

核能安全委員會 委託研究計畫研究報告

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 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：NSC11301002L
報 告 日 期：中華民國 113 年 12 月

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

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 113 年 02 月至 113 年 12 月

研究經費：新臺幣 1,137,960 元

核能安全委員會 委託研究

中華民國 113 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)

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

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：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

一、摘要

(一)中文摘要

目前我國核能電廠逐步進入除役階段，低放射性廢棄物的處置成為需要解決的課題。淺地表處置設施在國際間已發展多年並累積豐富經驗。我國目前規劃次地表坑道式設施，參考國際間處置技術，對瞭解趨勢與制定國內策略至關重要。可針對國際趨勢提出研究分析，以協助管制單位制定相關政策。本研究針對淺地表處置之研究發現，部分國家低放廢棄物產量超過現有處置場容量，已規劃新設施或擴建現有設施。而「IAEA-TECDOC-2041」彙整了淺地表處置論壇的成果，針對安全論證的應用、管制經驗、封閉後安全評估及溝通策略進行討論。除此之外，本研究綜整上述研析成果於專家技術討論會中進行討論，並提出管制建議，為我國未來低放廢棄物處置提供參考依據。

(二)英文摘要

Currently, as nuclear power plants in our country gradually enter the decommissioning phase, the disposal of low-level radioactive waste has become an issue that requires resolution. The disposal of low-level radioactive waste can take decades from site selection to closure, and our country is currently still in the site selection phase. Near-surface disposal facilities have been developed internationally for many years, with countries like the United States, France, Japan, and Spain accumulating extensive experience. Drawing on international disposal technologies is crucial for understanding trends and formulating domestic strategies. Research and analysis of international developments can support regulatory authorities in establishing relevant policies. This project's research on near-surface disposal revealed that some countries are experiencing low-level radioactive waste volumes exceeding the capacity of existing facilities. As a result, they have planned new facilities or expansions of current ones. The "IAEA-TECDOC-2041" compiles the outcomes of the Near-Surface Disposal Forum, focusing on the application of safety cases, regulatory experiences, post-closure safety assessments, and communication strategies. In addition, this study consolidates the findings from the above analysis and discusses them in expert technical forums, offering regulatory recommendations as a reference for Taiwan's future low-level waste disposal.

二、計畫目標

我國各核能電廠目前已逐漸進入除役階段，核設施產生之低放射性廢棄物亦是需要面對的課題。因此，掌握國際間對於低放射性廢棄物最終處置之技術發展趨勢，有助於提升我國安全管制量能。淺地表處置設施用於最終處置在國際間已發展多年，IAEA 於 2014 年針對淺地表處置提出具體的安全指引(SSG-29)，作為各國管制機構制定法規的參考依據。美國、法國、日本及西班牙等國對於淺地表處置設施已累積

相當豐富營運管理經驗。為因應國際趨勢及國內情勢之變化，探討淺地表處置及次地表坑道式處置在安全管制需求上之差異，提出「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」。研究中盤點及蒐整國際間淺地表處置國家之最新處置近況，整理淺地表處置設施類型，作為後續延伸研究之依憑。除此之外，重點研析 IAEA 於 2024 年公開之報告，該文獻主要彙整放射性廢棄物淺地表處置安全論證與安全評估的發展、審查及經驗交流相關資訊。彙整上述成果舉辦專家技術討論會讓專家提供相關意見。最後，提出管制要項建議。

三、 重要成果

(一) 本研究研析核電國家在低放射性廢棄物處置方面的應對措

施，發現處置場容量不足是普遍問題，具體應對措施如下：

1. 英國：廢棄物進行再處理，LLW 運至 LLWR 及 Dounreay 兩個處置場，VLLW 則運至 NDA 許可的垃圾掩埋場進行掩埋。
2. 捷克：針對可能新建核能電廠及處置技術進行研究。為確保 Dukovany 處置場足夠空間，計畫進行維修與擴建。
3. 西班牙：El Cabril 處置場透過擴建處置空間、設計新處置窖及加強與廢棄物產生單位合作來提升處置量能。
4. 法國：Cires 處置場計畫擴增處置能力，但不改變現有佔地，

維持相同安全水準。

(二) 本研究對國際間的淺地表處置類型進行蒐集與研析，包括壕溝式、地面土丘、地面型及淺地表混凝土處置窖等，選擇設施需考量廢棄物放射性、隔離時間及地質環境等因素。壕溝和土丘設計較簡單，適合低活性且衰減期短的廢棄物，而混凝土處置窖則適合長半衰期且活性較高的廢棄物。

(三) 本研究舉行兩場專家技術討論會，邀請專家學者與台電公司參與，並針對研究結果進行了深入討論，得出以下三個重點：

1. 本研究成果可作為未來延伸研究的依據，特別是針對不同類型處置設施的優缺點、適用條件及限制，並重點分析設施的「隔離」安全功能及「監測」問題。
2. 法規方面，目前法規多集中於安全分析和評估，建議未來可新增安全論證規範，並在低放射性廢棄物處置的安全報告審查導則中加入與淺地表處置相關的關鍵資訊。
3. 安全論證及溝通方面，建議參考「IAEA-TECDOC-2041」技術報告中的經驗，例如進行處置計畫中的利害關係人盤點，並根據不同階段選擇適合的溝通方式。此外，應明確劃分政府部門角色，並編制簡易的報告供民眾了解。

(四) 「IAEA-TECDOC-2041」技術報告總結了國際淺地表處置論

壇的討論，內容涵蓋安全論證、管制經驗、封閉後安全評估及安全論證溝通四大主題，並整理以下重點：

1. 報告中參酌相關導則包括「基本的安全原則(SF-1)」、「放射性廢棄物處置之安全目標與標準(SSR-5)」、「放射性廢棄物淺地表處置設施的指引與建議(SSG-29)」及其他相關導則及技術報告。
2. 淺地表處置設施的開發決策中，首先需確認設施所處的發展階段，並明確定義決策指標與接受標準。例如，劑量可作為決策指標，並需考慮替代方案的影響及未來計畫可能被撤銷的風險。
3. 設施管制方面，監管機關需對不同階段的安全論證進行審查，制定適當的法規與導則，並確保有足夠能力的人員來執行審查工作。
4. ISAM 方法對於封閉後安全評估是良好的參考依據，但需關注不確定性及敏感性分析，並評估廢棄物異質性對處置場的可接受性。
5. 安全論證的溝通方面，應釐清國家政策及放射性廢棄物處置策略，並獲得相關組織的支持。溝通計畫需涵蓋所有利益相關者，特別是當地社區。並根據需求選擇適合

的溝通行動，確保建立信任並促進雙向溝通。

四、 展望

本研究蒐整國際間淺地表處置的資訊，包含各國年度報告、處置設施類型及「IAEA-TECDOC-2041」技術報告，對於未來展望之具體說明如下：

(一)未來延伸研究方向：

1. 優先整理與我國條件相似國家的淺地表處置資訊，加速掌握適用的知識。
2. 深入研究不同類型處置設施的優缺點及其環境適用條件與限制，已提供我國的參考。
3. 針對「隔離」功能及設施的「監測」進行研究，這些是淺地表處置中相較於坑道處置更為關鍵的安全問題。

(二)我國法規修訂建議：

1. 現有低放射性廢棄物安全報告審查導則偏重坑道式設施，未來如需納入淺地表處置，可增訂相關內容。
2. 建議在法規中加入安全論證規範，為設施經營者提供法規依據。

核能安全委員會 委託研究計畫研究報告

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 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：NSC11301002L
報 告 日 期：中華民國 113 年 12 月

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

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 113 年 02 月至 113 年 12 月

研究經費：新臺幣 1,137,960 元

核能安全委員會 委託研究

中華民國 113 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

目前我國各核能電廠已逐漸進入除役階段，受核污染之設備或低放射性廢棄物(low-level waste, LLW)是馬上需要面對的課題。然而，低放射性廢棄物處置技術發展，從選址至處置場封閉(closure)可能長達數十年。我國低放射性廢棄物最終處置迄今仍於選址階段，故掌握國際間對於低放射性廢棄物最終處置之處置技術及場址特性，有助於瞭解國際處置技術發展趨勢，並做為我國處置之參考。淺地表處置設施(near-surface disposal facility)用在低放射性廢棄物最終處置在國際間已發展多年，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)亦針對淺地表處置(near-surface repository)提出具體的安全指引「Specific Safety Guide (SSG-29)」(IAEA, 2014)。目前主要核能國家如美國、法國、日本及西班牙等國累積相當豐富之經驗。我國低放最終處置目前採次地表坑道式規劃，為因應國際趨勢及國內可能之情勢變化，提出「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」，針對國際間淺地表處置之現況、法規、關鍵資訊及處置設施等議題進行研析，並透過專家技術討論會，讓相關領域之專家學者進行技術交流及指導，協助管制單位掌握國際間不同處置技術之發展，並作為我國低放處置管制要項之參考。

本研究蒐整各國之年度報告發現，部分國家之低放廢棄物預估產生量已大於現有處置場容量，已規劃新的處置設施或將現有設施進行擴建。「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)主要內容為彙整淺地表處置論壇相關之討論成果，論壇包含4個工作小組，分別針對安全論證(safety case)對淺地表處置決策中的應用、處置場管制經驗及流程、封閉後安全評估(safety assessment)及安全論證溝通等四個主題進行討論及意見蒐整。淺地表處置設施決策中使用安全論證，用於選址、場址特徵化、廢棄物接收標準及設施設計等，決策時應考量到各單位之責任、不確定性及程序上之風險等因素；處置設施各階段之所有安全論證的管制審查，須從設施初期階段開始就進行規劃與管理，並對處置設施各階段進行審查；封閉後之安全評估可參考「ISAM」計畫所提出之方法，另外也需注意特殊規格之廢棄物可能無法符合廢棄物接收標準的可能；安全論證溝通部分，需要儘早確認溝通策略及規劃，對於官方之間、利益相關者之間、媒體之間或民眾都需要保持良好溝通管道，並以專業訓練人員及簡易圖表輔助溝通。除此之外，本研究也初步整理了淺地表處置設施之類型，對於後續需進一步針對淺地

表處置設施進行研究時，可供作為研究依憑。依據上述研究成果，本研究於 7 月及 10 月各舉辦一場專家技術討論會，邀請專家學者共同參與討論。相關成果及建議，彙整於本研究中，並提出淺地表處置管制要項之建議。

關鍵詞：淺地表處置、低放射性廢棄物、混凝土處置窖、安全論證、溝通

Abstract

Nuclear power plants in our country are gradually entering the decommissioning phase. Low-level radioactive waste (LLW) is an issue that needs to be addressed immediately. However, the development of low-level radioactive waste disposal technology, from site selection to facility closure, may take several decades. In Taiwan, low-level radioactive waste disposal is still in the site selection stage. Therefore, understanding international disposal technologies and site characteristics for final disposal of low-level radioactive waste can serve as a reference for our own disposal efforts. The near-surface disposal facility has been used for low-level radioactive waste disposal for many years, and the International Atomic Energy Agency (IAEA) has issued specific safety guidelines (SSG-29) regarding near-surface disposal. Taiwan's low-level radioactive waste disposal adopts a tunnel-type design. In response to international trends and potential domestic changes, a study titled "Analysis on the issues of safety control for near surface disposal of low-level radioactive waste" has been proposed. The study analyzes the current status, regulations, key information, and disposal facilities related to near-surface disposal internationally. It also facilitates technical discussions through expert seminars, allowing specialists and scholars in relevant fields to exchange knowledge and provide guidance.

This study gathers annual reports from various countries and finds that in some nations, the estimated generation of low-level radioactive waste has exceeded the capacity of existing disposal sites. As a result, new disposal facilities are being planned, or existing facilities are being expanded. Another key focus of this study is the review of the "IAEA-TECDOC-2041" technical report. The main content of the report discusses four themes: the application of safety cases in decision-making for near-surface disposal, experience and processes in site regulation, safety assessment after closure, and communication of safety cases. The study gathers insights and opinions on these topics. In addition, this study has preliminarily compiled the types of near-surface disposal facilities used internationally. This compilation can serve as a reference for further research on near-surface disposal facilities in the future. Based on the research findings, this study held two expert technical discussion seminars, one in July and another in October, inviting experts and scholars to participate in the

discussions. The opinions from the expert technical discussion seminars are compiled in this study, which also provides recommendations on key regulatory aspects for near-surface disposal management.

Keywords: Near-surface disposal, Low-level radioactive waste (LLW), concrete disposal vault, Safety case, Communication.

目錄

中文摘要	i
Abstract	iii
目錄	v
圖目錄	vii
表目錄	ix
第一章 前言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究重點及章節安排	2
第二章 國際間淺地表處置之現況蒐整及法規研析	5
2.1 各國淺地表處置之現況	7
2.1.1 各國年報有關淺地表處置近況	7
2.1.2 IAEA-TECDOC-2041 報告	23
2.2 淺地表處置相關法規、導則及技術報告	25
2.2.1 主要參考法規及導則	25
2.2.2 技術報告	39
第三章 國際間淺地表處置之關鍵議題研析	49
3.1 淺地表處置設施決策中使用安全論證	49
3.1.1 決策過程一般需考慮之因素	51
3.1.2 決策過程的詳細說明	54
3.2 與淺地表處置設施相關的管制經驗與過程	57
3.2.1 管制職責與流程	57
3.2.2 處置設施每個階段之安全論證的管制審查	59
3.2.3 安全論證變更的管制審查	61
3.3 淺地表處置設施封閉後安全評估的經驗	63
3.3.1 常見且相對需要解決之主題	64
3.3.2 工作小組重點討論之議題	66
3.4 淺地表處置設施安全論證的溝通	70
3.4.1 一般對於淺地表處置設施安全論證溝通的理解	71
3.4.2 與溝通有關的具體議題	73
3.5 論壇各小組之結論及建議	79

第四章 國際間淺地表處置設施及關鍵議題比較.....	83
4.1 淺地表處置溝通實例探究.....	83
4.1.1 古巴：放射性廢棄物處理.....	85
4.1.2 英國：LLWR「2011 年環境安全論證」的執行.....	88
4.1.3 巴基斯坦：利害關係人協商.....	92
4.1.4 加拿大：監管機關對於原住民族的溝通.....	95
4.1.5 法國：對於低放處置透明度採取的措施.....	96
4.2 淺地表處置設施類型.....	99
4.3 各國溝通案例回饋與處置設施比較.....	108
第五章 低放射性廢棄物淺地表處置場址特性專家技術討論會.....	115
5.1 會議說明.....	115
5.2 專家技術討論會成果彙整.....	117
第六章 低放射性廢棄物淺地表處置安全管制要項建議.....	121
第七章 結論與建議.....	125
7.1 結論.....	125
7.2 建議.....	128
參考文獻.....	129
附錄一.....	133
附錄二.....	136

圖目錄

圖 1.1	本計畫之研究架構.....	4
圖 2.1	各類別放射性廢棄物處置概念示意圖(IAEA, 2020)	5
圖 2.2	NDA 對於放射性材料及其廢棄物之處置策略(改自 NDA, 2023).....	10
圖 2.3	(a)低放射性廢棄物處置場(LLWR)；及(b)Dounreay 處置場(NDA, 2023).....	12
圖 2.4	西班牙放射性廢棄物相關設施分布圖(修訂自 ENRESA, 2023)	15
圖 2.5	西班牙 El Cabril 處置場鳥瞰圖(ENRESA, 2023).....	18
圖 2.6	西班牙 LILW 處置窖(ENRESA, 2023).....	18
圖 2.7	西班牙 VLLW 處置設施(ENRESA, 2023)	18
圖 2.8	2021 年底 ANDRA 處置場管理的廢棄物占比 (ANDRA, 2023a).....	22
圖 2.9	IAEA 為淺地表處置安全設立論壇之工作分組 (改自 IAEA, 2024).....	24
圖 2.10	用於推估營運及封閉後期間的活性限度的方法(IAEA, 2003).....	41
圖 2.11	不同時期安全論證相對重要性的變化案例 (改自 IAEA, 2017a).....	44
圖 3.1	放射性廢棄物處置設施安全論證的主要組成(IAEA, 2024)	50
圖 3.2	決策尺度與決策標準之間的關係 (a)直接相關；及(b)綜合的決策標準(IAEA, 2024)	51
圖 3.3	處置設施各個階段管制機關角色與溝通的範例(IAEA, 2024)	60
圖 3.4	「ISAM」計畫中封閉後安全評估的方法(改自 IAEA, 2024)	64
圖 3.5	「易於閱讀」的摘要文件說明中低放射性廢棄物淺地表處置的範例(IAEA, 2024) ...	77
圖 4.1	2011 ESC 報告結構(IAEA, 2024)	90
圖 4.2	LLWR 處置場結構的示例資訊圖(IAEA, 2024)	90
圖 4.3	法國 Morvilliers 附近的 Cires 處置設施示意圖(Garamszeghy, 2021).....	100
圖 4.4	德克薩斯州壕溝設計的 WCS 低放處置設施(Garamszeghy, 2021).....	101
圖 4.5	Oskarshamn 核電站的 VLLW 處置設施(Garamszeghy, 2021).....	102
圖 4.6	法國 CSM 處置設施的廢棄物處置(Garamszeghy, 2021).....	103
圖 4.7	Fernald 處置設施土丘的橫截面(Garamszeghy, 2021).....	103

圖 4.8	法國短 CSA 處置場鳥瞰圖(Garamszeghy, 2021)	104
圖 4.9	斯洛伐克短半衰期 L&ILW 的 Mochovce 處置場(Garamszeghy, 2021).....	106
圖 4.10	日本六所村低放處置場示意圖(Garamszeghy, 2021)	107
圖 5.1	兩次專家技術討論會議照片記錄.....	116

表目錄

表 2.1	各低放處置方法及其相關特性一覽表(改自 Ojovan & Steinmetz, 2022).....	6
表 2.2	不同國家的 LILW 最終處置設施(改自 ENRESA, 2023)	8
表 2.3	不同國家的 LILW 最終處置設施(續)(改自 ENRESA, 2023).....	9
表 2.4	西班牙放射性廢棄物目前存量及預估未來產量(ENRESA, 2023)	15
表 2.5	西班牙核能電廠及其他設施產生的 VLLW(ENRESA, 2023)	16
表 2.6	西班牙核能電廠及其他設施產生的 LILW (ENRESA, 2023).....	16
表 2.7	法國放射性廢棄物之分類及處置方式(ANDRA, 2023a).....	20
表 2.8	ANDRA 已處置或應管理的廢棄物的存量(m ³) (ANDRA, 2023a).....	21
表 2.9	截至 2021 年法國所有廢棄物存量動向(m ³) (ANDRA, 2023a).....	22
表 2.10	處置系統安全要素分類架構(IAEA, 2003)	40
表 2.11	MASC 矩陣(IAEA, 2017a)	45
表 2.12	MASC 矩陣(續(1))(IAEA, 2017a).....	46
表 2.13	MASC 矩陣(續(2))(IAEA, 2017a).....	47
表 3.1	第一工作小組對每個領域的決策描述(IAEA, 2024)	56
表 4.1	IAEA-TECDOC-2041 技術報告中列舉之淺地表處至溝通實際案例	84
表 4.2	古巴主要參與廢棄物處置之機關(單位)及其扮演之角色(IAEA, 2024).....	87
表 4.3	溝通問題及緩解措施(IAEA, 2024)	88
表 4.4	巴基斯坦參與計畫之各單，及其扮演的角色及溝通方式(IAEA, 2024)	93
表 4.5	淺地表處置設施概念整理(修改自 Veinović et al., 2023).....	111
表 4.6	淺地表處置設施概念整理(續 1)(修改自 Veinović et al., 2023)	112
表 4.7	淺地表處置設施概念整理(續 2)(修改自 Veinović et al., 2023)	113
表 5.1	專家技術討論會議程.....	115
表 5.2	專家技術討論會與會專家名單.....	116

第一章 前言

1.1 研究背景

目前我國各核能電廠已逐漸進入除役階段，除了供應發電之燃料棒(fuel rod)屬高放射性廢棄物(high-level waste, HLW)外，核能電廠污染的設備，或是使用核能之相關單位產生的低放射性廢棄物亦是需要面對的課題。因此，低放射性廢棄物最終處置之安全管理，為管制單位長期重大關注之議題。國際間低放射性廢棄物處置技術發展，從選址作業、現地調查、場址選定、設計、建造至完工，直至營運及後續封閉及監管，期程可能長達數十年之久。我國低放射性廢棄物最終處置迄今仍於選址階段，故掌握國際間對於低放射性廢棄物最終處置之技術及場址近況，有助於瞭解國際處置技術發展趨勢，提升我國安全管理量能。

淺地表處置設施用於最終處置在國際間已發展多年，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)於 2014 年針對淺地表處置提出具體的安全指引「Specific Safety Guide (SSG-29)」(IAEA, 2014)，作為各國管制機構制定法規的參考依據。目前主要核能國家如美國、法國、日本及西班牙等國，針對低放射性廢棄物已採用淺地表之壕溝或混凝土處置窖等型式來進行最終處置，累積相當豐富之場址特性安全評估及處置場營運管理經驗。

我國目前低放處置候選場址均採次地表坑道式規劃類似於瑞典 SFR 處置場及芬蘭的 Olkiluoto 處置場等。為因應國際趨勢及國內情勢之變化，探討淺地表處置及次地表坑道式處置在安全管理需求上之差異，以及發展淺地表處置相關審驗技術確有其必要性。因此，本計畫為協助核能安全委員會持續汲取國際低放射性廢棄物最終處置技術及法規發展，並配合我國既有之地質及環境條件，提出「113 年低放射性廢棄物淺地表處置安全管理之關鍵議題研析」之研究，本研究將針對淺地表處置之議題進行國際資訊之研析，盤點及蒐整國際間淺地表處置之國家之最新處置近況，並初步整理淺地表處置設施類型，作為後續延伸研究之依憑。除此之外，IAEA 為了解決大量低放射性廢棄物可能為後續處置相關發展的問題，籌辦各種放射性廢棄物處置安全的國際會議，以及一系列針對淺地表處置計畫，並於 2024 年針對這些成果彙整並公開(IAEA, 2024)，該文獻主要彙整放射性廢棄物淺地表處置安全論證與安全評估的發展、審查及經驗交流相關資訊。因此，本研究其中一個重點，將針對此報告進行重點研析。

1.2 研究重點及章節安排

本計畫研究架構如圖 1.1 所示，首先，針對國際間淺地表處置之議題進行國際資訊研析，透過蒐整國際間淺地表處置之現況、重要關鍵議題及處置設施等相關資訊進行研析；除此之外，本研究另一項重點為研析 IAEA(2024)出版之報告「Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-2041)」，針對報告中有關淺地表處置相關之重要關鍵、相關法規及導則等資訊進行彙整。計畫執行期間，透過專家技術討論會，讓相關領域之專家學者進行技術交流及指導，協助管制單位掌握國際間不同處置技術之發展，作為我國低放處置管制要項之參考。以下為各章節說明：

第一章 前言

本章首先針對本研究之研究背景進行闡述，說明我國目前低放射性廢棄物處置發展近況，並依據我國低放射性廢棄物處置發展，說明本研究關注之低放射性廢棄物淺地表處置議題動機，以及本研究之目的。接著，說明本研究之研究重點，並依據研究重點進行各章節安排說明。

第二章 國際間淺地表處置之現況蒐整及法規研析

國際間針對放射性廢棄物處置，依照其特性分為三種深度進行處置，包含淺地表、中深度(intermediate depth)及深層地質處置(deep geological repository)，各國間針對低放處置也採取了不同的處置方法。因此，本章針對國際間規劃中、或營運及建造中、或已封閉之淺地表處置設施相關資訊進行蒐集與整理，並蒐整各國有關放射性廢棄物處置之年度報告，確實掌握最新的國際資訊。另一方面，本章針對 IAEA 所提出之報告 (IAEA, 2024)之背景進行說明，並彙整該報告中，有關淺地表處置之相關導則及參考文獻。

第三章 國際間淺地表處置之關鍵議題研析

IAEA 於 2017 年設立淺地表處置之安全論壇，並設立四個工作小組，四個工作小組討論之議題包含(1) 淺地表處置設施決策中使用安全論證、(2) 淺地表處置設施相關

的監理經驗與流程、(3) 淺地表處置設施封閉後安全評估的經驗及(4) 淺地表處置設施安全論證的溝通，期望能提供一個協助會員國確保淺地表處置安全的一個長期性論壇。論壇中討論之重點主題及其成果彙集成「Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-2041)」(IAEA, 2024)技術報告，該報告透過(1) 斟酌制定導則、方法及工具；(2) 促進良好的資訊交流(例如：安全論證、安全評估及技術等)；及(3) 對設施或安全論證提供非正式審查等服務，協助會員國提升淺地表處置之安全，提供有關淺地表處置設施安全管制策略與決策的實用資訊，以及開發與使用安全評估及安全論證過程中獲得的經驗資訊。本章依據上述報告中四個工作小組之討論議題進行研析。

第四章 國際間淺地表處置設施及關鍵議題比較

延續前一章節，第三章針對「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，對於淺地表處置之安全論壇四個工作小組討論之重點進行綜整，內容包含淺地表處置設施決策中使用之安全論證、處置設施管制經驗及過程、封閉後之安全評估經驗及安全論證之溝通。其中，「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)針對安全論證之溝通列舉了四個國家之案例，本章首先就這些案例進行研析，並整理相關經驗及成果。本章另一部分，延續各國淺地表處置之議題，整理國際間有關淺地表處置之設施類別。最後，各種淺地表處置設施設計的比較，並針對「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，有提出幾個溝通的案例，討論從管制機關的角度如何協助相關溝通。

第五章 低放射性廢棄物淺地表處置場址特性專家技術討論會

本計畫舉辦了 2 場專家技術討論會議，針對本研究所研析之內容進行實質討論。討論內容包含國際間淺地表處置之現況、相關法規、處置環境及處置設施相關之議題，以及「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，淺地表處置設施決策時使用的安全論證、處置場相關管制經驗及過程、封閉後之安全評估及安全論證的溝通等四項重要議題，另外，本報告也蒐集了各國之年度報告，以及淺地表處置設施設計方法等相關文獻。透過討論會之交流強化本研究之成果，並蒐集專家對淺地表處置我國未來

可發展之審驗技術進行討論，提供安全管制之建議。

第六章 低放射性廢棄物淺地表處置安全管制要項建議

本研究主要研析內容包含各國目前淺地表處置之現況，淺地表處置設施分類，以及「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，有關各國對於淺地表處置設施決策中使用的安全論證、處置場管制經驗、封閉後安全評估及安全論證的溝通等經驗等。而我國尚未有低放處置場，且處置方式目前以坑道式處置場進行規劃，因此本章主要因應未來可能的政策改變，提前進行淺地表處置相關資訊的彙整，提出有關淺地表處置之安全管制要項之建議，提供未來管制單位作為參考依據。

第七章 結論與建議

本研究針對國際間淺地表處置之資訊、各國之年度報告及淺地表處置設施種類進行蒐整，並針對「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)之背景、相關參考導則及文獻進行彙整，並對該報告中淺地表處置設施決策中使用安全論證、淺地表處置設施相關的管制經驗與流程、處置場封閉後之安全評估及安全論證之溝通等四個議題進行研析，並就上述之研析成果舉辦兩場專家技術討論會，提出淺地表處置安全管制要項建議。本章針對上述成果提出結論及建議。

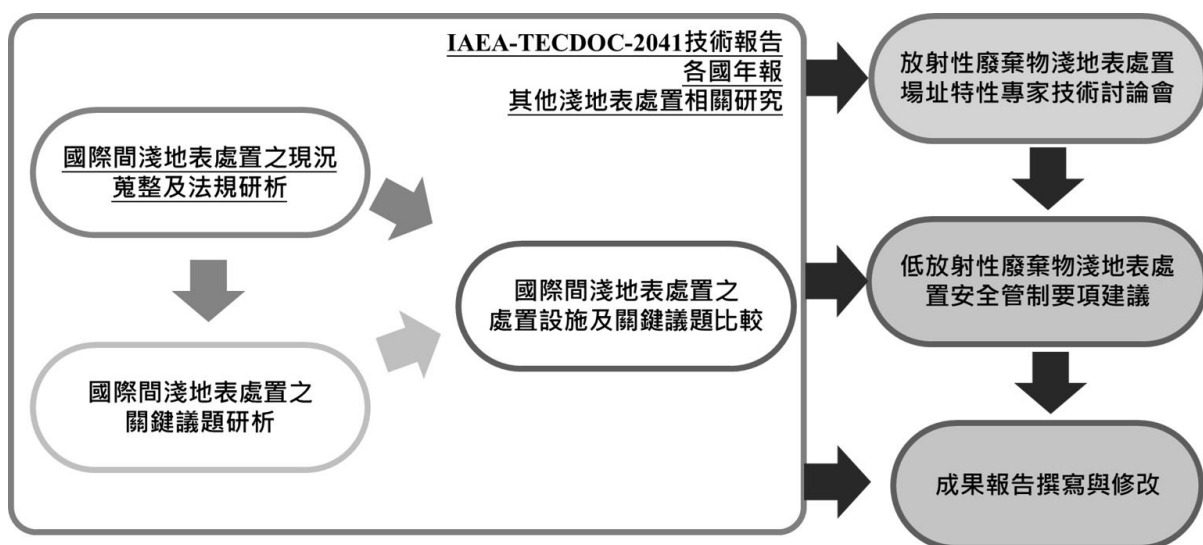


圖 1.1 本計畫之研究架構

第二章 國際間淺地表處置之現況蒐整及法規研析

國際間針對放射性廢棄物處置依照其特性分為三種深度進行處置，包含淺地表處置、中深度及深層之地質處置，如圖 2.1 所示，不同類別的廢棄物皆有適合的處置方式，例如，極低放射性廢棄物(VLLW)之處置型式採用地表壕溝(trenches)式，低放射性廢棄物(LLW)之處置型式可採用地表及(半)掩埋處置窖(surface and (semi) vaults)式、淺地表筒倉(near-surface silos)式、淺層水平坑道/隧道(shallow drift / tunnels)，中放射性廢棄物(ILW)之處置型式可採用水平坑道/隧道/筒倉/中等深度鑽孔(drift / tunnels / silos / boreholes)，高放射性廢棄物(HLW)之處置型式可採用深層地質處置場及深鑽孔(geological repositories / boreholes)等。

其中，低放射性廢棄物處置又可分為 4 類處置方法(IAEA, 2020; Ojovan & Steinmetz, 2022; Ojovan, 2023)，包含掩埋(Landfill)、簡單的淺地表設施(例如壕溝(trenches))、地表及(半)掩埋處置窖及淺地表鑽孔或豎井設施等，如表 2.1 所示。各國針對低放處置採取不同的處置方法，例如法國 Cires 處置場採取壕溝方式處置極低放射性廢棄物(Very low-level waste, VLLW)；西班牙 El Cabril 處置場同時採壕溝及淺地表處置窖，分別處置不同類型之低放射性廢棄物；英國 LLW 處置場、捷克的 Dukovany 與 Richard 處置設施，採淺地表處置窖進行處置 LLW。由上述可知，不同國家依不同分類之低放射性廢棄物所採取的處置方式不同。世界各國對於放射性廢棄物處置之方式、種類及環境等不同，因此，國際原子能總署(IAEA)於 2014 年針對淺地表處置提出具體的安全指引(IAEA, 2014)，作為各國管制機構制定法規的參考依據。

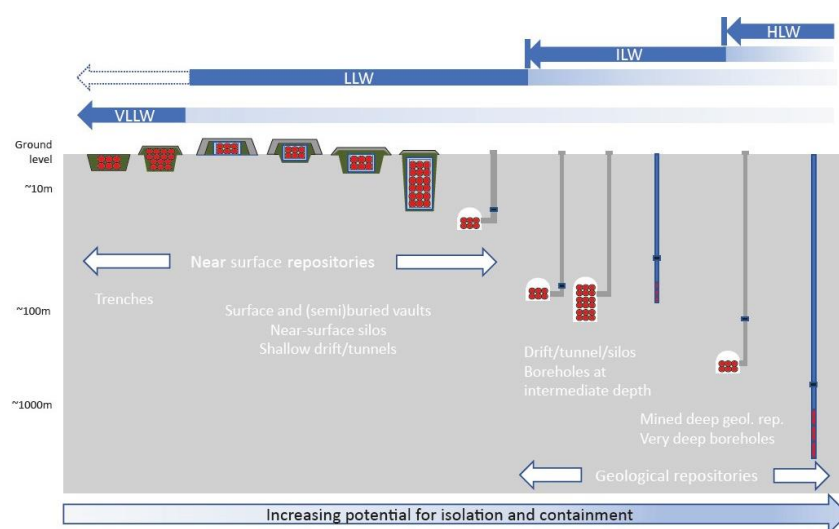


表 2.1 各低放處置方法及其相關特性一覽表(改自 Ojovan & Steinmetz, 2022)

處置方法		處置方法特徵	處置方法之限制	待處理廢棄物
生活及工業廢棄物的垃圾掩埋場		- 簡單、易於構及操作 - 對廢棄廢棄物沒有制度化管 - 可利利用現有設施	圍阻與隔離效果不佳	- 未受管制之廢棄物 - VLLW
淺地表設施	簡單的淺地表設施(壕溝)(trenches)	- 開挖壕溝，將廢棄物處置於壕溝後覆蓋土層 - 簡單又便宜 - 用於短半衰期之 LLW - 應設立活度濃度限值	- 可能會受雨水的侵蝕、侵入及滲透影響 - 需要進行管制(例如 100-300 年) - 放射性核種快速遷移至生物圈的風險	含有半衰期(half-life)極短的放射性核種的廢棄物
	淺地表設施(工程結構)	- 多重障壁提升處置安全 - 經設計的處置場 - 長期的營運經驗，易於廢棄物處置並提高管理及封閉處置場的效率	- 需要有制度化管(例如 100-300 年) - 雨水的侵蝕、侵入及滲透可能會影響處置場特性	- 短半衰期核種(short-lived nuclide)，具有較高活度濃度之 LLW - 長半衰期核種(long-lived nuclide)，具有相對較低活度濃度
	淺地表鑽孔或豎井設施	淺地表處置窖的替代或補充計畫。較經濟的選擇，也最大限度地減少了人類入侵的可能性	- 廢棄物包件(waste package)的尺寸及數量有限制 - 需要長達例如 300 年制度化管	廢棄的密封放射源

另一方面，IAEA 針對淺地表放射性廢棄物處置安全，執行專門針對淺地表處置的多年期計畫，為廢棄物處置設施之安全評估、設施安全論證發展，以及實際應用等議題設立淺地表處置之安全論壇，期望能提供一個協助會員國確保淺地表處置安全的長期性論壇。本研究其中一項主要研析技術報告：「Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-2041)」(IAEA, 2024)，即為此論壇之成果，該報告提供有關淺地表處置設施安全管制策略與決策的實用資訊，以及安全評估與安全論證過程中獲得的經驗資訊。

本章 2.1 節首先針對國際間規劃中、營運及建造中、或已封閉之淺地表處置設施相關資訊進行蒐集與整理，主要針對各國公開之年度報告進行蒐整，另一部分針對「IAEA-TECDOC-2041」報告(IAEA, 2024)進行背景說明。2.2 節進一步針對「IAEA-TECDOC-2041」報告(IAEA, 2024)中涉及之導則及技術報告進行重點整理。

2.1 各國淺地表處置之現況

本節針對各國淺地表處置之現況，將重點分為兩個部分，其一為蒐整各國放射性廢棄物處置單位公開之年度報告，或是私人機構所發表之研究報告，針對該國家之淺地表處置現況進行蒐整並研析。另一部分為「Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-2041)」報告(IAEA, 2024)之研析，該報告主要是針對放射性廢棄物淺地表處置議題，有關安全論證與安全評估的發展、審查及意見交流等經驗進行成果彙整。因此，本節針對「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)之背景、目的及主要工作等進行介紹。

2.1.1 各國年報有關淺地表處置近況

國際間，對於中、低放射性廢棄物的最終處置，幾十年來有許多營運良好的處置系統案例，許多國家已經擁有或計劃建造處置場。雖然在地表或淺地表設施中處置低放及中放射性廢棄物(Low and intermediate level waste, LILW)是典型的處置策略，例如西班牙的 El Cabril 處置場，利用工程障壁(engineered barrier)處置 LILW，以壕溝方式處置 VLLW。但部分國家(例如：瑞典、芬蘭、韓國、匈牙利、德國、瑞士及加拿大)也選擇或正在考慮在地表下 50 至 100 公尺深的設施中處置，各國最終處置場整理如表 2.2 及表 2.3 所示，表中整理國際間低及中放射性廢棄物最終處置之國家、處置類型、設施名稱、處置廢棄物種類及目前處置場之狀態等資訊，第四章將更深入說明及整理有關淺地表處置設施相關資訊。

目前國際上認為 El Cabril 處置設施是解決 LILW 及 VLLW 最終處置的基準(ENRESA, 2023)，而這種 LILW 解決計畫的國際形勢不會發生重大變化，但仍有些國家(例如：德國、比利時及瑞士)對此計畫仍存在一些問題待解決，例如民眾接受度問題，使處置計畫延宕。儘管如此，現有的處置場將不斷發展，並要符合中、低放射性廢棄物處置的營運需求、最佳化技術及經濟能力。因此，為了更了解各國間低放處置之發展近況，本節蒐集各國管制單位或專責機構年報，並彙整國際間有關低放處置相關之最新資訊。

表 2.2 不同國家的 LILW 最終處置設施(改自 ENRESA, 2023)

國家	處置類型	設施名稱	廢棄物種類	目前進度
德國	深層地質處置(舊礦場坑道)	Konrad	LLW及ILW	建造中
比利時	淺地表設施 (庫房、混凝土處置窖)	Dessel	短半衰期LLW及 ILW	已許可 預備建造中
保加利亞	淺地表設施 (庫房、混凝土處置窖)	Radiana	LLW及ILW	建造中
加拿大	深層地質處置(坑道)	Kincardine	LLW及ILW	撤銷申請
	淺地表設施 (混凝土處置窖)	The Near Surface Disposal Facility(NSDF)	LLW	已許可 預備建造中
韓國	中深度地質處置(筒倉)	Wolseong	ILW	營運中
	淺地表設施(混凝土處置窖)		LLW	建造中
	簡單的淺地表設施(壕溝)		VLLW	規劃中
斯洛伐克	淺地表設施 (處置庫、混凝土處置窖)	Mohovce	VLLW及及LLW	營運中
美國	簡單的淺地表設施(壕溝)	Richland (WA)	A、B及C類廢棄物	營運中
	淺地表設施 (壕溝、混凝土處置窖)	Barnwell (SC)	A、B及C類廢棄物	營運中
	淺地表掩埋	Andrews (TX)	A、B及C類廢棄物	營運中
	淺地表掩埋	Clive (UT)	A類廢棄物	營運中
芬蘭	中深度地質處置(筒倉)	Olkiluoto	LLW及ILW	營運中
	深地層坑道處置(坑道)	Loviisa	LLW及ILW	營運中
法國	淺地表設施(土丘)	(Centre de la Manche , CSM)	短半衰期LILW	封閉
	淺地表設施(混凝土處置窖)	(Centre de l' Aube , CSA)	短半衰期LILW	營運中
	簡單的淺地表設施(壕溝)	Cires	VLLW	營運中
匈牙利	淺地表設施 (混凝處置窖、淺層鑽孔)	Püspökszilágy	LLW及ILW	營運中
	深層地質處置(坑道)	Bátaapáti	LLW及ILW	營運中
日本	淺地表設施(混凝處置窖)	Rokkasho Mura	LLW及ILW	營運中

* 美國將低放射性廢棄物分類為 A、B 及 C 三類，其中 A 類廢棄物近似 IAEA 規定之 VLLW，B 及 C 類廢棄物近似 IAEA 規定之 LLW。

表 2.3 不同國家的 LILW 最終處置設施(續)(改自 ENRESA, 2023)

國家	處置類型	設施名稱	廢棄物種類	目前進度
立陶宛	淺地表設施(混凝土處置窖)	Visaginas	LLW及ILW	營運中
	淺地表設施(混凝土處置窖)	Maišigala	LLW及ILW	營運中
捷克 共及國	淺地表設施(混凝土處置窖)	Dukovany	LLW	營運中
	中深度地質處置 (舊礦場坑道)	Richard	LLW	營運中
	中深度地質處置(坑道)	Bratrstvi	LLW	封閉
英國	簡單的淺地表設施(壕溝)	Drigg	LLW	營運中
	淺地表設施(混凝土處置窖)			
	淺地表設施(混凝土處置窖)	Dounreay	LLW	營運中
瑞典	中深度地質處置 (處置窖及筒倉)	Forsmark	LLW及ILW	營運中
西班牙	淺地表設施(混凝土處置窖)	El Cabril	VLLW、LLW及 ILW	營運中
	簡單的淺地表設施(壕溝)			

1. 英國(NDA)

英國核能除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)為英國政府依據能源法所成立的非政府部門公共機構，負責核能後端營運工作。NDA 出版之最新年報為「Mission Progress Report」(NDA, 2023)。隨著資料的更新，處置場的不確定性、處置場的發展及處置策略的制定可能會隨著時間而變化。因此，該報告主要說明及更新英國有關放射性廢棄物的最新近況，報告中使用之資料截止至 2023 年 3 月 31 日。英國針對放射性相關議題之處置策略如圖 2.2 所示，用過核燃料、核子材料等產生之廢棄物將進行綜合管制，這些存放設施或場址將進行除役或修復，處理過之土地即可釋出再利用。其中，與本研究較相關的部分為廢棄物綜合管理，此部份考慮如何管制營運及除役而產生的各種形式的廢棄物，包括來自發電、研究、早期國防計畫及除役的大量放射性廢棄物。這些放射性廢棄物中部分是未經處理過的廢棄物，部分為已經過處理並正在暫時貯存狀態，例如英國所有中放射性廢棄物(Intermediate-level waste, ILW)都將暫時貯存於安全的空間，直至合適的處置設施可用為止。而部分低放射性廢棄物已進行最終處置。

