

出國報告（出國類別：開會）

高放處置技術國際合作平台工作年  
會及設施參訪  
(瑞士、西班牙、瑞典)  
(公開版)

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：李在平 主管安全評估

曾于修 技術規劃專員

蘇鈺婷 安全評估專員

派赴國家/地區：瑞士、西班牙、瑞典

出國期間：113年9月9日~113年9月22日

報告日期：113年11月1日

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放處置技術國際合作平台工作年會及設施參訪

頁數 47 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/黃惠淪/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

李在平/台灣電力公司/核能後端營運處/主管安全評估/(02)2365-7210

曾于修/台灣電力公司/核能後端營運處/技術規劃專員/(02)2365-7210

蘇鈺婷/台灣電力公司/核能後端營運處/安全評估專員/(02)2365-7210

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：113 年 9 月 9 日至 113 年 9 月 22 日

派赴國家/地區：瑞士、西班牙、瑞典

報告日期：113 年 11 月 1 日

關鍵詞：最終處置、地下實驗室、資料庫

內容摘要：(二百至三百字)

台電公司依法推動高放處置計畫，並持續強化國際合作。考量瑞士於 2022 年剛完成放射性廢棄物最終處置的選址作業，是近期國際最新的成功案例，本次出國特別前往拜會瑞士放射性廢棄物處置專責機構 Nagra，洽談合作的可能，並參訪瑞士的地下實驗室，商討雙方簽署合作協議書(MOU)的相關細節，深入了解瑞士能順利推動選址的方式，有助於後續規劃地下實驗室的相關工作。此行也參與由西班牙 AMPHOS 21 公司主辦之「放射性廢棄物吸附資料管理及資料庫發展」研討會，探討核種吸附資料管理和資料庫開發的最新技術與現況。由於瑞典 ASPO 地下實驗室將於 2025 年關閉，為強化本次出國的效益，也特別前往參訪以了解地下實驗室的營運經驗，並參觀了廢棄物罐實驗室與地質調查設備。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網(<https://report.nat.gov.tw/Reportwork>)

## 摘要

台電公司目前參與由瑞典 SKB 所召集之 Task Force—地下水流和溶質傳輸 (GWFTS, modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes) 國際合作研究平台，該研究平台中的主要成員西班牙 AMPHOS 21 公司主辦本次「放射性廢棄物核種吸附資料管理及資料庫發展」研討會，探討核種吸附資料管理和資料庫開發的最新技術與現況，就目前雙方技術差異進行了解，並安排參訪實驗室以及商討 2025 年地下水流和溶質傳輸國際合作研究平台來台辦理會議的相關事宜。

依照目前核定的用過核子燃料最終處置計畫(高放處置計畫)期程，規劃將於 2033 年開始進行地下試驗設施規劃與建造，由於目前計畫母岩設定以結晶岩為優先目標，本次特安排前往參訪明年即將關閉之 Äspö 地下實驗室，把握機會汲取瑞典相關實務經驗，另考量瑞典 Äspö 地下實驗室關閉後，瑞士的 GTS (Grimsel Test Site) 地下實驗室將是全世界僅存開放國際合作的結晶岩地下實驗室，本次亦前往參訪並尋求未來合作的機會，並一起參訪瑞士另一以泥岩為母岩之地下實驗室(Mont Terri Rock Laboratory)。

瑞士於 2022 年剛完成放射性廢棄物最終處置的選址作業，是近期國際最新的成功案例，本次特別前往拜會瑞士放射性廢棄物處置專責機構 Nagra 請益，並商討後續雙方簽署合作協議書(MOU)的可能與細節，希望透過加強合作關係能學習瑞士順利推動選址工作的過程與成功經驗，也有助於未來規劃地下實驗室相關工作的規劃作業。

本次出國行程為目標導向，在高放處置技術國際合作平台的架構下持續深化與各國國際機構間的交流，了解相關技術與資料庫系統的發展現況，並邀請各國參加將於明年舉辦之 GWFTS 年會，也藉由地下實驗室的參訪，進一步認知地下實驗室對高放處置的必要性，後續將積極籌備前期的準備工作。

# 目錄

摘要 .....	i
目錄 .....	ii
圖目錄.....	iii
表目錄.....	v
壹、出國目的 .....	6
貳、出國過程 .....	7
參、工作內容 .....	8
一、參訪 Mont Terri 地下實驗室 .....	8
二、GTS 地下實驗室及 Nagra 工作會議 .....	14
三、放射性廢棄物核種吸附資料管理及資料庫發展研討會及實驗室參訪..	21
四、Äspö 地下實驗室 .....	34
肆、出國心得 .....	46
伍、建議.....	47

## 圖目錄

圖 1：Mont Terri 岩石實驗室位置.....	10
圖 2：Mont Terri 岩石實驗室不同時期擴建展示圖.....	10
圖 3：Mont Terri 岩石實驗室現場之工程障壁示意模型.....	11
圖 4：FE 實驗現場.....	11
圖 5：Mont Terri 岩石實驗室參與研究計畫之國家與組織.....	12
圖 6：Mont Terri 岩石實驗室人員介紹現地實驗.....	12
圖 7：Mont Terri 岩石實驗室現場實驗監測及網通設備.....	13
圖 8：參訪人員與 Mont Terri 岩石實驗室人員於現場合影.....	13
圖 9：李課長在平簡報說明我國高放計畫現況.....	17
圖 10：雙方討論之會議現場.....	18
圖 11：GTS 規劃中之研究計畫.....	18
圖 12：瑞士三個組織間相互關係圖.....	19
圖 13：選址三階段.....	19
圖 14：最終處置場相關作業預計期程.....	20
圖 15：AMPHOS 21 主持人 David García 開幕致詞.....	24
圖 16：西班牙 PSI 分享開發 TSMs.....	25
圖 17：韓國 KAERI 分享開發 SDB 管理系統.....	25
圖 18：韓國 KAERI 分享開發 APro 框架.....	26
圖 19：比利時 SCK CEN 探討固液相比比例對於批次吸附試驗的影響.....	26
圖 20：美國 LLNL 分享 FAIR Data 數據管理概念.....	27
圖 21：比利時 SCK CEN 放射性核種在水泥基相上的吸附行為.....	27
圖 22：韓國 KORAD 分享韓國處置現況.....	28

圖 23	：法國 ANDRA 分享 Cigéo 處置計畫內容.....	28
圖 24	：德國 GRS 分享使用 AI 輔助知識及文件管理.....	29
圖 25	：放射性廢棄物核種吸附資料管理及資料庫發展研討會後合影 .....	29
圖 26	：Eurecat 研究中心外觀 .....	30
圖 27	：Eurecat 實驗室人員介紹各項試驗設備 .....	31
圖 28	：AMPHOS 21 人員介紹岩芯樣本分析試驗情況.....	32
圖 29	：Eurecat 實驗室參訪後合影 .....	33
圖 30	：地質調查相關設備 .....	37
圖 31	：地質調查車.....	37
圖 32	：設備中心內的研究井與量測設備 .....	38
圖 33	：岩芯庫.....	39
圖 34	：廢棄物罐實驗室外的廢棄物罐展示.....	39
圖 35	：KBS-3 概念及其材料展示.....	40
圖 36	：燃料束及廢棄物罐展示.....	40
圖 37	：電子束焊接之焊道較粗糙.....	41
圖 38	：摩擦攪拌焊接設備 .....	41
圖 39	：摩擦攪拌焊接之焊道平整.....	42
圖 40	：X 光檢測設備 .....	42
圖 41	：Äspö 地下實驗室滲水情況.....	43
圖 42	：全尺寸取樣計畫之說明板.....	43
圖 43	：全尺寸取樣計畫開挖中之坑道.....	44
圖 44	：全尺寸取樣計畫已拆除封塞之坑道.....	44
圖 45	：全尺寸取樣計畫開挖之處置孔.....	45
圖 46	：Äspö 地下實驗室地表展示 KBS-3 系統.....	45

## 表目錄

表 1 : 出訪行程及工作內容 .....	7
-----------------------	---

## 壹、出國目的

台電公司依法推動高放處置計畫，並依照管制機關核能安全委員會（前原子能委員會）要求，持續強化國際合作。台電公司目前參與由瑞典 SKB 所召集之 Task Force—地下水流和溶質傳輸 (GWFTS, modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes)國際合作研究平台，並與當中的主要成員西班牙 AMPHOS 21 公司進行合作，將核種化學分析技術、核種傳輸試驗以及水文地球化學演化模擬等相關技術引進國內，也將協助辦理 2025 年在台灣舉辦的 GWFTS 平台工作會議。本次受邀參加由 AMPHOS 21 主辦之「放射性廢棄物核種吸附資料管理及資料庫發展」研討會，探討核種吸附資料管理和資料庫開發的最新技術與現況，並就目前雙方技術差異進行了解，提供我方團隊後續精進的方向外，也共同商討 2025 年來台舉辦 GWFTS 平台會議的相關事宜。

依我國高放處置計畫期程，規劃將於 2033 年開始進行地下試驗設施規劃與建造，本次出國安排前往瑞典參訪 Äspö 地下實驗室與廢棄物罐實驗室，在實驗室關閉以前盡快汲取相關實務經驗，以供後續建置工作規劃參考。另，瑞士的高放處置選址工作在近期已有突破性進展，於 2022 年已選定 Nördlich Lägern 為最終處置場址，並預計於今年 11 月提出最終處置設施一般許可申請。考量瑞典 Äspö 地下實驗室關閉後，瑞士的 GTS (Grimsel Test Site) 地下實驗室將是全世界僅存的結晶岩地下實驗室，目前與日本、韓國、德國、瑞典等十幾個國家持續有合作計畫，而除了 GTS 外，瑞士也設有以泥岩為母岩之地下實驗室(Mont Terri Rock Laboratory)。因此，為了解瑞士順利推動選址工作的實務經驗，並幫助規劃後續與地下實驗室有關的工作，本次出國安排與瑞士放射性廢棄物處置專責機構 Nagra 洽談合作的可能，並商討後續簽署合作協議書(MOU)的相關細節，另透過參訪實驗室的過程中，了解相關工作的規劃與其必要性，相關經驗分享與了解亦將回饋至未來建置地下實驗室的相關工作。

