

出國報告(出國類別：開會)

高放射性廢棄物 國際處置技術研討會

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：李宗倫 組長

李柏叡 安全評估專員

派赴國家/地區：美國

出國期間：108年6月21日至108年7月3日

報告日期：108年8月8日

(本頁為空白頁)

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放射性廢棄物國際處置技術研討會

頁數37 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/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

1. 李宗倫/台灣電力公司/核能後端營運處/組長/02-23657210 #2207
2. 李柏叡/台灣電力公司/核能後端營運處/安全評估專員/02-23657210 #2307

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：108.6.21~108.7.3

出國地區：美國

報告日期：108.8.8

分類號/目

關鍵詞：高放射性廢棄物、最終處置、岩石力學、THMC 耦合

內容摘要：

美國岩石力學學會每年皆會舉辦美國岩石力學研討會，108年6月23日至27日於紐約舉辦「第53屆美國岩石力學研討會」，會議中針對土木工程、地質科學與採礦、地球物理勘探、石油工程、二氧化碳封存、放射性廢棄物最終處置等領域的應用，進行廣泛的技術交流。本次派員赴美國參加美國岩石力學研討會，透過參加發表人簡報及海報展示等方式，掌握國際上岩石力學最新技術與研究成果，由於會議討論議題廣泛，主要參加用過核子燃料最終處置計畫相關

需求之議題。

大型國際合作計畫 DECOVALEX 主要目的係探討熱力、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、發展相關模擬模式並利用實驗數據進行驗證。DECOVALEX 計畫目前正在規劃最新的研究議題，台電公司與 DECOVALEX 計畫負責人針對最新提出之議題進行交流討論，經討論後，(1)高放處置設施性能評估模式成果比較與確認基準、(2)高放處置設施工程障壁系統熱-水-力-化耦合機制了解與數值模擬，值得台電公司考慮參與，有助於發展國內高放最終處置技術，研究成果亦可與國際知名研究機構進行技術驗證。

參加美國岩石力學研討會與 DECOVALEX 計畫，增加與各國專家交流機會，可瞭解目前國際上岩石力學與 THMC 技術之發展現況與未來趨勢，並建立國內相關技術，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。

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

摘要

美國岩石力學學會每年皆會舉辦美國岩石力學研討會，108 年 6 月 23 日至 27 日於紐約舉辦「第 53 屆美國岩石力學研討會」，會議中針對土木工程、地質科學與採礦、地球物理勘探、石油工程、二氧化碳封存、放射性廢棄物最終處置等領域的應用，進行廣泛的技術交流。本次派員赴美國參加美國岩石力學研討會，透過參加發表人簡報及海報展示等方式，掌握國際上岩石力學最新技術與研究成果，由於會議討論議題廣泛，主要參加用過核子燃料最終處置計畫相關需求之議題。

大型國際合作計畫 DECOVALEX 主要目的係探討熱力、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、發展相關模擬模式並利用實驗數據進行驗證。DECOVALEX 計畫目前正在規劃最新的研究議題，台電公司與 DECOVALEX 計畫負責人針對最新提出之議題進行交流討論，經討論後，(1)高放處置設施性能評估模式成果比較與確認基準、(2)高放處置設施工程障壁系統熱-水-力-化耦合機制了解與數值模擬，值得台電公司考慮參與，有助於發展國內高放最終處置技術，研究成果亦可與國際知名研究機構進行技術驗證。

參加美國岩石力學研討會與 DECOVALEX 計畫，增加與各國專家交流機會，可瞭解目前國際上岩石力學與 THMC 技術之發展現況與未來趨勢，並建立國內相關技術，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。

目次

摘要.....	i
目次.....	ii
圖目次.....	iii
壹、 目的.....	1
貳、 過程.....	2
參、 工作內容	3
一、 第 53 屆美國岩石力學研討會	3
二、 岩石力學技術交流討論會議	20
三、 用過核子燃料最終處置技術交流討論會議	22
肆、 心得.....	36
伍、 建議.....	37

圖目次

圖 1：美國岩石力學研討會簡報會場.....	4
圖 2：美國岩石力學研討會海報展示會場.....	4
圖 3：Call & Nicholas Inc.所發表之隧道變形監控設備	6
圖 4：(左)隧道變形量尚未超過極限值(右)隧道變形量超過極限值	6
圖 5：交通大學提出之岩栓模型.....	9
圖 6：交通大學所使用之 DEM 模型.....	9
圖 7：裂隙連接方式(a)隨機模型中生成的隨機陣列(b)裂隙網路示意圖	12
圖 8：不同裂隙幾何關係比例的三角圖.....	12
圖 9：動態裂隙網路生成參數影響 DFN 連接特性之三角圖.....	13
圖 10：THMC 耦合過程關係.....	15
圖 11：日本京都大學使用之分析範圍.....	15
圖 12：三軸注入流體誘發剪切滑移試驗.....	16
圖 13：採樣窗口法示意圖.....	17
圖 14：裂隙內寬於不同溫度與圍壓下的變化(橫切面).....	19
圖 15：裂隙內寬於不同溫度與圍壓下的變化(放大圖).....	19
圖 16：通用型處置概念.....	26
圖 17：美國 Sandia 國家實驗室開發的深層地下處置設施模擬平台...26	
圖 18：日本幌延地下實驗室全尺寸工程障壁系統實驗示意圖.....	31
圖 19：日本幌延地下實驗室全尺寸工程障壁系統實驗設計尺寸.....	31
圖 20：日本幌延地下實驗室全尺寸工程障壁系統實驗施工照片	32
圖 21：處置孔膨潤土偵測儀器安裝位置.....	32
圖 22：實驗坑道回填膨潤土偵測儀器安裝位置.....	33
圖 23：全尺寸工程障壁系統實驗之注水系統.....	33
圖 24：全尺寸工程障壁系統實驗注水過程.....	34
圖 25：全尺寸工程障壁系統實驗加熱過程.....	34
圖 26：高放處置設施工程障壁系統熱-水-力-化耦合關連圖.....	35
圖 27：高放處置設施工程障壁系統熱-水-力-化耦合實驗與數值模擬規劃期程.....	35

壹、目的

台電公司依法執行用過核子燃料最終處置計畫，已於 106 年底提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(SFND2017 報告)」，亦經國際專家與主管機關審查同意，確認國內具備地質處置工程技術能力。岩石力學為影響高放最終處置設施佈置與工程障壁完整性之關鍵因子，亦屬於高放最終處置安全評估之核心技術項目，國際上各國家仍持續發展相關岩石力學技術(包含理論基礎、調查技術、評估技術等)，台電公司須參考國際經驗持續精進岩石力學相關技術。

美國岩石力學學會(American rock mechanics association, ARMA)每年皆會舉辦美國岩石力學研討會(US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium)，108 年 6 月 23 日至 27 日於紐約舉辦「第 53 屆美國岩石力學研討會」，會議中針對土木工程、地質科學與採礦、地球物理勘探、石油工程、二氧化碳封存、放射性廢棄物最終處置等領域的應用，進行廣泛的技術交流，台電公司派員出席有助於提升應用於高放最終處置之岩石力學技術，對高放最終處置計畫之推動亦有相當大的助益。美國岩石力學年會結束後，安排拜訪紐約市立大學(New York College)，將介紹國內高放最終處置計畫之現況與針對岩石力學技術議題進行交流，商討未來可能之合作機會。

本次公出亦順道拜訪位於美國伯克萊(Berkeley)的勞倫斯伯克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory)，該單位為大型國際合作計畫 DECOVALEX(Development of coupled models and their validation against experiments)之主辦單位，主要探討熱力、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，目前 DECOVALEX 計畫正在規劃下階段(2020 年~2023 年)之研究議題，台電公司與勞倫斯伯克萊國家實驗室針對下階段研究議題進行交流討論，以利台電公司評估未來可參加之研究議題。

貳、過程

自 108 年 6 月 21 日出發，迄 7 月 3 日返國(共計 13 天)，6 月 23 日至 6 月 27 日參加美國岩石力學學會舉辦之「第 53 屆美國岩石力學研討會」、6 月 28 日拜訪紐約市立大學進行岩石力學技術交流討論，以及 7 月 1 日拜訪勞倫斯伯克萊國家實驗室進行用過核子燃料最終處置技術交流討論，詳細訪問行程如表 1。

表 1：公出地點與工作內容

日期	地點	工作內容
6 月 21 日 至 6 月 22 日	Taipei→San Francisco→ New York	去程
6 月 23 日 至 6 月 27 日	New York	第 53 屆美國岩石力學研討會
6 月 28 日	New York	岩石力學技術交流討論會議
6 月 29 日	New York→San Francisco →Berkeley	週六，移動日
6 月 30 日	Berkeley	週日
7 月 1 日	Berkeley	用過核子燃料最終處置技術交流討論會議
7 月 2 日 至 7 月 3 日	Berkeley→San Francisco →Taipei	返程

參、工作內容

一、第 53 屆美國岩石力學研討會

美國岩石力學學會舉辦的美國岩石力學研討會，是國際上重要的岩石力學領域研討會，除了美國外，亦有來自世界各地的學術單位與研究機構共數百名學者專家與會。本屆會議已是第 53 次舉辦，研討會時間為 2019 年 6 月 23 日至 6 月 27 日，地點位於紐約布魯克林橋萬豪酒店 (New York Marriott at the Brooklyn Bridge)，會議中針對土木工程、地質科學與採礦、地球物理勘探、石油工程、二氧化碳封存、放射性廢棄物最終處置等領域的應用，進行廣泛的技術交流與討論。本次會議透過參加發表人簡報(圖 1)及海報展示(圖 2)等方式，掌握國際上岩石力學最新技術與研究成果，由於會議討論議題廣泛，主要針對用過核子燃料最終處置計畫相關需求之資料進行說明。



圖 1：美國岩石力學研討會簡報會場



圖 2：美國岩石力學研討會海報展示會場

1. Underground Ground Deformation Monitoring – A User Friendly Approach

本篇論文由美國 Call & Nicholas Inc.所發表，該公司為了監測開挖所引起的隧道變形，開發一個簡單且方便使用的監控設備(圖 3)，針對隧道變形所導致之潛在危險，整合預警與瞬時反應功能，透過可以變色的 LED 燈警告隧道內的工人是否有隧道變形的危害(圖 4)，當隧道變形量尚未超過極限值時為綠燈，隧道變形量超過極限值而觸發 LED 燈轉換為紅色，有助於營造更安全的工作環境。使用該設備之優點如下：

