

出國報告（出國類別：開會）

高放射性廢棄物最終處置熱水力耦合國際研討會 (DECOVALEX2019 8th Workshop)暨放射性廢棄物設施觀摩與討論會議

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：簡國元 主管技術規劃

王郁如 場址評估專員

派赴國家/地區：瑞士、德國

出國期間：108年11月2日~108年11月13日

報告日期：108年12月24日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放射性廢棄物最終處置熱水力耦合國際研討會  
(DECOVALEX2019 8th Workshop)暨放射性廢棄物設施  
觀摩與討論會議

頁數 27 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

1. 簡國元/台灣電力公司/核能後端營運處/主管技術規劃  
/(02)2365-7210
2. 王郁如/台灣電力公司/核能後端營運處/場址評估專員  
/(02)2365-7210

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：108 年 11 月 2 日 至 108 年 11 月 13 日

派赴國家/地區：瑞士/布魯格、德國/杜賽道夫

報告日期：108 年 12 月 24 日

關鍵詞：熱水力化、THMC、DECOVALEX、瑞士放射性廢棄物處置專責  
機構(Nagra)、德國核能服務公司(GNS)

內容摘要：(二百至三百字)

為深化對於高放處置設施相關熱-水-力-化耦合作用之理解並精進安全評估技術能力，台電公司於 2016 年加入 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments)熱-水-力-化耦合模式開發驗證計畫，本次出國之目的係參加 DECOVALEX-2019 成果研討會暨委員會，並與各國團隊討論下期計畫(DECOVALEX-2023)任務提案內容；會後赴瑞士放射性廢棄物處

置專責機構 Nagra，就兩國高放處置計畫推動經驗與溝通重點進行交流，從中了解瑞士如何克服困難，務實穩定推進計畫之歷程，同時也對 Nagra 所屬之 Grimsel 與 Mont Terri 兩座地下實驗室研究計畫與國際合作項目有更深入的了解，並探詢雙方未來合作的可能性，前述會議結束後，轉赴德國核能服務公司(GNS)參訪 Mülheim 護箱工廠，實地走訪了解各式金屬護箱之特性與組裝流程。

## 摘要

依據「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之規定，我國高放射性廢棄物最終處置應採深層地質處置之方式，台電公司「高放最終處置計畫」於 106 年完成第 1 階段「潛在母岩特性調查與評估」工作，並提出「用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(簡稱 SNFD 2017 報告)」，說明臺灣地質穩定性研究成果以及地質處置工程設計、長期安全評估之技術能力，並經國際專家與管制機關審查同意。

為達成物管局要求本公司持續精進高放處置技術、確保符合國際水平之目標，台電公司於 2016 年加入 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments)國際高放處置熱傳-水力-力學-化學(Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical, THMC) 耦合模式驗證計畫，該計畫由瑞典核能檢察署於西元 1992 年發起，主要目的係利用各國高放處置研究計畫之實驗數據開發先進之安全評估模式，以增進對於處置設施與環境中 THMC 耦合作用與相關影響之評估能力，歷經多年發展已累積豐碩成果，成為國際知名技術交流平台，本次出國第 1 項重點任務為參加 DECOVALEX-2019 成果研討會暨委員會。

THMC 耦合分析最大的挑戰在於各因子間彼此存在交互作用並會相互影響，此外在不同的時間與空間下，必須考慮不同的耦合方式與機制，也因此加深耦合系統之評估難度，DECOVALEX 計畫長期運用實驗數據進行數值模擬，建立數值模型並進行驗證優化，然而，數值模型的複雜度亦隨著模擬技術的發展不斷提高，模擬成果的不確定性也隨之提高，因此未來的 DECOVALEX-2023 計畫將更著重於模式不確定性的探討與研究降低不確定性的方法，另一項重點則是考量如何應用實驗室模擬成果之基礎開發升尺度現地試驗評估模式。

本次會議，主辦單位彙整各方意見後，決議 DECOVALEX-2023 將含 7 項任務，經研析以下 3 項任務(Task G、I、J)應能對提升我國高放處置之安全評估技術能力有實際幫助：

- 一、Task G：由日本原子能研究發展機構(JAEA)提出，目的在於瞭解膨潤土與回填材料遇水飽和過程中的各項變化，JAEA 規劃利用晃延(Horonobe)地下實驗室全尺寸工程障壁系統進行注水試驗並偵測各項參數的變化，應用於相關 THMC 耦合作用模式的開發；
- 二、Task I：由美國能源部(DOE)與桑迪亞國家實驗室(Sandia National Laboratories, SNL)提出，任務目標在於建立功能評估(Performance Assessment, PA)、敏感度分析(Sensitivity Analysis, SA)和不確定性量化(Uncertainty Quantification, UQ)的比對基準(Benchmark)，由於各國 PA 及 SA 所使用的模型、方法和軟體均不相同，此項任務將透過比對不同的評估架構下的模型及方法，分析敏感度與量化不確定性，進而提升評估方法之信心；
- 三、Task J：由德國亥姆霍茲環境研究中心(UFZ)、愛丁堡大學及韓國土木工程與建築工程技術研究所(KICT)等單位合作提出，以結晶岩的力學作用為起點，逐步增加耦合因子，最終擴展至熱-水-力耦合作用或水-力-化耦合作用，以建立系統性耦合作用分析機制並解釋結晶岩中裂隙增長過程，有助於增進地質活動危害度的分析能力與理解。

第 2 項任務為參訪瑞士放射性廢棄物處置專責機構 Nagra (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste)並舉行「台電公司-Nagra 最終處置國際會議」，Nagra 於簡報時說明瑞士處置場選址程序包含 3 個階段，目前已完成第 1 階段(調查研究區域建議)與第 2 階段地方社區及各州(canton)討論階段，聯邦議會於 2018 年 11 月宣布將在 Zürich Nordost、Jura Ost 及 Nördlich Lägern 三

個地區進行第 3 階段地質調查，預計在 2024 年選出場址，瑞士推動處置計畫獲得重大進展，Nagra 代表在會中分享經驗時，特別強調聯邦政府的參與和決策是促成計畫順利向前推展重要關鍵，此外，Nagra 負責以中性的科學證據提出調查研究區域，並與社區民眾、各州議會就地表設施、社經層面、地方發展等議題進行客觀的討論與溝通亦是計畫能夠持續推進的重要因素。