## 貳、出國過程

本次出國自 113 年 9 月 9 日出發，迄 9 月 22 日返國(共計 14 天)，首先前往瑞士參訪 Mont Terri 與 GTS 地下實驗室，並與瑞士放射性廢棄物處置專責機構人員召開會議，尋求未來合作機會。接著前往由 AMPHOS 21 公司於西班牙巴塞隆納主辦之「放射性核種核種吸附數據管理與資料庫建置工作會議」，會議中討論核種相關試驗與模型應用，以及數據管理與資料庫建置發展等相關議題；會後前往瑞典參訪 Äspö 結晶岩地下實驗室與廢棄物罐實驗室，汲取地下實驗室相關實務經驗，本次開會行程及工作內容如 表 1 所示：

表 1：出訪行程及工作內容

日期	地點與行程	工作內容
09 月 09 日	臺北－泰國曼谷(轉機)－瑞士蘇黎世	往程
09 月 10 日	蘇黎世－杜園	路程
09 月 11 日	Mont Terri 地下實驗室	參訪地下實驗室
09 月 12 日	杜園－古坦嫩	路程
09 月 13 日	Grimsel Test Site 地下實驗室	參訪地下實驗室 Nagra 工作會議
09 月 14 日	古坦嫩－蘇黎世	週六，路程
09 月 15 日	蘇黎世－西班牙巴塞隆納	週日，路程
09 月 16 日	巴塞隆納	參加放射性廢棄物核種 吸附資料管理及資料庫 發展研討會
09 月 17 日		參訪實驗室
09 月 18 日		
09 月 19 日	巴塞隆納－瑞典斯德哥爾摩	路程
09 月 20 日	斯德哥爾摩－奧斯卡港－斯德哥爾摩	參訪 Äspö 地下實驗室 廢棄物罐實驗室
09 月 21 日	斯德哥爾摩－英國倫敦(轉機)－臺北	返程
09 月 22 日		

## 叁、工作內容

### 一、參訪 Mont Terri 地下實驗室

Mont Terri 岩石實驗室(Mont Terri Rock Laboratory)位於汪省聖烏爾桑(St-Ursanne in the Canton of Jura)附近(圖 1)，為一研究用地下實驗室，其上層岩覆達 300 公尺，該實驗室對做為放射性廢棄物深地層地質處置母岩之一的 Opalinus clay 進行實驗與調查，且該實驗室其僅限於研究用，並不允許在此進行深地層地質處置。Mont Terri 岩石實驗室的研究隧道總長度約 1200 公尺，高度約 4 至 5 公尺，且共有超過 1000 個鑽孔，可透過鑽孔將測量儀器直接深入完整的岩石中，並採集岩芯進行進一步研究。該實驗室的研究隧道自 1996 年開始隨著時間而擴建(圖 2)。Mont Terri 岩石實驗室的研究主要集中在以下三個主題：

1. 研究與開發，如測量方法的開發與應用。
2. Opalinus clay 的特徵化，如量化與描述水文地質、岩石力學及地球化學特性等，透過實驗獲取水力滲透率、擴散係數及熱特性等相關特徵值。另外，調查 Opalinus clay 中隧道周圍的開挖損傷帶亦為研究的目標，透過研究了解隧道中自然生成和開挖產生的裂隙等相關問題。
3. 工程障壁系統的相關特性，如處置容器的相互作用、膨潤土回填行為與 Opalinus clay 長期演化等研究。(圖 3)

為在不影響岩芯樣本的情況下於 Opalinus clay 中鑽孔，Mont Terri 岩石實驗室不斷改進鑽探技術，同時因目前用於岩石及隧道周圍應力場的方法通常適用於結晶岩，因此也在實驗室中研究開發相關技術以適用於 Opalinus clay。Mont Terri 岩石實驗室亦關注及實驗調查 Opalinus clay 透水性、自密封能力以及放射性核種的擴散行為，其中一項實驗即在鑽孔中注入示蹤劑(例如氬)，經過一段時間後，測量示蹤劑在岩石中滲透的距離。Mont Terri 岩石實驗室亦探討熱-水-力(THM)

耦合相關機制，透過 1:1 的全尺寸實驗(稱為 FE 實驗)，模擬放射性核種衰變產生的熱來測試廢棄物容器的設計(圖 4)，經過數年研究時間，觀察並了解緩衝回填材料和周圍岩石在不同溫度條件下的行為，並進一步探討未來深地層地質處置的可行性。

Mont Terri 岩石實驗室另有一項國際研究計畫，稱為 Mont Terri Project，旨在對 Opalinus clay 進行水文地質、地球化學及岩土工程等相關研究。Mont Terri Project 由瑞士聯邦地質調查局 Swisstopo 負責營運，Swisstopo 為瑞土地質調查的專業中心，其每年向汪省提出申請 Mont Terri Project 相關的研究活動以審核和獲得許可。Mont Terri Project 目前共有 22 個來自世界各國的研究組織參與，並由各研究組織資助實驗及評估研究後續發展等。因應各國實驗相關設備連接網路及實時監測需求，Mont Terri 岩石實驗室內部設置許多監測及網通設備，並架設對外統一網路線路，供對外連線交換資料使用(圖 5 至圖 8)。

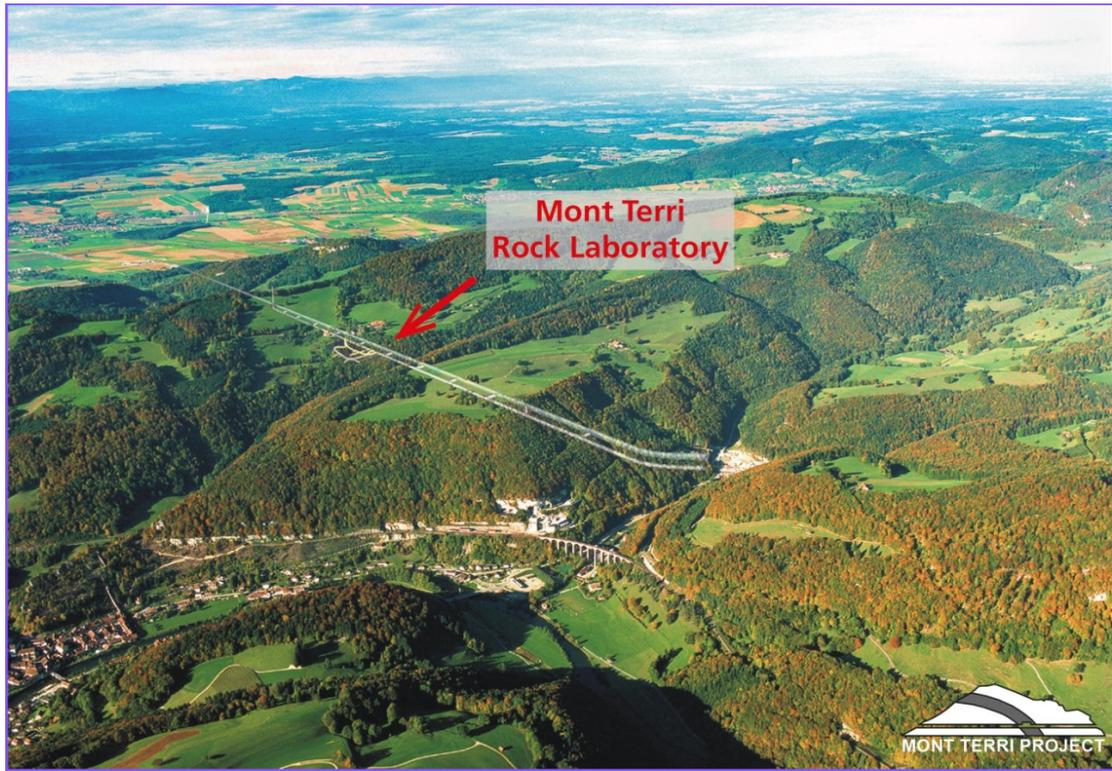
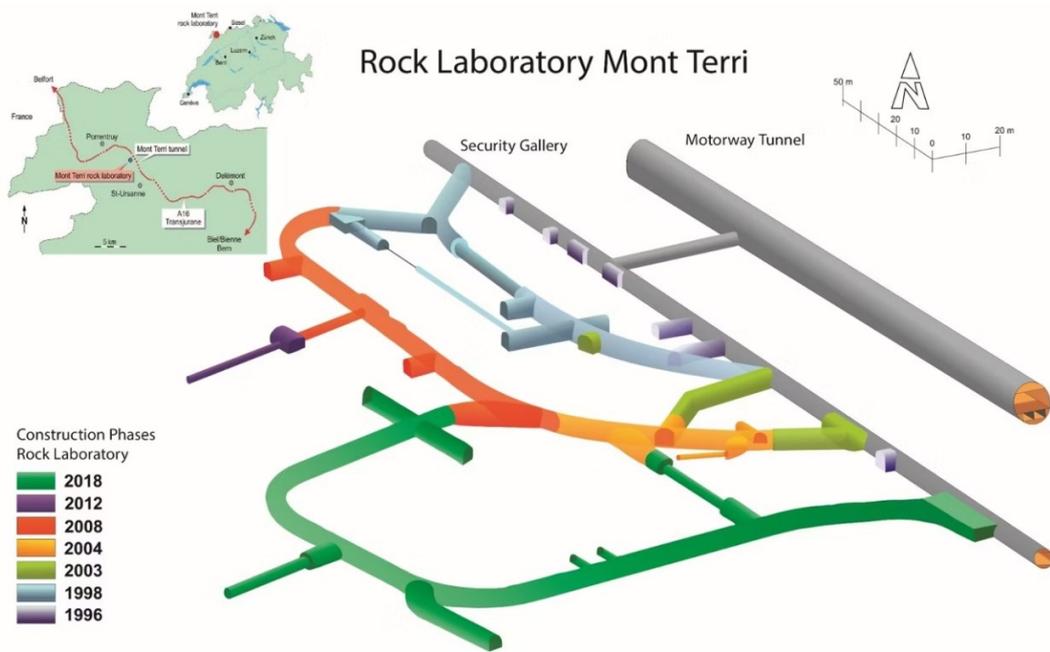


