

出國報告（出國類別：開會）

# 高放射性廢棄物地下實驗室 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：潘維耀 副處長

李在平 地質調查專員

派赴國家／地區：韓國首爾

出國期間：107年10月11日～

107年10月20日

報告日期：107年12月07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 60 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

潘維耀/台灣電力公司/核能後端營運處/副處長/(02)2365-7210

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

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：107 年 10 月 11 日 至 107 年 10 月 20 日

派赴國家/地區：韓國/首爾

報告日期：107 年 12 月 07 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)

台電公司依法執行用過核子燃料最終處置計畫，並依管制機關要求持續加強國際合作，於 2016 年加入 DECOVALEX 大型國際合作計畫。該計畫每半年定期召開會議，由各國研究團隊進行相關研究成果發表。由於 DECOVALEX-2019 計畫將於 2019 年底結束，本次亦與各國代表會商，提出我方需求且表達持續參與之意願，共同規劃討論下一期 DECOVALEX-2023 之工作項目。本屆 DECOVALEX 研討會由韓國主辦，並安排前往 KURT 地下實驗室進行觀摩，我方團隊亦就我國 SNFD2017 報告的階段成果與韓國原子能研究所(KAERI)進行交流，在技術議題上獲得許多寶貴意見，未來也將參考國際 THMC 研究的發展現況，完備處置計畫下階段的工作規劃。

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，並依管制機關要求持續加強國際合作，於 2016 年加入 DECOVALEX 大型國際合作計畫。DECOVALEX-2019 共有 7 個研究項目，針對處置母岩與工程障壁間可能產生的熱力-水力-力學-化學 (THMC) 耦合作用進行探討，由各團隊提供該國計畫之現地試驗數據，選擇不同評估模式進行模擬分析的綜合比較。該計畫每半年定期召開會議，由各國研究團隊進行指定的成果發表。本屆為韓國主辦的第六次工作會議，台電公司計畫執行團隊共參與 Task-A、Task-B、Task-D 三項研究議題，透過會議過程中與各國代表的交流互動，有效提高模式分析的技術水平，並對分析工具的長期發展方向有更全面性的了解。由於 DECOVALEX-2019 計畫將於 2019 年底結束，本次亦與各國代表會商，提出我方需求且表達持續參與之意願，共同規劃討論下一期 DECOVALEX-2023 之工作項目，未來也將持續參考國際 THMC 研究的發展現況，完備處置計畫下階段整體的工作規劃。

除了參加工作會議的研討會外，會前亦受到韓國原子能研究所(KAERI)的邀請，就我國 SNFD2017 報告的階段成果進行說明與意見交換，分享兩國在推動用過核子燃料最終處置計畫的過程與經驗，同時也在技術議題上獲得許多寶貴意見。會後大會則安排前往韓國的 KURT 地下實驗室進行觀摩，展示進行中的現地縮尺耦合試驗、水文試驗等設施，皆可供我國設計下階段地下實驗室之參考。

## 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、拜會韓國原子能研究所並就處置技術進行交流.....	4
二、地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會.....	5
三、DECOVALEX-2019 第六次工作會議 .....	10
(一)Task-A : Modelling gas injection experiments .....	15
(二)Task-B : Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock .....	21
(三)Task-C : Groundwater recovery experiment in tunnel .....	25
(四)Task-D : Hydro-mechanical interactions in bentonite engineered barriers . .....	27
(五)管理會議 .....	33
四、韓國 KURT 地下實驗室觀摩.....	34
肆、出國心得 .....	41
伍、建議.....	42
六、附錄.....	I
附錄 I. DECOVALEX-2019 第六次工作會議議程.....	I
附錄 II. DECOVALEX-2019 技術參訪行程 .....	XII

## 圖目錄

圖 1：地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會會場.....	6
圖 2：DECOVALEX 主席 JENS BIRKHOLZER .....	8
圖 3：DECOVALEX 技術召集人 ALEX BOND .....	8
圖 4：韓國 KORAD 說明用過核子燃料管理現況 .....	9
圖 5：韓國 KAERI 說明 KURT 地下實驗室發展現況 .....	9
圖 6：DECOVALEX-2019 第六次工作會議地點 .....	13
圖 7：工作會議報到櫃台 .....	13
圖 8：工作會議會場 .....	14
圖 9：與會人員合照 .....	14
圖 10：氣體遷移機制 .....	15
圖 11：TASK-A 氣體灌入試驗設備與示意圖 .....	16
圖 12：TASK-A 分析流程.....	16
圖 13：TASK-A 團隊負責人 BGS 的 JON HARRINGTON.....	17
圖 14：TASK-A 規劃執行進度 .....	18
圖 15：TASK-A 各團隊採用之分析理論與方法.....	18
圖 16：國立中央大學團隊第一階段執行成果 .....	19
圖 17：TASK-A 第一階段各國團隊進度(綠色表示完成).....	19
圖 18：TASK-A 第一階段各國成果比較.....	20
圖 19：TASK-A 第二階段各國團隊進度(綠色表示完成).....	20
圖 20：TASK-B MONT TERRI 斷層再活化現地試驗設置示意圖.....	22
圖 21：TASK-B 高壓脈衝儀(HIGH-PRESSURE PULSE PROBE, HPPP).....	22

圖 22	： TASK-B 規劃執行進度 .....	23
圖 23	： TASK-B 各國團隊進度(紅色表示本次更新內容).....	23
圖 24	： TASK-B BMT 各國成果比較 .....	24
圖 25	： TASK-B 第二階段各國成果比較.....	24
圖 26	： TASK-C 工作目標.....	25
圖 27	： TASK-C 階段成果.....	26
圖 28	： TASK-D EB 試驗設計示意圖 .....	27
圖 29	： TASK-D FEBEX 試驗設計示意圖.....	28
圖 30	： TASK-D 規劃執行進度.....	28
圖 31	： TASK-D EB 試驗各團隊之分析工具、模式理論與網格設定 .....	29
圖 32	： TASK-D EB 試驗各團隊成果比較 .....	30
圖 33	： TASK-D FEBEX 試驗各團隊之網格設定.....	31
圖 34	： TASK-D FEBEX 試驗各團隊成果比較(溫度) .....	31
圖 35	： TASK-D FEBEX 試驗各團隊成果比較(徑向應力) .....	32
圖 36	： TASK-D FEBEX 試驗各團隊成果比較(系統拆除後相關數據) .....	32
圖 37	： 韓國原子能研究所(KEARI)接待中心 .....	35
圖 38	： 韓國 KURT 地下實驗室研發規劃.....	35
圖 39	： 韓國 KURT 地下實驗室周圍環境調查文獻.....	36
圖 40	： 韓國下階段耦合分析模式開發計畫 APRO.....	36
圖 41	： KURT 地下實驗室規劃空間示意圖.....	37
圖 42	： KURT 地下實驗室未來規劃示意圖.....	37
圖 43	： KURT 地下實驗室導覽與解說.....	38
圖 44	： 台電公司團隊於 KURT 地下實驗室合影.....	38

圖 45	： KURT 花崗岩樣本採集.....	39
圖 46	： KURT 岩石力學現地應力試驗.....	39
圖 47	： KURT 地下實驗室配置.....	40
圖 48	： KURT 縮尺工程障壁 EBS THM 耦合試驗.....	40

## 表目錄

表 1：出訪行程及工作內容.....	3
表 2：地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會議程.....	7
表 3：DECOVALEX-2019 各項研究之參與單位.....	12

## 壹、出國目的

台電公司依法執行用過核子燃料最終處置計畫，其中熱力-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，世界各核能先進國家皆持續進行 THMC 研發工作，管制機關亦多次於審查會議中要求台電公司加強相關研究及國際合作。國際合作計畫 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments) 為多國合作進行之 THMC 大型試驗計畫，目前已有日本、韓國、法國、美國及德國等國家參與，而台電公司亦於 2016 年加入 DECOVALEX 研究計畫，主要執行 Task-A：氣體灌入試驗模擬、Task-B：泥岩中斷層滑動試驗的模擬、Task-D：膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合分析，共三個研究項目。該計畫每半年定期召開會議，由研究團隊進行成果發表，並進行計畫內容之整合及討論後續研究方向。

高放射性廢棄物的最終處置，國際上的共識是採用地面下約 300 至 1000 公尺深的地質處置方式，由於該深度的地質環境具有地區獨特性，無法完全參考國際經驗或資訊，處置技術發展較快的國家皆以地下實驗驗證特定處置技術，並以此做為與民眾溝通的平台。為瞭解國內深層地質環境，建立國內深層調查技術，確認深層地質處置技術之適用性，並促進公眾對處置安全的認知，參考韓國建置地下實驗室之經驗將有助於我國地下實驗的推動。

由於台電公司已於 2017 年底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)並提報原能會審查，此行亦受韓國原子能研究所(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)的邀請，就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。

## 貳、出國過程

自 107 年 10 月 11 日出發，迄 10 月 20 日返國(共計 10 天)。10 月 12 日受邀前往韓國大田的原子能研究所(KAERI)進行交流，由台電公司針對 SNFD2017 報告與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方向。10 月 15 日參加於韓國首爾大學所舉辦的地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會(International Workshop on Coupled Processes in Geological Disposal of Nuclear Waste and Underground Research Laboratory)。10 月 16 日至 10 月 18 日為 DECOVALEX 第六次工作會議，偕同計畫團隊行政院原子能委員會核能研究所與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。10 月 19 日則參加大會安排的 KURT(KAERI Underground Research Tunnel)地下實驗室觀摩行程，並於 10 月 20 日返回台灣。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
10 月 11 日(四)	臺北到韓國首爾	往程
10 月 12 日(五)	大田/首爾	拜會 KAERI 並就 SNFD2017 報告成果進行技術交流
10 月 13 日(六)	首爾	資料處理
10 月 14 日(日)		
10 月 15 日(一)		參加地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會
10 月 16 日(二)		參加 DECOVALEX 工作會議
10 月 17 日(三)		
10 月 18 日(四)		
10 月 19 日(五)	大田/首爾	KURT 地下實驗室觀摩
10 月 20 日(六)	韓國首爾到臺北	返程

## 叁、工作內容

### 一、拜會韓國原子能研究所並就處置技術進行交流

本次 DECOVALEX 工作會議由韓國主辦，因此台電公司受韓國原子能研究所(KAERI)之邀，藉此機會在工作會議之前概要說明我國 SNFD2017 報告的內容，雙方就技術議題進行討論，也分享彼此推動用過核子燃料最終處置計畫的經驗。我方由台電公司李在平專員與核研所林子瑜助理研究員進行簡報，韓方則由資深副總裁(Senior Vice President) Yongsoo Huang 博士親自接待，並有多位資深研究人員包括放射性廢棄物處置部門主管 Baik Min-Hoon 博士、DECOVALEX 工作會議負責人 Lee Changsoo 博士、KURT 地下實驗室負責人 Geon-Young Kim 博士，與南韓科學技術院(Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST)的 Jong-Il Yun 教授等共約 20 人代表參加。

李在平專員以 Review Process for SNFD2017 & Plan for Next Stage 為題，概要說明了 SNFD2017 報告提報管制機關前後的審查程序，與國際同儕審查的意見，並強調目前依照國際上安全論證(Safety Case)相關要求擬定發展方向的策略，以及進入下階段「候選場址評選與核定階段」所作的準備。核研所團隊則就 SNFD2017 報告當中安全評估的成果進行簡報，分享目前採用的評估流程與分析模式。會議中韓方對於我國現階段能源政策、選址進展、國際同儕審查過程、技術發展方向與下階段的技術建置計畫都表達極高的興趣，更積極尋求未來雙方合作的可能。由於韓國原子能研究所(KAERI)屬高度管制單位，門禁管制森嚴，相關攝影設備包括手機都必須遮蔽鏡頭，因次並未留下照片紀錄。

## 二、地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會

用過核子燃料的最終處置一直都是國際間所關切的重要議題，同時也是需要持續發展的方向。在韓國也同樣受到民眾的關注與討論，韓國政府亦相當認真看待地質處置所必要的技術，並於 2016 年提出國家基本計畫(national basic plan)。地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會係由韓國地球科學和礦物資源研究中心(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM)、韓國原子能研究所(KAERI)、首爾大學(Seoul National University, SNU)及韓國岩石力學與岩體工程協會(Korean Society for Rock Mechanics & Rock Engineering, KSRM)共同主辦，會議地點為韓國首爾大學校內的教職員俱樂部(圖 1)，選定各國專家赴韓參與 DECOVALEX 工作會議之際，開闢專題邀請國際知名學者進行技術交流，討論目前最先進的研究方向，並向韓國民眾與國際社會展示韓國近年來發展地質處置技術的最新成果，本會議也稱之為 Pre-DECOVALEX 會議，相關議程如表 2。

會議主席為韓國地球科學和礦物資源研究中心的 Eui-Seob Park，研討會議題分為放射性廢棄物處置的耦合作用、各國處置計畫與地下實驗室的最新進展，以及韓國目前的最新動態。邀請學者包括：美國勞倫斯伯克利國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)能源地球科學部的主任 Jens Birkholzer 博士，同時也是 DECOVALEX-2019 的主席，針對過去 25 年來處置相關耦合作用的實驗與分析模式發展過程進行了完整的介紹，並分享美國地質處置計畫過去與未來的發展方向(圖 2)；英國 Quintessa 顧問公司的 Alex Bond，同時也是 DECOVALEX-2019 的技術召集人，介紹了目前 DECOVALEX 計畫中的七個研究議題，以及階段成果，同時也說明了這次工作會議各團隊預期達到的目標(圖 3)；瑞典輻射安全局(Swedish Radiation Safety Authority, SSM)的 Carl-Henrik Pettersson 則以管制機關的立場，介紹瑞典最終處置場申請執照的最新情況，目前核能管制單位已同意申請，但環境法庭上仍有部分爭議待釐清；法國國家放射

性廢棄物管理局(Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs，ANDRA)的 Darius Seyedi 則以法國 CIGEO 地下實驗室的試驗，概要介紹法國目前在泥岩當中進行處置的研究成果。

