

核能安全委員會 委託研究計畫研究報告

112 年放射性廢棄物安全管制國際資訊研析 期末報告

委 託 單 位：核能安全委員會
執 行 單 位：國家原子能科技研究院
計畫主持人：曾漢湘
子項主持人：
計 畫 編 號：112FCMA008
報 告 日 期：中華民國 112 年 12 月 31 日

112 年放射性廢棄物安全管制國際資訊研析 期末報告

受委託單位：國家原子能科技研究院

研究主持人：曾漢湘

協同主持人：楊進有

研究期程：中華民國 112 年 6 月至 112 年 12 月

研究經費：新臺幣 134 萬 7 千元

核能安全委員會 委託研究

中華民國 112 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）

112 年放射性廢棄物安全管制國際資訊研析

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	2
四、 展望	6

計畫名稱：112 年放射性廢棄物安全管制國際資訊研析

一、摘要

中文摘要

本案以協助管制機關完成放射性廢棄物安全管制國際資訊研析為主要目的。具體工作項目包括：

- 一、放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析。
- 二、放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析。
- 三、放射性廢棄物處置國際動態資訊研析。

本案之研析成果將有助於我國放射性廢棄物管制決策與研發工作之參考應用，以加速提昇管制技術能力，確保管制安全合於國際水準。

關鍵字：處置、放射性廢棄物管理、案例研析

ABSTRACT

This work aims to review and summarize the information of national experience by nuclear power counties on regulatory control of the site selection process and license application for a radioactive waste disposal facility. The main tasks focus on:

1. Study on international information of radioactive waste disposal plan information preserved across generations.
2. Case study on the regulatory framework and R&D strategy of high-level waste disposal in the Republic of Korea.
3. News highlights of radioactive waste disposal in 2022.

The international experiences can benefit regulatory research in the area of radioactive waste management in Taiwan.

Keywords: Disposal, Radioactive Waste Management, Case Study

二、計畫目標

核能署(Nuclear Energy Agency, NEA)放射性廢棄物管理委員會(Radioactive Waste Management Committee, RWMC)已發佈國際倡議，以解決跨世代保存紀錄、知識與記憶(Records, Knowledge and Memory, RK&M)問題的挑戰。本計畫藉由跨世代保存紀錄、知識與記憶(RK&M)國際案例研析，獲取保存紀錄之經驗與實施步驟。

韓國是核能發電大國，其高放射性廢棄物處置技術亦積極發展中。2022年韓國政府發布「高放射性廢棄物處置管理研發路徑圖(Roadmap)」，顯示其推動計畫的決心。本計畫借鏡韓國優良實務經驗，以期在管理與管制面向有助於我國處置計畫推展，技術符合國際安全水準。

針對2022年放射性廢棄物處置相關資訊，有必要持續蒐集整理，包含國際核後端新聞，以及高、低放射性廢棄物處置資訊，藉以瞭解國際核能後端管制重要議題與發展趨勢。

計畫之具體執行項目包括：

- (一) 放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析。
- (二) 放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析。
- (三) 放射性廢棄物處置國際動態資訊研析重要成果。

三、重要成果

(一) 放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析。重要成果如下：

1. 高放射性廢棄物處置屬長時間達百萬年處置型態，藉由理解必要的跨世代資訊保存紀錄架構，確保在未來廢棄物管制上降低人類無意闖入的可能性。
2. 研析成果將有助於我國管制機關瞭解放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存的重要性，提供我國管制機關擬定合適資訊保存作法、規定與必須的紀錄內容。

(二) 放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析。重要成果如下：

1. 韓國已於2021年發布「第2版高放射性廢棄物管理基本計畫」，計畫將俟選址程序立法，並實際推動後落實設計、調查及安全評估技術之應用。列舉處置需求之關鍵技術與成本，依據韓國在高放射性廢棄物處置在產業上推動的優良經驗，通盤檢視我國在處置技術上是否不足處，以精進我國在處置技術上符合發展時程，循序漸進達成處置設施設計目標。

2. 韓國放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略研析，以系統性歸納韓國核電、政策管理、重要法規與組織等資訊，成果有助於我國管制機關借鏡並完善我國法規體系與管制要求，提升我國核能管制人員瞭解鄰近國家核後端知識。

(三) 放射性廢棄物處置國際動態資訊研析。重要成果如下：

1. 研析成果將有助於我國管制機關瞭解2022年(111年度)放射性廢棄物處置國際動態資訊，包含國際核後端資訊新聞，及低與高放射性廢棄物處置新聞(如表1所示)，作為擬訂國內管制策略參考，確保管制安全符合國際水準。
2. 針對2022年國際上有關放射性廢棄物安全管制的重大事件，例如，瑞士選定深層地質處置設施建議場址與芬蘭用過核子燃料處置設施運轉執照申請進度兩個案例，進行資訊蒐整與研析。成果可供管制機關、處置計畫執行單位及學術界等參考應用。蒐整之資訊亦有利於管制機關瞭解相關議題的國際現況與趨勢，精進我國安全管理技術能與時俱進，並符合國際水準。

表 1：2022 年放射性廢棄物處置國際動態資訊表

國家/ 機構	新聞 分類	2022 年放射性廢棄物處置新聞標題
比利時	高放 處置	• 2022.12 比利時制定高放射性與長半化期放射性廢棄物地質處置政策
加拿大	高放 處置	• 2022.03 加拿大核廢棄物管理組織完成高放處置計畫選址鑽探工作 • 2022.06 加拿大 NWMO 完成用過核子燃料處置工程障壁驗證 • 2022.06 加拿大發布用過核子燃料處置候選場址安全信心報告 • 2022.08 加拿大高放處置選址進度將延遲一年至 2024 年選出優先場址
中國	高放 處置	• 2022.11 中國高放處置地下研究實驗室開始隧道挖掘工程
法國	高放 處置	• 2022.07 法國政府發布高放射性廢棄物地質處置設施法令
德國	低放 處置	• 2022.01 德國 Asse II 處置設施招標廢棄物處理廠和中期貯存設施設計 • 2022.04 德國 Asse II 處置設施廢棄物開發回收機器 • 2022.08 德國 Konrad 低與中放射性廢棄物處置設施將建造作業廠房

芬蘭	高放處置	• 2022.01 芬蘭 Posiva 公司提出用過核子燃料處置設施運轉執照申請 • 2022.06 芬蘭 Posiva 公司完成用過核子燃料封裝廠建造 • 2022.06 芬蘭 Posiva 公司接收用過核子燃料處置孔鑽機設備 • 2022.07 芬蘭用過核子燃料處置設施完成首批五條處置隧道開挖 • 2022.11 芬蘭用過核子燃料封裝廠完成乾燥系統安裝測試 • 2022.12 芬蘭用過核子燃料處置設施進行處置孔鑽孔與設備測試
義大利	低放處置	• 2022.03 意大利低放射性廢棄物處置計畫結束公眾諮議程序
韓國	低放處置	• 2022.07 韓國核子安全委員核准中與低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施建造和運轉申請案 • 2022.08 韓國慶州低與中放射性廢棄物處置設施展開第二期工程
	高放處置	• 2022.07 韓國規劃於 2060 年啟用高放射性廢棄物最終處置設施
斯洛維尼亞	高放處置	• 2022.01 斯洛維尼亞評估研究用反應器用過核子燃料深層鑽孔處置可行性
瑞典	低放處置	• 2022.12 瑞典土地與環境法院同意 SFR 低放處置設施擴建環境許可
	高放處置	• 2022.01 瑞典核准用過核子燃料處置設施建造執照申請 • 2022.02 瑞典用過核子燃料處置設施建造案後續步驟
瑞士	高放處置	• 2022.03 瑞士處置專責機構即將完成深層岩體鑽探作業 • 2022.09 瑞士選定 Nördlich Lägern 地區為深層地質處置設施建議場址
英國	低放處置	• 2022.10 英國 Dounreay 處置設施完成第一批低放射性廢棄物處置作業
	高放處置	• 2022.01 英國成立第三個高放處置社區夥伴關係組織 • 2022.07 英國第四個地區加入高放射性廢棄物處置選址計畫

		• 2022.09 英國將委託美國 KBR 公司配合執行地質處置設施計畫 • 2022.11 英國開發高放處置鑽孔密封技術
美國	低放處置	• 2022.02 美國 WIPP 處置設施通風設施升級工程取得重大進展 • 2022.05 美國薩凡納河場址最後一批超鈾放射性廢棄物已運往處置 • 2022.10 美國 WIPP 處置設施完成第 7 處置區廢棄物置放作業
	高放處置	• 2022.01 美國國家實驗室參與瑞士高放處置膨潤土材料受熱研究計畫 • 2022.08 美國深層隔離公司授權 Amentum 公司推廣高放處置技術 • 2022.09 美國能源部致力在高放射性廢棄物處置過程中建立信任關係

註：日期表示新聞登載的月份

四、 展望

在使用核能的同時，亦應肩負世代責任，為後代環境永續謀求長遠的福祉。因此，對於處置計畫推行紀錄、知識與記憶保存之相關議題，亦應予以重視，並盡早做好未來規劃及採取保存措施。在社會科學方面，處置計畫推動過程期間已產生大量諮議與決策演變的紀錄、知識與記憶，隨著組織變革與人員離退等各種因素，有喪失的風險。因此，有實施資訊集中管理與維護保存的必要性與急迫性。

借鏡韓國高放射性廢棄物處置技術研發策略，學習國際經驗開始再逐漸考慮國情特色發展本土技術。透過視覺化的實體模型設計為主導，再配套發展尚未能實際展開的深層地質調查技術與較為抽象的安全評估技術。此作法可以促進公眾溝通，利於處置計畫推動。另可學習韓國關鍵技術與成熟度之評量方式，確認我國處置技術發展是否已達設計目標，也可作為未來向管制機關申請建造有利之審查依據。

本計畫系統性與全面性的蒐集彙整2022年度之放射性廢棄物處置國際動態資訊研析，完成37篇羅列國際核後端、核廢棄物管理計畫暨法規、低階與高階處置等相關新聞。鑒於國際資訊彙整成果的多方面應用價值，宜應採持續推動相關研究工作之策略，以確保我國掌握國際安全管制推展之新聞脈動，擬定管制規定符合國際水準。

112 年放射性廢棄物安全管制國際資訊研析

目 錄

1. 前言	1
1.1 工作目的	1
1.2 工作內容	1
1.3 工作方法	2
1.4 報告架構	8
2. 放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析	10
2.1 資訊蒐整	10
2.2 資訊研析	13
2.2.1 RK&M 專題計畫的任務目標	13
2.2.2 紀錄、知識與記憶保存之目的與需求	14
2.2.3 紀錄、知識與記憶保存之挑戰	15
2.2.4 紀錄、知識與記憶保存之特性	17
2.2.5 紀錄、知識與記憶保存之方法	23
2.2.6 關鍵資訊檔案(KIF)	28
2.2.7 整套必需的紀錄(SER)	30
2.3 綜合討論	45

3. 放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析	49
3.1 韓國核能發展與核能後端營運概況資訊之蒐整	49
3.2 韓國高放射性廢棄物處置計畫推動概況資訊之蒐整	65
3.2.1 高放射性廢棄物處置計畫發展沿革	65
3.2.2 高放射性廢棄物處置計畫近況-2022 年版研發路徑圖	74
3.3 韓國場址調查與安全評估技術發展之研析	95
3.3.1 場址調查技術發展	95
3.3.2 安全評估技術發展	111
3.4 綜合探討韓國之優良實務經驗	123
4. 放射性廢棄物處置國際動態資訊研析	128
4.1 放射性廢棄物處置 2022 年國際動態資訊蒐整	128
4.1.1 各國動態資訊蒐整	128
4.1.2 國際核能機構規範與專業技術報告蒐整	172
4.2 重要個案資訊研析	173
4.3 國際動態資訊綜合討論	182
5. 結論與建議	184
5.1 報告結論	184
5.2 心得建議	185

參考文獻.....	1
附錄一：表 2-3 從擬議紀錄選擇程序推導整套必需的紀錄(SER)內 容之範例(原文).....	14

圖 目 錄

圖 1-1：工作架構與流程圖	2
圖 2-1：紀錄、知識與記憶保存之多重時間尺度	20
圖 2-2：處置設施紀錄的階層圖	24
圖 2-3：處置設施紀錄階層與保存之間的關聯性	32
圖 2-4：處置設施各種紀錄之間的相互關係	32
圖 2-5：法國 La Manche 處置設施紀錄管理系統應用範例	43
圖 3-1：韓國核能電廠與放射性廢棄物管理設施位置圖	50
圖 3-2：韓國放射性廢棄物管理之行政體系	53
圖 3-3：韓國核子安全與保安委員會(NSSC)組織架構圖	54
圖 3-4：韓國核子安全研究所(KINS)組織架構圖	55
圖 3-5：韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)組織架構	56
圖 3-6：韓國月城核能電廠乾式貯存設施	60
圖 3-7：韓國月城低放處置設施配置示意圖	62
圖 3-8：韓國月城低放處置設施第一期工程地形剖面示意圖	63
圖 3-9：韓國參考處置系統處置坑道配置概念示例	68
圖 3-10：韓國 KURT 地下研究坑道示意圖	70
圖 3-11：韓國 KURT 第二期地下試驗規劃	70
圖 3-12：韓國 KURT 第二期地下試驗位置	71

圖 3-13：韓國 A-KRS 計畫五大技術發展主題.....	72
圖 3-14：韓國 A-KRS 計畫垂直式與水平式處置概念.....	73
圖 3-15：韓國 A-KRS 計畫分層處置概念.....	73
圖 3-16：高放射性廢棄物管理技術研發之推動策略與方向.....	81
圖 3-17：韓國 1995 年建構之三維地質模型.....	103
圖 3-18：韓國 KURT 二期工程三孔調查鑽孔位置	104
圖 3-19：韓國 KURT 二期工程二維與三維岩石力學場址描述模型	105
圖 3-20：韓國境內岩石強度分布圖(單位 Mpa)，(a)為岩石單軸抗壓 強度試驗結果；(b)為岩石抗張強度試驗結果；火成岩 (IGN，圖示○)、變質岩(MET，圖示□)及沈積岩(SED， 圖示△)。	111
圖 3-21：韓國研究假定之核種傳輸途徑(Q1 至 Q7)	113
圖 3-22：各式處置概念	114
圖 3-23：韓國 2016 年高放射性廢棄物處置概念設計	116
圖 3-24：韓國 A-KRS 處置系統核種傳輸概念模型.....	116
圖 3-25：韓國 2016 年 GoldSim 程式安全評估模擬概念圖示	117
圖 3-26：韓國 AKRS-16 安全論證報告架構.....	117
圖 3-27：韓國處置設施風險評估流程圖	120
圖 3-28：韓國處置設施風險評估核種傳輸概念模型	121

圖 3-29：韓國 KRS+計畫處置系統參考設計	121
圖 3-30：韓國處置設施運轉期間安全評估流程圖	122
圖 3-31：韓國處置設施 Apro 系統安全評估平台	123
圖 4-1：瑞士北部 Nördlich Lägern 深層地質處置場址位置圖	174
圖 4-2：瑞士選擇 Nördlich Lägern 深層地質處置場址的理由示意圖	176
圖 4-3：芬蘭深層地質處置場運轉執照申請安全論證流程與報告..	177

表 目 錄

表 1-1：核能國家核安主管機關與放射性廢棄物營運機構資訊表.....	4
表 2-1：紀錄、知識與記憶保存的作法與機制	23
表 2-2：整套必需的紀錄(SER)選擇的擬議分類與評分方案	35
表 2-3：從擬議紀錄選擇程序推導整套必需的紀錄(SER)內容之範例	36
表 3-1：韓國高放射性廢棄物管理關鍵技術判定數量	78
表 3-2：韓國技術成熟度評量結果	79
表 3-3：韓國技術成熟現況(關鍵技術)	80
表 3-4：韓國傳輸與貯存技術發展之細部技術項目與時程	82
表 3-5：韓國場址技術發展之細部技術項目與時程	86
表 3-6：韓國處置技術發展之細部技術項目與時程	90
表 3-7：韓國研究建議之場址要求和偏好地球科學指標架構	97
表 3-8：韓國研究建議之場址必要條件與有利條件	98
表 3-9：韓國研究建議之場址特性調查項目與參數	106
表 4-1：2022 年放射性廢棄物處置國際動態資訊表	170
表 4-2：芬蘭深層地質處置場運轉執照申請安全論證報告名稱、目的 與內容章節架構	178

112 年放射性廢棄物安全管制國際資訊研析

摘要

本案以協助管制機關完成放射性廢棄物安全管制國際資訊研析為主要目的。具體工作項目包括：

1. 放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析。
2. 放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析。
3. 放射性廢棄物處置國際動態資訊研析。

本案之研析成果將有助於我國放射性廢棄物管制決策與研發工作之參考應用，以加速提昇管制技術能力，確保管制安全合於國際水準。

關鍵字：處置、放射性廢棄物管理、案例研析

ABSTRACT

This work aims to review and summarize the information of national experience by nuclear power counties on regulatory control of the site selection process and license application for a radioactive waste disposal facility. The main tasks focus on:

4. Study on international information of radioactive waste disposal plan information preserved across generations.
5. Case study on the regulatory framework and R&D strategy of high-level waste disposal in the Republic of Korea.
6. News highlights of radioactive waste disposal in 2022.

The international experiences can benefit regulatory research in the area of radioactive waste management in Taiwan.

Keywords: Disposal, Radioactive Waste Management, Case Study

1. 前言

1.1 工作目的

核能安全委員會(以下簡稱核安會)，負責全國放射性物料之安全管理制職責。基於健全放射性廢棄物管制體系，強化管制技術，並使安全標準與具體管制措施符合當前國際水準之業務實際需要，爰成立「112 年放射性廢棄物安全管理制國際資訊研析」專業服務勞務採購案(以下簡稱本案)，委託國內學術研究或技術專業機構進行相關管制技術資訊蒐整研析工作。

國家原子能科技研究院(以下簡稱國原院)為我國核能領域的專業研究機構，有專職的研發人力長期從事用過核子燃料及低放射性廢棄物安全管理技術發展，並持續掌握國際動態資訊。國原院針對本案之任務目標與工作內容，深具經驗與信心，能提供任務所需的高品質成果與服務，爰經由政府招標程序承攬本案工作。工作期程自民國112年6月6日至112年12月31日。經彙整研析國際資訊後，依契約書規定如期提出「112年放射性廢棄物安全管理制國際資訊研析」工作成果報告(以下簡稱本報告)。

1.2 工作內容

本案完成核安會的委託任務需求，共包含以下 3 項工作：

- (1) 放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析。
- (2) 放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析。
- (3) 放射性廢棄物處置國際動態資訊研析。

1.3 工作方法

本案整體工作之架構與流程圖參見圖 1-1 所示。

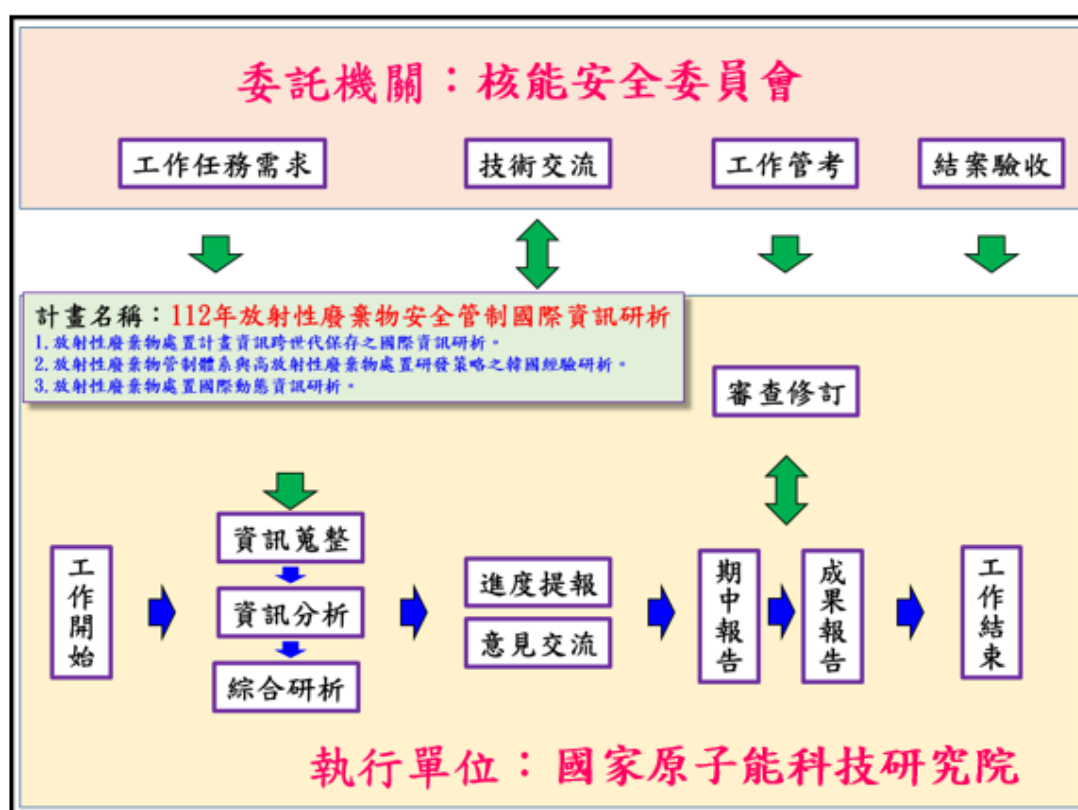


圖 1-1：工作架構與流程圖

各項細部工作方法說明如後：

(1) 放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析

(A) 資訊蒐整：藉由網路便利性，從國際核能組織與核能國家處置計畫等資訊管道，蒐集整理有關處置計畫資訊跨世代保存的相關文獻。

(B) 資訊研析：就重要文獻摘述說明其內容要項。

(C) 綜合討論：提出研究心得，闡述對我國具借鏡價值之安全管理技術資訊，供核安會參考應用。

(2) 放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國

經驗研析

(A) 資訊彙整：藉由網路便利性，從韓國相關單位官網與電子期刊等，蒐集整理有關韓國放射性廢棄物管制與管理的相關資訊。

(B) 資訊研析：研析韓國核能發展與核能後端營運概況、高放射性廢棄物處置計畫推動概況、場址調查與安全評估技術發展等資訊。

(C) 綜合討論：綜合探討韓國之優良實務經驗，闡述對我國具借鏡價值之安全管理技術資訊，供核安會參考應用。

(3) 放射性廢棄物處置國際動態資訊研析

(A) 資訊彙整：藉由網路便利性，蒐集整理2022年有關放射性廢棄物處置的重要新聞報導，以及國際核能機構發布之重要文獻。

(B) 資訊研析：研析2022年重要的放射性廢棄物處置國際個案資訊。

(C) 綜合討論：蒐集整理2022年國際動態個案，闡述對我國具借鏡價值之安全管理技術資訊，供核安會參考應用。

本案研究資訊的主要蒐集對象包含國際核能機構/組織的相關網路資訊例如：

(A) 國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)。
▪ 發電反應器資訊系統(Power Reactor Information System, PRIS)^[1]。

- 用過核子燃料管理安全與放射性廢棄物管理安全聯合公約 (Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management)^[2]。

(B)經濟合作暨發展組織(Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD)。

- 核能署(Nuclear Energy Agency, NEA)^[3]。

(C)世界核子協會(World Nuclear Association, WNA)。

- 世界核子新聞網(World Nuclear News, WNN)^[4]。

本案研究資訊的主要蒐集對象亦包含各核能國家的核安主管機關與營運機構的相關網路資訊，如表 1-1 所示。

表 1-1：核能國家核安主管機關與放射性廢棄物營運機構資訊表

國家	主管機關與營運機構名稱	
阿根廷	主管機關	Nuclear Regulatory Authority (Autoridad Regulatoria Nuclear), ARN https://www.argentina.gob.ar/arn
	營運機構	National Atomic Energy Commission (Comision Nacional de Energia Atomica), CNEA https://www.argentina.gob.ar/cnea
亞美尼亞	主管機關	Armenian Nuclear Regulatory Authority, ANRA http://www.anra.am/index.aspx
	營運機構	Armenian NPP http://armeniannpp.am/en/
孟加拉	主管機關	Bangladesh Atomic Energy Regulatory Authority, BAERA http://www.baera.gov.bd/
	營運機構	Nuclear Power Company of Bangladesh, NPCB https://npcbl.portal.gov.bd/
白俄羅斯	主管機關	Department for Nuclear and Radiation Safety, Gosatomnadzo https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/en/o-gosatomnadzore/polozhenie-o-gosatomnadzore/
	營運機構	Belarusian Nuclear Power Plant https://www.belaes.by/ru/
比利時	主管機關	Federal Agency for Nuclear Control, FANC https://fanc.fgov.be/en
	營運機構	Belgian Nuclear Safety Authority, Bel V https://www.belv.be/index.php/en/

	營運 機構	Belgian National Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, NIRAS/ONDRAF https://www.ondraf.be/
巴西	主管 機關	National Commission for Nuclear Energy (Comissão Nacional de Energia Nuclear), CNEN - Directorate for Radiation Protection and Nuclear Safety (DRSN), https://www.gov.br/cnen/pt-br 2021 年 10 月組改成立新的主管機關 National Nuclear Safety Authority (Autoridade Nacional de Segurança Nuclear, ANSN)
	營運 機構	National Commission for Nuclear Energy (Comissão Nacional de Energia Nuclear), CNEN - Directorate for Research and Development (DPD) 小產源低放射性廢棄物 https://www.gov.br/cnen/pt-br Eletrobras Eletronuclear 高放射性廢棄物 https://www.eletronuclear.gov.br/Paginas/default.aspx
保加利亞	主管 機關	Bulgarian Nuclear Regulatory Agency, BNRA https://www.bnra.bg/
	營運 機構	State Enterprise 「Radioactive Waste」, SERAW http://dprao.bg/en/
加拿大	主管 機關	Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC https://nuclearsafety.gc.ca/eng/
	營運 機構	Nuclear Waste Management Organization, NWMO https://www.nwmo.ca/
中國	主管 機關	國家核子安全局 https://nnsa.mec.gov.cn/
	營運 機構	中核清原環境技術工程有限責任公司(官網不明) 廣東大亞灣核電環保有限公司(官網不明)
捷克	主管 機關	State Office for Nuclear Safety, SÚJB https://www.sujb.cz/en/
	營運 機構	Radioactive Wastes Repository Authority, SÚRAO https://www.surao.cz/en/
芬蘭	主管 機關	Radiation and Nuclear Safety Authority (Säteilyturvakeskus), STUK https://www.stuk.fi/web/en
	營運 機構	Posiva Oy https://www.posiva.fi/en/
法國	主管 機關	French Nuclear Safety Authority (Autorité de Sûreté Nucléaire), ASN https://www.asn.fr/
	營運 機構	National Radioactive Waste Management Agency, Andra https://international.Andra.fr/
德國	主管 機關	Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung), BASE https://www.base.bund.de/EN/home/home_node.html

	營運 機構	Federal Company for Radioactive Waste Disposal (Bundesgesellschaft für Endlagerung), BGE https://www.bge.de/de/
匈牙利	主管 機關	Hungarian Atomic Energy Authority, HAEA http://www.oah.hu/web/v3/haeaportal.nsf/web?openagent
	營運 機構	Public Limited Company for Radioactive Waste Management, PURAM (官網不明)
印度	主管 機關	Atomic Energy Regulatory Board, AERB https://www.aerb.gov.in/english/
	營運 機構	Nuclear Power Corporation of India Limited, NPCIL https://www.npcil.nic.in/index.aspx
伊朗	主管 機關	Iranian Nuclear Regulatory Authority, INRA(官網不明)
	營運 機構	Nuclear Power Production & Development Co. of Iran, NPPD(官網不明)
義大利	主管 機關	National Inspectorate for Nuclear Safety and Radiation Protection, ISIN https://www.isinucleare.it/en/about-us
	營運 機構	Societa Gestione Impianti Nucleari S.p.a., Sogin https://www.sogin.it/it
日本	主管 機關	Nuclear Regulation Authority, NRA https://www.nsr.go.jp/english/
	營運 機構	Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO https://www.numo.or.jp/en/
哈薩克	主管 機關	Committee for Atomic and Energy Supervision and Control, CAESC https://www.gov.kz/memleket/entities/kaenk?lang=en
	營運 機構	National Atomic Company, KAZATOMPROM https://kazatomprom.kz/en
韓國	主管 機關	Nuclear Safety and Security Commission, NSSC https://www.nssc.go.kr/en/index.do
	營運 機構	Korea Radioactive Waste Agency, KORAD https://www.korad.or.kr/korad-eng/index.do
立陶宛	主管 機關	State Nuclear Power Safety Inspectorate, VATESI http://www.vatesi.lt/index.php?id=2&L=1
	營運 機構	Ignalina Nuclear Power Plant https://www.iae.lt/en
墨西哥	主管 機關	National Commission for Nuclear Safety and Safeguards, CNSNS https://www.gob.mx/cnsns
	營運 機構	Comision Federal de Electricidad, CFE http://www.cfe.mx/
荷蘭	主管 機關	Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection, ANVS https://english.autoriteitnvs.nl/
	營運	Central Organization for Radioactive Waste, COVRA

	機構	https://www.covra.nl/en/
巴基斯坦	主管機關	Pakistan Nuclear Regulatory Authority, PNRA https://www.pnra.org/index.asp
	營運機構	Pakistan Atomic Energy Commission, PAEC https://paec.gov.pk/
羅馬尼亞	主管機關	National Commission for Nuclear Activities Control, CNCAN http://www.cncan.ro/main-page/
	營運機構	Nuclear Agency and for Radioactive Waste, ANDR http://andr.ro/en/home/
俄羅斯	主管機關	Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision, Rostekhnadzor https://www.gosnadzor.ru/
	營運機構	National Operator for Radioactive Waste Management, NO RAO https://www.norao.ru/en/
斯洛伐克	主管機關	Nuclear Regulatory Authority, ÚJD SR https://www.ujd.gov.sk/?lang=en
	營運機構	Nuclear and Decommissioning Company, JAVYS https://www.javys.sk/en/
斯洛維尼亞	主管機關	Slovenian Nuclear Safety Administration, SNSA https://www.gov.si/en/state-authorities/bodies-within-ministries/slovenian-nuclear-safety-administration/o-upravi/
	營運機構	Agency for Radwaste Management, ARAO https://www.arao.si/index.php/en/
南非	主管機關	National Nuclear Regulator, NNR https://nnr.co.za/
	營運機構	National Radioactive Waste Disposal Institute (NRWDI) https://www.nrwdi.org.za/
西班牙	主管機關	Nuclear Safety Council, CSN https://www.csn.es/en/seguridad-nuclear
	營運機構	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A., ENRESA https://www.enresa.es/eng/
瑞典	主管機關	Swedish Radiation Safety Authority, SSM https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/
	營運機構	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB https://www.skb.com/
瑞士	主管機關	Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI https://www.ensi.ch/en/
	營運機構	National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Nagra https://www.nagra.ch/en
土耳其	主管機關	Nuclear Regulatory Authority, NDK https://www.ndk.gov.tr/en-US
	營運機構	Turkish Atomic Energy Authority, TAEK (官網不明)

烏克蘭	主管機關	State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, SNRIU https://snriu.gov.ua/en
	營運機構	National Nuclear Energy Generating Company Energoatom, NNEGC Energoatom (官網不明)
阿拉伯聯合大公國	主管機關	Federal Authority for Nuclear Regulation, FANR https://www.fanr.gov.ae/en
	營運機構	Emirates Nuclear Energy Corporation , ENEC https://www.enec.gov.ae/
英國	主管機關	Office for Nuclear Regulation, ONR https://www.onr.org.uk/index.htm
	營運機構	Nuclear Waste Services, NWS https://www.gov.uk/government/organisations/nuclear-waste-services
美國	主管機關	Nuclear Regulatory Commission, NRC https://www.nrc.gov/
	營運機構	Department of Energy, DOE https://www.energy.gov/

註：表列各單位官網之網址連結查核日期為 2023 年 7 月 31 日。

1.4 報告架構

本報告參酌本案工作內容，擬定共 5 個章節，藉以論述資訊蒐集與研析成果：

- 第 1 章為前言：說明研究目的、研究內容、研究方法與報告架構。
- 第 2 章為放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析：說明放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際研發概況、理論方法與實務案例經驗等。
- 第 3 章為放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析：說明韓國放射性廢棄物管制體系、核後端管理現況與高放射性廢棄物處置計畫現況及研發策略等。

- 第 4 章為放射性廢棄物處置國際動態資訊研析：說明 2022 年國際上有關放射性廢棄物處置的重大新聞報導與國際核能機構發布的重要文獻，並對重要個案進行資訊研析。
- 第 5 章為結論與建議：對成果提出總結說明與後續發展之心得建議。

2. 放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析

本章說明放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際研發經驗、理論方法與實務案例。

2.1 資訊蒐整

(1) 國際原子能總署(IAEA)

放射性廢棄物處置設施的建設從概念發展、選址、設計、運轉到封閉，整體處置計畫生命週期可達百年。而處置設施封閉後仍具有安全危害風險的期間，通常低與中放射性廢棄物可達數百至數千年；高放射性廢棄物則可達數十萬年。因此，對於處置計畫的紀錄保存問題很早即被關注。

國際原子能總署於1999年即曾發布專題技術報告IAEA-TECDOC-1097：「放射性廢棄物處置紀錄之維護」^[5]。內容說明哪些紀錄對於未來世代是有用的？誰要負責保存？如何建立妥適的紀錄管理系統(Records Management System, RMS)。

國際原子能總署於2008年發布安全導則GS-G-3.4：「放射性廢棄物處置之管理系統」^[6]。內容雖主要針對運轉期間的如何建立管理系統？管理責任歸屬？如何進行資源管理？如何落實管理？等提出建議。但若無封閉前的妥善管理，則無封閉後的資訊傳承，故二者有密切的關連性。此後，2010年代期間國際原子能總署針對知識管理發布多種相關文獻，例如IAEA-TECDOC-1675：「核子研發機構之知識管理」^[7]、NG-T-6.10：「核子組織之知識管理與實施」^[8]、研討會論文集：「核子知識管理之挑戰與作法」^[9]等，顯見知

識管理的重要性。

(2) 經濟合作暨發展組織/核能署(OECD/NEA)

隸屬經濟合作暨發展組織/核能署之放射性廢棄物管理委員會(Radioactive Waste Management Committee, RWMC)於2010年倡議「跨世代紀錄、知識與記憶(Records, Knowledge and Memory, RK&M)之保存」專題計畫(以下簡稱**RK&M專題計畫**)^[10]。RK&M專題計畫之目的在瞭解各會員國實施RK&M的現況與需求、所遭遇的困難，以及研提建議方案與對策。

專題計畫的第一階段從2011年3月正式啟動，至2014年4月結束。計畫亦著重於理論的完善與方法的建立。第二階段持續推動至2018年4月，著重於開發可參考應用的管理方案與工具。專題計畫由14個國家的21個組織共同參與^[11]。

RK&M專題計畫於2019年發布三份重要的成果報告：

- RK&M 倡議最終報告(NEA 第 7421 號報告)^[12]。
- 關鍵資訊檔案(Key Information File, KIF)概念報告(NEA 第 7377 號報告)^[13]。
- 必要紀錄集(Set of Essential Records, SER)概念報告(NEA 第 7243 號報告)^[14]。

RK&M專題計畫對一些詞彙做特定的定義^[15]，例如：

- 資料(Data)：原始收集的事實和想法。
- 資訊(Information)：為組織化的資料。可能記錄在媒體上，也可能不記錄在媒體上。
- 紀錄(Record)：通常是獨特與原始的物件或選定的片段資料/片段資訊。已登錄到媒體上並與適當的上下文和架構一起保存以供後續使用。

- 知識(Knowledge)：學習過程的結果。一旦在特定領域獲得知識，知識就會提供見解和技能。知識是由理解、解釋和利用相關資料、資訊和紀錄的能力所產生。
- 記憶(Memory)：對過去的事件、人物、地點和知識水準的認識。

RK&M專題計畫對紀錄、知識與記憶保存的時間尺度定義如下^[15]：

- 極短期：與員工角色穩定性、組織變革週期以及安全管制定期審查一致之時間段。典型的時間尺度是 10 到 20 年。
- 短期：至處置設施封閉後前期階段的一段時間。包含處置設施運轉前階段、運轉階段及封閉後初期階段。時間尺度約為 100 年。
- 中期：處置設施封閉後進行間接看管(oversight)活動的時期。時間尺度大約是數百年。
- 長期：處置設施已無看管的時間。此時期超出安全監管的時間，對於高放射性廢棄物而言通常為數十萬年。

(3) 其他文獻

RK&M專題計畫結束後，近年來國際上相關議題較重要的文獻為瑞士聯邦能源辦公室(Swiss Federal Office of Energy, SFOE)於2019年發布的「如何讓核廢棄物的記憶永存」文宣^[16]，以及瑞典輻射安全署(Swedish Radiation Safety Authority, SSM)於2021發布的第24號報告：「確保用過核子燃料最終處置設施長期資訊與知識之方法」^[17]。此二份文件僅為RK&M專題計畫成果的本土化延伸應用。

此外，國內前期研究方面，在RK&M專題計畫2018年結束後，國原院研發團隊於2020年即曾指派同仁進行研究，並完成對內報

告^[18]。

2.2 資訊研析

如前節所示，國際原子能總署 1999 年的文獻^[5]有些觀念已老舊，例如儲存媒體(例如硬碟)已有日新月異的變化。其他的文獻資訊或者是跟 RK&M 專題計畫間接相關；或者是其延伸應用。因此，本節直接對 RK&M 專題計畫的成果文獻^[12-15]進行重要摘述與說明。

2.2.1 RK&M 專題計畫的任務目標

放射性廢棄物處置的目標，在於將其在特定時間段之內，隔離於人類生活圈外，使其所含的放射性核種經過衰變後，即使萬一從放射性廢棄物包件釋出，並遷移至未來世代的生活環境時，亦已無害於人體。

雖然在設置處置設施時，已經過充分的調查、設計與評估，可以藉由多重障壁確保一定程度的安全性。但儘管如此，在漫長的處置期間，仍不排除因未來世代已遺忘處置設施的存在，而發生無意的人類闖入(Inadvertent Human Intrusion)行為(例如鑽探)，而導致破壞處置設施安全功能，致使放射性核種提前釋出至人類生活環境，造成潛在危害。因此，現代人有世代責任應妥善保存有關處置設施的重要紀錄、知識與記憶，傳達給未來世代，以警醒設施的位置與潛在危害，並且必要時可做進一步的管理或整治。簡而言之，如何才能代代相傳地持續記住與理解放射性廢棄物的處置設施場址、建置原因與處置方式？此即為 RK&M 專題計畫的首要任務目標。

RK&M 專題計畫須解決五項關鍵議題^[12]：

- 基於何種原因與目的，需要並希望跨世代保存有關放射性廢棄物的 RK&M？(WHY？)
- 需要維護何種資訊？(WHAT？)

- 在何種時間尺度內？(WHEN?)
- 由誰執行以及為誰執行？(WHO?)
- 現在與未來可以做什麼以維繫 RK&M 的最大持續性與容易取得性？(HOW?)

2.2.2 紀錄、知識與記憶保存之目的與需求

為什麼需要保存紀錄、知識與記憶？主要有以下三項理由^[12]：

(1) 與安全相關

- 從「隔離與遺忘」轉變為融入社會：早期處置觀念以遠離與隔離為理念，強調無須長期看管；近年來，考慮更加動態的機制，例如持續監測、有條件地再利用場址以及當地社區積極參與決策等。這種加強後續行動、靈活度與參與性的趨勢意味著處置設施將成為社會結構的一部分。透過 RK&M 保存可使未來社會各界持續保持知情與警惕的態度。
- 導入看管(oversight)的概念：2013 年國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)發布第 122 號刊物：「長半化期固體放射性廢棄物地質處置中的輻射防護」^[19]，導入看管的概念。看管是看顧(watchful care)的統稱，係指社會關注技術系統以及計畫與決策實際之執行情況。紀錄、知識與記憶保存是看管的基礎。藉此保存設施記憶的措施可能有助於減少無意的人為闖入的可能性；且可能有助於任何故意闖入的合理性與規劃。不同的看管程度會影響管控放射性廢棄物來源（包含廢棄物和處置設施），以及避免或減少潛在暴露輻射源的能力。考慮三個主要看管時間範圍如下：「直接看管」時間，即處置設施正在實施並受到積極看管的期間；「間接看管」時間，即處置設施完成封閉，由管制機關、特別

行政管理機構或一般社會大眾進行看管，以代表社會提供額外保證；「無看管」時間，即在處置設施的記憶喪失的情況下不再進行看管(如圖 2-1 的黑色文字)。

(2) 保護人類與環境

為了達成保護人類與環境的道德原則，可藉由紀錄、知識與記憶保存使未來世代能保持對處置設施的存在、位置與風險的認識，進而防止無意闖入。

(3) 提供知情決策(informed decision making)所需資訊

在未來世代知悉處置設施存在的情況下，紀錄、知識與記憶保存可提供盡可能多的相關資訊，供其就有意的行動做出明智的決策並評估後果。

2.2.3 紀錄、知識與記憶保存之挑戰

放射性廢棄物處置紀錄、知識與記憶保存須面臨後述挑戰^[12]。

(1) 資訊生命週期管理

跨世代溝通存在代溝。如何讓未來世代理解現代的紀錄、知識與記憶可能是一項挑戰。在整個資訊生命週期中可以區分三項子區間：

- 記憶化(memorisation)：產生者(producer)應識別、收集、組織與表達要保存的資訊。
- 保存(preservation)：傳承者(curator)應考慮資訊載體(媒體)在技術(有形)意義上(例如轉移到永久性紙張)與社會(無形)意義上(例如在國際組織之間共享資訊)的潛在持久性，隨著時間的推移的資訊維護(如資訊載體退化或內容變得不完整)。

- 取得(access)：接受者(receiver)應知道資訊的存在，必須能夠找到相關的資訊，並且必須以有意義的方式解釋與理解資訊。

(2) 紀錄、知識與記憶遺失的原因與後果

紀錄、知識與記憶極可能經過跨世代而(部分)遺失、被遺忘，或者變得不適合未來的理解與決策，如何保存與維護極具挑戰性。可能的遺失原因，例如：

- 無紀錄/紀錄不完整(例如沒有足夠的資料來通知檢索或補救行動)、缺乏紀錄集副本或無檔案/檔案缺漏。
- 資訊沒有更新或更新不足(例如地圖或計畫)。
- 無預算/預算不足以履行保存職責或經費中斷(例如破產)。
- 組織變動(業務職掌變更)。
- 人事變動(例如離職或退休)。
- 非法行為(故意銷毀紀錄與知識)。
- 社會不連續性(例如戰爭、國界的轉移)。
- 紀錄的技術失效或環境退化。

(3) 紀錄、知識與記憶保存的管制要求

參與 RK&M 專題計畫的各國機構普遍認為發布管制導則有助於紀錄、知識與記憶保存的推動，但實際上目前大多數國家均尚未實施。原因在於制定此種導則面臨著一些挑戰，例如所需的詳細程度、規定的行動以及如何確定應長期執行與管制這些行動的行為者。

歐盟委員會 2011 年發布的指令 Council Directive 2011/70/Euratom 第 12(e)條，已要求各會員國應於國家計畫內述明處置設施封閉後的概念或計畫，包括適當的管制時期以及保存處置設施知識而採取的手段。^[20]

目前國際規範或各國法規對於封閉後的管制措施大多語焉不詳。原因在於隨著時間推移，現有機構(例如專責機構與管制機關)都可能有所變動。未來紀錄、知識與記憶保存相關的許多細節，特別是責任規劃可能亦會變動。過早的管制可能無濟於事。然而，管制是一個動態且持續的過程。從紀錄、知識與記憶保存與責任規劃的角度來看，積極主動的態度至關重要。

(4) 紀錄、知識與記憶保存的經費問題

紀錄、知識與記憶保存的經費目前通常不屬於處置預算的一部分。在某些情況下(例如設置永久性地標)可能所費不貲。這可能會低估當前與未來處置計畫的總體費用。

花費多少與如何籌集基金依處置個案與國情可能不同。此外，應由本世代承擔費用，或跨世代分攤亦有不同見解。因此，宜採取專門的參與性與創造性思維與行動，創建基金並進行投資，以利永續發展。

2.2.4 紀錄、知識與記憶保存之特性

放射性廢棄物處置之紀錄、知識與記憶保存，須考慮其需求特性，以達成傳播與保存的目的^[12]。

(1) 導入系統性的策略(systemic strategy)的理念

沒有任何單一方法或機制可以單獨將紀錄、知識與記憶保存達百年或萬年之久。因此，需要採取系統性的策略方式，將各種機制與作法加以整合或互補，並提供多樣性與餘裕性，以期在考慮的不同時間尺度內最大限度的提高資訊的容易取得性、可理解性與保存性。

(2) 多重時間尺度(multiple time frames)

紀錄、知識與記憶保存是立足現在，著眼未來。重點是放射性廢棄物處置設施封閉後階段的保存，而非封閉前的知識管理。儘管如此，保存作業仍需要在處置設施封閉之前的數十年內即採取行動。且需要考慮當今社會的多樣性與不連續性，以及務實推演未來社會將如何對待處置設施，來制定保存策略。保存是否成功，不能僅以能否保存百年或萬年來判斷。而是透過持續評估是否能夠在廢棄物產生者、管制機關、專責機構、其他利害相關者與公眾的思想與態度中確立其與處置設施的相關性與責任，以及這種需求與責任是否得到理解與接受來判斷。

雖然對於保存的目標時間尺度，總體共識是「盡可能長」。但 RK&M 專題計畫建議實務上宜針對不同的處置計畫做不同的考量。且應劃分為短期、中期與長期階段，如圖 2-1 所示，並參考第 2.1 節之第(2)小節定義。短期的作法主要為知識管理；中期主要為文化、教育與藝術的傳播；長期則例如採用時間膠囊。

圖 2-1 中說明紀錄、知識與記憶保存之多重時間尺度，可劃分為短期、中期與長期階段(藍色文字)。處置計畫生命週期運轉階段區分(紅色文字)，包含處置設施運轉前、運轉中及運轉後階段；處置設施自運轉前階段包含建造期程，運轉中階段包含置放廢棄物、地下觀察及處置設施封閉後初期期程，運轉後階段包含處置設施封後長期期程(紅色文字；紅色實線粗細度代表當期人類活動密度；紅色虛線屬處置千年以上的長期階段，無假定人類活動密度)。處置計畫所遭遇的多個決策時間點(綠色文字)，依序計畫期程包含：決定選址、決定建造、決定開始處置、決定部分回填處置區、決定終止置放廢棄物、決定最終封閉、決定後續措施等。而這些重大決策的

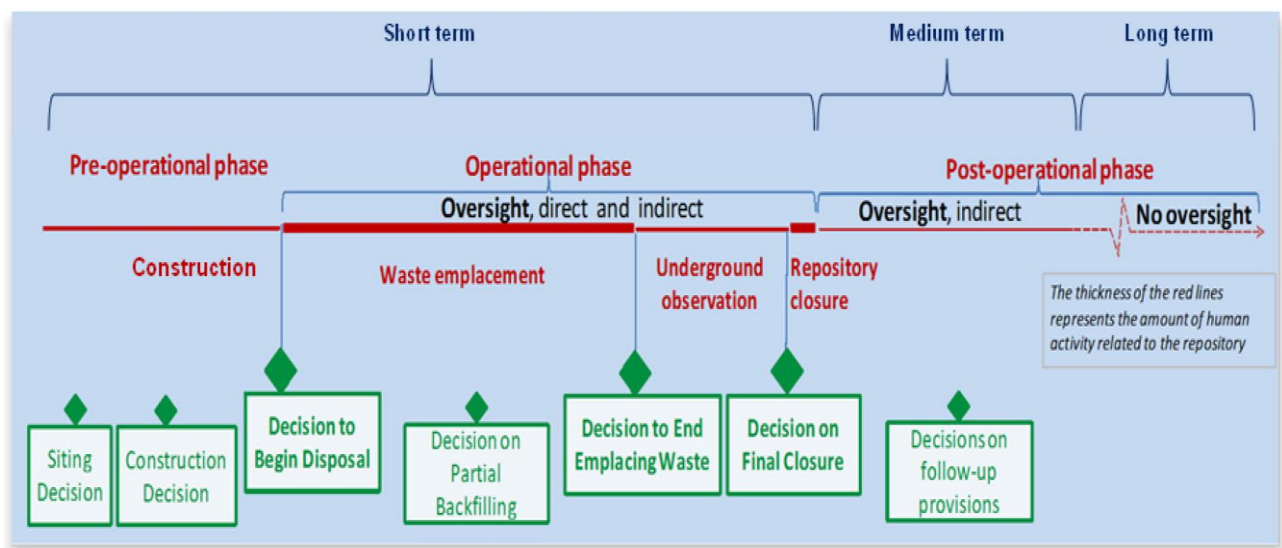
時間點，也同時是檢視紀錄、知識與記憶保存的時機。紀錄、知識與記憶保存之多重時間尺度整體性說明如下(對應如圖 2-1)：

