

出國報告（出國類別：開會）

赴德國參加放射性廢棄物自然及
工程障壁黏土材料研討會
(9th Clay Conference)

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：林清源技士

派赴國家/地區：德國/漢諾威

出國期間：113年11月23日至11月30日

報告日期：114年2月11日

摘要

本會因應業務需求，於113年11月25日至28日派員前往德國漢諾威，參加由德國聯邦放射性廢棄物處置公司（Bundesgesellschaft für Endlagerung, BGE）主辦的第9屆「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」（Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement 2024, 9th Clay Conference）。本次研討會匯集來自超過25個國家的專家，共計發表250篇論文，與會人數超過400位。會議重點聚焦於以黏土(Clay)作為高放射性廢棄物深層地質處置的母岩，以及壓實膨潤黏土在工程障壁中的應用。研討會提供了設計、建造、營運及場址封閉等全方位議題的交流平台，參與者涵蓋黏土材料研究、工程應用及放射性廢棄物管理領域的專家與新進人員。

國際間長期以來，高放射性廢棄物通常暫時或中期貯存在核能電廠或相關設施內。針對高放射性廢棄物的處置方式，國際科學界普遍認為深層地質處置設施（Deep Geological Repository, DGR）是提供長期安全保障的最佳解決方案，能有效將高放射性廢棄物與人類環境隔離。經過各國數十年的技術探索與發展，目前在深層地質處置領域已累積豐富經驗，為其他國家啟動相關計畫奠定了良好基礎。這些經驗包括制定計畫時需要考量的跨領域議題及社會因素，如建立並維持公眾信任、確保專業人力資源的供應，以及資訊和技術的傳承等。

透過參與相關國際研討會，得以掌握先進國家在高放射性廢棄物處置計畫中的進展，包括各國計畫的推展成果、技術精進與克服挑戰的經驗，並檢討這些資訊對我國處置管制需求的回饋，有助於我國處置計畫與國際接軌，提升我國在廢棄物處置管理及技術管制方面的能力，確保未來處置設施的安全與永續發展。

目次

一、目的	1
二、過程	2
(一) 行程	2
(二) 第9屆「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」	2
(三) 會議議題	5
三、心得及建議	21
(一) 心得	21
(二) 建議事項	22

一、目的

黏土作為放射性廢棄物最終處置設施天然與工程障壁，其相關作用機制相當複雜，主要涉及熱學、水力、力學與化學（thermo-hydro-mechanical-chemical, THMC）耦合效應的因素。透過跨領域研究，可掌握及瞭解地質母岩的詳細特性，並預測工程與天然障壁在各類干擾下的行為。此外，黏土障壁受干擾影響的各項評估，也是最終處置計畫的核心之一，這些研究有助於建立放射性廢棄物最終處置設施的長期行為模式。

黏土被認為是放射性廢棄物最終處置的理想母岩之一，並廣泛用作處置系統中的緩衝與回填材料（buffer and backfill materials）。最常被研究的緩衝材料為含蒙脫石黏土，亦稱為膨潤土。這是因為膨潤土具備多項優異特性，如限制溶質傳輸的擴散性、化學緩衝能力、高放射性核種遲滯性，以及自癒（self-healing）裂隙的回脹能力。作為工程障壁材料，黏土的兩大功能包括：一是保護廢棄物容器免受母岩變動影響，二是吸附放射性核種，延緩釋放時間，直至核種衰變至無害狀態。

第9屆「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」由德國聯邦放射性廢棄物處置公司(BGE)主辦，於113年11月25日至28日舉行，共超過400位學者專家與會，內容涵蓋地質學、礦物學、地球化學、黏土礦物物理與化學等領域的研究發表，以及放射性廢棄物最終處置計畫的最新進展。積極參與此類國際研討會，有助於提升放射性廢棄物管理與管制相關概念、技術與知識水平。

二、過程

(一) 行程

日期(113 年)	地點	工作內容
11 月 23-24 日	臺北→漢諾威	路程
11 月 25-28 日	Hannover Congress Centrum (HCC)	參加第 9 屆「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」
11 月 28-30 日	漢諾威→臺北	路程

(二) 第9屆「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」

1. 會議背景

本次國際會議係第9屆「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」，由德國聯邦放射性廢棄物處置公司(BGE)主辦，其他協辦單位有法國國家放射性廢棄物管理局(French national radioactive waste management agency, ANDRA)、德國聯邦地球科學與自然資源研究所 BGR (Institute for Geosciences and Natural Resources)、荷蘭放射性廢棄物管理機構(Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval, COVRA)、日本原子力發電環境整備機構(Nuclear Waste Management Organization, NUMO)、芬蘭放射性廢棄物處理專責公司 Posiva、瑞典核燃料及廢棄物管理公司(Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB)、瑞士國家放射性廢棄物處置公司(NAGRA)等，會議地點為漢諾威 Hannover Congress Centrum (HCC)會議中心，照片1及照片2為 HCC 會議中心及國際研討會會場。

德國聯邦放射性廢棄物處置公司(BGE)負責德國最終處置設施規劃、建造、運轉與除役，為民營公司形式，但其唯一股東是德國聯邦政府，前身為德國處置設施建造與運轉公司(DBE)。BGE 於2017年4月25日成立，負責高放射性廢棄物處置設施之選址，以及 Asse II 礦場、Gorleben 礦場、Konrad 低放射性廢棄物處置設施與 Morsleben 低放射性廢棄物處置設施之營運，2022年8月員工約1,900人，將承擔執照核准程序中的申請者責

任，而由聯邦放射性廢棄物管理安全辦公室(BASE) 作為管制機關進行審核。

另德國 BGR 隸屬於 BMWK(聯邦經濟與氣候行動部，為經濟與能源發展應用之主管機關)，負責處置領域專案計畫相關的地球科學問題，並參與處置相關領域的研究工作。



照片1 HCC 會議中心



照片2 國際研討會會場

2. 會議相關簡介

第9屆「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」會議現場之分區包括接待區、主要會議室、專題討論會議室(照片3)、海報展示區(照片4)。會議於113年11月25日至28日舉行。