- (a) 該監控設備易於安裝與監測，且不須進行例行性維護。
- (b) 使用該監控設備不需要特殊的工程技術或知識，即可識別潛在的危險跡象。
- (c) 透過該監控設備，可以精確的判斷岩體的位移是否超過預訂的極限值。
- (d) 現地位移監測所獲得的數據亦可用於校正數值模型。
- (e) 該監控設備亦具有防止竄改的功能，只有主管專業人員宣布區域安全後才能更換。



圖 3：Call & Nicholas Inc.所發表之隧道變形監控設備

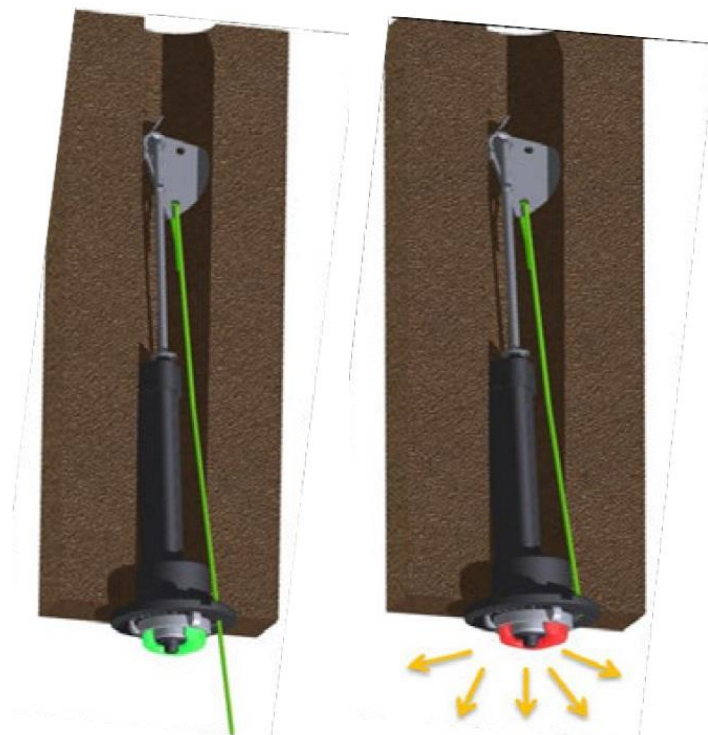


圖 4：(左)隧道變形量尚未超過極限值(右)隧道變形量超過極限值

2. Cutoff Modeling for Drift Sealing in Underground Nuclear Waste Repositories

本篇由加拿大約克大學(York University)所發表，針對地底下放射性廢棄物處置場的隧道封閉截斷(cutoff)模型進行研究，放射性廢棄物處置場使用不同類型的屏障來隔離放射性廢棄物，包含天然障壁(natural barriers)與工程障壁(engineered barriers)，截斷密封是工程障壁設計的一部分，用於處置場隧道與豎井的特定位置，以確保放射性廢棄物可被隔離於處置區域。

該研究使用矩形、三角形與梯形的截斷形狀進行數值模擬，結晶岩(crystalline rock)的開挖損傷區(excavation damage zone)範圍是根據截斷模型的形狀與尺寸改變進行預估，在數值模擬中開挖損傷區的尺寸是基於朔性降伏與體積應變，另外進行應力強度比對截斷構造引起的開挖損傷區延伸的影響。隧道周圍的岩石力學性質顯示，超過截斷點的開挖損傷區之範圍取決於岩石性質與截斷的幾何形狀。該研究亦針對矩形的截斷模型進行優化，確定使用矩形的截斷模型其開挖損傷帶深度增加最小。

3. Modeling rock bolt behavior by using the interface model of DEM

本篇由臺灣交通大學所發表，利用離散元素法(discrete element method, DEM)界面模型模擬岩栓(Rock bolt)之行為。岩栓為現代隧道工法主要使用的支撐構件，主要用途為抵抗節理面滑動及穩定懸浮岩塊。

該研究提出一個岩栓模型(圖 5)，其包括兩個部分：岩栓與岩體界面，岩栓與周圍岩體間的界面採用光滑連接模型(smooth-joint model)進行模擬。首先進行實驗室拉伸與剪力試驗，驗證本研究提出的模型，並觀察尖峰強度、勁度與破壞型態，以確保模型的正確性。另外，對於岩石力學行為之分析，由於塊體分離及滑動，以往連體力學較難詳盡的分析與探討，因此該研究採用 DEM 探討岩體力學行為(圖 6)。

最後進行隧道案例模擬，探討岩栓應用在實際案例中的效果，比較有無設置岩栓、不同岩栓長度、覆土深度等情況下，對隧道位移量之影響。該研究模擬結果結論如下：

- (a) 該研究之岩栓模型能有效模擬岩栓之力學行為。
- (b) 在相同條件下，岩栓應用於隧道中能有效降低隧道內的位移量。
- (c) 該研究之岩栓模型模擬結果與實際案例大致相符，當岩栓長度越長、勁度越大時，隧道之位移量則越低。

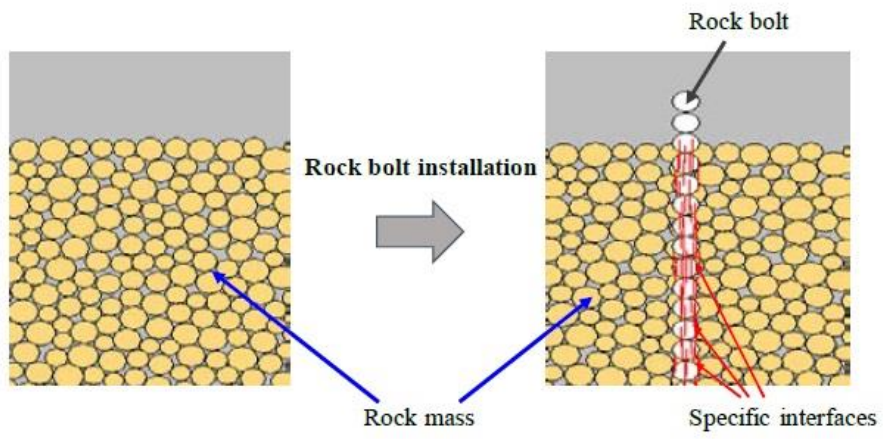


圖 5：交通大學提出之岩栓模型

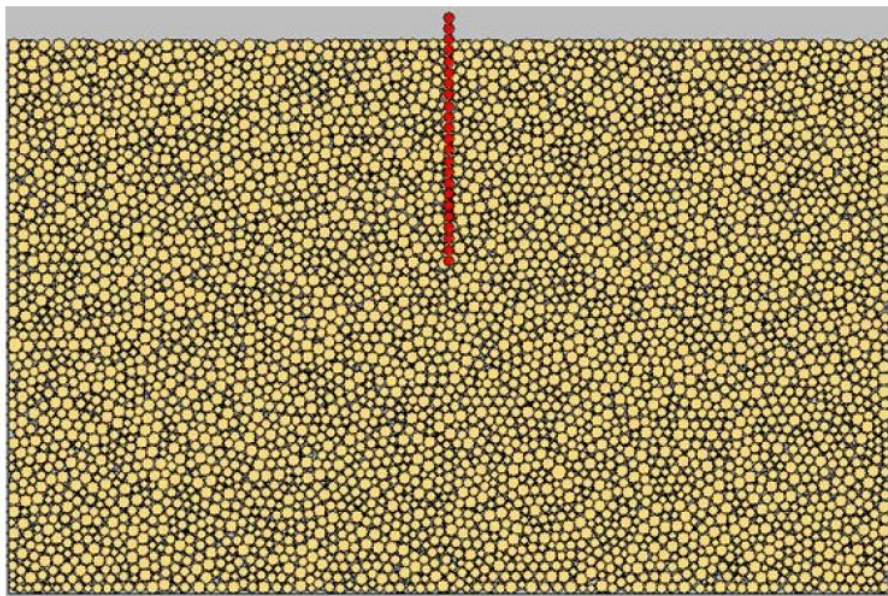


圖 6：交通大學所使用之 DEM 模型

4. Coupled hydro-mechanical modeling of injection-induced seismicity in the multiphase flow system

本篇由美國桑地亞國家實驗室(Sandia National Laboratories)所發表，探討多相流系統中誘發地震的水-力耦合模型，該研究所注入的流體改變原先存在斷層中的孔隙壓力和應力，進而引起斷層再活化造成剪切位移，並探討斷層滑動、孔隙水壓及液體遷移的交互作用機制。

該研究假設為雙相流系統(氣-水)和多孔彈性模型，並直接將注入壓力設定於斷層中。在多相流系統中，流體與岩體間會產生壓力梯度及後續的應力變化，並同時設置單相多孔彈性模型，以評估氣體直接注入斷層的多相流效應，並透過改變斷層的滲透率完成靈敏度分析。

該研究之研究成果顯示，多孔彈性系統中的多相流對誘發地震產生以下影響：

- (a) 在注入井附近，較大的氣相移動可降低氣體飽和區域的壓力累積。
- (b) 依據斷層的滲透率，斷層可作為液態相的水力或毛細屏障，亦可以提高沿著斷層誘發地震活動的可能性。
- (c) 多孔彈性耦合可以減少斷層中對孔隙壓力累積的直接影響。
- (d) 該研究建議建立多相流與多孔彈性系統的耦合模型，以預測二氧化碳封存相關的潛在地震事件。

5. Dynamic Fracture Network Generation: a new method for growing fractures according to their deformation history

本篇由 Golder 公司與瑞典 SKB(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)聯合發表，主要根據裂隙的變形歷史提出新的動態裂隙網格生成方法。Golder 公司所開發的 Fracman 軟體為全球第一個離散裂隙網路(Discrete fracture network, DFN)商用軟體，而瑞典 SKB 為瑞典放射性廢棄物處置專責機構，其積極發展 KBS-3 處置概念，並選擇結晶岩作為處置母岩，而離散裂隙網路之發展與應用技術為瑞典 SKB 的研究重點，故 Golder 公司與瑞典 SKB 共同針對動態裂隙網格生成進行研究。

該研究提出新穎的產生裂隙的方法，裂隙產生過程是動態的，且裂隙間會產生相互作用，相互作用過程模擬應力影(Stress shadow)的自然產生過程、裂隙的連接特性(圖 7)、不同岩石性質導致之裂隙增長。該研究透過模擬裂隙相互作用過程，並提供使用者對裂隙有效的控制方法，相較於其它產生裂隙方法，新的裂隙生成方法所產生新的模擬 DFN，可以更貼近現地的 DFN，且無需額外的計算成本即可明確地模擬裂隙岩體中的應力。

