

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  
(比利時、法國)

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：李在平 主管地質調查

林正中 協辦安全評估專員

蘇鈺婷 安全評估專員

派赴國家/地區：比利時/梅赫倫、法國/特華

出國期間：112年11月9日~112年11月18日

報告日期：112年12月26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 54 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/主管地質調查/(02)2365-7210

林正中/台灣電力公司/核能後端營運處/協辦安全評估專員/(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：112 年 11 月 9 日至 112 年 11 月 18 日

派赴國家/地區：比利時/梅赫倫、法國/特華

報告日期：112 年 12 月 26 日

關鍵詞：DECOVALEX、最終處置、EURAD、THMC

內容摘要：(二百至三百字)

台電公司依管制機關要求加強國際合作，於 2016 年開始參與高放處置國際技術合作平台 DECOVALEX，並於本期計畫參與兩個研究項目。本次先參加由歐洲放射性廢物管理聯合計劃(EURAD)於比利時舉行之研討會，蒐集與了解國際上就工程障壁長時間性能安全評估之最新發展技術，強化我國團隊對耦合分析技術之了解。接著參與由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)及法國放射性廢棄物管理機構 ANDRA 共同主辦的工作會議暨成果發表研討會，我方團隊展現良好的研發成果，各國研究團隊也就處置母岩與工程障壁間可能產生之熱-水-力-化(THMC)耦合作用進行議題發表及探討，並安排參訪法國的地下實驗室。

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

台電公司依法執行用過核子燃料最終處置計畫，依照處置計畫的規劃期程，目前已進入第 2 階段—候選場址評選與核定階段，本階段預期目標之一為建立候選場址功能/安全評估技術，台電公司除持續發展最終處置所需要的相關技術外，亦關注處置系統工程障壁與處置母岩間長期演化機制，其中熱力-水力-力學-化學 (THMC) 各作用機制間的耦合分析能力是目前功能/安全評估的研發重點項目。

DECOVALEX 國際技術合作平台透過共享相關實驗數據，藉由不同研究主題，各國參與會員單位互相驗證彼此的分析方法，以求精進技術。本次會議 (Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium) 由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) 及法國放射性廢棄物管理機構 ANDRA 共同主辦，會議地點在法國特華 (Troyes)，邀請各國研究團隊發表處置母岩與工程障壁間可能產生之熱-水-力-化耦合作用相關議題研究成果。台電公司計畫執行團隊參與 DECOVALEX-2023 項下「日本幌延地下實驗室工程障壁實驗 (Task-D)」及「結晶岩安全評估平行驗證 (Task-F1)」2 項研究項目，會議中由各項目主持人於大會中發表研究團隊成果；同時邀請團隊投稿發表熱-水-力-化耦合作用相關研究成果，於會中與會議參與者分享與交流經驗。除參與會議外，與 ANDRA 人員聯繫參訪地下實驗室 (Centre de Meuse/Haute-Marne)，了解法國於地下實驗室所投入之相關研究與人力規模。

此外本次亦參與由歐洲放射性廢物管理聯合計畫 (European Joint Programme on Radioactive Waste Management, EURAD) 舉行之研討會，該會議主要探討處置系統之演化評估及耦合建模數值方法之開發與改進，透過會議除可蒐集與了解處置系統長期演化研究技術的最新發展動態外，會議中亦與參與該計畫研究的專家進行交流，有效了解數值建模分析的技術。

## 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 .....	8
參、工作內容 .....	9
一、EURAD.....	9
二、法國地下實驗室(Centre de Meuse/Haute-Marne)參訪 .....	15
三、Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium .....	29
(一) 會議第一天.....	31
(二) 會議第二天.....	43
(三) 會議第三天.....	47
肆、出國心得 .....	48
伍、建議.....	49
陸、附錄.....	50
附錄 I、DECOVALEX Symposium 會議議程.....	50

## 圖目錄

圖 1：會議室.....	13
圖 2：POET（POtsdam reactive Transport）開發說明.....	13
圖 3：具有輸入和輸出的 ANN 架構圖示.....	14
圖 4：Amphos 21 團隊簡報說明開發監督機器學習演算法技術.....	14
圖 5：法國地下實驗室位置.....	18
圖 6：Cigéo 計畫研發流程.....	18
圖 7：Cigéo 計畫技術研發與處置坑道設計發展之迭代關係.....	19
圖 8：法國地下實驗室自 2004 年至 2017 年建造之豎井與地下坑道.....	19
圖 9：Cigéo 計畫深地質處置設施示意圖.....	20
圖 10：Cigéo 計畫深地質處置主要設施分布示意圖.....	20
圖 11：Cigéo 計畫高放射性廢棄物處置孔與安裝設備示意圖.....	21
圖 12：Cigéo 計畫之兩種坑道封閉形式.....	21
圖 13：2000-2006 年法國地下實驗室坑道開挖與鑽孔分布.....	22
圖 14：觀測豎井降挖過程圍岩反應的 REP 實驗鑽孔分布.....	22
圖 15：觀測開挖擾動是否造成坑道圍岩沿軸向方向滲透性增加之 KEY 實驗..	23
圖 16：2006-2009 年法國地下實驗室擴建(綠色)部分.....	23
圖 17：處置孔開挖微型鑽機.....	24
圖 18：觀測開挖引致圍岩壓力(a)、溫度、飽和度變化裝置(b)示意圖.....	24
圖 19：岩石熱-水-力耦合實驗監測孔佈置圖.....	25
圖 20：岩石熱-水-力耦合實驗加熱歷時曲線.....	25
圖 21：2010-2015 年法國地下實驗室擴建(藍色)部分.....	26
圖 22：處置設施全尺度實驗佈置圖.....	26

圖 23：加熱器元件安裝圖(左)與加熱器/套管、感測器圖(右) .....	27
圖 24：封閉設施滲透性實驗佈置圖 .....	27
圖 25：2015-2019 年法國地下實驗室擴建(黃色)部分 .....	28
圖 26：坑道支撐系統原型與壓縮式支撐材近照 .....	28
圖 27：會議議程 .....	30
圖 28：Stéphan Schumacher 講述法國整體 R&D 近況 .....	38
圖 29：大會主席 Jens Birkholzer 簡報說明 DECOVALEX 計畫 .....	38
圖 30：DECOVALEX 計畫整體回顧 .....	39
圖 31：DECOVALEX-2023 Task B 主持人進行整體說明 .....	39
圖 32：DECOVALEX-2023 Task A 主持人進行整體說明 .....	40
圖 33：DECOVALEX-2023 Task E 主持人進行整體說明 .....	40
圖 34：DECOVALEX-2023 Task C 主持人進行整體說明 .....	41
圖 35：DECOVALEX-2023 Task D 主持人進行整體說明 .....	41
圖 36：幌延地下實驗室工程障壁系統示意圖 .....	42
圖 37：利用分子觀點開發流體動力學模式示意圖 .....	42
圖 38：Jeoung Seok Yoon 與與會者討論成果 .....	46
圖 39：我方團隊口頭簡報研究成果 .....	46

## 表目錄

表 1 : 出訪行程及工作內容 .....	8
-----------------------	---

## 壹、出國目的

台電公司目前依照核安會(前原能會)核定之「用過核子燃料最終處置計畫書」,切實執行用過核子燃料最終處置技術發展相關工作,依處置計畫書之規劃,全程工作共分為 5 個階段,目前屬於第 2 階段—「候選場址評選與核定」階段,階段目標之一為建立候選場址功能/安全評估技術,台電公司為進一步了解處置系統長期演化機制,並強化各機制間耦合分析能力,積極參與國際處置研究合作平台與合作計畫,除能共享國際團隊實驗數據外,透過成果發表驗證與檢視台電公司處置技術可達國際水平,並同步精進相關研究議題之分析方法與能力。

本次會議「Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium」性質為工作會議暨成果發表研討會,由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)與法國放射性廢棄物管理機構 ANDRA 共同主辦。該會議前三天開放非 DECOVALEX-2023 計畫成員報名,並邀請各國研究團隊就處置母岩與工程障壁間可能產生之熱-水-力-化(THMC)耦合作用進行議題發表及探討。除研討會外,會議最後一天為 DECOVALEX-2023 計畫工作會議,除確認計畫最終報告之內容外,亦於會中討論與決策 DECOVALEX-2027 計畫之相關細節。DECOVALEX-2023 參與成員來自 17 個國際合作團隊,包含英國、瑞士、日本、法國、美國、德國、韓國等,共有 7 項模型驗證工作與評估比較,台電公司於該計畫中執行「Task D 日本幌延地下實驗室工程障壁實驗」及「Task F1 結晶岩安全評估平行驗證」兩項研究工作。透過參與本次會議可強化與國際社群之交流,並了解各國研究團隊熱水力化耦合分析技術發展現況,同時透過參考其他團隊之評估方式,供國內處置技術發展規劃與精進。本次亦特別聯繫法國 ANDRA 的負責人安排地下實驗室的參訪,參訪過程深入了解法國地下實驗室的相關規劃與準備,可供我國未來籌備地下實驗室之參考。



本次出國除參與 DECOVALEX symposium 及參訪地下實驗室外，在出國行程的時間允許下，為達最大效益，亦參加由歐洲放射性廢物管理聯合計畫 (EURAD) 舉行之研討會，該會議經申請同意後可免費參加，透過會議進一步蒐集並了解各國評估放射性廢棄物處置工程障壁系統的長期演化，亦可與相關領域之專家進行交流互動，強化台電公司於國際社群的能見度。

## 貳、出國過程

本次出國自 112 年 11 月 9 日出發，迄 11 月 18 日返國(共計 10 天)，首先前往比利時參加歐洲放射性廢物管理聯合計畫(EURAD) 於梅赫倫(Mechelen)舉行之「處置工程障壁系統長期演化研討會」；研討會後前往法國比爾(Bure)參訪地下實驗室；隔天參與為期 3 天的「Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium」，並接續參加「DECOVALEX-2023 8th Workshop」，討論本期計畫期末報告及 DECOVALEX-2027 計畫的細節，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
11 月 09 日	臺北－阿姆斯特丹(Amsterdam)－布魯塞爾(Brussel)－梅赫倫(Mechelen)	往程
11 月 09 日	梅赫倫	參加 EURAD 研討會
11 月 10 日		
11 月 11 日	梅赫倫	週六，資料整理
11 月 12 日	梅赫倫－巴黎(Paris)	週日，路程
11 月 13 日	巴黎－特華(Troyes)－比爾(Bure)	參訪地下實驗室
11 月 14 日	特華	參加 Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium
11 月 15 日		
11 月 16 日		
11 月 17 日	特華	參加 DECOVALEX-2023 8 <sup>th</sup> Workshop
11 月 17 日	特華－巴黎－香港－臺北	返程
11 月 18 日		

## 叁、工作內容

### 一、EURAD

EURAD (European Joint Programme on Radioactive Waste Management) 為歐洲放射性廢棄物管理聯合計畫，包含四項主要任務，為研發 (R&D)、策略研析 (Strategic studies)、知識管理 (Knowledge management)、社會互動 (Interacting with Civil Society)，成員來自 23 個國家 (包含 20 個歐盟成員國)及 3 個國際合作夥伴 (加拿大 NWMO、澳洲 CSIRO、日本 NUMO)，共有 51 個組織參與其中。

本次參與會議係屬 EURAD 的兩個研究計畫，分別為 ACED (Assessment of Chemical Evolution of ILW and HLW Disposal Cells)中放射性及高放射性廢棄物處置的化學演化評估，以及 DONUT (Development and improvement Of Numerical methods and Tools for modelling coupled processes)耦合過程建模數值方法和工具的開發和改進。ACED 探討多尺度方法和流程，以改進長時間尺度的建模與評估；DONUT 旨在提高耦合過程中對熱-水-力-化模型之理解，計畫執行期間為 2019 年 6 月至 2024 年 5 月。

研討會議在利時梅赫倫的會議中心(Lamot Mechelen - Congress and heritage center)舉行(圖 1，會議時間為 11 月 8 日至 10 日，在出國行程時間有限的情況下，我方於 11 月 9 日中午抵達比利時布魯塞爾後，旋即轉乘火車前往梅赫倫參與會議，積極參與各研究團隊之成果發表。

為強化驗證的精確、不確定性及敏感度分析的能力，並了解耦合過程中的整合，DONUT 共執行三項驗證作業。第一項與機器學習(machine learning)和地球化學(geochemistry)相關；第二項旨在模擬膨潤土(bentonite)的熱水力學行為；第三項涉及兩相流耦合熱-水-化過程的反應傳輸模型。

ACED 整合 ILW 和 HLW 廢棄物中材料內部和材料間地球化學過程的方法，

以便更加理解和評估該複雜系統的長期演化。多過程和多尺度建模將能評估各種材料界面的化學演化，以及從微尺度到處置尺度（ILW、HLW）的熱、水力或化學梯度，並考慮近場環境和更大時間尺度的母岩。這項計畫希望能考慮到處置設施設計和安全評估的需要，藉此探討哪些地球化學過程可能需要納入化學演化的評估中。

以下為相關議題發表重點：

1. Combining approximated computing and hardware accelerators in coupled reactive transport simulations: POET (圖 2)

耦合反應傳輸模擬對所需的計算能力要求極高，為了能夠增快耦合反應模擬速度，講者團隊開發了 POET (POtsdam reactive Transport)，這是一種整合了演算法改進的研究型平行反應傳輸模擬器(a research parallel reactive transport simulator)，可顯著加快耦合模擬速度，透過 POET 執行相關領域(用過核子燃料處置、地熱及二氧化碳儲存等)之模擬，可顯著降低硬體需求及計算成本。

2. Digitization and digital twins in long term management of radioactive waste.

數位化(Digitization)和人工智慧(Artificial Intelligence)是工程和自然科學應用中的新興範例。例如，數據驅動和物理啟發的機器學習(Machine learning, ML)方法已經被開發和評估，以加速數值模擬；因此，評估其在放射性廢棄物管理相關應用中的可行性是相當重要的。在 EURAD 和放射性廢棄物預先處置管理 (Pre-disposal Management of Radioactive Waste, PREDIS) 的框架下，已經制定了不同的措施來促進數位化技術，並用於長期放射性廢棄物管理。先前的研究表明，數位化是改善整個廢棄物管理的重要工具，包括廢棄物處理、儲存等，以及與處置系統的運作和長期性能。然而，現階段數位轉型中對於廢棄物管理之具體

潛力和作用尚待進一步研究。

### 3. Surrogate models for geochemical simulation of cement degradation based on Artificial Neural Networks.

工程障壁系統(EBS)在放射性廢棄物地質處置設施的長期安全中發揮至關重要的功能，其由多種元件組成，例如金屬罐、膨潤土、混凝土或水泥漿等。障壁的特性會隨著時間的推移而發生變化，所以預測工程障壁系統隨時間的推移產生之行為作用，對於確保處置設施設計的安全相當重要。因此，數值模擬對於評估系統演化的過程和參數的影響為分析研究的重點。

反應輸運模型(Reactive Transport Models, RTM)對於理解工程障壁系統的長期地球化學演化尤其重要，其雖然涉及長時間數值的迭代計算，時空離散化可能跨越數十萬年以及大空間之尺度，但仍需要界面附近的高解析度。因此，相關研究團隊正在致力提高反應輸運模型的計算效率。其中一種解決方案為充分簡化模型，雖仍以捕獲大多數潛在現象，但同時限制計算負擔；另一種方法則為使用替代地球化學模擬來取代傳統的地球化學求解。機器學習亦是替代方案，也是目前相當被關注的研究主題(相關研究如 Asher et al. 2015、Karpatne et al. 2019、Laloy & Jacques 2019、Leal et al. 2020、Prasianakis et al. 2020、Razavi et al. 2020 等)。在不同的機器學習技術中，人工神經網路(Artificial Neural Networks, ANN，圖 3)已被證明在其他領域能夠成功捕獲潛在現象，並在訓練期間提供足夠的資訊時概括超出觀察到的數據。

Amphos 21 團隊進一步開發了監督機器學習演算法技術，以提高日益複雜的運算效率。研究團隊從 Ca-Si 和簡單的 C-S-H 模型到考慮 Al、Mg、S、C、Na 和 K 物質和固相。這項工作進行更廣泛的耦合建模數

值方法和工具的開發和改進，並旨在改善使用機器學習技術在生成的資料上訓練模型，並強化評估地球化學計算和反應輸運模型的模型推理準確性，以及進行不確定性分析。本研究選擇深度學習進行代理建模，並使用傳統地球化學求解如 PhreeqC、Orchestra 和 Gems 產生的地球化學資料來訓練人工神經網絡，同時談討各種技術來簡化和提高，從而減少所需要的人工時間。初步成果顯示，與傳統地球化學求解相比，其計算速度至少提高了一個數量級。(圖 4)