研討會上午於主要會議室進行主題發表會議，下午於三個專題討論會議室同時進行分項研討會，由海報展示單位說明其研究成果，由參加人員自由入座，會議議題包括深層地質處置進度的分享、深層地質處置技術能力建構、開挖擾動帶(Excavation Damage Zone, EDZ)行為研究、核種於黏土材料之擴散與吸附(diffusion-sorption)、黏土材料之 THMC 行為研究、地質化學、氣體於黏土材料之擴散行為、地下實驗室(Underground Research Laboratory, URL)實驗、物質傳輸、鐵/混凝土與黏土交互作用(Clay-Iron/Cement Interaction)、數值分析模擬及水合作用、脫水作用及回脹(Hydration, Dehydration and Swelling)等。



照片3 專題討論會議室



照片4海報展示區

(三) 會議議題

本次會議重點聚焦於以黏土作為高放射性廢棄物深層地質處置的母岩，以及黏土在工程障壁中的應用，研討會提供了高放射性廢棄物最終處置設施天然與工程障壁設計、建造、營運及場址封閉等全方位議題的交流平台，以下分為會議發表內容及海報發表內容，就放射性廢棄物管制相關議題作簡要摘述：

1. 會議發表內容紀要

(1) 「黏土處置母岩之處置設施的優化-從場址選擇到營運」(Optimisation of clay based repository concepts from site selection to operations, Irina Gaus, Nagra, Switzerland)

高放射性廢棄物深層地質處置計畫項目的優化在各個發展階段都受到廣泛關注，由於深層地質處置計畫項目涉及的時間跨度長、資金投入巨大，因此持續優化是確保成功的關鍵要素之一。雖然高放射性廢棄物最終處置設施概念開發的初期重點主要集中在封閉後的安全性，但如今其範疇已顯著擴展，涵蓋設計、工程、成本、環境影響以及社會接受度等多個重要方面。

以黏土為母岩的處置計畫目前正處於從場址選擇前的初步階段，欲進一步往前發展到建設許可提交階段，場址選擇是邁向優化的第一個重要步驟，而隨後的處置設施建設和營運階段則提供了廣泛的優化機會，包括放射性廢棄物來源減量、處置容熱負載、處置設施佈置優化、創新的隧道設計概念、封閉與封閉技術，以及在機器人技術和遠端操作方面的進展。

處置專案優化原則包括：

- i. 「安全第一」為核心。
- ii. 對處置項目進行全方位評估，以確保其在設計、建設、營運和封閉階段的安全性。
- iii. 通過詳盡的規劃，減少對地下環境的干擾。
- iv. 採用最先進的技術與工法，提升施工品質。
- v. 在設計和營運中預留適應未來技術進步和社會需求變化的空間。
- vi. 整合多方資源與專業知識，實現成本效益和營運效率最大化。
- vii. 採用模組化設計。
- viii. 採用標準化的設計方法，在設計過程中引入統一的規範、模組和技術標準，以提高效率、降低成本，並確保設計的相容性和永續性。

講者最後總結，放射性廢棄物於最終處置階段，第一個考慮重點為「安全」，而這需要多方利害關係人的參與，從放射性廢棄物產生初期就介入具有最大的優化效益，包括從減量、分類、管理等面向，可有效減少處置成本，另外，數位科技的導入對於模型建立、處置設施設計優化、成本管控等也是一大突破。

(2) 「與黏土岩相關的實務與考量」 (Claystone-related implementation and consideration, Nadine Schöner, BGE, Germany)

德國聯邦放射性廢棄物處置公司負責執行德國的放射性廢棄物處置計畫，主要為制定處置設施之廢棄物接收標準、深層地質處置設施的建設、營運和封閉工作，並負責高放射性廢棄物處置設施場址的選址，及相關技術之研究與開發等。

講者說明德國目前放射性廢棄物總量，分為高放射性廢棄物與中低放射性廢棄物兩類。高放射性廢棄物預估以 1,900 個乾式貯存護箱 (Castor)

裝載，包括10,500 噸重金屬（來自核燃料元件）及3,836 個玻璃固化體（來自燃料再處理的廢棄物）；中低放射性廢棄物來自核電廠營運與除役部分預估約 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，其中 $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 將被送往 Konrad 處置設施，另外中低放射性廢棄物約 $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 來自 Asse II 礦坑， 10^5 m^3 來自鈾濃縮。放射性廢棄物總量統計上，高放射性廢棄物占 99% 的放射性活度，但僅占 5% 的體積，而中低放射性廢棄占 1% 的放射性活度，但占了 95% 的體積。

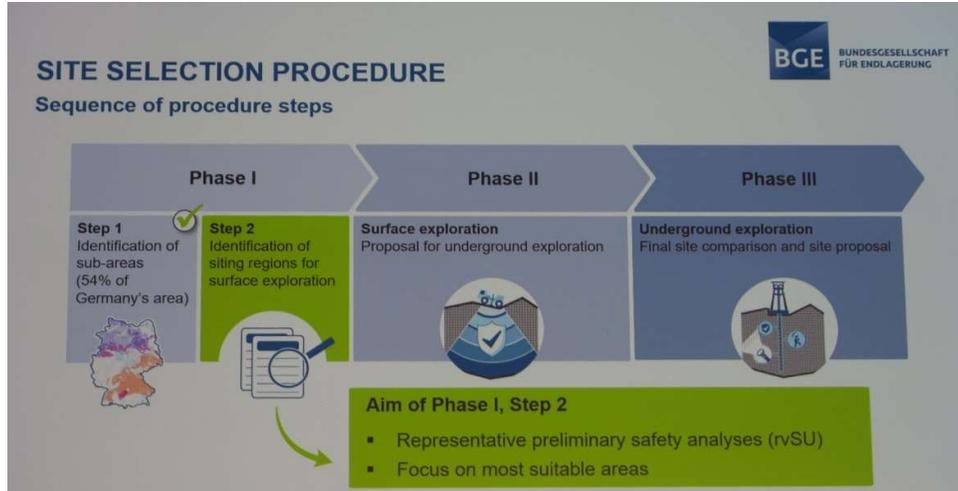
德國「放射性廢棄物處置選址法案」(Standortauswahlgesetz, StandAG) 是為了規範德國高放射性廢棄物深層地質處置設施的選址程序而制定的一部法律，於 2013 年通過，並於 2017 年進行修訂，目的是確保德國聯邦放射性廢棄物處置公司的選址過程具有科學性、透明性和社會參與性，主要原則如下：

