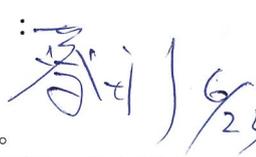


出國報告審核表

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
黃添煌	主管	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：開會（例如國際會議、國際比賽、業務接洽等）	
出國期間：106年4月23日至106年5月5日		報告繳交日期：106年6月20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「目的」、「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：

報告人：  105. 6. 20 李柏叡
 單位：  106. 6. 20 黃添煌
 主管處：  106. 6. 20 張學植
 主管： _____
 總經理： _____
 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。

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 50 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. 黃添煌/台灣電力公司/核能後端營運處/副處長/02-23657210 #2202
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 其他：開會

出國期間：106.4.23~106.5.5

出國地區：瑞典

報告日期：106.6.20

分類號/目

關鍵詞：DECOVALEX 計畫、THMC 耦合、放射性廢棄物、最終處置

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 25 年，從 1992 年瑞典核能檢察署發起後，目前已邁入第七期(DECOVALEX-2019 計畫)，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實驗數據進行驗證。今年適逢 DECOVALEX 計畫成立 25 週年，大會舉辦慶祝活動並邀請 DECOVALEX

計畫關鍵人物進行專題演講，講述 DECOVALEX 計畫成立之原因與成功的關鍵。

DECOVALEX-2019 計畫為期 4 年，本期共有 12 個贊助機構，共有 7 項研究項目。本次研討會為 DECOVALEX-2019 第三次會議，由瑞典輻射安全局於 2017 年 4 月 25 日至 28 日舉辦，包含 1 天技術參訪及 3 天技術研討會。技術參訪前往瑞典核燃料及廢棄物管理公司(Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB)營運之中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR。目前臺灣研究團隊參加 3 個研究項目，Task A：低滲透材料中之平流氣體模擬、Task B：泥岩中斷層導致滑動模擬、Task D：膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合研究。

瑞典 SKB 在放射性廢棄物處置技術於國際上具有領先之地位，目前已提出用過核子燃料最終處置場之建造執照申請，為瞭解瑞典在最終處置計畫之發展現況，參訪位於瑞典 Oskarshamn 之 Äspö 硬岩地下實驗室、中期貯存設施 CLAB 與廢棄物罐實驗室，並進行相關討論。

參加 DECOVALEX 技術研討會，增加與各國交流機會，可瞭解目前國際上 THMC 試驗發展現況與未來趨勢，並建立國內相關技術，以及參訪瑞典 SKB 處置設施，獲得瑞典放射性廢棄物營運之實際經驗，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>)

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：黃添煌 副處長

李柏叡 安全評估專員

派赴國家：瑞典

出國期間：106年4月23日至106年5月5日

報告日期：105年6月20日

(本頁為空白頁)

摘要

大型國際合作計畫 DECOVALEX(Development of coupled models and their validation against experiments)成立已 25 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 計畫)，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實驗數據進行驗證。今年適逢 DECOVALEX 計畫成立 25 週年，大會舉辦慶祝活動並邀請 DECOVALEX 計畫關鍵人物進行專題演講，講述 DECOVALEX 計畫成立之原因與成功的關鍵。

DECOVALEX-2019 計畫為期 4 年(2016 年至 2019 年)，本期共有 12 個贊助機構，共有 7 項研究項目。本次研討會為 DECOVALEX-2019 第三次會議，由瑞典輻射安全局(Swedish Radiation Safety Authority, 簡稱 SSM)於 2017 年 4 月 25 日至 28 日舉辦，包含 1 天技術參訪及 3 天技術研討會。技術參訪前往瑞典核燃料及廢棄物管理公司(Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB)營運之中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR，技術研討會先由各研究項目之負責人簡短說明目前進度與該項目未來之研究方向，再由參與該項目之團隊進行半年成果報告。目前臺灣研究團隊參加 3 個研究項目，Task A：低滲透材料中之平流氣體模擬、Task B：泥岩中斷層導致滑動模擬、Task D：膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合研究。

瑞典 SKB 在放射性廢棄物處置技術於國際上具有領先之地位，目前已提出用過核子燃料最終處置場之建造執照申請，為瞭解瑞典在最終處置計畫之發展現況，參訪位於瑞典 Oskarshamn 之 Äspö 硬岩地下實驗室(Äspö hard-rock underground laboratory)、中期貯存設施 CLAB (Central Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel)與廢棄物罐實驗室(Canister laboratory)，並進行相關討論。

參加 DECOVALEX 技術研討會，增加與各國交流機會，可瞭解目前國際上 THMC 試驗發展現況與未來趨勢，並建立國內相關技術，以及參訪瑞典 SKB 處置設施，獲得瑞典放射性廢棄物營運之實際經驗，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。

目錄

摘要.....	i
目錄.....	iii
圖目錄.....	iv
壹、 目的.....	1
貳、 過程.....	3
參、 工作內容	4
一、 DECOVALEX-2019 第三次會議.....	4
(一) DECOVALEX 技術參訪	5
(二) DECOVALEX 技術研討會	10
1. DECOVALEX-2019 第三次會議開會致詞.....	10
2. DECOVALEX 計畫 25 周年慶祝活動	11
3. Task A ：平流氣體於低滲透材料之模擬.....	13
4. Task B ：泥岩中斷層滑動模擬.....	19
5. Task D ：膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合研究.....	23
6. 專案管理會議	26
二、 參訪瑞典 SKB 處置設施	27
(一) 廢棄物罐實驗室	27
(二) 中期貯存設施 CLAB	37
(三) Äspö 硬岩地下實驗室.....	40
肆、 心得.....	46
伍、 建議.....	47

圖目錄

圖 1：本次公出行程於瑞典的相對位置圖.....	3
圖 2：中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 地面設施空照圖	8
圖 3：中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 地下設施配置圖	8
圖 4：中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 預計擴建之處置設施	9
圖 5：瑞典 SKB 技術人員 Rolf Christiansson 博士簡報高放射性廢棄物 最終處置場選址過程.....	9
圖 6：瑞典輻射安全局 Johan Anderberg 先生進行致詞	12
圖 7：DECOVALEX-2019 第三次會議參加人員合照	12
圖 8：Task A 第一階段於膨潤土進行一維進氣實驗	15
圖 9：Task A 第一階段的 MX80-D 實驗結果(0 至 39 天).....	15
圖 10：Task A 第一階段的 MX80-D 實驗結果(39 至 63 天).....	16
圖 11：Task A 第一階段的 MX80-D 實驗結果(63 至 71 天).....	16
圖 12：Task A 第一階段的 MX80-D 實驗結果(71 至 200 天).....	16
圖 13：Task A 水流模組模擬膨潤土中氣體壓力	17
圖 14：Task A 水流模組模擬膨潤土中孔隙率	17
圖 15：Task A 水流模組模擬膨潤土中氣體飽和度	18
圖 16：Mont Terri 斷層再活化現地實驗設置示意圖	21
圖 17：高壓脈衝探測裝置實驗儀器配置圖.....	21
圖 18：臺灣研究團隊所使用之 3DEC 幾何數值模型.....	22
圖 19：由觀測點觀察斷層注水後之移動路徑.....	22
圖 20：瑞士 Mont Terri 地下實驗室 EB 實驗示意圖	24
圖 21：瑞士 Grimsel 測試場址 FEBEX 實驗示意圖	24
圖 22：Task D 工程障壁耦合研究示意圖	25
圖 23：Task D 工程障壁耦合研究模擬結果	25
圖 24：參訪 SKB 處置設施行程.....	29
圖 25：瑞典 SKB 公關人員 Stefan Bergli 先生簡報廢棄物罐的製作方 法.....	30
圖 26：銲接連接後之方管.....	30
圖 27：方管內部進行填砂.....	31
圖 28：高溫熔融狀態的鐵充填至鑄造模具中.....	31
圖 29：鑄鐵內襯澆鑄方法圖.....	32
圖 30：澆鑄完成後之鑄鐵內襯.....	32
圖 31：銅塊加熱擠壓成中空銅管圖.....	33

圖 32：壓製成所需厚度之銅管成品圖.....	33
圖 33：廢棄物罐實驗室配置.....	34
圖 34：從瓦薩博物館租借的銅製砲管.....	34
圖 35：Stefan Bergli 先生介紹摩擦攪拌銲接機.....	35
圖 36：摩擦攪拌銲接工具.....	35
圖 37：Stefan Bergli 先生介紹展示用之摩擦攪拌銲接成品.....	36
圖 38：瑞典 SKB 放射性廢棄物運輸船 M/S Sigrid.....	38
圖 39：中期貯存設施 CLAB 之佈置圖.....	38
圖 40：中期貯存設施 CLAB 貯存用過核子燃料之操作流程.....	39
圖 41：瑞典 SKB 公關人員 Eva Häll 簡報 Äspö 硬岩地下實驗室歷史與背景.....	42
圖 42：採用全斷面挖掘機開挖之坑道.....	42
圖 43：Eva Häll 女士介紹 Äspö 硬岩地下實驗室配置.....	43
圖 44：本團與 Äspö 硬岩地下實驗室展示用之全尺寸廢棄物罐合影.....	43
圖 45：瑞典 SKB 處置廢棄物罐之運輸車.....	44
圖 46：Äspö 硬岩地下實驗室展示用之處置孔.....	44
圖 47：裝填緩衝材料與廢棄物罐之處置孔.....	45

壹、目的

台電公司依法執行用過核子燃料最終處置計畫，將於 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)」，將確認國內地質處置工程技術能力是否完備，其中熱力-水力-力學-化學耦合試驗 (Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical, THMC) 為處置場安全評估之核心技術，主管機關於審查會議中多次要求台電公司加強相關研究及國際合作。

大型國際合作計畫 DECOVALEX(Development of coupled models and their validation against experiments)成立已 25 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 計畫)，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 計畫為多國合作進行之 THMC 大型試驗計畫，目前已有瑞典、芬蘭、日本、法國及德國等國家參與，而台電公司亦已加入 DECOVALEX 計畫。

DECOVALEX-2019 計畫為期 4 年(2016 年至 2019 年)，本期共有 12 個贊助機構，共有 7 項研究項目。本次研討會為 DECOVALEX-2019 第三次會議，由瑞典輻射安全局(Swedish Radiation Safety Authority, SSM)於 2017 年 4 月 25 日至 28 日舉辦，包含 1 天技術參訪及 3 天技術研討會。今年適逢 DECOVALEX 計畫成立 25 週年，大會舉辦慶祝活動並邀請 DECOVALEX 計畫關鍵人物進行專題演講，講述 DECOVALEX 之過去、現在、未來。目前台灣研究團隊參加 3 個研究項目，Task A：平流氣體於低滲透材料之模擬、Task B：泥岩中斷層滑動模擬、Task D：膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合研究。

瑞典核燃料及廢棄物管理公司(Svensk Kärnbränslehantering AB, 簡稱 SKB)在放射性廢棄物處置技術於國際上具有領先之地位，目前已提出用過核子燃料最終處置場之建造執照申請，並且有相當豐富的國際合作經驗，為

瞭解瑞典在最終處置計畫之發展現況，台電公司派員參訪位於瑞典 Oskarshamn 之 Äspö 硬岩地下實驗室(Äspö hard-rock underground laboratory)、中期貯存設施 CLAB(Central Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel)與廢棄物罐實驗室(Canister laboratory)。

藉由參加 DECOVALEX 技術研討會，增加與各國交流機會，可瞭解目前國際上 THMC 試驗發展現況與未來趨勢，並建立國內相關技術，以及參訪瑞典 SKB 處置設施，獲得瑞典放射性廢棄物營運之實際經驗，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。

貳、過程

自 106 年 4 月 23 日出發，迄 5 月 5 日返國(共計 13 天)，參加由瑞典 SSM 舉辦之 DECOVALEX-2019 第三次會議，並參訪瑞典 SKB 之處置設施與相關實驗室，詳細訪問行程如表 1，其相關位置如圖 1。