圖 1：Mont Terri 岩石實驗室位置



Chronological development of the laboratory: 1996 Construction of the initial niches, 1998 Construction of the first experiment gallery (Gallery 98), 2003 Construction of additional niches, 2004 Expansion (Gallery 04), 2008 Expansion (Gallery 08), 2012 Full-scale emplacement (FE niches), 2018-2019 Expansion (Gallery 18)

圖 2：Mont Terri 岩石實驗室不同時期擴建展示圖



圖 3：Mont Terri 岩石實驗室現場之工程障壁示意模型



圖 4：FE 實驗現場



圖 5：Mont Terri 岩石實驗室參與研究計畫之國家與組織



圖 6：Mont Terri 岩石實驗室人員介紹現地實驗



圖 7：Mont Terri 岩石實驗室現場實驗監測及網通設備



圖 8：參訪人員與 Mont Terri 岩石實驗室人員於現場合影

## 二、GTS 地下實驗室及 Nagra 工作會議

本次出國行程原訂在參訪 GTS 地下實驗室後，與 Nagra (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste) 負責國際合作與地下實驗室的 Ingo Blechschmidt 洽談未來合作相關事宜，惟參訪前夜突遇罕見之暴雪襲擊，一早前往 GTS 的道路就因大雪而關閉，並通知即將封山。在 Nagra 人員的通知下緊急往山下撤退，所幸一行人在鏟雪車的導引下平安退至山下的村莊，改在 Nagra 臨時安排的會議中心與 Nagra 的專家們召開會議，會議情形如圖 9、圖 10。Ingo 首先在簡報中先說明瑞士目前的能源使用現況，2019 年前共有五部核能機組用於發電，但在同年底有一個位於 Muhleberg 的機組在 48 年的營運下停止運轉。截至 2022 年，核能在瑞士的發電佔比約 36.4%。Nagra 作為瑞士的放射性廢棄物處理專責機構，其創立於 1972 年，目前共有約 130 位成員，大部分都是科學家和工程師，主要經費來源為放射性廢棄物的產生者，其中核電廠佔約 92%，政府則提供約 8% 的資金。瑞士的放射性廢棄物最終皆採深地層地質處置，利用多重障壁系統，將高放射性廢棄物裝在碳鋼容器中，以水平的放式放置在隧道，並回填膨潤土以作為緩衝/回填材料，目前瑞士選擇的處置母岩為 Opalinus clay，Opalinus clay 具吸附能力、滲透性低的優點。瑞士選址由聯邦能源辦公室(Swiss Federal Office of Energy, SFOE)負責主導選址程序，並由 Nagra 負責技術面的支援，而瑞士聯邦核安監察局(the Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI)則確認過程中的安全性(圖 12)。在場址調查的部分，瑞士採取了多樣性的調查方法，包含文獻蒐集與遙測近地表調查、地球物理(如地震探測)、鑽井等，其中在 2019 年至 2022 年間，瑞士執行了 9 口深鑽井，獲取約 4600 個鑽孔岩芯樣本，並進行多樣測試(如進行 140 次裂隙水流的測試等)。瑞士的選址程序為循序漸進，主要分為三階段(圖 13)，自 2008 年開始選址計畫，2011 年完成第一階段的初步選址結果後，進行更詳細的地質調查，於 2018 年完成第二階段的工作，並根據第二階段的結果，進展三個候選場址的調查比較與選擇，2022 年 Nagra 宣布候

選場址為 NÖRDLICH LÄGERN，預計於 2024 年獲得一般性的執照後，再接續申請核能建物及營運的執照，最終預計於 2125 年關閉處置場(圖 14)。在下一階段(2025 年後)開始前，Nagra 將提供以下支援：

1. 規劃和實施所有地表和地下調查及勘探工作。
2. 規劃和實施所有正在進行中和未來的相關監測工作。
3. 規劃、實施和運作 Nagra 的地下實驗室相關實驗。
4. 持續進展及管理國際交流、合作與諮詢相關工作。

本次參與會議的 Nagra 專家主要來自合作與諮詢部門(Collaborate & Consult, C&C)，負責國際合作與技術諮詢的相關工作。當天除負責人 Ingo 外，還有負責諮詢與國際合作計畫(Consulting & International Projects, CIP)的地球化學專家 Emiliano Stopelli，以及負責 GTS 地下實驗室的分項負責人 Florian Kober 與會。C&C 部門的任務包括：

1. 發展 Nagra 的專業知識：支持國家的計畫以及蒐集資訊，來擴展 Nagra 的知識網絡。
2. 國際合作與交流：規劃與執行專案，並創造其附加價值。
3. 與 Nagra 主要任務外的合作成員進行協作與諮詢
4. 作為技術中心去支持 Nagra 的研發計畫
5. 營運 GTS 地下實驗室

目前參與 Nagra 合作的國家包含日本、韓國、英國、德國、挪威、美國和加拿大等至少 16 個國家。為進行知識保存及傳播，也設有一訓練中心稱為 Grimsel Training Centre (GTC)，其設立目標包含提供 Nagra 及相關合作夥伴專業知識、GTS 實驗，與 Nagra 50 年的選址與申請執照等經驗及專業知識移轉、密切互動

與實地考察、理論與實務並重、知識分享與討論和激發等。GTC 召開不同技術的相關課程與工作坊，像是地下實驗室的現場測試與水力特徵、數據資料管理、深地層地質處置的選址等，目前將公布與進行 2025 年的相關課程規劃，屆時亦開放有興趣之國際團隊參與。

GTS 為一以結晶岩為母岩之通用型地下實驗室，位於海拔 1730 公尺的結晶岩中，並在地表以下約 450 公尺深處，GTS 隧道長約一公里。自 1984 年開始營運後，持續進行岩石裂隙、工程障壁系統的評估研究與開發，包含透過試驗了解工程障壁的長期行為，並確認潛在場址母岩的適用性，並發展相關地質模型。GTS 並不會處置任何放射性廢棄物，但為了解岩石與地下水的相關機制，在輻射防護專家監督下，並遵循瑞士聯邦核安監察局 ENSI 所制定的嚴格規定，GTS 被授權僅在特定的輻射控制區可使用多種具放射性的示蹤劑進行實驗，但必須確保試驗對環境產生影響降至最低。GTS 地下實驗室目前開放有興趣參與的第三方組織進行測試與研究，並由具數十年經驗的瑞士研究團隊提供技術支援，已參與的成員包含日本、德國、法國、芬蘭、韓國、加拿大、美國等來自約 12 國的國際組織。目前正在進行中的幾項研究計畫簡述如下：

1. Long term diffusion (LTD) —LTD（長期擴散）計畫自 2004 年開始，主要目標是提供裂隙岩石中擴散的定量資訊。
2. Colloid formation and migration (CFM) —CFM（膠體形成和遷移）計畫自 2004 年開始，為加強對膨潤土/母岩界面膠體形成相關過程的了解。
3. Gas permeable seal test (GAST) —GAST（透氣密封測試）計畫自 2012 年開始，以真實規模和真實邊界條件驗證與展示透氣密封的有效功能。
4. Material corrosion test (MaCoTe) —材料腐蝕測試 (MaCoTe) 計畫自 2013 年開始，包括非加熱和加熱實驗，用於研究膨潤土與廢棄物罐材料的腐蝕。

5.  $^{14}\text{C}$  and  $^{129}\text{I}$  migration in cement & rock (CIM) —CIM 計畫自 2017 年開始，模擬  $^{14}\text{C}$  和  $^{129}\text{I}$  進入飽和母岩的遷移。
6. High temperature bentonite project (HotBENT) —HotBENT 計畫自 2018 年開始，透過研究高溫對膨潤土的屏障及其安全功能的影響。

除上述的計畫持續進行外，預計於 2024 年底至 2025 年將展開另外 9 項的研究計畫，包含研究裂隙環境中的熱-水-力-化耦合行為(THMC-coupled processes in fractured systems)、進階腐蝕研究(Advanced Corrosion Studies)、數位孿生(Digital Twin project)等項目，而這些研究計畫亦歡迎有興趣參與的研究單位及國家投入。(圖 11)其於會後將參與研究計畫的相關資料提供台電公司，並初步表達未來簽署合作備忘錄(MOU)之可能。

