

出國報告(出國類別：開會)

赴美國參加 2025 年放射性廢棄物 管理研討會

服務機關：核能安全委員會放射性物料管制組
姓名職稱：藍泰蔚科長
派赴國家：美國
出國期間：114 年 3 月 7 日至 114 年 3 月 15 日
報告日期：114 年 5 月 6 日

摘要

WM2025放射性廢棄物管理研討會為全球放射性廢棄物管理及相關議題的重要國際會議，今年為第 51 屆會議，於美國鳳凰城 (Phoenix) 舉辦，聚集世界各國專家學者，本次會議針對放射性廢棄物管理與最終處置的安全性、技術可行性、成本效益及環保解決方案等議題進行深入交流與討論，並特別聚焦數位技術和人工智慧在全球放射性廢棄物管理和清理重要性。

本次會議超過900篇技術論文發表，240場技術會議，議題涵蓋包括高中低與極低放射性廢棄物、長半衰期超鈾廢棄物、混合廢棄物、核電廠廢棄物管理、現場用過核子燃料貯存、包裝與運輸等多個領域，吸引政府管制機關、實驗室、除役和放射性廢棄物處理領域的營運單位或企業，來自30多國約2,500位相關領域專業人員參加。

有鑒於國內核電廠已逐步邁入除役階段，各核能電廠除役階段皆規劃再設置放射性廢棄物貯存設施。另針對核電廠除役之用過核子燃料安全管理，已規劃於各核電廠興建一座室內乾式貯存設施，持續精進用過核子燃料與低放射性廢棄物設施營運安全管制，與放射性物料設施之興建與運轉安全審查及檢查作業，為放射性廢棄物安全管制之關鍵。透過參與WM2025研討會，借鑑世界各核能先進國家在放射性廢棄物處理、貯存與處置方面所累積的管制實務經驗，藉由與國際專家學者的交流互動，了解放射性廢棄物處理與最終處置相關規範與技術之最新國際發展趨勢，提升放射性廢棄物管制技術專業知識，並為回饋與精進國內管制措施之參考。

目錄

一、	目的.....	4
二、	過程.....	5
	(一) 行程概要.....	5
	(二) 2025 年放射性廢棄物管理研討會.....	6
	(三) 會議議題.....	10
三、	心得及建議.....	44

一、目的

WM2025 放射性廢棄物管理研討會(以下簡稱 WM2025 研討會)為全球放射性廢棄物管理及相關議題的重要國際會議，自 2018 年以來，主辦單位放射性廢棄物管理協會(WM Symposia, Inc.)於美國鳳凰城(Phoenix)舉辦會議，今年為第 51 屆會議。該協會是專注於放射性廢棄物管理和相關領域的非營利國際會議組織，透過每年舉辦一系列會議和活動，以促進專業知識交流、討論最新的技術和政策發展。

本屆研討會目的為聚集世界各國專家學者，針對放射性廢棄物管理與最終處置的安全性、技術可行性、成本效益及環保解決方案等議題進行深入交流與討論，並強調數位技術和人工智慧在全球放射性廢棄物管理和清理領域中的重要性，提高設施營運效能、安全性和數據管理與分析，確保核能安全和對環境的保護，同時促進核能技術的和平利用和持續發展。

有鑒於國內核電廠已逐步邁入除役階段，各核能電廠除役階段皆規劃再設置放射性廢棄物貯存設施。另針對核電廠除役之用過核子燃料安全管理，已規劃於核一、二、三廠各興建一座室內乾式貯存設施，持續精進用過核子燃料與低放射性廢棄物設施營運安全管制，與放射性物料設施之興建安全審查及檢查作業，為放射性廢棄物安全管制之關鍵。透過參與 WM2025 研討會，可提升放射性廢棄物管制技術的專業知識，並借鑑世界各核能先進國家在放射性廢棄物處理、貯存與處置方面累積的管制實務經驗，提升管制機關之審查與管制能力。藉由與國際專家學者的交流互動，了解放射性廢棄物處理與最終處置相關規範與技術之最新國際發展趨勢，以為回饋與精進國內管制措施之參考，確保放射性廢棄物管制工作與時俱進，符合國際標準。

二、過程

(一)行程概要

本次行程自 114 年 3 月 7 日出發，3 月 15 日返國，共計 9 天，目的地為鳳凰城(Phoenix)。路程規劃 3 月 7 日由桃園國際機場出發至舊金山國際機場轉機，經美國內陸航線到達鳳凰城天港國際機場。

3 月 8 日至 3 月 13 日間參加 WM2025 研討會，主要參加放射性廢棄物處理及貯存領域創新技術、各國高低放射性廢棄物處置計畫發展、放射性廢棄物管理及管制策略有關之技術議題會議，瞭解世界各國發展現況、未來的發展趨勢，及學習世界各核能先進國家面對放射性廢棄物管理議題採用之策略、措施及法規制度；3 月 13 日由鳳凰城天港國際機場至西雅圖國際機場轉機搭乘國際航線，3 月 15 日返程抵達桃園國際機場。



照片 1、2：美國鳳凰城會議中心舉辦之 2025 放射性廢棄物管理研討會

(二)WMS 舉辦之 2025 年放射性廢棄物管理研討會

1.會議簡介

放射性廢棄物管理研討會由放射性廢棄物管理協會主辦，該協會為致力於全球放射性廢棄物管理教育和資訊交流的非營利組織，促進全球在放射性廢棄物管理、核設施除役與環境修復領域的知識交流與技術合作，該組織透過每年舉辦該會議，提供開放論壇，討論放射性廢棄物管理與核設施除役相關議題。本屆會議為第51屆，3月9日至13日在美國亞利桑那州鳳凰城舉行，聚焦探討數位技術與人工智慧如何提升放射性廢棄物管理流程，並展示全球在除役工程、最終處置、安全文化等領域實務成果，吸引來自30多國超過2,500名相關領域專業人員參加，超過900篇論文發表並分別召開240場技術議題會議，會場另外設有研究論文海報展示區及產業博覽會等、聚集204家以上相關產業展商共襄盛舉，為政府、學術與產業界提供知識交流、討論處理放射性廢棄物議題之平台。



照片3：美國鳳凰城會議中心舉辦之2025放射性廢棄物管理研討會

2.會議開幕致詞演講

開幕演講首先由研討會理事成員Greg Meyer先生主持並進行致詞，指出了本屆會議核心主題為「以先進科技、人工智慧與速度實現永續未來」，此次研討會技術場次、海報展示、與跨國合作，皆圍繞此主題，展現出放射性廢棄物管理與除役產業在技術與策略上因為科技進步而快速演進。

Greg Meyer先生強調儘管人工智慧和數位孿生(Digital Twins)等技術令人驚嘆，也不能過度依賴技術，忘記人本思維與現場經驗價值。此外，加拿大在核能技術創新與政策推動上的成果令人矚目；而美國田納西州的橡樹嶺(Oak Ridge)清理行動則展現將區域再工業化與經濟重振契機，代表核能產業不再只是清理過去歷史遺留的包袱，更是打造永續能源未來的關鍵動力。

繼Greg Meyer先生致詞後，接續由幾位大會邀請之著名國際核廢組織專家學者進行演講，摘述如下：

1.Laurie Swami, Nuclear Waste Management Organization (Canada)

加拿大放射性廢棄物管理機構(NWMO)首席執行官Laurie Swami女士分享了加拿大在核能與放射性廢棄物管理上的最新進展。加拿大核能產業正處於重要的轉型階段。隨著全球朝向氣候目標努力，核能被越來越多國家視為潔淨能源轉型的關鍵。

演講重點聚焦於NWMO於放射性廢棄物長期管理上的關鍵成就。NWMO為加拿大放射性廢棄物管理專責機構，成立23年來負責用過核子燃料的深層地質處置計畫。

其中最具突破性的進展是NWMO於2023年11月宣布選定位於安大略省西北部Wabigoon Lake Ojibway Nation-Ignace作為加拿大用過核子燃料的最終處置場地。此決策之做成歷經超過十年的對話、以及持續參與及建立信任關係，最終透過社區同意完成，NWMO特別重視與原住民族之合作關係，並建立於

「權利、平等與共榮」的基礎上，這一歷史性的選址決策，將為當地社區帶來數百個工作機會與數十億加幣的投資，幫助社區實現發展願景。Laurie Swami女士最後以三點總結：

- 合作與社區參與是放射性廢棄物處置的成功關鍵；
- 永續、安全是最終目標，需逐步達成；
- 保護人與環境，為後代創造安全清潔的未來視為核心使命。

2.Olena Mykolaichuk, IAEA (Austria)

環境復育專家Olena Mykolaichuk女士現任職於國際原子能總署(IAEA)核能部門，服務全球180個成員國，她指出每個國家在放射性廢棄物、用過核子燃料處理、遺留設施整治等方面都有其獨特挑戰，儘管世界對核能的接受度已有所變化，但放射性廢棄物管理與除役仍是核心議題。

Olena Mykolaichuk女士強調青年參與、跨國合作與創新技術實踐重要性，IAEA已透過多元工具及管道，包含出版物、協作計畫、合作研究項目，進行包括遺留設施除役、數位化管理、創新科技運用等主題計畫。其中特別談到成員國設立之協作中心(Collaborating Centers)，迄2023年為止已設置78座，廣泛分布於全球40國，專注於廢棄物管理、除役與用過核子燃料貯存等領域。

3.Mark Whitney, Amentum (USA)

美國政府和商業服務公司Amentum，現任職能源與環境總裁Mark Whitney先生，負責帶領由9,000名專業人員組成的團隊，為美國政府提供工程整合與技術解決方案。Mark Whitney先生提到今天所做的決策，將深遠影響未來放射性廢棄物管理成敗，應結合創新科技提出全新解方，資料科學與人工智慧運用正為放射性廢棄物處置領域帶來革命性轉變，例如：