表 1：公出地點與工作內容

日期	地點	工作內容
4 月 23 日 至 4 月 24 日	Taipei→Stockholm	去程
4 月 25 日	Forsmark	技術參訪：中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR
4 月 26 日 至 4 月 28 日	Stockholm	技術研討會：DECOVALEX-2019 第三次會議
4 月 29 日	Stockholm	週六
4 月 30 日	Stockholm→Oskarshamn	路程
5 月 1 日	Oskarshamn	勞動節
5 月 2 日	Oskarshamn	參訪 Äspö 硬岩地下實驗室、廢棄物罐實驗室、中期貯存設施 CLAB
5 月 3 日	Oskarshamn→Paris	轉機
5 月 4 日 至 5 月 5 日	Paris→Taipei	回程



圖 1：本次公出行程於瑞典的相對位置圖

參、工作內容

一、DECOVALEX-2019 第三次會議

本次由瑞典 SSM 舉辦 DECOVALEX-2019 第三次會議，包含 1 天的技術參訪及 3 天的技術研討會，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 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)、中央大學、核能研究所與台灣電力公司等。本次會議前加拿大放射性廢棄物管理機構(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)，提出申請欲加入 DECOVALEX-2019 計畫，大會安排加拿大 NWMO 於技術研討會後進行簡報，並開會討論是否同意其加入。

(一) DECOVALEX 技術參訪

DECOVALEX-2019 第三次會議第一天(4 月 25 日)，主辦單位瑞典 SSM 安排參訪中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR(Swedish Final Repository)(圖 2)。中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 位於瑞典斯德哥爾摩北部的 Östhammar 市之 Forsmark，而 Forsmark 核能電廠亦位於此處，同時於 2009 年 6 月 Forsmark 亦被選為用過核子燃料最終處置場的場址。Forsmark 核能電廠擁有 3 組沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR)，分別於 1980 年 12 月、1981 年 7 月及 1985 年 8 月商轉，營運者為瑞典國營的電力公司 Vattenfall。

抵達中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 後，參訪人員依序進入中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 的接待中心，進行安全檢查，並聽取安全教育訓練及中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 相關簡介，以便瞭解若發生意外(尤其是火災)時該如何採取緊急應變措施，並說明各重要據點皆備有緊急存糧與緊急聯絡電話，可提供受困者食用與向外請求救援。因中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 為管制區，進入管制區並不能攜帶手機、相機等，因此並無相關照片可供參考。

本次參訪人員較多，瑞典 SKB 安排搭乘巴士進入中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR。抵達地下 60 公尺處，瑞典 SKB 公關人員 Inger Nordholm 女士介紹中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 之相關設施，並解說目前瑞典 SKB 所採用之處置概念。中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 位於波羅的海(Baltic sea)海床底下約 50 至 60 公尺，其連接通道及建造通道皆與 Forsmark 港口相近。中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 於 1988 年開始營運，可處置 63,000 立方公尺的中、低放射性廢棄物，每年可接收約 600 立方公尺的廢棄物，除了核能電廠產生之運轉廢棄物，亦接收醫院、研究設施等產生之廢棄物，中/低放射性廢棄物最終處

置場 SFR 地下設施由 4 條長約 160 公尺的岩窖(rock vaults)和 1 個深約 50 公尺的筒倉(silo)組成，彼此以隧道相連(圖 3)，目前中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 之處置量已經超過一半。

為了處置核能電廠除役產生之中、低放射性廢棄物(包含反應器組件、金屬廢棄物等)，瑞典 SKB 正計畫擴建中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR，已於 2014 年底提送申請許可至瑞典 SSM 及環境與土地法院，但直到現在建造許可仍未通過，瑞典 SKB 規劃 2022 年開始進行建造，2028 年開始運轉，擴建之示意圖如圖 4。擴建的處置容量為目前容量的 2 倍大，目前估計約有 50,000 立方公尺之中放射性廢棄物將置於擴建的處置場，而擴建的處置場深度較深，大約在海底下 120 公尺，經由諸多研究顯示，海床底下 120 公尺的岩石具有較適合的性質進行地質處置。擴建的處置場預計開挖 6 條岩窖，5 條 275 公尺長、1 條 240 公尺長，並規劃興建一條新的運輸坑道，長度 1,700 公尺，且該運輸坑道需夠大以讓反應器壓力槽通過，擴建之建造期程預計耗時 5 年、聘用 200 人、並開挖 1,270,000 立方公尺的岩石。於參訪過程中，除瑞典 SKB 公關人員進行介紹外，更有 2 位保全人員隨行，以避免參訪人員發生危險。

參訪結束後，由 Rolf Christiansson 博士進行簡報(圖 5)，Rolf Christiansson 博士說明瑞典 SKB 用過核子燃料最終處置場選址過程，其採用階段式方法進行選址與發展處置技術。經過一連串的区域調查後，瑞典 SKB 將由 Laxemar 與 Forsmark 兩個候選場址，決定用過核子燃料最終處置場，並於 2002 年至 2009 年針對 2 個候選場址進行地質調查，同時亦進行初步工程設計、安全評估、環境影響評估等研究，最後於 2009 年 6 月決定 Forsmark 為最終處置場址，並於 2011 年向瑞典 SSM 申請建造執照。

Rolf Christiansson 博士針對 Laxemar 與 Forsmark 兩個候選場址進

行比較(表 2)，Forsmark 部分，地理位置接近中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 與 Forsmark 核能電廠，其處置場占地面積約為 3.6 平方公里、處置場深度須大於 450 公尺、處置場開挖量為 $1,736 \times 10^3$ 立方公尺；Laxemar 部分，地理位置接近中期貯存設施 CLAB、Äspö 硬岩地下實驗室與 Oskarshamn 核能電廠，其處置場占地面積約為 5.7 平方公里、處置深度須大於 500 公尺、處置場開挖量 $2,594 \times 10^3$ 立方公尺。而最終瑞典 SKB 於 2009 年 6 月選擇 Forsmark 作為用過核子燃料最終處置場，其原因為母岩具有較佳的性質，可提供處置場長期安全，而詳細之原因如下：(1)在處置場深度，母岩較為均質，且擁有較少的導水裂隙；(2)母岩具有較高的熱傳導度，允許建造較小的處置場；(3)需要較少的混凝土噴漿，回填隧道之方式較為簡單；(4)處置場開挖量較少，建造費用較少；(5)具有較高的岩石應力；(6)近地表母岩(小於 100m)具有較高的滲透係數。

表 2：Laxemar 與 Forsmark 兩個候選場址比較表

	Forsmark	Laxemar
地理位置	接近中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 與 Forsmark 核能電廠	接近中期貯存設施 CLAB、Äspö 硬岩地下實驗室與 Oskarshamn 核能電廠
占地面積	約 3.6 平方公里	約 5.7 平方公里
處置場深度	須大於 450 公尺	須大於 500 公尺
開挖量	$1,736 \times 10^3$ 立方公尺	$2,594 \times 10^3$ 立方公尺



圖 2：中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 地面設施空照圖

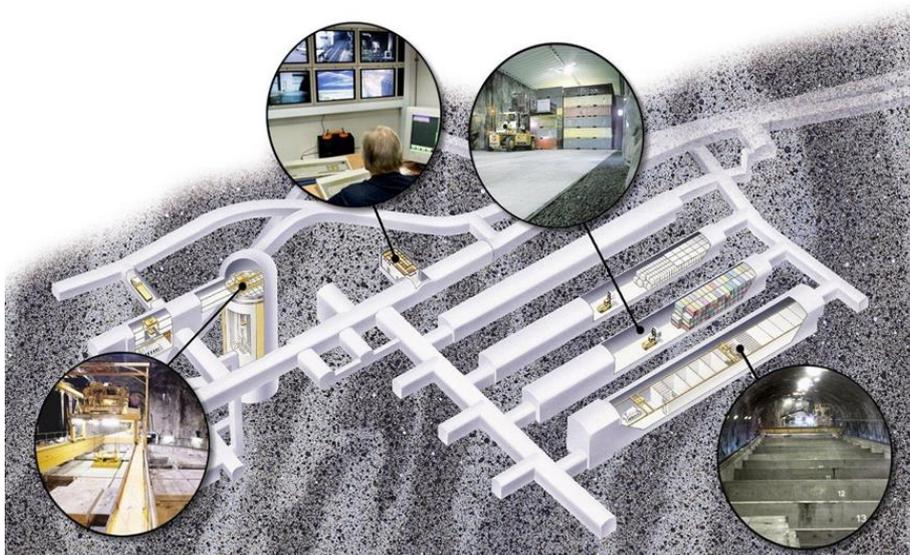


圖 3：中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 地下設施配置圖

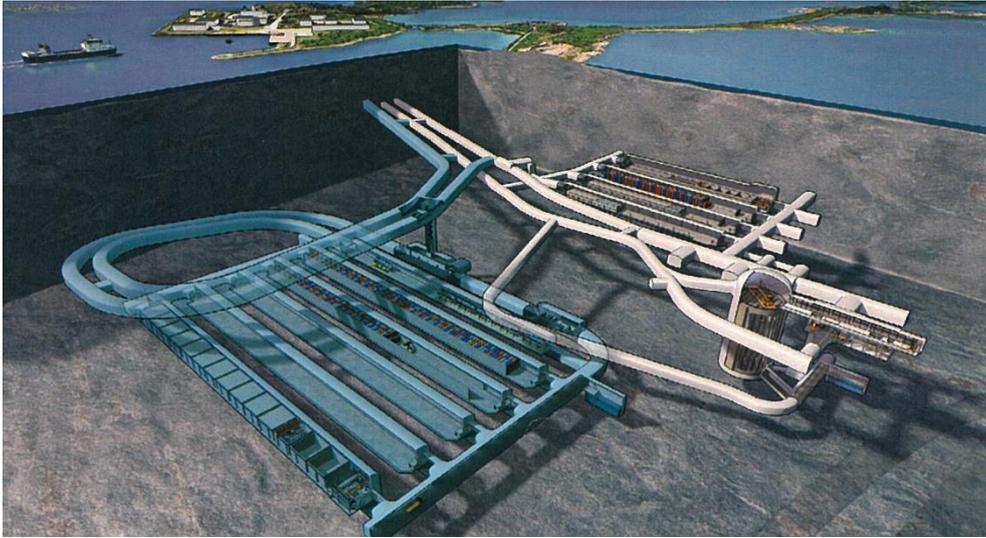


圖 4：中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 預計擴建之處置設施



圖 5：瑞典 SKB 技術人員 Rolf Christiansson 博士簡報高放射性廢棄物最終處置場選址過程

(二) DECOVALEX 技術研討會

1. DECOVALEX-2019 第三次會議開會致詞

DECOVALEX-2019 第三次會議後 3 天的技術研討會(4 月 26 日至 28 日)於瑞典 SSM 召開，首先由瑞典 SS 放射性物料部處長 Johan Anderberg 先生進行致詞(圖 6)，並進行該局之概況介紹，目前瑞典 SSM 共有 300 名員工，每年預算為 450 百萬瑞典幣，該機構之核心業務為確保核能電廠運轉安全、核子保防、管控放射性物料及輻射防護等。瑞典 SSM 有自身的核心審查團隊，大約有 14 名成員，其具備獨立的模擬能力，約有 40 名的顧問與研究員及約 50 名派遣工作人員作為核心審查團隊之後盾。Johan Anderberg 先生簡報中提及瑞典用過核子燃料最終處置場申請執照的過程，瑞典 SKB 於 2011 年 3 月申請建造執照，在 2011 年至 2016 年審查期間，瑞典 SSM 提出約 70 份之外部專家技術說明與 80 次之額外資訊要求，而瑞典 SKB 於 2015 年 6 月已全數提交補充文件。於 2015 年 6 月至 2016 年 3 月瑞典 SKB 之申請文件公開予大眾審視，2016 年 6 月瑞典 SSM 之審查資料已送至土地與環境法院中，預計 2017 年 9 月至 10 月辦理公聽會，2017 年 12 月提交審查資料予瑞典政府，瑞典政府預計在 2018 年至 2019 年決定是否同意瑞典 SKB 興建用過核子燃料最終處置場。

