDOC-1814 「近地表放射性廢棄物處置的安全論證內容與範例(Contents and Sample Arguments of a Safety Case for Near Surface Disposal of Radioactive Waste)」 (IAEA, 2017)
- 「近地表處置設施安全評估方法(Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, ISAM, Volume 1)」 (IAEA, 2004a)
- 「近地表處置設施安全評估方法(Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, ISAM, Volume 2)」 (IAEA, 2004b)
- SF-1 「基本安全原則」 (IAEA, 2006)

3. 安全策略

NSDF 計畫所採行的安全策略，旨在確保並證明低放射性廢棄物及其處置系統於整個處置期內的安全性。該策略涵蓋整體管理、選址、設計與安全評估等面向，並為計畫在規劃、開發、發證、營運、封閉、除役及封閉後管理等關鍵階段提供決策依據。CNL 的管理系統確保所有活動均依品質保證(Quality Assurance, QA)體系執行。該安全策略的主要目標包括：

- 提供公眾與環境最高程度的安全與防護；
- 確保工作人員之健康與安全；
- 證明設施符合相關安全目標、標準與法規要求；
- 證明不確定性已獲妥善管理，以確保安全；
- 建立對處置系統長期安全性的信心。

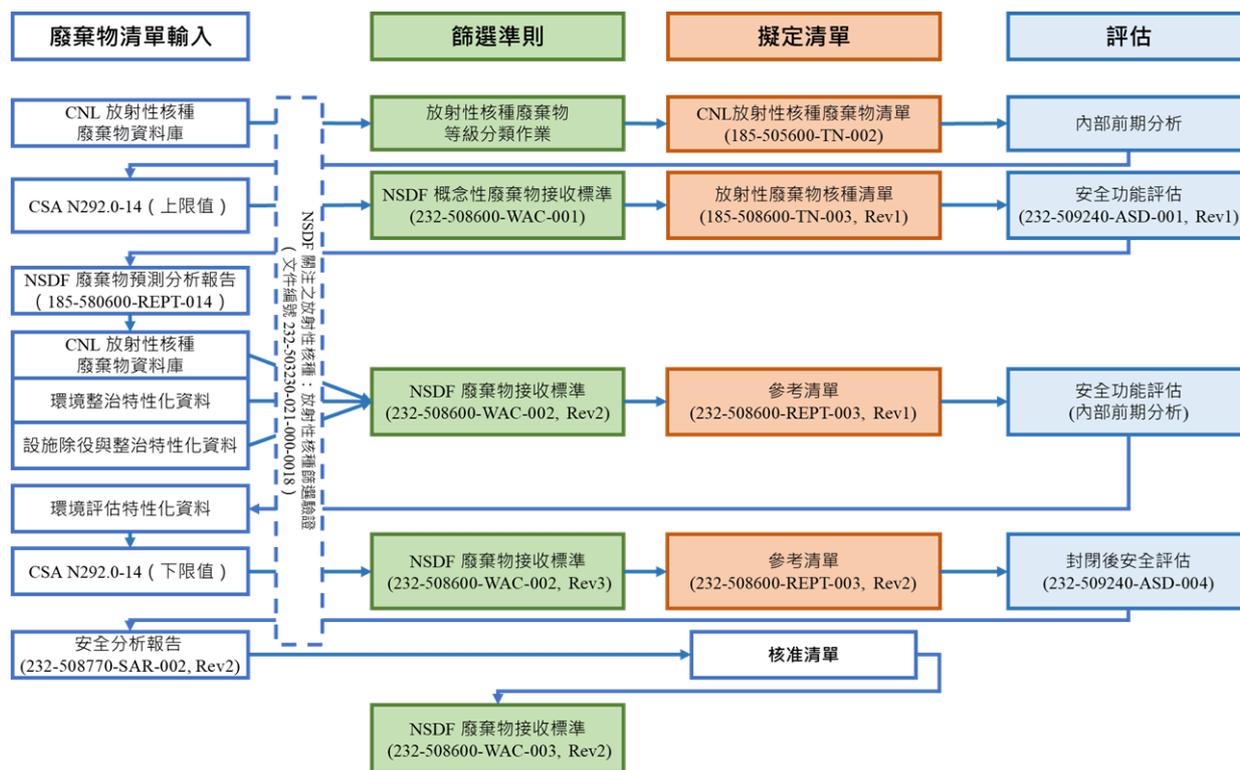
NSDF 安全策略以達成安全目標、安全原則及法規要求為核心，涵蓋選址、設計、建造、運轉與封閉等階段，並確保系統運作不超出安全評估所設定的接受準則範圍。選址與設計策略重點在於建構具高度可靠性與韌性的處置系統，於合適場址結合工程與天然障壁，實現多重安全功能與縱深防禦，有效包覆並隔離廢棄物。設計程序採用良好工程實務及迭代優化原則，以提升系統、結構與元件(SSCs)之安全性與特性。安全評估策略方面，則參照加拿大國內與國際相關法規與指引，針對處置系統在正常運作、事故情節及長期演化情節下之安全性進行分析，以驗證其符合既定之安全評估準則。

4. 處置廢棄物類型

廢棄物處置之場址特徵、工程設計，甚至於管理強度等方面，處置廢棄物的類型為重要的關鍵。明確確定處置廢棄物之類型後，才能依據廢棄物之特性，進行攸關安全之場址特性參數、工程設計及處置年限等進行安全評估。因此本段重點優先整理 NSDF 預計處置之廢棄物類型。確立廢棄物種類後，方可討論後續工作。NSDF 的放射性廢棄物清單是依據以下步驟進行開發：

- 彙整從廢棄物包件記錄、設施除役及環境修復項目中獲得或推導出的特徵化資料。
- 依據WAC評估相關資料，彙報總放射性(total radioactivity)及放射性核種濃度等資訊。
- 評估清單是否符合長期安全標準，以確認放射性清單在封閉後安全評估中提供可接受的結果。
- 制定核准清單(Licensed Inventory)，作為NSDF最大放射性清單限代之代表。

NSDF 擬定清單內容隨著計畫推進不斷調整，這些變化主要依據多項資料而形成，包括 NSDF 之 WAC 的制定、EIS 草案審查所獲得的公眾意見，以及後續安全評估模型的分析結果。圖 3.2 說明了開發 NSDF 參考清單與最終核准清單的逐步迭代過程。



資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

圖 3.2 NSDF 開發參考清單之迭代流程圖

透過這個流程，預計處置於 NSDF 的總放射性比最初相比顯著減少。減少主要受到後續安全評估(PostSA)的結果影響，目的是在劑量接受標準方面建立更大的安全邊際。為了劑量優化，通過移除較高活性廢棄物(初始廢棄物清單中含有少量 ILW)，解決聯邦、省級政府和公眾提出的處置 ILW 安全性的擔憂。為了提供更多信心，確保 NSDF 廢棄物清單僅包含 LLW，以符合 IAEA 和加拿大標準協會(CSA)對 LLW 的最低範圍。NSDF 之 WAC 在表 3.1 中規定了單一放射性核種的限值；或者在混合放射性核種的情況下，組成放射性核種限值依照公式 3-1 中定義的「分數總和」規則的總和必須不超過 1，以顯示符合要求。濃度限值的計算應排除包件和障壁的品質。

$$\sum_{i=1}^n \frac{\text{放射性核種 } i \text{ 的濃度}}{\text{放射性核種 } i \text{ 的 WAC 限值}} < 1 \quad 3-1$$

表 3.1 NSDF 廢棄物中放射性核種濃度限值

<p>散裝廢棄物和不需受滲出污水控制之廢棄物包件的濃度限值</p>	<ul style="list-style-type: none"> - α放射放射性核種：100 Bq/g - 長半衰期之β及γ放射放射性核種：1,000 Bq/g ($t_{1/2} > \text{Cs-137}$) - 短半衰期之β及γ放射放射性核種：10,000 Bq/g ($t_{1/2} \leq \text{Cs-137}$) - H-3：100,000 Bq/g
<p>需受滲出污水控制之廢棄物包件的濃度限值</p>	<ul style="list-style-type: none"> - α放射放射性核種：400 Bq/g - 長半衰期之β及γ放射放射性核種：10,000 Bq/g ($t_{1/2} > \text{Cs-137}$) - Cs-137：10,000 Bq/g for Cs-137 - Sr-90：10,000 Bq/g for Sr-90 - H-3：10,000,000 Bq/g

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

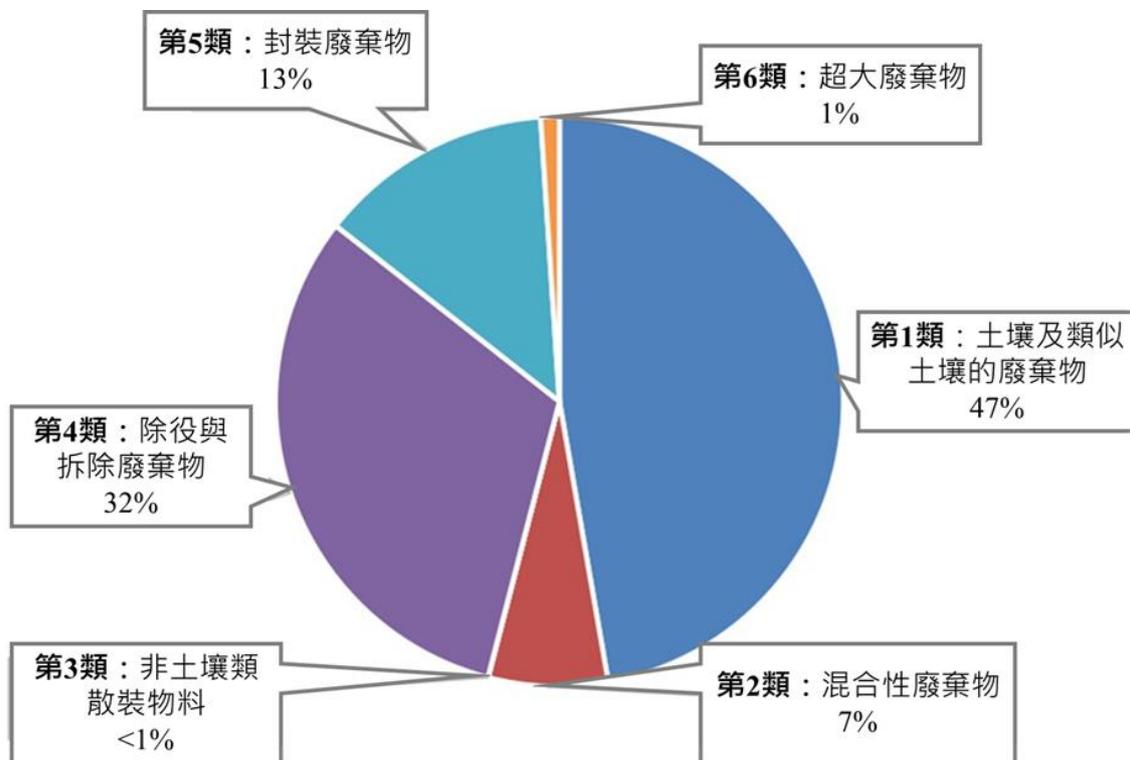
NSDF 的廢棄物根據材料類型又可劃分為六種類型，圖 3.3 為 NSDF 中各類廢棄物類型預計占比圖。各類的廢棄物分別為：

- **第1類廢棄物**：土壤及類似土壤的廢棄物，包括受污染土壤及具類似性質者，可直接放置於處置區中。
- **第2類廢棄物**：混合性廢棄物，至少50%為土壤或類似物質，含有不同程度放射性，需比第1類更高層級之處理。
- **第3類廢棄物**：非土壤類散裝物料，如製程廢棄物、高有機或高可壓縮、流動性廢棄物等。
- **第4類廢棄物**：除役與拆除廢棄物，包括混凝土、瀝青、磚塊、木材、鋼材、設備及管線等建築材料。
- **第5類廢棄物**：封裝廢棄物，指經堅固包裝處理者。
 - **不需受滲出污水控制之廢棄物包件**：可維持封裝至最終處置前，如 ISO 集裝箱、B-25鋼箱、205L鋼桶。
 - **需受滲出污水控制之廢棄物包件**：可於覆蓋層完成前(約5 - 10年)提供防滲與封存功能。

- **第6類廢棄物**：超大廢棄物，不符合前述分類者，依尺寸與形狀區分，須經特別程序核准後處置。

NSDF 廢棄物參考清單和授權清單之規定遵循導則 SSG-23 之規定，該表提供了：

- **NSDF參考清單**：列示處置及封閉時主要放射性核種之總活度，作為設計與安全分析依據。
- **NSDF授權清單**：規定處置及封閉時主要放射性核種之最大允許活度。



資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

圖 3.3 NSDF 依廢棄物類型預測的體積分配圖

5. 方法論

加拿大 NSDF 安全論證及其相關支援報告所採用的評估方法論，係依循下列導則報告之原則與架構：IAEA SSG-23 (IAEA, 2012)、CNSC REGDOC-2.11.1 第三冊(CNSC, 2018b)、「定率式安全分析(Deterministic Safety Analysis)」(CNSC, 2014)、以及 IAEA 「近

地表處置設施安全評估方法(Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, ISAM)」第一冊(IAEA, 2004a)與第二冊(IAEA, 2004b)。

有關環境效應的評估，則依據 REGDOC-2.9.1「環境保護：環境原則、評估與防護措施(Environmental Protection—Environmental Principles, Assessments and Protection Measures)」(CNSC, 2017)、CEAA 2012 所編製之「環境影響報告書編制的一般導則(Generic Guidelines for the Preparation of an Environmental Impact Statement)」(CNSC, 2016)，以及「加拿大環境評估法(Canadian Environmental Assessment Act (Government of Canada, 2012)」第 19(1) 款所列之評估因子等。

封閉前之安全分析遵循系統性與全面性的方法論，針對所有潛在危害與事故情節進行識別與評估，內容包括：

- 危害識別；
- 識別與 NSDF 設計與營運相關之主要危害與假設起始事件(Postulated Initiating Events, PIEs)；
- 對 NSDF 設施的主要危害與 PIEs 統整清單進行危害分析；
- 執行廢水處理廠之失效模式、效應與關鍵性分析；
- 在正常運轉、預期營運狀況、設計基準事故、超出設計基準事故以及設計擴展條件下，針對可信或具代表性的情節進行安全分析；
- 對分析結果進行詮釋與討論，提供系統功能、整體韌性，以及關鍵不確定性之性質與影響的相關資訊。特別著重於將所識別之安全與功能指標結果與監管接受標準進行比較。

6. 評估時間框架

依據 CNSC REGDOC 2.11.1 (CNSC, 2018b)及 IAEA SSG-23 (IAEA, 2012)，評估時間框架指的是 PostSA 所評估的時間段。其中，CNSC 的 REGDOC 2.11.1 (CNSC, 2018b)對此提供了具體指引，內容包括以下要素：

(1) 廢棄物的危險週期

長半衰期放射性核種本質上構成 CRL 及其他 CNL 場址廢棄物的放射性特徵，因此被納入 NSDF 的廢棄物處置清單中。從技術及經濟角度來看，將長半衰期核種從廢棄物中分離是不切實際的。然而，NSDF 參考清單中此類核種的濃度受到限制，並符合加拿大標準協會(CSA)與 IAEA 的相關指導方針，如 IAEA GSG-1 (IAEA, 2009)。

設施封閉後的前 100 年內，由於短半衰期核種的衰變，整體放射性濃度會顯著下降，如圖 3.4 所示。至 300 年主動監管期(Institutional Control Period, ICP)結束後，NSDF 中殘留的放射性主要為少量長半衰期核種。這些核種帶來的風險已在 PostSA 中詳細評估。計算結果顯示，輻射劑量與環境濃度均符合相關接受標準，對公眾及環境不構成不可接受風險。風險高峰期的角度而言，PostSA 先前版本顯示風險高峰約出現在封閉後 5000 年左右(障壁劣化和污染物遷移速率)。基於此，評估時間框架應至少涵蓋封閉後 5000 年。至於非放射性污染物，雖不會衰變，但其濃度已透過 WAC 及遵守「安大略省法規第 347 號」(Ontario Regulation, R.R.O., 1990)加以控制。

(2) 設施營運期長度

設施的營運階段為 50 年。

(3) 工程障壁設計年限

NSDF 的工程障壁包括多層最終覆蓋層、多層基底襯墊及圍牆堤。這些結構性安全組件(SSCs)的設計年限為 550 年。

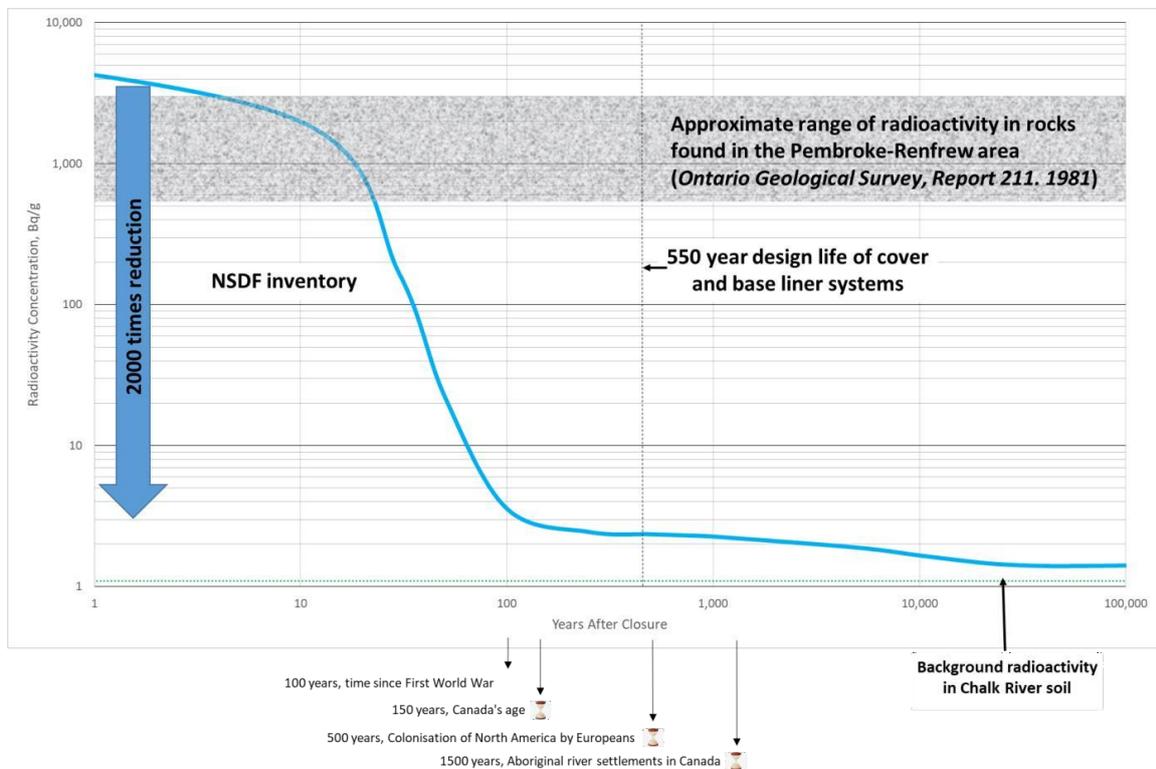
(4) 監管持續時間

放射性核種在經過十個半衰期後，其活性將衰減至原始活性的不到 0.1%，可視為基本完成衰變。以 Zr-90 與 Cs-137 為例，這兩種常見的放射性廢棄物核種半衰期約為 30 年，對應的十個半衰期約為 300 年。因此，300 年可視為合理的主動監管期。此外，IAEA GSG-1 (IAEA, 2009)指出，許多會員國假設主動監管可以有效地維持 300 年的期限。表 3.2 彙整了多個國際低放射性廢棄物陸地處置設施的主動監管期。可見，NSDF 所提議的 300 年主動監管期與其他國際處置設施大致相符，唯一例外為

英國低放射性廢棄物處置庫(LLWR)，其提議的主動監管期較短。

(5) 自然事件和人為環境變化的頻率

自然事件及其發生頻率會在 FEPs 分析過程中進行評估與篩選。在所有可能對 ECM 造成不利影響的自然事件中，大規模地震被認為具有最高的潛在風險。因此，抗震能力成為 ECM 設計中的一項關鍵考量。ECM 的設計能承受一萬年一遇地震事件所產生的力學作用。為與地震設計基準保持一致，NSDF 計畫採用 10,000 年的評估時間框架，以涵蓋設施的整個最佳功能期間。



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.4 NSDF 中處置廢棄物之放射性核種隨時間衰減示意圖

表 3.2 國際間低放射性廢棄物處置設施的主動監管期彙整

國家	處置設施	監管期(年)
西班牙	El Cabril	300
法國	Centre de l' Aube(CSA)	300
英國	LLWR	100
日本	Rokkasho	300

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

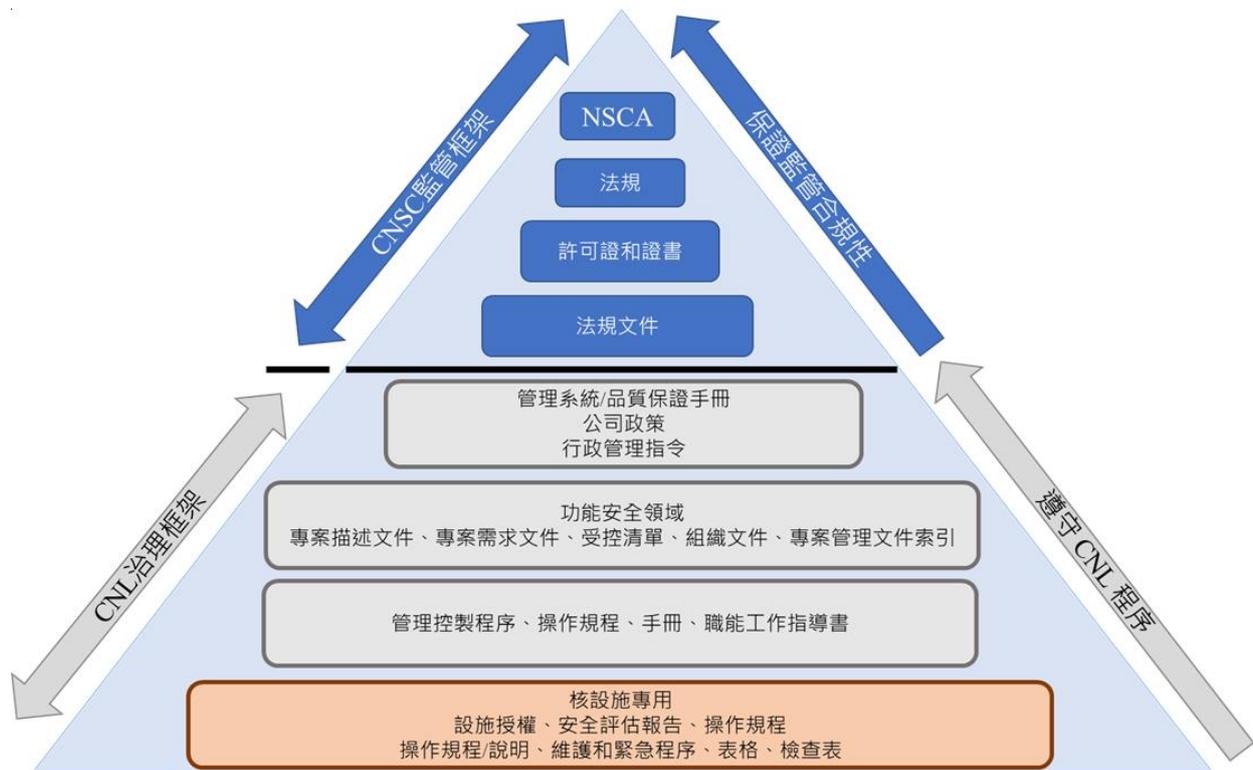
7. 管理系統和品質保證

CNL 管理系統依據圖 3.5 層級結構執行，涵蓋以文件化的政策、標準、程序與責任，提供一致的治理與問責框架，適用於從決策層到日常營運的各個環節。該系統結合 CNL 品質保證手冊(CNL, 2019a)，為高品質產品與服務的交付提供必要的管理架構。CNL 的品質保證計畫依循加拿大標準協會(CSA)頒布 N286 與 ISO 9001 的相關要求。其品質保證手冊(CNL, 2019a)說明：

- 品質保證計畫內容與最高層級的執行方法；
- 針對可能影響核能安全的活動，訂定分級品質要求，以降低風險與潛在影響；
- 透過管理系統提升安全性、可靠性與效能。分級方法依據 SSCs 的安全重要性、法規要求、風險評估、複雜度及歷史經驗，調整適用要求；

該管理系統涵蓋 CNL 各項業務，包括：

- 研發、設計工程、採購、製造、建設、資格測試與報廢；
- 廢棄物管理、檢查、維護、壽期管理及核設施營運與計畫管理。



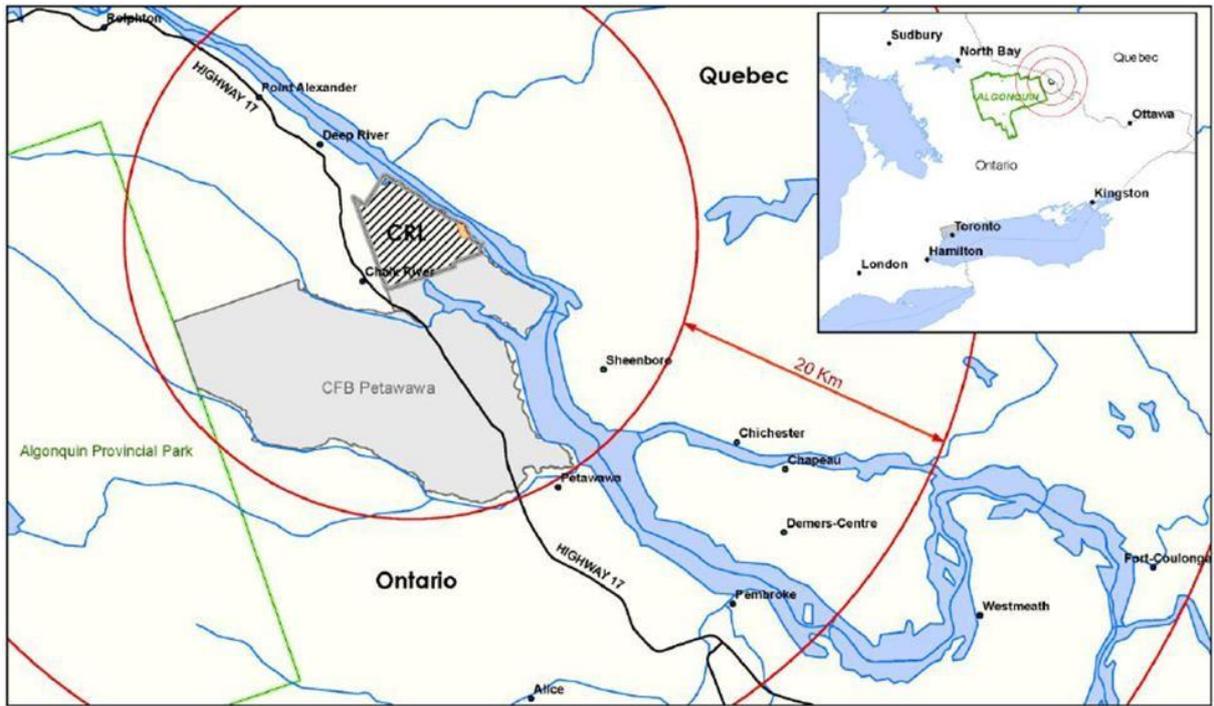
資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

圖 3.5 加拿大核能實驗室管理系統文件層級結構

3.2 系統描述

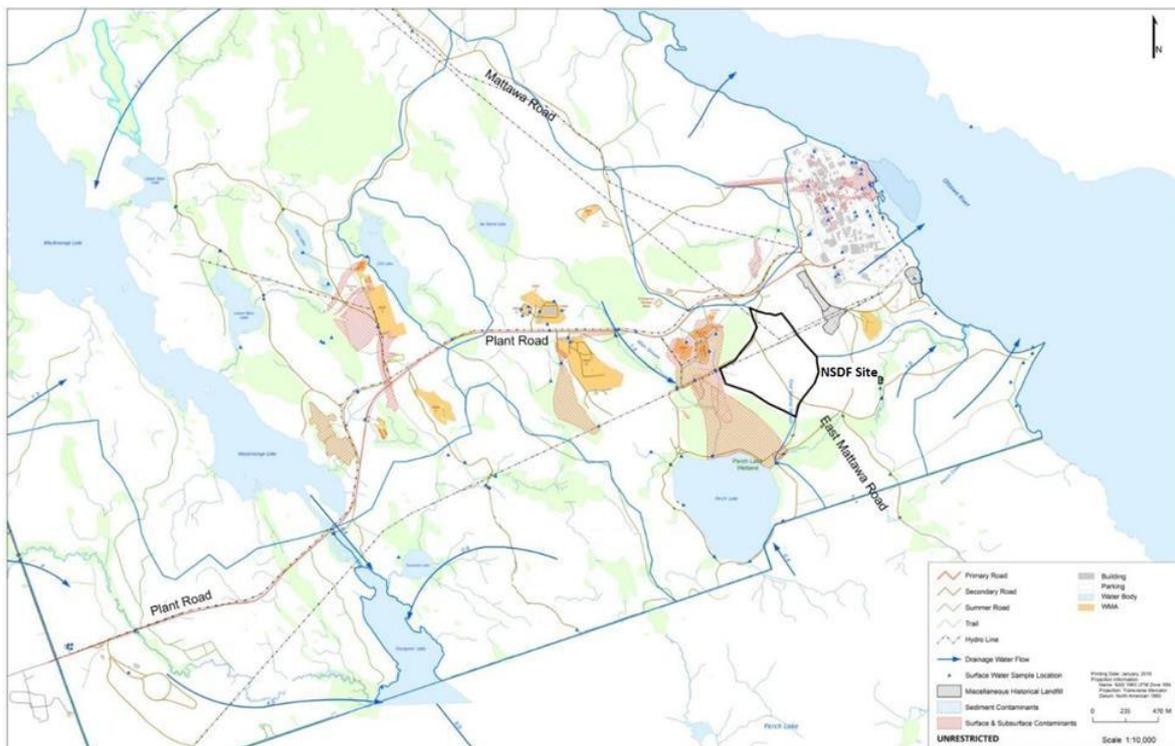
3.2.1 場址特徵

CRL 由 CNL 營運，位於倫弗魯縣(Renfrew County)，渥太華河北岸，距離渥太華西北約 185 公里。CRL 場址的總面積約為 3,853 公頃，其位置如圖 3.6 所示。NSDF 場址面積約為 37 公頃，位於 Perch 湖集水區內，場址中心至渥太華河最近點的距離約為 1.2 公里，地表高程自 Perch Lake 北側的最低點海拔 156 公尺，至分隔 Perch Lake 與渥太華河流域的山脊頂端的最高點海拔 197 公尺，NSDF 於 CRL 場址中的位置如圖 3.7 所示。CNL 範圍內除了進行的核能營運及已獲許可活動外，由於公眾進入受限制，CRL 土地不允許其他用途。CRL 場址內禁止狩獵和釣魚，亦未被原住民作為傳統用途使用。



