

出國報告（出國類別：開會）

出席德國聯邦廢棄物安全辦公室
(BASE)舉辦之第三屆核能安全處置
實踐研討會(safeND2025, Research
Symposium on the Safety of Nuclear
Disposal Practies)

服務機關：核能安全委員會

姓名職稱：葉斌助理研究員

派赴國家/地區：德國/柏林

出國期間： 114年9月15日至9月21日

報告日期： 114年12月10日

摘要

自人類核能科技發展以來，高放射性廢棄物(High Level Radioactive Waste, HLW)的暫時貯存(Interim Storage)與最終處置(Final Disposal)問題，一直是核能應用國家的關注議題，而關於高放射性廢棄物，除用過核子燃料(Spent Fuel, SNF)外，還有部分再處理過程，也會產生高放射性廢棄物。國際社會在透過長達數十年的放射性廢棄物最終處置科學研究發展後，逐漸凝聚出深層地質處置場(Deep Geological Repository, DGR)最終處置共識；深層地質處置場處置概念係將包封完好之放射性廢棄物，置入天然障壁(Natural Barrier)與工程障壁(Engineered Barrier)系統所組成之多重障壁(Multiple Barrier)系統，利用處置系統設計之核種延緩、遲滯與阻絕之安全功能(Safety Function)，達成放射性廢棄物與人類生活區域隔絕之效益。可保障未來人類之長期安全生活，並可符合核能世代正義之精神。

在世界各國長期科學研發努力下，深層地質處置方法已有相當豐富之經驗，然而，世界各國放射性廢棄物類型不同，地質處置環境與國情也不盡相同，使得國際放射性廢棄物處置與貯存經驗，具有一定程度之地區差異性。本次德國聯邦廢棄物安全辦公室(Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management, BASE)，為分享放射性廢棄物處置科技發展成果並傳承人類處置專業知識，辦理第三屆核能安全處置實踐研討會(Research Symposium on the Safety of Nuclear Disposal Practices 2025, safeND2025)。BASE 為德國放射性廢棄物運輸、處理、貯存與處置之安全管制機關，並負責監督最終處置選址程序。

德國聯邦廢棄物安全辦公室(BASE)舉辦之第三屆核能安全處置實踐研討會於2025年9月16日至19日在德國柏林舉辦，此研討會為兩年辦理一次，會議主題包含對於放射性廢棄物長期安全的處置概念，細部議題包含核設施除役、放射性廢棄物的貯存、調節和運輸、放射性廢棄物選址與深層地質處置、替代處置方法、公眾參與、核能安全文化與知識保存、核能和放射性廢棄物的社會科學和人文學科觀點、放射性廢棄物處置中的保障措施和不擴散原則。本次研討會可瞭解國際放射性廢棄物處置之技術發展及營運經驗，有助於我國處置計畫推動與處置管制技術提升。

目次

一、目的.....	1
二、過程.....	2
(一) 行程.....	2
(二) BASE 舉辦之核能安全處置實踐研討會	2
(三) 會議議題.....	7
三、心得及建議.....	37
(一) 心得.....	37
(二) 建議事項.....	38
四、附錄：會議議程手冊	

一、目的

依據國際經驗，高放射性廢棄物最終處置計畫須歷經長期間技術發展及社會溝通過程，方能逐步推動完成。世界各國擬定之放射性廢棄物最終處置計畫大多具有政策涵蓋範圍廣，執行時間跨度長並具社會高爭議性等特性。我國台電公司之「用過核子燃料最終處置計畫書」，規劃區分為「潛在處置母岩特性調查與評估」、「候選場址評選與核定」、「場址詳細調查與試驗」、「處置場設計與安全分析評估」及「處置場建造」等五個階段執行，規劃時程長達50年，我國用過核子燃料最終處置設施預計於2055年完工啟用。核安會為核能安全主管機關，依法督促台電公司最終處置設施之興建。

有鑑於國際間已逐步達成共識，認為深層地質處置設施可提供高放射性廢棄物之必要安全保障，並可長期將高放射性廢棄物與人類環境隔離，各核能先進國家如芬蘭、瑞典、法國、加拿大、及日本等均已先後開始推動各自之最終處置計畫，其中芬蘭為高放處置計畫之領先國家，其所推動之 ONKALO 深層地質處置設施已於2024年底前進行試運轉，而瑞典 Forsmark 最終處置設施亦於2022年1月獲得建造許可，目前已在規劃興建中。

德國管制機關(BASE)將放射性廢棄物最終處置的安全管制，列為該機關施政重點目標。BASE 自2021年開始定期舉辦核能安全處置實踐研討會，目的是建構德國境內與世界各國放射性廢棄物處置科學研究者之成果發表平台，提供相關處置資訊，並培養新世代之放射性廢棄物研究者。此外，該研討會也相當重視其他最終處置進程較快之國家如芬蘭，瑞典，瑞士等放射性廢棄物研究，希冀藉由良性正面之國際交流，提升德國未來最終處置研發工作品質。

本次德國 BASE 舉辦之第三屆核能安全處置實踐研討會目標及目的包括：

- 德國發展及執行高放射性廢棄物深層地質處置設施方面之科學研究成果。
- 深層地質處置設施計畫推動經驗分享。
- 執行放射性廢棄物政策所遭遇之科學、人文等多面向挑戰與解決策略。
- 促進年輕一代的參與。

核安會為我國核能安全監督與管制機關，為了持續汲取國際最新處置計畫之管制經驗，掌握國際放射性廢棄物研究脈動，提升我國處置設施整體安全管

制技術及因應未來各階段之審查作業與安全檢查技術需求，派員參加本次柏林第三屆核能安全處置實踐研討會，本次出國開會經驗與所獲取資訊，可做為我國放射性物料安全管制之參考。

二、過程

(一)行程

日期	地點	工作內容
114年9月15日~9月16日	臺北→維也納→柏林	路程(臺北→柏林)
114年9月17日~9月19日	柏林	德國聯邦廢棄物安全辦公室(BASE)第三屆核能安全處置實踐研討會—會議行程
114年9月20日~9月21日	柏林→法蘭克福→臺北	路程(柏林→臺北)

(二)BASE 舉辦之核能安全處置實踐研討會

1. 會議背景

德國有26座核能電廠，共計36部核能發電反應器。德國政府根據2002年4月22日「關於循序終止核能用於商業發電的法律」，所有核能發電反應器應於執照屆期後(最晚的機組為2022年)終止營運，但後續國際局勢變化，德國考量烏俄戰爭帶來可能的冬季缺電危機，國會於2022年11月11日同意最末3部反應器得延至2023年4月15日全部永久停機，此三部反應器依國會決議持續運轉至該日期停機，最後為德國超過60年的核能時代畫下句點。

德國核能發電放射性廢棄物之處理、包裝與短期暫貯，係由設施經營者管理；放射性廢棄物包件移交給政府指定單位後，貯存與處置由聯邦政府統籌管理。

德國政策規劃將境內所有類型的放射性廢棄物以深層地質處置方式處置，因此，放射性廢棄物不以核種半衰期長短來區分放射性廢棄物，而是將放射性廢棄物分為發熱放射性廢棄物與可忽略發熱放射性廢棄物兩大類，如下說明；(1)發熱放射性廢棄物(Heat-Generating Radioactive Waste)：主要來自核能電廠產生的活度濃度高且衰變熱顯著的放射性廢棄物，例如用過核子燃料、再處理後的玻璃固化體、活化組件、高濃度漿體等。(2)可忽略發熱放射性廢棄物(Radioactive Waste with Negligible Heat Generation)：核子設施運轉與除役，以及放射性同位素應用產生的較低活度濃度放射性廢棄物。例如泵或管件、離子交換樹脂、過濾器、受污染的工具、防護衣、清潔劑、實驗室廢棄物、密封射源、污泥、懸浮液、油以及受污染與活化的混凝土結構與碎屑等。

德國之核能安全管制機關為聯邦廢棄物安全辦公室(BASE)，BASE 隸屬於德國聯邦環境、自然保護、核能安全與消費者保護部((Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, BMUV))。BASE 前身為 BfE (Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, BfE)，BfE 於2019年12月組織改造為 BASE，並自2020年1月1日起生效。自此 BASE 負責德國放射性廢棄物運輸、處理、貯存與處置之安全管制，以及選址程序的監督。BASE 總部位於柏林，並在 Salzgitter 與 Bonn 分設辦事處。

BASE 的核心業務包括；(1)最終處置選址程序監督：監督德國高放射性廢棄物最終處置場的全國範圍選址程序，並根據選址法(Standortauswahlgesetz, StandAG)確保選址過程科學、透明且符合法律要求；(2)安全評估與技術審查：對選址、地質條件、處置設計與安全概念進行獨立的專業審查，並評估地下地層是否具備長期隔離放射性廢棄物的能力；(3)輻射防護與管制：制定並執行輻射防護相關規範，確保在放射性廢棄物在管理、運輸、暫存過程中，公眾與工作人員的安全受到保障；(4)資訊公開與公眾參與：舉辦聽證會、資訊透明化；(5)法定程序與行政裁定：BASE 負責做出放射性廢棄物相關行政裁決與

准駁；(6)科學研究與國際合作：支援並推動與放射性廢棄物安全相關的科學研究專案。

德國聯邦環境、自然保護與核子安全部(BMU) (現組改為 BMUV) 於2020年9月發布「發熱放射性廢棄物最終處置之安全要求」與「處置場選址程序初步安全評估實施要求」。前者將各種母岩安全特性納入考量；後者根據「選址法」規定在三階段選擇程序的相關內容，根據「選址法」，目標是在2031年之前選定高放射性廢棄物最終處置場址。

依據國際經驗，推動及發展深層地質處置設施計畫是一項跨多領域的任務，其涉及許多橫向連結的科學及政策方面的結合，需綜合科學、社會、政治、倫理、法律及經濟等各項要素，並須具體考量維持公眾信心、確保足夠的人員能力、跨世代資訊及專業知識保存等因子如何實踐，來完善深層地質處置設施之建置。

2. 會議相關簡介

核能安全處置實踐研討會自2021年舉辦第1屆以來，至本年度(2025)已舉辦至第三屆，研討會期程多規劃為三天，研討會期間內，德國邀請世界各國的放射性廢棄物專家與科學家，聚集於柏林交流最新資訊，並討論德國關於安全處理和處置放射性廢棄物的當前研究成果。每年的核能安全處置實踐研討會將提前釋出會議主題以利邀稿，本報告整理歷年核能安全處置實踐研討會討論主題與具體出版品表一。