參加本次會議強化了解工程障壁系統(EBS)特性隨時間演變對處置設施的安全功能評估之影響，並以數值模型評估熱-水-力-化耦合過程對工程障壁系統不同性能之影響。



圖 1：會議室



圖 2：POET（POtsdam reactive Transport）開發說明

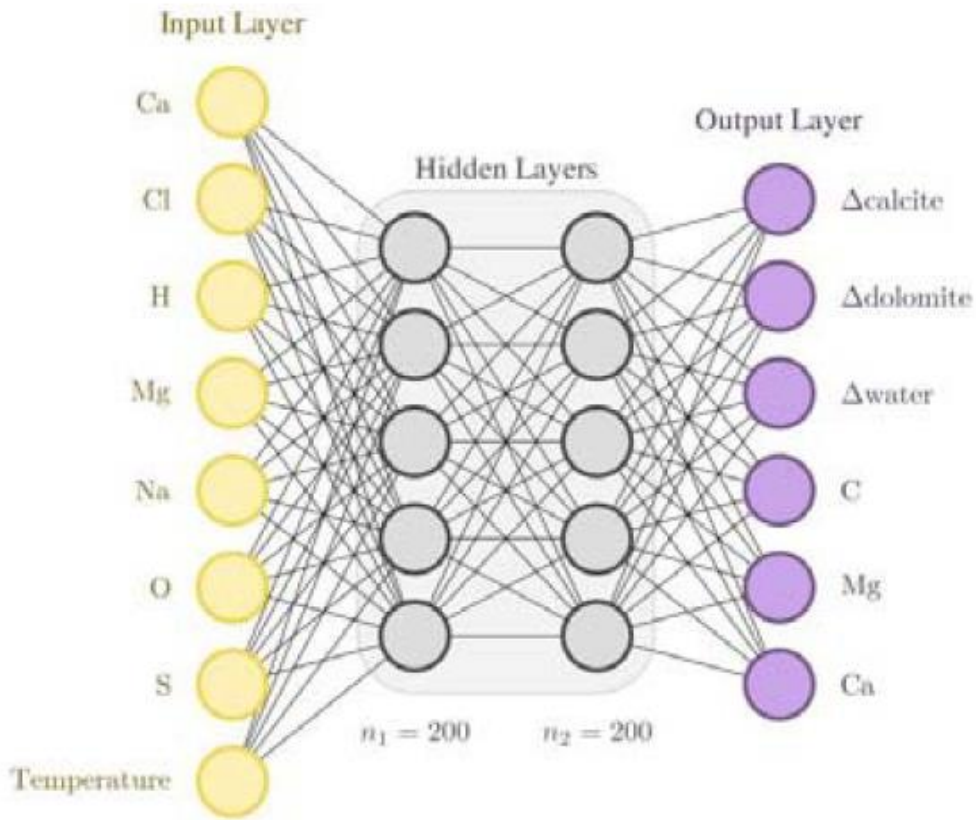


圖 3：具有輸入和輸出的 ANN 架構圖示



圖 4：Amphos 21 團隊簡報說明開發監督機器學習演算法技術



## 二、法國地下實驗室(Centre de Meuse/Haute-Marne)參訪

法國於 1990 年代開始推動地質處置工業中心計畫(The Industrial Centre for Geological Disposal, 簡稱 Cigéo 計畫)。主要目標為研發及更深入了解放射性廢棄物深地質處置設施相關的設計、建造、營運，以及封閉後處理技術。Cigéo 計畫選擇位於 Gard、Vienne、Meuse、Haute-Marne 行政區的四個候選場址展開地質調查作業，而根據初步調查結果，Meuse 和 Haute-Marne 二個場址較為合適，故將二者合併為一，於 2000 年開始於比爾(Bure)附近建造地下實驗室 (ANDRA URL, 圖 5)，並展開更進一步的調查。法國地下實驗室 (Centre de Meuse/Haute-Marne) 位於比爾(Bure)地下 490 米處，以泥質岩類為母岩，由 ANDRA 主導研究計畫。

Cigéo 計畫一開始即規劃技術發展流程(圖 6)，整個計畫分階段推動，包括地下實驗室的建造以及實驗，並且明確建構地下實驗室技術研發與深地質處置坑道設計所需技術的關聯性，透過反覆實驗逐步蒐集所需資料，並確認所需技術已完整建立(圖 7)。圖 8 為蒐集所得 2004 年至 2017 年間地下實驗室建造的豎井與地下坑道，圖中複雜的坑道系統間亦大量鑽孔，並安裝各種量測儀器，以進行高放射性廢棄物與中放射性廢棄物處置坑道設計及建造所需之技術研發與相關實驗(圖 9、圖 10)，如高放射性廢棄物處置孔與安裝(圖 11)，以及不同的封閉形式(圖 12)等。其地下實驗室與處置坑道雖位置相近，但之間並不相互連通。

在 Cigéo 計畫架構下，1999 年為三個地下實驗室建造申請階段，ANDRA 於位在比爾(Bure)實驗室場址於 1993 年至 1996 年間進行深鑽孔地質調查。2000 年至 2006 年完成第一階段地下實驗室建造(圖 13)，配合豎井開挖，並預先鑽孔監測硬頁岩中地下水位洩降，以及記錄地質狀況。另外，在豎井與坑道交會處附近也預先設置許多鑽孔，觀測豎井降挖過程圍岩反應(REP 實

驗，圖 14)，在坑道四周觀測開挖擾動是否造成坑道圍岩沿軸向方向滲透性變化(KEY 實驗，圖 15)，以及硬頁岩間隙水(interstitial fluids)中化學與同位素變化等實驗的概念設計。2006-2009 年為第二階段地下實驗室建造如圖 16，測試驗證處置孔開挖所需採用的微型鑽機(圖 17)，開挖擾動範圍調查為主要的實驗項目，另外還包括觀測開挖引致圍岩壓力、溫度、飽和度(圖 18)，以及進行岩石熱-水-力耦合實驗(圖 19、圖 20)。2010-2015 年之第三階段地下實驗室建造如圖 21，期間進行處置設施全尺度實驗(圖 22)，透過一系統感測器佈置(圖 23)，監測加熱器升溫後緩衝材料的行為，並檢核封閉設施之滲透性(圖 24)。2015-2019 年第四階段地下實驗室建造如圖 25，此期間坑道支撐為主要關注內容，為了抑低硬頁岩特性造成坑道長期變化影響，試驗不同坑道支撐系統的性能，並研發壓縮式支撐材料(圖 26)，以及其存放與組裝，同時亦測試坑道開挖機具在硬頁岩的性能。(ANDRA, 2019. Synthesis of 20 years Research, Development and demonstration in Andra's Underground Research Laboratory in Bure for Cigeo Project-France.)

該實驗室於各區域進行不同的試驗，如為了確定岩石中放射性廢棄物的擴散情況，使用含有天然放射性元素的示蹤劑進行試驗。實驗室試驗亦就岩石對開挖的反應進行研究，對不同襯砌與支撐結構，以及不同的結構直徑進行測試，藉此檢視岩石是否均勻；同時安裝感測器在鑽孔中，以便連續量測在開挖期間及其後出現的變形及裂隙。由於前述狀況可能導致岩石局部的滲透性增加，因此也進行了由膨潤土製成塞子的功能效率。由於高放射性廢棄物會釋放熱量，ANDRA 也進行了岩石加熱試驗，透過岩石外圍的感測器測量，藉此了解岩石在溫度升高後的流體力學行為，以檢視其密封性能是否受到影響，結果顯示岩石並沒有因為溫度升高而有損壞。

在過程中也和 ANDRA 人員交流，其表示在最終處置外，法國也有另外兩項廢棄物管理策略，為分離與核種轉化(Partitioning and Transmutation)及長

期貯存，因此自 1991 年開始，管理高放射性廢棄物的研究共有三項：分離與核種轉化、長期貯存以及深層地質處置。但法國核安局(French Nuclear Safety Authority, ASN)認為即使實施前二者相關工作，也不能完全解決高放射性廢棄物，因此 ASN 認為深地質處置是唯一可能的處置方案。所以地下實驗室的設置，亦是為了更加了解法國地質條件中所需要的工程設計，以及處置設施相關的性能評估。

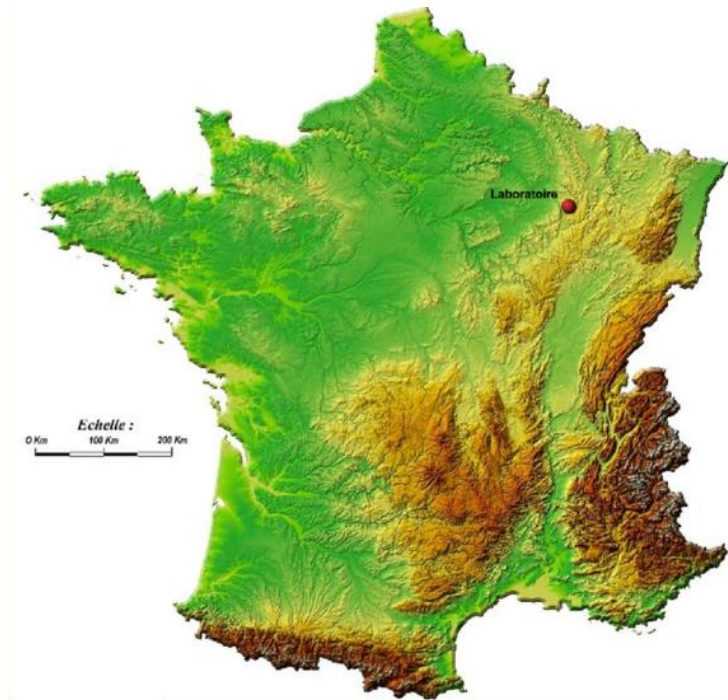


圖 5：法國地下實驗室位置

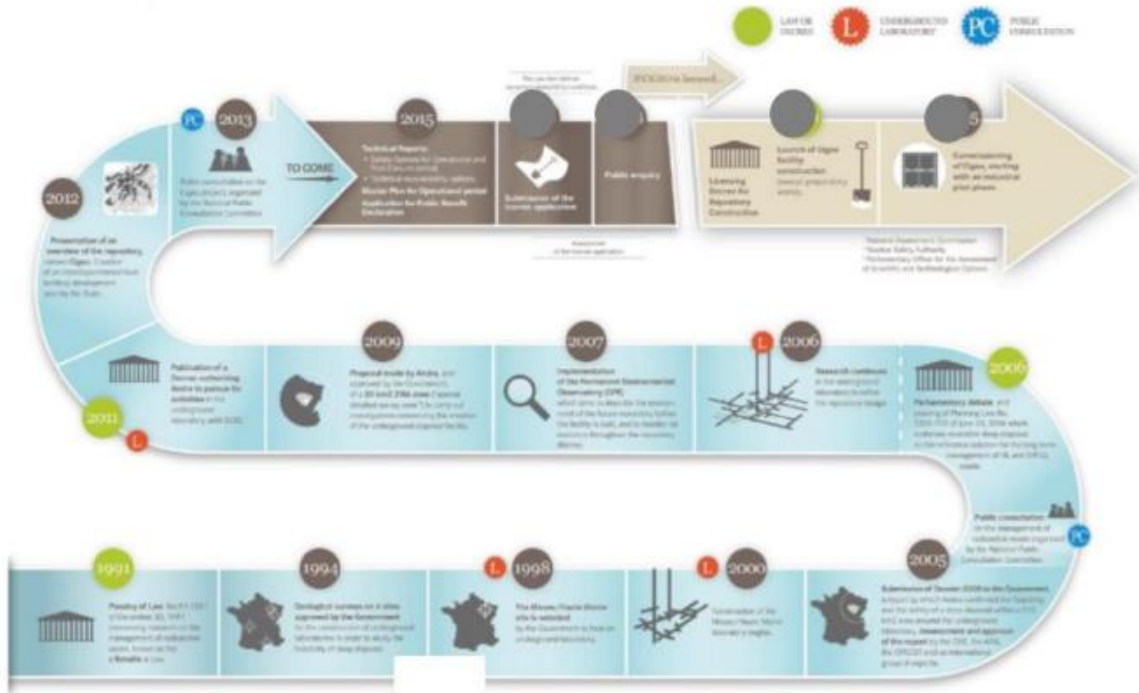


圖 6：Cigéo 計畫研發流程

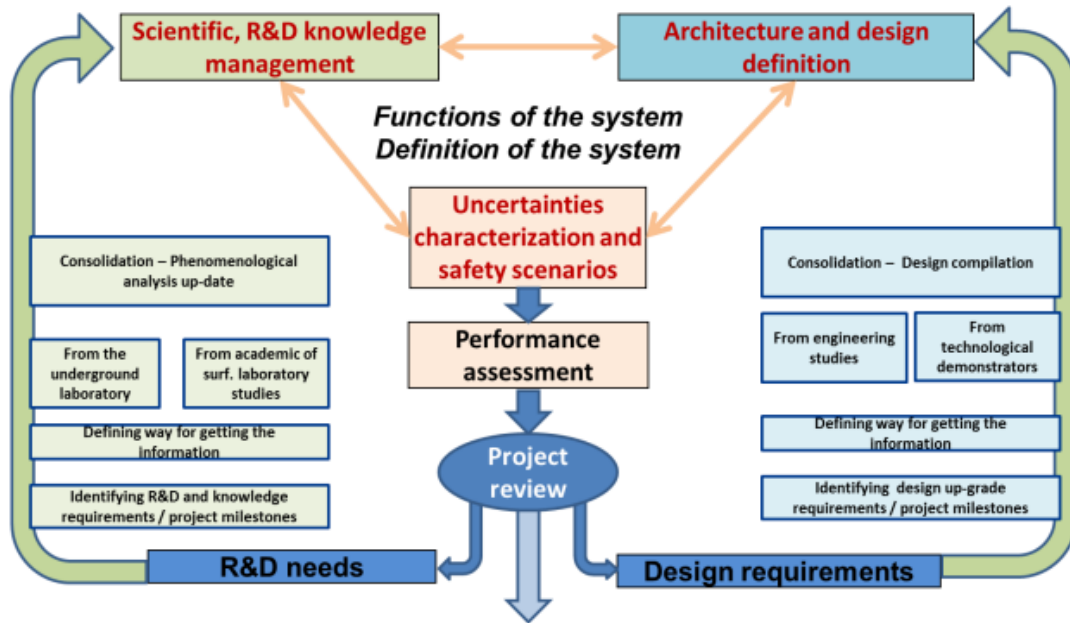


圖 7：Cigéo 計畫技術研發與處置坑道設計發展之迭代關係

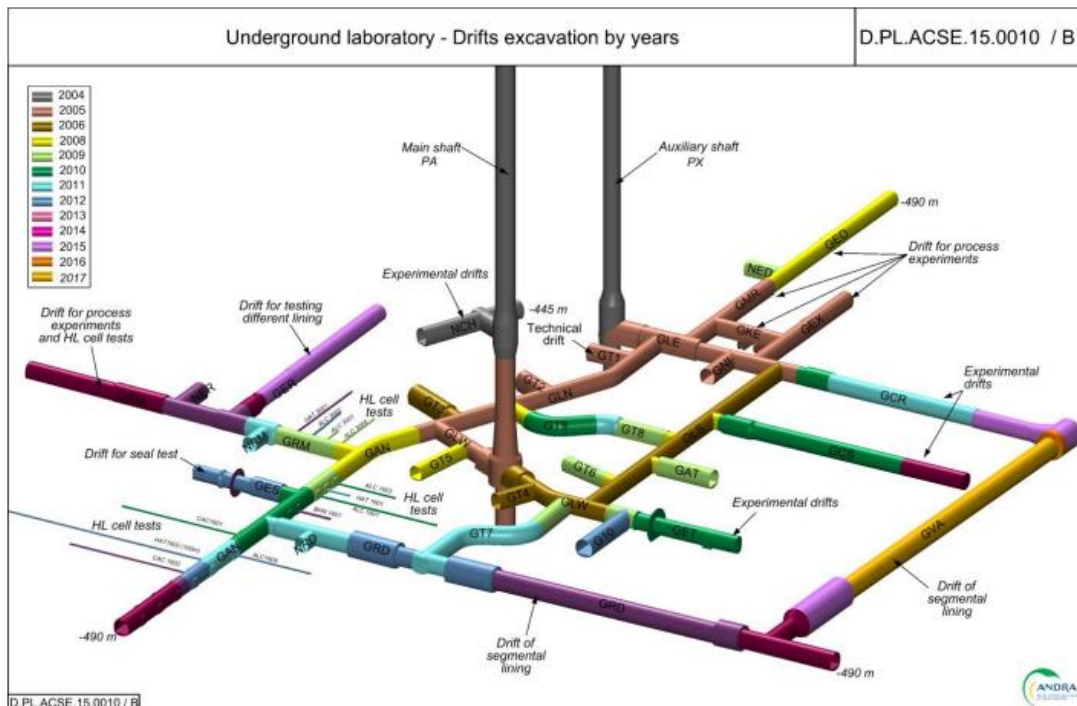
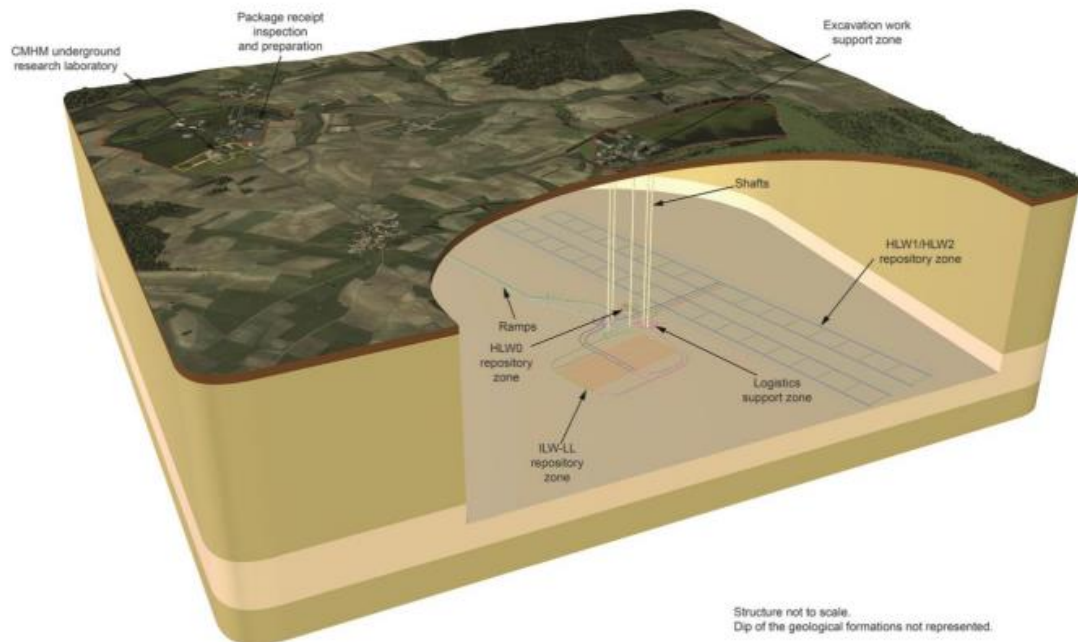