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.6 CRL 場址與周遭城鎮之相對位置圖



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.7 CRL 場址中 NSDF 之相對位置圖

1. 人口

圖 3.6 之紅色圓線為 CRL 場址為中心，分別以 20 公里之半徑長度向外延伸的圓。聯邦國防部的佩塔瓦瓦軍營(Garrison Petawawa)位於 CRL 場址東南方，加拿大安大略省羅朗興丘自治區(Municipality of Laurentian Hills, Ontario, Canada)內的白堊河村(Village of Chalk River)則位於西南方。該地區的人口數量相對穩定，大多數圍繞 CRL 地區居住的人口位於安大略省的倫弗魯縣，人口約有 102,400 人；魁北克省則集中於龐蒂亞克縣(Pontiac County)，人口約 14,250 人。其中多集中於深河鎮(Town of Deep River)與白堊河村周邊。白堊河村約有 1,200 名居民，距離 NSDF 場址約 5 公里。深河鎮約有 4,100 名居民，距離 NSDF 場址約 10 公里，位於其西北方。佩塔瓦瓦鎮(Town of Petawawa)由原佩塔瓦瓦村、合併後的周邊城鎮與軍營組成，位於 CRL 東南方約 20 公里處，總人口約為 17,200 人。另一個較大的聚居地是彭布羅克市(City of Pembroke)，位於 CRL 東南方約 34 公里處，居民約為 14,400 人。圍繞彭布羅克的勞倫提安谷鎮區(Laurentian Valley Township)則有約 10,000 名居民。

2. 氣候

NSDF 處置設施所在之地區的氣候屬於濕潤大陸型氣候，特徵為夏季溫暖、冬季寒冷，且全年無明顯乾季。根據位於 NSDF 計畫中心點東南偏東約 3 公里的 Chalk River AECL 氣象站 30 年(1981 至 2010 年)氣候資料，該地區的年均溫約為 5.6°C；冬季均溫約為 -9.3°C，夏季約為 19.1°C。極端最低氣溫曾達 -39°C，極端最高氣溫則為 36°C。氣溫低於 -10°C 的情況曾出現在 11 月至翌年 4 月之間，而氣溫高於 30°C 的情況偶爾出現在 5 月至 8 月期間。該地區的年平均降水量約為 859 mm，其中夏季的降水量最高，約為 252 mm。最大極端日降水量亦出現在夏季，達 71 mm。冬季與春季的降水量相當，但冬季約有 70% 的降水量來自降雪。冬季的最大極端日降水量通常為 35.9 mm。CRL 地區的風向主要為西北風與東南風。冬季時，風向通常為東南風，平均風速為每小時 10 公里或更高。春季的風速與冬季相似，但風向則多為西北風。夏季風向轉為偏西，風速較低。秋季風向以東南風為主，風速在 10 月和 11 月期間逐漸增強。

3. 地質

(1) NSDF 場址特徵化歷程與資料整合

本節說明 NSDF 場址特徵化的主要原則與採用的技術方法。報告首先彙整該區域既有的地質、水文地質與地工調查成果，並評估 CRL 場址的現況與未來演變情形。CRL 場址過去已執行多項地質特徵化計畫，包括：加拿大燃料廢棄物管理計畫(Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, CNFWMP)、選址工作小組(1990 年代)、地質廢棄物管理設施(Geological Waste Management Facility, GWMF)可行性研究。這些研究主要評估於 CRL 建立深地質處置設施(Deep Geological Repository, DGR)的可行性，因此場址特徵化工作多聚焦於約 500 至 1200 公尺深度的地層與長期穩定性分析。由於這些深層特徵對 NSDF 的影響相對有限，其成果多作為補充資料，支援後續設計開發與數值模擬。NSDF 計畫為建立完整的淺層地質環境資料，整合了歷年與近期的調查成果，包括：GWMF 描述性地圈場地模型報告(CNL, 2016a)、GWMF 綜合地合成報告(CNL, 2016b)、NSDF 多學科地下調查第一階段和第二階段(AMEC, 2017a；2017b)、NSDF 環境影響報告(Golder Associates, 2019)、NSDF 地下水流動模型(CNL, 2019b；CNL, 2020a；CNL, 2020b)、NSDF 封閉後安全評估(PostSA)(Arcadis & Quintessa, 2020)。截至 NSDF 安全論證報告出版，已完成之主要場址調查與技術工作如下：

- 辨識土壤類型、母岩與地下水位，執行 14 個試坑、7 個鑽孔、4 組螺旋鑽探及地球物理試驗，以分析粒徑分布與含水量(Golder Associates Inc., 2016)。
- 第一階段調查涵蓋 ECM 基地及其支撐結構，進行 14 組 SPT (Standard Penetration Test)鑽孔、8 組 CPT (Cone Penetration Test)、4 組下孔式震測與 3 區土壤地電阻探測(AMEC, 2017a)。
- 第二階段調查補充前一階段結果，新增 7 孔鑽孔岩心取樣與監測井設置，並執行 11 組 CPT (AMEC, 2017b)。
- 第三階段調查進一步補強地工資料，含 5 孔辦理 SPT 之鑽孔、3 個辦理滲濾試驗之試坑，以及透地雷達(Ground Penetrating Radar, GPR)探測以建立母岩地形圖(AMEC, 2017c)。

- 第四階段新增 9 孔辦理 SPT 之鑽孔及 2 孔入岩之螺旋取樣鑽孔(AMEC, 2018)。
- 第五階段現地作業係利用第四階段現地作業所設置之監測井，以單井上升及下降水頭法進行水力試驗(Wood, 2018)。
- 第六階段現地作業旨在提供足夠的資料與資訊，以用於排放加壓管線 (effluent forcemain)之設計及施工；試驗內容包含進行 5 孔辦理 SPT 之鑽孔，其中 3 孔鑽孔完工後作為監測井(Wood, 2019)。

NSDF 場址特徵化的主要目的在支援設計開發與數值模擬，特別針對 ECM。由於 ECM 的影響範圍屬淺層(距地表約 30 公尺以內)，因此研究重點集中於覆土、母岩及淺層地下水特性，這些因素對設計與安全分析影響最為顯著。根據上述資料建立地下水流動模型，並以 MODFLOW 軟體進行三維數值模擬，分析 NSDF 各設施在運轉與封閉後對區域水文條件的潛在影響。模型採定率式建構與校正，作為「最佳估算」情節，同時對主要參數進行敏感度分析，以評估結果的不確定性。

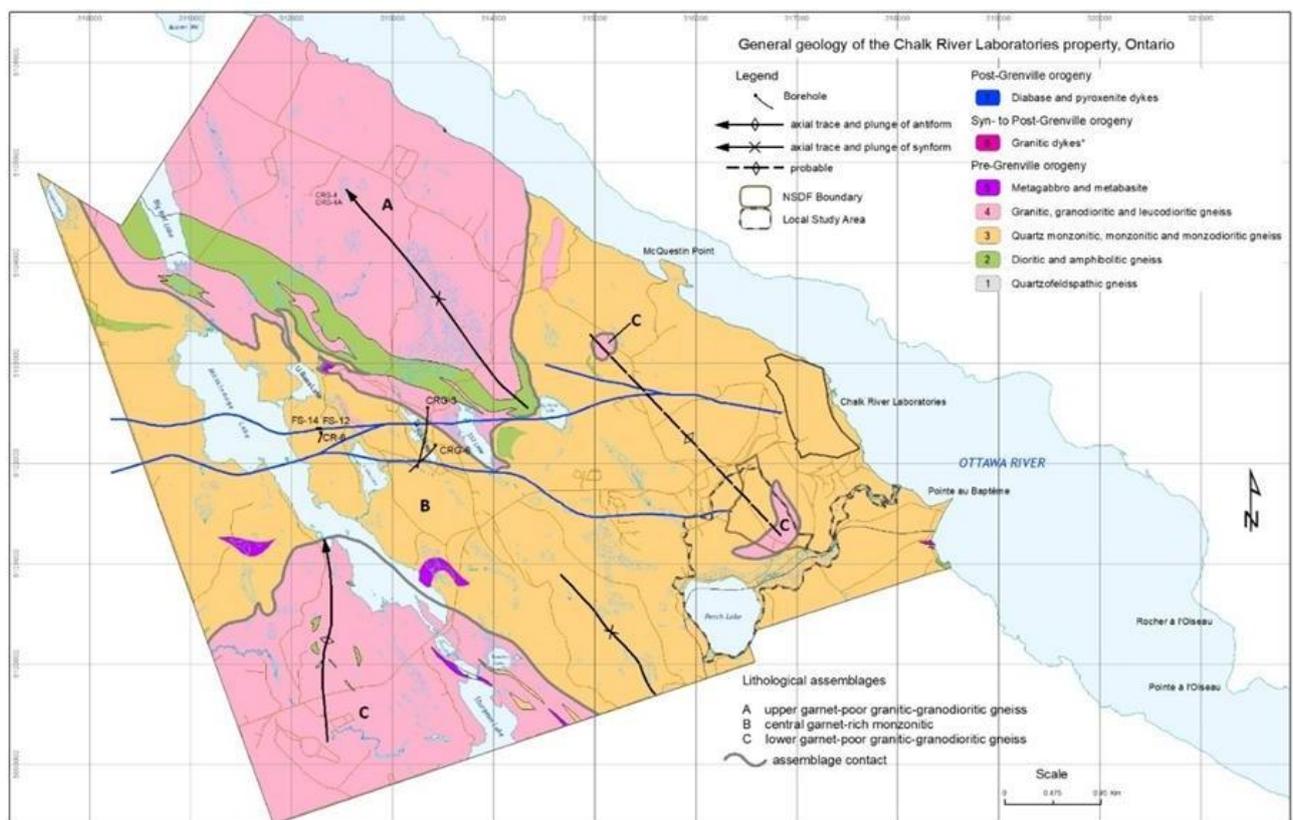
(2) CRL 場址之地質背景

CRL 場址的母岩主要由晚前寒武紀的花崗質片麻岩組成，並夾雜少量輝長岩片麻岩與變質沉積片麻岩。此外，區內亦可見新元古代的基性岩與長英質脈岩，以及若干孤立的鹼性碳酸鹽岩複合體。CRL 位於加拿大地盾格倫維爾省的中央片麻岩帶，鄰近其與東南方中央變質沉積帶之構造接觸區。這些主要地質帶在晚中元古代的格倫維爾造山運動期間(約 11.9 億至 10.6 億年前)經歷了破裂、碰撞與變質作用。根據 CRL 場址及周邊地區的地質測繪成果與 GWMF 可行性研究期間之鑽探資料，區內岩石可劃分為七個岩性單元(表 3.3)，出露至地表之分布圖如圖 3.8 所示。這七個單元與 CRL 場址特徵化研究中辨識出的三個具有層狀結構的岩性組合相對應。自上而下依序為：上部為石榴石含量低的片麻岩組合、中部為石榴石含量高的片麻岩組合，以及下部為石榴石含量低的片麻岩組合。

表 3.3 CRL 場址由上而下之主要岩性單元，以及次要岩性單元表

新元古代岩層單元	7-鐵鎂質岩脈(或輝綠岩和輝石岩岩脈)
	6-長英質岩脈(或花崗岩岩脈)
中元古代岩層單元	5-變質輝長岩與變質基性岩
	4-花崗岩質至花崗閃長岩質片麻岩
	3-石英正長岩質、正長岩質與正長閃長岩質片麻岩
	2-閃長岩質與角閃岩質片麻岩
	1-石英長石質片麻岩
次要岩性	鐵鎂質與超鐵鎂質鹼性侵入岩

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

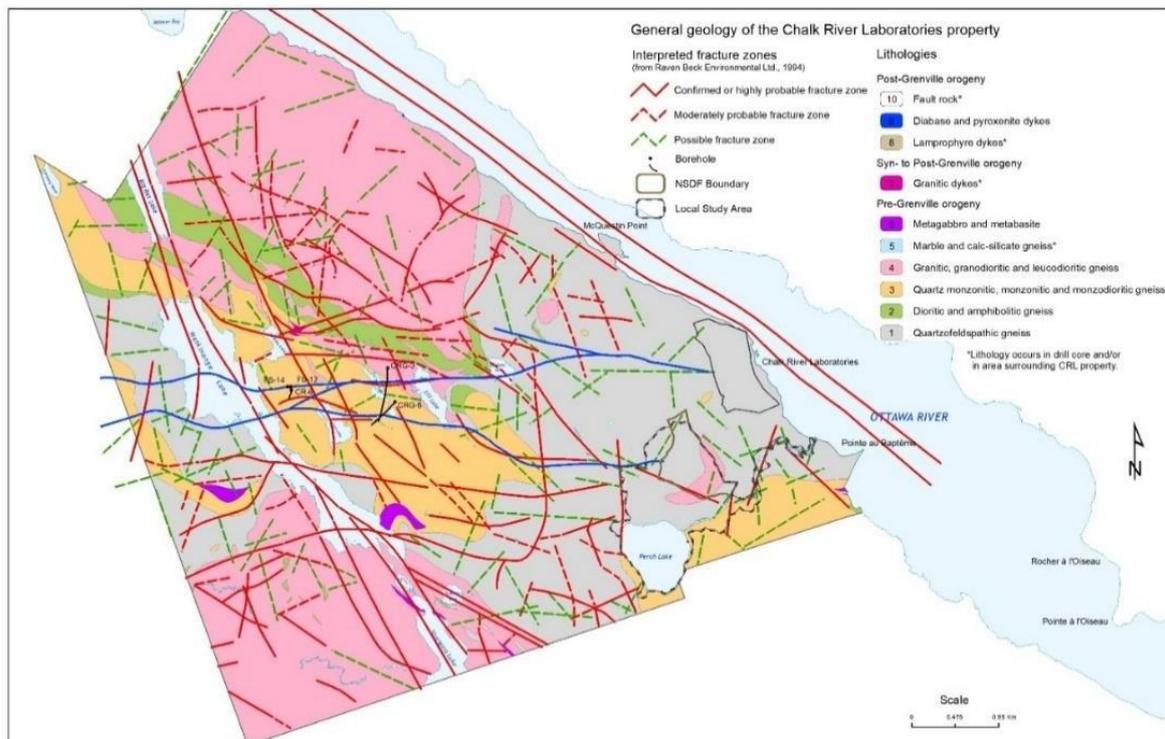
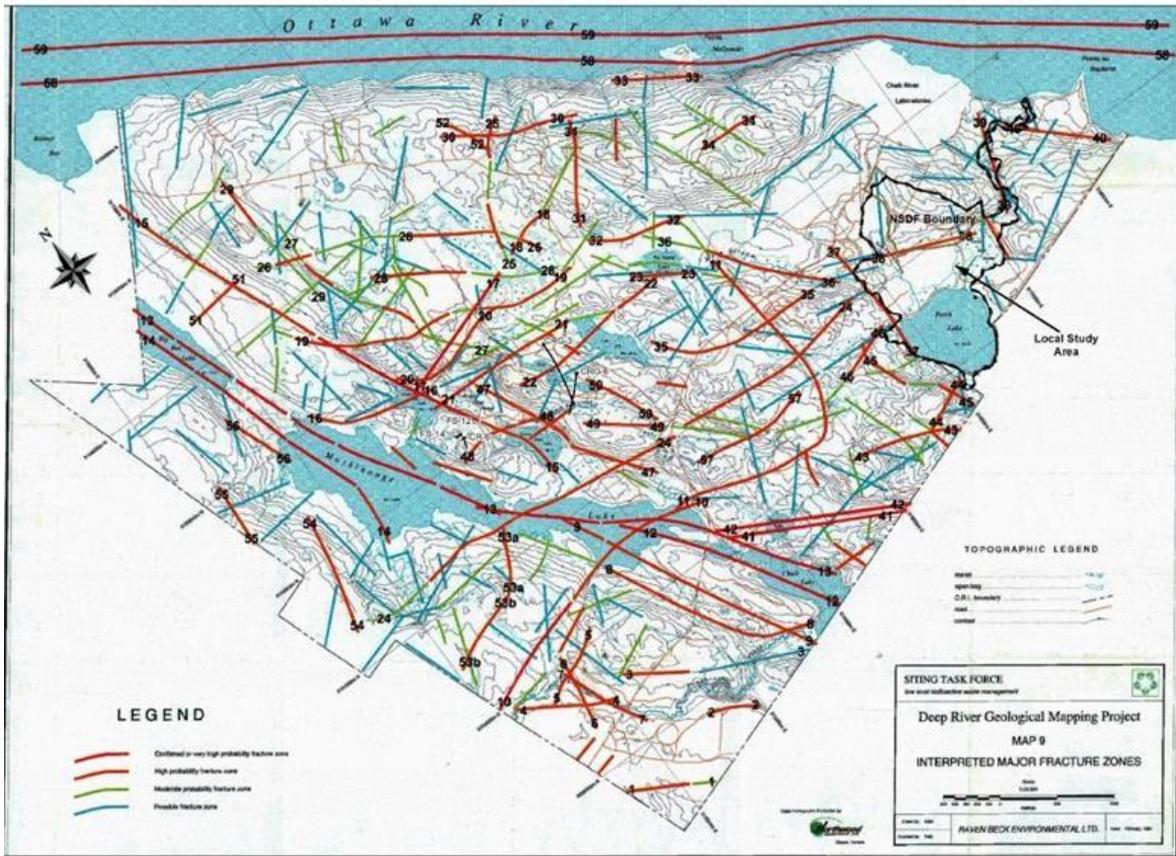
圖 3.8 CRL 場址之地值概況

(3) CRL 場址之構造

CRL 場址位於渥太華－博內舍爾地塹(Ottawa-Bonnechère Graben, OBG)北緣。這是一個主要的破裂與正斷層帶，寬度約為 40 至 60 公里，自西北西至東南東方向延伸約 700 公里，從尼皮辛湖(Lake Nipissing)延伸至蒙特婁地區，並在那裡與聖勞倫斯地塹(St. Lawrence Graben)匯合。地塹的中心區域西北走向的斷層發育良好。輝綠岩岩脈(diabase dykes)則表現出明顯的東－西走向排列，與當時地殼主要張裂方向有關。此地塹被認為起源於前寒武紀晚期或古生代早期，是聖勞倫斯裂谷系統的一個分支，代表三叉交會構造(triple junction)的一個分支，後來發展為地盾內部的地塹構造。之後在中生代期間的主要正斷層活動，形成了(a)古生代沉積岩的大型殘留塊體(outliers)，以及(b)突出的邊緣斷崖。

地塹(graben)的東北邊界部分為馬特瓦斷層(Mattawa Fault)。該斷層是在伸張應力環境下形成的區域性正斷層，位於渥太華河下方並控制著該河流的走向，鄰近 CRL 場址，斷層向西南傾斜，傾角較陡。地塹的西南邊界為馬斯基諾格湖破裂帶(Maskinonge Lake Fracture Zone)，該破裂帶位於 CRL 場址西南方約 50 公里處。

過去針對 CRL 場址的局部構造研究，主要有 CNFWMP、STF 和 GWMF。其中 CNFWMP 距離 NSDF 較遠，因此報告中不考慮此研究之結果。STF 所進行的線性構造研究為主要破裂與斷層帶提供了依據。解析出的破裂帶依信賴水準進行分類，從最高到最低分別為：「已確認或高機率」、「高機率」、「中等機率」和「可能」的破裂帶(圖 3.9(上))。GWMF 進行更進一步的場址調查，同時也重新解譯破裂帶的信賴水準，從最高到最低分別為：「已確認或高機率」、「中等機率」和「可能」的破裂帶(圖 3.9(下))。STF 與 GWMF 所進行的線性構造分析提供了破裂帶的大致位置、走向以及相應的信賴水準。

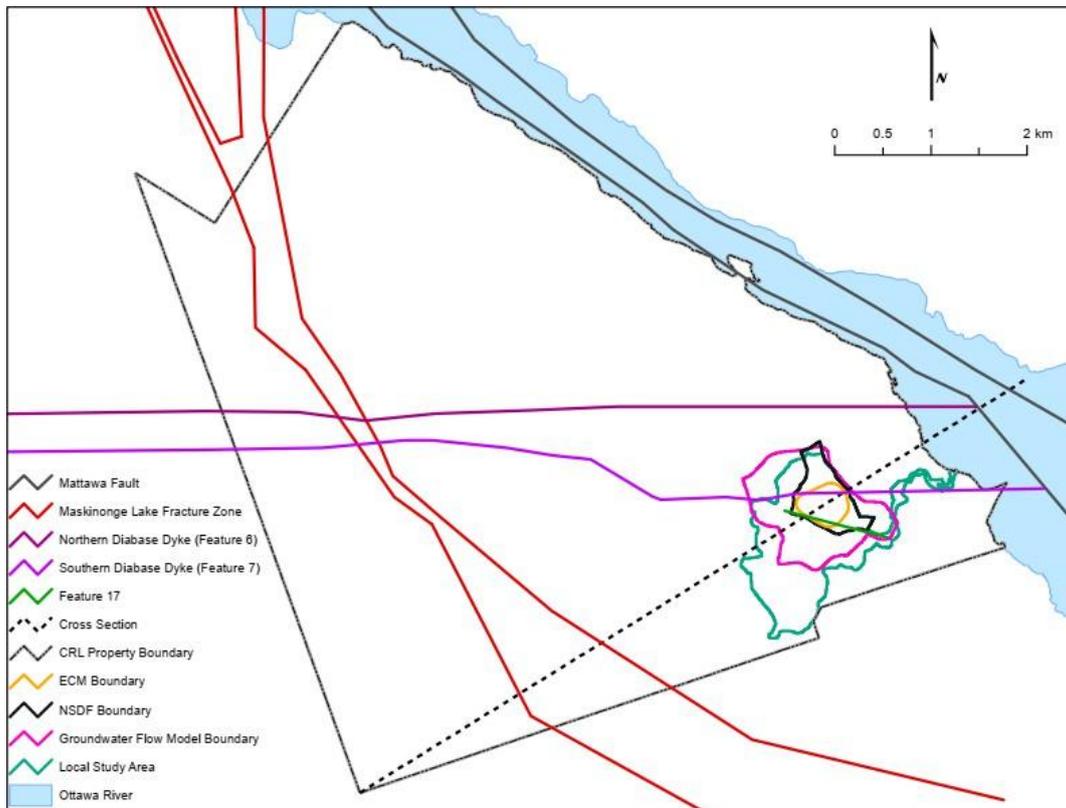


資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.9 STF(上)和 GWMF(下)解析的 CRL 場址破裂帶，包含 NSDF 的位置

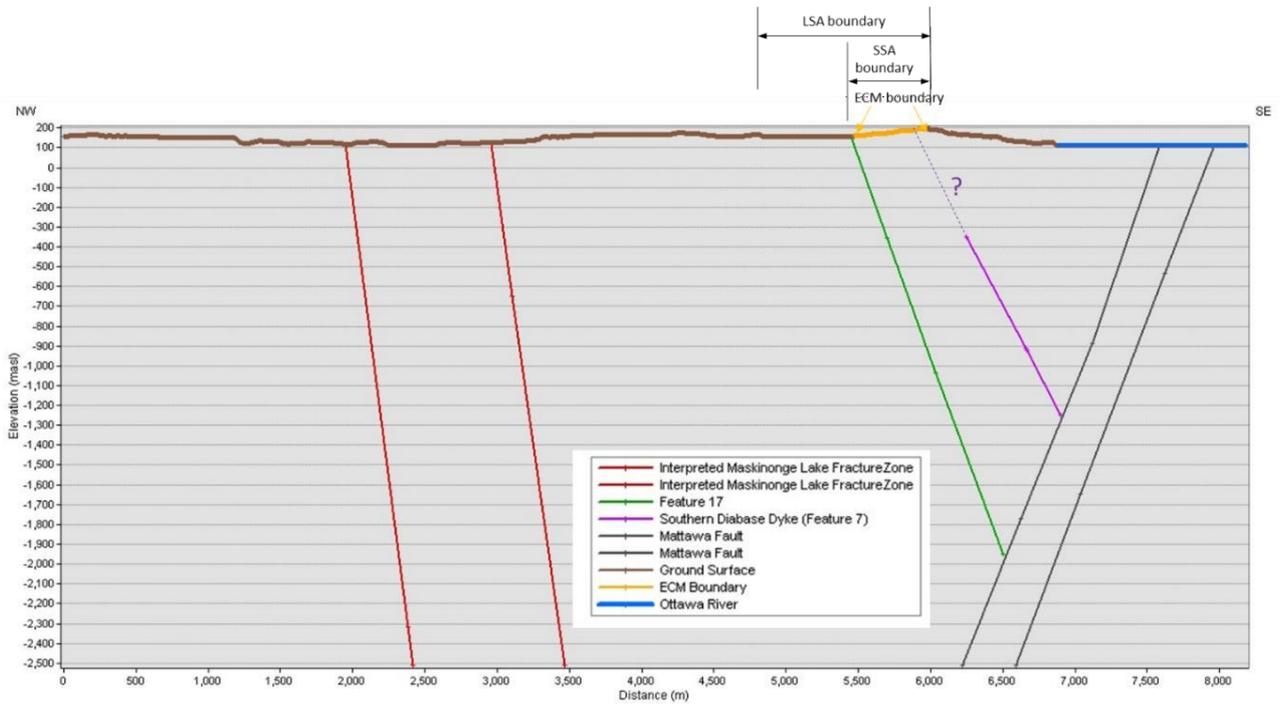
(4) NSDF 安全評估範圍內之地質特徵

影響 NSDF 區域安全評估範圍(Site-Specific Assessment, SSA)的地質特徵包括：馬塔瓦斷層(Mattawa Fault)、馬斯基農湖斷層帶(Maskinonge Lake Fracture Zone)、北部輝長岩岩脈(Northern Diabase Dyke)(特徵#6)、南部輝長岩岩脈(Southern Diabase Dyke)(特徵#7)及特徵#17(破裂帶)。圖 3.10 及圖 3.11 為 NSDF 之 SSA 地質特徵平面圖和剖面圖。馬塔瓦斷層和馬斯基農湖斷層帶在圖 3.9 被標識為「已確認或高機率」的地質構造。北部輝長岩岩脈(特徵#6)被標識為「可能」存在。由於馬塔瓦斷層、馬斯基農湖斷層帶與北部輝長岩岩脈(特徵#6)皆位於 NSDF 的 SSA 之外，距離處置設施較遠，預期對 NSDF 設計與安全分析的影響極為有限。NSDF 的 SSA 範圍內，仍需進一步評估與討論的地質特徵為南部輝長岩岩脈(特徵#7)及破裂帶(特徵#17)(圖 3.11)。



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.10 近地表處置設施安全評估區域(NSDF SSA)附近主要地質構造的平面圖



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.11 近地表處置設施安全評估區(NSDF SSA)附近主要地質特徵的剖面圖

A. 特徵 #7(輝綠岩脈)

輝長岩脈(特徵#7)被認為可能存在於 NSDF 的 SSA 範圍內。根據 CNFWMP 與 GWMF 的量測結果，兩者對輝長岩脈滲透性的評估相互一致，顯示儘管岩脈內部存在大量裂隙，其整體滲透性仍維持於低水準。此一低滲透性主要歸因於裂隙內普遍分布的充填物所造成的封閉效應。於 CRL 現地進行的量測結果顯示，輝長岩脈的滲透係數 k 約介於 4×10^{-21} 至 $6 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ，相當於水力傳導係數 K 約 4×10^{-14} 至 $4 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 。相比之下，相似深度的一般岩體滲透係數 k 約為 10^{-17} m^2 (即 $K \approx 10^{-10} \text{ m/s}$)。因此，輝長岩脈的存在預期不會形成額外的潛在污染物流動路徑。

B. 特徵 #17(破裂帶)

破裂帶(特徵#17)位於 SSA 南側區域，位於 ECM 影響範圍之外(圖 3.17)。該特徵最初於 STF 中被歸類為「高概率」存在，但在 GWMF 之後的評估中被

重新分類為「可能」。此破裂帶的水力傳導係數較周圍岩體高出數個數量級，理論上可作為優勢地下水流路徑。然而，鑑於其位置位於 ECM 影響範圍外，且其走向大致垂直於主要地下水流動方向，因此其作為優勢地下水流路徑的潛勢有限。為採取保守評估，研究團隊已在水文地質數值模擬中，進一步評估該破裂帶若延伸至 ECM 影響範圍內時可能造成的影響。

(5) 水文地質模型及封閉後安全評估

此處說明 NSDF 計畫為 NSDF 所建立的水文地質模型，旨在模擬設施對地下水流動的潛在影響。該模型結果構成評估放射性核種在地圈中遷移途徑的重要基礎，並作為封閉後安全評估模型的主要輸入之一。封閉後安全評估的目的在於對 NSDF 進行定量化分析，評估其封閉後的放射性與非放射性安全性。

水力傳導係數(K)是影響水文地質模型的關鍵參數之一。地質構造(如斷層帶與岩脈)的存在可能改變 K 值，進而影響模型結果。為便於討論，表 3.4 比較了模型開發所採用的水力傳導係數(K)值與 NSDF、GWMF 及其前身所進行的現地實際測量值，並同時列出對應的滲透係數(k)資料。