2. DECOVALEX 計畫 25 周年慶祝活動

今年適逢 DECOVALEX 計畫成立 25 週年，大會舉辦慶祝活動並邀請 DECOVALEX 計畫關鍵人物進行專題演講，邀請的學者包含岩石力學專家 Ove Stephansson 先生、Lanru Jing 先生與 Fritz Kautsky 先生、水文地質學家 Chin-Fu Tsang 先生以及現任的 DECOVALEX 計畫主席 Jens Birkholzer 先生與秘書 Alex Bond 先生。與會的學者除了肯定 DECOVALEX 計畫在過去的 25 年的研究貢獻外，也期許未來能朝多元的研究發展繼續邁進。

與會之學者並進行簡報，說明 DECOVALEX 計畫成立之原因與成功的關鍵，瑞典 SKI 為瑞典 SSM 之前身，於 1983 年起瑞典 SKI 對 THM 耦合模式有興趣，且當時瑞典 SKI 正在審查中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR 與中期貯存設施 CLAB 之建造執照，以及瑞典 KBS-3 處置概念，因此瑞典 SKI 規劃發起 DECOVALEX 計畫。DECOVALEX 計畫所需經費為世界各參與專責機構與管制機關共同分攤，而參與單位能決定研究項目、加入之費用合理與財務透明為 DECOVALEX 計畫能夠順利運作迄今之原因。DECOVALEX 計畫 25 周年慶祝活動結束後，所有參加人員於瑞典 SSM 外進行大合照(圖 7)。



圖 6：瑞典輻射安全局 Johan Anderberg 先生進行致詞



圖 7：DECOVALEX-2019 第三次會議參加人員合照

3. Task A：平流氣體於低滲透材料之模擬

在處置場中，廢棄物罐腐蝕將產生氣體，而氣體逐漸累積至臨界壓力後，會破壞緩衝材料，對處置系統的安全性有很大的影響。Task A 主要目的是探討氣體於膨潤土及自然泥岩物質之遷移行為。

英國 BGS 針對此議題，於實驗室進行小規模實驗及於現地進行大型實驗。Task A 第一階段於膨潤土進行一維進氣實驗，而膨潤土為固定體積，此實驗編號為 MX80-D，實驗機台設備如圖 8，進氣端在腔體左側，氣體洩漏偵測感應器位於腔體右側，自腔體左側加壓進入膨潤土的氦氣方向假設為一致，則此實驗可以簡化為一維進氣實驗。

Task A 第一階段的 MX80-D 實驗，主要分成 4 個階段：

- (1) 0 至 39 天，進行膨潤土水合作用(hydration)，膨潤土壓力達到 1.0MPa，並維持此穩定值，而孔隙水壓亦為 1.0MPa，膨潤土與孔隙水達到壓力平衡，實驗數據如圖 9。
- (2) 39 至 63 天，一維進氣實驗為 Task A 第一階段最主要的實驗，氦氣以固定流率(500 μ L/hr)加壓注入膨潤土，直到進氣端壓力達到 5MPa 後(約第 54 天)，降低固定流率(375 μ L/hr)。大約第 63 天時，氣體洩漏偵測感應器偵測到外洩氣體，此現象稱為氣體突破(breakthrough)，實驗數據如圖 10；
- (3) 63 至 71 天，第 63 天時發生氣體突破後，膨潤土的孔隙水壓突然上升，進氣端持續注入固定流率的氦氣，於第 71 天停止注入氦氣，此時進氣端壓力逐漸下降並趨近穩定狀態，實驗數據如圖 11；
- (4) 71 至 200 天，第 71 天停止注入氦氣後，膨潤土中仍持續有新的氣體通道產生，氦氣經由氣體通道洩漏，而進氣壓力持續下降。同時，亦有舊的氣體通道密合，膨潤土壓力下降趨勢會減

緩，實驗數據如圖 12。

各團隊藉由英國 BGS 提供的實驗數據設計模擬條件，並將模擬結果與實驗結果進行比較。臺灣研究團隊採用中央大學開發之 HydroGeoChem 程式進行 TaskA 的模擬研究工作，並選用多相水流模組與適用 visco-elastic-plastic 材質的力學模組。臺灣研究團隊模擬的時間區間為第 63 天發生氣體突破之前，根據所採用之力學模組，假設膨潤土因摩擦力影響，而與腔體之接觸面完全不移動，但膨潤土之體積為定值，另外假設滲透係數及孔隙率皆為定值，初始氦氣飽和度為 0.01，腔體右側之壓力保持 1.0MPa，進氣端以氣體質量通量作為輸入條件，並採用英國 BGS 採用之實驗數據作為模擬參數。

Task A 水流模組模擬膨潤土中氣體壓力如圖 13，Task A 水流模組模擬膨潤土中孔隙率如圖 14，Task A 水流模組模擬膨潤土中氣體飽和度如圖 15，從模擬結果可以得知，於第 53 至 54 天時，氣體突然快速通過膨潤土，與英國 BGS 之實驗數據不符，經與與會專家討論後，建議進行各種參數與條件之測試，同時臺灣研究團隊亦會持續精進中央大學所開發之 HydroGeoChem 程式。

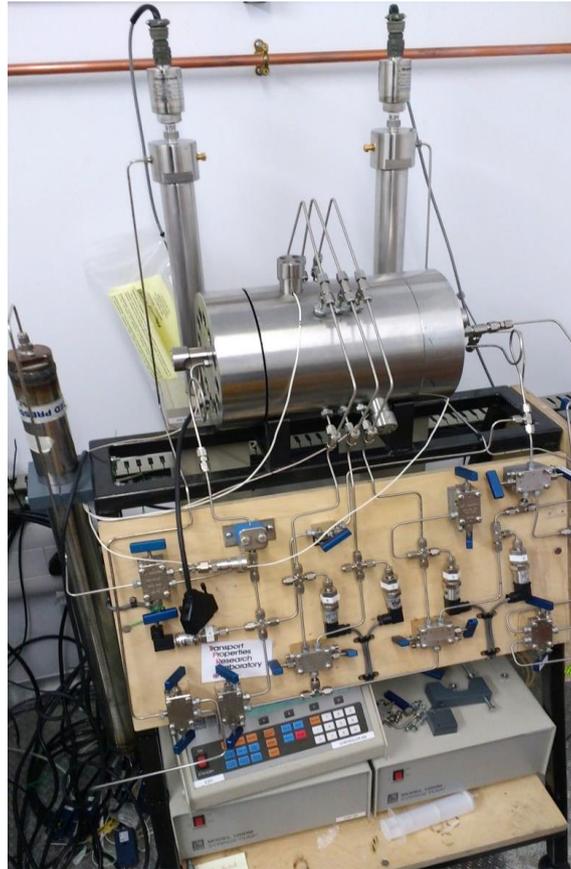


圖 8：Task A 第一階段於膨潤土進行一維進氣實驗

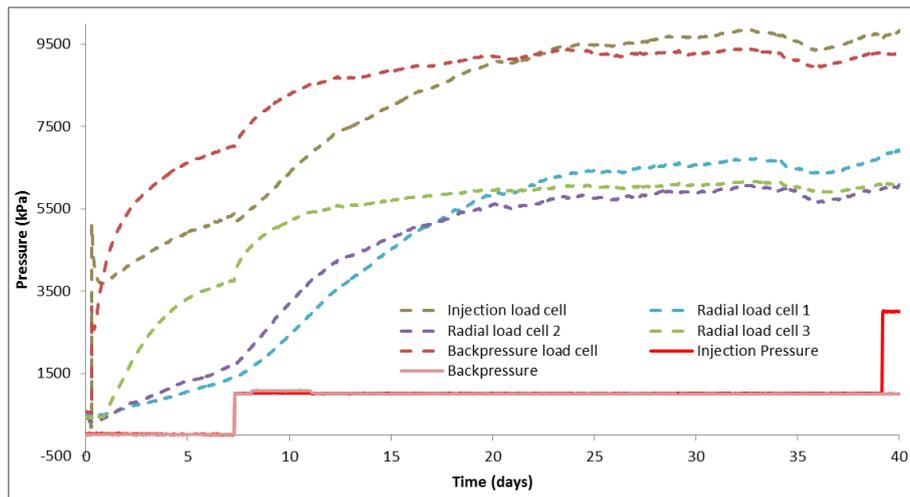


圖 9：Task A 第一階段的 MX80-D 實驗結果(0 至 39 天)

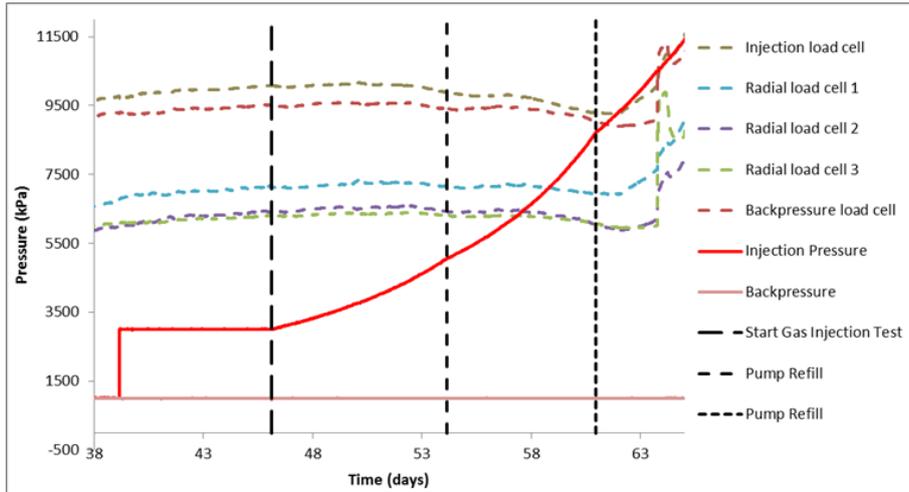


圖 10：Task A 第一階段的 MX80-D 實驗結果(39 至 63 天)

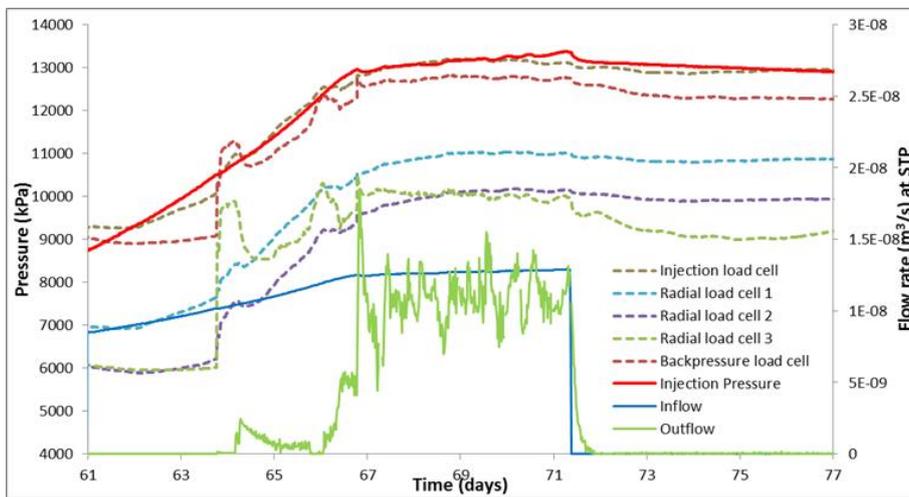


圖 11：Task A 第一階段的 MX80-D 實驗結果(63 至 71 天)