韓國目前最新動態方面，則分別由韓國放射性廢棄物管理局(Korea Radioactive Waste Agency，KORAD)的 SeungHyun Kim 說明韓國目前針對不同廢棄物罐材料所進行的評估研究(圖 4)；韓國原子能研究所(KAERI)的 Geon-Young Kim 介紹 KURT 地下實驗室的進展(圖 5)；韓國地球科學和礦物資源研究中心(KIGAM)的 Eui-Seob Park 概述該機構目前針對深地層處置的研發規劃；最後由國際知名岩石力學專家，首爾大學的 Ki-Bok Min 教授說明該團隊發展耦合分析技術的成果。



圖 1：地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會會場

表 2：地質處置耦合技術及地下實驗室國際研討會議程

## Session 1 Coupled Processes for Geological Disposal of Nuclear Waste

09:20 – 10:00	<b>Registration &amp; Welcome Remarks</b>
10:00 – 10:30	The international DECOVALEX model comparison project - 25 years of coupled processes research ( <b>Jens Birkholzer</b> , Lawrence Berkeley National Laboratory, USA)
10:30 – 11:00	Overview of the current tasks and outstanding issues in the DECOVALEX 2019 project ( <b>Alex Bond</b> , Quintessa, UK)
11:00 – 11:30	Coupled THM processes and nuclear waste disposal in hard fractured rocks ( <b>Jonny Rutqvist</b> , Lawrence Berkeley National Laboratory, USA)
11:30 – 12:00	Coupled THM processes and nuclear waste disposal in argillaceous materials ( <b>Antonio Gens</b> , Universitat Politècnica de Catalunya, Spain)
12:00 – 13:30	<b>Lunch</b>

## Session 2 Country Updates on National Program & URL

13:30 – 14:00	Geological disposal in the United States: the past, the present and the future ( <b>Jens Birkholzer</b> , Lawrence Berkeley National Laboratory, USA)
14:00 – 14:30	Licensing of the final geological disposal of spent nuclear fuel – a perspective from the Swedish authority ( <b>Carl-Henrik Pettersson</b> , Swedish Radiation Safety Authority, Sweden)
14:30 – 15:00	Some contributions of the Meuse-Haute-Marne URL for the Cigeo geological disposal project in France ( <b>Darius Seyedi</b> , Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, France)
15:00 – 15:30	<b>Break</b>

## Session 3 Status of Geological Disposal of Nuclear Waste in Korea

15:30 – 16:00	Country update in Korea ( <b>SeungHyun Kim</b> , Korea Radioactive Waste Agency, Korea)
16:00 – 16:30	R&D activities at KURT for HLW disposal technology development in Korea ( <b>Geon-Young Kim</b> , KAERI, Korea)
16:30 – 17:00	KIGAM's R&D activities related to HLW geological disposal in Korea ( <b>Eui-Seob Park</b> , KIGAM, Korea)
17:00 – 17:30	Korea's R&D Development in coupled processes and geomechanics for geological disposal of nuclear waste ( <b>Ki-Bok Min</b> , SNU, Korea)
18:00 – 20:30	<b>Banquet</b>



圖 2 : DECOVALEX 主席 Jens Birkholzer



圖 3 : DECOVALEX 技術召集人 Alex Bond

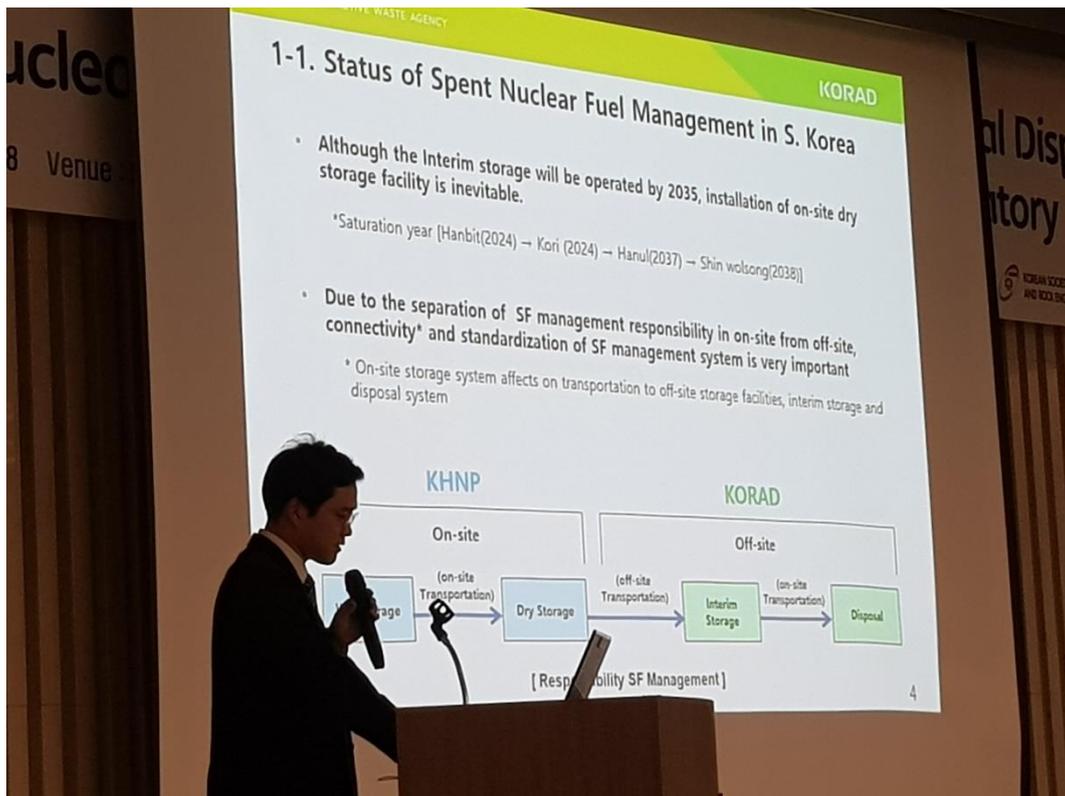


圖 4：韓國 KORAD 說明用過核子燃料管理現況

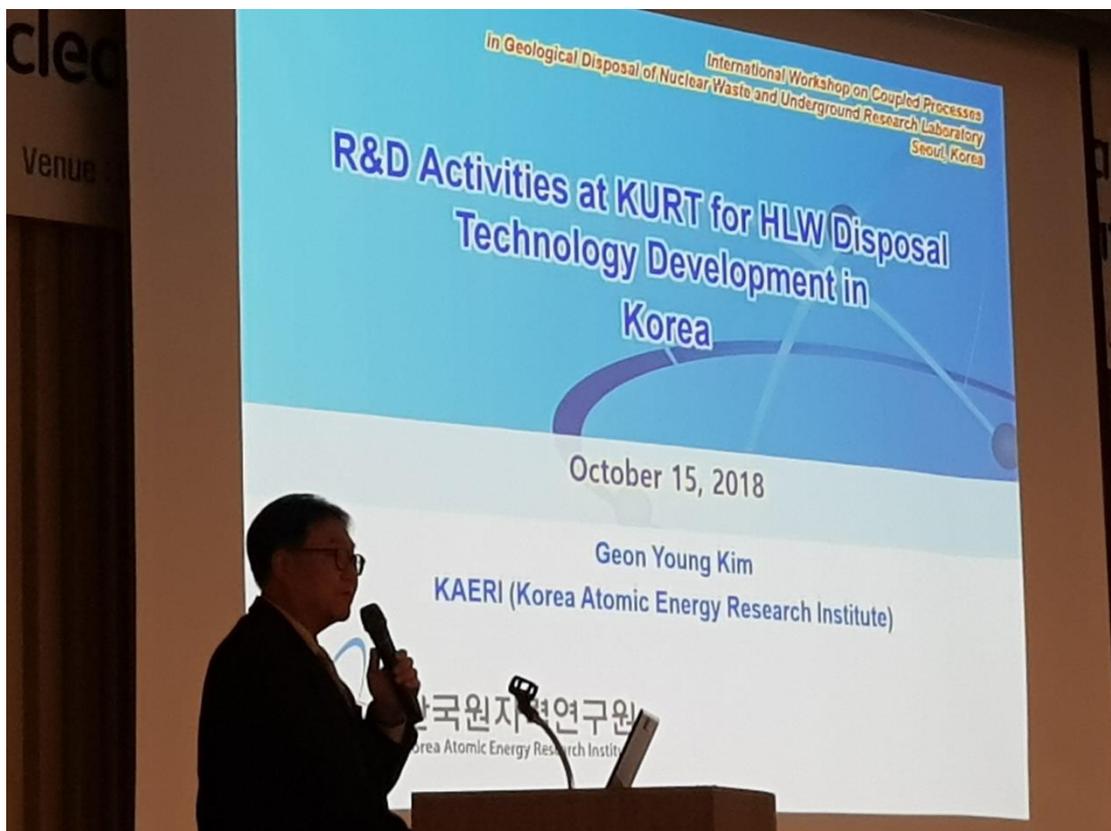


圖 5：韓國 KAERI 說明 KURT 地下實驗室發展現況

### 三、DECOVALEX-2019 第六次工作會議

由於放射性廢棄物的最終處置必須進行長時間的安全評估，其中 THMC 彼此間的耦合分析更是相當複雜，因此 DECOVALEX 大型研究計畫自 1992 年由瑞典發起，並與幾個主要國家共同籌組，對象包括處置計畫的執行者與管制單位，以國際合作的方式進行研究，針對特定議題進行耦合試驗與分析模式的開發，透過各國不同團隊間的平行驗證，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-2019，參與 Task-A 氣體灌入試驗模擬、Task-B 泥岩中斷層滑動試驗的模擬、Task-D 膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合分析三個項目，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

本次工作會議由韓國原子能研究所(KAERI)主辦，為期三天，地點為韓國首爾的 Center Mark Hotel (圖 6、圖 7、圖 8)。出席單位包括：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, SURAO)、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 9), 各單位參與的研究項目如表 3, 會議相關議程詳見附錄 I。

表 3：DECOVALEX-2019 各項研究之參與單位

FO\Task	A	B	C	D	E	F	G
Task Lead	BGS	ENSI	IAEA	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					
IAEA			IAEA	IAEA			
KAERI	KAERI	KIGAM		KAERI			
RWM	Quintessa				Quintessa		
SURAO			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	INER		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)

INER 為我國核能研究所(Institute of Nuclear Energy Research)



圖 6 : DECOVALEX-2019 第六次工作會議地點



圖 7 : 工作會議報到櫃台



圖 8：工作會議會場



圖 9：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 10)，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。

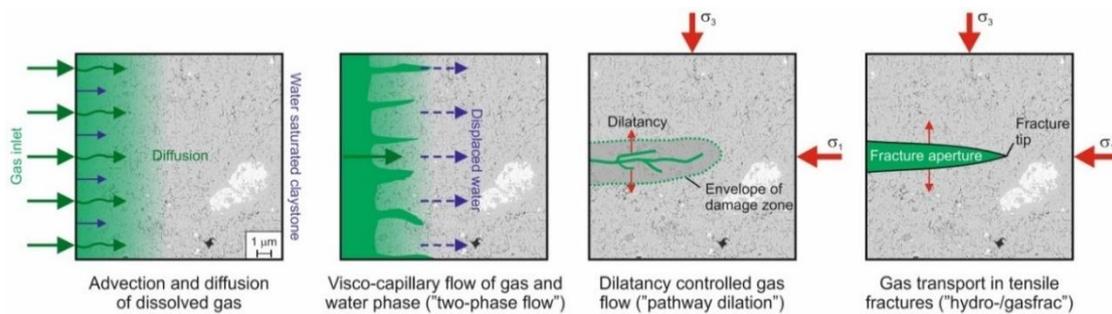


圖 10：氣體遷移機制

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，以氬氣進行灌入試驗(圖 11)。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，先將氬氣由容器左側灌入，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，完成數值模擬分析(圖 12)。

