

出國報告審核表

出國報告名稱：高放射性廢棄物最終處置技術交流研討會

出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
李宗倫	高放處置組組長	台灣電力公司核能後端營運處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 國際會議 (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	

出國期間： 105年5月16日至105年5月23日 報告繳交日期： 105年6月7日

出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.格式完整 (本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.內容充實完備.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.建議具參考價值
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.送本機關參考或研辦
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7.送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8.退回補正，原因：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 辦理本機關出國報告座談會 (說明會)，與同仁進行知識分享。
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 其他 _____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.其他處理意見及方式：


 專業工程師
 103.6.13
 林德福

報告人：  105.6.7 李彥宏
 單位：  105.6.8 吳才基
 主管處：  103.6.13 林德福
 總經理： _____
 主管： _____ 副總經理： 

說明：
 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務出國報告資訊網」為原則。

6/14

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放射性廢棄物最終處置技術交流研討會

頁數 45 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/李彥宏/02-2365-7210#2241

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

李宗倫/台灣電力公司/核能後端營運處/高放處置組組長/02-2365-7210#2207

李彥宏/台灣電力公司/核能後端營運處/技術規劃專員/02-2365-7210#2241

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：105.5.16~105.5.23

出國地區：美國

報告日期：105.6.7

分類號/目

關鍵詞：放射性廢棄物、最終處置計畫

內容摘要：

大型國際合作計畫 DECOVALEX(Development of coupled models and their validation against experiments)成立已超過 20 年，從 1992 年瑞典核能檢察署(Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI)發起後，目前已邁入第七期(DECOVALEX-2019)，主要目的係探討熱力、水力、力學及化學(thermal-hydrological-mechanical-chemical, THMC)4 項因子對高放射性廢棄物最終處置場的影響、發展相關模擬模式並利用現地的實驗數據進行驗證。

DECOVALEX-2019 計畫為期 4 年(2016-2019)，共有 7 項研究項目，研究內容含括實驗室的顯微鏡觀察到等比例的現地實驗，本期共有 12 國參加。本次研討會為此計畫的開案會議，包含 2 天技術討論及 1 天技術參訪，技術討論由各研究項目之主持人報告研究之目的與內容並進行討論，以便各國決定是否要參與該研究項目並同時執行數值模擬之驗證。

出席此研討會，可以獲得目前國際上，各國在地下實驗室進行研究項目的相關資訊，同時認識國際上相關領域的專家，有助於國內最終處置計畫的推動。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

出國報告(出國類別：開會)

高放射性廢棄物最終處置技術交流 研討會

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：李宗倫 高放處置組組長

李彥宏 技術規劃專員

派赴國家：美國

出國期間：105年5月16日~105年5月23日

報告日期：105年6月7日

摘要

大型國際合作計畫 DECOVALEX(Development of coupled models and their validation against experiments)成立已超過 20 年，從 1992 年瑞典核能檢察署 (Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI) 發起後，目前已邁入第七期 (DECOVALEX-2019)，主要目的係探討熱力、水力、力學及化學(thermal-hydrological-mechanical-chemical, THMC)4 項因子對高放射性廢棄物最終處置場的影響、發展相關模擬模式並利用現地的實驗數據進行驗證。

DECOVALEX-2019 計畫為期 4 年(2016-2019)，共有 7 項研究項目，研究內容包括實驗室的顯微鏡觀察到等比例的現地實驗，本期共有 12 國參加。本次研討會為此計畫的開案會議，包含 2 天技術討論及 1 天技術參訪，技術討論由各研究項目之主持人報告研究之目的與內容並進行討論，以便各國決定是否要參與該研究項目並同時執行數值模擬之驗證。

出席此研討會，可以獲得目前國際上，各國在地下實驗室進行研究項目的相關資訊，同時認識國際上相關領域的專家，有助於國內最終處置計畫的推動。

目錄

摘要.....	i
目錄.....	ii
圖目錄.....	iii
目的.....	1
壹、 過程	2
貳、 工作內容	3
一、 第一天技術研討會	4
(一) 美國高放射性廢棄物處置相關研究現況.....	5
(二) DECOVALEX-2019 計畫介紹	10
(三) 研究項目 A：ENGINEER 討論.....	12
(四) 研究項目 E：Upscaling of Heater Tests 討論.....	14
(五) 研究項目 C：GREET 討論	18
二、 第二天技術研討會	21
(一) 研究項目 D：INBEB 討論.....	22
(二) 研究項目 B：Fault slip test 討論	26
(三) 研究項目 F：FINITO 討論	28
(四) 研究項目 G：EDZ Evolution 討論	30
(五) 專案管理會議.....	32
三、 技術參訪	33
參、 心得	36
肆、 建議	37

圖目錄

圖一 美國勞倫斯柏克萊國家實驗室及蓋瑟爾斯地熱場相對位置.....	2
圖二 第一天技術研討會議程.....	4
圖三 美國能源實驗室位置.....	7
圖四 美國預計用過核子燃料的產量.....	7
圖五 美國能源部核能總署組織圖.....	8
圖六 美國高放射性廢棄物貯存及處置設施時程.....	8
圖七 美國用過核子燃料及高放射性廢棄物研究分類.....	9
圖八 計畫主持人 Jens Birkholzer 及技術顧問 Alex Bond	11
圖九 DECOVALEX-2019 計畫未來可能的會議型式	11
圖十 球面流實驗.....	12
圖十一 現地大規模注氣試驗.....	13
圖十二 3 軸試驗.....	13
圖十三 法國處置場概念圖.....	15
圖十四 Cigéo 處置場位置圖	15
圖十五 升尺度概念.....	16
圖十六 小規模 TED 實驗.....	16
圖十七 大規模 ALC 實驗.....	17
圖十八 大型加熱器.....	17
圖十九 日本瑞浪地下實驗室.....	19
圖二十 封閉試驗坑道示意圖.....	19
圖二十一 封閉試驗坑道現地照片.....	20
圖二十二 封閉試驗坑道儀器部置圖.....	20
圖二十三 第二天技術研討會議程.....	21
圖二十四 EB 實驗示意圖	23
圖二十五 EB 實驗現地照片	23
圖二十六 FEBEX 實驗示意圖.....	24
圖二十七 FEBEX 實驗現地照片	24
圖二十八 FEBEX 實驗第一次拆除.....	25
圖二十九 FEBEX 實驗最終拆除.....	25
圖三十 井下位移偵測器.....	26
圖三十一 儀器布置位置圖.....	27
圖三十二 模型示意圖.....	27
圖三十三 現地儀器.....	29
圖三十四 顯微鏡觀測.....	29
圖三十五 瑞典 Äspö 地下實驗室 TAS04 坑道.....	31

圖三十六 瑞典 Äspö 地下實驗室 TAS04 坑道裂隙圖.....	31
圖三十七 DECOVALEX-2019 開案會議出席者合影	32
圖三十八 Calpine geothermal visitors center 解說.....	33
圖三十九 美國第一座地熱發電機組.....	34
圖四十 地熱電廠.....	34
圖四十一 蓋瑟爾斯地熱場.....	35
圖四十二 硫噴氣孔.....	35

目的

大型國際合作計畫 DECOVALEX(Development of coupled models and their validation against experiments)成立已超過 20 年，從 1992 年瑞典核能檢察署 (Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI) 發起後，目前已邁入第七期 (DECOVALEX D-2019)，主要目的係探討熱力、水力、力學及化學(thermal-hydrological-mechanical-chemical, THMC)4 項因子對高放射性廢棄物處置場的影響、發展相關模擬模式並利用現地的實驗數據進行驗證。

DECOVALEX -2019 計畫為期 4 年(2016-2019)，本期共有 12 國參加，預計每半年召開 1 次技術研討會，本次研討會為計畫的開案會議，由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)召開，並由其地球與環境科學領域、地質能源的分部長(Division Director, Energy Geosciences) Dr. Jens T. Birkholzer 擔任召集人及主持人。

參加本次研討會不僅能瞭解目前國際上最新的研究成果，有助於國內高放射性最終處置計畫之推動；並且能與各國高放射性處置相關領域專家認識，有助未來與國際間的交流；同時透過 DECOVALEX-2019 計畫內各研究項目的簡報過程，探討國內研究團隊參與之可能性。

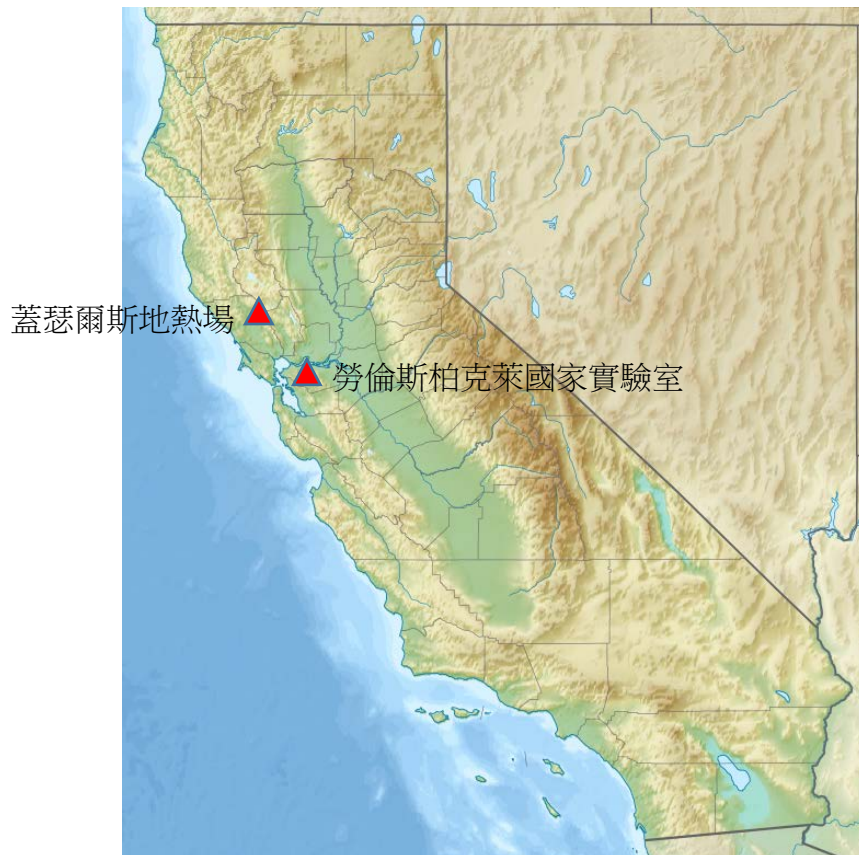
壹、過程

自 105 年 5 月 16 日出發，迄 5 月 23 日返國(共計 8 天)，參加由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室舉辦之 DECOVALEX-2019 技術研討會並參訪蓋瑟爾斯地熱場(The Geysers Geothermal Field)，其在美國加州的相對位置詳圖一。

詳細訪問行程如下：

表一 訪問行程及工作內容

日期	地點與行程	工作內容
5 月 16 日(一)	臺北到舊金山	往程/整理資料
5 月 17 日(二)	舊金山到柏克萊	
5 月 18 日(三)	柏克萊	參加技術研討會
5 月 19 日(四)	柏克萊	參加技術研討會
5 月 20 日(五)	米德爾敦	參訪蓋瑟爾斯地熱場
5 月 21 日(六)	柏克萊到舊金山	返程
5 月 22 日(日)	舊金山到臺北	
5 月 23 日(一)		



圖一 美國勞倫斯柏克萊國家實驗室及蓋瑟爾斯地熱場相對位置

貳、工作內容

本次由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室召開之 DECOVALEX-2019 開案會議，包含 2 天的技術研討會及 1 天的技術參訪，出席的單位有美國聖地亞國家實驗室(Sandia National Laboratory)、法國國家放射性廢料管理局(French National Agency for Radioactive Waste Management, ANDRA)及輻射防護暨核能安全研究所(The Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety, IRSN)、瑞士核能管制機關(Swiss Nuclear Safety Inspectorate, ENSI)、瑞典輻射安全局(The Swedish Radiation Safety Authority, SSM)、加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)、日本原子能機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)、韓國原子能研究所(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)及地質與礦產資源研究院(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM)、英國地質調查所(British Geological Survey, BGS)、德國聯邦地球科學與自然資源研究所(Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, BGR)、捷克放射性廢棄物最終處置場管理局(Radioactive Waste Repository Authority, SURAO)與台灣電力公司等。

一、第一天技術研討會

DECOVALEX-2019 計畫共含 7 項研究主題，分在 2 天研討會中進行討論，其第一天的議程詳圖二。



1st Workshop & Steering Committee Meeting

Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley, California, USA
18th-20th May 2016

Day 1 (18th May 2016 – Chair: Jens Birkholzer)

08:30 - 09:00 On-site registration and refreshments

Opening and Special session

09:00 – 09:15 Welcoming address (Jens Birkholzer)

09:15 – 09:45 Guest Speaker: Earth and Environmental Sciences at Berkeley Lab (Susan Hubbard, Associate Director, LBNL)

09:45 – 10:15 Guest Speaker: Current Status of the US Radioactive Waste Disposal Program (TBD)

10:15 – 10:30 Workshop Organisational Matters (Jens Birkholzer)

10:30 - 11:00 Break

Session 1. Overall Organisation of the D-2019 Project

11:00 – 11:30 D-2019 Overview (Jens Birkholzer)

11:30 – 12:00 D-2019 Organisational Details (Alex Bond)

12:00 – 13:00 Lunch

Session 2. Task A – ENGINEER – Modelling advective gas flow through low permeability materials.