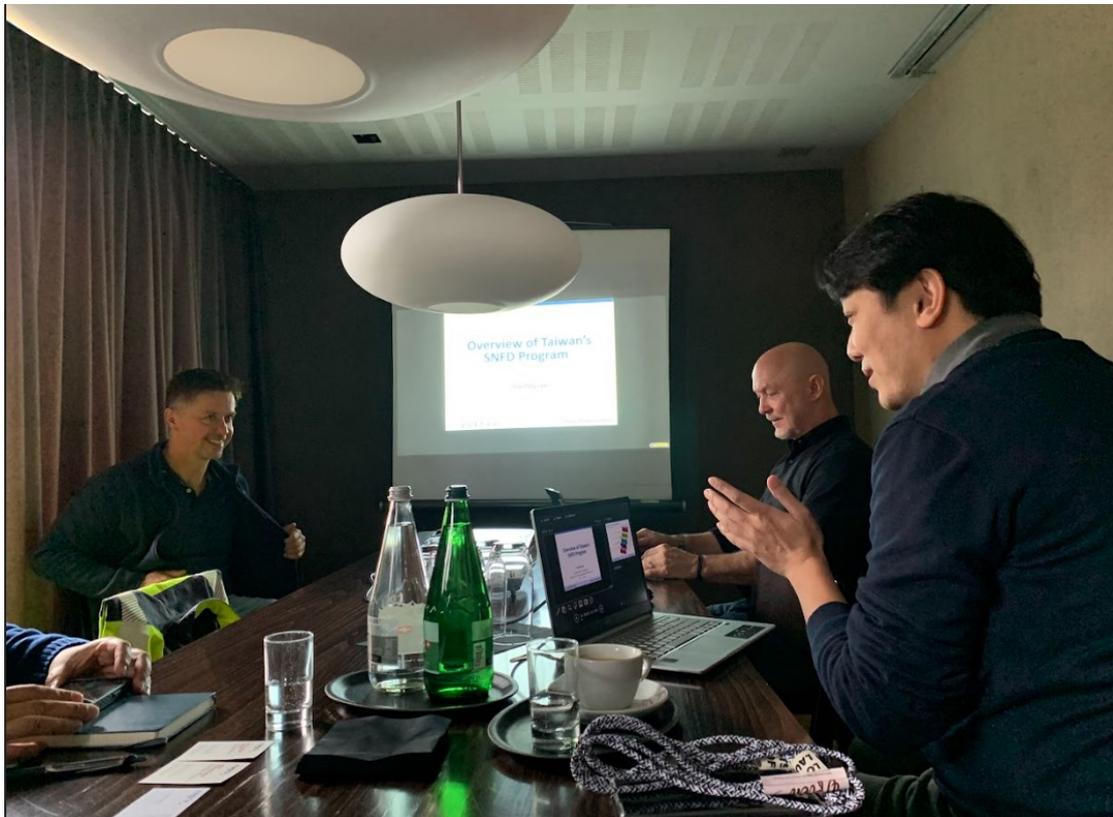


圖 9：李課長在平簡報說明我國高放計畫現況



圖 10：雙方討論之會議現場

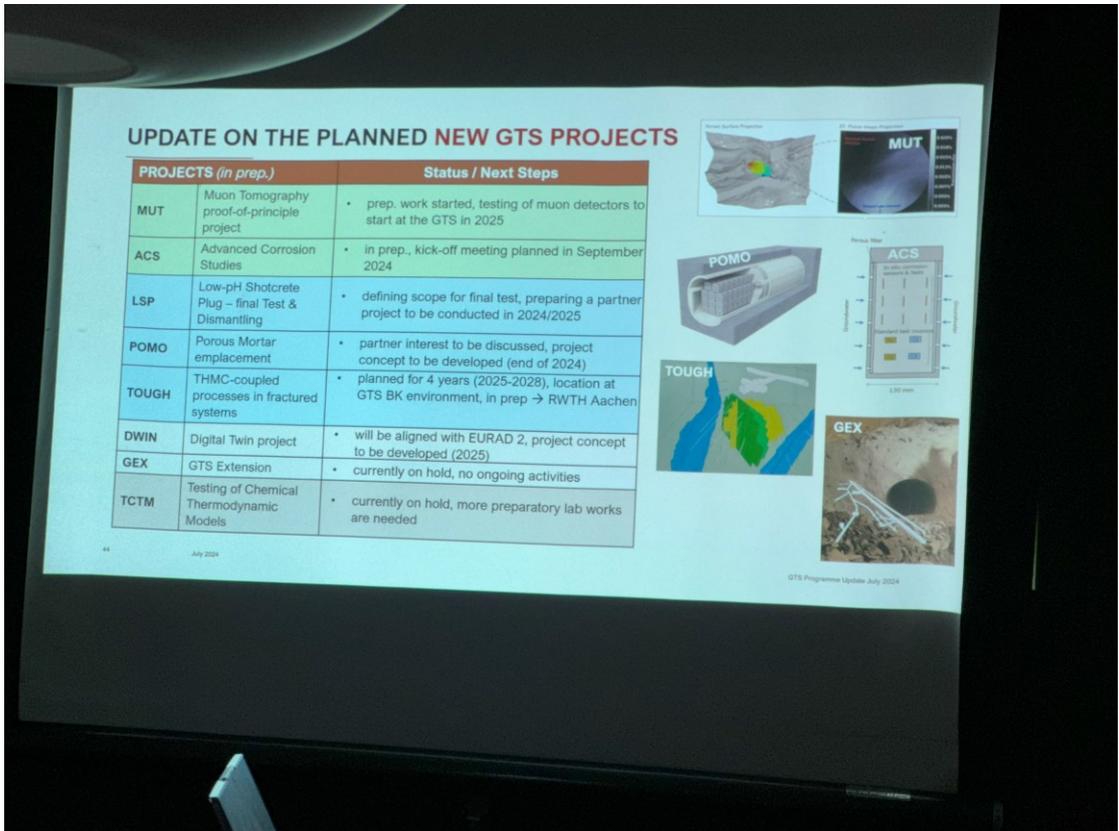


圖 11：GTS 規劃中之研究計畫

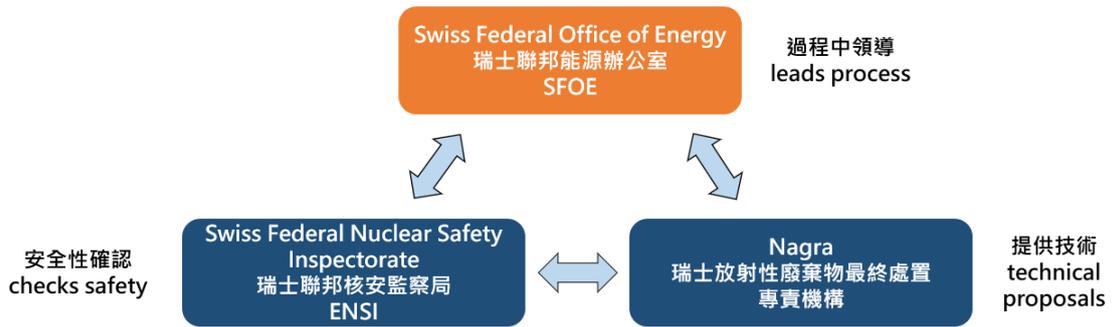


圖 12：瑞士三個組織間相互關係圖



圖 13：選址三階段

# Time plan for the combined repository

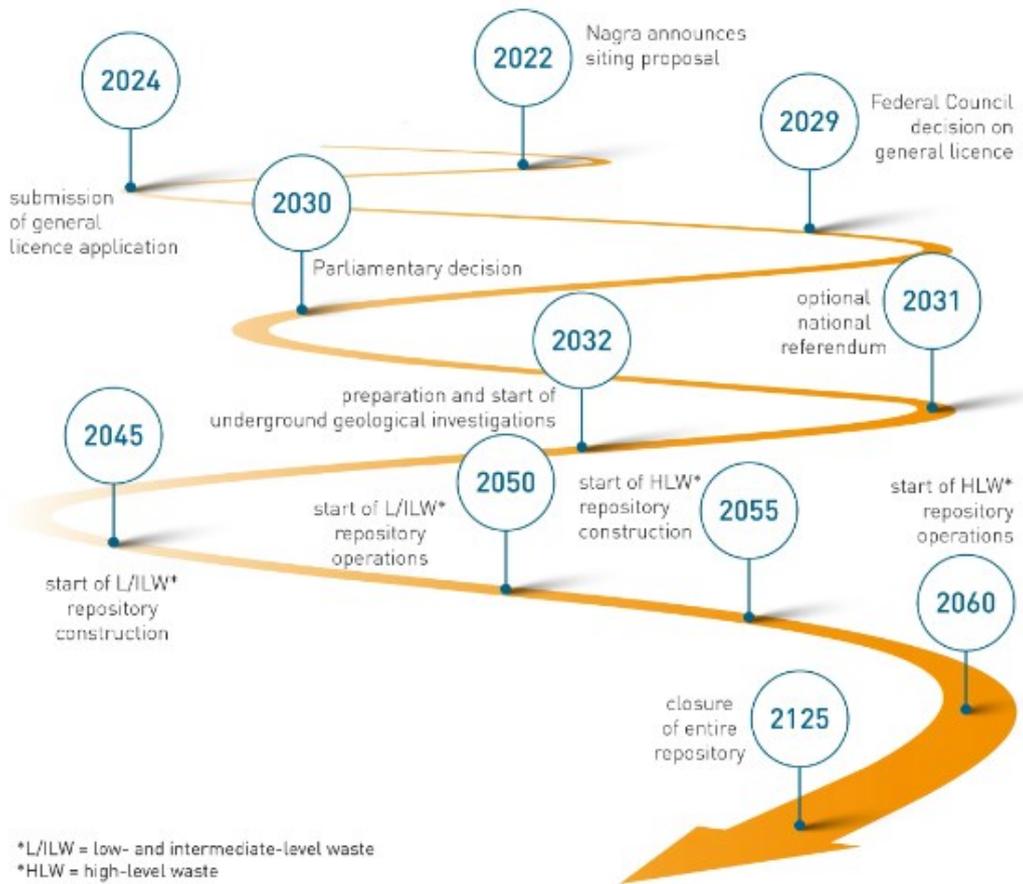


圖 14：最終處置場相關作業預計期程

### 三、放射性廢棄物核種吸附資料管理及資料庫發展研討會及實驗室參訪

放射性廢棄物核種吸附資料管理及資料庫發展研討會 (Sorption data management and database development for radioactive waste management workshop) 為期 2 天，由西班牙 AMPHOS 21 公司主辦，AMPHOS 21 是一家總部位於西班牙的獨立技術諮詢公司，主要提供的服務包含放射性廢物管理、核能發電和環境修復等。核種吸附資料目前數據量有限並由全世界實驗室各自運作，因此如何蒐集核種吸附資料建置熱動力資料庫，亦是各國努力的方向。研討會邀請各國合作機構專家就放射性廢棄物核種吸附資料管理及資料庫發展等相關議題進行探討，會議首先由 AMPHOS 21 的 David García 作為主持人開場(圖 15)，其後區分為四大主題進行報告，主題分別為「核種吸附資料知識發展現況」、「現階段研究趨勢」、「廢棄物管理組織觀點」及「知識管理」，每個主題結束後則會共同探討共識並總結。

