

出國報告（出國類別：開會）

高放射性廢棄物設施 觀摩與討論會議

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：李在平 地質調查專員

康景翔 安全評估專員

派赴國家／地區：捷克、德國、瑞典

出國期間：108 年 04 月 07 日～

108 年 04 月 20 日

報告日期：108 年 05 月 30 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放射性廢棄物地下實驗室觀摩與討論會議

頁數 70 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/(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/地質調查專員/(02)2365-7210

康景翔/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：108 年 04 月 07 日 至 108 年 04 月 20 日

派赴國家/地區：捷克、德國、瑞典

報告日期：108 年 05 月 30 日

關鍵詞：地下實驗室、THMC、用過核子燃料最終處置

內容摘要：(二百至三百字)

DECOVALEX 為一項國際合作研究計畫，台電公司於 2016 年正式加入，與世界各先進國家就放射性廢棄物最終處置的技術進行跨國交流，並針對天然岩體與工程障壁材料內之熱力、水力、力學及化學耦合模式的理論與實驗進行研究。該計畫每半年定期召開會議，由各國代表針對最新研究成果進行討論。本次會議由捷克放射性廢棄物管理局 (SÚRAO) 主辦，並安排參訪 BUKOV 地下實驗室。會後則前往德國專責機構 BGE，雙方就目前處置推動近況進行簡報交流，洽談未來長期合作之機制，並觀摩中低放最終處置場 KONRAD。最後前往瑞典核燃料與廢料處理公司(SKB)，就目前發展中的離散裂隙網路分析驗證技術進行討論，並評估加入其目前籌組之跨國研究計畫之可能。

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

DECOVALEX 為一項大型國際合作研究計畫，台電公司因執行我國用過核子燃料最終處置計畫，於 2016 年正式加入 DECOVALEX-2019，與世界各先進國家就放射性廢棄物最終處置的技術進行跨國交流，並針對天然岩體與工程障壁材料內之熱力、水力、力學及化學耦合模式的理論與實驗進行研究。該計畫選定七項研究議題，每半年定期召開會議，由各國代表針對最新研究成果進行討論。本屆為第七次會議，由捷克放射性廢棄物管理局 (SÚRAO) 主辦，台電公司團隊共參加 Task-A 與 Task-D 兩個項目，本次研究成果與分析數據與各國相比皆有顯著進步，顯示多次的國際交流確實可有效提升我國技術水平，並對國際最新趨勢有更全面性的了解。大會亦安排參訪捷克廢棄鈾礦所改建的 Bukov 地下實驗室，了解捷克於 2017 年規劃設置的試驗與設備。

研討會後則應邀前往德國專責機構 BGE 拜會，雙方就目前處置推動近況進行簡報交流，並安排觀摩 Konrad 中低放最終處置場。德國 BGE 的專家概要說明德國目前高放選址的最新近況與法規基礎，對於我國現階段選址工作有相當大的參考價值。我方則就目前 SNFD2017 報告的階段成果及未來規劃進行說明與意見交換，德國專家亦對我國發展現況表達高度興趣，積極洽談未來長期合作之機制。此行最後則前往瑞典核燃料與廢料處理公司(SKB)，就目前發展中的離散裂隙網路分析驗證技術進行討論，並評估加入其目前籌組之跨國研究計畫(DFN Task Force)之可能。綜整本次出國參加會議與觀摩之成果，對於放射性廢棄物地下處置及相關領域的理論研究、工程實例、最新技術的方法與進展都有廣泛的收穫，相關成果將有助於我國高放射性廢棄物處置計畫之後續管理及推動參考。

目錄

摘要	I
目錄	II
壹、出國目的	1
貳、出國過程	2
參、工作內容	4
一、DECOVALEX-2019 第七次工作會議	4
(一)Task-A：Modelling gas injection experiments	10
(二)Task-D：Hydro-mechanical interactions in bentonite engineered barriers	16
(三)Task-E：Upscaling of modeling results from small scale to one-to-one scale	21
(四)管理會議	26
二、捷克 BUKOV 地下實驗室觀摩	28
三、拜會德國 BGE 及 KONRAD 地下實驗室觀摩	37
四、拜會瑞典 SKB	47
肆、出國心得	48
伍、建議	49
六、附錄	I
附錄 I. DECOVALEX-2019 第七次工作會議議程	I
附錄 II. DECOVALEX-2019 技術參訪行程	XII
附錄 III. BGE 會議及參訪行程	XIII

圖目錄

圖 1：DECOVALEX-2019 第七次會議旅館.....	7
圖 2：DECOVALEX-2019 第七次工作會議地點.....	7
圖 3：會議報到櫃台.....	8
圖 4：會議會場.....	8
圖 5：會議會場.....	9
圖 6：會議會場.....	9
圖 7：與會人員合照.....	10
圖 8：氣體遷移機制.....	10
圖 9：TASK-A 氣體灌入試驗設備與示意圖.....	11
圖 10：各團隊所使用的水-力模型.....	12
圖 11：各團隊所使用的數值模型.....	13
圖 12：各團隊在模擬過程中不同參數之不確定性.....	13
圖 13：各團隊成果比較(徑向應力).....	14
圖 14：各團隊成果比較(軸向應力).....	14
圖 15：各團隊成果比較(孔隙水壓).....	15
圖 16：各團隊成果比較(氣體體積).....	15
圖 17：TASK-D EB 試驗設計示意圖.....	16
圖 18：TASK-D FEBEX 試驗設計示意圖.....	17
圖 19：TASK-D FEBEX 試驗各團隊之分析工具與選用理論.....	17
圖 20：TASK-D FEBEX 試驗階段 3 各團隊成果比較(溫度).....	18
圖 21：TASK-D FEBEX 試驗階段 3 各團隊成果比較(相對溼度).....	19
圖 22：TASK-D FEBEX 試驗階段 3 各團隊成果比較(系統拆除後相關數據).....	19
圖 23：TASK-D FEBEX 試驗階段 4 各團隊成果比較(溫度).....	20

圖 24：TASK-D FEBEX 試驗階段 4 各團隊成果比較(相對溼度).....	20
圖 25：法國 CIGÉO 處置場.....	22
圖 26：TASK-E 階段研究目標.....	22
圖 27：TASK-E 第二階段 TED 實驗規劃.....	23
圖 28：TASK-E 第三階段 ALC 實驗規劃.....	23
圖 29：TASK-E 第四階段工作規劃.....	24
圖 30：TASK-E 各團隊之模式設定.....	24
圖 31：TASK-E 各團隊之模式設定(續).....	25
圖 32：TASK-E 各團隊成果比較.....	25
圖 33：TASK-E 各團隊成果比較(續).....	26
圖 34：DECOVALEX-2019 國際研討會公告.....	27
圖 35：SÚRAO BUKOV 地下實驗室行政中心暨接待中心.....	30
圖 36：ROŽNÁ MINE 的舊礦場大門口.....	30
圖 37：SÚRAO 地質專家 JAN SMUTEK 針對 BUKOV 地下實驗室進行簡報.....	31
圖 38：原礦坑及 BUKOV 地下實驗室位置圖.....	31
圖 39：BUKOV 地下實驗室坑道設計及設施配置圖.....	32
圖 40：BUKOV 地下實驗室之安全宣導.....	32
圖 41：MAREK VENCL 說明礦坑運送主機與限速器.....	33
圖 42：BUKOV 地下實驗室地表設施入口.....	33
圖 43：BUKOV 地下實驗室電梯.....	34
圖 44：搭乘電梯進入到地下實驗室.....	34
圖 45：BUKOV 地下實驗室主通道.....	35
圖 46：BUKOV 地下實驗室周圍岩體.....	35
圖 47：水文監測井及流量計.....	36
圖 48：表面滲流監測.....	36

圖 49：BGE 討論會議.....	38
圖 50：與 BGE 專家合影.....	38
圖 51：KONRAD 處置場地下構造示意圖.....	39
圖 52：KONRAD 處置場外的抗議裝飾.....	40
圖 53：KONRAD 處置場電梯.....	40
圖 54：電梯抵達深度.....	41
圖 55：專用車輛與個人緊急呼吸設備.....	42
圖 56：參訪 KONRAD 中低放廢棄物處置場的全體合照.....	42
圖 57：KONRAD 處置場地下設施介紹.....	44
圖 58：泥岩層中隧道開挖與支撐.....	44
圖 59：KONRAD 運轉裝載設施施工情形.....	45
圖 60：KONRAD 處置場運轉裝載設施用隧道.....	45
圖 61：KONRAD 處置場處置深度之聯絡隧道.....	46
圖 62：KONRAD 處置場處置隧道.....	46
圖 63：SKB 水文地質專家合影.....	47

表目錄

表 1：出訪行程及工作內容.....	3
表 2：DECOVALEX-2019 各項研究之參與單位.....	6

壹、出國目的

台電公司依法執行我國用過核子燃料最終處置計畫，應長期技術發展需求與管制機關原能會之建議，近年相當積極接洽世界各國之放射性廢棄物處置專責機構，除洽談技術交流與合作機制外，更嘗試參與國際大型之相關研究計畫。其中工程障壁與天然母岩的熱力-水力-力學-化學(Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical, THMC)耦合現象之分析為處置場安全評估核心技術，因此自 2016 年加入 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments)計畫後，台電公司即固定每半年協同研究團隊一起參與工作研討會議，本次會議主要就 Task-A：氣體灌入試驗模擬，與 Task-D：膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合分析項目進行成果發表。

高放射性廢棄物的最終處置，目前國際普遍認為其安全評估應以確保一百萬年不影響人類環境為目標，故多採用地面下約 300 至 1000 公尺深的地質處置方式，以達到與生物圈長期隔離的安全功能。由於地下深處的地質環境不確定性高，又因各地的環境不同而有極高的異質性，因此各國多以設立地下實驗室的方式進行處置技術的研究與驗證。我國地下實驗室的相關發展起步較晚，故參考觀摩各國設施的推動方式與試驗規劃將有助於我國未來相關工作的推展。

台電公司目前已完成我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(SNFD2017 報告)之審查，此行受德國放射性廢棄物處置專責機構(BGE)的國際合作部門(BGE technology gmbh)邀請，就 SNFD2017 報告內容以及處置計畫下階段的研發重點進行說明，並尋求未來可能的合作機會。會後則前往瑞典核燃料與廢料處理公司(SKB)，就目前發展中的離散裂隙網路分析驗證技術進行討論，並評估加入其目前籌組之跨國研究計畫(DFN Task Force)之可能。

貳、出國過程

自 108 年 04 月 07 日出發，迄 04 月 20 日返國(共計 14 天)。04 月 09 日至 04 月 12 日全程參加於捷克布拉格舉辦之 DECOVALEX 第七次工作研討會議，偕同計畫團隊國立中央大學的代表進行成果簡報，並參與下一期 DECOVALEX-2023 規劃討論會議，提出台電公司的技術發展需求，會後則安排觀摩捷克的 Bukov 地下實驗室。04 月 14 日赴德國漢諾威，沿途中轉法蘭克福。04 月 15 日與本公司同仁簡國元課長、俞舜文專員會合後，一同前往德國 BGE TECHNOLOGY 的辦公室進行交流。會中由職二人分別就我國核能發電的現況、SNFD2017 報告內容，以及我國用過核子燃料最終處置計畫下階段技術發展的規劃方向進行簡報，雙方並討論未來可能合作的機制，對於簽訂雙方合作意向書都有極高的共識。04 月 16 日由 BGE 安排觀摩其 Konrad 放射性廢棄物最終處置場，行程結束後當日則立即前往機場，準備前往瑞典。翌日，則應瑞典 SKB 之邀請，與多位專家進行技術交流會議，順利完成本次出國之規劃與所有任務。04 月 18 日返程，夜宿阿姆斯特丹等候轉機，於 04 月 20 日返抵台灣。出訪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
04 月 07 日(日)	臺北到捷克布拉格	往程
04 月 08 日(一)		
04 月 09 日(二)	捷克布拉格	參加 DECOVALEX 工作會議
04 月 10 日(三)		
04 月 11 日(四)		
04 月 12 日(五)		Bukov 地下實驗室觀摩
04 月 13 日(六)		資料處理
04 月 14 日(日)	德國漢諾威	路程
04 月 15 日(一)	德國漢諾威	德國 BGE 進行技術討論
04 月 16 日(二)	德國漢諾威	德國 Konrad 放射性廢棄物 最終處置設施觀摩
04 月 17 日(三)	瑞典斯德哥爾摩	與瑞典 SKB 進行技術討論
04 月 18 日(四)	荷蘭阿姆斯特丹	返程
04 月 19 日(五)	荷蘭阿姆斯特丹到臺北	返程
04 月 20 日(六)		

叁、工作內容

一、DECOVALEX-2019 第七次工作會議

DECOVALEX 大型研究計畫自 1992 年由瑞典發起，並與多個國家共同籌組，成員包括處置計畫的執行者與管制單位，規劃以國際合作的方式進行研究，針對工程障壁與天然岩體等特定議題進行耦合試驗與分析模式的開發，透過不同團隊間的平行驗證，進一步確認理論的正確性，並提高分析模式的可信度。

DECOVALEX 計畫每四年為一期，台電公司於 2016 年加入 DECOVALEX-2019，本次主要參與 Task-A 氣體灌入試驗模擬與 Task-D 膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合分析二個項目，本期則共計有七個研究議題，分別為：

- Task-A : Modelling gas injection experiments (ENGINEER)
- Task-B : Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock
- Task-C : Groundwater recovery experiment in tunnel (GREET)
- Task-D : Hydro-mechanical interactions in bentonite engineered barriers (INBEB)
- Task-E : Upscaling of modelling results from small scale to one-to-one scale
- Task-F : Fluid inclusion and movement in tight rock (FINITO)
- Task-G : EDZ evolution in sparsely fractured competent rock