- 加速繁瑣的資料分析工作
- 提升安全評估與法規文件產出的效率

- 支援新一代核設施選址與設計決策

4. Roger Jarrell, US DOE EM (USA)

Roger Jarrell先生作為美國能源部環境管理局(Department of Energy Office of Environmental Management, DOE EM)的高級顧問，指出DOE EM不僅是一個清理過去遺留放射性廢棄物的機構，更是美國能源轉型與核能復興的重要推手。具體來說，DOE EM正在推動放射性廢棄物處置設施的現代化，將橡樹嶺(Oak Ridge)、樸次茅斯(Portsmouth)、帕度卡(Paducah)等場址轉型為能源與創新產業中心，嘗試地方經濟活化與土地再利用，橡樹嶺(Oak Ridge) 是一個成功範例：從過去軍用核設施蛻變為創新聚落，並吸引包括 Kairos Power等核能公司投資。樸次茅斯也正在複製這條成功路線。

在技術方面，今(2025)年DOE EM計畫啟用新墨西哥州的廢棄物隔離試驗廠 (Waste Isolation Pilot Plant, WIPP)的新通風系統、完成南卡羅萊納州先進製造中心(Advanced Manufacturing Collaborative, AMC)、於華盛頓州漢福德(Hanford)首次將低放射性廢液轉化為玻璃固化，這是美國有史以來最大規模的放射性廢棄物玻璃固化處理。Roger Jarrell先生坦言，漢福德是 DOE成本最高的清理場址，目前預計清理作業至2091年完成，為降低成本，有必要進行創新改革。因此，DOE EM呼籲產官學界與國際夥伴集思廣益，用創新、智慧與效率來縮短時程、降低成本、並保障安全。

(三)會議議題

研討會技術議程涵蓋甚廣，並細分多個主題，包括跨領域政策與計畫、高放射性廢棄物、用過核子燃料和長半衰期超鈾廢棄物、中低與極低放射性廢棄物、混合廢棄物、核電廠廢棄物管理與現場用過核子燃料貯存、包裝與運輸、除污與除役、環境復育、公眾溝通與原住民參與、人力資源管理及先進核子反應器應用等多個領域，以下就放射性廢棄物相關議題作簡要摘述：

1.核能工業石墨材料熱處理方法發展 - Development of Thermal Treatment Method for Graphite Materials in Nuclear Industry

石墨在核子反應器作為中子減速劑與反射體，長時間使用後會受到中子照射活化，內含碳-14等長半衰期放射性核種，對於受照射石墨之安全貯存與處理議題須加以重視。全球約有25萬噸受照射石墨存放在臨時貯存設施中，等待適當的處理與最終處置。

目前，石墨除污技術主要分為化學處理與熱處理。化學法雖能去除放射性物質，卻會產生大量液態廢棄物，增加後續處理的難度。熱處理技術因其低毒性、低成本、高能源效率，並能有效去除放射性核種，同時回收石墨，成為更具潛力的選擇。

加拿大核子實驗室(Canadian Nuclear Laboratories, CNL)進行了一項熱處理研究，使用未受輻射照射的核能級石墨與模擬碳-14污染的石墨試片來探討不同條件對石墨氧化行為的影響。實驗中將碳-13作為模擬物沉積於石墨表面，測試氧化過程對於去除碳-14的效率。

研究結果顯示，在500~1,050°C範圍內，以空氣作為氧化劑時，主要產物為二氧化碳，次要產物為一氧化碳，並在700°C時完全氧化石墨。水蒸氣作為氧化劑時，石墨需達到1,050°C才完全氧化。

根據文獻研究，認為在低溫狀態下，氧化劑可以到達孔隙內部，大部分氧化發生在孔隙中，其氧化速率受石墨和氧化劑之間的氧化反應動力學控制。在中間溫度範圍內，石墨氧化過程受氧化劑向孔隙的擴散的控制。在高溫狀態下，氧化反應發生得非常快，僅少許氧化劑在孔隙內擴散，氧化速率受氧化劑從大氣到表面傳輸控制。是以低溫下(<400°C)使用空氣作為氧化劑，空氣可以不受阻礙地通過石墨的孔隙並進行氧化反應。在中等溫度範圍(400-800°C)內使用蒸氣作為氧化劑，可能由反應物及產物於孔洞內之擴散機制控制氧化速率。900°C以上之高溫範圍，蒸氣於表面邊界層控制區域(layer-controlled regime)從石墨表面進行氧化，而對石墨結構干擾最小。

以上結果表明，當用空氣或蒸氣對受照射石墨進行熱處理，空氣溫度需在700°C以下，水蒸氣溫度在1,050°C以下，以免過度改變石墨的結構跟機械強度，且水蒸氣環境於900°C時主要於石墨表面進行氧化反應，從而有效去除碳-14，同時保留石墨的結構，使其成為可控的除污選擇。

此一研究結果透過改變氧化條件，顯示熱處理技術在照射石墨放射性廢棄物去除放射性污染、減少放射性廢棄物體積方面具有潛力，有機會讓輻射照射石墨轉化為可再利用材料。CNL研究團隊表示未來將進一步研究碳-14具體之釋放行為與回收方法，及探索更精確的熱處理條件。

2. 核工基礎與漢福德放射性廢棄物管理實務 - Workshop: Nuclear Engineering Fundamentals and Hanford Waste Legacy

該工作坊目的為提供參與者核工程基本概念，並介紹漢福德(Hanford)核歷史及廢棄物管理實務，深入了解漢福德場址在處理放射性廢棄物方面的技術挑戰與最新進展，以及漢福德核設施中採取之廢棄物處置與封存措施。

漢福德場址占地約580平方英里，自1940年代漢福德開始核武生產以來，

該地區產生了大量放射性與化學廢棄物，並導致土地與地下水污染。1989年美國環保署、華盛頓州生態部及美國能源部簽署《三方協議》(Tri-Party Agreement)，合力清理與處置這些歷史遺留污染物，至今整治工作已取得重大進展，但仍有大量工作待完成。

場址內共有177座地下貯存槽用於存放高放射性及化學廢棄物，容量範圍從55,000加侖到1,000,000加侖不等。其中共有149個單層貯存槽(Single-Shell Tanks, SSTs)和28個雙層貯存槽(Double-Shell Tanks, DSTs)

漢福德對於貯存槽中液體廢棄物的清理方式為首先將來自單層貯存槽貯存廢棄物透過輸送系統轉移至雙層貯存槽。在轉移過程中，這些廢棄物會先通過蒸發器，去除多餘的水分，以減少體積。最終將這些廢棄物從雙層貯存槽送往廢棄物處理廠(Waste Treatment Plant, WTP)，並透過玻璃固化技術(vitrification)進行安定化處理，以利長期貯存與最終處置。

漢福德廢棄物處理廠是專門用來處理高放射性和化學性廢棄物之設施，該廠建置始於2002年，預計將於2025年開始營運，漢福德廢棄物處理廠包含以下設施：預處理設施(Pretreatment Facility)、低活度廢棄物玻璃固化設施(Low-Activity Waste Vitrification Facility)、高活度廢棄物玻璃固化設施(High-Level Waste Vitrification Facility)、分析實驗室(Analytical Laboratory)、排放管理設施(Effluent Management Facility)。

該廠通過玻璃固化處理程序將廢棄物轉化為玻璃固化體，將放射性和化學性物質安定化，並防止廢棄物進一步污染環境。處理程序主要如下步驟：

- 預處理：首先廢棄物流將在預處理設施中被分離成低活度廢棄物流和高活度廢棄物流。
- 玻璃固化：分離後的廢棄物流將被送往對應的玻璃固化設施。在這裡，將向廢棄物中加入玻璃形成劑，然後將混合物加熱至約2100°F(約1149°C)，使其

融化並轉化成玻璃。

- 樣本分析：分析實驗室將對廢棄物樣本進行分析，以確保處理品質。
- 排放管理：在處理過程中產生的液體排放物將在排放管理設施中進行處理，通過蒸發減少排放體積。

3.以容器內熔融固化技術處理反應性金屬廢棄物 - Treatment of Problematic Reactive Metal Wastes Using the GeoMelt® In-Container Vitrification Process

鈉冷卻反應器(Sodium-cooled Reactor)與快中子反應器(Fast Neutron Reactor)除役過程將產生大量反應性金屬廢棄物，由於其複雜之化學活性，極難以傳統方式處理，尤其使用含水處理方式會產生具爆炸性氫氣與強腐蝕性放射性液體，對安全與成本形成重大挑戰。

根據美國《資源保護與回收法案》(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)，為符合土地處置限制，必須將反應性金屬廢棄物的反應性與可燃性移除，為了解決該問題，核廢料處理和環境復育公司VNS (Veolia Nuclear Solutions)在愛達荷國家實驗室合作展示一種容器內玻璃固化(In-Container Vitrification)熱處理技術，可在富含二氧化矽環境中將金屬鈉氧化，進而轉化為穩定的玻璃固化氧化物，由於鈉金屬直接暴露於熔融環境中進行氧化，無需繁瑣的預處理，降低工人暴露風險。相比其他鈉處理技術，該技術不會產生氫氣，避免爆炸風險，亦無產生氫氧化鈉等二次廢棄物，可簡化後續處理流程。鈉金屬將安全轉化為非反應性玻璃固化氧化物，並將放射性核種固化於玻璃固化廢棄物，其耐久性等同於或優於玻璃固化核燃料再處理廢棄物。

目前開發廠商正在嘗試提升技術規模，2018年9月核廢料處理和環境復育公司於華盛頓州PNFW(Perma-Fix Northwest Richland)低放廢棄物處理設施，設計、安裝並正式運轉了一座10公噸級全規模處理單元。至2019年9月，該設施

已成功處理超過900個55加侖桶廢棄物，總計約3,500磅低放射性污染金屬鈉，其玻璃固化廢棄物已運送至內華達國家安全場址(Nevada National Security Site ,NNSS)進行最終處置。