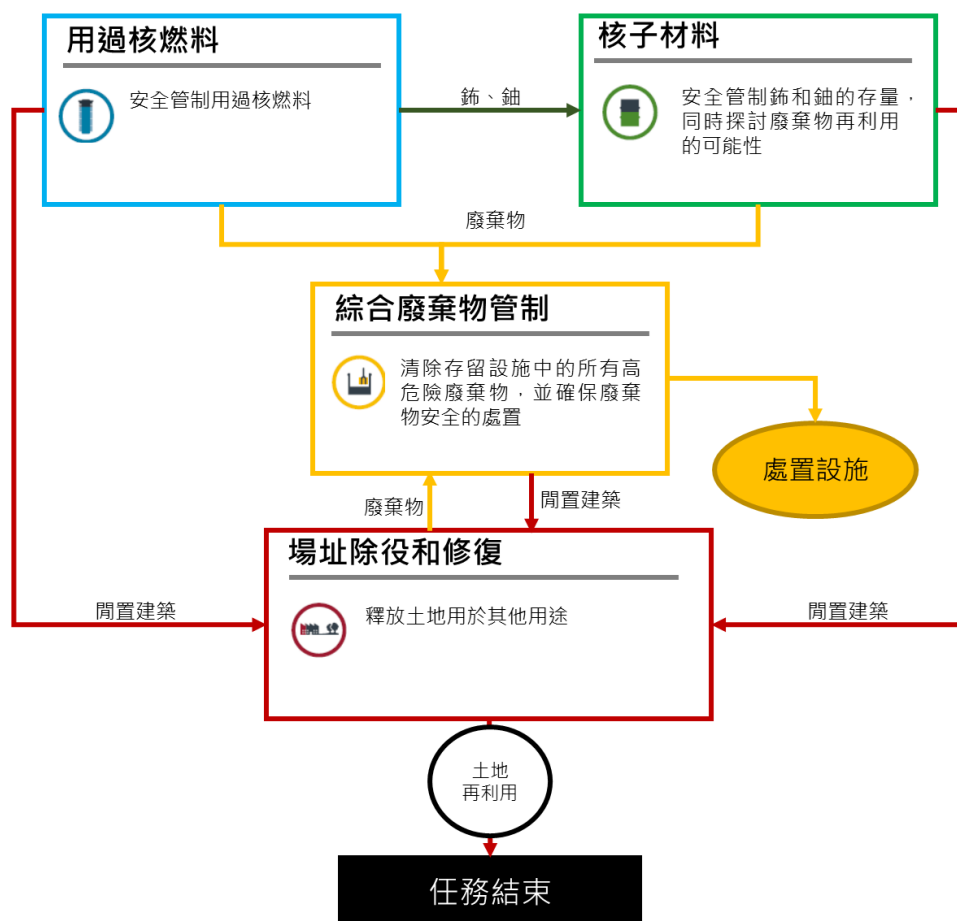


圖 2.2 NDA 對於放射性材料及其廢棄物之處置策略(改自 NDA, 2023)

英國對放射性廢棄物進行管制，並在可能的情況下進行處置，或將廢棄物置於安全且適當的貯存空間中，確保按照英國政府及符合其頒布的低放處置政策。2023 年度之工作，NDA 將持續進行將低放射性廢棄物再處理，以延長處置設施的使用年限。以下針對英國低放射性廢棄物產生數量、再處理及處置現況進行說明：

(1) 低放射性廢棄物產生數量

截至 2023 年，英國已產生 323,000 m³ 之未經處理之 LLW，預計於 2127 年預計產生 3,817,000 m³ 之未經處理之 LLW，目前未經處理之 LLW 占總預估量(4,140,000 m³)之 8%。其中，LLW 及 VLLW 是 NDA 因設施的維護、營運及除役產生之廢棄物，亦是 NDA 產生的最大量的放射性廢棄物，但僅佔總放射性的 0.0001%。

(2) 低放射性廢棄物再處理

該報告指出，目前已處理約 69,000 m³ 之未經處理之 LLW，預計至 2127 年仍需要再處理 654,000 m³ 之未經處理之 LLW，已處理之 LLW 占需要再處理之預估量 (723,000 m³) 之 9%。這些可再處理之廢棄物主要為金屬處理(metal treatment)及焚燒，其目的期望於 2127 年達到所有 LLW 均經過處理或再利用。

(3) 低放射性廢棄物處置

NDA 目前已處置 49,000 m³ 之 LLW 包件，預計至 2127 年仍有 264,000 m³ 之 LLW 包件需要處理，目前已處置之 LLW 包件占總預估量(313,000 m³)之 16%。固體低放射性廢棄物在低放射性廢棄物處置場(Low Level Waste Repository, LLWR)及 Dounreay 處置場兩個設施中進行處置(圖 2.3)。其中，前者為英國目前主要的低放射性廢棄物處置設施。

(4) 掩埋

掩埋僅用於 VLLW，VLLW 成分主要來自核設施拆除的建築結構材料(例如：混凝土、磚塊、金屬及其他材料)，以及少量建築與拆除活動中挖出的土壤，目前已處置 144,000 m³ 之 VLLW，預計至 2127 年仍需要再處理 3,000,000 m³ 之 VLLW，已處置之 VLLW 包件占總預估量(3,144,000 m³)之 5%。已處置 VLLW 約有 81%在 NDA 許可的垃圾掩埋場處置，一些則於 Sellafield 工廠(該工廠為一大型多功能核設施，主要任務為放射性廢棄物處理、貯存及除役等)的 Calder 垃圾掩埋場擴建隔離區 (CLESA)設施進行掩埋。

(a)



(b)



圖 2.3 (a)低放射性廢棄物處置場(LLWR)；及(b)Dounreay 處置場(NDA, 2023)

2. 捷克 (SÚRAO)

捷克放射性廢棄物處置場管理局 (Radioactive Wastes Repository Authority, SÚRAO) 為捷克工業與貿易部所成立的放射性廢棄物管理專責機構，該機構的任務是按照核能安全及保護人類與環境的要求，安全的處置目前及今後產生的放射性廢棄物，並依捷克頒布之《原子能法》及其他法律標準規定進行相關業務。例如，SÚRAO 依據政府批准的法規，針對年度、三年及長期活動計畫進行相關處置業務，「Plán činnosti Správy úložišť radioaktivních odpadů na rok 2024, tříletý plán a dlouhodobý plán」(SÚRAO, 2023) 即為 SÚRAO 依據《原子能法》公告之最新出版之年度報告。以下針對捷克低放處置現況、年度、三年及長期之計畫進行說明。

(1) 低放射性廢棄物處置現況

該報告指出，捷克產生最大宗的廢棄物是 LILW。這些廢棄物於反應爐運轉與除役，以及游離輻射源與放射性物質的處理過程中，以液體或固體形式產生。這些廢棄物的放射性將在幾百年內顯著下降，因此，這些廢棄物可以在淺地表處置場 (ÚRAO) 中處理。

核能發電產生的低放射性廢棄物處置於 Dukovany 核能電廠地區的地面處置設施中，該核能電廠的地面處置設施於 1995 年投入營運，總處置容量為 55,000 立方公尺(約 180,000 桶)，足以接受 Dukovany 及 Temelín 核能電廠所有符合處置條件的廢棄物，即使在延長兩座電廠營運時間，並加入一個新核能電廠營運的情況下仍有

足夠的處置空間。工業、研究及醫療的低放射性廢棄物於 Richard 及 Bratrství 的地下處置設施中進行處置，部分廢棄物運往 Dukovany 處置設施。所有營運的處置設施中，包含已封閉的 Hostim 處置設施的監控，均由監管機關負責。

(2) 2024 年預計的低放射性廢棄物處置計畫

監管機關預計在 2024 年，將處置來自 Dukovany 及 Temelín 核能電廠約 350 m³ 的 LLW。負責管制的廠商每年將針對處置建物及設備的狀態進行檢查，並進行日常維護、土地管理、機械及電氣設備的維護、輻射防護、核安全、應對輻射緊急情況，以及處置設施的安全等工作。直至 2023 年，Dukovany 處置設施已使用四分之一之空間。該處置設施位於 Dukovany 核電廠廠區內，由 ČEZ 公司建造及經營，捷克放射性廢棄物管理專責機構 SÚRAO 負責廢棄物接收(符合條件)、維修及保養。管理該處置設施的工作是 ČEZ 公司負責。2022 年，SÚRAO 將對處置場進行更大範圍的維修或重建，及其他處置相關研究，確保未來處置場安全營運(SÚRAO, 2022)。然而，ČEZ 公司不希望再承擔執行其他營運業務的責任而傾向不續約，因此 SÚRAO 將另尋接手的單位，預計於 2024 年將有新的廠商進駐處置場的營運。考量處置場的位置，部分活動仍由 ČEZ 公司繼續服務。期間，將由監管機關直接負責將廢棄物接收到處置設施，以及其他特殊監控性質的作業。

(3) 未來 3 年之低放射性廢棄物處置計畫

處置設施的營運將由新的廠商接手，監管機關主要工作包括協調及監督所有處置活動，特別是接收符合接受條件之放射性廢棄物及處置設施的維修與保養，以維持處置設施長期穩定並安全的營運。未來幾年，監管機關預計將進行更大規模的維修或重建工作，並且維持研究量能，確保處置設施的隨技術進步而更新並安全營運。

(4) 長期之低放射性廢棄物處置計畫

核能電廠的營運廢棄物將存放在 Dukovany 處置設施。該設施足以存放現有的 Dukovany 及 Temelín 核能電廠及新增核能電廠的所有低放射性廢棄物。混凝土結構及營運技術的維護將會持續進行。然而，依據最新的研究結果，並考慮捷克新核能

電廠的建造計畫，Dukovany 處置場可能將採取進一步的應變措施，以確保有足夠的廢棄物處置空間，其中，增建處置設施也是 Dukovany 處置場的潛在選項之一。

3. 西班牙 (ENRESA)

ENRESA 為西班牙政府依法成立的國營公司，該機構負責西班牙境內放射性廢棄物之蒐集、處理、貯存與處置作業，並負責核能電廠與放射性相關設施之除役作業，以及人員與環境輻射安全。「GENERAL RADIOACTIVE WASTE PLAN(縮寫為 GRWP)」報告(ENRESA, 2023)為依據 NEA(全名為 Nuclear Energy Agency，為經濟合作暨發展組織(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 其下設置的核能署)《核能法》第 38 條之 2 的規定，概述短期、中期及長期將要制定的策略、必要行動及技術解決計畫，以妥善管理放射性廢棄物、核能電廠及核設施的除役與封閉，以及與這些相關的其他活動。以下將針對西班牙之低放射性廢棄物來源及其處置狀況進行說明。

(1) 低放射性廢棄物來源

西班牙的放射性廢棄物主要產生單位是核能電廠，包含營運與除役產生之廢棄物。然而，也有一些使用核能之單位產生放射性廢棄物，例如 Juzbado 核燃料組裝廠、研究中心、大學、醫院、工業等，其分布如圖 2.4 所所示。

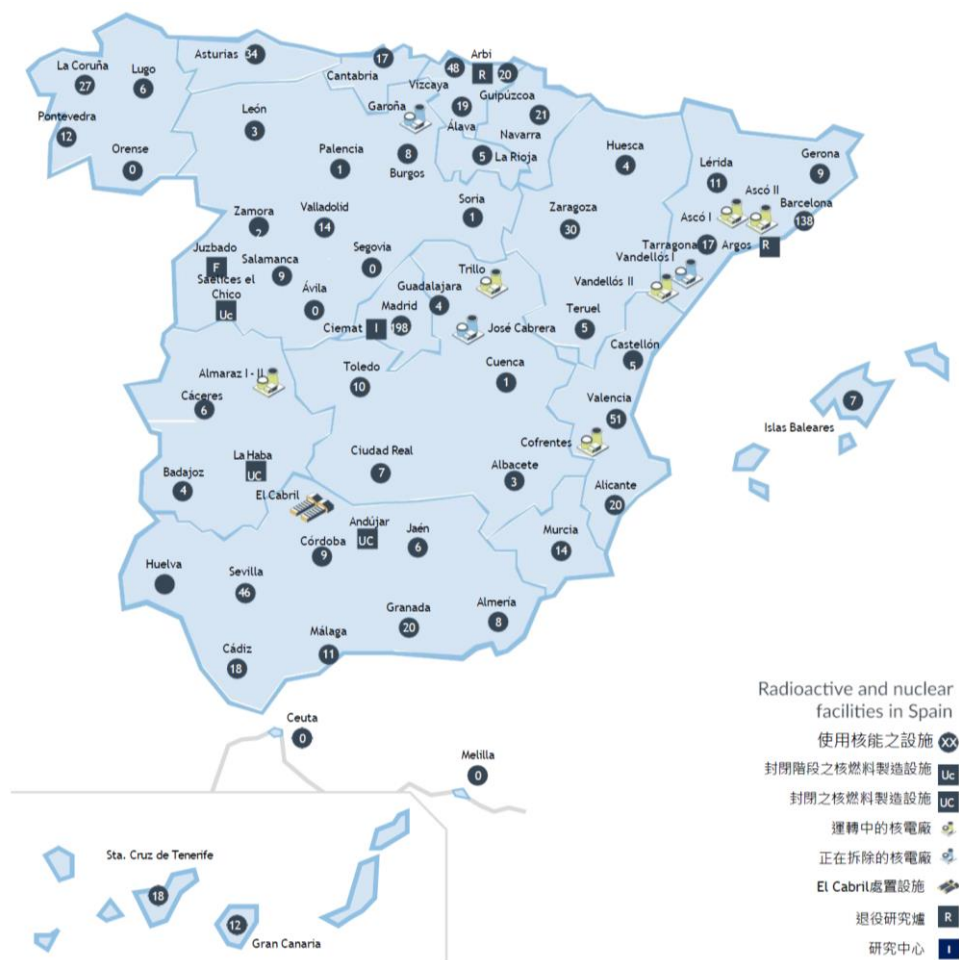


圖 2.4 西班牙放射性廢棄物相關設施分布圖(修訂自 ENRESA, 2023)

西班牙截至 2022 年 12 月 31 日產生的放射性廢棄物及未來預計產生的預測，如表 2.4 所示。其中，VLLW 及 LILW 來源及相關資訊如表 2.5 及表 2.6 所示。截至 2022 年 12 月 31 日，El Cabril 處置場的 LILW 處置窖的使用率為 82.11%，VLLW 第 29 號處置窖使用率為 25.09%，第 30 號處置窖使用率為 24.81%。

表 2.4 西班牙放射性廢棄物目前存量及預估未來產量(ENRESA, 2023)

廢棄物種類	大約體積(m ³)			%
	截至2022年12月31日前存量	未來產生預測	總量	
VLLW	31,300	93,700	125,000	53
LILW	41,100	53,100	94,200	40
SW	200	3,700	3,900	2
SF AND HLW	8,900	2,500	11,400	5
Total	81,500	153,000	234,500	100

表 2.5 西班牙核能電廠及其他設施產生的 VLLW(ENRESA, 2023)

		VLLW體積 (m ³)			
		產生	暫存於廢棄物產出機構	暫存於El Cabril處置場	最終處置於El Cabril處置場
Almaraz NPP	營運中	1,447	981	3	463
Ascó NPP	營運中	1,022	677	14	331
Cofrentes NPP	營運中	1,857	863	1	993
Garoña NPP	營運中	782	152	14	616
José Cabrera NPP	營運中	412	0	0	412
	除役	10,905	3,001	9	7,895
	Total	11,317	3,001	9	8,307
Trillo NPP	營運中	244	71	19	154
Vandellós I NPP	除役	1,163	757	0	406
Vandellós II NPP	營運中	494	299	27	168
Juzbado FAF	營運中	634	220	47	367
CIEMAT	營運中	730	37	7	686
	除役	7,567	0	2	7,565
	Total	8,297	37	9	8,251
El Cabril DC/ radioactive facilities/incidents	營運中	4,062	0	743	3,319
Total		31,319	7,058	886	23,375

表 2.6 西班牙核能電廠及其他設施產生的 LILW (ENRESA, 2023)

		LILW體積 (m ³)			
		產生	暫存於生產中心	暫存於El Cabril處置場	最終處置於El Cabril處置場
Almaraz NPP	營運中	5,278	1,032	33	4,213
Ascó NPP	營運中	4,732	521	21	4,190
Cofrentes NPP	營運中	8,002	1,485	49	6,468
Garoña NPP	營運中	5,236	64	2	5,170
José Cabrera NPP	營運中	4,767	0	2	4,765
	除役	2,026	0	8	2,018
	Total	6,793	0	10	6,783
Trillo NPP	營運中	1,660	66	13	1,581
Vandellós I NPP	營運中	1,968	1,572	0	396
	除役	1,796	4	0	1,792
	Total	3,764	1,576	0	2,188
Vandellós II NPP	營運中	1,594	207	13	1,374
Juzbado FAF	營運中	122	73	7	42
CIEMAT	營運中	329	15	4	310
	除役	175	0	0	175
	Total	504	15	4	485
El Cabril DC/ radioactive facilities/incidents	營運中	3,431	0	93	3,338
Total		41,116	5,039	245	35,832

(2) 低放射性廢棄物管理及其解決計畫

西班牙立法要求將低放射性廢棄物從產生機構或持有機構處移交給 ENRESA，必要時國家將進行介入。ENRESA 對放射性廢棄物產生機構進行管理，但受技術、行政或驗收規範約束。這些接受監管之放射性廢棄物產生機構，必須具備處理放射性廢棄物的能力，並按照 ENRESA 制定的技術規範執行。ENRESA 按照驗收規範進行驗收，以便後續運往 El Cabril 處置場進行處置。圖 2.5 為 El Cabril 處置場固體放射性廢棄物的最終處置場址，該處置場具有各種處置技術能力，包括處理及固化包裝放射性廢棄物的設備。對於 LILW 的最終處置，有大約 50,000 m³ 的處置量能。截至 2022 年 12 月 31 日，已興建 28 個處置窖，其中 22 個已完工(圖 2.6)。VLLW 處置設施如圖 2.7，總容量約為 130,000 m³。

El Cabril 處置場後續工作將側重於維持並最佳化處置能力，例如最佳化放射性廢棄物的數量與處置活動、LILW 與 VLLW 分類技術及最低成本解決計畫。經估算，目前所有存放 VLLW 之空間已足夠使用，其中 29 號及 30 號處置窖目前分別自 2008 年 10 月及 2016 年 7 月開始營運。必要時，計劃建造第 30 號處置窖的第 2 部分及另外兩個處置窖(第 31 號及第 32 號處置窖)。LILW 處置的部分，現有 28 個 LILW 處置窖容量不足以容納未來產生之廢棄物，至 2028 年需要新的處置窖，以避免影響核能電廠的營運與除役計畫。新處置窖的建造將分階段進行，第一階段建造 12 個處置窖，隨後視核能電廠的除役情況，視需求建造新的處置窖。

GRWP 的原則之一為盡量減少放射性廢棄物的產生及體積，以實現最佳的處置窖使用率。ENRESA 將持續並加強與放射性廢棄物生產機構之間的合作，包括參加聯合工作小組，例如共同開啟專案，應用減容(volume reduction)、分類及去污技術來最佳化其管理。因此，El Cabril 處置場針對上述議題將採取以下行動：

- A. 提供新的處置資源以增加 VLLW 及 LILW 的處置量能。
- B. 評估新的 LILW 處置窖設計，並考慮除役作業的結果。
- C. 持續與放射性廢棄物產生機構合作，以最佳化其產生廢棄物的原地管理。



圖 2.5 西班牙 El Cabril 處置場鳥瞰圖(ENRESA, 2023)



圖 2.6 西班牙 LILW 處置窖(ENRESA, 2023)



圖 2.7 西班牙 VLLW 處置設施(ENRESA, 2023)

4. 法國(ANDRA)

ANDRA 為法國成立之國營公司，主要負責所有放射性廢棄物的長期管理之專責的獨立機構。ANDRA 每五年會發布新版的全國放射性物質及廢棄物清單，該報告的內容為定期更新法國放射性廢棄物處置之工作。而最新一期的報告是 2023 年公開於官網中之「National Inventory of radioactive materials and waste」報告(ANDRA, 2023a)。報告中更新全國廢棄物清單重點，以及法國產生的放射性物質及廢棄物清單的年度趨勢。此報告資料更新法國境內放射性材料與廢棄物庫存的最新資訊至 2021 年 12 月 31 日。ANDRA 每年會發布 CSM 及 CSA 兩座之處置場的年度報告，因這兩個場址屬於法國「基本核設施」的法規分類。根據法規的規定，報告需說明這些設施在安全性、輻射防護以及對環境潛在影響方面的現況。為了保持一致性與透明度，ANDRA 也發布 Cires 處置場的年度報告「Rapport d'information - SUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE ET LA RADIOPROTECTION」報告(ANDRA, 2023b)。儘管 Cires 被法國歸類為環境保護設施，並不受法規要求發布報告的義務，因此本研究針對這兩本報告進行整理。

(1) 低放射性廢棄物來源

法國使用放射性物質的機構包含核能電廠、非核電廠機構(例如稀土開採及應用)、國防(例如核子潛艇、艦艇)、研究單位及醫療等。法國將放射性廢棄物含有放射性核種的混合物(即放射性同位素：銫、鈷、鋇等)，依據廢棄物的成分、放射性強度分為六類，如表 2.6 所示。適用於淺地表處置之廢棄物包含長半衰期低放射性廢棄物(FA-VL)、短半衰期低與中放射性廢棄物(FMA-VC)、極低放射性廢棄物(TFA)及極短半衰期廢棄物(VTC)，以下針對這四類廢棄物進行說明：

- A. 長半衰期之低放射性廢棄物(FA-VL)：此類廢棄物包含法國第一批核能電廠營運及拆除產生的廢棄物、非工業活動(例如稀土元素開採)之含鐳廢棄物及其他廢棄物。
- B. 短半衰期之低放與中放射性廢棄物(FMA-VC)：此類廢棄物主要來自核能電廠、研究中心的營運(液體流出物的處理或氣體流出物的過濾等)、維護(衣

服、工具、手套、過濾器)及核設施拆除作業，也有一小部分為醫學研究。

C. 極低放射性廢棄物(TFA)：此類廢棄物主要來自核能電廠、燃料循環設施及研究中心的營運、維護與拆除等。VLLW 通常為混凝土、碎石、土等廢棄物或金屬及塑膠廢棄物。

D. 極短半衰期廢棄物(VTC)：此類廢棄物主要來自醫療及研究部門。醫療廢棄物可能造成液體或氣體流出物，或在該領域使用放射性核種產生的受污染的固體或液體廢棄物。

表 2.7 法國放射性廢棄物之分類及處置方式(ANDRA, 2023a)

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、貯存及處置的工業設施)	
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)	

(2) 低放射性廢棄物管理

為了充分限制廢棄物並將其與人類與環境隔離，法國決定依不同放射性等級及半衰期長度特性，分類在不同專用處置設施中，並對其進行管理。低放射性廢棄物處置的部分，目前法國已有幾處地表處置設施，例如自 2003 年以來，ANDRA 在 CSA 處置場設有兩個用於處置 VLLW 的設施，自 1992 年以來，用於處置短半衰期 (LILW-SL) 之低放及中放射性廢棄物；CSM 處置場於 1969 年至 1994 年投入使用，目前處於封閉階段。另外，法國目前正在發展用於處置長半衰期之低放射性廢棄物 (LLW-LL) 的淺地表處置場。極短半衰期廢棄物(VSLW)之放射性在幾個月內，甚至幾

天或幾小時內顯著降低。因此，這類廢棄物被貯存在現場，直至衰變至不受列管之程度，然後使用適合其物理、化學及生物特性的常規廢棄物處置方法進行處理。

A. 廢棄物存量

ANDRA 依據廢棄物持有機構提供的資訊，每年 12 月 31 日對法國全國放射性廢棄物進行年度清查。這些廢棄物經過處理，即將廢棄物放入適合的處置容器中，然後將其固定(如有必要)或包覆材料中。表 2.8 為 ANDRA 已處置或應管理的廢棄物的存量。表 2.9 為截至 2021 年法國各類廢棄物存量之動向。

B. Cires 處置場的 TFA 類型之廢棄物

法國 Cires 處置場處置廢棄物之類型為 TFA 類之極低放射性廢棄物，法國廢棄物分類請參閱表 2.7，該類廢棄物主要為核設施或放射性材料拆除之瓦礫、廢土或廢金屬等。截至 2021 年底，該處置場已達到其許可處置能力(650,000 m³) 的 66%(ANDRA, 2023a)，至 2021 年底增至 72.2%(ANDRA, 2023b)。按照目前的配置，Cires 處置場不足以處理未來幾年拆除過程中產生的低放射性廢棄物量。因此，目前正在研究其他管理解決計畫。中期解決計畫是將 Cires 處置場的許可處置能力增加到 900,000 m³ 以上，且不改變處置區目前的佔地面積，並維持相同的安全水準。如果獲得許可，處置容量的增加將使 Cires 處置場的營運時間延長十年左右，即延長至 2040 年左右。目前 Cires 處置場處置之廢棄物來源占比如圖 2.8 所示。

表 2.8 ANDRA 已處置或應管理的廢棄物的存量(m³) (ANDRA, 2023a)

類別	截至 2021 年底
HLW	4,320
ILW-LL	39,500
LLW-LL	103,000
LILW-SL	981,000
VLLW	633,000
DSF	304
Total	~ 1,760,000

表 2.9 截至 2021 年法國所有廢棄物存量動向(m³) (ANDRA, 2023a)

廢棄物類別	總量	生產/持有之機構	在 ANDRA 設施中處置	現有處置容量
HLW	4,320	4,320	-	-
ILW-LL	39,500	39,500	-	-
LLW-LL	103,000	103,000	-	-
LILW-SL	981,000	91,000	890,000	1,530,000
VLLW	633,000	203,000	430,000	650,000
DSF	304	304	-	-
Total	~ 1,760,000	~ 441,000	~ 1,320,000	2,180,000
		25%	75%	

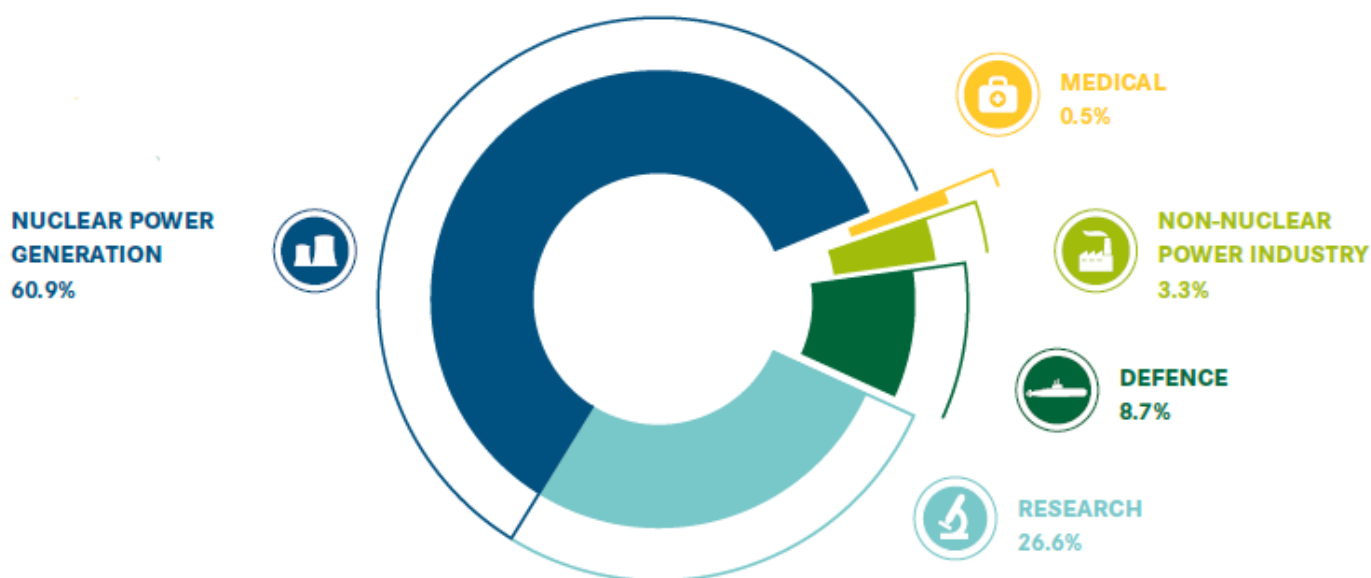


圖 2.8 2021 年底 ANDRA 處置場管理的廢棄物占比 (ANDRA, 2023a)

2.1.2 IAEA-TECDOC-2041 報告

幾乎所有國家都有需要處置低放射性廢棄物，一些較發達國家在淺地表處置設施的開發、授權、建造、試營運、營運、封閉及監測方面擁有數十年的經驗。另一方面，計劃啟動核電計畫的國家，也需要考慮將淺地表處置納入其放射性廢棄物管制策略。因此，要如何處置大量 LLW，可能為日後處置場維修及除役的關鍵問題。隨著許多國家發展放射性廢棄物處置之技術，已投入大量資源制定系統性、國際認可的安全論證方法，證明處置設施的安全性。另一方面，安全論證的執行，也需要解決管理層面與程序層面上之問題，以確保處置作業各個方面的安全品質。

為此目的，國際原子能總署(IAEA)針對放射性廢棄物處置安全，長期舉辦許多國際會議，並執行專門針對淺地表處置的多年期計畫，計畫包含：淺地表放射性廢棄物處置設施之安全評估(Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities, NSARS)(IAEA, 1995)、淺地表處置設施安全評估的方法(Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, ISAM)(IAEA, 2004)、安全評估方法的應用(Application of Safety Assessment Methods, ASAM)(IAEA and OECD/NEA, 2005)，以及淺地表處置管理中使用安全論證概念的實際案例(PRACTICAL Illustration of the use of the Safety case concept in the Management of near surface disposal, PRISM) 及應用(PRACTICAL Illustration of the use of the Safety case concept in the Management of near surface disposal - Application, PRISMA) (IAEA, 2017a)。上述 IAEA 針對淺地表處置計畫有幾個重要之工作，包含：(1) 針對安全評估模型之標準進行測試；(2) 發展改良安全評估方法；(3) 改良安全評估方法應用於建議的處置案例及現有的處置設施，並考慮對其應用進行監管審查；(4) 強化對淺地表處置設施安全論證的理解；以及(5) 探討安全論證在淺地表處置設施管理中的實際運用方法。透過上述之工作，為廢棄物處置設施之安全評估、廢棄物處置設施安全論證發展，以及實際應用等議題進行討論、交流經驗、制定方法及相互學習提供一個平台。IAEA 於 2016 年完成「PRISMA」計畫(IAEA, 2017a)後，於次年(即 2017 年)設立淺地表處置之安全論壇，並設立四個工作小組，如圖 2.9 所示。

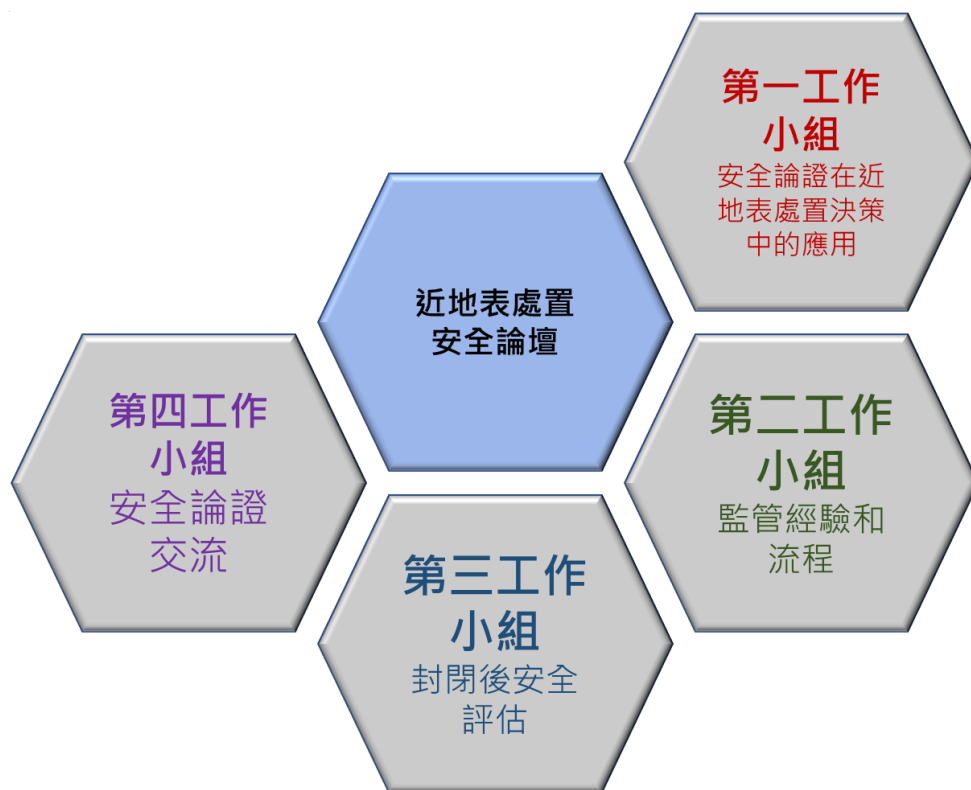


圖 2.9 IAEA 為淺地表處置安全設立論壇之工作分組 (改自 IAEA, 2024)

IAEA 設立淺地表處置之安全論壇，期望能提供一個協助會員國確保淺地表處置安全的長期性論壇，透過(1) 斟酌制定導則、方法及工具；(2) 促進良好的資訊交流(例如：安全論證、安全評估及技術等)；及(3) 對設施或安全論證提供非正式審查的服務等協助，促進會員國提升淺地表處置之安全性。本研究主要研析之技術報告：「Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-2041)」(IAEA, 2024)，即為此論壇經四個工作小組匯集各方討論之成果。彙整這些經驗，提供會員國有關淺地表處置設施安全管理策略及決策的實用資訊，以及開發並使用安全評估與安全論證過程中獲得的經驗資訊。

2.2 淺地表處置相關法規、導則及技術報告

本節依據「IAEA-TECDOC-2041」(IAEA, 2024)技術報告之內容，其參考之相關導則及技術報告進行彙整，並摘述這些導則及技術報告之重點。

2.2.1 主要參考法規及導則

1. 「Fundamental Safety Principles」(SF-1)

「Fundamental Safety Principles」(SF-1)(IAEA, 2006)目的為建立基本安全目標、安全原則及概念之導則，為 IAEA 的安全標準及其安全相關計畫提供基礎，並提供滿足相關要求的指引。該導則闡述基本安全目標及十項相關安全原則，並簡要描述其目的；該導則適用於所有引起輻射風險的情況；該導則為保護民眾與環境免受輻射風險以及引起輻射風險的設施與活動的安全，特別是核設施與輻射源的使用、放射性材料的運輸及放射性廢棄物的管理等要求提供基礎。

(1) 安全目標

「Fundamental Safety Principles」(SF-1)(IAEA, 2006)基本的安全目標是保護人類與環境免受游離輻射的影響。基本安全目標必須在不過度限制設施的營運或引起輻射風險的活動進行的情況下執行。為確保設施的營運及任何有關核活動的進行，以達到可以合理執行的最高安全標準，必須採取措施包含：

- A. 控制民眾的輻射暴露及放射性物質向環境的釋放；
- B. 限制可能導致反應爐爐芯(core)、核連鎖反應(nuclear chain reaction)、輻射源(radioactive source)或任何其他輻射源失去控制的事件的可能性；
- C. 如果發生此類事件，可減輕其後果。

基本安全目標適用於所有設施與活動，以及設施或輻射源的所有階段，包括規劃、選址、設計、製造、施工、營運、除役及封閉。包括放射性物質的相關運輸與放射性廢棄物的管理。導則中制定十項安全原則，在此基礎上制定安全要求並執行安

全措施，以實現基本安全目標。這些安全原則構成一個完整的體系，儘管在執行中，不同的原則在特定情況下的重要性可能有所不同，但需要適當應用所有相關的原則。

(2) 安全原則

本導則之「安全原則」是指保護人類與環境免受輻射風險，以及引起輻射風險的設施與活動的安全。10 項安全原則如下：

原則 1： 安全責任。安全責任必須由負責引起輻射風險的設施及活動的個人或組織承擔。

原則 2： 政府的作用。必須建立與維持一個有效的安全法律與政府架構，包括一個獨立的監管機關。

原則 3： 安全領導與管理。與輻射風險有關的組織，以及引起輻射風險的設施與活動中，必須建立與維持有效的安全領導與管理。

原則 4： 設施及活動的理由。引起輻射風險的設施與活動必須產生效益。

原則 5： 最佳化保護。必須最佳化保護，以提供可以合理實現的最高安全級別。

原則 6： 限制個人風險。控制輻射風險的措施必須確保沒有人承擔不可接受的傷害風險。

原則 7： 保護今世後代。必須保護人類與環境，無論是現在還是未來，都免受輻射風險。

原則 8： 事故預防。必須作出一切實際努力，防止及減輕核事故或輻射事故。

原則 9： 應急準備與回應。必須為應急準備及回應作出安排，用於核事故或輻射事故。

原則 10： 採取保護行動，減少現有或不受管制的輻射風險。減少現有或不受管制的輻射風險的保護措施必須合理化及最佳化。

2. 「Specific Safety Requirements」(SSR-5)

「Specific Safety Requirements」(SSR-5) (IAEA, 2011)的目的是規定處置所有類型放射性廢棄物的安全目標及標準，並依據 IAEA 出版之「Fundamental Safety Principles(SF-1)」(IAEA, 2006)中的基本安全原則，確定處置放射性廢棄物時必須滿足的要求。該導則提供所有負責或關注放射性廢棄物管制，以及處置設施開發、營運及封閉做出決策的人員使用，特別是與監管有關的人員。

導則的適用範圍包含處置設施中處置所有類型的放射性廢棄物，但須對廢棄物的處置以及設施的開發、營運及封閉進行必要的管制。並規定處置設施營運期間，特別是在處置設施封閉後，要求提供放射性廢棄物處置的輻射安全保證。

該導則主要包含幾個重點：要求(1) 保護人類與環境；(2) 放射性廢棄物處置規劃的安全要求；(3) 處置設施的開發、營運及封閉要求；(4) 安全保證；(5) 現有處置設施等五個主要方向。並依據這五個方向提擬出 26 項要求，重點摘述如下：

- (1) 保護人類與環境：基本原則參考 IAEA 出版之「Fundamental Safety Principles(SF-1)」(IAEA, 2006)，規定適用於放射性廢棄物管理及處置的所有設施與活動之基本安全目標及安全原則，包含在營運期間與封閉後之輻射防護、其他環境及非輻射的問題。基本安全目標是保護人類與環境免受游離輻射的有害影響。
- (2) 放射性廢棄物處置規劃的安全要求：為確保滿足第(1)點之規定的處置設施安全目標與標準而制定的要求。放射性廢棄物處置設施規劃的要求分為三個部分，分別是 A. 政府、法律及監管架構；B. 安全方法；以及 C. 安全設計概念。其中共有 10 個要求，**要求 1 至要求 3** 針對政府、監管機關以及設施經營者提出具體要求；**要求 4 至要求 6** 針對處置設施開發及營運過程中對於安全的重要性、處置設施安全的被動手段進行要求；安全設計概念需要有多種安全功能，即針對放射性廢棄物的抑制與隔離進行設計，並要採取被動安全功能的監控與控制，相關要求如**要求 7 至要求 10**。

要求 1：政府責任

必須建立並維持適當的政府、法律及監管安全架構，應明確分配放射性廢棄物處置設施的責任，以便於選址、設計、建造、營運及封閉。

要求 2：監管機關的責任

監管機關應為開發不同類型的放射性廢棄物處置設施制定監管要求，並應規定滿足許可證申請過程各個階段的要求。還應為每個處置設施的發展、營運及封閉規定條件執行必要的行動，以確保滿足這些條件。

要求 3：設施經營者的責任

放射性廢棄物處置設施的經營者應對其安全負責。經營者應依據國家策略，按照監管要求，在法律與監管基礎設施內，展開所有必要的行動，包含選址、評估、設計、施工、營運、封閉，必要時進行封閉後的監管。

要求 4：處置設施開發及營運過程中安全的重要性

放射性廢棄物處置設施的整個開發及營運過程中，經營者應瞭解該設施現有替代方案的相關性及其對安全的影響，以達成處置作業階段與封閉後提供最佳化的安全水準。

要求 5：處置設施安全的被動手段

經營者應評估場址之設計、建造、處置作業及封閉處置設施，以盡可能透過被動手段確保安全，並在設施封閉後盡量減少行動。

要求 6：瞭解處置設施並對安全有信心

處置設施的經營者應充分瞭解該設施及其環境特性，以及在適當長的時間內對封閉後影響安全之因素等，以便對安全有充分的信心。

要求 7：多種安全功能

應選擇適當之處置環境及設計處置設施的工程障壁，以確保透過多種安全功

能提供安全。應證明各個障壁、設施及整個處置系統的功能，以在安全情況下執行。處置系統整體功能不應過分依賴於單一的安全功能。

要求 8：放射性廢棄物的接收

應設計工程障壁，包括廢棄物形式與包件，並選擇處置環境，以便抑制廢棄物的放射性核種。放射性衰變大幅度減少廢棄物造成的危害之前，應提供安全限制。此外，產生熱之廢棄物，應在廢棄物仍在產生熱能，並可能對處置系統功能產生不利影響時提供必要的安全保護。

要求 9：放射性廢棄物的隔離

處置設施的選址、設計及營運應提供放射性廢棄物與人及與生物圈隔離的設施。這些特徵為短半衰期廢棄物提供數百年的隔離，為中高放射性廢棄物提供至少數千年的隔離，並同時考慮處置系統的自然演變及對設施造成干擾。