表一 核能安全處置實踐研討會討論主題與具體出版品

年度	研討會主題	出版品
safe ND 2021 (第一屆)	核能安全處置實踐研討會初創期，跨領域 核廢安全	Interdisciplinary Research Symposium on the Safety of Nuclear Disposal Practices (SafeND): Berlin (and Online), 10 – 12 November 2021/Copernicus Publications 期刊
safe ND 2023 (第二屆)	極端事件對核廢安全 之挑戰	Volume 2 :《Safety of Nuclear Waste Disposal (SaND)》期刊

	(Research for resilient safety: Gaps, Progress and Priorities)	
safe ND 2025 (本屆)	探討「時間」如何作為核廢料安全的重要因素 (Time as a safety factor: opportunities and challenges of timely nuclear waste disposal)	推測為 Volume 3 :《Safety of Nuclear Waste Disposal (SaND)》期刊，待後續觀察。

本屆研討會於柏林市區之 Radialsystem 辦理，會場會議室共有四個區域，分為大講堂(plenary panel)，研究室1(studio 1)，研究室2(studio 2)以及會議船(seminar ship)，這四個區域為本屆研討會主要演講與討論區，除大講堂可容納約200人外，其餘會場容納約50人左右，與會人員可依議程規劃主題自行選擇會議場地入座。除演說議程外，研討會還規劃海報展示區，海報展示區多由政府機關或學術研究單位張貼，海報作者將於特定時段或不定時現場向參觀者進行解說及問題答復。研討會有另設交誼廳空間，利於與會者進行業務交流，如圖1至圖8。



圖 1 研討會場地 Radialsystem



圖 2 研討會大廳接待區

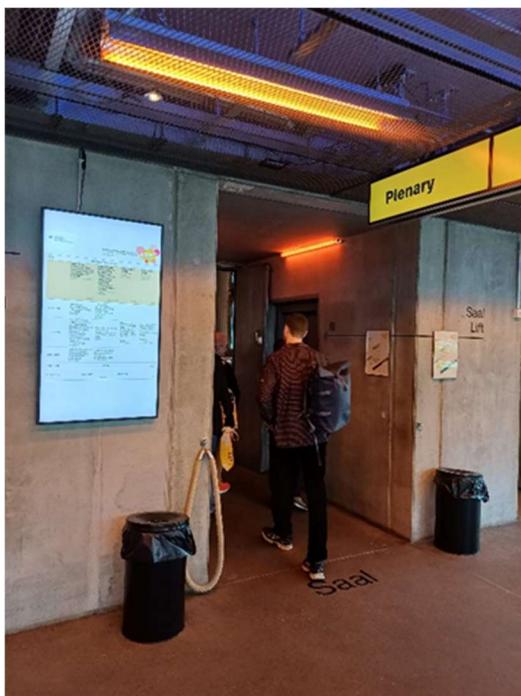


圖 3 研討會 plenary panel 入口與告示板



圖 4 研討會交誼廳

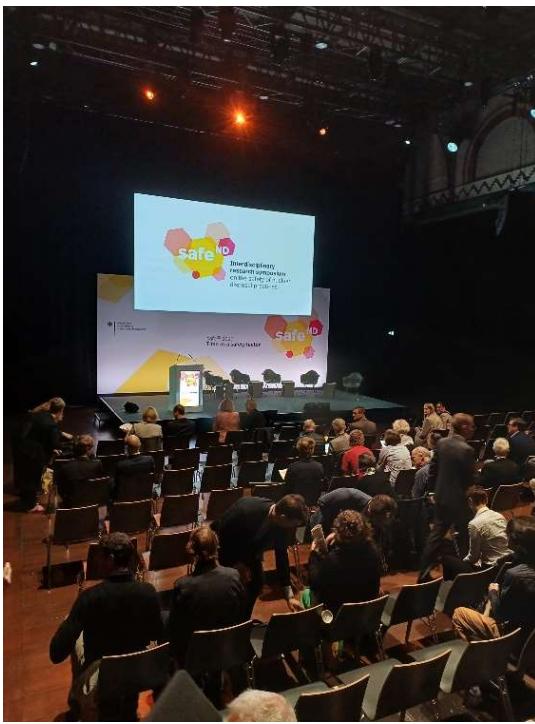


圖 5 研討會 plenary panel



圖 6 研討會研究船會議室



圖 7 入口海報展示區



圖 8 大廳海報展示區

(三)會議議題

本次第三屆核能安全處置實踐研討會涵蓋主題多元，本報告整理研討會會議主題如表二，總議程摘述如表三，詳細議程表詳如本報告附件：

表二：safeND2025研討會主題整理

主題	內容
社會人文科學	選址，歷史事件，公眾溝通，法律與規範框架，人才培育，人類記憶傳承
放射性廢棄物最終處置相關科學研究	緩衝/回填材料特性，天然障壁特性，核種傳輸、吸附溶解行為，容器性能，熱水力化耦合
核設施除役	核燃料鏈，除役經驗，數位孿生，廢棄物減量
核子保防	核不擴散戰略，掃描技術

表三：safeND2025研討會總議程摘述表

Wednesday, September 17th		
08:30 – 08:35	歡迎致詞	Christoph Hamann (BASE 聯邦廢棄物安全辦公室經理)
08:35 – 09:00	開幕式	Peter Hart (BMUV 德國聯邦環境、自然保護、核能安全與消費者保護部副總幹事) Christian Kühn (BASE 聯邦廢棄物安全辦公室主任)
09:00 – 09:20	關鍵議題 如何提高社會對核廢料處置的認識	Harald Lesch (慕尼黑路德維希馬克西米利安大學)
09:20 – 10:20	小組討論 時間是核廢料處置的安全因素	Kai Hämäläinen (STUK 芬蘭輻射及核能安全局) Allison Macfarlane(加拿大不列顛哥倫比亞大學) Sönke Reiche (BASE 聯邦廢棄物安全辦公室) Anna Storm(瑞典林雪平大學)

T6b 會議	T5e 會議	T5f 會議	工作坊 1
論核能復興：記憶、實踐、未來	深層地質處置中放射性核種遷移率和生物地球化學方面	滲透性評估的挑戰與創新：從實驗室到地質系統的數位孿生	下一代網路和可能性—如何讓未來的專家參與進來
科技樂觀與現實：核能悖論與敘事 (F. Böse)	系統性評估深地質放射性廢棄物處置背景下放射性核種吸附的現狀 (T. Philipp)	黏土岩傳輸研究二十年：方法、挑戰與經驗教訓 (G. Gaus)	下一代網路及其可能性：如何讓未來的專家參與進來 演講嘉賓： A. Jaros W. Rühaak L. Friedenberg S. Tillmann A. Kozlowski N. Belmans J. Flügge
芬蘭用過核子燃料安全地質處置承諾的建構中，地質知識、機構與重要性 (M. Lehtonen, M. Kojo & T. Litmanen)	PARFREI 計畫—確定放射性核種釋放、吸附和溶解度等參數的研究項目 (M. Altmaier)	從露頭和實驗室岩石樣本到三維裂隙和流動通道建模 (N. Ovaskainen)	
這究竟是誰的復興？重新思考人類世核復興的推測性未來 (T. Keating)	揭示偽脫硫弧菌在 Tc-99 固定化中的作用 (M. F. Martinez Moreno)	定義 Opalinus 黏土氣體遷移的物理特性；氣體傳輸(GT)項目 (R. Cuss)	
巴塞貝克的維多利亞湖：放射性污泥池作為證據 (A. Storm)	用過核子燃料在缺氧和還原條件下的浸出行為—裂變氣體的釋放及其對瞬時釋放分率和基質溶解的影響 (T. König)	Opalinus 黏土封塞試驗的水力學分析：對地層壓力計算的影響 (A. Madaschi)	
德國的長期文獻記錄：邁向系統性策略的步驟 (D. Möller)	深層地質處置場安全評估的放射性核種吸附參考資料庫建置 (O. Marinich)	發展 Mercia 泥岩可測量超低滲透性的方法：對地下核廢料安全處置的啟示 (Z. Jangda)	
13:30 – 14:10	關鍵議題 核廢料處置：「時間」究竟意味著什麼？審視參與者、學科和國家方法		Klaus-Jürgen Röhl (德國克勞斯塔爾工業大學)
海報推廣			

T3c 會議	T5dI 會議	工作坊 2 一階段	工作坊 6 一階段
防範核威脅：放射性廢棄物處置中的保障和防擴散措施	放射性廢棄物處置中的地質和岩土障壁的岩土力學：熱-水耦合，岩石完整性和長期安全性		
德國高放射性廢棄物地質處置場的保障要求 (M. Dürr)	從現地逐點資料到三維應力預測 (O. Heidbach)	核燃料鏈前端與後端放射性廢棄物管理對比 C. Pescatore	加快選址流程－我們可以從其他環境政策領域學到什麼？ C. Schaffner K. Peneva-Gädeke
μ 子斷層掃描技術在放射性廢棄物貯存和安置安全防護監測的應用 (L. Thompson)	德國南部放射性廢棄物處置潛在區域的三維地質力學建模：子模型技術的應用 (V. Kuznetsova)		
反微中子探測保障措施：貯存設施的概念與可行性 (Y. Schnellbach)	斷層的空間延伸：它們如何形成區域應力場 (L.S.A.R. Velagala)		
T6a 會議	T5dII 會議	工作坊 2 二階段	工作坊 6 二階段
替代處置方法：簡化深層地質處置需求的可能性？	放射性廢棄物處置中的地質和岩土障壁的岩土力學：熱-水耦合，岩石完整性和長期安全性		
現況：加速器驅動致使高放射性廢棄物的轉變 (F. Frieß)	大規模地下引發地震：地震指數法 (S. Shapiro)	與核燃料鏈的後端相比，從前端管理放射性廢棄物遺留問題 C. Pescatore	加速選址過程－可以從其他環境政策領域學到什麼？ C. Schaffner K. Peneva-Gädeke
評估法國 Vendeuvre-Soullaines 市(CCVS)淺層處置可行性的技術和安全方案報告的目標和範圍(法國，第 10 部門) (B. Cordier)	熔鹽作為岩鹽處置場密封材料－可行性研究 SalVE (A. Keller)		
長半衰期衰變產物 I-129 分離與轉變的機會與風險	碎鹽模型校準的系統策略 (L. Friedenberg)		