A. 淺層裂縫的影響

NSDF 的水文地質模型假設上部與下部母岩具有不同的水力傳導係數。上部母岩(覆土下約 6 公尺)之 K 值為 9×10^{-7} m/s，下部母岩(覆土下 6~50 公尺)之 K 值為 4×10^{-8} m/s，並假設覆土下約 50 公尺處存在不透水層作為邊界條件。K 值的選擇依據現地量測結果(表 3.4)。該量測結果反映的是岩體(含裂隙)的整體傳導性，而非完整岩石本身的滲透性。模型已納入現地觀察到的裂隙特徵，並依據地下水位實測資料進行校正，因此可合理反映淺層裂隙對地下水流動的影響。

B. 輝綠岩脈的影響

在 CRL 場址測得之輝綠岩脈水力傳導係數約 1×10^{-14} m/s，遠低於模型參數 4×10^{-8} m/s。由於岩脈具極低滲透性，其存在將形成水力障礙，對整體地下水流動及模型結果的影響可視為可忽略。

C. 破裂帶的影響

CRL 場址量測的破裂帶水力傳導係數約 5×10^{-6} m/s，高於模型中上層母岩採用的值(9×10^{-7} m/s)。模型所使用的參數仍基於現場平均測得值，已反映一般條件下的水文地質特性。為評估裂縫帶潛在影響，開發團隊設計了多個敏感性分析案例，例如假設上層 6 公尺母岩之 K 值整體提高兩倍，又或是開發模型模擬假設性破裂帶狀況。

表 3.4 比較用於開發模型和進行現地量測的水力傳導係數(K)

	水力傳導係數(K)(m/s)	滲透係數(k) (m ²)
NSDF地下水文地質模擬		
<ul style="list-style-type: none"> 上層母岩，深度達覆蓋層下方6公尺 下層母岩，深度自覆蓋層下6公尺至50公尺 破碎帶 邊界條件，深度大於覆蓋層下50公尺 	上層母岩 9×10^{-7} 下層母岩 4×10^{-8} 破碎帶 10^{-5} to 10^{-4}	上層母岩 9×10^{-14} 下層母岩 4×10^{-15}
現地測量		
現地測量於近地表處置設施場址	平均值： 1.4×10^{-7} 最小值： 2.3×10^{-9} 最大值： 1.5×10^{-5}	平均值： 1.4×10^{-14} 最小值： 2.3×10^{-16} 最大值： 1.5×10^{-12}
CRL場址的完整岩石(較深深度)	10^{-10}	10^{-17}
CRL場址的岩脈	10^{-14}	10^{-21}
CRL場址的破裂帶	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-13}$
FS系列鑽孔(深度約50公尺以下)	$10^{-12} \sim 10^{-4}$	$10^{-19} \sim 10^{-11}$
STF系列鑽孔(深度約200公尺以下)	$10^{-10} \sim 10^{-4}$	$10^{-17} \sim 10^{-11}$
CRG系列鑽孔(深度可達1200公尺以下)	$10^{-14} \sim 5 \times 10^{-3}$	$10^{-21} \sim 5 \times 10^{-10}$

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

(6) 地震危害度分析

此安全論證報告針對 NSDF 場址已執行特定地點的機率式地震危害評估 (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA)，以確定 ECM 設計與建模所需的地震危害水準。PSHA 依據 2015 年版「加拿大國家建築規範」(National Building Code of Canada, NBCC)進行評估。分析中考慮了 NSDF 場址的地質構造特徵及歷史地震活動紀錄。CNL 採取保守原則，選擇重現期一萬年的地震作為 ECM 設計的設計基準地震(Design Basis Earthquake, DBE)，並以此作為工程覆土堆 550 年設計年限的抗震依據。此一選擇被視為保守，因為 NSDF 所存放的放射性物質遠低於核電廠的放射性清單；因此，即使在設計年限期間發生超出 DBE 的地震事件，其潛在後果亦顯著低於核電廠在運轉中圍阻系統失效所造成的影響。在後續的封閉後安全評估 (PostSA)中，CNL 證實即使發生超出設計基準地震規模的地震事件，對人類健康與環境亦不會造成顯著影響。

4. 地表水文

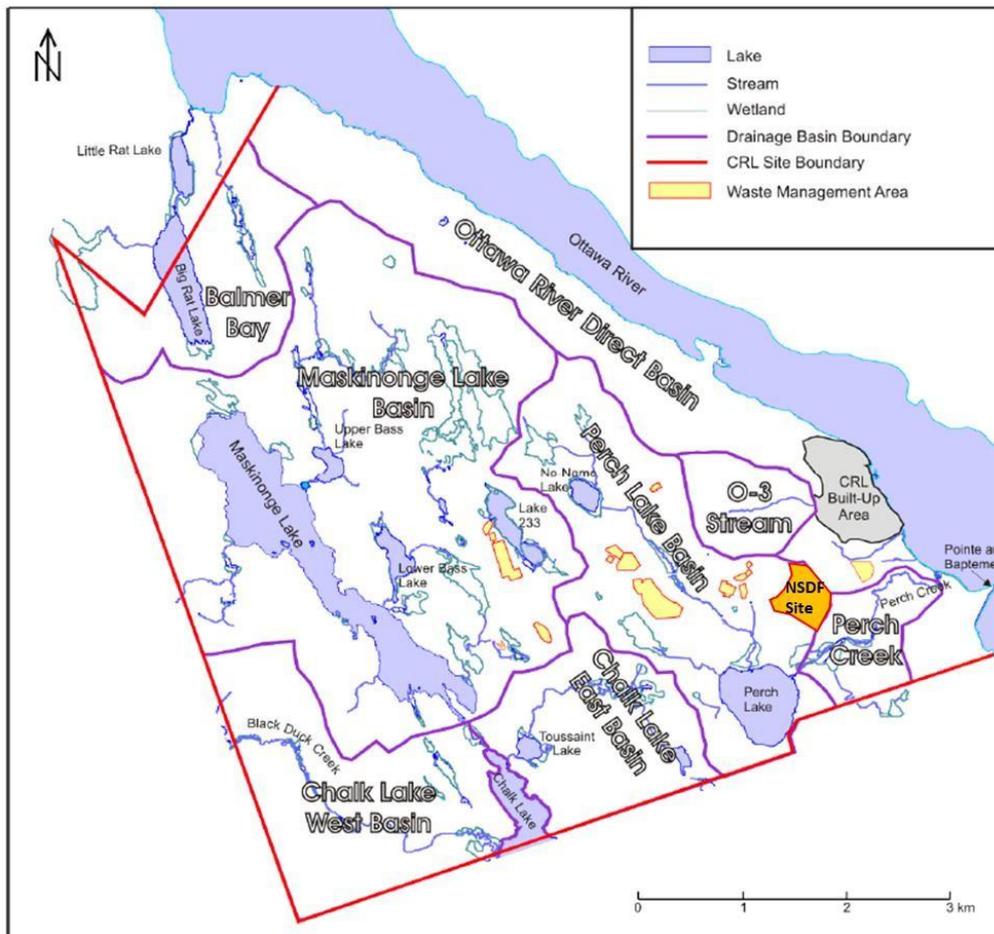
CRL 所在地及其周邊區域位於渥太華河流域內。渥太華河的歷史流量統計如下：

- 歷年最高流量為每日 4 億立方公尺(m^3/d)，發生於 1970 年 5 月 8 日。
- 歷年最低流量為每日 790 萬立方公尺(相當於 $91 m^3/s$)，發生於 1955 年 10 月 9 日。
- 一般平均流量介於每日 5,000 萬至 1 億立方公尺之間。

CRL 區段的渥太華河水位受到人為調控，由於位於上游約 30 公里處的 Des Joachims 水力發電大壩排放量影響。根據距離 CRL 約 36 公里下游的佩姆布魯克(Pembroke)監測站記錄，月平均水位介於 110.8 公尺(2005 年 8 月)至 113.1 公尺(1960 年 5 月)之間，平均水位約為 111.5 公尺(以上皆為海拔高程，mASL)。CRL 場址的設計基準洪水水位考量了降雨事件及複合性事件(例如由隨機因素或地震導致上游大壩及 Temiskaming 湖出口控制設施失效的情況)，設定為 122 公尺(mASL)，其中包含 2 公尺的安全裕度。

CRL 場區內分布有多個水體，其位置及排水集水區如圖 3.12 所示。NSDF 預定設址位於 Perch 湖盆地內。該盆地涵蓋 Perch Creek 集水區，約占整個 CRL 場區排水面積的

15%。在 NSDF 設址西側有一片稱為「東沼澤」(East Swamp)的濕地，透過東沼澤溪流及主溪流與 Perch 湖相連；而位於 NSDF 與 Perch 湖之間的地區為 Perch 湖沼澤(Perch Lake Swamp)。這些濕地以森林沼澤為主，夾雜少量更潮濕或具淺水的區域。



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

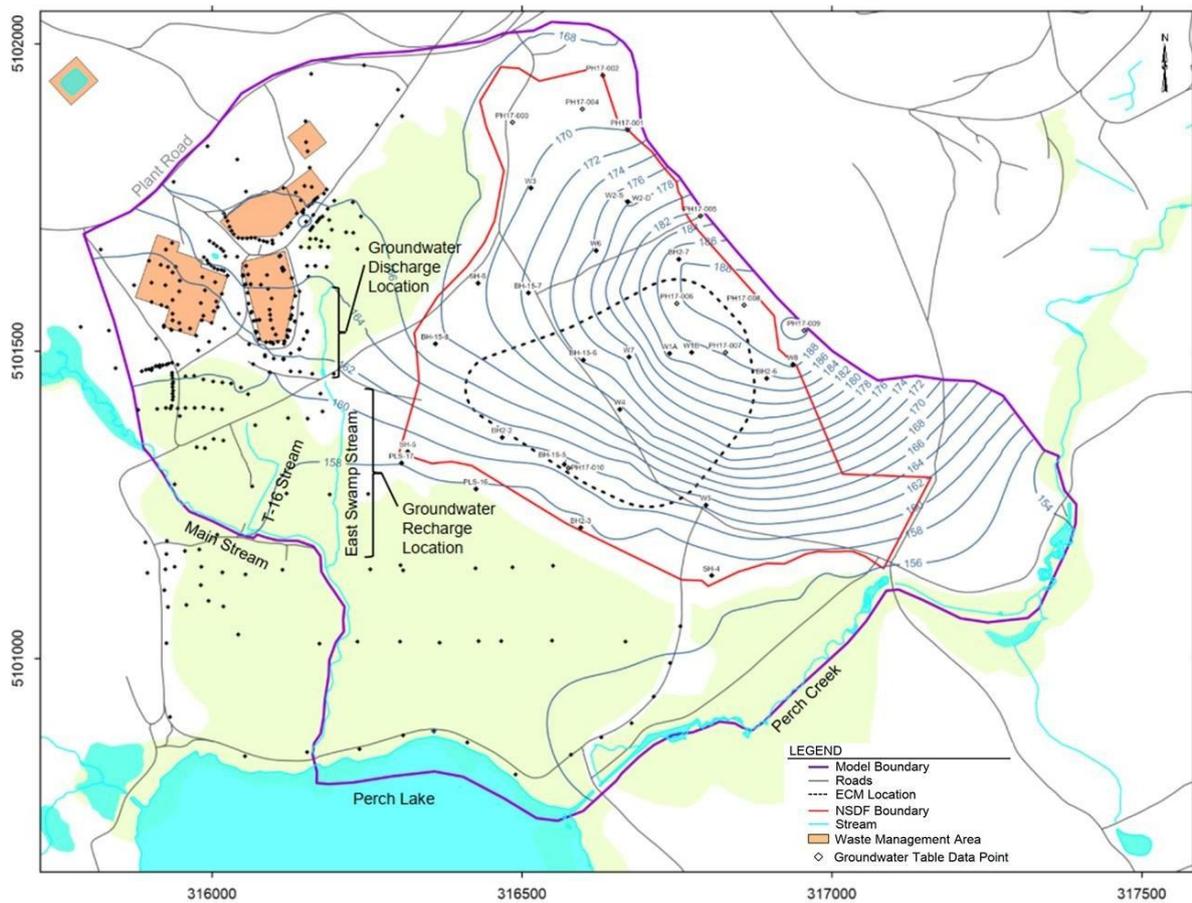
圖 3.12 CRL 流域分布圖

5. 水文地質

地下水主要流經砂質覆蓋層單元(上層砂、中央砂及基底砂／泥層)，而母岩的滲透性則相對較低。整體地下水流動模式與地形密切相關，補注主要發生於高地區域，最終排放於 Perch Lake 或 Perch Creek。NSDF 北部區域，地下水流向大致為西北方，流入 East Swamp。由於該區水力梯度較低，地下水位的細微變化可能導致局部流向東北，這種情況主要出現在研究區最北端。相對地，在 NSDF 南部區域(含 ECM 區域)，地下水通常向

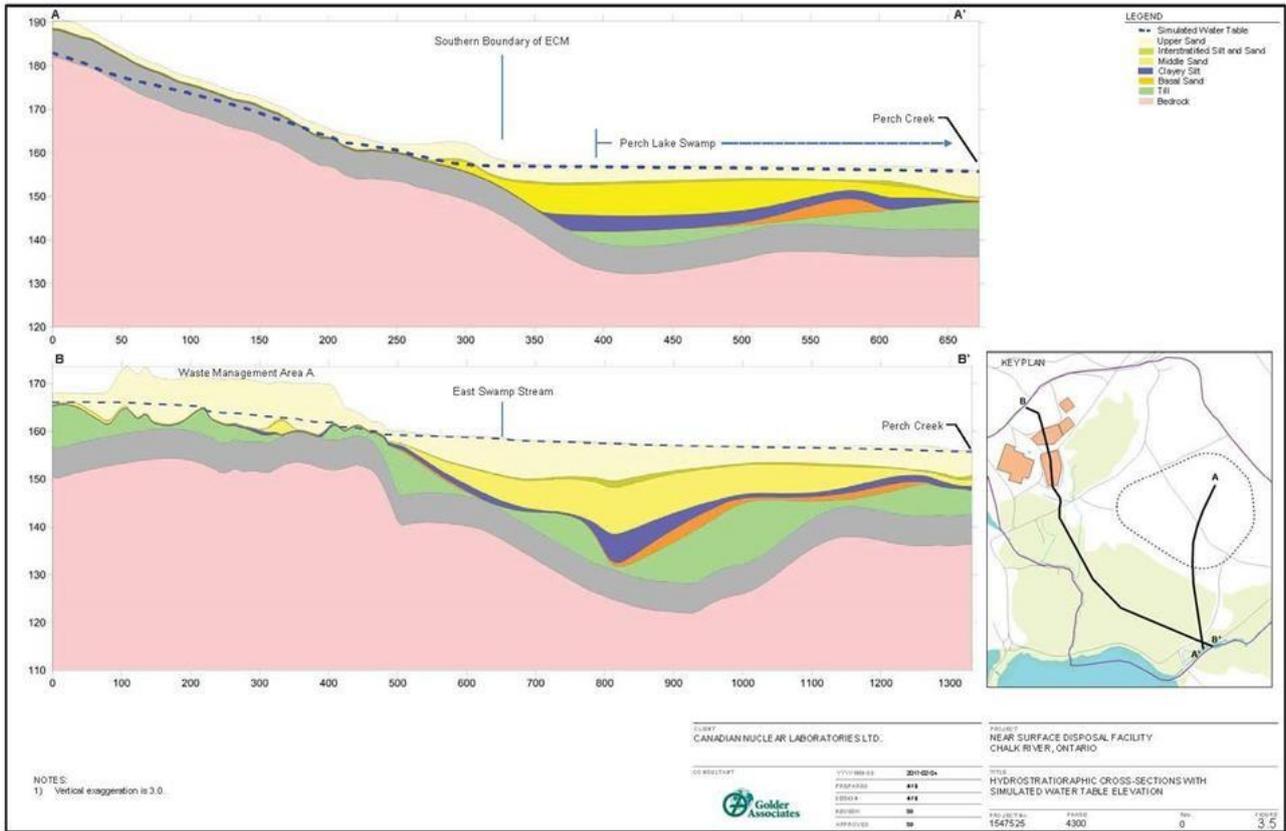
西南與南方流動，最終匯入 Perch Lake Swamp 或 Perch Creek。在 Perch Lake 盆地南側，地下水主要向南流入 Perch Lake，部分則向東南流至 Perch Creek。

Perch Lake 盆地東、西兩側的母岩脊與地形高處形成地下水與地表水的分水嶺。淺層地下水系統主要由這些高地的降水補注，而排放通常發生於盆地低窪區的地表水體中。根據監測資料，NSDF 場址及 Perch Lake 盆地低地區域的地下水位高程如圖 3.13 所示。於未固結沉積層(砂與泥)中，地下水位季節性與年際變化約為 2~3 公尺；而在母岩中，因孔隙率遠低於沉積層，水位高程變化可達數公尺。擬建 NSDF 區域的非飽和帶厚度分布如圖 3.14 所示。覆蓋層總厚度在場址東側母岩脊處最薄，向西逐漸增加，在母岩谷內達最大值，厚度超過 36 公尺。於場址北部與東部區域，未固結沉積層相對較厚，在母岩脊北端可達 26 公尺以上。



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.13 平均地下水位高程圖



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.14 NSDF 場址水文地質剖面圖

3.2.2 設施設計

NSDF 設計營運年限為 50 年，設計年限則為 550 年。整體設計可分為四個主要構成要素，其位置如圖 3.15 所示：

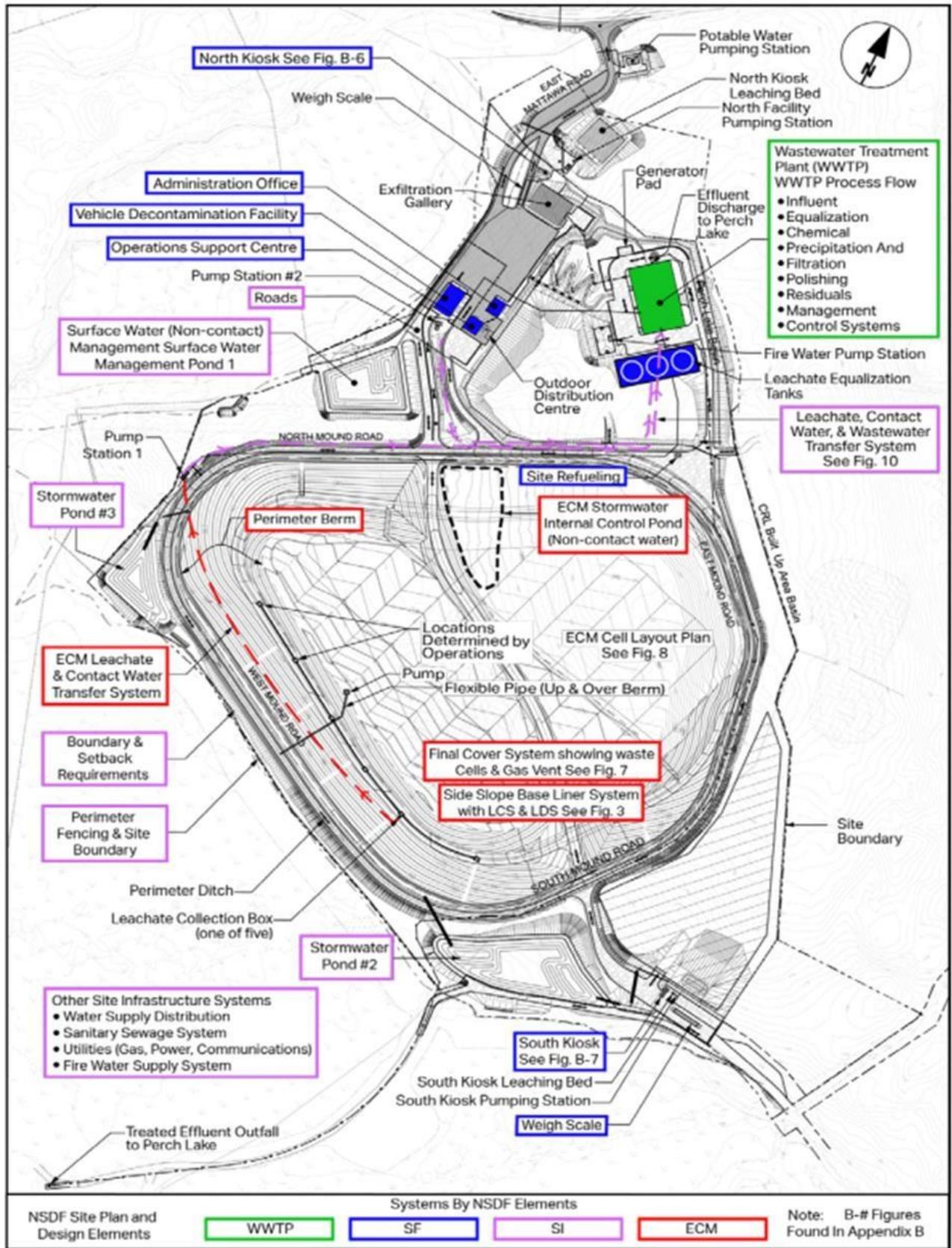
- **工程覆土堆(ECM)**: 用於處置約 1,000,000 立方公尺的低放射性廢棄物(LLW)，如圖 3.15 中紅色區域。
- **廢水處理廠(Waste Water Treatment Plant, WWTP)**: 用於處理設施運作過程中產生的廢水，如圖 3.15 中綠色區域。
- **輔助設施(Support Facilities, SF)**: 提供日常營運及維護所需的相關服務，如圖 3.15 中藍色區域。

- **基礎設施(Site Infrastructure, SI)**：支援設施設計與營運的基礎設施系統，如圖 3.15 中桃紅色區域。

表 3.5 列出了這四項主要設計要素的結構、系統與組件(SSCs)。建築設計依據 2015 年「加拿大國家建築規範」(NBCC)，採用設計基準地震(DBE)作為抗震設計標準。NSDF 的安全目標與長期安全要求，透過多重障壁設計以提供縱深防禦的理念加以達成。整體設計納入多項安全特徵與控制措施，以防止或消除可能對設施人員、現場工人、公眾與環境造成危害的情況。安全相關的 SSCs 主要用於預防事故發生或降低其潛在後果，以確保設施安全運作。這些安全功能是藉由二類防護機制實現的：

- **主動式工程安全設計**：主動設計需在事故發生期間與事故後持續運作，以降低事故後果，並具備足夠的餘裕。此類系統仰賴電力或機械元件維持功能，典型例子包括：輻射監測系統、主動通風系統(Active Ventilation System, AVS)、滲出污水收集系統(Leachate Collection System, LCS)、洩漏檢測系統(Leak Detection System, LDS)和廢水處理廠(WWTP)內的廢水監測系統。
- **被動式工程安全設計**：被動設計如主要與次要圍護結構(primary and secondary containment structures)，在經過事故條件評估後仍可維持完整性，確保安全功能不受外力影響。此類設計透過固定的物理構造達成安全目的，無需外部輸入(如啟動指令、機械運作或電力供應)。

透過程序管理、作業規範與監測制度確保安全設計與運作要求的落實。這些措施共同構成 NSDF 的安全防護體系，確保設施在設計壽期內能穩定、可控且符合輻射防護標準地運轉。以下將針對這兩類防護機制進行說明。



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.15 NSDF 近地表處置設施與設計元素位置圖

表 3.5 NSDF 主要設計要素及結構、系統及組件

工程覆土堆(ECM)	廢水處理廠(WWTP)
<ul style="list-style-type: none"> • 處置單元 • 基底襯墊系統 • 周邊護堤 • 臨時儲存廢棄物接收與處理區 • 滲出污水(leachate)輸送系統 • 接觸水收集、輸送及排放系統 • 非接觸水收集、輸送及排放系統 • 每日、臨時及最終覆蓋系統 • 氣體排放系統 	<ul style="list-style-type: none"> • 進水流量調節(調節池) • 化學沉澱 • 膜過濾 • pH 調整 • 精製處理系統(Polishing treatment system) • 最終廢水儲存與採樣 • 殘餘物管理 • 化學品儲存與計量 • 製程控制系統 • 廢水排放系統
輔助設施(SF)	基礎設施(SI)
<ul style="list-style-type: none"> • 車輛除污設施(VDF) • 作業支援中心 • 管理辦公室 • 南、北入口管制亭 • 磅秤 • 場區車輛加油站 	<ul style="list-style-type: none"> • 可飲用水泵站 • 消防用水泵站 • 周界圍欄、道路 • 地表水管理池 • 骨材堆放/存放區 • 配電室 • 衛生污水處理系統

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

1. 主動式工程安全設施

在 NSDF 的整體安全架構中，ECM 是確保廢棄物長期隔離與環境防護的核心設施之一。為確保其在運轉階段的安全性與穩定性，ECM 內部配置了多項主動式工程安全設施，這些系統在運轉期間負責監測、控制與防護，並在必要時提供自動化的安全反應，以避免放射性或受污染液體外洩至環境。本節所述之主動式安全設施，主要包括滲出污水收集與監測系統(LCS 與 LDS)、接觸水抽水站(Contact Water Pumping Station, CWPS)、以及滲出污水與接觸水輸送系統，如表 3.6 所示。這些系統共同構成 ECM 的主動安全功能，確保封閉系統在運轉過程中維持完整與可監控狀態。

LCS 與 LDS 是 ECM 底襯系統中最關鍵的主動監控構件。兩者皆配置「高-高水位」警報，用於即時偵測集水槽內液位異常上升。若控制系統失效，警報功能可作為餘裕保護機制，防止 ECM 主襯墊承受過高水頭，從而降低底襯滲漏或破壞風險。接觸水抽水站分為兩級(CWPS#1 與 CWPS#2)，皆具備自動監測與防溢控制功能。CWPS#1 主要防止因控制系統故障而發生的廢水溢流；CWPS#2 則在接收主動排水時提供「高-高水位」警報，確保排水作業於異常狀況下仍可即時通報，避免未經處理的廢水外洩。為強化圍阻功能，ECM 所有關鍵液體輸送系統皆採雙層結構設計。次級圍阻與滲漏檢測系統(LDS)可於一次圍阻失效時立即偵測異常，並防止污染物外逸。此外，埋地管線設於凍土層以下，以雙層高密度聚乙烯(HDPE)材質建造；地上管線則配置低點漏水檢測裝置，透過警報系統提供即時監測。此外，考量加拿大嚴寒氣候條件，ECM 內所有滲出污水與接觸水輸送管線設有加熱與保溫系統，以確保管線在低溫環境下仍能維持正常運作與保持密封功能。

表 3.6 ECM 主動工程安全功能

主動式工程安全設施(SSCs)	安全功能	選擇依據／理由
LCS 集水槽 「高-高水位」	監測與控制	監測被動式工程障壁(ECM 主襯墊)。若基本程序控制系統失效，可能導致 LCS 集水槽水位異常未被偵測，最終使 ECM 主襯墊承受過高水頭(liquid head)。
LDS 集水槽 「高-高水位」	監測與控制	監測被動式工程障壁(ECM 主襯墊)。若基本程序控制系統失效，可能導致 LDS 集水槽水位異常未被偵測，最終使 ECM 主襯墊承受過高水頭(liquid head)。
接觸水抽水站 (CWPS#1) 溢流防護泵跳脫	監測與控制	控制系統故障時，可能發生未同步關閉進水泵的情況，卻關閉了 CWPS #1 出水泵，導致未處理廢水溢流至環境。
接觸水抽水站 (CWPS#2) 「高-高水位」警報	監測與控制	檢查 CWPS #2 是否可接收 NSDF 主動排水。若控制系統故障，CWPS #2 可能停機並失去水位監測，若未通知人員，恐造成排水外洩。
雙層結構與管線的次級圍阻及滲漏檢測系統(LDS)	圍阻	次級圍阻可在一次圍阻失效(如溢流或洩漏)時防止污染進入環境，並於液體積聚時觸發警報。
單層滲出污水管線輸送系統	圍阻	單層不鏽鋼管線僅設於可由均化槽次級圍阻收集的位置，或安裝於污水處理廠內部。
埋地滲出污水／接觸水泵／管線輸送系統	圍阻	地下 HDPE 管道均為雙層結構，提供主層與次層防護，並埋設於凍土層以下。
	監測與控制	低點檢測口可讓人員檢查雙層管之間是否有水，若有則顯示管線可能故障。
地面以上滲出污水／接觸水泵／管線輸送系統	圍阻	地上輸送管線採雙層 HDPE，並配備低點漏水檢測裝置，若環狀空間積水則會警報。
滲出污水／接觸水泵／管線輸送系統的加熱裝置	監測與控制	管線與設備設有加熱與保溫，防止結冰造成破裂。熱追蹤系統維持溫度高於 4°C，並設有警報提示異常。

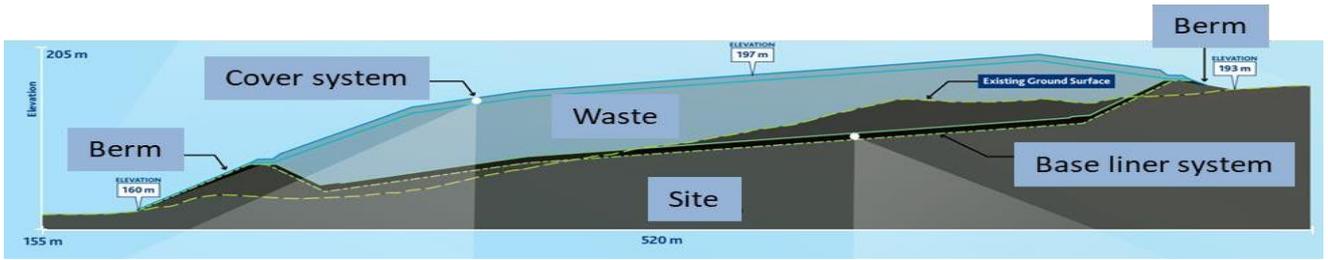
資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

2. 被動式工程安全設施

NSDF 的 ECM 為一座雙層被動式工程安全設施，設計目的在於長期封閉與隔離多達 100 萬立方公尺的低放射性廢棄物，並確保符合廢棄物接收標準(WAC)的要求。在每個處置單元完成處置操作後，會在已放置廢棄物上安裝多層最終覆蓋系統。ECM 由 10 個獨立且相連的處置單元所組成，總面積約 17 公頃(含周邊護堤)。各單元採平行排列配置，最大設計高度約 18 公尺，包含廢棄物、填充材料及最終覆蓋層。單元內部的廢棄物層厚度約 15 公尺，位於結構中央，整體設計可承受廢棄物與回填材料的靜載重、漸增載重，以及廢棄物放置作業所造成的動載重，確保結構穩定與長期完整性。在每個處置單元完成廢棄物安置作業後，將於其上方安裝多層最終覆蓋系統，以提供輻射屏蔽、防滲功能及環境隔離。此覆蓋系統為 ECM 的核心封閉構造之一，旨在於 550 年的設計年限維持安全功能與結構完整性。ECM 的高度範圍介於海拔約 163 公尺至 202 公尺之間，橫剖面示意圖(圖 3.16)顯示了 ECM 的主要構造與高程分佈。包含處置單元、底襯系統、周邊護堤、最終覆蓋系統及臨時覆蓋層等。以下將依序說明。