圖 8：法國地下實驗室自 2004 年至 2017 年建造之豎井與地下坑道



CG-TE-D-MGE-CEKS-ASU-5200-17-0015-A\_EN

圖 9：Cigéo 計畫深地質處置設施示意圖

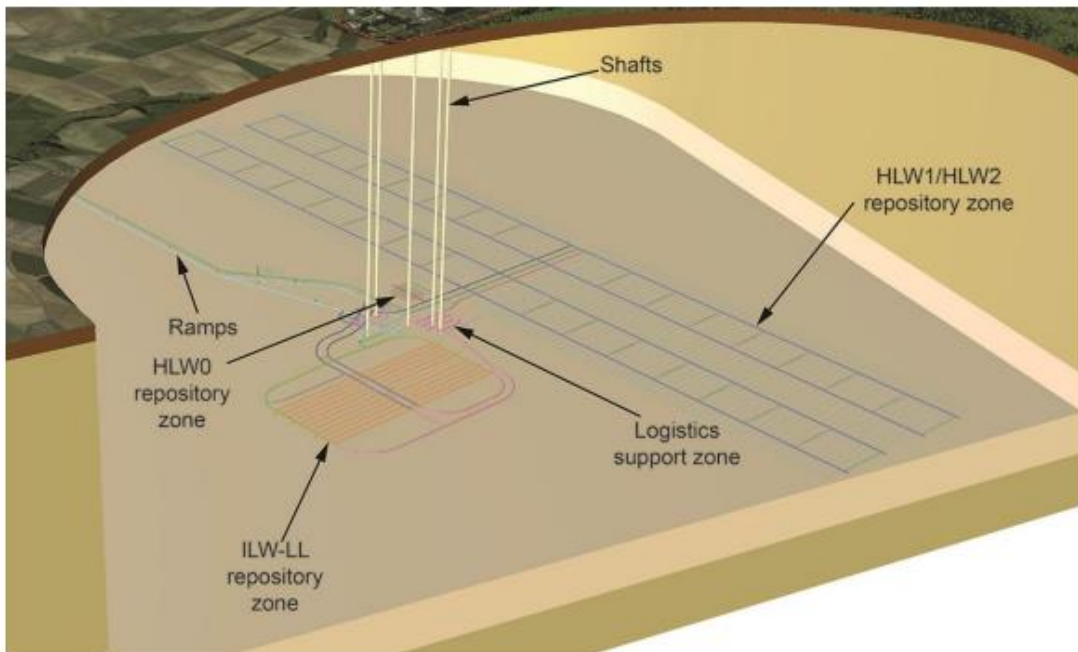


圖 10：Cigéo 計畫深地質處置主要設施分布示意圖

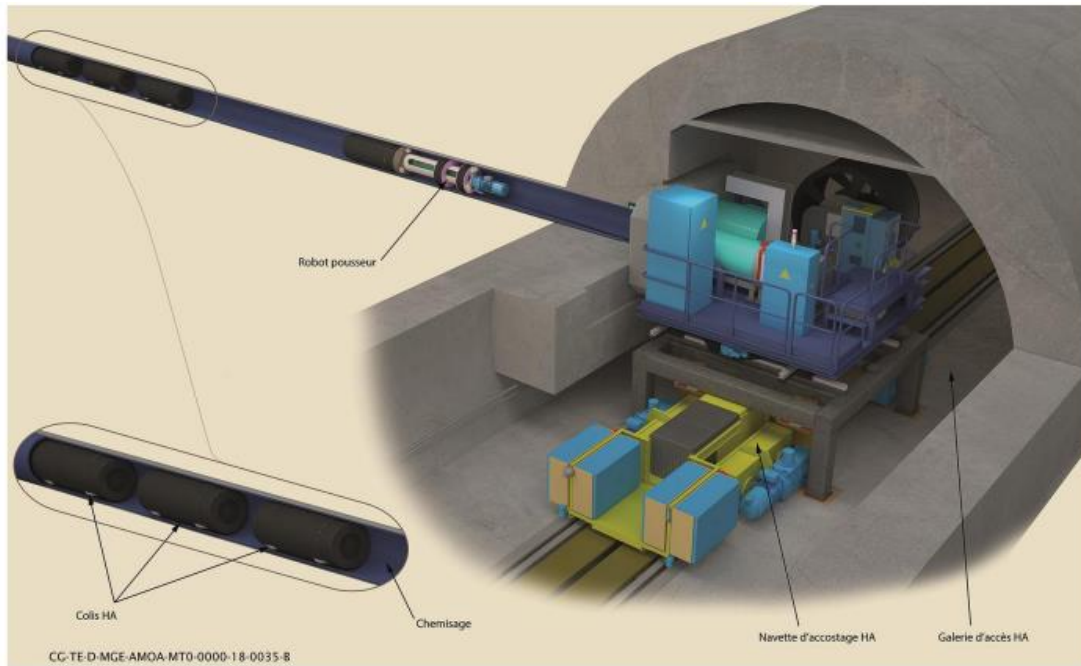
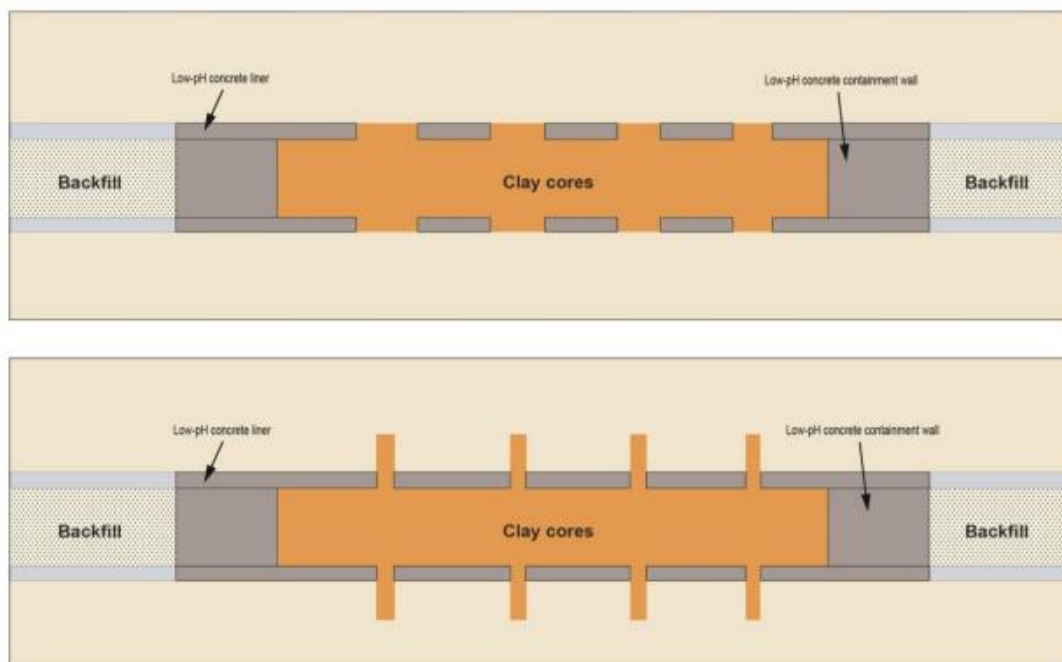