藉由模擬結果與觀測數據的等效點(圖 8)進行比較，並適當的調整輸入參數，動態裂隙網路生成的 DFN 連通特性更符合現地觀測數據，在預測岩體變形、地下水流動等皆具有更高的可靠性。圖 9 顯示一組測試案例，說明改變動態裂隙網路生成的輸入參數將影響 DFN 的連接特性。

現階段動態裂隙網路生成的現地測試案例正在進行中，將與現地資料進行驗證，未來的主要目標將集中在改善裂隙網路幾何描述，此外，動態裂隙網路生成相關的精進持續進行中。

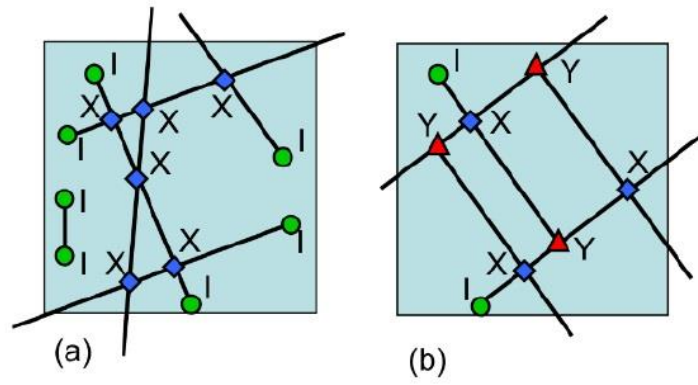


圖 7：裂隙連接方式(a)隨機模型中生成的隨機陣列(b)裂隙網路示意圖

註：I：isolated；Y：abutting；X：crossing

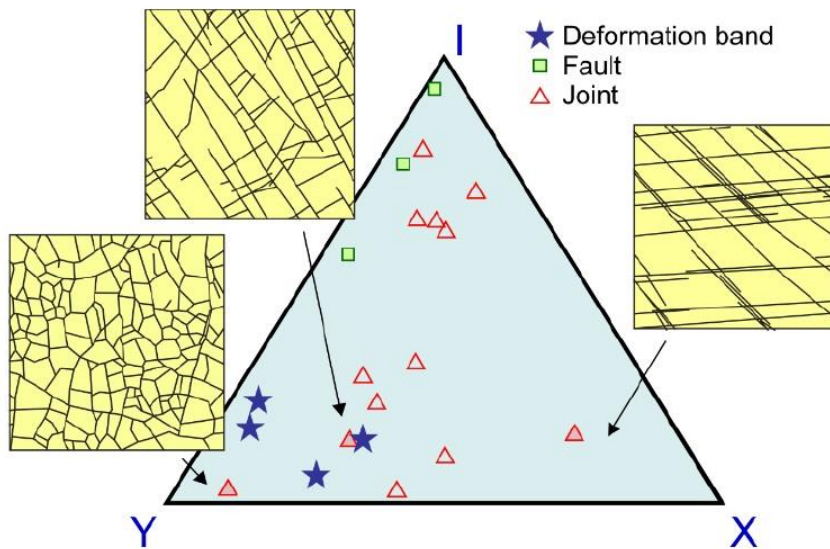


圖 8：不同裂隙幾何關係比例的三角圖

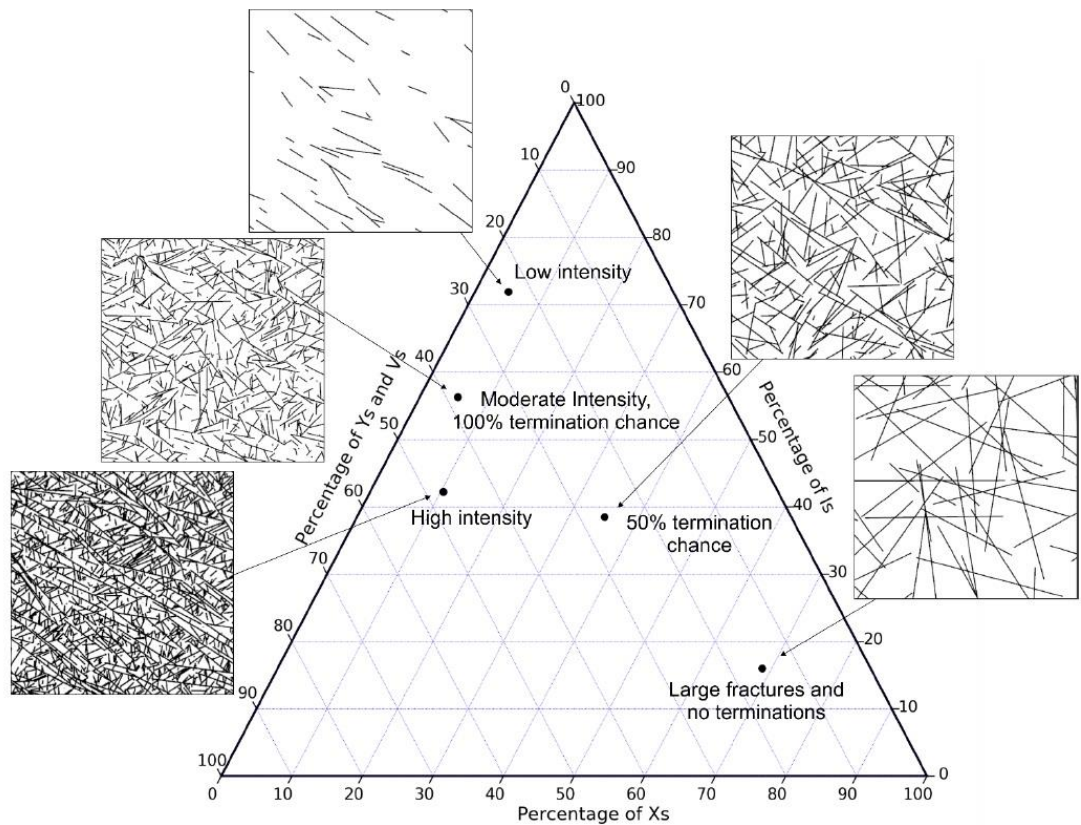


圖 9：動態裂隙網路生成參數影響 DFN 連接特性之三角圖

6. Coupled THMC analysis for predicting hydro-mechanical evolution in siliceous mudstone

本篇由日本京都大學(Kyoto University)所發表，採用日本北海道幌延地下研究中心(Horonobe Underground Research Center)資料，進行矽質泥岩的水-力耦合演化研究。幌延地下研究中心於地下 350 m 坑道中，建置全尺寸之工程障壁系統，進行熱力、水力、力學及化學(thermal-hydrological-mechanical-chemical, THMC)耦合實驗，探討 THMC 耦合因子對高放射性廢棄物最終處置場的影響(圖 10)，以驗證工程障壁系統之技術可行性。

該研究發展 THMC 耦合模型，主要進行岩體的水力與力學性質的長期演化研究，例如隧道開挖引起裂隙內的地球化學反應而改變滲透性(permeability)與剛性(stiffness)等。該研究使用所發展的模型，進行用過核子燃料最終處置設施週遭地下環境之長期演化分析，該研究所使用之分析範圍如圖 11。

該研究分析結果顯示，開挖過程中，處置隧道週遭的開挖區產生許多裂隙，導致滲透率增加、彈性模數降低；在開挖後，開挖損傷區中裂隙的壓溶作用(pressure solution)導致滲透性降低至完整岩石的狀態，彈性模數增加原先狀態的 30%。因此，可以得到結論，裂隙內的壓溶作用對於減輕隧道內的岩體損傷有重要影響。

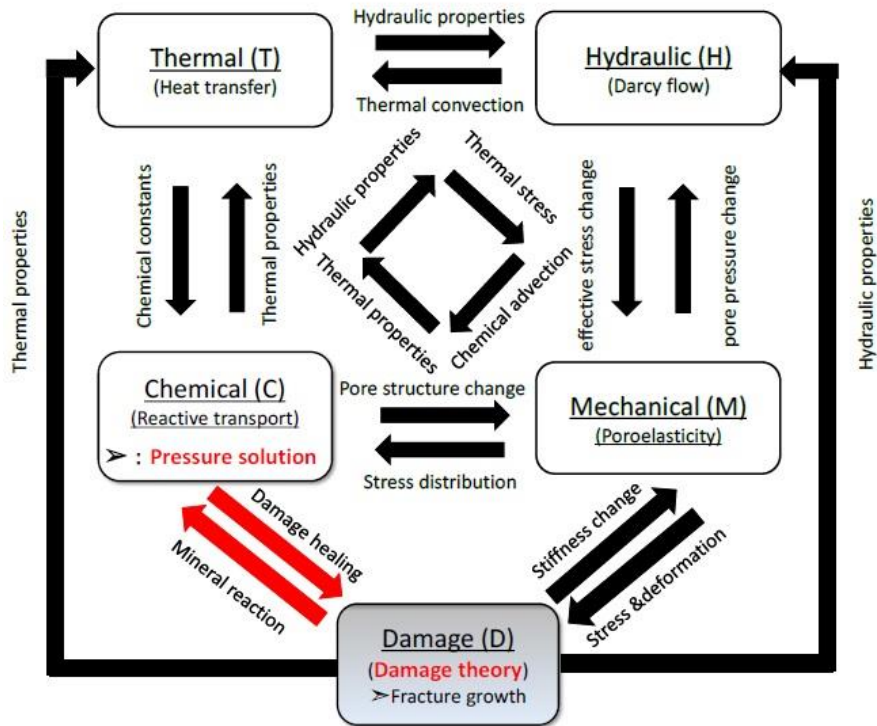


圖 10：THMC 耦合過程關係

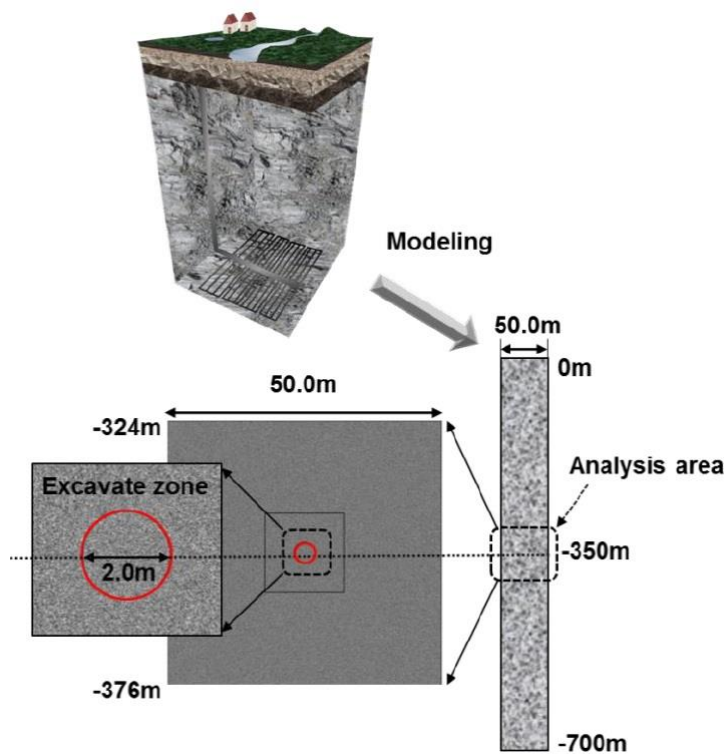


圖 11：日本京都大學使用之分析範圍

7. Slow-slip evolution of injection-induced shearing on granite fracture

此篇由中國北京石油大學(China University of Petroleum-Beijing)所發表，主要研究注入流體導致花崗岩裂隙的剪切滑移演化，而注入加壓流體引起裂隙或斷層的剪切滑移已被認為是誘發地震的重要機制，現階段仍然缺乏對於剪切滑移演化的了解，因此中國北京石油大學進行實驗室尺度的試驗，以增進對於剪切滑移機制之理解。