本次工作會議由捷克放射性廢棄物管理局 (SÚRAO) 主辦，為期三天，地點為捷克布拉格的 Hotel Ambassador (圖 1、圖 2、圖 3、圖 4、圖 5、圖 6)。由於舉辦地點在歐洲，非會員之鄰近國家亦派出觀察員列席，如比利時的國家放射性廢棄物管理專責機構(ONDRAF/EURIDICE)等。正式出席單位則包括：法國國

家放射性廢棄物管理局(ANDRA)、德國聯邦地球科學與自然資源研究院(Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, BGR)、加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)、美國能源部(Department of Energy, DOE)、美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)、瑞士核能管制機構(Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI)、法國輻射防護暨核能安全研究所(Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, IRSN)、日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)、加拿大放射性廢棄物管理機構(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)、英國核子除役管理機構(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)所屬放射性廢棄物管理單位(Radioactive Waste Management, RWM)、瑞典輻射安全局(SSM)、捷克放射性廢棄物最終處置場管理局(Radioactive Waste Repository Authority, SÚRAO)、德國亥姆霍茲環境研究中心(Helmholtz Centre for Environmental Research, UFZ)以及台電公司等團隊(圖 7)，各單位參與的研究項目如表 2，會議相關議程詳見附錄 I。

表 2：DECOVALEX-2019 各項研究之參與單位

FO\Task	A	B	C	D	E	F	G
Task Lead	BGS	ENSI	JAEA	UPC	ANDRA	BGR/UFZ	SSM
BGR/UFZ	BGR/UFZ	BGR/UFZ			UFZ/BGR	BGR/UFZ	
DOE	SNL & LBNL	LBNL	SNL		LBNL	SNL	SNL
ENSI		ENSI					
JAEA			JAEA	JAEA			
KAERI	KAERI	KIGAM		KAERI			
RWM	Quintessa				Quintessa		
SÚRAO			TUL	IGN			TUL/IGN
<i>IRSN</i>	<i>IRSN</i>			<i>IRSN</i>			
CNSC	CNSC	CNSC					
SSM							Geomecon & SNU
NWMO					NWMO		
ANDRA	UPC				ANDRA		
TaiPower	NCU/TP			NCU/TP			

註：UPC 為西班牙加泰隆尼亞理工大學(Universitat Politècnica de Catalunya)

BGS 為英國地質調查所(British Geological Survey)

TUL 為捷克利貝雷茨科技大學(Technical University of Liberec)

IGN 為捷克 Institute of Geonics of the CAS

NCU 為我國國立中央大學(National Central University)



圖 1：DECOVALEX-2019 第七次會議旅館



圖 2：DECOVALEX-2019 第七次工作會議地點



圖 3：會議報到櫃台



圖 4：會議會場



圖 5：會議會場



圖 6：會議會場



圖 7：與會人員合照

(一)Task-A：Modelling gas injection experiments

地下處置場內可能存在多種機制產生氣體，例如裝置用過核子燃料廢棄物罐的腐蝕產物、地下水的輻射水解、放射性核種衰變，或微生物分解等作用。這些氣體可以透過平流與擴散的機制向外遷移(圖 8)，當氣體逐漸累積至臨界壓力，即可能對緩衝材料的安全功能帶來負面的影響，因此氣體遷移行為的研究對於工程障壁的性能評估是相當重要的一項工作。

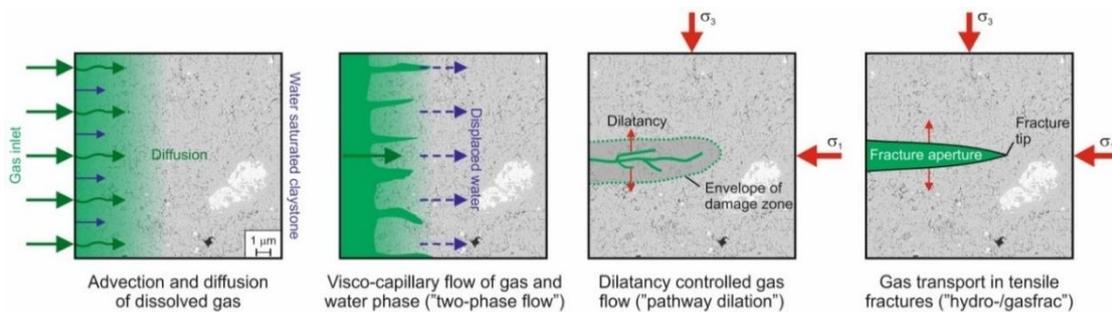


圖 8：氣體遷移機制

資料來源：工作會議簡報

英國地質調查所(BGS)為研究氣體遷移機制，規劃使用壓密後的 MX-80 膨潤土，在良好控制的實驗室環境下，以氦氣進行灌入試驗(圖 9)。Task-A 的目標即根據此試驗之數據，進一步了解控制氣體在不透水材料內平流傳輸的行為，相關成果也可以應用在頁岩氣開採、二氧化碳封存等領域。

Task-A 共分四個階段，準備階段(Stage 0)主要為分析工具與程式的開發；第一階段(Stage 1)量測氣體通過容器內飽和膨潤土的通量，先將氦氣由容器左側灌入，再於右側裝設氣體監測設備，因此實驗條件可視為簡化的一維遷移分析；第二階段(Stage 2)改由容器中央灌入氣體，分析三維空間中氣體的遷移行為；第三階段(Stage 3)則規劃將實驗室的分析模型進一步擴展到天然的泥岩樣本中，並進行三軸試驗，蒐集有關初始水合、水力試驗與氣體注入等資料，完成模型方法(如連續、異質性、結構模型等)、模型特徵(1D 或 3D、計算方法、網格等)、邊界條件、參數不確定等數值模擬分析。

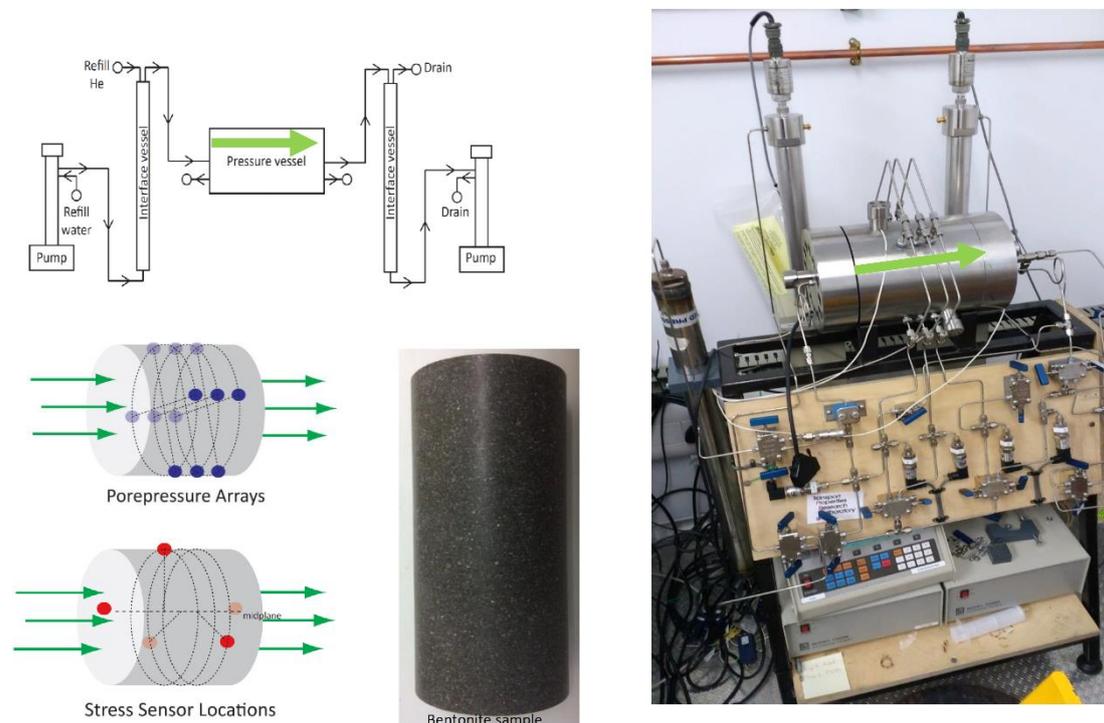


圖 9：TASK-A 氣體灌入試驗設備與示意圖

資料來源：工作會議簡報

台電團隊由國立中央大學(NCU)執行，使用程式為該團隊自行研發的 THMC 耦合分析工具，水的部分採用模擬雙相流(two-phase flow)的模組，以及適用黏彈性(visco-elastic)材質的力學模組(圖 10)，模式相關設定如圖 11，輸入參數類別與不確定性的控制如圖 12。與上一次會議相比，分析成果已有較顯著的改善，模式預測的整體趨勢也逐漸符合實驗的觀測結果。由於本次會議已接近 DECOVELX-2019 計畫尾聲，團隊負責人英國地質調查所(BGS)的 Jon Harrington 將各團隊之成果進行綜合比較，並依據各階段的相關輸出結果包括徑向應力、軸向應力、孔隙水壓等進行討論，各團隊之比較如圖 13、圖 14、圖 15、圖 16。

Hydro-mechanical models

Team	Model	Heterogeneity?	Mechanical model	Hydraulic model
BGR/UFZ	Continuous	No	elasticity	two-phase
CNSC	Continuous	Yes (random initial porosity)	elasto-plasticity + damage	two-phase
KAERI	Continuous	No	damage	two-phase
LBNL-C	Continuous	No	elasticity	two-phase
LBNL-D	Discontinuous	No	damage + fractures	two-phase
NCU/TPC	Continuous	No	visco-elasticity	two-phase
Quintessa/RWM	Continuous + capillary opening	No	elasticity	single gas phase
UPC/Andra	Continuous + embedded fractures	Yes (random intrinsic permeability)	elasticity + dilatancy	two-phase

Please note: not all have provided the information requested which complicates analysis and is important to maximise the impact of the Task

© NERC All rights reserved



圖 10：各團隊所使用的水-力模型

Numerical models: different technical features

Team	Test geometry						Time stepping		
	Dimension		Method	type of elem		# nodes			
	1A	2A		1A	2A	1A	2A	1A	2A
BGR/UFZ	2D symm	3D	FE	tri	hex.	≈ 1.500	≈ 5.500	Not reported	
CNSC	2D axisym. + 3D		FE	tri. tet.	tri. tet.	≈ 1.000 ≈ 31.000	≈ 2.000 ≈ 500.000	Not reported	
KAERI	3D		FE	hex.	tet.	≈ 8.000		$\Delta t \leq 1$ d	
LBNL-C	3D		FD	hex.		≈ 25.000		$0.001 \text{ d} \leq \Delta t \leq 1$ d	
LBNL-D	3D		FV + lattice	polyhedral		≈ 1.500	≈ 8.000	Not reported	
NCU/TPC	3D		FE	hex.		≈ 8000		$0.001 \text{ d} \leq \Delta t \leq 0.1$ d	
Quintessa/RWM	1D	2D axisym	FV	cells		≈ 20	≈ 100	Not reported	
UPC/Andra	3D		FE	hex.		≈ 8000		$0.1 \text{ d} \leq \Delta t \leq 1.5$ d	$0.01 \text{ d} \leq \Delta t \leq 1.5$ d

FE: finite element; FD: finite differences; FV: finite volume
Tri: triangles; Hex: hexahedra; Tet: tetrahedra

© NERC All rights reserved



圖 11：各團隊所使用的數值模型

Numerical models: different parameter uncertainty

Team	# parameters to be calibrated	Parameters
BGR/UFZ	5	Intrinsic capillary pressure, intrinsic permeability, initial saturation curve of gas and water for the van Genuchten, Young's modulus, Biot factor
CNSC	18	Air-Entry Value, Coefficient of the Klinkenberg Effect, damage parameters (x2), plastic values (x10), swelling Stress Calibration Parameters (x4)
KAERI	5	Tensile strength, residual tensile strength, tensile strain limit, maximum damage value, maximum damaged permeability
LBNL-C	4	Swelling coefficient, maximum aperture for stress, reference stress, Corey relative permeability
LBNL-D	2	Swelling coefficient, Corey relative permeability
NCU/TPC	7	Elastic parameters, viscous parameters (x4), intrinsic permeability, gas compressibility
Quintessa/RWM	12	Gas breakthrough values (x3), shut-in parameters for Stage 1A (x4), post-breakthrough values (x2), permeability values (x3)
UPC/Andra	12	Biot's coefficient, intrinsic permeability values (x4), van Genuchten values (x2), relative permeability values (x3), maximum saturation of gas, elastic dilatancy

There are some parameters (calibrated or assumed known) with a wide range of values: e.g. Biot's coefficient range from 0.3 to 1.

What does this tell us about the models - how can they be compared?