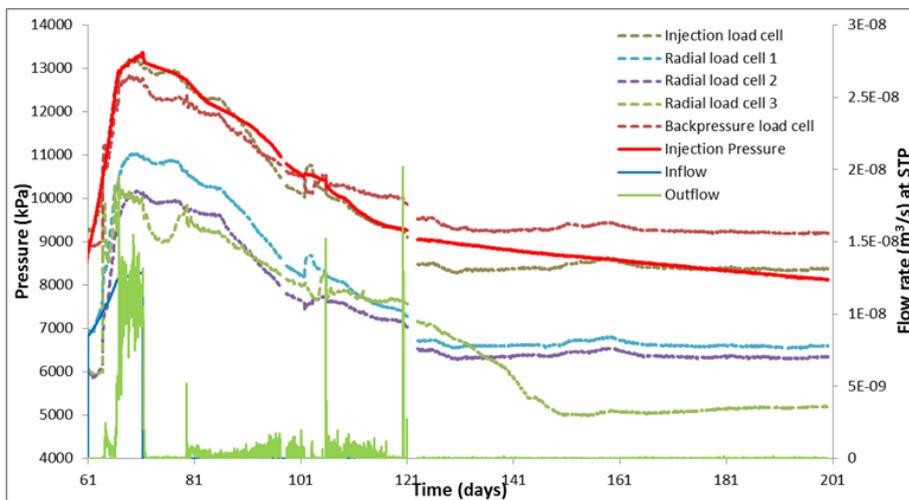


圖 12：Task A 第一階段的 MX80-D 實驗結果(71 至 200 天)

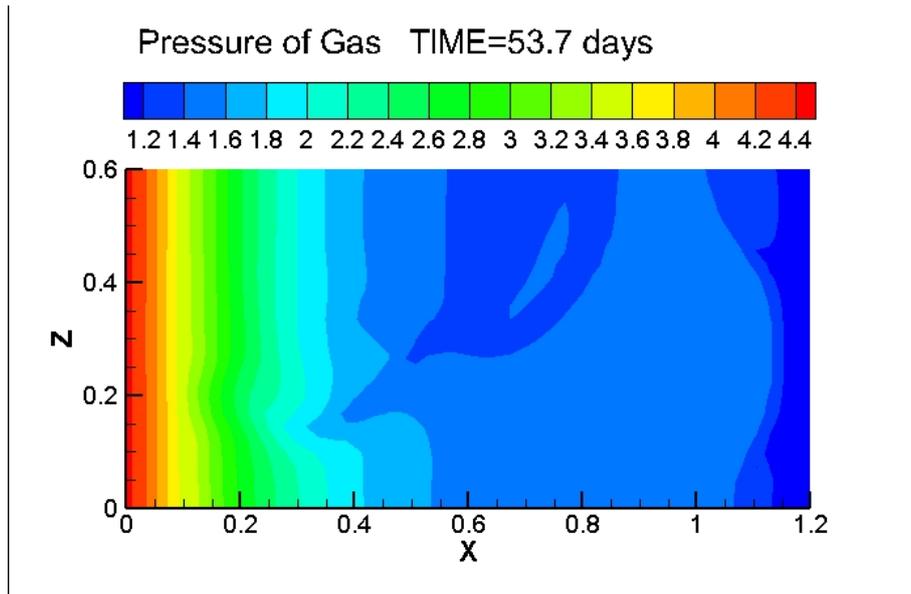


圖 13：Task A 水流模組模擬膨潤土中氣體壓力

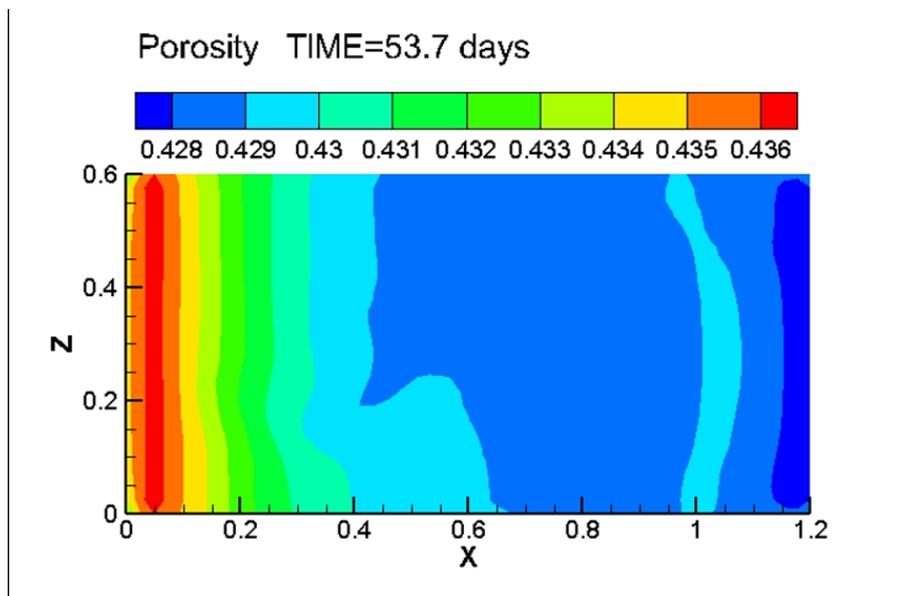


圖 14：Task A 水流模組模擬膨潤土中孔隙率

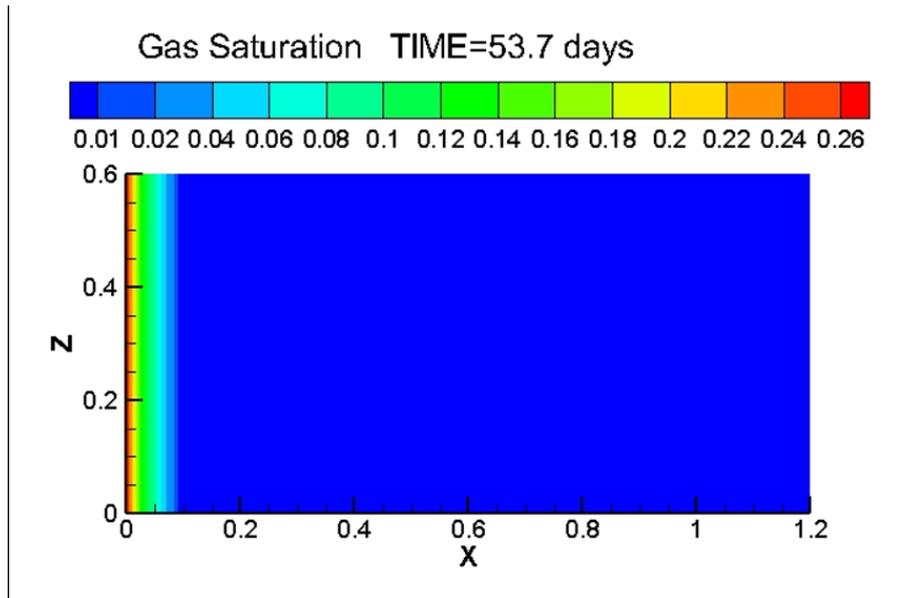


圖 15：Task A 水流模組模擬膨潤土中氣體飽和度

4. Task B：泥岩中斷層滑動模擬

在處置場運轉或封閉期間，THM 耦合反應可能造成斷層再活化，而在處置母岩既有斷層中產生高滲透性的導水路徑，導致放射性核種可能經由高滲透性的導水路徑傳輸至生物圈。Task B 主要目的為探討斷層在泥岩中的穩定性或滑移情形，並瞭解斷層滑動、孔隙水壓及液體遷移的交互作用機制，而引發斷層再活化的主要機制為斷層中孔隙水壓的改變。

Task B 之現地實驗為瑞士 Mont Terri 地下實驗室的斷層滑動實驗 (Fault Slip Test)(圖 16)，斷層滑動實驗之目的為探討泥岩中斷層再活化行為，以及周圍泥岩因斷層再活化所造成的剪切位移。斷層滑動實驗所使用之設備為高壓脈衝探測裝置(High-Pressure Pulse Probe, HPPP)(圖 17)，該裝置置於鑽井內適當的深度，並在岩盤上下盤處分別安裝膨脹分隔器(infalltable packer)，分隔器的中間即形成密閉的試驗段，於試驗段開始注水時，位移感應裝置開始量測井內側壁上的正向位移與剪切位移，所獲得的數據可用於解析試驗段的滲透係數與彈性變形參數。同時，在試驗段安裝奈米地震監測儀，量測斷層滑動時可能發生之微地震事件。於瑞士 Mont Terri 斷層滑動實驗所量測之數據，有助於斷層滑動模擬模式的研發、精進與驗證工作。

Task B 共分為 3 個研究階段，第 1 個階段為數值模型研究階段，包含軟體的開發與各研究團隊的初始結果比對(Benchmark)。第 2 個階段為次要斷層再活化之模擬與實驗結果比較，第 3 階段為主要斷層再活化模擬。

第 1 階段臺灣研究團隊所使用之 3DEC 幾何數值模型如圖 18，目前建立之模型為相對簡單的裂隙岩體模型，主要考慮邊長為 20 公尺的立方塊體，內部包含傾角 65° 的裂隙，注水點位置位於裂隙正中央。為

了確保輸入參數的一致性，Task B 的負責人提供模擬參數予各研究團隊 (表 3)，其中母岩岩體假設為彈性介質，而斷層則採用彈塑性庫倫摩擦準則，臺灣研究團隊將針對斷層的膨脹角與開口寬探討斷層注水後之移動路徑。

由觀測點觀察斷層注水後之移動路徑如圖 19，可得知斷層因注水導致剪切位移，依模擬結果可分為 3 階段：

- (1) 斷層開口寬變大階段：0 秒至大約 212 秒。斷層開口寬會隨水壓增加而增加，斷層並無明顯的剪切位移。
- (2) 斷層產生剪切位移階段(裂隙再活化)：大約 212 秒至 450 秒。斷層產生明顯的剪切位移，斷層的破裂面也隨時間增加而逐步擴大，而斷層的正向位移仍隨水壓增加而持續增加。
- (3) 水壓下降正向位移減少：大約 450 秒至 800 秒。剪切位移並不會因水壓下降而減少，意即剪切位移在注水過程中為不可逆，而正向位移會隨水壓下降而減少。

表 3：斷層、母岩岩體與孔隙水參數

Material	Parameter	Value	
		FM 1	FM 2
Fault (Elasto-plastic)	Normal stiffness, kn (GPa/m)	20	20
	Shear stiffness, ks (GPa/m)	20	20
	Cohesion (MPa)	0	0
	Static Friction Angle (°)	22	22
	Dilation angle (°)	0	10
	Tensile strength	0	0
	Initial aperture (μm)	0	10
	Initial creation aperture (μm)	28	0
Host Rock Matrix (Elastic)	Bulk Modulus, K (GPa)	5.9	5.9
	Shear Modulus, G (GPa)	2.3	2.3
	Bulk density, ρ_R (kg/m ³)	2450	2450
	Permeability	0	0
Fluid	Density (kg/m ³)	1000	1000
	Compressibility (Pa ⁻¹)	4.4e-10	4.4e-10
	Dynamic Viscosity (Pa s)	1.0e-3	1.0e-3