(1) 處置單元

圖 3.17 顯示了 ECM 內 10 個處置單元的配置。這些單元依序運作，由處置單元 #1 起，至處置單元 #10 止。當一個單元填滿後，即啟用下一個單元以持續接收廢棄物。每個處置單元的平均面積約為 12,000 平方公尺，其中最大處置單元可達 15,000 平方公尺。此外，處置單元旁另設有約 6,000 平方公尺的區域，作為廢棄物處置前的暫存空間。處置單元的開發順序包括單個單元的逐步建設、填充和封閉。處置單元的開發採「逐一建設、填充與封閉」的循序方式進行。第一階段的初始處置單元總容量為 525,000 立方公尺，除容納現有儲存廢棄物外，也預計處置未來 20 至 25 年所產生的低放射性廢棄物。第二階段則新增後續單元，提供額外 475,000 立方公尺的容量，使 ECM 的總處置容量達 1,000,000 立方公尺。在設計上，各處置單元的方向與坡度呈人字形/梯形配置，以利暴雨逕流的收集與排放。接觸水會被引導至集水槽，而非接觸水則流入各單元內設置的臨時雨水集水區，最終從 ECM 排出。



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.16 NSDF 剖面示意圖



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.17 工程圍堵土墩處置單元佈局

(2) 底襯系統

底襯系統的主要功能是為 ECM 廢棄物與滲出污水提供封閉、隔離與遲滯效果，以降低滲出污水對地下水的潛在影響。該系統由初級襯墊與次級襯墊組成，其中次級襯墊在初級襯墊失效時提供足夠的保護，並結合天然土壤與土工合成障壁材料構成。

初級襯墊負責封閉 ECM 內產生的廢棄物與滲出污水，並形成防滲屏障，防止滲出污水滲入下層構件；次要襯墊則進一步攔截可能穿透主要襯墊的滲漏，降低下方土層遭污染的風險。系統中的土工皂土毯(Geosynthetic Clay Liner, GCL)與夯實黏土阻水層(Compacted Clay Liner, CCL)具有極低的水力傳導特性，能有效延遲滲出污水遷移，而不依賴下方原生土或回填層。GCL 可減緩滲出污水於初級與次級襯墊間的流動；CCL 則進一步延遲滲出污水向地圈的移動。

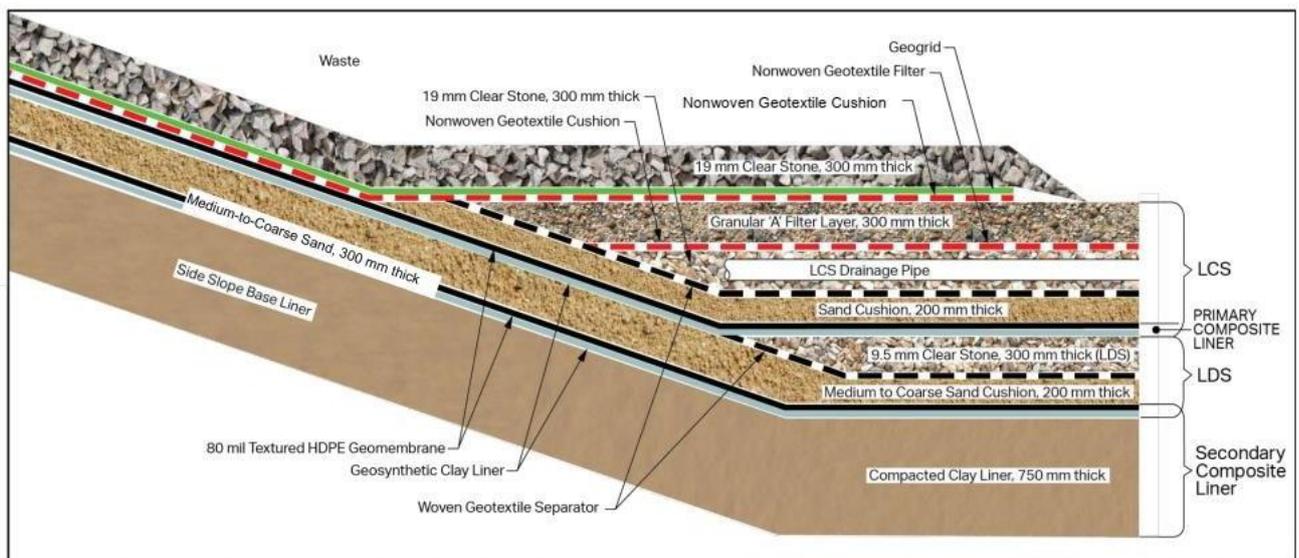
底襯系統總厚度為 2.05 公尺(圖 3.18)。材料選擇依據 ECM 中滲濾液的放射性與化學特性。系統中的高密度聚乙烯(High-Density Polyethylene, HDPE)土工止水膜採白色表面設計。白色表面可反射陽光，減少安裝過程中因熱膨脹造成的起皺與變形問題。底襯系統的預估滲漏率約為 ≤ 2 mm/year。

圖 3.19 顯示了基底襯墊系統在 ECM 地板和 ECM 內部圍堤部分交接處的配置。基底襯墊和 ECM 地板表面之間定義了一個 5%至 10%的複合縱向坡度。隨著縱向坡度提供了 3%的坡度，以促進滲出污水排水至 LCS 排水層，每個谷部均配置收集管線以促進排水。在 3H:1V 側坡區，系統內設置土工格柵(geogrid)，以防止土工不織布過濾層與初級襯墊之大顆粒(19 mm)乾淨石材排水層於施工期間發生下滑。此外，在側坡上方 HDPE 土工止水膜上鋪設一層土工不織布，以保護土工止水膜不受上覆粒徑為 19 mm 乾淨石材排水層中尖銳顆粒造成的局部應變或破損。



資料來源：改自 Kingsbury et al. (2021)

圖 3.18 NSDF 底襯系統剖面圖

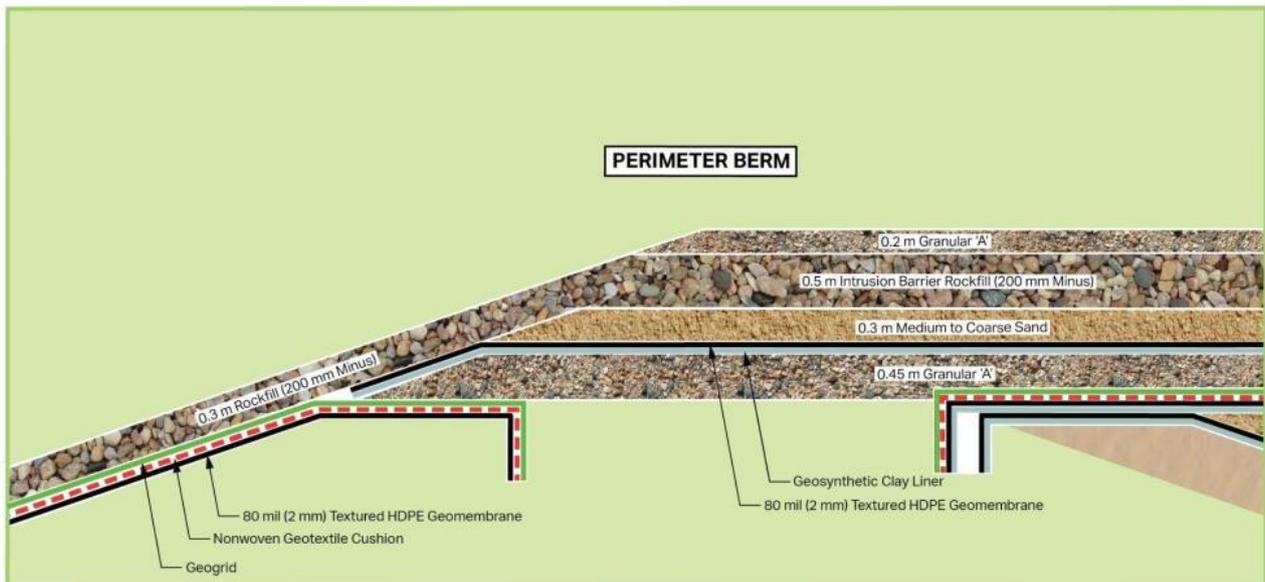


資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.19 NSDF 邊坡基層襯砌系統剖面圖

(3) 周邊護堤

周邊護堤構造如圖 3.20 所示，周邊護堤構成 ECM 的外部邊界與側牆，圍繞整個處置模塊形成封閉周界。其主要功能是在 ECM 運作期間及封閉後的設計期間內，維持包覆系統的結構完整性，並隔離與圍封廢棄物及滲出污水，同時減少地表水自鄰近區域流入 ECM。周邊護堤由三層粒徑逐漸變化的填料構成，自上而下由細至粗。護堤側坡設置高密度聚乙烯(HDPE)土工止水膜、土工皂土毯(GCL)及夯實黏土阻水層(CCL)所組成的初級、次級複合襯層，以圍封廢棄物與滲出污水。GCL 具低水力傳導特性，可有效抑制滲出污水在底部襯層系統內的流動。由岩石材料構築的護堤同時作為 ECM 的側牆，防止外部入侵並確保廢棄物與生物圈之隔離。護堤頂部設計可供車輛通行，便於運作與監測，並兼具導流功能，引導暴雨徑流遠離 ECM 包覆區。堤頂寬度 7 公尺，外表面覆蓋岩石層以防止侵蝕。

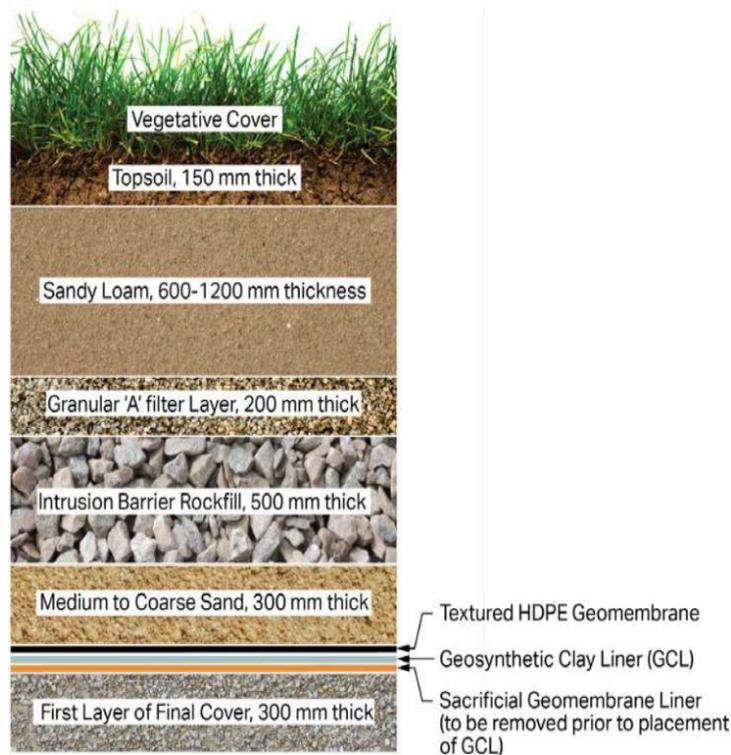


資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.20 NSDF 工程圍堰土墩周邊護堤剖面圖

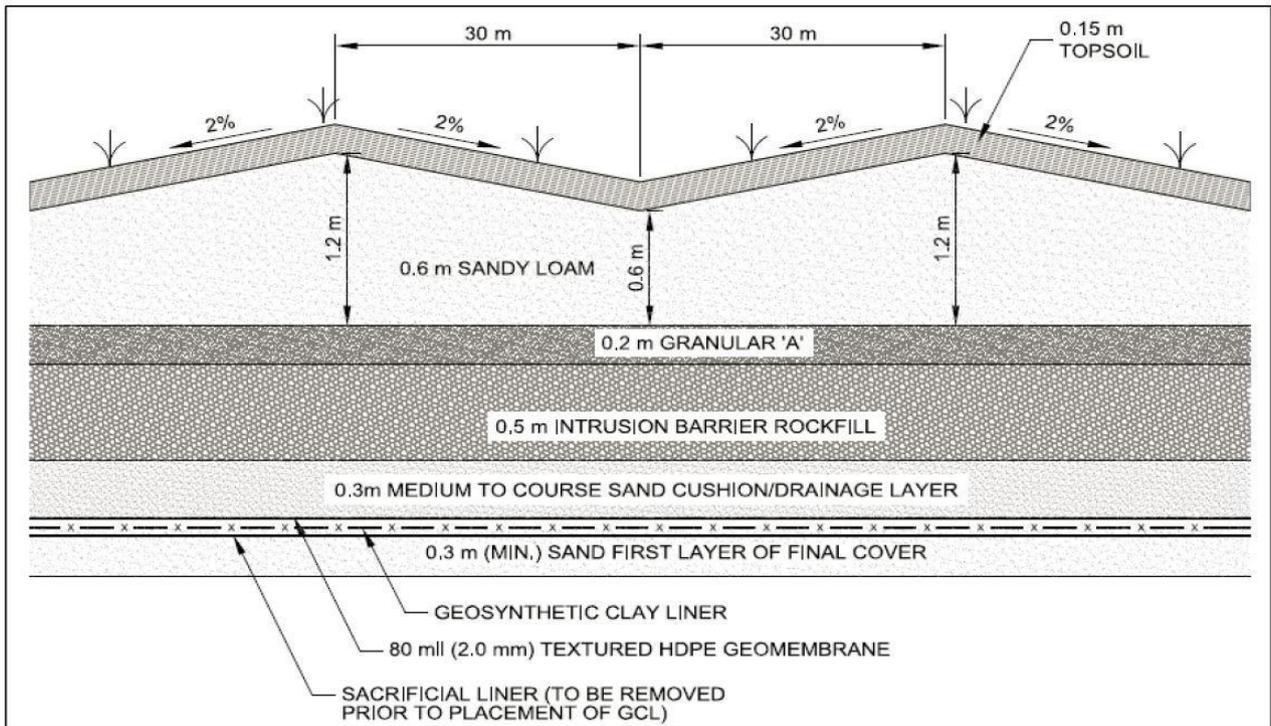
(4) 最終覆蓋系統

ECM 最終覆蓋系統旨在保護人類與自然環境免受廢棄物及其衍生物污染影響，並確保地表環境維持在背景輻射值附近。此系統具包封與隔離功能，為多層組成，由上而下依序為：(1)植被覆蓋層，以提供美觀的表面，增強蒸散作用，並減少侵蝕的可能性；(2)提供阻隔輻射的一般砂質壤土(sandy loam)填充層；(3)阻止動植物入侵的粗石層，以及(4)控制滲水的 HDPE 與 GCL。該系統可有效防止降水入滲，減少滲出水產生，並在封閉後階段維持廢棄物與外界隔離。覆蓋層總厚度隨地形略有變化，最小厚度為 2.05 公尺，可充分屏蔽廢棄物輻射，圖 3.21 顯示了覆蓋層自上而下的結構。在最終覆蓋層上安裝四個永久性的花崗岩標記，標示設施名稱、封閉日期、面積、廢棄物容量或其他關於處置設施的重要資訊。隨著設施整個處置規劃的推進及 CNSC 相關指導方針的完備，設施封閉的規劃與細節可能會有所調整。其中，砂質壤土填充層採山脊-山谷幾何配置(圖 3.22)，此幾何設計可降低集水流量與流速，並以可控方式引導地表逕流。



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.21 NSDF 最終覆蓋系統剖面 5716



資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.22 NSDF 最終覆蓋層山脊-山谷幾何配置剖面圖

3.2.3 設施施工

關於設施施工，《施工品質保證計劃(Construction Quality Assurance, CQA)》(AECOM, 2019) 記錄了 NSDF 施工所需的品質保證程序與監測要求。NSDF 的施工將依據施工圖說與規範執行，並符合 ISO 9001:2015 的品質管理要求。所有施工工作均須依施工規範進行檢查與測試，以確保施工品質與材料皆符合驗收標準。ECM 的施工品質與品質管制對其達成長期安全性能具有關鍵影響，因此制定並遵循完善的施工規範與 CQA，以降低施工與材料相關的不確定性。

CNL 的施工程序提供外部承包商在 CNL 場址進行施工與設備安裝的作業框架，確保工程活動受適當控管，並在核准的安全範圍與法規要求下執行。相關作業由多項程序文件加以管理，提供必要指引，以確保所有施工活動符合《核電廠管理系統要求》(CSA, 2012a)之規範。

3.2.4 設施運轉

設施營運依據「整合式作業管制(Integrated Work Control)」(CNL, 2019c) 執行，內容包括：

- 正常運轉及異常狀況應變的作業程序；
- 緊急狀況下的應變程序；
- 新設備測試時的試運轉程序；
- 設備或系統在維護、修理、校正、檢查或測試後的復役作業，須依據 NSDF 主導文件索引(待制定)所列文件執行；
- 因設備故障、維護或修改而需採用的臨時程序；
- 非例行或不常執行的高危害作業，須接受相同標準的審查、核准與授權程序。

其他必要的管制文件包含 CRL 場址許可證、CRL 許可證條件手冊、近地表處置設施授權文件、品質保證手冊，以及管理系統主導文件索引等。

3.3 安全評估

NSDF 安全論證報告有關於安全評估之章節提供了關於 NSDF 在開發、營運、封閉及封閉後各階段相關安全議題的評估。評估內容將概述現有的資訊，詳細資料則記載於相關的支援文件及參考資料中。與 NSDF 安全性相關的主要評估面向包括：

- 封閉後的輻射影響(Post-closure Radiological Impact)
- 營運期間的安全性(Operational Safety)
- 非放射性環境影響(Non-radiological Environmental Impact)
- 場址與工程(Site and Engineering)
- 管理系統(Management System)

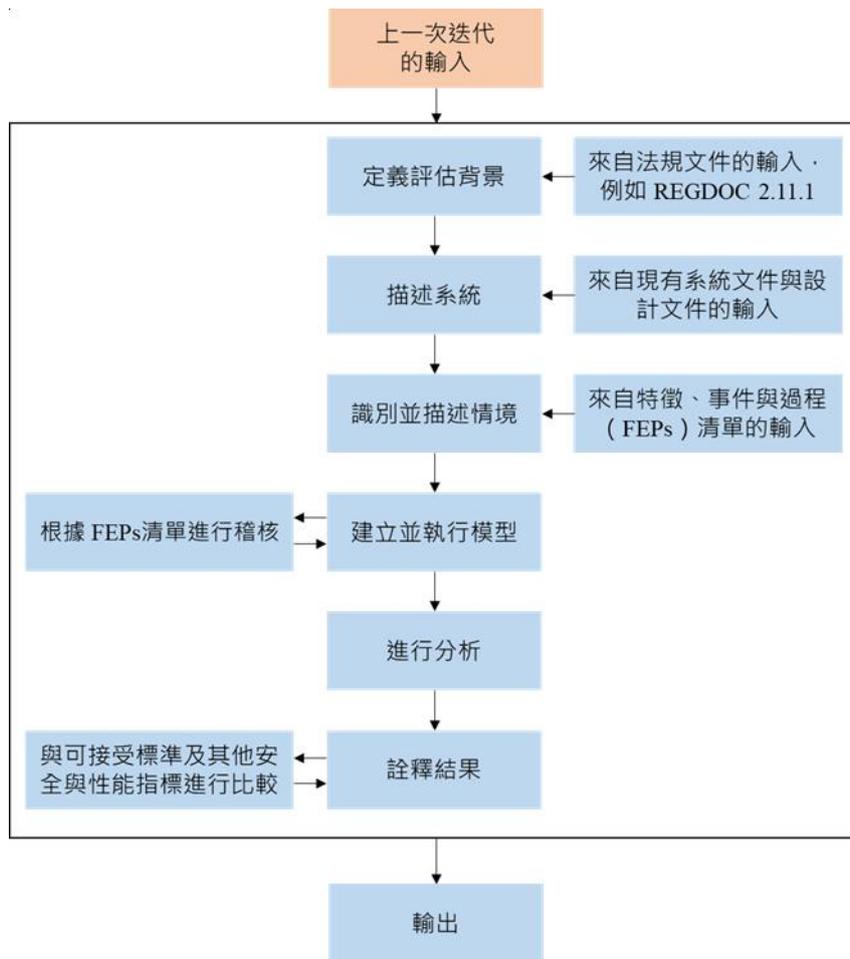
- 科學與工程原則(Scientific and Engineering Principles)
- 場址特性調查品質(Quality of Site Characterization)

安全性評估採用定性與定量分析方法，考量多種潛在起始事件與情節，以全面評估各階段可能的風險與影響。

1. 封閉後安全評估(PostSA)

NSDF 的封閉後安全評估(Post-Closure Safety Assessment, PostSA) (Arcadis & Quintessa, 2020)依據 IAEA 所制定的「近地表處置設施安全評估方法(Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, ISAM, Volume 1)」(IAEA, 2004a)進行開發。該方法為一套系統化、階段性推進之流程，其主要步驟如下(圖 3.23)：

- **評估背景設定**：明確界定評估範圍，包括假設、限制條件(如監管要求)、評估目的與終點、不確定性的處理方式，以及時間尺度；
- **現有資料整理**：蒐集並彙整與封閉後安全相關之資訊，包括廢棄物特性、處置設施、地質環境與地表環境等；
- **未來情節辨識**：採用 FEPs 分析法，系統性辨識潛在的系統演化情節，並據以設計模擬案例，以評估不同條件下的系統表現之不確定性及敏感度；
- **模型與資料開發**：針對各種情節與案例建立概念模型與數值模型，並利用適當模擬工具執行，以評估不確定性對結果的影響；
- **結果分析與解讀**：分析模擬結果，評估系統整體穩健性與關鍵不確定性，並與 CNSC REGDOC-2.11.1(CNSC, 2018b)規範之參考標準進行比較。



資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

圖 3.23 封閉後安全評估所採用的方法流程

(1) 特徵、事件與作用(FEPs)分析

「特徵、事件與作用(FEPs)」是封閉後安全評估(PostSA)中為確保完整性的重要基礎。其概念源自經濟合作暨發展組織(OECD)核能機構(NEA)之安全案例整合小組(IGSC)及其前身「功能評估諮詢小組」(Performance Assessment Advisory Group, PAAG)所建立。自 1990 年代起，這些專家群持續建構並維護 FEPs 資料庫，作為放射性廢棄物處置安全論證的共同起點，使各國在進行長期評估時可依循標準化清單進行分析。這三項基本要素如下：

- **特徵(Features)**：系統的物理特性或屬性，例如岩性、孔隙率、滲透率、斷層、井以及鄰近社區。

- **事件(Events):**可能在未來發生、影響系統一個或多個組成部分的離散事件，如地震、地層下陷、洪水與人為侵入。
- **作用(Processes):**系統中持續作用的物理與化學作用，例如化學反應、礦物沉澱、地下水流動、吸附作用及現地應力變化。

NSDF 安全論證中採用 OECD/NEA 最新且可取得的國際 FEPs 清單，分為五大類：

- **第 1 類「外部因素」:**源自處置系統(處置設施、地質圈、生物圈)外部的作用。
- **第 2 類「廢棄物包件因素」:**與廢棄物形態、包裝及污染物釋放相關的因素。
- **第 3 類「處置設施因素」:**與處置設施結構、開挖擾動區、監測鑽孔及污染物遷移相關的因素。
- **第 4 類「地質圈因素」:**與未受擾動地層及污染物在地質圈遷移有關的因素。
- **第 5 類「生物圈因素」:**與地表環境、人類及生物體內污染物遷移相關因素。

(2) 情節分析

封閉後安全評估旨在評估設施於封閉後，隨時間演化對人類健康與環境的潛在影響。評估以模型模擬設施及周圍環境的長期行為，並系統性蒐集所有合理且可預見的 FEPs，作為安全分析依據。依據 FEPs 所建立的模擬情節可分為以下類型：

A. 正常演化情節(Normal Evolution Scenario, NES)

此情節針對 ECM 及其周邊區域的預期演變與潛在排放物，依據 CNSC 發布之 REGDOC-2.11.1 要求進行描述。內容涵蓋場址演化、放射性核種來源、傳輸途徑及受體等，為一敘述性、定性評估。模擬時間自設施封閉起延伸至封閉後 10,000 年。

其中，敏感度分析為整個分析過程中重要的一個環節，敏感度分析用以評

估模型與資料中主要不確定性對結果的影響，主要透過改變參數值進行測試。改變這些參數值不代表不確定性的上下限，而是用於檢視不同假設下的系統反應。主要測試的項目包含：

- **改變放射性廢棄物清單：**評估不同初始放射性清單對系統功能之影響。例如將廢棄物包件與散裝廢棄物比例由 14%：86%改為 50%：50%，此清單比例平均放射性活度約增 3.4 倍。
- **改變主動監管期：**將主動監管期由 300 年縮短至 100 年，以檢視控制措施提早終止對受體劑量的影響。
- **改變吸附係數：**吸附控制污染物於地下水中的遷移速率，受化學與礦物成分影響甚大。此情節將吸附係數降低，以測試吸附減弱對釋放量的影響。
- **縮短設施向 Perch Creek 傳輸時間：**以 5 年(原平均 7 年)估算地下水傳輸時間，評估加速傳輸對系統的影響。
- **加速覆蓋層與襯墊的劣化：**模擬工程障壁提前劣化或劣化速率加快對滲透與釋放時機的影響。
- **改變氣候變化：**評估氣溫升高導致蒸發蒸散作用增加、降水減少時對系統的影響。
- **護堤的劣化：**檢視防護堤因設計外強震或長期老化導致部分失效對防護功能的影響。

B. 擾動事件情節(Disruptive Event Scenarios)

此類情節類似「事故」，涵蓋對場址、系統或環境的擾動與無意的人類侵入。這些事件可能挑戰 ECM 完整性並增加暴露風險，發生時間可延續數千年。主要情節如下：

- **鑽孔作業：**於主動監管期結束時，鑽孔誤入廢料層，操作員因挖出受

污染物質而受到輻射劑量。

- **有地下室的房屋**：於主動監管期結束後，住戶於 ECM 上方建造房屋並開挖地下室，挖出物質散布於農園，造成輻射暴露。
- **增強侵蝕**：假設氣候變濕或地震造成覆土層侵蝕加劇，使 ECM 物質被沖刷至沼澤與下游溪流，最終進入渥太華河。報告中選定的侵蝕速率為 4.00×10^{-4} m/year，位於其他處置設施預測值的上限範圍。
- **局部覆蓋層失效**：此情節發生於主動監管期結束，即封閉後 300 年，可能因處置區下陷或地震導致覆蓋層局部失效，導致覆蓋層的滲透率增加或水流經廢棄物的時間比正常演化情節條件下更早。
- **局部襯墊失效**：此情節發生於主動監管期結束，即封閉後 300 年，基底襯墊可能因為多種不同事件(如處置區下陷或地震等)引起局部破損，導致污染物外洩。
- **護堤損壞**：強震造成防護堤下坡邊界破損，影響防洪高度與覆土穩定性，導致水位可能越過護堤，並增加污染物沿下游擴散的風險。

C. 縱深防禦情節(Defence-in-Depth Scenarios)

此類情節為極端假設，用以探索安全功能的極限。雖發生機率極低，但有助評估系統韌性。主要模擬如下：

- **地質圈的作用**：將所有核種的地質圈吸附係數(K_d)值設為零，模擬完全可溶、立即遷移的最極端情況。
- **覆蓋層的作用**：假設封閉時覆蓋層缺失，允許更多的水進入設施導致積水。
- **基底襯墊的作用**：假設基底襯墊完全失效，使滲流水直接外洩。
- **滑坡事件**：假設滑坡導致圍牆下移，部分廢料外露，使水流可直接排

出設施。

D. 劑量最佳化情節(Dose Optimization Scenarios)

在 NSDF 計畫的設計與模式分析中，封閉後研究曾探討多項最佳化策略，包括廢棄物清單調整(如移除 ILW)、氬與鐳含量等。在此處封閉後安全評估(PostSA)主要關注以下替代方案：

- **廢棄物包件的阻隔功能：**以鋼製內襯搭配灌漿包件限制放射性核種的釋放。以往正常演變情節假設包件及灌漿長期不提供阻隔，本情節評估若將其阻隔效果納入模式，結果會有何差異。
- **緩衝區與土地使用假設：**正常演變情節假設土地使用限制最終被忽略，受體可能進入場址。本情節則評估若限制得以遵循，受體不居於場內，而以處置場外之居民(沿渥太華河、使用河水飲用、灌溉與捕魚)為代表，對劑量的影響。
- **廢棄物配置與氬氣最佳化：**ECM 中廢棄物會產生氬氣。本情節透過將含有高量氬之廢棄物置於 ECM 深層，或限制上層氬濃度，評估劑量最佳化效果。

E. 假設情節(What If? Scenarios)

此類情節為極端假設，用以探索安全功能的極限。雖發生機率極低，但有助評估系統韌性。例如：

- **大規模挖掘與耕作：**模擬長時間、大範圍擾動導致更多廢棄物外露與暴露途徑延長，為邊界性極端情節。
- **淺層污染水井：**此情節模擬受體從受污染地下水帶影響的淺層水井取水，並將該水用於飲用、灌溉與畜牧，導致額外的輻射暴露途徑。
- **永久積水：**覆蓋層劣化而基底襯墊仍完好，導致水滯留於設施內之長期積水情況。

2. 營運階段之安全評估

NSDF 與營運階段安全相關的安全分析／評估文件包括 NSDF 安全分析報告(Safety Analysis Report, SAR)(CNL, 2020c)、NSDF 關鍵性安全文件、合理可行的輻射防護最佳化評估(As Low As Reasonably Achievable, ALARA)及火災危害分析(Fire Hazard Analysis, FHA)。其中，NSDF 安全論證報告占較大篇幅在說明 NSDF 安全分析報告(SAR)。該報告的範圍是基於詳細設計包、擬議的操作和識別的危害，進行 NSDF 的營運安全分析。