該研究針對具有裂隙的圓柱型花崗岩樣品進行三軸注入流體誘發剪切滑移試驗(圖 12)，可以模擬天然裂隙的特性、現地應力與溫度等條件。該實驗所獲得之結果顯示，從初始靜摩擦階段至不穩定滑移共有三個滑移階段，包含摩擦速度減弱(地震潛變)、摩擦速度增強(抗震潛變)與穩定滑移，摩擦穩定性分析顯示地震與抗震潛變交替出現，顯示注入流體誘發剪切摩擦的複雜性。此外，注入流體誘發剪切滑移主要由緩慢地黏滑摩擦所主導，其速度約為幾十微米/秒。

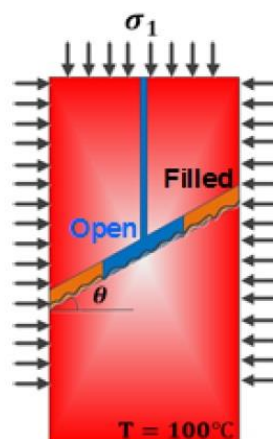


圖 12：三軸注入流體誘發剪切滑移試驗

8. Uncertainty of fracture intensity measurement in discontinuous rock masses – A sampling window approach

此篇由臺灣中央大學所發表，採用採樣窗口法(sampling window approach)(圖 13)進行不連續岩體的裂隙強度量測，並探討裂隙強度的不確定性。岩體是由完整岩體與不連續岩體所組成，裂隙強度為岩體重要的幾何性質，對於不連續岩體之力學行為和水力傳導性亦扮演重要的角色。

該研究針對二維裂隙強度(P_{21})量測之不確定性提出數值分析方法， P_{21} 量測是預測岩體中裂隙強度的有效方法，但仍然具有不確定性，該研究使用柏松分布(Poisson distribution)進行裂隙強度量測不確定性之研究，亦針對 P_{21} 量測提出降低不確定性之解決方案。為了驗證分析結果，該研究使用 Golder 公司開發之 Fracman 軟體來模擬 P_{21} 的測量，該研究使用具有多個變數(裂隙強度、裂隙尺寸、採樣窗口尺寸)的 3D 裂隙數值模型，該數值模型已使用解析解進行驗證，該研究結果顯示， P_{21} 量測的不確定性主要受採樣窗口尺寸、裂隙直徑、裂隙強度所影響，其與採樣區域/裂隙直徑的平方根成反比。該研究所提出的模型不適用於裂隙直徑大於採樣窗口尺寸的情況，當裂隙直徑大於採樣窗口尺寸時應使用不同的機率模型。

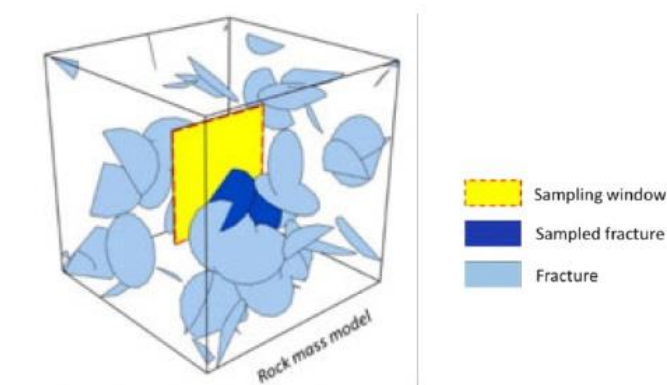


圖 13：採樣窗口法示意圖

9. Long-term permeability experiments of a single fracture in granite under thermal conditions and evaluation of the aperture distribution through microfocus X-ray CT

本篇由日本京都大學(Kyoto University)所發表，主要透過長期的滲透實驗探討熱效應對花崗岩裂隙內寬之影響，並透過微焦 X-ray CT 觀測裂隙內寬的變化。由於現階段岩石裂隙界面隨時間變化的研究並不多，因此該研究亦探討裂隙滲透率的長期演化。

該長期滲透性演化實驗所使用之操作溫度為 20°C 與 60°C，在 20°C 時，需要注意影響水力內寬的力學潛變，壓溶作用可能發生在裂隙粗糙處，滲透率的變化取決於裂隙表面粗糙度的化學-機械相互作用；在 60°C 時，熱膨脹效應將造成滲透率之降低，60°C 的滲透率是低於 20°C 的滲透率，此外，熱傳導亦會改變流體的黏度與速度，並改變水力內寬，然而較高的溫度可能導致活性礦物溶解，並改變裂隙內寬。

然而，裂隙表面的形貌與內寬分布不能直接從滲透實驗獲得，因此為了檢視裂隙面的變化，組裝具有加熱能力的三軸單元，並利用微焦 X-ray CT 獲得不同溫度下的裂隙結構與內寬分佈(圖 14 與圖 15)，實驗結果顯示，裂隙表面粗糙度與接觸面積因溫度不同而發生改變，較高的溫度與較高的圍壓狀態下，裂隙內寬會閉合，此結果與長期滲透性演化實驗一致。另外，京都大學提出裂隙內寬的縮小與接觸面積的增加皆可能歸因於壓溶作用的化學過程，後續將針對該機制進行進一步的研究。

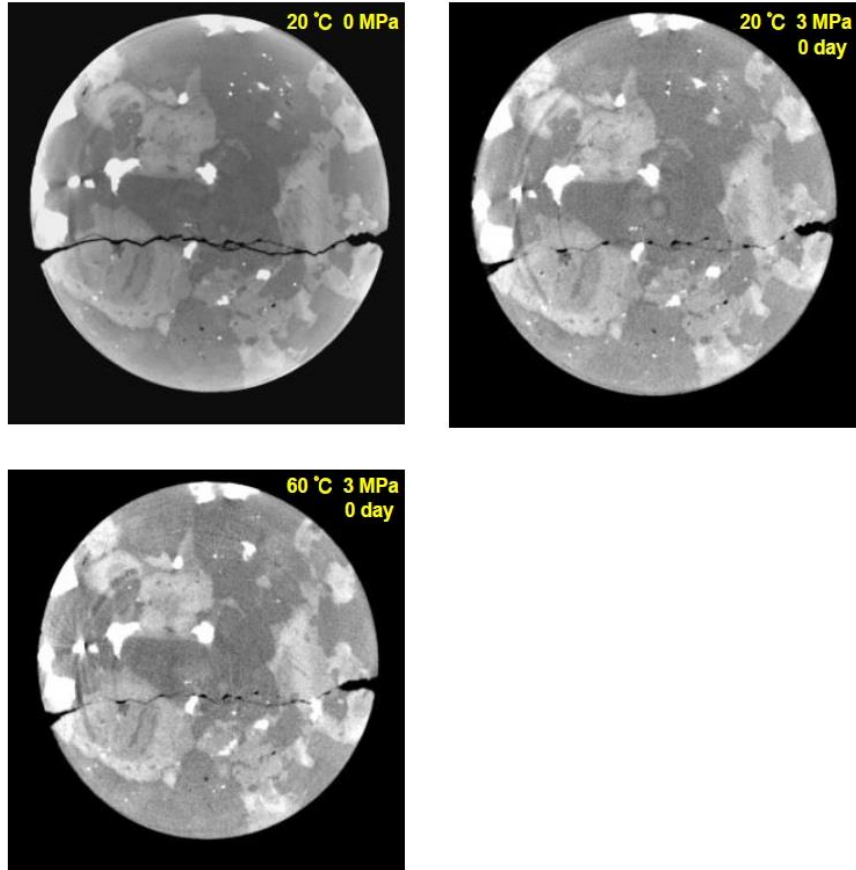


圖 14：裂隙內寬於不同溫度與圍壓下的變化(橫切面)

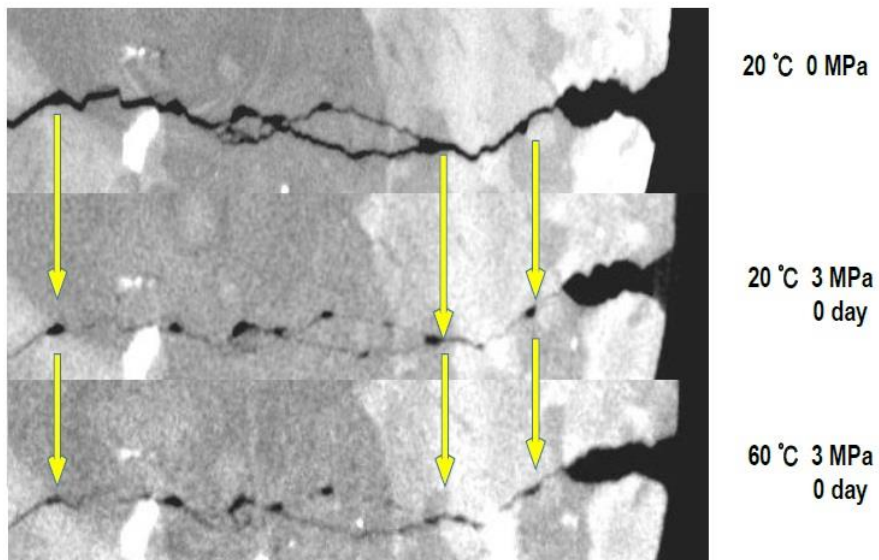


圖 15：裂隙內寬於不同溫度與圍壓下的變化(放大圖)