- i.地點必須位於德國境內。
- ii.採用深層地質處置方式。
- iii.確保在 100 萬年內達到最佳可能的安全性。
- iv.在處置設施的運行階段，廢棄物需具備再取出功能(retrievability)。
- v.程序上符合社會參與性、科學性、透明性、自我審視性。
- vi.公眾參與程序由法律制定。

德國針對深層地質處置考慮了三種母岩，有岩鹽(Rock Salt)、黏土岩(Claystone)與結晶岩(Crystalline Rock)，選址程序包含三個主要階段(照片 5)，階段 1 先進行子區域識別（占德國總面積的 54%），再執行地表特性調查進行初步安全分析以聚焦於最適合的地區，僅蒐集現有資料但不執行探勘；階段2 提出地下探勘之建議；階段3完成地下探勘及最佳場址建議。2020 年，場址選擇程序階段 1 的結果發表於「子區域中期報告」(sub-areas interim report)，報告排除了德國境內部分區域的處置設施場址搜尋，並確定了 90 個將在階段 1 中進行更詳細調查，其中岩鹽74個、黏土岩9個與結晶岩7個。

目前 BGE 正在縮小選址範圍，目標是在場址選擇程序第二階段中確定若干有利的地表特性調查區域，為保證持續的透明度和對話，關於黏土

岩子區域評估的工作進展已於 2024年11 月初公佈，將邁入步驟 2地表特性調查進行初步安全分析，根據第二階段的工作成果，將在第三階段提出進行地下探測的場址，日後 BGE 將每年發布工作成果。



照片 5：德國選址三階段，地區調查、地表探勘、地下探勘

(3) 「瑞士以安全為導向的場址選擇：深層地質處置設施的地球科學基礎」
(Safety-driven site selection in Switzerland: the earth-science basis for the deep geological repository, Tim Vietor, Nagra, Switzerland)

Nagra 於2024年11月19日向瑞士政府提交深層地質處置設施的通用許可申請，用於放射性廢棄物的最終處置。瑞士的處置設施選址過程旨在最大化地質岩層對多重障壁系統的貢獻，這個申請案是經過16年密集技術研究工作的結果。

Nagra 最終選擇 Nördlich Lägern (NL)作為最適合的處置設施場址，簡報中表示預計可將一般人個人年有效劑量降至法規標準的千分之一以下。最終處置設施的設計將包括一組建置於圍岩區黏土岩層（Opalinus Clay）的被動、長期的工程障壁系統，這些障壁能夠確保滿足嚴格的法規標準，並具有較大的安全餘裕，可持續地長久使用。

此外 Nördlich Lägern 周圍圍岩區具有優越的障壁效能，尤其是在擴散為主的核種遷移傳輸過程中，這是黏土岩層低水力傳導性與自我封閉性相結合的結果，展示了其在長期地質過程中的穩定性。

圍岩區優越的障壁效能主要來自於其黏土礦物含量，在該岩體中，即

使因岩體破裂形成了流體通道，其岩體特性也能迅速恢復極低的水力傳導性，而依據鑽孔和地下實驗室的數據，顯示了黏土含量與岩石強度及水力傳導性之間的高度相關性。

除了圍岩區優越的障壁效能，Nördlich Lägern 場地包含廣大的無地震斷層區域，且結合地下水定年與水文地質模型，顯示地下水文的跨地層流動在候選區中央並不顯著，擴散是該場址主要的傳輸機制。根據各項研究數據，總括來說 Nördlich Lägern 是瑞士放射性廢棄物深層地質處置的最佳場址，能夠滿足長期安全需求。

(4) 「BGR 在 Mont Terri 岩石實驗室的黏土岩研究」 (BGR research on claystone in the Mont Terri rock laboratory, Jürgen Hesser, BGR, Germany)

在德國處置設施選址過程中，鹽岩、黏土岩和結晶岩均為潛在的處置母岩，處置母岩依據德國「放射性廢棄物處置選址法案」StandAG 中定義的最低標準進行評估，已識別的子區域需滿足這些要求，才能成為適合進行探勘的地點。而德國境內的黏土岩層作為潛在的母岩或障壁，僅能通過深鑽孔或礦井顯現，且厚度通常較小或有限，這些岩層露頭(outcrop)獲得的資訊尚無法滿足研究與安全相關的性質的需求(如 THMC 耦合效應分析)。因此，BGR 參與國際合作如瑞士 Mont Terri 計畫，並在其計畫框架下進行實驗，該合作促進了地球科學跨學科專業知識的交流、改進探勘技術和數值分析方法、分析地質及岩土邊界條件對黏土岩層的影響，並探討相關的物理過程。這些研究結果可定性地應用於德國類似的地質結構，可支持其地球科學探勘方法和數值分析設備的開發與測試。

StandAG 中的一項排除標準是有效封閉區內(effective containment zone)的地下水年齡(the age of the groundwater)，有效封閉區指的是一個能夠有效阻止放射性廢棄物污染擴散的地層或區域，在放射性廢棄物處置中，通常是指能夠長期限制放射性核種遷移的地質障壁。BGR 在「孔隙水氣體特徵方法」(Porewater Gas Characterisation Methods, PC-D)實驗中，研究人員使用多種方法提取並分析黏土岩層孔隙水中溶解的氣體，透過各種研究以獲得關於地下水年齡、孔隙水與地下水遷移及交互作用等重要資訊。通過驗證、改進和比較各種替代和創新方法的結果，實驗開發出了適用於特