第 3 項任務是參訪德國 GNS 公司的 Mülheim 護箱工廠，德國在核能電廠除役、用過核子燃料護箱以及放射性廢棄物處置規劃皆有相當先進之技術，且俱備核能電廠除役廢棄物處理及包裝、製造用過核子燃料護之實務經驗，對於高放射性廢棄物，在 Mülheim 護箱工廠組裝的 CASTOR®金屬護箱，適用裝載高燃耗或短冷卻時間之用過核子燃料；CONSTOR®水泥護箱則以裝載冷卻時間較長之用過核子燃料，本次參訪除了解各式護箱的特性與實際組流程外，另也對於護箱裝載操作模擬與護箱安全測試內容有更深入的了解。

本次出國，除了透過參與 DECOVALEX 國際合作研究計畫，瞭解國際的技術發展現況外，亦透過與瑞士、德國相關單位的討論，相互分享經驗，獲得相關資訊以瞭解國際處置技術發展近況與趨勢。

## 目錄

摘要 .....	I
目錄 .....	IV
壹、出國目的 .....	1
貳、出國過程 .....	3
參、工作內容 .....	4
(一) DECOVALEX-2019 研討會暨委員會 .....	4
(二) 瑞士放射性廢棄物處置專責機構 (NAGRA) .....	14
(三) 德國核能服務公司(GNS)參訪.....	21
肆、出國心得 .....	23
伍、建議 .....	26

## 圖目錄

圖 1 DECOVALEX-2019 研討會會場_瑞士西部應用科學與藝術大學。.....	9
圖 2 DECOVALEX-2019 委員會會場_瑞士聯邦核安督察委員會大樓。.....	9
圖 3 在放射性廢棄物的地質處置環境中，熱(THERMAL)-水(HYDROLOGIC)- 力(MECHANICAL)-化(CHEMICAL)耦合關係圖(YOW AND HUNT, 2002)。.....	10
圖 4 DECOVALEX-2019 第八屆研討會主辦單位開幕致詞。.....	10
圖 5 加拿大核安委員會研究員利用隨機模擬定義斷層面磨擦係數的異質特 性(摘自 T.S. NGUYEN ETAL. 海報內容)。.....	11
圖 6 DECOVALEX-2023 尹廷碩(JEOUNG SECK YOON)博士針對水-力耦合作 用誘發斷層重新滑動之海報發表。.....	11
圖 7 DECOLVAX-2019 委員會主持人 JENS BIRKHOLZER (DECOLVAEX 計畫 主席)與 ALEX BOND(DECOLVAX 技術秘書)。.....	12
圖 8 NAGRA 地質學家說明瑞士特呂利孔(TRÜLLIKON)小鎮井位的地質概況。	12
圖 9 位於蘇黎世北方的特呂利孔(TRÜLLIKON)小鎮井位的鑽探現場。.....	13
圖 10 與會團隊徒步攀爬德國境內之赫高(HEGAU)火山。.....	13
圖 11 我方代表與 NAGRA 的 STRATIS VOMVORIS 針對兩國處置現況做討論。	16
圖 12 我方代表與 NAGRA 團隊彼此簡報交流討論現況。.....	17
圖 13 瑞士放射性廢棄物處置場址選定之進程規劃(摘自 NAGRA 簡報資料)。 .....	17
圖 14 選址初期準備階段:全面性大範圍的地質調查(摘自 NAGRA 簡報資料)。 .....	18



圖 15 第一階段選址工作：NAGRA 提出 6 處場址做為最終處置預選地(摘自 NAGRA 簡報資料)。	18
圖 16 第二階段評選工作：ZÜRICH NORDOST、JURA OST、NÖRDLICH LÄGERN 將列入第 3 階段及最終階段評選名單，其餘 3 處則暫先規劃為保留場址 (摘自 NAGRA 簡報資料)。	19
圖 17 第三階段評選工作：預定場址鑽井調查現況(摘自 NAGRA 簡報資料)。	19
圖 18 最終處置候選場址評估比對表(摘自 NAGRA 簡報資料)。	20
圖 19 我方代表與 NAGRA 團隊會後合影。	21
圖 20 我方團隊與德國 GNS 代表於金屬護箱前合照。	22
圖 21 我方代表與 GNS 代表互贈禮物留影。	23

## 表目錄

表 1、出訪行程及工作內容.....	3
--------------------	---

## 壹、出國目的

依據我國「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之規定，我國高放射性廢棄物最終處置應採深層地質處置之方式。所謂深層地質處置係指將高放射性廢棄物埋在深約 300~1000m 深的穩定地質環境中，藉由人工障壁(廢棄物罐、緩衝、回填材料及廢棄物本身)與天然障壁(處置母岩、地質圈)所組成的「多重障壁」，有效阻絕或遲滯核種的外釋與遷移，換取足夠的時間，使高放射性廢棄物的輻射強度在到達生物圈之前已衰減至可忽略的程度。在長期的處置時間歷程中，高放處置設施的安全性評估為重要的關鍵議題。安全評估除了考量地表與地下坑道處置作業區之建物、結構體與設備外，亦包含隔絕高放射性廢棄物之地下處置區域(包括人工及天然障壁)。

為了精進高放處置設施安全評估之能力，台電公司於 2016 年加入 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments)大型國際合作計畫。該計畫始於 1992 年，致力於研究熱(T, Thermo)-水(H, Hydro)-力學(M, Mechanical)-化學(C, Chemical)在地質處置環境中彼此之間交互作用的機制，和瞭解耦合效應對處置設施的影響。參與計畫的成員包含處理放射性廢棄物處置議題的主管機關、專責機構、國家型研究機構(實驗室)、大學院所、相關企業及顧問公司等，參與國家計有美國、瑞典、瑞士、德國、捷克、韓國、日本、法國、英國等。

此次赴瑞士主要是參加 DECOVALEX-2019 第八屆研討會，會議主要為總結 DECOVALEX-2019 的執行成果，並表達我方團隊對下一期(DECOVALEX-2023)提案之研究項目的參與意願，以利確定 DECOVALEX-2023 的研究項目。會後，我方團隊則赴瑞士國家放射性廢棄物處置專責機構 Nagra，就雙方目前放射性廢棄物處置計畫之推動現況做討論，並交流執行經驗以及最新處置技術之進展。另，會後，亦赴德國核能服務公司(GNS)，實地瞭解高、低放射性廢棄物護箱的製作

流程、規格及設計概念。此次行程，透過參與國際合作研究計畫，瞭解國際的技術發展現況，並與各國專家學者交流討論，希望汲取國際專家之實務經驗與專業意見，對國內用過核子燃料最終處置計畫之技術規劃與問題因應有所助益，並精進我國用過核子燃料最終處置計畫之技術能力，提升研究發展能量。