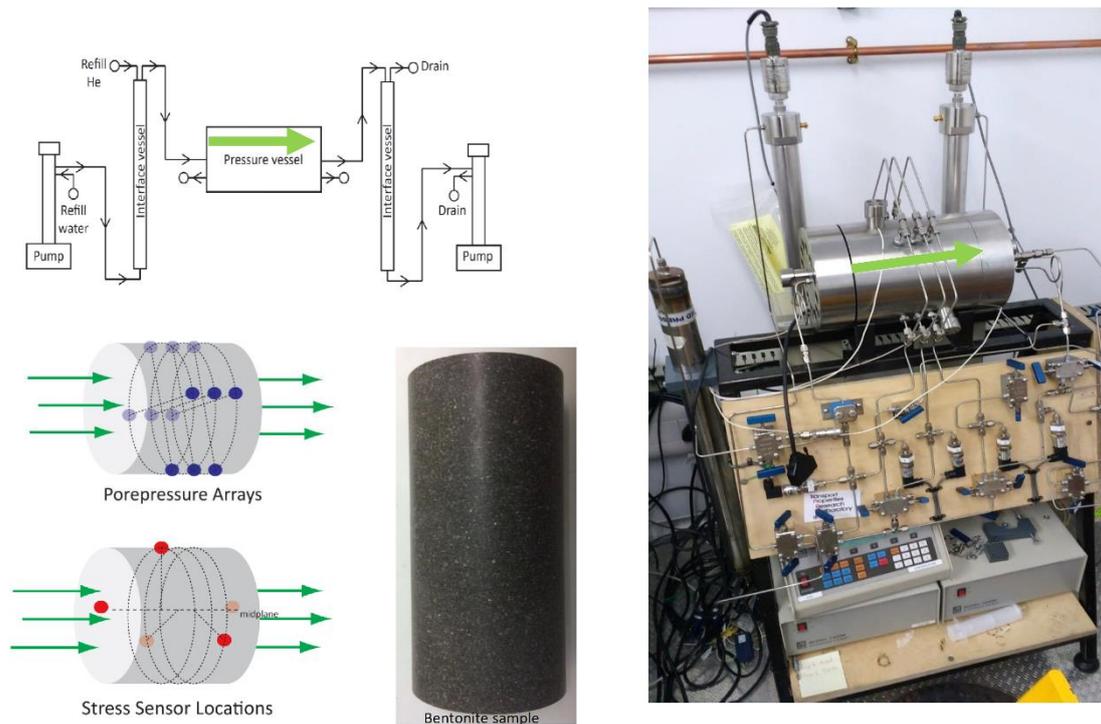


圖 11 : TASK-A 氣體灌入試驗設備與示意圖

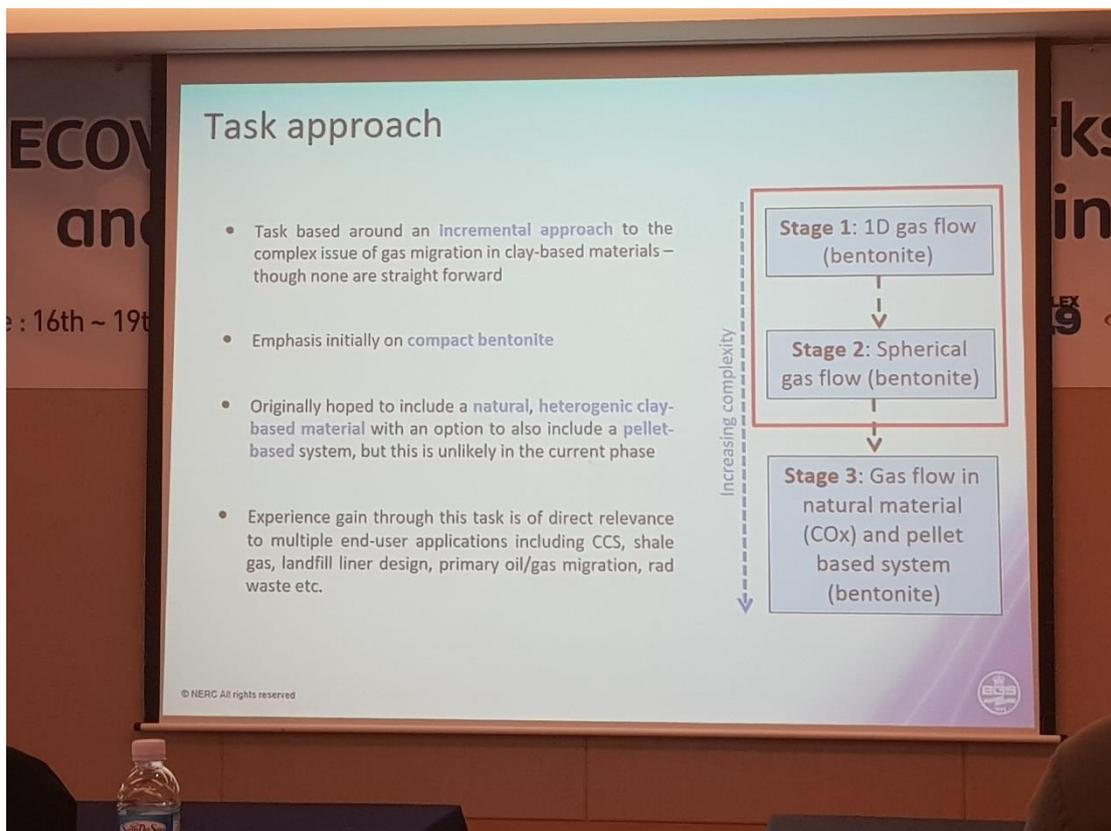


圖 12 : Task-A 分析流程

資料來源：工作會議簡報

依照 Task-A 團隊負責人英國地質調查所(BGS)的 Jon Harrington(圖 13)擬定之進度要求(圖 14)，2018 年應進入第三階段，但因氣體遷移機制複雜，各團隊的進度皆落後，故本次仍以完成第二階段之分析工作為目標，延續第五次工作會議成果，各團隊使用分析理論與方法更新如圖 15 所示。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，採用模擬多相流(multiphase flow)的水流模組，以及適用黏彈性(visco-elastic)材質的力學模組，第一階段僅提交部分成果如圖 16，內容與進度也尚未達到團隊負責人的要求(圖 17)，第二階段各團隊的部分成果如圖 18，顯示目前分析方式與實驗數據的比對仍有相當大的差距，國立中央大學團隊進度亦落後(圖 19)，DECOVALEX 計畫主席會後表示，將重新討論如何改善本項研究。檢討本次工作會議 Task-A 成果，與各國進度相比仍有一定的差距，台電公司將要求持續精進。



圖 13：Task-A 團隊負責人 BGS 的 Jon Harrington

Activity	Spring 2016	Autumn 2016	Spring 2017	Autumn 2017	Spring 2018	Autumn 2018	Spring 2019	Autumn 2019
Stage 0: code development	Green	Green						
Stage 1 A & B: 1D flow (laboratory)		Green	Green	Grey	Grey	Grey	Grey	
Stage 2 A & B: Spherical flow (laboratory)			Green	Green	Green	Grey	Grey	
Interim reporting					Red			
Stage 3A: Gas flow in natural clay					Green	Green	Grey	
Stage 3B: Gas flow in pelletised bentonite						Green	Green	
Final Reporting								Red

圖 14 : Task-A 規劃執行進度

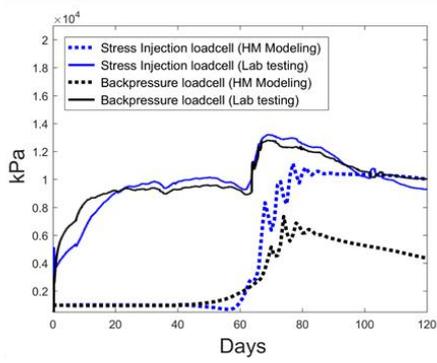
## Modelling approaches (update since Nancy)

STAGE 1A	STAGE 2A
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Two-phase flow continuum models</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>UPC/Andra-H: rigid medium</li> <li>LBNL-C-E: elasticity</li> <li>CNSC-E: elasticity</li> <li>CNSC-D: damage</li> <li>KAERI-D: damage</li> <li>BGR/UFZ-P: elastoplasticity</li> <li>CNSC-P: elastoplasticity</li> <li>NCU/TPC-E: elasticity</li> </ol> </li> <li><b>Enriched model with preferential pathways</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>Quintessa/RWM-Cap: capillary model</li> <li>UPC/Andra-HM-E1: elasticity</li> <li>UPC/Andra-HM-E2: elasticity</li> <li>UPC/Andra-HM-P: elastoplasticity</li> </ol> </li> <li><b>Discrete approaches</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>LBNL-D: discrete fracture network</li> </ol> </li> <li><b>Other</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>SNL: chaotic model (conceptual)</li> </ol> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Two-phase flow continuum models</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>CNSC-D: damage</li> <li>KAERI-D: damage</li> <li>BGR/UFZ-P: elastoplasticity</li> <li>CNSC-P: elastoplasticity</li> <li>NCU/TPC-E: elasticity</li> </ol> </li> <li><b>Enriched model with preferential pathways</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>Quintessa/RWM-Cap: capillary model</li> <li>UPC/Andra-HM-E1: elasticity</li> <li>UPC/Andra-HM-E2: elasticity</li> <li>UPC/Andra-HM-P: elastoplasticity</li> </ol> </li> <li><b>Discrete approaches</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>LBNL-D: discrete fracture network</li> </ol> </li> <li><b>Single-phase flow model (empirical model)</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>Quintessa/RWM-E1</li> <li>Quintessa/RWM-E2</li> </ol> </li> <li><b>Other</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>SNL: chaotic model (conceptual)</li> </ol> </li> </ul>

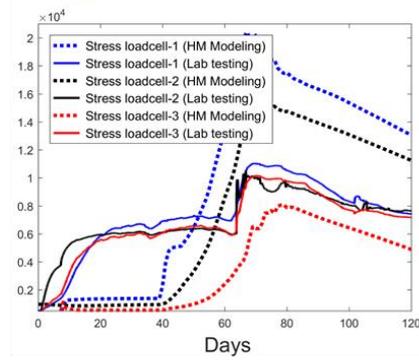
圖 15 : Task-A 各團隊採用之分析理論與方法

資料來源：工作會議簡報

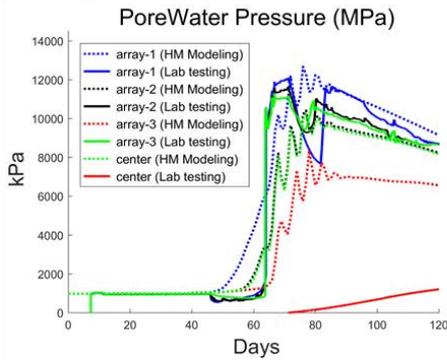
- Stage-1 Axial Stress



- Stage-1 Radial Stress



- Stage-1 Pore Pressure



- Stage-1 Gas Inflow and Outflow Rate

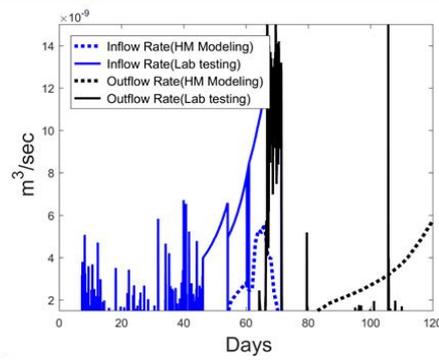


圖 16 : 國立中央大學團隊第一階段執行成果

Summary results: Stage 1A

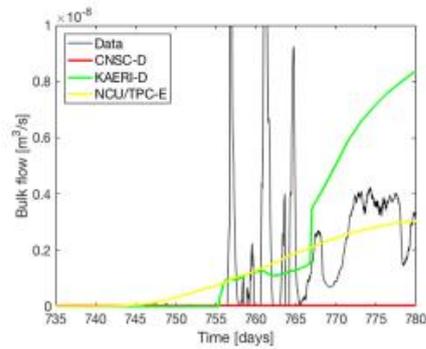
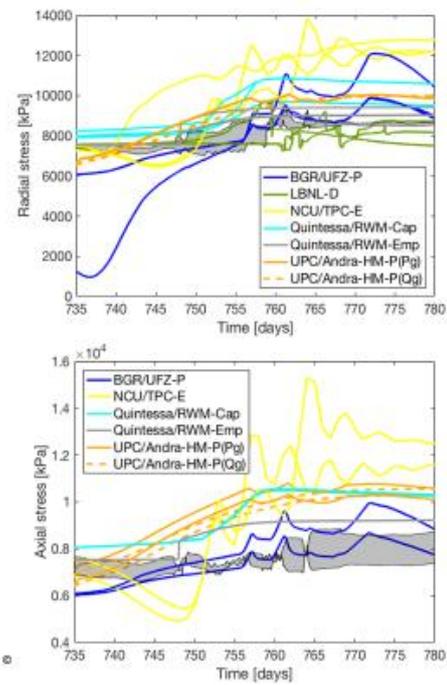
Model	Radial stress				Axial stress				Pore pressure			
	Initial	Break.	Peak	Decay	Initial	Break.	Peak	Decay	Initial	Break.	Peak	Decay
BGR/UFZ-P			█	█				█				█
CNSC-D									█			█
CNSC-P				█				█				█
KAERI-D	█			█				█			█	█
LBNL-C-E	█	█	█		█	█	█		█	█	█	
LBNL-D	█	█		█	█	█		█	█	█		█
NCU/TPC-E												█
Quintessa/RWM-Cap				█				█				█
UPC/Andra-H	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
UPC/Andra-HM-P				█				█			█	█

© NERC All rights reserved



圖 17 : Task-A 第一階段各國團隊進度(綠色表示完成)

## Stage 2A: peak values



**QUESTION 8:**  
Peak values seem to be overpredicted by most teams. Why?

圖 18 : Task-A 第一階段各國成果比較

## Summary results: Stage 2A

Model	Radial stress				Axial stress				Bulk flow			
	Initial	Break.	Peak	Decay	Initial	Break.	Peak	Decay	Initial	Break.	Peak	Decay
BGR/UFZ-P				█				█				█
CNSC-D			█				█		█			
CNSC-P	Not provided											
KAERI-D		█	█			█	█		█			
LBNL-D					█	█	█		█			█
NCU/TPC-E												█
Quintessa/RWM-Cap								█	█		█	█
Quintessa/RWM-Emp		█			█	█			█		█	█
UPC/Andra-HM-P(Pg)				█				█				█
UPC/Andra-HM-P(Qg)											█	█

© NERC All rights reserved

圖 19 : Task-A 第二階段各國團隊進度(綠色表示完成)

資料來源：工作會議簡報

## (二)Task-B：Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock

岩體中的斷層與裂隙，常容易成為地下水的主要流動通道，在處置場運轉過程與封閉後的期間，也可能因為受到大地應力改變，或熱力、水力等作用的影響而產生錯動，進而對處置場造成一定的危害。因此，Task-B 利用瑞士 Mont Terri 地下實驗室的斷層滑動實驗(Fault Slip Test)來進行研究(圖 20)，使用設備為高壓脈衝儀(High-Pressure Pulse Probe, HPPP)，可於鑽井內選定試驗深度，量測區段內上下錨點間，裂隙壁彈性變形所產生的相對位移量(圖 21)。此外，也在試驗地點周圍佈設微地震觀測站，記錄斷層滑動所產生的地震數據，針對泥岩中斷層再活化行為進行綜合分析，希望能建立斷層滑動、孔隙水壓與地下水流間交互作用的分析模式。

Task-B 依照規劃共分作三個階段，逐步增加分析模式的複雜性。第一階段為模式建立，針對單一斷層面的活化行為進行運算基準的比較；第二階段針對次要斷層的活化建立解釋模型；第三階段才分析主要斷層的活化現象。本次工作會議的預期進度由團隊負責人美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)的 Jonny Rutqvist 擬定，如圖 22 所示。台電團隊執行單位核研所(INER)使用三維離散元素法軟體 3DEC 進行研究，如期完成第二階段並更新基準模型驗證(BMT)的分析工作(圖 23)，各團隊 BMT 相關成果比較如圖 24，以及圖 25 可顯示剪力位移與正向位移量對時間的變化，惟各團隊的計算結果與現地實驗數據相比仍有差異，將持續精進分析方法。