第一個主題為「核種吸附資料知識發展現況」，瑞士 PSI(Paul Scherrer Institute) 的 Dan Miron 分享開發 TSMs(Thermodynamic Sorption Models)(圖 16)，可以計算不同條件下化學條件下的場址特定核種吸附特性，並從實驗測量數據導入至模型，執行後續敏感性分析及不確定性傳遞等。韓國 KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute)的 Seonggyu Choi 分享開發中的 SDB(Sorption DataBase)管理系統資料結構及網頁介面設計(圖 17)，提供使用者透過既有分類點選搜尋，並透過條件篩選及繪圖縮小搜尋結果範圍，達到精確搜尋目的。韓國 KAERI 的 Jeonghwan Hwang 則分享開發 APro(Adaptive process-based total system performance assessment framework)整體框架(圖 18)，整合了 COMSOL 及 PHREEQC 等專業軟體，協助評估從處置容器、近場、遠場、至生物圈等高放最終處置場的長期安全。比利時 SCK CEN(Belgian Nuclear Research Centre)的

Liesbeth Van Laer 則探討固液相比比例對於批次吸附試驗的影響(圖 19)。

第二個主題為「現階段研究趨勢」，美國 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)的 Mavrik Zavarin 分享 FAIR Data 之數據管理概念(圖 20)，分別由 Findable、Accessible、Interoperable、Reusable 組成，期望透過標準化的方式處理數據轉換，並建立可追溯之資料流程，除了便於資料後續應用及資料共享，亦可以提高研究效率。另外亦包含自動化數據蒐集、機器學習(Machine learning)和混合機器學習模型來處理大型數據集，提升模型構建效率並降低計算負荷。比利時 SCK CEN(Belgian Nuclear Research Centre)的 Delphine Durce 則描述使用實驗設計法(Design of Experiments, DoE)來研究放射性核種在水泥基相上的吸附行為(圖 21)。德國 GRS(Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit)的 Susan Britz 則討論放射性廢棄物管理中，核種吸附資料庫的應用與開發，針對不同地質和化學邊界條件下的放射性核種傳輸和滯留的影響。

第三個主題為「廢棄物管理組織觀點」，韓國 KORAD(Korea Radioactive Waste Agency)的 Soo-Gin Kim 說明目前韓國的處置概況(圖 22)，並提到纖維素處置的安全評估，透過軟體輔助計算限值以確保安全性。法國 ANDRA(French national radioactive waste management agency)的 Benoît Madé 則提到強調核種滯留和吸附機制對安全評估的關鍵性，並在 Cigéo 計畫中利用黏土質岩層的深層隔離來防止放射性物質遷移至生物圈(圖 23)，另外其正開發基於 XML 格式的資料庫，易於進行資料交換。加拿大 NUMO 的 Tammy Yang 則提到 NWMO 長期進行吸附研究，測量多種核種的分配係數(Kd)值，並分析溶液化學特性(如離子強度、pH、Eh)對吸附的影響，涵蓋沉積岩與結晶岩的吸附數據測量和模型化分析。

第四個主題為「知識管理」，德國 GRS 的 Susan Britz 提到知識管理及學習型組織的概念(圖 24)，都是希望能確保處置相關資料及知識能夠長期保存，並能夠隨科技、研究技術發展不斷進步。並且成立跨組織合作的 K.I.S.S.(Kompetenz.

Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz.)專案，內容包含開發採用創新科技的數位學習平台、開發審核及監督程序使用的數位平台、導入 AI 輔助知識管理等。另外亦提到 AI-based 的知識及文件管理概念，搜尋時 AI 可以協助從「知識庫」(Knowledge Pool)中尋找資料，以取代傳統的資料庫搜尋邏輯，提升搜尋時精確度。瑞士 PSI 的 Dan Miron 介紹其與 Nagra 共同開發的熱力學資料庫 TDB 2020，用以支援瑞士放射性廢料處置安全評估，並可應用於環境地球化學領域的系統模擬。AMFOS 21 的 David García 則提到其開發之核種吸附資料庫，旨在支持放射性廢棄物處置的安全分析和設施建設，數據涵蓋各種岩石樣本和水泥材質，在接近中性至高鹼性的 pH 化學條件下進行，蒐集在室溫範圍內並包含多種化學元素的完整原始數據。另外數據管理功能包括使用 JSON 格式的數據前置工具、支援遠端操作，提供篩選、繪圖及單位轉換功能等。

會議最後同樣由 AMPHOS 21 公司進行總結，包含以下要點：

1. 期望建立有關核種吸附數據資料的統一交換標準，確保數據一致性能夠提升資料共享的效率。
2. 良好的核種吸附數據資料管理為後續模擬及評估的重要來源。
3. 現階段機器學習 AI 的輔助方式主要為協助加速模型計算，提高模擬分析效率。
4. 確保處置相關資料及知識能夠長期保存為知識管理中的要項。

研討會後則前往 Eurecat(Eurecat Centre Tecnològic)西班牙巴塞隆納的研究中心(圖 26)的實驗室參訪。Eurecat 是加泰隆尼亞地區最大的技術研究中心，成立於 2015 年，總部位於巴塞隆納，通過整合多個研究機構而成，現已發展成為西班牙重要的應用研究及技術轉移中心之一。會議一開始由 Eurecat 實驗部門的主管 Anna Gimenez Pujol 進行介紹，後由現場實驗室人員細心導覽各項試驗設備功