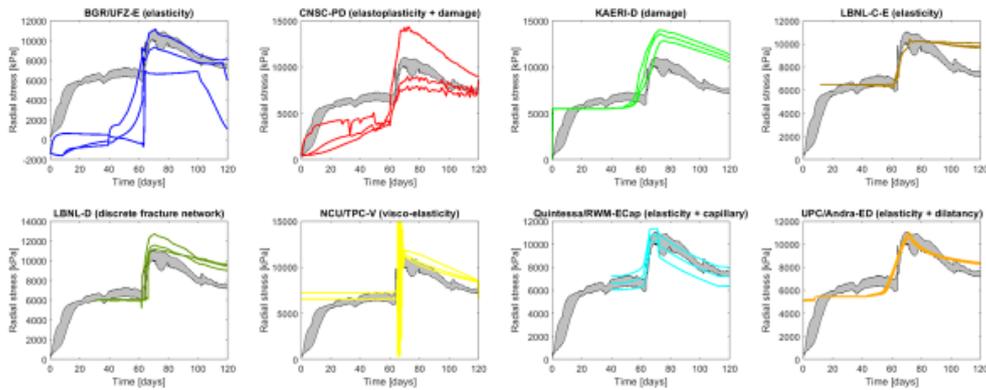
© NERC All rights reserved



圖 12：各團隊在模擬過程中不同參數之不確定性

資料來源：工作會議簡報

Stage 1A (1D flow): radial stress



Similar results as the ones presented in Seoul.

Quiescence: some teams obtain good initial values while others still underpredict them.

Gas breakthrough: timing and value is still wrongly captured in general (good: within +/- 2 days, reasonably good: within +/- 4 days).

Peak values: some teams correctly capture the peak values.

Negative decay: most of the teams predict a correct decay.

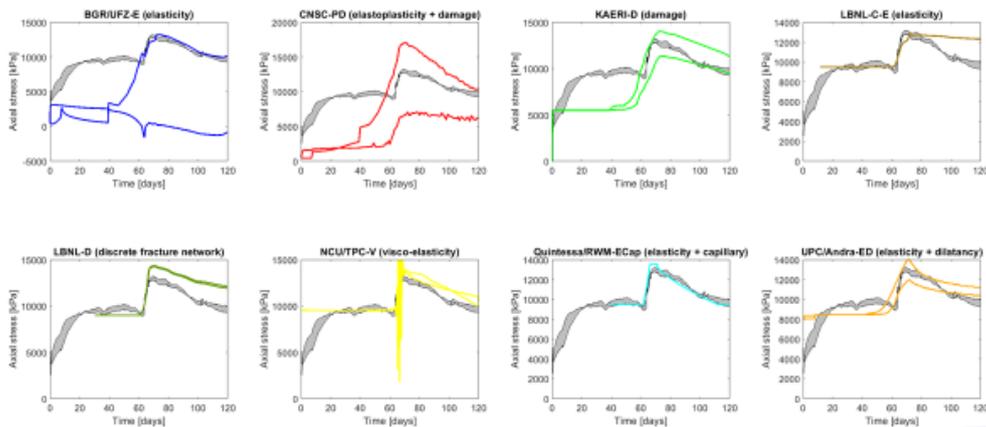
Note that even if the same mechanical behaviour is considered, the output is different (meshing, time/stepping, boundary conditions, etc... all vary between models which make comparison very difficult).

© NERC All rights reserved



圖 13：各團隊成果比較(徑向應力)

Stage 1A (1D flow): axial stress



Similar results in terms of axial stress.

Quiescence: some teams obtain good initial values while others still underpredict them.

Gas breakthrough: timing and value is still wrongly captured in general (good: within +/- 2 days, reasonably good: within +/- 4 days).

Peak values: some teams correctly capture the peak values.

Negative decay: most of the teams predict a correct decay.

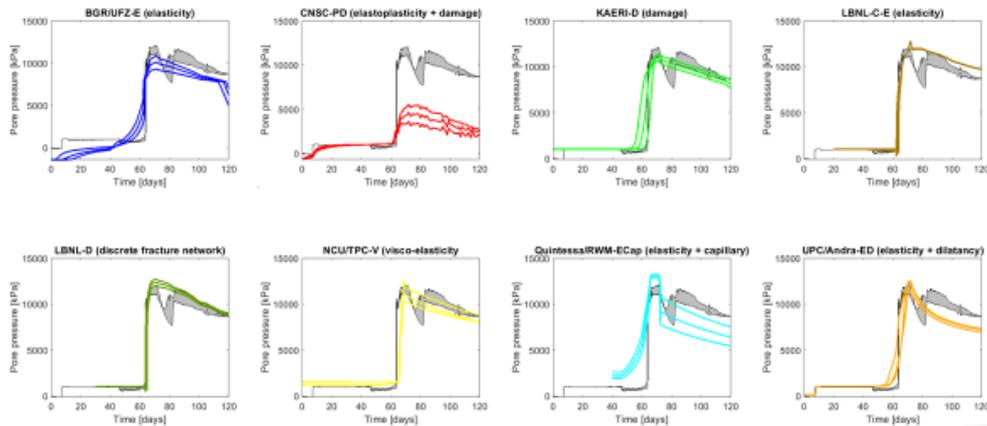
© NERC All rights reserved



圖 14：各團隊成果比較(軸向應力)

資料來源：工作會議簡報

Stage 1A (1D flow): pore pressure



Similar results as the ones presented in Seoul.

Quiescence: good initial values are in general obtained.

Gas breakthrough: timing and value is still wrongly captured in general (good: within +/- 2 days, reasonably good: within +/- 4 days).

Peak values: some teams correctly capture the peak values.

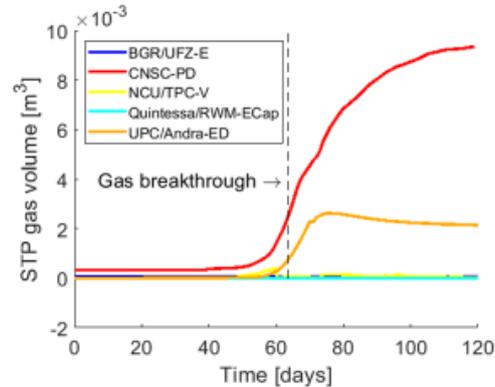
Negative decay: most of the teams predict a correct decay.

© NERC All rights reserved



圖 15：各團隊成果比較(孔隙水壓)

Stage 1A (1D flow): model differences (gas volume)



Model	Final STP gas volume [m ³]	Number of moles [mol]	Final gas volume [m ³]	Gas saturation
BGR/UFZ-E	6.00E-05	2.68E-03	7.02E-07	0.47%
CNSC-PD	9.35E-03	4.17E-01	1.09E-04	73.27%
NCU/TPC-V	3.97E-05	1.77E-03	4.65E-07	0.31%
Quintessa/RWM-ECap	1.02E-11	4.57E-10	1.20E-13	0.00%
UPC/Andra-ED	2.14E-03	9.55E-02	2.50E-05	16.77%

© NERC All rights reserved



圖 16：各團隊成果比較(氣體體積)

資料來源：工作會議簡報

(二)Task-D：Hydro-mechanical interactions in bentonite engineered barriers

Task-D 所使用的數據來自於兩個現地試驗，分別是瑞士 Mont Terri 地下實驗室的 EB 試驗(圖 17)，與瑞士 Grimsel 地下實驗室進行的 FEBEX (Full-scale high level waste engineered barriers)試驗(圖 18)。Mont Terri 地下實驗室周圍的母岩為 Opalinus 黏土，EB 試驗使用大型加熱器等溫加熱下方的膨潤土塊，上方則填滿膨潤土粒料，人工注水，試驗為期 10.5 年，同時量測廢棄物罐的位移量，緩衝材料相對濕度、孔隙水壓等參數，觀察膨潤土的 HM 耦合作用。Grimsel 地下實驗室周圍的母岩則為花崗岩，試驗長達 18 年，同樣在膨潤土塊中央置放加熱器，自然飽和，但變溫觀測各項參數長期的變化，研究 THM 的耦合作用。

Task-D 主要分為 4 階段，階段 1: 依據 EB 長年的水化測試與監測系統所得之數據進行建模;階段 2: 根據數據進行計算與預測障壁的狀態;階段 3:對 FEBEX 前 5 年加熱階段測試之結果進行建模;階段 4: 依據 FEBEX 實驗結束之結果進行模擬。本次會議主要就階段 3 的成果更新，以及階段 4 的最新成果進行比較。

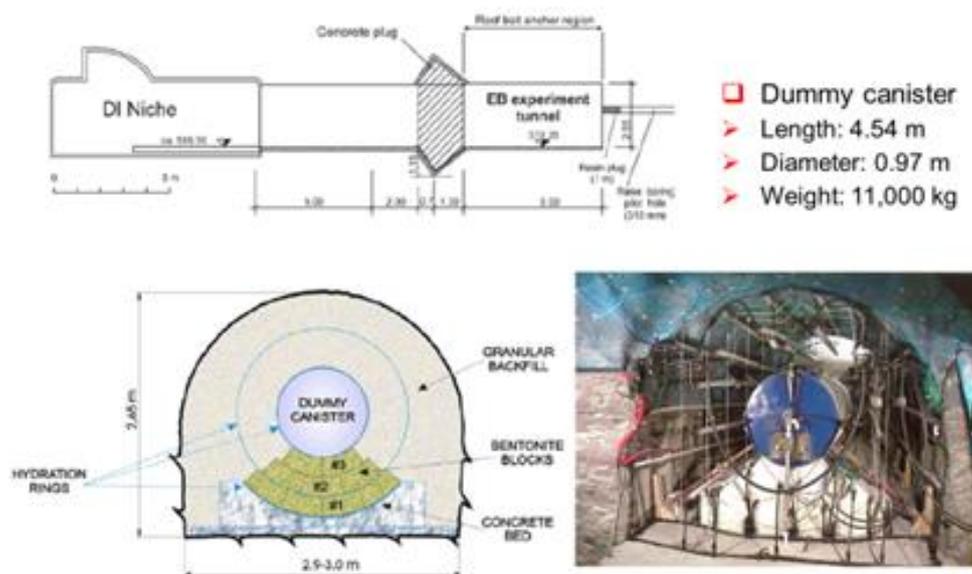


圖 17：Task-D EB 試驗設計示意圖

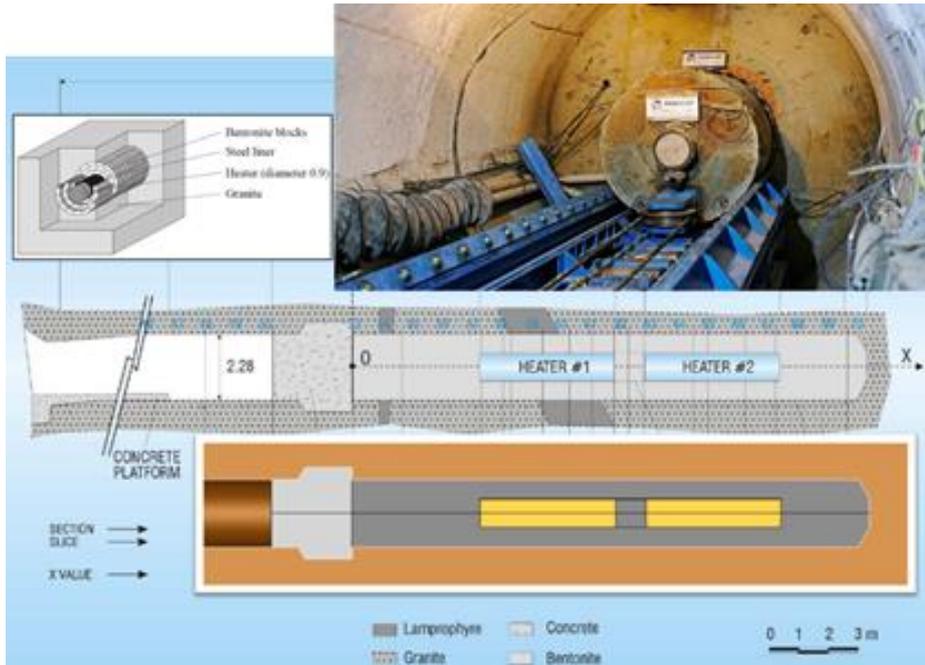


圖 18：Task-D FEBEX 試驗設計示意圖

Task-D 的團隊負責人為西班牙加泰隆尼亞理工大學(UPC)的 Antonio Gens，本次會議主要探討 FEBEX 實驗加熱器表面功率、相對濕度、溫度與總應力隨時間的變化，以及加熱器拆除後，緩衝材料的乾密度、飽和度和含水量的分布情形。各國團隊所使用的分析工具與網格設定如圖 19。

TASK D: INBEB (Stages 3 and 4)

□ Formulation, code and constitutive laws

Team	Formulation	Code/Model	Retention curve	Intrinsic permeability	Mechanical const. law
IGN	Richards' equation + vapour+mechanics	COMSOL 2D	Van Genuchten (mod.)	$2.5 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ (est.)	Non linear elastic + swelling term
JAEA	Unsaturated flow + mechanics	THAMES 3D DAC SAR 2D	Van Genuchten (mod.)	$8 \times 10^{-21} \text{ m}^2$	Unsaturated elasto-plastic model
KAERI	Unsaturated flow + mechanics	TOUGH2-MP FLAC 3D	Van Genuchten	$0.25 \times 10^{-21} \text{ m}^2$	BBM + elasticity
NCU	Unsaturated flow + mechanics (uncoupled)	HGC 5.3/3D	Van Genuchten (mod.)	$2 \times 10^{-21} \text{ m}^2$	Linear elasticity + swelling term

圖 19：Task-D FEBEX 試驗各團隊之分析工具與選用理論

依照進度，本次會議應完成階段 3 前五年加熱運轉階段，以及第五年系統拆除後各量測數據的變化情形。國立中央大學團隊(NCU)參考第六次會議的成果將模型修正後，其溫度計算結果已與實驗數據的變化趨勢相符(圖 20)，但相對溼度的分析成果則仍與其他國家團隊存在差異，需要進一步探討原因(圖 21)。階段 4 部分，相關溫度變化的結果如圖 23，各團隊的結果相近，但加熱器周圍的相對濕度差異則較大(圖 24)，模式擬合的結果並不如預期。