短期時間尺度，涉及處置設施運轉前建造過程，包含處置設施場址選定及建造，此時涵蓋地質人員調查、建造商施工、處置專責機構會勘等人類活動，其人類活動密度較少；運轉中階段開始啟用處置設施並置放高放射性廢棄物(此時涉及頻繁置放廢棄物活動，人類活動密度較高)，已置放廢棄物且尚未回填的處置隧道屬於「直接看管(direct oversight)」的主動監測範疇，但當部分處置隧道填滿後，處置隧道與豎井逐漸被回填封阻，直到所有高放射性廢棄物都置放完成後，人類不再能夠方便地進入地下處置設施與靠近廢棄物，隨後展開「間接看管(indirect oversight)」的地下設施觀察活動(當結束置放廢棄物後，人類活動密度又開始下降)，並進入處置場封閉的初期階段，此時尚可保存處置設施的紀錄、知識與記憶(由於涉及處置設施封閉施工作業，及機具與人員撤離，人類活動密度又會回升)。因此，短期時間尺度內的幾代人類預計將用「間接看管」來補充並逐步取代「直接看管」。而「間接看管」是比「直接看管」透過更遠程的方式來實施的。

中期時間尺度，係指處置設施封閉後開始的一段時間。此時對處置設施進行遠端的「間接看管」。此時期屬於處置設施運轉後階段，處置設施被設計成無需人為干預即可發揮管制與隔離廢棄物功能(此時人類活動需求及密度較低)，並於進入「無看管(no oversight)」時間前應決定後續管理措施。由於「人們可能期望社會將盡可能長時間地維持各種形式的間接監管」，中期階段目標應該是持續下去。這是紀錄、知識與記憶保存的關鍵目標，以便能夠持續防止與處置設施相關的人類無意闖入行為，若有需要將持續促進知識保存活動。

因此，在短期階段內為中期階段的紀錄、知識與記憶保存做好準備，並持續在中期階段執行紀錄、知識與記憶的保存至關重要。

長期時間尺度，係指處置設施處於運轉後階段且保存記憶喪失後「無看管」的時間。這正是紀錄、知識與記憶保存的目的，當人類意識到社會不再對處置設施保持警惕與關心時，封閉後的某個時間點可能會失去看管(對於此時人類活動不確定高，無假定的人類活動密度)。在這個階段，對於放射性廢棄物處置場可能仍然有一定的認識，但不再透過看管的方式來進行紀錄、知識與記憶保存，也可能或者根本沒有更多的認識。社會上可能還有記錄、知識與記憶，但有可能是支離破碎的。處置設施的存在可能不再被人們所知悉、理解或使用。這意味著，須為長期階段允許任何資訊傳輸留存，至少某些紀錄、知識與記憶必須具有被及時重新發現的潛力，以構成紀錄、知識與記憶重建的基礎。儘管該設施本身被設計為安全的，但紀錄、知識與記憶與的重建及其後的看管活動可被重啟，以繼續減少人類無意闖入的可能性並強化有關該設施的明智決策。



資訊來源：[19]

圖 2-1：紀錄、知識與記憶保存之多重時間尺度

(3) 多重媒體(multiple media)

紀錄、知識與記憶的保存可概分為兩種形式：一種是有形的儲存實體，例如文件紀錄、圖書、新聞雜誌；影音與電子儲存媒體；標記物、紀念碑；檔案館、圖書館、博物館及其保存/展示品；及時間膠囊、工業遺跡、藝術品與地圖等。另一種是無形的資訊內容認知保存，例如知識管理、教育、慣例、口頭傳統(講故事、歌唱與戲曲)、儀式與紀念活動等，以傳播與共享資訊。在擬定紀錄、知識與記憶保存策略時，宜同時考慮兩種形式的結合。

對於有形保存的實體多重媒體，需要根據其耐用性以及所含資訊的可讀性與容易取得性來選擇所使用的媒體。

(4) 多重內容(multiple contents)

對於無形保存的抽象多重內容，需要考慮傳播資訊的可讀性(易讀性與所使用的語言)與可理解性(合理與前後關聯)。且針對不同的聽眾(公眾或專家)採用不同的內容。設計保存內容時，應吻合(A)防止無意人類闖入；(B)提供未來世代管理決策參考；(C)以有效方式跨世代傳播資訊，以促進達成前兩項(A 與 B)目標。

RK&M 專題計畫歸納未來世代可能基於其自身利益，對發現的處置設施採取三種可能活動：

- 自己執行安全評估：使用新發展的技術與工具，驗證處置設施安全性，決定是否採取改善或補救措施。
- 回溯決策過程：檢討廢棄物從何而來？為何處置於此處？處置設施如何建構？等。
- 從處置設施再取出物質：某些國家有再取出廢棄物可行性的規定。此外，亦不排除未來世代從處置設施中回收可利用物質，例如處置容器的銅金屬。

處置設施紀錄、知識與記憶的保存將有助於未來世代採取行動時的決策參考。

(5) 多重傳播模式(multiple transmission modes)

傳播可概分為兩種模式：一種是逐世代的資訊傳播，也就是代代相傳(例如透過教育)；另一種是跨越時間直接傳播資訊給未來世代(例如使用時間膠囊)。以有形(實體)保存的紀錄、知識與記憶可以用這兩種模式傳播。以無形(抽象)保存者，則僅能以代代相傳的模式傳播。RK&M 專題計畫建議應同時考慮兩種模式，且不宜僅依靠跨越時間的方式，而忽略代代相傳的必要性。

(6) 多重行為者(multiple actors)

紀錄、知識與記憶的保存涉及資訊產生者、保存者及接受者，因此，需結合自然科學與社會科學的多學科見解與更廣泛的社會公眾參與。

- 多重學科：紀錄、知識與記憶的保存是一項需要技術、科學、社會與文化等多個學科共同努力的任務。藉由互動並瞭解彼此的目標與關注點，可歸納各種更具技術性與社會性的合理方案。
- 多重感興趣者、關注者及其角色：除了前述專業人士外，紀錄、知識與記憶保存的過程中，亦涉及國際、國家、地方與社區的眾多部門、團體與個人。因此，在設計、制定與實施系統性的保存策略時，無論是在內容上還是在方法上，都應盡可能的由眾多不同參與者來執行(例如管制機關、專責機構、國家檔案室與當地社區等)，從而提供保存方式的多樣性與餘裕性。

(7) 多重地點(multiple locations)

放射性廢棄物相關資訊通常分散各處，例如廢棄物產生者、業界處理/貯存設施、研究機構、處置專責機構、核安管制機關、地方與國家政府當局等。這些資訊極可能隨著時間的推移而丟失、遺忘與無法取得。處置設施的紀錄、知識與記憶保存也一樣的道理，應在處置設施封閉前完成彙整，而在封閉後宜盡可能分散多處(包含放置於國際、國家、地方與社區各地點)保存副本，避免因放置單一地點，而有全部損毀或遺失的風險。也藉此提供保存方式的多樣性與餘裕性。

2.2.5 紀錄、知識與記憶保存之方法

RK&M 專題計畫歸納出 9 種跨世代資訊保存的實務作法，包含 35 種機制，如表 2-1 所示。重點內容概述如後^[12-14]。

表 2-1：紀錄、知識與記憶保存的作法與機制

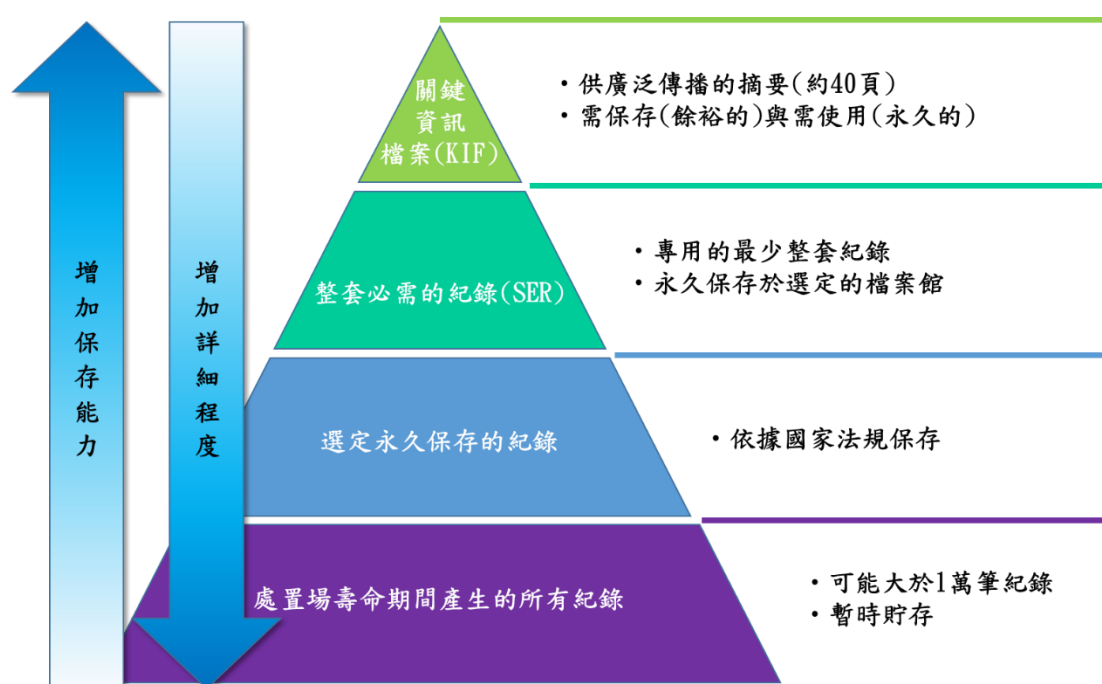
作法	機制
專用紀錄集與摘要文件	關鍵資訊檔案(KIF)；整套必需的紀錄(SER)
記憶機構	檔案館；圖書館；博物館
標記	地上標記；紀念碑；地下標記；深層地質標記；地表蹤跡
時間膠囊	大型可見時間膠囊；大型不可見時間膠囊；小型時間膠囊
文化、教育與藝術	工業遺跡；處置設施址/基礎建設的替代再利用；遺跡清單與目錄；當地歷史學會；非物質文化遺產；教育、研究與訓練；公共資訊傳播活動；藝術
知識管理	知識保存工具、知識風險分析、知識分享理念
看管規定	監測；土地利用管制；明確與有規劃的責任
國際機制	國際法規與協議；國際標準與導則、國際清單與目錄、國際教育與訓練計畫、國際合作、國際倡議
管制體系	國家管制體系；保防措施

資訊來源：整理譯自[12,14]

(1) 專用紀錄集與摘要文件(機制：關鍵資訊檔案；整套必需的紀錄)

處置設施的生命週期中，從規劃開始，就會產生大量的資訊與資料。將全部所有文件留存給未來世代，不僅費時費力，且不切實際。因此，應縮小範圍保存對未來世代有用者，且應結構化整理成專用紀錄集與摘要文件，以利傳播、取得與理解。

RK&M 專題計畫建議可採用編撰「 (Key Information File, KIF)」與「 (Set of Essential Records, SER)」的兩種機制，以減小保存規模，並利於可操作性與容易取得性。「關鍵資訊檔案(KIF)」與「整套必需的紀錄(SER)」在處置計畫中的定位如圖 2-2 所示。另闡述與本報告第 2.2.6 節與第 2.2.7 節。



資訊來源：譯自[12]

圖 2-2：處置設施紀錄的階層圖

(2) 記憶機構(機制：檔案館；圖書館；博物館)

檔案館定義為透過其長期任務，來保存所蒐集的紀錄供未來世代使用，而無時間限制。因此其為紀錄、知識與記憶保存程序的關

鍵制度組成。取決於其個別目的與範疇，不同類型的檔案館(例如國家的、區域的、文化的與核能的)在相關紀錄的保留與存取上可能扮演著不同的角色。圖書館與博物館是另一類型的記憶機構，透過其任務對於保存警示資訊與處置設施的記憶可能會有所貢獻。

(3) 標記(機制：地上標記；紀念碑；地下標記；深層地質標記；地表蹤跡)

標記是長期存在的物件，策略性的置放在場址或鄰近場址處，以便未來人類能立即識別，或稍後發現處置設施的存在。這些物件係設計用來使中期與長期的未來世代能知道情況。任何標記應該是不會移動的、穩固的且能提供可被未來世代所能理解的資訊。標記系統可以是簡單的石頭到人為且具紀念性的多重組合系統。取決於其材料、結構設計與所考慮的時間範疇，標記上所賦予的資訊可以從「這是人為的」到更為詳盡的技術內容。對於標記所使用的技術與材料有各種概念，包含安裝在地表與地下的物件，例如護堤、磁鐵、雷達反射器、小型陶瓷符記、蹤跡、聲波信號與有顏色的回填材料等。

(4) 時間膠囊(機制：大型可見時間膠囊；大型不可見時間膠囊；小型時間膠囊)

時間膠囊是一種特製密封的外部殼體，其中存放具歷史性須保存的紀錄，用來在未來特定的時間點或無意間被發現，以便使未來世代知悉的手段。某些時間膠囊計畫涉及定期打開與重新閉合膠囊。時間膠囊可視為是獨特類別的歷史紀錄保存方式，可以做為檔案館與場址標記的輔助與補充。地表標記系統可以結合時間膠囊，將小型時間膠囊放在深處，或鄰近處置設施的位置。將這些標記策略性的放在地下，當有人無意開挖處置設施址時可以做為警示。

- (5) 文化、教育與藝術(機制：工業遺跡；處置設施址/基礎建設的替代再利用；遺跡清單與目錄；當地歷史學會；非物質文化遺產；教育、研究與訓練；公共資訊傳播活動；藝術)

此作法包含一系列的文化、教育與藝術機制，處理世代相傳群體或社會傳承的遺產，進行當代的維護並造福未來世代。包含有形項目(例如建築物、人為景觀、書籍與視覺藝術品)、無形的項目(例如民俗、傳統與教學)且亦可包含天然項目(例如具重要文化意義的自然景觀)。

文化、教育與藝術領域內的紀錄、知識與記憶機制通常是具有代代相傳與公眾參與的性質。但是何種紀錄、知識與記憶可以成為文化、教育與藝術的一部分，卻是不容易的預測的或控制的。這些領域中感興趣的主題會隨時間變化，並且會不斷被重新詮釋。儘管如此，文化、教育與藝術仍可以是紀錄、知識與記憶保存的重要作法。

- (6) 知識管理(機制：知識保存工具、知識風險分析、知識分享理念)

知識管理泛指個人與組織創造、分享、使用與保存知識與資訊的過程。雖然知識亦被認為是企業擁有的，但大多數知識管理的作法都涉及個人。在此情況下，顧名思義，這是一種媒體形式的移轉，需要合作與承諾。知識管理的有效應用所需時間尺度變化很大，從短暫的商業專案計畫到持續數百或數千年的跨世代機制。企業在較短時間尺度使用知識管理技術現已相對普遍，且此經驗對於紀錄、知識與記憶保存的應用極具潛力。

- (7) 看管規定(機制：監測；土地利用管制；明確與有規劃的責任)

看管(oversight)是看顧(watchful care)的通用名詞，亦泛指社會隨時關注(keeping an eye)技術系統與實際實施的處置計畫與決策。

此概念提供有用的體系，形成整體處置計畫的一部分，以關注技術看管活動與社會參與。在欠缺處置設施址相關資訊的情況下，社會無法採取有效的看管，故紀錄、知識與記憶的保存是未來社會看管處置設施所必需的部分。看管的規劃應始於啟動選址程序時。為了設計最適化的看管作法，很重要的是需調和社會與技術需求。處置計畫從一開始就應將當地與區域利害相關者納入，以做為良好設計看管過程的一部分，此有助於激勵當地與區域族群跟處置設施之間的緊密聯繫。

(8) 國際機制(機制：國際法規與協議；國際標準與導則、國際清單與目錄、國際教育與訓練計畫、國際合作、國際倡議)

國際機制有可能促進紀錄、知識與記憶的保存達數百年的時間尺度，此時間可相對應於處置設施的直接與間接看管時期。國際機制可以是政府的(例如聯合國機構或正式的國際公約)，或非政府的(例如私人倡議)。經驗顯示國際機制可以對紀錄、知識與記憶的保存有重大貢獻，例如聯合國教育、科學與文化組織(United Nations Educationnel, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)的「世界計畫之記憶 (Memory of the World Programme)」或國際原子能總署(IAEA)的「國際核子資訊系統(International Nuclear Information System, INIS)」資料庫。

(9) 管制體系(機制：國家管制體系；保防措施)

全面的管制體系被認為是短期與中期防止喪失紀錄、知識與記憶的關鍵因素。國家管制體系(亦即法律與條例，輔以要求與導則)可以明確的推動國家處置策略與需求，以便解決國家紀錄、知識與記憶保存的問題需求與主要責任。管制體系亦可包含土地利用管制

的規定。土地利用管制可防止潛在的有害無意人類闖入，並藉由保存先前土地利用的紀錄與記憶來增加後續決策的價值。

設計用來防止未經授權的取得與使用核物料的國際保防安排，構成另一種管制體系作法的機制。目前國際保防工作係透過國際原子能總署(IAEA)協調，主張採取措施確保處置設施核物料存量知識持續性的重要性。

2.2.6 關鍵資訊檔案(KIF)

關鍵資訊檔案(KIF)是 RK&M 專題計畫所建議構成紀錄、知識與記憶保存體系的重要組成^[13]。以簡短的篇幅概要說明特定單一處置設施的足夠資訊，使後代受過教育的一般公眾能據以判定與認知處置設施的存在性及其所伴隨的危險性。

(1) 編撰關鍵資訊檔案(KIF)之目的

關鍵資訊檔案(KIF)的目的在於以精簡且可被廣泛理解的方式(亦即針對受過教育但非專業的讀者)講述處置設施的故事，提供放射性廢棄物永久處置工程設施存在性、位置與內容的摘要說明。

(2) 關鍵資訊檔案(KIF)編撰之原理

- 應提供相關資訊給未來世代，以幫助保護處置設施的被動性能與使其能做出任何必要的決策。
- 應敘明廢棄物可能造成的危害；描述危害隨時間的減低情況；描述利用工程與天然障壁防止人類接觸放射性廢棄物的方法。
- 應儘可能以簡潔的與非技術性的方式撰寫。當必要時，應提供技術情況以防止模稜兩可的資訊解釋。
- 應以國際標準化的格式產出、廣泛分發與使用當地語言及該國任何其他官方語言。部分內容亦可以使用聯合國典型的國

際官方多種語言提供(如阿拉伯文、中文、英文、法文、俄文與西班牙文)。

- 應保存為可公開獲取的文件，且其備份保存的格式與位置應在可容易找到與通行的地點。
- 應記載指向有關處置設施及其內容與相關安全論證更詳細資訊的保存處所。
- 應以適宜的紀錄管理系統技術加以管理。
- 其發展、測試與傳播應採取多學科專家與公眾共同參與的程序。

(3) 關鍵資訊檔案(KIF)編撰之建議架構，如表

- 背景：檔案目的；放射性廢棄物來源與性質；處置設施重要時間點。
- 位置：處置設施座標(經緯度與深度)；天然環境(封閉時的場址特性參數)；輻射背景。
- 設計：處置設施設計；關鍵工程結構物與特徵；包件類型。
- 存量：關鍵危害與時間曲線、非放射性毒性元素。
- 安全：潛在影響與障壁、廢棄物隔離與圍阻、無意人類闖入防患。
- 版次：版本更新時間，版本分發單位/對象。
- 備註：從何處可取得更詳細的紀錄。

應審慎確保關鍵資訊檔案(KIF)不會成為過長的文件。此需靠熟練的擬稿與小心的編輯。建議最終關鍵資訊檔案(KIF)大約為40頁。

(4) 關鍵資訊檔案(KIF)發展之責任

- 政府：國家負起處置設施及相關管理紀錄保存體系的整體責任，包含產生與發布關鍵資訊檔案(KIF)。實際工作可指定相關單位負責，例如國家、區域及/或地方層級的放射性防護與健康管制機關。
- 設施經營者：負責處置設施管理、運轉與封閉的經營者應在處置設施運轉與封閉階段期間產出關鍵資訊檔案(KIF)。依國情不同，設施經營者的責任為編輯、發布與分發關鍵資訊檔案(KIF)，且可能委請具有適當技術與經驗的外部單位協助完成詳細的設計與實施關鍵資訊檔案(KIF)。
- 各學科專家：為關鍵資訊檔案(KIF)發展過程中的廣泛參與者，將有助於發展、維護、備份、貯存及使社會公眾關注關鍵資訊檔案(KIF)。可包含技術專家、溝通專家、語言學家、檔案管理專家與社群參與專家等。
- 處置設施當地社區：雖然對於關鍵資訊檔案(KIF)而言，當地社區可能沒有正式的责任；但從紀錄、知識與記憶保存的觀點而言，其參與發展有助於關鍵資訊檔案(KIF)的實施。

2.2.7 整套必需的紀錄(SER)

整套必需的紀錄(SER)是 RK&M 專題計畫所建議構成紀錄、知識與記憶保存體系的重要組成^[14]。是在處置設施生命週期內選擇出來的一套獨特紀錄，旨在為未來世代提供足夠的資訊，以確保充分瞭解處置設施的系統及其性能，且若必要時，能幫助他們做出知情的決策。

整套必需的紀錄(SER)篇幅多於關鍵資訊檔案(KIF)，主要是提供給現在與未來世代的放射性廢棄物管理專家、決策者、管制機關與其他主管機關閱讀。

(1) 整套必需的紀錄(SER)之概念

(A) 整套必需的紀錄(SER)之定義與目的

整套必需的紀錄(SER)指的是在處置設施生命週期的期間，蒐集廢棄物處置所選定需要永久保存的最重要紀錄。目的在於提供足夠的資訊給現在與未來世代，以確保對處置設施的系統及性能有充分的瞭解。此將可使權責單位得以進行審查與驗證處置設施性能與安全論證，並做出知情的決策。

(B) 整套必需的紀錄(SER)與其他紀錄的關係

RK&M 專題計畫建議的紀錄基本階層架構如圖 2-3 所示。最高層級的是關鍵資訊檔案(KIF)，此為約 40 頁的單一文件。關鍵資訊檔案(KIF)具有最低層級的詳細程度，但卻有最高留存的機率及對於所有關切的利害相關者的廣泛可獲取性。

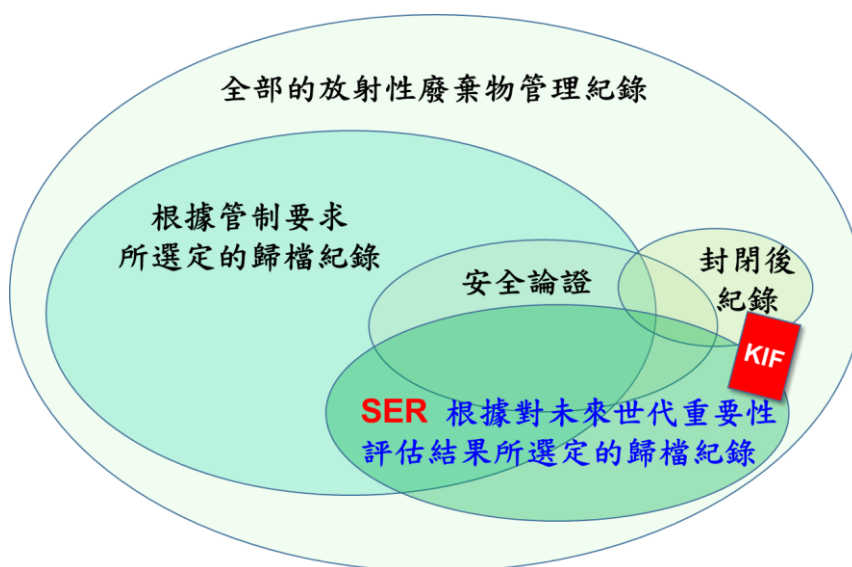
整套必需的紀錄(SER)含有選定的最重要紀錄，預見可以做永久貯存。然而，即使根據管制需求不被考慮的紀錄，也可能被判定為跟整套必需的紀錄(SER)有關，且選定供永久貯存於檔案館(參見圖 2-4)。

圖 2-3 中的最低層級紀錄，係處置設施壽命期間完整蒐集所有產生的紀錄，具有最高的詳細程度，雖然暫時保存，但多數預期不會永久保存，而將在處置設施運轉期間與運轉後銷毀。



資訊來源：譯自[14]

圖 2-3：處置設施紀錄階層與保存之間的關聯性



資訊來源：譯自[14]

圖 2-4：處置設施各種紀錄之間的相互關係

(C) 整套必需的紀錄(SER)與其他紀錄、知識與記憶保存作法的關係

整套必需的紀錄(SER)與記憶機構作法之間有密切的關聯，其機制包含檔案館、博物館與圖書館。特別重要的是檔案館，可透過長期任務永久保存所蒐集的紀錄以供未來世代使用。

整套必需的紀錄(SER)跟關鍵資訊檔案(KIF)之間亦有密切關聯性。關鍵資訊檔案(KIF)屬於摘要性質的文件，含有基本的處置設施與廢棄物資訊，提供資訊給無放射性廢棄物管理專業知識的一般公眾。而整套必需的紀錄(SER)則含有處置設施更專業的詳細資訊，包括其技術內容與伴隨的安全論證。整套必需的紀錄(SER)可以將關鍵資訊檔案(KIF)納入其中，但更重要的是，單獨分發的關鍵資訊檔案(KIF)，其內容應說明何處可取得處置設施更進一步的詳細紀錄，包含整套必需的紀錄(SER)。

(2) 整套必需的紀錄(SER)之選擇程序

整套必需的紀錄(SER)的紀錄選擇過程應透明、可追溯與正當。過程應基於法令要求及專業與技術知識，且應考慮未來世代的潛在需求、處置設施壽命期間產出的紀錄種類與性質，及處置計畫時間段等因素。

(A) 未來世代之潛在需求

如本報告前文所述，未來世代的潛在需求可能為：自己執行安全評估；回溯決策過程；從處置設施再取出物質等。紀錄選擇程序的基準，有必要根據未來世代的這些需求，來判定哪些是必需保存的紀錄。

(B) 放射性廢棄物處置設施相關之紀錄

處置設施最重要的紀錄是安全論證結果與佐證的技術報告與參數清單等，應優考慮納入整套必需的紀錄(SER)。其次是目前依法

令規定應由相關檔案館保存的紀錄，但應注意，法定文件並非全部都是整套必需的紀錄(SER)，應經適當選擇(參見圖 2-4)。

(C) 整套必需的紀錄(SER)相關的處置設施計畫階段與時間尺度

整個處置設施過程通常持續數十年直到封閉，且可能甚至超過一百年。整套必需的紀錄(SER)在短期、中期與長期均扮演一定的角色，但最主要相關的目標時間尺度可能是在中期(亦即處置設施封閉後採取間接看管活動的時間段)。處置設施運轉結束時，放射性廢棄物管理組織的檔案館可能會關閉。在此階段，整套必需的紀錄(SER)將最有可能達到其最終狀態。

儘管如此，在短期階段即應建立整套必需的紀錄(SER)之正確架構與適宜程序，並進行內容的蒐整與建置，以利盡早保存所有處置設施相關的重要資訊與知識。

(D) 必要紀錄之判定

判定必需紀錄的擬議程序，需考慮前述的各種需求並維持彼此之間的平衡，亦即一方面維持整套必需的紀錄(SER)儘可能的小；另一方面要維持紀錄的清晰度與可追溯性，且同時須提供儘量多的必要資訊，以滿足未來世代的潛在需求。

由於必要紀錄之判定可能因國情與處置設施個案因素等而有差異，且無法排除主觀因素，因此，RK&M 專題計畫建議可擬定分類與評分方案應用於處置計畫實施期間產出的大量紀錄。

例如從下列兩方面來進行評分(參見表 2-2)：

I. 個別紀錄的關聯性，用於判定能否滿足未來世代的需求。

針對關聯性再細分為四個類別：

0=無關：此紀錄中所含的資訊跟解決問題的要求無任何關聯。

1=最好有此紀錄：此紀錄中所含的資訊有助於符合需求，
但若無此資訊事情仍可持續進行。

2=應該要有此紀錄：一般需要此紀錄中所含的資訊以符合需求。

3=必須要有此紀錄：若無此紀錄中所含的資訊則無法符合需求。

II.估計未來世代需花多大的努力才能重新再產生紀錄中所含有的資訊(亦即若紀錄未能移轉給未來世代)。

針對努力再細分為二個類別：

a=無此紀錄時，未來世代靠些許努力也可以獲得資訊。

b=無此紀錄時，未來世代極難或甚至無法直接獲得資訊。

表 2-2：整套必需的紀錄(SER)選擇的擬議分類與評分方案

關聯性/努力		a 些許努力	b 極努力
無關	0		
最好有此紀錄	1		
應該要有此紀錄	2		SER
必須要有此紀錄	3	SER	SER

資訊來源：譯自[14]

表 2-2 中評分達 3a、3b 與 2b 的紀錄建議才能選擇納入至整套必需的紀錄(SER)中。

(E) 整套必需的紀錄(SER)建議範例

依據處置計畫的不同階段，可以將可能產出的紀錄做成表單，並據以進行保存紀錄的選擇。表 2-3 所示為建議範例。其中依據未來世代的目的/需求，劃分為三個類別：I=未來世代進行自己的安全評估；II=未來世代追溯處置設施實施過程的決策；及III=未來世代從處置設施再取出物質。

表 2-3：從擬議紀錄選擇程序推導整套必需的紀錄(SER)內容之範例

時期	紀錄群組範例	紀錄/文件範例	目的/需求
	紀錄類別：場址與母岩調查與特性調查紀錄		
選址與場址特性調查	場址接收準則與要求	準則提案與定義，外部審查與更新	II
		準則核准與準則評估方法論	II
	地表調查	初始地表與地下環境監測(例如放射性性質，空氣/水污染)	I、II、III
		地表調查摘要報告	I、II、III
	地質調查	地質模型	I、III
	水文地質調查	調查量測紀錄	I、III
		水文地質模型	I、III
		水文(地質)調查評估摘要報告	I、III
	場址性質評估	接收準則，符合性評估報告	II
處置設施建造	場址接收準則與需求	場址接收準則審查、更新、外部檢驗與核准	II
	場址與處置設施性質驗證	場址與處置設施性質驗證規程與報告	I、III
		現地調查評估與場址驗證摘要報告	I、III
廢棄物置放	地上與地下調查與監測	調查與監測感應器性能紀錄	I、III
		調查與監測量測紀錄	I、III
		調查與監測結果摘要與符合性檢查報告	I、II、III
封閉前	地上與地下封閉前調查與監測	調查與監測量測紀錄與實驗室規程	I、III
		調查與監測摘要報告與評估報告	I、III
		封閉安全評估輸入資料，環境影響評估(EIA)與執照申請程序	I
		處置設施除役輸入資料，封閉計畫與設計	I
	紀錄類別：處置設施設計與建造		
場址確認	處置設施建造準備	工程障壁系統(EBS)設計，外部檢驗與核准	II

		處置設施建造設計外部檢驗與核准	II
處置設施建造	處置設施建造	建造材料，工程障壁系統與設備測試/量測報告	I、III
		處置設施建造，工程障壁系統修改計畫與核准	I、II、III
		處置設施複雜性能測試與評估	I、II、III
		處置設施設計完工文件，處置設施設備運轉與維護手冊	I、II、III
廢棄物置放	處置設施運轉	處置設施結構物，工程障壁系統，設備修改計畫，外部檢驗，核准，實施，處置設施設計與完工文件更新	I、II、III
		部分處置孔與處置室回填作業	I、III
封閉前	監測	處置設施結構物，工程障壁系統與設備監測，除役測試與輸入及封閉計畫發展	I、II、III
	除役準備	除役與封閉計畫外部檢驗與核准	II
處置設施封閉	處置設施封閉作業	處置設施拆除與封閉日誌，協調會議規程，品質管控(品管)規程，外部視察規程，材料符合性規程等	I、III
		封閉作業品質評估與外部同儕審查報告	I、II、III
		最終除役與封閉完工文件，技術說明書，圖件，需求符合性說明書與品管評估報告	I、III
		環境影響評估、封閉安全評估與執照申請程序的輸入與資料	I、III
		施工材料，工程障壁系統測試/量測規程，實驗室規程，材料證明試樣與照片/影像紀錄	I
	紀錄類別：廢棄物與廢棄物包件		

選址、場址特性調查與確認及處置設施建造	廢棄物存量	廢棄物特性調查與分類報告(廢棄物型體、核種內容、毒性等性質)	I、II、III
		廢棄物存量登錄資料	I、II、III
	核物料存量	核物料登錄資料	I、II、III
	廢棄物包件設計與發展	廢棄物包件設計，圖件，計算，技術解決方案報告與品質保證(QA)/品管計畫	I，II
		廢棄物包件製造，前處理與處理報告	I、II、III
	廢棄物接收準備	廢棄物接收準則，外部檢驗與核准	II
廢棄物置放	廢棄物接收	廢棄物包件接收規程，廢棄物包件資訊檔案，其他相關資訊與符合性說明書	I、III
		廢棄物包件符合性檢查規程與非一致性規程	I、III
		廢棄物包件定位檔案	I、III
		廢棄物中期貯存紀錄	I、III
	廢棄物存量	廢棄物包件監測與檢查	I、III
		廢棄物包件登錄資料與核物料登錄資料	I、III
		處置室與坑道存量紀錄	I、III
		處置設施摘要存量報告	I、II、III
		核物料存量變更報告，存量報告，存量接收規程與核物料平衡報告	I、II、III
	紀錄類別：處置設施運轉紀錄		
廢棄物置放	處置設施內部規定	處置設施保防，核子安全，輻射防護說明書，導則與安全文化實施計畫	I
		紀錄管理系統，紀錄分類，選擇歸檔與廢止規則	I、II、III
	監測紀錄	地表(場址/附近)監測(例如放射性，其他污染，地震與降水監測)	I
		地下監測(例如放射性，地質與工程障壁系統性能監測)	I

		封閉後監測概念	I, II
	核物料帳目	核物料登錄資料	I、III
		存量變化報告，實體存量接收與登帳存量	I、III
	安全，保防與保安	運轉日誌，緊急訓練，緊急事件紀錄，採取措施紀錄與緊急事件評估報告	I、III
	紀錄類別：安全與環境影響評估與申請執照文件化		
選址、特性調查與確認	安全論證與環境影響評估與申請執照	公聽會與彙整公眾意見等	II
		選址，核准，政府決策文件等	II
		初步建造核准與政府決策文件	II
		處置設施建造核准與政府決策文件	II
處置設施建造	安全論證與環境影響評估與申請執照	公聽會與編輯公眾意見	II
		處置設施運轉核准與政府決策文件	II
廢棄物置放與封閉前	定期或不定期安全評估/安全論證	主管機關決策與核准	II
	處置設施封閉的安全評估/安全論證與環境影響評估	處置設施除役與封閉核准，與政府決策文件	II
處置設施封閉	處置設施場址外釋的安全評估/安全論證	安全論證策略，計畫與時程	I, II
		地質、岩石力學、水文、化學、微生物等的作用報告(包含基礎研發)	I、III
		模式與工具	I
		地球科學長期演化	I、II、III
		場址-特定的特徵、事件與作用(FEP)內容	I、III
		情節發展(參考、替代與萬一的案例)	I、II、III
		輸入資料規格；安全評估模式計算；評估結果包含安全功能，(次)系統性能與完整	I、III

		性；指標；法規評估符合性；及不確定性的討論	
		多重證據(額外的地質論點，類比，其他指標等)	I，II
		額外的分析(例如臨界、未來人類活動、最適化與定性分析)	I、II、III
		外部檢驗與同儕審查	I，II
	場址外釋的環境影響發展與評估	環境影響評估方法論，輸入資料蒐集與計算	I
		環境影響評估摘要報告，圖件，地圖與計算	I，II
	場址外釋的安全論證與環境影響評估與申請執照	安全論證報告外部檢驗與同儕審查	I，II
		環境影響評估外部檢驗與同儕審查	I，II
		公聽會與編輯公眾意見	I，II
		處置設施運轉核准與政府決策文件	I，II
	紀錄類別：社會與一般資訊		
		法令，法規	核子法律與法規(核子法律，輻射防護法規，廢棄物管理法規，核子設施建造與運轉，保防，緊急規劃等)
外部溝通		應對申請執照與主管機關	II
		應對其他主管機關	II
		溝通政治人物與政治團體	II
		溝通指定的社群與聯繫利害相關者	II
政策與概念文件		國家廢棄物管理政策與實務，包含公聽會與擬議選項討論	II
		廢棄物管理環境影響評估與處置設施實施概念	II
記憶工具		關鍵資訊檔案(KIF)	I、II、III
		標記與痕跡	II

資訊來源：譯自[14]。

(3) 整套必需的紀錄(SER)之管理

(A) 關鍵利害相關者與組織

構成整套必需的紀錄(SER)的文件，其主要來源是在處置計畫不同階段，由計畫執行者/設施經營者發展與編輯安全論證時，所產出的技術報告。故計畫執行者/設施經營者應為整套必需的紀錄(SER)創建過程的主要執行/參與者。因此，可合理期待由計畫執行者/設施經營者成立與組織一個負責紀錄選擇與登錄的工作小組，且建議此工作小組應由跨學科與不同專長領域的人員組成，例如核安專家、廢棄物技術專家、廢棄物處理人員、處置設施建造工程師、溝通專家與社會科學家等。藉此，所有選定的專家能貢獻其專長，確保選定必需保存紀錄的重要性與全面性。

然而，整套必需的紀錄(SER)應由國家負起最終責任，因為預期處置設施封閉後，亦將由國家負起最終責任。政府通常將透過管制機關提供適當的法令，定義地質處置設施紀錄保存的架構、內容與條件。法令將包含如何維護資訊、未來的責任分工、及其他應立法規定的相關事項。

(B) 整套必需的紀錄(SER)之編撰與維護

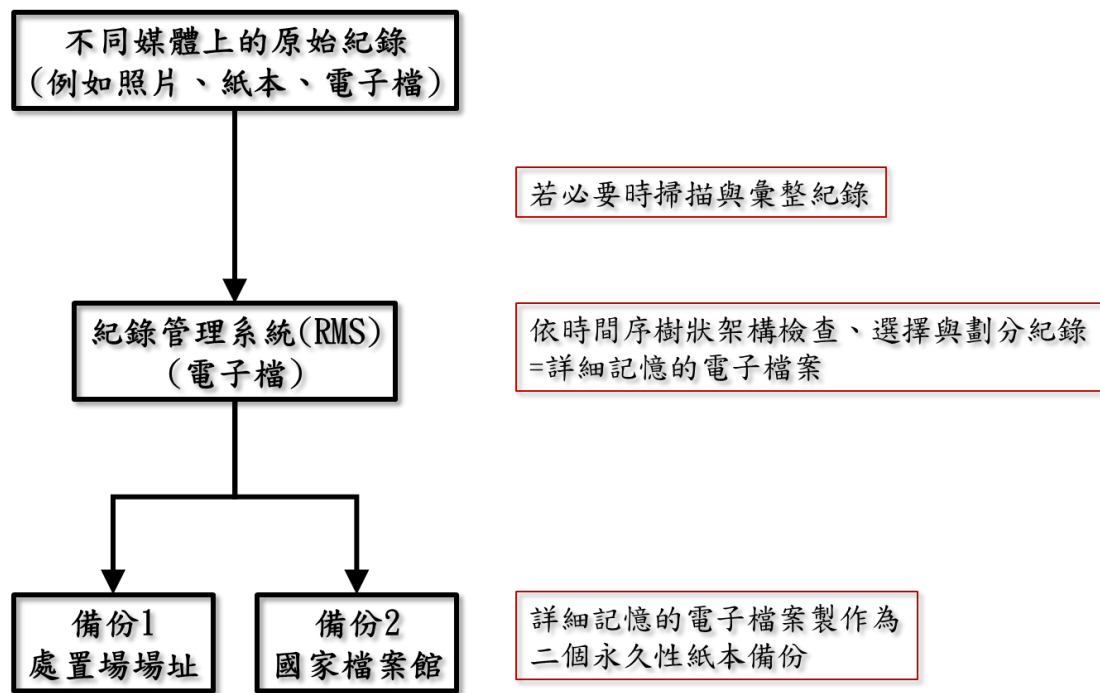
(a) 何時展開選擇紀錄的程序? 整套必需的紀錄(SER)何時開始存在?

- 紀錄產生後即可被選擇，宜儘早檢視，以免隨時間而疏漏。
- 強烈建議應儘早於處置計畫中開始創建整套必需的紀錄(SER)，亦即至少是處置設施場址被選定時。

- 整套必需的紀錄(SER)的第一版甚至是早在場址特性調查時期即已存在。
- 整套必需的紀錄(SER)的創建時機可能會受到法規影響，例如，配合法規要求而定期/不定期或階段性/任務性提報管制機關審核的各種紀錄。

(b) 選擇紀錄的程序應如何進行？

- 處置計畫期程長達數十年甚至一百多年，選擇紀錄的程序亦應配合時程逐步進行/修訂。
- 選擇紀錄的程序應每次增加一些必要的新紀錄，但須抑低保存的紀錄總量。
- 處置設施運轉期間是產出與選擇紀錄的高峰期(例如廢棄物本身特性、廢棄物置放、構築封塞與封阻材料、處置坑道局部封閉、與其他資訊等)。
- 整套必需的紀錄(SER)無須貯存所有安全論證版本的完整紀錄。應著重於保存演變過程與決策依據的紀錄。且宜建立由主管機關核准的特定審查程序。
- 宜儘早建立紀錄管理系統(Record Management System, RMS)以支持整套必需的紀錄(SER)選擇。處置計畫全程產出的文件與資訊均蒐整於紀錄管理系統(RMS)內進行判定與標註，再從其中維護、選擇與轉移相關紀錄到整套必需的紀錄(SER)。圖 2-5 為法國紀錄管理系統(RMS)的案例經驗。



資訊來源：譯自[14]。

圖 2-5：法國 La Manche 處置設施紀錄管理系統應用範例

(c) 整套必需的紀錄(SER)其實體樣式為何？

- 整套必需的紀錄(SER)的實體型態，須建立某種形式的目錄格式。作法上可結合紀錄管理系統(RMS)架構化所有必要資訊的各個選取紀錄及其位置。此外，需決定是否所有的整套必需的紀錄(SER)從一開始即需貯存於特定的位置，此取決於各國法令，特別是歸檔規則。

(d) 誰應負責創建與維護整套必需的紀錄(SER)? 誰核可或否決存取整套必需的紀錄(SER)?