13:00 – 13:30 Task Overview, Technical and Proposed Schedule (Jon Harrington, BGS)

13:30 – 14:30 Task Discussion (All)

14:30 – 14:45 Break

Session 3. Task E – Multi-scale Heater Experiments – Upscaling of modelling and experimental results from small scale to one-to-one scale.

14:45 – 15:15 Task Overview, Technical and Proposed Schedule (Manon Vitel, ANDRA)

15:15 – 16:15 Task Discussion (All)

16:15 – 16:30 Break

Session 4. Task C – GREET - Hydro-mechanical-chemical-biological processes during groundwater recovery.

16:30 – 17:00 Task Overview, Technical and Proposed Schedule (Teruki Iwatsuki, JAEA)

17:00 – 18:00 Task Discussion (All)

19:00 – 20:00 Group Dinner at Revival Bar + Kitchen 2102 Shattuck Ave, Berkeley

Finish day 1

圖二 第一天技術研討會議程

第一天的會議內容共分為 5 個部份：(一)美國高放射性廢棄物處置相關研究現況；(二) DECOVALEX-2019 計畫介紹；(三)研究項目 A：ENGINEER 討論；(四)研究項目 E：Upscaling of Heater Tests 討論及(五)研究項目 C：GREET 討論。

(一) 美國高放射性廢棄物處置相關研究現況

在會議開始前，先由主持人 Jens Birkholzer 進行開場致詞，每位出席者進行自我介绍，相互瞭解各自的背景。

接著由其地球與環境科學領域的副主任(Associate Director, Earth and Environmental Sciences Area)Susan Hubbard 女士進行勞倫斯柏克萊國家實驗室的簡介。

勞倫斯柏克萊國家實驗室坐落在加州大學柏克萊分校的中心校園內，位於柏克萊山的山頂，隸屬於美國能源部(Department of Energy, DOE)，在美國類似的能源實驗室共有 17 處(詳圖三)。其柏克萊實驗室的起源可追溯至 1931 年勞倫斯科學團隊(Lawrence's team science)，目前分為計算科學、生物科學、物理科學、能源科學、能源技術以及地球與環境科學(Computing Sciences, Biosciences, Physical Sciences, Energy Sciences, Energy Technologies, and Earth & Environmental Sciences)6 大領域，擁有超過 4,200 名員工，曾出現過 13 位諾貝爾獎得者。

本次會議的東道主為地球與環境科學領域，其下分為地球化學、地球物理、水文學、生態與氣候(Geochemistry, Geophysics, Hydrogeology, Ecology, Climate)5 個部門，共有約 500 名員工，主要任務為創造永續管理地球能源的系統及獲得所需的相關知識。

本議題最後由聖地亞國家實驗室的 Dr. David C. Sassani 說明美國高放射性廢棄物處置相關研究現況。

截至目前為止美國的用過核子燃料約有 80,150 MTHM (metric tons heavy metal)，其中約 25,400 MTHM 以乾式貯存存放，每年全美產生約 2,200 MTHM，至 2060 年美國預計用過核子燃料的產量詳圖四 (假設沒有新的機組，現行的機組全部延役)。

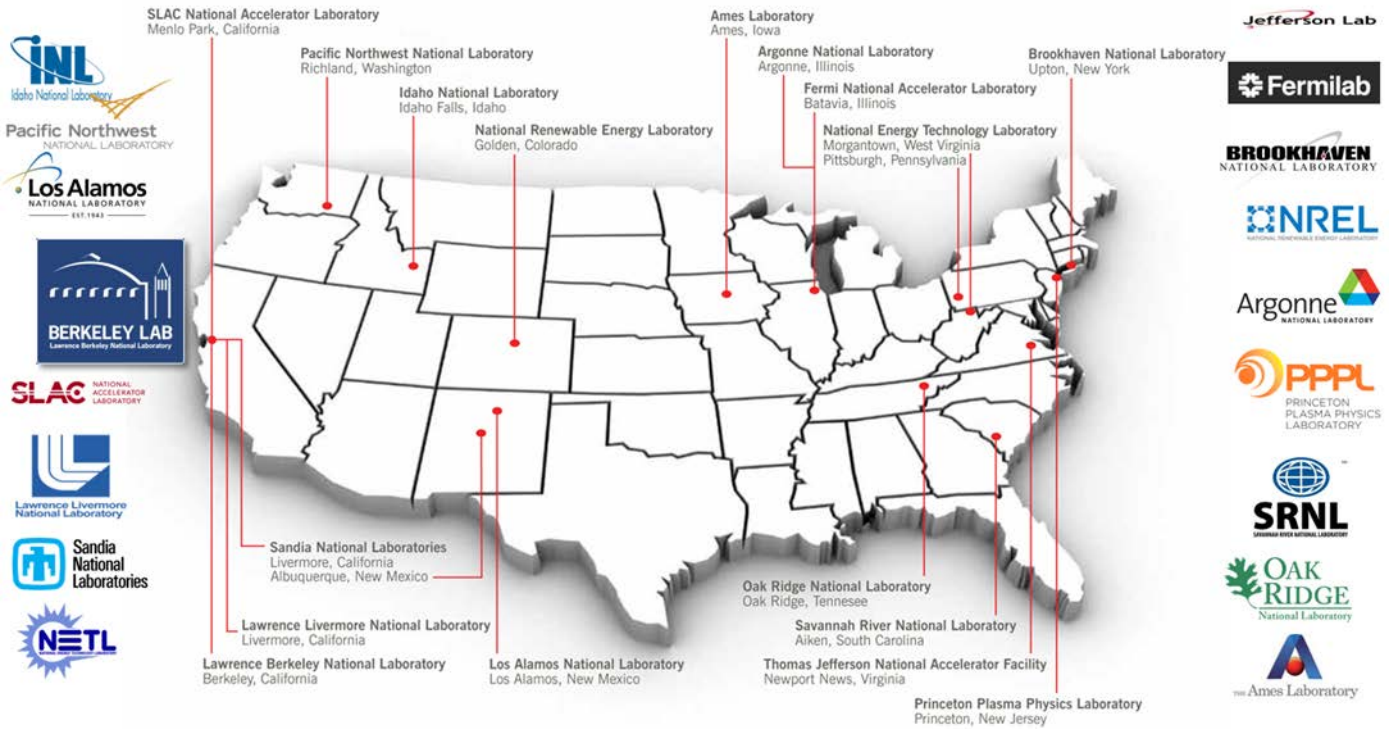
依據美國能源部核能辦公室 (Office of Nuclear Energy, Department of Energy, DOE-NE)(組織圖詳圖五)2013 年 1 月發布用過核子燃料及高放射性廢棄物管理及處置策略 (Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste)，其高放射性廢棄物相關貯存及處置設施時程如下(詳圖六)：

1. 2021 年先導型中期貯存設施開始啟用(pilot interim storage facility)；
2. 2025 年大型中期貯存設施開始啟用(larger interim storage facility)；
3. 2026 年選定最終處置場場址；2042 年完成申照；2048 開始運轉。

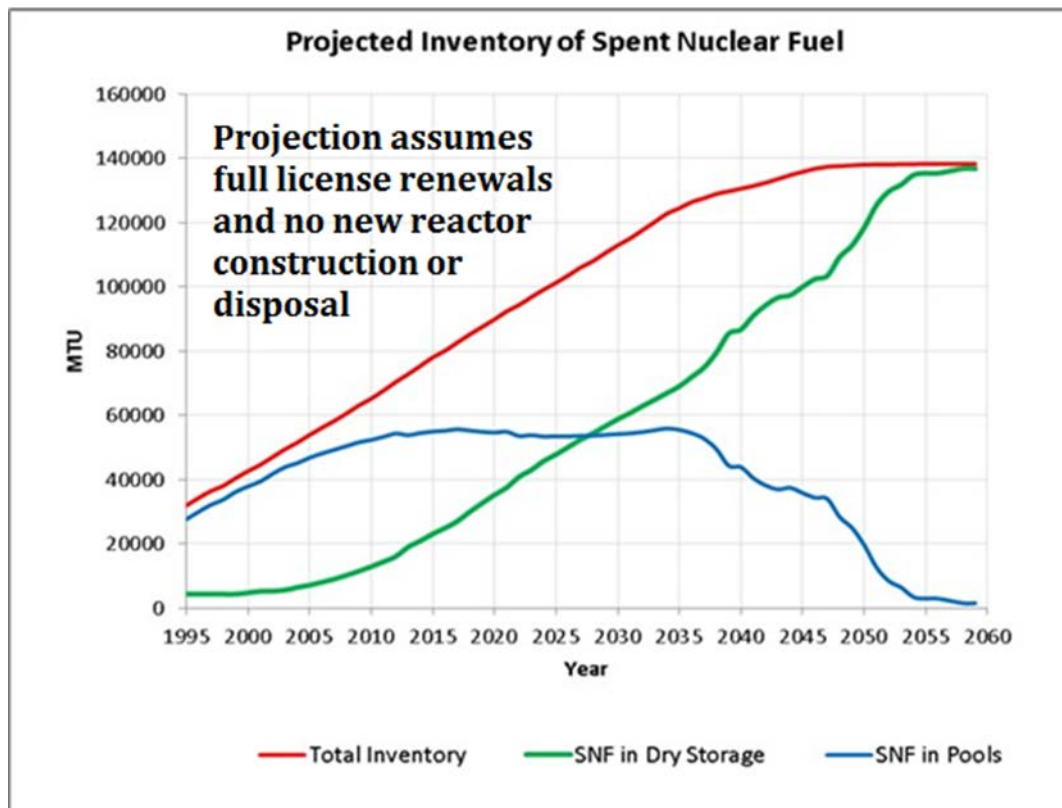
研究項目可概略分為 3 類(1)貯存與運輸 (Storage and Transportation)；(2)處置(Disposal)及(3)用過核子燃料與高放射性廢棄物研究(DOE Managed HLW and SNF Research)(詳圖七)。其中 2016 年完成處置項之研究項目如下：

1. Evaluation of Used Nuclear Fuel Disposition in Clay-bearing Rocks (SNL, 9/15/2016)
2. Evaluation of Used Nuclear Fuel Disposition in Crystalline Rocks (SNL, 9/21/2016)
3. International Collaboration Activities in Different Geologic Disposal Environments (LBNL, 9/23/2016)
4. Deep Borehole Field Test Conceptual Design Report (SNL, 6/30/2016)