講者Ron Mitchell先生認為此技術可將來自鈉冷卻反應器的放射性金屬廢棄物，轉化為可符合現行法規、可安全處置的穩定廢棄物形式，為處理反應性金屬放射性廢棄物提供安全、經濟及環保之創新技術解決方案。

4.以遠端操作學習方法論教導機器人處理放射性廢棄物 - Teaching Robots to Handle Nuclear Waste: A Teleoperation-Based Learning Approach

放射性廢棄物處理因作業風險和複雜性而帶來巨大挑戰。這些作業通常需要作業人員進行高度精神集中並謹慎操作，人類工作人員在這種環境中面臨相當風險。目前傳統遠端操作技術雖已廣泛運用，人類操作員從遠端控制機器人操作以提高作業安全性。然而這些系統嚴重依賴人類持續干預，容易導致操作員疲勞，並降低操作效率。

由於放射性廢棄物處理環境具有動態性與不可預測性，使傳統程式設計方法難以實現全面自動化，為了解決上述問題，韓國科學技術院(Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST)與美國阿貢國家實驗室(Argonne National Laboratory)合作提出了遠端操作學習(Learning from Teleoperation, LfT)框架，機器人利用遠端操控過程模仿人類專業技能，並且使機器人自主學習進而具備執行複雜操作任務能力。LfT框架包含兩個主要階段，如圖1：

1. 學習階段：透過雙向遠端操作系統記錄人類操作員的動作示範，收集關鍵數據如位置軌跡及力量含扭矩等資訊，並加以處理、編碼成可重複使用的任務知識。

2. 任務執行階段：機器人利用學習到的任務資訊，自主重現所示範的技能。操作員設定目標後，框架便會生成適當的運動軌跡，並執行力量追蹤，以確保任務精確執行。

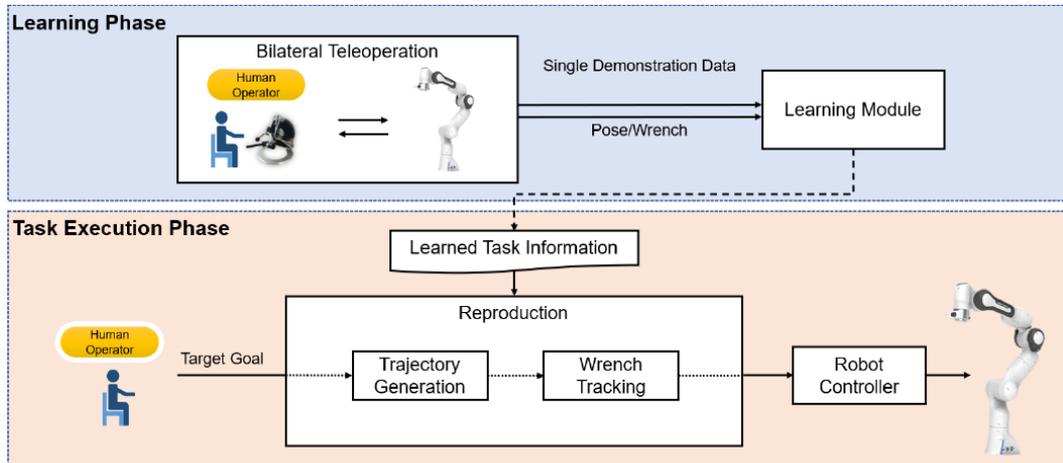


圖1：機器學習應用LfT框架概念

為了確認此框架可行性，本研究設定使用機械手臂將電源插入插座為測試任務，雖然此任務看似簡單，但其重複性高、要求精確的軌跡規劃及穩定的力量控制，很大程度反映放射性廢棄物處理環境操作需求。實驗結果顯示，經LfT框架訓練的機器人在10個不同初始條件下進行指定任務，其中僅1次失敗，成功率達90%。該次失敗的原因是尚未針對被抓取物體碰撞情境提供迴避演算法，導致在接近階段插頭與插座發生碰撞。然而，此情況屬於極端條件，並不常見於一般情境。

講者Joong-Ku Lee先生總結LfT框架技術，可幫助機器人自主學習與執行危險環境的複雜任務，透過結合人類專業技能與機器人精確度，可收集豐富的遠端操作數據，持續改善並演進學習過程，從而提高任務效率以及穩定性，降低操作員持續參與需求。未來此框架可望運用於更多需要精密控制的領域，在放射性廢棄物管理、工業自動化等領域支援技術實務。

5. 提高HYPEX®離子交換樹脂固化過程無機聚合物性質 - Enhancing Geopolymer Performance in the HYPEX® Conditioning Process for Ion Exchange Resins

無機聚合物是一類以鋁矽酸鹽材料與鹼性溶液反應形成的無機聚合物材料，目前全球已有多個國家如斯洛伐克、捷克、英國與韓國等，嘗試並研究採用不同的無機聚合物進行放射性廢棄物固化，其固化體具有良好的化學穩定性及機械性能，能有效包覆放射性核種。

講者Francesca Crivelli女士來自義大利都靈理工大學(Politecnico di Torino Italy ,PoliTo)，介紹了關於以偏高嶺土基無機聚合物(metakaolin-based geopolymers)固化廢離子交換樹脂技術之研究結果。該技術由義大利綠地公司(Green-Land S.R.L.)與都靈理工大學合作開發，並於WM Symposia 2024首次發表，適用於處理放射性離子交換樹脂(Radioactive Ion Exchange Resins, IEXs)的固化技術。與傳統水泥固化法相比，該技術能夠在常溫條件下操作，並且證明固化體樹脂含量可從傳統10wt%提高至少20wt%。

本研究進一步改變處理過程條件，如加入真空條件增強無機聚合物(geopolymer)的性能，提高其作為中、低放射性廢棄物固化基材(conditioning matrices)的能力。研究發現，真空環境下進行混合程序可去除氣泡並增加材料均勻性，從而提升抗壓強度與降低滲透性，從而允許摻入更高樹脂量，提升固化效率。

在實驗設計方面，聚焦於探討三個主要變數的影響：嘗試調整樹脂含量(20 wt%、30wt%)、真空環境及加入惰性材料(砂)(0wt%、15wt%)，並且進行系列實驗測試樹脂和惰性填料含量、真空強度等變數，並根據抗壓強度、耐水性、滲透性和孔隙率測試確定最佳組合。

經過28天常溫養護後的樣品進行抗壓強度測試、耐水性測試、銻離子瀝濾測試與孔隙度測試。結果顯示，樹脂含量越高，抗壓強度明顯降低，但加入真空環境變數後，能顯著提升材料的機械性能，平均強度提高約25%。相反地，添加砂會降低抗壓強度，但透過真空環境可部分抵消砂所造成的負面影響。耐水性測試結果顯示，真空條件下製備的樣品具有更佳的抗壓性能。孔隙度分析則指出，較高的樹脂含量樣品具有較低孔隙度，而加入砂能進一步降低孔隙度，有助於提升抗瀝濾性。銻離子瀝濾測試結果亦證實，添加砂的樣品因孔隙度降低而呈現較佳的抗瀝濾性，但真空條件對此影響不顯著。

依據義大利國家放射性廢棄物接收標準，均質之中階廢棄物的抗壓強度需超過10MPa，銻離子瀝濾指數需高於7。實驗中，含20wt%樹脂的樣品除含砂且未使用真空條件製備者外，均符合此標準。而30wt%樹脂含量的樣品中，只有在真空條件下不添加砂的樣品達到要求，顯示真空混合技術能夠有效提高無機聚合物固化基材的性能。

總體來說，透過真空條件混合無機聚合物漿體能夠顯著提高其機械性能，成功實現30wt%樹脂含量的安全固化，且符合義大利之處置標準，可望降低放射性廢棄物處理成本，具有重要的實務運用價值。

6.加拿大核子實驗室燃料管理策略 - Canadian Nuclear Laboratories' Fuel Management Strategy

加拿大原子能有限公司(Atomic Energy of Canada Limited, AECL)，即現在的加拿大核子實驗室(Canadian Nuclear Laboratories, CNL)是加拿大核能研究與管理的重要機構，七十多年來的核能研究產生大量放射性廢棄物與用過核子燃料。加拿大核子實驗室的燃料管理計畫(Fuel Program)負責制訂並執行全面性的管理策略，以妥善處理加拿大原子能公司所擁有的用過核子燃料。

根據加拿大用過核子燃料的長期管理策略，由放射性廢棄物管理組織(NWMO)負責建置深層地質處置設施與運輸系統，大多數加拿大原子能公司用過核子燃料將運往地質處置設施進行最終處置，因此加拿大核子實驗室需確保用過核子燃料符合廢棄物接收標準，並配合預計於2055年至2065年進行的運輸時程。

加拿大原子能有限公司現有用過核子燃料約有83%(約420噸)來自加拿大重水鈾反應器(Canada Deuterium Uranium Reactor, CANDU)，根據初步評估，大多數燃料可直接送往處置場處置。用過核子燃料總存量的17%為研究用反應器用過核子燃料，則需要經過固化(conditioning)才能符合地質處置設施之廢棄物接收標準。研究用反應器用過核子燃料中約半數(48%)是二氧化鈾型式，需要縮減尺寸、減少反應性並重新包裝後才能進行處置。剩餘燃料由多種類型的燃料組成，這些燃料的化學反應性比二氧化鈾更強，並且經過濃縮，大部分是由化學性質更活潑的燃料材料製成，有些含有自燃物質，並且覆蓋著耐腐蝕性較差之鋁製包覆層，並不符合廢棄物接收標準，需要再進行安定化、降低反應性和重新包裝以滿足運輸及處置要求。

目前大部分研究用反應器用過核子燃料存放在查克河實驗室(Chalk River Laboratories, CRL)之廢棄物管理區內瓷孔(tile holes)形式之地下貯存結構，然而隨著結構的惡化，可能會向環境中釋放污染物。加拿大核子實驗室經過評估，為利強化安全性和降低風險，針對加拿大原子能有限公司用過核子燃料制定整體綜合管理策略，包括以下關鍵要素：