## 貳、出國過程

本次出國的行程主要可分為三部分，第一部分為參加自 108 年 11 月 4 日迄 11 月 7 日的「DECOVALEX-2019 研討會暨委員會(含技術參訪)」，第二、三部分則分別為參訪瑞士放射性廢棄物處置專責機構（Nagra）與德國核能服務公司（GNS），就國內及國際之處置計畫執行現況與所遇到的問題進行討論，汲取該國專家之實務經驗與專業意見，反饋於國內用過核子燃料最終處置計畫之技術發展與規劃，並希望對於處置計畫執行、問題因應與未來規劃有所助益。

本次開會與參訪行程及其工作內容如 表 1 所示：

表 1、出訪行程及工作內容

日期	地點與行程	工作內容
11 月 2 日至 11 月 3 日	臺灣到瑞士(蘇黎世)	往程
11 月 4 日	瑞士 布魯格(Brugg)	參加 DECOVALEX-2019 研討會
11 月 5 日		
11 月 6 日	瑞士 布魯格(Brugg)	參加 DECOVALEX-2019 委員會
11 月 7 日	瑞士、德國	技術參訪
11 月 8 日	瑞 士 韋 廷 根 (Wettingen)	參訪瑞士放射性廢棄物處置專責機構（Nagra）並進行技術討論
11 月 9 日	前往德國 杜賽道夫	週六，由瑞士前往德國杜賽道夫
11 月 10 日	德國 杜賽道夫	週日，資料整理
11 月 11 日	德國 杜賽道夫	參訪德國核能服務公司（GNS）並進行技術討論
11 月 12 日至 11 月 13 日	德國(法蘭克福)到臺灣	回程

## 叁、工作內容

### (一)DECOVALEX-2019 研討會暨委員會

本次 DECOVALEX-2019 研討會與委員會分別於瑞士西部應用科學與藝術大學(圖 1)與瑞士聯邦核安督察委員會(ENSI)大樓 (圖 2)舉行。DECOVALEX-2019 研討會約有 150 人與會，共有 36 個口頭報告，62 個海報成果於會議中發表，議題包含工程障壁系統與工程-天然障壁材料間的交互作用、結晶岩中之氣體傳輸與耦合作用、鹽岩與泥岩中之熱水力化耦合作用、斷層滑動與誘發之地震活動，以及交叉議題和創新方法之討論。而 DECOVALEX-2019 委員會則是針對有潛在意願參與下期計畫的單位代表與會。以下將針對各會議之工作內容重點做摘要描述：

#### 1. DECOVALEX-2019 研討會

DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments)國際合作研究計畫始於 1992 年，透過現地實驗數據與電腦的數值模擬，致力於瞭解在地質處置環境中，熱(T, Thermo)-水(H, Hydro)-力學(M, Mechanical)-化學(C, Chemical)彼此之間交互作用的機制(圖 3)，並探討其耦合作用對處置設施的影響。DECOVALEX-2019 計畫自 2015 年開始，在為期四年的研究計畫中，研究的議題含括七個研究項目(Task A~Task G)：

- (1) Task A: Modelling gas injection experiments (ENGINEER)
- (2) Task B: Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock
- (3) Task C: Groundwater recovery experiment in tunnel (GREET)
- (4) Task D: Hydro-mechanical interactions in bentonite engineered

barriers (INBEB)

(5) Task E: Upscaling of modelling results from small scale to one-to-one scale

(6) Task F: Fluid inclusion and movement in tight rock (FINITO)

(7) Task G: EDZ evolution in sparsely fractured competent rock

其中，台電在此期計畫參與了 Task A、Task B 和 Task D 三個研究項目。此次會議，報告內容除了總結 DECOVALEX-2019 各單位的研究成果外，內容亦包括未來計劃執行的看法(圖 4)。報告述及 DECOVALEX 計畫的進行已經累積許多數值模擬成果，然而大多數結果卻缺乏明確的結論，模型結果的增加也讓模型的不確定性增加。數值模擬應基於科學基礎，並對模型的建立以及模型的輸入參數有具體的背景知識，以此為前提，應試圖瞭解並找出模擬結果的不確定性。數值模擬是在有限資料下，結合理論原則與假設模型所得的結果，未來亦應探討這些針對特定實驗場址所做的簡化性模擬結果是否適用於各地的真實場址，以及如何應用這些結果於安全評估，或是採用機率式的概念應用於安全評估，並據以做為決策依據。

在海報發表成果方面，加拿大核安委員會的研究員根據注水量、流量及力學模型，以斷層滲透率模型評估裂隙破裂情況及破裂大小。為了反映實際斷層面的異質特性，作者以隨機亂數模擬(stochastic modeling)來估算破裂面上的摩擦角 (Friction angle)，此作法不同於其它研究者以單一斷層面摩擦係數進行研究，較能反映斷層面的異質性。由於程式可直接輸出應力變化，因此作者在計算裂隙破裂所誘發地震之大小時，是採用應力釋放量。經討論後，我們認為使用

裂隙滑移量來評估誘發地震大小亦是可行的做法(圖 5)。

而我方核研所亦在海報發表中提出 Task B 的成果。核研所使用的軟體為 3DEC。在整個計畫執行的初始模擬階段，參與 Task B 的各研究單位使用單純的模型進行模擬，建立對比標準(Benchmark)。目的在於瞭解不同程式的性能及限制，據核研所代表之口述，即使針對最簡易的模型，各單位的模擬結果仍有很大的差異，經討論後認為造成差異的原因在於液體（水）注入時，水在破裂面上的擴散情況即造成模擬結果之差異。擴散模式之一：水一注入後立即在破裂面上向四周擴散分佈；擴散模式之二：水注入後，先在注入點附近分佈，當水的聚集區壓力達到一定程度時，再往外沿破裂面擴散。兩種不同的擴散模式取決於破裂面的間隙(initial creation aperture)性質，此特性是在模擬工作中必須特別加以考慮。此外，對於破裂面，模型網格細緻度設定亦會影響模擬結果，最後，彼此亦針對數值模型之斷層(破裂面)位態的決定做相關討論。

尹廷碩(Jeoung Seck Yoon)博士為 DECOLVAX-2023 研究項目 Task J 的提案人之一，專長在於研究地質環境中的熱-水-力耦合作用。尹博士利用數值模擬瞭解耦合作用所造成之斷層、裂隙活化及誘發地震的現象，並進行放射性廢棄物處置設施之相關安全分析評估(圖 6)。針對 Task J 的數值模擬工具，尹博士除建議 3DEC 外，也以自身經驗推薦 PFC2D。主要原因在於 PFC2D 在熱力學及動力學誘發地震的模擬上，有強大及周延的運算能力。此次會議除與尹博士針對 Task J 討論相關細節外，並述及韓國在近年來地震似乎有逐漸增加的趨勢。地震增加的原因可能來自於人工誘發，也可能是因韓國境內地震網觀測能力增強。尹博士對於台灣的機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)成果感到印