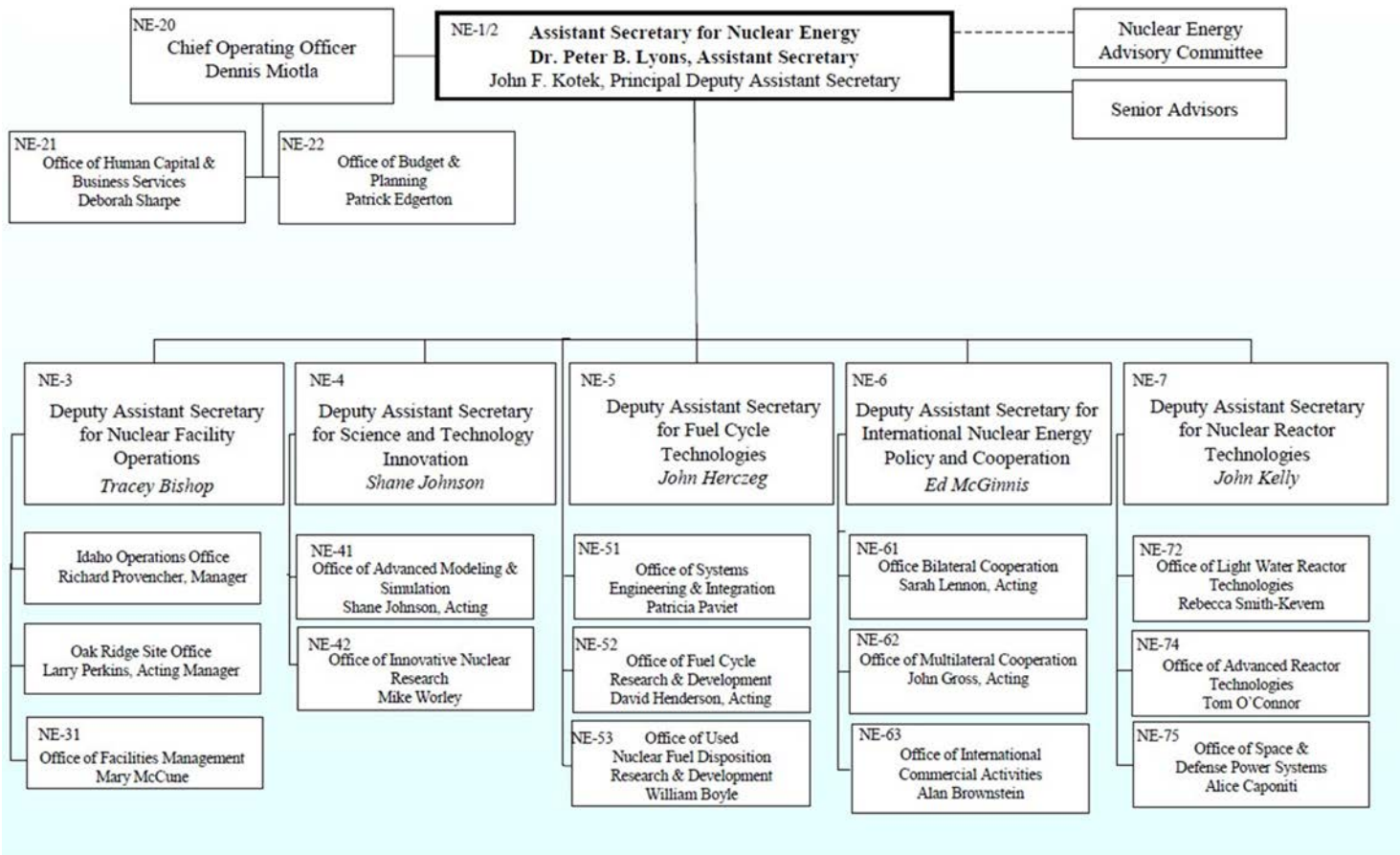
5. Deep Borehole Field Test Laboratory and Borehole Testing Strategy (SNL, 8/31/2016)



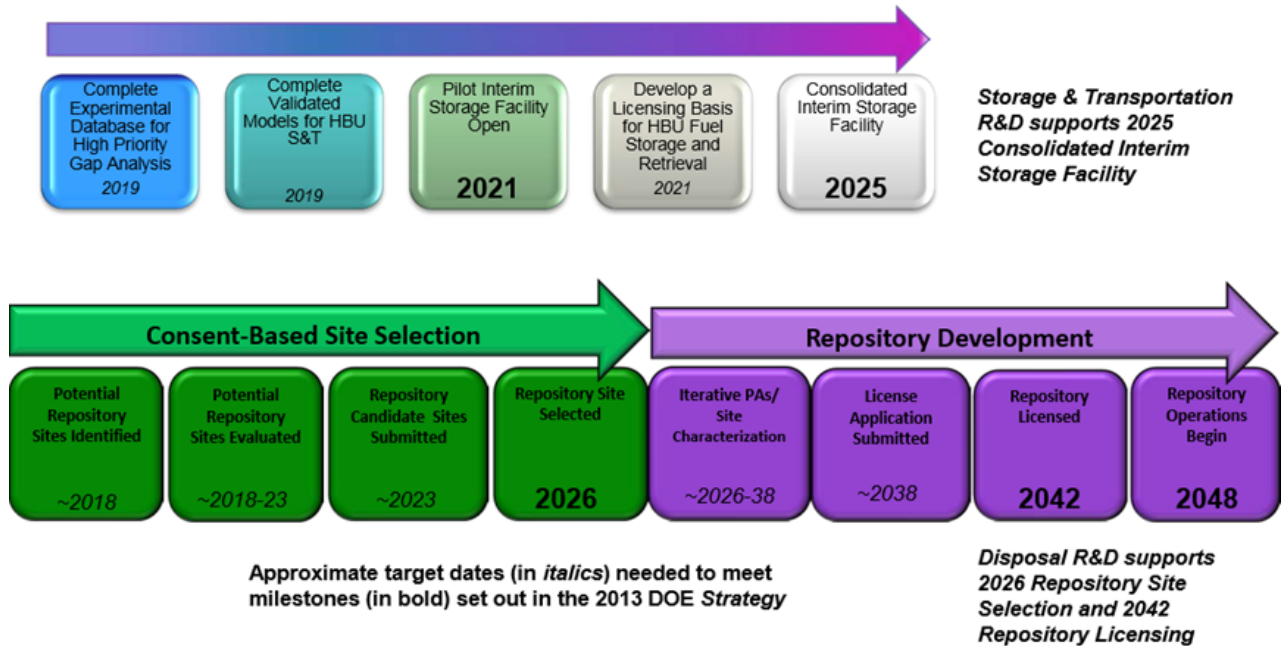
圖三 美國能源實驗室位置



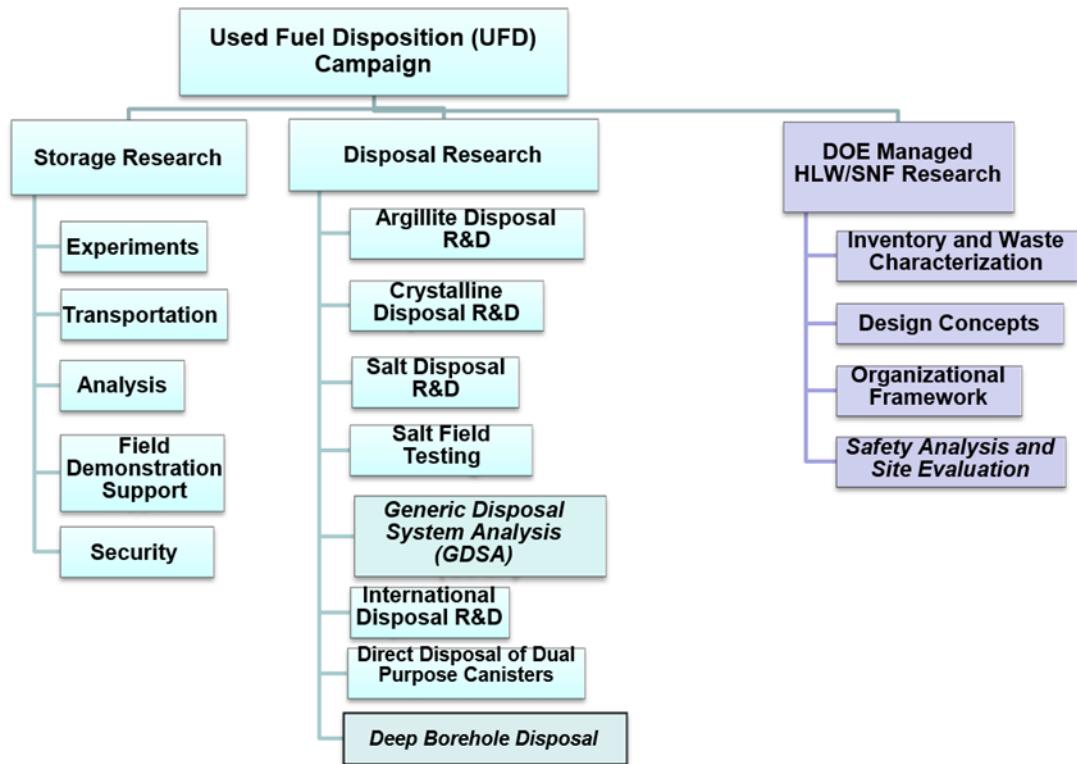
圖四 美國預計用過核子燃料的產量



圖五 美國能源部核能總署組織圖



圖六 美國高放射性廢棄物貯存及處置設施時程



圖七 美國用過核子燃料及高放射性廢棄物研究分類

(二) DECOVALEX-2019 計畫介紹

DECOVALEX-2019 計畫主持人 Jens Birkholzer 及技術顧問 Alex Bond(詳圖八),是從 2015 年開始擔任,前任計畫主持人為 John Hudson(2007-2015)、技術顧問為 Lanru Jing(1992-2015)。

DECOVALEX 為 DEvelopment of Coupled models and their VALidation against Experiments 的縮寫,成立於 1992 年,主要探討熱力、水力、力學及化學 4 項因子對高放射性廢棄物最終處置場的影響,有 5 大目標:(1)發展及測試熱水力化耦合模型的模擬及其演算法;(2)提升對熱水力化作用在地球科學及工程領域的瞭解;(3)進行模擬結果與現地實驗數據的比較;(4)設計實驗去支援模擬程式的發展及(5)將熱水力化耦合模型運用於最終處置場的功能與安全評估。

本計畫預計每半年召開 1 次技術討論會議,其未來可能的會議型式(詳圖九)將先進行各研究項目的分別討論,再將各討論結果與全部參與者進行說明。DECOVALEX-2019 計畫共有 5 個核心研究項目(Task A-E)及 2 個支援型研究項目(Task F-G)如下:

Task A : **ENGINEER** – 模擬平流氣體在低滲透率物質流動情形。

Task B : **Fault Slip Test** – 模擬粘土性母岩(argillaceous rock)中斷層受誘發的滑動情形。

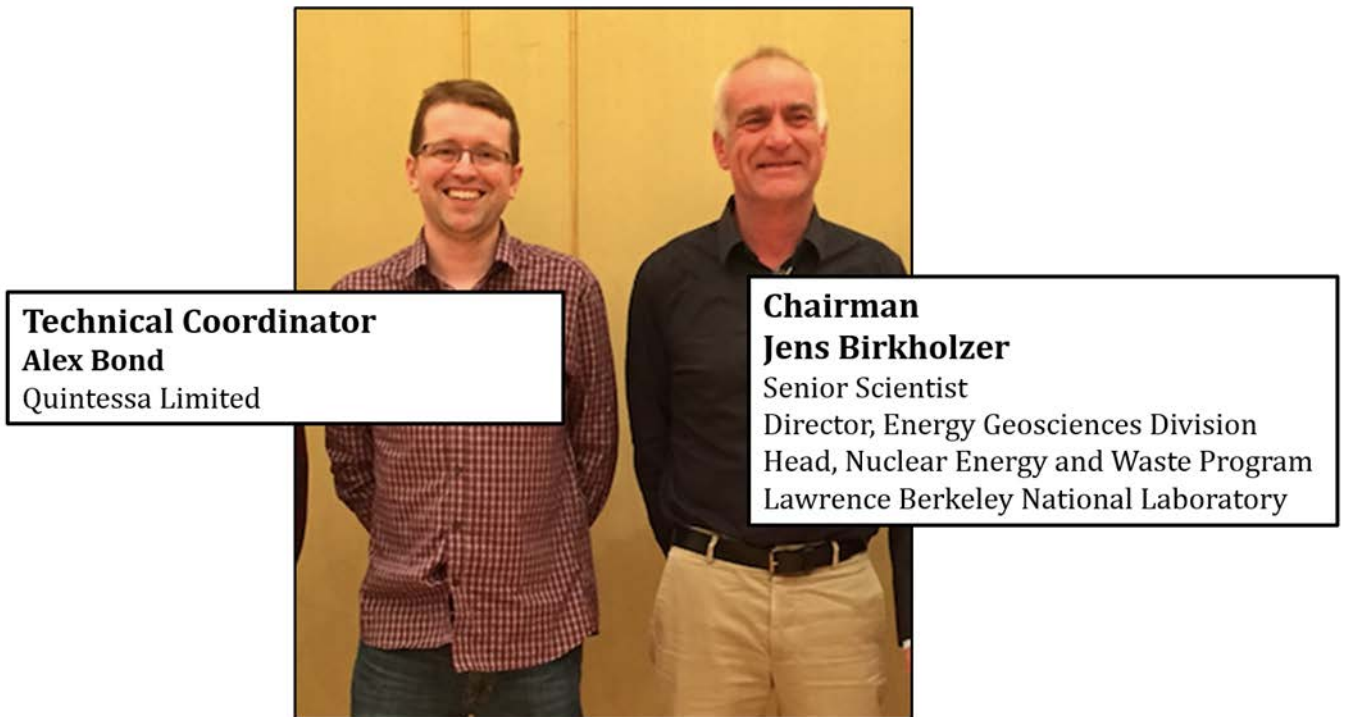
Task C : **GREET** – 工程障壁在地下水回填處置場時水力化及生物作用情形。