二、岩石力學技術交流討論會議

美國岩石力學年會結束後，台電公司拜訪紐約市立大學，介紹國內高放最終處置計畫之現況，並針對應用於高放最終處置計畫之岩石力學技術議題進行交流。

台電公司介紹臺灣用過核子燃料管理策略與最終處置計畫之背景，目前臺灣是採用水池冷卻、乾式貯存、最終處置等 3 階段進行用過核子燃料之管理，最終處置計畫的部分，臺灣是採用「深層地質處置」，利用深部岩層的隔離阻絕特性，採用「多重障壁」的概念，將用過核子燃料埋在深約 300 m 至 1,000 m 的地下岩層中，再配合廢棄物罐、緩衝回填材料等工程設施。藉由人工與天然障壁所形成的多重障壁系統(Multi-barrier System, MBS)，可有效使可能釋出的放射性核種受到圍阻與遲滯，以換取足夠的時間，讓放射性核種的輻射強度在影響人類生活環境之前，已衰減至法令規定所容許的限值。另外說明臺灣採用階段式決策方式(Step-wise decision making)執行用過核子燃料最終處置計畫，包含 5 個階段：

1. 「潛在處置母岩特性調查與評估階段」(2005 年至 2017 年)；
2. 「候選場址評選與核定階段」(2018 年至 2028 年)；
3. 「場址詳細調查與試驗階段」(2029 年至 2038 年)；
4. 「處置場設計與安全分析評估階段」(2039 年至 2044 年)；
5. 「處置場建造階段」(2045 年至 2055 年)。

台電公司已針對管制機關與法規之要求，已如期如質於 2017 年底提出 SNFD2017 報告，並完成國際同儕審查，管制機關亦已同意 SNFD2017 報告審查意見回復。會議中台電公司重點說明 SNFD2017 報告已獲得重點成果，相關內容如下：

1. SNFD2017 報告經過系統化分析評估，明確建議排除臺灣西南部

泥岩的處置可行性，並建議花崗岩是臺灣目前具潛能之處置母岩，現階段的研究顯示臺灣本島及離島皆有合適的花崗岩體，其岩體尺寸及地質特性，具備提供後續進行深層地質處置研究的潛力；至於中生代基盤岩仍需持續關注進行研究，以探討其未來處置可行性。

2. SNFD2017 報告採用 KBS-3 處置概念做為現階段處置設施之參考概念，並探討處置設計與工程技術之可行性，SNFD2017 報告依照國內地質特性，自行建立與掌握廢棄物罐、緩衝材料與回填材料、處置隧道、封塞設計等設計基礎能力。
3. SNFD2017 報告安全評估技術發展，針對用過核子燃料最終處置系統，以及地質概念模式與特性數據，建立安全評估與情節建構方法論，具體展現地質處置設施長期安全性的評估能力。

後續與紐約市立大學針對可以應用於高放最終處置計畫之岩石力學研究進行討論，並商討後續可能的合作機會。

三、用過核子燃料最終處置技術交流討論會議

由於用過核子燃料最終處置設施採用深層地質處置，係將用過核子燃料處置於多重障壁的處置設施及深層的穩定地層，結合妥善的工程措施與地層的遲滯特性與深度，發揮隔離(使地表的地質作用與人類活動不會影響地下的處置設施)、圍阻(使處置設施中的放射性物質不易釋放到地層)與遲滯(有效延緩放射性核種的釋出與遷移，使放射性物質在影響人類生活環境之前，已衰變到對人體健康無害的程度)的功能，以達成確保人類環境長期安全之目的。

美國勞倫斯伯克萊國家實驗室為大型國際合作計畫 DECOVALEX 的主辦機構，計畫主要目的係探討熱力、水力、力學及化學四項因子對高放射性廢棄物處置設施的影響，並利用現地的實驗數據進行相關模式之驗證，第七期(DECOVALEX-2019)將於 2019 年底結束。美國勞倫斯伯克萊國家實驗室目前正在規劃第八期(DECOVALEX-2023)之研究主題，經評估後，下列二個研究主題值得本公司考慮參與：

1. 高放處置設施性能評估(Performance Assessment, PA)模式成果比較與確認基準(Validation Benchmarking)
 - (a) 提案機構：美國 Sandia 國家實驗室
 - (b) 目標：
 - (i) 採用一個或多個通用型之處置概念，例如瑞典的花崗岩概念案例、德國的鹽岩概念案例、法國的黏土岩概念案例、美國的不飽和凝灰岩概念案例(圖 16)。
 - (ii) 探討複雜模式與簡化模式模擬結果對整個系統的差異及影響。
 - (iii) 探討適合的不確定性分析方法，高放處置設施性能評估之不確定性包括數據的不確定性、模式的不確定性與情節發

展的不確定性，在各團隊皆使用相同之數據與情節下，探討模式的不確定性。

(iv) 參數敏感度分析方法之比較，探討各團隊使用之方法及其性能評估所用之重要參數所涵蓋之範圍及其影響。

(v) 調查各團隊不確定性量化方法。

(c) 背景說明：

美國 Sandia 國家實驗室長期開發新的深層地下處置設施的模擬平台(Geologic Disposal Safety Assessment Framework)，其全系統性能評估計算係採用 PFLOTRAN (熱-水-力-化等多項耦合方程式)和 DAKOTA(不確定性取樣和誤差傳遞)為主程式框架，每個程式都運用高效能運算設備，進行大規模的平行運算。其中，PFLOTRAN 可描述多元的物理現象，涵蓋熱、水、力、化等各種耦合作用機制，模擬長期性能評估，包括源項描述、放射性廢棄物基質溶解、放射性核種釋放、衰變和氣體生成，以及模擬放射性核種通過近場工程障壁和遠場母岩的傳輸過程，進而到最後生物圈的描述，都可以完整考慮。同時，全系統性能評估計算中，亦可應用 DAKOTA 進行參數敏感度與不確定性的分析。

DAKOTA(Design Analysis Kit for Optimization and Terascale Applications)提供科學家和工程師(分析師、設計師、決策者)更好的模型預測，通過量化不確定性來增強對風險的理解；並通過模擬來改良設計、評估可信度。Sandia 國家實驗室開發的深層地下處置設施模擬平台如圖 17。

因為在美國於特定場址進行上述模擬平台之驗證是不可能的，然而為了測試平台新增的功能，將在設計成熟的通用型

處置概念進行測試。參考國際原子能總署安全導則 SSG-14 附錄 II 封閉後安全評估導則，經由同儕審查與模式的確認基準，可以建立並提升安全評估的信心，是故 Sandia 國家實驗室提出本項研究計畫，希望各國的研究團隊在使用相同之數據與情節下，經由不同的評估模式與軟體，就成果比較與確認探討模式的不確定性、參數敏感度分析與不確定性量化方法。

(d) 研究工作項目：

- (i) 問題界定(Problem definition)：母岩種類、設施設計與參考情節之選定；選定過程將經過各國參與團隊之同意，而且必須確定各國參與團隊能夠有能力使用自己的工具執行功能評估。
- (ii) 模式建置(Model setup)：就通用型處置概念開發更進步的評估模式；建立不確定性分析範本與參數敏感度分析之架構。各國參與團隊使用自己的功能評估程式或軟體。
- (iii) 敏感度分析(Sensitivity analysis)：就選定之關鍵參數進行敏感度分析。比較各國參與團隊參數敏感度分析使用之方法與結果。
- (iv) 功能評估模擬與不確定性量化 (PA Modeling and Uncertainty Quantification)：評估參數不確定性是事先訂定一系列不確定性參數及其參數範圍進行功能評估模擬；就事先訂定好之指標，如個人劑量或核種水相濃度進行功能評估模擬，並探討不確定性量化方法。
- (v) 模式不確定性(Model uncertainty)：評估模式不確定性係使用接近真實情境的模式對照簡化保守的模式(如何應用功能評估針對處置設施封閉後早期的自然演化模擬成果及

其長期的模式不確定性)；探討子模式不確定性與其它子模式不確定性彼此間之關連與影響。

- (vi) 整合(Synthesis)：整合與指引，或許可以增加下列議題之探討：功能評估到底要多複雜或簡化；保守與真實，複合性情節或單一情節，全系統評估或單一組件評估等。