- 處置計畫執行者/設施經營者應負責整套必需的紀錄(SER)的選擇紀錄、更新紀錄清單、及使紀錄可被閱覽與獲取等。

- 整套必需的紀錄(SER)的監督與管控，建議應由主管機關設定審查程序與審查頻率。例如，審查頻率得為：
 - 通常每五到十年。此時間尺度較易於行政管理。
 - 配合安全論證定期更新。此通常跟處置計畫的相關階段或決策有關。
 - 配合法規要求的其他活動。例如十年安全再評估或特定的事件(例如置放區回填或變更應用技術)。

(e) 如何確保整套必需的紀錄(SER)以正確的方式實施？

- 為了允許容易與有效率維護整套必需的紀錄(SER)，可善運各種國際通用的搜尋與檔案管理工具與作法，例如：
 - 描述所有選定的紀錄及其組織。
 - 說明處置設施目前的歷史。
 - 促進紀錄的瞭解，例如針對特定主題搭配表單或圖解進行說明。

(f) 整套必需的紀錄(SER)應製作多少數量？

- 由於整套必需的紀錄(SER)係由大量的紀錄組成，故建議僅產生一套最終版本，以利管理，並避免因存在兩套或多套平行版本而造成混淆的風險。
- 單一最終版本應至少有兩份的備份，以利長期保存。
- 至少兩份的備份應異地保存，且內容應與原始紀錄完全一樣，但獨立管理。

(g) 整套必需的紀錄(SER)之保存

- 處置設施壽命期間：整套必需的紀錄(SER)可利用電子媒體保存。電子媒體具有可提供高資料貯存容量、

方便搜尋功能與多重備份的優點。電子媒體更利於平日使用，因為相對於紙本更容易操作，且可供多人同時使用，甚至是在不同的地點使用。

- 長期保存：並不建議電子媒體。因為其相對低耐用性且需要永久維護、更新或升級硬體與軟體工具。目前，永久性紙本看來仍是長期保存的最佳媒體。
- RK&M 專題計畫的主流意見，認為國家檔案館是長期保存的最佳解決方案。各國有不同的國家檔案歸檔體系。需長期保存的整套必需的紀錄(SER)或其備份版本，應在處置設施封閉後提送國家檔案館做進一步保存與維護
- 處置設施當地檔案館亦應留存一份備份版本，供平日使用。

2.3 綜合討論

針對跨世代紀錄、知識與記憶保存之議題，本報告提出心得討論如後。

(1) 我國處置計畫推行紀錄、知識與記憶保存之重要性與急迫性

OECD/NEA 發起紀錄、知識與記憶保存倡議，目的係基於世代正義的理念，避免未來世代無意闖入處置設施，並維護後代人類與環境的安全；此外，亦提供未來世代自主決策的權力，包括重新安全實施評估、檢視歷史決策正當性與必要時回收有用物質等。

我國為民主進步國家，在使用核能的同時，亦應肩負世代責任，除了不應將負擔加諸後代子孫外，亦應為後代環境永續謀求長遠的福祉。因此，對於處置計畫推行紀錄、知識與記憶保存之相關議題，亦應予以重視。

處置計畫紀錄、知識與記憶保存的國際共識是應儘早採取保存措施，否則隨著時間流失，紀錄、知識與記憶極可能因各種因素而喪失。我國雖然尚未選定場址，但處置計畫已推動多年，實質上已產生大量的紀錄、知識與記憶。在自然科學方面，雖然未來會有更確切的場址，會以新的調查工具與技術產生更可靠與真實的紀錄，但相關的知識對於處置計畫後續發展，仍極具參考價值，應加以妥善進行資訊管理。而在社會科學方面，處置計畫推動過程期間已產生大量諮議與決策演變的紀錄、知識與記憶，隨著組織變革與人員離退等各種因素，有喪失的風險。因此，有實施資訊集中管理與維護保存的必要性與急迫性。

(2) 我國處置計畫推行紀錄、知識與記憶保存之建議策略方案

根據對 RK&M 專題計畫文獻研析的心得，本報告建議我國可採行以下的策略性執行方案，逐步推動處置計畫紀錄、知識與記憶之保存：

- (A) 由主管機關透過管制協調會議，請處置計畫作業單位規劃並實施處置計畫紀錄、知識與記憶之保存。並請國內各相關單位配合提供必要的協助。
- (B) 處置計畫作業單位結合現行的品質管理系統/紀錄管理系統知識管理系統/資訊管理系統等，衍生創建跨世代紀錄、知識與記憶保存資訊系統。
- (C) 處置計畫作業單位參考國際經驗與國內實況，進行現有與後續資訊跟跨世代紀錄、知識與記憶保存資訊系統的關聯。亦即哪些資訊須納入保存系統中，並且與既有資訊系統同步維護。
- (D) 處置計畫作業單位定期與不定期邀集各單位代表與專家學者研議具體措施，逐步完善我國跨世代紀錄、知識與記憶保存資

訊系統與充實重要紀錄。例如高放射性廢棄物最終處置計畫應配合我國「放射性物料管理法施行細則」第37條規定，於每4年檢討修正，提報主管機關說明作業情況。

(E)處置場址選定後，主管機關發布跨世代紀錄、知識與記憶保存導則。規定職責、期程、文件格式與內容等。

(F)處置計畫作業單位提出處置設施建造執照申請時，應完成第一版整套必需的紀錄(SER)的編寫，並提報主管機關審議。

(G)處置設施運轉期間設施經營者應定期更新整套必需的紀錄(SER)，例如配合我國「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第15條規定，其經營者應每五年更新其安全分析報告，並提報主管機關審議。

(H)處置設施封閉後，監管期結束前，設施經營者應提出最終版整套必需的紀錄(SER)與關鍵資訊檔案(KIF)，同時提報主管機關審議跨世代紀錄、知識與記憶保存的作法與採用的機制。

(3) 我國處置計畫實施紀錄、知識與記憶保存之建議注意要項

- 放射性廢棄物也是垃圾的一種，跨世代紀錄、知識與記憶保存宜在安全的基本前提下，以經濟有效的手段實施。
- 跨世代紀錄、知識與記憶保存是基於現有資訊系統的精簡版，著眼於未來世代的資訊應用，彼此間宜做好關聯，同時依其應用目的，亦宜有所區隔。
- 跨世代紀錄、知識與記憶保存極為強調資訊傳承/傳播的多樣性與餘裕性，在將來處置設施封閉後的作法上，應依國情特色，充分靈活結合運用各種可能的方式與手段。

(4) 處置計畫推行紀錄、知識與記憶保存之國際認知

整體而言，如同 RK&M 專題計畫所述：「目前國際上對於紀錄、知識與記憶保存的短期意識與行動重要性已經有一定程度上的認知；但如何規範放射性廢棄物最終處置紀錄、知識與記憶的長期保存，則尚無總體趨勢」^[12]。對於我國而言，這也是一件該做的事。我國對於相關資訊保存工作，宜結合現有的資訊系統，儘早開始思考行動方案，且不僅止於自然與工程科學資訊，亦應納入社會科學資訊的保存。此外，應持續關注相關議題的國際進展，因為透過國際組織進行久遠的處置資訊保存，是普遍被認可的重要作法。

3. 放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析

韓國是核能發電大國，其高放射性廢棄物處置技術亦積極發展中。2022 年韓國政府發布「高放射性廢棄物處置管理研發路徑圖」，顯示其推動計畫的決心。借鑑韓國的優良實務經驗有助於我國處置計畫的發展，提升技術符合國際安全水準。

本章說明韓國放射性廢棄物管制體系、核後端管理現況與高放射性廢棄物處置計畫現況及研發策略等。

3.1 韓國核能發展與核能後端營運概況資訊之蒐整

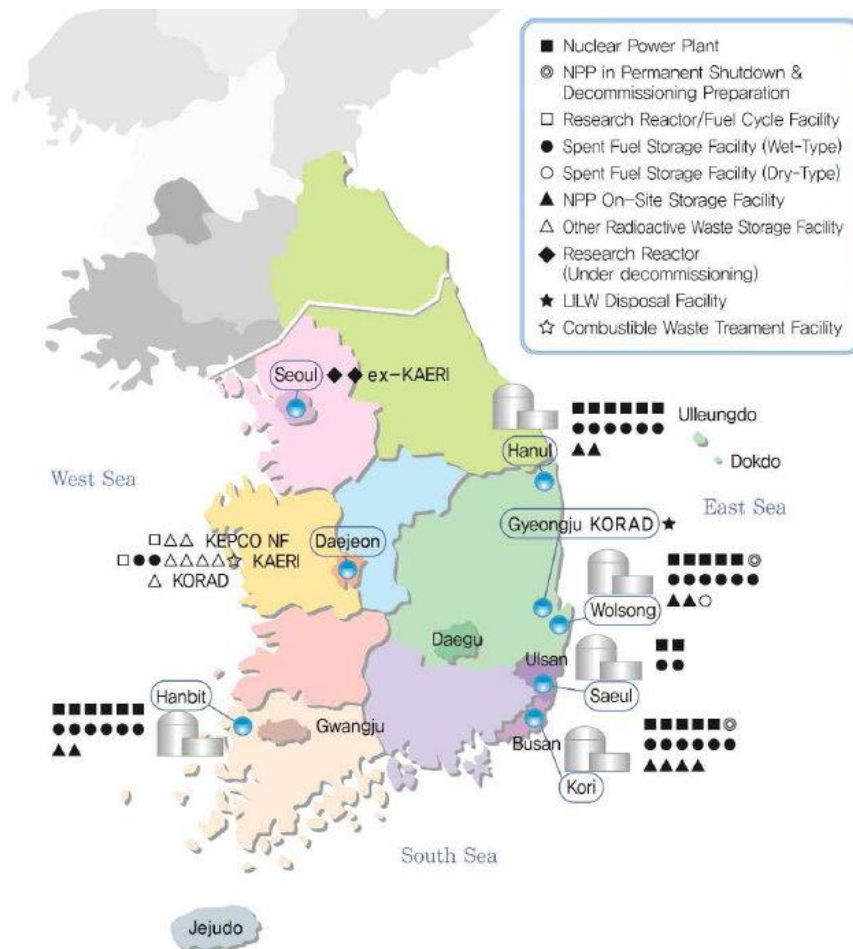
本節資訊主要摘自韓國 2020 年版「用過核子燃料管理安全與放射性廢棄物管理安全聯合公約」國家報告^[21]。另依據其他相關網站與文獻增補/更新部分內容。

(1) 核電概況

韓國目前有5座核能電廠，共有發電核子反應器30部。其中25部運轉中；3部建造中；2部已永久停機。2022年核能發電量占比30.4%^[1]。韓國核能電廠位置如圖3-1所示。

韓國有4部研究用反應器，其中2部進行除役程序中。

韓國因應2011年福島事故的影響，對核安管制機關進行組織改造，持續發展核能。但2017年5月文在寅總統當選並上任後，宣布採取無核能發電政策。2022年5月尹錫悅當選總統，改為推動核能發展的政策。2023年1月韓國通商產業和能源部(MOTIE)宣布將增加核能發電佔全國發電量的比例：從2018年的23.4%增加到2036年的34.6%^[22]。



資訊來源：[21]

圖 3-1：韓國核能電廠與放射性廢棄物管理設施位置圖

(2) 國家政策

- 政府直接管理：放射性廢棄物需要長期安全管理，故應由政府負責，並按照國內與國際有關廢棄物安全管理的法律與法規進行安全管理。
- 安全第一：放射性廢棄物應在適當考慮生態與環境影響的情況下進行安全管理，以保護人類健康與環境免受有害影響。
- 公信力執行：放射性廢棄物管理應透明公開，以改善公眾的理解與信任。實施放射性廢棄物管理專案計畫，以促進當地社區的和諧與發展。

- 產生者付費原則：管理放射性廢棄物所需費用應由產生者承擔，而不會給後代造成不必要的負擔。高放射性廢棄物管理費用由發電業者支付。
- 提高放射性廢棄物管理效率：應盡量減少放射性廢棄物的產生，處置設施應有效運轉。應不斷發展有效管理高放射性廢棄物運輸、貯存、與處置技術，以及減少體積與放射性毒性。
- 當代人應有的負擔：受益於核能的當代人應承擔高放射性廢棄物管理的責任。

(3) 重要法令

韓國核子安全法令體系實務上可分為3大類：(a)具有強制力的法律、施行命令、施行規則、及管制機關發布的技術標準與解釋；(b)具有建議性的管制標準、管制導則、及審查導則；(c)具有參考性的一般工業標準與規範。

韓國與放射性廢棄物管理相關的重要法令列舉如後述：

(A) 核子安全法及其相關法令[主管機關為核子安全與保安委員會(Nuclear Safety and Security Commission, NSSC)]

(a) 核子安全法及其施行命令與施行規則。

(b) 核子安全與保安委員會(NSSC)發布之相關技術標準。

- 低與中放射性廢棄物處置設施結構標準。
- 低與中放射性廢棄物運輸規定。
- 放射性廢棄物處置設施品質保證標準。
- 低與中放射性廢棄物處置設施輻射危害預防標準。
- 低與中放射性廢棄物處置設施場址特性調查報告編製說明。
- 用過核子燃料運輸規定。

- 放射性廢棄物分類與處置標準規定。
- 低與中放射性廢棄物焚化標準。
- 放射性廢棄物處理設施結構和設備技術標準。
- 低與中放射性廢棄物處置設施運轉技術標準。
- 低與中放射性廢棄物處置設施安全分析報告編製導則。
- 低與中放射性廢棄物處置視察規定。
- 用過核子燃料中期貯存設施結構和設備細部技術標準。
- 用過核子燃料中期貯存設施安全分析報告編製說明。
- 高放射性廢棄物深層處置設施之通案標準。

(B)放射性廢棄物管理法及其相關法令[主管機關為通商產業和能源部
(Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE)]

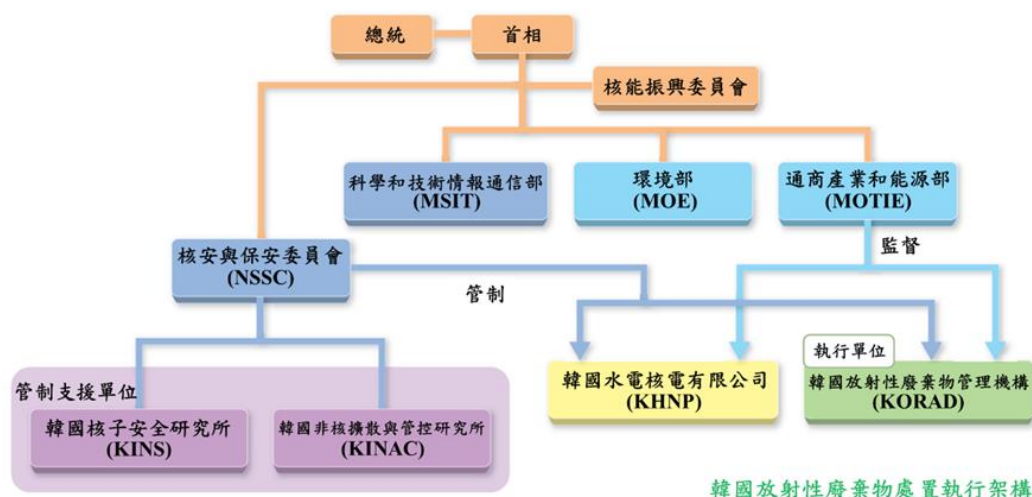
(a) 放射性廢棄物管理法及其施行命令與施行規則。

(b) 通商產業及能源部(MOTIE)發布之相關規定。

- 放射性廢棄物管理費用與用過核子燃料管理費用計算基準規定(2015-132 號)。
- 放射性廢棄物管理基金使用管理規定(2013-127 號)。
- 放射性廢棄物接收方式規定(2016-230 號)。

(4) 組織體系

韓國放射性廢棄物管理的行政體系如圖3-2所示。重要機關/機構之權責與組織概況說明如後。



資訊來源：改繪自[23]

圖 3-2：韓國放射性廢棄物管理之行政體系

(A) 政府機關

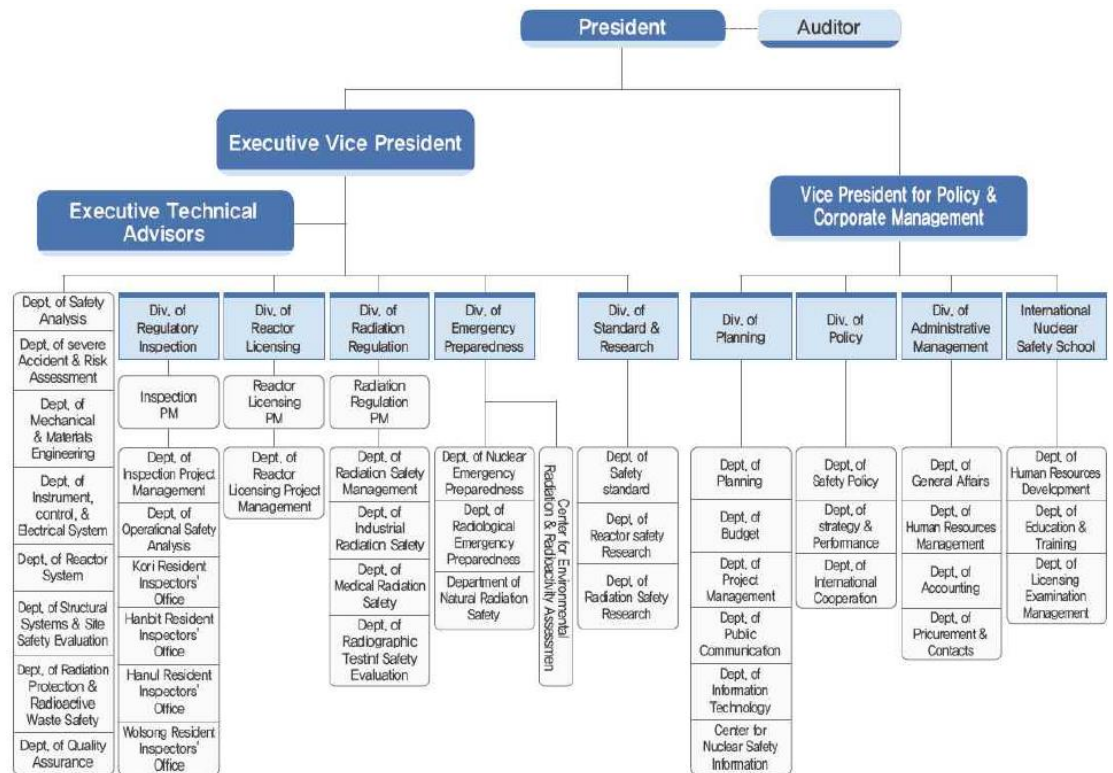
(a) 核子安全與保安委員會(Nuclear Safety and Security Commission, NSSC)：福島事故後於 2011 年 10 月組改成立。負責核子設施的執照核發與安全管理檢查。委員會包括主席在內由 9 名委員組成，主席由總理提名由總統任命，委員任期 3 年，可以連任一次。內部常設諮詢委員會由最多 15 名專家成員組成。核安與保安委員會(NSSC)設有秘書處，負責處理委員會的一般事務，常務委員兼任秘書長一職。秘書處由 1 個規劃協調辦公室、2 個局、11 個處、與 5 個現場辦公室組成，其中 2017 年 2 月新成立放射性廢棄物安全處，負責放射性廢棄物管制。核安與保安委員會(NSSC) 2020 年度總預算為 2,162 億韓元，其中包括來自核電基金 1,109 億韓元與施政會計預算 1,053 億韓元。2020 年 4 月總在職人數為 158 人。組織架構如圖 3-3 所示。



資訊來源：改繪自[24]

圖 3-3：韓國核子安全與保安委員會(NSSC)組織架構圖

(b) 韓國核子安全研究所(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)：依據組織條例於 1990 年 2 月成立，為核子安全與保安委員會(NSSC)所屬技術支援機構，受其委託執行與安全相關的管制活動，包含技術安全審查、安全檢查、驗證檢驗、標準研發、及證照考試等核子安全管制業務。2020 年政府預算為 11,340 億韓元。2020 年 3 月總在職人數為 623 人。組織架構如圖 3-4 所示。



資訊來源：[25]

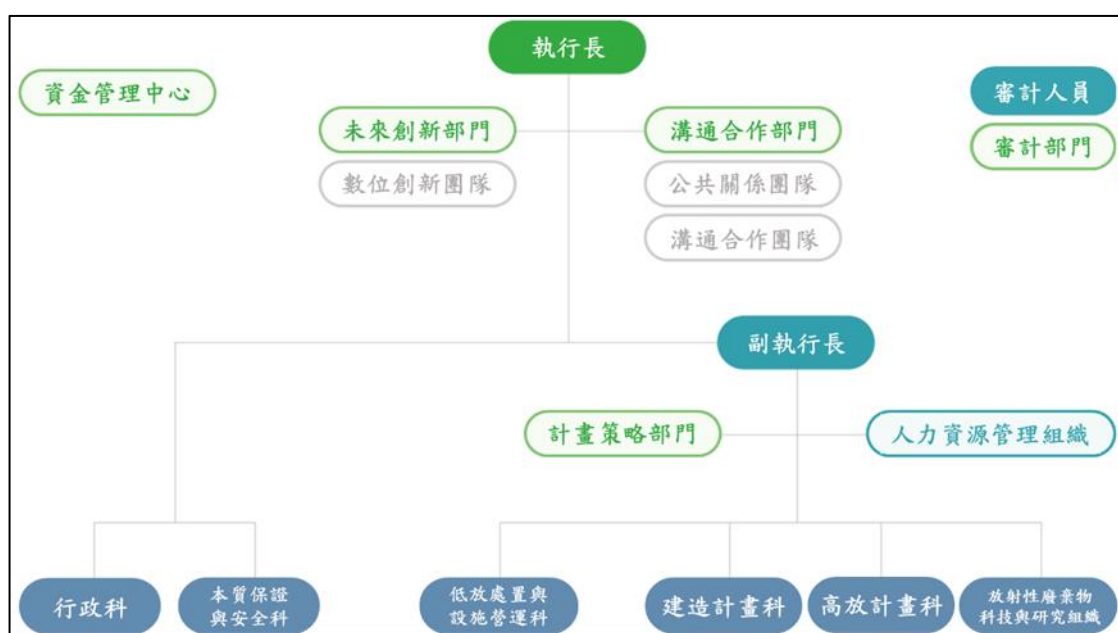
圖 3-4：韓國核子安全研究所(KINS)組織架構圖

(c) 通商產業和能源部 (Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE)：負責制定與執行國家基本計畫，其中包括根據放射性廢棄物管理法進行基本政策規劃、估計廢棄物產生量、與推動管理設施相關計畫等。

(B) 營運單位

(a) 韓國放射性廢棄物管理機構 (Korea Radioactive Waste Agency, KORAD)：2009 年依據放射性廢棄物管理法組改成立的專責機構，機構前身為 1976 年成立的韓國放射性廢棄物管理公司 (Korea Radioactive Waste Management Corporation, KRMC)。負責放射性廢棄物的運輸、貯存、與處置等放射性廢棄物管理業務。由總公司(3 個部門)、研發機構、低放處置中心、與基金管理中

心組成，基金管理中心負責放射性廢棄管理基金經營。2011 年 3 月因應處置計畫公眾溝通需求總部從龍仁市搬遷到慶州。經費來源包含政府預算及廢棄物產生者交付的費用，2019 年經費約 861.78 億韓元。迄 2020 年，已使用 1,607 億韓元用於低放管理、19.3 億韓元用於用過核子燃料管理、及 13.2 億韓元用於技術發展。2020 年 3 月韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)共有員工 316 人；總部 178 人，月城低放處置中心 99 人，研發部門 29 人，基金管理中心 10 人。組織架構如圖 3-5 所示。另亦針對實務作業方式進行研發，2019 年研發費用約 6.14 億韓元。



資訊來源：改繪自[26]

圖 3-5：韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)組織架構

(b) 韓國水電核電有限公司(Korea Hydro & Nuclear Power, KHNP)：為韓國電力公司(Korea Electric Power Corporation, KEPCO)的子公司，負責電廠營運。總公司安全部下設輻射安全組負責核能電廠運轉期間低放廢棄物管理與輻射安全管理。總公司設後端

管理與除役部負責用過核子燃料管理中期貯存管理。各核能電廠另有約 30 人負責低放廢棄物處理與貯存。

(C)研發機構

(a) 韓國原子能研究所(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)：隸屬科學和技術情報通信部(Ministry of Science and ICT, MSIT)。負責核能技術研發、研究用反應器運轉與除役、研究衍生放射性廢棄物之處理與貯存等。設有放射性廢棄物管理中心，人員 15 名。2015 年 7 月以前亦負責接收小產源放射性廢棄物；之後由月城低放處置場接收。韓國原子能研究所(KAERI)研究用反應器用過核子燃料相關設施與放射性廢棄物處理及貯存設施的管理費用由政府預算支應。迄 2020 年韓國原子能研究所(KAERI)已使用 369.2 億韓元於處置其放射性廢棄物，並使用 35.8 億韓元於準備與分析待處置的放射性廢棄物，以滿足處置設施的接收準則。

(b) 韓國非核擴散與管控研究所(Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, KINAC)：負責核子保安與保防相關研究，包含用過核子燃料管理之研究。

(5) 分類數量

依據核子安全法將放射性廢棄物分為高放射性廢棄物與低放射性廢棄物兩大類。

(A) 高放射性廢棄物：放射性濃度與發熱量高於下列規定者。

- 放射性濃度：半衰期超過 20 年的 α 發射放射性核種 $\geq 4,000$ Bq/g。
- 發熱量： ≥ 2 kW/m³。

(B) 低放射性廢棄物：除高放射性廢棄物以外的放射性廢棄物。另依據

放核安與保安委員會(NSSC)發布之放射性廢棄物分類與放射性廢棄物清潔規定，分為3類：中放射性廢棄物(ILW)、低放射性廢棄物(LLW)、與極低微放射性廢棄物(VLLW)。其分類基準與IAEA GSG-1規範相當。

韓國迄2020年3月31日累計放射性廢棄物數量如下：

- 核能電廠貯存用過核子燃料約 16,921 噸。
- 核能電廠貯存低放射性廢棄物約 90,658 桶(200 公升桶)。
- 核子研究設施貯存研究用反應器用過核子燃料約 4.224 噸。
- 核子研究設施貯存研究用反應器運轉與除役低放射性廢棄物約 21,826 桶(200 公升桶)。
- 燃料製造廠貯存運轉低放射性廢棄物約 9,016 桶(200 公升桶)。
- 大田同位素管理設施貯存小產源低放射性廢棄物約 561 桶(200 公升桶)。2015 年 7 月起改由位於慶州的月城低放處置場接收小產源低放射性廢棄物。
- 月城低放處置場接收暫貯低放射性廢棄物約 4,222 桶(200 公升桶)。已處置低放射性廢棄物約 29,386 桶(200 公升桶)^[27]。

(6) 後端基金

1983年以來，核能電廠經營者即依據電力事業法的規定，儲備放射性廢棄物處置所需的費用。

2008年公布放射性廢棄物管理法(2009年1月1日生效)，核能電廠經營者內部儲備的資金轉為放射性廢棄物管理基金進行管理。韓國水電核電有限公司(KHNP)為唯一的核能電廠經營者，故由其提供資金交由韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)負責管理放射性廢棄物管理基金。費用由相關單位每半年共同審議一次。後端基金可用於低與中放射性廢棄物管理與處置，以及用過核子燃料中期貯存與處置等。迄

2018年底累計6兆7,745億韓元。

此外，韓國水電核電有限公司(KHNP)亦依放射性廢棄物管理法每年儲備除役基金，為核能電廠除役做準備，並每年向通商產業和能源部(MOTIE)提交儲備計畫。迄2020年，已積累約 8,129億韓元的除役儲備金。

(7) 電廠除役

古里第1號機組：1978年4月開始運轉，設計壽命為30年，曾獲准延役10年。2017年6月成為韓國第一部永久停機的發電反應器，目前除役中。將採取立即拆除的策略，過程將包含除役計畫的準備與核准、用過核子燃料冷卻與移除、拆除與場址復原等階段。

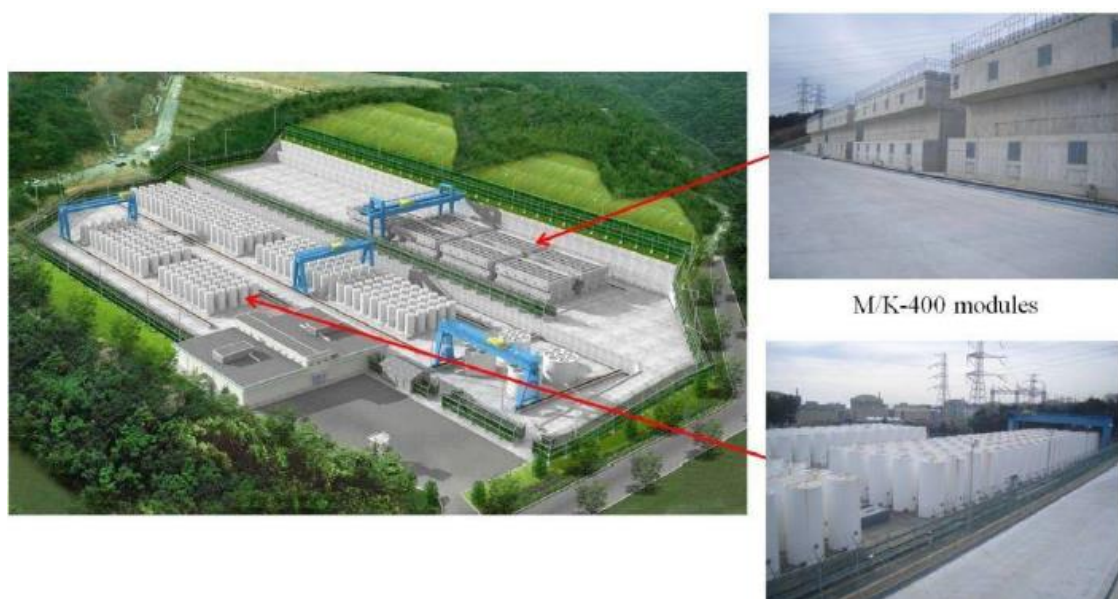
月城第1號機組：1982年12月開始運轉，2019年12月永久停止運轉。除役準備中。

(8) 用過核子燃料中期貯存

核能電廠產生的用過核子燃料目前均貯存在各電廠內的濕式貯存設施中。除了月城電廠第1號至第4號機組的加壓重水式反應器(Pressurized Heavy Water Reactors, PHWR)，另建有乾式貯存設施運轉中。用過核子燃料將按照上述方式進行管理，直至規劃中的廠外集中式用過核子燃料中期貯存設施投入運轉。

月城乾式貯存設施(圖3-6)：乾式貯存分為護箱式與模組式兩種設施，均運轉中。月城第1號至第4號機組產生的加壓重水式反應器(PHWR)用過核子燃料先在燃料池中冷卻6年以上，然後轉移至廠內乾式貯存設施。自1992年月城廠址建成第一批60個乾式護箱以來，先後曾增建兩次護箱，目前共有300個護箱(總容量162,000束或相當3,061.8噸鈾)。2011年2月在月城場址建造7座容量為168,000束的高密度乾式

貯存模組(M/K-400型)。2016年4月提報修改運轉執照的申請，以增建7座與現有容量相同的乾式貯存模組，2020年1月獲得核准。



資訊來源：[3] korea profile

圖 3-6：韓國月城核能電廠乾式貯存設施

(9) 用過核子燃料再處理

韓國迄今未進行用過核子燃料再處理，但政策上不排除此選項。

(10) 低放處置計畫

(A) 低放處置安全要求

運轉期間處置場外公眾劑量限值如下：

- 有效劑量：0.03 mSv/y。
- 器官等效劑量：0.1 mSv/y。

封閉後設計目標如下：

- 正常/天然現象的年劑量：0.1 mSv/y。
- 由天然或人為因素引起的意外破壞性事件年風險： $10^{-6}/y$ 。
- 人為闖入造成的輻射影響：1.0 mSv/y。

設計要求：

- 處置設施的設計應考慮場址特性，以補充與改善場址特性。
- 處置設施的設計應考慮場址特性調查因素，例如地質、地震、氣象、與水文，以及其他人為災害。
- 處置設施的設計應在監管期間以最少的維護與維修活動保持其結構完整性。

建造要求：

- 處置設施的建造應符合品質保證要求。
- 處置設施的建造應盡量減少對天然障壁功能的損害。
- 關於設計階段假定的天然障壁特性，應藉由建造階段的場址調查來確認其有效性。
- 當建造與運轉階段並行時，建造工作應以不對處置設施運轉安全產生不利影響的方式進行。

(B)低放處置設施

月城低放處置場(圖3-7)：由韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)負責營運。規劃分期擴建，最終處置總量達到80萬桶。第一期工程規劃處置約10萬桶，地面設施包含接收大樓、放射性廢棄物處理廠、行政大樓、參訪中心、及其他附屬建物。地下設施包括施工斜坡道、運轉斜坡道、檢修豎井、卸載坑道、與處置單元等[處置倉(silo)]。第一期工程在海平面以下約80至130公尺處建造6個處置倉(圖3-8)。處置倉為混凝土結構。廢棄物桶(200公升鐵桶)使用方形混凝土模組外包裝盛裝，隨後在處置單位中進行處置。重要里程碑如下^[28]：

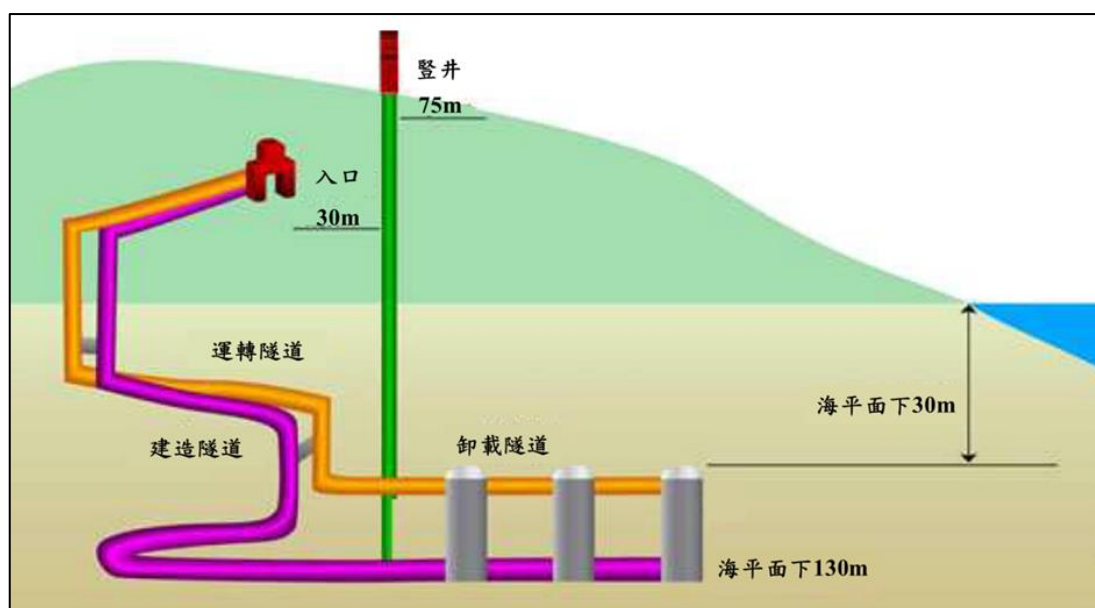
- 2008年8月第一期工程開工建造。
- 2014年6月第一期工程竣工。

- 2014 年 12 月第一期工程通過管制機關的運轉前檢查。
- 2015 年 1 月第一期工程開始運轉(地下處置倉型式)。
- 2015 年 12 月第二期工程(近地表處置窖型式)提出申請(容量 12.5 萬桶；2,714 億韓元)。
- 2019 年 1 月第三期工程(近地表處置壕溝型式)進行準備工作。
- 2022 年 7 月第二期工程取得施工/營運許可證。2022 年 8 月開工建造，預計 2024 年 12 月竣工。



資訊來源：[26]

圖 3-7：韓國月城低放處置設施配置示意圖



資訊來源：改繪自[25]

圖 3-8：韓國月城低放處置設施第一期工程地形剖面示意圖

(C) 低放處置設施選址

2005年8月，群山市、慶州市、浦項市、永德郡等4個地方政府通過應徵程序申請做為低放處置設施場址。所有這4個場址都被評估為適合處置的場址。經過各地方政府舉行地方公投。2005年11月，慶州市最終以居民贊成率最高(89.5%)，被選為低放處置設施的場址。

(D) 低放處置設施地方回饋

對於月城低放處置場的地方回饋，韓國政府核定在2007年至2035年期間補助55項一般支持專案計畫，總計3兆4,920億韓元，用於區域發展規劃；公共設施維護業務；促進產業發展；社會福利措施；地方發展措施等。另有3項特別支持專案計畫，總計3000億韓元。特別支持專案計畫包含：

- 韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)總部搬遷至處置場址以促進地方發展。
- 質子加速器設置案。
- 放射性廢棄物運入費：每年約 46 億韓元。每接收一桶提撥 637,500 韓元用於地方回饋。

(11)公眾溝通

隨著公眾對核子安全的關注度不斷提高，核安與保安委員會根據核子安全法第 103-2 條設立核子安全資訊中心，以透明、及時的方式公開資訊，鼓勵與公眾積極溝通。由核安與保安委員會(NSSC)組織的核子安全諮詢委員會(Nuclear Safety Consultative Council, NSCC)向核能電廠與其他核子設施場址的當地居民提供核安資訊，並收集居民的意見。核子安全諮詢委員會(NSCC)由當地居民、當地居民推薦的專家、地方政府與核安與保安委員會(NSSC)的官員以及韓國核子安全研究所(KINS)的專家小組成。

韓國核子安全研究所(KINS)建立廢棄物綜合資訊資料庫，為公眾與利害相關者提供放射性廢棄物安全資訊，包括低放貯存與處置存量、用過核子燃料管理狀況、放射性廢棄物運輸、放射性物質排放等。

此外，韓國核子安全研究所(KINS)、韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)、韓國原子能研究所(KAERI)、與韓國水電核電有限公司(KHNP)在其官網上開設問答頁面，回答有關放射性廢棄物與用過核子燃料安全管理的各種問題，以確保安全管制與管理的透明度。

對於月城低放處置場，2018 年 11 月，韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)在當地成立放射性廢棄物管理業務交流委員會。

該委員會由教育工作者、家長、與民間社會團體組成，旨在加強與公眾的溝通。該委員會向當地居民收集關於放射性廢棄物管理專案計畫的意見，例如對第一期處置設施運轉與第二期處置設施建造的意見、政策建議、系統改進與對策活動等。

3.2 韓國高放射性廢棄物處置計畫推動概況資訊之蒐整

韓國對於高放射性廢棄物處置技術亦如同多數核能發電國家一般，自展開核能發電以來，已配套從事數十年的研發工作。本節彙整韓國高放射性廢棄物處置計畫的發展沿革與最新動態資訊。

3.2.1 高放射性廢棄物處置計畫發展沿革

韓國高放射性廢棄物處置計畫發展過程分為政策面與技術面兩個領域說明如後。

(1) 政策面

韓國的國家政策將放射性廢棄物處置做為國家責任，且韓國近十數年來極力發展核能產業，並拓展海外市場。因此，做為核能產業配套措施的核能後端營運措施，亦被視為重要議題，納入國家政策做整體考量。

為制定用過核子燃料管理的國家政策，韓國政府於 2013 年 10 月成立「用過核子燃料管理公眾參與委員會 (Public Engagement Commission on Spent Nuclear Fuel Management, PECOS)」，以收集社會各界利益相關者的意見。2015 年 6 月，「用過核子燃料管理公眾參與委員會(PECOS)」對用過核子燃料數量與對策進行分析，並據此向政府提交關於用過核子燃料安全管理與策略的建議方案。根據這些建議，政府於 2016 年 7 月訂定「高放射性廢棄物管理基本計畫」，明定用過核子燃料安全管理的方法與程序。政府隨後於 2016

年 11 月向國會提交關於高放射性廢棄物管理設施的選址程序與場址社區回饋的立法草案，以便長期有效的推動「高放射性廢棄物管理基本計畫」。計畫內容預定 2053 年啟用高放射性廢棄物處置場^[23]。

然而，2017 年 5 月文在寅總統當選並上任後，宣布採取無核能發電政策。因此，2018 年 5 月開始，「高放射性廢棄物管理基本計畫」配合能源政策重新檢討。2019 年 5 月，通商產業和能源部(MOTIE)邀集 15 位各領域專家組成「用過核子燃料管理政策檢討委員會」。該委員會審視用過核子燃料管理政策，並在 2021 年 3 月向政府提出建議報告。2021 年 12 月，通商產業和能源部(MOTIE)發布「第 2 版高放射性廢棄物管理基本計畫」(草案)，接受公眾評議^[29]。「第 2 版高放射性廢棄物管理基本計畫(草案)」提出安全有效管理用過核子燃料的基本原則、可行方案、處置概念及政策路線圖等。預計以 13 年的時間進行選址作業；選定場址後，先在場址地表建造一處集中式用過核子燃料貯存設施(工期約 7 年)，同時在場址地下建造地下研究實驗室進行場址驗證(約 14 年)；場址核定後開始建造處置場(工期約 10 年)；如果過程一切順利，高放射性廢棄物處置場可望約在 37 年後啟用(約 2060 年)^[29]。

2022 年 5 月尹錫悅當選總統並上任後，改變核能政策為擴大核能發展。通商產業和能源部(MOTIE)邀集專家學者重新檢討與議定高放射性廢棄物管理政策後，於 2022 年 7 月提出「高放射性廢棄物處置管理研發路徑圖(Roadmap)」^[30]。「高放射性廢棄物處置管理研發路徑圖」相關另於本報告下節進行詳述。

(2) 技術面

本報告彙整韓國高放射性廢棄物處置技術建置與研發過程如後。韓國高放射性廢棄物處置技術發展依所考量的參考燃料不同，

可以大致分為以下三個主要的研發階段：

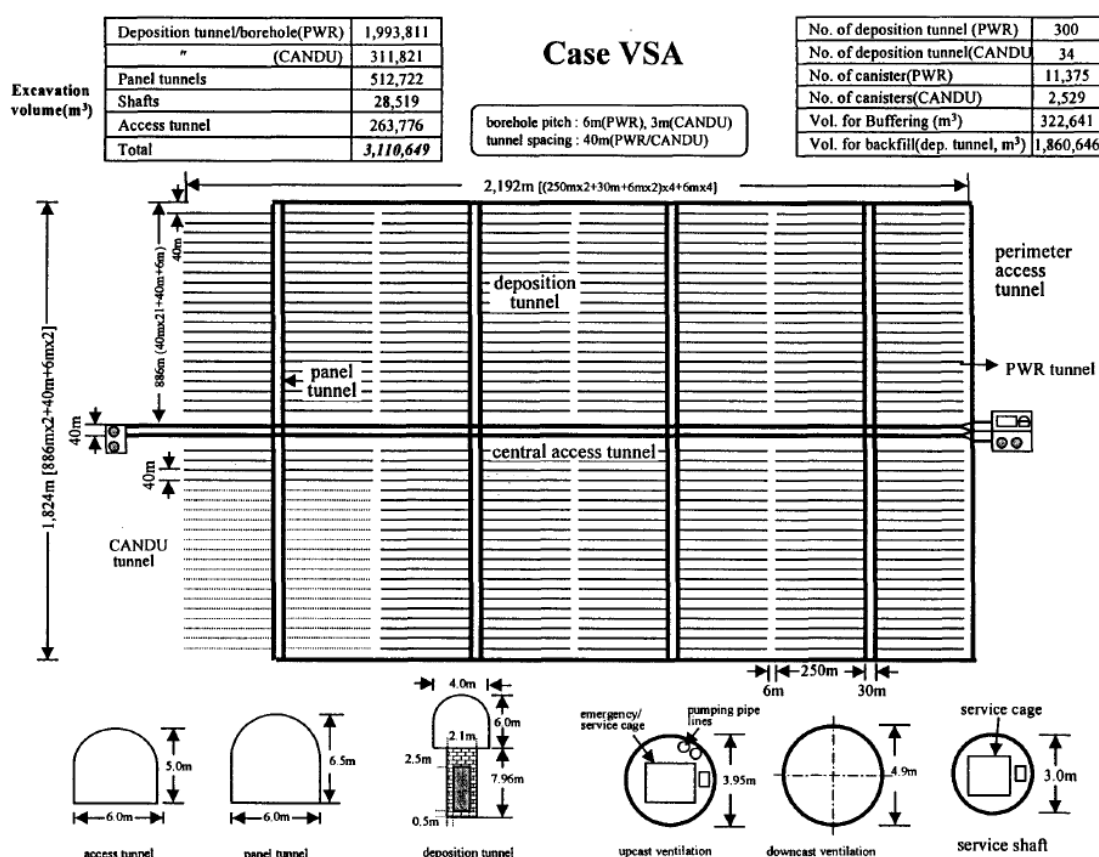
(A) 1997~2006 年參考處置系統計畫(KRS)

韓國核能發電始於 1978 年，此後處置技術研發亦配合持續推動。研發過程中的一個重要里程碑是在 1997 年起，由韓國原子能研究所(KAERI)執行 10 年期程的研發計畫，用於發展用過核子燃料韓國參考處置系統(KAERI [或稱為 Korea] Reference Disposal System, KRS)，內容包含針對不同型式的用過核子燃料設計不同的處置容器、考慮各種可能的設施需求與配置方式及評估本土黏土材料的可用性等。完成的初步參考處置系統採取類似於瑞典 KBS-3 的處置概念，並以此處置概念做為後續安全評估技術發展的基準案例。

在計畫的前期階段，研發重心為本土母岩適宜性評估^[31]、處置概念發展與初步概念設計(參見圖 3-9)等。參考用過核子燃料為韓國標準燃料束(Korean Standard Fuel Assembly, KSFA)平均燃耗為 45 GWD/tU；加拿大氘鈾重水式用過核子燃料(CANada Deuterium Uranium, CANDU)平均燃耗為 8.1 GWD/tU^[32, 33]。

計畫後期階段，研發重心在於根據前期的設計進行安全評估技術的發展。策略上將該國低放射性廢棄物處置計畫的經驗擴展到高放射性廢棄物處置技術領域，包含特徵、事件及作用 (Feature, Event, and Process, FEPs)清單的擬定與評估程式的發展等。主要的安全評估策略採用全系統性能評估(Total System Performance Assessment, TSPA)的理念建構評估體系。以韓國自行發展的 MASCOT-K 程式評估井水與地下水兩種參考情節。此外，亦配合安全評估技術發展，建置網路版的參數資料庫與品質管理系統等^[34]。

在計畫期程結束前，韓國原子能研究所(KAERI)規劃從室內研究走向現地研究，於是在該所場址後山丘陵地區，進行地下研究坑道(KAERI [或稱為 Korea] Underground Research Tunnel, KURT)的地質調查與可行性評估，包含預擬地下實驗室將進行的研究項目與期程。KURT 從 2005 年 5 月開工建造，至 2006 年底完工^[35]。KURT 竣工後，提供結晶岩現地試驗場所，產出豐碩研發成果，對於韓國高放射性廢棄物處置技術發展極具貢獻。



資訊來源：[32]

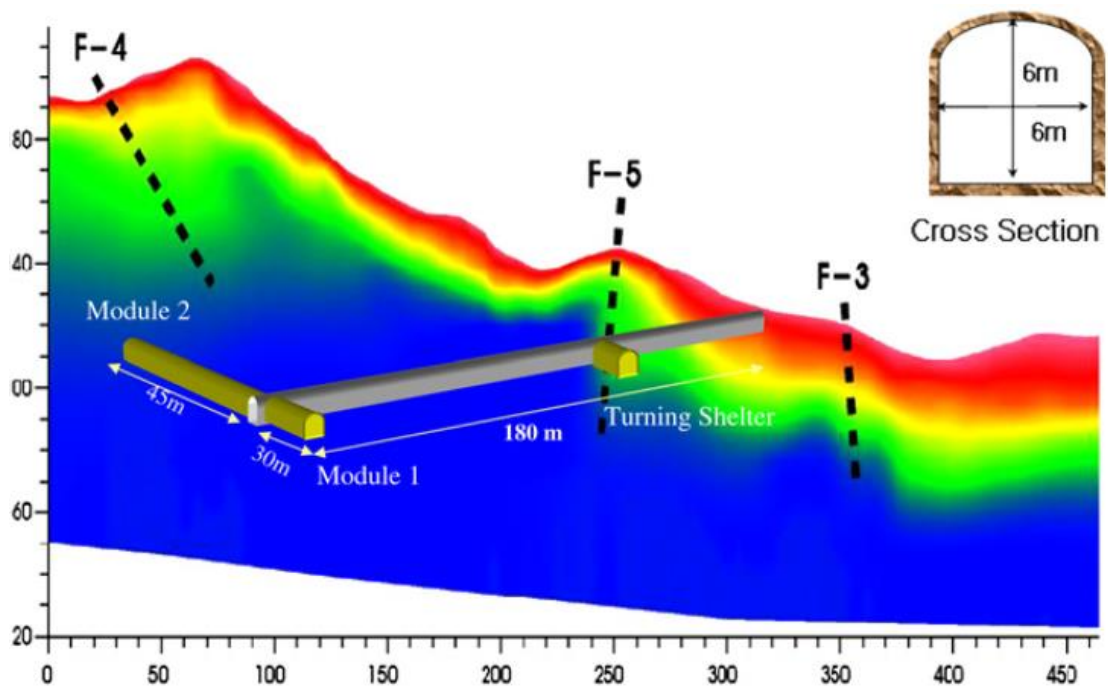
圖 3-9：韓國參考處置系統處置坑道配置概念示例

韓國原子能研究所(KAERI)所區三面環山，地質岩性為花崗岩，在靠山的所區範圍內建造完成 KAERI 地下研究坑道(KURT)。地下研究坑道採用鑽炸法開挖，剖面尺寸為 6 公尺 x 6 公尺，通

行坑道長度為 180 公尺，通行坑道尾端兩邊分別有長 30 公尺與 45 公尺的研究坑道，整體呈現 T 字形(圖 3-10)。建造費用約為美金三百萬元^[36]。

KAERI 地下研究坑道(KURT)2006 年建成後至 2016 年第一期研究期間，進行眾多現地試驗與研究，依據本報告資訊蒐整結果，依文獻發布時間順序，主題涵蓋：地質模型建構^[37]、地質與水文模型整合建構^[38]、裂隙溶質傳輸模擬^[39]、處置坑道空間配置研究^[40]、地質單元水文性質研究^[41]、地下水流模擬^[42]、核種傳輸模擬^[43]、結晶岩流體水流國際合作研究^[44]、礦物地球化學穩定性研究^[45]、In-DEBS 現地工程障壁系統性能驗證 (In-situ Demonstration of EBS performance at KURT)^[46]。

2015 年 1 月 KAERI 地下研究坑道(KURT)展開第二期擴建工程。將坑道總長度增加至 551 公尺(圖 3-12)。並將研究內容整合為 6 項研究模組 Research Modules, RM)，如圖 3-11 與圖 3-12 所示^[47]。第二期研究除了持續精進水文地質模型等第一期的基礎研究外^[48]，研究重心著重於工程障壁材料受到現地應力影響以及熱力及水文的耦合效應研究，即所謂的 THM(Thermal, Hydraulic, and Mechanical)研究^[49-50]。



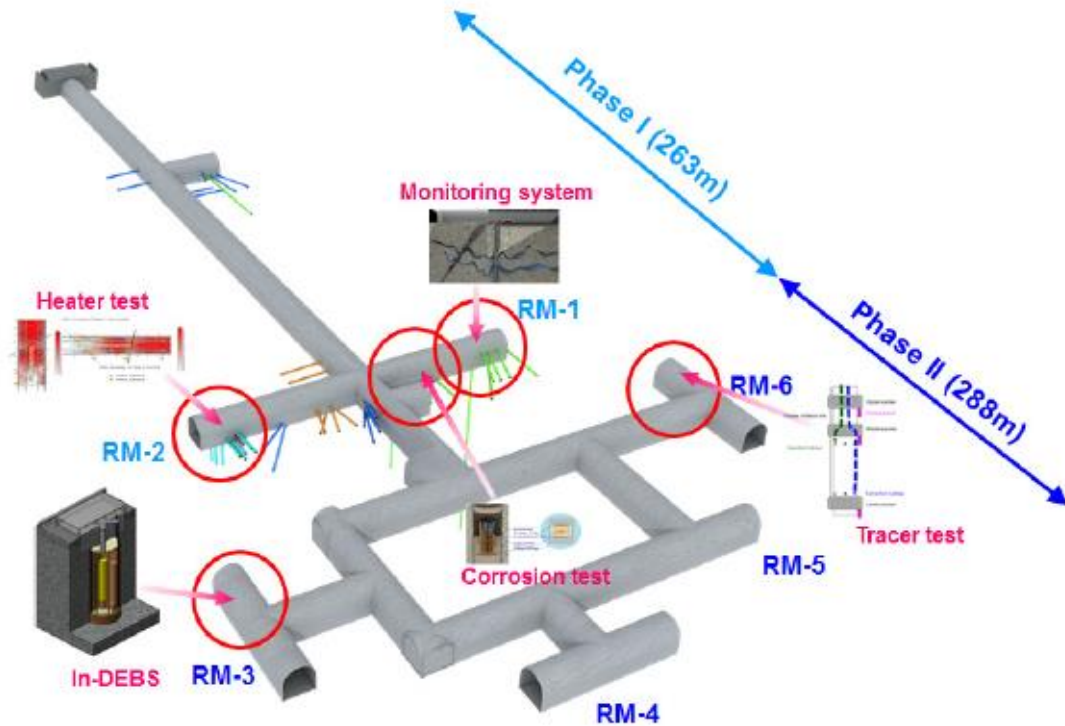
資訊來源：[36]