Task D : **INBEB** – 水力在工程障壁內的相互作用。

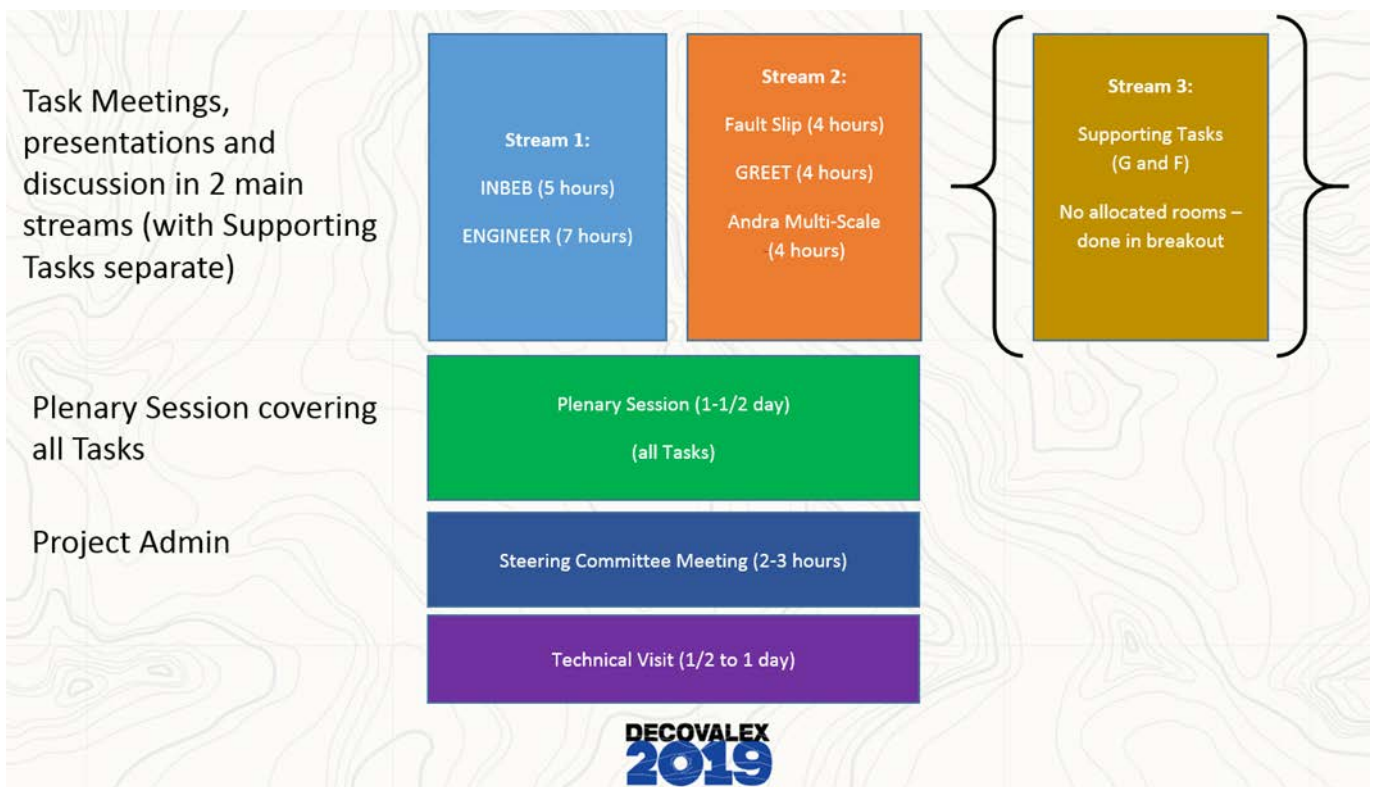
Task E : **Upscaling Heater Tests** – 利用小規模實驗室試驗結果去模擬全尺寸模型。

Task F : **FINITO** – 在致密岩體中流體包裹體的移動情形。

Task G : **EDZ Evolution** – 瞭解最終處置場在各階段開挖擾動帶對導水率及滲透率的影響。



圖八 計畫主持人 Jens Birkholzer 及技術顧問 Alex Bond



圖九 DECOVALEX-2019 計畫未來可能的會議型式

(三) 研究項目 A：ENGINEER 討論

本項研究內容由英國地質調查所 Dr. Jon Harrington 進行說明，ENGINEER 為 modElliNg Gas INjection ExpERiments 的縮寫，是由英國地質調查所提出，主要目的為探討在致密膨潤土及自然泥岩物質中，控制氣體平流移動的機制和作用。

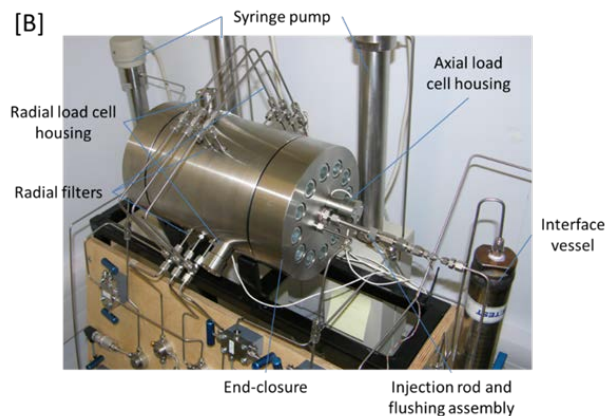
其內容包含在實驗室進行的小規模實驗及在現地進行的大型實驗，分為 4 個階段如下：

第一階段為在實驗室進行實驗，量測 1 維流體通過飽和膨潤土的情形，進行 2 種條件(同邊界壓力 isotropic boundary stress 及定容邊界壓力 constant volume boundary stress)下的試驗。

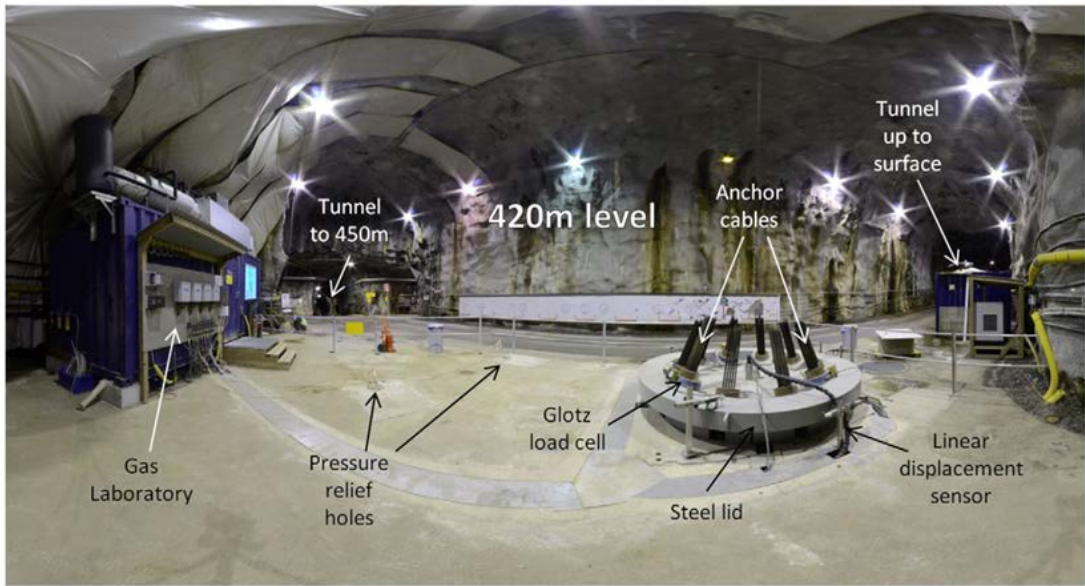
第二階段也是在實驗室進行實驗(如圖十)，量測球面流(spherical flow)在定容邊界壓力下通過飽和膨潤土的情形，利用 2 種不同膨潤土(Mx80-10 及 Mx80-A)進行試驗。

第三階段為在現地進行的大型實驗 Lasgit(如圖十一)，大規模注氣試驗(Large scale gas injection test)，共進行 4 種不同試驗。

第四階段為在實驗室自然粘土物質(Callovo-Oxfordian claystone)進行 3 軸試驗(triaxial test)(如圖十二)，量測氣體通過情形。



圖十 球面流實驗



圖十一 現地大規模注氣試驗



圖十二 3 軸試驗

(四) 研究項目 E：Upscaling of Heater Tests 討論

本簡報是由法國國家放射性廢料管理局 ANDRA 的 Manon VITEL 進行說明，簡報內容先說明法國的處置概念(詳圖十三)，接著說明本研究項目的架構及實驗方法。

法國預定的 Cigéo 處置場位於巴黎盆地東邊(詳圖十四)，處置母岩為 Callovo-Oxfordian 粘土層，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。廢棄物罐預計處置於水平的處置坑道(長徑 0.7 公尺，長 80 公尺)中，有 2 項設計準則：

1. 熱設計準則(thermal criteria): 要避免(1)孔隙水蒸發及(2)岩石相變產生。
2. 熱水力作用準則(THM criterion)：要避免母岩產生有危害的裂隙。

將小規模實驗得到的資訊運用到處置場的設計及安全評估計算是很重要的(升尺度 Upscaling 如圖十五)，本研究預計將規模 0.1 平方公里的研究數據運用到規模 8 平方公里的處置場設計，進行模擬分析。本研究分為 4 個階段執行。

第一階段將進行 3 維熱水力模型的校驗，將模擬結果與解析解(analytical solution)進行比較。

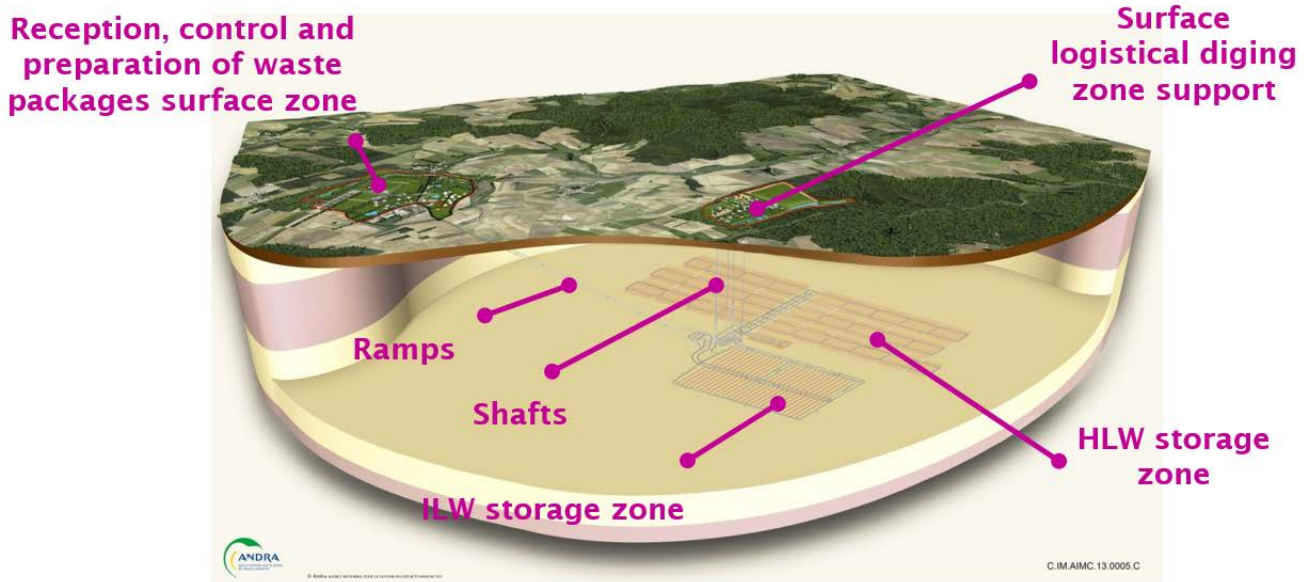
第二階段將進行較小規模的現地實驗(TED experiment 詳圖十六)，主要目的為瞭解熱水力在粘土中的行為模式。

第三階段將進行較大規模的現地實驗(ALC experiment 詳圖十七)，在 25 公尺長的處置坑道中放置加熱器(如圖十八)，以得到更接近實際處置場的結果。分為 3 步驟。