象深刻，並表示非常希望台灣與韓國能就此議題做經驗交流。在 Task J 之外，尹博士提出另一項研究概念，他認為衰變熱可能造成處置場址岩層中的裂隙擴張，進而造成接觸面降低，產生滑動，誘發地震。此活動若考慮應力的傳遞疊加效應，可能觸發遠場的斷層滑動，考量此遠場斷層破裂反饋於場址的影響是另一項可供討論的研究議題。

## 2. DECOVALEX-2019 委員會

委員會的參與成員主要是針對有潛在意願參與下一期計畫 DECOVALEX-2023 的單位(圖 7)。與會單位包括美國能源部(DOE)、法國放射性物料管理局(Andra)、德國放射性廢棄物處置專責機構(BGE)及其聯邦核廢棄物管制辦公室(BfE)、加拿大核安委員會(CNSC)、荷蘭放射性廢棄物中央組織(COVRA)、西班牙國家廢棄物營運公司(ENRESA)、瑞士聯邦核安督察委員會(ENSI)、日本原子能研究開發機構(JAEA)、韓國核能研究所(KAERI)、加拿大放射性廢棄物管理機構(NWMO)、英國放射性廢棄物管理公司(RWM)、捷克放射性廢棄物管理局(SURAO)、瑞典輻射安全局(SSM)及本公司等。各單位就下一階段各提案項目表達規劃建議及看法後，經主辦單位統計每個項目的參與單位個數與參與意願強度，最後總結下一期計畫的研究項目。在本次會議中，因各研究項目皆有足夠的參與單位，因此預估將保留所有的研究提案項目。

在委員會之後，主辦單位安排於第二日參訪瑞士放射性廢棄物處置專責機構(Nagra)於瑞士北方的特呂利孔(Trüllikon)小鎮的鑽井調查作業現場(圖 8、圖 9)。此孔是瑞士第三階段選址作業中，繼比拉赫(Büllach)小鎮鑽井後的第二個鑽井作業。目地主要是希望能

對於瑞士北部三個建議場址的地下地質狀況能有全面性的瞭解，提供深層地質處置設施安全評估的科學基礎。鑽孔深度預估將達 2000 公尺，調查內容包括瑞士放射性廢棄物處置母岩(Opalinus Clay)的厚度、滲透率和岩層礦物組成，以及 Opalinus Clay 上覆及下部岩層的特性調查。鑽井作業前，該區域皆以三維震波測勘詳細調查其地質概況，以提供鑽井作業的前置資訊。在鑽井作業期間，Nagra 設有免費的熱線電話，提供諮詢服務給予關心此計畫、或對此計畫有興趣的地方民眾。作業現場亦設立觀景平台供遊客或訪客參訪使用，並於特定時間提供導覽服務。

隨後，團隊則前位於德國南部的赫高火山(Hegau Volcanoes)(圖 10)。Hegau Volcanoes 是德國南部 Baden-Württemberg 的 Hegau 地區的一座死火山。過去在 Opalinus Clay 的分布範圍調查中，地質調查發現在瑞士北部及德國南部有一不自然的分布空白帶，經過調查發現該區為火山侵入岩的分布區域。為了確認此火山下是否有岩漿庫存在或是具有活動之特性，因此，透過地震的三維震波層析影像法(3D tomography)瞭解其深部構造。經探查後發現該火山下已無岩漿庫，且經定年確認數百萬年來亦無活動的證據，因而確認此構造對於處置場址並不會構成安全威脅。



圖 1 DECOVALEX-2019 研討會會場\_瑞士西部應用科學與藝術大學。



圖 2 DECOVALEX-2019 委員會會場\_瑞士聯邦核安督察委員會大樓。

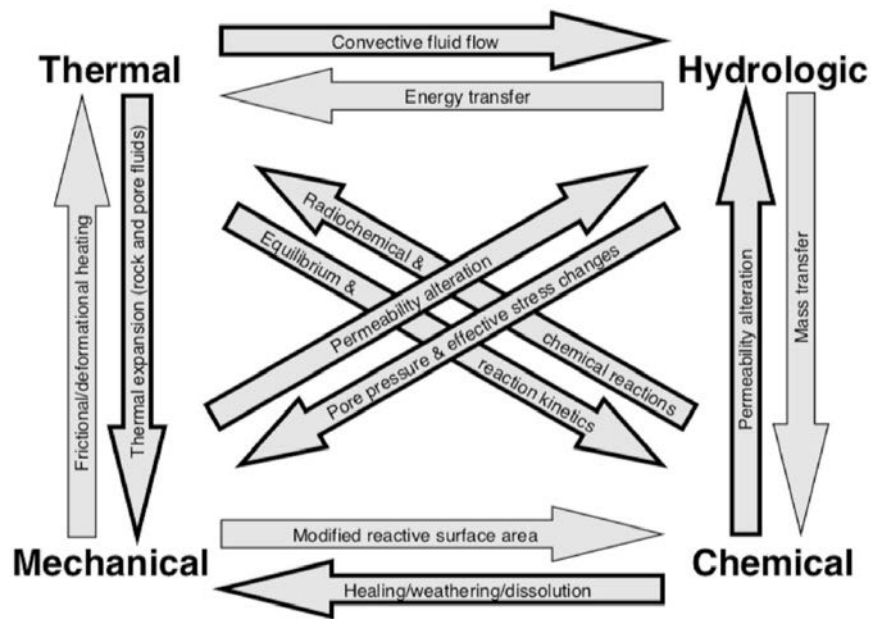


圖 3 在放射性廢棄物的地質處置環境中，熱(Thermal)-水(Hydrologic)-力(Mechanical)-化(Chemical)耦合關係圖(Yow and Hunt, 2002)。