用，並展示我方岩石樣本與土壤樣本分析試驗流程(圖 27、圖 28)。



圖 15 : AMPHOS 21 主持人 David García 開幕致詞



圖 16 : 西班牙 PSI 分享開發 TSMs



圖 17 : 韓國 KAERI 分享開發 SDB 管理系統

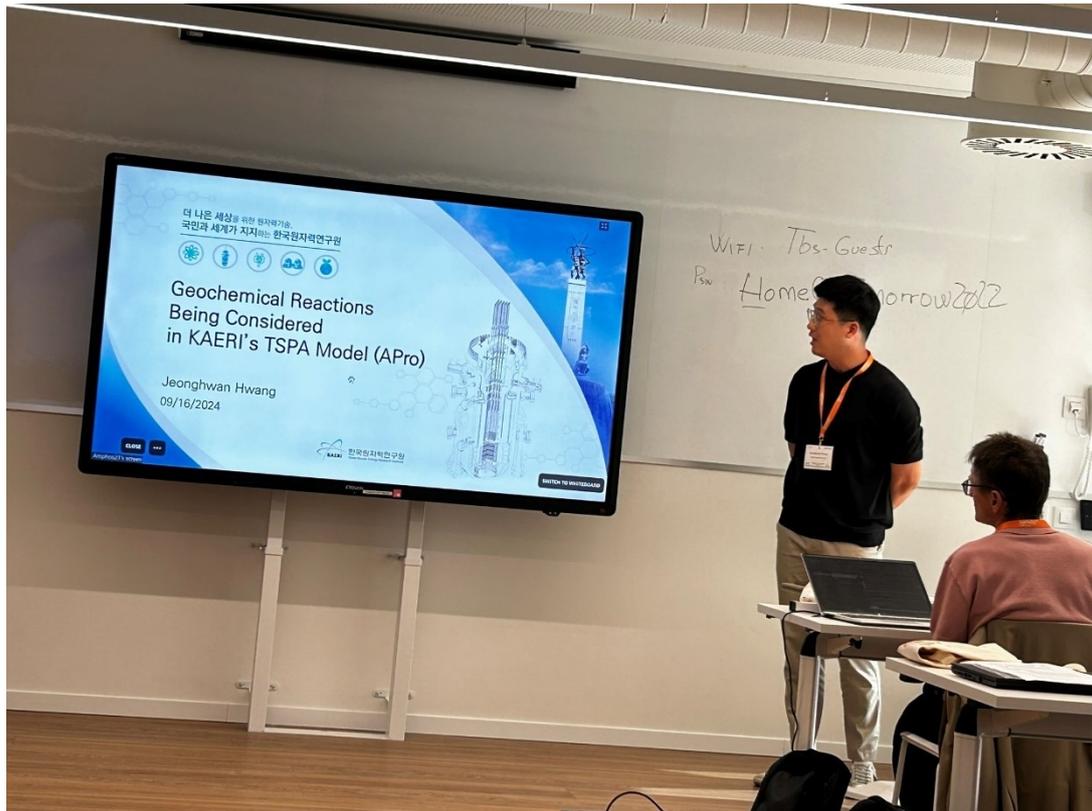


圖 18 : 韓國 KAERI 分享開發 APro 框架

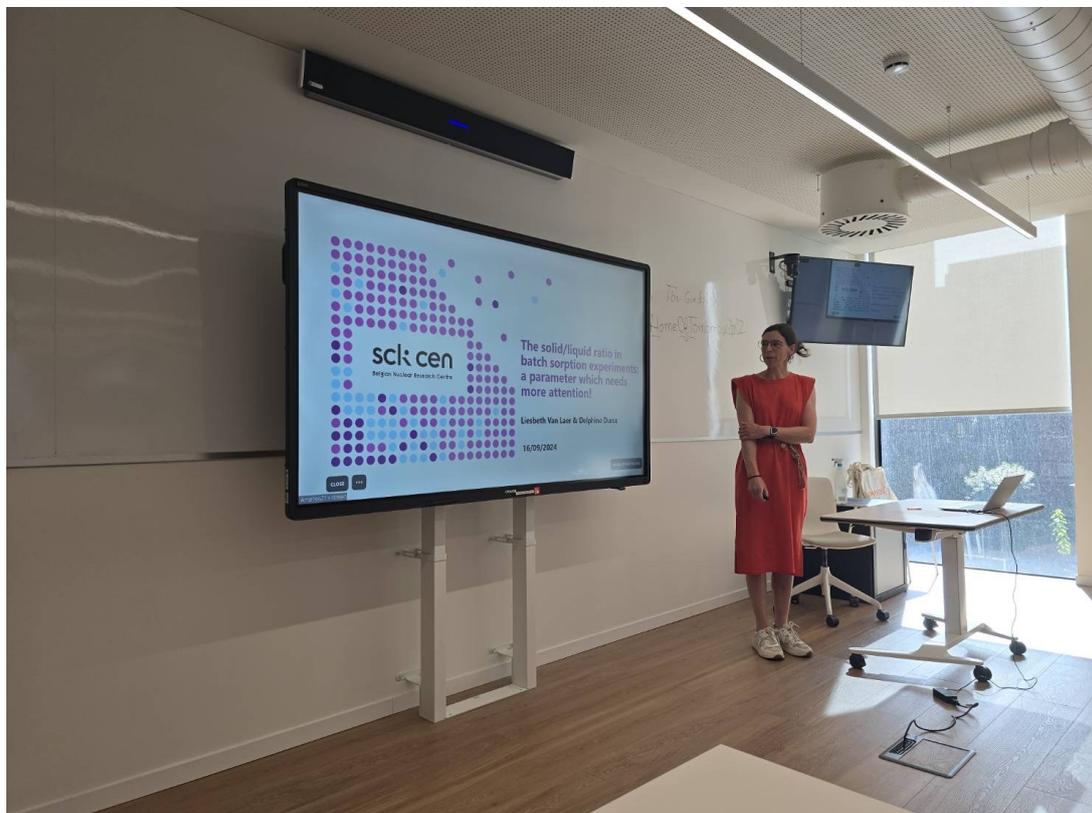


圖 19 : 比利時 SCK CEN 探討固液相比比例對於批次吸附試驗的影響



圖 20 : 美國 LLNL 分享 FAIR Data 數據管理概念



圖 21 : 比利時 SCK CEN 放射性核種在水泥基相上的吸附行為

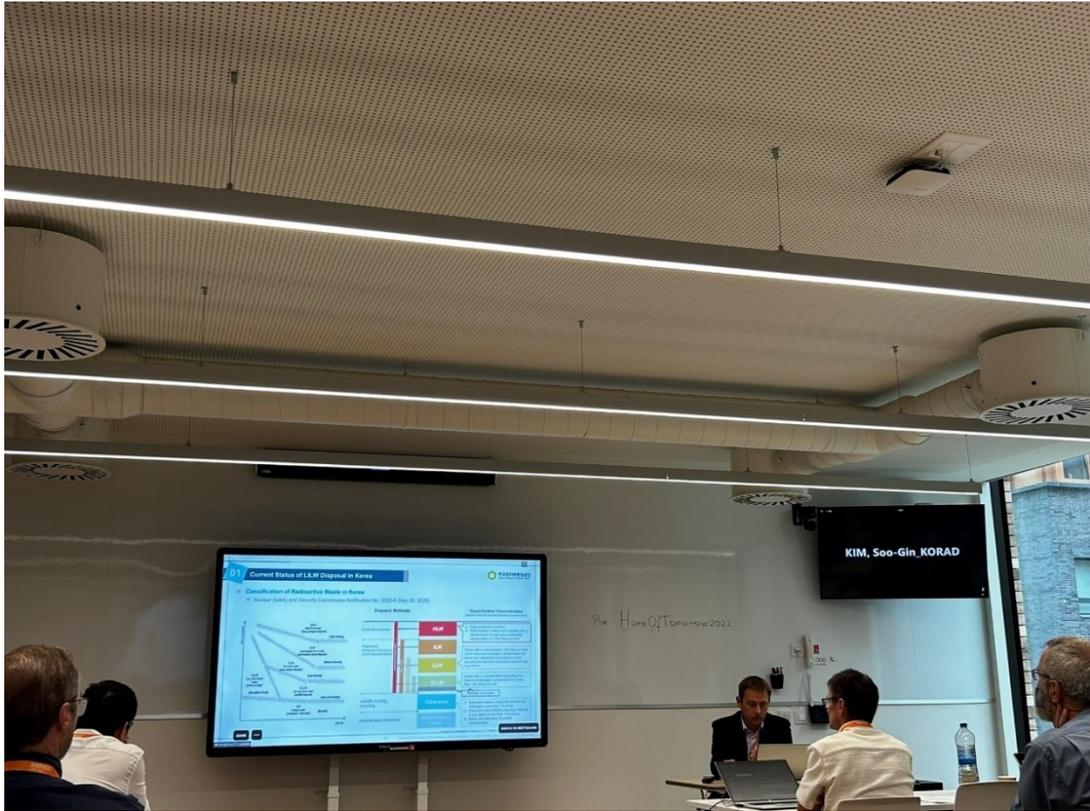


圖 22 : 韓國 KORAD 分享韓國處置現況



圖 23 : 法國 ANDRA 分享 Cigéo 處置計畫內容



圖 24：德國 GRS 分享使用 AI 輔助知識及文件管理



圖 25：放射性廢棄物核種吸附資料管理及資料庫發展研討會後合影



圖 26 : Eurecat 研究中心外觀

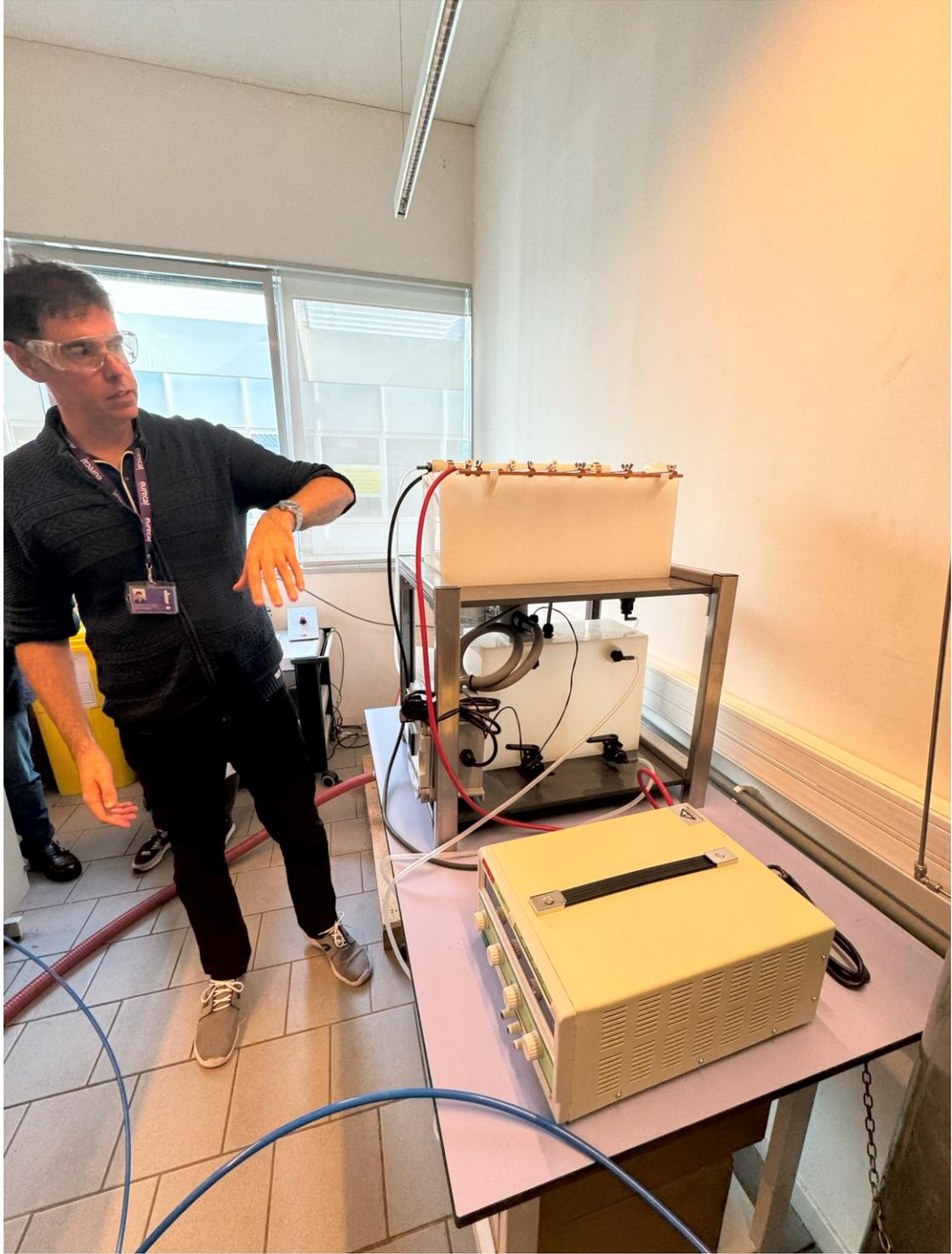


圖 27 : Eurecat 實驗室人員介紹各項試驗設備



圖 28 : AMPHOS 21 人員介紹岩芯樣本分析試驗情況



圖 29 : Eurecat 實驗室參訪後合影

#### 四、Äspö 地下實驗室

Äspö 結晶岩地下實驗室位於奧斯卡港北部(north of Oskarshamn)，其為瑞典 SKB (the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) 進行用過核子燃料最終處置的主要研究場所，包含地面上的 Äspö 村，設有辦公場所、不同實驗室及多功能測試設施等。參訪當天先前往奧斯卡港的地質調查設備中心與岩芯庫，SKB 的同行專家強調地質調查的重要性，並展示針對高放處置需求所開發的各項設備，並特別分享 SKB 在調查拖車上都會特別標註正在進行選址調查的標語，採公開透明的方式讓瑞典民眾清楚了解調查正在進行中，也開放讓民眾了解過程，逐步建立民眾對 SKB 專業的信心(圖 30、圖 31)。為了開發地質調查的技術，SKB 還特別在設備中心內鑽了一口深達 1000 公尺的井進行研發，並展示井內量測設備與數據分析軟體 OPTV Acquisition software 的操作(圖 32)，地質鑽探所獲得的岩芯也都被系統性且完整保存(圖 33)。在參觀完設備中心後，則接續參訪 SKB 在奧斯卡港設立的廢棄物罐實驗室，也是封裝技術開發的研究中心。廢棄物罐實驗室的大門外即可見全尺寸的樣本展示，罐體採純銅製作，長約五公尺，直徑超過一公尺(圖 34)，實驗室內也可見 KBS-3 處置概念的示意圖及材料說明(圖 35、圖 36)。