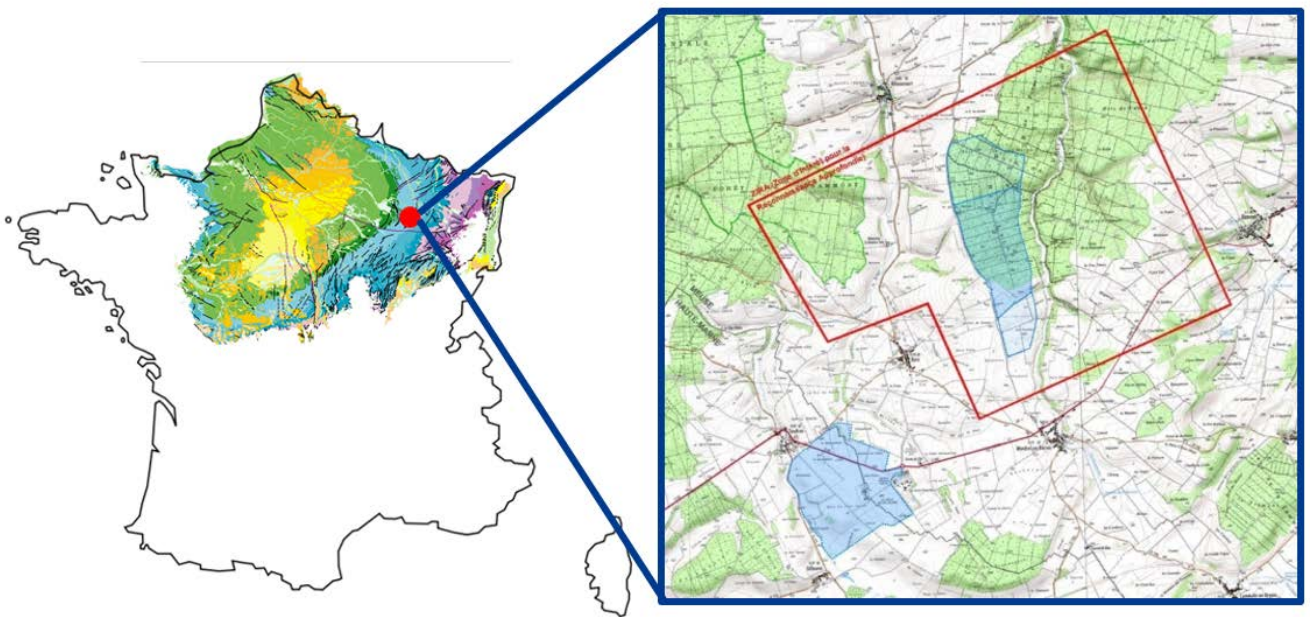
1. 進行 ALC 實驗的模擬。

2. 利用現地實驗量測到的數據，去修正及解釋模擬模型。
3. 將實驗結果反饋到設計上。

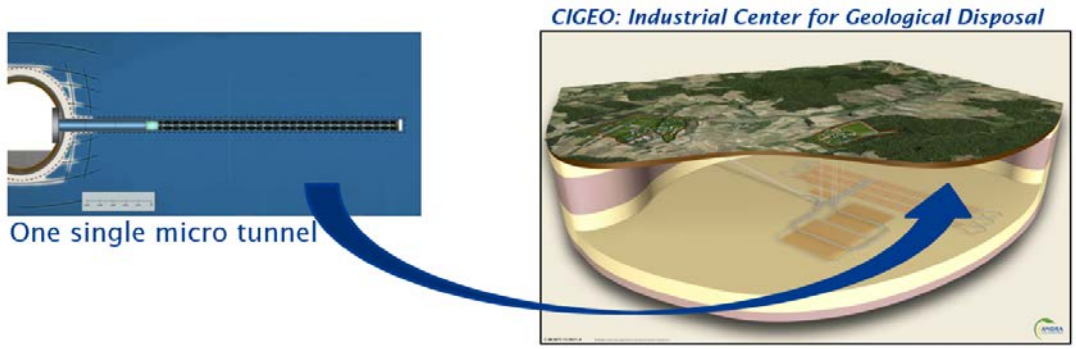
第四階段為利用前面階段模擬結果，去模擬全尺寸處置場模型。



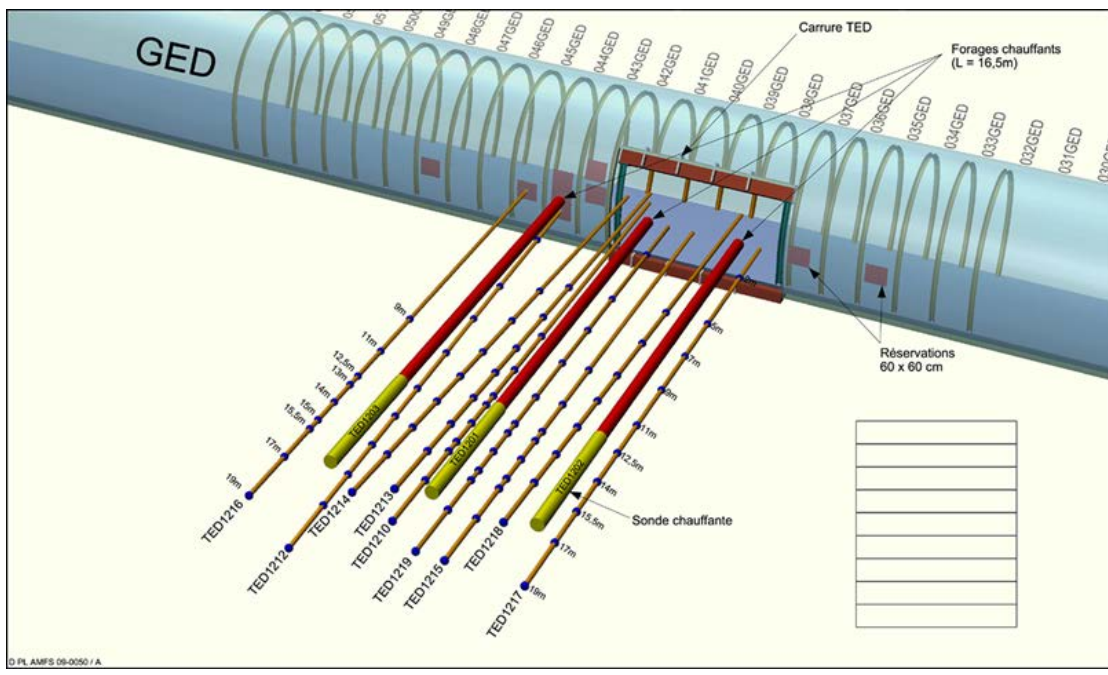
圖十三 法國處置場概念圖



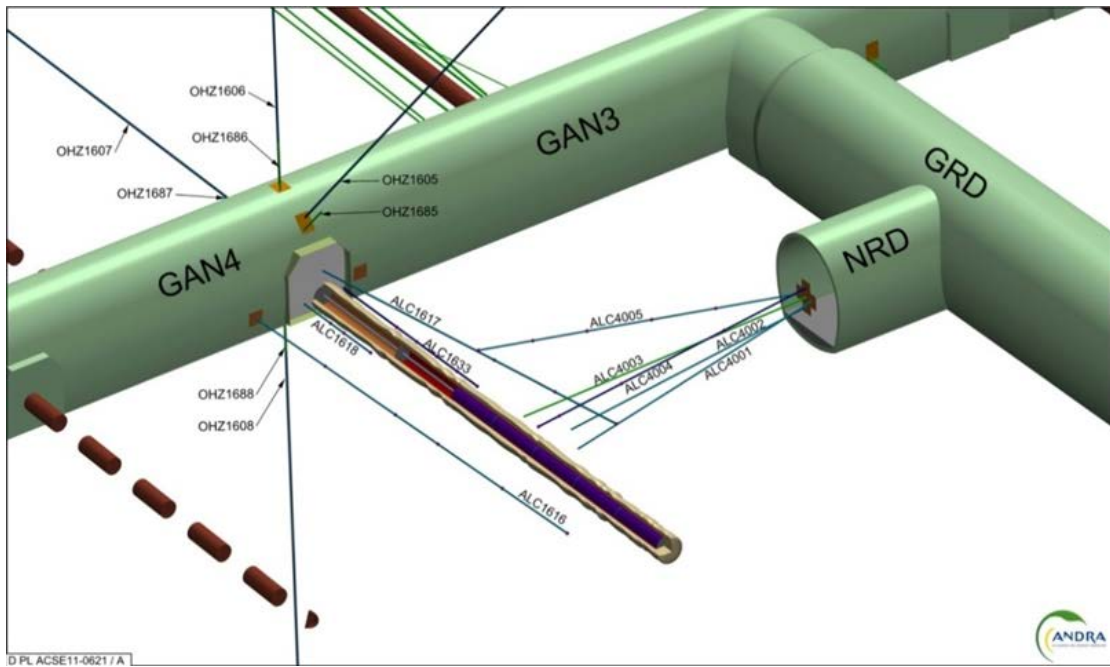
圖十四 Cigéo 處置場位置圖



圖十五 升尺度概念



圖十六 小規模 TED 實驗



圖十七 大規模 ALC 實驗



圖十八 大型加熱器

(五) 研究項目 C：GREET 討論

本研究項目由日本原子能機構 JAEA 提出，由瑞浪(Mizunami) 地下實驗室(如圖十九)的 Teruki IWATSUKI 進行簡報說明。GREET 為 Groundwater REcovery Experiment in Tunnel 的縮寫，主要有 3 個目的：(1)瞭解處置場封閉後，地質環境的回復情形(To understand the recovery process and mechanism of geological environment during facility closure)；(2)驗證水力化及生物耦合模型(To verify the H-M-C-B simulation methodology for recovery process in fractured granite)；(3)發展處置場封閉後的監控機制(To develop the monitoring technique for facility closure phase and the appropriate closure method taking recovery process into account)。

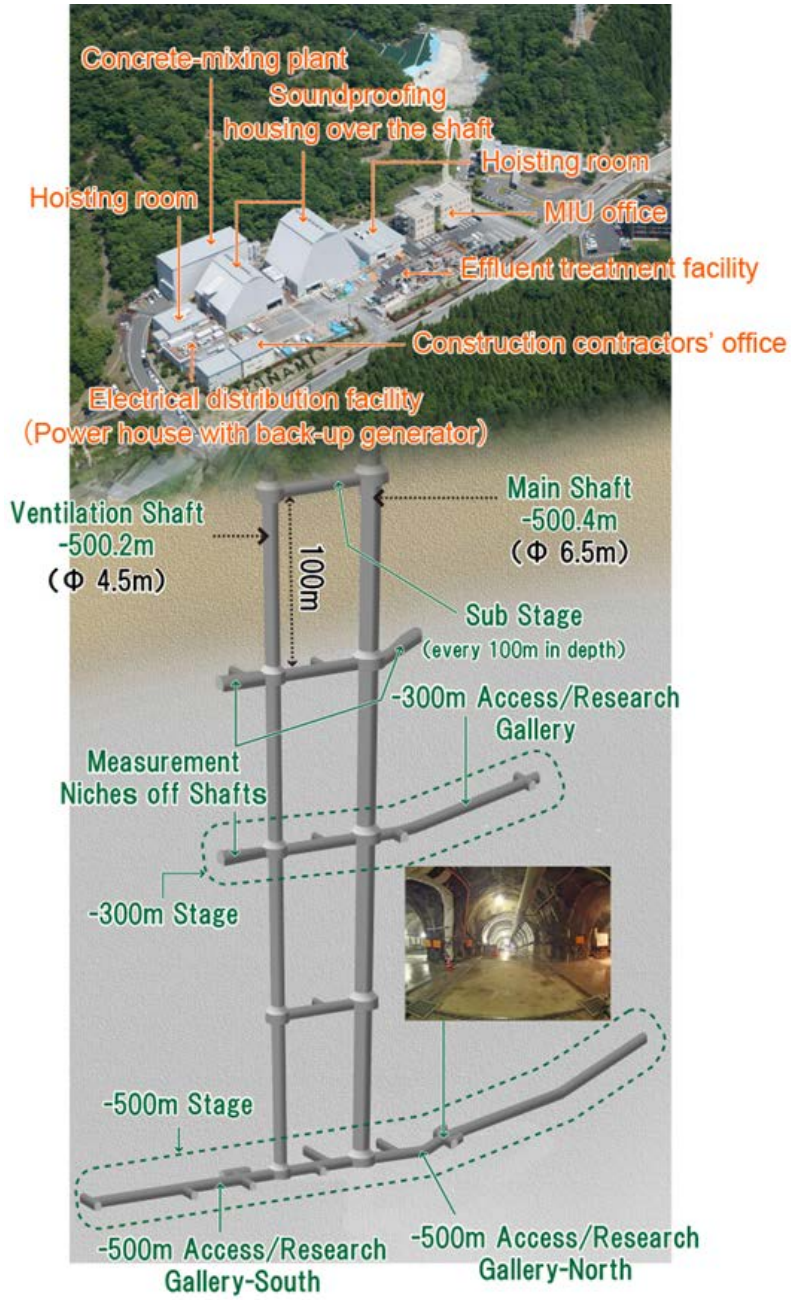
本實驗內容為在瑞浪地下實驗室開挖一條封閉試驗坑道(Closure test drift, CTD 如圖二十及圖二十一)，分為三個階段執行。