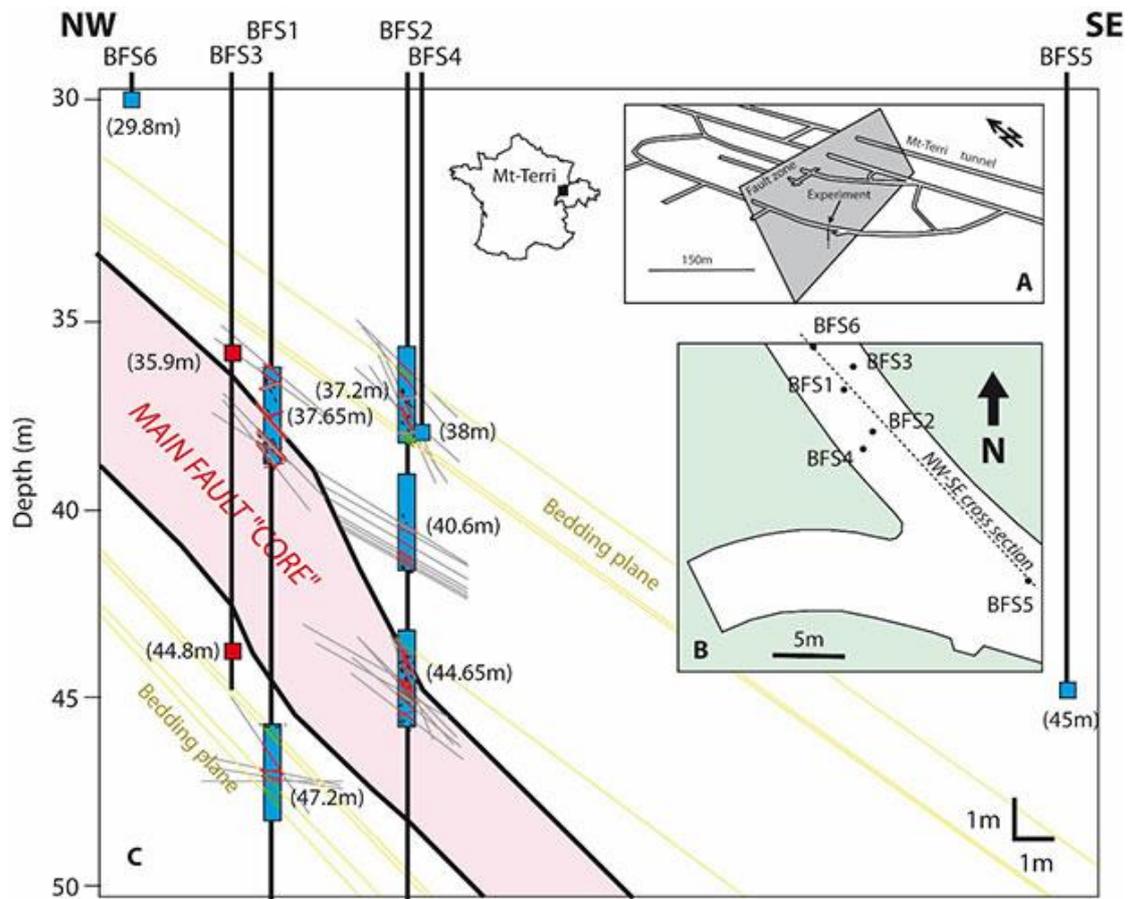


圖 20 : Task-B Mont Terri 斷層再活化現地試驗設置示意圖

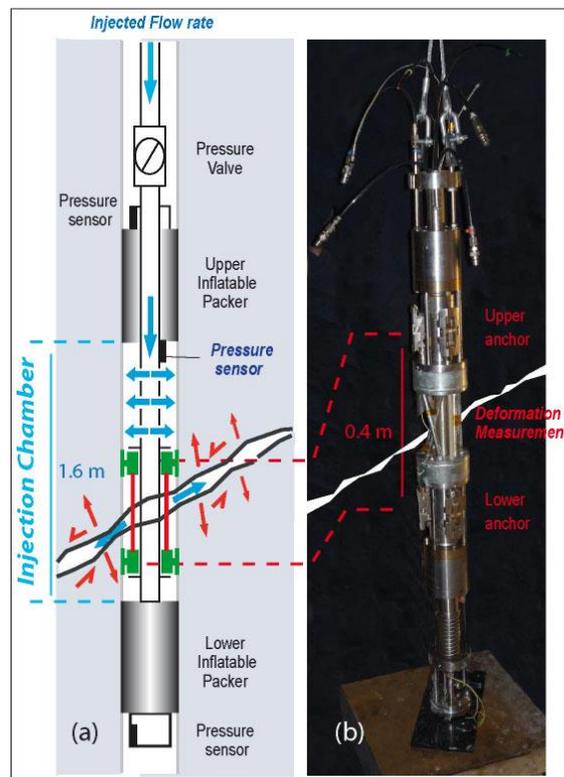


圖 21 : Task-B 高壓脈衝儀(High-Pressure Pulse Probe, HPPP)

## DECOVALEX-2019 Task B Steps

	2016				2017				2018				2019																													
	May WS1	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov WS2	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr WS3	May	June	July	Aug	Sept	Oct WS4	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr WS5	May	June	July	Aug	Sept	Oct WS6	Nov	Dec	Jan	Feb	March	April WS7	May	June	July	Aug	Sept	Nov WS8
Step 1																																										
Step 2																																										
Step 3																																										
Wrap up Final Report																																										
Joint Journal Paper																																										

IR1, IR2 = Delivery of Interim Reports on Steps 1, 2, FR = Final Report, WS1 - 8 = Workshops

**Step 1) Model inception:** A benchmark calculation on activation of a single fault plane

**Step 2) Minor fault activation:** Interpretative modelling of minor fault-activation

**Step 3) Major fault activation:** Interpretative modelling of activation in a major fault

圖 22 : Task-B 規劃執行進度

### Cases teams have worked on to date

TEAM	CODE/fault representation	BMT	Step 1 2D		Step 1 3D		Step 2	Step 3
			FM 1	FM2	FM 1	FM2		
BGR/UFZ	1) Open GEOSYS/XFEM interface 2) Rolox LEFM	✓	✓	✓	✓	✓		
CNSC	COMSOL/interface	✓				✓	✓	
ENSI	Open GEOSYS/finite thickness	✓	✓	✓	✓	✓		
GFZ								
INER	3DEC/interface	✓		✓	✓	✓	✓	
KIGAM	TOUGH-FLAC/interface TOUGH-Elements	✓ ✓			✓	✓		
LBNL	1) 3DEC/interface 2) TOUGH-FLAC/finite thickness element	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

✓ Previous Results    
 ✓ New Results for Seoul WS

圖 23 : Task-B 各國團隊進度(紅色表示本次更新內容)

資料來源：工作會議簡報

# Simplified Benchmark Simulations BMT

**BMT 6 – Profile along Dip**  $K \propto P_w, S_S \propto k_n + C_w$

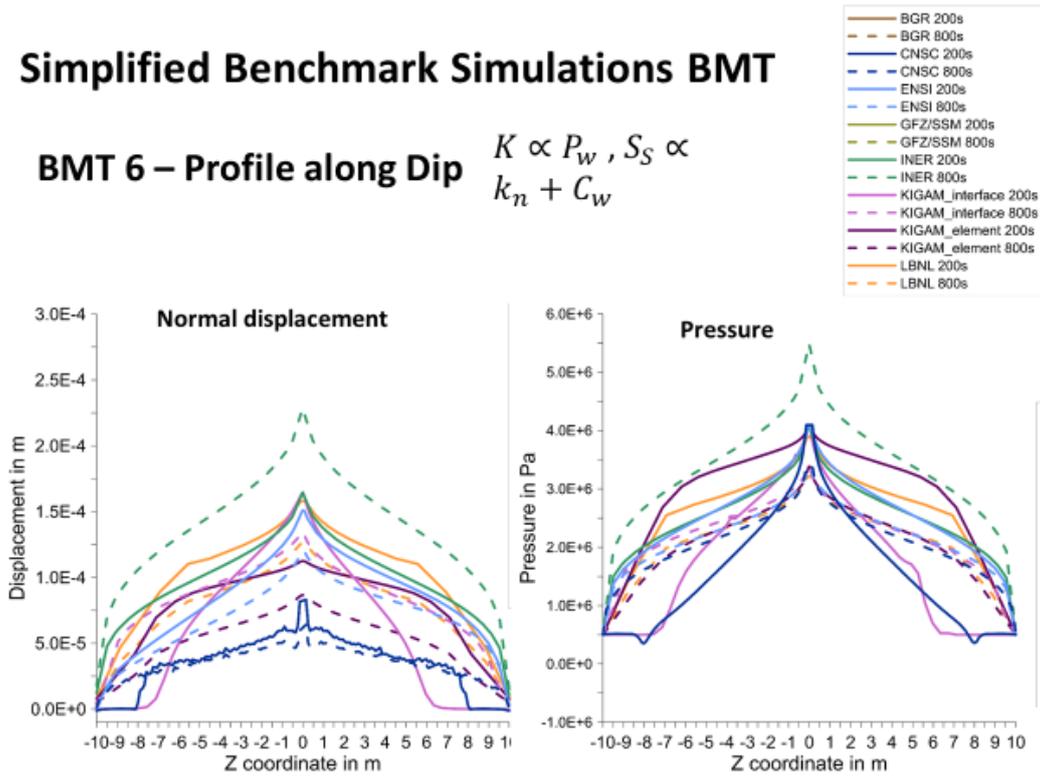


圖 24 : Task-B BMT 各國成果比較

## Step 2: fault shear & normal displacement at Point 1

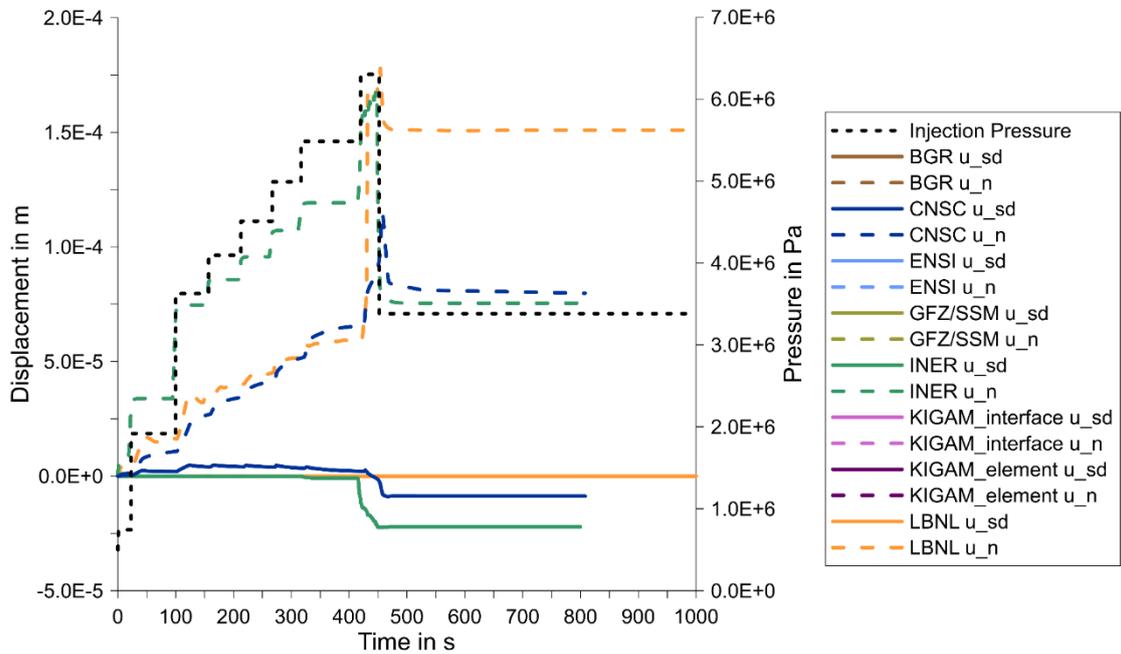


圖 25 : Task-B 第二階段各國成果比較

資料來源：工作會議簡報

### (三)Task-C：Groundwater recovery experiment in tunnel

日本 Mizunami 瑞浪地下實驗室是為了發展最終處置相關技術與驗證所建立，Task-C 團隊負責人日本原子力研究開發機構(JAEA)的 Teruki Iwatsuki 利用實驗室的地下坑道，進行地下水恢復試驗，研究隧道周圍裂隙與開挖擾動帶在封閉後的地下水恢復情況，以及過程中的 HMC 與生物之耦合行為(圖 26)，目前僅有日本 JAEA、美國 LBNL 與捷克 TUL 參加。由於 HC 相關耦合分析將是我國高放處置計畫下階段的發展重點，因此台電團隊雖未執行此研究，仍參與本項議題之工作會議，評估未來合作之可能。但可惜的是，Teruki Iwatsuki 博士表示日本瑞浪地下實驗室因為租約到期，地方政府也無意續約，因此即將封閉，造成本項計畫將無法延續，但相當樂意將過去的實驗數據與台電團隊分享，未來也將嘗試邀請他來台技術交流。