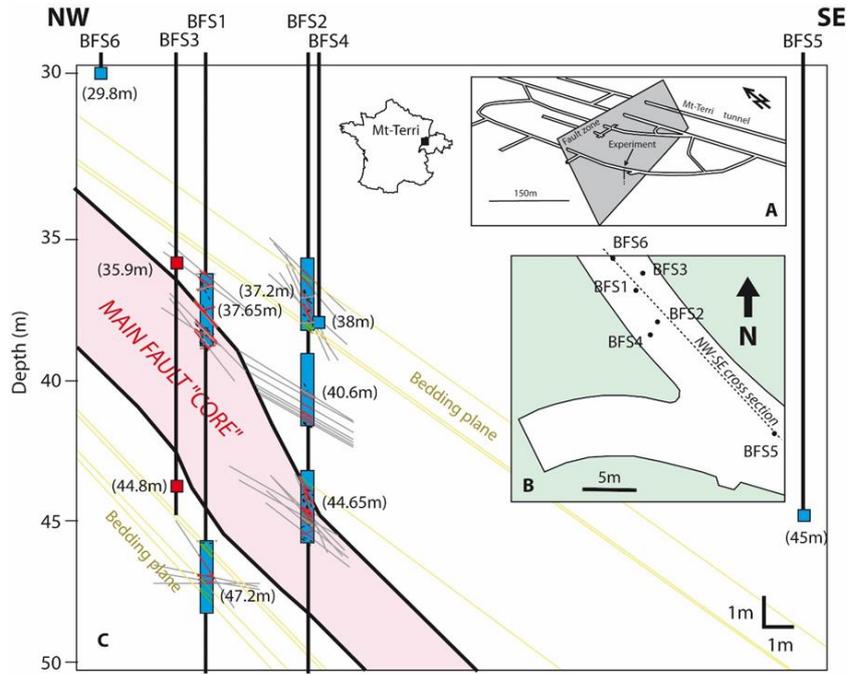


圖 16：Mont Terri 斷層再活化現地實驗設置示意圖

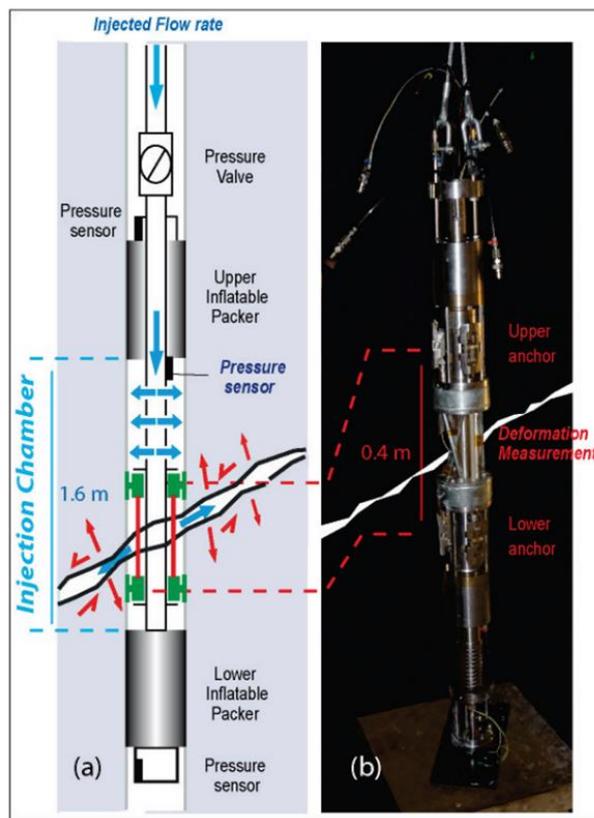


圖 17：高壓脈衝探測裝置實驗儀器配置圖

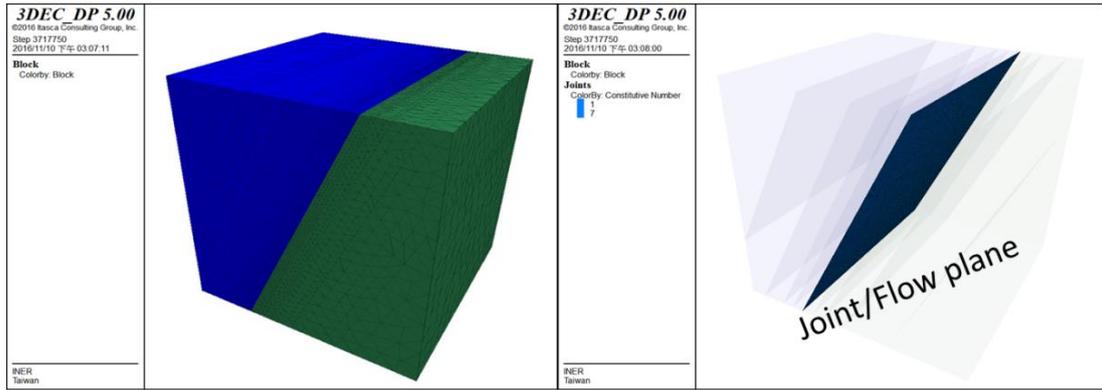


圖 18：臺灣研究團隊所使用之 3DEC 幾何數值模型

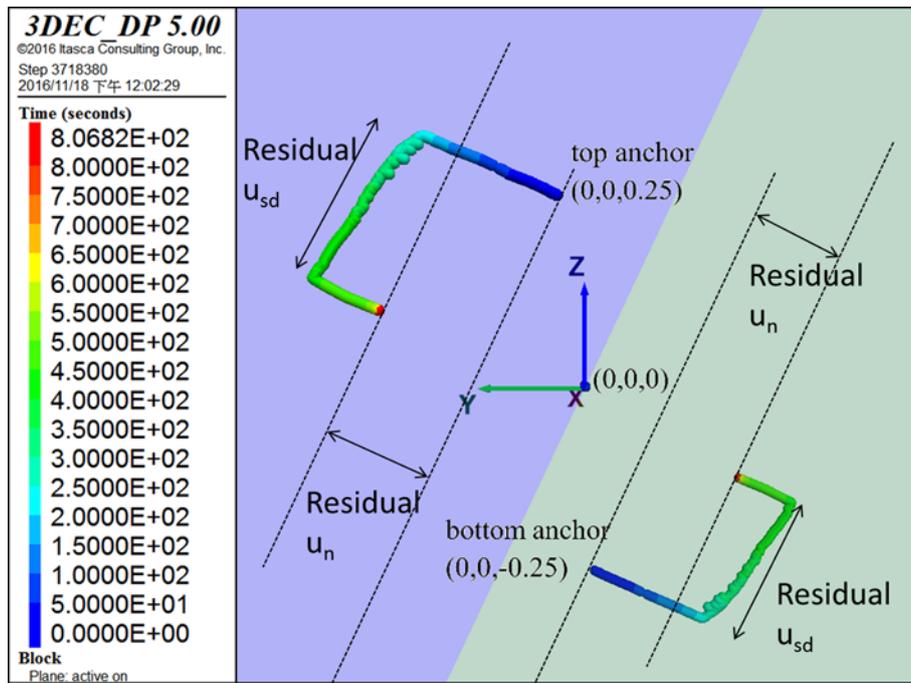


圖 19：由觀測點觀察斷層注水後之移動路徑

5. Task D：膨潤土工程障壁的 HM 與 THM 耦合研究

為確保最終處置場安全，工程障壁之演化為關鍵因子，Task D 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處置場安全功能的影響。

為瞭解工程障壁之功能，驗證工程障壁之可靠度，目前已於瑞士 Mont Terri 地下實驗室進行 EB 實驗與瑞士 Grimsel 測試場址進行 FEBEX 實驗。EB 實驗的母岩為 Opalinus 黏土，利用大型加熱器進行加熱實驗，加熱器下方放置膨潤土塊，上方填滿膨潤土顆粒(pellets)，並進行人工注水，其示意圖如圖 20，整個實驗為期 10.5 年，過程中量測廢棄物罐位移动情形、緩衝材料的相對濕度、孔隙水壓及應力等，目前實驗裝置已經拆除；FEBEX 實驗的母岩為花崗岩，設置可進行溫度控制的加熱器，周圍放置緻密膨潤土塊，並採自然注水，其示意圖如圖 21，實驗為期 18 年，過程中量測工程障壁內的溫度、緩衝材料的相對濕度及應力等，以瞭解其熱水力的相互作用，目前實驗裝置已拆除。

臺灣研究團隊採用中央大學開發之 HydroGeoChem 程式進行 Task D 的模擬研究工作，使用水流與力學模組進行耦合模擬。水流模組部分，使用流體與固體之連續方程式，流體運動則採用達西定律(Darcy's Law)；力學模組部分，有效應力使用柯西定律(Cauchy's Law)進行計算，並採用黏彈性材料模型。Task D 工程障壁耦合研究示意圖如圖 22。模擬結果顯示(圖 23)，膨潤土顆粒在 50 天即達到飽和，但膨潤土塊因水力傳導係數低，即使 2000 天仍未達到飽和。臺灣研究團隊未來將持續針對 EB 實驗與 FEBEX 實驗所提供之數據修訂數值模擬模式，以建立國內相關研究能量。