- 再取出能力(Retrieval capabilities)：建立技術，從現有貯存設施中回收歷史遺留的用過核子燃料。
- 特性鑑定能力(Characterization capabilities)：對回收的燃料進行識別與放射性、物理化學特性分析與量化。

- **處理與安定化能力(Conditioning capabilities)**：將研究用反應器用過燃料轉化為穩定、可貯存或可處置的狀態，並努力減少最終處置之體積。
- **包裝能力(Packaging capabilities)**：將燃料以符合貯存與最終處置需求容器進行包裝，因應最終處置的需求。
- **貯存能力(Storage capabilities)**：提供現代化且符合法規之中期貯存設施，以貯存回收與處理後的燃料，直到最終處置設施可運轉為止。
- **處置能力(Disposition and disposal capabilities)**：為加拿大原子能有限公司的用過核子燃料提供符合法規且具安全性之最終處置途徑。

根據此策略，CNL將分階段設置下列系統或設施，建置相對應之廢棄物管理技術能力：

- **瓷孔廢棄物回收系統(Tile Hole Waste Retrieval, THWR)專案**：旨在設計和製造從瓷孔中回收用過核子燃料所需的系統和設備。
- **屏蔽固化設施(Shielded Conditioning Facility, SCF)專案**：設計和建造熱室，以利回收研究用反應器燃料，並對用過核子燃料進行安定化、固化和重新包裝，以供最終處置。
- **高放射性廢棄物貯存設施(High Level Waste Storage Facility, HLWSF)專案**：用於接收來自屏蔽固化設施之固化和重新包裝的研究用反應器燃料並貯存，直到處置設施可用。

針對不符合廢棄物接收標準的研究用反應器燃料，需透過安定化與處理程序製成與CANDU用過核子燃料等效之廢棄物形態，以便適用最終處置技術與安全依據。對此，加拿大核子實驗室已設計系統之處理流程，如下圖2，根據燃料類型不同，採取相對應的處理步驟。主要流程包括：

- **拆解與切割(Disassembly and Sectioning)**
- **去除包覆層(Cladding Removal)**

- 安定化處理(Stabilization)
- 降低反應性(Reactivity Reduction)
- 製成燃料顆粒(Pellet Formation)
- 包裝與貯存(Packaging)

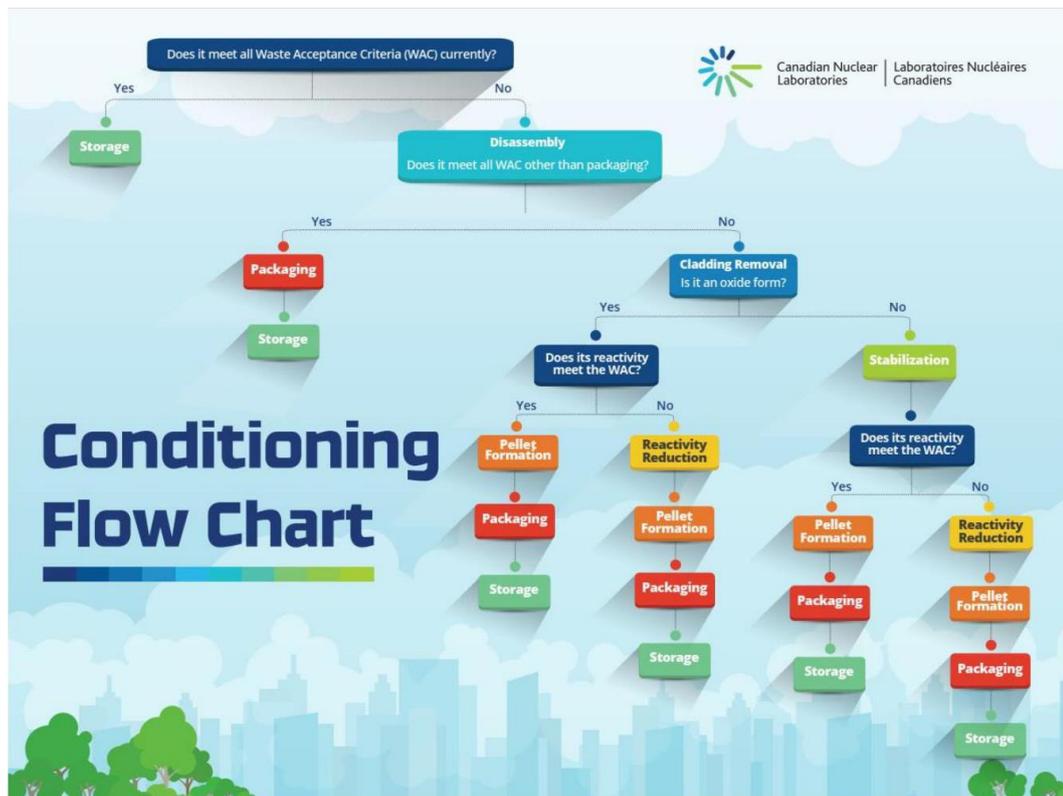


圖2：用過燃料處理流程圖

鑒於處理研究用反應器燃料之複雜性，講者Sarah Klein女士總結加拿大針對研究用反應器用過核子燃料管理已制定長期規劃與技術建置策略，透過整合資源與逐步建立相關設施，積極面對技術難題。

7.加拿大核子實驗室近地表處置設施與廢棄物認證計劃 - The Near Surface Disposal Facility and Waste Certification Program at Canadian Nuclear Laboratories

加拿大核子實驗室規劃建置一座近地表廢棄物處置設施(Near Surface Disposal Facility, NSDF)，以處置由加拿大原子能公司之低放射性廢棄物，

NSDF建設之另一目的是為了清理和修復查克河(Chalk River)的受污染土地，並促進區域振興。查克河場址建立於1940年代中期，主要用於暫存核能運用科學與技術活動產生之放射性廢棄物，例如用於癌症檢測和治療的醫用同位素。

NSDF是加拿大第一座放射性廢棄物處置設施，該設施僅接收低放射性廢棄物，主要來自加拿大原子能公司及查克河場址，設計壽期達到550年，此設施將容納一百萬立方公尺廢棄物，預計完成10個廢棄物處置單元，如下圖3。加拿大核子實驗室為NSDF設計如下系列之隔離措施，可將低放射性廢棄物與環境隔離，保護公眾和環境免受放射性廢棄物的影響：

- 結合天然和工程屏障：可將廢棄物與環境隔離超過550年，遠超過廢棄物放射性衰減至自然環境水平所需的時間。設施內的放射性物質大約在100年內會衰減至自然環境中的水平。
- 基礎襯墊系統(Base Line System)：NSDF設有約1.5公尺厚的基礎襯墊系統，以防止廢棄物滲漏。
- 覆蓋系統(Cover System)：NSDF具有約2公尺厚的覆蓋系統，包括植被、土壤和其他材料，保護廢棄物，使其與環境隔離，防止極端天氣條件對設施的影響，並減少雨水滲透。
- 滲濾液收集系統：NSDF具備主要和次要的收集系統，用於收集污水，並在專門設計的廢水處理廠進行處理。
- 廢水處理：污水會被收集並在廢水處理廠處理，處理後會先經過測試，以確保符合排放標準，保護人類和環境。
- 環境監測系統：NSDF周圍設有一系列之環境監測系統，用於採樣並監測空氣、水和地下水品質。
- 長期監管：NSDF在關閉後的數百年內，將持續受到營運機構之監督，包括長期之監測計畫，以確保設施依設計運轉，並及時解決任何問題。

- 選址考量：NSDF位於海平面以上約163公尺，比渥太華河的目前水位高約50公尺，遠離洪氾區。選址在基岩山脊上，可自然地將水導離河流。



圖3：NSDF營運階段模擬圖

目前加拿大核子實驗室正在積極推動NSDF建置進度，並已在2024年1月獲得建造許可。此外，加拿大核子實驗室已經提交了最終的環境影響評估報告，並且根據公眾和原住民的反饋，對計畫項目進行調整。

為了準備申請NSDF設施營運許可，並增強現有之廢棄物管理流程，加拿大核子實驗室正在開發加拿大首個低放射性廢棄物處置認證計畫(Waste Certification Program)，為廢棄物包件建立詳盡之認證程序，包括須提供廢棄物歷史和特性、包裝程序和形式、廢棄物包裝及內容目視檢查，與接收機構完成之最終認證和驗證程序。此一過程確保廢棄物滿足廢棄物接收標準中詳細列出的要求，並將產生者與認證者資訊分離顯示，以保持程序獨立性。目前，NSDF廢棄物認證計畫正在由查克河實驗室(Chalk River Laboratories, CRL)部分廢棄物產生機構試行並持續完善。

8. 斯洛維尼亞建設中之中低放射性廢棄物最終處置設施 - Slovenian LILW

Disposal Facility Under Construction

斯洛維尼亞計畫興建一座中低放放射性廢棄物最終處置設施，為世界首座採用近地表筒倉(near-surface silo)處置概念設計之設施，用於接收核電廠的營運和除役廢棄物、貯存設施(醫療、工業和研究產生的廢棄物)、研究用反應器的除役、設施營運以及現場建築物除役廢棄物，該設施設計僅接收短半衰期的固體中低放射性廢棄物。

該設施自2004年起在全國範圍內進行選址，根據地質條件、岩石類型及其地球化學性質、地下水存在情況、地震學、地質構造、地形穩定性等進行評估，總共確定了12個潛在地點，從中選擇其中3個地點進行更詳細的分析篩選，最後選定克爾什科(Krško)市鎮內的弗爾比納(Vrbina)做為場址。經過分析可行處置方案，如地埋筒倉處置(buried silos)、隧道處置(disposal in tunnels)和地表處置(surface disposal)等方案，及根據2009年國家規劃法令(Decree on national planning, DPN)要求，最終採用近地表筒倉(near-surface silo)作為處置方案。