(1) 評估範圍

NSDF 安全分析報告(SAR)所評估的時間範圍包括 NSDF 的封閉前階段，這包括建設期、50 年的營運期和 30 年的封閉期。評估了正常營運和事故條件下，對現場和非現場人員以及環境的安全性。核能安全評估涵蓋正常營運和事故條件，包括預期營運事件(Anticipated Operational Occurrences, AOO)、設計基準事故(Design Basis Accidents, DBA)和超出設計基準事故(Beyond Design Basis Accidents, BDBA)，包括設計延伸情節以及一般職業健康與安全部分，則評估正常運轉與一般工業事故之風險。

(2) 危害識別與事故分析

危害分析的旨在於確保所有潛在危害均被識別與評估，其重點為與 NSDF 設計及運轉相關的潛在事故。一般而言，危害分析程序包括：

- 系統性評估危害、發展事故序列／情節，並確認行政與工程控制措施；
- 定性評估各危害或事件之發生頻率與後果(嚴重性)；
- 結合頻率與後果評估結果，以確定事件的風險排序與減緩優先級。

所採用的風險矩陣、風險等級、頻率及嚴重性分級，分別列於表 3.7 至表 3.10。危害分析的危害和事件按事故類型進行分組，可歸納為 4 類：

- A 類：預期營運事件(AOO)；

- B類：設計基準事故(DBA)；
- C類：超出設計基準之事故(BDBA)(含 DEC)s)；
- D類：常規健康與安全事件。

A、B、C類屬具放射性後果之事件；D類則為非放射性事件，進行質性評估以說明影響與減緩措施。

表 3.7 NSDF 風險矩陣

頻率	S0	S1	S2	S3
AOO (經常或偶爾； $\geq 10^{-2}/a$)	R0	R1	R2	R3
DBA ($< 10^{-2}/a$ 及 $\geq 10^{-5}/a$)	R0	R0	R1	R2
BDBA ($10^{-6}/a$ 至 $< 10^{-5}/a$)	R0	R0	R0	R1

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

表 3.8 風險等級解釋指引

風險排名	定義
R0	風險微乎其微，無須採取進一步措施。
R1	風險可容忍；無需採取進一步的防護措施，但應考慮採取一些措施。
R2	風險不合理；必須採取工程措施來防範危險。
R3	風險不合理；提議的製程或設備本身就不安全，需對設計進行重大修改。

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

表 3.9 頻率等級

頻率等級	頻率範圍(事件/年)	定義
F0	10^{-6} to $< 10^{-5}$	超出設計基準之事故(BDBA)：設施整個使用年限間極不可能發生的事故。這類事故發生頻率較低，但潛在後果可能比設計基準事故更為嚴重。
F1	$> 10^{-5}$ to 10^{-2}	設計基準事故(DBA)：設施的使用年限間不太可能發生，但被認為有可能發生的事故。
F2	$> 10^{-2}$	預期營運事件(AOO)：偶發事件之異常情況，預計該事件會在設施的使用年限間發生，但不屬於正常運作。

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

表 3.10 嚴重性分級

嚴重程度分級	定義
S0	<ul style="list-style-type: none"> • 工業後果(Industrial Consequences)：影響可忽略，僅造成需一般醫療處理的輕微傷害，無需休假或停工。 • 營運後果(Operational Consequences)：無營運影響，設施無需停機(例如進行清理等作業)。 • 輻射後果(Radiological Consequences)：有效劑量最高達1 mSv(場內)或0.1 mSv(場外)。 • 環境後果(Environmental Consequences)：對環境之排放可忽略，影響雖可測量但極小或可忽略，且侷限於場區內或持續時間短暫。
S1	<ul style="list-style-type: none"> • 工業後果：後果屬輕微等級，包括需由醫師(非CNL健康中心護理人員)進行治療之傷害或職業病；或因傷導致醫師開立工作限制(且CNL提供調整後工作)，或需休假(工時損失)不超過5天。 • 營運後果：對營運造成輕微影響，設施可能需停機不超過1天。 • 輻射性後果：有效劑量介於1至5 mSv(場內)，或0.1至0.5 mSv(場外)。 • 環境後果：對環境造成輕微釋放，影響可被量測；其影響範圍中等(主要在場內，亦可能延伸至場外)，持續時間中等。
S2	<ul style="list-style-type: none"> • 工業後果：後果屬中等程度，包括電擊、有毒氣體環境或缺氧環境導致失去意識，需實施救援、復甦或其他緊急處置程序。造成一名或多名作業人員出現暫時性失能傷害或疾病，並導致累計工時損失超過5天但不超過60天。 • 營運後果：對營運造成中等影響，設施可能需停機1至5天以上。 • 輻射後果：有效劑量介於5至50 mSv(場內)或0.5至20 mSv(場外)之間。 • 環境後果：對環境造成中等程度釋放，影響範圍廣泛(含場內與場外)，且持續時間較長。
S3	<ul style="list-style-type: none"> • 工業後果：後果嚴重，可能導致死亡；或造成肢體截肢、肢體部分喪失、肢體功能永久喪失，或身體機能永久損傷；亦或造成一名或多名作業人員非永久性失能傷害，並導致累計失能工時超過60天。 • 營運後果：對營運造成重大影響，並導致設施停運超過5天。 • 輻射後果：有效劑量超過50 mSv(場內)或20 mSv(場外)。 • 環境後果：發生重大放射性物質外洩，對環境造成災難性影響。

資料來源：翻譯自 Kingsbury et al. (2021)

3. 非放射性環境影響

報告指出，NSDF 排放中的非放射性污染物可能會對環境產生影響，NSDF 與非放射性環境影響相關的安全分析及評估包括 NSDF 安全分析報告(SAR)(CNL, 2020d)、NSDF 封閉後安全評估(PostSA)(Arcadis & Quintessa, 2020)、生態風險評估報告(EcoRA)(CNL, 2020e)、環境影響報告書(Golder Associates Inc., 2019)及《常規安全評估》(AECOM, 2018a)。其中，NSDF 安全論證報告針對非放射性環境影響列舉了四項，包含空氣品質、地下水、地表環境(封閉前階段)以及封閉後階段等，以下就上述及提之內容進行說明。

(1) 空氣品質

ECM 產生的垃圾掩埋氣體主要為低濃度甲烷與二氧化碳，並會主要隨作業區域上方的空氣流動而散逸，這些廢棄物產生的垃圾掩埋氣體可能含有少量的氚或碳-14。氣體產生量會隨 ECM 在 50 年營運期間逐漸填滿而增加。封閉並完成最終覆土後，由於廢棄物中的水分與氧氣可用量降低，氣體產生量將隨之減少。NSDF 計畫的指標性污染物排放包括：懸浮微粒、粒狀物質(PM10 與 PM2.5)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)及氮氧化物(NO_x)。大氣排放可能影響人類、水生生物與陸域生物的健康。

- A. 儲槽氣體排放：WWTP 的非放射性污染物之氣體排放，來源為儲存液體的蒸發，以及液位變化所造成的排放。計算結果顯示，相關排放量皆低於國家污染物排放清冊(NPRI)揮發性有機化合物 10 公噸之申報門檻。
- B. 溫室氣體排放：NSDF 計畫在建設與營運期間所排放的溫室氣體包括二氧化碳、甲烷與氧化亞氮。建設期排放約佔加拿大總排放的 0.004%、安大略省的 0.02%；營運期則分別為 0.001%與 0.006%。NSDF 導致 CRL 場址溫室氣體排放量增加，但對省級與全國排放增幅極小，因此環境影響被視為可忽略。

(2) 地下水

地下水的水量與水質是自然與人類環境的重要指標。水文地質評估主要預測地下水流動模式、水位變化及特定非放射性物質濃度。WWTP 處理後排放水進入處置

設施周圍的沼澤濕地，可能影響地下水質。非放射性物質排放遵循聯邦及省級水質之相關導則，放射性物質則依加拿大衛生部飲用水相關導則。運轉期間，排放水將符合上述標準，因此對地下水影響可忽略。NSDF 的襯墊系統在運轉及封閉階段，將大幅度限制地下水和地表水的影響。剩餘影響主要來自建設活動引起的地下水位/流動變化，或 ECM 滲水可能造成水量/水質變化。除此之外，也將會制訂地下水監測計畫，並符合「核設施地下水保護標準」(CNSC, 2014)。

(3) 地表環境(封閉前階段)

封閉前階段對於地表環境重要因素所造成的影響主要與植被清除或翻耕，以及現有植被和地形特徵的喪失或改變有關。此外，由於施工設備和車輛的交通活動，布蘭丁龜(Blanding's turtle)與東部奶蛇(eastern milksnake)在道路上遭受受傷或死亡的風險也隨之增加。

(4) 封閉後階段

生態風險評估報告(EcoRA)(CNL, 2020e)使用封閉後安全評估(PostSA)模型產生的環境濃度，評估廢棄物中主要潛在污染物的生態風險。其中，Al(鋁)、Cu(銅)、Pb(鉛)及 U(鈾)被選定納入 EcoRA 受關注的潛在非放射性污染物。

A. 主要分析項目

各項封閉後情節中(除人為侵入外)，化學污染物主要由 ECM 下方向地下水釋放，並影響下游的 Perch Creek 及渥太華河的地下水、沉積物與地表水。正常演變情境下亦可能出現 ECM 積水，使 ECM 積水外溢至下游的畜牧區，污染當地土壤，進而影響空氣、作物與牲畜。人為侵入情節中，生物則暴露於挖掘後散布於地表的污染土壤。針對各情節預測 10,000 年期間內，各環境介質的最大污染濃度。此最大濃度會與背景值相加，再與最保守的環境標準比較，用以篩選潛在關注污染物。篩選標準採用安大略省環境、保育與公園廳(Ministry of the Environment, Conservation and Parks, MECP)與加拿大環境部長理事會(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)等單位的規範。若污染物在任一

介質中超標，且具備毒性參考值(Toxicity Reference Value , TRV)，即納入後續評估，符合加拿大標準協會(CSA)頒布之「第一類核設施與鈾礦及鈾磨礦場的環境風險評估」(CSA, 2012b)對環境風險評估的要求。

B. 評估結果

生態風險評估結果顯示，鈾在所有情節中皆低於篩選指數，無潛在風險。銅與鉛在多數情境下雖有超標，但主要由背景濃度主導。僅有三種極端且發生機率極低的情節(增強侵蝕、一連串山崩、大量挖掘與農耕)來自 NSDF 計畫造成的暴露。這些情節皆假設障壁失效或大規模地表破壞，屬高度保守推估。其中，NSDF 中的鉛多被包覆於鋼材或經處理以符合處置要求，未納入本次評估；若考量這些處理，鉛的釋放時程可能更晚、峰值更低。此外，一般掩埋場也可包含大量鉛，ECM 的工程覆蓋系統設計比照一般掩埋場的最佳工程標準，預期在鉛的長期圍阻上可達相同水準。

3.4 反覆修正與設計最佳化

從 NSDF 安全論證報告可見，該計畫經歷多次設計修正與優化，持續採納國內外最新技術指引、標準與成熟技術經驗，並結合最新研發成果。參與設計與審查的團隊包含 CNL 專家、顧問公司、產業界與學術界成員，另邀請具公正性的第三方進行獨立審查。整體設計優化過程充分納入利害關係人(interested parties)之意見與建議，顯示該案在技術與社會溝通兩層面均重視透明性與可問責性。安全論證報告對設計修正與優化的範圍有明確說明，涵蓋場址與設計選擇、場址特性調查、ECM 設計、污水處理廠配置、管理與行政措施、廢棄物清單與接納標準，以及封閉後階段的功能評估模型。以下說明反覆修正與設計最佳化工作之執行方法及法源依據，並以「場址特性調查」與「ECM 設計優化」兩部分為例，說明其在安全論證中所扮演的角色。

1. 執行方法與法源依據

本報告依據 IAEA SSG-23 導則(IAEA, 2012)執行反覆修正與設計最佳化工作，從中

尋找最佳之方案。主要三項核心問題：

- 有哪些方案？
- 各方案的影響、優缺點為何？
- 為何選擇某方案為最終方案？

各方案均提供足夠細節，並依技術可行性、經濟性及環境影響進行比較後，選定最適方案。公眾參與為決策的重要部分，這些方案之摘要已公開諮詢並納入 NSDF 最終設計考量。此外，方案評估亦納入「社會可接受性」，反映公眾與原住民族意見。

根據 IAEA SSG-23 導則(IAEA, 2012)的規定，優先選擇之設計方案應透過一套明確且合乎邏輯的程序進行。為了確定開發處置設施的最佳或最有利方式，首先對各方案進行技術可行性的評估。對於被認為具備技術可行性的方案，進一步比較其經濟可行性(即成本)，以及可能造成的環境影響。

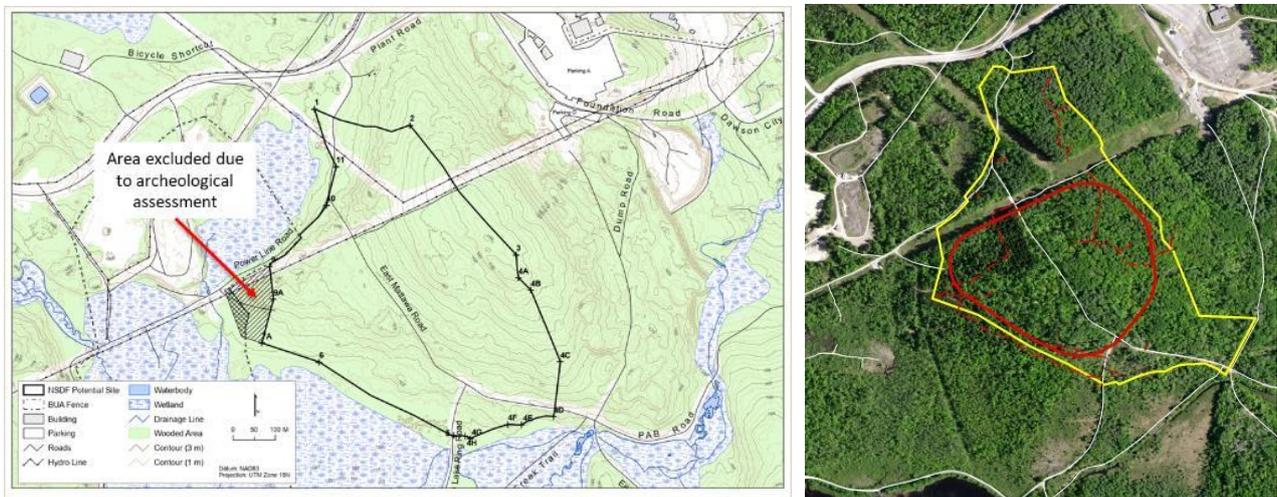
2. 場址特性調查

安全論證指出，「場址特徵化」(site characterization)在降低場址條件與潛在風險相關不確定性方面具有關鍵貢獻，其目的在於：

- 建立場址的環境基線與專屬資訊；
- 支援場址選擇與設計階段的決策；
- 以場址專屬資料與參數進行詳細設計；
- 建立具代表性的數值模型；
- 發展環境監測機制。

場址特性調查採跨學科整合方式進行，涵蓋土壤、岩石、地表水與地下水的水質與水量、生物多樣性等項目。於場址選擇階段，CNL 針對 NSDF 及備選場址均進行詳細調查，以確保比較依據一致。在初期階段，團隊利用 CRL 既有地質資料與 LIDAR 生成地形模型，並以透地雷達(GPR)確認表層厚度。進入詳細設計後，調查重點集中於 NSDF 場

址，以支援設計、施工與監測活動，並建立場址專屬數值模型以支援許可申請。報告顯示，於第 1 至第 6 階段及營運監控期間均進行廣泛調查，使水文地質模型能依據現地量測資料(如岩體特性與地下水流向)進行校正，提高模型代表性。同時，為建立基線資料並支援施工，CNL 亦針對土壤與植被進行放射性檢測，並設置地下水監測井與空氣監測系統。此外，調查結果直接促使多項設計優化，包括場址邊界調整、受威脅物種保護措施以及監測系統設計修正。例如，考古評估(Archaeological Assessment)顯示部分區域具文化遺址潛勢，因此 CNL 依結果修正場址邊界(圖 3.24)，並於獲得完整評估前暫緩場址最終確認。



(a)初始場址邊界

(b)修正後之場址邊界

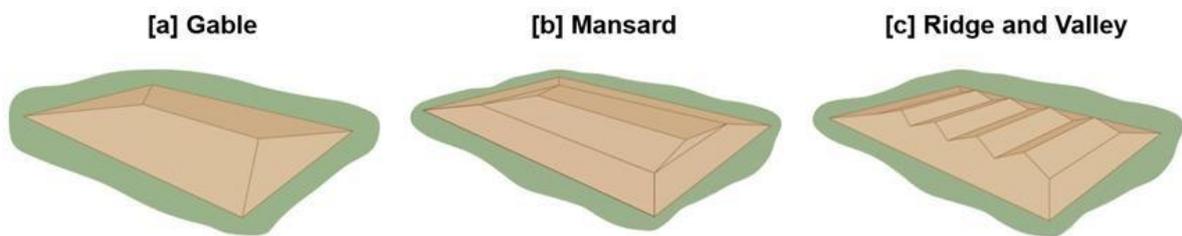
資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.24 因應考古評估之場址邊界變更

3. ECM 設計優化

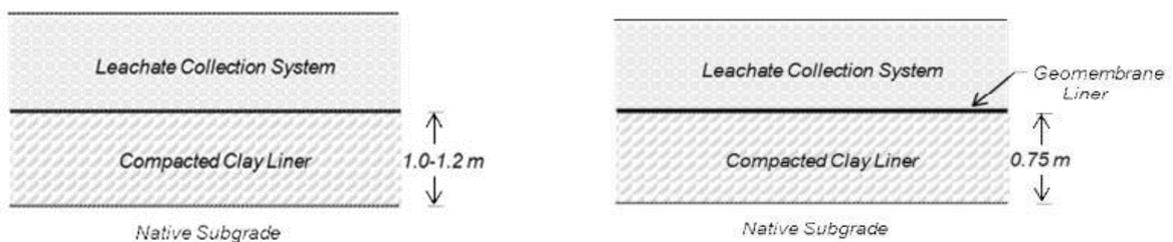
ECM 結構設計年限為 550 年。依報告分析與材料試驗，高密度聚乙烯(HDPE)地工止水膜使用年限遠超設計要求，足以支撐長期安全目標。設計歷經概念、30%、60%、90%、最終設計與竣工後更新等階段，並遵循公認方法學與國際標準。以工程設計在 30%的開發階段為例，曾進行方案優選(Optioneering)研究，以比較 ECM 各設計構件

之方案。評估項目包括：ECM 地板標高、滲出污水收集系統(LCS)與滲出污水偵測系統(LDS)、底部襯墊系統的類型及最終覆蓋系統的幾何形狀與配置。舉例而言，最終覆蓋系統的幾何設計對 ECM 的長期穩定性與維護性具有關鍵影響。圖 3.25 顯示方案研究中考慮的三種配置，包含人字形(gable)、折線式(mansard)或山脊與谷地式(ridges and valleys)。最終選擇山脊與谷地式配置，以更有效控制暴雨逕流、防止侵蝕並確保長期功能。底襯系統在優先選擇方案分析中，考慮了三種設計選項(圖 3.26)，包含單層壓實黏土襯墊(Option 1)、單層複合襯墊(Option 2)、或雙層複合襯墊(Option 3)。最終選擇雙層複合襯墊(Option 3)作為底部襯墊系統。



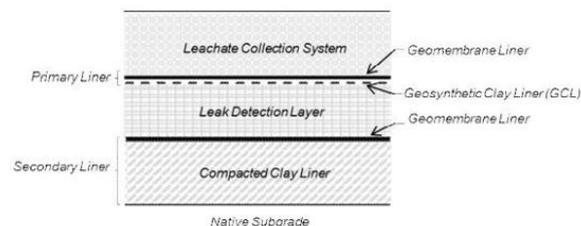
資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.25 NSDF 中 ECM 之覆蓋系統選項



單層緊密黏土層(Option 1)

單層複合襯墊(Option 2)



雙層複合襯墊(Option 3)

資料來源：Kingsbury et al. (2021)

圖 3.26 NSDF 中 ECM 之基礎襯墊系統選項

3.5 不確定性管理

NSDF 安全論證報告將不確定性管理視為確保長期安全的重要基礎，整體策略包括「識別、避免、降低、評估及管理」等步驟。不確定性的辨識與溝通，是理解處置系統行為與建立安全信心的核心。在設計階段，處置系統以穩定性與多重防護功能為設計原則，避免採用具高度不確定性的概念或結構，並透過反覆設計優化、材料與特性調查及安全分析，以逐步降低不確定性。對於仍無法完全消除的部分，則依其對人員與環境可能造成的影響進行評估與管理。

1. 主要目的與策略

在設計與評估階段，NSDF 透過敏感度研究、不確定性分析與保守假設來處理模型與資料的不確定性；而於營運期間，則利用環境監測結果驗證模型預測，並於必要時更新評估模型。從設計、營運到封閉各階段，皆要求系統性地辨識並納入關鍵不確定性，以作為決策與風險管理的依據。安全論證中的不確定性處理涵蓋三個面向：

- 識別處置系統中存在的
不確定性；
- 分析這些不確定性的影響與重要性；
- 管理重大不確定性的策略與方法。

安全評估的穩健性與可靠性，取決於不確定性處理的完整性。報告中採用分級方法(graded approach)，綜合設計驗證、操作經驗及類似設施資料。對於關鍵安全系統，因維修困難，其設計中已內含足夠安全邊際。在安全分析與設計決策中，不確定性分析著重於資料與參數誤差對結果的傳遞；敏感度分析則評估模型假設或參數變動對結果的影響。進一步採用序率式分析(probabilistic approach)，量化關鍵參數的不確定性、估算情節發生機率，並據以確認對人員、設施與環境的潛在風險。這些結果可用於制訂符合法規、具長期穩定性的保守設計與操作準則。此外，NSDF 強調透過對「信心度(confidence level)」的評估與提升，進一步降低整體不確定性。報告中亦列出針對主要不確定來源的後續研究與開發計畫，以持續提升模型與資料的可信度。

2. 不確定性處理方法與流程

依據封閉後安全評估(PostSA)(Arcadis & Quintessa, 2020)中的不確定性可分為三大類：

- **未來或情節不確定性**：系統演變與人類行為在長期時間尺度下的變化；
- **模型不確定性**：與概念模型、數學模型或計算模型之近似與簡化有關的誤差；
- **資料與參數不確定性**：由於場址特定資料不足或試驗解釋誤差造成的參數估計變異。

在後續的安全評估中，這些不確定性依以下原則加以管理：

- 以多組情節、模型與資料組合進行分析；
- 優先採用保守假設；
- 對自然變異性採用時間或空間平均處理；
- 對關鍵參數執行不確定性與敏感度分析。

3. 情節、模型與資料範圍

在 PostSA 中，針對未來場址演變與人類行為之不確定性，透過系統化的情節識別程序，建立涵蓋多種可能發展路徑的代表性情節。此程序以 FEPs 分析為基礎，分類並評估處置系統的潛在影響因素，據以界定關鍵不確定性及其可能後果。模型不確定性則透過結構化的模型開發流程及 FEPs 分析辨識，部分模型不確定性可轉化為參數變異，進而以資料不確定性方法處理。對於資料不確定性，報告採用兩種主要分析方法：

- **確定性分析(Deterministic Analysis)**：以多組自洽的參數組合建立一系列計算案例，與「參考案例」比較以辨識參數變動之影響。此方法能釐清特定參數或組合對結果的主導性，但無法系統涵蓋所有不確定性空間。
- **機率分析(Probabilistic Analysis)**：為關鍵參數設定機率分佈函數，進行大量隨機抽樣模擬，輸出結果分佈。此方法能全面探索模型與參數的不確定範圍，但若分佈函數表徵不足，可能導入額外不確定性，且結果解釋較具挑戰性。

綜合考量後，PostSA 主要採用確定性方法，以「最佳估計」與「保守值」為分析基礎，同時輔以關鍵參數的不確定性分析，以界定潛在情節範圍並驗證安全邊界。

4. 保守假設與評估原則

安全評估過程需採用多項假設，涵蓋情節、模型與資料層面。NSDF 報告將假設分為「現實型」與「保守型」，並對主要假設逐一記錄其潛在影響。當存在顯著不確定性時，評估傾向採用保守假設，以確保安全邊界不被低估。然而，報告亦強調過度保守假設的疊加可能導致不合理結果，甚至削弱後續優化研究的效度。因此，在具可靠資料的條件下，採用最佳估計值能維持分析的代表性與合理性。

5. 封閉後安全評估中的不確定性處理

NSDF 封閉後安全評估的主要不確定性來自於對設施及場址在長期演化過程中的了解與模擬。為探討此類不確定性，報告設計多組敏感度假設情節與假設性事件，以分析關鍵參數變動、人為行為、障壁劣化速率及自然作用的潛在影響。封閉後安全評估結果顯示，即使在多種假設與參數組合下，設施仍能符合劑量限值標準。敏感度案例顯示，特定參數(或參數組合)對結果的影響可被量化；而低機率但具高影響的破壞性事件則用以評估極端條件下的系統表現。報告同時納入「縱深防禦」與「假設情節(What-if)」分析，以檢驗障壁功能，並進一步降低極端情況下的不確定性。

3.6 限制、控制與條件

根據 NSDF 安全論證報告所述，設施的限制、控制與條件係依據設計報告、安全分析結果，以及 CNL 管理系統之相關要求所訂定。這些要求涵蓋所有對安全運作具有關鍵影響的系統，其核心目的在於設施各階段，包括建造、營運及封閉階段，確保作業人員、一般民眾與環境受到的放射性與有害物質暴露風險降至最低。此一安全管理架構透過一系列明確的限制與控制條件，建立完整的運作規範機制，用以界定關鍵參數的允許範圍、系統與人員的功能能力、以及設備之功能標準。以下針對建造與試營運階段、封閉前階段、封閉與除役階段，並針對其長期安全評估之檢討、紀錄維護及員工訓練等方面進行說明。

1. 建造與試運轉階段

在建造與試運轉階段，NSDF 透過完善的施工品質保證(CQA)制度(AECOM, 2019)，以確保重要結構、系統與組件(SSCs)均符合設計與安全標準。依據 CQA 計畫，所有關鍵施工項目均需執行檢查與測試，並依既定的驗收標準進行確認。ECM 的建造亦設置明確的檢測要求，包括夯實黏土阻水層、高密度聚乙烯、土工阻水膜、土工格柵等，確保其材料品質與施工完整性。

試運轉計畫規範了各項試運轉活動的準備、審查、核准及版本管理方式，確保責任清楚、可追溯，並依據 CNL 相關計畫的文件階層逐步執行。為保障建造期間的安全與環境保護，NSDF 亦訂有多項限制與控制條件，例如作業人員須完成通用與環境訓練、強風或揚塵時需停止作業、工程區車輛行駛速度限制等。

2. 封閉前階段(Pre-Closure Phase)

在封閉前階段，NSDF 的操作限制與條件依據「操作限制與條件編制指引」(CNL, 2018)所制定，透過界定安全相關參數與實際操作條件之間的明確關聯，確保設施能持續維持在安全操作範圍內。此處的操作限制與條件不僅是作業執行的基本要求，更是保護設施本體、作業人員、其他場內工作人員、場外民眾以及周遭環境免於不可接受風險的核心機制。

在安全限制方面，ECM 內的放射性核種活度須符合 NSDF 安全分析報告(SAR)所列之核准封閉階段處置清單(CNL, 2020d)之上限，以確保封閉期間的輻射安全。此外，封閉前階段亦涵蓋安全操作的通用要求，包括維持設施圍欄與警示系統之完整性、確保廢棄物處置過程中邊界輻射劑量率符合標準、在電力中斷時適時停止需電力支持的作業，以及於任何固定輻射或相關警報啟動時依循程序調查與矯正。同時，火災偵測系統須保持正常運作，若偵測系統故障則需依火災防護計畫採取補償措施並經設施經理核准，確保火災風險受到有效控管。此階段的所有操作均需在操作限制與條件規範下進行，以確保封閉作業能在已知、可控且可驗證的條件下運作，為後續封閉與長期管理奠定安全基礎。

3. 封閉與除役階段

在封閉與除役階段中，相關限制、控制與條件將依據《初步除役計畫(Preliminary Decommissioning Plan, PDP)》(AECOM, 2018b)及後續制定的詳細除役文件予以規劃與執行，以確保最終階段的安管理要求能獲得充分滿足。封閉階段工作包括完成 ECM 最終覆蓋層剩餘組件的安裝、除役設施與支援系統、場址修復與整理，以及持續運轉廢水處理廠(WWTP)，以確保排放水質維持於可接受的標準內。同時，也會維持長期的性能監測、監視與檢查作業，以確認封閉後系統的功能穩定性。

除役作業的執行將依許可程序進行，並需取得相應的除役許可證。其範圍包括 ECM 的最終覆蓋層建設與景觀整治、滲出污水收集系統(LCS)之除役，以及於廢水量減少至不再需經 WWTP 處理時，逐步關閉並除役 WWTP。此外，其他支援設施如行政辦公室、供水系統、相關連接基礎設施等，也將依各設施於封閉後之必要性分階段方式除役。在完成所有除役工作後，將進行最終調查與確認，以證明殘餘放射性與有害物質均符合最終除役標準。

4. 封閉後階段

於封閉後階段，NSDF 將進入約 300 年的主動監管期，並於該期結束後進入更長期的被動監管期。在主動監管期內，監測作業將持續驗證處置系統的完整性，並透過環境監測確認設施表現是否持續符合環境影響評估之預測。此階段的主要目標包括防止放射性物質經地下水等途徑遷移、確保最終覆蓋層不因侵蝕、植被損壞或坡度變化而影響功能，以及確認封閉後的安全可由被動系統維持。監測內容涵蓋覆蓋層穩定性、地表水排水設施、暴雨後的結構檢查等，並要求發現汗水從處置區滲出時於 24 小時內通報。