Task D: INBEB. Stage 3, performance: temperatures

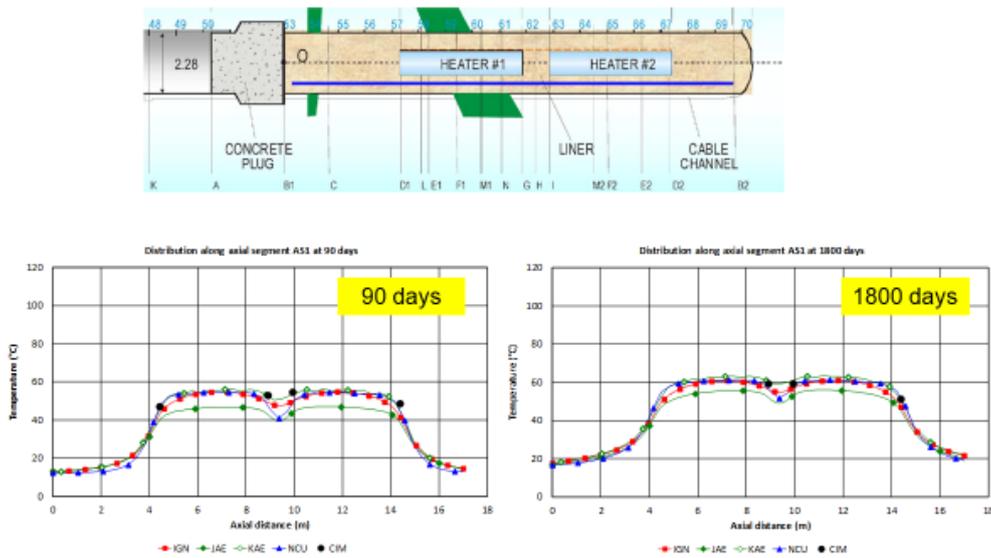


圖 20：Task-D FEBEX 試驗階段 3 各團隊成果比較(溫度)

Task D: INBEB. Stage 3, performance: relative humidity

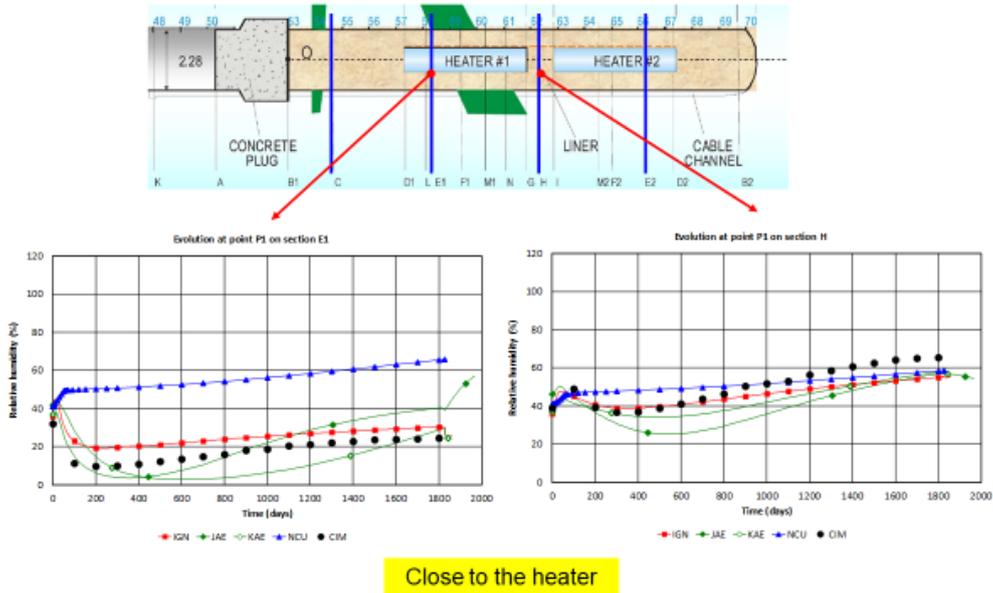


圖 21：Task-D FEBEX 試驗階段 3 各團隊成果比較(相對溼度)

Task D: INBEB. Stage 3, dismantling

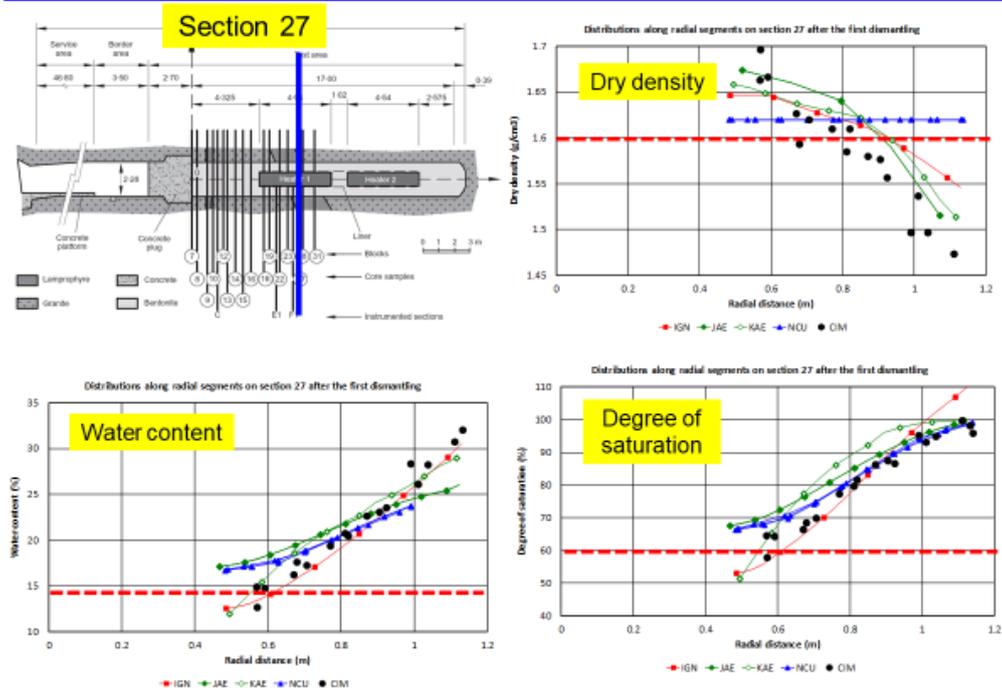


圖 22：Task-D FEBEX 試驗階段 3 各團隊成果比較(系統拆除後相關數據)

資料來源：工作會議簡報

Task D: INBEB. Stage 4, performance: temperatures

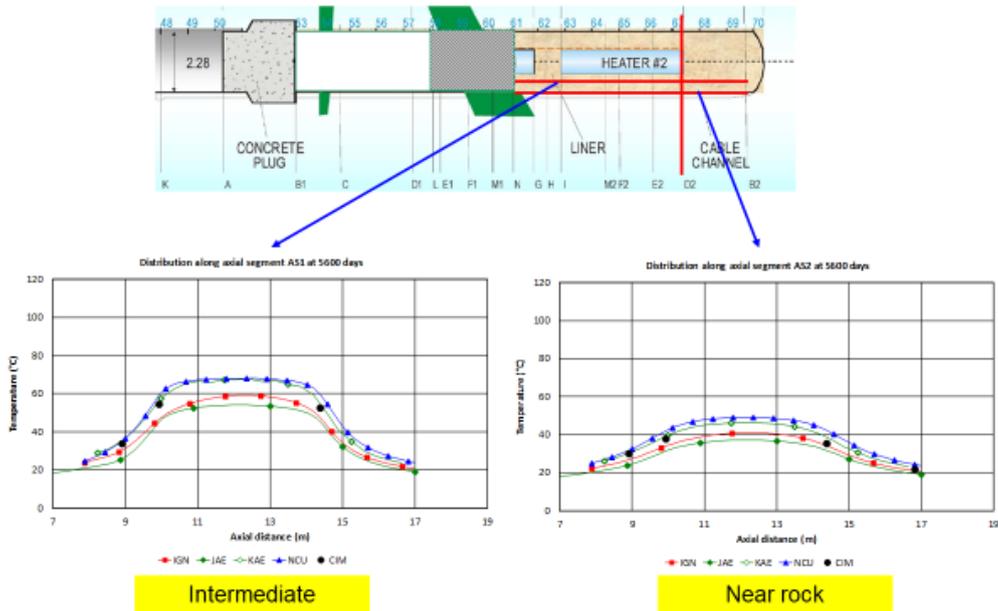


圖 23：Task-D FEBEX 試驗階段 4 各團隊成果比較(溫度)

Task D: INBEB. Stage 4, performance: relative humidity

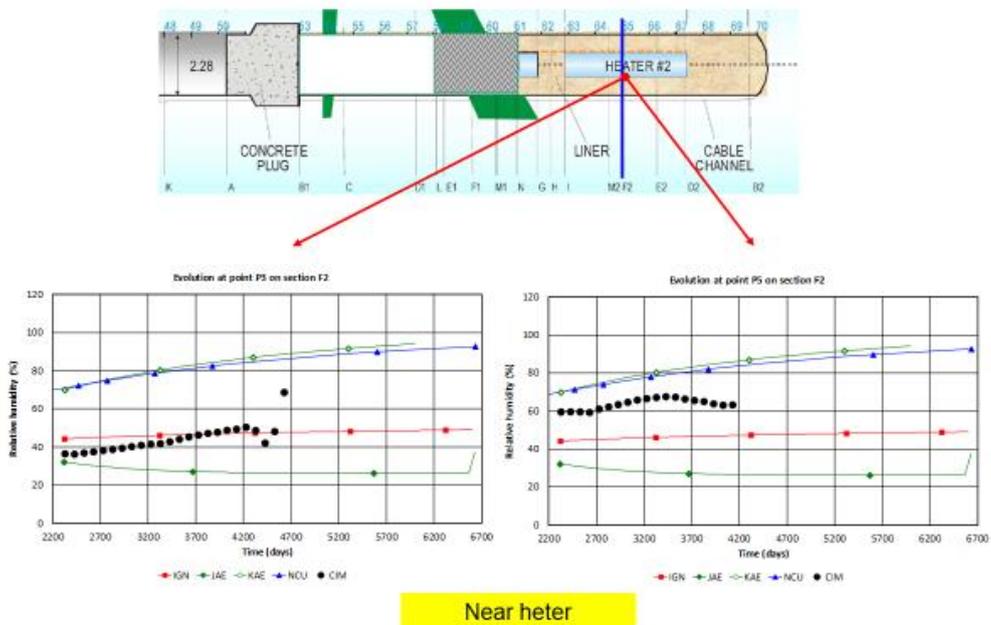


圖 24：Task-D FEBEX 試驗階段 4 各團隊成果比較(相對溼度)

資料來源：工作會議簡報

(三)Task-E : Upscaling of modeling results from small scale to one-to-one scale

法國位於巴黎盆地東邊的 Cigéo 處置場 (圖 25), 處置場規劃建立於 500 公尺深, 採水平處置方式, 其處置母岩為 Callovo-Oxfordian 黏土層(COx), 其優點有(1)非常低的導水係數;(2)相當小的分子擴散及(3)對核種有非常強的遲滯能力。本項實驗目的主要探討孔隙壓力、孔內總壓力變化及孔內周圍之應力場變化。台電團隊目前雖未執行此項研究, 但本次仍參與該議題之工作會議, 評估未來合作之可能。

Task-E 共分 4 個階段執行(圖 26), 並有六個單位參與(LBNL、Qutintessa、BGR、NUMO、LaMCU3E、ANDRA)。第一階段進行 3 維 THM 模型的校驗, 將模擬結果與解析解進行比較。第二階段進行較小規模的現地實驗(TED experiment), 主要目的為瞭解熱水力在粘土中的行為模式(圖 27)。第三階段進行較大規模的現地實驗(ALC experiment), 以得到更接近實際處置場的結果(圖 28)。第四階段為這次模擬分析之重點, 主要進行處置場尺寸的模型建立與分析(Repository scale), 應建立 2D 與 3D 之全尺寸模型, 分析 THM 參數之變異性及近/遠場 THM 之關係與影響(圖 29)。各國團隊所建立的模型如圖 30、圖 31。

第四階段試驗部分, 各國團隊依照進度應完成模擬 100 年加熱加壓後之變化趨勢, 其模擬分析成果比較如圖 32、圖 33, 可發現各團隊在溫度及孔隙壓力之模擬趨勢皆符合實驗值, 但因 2D 及 3D 網格介面及建模方式不同, 導致各團隊在成果展現上皆有某種程度上之誤差, 會中建議未來應該先定義網格大小, 並且限定各團隊網格改變之容許範圍為 5%, 針對模型介面交界也該給予更多的限制。