定場址孔隙水年齡調查的工具和標準，該方法未來可成熟的運用到場址選址過程中。

StandAG 要求，有效封閉區的岩體滲透率必須低於 10^{-10} m/s，BGR 參與了多項實驗以確定岩體滲透率，並測量其隨時間的變化，例如，在「全尺寸放置實驗」(full scale emplacement experiments, FE)中，研究人員在回填材料中安裝加熱器模擬用過核燃料產生之衰變熱，測量了近場及數米範圍內的岩體滲透性，監測結果為溫度影響下回填材料及岩體內 THM 過程的數值模擬提供依據，並為選址過程的安全分析提供了基礎與經驗。

講者表示，地質力學(geomachanical)特性研究針對每個地點進行評估，以作為選址過程中的安全加權標準，BGR 在透過實驗室分析黏土岩層特性的過程中，累積了確定黏土岩層相關特性的經驗，這些實驗室研究涵蓋了黏土岩層的彈性和塑性特性，並考慮了現場取樣、樣本貯存及準備過程的影響。這些研究為數值計算中的材料模型開發以及選址過程的地面及地下探勘奠定了基礎。

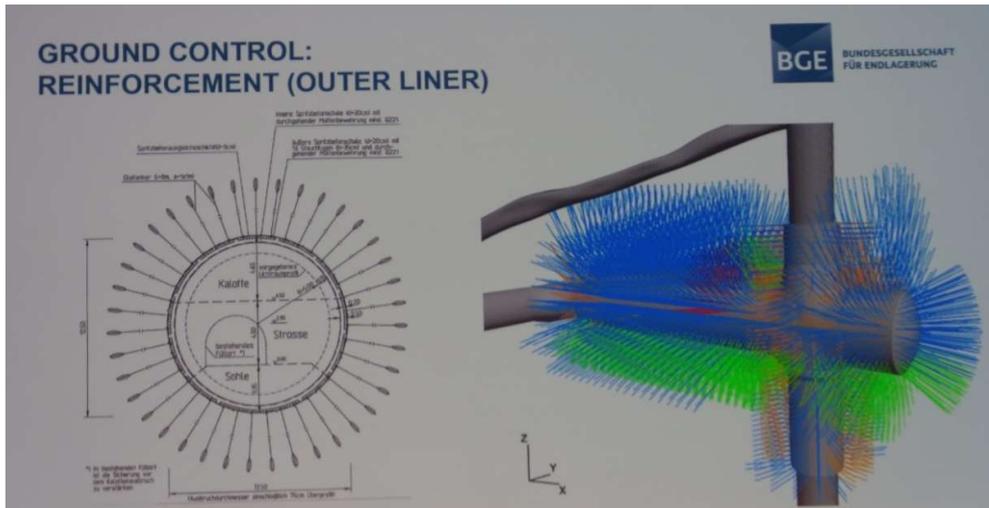
BGR 的研究為德國選址過程提供了標準和方法，可用於現場探勘和安全評估，並改進數值模型以模擬 THMC 過程，提升長期安全分析能力。

(5) 「Konrad 處置設施-應對挑戰性黏土岩層的地表工程控制」 (Konrad Repository: Ground control in challenging clay strata, Thomas Lautsch, BGE, Germany)

德國 Konrad 處置設施的母岩具有複雜的地質特性，貯存層位於穩固的鐵礦岩層中，而處置設施的基礎設施則位於不同的黏土岩層之間。其中一層黏土層(Fladentonsteinserie)構成了2號豎井入口至第二層的一部分。雖然結晶岩系統和砂岩在經歷數年的岩體運動後會趨於穩定，但該黏土層則在數十年內仍保持潛動性(longterm mobility)，這一現象在2號井入口處的第二層尤為顯著，因為該區域附近存在大量構造裂隙。

為控制地面穩定性，Konrad 處置設施在開挖後立即分步驟設置襯砌系統，該系統結構複雜，包括岩錨(rock bolting) (照片6)、噴凝土(shotcreting)及灌漿(injection)。然而，由於黏土層潛動性，內襯設計需要極高的強度，採用高品質混凝土並結合大量鋼材來應對其應力。

講者表示，在整個計畫中學到一個關鍵經驗，在黏土岩層中建設處置設施時，必須充分考慮不同黏土岩層的特性，設計合適的地面控制系統，該系統不僅應包括岩石錨桿和噴凝土，還應在幾何結構和地層配置方面進行智能化設計，以適應特定地質條件(照片7)。



照片6：2號井入口至第二層的岩錨設計圖



照片7：隧道開挖工程現場

2. 海報發表重點紀要

(1) 「放射性廢棄物服務公司最新進展-英國深層地質處置設施計畫的進展情況」(Nuclear waste services update – Progress with the UK geological disposal facility programme)

英國核能除役局(Nuclear Decommission Authority, NDA)所屬的放射性廢棄物服務公司(Nuclear Waste Services, NWS)發表深層地質處置設施(Geological Disposal Facility, GDF)推動計畫的現況及未來發展方向，GDF可永久處置英國放射性廢棄物，並確保未來世代的安全。

GDF推動計畫的社區效益上，社區參與的好處包括創造數千個就業機會、基礎設施投資以及數百億英鎊的當地經濟支持。本計畫英國各地的主要社區合作夥伴，包括 Allerdale、Mid Copeland、South Copeland、Theddlethorpe 等地。

GDF在選址考量因素上，考量了安全性與保安、社區接受度、環境影響、工程可行性、交通便利性與成本效益等六大因素。在目前選址進度上，詳述2014年至2024年的階段性進展，包括社區合作夥伴的建立、地質調查與評估，以及工程可行性試驗等。