圖 11：Cigéo 計畫高放射性廢棄物處置孔與安裝設備示意圖



C.IM.AMSI.16.0026.A



圖 12：Cigéo 計畫之兩種坑道封閉形式

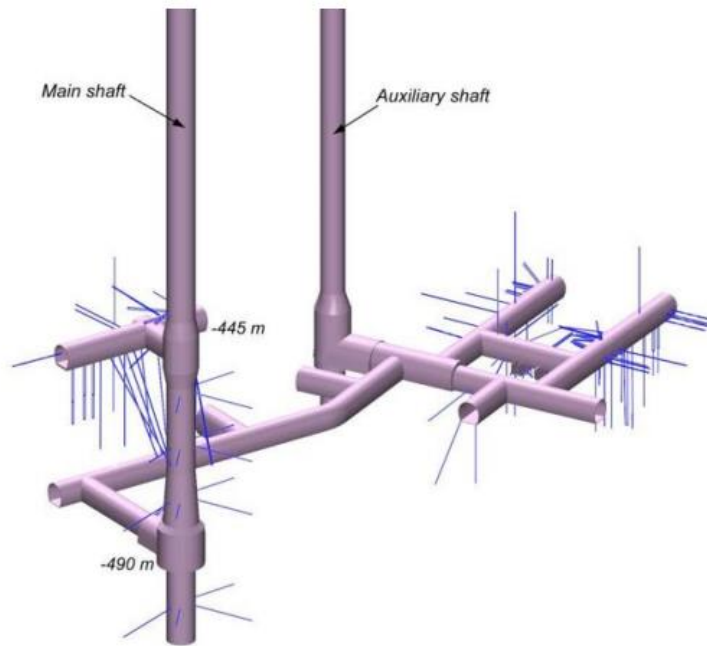


圖 13：2000-2006 年法國地下實驗室坑道開挖與鑽孔分布

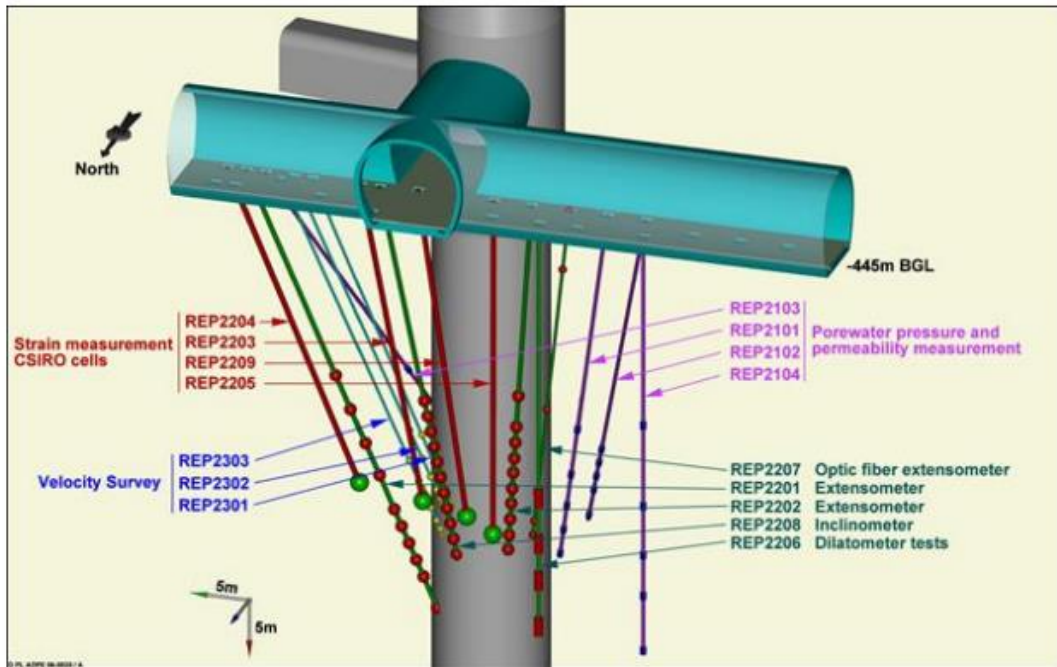


圖 14：觀測豎井降挖過程圍岩反應的 REP 實驗鑽孔分布



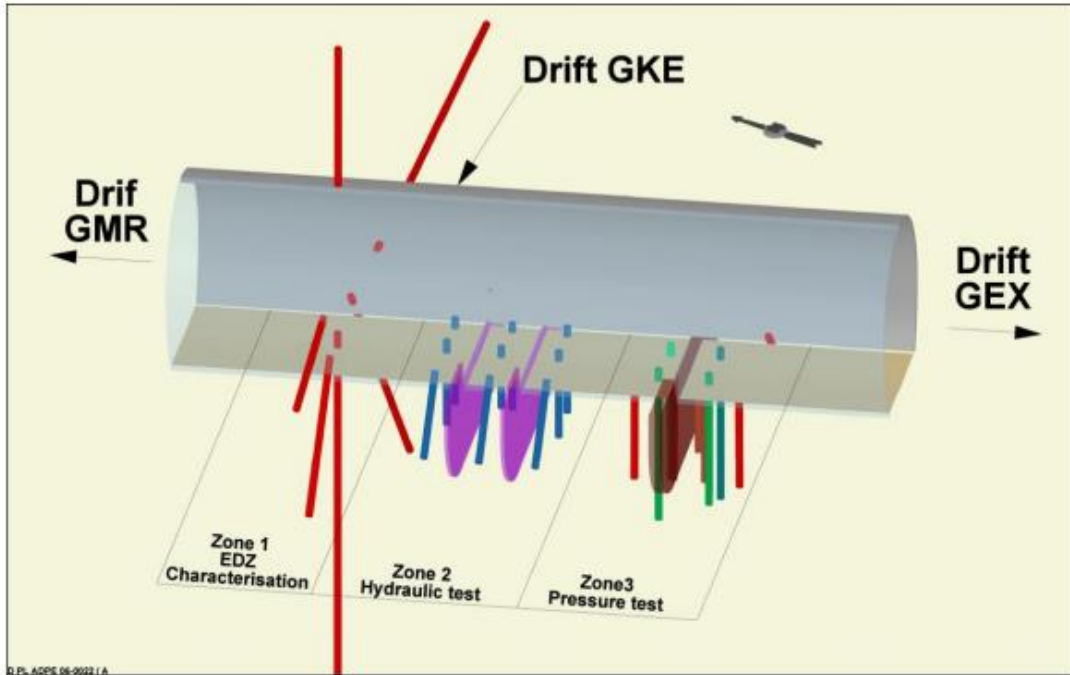


圖 15：觀測開挖擾動是否造成坑道圍岩沿軸向方向滲透性增加之 KEY 實驗

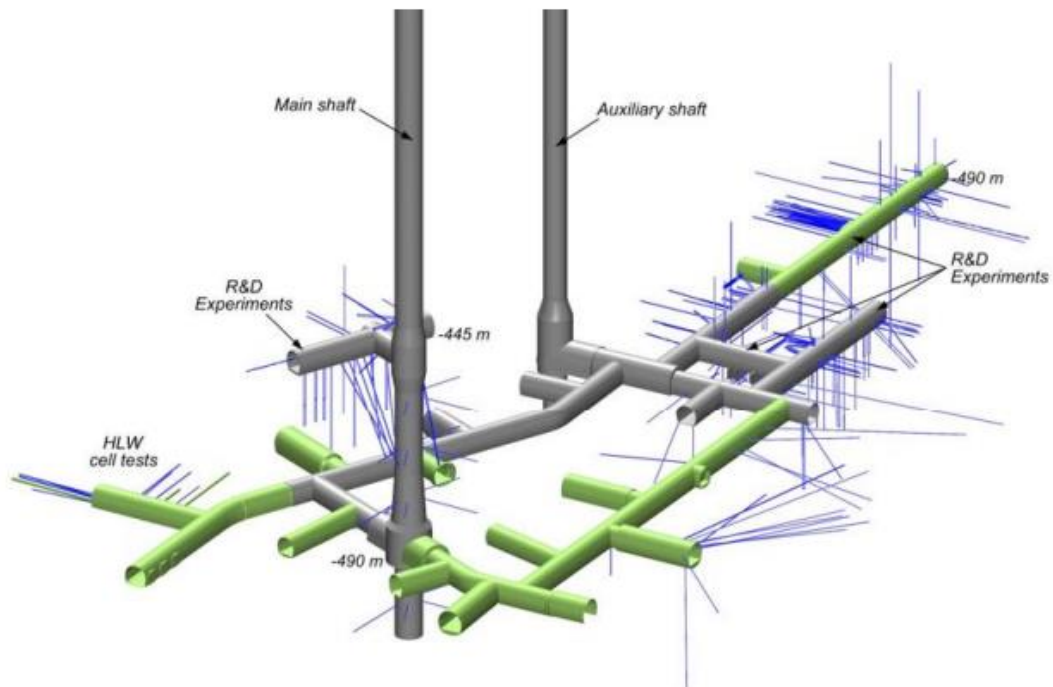


圖 16：2006-2009 年法國地下實驗室擴建(綠色)部分



圖 17：處置孔開挖微型鑽機

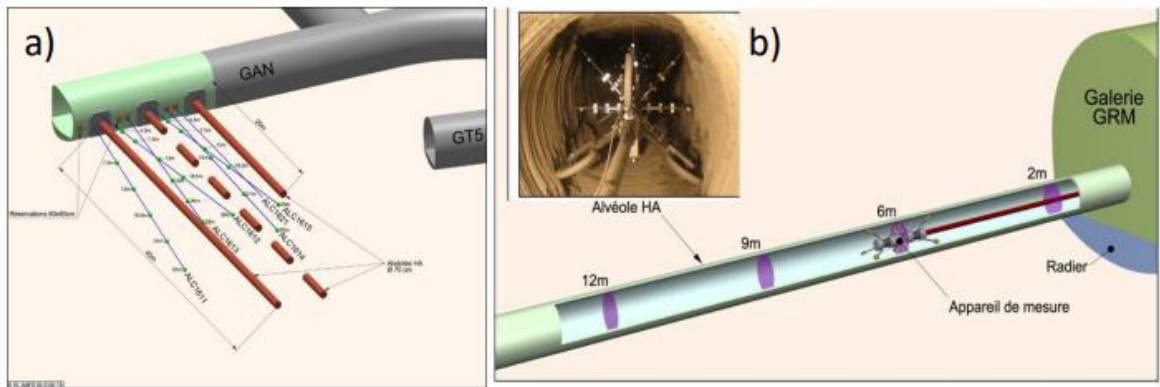


圖 18：觀測開挖引致圍岩壓力(a)、溫度、飽和度變化裝置(b)示意圖

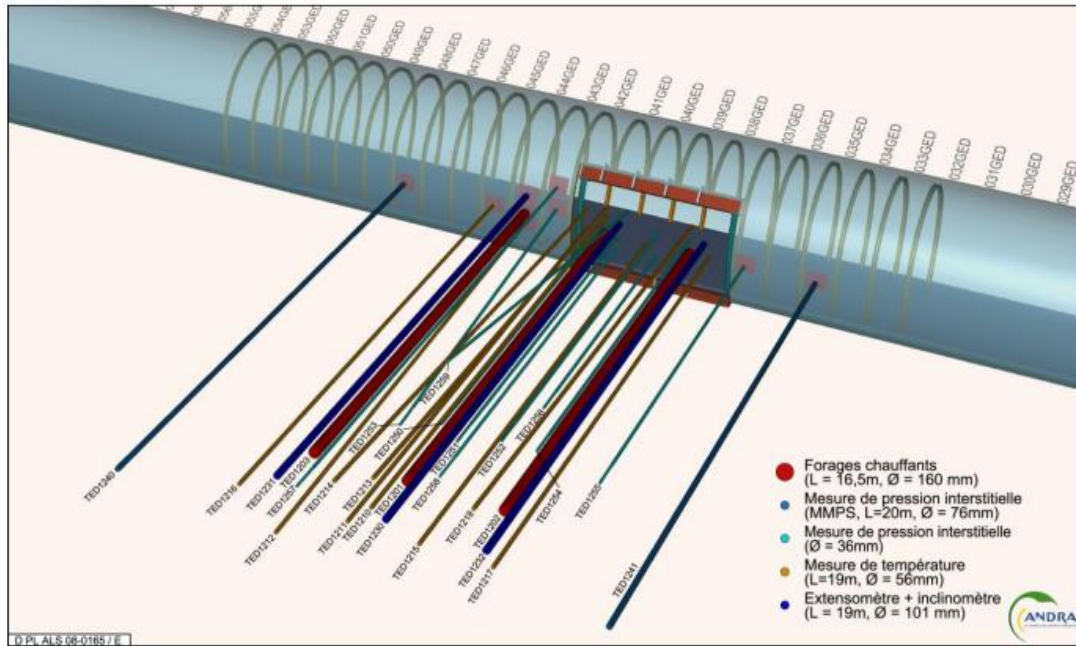


圖 19：岩石熱-水-力耦合實驗監測孔佈置圖

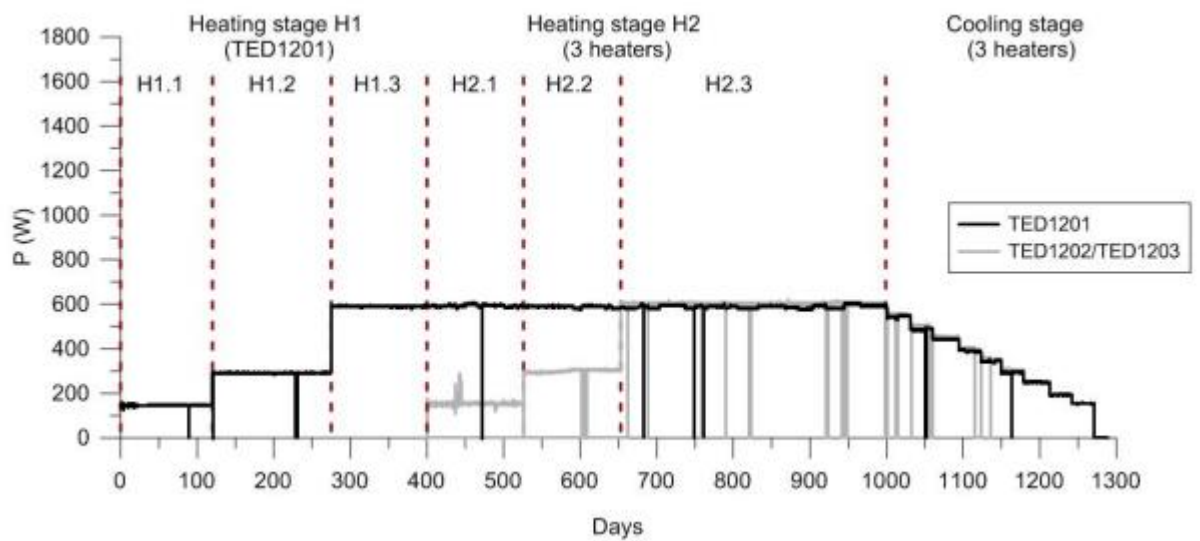


圖 20：岩石熱-水-力耦合實驗加熱歷時曲線

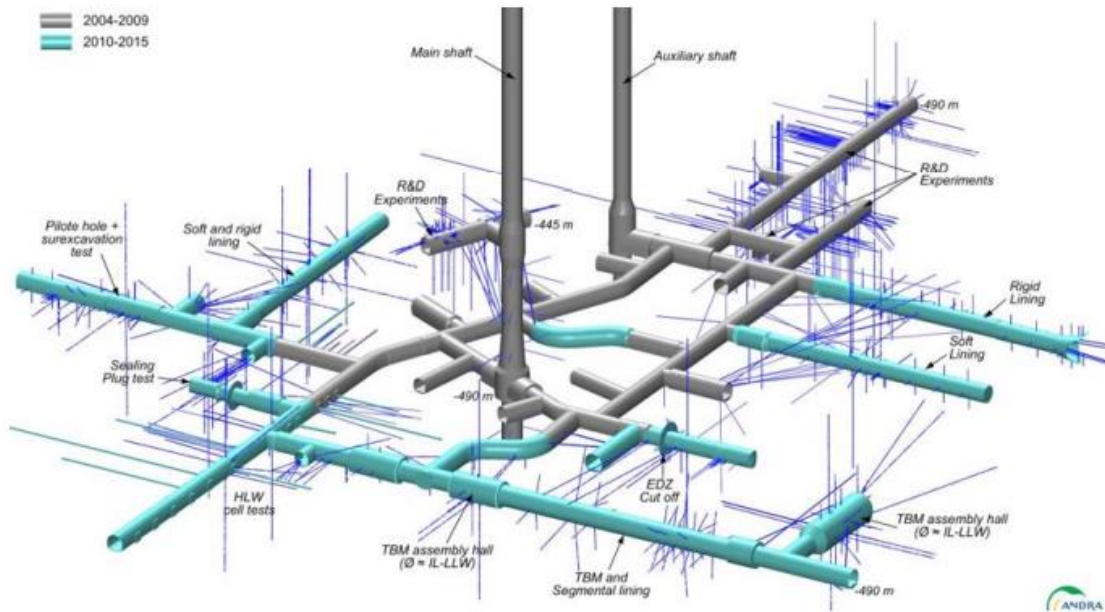


圖 21：2010-2015 年法國地下實驗室擴建(藍色)部分

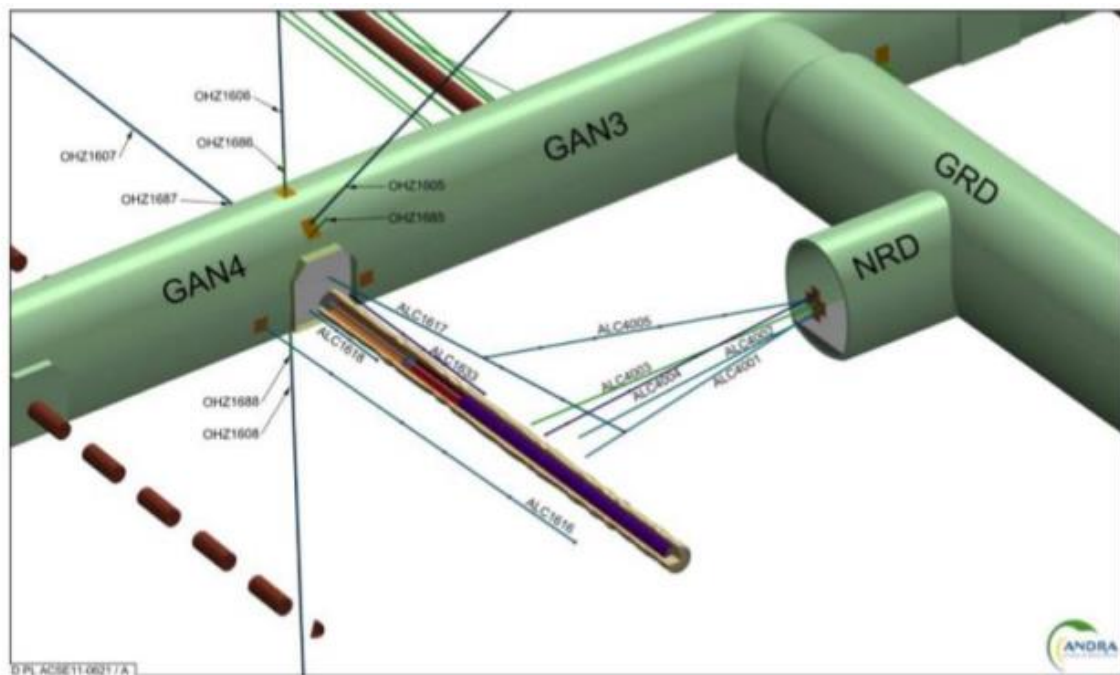


圖 22：處置設施全尺度實驗佈置圖



圖 23：加熱器元件安裝圖(左)與加熱器/套管、感測器圖(右)

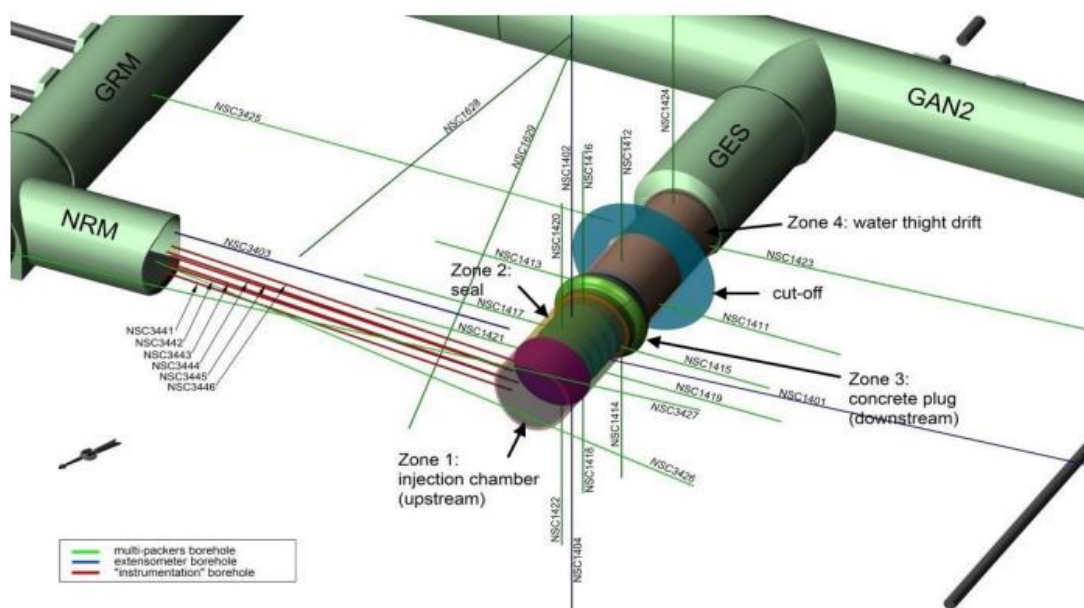


圖 24：封閉設施滲透性實驗佈置圖

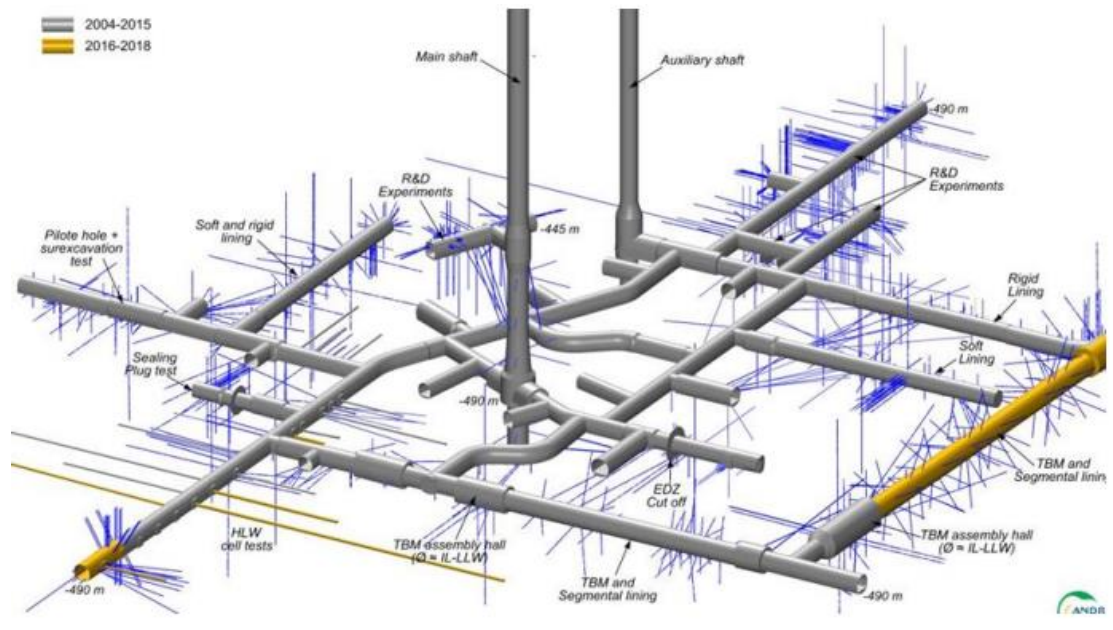


圖 25：2015-2019 年法國地下實驗室擴建(黃色)部分



圖 26：坑道支撐系統原型與壓縮式支撐材近照

### 三、Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium

DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments) 為國際高放處置研究計畫，旨在探討對地質系統中熱-水-力-化 (THMC) 耦合作用的理解，並評估其對用過核子燃料的性能與安全影響。該計畫由多個放射性廢棄物管理組織和監管機構支持的研究團隊共同執行，包含國家研究機構、管制機關、大學、研究中心、工程顧問公司等共 17 個國家團隊。本期 DECOVALEX-2023 計畫共有 7 項子計畫(Task)，其利用地下實驗室或大型室內實驗，就處置母岩與工程障壁間可能產生的耦合作用進行建模與探討，參與團隊依使用不同的模型及方法進行結果比較，除了可從過程中更加了解 THMC 耦合過程的影響，同時也比較不同分析工具所建立的模型優缺點及合理性。本期計畫預計於 2024 年 3 月底結束，並於 2024 年 4 月展開 DECOVALEX-2027 計畫。

本次會議前三天開放非會員國參與(Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium)，最後一天則為參與計畫之工作會議 (DECOVALEX-2023 8<sup>th</sup> Workshop)，會議由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL) 與法國放射性廢棄物管理機構 ANDRA 共同主辦，會議時間及地點為 11 月 14 至 17 日於法國特華舉行。各主題研究成果以分場方式進行口頭簡報及海報呈現，會議議程如圖 27。

Day 1 - Tuesday, 14 November		Day 2 - Wednesday, 15 November	
8:45-9:00	Welcome		
9:00-9:30	Overview of Andra's R&D Program Stéphan Schumacher, Andra, France	8:15-9:15	Track A: Session 1 (4 presentations) - Clay II Track B: Session 2 (4 presentations) - Emerging II
9:30-10:15	Keynote 1: Professor Ki-Bok Min, Seoul National University, South Korea	9:30-10:30	Track A: Session 3 (4 presentations) - EBS II Track B: Session 4 (4 presentations) - Emerging III
10:15-10:45	Break	10:30-11:00	Break
10:45-12:30	Plenary oral session: DECOVALEX	11:00-12:30	Track A: Session 1 (6 presentations) - Crystalline Track B: Session 2 (6 presentations) - PA
12:30-13:30	Lunch	12:30-13:30	Lunch
13:30-14:45	Track A: Session 1 (5 presentations) - Clay I Track B: Session 2 (5 presentations) - Salt	13:30-14:15	Keynote 2: Professor Antonio Gens, University of Catalonia, Spain
15:00-16:00	Track A: Session 3 (4 presentations) - EBS I Track B: Session 4 (4 presentations) - Emerging I	14:15-15:30	Plenary oral session: Coupled Processes Across Scales
16:00-18:00	Poster session	15:30-16:00	Break
		16:00-17:00	Panel discussion: What is the Value of International Collaboration?
19:00	Banquet Dinner	17:00-17:15	Closing remarks