Introduction. Cigéo repository



圖 25：法國 Cigéo 處置場

Introduction. Objective

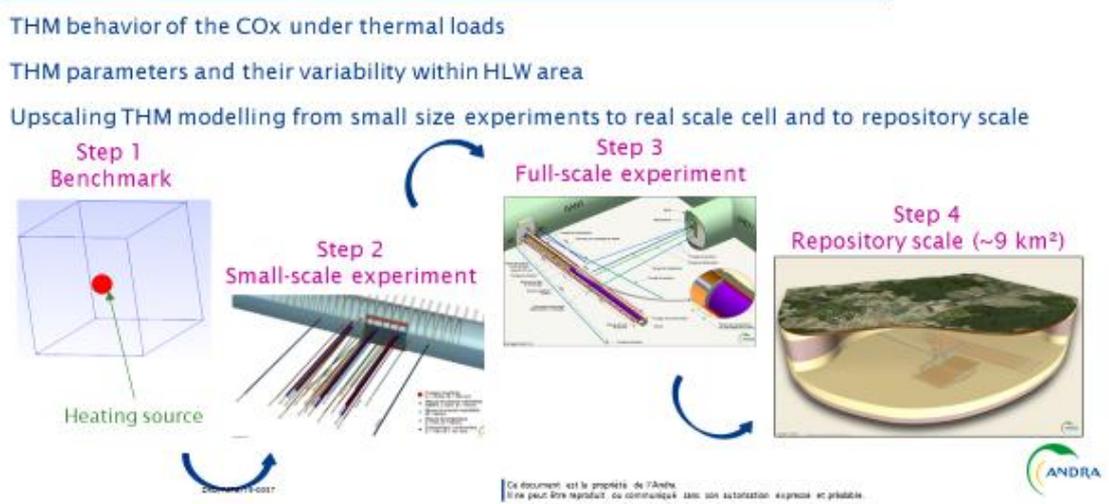
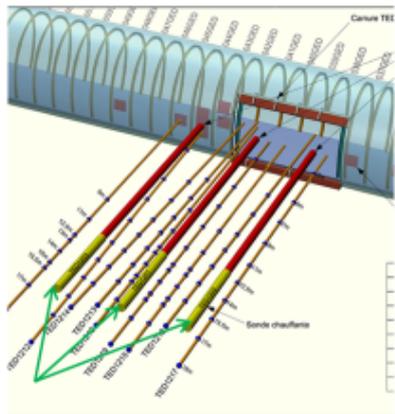


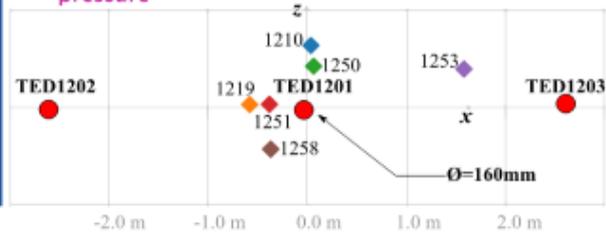
圖 26：Task-E 階段研究目標

資料來源：工作會議簡報



Step 2. TED experiment

- Small-scale in-situ heating experiment
- Interpretative modeling
- Calibrate THM parameters to satisfy in-situ observations in terms of temperature and pore pressure

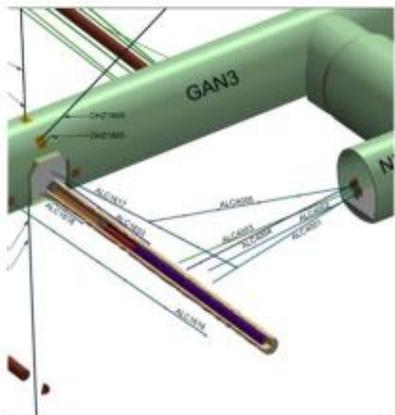


DEI/MFR/19-0017

Ce document est la propriété de l'Andra. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

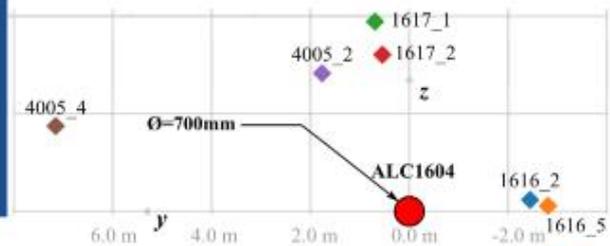


圖 27：Task-E 第二階段 TED 實驗規劃



Step 3. ALC experiment

- Full-scale heating experiment
- Blind prediction with THM parameters calibrated from TED experiment
- Focus on the near field



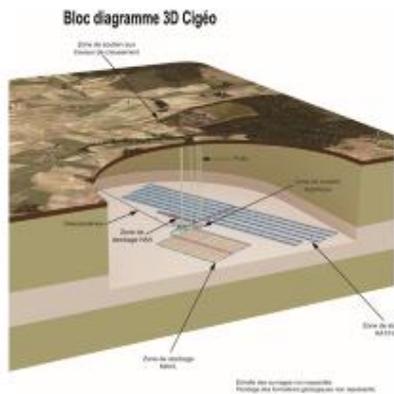
DEI/MFR/19-0017

Ce document est la propriété de l'Andra. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.



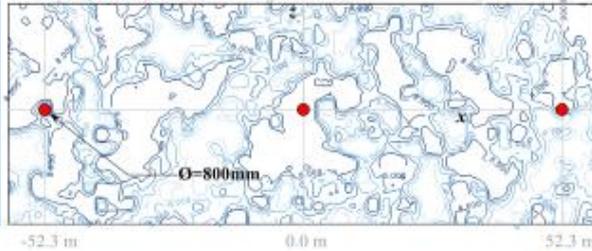
圖 28：Task-E 第三階段 ALC 實驗規劃

資料來源：工作會議簡報



Step 4. Repository scale

- 2D/3D models of several HA cells
- Spatial variability of the THM parameters
- Influence of the near-field behavior on the far-field THM response



DECI/MFR/19-0017

Ce document est la propriété de l'Andra. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.



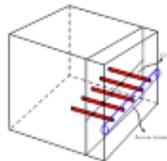
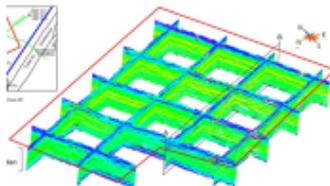
圖 29：Task-E 第四階段工作規劃

Task progress. Step 4 - Repository scale

LBNL

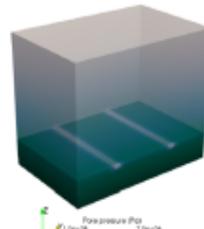
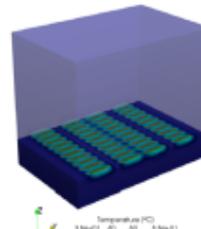
Connected 2D slice model with refined mesh and detailed geological heterogeneity

Simulate a detailed cell model surrounded by coarse mesh of other domain.



UFZ-BGR

Comparison of 2D & 3D conceptual models
Homogeneous parameters



DECI/MFR/19-0017

Ce document est la propriété de l'Andra. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.



圖 30：Task-E 各團隊之模式設定

資料來源：工作會議簡報

Task progress. Step 4 - Repository scale

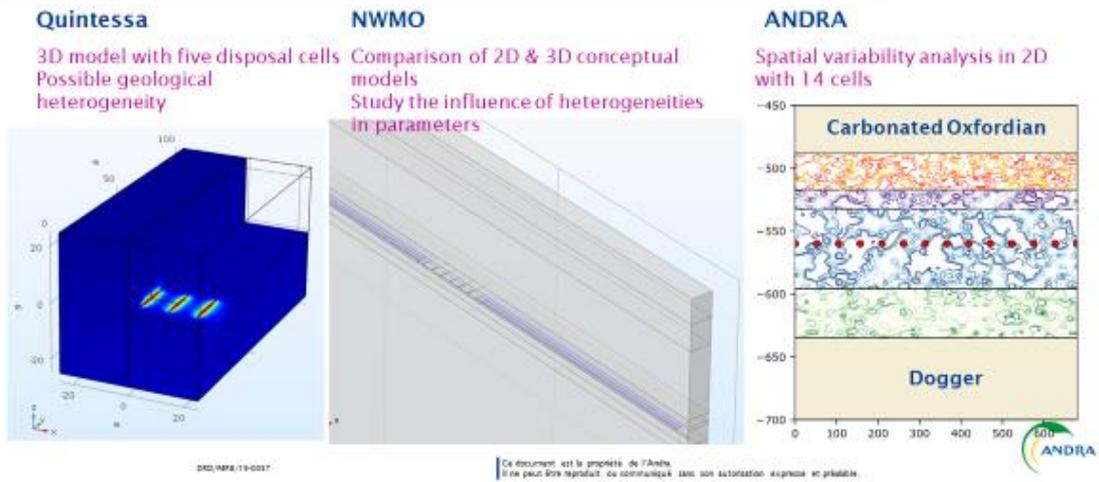


圖 31：Task-E 各團隊之模式設定(續)

Step 4. Two different types of response (peak)

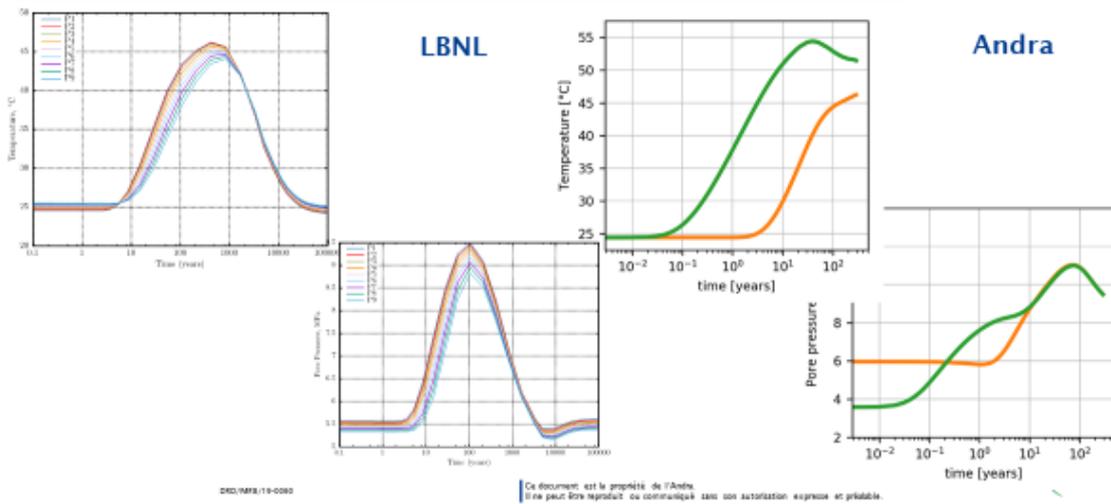


圖 32：Task-E 各團隊成果比較

資料來源：工作會議簡報

Step 4. Two different types of response (no peak)

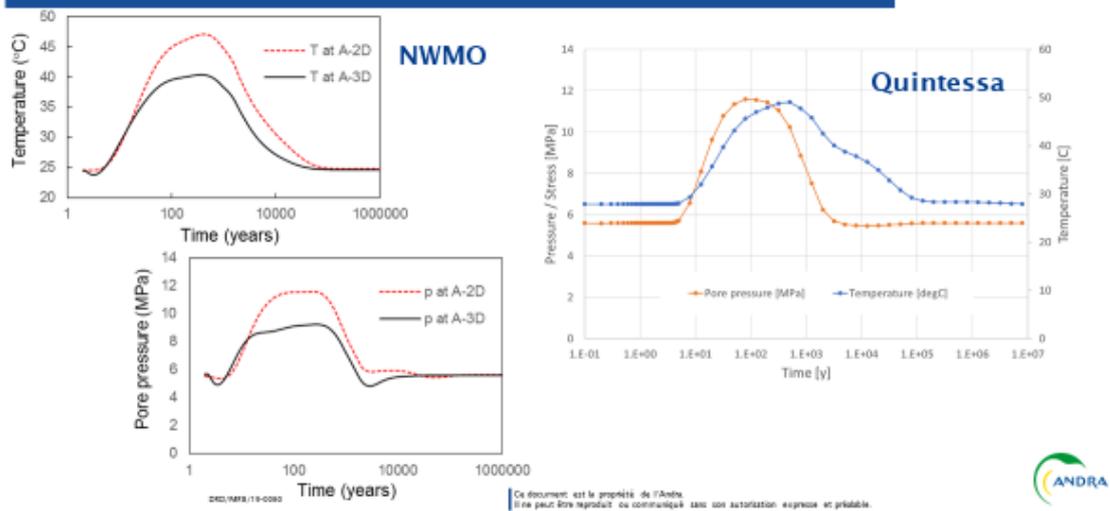


圖 33：Task-E 各團隊成果比較(續)

(四)管理會議

管理會議由台電公司李在平博士代表參加，會議中 DECOVALEX 主席 Jens Birkholzer 代表各團隊再次感謝主辦捷克放射性廢棄物最終處置場管理局 (SÚRAO)，並就第八次工作會議將擴大舉辦成國際研討會的形式進行討論(圖 34)，DECOVALEX-2019 計畫的最終會議決議在瑞士蘇黎世的近郊，並由瑞士核能管制機構(ENSI)主辦，時間暫定於 2019 年 11 月 4 日，並規劃參訪瑞士目前正在進行的現地鑽井與試驗。因第八次會議將擴大為研討會形式，考量與會人數將分成兩個地點舉行，11 月 4 日至 5 日為研討會，11 月 6 日至 7 日為工作會議。會議中並就研討會註冊費的補助形式、論文審查委員、論文公開形式都作了意見交換與確認，也決議將整合 DECOVALEX 過去的研究成果，發行 25 周年的紀念論文，並資助公開費用讓全世界免費參閱，分享重要的最新發現。

**DECOVALEX
2019
SYMPOSIUM**
Brugg, Switzerland
November 4-5, 2019



HOME PROGRAM VISITOR INFO SUBMISSION & REGISTRATION COMMITTEES

DECOVALEX 2019 Symposium

Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes in geological systems are critically important to the performance and safety assessment of geologic disposal systems for radioactive waste and spent nuclear fuel. Understanding of such processes is also essential for a number of other subsurface engineering processes, including mining, geothermal exploration, geological carbon sequestration, energy storage, and oil and gas production. The **DECOVALEX 2019 Symposium on Coupled Processes in Radioactive Waste Disposal and Subsurface Engineering Applications** invites you to the beautiful city of Brugg, Switzerland, November 4-5, 2019. Located about 28 kilometers from Zürich, Brugg is known for its historic center developed along a narrow gorge of the river Aare. This open symposium will feature internationally recognized keynote speakers and researchers focusing on coupled processes, including computational methods, lab experiments, and in situ tests. The symposium will also provide exciting insights from the current phase of the **DECOVALEX project**, an international collaboration for advancing the understanding of coupled THMC processes in a geological system.