要求 10：被動安全功能的監控與控制

必要時應採用適當級別的監管及控制來保護與保持被動安全功能，使其能夠於封閉後仍能維持安全論證中的功能。

- (3) 處置設施的開發、營運及封閉要求：此部分規定執行上述規劃有關的安全要求，這些要求包含 3 個部分：A. 放射性廢棄物處置架構；B. 安全論證及安全評估；及 C. 處置設施的開發、營運及封閉。放射性廢棄物處置架構要求處置設施應逐步開發、營運及封閉，必要時須反覆評估以支持這些決定(要求 11)；要求 12 至要求 14 則針對安全論證及安全評估進行要求，包含安全論證與安全評估的準備、批准與使用、範圍及建檔等。要求 15 至要求 19 針對處置場址特徵化、設施設計、建造、營運及封閉等進行要求。

要求 11：處置設施的逐步開發與評估

應以一系列步驟進行放射性廢棄物處置設施之開發、營運及封閉。必要時，應對場址、設計、建造、處置作業、管理替代方案，以及處置系統的功能與

安全性進行反覆評估。

要求 12：處置設施安全論證與安全評估的準備、批准及使用

經營者應依據需要，在處置設施開發、營運及封閉後的每一步準備並更新安全論證與安全評估。安全論證與安全評估應提交給監管機關批准。

要求 13：安全論證與安全評估的範圍

處置設施的安全論證應說明場址所有與安全有關、設施設計、管制措施及監管內容。安全論證與安全評估應證明所提供的人員與環境保護水準，並應向監管機關及其他利益相關者(interest parties)保證將滿足安全要求。

要求 14：安全論證與安全評估建檔

處置設施的安全論證與安全評估應以足夠詳細的內容並以高品質進行記錄，並允許對安全論證與安全評估進行獨立審查。

要求 15：處置設施的場址特徵化

處置設施的場址特徵化應足夠詳細，足以支持對場址的特徵及場址如何隨時間演變，例如包含現狀、可能的自然演變、可能的自然事件及可能影響設施安全的人類活動。

要求 16：處置設施的設計

處置設施及其工程障壁的設計應能容納廢棄物及其相關危害，在物理及化學上與處置地質構造或地表環境相容，並在封閉後提供足夠的安全，以輔助處置環境的先天缺陷。設施及其工程障壁的設計應確保在營運期間提供安全。

要求 17：建造處置設施

處置設施應按照批准的安全論證與安全評估中之描述進行設計建造。建造方式應保持處置環境的安全功能，這些功能已被安全論證證明對封閉後的安全至關重要。施工活動應確保營運期間的安全。

要求 18：處置設施的營運

處置設施應按照許可證的條件及相關要求營運，以維持營運期間之安全，並在正常情況下維持安全功能，這些功能對封閉後的安全至關重要。

要求 19：封閉處置設施

處置設施的封閉方式應符合規定，即提供安全論證以證明封閉後那些重要的安全功能皆能正常運作。

- (4) 安全保證：此部分主要是針對處置設施廢棄物進行驗收、設施之監測計畫、設施封閉後、核能保安(security)及管制系統進行相關要求(要求 20 至要求 25)。

要求 20：處置設施的廢棄物驗收

接收的廢棄物應符合與處置設施營運中與封閉後的安全論證標準。

要求 21：處置設施的監測計畫

如果屬於安全論證的一部分，則應在處置設施的建造、營運及封閉後執行監測計畫，主要目的為蒐集並更新保護及安全目的所需的資訊。應取得相關資訊，以確認設施營運期間工作人員及民眾安全，以及環境保護所必需的條件。

要求 22：封閉後與制度化管制時期

應為封閉後時期制定計畫，以解決制度化管制問題及保持處置設施資訊可用性。這些計畫應與被動安全特徵一致，並應構成授權封閉設施的安全論證的一部分。

要求 24：關於核能保安的要求

應採取措施確保放射性廢棄物處置過程中採取安全與核能保安措施的綜合辦法。

要求 25：管理系統

處置設施開發與營運的所有步驟中，應將提供品質保證的管理系統，並應用

於所有與安全相關的活動、系統及元件。每個要素的保證水準應與其對安全的重要性相稱。

- (5) 現有處置設施：在這些要求制定之前投入營運之處置設施，部分可能無法滿足以上要求。因此為這些處置設施進行規範(要求 26)，以達安全需求。

要求 26：現有處置設施

應定期評估現有處置設施的安全性，直至許可證終止。在此期間，當計劃進行安全重大修改或授權條件發生變化時，也應評估安全性。如果有不滿足規範的任一要求，則應採取措施提升設施的安全性，並考慮經濟與社會因素。

3. 「The Safety Case And Safety Assessment For The Disposal Of Radioactive Waste」(SSG-23)

「The Safety Case And Safety Assessment For The Disposal Of Radioactive Waste」(SSG-23) (IAEA, 2012) 主要內容，為提供放射性廢棄物處置關於安全論證與安全評估之具體安全指引。放射性廢棄物處置之處置設施設計、營運及封閉，其目的皆為提供必要的抑制與隔離，以確保人類與環境免受有害游離輻射的影響。對於放射性物質及輻射的所有設施與活動，處置設施的設施經營者對處置安全負有首要責任，必須評估設施的安全性，並證明設施設計及營運符合「SF-1」(IAEA, 2006)的安全要求。放射性廢棄物處置的安全要求「SSR-5」(IAEA, 2011)中規定，必須開發一套安全論證及安全評估。

本導則的目標是提供有關如何評估、展示及記錄各類型放射性廢棄物處置設施安全性的指引。這些指引對於負責準備安全論證的設施經營者，以及負責制定相關法規與監管機關同樣重要；這些法規與導則決定安全論證的基礎與範疇。為進一步支持監管過程，本導則還提供監管機關對安全論證進行審查的指引。本導則涵蓋所有需要專門處置放射性廢棄物的設施之安全論證與安全評估的準備工作，並對處置設施開發過程中的所有階段提供指引及建議，其重點著重於處置設施的功能及其封閉後的影響評估。導則中包含幾個重點如下，詳見核能安全委員會(2014a)之報告：

- (1) 證明放射性廢棄物處置的安全性。討論放射性廢棄物處置設施安全性的所有過程；

- (2) **安全原則與安全要求**。針對安全論證時需要滿足的主要安全原則與安全要求進行統整，並提供如何滿足這些要求的指引；
- (3) **放射性廢棄物處置的安全論證**。詳細說明安全論證的概念，描述安全論證的組成及其在處置設施的開發、營運及封閉中的作用，同時還討論建立安全論證信心的可能性；
- (4) **場址封閉後的輻射影響評估**。說明場址封閉後輻射影響評估的方法，針對各個步驟進行詳細的說明與討論，特別是對輻射影響評估中不確定性管理的指引及建議，以及如何使用評估結果與評估標準進行比較的建議；
- (5) **具體問題**。討論準備安全論證過程中出現的具體問題；
- (6) **安全論證的記錄及使用**。說明安全論證相關文件的記錄，以及處置設施開發中安全論證的可能用途；
- (7) **管制審查流程**。針對安全論證進行管制審查的指引及建議。

4. 「Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste」(SSG-29)

淺地表處置設施的安全方法與核設施有顯著差異，因為核設施(例如燃料製造廠、核能電廠或核後端處理設施)處於營運狀態，並涉及發電等生產活動。與核設施相比，放射性廢棄物處置設施的核心功能是長期提供被動安全。然而，對於淺地表處置設施來說，處置作業之限制與條件仍然很重要，以確保處置作業安全與封閉後的安全功能。

本安全導則「Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste」(SSG-29) (IAEA, 2014)的目的，是提供與放射性廢棄物淺地表處置設施的開發、處置作業、封閉及制度化控制有關的指引及建議，以滿足「SSR-5」(IAEA, 2011)中規定的安全要求，提供參與政策制定、制度化控制及淺地表處置使用的人員使用。本安全導則中「淺地表處置」之範疇，主要涉及選定場址後，針對設施的開發、營運及封閉相關的活動。設施類型包含將固體放射性廢棄物處置於壕溝、地上工程結構、地表以下的工程結構以及在地下數十米深處挖掘的岩洞、筒倉及隧道，並且適合處置含有短半衰期放射性核種的廢棄物(半衰期少於約 30 年)及僅含有低濃度的長半衰期放射性核種，即 VLLW 及 LLW。本安全導則包

含幾個主要重點，詳見核能安全委員會(2014b)：

- (1) **淺地表處置及其執行狀況，以及開發淺地表處置設施的方法。**
- (2) **法律及基礎設施的指引。**這部分涉及導則「SSR-5」第 1 至 3 條要求，有關政府、監管機關及設施經營者的責任要求。
- (3) **安全方法與設計原則。**這部分涉及導則「SSR-5」第 4、5、7、8、9 及 10 條要求。主要要求包含處置設施開發與營運過程中安全的重要性；放射性廢棄物的接收、處置及隔離；處置設施需要多種安全功能、被動安全功能及監控設施等要求。
- (4) **安全論證與安全評估。**這部分涉及導則「SSR-5」第 6、12、13 及 14 條要求。包含處置設施安全論證與安全評估的準備、批准、使用、範圍及記錄，以及設施經營者對處置設施的瞭解與對安全性的信心。
- (5) **淺地表處置設施的開發、營運及封閉的具體步驟。**這部分涉及導則「SSR-5」第 11、15、16、17、18、19 及 20 條要求。內容包含場址特徵化；處置設施之逐步開發及評估、設施設計、建造、營運及封閉；及廢棄物接收標準等要求。
- (6) **安全保證。**這部分涉及導則「SSR-5」第 21、22、23、24 及 25 條要求。主要要求處置設施之監測計畫、封閉後之監控、核能保安措施及管理系統等。
- (7) **現有的處置設施。**這部分涉及導則「SSR-5」第 26 條要求，主要是針對現有處置設施的安全性進行定期評估。
- (8) **淺地表處置設施選址、現地調查與場址特徵化的補充資訊及指引，特別著重於資料需求。**

5. 「Predisposal Management of Radioactive Waste」(No. GSR Part 5)

安全導則「Predisposal Management of Radioactive Waste」(No. GSR Part 5) (IAEA, 2016) 的目的是根據 IAEA 出版之「Fundamental Safety Principles(SF-1)」(IAEA, 2006)中建立的基本安全原則，確定放射性廢棄物處置前管理必須滿足的要求。內容規定適用於放射性廢棄物處置前管制設施的選址、設計、建造、營運及封閉，以保護人類健康與環境的目

標、標準及要求，及為確保此類設施與活動的安全而必須滿足的要求。

本安全導則適用於各類放射性廢棄物的處置前之管理，涵蓋從產生到處置的所有管制步驟，包括加工(預處理、處理及固化包裝)、貯存及運輸。適用於放射性廢棄物處置前管制之所涉及的所有設施及活動的安全要求。

本導則包含三個部分，分別針對放射性廢棄物處置前管理相關責任；放射性廢棄物處置前管理的步驟及；放射性廢棄物處置前管理設施及處置活動的開發與營運等三個部分進行要求。

- (1) 放射性廢棄物處置前管理相關責任：放射性廢棄物處置前之處理可能涉及多位處理人員或處理單位，這些廢棄物甚至可能在另一個國家進行處理。在此情況下，必須明確規範相關之安全責任。本導則**要求 1**至**要求 7**則為與處置前管理相關責任之要求：

要求 1：法律及監管框架

政府應訂定適當的國家法律及監管框架，在框架內可以規劃與安全地執行放射性廢棄物管理之活動。應包含明確的責任分配、確保財政與其他資源，及提供獨立的監管能力。對於可能受到影響的鄰國，還應酌情及必要地在國界之外提供保護。

要求 2：國家放射性廢棄物管理政策及策略

為確保放射性廢棄物有效管理，政府應制定放射性廢棄物管理的國家政策。政策應適合國家放射性廢棄物的特性與數量，應說明所需的監管與控制，並應考慮相關的社會因素。

要求 3：監管機關的責任

監管機關應制定放射性廢棄物管理設施及活動要求，並制定滿足許可過程各階段要求的程序。審查及評估設施經營者在授權前與營運期間定期準備的放射性廢棄物管理設施與活動的安全論證及環境影響評估。

要求 4：設施經營者的責任

設施經營者應對處置前放射性廢棄物管理設施或活動的安全負責。設施經營者應進行安全評估並制定安全論證，並應確保設施之選址、設計、施工、營運、關閉及除役等必要活動符合法律與法規要求。

要求 5：安全措施要求

應採取措施確保放射性廢棄物處置前管理採用綜合安全保障方法。

要求 6：相互依存

應適當考慮放射性廢棄物處置前管理中所有步驟之間的相互依賴性以及預期處置方案的影響。

要求 7：管理體系

管理系統應適用於放射性廢棄物處置前管理的所有步驟與要素。

- (2) 放射性廢棄物處置前管理的步驟：決定放射性廢棄物處置前管理方案時，應考慮各種因素，包括放射性廢棄物的特性與數量、民眾暴露、環境影響、人類健康、安全及社會及經濟因素。放射性廢棄物的處置前管理中，通常必須在沒有可用處置設施且不知道處置廢棄物接受標準的情況下做出決定。在此情況下，必須考慮出於安全目的，放射性廢棄物是否以原始或處理的形式貯存。在做出廢棄物處理決策時，必須盡可能考慮放射性廢棄物管理未來任何步驟的預期需求。因此，本導則**要求 8 至要求 12**則為要求放射性廢棄物處置前管理的步驟：

要求 8：放射性廢棄物的產生及控制

所有放射性廢棄物應予以辨識與控制。放射性廢棄物的產生應保持在可行的最低限度。

要求 9：放射性廢棄物的特徵化及分類

放射性廢棄物處置前管理的各個步驟中，應依照監管機關制定或批准的要求

對放射性廢棄物進行特徵化與分類。

要求 10：放射性廢棄物的處理

放射性廢棄物的處理應適當考慮廢棄物的特性及其管理不同步驟(預處理、處理、運輸、貯存及處置)的要求。廢棄物包件的設計與生產應確保放射性物質在正常運轉期間及廢棄物處理、貯存、運輸及處置過程中可能發生事故的狀況下都能得到適當的控制。

要求 11：放射性廢棄物的貯存

廢棄物的貯存方式應便於檢查、監測、回收並保存在適合其後續管理的條件下。應適當考慮預期貯存期限，並應盡可能採用被動安全功能。特別是對於長期貯存，應採取措施防止廢棄物容器劣化。

要求 12：放射性廢棄物驗收標準

接受處理、貯存或處置的廢棄物包件與未包裝之廢棄物應符合與安全論證一致的標準。

- (3) 放射性廢棄物處置前管理設施及處置活動的開發與營運：放射性廢棄物處置前管理的授權、限制條件及控制的制定得益於設施經營者、監管機關及其他利益相關者之間的密切溝通與合作。監管機關有責任以明確的方式得出並記錄監管決策過程所依據的標準。導則**要求 13**至**要求 22**則針對上述內容進行規範：

要求 13：準備安全論證及支援安全評估

設施經營者應準備安全論證及支援安全評估。如果是逐步開發，或對設施或活動進行修改，則應根據需要審查及更新安全論證及其支援的安全評估。

要求 14：安全論證的範圍及支援安全評估

放射性廢棄物處置前管理設施的安全論證應包括對場地所有安全方面、設施的設計、營運、封閉及除役以及管理控制如何滿足監管要求的描述。安全論證及其支援的安全評估應證明可提供的保護標準，並向監管機關保證安全要

求將得到滿足。

要求 15：安全論證紀錄及支援安全評估

安全論證及其支援的安全評估應以足以證明安全性的詳細程度與品質，並記錄下來，以支援每個階段的決策，及允許對安全論證與安全評估進行獨立審查及批准。

要求 16：定期安全審查

設施經營者應定期進行安全審查，並應在審查後執行監管機關要求的任何安全升級。定期安全審查的結果應反映在設施安全論證的更新版本中。

要求 17：設施的位置及設計

放射性廢棄物處置前管理設施的選址與設計應確保在正常及可能的事故情況下，及在設施除役期間預期內的安全。

要求 18：設施的建造及測試

放射性廢棄物處置前管理設施應依照安全論證中所述的設計進行建設，並經監管機關批准。應進行設施試營運，以驗證設備、結構、系統及整個設施是否按計畫營運。

要求 19：設施營運

放射性廢棄物處置前管理設施應依照國家法規與監管機關之規定的條件營運。應適當考慮設施的維護，以確保其安全運作。如果設施經營者制定緊急準備及應變計畫，則須經監管機關批准。

要求 20：設施關閉及除役

設施經營者應在設計階段制定放射性廢棄物處置前管理設施關閉及除役的初步計畫，並在整個營運期間定期更新。設施除役應根據監管機關批准的最終除役計畫進行。此外，還應保證有足夠的資金用於關閉及除役。

要求 21：核物料料帳管理與控制

對於受核物料料帳管理協議約束的設施，在處置前放射性廢棄物管理設施的設計及營運中，應以不損害設施安全的方式執行核物料料帳管理與控制。

要求 22：現有設施

應審查現有設施的安全性，以驗證是否符合要求。安全相關升級由設施經營者依照國家政策及監管機關的要求進行。

2.2.2 技術報告

1. 「Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities」(IAEA TECDOC-1380)

「Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities」(IAEA-TECDOC-1380)(IAEA, 2003)技術報告，主要目的為介紹一種確定放射性廢棄物接收標準的安全評估方法。透過安全評估方法來計算淺地表處置設施中，放射性廢棄物的活性限度，以評估固體與固化放射性廢棄物在淺地表設施中，營運及封閉後放射性的潛在影響。此方法適用放射性廢棄物類型包括醫療、工業及研究含有放射性核種的廢棄物，以及核設施除役後產生的廢棄物。

(4) 活性限度與處置系統安全之間的關係

評估處置系統的安全性時，確定系統中有助於其安全性的元件(即處置系統概念)及評估系統安全性所需的要素(即評估能力)如表 2.10 所示。表中左欄代表有助於處置系統安全的物理及組織方面的概念，包括系統特徵，例如場址之地下水文地質、工程障壁材料的特性以及廢棄物包件檢查及驗收等。右欄介紹與安全評估相關的能力，對安全評估結果的可信度直接取決於資料的品質、採用的方法及使用的模型。因此，控制淺地表設施中放射性廢棄物的接收，是直接影響處置系統安全的眾多因素之一。必須規定廢棄物驗收要求，以確保廢棄物包件可以安全處置，且不會損害各種工程及天然障壁對廢棄物的安全限制。

表 2.10 處置系統安全要素分類架構(IAEA, 2003)

處置系統概念	評估能力
場址特徵化	- 資料與論述的品質(例如，放射性核種清單、滲透率、放射性核種吸附係數)。 - 評估方法及模型的品質。 ↓
設施設計	
處置建築(例如，結構與工程障壁的材料規範，以及設施的建造)。	
實際操作處置作業(例如，檢查、接收及處置廢棄物包件)。	
↓	
對處置安全的信心	

(5) 輻射防護標準

所有涉及實際或潛在暴露於游離輻射的人類活動，包括放射性廢棄物管制，都需要執行保護人類及環境的措施。處置設施營運期間的輻射防護目標及標準與任何核設施相同，考慮社會及經濟因素的情況下，因處置設施的作業而暴露給工作人員及民眾的輻射劑量應盡可能低，個人的輻射應保持在適當的劑量限度範圍內。其中，應控制任何工作人員的職業暴露，以免超過連續五年平均每年有效劑量為 20 mSv，或任何一年的有效劑量為 50 mSv。民眾群體平均劑量不得超過一年的有效劑量為 1 mSv。對於長期的輻射防護，放射性廢棄物處置設施的主要設計目標是在設施封閉後，直至放射性危害達可忽略之標準為止。因此，規定民眾暴露於所有來源之有效劑量限值為每年 1 mSv。為遵守這一限制，設施設計應使未來可能因處置設施而暴露之民眾的估計平均劑量或風險，每年不得超過 0.3 mSv，或每年產生 10^{-5} 次的風險。

(6) 推估活性限度的方法

「Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste」導則(IAEA, 1999)指出，安全評估的結果，是確定廢棄物中特定放射性核種的存量及濃度限值的重要手段，並為制定廢棄物接收要求提供一種方法。此方法可用於處置設施的營運及封閉後時期，推估淺地表處置設施活性限度的主要標準與輻射防護標準相符。許多安全評估方法已經開發並以不同方式應用於淺地表設施的評估(IAEA, 1997)。

IAEA 針對安全評估方法也透過「ISAM」計畫進行嚴謹的研究，本技術報告基於該計畫進一步提出推估營運及封閉後期間的活性限度(activity limits)方法，流程如圖 2.10 所示，主要步驟如下：

- 評估處置環境背景(步驟 1)；
- 處置系統的描述(步驟 2)；
- 情節(scenario)開發與論證(步驟 3)；
- 模型開發與執行(步驟 4)；
- 說明活性限度的計算及推估(步驟 5 及 6)。

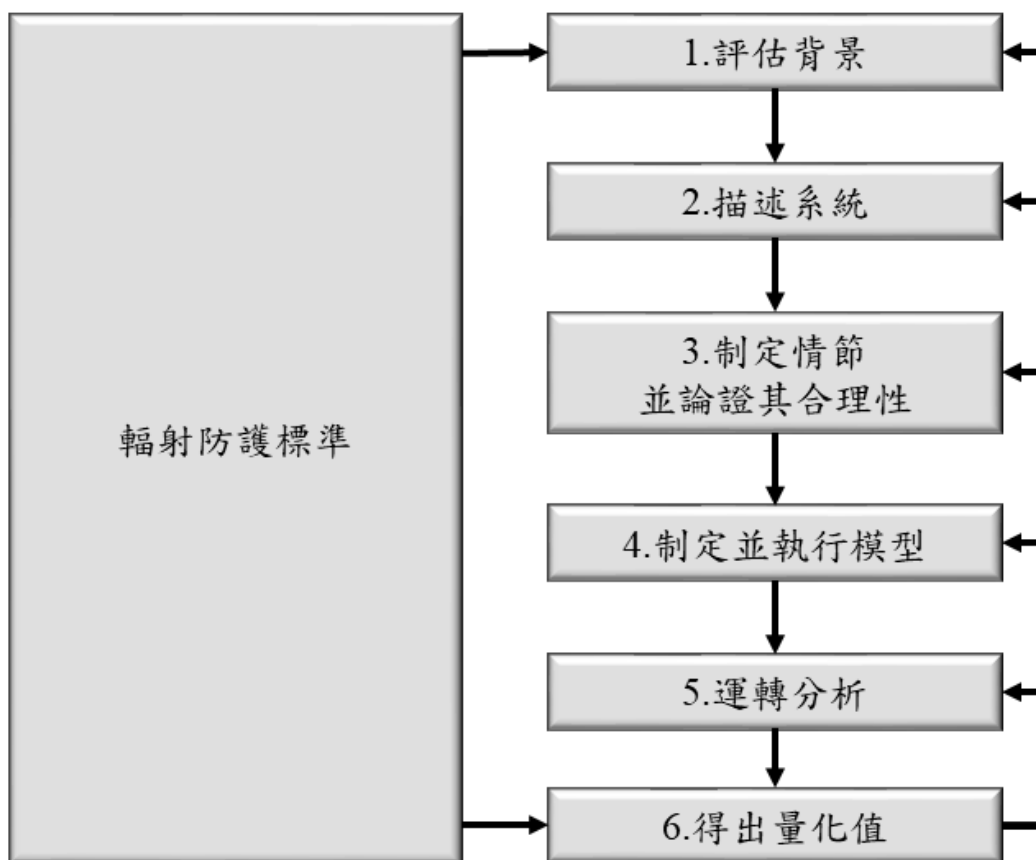


圖 2.10 用於推估營運及封閉後期間的活性限度的方法(IAEA, 2003)

(7) 推估活性限度方法應用

報告中制定的方法，可用於幾個方面，包含：

A. 明確且有據可查的方式得出淺地表設施處置放射性廢棄物的特定活性限度；

B. 涉及此類處置設施安全評估技術的訓練計畫。包含：

- 尚未擁有處置系統具體資料，或處於淺地表處置發展初期階段的國家的參考依據。例如針對管理廢棄物處置概念的可行性進行測試，或可用於淺地表處置計畫「篩選」階段。
- 作為處置系統具體活性限度的比較基準，但應謹慎進行。例如應檢查報告中考慮的範例與欲比較的特定處置系統之間的差異已被充分考慮，並正確理解這些差異對結果的影響。這些差異可能存在於評估背景層面(例如：不同的法規標準或時間範圍)，或系統描述層面(例如：情節、概念及數學模型等)。

C. 淺地表處置設施安全評估技術的訓練計畫。

2. 「Contents And Sample Arguments Of A Safety Case For Near Surface Disposal Of Radioactive Waste」(IAEA-TECDOC-1814)

許多會員國正在開發或營運放射性廢棄物淺地表處置設施。近年來，包括 IAEA 及經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)在內的國際組織，已應用安全論證的概念，以結構化整合需要的資訊提供給決策者。安全論證的一個特點，其內容必然會隨著時間及設施使用期間的決定而變化。由於安全論證概念逐漸受到重視，促使兩個國際計畫誕生。第一個計畫為淺地表處置管制中，安全論證概念的實際應用示範計畫，即「PRISM」。該計畫針對淺地表處置設施每個階段的決策過程中，有關安全論證的性質及使用進行探討，最終確定安全論證的組成，並記錄於安全論證論矩陣(MASC)中。後續計畫「PRISMA」，其中「A」指的是應用，使用 MASC 矩陣來跟蹤及記錄安全論證，「PRISMA」專注於記錄在制定安全論證內容過程中做出決策的依據。

「Contents And Sample Arguments Of A Safety Case For Near Surface Disposal Of Radioactive Waste」(IAEA-TECDOC-1814) (IAEA, 2017a)技術報告介紹「PRISM」及「PRISMA」這兩個計畫，並說明計畫的成果，以幫助會員國開發放射性廢棄物處置設施的安全論證。該技術報告的目的，為替準備安全論證的技術專家，提供放射性廢棄物處置安全論證內容及論述的詳細指引，並為監管機關及政府，提供制定安全論證內容過程中做出決策的依據。報告中概述安全論證的主要用途、安全論證與處置設施的同步演變、廢棄物處置設施開發的關鍵決策步驟、安全論證的組成、MASC 矩陣中的角色等。

(1) MASC 矩陣

「PRISM」計畫意識到處置設施的每個階段中，不同的安全論證在不同時間(例如每個關鍵決策步驟)具有不同的重要性。因此，開發一種工具，用於追蹤處置設施不同階段安全論證的發展與相對重要性。該工具採用矩陣的形式，稱為 MASC 矩陣。IAEA 在「SSG-23」(IAEA, 2012)定義的安全論證的主要組成、安全論證的子組成及處置場開發中的典型決策步驟，這些被結合到 MASC 矩陣中，如表 2.11 至表 2.13 所示。MASC 矩陣的開發目的是為了實現以下目標：

- A. 確保在設施每個階段中所有相關的安全論證都得到了處理。
- B. 評估在處置設施每個階段中安全論證論點的相對重要性。
- C. 用於程序上之風險評估，並評估安全論證中未完成或處理不充分的部分，以致對後續處置場開發可能產生的影響。

MASC 矩陣的作用，為確保在正確的決策步驟及適當的重要性下，處理安全論證的每個組成。MASC 矩陣對於設施經營者及監管機關來說，是一個有價值的工具，用於開發或審查安全論證，並確保安全論證的完整性與可追溯性。此外，「PRISM」計畫為不同階段的處置場開發過程中，提供安全論證的各個組成分配相對重要性的任務。對於理想的安全論證，MASC 矩陣的每個單元依相對重要性進行評分：

- 「3」：考慮所做的決策步驟時，這個論證必不可少。
- 「2」：考慮所做的決策步驟時，這個論證重要。

- 「1」：考慮所做的決策步驟時，這個論證有價值，但不太重要。
- 「0」：這個論證在這個決策步驟上不適用。

透過 MASC 矩陣中每個決策步驟的編號進行平均，可得到每個決策步驟中特定安全論證的相對重要性。每個時期安全論證相對重要性的變化如圖 2.11 所示。其中，橫軸為處置過程中的每個時期，縱軸為透過 MASC 矩陣進行評分後之分數，以系統描述(System Description)為例(圖 2.11 中粉紫色實線)，從處置概念階段至建造階段平均分數皆為 3 分，顯示在這個階段，有關係統描述之安全論證為重要且必不可少的因素。有關係統描述所考慮的要素依據表 2.11 至表 2.13 所羅列，包含廢棄物特性、設施設計、場址特性及安全功能等。

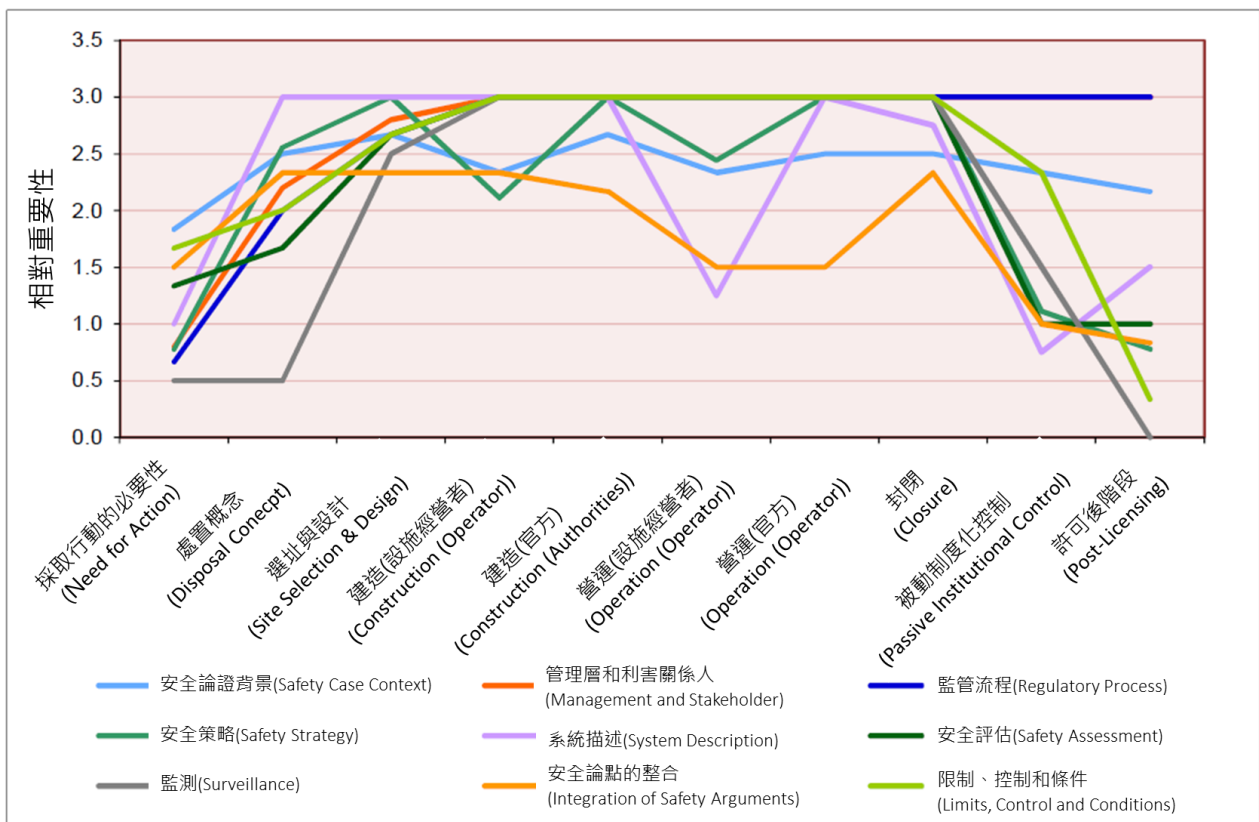


圖 2.11 不同時期安全論證相對重要性的變化案例 (改自 IAEA, 2017a)

表 2.11 MASC 矩陣(改自 IAEA, 2017a)

一般資料(General Data)				
名稱(Name)				
國家(Country)				
受眾(Audience)				
處置設施(Disposal facility)				
主要決策步驟 (Main decision-making steps)	行動需求(NEED FOR ACTION)			
決策替代方案 (Decision alternatives)	貯存、處置、出口至其他國家(Storage, disposal, export to a foreign country)			
建議決策 (RECOMMENDED DECISION)				
決策摘要 (DECISION SUMMARY)				
	決策依據 (Basis for the decision)	決 策 理 由 (Rationale for the decision)	可能影響決策的不確定因素 (Uncertainties that could affect the decision)	建議支持決策的專業知識 (Recommended expertise supporting the decision)
安全論證背景 (Safety Case Context)				
國家策略 (NATIONAL STRATEGY)				
國家法律框架 (National Legal Framework)				
法規(REGULATIONS)				
國際承諾 (International Commitments)				
國際指引 (INTERNATIONAL GUIDANCE)				
財務考量 (FINANCIAL CONSIDERATIONS)				
管理層和利害關係人 (Management and Stakeholder)				
利害關係人的參與 (INVOLVEMENT OF STAKEHOLDERS)				
管理體系 (MANAGEMENT SYSTEM)				
- 組織(Organization)				
- 員工能力(Staff competence)				
- 品質保證(Quality assurance)				
- 記錄保存/可追溯性(Record keeping/traceability)				

表 2.12 MASC 矩陣(續(1))(改自 IAEA, 2017a)

監管流程 (REGULATORY PROCESS)				
- 管理系統(Management system)				
- 許可流程(Licensing process)				
- 初期且持續的參與(Early and continuous involvement)				
安全策略(Safety Strategy)				
最佳化(OPTIMIZATION)				
不確定性管理 (MANAGEMENT OF UNCERTAINTIES)				
穩定性(ROBUSTNESS)				
可論證性(DEMONSTRABILITY)				
被動安全(PASSIVE SAFETY)				
工程科學的重要性 (IMPORTANCE OF ENGINEERING SCIENCE)				
選項比較 (COMPARISON OF OPTIONS)				
分級方法 (GRADED APPROACH)				
系統描述(System Description)				
廢棄物特性 (WASTE CHARACTERISTICS)				
設計(DESIGN)				
場址特徵 (SITE CHARACTERISTICS)				
安全功能 (SAFETY FUNCTIONS)				
安全評估(Safety Assessment)				
環境影響評估 (ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT)				
輻射影響與效能評估 (RADIOLOGICAL IMPACT AND PERFORMANCE ASSESSMENT)				
營運安全 (OPERATIONAL SAFETY)				
- 監測(Surveillance)				
監控(MONITORING)				
安全性(SEcurity)				

表 2.13 MASC 矩陣(續(2))(改自 IAEA, 2017a)

安全論點的整合 (Integration of Safety Arguments)				
安全論點(SAFETY ARGUMENTS)				
增加信心的額外措施 (ADDITIONAL MEASURES TO INCREASE CONFIDENCE)				
- 獨立審查(Independent review)				
- 補充安全指標 (Complementary safety indicators)				
- 多重推理線(Multiples lines of reasoning)				
研究與發展(RESEARCH AND DEVELOPMENT)				
處理未解決問題的計畫 (PLANS FOR ADDRESSING UNRESOLVED ISSUES)				
限制、控制和條件 (Limits, Control and Conditions)				
條件(CONDITIONS)				
限制 (LIMITS) (例如劑量(Dose)、風險(risk)、活度限制(activity limits)等)				
控制(CONTROL)				

(2) 從中獲得的經驗

A. 來自設施經營者的經驗

在開發安全論證的過程中，或許最重要的經驗不是關於相關資料的輸入，而是設施經營者在決策過程中避免某些類型的不確定性。例如缺乏對場址之自然系統的了解，或是場址面臨民眾反對可能帶來的影響。上述兩種情況之不確定性都不是無法克服。前者之設施經營者本可以針對場址進行額外的特徵化工作，以減少參數的不確定性；後者可針對民眾反對制定應對的策略。然而，與其處理這些不確定性，這些設施經營者選擇另尋場址，但這個場址需依靠複雜的障壁系統。

B. 來自監管機關的經驗

這部分來自監管機關在做出決定時面臨的難題。監管機關做出決策時，該決策可能需要滿足下一個決策時的條件，即便目前的決策不需要這些條件，或是監管機構在接受設施經營者提出任何申請之前，先要求設施經營者滿足申請所需的條件後在進行決策，又或是政府或監管機關在決策時會使用「可接受」而非「接受」。這種避免決策的做法，使決策結果傾向為開放式的趨勢，保留可改變之空間。

C. MASC 矩陣的經驗

MASC 矩陣之優點即對安全論證輸入的開發者而言非常有用。例如，政府或監管機關評判安全論證標準的制定，MASC 矩陣是一個重要的補充。另一方面，MASC 矩陣雖然對於辨識程序性的風險非常有用，但缺點是假設這些程序性的風險被辨識後，卻未在 MASC 矩陣中得到良好追蹤。因此，參與者建議需對 MASC 矩陣進行改進。

第三章 國際間淺地表處置之關鍵議題研析

全球有許多使用核能的國家，除了核能發電外，幾乎所有國家都有需要處置低放射性廢棄物，要如何處置大量 LLW 可能為日後重要之問題。許多國家發展放射性廢棄物處置之技術，投入大量資源證明處置設施的安全性。另一方面，安全論證的執行，也需要解決管理及程序等問題，以確保安全相關工作各個方面的品質。IAEA 於 2017 年設立淺地表處置之安全論壇，並設立四個工作小組，期望能提供並協助會員國，確保淺地表處置安全的長期性論壇。

「Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-2041)」(IAEA, 2024) 即為此論壇各工作小組匯集各方研究之成果，透過(1) 斟酌制定導則、方法及工具；(2) 促進良好的資訊交流(例如：安全論證、安全評估及技術等)；及(3) 對設施或安全論證提供非正式審查的服務等協助，協助會員國提升淺地表處置之安全，提供有關淺地表處置設施安全管理策略與決策的實用資訊，以及開發與使用安全評估及安全論證過程中獲得的經驗資訊。

本章針對此技術報告中，各工作小組匯集之關鍵議題進行研析及重點整理，3.1 節為淺地表處置設施決策中使用之安全論證，針對淺地表放射性廢棄物處置設施安全的決策時，使用安全論證的實務經驗綜整；3.2 節為與淺地表處置設施相關的監管經驗及過程，彙整有關淺地表放射性廢棄物處置設施封閉後安全評估的監管審查的實際案例資訊；3.3 節為淺地表處置設施封閉後安全評估的經驗，目標是檢討淺地表處置設施封閉後安全評估的經驗，以及現有安全評估方法的使用；3.4 節為淺地表處置設施安全論證的溝通，目標是解決如何溝通安全論證，以及如何在溝通的過程中納入不同相關單位的問題；最後，3.5 節綜整各個小組得到之經驗，提出相關建議，詳如下述。

3.1 淺地表處置設施決策中使用安全論證

放射性廢棄物處置設施安全論證的主要內容如圖 3.1 所示，依順序包含安全論證背景說明、制定安全策略、針對處置系統進行描述、安全評估、制定限制或控制條件，及安全論證之論述整合，同時還需考量不確定性的管理、進行反覆運算及最佳化設計。安全論證為建造淺地表放射性廢棄物處置設施的主要決策基礎。處置設施於每個階段的發展，將隨時間持續

演變或更新安全論證，為下一階段決策時，更新的安全論證具有可辯護性。

因此，本節重點為整理「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，第一工作小組討論之主題，即淺地表放射性廢棄物處置設施安全架構內的決策中，使用安全論證的實務經驗綜整。參與此小組討論之參與者來自設施經營者、監管機關、安全評估人員以及參與安全論證相關決策的其他人員。負責此議題之工作小組調查安全論證如何用於幫助會員國進行廢棄物管制計畫做出決策的真實案例，依據的案例及 IAEA 現有的導則。工作小組透過上述調查，最後綜整在決策中使用安全論證的經驗及教訓，這些成果主要受眾為為放射性廢棄物處置之設施經營者，以及參與安全論證開發的其他組織及專家，這些資訊還可以給參與審查的人員及負責制定驗收標準人員提供幫助。本節首先針對淺地表處置設施決策過程中，一般需考慮之因素，例如決策時各組織單位的角色及其職責、決策時的不確定性、安全論證與決策之間的關係及相關風險等進行說明，接著針對決策所涵蓋的領域進行較詳細的說明，包含(1)選址；(2) 場址特徵化；(3) 設施設計；及(4) 廢棄物接收標準(Waste acceptance criteria, WAC)。

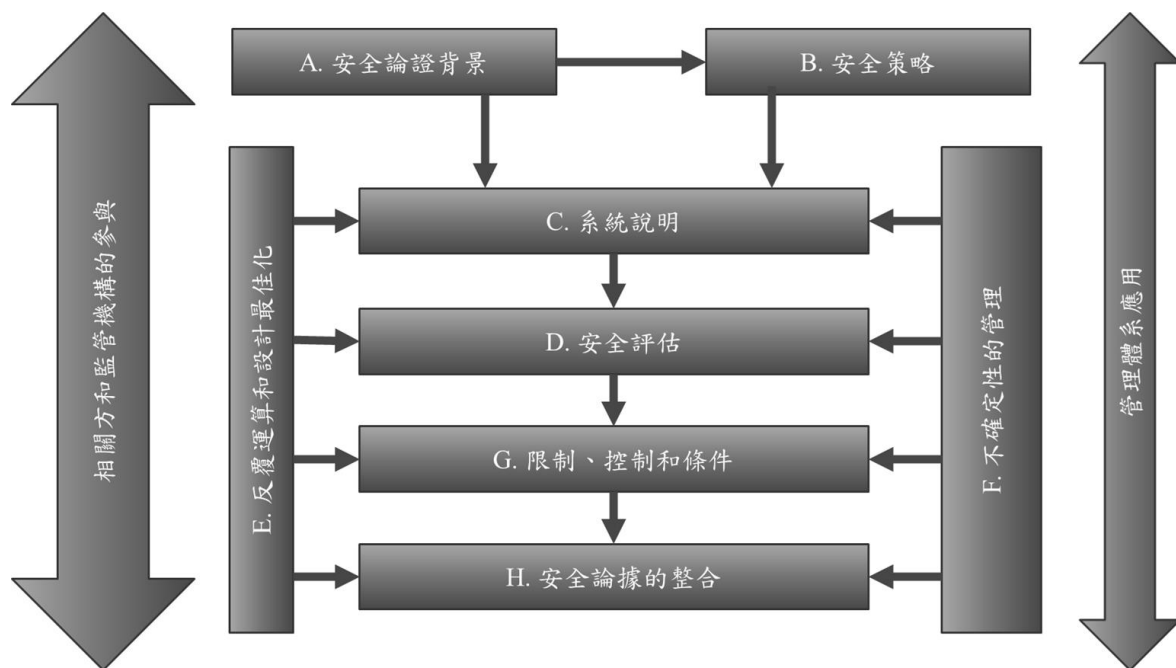


圖 3.1 放射性廢棄物處置設施安全論證的主要組成(IAEA, 2024)