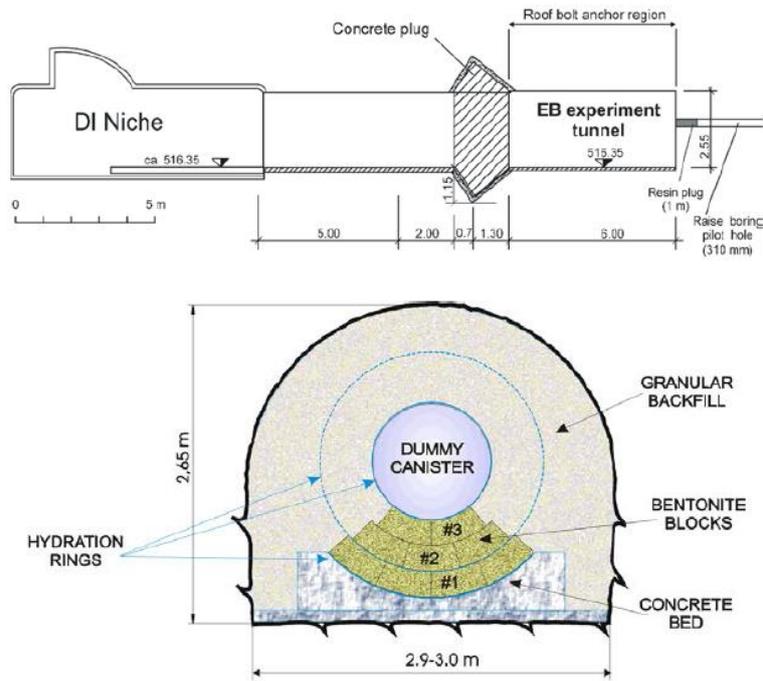


圖 20：瑞士 Mont Terri 地下實驗室 EB 實驗示意圖

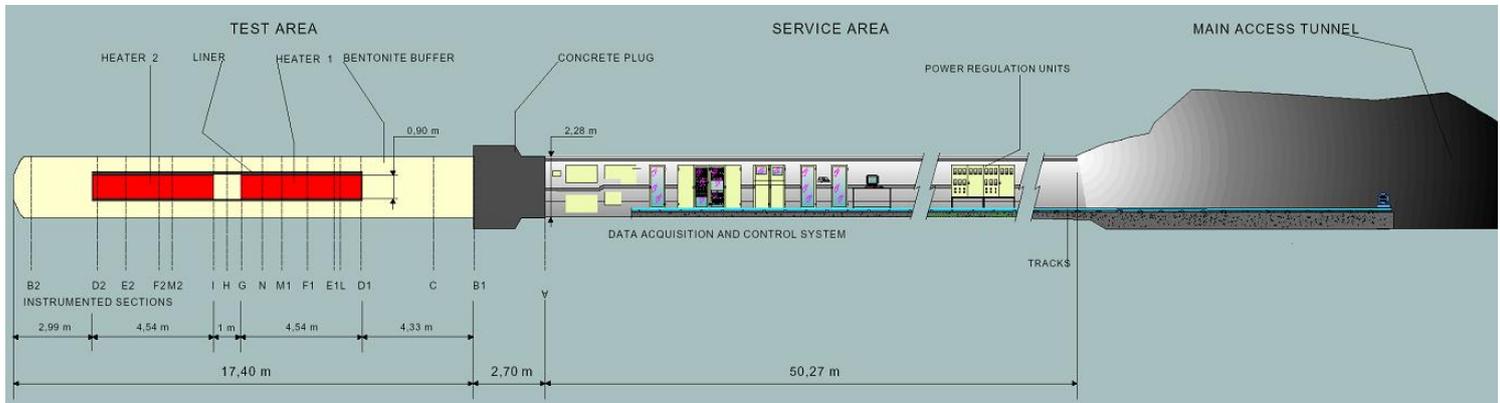


圖 21：瑞士 Grimsel 測試場址 FEBEX 實驗示意圖

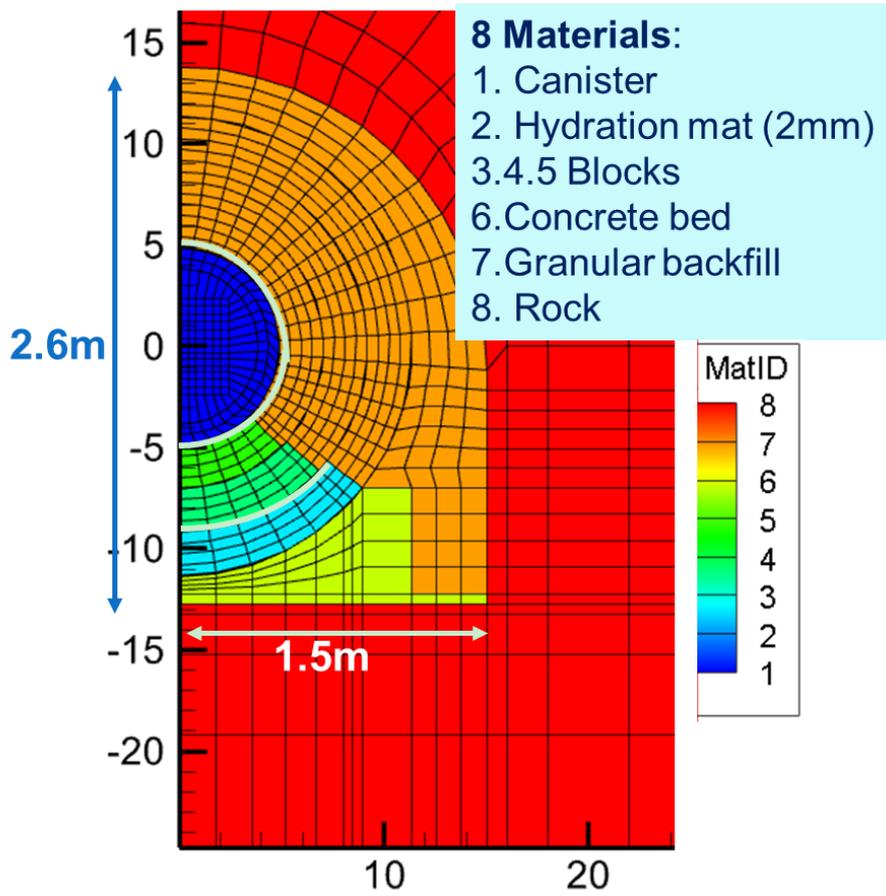


圖 22：Task D 工程障壁耦合研究示意圖

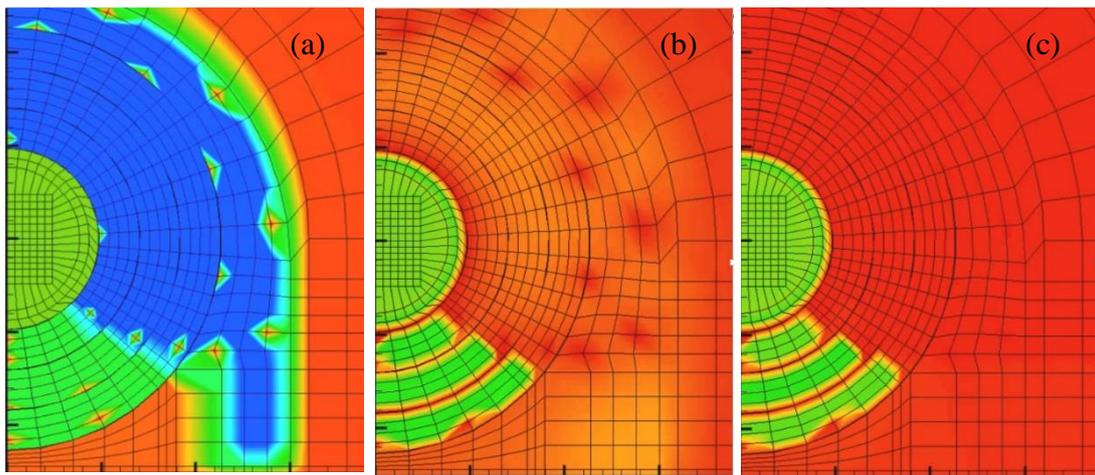


圖 23：Task D 工程障壁耦合研究模擬結果

註：(a)工程障壁初始狀態；(b)膨潤土顆粒在 50 天達到飽和；(c)膨潤土塊在 2000 天仍未達到飽和。

6. 專案管理會議

專案管理會議先由 DECOVALEX 計畫主席 Jens Birkholzer 先生與秘書 Alex Bond 先生進行致詞，感謝 DECOVALEX-2019 第三次會議主辦單位瑞典 SSM 的安排與協助，並感謝出席單位的配合。

接著由 DECOVALEX-2019 第四次會議主辦單位加拿大 CNSC 的 Peter Button 先生進行簡報，說明 DECOVALEX-2019 第四次會議之相關規劃細節，下次會議將於加拿大召開，時間訂於 10 月 10 日至 13 日，其中包含一天的技術參訪。

目前 DECOVALEX-2019 計畫共有 7 個研究項目進行中，為了最佳化研討會之架構，秘書 Alex Bond 先生仍持續請求出席單位提供建議與回饋。目前採 2 個會議室分別進行各研究項目之進度報告，而在加拿大舉辦之 DECOVALEX-2019 第四次會議將採相同模式進行，但是各研究項目之簡介將於 DECOVALEX-2019 第四次會議一開始的全體會議進行。

在 DECOVALEX-2019 第三次會議前，加拿大 NWMO 提出申請欲加入 DECOVALEX-2019 計畫，並成為贊助機構，故 DECOVALEX-2019 計畫邀請該機構的 Ruiping Guo 先生進行簡報，說明該機構執行加拿大放射性棄物最終處置計畫之整體策略、處置概念、選址概況與近期之研究項目，最後 Ruiping Guo 先生提出欲加入 DECOVALEX-2019 計畫之研究項目。

二、參訪瑞典 SKB 處置設施

106 年 5 月 2 日安排參訪瑞典 SKB 處置設施，參訪成員有台電公司黃添煌副處長、李柏叡先生與中央大學葉高次教授、詹淑菁博士，第一站為參訪位於 Oskarshamn 海港碼頭旁之廢棄物罐實驗室，第二站為參訪位於 Oskarshamn 北方約 20 公里處，緊鄰 Oskarshamn 核能電廠之中期貯存設施 CLAB，最後一站為參訪 Äspö 硬岩地下實驗室，並進入地下 460 公尺深之實驗坑道，當日參訪詳細行程如圖 24。

(一) 廢棄物罐實驗室

瑞典 SKB 公關人員 Stefan Bergli 先生是廢棄物罐實驗室之接待人員，首先由 Stefan Bergli 先生簡報廢棄物罐的製作方法(圖 25)，製作過程則可分為鑄鐵內襯製作和銅殼製作，鑄鐵內襯製作部分，首先將方管(cassette)銲接為一體(圖 26)，當方管放進鑄造模具內後，方管內部須先填滿沙子(圖 27)，以避免鑄造時造成方管變形，確保未來用過核子燃料可以順利置入，最後將高溫熔融狀態的鐵充填至鑄造模具中(圖 28)，充填方式又分為頂部澆鑄灌製與底部充填灌製(圖 29)，經瑞典 SKB 研究發現，前述兩種鑄造方法在品質上並無顯著差異。當鑄鐵內襯澆鑄完成後，須在鑄模中冷卻數天才能拆模取得鑄鐵內襯(圖 30)。銅殼製作部分，則是採用擠壓成型方式，先將銅錠壓製成適當的直徑後，再藉由加熱擠壓方式將銅錠擠壓成中空銅管(圖 31)，最後置入壓模機中壓製拉伸成所需厚度(5 cm)之銅殼(圖 32)。簡報中，本團成員向 Stefan Bergli 先生詢問，銅殼與鑄鐵內襯間是否有間隙，Stefan Bergli 先生回應銅殼與鑄鐵內襯之間約有 4 mm 間隙以利安裝，但未來廢棄物罐置入處置孔後，可透過緩衝材料之回脹壓力將此間隙縮小。

簡報結束後，由 Stefan Bergli 先生帶領本團參訪廢棄物罐實驗室，

該實驗室中共有 7 個重要設施(圖 33)，分別為：(1)燃料吊車；(2)摩擦攪拌銲接機；(3)電子束銲接機；(4)X-ray 檢測機；(5)銲接部分超音波檢測機；(6)廢棄物罐組件超音波檢測區；(7)氣墊搬運設備。一進入廢棄物罐實驗室，即可看到一根從瓦薩博物館租借的銅製砲管(圖 34)，該砲管於 1628 年沉沒於斯德哥爾摩海灣，並於 1961 年打撈上岸，瑞典 SKB 已針對該砲管進行腐蝕實驗，其天然類比之案例，為廢棄物罐選擇銅質材料之原因，也作為與民眾溝通的重點。Stefan Bergli 先生帶領本團參觀摩擦攪拌銲接機(圖 35)，其原理是利用銲接工具與銅質材料摩擦攪拌，產生熱量與銅質材料流動特性使其接合，並不需要使用銲條即可進行銲接，而摩擦攪拌銲接銅質材料之工作溫度約為 800 至 850 度，Stefan Bergli 先生並介紹摩擦攪拌銲接工具之設計，銲接工具可分為鑽頭與肩部(圖 36)，鑽頭主要功能為打破氧化層並進行攪拌，而為了增強塑性流往下填補的壓力，故將鑽頭設計成螺旋狀，其所選用之材料為鎳-鈷-鉻超合金，肩部主要功能為與材料摩擦產生熱量並限制材料，於肩部設計凹槽可增加對銅質材料之擾動深度。Stefan Bergli 先生介紹展示用之摩擦攪拌銲接成品(圖 37)，並說明在進行摩擦攪拌銲接之前，會先於銅殼上蓋鑽孔，以利進行銲接，而摩擦攪拌銲接之起始點與終止點皆為銅殼上蓋之鑽孔。參觀過程中，Stefan Bergli 先生表示，製造單一個銅殼需花費約 200 萬瑞典幣，進行單一銅罐摩擦攪拌銲接需一小時之工作時間，而生產過程中皆利用超音波及 X-ray 等非破壞檢測方式來確認廢棄物罐之品質。



Programme

2017-05-02

- 08:30 ***Visit to SKB, Canister Laboratory in Oskarshamn:***
Arrival at the Canister Laboratory.
Presentation of SKB and the facility.
- 09:00 Guided tour of the facility.
- 10:00 Departure for Clab.
- 10:30 ***Visit to SKB, the Central Interim Storage for Spent Nuclear Fuel = Clab:***
Arrival at the Clab entrance.
Security- and passport control. (Marked "Clab-vakten" on the map).
- 10:45 Presentation of Clab.
- 11:15 Guided tour of the facility.
- 12:45 Lunch in the staff canteen at Clab, Claberian.
- 13:45 ***Visit to SKB, Äspö Hard Rock Laboratory:***
Arrival at Urbergsentrén outside Clab.
Passport control.
- 14:00 Presentation of the Äspö HRL.
- 14:30 Guided tour by bus to the depth of 420 metres.
Elevator up to Äspö research village.
- 15:30 Time for Questions and conclusions in the exhibition hall at Äspö.
- 16:00 Departure.