近地表筒倉處置概念結合了傳統的地表與地下處置技術。筒倉內徑27.3公尺，深56公尺，主體由主牆、次牆和維護井組成，筒倉每層可容納99個混凝土容器，單一筒倉總處置容量合計可達990個容器，如下圖4。

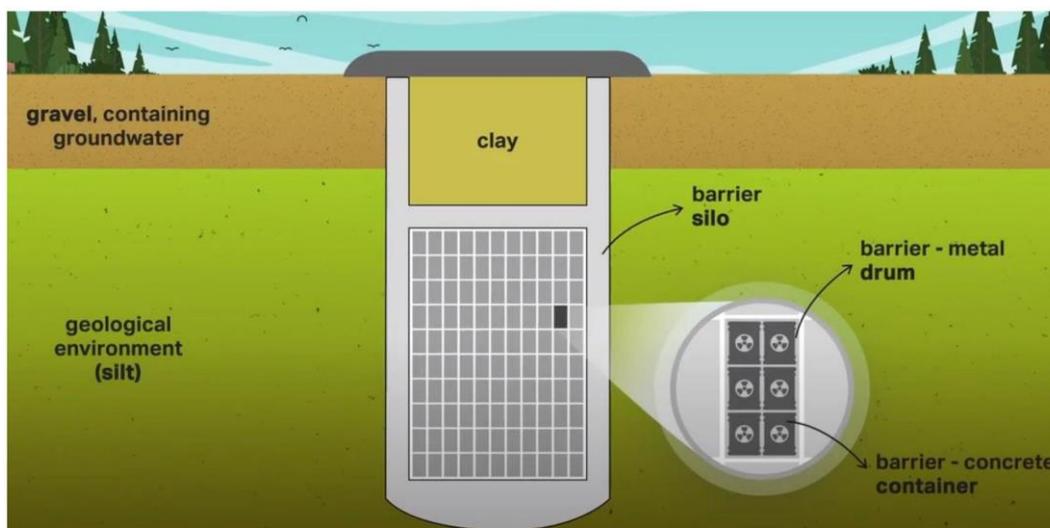


圖4：近地表筒倉處置概念與多重屏障系統

該設施採用多重屏障策略，廢棄物包封與隔離功能採用多重之工程與天然屏障方式。第一道工程屏障是用於存放廢棄物的金屬桶，第二道是N2d混凝土容器，該容器於2017年取得認證，可容納12個200公升金屬桶，混凝土厚度約在200-230公分不等，第三道屏障是筒倉本體，最後第四道是低滲透性地質環境。容器與筒倉採用高性能混凝土，確保長期耐久性，並盡可能使混凝土緩慢降解，以防止放射性核種從筒倉內快速遷移至環境。場址封閉時，容器與筒倉牆體間空隙將以回填混凝土填充，所有空隙、豎井及筒倉排水系統也以回填混凝土完全密封，並於最上層覆蓋厚黏土層，使筒倉成為一體化結構。

該處置設施建設期長約三年半，於2023年8月開工，預計2026年初完工，施工完成後，周邊環境將種植當地的植物與樹木，形成新的生態棲息地，確保該設施與環境和諧共存。筒倉上方廠房建築採用可再利用建築設計，未來若建設新的筒倉，該廠房可移動至新筒倉上方繼續使用。

該設施預計自2028年開始運轉，至2059年封閉，並啟動達300年之監管期進行長期監測及維護工作，包含50年的主動長期監管和250年被動監管，之後該區域將無限制地開放供當地社區使用。

9.韓國用過核子燃料乾式貯存容器安全審查與檢查導則 - Guideline for Safety Review and Inspection of Spent Fuel Storage Casks in Korea

韓國核能安全技術院(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)負責對核能管制機關核能安全委員會(Nuclear Safety and Security Commission, NSSC)提供技術支援。講者Jeongeken Lee博士目前擔任該院核燃料循環設施管制項目經理，介紹了韓國自發布高放射性廢棄物管理基本計畫後，管制機關針對該計畫進行的重要法規變革。

2021年12月韓國產業通商資源部(Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE)發布「第二次高放射性廢棄物管理基本計畫」，確立政策方向為設置臨時貯存設施管理用過核子燃料，計畫並指出在臨時貯存設施正式營運前，核電廠內將有必要設置臨時貯存設施，並建議採用已驗證安全性之乾式貯存。根據該計畫，韓國水力原子力公司(Korea Hydro & Nuclear Power, KHNP)開始於各核電廠廠址陸續建置臨時貯存設施，由於相關設施申請許可時間表逐漸明確，管制機關亦配合建置並完備相應之法規基礎及檢查制度。

韓國於2020年修訂核能安全法(Nuclear Safety Act, NSA)後，引入用過核子燃料貯存容器設計審核制度、制定相關技術標準並建立法規體系，完備用過核子燃料貯存容器設計之審核，與製造階段之檢驗相關技術標準及申請程序法規，如2020年11月頒布之用過核子燃料貯存容器安全分析報告安全審查導則(Safety Review Guideline for SAR of SF Storage Containers, KINS/GE-G003)。此導則以輻射安全管理技術標準(Radiation Rules)以及韓國核能安全委員會制定的貯存容器安全分析報告準備通知為基礎，並參考了美國核能管制委員會NUREG-2215文件。

Lee博士提到，在韓國引入貯存容器設計審核制度之前，預備在核電廠內建設並營運乾式貯存設施的經營者，必須先完成乾式貯存設施及貯存容器設計核准，然後依據核能安全法第20條申請營運修改許可(Operating Amendment License)，經管制機關完成對乾式貯存設施與容器的安全驗證，並核發營運修改許可之後，經營者才可開始製造容器或向供應商下單。此流程耗時較長，並導致乾式貯存設施延後正式營運期程。

在貯存容器設計審核制度下，由於容器的安全性已在設計審核階段經由管制機關完成評估，因此無需在營運修改許可的審查過程中再次進行驗證，審查重點可聚焦於評估乾式貯存設施及其場地特性，管制機關通過調整法規，取消

對已獲設計核准容器於營運修改許可階段之額外安全驗證需求，此項變更將大幅縮短審查範圍和所需時間。此外，已獲得設計核准容器可在乾式貯存設施營運修正許可證核發前進行製造，一旦取得營運修改許可，可立即接受管制機關製造檢查。當貯存設施建設完成後，容器亦能立即進行使用前檢查，並快速運送至場址投入使用，縮短整體專案時程。

韓國逐步完善核能安全的法律架構與檢查程序，整合貯存容器設計審核制度，在確保貯存容器的安全性前提下，減少了後續營運修改許可審查時間，提高審查效率，並允許提前進行容器生產，縮短專案時程，確保乾式貯存設施之安全且符合法規要求。

10.愛達荷州用過核子燃料設施概念設計 - Conceptual Design of the Idaho Spent Nuclear Fuel Staging Facility

講者 William Kirby 先生介紹美國愛達荷國家實驗室 (Idaho National Laboratory, INL) 正在推動的用過核子燃料暫存設施 (Idaho Spent Nuclear Fuel Staging Facility, SNF-SF) 計畫。該計畫由愛達荷環境聯盟 (Idaho Environmental Coalition, IEC) 代表美國能源部執行，現階段由愛達荷國家實驗室所管理用過核子燃料總量約為 285 公噸。

根據 1995 年簽訂的《愛達荷州和解協議》 (Idaho Settlement Agreement, ISA)，所有用過核子燃料必須在 2035 年前遷出愛達荷州。由於原預期亞卡山處置場將於期限前完成，但後來該計畫已被取消，為履行協議承諾，能源部已著手推動 SNF-SF 計畫，於美國愛達荷國家實驗室的技術與工程中心 (Idaho Nuclear Technology and Engineering Center, INTEC) 設置暫存設施，作為用過核子燃料等待最終處置場或集中中期貯存設施 (Consolidated Interim Storage Facility, CISF) 啟用前的暫時貯存基地。

根據2021年研究與2024年的替代方案分析(Analysis of Alternatives, AoA)，確定最適方案為室外之乾式垂直筒貯存平台(Staging Pad for Vertical Storage with Full Capacity)。根據此概念設計，SNF-SF將採用混凝土基座及直立式圓柱筒型式之貯存護箱，設計容量為200個多用途密封鋼筒(multi-purpose canisters)。

考慮貯存護箱之排列配置、燃料運輸方式與設施空間規劃，及將來燃料調度與回收效率，採用5×X及3×X排列方式，確保各個護箱儲放位置可在最少搬移情況下存取，提升營運靈活性。設計配置如下圖5，除主要貯存區外，尚包括：

- 製造平台(Fabrication Pad)
- 傳送護箱轉運站(Cask Transfer Station, CTS)
- 運輸通道(Travel Path)
- 與CPP-603模組化倉庫連接