英國目前選址具體案例，包括有 Mid Copeland、South Copeland 和 Theddlethorpe 三個候選場址的岩層概況與地理位置圖，Mid Copeland、South Copeland 為泥岩層，Theddlethorpe 為黏土岩層，三候選場址的議會已獲得超過數百萬英鎊的投資，用於多項當地建設。

(2) 「日本深層地質處置計畫概述」(Overview of the geological disposal program in Japan)

NUMO近日發表了日本深層地質處置計畫的最新進展，介紹了日本高放射性廢棄物深層地質處置的現況與相關進程，同時闡述了該計畫的組織架構、選址流程、社會溝通策略以及近期的重大進展。

日本深層地質處置計畫的推動主要執行單位為 NUMO，負責計畫執行、研究與社會溝通，並接受電力公司與核燃料再處理機構的資金支持。

日本的選址流程分為意向調查與選址兩大階段。意向調查方面，

NUMO 先進行全國性的文獻調查及民間訪查，隨後由符合條件的地方機關主動提出申請。選址方面，依序進行初步調查、詳細調查、設施建設，在進行下一階段前均需當地機關同意。自 2015 年以來，NUMO 持續透過全國性研討會和公開對話等形式促進與社會的溝通交流。截至目前，這些活動吸引了數百名參與者，為推動深層地質處置計畫奠定了社會共識。

根據日本經產省2017年針對日本全國進行的地質文獻調查，潛在的處置區域包括北海道的壽都町（Suttu Town）與神惠內村（Kamoenai Village），以及佐賀縣的玄海町（Genkai Town）。地質文獻調查的排除標準為地震斷層、火山活動、侵蝕、礦產資源及地熱資源等因素，以確保潛在地點的穩定性與安全性。

在壽都町與神惠內村，NUMO 積極展開溝通活動，推動與居民的互動。從 2021 年 4 月至 2022 年 3 月，NUMO 在壽都町舉辦了 8 場溝通會議，在神惠內村則舉行了 6 場，促進了地方對深層地質處置計畫的理解與參與。

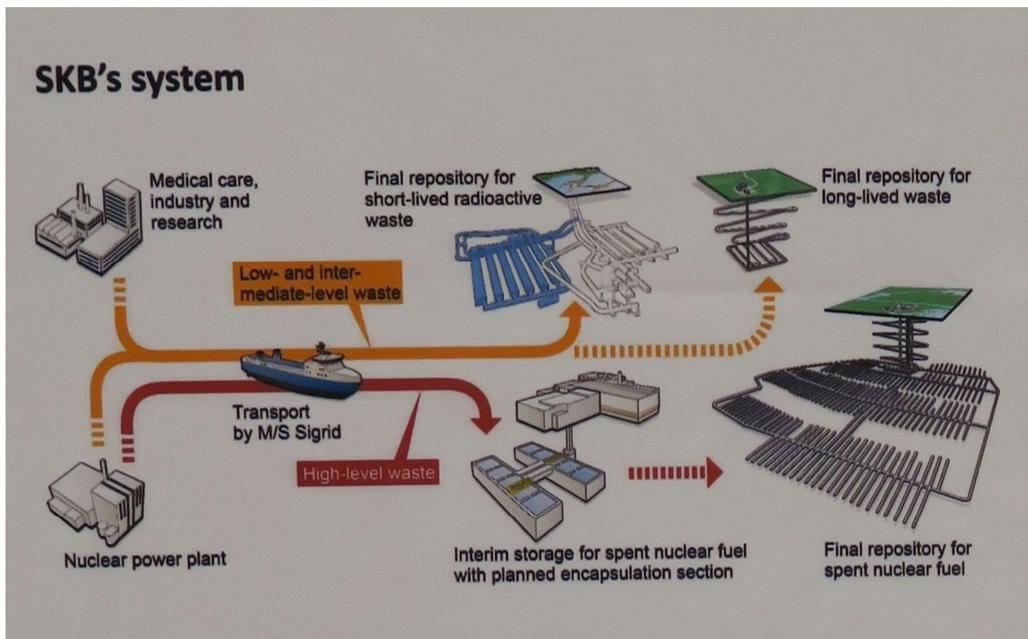
(3) 「SKB 計畫的現況」(Current status of the SKB program)

瑞典核燃料及廢棄物管理公司(SK B)於本次會議說明瑞典處置設施進展與研究方向，強調持續研究與技術變革的重要性。

SKB 的放射性廢棄物處置以示意圖展示瑞典低放、中放及高放射性廢棄物的分類、運輸流程以及相關處置設施的規劃(照片 8)。SKB 計畫在地下 500 公尺深、擁有 19 億年歷史的岩層中，貯存約 12,000 噸用過核子燃料。另外瑞典中低放射性廢棄物處置設施(SFR)位於 Forsmark 核電廠附近離岸約一公里的海床下，由 SKB 管理營運，為世界上第一座建於海床下之坑道式中低放射性廢棄物處置設施。

研究與開發上，SKB 已提交第 17 期研究與開發計畫，並為 2025 年的後續研究做準備，以減少不確定性並優化處置技術，SKB 研究領域包括放射性廢棄物源項、銅容器材料特性、膨潤土、地質環境、生物圈及氣候變遷等因素。對於所面臨的未來挑戰，SKB 強調因應未來可能的需求，需投入新技術與建構設施建設能力，從研究階段轉向建設與營運，需要更聚焦且進行研究、加強知識管理與跨領域合作、增加數位工具與人工智慧