第一階段於封閉試驗坑道開挖期間，先進行模擬，再與後續開挖時的量測結果進行比對。

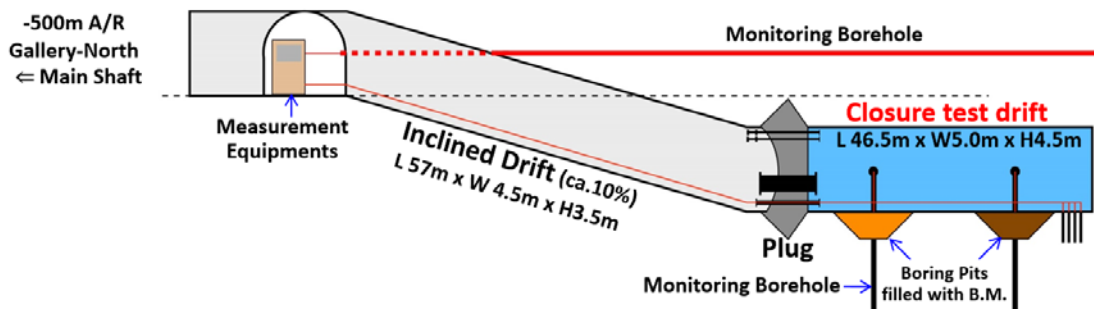
第二階段於地下水回補封閉試驗坑道後，量測相關資訊如水壓、化學成分等，再與事前的模擬結果進行比對。

第三階段於封閉試驗坑道內環境平衡穩定後，進行模擬與現地量測結果的比對。

在封閉試驗坑道中裝設的儀器包含無線水壓偵測器(Wireless water pressure)、水下照相機(Underwater camera)、水化學監控儀器(Hydrochemical monitoring equipment)及光學岩石應變計量器(Optical rock strain meter)等，詳細設置位置詳圖二十二。



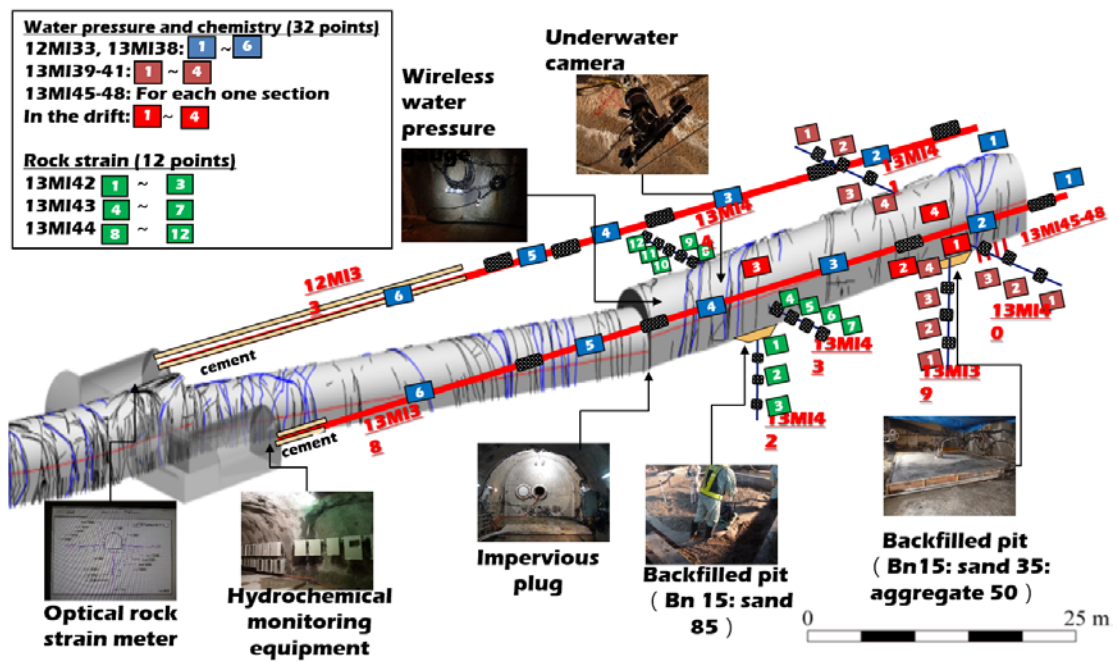
圖十九 日本瑞浪地下實驗室



圖二十 封閉試驗坑道示意圖



圖二十一 封閉試驗坑道現地照片



圖二十二 封閉試驗坑道儀器部置圖

二、第二天技術研討會

第二天會議議程如圖二十三。

Day 2 (19th May 2016 - Chair: Alex Bond)

Session 5. Task D – INBEB– Hydro-mechanical interactions in bentonite engineered barriers.

08:30 – 09:00 Task Overview, Technical and Proposed Schedule (Antonio Gens, UPC)

09:00 – 10:00 Task Discussion (All)

10:00 – 10:20 Break

Session 6. Task B – Fault Slip Test - Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock.

10:20 – 10:50 Task Overview, Technical and Proposed Schedule (Bastian Graupner, ENSI and Jonny Rutqvist, LBNL)

10:50 – 11:50 Task Discussion (All)

Session 7. Task F – FINITO (Supporting Task) – Fluid inclusion and movement in tight rock.

11:50 – 12:15 Task Overview, Technical and Proposed Schedule (Hua Shao, BGR)

12:15 – 13:00 Task Discussion (All)

13:00 – 14:00 Lunch

Session 8. Task G – EDZ Evolution (Supporting Task) - 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.

14:00 – 14:25 Task Overview, Technical and Proposed Schedule (Tobias Backers, Geomecon)

14:25 – 15:10 Task Discussion (All)

15:10 – 15:30 Break

Session 9. Project Administration

15:30 – 17:30 Steering Committee Meeting (Chair: Jens Birkholzer)

Finish day 2

圖二十三 第二天技術研討會議程

第二天的會議內容共分為 5 個部份：(一)研究項目 D：INBEB 討論；(二)研究項目 B：Fault slip test 討論；(三)研究項目 F：FINITO 討論；(四)研究項目 G：EDZ Evolution 討論以及在會議最後進行(五)專案管理會議。

(一) 研究項目 D：INBEB 討論

本議題由西班牙 Catalonia 理工大學的 Antonio Gens 進行簡報，本研究議題是由西班牙放射性廢棄物營運公司(Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A., ENRESA)提出。INBEB 為 **HM and THM Interactions in Bentonite Engineered Barriers** 的縮寫，主要目的為瞭解工程障壁均質化(homogenization)的演化機制，以驗證設計是否符合功能目標，並評估均質化作用對長期安全功能的影響。

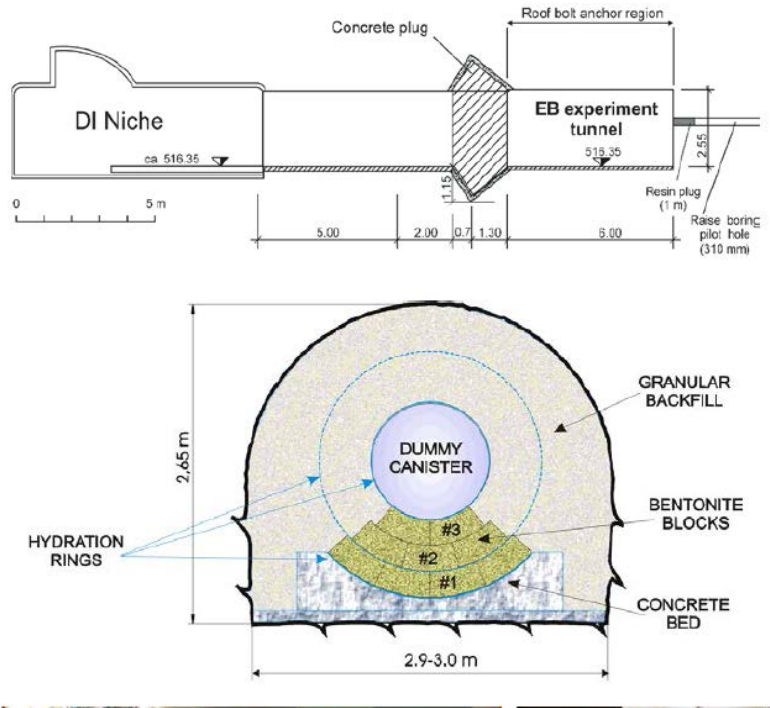
本項為延續性的大型研究計畫，包含 2 項大型現地實驗 EB 和 FEBEX。

EB 實驗地點為瑞士的 Mont Terri 地下實驗室，母岩為 Opalinus 粘土，利用大型均勻的加熱器，下方放置緻密膨潤土塊(blocks)，上方填滿膨潤土顆粒(pellets)，其示意圖詳圖二十四，現地照片詳圖二十五。人工注水後，量測廢棄物罐位移情形、緩衝材料的相對濕度、孔隙壓及應力等，觀察其水力的交互作用，整個實驗進行了 10.5 年，目前實驗裝置已經拆除。

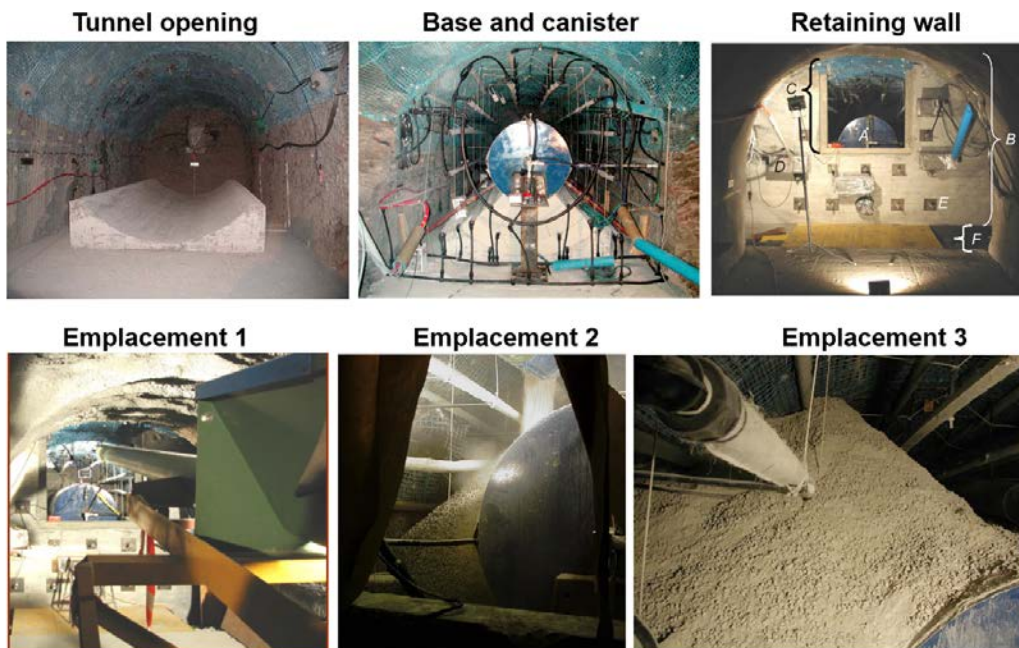
FEBEX 實驗地點為瑞士的 Grimsel Test Site，母岩為花崗岩，設置可進行溫度控制的加熱器(最高 100 度 C)，周圍放置緻密膨潤土塊，其示意圖詳圖二十六，現地照片詳圖二十七，自然注水，量測工程障壁內的溫度、相對濕度及應力等，以瞭解其熱水力的相互作用，實驗進行了 18 年，於實驗開始後第 5 年，進行第 1 次拆除作業(詳圖二十八)，觀察膨潤土內水的分布情形後重新放入，目前

已進行最終拆除作用(詳圖二十九)，觀察實驗 18 年後膨潤土內水的分布情形。

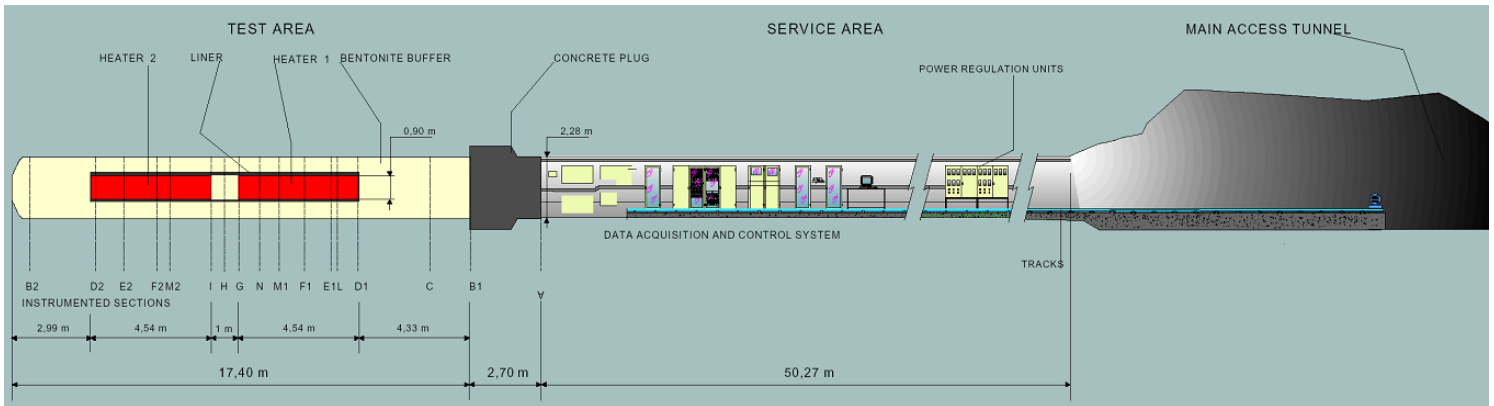
目前現地實驗所蒐集到數據已經完備，本期 D-2019 計畫目標將進行這 2 實驗的模擬，並與現地資料結合。