圖 3-10：韓國 KURT 地下研究坑道示意圖

Area	Experiment	Research Module		Period						
		Phase I	Phase II	'12	'13	'14	'15	'16	'17~'21	
Geoscience	① Geological investigation	-	-							
	② Site descriptive modeling	-	-							
	③ Groundwater monitoring programme	RM-1								
Natural barriers	④ Hydrogeological properties of MWCF	RM-1	RM-3							
	⑤ Transport properties of MWCF	RM-1								
	⑥ Geochemical behavior of Redox front along MWCF	RM-1								
	⑦ Pseudo-radionuclide sorption & diffusion experiment	-	RM-4							
Engineered barriers	⑧ Long-term corrosion experiment of canister material	RM-1	RM-1&2							
	⑨ Preliminary performance test of 1/6 scale EBS (KURT-LOT)	RM-2	RM-2							
	⑩ Long-term performance test of 1/3 scale EBS (In-DEBS)		RM-5							
	⑪ EDZ characterization	RM-2	RM-6							
International programme	⑫ KAERI-SNL Collaboration Project etc.	RM-1								

資訊來源：[47]

圖 3-11：韓國 KURT 第二期地下試驗規劃



資訊來源：[47]

圖 3-12：韓國 KURT 第二期地下試驗位置

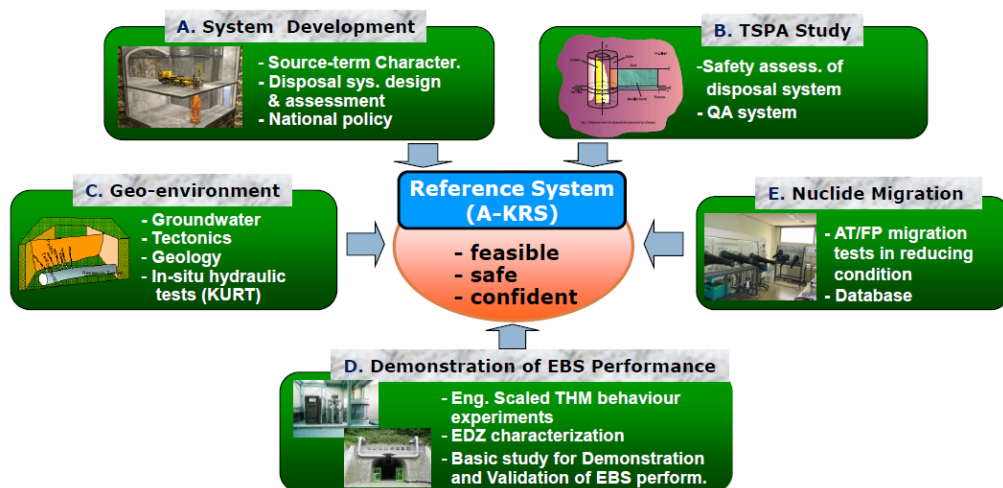
(B) 2007～2016 年先進參考處置系統計畫(A-KRS)

先進參考處置系統計畫(Advanced KRS, A-KRS)主要針對若經過高溫再處理的用過核子燃料(pyro-processed SNF)進行處置系統設計與安全評估。參考燃料簡稱為 PLUS7，意指來自韓國標準壓水式反應器的用過核子燃料，其平均燃耗為 55 GWD/tU^[52]。韓國用過核子燃料若經過再處理後，除了分離出鈾供循環利用外，預期將產生下列各種放射性廢棄物需進行處置[53]：

- 燃料護套與結構材料切割並壓縮後的金屬廢棄物。
- 高放射性廢棄物，例如含有大部分分裂產物與一些超鈾元素。

- 捕集碘與鎔的空氣過濾器。
- 含有大部分鋇的矽酸鹽磷酸銨的玻璃固化體。
- 含有大部分銻的飛灰。

A-KRS 計畫的技術發展有五大主題：處置系統研究；全系統性能評估研究；地質環境研究；工程障壁系統性能驗證；以及核種遷移試驗等，如圖 3-13 所示^[54]。

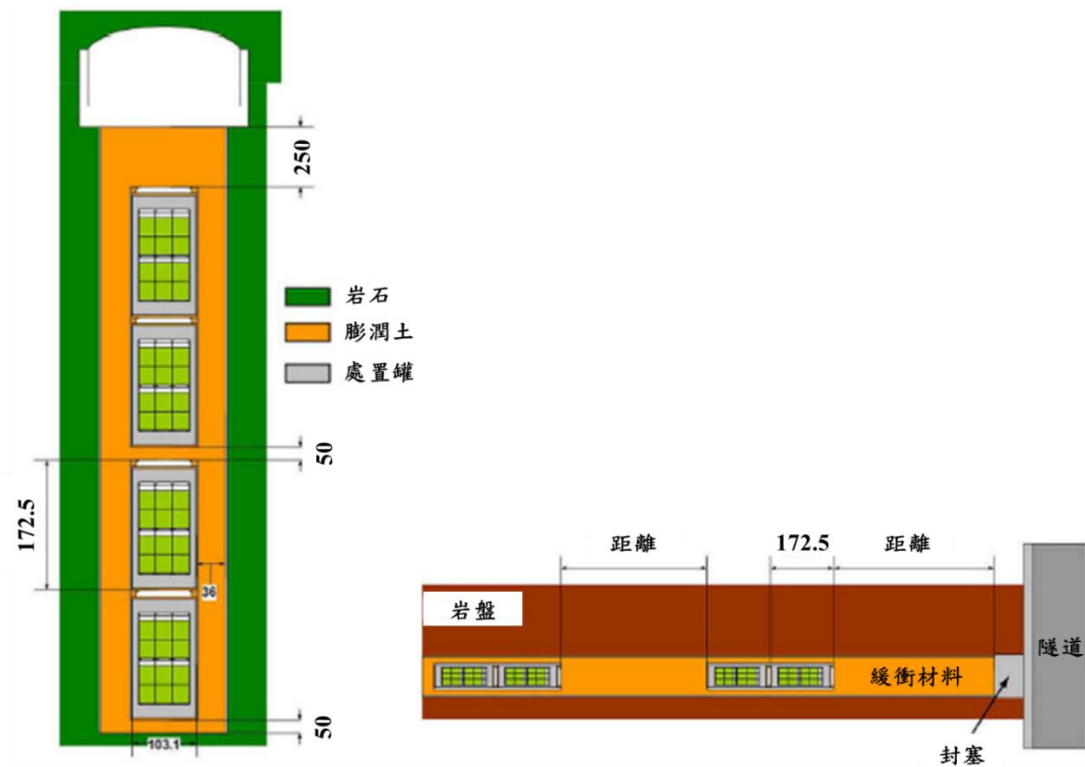


資訊來源：[54]

圖 3-13：韓國 A-KRS 計畫五大技術發展主題

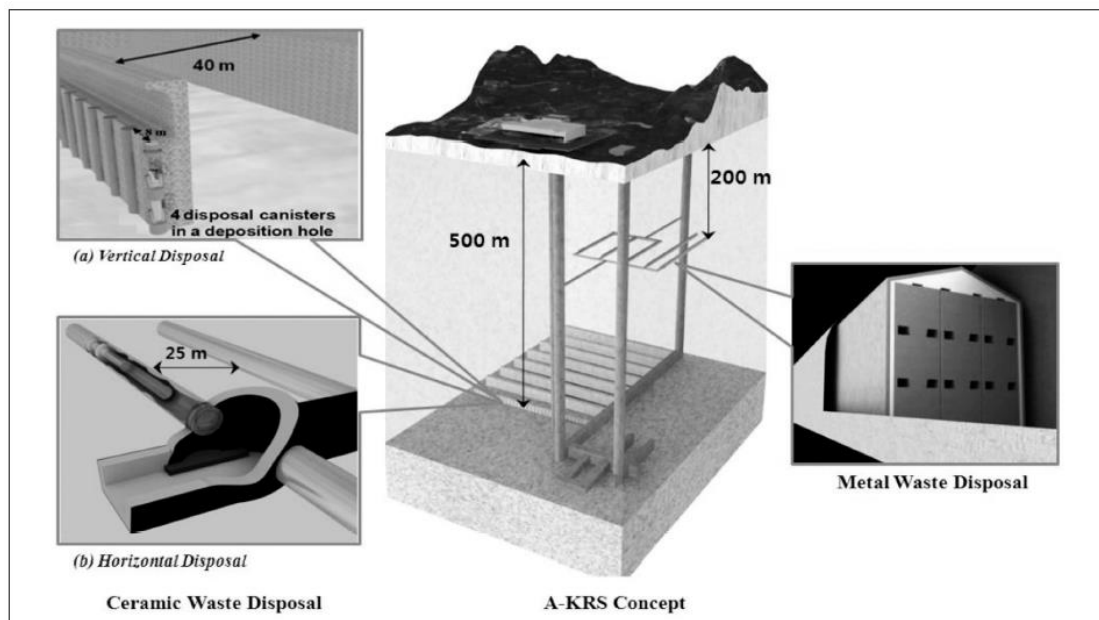
系統設計發展方面，係在 2008 年發布的 KRS 結案報告^[55]的技術基礎上持續改進。考慮將前述不同類別的放射性廢棄物做垂直式或水平式處置^[56](圖 3-14)，或者將不同類別的放射性廢棄物做分層處置^[57](圖 3-15)等設計方案。

A-KRS 計畫推動期間 KAERI 地下研究坑道(KURT)在驗證試驗與現地參數模擬方面亦均扮演著重要的角色^[47,58]。



資訊來源：[56]

圖 3-14：韓國 A-KRS 計畫垂直式與水平式處置概念



資訊來源：[57]

圖 3-15：韓國 A-KRS 計畫分層處置概念

(C) 2017～精進參考處置系統計畫(KRS⁺)

在 2016 年 7 月韓國政府發布「高放射性廢棄物管理基本計畫」後，韓國原子能研究所(KAERI)配合政策方案，執行精進參考處置系統計畫(KAERI Reference Disposal System Plus, KRS⁺)。調整參考燃料的設定，例如各類型燃料 45 年或 30 年冷卻時間對源項存量差異等進行處置系統精進與安全評估^[52]。隨著 2021 年 12 月，通商產業和能源部(MOTIE)發布「第 2 版高放射性廢棄物管理基本計畫」^[31]，計畫的相關研究工作亦配合進行中，將俟選址程序立法並實際推動後落實設計、調查及安全評估技術之應用^[59]。

3.2.2 高放射性廢棄物處置計畫近況-2022 年版研發路徑圖

韓國高放射性廢棄物處置計畫現階段的執行依據是通商產業和能源部(MOTIE)於 2022 年 7 月發布之「高放射性廢棄物處置管理研發路徑圖」^[30]。該文件內容包含處置技術要項的判定與技術成熟度的評量作法，對我國有一定的參考與比對價值。本研究將相關內容摘要整理如後。

(1) 「高放射性廢棄物處置管理研發路徑圖」編訂過程

「高放射性廢棄物處置管理研發路徑圖」的擬定過程係由通商產業和能源部(MOTIE)主導。可以大致分為以下 4 個步驟：

(A) 「第 2 版高放射性廢棄物管理基本計畫」編訂(2021 年 12 月～2022 年 2 月)

依據通商產業和能源部(MOTIE)於 2021 年 12 月發布之「第 2 版高放射性廢棄物管理基本計畫」為準，辦理以下工作：

- 以推動整體管理政策過程所需的技術發展為主要任務目標。
- 研議確保永久處置的安全性與可行性驗證技術之計畫與研

發工作所需之輔助系統。

(B) 籌組專家審查小組(2022 年 3 月～7 月)

- 籌組一個由產學研各界共 35 名專家學者組成之專家審查小組(分為貯存、運輸、場址、處置 4 個領域)，研議高放射性廢棄物管理研發路徑圖。(另有 30 位資深專家擔任顧問共同參與)。
- 判定實施「第 2 版高放射性廢棄物管理基本計畫」所需的關鍵技術，並確保每項技術的發展計畫。

(C) 韓國技術成熟度分析(2022 年 5 月～7 月)

- 韓國技術成熟度採用問卷調查方式，針對韓國產學研專家共進行 2 次問卷調查。第 1 次為 2022 年 5 月與第 2 次為 2022 年 6 月。共回收 122 份調查結果進行詳細分析。
- 針對韓國相關技術領域在國內外發表的論文(340 件)；申請的專利(529 件)；實施的專題計畫(256 件)與既有的設備(92 件)等進行事實查證，以確認技術成熟度。

(D) 路線圖驗證及意見收集(2022 年 7 月～)

- 通過公開討論與其他專家意見修改與補充研發路線圖草案(2022 年 6 月)。共辦理 2 場公開辯論：第 1 場辯論為 2022 年 7 月，第 2 場辯論為 2022 年 9 月。
- 委請技術先進國家合作協助研發路徑圖審查：芬蘭就業和經濟部為 2022 年 6 月、芬蘭 Posiva 公司為 2022 年 7 月～8 月、法國 Andra 公司為 2022 年 8 月等。

(2) 韓國過去技術發展的投入與成果

韓國從 1997 年開始正式推動高放射性廢棄物管理所需的技術發展。迄今在運輸/貯存/場址領域的某些技術在核能電廠運轉過程

中已達到技術可商業化的程度，但在處置方面，則整體上尚處於基礎研究的程度。

自 1997 年至 2022 年韓國已投入約 4,000 億韓元於高放射性廢棄物管理技術發展(通商產業和能源部約 1,522 億韓元；科學和技術情報通信部約 2,478 億韓元)，其中 72%投資於運輸與貯存；僅 28%用於場址與處置技術領域。未來將增加對場址與處置的投資。

(A) 在場址調查技術領域方面

- 韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)藉由推動低放射性廢棄物處置設施選址過程，已建立韓國地質調查文獻資料庫，可由此持續推動技術發展。已完成包括南韓半島地質調查結果在內的 984 萬筆地質資訊資料庫(截至 2020 年)。
- 核能電廠及低與中放射性廢棄物處置場址調查經驗、資源勘探與一般工程地質調查經驗等，可藉由後續場址調查活動獲得場址特性調查與分析技術。
- 場址調查技術以資源勘探應用(例如石油與天然氣)最為發達，韓國已具備 2 公里深度的鑽探與測量經驗。
- 未來須開展細部調查所需的場址特性調查建模技術與地質環境長期變遷預測技術。

(B) 在高放射性廢棄物處置技術領域方面

- 目前還處於基礎研究階段，重點工作為利用 KAERI 的小型地下研究坑道(KURT)進行地下處置環境研究。
- 從 2021 年開始，透過相關部會(通商產業和能源部、科學和技術情報通信部、核子安全與保安委員會)的聯合研發，推動處置系統安全性能的驗證，同時全面啟動處置技術發展。2021~2029 年將投入 429.2 億韓元發展用過核子燃料貯存

與處置安全的核心技術。但不包含通用型地下研究實驗室(Generic URL)的基礎建設費用(KURT 深度僅 120m, 在模擬實際深層地質處置環境方面存在侷限性, 故韓國規劃另建一處通用型地下研究實驗室)。

- 有關通用型地下研究實驗室(URL), 目前由 2020 年 12 月 24 日政府跨部會成立的韓國用過核子燃料研究所(iKSNF)進行可行性研究的規劃階段, 若 2024 年經有關部門審議通過後, 將規劃進行下一階段工作(2025~2026 年), 持續研發建置 SNF 長期管理所需之核心技術。其目標在 2030 年向公眾展示在地下 500 公尺深處的 URL, 為類似地下處置場條件, 並符合深地層處置設施設計的安全及功能。
- 藉由持續參與 DECOVALEX 國際合作計畫進行資訊交流與技術建立。該計畫為法國、德國及美國等 15 個國家參與的聯合研究地下深層環境熱-水力-力學-化學模型驗證專題計畫。

(3) 關鍵技術之判定

韓國放射性廢棄物領域的 65 位產學研專家召開 30 餘場研討會後, 判定運輸、貯存、場址及處置等 4 大領域共 104 項關鍵技術, 並衍生出 343 項細部技術。

判定的作法是以韓國的需求為準, 根據海外研究發展專案計畫、芬蘭等技術領先國家的處置設施核准文件(例如安全論證報告)、國際組織(例如國際原子能總署)的規範與報告, 再通過專家討論推導出關鍵技術。主要技術內容概述如下(參見表 3-1):

- 運輸技術 10 項: 包括不同類型高放射性廢棄物運輸容器的設計、製造、檢驗與性能測試; 運輸風險評估與最佳運輸路線等。

- 貯存技術 20 項：包括中期貯存設施設計；輻射及事故影響分析；設施安全評估；貯存容器設計；核能電廠營運與中期貯存聯動等。
- 場址技術 28 項：包括選址準則與要求；場址調查與評估程序；地質構造、水文及地熱調查與評估；場址特性調查與建模；長期演化預測等。
- 處置技術 46 項：包括處置容器、緩衝材料、封阻材料、天然障壁等的發展；綜合安全性驗證(安全論證)；處置設施的建造、運轉、封閉等。

表 3-1：韓國高放射性廢棄物管理關鍵技術判定數量

分類	運輸	貯存	場址	處置	合計
關鍵技術	10	20	28	46	104
細部技術	35	73	95	140	343

資訊來源：[30]

(4) 關鍵成熟度之評量

韓國對高放射性廢棄物管理技術進行自我評量，估計相較美國、瑞典及芬蘭等先進國家，在運輸方面已達成 83.8%；在貯存方面已達成 79.6%；在場址方面已達成 62.2%；在處置方面已達成 57.4%。在 104 項關鍵技術中已獲得 22 項；49 項正在發展中；33 項需要發展。

評量的作法是以國際上某個先進國家為對照，評估韓國的技術成熟度。採用以下的問卷調查方法：

- 向全國放射性廢棄物管理領域相關的產學研專家發送 2 次針對

104 項關鍵技術成熟度的德爾菲法(Delphi method)問卷調查。第 1 次調查回收 64 份有效問卷;第 2 次調查回收 58 份有效問卷)。

- 專家審查小組進行論文/專利分析、產業/學術/研究設備狀況等實況調查。結果確認有效論文 340 篇；專利 529 件；技術授權 256 件；設備 92 件。
- 根據前述調查結果，專家審查小組討論得出第一次結論。
- 通過公開辯論會與線上調查，廣泛收集不同專家意見。
- 通過專家審查小組焦點群體訪談(Focus Group Interview, FGI)，總結得出最終技術成熟度評量結果。

韓國產學研專家學者對於技術成熟度自評問卷的判定區間整理如下(參見表 3-2)：

- 運輸技術是美國商業技術的 70~100%；平均 83.8%
- 貯存技術是美國商業技術的 70~100%；平均 79.6%。
- 場址評估技術是瑞典的 52~72 %；平均 62.2%。
- 處置技術是芬蘭的 31~90%；平均 57.4%。

表 3-2：韓國技術成熟度評量結果

分類	運輸	貯存	場址	處置
對照國家	美國	美國	瑞典	芬蘭
成熟度(%)	平均 83.8 (70~100)	平均 79.6 (70~100)	平均 62.2 (52~72)	平均 57.4 (31~90)
平均技術 差距(年)	3.4	5.1	7.1	8.7

資訊來源：[30]

韓國自評在 104 關鍵技術中，已經建立 22 項，正在發展中 49

項，其餘 33 項尚有待進一步發展(參見表 3-3)。對於細部技術的掌握情況，在 4 大技術領域共 343 項細部技術中已掌握 98 項。

- 已建立的 22 項關鍵技術：通過管理經驗與研發在專案計畫推動過程中可立即應用或稍加補充後即可使用的程度。主要為用過核子燃料反應器之間的運輸；月城核能電廠乾式貯存設施建造；核能電廠場址資源勘探與地質調查；慶州低與中放射性廢棄物處理設施的建造與運轉等。
- 發展中的 49 項關鍵技術：目前正在通過政府主導研發計畫發展中的技術，例如用過核子燃料與護套的長期耐久性評估；處置容器的長期腐蝕評估等。
- 待發展的 33 項關鍵技術：例如破損核子燃料運輸與貯存系統設計；處置系統長期演化預測模型等，需要通過制定具體的安全計畫來發展。

表 3-3：韓國技術成熟現況(關鍵技術)

項目	已建立	未/未完全建立			總計
		發展中	待發展	小計	
運輸	3	1	6	7	10
貯存	4	4	12	16	20
場址	9	14	5	19	28
處置	6	30	10	40	46
總計	22	49	33	82	104

資訊來源：[30]

(5) 韓國技術發展推動方向及規劃

技術發展任務目標：韓國考量核能電廠除役與高放射性廢棄物中期貯存時程，擬於高放射性廢棄物處置設施啟動選址程序後 37 年內發展安全處置高放射性廢棄物管理政策全程所需的技術。

韓國高放射性廢棄物管理技術研發之推動策略與方向分為 3 大策略 4 大方向(參見圖 3-16)，並據以擬定實施方案，茲摘述運輸與貯存(參見表 3-4)、場址(參見表 3-5)及處置(參見表 3-6)各技術領域的要點如後。

3大策略	各領域推動方向	
發展實施管理政策所必需的技術技能	運輸/貯存	1. 優先發展核心運輸/貯存技術 2. 行業領先的先進容器設計製造技術 3. 基於安全的核電廠至中期貯存聯動技術開發
開發符合韓國條件的最佳技術	場址	1. 及時開發選址各階段的必要技術 2. 與IT相關的韓國場址評估方法之開發 3. 天然障壁長期性能驗證技術開發
考慮技術水準和特性的商業化和進步	處置	1. 韓國獨特的處置系統開發 2. 建立深層處置綜合安全驗證體系 3. 確保地下研究設施安全
	實施體系	1. 促進安全與效率的國際合作 2. 研發專家培養 3. 研發管理體系建立

資訊來源：[30]

圖 3-16：高放射性廢棄物管理技術研發之推動策略與方向

(A) 確保可以立即使用的商業化運輸與貯存技術

到 2030 年代末開始核准和許可中期貯存設施時，確保所有 30 項關鍵技術與 108 項細部技術可商業化運用。

(a) 優先發展核心傳輸與貯存技術

- 優先國產化產業連鎖效應強的核心技術。
- 從 2030 年代中期開始，乾式貯存和中期貯存採用國產技術。

(b) 行業領先的先進容器設計和製造技術

- 接近商業化階段的運輸和貯存容器技術將在 2030 年代推進到工業界以確保全球競爭優勢。

(c) 電廠安全與中期貯存介面技術開發

- 為中期貯存設施的運轉做準備，基於商業化的核能電廠機組間運輸技術，持續開發長距離運輸所需的陸路和海上運輸系統。
- 配合管理組織的變更，在申請中期貯存設施的設計許可之前，需要製定詳細的採購/交付標準、驗證技術和認證計畫。

表 3-4：韓國傳輸與貯存技術發展之細部技術項目與時程

技術項目	已確保	選址 (2036)	中期貯存 (2043)	最終處置 (2060)
運輸				
1 運輸容器製造、檢驗與性能測試技術	○			
2 運輸護箱安全措施實施技術		○		
3 輕水式反應器核子燃料運輸容器設計技術		○		
4 破損核子燃料運輸系統設計技術		○		

5 重水式反應器核子燃料運輸容器設計技術	○			
6 核心材料開發及生產技術			○	
7 海陸交通系統設計技術	○			
8 交通安全措施及安全實施技術			○	
9 海陸運輸風險及最優運輸路線評估技術			○	
10 海陸運輸條件下核子燃料完整性評估技術			○	
貯存				
1 中期貯存設施的標準設計技術	○			
2 中期貯存設施運轉運輸系統技術	○			
3 破損燃料處理與檢查技術		○		
4 中期貯存設施安全措施實施技術			○	
5 實現中期貯存設施安全的技術			○	
6 確保與實施拆卸簡易性的評估技術			○	
7 綜合拆卸評估技術，確保拆卸安全			○	
8 中期貯存設施運轉時的輻射影響評估技術			○	

9 中期貯存設施事故影響評估技術			○	
10 中期貯存設施機率安全評估技術			○	
11 中期貯存設施定期安全評估技術。			○	
12 貯存安全驗證的安全論證技術			○	
13 重水式蓄水系統設計技術	○			
14 輕水式貯存系統設計技術		○		
15 破損燃料貯存容器設計技術		○		
16 用過核子燃料與護箱長期穩健性評估技術			○	
17 核子燃料燃耗評估與驗證技術		○		
18 用過核子燃料貯存系統採購認證計畫實施技術。		○		
19 中期貯存驗證系統設計技術			○	
20 安全試驗設施建造及試驗評估技術	○			
總計(共計 30 項關鍵技術)	7	8	15	

資訊來源：[30]

(B) 發展安全性得到驗證之場址評估技術

場址技術發展之時程：2029 年時，28 項關鍵技術及 95 項細部技術可實際應用於不利區域排除、初步調查、細部調查等選址各階段。

(a) 及時開發選址各階段的必要技術

- 考慮階段性推動程序與所需週期，建立選址探勘評估技術，確保選址無後顧之憂。
- 初步規劃排除不適宜區域(1 年)→選址公開(2 年)→初步調查(5 年)→細部調查(4 年)→選址確認(1 年)。
 - 排除不適宜區域：2023 年制定選址方法及場址調查與合格評定程序。
 - 初步調查：地表調查、鑽孔調查、物理探勘等場址調查；岩石構造與水文地質特徵分析等場址評估，利用迄今為止獲得的技術。
 - 細部調查：2029 年建立長期構造穩定性評估；場址特性調查初步模型；地質環境變化模擬技術等。在進行細部調查的同時提高準確性，並用於未來的地下研究設施與處置設施(～2035 年)。

(b) 與資訊科技相關的韓國場址評估方法之開發

- 利用人工智能等先進資訊科技(Information Technology, IT)技術發展場址探勘評估系統，提高場址探勘的客觀性與準確性。
- 配合國內外地球物理調查與分析結果，基於機器學習的訓練發展場址調查結果解釋模型。可以與韓國探勘公司及國外機構(例如芬蘭 Posiva 公司、瑞士 Nagra 公司等)合作，獲取大量場址探勘結果，做為機器學習的訓練資

料。

- 確定與放射性核種遷移相關場址特性調查之場址建模技術，推動從目前的 2 維模型向 3 維模型技術的進步。同時發展地質構造與水文地質等場址特性調查整合建模技術(～2029 年)。

(c) 天然障壁長期性能驗證技術開發

- 發展地質環境長期演化預測技術，選擇能與人類居住區永久隔離的高放射性廢棄物處置場址(～2029 年)。
- 為能證明超過 10 萬年的天然障壁的性能，應綜合考慮氣候與海平面變化對生態系統及構造變化的影響。
- 通過與地質、氣候及海洋領域的產學研聯動，加強與中國、日本等周圍國家的合作，提高長期預報精度。鄰國地質與氣候變遷資料預測對處置場長期演化具有必要性。

場址技術發展之細部技術項目與時程如表 3-5 所示。

表 3-5：韓國場址技術發展之細部技術項目與時程

技術項目	已確保	2022～ 2023	2024～ 2026	2027～ 2029
1 選址準則與需求設置技術		○		
2 場址調查與合格評定標準/導則的制定		○		
3 場址調查/評估方法發展及場址適用性驗證			○	
4 地質要素監測技術發展與體系建立			○	

5 基於場址特性調查因素的綜合資料庫系統構建技術		○		
6 大尺度構造、線狀構造調查及地形分析	○			
7 場址調查的鑽孔安裝與管理	○			
8 岩石地質構造特性調查分析	○			
9 水文地質特性調查分析	○			
10 地球化學特性調查分析	○			
11 岩石力學及地熱特性調查分析	○			
12 核種傳輸特性調查分析	○			
13 生態系統特性調查與分析	○			
14 場址特性調查與品質管理的輸入資料構建			○	
15 全國與場址尺度的長期構造穩定性評估				○
16 岩石地質構造場址特性調查初步模型構建				○
17 水文地質場址特性調查初步模型建立				○
18 地化場址特性調查初步模型構建				○
19 岩石力學、地熱場址特性調查初步模型建立				○
20 初步建立核種位點特徵模型				○
21 生態環境立地特徵初步模型建立				○

22 綜合場址地形地質特徵可視化建模				○
23 氣候與地表環境變化引起的生態系統變化預測技術				○
24 預測氣候變遷引起的海平面變化的建模技術				○
25 場址地質環境長期演化預測與建模技術				○
26 長期安全識別場址特性調查評估體系建立技術				○
27 建立安全論證的場址特性調查評估體系案例評估				○
28 建立場址評估安全論證及發展可行性分析	○			
總計(共計 28 項關鍵技術)	9	3	3	13

資訊來源：[30]

(C) 考慮韓國條件的優化處置技術的發展

處置技術發展之時程：逐步發展與推動廢棄物處置技術，確保 2050 年代時全部達成 46 項關鍵技術與 140 項細部技術。

(a) 韓國獨特的處置系統開發

- 考慮到韓國高放射性廢棄物與地下基岩的特點，到 2040 年代分階段發展獨特的韓國式處置系統。
- 到 2029 年，發展處置領域核心技術，如核種在處置容器中的行為評估、處置系統性能與設計要求的建立及處置系統概念設計等。
- 通過在地下研究設施(URL)中展示工程障壁和天然障壁，(例如容器和處置隧道)的安全性，在 2040 年代完成韓

國處置概念。

- 處置容器、緩衝材料及封阻材料等主要材料目前處於實驗室研究程度，到 2050 年代推動國產化。韓國需要約 17,000 個處置容器，以及約 500 萬立方公尺的緩衝材料與封阻材料。
- 除深層地質處置技術外，考慮到未來的不確定性，深層鑽孔處置(Deep Borehole Disposal, DBD)技術等亦應做為技術替代方案進行推動。

(b) 建立深層地質處置綜合安全論證

- 推動建立深層地質處置安全保障體系、安全辨識方案、量化安全數字等綜合安全論證(Safety Case)。
- 通過分析可應用於處置設施的現象/事件/作用(Features, Events, Processes, FEP)來推導可能發生的情節。
- 根據情節，量化高放射性廢棄物中放射性核種通過工程與天然障壁最終對人類與環境的影響。
- 通過結合場址特性調查模型與韓國處置系統發展的最新资讯進行安全評估，到 2028 發展綜合安全論證初步模型。
- 通過產學研的分工，製作安全論證資料，發展安全驗證系統與方法論。

(c) 確保地下研究設施安全

- 為了驗證和優化韓國處置系統的安全性，從 2020 年代中期開始，推動與處置場分開進行研究的地下研究設施(通用 URL)。
- 在地下研究設施進行處置設施開挖技術、封閉/復原技

術、多重障壁的安全性驗證、天然障壁演化的識別等研發，以應用於處置設施的建設和申照。

- 地下研究設施亦可用於提高接受度的活動，例如選址過程中的公開解釋。
- 做為處置設施的一部分構建特定場址的地下研究設施，以便最終確認場址的地質特徵。
- 盡可能減少在特定場址的地下研究設施中挖掘與鑽孔，以免產生可能使核種遷移的通道，防止放射性核種藉此釋出到人類生活空間。

處置技術發展之細部技術項目與時程如表 3-6 所示。

表 3-6：韓國處置技術發展之細部技術項目與時程

技術項目	已確保	選址 (2036)	中期貯存 (2043)	最終處置 (2060)
1 處置容器性能評估及長期腐蝕評估技術			○	
2 處置容器核子行為評估技術		○		
3 處置容器設計製造技術				○
4 處置容器密封/缺陷檢測技術				○
5 緩衝材料 THMC 耦合行為特徵評估技術			○	
6 核種在緩衝材料中的行為評估技術			○	
7 緩衝材料長期性能變化特性評估技術			○	

8 回填材料/封阻材料/封塞材料性能評估技術			○	
9 天然障壁與地球化學變化識別技術			○	
10 天然障壁動力學與熱變化識別技術			○	
11 天然障壁核種行為評估技術			○	
12 天然障壁長期穩定性驗證技術			○	
13 處置系統性能與設計需求設定技術		○		
14 熱、結構、屏蔽與核臨界輸入資料量化與解釋技術		○		
15 多重障壁交互作用評估技術			○	
16 設計規範不確定性評估技術		○		
17 深層地質處置設施概念技術		○		
18 地表環境場址特性調查模型構建技術			○	
19 深層環境場址特性調查模型構建技術			○	
20 用過核子燃料輻射源項評估技術		○		
21 用過核子燃料釋出特性評估技術		○		

22 FEPs 與情節發展技術		○		
23 生態系統建模技術		○		
24 封閉後安全評估輸入資料		○		
25 封閉後安全評估與建模技術		○		
26 穩態評估技術	○			
27 事故狀態評估技術	○			
28 安全論證資料庫管理系統發展		○		
29 依處置設施發展階段建立安全論證		○		
30 通過天然類比的處理系統設計組件性能驗證技術		○		
31 通過天然類比的核種行為遲滯證明技術		○		
32 用過核子燃料封裝設施發展				○
33 用過核子燃料的接收/檢查設施的發展				○
34 緩衝材料、回填材料製造技術及設備發展	○			
35 處置坑道及處置孔開挖影響評估技術			○	
36 處置環境地下設施建造安全與效益評估技術	○			
37 建造與運轉並行過程發				○

展與優化技術				
38 制定用過核子燃料接收準則				○
39 處置設施安全措施與實體防護監測系統建立	○			
40 處置護箱運輸及工程障壁安裝設施發展				○
41 運轉中再取出技術			○	
42 制定地面與地下設施的最佳運轉程序	○			
43 處置設施及周圍環境監測技術				○
44 處置設施封閉與監測技術				○
45 替代處理系統發展		○		
46 替代處置系統安全評估技術		○		
總計(共 46 項關鍵技術)	6	17	14	9

資訊來源：[30]

(6) 韓國技術研發基礎與推動體系的建立

(A) 促進安全與效率的國際合作

- 通過國際聯合研究推動處置技術，以確保與芬蘭 KBS-3 方法等現有處置概念相比，具有更高安全性與效率的處置系統。
- 韓國處置系統的安全論證初步模型可藉由國際組織(IAEA、OECD/NEA 等)的同儕審查確保安全。
- 通過直接參與國際聯合研究提高處理效率，例如與瑞士 Nagra 合作的緩衝材料(膨潤土)耐熱性能驗證試驗。

- 與韓國正在發展的技術聯動，例如多層處置與最佳分佈式配置設計。
- 必要時促進發展週期與費用高於技術利用的 7 項技術的海外引進，例如開發用於處置設施的放射性廢棄物封裝設施。

(B) 研發專家培養

- 通過產學研聯合培養高放射性廢棄物領域的專業研究人才，擴大對中小企業與高校的研發投入。
- 制定中長期人才培育綜合計畫，建立穩定的人才培育體系，善用放射性廢棄物技術研究機構發展人才與結合大專院校等教育機構培養研究生。
- 高放射性廢棄物管理研發人力現況及需求預測：
 - 高放射性廢棄物管理領域的目前研發人員約 140 人。
KORAD 約 10 人；KAERI 約 100 人；KIGAM 約 20 人；
KHNP 中央研究所約 10 人。
 - 平均每年需要 300 人，預測期間預計需求達 410 人。
 - 從選址開始 Y+18~27 (9 年)人力需求達最高。

(C) 建立研發管理體系

- 指定專責管理機構，將分佈在相關部、產、學、研的研發職能有機銜接起來，加強運輸/貯存、場址、處置技術之間的聯動。
- 通過實施研發路線圖、性能檢查、國內外環境變化、最新技術動向監測等進行定期評估與補充。並根據放射性廢棄物管理基本計畫制定 5 年研發路線圖推動計畫。
- 通過相關部會分工，提升高放射性廢棄物研發效率。
 - 通商產業和能源部：實施高放射性廢棄物管理政策，將

運輸、貯存與場址調查技術商業化，並著重確保申請執照所需的綜合安全驗證技術。

- 科學和技術情報通信部：確保深層地質處置安全性證明基礎數據，提高放射性廢棄物處置系統效率，推動替代處置方案研究。
- 核子安全與保安委員會：制定管制要求與針對每個要求的驗證方法，同時保持管制獨立性，以便發展安全技術。

(7) 韓國技術研發投資計畫

- 未來至處置設施投入運轉(參考規劃為2060年)為止的研發投資規模估計約為1.4萬億韓元。
- 預計未來研發5年投資1,226億韓元，未來總投資9,002億韓元。(不含管制機關的研發費用)
- 由科學和技術情報通信部主導的提升處置系統效率與替代處置概念研究，預計另將投資1,889億韓元。
- 通用型地下研究設施(Generic URL)基礎建設費用，另由KORAD通過專案計畫預算(預計總計4,936億韓元)推動。
- 研發投入所需資金通過核廢棄物處置基金獲得，並在核算高放射性廢棄物管理費用時反映在專案計畫總費用中。

3.3 韓國場址調查與安全評估技術發展之研析

本節特別針對韓國高放射性廢棄物處置計畫有關場址調查技術發展及安全評估技術發展兩個主題提出研析心得，提供核安會參考。

3.3.1 場址調查技術發展

(1) 高放射性廢棄物處置設施場址調查與選址政策

韓國迄今尚未正式展開高放射性廢棄物處置設施選址作業。在 2005 年選定低放射性廢棄物處置場前，韓國各研究機構場址調查技術的研發重心多偏向低放射性廢棄物處置，對高放射性廢棄物處置計畫場址調查技術發展並無太多建樹。但也由於低放射性廢棄物處置計畫所蒐集的地質環境背景資訊為後來的高放射性廢棄物處置計畫奠立良好的基本資訊基礎。雖然早期有個別的研究，但韓國高放射性廢棄物處置計畫真正系統性投入場址調查技術研發大約是在 2006 年 KURT 地下實驗室建成之後。

韓國政府為提高公眾對高放射性廢棄物處置設施選址的接受度擬制定一項法律，規定場址調查與當地居民決策的方法與程序，以便透明地選擇高放射性廢棄物管理設施的選址。「關於高放射性廢棄物管理設施選址程序與所在社區支持的立法草案」的目的是通過規定選址委員會的組織方式與包括自願參加選址在內的詳細程序，提高選址的透明度與公眾接受度。當地政府與當地居民可參與場址調查決策。

為提高公眾對高放射性廢棄物管理的信任與理解，政府還計畫通過向當地居民提供高放射性廢棄物管理狀況與場外輻射程度等管理設施安全資訊，促進與當地居民的各種溝通計畫。以及通過運作所在地社區支持委員會來發展社區並提高居民的生活品質。

為使高放射性廢棄物管理設施選址程序透明與公正，2016 年將「關於高放射性廢棄物管理設施選址程序與所在社區支持的立法草案」提交國會審議。根據該法案，應收集居住在高放射性廢棄物管理設施場址附近的公眾的意見，以提高公眾的接受度^[31]。

(2) 高放射性廢棄物處置設施場址調查技術研發概要

2010 年代初期階段，韓國場址調查技術的研究進展仍著重於參考國際經驗發展本土化的場址準則與調查方法。韓國原子能研究所

(KAERI)於2012年發表的一篇文獻參考國際組織的規範與技術先進國家的經驗，針對用過核子燃料深層地質處置場地質環境條件的一些基本要求和偏好進行研究。該研究結果提出對處置場址要求的初步建議，包括影響多重障壁處置系統功能的長期地質穩定性的母岩地質、力、熱、水文地質、化學和核種傳輸特性等。該研究所建議的場址準則體系如表3-7所示^[60]。並另建議15項必要條件與48項有利條件如表3-8所示。

表 3-7：韓國研究建議之場址要求和偏好地球科學指標架構

國際要求	安全基礎/安全要求/安全指引							
國家要求	1.基本/通用要求；2.環境要求；3.安全要求；4.輻射防護要求							
安全與性能	隔離		障壁保護		遲滯		管理	
系統要求	長期地質穩定性	水文地質條件	工程障壁	天然障壁	被動	主動	發展過程	運轉與封閉
基本要求	- 法規層級：例如廢棄物處置場址準則 - 執照層級：所有領域的量化要求和偏好							
安全功能	1.廢棄物罐完整性；2.緩衝材料隔離能力；3.岩石隔離能力；4.岩石的遲滯能力；5.對地圈遲滯的影響；6.生物圈相關事項；7.建造相關事項							
準則指引	技術準則；應用於場址適宜性的指引；特性、性能；安全評估；地球科學適宜性指標 - 定量準則；應由執照申請者擬定的要求和偏好之指引 - 通過評估確定長期地質穩定性和深層地質環境條件選出全國適宜的母岩							

資訊來源：[58]

表 3-8：韓國研究建議之場址必要條件與有利條件

必要條件	有利條件
1. 處置場不應位於預計會因火山等構造活動而影響處置設施安全運轉的地區。	1. 處置場應盡可能遠離火山等預計會影響處置設施安全運轉的構造活動地區。
2. 處置場不應位於預計會因地震活動而影響處置設施安全運轉的地區。	2. 處置場應盡可能遠離預計會影響處置設施安全運轉的地震活動地區。
3. 處置場不應位於預計會因活動斷層等地殼活動而影響處置設施安全運轉的地區。	3. 處置場應盡可能遠離活動斷層等預計會影響處置設施安全運轉的構造活動地區。
4. 處置場不應位於預計會因抬升、沉降與侵蝕等地殼活動而影響處置設施安全運轉的地區。	4. 處置場應盡可能遠離預計會影響處置設施安全運轉的抬升、沉降與侵蝕等構造活動地區。
5. 處置場不應位於預計會因冰河作用等自然現象引起大地應力變化而影響處置設施安全運轉的地區。	5. 處置場應盡可能選在不因冰河作用等自然現象引起大地應力變化的地區。
6. 處置場不應位於預計會因氣候變遷引起海平面變化而影響處置設施安全運轉的地區。	6. 處置場應盡可能選在不因氣候變遷引起海平面變化而影響處置設施安全運轉的地區。
7. 處置場不應位於大面積塑性剪切帶分布的地區。	7. 處置場應盡可能選在坡度較緩的地方，以免影響處置設施的安全運轉。
8. 處置場不應位於基岩或地層裂縫較多的古石灰岩或煤田地區。	8. 處置場應盡可能選在地下水不會補給鄰近地區地表的地區。
9. 處置隧道不應位於廣域主要破碎帶經過的地區。	9. 處置場應盡可能遠離最近的地表水，以免因放射性核種的排放而對環境造成影響。
10. 處置孔不應位於局部主要破碎帶經過的地區。	10. 處置場應盡可能高於預期水位，在洪水、潰壩、海嘯或其他人為原因造成淹水時，不會影響處置設施的安全運轉。
11. 處置場必須位於預計不會影響處置設施安全運轉的古老地下水分布地區。	11. 處置場應為土層厚度盡可能薄且不影響處置設施安全運轉的地區，並具有地表易排水的特點。
12. 處置場必須位於還原環境中，以免影響工程障壁的性能。	
13. 處置場不應位於其他有關生態特徵相關法律指定與保護的生	

態區，或存在具有歷史與科學保護價值的文化資產的地區。 14.處置場不得位於預計因人類滲透而影響處置設施安全的自然資源分佈區。 15.處置場不得位於土壤、工業礦產與水資源管制區內。	12.處置場應盡可能選在母岩分布足夠厚且預計不會影響處置設施安全運轉的地區。 13.處置場應盡可能遠離大面積塑性剪切帶。 14.處置場應盡可能遠離地層裂縫較多的石灰岩與煤田。 15.處置隧道的位置應盡可能遠離主要破碎帶，避免該破碎帶成為核種遷移路線。 16.處置孔的位置應盡可能遠離當地主要破碎帶，避免該破碎帶成為核種遷移路線。 17.處置場應位於結構與力學穩定的基岩上，以免影響處置設施的安全運轉。 18.處置深度應使周圍的大地應力條件不會影響處置場的安全。 19.處置設施的結構、力學與水文地質特性不應影響處置設施的安全運轉。 20.處置場應位於地熱與熱特性穩定的基岩上。 21.處置場運轉的熱影響不應影響生態系統。 22.處置場及其周圍地區必須位於地下水壓力足夠低且不影響多重障壁安全的深度。 23.處置場周圍應盡可能保持地下水水位，以使由斷層與海水作用等自然現象與季節性波動引起的波動不會對處置設施的安全運轉產生不利影響。 24.地下水流速、流動坡度、處置場周圍岩體流速應盡可能小。 25.放射性核種在處置場周圍地下水流系統內的預計延遲時間與
--	---

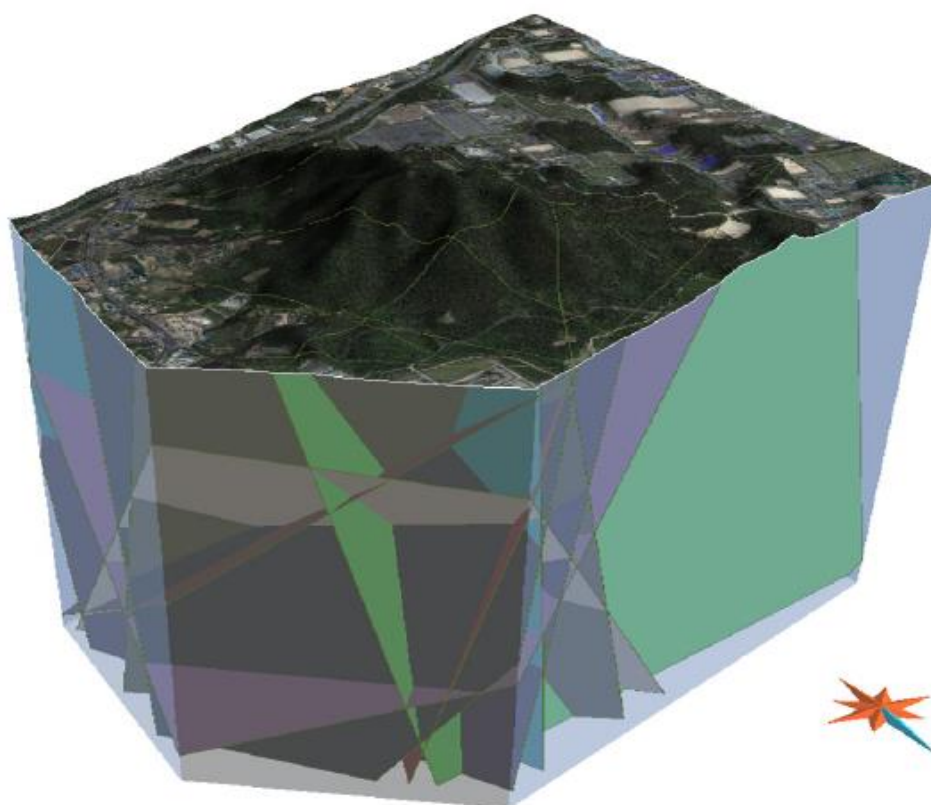
	活動路徑的距離應足夠長，以保證放射性核種可充分衰變，不影響人類生活圈。 26.在地下水流系方面，處置場周圍含水層應盡可能不與其他含水層連通。 27.處置場及其周圍地區應位於水力傳導度分布適宜，且在不影響處置安全的範圍內具有抑制氣體產生條件的地區。 28.處置場與圍岩的滲透係數必須位於具有足夠低條件且不影響處置場安全的深度。 29.處置場應位於周圍地下水的酸鹼值不會對處置設施安全運轉產生不利影響的地區。 30.處置場應位於總固體懸浮濃度足夠低而不會對處置設施安全運轉產生不利影響的環境條件地區。 31.放射性核種在處置場周圍地下水流系統中的預期延遲時間應足夠長，以使放射性核種充分衰變，且不會影響人類生活環境。 32.處置場應盡可能具有對放射性核種的吸附能力，尤其應選擇能延緩長半化期放射性核種遷移的天然障壁。 33.處置場應盡可能抑低放射性核種快速傳輸。 34.處置場應盡可能遠離相關法律指定與保護的生態系統管制區。 35.處置場應位於適當的深度，並具有足夠的障壁厚度，以免影響處置安全。 36.處置場應盡可能遠離水資源管制區。
--	--