5. 長期安全評估之檢討

在建造、營運及封閉等各階段，NSDF 亦透過定期的長期安全評估檢討，以持續確保限制、控制與條件的有效性。安全評估約每五年更新一次，並視需要修訂其假設與模型。檢討內容涵蓋設施設計與配置變更、操作程序調整、操作經驗、廢棄物清單、環境監測數據以及組織與行政系統之變化。同時亦會納入監管文件與國際指導方針的更新。於設施整個處置規劃後期，將利用竣工資訊與運轉數據，使處置系統模型更貼近實際情況，逐步提升評估準確性並降低不確定性。

6. 紀錄維護

為確保安全管理架構之完整性，紀錄的維護由 CNL 的資訊管理部門依既定程序執行，確保紀錄於其整個處置規劃內具備真實性、完整性及可追溯性。對 Class I 級別核設施而言，包括退役進展、廢棄物管理方式、作業結果、以及人員資格與再認證等紀錄，皆須永久保存並至少維持 100 年，或依監管要求延長保存期限。

7. 員工訓練

限制與控制條件的有效執行，基於完善且制度化的員工訓練機制。NSDF 之訓練架構採用系統化培訓法，確保操作與維護人員具備安全履行職責所需的知識與技能。所有運轉期之人員皆須完成基礎知識訓練、安全訓練及設施專屬訓練，並經能力驗證後方可執行操作。訓練內容涵蓋輻射防護、設備操作、緊急應變程序等領域，其計畫的成效與執行由設施經理負責，以確保 NSDF 的限制與控制措施得以持續落實。

3.7 安全論點整合

NSDF 安全論證報告以系統化方式整合可得的技術與科學證據，旨在驗證其安全評估所採用的資料、假設與模型均經充分測試與評估。不確定性來源已被識別並量化，模型之適用範圍與限制亦獲明確界定。所有分析皆採用保守假設，並運用經國際驗證的商業模擬軟體進行計算，以支持 NSDF 符合法規及監管要求之安全接受標準。報告內容涵蓋放射性與非放射環境影響、處置設施整體功能，以及對法規遵循性之評估。根據封閉後安全評估報告(PostSA) (Arcadis & Quintessa, 2020)，在所有假設情節下，評估所得輻射劑量與化學暴露值均遠低於相關標準限值，顯示設計具充分安全裕度。所有假設皆經技術審查與專家驗證，以確保其合理性與適用性。支持整體安全論點的核心包括：

- 僅處置低放射性廢棄物(LLW)，其輻射風險極低。大多數核種為短半衰期，核種於封閉後前 100 年內即顯著衰減；非放射性污染物亦依據省級法規嚴格限制含量；

- 處置單元採用高密度聚乙烯(HDPE)地工止水膜與多重人工與自然障壁系統組合，設計年限長達 2,000 年。此配置可有效延緩污染物遷移。設計與分析均由具專業資格之技術團隊完成，並經獨立第三方審查；
- Perch Lake 盆地經多年地質與水文研究，其場址地層穩定，具良好抗震能力與水文穩定性。周邊設施具備完善的安全與環境管理體系，提供監測與應變支援；
- 所有關鍵技術報告均已提交 CNSC 進行審查，確保論證內容與國家監管標準一致；
- 評估涵蓋最不利條件，包括設施滿載(100%處置容量)、主動監管期結束後即完全喪失監管控制及人為入侵(鑽探或建造地下室)等假設，並對暴露條件與障壁劣化速率採高估處理，以確保結果具保守性；評估結果顯示，在上述極端情境下公眾劑量仍低於 1 mSv/年限值；
- 設施採用土地使用限制、警示標誌與實體障壁以防範人為入侵，並以確保個人劑量符合 1 mSv/a 限值為設計原則。場址本身資源開發潛力低，可有效降低未來再利用或開發的誘因，同時對廢棄物的接收與處置量亦設有上限，以強化長期安全性；
- 整體建造採用經驗成熟之覆土堆工程技術(engineered mound)，該技術已於國際案例中證實可維持結構穩定性數千年。

綜上所述，NSDF 安全論證透過整合性分析與保守假設，展現出對放射性風險之充分控制，其整體設計與評估方法符合國際安全論證原則，並為後續監管審查提供完整技術依據。

3.8 綜合討論

本節根據 NSDF 安全論證報告的重點進行綜合分析與討論。該報告內容涵蓋場址特徵、安全評估、不確定性管理及反覆修正與設計最佳化等主題，報告中有許多重點值得我國進行學習，以下歸納主要重點。

1. NSDF 安全論證報告的重點

NSDF 安全論證報告採用 IAEA 建議之安全論證架構，內容包括安全策略、系統描述、場址特性、安全評估(含封閉後安全評估與 FEPs 分析)、不確定性管理及安全論點整合，逐層建立證據鏈以說明長期安全性。主要分析項目涵蓋基準資料建立(場址、廢棄物與工程設計)、FEPs 辨識、情節模擬、敏感度與不確定性分析，以及設計、監測與管理的反覆修正與優化。最終整合安全論點與監測計畫，以支撐監管審查。分析過程採取保守性做法，對滿載情節、障壁劣化與人為入侵等情節均以保守假設處理，並要求公眾及生態劑量低於規範值(如 1 mSv/a)以確保安全可接受性。

2. NSDF 處置廢棄物特性與接收標準

NSDF 依既定流程(圖 3.2)接收低放射性固體廢棄物，過程涵蓋廢棄物來源、法規依據、民眾溝通及安全評估，中放射性廢棄物則不予接收。報告明確規範廢棄物類型、放射性核種與濃度上限，以支持工程設計(如底襯、覆蓋與排水系統)及長期功能模擬。廢棄物特性(含衰變特性、體積與容器型式)為設計依據，並以保守上限作為情節假設以確保安全裕度。處置單元(cells)與 ECM 設計依廢棄物體積與核種衰減特性決定底襯與覆蓋層的材料、厚度與隔離功能；因此，接收標準直接影響工程障壁需求與耐久性目標。

3. 加拿大 NSDF 場址選擇

CRL 場址累積多年地質與水文觀測資料，位於母岩山脊上，天然排水方向指向渥太華河。報告指出，ECM 的高度範圍介於海拔約 163 公尺至 202 公尺之間，設計基準洪水水位為 122 m ASL，場址海拔約比渥太華河高超過 40 m，具充分安全裕度。場址表層為具高滲透性的砂質土壤，母岩局部裸露；地下水受季節變化影響，主要流向鄰近濕地與渥太華河。設計採雙層底襯與地表水管理系統，以防止污染物流入河川。該場址距渥太華河約 1.1 km，與濕地及 Perch Lake 流域具水文連通性，評估中已納入對流域水文與下游生態的潛在影響。

4. 現地調查資料完整性與地質水文條件分析

NSDF 之場址調查採分階段進行與逐步補強，內容包括多次鑽孔、監測井及地球物理探測(GPR)等，以建立完整的地質與水文特徵資料。這些資料用於支持 ECM 之設計與數值模擬模型的建立。報告指出，評估資料完整性時應考量涵蓋深度、監測井分布密度、試驗方法(靜水、動水與滲透試驗)及樣本代表性等因素。對關鍵水文參數(如水力傳導係數、含水層厚度與地下水位時序變化)須進行統計分析與不確定性評估，並在模型中納入季節性與時間變化效應，以提升水文模擬之準確性與可信度。

5. 與坑道式處置方式的差異

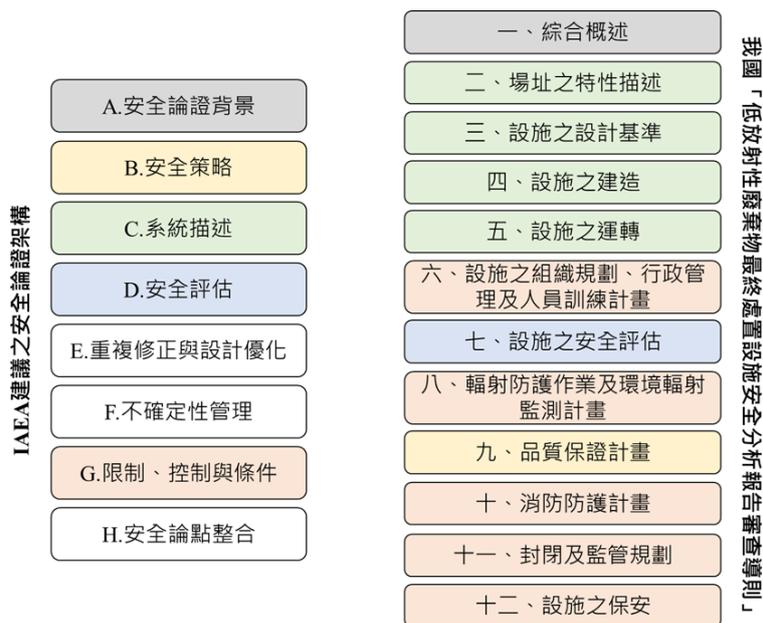
近地表處置(如工程覆土堆或混凝土窖)與坑道式處置的主要差異在於對障壁功能的依賴來源。NSDF 採多層工程防護構造，結合底襯系統、覆蓋層及地表水管理等設施，以控制滲流與防止侵蝕；其安全性主要仰賴工程化設計與場址表層條件的穩定性。相較之下，坑道式處置設於深部岩體中，隔離效果主要依靠天然岩體的低滲透性與長期地質穩定性。由於 NSDF 處置深度較淺(約 30 公尺以內)，需特別關注淺層地下水、地表逕流及侵蝕等對屏障系統的潛在影響；而坑道式處置則著重於評估深層地下水流動、岩體裂隙演化及長期地質變遷。因此，兩者在 FEPs 分析重點與時間尺度設定上有所不同。整體而言，坑道式因天然屏障能力較強，可處置放射性濃度較高的廢棄物；近地表處置則以工程化設計確保對低放射性廢棄物的長期安全隔離。

6. NSDF 安全論證報告與我國低放處置安全分析報告比較

本計畫將 NSDF 安全論證報告與我國低放射性廢棄物最終處置安全分析報告之間的主要差異，彙整於圖 3.27 及表 3.11。比較依據 IAEA 建議所撰寫之 NSDF 安全論證與我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則(以下簡稱報告導則)各章節之對照分析。經本計畫比較後發現，NSDF 安全論證報告於「系統描述」章節中，涵蓋場址特性描述、設施設計、施工與運轉等內容，其範圍與報告導則之第二、三、四及第五章相關性較高。「限制、控制與條件」章節則提出設施在建造、運轉、封閉等階段之規定與限制，以及安全評估檢討方法與人員訓練等要求，其內容與報告導則之第六、八、十、十一及第十二章較相近。

較為顯著的差異在於依據 IAEA 建議編撰的 NSDF 安全論證架構中特別將「反覆修正與設計最佳化」及「不確定性管理」獨立成章節。前者強調反覆修正，當場址資料更新或監測結果出現偏差時，會依據結果調整設計(如覆蓋層、排水或底襯系統)。後者則為不確定性建立完整的管理流程，包括識別、量化、敏感度分析與管理，並採用保守假設與定量機率分析，這兩個章節為安全論證的重要部分，與安全目標形成回饋循環。

相較之下，我國相關導則(如「報告導則」及「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(以下簡稱審查導則)」)主要依循美國 10 CFR Part 61 作為架構基礎，而上述「反覆修正與設計最佳化」及「不確定性管理」兩項之相關內容分散於各章節。例如「審查導則」於「設施之建造」章節中之「監測計畫及回饋設計計畫」，說明監測目的、項目及資料處理流程及設計回饋等。不確定性則分別於「場址之特性描述」及「設施之安全評估」章節中要求，包括參數與資料不確定性的評估，以及正常與異常狀況輻射劑量之不確定性分析。



資料來源：本計畫自製

圖 3.27 IAEA 建議之安全論證架構與我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則各章節之比較，左右底色相同的為關聯性較高的章節

表 3.11 IAEA 建議之安全論證架構與我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查
導則各章節之主要內容簡述

IAEA 建議之安全論證架構		我國「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」	
章節	簡述	章節	簡述
A.安全論證背景	說明計畫目的、安全目標與原則、法規背景、設施於全處置期間的規劃、報告架構。	一、綜合概述	說明場址位置、處置方式、容量、場區配置及廢棄物來源特性。
B.安全策略	概述支撐安全論證所採用的方法與策略	二、場址之特性描述	描述場址之社經環境、自然條件、地質水文、生態與輻射背景等資料。
C.系統描述	說明場址特性、各階段之計畫內容，以及確保安全所需的管理制度與設施安全功能	三、設施之設計基準	說明處置設施的設計原則、工程結構、屏蔽與輻射安全設計。
		四、設施之建造	說明施工規劃、施工方法、材料設備、品質與安全管理。
		五、設施之運轉	描述廢棄物接收、處理、暫存、處置作業及覆蓋與封閉程序。
D.安全評估	營運前後階段的安全評估成果，並與第二、三章的標準與原則進行比對。	六、設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫	說明管理架構、人員權責、訓練計畫與審查稽核制度。
E.反覆修正與設計最佳化	說明 NSDF 設計的最佳化過程	七、設施之安全評估	評估輻射劑量、設備操作、闖入者防護及長期穩定性。
F.不確定性管理	針對安全論證中的不確定性進行分類與評估，依其來源、性質與影響程度進行分析。	八、輻射防護作業及環境輻射監測計畫	提出輻射防護計畫與場址周界環境監測之要求。
		九、品質保證計畫	建立組織、文件、採購、檢驗等品質保證制度與紀錄。
G.限制、控制與條件	列出適用於整個處置期間所有與安全相關工作的限制、控制措施與條件。	十、消防防護計畫	分析火災風險，規劃防火設計、偵測、消防能力與訓練。
		十一、封閉及監管規劃	說明設施封閉後的穩定設計、監測與長期監管措施。
H.安全論點整合	統整前述章節之安全論證成果。	十二、設施之保安	規劃保安組織、周界防護、門禁管制與保安系統維護。

資料來源：本計畫自製

第四章 近地表處置安全評估專家技術討論會議

本章依據前兩章之研析結果，選取與近地表處置安全評估工作相關之關鍵議題，舉辦專家技術討論會議。本計畫於執行期間的下半年度辦理兩場專家技術討論會：第一次會議於 2025 年 7 月舉行，討論焦點為國際間近期近地表處置安全評估案例之分析；第二次會議於 2025 年 10 月舉行，重點為加拿大 NSDF 安全論證報告之研討與意見交流。透過專家技術討論會，邀集相關領域之專家學者進行技術交流與指導，蒐集其對近地表處置設施申照階段安全評估之審驗技術建議與管制意見。以下分別說明兩場專家技術討論會之辦理情形與重點內容。

4.1 會議說明

1. 會議資訊

本計畫共舉辦兩場專家技術討論會。第一次會議於 2025 年 7 月 22 日上午 10:00 至 11:30 在集思台大會議中心(亞里斯多德廳)舉行；第二次會議則於 2025 年 10 月 29 日下午 15:00 至 16:30 在政大公企中心(A903 會議室)舉行。每場會議均由本計畫團隊先進行約 30 分鐘之計畫成果簡報，隨後進行約 60 分鐘之專家及與會人員意見交流與討論。兩次會議之詳細議程如表 4.1 所示。討論主題聚焦於本計畫「114 年低放射性廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析」，分別就(1)國際間近地表處置安全評估案例與(2)加拿大低放射性廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例兩大議題進行研討。

表 4.1 專家技術討論會議程

第一次專家技術討論會		第二次專家技術討論會	
時間	議程	時間	議程
10:00~10:10	主席致詞	15:00~15:10	主席致詞
10:10~10:40	簡報	15:10~15:40	簡報
10:40~11:30	意見交流與討論	15:40~16:30	意見交流與討論

資料來源：本計畫自製

2. 討論內容

本計畫主要蒐整及探討兩項議題：(1)國際近地表處置安全評估案例，及(2)加拿大低放射性廢棄物近地表處置申照階段之安全評估。第一部分彙整近年國際間推動、建造或申請許可中的近地表處置設施案例，包括：加拿大 NSDF、比利時 Dessel 處置設施、韓國月城中低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施、中國龍和近地表處置場(第一期第一階段)，以及法國 Cires 處置設施第三期極低放廢棄物單元。相關討論於 2025 年 7 月 22 日舉行之第一次專家技術會議中進行。第二部分聚焦加拿大 NSDF 計畫之申照階段安全評估。該報告整合安全策略、系統描述、評估方法與不確定性管理，提出完整的安全論證架構，以驗證設施之長期安全性。2025 年 10 月 29 日第二次專家技術討論會議針對此案例進行深入討論。透過綜合兩次會議意見與研究成果，針對國際間之低放近地表處置與加拿大申照階段安全評估相關文獻研析成果，提出建議及未來研究方向，作為我國未來低放射性廢棄物處置設施審查與管制的重要參考。簡報參見附錄一。

4.2 意見成果彙整

本節依據兩次專家技術討論會之成果，綜整各位專家對本計畫所涉議題之意見與建議。討論內容可歸納為三個面向：首先，彙整專家對國際間近地表處置安全評估案例之意見；其次，整理針對加拿大 NSDF 安全論證報告的具體建議；最後，歸納專家對本計畫整體成果的評析，並提出我國後續研究與制度發展方向。內容如下：

1. 國際間近地表處置安全評估案例

有關國際案例之討論，主要源自第一次專家技術討論會，重點如下：

- (1) 本計畫已蒐集多國近地表處置安全評估案例，內容完整且具代表性，為後續分析奠定良好基礎。建議在此基礎上建立系統化的跨案例比較架構，以提升不同國家案例間的對照與歸納分析深度。
- (2) 建議整理並分析各國在「主動監管期」的相關資訊，藉以比較封閉後管理階段的制度差異，作為我國未來監管制度設計之參考。

- (3) 可進一步彙整各案例是否將氣候變遷納入長期情節分析，例如極端事件頻率變化、溫度上升對地下水流向與覆蓋層穩定性的影響。此類因素對長期安全具有關鍵意義，可提升案例比較的完整性與前瞻性。
- (4) 專家亦建議補充特定案例的重點議題，以豐富比較內容：
- 加拿大 NSDF 近年涉及的訴訟與生態保育爭議，可作為風險溝通與社會參與的實例；
 - 比利時近地表處置設施長達十年的審查與許可過程，反映審查機構與技術支持單位在安全論證審議程序中的角色。

2. NSDF 安全論證報告

有關加拿大 NSDF 安全論證報告之討論主要於第二次專家技術討論會提出。專家整體肯定 NSDF 安全論證架構之完整性，認為其可作為我國未來近地表處置安全分析與導則修訂的重要參考。相關意見如下：

- (1) 建議比較 NSDF 安全論證報告與我國「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」之章節架構差異，特別是「反覆修正與設計最佳化」與「不確定性管理」部分。NSDF 將反覆修正與設計最佳化視為持續性程序，透過監測資料與模擬結果之回饋調整設計參數；而我國現行導則對迭代式設計與監測回饋機制之規範尚屬概略，未能充分反映國際趨勢。
- (2) 建議補充廢棄物特性與接收標準，說明其如何作為工程設計與安全評估的重要依據，如廢棄物類型、核種濃度上限與封裝方式，以強化設計合理性與安全裕度。
- (3) 強化報告中對主動安全設計(Active Safety Systems)之討論，說明其在運轉階段對安全保障之貢獻，並於情節模擬中納入主動系統失效後之影響分析，以確保封閉後安全評估的完整性。
- (4) 場址選擇與地質條件，建議說明加拿大 NSDF 位於高於渥太華河洪水位約 50 公尺之地勢，具良好排水與地形穩定性，顯示其場址選擇與環境風險考量的周延性。

- (5) 建議強化對自然災害與極端氣候影響的分析，例如洪水、土石流、侵蝕與降雨強度變化等，說明其評估方法、模擬假設及安全裕度設定，以符合國際趨勢下對氣候韌性的重視。

3. 未來研究方向

我國未來推動近地表處置研究，應從整體安全論證體系與在地應用兩層面同步發展，具體建議如下：

- (1) 建議補充現地調查資料之完整性與水文地質條件說明，闡述多階段場址調查如何支撐數值模型建立與參數校正，以提升模擬準確度與可信度。
- (2) 建議針對各國案例之場址特性、地質與水文條件、工程設計及評估結果進行歸納比較，分析差異對安全評估結果之影響，作為後續模式建立與驗證的重要依據。應以系統化架構進行跨案例比較，涵蓋情節設定、時間尺度、不確定性分析與設計優化措施，以形成可持續更新之知識基礎。同時，針對台灣地質條件，研究工程設計調整原則與材料耐久性，評估不同屏障組合在高降雨與高侵蝕環境下的長期表現。
- (3) 研擬我國近地表處置系統化安全評估流程，明確界定規劃、興建、運轉與封閉各階段之重點與責任分工。建立結合數值模擬與環境監測資料之整合平台，統整場址調查、監測與運轉資料，以動態更新安全評估模型並支援決策。
- (4) 檢視各國政策形成過程、選址邏輯與社會溝通策略，作為我國推動最終處置計畫之參考依據。特別應重視地方溝通與公眾參與機制設計，並探討近地表處置於台灣的可行性、區域適用性與優先推動順序，建立長期規劃藍圖，以利後續政策與社會溝通推動。
- (5) 評估我國現行制度與國際案例之接軌性，研議適用我國法規之安全論證架構與審查程序，並建立與 IAEA 標準一致的技術審查指引。例如，可參照國際案例修訂「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」，明確規範反覆修正與設計最佳化、不確定性處理及審查重點，提升整體制度之透明性與國際一致性。

第五章 近地表處置申照階段安全評估審查要項建議

本計畫蒐整國際間近期推動、申照或已建造完成之近地表處置設施之安全評估成果，並針對加拿大 CRL 於近期成功申照之近地表處置設施 NSDF 安全論證報告，彙整其所採用之法規依據、導則架構、評估方法與審查流程等面向進行研析。計畫執行期間亦舉辦兩場專家技術討論會，邀請相關領域專家學者進行技術交流與指導，並蒐集專家對近地表處置申照階段安全評估審查技術及安全管制議題之意見。綜合上述之研析結果與專家意見，回饋於我國近地表處置申照階段之安全評估審查，分別從法規與導則修訂(5.1 節)及技術評估機制(5.2 節)兩層面提出具體審查要項建議，以強化審查架構之完整性與可操作性。

5.1 法規與導則建議

綜整國際間近地表處置之安全評估經驗及 NSDF 安全論證內容，針對我國法規與導則之修訂建議如下：

1. 我國目前針對低放射性廢棄物處置之管制，主要依據「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」及「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」，但尚未針對「安全論證」建立明確架構。如果未來我國需修訂相關法規，相關法規或導則中可參考安全論證概念，明確定義其內容組成、功能與審查重點，以與國際接軌並提升制度完整性。
2. NSDF 安全論證中明確說明修正及回饋機制之程序，用以持續優化處置設施的安全功能。我國未來如需針對現有導則進行精進，可參考 NSDF 安全論證的架構進行編修，於導則中明定設計階段與運轉階段應建立監測回饋機制，並依據監測結果定期更新模型與安全評估，形成閉環式的決策支援體系。
3. 我國現行導則於各章節中，要求針對不確定性進行分析，與 NSDF 安全論證之架構具有顯著的差異。如未來我國需要重新檢視現行導則之內容與架構，可參考 NSDF 安全論證之架構，將不確定性管理相關之章節獨立，要求申請單位辨識並量化主要不確定

性來源(如地質、水文、材料性質及模擬參數)，並透過情節分析與敏感度分析呈現其影響，作為審查評估依據。

4. 我國位處熱帶與副熱帶季風氣候區，常受強降雨及颱風影響。此類極端氣候事件對處置設施之滲流、侵蝕與覆土穩定性均具潛在風險。目前導則已於場址之特性描述章節要求申請單位蒐集氣候資料，建議未來如需針對導則進行修改時，可將氣候變遷納入長期不確定性分析，或通盤檢討分析架構，以提升評估之完整性。
5. 我國現行「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」及「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」已涵蓋各類低放處置形式之規範，然而隨著時間推進，國際間相關技術、方法與架構亦持續更新。未來若進行導則修訂，建議可重新檢視導則內容之適用性，並適度導入最新概念與工具(如安全論證架構、氣候變遷與社會風險分析)，以符合最新國際趨勢。

5.2 技術與評估面建議

1. NSDF 安全論證指出，該場址之地表及地下約 50 公尺深度範圍內的地質與水文參數對安全評估結果具有顯著影響。現地測量資料顯示，NSDF 範圍區之母岩水力傳導係數 K 值介於為 9×10^{-7} m/s 至 4×10^{-8} m/s 之間，而 CRL 場址量測的破裂帶 K 值約為 5×10^{-6} m/s，均顯示母岩及破裂帶具有較高滲透特性。然而，不同場址的水力條件各異，例如母岩水力傳導係數差異及裂隙異向性，可能影響地下水流動模式，進而對處置安全造成影響。因此我國未來在申照審查階段時，可參考其相關經驗，建議要求申請單位提供完整的場址地質與水文調查報告，說明模型假設與校正程序，並對關鍵參數(如滲透係數、水力傳導係數等)的合理性及不確定性進行檢核。
2. 誠如上述，近地表處置對地表擾動高度敏感。因此，未來我國如需朝向進地表處置發展，建議審查項目可納入洪水、降雨、侵蝕及地震等自然災害對設施長期安全之影響，並要求申請單位提出相應的設計防護與應變措施。

3. 場址原始背景資訊為後續安全監測與評估的重要基準。未來我國如順利推動進地表處置，建議建立結合數值模擬與現地監測資料的技術平台，作為申照審查與後續監督之依據，並持續更新模型與邊界條件，以支援長期安全管理。
4. 加拿大 NSDF 案例顯示，社會溝通與生態保育為確保計畫順利推動之重要因素。如未來需推動近地表處置，可參考加拿大 NSDF 案例中生態保育與社會溝通經驗，增設生態風險與社會影響評估項目，要求申請單位提出環境監測計畫與社區參與機制，以促進社會信任與透明度。

第六章 結論及建議

國際間已有逾百座中低放射性廢棄物處置設施持續運轉，其中以近地表處置最為普遍，顯示該技術具備成熟的應用經驗與穩定的運轉實績。為強化我國低放射性廢棄物近地表處置審查能量並與國際規範接軌，本計畫針對近年推動或運轉之國際近地表處置設施進行案例研析，包括加拿大 NSDF、比利時 Dessel、南韓月城中低放射性廢棄物處置中心、中國龍和近地表處置場與法國 Cires 處置設施等場址。彙整其安全評估成果與相關處置技術，掌握國際發展趨勢及管制要求之變化。研究中特別深入分析加拿大白堊河 NSDF 處置設施之安全論證報告。該報告係依據 IAEA 所訂定之安全論證架構撰寫，內容涵蓋安全策略、安全評估、反覆修正與設計最佳化及不確定性管理等要素，並最終統整形成整體安全論點。此外，本計畫亦舉辦兩場專家技術討論會議，廣納我國相關領域專家之意見與建議，並將研究成果與專家回饋進行彙整，提出申照階段可供參採之安全評估審查重點與技術建議，作為主管機關推動審查制度建構之參考依據。根據上述工作內容，以下說明本計畫之成果及未來近地表處置技術與管制之研究方向建議。

6.1 重要成果

1. 彙整近年國際間推動、建造或申請許可的近地表處置設施案例，包括加拿大 NSDF、比利時 Dessel、南韓月城中低放射性廢棄物處置中心、中國龍和近地表處置場及法國 Cires 處置設施等，並依據各國官方技術報告與文獻資料，整理各案例於申請許可階段所採用的法規架構、技術指引、分析方法及安全評估結果。
2. 研析 CRL 之 NSDF 環境影響說明書及安全論證書之內容。前者聚焦於評估方法論、監管依據、公眾參與、環境影響及設施設計等面向；後者則根據 IAEA 建議之安全論證架構撰寫，針對 NSDF 處置設施之整體安全性進行系統性論證。
3. 透過研析 NSDF 安全論證報告中之「安全論點整合」章節，確認其論證過程已統整所有相關證據，採用保守假設並運用具國際認證之模擬工具，評估放射性與非放射性潛在影響。報告亦特別強調對不確定性的說明，並已透過封閉後安全評估(PostSA)，

驗證設施在各種情節下的劑量與風險均遠低於法規標準。相關成果可提供我國未來建立安全論證技術架構與審查要項之重要參考依據。

4. 本計畫於 2025 年 7 月 22 日及 2025 年 10 月 29 日各舉辦一場專家技術討論會，邀集國內學研與實務專家，以及台電公司代表共同參與，蒐集專業意見與技術建議。部分長期性建議亦納入本章後續研究方向，以持續支援制度發展。
5. 本計畫透過研析國際間近地表處置安全分析相關之報告，以及深入對加拿大 NSDF 安全論證報告，研析成果邀集相關領域專家進行討論，相關成果依據法規導則面向及技術層面之面相提供審查要項建議。

6.2 未來研究建議

1. 本計畫初步掌握加拿大 NSDF 對場址敏感參數(如滲透係數、含水層連通性等)之分析重點。建議後續可針對地質水文特性、不確定性來源與模型校正方法進行更深入探討，建立參數合理性檢核機制，作為我國發展處置設施評估模型與導則修訂之依據。
2. 本計畫針對加拿大 NSDF 安全論證報告進行詳細研析，深入瞭解其廢棄物特性、設施設計考量及安全評估方法。惟國際間各國雖多依循 IAEA 所訂定之安全論證原則與技術規範，然在設計理念、工程障壁配置及安全分析架構上，仍因地質條件、氣候環境與監管要求之不同而呈現差異。建議後續可擴大蒐集並系統性研析其他國家之安全論證報告，透過跨案例比較整理各國在場址特性、設施設計與安全評估面向之差異與優勢，進而將相關成果回饋於我國審查與監管制度之建構與優化。
3. 綜觀國際低放射性廢棄物處置安全評估之經驗，建議可重新檢視我國現行「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」及「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」內容，評估其與國際慣用方法(如 IAEA SSG-23、SSG-29、OECD/NEA 案例)之差距，逐步納入安全論證架構、氣候變遷考量及不確定性管理等重要因素，與國際接軌。

第七章 参考文献

1. AECOM, 2018a. Conventional Safety Analysis, Revision 1, 232-503230-AR-002.
2. AECOM, 2018b. Preliminary Decommissioning Plan, 232-508300-PLA-001, Revision 1.
3. AECOM, 2019. Construction Quality Assurance Plan, 232-508244-QAP-001, Revision 2.
4. AMEC, 2017a. Multidisciplinary Subsurface Investigation Phase 1, 232-10180-REPT-003, Revision 1, 2017 April.
5. AMEC. 2017b. Multidisciplinary Subsurface Investigation, Phase 2, For the Detailed Design of the Near Surface Disposal Facility Project at Chalk River Laboratories. 232-10180-REPT-004. Revision 0.
6. AMEC. 2017c. Multidisciplinary Subsurface Investigation Phase 3, 232-10180-REPT-006, Revision 0, 2017 August.
7. AMEC. 2018. Multidisciplinary Subsurface Investigation Phase 4, 232-10180-REPT-007, Revision 0, 2018 March.
8. ANDRA, 2021. Augmentation de la capacité autorisée du CIREs: enseignements et suites données par l'Andra à la concertation préalable. Aube. Retrieved from Andra Aube website.
9. Arcadis & Quintessa, 2020. Post-Closure Safety Assessment 3rd Iterations to the NSDF Project, 232-509240- ASD-004, Revision 2.
10. Autorité environnementale (AE), 2023. Avis délibéré n° 2023-85 sur l'augmentation de la capacité de stockage du Cires situé sur les communes de Morvilliers et La Chaise (10). Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.
11. CNL, 2016a. Geologic Waste Management Facility Descriptive Geosphere Site Model Report: Phase I. 361101- 10260-REPT-005. March 2016.
12. CNL, 2016b. Geologic Waste Management Facility Integrated Geosynthesis Report: Phase I. 361101-10260- REPT-004. March 2016.
13. CNL, 2018. Preparation of Operational Limits and Conditions, 900-508770-FID-003, Revision 0.
14. CNL, 2019a. Quality, 900-514200-PDD-001, Revision 0.