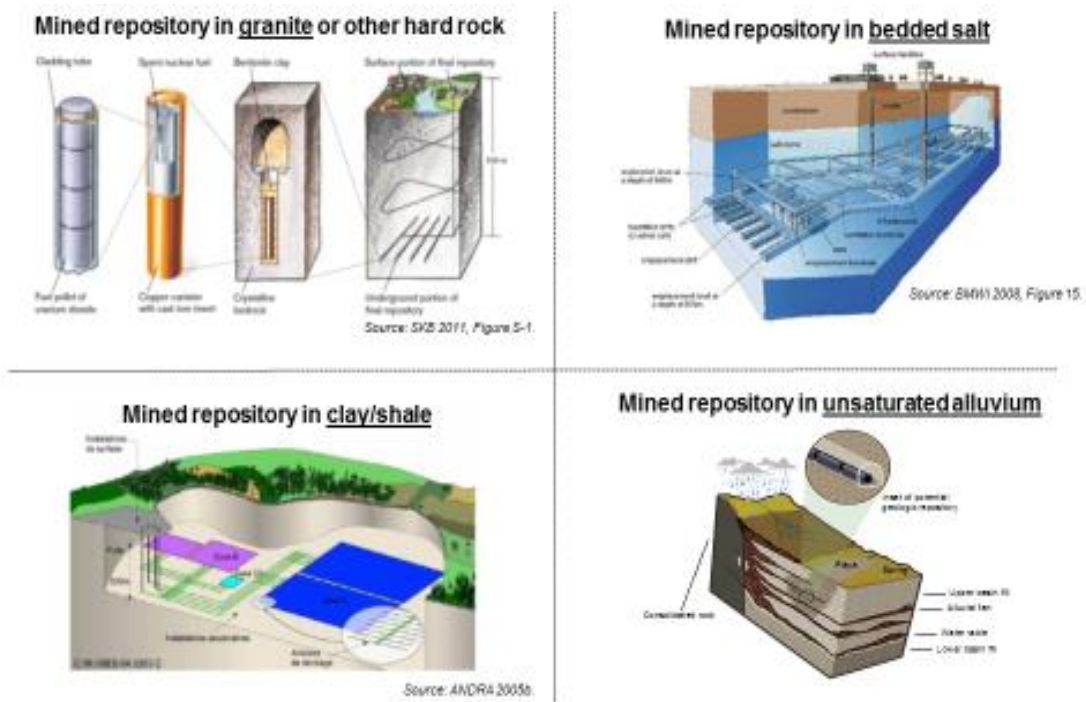


圖 16：通用型處置概念

註：左上：瑞典之花崗岩概念案例；右上：德國的鹽岩概念案例；左下：法國的黏土岩概念案例；右下：美國的不飽和凝灰岩概念案例

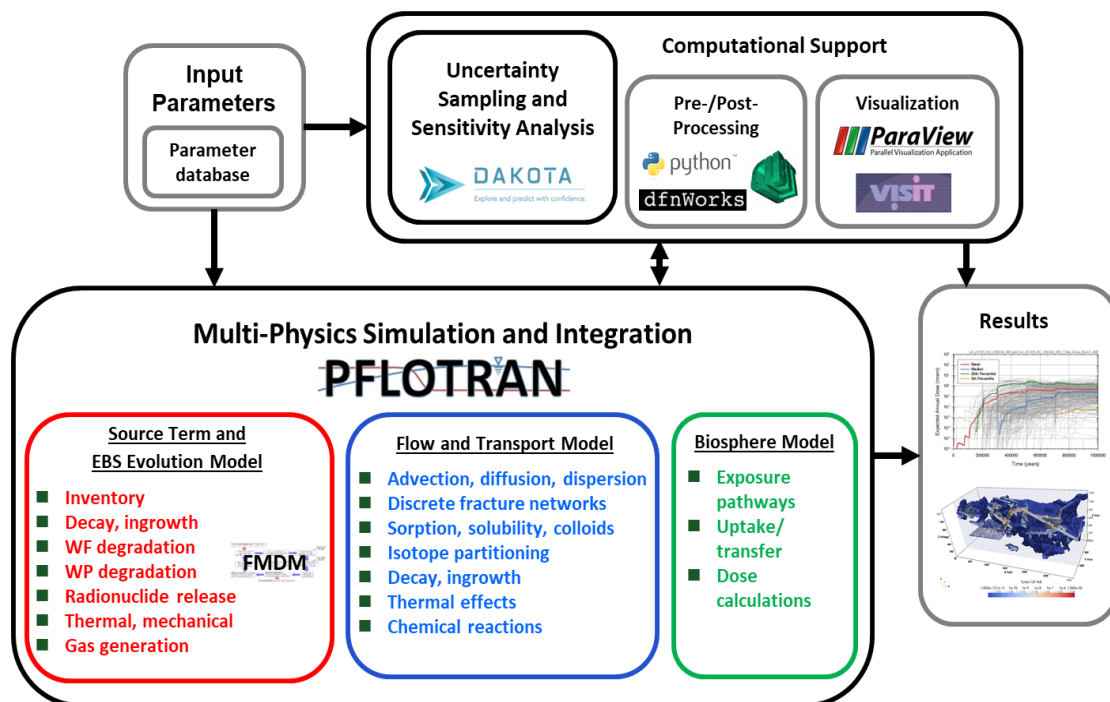


圖 17：美國 Sandia 國家實驗室開發的深層地下處置設施模擬平台

2. 高放處置設施工程障壁系統(Engineering Barrier System, EBS)熱-水-力-化耦合機制了解與數值模擬
- (a) 提案機構：日本原子能研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)
- (b) 目標：
- (i) 經由日本北海道幌延地下實驗室之全尺寸工程障壁系統實驗，了解工程障壁系統(包括回填材料)熱-水-力-化耦合機制。
- (ii) 經由全尺寸工程障壁系統實驗取得之數據進行數值模擬，並校正所使用之模式。
- (c) 背景說明：
- (i) JAEA 建置全尺寸工程障壁系統實驗之目的：
- 觀察工程障壁熱-水-力-化現象及提高數值模擬之信心。
 - 驗證處置孔開挖技術、工程障壁置放技術、混凝土封塞技術以及坑道回填技術。
 - 評估高放處置設施設計技術的適用性。
- (ii) 全尺寸工程障壁系統實驗(圖 18)概述：
- 位於地下 350 公尺的水平通道。
 - 採用垂直置放之方式。
 - 碳鋼包封容器(Overpack)，內置加熱棒，並置於測試孔中央。
 - 包封容器周圍置放膨潤土塊作為緩衝材料(Buffer)，以 70%膨潤土與 30%石英砂混合壓製而成，密度為 1,800 公斤/立方公尺，含水量 10.5%。

- 測試孔上方放置膨潤土作為回填材料(Backfill)，以 40% 膨潤土與 60% 開挖土方混合而成，並填滿整個實驗坑道。
 - 實驗坑道最後以混凝土封塞(Concrete Plug)予以密封。
 - 實驗坑道支撐與混凝土封塞皆使用低鹼混凝土。
 - 實驗所需之水源係使用相同水平位置之地下水。
- (iii) 工程障壁系統實驗設計尺寸如圖 19。
- (iv) 工程障壁系統實驗歷程：
- 2013 年開挖實驗坑道。
 - 2014 年 2 月開挖測試孔。
 - 2014 年 8 月安裝膨潤土塊、包封容器與偵測儀器。
 - 2014 年 9 月封閉實驗坑道。
 - 2015 年 1 月開始加熱與注水。
 - 規劃於 2019 年 12 月 31 日停止加熱。
 - 施工照片如圖 20。
- (v) 於測試孔膨潤土塊內安裝之偵測儀器：
- 安裝之偵測儀器與位置如圖 21。
 - 安裝之偵測儀器有 117 組，分別置於不同之位置。
 - 安裝之偵測儀器分別可量測膨脹壓力、位移、酸鹼值、溫度、電位值、相對濕度、含水量等。
- (vi) 於實驗坑道回填膨潤土內安裝之偵測儀器：
- 安裝之偵測儀器分別可量測應變、膨脹壓力、含水量、孔隙壓力等。
 - 安裝之偵測儀器有 68 組，置於不同之位置，如圖 22。
- (vii) 注水系統之佈置：

— 為了解膨潤土從乾到濕的行為變化，所設計地下水注水系統有 3 個迴路，在適當位置，管路留有切口(Slit)，方能注水。第 1 個迴路流經測試孔的底部；第 2 個迴路沿著實驗坑道四周，在不同角度，有 6 段注水；第 3 個迴路流經回填材料內部，在每 90 度注水，共 4 段。

(viii) 實驗注水過程如圖 24。

(ix) 實驗加熱過程，包封容器表面之溫度量測值如圖 25。

(x) 本實驗熱-水-力-化耦合機制：

— 工程障壁系統涵蓋大量龐雜繁複的作用與現象，由於用過核子燃料安全處置的時間尺度較長，更需要考慮長期的自然演化，模擬時間越長其不確定性越高，經由本實驗探討工程障壁系統早期的熱-水-力-化耦合機制，其成果將有助於作為長期的數值模擬之基礎。