	37.處置場應位於周圍地區具有社會經濟條件有利的地區。 38.處置場應盡可能選在降雨與降雪不影響處置設施安全運轉的地區。 39.處置場應盡可能設在不受颱風、陣風、海嘯、風暴潮等影響處置設施安全運轉的地區。 40.處置場及周圍地區的自然輻射背景應足夠低或者可以保持低狀態，不會影響建造與運轉人員的健康。 41.處置場應盡可能位於沒有太多挖掘工作與相關鑽孔的區域。 42.處置場不應因處置設施建造與運轉引起的應力場變化以及自然原因而影響安全。 43.處置場預計的核種傳輸途徑不會發生變化或滲透性增加。 44.處置場的位置應可確保有足夠空間以整合地表水管理系統、緩和放射性核種的意外釋出與測量放射性核種釋出的地點。 45.處置場應盡可能位於土地利用效率低的地區，不應位於有機場或高壓輸電/通信線路或油氣運輸路線經過的地方。 46.處置場應位於交通條件適宜、可安全運輸廢棄物的地區或易於建造交通設施的地區。 47.處置場不得位於可能會因軍事活動而影響處置場安全運轉或預計放射性核種遷移會增加的地區。 48.處置場應位於有利於周圍所有社會經濟條件的地區。
--	--

資訊來源：[60]

韓國場址調查技術的發展，跟大多數核能發電國家一樣，多數研發工作都是配合安全評估技術發展來執行。韓國原子能研究所(KAERI)於 2015 年發表的一篇文獻係基於外部事件與異常情節的安全評估需要，進行韓國地震資料的統計與機率式分析，並藉此預測未來地震發生的特性。該研究結果發現韓國地震的年頻率分布廣泛，從每年 0.4 次到每年 36.2 次。根據資料模型與最小有效地震規模，從處置系統安全評估的穩健性考慮，建議將範圍內的最大值每年 36.2 次做為年地震發生頻率。此外，考慮處置系統面積，建議處置系統影響半徑內的年地震發生頻率為 $5.4 \times 10^{-4}/\text{yr}$ ，此時最小有效地震規模為 2.3^[61]。

2015 年時韓國原子能研究所(KAERI)亦已展開現地調查技術發展。在大田市附近鑽設 1 孔 1000 公尺深及 3 孔 500 公尺深的鑽孔，進行結晶岩區地質鑽探、地球物理探測、水文地質試驗、地球化學試驗與三維地質模型建構等。地球物理探測包含從瑞典引進孔內攝影井錄(Borehole TV logging)及鑽孔影像處理系統(Borehole Image Processing System, BIPS)，進行破碎帶與斷層掃描測繪與判識。水文地質試驗包含以雙封塞法(Double Packer Method)量測含水層滲透性與裂隙連通性。水文地質試驗包含現場採集水樣直接測定水溫、酸鹼值、氧化還原度與溶氧量等；水樣另送實驗室分析地下水中主要陽離子、陰離子、微量元素、同位素、膠體、微生物與溶解有機碳等。三維地質模型建構則採用商業應用軟體 GOCAD 進行地質資訊整合與展示，該研究區三維地質模型如圖 3-17 所示^[62]。

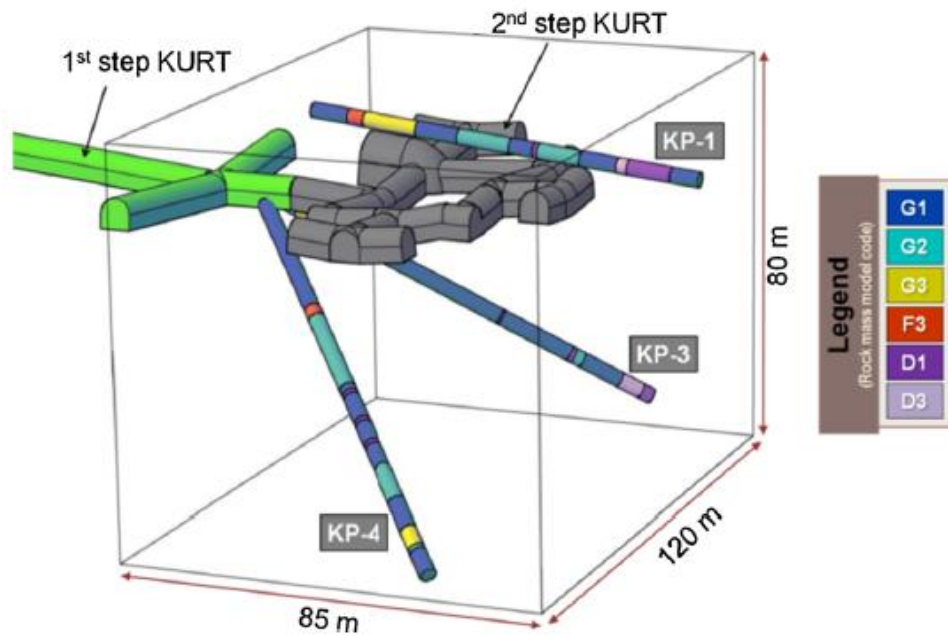


資訊來源：[62]

圖 3-17：韓國 1995 年建構之三維地質模型

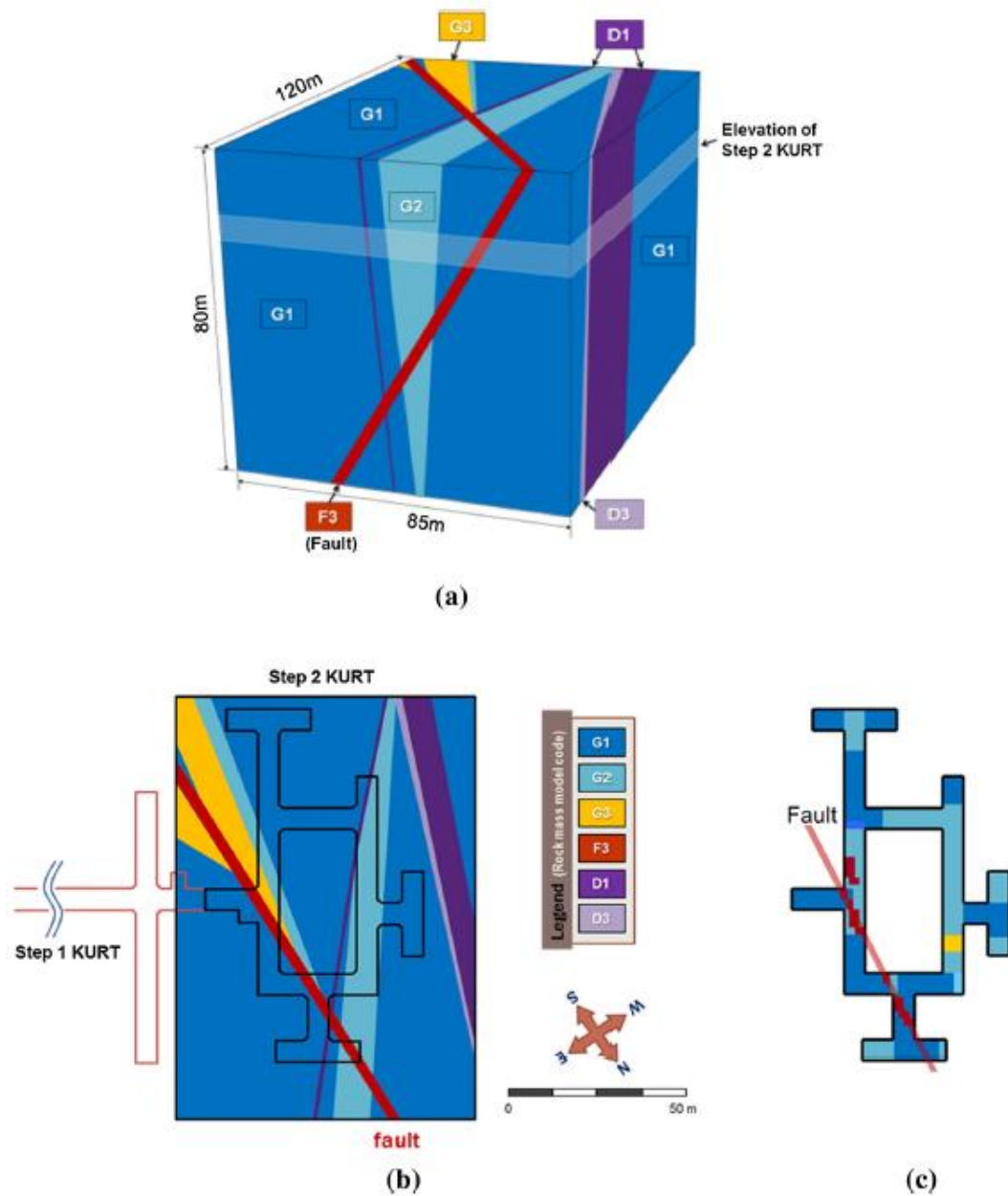
2016 年時韓國原子能研究所(KAERI)藉著其地下研究坑道(KURT)第二期擴建工程鑽探調查所取得的岩心資料進行岩體分布與力學性質的分析研究，並據以建構三維的岩石力學場址描述模型(Rock Mechanical Site Descriptive Model, RMSDM)。該研究的基本資料來自 3 孔總長度為 270.8 公尺的鑽孔岩心資料(參見圖 3-18 中編號 KP-1、KP-3 與 KP-4 鑽孔)。研究方法係對岩心採用不同的岩體分類方式，例如岩石品質指標法(Rock Quality Designation, RQD)、岩體評分法(Rock Mass Rating, RMR)與岩體品質系統法(Rock Mass Quality System, Q-System)等進行岩石力學評分。再依據岩心試驗取得的岩石力學物理參數例如岩石孔隙率、變形模數、單軸壓縮強度、凝聚力與摩擦角等進

行空間分布分析。最後整合資訊研判地質構造與岩體分布，並以二維與三維模型呈現結果，如圖 3-19 所示^[63]。



資訊來源：[63]

圖 3-18：韓國 KURT 二期工程三孔調查鑽孔位置



資訊來源：[63]

圖 3-19：韓國 KURT 二期工程二維與三維岩石力學場址描述模型

因應 2016 年 7 月韓國政府發布「高放射性廢棄物管理基本計畫」，故 2017 年時，韓國的研究重心顯然偏向於場址調查方法的研究，有數篇韓國原子能研究所(KAERI)與韓國地球科學和礦產資源研究所(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM)的文獻回顧國際經驗的研究成果^[64-66]。

韓國地球科學和礦產資源研究所(KIGAM)在 2017 年提出的第一篇文獻是回顧國際上高放射性廢棄物處置計畫有關構造地質因素的調查方法。該研究彙整芬蘭、德國、日本、瑞典、英國與美國的高放射性廢棄物深層處置設施通案選址標準，探討地質構造相關的影響因子，例如第四紀活火山、地震與活動斷層等之定義與評量準則。包括調查範圍或處置設施跟地質構造之間的避退距離等^[64]。

韓國地球科學和礦產資源研究所(KIGAM)的在 2017 年提出第二篇文獻是針對高放射性廢棄物處置場址調查方法之建議。該研究考量韓國的地質與社會環境，提出深層地質處置場址調查的階段性建議，並基於地質調查的概念，提出各場址調查階段應產出的成果與參數。該研究建議場址調查採三階段進行：文獻調查階段；基本調查階段；詳細調查階段。調查項目共分為六個大項：岩性與構造地質；地震；第四紀地質；水文地質；地球化學；工程地質。各大調查項目依三個調查階段再細分不同的參數需求，基本上隨著調查工作的進展，逐步縮小調查範圍並增加調查精度^[65]。

2017 年時韓國原子能研究所(KAERI)提出一篇場址特性調查方法論國際經驗回顧的文獻。該研究歸納芬蘭、日本、瑞士與瑞典的經驗，提出場址特性調查應實施的項目與應取得的重要參數，包含地質、水文地質、地球化學、岩石力學、熱與傳輸等，彙整如表 3-9 所示^[66]。

表 3-9：韓國研究建議之場址特性調查項目與參數

項目		參數
地質	地形	地形
	土壤	覆土厚度 土壤中礦物分布及描述 土壤特性 底部沉積物

				新地體構造現象
	岩性	岩類的產生		岩類分布 捕虜岩和岩脈 接觸岩 發生年代 工業用途的礦石潛力
		岩類的描述		礦物成分 晶粒大小 礦物排列方向 微裂縫 密度和孔隙率 磁化率、伽馬輻射等 礦物蝕變/風化 基岩
	構造	塑性構造	褶皺 葉理 線型 紋脈	延伸/年代
			剪 切 帶	延伸/年代，性質
		脆性構造	主 破 碎帶	位置和方向 尺寸(長寬) 位移(大小、方向) 年代 性質
			次 破 碎帶	位置和方向 尺寸(長寬) 位移(大小、方向) 年代 性質
			裂隙	密度(各組) 方位和軌跡長度 接觸模式 孔徑寬度 粗糙度 風化(蝕變) 裂隙充填(裂隙礦物) 年代

水文 地質	土壤層	具有相似水力性質的土體幾何 水力傳導度 比貯水率
	確切的導水破碎帶	幾何形態-區域和局部破碎帶 破碎帶空間分布與幾何形狀的統計描述 貯水係數
	岩體與隨機分布的破碎帶	具有相似水力性質岩體的幾何形狀 破碎帶空間分布與幾何形狀的統計描述 透水率(破碎帶)和水力傳導度(岩石)的統計分布 比貯水率(岩石)和貯水係數(破碎帶)的統計分布
	地下水的水力性質	密度、黏滯性與可壓縮性 鹽度與溫度
	邊界條件與佐證資料	氣象水文資料 補注/排放地區 鑽孔段的水頭 通過鑽孔的地下水流 區域邊界條件 歷史和未來發展
地球 化學	變數	pH、Eh
	主要成分	總溶解固體
	主要成分中的微量物質	Na、K、Ca、Mg、HCO ₃ 、SO ₄ 、Cl、Si、Fe、Mn、U、Th、Ra、Al、Li、Cs、Sr、Ba
	微量物質溶解氣體	HS、I、Br、F、NO ₃ 、NO ₂ 、NH ₄ 、HPO ₄ 、REE、Cu、Zr、N ₂ 、H ₂ 、CO ₂ 、CH ₄ 、Ar、He、C _x H _x 、O ₂
	穩定同位素	2H、18O、13C、34S、87Sr/86Sr、3He、4He、Xe 同位素、Kr 同位素
	放射性同位素	T、14C、234U/238U、36Cl、222Rn
	其他	溶解有機物、腐殖酸、黃腐酸、膠體、細菌
	裂隙填充礦物	δ18O、δ13C、86Sr/87Sr、235U/238U 方解石和氧化鐵的形態
岩石 力學	破碎帶	幾何形狀
	裂隙力學性質	法向變形性質

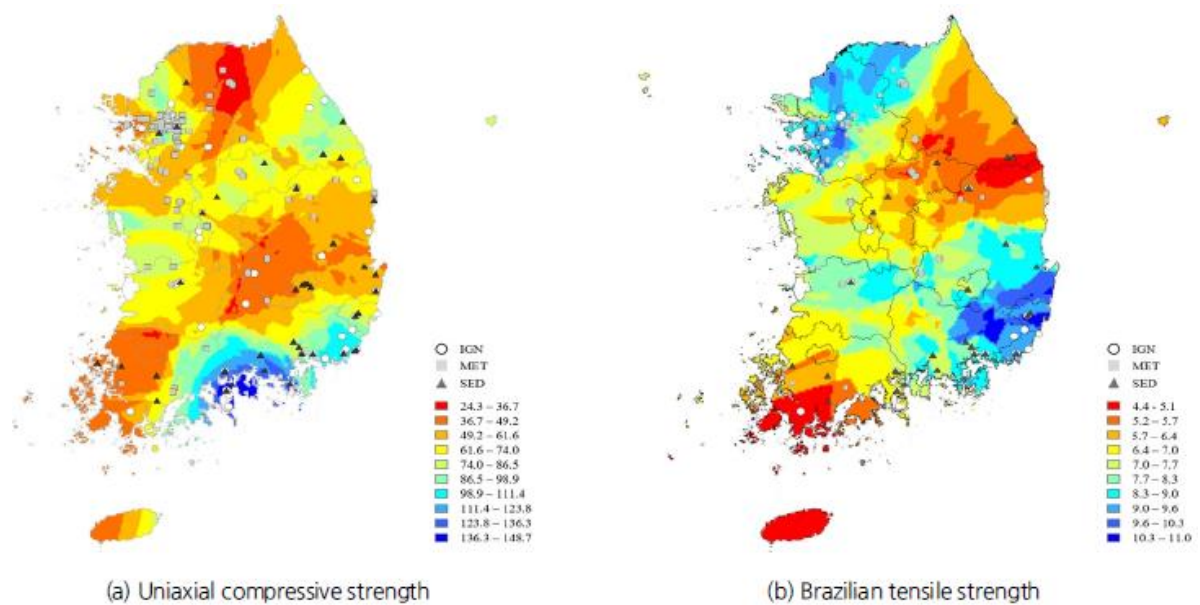
		剪力方向的變形性質 剪力強度
	堅硬岩石性質	彈性模數(楊氏模數) 波松比(n) 抗壓強度 抗拉強度 壓痕指數、可鑽指數、磨損指數 可爆破性
	岩體力學性質	彈性模數(楊氏模數) 波松比(n) 岩石分類 地下水化學 動態傳播速度，壓縮波 動態傳播速度，剪力波 強度
	密度與熱性質	密度 熱膨脹係數
	邊界條件與佐證資料	現地應力的大小與方向 觀察到的變形與地震活動
熱	岩石熱性質	熱傳導度 熱容量
	溫度	岩石溫度與地下水溫度 熱邊界條件/梯度
傳輸	處置孔尺度性質	地下水化學 地下水成分 裂隙孔徑與幾何形狀
	水流途徑性質	水流途徑 沿水流途徑的傳輸阻力 延散性 流徑孔隙率
	岩石基質性質	吸附係數(Kd) 基質擴散率 基質孔隙率 進入岩石的最大穿透深度 地下水化學
	佐證資料	示蹤劑試驗結果 裂隙填充物質的化學分析

		圍岩化學分析 地下水化學
--	--	-----------------

資訊來源：[66]

韓國地球科學和礦產資源研究所(KIGAM)在 2020 年時與高麗大學地球環境科學系合作研究，重新檢視 2017 年提出的場址特性調查項目與參數^[47]，經過研究討論後歸納為 17 個調查項目與 103 個參數。並建議配合三個調查階段，由大範圍到小範圍，分別使用 25 萬分之一、5 萬分之一及 2 萬 5 千分之一的地質圖幅為底圖。該研究建議的 17 個調查項目列舉如下：礦產、線型構造、斷層、地震、火山、抬升/沉降、水文地質、地熱、地球化學、核種行為、微生物、土壤、裂隙、岩類、堅硬岩石、岩體及天然災害^[67]。

近年來，韓國地球科學和礦產資源研究所(KIGAM)持續強化地質資訊系統的建立工作。2021 年的一篇研究文獻廣泛蒐集整理韓國各類岩石(包含火成岩、沉積岩及變質岩)的各種岩石力學實驗室測試結果，並根據岩石類型、強度和區域分析和分類了幾個描述性的統計數據，該資料庫未來可實際應用於高放射性廢棄物處置計畫選址過程。圖 3-20 即為該資料庫衍生應用示例之韓國境內岩石強度分布圖^[68]，依據韓國國內各地區站點分別取樣，岩石分類包含火成岩(IGNeous rock, IGN)、變質岩(METamorphic rock, MET)及沈積岩(SEDimentary rock, SED)，其中圖 3-20 (a)為岩石單軸抗壓強度試驗結果，代表岩石所能承受的抗壓力強度，顯示韓國南部地區多為沉積岩且抗壓力強度超過 120 Mpa 以上；圖 3-20 (b)為岩石抗張強度試驗結果，代表岩石所能承受的抗張壓力強度，顯示韓國西北部及東南部地區多為火成岩及變質岩的岩性，抗張強度超過 8.0 Mpa 以上。



資訊來源：[68]

圖 3-20：韓國境內岩石強度分布圖(單位 Mpa)，(a)為岩石單軸抗壓強度試驗結果；(b)為岩石抗張強度試驗結果；火成岩(IGN，圖示○)、變質岩(MET，圖示□)及沈積岩(SED，圖示△)。

3.3.2 安全評估技術發展

(1) 高放射性廢棄物處置設施安全評估之基準

韓國高放射性廢棄物處置設施安全要求，對於運轉期間處置場外公眾劑量限值如下^[21]：

- 有效劑量：0.03 mSv/y。
- 器官等效劑量：0.1 mSv/y。

對於處置設施封閉後設計目標如下：

- 正常/天然現象的年劑量：0.1 mSv/y。
- 由天然或人為因素引起意外破壞性事件的年風險： $10^{-6}/y$ 。
- 由任何不太可能發生事件或人為闖入造成的各單一情節年劑量：10 mSv/y。

(2) 高放射性廢棄物處置設施安全評估技術研發概要

韓國高放射性廢棄物處置計畫的特點之一是其技術研發係以十年為周期，以發展處置系統(即概念設計)為核心，再配套進行安全評估。因此，對於安全評估技術的研發過程與重要內容，亦可依此分為三個時期進行說明。

(A) 1997～2006 年參考處置系統計畫(KRS)

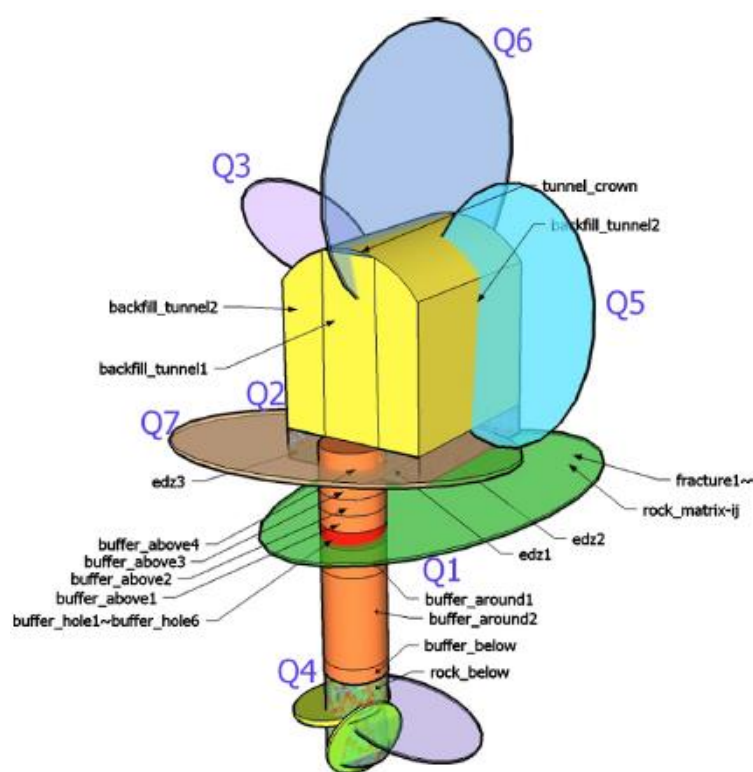
2003 年時韓國原子能研究所(KAERI)即曾對處置設施封閉後廢棄罐初始破壞(Initial Container Failure, ICF)情節進行全系統性能評估(Total System Performance Assessment, TSPA)。所使用的工具為韓國原子能研究所(KAERI)自行開發的機率式評估程式 MASCOT-K。評估結果顯示公眾個人年劑量符合法規要求^[69]。

2005 年韓國原子能研究所(KAERI)進行安全論證研究(稱為 2005 Safety Case 或 2005 TSPA)^[70]。考慮 CANDU 與 PWR 兩種不同類型的用過核子燃料存量與衰變熱；廢棄物罐為不銹鋼外殼鑄鐵內襯；使用鈣型膨潤土為緩衝材料；兩種主要傳輸途徑為地下水與井水。重要成果產出包括^[68]：

- 建立 KAERI FEP 百科全書(Encyclopedia)。
- 以岩石工程系統(Rock Engineering System, RES)矩陣法判定 2 種參考情節與 32 種替代情節。
- 發展評估程式 MASCOT-K 與 MDPSA。
- 建立參數資料庫 PAID (Input Database for Total System Performance Assessment)。
- 完成韓國生物圈建模。
- 建立研發管理資訊平台 CYPRUS (Cyber R&D Platform System)，並納入品質保證系統。
- 建立虛擬實境系統(Virtual Reality System)展示研發成果。

(B) 2007~2016 年先進參考處置系統計畫(A-KRS)

2007 年韓國原子能研究所(KAERI)發表的文獻嘗試以 ACGEO 程式(即 AMBER 程式的客製化版本)建構隔室模型(Compartment Model)。用於改進近場核種傳輸的衰變鏈計算。該研究根據裂隙與處置系統截切的現象，將核種釋出途徑分為 Q1 至 Q7 共 7 種情況(圖 3-21)。再據以評估核種釋出行為。模擬分析結果並與 KAERI 既有的 MASCOT-K 程式工具模擬分析結果進行比對，以證明結果的可靠性^[71]。



資訊來源：[71]

圖 3-21：韓國研究假定之核種傳輸途徑(Q1 至 Q7)

韓國致力於推動用過核子燃料的再處理計畫，2007 年至 2016 年的研發重心即在評估先進核燃料循環(Advanced Nuclear Fuel Cycle, ANFC)衍生廢棄物的處置安全性與可行性。A-KRS 設計須

考慮 PWR 用過核子燃料在處理後衍生的玻璃固化高放射廢棄物、玻璃固化中放射廢棄物、陶瓷固化低放射廢棄物及金屬放射廢棄物等(圖 3-22)。A-KRS 設計考慮在深度 200 公尺建造低放射廢棄物處置倉或處置坑道；在深度 500 公尺處建造高放射廢棄物處置倉或處置坑道^[72]。

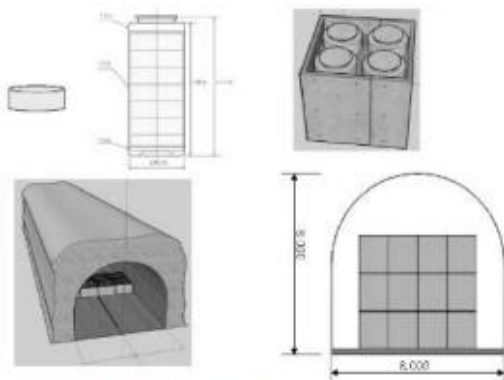


圖 3. 金屬廢物處理概念

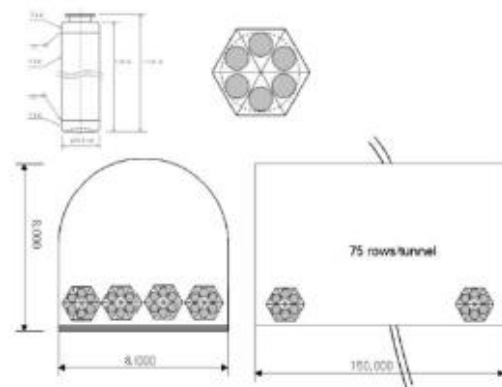


圖 5. 陶瓷 LLW 處理概念

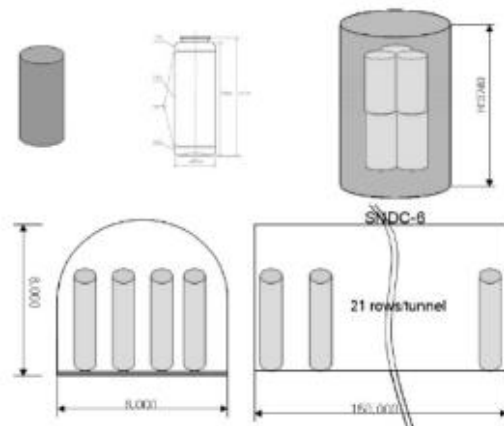


圖 4. 玻璃化 HLW 處置概念

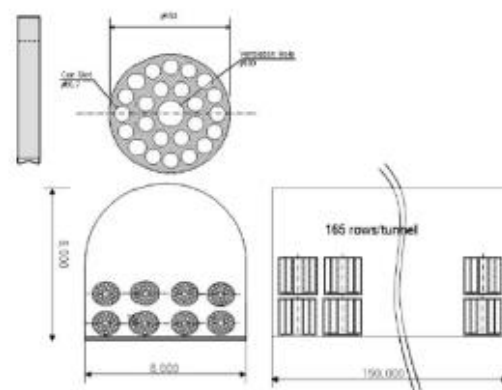


圖 6. 玻璃化 ILW 處置概念

資訊來源：[72]

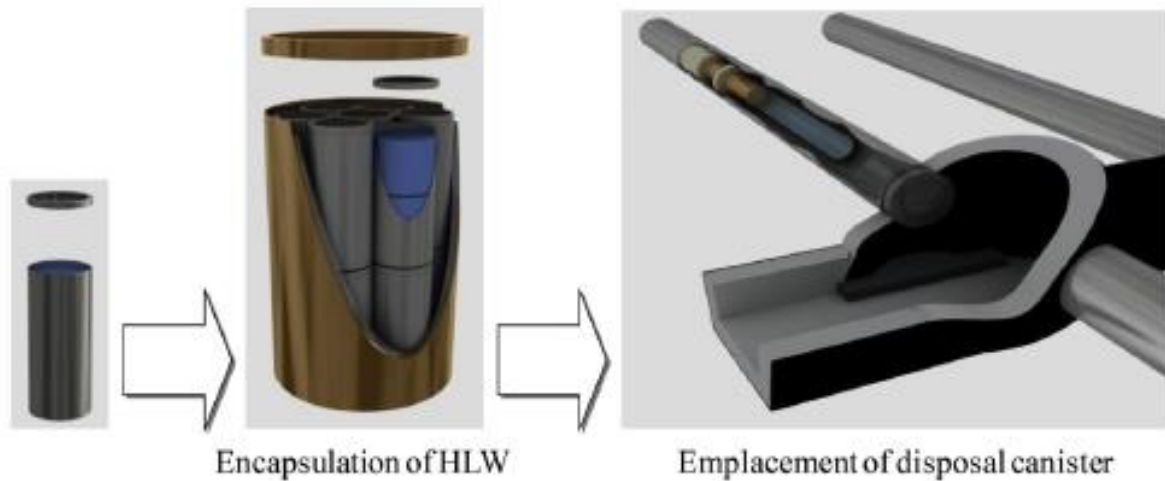
圖 3-22：各式處置概念

2010 年韓國原子能研究所(KAERI)發表的安全評估文獻採取以下的作法^[72]：

- 假設廢棄罐平均壽命 1 千年；但另保守假設 0.1%有初始製造缺陷。
- 開挖擾動帶(Excavation Disturbed Zone)範圍視施工方式而定，以隧道鑽掘機施工則為 30 公分；若以鑽炸法施工則為 1 公尺。
- 安全評估工具使用 GoldSim 程式。
- 考慮水井飲水情節、地震情節及工程障壁系統早期失效情節。
- 另假定處置場位於沿海，生物圈考慮漁業養殖、海水捕魚及淡水捕魚食物鏈途徑。
- 評估結果求得各類放射性廢棄物在不同情節與變因下，所含主要核種的定率式劑量曲線。

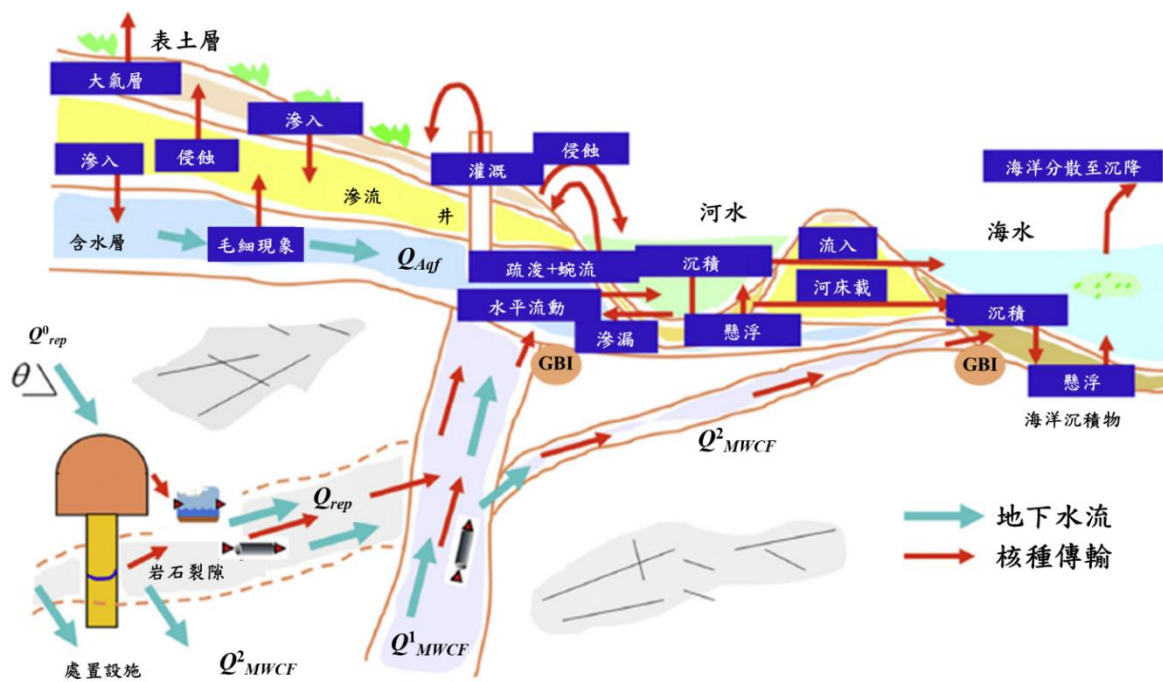
2016 年韓國原子能研究所(KAERI)發表多篇的安全評估文獻，展現階段性研發成果^[73, 74]。安全評估以 GoldSim 程式為工具，評估參考情節以及地震、鑽井侵入及廢棄物罐初始缺陷等三種替代情節的曝露劑量率。與前期研究的最大不同在於發展出一種針對複雜情節的風險評估方法。此外，參考處置系統的設計亦更為精細化(例如圖 3-23)。整體的 A-KRS 處置系統核種傳輸概念模型與 GoldSim 程式安全評估模擬概念圖示，分別如圖 3-24 與圖 3-25 所示^[73]。

2017 年韓國原子能研究所(KAERI)發表文獻^[74]指出，已根據 KURT 的資料進行用過核子燃料再處理後長期處置的安全論證，並整合研究成果提出 AKRS-16 安全論證報告。該報告的內容架構如圖 3-26 所示，但現已無網路公開資訊，具體內容不明。



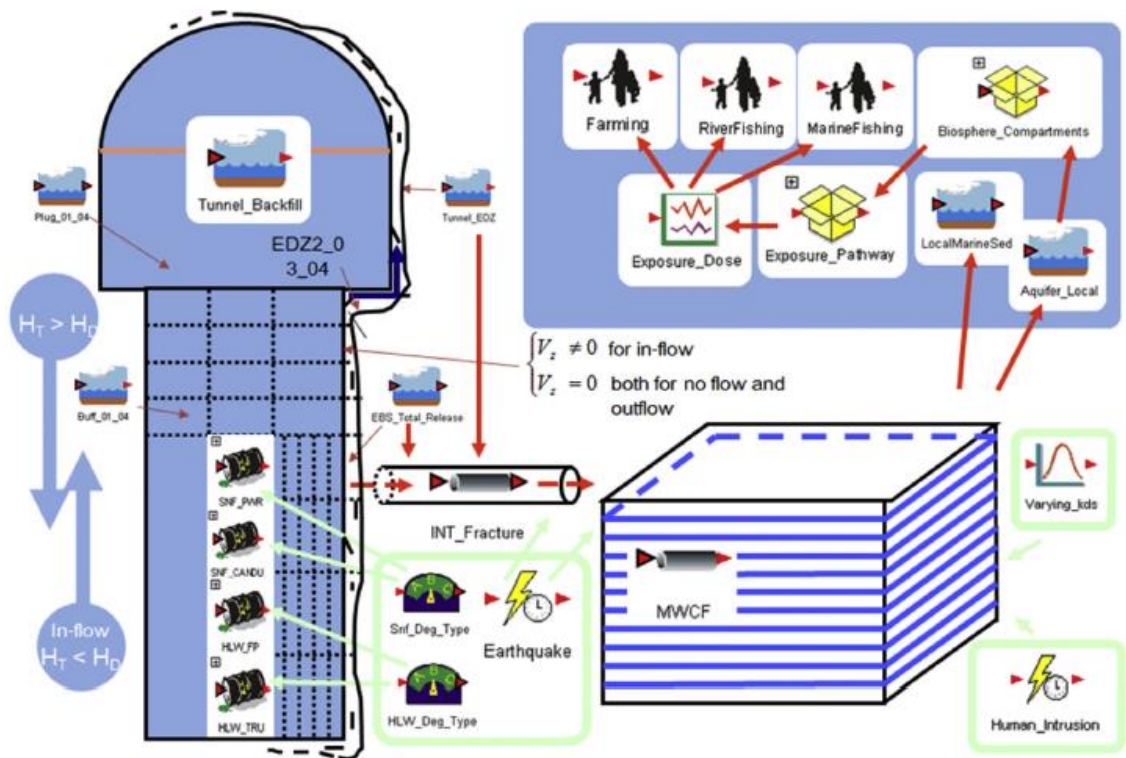
資訊來源：[73]

圖 3-23：韓國 2016 年高放射性廢棄物處置概念設計



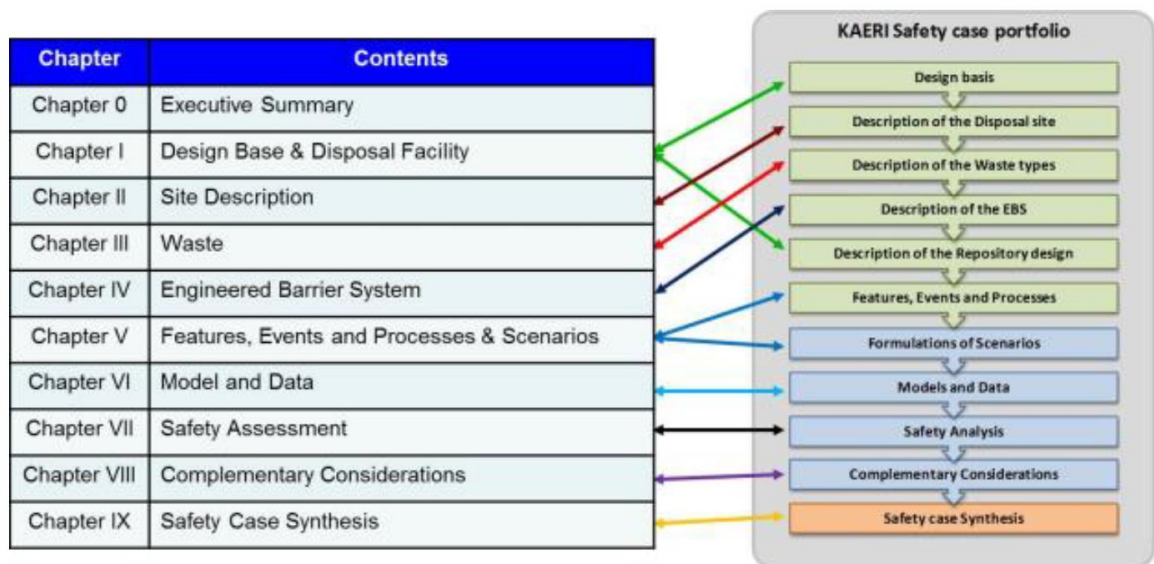
資訊來源：[73]

圖 3-24：韓國 A-KRS 處置系統核種傳輸概念模型



資訊來源：[73]

圖 3-25：韓國 2016 年 GoldSim 程式安全評估模擬概念圖示



資訊來源：[74]

圖 3-26：韓國 AKRS-16 安全論證報告架構

2007 年至 2016 年期間韓國文獻顯示其在安全評估技術發展領域中亦進行多項研究，重點研發項目依年代順序列舉如後，細節不另贅述。

- 2010 年：緩衝材料熱傳評估^[74]。
- 2012 年：FEPs 與情節發展^[76]；定率式安全評估^[77]。
- 2013 年：核種吸附資料庫發展^[76]；GoldSim 程式驗證^[79]；地震情節評估^[80]；天然類比研究^[81]。
- 2014 年：近場定率式安全評估^[82]；近場機率式安全評估^[83]。
- 2015 年：天然類比研究^[84]；輔助安全指標探討^[85]。
- 2016 年：源項放射毒性研究^[86]；再處理後玻璃固化體源項研究^[87]；多層處置熱傳分析^[88]。

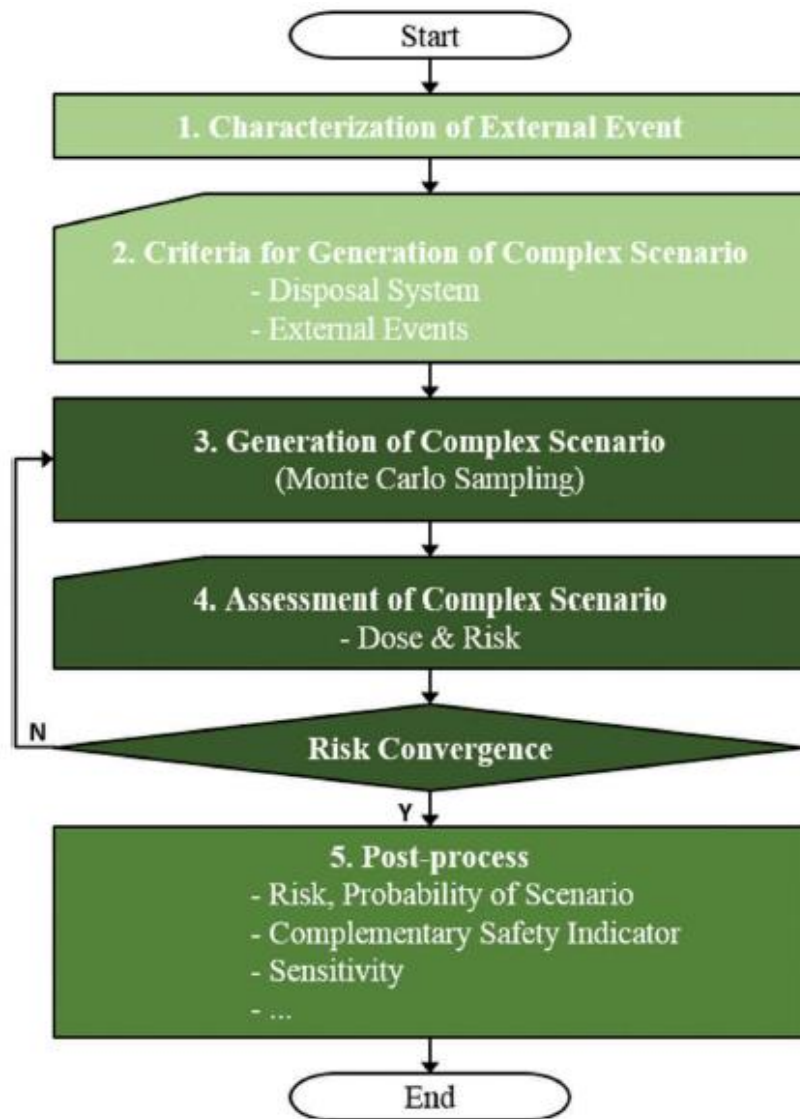
(C) 2017～精進參考處置系統計畫(KRS+)

2017 年至 2020 年期間，根據韓國原子能研究所(KAERI)發表文獻可以發現其研究重心在於深化風險評估技術^[89]、異常情節分析(例如人類無意闖入)^[90]、以安全評估結果回饋精進參考處置系統的精進^[91-96] (此亦即 KRS+計畫的階段性任務目標)及進行運轉期間安全評估^[95]等，同時建置全系統性能評估資料處理平台並友善化使用者介面，即韓國原子能研究所(KAERI)所自稱的 Apro 系統(Advanced Process-based total system performance assessment framework for a geological disposal system)^[98]。

韓國經驗值得關注點重點，包含風險評估的作法(圖 3-27 為風險評估流程圖；圖 3-28 為風險評估核種傳輸概念模型)、人類無意闖入頻率的量化模式、安全評估結果如何回饋應用於處置系統設計最適化(例如圖 3-29 為 KRS+計畫參考設計之一)、運轉期間安全評估的作法(例如圖 3-30 為運轉期間安全評估流程圖)、以

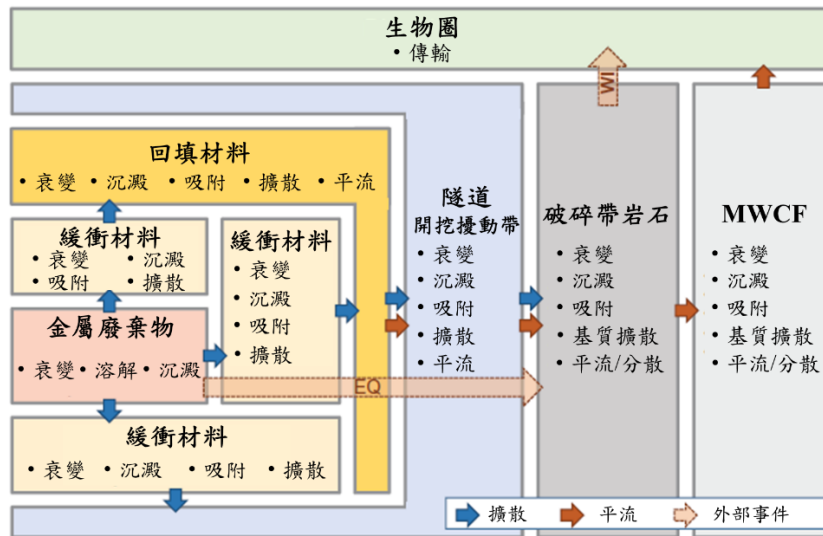
及安全評估模擬分析的核心系統 Apro(圖 3-31 為平台架構與介面示意圖)。

Apro 系統為流程導向的全系統性能評估(TSPA)架構，專門應用於高放射性廢棄物的通用地質處置系統。如圖 3-31 所示，該安全評估模擬分析平台分成兩個部分：(一)輸入資料部分，係以 EXCEL 檔案彙整提供，可為既定格式的 EXCEL 檔案，該 EXCEL 檔案可包含：模擬條件中計算所需的時間(總評估週期及時間尺度)及空間資訊(2 維或 3 維)；處置設施組成(處置容器、緩衝材料、回填材料及母岩)、多重物理現象作用(含熱、水、力學及化學作用(Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical, THMC)的數據或參數；失效條件(處置容器厚度指標及腐蝕相關參數)；(二)分析計算部分，該平台架構使用利用 MATLAB 軟體建立 Apro 建模介面，結合多重物理模擬軟體(COMSOL)與地球化學反應計算軟體(PHREEQC)評估處置設施安全性能。初期以 MATLAB 軟體處理 EXCEL 資料並轉檔編碼提供至 COMSOL 軟體及 PHREEQC 軟體使用。後續藉由 COMSOL 軟體模擬處置系統中 THMC 的單一或耦合現象，以 COMSOL 軟體設定 THMC 初始條件及邊界條件，並將 THMC 模組化帶入評估。以及藉由 PHREEQC 軟體設定物質生成及地球化學作用的初始條件，以評估計算地球化學反應。Apro 系統係採非迭代方法(Sequential Non-Iterative Approach, SNIA)，依據每單位時間條件下執行 COMSOL 軟體及 PHREEQC 軟體運算，直到運算達到目標時間為止的性能評估。