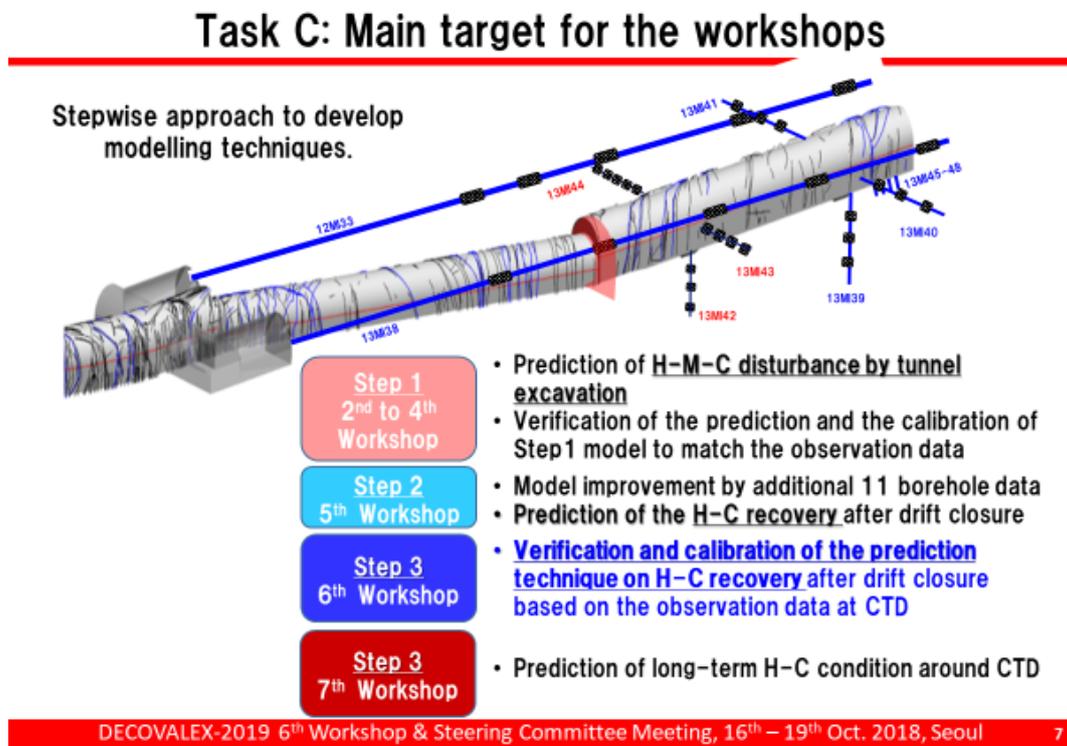


圖 26：Task-C 工作目標

Task-C 分為三個階段，第一階段評估封閉試驗隧道(Closure Test Drift，CTD)在開挖過程階段受到擾動的 HMC 耦合行為；第二階段模擬 CTD 在地下水回復過程中的 HMC 行為；第三階段則分析預測 CTD 周圍長期穩態的 HMC 耦合作用。評估隧道岩體周圍的地下水流，則必須使用離散裂隙網路分析技術(Discrete Fracture Network，DFN)將其特徵化，並透過升尺度為等效連續孔隙介質(Equivalent Continuous Porous Media，ECPM)進行較大範圍的地下水流分析。目前各團隊的地下水流分析結果與實驗數據相符，但化學部分，pH/ORP 與關鍵氯離子的預測濃度仍存在很大的誤差，僅日本 JAEA 有部分突破，可提供部分研究成果比對(圖 27)。

Short synthesis

### Progress/achievements in the 6<sup>th</sup> workshop

	Prediction	Location	Each team's current achievement on simulation		Prospect until the 7 <sup>th</sup> meeting
Hydrology	Water pressure	Borehole	△	A little more	Probably be achieved
		CTD	○	Almost achieved	Achieved
Chemistry	pH/ORP	Borehole	×	It has not been fully improved.	Difficult to achieve because of the lack of time?
		CTD	△	A little more	Probably be achieved
	Cl conc.	Borehole	?	Found a clue of the solution	Check the found solution
		CTD	△	A little more	Probably be achieved

Hydraulic simulation is being able to reproduce the observed data. There are still some problems to be solved in the H - C coupling simulation to capture the Cl change.

**The task until 7<sup>th</sup> meeting**

- **Water pressure variation:** Additional calibration of the simulation in/around CTD
- **Chemical variation:** Additional calibration of the simulation in CTD.
- **Cl concentration:** Additional calibration in all monitoring point using the new idea

圖 27：Task-C 階段成果

資料來源：工作會議簡報

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

放射性廢棄物的地層處置主要採用多重障壁的防護概念，其中工程障壁的長期演化與性能評估，是目前重要的技術發展方向。Task-D 的主要目標即為研究緩衝回填材料膨潤土在達到完全飽和之前的 HM 與 THM 耦合行為，尤其是均質化 (homogenization)對安全功能的影響。

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 28)，與瑞士 Grimsel 地下實驗室進行的 FEBEX (Full-scale high level waste engineered barriers)試驗(圖 29)。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。

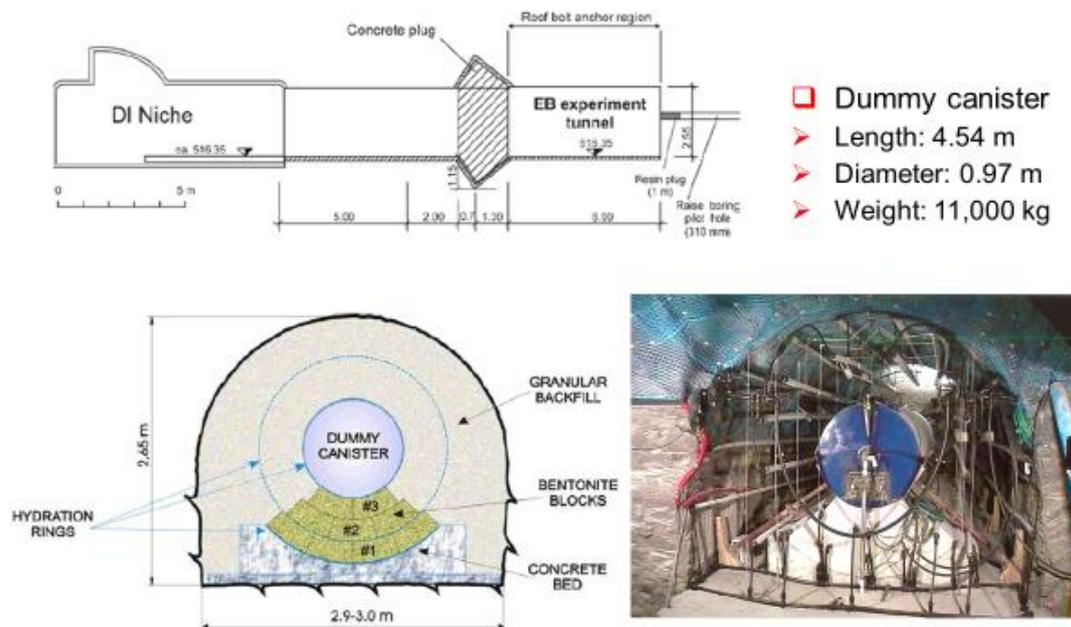


圖 28 : Task-D EB 試驗設計示意圖

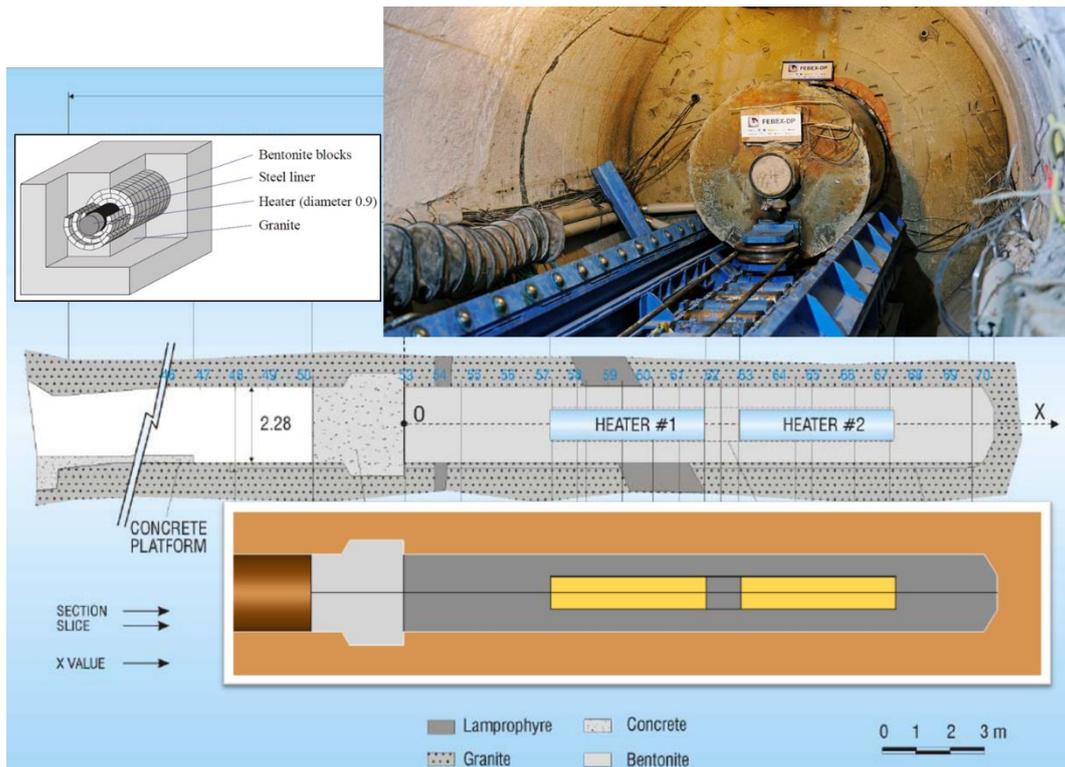


圖 29 : Task-D FEBEX 試驗設計示意圖

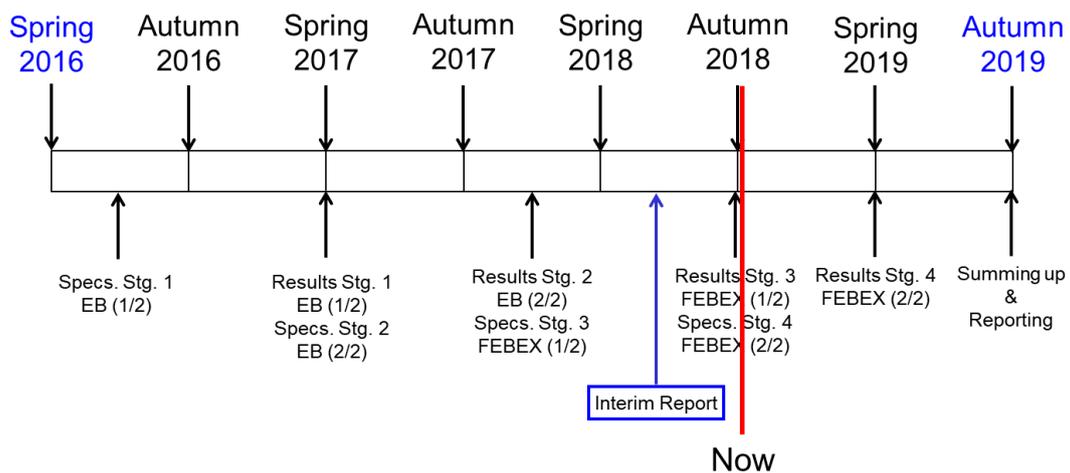
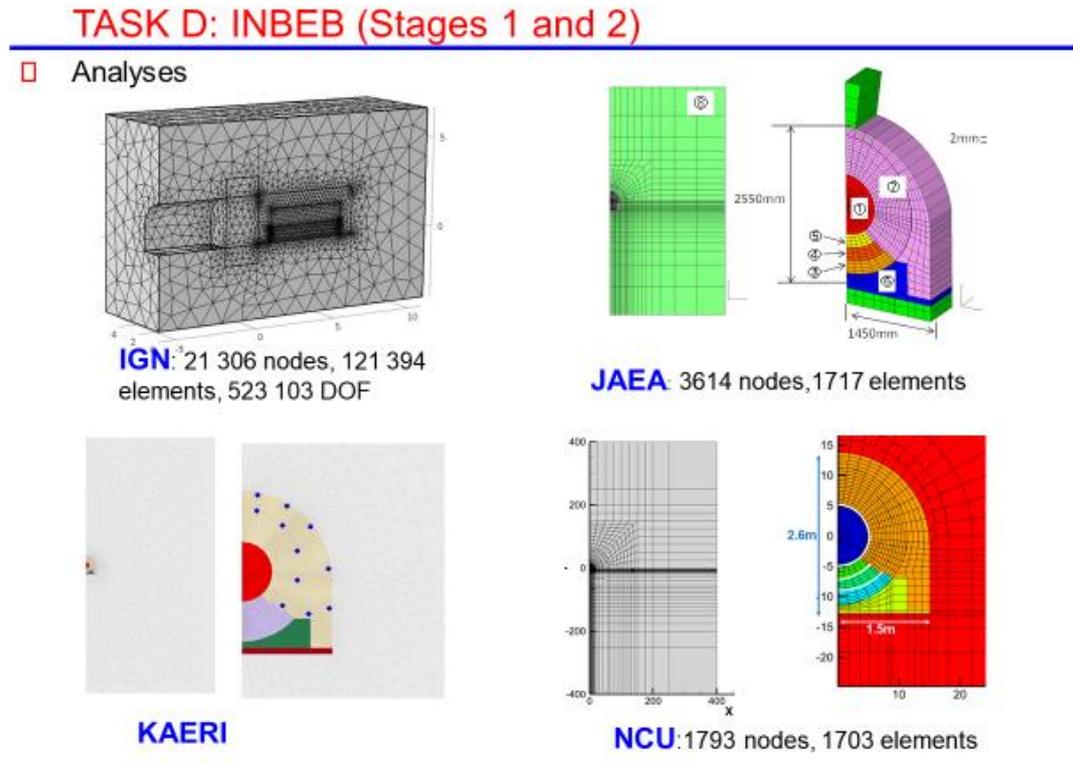


圖 30 : Task-D 規劃執行進度

資料來源：工作會議簡報

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，工作規劃進度如圖 30，本次會議將完成 EB 試驗之比對並提交部分 FEBEX 試驗的模擬成果。EB 試驗部分，各國團隊所使用的分析工具與網格設定如圖 31。