的使用。



照片8：瑞典放射性廢棄物處置方式

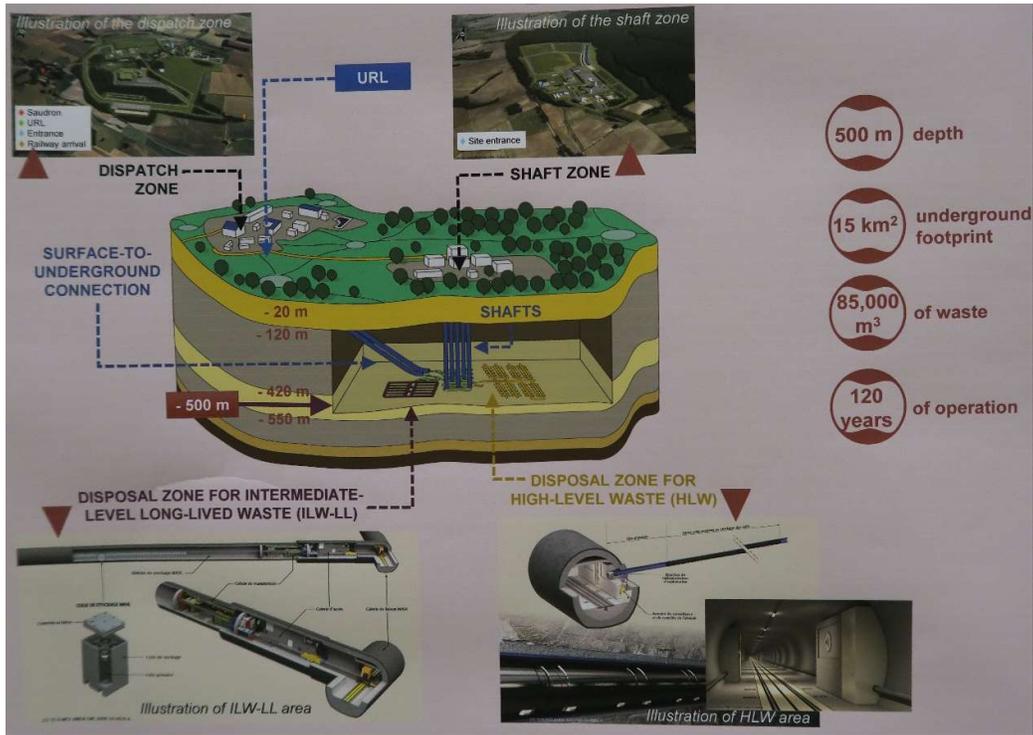
(4) 「法國國家放射性廢棄物管理局執行現況」 (ANDRA – French national agency for radioactive waste management)

法國國家放射性廢棄物管理局(ANDRA)對其放射性廢棄物管理簡介，包括其組織概覽、法國放射性廢棄物的分類及數據、布雷 (Bure)地區深層地質處置中心 Cigéo 的計畫進展，以及相關的研究與開發工具和未來策略方向。

ANDRA 是一個獨立於放射性廢棄物產生者的國家機構，受法國政府委託負責管理放射性廢棄物，目標是確保放射性廢棄物的安全處置，保護當代與未來世代。ANDRA 擁有720名員工，主要核心任務包括放射性廢棄物的收集、貯存、深層地質處置研究等。法國的放射性廢棄物根據活度和半衰期長度分為幾個類別，並統計其總量，不同類型廢棄物分別採進地表處置或深層地質處置等。

Cigéo 深層地質處置中心(照片9)是專門為長半衰期高放射性廢棄物和中放射性廢棄物設計的深層地質處置設施，位於法國布雷 (Bure)附近的天

然黏土岩層中。Cigéo 包括地下500公尺深的處置區域和地表設施，規劃使用120年，預計處置 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的廢棄物。工程規劃分階段實施，目前進入地下實驗室測試和初步建設階段。主要研究活動包括地下實驗室的實驗和模擬技術開發、長期環境監測計畫等。



照片9：Cigéo 深層地質處置設施規劃

(5) 「德國放射性廢棄物處置計畫」 (German programme for radioactive waste disposal)

BGE 介紹了德國放射性廢棄物處置計畫，重點涵蓋中低放和高放射性廢棄物的管理策略、處置設施的選址流程，以及相關的研究與開發活動。

BGE 是德國負責執行放射性廢棄物處置計畫的機構，其核心任務包括制定放射性廢棄物接收標準；建設並營運 Konrad 深層地質處置設施；運轉與關閉兩處舊有處置設施（Morsleben 和 Asse II）；為高放射性廢棄物深層地質設施選址；參與國際合作與研究計畫等。

Konrad 處置設施位於下薩克森州 Salzgitter，前身是一座鐵礦場，可處置中低放射性廢棄物，該設施位於地下 850 公尺深，以厚達 160 至 400 公尺的下白堊紀黏土岩層作為主要障壁，有效確保放射性廢棄物的安全隔

離。

德國高放射性廢棄物深層地質處置設施選址流程依循 StandAG 法案，確保過程透明並以科學為基礎，選址工作包括多階段的篩選與評估，最終目標是在地質條件最佳的地點建設處置設施，確保放射性廢棄物能安全貯存至少 100 萬年。地質條件要求上，優先考慮黏土岩、鹽岩與結晶岩作為處置設施的處置母岩，2020年已確認黏土岩層有90個潛在適宜區域，覆蓋約13萬平方公里。

BGE 持續展開與深層地質處置相關的研究與實驗，主要進行與深層地質處置相關的實驗與模擬，包括岩層穩定性和材料特性的研究、數值模擬模型的應用、地下實驗室試驗等。

BGE 未來將持續完善高放射性廢棄物的處置設施選址流程；強化地質障壁特性的研究，確保放射性廢棄物處置的長期安全；支援新技術的開發與應用，提升放射性廢棄物管理的技術能量。

(6) 「荷蘭放射性廢棄物處置計畫的現況：位於黏土母岩的處置設施」(Status of the Dutch radioactive waste disposal programme : a facility in clay host rocks)

荷蘭放射性廢棄物管理機構(COVRA)自 2020 年起啟動了長期處置計畫，聚焦於古第三紀黏土岩層 (Paleogene Clay)，計畫於2130年前將所有放射性廢棄物移至深層地質處置設施。目前的研究重點在於優化地下隧道結構的設計，以確保長期安全性和技術可行性。