(G. Žerovnik)			
---------------	--	--	--

Thursday, September 18th			
09:00 – 09:05	開場	Christoph Hamann (BASE 聯邦廢棄物安全辦公室)	
09:05 – 09:15	BASE 新研究議程介紹	Jochen Ahlswede (BASE 聯邦廢棄物安全辦公室)	
09:15 – 09:55	關鍵議題 長半衰期放射性廢棄物管理：從控制到關注、不確定性和替代未來	Andrew Stirling (英國薩塞克斯大學)	
大講堂	T1a 會議 核設施除役	T5g 會議 第二屆歐洲放射性廢棄物管理計畫：戰略研究	工作坊 3 一階段
D. Orsini, V. Lagendijk, R. Dekker, R. Geysmans	以機器人本體與數位孿生輔助除役作業：DORADO 計畫 (J. A. Ridaو-Cabrerozo)	EURAD-2 策略研究概述 (A. Göbel)	數位地理系統及其加速放射性廢棄物處置的潛力 T. Cajuhi F. Magri
	驗證由篩子和磁性過濾器組成的創新分離裝置，用於減少放射性廢棄物的暫時貯存量 (M. J. E. Chaudhry)	推動數位孿生技術優化核廢料管理：跨學科融合，提升安全性 (A. Laikari)	T. Vietor K. Rink C. Lehmann
	ZuMoBau-ZL—暫時貯存設施結構劣化評估方法 (S. Sperbeck)	HERMES#DITOCO 2023：將流程建模融入數位孿生概念 (O. Kolditz)	
T3a 會議 深地質處置的定量安全評估：理解與傳達模型不確定性	T1c 會議一階段 核文化與記憶的過去、現在與未來	T5c 會議 高放射性廢棄物深地質處置場的廢棄物罐與緩衝回填材料的穩定性及劣化現象	
OpenWorkflow - 用於選址過程中模擬數值安全分析的開源軟體	記憶與遺忘之間：追溯法國兩處遺址核殘留物的歷史	廢棄物罐腐蝕建模方法：從質量平衡到耦合電化學模型 (M. Pekala)	

(C. Lehmann)	(U. Felt)	
透過不確定性條件下地質模擬結果的互動式視覺化增強理解 (M. Bittens)	路徑依賴與核循環：核子擴散、裁軍與處置之間的聯繫 (E. Saar)	全面洞察高溫膨潤土懸浮液中潛在廢棄物罐材料的腐蝕過程 (L. Panjiyar)
ThermoBase：德國沉積區淺部熱場特徵 (M. Frick)	核子太陽頌歌：藝術研究中的儀式探索，旨在探討撒丁島放射性廢棄物長期掩埋方案 (A. Del Rio)	對廢棄物罐材料腐蝕分析的信任：現況與挑戰 (C. Stephan-Scherb)
將地下不確定性納入高放射性核廢料地質處置設施的早期篩選階段 (C. Derer)	現場報告：核文化深地質處置場工作坊 (E. Carpenter)	會議主持人總結

Friday, September 19th			
09:00 – 09:10	開場	Christoph Hamann (BASE 聯邦廢棄物安全辦公室)	
09:10 – 09:50	關鍵議題 關於如何及時處置核廢料的法律架構：挑戰與機會—概述”	Dörte Fouquet (德國呂內堡大學)	
T4c 會議一階段 放射性廢棄物地質處置中的永續性挑戰—社會視角	T3b 會議一階段 社會科學與人文：放射性廢棄物研究的當前問題	T1b 會議 暫時貯存和最終處置的安全性—相互關係？	工作坊 7
永續性和長期過程：文化視角 (C. Holtorf)	讓子孫後代參與：公民長期參與放射性廢棄物管理的世代挑戰 (R. Geysmans)	OBSERVE – 綜合劑量率和溫度測量程序-用於長期暫時貯存 (J. H. Klingen)	地質三維模型的不確定性：核廢料處置場選址程序的挑戰 I. Møller A. Laikari V. Zampetti
分析社會技術衝突：特徵、維度	大型基礎設施計畫背景下的區域發展：實施、區	德國高放射性廢棄物長期暫時貯	

及其對放射性廢棄物治理的潛力 (S. Enderle)	域應用和成功條件 (F. Sperfeld)	存的環境影響評估挑戰 (J. Neugebauer)	
無知的悖論：「無知」在放射性廢棄物處置場研究中的作用 (A. Hirn)	創造性破壞？從除役中學習，為最終目標而建設 (E. Ahlström)	全球首例大尺度與長週期乾式貯存模擬燃料棒實驗結果 (S. Weick)	
根據法律「StandAG」設計管理系統 (O. Straeter)	從治理角度製定利害關係人參與策略 (C.-H. Pettersson)	暫時貯存和最終處置：相互關係研究中的假設 (G. Bracke)	
T4c 會議二階段 放射性廢棄物地質處置中的永續性挑戰—社會視角	T3b 會議二階段 社會科學與人文：放射性廢棄物研究的當前問題	T2a 會議 用過核子燃料和放射性廢棄物的暫時貯存和最終處置特性	工作坊 5
評估不確定性條件下國家基金的長期資金充足性和跨世代公平性：德國核廢料基 KENFO 的隨機模型 (M. Awawda)	讓基岩變得有價值：(再)生產芬蘭最終處置場景觀中的稅收和品牌條件 (A. Sievers)	檢視廢棄物包件是否符合比利時近地表處置 LLW&ILW-SL 的規定 (R. Sghir)	早期職業研究人員、知識保留和核廢料處理與輻射防護的未來發展 A. Jaros C. Stephan-Scherb
使用創新技術支援 RWMO 知識管理，即 GRS 方法 (H. Seher)	驕傲與負擔之間：法國核文化中核遺產與核繼承狀況的不和諧 (A. Pottin)	Konrad 容器設計評估的經驗與展望 (A. Kömmling)	A. Sitting M. Ziegler
經驗教訓是 BGE 跨世代知識管理的關鍵面向之一 (P. Feuker)	義大利燃料循環電廠除役的經驗：歷史學家的視角 (M. Elli)	破壞性火災中符合允許活性釋放的數值驗證策略 (A. Glindkamp)	
數位儲存媒體長期耐久性的評估與優化—「Labest Digital」研究計畫的最新成果 (C. Melzer)	主持人總結	如何經受時間的考驗—廢棄物包裝最終處置的特性 (S. Pudollek)	

1. Wednesday, September 17th 議程

(1) 歡迎致詞 (Christoph Hamann)

此次研討會的序幕由 BASE 主持人 Christoph Hamann 開始，Christoph 首先歡迎世界各國之與會嘉賓，同時也積極介紹 BASE 在德國之管制角色以及核心業務，如圖9至圖10。

(2) 開幕式(Peter Hart, Christian Kühn)

研討會的開幕式由兩位講者進行，首先是 Peter Hart，代表德國聯邦環境、自然保護、核能安全與消費者保護部，Peter Hart 首先肯定研討會對於德國當前放射性廢棄物政策之重大貢獻，並強調，德國的核廢料處置不僅為現代之全國性問題，核能科技之發展傳承與舊世代之記憶保存也是德國的核廢軸心目標，如何在時間的長河中，提升新世代的參與是本屆研討會一項非常重要的目標。研討會建構了一個現有核能與核廢科技與新世代連結之平台，並期許推進德國核文化記憶，而德國聯邦環境、自然保護、核能安全與消費者保護部(BMUV)，也透過對新世代科學家的經費挹注，來完成此一重大之國家目標，如圖11。



圖 9 研討會主持人 Christoph Hamann



圖 10 大講堂開幕



圖 11 Peter Hart 德國聯邦環境、自然保護、核能安全與消費者保護部



圖 12 BASE 聯邦廢棄物安全辦公室主任 Christian Kühn

次一講者為德國 BASE 聯邦廢棄物安全辦公室主任 Christian Kühn，是本次 BASE 主持人 Christoph Hamann 之直屬業務長官，Christian Kühn 首先感謝所有與會嘉賓不辭辛勞抵達柏林，為 BASE 舉辦之研討會注入世界級的活力，也感謝主持人 Christoph Hamann 以及 BASE 簽辦單位之努力。Christian Kühn 強調，BASE 在德國是國家的核能管制機關，需要迎接不同層面之挑戰，這些挑戰可能來自於科技發展，極端氣候，政治策略等，但 BASE 始終在迎接這些未知的困難並持續積累能量。透過研討會，除能展現德國在核廢工作之努力成果外，也充分吸收其他國家的研究動能，如圖12。

(3) 關鍵議題：(Harald Lesch)

本屆研討會的第一個關鍵議題為如何提高社會對核廢料處置的認識，主講者為慕尼黑路德維希馬克西米利安大學的 Harald Lesch 教授，其以訪問瑞典地下實驗室之經驗，製作一段輕鬆詼諧的地下探險影片，並藉此方式展現最終處置之概念，並反問在場之嘉賓，經過他的介紹，民眾是否可以更加認識核廢料的處置過程？關鍵問題在於核廢政策對任何國家來說都相當敏感，而越敏感之問題越需要

公開透明，只有誠實以告，才能與公眾建立互信之連結。Harald Lesch 教授提到德國之最終處置場里程碑，相較於其他國家的場址決定期程，如加拿大(2024年)，芬蘭(2001年)及瑞典(2009年)，德國的期程明顯落後，但這並不是 BASE 不負責任的表現，這是因為德國非常重視社會對核廢料處置的認識，核能世代的傳承是項無止境的任務，只有建立長期的互信，才能以公平正義的方式完成德國最終處置，也呼應本屆研討會的「時間」主軸，如圖13至圖14。