### TASK D: INBEB (Stages 1 and 2)

□ Activities of the modelling teams

Team	Code	Mechanical const. model	Results	Report
IGN	COMSOL	Elastic + swelling term	EB Stages 1 and 2 Benchmarks	Final report submitted
IRSN		No activity	No activity	No activity
JAEA	THAMES	Elastic + swelling term	EB Stages 1 and 2 Benchmarks	Final report submitted
KAERI	TOUGH2-MP FLAC 3D	BBM	EB Stages 1 and 2 Benchmarks	Final report submitted
NCU	HGC 4.3	Elastic + swelling term	EB Stages 1 and 2 Benchmarks	Final report submitted

圖 31 : Task-D EB 試驗各團隊之分析工具、模式理論與網格設定

## EB test observations vs modelling results (Stage 1)

### Relative humidity

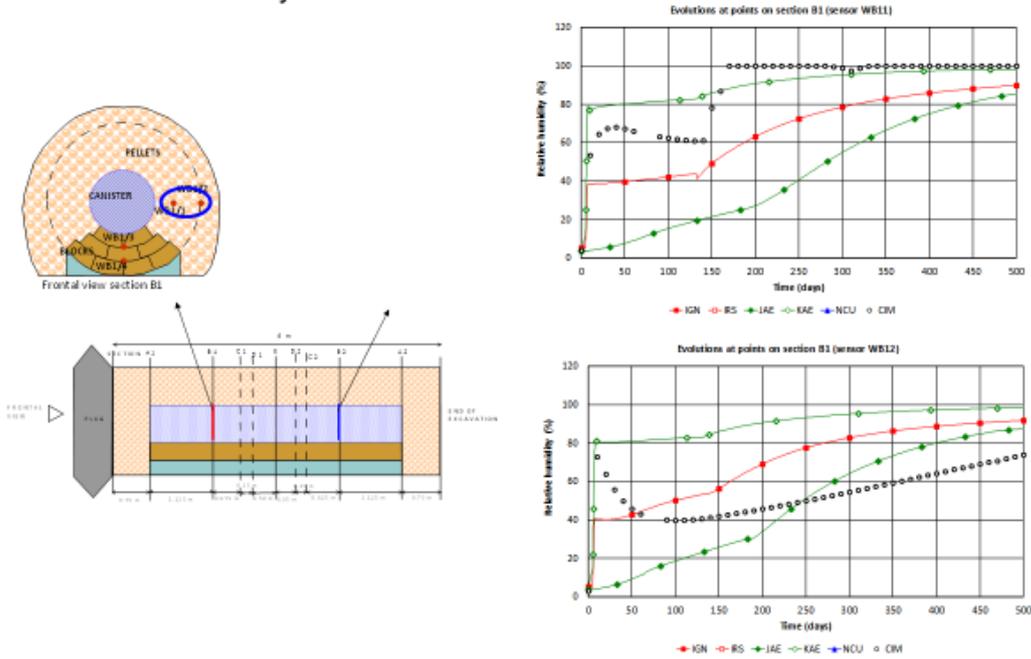


圖 32 : Task-D EB 試驗各團隊成果比較

資料來源：工作會議簡報

EB 試驗各國團隊的模擬成果比較如圖 32，可見相對溼度的計算成果仍無法與實驗數據完全擬合。國立中央大學團隊 (NCU) 因使用自行開發的 HydroGeochem 程式進行分析，部分模組仍在開發中，本次以更新網格設定的測試為主，因此尚未完成本項試驗成果的提交，需要持續精進。

FEBEX 試驗部分，各國團隊建立的網格設定如圖 33，依照進度主要完成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。各團隊模擬成果比較如圖 34，國立中央大學團隊 (NCU) 使用更新的分析模組後，溫度計算結果與實驗數據的變化趨勢相近，但溫度值仍較高。此外，徑向應力的部分出現相反的變化趨勢 (圖 35)，也尚未完成系統拆除後各相關數據的分析 (圖 36)，顯示目前開發中的 HydroGeochem 程式仍有持續修正的必要。

## TASK D: INBEB (Stages 1 and 2)

### Analyses

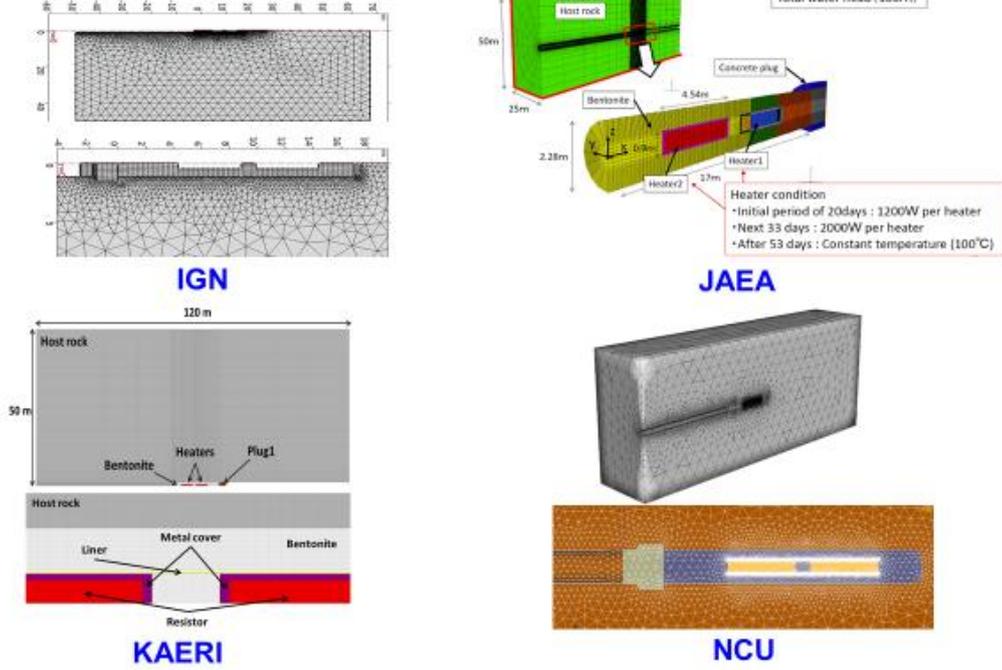


圖 33 : Task-D FEBEX 試驗各團隊之網格設定

## Task D: INBEB. Stage 3, performance: temperatures

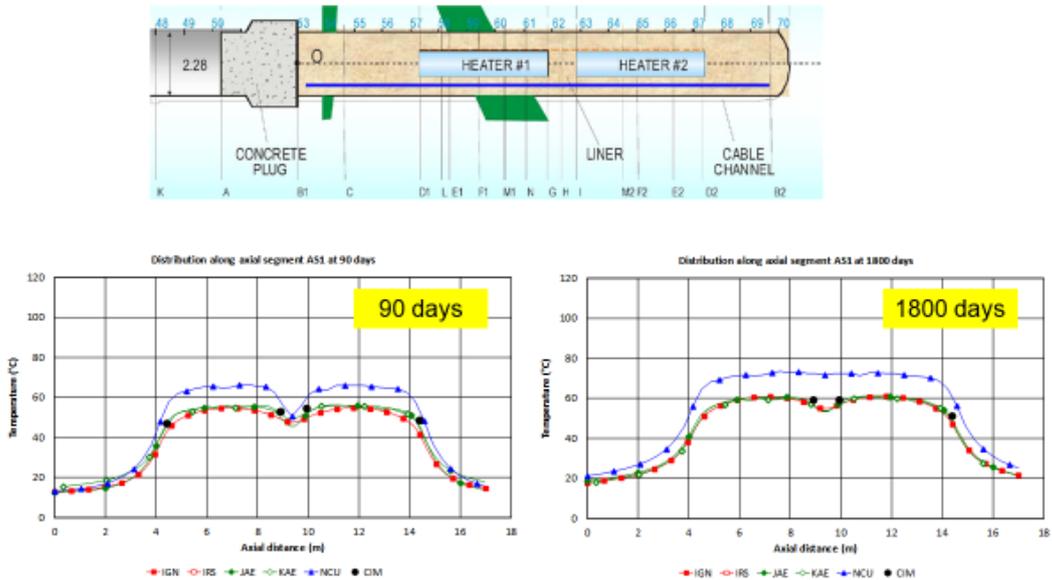


圖 34 : Task-D FEBEX 試驗各團隊成果比較(溫度)

資料來源：工作會議簡報

## Task D: INBEB. Stage 3, performance: radial stress

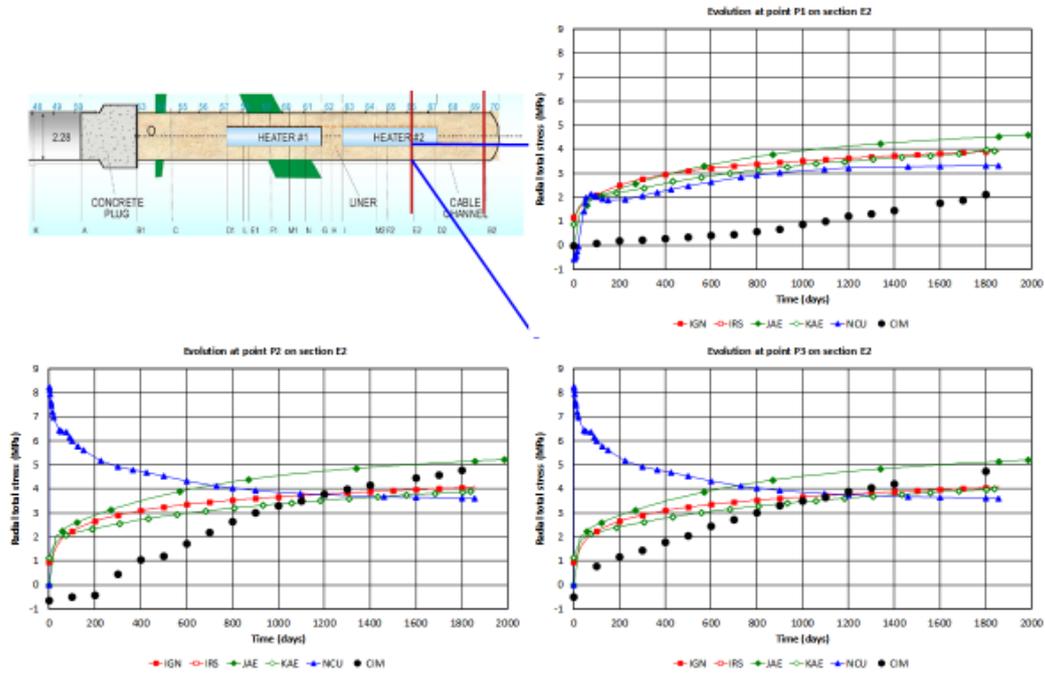


圖 35 : Task-D FEBEX 試驗各團隊成果比較(徑向應力)

## Task D: INBEB. Stage 3, dismantling

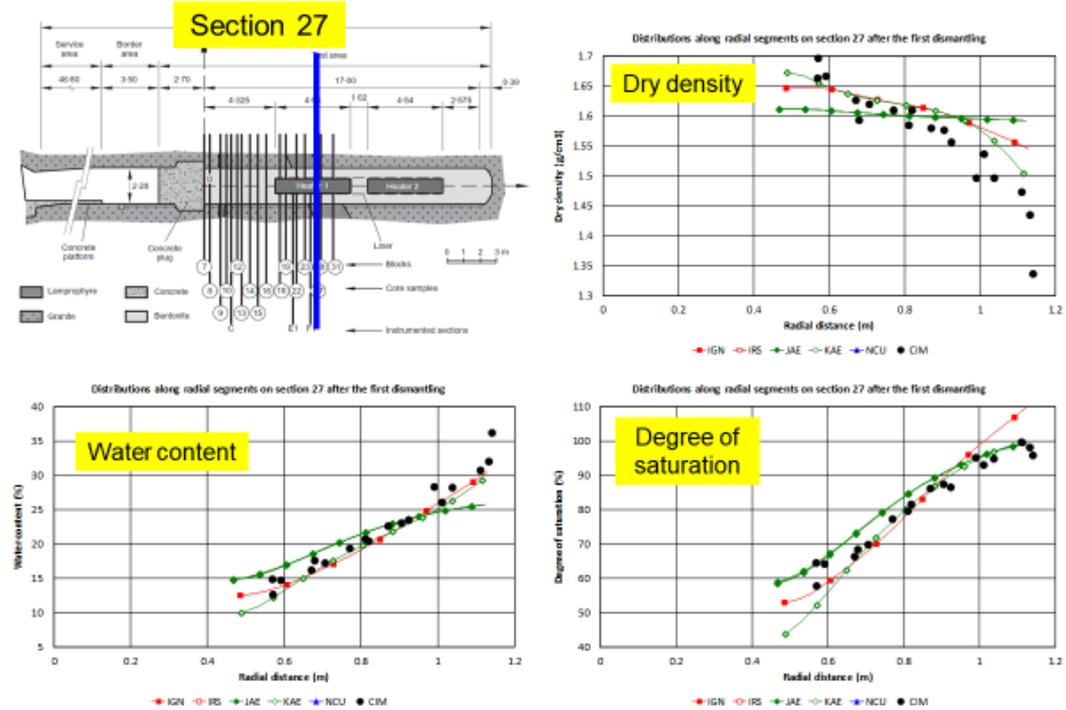


圖 36 : Task-D FEBEX 試驗各團隊成果比較(系統拆除後相關數據)

資料來源：工作會議簡報

## (五)管理會議

管理會議僅有台電公司代表參加，DECOVALEX 主席 Jens Birkholzer 再次感謝韓國原子能研究所(KAERI)的安排與地主之誼，技術召集人 Alex Bond 針對各項研究議題進行綜整的成果說明，目前僅 Task-A 整體的進度相對落後，提醒各團隊應重新檢視耦合作用的機制，而非僅是鑽研分析工具與計算結果上的比對。