圖 24：參訪 SKB 處置設施行程



圖 25：瑞典 SKB 公關人員 Stefan Bergli 先生簡報廢棄物罐的製作方法



圖 26：銲接連接後之方管

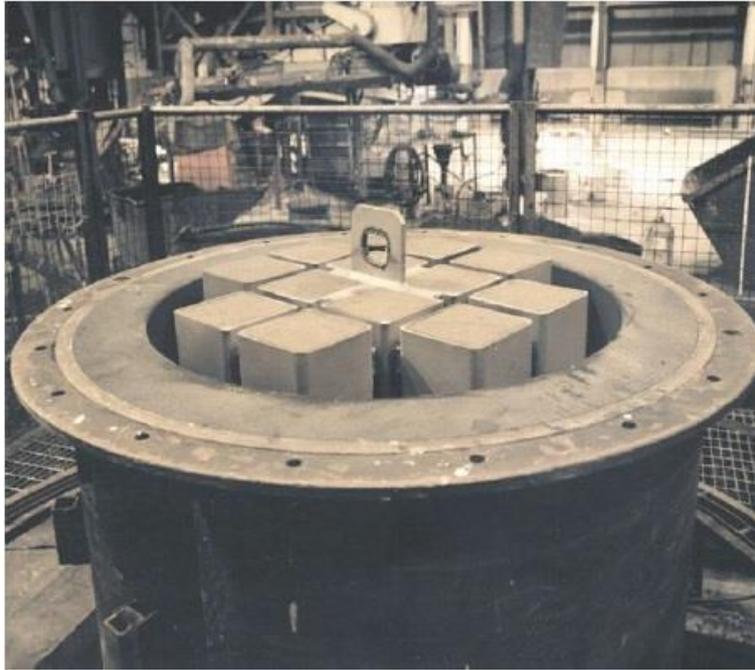


圖 27：方管內部進行填砂



圖 28：高溫熔融狀態的鐵充填至鑄造模具中

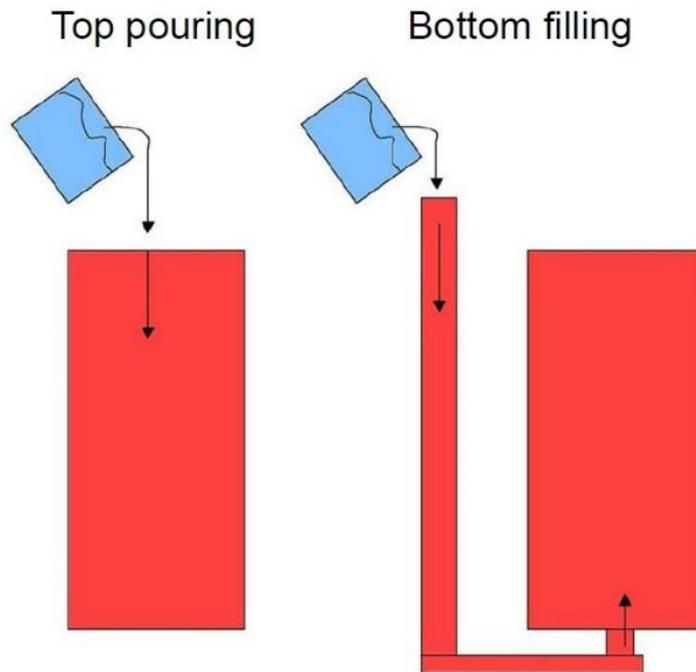


圖 29：鑄鐵內襯澆鑄方法圖



圖 30：澆鑄完成後之鑄鐵內襯

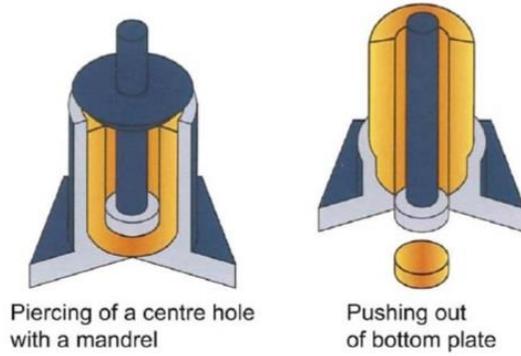
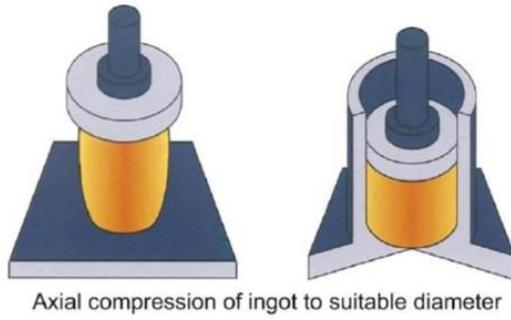


圖 31：銅塊加熱擠壓成中空銅管圖

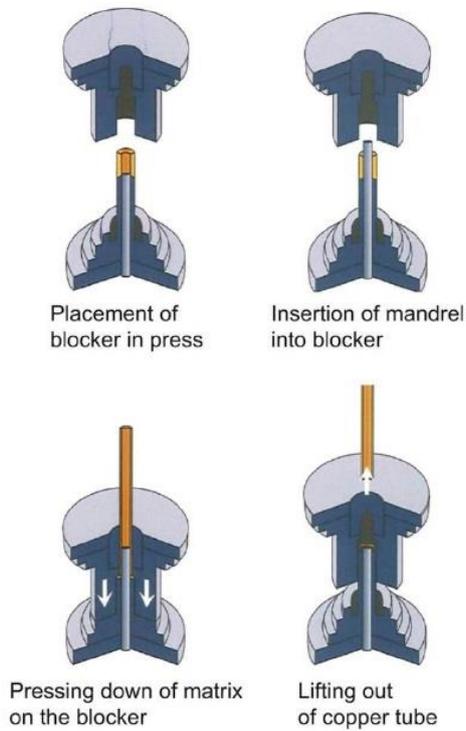
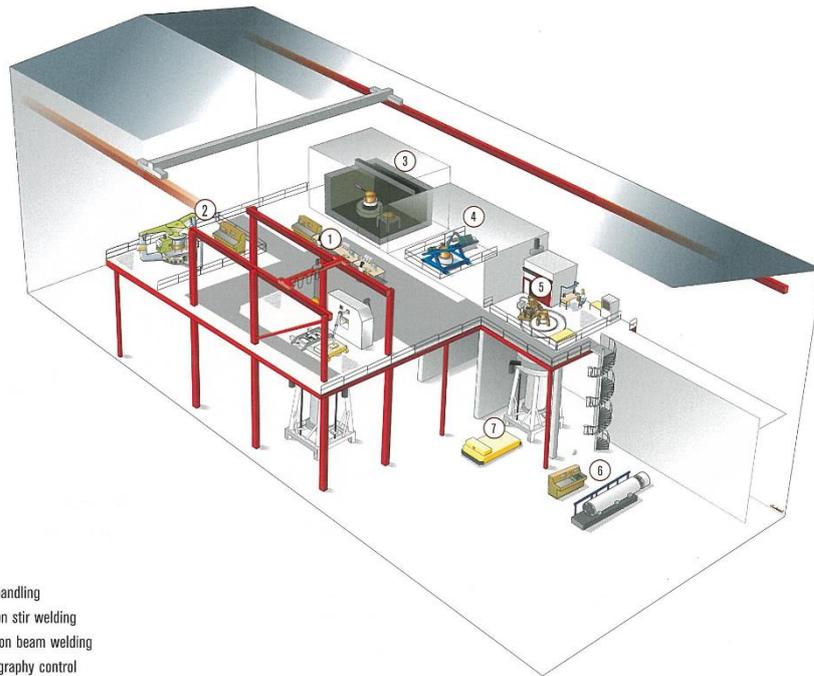


圖 32：壓製成所需厚度之銅管成品圖



- ① Fuel handling
- ② Friction stir welding
- ③ Electron beam welding
- ④ Radiography control
- ⑤ Ultrasonic inspection of welds
- ⑥ Ultrasonic inspection of canister components
- ⑦ Air cushion transporter

There are different stations in the Canister Laboratory for practicing the different steps in the encapsulation of spent nuclear fuel.

圖 33：廢棄物罐實驗室配置



圖 34：從瓦薩博物館租借的銅製砲管



圖 35：Stefan Bergli 先生介紹摩擦攪拌銲接機



圖 36：摩擦攪拌銲接工具



圖 37：Stefan Bergli 先生介紹展示用之摩擦攪拌銲接成品

(二) 中期貯存設施 CLAB

瑞典 SKB 公關人員 Maria Fornander 女士是中期貯存設施 CLAB 之接待人員，首先由 Maria Fornander 女士簡報中期貯存設施 CLAB 之現況，中期貯存設施 CLAB 於 1980 年開始規劃興建，1985 年開始接收瑞典的用過核子燃料，該設施為濕式中期貯存設施。瑞典用過核子燃料在退出爐心後，將先暫時貯存於核能電廠內的燃料池，貯存時間至少 1 年，即以運輸船 M/S Sigrid (圖 38)將用過核子燃料運至中期貯存設施 CLAB，中期貯存的時間長達 30 至 40 年，最後於封裝廠將用過核子燃料置入廢棄物罐後，再送至最終處置場場址 Forsmark。

中期貯存設施 CLAB 之佈置如圖 39，用過核子燃料貯存池位於地底 40 公尺處，可有效降低保全設施及人為破壞之疑慮，而貯存池與花崗岩岩盤間設有防震裝置，可降低地震造成的影響。中期貯存設施 CLAB 經擴充後之容量為 8,000 噸，共有 10 個貯存池，足以容納瑞典所有的用過核子燃料，目前於中期貯存設施 CLAB 中總共有 6,300 噸用過核子燃料，而該設施每年約接收 200 噸用過核子燃料與 70 個傳送護箱。而用過核子燃料置於貯存池後，上覆有 8 公尺深的淡化水，可以有效阻絕輻射，並作為移除衰變熱之用。

中期貯存設施 CLAB 貯存用過核子燃料之操作流程如圖 40，以下簡單說明操作流程：(1)用過核子燃料以運送護箱運入中期貯存設施 CLAB 後，吊運至冷卻區並加裝防護護套，以避免運送護箱受污染；(2)冷卻水注入運送護箱以冷卻用過核子燃料；(3)運送護箱吊運至護箱池後再傳送至卸載池；(4)於卸載池將運送護箱開蓋，並將用過核子燃料分裝至貯存護箱，最後將貯存護箱送至貯存池之指定位置進行濕式中期貯存。用過核子燃料將循反方向逐步退出中期貯存設施 CLAB，過程中多增加運送護箱除汙之步驟，後續用過核子燃料將被運送至廢棄物罐封裝