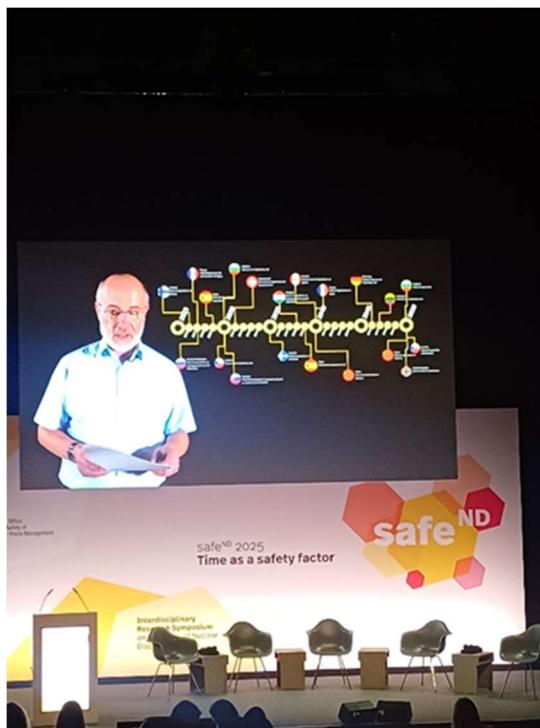


圖 13 慕尼黑路德維希馬克西米利安大學 Harald Lesch 教授(預錄影片)

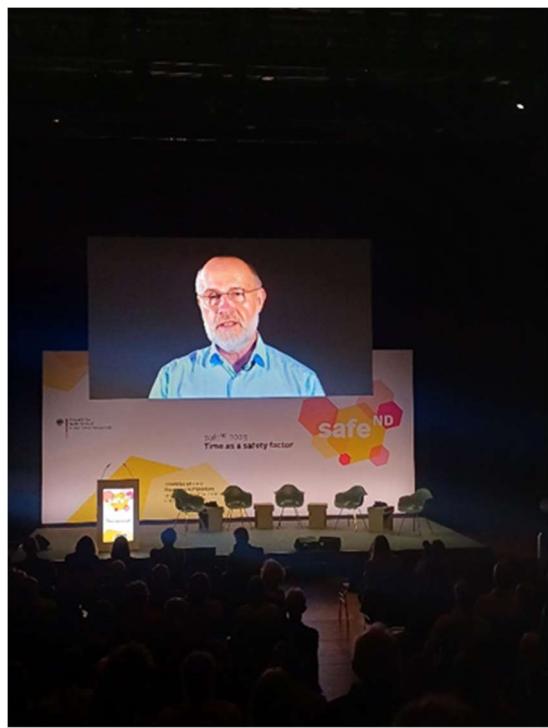


圖 14 Harald Lesch 教授(預錄影片)

(4) 小組討論：時間是核廢料處理的安全因素 (Harald Lesch)

本屆研討會的小組討論進行方式，是主辦方邀請各界講者進行特定話題之討論，類似工作坊之進行方式，本場大講堂小組討論共邀請4位講者如 Kai Hämäläinen (STUK 芬蘭輻射及核能安全局)，Allison Macfarlane(加拿大不列顛哥倫比亞大學)，Sönke Reiche (BASE 聯邦廢棄物安全辦公室)，Anna Storm(瑞典林雪平大學)，與主持人一同進行。討論內容圍繞於各國核廢料處置現況以及所遭遇困難與解決策略，依據 Anna Storm 教授的總結，過去瑞典在放射性廢棄物處

置的推動經驗上，多半聚焦於設施工法與非常繁瑣的安全認證或科學計算，若從研討會主題「時間」的角度切入，其實這些處置措施都是寄望時間的演進能使放射性廢棄物的核種活度衰變至安全限值以下，推動處置國家或可以嘗試將時間為主體，作為與民眾溝通之橋梁，也許可能達到更有效之對話成效，如圖15至圖16。

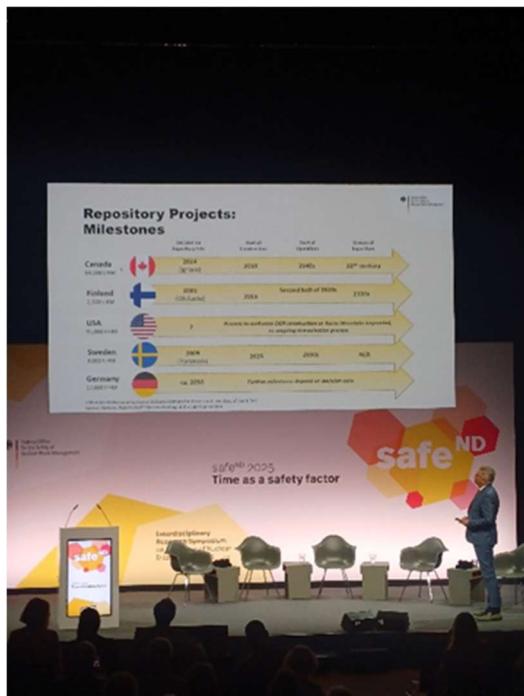


圖 15 小組討論主持人介紹講者國家最終處置現況

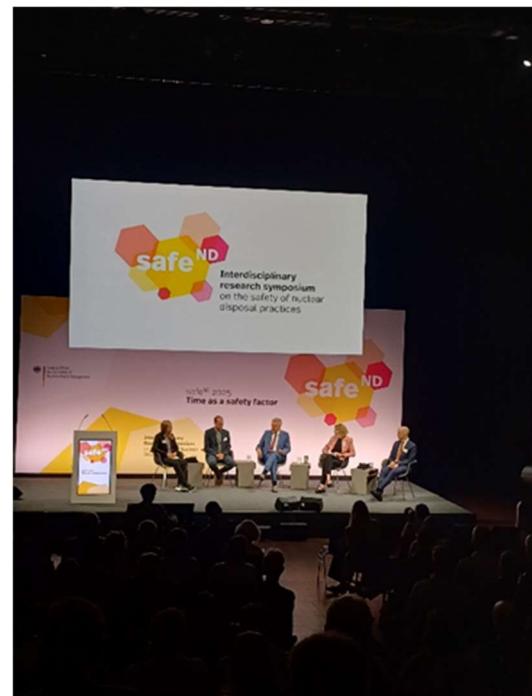


圖 16 小組討論

(5) T5f 會議：滲透性評估的挑戰與創新：從實驗室到地質系統的 數位孿生子題：黏土岩傳輸研究二十年：方法、挑戰與經驗教訓 (Garri Gaus)

「黏土岩傳輸研究二十年：方法、挑戰與經驗教訓」由德國阿亨工業大學(Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, RMTH)石油與煤炭地質地球化學研究所岩石物理研究小組的 Garri Gaus 博士主講，Garri Gaus 博士介紹了自己團隊多年對黏土岩傳輸的研究成果，黏土岩(Clay Rock)在地質應用中都扮演著重要角色，它既是地下流體儲存的有效蓋層(Caprock)，對一些歐洲國家如法國、德國及瑞士等

國家，黏土岩也是放射性廢棄物處置的潛在母岩。

過去20多年來，Garri Gaus 博士領導的研究小組，利用水、氫氣、甲烷和二氧化碳等多種流體，研究了這些流體在黏土岩中可能發生的對流、滑移流和擴散現象。研究小組應用了穩態法到非穩態脈衝衰減測試的各種方法，以及「非常規」的徑向和軸向吸收技術，來嘗試精確定義黏土岩在不同邊界條件下的氣體，液體與多相流傳輸性質，這些邊界條件包括溫度、岩石靜壓力和孔隙壓力、流體組成以及飽和度。本議題也同時探討了這些量測方法時遇到的敏感性問題和潛在缺陷。

Garri Gaus 博士領導的研究小組已獲得了德國聯邦教育與研究部(Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF)和聯邦放射性廢棄物處置公司(Bundesgesellschaft für Endlagerung, BGE)的 MATURITY 計畫共同資助，在 MATURITY 計畫中的最新研究成果，Garri Gaus 博士系統性的透過各種測量技術獲得的實驗室滲透係數與現場觀測比較結果，以識別潛在的差異並評估其影響。例如分析來自同一採樣點的兩組樣品並研究不同的岩心(Core)貯存條件，如何影響傳輸特性。其中一組樣品自1980年代以來一直貯存在常溫常壓下，另一組樣品則在取出後立即真空密封於鋁箔中。

「黏土岩傳輸研究二十年：方法、挑戰與經驗教訓」結論強調了建立標準化測試流程和採用基準樣品的必要性，以確保不同實驗室和研究團隊之間滲透係數資料的可重複性和可比性，如圖17。

(6) T5e 會議：深層地質處置中放射性核種遷移率和生物地球化學方面子題：PARFREI 計畫—確定放射性核種釋放、吸附和溶解度等參數的研究項目 (Marcus Altmaier)

「PARFREI 計畫-確定放射性核種釋放、吸附和溶解度等參數的研究項目」是一個德國聯邦放射性廢棄物處置公司委託研究計畫的介紹議題，由卡爾斯魯厄理工學院(Karlsruhe Institute of Technology, KIT)的 Marcus Altmaier 博士主講。根據德國「選址法」德國高放射性廢棄物處置場的選址程序將會是一個迭代過程，而德國聯邦放射性

廢棄物處置公司負責制定此選址程序。

德國聯邦放射性廢棄物處置公司首先須確定潛在的子區域 (Teilgebiete) 進行初步安全分析 (vorläufige Sicherheitsuntersuchungen, vSU)。在選址程序第一階段的第二步 (選址法 StandAG 第 14 條)，需要進行代表性的初步安全分析 (repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen, rvSU)。而 rvSU 其中一項挑戰，在於描述並評估處置場系統的放射性核種遷移性。

PARFREI 計畫進行的研究工作提供了放射性核種釋放、溶解和吸附的定量數據，作為 rvSU 的輸入數據。PARFREI 計畫由卡爾斯魯厄理工學院核廢料處置研究所 (KIT-INE)、亥姆霍茲德累斯頓-羅森多夫中心資源生態研究所 (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR) 和於利希研究中心聚變能源與核廢料管理研究所 (Forschungszentrum Jülich GmbH, FZJ) 共同進行。PARFREI 計畫提供一系列全面的參數，用於量化潛在的放射性核種遷移性，同時批判性地反映了國際科學技術的最新進展。