目前荷蘭的放射性廢棄物經蒐集和處理後，貯存於特定設施中，貯存期限可長達至少100年。COVRA 負責執行荷蘭深層地質處置設施研究計畫 (COEPRAL 計畫)，著重於鹽岩與黏土岩的地質研究，三大研究方向為確保場址封閉後的多重障壁系統安全性、放射性廢棄物特性分析與處置成本優化。

古第三紀黏土岩廣泛分布於荷蘭，幾乎在所有的高放射性廢棄物深層地質處置候選場址中均有出現，是重要候選岩層。然而，該層岩石的低硬化程度(poorly indurated clay)為施工帶來挑戰，於該岩層建造深層地質處置設施，需要高成本的技術和設備，且隧道穩定性與施工風險的不確定性

增加。COVRA 正進行處置成本優化，優化的目的是降低設施的營運成本，同時提高安全性。

荷蘭正在調查建造兩座新核電廠的可能性，新核電廠的除役和拆除將產生額外的廢棄物，可能導致處置需求的增加，而模組化的設計可提升處置效率並降低成本。

(7) 「匈牙利放射性廢棄物的現況與進展」 (Status and progress of Hungarian radwaste programme)

匈牙利放射性廢棄物最終處置的規劃與執行，主要由專責機構放射性廢棄物管理有限公司 (Public Limited Company for Radioactive Waste Management, PURAM) 推動，PURAM 成立於1998年，經費來源100%為政府所資助，主要任務是推動深層地質處置計畫並建立公眾對深層地質處置的信心。

匈牙利自 1960 年代開始發展核能以來，產生了高放射性廢棄物和用過的核燃料，匈牙利正積極研究適合深層地質處置的地點，其中位於西南部的 Boda Claystone Formation (BCF) 是主要候選區域。BCF 擁有高達 90% 的黏土含量 和優異的隔離性能，具備深層地質處置的理想母岩地質特性。

PURAM 針對 BCF 展開了全面的地質與水文調查，主要聚焦於 Garics 和 Boda 兩個區塊，進行多種地質鑽探與分析活動，近期重點工作包括進行3D 高解析度地質探勘與2D 水平剪切波(SH-wave)地震反應測量，以進一步確定地質結構，並使用三維數值模型進行水文地質模擬，目的是為深層地質處置提供準確數據。PURAM 制定了針對 BCF 的長期研究計畫，包括進一步的地質探勘與實驗及建立地下實驗室，PURAM 計畫在2036年前完成選址程序。

PURAM 負責運轉 Bataapáti 國家放射性廢棄物最終處置設施 (National Radioactive Waste Repository, NRWR)，其用來處置核電廠營運與除役所產生之中低放射性廢棄物，營運結束後將封閉其處置坑道，PURAM 已著手全尺寸密封系統性能驗證，密封系統關鍵元件為高密度黏土(Highly Compacted Clay, HCC)並填充膨潤土顆粒，技術展示為建立公眾信心之重要一環，驗證內容包括不同材料的密封性能，確保其符合長期隔離要求。

(8) 「美國能源部核能辦公室-處置研究辦公室」 (The office of disposal R&D in the Department of Energy Office of Nuclear Energy)

美國能源部核能辦公室的轄下處置研究辦公室 Office of Spent Fuel and High-Level Waste Deposition，介紹了高放射性廢棄物和用過核子燃料深層地質處置的研究與發展，強調了美國在相關領域的研究與國際合作，展示了先進的科學技術、實驗成果以及未來的研發方向。

該辦公室轄下的三個子部門為處置研發辦公室(Office of Disposal R&D)、貯存與運輸辦公室(Office of Storage & Transportation)、共識基礎選址辦公室(Office of Consent-Based Siting)，現正開發一套整合的放射性廢棄物管理系統，涵蓋用過核子燃料和高放射性廢棄物的貯存、運輸及最終處置。研究重點包括：

- i. 提供美國多種可行的處置方案與技術基礎。
- ii. 增強對處置概念的信心。
- iii. 發展可支持處置概念的科學工具。
- iv. 評估現有雙用途 (貯存與運輸) 容器的直接處置可行性。
- v. 加強國際合作。
- vi. 規劃下一步研究的方向。

另外，該處置研究辦公室國際合作重點包括：

- i. 蒐集相關資訊，掌握科學最新進展。
- ii. 蒐集各國數據和實驗結果。
- iii. 測試和驗證先進的模型和實驗工具。
- iv. 瞭解與實際場址相關的研究需求。
- v. 與國際實驗室合作，降低大型實驗的資源和成本。

該處置研究辦公室建立深層地質處置安全評估的參考範例，以泥岩和鹽岩為案例，展開深層地質處置的多物理場模擬與整合研究(Multi-Physics Simulation and Ietegration)，並使用包括名為 PFLOTRAN 在內的多種數值模擬工具，進行不確定性分析和安全性評估，整合實驗數據，以優化處置系統的設計和性能。

在國際合作參與上，處置研究辦公室以泥岩、鹽岩和結晶岩為標的，

例如瑞士的 Mont Terri 實驗室、法國的 Bure 地區、日本的 Horonobe 與 Mizunami 等，以 HotBENT 專案為處置設施建立工程性能測試。

(9) 「捷克深層地質處置計畫」 (DGR programme in the Czech Republic)

SÚRAO 於1997年成立，為捷克工業與貿易部所成立的放射性廢棄物管理專責機構，SÚRAO 的任務是管理和處置捷克核電廠及其他單位所產出之放射性廢棄物。SÚRAO 介紹了捷克的深層地質處置計畫(DGR programme)，描述了其處置設施設計、研究重點以及執行進度安排。其深層地質處置計畫時間表：