— 本實驗熱-水-力-化耦合關連如圖 26。

(xi) 未來實驗規劃(圖 27)：

— 加熱階段：2015~2019 年，加熱棒維持攝氏 100 度之溫度。

— 冷卻階段：2020~2023 年，停止加熱，了解沒有熱影響後之變化。

— 拆除階段：2024 年~，將可檢視膨潤土飽合情形與包封容器腐蝕情形，亦可與數值模擬結果進行比較。

(d) 研究工作項目：

(i) 2020 年：分析前之準備工作，包括問題界定、參數設定、邊界條件等。

(ii) 2021 年：就加熱階段所使用之模式進行調校。

(iii) 2022 年：就冷卻階段與所使用之模式進行數值模擬與預測。

(iv) 2023 年：就冷卻階段所使用之模式進行調校。

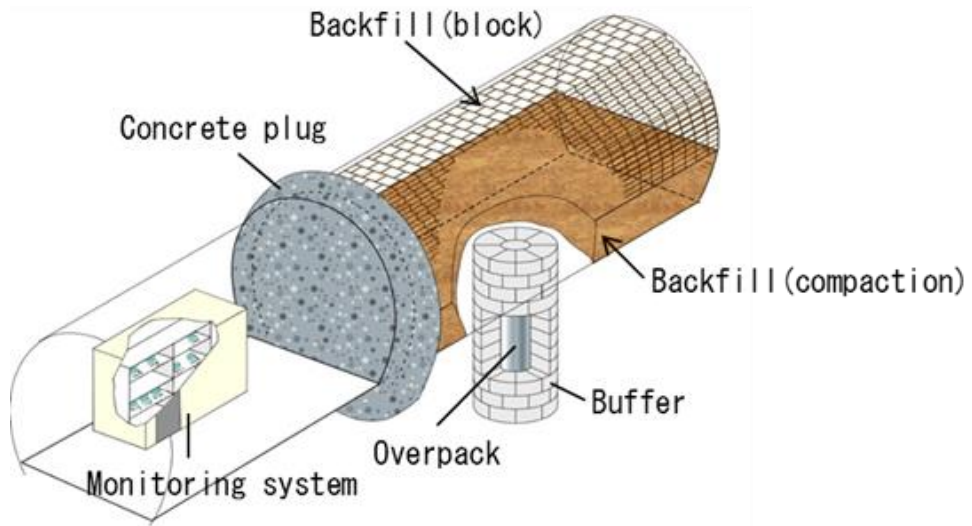


圖 18：日本幌延地下實驗室全尺寸工程障壁系統實驗示意圖

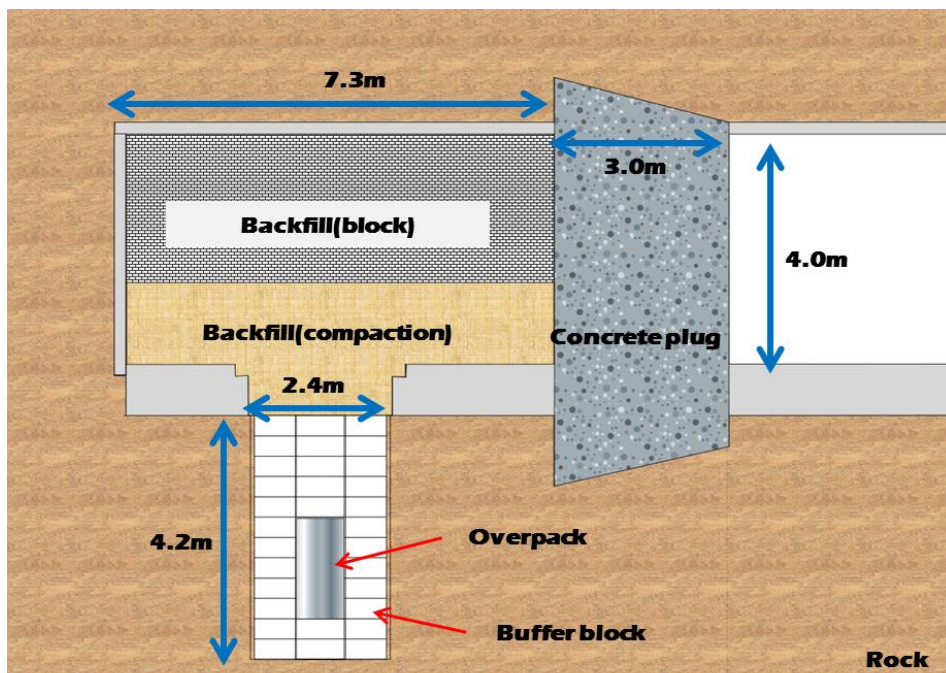


圖 19：日本幌延地下實驗室全尺寸工程障壁系統實驗設計尺寸

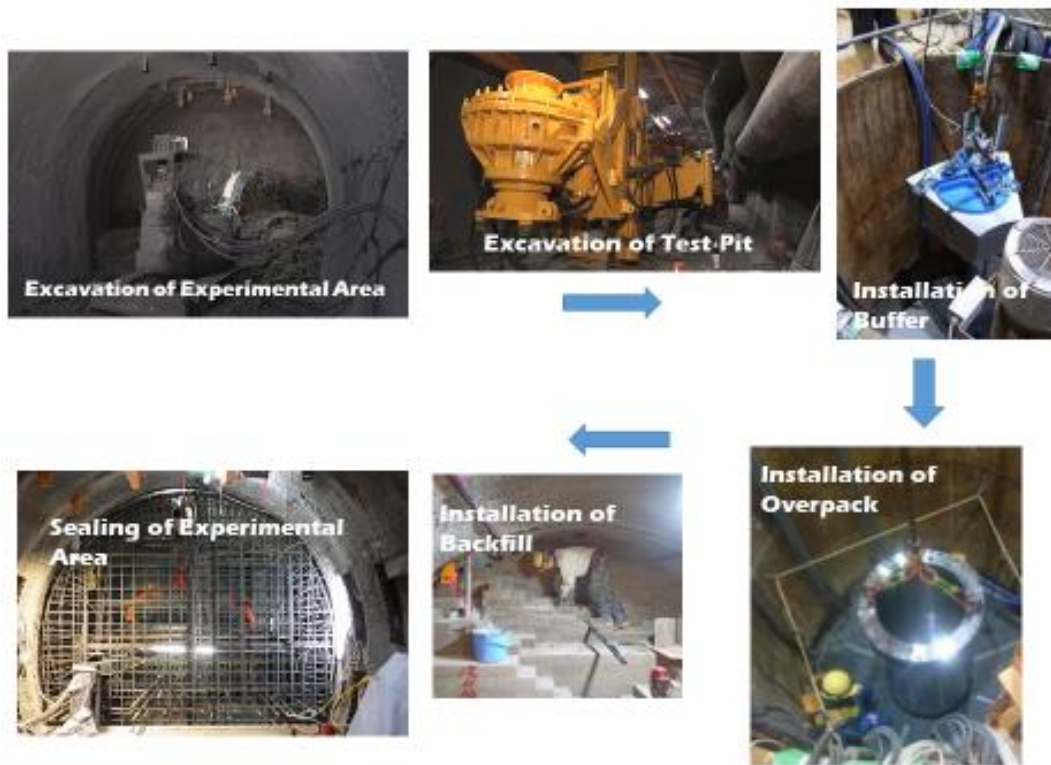


圖 20：日本幌延地下實驗室全尺寸工程障壁系統實驗施工照片

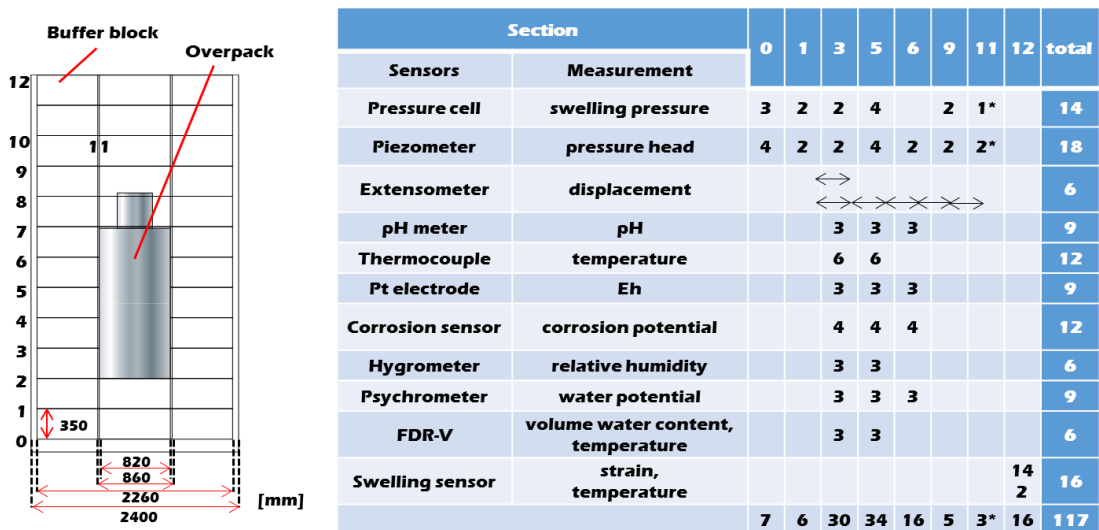


圖 21：處置孔膨潤土偵測儀器安裝位置

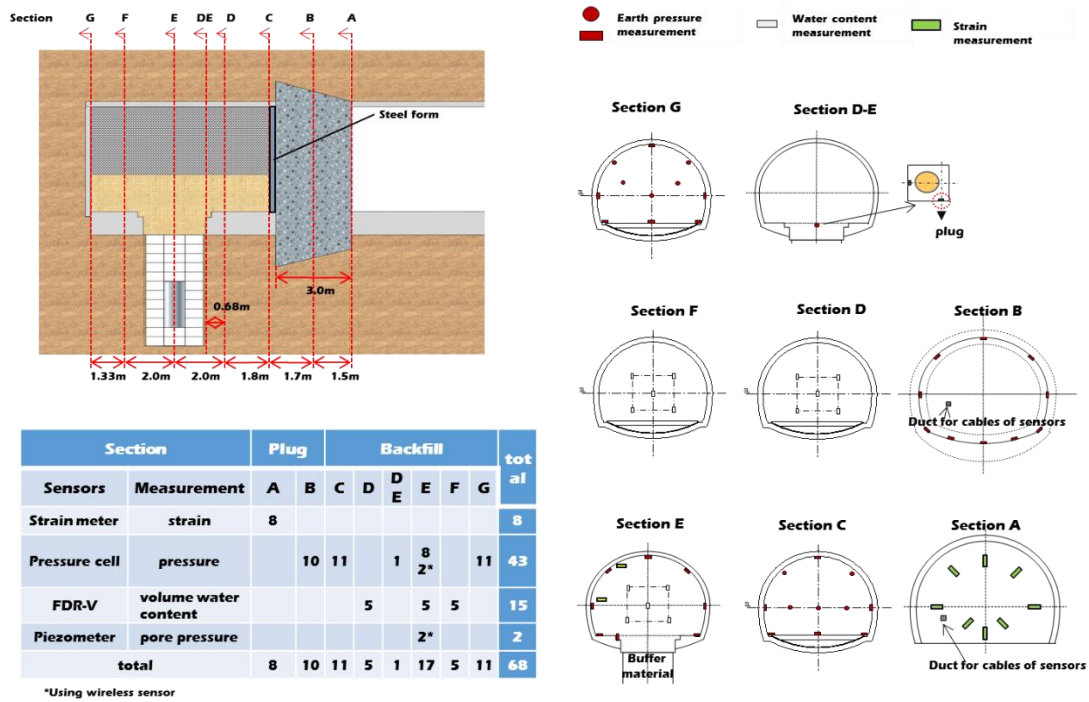


圖 22：實驗坑道回填膨潤土偵測儀器安裝位置

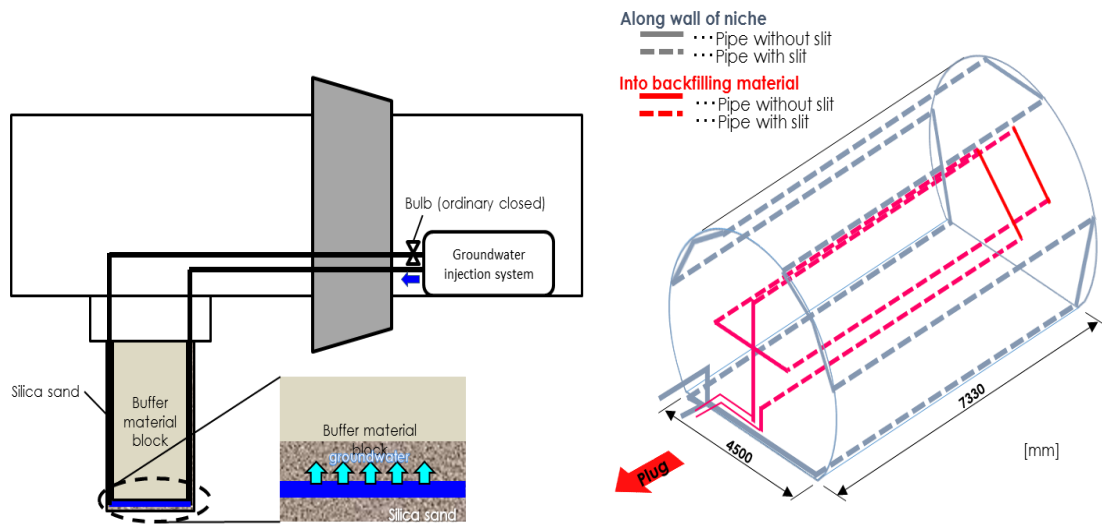


圖 23：全尺寸工程障壁系統實驗之注水系統

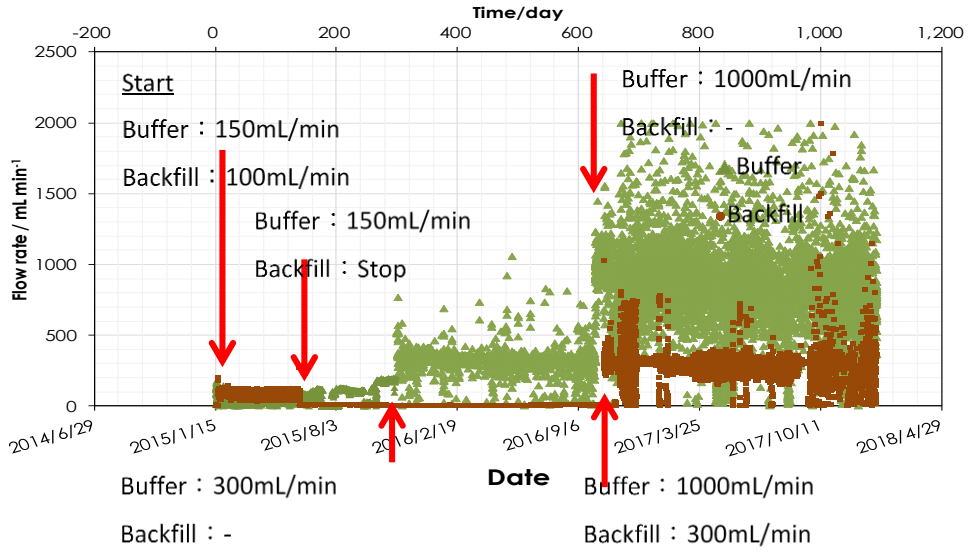


圖 24：全尺寸工程障壁系統實驗注水過程

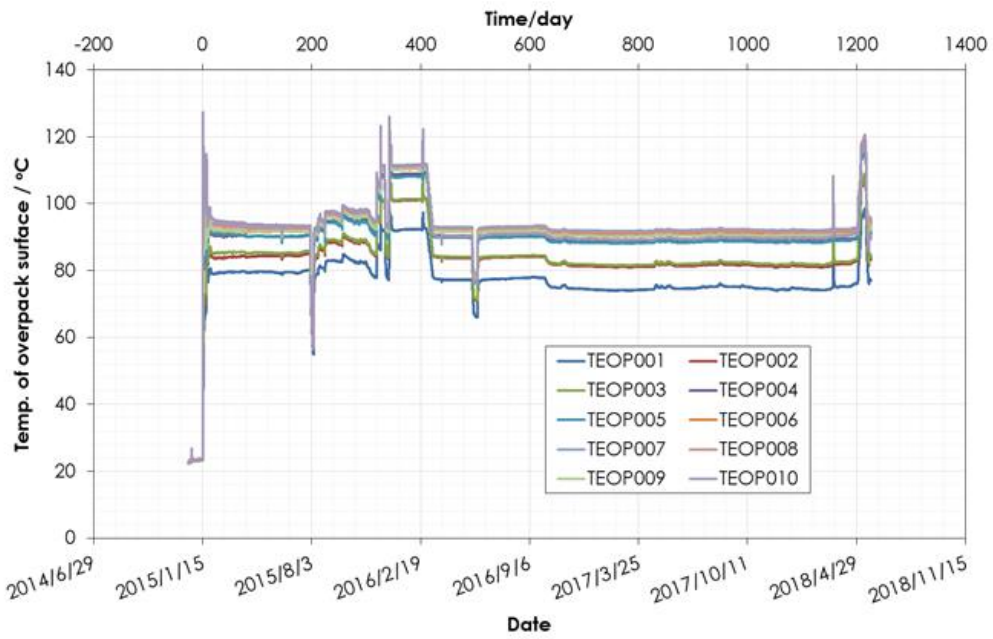


圖 25：全尺寸工程障壁系統實驗加熱過程

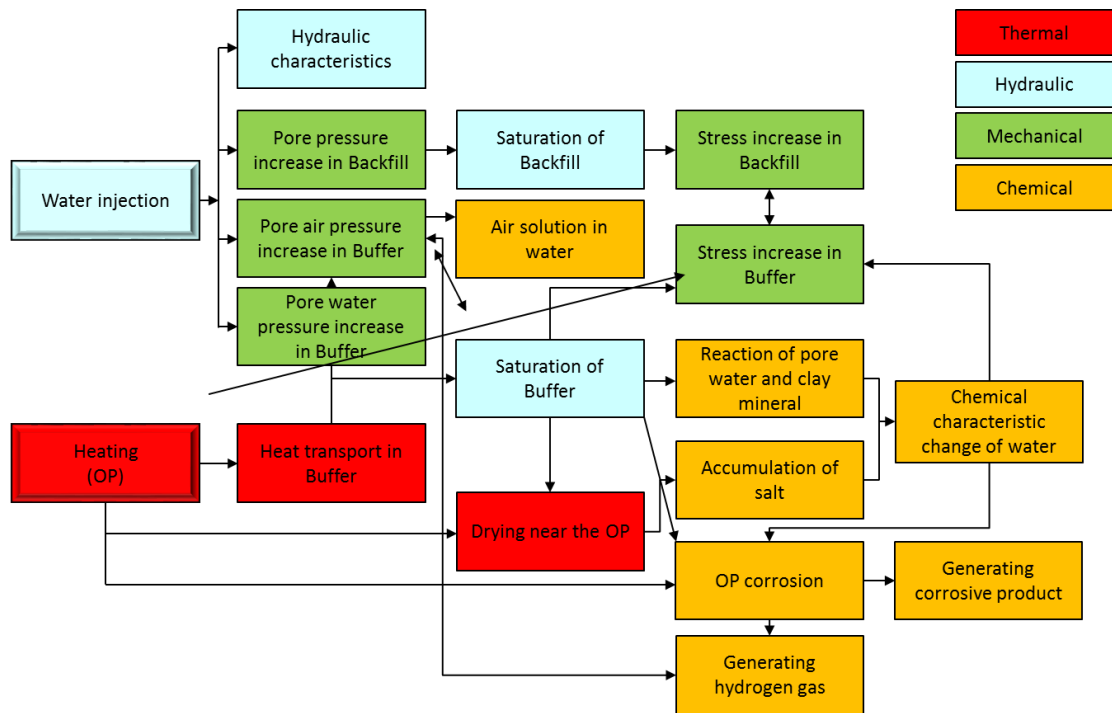


圖 26：高放處置設施工程障壁系統熱-水-力-化耦合關連圖

	2015 ~ 2019	2020	2021	2022	2023	2024 ~
EBS Experiment	Heating Phase	Cooling Phase				Dismantling
DECOVAL EX2023		Preparation for analysis	Calibration modeling of heating phase	Predictive modeling of cooling phase	Calibration modeling of cooling phase	

圖 27：高放處置設施工程障壁系統熱-水-力-化耦合實驗與數值模擬規劃期程

肆、心得