在本計畫第一個工作包 (Work Package) WP1 中，PARFREI 分析現有數據，並推導出所考慮的不同母岩系統的代表性地球化學條件。根據德國潛在處置場的母岩地層，PARFREI 考慮了以下系統：(1) 結晶岩，(2) 泥岩 (根據德國南部和北部的情況分別劃分)，以及(3) 岩鹽。在後續工作包中，PARFREI 利用 WP1 中獲得的水化學邊界條件，進行以下任務：(a) 量化用過核子燃料放射性核種的釋放量 (WP2)，以及 (b) 確定放射性核種在溶液中的溶解度極限 (WP3)，以及 (c) 提供數據，描述放射性核種在母岩材料上的吸附現象。PARFREI 針對每個潛在場址的相關地球化學邊界條件和母岩都進行上述工作。PARFREI 考慮的放射性核種清單包括多種銅系元素 (及其衰變產物) 以及相關的裂變和活化產物，並在必要時考慮不同的潛在氧化態。PARFREI 的定量參數通常基於實驗證據和模型計算得出，必要時也會考慮化學類比和專家判斷，PARFREI 計畫的工作是基於科學出版物、國內外計畫報告來建立德國公認且透明的熱力學資料庫 (Thermodynamics

database)，如圖18。



圖 17 Garri Gaus 博士主講「黏土岩傳輸研究二十年：方法、挑戰與經驗教訓」



圖 18 Marcus Altmaier 博士主講「PARFREI 計畫—確定放射性核種釋放吸附和溶解度等參數」

(7) T5e 會議：深層地質處置中放射性核種遷移率和生物地球化學方面子題：揭示偽脫硫弧菌在 Tc-99固定化中的作用(Marcos Felipe Martinez Morenoo)

「揭示偽脫硫弧菌在 Tc-99固定化中的作用」由 Marcos 博士向與會者介紹研究成果，本研究調查了從與地下實驗室的地下水中分離出的一種硫酸鹽還原菌—假脫硫弧菌(*Pseudodesulfovibrio aespoeensis*, ASPO-2)在 Tc-99直接還原作用的固定效應。Marcos 博士使用液體閃爍計數法(LSC)評估中性 pH 條件下假脫硫弧菌對 Tc-99的固定效率。結果表明在深層地質處置環境中此菌種的存在可能會影響 Tc-99 的遷移，從而限制該放射性核種向生物圈和地質圈的擴散，如圖19。

(8) T5e 會議：深層地質處置中放射性核種遷移率和生物地球化學方面子題：用過核子燃料在缺氧和還原條件下的浸出行為—裂變氣體的

釋放及其對瞬時釋放分率和基質溶解的影響(Tobias König)

此議題由來自卡爾斯魯厄理工學院核廢料處置研究所的 Tobias König 博士主講，該研究由 ONDRAF/NIRAS 資助，以深層地質處置場的廢棄物罐失效和包封完整性受損後，地下水滲入設施並與用過核子燃料接觸的情況做考量，進行長期安全性評估。假設滲入的溶液接觸燃料，放射性核種將迅速釋放，這種初始釋放稱為瞬時釋放分率(Instant Release Fraction, IRF)。

IRF 的計算方式如下：

$$IRF = \frac{I_{CRUD} + (F_{GGB^-} + I_{UO_2})}{I_t}$$

其中：

IRF 為瞬時釋放分率

I_t 為廢棄物罐總存量 (mol/canister)

I_{CRUD} 為廢棄物總存量 (mol/canister)

F_{GG^-} 為 UO_2 在縫隙與顆粒邊界之總存量(無單位)

I_{UO_2} 為 UO_2 顆粒總存量 (mol/canister)

瞬時釋放分率在安全評估中至關重要。根據德國安全要求條例 (EndlSiAnfV)，瞬時釋放分率在評估近場處置環境的安全性能時，將會起著決定性作用。在瞬時釋放後，可觀察到鈾氧化物基質本身溶解的釋放速度較慢，而在整個溶解過程中，裂變氣體與水溶液中放射性核種交織在一起，從破損的燃料棒中釋放出來。

在該研究中，Tobias König 博士展示了用過核子燃料進行中的浸出實驗結果。所有實驗均在缺氧或還原條件下，於高鹼性水溶液(pH 13.7) 或碳酸氫鹽水溶液(pH 7.9)中進行。實驗使用的樣本取自於 1970 年代和 1980 年代在德國和瑞士的核電廠中受過輻照之用過核子燃料。研究結果表明，浸出實驗過程中裂變氣體的釋放與放射性核種(例如 I-129、 Cs-137)在溶液中的釋放行為之間存在相互關聯，如

圖20。



圖 19 Marcos Felipe Martinez More-
no 博士主講「揭示偽脫硫弧菌在
Tc-99 固定化中的作用」



圖 20 Tobias König 博士主講「用過核
子燃料在缺氧和還原條件下的浸出行
為—裂變氣體的釋放及其對瞬時釋放
分率和基質溶解的影響」

**(9) T5e 會議：深層地質處置中放射性核種遷移率和生物地球化學方面
子題：深層地質處置場安全評估的放射性核種吸附參考資料庫建置
(Olha Marinic)**

「深地質處置場安全評估的放射性核種吸附參考資料庫建置」由聯邦放射性廢棄物處置公司資助，屬於 SOREDA(Sorption Reference Database, SOREDA) 計畫的一部分。議程由瑞士聯邦理工學院核工程與科學中心 (Paul Scherrer Institute Center for Nuclear Engineering and Sciences, PSI)的 Olha Marinic 博士主講。由於國際間尚無產出具公信力的資料庫能夠提供世界各國高品質的吸附熱力學數據，來評估放射性核種在各自國家深地質處置場障壁系統中的遷移行為，故德國聯邦放射性廢棄物處置公司以及亥姆霍茲德累斯頓-羅森多夫中心資源生態研究所，以及瑞士聯邦理工學院核工程與科學中心聯合發起

了 SOREDA 計畫，該計畫旨在開發具公信力的的資料庫，來滿足處置場吸附熱力學數據的需求。

該研究建立的吸附資料庫包含：Cs、Sr、Ra、Ni、Am、Cm、Np、Pu、Sn、Th 和 U，以及不同氧化態的低吸附元素 I、Se 和 Tc。Olha Marinic 博士分析這些元素的吸附數據，以及已被確定與上述元素吸附行為為最相關的礦物(石英、高嶺石、伊利石、蒙脫石、水鐵礦、針鐵礦、赤鐵礦、磁鐵礦、黃鐵礦、方解石和白雲石)的滴定數據。數據來自內部實驗、公開文獻、勞倫斯·利弗莫爾國家實驗室(LLNL)的表面絡合/離子交換資料庫(Zavarin, 2025)以及日本原子能機構支持的線上吸附資料庫，並使用擴散雙電層 (DDL) 模型來模擬石英、碳酸鹽和鐵礦物的吸附行為。該研究完成之綜合吸附資料庫可為德國深地質處置場障壁系統的安全評估提供支持，且資料庫具有擴展潛力，可納入更廣泛的放射性核種及有機複合物，未來可用於研究其在造岩礦物和其他礦物上的吸附作用探討，如圖21。

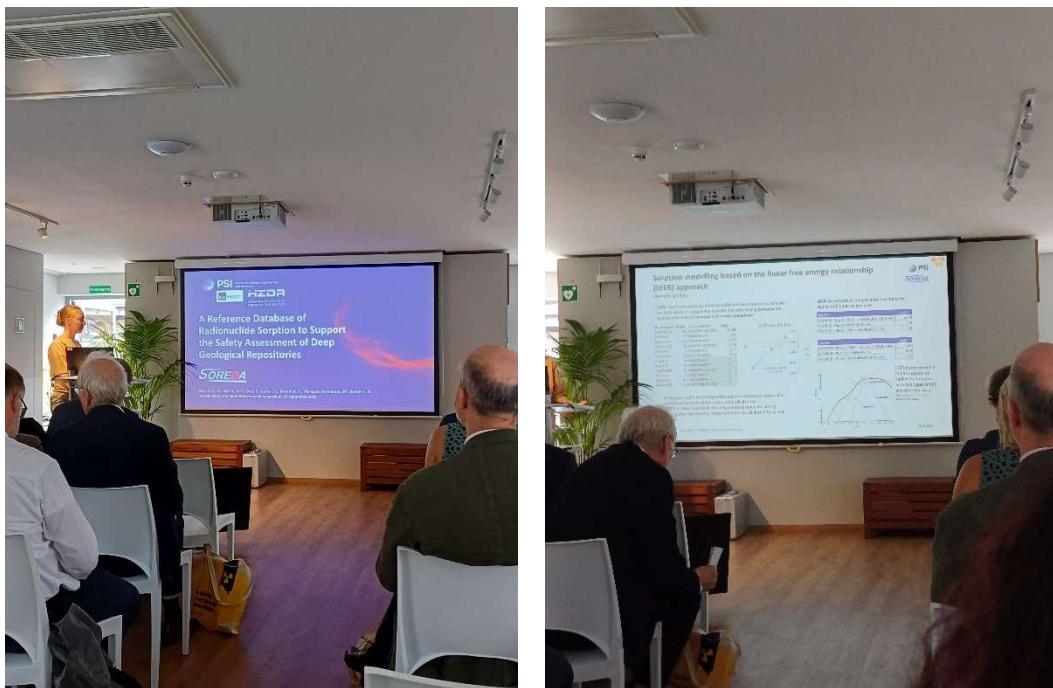


圖 21 Olha Marinic 主講「深層地質處置場安全評估的放射性核種吸附參考資料庫建置用」

圖 22 Oliver Heidbach 主講「從現地逐點資料到三維應力預測」

(10) T5dI 會議：放射性廢棄物處置中的地質和岩土障壁的岩土力學： 熱-水耦合，岩石完整性和長期安全性子題：從現地逐點資料到三維 應力預測(Oliver Heidbach)

「從現地逐點資料到三維應力預測」由 Oliver Heidbach 博士主講，該研究目的係採用地質力學數值模型來對處置場的應力場進行三維預測。這些模型的地質結構來自於三維地震勘探和鑽孔測井資料的剖面解釋。在為不同岩性賦予岩石屬性後，利用水平應力大小的原位資料對模型進行校準。校準過程中遇到的問題之一是應力測量可能反映地質力學模型未明確表示的地下單元力學變異性。

該研究為瑞士放射性廢棄物最終處置場選址評估的一部分，瑞士對三個選址區域進行了勘探。2019年至2022年間，利用微水力壓裂(MHF)和乾式套管(SR)試驗，在8個鑽孔中完成一項廣泛而綜合的水平應力測量活動。在139次成功的 MHF 試驗中，獲得了121個最小水平應力(Sh_{min})的估計值和65個最大水平應力(Sh_{max})的估計值。這些數據可用於校準三個選址區域的三維地質力學數值模型。