圖 27：會議議程



### (一) 會議第一天

開幕式由主辦方 ANDRA 地下實驗室的經理 Patrice Torres 開場，接著由 ANDRA 的 Stéphan Schumacher 進行演講，主題為「Overview of Andra's R&D Program – Is R&D Still Needed Once the Construction License Application Has Been Submitted?」。法國已於 2023 年 1 月 16 日申請高放處置場的建造許可，申請建造許可的文件內容涵蓋 ANDRA 過去 30 年的評估成果，且皆奠基於明確及完善的工程設計與可信賴的安全演示。該場址位於法國東北部/巴黎盆地東部，以富含黏土(Clay)的岩層做為處置母岩，該地點具限制放射性核種遷移的有效特性。ANDRA 也說明於建造申請後還需要進行 R&D 工作，像是建立工程技術與經濟的優化、確保了解 Cigéo 的演化現象(包含營運期間)、開發監測工具等。ANDRA 進行多尺度調查，藉由建立模型去理解及掌握處置可能發生的現象，並從地質環境中取得相關特徵參數，建立處置區域在不同空間及時間尺度上進行演化的數值模型。ANDRA 也在不同階段進行處置設施的設計與開發，包含混凝土的設計、廢棄物罐設計、吊掛車等，並於地下實驗室進行現地實驗。(圖 28)

第二個專題演講為「Coupled Processes in Fractured Rock for Deep Geothermal Energy (EGS) and Less Deep Geological Repositories」，由韓國知名岩石力學專家 Ki-Bok Min 博士擔任講者，其就裂隙岩層的應用進行說明。目前地熱能源與深地層處置兩者皆須考慮裂隙岩層，而兩者之差異在於地熱能源的深度可達地下 5000 公尺深，深地質處置則為地下 300 公尺至 1000 公尺深。傳統使用地熱能源的方式為直接將地下的熱水抽出使用，但在地下水源不足的地方則須採用增強行地熱系統(Enhanced Geothermal System, EGS)，該系統為僵冷水注入到地下的地熱環境中，使注入的冷水吸收地下熱量後，再將其抽出利用。Ki-Bok Min 博士分享 EGS 系統的五大經驗：高效率的鑽井技術、井下技術的研發、地下概況的描述與評估、進行地震評估與監管。其認為亦須評估熱應用對裂隙岩層導水性的影響，觀察裂隙中熱-力耦合作用的行為。

接著由大會主席 Jens Birkholzer 對 DECOVALEX 進行整體性的計畫說明(圖 29)，該計畫自 1992 年開始，已執行 30 多年，而當初啟動計畫的原因為過去的專家們認為耦合作用的評估可用來證明放射性物質的安全(圖 30)。在高放射性廢棄物處置中，工程障壁系統與自然環境中的交互作用會產生耦合反應，透過不同的實驗設計與數值模型，可用來建立不同條件下的處置環境，並藉此評估處置設施的性能與安全。主席說明完畢後，由 DECOVALEX-2023 各研究計畫的主持人上台說明執行重點與結論，除了 Task G 沒有簡報外，其餘內容依簡報順序簡介如下：

**1. Task B - Quantitative Treatment of Gas in Clay-Based Repository Systems:  
From Small-scale Laboratory Experiments to the Field**

本研究計畫主要探討氣體於土體中的流動行為，在深地質處置中，氣體可能會由金屬腐蝕、放射性廢棄物衰變及水的放射性溶解中等作用產生，當氣體累積定量後，會突破進到工程障壁或是母岩中，因此了解氣體的產生與移動是評估處置設施性能的其中一項關鍵議題。本研究主要分為三階段任務，第零階段為分析模式開發，第一階段進行 MX-80 膨潤土飽合狀態下的一維氣體流動試驗，第二階段為三維進氣實驗，實驗數據與分析模型得到了良好的結果。(圖 31)

**2. Task A - Investigating Fracturing Processes in Claystone for High-Level and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal**

法國目前提出的高放射性廢棄物處置場場址為 Cigéo，其岩性為泥岩，以 Callovo-Oxfordian(Cox)黏土做為緩衝材料，其特性為低滲透率。高放射性廢棄物會產生熱，可能會造成 Cox 區域的溫度升高，進而造成孔隙水壓的升高；而金屬腐蝕或是微生物降解作用可能導致氣體產生遷移行為。上述過程皆有可能導致地層的有效應力狀態改變，因此了

解作用機制可以幫助處置設施的設計與優化。本研究計畫主要有三個步驟：(1)S1：定義概念模型；(2)S2：現地模型參數的闡釋；(3)S3：處置設施尺度的模型應用，透過現地試驗進行鑽孔內部的加熱或是氣體注入，觀察應力及孔隙壓力的變化。(圖 32)

### 3. Task E - Brine Availability Test in Salt (BATS)

本研究計畫主要目的為了解鹽水與氣體的遷移方式(圖 33)，實驗地點為美國的 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)，試驗小組對鹽岩層加熱後，觀察鹽岩性質之開挖損傷帶(EDZ)的損害，並觀察鹽水遷移情況。

### 4. Task C – Modelling THM Coupled Effects around a Full-Scale Heater Experiment: Model Development, Calibration and Prediction

本研究計畫又稱 FE 實驗(The Full-Scale Emplacement Experiment)，地下實驗室位於瑞士的 Monti Terri，實驗設施與處置設施比例為 1:1 建造而成，該實驗目的為研究高放射性廢棄物的熱-水-力耦合作用。FE 實驗的第一階段為簡化幾何模型，目的為測試溫度、孔隙水壓與相對濕度的變化；第二階段則增加模型的複雜度，並加入多項條件與模型細節，最後預測三項因子於全尺度實驗尺寸的演化過程。(圖 34)

### 5. Task D – Numerical Simulation of Coupled THM Behavior of Full-scale EBS in Backfilled Experimental Gallery, Horonobe, Japan

本研究計畫為日本幌延(Horonobe)地下實驗室建立工程障壁實驗，為台電公司與財團法人中興工程顧問社的研究團隊共同執行之項目。其實驗目的為探討工程障壁受到熱-水-力等過程變化的影響。該實驗為膨潤土工程障壁系統全尺度實驗，安裝一百多個監測儀器，可監測耦合試驗過程中的各項變化，包含溫度、PH 值、孔隙水壓、導電度、含水量、

位移量等。本研究分兩大步驟，第一步驟由四個實驗室尺度的小實驗為主軸，分別為回脹實驗、自由回脹實驗、滲透實驗與水分擴散試驗，藉由第一步驟測試並驗證模型的可信度；第二步驟則為前述之泉尺度地下實驗，該實驗位於幌延地下實驗室的地下 350 公尺深，工程障壁組成包含加熱器、緩衝材料、回填材料(分塊體及壓實)、碳鋼包件、沙、混凝土封塞等，並設置注水系統對沙與回填材料注水，觀察孔隙水壓、應力、含水量、位移量及濕度等變化，因此模擬分析工具需具備至少三項以上的物理模組才有辦法執行本研究計畫。(圖 35、圖 36)

## 6. Task F – Overview on Comparative Performance Assessment Modeling

本研究計畫中的 F1 為台電公司與國家原子能科技研究院的研究團隊共同執行之項目。其目的為建立並驗證結晶岩與鹽岩兩種岩性間的安全評估能力，故分為 F1-結晶岩及 F2-鹽岩兩項研究。其評估流程涵蓋核種源項、衰變鏈、核種傳輸及場址相關的水文特性。F1 模擬案例第一階段為傳輸模型及裂隙水流模型的驗證，第二階段則依 KBS-3V 的設計，進行 2500 個處置孔、銅罐、鑄鐵內襯、緩衝及回填材料的參考案例模擬，其分為穩態場址尺度水流模擬與暫態場址尺度核種傳輸模擬，並於最後進行全域分析。

總結本期 DECOVALEX 各計畫任務參與團隊四年來的努力與成果，參與研究團隊需要對基本物理現象與耦合行為有非常多的了解，才能透過實驗與模擬兩者交互驗證，而參與研究可強化性能評估的能力與演化模型的可信度。由於本次會議開放與耦合作用相關的各類研究投稿，接下來的會議議程為各研究團隊之口頭發表，並以分場方式進行簡報說明。以下摘錄與用過核子燃料最終處置較相關之議題。

### 1. Thermal Management in Deep Geological Nuclear Waste Disposal Using

## Engineered High-heat Conduction Bentonite

本研究由 Lawrence Berkeley National Laboratory 的 Jonny Rutqvist 進行簡報說明，該研究為探討使用較高熱傳導膨潤土於深地質處置的應用，研究結果顯示，較高熱傳導膨潤土可大幅降低緩衝材料的溫度，且必須關注溫度導致母岩的壓力與應力變化。

## 2. Multiscale Simulation of THMC Couplings in Bentonite Clay Using a Soft Matter Physics Framework

本研究由 Princeton 大學的 Ian Bourg 進行簡報說明，該研究為探討膨潤土熱-水-力-化行為，旨在開發可以處理壓實黏土的雙向流流體計算動力學程式(圖 37)，目前具體成果已可以應用在壓實膨潤土中的流體流動、固體變形、熱傳輸之間的耦合行為，其使用全新分子動力學(new all-atom molecular dynamics, MD)模擬水與蒙脫石間的作用機制。

## 3. Evaluating Hydraulic, Mechanical and Chemical Fracture Apertures

本研究講者為 Karlsruhe Institute of Technology 的 Philipp Blum。在建構高放射性廢棄物的模型時，通常會使用離散裂隙網路(Discrete fracture networks, DFN)，並使用離散裂隙網路控制流體的流動或是溶質的遷移行為，所以模型的輸入參數是相當重要的關鍵之一。本研究使用幾種新穎的實驗與數值方式來測定在裂隙中的水、力及孔徑等參數，其實驗所使用的儀器包含注射空氣滲透儀、顯微鏡、雷射掃描器等，前述三種儀器可用來確定水力與力學的有效裂隙孔徑。水流方面也使用晶體幾何形狀因子來推估水力孔隙大小，其成果皆顯示以上實驗與數值方法可以更加精確地了解裂隙孔徑大小，並進而提高對裂隙介質中流體耦合過程的理解。

海報論文發表部分，我方團隊共發表兩項研究成果，與會者皆表達高度興趣並提問交流。以下摘錄其他團隊的研究重點說明：

### 1. Value of Abstraction in Performance Assessment- When is a Higher Level of Detail Necessary?

本研究的研究動機起源於放射性廢棄物的長期安全分析必須符合國家法規，且須與科學技術進步保持同步，因此程式的運算必須涵蓋監管範圍，為能呈現複雜的評估過程，應盡可能簡單但又必須全面考量，所以本研究討論的重點是透過不同的分析來探討何時能應用簡化以及探討產生的結果。其中有關流量模型的比較，當密封系統未完全飽和時，由於空氣的限制，將出現微小變化。未來需要進一步研究以確定建模所需要的詳細資訊。

### 2. Coupled Ionic Chemical Diffusion in Bentonite

以往在處理核種擴散行為時通常只考慮單一物種的擴散，而非離子的耦合過程，所以本研究透過實驗證明擴散遷移非單一過程而是一耦合過程。

### 3. Modelling of nuclide transport in fracture rock: effect of fracture distribution, reactive tracer, injection strategy

韓國原子能研究所（KAERI）正開發一套可運用在用過核子燃料最終處置的評估系統，重點為了解裂隙岩層中的放射性核種傳輸，所以參加 DECOVALEX-2023 Task F，以確認並評估模型的性能。本研究進行核種裂隙傳輸的測試案例，該案例由 Task F 的負責單位 Sandia 國家實驗室提供四條固定裂隙，並給予離散裂隙網路參數值使其在同一空間中產生離散裂隙，模擬於模型左側注入示蹤劑，其分為保守型與非

保守型，前者只考慮平流與岩散，後者則多考慮了吸附與衰變。

#### 4. Characterization and Utilization of Buffer Material for the Engineered Barrier System at Horonobe URL: Parameter Identification and Application

本研究評估壓實膨潤土的熱-水-力演化行為，其配合日本 JAEA 的試驗數據，進行緩衝材料的驗證，數據來自日本幌延地下實驗室，研究團隊模擬驗證工具則使用 COMSOL Multiphysics。研究使用的緩衝材料組成為 70%膨潤土及 30%沙，使用的水流模組為雙相流，力學模組則為巴塞隆納基本，熱傳導模組使用孔隙介質熱傳，力學參數則使用機器學習方式推估。其模擬結果與 JAEA 的實驗結果趨勢呈現一致，結果相當吻合。