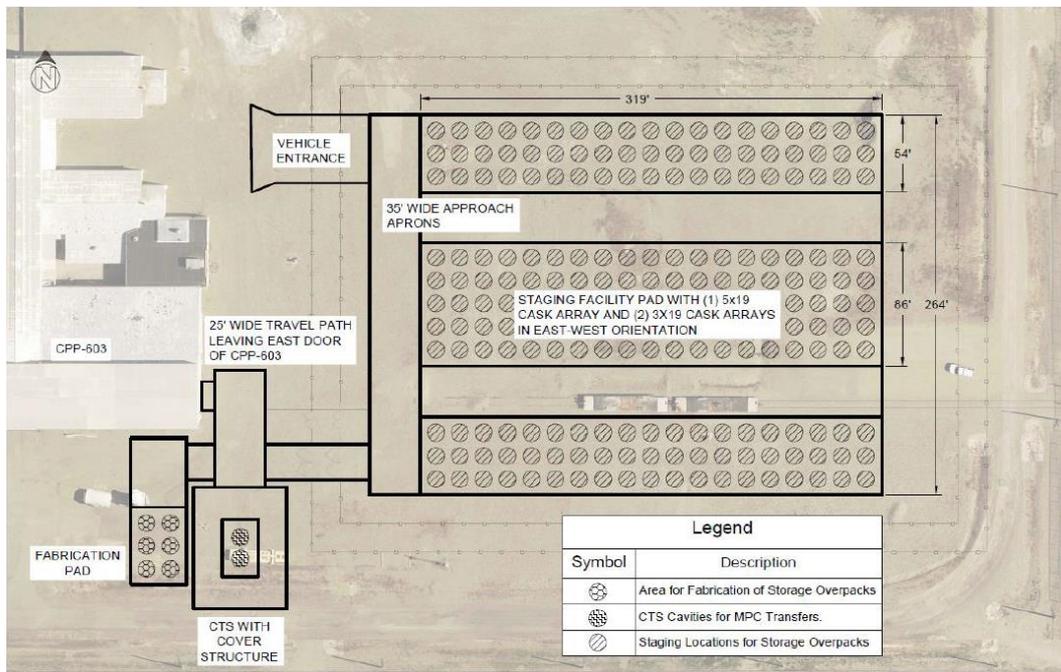


圖5：用過核子燃料暫存設施(SNF-SF)配置圖

鑒於預定設置區域曾有建物存在並進行多次整地行動，為了確認SNF-SF

計畫是否適合在該地點設置，地質團隊於2024年3月執行鑽探與取樣調查，總計完成5處鑽井，深度達32–35呎，直到玄武岩基岩層。調查結果指出整體地質條件適合設施建造，但應先移除0–5呎深處之填土與鬆軟粉土，以確保場址基座地質穩定性。

根據概念設計，SNF-SF的營運流程分為兩階段：貯存階段與未來運出階段，並已規劃營運設施所需之全套作業流程。

貯存階段：

1. 預製貯存護箱(Storage Overpacks)運抵製造平台，灌注混凝土成形；
2. 混凝土固化後，由垂直筒運輸機將貯存護箱運至轉運站；
3. 裝有多用途密封鋼筒的傳送護箱由 CPP-603運至轉運站；
4. 垂直筒運輸機將多用途密封鋼筒由傳送護箱轉移至貯存護箱內；
5. 密封後將貯存護箱運至貯存場安置。

未來運出階段：

1. 空運輸護箱(shipping Cask)與已裝載之貯存護箱被運至轉運站；
2. 垂直筒運輸機執行兩階段轉運：將多用途密封鋼筒自貯存護箱轉入傳送護箱(Transfer Cask)，再轉入運輸護箱；
3. 最終由卡車或火車將裝載好的運輸護箱運出州外。

目前愛達荷環境聯盟已依循能源部指令(DOE Order) 413.3B 提交專案執行計畫(Project Execution Plan)、安全設計策略與概念設計報告 (Conceptual Design Report, CDR)以供審查，並完成關鍵決策CD-1 (Critical Decision 1, CD-1)。下一步將進入初步設計(Preliminary Design)與最終設計(Final Design)階段，預計於2030年開始動工並啟動營運。

美國能源部在核燃料貯存規劃之SNF-SF計畫，提供符合當前法規要求之解決方案，並可因應未來可能燃料暫時貯存需求，以利銜接未來最終處置。

11. 執行者與管制者間建立長期及建設性對話，以法國Cigéo計畫為例 - Developing and Maintaining a Long-Term and Constructive Step by Step Dialogue Between Implementer and Regulator: French Example on DGR “CIGÉO” Project

法國國家放射性廢棄物管理機構(French National Radioactive Waste Management Agency, Andra)自1990年代初期起推動深地質處置專案Cigéo，以妥善管理法國的中階長半衰期(ILW-LL)與高階放射性廢棄物。Cigéo規劃將放射性廢棄物處置在法國東部地下約500公尺深的Callovo-Oxfordian黏土層中，以達到長期隔離廢棄物、防止放射性物質逸散及確保環境與人類安全之目的，預計運轉超過一百年，合計存放約85,000立方公尺之中、高放射性廢棄物。

Cigéo處置設施整體包含地下處置區(分別用於HLW及ILW-LL)、地表設施、及連接地面與地下通道(2個斜坡道及5個豎井)。其中斜坡道區域負責接收和檢驗廢棄物包裝，並透過斜坡道送往地下處置區。所有廢棄物處置完畢後，設施將依據法規申請核准永久封閉，後續於場址封閉階段將以無需人為干預的方式長期確保廢棄物的封存，如下圖6。

2023年1月16日Andra向法國核安全與輻射防護局(French Nuclear Safety Authority, ASN)提交了Cigéo專案建造許可申請(Construction License Application, DAC)，目標是取得初始建造階段的授權，其中涵蓋兩個地表設施和第一個地下單元，並將逐步擴展。

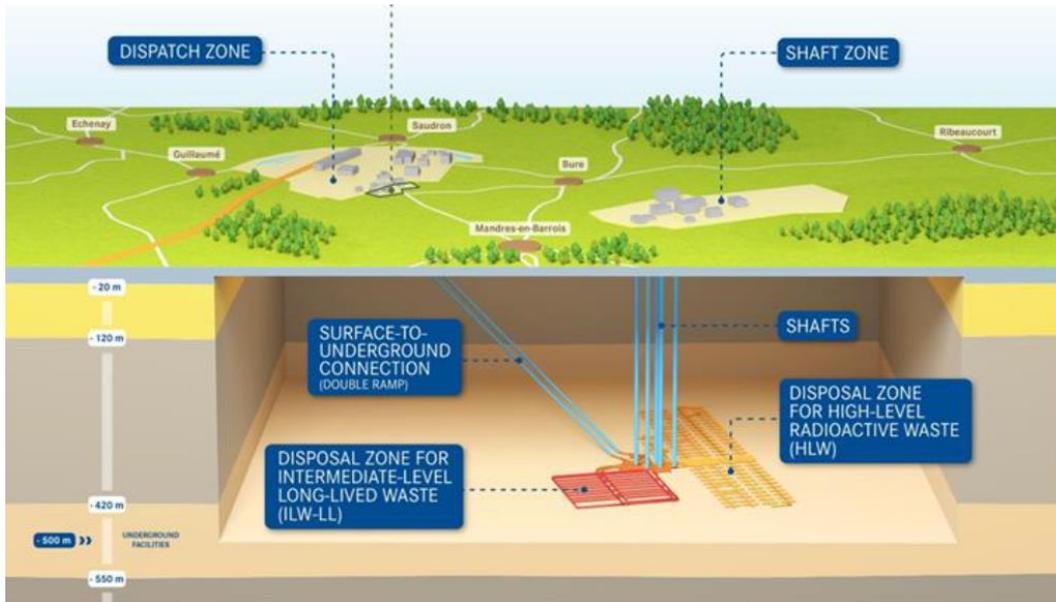


圖6：Cigéo高放深地層處置設施示意圖

為順利推動專案，過去30年間，Andra與管制機關之間透過持續正式和非正式對話持續互動，以達成每個關鍵階段的里程碑。正式對話主要透過關鍵節點提送正式文件給核安管制機關，經審核後由核安管制機關提出正式意見。包括可行性研究、安全評估和設計發展等議題；而非正式對話則針對法規指引、技術問題及安全細節進行深入討論，以確保雙方對專案的共同理解及順利推進。經營者和管制機關間的持續溝通，將有助於提升安全認知、法規變動、確保技術知識的可追溯性。對話的主要目標包含：

- 建立深地質處置場的安全性基本原則，特別是場址封閉後長期安全性
- 評估場址選擇標準並進行初步安全評估，以作為建置地下研究實驗室之準備工作(如取得建置許可)；
- 準備地下設施的可行性及詳細研究
- 與地方利害相關者共同確認地表與地下設施的選址區域；
- 在許可申請過程考慮到工業技術設計逐步發展及演進，如就火災指引及密封等技術文件進行意見交換。
- 依據法規要求，於申請許可前提交安全選項(safety options)。

自2016年安全選項審核以來，現今對話主要目標在於準備建造許可申請及其後續審查工作。目前核安全與輻射防護管理局正委託技術支持單位及專家團隊對基礎資料、營運安全及場址封閉後安全進行詳細評估，同時也進行公開諮詢，確保專案建設獲得社會與法規認可。

此外，Andra也與公眾和其他利害關係人建立對話關係並取得意見回饋，如Andra在2013年就該計畫進行公開辯論後，採納了於計畫中引進工業試驗階段(Industrial Pilot Phase, Phipil)原則之意見。Phipil目標是整合、達成共識，並在可能範圍將背景資料提交給國會作為Cigéo專案決策依據。根據法規，Phipil主要有以下兩個目標：1.在實際處置場的環境、建設及運轉條件提供現地驗證數據；2.提供為設計處置場所需資料。Phipil規劃於建造及運轉階段之數年期間執行，具體工作則包括驗證Callovo-Oxfordian地層地質特性、開挖方式，及測試處置設施可逆性，廢棄物包件再取出功能測試等細項工作。Phipil之具體流程、目標與準則目前仍在制定中，將隨著後續協商而進一步釐清。

整體而言，Cigéo專案經驗反映廢棄物管理必須長期且精密規劃，與管制機關、公眾及利害關係人建立持續對話是Cigéo逐步發展關鍵因素，確保放射性廢棄物最終處置計畫在技術支持與社會共識基礎上成功推動。

12.法國DGR計畫Cigéo針對能源政策發展不確定適應性 - Adaptability of Cigéo, the French DGR Project, to Possible Developments in Energy Policy or to Uncertainties in the Management Sectors of Certain Waste

Andra是負責法國放射性廢棄物長期管理的國營機構，自1990年代初以來持續推動深地質處置計畫Cigéo。由於該處置設施預計將運轉長達一個世紀，負責創建設施之當代人員有責任確保子孫後代不受項目初始設計選擇束縛，因此Cigéo計畫在推動之初即遵循可逆性原則，旨在為後代保留對處置設施做出