為使模型與原位應力資料達到最佳擬合，該研究以彈性線性系統進行橫向位移。這些模型的橫向邊長在 10 至 15 公里之間，共有17 或 18 種岩性，包含 6 至 13 條斷層，這些斷層以接觸面的形式實現，彼此之間可以發生相對位移。研究結果顯示實現現地應力場與井下資料可達到最佳擬合，三維應力狀態的預測結果和岩石硬度在地層中的分布有關，為一個機率分佈形式，如圖22。

(11) 工作坊6：加快選址流程－我們可以從其他環境政策領域學到什麼

德國諸如高放射性廢棄物處置場選址等重大社會相關進程需要時間推行，並取得整體社會以及潛在或直接受影響群體的認可和接受。但是在許多環境工程相關領域，「時間」正成為一種重要考量。例如氣候變遷的影響日益顯著，能源系統轉型迫在眉睫，安全政策情勢要求世界各國迅速應對新的威脅，德國的大量核能基礎設施需要更新等，都面臨須與時間賽跑的困境。

同理，「時間」也日益成為高放射性廢棄物處置場選址的關鍵安全因素。工作坊6以來自 BASE 的 Christian Schaffner 博士與 Kalina Peneva-Gädeke 博士為首，邀請與會來賓討論「時間」這一因素，支持或反對加速發展的論點有哪些，以及在討論「時間」問題時需要權衡哪些利弊。工作坊6在討論如何建立一種既能避免過時思維，又能充分利用科技進步或年輕世代新價值觀等機會的加速發展模式。

2. Thursday, September 18th 議程

(1) T1a 會議：核設施除役子題：以機器人本體與數位孿生輔助除役作業：**DORADO 計畫(Joseph. A. Ridao-Cabrerozo)**

世界許多國家都將需要對其已達到或即將達到使用壽命終點的核設施進行除役。核設施除役極具挑戰性，通常在現有設施的規劃和建設階段並未預料到這一點。因此，實務上各國的核設施除役計畫(NDP)相對於設施興建時的概念，都較為新穎許多，目前國際尚無如何弭平此一缺陷並完全標準化的實施方法，而是根據各國的具體情況逐案實施。在國際層面，各方正在尋求對核設施除役計畫的共識，歐盟也一直在資助該領域的研究計畫。

在2020年，PLEIADES 計畫獲得了歐盟委員會透過 EURATOM 計畫的資助。該專案最終建立了一個平台，將不同的數位工具連接起來，以提高規劃活動的效率。並在專案結束時，考慮了涉及擴展整合、本體資料傳輸技術等進一步的研究開發需求。DORADO (Digital twins and Ontology for Robot Assisted Decommissioning Operations, DORADO) 計畫因此於2024年9月啟動，由一個聯盟負責實施，該聯盟包括7個前 PLEIADES 計畫的參與者。DORADO 計畫也獲得了 EURATOM 的資助，其主要目標是利用人工智慧(AI)、建築資訊模型(BIM)、機器人、語音辨識或感測器資料視覺化等數位技術，提高除役計畫的安全性和效率。在 DORADO 專案中，將創建一個基於本體的資料傳輸協定的數位孿生。這個數位孿生將把各種數位工

具整合到一個統一的套件中，以應用於各種除役作業。例如以下數位技術可在該平台中進行分析和實施：具有時間維度的感測器資料整合；環境資料與 BIM 對比；點雲(Point Cloud)和三維模型建立與檢測；基於 ALARA(合理抑低)劑量估算和規劃的數位孿生動態建模；基於伺服器的 IFC 文件格式整合和擴展資料查詢；任務規劃與機器人最佳化模型。最後來自卡爾斯魯厄理工學院的 Josephru 博士總結 DORADO 平台開發目標未來可完成以下任務：成本估算，現場廢棄物特性分析和採樣，遠端分類和包裝規劃，風險識別和知識管理；機器人和遠端處理系統，以及表面和結構清潔等，如圖23。

(2) T1a 會議：核設施除役子題：驗證由篩子和磁性過濾器組成的創新分離裝置，用於減少放射性廢棄物的暫時貯存量(Muhammad Junaid Ejaz Chaudhry)

「驗證由篩子和磁性過濾器組成的創新分離裝置，用於減少放射性廢棄物的暫時貯存量」此議程由來自 Iqony GmbH 公司的 Muhammad 博士主講，其解釋，由於反應器壓力容器及其內部零件有多種切割方法。其中一種具有諸多技術優勢的製程是水磨料懸浮切割製程。這種冷切割製程係利用高壓水刀混合磨料顆粒進行切割，即使是複雜的結構(例如夾具)和部件，也能在安全、遠端的條件下，快速地進行切割。切割過程中會產生廢磨料和放射性鋼顆粒的混合物，這些混合物必須作為放射性廢棄物處理。每次切割都會增加需要處理的二次廢棄物量，進而增加整個製程的成本。儘管該切割技術具有諸多技術優勢，但其成本問題使其吸引力不足。為了減少二次廢棄物的產生，Iqony GmbH 公司開發了一種用於處理鋼/磨料顆粒混合物的分離過程。此製程採用篩分和磁過濾技術將磨料顆粒從混合物中分離出來。首先，將鋼和磨料顆粒的均勻混合物進行篩分，去除含有破碎磨料和細小鋼顆粒的細小顆粒。下一步，篩分後的物料經過磁性過濾器處理，以去除較大的鋼顆粒。此分離過程旨在透過回收磨料顆粒用於後續的廢鋼切割，從而減少二次廢棄物的產生。

Iqony GmbH 公司建構了一個包含篩網和磁性過濾器的原型分離

系統，並在間歇式製程中進行了測試。篩分機的初步測試結果顯示，其篩分誤差控制良好，但在穩定性方面仍有改進空間。Iqony GmbH 公司的創新結果已獲得專利，磁性過濾器樣本也展現出令人振奮的早期成果，但該製程在製程控制和測量方法方面仍需大幅改進。Iqony GmbH 公司為此計畫提供諮詢支援。他們將從研發階段提供與核能領域特殊需求相關的專業知識，如圖24。

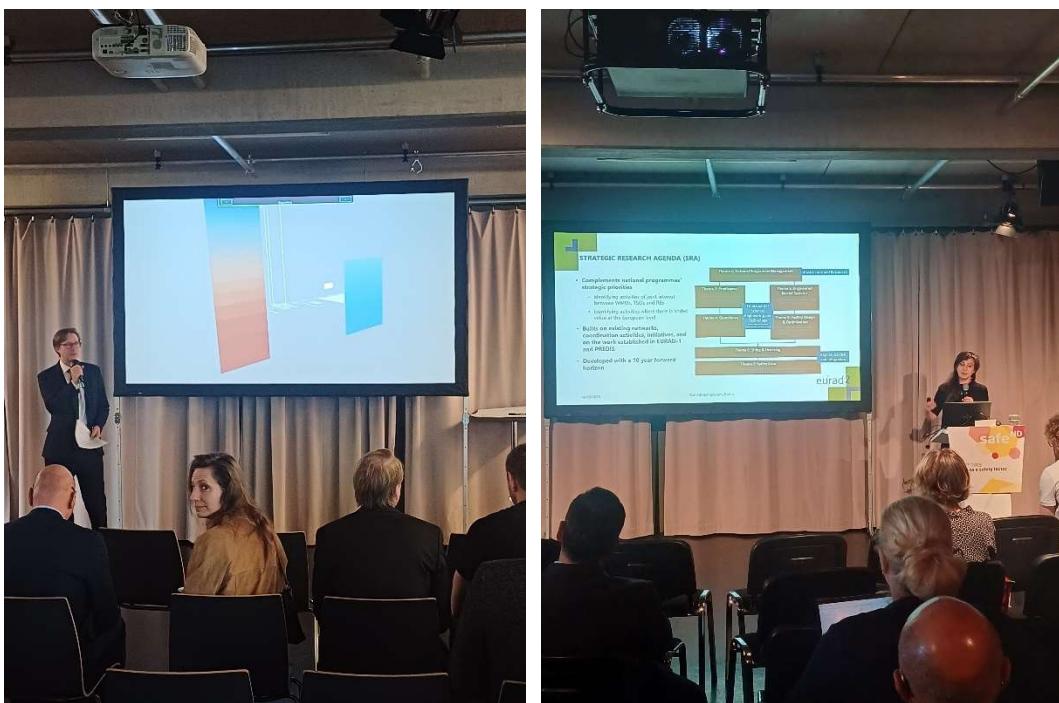


圖 23 Joseph. A. Ridao-Cabrerizo 主講「以機器人本體與數位孿生輔助除役作業：DORADO 計畫」

圖 24 Muhammad Junaid Ejaz Chaudhry 主講「驗證由篩子和磁性過濾器組成的創新分離裝置，用於減少放射性廢棄物的暫時貯存量」

(3) T1a 會議：核設施除役子題：ZuMoBau-ZL—暫時貯存設施結構劣化評估方法(Silvio Sperbeck)

「暫時貯存設施結構劣化評估方法」由柏林工業大學(Technische Universität Berlin, TUB)的 Silvio Sperbeck 博士主講。由於德國暫時貯存設施的現況設計壽命為50年，並已獲得40年的運作許可。ZuMoBau-ZL 研究計畫的目標是為暫時貯存設施的結構開發一套合適的評估和監測方案，包括設施壽命預測模型，以盡可能地預測、驗

證和監測設施可能之使用壽命。ZuMoBau-ZL 研究計畫將分四個步驟進行：

- (1)德國用過核子燃料暫時貯存設施的損傷和劣化機制目錄，並考慮其具體用途、建造細節和其他邊界條件，選擇合適的模型來描述。
- (2)提供非破壞或低破壞檢測方法、結構健康和監測技術的應用矩陣，該矩陣將與前述的目錄相匹配，並識別現有技術的不足之處。
- (3)針對特定類型的結構，調整並優化耐久性模型，以便預測未來的狀況和劣化情況，從而規劃維護與維修措施。
- (4)提供與資料庫和建築資訊模型。維護與維修選定的方法和結果將在柏林工業大學的參考結構(CONCERTO)上進行展示。

ZuMoBau-ZL 研究計畫前兩個步驟已完成，結果顯示已確定結構的主要劣化機制是鋼筋腐蝕和碳化。後續將採用雷達、超音波和空氣滲透率測量等方法來評估劣化狀況，如圖25。

(4) T5c 會議：高放射性廢棄物深地質處置場的廢棄物罐與緩衝回填材料的穩定性及劣化現象子題：廢棄物罐腐蝕建模方法：從質量平衡到耦合電化學模型(Marek Pekala)