15. CNL, 2019b. Groundwater Flow Modelling of the Near Surface Disposal Facility, 232-509249-REPT-001, Revision 5, 2019 July.
16. CNL, 2019c. Integrated Work Control (900-514100-STD-002, Rev. 2). Internal document, Chalk River Laboratories. (Not publicly available).
17. CNL, 2020a. NSDF– Additional Groundwater Flow Simulations To Evaluate the Potential Impact of a Hypothetical Conductive Bedrock Fracture, 232-121221-021-000, 2020 July.
18. CNL, 2020b. NSDF– Calibration of Groundwater Flow Model including a Hypothetical Transmissive Bedrock Fracture zone, 232-121221-021-000, 2020 October.
19. CNL, 2020c. Near Surface Disposal Facility ALARA Assessment, 232-508740-ASD-001, Revision 1, 2020 March.
20. CNL, 2020d. Near Surface Disposal Facility Safety Analysis Report, 232-508770-SAR-002.
21. CNL, 2020e. *Ecological Risk Assessment (Radiological & Non-Radiological) for the 3rd Iteration Post-closure Safety Assessment*. 232-121240-ASD-001.
22. CNSC, 2014. Deterministic Safety Analysis, REGDOC-2.4.1.
23. CNSC, 2016. Generic Guidelines for the Preparation of an Environmental Impact Statement, ISBN 978-0-660-05139-0, Version 1.0.
24. CNSC, 2017. Environmental Protection – Environmental Principles, Assessments and Protection Measures, REGDOC-2.9.1 Version 1.1.
25. CNSC, 2018a. Framework for Radioactive Waste Management and Decommissioning in Canada, REGDOC-2.11.
26. CNSC, 2018b. Waste Management, Volume III: Assessing the Long-Term Safety of Radioactive Waste Management, REGDOC-2.11.1.
27. CSA, 2012a. Management System Requirements for Nuclear Power Plants, CSA N286(R2017).
28. CSA, 2012b. Environmental Risk Assessments at Class I Nuclear Facilities and Uranium Mines and Mills, Canadian Standards Associate report N288.6.
29. FANC, 2023. Federale Overheidsdienst Binnenlandse Zaken, and Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle. FANC Nr. AB-0304008. FANC, n.d. Web. Retrieved from FANC official website.

30. Federal Court of Canada, 2025. Decision: Kebaowek First Nation et al. v. Minister of Environment and Climate Change Canada (T-647-24). *Judicial Review Law*. Ottawa, Canada.
31. Golder Associates Inc., 2016. Subsurface Geotechnical Survey of the Proposed Near Surface Disposal Facility at Chalk River Laboratories, 232-10180-ASD-001, Revision 1.
32. Golder Associates Inc., 2019. Near Surface Disposal Facility Environmental Impact Statement, 232-509220-REPT-004, Revision 1, 2019 November.
33. Golder Associates Inc., 2021. Final NSDF Environmental Impact Statement – EIS Report.
34. Government of Canada, 1985. Fisheries Act (R.S.C., 1985, c. F-14)
35. Government of Canada, 1994. Migratory Birds Convention Act, 1994 (S.C. 1994, c. 22)
36. Government of Canada, 1999. Canadian Environmental Protection Act, 1999 (S.C. 1999, c. 33)
37. Government of Canada, 2002. Species at Risk Act (S.C. 2002, c. 29)
38. Government of Canada, 2008. PCB Regulations (SOR/2008-273)
39. Government of Canada, 2009. Canada Occupational Health and Safety Regulations (SOR/86-304)
40. Government of Canada, 2012. Canadian Environmental Assessment Act, 2012 (S.C. 2012, c. 19, s. 52)
41. Government of Canada, 2015a. General Nuclear Safety and Control Regulations, SOR/2000-202, Last amended 2015 June 12.
42. Government of Canada, 2015b. Nuclear Substances and Radiation Devices Regulations, SOR-2000-207.
43. Government of Canada, 2017a. Nuclear Safety and Control Act. S.C. 1997, c. 9.
44. Government of Canada, 2017b. Class I Nuclear Facilities Regulations. (SOR/2000-204).
45. Government of Canada, 2021. Radiation Protection Regulations, SOR-2000-203.
46. Government of Ontario, 1990. Occupational Health and Safety Act, R.S.O. 1990, c. O.1.
47. Government of Ontario, 2000. Technical Standards and Safety Act, 2000, S.O. 2000, c. 16
48. Government of Ontario, 2003. Stormwater Management Planning and Design Manual, 2003.
49. Government of Ontario, 2011. Ontario Regulation 232/98, 2011 Land-filling Sites. 232/9.

50. Government of Ontario, 2012. Landfill standards: A guideline on the regulatory and approval requirements for new or expanding landfilling sites.
51. IAEA, 2004a. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, ISAM, Volume 1.
52. IAEA, 2004b. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, ISAM, Volume 2.
53. IAEA, 2006. Fundamental Safety Principles, SF-1, STI/PUB/1273.
54. IAEA, 2009. General Safety Guide No. GSG-1. Classification of Radioactive Waste.
55. IAEA, 2011. Disposal of Radioactive Waste, SSR-5.
56. IAEA, 2012. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, SSG-23.
57. IAEA, 2014a. Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, SSG-29.
58. IAEA, 2014b. Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, SSG-31.
59. IAEA, 2017. Contents and Sample Arguments of a Safety Case for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, TECDOC-1814.
60. Kim, Y., Seo, E., Park, J., Jeong, C. W., Ahn, S., Bang, J., ... & Park, S, 2022. Review of Licensing Process of the 2nd Phase Low Level Radioactive Waste Disposal Facility in Gyeongju. 한국방사성 폐기물학회 학술논문요약집, 20(2), 283-283.
61. OECD/NEA, 2012. The Long-term Radiological Safety of a Surface Disposal Facility for Low-level Waste in Belgium: An International Peer Review of Key Aspects of ONDRAF/NIRAS' Safety Report of November 2011 in Preparation for the License Application. Paris: OECD Publishing.
62. Ontario Regulation, R.R.O. 1990, Reg. 347: General – Waste Management, under Environmental Protection Act, R.S.O. 1990, c. E.19.
63. R. Kingsbury, M. Labriola, G. Finley, M. Vickerd, 2021. Safety Assessment Report – Near Surface Disposal Facility Safety Case –Near Surface Disposal Facility (NSDF) Revision 2(232-03610-SAR-001)

64. Wacquier, W., & Cool, W., 2014. The safety case in support of the license application of the surface repository of low-level waste in Dessel, Belgium. In The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Symposium Proceedings, 7-9 October 2013, Paris, France (No. NEA-RWM-R--2013-9, pp. 327-335).
65. Wood, 2018. Hydraulic Conductivity (Slug Test) Results for PH17-001 to PH17-010, 232-10180-041-000, 2018 July.
66. Wood, 2019. Geotechnical Investigation (Ring Road For Effluent to Perch Lake), 232-10180-REPT-008, Revision 0, 2019 February.
67. 中核清原環境技術工程有限責任公司，2020，龍和近地表處置場一期一階段建設專案環境影響報告書(申請建造階段)。
68. 核能安全委員會，2024。113 年低放射性廢棄物淺地表處置安全管制之關鍵議題研析，NSC11301002L。

附錄一

一、第一次專家會議簡報

114年低放射性廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析

第一次專家技術討論會

報告人 梁興樑 計畫經理

王士榮 副教授 董家鈞 教授
台灣地下水資源暨水文地質學會

114年7月22日(星期二)上午10:00
集思台大會議中心亞里斯多德廳



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission



臺灣地下水資源暨
水文地質學會

簡報大綱

1. 前言
2. 本次主題報告
3. 討論

1

前言

2

3

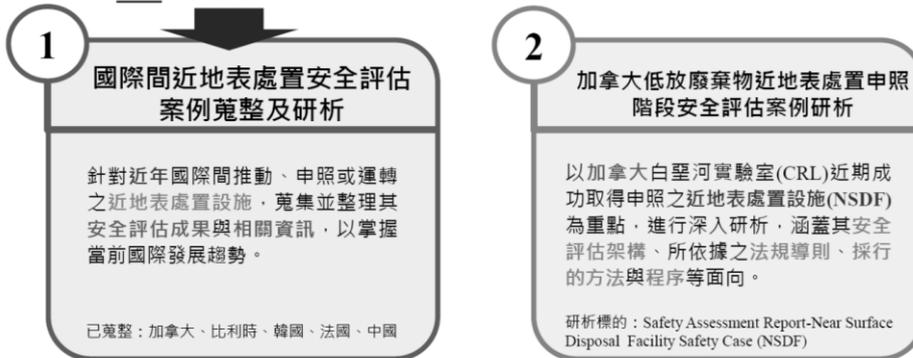
前言

- 截至目前，國際上已有逾百處中低放射性廢棄物處置設施持續運轉，設施類型以近地表處置為主，坑道處置次之，深層地質處置則較少，整體運轉安全穩定。
- 近地表處置技術於國際間已發展多年，並具豐富實績，近年如加拿大、比利時與中國等國皆有推動相關設施。在推動過程中，安全評估扮演關鍵角色，且隨著各國實務經驗的累積與處置技術的精進，相關管制要求亦持續調整與強化。
- 為確保我國處置設施之安全評估作業與國際接軌，並提升我國相關技術水準與審驗能力，提出「114年低放射性廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析」，以支援主管機關強化審查能量。

4

討論主題說明

本次討論會之討論主題



5

2

階段成果說明

6

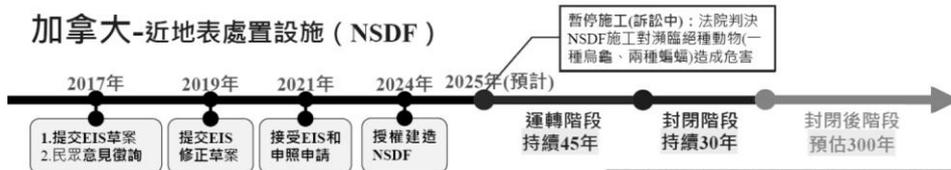
蒐整之各國文獻

國家	參考文獻	重點說明
加拿大	Golder Associates Inc. 2021. Final NSDF Environmental Impact Statement – EIS Report.	「環境影響報告書」(EIS), 包含替代方案分析、公眾與原住民參與程序, 以及對潛在環境影響的詳細評估。
	Kingsbury et al. 2021. Safety Assessment Report – Near Surface Disposal Facility Safety Case –Near Surface Disposal Facility (NSDF) Revision 2023-03610(SAR-001)	「安全評估報告-近地表處置設施安全論證(NSDF)」, 內容包含安全策略、系統描述、安全評估及不確定性等重要議題。
比利時	OECD / NEA. (2012) The Long-term Radiological Safety of a Surface Disposal Facility for Low-level Waste in Belgium: An International Peer Review of Key Aspects of ONDRAF/NIRAS' Safety Report of November 2011 in Preparation for the License Application. Paris: OECD Publishing.	準備申請低放射性廢棄物地面處置設施許可證之安全報告內容的國際間審查報告。
	FANC. 2023. Federale Overheidsdienst Binnenlandse Zaken, and Federal Agentschap voor Nucleaire Controle. FANC Nr. AB-0304008.	比利時皇家法令批准在Dessel建立和運作用於在地面貯存短期低強度和中強度放射性廢物的設施。
	Wacquer, W., & Cool, W., 2014. The safety case in support of the license application of the surface repository of low-level waste in Dessel, Belgium.	比利時Dessel低放射性廢棄物近地表處置設施許可證申請安全論證經驗與回饋。
韓國	Kim et al. 2022. Review of Licensing Process of the 2nd Phase Low Level Radioactive Waste Disposal Facility in Gyeongju	審查過程中所面對的關鍵議題與安全方面的重要改進措施, 並提出監管審查程序中的經驗與所獲得的教訓。
法國	Andra. 2021. Augmentation de la capacité autorisée du Cires: enseignements et suites données par l'Andra à la concertation préalable. Aube. Retrieved from Andra Aube website.	Cires處置中心擴增所進行的事前協商過程, 並彙整了民眾的意見回饋, 以及法國核廢料管理局(Andra)對這些回饋所採取的後續應對措施。
	Autosité environnementale (AE). 2023. Avis délibéré n° 2023-85 sur l'augmentation de la capacité de stockage du Cires situé sur les communes de Morvilliers et La Chaise (10). Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.	AE就Cires處置中心擴建計畫所提出的建議與審查意見。
中國	中核清源環境技術工程有限責任公司, 2020, 龍和近地表處置場一期一階段建設專案環境影響報告書(申請建設階段)。	中國龍和近地表處置場一期一階段建設專案之環境影響報告書, 內容包含處置場基本資訊、安全分析、環境影響等。

← 下一次討論會主題

← 只取得摘要

加拿大-近地表處置設施 (NSDF)



環境影響報告書 (EIS) (1/3)

- 容量: 最多可容納 1,000,000 m³ 低放廢棄物
- 建造方式: 近地表工程建築
 - 分為 10 個廢棄物處置單元 (cells), 分兩個階段建造
 - 多層底襯與覆蓋系統, 裝滿後封蓋
- 廢棄物接收: 接收短半衰期LLW。主要接收CRL現存、修復與退役產生的廢棄物、未來核活動預期產生的廢棄物、少量AECL管轄設施、醫院及大學等場外來源。
- 設施設計主要依賴三項功能:
 - 基底襯墊系統, 用於容納廢棄物並限制污染物向地下水釋放。
 - 最終覆蓋系統, 隔離廢棄物, 提供輻射遮罩和入侵, 防止降水滲入。
 - 圍壩護堤, 提供結構穩定性, 承受自然物理事件。



加拿大-近地表處置設施 (NSDF)

環境影響報告書 (EIS) (2/3)

3. 民眾與原住民參與

- 民眾參與是 環境評估程序的核心要素
- 可提高社區知情程度, 並建立與社區、原住民、非政府組織的長期、互利合作關係

參與方式

- 演講、說明會、場地參觀
- 發佈網頁、資訊圖、說明書、社區通訊
- 媒體合作與公共活動
- 社交媒體與線上平台 (如 Facebook、YouTube、網路研討會)
- 原住民與民眾參與方式類似, 但包含更多直接接觸形式, 例如網路研討會、工作小組會議、社區資訊會議, 並提供資金 (Capacity Funding), 協助原住民社區更有效參與環境評估流程。

意見回饋

1. NSDF 計畫的必要性與正當性
2. 渥太華河的保護
3. 廢棄物清單與分類
4. 設施設計與工程細節
5. 長期監督與問責
6. 替代方案與選址考量
7. 潛在環境事件 (洪水、地震)

原住民關切議題

1. 渥太華河的環境保護
2. 傳統領土使用的潛在影響
3. 原住民族群利益的長期保護
4. 參與未來環境監測的機會
5. 傳統領域佔用、長期運營與潛在後續計畫的不確定性

回饋影響與修正

- 意見納入環境影響報告, 例如擴大評估範圍與技術分析, 並且將技術報告與支持資料公開於NSDF官方網站, 以強化透明度。
- 持續與政府機關(聯邦、省級監管機構)合作, 依審查與建議進行更新。
- 承諾與原住民建立公開透明的溝通管道、尊重文化歷史議題等。

加拿大-近地表處置設施 (NSDF)

環境影響報告書 (EIS) (3/3)

4. 環境評估結果

評估項目	評估結果	評估項目	評估結果
大氣	經過完整評估與模型預測。透過預防性管理與持續監測，已確認對環境影響可控且不顯著。	人類健康	透過工程設計、排放控制與嚴格監測，對民眾與工人的輻射暴露風險極低，其對人類健康影響不顯著。
地質和水文地質	透過設計與緩解措施，有效控制地質與水文地質方面的影響，預期不會對周圍環境與人類健康造成重大不利影響。	土地及資源利用	<ul style="list-style-type: none"> • 預計不會對土地和資源使用產生影響。 • 對考古資源無顯著影響，已完成預防性處置。
地表水環境	透過設計與管理計畫，預測這些變化不會對環境或公共健康構成顯著影響。	社會經濟環境	<ul style="list-style-type: none"> • 具有正面影響，特別是就業與經濟發展方面。 • 負面影響在緩解措施實施後預計不顯著。 • 將持續參與、監測與溝通機制來管理影響。
水域環境	在實施全面緩解與設計措施下，預期不會對水生棲息地或魚類多樣性造成重大影響。	事故和故障	風險管理系統能有效控制並回應潛在事故，確保工人安全、環境保護及公眾健康不受重大影響。
陸域環境	在採取嚴格的緩解與監控措施下，預期對陸地生態整體影響可控且不顯著。	極端環境對專案評估的影響	極端環境條件下，設施功能與環境保護機制仍將持續有效，風險「不顯著」。
環境輻射與生態健康	經完善工程設計與多層防護，環境輻射與生態健康的殘留風險低、影響可控、不具顯著性。	監測與後續計畫	動態、應變性強的系統設計，確保在各階段持續符合環境保護與社會責任標準。

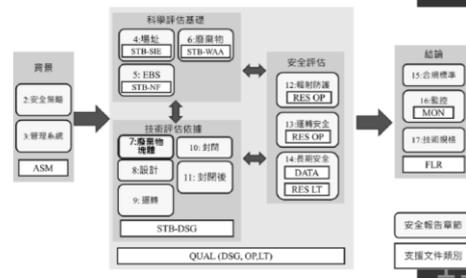
10

比利時-Dessel近地表處置場



A類廢棄物安全論證架構與審查程序

- 安全論證依閱讀對象共分為4個層級
 - 層級1：對民眾的非技術性綜述，包括安全論證的概述與技術摘要。
 - 層級2：安全報告，由17個詳細章節組成，以技術專家為對象撰寫。
 - 層級3：技術報告，描述並證明科學基礎、設計開發與安全評估的方法論。
 - 層級4：支撐報告，方法論的實際應用，包括科學與技術基礎、設計的開發與執行，以及安全評估的進行。
- 各層級內外部審查，包括OECD/NEA組織的國際同儕審查，並在最終提交前根據審查建議進行改進。

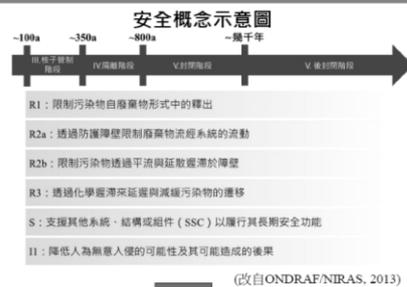


(改自 ONDRAF/NIRAS, 2013)

比利時-Dessel近地表處置場

安全策略

- 安全策略是建立安全論證的重要準備步驟，提供一個整體、高層次的方法來實現安全處置。
- 透過科學基礎、設計與安全評估確保初始設計符合基本安全需求。
- 處置場的開發與安全評估採用迭代方式，隨重大決策更新並定期審查，以確保長期安全。
- 近地表處置的長期安全依賴於：
 - 工程障壁：提供被動容納與隔離功能。
 - 場址特性：支持放射性廢棄物的安全封存。
 - 限制廢棄物的措施：確保長半衰期廢棄物活度在安全範圍內。
 - 監測與控制：防止外部干擾。
- 安全概念
 - 安全概念：結合安全功能、SSC及不同時間階段。
 - 安全功能：由設施的系統、結構與組件 (SSC) 提供。



(改自 ONDRAF/NIRAS, 2013)

細化

表格化

	長期安全功能1			長期安全功能2			...
	階段III	階段IV	階段V	階段III	階段IV	階段V	
SSC1	M	M	C	M	M	C	
SSC2	M			M			
...							

- M：需證明能長期穩定運作的關鍵系統。
- C：支援長期安全功能。

(改自 ONDRAF/NIRAS, 2013)

12

比利時-Dessel近地表處置場

安全論證的成功與挑戰

依賴

- 計畫的決策需將技術層面與社會參與機制成功整合。
- 透過管理系統確保安全論證的透明度與可追溯性。
- 安全策略與安全概念提供清晰的論證框架。
- 科學知識支持設施的可行性與安全性評估。
- 設施之設計、建造、營運及封閉之安全已證明可行。
- 安全評估符合所有安全標準。
- 為後續計畫預作準備，積極推動研發，以提升對處置系統的理解、降低不確定性、強化安全信心。

主要挑戰

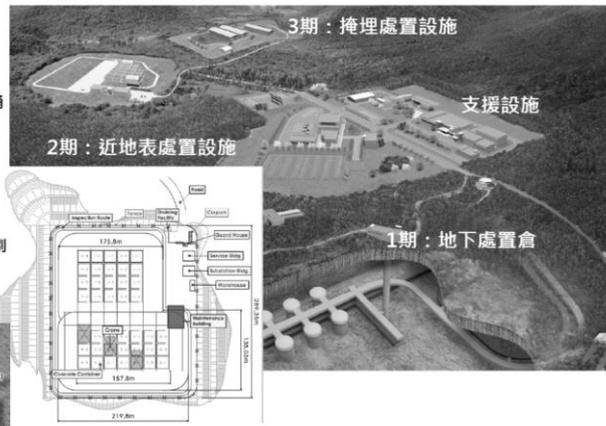
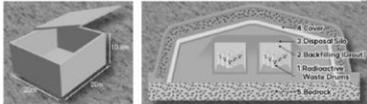
- 工程障壁為主要安全要素，因此其建造與驗證尤為重要。
- 廢棄物為源項主要風險，需嚴格訂定活度限值與合格標準。
- 水泥材料的長期特性具不確定性，透過保守分析與多元情節評估確保安全界線。

13

南韓-慶州第二期低放射性廢棄物處置設施

- 位置：慶尚北道慶州市文武大王面東海岸路
- 二期設施：約120,000 m² (總面積為2,060,000 m²)
- 設施容量：125,000桶(總處理量為80萬桶(以每桶200公升計算))
- 處置類別：低放射性及以下廢棄物
- 處置類型：近地表型(混凝土結構)
- 相關法例：
 - 放射性廢棄物管理法
 - 中低放射性廢棄物處置設施託管地區支援特別法

處置倉 多重阻隔結構(5層)



14

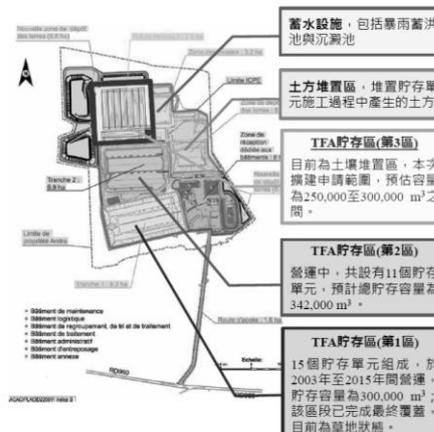
法國-Cires第三期極低放廢棄物處置設施



- 主要處置核設施拆除所產生的TFA廢棄物。
- 截至2021年底已使用約三分之二的容量，預估僅能持續營運至2029-2030年。
- 法國2022-2026年放射性廢棄物管理計畫(PNGMDR)提出擴建計畫，並要求Andra於2022年底前提交申請。

活度	放射性半衰期	極短半衰期(VSL) (半衰期<100天)	短半衰期(SL) (半衰期<31年)	長半衰期(LL) (半衰期>31年)
極低放射性廢棄物(VLLW) <100 Bq/g		☉	☉	☉
低放射性廢棄物(LLW) 幾百Bq/g至一萬Bq/g之間		☉	☉	☉
中放射性廢棄物(ILW) 在一百萬到一億Bq/g之間		☉	☉	☉
高放射性廢棄物(HLW) 數十億Bq/g數量級		☉	☉	☉

- ☉ 高放射性廢棄物
- ☉ 長半衰期中放射性廢棄物
- ☉ 長半衰期之低放射性廢棄物
- ☉ 短半衰期之低放與中放射性廢棄物
- ☉ 極低放射性廢棄物
- ☉ 極短半衰期廢棄物



15

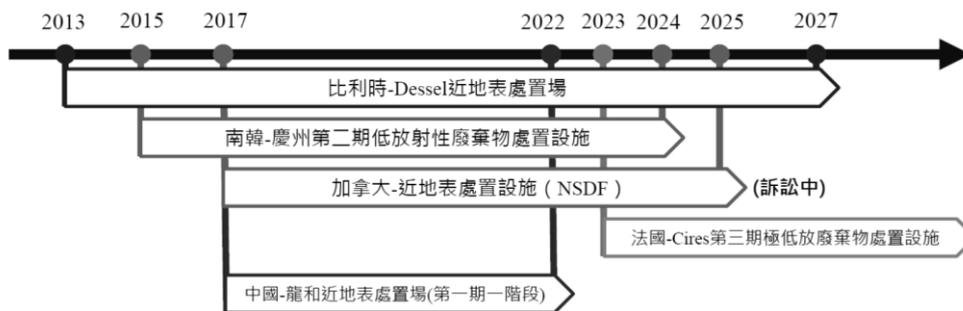
中國-龍和近地表處置場(第一期一階段)

環境影響

	施工期間的環境影響	運轉期間的環境輻射影響	處置場封閉後的長期影響(正常狀況)	圍入情節模擬與評估				
				打井情節	鑽孔情節	鑽孔後岩心墜落情節	建房屋居住情節	風蝕導致廢棄物裸露並建房居住情節
主要發生時期	主要影響來源為揚塵、施工廢水、固體廢物、噪音，多為短期、局部性影響，透過污染防治與現場管理，可將影響降至最低；施工結束後清理場地，影響可於短期內消失。	• 放射性廢氣排放量極低，對周圍環境影響可忽略。 • 廢棄物包件掉落事故，不會對周圍環境造成明顯影響。	封閉後6700年	封閉後6600年	封閉後300年		封閉後300年	封閉後5萬年
劑量			3.27×10^{-4} mSv/a，遠低於劑量約束值 0.01 mSv/a。	3.30×10^{-4} mSv/a，小於 1 mSv/a	1.10×10^{-2} mSv/次，小於 5 mSv/次	3.58×10^{-2} mSv/a，小於 1 mSv/a	0.742 mSv/a，小於 1 mSv/a	0.424 mSv/a，小於 1 mSv/a
關鍵核種			Tc-99	Tc-99	Ni-63	Cs-137	Cs-137	I-129
途徑			食入造成內照射	食入造成內照射	吸入造成內照射	沉積造成外照射	外照射	食入受汙染物質造成內照射

19

各國近地表處置設施申請至開始營運時間線



20

各國可蒐整之文獻比較

- 各國可蒐整到的資訊程度不同，但可發現幾個重要的重點：

國家	文獻與分析重點
加拿大(NSDF)	<ul style="list-style-type: none"> 環境影響報告書涵蓋分階段環境分析、設施設計、替代方案、事故風險等 原住民族參與社會溝通納入評估流程 安全論證依IAEA建議撰寫，結構完整
比利時(Dessel)	<ul style="list-style-type: none"> 安全論證依受眾對象分層級架構，橫跨技術與制度面 各階段明確區分「主要」與「輔助」安全功能 強調工程障壁設計、多情節模擬與長期穩定性分析 經OECD/NEA國際專家同儕審查
中國(龍和)	<ul style="list-style-type: none"> 公開資訊較少，但顯示出遵循IAEA導則 展現中國逐步與國際標準接軌之趨勢
法國(ANDRA)	<ul style="list-style-type: none"> 強調地方參與、民眾溝通與回饋機制 回應關切面向：設址合理性、交通風險、生態保護 審查意見建議納入氣候變遷與生態修復評估
南韓(慶州)	<ul style="list-style-type: none"> 可蒐整之資訊較少，處置場採地下、近地表及掩埋場之綜合規劃。

21

安全評估時間尺度比較

國家 / 地區	主動監管期	評估時間尺度	依據與備註
加拿大 (NSDF)	550 年	10,000 年 (建模)	依據 CNSC REGDOC-2.11.1 與 IAEA SSG-23, 涵蓋侵蝕、人為侵入等低機率事件; 預期最大劑量時間作為考量基礎。
法國 (Cires)	300 年	數百年至數千年 (未明載具體數值)	僅可自民眾公開資訊與審查報告推論出安全評估時間涵蓋封閉後 100、350、800 年及數千年之尺度。
比利時 (Dessel)	超過 300 年	數百年至數千年 (未明載具體數值)	未明確指出安全評估所採用的時間尺度, 但就安全概念去推敲, 涵蓋 100~數千年以上之尺度。
中國 (龍和處置場一期)	未明確說明	• 10,000 年 (核種釋放) • 100,000 年 (公眾劑量)	雖報告中未直接說明評估尺度, 但模擬範圍涵蓋時間推演至十萬年。
韓國 (慶州二期)	未明確說明	資料不足	公開資訊未包含安全評估尺度; 僅有年度摘要報告與設施許可程序資料。
IAEA 導則 (SSG-23)		無固定年限, 強調風險基礎與多情節考量	建議涵蓋可能產生最大影響之期間, 即便發生機率低仍應評估; 建模期間常為數千年以上。