Subject Areas

- Coupled processes in argillite
- Coupled processes in crystalline
- Coupled processes in salt
- Engineered barrier systems and engineered-natural material interactions
- Fundamental microscale processes
- Emerging experimental and computational methods
- Incorporation of coupled processes in performance assessment
- Cross-cutting coupled processes analysis in various geo-applications

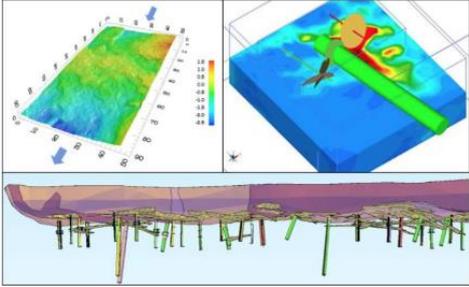


圖 34：DECOVALEX-2019 國際研討會公告

DECOVALEX-2019 即將結束，會議中主要針對各單位下一期 DECOVALEX-2023 所提出的構想進行討論與投票，因提案眾多且票數分散，日本 JAEA 更表示僅願意參加自己所提案的幌延(Horonobe)地下實驗室項目，主席一時之間無法決議，故保留至下一次會議再定案，但各團隊已有共識，下一期計畫將維持 7 個研究議題，因此部分提案將被整併與放棄。會議中並針對我方下一期的參與形式進行專案討論，目前因我國受限於國際情勢，無法與 DECOVALEX 的主辦單位美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)直接簽約，討論後決議維持目前與第三方合作的參與方式。

二、捷克 Bukov 地下實驗室觀摩

本次主辦單位 SÚRAO 於會議結束後安排 04 月 12 日前往捷克共和國 Vysočina 州的 Bukov 村的地下實驗室(Underground Research Facility, URF)進行參訪。上午七點於會議旅館前集合出發，搭乘大會安排的巴士，車程約兩個小時，首先抵達 Rožná Mine 的舊礦場，也是目前 SÚRAO 行政中心暨接待中心(圖 35、圖 36)。接著由 SÚRAO 地質專家 Jan Smutek 進行簡報及說明實驗規劃、場區地質調查的資料與環境條件、初步驗證成果等開發計畫(圖 37)。

捷克放射性廢棄物選址作業規劃從 1992 年開始，選址過程亦遭遇民眾抗爭而改變策略；於 2013 年至 2016 年已就 7 個候選場址進行地表之地質調查工作，目前規劃在 2020 年將篩選出 4 個候選場址，並於 2020 年至 2025 年經詳細調查後篩選出 2 個候選場址，並從中決定最終處置場址，擬於 2065 年開始運轉。

Bukov 地下實驗室的所在岩層為結晶岩，過去為天然鈾礦場，整體設施深達 1000 公尺(圖 38)。礦場廢棄後由 SÚRAO 進行一系列有關用過核子燃料處置之實驗性規劃，於 2013 年開始在地表下約 550 公尺處，開設長度約 90 公尺的實驗用坑道(圖 39)，2015 年針對周圍區域地質進行特性調查，於 2017 年進行水力、傳輸、岩石力學等試驗並開始長期監測。

進入地下實驗室的坑道前，由地質師 Marek Vencel 負責介紹整個礦場之歷史與入隧道前之安全宣導，並展示全世界服役最久且最大的礦坑運送電梯系統與限速器(圖 40、圖 41)。地下實驗室的入口距離接待中心約 15 分鐘車程，抵達地表設施入口後，搭乘過去礦坑沿用的雙層電梯進入地下實驗室，該電梯每層僅能裝載 4 人 (圖 42、圖 43、圖 44)。

Bukov 地下實驗室的周圍岩層以強度高的結晶岩或變質火成岩為主，其僅需要岩栓、架設鋼支保或是噴漿就可以維持穩定(圖 45、圖 46)。目前執行項目包

括地質、岩石學和岩石物理特徵的研究、水文地質參數的確定、岩芯的光譜分析、地震監測、岩石樣本的分析 and 岩石的地質力學等研究，並分析不同深度的空間特性分佈，發展三維結構與地質模型，以利提供後續在研究深層地質處置的長期安全性和技術可行性。現地應力的測量方面，有安裝孔內側向壓力試驗儀以量測周遭應力狀態的變化。水文監測方面，在整個試驗坑道中共有 3 個監測井、6 個地表滲流監測和 36 個地下監測點，可供流量監測及水文地球化學等研究，並分析該地點存在的水的組成、來源和區域水系(圖 47、圖 48)。



圖 35：SÚRAO Bukov 地下實驗室行政中心暨接待中心



圖 36：Rožná Mine 的舊礦場大門口



圖 37：SURAO 地質專家 Jan Smutek 針對 Bukov 地下實驗室進行簡報

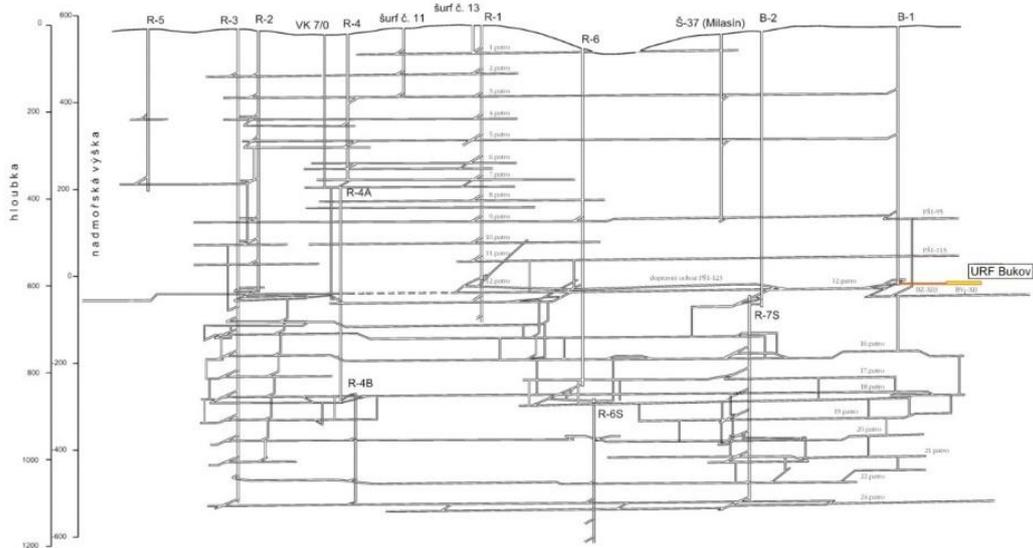


圖 38：原礦坑及 Bukov 地下實驗室位置圖

資料來源：<URF Bukov 官網> <https://www.pvpbukov.cz/en/home-page/>

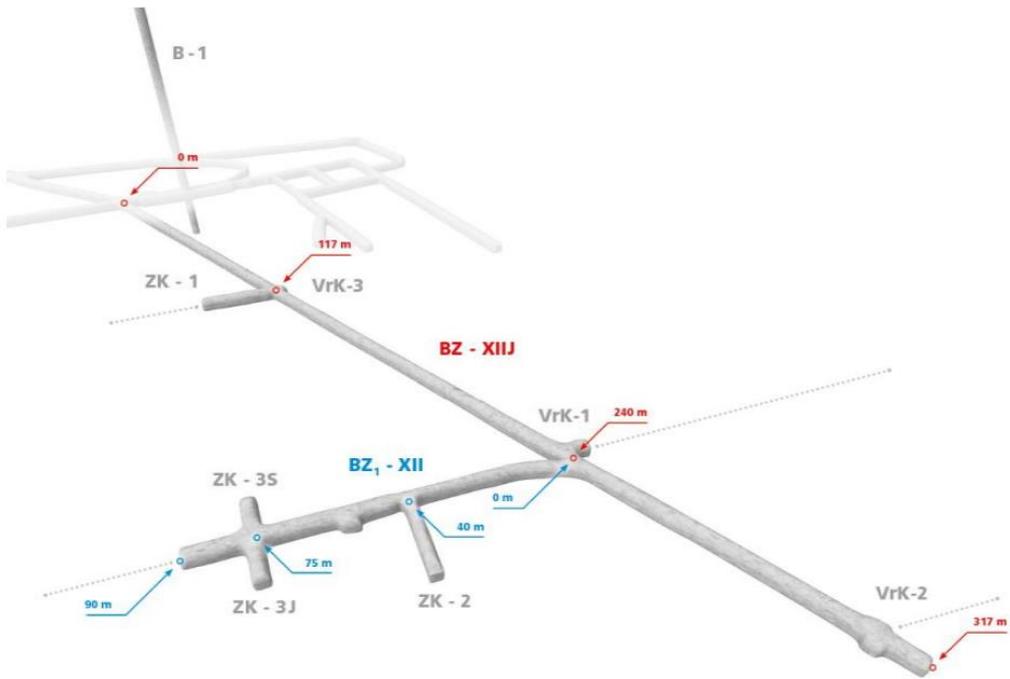


圖 39：Bukov 地下實驗室坑道設計及設施配置圖

資料來源：<URF Bukov 官網> <https://www.pvpbukov.cz/en/home-page/>



圖 40：Bukov 地下實驗室之安全宣導



圖 41：Marek Venci 說明礦坑運送主機與限速器



圖 42：Bukov 地下實驗室地表設施入口



圖 43：Bukov 地下實驗室電梯

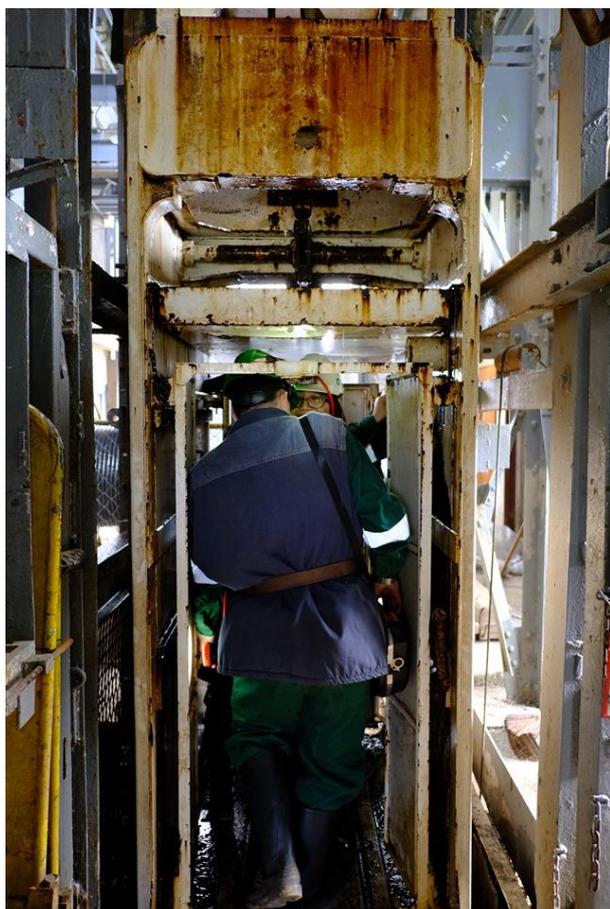


圖 44：搭乘電梯進入到地下實驗室



圖 45：Bukov 地下實驗室主通道



圖 46：Bukov 地下實驗室周圍岩體



圖 47：水文監測井及流量計



圖 48：表面滲流監測

三、拜會德國 BGE 及 Konrad 地下實驗室觀摩

BGE 為德國的放射性廢棄物處置專責機構，BGE TECHNOLOGY GmbH 則為其下的技術單位，由過去自 2000 年所成立的 DBE TECHNOLOGY GmbH 所改制納入，提供國內外公共和民間客戶相關的科學、技術和管理經驗，以拓展國際發展之目的作為出發點。目前 BGE TECHNOLOGY GmbH 的任務包括國內研究與發展、國際合作與顧問、支援 BGE 特定專業知識的技術研究項目等，並參與國際組織內的工作團隊，如 IAEA、NEA 等。BGE TECHNOLOGY GmbH 總部設立於德國漢諾威(Hannover)旁的派內(Peine)小鎮，員工人數約 30 人。

本次會議由台電公司康景翔專員與李在平博士分別就我國最終處置計畫之近況、SNFD2017 技術內容與未來規劃進行簡報，BGE TECHNOLOGY GmbH 專家也以專題簡報方式與我方分享德國在處置方面的最新進展(圖 49)。執行長 Thilo v. Berlepsch 博士首先概要說明該公司目前的發展項目，如設施封閉技術、長期安全評估、深層地質處置場設計、近地表處置場設計、工程技術與特殊地質條件的解決方案等。此外，也針對過去從 DBE 延續至今還在執行的研究案進行介紹，展現該公司在國際上的競爭力。Wolfram Rühaak 博士則說明 BGE 的選址過程，介紹如何依靠地質調查之方式選擇場址，由於過去德國盛產鐵礦，國家境內已有相當豐富的基本地質調查資料，再利用排除法的方式將斷層、火山、地震敏感區、高抬升率地區進行篩選，最後搭配地下水傳輸、岩石結構、岩石力學、氣體傳輸、水化學等具有科學可靠性的證據來進行更進一步的評估。在工程設計方面，則由 Michael Jobmann 博士與我們分享 BGE 目前在結晶岩之最新工程設計概念，主要參考瑞典的 KBS3-V 進行改進。