圖 28：Stéphan Schumacher 講述法國整體 R&D 近況

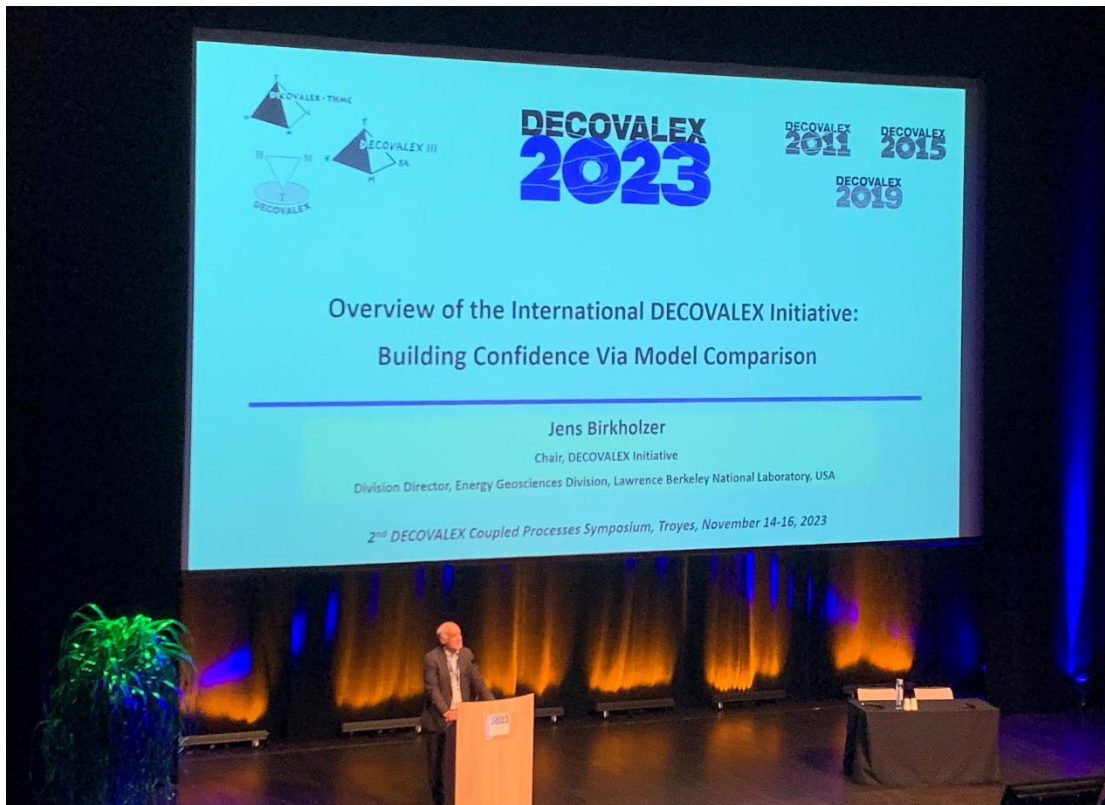


圖 29：大會主席 Jens Birkholzer 簡報說明 DECOVALEX 計畫



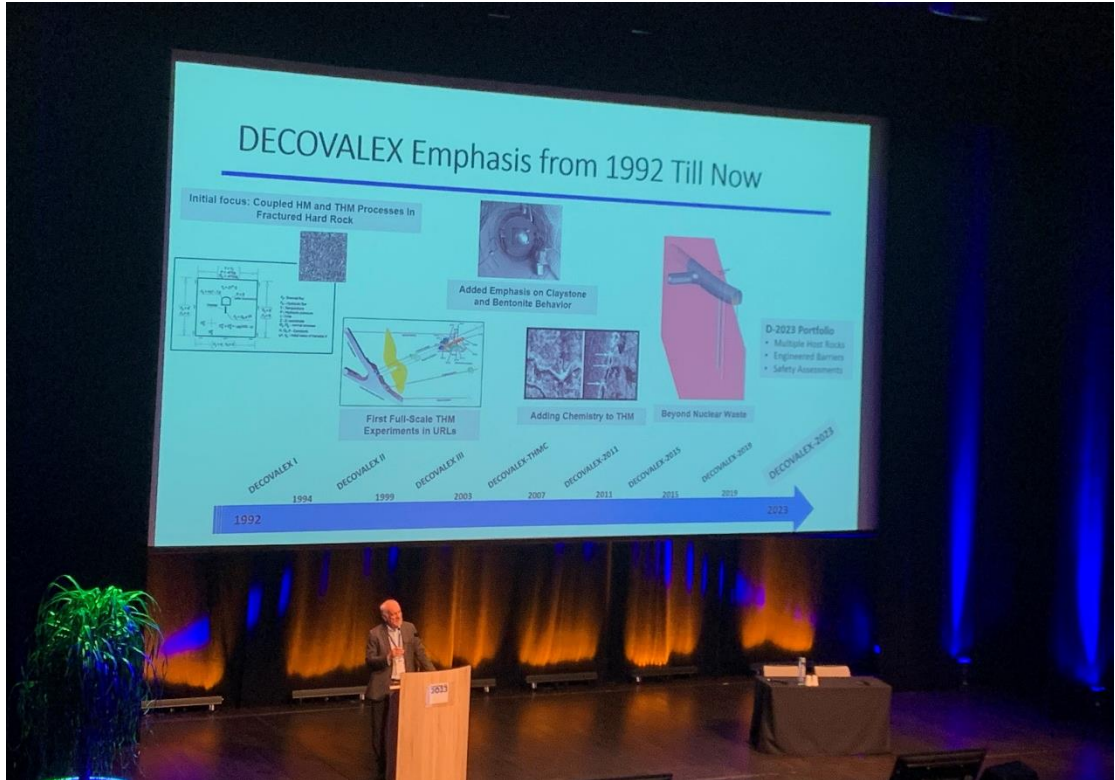


圖 30：DECOVALEX 計畫整體回顧

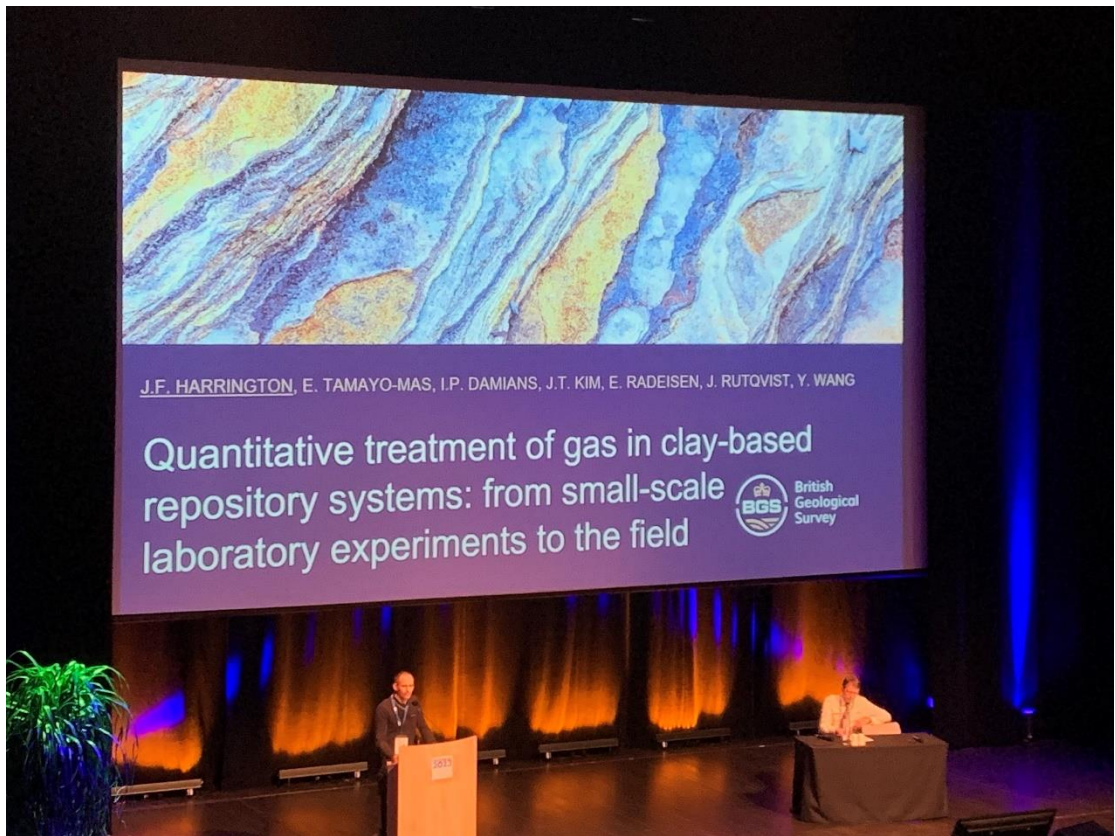


圖 31：DECOVALEX-2023 Task B 主持人進行整體說明

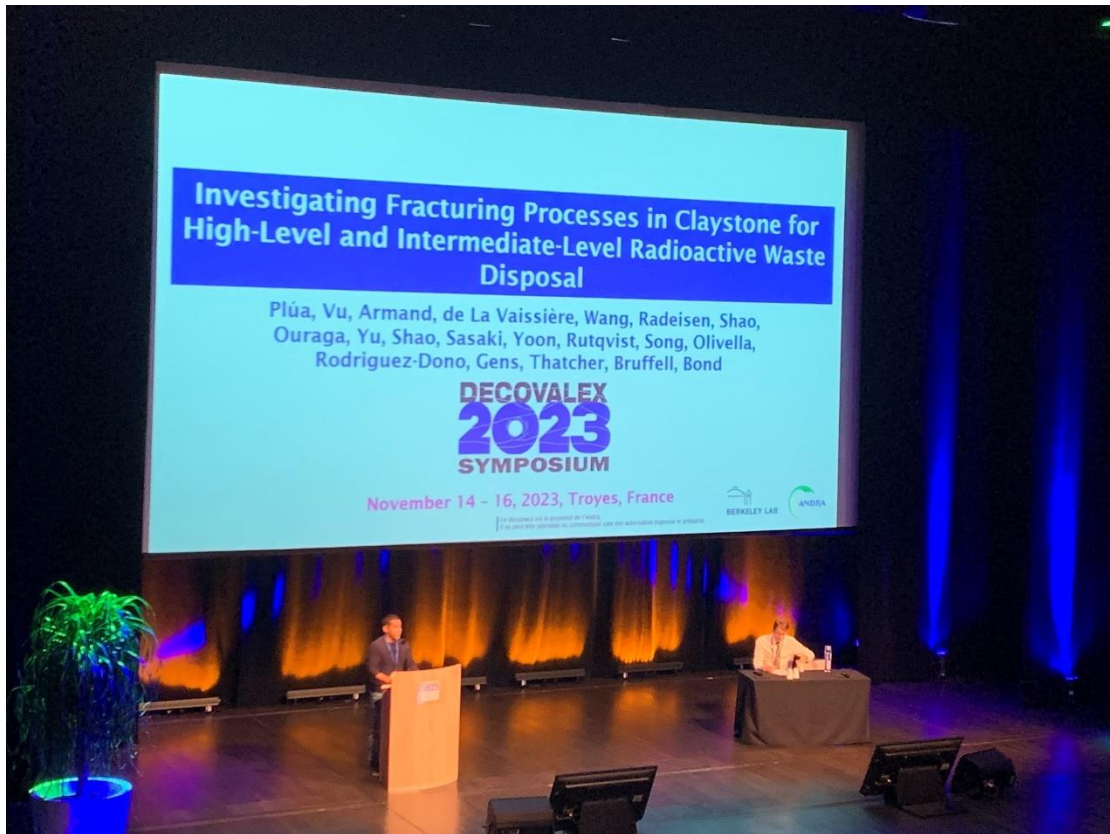


圖 32：DECOVALEX-2023 Task A 主持人進行整體說明

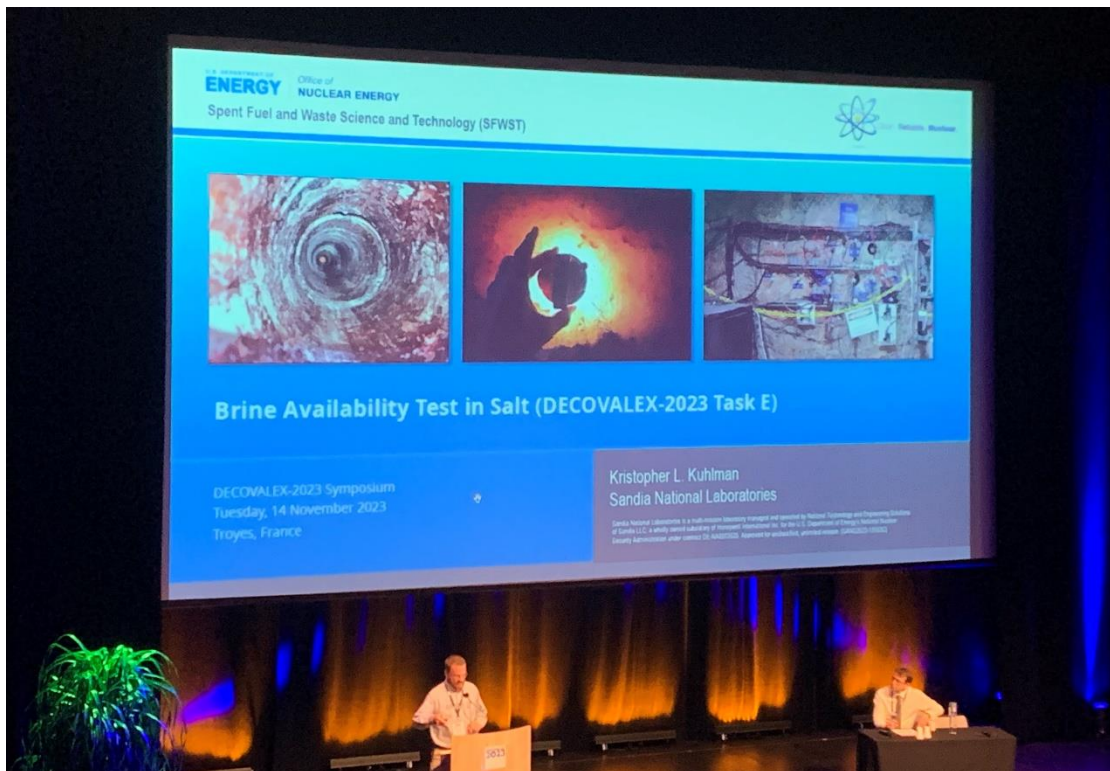


圖 33：DECOVALEX-2023 Task E 主持人進行整體說明

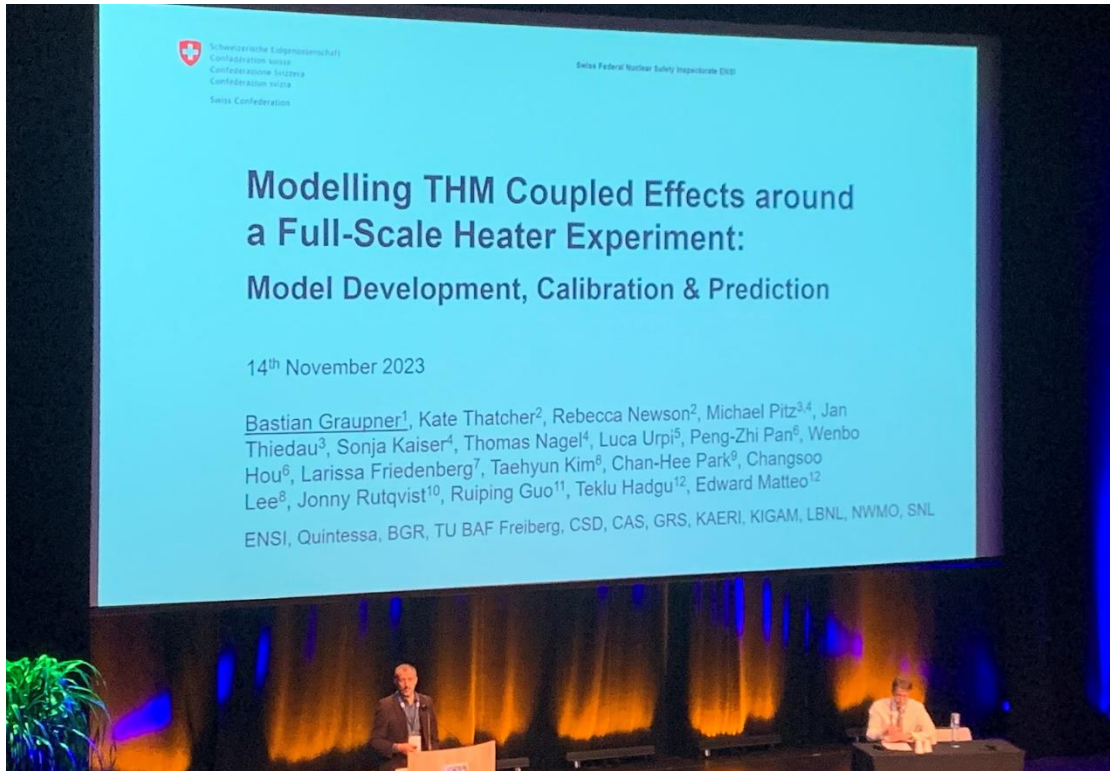


圖 34：DECOVALEX-2023 Task C 主持人進行整體說明

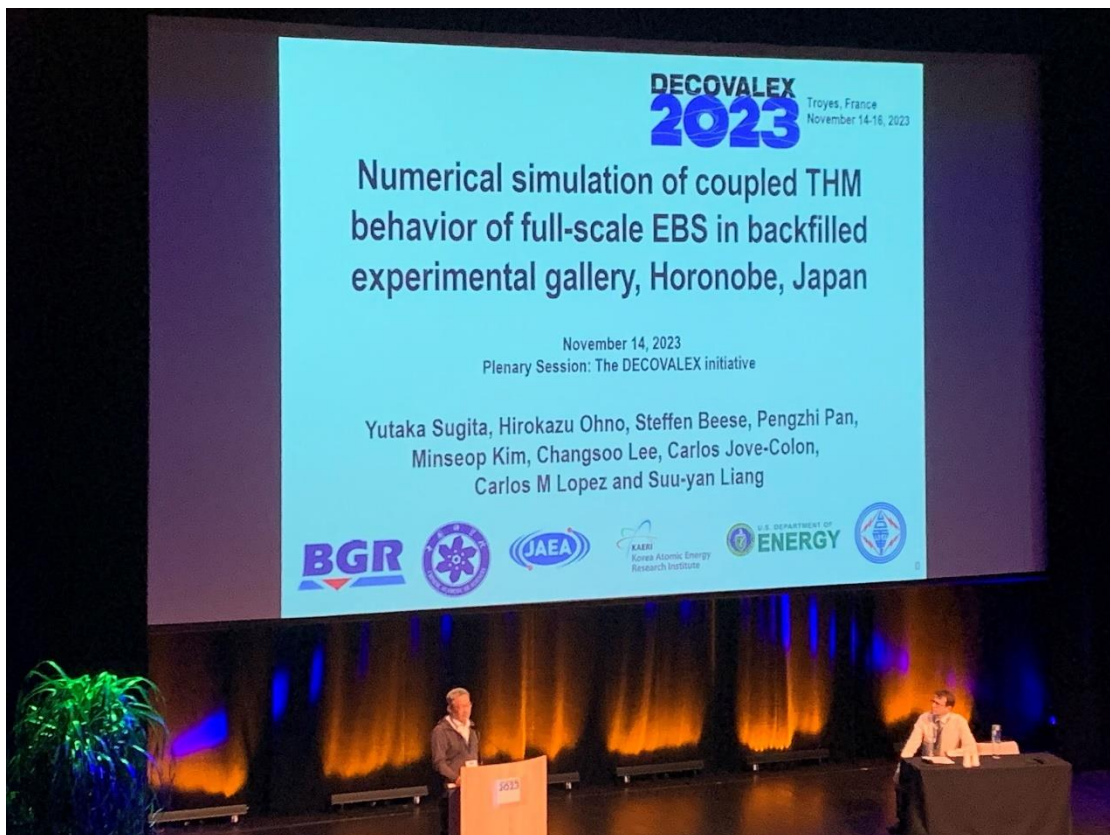


圖 35：DECOVALEX-2023 Task D 主持人進行整體說明

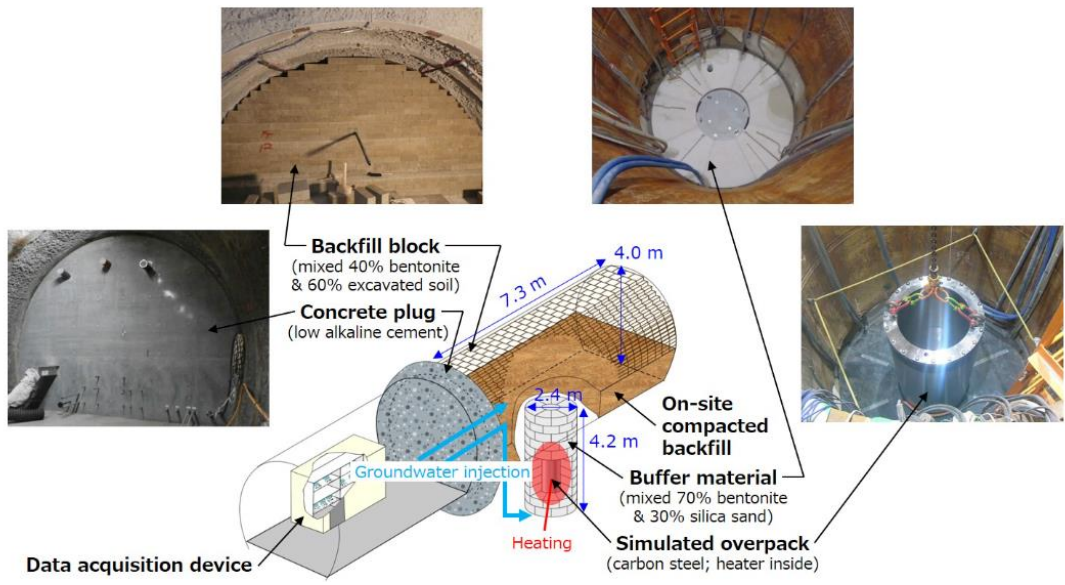


圖 36：幌延地下實驗室工程障壁系統示意圖

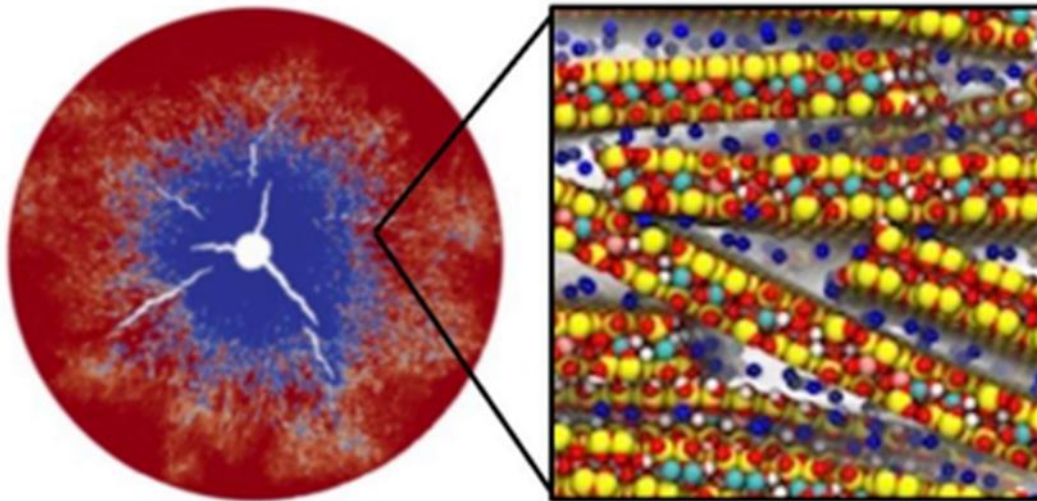


圖 37：利用分子觀點開發流體動力學模式示意圖

## (二) 會議第二天

除了原本的工程障壁與兩大岩性相關研究之外，增加安全評估及處置設施周圍的大範圍模擬，但議題仍以工程障壁的性能及裂隙水流的熱水力耦合為主。以下摘錄相關重要議題。

### 1. Lessons Learned from Geomechanical in Situ Testing of Fault Reactivation Processes in Opalinus Clay

斷層如果受到處置設施的影響可能造成其重新活化或是滲透性增加，本研究主要關注因為放射性廢棄物衰變熱導致溫度上升與腐蝕產生的氣體可能導致母岩中斷層的壓力增加，母岩與斷層的天然滲透率極低，無法承受孔隙水壓的增加，所以研究重點為滲透率低且孔隙水壓增加後無法消散的斷層。本研究的試驗地點位於瑞士的 Mont Terri 地下實驗室，該實驗室安裝一台多模型監測試驗機台，可以監測應變、地震、溫度、斷層孔隙水壓、位移等數據。試驗前期觀察斷層的無震狀態下變化情形，後期則進行微地震試驗(即水力破裂試驗)，選定一區域進行加壓，累積壓力直到應力臨界點可誘發地震破裂。目前正在加熱 Mont Terri 的母岩岩體並測量斷層的穩定性，其試驗所得到的訊息可於未來安全功能評估中，提供相關依據。

### 2. Modelling Thermally Induced Slip of Rock Fracture System: Comparison of Two Modelling Approaches- Bonded-Particles Based vs. Rigid-Blocks Based

本研究的研究動機來自於 DECOVALEX-2023 Task G，該計畫項目的實驗中觀察到熱負載導致裂隙滑移，因此想探討在用過核子燃料最終處置中，裂隙是否會因為熱而產生滑動，且該現象是否需在離散裂隙網路的數值模型中納入長期安全及性能評估。本研究以兩項建模(3DEC

與 PFC3D)。評估結果顯示處置場封閉後 100 年岩時將達最大溫度(升溫近 50°C)，而裂隙滑移集中在處置設施深度的上方與下方，其為可逆的裂隙滑移。(圖 38)

### 3. Hydro-Mechanical Modelling of Bentonite Homogenisation

目前水力耦合模型的開發與測試在歐洲相當成熟，且在歐盟已完成 BEACON(Bentonite Engineered Barrier Mechanical Evolution Effects on the Long-term Performance of the Barrier)的試驗項目，該試驗使用與 FEBEX(Full-scale Engineered Barrier Experiment)計畫相同的膨潤土進行，試驗底部使用水將膨潤土底部潤濕，其流量為 0.07cm/h，模擬軟體使用 COMSOL 並實現力-水的完全耦合。BECON 進行單軸壓縮試驗獲得應力與應變的關係，其與含水量跟密度相關，回脹壓力會受到黏土礦物的吸力值影響。目前力學邊界皆使用滾動邊界(Roller Boundary)，以評估容器壁與膨潤土樣品間摩擦的影響，模型預測膨潤土在試驗容器中移動是因為底部的水壓超過摩擦力產生的約束力。

### 4. Long-term Thermoshearing of Rock Fracture in an HLW Repository, Can it be Reproduced in Laboratory Experiments?

目前深地層處置系統採用多重障壁，高放射性廢棄物會產生衰變熱影響近場的工程障壁系統與遠場的天然障壁系統，因為岩石節理和剪切行為所造成的滲透率增加，所以本研究於試驗樣品為有裂隙的花崗岩進行加熱，並觀察其位移行為與位移速率，並進一步討論熱引致岩石裂隙位移的影響情況，用於研究評估深地質處置設施的長期安全性。

### 5. Fully Coupled THMC Interactions in Bentonite Engineered Barrier Systems

本研究以瑞士全尺度工程障壁系統 FEBEX 為分析目標，試驗有儀器

測量溫度、相對濕度、水壓力、總應力等分布情形，在實驗結束後獲得乾密度與含水量，模擬物理場包含熱-水-力-化，並進行全耦合行為，使用的軟體為 HYDROGEOCHEM 5.3，模型考慮材料包含膨潤土、混凝土封塞及花崗岩。水力模型使用變飽和流、力學模型為線型、熱傳模型則為固態熱傳。本研究考慮四種不同化學反應方式，其中包含十五種水相錯合反應、三種礦物沉澱溶解反應、三種離子交換反應與六種表面錯合反應，共使用四十二種化學物種來完成化學反應模塊。本研究的目的是為完整了解工程障壁系統中的所有物理行為與反應機制，但數值處理程序相當複雜。(圖 39)

專題演講部分由 Technical University of Catalonia 的 Antonio Gens 教授以「On the HM and THM Behavior of Argillaceous Rocks」為題，說明泥岩做為適用於高放射性廢棄物深地質處置的母岩有幾項特點：低滲透率、對溶質傳輸具顯著的延遲功能、可能較無經濟價值、一些顯著的自密封能力(self-sealing capacity)等，雖然有以上優點，但仍有一些缺點，像是岩石強度並不高，所以需要特別關注額外支撐的研究；對化學變化(氧化)較為敏感；若溫度升高，孔隙水超壓問題可能會出現等，因此本演講說明法國在地下實驗室所做的系列研究，解決以泥岩做為母岩可能面臨的問題。

會議結束後，我方團隊特別感謝 ANDRA 主辦方協助安排地下實驗室的特別參訪，並請益法國在處置設施建造申請所做的努力，可做為我國未來的安排規劃之參考。

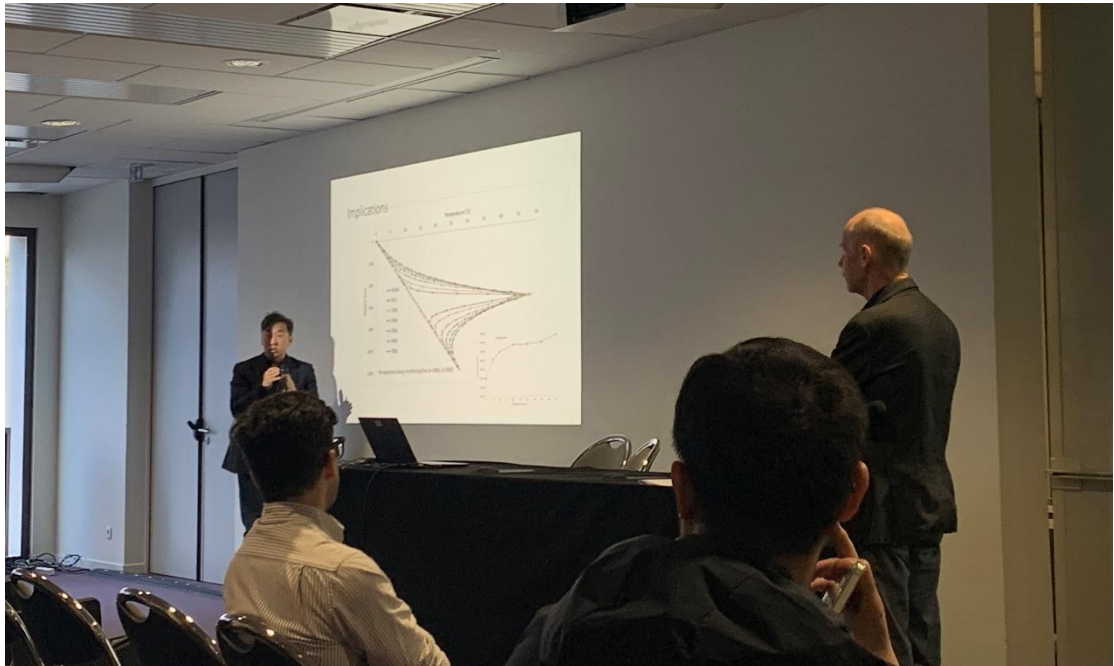


圖 38：Jeoung Seok Yoon 與與會者討論成果

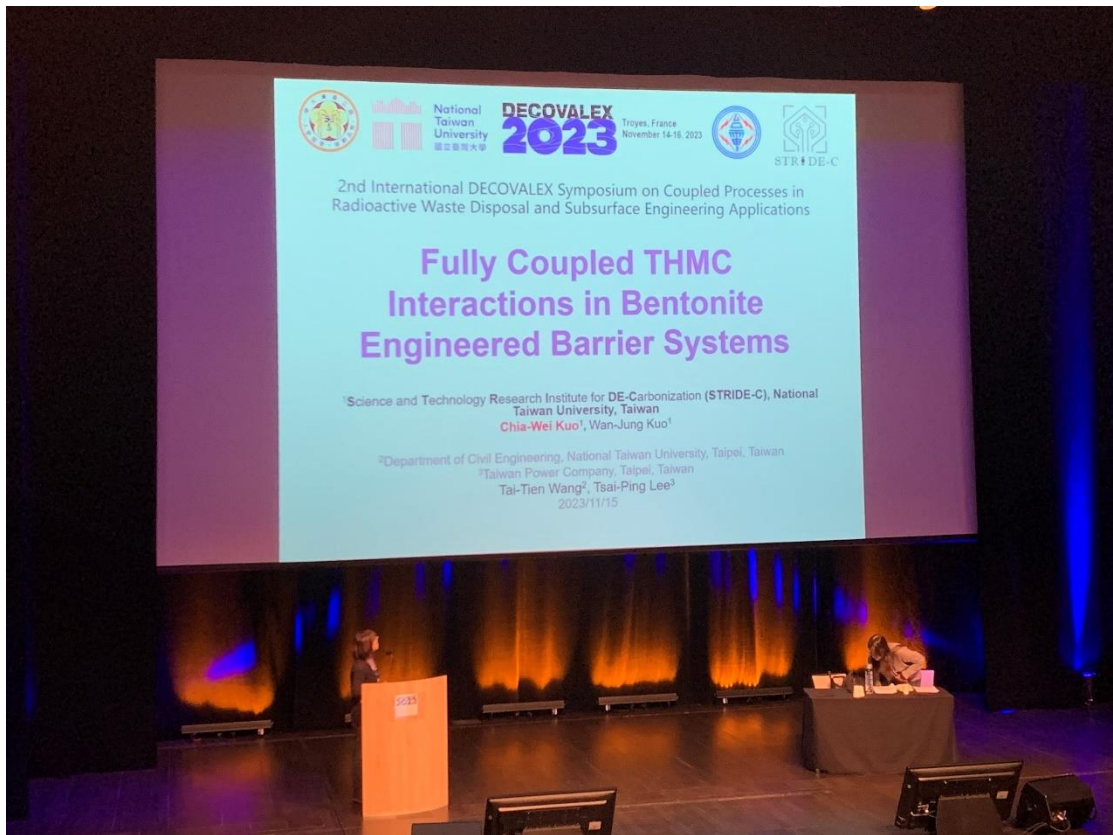


圖 39：我方團隊口頭簡報研究成果



### （三）會議第三天

會議最後一天為非公開的「DECOVALEX-2023 Final Workshop」，由 DECOVALEX-2023 計畫參與團隊進行工作會議，會議以各個任務項目進行分場討論。台電公司於本期計畫中參與兩項研究計畫，為「Task D-日本幌延地下實驗室工程障壁實驗」及「Task F1-結晶岩安全評估平行驗證」。大部分國家團隊之分析結果皆有完成且具有良好的趨勢線，最後各團隊也討論有關期末報告及投稿 GEOMECHANICS FOR ENERGY AND THE EMVIROMENT 期刊的相關內容。

會議最後一個議程為管理會議，僅開放各參與組織的代表參加，台電公司由李課長在平及林正中專員出席，會中並確認各國參與下期計畫 DECOVALEX 2027 意願。

## 肆、出國心得

本次赴比利時參加 EURAD 會議及法國參加 Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium，心得如下：