評估假設情節

各國在低放處置設施的安全評估情節設定上, 大致依循IAEA之建議架構, 但在執行上仍有各自特色。整體呈現以下共同趨勢:

- 評估通常涵蓋百年至萬年長時間尺度
- 不確定性 (如氣候變遷、地質演化、人為入侵) 透過情節設定進行模擬

類型	說明
正常演變情節	模擬設施按計畫運作, 並評估場址隨時間的自然變遷 (如氣候、地下水流動等)。
替代演變情節	模擬非預期但合理的變化, 例如工程障壁劣化、異常侵蝕或極端氣候。
人為入侵情節	考量未來世代可能因不知情而入侵處置場 (如鑽井、建設) 所引發的風險。
極端低機率假設情節	探討在極度保守或障壁失效條件下, 系統的最差表現, 作為安全驗證依據。

3

討論

- 本研究所蒐整到的安全論證案例中，比利時的安全功能矩陣與依不同受眾採多層級報告架構，加拿大的原住民參與、替代方案比較與社會監督機制的經驗。台灣目前低放處置朝向坑道處置發展，未來如需往近地表處置發展，應如何整合工程安全（如多重障壁與多情節模擬）、多元制度設計（如報告分級與審查架構）與社會參與機制（如原住民參與與資訊公開），以建構具備信任與說服力的安全論證架構？
- 各國處置場設計之案例，韓國慶州採取地下、近地表及掩埋等多元化設計。法國依據廢棄物之活度及半衰期長度亦採取不同強度的管制。台灣低放射性廢棄物處置技術與制度目前仍採取坑道處置之方向發展，對於處置方式多元化選項的必要性與可行性？
- 從各國近地表處置設施之設計，主動監管期及安全評估之時間尺度各有所差異。另外，對於安全評估的模擬情節上，各國也有不同的考量。我國低放目前仍採坑道處置方式發展。如未來從坑道處置轉向近地表處置，亦或是複合型處置場，其法規制度、安全評估方法與模擬架構應從哪些面向進行修正或補充，以因應不同處置類型所需的長期安全論證要求？
- 對本研究其他有興趣的議題？

簡報完畢
敬請指教

二、第二次專家會議簡報

114年低放射性廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析

第二次專家技術討論會

報告人 梁興樸 計畫經理

王士榮 副教授 董家鈞 教授
臺灣地下水資源暨水文地質學會

114年10月29日(星期三)下午15:00

政大公企中心 (A903會議室)



核能安全委員會
Nuclear Safety Commission



臺灣地下水資源暨
水文地質學會

簡報大綱

1. 前言
2. 主題報告
3. 討論

1

前言

3

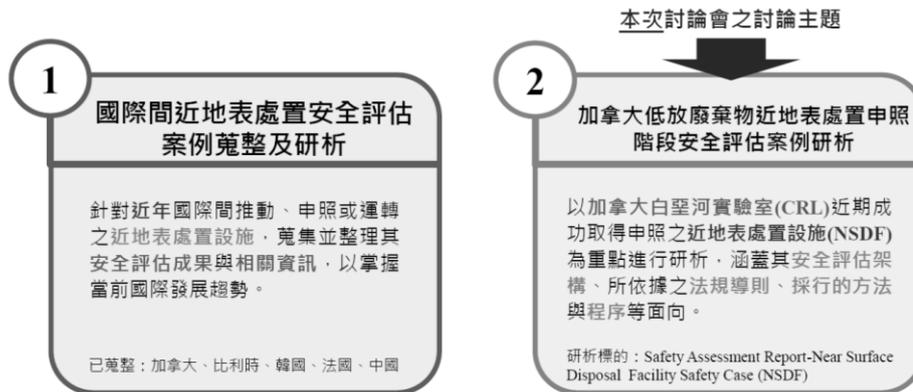
4

前言

- 截至目前，國際上已有逾百處中低放射性廢棄物處置設施持續運轉，設施類型以近地表處置為主，坑道處置次之，深層地質處置則較少，整體運轉安全穩定。
- 國際間近地表處置技術已發展多年，並具豐富實績，近年如加拿大、比利時與中國等國皆有推動相關設施。在推動過程中，**安全評估扮演關鍵角色**，且隨著各國實務經驗的累積與處置技術的精進，相關管制要求亦持續調整與強化。
- 為確保我國處置設施之安全評估作業與國際接軌，並提升我國相關技術水準與審驗能力，執行「**114年低放射性廢棄物近地表處置申照階段安全評估案例研析**」研究，以支援主管機關強化審查能量。
- 邀請相關專業領域之專家共同研討，藉由專家意見交流與回饋，提升研究成果之完整性與實用性。

5

討論主題說明

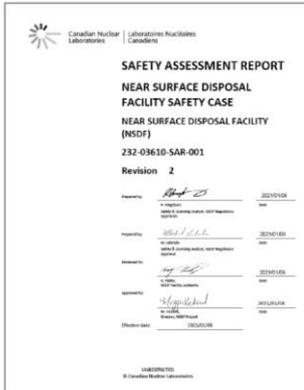


6

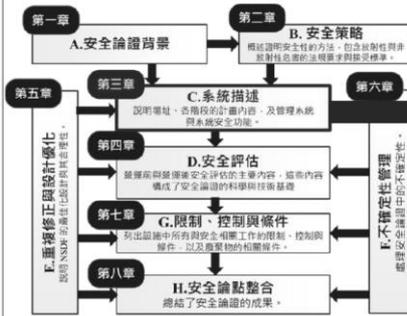
2

階段成果說明

7



參考文獻：Safety Assessment Report – Near Surface Disposal Facility safety case: Near Surface Disposal Facility (NSDF)(Kingsbury et al., 2021)

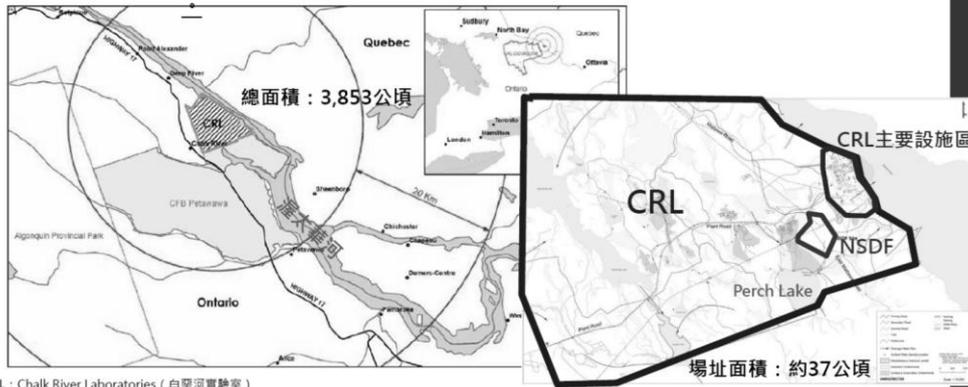


場址特性和設施設計為安全評估前重要的工作。
國內目前以坑道處置方向，如需往近地表處置發展，場址特性和工程設計可先快速了解近地表關注之重點。



場址特徵(1/6)

除了CRL進行的核能營運及已獲許可活動外，由於公共進入受限，CRL土地不允許其他用途。CRL場址內禁止狩獵和釣魚，亦未被原住民作為傳統用途使用

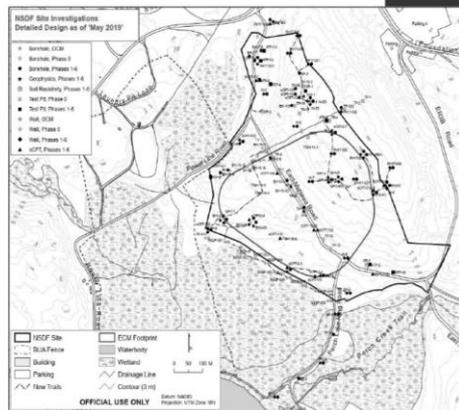


CRL: Chalk River Laboratories (白蠟河實驗室)

場址特徵(2/6)

- 場址特徵調查
- 現有資料：深層（大約 1000 公尺）場址的特徵。
 - 階段性調查：
 - 識別土壤類型、母岩標高和地下水標高。
 - 第一階段：擬建 ECM 範圍及其支撐結構。
 - 第二階段：補充第一階段結果。
 - 第三階段：進一步補充現有地工資料和現地工作結果。
 - 第四階段：持續補充現有地工資料和現地工作結果。
 - 第五階段：使用單井升降水頭法在第四階段現地工作中安裝的監測井中進行水力傳導係數試驗。
 - 第六階段：提供足夠資料/資訊來設計和建設。
(包含數個監測井、試驗坑及地物試驗測點)

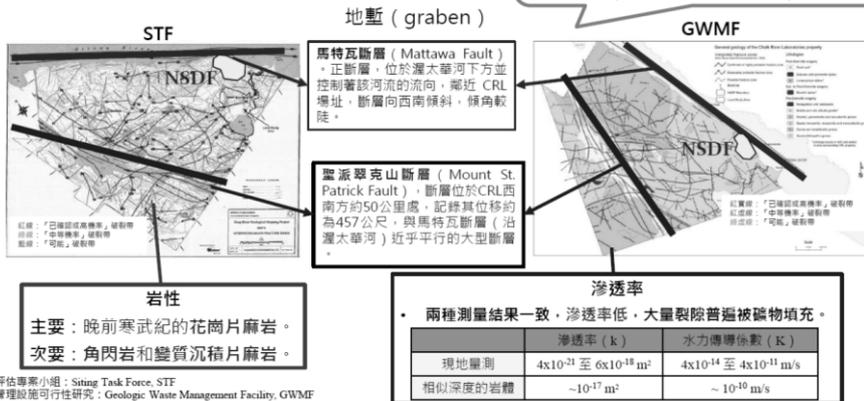
- 數值模擬
- 開發地下水流動模型，估算 NSDF 各組件在運營和封閉後條件下對水文地質條件的影響。
 - 定率式方法構建並驗證 3D 數值地下水模型 (MODFLOW)。
 - 不確定性、敏感度分析。



工程圍土牆：Engineered Containment Mound, ECM
單井升降水頭法：rising and falling head single-well methodology

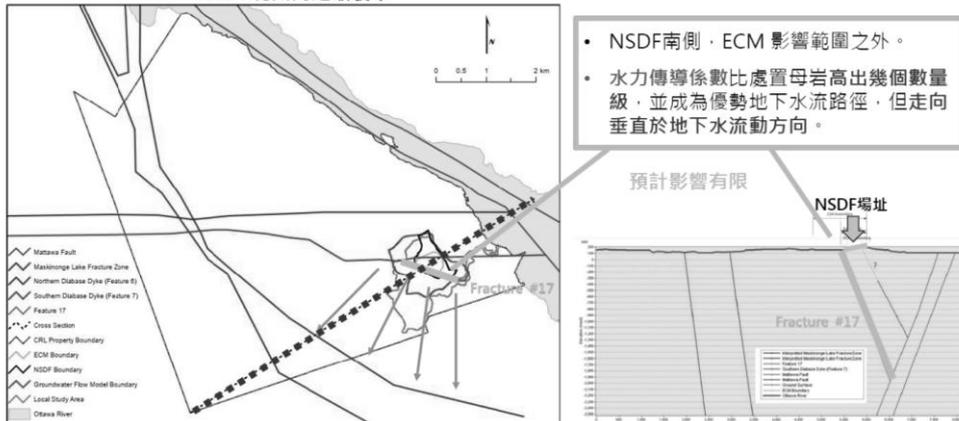
場址特徵(3/6)

CRL場址之構造及地質特性



場址特徵(4/6)

NSDF範圍內之破裂帶



場址特徵(5/6)

地表水文

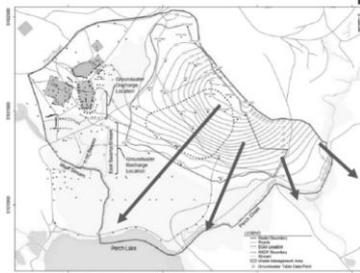
• 流域位置：渥太華河流域。

渥太華河流量

- 最高：4 億 m³/d
- 最低：790 萬 m³/d
- 平均：5000 萬 ~ 1 億 m³/d

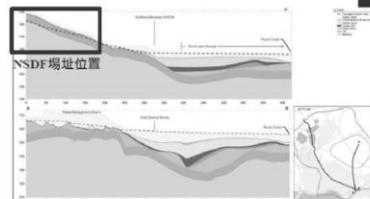
水位

- 受上游 Des Joachims 大壩影響。
- 最高水位：113.1 mASL
 - 最低水位：110.8 mASL
 - 平均水位：111.5 mASL
 - 設計基準洪水水位：122 mASL
- 高於海平面：Above Sea Level, ASL



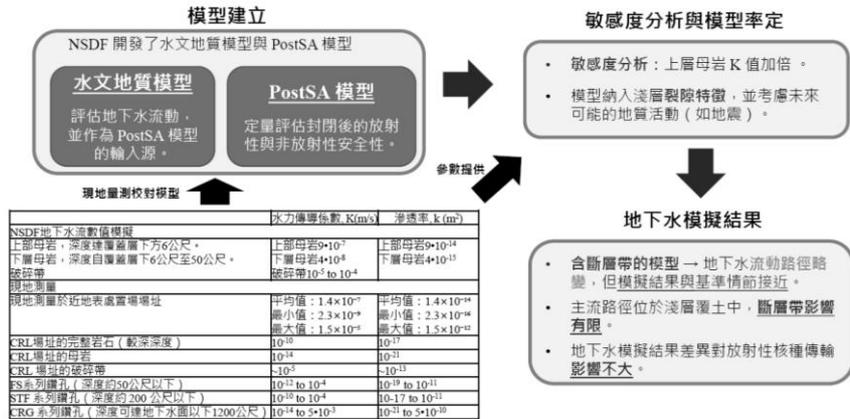
水文地質

- 地下水流動主要經由砂質沉積層流動。母岩滲透率低，對流動貢獻小。
- 地下水流動整體上與地形起伏一致，補注發生於高地，流出於 Perch Lake 或 Perch Creek。
- 水位變化：
 - 未固結沉積層 (砂與泥)：季節/年際變化 2-3 公尺。
 - 母岩：因孔隙率低，變化較沉積層大。
- 沉積層厚度以東部母岩脊最薄，往西逐漸增厚，在母岩脊超過 36 公尺。



場址特徵(6/6)

水文地質模型及封閉後安全評估(PostSA)



設施設計與工程(1/9)

- 設計運營年限：50年
- 設計年限：550年
- 設計標準：2015年NBCC，其中包含2,475年回歸期地震DBE。

安全目標和長期安全要求



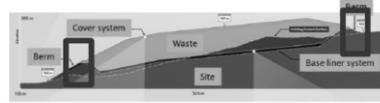
設施設計與工程(2/9)

主動式工程安全設施 (PEC)	安全功能	選擇依據 / 理由
LCS 集水槽 「高-高水位」	監測與控制	監測被動式工程障壁 (ECM 主襯墊)。若基本程序控制系統失效，可能導致 LCS 集水槽水位異常未被偵測，最終使 ECM 主襯墊承受過高水頭 (liquid head)。
LDS 集水槽 「高-高水位」	監測與控制	監測被動式工程障壁 (ECM 主襯墊)。若基本程序控制系統失效，可能導致 LDS 集水槽水位異常未被偵測，最終使 ECM 主襯墊承受過高水頭 (liquid head)。
接觸水抽水站 (CWPS#1) 溢流防護系統	監測與控制	控制系統故障時，可能發生未同步關閉進水閘的情況，卻關閉了 CWPS #1 出水泵，導致未處理廢水溢流至環境。
接觸水抽水站 (CWPS#2) 「高-高水位」警報	監測與控制	檢查 CWPS #2 是否可接收 NSDF 主動排水。若控制系統故障，CWPS #2 可能停機並失去水位監測，若未通知人員，恐造成排水外洩。
雙層結構與管線的次級圍阻及滲漏檢測系統 (LDS)	圍阻	次級圍阻可在一次圍阻失效 (如溢流或洩漏) 時防止污染進入環境，並於液體積聚時觸發警報。
單層淨出污水管線輸送系統	圍阻	單層不鋪管管線僅設於可由均化槽次級圍阻收集的位置，或安裝於污水處理廠內部。
埋地淨出污水 / 接觸水泵 / 管線輸送系統	圍阻	地下 HDPE 管線均為雙層結構，提供主層與次層防護，並埋設於凍土層以下。
管線輸送系統	監測與控制	低點檢測口可讓人員檢查雙層管之間是否有水，若有則顯示管線可能發生水滲漏。
地面以上淨出污水 / 接觸水泵 / 管線輸送系統	圍阻	地上輸送管線採雙層 HDPE，並配備低點漏水檢測裝置，若環狀空間積水則會警報。
淨出污水 / 接觸水泵 / 管線輸送系統的伴熱裝置	監測與控制	管線與設備設有加熱與保溫，防止結冰造成破裂。熱追蹤系統維持溫度高於 4°C，並設有警報提示異常。

加熱裝置

滲漏檢測系統：Leak Detection System, LDS
 淨出污水收集系統：Leachate Collection System, LCS
 高密度聚乙烯：High-Density Polyethylene, HDPE

設施設計與工程(6/9)



週邊護堤

功能

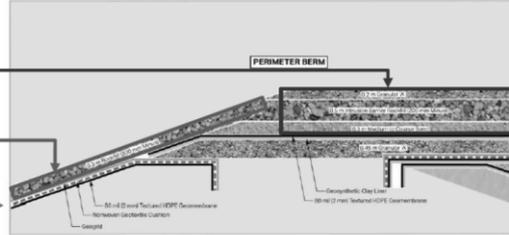
- 構成 ECM 的外部邊界與側牆，形成完整邊界。
- 維持 ECM 廢棄物包圍系統的結構完整性。
- 提供廢棄物與滲出污水的圍阻與隔離。
- 減少外部地表水進入 ECM。
- 通過地震分析驗證，可享受設計基準地震 (DBE) 與運作基準地震 (OBE)。
- 作為物理障壁，引導暴雨逕流遠離 ECM。

堤體：由三層粒徑填料構成。

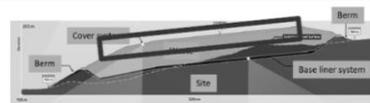
堤頂寬度：7 公尺，可供車輛通行與監測作業。

側牆：以岩材建造，強化圍阻與防止入侵。

側坡：鋪設主要與次要複合襯層。
(HDPE GMB 襯墊 / 土工不織布過濾層+土工格柵 (geogrid))



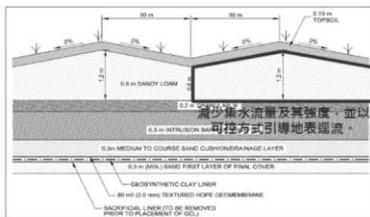
設施設計與工程(7/9)



最終覆蓋系統

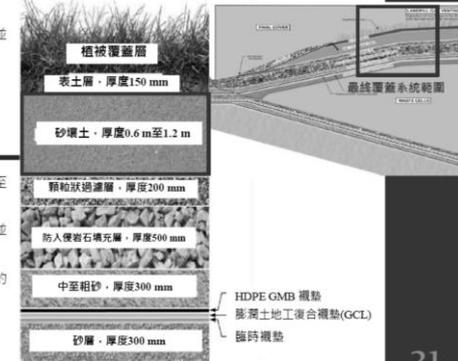
設計目的

- 保護人類與自然環境，圍阻廢棄物及污染物。
- 確保表面輻射接近背景值。
- 提供廢棄物隔離功能，防止降水滲入，降低滲出污水產生。



- 提供美觀的表面，增強蒸散作用，並減少侵蝕的可能性。
- 提供適合耐寒草生長的生長區。
- 保持水分，供植物吸收和蒸散。
- 減少細小顆粒從砂壤土層向下遷移至下方入侵壁岩石填料的的可能性。
- 阻止掘洞動物和深根植物根系穿透並損壞覆蓋系統。
- 減少上層填料層中較大顆粒所產生的局部應變。

平整基底



設施設計與工程(8/9)

臨時覆蓋層

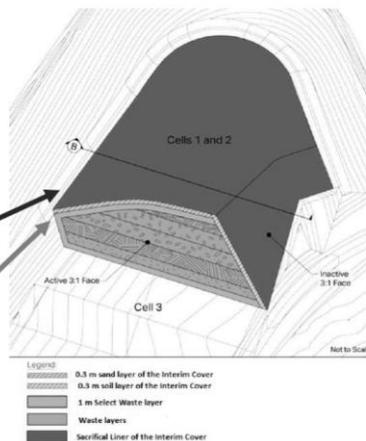
適用範圍

- 無處置活動超過 30 天、未來仍可能接收廢棄物的處置區
- 已達設計填埋高度、等待最終覆蓋系統安裝的處置區

臨時襯墊

- 促進表面逕流
- 減少降水滲入廢棄物
- 保護下方潔淨土壤/砂層免於侵蝕
- 耐久、抗紫外線破壞，具備高韌係數
- 安裝期間須妥善鋪設，防止風掀起

0.3 公尺厚的土壤或砂層

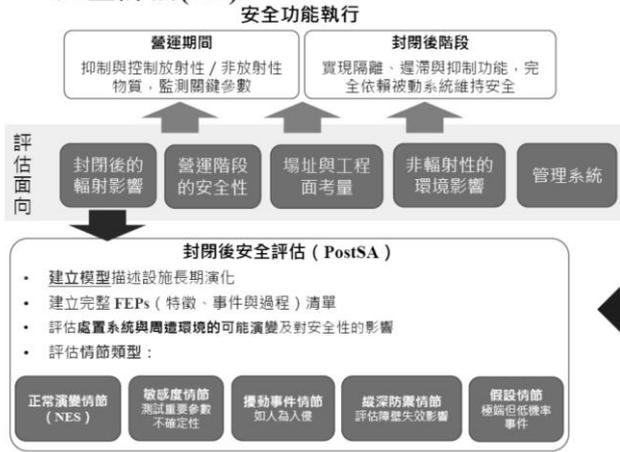


設施設計與工程(9/9)

NSDF 場址對安全至關重要之基礎設施和支援設施系統

結構系統與元件	安全功能	運作條件 / 理由
第三級(Class III)電力	提供緊急備用電力給安全相關系統與組件 (SSCs) 以應對第四類停電	二級發電機使用無限供應的天然氣運作。該發電機將為「主動」安全重要結構、系統及組件 (SSC) 中的各個部件提供電力，這些組件在正常的第四級(Class IV)電力中斷期間，需要電力以執行其安全功能。
第二級(Class II)電力	電池備用電力	不斷電系統 (UPS) 將為監控與資料收集系統 (SCADA) 及關鍵儀器提供電力，以在失去第三級電源且第四級電源無法使用時，仍能繼續記錄關鍵參數達 30 分鐘。CRL 建築物中，第二級電源通常用於緊急照明、出口照明、安全系統及消防監控系統。
消防水系統	消防保護	設置消防水系統，以服務 NSDF 的支援設施。週邊並具加熱功能的消防水房位於消防水儲槽頂部。消防水系統 (FWPS) 內設有消防控制面版、自動切換開關 (在需要時將電源由第四級切換至第二級)、消防泵及供水管線。消防水系統故障可能降低應變能力，並在火災發生時導致更多與火災相關的傷害和 / 或暴露風險。火災偵測系統失效可能導致與火災相關的暴露、傷害或建築物損壞。
VDF 消防及輻射防護系統	消防保護 輻射防護監測與控制	可攜式即時 α/β 粒子監測儀 (iCams) 及固定區域劑量率監測儀。連續空氣監測器 (CAM) 系統若發生故障，可能導致無法指示建築物內空氣中污染物濃度升高，並可能影響設施人員的放射安全。該系統依據放射防護要求，提供空氣中總量 α/β 粒子活度的聲音及視覺警報，當處置場中的有害廢氣外洩時，能提前警示人員。若有有害廢氣外洩濃度超過輻射防護設定的臨界值，系統會發出聲音警報，並亮起紅色視覺警示燈。
VDF 一氧化碳監測器	監測與控制	一氧化碳氣體監測。警報會通知一氧化碳氣體濃度達到不安全水平。
作業支援中心 - 消防保護系統	消防保護	火災偵測系統故障可能導致火災相關的暴露、傷害或建築物損壞。
行政辦公室消防保護系統	消防保護	火災偵測系統故障可能導致火災相關的暴露、傷害或建築物損壞。
入口管制亭 (北側與南側)	消防保護	火災偵測系統故障可能導致火災相關的暴露、傷害或建築物損壞。
消防保護系統		

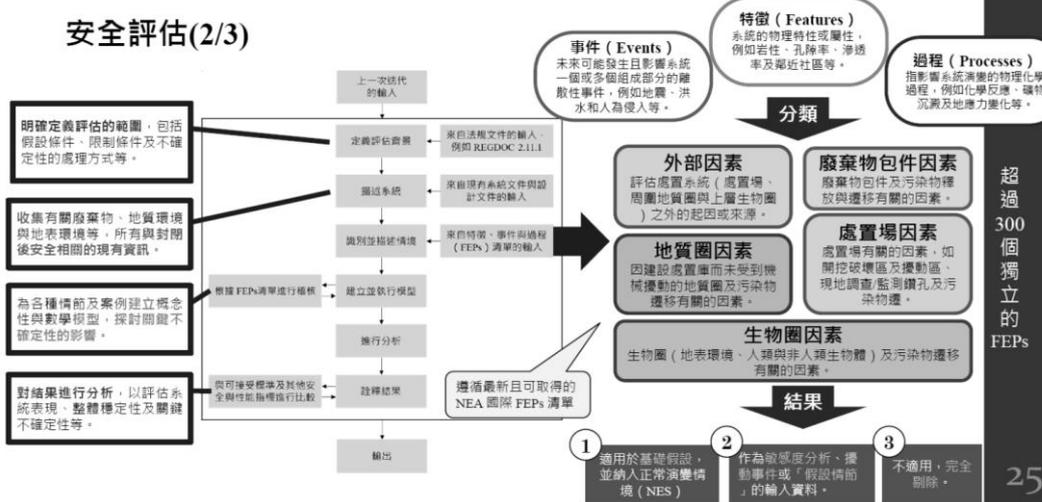
安全評估(1/3)



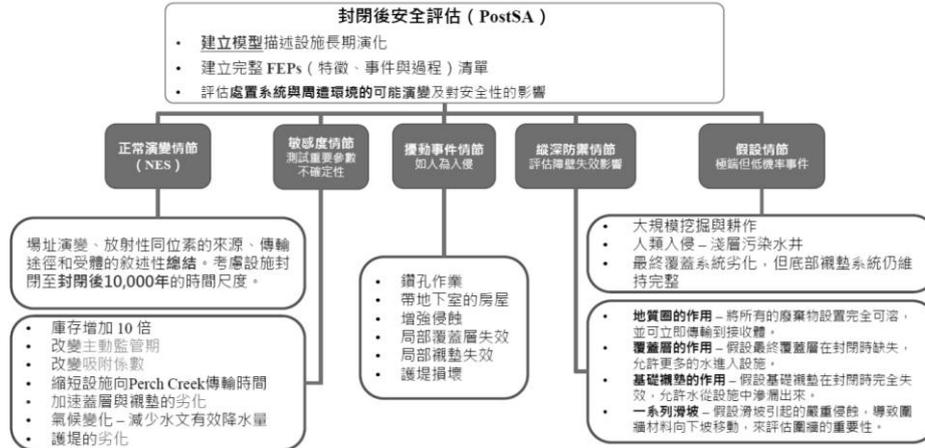
評估流程



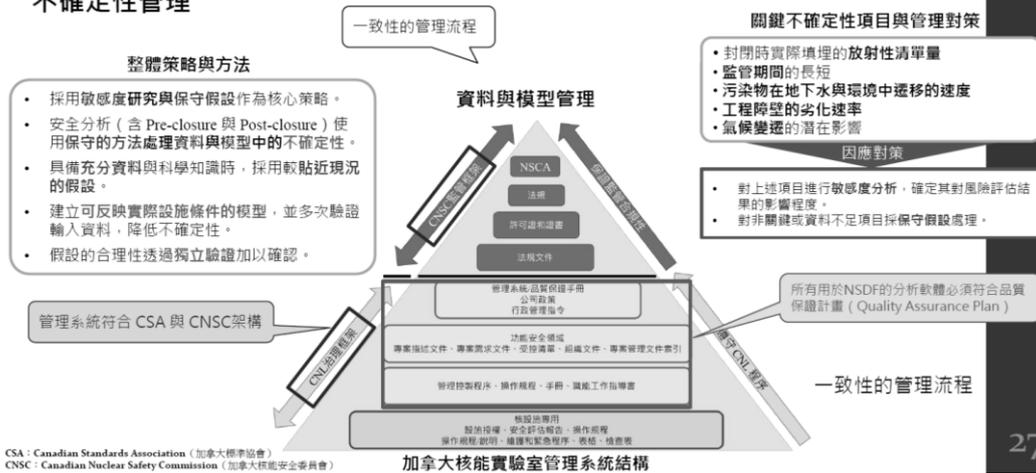
安全評估(2/3)



安全評估(3/3)



不確定性管理



3

討論

- 我國低放廢棄物未來如採行近地表處置策略，場址調查與安全評估工作之關鍵項目（如滲透率、破裂帶、地震危害）為何？建議該如何進行？
- 如何確認安全評估所需之模型種類、採用之數值軟體與程式、使用資料品質與數值模擬結果符合安全評估管理要求？例如：
 - 我國申照階段應建立哪些主要概念模型（如水文地質、封閉後安全評估模型）？
 - 數值模型率定與參數來源資料不足時，該如何確保模擬結果具有代表性？
 - 關鍵不確定性（如氣候變遷或障壁劣化速率），如何進行量化與追蹤？
 - 封閉後監測與維護期間之時間長度與管理機制，如何建立制度與標準化準則？
- 針對未來我國低放廢棄物可能進行近地表處置安全評估作業的優先或重點項目，主管機關在審驗技術與資料品保要求面向上可強化之項目，以及評估建立跨領域資料庫或示範模擬平台的可行性等，是否有任何建議項目或進行方式？
- 其他關於低放廢棄物近地表處置申照階段安全評估的議題，也請不吝提出討論。

簡報完畢
敬請指教