自由決策之彈性。它基於四個主要方面：處置場的逐步發展、操作靈活性、設計適應性，及確保取出已處置廢棄物可行性。

講者Corinne Bauer先生以Cigéo為例介紹適應性原則，Cigéo設計考慮方向除基於2018年國家清單(2018 National Inventory)所相應國家能源政策之放射性廢棄物參考清單(reference inventory)以外，還另外考慮法國能源政策未來潛在發展及廢棄物管理不確定性，使處置設施之設計具備對未來情勢發展之適應性。

參考清單涵蓋了現有核電廠和其他授權核設施產生之廢棄物，其情境為假設所有用過核子燃料都經過再處理，現有核電廠反應器使用壽期約為50年。原則如下：

- 假設核電廠持續50年運轉壽期，並對這些設施(包括現有和未來的設施)產生的所有用過核子燃料進行再處理。
- 目前興建中核子設施，包括弗拉曼維爾歐洲壓水式反應器(Flamanville European Pressurized Reactor)、朱爾斯霍洛維茨實驗反應器(Jules Horowitz Experimental Reactor)、國際熱核融合實驗反應爐研究設施(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)運轉產生的廢棄物。
- 不包括未來潛在核能機組所產生廢棄物。

參考清單中高階放射性廢棄物和長半衰期中階放射性廢棄物的體積分別約為10,000立方公尺(其中約40%已生產)和73,000立方公尺(其中約60%已生產)。

儲備清單(reserve inventory)是基於對2018年國家清單中各種能源政策情境下，以保守條件考慮最大化廢棄數量之情境。包含兩種截然不同的用過核子燃料管理策略：(i)對所有用過核子燃料進行再處理；(ii)停止用過核子燃料再處理，並將這些燃料重新歸類為廢棄物。此外，也考慮將核電機組之運轉壽期

額外延長10年。儲備清單另包含研究性質之用過核子燃料，及某些管理途徑仍不確定的長半衰期中低放射性廢棄物。而對於所有用過核子燃料進行再處理方案，由於核電機組運轉壽期延長而產生的高放射性廢棄物和低放射性廢棄物之數量相當於：

- 高階廢棄物數量增加約17%；
- 長半衰期中低放射性廢棄物的數量略有增加(約0.1%)。

停止用過核子燃料再處理方案將考慮停止處理來自核子反應器60,000多束用過核子燃料，但也伴隨著再處理產生的高放射性廢棄物的減少。儲備清單中長半衰期中低放射性廢棄物體積約為110,000立方公尺。

根據Cigéo儲備清單適應性研究，為確保未來可能產生之儲備廢棄物能進行處置，無論是全部進行再處理或停止再處理方案，高放射性廢棄物增加均需要對應擴大整體高放處置面積。對於儲備清單中長半衰期中低放射性廢棄物也需要增加額外處置區域及處置單元(下圖7)，為了保持接收儲備廢棄物技術可行性，Cigéo已經準備預防措施並將其納入設施初始建設階段，例如增加容納較大尺寸用過核子燃料包裝設計，及增加長半衰期中低放射性廢棄物處置區的支撐結構等，隨著設施後續建設進度，亦可進行其他必要設計調整。

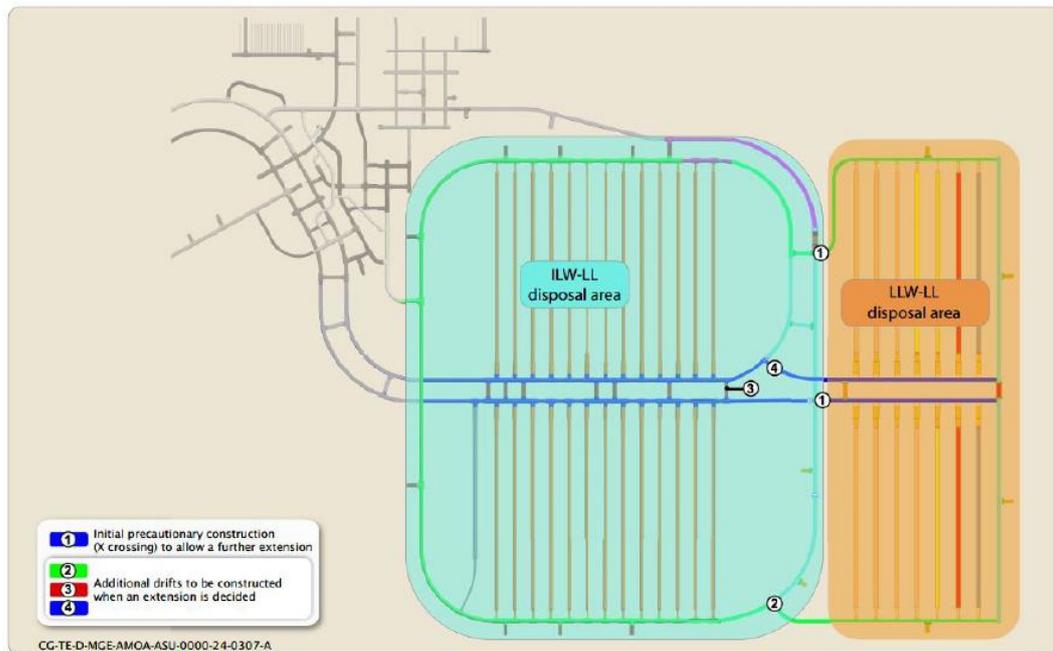


圖7：Cigéo 設施儲備清單長半衰期低放射性廢棄物延伸處置區域示意圖

適應性研究中相關安全評估表明，Cigéo設施在納入儲備廢棄物情境下仍維持安全性能，設施場址封閉後的長期安全性不受影響。研究指出，即使貯存量增加，長期人體健康影響仍極低，遠低於參考值(0.25 mSv/年)，且最大影響出現在極遙遠的未來。營運期間的安全措施亦能有效涵蓋儲備放射性廢棄物特性。

整體而言，經過評估關鍵因素，例如對設施安全的影響、運轉壽期、地下區域範圍、封閉策略以及決策時間，適應性研究結果表明Cigéo目前之設計不會對儲備放射性廢棄物處置形成阻礙。

Andra預期處置計畫推動期間能源政策將可能持續修改，必須持續更新儲備清單，並進行適應性研究來因應能源政策變化。2022年初，法國宣布重啟新建6座EPR2核子反應器，Andra已考慮於下次更新許可證申請時，將預期可能會額外產生之廢棄物數量整合入儲備清單中。

鑑於Cigéo長達一個世紀的發展時間表，在適當的時間解決正確的問題並

避免做出可能需要在未來重新審視的過早決定至關重要。Cigéo專案在考量技術可行性的同時，亦將政策變動與未來不確定因素納入設計，確保設施具備長期適應性。

13.Andra 地下研究實驗室對 CIGÉO 運轉貢獻 - Contribution of the Underground Research Laboratory Andra on Operational Aspects of CIGÉO

法國Meuse/Haute-Marne地下研究實驗室(Underground Research Laboratory, URL)為法國國家放射性廢棄物管理機構Andra之核心研究設施之一，目的為Cigéo計畫(即法國深地質處置場)提供工程設計及可行性論證之科學依據。

該地下實驗室示意圖如下圖8，實驗室位於地表以下500公尺黏土層內，內部結構包含豎井、通風系統、監控中心、地下通道與支撐設施，可全面性模擬Cigéo實際運轉情境，提供未來處置設施營運所需實務經驗及數據驗證。該地下實驗室自1999年啟用至今已累積超過25年的運轉經驗，在地質、工程設計與安全評估上提供關鍵數據，並且幫助Andra建立營運地下設施所需知識與技術。



圖8、法國Meuse/Haute-Marne地下研究實驗室地表及地下設施示意圖

綜觀Andra長期穩定運轉地下實驗室之關鍵，其運轉策略圍繞於建立在可靠性、可維護性、可用性和安全性(Reliability, availability, maintainability, and safety ,RAMS)基礎。特別是地下設施設備(電梯、通風設備等)的部署和維護，及操作安全與火災之風險管理。

在地下設施設備的檢查方面，Andra經歷地下實驗室的長期運轉，累積大量檢查地下結構和監測經驗及知識並將其回饋至實務工作，例如每週對結構進行檢查；每天檢查走廊和廊道(galleries and channels)；現場開放作業前，對豎井進行全面檢查等。在監測方面，Andra根據法國和國際專家委員會(international expert committees)建議，每年委託專業公司對豎井(shafts)和廊道(galleries)進行檢查並提出詳細報告。

地下實驗室維護策略主要是系統性、定期的預防性維護，包括許多非破壞

性測試項目，例如所有電氣設備紅外線熱成像分析，井道內升降機的油分析 (Oil Analysis)、主風扇振動分析項目等。所有預防性維護作業具體執行方式訂於多年期維護計劃中，並且每年進行審查。由於預防性維護策略的實施，根據統計，近20年之維護項目顯示約40%的維護工作用於地下設施；大約25%的維護工作專門針對兩個豎井；僅有大約15%是因為故障請求改正之維護項目。此外，地下實驗室維護部門設有備用零件倉庫，貯存緊急零件及對設施持續運轉所需之關鍵零組件，例如可拆換主通風組件等，總計約4,000項零組件。

在安全與風險管理方面，地下實驗室將「地下火災」列為最高等級營運風險之一，Andra根據火災和通風研究(fire and ventilation" studies)之評估結果，對於火災風險執行相關預防措施，包括限制通道內的熱負荷(例如，不使用木材)、停放機械設備互相至少間隔5公尺、在所有熱動力機械和主要電氣裝置上安裝自熄設備(self-extinguishing)等。

在火災事故階段，Andra透過模擬主要火災場景，制訂針對(熱環境、煙霧、有毒氣體)等狀況之應對措施，並且可依疏散程序將人員疏散到緊急通道。此外，地下設施內長度超過100公尺通道並配備獨立安全避難所，使人員因為火勢無法穿越事故區域情況下，提供將人員迅速帶往安全地帶的額外途徑，如下圖9。