廠完成封裝，最後以運輸船 M/S Sigrid 運至最終處置場進行最終處置。



圖 38：瑞典 SKB 放射性廢棄物運輸船 M/S Sigrid

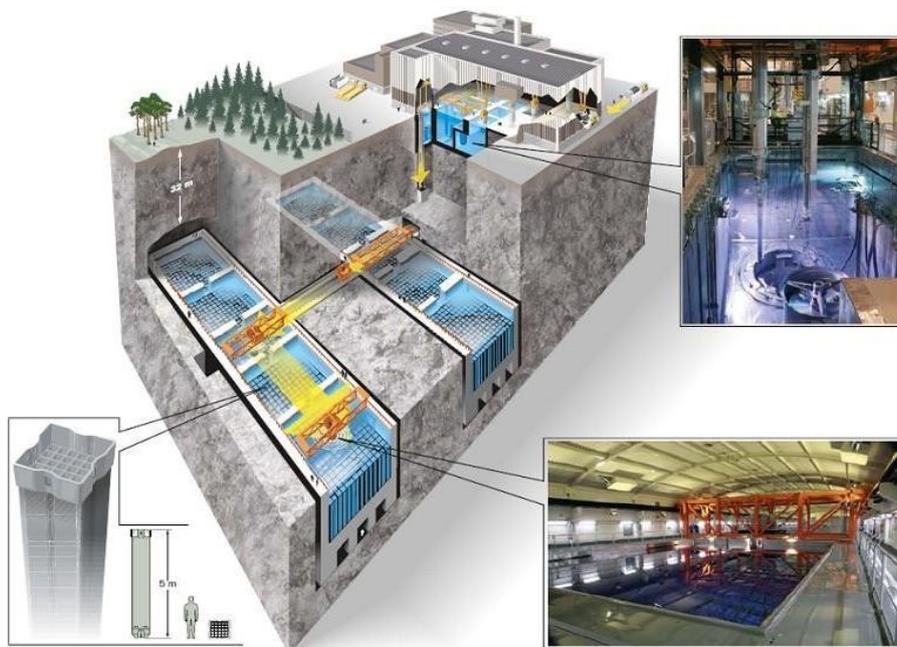


圖 39：中期貯存設施 CLAB 之佈置圖

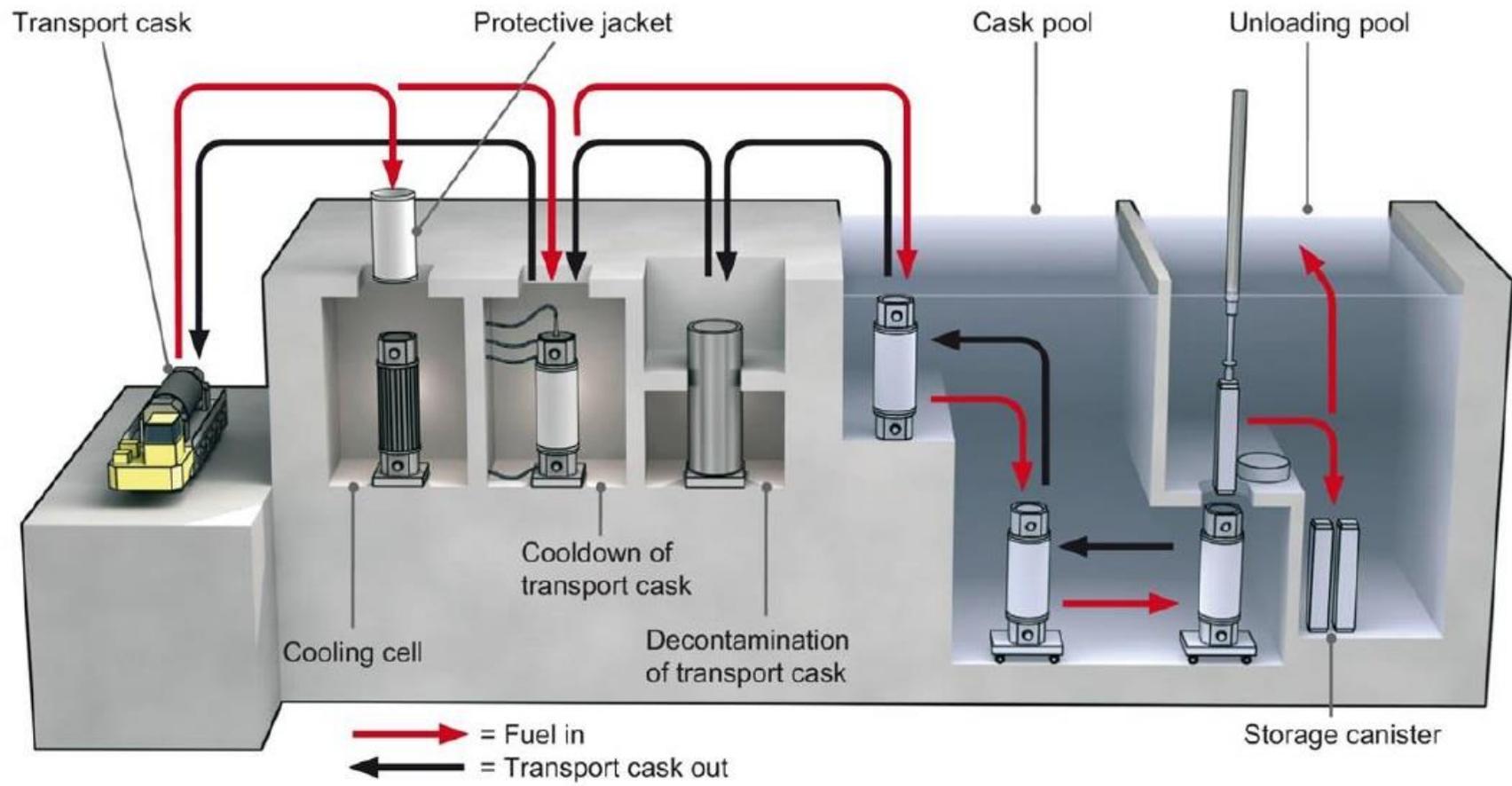


圖 40：中期貯存設施 CLAB 貯存用過核子燃料之操作流程

(三) Äspö 硬岩地下實驗室

瑞典 SKB 公關人員 Eva Häll 女士是 Äspö 硬岩地下實驗室之接待人員，首先由 Eva Häll 女士簡報 Äspö 硬岩地下實驗室歷史與背景(圖 41)，1986 年瑞典 SKB 開始規劃建造地下實驗室，其主要目的係作為研究、發展相關處置技術之平臺，並可展示位於處置深度之地質環境。Äspö 硬岩地下實驗室位於 Oskarshamn 之 Simpevarp 半島，以螺旋坑道方式下降至地下深度 460 公尺，坑道總長度約 3,600 公尺，地下坑道與地面以 1 條升降豎井與 2 條通風豎井連接。坑道開挖主要採用傳統的鑽炸法進行，最後的 400 公尺才以全斷面挖掘機(Tunnel Boring Machine, TBM)進行直徑 5 公尺的開挖(圖 42)。目前仍在 Äspö 硬岩地下實驗室進行實驗之國家有瑞典、芬蘭、加拿大、法國、英國、德國及日本。

Äspö 硬岩地下實驗室之規劃分為 3 個階段，第一階段為建造前階段(1986 年至 1990 年)，主要進行區域地質調查、表面調查與鑽井調查，並依據調查結果進行地質構造之預測；第二階段為建造階段(1990 年至 1995 年)，主要進行地下水流場模擬、母岩詳細特性調查，並依據前階段所預測之地質構造進行場址評估；第三階段為運轉階段(1995 年至 2025 年)，主要透過國際合作進行母岩障壁功能與工程障壁系統之測試，展示處置系統之技術與功能。Äspö 硬岩地下實驗室的任務共有 5 項：

- (1)發展建造與運轉階段的最終處置技術；
- (2)測試替代技術，可改善與簡化最終處置場之設計，且不會降低處置場之品質與安全；
- (3)增加對安全餘裕(safety margin)的科學理解，並提供處置系統長期安全評估的真實數據；
- (4)提供訓練技術人員之場所，並累積最終處置計畫相關經驗；
- (5)展示最終處置技術與方法予一般大眾，可增加民眾之信任。

簡報中，本團成員向 Eva Häll 女士詢問，營運 Äspö 硬岩地下實驗室每年需花費多少經費，Eva Häll 女士回答每年約 300 萬歐元才可以維持其營運。

簡報結束後，由 Eva Häll 女士帶領參訪 Äspö 硬岩地下實驗室，先搭乘升降豎井至地下 320 公尺之實驗坑道，在步行至地下 460 公尺之實驗坑道，Eva Häll 女士在參訪過程中沿途向本團介紹 Äspö 硬岩地下實驗室相關配置(圖 43)。瑞典 SKB 於 Äspö 硬岩地下實驗室置放諸多處置設備作為展示用，證明瑞典 SKB 已具備相關技術與設備，參訪成員與展示用之全尺寸廢棄物罐進行合影如圖 44，而瑞典 SKB 未來作為處置廢棄物罐之運輸車亦已完成設計(圖 45)，目前亦已置於地下實驗室中。瑞典 SKB 於地下 460 公尺處鑽掘一個全尺寸的處置孔(圖 46)，旁邊亦有裝填廢棄物罐與緩衝材料之處置孔(圖 47)，可提供參訪人員對處置概念有更深刻的印象。瑞典 SKB 考量未來處置完廢棄物罐並進行回填後，發現相關安全功能無法滿足需求，需要將廢棄物罐取出，因此已於 Äspö 硬岩地下實驗室進行廢棄物罐再取出之測試，目前最佳方法為採用鹽水將緩衝材料泥漿化，即可順利將廢棄物罐吊出，目前瑞典 SKB 已證明有廢棄物罐再取出之能力。



圖 41：瑞典 SKB 公關人員 Eva Häll 簡報 Äspö 硬岩地下實驗室歷史與背景



圖 42：採用全斷面挖掘機開挖之坑道



圖 43：Eva Häll 女士介紹 Äspö 硬岩地下實驗室配置



圖 44：本團與 Äspö 硬岩地下實驗室展示用之全尺寸廢棄物罐合影



圖 45：瑞典 SKB 處置廢棄物罐之運輸車



圖 46：Äspö 硬岩地下實驗室展示用之處置孔



圖 47：裝填緩衝材料與廢棄物罐之處置孔

肆、心得

參加 DECOVALEX-2019 第三次會議，與各國放射性廢棄物專責機構與管制機關進行交流討論，有助於取得最新國際資訊，並可瞭解目前國際上 THMC 發展現況與未來趨勢。雖然臺灣研究團隊近期才加入 DECOVALEX 計畫，相關模擬程式亦於發展階段，但是透過參加會議與國際專家進行討論，模擬結果與現地實驗數據進行比對，皆能快速推進國內建立 THMC 耦合模擬程式。

DECOVALEX 計畫是國際大型合作計畫，目前共有 12 個贊助機構，研究項目共有 7 項，而 DECOVALEX 計畫卻能妥善整合及管理各研究項目之進度，其計畫管理能力非常值得國內學習。每次研討會前，主席 Jens Birkholzer 先生與秘書 Alex Bond 先生會先將會議議程及待討論議題傳送給贊助機構，並進行初步解釋，相關決策則於會議中討論；而各研究項目負責人會先提供模擬參數予研究團隊進行模擬研究，並分段釋出實驗結果，避免研究團隊刻意調整參數以符合實驗結果，最後會嚴格管控各研究團隊之工作進度。

本次公出安排參訪瑞典 SKB 之中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR、中期貯存設施 CLAB、廢棄物罐實驗室及 Äspö 硬岩地下實驗室等處置設施，透過參訪相關處置設施，並進入地下 420 公尺實驗坑道，感受到瑞典執行放射性廢棄物處理之決心，而參訪過程中看到全尺寸的處置系統與其元件，亦加深對處置系統之印象。目前共有 7 個國家於 Äspö 硬岩地下實驗室進行現地實驗，期望臺灣研究團隊未來亦能參與類似的國際大型合作計畫，與世界處置技術先進國家共同實驗，以利培養優秀人才與建立國內處置技術。瑞典 SKB 處置設施不僅可展示處置技術能力，更可做為溝通管道，讓參訪者看到實體的處置設施，進而對處置技術深具信心。

伍、建議

- 一、參加 DECOVALEX 技術研討會，增加與各國專責機構與管制機關之交流機會，有助於取得最新國際資訊，並可瞭解目前國際上 THMC 試驗發展現況與未來趨勢，而國內研究團隊之評估能力亦可於會議中受國際專家檢視，建議持續派員出席 DECOVALEX 技術研討會。
- 二、目前 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，建議臺灣研究團隊未來可投入更多人力與研究能量，參與更多研究項目，進行相關模式開發與技術驗證，建立屬於國內之 THMC 耦合技術。
- 三、瑞典已於 1970 年成立放射性廢棄物最終處專責機構 SKB，負責規劃及執行放射性廢棄物最終處置，並已完成興建中/低放射性廢棄物最終處置場 SFR、中期貯存設施 CLAB、廢棄物罐實驗室及 Äspö 硬岩地下實驗室，而高放射性廢棄物最終處置場正在申請建造執照中，目前 SKB 總人力為 550 人，具有非常充足的人力執行放射性廢棄物處理。建議國內參考瑞典 SKB 發展經驗，成立放射性廢棄物最終處置專責機構，並規劃合適之組織架構，進行處置技術之長期研發與民眾溝通，以利放射性廢棄物最終處置計畫之推動與執行。
- 四、瑞典 SKB 於 Oskarshamn 設立廢棄物罐實驗室與 Äspö 地下實驗室，不僅可進行處置技術之研究，更提供公眾溝通之平台，讓參訪者更深刻了解目前研究進展與相關技術，可提高參訪者對處置技術之信心。建議未來國內成立相關技術實驗室，以實體展示方式讓民眾了解技術進展，並建議盡早推動地下實驗室規劃，以增強民眾信心更利於與民眾溝通。