廢棄物罐為高放射性廢棄物最終處置的重要組件，廢棄物罐的腐蝕評估結果將影響系統性安全性能。BASE 的 Marek Pekala 博士首先介紹了以質量平衡與電化學兩種方式建置廢棄物罐腐蝕模型的範例。此兩種方式都是討論如何評估銅罐體在處置場條件下因硫化物引起的長期腐蝕。在建模策略中。這些模型涵蓋從簡單的粗略質量和通量平衡方法，到後續涉及三維反應傳輸的複雜方法，使用者可根據安全評估的背景和基礎知識庫採用，進而完成安全論證。

為進一步說明廢棄物罐腐蝕機制與模型的應用，Marek Pekala 博士介紹了在封閉後階段典型條件下的碳鋼腐蝕模型。該模型耦合了腐蝕的關鍵過程，例如 γ 射線誘導的近場水和氯化物輻射分解、有氧和缺氧條件下的電化學腐蝕反應以及地球化學相互作用。它包含數10個反應和60多種化學物質。此模型可用於解釋實驗結果，從而深入了解碳鋼-膨潤土界面以及更遠端區域的化學演變。

(5) T5c 會議：高放射性廢棄物深地質處置場的廢棄物罐與緩衝回填材料的穩定性及劣化現象子題：全面洞察高溫膨潤土懸浮液中潛在廢棄物罐材料的腐蝕過程(Louisa Panjiyar)

「全面洞察高溫膨潤土懸浮液中潛在廢棄物罐材料的腐蝕過程」由哈雷-維滕貝格大學的 Louisa 進行解說，本研究旨在闡明潛在容器材料在高溫厭氧條件下於膨潤土懸浮液中的基本腐蝕過程。研究對象包括四種金屬：冷軋鍛造銅、無氧磷摻雜鍛造銅、球墨鑄鐵(EN-GJS-400-15)和不鏽鋼。所有金屬試片均使用 600/800/1200 目碳化矽砂紙研磨，隨後用丙酮清洗，以確保在實驗前獲得新鮮的表面。試片的金相特徵採用光學顯微鏡 (LOM) 和掃描電子顯微鏡 (SEM) 進行。曝露實驗使用兩種不同的膨潤土：(1) 市售膨潤土(Sigma Aldrich)；(2) 顆粒狀懷俄明型膨潤土(Bara Kada)。膨潤土漿液的製備方法為：將 5 g 膨潤土與 100 ml 合成奧帕林黏土孔隙水混合。將配製好的膨潤土懸浮液和試片分別放入裝有聚四氟乙烯內襯的鋼製高壓艙中。高壓艙在 60 °C 下分別保持 60 天和 90 天。實驗結束後進行 X 射線繞射儀 (XRD)、X 射線螢光光譜儀 (μ XRF)、掃描式電子顯微鏡 (SEM)、光學顯微鏡 (LOM) 和拉曼光譜。結果表明，局部腐蝕是鐵基材料的主要腐蝕機制，如圖26。



圖 25 Silvio Sperbeck 主講「ZuMoBau-ZL—暫時貯存設施結構劣化評估方法」



圖 26 Louisa Panjiyar 主講「全面洞察高溫膨潤土懸浮液中潛在廢棄物罐材料的腐蝕過程」

(6) T5c 會議：高放射性廢棄物深地質處置場的廢棄物罐與緩衝回填材料的穩定性及劣化現象子題：對廢棄物罐材料腐蝕分析的信任：現況與挑戰 (Christiane Stephan-Scherb)

「對廢棄物罐材料腐蝕分析的信任：現況與挑戰」由同樣來自哈雷-維滕貝格大學的 Christiane Stephan-Scherbl 教授講解，本講題著重於銅腐蝕研究的文獻回顧，銅作為瑞典廢棄物管理計畫的容器材料，但在1986年一項基於實驗數據探討銅的長期穩定性研究時，該研究曾對銅在厭氧條件下的熱力學穩定性提出質疑。這個質疑引發一場至今仍在持續的科學辯論。1986年提出之銅罐將於腐蝕過程產生氫氣之質疑論點，促使瑞典廢棄物管理機構 SKB 開展另一項全面的實驗和理論研究計畫，用以支持銅容器壁厚因腐蝕導致之質量損失的數值模型。即使在今天，國際上對可能影響銅材料穩定性的潛在腐蝕過程的研究仍未完成。

為及時開發德國可用於外壁(與地質障壁接觸)的容器材料，應從一開始就制定一套合理的策略。目前容器及其周圍緩衝材料接觸的

地球化學環境和電解質尚未明確界定。然而，隨著時間的推移，處置環境地球化學條件預計會發生變化，這將影響容器和緩衝材料的長期性能。瑞典處置計畫中關於銅腐蝕的爭議清楚地表明，進行有意義的實驗以支持安全評估至關重要。但是，銅腐蝕議題需要哪些實驗數據來支持各種腐蝕模型，研究者所設計相對應的腐蝕參數實驗是否合理；後續如何分析和解釋這些結果，目前仍然有爭議。Christiane Stephan-Scherbl 教授於此講題為與會者回顧關於銅腐蝕的爭議，如圖27。



圖 27 Christiane Stephan-Scherbl 教授主講「對廢棄物罐材料腐蝕分析的信任：現況與挑戰」



圖 28：T5c 海報解說

3. Friday, September 19th 議程

(1) 關鍵議題(Dörte Fouquet)

研討會最後一天議程之關鍵議題由德國呂內堡大學(Leuphana Universität Lüneburg, LUL)Dörte Fouquet 博士演講「關於如何及時處置核廢料的法律架構：挑戰與機會一概述」。內容提及，德國選址法以及德國高放處置設施的政策規劃，依據現行政策德國預計於

2031年選出處置場址，2024年德國 BASE 委託 Freiburg Das Öko-Institut 的報告指出，此目標可能無法及時完成，對德國來說，高放射性廢棄物場址的延後，可以是挑戰也可以機會；對 BASE 而言，如何在現有的法律管制框架下，將現有的時間落差轉化為更堅實的放射性廢棄物公眾意識，將是個非常重要的議題，如圖29。

(2) T1b 會議：暫時貯存和最終處置的安全性－相互關係？子題：

OBSERVE - 綜合劑量率和溫度測量程序-用於長期暫時貯存(Jan Henrik Klingen)

本講題由德國聯邦暫時貯存公司 (Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH, BGZ)的 Jan Henrik Klingen 博士主講，Jan Henrik Klingen 博士介紹了劑量率和溫度測量計畫 (OBSERVE)，該計畫旨在監測此兩變數在貯存容器之長期貯存期間的狀態。貯存容器表面的劑量率和溫度空間分佈特性，會受到容器內放射性物質的排列方式和容器零件特性的影響。在將貯存容器放入貯存設施之前，通常會進行測量。其目的是驗證是否符合相應貯存設施的劑量率和溫度限值。這些測量在容器表面指定的代表性測量點進行，以便獲得關於平均值或最大值的可靠資訊。

德國聯邦暫時貯存公司發起的 OBSERVE 計畫旨在測量選定貯存容器完整表面的劑量率和溫度。在計畫的第一階段已進行了敏感性研究，來檢驗劑量率和溫度測量結果到底多大程度上可適用於推斷貯存容器部件和內存物的狀態。敏感性分析結論表明 OBSERVE 測量方案可有效透過測量評估容器的狀況。

在專案第二階段，將開發一種可自動擷取整個容器表面的數值的測量裝置。為了評估測量結果，將考慮測量時的實際庫存以及容器的配置。比較結果及其分佈將用於得出關於實際屏蔽和散熱性能的結論。此測量方案能作為容器組件和長期貯存運作的安全評估，可直接作為未來審視安全分析的參考依據，如圖30。

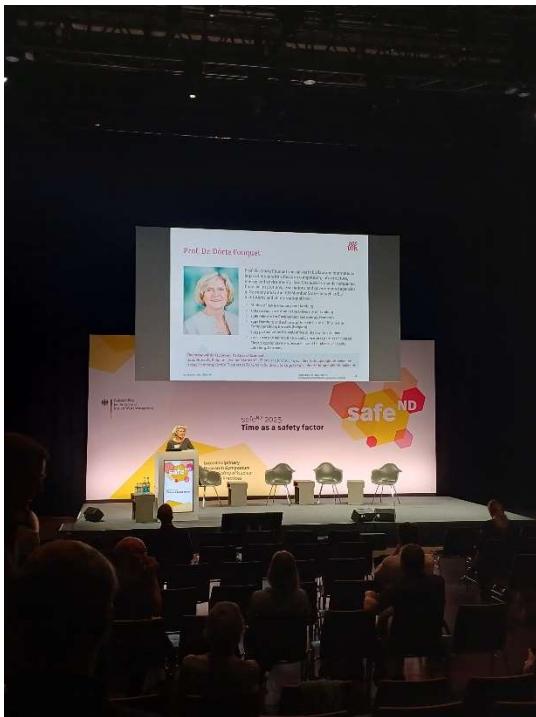


圖 29 Dörte Fouquet 博士關鍵議題「關於如何及時處置核廢料的法律架構：挑戰與機會—概述」

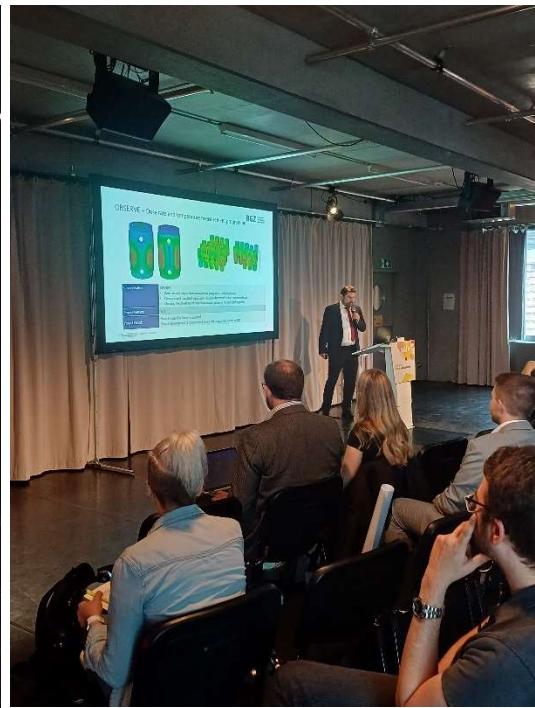


圖 30 Jan Henrik Klingen 博士主講「OBSERVE - 綜合劑量率和溫度測量程序-用於長期暫時貯存」

(3) T1b 會議：暫時貯存和最終處置的安全性—相互關係?子題：德國

高放射性廢棄物長期暫時貯存的環境影響評估挑戰(Julia Neugebauer)