會中安排下一次工作會議的主辦單位，捷克放射性廢棄物最終處置場管理局 (SURA)的 Marek Vencel 說明目前規劃進度，第七次的工作會議訂於 2019 年的 4 月 9 日至 4 月 12 日舉行，地點位於捷克布拉格的 Hotel Ambassador，並將安排前往捷克的地下實驗室 URF Bukov 進行參訪。DECOVALEX-2019 計畫的最終會議也決議將由瑞士舉辦，時間暫定於 2019 年 11 月 4 日，並擬擴大為公開研討會的形式，開放國際投稿 THMC 相關耦合分析的研究論文。

由於本期 DECOVALEX-2019 即將結束，部分團隊針對下一期 DECOVALEX-2023 已提出延續的構想，包括開發監測 Task-B 斷層滑動的新設備，開挖擾動帶的延伸研究等，韓國原子能研究所(KAERI)也想爭取利用 KURT 新設的現地實驗進行模擬驗證。最後各國代表透過投票方式表達意見，我方亦參考現階段處置技術發展的需求，充分闡述下階段持續參與 DECOVALEX 的意願，研究議題則仍保留開放，將待下一次工作會議進行確認。

#### 四、韓國 KURT 地下實驗室觀摩

DECOVALEX 工作會議結束後，大會安排 10 月 19 日前往大田市的 KURT 地下實驗室進行參訪，上午七點集合出發，搭乘大會安排的巴士，車程約兩個小時，抵達接待中心(圖 37)後由韓國原子能研究所(KAERI)的專家 Jung-Woo Kim、Geon-Young Kim、Sung-Hoon Ji 與 Jin-Seob Kim 分別進行簡報，說明實驗規劃(圖 38)、場區地質調查的資料與環境條件(圖 39)、初步驗證成果、以及對應下階段耦合分析模式的開發計畫 APro (圖 40)。

韓國自 2003 年起啟動評估，2005 年開始興建處置研究用設施，KURT 屬於通用型的地下實驗室，地點就位在韓國原子能研究所(KAERI)的所區內，因此與未來可能作為最終處置場的選項無關。KURT 周圍的岩層屬於花崗岩，相較於其他國家的地下實驗室規模較小也較淺(圖 41)，第一階段長約 263 公尺，第二階段則繼續延伸約 288 公尺，坑道坡度大約 10%向下延伸，目前深度僅約 120 公尺，但仍持續規畫擴建中(圖 42)。現階段試驗則以可供調查驗證的水力試驗、傳輸試驗、岩石力學試驗與縮尺耦合試驗為主。

坑道內的解說由地球化學專家 Ji-Hun Ryu 負責導覽(圖 43)，由於地下實驗室坑道內禁止攝影，因此進入 KURT 坑道內後無法自行留下影像紀錄，僅有部分大會提供的側拍與合照(圖 44、圖 45、圖 46)。目前 KURT 共分為六個實驗區 RM-1 至 RM-6(圖 41)，各項試驗安排如圖 47 所示。剛完成的縮尺工程障壁 EBS THM 耦合試驗(圖 48)位於 RM-3，並設有即時的數據監測設備，相關數據將提供韓國目前發展中的耦合分析平台 APro 使用。



圖 37：韓國原子能研究所(KEARI)接待中心

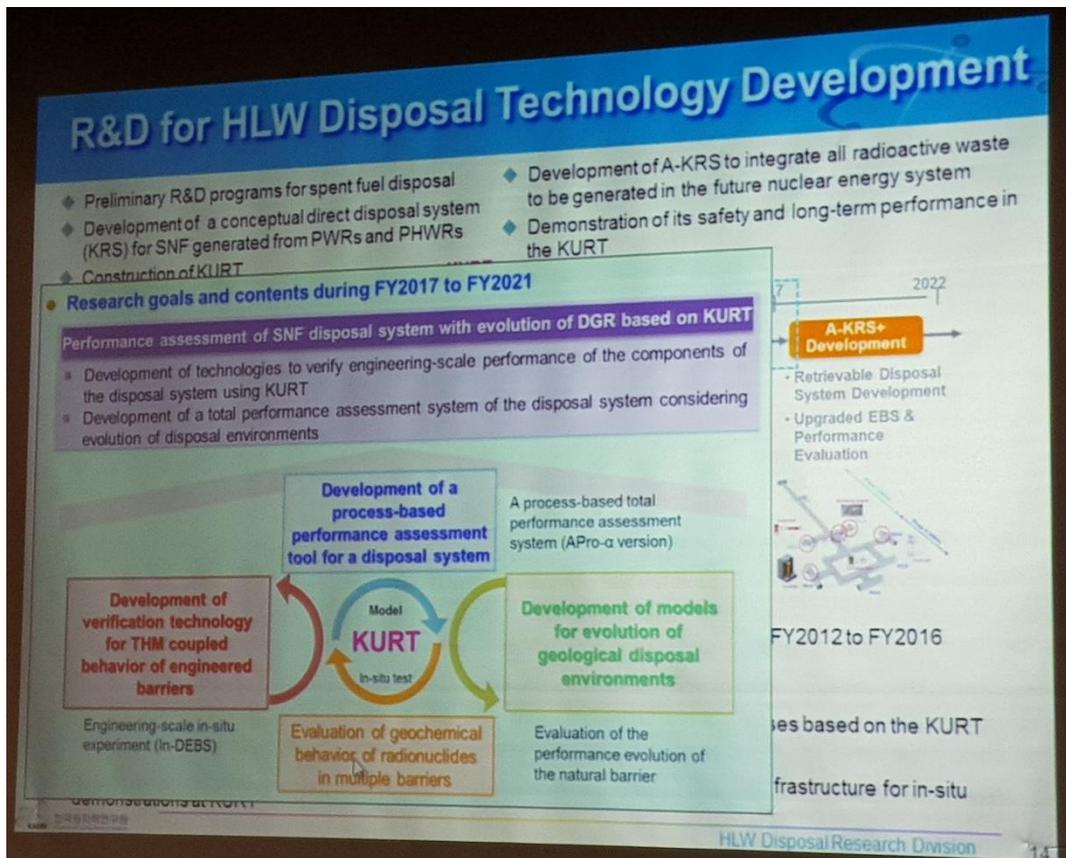


圖 38：韓國 KURT 地下實驗室研發規劃

## Why KURT ? – surrounding environment

- All 9 attempts for RW disposal site selection since 1986 have failed.
- Gyeongju was decided as a LILW repository (Nov. 2, 2005), Gyeongju LILW repository → in operation (July 2015)
- The NPP sites will be reached their maximum temporary on-site storage capacity from 2024.
- June 11<sup>th</sup>, 2015: PECOS (Public Engagement Commission on Spent Nuclear Fuel Management) submitted its final recommendations on how to manage the country's SNF that included site selection, URL, and final disposal.
- July, 2015 ~ April, 2016: TF (Task Force) for establishing basic national plan for HLW management
- The government (MOTIE) announced a draft of basic national plan for HLW management based on the recommendations by PECOS on May 26<sup>th</sup>, 2016 → **First official long-term national plan including milestones**
  - ✓ Phased siting process, interim storage, generic URL & RD&D, on-site URL for licensing, construction & operation of final disposal facility, etc.
- The Atomic Energy Commission (AEC) approved the national plan for HLW management prepared by MOTIE on July 25<sup>th</sup>, 2016, according to the Article 3 of Nuclear Energy Promotion Act.
- Enactment of special act on SNF management corresponding to the national policy is in progress.
- All national programmes of nuclear energy including the "Basic National Plan" are being reconsidered based on the new national energy policy (without nuclear power).
- DGR for HLW must be prepared, whatever Government will determine in the future; centralized interim storage, direct disposal or reprocessing, or without nuclear power generation.
- KAERI has been developing safe and reliable geological disposal techniques for HLW and performing various experiments at KURT to test their feasibility, safety and stability.
- KURT, which is not real deep URL for final disposal but currently the only URL in Korea, **must play a major role in development and demonstration of the proposed disposal concept and the technologies, and especially in public acceptance, until and after a real deep URL which is being planned based on the national plan in Korea.**

HLW Disposal Research Division

圖 39 : 韓國 KURT 地下實驗室周圍環境調查文獻

## 2 APro

Process-based TSPA Model: APro

**: Advanced Process-based total system performance assessment framework for a geological disposal system**

### Capabilities

- Spatio-temporal simulation of multiphysics
- Simulation of coupled effects of variable physico-chemical processes
- Simulation of short- and long-term evolutions of geological disposal system

### Benefits

- Variety of TSPA tool → Public reliability ↑
- Uncertainty ↓
  - Conservatism ↓
  - Efficiency ↑