- i. 2020 年：選定 4 個候選場址。
- ii. 2026 年：完成安全論證(Safety Case)研究。
- iii. 2030 年：確定最終場址及備用場址。
- iv. 2032 年：取得場址使用執照。
- v. 2037 年：取得建造許可。
- vi. 2050 年：開始營運。
- vii. 2167 年：結束營運。

捷克深層地質處置設施規格為深度約500公尺的結晶岩地層，共分為2區域，可處置廢棄物類型為高放射性廢棄物約9,000噸，與中放射性廢棄物約4,500立方公尺，長期安全性評估將評估1百萬年之安全隔離要求。其工程屏障系統設計，包括：

- i. 雙層容器，外層為碳鋼，內層為不銹鋼。
- ii. 緩衝材料為捷克鈣鎂型膨潤土（平均乾密度 1,600 kg/m³）。
- iii. 回填材料為膨潤土混合物（平均乾密度 1,400 kg/m³）。
- iv. 結晶岩地層。

捷克膨潤土的緩衝與回填研究，目前研究重點包括評估捷克膨潤土的穩定性與適用性，並與外國材料進行比較；分析膨潤土的蒙脫石含量以決定膨潤土適用性；研究腐蝕、地球化學與礦物學穩定性；研究微生物對膨潤土穩定性的影響；研究膨潤土與計畫使用建材材料的相容性。

(10) 「芬蘭 Posiva 公司用過核子燃料處置設施的進展」 (Progress of Posiva's spent nuclear fuel disposal facilities)

Posiva 目前正在芬蘭 Olkiluoto 建造 Onkalo 高放射性廢棄物處置設施 (照片10)，芬蘭是唯一一個已開始建造(2016年12月)最終處置設施的國家，並將成為全球首個啟動的最終處置設施，同時樹立用過核子燃料安全處置的標準。

Posiva 已於2021年底提交用於用過核子燃料封裝和最終處置設施的營運許可申請，並著手進行最終處置的準備工作，於2024年8月開始進行試運轉(commissioning)。在設施中，所有系統、結構和設備需要通過試運轉測試，試運轉旨在驗證處置容器封裝廠及最終處置設施操作流程的完整性，並使用合格車輛和設備進行處置操作，同時考慮到核設施的監管和安全措施。

處置設施從系統描述、建造計畫到最終的運轉許可，每一階段都需通過核准，包括：

- i. 系統描述與技術規範。
- ii. 建造計畫的核准。
- iii. 建造階段中結構與設備的核准。
- iv. 設備安裝。
- v. 試運轉的核准。
- vi. 核發運轉執照。

在處置設施營運時，將用過核子燃料密封於處置容器內，處置容器將被安置於最終處置隧道中，該設施的隧道深度為400至430公尺，初步階段預計開挖處置隧道約350公尺，包含30個處置孔，預計第一條處置隧道的處置孔將於2025年完成鑽孔。



照片 10：全尺寸(full-scale)系統測試，已於 Onkalo 進行6年

三、心得及建議

(一) 心得

1. 透過參與第 9 屆「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」，得以深入了解全球高放射性廢棄物處置的最新進展及技術創新。與會的專家學者提供了有關深層地質處置技術的關鍵經驗，包括材料選擇、障壁系統設計、地下實驗室研究以及數值模擬應用。特別是在黏土材料的應用中，國際研究顯示其在熱力、水力、力學、與化學耦合效應下的穩定性及障壁性能，是保證處置設施安全的關鍵。
2. 會議強調了處置設施從設計、建設到營運的全生命週期安全性，並探討了社會接受度、跨領域合作以及透明溝通的重要性。各國在法規或規範制定、選址流程和技術實現方面的經驗，可為我國推動處置計畫提供參考經驗。
3. 各國的選址作業均強調符合科學性和透明性原則的選址流程，並納入公眾參與機制，提升決策過程的社會接受度。同樣地，我國已訂定「高放射性廢棄物最終處置設施場址規範」以利場址選址作業有科學上的依循，另外，「放射性物料管理法」訂有舉行聽證之規定。台電公司處置計畫已納入公眾溝通

作業，但仍須加強辦理取得各界共識，方能順利推動處置設施選址作業。

4. 國際已有多國設立放射性廢棄物營運專責機構，如德國 BGE、荷蘭 COVRA、日本 NUMO、芬蘭 Posiva、瑞典 SKB、瑞士 NAGRA、法國 ANDRA 等，負責推動處置設施選址作業、建置處置技術能力，並辦理公眾溝通，以促進放射性廢棄物處置計畫的順利推動。
5. 各國因其現有國情及地質環境條件不同，其深層地質處置計畫均有可能遭遇其獨特之挑戰，透過像「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」的平台來進行國際交流合作，可供我國深層地質處置設施計畫管制參考。

(二) 建議事項

1. 高放射性廢棄物最終處置設施之設置，涉及地質及工程障壁材料之熱力、水力、力學、與化學耦合效應下的穩定性，以及處置容器、工程障壁、母岩等處置單元之安全評估議題。建議參酌國際發展趨勢，持續精進最終處置相關技術及能力，加強放射性廢棄物處置管制技術研究，以持續累積本土技術資料，並培育專業人才與技術能力，確認我國高放射性廢棄物最終處置技術發展符合國際作法。
2. 核安會為督促台電公司最終處置計畫的順利推動，建議參考國際成功案例，要求加強與社會各界及相關利害關係人的溝通，說明處置設施的必要性及安全性。透過透明的溝通策略，爭取公眾認可與支持，提升社會接受度，以利選址及設置過程推動。
3. 「放射性廢棄物自然及工程障壁黏土材料研討會」已舉辦至第 9 屆，該研討會彙集深層地質處置計畫國家的最新進展與挑戰，為管理與技術創新提供重要交流平台。建議可定期派員參與類似研討會，掌握國際間最新發展動態，提升我國高放射性廢棄物最終處置計畫的管理與安全管制作為，確認我國相關處置計畫之發展與國際趨勢具有一致性。