圖 4 DECOVALEX-2019 第八屆研討會主辦單位開幕致詞。

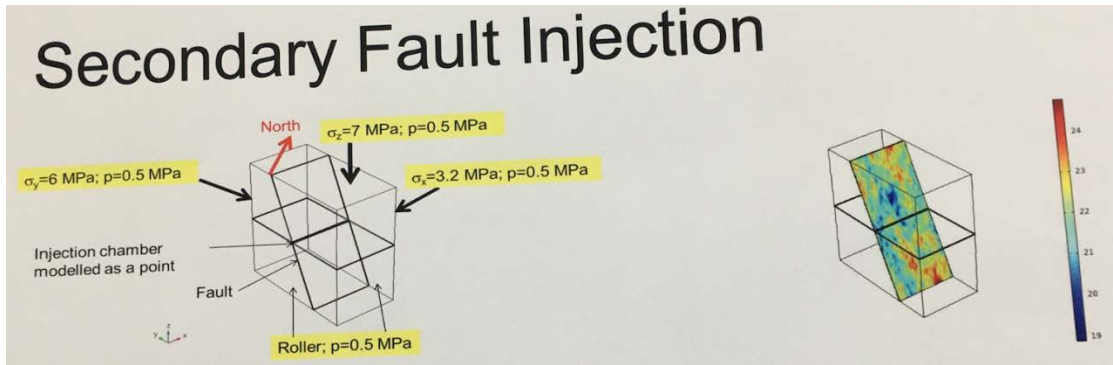


圖 5 加拿大核安委員會研究員利用隨機模擬定義斷層面磨擦係數的異質特性(摘自 T.S. Nguyen et al. 海報內容)。

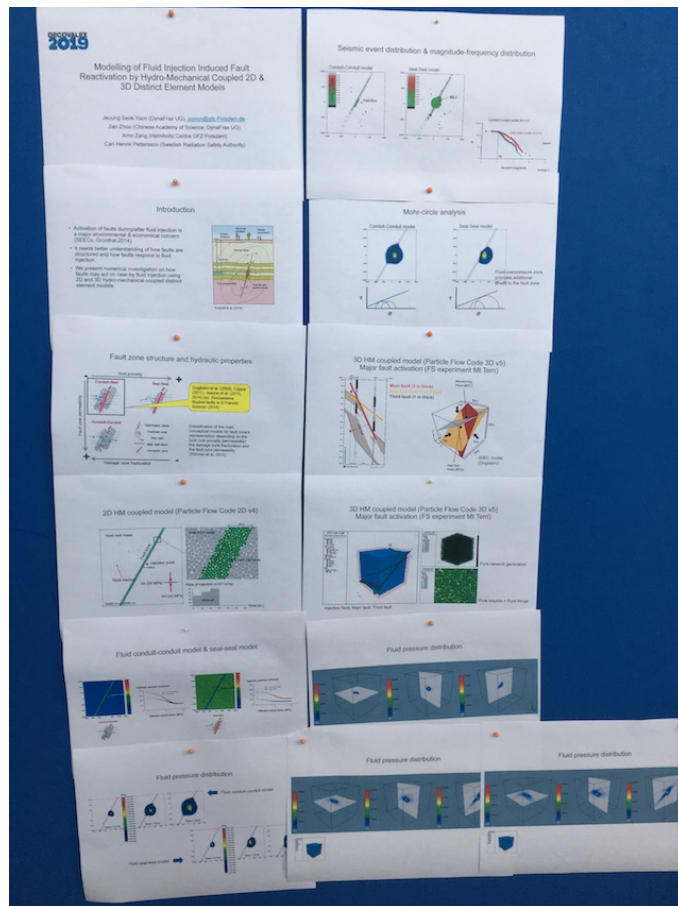


圖 6 DECOVALEX-2023 尹廷碩(Jeoung Seck Yoon)博士針對水-力耦合作用誘發斷層重新滑動之海報發表。



圖 7 DECOLVAX-2019 委員會主持人 Jens Birkholzer (DECOLVAEX 計畫主席)與 Alex Bond(DECOLVAX 技術秘書)。



圖 8 Nagra 地質學家說明瑞士特呂利孔(Trüllikon)小鎮井位的地質概況。



圖 9 位於蘇黎世北方的特呂利孔(Trüllikon)小鎮井位的鑽探現場。



圖 10 與會團隊徒步攀爬德國境內之赫高(Hegau)火山。

## (二)瑞士放射性廢棄物處置專責機構 (Nagra)

Nagra (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste) 為瑞士放射性廢棄物處置的專責機構。此次參訪 Nagra，與會人士除我方人員外，亦包含 Nagra 執行長 Thomas Ernst、國際服務與計畫部主管 Stratis Vomvoris、地質學家兼副主管 Ingo Blechschmidt 及地球化學家兼 R&D 副主任 Olivier X. Lepupin。會中，我方代表先就台灣放射性廢棄物最終處置的進程及現況做說明及介紹，Nagra 工作團隊亦就瑞士的放射性廢棄物處置之發展、執行現況與目前跨國之國際型研究計畫做介紹及說明(圖 11、圖 12)。

依據瑞士的核能法和核能條例，瑞士的放射性廢棄物深層地質處置之目標和標準須由聯邦政府在施政計畫(Sectoral Plan)中明確定義。2008 年聯邦會議批准之施政計畫已明定放射性廢棄物處置之各項標準、作業程序及相關參與機關之執掌。在此之前的 2006 年至 2007 年間，處置計畫所涉及之州、社區、相關主管機關、鄰近國家、組織、政黨和民意代表皆已透過公聽會及作業程序之參與，瞭解計畫內容並進行廣泛之溝通與協調。Nagra 代表廢棄物生產者，負責有關之場址選擇、評估等科學及技術面分析研究，進行全面性評估，並向主管機關提交廢棄物管理計畫及建議處置場址，同時對專家所提之審查意見進行答覆。Nagra 之選址作業只基於科學及技術面之考量，最後則交由相關主管機關及聯邦會議做最終通盤性之決策。

瑞士放射性廢棄物處置場址的選定包含三個階段的工作(圖 13)。2008 年 10 月，Nagra 已就所完成的前置作業(圖 14)提出建議處置場址(第一階段)。在安全性及工程技術可行性的基礎下，Nagra 提出之建議處置場址包括：Zürcher Weinland (Cantons Zürich, Thurgau), North of



Lägeren (Cantons Zürich, Aargau) and Bözberg (Canton Aargau); 對於中、低放射性廢棄物處置，其提出之建議處置場址包括：Südranden (Canton Schaffhausen), Zürcher Weinland (Cantons Zürich, Thurgau), North of Lägeren (Cantons Zürich, Aargau), Bözberg (Canton Aargau), Jura-Südfuss (Cantons Solothurn, Aargau) and Wellenberg (Cantons Nidwalden, Obwalden)。而同時被提出作為高、中、低放射性廢棄物處置之建議處置場址包括：Zürcher Weinland, North of Lägeren and Bözberg(圖 15)。第二階段評選工作包括與涉及處置計畫的相關單位(包括州、社區、相關主管機關等 203 個單位)進行溝通討論。內容包括放射性廢棄物處置的地表設施、設施對於區域土地利用和社會經濟發展的影響，以及區域環境的永續發展等議題皆納入考量。2015 年 Nagra 提出將對 Zürich Nordost 及 Jura Ost 進行第三階段及最終階段調查工作，而其餘 4 處則暫先規劃為保留場址。但 2016 年瑞士聯邦核安督察委員會(ENSI, Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate)表示，需將 Nördlich Lägern 列入第 3 階段及最終階段評選名單，並將 Jura-Südfuss、Südranden 及 Wellenberg 等三個場址列為保留場址(圖 16)。2018 年，在聯邦政府的裁定下，瑞士最終處置場址進入第三階段評估，針對已入選為優先調查的 3 處預定場址進行鑽探，藉以瞭解相關地質構造環境(圖 17)。在進行鑽探工作前，各場址將先進行三維震波測勘，以求對該區構造有通盤的瞭解，之後進行深井鑽探，進一步獲得岩層岩性、孔隙率、滲透率等參數，同時並進行該區第四紀地層的調查，以便瞭解淺層構造侵蝕、堆積的演化情境。