圖 49：BGE 討論會議

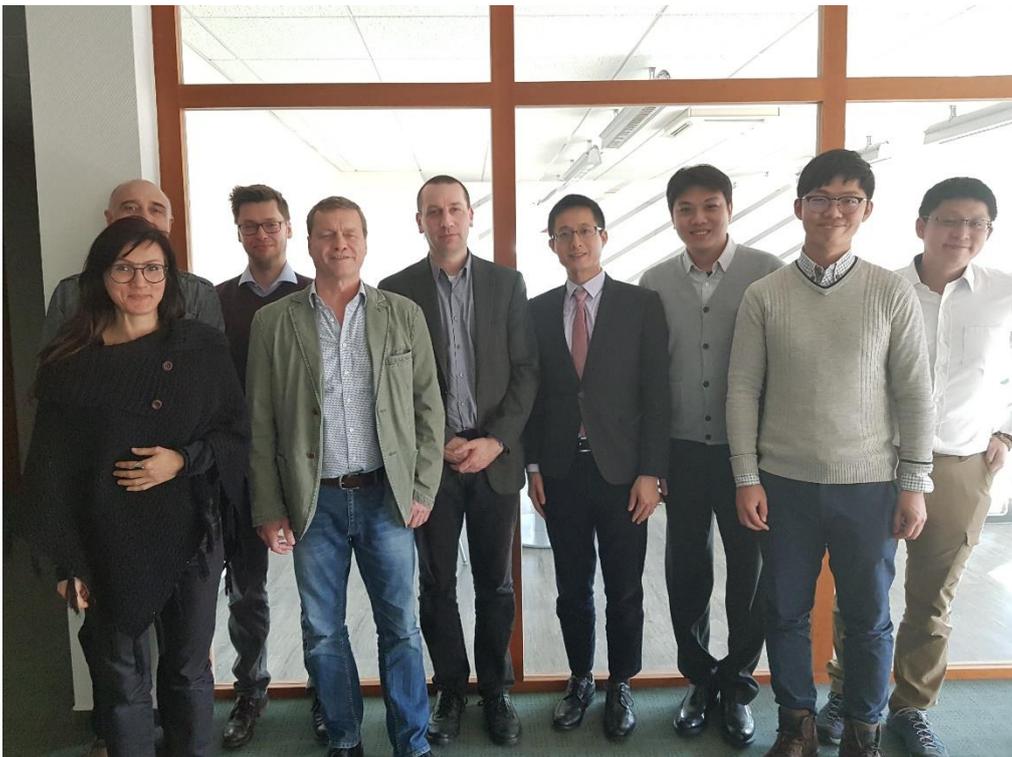


圖 50：與 BGE 專家合影

Konrad 處置場是德過第一個根據德國核子法律許可的放射性廢棄物處置場，位於 Salzgitter (Lower Sazony)，所處地層為沉積岩，過去曾經是重要的鐵礦床，直至 1976 年開採作業停止後，德國即針對該處之地質架構與合適性進行相當長時間之調查與研究，並決定 Konrad 將成為中低放射性廢棄物的最終處置場場址。依照目前處置場的規劃及舊有礦坑結構，整個礦區共有六層，各層之深度垂直距離約 100 公尺，深度範圍自 800 至 1,300 公尺，預估將處置 303,000 立方公尺的放射性廢棄物，目前處置場仍在建造中(圖 51)。

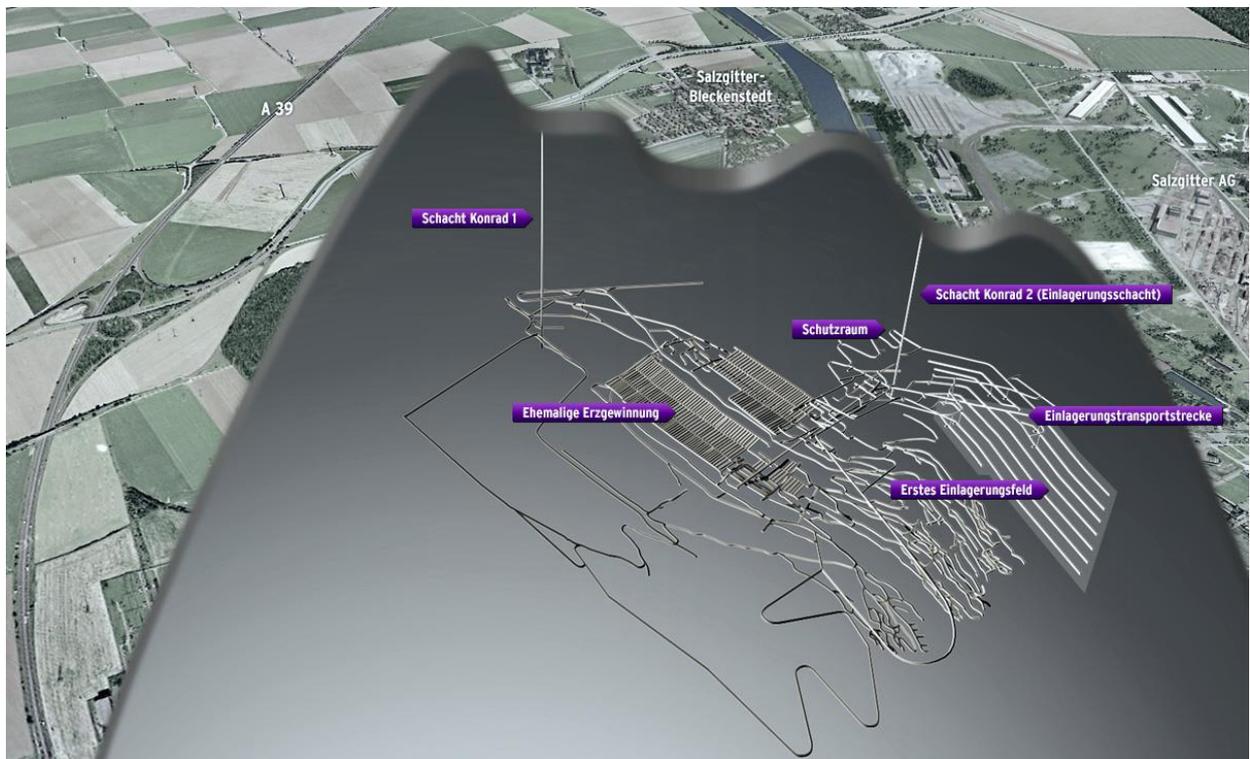


圖 51：Konrad 處置場地下構造示意圖

資料來源：<Konrad 官網> <http://www.endlager-konrad.de>

參訪行程由 BGE 的專家 Niklas 安排並進行導覽，德國雖然已透過法定程序完成本設施之選址與興建，但處置場周圍仍可看見地方民眾所設立之抗議看板與裝飾(圖 52)，顯示德國過去也確實經過一番努力，才能夠在國內取得共識，更需要長期與地方民眾溝通，才能創造社會都能接受的解決方案。



圖 52：Konrad 處置場外的抗議裝飾



圖 53：Konrad 處置場電梯

因 Konrad 已是興建中的處置場，與捷克的 Bukov 地下實驗室相比，電梯規模差異極大(圖 53)，可搭乘 30 人並與機具同時垂降至深度 1000 公尺(圖 54)。因處置場仍在施工，環境風險較高，必須全程搭乘專用車輛並背掛個人用緊急呼吸設備。前往地下主要設施的通行過程中，空氣品質相當不好，環境溫度受到地溫梯度的影響更可達 30 度以上，參訪過程中深刻體驗地下礦工與工程人員的辛苦(圖 55、圖 56)。



圖 54：電梯抵達深度



圖 55：專用車輛與個人緊急呼吸設備



圖 56：參訪 Konrad 中低放廢棄物處置場的全體合照

Konrad 處置場選定過去的鐵礦床位置為目標，其上主要為早白堊紀的泥岩層，因此提供相當良好的阻水環境。目前處置場所規劃的運轉裝載設施就位於此深度，但因泥岩的強度較低且容易變形，工程施作的困難度較高，因此需要裝設大量的岩栓，並採用特殊的支撐工法來穩定隧道周圍，德國 BGE 對其工程設計相當自豪，刻意安排多作停留與介紹(圖 57、圖 58、圖 59)。

由於處置場仍在興建，實際放置放射性廢棄物的坑道目前仍未開放參觀，但可以抵達目標深度的鐵礦床(圖 60、圖 61)。BGE 的 Niklas 在現場表示，Konrad 處置場雖然只存放中低放射性的廢棄物，與其他國家淺地表或是近地表的方式相比，其處置深度深達 1000 公尺，最主要的理由還是這個區域地質架構的特點，以及過去曾經是礦坑的優勢，已有效降低深開挖的成本。經過相關研究也顯示，此處的鐵礦床環境對於未來裝置廢棄物的金屬容器耐用性有正向的效益，區域地質架構也讓放射性核種不容易往地表生物圈遷移，上方的泥岩層更是最好的地下水阻水層，因此最終選定此處作為處置場。

Konrad 處置場的深度已達 1000 公尺，符合國際高放射性廢棄物最終處置的建議深度，德國目前也尚未選出明確的高放射性廢棄物處置場址，但 BGE 表示，必須信守對當地居民的承諾，因此未來也絕對不會在這存放高放射性廢棄物。



圖 57：Konrad 處置場地下設施介紹



圖 58：泥岩層中隧道開挖與支撐



圖 59：Konrad 運轉裝載設施施工情形



圖 60：Konrad 處置場運轉裝載設施用隧道



圖 61：Konrad 處置場處置深度之聯絡隧道



圖 62：Konrad 處置場處置隧道

四、拜會瑞典 SKB

有關用過核子燃料的最終處置，芬蘭與瑞典皆採用結晶岩作為母岩，以及 KBS-3 系統的處置概念。目前芬蘭雖已取得該國政府同意，開始興建用過核子燃料的最終處置場，但針對部分議題，如結晶岩當中的裂隙網路特性描述、地下水在裂隙網路中的流動路徑、放射型何種在裂隙中的傳輸行為等，政府的審查委員仍要求應該作更一步的現地驗證工作。

在芬蘭政府的要求下，芬蘭專責機構 POSIVA 與瑞典 SKB 合作，研擬召集國際上相關國家團隊籌組大型研究計畫，就有關離散裂隙網路模式的驗證與現地試驗規劃進行討論。本次瑞典 SKB 的拜會行程，即受 SKB 水文地質部門負責人 Jan-olof 博士的邀請(圖 63)，共同商討台電公司團隊加入該合作計畫之可能性。經過討論，我方認為該研究計畫確實有助於我國推動後續相關技術之發展，目前正在積極辦理相關業務中。



圖 63：SKB 水文地質專家合影

肆、出國心得

用過核子燃料應採深地層處置已是國際普遍的共識，多數先進核能國家皆已開始規劃處置時程，並興建地下實驗室以進行相關技術的驗證。最終處置的相關工作不論場址調查、工程設計及安全評估，其所需之技術門檻極高，更需要各項專業領域的整合串連，此行與各國代表的交流互動過程中，皆強烈感受各國對此議題的重視，並積極投入資源與人力進行綜合性的研究，期望能夠以最安全的方式處理放射性廢棄物。

DECOVALEX 計畫目前已累積 25 年的研究成果，本公司自 2016 年加入後即積極參與各項研究議題，研究團隊雖然起步較晚，但透過歷次會議與各國專家的互動學習，已逐步掌握工程障壁與天然環境的熱-水-力-化作用機制，並進一步建立與其他國家的合作管道。本次相關分析結果已大致符合實驗數據的變化趨勢，後續將持續檢討理論模型的合理性與可能造成誤差的原因。

我國用過核子燃料最終處置計畫已進入到第二階段，有關選址可能遭遇的困難與場址合適性的科學論證，都相當需要透過國際交流以汲取成功經驗。經過 SNFD2017 報告國際同儕審查的過程，我國處置計畫的推動情形亦逐漸獲得國際上的關注。本次有幸應德國 BGE 與瑞典 SKB 之邀，就處置相關技術規劃、地質調查作業及水文地質等各方面都進行了相當深入的討論，一方面藉此機會向國際社會展現我國的技術研發能力，未來也將更積極尋求引進最新技術的可能。

伍、建議

- 一、依照目前執行 DECOVALEX 研究計畫的經驗，確實能有效提升研究團隊的技術能力與視野，建議未來應擴大研究團隊，並持續參與下一期的 DECOVALEX-2023 計畫。
- 二、考量我國目前高放處置的選址相關法源仍未完備，建議可加強與其他國家地下實驗室的交流合作，透過數據分享與平行驗證，先進行必要技術的整備。
- 三、我國目前已完成採用瑞典 KBS-3 處置概念的可行性評估，德國雖參考相同概念，但針對其地質環境進行部分工程設計的改良，建議未來應持續關注其可行性之發展，可供我國未來參考設計調整之依據。
- 四、處置計畫執行期程長，且涵蓋多項專業領域技術，包括：地質、地球物理、水文地質、核子工程、輻射防護、土木工程、機械材料等專業人才，建議應持續培養相關人才庫，確保相關知識及經驗的順利傳承。
- 五、放射性廢棄物的最終處置具高度敏感性，相關技術專業性高，一般民眾並不易快速理解計畫的內涵，參考本次所見各國地下實驗室的規劃，可透過親眼所見傳遞最直接的訊息，建議可參考其成功經驗，建置我國之地下實驗室。