3.1.1 決策過程一般需考慮之因素

決策為多種選項中進行選擇，決策標準為決策尺度，有些決策標準是固定的，除非有具體、可辨的理由，否則其不得超過其值(圖 3.2(a))。例如，淺地表處置設施的重要決策標準包含劑量及風險。反之，安全評估中為決策指標的組合，例如，降水、地下水梯度、岩層滲透性、孔隙率及吸附特性之組合，這些組合影響放射性核種從設施到自然環境的傳輸評估。此狀況下，決策通常不是基於一個指標，而是整體指標的組合，如圖 3.2 (b)所示。

最終目標是一個可接受的安全論證，IAEA 在 SSG-23(IAEA, 2012)中定義安全論證應包含什麼內容，並分析安全論證中可以包含的論點類型且有據可查。安全論證為假設及建構安全評估的基礎，並提供與場址及設施相關之安全論證知識背景一致的參數。為此，需考慮一些影響決策時的因素，例如決策時的不確定性、安全論證與決策之間可能存在的關係、決策結果導致後續程序上之風險，以及決策時不同的角色與其應有之責任，本節究這些影響決策之因素進行說明。

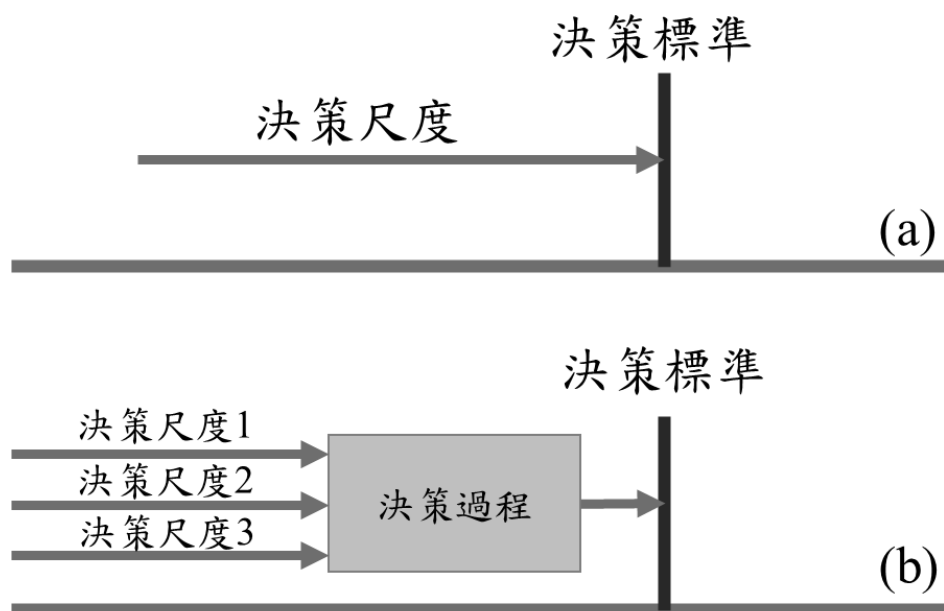


圖 3.2 決策尺度與決策標準之間的關係 (a)直接相關；及(b)綜合的決策標準(IAEA, 2024)

1. 決策角色及其責任

對於選擇場址、設施設計或定義 WAC，參與第一工作小組討論之人員有不同的經驗及看法。安全標準明確將這些決策定義為設施經營者的責任。對於第一工作小組的觀點，決策中使用安全論證是設施經營者的責任，未取得監管機關同意之前，任何 WAC 或設施設計都不能執行。設施經營者需要制定安全論證，並利用安全論證來選擇場址、定義 WAC、設計設施以及控制設施的廢棄物接收。不同階段中，處置設施開發的角色及責任在「TECDOC-1814」(IAEA, 2017a)中有詳細描述。可以區分三個主要角色：

- 政府對核活動及放射性廢棄物處置的決策負有全面責任；
- 設施經營者的角色是開發並營運一個安全的處置設施；
- 監管機關的角色是確保設施經營者是一個合適的組織，並以適當且安全的方式選址及營運。

2. 不確定性與決策

決策中的不確定性與技術不確定性不同，且不直接相關。舉例而言，給定的計畫中，決策對技術不確定性不敏感。因此，管理不確定性的關鍵是關注其對決策的影響。與場址選擇、設施設計、WAC 建立及場址特徵化相關的不確定性源於許多因素，大致可分為情節不確定性、模型不確定性與參數不確定性。

(1) 情節不確定性

情節可以用來表示處置系統未來可能的演變，通常被描述為特徵、事件及過程 (features, events and processes, FEPs) 組成的集合或系列。場址選擇、WAC、設施設計及場址特徵化的決策可以與情節的考量相關，即使設施條件預期不會隨時間改變。依據第一工作小組成員所得到的經驗發現，做出決策時，雖然會對未來可能發生的情節進行一些考量，但這些考量大多並未被明確地表達或記錄下來，且主要依賴於主觀判斷或經驗，而非基於量化數據或系統性分析，僅有少數決策受到安全評估中對情節的明確、結構化及定量評估的影響。

(2) 模型不確定性

概念模型是一組用於描述系統的定性假設。這些假設通常至少涵蓋系統的幾何形狀及尺寸、初始值、邊界條件、隨時間的變化，及相關的物理、化學及生物過程與現象的性質。

(3) 參數不確定度

參數被定義為安全評估的輸入源，例如水力傳導率(hydraulic conductivity)。第一工作小組考慮所有情況下，皆依賴保守論來應對參數不確定性。「TECDOC-1380」(IAEA, 2003)中也是採用了相同的方法。保守性可能會為安全評估結果及相關 WAC 提供一定程度的信心。

3. 安全論證與不確定性

最關鍵的不確定性是在安全論證中發現，但在安全評估中未量化的不確定性。安全論證透過研究來定義及管理不確定性，決定收集什麼資料、哪裡收集資料、使用什麼方法收集資料，並在整個資料收集及分析過程中確保充分的品質保證與控管。

4. 處置設施各個發展階段

第一工作小組所討論的決策議題幾乎涵蓋所有的廢棄物處置設施及安全論證開發的所有階段，包含設定與調整 WAC，這一過程可能會在選址階段之前開始，並持續到設施封閉階段。其中，程序性的風險和 WAC 的設定過程是在整個處置過程中，工作小組重點討論的議題。程序性風險指的是在設施發展初期時所做的決策，可能在後期需要撤回並帶來負面影響。設定 WAC 是最常見的程序性風險例子。設定 WAC 時需要考慮接下來的每個階段的影響，並確保不會在後期需要對廢棄物進行重新包裝。WAC 設定過程的部分，在場址選擇和安全論證尚未完成時，必須使用初步的 WAC 進行廢棄物處置。隨著場址選定和設施發展，初步 WAC 需不斷審查、更新和精細化。其中，WAC 可能需要根據幾個要求進行調整，例如接受新的或更改現有廢棄物處理流程、設施設計的變動或址和廢棄物特徵知識的提升，逐步改進安全論證等。因此，持續調整 WAC 避免在後期設施發展過程中需要重新包裝廢棄物，並確保隨著設施安全性提高而逐步擴展 WAC，為在處置設

施的所有發展階段中重要的考量因素之一。

5. 與決策過程相關的方法及文件

決策可以透過專家判斷或遵循正式的決策過程來完成。遵循被記錄的正式決策過程之優點，可以確定影響決策的關鍵參數及因素。許多外部因素，例如成本及民眾接受度，可能會影響決策。其中，正式的決策過程最常用於選址。外部因素是否真正影響決策，在某種程度上取決於決策是否是安全評估的直接結果。例如，從安全評估中得出的活性限度，在所有案例中都未因考慮外部因素而更改。對於沒有使用安全評估的決策，專家的判斷被用於權衡這些外部因素。

6. 解決程序性風險

程序性風險源於做出的決策可能在以後需要被撤銷。整體而言，也許最大的程序性風險是有關放射性廢棄物處置的政策或法規的變更。此類變更在「PRISM」及「PRISMA」計畫中，被辨識為是最重要及最頻繁的程序性風險。政策及法規變更之後，選址可能是具有最大風險的決策。選址完成後，撤銷或修改後續任何決策步驟可能帶來較低的程序性風險，但仍可能導致額外的成本、計畫延宕，以及可能失去民眾信任。設置 WAC 可能會帶來重大的程序性風險，因為在整個廢棄物處置設施的開發過程中，WAC 可能會發生變化。所有討論中，基於保守的參數及假設來設定 WAC 可以最小化因場址理解變化而產生的程序性風險。因此，保守參數及假設需要得到證明。

3.1.2 決策過程的詳細說明

本節針對場址選擇、場址特徵化、廢棄物接收標準及設施設計的決策有更詳細見解。上述之領域由工作小組提供之樣本進行描述，包含替代方案、決策指標、決策標準及決策與安全論證之間的關係，整理於表 3.1。

1. 選址

工作小組匯集資訊後發現，每個範例場址都至少包含兩個階段，第一階段為確定候

選場址的初步名單，並篩選出部分場址，最後選出候選場址。第二階段針對這些候選場址進行調查，確認場址是否可用於淺地表處置。此方法通常參考 IAEA 安全標準系列「SSG-29」(IAEA, 2014)。另外，工作小組發現，選址過程幾乎沒有人支持尋找「最佳」場址，原因為難以證明該場址為最佳場址，且不同場址及設施設計的組合，可以提供等效的場址安全性，表示不需要「最佳」場址即可達到安全標準，而是尋找結合場址特徵化、設施設計及 WAC 所提供足夠安全性的「可接受」場址。

2. 場址特徵化

場址特性描述包括地質學、水文學、地球化學、構造學、地震活動、地表過程(例如侵蝕、洪水、山崩)、氣象學及與人類活動相關的特徵(IAEA, 2014)等。其中，有關場址特徵化的決策，例如支持安全評估建模需要哪些資料，需要決定收集哪些類型的資料(例如水文、地球化學、地球物理學)、在哪收集，以及何時完成特徵描述。

3. 廢棄物接收標準

確定廢棄物活性限度是廢棄物接收標準決策的優先事項。因此，工作小組回顧過去使用的安全論證來確定 WAC 的方法。活性限度依據「TECDOC-1380」(IAEA, 2003)中描述的方法來確定。此外，安全論證中還定義長半衰期放射性核種的最大可接受量、廢棄物存量的限制、所有廢棄物的包裝標準、廢棄物包件的數量限制、廢棄物包件中的空隙限制及放射性核種的濃度限制等。安全論證及安全評估可以用於管理廢棄物接收，確保任何新的廢棄物都符合 WAC。另一方面，安全論證還可對現有設施之廢棄物接收進行最佳化，這對於容量有限的設施至關重要。

4. 設施設計

有關設施設計的決策，包括(但不限於)處置設施覆蓋層的類型及設計、場址的布局及方向、回填材料的選擇，以及廢棄物包件配置。大多數情況下，設施設計決策重點在於考慮可能的設計選項及工程替代方案，例如限制水流入的措施(如覆蓋層設計) 及保持水遠離廢棄物罐的措施。

表 3.1 第一工作小組對每個領域的決策描述(改自 IAEA, 2024)

	備選方案	決策指標	決策標準	決策與安全論證之間的關係
選址	- 篩選潛在淺地表處置設施場址。 - 選定場址後，決定建造處置設施的確切位置。	不同國家之間有普遍共識： - 自然指標：場址對放射性核種的隔離能力，包括降水率、滲透率、地下水流速等。 - 人為指標：人口密度、運輸時間、距離及礦產資源等。	民眾接受度納入對所有決策，但作為一個強制性標準，仍存在不同意見。	選址通常先於安全論證制定之前。選址時大多缺乏場址特性描述的數據。
場址特徵化	特徵化的備選方案包括：鑽孔的位置、鑽孔深度、調查過程(例如化學、水文、地球物理)、以及現象學調查(例如斷層、洪水、自然資源開採)。	決策指標與選址非常相似：地質情況、地表侵蝕速率、地震活動的頻率及規模、地下水流速率及方向，以及土壤及基岩的地質特性。	對於前幾節列出的大多數指標，無法設定標準，因為這些指標組合可以產生好幾種相同的放射性核種傳輸速率及濃度。因此，對指標設定標準幾乎沒有意義。	決策重點在於其完整性、品質，或可防禦性。
廢棄物接收標準	採用 TECDOC-1380 中描述的方法，確保潛在劑量或風險在場址符合安全標準。	- 每個包件、處置窖或處置設施的放射性活度限值。 - 放射性核種的數量、半衰期及廢棄物包件的壽命等。	由設施經營者使用多種指標進行設定，以便在遵守風險及劑量標準的同時營運設施。	- 放射性核種活度是安全論證中安全評估的直接輸入源，通常使用 TECDOC-1380 中描述的程序。 - 廢棄物接收標準可以直接作為安全評估的輸入源。例如，淺層處置設施通常對可接受的長半衰期放射性核種的數量有一定限制。
設施設計	預先定義設施設計，並形成安全評估的基礎： - 標準水泥封存處置單元(Monoliths)間的距離、填充可滲透材料。 - 處置系統的排水設計。 - 處置設施的尺寸、形狀、坡度、結構及方向。	表面排水的速率及方向、處置窖、水泥封存處置單元與廢棄物包件之間的距離、接觸廢棄物包件的地下水流量及速率等。	- 可以依據決策目標使用多種指標的組合。例如，不同類型設計(處置窖、筒倉)的選擇。 - 這些標準可能基於最佳可用技術、成本、風險及劑量等。	- 大多直接作為安全論證及安全評估的輸入源。 - 少數情況下，安全評估才會用於評估多種替代設計，以尋求最佳設計。 - 最佳化目標可以是劑量及風險限制、系統的改善或成本。

3.2 與淺地表處置設施相關的管制經驗與過程

管制審查實際面臨的挑戰為安全評估過程的時間及迭代特性(IAEA, 2011)。處置設施的各個階段，隨著提出設施計畫、許可、建造、營運及封閉，需要對安全論證及安全評估進行多次審查。審查的技術挑戰與自然及工程系統建模的不確定性有關，特別是考慮場址封閉後很長的時間段。鑑於安全評估對管制決策的重要性，監管機關審查安全評估的過程必須系統化，並基於明確的管制要求及導則，及整個過程中與相關機構進行有效溝通的重要性。

放射性廢棄物處置設施的安全論證及安全評估的管制審查，主要是為了協助監管機關在授權處置設施時做出決策。管制審查重點在於確定安全論證及安全評估是否證明處置設施符合安全目標及原則，以及管制要求、標準及指導方針。這類管制審查與科學同儕審查不同，但往往會得到科學同儕審查的補充，這些審查可能專注於特定的科學及技術領域，或與國際標準及實例的比較。有效的管制審查及其溝通還可以大幅增強民眾對管制過程及處置設施安全的信心。因此，本節主要目標是整理第二工作小組負責的工作中，有關淺地表放射性廢棄物處置設施封閉後安全評估的管制審查的實際案例。本節討論如何進行審查以及如何判斷安全評估的可接受性。

3.2.1 管制職責與流程

制定審查淺地表處置設施的安全論證及安全評估的管制功能及流程時，可以參考以下這些重要考慮因素其依據之導則，以獲取更多資訊。參考文獻(FANC, 2016)強調考慮行政因素，例如明確定義角色與責任、溝通計畫、文件期望、分級方法，因為這些考慮對於成功的計畫至關重要。

1. 角色與職責

規劃、開發、營運及監管處置設施可能涉及大量組織。因此，有必要從處置設施開發過程的初始階段起，明確定義所有相關組織的角色與責任。「SSR-5」(IAEA, 2011)提供不同組織需要履行之責任要求，「GSG-13」(IAEA, 2018)進一步提供確定角色與責任時應考慮的其他細節。

儘管有導則規定三種主要組織類型(即政府、監管機關、設施經營者)的角色，但由於這三種職能中的每一種職能都涉及多個組織。例如，軍事、工業、能源、衛生或原住民的政府組織可能都在放射性廢棄物方面發揮一定的作用。也可能存在核安全、環境保護、軍事及其他領域的不同監管組織。因此，處置初期須確定每個單位的角色與責任。監管機關可能會為設施制定管制策略，提供關於如何及何時審查是否符合規定、技術與環境條件以及授權條件的指引，並確定可能需要重新評估安全性的情況。策略中還應辨識出需要或不需要正式管制審查。

2. 溝通

溝通是管制過程的關鍵要素。IAEA 安全標準「GSG-6」(IAEA, 2017b)提供關於與廢棄物處置相關單位的溝通與協商建議。國家政策、策略或法規需要明確規定相關單位的角色，並明確定義參與過程的時間及方式之要求。還可規定報告要求，包括正式管制審查計畫及民眾會議與民眾審查機會的時間安排。從處置初期明確並同意這些方法可協助避免設施使用期間出現溝通不順或誤解。

3. 分級方法

「GSG-13」(IAEA, 2018)提供管制能力及過程執行分級方法的建議。分級方法旨在確定國家在各階段的情況下可達到的水準需與設施及處置活動相關的風險相符。初期階段可用資訊較少，安全評估方法及相關審查可能非常簡單。隨著設施的發展及更多有關廢棄物、場址、設施設計及營運計畫的資訊，安全評估的詳細程度預計也會增加。

4. 要求、標準及導則

「GSG-13」(IAEA, 2018)強調，明確的管制要求、標準及有關廢棄物處置安全的導則對於安全評估的制定及審查都至關重要。明確的要求與標準有助於安全評估的設施經營者建立準確的評估背景，並在進行安全評估時專注於關鍵的管制問題。「GSG-13」(IAEA, 2018)也指出，監管機關可能需要制定導則，詳細說明設施開發每個階段需提供的資訊。管制驗收標準的使用使審查人員能夠決定安全評估文件是否滿足最低要求。

5. 法規管制及條件

安全論證、安全評估及相關的許可條件，很大程度上確定處置設施的主要管制與要求。例如，為處置設施確定限值、管制及條件時，安全評估被用來確定廢棄物包件及其放射性核種的要求，無論是對於單個包件還是整個場址。許可條件涉及整個安全論證，可以是幾種類型，可以來自幾個來源，包括：

- (1) 確保處置設施設計、施工、營運及封閉符合安全論證假設；
- (2) 存量控制或廢棄物接收標準；
- (3) 品質保證要求；
- (4) 場址特徵化要求；
- (5) 設施監測要求；
- (6) 研究與發展要求；
- (7) 安全改進計畫，包括任何合理的干預措施；
- (8) 定期提交更新資訊的安全論證。

3.2.2 處置設施每個階段之安全論證的管制審查

處置設施的開發分為多個階段，安全論證的功能為支持從一個階段向下一個階段的決策過程。支持安全論證的安全評估要素可以分為以下幾類：可行性、場址與設施的功能、對工作人員與環境影響的安全評估，以及管理系統的評估。安全論證及安全評估的管制審查與每個決策點密切相關，並將成為建立每個決策信心的重要因素。

設施開始使用時，監管機關需要有效地溝通計畫，哪些階段進行正式審查及每次審查的預期需要哪些資訊。政府、設施經營者及其他相關單位都需要從一開始就被告知，以確定每次審查中的角色，並期望對每次正式審查的詳細程度保持適當及一致。初期階段，監管機關可能會發揮更正式的作用，例如諮詢機構中擔任代表並為相關法案的建立提供意見。隨著計畫的進行，監管機關將越來越頻繁的針對安全論證進行審查。審查過程需要從設施使用期間的初期階段開始就進行規劃與管理。「SSG-29」(IAEA, 2014)包含管制審查的具體指引。雖然

整個過程中需要與相關單位進行持續的溝通，但相關單位的參與程度會在整個設施使用期間改變。因此，必須先決定不同階段相關單位的角色，且需要一開始就傳達這些決定，以確保角色被理解。

設施使用初期階段，場址具體設計尚未可用之前，使用不確定或通用資料集進行詳細的封閉後安全評估需謹慎。監管機關可預期輸入的資料及假設可能會改變，審查報告需要反映這種預期。由於溝通策略，讓民眾了解這些過程至關重要。此外，從初期階段起，需要確保設施經營者分配並承諾提供適當的資源給監管機關進行審查。監管機關還需要定義並執行適當的審查計畫，以確保在廢棄物處置設施發展的各個階段分配足夠的資源來審查安全論證。監管機關需要建立並發展必要的研究能力，以支持其專業知識並確保在適當的時間內可用。後期階段，監管機關將必須做出決策並透過明確的法律程序，涉及授權設施經營者進入下一階段。監管機關將制定並頒發授權的任何必要條件。例如，必須按照安全論證中評估的設計及材料建造設施，或對可處置的廢棄物清單設置特定限制。

廢棄物處置設施的每個階段，將對安全論證及安全評估進行多次審查。「SSG-23」(IAEA, 2012)中討論重大審查的時機。這些重大審查將涉及最重要的工作，並且可能需要跨多個政府機構、監管機關及設施經營者進行協調。另外，還可能進行外部同儕審查。圖 3.3 展示設施在各個階段，管制監督與管制對話考量的視角，但實際可能因會員國而異。

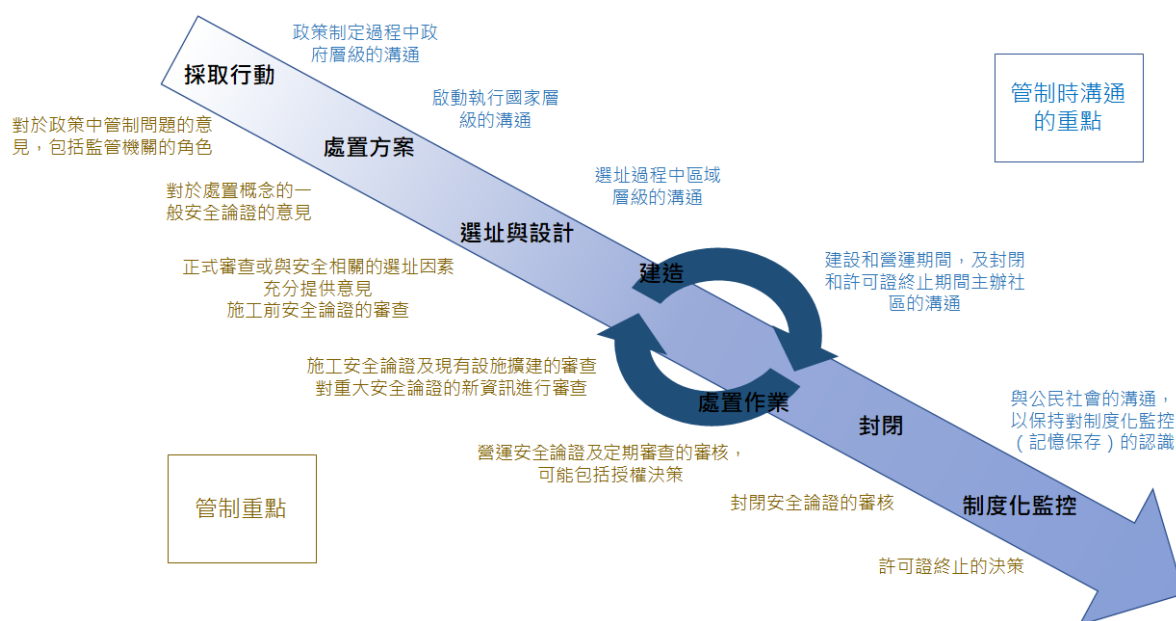


圖 3.3 處置設施各個階段管制機關角色與溝通的範例(IAEA, 2024)

3.2.3 安全論證變更的管制審查

1. 安全論證的變更

處置設施的發展是一個動態過程，涉及處置設施各個階段的變化。最初的安全論證通常是依據有限的資訊進行制定，並且會存在許多不確定性。設施的建造及營運過程將獲得新的資訊及知識，從而提高對系統及現象的科學理解。「SSG-23」(IAEA, 2012)中說明對營運階段變化的預期。可能發生的一些具體變化範例包括：

- (1) 設施設計：包含處置能力、工程覆蓋設計、擴大設施佔地面積、新的處置裝置及混凝土成分等。
- (2) 廢棄物包件：新型容器(例如纖維增強混凝土取代鋼筋混凝土、不銹鋼)。
- (3) 廢棄物形式、基質、處理或調節過程：包含新型廢棄物基質(例如熔融固化廢棄物、高壓壓實廢棄物、瀝青廢棄物、旨在吸附關鍵放射性核種的水泥漿)、新型固化材料(即主要成分是礦物源材料的地質聚合物(geopolymer)或塑膠等)及 WAC 的變更等；
- (4) 異常監控資料：例如地下水資料顯示工程障壁系統的長期完整性有潛在問題、放射性核種意外外洩或水化學的變化顯示潛在的危險。
- (5) 廢棄物處理意外：例如處置後未經批准的廢棄物 (超出 WAC 限制)。
- (6) 安全情節下不考慮的自然現象：包含洪水、海嘯、龍捲風、火山活動或降水量增加等。
- (7) 新的研究成果：例如工程障壁系統的長期退化現象、更了解吸附值或改進地下特性的特徵等。
- (8) 新的場址特徵：例如施工過程中發現新的地質特徵或進一步的探勘更了解水文地質學。
- (9) 設施使用期變化：例如需要延長營運期限。

(10) 需要接收其他設施的廢棄物：例如計畫外之廢棄物類型(即混合廢棄物)或新設施(例如新型研究器)產生新類型廢棄物。

(11) 管制架構的變化。

2. 監管機關解決安全論證變更的方法

處置初期建立規範流程對於有效應對安全論證變更而言至關重要。例如，哪些審查需要多個監管機關的參與？民眾何時參與審查、觀察審查，或僅接收審查文件？不同程度的變更將會發生。考慮變更的累積如何影響安全論證及安全評估至關重要。一些獨立考慮時可能看似不重要的個別變更，一起考慮時可能變得重要。另外，變更的文件記錄至關重要，因為製作安全評估及安全論證是一項重大工作。因此，需要一個與主要報告分開的文件系統來報告並追蹤變更。對於審查特定變更時考慮因素包含：

(1) 設施經營者與監管機關之間就變更進行初步討論，目的包含：

- A. 評估變更安全論證的可接受性(例如，快速確定變更對監管機關是否可接受，或者在進一步評估後可能可接受)；
- B. 討論需要調整許可證的必要性；
- C. 確定是否需要立即向民眾通報，或可將其作為例行計畫報告進行記錄；
- D. 就變更的時間架構達成協議，以及安全論證的哪些部分需要在實施變更之前進行調整(例如，WAC、設計要求)，哪些部分可以稍後更新等。

(2) 設施經營者提供相關文件：例如詳細解釋變更，如有必要，進行部分安全評估，或指出安全論證中需要修改的具體部分。

(3) 正式的問題過程直至批准。

(4) 執行變更並修改安全論證。

3.3 淺地表處置設施封閉後安全評估的經驗

安全評估是對與保護及安全相關的所有方面進行評估，對於淺地表處置設施，安全評估提供整個處置系統及其影響的分析。對於放射性廢棄物處置而言，通常集中關注於封閉後安全評估，因為對人類及環境的影響可能會發生在設施封閉很長時間的監管期之後，且營運中之安全的評估相對簡單且直接。封閉後安全評估主要基於「FEPS 方法」，其中「FEPS」指的是特徵、事件及可能直接或間接影響處置系統，並影響從處置廢棄物中釋放的放射性核種遷移的過程。

依據此基礎，IAEA 之「ISAM」計畫提出淺地表設施安全評估的標準方法(圖 3.4)。首先，針對場址進行背景評估，接著，針對場址之特性進行處置系統的描述，並制定情節探討其合理性，最後透過模型分析，將分析結果進行解釋與比較，確認安全論內容證是否充足，假設安全論證不夠充分，將進一步對其修改。「ISAM」計畫也引入新概念，例如為每個處置方案制定描述，包括估計已確認的安全功能，其預期的使用壽命或性能，這些安全功能如果被明確定義，則評估結果相對容易掌控。該方法已成為淺地表放射性廢棄物處置設施封閉後安全評估的國際標準。隨著「ISAM」計畫開始制定安全論證的概念，「ISAM」的安全評估方法需要修訂。「SSG-23」(IAEA, 2012)中，IAEA 將安全評估納入安全論證架構內(圖 3.1)。

因此，第三工作小組的目標是檢討淺地表處置設施封閉後安全評估的經驗，以及現有安全評估方法的使用。第三工作小組首先針對淺地表處置設施封閉後安全評估之議題進行討論，首先確定幾項認為相對重要的主題。接著，第三工作小組針對其中兩項被認為更重要之主題進行詳細的討論，詳如下述。

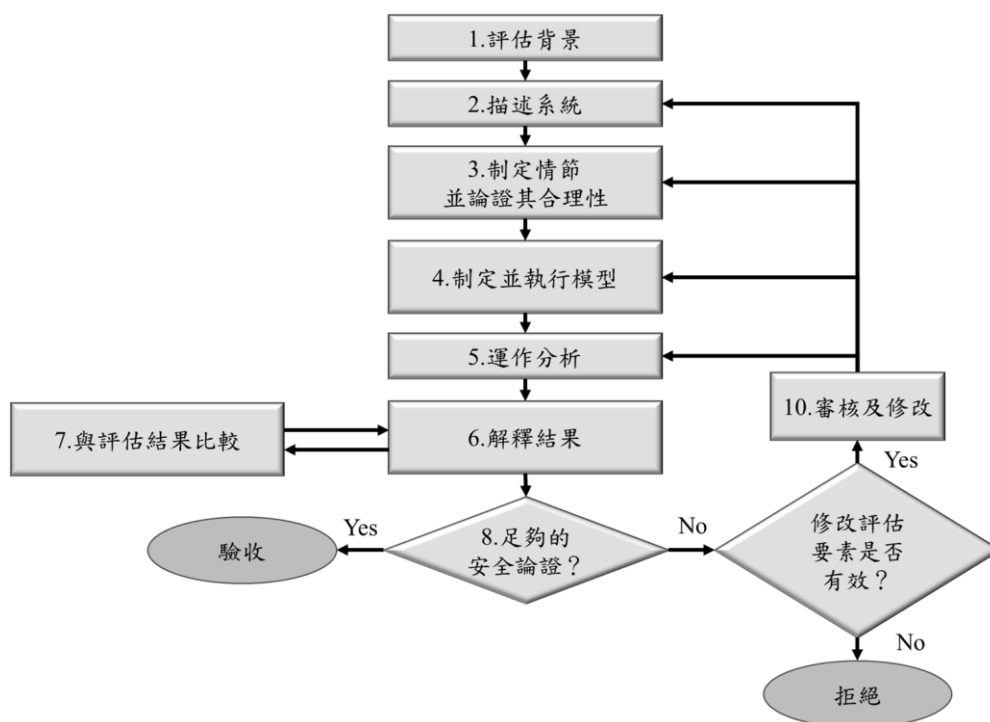


圖 3.4 「ISAM」計畫中封閉後安全評估的方法(改自 IAEA, 2024)

3.3.1 常見且相對需要解決之主題

工作小組透過討論後，確定認為相對重要的主題，這些僅是工作小組整理出相對重要的主題，但並未在該報告得出結論，如下：

1. 評估放射性與非放射性影響

工作小組對於管制過程中觀察發現，非放射性對廢棄物處置的影響逐步納入封閉後安全評估之趨勢。然而，評估放射性與非放射性影響的方法可能有很大不同(例如，空氣中以濃度之概念評估化學毒性，而處置設施中以劑量的概念評估放射性)。

2. 修訂安全評估

考慮到的新資訊、處置設施變更及計畫的修正，安全評估需隨時間推進而進行更新，並於決策中使用修訂後之評估結果(例如設施設計、廢棄物驗收標準)。安全評估修訂可能是由多種原因引起，例如地質條件比預期更差，進一步導致廢棄物處置安全性的問題。安全評估的修訂也將進一步改變安全論證，這些變化可能需要被重新檢視並修正。例如，

新的資訊導致以前不存在的限制，或者以前的限制被鬆綁。

3. 如何應用分級方法進行廢棄物處置的封閉後安全評估

處置設施安全評估與決策通常關注最佳化及盡可能合理實現的兩個原則。提高知識及開發更複雜的模型可能非常昂貴，因此，決定在哪花費資源時必須找到平衡。

4. 具體廢棄物類型

處置設施與系統是基於廢棄物類型進行設計，這些廢棄物類型佔據處置場最大的部分。但特定廢棄物類型的管理，例如具有不同物理或化學特性的廢棄物或非標準廢棄物包件，可能需要進一步分析。

5. 長期履行安全功能

安全功能通常與某些物理特徵的設計要求有關，例如廢棄物包件或工程障壁。這些設計通常可透過監控或重新建立安全功能的有效性。然而，在封閉後階段，需假設不能透過人為干預來重新建處置設施的安全。因此，處置系統將在多長時間內履行其安全功能是一個值得關注的問題。

6. 應對長期變化

封閉後安全評估中的許多假設(例如關於氣候、人類習慣或水文地質)都是基於當今的知識及資訊。然而，封閉後的安全評估必須處理很長的時間尺度，在此期間可能會發生重大變化。第三工作小組指出，有必要考慮處置系統發生各種變化的可能性。

7. 正確解釋及使用封閉後安全評估

第三工作小組指出，進行不同情節的評估時，理由並不總是非常明確，這種情況與選擇較保守或較現實的程度有關。

8. 解決與管理不確定性的方法

論壇參與者的回饋顯示，國際間沒有足夠詳細地解決不確定性管理及敏感度分析之標準。

9. 長半衰期放射性核種的管理

淺地表處置設施通常是針對含有短半衰期放射性核種的極低放射性廢棄物及低放射性廢棄物而設計。工作小組參與者指出，這些廢棄物類別也含有一些長半衰期放射性核種，且長半衰期放射性核種可能對處置系統設計及廢棄物接收產生重大影響。

10. 選擇性納入安全評估的放射性核種

安全評估基於處置系統模型，該模型提供現地環境的簡化特徵。某種程度的簡化是不可避免的。例如，可用資料的詳細程度在模型上可能不完整。因此，如何選擇在封閉後安全評估中需要考慮哪些放射性核種，以便簡化計算，而不會遺漏可能對劑量或風險很重要的放射性核種是個值得關注的問題。

11. 了解工程障壁在封閉後安全評估的變化

工作小組指出，封閉後安全評估中，完全掌握工程障壁及其材料(例如鋼、混凝土、黏土)的逐漸演變、劣化或長期維持性能存在一定程度的困難。

12. 情節生成

安全評估與安全論證中應用「ISAM」報告提出之方法進行情節開發已經累積豐富的經驗。然而，「ISAM」報告自發布以來，最佳的情節開發的已經發生變化，而 IAEA 的各種導則及報告尚未反映這些發展。

3.3.2 工作小組重點討論之議題

1. 處置設施對於特規之廢棄物類型處置方法

第三工作小組重點討論議題之一，著重避免特殊規格之廢棄物類型可能不符合 WAC，並成為無法處置之廢棄物。潛在的解決方案，例如改變廢棄物包件或提高封閉後安全評估模型的真實性與詳細程度。

淺地表處置設施通常有兩種類型的限制，其一為處置設施接收廢棄物及放射性核種

的整體能力的限制，其二為在較小範圍內對廢棄物包件中放射性核種濃度的限制。工作小組整理並討論了以下經驗：

- (1) 英國 Dounreay 處置場：由於最初的安全論證並未對特定放射性核種有足夠的處置容量，因此正在重新審查許可證。設施經營者需要修改安全論證，以便修改 WAC，從而允許進行處置特定放射性核種。
- (2) 英國 Drigg 處置場：該處置場有一套處理特殊廢棄物的系統，允許在處置設施的總容量及各個處置窖的容量仍能滿足相關限制的情況下接納這些廢棄物，確保不會產生無法處理的「孤兒廢棄物」。安全論證的更新提供修改設施容量的機會，但如果發現不利條件，也可能導致容量減少。
- (3) 西班牙：應對類似問題，西班牙的策略是以不同的方式管理廢棄物，而非更改處置設施的 WAC。例如強化設施之工程障壁，以提升設施之安全性能，從而提高處置設施對不同規格之廢棄物的接受程度。此外，更精確的了解廢棄物特性通常也能讓更多的廢棄物被安全處置，例如經過重新評估後，發現廢棄物實際上並未含有高放射性核種，進一步可降低對該類型廢棄物之管制程度。
- (4) 韓國：處置設施的容量限制已根據廢棄物清單中的變化(例如新增的廢棄物及廢棄物的異質性)進行了調整。對於之前在封閉後安全評估中採用的高度保守假設，尤其是透過考慮廢棄物形態的特性來允許設施容量的增加，這些假設得到了處理。這種方法使得設施的容量得以提高，更好地適應當前的廢棄物管理需求。

2. 使用「ISAM」評估方法的相關經驗

工作小組認為有必要更新「ISAM」評估方法，以反應實際經驗，同時也需適當的考慮其他相關計畫的發展，例如「Scenario Development Workshop Synthesis, Integration Group for the Safety Case」報告(NEA, 2016)，該研討會主要目的為提供一個論壇來檢視及討論情節發展方法及其對最近安全論證發展的貢獻。以下就第三工作小組針對「ISAM」評估方法之討論進行說明。

(1) 評估背景

安全評估的背景(參閱圖 3.4 中的步驟 1)決定了系統描述所需的細節程度，並且可進一步影響情節的數量等其他方面。近期的安全論證及安全評估流程圖將評估背景放置在整體方法中的不同位置。需要明確的評估背景與進行安全評估計算的原因，即計算所要回答的具體問題。了解為什麼需要進行安全評估計算非常重要，在一個安全論證中，可能會提出多個問題，這些問題會需要不同的計算。因此，可能不存在單一的評估模型，而是一系列相關模型。理解計算結果將如何在決策過程中被使用，也是評估背景的重要一部分。

(2) 系統描述

系統描述(參閱圖 3.4 中的步驟 2)是一種現象學描述，達到適當的層次以便進行安全評估計算。為了建立系統描述，科學家需要與安全評估人員及工程師合作，確保最終的描述涵蓋系統中對評估重要的特徵。因此，這一步驟需要一個跨學科的團隊，單憑一個人無法完成評估。

提供系統描述的專家必須對整個系統及安全評估過程有全面性的了解，才能理解各個部分如何融入整個系統中。不同學科之間的交流平台非常重要，專家們必須互相交流。需要確立邊界條件，並確保描述一致性。系統描述還必須包括系統隨時間的預期變化、需考慮的過程以及不確定性。

安全論證中的安全策略(圖 3.1 中的 B 步驟)會影響系統描述，因為其支撐安全功能的發展，而安全功能進一步幫助定義對安全評估重要的組成及理解安全所需的重要屬性及不確定性。

(3) 情節發展

要生成情節(參閱圖 3.4 中的步驟 3)，所有工作小組一致認為考慮「ISAM」評估方法是進行安全評估的良好基礎。工作小組發現，不同設施的情節生成方法有所不同，例如，比利時 Dessel 淺地表廢棄物處置設施的封閉後安全評估情節基於現象學分析；西班牙 El Cabril 淺地表廢棄物處置設施及立陶宛淺地表處置設施的封閉後安

全評估情節按照「ISAM」方法進行開發；法國的 CSA 與 CSM 處置設施基於安全功能分析生成情節。

「ISAM」方法圖(圖 3.4)中未將特徵、事件及過程(FEPs)明確列為安全評估的輸入。第三工作小組認為，如果更新方法圖時，將其列上可能是較正確的選擇。如前一段及提的西班牙案例，El Cabril 處置設施的極低與低放射性廢棄物的安全評估近期根據「ISAM」方法進行修訂。參與分析的人員認為他們能夠遵循「ISAM」方法，部分原因是他們已有 FEPs 篩選與情節開發的背景知識，僅憑「ISAM」報告無法完成分析。

(4) 無意的人為入侵

人為入侵在封閉後安全評估中的處理方式因各國計畫的法律及管制框架而異。舉例而言，英國在評估中假設淺地表處置設施的人為入侵是一個可能事件，特別是在主動監管結束後。美國能源部假設將持續主動監管，因此認為人為入侵的概率較低。西班牙認為某些人為入侵情節具有較高的機率發生，因此在主要參考情節中考慮這些可能的影響。一些人為入侵可能對場址的演變產生短期或長期的影響。例如，比利時評估人為入侵的即時與衍生影響，以便單獨評估此類活動對處置系統影響。

(5) 模型的驗證與確認

「ISAM」方法圖(圖 3.4)中並未明確顯示模型的驗證或驗證步驟。俄羅斯進行模型評估會根據營運期間的地下監測資料進行校準。英國與法國則透過測試不同的處置系統並進行比較來評估模型的適用性。

(6) 不確定性及敏感性分析的處理與管理

「ISAM」報告中對不確定性的處理相對較少，「PRISM」及「PRISMA」報告中對不確定性處理的覆蓋也相當有限，主要集中在應該做什麼而非如何做。

比利時的經驗是將安全評估中的不確定性處理與不確定性管理分開。不確定性管理包括決定哪些不確定性可以在評估中處理，哪些不行，並且可能需要以其他方式進行管理。加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, NUSC)的

法規「REGDOC-2.11.1」中指出：「應對評估結果進行不確定性分析，以辨識不確定性的來源與重要性。此分析應區分以下來源的不確定性：A. 輸入資料或參數；B. 情節假設；C. 數學模型中的不精確性；及 D. 概念模型。」