值得注意的是，Nagra 在選址的過程中，基於安全性的考量，對最終處置場址選址所應考慮的項目、條件、參數要求具體標列出來(圖 18)，並據以進行調查及評定工作。列出該表，不但對於整個調查計畫的研究

目標和調查研究項目提供具體的輪廓，亦指引了調查計畫的規劃方向。而整個表格資料，亦提供了完整的場址評估之結果的訊息，對於主管機關的決策，或是與相關單位的溝通皆有助益。

最後，Nagra 展示了數項國際型的實驗研究計畫，並介紹了相關的教育訓練課程。國際上各單位對於處置計畫中的任何技術若有興趣，Nagra 可針對單位需求，量身規劃和設計課程，課程包含理論及實地試驗，上課地點可能根據專業技術的所屬單位，在各地進行移地訓練。

整個參訪會議，雙方並就各自過去計畫執行經驗交換意見和看法。Nagra 非常樂意也希望雙方未來能有機會建立國際合作關係，共同執行相關國際型的實驗計畫，並分享除役或處置的知識經驗。



圖 11 我方代表與 Nagra 的 Stratis Vomvoris 針對兩國處置現況做討論。



圖 12 我方代表與 Nagra 團隊彼此簡報交流討論現況。

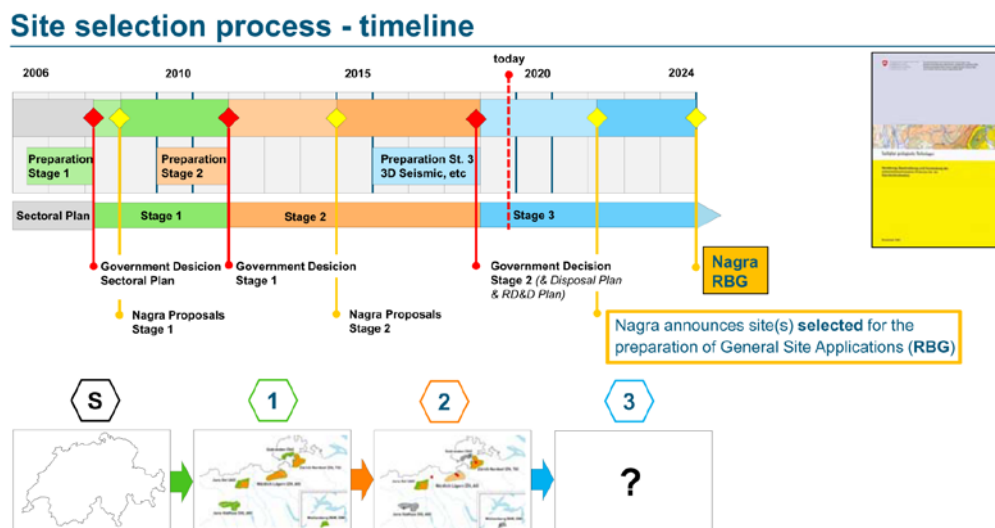


圖 13 瑞士放射性廢棄物處置場址選定之進程規劃(摘自 Nagra 簡報資料)。

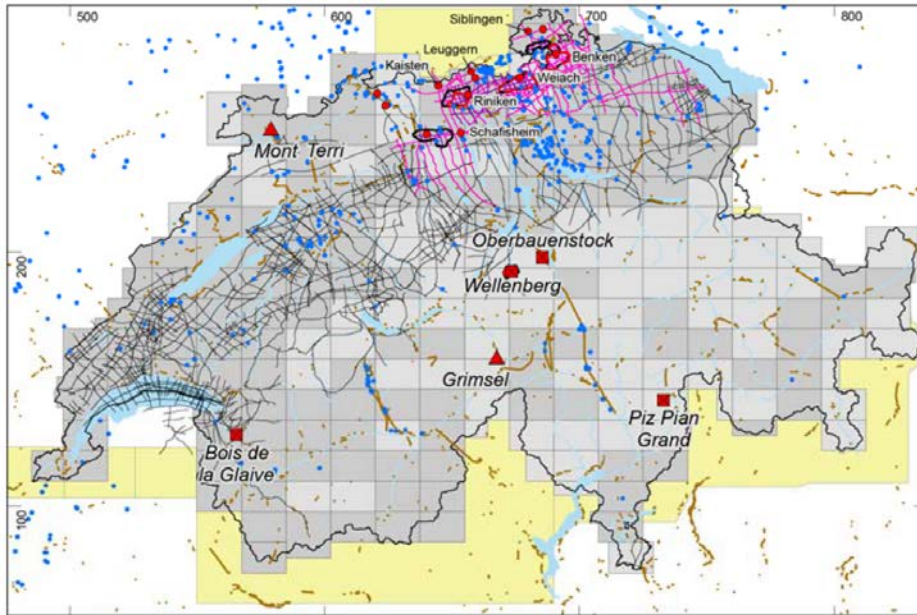


圖 14 選址初期準備階段:全面性大範圍的地質調查(摘自 Nagra 簡報資料)。

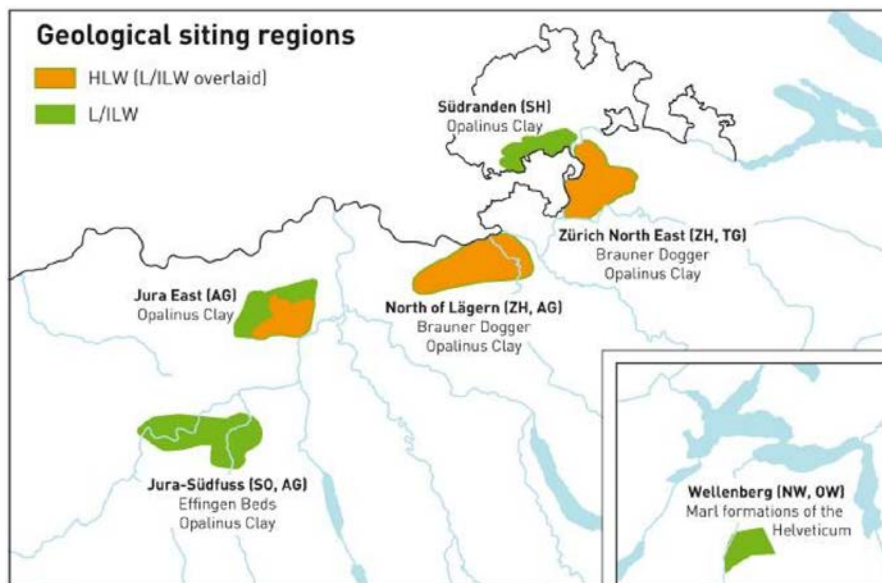


圖 15 第一階段選址工作：Nagra 提出 6 處場址做為最終處置預選地(摘自 Nagra 簡報資料)。

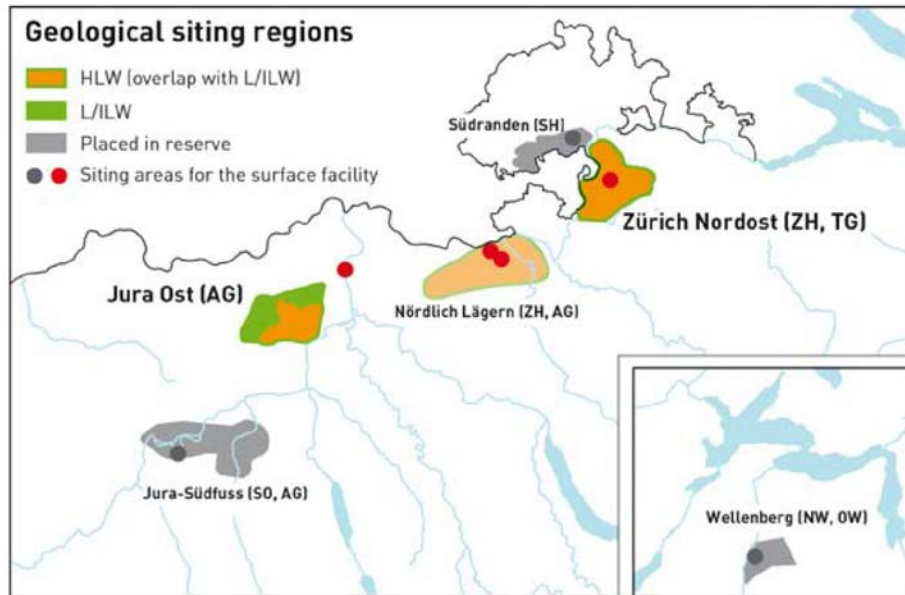


圖 16 第二階段評選工作：Zürich Nordost、Jura Ost、Nördlich Lägern 將列入第 3 階段及最終階段評選名單，其餘 3 處則暫先規劃為保留場址(摘自 Nagra 簡報資料)。

### Deep borehole investigations – at a glance

3

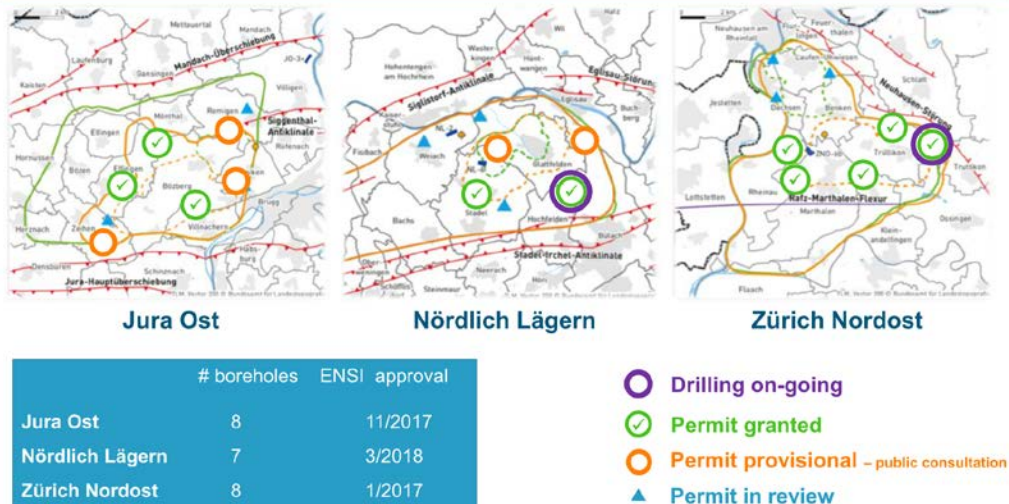


圖 17 第三階段評選工作：預定場址鑽井調查現況(摘自 Nagra 簡報資料)。

Decision-relevant features / Decision-relevant indicators	HLW repository				L/ILW repository					
	Zürich Nordost	Nördlich Lägern	Jura Ost	Südanden	Zürich Nordost	Nördlich Lägern	Jura Ost	Jura- Südfluss	Wellen- berg	
<b>Effectiveness of the geological barrier (E)</b>										
Hydraulic conductivity										
Type of transport pathways and structure of the pore space										
Transmissivity of preferential release pathways										
Self-sealing capacity										
Homogeneity of the rock structure										
Thickness										
Length of critical release pathways										
Colloids										
<b>Long-term stability of the geological barrier (S)</b>										
Conceptual models of long-term evolution (geodynamics and neotectonics; other processes)										
Self-sealing capacity										
Potential for formation of new water flowpaths (karstification)										
Erosion during the time period under consideration										
Depth below the local erosion base level as relevant for formation of new ice-marginal drainage channels										
Depth below terrain as relevant for rock decompaction										
Depth below top bedrock as relevant for glacial overdeepening										
Seismicity										
<b>Explorability and ease of characterisation of the geological barrier in the siting region (C)</b>										
Variability of the rock properties as relevant for their ease of characterisation										
Exploration conditions in the geological underground										
<b>Engineering feasibility (F)</b>										
Depth with respect to engineering feasibility (considering rock strength and deformation properties)										
Geotechnical and hydrogeological conditions in overlying rock formations										
Available space underground										