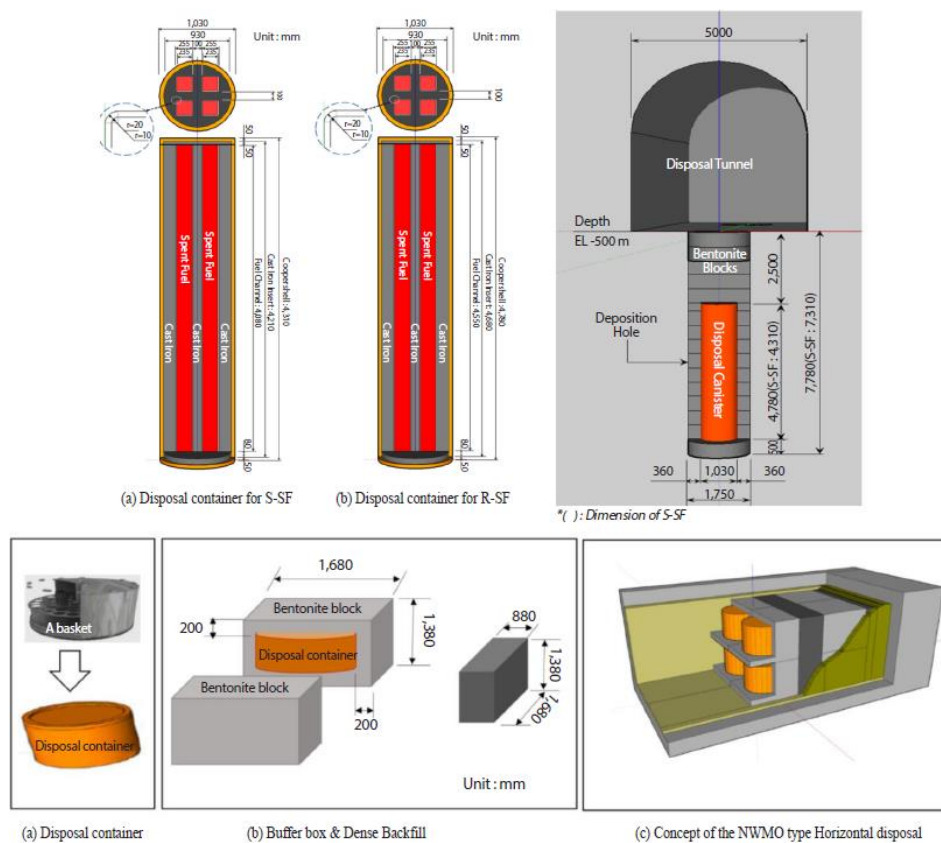
資訊來源：[89]

圖 3-27：韓國處置設施風險評估流程圖



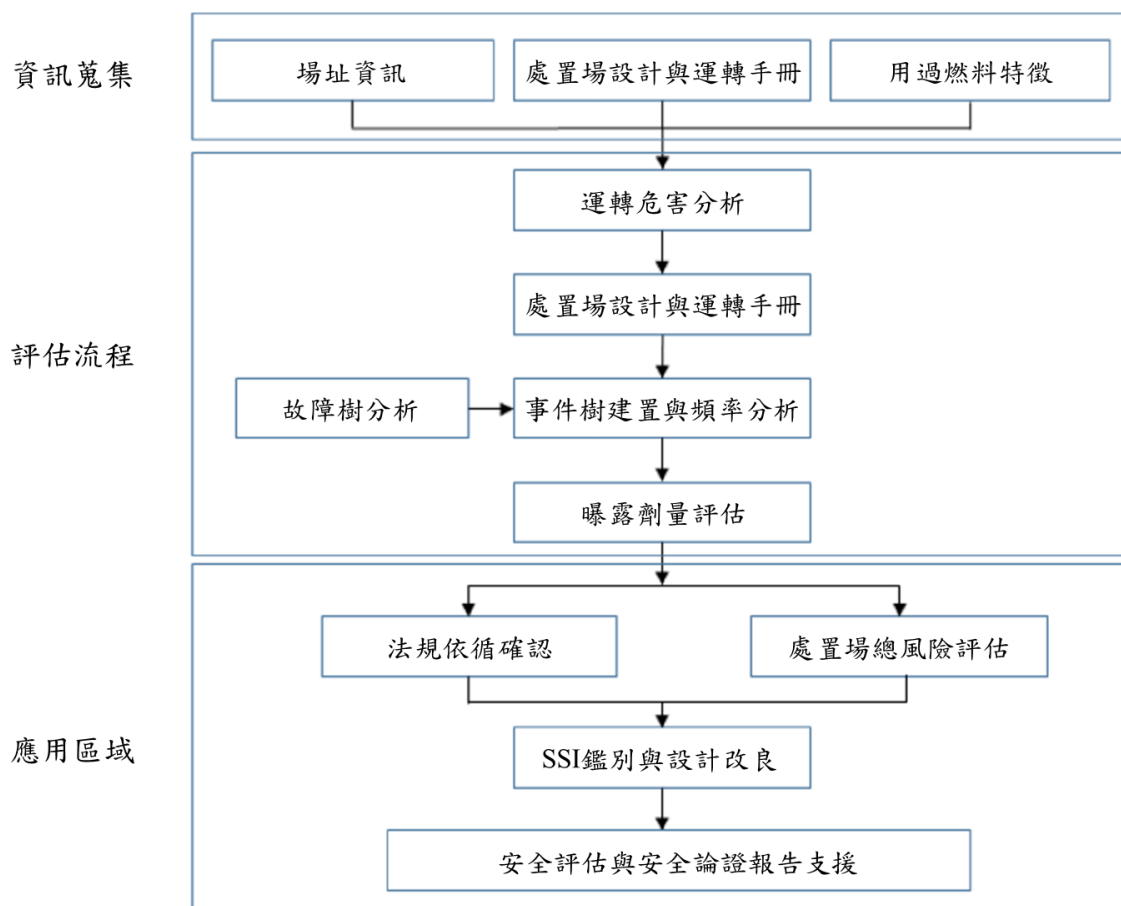
資訊來源：[89]

圖 3-28：韓國處置設施風險評估核種傳輸概念模型



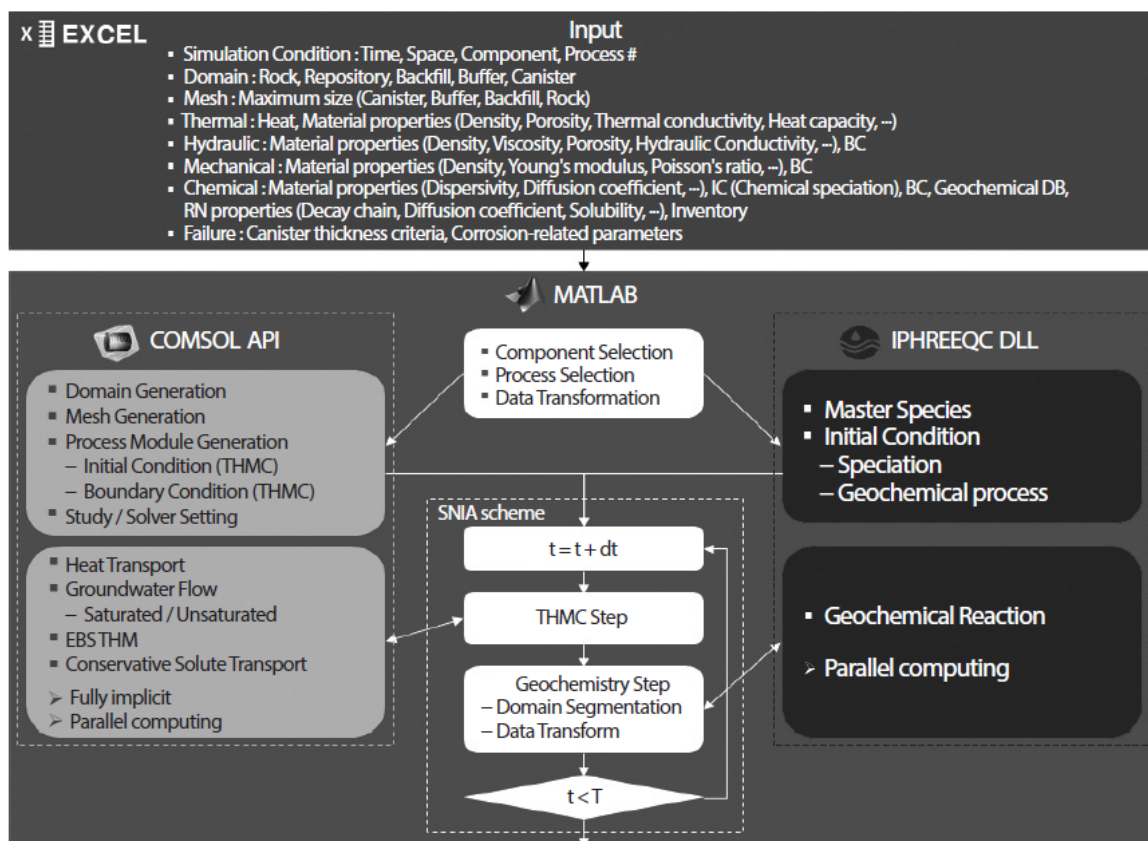
資訊來源：[96]

圖 3-29：韓國 KRS+計畫處置系統參考設計



資訊來源：[97]

圖 3-30：韓國處置設施運轉期間安全評估流程圖



資訊來源：[98]

圖 3-31：韓國處置設施 Apro 系統安全評估平台

2021 年之後迄今，韓國原子能研究所(KAERI)的安全評估技術研究重心放在 THMC 耦合效應的評估^[99-105]。此外，亦加強對於微生物^[99, 104, 105]及膠體^[106]對安全性影響之研究。

3.4 綜合探討韓國之優良實務經驗

本節總結探討韓國核能後端營運的特色，並歸納說明韓國高放射性廢棄物處置計畫在場址調查與安全評估技術發展領域的優良實務經驗，以供核安會參考。

(1) 韓國核能與核後端營運特色

韓國國情特色簡述如下：

- 現行核能發電政策為逐步擴大核能發電比例。

- 核能發電反應器現況：25 部運轉中；3 部建造中；2 部除役中。
- 2020 年核能發電量占比 29.6%。
- 放射性廢棄物處置為國家的責任。
- 已設立後端基金與處置專責機構。
- 月城低放射性廢棄物處置設施運轉中。
- 高放放射性廢棄物處置計畫將俟國會通過選址相關法規後，啟動選址程序
- 新版國家高放射性廢棄物管理基本計畫完成公眾諮議程序，進行後續修訂中。

我國研發人員在參考韓國經驗時，應注意兩國的差異，例如政策不同、產業規模不同及用過核子燃料不同等。

(2) 韓國整體考量高放射性廢棄物管理計畫

韓國依據法律規定，放射性廢棄物處置為國家的責任。因此，政府統合國家各部會的力量制定高放射性廢棄物管理計畫，內容結合運輸、貯存、場址及處置等做整體考量。此做法與我國有很大的差別。我國依照放射性物料管理法，放射性廢棄物處置為產生者之責任，難免在介面協調與計畫推動上不如國家力量有力。因此，需做更多的努力。

(3) 韓國高放射性廢棄物處置技術研發策略

韓國高放射性廢棄物處置的研發過程本質上與各國大同小異，從學習國際經驗開始再逐漸考慮國情特色發展本土技術。韓國在推動處置計畫過程中，以發展參考處置系統為核心，二十餘年來從 KRS 進步到 A-KRS 再進步到 KRS+。以可視覺化的實體模型設計為主導，再配套發展尚未能實際展開的深層地質調查技術與較為抽象的安全評估技術。此作法可以使社會公眾有明確的印象，利於計畫溝通，值得我國

參考。

(4) 韓國關鍵技術與成熟度之評量

韓國以產學研專家學者共同討論及以問卷調查擴大參與的方式自我評量關鍵技術與成熟度，在場址技術領域方面的 28 項關鍵技術中，已完成 9 項，主要為大區域的地表調查，而對於地下深層的特性調查技術則仍待持續開發。值得注意的是，韓國關鍵技術成熟度有多達 340 篇論文可供佐證。相較於國內，期刊論文發表較為欠缺，未來我國若實施技術成熟度評量，恐有不利的影響。

(5) 研發資源(經費與人力)

韓國的國家政策係將放射性廢棄物處置訂為國家責任。因此，由政府各部會/單位協力推動高放射性廢棄物處置計畫。根據「高放射性廢棄物研發路徑圖」^[30]的資訊顯示，韓國在高放射性廢棄物管理方面(含運輸、貯存、場址與處置)，從 1997 年至 2022 年已花費 4,000 億韓元(以 1 韓元=0.024 新台幣計，約相當 96 億新台幣)。韓國未來 2023 年至 2029 年將投入高放射性廢棄物管理的"處置"領域約相當 10.3 億新台幣(不含場址調查技術領域與地下研究實驗室建設費用)。

此外，自 2016 年 7 月韓國政府發布「高放射性廢棄物管理基本計畫」後，韓國原子能研究所(KAERI)配合政策方案，執行精進參考處置系統(即設施設計技術發展)與安全評估(研發人員約 100 人)；韓國地球科學和礦產資源研究所(KIGAM)(相當於我國地質調查所)特別成立高放射性廢棄物地質處置中心(Center for HLW Geological Disposal)將負責場址調查工作(研發人員約 20 人)；韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)則負責規劃處置計畫推動時程(研發人員約 10 人)；另外電力公司亦投入貯存與處置介面的研發(研發人員約 10 人)。目前研發人員約 140 人，預估研發人力高峰可達 410 人^[30]。

韓國投入高放射性廢棄物處置計畫的經費與人力，可供我國長期計畫規劃之比對參考。

(6) 韓國處置計畫分工明確

如前所述韓國放射性廢棄物管理機構(KORAD)負責規劃與推動處置計畫；韓國原子能研究所(KAERI)負責設計與安全評估；韓國地球科學和礦產資源研究所(KIGAM)負責地質調查。此明確分工除了專業考量外，亦有利於資料保存及知識與經驗傳承。基本上，韓國處置技術研發的推動及精進主要基於(1)建立研發管理體系：指定專責管理機構，整合相關部會、產、學、研的研發職能，實施並定期評估補充研發路線圖及性能檢查，並透過相關部會分工，提升研發效率，落實關鍵資訊保存及知識管理。(2)培育研發專家：制定中長期人才培育綜合計畫，根據研發人力現況及需求預測，通過產學研聯合培育專業研究人才，並擴大對中小企業與高校的研發投入，建立穩定的人才培育體系，以落實經驗傳承。我國因由廢棄物產生者負責處置，在研究計畫發包時得標廠商具有不確定性，並不利於介面協調以及資料保存及知識與經驗傳承。

(7) 韓國地下研究實驗室的設置

韓國原子能研究所(KAERI)在 2006 年完成 KURT 地下研究坑道建造後，以此為基地，在各研發領域均發揮重大效果，尤其在國際上給予他人一種推動處置計畫積極正面的印象。由於 KURT 僅 120 公尺深，並非真正的深層地質環境，因此，未來韓國仍考慮在處置場完工啟用前，另建一處通用型地下研究實驗室。KURT 所執行的現地試驗、研發項目與成果值得我國參考。

(8) 韓國的國際合作 DECOVALEX

韓國原子能研究所(KAERI)極重視國際合作，例如從 2008 年即參

與 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiment)計畫迄今^[109, 110]。並與美國各國家實驗室互動頻繁^[100]。此作法有助提升研究人員的素養與國際觀，進而提升國家的研發能力。

(9) 韓國的替代處置方案

美國雅卡山處置計畫終止後，深層鑽孔處置 (Deep Borehole Disposal, DBD) 技術重新受到重視。韓國對此亦頗感興趣從 2015 年迄今均有相關研究在持續進行^[111-116]。2022 年韓國政府發布的研發路徑圖^[30]亦將此技術列入替代方案，將持續投入經費進行研究。對於深層鑽孔處置技術的未來發展，我國亦宜適度關注。

4. 放射性廢棄物處置國際動態資訊研析

本章說明 2022 年國際上有關放射性廢棄物處置的重大新聞報導與年度內國際核能機構發布的重要文獻，並對重要個案進行資訊研析。

4.1 放射性廢棄物處置 2022 年國際動態資訊蒐整

本節蒐整的主題範疇為 2022 年放射性廢棄物處置相關資訊，包含低放射性廢棄物處置與高放射性廢棄物處置。資訊蒐整的對象係針對國際原子能總署「動力反應器資訊系統 (PRIS)」所列舉的核能發電國家。動態新聞資訊主要來自世界核能協會(WNA)所發布的核能新聞，並對照各國管制機關與營運單位的官方網址資訊確認新聞內容。除核能發電國家資訊外，亦彙整國際核能組織如國際原子能總署(IAEA)與經濟合作暨發展組織核能總署(OECD/NEA)於 2022 年發布的重要處置相關文獻資訊，以提供核安會參考。

4.1.1 各國動態資訊蒐整

核能國家於 2022 年重大的放射性廢棄物處置國際動態資訊依發生時間先後順序摘述如後，並歸納整理如表 4-2 所示。

- (1) 2022年1月：德國Asse II處置設施招標廢棄物處理廠和中期貯存設施設計

德國聯邦放射性廢棄物處置公司(BGE)招標規劃Lower Saxony邦Wolfenbüttel地區前Asse II處置設施的廢棄物處理廠和中期貯存設施之設計和執照申請案。得標廠商必須在2023年底前提

交計畫書。

該合約要求地面廢棄物處理廠的設計應能夠處理約10萬立方公尺從Asse II回收的低與中放射性廢棄物。而中期貯存設施應能容納約20萬立方公尺從Asse II回收的低與中放射性廢棄物。相關設施且應能預防事故和便於整備過程中的運輸。

合約內容包括為廢棄物處理廠和中期貯存設施完成基本評估、初步、草案和核定規劃。亦包括室內、室外設施、工程結構和交通設施，包括用於緩衝、特性調查、處理和中期貯存等的建物規劃和技術設備，以利將來從Asse II處置設施回收放射性廢棄物。

依據2021年12月20日開標結果，得標廠商包括 Uniper Anlagenservice GmbH公司、Uniper Technologies GmbH公司和 Brenk Systemplanung GmbH公司。依合約將為必要系統的建設和運轉提出具技術與經濟效能的專業規劃，並考慮到所有法律和作業要求。

Asse II處置設施原為廢棄的岩鹽礦坑，後來改為放射性廢棄物處置設施。在1967年至1978年間曾處置數千桶低放射性廢棄物。然而，由於地下水滲入而有安全疑慮，自2013年以來，法律強制要求回收放射性廢棄物。依據BGE於2020年4月提報的Asse II處置設施回收放射性廢棄物計畫，回收作業規劃於2033年開始。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Contract-awarded-for-planning-of-Asse-II-facilitie>

(2) 2022年1月：斯洛維尼亞評估研究用反應器用過核子燃料深層鑽孔處置可行性

斯洛維尼亞放射性廢棄物管理組織(ARAO)在針對TRIGA II

研究用反應器用過核子燃料處置計畫進行初步研究後表示，深層鑽孔處置是可供考慮的重要選項。

此項研究為由ARAO與美國深層隔離公司(Deep Isolation)合作進行，其研究結論認為，深層鑽孔處置將是一種安全且經濟效益高的解決方案。

斯洛維尼亞1960年代建立的TRIGA II反應器為世界上66個同類型反應器之一，所生產的放射性同位素用於醫學研究和訓練使用。該反應器預計在2043年停機。

處置計畫初步研究發現，最具成本效益的方案是由位在斯洛維尼亞Ljubljana市的Josef Stefan研究所和Krško核能電廠合資建造一處深層鑽孔處置(Deep Borehole Disposal, DBD)設施，用於處置來自TRIGA II研究用反應器的用過核子燃料。另一方案則獨資建立一處微型處置設施，以很小的占地面積在單一鑽孔中處置其所有的用過核子燃料。

先前挪威核子除役機構(NND)和歐洲處置設施發展組織(ERDO)亦曾委託美國深層隔離公司(Deep Isolation)完成另一項研究計畫，於2021年12月發布的報告結論指出，DBD技術是一種可行的且經濟有效的解決方案，可以解決克羅埃西亞、丹麥、荷蘭、挪威和斯洛維尼亞的中與高放射性廢棄物問題。

美國深層隔離公司總部位於加州柏克萊市，為管理用過核子燃料和高放射性廢棄物提供一種解決方案，該方案是將用過核子燃料放置在水平鑽孔深處的耐腐蝕罐中。該技術採用了現有的定向鑽孔技術。廢棄物可以在確定的時間範圍內再取出或永久處置。

此種深層鑽孔處置方案受限於處置時間不可能永遠無限期地

保持可逆性，該鑽孔通道可能在長時間岩石應力下受到損害，造成可逆性喪失，故在選址期間就應考量場址母岩條件以確保鑽孔穩定性。在處置設施運轉期間，可以輕易的從鑽孔處置場中安全地再取出廢棄物罐，如果需要的話，可以在置放後的預封閉的監管階段維持數年可逆性。如果可逆性是所有以深層地質處置國家的政策必要項目，那麼與DBD的重點應該是確保「最終封閉前的可逆性」，既能完成置放，又能保有在預封閉的監管階段下的可逆性。若在最終封閉後階段才執行再取出，應視此階段再取出規定是否為管制政策要求項目，但仍需使用水平鑽孔進行再取出時(例如，透過沿著封阻的通道進行引導並重新建立通向地面的套管通道)，將產生昂貴費用並且造成嚴重的作業困難。因此，DBD應被視為永久性處置作業，百年規模的可逆性要求是不合適的。DBD設定可再取出的時間尺度應為數月或數年^[114]。

2019年，深層隔離公司公開展示了其概念，透過一個鑽孔成功地將一個原型核廢棄物處置罐放置在地下數百公尺深處，然後將其回收。

美國深層隔離公司亦完成其他深層鑽孔處置可行性研究，包括跟美國電力研究所和愛沙尼亞Fermi Energia能源公司的合作計畫。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Study-puts-case-for-deep-borehole-disposal-in-Slov>

(3) 2022年1月：英國成立第三個高放處置社區夥伴關係組織

英國Cumbria郡Allerdale市成立一個社區夥伴關係組織，以推動高放射性廢棄物地質處置設施(GDF)選址程序事宜。Allerdale

GDF 社區夥伴關係組織是繼2021年底Mid Copeland 和 South Copeland之後成立的第三個社區。

社區夥伴關係組織的最初成員包括來自Allerdale市議會、Cumbria地方議會協會(CALC)、放射性廢物管理公司(RWM)、Cumbria商會和Inspira的代表。

Allerdale GDF社區夥伴關係組織將探討在行政區320平方公里範圍內13處選址地點設置處置設施的可行性。並讓候選地區的居民明白，他們對是否要設置地質處置設施擁有最終的決定權，確保所有意見都能被聽到。

社區夥伴關係組織是長期運作的團體，將由更多人參與，以便更深入考慮在選定的地點設置GDF的可能性。隨著社區夥伴關係的成立，每年可為社區提供100萬英鎊(140萬美元)的投資經費用於當地計畫項目。如果進入地質鑽探調查階段，投資經費將可提升至每年250萬英鎊。

GDF的建造既需合適的場址，也需要有意願的社區。尋找合適的場址來建造GDF預計需要10至15年的時間，但如果在Allerdale找到合適的場址，將需要進行公眾支持度測試，讓受影響選址區域的居民有直接發言權。若處置計畫未獲得公眾支持，則不會建造處置設施。

負責推動處置計畫的RWM公司將持續在英國各地舉行討論，尋求成立更多的工作小組及社區夥伴關係。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Another-GDF-community-partnership-forms-in-Cumbria>

(4) 2022年1月：美國國家實驗室參與瑞士高放處置膨潤土材料受熱研

究計畫

美國能源部(DOE)所屬的三個國家實驗室參與國際HotBENT現地實驗計畫之模擬評估和實驗室工作，以研究高放射性廢棄物深層地質處置設施不透水膨潤土回填材料的性能。

深層地質處置概念的特點係由數個工程和天然安全障壁所組成的系統，將高放射性廢棄物與環境隔離。其中，採用的膨潤土是一種天然的黏土材料，具有非常低的滲透性，與水分接觸時具有膨脹特性。這使得膨潤土成為合適的緩衝/回填材料，用來包圍廢棄物罐或回填地質處置設施內隧道。該材料有助於使水流遠離放射性廢棄物，同時可遲滯放射性物質的遷移。

由瑞士國家放射性廢棄物處理公司(Nagra)所主導的HotBENT(膨潤土緩衝材料之高溫影響)計畫，目的在研究瞭解高放射性廢棄物釋放的熱量如何影響緩衝材料和圍岩的地球物理與地球化學特性，以確保膨潤土於長期受熱環境下能維持其安全性能。HotBENT計畫從2021年9月在瑞士Grimsel試驗場(GTS)，展開長期的現地測試，以研究膨潤土在高達攝氏200度下的受熱影響。

美國勞倫斯伯克萊國家實驗室(LBNL)、桑迪雅國家實驗室(SNL)與洛斯阿拉莫斯國家實驗室(LANL)亦參與HotBENT計畫，配合現地測試工作進行模擬評估和實驗室工作。LBNL進行縮小比例尺實驗，觀察緩衝材料在一年半時間的變化，並與現地進行對照比較，重點為瞭解膨潤土膨脹能力可能損失的情況。SNL研究熱傳導對材料礦物學的變化及其膨脹能力的影響。LANL研究膨潤土和其他工程障壁混合材料受熱的影響，以及測試整體障壁系統在高溫下的影響。

整體計畫成果若能驗證膨潤土緩衝材料在高溫下可維持保護

功能，便可縮減處置罐處置時的置放間距，從而減少處置所需面積。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-national-labs-support-international-waste-dispo>

(5) 2022年1月：立陶宛委託芬蘭Posiva公司研究用過核子燃料處置準則

立陶宛委託芬蘭Posiva Solutions公司研究用過核子燃料處置一般準則。由立陶宛Ignalina核能電廠與Posiva Solutions公司簽署的合約為期一年。將討論確保地質處置設施中用過核子燃料與長半化期放射性廢棄物貯存安全的原理、長期安全評估的方法論、安全評估使用的方法、軟體與資訊。此外，亦將對立陶宛可能適合設置用過核子燃料處置設施的地質構造進行一般安全評估，並擬定一般性的準則。此項最終處置設施系統的設計需要符合立陶宛對核子設施的一般核子安全要求，同時亦應符合國際原子能總署(IAEA)的安全建議。

芬蘭Posiva Solutions公司是Posiva公司的全資子公司，負責處置技術國際服務推廣業務。Posiva公司則是由芬蘭的兩家核電公司集資成立。2021年底Posiva公司已向芬蘭政府提出用過核子燃料運轉執照申請，並預計2024年開始處置。

立陶宛Ignalina核能電廠有2部RBMK型反應器，原先可提供立陶宛70%的電力，因安全性存疑在加入歐盟時關閉，目前除役中，用過核子燃料則乾式貯存中。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Finland-s-Posiva-to-support->

(6) 2022年1月：瑞典核准用過核子燃料處置設施建造執照申請

瑞典氣候與環境部宣布，核准放射性廢棄物管理公司(SKB)在 Forsmark 建造用過核子燃料處置設施以及在 Oskarshamn 建造封裝廠的申請案。

SKB 公司於 2011 年 3 月向輻射安全局(SSM)提出用過核子燃料處置設施與封裝廠的建造申請。申請案內容包含將在約 500 公尺深的地層中處置約 6,000 個廢棄物罐，共計約 12,000 噸的用過核子燃料。同時將 Clab 設施的貯存容量從目前的 8,000 噸擴建到 11,000 噸用過核子燃料。其中，位於 Oskarshamn 的新建封裝廠將與既有且將擴建的 Clab 中期貯存設施合併成立新的 Clink 設施。

先前 SSM 和土地暨環境法院已完成申請文件的審查。SSM 依據核子作業法審查設施的核子安全與輻射問題。土地暨環境法院依據環境法審查環評問題。SSM 與土地暨環境法院均於 2018 年 1 月就申請案分別向政府提交審查結論文件。

2018 年 6 月，Oskarshamn 市議會通過封裝廠建造計畫。2020 年 10 月，Östhammar 市議會通過在 Forsmark 處置設施建造計畫。

政府整體考量申請案符合環境法與核子作業法的要求，因此核准建造封裝廠與最終處置設施。後續將由 SSM 及土地暨環境法院進行管制與監督。

SKB 公司的處置設施建造工程約需 190 億瑞典克朗(20 億美元)。預計工期約需十年時間。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Swedish-government-gives-go-ahead-for-used-fuel-re>

(7) 2022年2月：美國WIPP處置設施通風設施升級工程取得重大進展

美國能源部(DOE)位於新墨西哥州的廢棄物隔離先導廠(WIPP)為美國唯一的超鈾廢棄物處置設施。超鈾廢棄物包括受到鈾和其他美國軍事計畫中人造放射性核種污染的服裝、工具、碎布、殘渣、碎片、土壤等，廢棄物以密封鋼桶封裝後運至WIPP進行最終處置。

近期WIPP安全重要性密閉通風系統(SSCVS)的三項主要工程取得重大進展，此前係因疫情影響而延遲。

新建空氣過濾器廠房的地基已提前三週完成，並已展開建物牆體的施工。該廠房將安裝1,000馬力的風扇，使地下處置設施排出的空氣通過高效率微粒濾網(HEPA)進行過濾。

除鹽廠房的預鑄混凝土牆和屋頂已完工。該廠房為DOE於2021年環境管理計畫的優先事項之一，用於去除空氣中的鹽分。

通用豎井系統的巨型進風口已部分完成總深度693公尺的其中38公尺。新的豎井將安裝增壓室和管道系統，以便加壓輸送新鮮空氣進入地下。俟完工後，將成為WIPP最大的豎井，直徑為8公尺。

SSCVS通風系統規劃於2025年啟用，可切換過濾或未過濾模式，並可提供高達每分鐘54萬立方英尺的空氣。大量的空氣可供更多的機械進行地下作業，並使工作環境更加安全與舒適。

WIPP處置設施位於地下600餘公尺的古老鹽岩地層中。WIPP配置了8個處置區，在主要通道兩側各有4個，另外兩個處置區正在規劃中。WIPP第8處置區的開挖工作於2021年10月完成，俟安裝電力、通信和空氣監測器後，將於2022年4月繼第7處置區放滿

廢棄物包件後啟用。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Progress-on-WIPP-ventilation-upgrade>

(8) 2022年2月：瑞典用過核子燃料處置設施建造案後續步驟

瑞典政府於2022年1月27日核准放射性廢棄物管理公司(SKB)用過核子燃料處置設施建造申請案。2月5日SKB發布新聞稿說明後續步驟。

SKB公司表示，該案現在將返回土地與環境法院及瑞典輻射安全局(SSM)進行管制。土地與環境法院與SSM將在未來幾年進行逐步的審查與核准程序，以釐清眾多環境保護與安全技術細節。

土地與環境法院依據「環境法典」，將對處置設施的環保議題提出管制條件。首先將與SKB公司談判條款與條件，然後在法院裁決中確定。

SSM則依據「核子作業法」與「輻射防護法」決定管制條件。SSM亦將持續檢查SKB公司是否滿足各階段的輻射安全要求。為此，SKB公司需要在開工、試運轉、正常運轉、除役與封閉之前準備新的安全分析報告。各階段安全分析報告在獲得SSM核准後，SKB公司方可開始下一步驟。

設施所在地的瑞典Östhammar市政府亦須制定細部區域發展計畫與核發建造許可。

當核准程序皆通過土地與環境法院及SSM完成審查及制定管制條件後，取得土地與環境法院及SSM核准，並通過市政主管機關審查及核發建造許可，該處置設施建造作業才能開始。

SKB公司的工程案將需要大量投資，尤其是在相關城市與地區，預計總共將投資約190億瑞典克朗，主要用於建築、開挖與設備安裝等。用過核子燃料處置設施的建造估計需要大約10年時間。

資訊來源：

<https://www.neimagazine.com/news/newsuk-integrates-nuclear-waste-services-9458408>

(9) 2022年3月：瑞士處置專責機構即將完成深層岩體鑽探作業

瑞士國家放射性廢棄物處置公司Nagra宣布，已成功完成深層岩體鑽探作業。深層地質處置計畫目前已接近一個重要的里程碑——即將提出建議處置設施場址。

Nagra公司在過去三年中針對瑞士放射性廢棄物處置設施的三處候選場址(Jura Ost、Nördlich Lägern和Zürich Nordost)共進行八次鑽探，最後的一處鑽井即將完成作業。根據鑽探結果，Nagra公司預計將於今年秋季向政府提出建議的處置設施場址。

政府核定的場址地點，須由瑞士聯邦委員會和國會做最終決定。必要時得進行全民公投。

Nagra公司的鑽探作業，全部鑽井總深度合計達10,000餘公尺，共取得6,000餘公尺的岩心和4,000餘個樣本。

本項鑽探作業全部費用約為1.7億瑞士法郎(約1.83億美元)。自2019年初以來瑞士北部所有地下調查作業的費用約為 2.4億瑞士法郎。

資訊來源：

<https://www.neimagazine.com/news/newsnagra-completes-deep-drilling-9540841>

(10) 2022年3月：意大利低放射性廢棄物處置計畫結束公眾諮議程序

意大利放射性廢棄物處置計畫經過一年的公眾諮議後，處置專責機構Sogin公司已向生態轉型部提交國家合格區域 (CNAI)的提案，以利設置國家放射性廢棄物處置設施暨技術園區。

2021年1月5日，Sogin公司曾發布國家潛在適宜地區(CNAPI)及處置計畫相關文件，共列出67處潛在處置設施址，並展開公眾諮議程序至2022年1月14日止。

公眾諮議程序分為三個階段。第一階段持續六個月，直到2021年7月5日，Sogin共收到300多項關於潛在場址與國家處置計畫的各方意見與技術建議。第二階段是9月7日至11月24日舉行的全國研討會。全國研討會由九次會議組成，含網路播放。全國研討會階段於12月15日結束，併發布會議總體報告。

在全國研討會結束後，在接下來的 30 天內舉行第三階段的公眾諮議，在此期間，利害相關者可根據全國研討會的總體報告，提交進一步的意見與技術建議。

生態轉型部在收到國家核子安全與輻射防護檢查局(ISIN)的技術意見後，必須與永續基礎建設和交通部(MSIM)達成協議，核定國家合格區域。之後，Sogin公司將公告潛在場址，並徵求地方政府共同設置國家處置設施的意願。

處置計畫規劃設置地表處置設施暨科技園區占地約150公頃，其中110公頃專用於處置設施，40公頃為科技園區。處置設施可處置約78,000立方公尺的極低微與低放射性廢棄物，以及貯存約17,000立方公尺的中與高放射性廢棄物。中與高放射性廢棄物未來將另建一處深層地質處置設施。處置設施附設的科技園區將成為對國際合作開放的研究中心，可以開展能源、廢棄物管理、與創新發展領域的活動。

意大利的放射性廢棄物目前貯存在大約20處暫貯地點。來源除了核燃料循環設施與核能電廠運轉與除役產生的放射性廢棄物外，亦包括來自醫療、工業及研究產生的放射性廢棄物。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Consultation-on-Italian-repository-concludes>

(11) 2022年4月：加拿大核廢棄物管理組織完成高放處置計畫選址鑽探工作

加拿大核廢棄物管理組織(NWMO)已完成其用過核子燃料處置計畫的深井鑽探作業，以瞭解兩處候選場址的地下地質情況，此將有助於選定最終處置設施場址。

NWMO為負責實施加拿大對用過核子燃料處置計畫的專責機構，自2010年展開選址程序。選址的基本原則是候選場址地方社區必須知情且願意，並且NWMO應致力確保所選定場址的安全性。

在2012年時，有22個社區表示有興趣參與處置計畫。其中11個社區進入選址初步評估過程的第二階段。到2019年底，候選場址名單已縮小到二處場址：一個是在Wabigoon的Ignace鎮，另一個是在Saugeen Ojibway Nation(SON)的South Bruce市。這兩處候選場址均位於安大略省。

NWMO在這兩處候選場址進行地表以下1,000公尺的鑽探作業，並鑽取岩石樣品(即所謂的岩心)，以瞭解當地的地下地質情況，據以研判場址是否符合安全管制要求。

South Bruce的2個鑽孔於2021年4月開始鑽探。在COVID-19大流行期間曾暫停。而在Ignace的6個鑽孔從2017年開始作業，於

2021年11月完成。South Bruce的最後一個鑽孔終於在近期完成，結束全程約五年的現地調查工作。在此期間，從這兩個候選場址共取得約8公里長的岩心。

未來選定一處場址後，將開始更詳細的場址特性調查、環境影響評估與申請執照程序。NWMO表示，可望在2023年完成選址程序。目前預計處置設施將於2033年開始建造，並在2040年至2045年之間開始運轉。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Canadian-waste-organisation-completes-borehole-pro>

(12) 2022年4月：德國Asse II處置設施廢棄物開發回收機器

德國工業服務廠商Bilfinger公司接受德國處置專責機構BGE的委託合約，正在發展、製造與測試特殊機器，以便使用於從750公尺深的Asse II低放處置設施中安全地回收放射性廢棄物。這是BGE在繼2021年10月後，數個月內委託給Bilfinger公司的第二個合約。這兩個合約的期程均為四年。

Bilfinger公司團隊將與其他行業夥伴合作發展特殊的原型機，使用遙控技術回收低放射性廢棄物。這些機器最初將經過廣泛的地表測試，然後才能在處置設施中安全的投入運轉。從採礦與放射化學的角度來看，750公尺深的回收工作極具挑戰性，其中大部分放射性物質處置在11個處置坑洞中。舊坑道難以進入，且處置坑洞一部分已回填鹽岩塊。回收作業除應符合核安的嚴格條件外，亦須遵守適用的礦業法規。這對機器的安全性以及防火、污染預防與作業步驟均有特別嚴格的要求。

Asse II低放處置設施原本是德國Braunschweig附近的一個舊

鹽礦場，在1960年代被做為低放射性廢棄物處置設施。放射性廢棄物以大約126,000個金屬桶處置在地下坑洞中，後來由於地下滲水，而有安全疑慮，因此德國政府決定將在未來數十年中，使用特殊機器進行回收，以便根據當前的技術與法律進行妥善處置。

資訊來源：

<https://www.neimagazine.com/news/newsbilfinger-supports-retrieval-rad-waste-from-asse-ii-mine-9648299>

(13) 2022年5月：美國薩凡納河場址最後一批超鈾放射性廢棄物已運往處置

隸屬於美國能源部位於南卡羅萊納州的薩凡納河場址(Savannah River Site, SRS)已將其最後一批歷史遺留的超鈾放射性廢棄物(TRU)運送至位於新墨西哥州的廢棄物隔離先導場(WIPP)進行最終處置。SRS從2011年以來，共進行了239次的運送作業。

運送作業係採用TRUPACT-III型專用護箱，使美國能源部得以運送大型的超鈾廢棄物例如手套箱、使用過的機件及受到鈾或其他人造放射性核種污染的大型分析設備等。TRUPACT-III型護箱寬度與高度為8英尺，長度為14英尺，裝載時重量約22.7噸，可由特製拖車進行運輸，於2011年首次投入使用。

WIPP在2014年時曾發生廠內卡車火災和輻射污染事件而暫時關閉，停止廢棄物運輸與接收作業。至2017年1月才恢復作業。

SRS設立於1950年代，用於生產製造核武器所需的基本材料，主要是氚和鈾-239。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Last-of-legacy-TRU-waste-from-SRS-arrives-at-WIPP>

(14) 2022年6月：芬蘭Posiva公司完成用過核子燃料封裝廠建造

2019年6月時，芬蘭負責處置用過核子燃料的Posiva公司委託芬蘭Skanska Talonrakenus營造公司執行用過核子燃料封裝廠的建造合約。該合約總價值約為4,500萬歐元(約4,800萬美元)。建造工程從2019年9月開工；至2022年5月底完工移交給Posiva公司，以便後續安裝作業系統和調試設備。封裝廠位於Olkiluoto地區，建物長約72公尺，寬約40公尺。

封裝廠是用過核子燃料最終處置設施的一部分。一旦最終處置作業開始後，用過核子燃料將從核能電廠的中期貯存設施轉運到封裝廠，在此封裝至由銅殼和鑄鐵內襯製成的最終處置罐中。隨後，處置罐將被轉移到位於地下400至450公尺深處的處置設施，並進一步放置到周圍以膨潤土緩衝材料環繞的處置孔中。

Posiva公司為芬蘭核電業者Fortum公司和Teollisuuden Voima Oyj公司共同集資成立的處置專責公司。Posiva公司於2000年選定位於Eurajoki市，且鄰近Olkiluoto核能電廠的處置設施場址。2001年，芬蘭國會通過該處置設施計畫的原則性決策。2015年11月，芬蘭政府核發處置設施建造執照，2016年處置設施開始施工。2021年12月30日，Posiva公司向芬蘭經濟事務與就業部提交封裝與最終處置設施的運轉執照申請。處置設施預計將於2023年開始運轉。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Finnish-fuel-encapsulation-plant-enters-installati>

(15) 2022年6月：加拿大NWMO完成用過核子燃料處置工程障壁驗證

加拿大核廢棄物管理組織 (Nuclear Waste Management

Organization, NWMO)，歷經8年餘的工作，完成了一項全尺寸工程障壁驗證計畫，該障壁將可安全地將該國用過核子燃料隔離於深層地質處置設施中。

NWMO係負責規劃和執行加拿大用過核子燃料處置計畫的專責機構。該國用過核子燃料最終將被放置在地下約500公尺深的地質處置設施中。在堅固母岩的天然障壁內部，共有一系列五個由工程和自然所組成的障壁，用於隔離用過核子燃料。其中工程障壁主要是用過核子燃料「處置罐」(由碳鋼製成，表面電鍍耐腐蝕的銅)，以及緊密包裝處置罐由夯實膨潤土製成的「緩衝材料箱」中。緩衝材料箱可提供處置罐額外的保護，防止腐蝕或劣化，且膨潤土可有效抑制地下水流動和微生物的生長。

NWMO的技術專家和工程合作夥伴為驗證工程障壁技術可行性，在安大略省Oakville市的NWMO的驗證測試設施中，設計和製造全尺寸的設備和組件，包含實際尺寸的地下貯存室模型，及內牆鋪設模擬的岩石瓷磚等。

在驗證的過程中，模擬處置作業將用過核子燃料處置罐封裝在緩衝材料箱中，然後將緩衝材料箱抬起來，精準地放入貯存室，然後從地板到天花板的所有剩餘空間都用鬆散顆粒狀的膨潤土填充。接著，貯存室被清空，以評估工程障壁系統的安裝情況。NWMO表示，目前正在進行深入分析，後續將獲得評估結果，並且得出結論，以因應正在持續進行的深層地質處置計畫的設計和規劃。

NWMO的用過核子燃料選址程序始於2010年，從22個志願社區，目前已縮小範圍至安大略省西北部的Ignace和安大略省南部South Bruce共2處候選場址，預計將在2023年確定場址。處置設施

建造前仍須經過嚴格的執照申請和管制決策程序。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Repository-engineering-demonstration-success-for-N>

(16) 2022年6月：加拿大發布用過核子燃料處置候選場址安全信心報告

加拿大核廢棄物管理組織 (Nuclear Waste Management Organization, NWMO) 針對2處評估中的用過核子燃料的深層地質處置候選場址發布「安全信心報告 (Confidence in Safety Reports)」°。該報告係基於多年的研究和場址調查成果，總結說明對安全性的認知現況。2處場址分別安大略省的Ignace及South Bruce。

NWMO表示，這2處候選場址有共同的特性可支持計畫的整體安全性。其特性包含位於穩定且地震頻率少的環境中，以及具備適當深度、寬度和體積的岩層來隔離將建在地下500多公尺深的處置設施。這2處候選場址岩層中均不具有經濟上可開發的資源，如礦物、鹽或天然氣，這降低了未來人類侵入處置設施的風險。

NWMO於2010年啟動選址程式，以地方知情且有意願為選址的首要條件。一開始有22個社區表示有興趣參與選址程序。至今已縮小範圍至2處候選場址，預計2023年可選定場址。

安全信心報告說明了NWMO的信心基礎，亦即可以在候選場址建立深層地質處置設施，以便安全與負責地長期管理加拿大用過核子燃料。安全信心報告將有利於跟候選場址當地公眾就處置計畫的後續推動進行溝通。

在確定最終處置設施場址後，其安全性將通過嚴格的處置設施設計和安全評估的管制審查來做確認。管制審查和執照申請程

序預計將需要大約10年的時間來完成。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Safety-reports-confirm-suitability-of-Canadian-rep>

(17) 2022年6月：芬蘭Posiva公司接收用過核子燃料處置孔鑽機設備

芬蘭Posiva公司已接收從德國運抵ONKALO用過核子燃料處置設施的DHBM處置孔鑽機，這是目前運抵ONKALO處置設施的最大設備。該處置孔鑽機由特製的拖運車輛從赫爾辛基長途運送至Olkiluoto，目前已卸載並移動至處置設施地下停放。

該處置孔鑽機係由Posiva公司委託德國Herrenknecht AG公司製造。從2020年春開工；2021年完工並進行工廠測試。處置孔鑽機的設計和製造是Posiva處置設施啟用專案計畫和生產準備工作的重要一步。在2022年下半年，Herrenknecht AG公司將按照用過核子燃料最終處置的概念和要求，進行處置孔鑽機的現地實際試驗。

該處置孔鑽機命名為Aava，長9.13公尺，寬3.15公尺，高3.93公尺，總重78噸。亦配備7公尺長，重22噸的電源設備；以及高4.1公尺，重18.5噸的鑽頭處理設備。

資訊來源：

<https://www.posiva.fi/en/index/news/pressreleasesstockexchangereleases/2022/posivareceivedadisposalholedrillingriginolkiluoto.html>

(18) 2022年7月：芬蘭用過核子燃料處置設施完成首批五條處置隧道開挖

2022年6月21日，芬蘭放射性廢棄物管理公司Posiva Oy宣布，位於Olkiluoto附近的Onkalo用過核子燃料處置設施，已經完成首

批5條處置隧道的開挖工作。5條處置隧道的開挖工程始於2021年5月，總長度約為1,700公尺，工程承包商為芬蘭YIT Suomi Oy公司，後續將在5條處置隧道地面鑽設約180個處置孔。首批5條隧道開挖總經費約5億歐元(5.2億美元)，涵蓋施工和處置設備安裝，以及第一條處置隧道的準備作業。

用過核子燃料將被放置在深度約450公尺的母岩中。處置系統係由密封的鑄鐵銅罐、膨潤土處置孔緩衝材料及隧道回填材料、隧道封塞結構物以及穩定的緻密岩石等所組成。

處置設施規劃運轉100年，將分期開挖約100條處置隧道，總長度達35公里，每條隧道的長度約為350公尺，高約4.5公尺，寬約3.5公尺。

芬蘭Onkalo用過核子燃料處置設施預計將在2020年代中期開始運轉，可望成為世界上第一個用過核子燃料處置設施。瑞典的Forsmark處置設施已取得建造執照，可望成為第二個。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/First-five-disposal-tunnels-excavated-at-Finnish-r>

(19) 2022年7月：英國第四個地區加入高放射性廢棄物處置選址計畫

英國英格蘭東部林肯郡(Lincolnshire)的Theddlethorpe地區同意參與高放處置選址計畫，成為社區夥伴關係(Community Partnership)，將考慮在附近海域地下安全設置處置設施的可行性。這是繼去年在英格蘭西北部坎布里亞郡(Cumbria)西部的3個地區之後，志願參與的第4個地區。英國放射性廢棄物管理專責機構「核廢棄物服務(NWS)」公司將成立工作小組，透過社區夥伴關係組織，在未來幾年內擴大與當地公眾的溝通，以便評估在

Theddlethorpe地區設置高放處置設施的可能性。

社區夥伴關係組織已開始招募成員，將逐步擴大公眾參與的規模，長期致力於促進當地公眾對於處置計畫的瞭解，並聽取意見。

針對Theddlethorpe地區，初步設想將一處舊的天然氣接收站改建為用過核子燃料地面接收設施，而將處置設施地下設施建造在海岸線外海的深層岩層中。

社區夥伴關係組織成立後，每年各地區可獲得100萬英鎊(約140萬美元)的建設基金，未來如果進行進一步的地質鑽探，則每年可增加至250萬英鎊。

英國預估高放地質處置設施的選址將須10至15年的時間。未來若發現Theddlethorpe有合適的地質條件，則需要進行公共支持度測試，由受影響的當地公眾發表意見。若未獲得公眾的支持，則不會繼續進行處置計畫。