圖9：左：可容納70人緊急通道；右：可容納14人安全避難所

中央控制站和疏散小組在中央緊急通道中配備了地理定位軟體，以檢查地

下設施中的每個人是否都已到達緊急位置。廊道內每隔30公尺安裝一個指引標誌，以便在發生火災時引導人員通過最安全路線到達緊急避難所。中央控制站配備決策支援單元(Decision Support Unit, DSU)，為操作電梯、廊道通風系統等提供安全操作流程。

此外，Andra重視危機管理組織建立及人員技能培養，每3年更新其危機管理組織，並借鑒自身和其他場址經驗來改善其運轉，並為危機管理團隊成員制定訓練計劃，以根據可能面對風險對應發展必要技能。

經由地下實驗室之營運，Andra發展所需系統性維護、科學風險管理與訓練制度，並獲取未來營運Cigéo最終處置場所需知識與技術，對設施之建置與運轉具高度參考價值。

14.芬蘭用過核子燃料地質處置設施安全與永續實施 - Safe and Sustainable Implementation of a Geological Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel in Olkiluoto, Finland

芬蘭的用過核子燃料處置計畫始於1970年代末期，最初透過地質調查評估合適的深地質處置區域與處置方法選擇場址，經過近20年選址程序，最終在芬蘭市議會與政府核准下將處置設施設於 Eurajoki 市的 Olkiluoto 地點。2015年，芬蘭政府經輻射與核安全局(Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland, STUK)核准後，正式核發建造許可。2021年12月30日，Posiva公司依據芬蘭放射性廢棄物處置許可審核程序已提送營運許可申請，申請文件涵蓋設施營運安全、長期安全、保安及保障等多個層面，並附有場址封閉後安全性評估。

目前Posiva正為未來營運階段進行前置準備，預計於2020年代中期正式啟動用過核子燃料處置作業，地下設施的前五個處置隧道已於2022年6月完成開

挖，首批貯存罐具體處置位置也依據2024年之試驗孔數據選定。同時，封裝廠及工程屏障系統(Engineered Barrier System, EBS)主要設備之認證、生產及驗收測試亦在進行中。

2024年8月30日正式啟動最終處置試運轉(Trial Run for Final Disposal, TRFD)的啟用測試(Commissioning Test)，透過全尺寸現場測試設施以監測工程屏障和母岩(host rock)的早期演變，並從未來營運階段之程序、設備及人員各方面驗證處置系統的長期安全性，測試項目包含模擬燃料運輸、封裝、儲罐處置作業，及緩衝材、回填(backfill)及隧道封閉作業，及從底層貯存位置回收儲罐。啟用測試於約420公尺深處以全尺寸系統安裝測試 (Full-Scale System and Installation Test, FISST)方式進行，如下圖10位置。監測測試隧道(demonstration tunnel)中回填土、緩衝層和密封層中熱、水和機械演變情形。

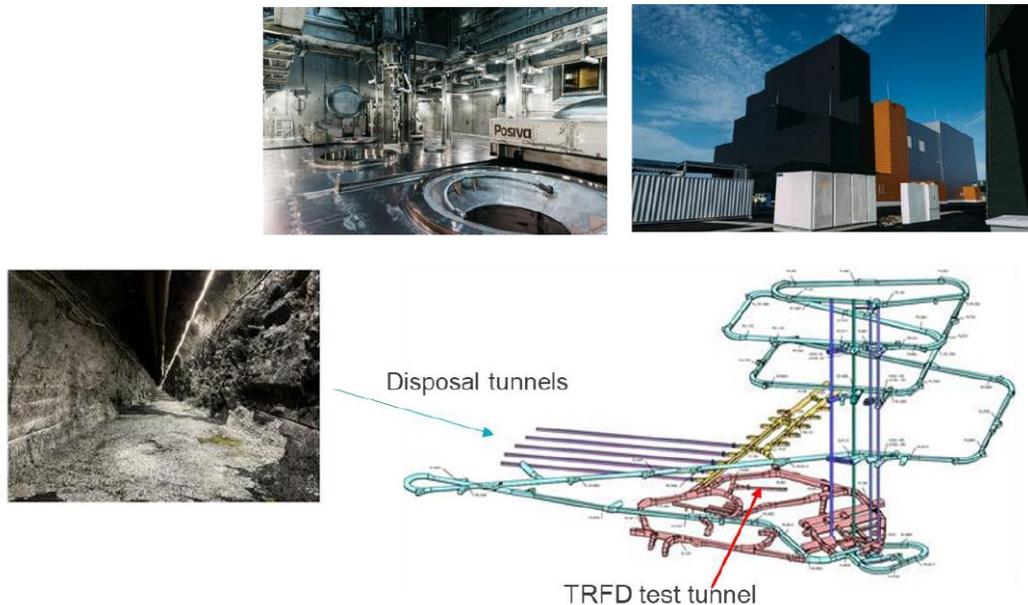


圖10：用過核子燃料處置設施和封裝廠的最終處置試運轉啟用測試。左上：封裝工廠的燃料處理室。右上：封裝工廠的外部。左下：五條挖掘的處置隧道之一。右下：地下處置設施的挖掘部分，顯示了前五條處置隧道和TRFD測試隧道的位置。

測試隧道約50公尺長，包括兩個垂直處置孔(Deposition Hole)，每個處置孔都包含一個配備加熱器的全尺寸KBS-3罐，周圍包覆黏土材料作為緩衝；隧道用黏土材料回填，並用鋼筋混凝土塞(Reinforced Concrete Plug)密封。芬蘭當局，包括輻射與核安全局將會評估封裝和處置用過核子燃料相關流程和程序是否妥適。

由於芬蘭處置設施屬首次實施，且設施運轉期間極長，講者Barbara Pastina女士另外提及芬蘭處置計畫必須於存在不確定性(uncertainties)的情況下做出重大決策(例如對設備或材料的大量投資)。其他行業，例如核能、航空航太、醫療和製藥業，也會面臨於存在不確定性的情況下進行決策的需求，運用不確定管理程序是其他高可靠性組織(high-reliability organizations, HRO)的常見做法。自芬蘭處置計畫開始以來，就將不確定性管理程序運用於風險決策。Posiva在規劃和推動處置設施過程中一直採用系統性和反覆評估修正方法來識別、避免、減少和評估不確定性，即潛在風險來源，並依據當下可用知識及歷史安全案例或安全評估之回饋進行風險管理，對於每項不確定性，都會提出以下問題以建立其管理策略：

- 1.不確定性的主要來源有哪些？
- 2.它們與安全有關嗎？
- 3.如何描述和量化不確定性的程度？
- 4.是否可以避免、減少不確定性或減輕其影響？

經過識別後之不確定性，可以透過設計要求來管理，也可以透過在設計中增加安全餘裕來解決設計基準負載(design basis loads)和條件中的不確定性。

Barbara Pastina女士簡要介紹了芬蘭用過核子燃料處置計畫現狀，面對芬蘭處置設施必須應對的挑戰及不確定性，芬蘭採取以風險為基礎的決策方法，並推動組織學習與適應性管理，以確保安全與持續推動用過核子燃料處置。

三、心得及建議

(一)心得

- 1.本屆會議核心主題訂為「以先進科技、人工智慧與速度實現永續未來」展現出機器人及人工智慧技術在放射性廢棄物管理與除役產業潛力。然而考慮放射性廢棄物作業環境之風險及複雜性，經營者不宜完全依賴先進技術，最終仍需有具備專業技術與經驗之人員參與確認與把關決策，以確保放射性廢棄物安全管理。
- 2.加拿大經過與當地民眾歷時超過十年對話建立信任關係，最終透過社區同意並選定用過核子燃料最終處置場址。法國在推動用過核子燃料最終處置計畫過程採納公開辯論之公眾意見，於設施建造及營運期間納入工業試驗階段，顯示國際間處置計畫之成功經驗，關鍵在於公眾參與及社會溝通，台電公司可參考國際作法，加強公眾溝通，凝聚社會共識，以順遂處置計畫之推行。
- 3.做為法國Cigéo高放處置計畫一環，Meuse/Haute-Marne地下實驗室提供大量工程設計及可行性論證之科學依據。我國高放處置計畫亦規劃於第三階段「詳細場址與試驗」進行「地下試驗設施規劃與建構」，以取得設施現地工程地質特性相關參數，並提供申照安全評估報告設施設計與安全評估精確數據。法國在建置及長年穩定運轉地下實驗室之實務經驗，可供我國後續建置地下實驗室之參考借鏡。
- 4.芬蘭用過核子燃料最終處置計畫已在2024年8月進行試運轉測試，以全尺寸現場測試驗證處置系統的長期安全性，並監測工程屏障和母岩的早期演變，及確認用過核子燃料封裝和處置流程，相關測試數據結果及現場作業經驗回饋，可為未來我國推動處置計畫之科學佐證及經驗參考。

(二)建議

1. 「放射性廢棄物管理研討會」分享最新國際間重大廢棄物處置專案進度，也提供最新放射性廢棄物處理與貯存創新技術成果交流平台。建議定期派員參與類似研討會，除可即時掌握國際間最新廢棄物管理技術發展動態，也可藉此與各國管制機關人員進行技術與經驗交流，增進國際視野並提升管制技術能力。
2. 本次研討會介紹多項放射性廢棄物處理技術創新研究，如照射石墨廢棄物處理、無機聚合物處理放射性離子交換樹脂等創新技術，具有實務運用潛力，建議我國相關產官學研可加強瞭解國際放廢技術進展及處理經驗，並反饋至國內放射性廢棄物管理與管制實務，俾提升作業安全。
3. 參考法國高放射性廢棄物深地質最終處置計畫(Cigéo)發展經驗，顯示與相關利害關係人建立溝通管道，並持續對話取得共識，為計畫推動之關鍵。核安會為督促台電公司最終處置計畫的順利推動，建議參考法國經驗，要求台電公司與相關利害關係人建立溝通管道，加強對話以取得共識，俾利於處置計畫之推動。