柏林工業大學的 Julia Neugebauer 女士在本講題探討了目前德國在延長暫時貯存設施的環境影響評估(EIA)中必須應對的具體挑戰，包括由於對貯存容器老化行為的認知不足而導致的科學不確定性；氣候變遷導致極端天氣事件風險增加；以及不斷演變的安全威脅，例如潛在的恐怖攻擊和軍事攻擊。此外，延長貯存期限可能對受影響社區產生深遠影響，引發公眾參與、環境正義以及當地居民心理壓力等方面的擔憂。

Julia Neugebauer 女士透過國際案例研究分析，探討其他暫時貯存設施的許可流程是否以及如何應對上述關鍵挑戰，並旨在提出改善德國環境影響評估流程的建議。初步研究結果表明，德國目前在核廢料管理方面的環境影響評估實踐可能需要調整，以充分應對不

確定性、新出現的風險和社會挑戰。加強許可流程中的環境影響評估環節，有助於提高延長暫時貯存設施的技術穩健性和社會合法性。本講題之相關成果可提供正在考慮/準備暫時貯存設施國家作為參考，如圖31。

(4) T1b 會議：暫時貯存和最終處置的安全性－相互關係？子題：全球首例大尺度與長週期乾式貯存模擬燃料棒實驗結果(Sarah Weick)

來自卡爾斯魯厄理工學院的 Sarah Weick 博士為與會者介紹了 LICAS 試驗裝置。由於德國已可預見在尋找和準備最終處置場的時程上會存在延誤問題，也就是說，德國用過核子燃料的長期乾式貯存階段未來可能長達數十年。這表示德國需要收集更多可證明用過核子燃料在長期貯存條件下如何保持完整性的證據。

LICAS-01束實驗及其結果重點關注鎔基護套中的護套潛變(creep)和氫的行為，由卡爾斯魯厄理工學院主導的全球首個長期大型燃料束實驗 LICAS-01 是在 SPIZWURZ 研究專案的框架下進行，其試驗條件與乾式貯存條件非常相似，LICAS 裝置的概念是將21根長度為2.5公尺的燃料棒模擬器加熱至約400°C，然後均勻冷卻，用以模擬乾式貯存階段特有的緩慢冷卻過程。實驗採用了三種護套材料(鎔合金-4、優化型 ZIRLO™和 DX D4)，每種材料都有兩種不同的氫含量(100和300 wt. ppm)和兩種不同的內壓(106和146 bar)，並進行了250天的冷卻。實驗後，對護套內的潛變行為、氫擴散行為以及氫化物方位重排 (Hydride Reorientation)過程進行了非破壞性和破壞性測量。在分析之後，驗證了不同燃料棒特性在氫相關特性和護套管潛變行為方面的適用性。與最佳化後的 ZIRLO™相比，鎔合金-4 和 DX-D4 的護套潛變和氫化物方位重排表現出不同的行為。後者幾乎不受氫化物方位重排的影響，而電腦程式在對應的盲測中並未預測到這一現象。這些結果表明，需要更多的數據來改進和擴展用於建模的資料庫，如圖32。



圖 31 Julia Neugebauer 女士主講「德國高放射性廢棄物長期暫時貯存的環境影響評估挑戰」

圖 32 Sarah Weick 博士主講「全球首例大尺度與長週期乾式貯存模擬燃料棒實驗結果」

(5) T1b 會議：暫時貯存和最終處置的安全性—相互關係?子題：暫時貯存和最終處置：相互關係研究中的假設(Guido Bracke)

根據統計，德國2022年將擁有約1750個用於貯存高放射性廢棄物、用過核子燃料和玻璃化廢棄物的運輸和貯存容器。由於高放射性廢棄物處置場的選址與暫時貯存是兩個獨立的過程，可預期的是長期暫時貯存和最終處置之間可能存在某些相互作用，本項議題由 GRS 公司(Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, GRS)的 Guido Bracke 博士進行「KombiLyse」研究計畫的介紹。「KombiLyse」研究計畫分析了廢棄物(包括運輸和貯存容器)的老化效應和損傷機制。分析結果表明，在乾式貯存期間，溫度不會產生任何不可接受的影響。這期間輻射的影響也很小。根據研究結果，在長達100年的貯存期間，預計不會出現護套、容器或屏障的系統性失效，如圖33。

(6) T2a 會議：用過核子燃料和放射性廢棄物的暫時貯存和最終處置特性子題：檢視廢棄物包件是否符合比利時近地表處置 LLW&ILW-SL

的規定(Radouane Sghir)

在比利時放射性廢棄物管理計畫中，低放射性及中放射性短半衰期廢棄物(LLW & ILW-SL)將於比利時北部莫爾及德塞爾兩城市設置的近地表處置設施 (簡稱 cAt)進行最終處置。這些 LLW & ILW- SL 的主要來源是比利時核電廠 (位於蒂昂日和多爾)、比利時核子研究中心(The Belgian Nuclear Research Centre, SCK CEN)以及放射性同位素生產研究所(Institute for radioelements, IRE)。放射性廢棄物的管理由比利時廢棄物管理組織 ONDRAF-NIRAS 負責。該組織擁有一套驗收系統，能夠深入控制廢棄物從產生到在 cAt 的暫時貯存期間，是否符合多項廢棄物接收標準(WAC)。

近年來，比利時的廢棄物接收標準不斷改進，一些新的廢棄物接收標準已經制定，現有的廢棄物接收標準也進行了修訂，變得更加嚴格。因此，有必要評估過去由 ONDRAF-NIRAS 根據舊版廢棄物接收標準的廢棄物包件是否仍符合新版。比利時的相關營運組織已與該國管制機關 FANC(Federal Agency for Nuclear Control, FANC)和 Bel V(Bel V S.A., Technische Veiligheidsorganisatie voor nucleaire installaties, Bel V)合作啟動了一個項目，旨在評估 ONDRAF-NIRAS 過去接收的低放射性廢棄物和中放射性短半衰期廢棄物是否符合目前與 cAt 相關的廢棄物接收標準。該計畫旨在製定一項策略，利用非破壞檢測和破壞性檢測來證明其符合性，作為歷史特徵資料評估的補充，如圖34。



圖 33 Guido Bracke 博士主講「暫時貯存和最終處置：相互關係研究中的假設」



圖 34 Radouane Sghir 博士主講「檢視廢棄物包件是否符合比利時近地表處置 LLW&ILW-SL 的規定」

三、心得及建議

(一)心得

本次奉派參加為期三天之 BASE 舉辦之第三屆核能安全處置實踐研討會，有機會深入了解德國放射性廢棄物國家政策推行方向與處置進程，拓展國際視野，對於本會執行放射性廢棄物安全管制具實務參考價值。

觀察研討會歷次舉辦歷史，可發現德國 BASE 在舉辦最終處置會議研討會時，非常強調其主題性，BASE 定調本屆研討會主題為「Time」，發表者投入議題即圍繞「時間」做為整體論述元素，例如處置系統組件長期穩定性、暫時貯存至最終處置之時間跨度延伸之介面問題，人類記憶傳承等，完成向外論述。另本屆研討會於會議中公開揭示德國政府於深層地質處置設施計畫的推動現況，使與會各界能掌握該國政策脈動，並為後續國際交流與經驗分享奠定良好基礎。

本研討會的特色在於討論議題多元具有包容性，除了常見的放射性廢棄物最終處置與貯存相關科學研究，如處置隧道設計、工程障壁性能探討、

天然障壁特性、耦合效應以外，核設施除役的經驗與技術分享也囊括其列。令筆者印象深刻的是，研討會也為人文科學搭建發聲的舞台，這在國內的研討會經驗來說相當特別，該研討會的社會人文科學主題除了探討國家政策之法律框架外，也透過深入研究核歷史與人類記憶傳承之方式，為處置科學帶來完全不同的風貌。顧問公司開發最新商用技術的發表也為本屆研討會帶來後續經濟發展之可能性。

由國際趨勢可以發現，深層地質最終處置之時間跨度動輒數十年，甚至可以說最終處置工作是國家百年大計，BASE 以時間作為處置思考主軸，為處置實踐經驗帶來新的面貌，可想而知，世界各國在完成最終處置任務前，這接近百年的時間，人類社會的演進，處置技術的發展，法律框架等因子可能會發生變動。參酌德國經驗，了解最終處置的管制框架與法律系統，當代不單只需專注於解決眼前問題，同時也要保留新世代參與/否決之空間，從此視角出發，決策程序的透明性與包容性更顯其核心價值，亦為長期政策推動的重要基礎。

(二)建議事項

1. 本次出席德國聯邦廢棄物安全辦公室(BASE)舉辦之第三屆核能安全處置實踐研討會，藉由參與各項處置議題討論交流，瞭解世界各國高放處置技術發展現況，以及各國處置計畫執行策略與推動經驗，以掌握國際最新處置計畫發展脈動，可作為強化我國放射性廢棄物最終處置與安全管制之參考。
2. 本次研討會議題多元，除探討處置安全技術議題外，亦納入社會經濟、歷史人文層面，廣納眾多專業領域，我國推動處置計畫，除安全技術議題外，亦可廣納各界意見觀點，俾利於處置計畫之推動。
3. 國際社會脈動快速，數據時代的演進導致世界各國都面臨核專業人才新世代不足之問題，德國核能相關機構對此有相當認知，並投入相關預算致力於新世代之培育。建議可參照德國經驗，提升未來人才培育比重，透過大專院校推廣，國家級核能相關專案預算等方式，

吸引國內新世代持續投入處置研發領域。

4. 德國聯邦廢棄物安全辦公室(BASE)核能安全處置實踐研討會自 2021 年起每二年舉辦，相較於其他歷史悠久之研討會，該會議較為年輕多元，議題內容多較新穎，整體而言可窺見德國處置技術之創意與活力，故定期參與 BASE 舉辦之核能安全處置實踐研討會可有效掌握國際動態，有助於提升並強化我國用過核子燃料最終處置計畫之管理及安全管制作為，建議可持續派員參加。

四、附錄：會議議程手冊