總體而言，不確定性分析、敏感性分析及不確定性管理在現有國際標準中處理得不夠充分。此外，「ISAM」方法圖(圖 3.4)也可以升級，以進一步強調敏感性與不確定性分析。

3.4 淺地表處置設施安全論證的溝通

淺地表處置設施的設施經營者必須提出多份文件作為安全論證的一部分。安全論證是收集科學、技術、行政及管理方面論點及證據之核心，以支持處置設施的安全性。其中包括場址的適用性、設計、建造、營運、輻射風險評估，以及確保與處置設施相關的所有安全工作的充分性及品質保證。

安全論證還可作為處置場各項功能或評估的不確定性，這些不確定性需要在研究與開發活動中解決，以實現淺地表處置所需的安全性。另外，安全論證的內容還必須與參與淺地表處置設施的相關單位進行溝通。其中，透明度及開放性的概念是與相關單位進行溝通及諮詢的策略之基礎，基本要素包括資訊提供、主動溝通、願意傾聽及回應各種關切，並將其記錄的結果。

第四工作小組的目標是解決如何溝通安全論證，及如何在溝通的過程中納入不同相關單位的問題。相關單位進可能包括監管機關、民眾、非政府組織或任何其他對淺地表處置設施表達興趣的相關單位。

3.4.1 一般對於淺地表處置設施安全論證溝通的理解

1. 溝通基礎知識

為了有效及有效率地執行淺地表處置安全論證的溝通，最佳做法是制定溝通計畫，並進行持續監測與評估，以確定需要改進的領域。每個參與淺地表處置的官方機構都有自己的溝通計畫，但核心責任由設施經營者承擔。溝通計畫是正確解決安全論證溝通的一般方法、提出的具體問題，以及有效規劃、使用人力及財務資源的關鍵工具。制定任何的溝通計畫都有幾個基本步驟，包括以下步驟：

- 確定溝通目的及目標；
- 考慮背景，包括社會氛圍、國家框架及活動發生的背景；
- 確定對計畫感興趣但影響力較小的利益相關者(interest parties)相關方和與對計畫有利益或直接影響的利害關係人(stakeholders)分布圖；
- 制定關鍵資訊；
- 確定溝通機制及方法，包括建立溝通工具；
- 制定溝通計畫；
- 溝通計畫的執行；
- 持續監測與評估以確定需要改進的領域；
- 根據評估結果更新溝通計畫。

2. 良好的溝通習慣

論壇參與者提供的經驗，確定一些良好的溝通範例，包括：

- 良好的溝通技巧，例如傾聽各方意見、討論過程中具有同理心、清晰及自信。
- 利益相關者擔憂的問題可能不合理，因此可能無法透過嚴格的事實論點來解決這些問題。

- 有效的溝通需要建立信任，表示在可行及適用的範圍內讓利益相關者參與其中。
- 溝通活動與內容需要針對利益相關者進行客製化。
- 與民眾溝通的重要性永遠不應被低估，需要制定有效的溝通策略。
- 進行交流活動時，來自各個領域的不同學科的參與有助於進行溝通。
- 當利益相關者在特定領域意見分歧時，承認問題及關切的處理方式，或確定任何懸而未決問題的前進道路，可以表明對話的完整性以及各種觀點都已被考慮。
- 公開會議中，讓所有參與者都有機會表達自己的意見。
- 學校系統內的教育傳播，例如核科學的討論，建立相關知識水平。
- 資訊需要非常清晰、民眾能夠理解並及時傳遞。

3. 溝通問題與挑戰

有關放射性廢棄物管理及處置溝通的問題與挑戰包括：

- 放射性廢棄物管理與淺地表處置通常與其他活動相關。因此，在處理淺地表處置時，其他相關的活動可能會影響溝通，儘管溝通看似簡單，實際上對安全論證及處置設施的接受程度有影響顯著。
- 通常反對核能、因此也反對放射性廢棄物處置的利益相關者溝通時，這經常會影響到是否願意以開放的態度進行溝通。
- 協調各個官方機關時，監管機關需保持其獨立性，並與設施經營者分開，因為監管機關代表核能、輻射及環境安全的主要權威。
- 為了達成長期決策並建立穩定的國家框架，以促進處置設施的設立，需要有明確的政策。

3.4.2 與溝通有關的具體議題

1. 針對不斷發展的安全論證各階段的溝通策略

應在處置設施發展的初期階段就明確溝通策略，以確保活動妥善計劃與實施。包括：

- 國家層級協調淺地表處置設施的溝通；
- 針對「處置計畫」的目的及「什麼都不做」的後果進行溝通；
- 與利益相關者溝通法律要求及其責任；
- 建立處置設施過程的溝通；
- 民眾在處置設施建立中的角色。

論壇參與者一致認為，淺地表處置溝通最困難的階段可能是場址選擇。許多經驗教訓中，不少因民眾反對而失敗的場址選擇案例。因此，場址選擇似乎是溝通過程中最重要的一部分。溝通活動需要涵蓋廣泛的議題，包括政策制定、放射性廢棄物的產生、場址選擇標準、可能的處置設計、安全問題、許可流程與決策，以及與民眾首次互動時可能出現的任何其他問題。成功場址選擇案例顯示，建立靈活的流程非常重要。另外，論壇參與者表示，已宣布的活動因故延遲執行可能會對利益相關者建立信任與信心的過程產生負面影響。

2. 安全論證溝通中的角色與職責

地表處置設施的「建立」過程中可能涉及許多不同的官方機構，包括議會、政府、部會、監管機關、設施經營者、技術支援組織、廢棄物產生者、地方政府、運輸公司及產業內的其他公司。所有官方機關在淺表面處置設施的各個階段都可能參與安全論證的溝通。根據論壇參與者的回饋，各自的角色及責任包括：

- 政府負責傳達國家框架與決策。
- 設施經營者主要負責與監管機關的溝通，前者主要負責安全論證的制定，後者主要負責安全論證的審查及批准並支持安全評估。

- 設施經營者與民眾、市政府、地方團體及非政府組織的溝通中發揮更重要的作用。
- 監管機關向議會、其他政府或會員國提供資訊發揮更重要的作用。此外，監管機關或其他國家還有義務提供國際層面的資訊，以履行相關公約規定的義務。
- 技術支持組織中聘用專家確保提供支援安全論證的科學及技術資訊。
- 意識到溝通是一個互利的過程，民眾在安全論證的溝通中扮演重要角色，因為政府及監管機關可以接收民眾的意見，以便制定策略、政策、澄清或修訂。

3. 協調官方之間的溝通

官方機構之間，需要有良好的溝通管道，並在安全論證各階段溝通需達成一致，各個官方機構需酌情制定與協調各自溝通計畫。論壇參與者提到的其他例子包括：

- 監管機關、設施經營者及技術支援組織在溝通過程中的協調非常重要，以便找到最有效的方法，從而獲得利益相關者的信任。
- 從淺地表處置設施的安全論證準備及開發的早期階段，建立監管機關與設施經營者之間的對話至關重要，需要以正式及透明的方式完成，以便透過溝通建立信任，並同時保持必要的獨立性。
- 與多個參與審查及決策的監管機關協調審查。設施經營者需要與監管機關進行溝通，但這些監管機關也需要相互溝通，以更好地理解各自的角色以及相關文件，因為對於部分官方機構而言，淺地表處置並不是他們決策的常見議題。
- 雖然監管機關需要保持獨立性，但技術討論也很有價值。這一過程的溝通有利於在初期發現潛在問題，或法律及監管期望解釋的錯誤。
- 根據《跨界環境影響評估公約(Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context)》的要求提供資訊時，會員國之間的協調。

4. 與利益相關者建立信任與信心

雖然淺表面處置設施的風險不高，但對於沒有一定程度了解淺表面處置的人(特別是民眾)而言，通常會有一些安全顧慮。民眾會想知道處置設施將對他們產生什麼影響。有效的溝通以及建立信任或信心是民眾接受任何核設施的關鍵。例如：

- (1) 民眾最有可能信任一個獨立的監管機關，該機關具備透明的決策過程及可追溯的過去記錄來證明其可信度。許多論壇參與者認為，設施經營者可以透過證明其完全遵守監管機關的要求來建立民眾的信任或信心。
- (2) 選擇淺地表處置設施場址之前，設施經營者需要調查當地社區，以了解他們並與其意見領袖接觸，向他們解釋設施的用途。向民眾提供事實資訊非常重要，包括與社區內設施選址相關的積極或消極影響的詳細資訊，以及已經或將要採取的減輕負面影響的措施。
- (3) 舉辦會議應在代表及意見領袖方便的時間及地點進行。會議的時間表及議程需提前告知公眾，以便他們充分準備問題。設施經營者或監管機關可以與代表及意見領袖合作，促進整個社區的參與。
- (4) 監管機關必須向民眾解釋其職責、角色以及設施經營者需要滿足的要求，以便獲得任何必要的許可證(例如選址、建設或營運)。
- (5) 建立信任可以得到公認的獨立第三方支持，包括學術界或其他值得信賴的領域。當監管機關的信任或信心受到質疑時，設施經營者可以資助民眾選擇的獨立專家或機構來審查設施的安全評估或安全論證，並相應地提供建議。
- (6) 參與溝通活動的技術專家需要透過通訊培訓來獲得必要的技能。可能缺乏有資格向民眾傳達安全論證訊息的人員，特別是有能力克服可能的「熱門話題」，或處理偏見及不寬容態度的人員。需要進行培訓計畫，以提升技術人員的能力與溝通技能，確保溝通有效。

5. 與媒體溝通

如何與媒體溝通淺表面處置設施的安全論證是一個重要的事情，因為媒體可以廣泛傳播資訊，從而影響民眾輿論。即使是小事，如果溝通不當也會產生重大影響。為了正確傳達安全論證的結果，與媒體建立牢固的關係非常重要。為了建立牢固的關係，與媒體的互動可能需要更頻繁。需要制定計畫，主動與媒體建立聯繫，以建立信任並制定解決困難情況的方法。

論壇與會者表示，利用媒體作為平台來解釋安全論證，並向民眾發出明確的資訊是正確的做法。資訊必須公開且準確，對問題的回答要簡潔明了，並可以與公眾討論一般性問題。此外，改善與媒體的關係也可以幫助媒體更好地理解處置計畫的技術及所使用的特殊專有名詞，以便呈現正確的資訊進行知情或客觀的安全論證討論，而不是將資訊斷章取義。

同時，大多數論壇參與者也警告，媒體往往會選擇報導負面且發布不準確或誤導性的資訊。因此，相關的官方機構需考慮並追求發布更正聲明，與中立的媒體交換資訊更為妥當，因為能夠客觀專業地評價事實。鑒於上述情況，進行媒體溝通的人員必須接受相關培訓。

6. 複雜或技術資訊的交流

淺地表處置設施的安全論證中，有許多複雜及技術性的資訊需要傳達，這需要考慮不同受眾的需求及其技術知識水平。論壇參與者就如何溝通安全論證中複雜或技術概念，及核工業專有名詞，提供了以下經驗：

- (1) 需要考慮受眾的技術知識水準。否則，利益相關者可能會誤解安全論證的基礎及其重要性。
- (2) 對於安全論證的許多方面，細節都需要向民眾解釋或傳達。然而，提供過多的細節會導致民眾困惑，並可能產生新的顧慮。詳細程度取決於目標受眾與溝通主題的相關性。需要提供有關環境可能受影響的資訊時，討論前解釋如何通過深度防禦來減少影響環境事件的後果是比較良好的方法。

- (3) 溝通安全論證中所涉及的不確定性可能會很困難。這一問題非常技術性，科學家對不確定性的理解往往存在不同意見。比較好的做法是呈現整體情況，並描述如何評估及管理不確定性。這一主題的開放與清晰的溝通非常重要，因為這可能會影響利益相關者的信心。
- (4) 淺地表處置設施的安全論證不僅要考慮核安與放射安全，還要考慮非放射風險及其他環境影響。溝通需要考慮這些評估的不同監管制度及不同受眾。
- (5) 為多個受眾制定安全論證可能很困難。原則上，安全論證供監管機關審查，包括所有技術細節、已辨識的不確定性及進一步調查的領域。當安全報告公開時，部分內容可能會被誤解，特別是指出未來需要解決的問題。因此，發布「易於閱讀」的摘要文件供民眾傳播可能是有效的做法。
- (6) 有效的做法是解釋設施如何設計為安全，以對應於所處置廢棄物的風險。可以透過清晰呈現設施在時間上提供的安全功能，以及這些功能如何源於安全論證與安全評估來輔助。對於複雜系統及理念的溝通也可以通過圖示(例如圖 3.5)來支持。
- (7) 場址及處置計畫的具體特徵，以及處置場封閉後如何保留資訊尤為重要。

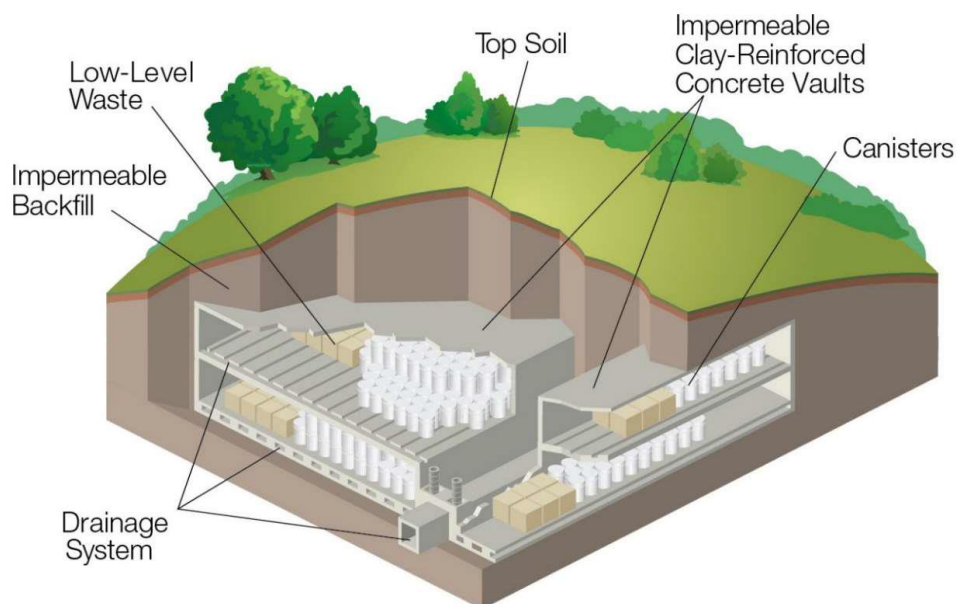


圖 3.5 「易於閱讀」的摘要文件說明中低放射性廢棄物淺地表處置的範例(IAEA, 2024)

7. 有效的溝通機制與方法

關於一般的溝通機制與方法，論壇參與者提出了幾個例子，總結如下：

- (1) 向議會、政府、地方政府、國際機構及其他機構提交報告(包括年度報告)；以口頭或書面回答議會問題；在安全論證開發過程中協調利害關係人的參與及溝通。
- (2) 參加研討會、會議及其他國際論壇，討論環境與安全問題，涵蓋安全方面、環境監測及控制、應急準備及其他相關事項。
- (3) 發起、組織及舉行技術會議、諮詢、討論及視訊會議，通常是在設施經營者與監管機關之間進行。
- (4) 確保媒體、利益團體及非政府組織透過溝通管道獲取資訊；組織「透明度座談會」；舉辦公開會議，包括在大學及學校舉行；進行公共資訊宣傳活動。
- (5) 透過正式出版物進行溝通，包括官方網站、社群媒體、新聞稿、電子報、官方信件及簡訊。論壇期間也確定與安全論證相關的複雜或技術資訊交流的幾種機制。大家一致認為，所採用的溝通工具需要符合目標受眾能理解的需求，使用清晰簡單的語言，並盡可能包括圖形及其他視覺輔助工具。以下可以支援溝通方法：
 - A. 適當的時候使用資料(例如數字、統計資料、關係)進行溝通。
 - B. 應用邏輯來支持溝通。例如，核能的使用及核應用會產生需要以安全方式管理的廢棄物。國際上達成共識，根據國家立法要求採用多重障壁方法設計處置設施，是支持安全並控制對人類與環境的相關風險的適當方法。
 - C. 使用圖片與圖表。視覺、圖形或資料視覺化(例如圖 3.5)可用來快速、清晰地呈現資訊。視覺元素通常更易於理解及記憶。
 - D. 使用故事或類比。
 - E. 鼓勵所有負責機關參與這些活動。

F. 使用隱喻或類比來支持溝通。

G. 尋找讓受眾感興趣的方法。

H. 使用受眾已知的細節來解釋概念。

I. 省略不必要的細節。

- (6) 社會科學研究也可以為淺地表處置安全論證的交流提供非常有價值的投入，以補充技術及自然科學研究的發現。社會學家、心理學家及政治學家等社會科學研究人員可以幫助設施經營者更好地設計用於傳達淺地表處置安全論證的材料，並滿足受眾的需求，提高對看法、態度及觀點的理解。

3.5 論壇各小組之結論及建議

本節根據「IAEA-TECDOC-2041」報告(IAEA, 2024)中，關於淺地表處置之論壇四個工作小組之討論內容，整理各工作小組對其關注之議題提出之結論與建議，如下：

1. 第一工作小組—淺地表處置設施決策中使用安全論證

根據第一工作小組針對該議題的工作經驗，提出以下十個步驟概述利用安全論證幫助淺地表處置設施開發決策的建議方法。第一工作小組建議所有利益相關者應參與每個步驟的決策。至於利益相關者的參與僅限於被告知，還是實際成為決策團隊的一部分，則取決於具體的計畫及情況，但利益相關者的參與對這個過程至關重要。

- (1) 確認處置設施發展的階段：處置設施所處的階段不僅決定決策的類型，也決定利害關係人最終影響決策的外部因素。
- (2) 定義決策：儘可能具體地定義所考慮的決策，例如針對廢棄物包件的活度限值與處置設施的活度限值的區別。
- (3) 產生替代方案：決策本質上是替代方案之間的選擇，此步驟要求辨識所有合理的替代方案，並記錄每個替代方案是否明確。

- (4) 確認決策指標：決策指標是評估接受標準的指標，這些指標衡量各種因素對決策的影響。輻射劑量與風險是決策指標，而輻射劑量與風險的限值是接受標準。
- (5) 定義決策接受標準：決策接受標準設定了決策的限制，最重要的是安全的輻射劑量與風險限值，通常不能超過這些標準。
- (6) 定義決策指標與安全論證之間的關係：決策者需要確定指標與安全論證之間的關聯，無論這種關聯是否透過安全評估確立。PRISM 計畫中開發的 MASC 矩陣可以用來幫助達成這個目的。
- (7) 評估每個替代方案對決策指標的影響：評估不同替代方案對各個決策指標的影響，如輻射劑量、風險及成本。
- (8) 篩選不符合接受標準的替代方案：篩選過程主要是排除超過接受標準(如劑量或風險限值)的替代方案，這些標準基於估計值而非實測值，因此保留符合標準的方案繼續作為下一階段的參考方案。
- (9) 從合格替代方案中進行選擇：根據所有之因素(如成本、公共接受度)綜合考量，選擇最適合的替代方案。
- (10) 估算並考量計畫風險：需要管理未來可能撤銷決策的風險，並盡可能將風險最小化。

2. 第二工作小組—與淺地表處置設施相關的管制經驗與過程

第二工作小組針對淺地表處置設施相關的管制經驗與過程提出幾項重點：

- (1) 監管機關需準備好對安全論證審進行審查，且這一工作將持續整個淺地表處置設施的各個時期。
- (2) 監管機關需要制定適當的法規與導則，並執行具體的審查計畫。
- (3) 監管機關需擁有具備足夠資質的員工以維持審查能力。
- (4) 安全論證的審查的重點會隨著設施在不同階段的變化而演變。

3. 第三工作小組—淺地表處置設施封閉後安全評估的經驗

第三工作小組認為「ISAM」方法仍是進行封閉後安全評估的良好參考依據。然而，工作小組提出以下建議來幫助安全評估人員應用該方法論：

- (1) 強調評估背景的重要性，以確保模型的結果被適當使用，從而做出良好的決策。
- (2) 明確且一致地闡述系統描述與評估基礎之間的關係，包含科學發展、處置系統的安全功能、時間依賴性及系統演變(例如工程障壁、氣候及其他條件的演變)。
- (3) 考慮當前針對封閉後安全情節之最佳方案。
- (4) 提供健全的假設基礎，避免保守假設(例如廢棄物清單、障壁劣化率)。
- (5) 封閉後安全評估中，包括對不確定性及敏感性分析的明確且詳細的資訊。
- (6) 需要考慮廢棄物的異質性，以評估這些異質廢棄物對於處置場的可接受性。
- (7) 建立一個處理不符合 WAC 的廢棄物的流程。

4. 第四工作小組—淺地表處置設施安全論證的溝通

第四工作小組根據收集的案例研究及論壇的一般討論，可以得出一些與淺地面處置安全論證溝通相關的共同經驗教訓：

- (1) 需要清晰的國家政策及放射性廢棄物處置策略，並需要得到每個負責組織適當的溝通策略及計畫的支持。
- (2) 有效且高效的淺地面處置安全論證溝通是一個持續的活動，必須仔細規劃及監控。
- (3) 溝通計畫中應包括所有利益相關者，特別是當地社區，並根據不同需求採取適當的溝通行動。
- (4) 需要最佳的溝通策略及方法來確保有效且高效的雙向溝通，所有相關官方組織需要與利益相關者不斷建立信任。

- (5) 不同的利益相關者可能有不同的興趣及溝通需求。
- (6) 安全論證相關文件應該對所有利益相關者公開，包括網絡選項及替代資訊來源。
- (7) 溝通計畫需要定期審查與修改，以確保需要改進的領域，例如可能需要不同溝通方法的不太理解的概念。
- (8) 將關鍵的「概念摘要」開發為動畫及資訊圖表，以便嵌入多種傳播檔案格式(例如文件、PowerPoint 簡報)。

第四章 國際間淺地表處置設施及關鍵議題比較

本研究第二章首先針對淺地表處置相關導則、國際間進行淺地表處置之國家年度報告進行彙整；第三章主要針對「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中淺地表處置之安全論壇進行詳細綜整。論壇中共分為四個工作小組討論不同主題，分別為淺地表處置設施決策中使用之安全論證、處置場管制經驗及過程、封閉後之安全評估經驗及安全論證之溝通。其中，第四個工作小組討論的安全論證之溝通，「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)列舉了四個國家之案例，本章 4.1 節就這些案例進行研析，並整理相關經驗及成果。本章另一部分，延續各國淺地表處置之議題，整理國際間有關淺地表處置之設施，整理於 4.2 節。最後，各種淺地表處置設施設計的比較，及「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，有提出幾個溝通的案例，討論從管制機關的角度如何協助相關溝通綜整於 4.3 節。

4.1 淺地表處置溝通實例探究

淺地表處置安全論壇上開發了一個用於描述會員國的溝通實際案例的模式，這個模式包含涵蓋背景、參與方、主要資訊、目標受眾、使用的工具及材料、溝通結果、困難及經驗教訓。這項工作目的在獲取與特定利益相關者的溝通提升對安全論證的理解，並透過溝通增進對利益相關者需求的理解，為未來更好的溝通提供經驗教訓。「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，共列舉了 4 個案例，如表 4.1 所示，第一個案例為古巴，該案例說明了古巴發展淺地表處置時，選址階段的溝通過程，本報告整理於 4.1.1 節；第二個案例為英國，該案例提供了英國在實施淺地表處置設施環境安全論證時，與利害關係人進行溝通的經驗，本報告整理於 4.1.2 節；第三個案例為巴基斯坦，該案例探討巴基斯坦在淺地表處置場址選擇中，與利害關係人的協商經驗，本報告整理於 4.1.3 節；最後，第四個案例為加拿大，該案例則討論加拿大在與原住民團體進行協商與溝通，以及相對應的管制方法，本報告整理於 4.1.4 節。另外，ANDRA 的年度報告「Rapport d'information - SUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE ET LA RADIOPROTECTION」報告(ANDRA, 2023b)也針對溝通的部分進行說明，本報告整理於 4.1.5 節。相關內容如詳如下述。

表 4.1 IAEA-TECDOC-2041 技術報告中列舉之淺地表處至溝通實際案例

國家(案例)	主要溝通主導單位	執行方法	成果及教訓
加拿大 (監管機構的溝通)	加拿大核安全委員會 (CNSC)	- 決策時透過公開程序得到專家的研究、分析和意見支持。 - 監管研究，並在期刊、同儕審查傳遞研究成果。 - 舉辦許多活動(例如：研討會等)，與利害關係人交流。	完成安全論證和其他資料的審查。
英國 (安全論證的執行)	西坎布里亞場址利益相關者小組 (WCSSG)	- 不同層級報告使用共同的模板編寫。 - 與環境局主要檢查員進行每月會議。 - 對第二層級報告進行簡報，強化報告資訊並允許提問。 - 發布聚焦於 ESC 關鍵技術資訊的新聞稿。	- 許可申請獲得民眾諮詢支持。 2016 年獲得處置窖的規劃許可證。 - 溝通措施減少當地社區對處置場的恐懼。 媒體報導案例經驗 - 核領域容易面臨負面渲染，需做好準備。 - 建立信任關係的重要性。
古巴 (低放處置推動)	多個部門參與，例如政府部門(國家核能與先進技術機構、省市政府等)、研究單位(地質與採礦研究所等)及民間企業(Energoproject 顧問公司等)	- 監管機構和其他相關機構舉行會議。 - 在當地和潛在場址附近的省、市政府演講。 - 關於環境和廢棄物處置主題的研討會。 - 溝通機制和工具：技術報告、簡報、講座和相關出版物。	批准所選的場址、安全評估和安全論證的修正。並提出檢討改善措施： - 先制定國家策略(計畫、預算等)。 - 改善提供給民眾的資訊及改進溝通策略。 - 加強選址研究，例如：地球物理學。
巴基斯坦 (利害關係人協商)	民眾參與環境影響評估 (Environmental Impact Assessment, EIA)	- 確認主要利害關係人。 - 確認地方社區的利益、關切和期望。 - 舉辦民眾聽證會。	對該計畫有一定了解，對計畫表示歡迎，相關措施： - 建立或升級教育機構。 - 提供基本醫療設施。 - 當地居民優先就業。 - 基礎設施發展，特別是道路網絡。

4.1.1 古巴：放射性廢棄物處理

1. 基本背景

古巴放射性廢棄物主要來自工業、研究、醫療三大類型，其中醫療產生之放射性廢棄物主要為液體及固體材料，包含短半衰期放射性核種及用於放射治療與醫療材料滅菌的密封源；工業產生之放射性廢棄物通常來自用於液位檢測、品質控制、煙霧探測及無損檢測等用過的密封源；研究單位產生之放射性廢棄物包含各類液體、垃圾、生物廢棄物等固體廢棄物。這些廢棄物的分類符合 IAEA 的指引。但迄今為止，古巴尚未制定或執行放射性廢棄物處置的國家策略。因此，目前也尚無處置設施，主要做法為對短半衰期放射性核種進行暫存，然而，廢棄的密封源仍是處置的主要問題。

2. 選址

選址過程始於 1985 年，並於 2001 年結束，完成「選址確認」階段。場址位於古巴中部人口稀少地區的花崗閃長岩中。選址期間，評估了 32 個候選場址，包含沉積層、火成岩及鹽丘，並進行多項研究(地質、水文、氣候等)。

3. 影響安全論證變更之因素

選址及概念設計階段以及其他相關溝通活動期間，許多因素影響安全論證的演變，包含新立法，在此期間《核能法》、《環境法》及相關法規、《輻射防護法》、《廢棄物管理法》等法規新立法，進一步影響處置相關的範圍、要求、階段及許可需求等。處置場設施也因為核電廠關閉後進行巨大的改變，處置設施修改了原始設計。因此，處置設施也需要進行額外的安全評估，以評估對環境(非人類物種)的放射性影響。

4. 與處置相關之溝通活動

(1) 參與機關

參與溝通活動的單位眾多，主要包含監管機關及相關部門(環境、公共健康等)，另外也包含研究機構、核能技術機構及地方政府等，參與單位如表 4.2 所示。

(2) 溝通的關鍵資訊

放射性處置之溝通包含場址選擇、經濟研究、環境影響評估、安全評估報告(範圍、目標、情節、模型及結果等)、設施設計(設計圖、預算及計畫等)、技術研究報告(地質、地球物理、地震學、水文及水文地質、地形、氣候等)、社會經濟(人口、城鎮及經濟活動等)、放射性特徵化、資料管理(資料庫及現地記錄等)、品質保證程序、主題地圖(地質、地球物理、水文地質、地形等)、外部事件(自然及人為因素)、國內外法規、指導方針及方法、溝通(機構、專家、委員會等)、會議(簡報、會議報告或討論等)，及文獻綜述(國際廢棄物處置設施及管理活動的現狀)。

(3) 溝通方法

- A. 會議：整個場址選擇過程中，與環境及核能監管機關進行互動。
- B. 地方簡報：在社區場所及靠近候選場址的市政辦公室進行講座。
- C. 研討會：重點討論場址選擇標準及提議場址的有利性。

(4) 溝通機制

使用的溝通機制及工具包括：技術報告、簡報、講座及正式信函。

(5) 溝通的效果與結果

- A. 獲得監管機關及同儕批准選定的場址。
- B. 修正及改善安全評估與安全論證。

(6) 溝通遇到的問題及解決辦法

在溝通過程中遇到的具體問題如表 4.3 所示，該案例詳細說明採取的策略。

表 4.2 古巴主要參與廢棄物處置之機關(單位)及其扮演之角色(改自 IAEA, 2024)

機關(單位)	角色
國家核能與先進技術機構(National Agency for Nuclear Energy and Advanced Technologies, AENTA) 古巴科技環境部(Ministry of Science, Technology and Environment, CITMA)	選址過程的協調者及對應窗口
廢棄物管理設施經營者：輻射防護和衛生中心 (Center for Radiation Protection and Hygiene, CPHR)	負責放射性廢棄物管理的單位，安全論證執行負責人，負責選址過程、安全評估、概念設計等。
城市規劃研究所(Urban Planning Institute)	選址時城市發展相關議題的對應窗口 (當前與未來社會經濟的影響)
氣象研究所(Meteorology Institute)	定義氣候事件情境，提供氣象資訊
地質與採礦研究所 (Institute of geology and mining studies)	在場址進行多項研究：地質、地球物理、地震、水文、水文地質等。
交通部(Transport ministry)	評估進入場址的通道，設計通往處置設施的道路
地理研究所(Geography Institute)	被提案的場址之環境基準
航空研究所(Aviation Institute)	意外事件情境資訊(例如飛機事故)
環境監管機關：古巴環境法規與核能安全辦公室 (Cuban Office for Environmental Regulation and Nuclear Safety, ORASEN)/古巴環境檢查與控制中心 (Cuban Environmental Inspection and Control Centre, CICA)	選址的對應窗口(環境議題)
核監管機關：國家核能安全中心(National Nuclear Safety Centre, CNSN)	選址的對應窗口(核能議題)
專案企業(Project Enterprise)	開發淺地表設施的概念設計
國際能源顧問公司：Energoproject	意外事件情境資訊(例如淹水事件)
礦產資源管理組織 (Mineral Resources Management Organization)	場址選擇的對應窗口，提供場址調查許可
國家地震調查中心 (National Centre for Seismological Investigations)	自然事件情境資訊(例如地震研究)
國防組織：古巴國防部民防部門 (Cuban Civil Defence, Ministry of Defence)	場址選擇的對應窗口，並提供極端事件情境的相關資訊。
公共衛生部(Ministry of Public Health)	選址過程的對應窗口
省市府	選址過程的對應窗口

*專案企業：提供特定專案計畫(例如商業、工程、技術或其他領域)服務的組織

表 4.3 溝通問題及緩解措施(IAEA, 2024)

問題	緩解
目標受眾缺乏對放射性廢棄物管理及安全問題的認知	舉辦以這些主題為重點的研討會、會議、講座及講習班
對核設施的負面風險認知	舉辦會議，介紹選址、安全評估、環境影響評估、廢棄物管理的國際現狀
選址的理由	- 關於候選選址的有利特徵及選址過程的講座或會議。 - 安全評估結果。

(7) 經驗及教訓

- A. 需要制定放射性廢棄物處置的國家策略(包括行動、資金等)，以支援所有最終廢棄物處置為目標的行動；
- B. 需要改善有關放射性廢棄物管理及安全主題的資訊，以便決策者及民眾更容易理解；
- C. 需要改進當前的溝通策略，包括廣泛的民眾諮詢；
- D. 加強場址選擇的研究，以完善候選場址的特徵描述(例如額外的地震(例如地球物理學)及水文地質研究)。

4.1.2 英國：LLWR「2011 年環境安全論證」的執行

1. 「2011 年環境安全論證」基本資訊

LLWR 是英國處置固體低放射性廢棄物的主要設施。LLWR 由核廢料處理局擁有，並由 LLWR Ltd 公司營運。根據許可要求，LLWR Ltd 需要提交並更新一個環境安全論證(ESC)，以證明當前及未來的處置安全。2011 年 ESC 的主要受眾是環境局，該場址的環境監管機關。次要受眾包括：(1)地方政策制定者、(2)當地社區、(3)廢棄物產生及運輸者及(4)科學界。2011 年環境安全論證(ESC)主要目標為傳達四個整體資訊：

- (1) **管理框架**：在健全的管理框架下運作，並與利害關係人進行對話。

- (2) **場址特徵化**：充分理解 LLWR 場址及設施的特徵及其與環境安全相關的演變。
- (3) **最佳發展計畫**：基於全面評估選項，制定 LLWR 的最佳場地發展計畫。
- (4) **環境安全評估**：評估場址發展計畫的環境安全，確保影響程度低且符合監管指導，並確定安全接受及處置廢棄物的條件。

2011 年 ESC 的主要溝通方式是一系列書面文件，根據圖 4.1 所示的層級組織。第一層級與第二層級報告使用共同的模板編寫，並保持一致的技術寫作風格。此外，技術報告還補充：

- (1) ESC 開發過程中，與環境局進行每月會議，更新進度並商定技術決策；
- (2) 需針對每個第二層級報告進行簡報，強化報告資訊並允許提問；
- (3) 發布聚焦於 ESC 關鍵技術資訊的新聞稿。

2. 主要溝通管道及相關活動

西坎布里亞場址利害關係人小組(West Cumbria Site Stakeholder Group, WCSSG)是 ESC 的一個重要溝通管道。WCSSG 是一個獨立機構，負責對西坎布里亞的核工業進行公民監督。民眾被邀請參加所有會議，會議選擇在民眾及媒體自由開放的地點舉行，每季度在附近的村莊會議廳舉行一次工作會議。ESC 開發的後期，ESC 專家及溝通人員進行多次關於 ESC 的簡報，並提供問答環節。LLWR Ltd.公司還向可能感興趣的團體(例如：綠色和平組織)發送了信函，確保他們獲得有關 ESC 的一手消息。最後，準備「非技術性摘要」報告，總結設施特性及安全論點。

3. 主要溝通工具

安全論證的主要溝通機制或工具為 ESC 報告。這些報告在線上發布，並以裝訂的方式提供利害關係人。這些報告可在國家報告網站上獲取。ESC 的目的是「證明」處置是安全的，主要方法是向技術專家提供複雜的技術資訊。因此，針對難以理解的技術概念，與外部圖形公司合作製作圖表，並用於簡報及展示，例如圖 4.2 所示。

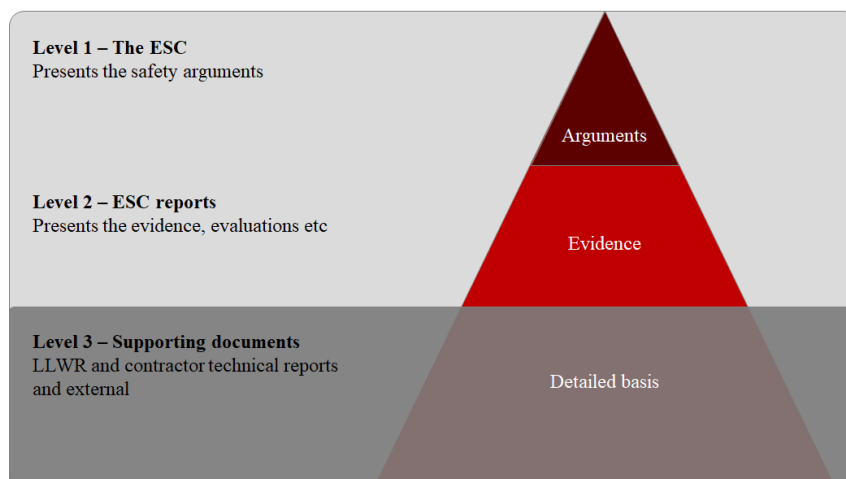


圖 4.1 2011 ESC 報告結構(IAEA, 2024)

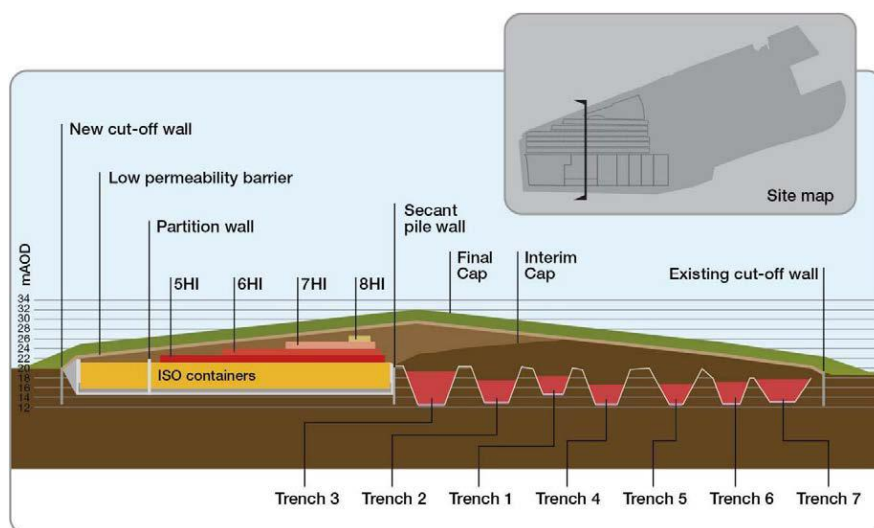


圖 4.2 LLWR 處置場結構的示例資訊圖(IAEA, 2024)

4. 溝通成果

這一溝通策略成功地向主要目標受眾(即環境局)傳達資訊，並得出結論認為 ESC 足以支持許可申請。審查報告中，環境局表示 2011 年 ESC 有顯著改進，並認為報告足夠全面，能完成技術審查。隨後的許可申請經過民眾諮詢，回應普遍正面，尤其是來自當地議會及社區團體的回饋。2016 年，建設處置窖的規劃許可證獲得批准，這進一步顯示與周邊地區的良好關係，前述措施幫助消除了當地社區對處置場的恐懼。

5. 遇到的溝通問題

- (1) 環境局審查 ESC 及許可申請耗時超過四年，提交 72 個問題，反映 ESC 呈現方

式的不足。

- (2) ESC 內容對不同學科之間的上下文連結性不佳，導致環境局中來自不同背景的專家的審查人員理解困難。

6. ESC 報告的改善措施

LLWR Ltd.公司於 2018 年對 ESC 溝通進行全面檢討，為下一次重大審查(2021 年 ESC)進行內容補強，包括寫作風格、呈現格式、視覺輔助工具及傳播媒介。例如：

- (1) **改善報告可及性**：報告電子檔嵌入超鏈接及搜索功能，便於獲取關鍵資訊。
- (2) **辨識不易理解的概念**：透過結構化訪談及問卷調查找出 ESC 中難以理解的概念，並將其製做動畫及資訊圖表，適用於多種呈現格式。
- (3) **增強安全功能的描述**：改進 ESC 中安全功能的描述，以作為解釋工具。

7. 對於媒體的經驗及教訓

2014 年 4 月 20 日，《衛報》發表一篇標題為「坎布里亞核廢棄物處置場」幾乎肯定」會因海平面上升而侵蝕」的文章，該篇新聞報導引用「2011 年 ESC」的一個結論，即處置場將在幾百至幾千年的時間內開始被海水侵蝕。但「2011 年 ESC」顯示，即使處置場被侵蝕，對民眾的風險仍然很低。此文章引發一些後續的地方及國家媒體報導，LLWR 高級人員透過電視及報紙進行反駁，加強 ESC 的安全資訊。這一事件提供兩個主要教訓：

- (1) **媒體報導的挑戰**：在核工業，特別是放射性廢棄物處置領域，總會有人試圖削弱與渲染負面新聞。不論你的溝通多麼優秀，論據多麼充分，總要準備好面對某種形式的負面媒體報導。
- (2) **建立信任關係的重要性**：為了應對這類報導，與關鍵利害關係人，特別是容易受到媒體影響的民眾建立信任關係。此案例中，許多關鍵的當地利害關係人及民眾已經因之前的溝通而了解海岸侵蝕的情況。那些不知情的人，對 LLWR 的反駁更容易產生信任。

4.1.3 巴基斯坦：利害關係人協商

有效的環境評估中，利害關係人的參與至關重要，這一點在計畫規劃與發展同樣重要。世界銀行(World Bank)發現，民眾參與環境影響評估(Environmental Impact Assessment, EIA)有助於改善計畫設計、環境合理性及社會接受度。此案例中，介紹與利害關係人舉行協商會議的細節。

1. 利害關係人定義

利害關係人是指在某種程度上直接或間接受到處置計畫影響的人或團體，或對計畫有興趣或有能力正面或負面地影響其結果的人。

2. 利害關係人協商的目標

利害關係人協商的整體目標是幫助驗證或預測環境及社會問題，及辨識計畫獨特的未知問題。積極的民眾參與及利用所獲資訊改善計畫，可使結果導向好的方面發展，並為參與者之間建立持續的良好關係。協商過程的目標包括：