廢棄物罐上蓋的焊接技術是這個實驗室的重點項目，早期曾嘗試評估過不同的焊接方法，其中一種為電子束焊接，焊接溫度為攝氏 1200 度，但焊接區域會有較大顆粒的結晶(圖 37)；另一種焊接技術為摩擦攪拌焊接，溫度在攝氏 850 度左右，焊接處較平整且均勻，由英國焊接研究所 TWI 於 1990 年代初開發，並與 SKB 合作(圖 39)。為確保焊接品質符合預期標準，也同步開發使用多種非破壞性檢測技術進行檢查，如以超音波方式檢測，輔以 X 光和感應檢測(圖 40)，相關技術都在這個廢棄物罐實驗室完成開發與測試。目前 SKB 亦與芬蘭放射性廢棄物處理專責機構 Posiva 在製造廢棄物容器和密封技術進行緊密的合作，由於

瑞典與芬蘭在用過核子燃料最終處置方面有相似的條件與做法，兩國在廢棄物罐上也使用相似的設計，SKB 將提供芬蘭後續所需要的廢棄物罐，目前潛在的供應商包括英國、德國與正在測試中的美國廠商。

在參觀完廢棄物罐實驗室後，便前往 Äspö 地下實驗室。Äspö 地下實驗室位於地下 500 公尺，主要為確認與了解在真實環境及條件下，膨潤土、廢棄物罐與岩石間的相互作用，以及如何減緩放射性物質遷移，和研究該環境中的微生物會如何影響處置深度的環境條件等相關研究議題，並進行全尺度的試驗與發展相關技術，進一步研究結晶岩、設計處置場並透過放置廢棄物罐來測試相關性能。Äspö 的調查工作自 1986 年開始，SKB 希望能找到建立地下實驗室的可能性，並提出研究開發計畫，Äspö 結晶岩地下實驗室的建造於 1990 年至 1995 年進行，期間累積重要的技術經驗，SKB 因此建立了地下設施設計和建造的相關知識，像是如何使用爆破和鑽孔技術來開鑿實驗室的隧道、研究不同開挖方法對隧道周圍岩石的影響，以及研究對地下水流動模式和其所含化學性質的潛在影響等。1995 年 Äspö 結晶岩地下實驗室正式啟用後，開始進行最終處置方法和技術開發的研究，包含在真實條件下進行全尺度試驗，其中亦進行多項實驗以探查岩石的相關性質與特徵，進一步確認可能影響最終處置長期安全性的相關特徵與因子，像是岩石如何遲滯放射性物質的遷移，或微生物如何影響該深度的環境等研究。相關計畫自 1987 年持續到 2010 年，也包括天然障壁在最終處置中詳細的性能研究，並開發最終處置相關技術。

在參訪 Äspö 結晶岩地下實驗室的過程中可見滲水情況較為嚴重(圖 45)，這也是該區域在早期選址階段被排除的主要原因。隧道周圍的開挖擾動帶(Excavation Disturbed Zone, EDZ)及裂隙與構造的位置都是影響未來地下水環境是否的關鍵因素，需要透過嚴謹的調查、實驗、採樣、模擬分析才能確認是否能夠作為處置場址。目前 Äspö 地下實驗室的實驗計畫多已結束拆除，僅剩最後的全尺寸取樣計畫(圖 42 至圖 45)，該實驗在 2001 年於全尺寸的處置坑道放置廢

棄物罐並回填緩衝材料進行封閉，而廢棄物罐內安裝加熱器，用以模擬用過核子燃料衰變熱的情況。該實驗安裝多種實驗設備，提供處置場不同階段開發所需要的資訊與數據，並展示 SKB 在建模與預測處置技術相關性能的能力。在封閉 20 年後，於 2022 年開始規劃挖掘並持續至今，將於 2025 年初完成，後續將進行建模與分析。在現場見證進行超過 20 年的全尺寸實驗，能深刻感受到其在放射性廢棄物最終處置上投入相當多的研究心力，同時也深感佩服其能全面且完善地規劃地下實驗室所需進行的相關細節，透過不同的實驗、取樣規劃及後續的建模和數值分析等，可驗證地質環境與處置系統間的相互作用，除地下實驗室外，其地表亦設有對民眾展示之區域，科普處置技術及實驗室資訊，除了讓當地民眾能夠更加瞭解外也能增加其對 SKB 的信任感(圖 46)，這是相當值得我國效仿與學習的精神。