Very suitable   
 Suitable   
 Limited suitability   
 Less suitable

圖 18 最終處置候選場址評估比對表(摘自 Nagra 簡報資料)。



圖 19 我方代表與 Nagra 團隊會後合影。

### (三)德國核能服務公司(GNS)參訪

GNS(Gesellschaft für Nuklear-Service) 原名為 GNT 核能運輸公司 (Gesellschaft für Nuklear-transporte mbH)。1977 年，由德國電力公司 PreussenElektra GmbH、Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG(RWE AG)、Energie Baden-Württemberg AG(EnBW AG)和瑞典電力公司 Vattenfall 合資，改名成立 GNS 德國核能服務公司。總部位於德國杜賽道夫東北方的埃森市(Essen)。GNS 於 1977 年發表第一個 MOSAIK 中階放射性廢棄物盛裝容器，隔年 1978 年即發表第一個 CASTOR 用過核子燃料貯存暨運輸兩用型護箱。GNS 至今已有 45 年的核能服務經驗，除了協助管理德國核能電廠營運及除役所產生的放射性廢棄物外，亦提供盛裝容器之顧問諮詢、設計規

劃、執照申請與技術訓練等服務。

在與 GNS 代表-放射性廢棄物管理部門經理 Dirk Becher 會面後，我方團隊則隨 Dirk Becher 經理赴 GNS 位於米爾海姆(Mülheim)的盛裝容器製造工廠 Siempelkamp 參訪。Siempelkamp 對於放射性廢棄物容器製作已有 50 年之經驗，專事生產與加工放射性廢棄物盛裝容器。此次透過實地的介紹和說明，瞭解各護箱或盛裝容器的規格設計以及製造和品保流程。



圖 20 我方團隊與德國 GNS 代表於金屬護箱前合照。





圖 21 我方代表與 GNS 代表互贈禮物留影。

## 肆、出國心得

本次赴瑞士、德國參加「DECOVALEX-2019 研討會暨委員會」和瑞士放射性廢棄物處置專責機構 Nagra 與德國核能服務公司之參訪心得如下：

一、處置設施及其周圍環境的熱、水、力、化耦合作用對於設施的安全評估至為重要，國際上極早即開始重視此議題，並開始進行國際合作研究計畫，希望藉由整合國際的研究能量，去探討以及瞭解 THMC 耦合作用的機制及原理。DECOVALEX 已發展 25 年，其中心概念為透過數值模擬從看似不規則的熱-水-力-化的耦合機制中，逐步找出其規則

(to find the order out of disorder)。同時利用真實的試驗數據去發展數值模擬工具、優化數值模擬工具的演算能力，逐步增進對於熱-水-力-化耦合機制的理解。執行此計畫最大的收穫在於：

1. DECOVALEX 提供珍貴的實驗室或現地實驗數據，讓成員可據以研究；
2. DECOVALEX 成員包含各國專家學者，可藉討論與交流，加速專業能力的成長；
3. 開發模擬軟體的成員可以透過此計畫驗證軟體的功能性與成熟度，並且隨著實驗的複雜度增加，升級軟體的性能與達到宣傳的效果。

二、由於熱-水-力-化的耦合作用機制極為複雜，目前離全面理解耦合作用的機制尚有一段距離，但是透過執行計畫的過程，成員能夠學習如何由實驗數據建構模型、考量如何運用各項模擬參數以及如何透過程式語言將實際現況條件盡可能地真實呈現於數值模型之中，並能夠合理解釋差異與判讀結果，並與國際專家學者交流，成為國際工作團隊和資源夥伴的一員。

三、瑞士最終處置場址的選址過程當中，Nagra 基於處置場場址之安全性及工程技術可行性提交各項規劃、研究及評估報告，Nagra 對選址作業以科學及技術面為考量的基礎，其後再交由相關主管機關及聯邦會議做最終通盤性之決策。主管機關及聯邦會議的決策是推展整個計畫的舵手，亦是處置計畫進程穩定前進的關鍵。

四、Nagra 在選址的過程中，基於安全性考量，對最終處置場址選址所應考慮的項目、條件、參數要求具體標列出來，並據以進行評定工作。列出該表格，不但對於整個計畫進行的調查目標及研究項目提供具體的輪廓，亦指引了調查計畫的規劃方向。而整個表格資料，亦提供了完

整的場址評估結果之訊息，對於主管機關的決策，或是與相關單位的溝通皆有助益。

五、Nagra 為瑞士放射性廢棄物處置之專責機構，機構除了負責瑞士境內的最終處置計畫的規劃、調查、分析、評估工作外，同時也擔任國際型整合計畫的計畫主持人，統籌及辦理跨國的實驗計畫，另外，透過自身的專業及擁有的國際資源，亦提供世界各國相關技術人員的教育訓練服務，其營運模式值得我國借鏡。

## 伍、建議

本次赴瑞士、德國參加「DECOVALEX-2019 研討會暨委員會」和參訪瑞士放射性廢棄物處置專責機構 Nagra 與德國核能服務公司，建議事項如下：

- 一、對於放射性廢棄物處置設施，天然或人工障壁之 THMC 耦合作用對於設施安全性是一個重要議題。參與 DECOVALEX 計畫有助於了解國際 THMC 耦合研究發展現況，透過與國際專家討論及經驗交流之過程，拓展國際合作之契機，能獲得專業建議，並確保國內處置技術符合國際水平。然而，THMC 耦合作用複雜，必須長期研究才能對於耦合作用的機制有較為全面性的瞭解或得到具體成果，參與此計畫最重要的收穫在於執行計畫過程中對於專業人員的訓練與養成，包括技術演練、問題分析與國際參與交流能力，我方可在此前提下思考長期參與 DECOVALEX 的模式並據以規劃。
- 二、Nagra 在選址作業的過程中，對最終處置場址選址所應考慮的項目、條件、參數要求皆具體標列出來，並據以評估建議處置場址之優劣。該資料不但為處置計畫將進行的調查目標及研究項目提供具體的輪廓，亦指引了調查計畫的規劃方向。整個表格資料提供一目了然的完整場址評估結果，對於主管機關的決策，或是與相關利害關係人的溝通皆有助益。建議可參考此作法，依據國內的地質和地體構造環境、工程技術現況，制訂適用於國內地質處置場址要求的考量項目進行規劃評估。
- 三、Nagra 在進行場址的鑽井作業工作前，皆會提出具體的鑽井計畫報告，計畫內容清楚揭示鑽井的時程、目的、調查或試驗項目等資訊，向聯邦政府提出申請，聯邦政府核准後，則開始進行鑽探作業。舉行公聽

會向公眾透明化調查計畫的研究和工作項目內容是其中重要的工作，而獲聯邦政府的鑽井許可則是促使調查工作順利進行的關鍵。我國雖無相關的規定和程序可依循，但是瑞士制定調查程序得以讓場址調查順利進行的經驗值得參考與借鏡。

四、Nagra 和 GNS 在放射性廢棄物處置及電廠除役的專業技術上皆經驗豐富，並擁有國際資源。我國可規劃利用此資源，透過國際合作以及相關的培訓計畫或教育訓練課程，培養國內電廠除役與處置之專業人才、提升我國在高放處置以及除役等相關領域之技術水平。