- (1) 通知利害關係人有關計畫的類型；
- (2) 為弱勢群體提供表達其觀點及價值觀的機會，進而考慮緩解措施；
- (3) 確保規劃者能將計畫的利益最大化，並不會忽視重大影響；
- (4) 增加民眾對提案者、審查者及決策者的信心；
- (5) 提高決策過程的透明度；
- (6) 能提早意識到有爭議的問題以減少衝突，並尋找可接受的解決方案；
- (7) 在利害關係人心中創造對提案的擁有感。

3. EIA 研究步驟

- (1) 確認主要利害關係人：確定與計畫主要相關的利害關係人；
- (2) 確認地方社區的利益、關切及期望：透過調查、小組討論及與地方社區及行政

部門的會議了解當地人的看法；

- (3) **民眾聽證會**：在計畫區域附近舉辦的民眾聽證會中，確認所有利害關係人提出的利益及關切問題。

4. 確定利害關係人

不同類型的利害關係人可以以不同方式為 EIA 做出貢獻。因此，在計畫開始時，建議列出預期將成為計畫重點的利害關係人名單。巴基斯坦原子能委員會(PAEC)是主要利害關係人，負責計畫的推動及宣傳，也是利害關係人參與的負責機構。該國官方公布的主要利害關係人、其在計畫中扮演的角色，以及溝通方式如表 4.4 所示。

表 4.4 巴基斯坦參與計畫之各單，及其扮演的角色及溝通方式(IAEA, 2024)

機構(單位)	角色	溝通方式
廢棄物產生者	預處置活動及廢棄物驗收標準的制定	會議、訪查、報告
巴基斯坦核監管局 (PNRA)	巴基斯坦核設施管理	專案、設施的許可
環境保護署 (EPA)	透過環境影響評估過程評估專案對環境的影響	透過環評報告及實地考察獲得無異議證明
地方行政管理		
Chakwal 區 Tehsil Lawa 助理專員	評估專案對當地行政管理的影響	
Chakwal 森林分部分區森林官員辦公室	評估專案對附近森林及國家保護區的影響	透過會議、實地考察、報告獲得無異議證書
礦業及礦產部 Chakwal 分區辦公室	評估專案對專案區附近自然資源的影響	
當地社區	計畫對影響當地人民生活的社會經濟及社會文化因素的影響	小組討論、範圍界定會議、透過媒體在現場或附近召開的公開聽證會
環保從業者及專家		
巴基斯坦動物學調查局	評估專案對動物群的影響	透過實地考察、儀器及發布專案區域相關技術報告，評估專案對動植物及環境空氣品質監測的影響
巴基斯坦 Quaid-I-Azam 大學	評估專案對植物區系的影響	
WELCOS 實驗室	環境空氣品質評估	

5. 協商過程

(1) 小組討論

與當地居民及相關機構進行小組討論及會議，EIA 團隊成員訪問了周圍村莊，舉行了兩次公開會議，約有 35 名來自 11 個附近村莊的人參加。會議中分享了以下資訊：

- A. 計畫的名稱及目的；
- B. 選擇目前位置的原因；
- C. 計畫的具體位置；
- D. 計畫執行過程；
- E. 計畫將進行的活動；
- F. 計畫的社會經濟效益，包括基礎設施發展、就業機會、提供標準教育及醫療設施，以及促進當地市場的發展；
- G. 計畫的影響及其緩解措施，包括噪音、灰塵、交通增加、土地利用變化、野生動植物的影響。

(2) 公開聽證會

巴基斯坦旁遮普省環境保護局(EPA)在計畫附近安排一次民眾聽證會，透過媒體發布通知，歡迎所有利害關係人表達其對計畫的關切與期望。EPA 代表向民眾介紹計畫詳細內容，主辦方完成簡報後開放了問答環節。整個民眾聽證會過程也透過 Zoom 直播，方便無法到場的人在線參加。

6. 利害關係人的期望

附近村莊的社區已經對該計畫有一定了解，對計畫表示歡迎，並讚賞 PAEC 在確認偏遠的 Dhok Miani 地區所做的努力，該地區長期以來發展不足。由於該計畫不會直接影響該地區的生活，當地居民普遍對計畫並無憂慮，但計畫仍然將創造就業機會及小型商

業機會。參加協商會議的利害關係人有以下期望：

- (1) 建立新的教育機構或升級現有機構；
- (2) 提供基本醫療設施；
- (3) 當地居民優先就業；
- (4) 植樹以保護該地區的自然美景；
- (5) 基礎設施發展，特別是道路網絡。

4.1.4 加拿大：監管機關對於原住民族的溝通

1. 加拿大監管機關背景及其對安全論證之交流

加拿大主要對於核能安全之監管機關為加拿大核安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)。CNSC 是獨立的監管機關，由最多七名成員組成，負責許可決策。委員會的決策依賴 CNSC 員工提供的專業研究及分析。其中，針對安全論證的交流流程通常包含以下步驟：

- CNSC 員工首先與提議者溝通管制要求；
- 提議者開發安全論證，並提交 CNSC 員工審查；
- 根據 CNSC 的反饋，提議者需修訂安全論證，直到滿足所有要求；
- CNSC 根據安全論證向委員會提供建議並回答相關問題。

除此之外，CNSC 員工還有兩個重要任務，其一為針對管制方面進行研究，透過這些研究成果提供科學支持，並發表研究結果來促進透明度。研究結果為工作人員的許可建議提供獨立的科學支援，CNSC 工作人員在同儕審查的期刊出版物，以及同儕審查會議上的出版物及報告中說明研究成果。另一個任務為公共參與，CNSC 員工進行多種宣傳活動，包括訪問社區、舉辦工作坊及網絡研討會，以促進與民眾及原住民社區的交流。

2. 原住民諮詢及參與的管制方法

在加拿大，原住民權利及條約權利受到《加拿大憲法》的保護，政府必須在作出影響原住民族及社區的決策時進行有意義的協商。2021 年，加拿大通過了《聯合國原住民人民權利宣言》法案，並將其原則寫入加拿大法律。

CNSC 作為加拿大的監管機關及加拿大政府的代理人，致力於超越法律最低要求，積極履行諮詢義務。透過提供資金、持續對話、正式協定及定期資訊共享，確保原住民族及社區有機會在整個監管期間參與，並將收集到的資訊，包括原住民知識，提供作為委員會的決定參考。

CNSC 的參與者資助計畫成立於 2011 年，向民眾、環保組織及原住民社區提供財政援助，促進其參與環境評估及許可程序。CNSC 已經建立幾個有效的程序來支援其諮詢義務。例如，CNSC 與原住民族及社區簽署多項協定，為如何與 CNSC 與原住民族或社區進行協商並參與監管過程建立一個架構。合作範例包括共同草擬評估報告、參與技術審查及納入原住民族的知識。透過這些工作，確保原住民群體作為另一個政府級別直接參與 CNSC 的審查與評估過程，目的主要為實現《聯合國原住民人民權利宣言》的原則，解決原住民社區對核計畫的擔憂，特別是對權利、文化及生活方式的潛在影響。

4.1.5 法國：對於低放處置透明度採取的措施

根據 ANDRA(2023b)報告顯示，ANDRA 積極推廣與各類群體的溝通、資訊傳遞及對話。同時也會回應來自 Cires 場址之監督委員會、當地民選官員、社會團體、地方媒體及任何希望了解處置活動的人的諮詢。除此之外，ANDRA 也對收到的各類問題(例如：電子郵件、網站留言或書面信件)進行回應，確保提供清晰的解釋與答案。以下將列舉 ANDRA 對於 Cires 處置場採取的溝通手段。

1. 參觀導覽

參觀導覽為資訊傳遞、提高意識及交流的重要工具，ANDRA 在 Aube 的 CSA 處置設施提供放射性廢棄物管理相關主題之參觀導覽，這些參觀活動可以回答訪客的疑問。

討論的主題包括環境監測、ANDRA 與其場址所屬地區的關係、社會經濟影響以及正在進行的計畫等。2023 年，學生及大學生群體是 CSA 處置設施中最多的訪客群體，共接待了 1,524 人，占總訪客人數的 43% 以上。放射性廢棄物管理是社會問題，並且已經成為多個大學課程中的一部分。高中層級對此問題的關注也日益增強，參觀的需求顯著增加。其次是核能行業的專業人士(19%)及一般民眾(18%)，這兩個族群主要是在開放日活動中參觀。CSA 處置設施還在 2023 年接待 314 名當地民選官員及地方政府代表(9%)，以及 243 名來自各種協會的成員(7%)。還有一些國家媒體及 YouTuber 的到訪。此外，也有一些來自海外的代表團來到這些中心參觀，他們分別來自南韓、伊拉克、日本、英國、斯洛維尼亞及土耳其。

2. 外部展示

2023 年，ANDRA 的員工受邀前往 Sainte-Savine 參加全國退休人員協會的活動，並在 Vitry-le-François 與大學研究所的成員進行交流。此外，ANDRA 還前往 Vendée 的一所高中進行一場關於放射性廢棄物管理的介紹。

3. 工作坊、節目與教育性外出活動

ANDRA 於 CSA 處置場全年都會舉辦活動，或者與具有科學、技術或環境性質的省級或國家級大型活動合作。包含：

- (1) 第五屆「捕捉你的工業遺產」地區攝影比賽，與世界青年藝術學院-聯合國教科文組織中心合作，活動成果顯著，共收到許多參賽作品；
- (2) 「自然節」期間，舉辦一次發現當地動植物的漫遊活動，探索了奧布省貯存中心周邊的可食用及藥用植物；
- (3) 第三年連續與電台廣播公司 Troyes Aube Radio 合作共同製作每月播出的節目《與 ANDRA 的另一種視角》(Autres regards avec l'ANDRA)。該節目邀請與 Troyes Aube Radio 建立緊密合作關係的各界人士，介紹他們對地方經濟、文化及社會活力的貢獻。
- (4) 一次發現 Aube 地質的旅程，約 30 人乘坐巴士行駛 200 多公里，穿越 Aube，了

解及解析所觀察到的不同景觀，並深入了解巴黎盆地的地質歷史；

- (5) 為 Aube 地區的中學生舉辦有關 ANDRA 及其他與放射性廢棄物管理相關主題的工作坊，協助學生進入高等教育。

4. 出版物

ANDRA 收到了許多問題，這些問題有助於評估民眾希望獲得資訊的議題。為了確保能夠將回應傳遞給更廣泛的群體，這些問題的答案會定期在 ANDRA 的各種出版物中進行處理。包含：

- (1) 報紙(LE JOURNAL DE L'ANDRA)：為了向 Aube 的居民提供資訊，ANDRA 出版一本科學與技術普及的期刊，以通俗易懂的方式介紹關於居民關心的議題。期刊中也會大篇幅介紹 ANDRA 設置處置設施所在地區的生活現況，並透過對 ANDRA 員工的專訪，展示人員的日常工作與貢獻。
- (2) 雜誌(LE MAG DE L'ANDRA)：ANDRA 每月在其網站上發布一本線上雜誌，提供有關更全面資訊。
- (3) 網際網路與社交媒體：ANDRA 透過社交媒體平台，包含 X(前 Twitter)、Facebook、YouTube、Instagram 及網際網路，以快速傳遞最新資訊。在其網站 aube.andra.fr 上，2023 年共發布了 175 條新聞，並且在 @Andra_Aube 帳號上發佈了超過 150 條推文。
- (4) 其他出版物：許多介紹性出版物也可以在 ANDRA 的網站 andra.fr 上的「資源」欄中找到，還有許多關於放射性廢棄物的影片可以在其 YouTube 頻道「Déchets radioactifs」上觀看。

4.2 淺地表處置設施類型

低及中放射性廢棄物處置場的主要目標是確保放射性核種的長期隔離，方法是防止放射性核種遷移到環境中，直到其活性降至可忽略不計的水準。為了確保長期隔離，有必要考慮處置場的位置及處置場的設計，並採用多重工程障壁系統的技術解決方案。IAEA 定義的淺地表處置概念選項(IAEA, 1992; IAEA, 2001)包含有覆蓋層的壕溝(covered trench)；封閉式的處置窖(closed vault)；圓頂式處置窖(domed vault)；及開放式的處置窖(open vault)四種。通常這些處置類型或概念之間的選擇是基於地下水位及避免水與廢棄物接觸的考量。一般認為在乾燥氣候條件下，除了廢棄物包件之外，不需要額外的障壁系統(Crossland, 2012)，而較早的垃圾掩埋場類型的處置窖大多沒有在廢棄物上方或下方設置頂部保護層系統(Top System of Protective Layers, TSPL)或保護層系統(Bottom System of Protective Layers, BSPL)。許多此類處置窖後來發現放射性核種外釋，因為廢棄物包件(主要是鋼桶)腐蝕，導致放射性核種的釋放。

低及中放射性廢棄物(LILW)處置窖分為幾個部分，不僅是考慮設施所在位置(地面上或地下)及地下水的有無，還根據主要的廢棄物封閉系統以及上部及下部的保護層。關於保護層，通常有四種類型的障壁系統可以用來隔離廢棄物，這些障壁系統可以分為幾類，以便在處置窖封閉後進行隔離，分別為襯砌式的抗對流障壁(advection-resistant barrier)、雨水排水層式的導流障壁(conductive barrier)、滲透控制(infiltration control)及植被土壤覆蓋(vegetated soil cover) (Veinović et al., 2023)。

總結來說，處置設施必須在數百或數千年內營運，因此設計必須適應特定場址的地質、地形及氣候條件，也必須考慮其他幾個參數，即廢棄物的數量與類型、處置成本、社會及政治問題。儘管後兩者不是工程問題，但會影響安全性評估及處置窖的設計，因為有必要向所有利益相關者證明處置設施的品質與功能，這可能需要調整設計。因此，本章就淺地表處置之處置類型或概念進行整理，詳如下述。

1. 壕溝

壕溝的設計可以從簡單的無襯砌設計到配備高級工程障壁及蓋層系統的設施。全球使用核能初期，多數國家使用簡單的壕溝來處理放射性廢棄物。這些設施造價成本低廉，建造及營運便利，通常位於產生廢棄物的核設施附近。一般認為這種處置方式只適用於

在制度化控制的期間(通常為 100 至 300 年)內，能夠充分衰減至對民眾無風險的廢棄物。廢棄物運至壕溝進行處置之階段，臨時的防水覆蓋層可以用來保護廢棄物及壕溝的結構，並最大限度地減少雨水進入壕溝。在覆蓋層覆蓋之前，廢棄物包件之間的空隙可以用土壤、沙子、礫石或混凝土回填。

舊式壕溝設計通常沒有任何形式的工程障壁，例如排水系統、襯砌或多層覆蓋層系統。新的設計則通常包括所有這些功能，例如法國莫維利爾(Morvilliers)附近的 Cires 處置設施(圖 4.3)。該設施自 2003 年開始營運，包含一系列有襯砌的壕溝型處置單元，每個單元長達 124 m，寬 26 m，深 8.5 m，淨容量可達 25,000 m³，目前許可設施的總容量為 650,000 m³。截至 2016 年底，Cires 處置場已處置約 330,000 m³ 的極低放射性廢棄物(VLLW)。類似的設計也在西班牙的 El Cabril 場址用於極低放射性廢棄物(VLLW)的處置。

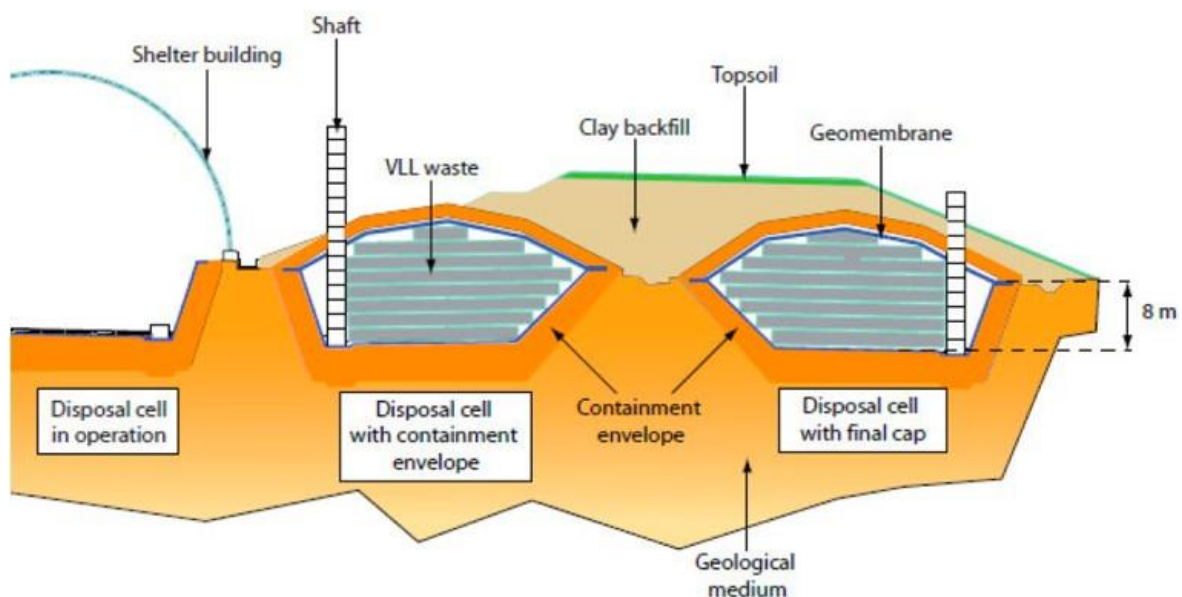


圖 4.3 法國 Morvilliers 附近的 Cires 處置設施示意圖(Garamszeghy, 2021)

在美國，壕溝被用於處置低放射性廢棄物，例如南卡羅來納州 Barnwell 場址、猶他州 Clive 場址、德克薩斯州安德魯斯縣及華盛頓州 Hanford 的商業處置設施。美國最新的商業低放射性廢棄物處置設施是位於德克薩斯州安德魯斯縣的 Waste Control Specialists (WCS)處置設施，於 2012 年春季投入營運。該設施位於乾旱地區，於 150 m 厚的不透水

紅黏土層建造，壕溝為設有襯砌的混凝土。設施內有兩個相鄰的類似設計的處置場：一個用於商業廢棄物，另一個用於處置美國聯邦政府的廢棄物。典型的壕溝與覆蓋層設計如圖 4.4 所示。商業處置場的總體積約為 $275\text{ m} \times 275\text{ m} \times 25\text{ m}$ 深，設施將分四個階段開發，每個階段的容量約為 $76,000\text{ m}^3$ 。廢棄物在安置前被放置在立方或圓柱形混凝土包件中，這些廢棄物包件堆疊到離壕溝底部約 15 m 的高度(通常為 4 層混凝土包件)，包件之間的空隙用沙子回填。處置壕溝填滿時，壕溝將覆蓋混凝土覆蓋層，並設置多層的工程覆蓋系統。WCS 壕溝的深度允許處置所有美國 LLW 類別的廢棄物，包括最具放射性的 C 類廢棄物。截至 2016 年 12 月，WCS 設施已處置約 $195,000\text{ m}^3$ 的廢棄物。

英國 Drigg 處置場也使用了壕溝處置，從 1959 年到 1995 年，共處置了約 $800,000\text{ m}^3$ 的低放射性廢棄物，這些廢棄物被放置在黏土襯砌的壕溝中。其他使用壕溝處置極低放射性廢棄物或低放射性廢棄物的國家包括阿根廷、中國、法國、印度、日本、挪威、俄羅斯、斯洛伐克及南非。

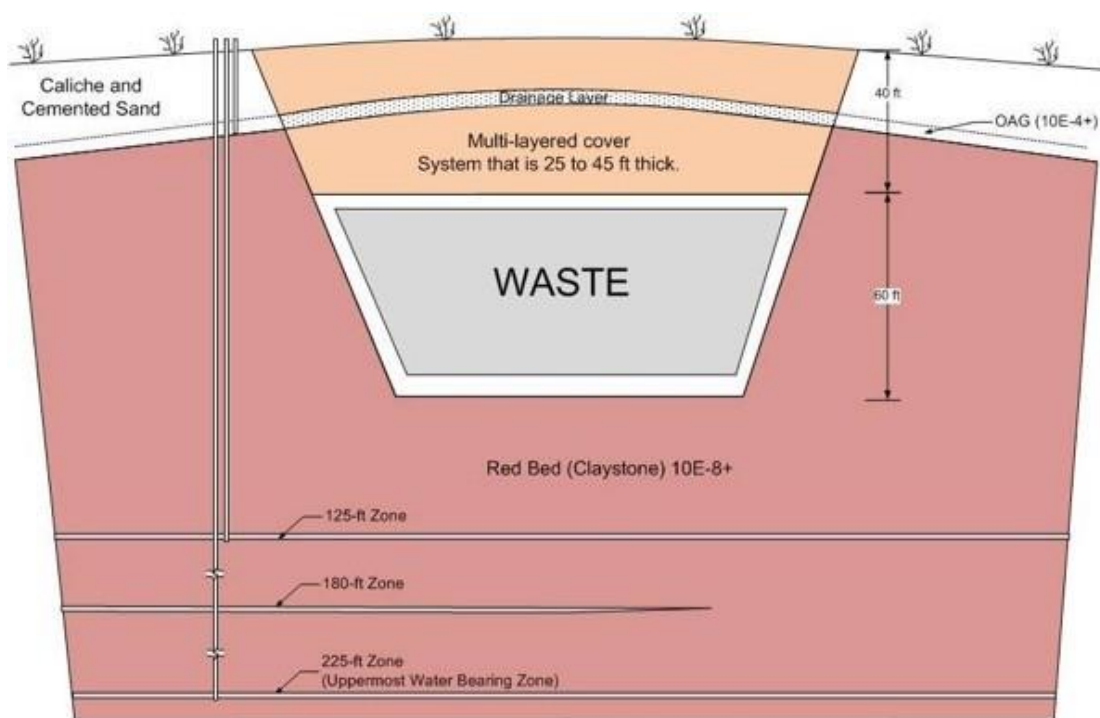


圖 4.4 德克薩斯州壕溝設計的 WCS 低放處置設施(Garamszeghy, 2021)

2. 土丘

土丘與壕溝非常相似，不同的是土丘建於地表上，並有覆蓋層及覆蓋系統。廢棄物運至土丘進行處置之階段，可以使用臨時防水覆蓋層來保護廢棄物，並最大限度地減少雨水滲透。廢棄物包件之間的空隙可用土壤、沙子、礫石或混凝土回填，然後再進行覆蓋。國際上，土丘用於極低放射性廢棄物(例如，瑞典大多數有核反應爐的場址)及低放射性廢棄物的處置(例如，美國猶他州 Clive 處置場、俄亥俄州 Fernald 處置場、法國 CSM 處置場)。圖 4.5 為位於瑞典 Oskarshamn 核電廠的短半衰期廢棄物的極低放射性廢棄物處置設施，用於處理短半衰期廢棄物，並於大約 50 年內衰變至不受列管之程度。Oskarshamn 的處置單元約 $3,000\text{ m}^3$ ，底部設有帶排水通道的混凝土墊。廢棄物以各種包件形式堆放在墊子上。當處置區填滿後，會在廢棄物堆上建造覆蓋層及蓋層系統，該系統由多層保護層、膨潤土及排水層組成，最上層為 1 m 厚的碎石及土壤覆蓋層。大型混凝土塊被安置場址的周邊，以固定覆蓋層提高結構的穩定性。

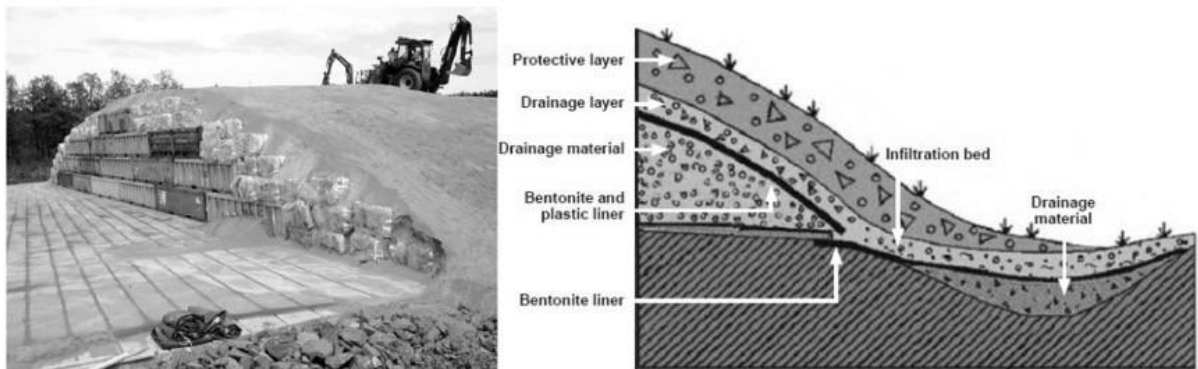


圖 4.5 Oskarshamn 核電站的 VLLW 處置設施(Garamszeghy, 2021)

法國早期針對短半衰期低及中放射性廢棄物的處置設施，建於位於北部的 La Hague 用過燃料再處理廠旁的曼什中心(CSM)。該設施自 1994 年開始封閉並進行監測。CSM 於 1969 年開始營運，內含約 $527,000\text{ m}^3$ 的廢棄物。廢棄物容器直接堆放在混凝土板上，如圖 4.6 所示。活性較高的廢棄物被放置在建在這些板上的混凝土掩體中。容器之間的空隙用沙子、礫石或混凝土填充。該設施占地約 15 公頃，並於 1997 年覆蓋了多層覆蓋層系統，該系統包括瀝青、一組排水及不透水層，以防止水滲入處置場。最上層的覆蓋層種植草皮，以促進雨水的蒸發，並防止風化及侵蝕。



圖 4.6 法國 CSM 處置設施的廢棄物處置(Garamszeghy, 2021)

美國也有多個場址使用土丘設計，例如俄亥俄州的 Fernald。前美國能源部 Feed Material 生產中心位於俄亥俄州 Fernald，該設施於 1951 年至 1989 年期間營運，作為鈾加工廠。1990 年代及 2000 年代初期，該設施進行除役及環境恢復，並在現地建設多個放射性廢棄物處置設施。其中最大的設施是一個土丘，內含約 230 萬立方公尺的低放射性廢棄物處置場。處置的材料約 85% 為土壤及類似材料，另外約 15% 為建築拆除垃圾、除役設備及其他各類低放射性廢棄物，該處置設施設計之基本要求為在合理可實現的範圍內將廢棄物與環境隔離長達 1,000 年，並於任何情況下隔離 200 年之要求。處置場包含 8 個排列成一排的單元，總體尺寸約為寬 240 m、長 1130 m、高 20 m，建於多層工程基底上(厚約 1.8 m)，包括隔離層與排水層交替設置，如圖 4.7 所示。最終的工程覆蓋層厚約 3 m，其中也包含隔離層與排水層，該設施於 2006 年完工並封頂，目前為長期監測狀態。

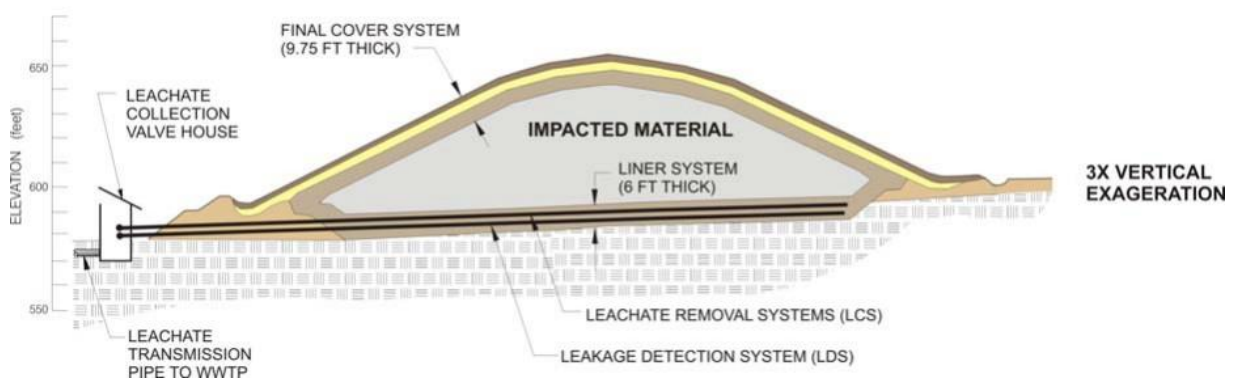


圖 4.7 Fernald 處置設施土丘的橫截面(Garamszeghy, 2021)

3. 混凝土處置窖

混凝土處置窖是目前全球處置低放射性廢棄物最常見的方法之一。此方法具有模組化特性，能夠根據需求擴展多種容量，並具靈活性以接受各種尺寸的廢棄物包件，包括非常大型及重型物體，如反應堆壓力容器。混凝土處置窖還可以在各種地質環境中建造，無論是在地表還是淺地表，深度可達數十公尺。基本的混凝土處置窖由厚的混凝土結構組成，通常配備內建的排水或水位監測系統。處置窖通常透過頂部(使用固定或移動起重機)或側面(使用叉車或類似車輛)裝卸廢棄物包件，當處置窖裝滿時，用混凝土封蓋及多層工程覆蓋系統封閉。廢棄物運至處置窖進行處置之階段，可以使用臨時防水罩來保護廢棄物及其結構，並最小化降雨造成的水滲入。廢棄物包件之間的空隙通常用沙子、礫石或混凝土回填，以形成一個單體結構，然後再進行封頂。

(1) 地表處置窖

混凝土處置窖類型的處置設施中，經典的例子是位於法國的奧布中心(CSA)，該設施由一系列地表混凝土處置窖組成，如圖 4.8 示。該設施的總許容量為 1,000,000 m³，擁有 400 個處置窖(每個處置窖尺寸為 25 m × 25 m × 8 m)。這些處置窖的設計年限為 300 年，填滿後將會用工程覆蓋系統進行封閉。截至 2016 年底，該設施內約有 325,000 m³ 的廢棄物。低放射性廢棄物容器透過橋式起重機堆疊在處置窖中。處置階段，使用可移動的防水罩來保護開放的處置窖。然後，處置窖將逐層用混凝土回填。當處置窖填滿後，會在上面澆築一層增強混凝土蓋層。



圖 4.8 法國短 CSA 處置場鳥瞰圖(Garamszeghy, 2021)

西班牙的 El Cabril L&ILW 短半衰期廢棄物處置場於 1992 年開始營運，其設計類似於法國 CSA 處置場。與法國設施不同，廢棄物桶首先放置在 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 或 $2.25\text{ m} \times 2.25\text{ m} \times 2.20\text{ m}$ 混凝土容器中。一些桶可以首先進行壓實，當容器裝滿時，內容物被混凝土灌漿固定，並將固化的容器放置在處置單元中。當處置單元填滿容器後，將建造上部的增強混凝土封閉板並進行防水處理。當所有處置單元都填滿後，將用多層工程覆蓋系統覆蓋並植被化。目前，共有 28 個處置窖，容量約為 $37,000\text{ m}^3$ 。預計總容量需求約為 $90,000\text{ m}^3$ ，需要增設約 50 個處置單元，將根據需求分批建造。截至 2016 年 12 月，該設施的處置量約為 $32,000\text{ m}^3$ 。

(2) 淺層淺地表處置窖

混凝土處置窖也可以在不同深度的地下建造。最常見的是淺埋設施，這些處置窖從上方進入，廢棄物包件由固定或移動起重機裝卸。與地面處置窖概念相似，近地表的地下處置窖通常使用年限設計為 300 年，填滿後將用工程覆蓋系統進行封閉。

斯洛伐克的一個淺埋近地表處置窖為短半衰期低放及中放射性廢棄物處置場 (RURAO)。該處置場旨在處置核設施營運過程中產生的固體及固化的短半衰期廢棄物。處置場建在低滲透性與高吸附能力的地質材料上，處置場下方的壓實黏土工程層提供了對放射性核種遷移的額外障壁。如圖 4.9 所示，該處置場由排列成雙排的 40 個混凝土處置窖(2×20)組成，並配備可移動的防水屋頂以便在裝卸作業時使用。每個處置窖的尺寸為 $6\text{ m} \times 5.5\text{ m} \times 18\text{ m}$ ，牆厚 0.6 m，容量為 90 個纖維增強混凝土容器，每雙排的總容量為 7200 個容器($22,320\text{ m}^3$)，總面積為 11.2 公頃。開放式處置窖裝卸期間，會在整個雙排上方使用防水罩。當處置窖填滿後，將進行回填並用混凝土蓋住。



圖 4.9 斯洛伐克短半衰期 L&ILW 的 Mochovce 處置場(Garamszeghy, 2021)

捷克也有類似的處置場，例如短半衰期 L&ILW 的淺地表處置場位於 Dukovany 核電廠旁，由 112 個鋼筋混凝土處置窖組成，排列成四排，每排 28 個，總容量為 55,000 m³。處置窖尺寸為 5.3 m × 5.4 m × 17.3 m。Dukovany 處置場位於不透水的第四紀黏土沉積物上，位於地下水位之上，並設有排水系統。2016 年底的處置量約為 11,520 m³。當一個處置窖填滿時，處置桶之間的空隙將用混凝土回填，然後用厚聚乙烯薄膜覆蓋，防止雨水滲入處置窖，再用厚混凝土板蓋住。

(3) 更深的淺地表處置窖

一個典型的範例是位於日本六所村的「日本核燃料有限公司(JNFL)」短半衰期低及中等放射性廢棄物處置場。該設施自 1992 年開始營運，包含兩個處置設施，每個設施都有數個建於母岩中的混凝土結構。「1 號處置設施」中，處置均質固化廢棄物，例如離子交換樹脂及蒸發器濃縮液，每個結構約為 24 m × 24 m × 6 m，開挖深度約為地表以下 15 m。這些結構被分為 6 m × 6 m 的單元，每個單元可容納最多 320 個標準的 200 升鐵桶。「2 號處置設施」處理壓縮及固化廢棄物，例如金屬及混凝土，於 2000 年開始營運。每個結構的大小為 36 m × 37 m × 7 m，開挖深度約為地表以下 20 m，包含 36 個 6 m × 6 m 的單元，每個單元可容納最多 360 個鐵桶。目前每個設施的設計容量為 40,000 m³，設施將根據需要分階段擴建，最終設計容量為約 600,000

m³。廢棄物通常被填灌進 200 升的鐵桶，鐵桶由自動裝卸設備分層放置，並在桶之間填漿。當單元填滿後，會用鋼筋混凝土蓋板封頂，如圖 4.10 所示。填滿後，整個區域將覆蓋一層 4 m 厚的膨潤土及土壤。到 2016 年底，1 號設施內約有 147,000 個鐵桶(約 29,000 m³)，而 2 號設施內約有 113,000 個鐵桶(約 22,600 m³)。

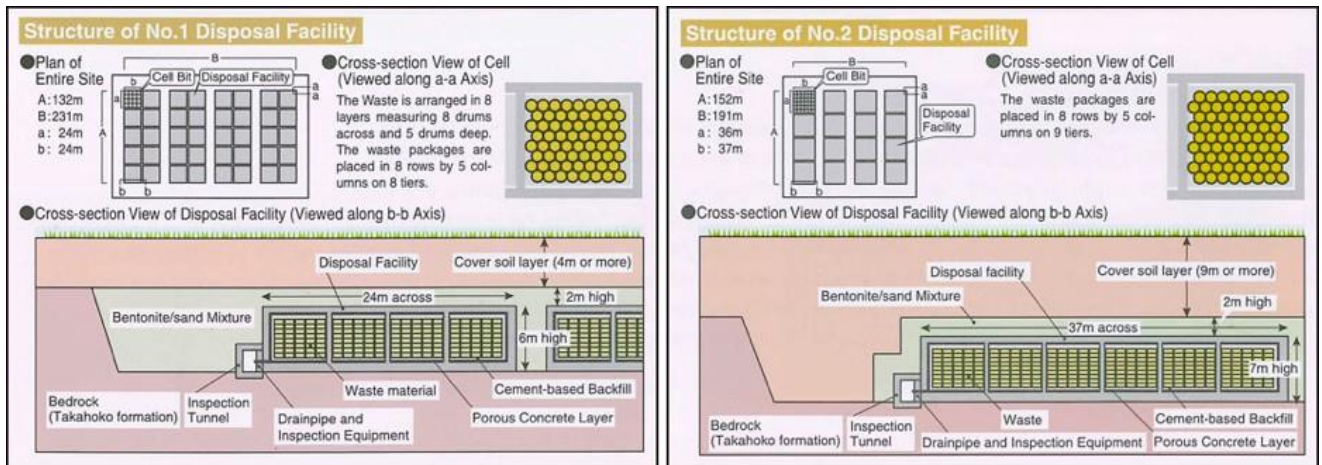


圖 4.10 日本六所村低放處置場示意圖(Garamszeghy, 2021)

另一個更深的淺地表混凝土處置窖的例子是蘇格蘭 Dounreay 處置設施，該處置窖於 2015 年開始營運。設施的第一階段包括一個 92 m × 46 m × 12.5 m 用於處置 LLW 的混凝土處置窖，以及一個 66 m × 46 m × 12.5 m 的混凝土處置窖，用於大體積、低活性廢棄物，其底部約位於地表以下 16 m，但高於地下水位。廢棄物主要裝在由叉車堆放的集裝箱，堆放高度可達 8 層，總容量為 38,100 m³ 的低放射性廢棄物及 26,900 m³ 的大體積、低活性廢棄物。在放置前，低放射性廢棄物的容器會進行灌漿。設施的第二及第三階段將增加更多處置窖，以容納總計約 130,000 m³ 的低放射性廢棄物及 46,000 m³ 的大體積、低活性廢棄物。

4.3 各國溝通案例回饋與處置設施比較

本節就「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，有關溝通的案例進行解析，透過這些案例的回饋，如何能深化於我國淺地表處(甚至是其他方面的活動)溝通進行說明。另一部分，針對淺地表處置設施類別進行整理，可做為我國未來延伸研究之參考。

1. 各國溝通案例回饋

我國管制機關在協助相關溝通時，根據「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)列舉四個溝通案例之經驗，整理可行之方向，作為管制機關參考。這些措施有助於增強計畫的社會接受度，降低潛在的社會阻力，確保處置過程的順利與可持續性。

(1) 跨機構合作與分工

- A. 成立跨機構合作機制：建立一個針對處置計畫的工作小組，例如包含環保、衛生、能源、地方政府等部門，形成清晰的分工與協作機制。我國管制機關為最熟悉低放射性廢棄物處置之機關，因此可在廢棄物處置計畫的審查與管理過程中，促進各單位間的資訊互通與資源共享。
- B. 定期會議：安排例行會議及工作坊，針對計畫進展、安全標準及技術問題進行協調，確保所有單位在執行上保持一致。

(2) 增加透明度及公開參與

- A. 設立公開資料平台：參考英國對於資料的公開透明度，管制機關可考慮建立一個便於搜尋的線上資料平台，公開廢棄物處置相關的環境影響報告、技術評估等，讓公眾能夠即時查詢。
- B. 增進與多元群體的溝通互動：定期舉辦參觀活動，邀請學生、一般民眾、專業人士、地方政府官員及環保組織參與，並在參觀中回答其對放射性廢棄物管理的問題，增進對處置場地的認識。另外，可在各地區或校園推廣放射性廢棄物管理的演講活動，提升學生對廢棄物管理的興趣。
- C. 設置常態性教育與宣傳平台：與當地學校或其他教育機構合作，定期舉辦工

作坊或競賽活動，使放射性廢棄物管理的教育內容更具趣味性，拉近與大眾之間的距離。或是透過廣播或網路節目，邀請在地人士或合作夥伴參與討論，分享項目對地方經濟、環境及文化的貢獻。

- D. 提升出版物的資訊普及度：定期出版普及性的期刊或雜誌，或是於網路平台及社交媒體更新內容，並簡化內容以幫助民眾理解放射性廢棄物管理的專業知識，例如放射性廢棄物管理的進展、環境監測結果、以及對社區的影響。
- E. 善用社交媒體及網際網路的即時性：建立社群平台帳號，並持續更新最新消息、環境數據、操作透明度等資訊。藉此讓資訊傳遞更快，並提供一個讓民眾反映意見、提出問題的互動渠道。

(3) 利害關係人協商及在地溝通

- A. 利害關係人識別與溝通：管制機關可在計畫初期就識別潛在的利害關係人，包括地方居民、原住民族群、環保團體及政府部門，並組織協商會議，進行初期的問題探討。
- B. 公開協商會議：計畫區域定期舉辦協商會議及民眾聽證會，讓所有利害關係人能充分了解計畫的進程及影響，並設置問答環節，回應社區的關切及建議。
- C. 重視在地知識與文化：協商過程中尊重並採納當地居民及原住民族群的傳統知識與生活需求，透過文化尊重促進在地支持。

(4) 原住民族的參與與支持措施

- A. 推動原住民族參與機制：參考加拿大的做法，建立一個專門的原住民族諮詢平台，提供經費支持及技術協助，確保原住民族在監管過程中能夠有效參與。
- B. 長期協定與合作框架：透過與原住民族簽署合作協定，建立長期諮詢架構，持續進行資訊共享與技術研討會，並允許其在評估報告及技術審查中發表意見。

2. 淺地表處置設施比較

綜整淺地表處置設施類型，主要差異在於設施的位置、構造及對放射性廢棄物隔離的能力。壕溝式建造成本較低，便於處置作業，但適合較短時間的隔離，因此只適用於管制力度相對較低的放射性的廢棄物；土丘設計簡單、易於建造及維護，但適用於低放射性且活性可在較短時間內衰減的廢棄物；混凝土處置窖提供更高隔離功能，適合長期封存具較高活性的低放射性廢棄物，但建造成本及設計複雜度也相對較高。