先前已成立社區夥伴關係的3個地區為坎布里亞郡西部的Mid Copeland、South Copeland及Allerdale。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Fourth-location-joins-search-for-UK-repository-sit>

(20) 2022年7月：法國政府發布高放射性廢棄物地質處置設施法令

2022年7月7日，法國能源轉型部發布第2022-993號法令，宣布成立Cigéo深層地質處置中心，用於處置高放射性廢棄物和長半化期中放射性廢棄物。該法令認可地質處置設施專案計畫具有公共利益性和合法性。因此，同意法國放射性廢棄物管理專責機構Andra公司擔任地層處置計畫的執行單位，並得依法徵收土地與取

得建造許可。此外，同意建造地面和地下設施所需的土地面積約為33平方公里，跨越2個市的11個鄉鎮。

Andra公司於2012年8月向生態轉型部提交「關於地質處置設施專案計畫之公益事業聲明(DUP)」申請案，說明實施地層處置專案計畫相關的選項成本和效益，以及對社會經濟影響的評估結果。Andra公司規劃分兩個階段推進地質處置設施的建設，將在2030年左右開始試運轉，利用實際處置罐進行安全相關的測試與評估。然後，在取得運轉執照後，從2040年左右到2100年左右進行長半化期中放射性廢棄物處置，2080年左右至2145年左右進行高放射性廢棄物處置。

環境和可持續發展委員會(CGEDD)和地方政府等24個地方機構就Andra公司的公益事業聲明(DUP)申請提出意見。在2021年秋季舉行的公開聽證會上也收到了4,150份公眾意見。2021年12月，聽證會對公益事業聲明(DUP)做出正面的意見與建議。參考各方意見後，法國能源轉型部於是發布本次公益事業聲明(DUP)相關法令。法令內容共7條，要點如下：

- 認可地質處置設施之設置符合公共利益。
- 確認Andra公司為地層處置計畫執行單位。
- 確認地質處置設施所在地，並賦予Andra公司土地徵收權。
- 土地徵收截止日期為2037年12月31日前。
- 必要時，Andra公司應根據農業和海洋漁業法規定的條件賠償徵收農田造成的損失。
- 生態和土地統一部和能源轉型部負責主管本法令。

在提出公益事業聲明(DUP)申請之前，Andra公司即透過協商

購買和置換土地來逐步取得建造地質處置設施所需地面設施的用地。預估建設地質處置設施所需的土地面積如下：

- 地面設施斜坡道區：296公頃。
- 地面設施區：約202公頃。
- 場址間聯絡區：約46公頃。
- 專用鐵路用地：約121公頃。
- 地下設施配置面積：2,900公頃。

隨著法國政府發布法令，法國的高放地質處置設施專案計畫將從規劃階段進入商業化階段。Andra公司規劃於2022年底提出建造執照申請，以便開始建造處置設施。

資訊來源：

<https://www2.rwmc.or.jp/nf/?p=29517>

(21) 2022年7月：韓國核子安全委員核准中與低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施建造和運轉申請案

2022年7月7日，韓國核子安全委員會(NSSC)第160次核子安全委員會議決議，核准韓國放射性廢棄物專責機構(KORAD)於2015年12月24日提出的「中與低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施建造和運轉申請」案。第二期處置設施的處置概念採用將放射性廢棄物埋入地表附近人工結構物(混凝土窖)的方法，做法與日本運轉中的青森縣六所村低放射性廢棄物處置設施相同。獲得許可的處置容量為12.5萬桶(以200公升桶計算)。KORAD規劃於2025年啟用第二階段處置設施。

中與低放射性廢棄物處置中心位於韓國東部慶州市。第一期處置設施從2015年開始處置放射性廢棄物，採用岩層內處置倉設

計，由6個地下圓柱形處置倉組成，深度約110至160公尺，處置容量為10萬桶。

依據韓國工業、貿易和資源部(MOTIE)於2020年12月制定的「第二版中與低放射性廢棄物管理基本計劃」規劃分三個階段，確保到2027年可以處置38.5萬桶，以便接收核能電廠運轉與除役所產生的放射性廢棄物。

資訊來源：

<https://www2.rwmc.or.jp/nf/?p=29544>

(22) 2022年7月：韓國規劃於2060年啟用高放射性廢棄物最終處置設施

2022年7月20日，韓國產業通商資源部(MOTIE)在首爾舉辦高放射性廢棄物研發路徑圖討論會。會議中說明韓國政府為落實高放射性廢棄物(用過核子燃料)管理，將從明年開始到2060年為止，共投入1.4萬億韓元(約10億美元)用於研發(R&D)計畫。

韓國政府規劃以高放射性廢棄物研發路徑圖為基礎，完成運輸、貯存、選址與處置等4個領域，共104項關鍵技術和343項細部技術。目前，在104項關鍵技術中，已有22項建立本國技術能力，49項正在開發中，其餘33項待開發。韓國高放射性廢棄物管理技術與美國、瑞典與芬蘭等先進國家相比，運輸領域為84%，貯存領域為80%，但選址(62%)和處置(57%)技術水準仍然較低。因此，韓國政府規劃，除了到今(2022)年底已經投資的4,000億韓元外，今後還將持續投入9,002億韓元的研發費用；另外在地下研究設施建設上投入4,936億韓元。到2060年為止共將追加投資約1.4萬億韓元。

從核心領域來看，在運輸與貯存的30項關鍵技術中，尚未確定的23項技術，將通過國內研發(17項)、國際聯合研究(2項)、國外

引進(4項)等方式，到2037年全部建立。選址領域28項關鍵技術中，尚未獲得的19項技術將在2029年完成國內自主研發。另外，處置領域的46項關鍵技術中，尚有40項未建立的技術，將通過國內研發(37項)和國外引進(3項)等，到2055年前達成。

產業通商資源部後續在7月28日於大田舉辦選址與處置領域的討論會；8月4日於釜山舉辦運輸與貯存領域的討論會。同時亦將諮詢國際組織與先進國家同儕審查意見，以便在今(2022)年下半年徹底完善研發路徑圖。

此外，產業通商資源部表示，在擬定研發路徑圖的同時，將配套推動特別法的法制作業，內容包括安全處置高放射性廢棄物的程序、方式、時程、地區自願機制、新設專責機構等。

高放射性廢棄物研發路徑圖規劃於明年開始處置設施選址，將在2043年前完成集中式中期貯存設施；最終處置設施預定2060年啟用。

資訊來源：

<https://www.neimagazine.com/news/newssouth-korea-plans-interim-used-fuel-storage-by-2043-9878307>

(23) 2022年8月：德國Konrad低與中放射性廢棄物處置設施將建造作業廠房

德國聯邦放射性廢棄物管理公司(BGE)將委託Ed Züblin AG建設公司，在下薩克森州Salzgitter市的Konrad低放射性廢棄物處置設施開始建造作業廠房。

在Konrad場址新建的作業廠房，建物長度達到140公尺，將成為場內最大建築物，旁邊將建造一棟暫貯庫。作業廠房規劃從2023年第一季開始施工，預計於2025年完工。低與中放射性廢棄物處

置設施則規劃於2027年啟用。

啟用後，低與中放射性廢棄物包件將以公路或鐵路運抵處置設施，在作業廠房內進行輻射偵檢，重新包裝於處置容器內，再經由豎井運往地下處置區進行處置。若豎井檢修時，則廢棄物包件於作業廠房旁的暫貯庫臨時存放。

Konrad在1976年前原先為廢棄的鐵礦場，之後調查評估改建為低與中放射性廢棄物處置設施的可行性。2002年，下薩克森州環境部核准Konrad處置計畫，但遭遇反對訴訟。2007年聯邦行政法院裁定合法後，於2008年1月取得建造執照。2017年4月，改由BGE公司接替聯邦輻射防護辦公室(BfS)負責德國各處置設施的建造與運轉責任。

Konrad礦場將由BGE公司繼續改建為處置設施。處置設施的兩座豎井正在進行改造，並在地下設置必要的基礎建設，包括進行850公尺深處運轉隧道和處置區的開挖。地表設施如作業廠房的豎井捲揚機塔樓的興建工程等亦進行中。

Konrad處置設施最終將可容納65萬立方公尺來自核能電廠運轉和除役的廢棄物，以及來自工業、醫藥和研究單位產生的廢棄物。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Contract-for-waste-repackaging-building-at-Konrad>

(24) 2022年8月：美國深層隔離公司授權Amentum公司推廣高放處置技術

美國深層隔離公司(Deep Isolation)已與技術和工程服務提供者美國Amentum公司簽署了一份協議備忘錄，就深層隔離公司

的放射性廢棄物處置技術在世界各地的商業化服務進行合作。

總部位於加州柏克萊市的深層隔離公司，針對用過核子燃料和高放射性廢棄物的管理提出了一項解決方案，即將用過核子燃料置於深層水平鑽孔中的耐腐蝕罐中永久處置。該技術採用了現有的定向鑽井技術，廢棄物可以在確定的時間範圍內回收，也可以被永久處置。2019年，深層隔離公司曾公開展示技術概念，並透過鑽孔成功地將一個原型廢棄物罐放到地下數百公尺深處，隨後展示再回收的技術能力。

深層隔離公司將授權Amentum公司，允許該關鍵行業參與者獲得其受保護的智慧財產權。該協議的特點是可以獲得深層隔離技術的專利和工程工法，以及可以獨立應用深層隔離技術執行規劃和作業流程。新協議為Amentum公司提供了50多項受保護的深層隔離專利發明，以及工程規範和專用技術，這包括深層隔離公司既有技術符合國際管制要求、廢棄物貯存、利益相關方需求和視當地地質情況客製化技術服務的細節和流程。

Amentum公司是美國聯邦政府和部分盟國政府的主要承包商，提供國防、安全和情報、能源和環境清理等重要國家計畫的技術服務。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Deep-Isolation-licenses-disposal-technology-to-Ame>

(25) 2022年8月：加拿大高放處置選址進度將延遲一年至2024年選出優先場址

加拿大核廢棄物管理組織(NWMO)表示，由於COVID-19疫情大流行的影響，預計要到2024年底才能選定深層地質處置設施的

優先場址，而原先的進度是預計2023年會做出決定。

NWMO負責實施加拿大用過核子燃料處置計畫，亦稱為適應性分階段管理(AMP)計畫。該計畫於2010年啟動選址程序，選定的場址必須得到當地社區知情且願意的支援。NWMO則努力確保所選定場址的安全可靠。

2012年時，曾有22個社區表示有興趣瞭解處置計畫，並配合調查是否具有做為場址的潛力。其中有11個社區進入選址初步評估過程的第二階段。到2019年底，潛在場址社區的名單已縮小到兩個地點Ignace鎮與South Bruce市，二者均位於安大略省。

近期NWMO在滾動檢討五年實施計畫時，考慮到疫情的影響，決定變更選址的時程。目前新的規劃預計到2024年秋季將可選出一處優先場址。

NWMO表示，調整時間有利於潛在場址社區公眾有更多時間來審查與吸收新資訊，並深入考慮處置計畫是否符合他們的願景與優先事項。

一旦最終選定場址，其安全性將須通過對處置設施設計與安全論證的嚴格管制審查來確認。管制與執照申請過程預計需要大約10年才能完成。

NWMO表示，選定優先場址的時間調整將不會影響加拿大處置計畫的整體時程。處置設施的建造仍有望在2033年開始，處置設施的運轉預計將在2040年代初開始。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/One-year-delay-in-Canadian-repository-site-selecti>

工程

2022年8月26日，韓國慶州低與中放射性廢棄物處置設施舉行第二期工程開工儀式。第二期工程將興建一座近地表處置設施。

韓國放射性廢棄物管理公司(KORAD)於2015年提出處置設施第2期工程建造執照申請案。申請內容：將建造一座低放射性廢棄物近地表處置設施；容量為12.5萬桶(每桶200公升)低放射性廢棄物；佔地約12萬平方公尺；預計經費2,621億韓元(1.95億美元)；規劃於2024年完工。

第二期工程建造申請案於2016年7月獲得貿易、工業與能源部(MOTIE)核准。核子安全與保安委員會(NSSC)於2022年7月核發建造執照。

韓國慶州低與中放射性廢棄物處置設施第一期工程耗資1.56萬億韓元(15億美元)。選址程序始於1986年，即韓國第一部核能發電反應器Kori-1開始運轉八年後。第一期工程從2006年初開工，至2014年6月完工。第一期工程包含六個地下處置倉，每個處置倉高約40公尺，直徑約24公尺。第一期工程可以處置10萬桶(每桶200公升)低放射性廢棄物。NSSC於2014年12月核發第一期工程運轉執照。處置設施於2015年7月正式接收第一批廢棄物。

慶州低與中放射性廢棄物處置設施未來各期工程全部完工後總容量將可達80萬桶。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Expansion-of-South-Korean-waste-repository-begins>

(27) 2022年9月：瑞士選定Nördlich Lägern地區為深層地質處置設施建議場址

瑞士國家放射性廢棄物管理專責機構Nagra，在經過14年的選址過程後，提報瑞士北部的Nördlich Lägern地區為深層地質處置設施場址，並規劃在既有的Zwilag中期貯存設施處建造一座用過核子燃料封裝廠。

瑞士的三階段選址程序始於2008年。至2011年11月完成第一階段，選出6個地點。後續將在其中選出兩處場址，分別用於處置低與中放射性廢棄物(LLW/ILW)，及高放射性廢棄物(HLW)。LLW/ILW處置設施預計在2050年啟用；而HLW處置設施則在2060年啟用。

第二階段選址程序從2011年底展開，至2015年1月Nagra提案將候選場址縮小範圍至Zürich Nordost和Jura Ost兩個地區。其他四個地區列為備選。然而，2016年12月，瑞士聯邦核子安全檢查署(ENSI)提議將Nördlich Lägern地區也納入第三階段進行調查。2018年11月，聯邦委員會核可ENSI的意見，於第三階段進行三處地區的評選。

2022年9月，Nagra經過調查與評估後，認為三處候選地區都具備合格場址的安全條件，但Nördlich Lägern地區的黏土岩可提供最大的地質障壁效果、岩層穩定性佳且易於地下處置設施配置的彈性設計。故優先建議Nördlich Lägern地區為處置設施場址。處置設施的入口，亦即地表設施的位置可建在Zürich州Stadel社區的Haberstal村。

此外，Nagra亦決定燃料組件的封裝設施將不建造於處置設施場址，而是建造在Aargau州Würenlingen既有的Zwilag中期貯存設施內，毗鄰Paul Scherrer研究所。

目前，瑞士的HLW大部分被貯存在Zwilag核能電廠的運輸和

貯存護箱中，只有一小部分被貯存在Beznau核能電廠的乾式中期貯存設施。在進行深層地質處置前，HLW將被轉移到封裝廠，並密封於處置罐中。

Nagra表示，後續將準備處置設施和封裝廠的一般執照申請，預計將在2024年提交給聯邦委員會。在聯邦委員會和國會做出決定之前，聯邦政府與管制機關將對這些申請文件進行審查。申請案預計將於2030年左右獲得通過，屆時將舉行公投，讓瑞士公民擁有最終決定權。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Site-proposed-for-Swiss-repository>

(28) 2022年9月：美國能源部致力在高放射性廢棄物處置過程中建立信任關係

美國能源部(DOE)依據公眾意見回饋，發布「公眾意見摘述與分析」報告，釐清如何在基於同意的程序下，徵求用過核子燃料的集中式中期貯存設施場址與處置設施場址。能源部表示，隨著進程的推進，將努力建立社會信任關係。

2021年12月，DOE為用過核子燃料與高放射性廢棄物管理的集中式中期貯存設施與處置設施選址問題發布資訊徵求意見(RFI)文件，請公眾對「基於同意的選址程序草案」提供意見。藉此消除有意參與選址社區的疑慮，特別是蒐集歷史上對此議題未充分發表意見的團體和社區之看法。

DOE在徵求意見期間共收到來自各界的225份意見書，包括部落、州和地方政府、非政府組織、學術界和工業界的成員、其他利益相關者，以及個人評論。DOE總結分析回饋意見後，提出「公眾意見摘述與分析」報告。

報告中根據公眾意見確定了幾個關鍵議題，包括「對DOE和更廣泛的聯邦政府核廢棄物管理工作的不信任」。另一個關鍵議題是針對選址程序本身的運作方式和結果的「公平性」。公眾意見亦顯示出「在核能技術的必要性和優點方面存在強烈的意見分歧」，以及聯邦政府是否應該對商業用過核子燃料進行集中式中期貯存，也存在意見分歧。

報告中指出，DOE意識到，要取得聯邦用過核子燃料集中式中期貯存設施選址程序的成功，則須在合作、雙向溝通、資訊共用和問責制的基礎上建立穩固和信任的關係。

為了建立和維持這些關係，DOE表示，下一步將依國會的指示，以集中式中期貯存的潛在利益最大化的方式執行；通過內部和外部的變革，解決DOE目前的「信任赤字」，確保「基於同意的選址程序」是公平和包容的；注重選址結果的公平性，將社區的需求和福祉置於選址程序的核心；解決交通問題和相關規劃需求；在選址程序的各個方面，嚴肅應用安全、保安和其他準則，包括對希望進行獨立研究的社區給予支持。

2009年，美國放棄在雅卡山建立聯邦核廢棄物處置設施的計畫，而「基於同意的選址程序」草案的意見徵詢，被視為是重啟美國用過核子燃料管理計畫向前跨出的一步。

美國1982年公布的「核廢棄物政策法案」規定，DOE有責任在1998年前完成用過核子燃料處置設施建造，並向核電公司徵收資金。但處置設施延宕迄今，核電公司不得不自建貯存設施，因此向DOE提出訴訟，DOE被迫補償費用，並尋求解決之道。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/DOE-to-work-on-relationships-as->

(29) 2022年9月：英國將委託美國KBR公司配合執行地質處置設施計畫

英國的核廢棄物服務公司(NWS)將委託美國KBR公司執行地質處置設施(GDF)開發案，合約為期三年。KBR公司將為英國核子除役管理局(NDA)所屬的NWS提供地質處置計畫相關的專案管理、地方溝通和社區參與支援，技術設計以及數位和轉型策略制定。

根據NWS的一份新報告，在選址和建造用於處置高放射性廢棄物的地質處置設施期間，將可創造4,000多個工作機會。NWS預估地質處置設施的工作將持續約175年，預計每年平均產生2,000個工作機會。在此期間，地質處置設施可以提供大量的額外投資，並通過增加商業機會以及在整個地區發展新的或改進的基礎建設和設施來創造數千個額外的就業機會。

英國採取全國自願性的地質處置設施選址程序，其中包含數年的詳細調查，以確保可以安全可靠地建造與運轉。目前在Mid Copeland、South Copeland、Allerdale、Theddlethorpe等四個社區已成立「社區夥伴關係」組織，以促進當地公眾溝通。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/KBR-to-support-UK-repository-development>

(30) 2022年10月：英國Dounreay處置設施完成第一批低放射性廢棄物處置作業

英國負責運轉Dounreay低放射性廢棄物處置設施的Dounreay場址復育公司(DSRL)宣布，第一批16個貨櫃的低放射性廢棄物已完成處置與混凝土灌漿密封作業。

2006年7月，DSRL公司向英國蘇格蘭議會提出在Dounreay場址建造6個低放射性廢棄物處置窖的申請。議會在2009年4月核准申請案，隨後於2011年11月開始施工。2014年4月，處置設施第一期工程完成2個處置窖的建造，將分別用於處置Dounreay場址內核設施運轉與除役產生的低放射性廢棄物。

每個處置窖占地約1.8公頃，高度達11公尺。較大的處置窖長80公尺，寬50公尺；另一個處置窖則略小。處置窖為鋼筋混凝土結構物，建築在基岩上，並有鋼骨結構的遮棚。同時設置排水和抽水系統，確保在廢棄物置放階段使處置窖保持乾燥。

配套的處理廠從2015年4月開始積極調試，裝滿低放射性廢棄物的貨櫃會先灌漿處理，之後再運至處置窖進行處置。

處置設施將可處置最多17.5萬立方公尺的固體低放射性廢棄物，包含Dounreay場址過去運轉產生者以及未來除役期間產生者。

低放射性廢棄物類型包含受到放射污染的金屬、塑膠和破布等。按體積計算，低放射性廢棄物占Dounreay場址核設施拆除所產生的放射性廢棄物的80%以上。然而，按輻射危害計算，僅占不到0.1%。

從1954年到1994年期間，Dounreay場址是英國快中子反應器的研究和發展中心。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/First-waste-sealed-within-Dounreay-waste-vault>

(31) 2022年10月：美國WIPP處置設施完成第7處置區廢棄物置放作業

美國能源部(DOE)位於新墨西哥州的廢棄物隔離先導廠(WIPP)，係美國唯一的超鈾(TRU)放射性廢棄物處置設施。近期已

完成其第7處置區的置放作業，隨後廢棄物將移轉到新開挖的第8處置區進行處置。

超鈾放射性廢棄物以密封的廢棄物鋼桶盛裝，主要為美國國防工業產生受到少量銻和其他人工放射性元素污染的衣服、工具、破布、殘留物、碎片、土壤和其他物品等。運抵WIPP後處置於地下2000英尺深處鹽岩地層開挖出的處置區中。每個處置區為長300英尺，寬33英尺，高15-16英尺的地下室。開挖一個處置區需要開採近16萬噸岩鹽。

2022年10月20日WIPP達成重要里程碑，完成第7處置區的置放作業。置放於第7處置區的廢棄物容器總數為20,056個。最常見的容器是55加侖桶，總計近13,000個。第7處置區隨後將進行封閉作業。

第8處置區從2013年2月開始開挖，但由於地下卡車火災等事件，WIPP從2014年暫停運轉。直至2017年才恢復廢棄物處置作業，2018年恢復開挖作業。第8處置區的開挖工作於2021年10月完成，並於今年8月獲得新墨西哥州環境部的核准。

WIPP處置設施現已開挖8個處置區，未來規劃再開挖2個處置區。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Waste-emplacement-completed-at-seventh-WIPP-panel>

(32) 2022年11月：芬蘭用過核子燃料封裝廠完成乾燥系統安裝測試

芬蘭放射性廢棄物管理公司(Posiva)位於Olkiluoto的用過核子燃料封裝廠完成組件乾燥系統安裝，該系統用於將用過核子燃料密封於銅質外殼處置罐的前處理程序。

乾燥系統由芬蘭Platom Oy公司製造，並於2020年4月完成生產。在Posiva公司和Platom公司團隊的密切合作下，已於2022年10月完成現場安裝與驗收測試。

該封裝廠係Posiva公司的最終處置綜合設施的一部分。一旦展開最終處置程序，用過核子燃料將從中期貯存場運輸至封裝廠，並封裝至銅質外殼鑄鐵內襯的廢棄物罐。完成封裝與檢驗後的廢棄物罐再從封裝廠運到位於地下400至450公尺深度的處置設施地下隧道中，並進一步置放到由膨潤土緩衝材料包圍的處置孔中，完成最終處置。

2022年5月，封裝廠主體營建工程由芬蘭Skanska talonrakenus Oy公司完成建造並移交Posiva公司進行後續安裝及調試設備系統。封裝廠長約72公尺、寬約40公尺。

Posiva公司是芬蘭兩家核能發電公司Fortum和Teollisuuden Voima Oyj集資成立的處置專責公司。Posiva公司於2000年選定位於Eurajoki地區的Olkiluoto做為處置設施場址，該場址亦鄰近Olkiluoto核能電廠。芬蘭國會隨後第二年原則性同意通過處置設施計畫。2013年12月Posiva公司向勞動暨經濟部提交處置設施建造執照申請。Posiva公司研究Olkiluoto地區的岩石特性，並利用Onkalo地下實驗室的研究結果完成建造執照申請文件，後續該實驗室將擴大成為處置設施的基礎設施。芬蘭政府於2015年11月核發建造執照，Posiva公司於2016年開始施工。Posiva公司2021年底提出運轉執照申請，處置設施預計將於2023年啟用。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Fuel-drying-system-at-Finnish-encapsulation-plant>

(33) 2022年11月：中國高放處置地下研究實驗室開始隧道挖掘工程

中國甘肅省酒泉市附近的北山地下研究實驗室，已使用一台大型隧道鑽掘機，開始進行螺旋狀斜坡道開挖工程。該實驗室位於戈壁沙漠，地下設施將包括螺旋狀斜坡道、三個垂直豎井和水平的處置試驗隧道。

中國核工業集團公司(CNNC)宣布，已於11月18日開始，使用世界上第一台「大坡度螺旋隧道硬岩隧道鑽掘機」(稱為北山1號)進行該地下研究實驗室的斜坡道鑽掘。

北山1號機器長約100公尺，直徑約7公尺。可以進行200公尺水平曲線半徑和380公尺的垂直曲線半徑的轉彎。

2021年6月，北山地下研究實驗室舉行奠基儀式，將在地下560公尺的花崗岩中進行實驗，用於測試該地區是否適合長期處置高放射性廢棄物。

北山地下研究實驗室是中國「十三五」規劃(2016-2020年)列出的100個重大科學建設專案計畫之一。2019年，該專案計畫獲得中國國家原子能機構批准，指定中核集團北京核工業地質研究所為專案計畫負責單位。

北山地下研究實驗室地面設施佔地247公頃，總建築面積為2.39公頃。地下綜合體的總結構體積為514,200立方公尺，以及13.4公里長的隧道。建造費用估計約27.2億元人民幣(3.77億美元)，工期7年，規劃運轉時間為50年。如果後續研究證明該場址合適，到2050年將在附近建造一座高放射性廢棄物處置設施。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Excavation-of-Chinese-underground-lab-begins>

(34) 2022年11月：英國開發高放處置鑽孔密封技術

英國核廢棄物服務公司(NWS)位於英格蘭西南部Cornwall郡Rosemanowes採石場的鑽孔密封驗證計畫，已成功完成鑽孔密封，展示其高放地質處置設施(GDF)選址鑽探的技術能力。

英國高放處置計畫進行選址作業中，此為基於社區同意且面向全國的程序，其中包括多年的詳細調查。NWS目前已在Cumbria郡的Mid Copeland、South Copeland和Allerdale以及Lincolnshire郡的Theddlethorpe成立社區夥伴關係(Community Partnerships)組織以強化地方溝通，確保當地公眾獲得有關做為場址時的權利與義務資訊。

選址過程中，須進行深孔鑽探以調查該地的地質情況。鑽探後這些鑽孔需進行密封，以恢復原場地，盡量減少對環境的影響。因此，NWS正在進行一項耗資超過500萬英鎊(約600萬美元)的研究計畫，以驗證並向管制機關展示其深孔密封方法。

該研究計畫的最新階段是在Rosemanowes採石場實際進行鑽孔測試。Rosemanowes是一處廢棄的採石場，既有鑽孔測繪資訊完整。

兩個預先存在的花崗岩鑽孔深度分別為2公里與300公尺，藉由使用創新技術開發的井下放置系統(DPS)工具，已成功的完成密封。密封材料主要為膨潤土與水泥。膨潤土因其低滲透性和膨脹性能而做為密封劑，水泥則用於密封支撐。膨潤土廣泛分布世界各地，各國放射性廢棄物管理計畫亦多採用做為工程障壁系統材料。

研究計畫開發的DPS工具正在不同地點、不同岩石類型和不

同鑽孔深度進行測試。第一次成功的測試是2018年在瑞典的200公尺鑽孔中，隨後在牛津郡Harwell的300公尺粘土層鑽孔中。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/UK-demonstration-of-borehole-sealing-technology>

(35) 2022年12月：比利時制定高放射性與長半化期放射性廢棄物地質處置政策

比利時聯邦政府決定高放射性與長半化期放射性廢棄物處置策略，並立法制定正式的國家政策，以便進行安全與負責任的長期管理。根據2022年12月2日生效的法律，比利時放射性廢棄物與濃縮分裂材料管理機構(ONDRAF/NIRAS)將負責推動地質處置計畫，依決策可逆的原則，提出規劃送審，以便逐步確定國家方案，例如處置設施概念、母岩類型、選址方法與實施時程表等。

截至2022年11月底，比利時共有6部核子反應器在兩座核能電廠運轉，這些核子反應器由電力公司Elec travel公司擁有。對於高放射性與長半化期放射性廢棄物的處置方案，ONDRAF/NIRAS於2020年4月曾提出地質處置策略環境評估報告，並提出一項法令草案建議。

聯邦政府認可制定處置法令的必要性，以便(1)履行歐盟會員國的義務，將2011年歐盟通過的「用過核子燃料與放射性廢棄物管理指令」轉為國內立法，(2)履行放射性廢棄物管理的世代公平義務，(3)避免發生聯邦政府可能必須承擔的核子債務。比利時本次公布的法律及聯邦政府發布的「關於長期管理高放射性與長半化期放射性廢棄物的國家政策」文件中規定，將分階段逐步制定推動處置計畫的國家政策，至少包括四個方面：

- 逐步制定與維持國家政策運作的決策過程。
- 經與所有利害相關者協商後將確定可逆性、可回收性與監測期限的安排。
- 選擇長期管理高放射性與長半化期放射性廢棄物的方法。
- 選擇處置設施場址。

實際的實施方案將由ONDRAF/NIRAS提交聯邦政府審核，再制定高放射性與長半化期放射性廢棄物的正式國家政策。在決策過程中，ONDRAF/NIRAS必須考慮以下事項：

- 除考慮放射性廢棄物管理的各個方面及其相互依存性，即安全、保防與環境保護外，並應考慮到科學、技術、財政、社會與管制等方面。
- 以參與、公平與透明的方式作出決策。特別是在國家、區域與地方各層級，透過由專家與公民代表的審議程序，向所有利害相關者，包括民間社會提供知情參與的機會。
- 使發展地質處置技術所需的社會基礎建設與地質處置設施所在地的社區能夠長期和諧相處。
- 監測國家政策落實情形的方式。

ONDRAF/NIRAS將於2023年進行廣泛的社會討論，以確認與完善比利時地質處置計畫的方案。

資訊來源：

<https://www2.rwmc.or.jp/nf/?p=30150>

(36) 2022年12月：芬蘭用過核子燃料處置設施進行處置孔鑽孔與設備測試

芬蘭Posiva公司為該國高放射性廢棄物處置專責機構，於

2016年12月開始在Olkiluoto建造用過核子燃料處置設施。2022年12月5日，公司在開工6周年之際發布新聞稿說明處置設施的建造進展。

用過核子燃料處置設施位於芬蘭西南部波羅的海沿岸，由地面廢棄物罐封裝廠與地下400至450公尺深的處置區組成。

地下處置區從2021年5月開始開挖第一批的5條處置坑道。開挖工程於2022年6月完成，5條處置坑道的總長度為1,700公尺，坑道地面垂直鑽將設置共180個處置孔。2022年6月，德國一家專業公司交付處置孔的鑽孔設備。Posiva公司規劃從2023年使用模擬處置罐進行整合功能測試，以驗證一系列處置運轉的工作，其中亦包含德國製造的處置孔鑽孔設備。處置設施目前已開始進行處置孔的鑽孔作業與設備測試。

地面封裝廠於2019年6月開始建造，至2022年5月如期竣工。封裝廠用於接收核能電廠先前貯存的用過核子燃料，並將其從運輸護箱移轉與密封至銅質外殼鑄鐵內襯處置罐中。2022年10月，封裝廠完成用過核子燃料乾燥設備安裝；2022年11月封裝廠完成處置罐密封焊接設備安裝。

Posiva公司規劃於2023年完成綜合功能測試後，更新 2021年底提交的用過核子燃料處置設施運轉執照申請文件。處置設施實際運轉的時間估計約在2020年代中期。

資訊來源：

<https://www2.rwmc.or.jp/nf/?p=30176>

(37) 2022年12月：瑞典土地與環境法院同意SFR低放處置設施擴建環境許可

瑞典土地與環境法院已同意瑞典放射性廢棄物管理公司(SKB)擴建位於Forsmark地區的低與中放射性廢棄物最終處置設施(SFR)之環境許可。

SFR處置設施位於波羅的海海床下60公尺處，從1988年開始運轉。處置設施包括4條160公尺長的處置坑道與1個高50公尺的混凝土處置倉，用於處置低與中放射性廢棄物。兩條平行的長達一公里地下交通隧道將處置設施與地面連接。處置設施目前的處置容量約為63,000立方公尺。

SKB於2014年12月提出擴建申請，將使全部容量達到約18萬立方公尺。申請案審查意見於2019年11月由土地與環境法院及輻射安全局(SSM)提交給瑞典政府。2021年4月，SFR所在的Östhammar市政府也同意擴建申請。瑞典政府於2021年12月核定申請案。擴建申請案重新交由SSM與土地環境法院研定執照與許可條件。

SKB公司取得土地與環境法院的環境許可後，將可展開擴建工程。環境許可內容規定噪音、交通與其他對環境的影響等問題。

按照計畫，處置設施擴建後將新建6條長度240公尺至275公尺處置坑道，擴建深度為120公尺至140公尺，鄰近目前SFR處置設施的位置。

擴建工程預計需耗時6年。第一階段包含土木工程、水處理廠與其他基礎建設的建造。第二階段將在地下岩石中進行隧道開挖。

SKB公司將在2023年初向SSM提交初步安全報告，此為依核子技術法應進行的後續許可審查。

資訊來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/SKB-receives-environmental-permit-for-SFR-expansio>

表 4-1：2022 年放射性廢棄物處置國際動態資訊表

國家/機構	新聞分類	2022 年放射性廢棄物處置新聞標題
比利時	高放處置	• 2022.12 比利時制定高放射性與長半化期放射性廢棄物地質處置政策
加拿大	高放處置	• 2022.03 加拿大核廢棄物管理組織完成高放處置計畫選址鑽探工作 • 2022.06 加拿大 NWMO 完成用過核子燃料處置工程障壁驗證 • 2022.06 加拿大發布用過核子燃料處置候選場址安全信心報告 • 2022.08 加拿大高放處置選址進度將延遲一年至 2024 年選出優先場址
中國	高放處置	• 2022.11 中國高放處置地下研究實驗室開始隧道挖掘工程
法國	高放處置	• 2022.07 法國政府發布高放射性廢棄物地質處置設施法令
德國	低放處置	• 2022.01 德國 Asse II 處置設施招標廢棄物處理廠和中期貯存設施設計 • 2022.04 德國 Asse II 處置設施廢棄物開發回收機器 • 2022.08 德國 Konrad 低與中放射性廢棄物處置設施將建造作業廠房
芬蘭	高放處置	• 2022.01 芬蘭 Posiva 公司提出用過核子燃料處置設施運轉執照申請 • 2022.06 芬蘭 Posiva 公司完成用過核子燃料封裝廠建造 • 2022.06 芬蘭 Posiva 公司接收用過核子燃料處置孔鑽機設備 • 2022.07 芬蘭用過核子燃料處置設施完成首批五條處置隧道開挖 • 2022.11 芬蘭用過核子燃料封裝廠完成乾燥系統安裝測試

		• 2022.12 芬蘭用過核子燃料處置設施進行處置孔鑽孔與設備測試
義大利	低放處置	• 2022.03 意大利低放射性廢棄物處置計畫結束公眾諮議程序
韓國	低放處置	• 2022.07 韓國核子安全委員核准中與低放射性廢棄物處置中心第二期處置設施建造和運轉申請案 • 2022.08 韓國慶州低與中放射性廢棄物處置設施展開第二期工程
	高放處置	• 2022.07 韓國規劃於 2060 年啟用高放射性廢棄物最終處置設施
斯洛維尼亞	高放處置	• 2022.01 斯洛維尼亞評估研究用反應器用過核子燃料深層鑽孔處置可行性
瑞典	低放處置	• 2022.12 瑞典土地與環境法院同意 SFR 低放處置設施擴建環境許可
	高放處置	• 2022.01 瑞典核准用過核子燃料處置設施建造執照申請 • 2022.02 瑞典用過核子燃料處置設施建造案後續步驟
瑞士	高放處置	• 2022.03 瑞士處置專責機構即將完成深層岩體鑽探作業 • 2022.09 瑞士選定 Nördlich Lägern 地區為深層地質處置設施建議場址
英國	低放處置	• 2022.10 英國 Dounreay 處置設施完成第一批低放射性廢棄物處置作業
	高放處置	• 2022.01 英國成立第三個高放處置社區夥伴關係組織 • 2022.07 英國第四個地區加入高放射性廢棄物處置選址計畫 • 2022.09 英國將委託美國 KBR 公司配合執行地質處置設施計畫 • 2022.11 英國開發高放處置鑽孔密封技術
美國	低放處置	• 2022.02 美國 WIPP 處置設施通風設施升級工程取得重大進展 • 2022.05 美國薩凡納河場址最後一批超鈾放射性廢棄物已運往處置

		• 2022.10 美國 WIPP 處置設施完成第 7 處置區廢棄物置放作業
	高放處置	• 2022.01 美國國家實驗室參與瑞士高放處置膨潤土材料受熱研究計畫 • 2022.08 美國深層隔離公司授權 Amentum 公司推廣高放處置技術 • 2022.09 美國能源部致力在高放射性廢棄物處置過程中建立信任關係

註：日期表示新聞登載的月份

4.1.2 國際核能機構規範與專業技術報告蒐整

2022 年期間國際原子能總署(IAEA)與經濟合作暨發展組織核能總署(OECD-NEA)所發布放射性廢棄物處置相關重要規範與專業技術報告蒐整如下：

(1) 國際原子能總署(IAEA)

- GSG-16：放射性廢棄物管理安全之領導管理與文化
- NW-T-1.14(R1)：用過燃料與放射性廢棄物管理之現況與趨勢
- NW-T-1.16：放射性廢棄物處置之溝通與利害相關者參與
- NW-T-1.31：核子事故後放射性廢棄物管理之經驗：預先規劃的基準
- IAEA 核安與保安詞彙 2022 年版。。

http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CIG_FRA_web.pdf

(2) 經濟合作暨發展組織核能總署(OECD-NEA)

- NEA No. 7606：利害相關者對放射性廢棄物管理之信心。

<http://www.oecd-neo.org/rwm/pubs/2017/7373-rad-char-pers.pdf>

4.2 重要個案資訊研析

本案執行期間，特別針對國際資訊個案進行研析。所選定的研析主題是瑞士選定深層地質處置設施建議場址與芬蘭用過核子燃料處置設施運轉執照申請進度兩個案例。

(1) 瑞士選定深層地質處置設施建議場址^[117-122]

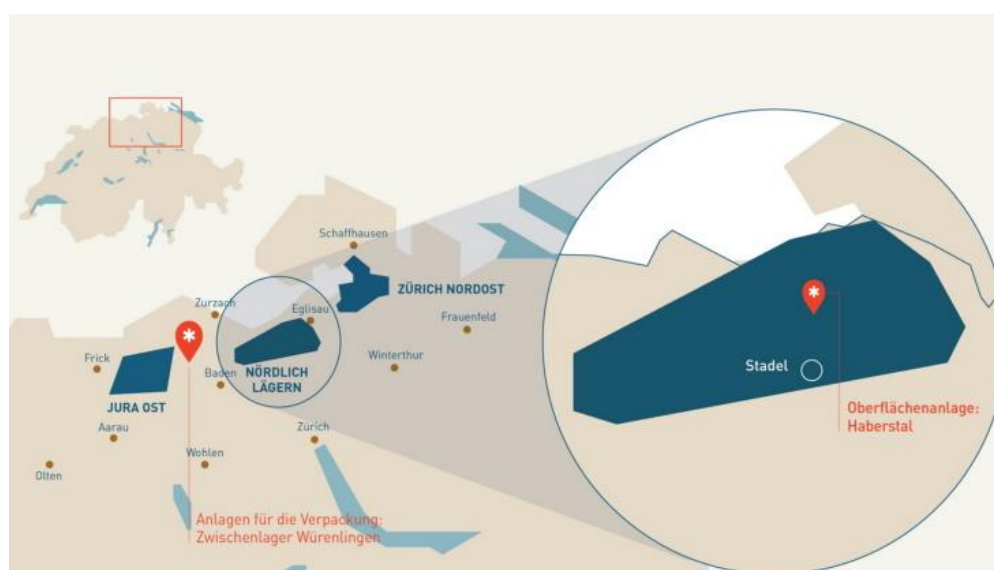
瑞士聯邦政府在能源辦公室(Federal Office of Energy, FOE)的主導下，擬定深層地質處置場選址程序，該程序於 2007 年進行廣泛的公眾諮商，包括瑞士全國以及鄰國。在根據回饋意見進行選址程序修訂後，瑞士聯邦委員會於 2008 年 4 月 1 日核准選址程序。

深層地質處置場選址程序界定選址的目標、程序與場址準則。選址程序的主要重點在於安全，其次為土地利用與社會經濟。聯邦能源辦公室(FOE)是選址程序的主導機關，協調土地利用規劃與環境影響評估等活動，規劃潛在選址區域的經濟發展等。瑞士國家放射性廢棄物處置公司(Nagra)負責選址作業。選址程序分為三個階段，其中定義所有利害相關者之間的協調方式與角色，且選址程序的每個階段均包含公眾諮商。各階段目標如下：

- 第一階段：進行區域篩選，選出數處符合安全準則的候選場址。
- 第二階段：選出至少 2 處以上的候選場址。根據初步安全評估比較潛在的處置場址，並闡明補充地質調查的必要性。實際進行地表調查與地球物理震測探勘。
- 第三階段：分別為低放與高放處置場選定一個處置場址(但也不排除將兩個處置場設在同一場址的方案)，並進行執照申請程序，實際進行地質鑽探作業。

至 2022 年 9 月，瑞士國家放射性廢棄物處置公司(Nagra)經過調查與評估後，認為 3 處地區均具備合格場址的安全條件，但以 Nördlich Lägern 地區的黏土岩可提供最大的地質障壁效果、岩層穩定性佳且易於地下處置設施配置的彈性設計。故優先建議以 Nördlich Lägern 地區為處置場址(圖 4-1)。

後續 Nagra 將準備處置場和封裝廠的一般執照申請，預計將在 2024 年提交給聯邦委員會。在聯邦委員會和國會做出決定之前，聯邦政府與管制機關將對這些申請文件進行審查。申請案預計將於 2030 年左右獲得通過，屆時將舉行全國公投，讓瑞士公民擁有最終決定權。預計 2050 年左右啟用低放處置場；2060 年啟用高放處置場。



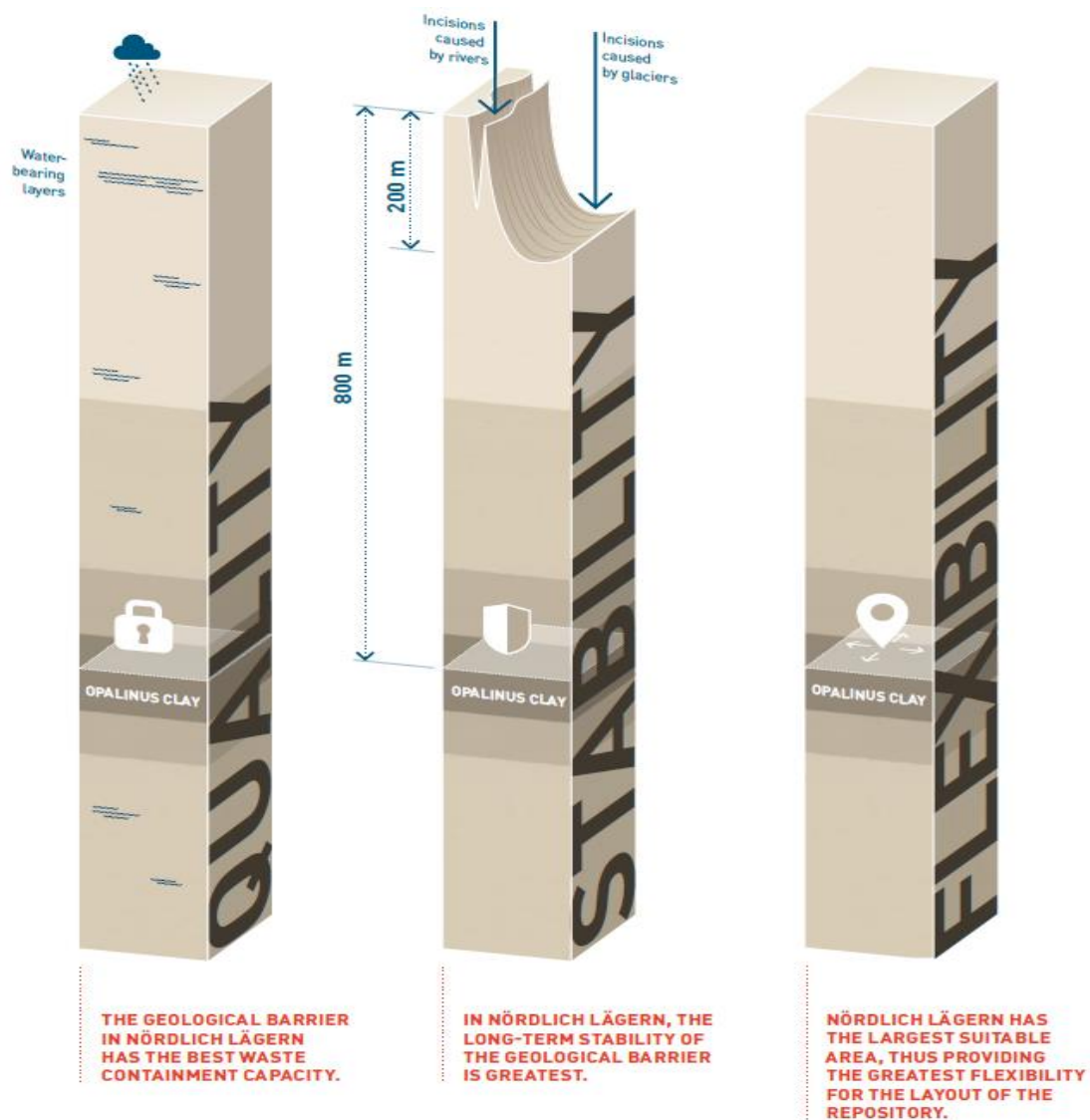
(引用自 <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Site-proposed-for-Swiss-repository>)

圖 4-1：瑞士北部 Nördlich Lägern 深層地質處置場址位置圖

在發布選址新聞的同時，瑞士國家放射性廢棄物處置公司(Nagra)亦發布一份 35 頁的計畫說明文件^[117]，以及四份頁數在 4 頁至 6 頁之間的補充資訊^[116-119]，做為公眾溝通的說帖。著重強調優先選擇 Nördlich Lägern 為場址係基於下列的科學考量：

- 地質障壁的品質：Opalinus 黏土層是設置地下處置坑道的目標地層。根據 Opalinus 黏土層中存在的古老孔隙水，顯示其具有良好的圍阻放射性廢棄物能力，即良好的障壁性能。而 Nördlich Lägern 場址的 Opalinus 黏土層中存在最古老的孔隙水，且與鄰近的含水層有最遠的距離。
- 地質障壁的穩定性：Opalinus 黏土層不僅必須在現代安全地圍阻放射性廢棄物，而且在遙遠的未來也是如此。冰河與河流侵蝕等自然作用可能會改變地表與地下的情況。Nördlich Lägern 場址所在之處的 Opalinus 黏土層深度更深，可以為處置場提供最好的保護，使其免受此類作用的影響。因此，該場址可確保最大的長期穩定性。
- 變通彈性：由於 Nördlich Lägern 場址的地下岩層具有最大的完整面積，且無重大的地質斷層，因此，可以為處置場的建造提供最大的變通彈性。

從瑞士國家放射性廢棄物處置公司(Nagra)的角度來看，Nördlich Lägern 場址整體安全性最好且空間範圍足夠大，是最適合建立深層地質處置場的地區(參見圖 4-2)。



資訊來源：[118]