DECON/LEX/2019 (2018-10-19): APro

KAERI 한국원자력연구원 16

圖 40 : 韓國下階段耦合分析模式開發計畫 APro

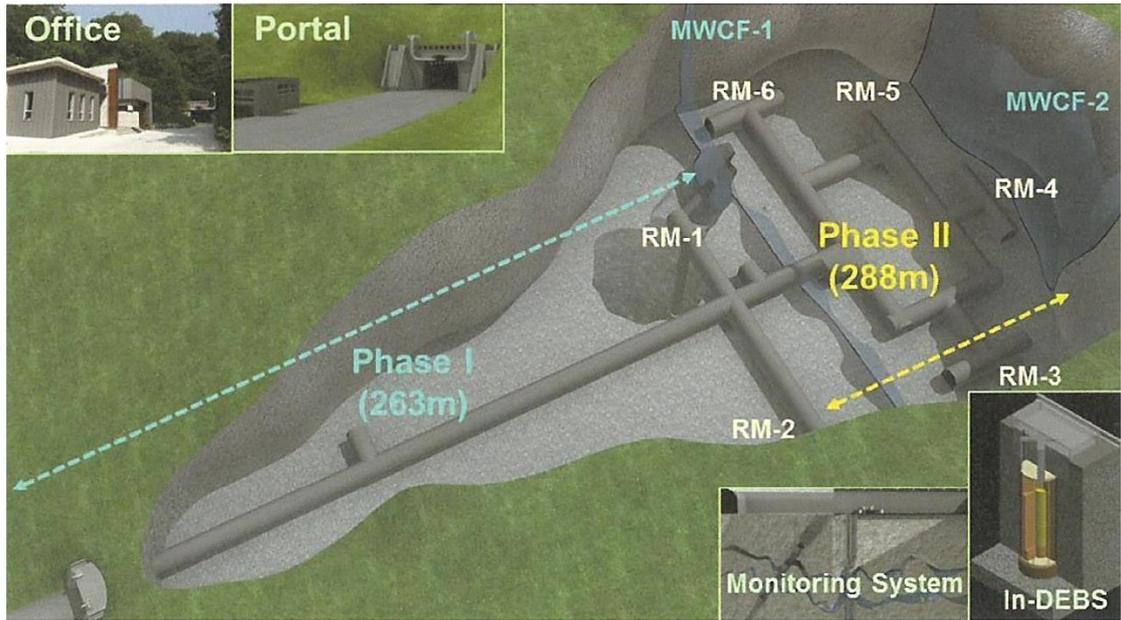


圖 41 : KURT 地下實驗室規劃空間示意圖

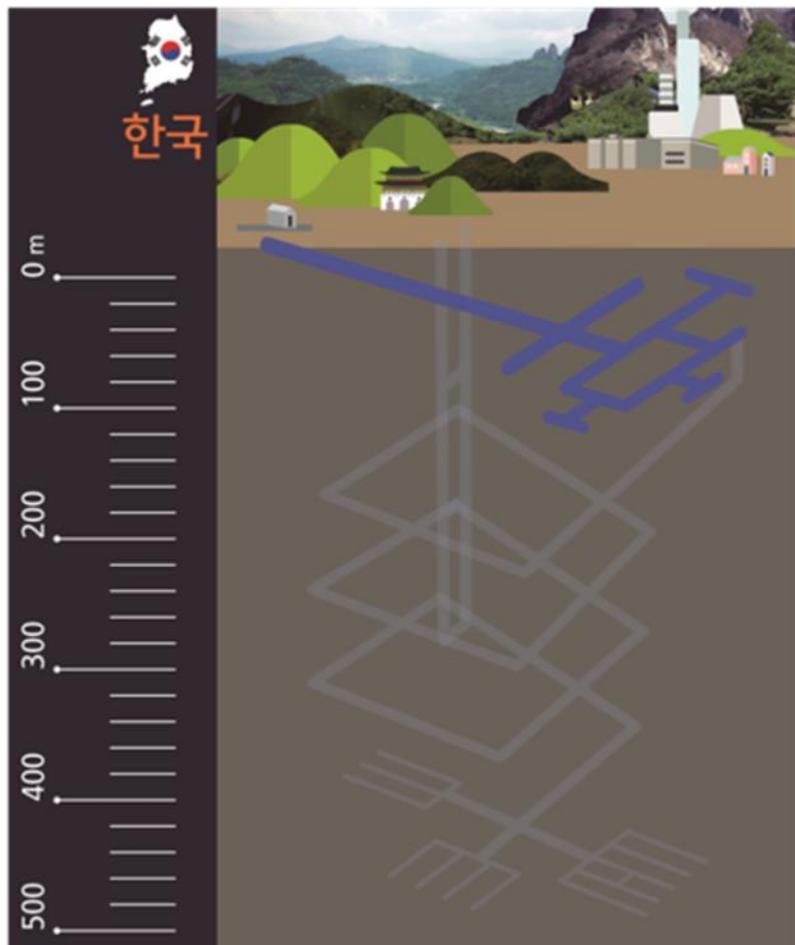


圖 42 : KURT 地下實驗室未來規劃示意圖

資料來源：工作會議簡報



圖 43 : KURT 地下實驗室導覽與解說



圖 44 : 台電公司團隊於 KURT 地下實驗室合影



圖 45 : KURT 花崗岩樣本採集



圖 46 : KURT 岩石力學現地應力試驗

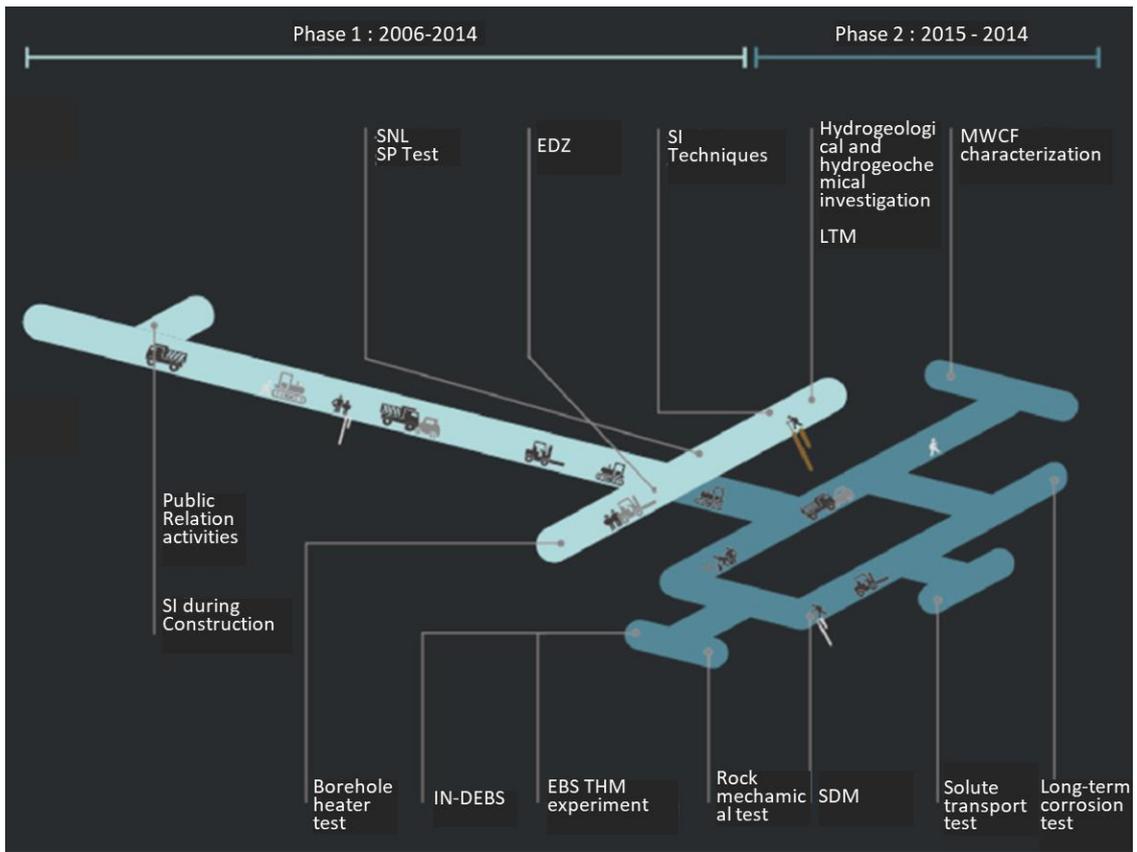


圖 47 : KURT 地下實驗室配置



圖 48 : KURT 縮尺工程障壁 EBS THM 耦合試驗

資料來源：工作會議簡報

## 肆、出國心得

用過核子燃料的最終處置是國際間仍在共同努力的研究議題，台電公司因加入 DECOVALEX 國際合作計畫，提供我國研究單位與世界一流研究機構直接互動的平台，藉由參與工作會議的機會更能夠分享國際最新研究成果，本次有幸代表公司出席，一方面藉此機會向國際社會展現我國現階段的處置技術研發能力，同時也深刻感受到其他國家政府對於放射性廢棄物最終處置的高度重視。

DECOVALEX 計畫的價值，在於各國無私分享處置相關大型實驗的原始數據，從現象的觀察、作用機制的探討、分析理論的發展，到最後數值模式的建立與各團隊間的平行驗證，過程當中累積了無數科學家的熱情與心血，雖然目前仍有相當多無法用模式解釋或預測的現象，但透過歷次工作會議上各國專家的集思廣益，模擬曲線已逐漸符合實驗數據的變化趨勢，每當有更進一步科學上的突破，對於地質處置長期安全的掌握也就更有信心。我國用過核子燃料最終處置計畫已正式進入第二階段，未來將有機會投入更多的研究資源與人力，計畫團隊將秉持相同的熱情與態度，持續精進並維持與國際相當的技術水平。

用過核子燃料採深地層處置已逐漸成為世界上的共識，這些使用核能的國家，大多也已開始規劃並興建地下實驗室，台電公司於 2017 年所提交的 SNFD2017 報告已說明我國具有發展最終處置技術的可行性，韓國 KURT 的相關經驗，將有助於我國未來持續推動地下實驗室的工作。

## 伍、建議

本次赴韓國首爾參加 DECOVALEX-2019 第六次工作會議，就與會過程與收穫心得，相關建議如下：

- 一、用過核子燃料最終處置的技術水準要求極高，惟有持續透過國際合作與交流才能獲取最新資訊，DECOVALEX 計畫更是相當難得的國際大型研究計畫，投入有限資源即可分享世界各國的試驗數據，建議未來應持續積極參與，對於提升我國處置相關技術與 THMC 耦合分析能力都有極大的助益。
- 二、目前台電公司團隊僅參與 DECOVALEX-2019 當中的三個研究項目，執行單位也有限，建議未來擴大參與的研究團隊與人力，綜整計畫下階段的目標需求後，積極投入下一期 DECOVALEX-2023 計畫。
- 三、由於地下實驗室地點的選定同樣具有一定敏感性，在國內尚未有明確法律授權可進行高放最終處置場的選址調查前，建議加強與國際地下實驗室的合作，完備必要的調查技術與模擬分析的驗證。
- 四、DECOVALEX-2019 計畫即將結束，台電公司團隊本期並未參加 Task-C 項目，但相關實驗數據對於我國下階段發展 HC 耦合分析能力應有相當大的幫助，考量 Task-C 下一期已確定不會延續，團隊負責人也已同意分享數據，因此建議可邀請該項目主要研究團隊日本的 JAEA 與美國 SNL 專家來台舉辦研討會。

## 六、附錄

附錄 I. DECOVALEX-2019 第六次工作會議議程

# 6<sup>th</sup> Workshop & Steering Committee Meeting

Seoul, Republic of Korea  
16<sup>th</sup> October – 19<sup>th</sup> October

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 <i>inc. 15 minutes break</i>
09:00	Welcome						
09:30	Invited Talk(s)						
10:00	Task Intros (20 mins each)						
10:30							
11:00							
11:30							
12:00							
12:30	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	
13:00							
13:30	Task B	Task D	Task C	Task A cont.			
14:00							
14:30					Break		
15:00					Planning Session		
15:30							
16:00							
16:30			Task F				
17:00							
17:30					Task Leader Meeting		
18:00				Close		Close	
18:30	Close	Close	Close		Close		
							Open SC Meeting
							Closed SC Meeting
							Close

16/10/2018 (Tuesday, Day 1 AM)

Room: Center Mark Hall

Time	Topic	Speaker
08:30-09:00	Registration	
09:00-09:15	Welcome	Jens Birkholzer
09:15-09:45	Overview of Spent Fuel Management Programme and KURT in Korea	Min-Hoon Baik
<b>Task Introductions and Invited Talks</b>		
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	<b>Break</b>	
11:00-11:20	Task D	Antonio Gens
11:20-11:40	Task E	Darius Seyedi
11:40-12:00	Task F	Hua Shao
12:00-12:20	Task G	Tobias Meier
12:20-13:30	<b>Lunch</b>	

16/10/2018 (Tuesday, Day 1 PM) – Stream 1

Room: Center Mark Hall 1

Time	Topic	Speaker
<b>Task B : Fault Slip Test</b>		
<b>Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock</b>		
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	<b>Break</b>	
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
16:20-16:35	Fault Reactivation using Roxol	Tobias Meier
16:35-16:55	Synthesis	Bastian Graupner / Jonny Rutqvist
16:55-17:15	Q&A with Yves Gugliemi	Yves Gugliemi
17:15-18:15	Task B Discussion	Bastian Graupner / Jonny Rutqvist
<b>18:15</b>	<b>Finish</b>	

16/10/2018 (Tuesday PM, Day 1 PM) – Stream 2

Room: Center Mark Hall 2

Time	Topic	Speaker
<b>Task D : INBEB</b>		
<b>HM and THM Interactions in Bentonite Engineered Barriers</b>		
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	<b>Break</b>	
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
<b>17:20</b>	<b>Finish</b>	

16/10/2018 (Tuesday PM, Day 1 PM) – Stream 3

Room: Meeting Room #4

Time	Topic	Speaker
<b>Task C : GREET</b>		
<b>Modelling of coupled behaviours during groundwater recovery process around the gallery</b>		
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	<b>Break</b>	
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
<b>16:30 – 16:35</b>	<b>Change-over – 5 mins</b>	
<b>Task F : FINITO</b>		
<b>Fluid inclusion and movement in tight rock</b>		
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
<b>18:30</b>	<b>Finish</b>	

17/10/2018 (Wednesday, Day 2 AM) – Stream 1

Room: Center Mark Hall 1

Time	Topic	Speaker
<b>Task A : ENGINEER</b>		
<b>Modelling advective gas flow in low permeability materials</b>		
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	<b>Break</b>	
11:00-11:20	Team 7: Quintessa	Alex Bond
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	<b>Lunch</b>	
13:30-14:15	Task A Discussion (cont)	Jon Harrington
14:15-14:30	<b>Change-over for DECOVALEX Future Phase Planning Session</b>	

17/10/2018 (Wednesday, Day 2 AM/PM) – Stream 2

Room: Meeting Room #4

Time	Topic	Speaker
<b>Task G : EDZ Evolution</b>		
<b>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</b>		
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
09:20-09:40	Team 1: Seoul National University	Saeha Kwon
09:40-10:00	<b>Break</b>	
10:00-10:20	Team 2: geomecon	Tobias Meier
10:20-11:40	Discussion of results, definition of next steps	All
11:40-12:30	<b>Change-Over</b>	
12:30-13:30	<b>Lunch</b>	
13:30-17:15	<b>VACANT</b>	
17:15-18:00	<b>Task Leader Meeting (Task Leads, Jens Birkholzer and Alex Bond)</b>	

17/10/2018 (Wednesday, Day 2 AM) – Stream 3

Room: Center Mark Hall 2

Time	Topic	Speaker
<b>Task E : Multi-scale heater tests:</b>		
<b>Upscaling of modelling results from small scale to one-to-one scale</b>		
08:30-08:40	Brief Introduction	Darius Seyedi
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	<b>Break</b>	
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	Darius Seyedi
11:20-12:20	Task E Discussion	Darius Seyedi
12:20-12:30	<b>Change-over for DECOVALEX Future Phase Planning Session</b>	
12:30-13:30	<b>Lunch</b>	

17/10/2018 (Wednesday, Day 2 PM) – Stream 1

Room: Center Mark Hall

Time	Topic	Speaker
<b>DECOVALEX Future Phase Planning Session</b>		
14:30-14:45	Introduction	Jens Birkholzer
14:45-16:00	Presentation of future Task ideas	Jens Birkholzer
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agenda TBD</li></ul>	
16:00-17:00	Discussion of proposals and further ideas	Jens Birkholzer
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agenda TBD</li></ul>	
17:00-17:15	Summary and Way Forward	Jens Birkholzer

**Workshop Dinner:**

18/10/2018 (Thursday, Day 3)

Room: Center Mark Hall

Time	Topic	Speaker
<b>Plenary (Chaired by Jens Birkholzer / Alex Bond)</b>		
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	<b>Break</b>	
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	<b>Lunch</b>	
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: Center Mark Hall

Time	Topic	Speaker
15:15-15:30	<b>Break</b>	

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

附錄 II. DECOVALEX-2019 技術參訪行程

19/10/2018 (Friday, Day 4)

**Technical Visit: KURT**

**Departure**

07:00 - 10:00 Travel to Daejeon by bus

**Seminar**

10:00 - 10:10 Welcome speech

10:10 - 10:50 Introduction of KURT and R&D activities at KURT

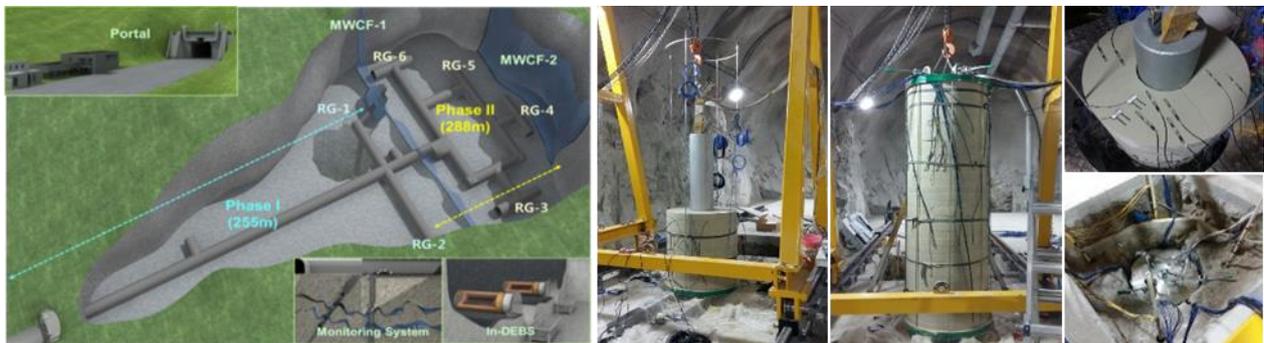
10:50 - 11:30 In-situ Demonstration of Engineered Barrier System (In-DEBS)

**Lunch**

11:30 - 13:00

**Technical visit**

13:00 - 16:00 KURT



**Return**

16:00 - 18:30 Travel to Center Mark Hotel by bus \*

\* If you want to go to Incheon international airport after the technical visit, you can take an airport limousine at Daejeon. We will take you to the bus stop and it will take about 20 ~ 30 minutes. And it will take about 3 ~ 3.5 hours from the bus stop to the airport. The fare of the limousine is about 22,000 won (about 20 USD) and it is not included the registration fee. You can book a ticket after 20 Sep. 2018 at the website(<https://txbuse.t-money.co.kr>). Unfortunately, CITI card is only available at the homepage.