圖 30：地質調查相關設備



圖 31：地質調查車



圖 32：設備中心內的研究井與量測設備

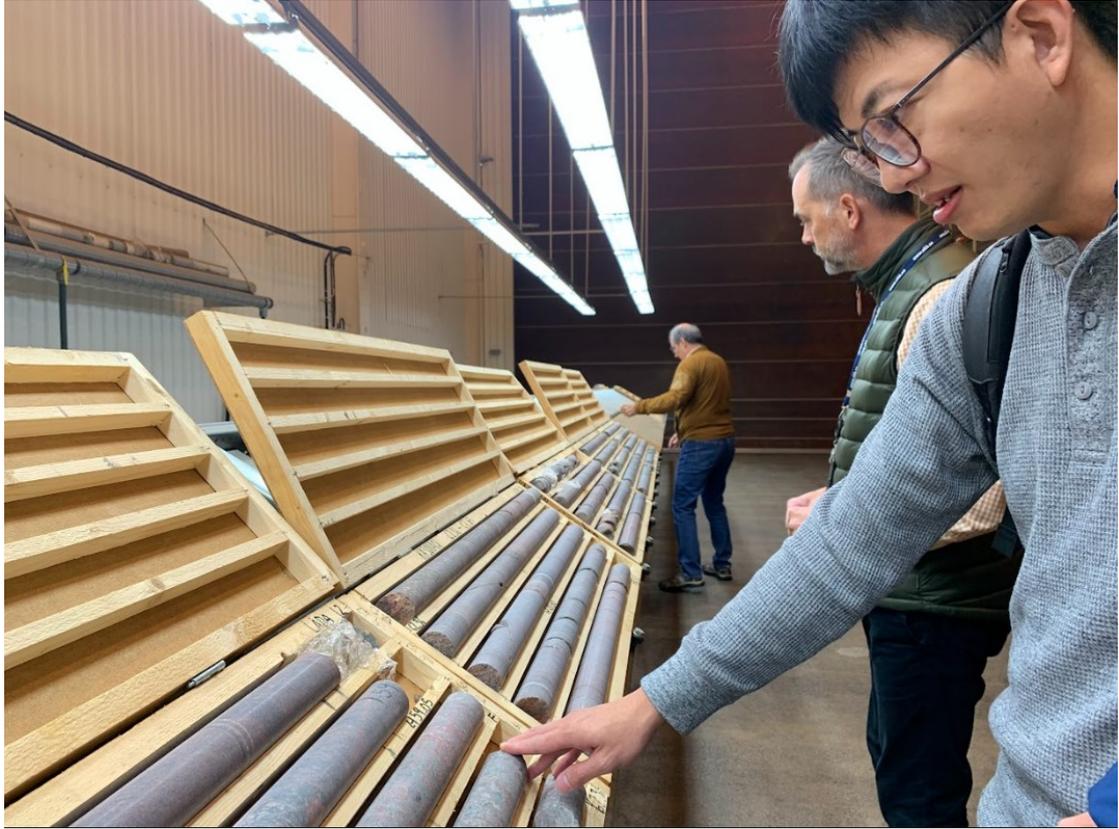


圖 33：岩芯庫



圖 34：廢棄物罐實驗室外的廢棄物罐展示



圖 35：KBS-3 概念及其材料展示



圖 36：燃料束及廢棄物罐展示



圖 37：電子束焊接之焊道較粗糙

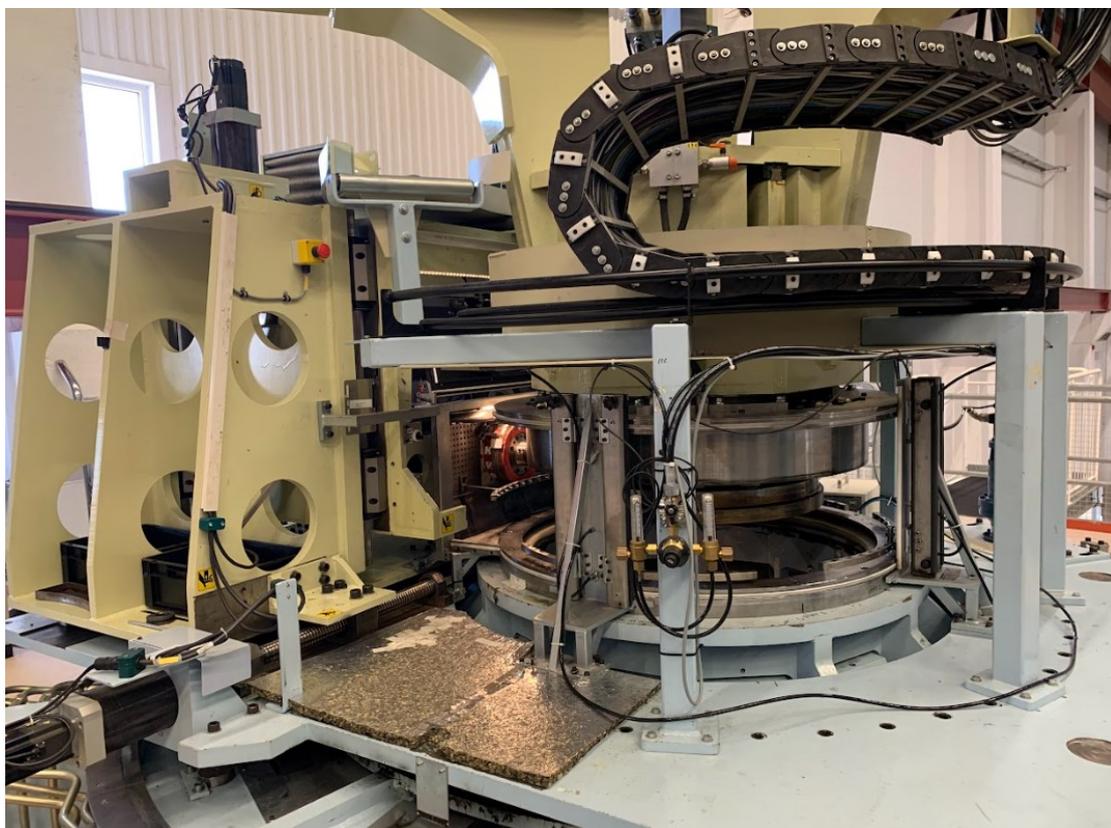


圖 38：摩擦攪拌焊接設備

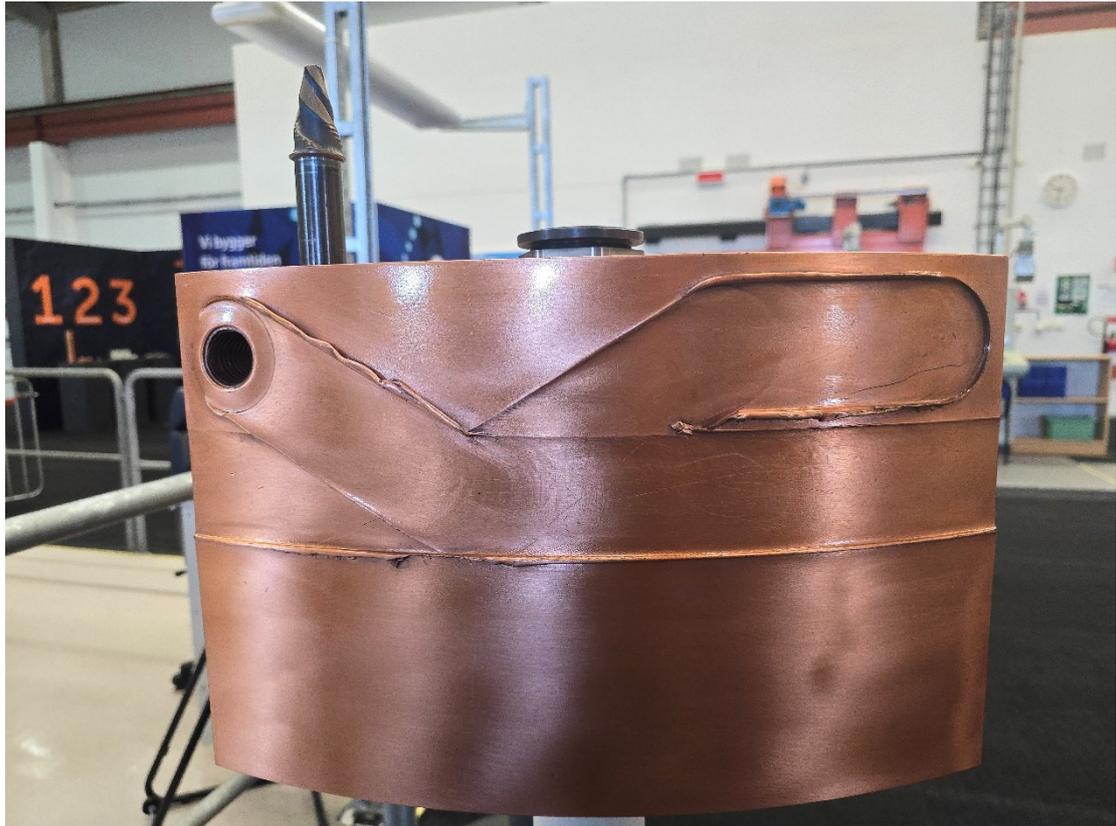


圖 39：摩擦攪拌焊接之焊道平整



圖 40：X 光檢測設備



圖 41：Äspö 地下實驗室滲水情況

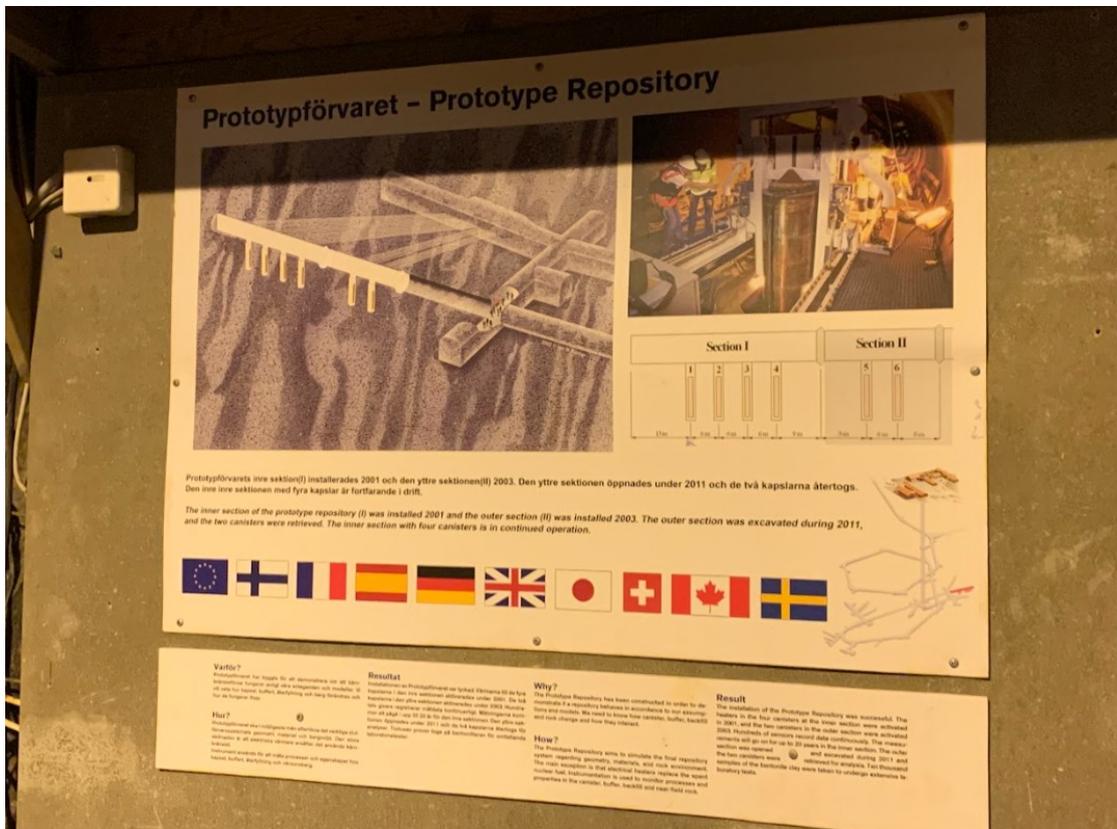


圖 42：全尺寸取樣計畫之說明板



圖 43：全尺寸取樣計畫開挖中之坑道



圖 44：全尺寸取樣計畫已拆除封塞之坑道



圖 45：全尺寸取樣計畫開挖之處置孔



圖 46：Äspö 地下實驗室地表展示 KBS-3 系統

## 肆、出國心得

本次出國心得如下：

- 一、瑞士最終處置近期已有重大突破，除了選址方式值得台灣學習外，即使已選定以泥岩為母岩，仍持續推動結晶岩地下實驗室的國際研究平台，非常值得我們積極合作。
- 二、「放射性廢棄物核種傳輸與資料庫開發」研討會中，各國團隊分享最新核種吸附與傳輸的分析方法以及數據管理的最新概念，台灣還有很大的進步空間，應加速精進相關技術的發展。
- 三、各國團隊在知識管理概念的應用、系統開發及 AI 等新型態科技的輔助都有很多進展，我們未來也應透過資訊系統輔助精進資料搜尋、增加資料分析利用效率。
- 四、瑞典的選址調查工作發展較早，針對高放處置需求的地質調查技術與設備仍多源自於 SKB，後續應強化與 SKB 的技術諮詢與技術引進。

## 伍、建議

本次出國之相關建議如下：

- 一、高放處置已在國際形成一個特別的技術社群，建議應持續並強化參與國際相關技術平台的交流，透過參與合作計畫，可共享其他國家的研發成果，降低自主研發的成本，更同時能拓展我國於國際上之能見度。
- 二、用過核子燃料最終處置相關技術於國際上已逐漸成熟且各國投入眾多人力，不同技術間的整合亦為處置的核心。建議應持續投入資源並提供適當環境，長期培養相關專業人員並鼓勵人才的留任，建立相關人員對處置計畫之通盤瞭解，方有能力掌握整合議題，並在國際場合與各國專家對談，建立我國與國際各團隊的合作管道。
- 三、高放處置相關技術包含大量長期研究、試驗等，為長期保存並利用過往及未來的資料數據，各國近年亦陸續都投入大量人力物力開發符合現今環境需求的管理系統，相關的模擬分析軟體、展示軟體等亦朝共同交換標準的方向發展，期望達到彼此資料共享並增進研究成果的目的，在資料交換上也能夠更有效率。建議我國相關系統發展應持續投入，除了確保資料數據能夠長期具有可用性，亦可參考國趨勢持續更新系統各項架構，以利在資料交換上能夠順利與國際接軌。