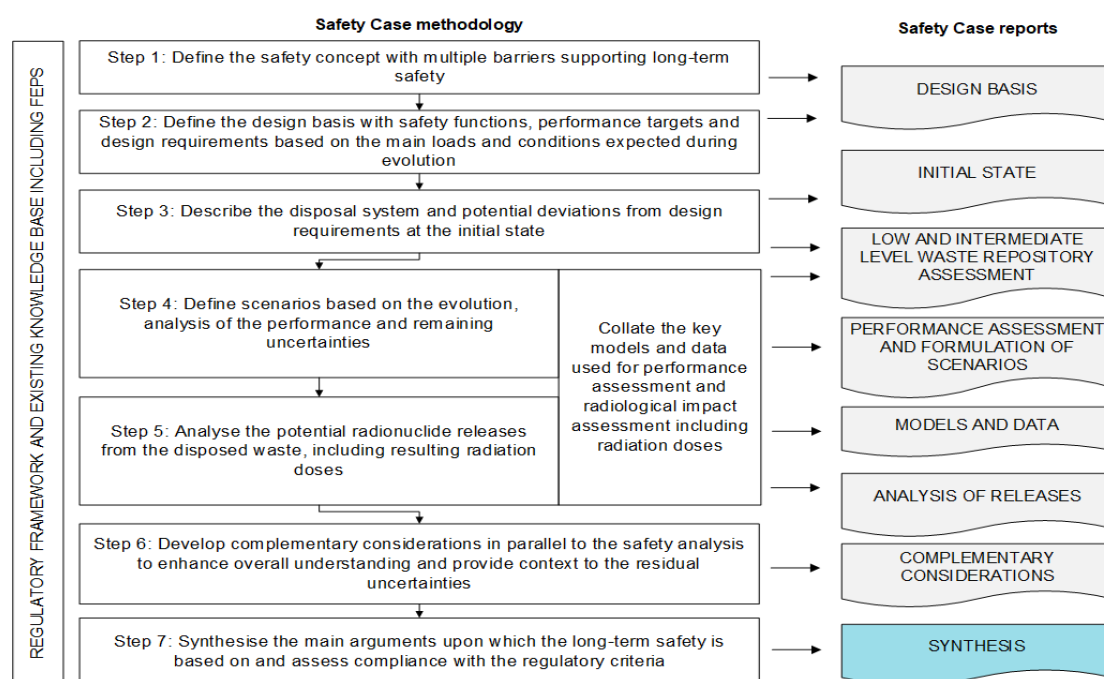
圖 4-2：瑞士選擇 Nördlich Läger 深層地質處置場址的理由示意圖

(2) 芬蘭用過核子燃料處置設施運轉執照申請進度^[123-131]

芬蘭是國際上用過核子燃料處置計畫進度最快的國家，其經驗與作法備受國際矚目。芬蘭處置專責機構 Posiva 公司於 2021 年 12 月 30 日向經濟事務暨勞動部(TEM)提出運轉執照申請。核安主管機關芬蘭輻射和核子安全管理局(STUK)於 2022 年 5 月完成申請執照文件完備性的程序審查，後續將進行技術細節的實質審查作業。此外，2022 年下半年處置場完成首批五條處置隧道開挖，

並進行處置孔鑽孔設備的接收測試，與地表封裝廠相關設備的驗收與測試等。

執照申請案的關鍵文件為安全論證報告(Safety Case reports)。安全論證報告共一式 8 冊，但因檔案過於龐大，Posiva 公司並未發布單獨的 Pdf 格式檔案，而是設置內容管理系統(Content Management System, CMS)，讓讀者經由網路註冊後(網址：<https://cms.posiva.fi/>)，以網頁方式進行瀏覽。安全論證的簡要流程與報告體系如圖 4-3 所示。



資訊來源：[120]

圖 4-3：芬蘭深層地質處置場運轉執照申請安全論證流程與報告

芬蘭深層地質處置場運轉執照申請安全論證(簡稱為 SC-OLA)報告的名稱、目的與內容章節架構，彙整如表 4-2 所示。

表 4-2：芬蘭深層地質處置場運轉執照申請安全論證報告名稱、目的
與內容章節架構

1	報告名稱	整合(Synthesis)
	報告目的	描述整體分析方法，彙集所有安全論點，以及信心說明和對長期安全符合法規要求的評估
	章節架構	1.前言 2.管制體系 3.安全論證方法 4.處置系統及其發展歷程 5.安全概念及設計基準 6.處置系統初始狀態 7.處置系統演化和情節 8.核種釋出分析 9.模型和輸入資料 10.補充考慮因素 11.安全論證總體品質 12.結論 13.後續發展計畫
2	報告名稱	設計基準(Design Basis)
	報告目的	說明安全功能、性能指標和設計要求、設計基準及其之間的關聯
	章節架構	1.前言 2.管制和利害相關者的要求 3.安全概念和安全功能 4.用過核子燃料 5.廢棄物罐 6.緩衝材料 7.回填材料和處置隧道封塞材料 8.封閉 9.母岩和地下開挖

		10.LILW 處置場的設計基準 11.結論
3	報告名稱	初始狀態(Initial State)
	報告目的	說明地下處置系統的初始狀態和地表環境的現況
	章節架構	1.前言 2.初始狀態的定義 3.場址和岩床的初始狀態 4.地下開挖初始狀態 5.母岩初始狀態 6.用過核子燃料初始狀態 7.廢棄物罐初始狀態 8.緩衝材料初始狀態 9.回填材料初始狀態 10.封閉組件初始狀態 11.不符合判定的初始狀態 12.初始狀態偏差和不確定性 13.結論
4	報告名稱	低與中放射性廢棄物處置場評估(Low and Intermediate Level Waste Repository Assessment)
	報告目的	說明 LILW 處置場的初始狀態、對其長期性能的評估以及其與 SNF 處置設施的交互影響
	章節架構	1.前言 2.設計基準 3.評估方法 4.LILW 處置場初始狀態 5.LILW 處置場演化 6.性能指標的實現和不確定性 7.結論
5	報告名稱	性能評估與情節建構(Performance Assessment and Formulation of Scenarios)

	報告目的	評估性能指標的實現情況，同時考慮到預期和替代的氣候和地表環境演化；根據評估中的不確定性/偏差建構情節
	章節架構	1.前言 2.情節建構方法 3.處置系統演化和不確定性 4.關鍵因素和關鍵因素狀態的規範 5.情節規範 6.處置系統在情節中的性能 7.結論
6	報告名稱	模式與資料(Models & Data)
	報告目的	說明用於性能評估和釋出分析的模型和資料管理方法
	章節架構	1.前言 2.模型和資料的管制要求 3.建模策略 4.資料管理策略 5.性能評估的模型和資料 6.釋出分析的模型和資料 7.結論
7	報告名稱	釋出分析(Analysis of Releases)
	報告目的	放射性核種釋放和從地下處置系統到地表環境遷移模擬的主要結果概述，並評估其放射性後果
	章節架構	1.前言 2.法令和管制要求 3.總體分析作法 4.基本情節中 LILW 處置場的釋出 5.靜態圍壓導致的 SNF 廢棄物罐失效 6.岩石剪切導致的 SNF 廢棄物罐失效 7.腐蝕導致的 SNF 廢棄物罐失效 8.「萬一？」案例

		9.結論
8	報告名稱	補充考量(Complementary Considerations)
	報告目的	其他支持安全性的證據，包括天然和人為類比
	章節架構	1.前言 2.廢棄物導致的放射性危害和地質處置的需要 3.影響處置系統的外部和大規模作用 4.放射性物質處置的穩定性 5.處置場材料的穩定性和性能 6.母岩情況的穩定性 7.一百萬年後處置系統的演化 8.補充指標 9.結論

資訊來源：[124-131]

Posiva 公司的核廢棄物管理包括用過核子燃料(SNF)處置設施與低與中放射性廢棄物(LILW)處置場計畫。LILW 產源將來自於 SNF 封裝廠的運轉和除役作業。目前處置設施設計包括一個深度約 180 公尺的 LILW 處置場並與約 400 至 500 公尺的 SNF 處置設施，兩者通道相連。因此，在 Posiva 處置設施申請營運許可的安全論證報告中，SNF 處置計畫中考量可能受到 LILW 處置庫影響而也被納入長期安全評估^[127]。

LILW 處置場的性能評估考慮了最可能影響處置場功能與安全的特徵/事件/作用(FEPs)，以及與設計要求的潛在偏差。經由各種影響因素的分析，並依據工程設計前提與地質環境的初始條件建立處置概念之安全功能，訂定處置場個別系統之安全功能指標，並於安全評估時間尺度內進行處置場各種情節的演化評估。LILW 處置場計畫採用與 SNF 處置設施相同的安全論證方法，依本安全論證報告結果顯示，在 SNF 處置計畫的現階段，LILW 處置場長期安全評估的詳細程度被

認為是足夠的，並且依據 LILW 處置場障壁系統在設計基礎上所設定的性能指標於時間尺度演化的安全評估結果獲得了極大的信心，據此結果，LILW 處置場規劃將在未來幾十年內建造完成^[127]。

LILW 處置場對於 SNF 處置設施的潛在影響，主要是考量放射性廢棄物衰變核種的遷移活動。對於核種釋出的整體性能評估和分析，更新其核種傳輸地下水流模型。對於核種遷移的結論，由於已考慮在確定的水文地質特性區域進行模擬分析，因此地下水流模型的更新預期不會顯著改變該區域或其附近母岩的特性。因此，經過演化評估後，預期在長達 10 萬年及更長時間尺度內，LILW 處置場對 SNF 處置設施將不會產生重大的影響，歸因於 SNF 地下處置設施與 LILW 處置庫處置深度不同的設計，及工程障壁的功能設計避免了相互之間的潛在影響^[127]。

4.3 國際動態資訊綜合討論

由第 4.1 節所蒐整的 2022 年放射性廢棄物處置相關國際資訊，可以分別就低放處置與高放處置歸納出觀察結論如後述。

(1) 低放射性廢棄物處置國際趨勢

- 不論是配合核能產業的持續發展或者是因應核子設施的除役，低放處置場仍有其需求。例如德國 Konrad 建造中；韓國慶州處置場展開第二期工程；瑞典 SFR 低放處置場取得擴建環境許可；英國 Dounreay 處置場完成新設施的第一批廢棄物處置作業等。
- 低放處置場的選址關鍵影響因素，仍在於公眾與地方是否認同。例如意大利低放處置計畫積極實施公眾諮議程序。

(2) 高放射性廢棄物處置國際趨勢

- 高放處置仍是核能國家具有挑戰性的課題，2022 年核能產業界的國際新聞中，各國高放處置計畫的進展仍佔有相當重要的比例。
 - 2022 年對某些核能國家而言是高放處置計畫的重要里程碑。例如芬蘭已進入運轉執照審查階段；瑞典建造執照申請獲得政府核准；瑞士選定建議場址等。
 - 階段性檢討與更新處置政策/計畫是各國通常採取的措施。例如比利時制定新的高放處置政策；韓國發布新的研發路徑圖等。
 - 鑽探技術是選址過程中取得深層地下資訊的重要方法，且耗費時間與經費。例如加拿大完成階段性鑽探工作，將於 2024 年選出優先場址；瑞士完成鑽探工作後，選出建議場址；英國開發高放處置鑽孔密封技術等。
 - 深層鑽孔處置技術雖尚無實例，但仍持續推廣中。例如斯洛維尼亞評估深層鑽孔處置可行性；美國深層隔離公司授權協力廠商推廣深層鑽孔處置技術等。
- (3) 公眾溝通仍是高放處置計畫推動過程的核心工作。例如英國成立第四個高放處置社區夥伴關係組織；美國能源部徵求社區參與溝通計畫等。

5. 結論與建議

本章總結說明本專業服務勞務採購案成果之結論，並提出後續進一步進行研究發展之建議。

5.1 報告結論

本專業服務勞務採購案完成下列 3 項重要工作項目，並提出研析成果：

(1) 放射性廢棄物處置計畫資訊跨世代保存之國際資訊研析

OECD/NEA 發起紀錄、知識與記憶保存倡議，目的係基於世代正義的理念，避免未來世代無意闖入處置設施，並維護後代人類與環境的安全。本報告針對該倡議的任務目標，以及紀錄、知識與記憶保存之目的與需求、挑戰、特性、方法、關鍵資訊檔案(KIF)與整套必需的紀錄(SER)等進行重點研析，並綜合討論我國可能的實施策略與建議方案。

(2) 放射性廢棄物管制體系與高放射性廢棄物處置研發策略之韓國經驗研析

韓國為世界上核能發電量排名第五的國家，其處置計畫推動概況與技術發展過程極具參考價值。本報告彙整韓國網路文獻資訊，完成以下研析成果：

- (A) 韓國核能發展與核能後端營運概況資訊之蒐整。
- (B) 韓國高放射性廢棄物處置計畫推動概況資訊之蒐整。
- (C) 韓國場址調查與安全評估技術發展之研析。
- (D) 綜合探討韓國之優良實務經驗。

成果可提供核安會做為安全管制的科學參考基準，以及與各利害相關者溝通的素材。

(3) 放射性廢棄物處置國際動態資訊研析

本報告摘譯 37 則 2022 年度有關放射性廢棄物處置國際動態資訊的新聞，並針對瑞士選定深層地質處置設施建議場址與芬蘭用過核子燃料處置設施運轉執照申請進度兩個案例做進一步的研析。總結歸納國際趨勢顯示，2022 年核能先進國家多數積極參與高放處置計畫的發展：芬蘭、瑞典與瑞士的高放處置計畫均達成重大的里程碑；加拿大、德國與英國選址中；韓國與美國籌劃選址前的溝通。

5.2 心得建議

他山之石可以攻錯，借鑑國際的優良實務經驗有助於我國處置計畫的發展，提升技術符合國際安全水準。由於各國放射性廢棄物處置技術日新月異，建議後續仍應持續關注芬蘭、瑞典、瑞士與韓國及其他技術先進國家的動態，適時進行國際資訊之彙整更新。

參考文獻

1. IAEA, 2023, Power Reactor Information System (PRIS), International Atomic Energy Agency. <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
2. IAEA, 2023, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/joint-convention-safety-spent-fuel-management-and-safety-radioactive-waste>
3. OECD/NEA, 2023, Radioactive Waste Management and Decommissioning Programmes in NEA Member Countries, Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_33688/radioactive-waste-management-programmes-in-nea-member-countries
4. WNN, 2023, Waste & Recycling, World Nuclear News. <https://www.world-nuclear-news.org/Waste-Recycling>
5. IAEA, 1999, Maintenance of Records for Radioactive Waste Disposal, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1097.
6. IAEA, 2008, The Management System for the Disposal of Radioactive Waste, International Atomic Energy Agency, Safety Guide GS-G-3.4.
7. IAEA, 2012, Knowledge Management for Nuclear Research and Development Organizations, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1675.
8. IAEA, 2016, Knowledge Management and Its Implementation in Nuclear Organizations, International Atomic Energy Agency, Nuclear Energy Series NG-T-6.10.
9. IAEA, 2018, Nuclear Knowledge Management Challenges and Approaches, International Atomic Energy Agency, Summary of an International Conference Vienna, Austria, 7–11 November 2016.
10. Pescatore, C., 2014, Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations. An Overview of the Eponymous OECD/NEA Project – 14425, WM2014 Conference, March 2-6, 2014, Phoenix, Arizona, USA.
11. OECD/NEA, 2020, Preservation of Records, Knowledge and Memory

- (RK&M) Across Generations, Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency. <https://www.oecd-neo.org/rwm/rkm/>
12. OECD/NEA, 2019, Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations - Final Report of the RK&M Initiative, Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, NEA No. 7421.
 13. OECD/NEA, 2019, Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations - Developing a Key Information File for a Radioactive Waste Repository, Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, NEA No. 7377.
 14. OECD/NEA, 2019, Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations - Compiling a Set of Essential Records for a Radioactive Waste Repository, Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, NEA No. 7423.
 15. OECD/NEA, 2013, Glossary of Terms - NEA Project on Long-term Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations, Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, NEA/RWM(2011)14/REV3.
 16. SFOE, 2019, How to Keep the Memory of Nuclear Waste Alive, Swiss Federal Office of Energy.
 17. SSM, 2021, Redovisning av regeringsuppdrag om metoder för säkerställande av information och kunskap över lång tid för slutförvaret för kärnbränsle, Strålsäkerhetsmyndigheten, 2021:24.(瑞典文)
 18. 陳誠一，2020，放射性廢棄物處置紀錄、知識與記憶保存，國原院對內報告，INER-15340。
 19. ICRP, 2013, Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, The International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 122, Annals of the ICRP, V 42.
 20. EC, 2011, The Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 Establishing a Community Framework for the Responsible and Safe Management of Spent Fuel and Radioactive Waste.
 21. NSSC，2020，사용후핵연료 관리 및 방사성 폐기물관리안전 공동협약，에 대한제7차 국가보고서 (用過核子燃料管理安全與放射性廢棄物管理安全聯合公約-第七次國家報告)。

22. NEI, 2023, South Korea to Increase Nuclear Share to More Than 34% by 2036, Nuclear Engineering International. <https://www.neimagazine.com/news/newssouth-korea-to-increase-nuclear-share-to-more-than-34-by-2036-10523129>
23. METI, 2022, 諸外國における高レベル放射性廃棄物の処分について(2022年版), 経済産業省資源エネルギー庁。
24. NSSC, 2023, Nuclear Safety and Security Commission. <https://www.nssc.go.kr/en/index.do>
25. NSSC, 2017, Korean Sixth National Report Under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Nuclear Safety and Security Commission.
26. KORAD, 2023, Korea Radioactive Waste Agency. <https://www.korad.or.kr/korad-eng/index.do>
27. KORAD, 2023, Korea Radioactive Waste Agency. https://www.korad.or.kr/korad/board/index.do?menu_idx=34&manage_idx=15
28. KORAD, 2023, Korea Radioactive Waste Agency. https://www.korad.or.kr/korad/html.do?menu_idx=158
29. MOTIE, 2021, 제2차 고준위 방사성 폐기물관리 기본계획(안)(第二版高放射性廢棄物管理總體規劃草案)。
30. MOTIE, 2022, 고준위 방사성 폐기물 R&D 로드맵(안) - 고준위 방폐물의 안전한 관리를 위한 기술 청사진(高放射性廢棄物研發路徑圖草案- 高放射性廢棄物安全管理技術藍圖)。
31. Kim, C-S., Bae, D-S., Kim, K-S., Koh, Y-K., 1999, Lithological Suitability for HLW Repository in Korea, IAEA-SM-357/67.
32. Chun, K-S., Choi, J., Kang, C-H., and Park, H-S., 1999, Approaches for Developing the Reference Concept of a Geological Disposal System and the Relevant R&d Status in Korea, Korea Atomic Energy Research Institute.
33. Choi, J., Kang, C-H., Chun, K-S., and Park, H-S., 2000, Development of A Deep Geological Repository System for High-level Waste in Korea: R&D Activities and Status, Nuclear Cooperation Meeting on Spent Fuel and HLW Storage and Disposal (March 7-9, 2000, Las Vegas).
34. Hwang, Y-S., Kang, C-H., Kim, S-G., Lee, Y-M., and Han, K-W., 2003,

Progress of R&D on Total System Performance Assessment of a Potential High-Level Radioactive Waste Repository in Korea, Progress in Nuclear Energy, Vol. 42, No. 2, pp.199-220.

35. Kwon, S., Cho W-J., and Han, P-S., 2006, Concept Development of an Underground Research Tunnel for Validating the Korean Reference HLW Disposal System, Tunnelling and Underground Space Technology 21, pp.203–217.
36. Cho, W-J., Kwon, S., and Park, J-H., 2008, KURT, a Small-scale Underground Research Laboratory for the Research on a High-level Waste Disposal, Annals of Nuclear Energy 35, pp.132–140.
37. Park, K-W., 2009, Construction of the Geological Model around KURT Area based on the Surface Investigations, J. of the Korean Radioactive Waste Society Vol. 7(4), pp. 191-205.
38. Park K-W., Kim, K-S., Koh, Y-K., and Choi, J-W., 2011, Synthetic Study on the Geological and Hydrogeological Model around KURT, J. of the Korean Radioactive Waste Society Vol.9(1), pp.13-21.
39. Park, C-K., Lee, J-W., Baik, M-H., and Jeong, J-T., 2012, Preliminary Modeling for Solute Transport in a fractured Zone at the Korea Underground Research Tunnel (KURT), Nuclear Engineering and Technology, Vol.44, No.1.
40. Kim, K-S., Park, K-W., Kim, G-Y., and Choi, H-J., 2012, Potential Repository Domain for A-KRS at KURT Facility Site, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol.10(3), pp. 151-159.
41. Park, K-W., Kim, K-S., Koh, Y-K., and Choi, J-W., 2012, Hydrogeological Properties of Geological Elements in Geological Model around KURT, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol.10(3), pp. 199-208.
42. Ko, N-Y., Park, K-W., Kim, K-S., and Choi, J-W., 2012, Groundwater Flow Modeling in the KURT site for a Case Study about a Hypothetical Geological Disposal Facility of Radioactive Wastes, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol.10(3), pp.143-149.
43. Ko, N-Y., Jeong, J., Kim, K-S., and Hwang, Y., 2013, Travel Times of Radionuclides Released from Hypothetical Multiple Source Positions in the KURT Site, JNFCWT(Korean) Vol.11 No.4, pp.281-291.
44. SNL, 2014, International Collaborations on Fluid Flows in Fractured Crystalline Rocks: FY14 Progress Report, Sandia National Laboratories, SAND2014-16913R.

45. 조완형, 백민훈, 박태진, 2016, Occurrence and Long-term Stability of U-Th Containing Minerals in the KURT Granite, 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집(韓國放射性廢物學會秋季會議論文摘要)。
46. 이재원, 이창수, 김건영, 김경수, 2016, TOUGH2-MP/FLAC3D 코드를 이용한 In-DEBS 복합거동 예비 평가(使用程式初步評估In-DEBS 複合行爲), 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집(韓國放射性廢物學會秋季會議論文摘要).
47. Kim, G-Y., G-Y., Kim, K., Lee, J-Y., Cho, W-J., W-J., and Kim, J-S., 2017, Current Status of the KURT and Long-term In-situ Experiments, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng. Vol. 54, No. 4, pp.344-357.
48. Park, K-W., Ko, N-Y., and Ji, S-H., 2018, Construction of Hydrogeological Model for KURT Site Based on Geological Model, Econ. Environ. Geol., 51(2), pp.121-130.
49. Jo, Y., Chang, C., Ji, S-H., Park, K-W., 2019, In Situ Stress States at KURT, an Underground Research Laboratory in South Korea for the Study of High-Level Radioactive Waste Disposal, Engineering Geology 259, 105198.
50. Lee, C., Yoon, S., Cho, W-J., Jo, Y., Lee, S., Jeon, S., and Kim G-Y., 2019, Study on Thermal, Hydraulic, and Mechanical Properties of KURT Granite and Gyeongju Bentonite, JNFCWT Vol.17 No.S, pp.65-80.
51. Kim, G-Y., Lee, J-O., Cho, W-J., and Baik, M-H., 2019, In-situ Demonstration of Engineered Barrier System (In-DEBS) for Characterization of Coupled THM Behavior in KURT, JNFCWT Vol.17 No.S, pp.1-14.
52. Ju, H., Kim, I-Y., Lee, Y-M., Kim, J-W., Hwang, Y., Choi, H-J., and Cho, D.K., 2020, Safety Assessment on Long-term Radiological Impact of the Improved KAERI Reference Disposal System (the KRS+), JNFCWT Vol.18 No.S, pp.75-87.
53. IAEA, 2013, An International Peer Review of the Programme for the Deep Geological Disposal of High Level Radioactive Waste from Pyro-Processing in the Republic of Korea, Report of an IAEA International Review Team.
54. Park, T-J., and Choi, J-W., 2012, Radioactive Waste Management in Korea, Hacettepe University.

55. KAERI, 2008, Korean Reference HLW Disposal System, KAERI/TR-3563/2008.
56. Choi, H-J., Lee, J-Y., and Choi, J., 2013, Development of Geological Disposal Systems for Spent Fuels and High-level Radioactive Wastes in Korea, Nuclear Engineering and Technology, Vol.45 No.1.
57. Lee, J-Y., Lee, M-S., Choi, H-J., Bae, D-S., and Kim, K-S., 2012, A Study on the Conceptual Development for a Deep Geological Disposal of the Radioactive Waste from Pyro-processing, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol.10(3), pp. 219-228.
58. Jeong, J-T., Choi, H-J., Koh, Y-K., Kim, G-Y., and Kim, K-S., 2013, The Role of KURT and A-KRS in the Development of Generic Safety Cases in Korea, NEA/RWM/R(2013)9.
59. Yoon, J-H., Lee, J-H., and Kim, S-H., 2017, Strategic and Technical Aspects in RD&D Program Development for HLW Disposal System in Korea, 6th East Asia Forum on Radwaste Management Conference November 27-29, 2017, Osaka, Japan.
60. Bae, D-S., Koh, Y-K., Park, J-W., Park, J-B., and Song, J-S., 2012, Study on Basic Requirements of Geoscientific Area for the Deep Geological Repository of Spent Nuclear Fuel in Korea, J. of the Korean Radioactive Waste Society Vol.10(1), pp. 63-75.
61. Kim, J-W., Cho, D-K., Ko, N-Y., and Jeong, J., 2015, Characterization of Domestic Earthquake Events for the Safety Assessment of the Geological Disposal System, JNFCWT Vol.13 No.2 pp.87-98.
62. 정수림, 박경우, 권장순, 2015, 고용권, 화강암반 수리지구화학 3차원 지질환경모델링 예비평가, 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집.
63. Zhang, Q-Z., Jang, H-S., Bae, D-S., Kim, G-Y., and Jang, B-A., 2016, Empirical Rock Mechanical Site-Descriptive Modeling (RMSDM) for the Korea Atomic Energy Research Institute Underground Research Tunnel (KURT), Environ Earth Sci 75:860.
64. Chae, B-G., Choi, J., Kihm, Y-H., and Park, S-I., 2017, Geological Structural Parameters to be Considered for Siting of HLW Repository: A Review for Case Studies of Foreign Countries, Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 1, pp.207-219.
65. Choi, J., Chae, B-G., Kihm, Y-H., Park, E-S., Hyun, S., Kim, H-C., Nahm, W-H, Jeon, J-S., and Suk, H., 2017, Suggestion of Site Investigation

- Method for HLW Disposal Facility, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng. Vol. 54, No. 4, pp.303-318.
66. Park, K-W., Kim, K-S., Koh, Y-K., Jo, Y., and Ji, S-H., 2017, Review of Site Characterization Methodology for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, JNFCWT Vol.15 No.3 pp.239-256.
 67. Kim, E., Kihm, Y-H., Cheon, D-S., Hyun, S-P., Jeon, J-S., Kim, H-C., Nahm, W-H., Suk, H., Jin, K., Ko K-T., and Choi, S., 2020, Development of Geoscientific Site Assessment Factors for the Deep Geological Disposal of HLW in South Korea, Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers Vol. 57, No. 2, pp.215-233.
 68. Choi, S., Cheon, D-S., Jeong, H., and Jeon, S., 2021, Establishment of a Basic DB of Korean Intact Rock Properties Applicable to Site Characterization for HLW Geological Disposal, Tunnel & Underground Space Vol.31, No.2, pp.83-97.
 69. Hwang, Y-S., Su, E-J., Lee, Y-M., and Kang, C-H., 2003, Post Closure Long Term Safety of an Initial Container Failure Scenario for a Potential HLW Repository, Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society.
 70. Hwang, Y-S., 2006, 2005 Safety Case in a Potential HLW Disposal in ROK for Better Communication among Stakeholders, ALDOR 2006. Values in Decisions on Risk, Stockholm (Sweden), 14-18 May 2006.
 71. Lee, Y-M., Kang, C-H., and Hwang, Y-S., 2007, Nuclide Release from an HLW Repository: Development of a Compartment Model, Annals of Nuclear Energy 34, pp.782–791.
 72. Hwang, Y-S., and Kang, C-H., 2010, The Development Of A Safety Assessment Approach And Its Implication On The Advanced Nuclear Fuel Cycle, Nuclear Engineering and Technology, Vol.42 No.1.
 73. Jeong, J., Lee, Y-M., Kim, J-W., Cho, D-K., Ko, N-Y., and Baik, M-H., 2016, Progress of the Long-term Safety Assessment of a Reference Disposal System for High Level Wastes in Korea, Progress in Nuclear Energy 90 37e45.
 74. Baik, M-H., Ko, N-Y., Jeong, J., and Kim, K-S., 2016, Confidence Improvement of Disposal Safety by Development of a Safety Case for High-Level Radioactive Waste Disposal, JNFCWT Vol.14 No.4, pp.367-384.
 75. Cho, W-J., Lee, J-O., and Kwon, S., 2010, A Correlation to Predict the Thermal Conductivity of Buffer and Backfill Material for a High-Level Waste Repository, Tunnel & Underground Space Vol. 20, No. 4, pp.284-

291.

76. Kang, C-H., Jeong, J-T., and Choi, J-W., 2012. A Study on the Development of the FEP and Scenario for the HLW Disposal in Korea, J. of the Korean Radioactive Waste Society Vol.10(3), pp. 133-141.
77. Lee, Y-M., Jeong, J., and Choi, J., 2012, A Deterministic Safety Assessment of a Pyro-processed Waste Repository, J. of the Korean Radioactive Waste Society Vol.10(3), P. 171-188.
78. Lee, J-K., Baik, M-H., and Jeong, J., 2013, Development of Sorption Database (KAERI-SDB) for the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal, J. Korean Radioact. Waste Soc. Vol.11 No.1 pp.41-54.
79. Lee, Y-M., and Jeong, J., 2013, A-KRS GoldSim Model Verification: A Comparison Study of Performance Assessment Model, J. Korean Radioact. Waste Soc. Vol.11 No.2 pp.103-114.
80. Lee, Y-M., Jeong, J., and Choi, J., 2013, An Evaluation of an Earthquake Scenario for a Pyroprocessed Waste Repository, Progress in Nuclear Energy 66 133e145.
81. Baik, M-H., Park, T-J., Kim, I-Y., and Choi, K-W., 2013, Research Status and Roles of Natural Analogue Studies in the Radioactive Waste Disposal, J. Korean Radioact. Waste Soc. Vol.11 No.2, pp.133-156.
82. Lee, Y-M., and Jeong, J., 2014, A Sensitivity Study on Nuclide Release from the Near-field of a Pyroprocessed Waste Repository System: Part 2. A Deterministic Approach, JNFCWT Vol.12 No.1, pp.37-43.
83. Lee, Y-M., and Jeong, J., 2014, A Sensitivity Study on Nuclide Release from the Near-field of the Pyroprocessed Waste Repository System: Part 1. A Probabilistic Approach, JNFCWT Vol.12 No.1, pp.19-35.
84. Baik, M-H., Park, T-J., Kim, I-Y., Jeong, J., and Choi, K-W., 2015, Development of a Natural Analogue Database to Support the Safety Case of the Korean Radioactive Waste Disposal Program, Swiss J. Geosci 108, pp.139-146.
85. 정종태, 김정우, 2015, 백민훈, 방사성폐기물 심층처분시설 Safety Case 에서 보조 안전지표 활용현황 분석, 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집.
86. 김인영, 최희주, 2016 , 기준 사용후핵연료의 방사성독성도 및 독성도 저감기간 예비 평가, 한국방사성폐기물학회

87. Kim, I-Y., and Choi, H-J., 2016, Preliminary Evaluation on Characteristics of Waste from Pyro-processing (FS v5.1), Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Gyeongju, Korea, October 27-28.
88. 이종열, 최희주, 이민수, 김경수, 김현아, 2016 , 사용후핵연료 다층 처분시스템 열적안정성 분석, 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집.
89. Kim, J-W., Cho, D-K., Ko, N-Y., Jeong, J., & Baik, M-H., 2018, Model Development for Risk-Based Safety Assessment of a Geological Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Pyroprocessing of Pressurized Water Reactor Spent Fuel in Korea, Nuclear Technology Vol. 203, 1–16.
90. Ju, H., and Hwang, I-S., 2018, Systematic Model for Estimation of Future Inadvertent Human Intrusion into Deep Rad-waste Repository by Domestic Groundwater Well Drilling, Nuclear Engineering and Design 327 38–50.
91. Kim, J-S., Choi, Y-C., Lee, M., Lee, C., Yoon, S., Cho, W-J., and Kim, G-Y., 2019, Design of In-DEBS (In-situ Demonstration of Engineered Barrier System) and Analysis on Optimized Manufacturing Conditions for EBS, JNFCWT Vol.17 No.S, pp.25-44.
92. Cho, D-K., Kim, J., Kim, I-Y., and Lee, J-Y., 2019, Investigation of PWR Spent Fuels for the Design of a Deep Geological Repository, JNFCWT Vol.17 No.3, pp.339-346.
93. Kim, I-Y., Cho, D-K., Lee, J., and Choi, H-J., 2020, Scoping Calculations on Criticality and Shielding of the Improved KAERI Reference Disposal System for SNFs (KRS+), JNFCWT Vol.18 No.S, pp.37-50.
94. Kim, J-S., Cho, W-J., Park, S., Kim, G-Y., Baik, M-H., 2019, A Review on the Design Requirement of Temperature in High-level Nuclear Waste Disposal System: Based on Bentonite Buffer, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association 21(5), pp.587-609.
95. Lee, J., Kim, I., Choi, H., and Cho, D., 2019, An Improved Concept of Deep Geological Disposal System Considering Arising Characteristics of Spent Fuels From Domestic Nuclear Power Plants, JNFCWT Vol.17 No.4, pp.405-418.
96. Ju, H., Kim, I-Y., Lee, Y-M., Kim, J-W., Hwang, Y., Choi, H-J., and Cho, D-K., 2020, Safety Assessment on Long-term Radiological Impact of the Improved KAERI Reference Disposal System (the KRS+), JNFCWT

Vol.18 No.S, pp.75-87.

97. Jeong, J. and Cho, D-K., 2020, A Method for Operational Safety Assessment of a Deep Geological Repository for Spent Fuels, JNFCWT Vol.18 No.S, pp.63-74.
98. Kim, J-W., Lee, J., and Cho, D-K., 2019, Development of User-friendly Modeling Interface for Process-based Total System Performance Assessment Framework (APro) for Geological Disposal System of High-level Radioactive Waste, JNFCWT Vol.17 No.2, pp.227-234.
99. Kim, K-I., Lee, C., and Kim, J-S., 2021, A Numerical Study of the Performance Assessment of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical (THM) Processes in Improved Korean Reference Disposal System (KRS+) for High-Level Radioactive Waste, Tunnel & Underground Space Vol.31, No.4, pp.221-242.
100. Kim, T., Lee, C., Kim, J-W., Kang, S., Kwon, S., Kim, K-I., Park, J-K., Park, C-H., and Kim, J-S., 2021, Introduction to Tasks in the International Cooperation Project, DECOVALEX-2023 for the Simulation of Coupled Thermo-hydro-mechanical-chemical Behavior in a Deep Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, Tunnel & Underground Space Vol.31, No.3, 2021, pp.167-183.
101. Ham, B., Kwon, J-S., Boyanov, M. I., O'Loughlin, E. J., Kemner, K. M., and Kwon, M. J., 2021, Geochemical and Microbial Characteristics of Seepage Water and Mineral Precipitates in a Radwaste Disposal Facility Impacted by Seawater Intrusion and High Alkalinity, Journal of Environmental Management 285, 112087.
102. Jeong, H., Yim, J., Min K-B., Kwon, S., Choi, S., and Shin, Y-J., 2022, Case Studies of Indirect Coupled Behavior of Rock for Deep Geological Disposal of Spent Nuclear Fuel, Tunnel & Underground Space Vol.32, No.6, pp.411-434.
103. Ji, S-H., Park, B-H., and Park, K-W., 2020, Distortion of the Estimated Hydraulic Conductivity from a Hydraulic Test in Fractured Rock due to Excessive Injection or Extraction, MDPI Water 12(10), 2712.
104. Kim, G-Y., Kim, S-W., Jang, J., Yoon, S., and Kim, J-S., 2022, Investigation of Early Corrosion Behavior of Canister Candidate Materials in Oxidic Groundwater by the EQCM Method, Science and Technology of Nuclear Installations Volume 2022, Article ID 4582625, p.6.
105. Cheon, D-S., Song, W-K., Kihm, Y-H., Jin, K., and Choi, S., 2022, A Study on Key Parameters and Distribution Range in Rock Mechanics for HLW Geological Disposal, Tunnel & Underground Space Vol.32, No.6, pp.530-

- 548.
106. Lee, S-Y., Lee, J-K., and Kwon, J-S., 2021, Influence of Microbial Activity on the Long-Term Alteration of Compacted Bentonite/Metal Chip Blocks, *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology* Vol.19 No.4, pp.469-477.
 107. Lee, J-U., and Jung, M-C., 2022, A Review of Research on the Geomicrobiological Behavior of Uranium for Deep Geological Disposal of High-Level Radioactive Wastes, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers* Vol. 59, No. 6, pp.693-706.
 108. Lee, S-H., Jin-Seok Kim, J-S., Kim, B-J., Lee, J-K., Lee, S-Y., and Kwon, J-S., 2022, International Joint Research for the Colloid Formation and Migration in Grimsel Test Site: Current Status and Perspectives, *JNFCWT* Vol.20 No.4, pp.455-468.
 109. Gardner, W. P. and Wang, Y., 2020, International Collaborations: DECOVALEX and KURT, Used Fuel Disposition Campaign, SAND2014-4543P.
 110. Lee, C., Kim, T., Lee, J., Park, J-K., Kwon, S., and Kim, J-S., 2020, Introduction of International Cooperation Project, DECOVALEX from 2008 to 2019, *Tunnel & Underground Space* Vol.30, No.4, pp.271-305.
 111. Kim, J-M., 2015, Deep Borehole Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel, *Journal of the Geological Society of Korea*. Vol.51, No. 4, pp.425-431.
 112. Lee, J., Lee, M., Choi, H., Kim, G., and Kim, K., 2016, Preliminary Analyses of the Deep Geoenvironmental Characteristics for the Deep Borehole Disposal of High-level Radioactive Waste in Korea, *JNFCWT* Vol.14 No.2, pp.179-188.
 113. Park, B., Kwon, S., and Min K-B., 2017, The Status and Outlook of High-Level Radioactive Waste Disposal in Deep Borehole Focusing on Behavior of Large-Diameter Deep Borehole, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.* Vol. 54, No. 4, pp.377-388.
 114. Sean T. and Tomaž Ž., 2020, Understanding Deep Borehole Disposal Technology in the context of Spent Fuel and High-Level Radioactive Waste Disposal: History, Status, Opportunities and Challenges, *IFNEC*, pp.5-6.
 115. Lee, J., Lee, M., Choi, H., Kim, K., and Cho, D., 2018, Preliminary Evaluation of Domestic Applicability of Deep Borehole Disposal System, *JNFCWT* Vol.16 No.4, pp.491-505.
 116. Cheon, D-S., Song, W-K., Kihm, Y-H., Choi, S., Lee, S-K., Hyun, S-P., and

Suk, H., 2022, Geoscientific Research of Bedrock for HLW Geological Disposal using Deep Borehole, Tunnel & Underground Space Vol.32, No.6, pp.435-450.

117. ENSI, 2020, Implementation of the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Seventh National Report of Switzerland, in Accordance with Article 32 of the Convention, Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (ENSI).
118. Nagra, 2022, The Site for the Deep Geological Repository - Nagra's Proposal.
119. Nagra, 2022, Data Basis for the Decision - Additional Information on the Siting Proposal.
120. Nagra, 2022, Flexibility - Additional Information on the Siting Proposal.
121. Nagra, 2022, Quality of the Barrier - Additional Information on the Siting Proposal.
122. Nagra, 2022, Stability of the Barrier - Additional Information on the Siting Proposal.
123. STUK, 2020, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, 7th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention.
124. Posiva, 2021, Safety Case for the Operating Licence Application - Synthesis (SYN). POSIVA 2021-01.
125. Posiva, 2021, Safety Case for the Operating Licence Application - Design Basis (DB). POSIVA 2021-08.
126. Posiva, 2021, Safety Case for the Operating Licence Application - Initial State (IS). POSIVA 2021-05.
127. Posiva, 2021, Safety Case for the Operating Licence Application - Low and Intermediate Level Waste Repository Assessment (LILW-RA). POSIVA 2021-07.
128. Posiva, 2021, Safety Case for the Operating Licence Application - Performance Assessment and Formulation of Scenarios (PAFOS). POSIVA 2021-06.
129. Posiva, 2021, Safety Case for the Operating Licence Application - Models and Data (M&D). POSIVA 2021-04.
130. Posiva, 2021, Safety Case for the Operating Licence Application - Analysis

of Releases (AOR). POSIVA 2021-03.

131. Posiva, 2021, Safety Case for the Operating Licence Application - Complementary Considerations (CC). POSIVA 2021-02.

附錄一：表 2-3 從擬議紀錄選擇程序推導整套必需的紀錄
(SER)內容之範例(原文)

Table 3.2. Example of a set of records to be included in the SER, derived from the proposed procedure

Period	Records group examples	Records/documents examples	Purpose/Need
	Record category: Site and host rock survey and characterisation records		
Site selection and site characterisation	Site acceptance criteria and requirements	Criteria proposal and definition, external reviews and updates	II
		Criteria approval and criteria evaluation methodology	II
	Surface survey	Initial surface and subsurface monitoring of the environment(e.g. radiological properties, air/water pollution)	I,II,III
		Surface survey summary report	I,II,III
	Geological survey	Geological model	I,III
	Hydrogeological survey	Survey measurement records	I,III
		Hydrogeological model	I,III
		Hydro (geo)logical survey evaluation summary report	I,III
	Site properties evaluation	Acceptance criteria, compliance evaluation report	II
Repository construction	Site acceptance criteria and requirements	Site acceptance criteria review, update, external examination and approval	II
	Site and repository properties verification	Site and repository properties verification protocols and reports	I,III
		In situ survey evaluation and site verification summary report	I,III
Waste emplacement	Above-ground	Survey and monitoring sensors performance records	I,III
		Survey and monitoring measurements records	I,III

	and underground survey and monitoring	Survey and monitoring results summary and compliance checking reports	I,II,III
Pre-closure	Above-ground and underground pre-closure survey and monitoring	Survey and monitoring measurement records and laboratory protocols	I,III
		Survey and monitoring summary reports and evaluation reports	I,III
		Input data for closure safety assessments, environmental impact assessment (EIA) and licensing process	I
		Input data for repository decommissioning, closure plan and design	I
	Record category: Repository design and realisation		
Site confirmation	Repository realisation preparation	Engineered barrier system (EBS) design, external examination and approval	II
		Repository construction design external examination and approval	II
Repository construction	Repository construction	Construction material, EBS and equipment testing/measurement report	I,III
		Repository construction, EBS modification proposals and approval	I,II,III
		Repository complex performance testing and evaluation	I,II,III
		Repository 「as built」 design documentation, repository equipment operational and maintenance manuals	I,II,III
Waste emplacement	Repository operation	Repository structures, EBS, equipment modifications proposal, external examination, approval, implementation, 「as built」 repository design and documentation updating	I,II,III
		Partial boreholes and disposal chambers backfilling realisation	I,III
Pre-closure	Monitoring	Repository structures, EBS and equipment monitoring, testing –inputs for decommissioning,	I,II,III

		and closure plan development	
	Decommissioning realisation preparation	Decommissioning and closure plan external examination and approval	II
Repository closure	Repository closure realisation	Repository dismantling and closure diary, co-ordination meetings protocols, quality control (QC) protocols, external inspection protocols, material compliance protocols, etc.	I,III
		Closure realisation quality evaluation and external peer review report	I,II,III
		Final decommissioning and closure 「as built」 documentation, technical description, drawings, requirements compliance declarations and QC evaluation report	I,III
		Inputs and data for EIA and closure safety assessments and for licensing process	I,III
		Construction material, EBS testing/measurement protocols, laboratory protocols, material proof samples and photo/video documentation	I
	Record category: Waste and waste packages		
Site selection, characterisation and confirmation as well as repository construction	Waste inventory	Waste characterisation and categorisation report (waste form, radionuclide content, toxic properties, etc.)	I,II,III
		Waste inventory register	I,II,III
	Nuclear material inventory	Nuclear material register	I,II,III
	Waste package design and development	Waste packages design, drawings, calculations, technical solution report and quality assurance (QA)/QC plan	I,II
		Waste package manufacturing, preconditioning and conditioning reports	I,II,III
	Waste taking over preparation	Waste acceptance criteria specification, external examination and approval	II
Waste emplacement		Waste package delivery protocols, waste package information files, other relevant information and	I,III

	Waste taking over	compliance declarations	
		Waste package compliance checking protocols and non-conformity protocols	I,III
		Waste package positioning files	I,III
		Waste interim storage records	I,III
	Waste inventory	Waste packages monitoring and checking	I,III
		Waste packages register and nuclear material register	I,III
		Disposal chamber and gallery inventory records	I,III
		Repository summary inventory reports	I,II,III
		Nuclear material inventory changes reports, inventory reports, inventory taking protocols and nuclear material balance reports	I,II,III
	Record category: Repository operation records		
Waste emplacement	Repository internal regulations	Repository safeguards, nuclear safety, radiation protection instructions, guidelines and safety culture implementation plan	I
		Record management system, records classification, selection archiving and discarding rules	I,II,III
	Monitoring records	Surface (site/vicinity) monitoring (e.g. radiological, other pollutions, seismicity and precipitation monitoring)	I
		Underground monitoring (e.g. radiological, geological and EBS performance monitoring)	I
		Post-closure monitoring concept	I,II
	Nuclear material accountancy	Nuclear material register	I,III
		Inventory change reports, physical inventory taking and book inventory	I,III
	Safety, safeguards and security	Operating diary, emergency training, emergency events records, adopted measure records and emergency event evaluation report	I, III
	Record category: Safety and environmental impact assessments and licensing documentation		
	Site selection, characterisation	Public hearings and compiled objections from the public, etc.	II
		Site selection, approval, governmental decision	II

	evaluation and licensing	document, etc.	
		Preliminary construction approval and governmental decision document	II
		Repository construction approval and governmental decision document	II
Repository construction	Safety case and EIA evaluation and licensing	Public hearings and compiled objections from the public	II
		Repository operation approval and governmental decision document	II
Waste emplacement and pre-closure	Periodical or ad hoc safety assessments/ safety cases	Authorities decisions and approvals	II
	Safety assessment/ safety case and EIA for repository closure	Repository decommissioning and closure approval, and governmental decision document	II
Repository closure	Safety assessment/ safety case for repository site release	Safety case strategy, plan and time schedule	I,II
		Process reports (including underlying R&D) on geology, rock mechanics, hydrology, chemistry, microbiology, etc.	I,III
		Models and tools	I
		Geoscientific long-term evolution	I,II,III
		Site-specific features, events and processes (FEP) catalogue	I,III
		Scenario development (reference, alternative and what-if cases)	I,II,III
		Input data specification; safety assessment model calculations; assessment results including safety functions, performance and integrity of (sub)systems; indicators; compliance with regulations evaluation; and discussion of uncertainties	I,III
		Multiple lines of evidence (additional geological arguments, analogues, other indicators, etc.)	I,II
		Additional analysis (e.g. criticality, future human action, optimisation and qualitative analyses)	I,II,III
		External examination and peer review	I,II

	EIA development and evaluation for site release	EIA methodology, input data collection and calculations	I
		EIA summary report, drawings, maps and calculations	I,II
	Safety case and EIA evaluation and licensing for site release	Safety case report external examination and peer review	I,II
		EIA external examination and peer review	I,II
		Public hearings and compiled objections from the public	I,II
		Repository operation approval and governmental decision document	I,II
	Record category: Societal and general information		
	Legislation, regulations	Nuclear law and regulations (nuclear law, radiation protection regulations, waste management regulations, nuclear installations construction and operation, safeguards, emergency planning, etc.)	II
	Communication with externals	Correspondence with licensing and supervising authorities	II
		Correspondence with other authorities	II
		Communication with politicians and political parties	II
		Communication with designated communities and relationship with stakeholders	II
	Policy and conceptual materials	National waste management policy and practice, including public hearings and discussion on proposed options	II
		EIA on waste management and repository implementation concept	II
	Memory tools	KIF	I,II,III
		Markers and tracers	II

資訊來源：參考文獻[14]。