圖二十四 EB 實驗示意圖

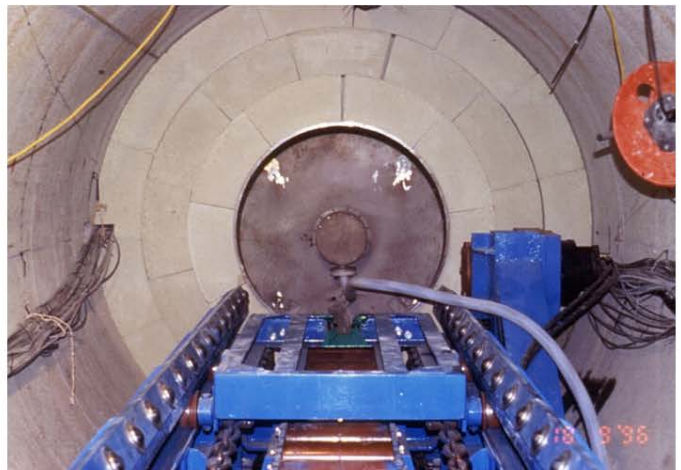


圖二十五 EB 實驗現地照片

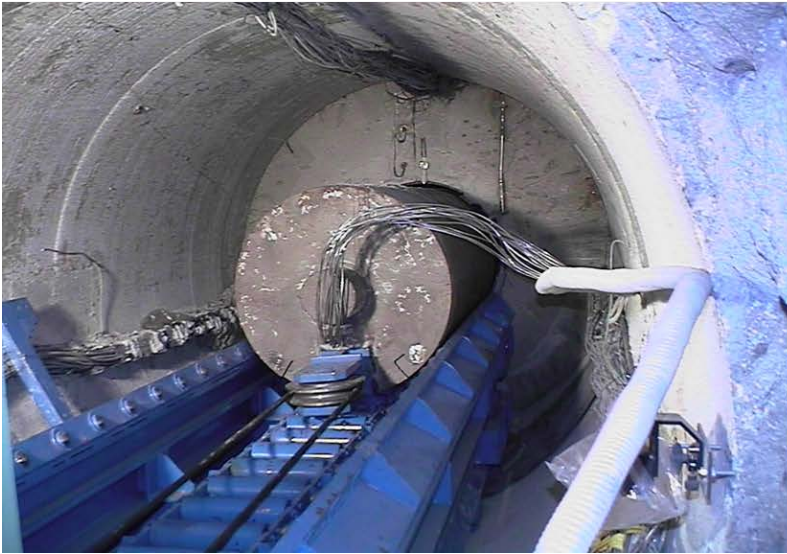


圖二十六 FEBEX 實驗示意圖

□ FEBEX test



圖二十七 FEBEX 實驗現地照片



圖二十八 FEBEX 實驗第一次拆除



圖二十九 FEBEX 實驗最終拆除

(二) 研究項目 B：Fault slip test 討論

本研究項目由瑞士核能管制機關 ENSI，簡報由其單位的 Bastian Graupner、德國 Geomeon 公司的 Tobias Backers 及勞倫斯柏克萊國家實驗室的 Yves Guglielmi 進行說明。

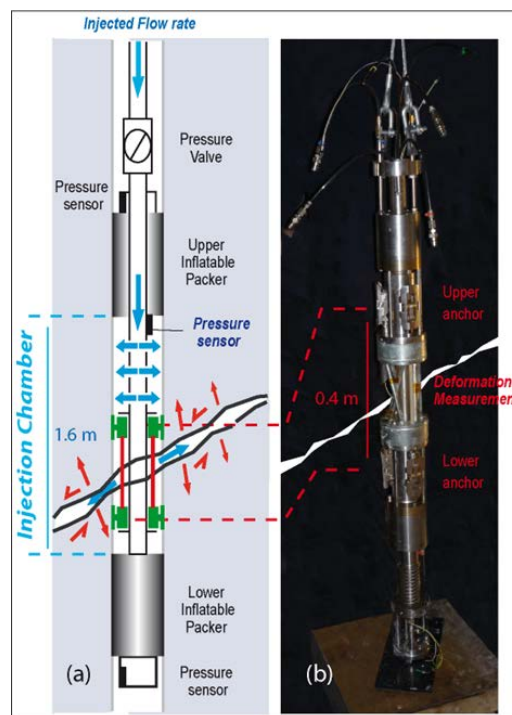
研究項目的完整名稱為 *Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock*，主要目的為探討在泥岩層中，斷層穩定性或滑移情形，並瞭解斷層滑動、孔隙壓及液體遷移的相互作用機制。

實驗地點位於瑞士的 Mont Terri 實驗室，在斷層深度架設井下位移偵測器(borehole deformation tool，如圖三十)，觀測斷層位於約 35-40 公尺深，其位置圖詳圖三十一。量測液壓變化與斷層滑動的關係。實驗分 3 階段執行。

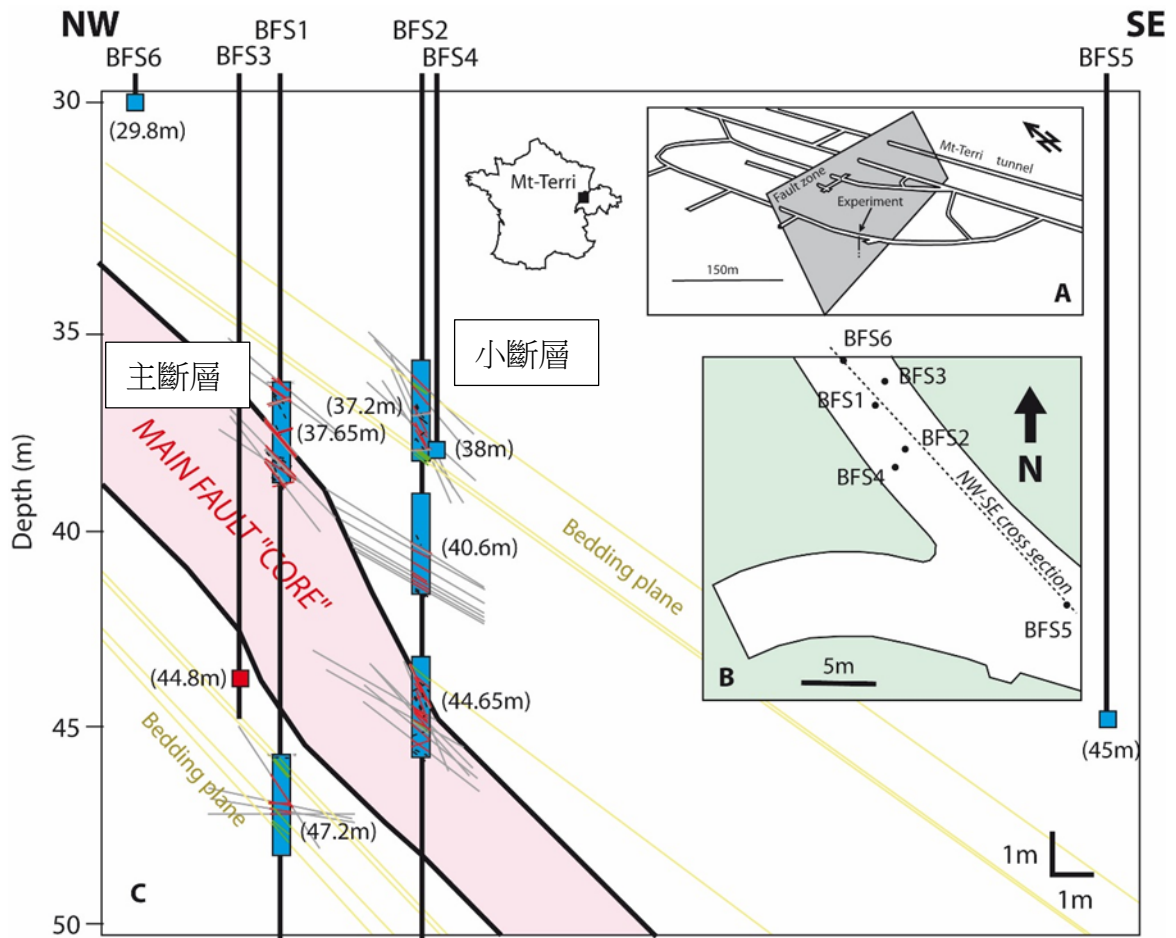
第一階段先進行模擬校驗(Model inception)，模擬模型的示意圖如圖三十二。

第二階段進行模擬結果與小斷層(Minor fault)觀測結果的比對。

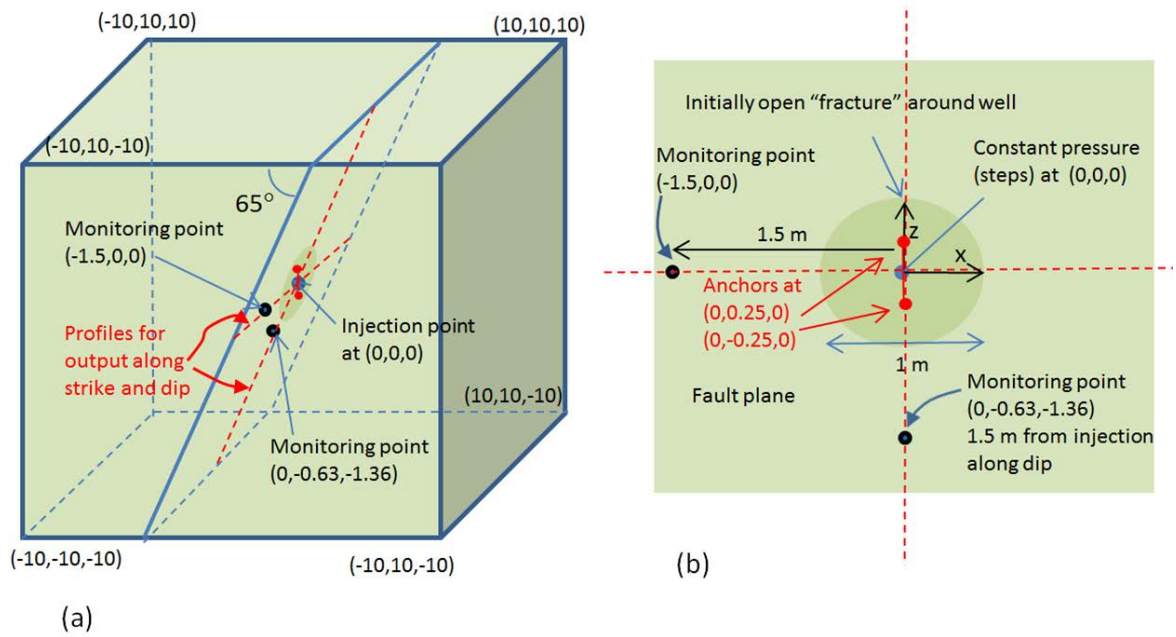
第三階段進行模擬結果與主斷層(Major fault)觀測結果的比對



圖三十 井下位移偵測器



圖三十一 儀器布置位置圖



圖三十二 模型示意圖

(三) 研究項目 F：FINITO 討論

研究項目 F 及 G 為支援型研究，實驗規模較小，研究項目 F 由美國聖地亞國家實驗室的 Yifeng Wang 進行簡報說明。

FINITO 為全名為 **Fluid Inclusion and Movement in the Tight Rock**，由德國聯邦自然資源及地球科學研究所 BGR 所提出，主要目的為瞭解流體(液體及氣體)在開挖後流動情形及高溫下的作用，並建立數值模擬工具，以量化(1)流體包裹體的體積(the volume of the fluid inclusions)；(2)到連通處位置所需最短路徑(the at-least distance to the opening)及(3)最大影響區域(the maximal influencing area)。

本研究項目的岩石為粘土及岩鹽(Clay & Salt Rock)，在現地利用鑽井設置壓力計等儀器進行觀察(如圖三十三)，在實驗室利用顯微鏡進行觀察(如圖三十四)。