總結來說，這三種設施的選擇需考量廢棄物的放射性、所需的隔離時間及地質環境等因素。壕溝與土丘設計相對簡單，適用於低活性且衰減期較短的廢棄物，而混凝土處置窖則提供更高的隔離保護，適合較長期且活性較高的廢棄物處置。表 4.5 至表 4.7 參考 Veinović et al. (2023) 之研究，整理上述各種處置概念的示意圖、主要處置之廢棄物、處置設施之特徵，及各國案例等。圖中，深灰色部分為混凝土加固之設施，例如有襯砌壕溝之覆蓋。

表 4.5 淺地表處置設施概念整理(修改自 Veinović et al., 2023)

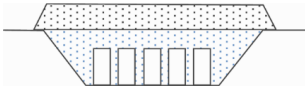
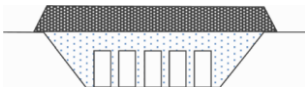
處置概念		主要處置廢棄物類型	國際案例	圖示	處置設施主要特徵
壕溝	無襯砌	VLLW LLW	Ezeiza(阿根廷)(營運中) Drigg(英國)(營運中) Hanford(美國)(營運中) Vaalputs(南非)(營運中)		- 建於地下或淺地表 - 施工簡單、價格低廉、可擴展性、可模組化 - 能夠處理各種尺寸及品質的廢棄物包件 - 某些情況下，廢棄物包件會迅速變質 - 長期易受降雨影響 - 設施長期易受下陷的影響 - 易受生物入侵 - 處置設施裝滿後，使用當地材料覆蓋廢棄物(例如：挖掘壕溝時收集的土壤)
	有襯砌	VLLW LLW	El Cabril(西班牙) (僅處置VLLW) (營運中)		- 建於地下或淺地表 - 施工簡單、價格低廉、可擴展性、可模組化 - 能夠處理各種尺寸及品質的廢棄物包件 - 某些情況下，廢棄物包件會迅速變質 - 長期易受降雨影響 - 設施長期易受下陷的影響 - 易受生物入侵 - 處置設施裝滿後，使用選定的保護層覆蓋廢棄物

表 4.6 淺地表處置設施概念整理(續 1)(修改自 Veinović et al., 2023)

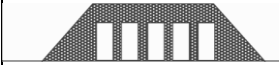
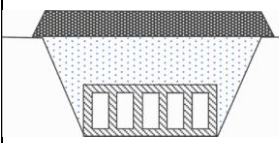
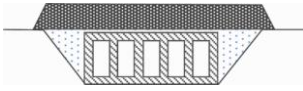
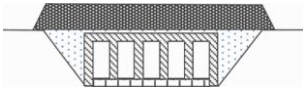
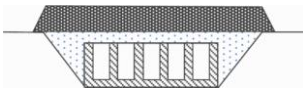
處置概念	主要處置廢棄物類型	國際案例	圖示	處置設施主要特徵
土丘	VLLW LLW	Forsmark(瑞典)(營運中) Oskarshamn(瑞典)(營運中) Ringhals(瑞典)(營運中) Studsvik(瑞典)(營運中) CSM(法國)(封閉中) Fernald OH(美國)(營運中)		- 地面 - 施工簡單、價格低廉 - 適用於處理大量廢棄物 - 根據環境的不同，廢棄物包件會迅速腐壞 - 長期易受降雨影響 - 設施長期易受下陷的影響 - 易受生物入侵 - 通常將廢棄物保持在地下水位以上 - 處置設施裝滿後，使用選定的保護層覆蓋廢棄物
地面混凝土處置窖	LLW	CSA(法國)(營運中) El Cabril(西班牙)(處置LILW)(營運中) Drigg(英國)(8號處置窖)(營運中) Beilong(中國)(營運中) Mochovce(斯洛伐克)(營運中)		- 地面 - 易於施工、作業、模組化及可擴充性 - 能夠處理各種尺寸及品質的廢棄物包件 - 易受生物入侵 - 通常將廢棄物保持在地下水位以上 - 處置設施裝滿後，使用選定的保護層覆蓋廢棄物 - 廣泛的國際經驗
更深的淺地表處置窖	LLW 部分ILW	Rokkasho-mura(日本)(營運中) Dounreay(英國)(營運中)		- 地下 - 易於施工、作業、模組化及可擴充性 - 處置有限制之廢棄物包件形式 - 比地表或淺地表處置窖更能抵抗生物入侵 - 通常將廢棄物保持在地下水位以上 - 處置設施裝滿後，處置窖用混凝土蓋層封閉，並用混凝土密封(或填充)

表 4.7 淺地表處置設施概念整理(續 2)(修改自 Veinović et al., 2023)

處置概念		主要處置廢棄物類型	國際案例	圖示	處置設施主要特徵
淺地表混凝土處置窖	封閉式	LLW 部分ILW	CSA(法國)(營運中) Trombay(印度) Tarapur(印度) Maišigala(立陶宛)(營運中)		- 地下 - 易於施工、作業、模組化及可擴充性 - 處置有限制之廢棄物包件形式 - 易受生物入侵 - 通常將廢棄物保持在地下水位以上 - 處置設施裝滿後，處置窖用混凝土蓋層封閉，並用混凝土密封(或填充)
	圓頂式	LLW 部分ILW	IRUS(加拿大) (未建造)		- 地下 - 易於施工、作業、模組化及可擴充性 - 處置有限制之廢棄物包件形式 - 易受生物入侵 - 通常將廢棄物保持在地下水位以上 - 廢棄物放置混凝土板上 - 處置設施裝滿後，使用選定的保護層覆蓋廢棄物
	開放式	LLW 部分ILW	Drigg(英國) (9號處置窖) (營運中)		- 地下 - 易於施工、作業、模組化及可擴充性 - 廢棄物經過預處理，最大限度減少體積 - 設施長期可能有輕微下陷的影響 - 易受生物入侵 - 通常將廢棄物保持在地下水位以上 - 處置設施裝滿後，處置窖上覆蓋低滲透性覆蓋層

*印度 Trombay 及 Tarapur 處置場未找到營運狀況相關資訊

第五章 低放射性廢棄物淺地表處置場址特性專家技術討論會

本研究針對國際間淺地表處置之現況、相關法規、處置環境及處置設施相關之議題進行研析。其中，主要研析「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)，針對決策時使用的安全論證、相關監管經驗及過程、封閉後之安全評估及安全論證的溝通等幾項重要議題進行重點資訊彙整。另外，本報告也蒐集了各國之年度報告，以及淺地表處置設施設計方法等相關文獻，初步掌握國際間有關淺地表處置之技術與現況。為能更進一步探討及正確的彙整低放射性廢棄物淺地表處置之相關資訊，本計畫舉辦了 2 場專家技術討論會議。兩場討論會邀請各 4 位相關領域之專家學者蒞臨指導，並同時邀請與低放射性廢棄物處置直接相關之單位台灣電力公司共同參與會議的討論。透過討論會之交流，進一步強化本研究之成果，並蒐集專家對淺地表處置我國未來可發展之審驗技術進行討論，提供安全管制之建議。本章共分為 2 個小節，5.1 節首先將專家技術討論會進行整體說明。5.2 節整理會議中受邀之專家提供之意見，並針對討論會進行結論與建議。

5.1 會議說明

1. 會議資訊

本計畫共舉辦兩場之專家技術討論會，舉辦日期分別為為 2024 年 7 月 18 日及 2024 年 10 月 08 日，舉辦時間皆為當日的 10：00 至 11：00，由本計畫先進行近 30 分鐘之計畫成果簡報，後 30 分鐘則為各專家及與會人員進行討論與意見交流，會議議程如表 5.1 所示，討論議題為「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」。場地的部分，為了因應本次與會之所有人員交通方便需求，因此兩次討論會皆辦在集思台大會議中心(亞里斯多德廳)。

表 5.1 專家技術討論會議程

時間	議程
10：00~10：10	主席致詞
10：10~10：30	簡報
10：30~11：00	意見交流與討論

2. 與會成員

本次專家技術討論會之參與成員包含主管機關核能安全委員會相關人員，及本計畫之成員臺灣地下水資源暨水文地質學會會員王士榮副教授及董家鈞教授，兩次專家討論會各邀請四位專家，包含國立中央大學水文與海洋科學研究所李明旭教授、淡江大學楊長義教授、中興工程顧問股份有限公司林伯聰經理、台灣電力公司核能後端營運處李在平博士及國防大學李宏輝教授，兩次邀請之專家名單詳見表 5.2，除此之外，本研究亦邀請與低放處置直接相關的台灣電力公司核能後端營運處低放組共同參與討論，會議照片記錄如圖 5.1 所示。透過邀請學術界及業界之專家，共同參與討論並提出寶貴之意見。簽到記錄參見附錄一，專家之建議請參閱 5.2 節。

表 5.2 專家技術討論會與會專家名單

	第一次專家技術討論會	第二次專家技術討論會
與 會 專 家	單位/專家姓名/職稱	單位/專家姓名/職稱
	國立中央大學水文與海洋科學研究所/ 李明旭/教授	國立中央大學水文與海洋科學研究所/ 李明旭/教授
	中興工程顧問股份有限公司/林伯聰/經理	中興工程顧問股份有限公司/林伯聰/經理
	台灣電力公司核能後端營運處/李在平/博士	台灣電力公司核能後端營運處/李在平/博士
	淡江大學/楊長義/教授	國防大學/李宏輝/教授



圖 5.1 兩次專家技術討論會議照片記錄

3.討論內容

本研究之研究重點(參見圖 1.1)主要為「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024), 針對淺地表處置論壇所討論之主題進行研析及重點整理。另外, 本研究亦蒐集國際間有關淺地表處置之相關文獻, 例如各國的年度報告, 以及有關淺地表處置設施相關的研究等。第一次專家技術討論會舉辦於 2024 年 7 月 18 日, 該次討論內容主要針對期中報告所完成之進度進行討論, 內容包含各國的淺地表處置之現況, 及「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)前半段之重點進行討論。第二次專家技術討論會舉辦於 2024 年 10 月 8 日, 這次討論會所呈現之內容為本計畫成果之 90%研究成果, 包含「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)所有內容, 以及淺地表處置設施相關之文獻等。透過兩次之專家技術討論會議的意見交流, 彙整專家之建議, 同時也更完備本研究之成果。簡報參見附錄二。

5.2 專家技術討論會成果彙整

本研究兩次專家技術討論會, 針對研析成果擬定幾項議題提供專家會議進行討論。首先, 由各國年報可以發現, 許多國家之低放射性廢棄物處置面臨處置容量不足需要擴建或需要減容處理。我國低放射性廢棄物是否有適當的貯存空間(暫存; 最終處置; 減容)? 如何監管? 另一個部分為資訊開放, 國外年報定期向民眾揭露資訊, 且為一般民眾容易理解的方式撰寫。我國目前對外公開之資訊(年度報告)偏向處置單位提供給管制單位審核之報告, 一般民眾可能較難以快速獲取相關資訊, 進一步造成多數民眾對於核能議題不理解。或許未來管制單位可以參考各國管制機關, 朝向製作供民眾瀏覽之報告? 是否有建議推動之方式? 最後, 針對各層級間的溝通, 本研究中主要之研析報告「IAEA-TECDOC-2041」(IAEA, 2024)針對溝通的部分佔了許多篇幅無論是監管機關、設施經營者、專家、民眾及媒體皆需要各方面的溝通以達到相互信任才能使處置計畫順利推動, 我國是否有可以參考的方向? 等議題進行討論。

針對討論會之結果, 本節整理兩次專家技術討論會之相關重點及建議, 主要分為三個部分。首先, 針對廢棄物處置形式方面, 針對淺地表處置, 未來可以進行深入研析之方向, 以

及對於淺地表處置發展之建議；第二個部分，針對我國法規可以加強的地方進行說明；最後，在安全論證及溝通方面，對於國際間之案例及經驗，綜整於本小節之中，如下所述。

1. 廢棄物處置形式方面

本計畫重點著重於將國際間淺地表處置之關鍵議題進行整理，內容包含國際間淺地表處置之各國最新資訊，初步了解目前各國淺地表處置相關資訊及淺地表處置設施之分類，並針對「IAEA-TECDOC-2041」報告(IAEA, 2024)中，有關安全論證、封閉後安全評估及溝通部分進行彙整，確立淺地表處置之關鍵議題，可做為後續淺地表處置系列研究之主題依憑。未來如需推動淺地表處置時，亦可朝幾個重點進行推動，包含：

- (1) 未來如需延續淺地表處置相關議題進行國際資訊研析時，可將範圍縮小，集中精力於條件較類似我國的國家。
- (2) 關於淺地表處置具體推動做法，「IAEA-TECDOC-2041」報告(IAEA, 2024)中各個工作小組對於各個階段的決策、處置設施管理過程、封閉後的安全評估，及安全論證溝通方面，皆具體的提出相關經驗、方法、執行架構及步驟等，如我國未來朝向淺地表處置發展，可參考之。
- (3) 淺地表處置與坑道式處置在安全功能最大的差異為確保「隔離」安全功能，未來如需朝向淺地表處置方向研究，淺地表處置之「隔離」安全功能可做為重要的研究方向之一。
- (4) 淺地表處置相較於坑道處置，更需要特別關注氣候變遷衝擊，例如淹水、坡地災害、沖蝕等相關議題，因此，處置場的「監測」相對而言則變得格外重要，未來如需朝向淺地表處置方向發展，處置場的「監測」亦是重要的研究方向之一。
- (5) 本研究已初步整理了淺地表處置之方法，例如壕溝式、地面土堆式、淺地表混凝土處置窖等，未來如需更深入針對此議題進行研究，可以進一步分析不同類型處置設施之優劣、適用條件或限制，有助於後續政策之篩選依據。
- (6) 我國目前尚未有低放處置設施，且目前經濟部核定之兩處低放射性廢棄物處置之候選場址為坑道式做為規劃，其篩選條件與淺地表處置設施所要求之環境有

所差異。因此，未來如需朝向淺地表處置方向發展，或因應可能的政策變更，我國各核能電廠場之場址可作為案例進行研究。

2. 法規方面

法規方面，政策的決策可能會很大的程度影響低放射性廢棄物處置之發展路徑，例如我國低放射性廢棄物處置目前採坑道式的方向進行推動，因此相關的法規也是按照坑道式的處置方式進行修訂，因此，在此提出相關結論及建議：

- (1) 我國低放射性廢棄物處置目前採取坑道式方式進行發展，為因應未來政策可能之變更，建議可以研究各國淺地表處置政策選擇的背景與考量因素。
- (2) 我國現行的低放射性廢棄物處置之安全報告審查導則之內容，主要是針對坑道處置進行規範，若未來如需考量淺地表處置之方案，應增訂與淺地表處置相關之關鍵資訊。
- (3) 安全報告審查導則除了增訂與淺地表處置相關之內容外，我國目前法規較側重於安全分析或安全評估之要求，未有明確針對安全論證之規範。然而，低放處置之安全論證相關要求為國際間之趨勢，建議未來應同時針對安全論證相關規範進行增訂，讓設施經營者有相關法規依循。
- (4) 針對低放射性廢棄物處置，各國針對不同強度之放射性廢棄物有不同的管制強度及相對應之處置方法，例如英國的極低放射性廢棄物採掩埋的方式進行處置。我國低放射性廢棄物目前採集中式的方式進行處置，因此建議可以考慮較靈活性之方案，讓設施經營者有較大的空間可以推動。

3. 安全論證及溝通方面

本研究主要研析之「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)，針對安全論證及溝通方面有非常豐富的經驗，對於我國低放射性廢棄物坑道處置，或是未來如果朝向淺地表處置方向發展時，可以做為重要的參考依據，相關建議及結論如下：

- (1) 因應民眾對於低放射性廢棄物處置之疑慮，未來如需推動淺地表處置相關計畫

時，可提前準備溝通素材，例如科學數據佐證或是較淺顯易懂的圖資，強調不同處置方法的差異、安全設計與保護標準等。

- (2) 除「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中揭示的重點外，建議納入如何盤點在處置計畫中的所有利害關係人，瞭解不同利害關係人的關切議題，且於不同階段的處置作業需對應並考量不同的溝通方式與內容。
- (3) 各國溝通計畫的主導單位不同，例如德國由管制機關主導，並設有專門法規支持溝通計畫。我國低放處置計畫在進行溝通時，如何界定溝通的時機與在計畫中的利害關係人可能為重要的因素，且應提前規劃相關的溝通策略，使處置計畫順利推動。
- (4) 「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，有部分國家明確羅列各個機構之分工名單及其權責，顯示各機構在溝通過程中分工的重要性。我國未來在進行低放射性廢棄物處置計畫時，建議可先明確定義及分工政府部門的角色與職責，以便未來在政府之間的協調，或是與民眾溝通時可有效的使計畫順利推動。
- (5) 對於政府部門或是設施經營者所提出之各項報告，建議可編制一份簡易好懂的報告，該報告主要受眾為民眾，可較有效率地傳達傳達相關資訊。

第六章 低放射性廢棄物淺地表處置安全管制要項建議

本研究主要針對淺地表處置技術進行研析，內容包含針對各國目前淺地表處置之現況，淺地表處置設施分類，以及「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，有關各國對於淺地表處置設施決策中使用的安全論證、處置場管理、封閉後安全評估及安全論證的溝通等經驗等。而我國尚未有低放處置場，且處置方式目前以坑道式處置場進行規劃，如未來因應可能的政策改變，需提前進行淺地表處置相關資訊的彙整，本研究之成果可提供未來之參考，如下：

1. 綜整各國年報發現，許多國家之低放處置設施正面臨處置容量不足之狀況，而各國處理方式大致上都以廢棄物再處理、增設新的處置空間(例如：原處置場擴建、興建新的處置場)為主。我國低放射性廢棄物處置迄今仍於選址階段，管制單位可借鏡國際間低放處置之經驗，如本研究所蒐整之英國、西班牙等案例，著重關注於處置場可處置之容量。例如針對處置場需要更精密的考量與設計，同時對於廢棄物處置前之處理流程或處理技術，隨國際間相關領域進步而更新。
2. 本研究蒐整了各國低放射性廢棄物淺地表處置之案例，對於不同種類的廢棄物，其處置方式、管制程度也不相同。例如針對 VLLW 的處置方式，韓國 Wolseong 處置場與法國 Cires 處置場採壕溝式處置，而美國近似 IAEA 規定之 VLLW 的 A 類廢棄物，Clive 處置場採淺地表掩埋方式處置，LLW 及部分的 ILW 依據其於半衰期或是活度採地表、淺地表或是更深的淺地表方式進行處置。其中，韓國 Wolseong 處置場與西班牙 El Cabril 處置場則是依據不同廢棄物分級處置於不同處置設施中。我國低放射性廢棄物處置迄今仍於選址階段，且採取集中於坑道處置之方式進行推動，因此建議參考國際之案例，將廢棄物進行分級管制，亦可讓設施經營者有較大的空間可以推動。
3. 「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中，所羅列之參考導則或技術報告，例如：SF-1(IAEA, 2006)、SSR-5(IAEA, 2011)、SSG-23(IAEA, 2012)、SSG29 及 No. GSR Part 5(IAEA, 2016)等，針對淺地表處置前的廢棄物管理，處置設施的開發、作業、封閉及監管，以及安全論證及安全評估等進行要求。未來我國如需考慮淺地表

處置之選項，上述所羅列之導則或技術報告可做為管制單位修訂相關法源或發展相關技術之依據。

4. 進行淺地表處置之決策時，將面臨不同時期可能會遭遇之問題，且不同階段所考量的因素不同，例如各國在選址階段時考慮提供足夠安全的「可接受」場址，而非「最佳」場址；場址特徵化階段時，需要哪些資料支持安全評估建模；廢棄物接收標準決策時，需優先確定廢棄物活性限度。同時，各單位的責任歸屬、不確定性及一些程序性風險(例如政策改變)也是在進行決策時重要的考量，上述對於決策時之考量可做為管制單位在進行協助政府管制設施經營者時之重要參考依憑。
5. 設施之管制包含在設施各階段之所有安全論證審查，或是安全論證變更之審查，皆需明確定義所有機關之角色及責任，並以法規進行要求(例如廢棄物接收標準、場址特徵化)，其中溝通為管制過程中的關鍵要素，可避免政府、管制單位、設施經營者或是其他利益相關者產生誤解。
6. 我國未來對於封閉後之安全評估之審查，設施經營者可參考「ISAM」計畫中所提出之方法可做為主要評估架構，雖然報告顯示此方法仍有許多地方需要改善，例如評估背景的結果如何運用在決策中、系統描述需要跨領域之團隊、情節發展可以增列「FEPs」、酌情制定處理無意的人為入侵之方法，及考慮模型驗證、不確定性和敏感性分析等，管制單位可依據我國之處置環境或是社會氛圍進行適當的調整。除此之外，也需要留意我國一些可能的特殊規格之低放射性廢棄物類型，避免這些類型之廢棄物不符廢棄物接受標準而無法進行處置，造成後續處置的困難。
7. 「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中有關安全論證之溝通所提出之建議，需盡早確認各種溝通策略，明確定義各個單位之角色與職責，對於官方之間、與利害關係人之間及與媒體之間的溝通都需要有良好的溝通管道，並且配合「簡單好懂」的概要類型的報告，或示意圖輔助說明等方法協助溝通。由此可知，溝通為計畫推動之重要的環節。做為管制單位，除對於低放射性廢棄物處置之管制職責外，從政府單位、設施經營者，或是一般民眾的溝通亦可將報告中的經驗做為參考。
8. 國際間有關溝通案例的經驗回饋，我國可做為參考：

- (1) 部分國家明確列出各個機關在處置計畫中扮演的角色，為來我國在推動相關計畫時，可參考其方法，確立哪些機關需要負責什麼業務，並定期舉辦會議或工作坊，增進跨機構之間的溝通效率，以免造成互相推諉責任，使計畫無法順利推動之窘境。
- (2) 英國案例中，媒體擷取部分研究資訊發布新聞，然而其報導的內容與研究成果原意差距甚大，造成後續之風波，其案例也值得我國借鏡。對於發布之內容需要嚴謹確認，同時也建議重視建立與民眾或媒體之間信任的重要性。
- (3) 增加資訊的透明度與民眾參與，例如公開的網路資料平台、定期舉辦參觀活動邀請不同族群人士參與、深入校園推廣或舉辦相關活動、提升出版物的資訊普及度、善用網路平台或社群媒體等，透過上述的工具，傳達管制機關希望傳達的資訊外，亦可拉近與民眾的距離，也可提供即時回覆、溝通的管道。

第七章 結論與建議

本研究針對淺地表處置之議題進行國際資訊之研析，針對國際間進行淺地表處置之國家進行盤點及蒐整最新處置近況。除此之外，IAEA 為了解決大量 LLW 可能為後續處置相關發展的問題，籌辦各種關於放射性廢棄物處置安全的國際會議，以及一系列針對淺地表處置計畫，並於 2024 年針對這些成果進行彙整並公開(IAEA, 2024)。該文獻主要彙整放射性廢棄物淺地表處置安全論證與安全評估的發展、審查及經驗交流相關資訊。研析成果透過兩次專家技術討論會，邀請相關領域之專家進行實質討論，並提出相關意見。本章根據本年度針對國際間淺地表處置相關議題之研析成果，以及專家意見彙整，提出本研究之結論(7.1 節)及建議(7.2 節)。

7.1 結論

1. 本研究蒐整核電國家之年度報告，包含英國、捷克、西班牙及法國，發現各國之低放廢棄物處置部分面臨處置場容量不足之狀況，其分別的應對措施如下：
 - (1) 英國：將廢棄物進行再處理，並將 LLW 分別運至 LLWR 及 Dounreay 處置場兩個設施進行處置，VLLW 則運至 NDA 許可之垃圾掩埋場進行掩埋。
 - (2) 捷克：考量可能會興建新的核能電廠及有關處置技術最新的研究，Dukovany 處置場確保有足夠的廢棄物處置空間，將針對處置設施進行維修、重建及相關研究工作，未來也不排除擴建的可能性。
 - (3) 西班牙：El Cabril 處置場透過提供新的處置空間、評估新的處置窖設計並持續與廢棄物產生單位合作，強化原地管理等方法，持續增加處置量能。
 - (4) 法國：Cires 處置場不足以處理未來幾年之廢棄物存量，中期解決計畫是增加 Cires 處置場的許可處置能力，且不改變處置區目前的佔地面積，並維持相同的安全水準。
2. 本研究蒐整國際間淺地表處置之類型，包含壕溝式、地面土丘、地面型、淺地表及更深的淺地表混凝土處置窖，處置設施的選擇需考量廢棄物的放射性、所需的隔離

時間及地質環境等因素。壕溝與土丘設計相對簡單，適用於低活性且衰減期較短的廢棄物，而混凝土處置窖則提供更高的隔離保護，適合較長半衰期且活性較高的廢棄物處置。

3. 本研究於7月18日及10月8日各舉辦一場專家技術討論會，兩場討論會各邀請4位專家，並同時邀請台電公司一起參與。會中，針對本研究之研析內容進行說明並進行實質討論，並整理出以下三項重點：

- (1) 淺地表處置國際資訊研析部分，可以本研究成果作為依據進行後續延伸研究，未來可朝向類似條件之國家，進一步分析不同類型處置設施之優劣、適用條件或限制，並可重點針對設施「隔離」安全功能及處置場的「監測」議題研究。
- (2) 法規方面，我國法規目前較側重安全分析及安全評估進行要求，建議未來可針對安全論證部分之規範進行條文增訂。另外，如未來需要因應政策之變更加入淺地表處置，低放射性廢棄物處置之安全報告審查導則方面可以增定與淺地表處置相關之關鍵資訊。
- (3) 安全論證及溝通方面，我國可參考「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)所整理之重點及各國之經驗，例如 A.盤點處置計畫中的所有利害關係人，瞭解不同利害關係人的關切議題，且於不同階段的處置作業需對應並考量不同的溝通方式與內容；B. 可先明確定義及分工政府部門的角色與職責，以便未來在政府之間的協調；C. 編制一份簡易好懂的報告，該報告主要受眾為民眾，可較有效率地傳達傳達相關資訊。

4. 「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)為彙整國際上淺地表處置論壇之討論成果。論壇中討論了淺地表處置設施決策中使用之安全論證、淺地表處置設施相關的管制經驗及過程、處置設施封閉後安全評估的經驗及安全論證的溝通四個主題，及其所依據之導則與技術報告，本研究也針對這些研析成果提出相關管制要項建議，該報告的結論如下：

- (1) 「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)中所參酌之導則及之技術報告主

要包含：基本的安全原則(SF-1) (IAEA, 2006)、放射性廢棄物處置之安全目標與標準(SSR-5) (IAEA, 2011)、放射性廢棄物處置安全論證與安全評估(SSG-23) (IAEA, 2012)、放射性廢棄物淺地表處置設施的指引與建議(SSG-29) (IAEA, 2014)、廢棄物接收標準(NO. GSR Part 5) (IAEA, 2016)、廢棄物接收標準的安全評估方法(IAEA-TECDOC-1380) (IAEA, 2003)及介紹 PRISM 及 PRISMA 計畫之成果(IAEA-TECDOC-1814) (IAEA, 2017a)。

- (2) 對於利用安全論證幫助淺地表處置設施開發決策，首先須確認處置設施發展的階段。處置設施所處的階段不僅決定決策的類型，也決定利害關係人最終影響決策的外部因素，並儘可能具體地定義所考慮的任何決策及其替代方案。接下來，確認決策指標及其決策之接受標準。例如劑量為決策指標，劑量限值為決策標準，並且定義決策標準與安全論證之間的關係(MASC 矩陣)。另外，也需考量替代方案對於決策的影響。最後，還需考量計畫未來可能被撤銷的決策風險。
- (3) 對於淺地表處置設施管制，管制機關需準備好對處置設施各個時期之安全論證審進行審查，監管機關還需要制定適當的法規與導則，並執行具體的審查計畫。且審查人員需擁有具備足夠資質的人力以維持審查能力。並注意安全論證的審查重點會隨著設施在不同階段的變化而演變。
- (4) ISAM 方法為進行封閉後安全評估的良好參考依據。除此之外，需要注意幾項重點，包含評估背景的重要性，以確保模型的結果被適當使用；明確且一致地闡述系統描述與評估基礎之間的關係，例如科學發展、處置系統的安全功能或系統演變(例如工程障壁或氣候的演變)；對於不確定性及敏感性分析的明確且詳細資訊等。另外，需要考慮廢棄物的異質性，以評估這些異質廢棄物對於處置場的可接受性，並建立一個處理不符合 WAC 廢棄物的流程。
- (5) 有關安全論證溝通方面，需要釐清國家政策及放射性廢棄物處置策略，並需要得到每個負責組織適當的溝通策略與計畫的支持。溝通計畫中應包括所有利益相關者，特別是當地社區，並根據不同需求採取適當的溝通行動，確保有效且高效的雙向溝通，不斷建立與利益相關者建立信任。另外，不同的利益相關者

可能有不同的興趣及溝通需求，需要針對不同受眾擬定溝通策略。最後，將關鍵的「概念摘要」做為動畫及資訊圖表，以便嵌入多種傳播檔案格式(例如文件、PowerPoint 簡報)。

7.2 建議

本研究針對淺地表處置相關議題進行國際資訊蒐整，內容包含蒐集各國最新年度報告、淺地表處置設施的種類及「IAEA-TECDOC-2041」技術報告(IAEA, 2024)相關內容，相關成果可做為我國未來延伸研究之依據。因此，對於淺地表處置相關之議題，本研究針對未來延伸研究方向及法規修訂兩個部份提出建議，建議如下：

1. 未來延伸研究方向方面

- (1) 針對淺地表處置之國際資訊研析，可優先集中於條件與我國類似的國家進行整理，可加速掌握適用於我國的淺地表處置之相關知識與資訊。
- (2) 可針對淺地表處置場之類型進行較深入的研究，例如不同類型之處置設施其優劣比較、不同類型之處置設施對環境的適用條件或限制等。
- (3) 對於淺地表處置技術而言，處置窖「隔離」之安全功能及處置場「監測」相對較於坑道處置更為重要。建議未來可朝向這兩個部分進行研究。

2. 我國法規或導則修訂方面

- (1) 我國低放安全報告審查導則之內容，目前主要以坑道式之處置設施進行訂定，未來如需納入淺地表處置，可增訂淺地表處置相關內容。
- (2) 我國目前針對低放射性廢棄物處置之法規，尚未對於安全論證相關規範進行要求，未來建議可增訂安全論證相關法規，讓設施經營者有相關法規依循。

参考文献

1. ANDRA, 2023a. National Inventory of radioactive materials and waste.
2. ANDRA, 2023b. Rapport d'information-SUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE ET LA RADIOPROTECTION.
3. Crossland, I., 2012. Disposal of radioactive waste. In: Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering, Woodhead Publishing Series in Energy; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2012; Chapter 18, pp. 531–557.
4. ENRESA, 2023. 7º Plan General de Residuos Radiactivos.
5. FANC, 2016. Report on the European Pilot Study on the Regulatory Review of a Safety Case for Geological Disposal of Radioactive Waste, European Commission.
6. Garamszeghy, M., & Eng, P., 2021. Disposal of Low-and Intermediate-Level Waste: International experience. Nuclear Waste Management Organization.
7. IAEA and OECD/NEA, 2005. Safety of Radioactive Waste Disposal: Proceedings of an International Conference.
8. IAEA, 1992. Review of available options for low level radioactive waste disposal. IAEA-TECDOC-661.
9. IAEA, 1995. Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities: Model Intercomparison Using Simple Hypothetical Data (Test Case 1), First Report of NSARS, IAEA-TECDOC-846.
10. IAEA, 1997. Planning and Operation of Low Level Waste Disposal Facilities, (Proc. of a Symp., Vienna, June, 1996).
11. IAEA, 1999. Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. WS-G-1.1.
12. IAEA, 2001. Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste. TECDOC-1256.
13. IAEA, 2003. Derivation of Activity Limits for the Disposal of Radioactive Waste in Near Surface Disposal Facilities, IAEA-TECDOC-1380.

14. IAEA, 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Results of a Co-ordinated Research Project. ISAM Volume I: Review and Enhancement of Safety Assessment Approaches and Tools.
15. IAEA, 2006. Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1.
16. IAEA, 2011. Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5.
17. IAEA, 2012. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23.
18. IAEA, 2014. Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-29.
19. IAEA, 2016. Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA General Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 5.
20. IAEA, 2017a. Contents and Sample Arguments of a Safety Case for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, IAEA TECDOC-1814.
21. IAEA, 2017b. Communication and Consultation with Interested Parties by the Regulatory Body, IAEA Safety Standards Series No. GSG-6.
22. IAEA, 2018. Functions and Processes of the Regulatory Body for Safety, IAEA Safety Standards Series No. GSG-13.
23. IAEA, 2020. Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories; NW-T-1.27.
24. IAEA, 2024. Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-2041.
25. NDA, 2023. Mission Progress Report. Published November 2023.
26. Ojovan, M. I., & Steinmetz, H. J., 2022. Approaches to disposal of nuclear waste. *Energies*, 15(20), 7804.
27. SÚRAO, 2022. Plán činnosti Správy úložišť radioaktivních odpadů na rok 2023, tříletý plán a dlouhodobý plán.
28. SÚRAO, 2023. Plán činnosti Správy úložišť radioaktivních odpadů na rok 2024, tříletý plán a dlouhodobý plán.

29. Veinović, Ž., Vučenović, H., Rožman, I., & Uroić, G., 2023. Improved conceptual design of LILW repository. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 38(1), 119-136.
30. 核能安全委員會, 2014a, 國際原子能總署處置安全導則 SSG-23 與相關管制技術之研究, 103FCMA008-1。
31. 核能安全委員會, 2014b, 低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究, 103FCMA002。

附錄一

會議簽到表	
會議名稱：「113 年低放射性廢棄物淺地表處置安全管理之關鍵議題研析」第一次專家技術討論會	
會議日期：2024/07/18	會議時間：10：00~11：00
地點/會議室：台大集思會議中心亞里斯多德廳	

與會專家：

單位	姓名	簽到
台灣電力公司	李在平 博士	李在平
中興工程顧問股份有限公司	林伯聰 經理	林伯聰
淡江大學	楊長義 教授	楊長義
國立中央大學	李明旭 教授	李明旭

列席單位(核能安全委員會)：

簽到	簽到
鄭敬瀚	
高嘉仁	
謝正弘	
楊長義	

列席單位(台灣電力公司)：

簽到	簽到

其他參與人員：

單位	簽到
	葉 嘉 鈞

會議簽到表	
會議名稱：「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」第二次專家技術討論會	
會議日期：2024/10/08	會議時間：10：00~11：00
地點/會議室：台大集思會議中心亞里斯多德廳	

與會專家：

單位	姓名	簽到
台灣電力公司	李在平 博士	李在平
中興工程顧問股份有限公司	林伯聰 經理	林伯聰
國防大學	李宏輝 教授	李宏輝
國立中央大學	李明旭 教授	李明旭

列席單位(核能安全委員會)：

姓名	簽到
郭嘉仁 科長	
鍾沛宇 技正	鍾沛宇
謝正驥 技士	謝正驥
	陳俊文

列席單位(台灣電力公司)：

姓名	簽到
張仁坤 組長	張仁坤

附錄二

附錄二-1 第一次專家技術討論會議簡報

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

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
台灣地下水資源暨水文地質學會

113年7月18日(星期四)上午10:00
台大集思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

- 前言
- 各國低放處置現況
- IAEA-TECDOC-2041技術報告
- 討論

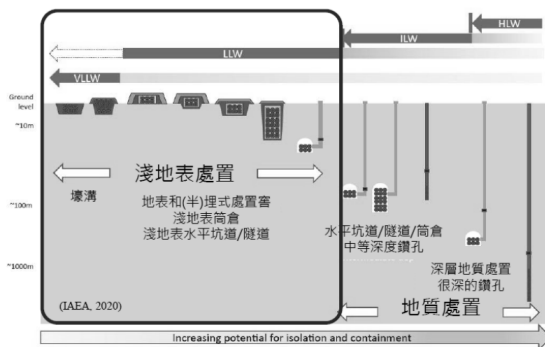
2

前言

- 為因應我國之能源政策，目前各核能電廠已逐漸進入除役階段，受核污染之設備之低放射性廢棄物是立即需要面對的課題。
- 低放射性廢棄物處置技術發展，從選址至處置場封閉可能長達數十年。我國低放射性廢棄物最終處置迄今仍於選址階段，故掌握國際間對於低放射性廢棄物最終處置之處置技術及場址特性，有助於瞭解國際處置技術發展趨勢，並做為我國處置之參考。
- 我國低放最終處置目前採次地表坑道式規劃，為因應國際趨勢及國內可能之情勢變化，本討論會針對國際間淺地表處置之現況、法規、IAEA-TECDOC-2041技術報告進行討論，作為我國低放處置管制要項之參考。

3

淺地表處置



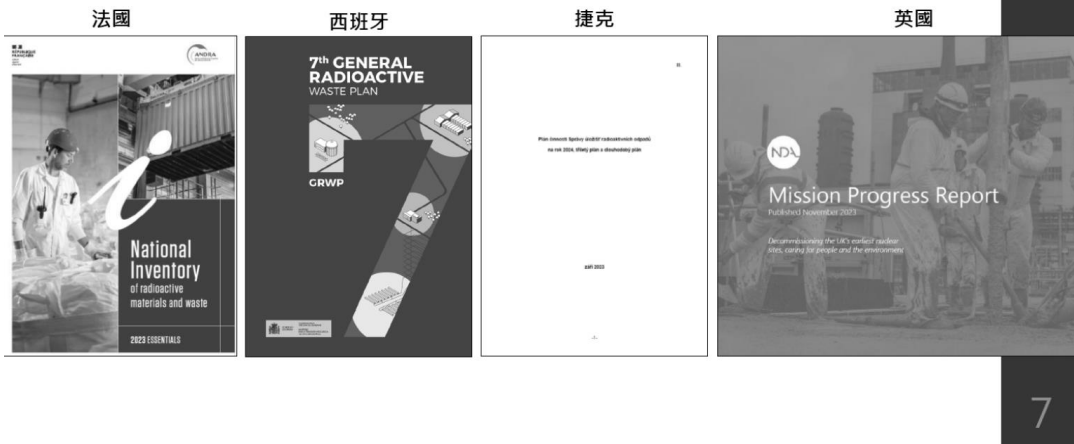
處置方法	處置方法特徵	處置方法之限制	待處理廢棄物
生活及工業廢棄物的垃圾掩埋場	- 簡單、易於構及操作 - 對廢棄廢棄物沒有制度化處理 - 可利用現有設施	圍阻與隔離效果不佳	- 未受管制之廢棄物 - VLLW
簡單的淺地表設施(壕溝)	- 開挖壕溝，將廢棄物處置於壕溝後覆蓋土層 - 簡單又便宜 - 用於短半衰期之LLW - 應設立活度濃度限值	- 可能會受雨水的侵蝕、侵入及滲透影響 - 需要進行管制(例如 100-300 年) - 放射性核種快速遷移至生物圈的風險	含有半衰期(half-life)極短的放射性核種的廢棄物
淺地表設施(工程結構)	- 多層障壁提升處置安全 - 經設計的處置場 - 長期的運轉經驗 - 易於廢棄物處置並提高管理及封閉處置場的效率	- 需要制度化管理(例如 100-300 年) - 雨水的侵蝕、侵入及滲透可能會影響處置場特性	- 短半衰期核種(short-lived nuclide)，具有較高活度濃度之LLW - 長半衰期核種(long-lived nuclide)，具有相對較低活度濃度
淺地表鑽孔或鑿井設施	淺地表填頂的替代或補充計畫，較經濟的選擇，也最大限度地減少了人類入侵的可能性	- 廢棄物包件(waste package)的尺寸及數量有限制 - 需要長達例如 300 年制度化管理	廢棄的密封放射源

(改自Ojovan & Steinmetz, 2022)

淺地表處置國家

國家	處置類型	設施名稱	廢棄物種類	目前進度
德國	深層地質處置(舊礦場坑道)	Konrad	LLW及ILW	建造中
比利時	淺地表設施(工程結構)	Dessel	短半衰期LLW及ILW	許可階段
保加利亞	淺地表設施(工程結構)	Radiana	LLW及ILW	建造中
韓國	中層地質處置(筒倉)	Wolseong	LLW及ILW	運轉中
斯洛伐克	淺地表設施(工程結構)	Mohovce	VLLW及LLW	運轉中
美國	簡單的淺地表設施(壕溝)	Richland (WA)	A、B及C類廢棄物	運轉中
	淺地表設施(工程結構)	Barnwell (SC)	A、B及C類廢棄物	運轉中
	淺地表掩埋	Andrews (TX)	A、B及C類廢棄物	運轉中
	淺地表掩埋	Clive (UT)	A類廢棄物	運轉中
芬蘭	中層地質處置(筒倉)	Olkiluoto	LLW及ILW	運轉中
	深層地質處置(坑道)	Loviisa	LLW及ILW	運轉中
法國	淺地表設施(工程結構)	La Manche	短半衰期LLW	封閉
	淺地表設施(工程結構)	L'Aube	短半衰期LLW	運轉中
	簡單的淺地表設施(壕溝)	Morvilliers	VLLW	運轉中
匈牙利	淺地表設施(工程結構)	Püspökszilágy	LLW及ILW	運轉中
	深層地質處置(坑道)	Bátaapáti	LLW及ILW	運轉中
日本	淺地表設施(工程結構)	Rokkasho Mura	LLW及ILW	運轉中
立陶宛	淺地表設施(工程結構)	Visaginas	LLW及ILW	建造中
捷克共及國	淺地表設施(工程結構)	Dukovany	LLW	運轉中
	中層地質處置(舊礦場坑道)	Richard	LLW	運轉中
	中層地質處置(坑道)	Bratstvi	LLW	封閉
英國	淺地表設施(工程結構)	Drigg	LLW	運轉中
	淺地表設施(工程結構)	Dounreay	LLW	運轉中
瑞典	中層地質處置(處置室及筒倉)	Forsmark	LLW及ILW	運轉中
西班牙	淺地表設施(工程結構)、簡單的淺地表設施(壕溝)	El Cabril	VLLW、LLW及ILW	運轉中