六、附錄

附錄 I. DECOVALEX-2019 第七次工作會議議程

7th Workshop & Steering Committee Meeting

Prague, Czech Republic

9th April – 12th April

Accommodation – Hotel Ambassador – booking until 15th March 2019

EN: [https://www.ambassador.cz/en/reservations/?date_in=2019-04-](https://www.ambassador.cz/en/reservations/?date_in=2019-04-06&date_out=2019-04-14&price_group=2097152)

[06&date_out=2019-04-14&price_group=2097152](https://www.ambassador.cz/en/reservations/?date_in=2019-04-06&date_out=2019-04-14&price_group=2097152)

CZ: [https://www.ambassador.cz/cs/rezervace/?date_in=2019-04-06&date_out=2019-](https://www.ambassador.cz/cs/rezervace/?date_in=2019-04-06&date_out=2019-04-14&price_group=2097152)

[04-14&price_group=2097152](https://www.ambassador.cz/cs/rezervace/?date_in=2019-04-06&date_out=2019-04-14&price_group=2097152)

Dress Code: Casual

WiFi Login:

Summary block agenda

Start At	Day 1			Day 2			Day 3			
	Stream 1	Stream 2	Stream 3	Stream 1	Stream 2	Stream 3				
08:30	Registration			Task A	Task G	Task E	Plenary: Tasks A - G inc. 15 minutes break			
09:00	Welcome			Task A cont.	Lunch	Lunch				
09:30	Invited Talk(s)									
10:00	Task Intros (20 mins each)							Break		
10:30								Planning Session		
11:00										
11:30										
12:00										
12:30	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch				
13:00	Task B	Task D	Task C							
13:30										
14:00										
14:30										
15:00										
15:30										
16:00			Task F							
16:30										
17:00					Task Leader Meeting					
17:30										
18:00				Close		Close				
18:30	Close	Close	Close		Close					
							Closed SC Meeting			
							Close			

9/4/2019 (Tuesday, Day 1 AM)

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
08:30-09:00	Registration	
09:00-09:15	Welcome	Jens Birkholzer
09:15-09:45	TBD	TBD
Task Introductions		
09:45-10:05	Task A	Jon Harrington
10:05-10:25	Task B	Bastian Graupner / Jonny Rutqvist
10:25-10:45	Task C	Teruki Iwatsuki
10:45-11:00	Break	
11:00-11:20	Task D	Antonio Gens
11:20-11:40	Task E	TBD
11:40-12:00	Task F	Hua Shao
12:00-12:20	Task G	Tobias Meier
12:20-13:30	Lunch	

9/4/2019 (Tuesday, Day 1 PM) – Stream 1

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
Task B : Fault Slip Test		
Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock		
13:30-13:40	Brief Introduction	Bastian Graupner / Jonny Rutqvist
13:40-14:00	Team 1: BGR/UFZ	Hua Shao
14:00-14:20	Team 2: CNSC	Son Ngyuen
14:20-14:40	Team 3: ENSI	Bastian Graupner
14:40-15:00	Break	
15:00-15:20	Team 4: INER	Hsien Chou Lin
15:20-15:40	Team 5: KIGAM	Jung-Wook Park / Taehyun Kim
15:40-16:00	Team 6: LBNL	Jonny Rutqvist
16:00-16:20	Team 7: DynaFrax/GFZ/SSM	Jeoung Seok Yoon
16:20-16:40	Synthesis	Bastian Graupner / Jonny Rutqvist
16:40-17:40	Task B Discussion	Bastian Graupner / Jonny Rutqvist
17:40	Finish	

9/4/2019 (Tuesday PM, Day 1 PM) – Stream 2

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
Task D : INBEB		
HM and THM INteractions in Bentonite Engineered Barriers		
13:30-13:40	Brief Introduction	Antonio Gens
13:40-14:00	Team 1: IGN	Martin Hasal
14:00-14:20	Team 2: JAEA	Yusuke Takayama
14:20-14:40	Team 3: KAERI	Changsoo Lee
14:40-15:00	Break	
15:00-15:20	Team 4: NCU/TP	Chia-Wei Kuo
15:20-15:40	<i>Team 5: IRSN (not expected to attend)</i>	<i>Nadia Mokni</i>
16:00-16:20	Synthesis	Antonio Gens
16:20-17:20	Task D Discussion	Antonio Gens
17:20	Finish	

9/4/2019 (Tuesday PM, Day 1 PM) – Stream 3

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
Task C : GREET		
Modelling of coupled behaviours during groundwater recovery process around the gallery		
13:30-13:40	Brief Introduction	Teruki Iwatsuki
13:40-14:10	Team 1: JAEA	Hironori Onoe/ Yusuke Ozaki
14:10-14:40	Team 2: SNL	Yifeng Wang
14:40-14:50	Break	
14:50-15:20	Team 3: TUL	Milan Hokr
15:20-15:40	Synthesis	Teruki Iwatsuki
15:40-16:30	Task C Discussion	Teruki Iwatsuki
16:30 – 16:35	Change-over – 5 mins	
Task F : FINITO		
Fluid inclusion and movement in tight rock		
16:35-16:40	Brief Introduction	Hua Shao
16:40-17:00	Team 1: BGR/UFZ	Hua Shao
17:00-17:20	Team 2: Sandia National Lab	Yifeng Wang
17:20-17:40	Team 3: UFZ	Olaf Kolditz
17:40-18:00	Synthesis	Hua Shao
18:00-18:30	Task F Discussion	Hua Shao
18:30	Finish	

10/4/2019 (Wednesday, Day 2 AM) – Stream 1

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
Task A : ENGINEER		
Modelling advective gas flow in low permeability materials		
08:30-08:40	Brief Introduction	Jon Harrington
08:40-09:00	Team 1: BGR/UFZ	Torben Brüning
09:00-09:20	Team 2: CNSC	Elias Dagher
09:20-09:40	Team 3: KAERI	Jaewon Lee
09:40-10:00	Team 4: LBNL	Kunhwi Kim
10:00-10:20	Team 6: NCU/TP	Shu-Hua Lai
10:20-11:00	Break	
11:00-11:20	Team 7: Quintessa	Neil Chittenden
11:20-11:40	Team 8: UPC	Sebastià Olivella
11:40-12:00	Synthesis	Jon Harrington
12:00-12:30	Task A Discussion	Jon Harrington
12:30-13:30	Lunch	
13:30-14:15	Task A Discussion (cont)	Jon Harrington
14:15-14:30	Change-over for DECOVALEX Future Phase Planning Session	

10/4/2019 (Wednesday, Day 2 AM/PM) – Stream 2

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
Task G : EDZ Evolution		
Reliability, Feasibility and Significance of Measurements of Conductivity and Transmissivity of the Rock Mass for the Understanding of the Evolution of a Repository of Spent Nuclear Fuel		
08:30-08:45	SSM welcome and update	Carl-Henrik Pettersson
08:45-09:00	Brief Overview Status Task G	Tobias Meier
09:00-09:20	Fracture Network Modelling	Joel Geier
09:20-09:30	Break	
09:30-09:50	Team 1: Seoul National University	Tobias Meier
09:50-10:10	Team 2: Technical University of Liberec	Jakub Rita
10:10-10:30	Team 3: geomecon	Tobias Meier
10:30-10:45	Break	
10:45-12:00	Discussion of results, definition of next steps	All
12:00-12:30	Change-Over	
12:30-13:30	Lunch	
13:30-17:15	VACANT	
17:20-18:00	Task Leader Meeting (Task Leads, Jens Birkholzer and Alex Bond)	

10/4/2010 (Wednesday, Day 2 AM) – Stream 3

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
Task E : Multi-scale heater tests: Upscaling of modelling results from small scale to one-to-one scale		
08:30-08:40	Brief Introduction	TBD
08:40-09:00	Team 1: LBNL	Jonny Rutqvist
09:00-09:20	Team 2: Quintessa	Kate Thatcher
09:20-09:40	Team 3: UFZ/BGR	Wenqing Wang
09:40-10:00	Team 4: NWMO	Ruiping Guo
10:00-10:20	Break	
10:20-10:40	Team 5: Andra	Carlos Plua
10:40-11:00	University of Lille - “Application of phase field method to the analysis of damage evolution taking into account THM coupling effects”	Zhen Yu
11:00-11:20	Synthesis	TBD
11:20-12:20	Task E Discussion	TBD
12:20-12:30	Change-over for DECOVALEX Future Phase Planning Session	
12:30-13:30	Lunch	

10/4/2019 (Wednesday, Day 2 PM) – Stream 1

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
DECOVALEX Future Phase Planning Session		
14:30-14:40	Introduction	Jens Birkholzer
14:40-16:10	Presentation of future Task ideas (detail agenda TBD)	TBD
16:10-17:10	Discussion of proposals	Jens Birkholzer
17:10-17:20	Summary and Way Forward	Jens Birkholzer

Workshop Dinner: Restaurant Tiskárna – 19:00

11/4/2019 (Thursday, Day 3)

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
Plenary (Chaired by Jens Birkholzer / Alex Bond)		
08:30-09:15	Task A: Teams 1-9 (5 minutes per team, same order as Day 2)	
09:15-09:25	Task A Synthesis	Jon Harrington
09:25-09:35	Task A Discussion	All
09:35-10:10	Task B: Teams 1-7 (5 minutes per team, same order as Day 1)	
10:10-10:20	Task B Synthesis	Bastian Graupner / Jonny Rutqvist
10:20-10:30	Task B Discussion	All
10:30-10:45	Task C: Teams 1-3 (5 minutes per team, same order as Day 1)	
10:45-10:55	Task C Synthesis	Teruki Iwatsuki
10:55-11:05	Task C Discussion	All
11:05-11:20	Break	
11:20-11:40	Task D: Teams 1-4 (5 minutes per team, same order as Day 1)	
11:40-11:50	Task D Synthesis	Antonio Gens
11:50-12:00	Task D Discussion	All
12:00-12:25	Task E: Teams 1-5 (5 minutes per team, same order as Day 2)	
12:25-12:35	Task E Synthesis	Darius Seyedi
12:35-12:45	Task E Discussion	All
12:45-14:00	Lunch	
14:00-14:15	Task F: Teams 1-3 (5 minutes per team, same order as Day 1)	
14:15-14:25	Task F Synthesis	Hua Shao
14:25-14:35	Task F Discussion	All
14:35-14:55	Task G: Teams 1-4 (5 minutes per team, same order as Day 2)	
14:55-15:05	Task G Synthesis	Tobias Meier
15:05-15:15	Task G Discussion	All

Room: TBD

Time	Topic	Speaker
15:15-15:30	Break	

Time	Topic	Chair
Project Administration		
15:30-16:00	Open Steering Committee Meeting	Jens Birkholzer
	<ul style="list-style-type: none">• Agenda TBD	
16:00-17:30	Closed Steering Committee meeting	Jens Birkholzer
17:30	Finish	

附錄 II. DECOVALEX-2019 技術參訪行程

12/4/2019 (Friday, Day 4)

Technical Visit: URF Bukov

Time	Topic	Chair
Technical Visit		
7:00	Departure from Hotel Ambassador Prague and transport to URF Bukov	Marek Vencl/Lucie Gorčica
10:15	Arrival at URF Bukov and short coffee break	All
10:35	Current status of URF Bukov and research activities	Jan Smutek
11:00	Safety training for entrance to URF Bukov	Will be specified
11:20	Change in locker rooms	SÚRAO
11:45	Visit of URF Bukov	SÚRAO
12:45	End of visit of URF Bukov	SÚRAO
13:15	Lunch and closing of technical visit	Marek Vencl
14:15	Departure to Prague (bus will stop before Hotel)	All
17:00	End of technical tour	All

附錄 III. BGE 會議及參訪行程

Agenda Site Visit Taiwan Power Company
15 Apr 2019 – 16 Apr 2019



Agenda

Visit of Taiwan Power Company to Peine and Konrad Repository

Participants:

Taiwan Power Company

Lee Tsai-Ping
Kang Chin-Hsiang
Chien Kuo-Yuan
Yu Shun-Wen

BGE TEC

von Berlepsch Thilo
Haverkamp Bernt
Jobmann Michael
Müller Christian

BGE

N.N.

Monday:	14:00 h	Arrival at premises of BGE TEC and Welcome
	14:15 h	Thilo von Berlepsch, BGE TEC Presentation of BGE TEC
	14:45 h	N.N., Taiwan Power Company Presentation of Taiwan Power Company and overview of SNFD2017 and R&D plan for next stage
	15:25 h	N.N., BGE The German Site Selection Procedure
	16:00 h	Break
	16:15	Michael Jobmann, BGE TEC Overview of disposal concepts in crystalline rocks currently under review by BGE TECHNOLOGY – pros and cons
	16:35 h	Christian Müller, BGE TEC Current R&D work on disposal in crystalline rocks
	16:55 h	All General discussion geological disposal and potential areas of common interest
	17:30 h	End of afternoon session.

Agenda Site Visit Taiwan Power Company
15 Apr 2019 – 16 Apr 2019



Tuesday:	07:16 h	Train from Hannover to Peine, Arrival 07:42 h probably platform 12 in Hannover
	07:45 h	Pick up by Mr. Bertrams at station and transfer to Konrad
	09:00 h	Arrival at Konrad Repository – Introduction
	09:30 h	Changing cloth, safety instruction
	10:00 h	Underground visit of the mine
	12:00 h	Changing cloths, small luncheon and opportunity to ask questions
	13:00 h	Transfer to Peine station
	14:00	Arrival at station Peine