- 一、EURAD 的主要參與成員皆為歐盟之成員國，但相關會議免費開放申請參與交流討論，會議中的研究發表都是國際最新的研發成果，深入了解可強化我國在相關領域的認知，且過程中與各參與會員有密切互動與交流，進一步拓展我國於國際相關社群之能見度。
- 二、DECOVALEX 計畫之參與團隊包含各國專責機構與研究機構，其多具有完整實驗室及實驗方式與流程，以取得模擬分析所需之參數，台電公司藉由參與本項計畫，除了可以共享國際實驗數據外，亦可透過各研究團隊成果分享的過程中，學習各國最新處置技術與發展經驗，精進本土團隊的分析能力，並強化我國高放處置安全評估的可信度。
- 三、目前耦合模式開發的技術水平愈來愈高，所需要之電腦運算能力亦相對需要提升。DECOVALEX 計畫提供各國可開發不同耦合模式的機會，使各國團隊均往較為複雜的三維模型做為開發目標，精進及突破本土團隊的技術水平。本次會議亦見到機器學習的發表，利用機器學習配合試驗資料推估材料參數，想必為未來發展趨勢。
- 四、處置所需發展之技術領域眾多，且處置計畫期程長達數十年，處置相關技術於國際上已逐漸成熟且投入人力亦大幅成長，除了須持續進行國際相關社群之技術交流，以利本土團隊能確實了解各類技術細節及跟上國際最新發展趨勢之外，長期培養相關專業人員並鼓勵人才的投入亦相當重要，未來望能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。

## 伍、建議

本次赴比利時及法國參加會議後之相關建議如下：

- 一、用過核子燃料最終處置所需技術水準要求極高，國際近年多採跨國合作的形式進行研究發展。建議我國應積極加強參與相關國際技術社群，並透過合作計畫，有效降低技術發展的初期門檻，且過程中除了可獲得各國經驗之外，亦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專業技術繁多，不同領域間技術的整合為處置計畫之核心，於會議中與各國代表交流時亦深刻感受到處置技術所需的專業能力必須經過長期累積與培養，才能與各國專家進行有效的互動與交流分享。建議未來應持續投入資源並提供適當環境，鼓勵相關專業人員及具發展潛力且對處置相關技術有熱忱的人才應長期投入計畫之執行，建立對處置計畫之通盤瞭解，方有能力掌握整合議題。

## 陸、附錄

### 附錄 I、DECOVALEX Symposium 會議議程

#### Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium

### Symposium Agenda

Tuesday November 14, 2023

<b>Welcome, Opening Ceremony and Andra Keynote (Chair: Jens Birkholzer)</b> Location: Auditorium	
8:00 am	Arrival and Registration with Coffee
8:45 am	Welcome <i>Patrice Torres, Andra Industrial and URL Operations Director</i> Safety and Logistics <i>Gilles Armand, Andra, France</i>
9:00 am	Keynote: Overview of Andra's R&D Program - Is R&D Still Needed Once the Construction License Application Has Been Submitted? <i>Stéphan Schumacher, Andra, France</i>
<b>Keynote (Chair: Gilles Armand)</b> Location: Auditorium	
9:30 am	Keynote: Coupled Processes in Fractured Rock for Deep Geothermal Energy and Less Deep Geological Repositories <i>Ki-Bok Min, Seoul National University, South Korea</i>
10:15 am	Coffee Break (30 minutes) – Location: Espace Champagne
<b>Plenary Session: The DECOVALEX Initiative (Chair: Alex Bond)</b> Location: Auditorium	
10:45 am	Overview of the DECOVALEX Initiative <i>Jens Birkholzer, DECOVALEX Chair, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA</i>
11:00 am	Quantitative Treatment of Gas in Clay-Based Repository Systems: From Small-scale Laboratory Experiments to the Field <i>Jon Harrington, British Geological Survey, United Kingdom</i>
11:15 am	Investigating Fracturing Processes in Claystone for High-Level and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal <i>Carlos Plúa, Andra, France</i>
11:30 am	Brine Availability Test in Salt (BATS) <i>Kristopher Kuhlman, Sandia National Laboratories, USA</i>
11:45 am	Modelling THM Coupled Effects around a Full-Scale Heater Experiment: Model Development, Calibration and Prediction <i>Bastian Graupner, ENSI, Switzerland</i>
12:00 pm	Numerical Simulation of Coupled THM Behavior of Full-scale EBS in Backfilled Experimental Gallery, Horonobe, Japan <i>Yutaka Sugita, Japan Atomic Energy Agency, Japan</i>
12:15 pm	Overview on Comparative Performance Assessment Modeling <i>Tara LaForce &amp; Paul Mariner, Sandia National Laboratories, USA</i>
12:30 pm	Lunch Break (1 hour) – Location: Espace Champagne
<b>Session Track A: Coupled Processes in Clay Rock I (Chair: Bastian Graupner)</b> Location: Auditorium	
1:30 pm	Coupled Processes at Clay Mineral Surfaces: At the Crossroads between Mineralogy, Geochemistry, and Geophysics <i>Christophe Tournassat (University of Orléans / Lawrence Berkeley Laboratory, France/USA), C. Steefel</i>
1:45 pm	Thermal Management in Deep Geological Nuclear Waste Disposal Using Engineered High-heat Conduction Bentonite <i>Jonny Rutqvist (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA)</i>
2:00 pm	Modelling Gas Flow in Damage-Susceptible Argillaceous Rocks <i>Son Nguyen (Canadian Nuclear Safety Commission, Canada), M. Sentis, B. Graupner, P. Schädle, R. Cuss, J. Harrington</i>

## Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium

2:15 pm	Effect of the Temperature on the THM Behaviour of the Callovo-Oxfordian Claystone: Constitutive Model <i>Mountaka Souley (Ineris, France), C. De Lesquen, M.N. Vu, G. Armand</i>
2:30 pm	Modeling the Self-Sealing Effect on the Hydro-Mechanical Behavior of Fractured Claystone: An EFEM Modeling Approach <i>Yue Sun (University of Lille, France), J.-B. Colliat, J. Shao</i>
2:45 pm	Stretch Break (15 minutes)
<b>Session Track B: Coupled Processes in Salt Rock (Chair: Kris Kuhlman)</b> <b>Location: Salle Temple 1 + 2</b>	
1:30 pm	Crushed Salt Compaction: Impact on Thermo-Hydro-Mechanical Response in Nuclear Waste Repositories <i>Hafssa Tounsi (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA), J. Rutqvist, M. Hu</i>
1:45 pm	Experimental Investigation of Hydrogen Infiltration into Rock Salt <i>Laura Blanco-Martin (Mines Paris, PSL University, France), A. Rouabhi, M. AbuAisha, J.A. Jiménez-Camargo, F. Hadj-Hassen, J. Jawarowicz</i>
2:00 pm	Modelling Brine Availability in Heated Salt: As Simply as Possible, As Complex as Necessary <i>Claire Watson (Quintessa Ltd., United Kingdom), S. Benbow, A. Bond, S. Norris, S. Parsons</i>
2:15 pm	Using Stable Isotopes in Water to Trace Brine Mobilization at the Waste Isolation Pilot Plant <i>Philip Stauffer (Los Alamos National Laboratory, USA), D. Eldridge, H. Miller, T. Rahn, E. Guiltinan, S. Otto, K. Kuhlman</i>
2:30 pm	Geophysical Insights of the Coupled Thermal-Hydro-Mechanical Processes during Heating in Salt <i>Yuxin Wu (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA), J. Wang, H. Chen, L. Luo, S. Otto, K. Kuhlman</i>
2:45 pm	Stretch Break (15 minutes)
<b>Session Track A: Coupled Processes in Engineered Barrier Systems I</b> <b>(Chair: Anne-Catherine Dieudonne)</b> <b>Location: Auditorium</b>	
3:00 pm	Creep Behaviour of Bentonite-Sand Mixture Subject to High Suctions Changing <i>Tomoyoshi Nishimura (Ashikaga University, Japan), I. Shahrour, H. Bian</i>
3:15 pm	Multiscale Simulation of THMC Couplings in Bentonite Clay Using a Soft Matter Physics Framework <i>Ian Bourg, Princeton University, USA</i>
3:30 pm	Coupled Hydro-Chemical-Mechanical Simulations of an Engineered Concrete Barrier in a Deep Geological Repository for Nuclear Waste <i>Sebastián González Fuentes (Spanish National Research Council (CSIC), Spain), M. Dentz, J.M. Soler, M. Mollaali, V. Montoya, V. Vilarasa</i>
3:45 pm	Stretch Break (15 minutes)
4:00 pm	Poster Session (see poster lineup on pages 6-8)
<b>Session Track B: Emerging Experimental and Computational Methods Across Geo-Applications I</b> <b>(Chair: Christophe Tournassat)</b> <b>Location: Salle Temple 1 + 2</b>	
3:00 pm	Derivation of THM Interactions from a Micro-Scale Perspective <i>Gary Couples (Heriot-Watt University, United Kingdom)</i>
3:15 pm	Evaluating Hydraulic, Mechanical and Chemical Fracture Apertures <i>Philipp Blum (Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany), S. Hale, M. Fuchs, T. Kling, F. Wendler, D. Jaeggi, L. Pastwaka</i>
3:30 pm	Characterizing a Rock Fracture Aperture's Spatial Continuity and its Effect on the Upscaled Distribution in Finite Element Method Meshes <i>Goncalo Cunha (University of Edinburgh, United Kingdom), C. McDermott</i>
3:45 pm	Stretch Break (15 minutes)
4:00 pm	Poster Session (see poster lineup on pages 6-8)
<b>Banquet Dinner</b>	
7:30 pm	Hôtel de Ville de Troyes - Salle des Fêtes <i>Alexander Square Israel, BP 767, 10000 Troyes</i>

## Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium

**Wednesday November 15, 2023**

Session Track A: Coupled Processes in Clay Rock II (Chair: Jianfu Shao)	
Location: Auditorium	
8:15 am	CIGEO Radioactive Waste Disposal Project – Thermomechanical Analysis of an ILW Storage Tunnel <i>Marco Camusso (Itasca Consultants SAS, France), M.N. Vu</i>
8:30 am	Influence of Rapid Heating on Porewater Pressurisation in Opalinus Clay and Callovo-Oxfordian Claystone <i>Jon Harrington (British Geological Survey, United Kingdom), E. Tamayo-Mas, A.C. Wiseall</i>
8:45 am	3-D Numerical Simulation of Structurally-Controlled Damage and Failure around an Opening in Faulted Opalinus Clay Shale at the Mont Terri Rock Laboratory <i>Martin Ziegler (ETH Zurich, Switzerland), C. Zhao, Q. Lei, S. Loew</i>
9:00 am	Lessons Learned from Geomechanical In Situ Testing of Fault Reactivation Processes in Opalinus Clay <i>Jens Birkholzer (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA), Y. Guglielmi, C. Nussbaum</i>
9:15 pm	Stretch Break (15 minutes)
Session Track B: Emerging Experimental and Computational Methods Across Geo-Applications II	
(Chair: Olaf Kolditz)	
Location: Salle Temple 1 + 2	
8:15 am	Gas Breakthrough and Migration across a Water-Saturated Compacted Bentonite Layer through Interface Instability <i>Yifeng Wang (Sandia National Laboratories, USA), T. Hadgu, K. Kuhlman, C. Jové-Colón, B. Faybishenko, J. Harrington, E. Tamayo-Mas</i>
8:30 am	Studying Water Infiltration on Bentonite/Sand Blocks with MRI and X-Ray $\mu$ CT Techniques <i>Pablo Elizaguirre (Andra / Navier Laboratory, France), A.M. Tang, M. Bomert, B. Maillat, P. Aïmedieu, R. Sidi-Boulouar, J.E. Gil, B. Chabot, J. Talandier, J.M. Pereira, P. Dangla, M.N. Vu</i>
8:45 am	Laboratory Observations of Reactivation of a Critically-Stressed Smooth Fracture in Granite Subjected to Short- and Relatively Long-Duration Heating <i>Changlun Sun (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea), L. Zhuang, J.S. Yoon, K.B. Min</i>
9:00 am	Modelling Thermally Induced Slip of Rock Fracture System: Comparison of Two Modelling Approaches – Bonded-Particles Based vs. Rigid-Blocks Based <i>Jeoung Seok Yoon (DynaFrax UG, Germany), C.H. Petterson, S.G. Hyun</i>
9:15 pm	Stretch Break (15 minutes)
Session Track A: Coupled Processes in Engineered Barrier Systems II (Chair: Patrik Sellin)	
Location: Auditorium	
9:30 am	The KOMPASS Projects – Investigations on Crushed Salt Compaction Processes <i>Larissa Friedenber (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Germany), J.Bean, J. Bartol, J.B. Coulibaly, O. Czaikowski, H.P. De Bresser, U. Düsterloh, S. Hangx, A.K. Gartzke, B. Laurich, C. Lerch, S. Lerche, W. Liu, C. Lüdeling, M.M. Mills, N. Müller-Hoeppel, T. Popp, O. Rabbel, M. Rahmig, B. Reedlunn, C. Rölke, N. Saruulbayar, C.J. Spiers, K. Svensson, J. Thiedau, B. Van Oosterhout, K. Zemke</i>
9:45 am	THM-Code Benchmarking in the Mont Terri FE-Modelling Task Force <i>Andres Alcolea (HydroGeoModels, Switzerland), J. Buchwald, I. Damians, S. Finsterle, A. Gens, L. Laloui, A. Madaschi, P. Marschall, S. Olivella, R. Schneeberger, H. Shao, W. Wang, M. Wojnarowicz</i>
10:00 am	Damage Behaviour of Callovo-Oxfordian Claystone Under Triaxial Loading <i>Hao Wang (Ecole des Ponts ParisTech, France), Y.J. Cui, M.N. Vu, J. Talandier</i>
10:15 am	Hydro-Mechanical Modelling of Bentonite Homogenisation <i>Peter Eriksson (SKB, Sweden)</i>
10:30 am	Coffee Break (30 minutes) – Location: Espace Champagne
Session Track B: Emerging Experimental and Computational Methods Across Geo-Applications III	
(Chair: Ki-Bok Min)	
Location: Salle Temple 1 + 2	
9:30 am	Development of CASRock for Modeling of Multiple Fractures Interactions in Hard Rock under Hydro-Mechanical Conditions <i>Peng-Zhi Pan (Chinese Academy of Sciences, China), W. Hou, Z. Wang</i>

## Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium

9:45 am	Machine Learning for the Optimization of THM Simulations of Nuclear Waste Repositories <i>Aldo Madaschi (Nesol - Numerical Engineering Solutions, Switzerland), M. Wojnarovicz</i>
10:00 am	TOUGH+ V2.0 with the TracerGasBrine V1.0 Option: A Code for the Simulation of Multiphase Transport of Solute and/or Gaseous Radioactive/Contaminant Tracers in Gas-Bearing Geologic Media <i>George J. Moridis (Texas A&amp;M University and Lawrence Berkeley National Laboratory, USA), M. Sentis, B. Graupner, P. Schade, A. Rinaldi</i>
10:15 am	Numerical Analysis of Irreversible Compaction and Sealing Integrity Caused by Thermo-Hydro-Elastoplastic Responses during CO <sub>2</sub> Injection into a Depleted Gas Reservoir <i>Ying Xin (Seoul National University, South Korea), H. Yoo, K.B. Min, J. Rutqvist</i>
10:30 am	Coffee Break (30 minutes) – Location: Espace Champagne
<b>Session Track A: Coupled Processes in Crystalline Rock (Chair: Adriana Palusny)</b> <b>Location: Auditorium</b>	
11:00 am	A Model for the Thermo-Mechanical Behaviour of Rock Joints <i>Son Nguyen (Canadian Nuclear Safety Commission, Canada)</i>
11:15 am	A Simplified Discrete Fracture Network Model for Shearing of Intersecting Fractures <i>Mengsu Hu (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA), J. Yoon, T. Sasaki, H. Liu, Z. Wang, J. Rutqvist, O. Kolditz, J. Birkholzer</i>
11:30 am	Long-term Thermoshearing of Rock Fracture in an HLW Repository, Can it be Reproduced in Laboratory Experiments? <i>Li Zhuang (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea), C. Sun, D.J. Youn, J.S. Yoon, K.B. Min</i>
11:45 am	Influence of Thermo Hydro and Mechanical Parameters in Presence of EDZ on Protozoic Malani Granitic Host Rock for Conceptual Indian GDS - Laboratory Investigation and Numerical Modelling <i>Binu Kumar (Homi Bhabha National Institute &amp; BARC, India), R.K. Bajpai, T.N. Singh</i>
12:00 pm	Fully Coupled THMC Interactions in Bentonite Engineered Barrier Systems <i>Chia-Wei Kuo (National Taiwan University, Taiwan), W.J. Kuo, T.P. Lee, T.T. Wang</i>
12:15 pm	Analysis of Thermal Slip Processes in a Laboratory Scale Fracture <i>Liangchao Zou (KTH Royal Institute of Technology, Sweden), Y. Jin, L. Zhuang, C. Sun, C. Yao, V. Cvetkovic</i>
12:30 pm	Lunch (1 hour) – Location: Espace Champagne
<b>Session Track B: Coupled Processes in Performance Assessment (Chair: Tara LaForce)</b> <b>Location: Salle Temple 1 + 2</b>	
11:00 am	Multi-Phase Flow Modeling at the Component Level for the Swiss Deep Geological Repository <i>Dominik Zbinden (INTERA Inc., Switzerland), U. Lengler, K. Luu, B. Shabani, C. Li, A. Papfotiou</i>
11:15 am	Long-term Evolution of Bentonite-Based Seals for Closure of a Radioactive Waste Repository in Claystone: A Hydro-Chemo-Mechanical Modelling Assessment <i>Andrés Idiart (Amphos 21, Spain), M. Laviña, J. Pelegrí, A. Pasteau, N. Michau, J. Talandier, B. Cochevin</i>
11:30 am	A Numerical Benchmark for Modeling a Large-Scale Repository in the Callovo-Oxfordian Claystone <i>Minh Ngoc Vu (Andra, France), G. Armand, M. Souley, V. Renaud, M. Alonso, J. Vaunat, A. Gens, Z. Yu, J.F. Shao, G. Corman, F. Collin, M. Camusso, D.P. Do</i>
11:45 am	Modelling Gas Transport on the Repository Scale within EURAD-GAS: Setup of a Numerical Non-Isothermal Multiphase-Multicomponent Model and First Results <i>Michael Pitz (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Germany), G. Zieffe, T. Schintgen, J. Maßmann, H. Kunz, T. Nagel</i>
12:00 pm	A Comparison of Performance Assessment Models and Methods in Crystalline Rock <i>Rosie Leone (Sandia National Laboratories, USA), C.C. Chang, J.W. Kim, J. Thiedau, O. Mikláš, J. Hyman, P. Mariner</i>
12:15 pm	Not Too Simple, Not Too Complex - In Search of a Goldilocks Model for a Salt Repository Whole-Systems Model <i>Alexander Bond (Quintessa Ltd, United Kingdom), S.J. Benbow, J. Nicholas</i>
12:30 pm	Lunch (1 hour) – Location: Espace Champagne
<b>Keynote (Chair: Jens Birkholzer)</b> <b>Location: Auditorium</b>	
1:30 pm	Keynote: On the HM and THM Behaviour of Argillaceous Rocks <i>Antonio Gens (Technical University of Catalonia, Spain)</i>

## Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium

<b>Plenary Session: Coupled Processes Across Scales (Chair: Gilles Armand)</b>	
<b>Location: Auditorium</b>	
2:15 pm	The Coupling of Stress, Strain, and Pore Pressure at Gas Entry in Opalinus Clay: The Gas Transport (GT) Laboratory and Field Study <i>Rob Cuss (British Geological Survey, United Kingdom), A. Wiseall, J. Gisiger, A. Rinaldi, E. Tamayo-Mas, C. Graham, M. Sentis, J. Harrington</i>
2:30 pm	Transport Regimes in Complex Discrete Fracture Networks <i>Philippe Davy (University of Rennes, France), R. Le Goc, C. Darcel, B. Pinier, J.O. Selroos, T. Le Borgne</i>
2:45 pm	Hydromechanical Response of a Large Clay Host-Rock Heated Volume: Preliminary Results from Borehole SIMFIP Tests Following the Callovo Oxfordian Clay Heating Experiment at Bure (Andra, France) <i>Yves Guglielmi (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA), G. Armand, C. Plúa, S. Van Gorp, S. Piot</i>
3:00 pm	Pre-Modelling of the Clay Barrier in the Inner Section of the Prototype Repository - Overview) <i>Patrik Sellin (SKB, Sweden)</i>
3:15 pm	Permeability of Complex Rocks - A Tribute to the Legacy of APS Selvadurai <i>Paul Selvadurai (ETH Zurich, Switzerland)</i>
3:40 pm	Coffee Break (20 minutes) – Location: Espace Champagne
<b>Panel Discussion: What is the Value of International Collaboration?</b>	
<b>Moderator: Alex Bond</b>	
<b>Location: Auditorium</b>	
4:00 pm	<p>This panel discussion will focus international collaboration initiatives in geologic disposal science. Panelists will briefly introduce the initiatives they are representing and will discuss their respective working practices and focus areas. Together with the audience, the panel will discuss the value of international collaboration and will review best practices for success.</p> <p>Panelists:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Christophe Nussbaum, swisstopo, representing the Mont Terri Project</li> <li>• Patrik Sellin, SKB, representing the SKB Task Forces</li> <li>• Louise Theodon, Andra, representing EURAD2</li> <li>• Bastian Graupner, ENSI, representing the NEA Clay Club</li> <li>• Karina Lange, IAEA, representing IAEA's initiatives</li> <li>• Jens Birkholzer, representing DECOVALEX</li> </ul>
<b>Closing Remarks</b>	
<b>Location: Auditorium</b>	
5:00 pm	Gilles Armand (Andra) and Jens Birkholzer (Lawrence Berkeley National Laboratory)
5:15 pm	Adjourn