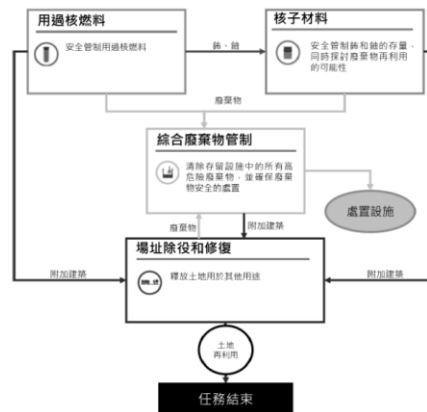
(改自ENRESA, 2023)



英國

- 2023年度之工作，NDA將持續進行將低放射性廢棄物從(低放射性廢棄物)處置場轉移，以延長處置設施的使用年限：

未經處理LLW	2021~2023-3	2127預計產生	總產生量
	323,000 m ³	3,817,000 m ³	4,140,000 m ³
再處理	2021~2023-3	2127預計再處理	總再處理量
	69,000 m ³	654,000 m ³	723,000 m ³
處置	2021~2023-3	2127預計處置	總處置量
	49,000 m ³	264,000 m ³	313,000 m ³
掩埋(VLLW)	2021~2023-3	2127預計處置	總處置量
	144,000 m ³	3,000,000 m ³	3,144,000 m ³



捷克

- SÚRAO根據政府批准的法規和年度、三年和長期活動計畫進行相關處置業務。

低放射性廢棄物處置現況

- 核能發電(Dukovany和Temelin核電廠)產生的低放射性廢棄物儲存在Dukovany核電廠地區的地面處置設施。
- 工業、研究和醫療的低放廢棄物存放在Richard和Bratrstvi地下處置設施，部分處至於Dukovany處置設施的容量。

2024年處置計畫

- 將處置Dukovany和Temelin核電廠約350 m³的低放廢棄物。
- 2023年Dukovany處置設施已使用1/4之空間。
- 負責管理該處置設施是CEZ公司。但CEZ公司傾向不續約，因此，預計2024年將與新的廠商合作。空窗期將由監管部門直接接手相關業務。

未來3年處置計畫

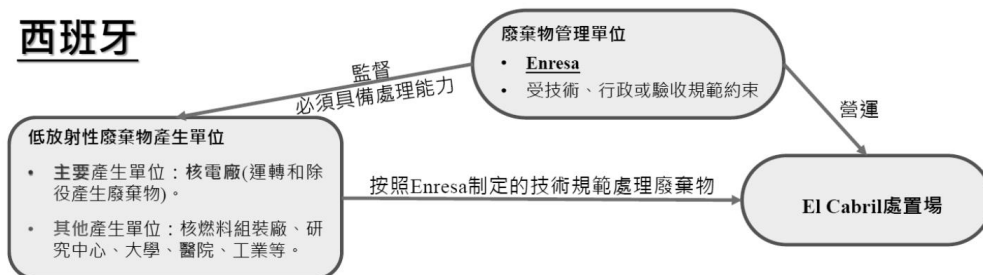
- 處置設施將由新的場商接手，監管部門將協調和監督所有活動，特別是廢棄物接收及設施維護。
- 將進行更大範圍的維修或重建工作，及維持研究量能確保處置技術隨時間更新。

長期處置計畫

- 核電廠的運轉廢棄物將存放在Dukovany處置設施。混凝土結構和運轉技術的維護將會持續進行。
- 考慮新核電廠的建設計畫，Dukovany擴建處置設施也是潛在選項之一。

國際間淺地表處置之現況蒐整及法規研析

西班牙



目前處置狀況

截至2022年12月31日，已興建28個處置窖，22個已完工。

El Cabril 處置場



極低放射性廢棄物處置施
，總容量約為130,000 m³。

中低放射性廢棄物最終處置，大約可處置50,000 m³。

未來工作重點

- 提供新的處置資源以增加VLLW和LILW的處置能力。
- 評估新的LILW處置單元設計，並考慮除役作業的結果。
- 持續支持廢棄物產生機構原地管理能力。

1

國際間淺地表處置之現況蒐整及法規研析

法國

- Andra每五年會發布新版全國放射性物質和廢棄物清單及年度趨勢(更新至2021年12月31日)。

來源

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天)	長半衰期(LL) (半衰期>31天)
活度	極低放射性廢棄物 (VLLW) < 100 Bq/g	 地表處置 (用於分組、儲存和處置 的工業設施)	 正在研究的遠地 表處置設施  正在開發的 深層地質 處置設施 (Cigeo計畫)  正在開發的深層地質 處置設施 (Cigeo專案)
低放射性廢棄物(LLW) 幾百Bq/g至一百萬Bq/g之間	 透過放射性衰變 進行管理	 地表處置設施 (Aube和 Manche 處置設施)	
中放射性廢棄物(ILW) 一百萬到十個億Bq/g之間			
高放射性廢棄物(HLW) 數十億Bq/g數量級			
 核電廠運轉和拆除產生的廢棄物、 稀土元素開採之含錳廢棄物等。	 VTC	醫療廢棄物，或在該領域受污染的 固體或液體廢棄物。	
 核電廠、研究中心的運轉、維護、 核設施拆除作業、醫學運輸。	 ITA	核電廠、研究中心的運轉、維護 和拆除。	

低放射性廢棄物管理

- Cires處置場(LLW處置場)：已使用66%，容量不足處置未來廢棄物量，中期方案將處置場擴增，預計可延長10年左右。



- **Aube**處置場：極低放廢棄物(VLLW)的設施、短半衰期(LILW-SL)之低和中放廢棄物。
- **Manche**處置場：封閉階段(1969~1994)。
- **正在發展**：長半衰期低放廢棄物(LLW-LL)淺地表面處置場。
- **原地包管後處置**：極短半衰期廢棄物(VSLW)。

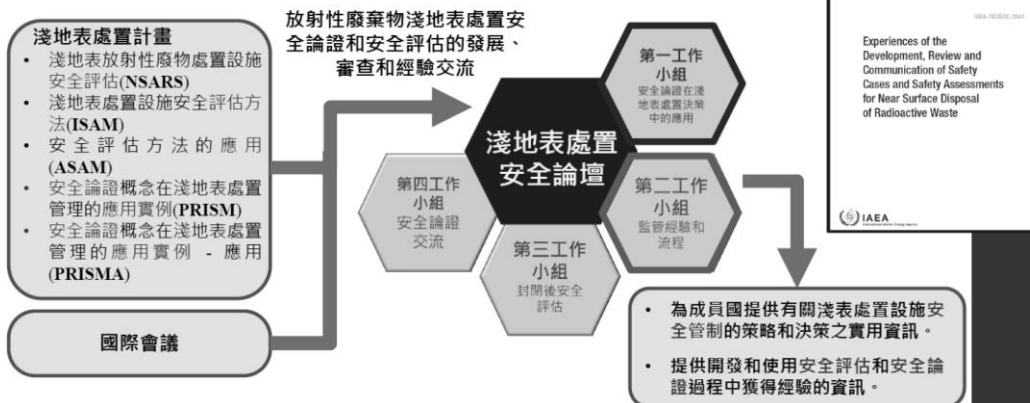
11

2

IAEA-TECDOC-2041 技術報告

12

IAEA-TECDOC-2041



參考資料

IAEA(2024). Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste(IAEA-TECDOC-2041)

13

主要參考導則

Fundamental Safety Principles(SF-1)

說明：建立基本安全目標、安全原則和概念，為IAEA的提供相關計畫之基礎。闡述基本安全目標和10項安全原則。

Disposal of Radioactive Waste(SSR-5)

說明：根據SF-1之規定，提出處置所有類型廢棄物的安全目標和標準，包含保護人類和環境、放射性廢棄物處置規劃的安全要求、處置設施的開發、運轉和封閉要求、安全保護及現有處置設施五項重點及26項要求。

The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste(SSG-23)

說明：根據SF-1的基本安全原則、SSR-5之安全要求，放射性廢棄物處置之安全論證和安全評估之具體安全導則，適用所有需要專門處置放射性廢棄物的設施。

Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste(SSG-29)

說明：提供淺地表處置設施開發、作業、封閉和監管的指引和建議，並滿足SSR-5之安全要求。適合處置VLLW和LLW。處置類型包含壕溝、地上工程結構、地表下的工程結構及在地下數十米深處挖掘的岩洞、筒倉和隧道中。

主要參考文獻

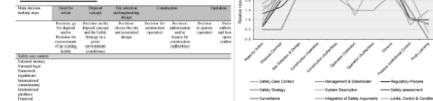
Derivation of Activity Limits for the Disposal of Radioactive Waste in Near Surface Disposal Facilities(IAEA TECDOC-1380)

說明：

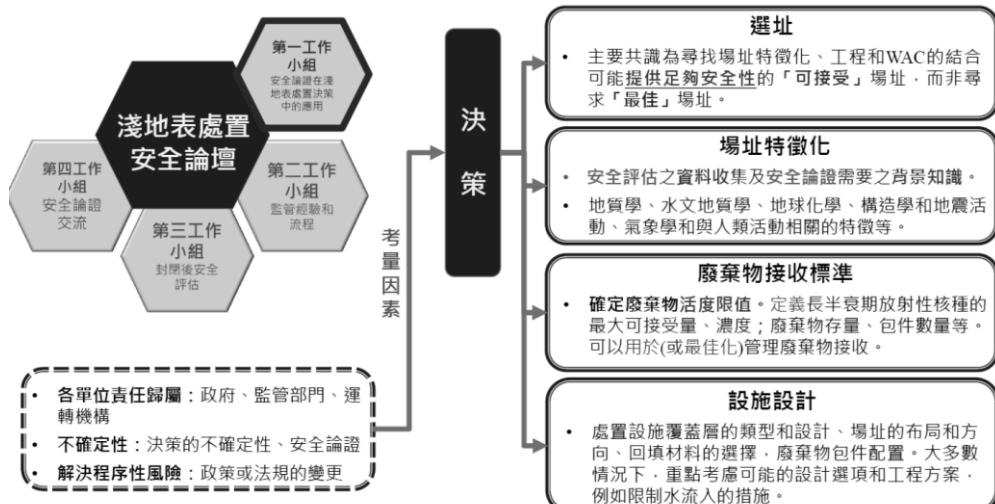
- 介紹廢棄物接收標準的安全評估方法，以計算淺地表處置設施中廢棄物總活度限值和具體活度限值，評估放射性廢棄物在淺地表設施中的潛在影響。
- 安全評估方法用於：淺地表設施處置放射性廢棄物的特定活度限值，或處置設施安全評估的相關之訓練、測試活動。

Contents and Sample Arguments of a Safety Case for Near Surface Disposal of Radioactive Waste(IAEA TECDOC-1814)

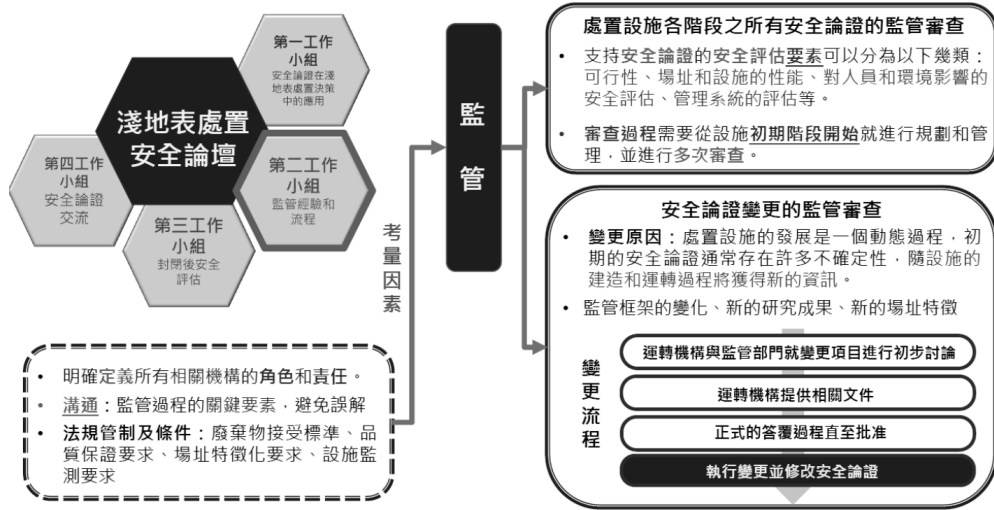
說明：介紹PRISM和PRISMA計畫的成果，幫助會員國開發安全論證。為技術專家提供關於放射性廢棄物處置安全論證內容和樣本論據的詳細指引。為監管部門提供在制定安全論證的依據。

MASC矩陣

14



15



3

討論

討論

- 處置容量：由各國年報可以發現，許多國家之低放射性廢棄物處置面臨處置容量不足需要擴建或需要減容處理。我國低放射性廢棄物是否有適當的貯存空間(暫存；最終處置；減容)?如何監管?

國家原子能科技研究院(113.5.7)

處置設施	已處置	總容量
放射性廢棄物第一貯存庫(015V)	TRU廢棄物499桶	2,200立方公尺
放射性廢棄物第二貯存庫(015K)	現貯存廢棄物5,517桶、廢棄射源308枚	規則區：5,868桶 不規則區：520平方公尺
低放射性廢棄物貯存設施(067)	6,984桶	一般活度廢棄物貯存區8,000桶以上 較高活度廢棄物貯存區900桶以上
低放射性廢棄物貯存設施(075)	廢棄物690桶、廢棄射源13,990枚	不規則廢棄物及廢棄射源貯存區2,449立方公尺 可燃性廢棄物貯存區2,989立方公尺
高活度廢棄物地下貯存庫(015D)	廢棄物3桶、廢棄射源297枚	132立方公尺
低微污染廢土地下暫存設施(066)	324桶	744桶

台灣電力公司(113.6.7)

處置設施	已處置	總容量
核一廠	一號貯存庫	15,870桶
	二號貯存庫	29,242桶
核二廠	1號低貯庫	0桶
	2號低貯庫	33,928桶
	3號低貯庫	25,523桶
	低放射性廢棄物壩溝	0桶
	廢料廠房暫存區	177桶
核三廠	#1廢棄物貯存區	1,426桶
	#2廢棄物貯存區	255桶
	#3廢棄物貯存區	0桶
	#4廢棄物貯存區	0桶
	低放射性廢棄物貯存庫	8,316桶
	蘭嶼貯存場(鋼筋混凝土貯存壩溝)	100,277桶

- 資訊開放：國外年報定期向民眾揭露資訊，且為一般民眾容易理解的方式撰寫，我國目前對外公開之資訊(年度報告)偏向處置單位提供給管制單位審核之報告，一般民眾可能較難以快速獲取相關資訊，進一步造成多數民眾對於核能議題不理解，或許未來管制單位可以參考各國管制機關，朝向製作供民眾瀏覽之報告？是否有建議推動之方式？

放射性廢物設施運轉年報-112年

設施名稱	項目名稱	公告日期
核一廠	◎ 112年核一廠放射性廢棄物管理年報	113.6.7
核二廠	◎ 112年核二廠放射性廢棄物管理年報	113.6.7
核三廠	◎ 112年核三廠放射性廢棄物管理年報	113.6.7
國家原子能科技研究院	◎ 112年國家原子能科技研究院放射性廢棄物管理年報	113.5.7
臺研所存庫	◎ 112年臺研所存庫廢棄物管理年報	113.6.7



IAEA-TECDOC-2041技術報告重點摘述

- 安全論證用於淺地表處置決策時，各單位之責任歸屬應明確，例如監管機關應確保運轉機構適當且安全的方式選址及運轉；另外，程序性風險源於做出的決策可能在以後需要被撤銷，例如政策或法規的變更，導致額外的成本、計畫延宕，以及可能失去民眾信任。
- 有關監管經驗和流程，由於處置計畫是一個大型工程，規劃、開發、運轉及監管過程可能涉及大量組織。因此，有必要從開發初期明確定義所有相關組織的角色與責任。另外，溝通是監管過程的關鍵要素，可協助避免設施使用期間出現溝通不順或誤解。

簡報完畢
敬請指教

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

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

113年10月08日(星期二)上午10:00

台大集思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

- 前言
- 各國低放處置方法及現況
- IAEA-TECDOC-2041技術報告
- 討論

2

前言

- 目前各核能電廠已逐漸進入除役階段，受核污染之設備之低放射性廢棄物是立即需要面對的課題。
- 低放射性廢棄物處置技術發展，從選址至處置場封閉可能長達數十年。我國低放射性廢棄物最終處置迄今仍於選址階段，故掌握國際間對於低放射性廢棄物最終處置之處置技術及場址特性，有助於瞭解國際處置技術發展趨勢，並做為我國處置之參考。
- 我國低放最終處置目前採次地表坑道式規劃，為因應國際趨勢及國內可能之情勢變化，本討論會針對國際間淺地表處置之現況、法規、IAEA-TECDOC-2041技術報告進行討論，作為我國低放處置管制要項之參考。

3

1

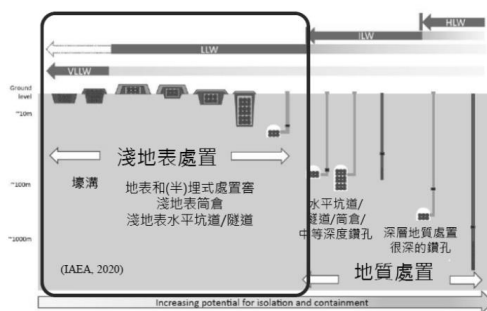
各國低放處置方法及現況

4

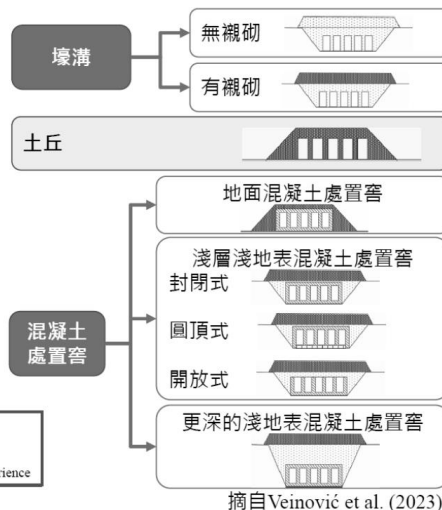
1

各國低放處置方法及現況

淺地表處置方法(1/6)



參考文獻：
Ojovan & Steinmetz (2022). Approaches to Disposal of Nuclear Waste
Veinović et al. (2023). Improved conceptual design of LILW repository
Garamszeghy (2021). Disposal of Low- and Intermediate-Level Waste: International experience



摘自Veinović et al. (2023)

5

1

各國低放處置方法及現況

淺地表處置方法(2/6)

壕溝

- 易於施工和作業，價格低廉、可擴展、模組化
- 可以有襯砌或無襯砌
- 能夠處理各種尺寸和品質的廢棄物包件
- 根據環境的不同，廢棄物包件會迅速腐壞
- 長期易受降雨影響
- 不適用於 ILW

地上土丘

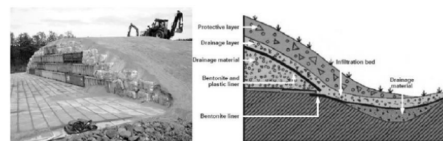
- 易於施工和作業，價格低廉
- 可處置各種尺寸和品質的廢棄物包件
- 通常適用於處理大量廢棄物
- 根據環境的不同，廢棄物包件會迅速腐壞
- 通常將廢棄物保持在地下水位以上
- 長期易受降雨影響
- 不適用於 ILW



深度允許處理所有類別的LLW，包括放射性最強的分類(C類)

瑞典Oskarshamn核電站的VLLW處置設施

- 底部安裝帶有排水通道的混凝土墊層，廢棄物堆放在墊層上。
- 處置區填滿時，建造覆蓋層和封蓋系統，頂部覆蓋碎石和土壤，周邊使用混凝土塊加固覆蓋層。



6

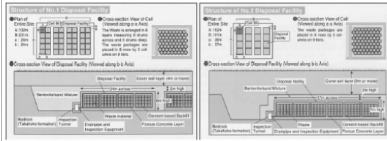
淺地表處置方法(3/6)

混凝土處置窖

- 目前最常用方法之一
- 易於施工、作業、模組化和可擴充性
- 可處理各種尺寸和品質的廢棄物包件
- 可以地表、淺地表或深達幾十米的地質環境中建造

日本Rokkasho-mura處置場

- 由兩個處置設施組成，每個處置設施都建有多個混凝土結構，深度為地表以下約20 m。
- 處置單元被裝滿時，覆蓋鋼筋混凝土蓋層，整個區域將被4 m厚的膨潤土和土壤層覆蓋。



地面混凝土處置窖

- 覆蓋廢棄物有選定的保護層
- 易受到生物入侵
- 通常將廢棄物保持在地下水位以上
- 一般不適用於ILW

淺層淺地表混凝土處置窖

- 通常將廢棄物保持在地下水位以上
- 可針對部分ILW進行設計
- 容易受到生物入侵影響

封閉式

- 覆蓋廢棄物有選定的保護層
- 包件形式或處理過的廢棄物
- 處置窖用混凝土蓋封閉，用混凝土密封(填充)

圓頂式

- 覆蓋廢棄物有選定的保護層
- 包件形式或處理過的廢棄物
- 將廢棄物放置在乾燥的透水層，並用不透水的混凝土屋頂覆蓋來控制滲透

開放式

- 廢棄物經過預處理，最大限度減少體積
- 低滲透性蓋層放置在已填滿的處置窖上，處置窖中之廢棄物無需放置混凝土板上

更深的淺地表混凝土處置窖

- 覆蓋廢棄物有選定的保護層
- 處置窖用混凝土蓋封閉，用混凝土密封(填充)
- 比地表或淺處置窖更能抵抗侵入
- 可針對部分ILW進行設計

法國Centre de l'Aube 設施

- 處置場裝滿時，將用工程覆蓋系統進行覆蓋。



淺地表處置方法(4/6)

處置概念	處置國家	圖示	處置設施特徵
壕溝-無襯砌	Drigg(英國)(1-7號壕溝) Hanford, WA(美國) Vaalputs(南非) Ezeiza(阿根廷)		• 地下、淺地表 • 用當地材料覆蓋廢棄物(挖掘壕溝時收集的土壤) • 施工簡單，價格低廉 • 某些情況下，廢棄物包件會迅速變質 • 顯著下陷 • 易受生物入侵 • 適用極低(VLLW)和低放射性廢棄物(LLW)
壕溝-襯砌	El Cabril(西班牙)(VLLW)		• 地下、淺地表 • 用選定的保護層覆蓋廢棄物 • 施工簡單，價格低廉 • 廢棄物包件會迅速變質 • 顯著下陷 • 易受生物入侵 • 適用於VLLW和LLW
土丘	Forsmark(瑞典) Oskarshamn(瑞典) Ringhals(瑞典) Studsvik(瑞典) Manche disposal facility (Centre de Stockage de la Manche - CSM)(法國) Fernald OH(美國)		• 地上 • 用選定的保護層覆蓋廢棄物 • 施工簡單，價格低廉 • 適用於處理大量廢棄物 • 廢棄物包件可能會迅速變質 • 易受生物入侵 • 處置於地下水位以上 • 顯著下陷 • 適用於VLLW和LLW

淺地表處置方法(5/6)

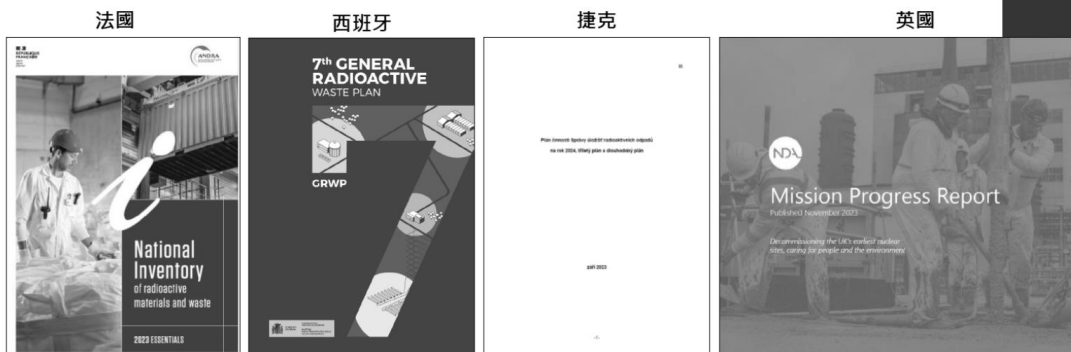
處置概念	處置國家	圖示	處置設施特徵
地面混凝土處置窖	Aube disposal facility (Le Centre de stockage de l'Aube - CSA)(法國) El Cabril(西班牙)(LLW) Drigg(英國)(8號處置窖) Beilong(中國) Mochovce(斯洛伐克)		• 地上 • 模組化，處置窖類型 • 用選定的保護層覆蓋廢棄物 • 易受生物入侵 • 處置於地下水位以上 • 適用於LLW
淺地表封閉混凝土處置窖	Aube disposal facility(法國) Trombay(印度) Tarapur(印度) Maişigala(立陶宛)		• 地下 • 模組化，處置窖類型 • 用選定的保護層覆蓋廢棄物 • 包件形式或已處理過的廢棄物 • 處置窖用混凝土蓋封閉，並用混凝土密封(填充) • 易受生物入侵 • 處置於地下水位以上 • 適用於LLW和有限數量(體積)ILW
淺地表圓頂混凝土處置窖	IRUS(加拿大)		• 地下 • 模組化，處置窖類型 • 將廢棄物放入乾燥的滲透層並覆蓋來控制滲透 • 用選定的保護層覆蓋廢棄物 • 包件形式或已處理過的廢棄物 • 易受生物入侵 • 處置於地下水位以上 • 適用於LLW和部分ILW

淺地表處置方法(6/6)

處置概念	處置國家	圖示	處置設施特徵
淺地表開放式 混凝土處置窖	Drigg(英國)(9號處置窖)		- 地下 - 模組化，處置窖類型 - 處置窖上放置低滲透性蓋層，無需放置混凝土板 - 廢棄物經過處理(最小化空腔率) - 一些下陷 - 易受生物入侵 - 處置於地下水位以上 - 適用於 LLW 和部分 ILW
更深的混凝土 處置窖	Rokkasho-mura(日本) Dounreay(蘇格蘭)		- 地下 - 模組化，處置窖類型 - 用選定的保護層覆蓋廢棄物 - 包件形式或已處理過的廢棄物 - 處置窖用混凝土密封，用混凝土密封(填充) - 比地表或淺地表處置窖更能抵抗生物入侵 - 處置於地下水位以上 - 適用於 LLW 和有限量的 ILW

10

各國低放處置現況(1/3)



11

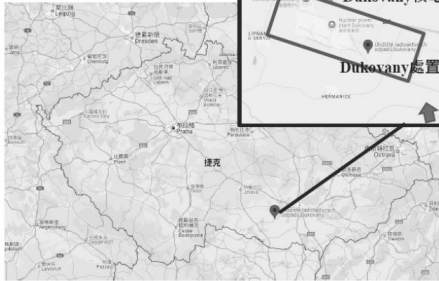
各國低放處置現況(2/3)

英國	2023年度之工作，NDA將持續進行將低放射性廢棄物從(低放射性廢棄物)處置場再處理並轉移，以延長處置設施的使用年限。
捷克	- 負責管理該處置設施是ČEZ公司。但ČEZ公司傾向不續約，因此，預計2024年將與新的廠商合作。空窗期將由監管部門直接接手相關業務。 - 考慮新核電廠的建設計畫，Dukovany擴建處置設施也是潛在選項之一。
西班牙	- El Cabril處置場將提供新的處置資源以增加VLLW和LILW的處置能力。 - 評估新的LILW處置單元設計，並考慮除役作業的結果。 - 持續支持廢棄物產生機構優化原地管理能力。
法國	- Cires處置場(LLW處置場)：已使用66%，容量不足處置未來廢棄物量，中期方案將處置場擴增，預計可延長10年左右。 - 正在發展長半衰期低放廢棄物(LLW-LL)淺地表處置場。

12

各國低放處置現況(3/3)

捷克



Dukovany核電廠

- 捷克境內第一座核電廠，占捷克總用電量20%，由ČEZ公司擁有和經營。

Dukovany處置場

- 位於Dukovany核電廠區內。
- ČEZ公司：建造和經營。
- SÚRAO：廢棄物接收(符合條件)、維修和保養。

- **2022**：SÚRAO將對處置場進行更大範圍的維修或重建，及其他處置相關研究，確保未來安全運轉。
- **2023**：ČEZ公司不希望再承擔執行其他營運業務的責任，因此SÚRAO將另尋接手的單位。考量處置場的位置，部分運轉業務仍由ČEZ公司繼續服務。
- **2024**：處置場的運轉將由新的廠商進駐。

資料來源：

<https://www.cez.cz/en/home> (ČEZ集團官方網站)<https://www.surao.cz/en/> (SÚRAO官方網站)

SÚRAO, 2021. Plán činnosti Správy uložení radioaktivních odpadů na rok 2022, tříletý plán a dlouhodobý plán SÚRAO, 2022. Plán činnosti Správy uložení radioaktivních odpadů na rok 2023, tříletý plán a dlouhodobý plán SÚRAO, 2023. Plán činnosti Správy uložení radioaktivních odpadů na rok 2024, tříletý plán a dlouhodobý plán

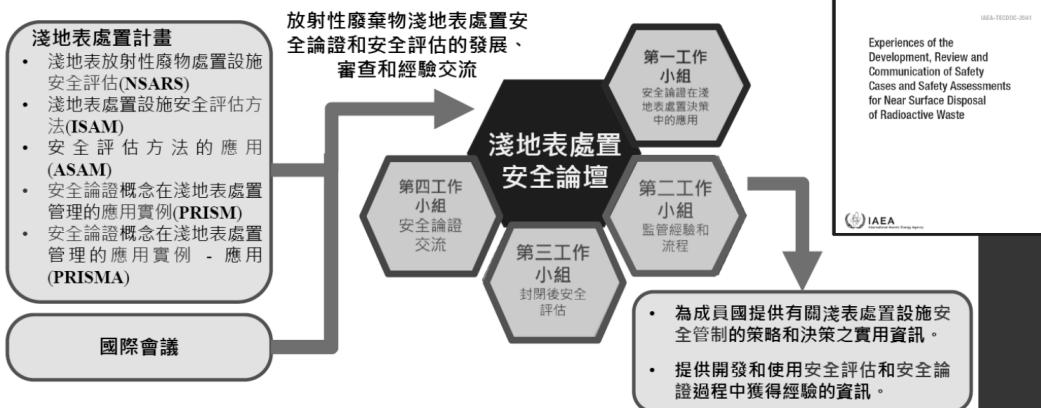
13

2

IAEA-TECDOC-2041技術報告

14

IAEA-TECDOC-2041



參考資料

IAEA (2024). Experiences of the Development, Review and Communication of Safety Cases and Safety Assessments for Near Surface Disposal of Radioactive Waste(IAEA-TECDOC-2041)

15

主要參考導則

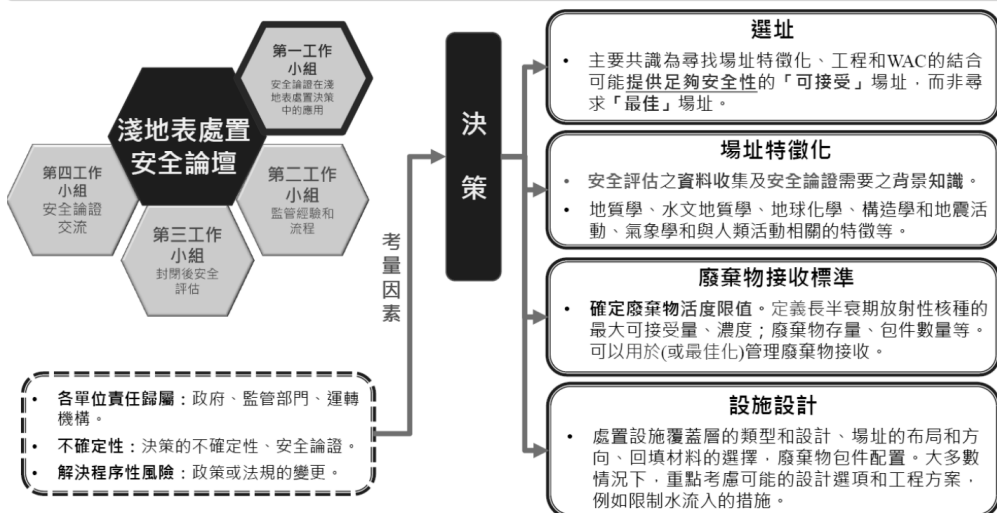
年份	報告書名	編號	說明
2006	Fundamental Safety Principles.	SF-1	基本安全原則 - 建立基本安全目標、安全原則和概念，為IAEA提供相關計畫之基礎。 - 闡述基本安全目標和10項安全原則，並簡要描述了其意圖和目的。 - 保護人類和環境免受電離輻射的有害影響，須在不過度限制的情況下執行，確保設施的運轉和任何有關核活動的進行。
2011	Disposal of Radioactive Waste.	SSR-5	放射性廢棄物的處置 - 根據SF-1規定處置所有類型放射性廢棄物的安全目標和標準。 - 適用範圍：處置設施中所有類型的放射性廢棄物。
2012	The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste.	SSG-23	放射性廢棄物處置安全論證與安全評估 - 根據SF-1、SSR-5開發之安全論證，並輔以支持安全評估。 - 提供如何評估、展示和記錄各類型放射性廢棄物處置設施安全性的指引。 - 適用範圍：所有需要專門處置放射性廢棄物的設施之安全論證和安全評估。
2014	Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste	SSG-29	放射性廢棄物淺地表處置設施 - 提供淺地表處置設施開發、作業、封閉和監管的指引和建議，並滿足SSR-5之安全要求。 - 適用範圍：適合處置VLLW和LLW，處置類型包含壕溝、地上工程結構、地表下的工程結構及在地下數十米深處挖掘的岩洞、筒倉和隧道中。
2016	Predisposal Management of Radioactive Waste	No. GSR Part 5	廢棄物接收標準 - 根據SF-1建立的導則，確定放射性廢棄物的處置前管理必須滿足的要求。 - 適用範圍：各類放射性廢棄物的處置前管理，涵蓋產生到處置的所有管理步驟。

16

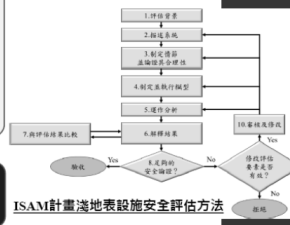
主要參考之技術報告

年份	報告書名	編號	說明
2003	Derivation of Activity Limits for the Disposal of Radioactive Waste in Near Surface Disposal Facilities	IAEA TECDO C-1380	- 目的：介紹廢棄物接收標準的安全評估方法，以計算淺地表處置設施中廢棄物總活度限值和具體活度限值，評估放射性廢棄物在淺地表設施中的潛在影響。 - 適用範圍：廢棄物類型包括醫療、工業和研究含有放射性核種的廢棄物活度，及核設施除役後產生的廢棄物。
2017	Derivation of Activity Limits for the Disposal of Radioactive Waste in Near Surface Disposal Facilities	IAEA TECDO C-1814	- 介紹PRISM和PRISMA計畫的成果，幫助會員國開發安全論證。 - 報告目的： - 為技術專家提供關於放射性廢棄物處置安全論證內容和樣本論據的詳細指引。 - 為監管部門提供在制定安全論證的依據。

17



18



加拿大：監管機構的溝通

- 監管機構：加拿大核安全委員會 (CNSC)，由最多七名成員組成。
- 委員會進行決策時，CNSC工作人員透過公開程序得到專家的研究、分析和意見支持，CNSC工作人員、提供資訊者、利害關係人或民眾等可能會在場旁聽。
- 監管研究是CNSC工作人員的一項重要工作。研究結果為許可建議提供獨立的科學支援，並在期刊、同儕審查會議或演講中傳遞研究成果。
- CNSC工作人員還舉辦許多活動(例如：研討會、線上會議、討論會等)，以分享監管的相關作用、交流技術資訊，並聽取當地居民和利害關係人之關切。

CNSC工作人員針對安全論證與不同利害關係人的溝通步驟



22

古巴：放射性廢棄物處置(1/2)

基本資訊

來源：工業、研究、醫藥和其他活動。

監管機構：國家核安全中心(CNSN)

運轉組織：輻射防護和衛生中心(CPHR)是唯一獲得許可的運轉組織。

選址：始於1985年，於2001年結束。場址位於古巴中部，位於人口稀少地區的花崗閃長岩中。

參與溝通之相關單位

機構	角色
核能和先進技術局(AENTA)	選址過程的協調員和對應方
科學技術與環境部(CITMA)	負責放射性廢棄物管理的單位，安全論證實施負責人，負責選址過程、安全評估、概念設計等
輻射防護和衛生中心(CPHR)	選址與城市發展相關(當前和未來的社會經濟影響)
城市規劃研究所	定義氣候事件情節，提供氣象資訊
氣象研究所	地質、地球物理、地震、水文、水文地質等多項研究
地質與探礦研究所	評估進入場址的通道，設計通往處置設施的道路
交通部(地面)	提案場址的環境基本資訊
地理研究所	意外事件情節(飛機事故)的資訊
航空研究所	選址(環境問題)
環境監管機構(ORASEN/CICA)	選址(核問題)
核監管機構(CNSN)	開發淺地表設施的概念設計
計畫企業	意外事件方案(洪水事件)的資訊
能源專案	選址，提供現場考察許可證
礦產資源管理組織	自然事件情節(地震研究)的資訊
國家地震調查中心	選址，為極端事件場景提供資訊
國防組織(國家民防、國防部)	選址過程
公共衛生部	選址過程
省市市政府	選址過程

23

古巴：放射性廢棄物處置(2/2)

選址過程的溝通

- 監管機構和其他相關機構舉行會議
- 在當地和潛在場址附近的省、市政府演講
- 關於環境和廢棄物處置主題的研討會：
 - 選址過程和選址要求(地質、水文、水文地質、地震、氣候、外部事件和社會經濟因素)
 - 選定為潛在場址的有利特徵
- 溝通機制和工具：技術報告、簡報、講座和相關出版物
- 成果：批准所選的場址、安全評估和安全論證的修正

問題	解決辦法
目標受眾缺乏對放射性廢棄物管理和安全問題的瞭解	舉辦以這些方面為重點的研討會、會議、講座、講習
對核設施的負面風險認知	舉辦會議，介紹：選址、安全評估、環境影響評估、廢棄物管理的國際現狀
選址的理由	舉辦關於選址的有利特徵和選址過程的講座和會議

經驗及教訓

- 需要制定放射性廢棄物處置的國家策略(包括處置計畫、預算等)，以支援所有最終廢棄物處置之活動
- 需要改善決策者提供給民眾有關放射性廢棄物處置和安全的資訊
- 需要改進溝通策略(例如廣泛的民眾諮詢)
- 加強選址研究，例如：場址的特徵描述中對於地震(地球物理學)和水文地質研究

24

IAEA-TECDOC-2041技術報告重點摘述

- 安全論證用於淺地表處置決策時，各單位之責任歸屬應明確，例如監管機關應確保運轉機構適當且安全的方式選址及運轉；另外，程序性風險源於做出的決策可能在以後需要被撤銷，例如政策或法規的變更，導致額外的成本、計畫延宕，以及可能失去民眾信任。
- 有關監管經驗和流程，由於處置計畫是一個大型工程，規劃、開發、運轉及監管過程可能涉及大量組織。因此，有必要從開發初期明確定義所有相關組織的角色與責任。另外，溝通是監管過程的關鍵要素，可協助避免設施使用期間出現溝通不順或誤解。

IAEA-TECDOC-2041技術報告重點摘述

- 關於封閉後之安全評估時，需注意放射性廢棄物的類型與處置設施類型之間的兼容性，避免有特定類型的廢棄物無法進行處置。另外，ISAM報告中所提到的安全評估方法，整體上仍是一個良好的參考，但需依照經驗進行適度的修正。
- 安全論證之溝通部分之重點如下：
 - 盡早確認各種溝通策略
 - 各單位溝通管道保持通暢
 - 利用好懂或圖表與利害關係人或民眾的溝通
 - 與媒體建立良好關係
 - 監管組織、運轉單位、學界及民眾間建立信任

- **各層級間的溝通：**本研究中主要之研析報告(TECDOC-2041)，針對溝通的部分佔了許多篇幅，無論是監管機構、處置單位、專家、民眾及媒體，皆需要各方面的溝通以達到相互信任，才能使處置計畫順利推動。
- **資訊開放：**國外年報定期向民眾揭露資訊，且為一般民眾容易理解的方式撰寫，或許未來管制單位可以參考各國管制機關，朝向製作供民眾瀏覽之報告？是否有建議推動之方式？

處置單位

- 台灣電力公司目前在核能後端營運處有專門針對高、低放處置之科普宣傳專區，其內容豐富，不過影片觀看人數不太理想，或許相關宣傳方法可以參考本研究主要研析報告(TECDOC-2041)建議之方法進行改善，以達到宣傳效果。
- 舉例：宣傳影片或許可以跟比較大的自媒體頻道合作(例如：PanSci 泛科學)



管制單位

我國目前對外公開之資訊(年度報告)偏向處置單位提供給管制單位審核之報告，一般民眾可能較難以快速獲取相關資訊，進一步造成多數民眾對於核能議題不理解。

放射性廢棄物設施運轉年報-112年

設施名稱	項目名稱	公告日期
核一廠	◎ 112 年第一階段核一廠高放廢棄物管理計畫	113.6.7
核二廠	◎ 112 年第二階段核二廠高放廢棄物管理計畫	113.6.7
核三廠	◎ 112 年第三階段核三廠高放廢棄物管理計畫	113.6.7
國家原子燃料供應中心	◎ 112 年國家原子燃料供應中心高放廢棄物管理計畫	113.5.7
廢物貯存場	◎ 112 年廢物貯存場高放廢棄物管理計畫	113.6.7



簡報完畢
敬請指教