台電公司依法執行用過核子燃料最終處置計畫，已於 106 年底提出 SFND2017 報告，亦經國際專家與主管機關審查同意，確認國內具備地質處置工程技術能力。用過核子燃料應採深層地質處置已是國際普遍共識，深層地質之岩石力學為影響高放最終處置設施佈置與工程障壁完整性之關鍵因子，亦屬於高放最終處置安全評估之核心技術項目。SNFD2017 報告主管機關審查意見中，亦針對岩石力學技術提出諸多問題，可感受主管機關對此議題之重視，台電公司有必要持續參考國際經驗進行精進，期望能夠以最安全的方式處置用過核子燃料。

美國岩石力學學會每年皆會舉辦美國岩石力學研討會，本次奉派參加於紐約舉辦之「第 53 屆美國岩石力學研討會」，會議中針對土木工程、地質科學與採礦、地球物理勘探、石油工程、二氧化碳封存、放射性廢棄物最終處置等領域的應用進行交流討論，而台電公司主要參加可應用至放射性廢棄物處置之岩石力學議題。藉由本次研討會可以發現岩石力學領域非常廣泛，單一技術可以應用至相當多的領域，例如 DFN 可以應用至二氧化碳封存、石油工程、放射性廢棄物處置等領域，國內相關技術人員如果能常與國際專家交流，可以提升國內岩石力學領域之技術與應用。

DECOVALEX-2019 計畫共有 7 項研究項目，目前臺灣研究團隊參加 3 個研究項目：Task A、Task B、Task D，將於 2019 年底結束，而 DECOVALEX 計畫已開始規劃下期 DECOVALEX-2023 研究項目，目前值得台電公司參與的研究項目為(1)高放處置設施性能評估模式成果比較與確認基準、(2)高放處置設施工程障壁系統熱-水-力-化耦合機制了解與數值模擬，其研究目標與用過核子燃料最終處置計畫較為相關，藉由參加 DECOVALEX-2019 的經驗，持續參加 DECOVALEX-2023，可使台電公司研究團隊與國際知名研究機構進行技術驗證，並促使台電公司研究團隊更精進安全評估技術。

伍、建議

- 一、美國岩石力學研討會每年皆會舉辦，提供國際專家交流平台，討論議題涵蓋土木工程、地質科學與採礦、地球物理勘探、石油工程、二氧化碳封存、放射性廢棄物最終處置等領域的應用，有助於取得最新岩石力學相關研究資訊，並可提升應用於高放最終處置之岩石力學技術，2020 年美國岩石力學研討會將於美國科羅拉多(Colorado)舉辦，建議持續派員出席美國岩石力學研討會，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。
- 二、目前世界各國學術單位或放射性廢棄物最終處置專責機構執行岩石力學相關研究，皆會至現地進行相關試驗，如瑞典 Äspö 地下實驗室、日本 Mizunami 地下實驗室、法國 Meuse/Haute-Marne 地下實驗室，所獲得之數據可作為安全評估之參數。建議未來國內可積極參加相關國際岩石力學計畫，或儘早推動國內地下實驗室相關規劃，建立國內岩石力學調查技術，並將國外先進技術引入國內。
- 三、DECOVALEX-2019 將於 2019 年底結束，美國勞倫斯伯克萊國家實驗室目前正在規劃 DECOVALEX-2023 之研究主題，經評估後，(1)高放處置設施性能評估模式成果比較與確認基準、(2)高放處置設施工程障壁系統熱-水-力-化耦合機制了解與數值模擬，值得台電公司考慮參與，有助於發展國內高放最終處置技術，研究成果亦可與國際知名研究機構進行技術驗證，提升國人對於高放最終處置技術之信心。