研究架構分為 3 階段如下。

WP1：

1. 文獻回顧；
2. 定義作用(process)；
3. 建立概念模型。

WP2：

1. upscaling 研究；
2. 數值模式(mathematical formulation)；
3. 流程建置。

WP3：

1. 利用觀測資料進行驗證。



Pressure gauge + separator



Data acquisition system



圖三十三 現地儀器

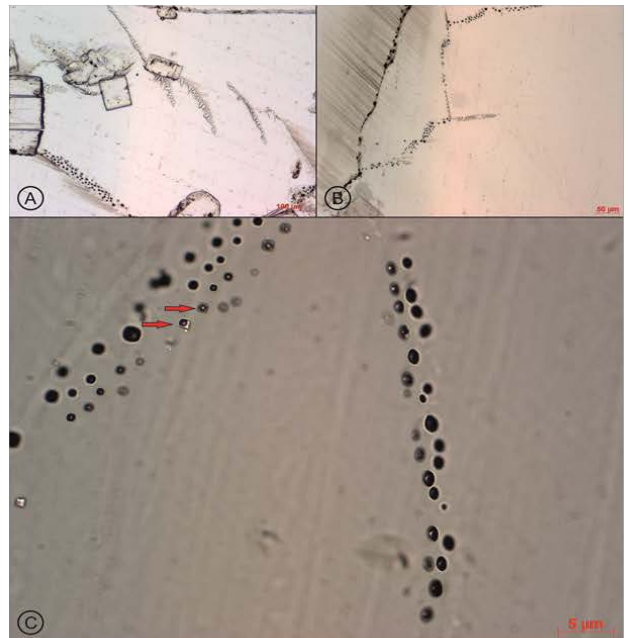
Hydrocarbon in salt rock



Characteristic pressure build-up curve



Niche surface



Microscopic observation

Hammer et al. 2012

圖三十四 顯微鏡觀測

(四) 研究項目 G：EDZ Evolution 討論

本研究項目由瑞典輻射安全局 SSM 提出，並由其單位的 Flavio Lanaro 進行簡報說明。

研究計畫的全名為 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。主要目的為探討開挖擾動帶(Excavation Disturbed Zone, EDZ) 對水文特性(導水、滲透等特性)的影響。

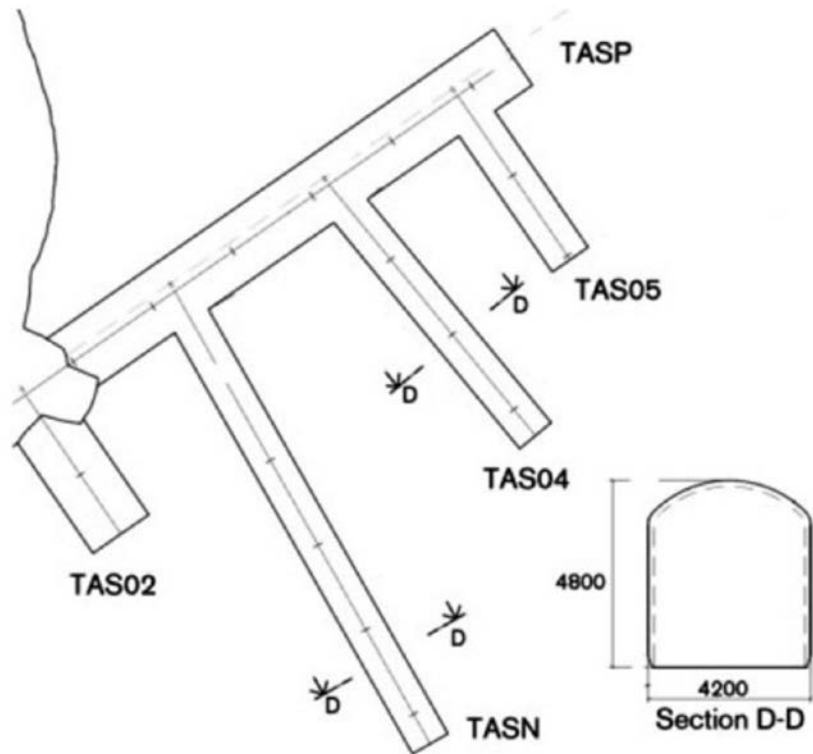
研究分為 3 階段進行，其架構如下：

WP1 : Validation of models (Year 1)：進行 3 個不一樣的 2 維模型(continuous porous media of poroelasticity, dual-porosity, and hybrid DFN and poroelastic matrix)的比較，找出較合適實驗的模式。

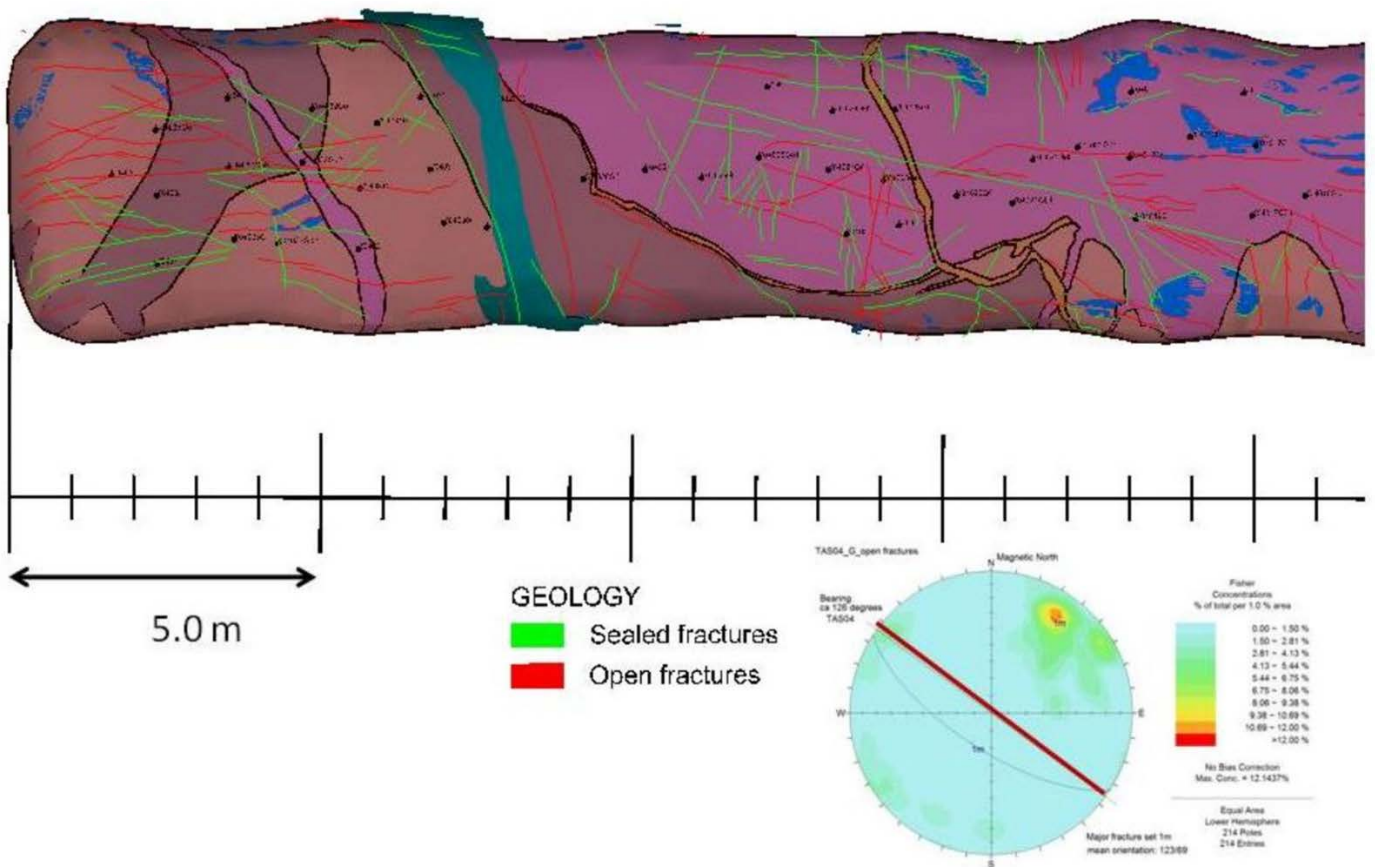
WP2: Simulation of inflow (Year 1–Year 2)：採用較複雜的 3 維模型，模擬 field reference case，並利用導水係數變化結果去設計量測方法。

Field reference case 為瑞典 Äspö 地下實驗室 TAS04 坑道(如圖三十五及圖三十六)實際量測的數據。

WP3: Simulation of transmissivity change due to DFN evolution (Year 2-Year4)：模型導入熱及應力的變化，分 2 部份：(1)先用 2 維模型分析導水係數的變化；(2)採用 3 維模擬以瞭解離散裂隙網路 (Discrete Fracture Network, DFN)變化的影響。並利用其結果設計量測及監控方法。



圖三十五 瑞典 Äspö 地下實驗室 TAS04 坑道



圖三十六 瑞典 Äspö 地下實驗室 TAS04 坑道裂隙圖

(五) 專案管理會議

此議題由計畫主持人 Jens Birkholzer 主持，主要討論內容分為

2 項：

1. 確認現場出席單位想參與的研究項目，各分項計畫主導單位將提供實驗數據予其他參與研究單位，各自模擬並進行比較分析。
2. 討論以後研討會舉辦方式與原則。

最後所有出席者進行合影如圖三十七。



圖三十七 DECOVALEX-2019 開案會議出席者合影

三、技術參訪

技術參訪的地點為蓋瑟爾斯地熱場，位於美國加州米德爾敦。技術參訪的首站為 Calpine geothermal visitors center(如圖三十八)，聽取蓋瑟爾斯地熱場的簡介。

蓋瑟爾斯在 1 萬 2 千年前開始有人類入住，1847 年 William Bell Elliott 先生將此地命名為蓋瑟爾斯，1852 年美國政府第一次正式調查此地。John D. Grant 於 1921 年在此地鑽了第一口 steam 井，到 1927 共有 8 口成功的井，美國第一座地熱電廠(35-KW power plant 如圖三十九)就是利用這 8 口井提供能量，以供應附近電力。後來陸陸續續越來越多的電廠產生，加州政府於 1996 年進行整合，目前主要由 2 家公司(Capline 及 NCPA)經營，可產生 850MW 的電力，係世界上最大的地熱電產生處。

聽取介紹後，緊接著進入蓋瑟爾斯地熱場，參訪其電廠(如圖四十)、地熱管線，並於至高點俯視整個蓋瑟爾斯地熱場(如圖四十一)，最後去觀察其硫噴氣孔(如圖四十二)。



圖三十八 Calpine geothermal visitors center 解說



Figure 2: Power generation unit from The Geysers Resort, now at the Calpine Geysers Visitor Center.

圖三十九 美國第一座地熱發電機組



圖四十 地熱電廠



圖四十一 蓋瑟爾斯地熱場



圖四十二 硫噴氣孔

參、心得

參與此技術研討會，獲得世界各國在地下實驗室的研究資訊，瞭解國際上最新的進展，同時認識各相關領域的專家，有助於我國未來最終處置計畫推動。

在各研究項目中，研究項目 D 最令人印象深刻，不但有近乎等比例的實驗規模，包含了世界上最多國考慮的 2 種母岩(粘土及花崗岩)，並進行非常長時間研究，獲得相當完整的實驗數據，在我國目前未有地下實驗室的情況下，相關實驗數據有助於建置最終處置場安全與功能評估技術，同時也助於未來我國進行相關研究。

研究項目 B 可能與我國所處環境最相關，探討斷層與地下水壓之間的作用。我國位屬環太平洋地震帶，地震是我國處置計畫無可避免的重大議題，任何國際上相關的研究資訊，都值得我國去瞭解及探討。

最後，DECOVALEX 計畫是一個非常好的平台，提供我們獲得國際上最新資訊的機會，參與此研討會獲益良多。

肆、建議

- 一、DECOVALEX 計畫提供了獲得國際上相關研究的機會，建議每次研討會皆派員出席，有助於取得國際資訊，同時加深與各國相關研究機構的交流。另，研討會有時會安排地下實驗室的技術參訪行程，讓出席者有實際觀察現地實驗的機會。
- 二、研究項目 A 及 D 有相當完整的研究數據，同時實驗架構也經過多國的認可，建議國內相關研究機構參加，取得實驗資料進行研究，有助國內技術與國際接軌。
- 三、對於研究項目 B，雖然量測資料還不夠完善，但因我國所處環境因素，也建議國內研究機構參與，學習其現地實驗設置及資料取得過程，有助於未來國內進行相關實驗。
- 四、本研討會有非常多國的管制機關參與，建議國內管制機關也可出席會議，有助於瞭解國際上研究的實際現況。