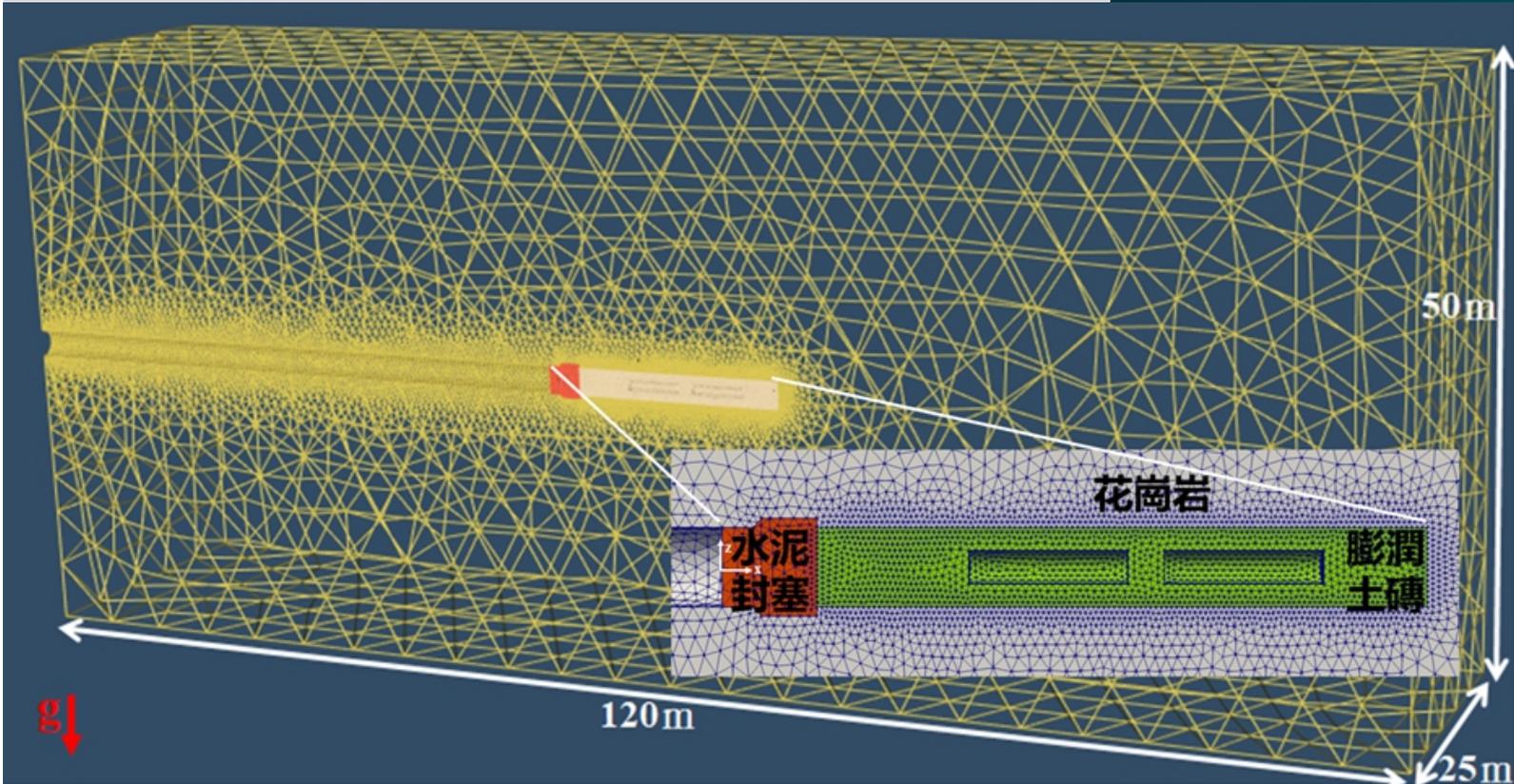


# 深入解析核廢料障壁系統的熱水力演化 —瑞士地下岩石實驗室的模擬研究下 二氧化碳感測系統建置與應用

doi: 10.30247/STRIDE-C\_NEWSLETTER.202508\_(2).0002



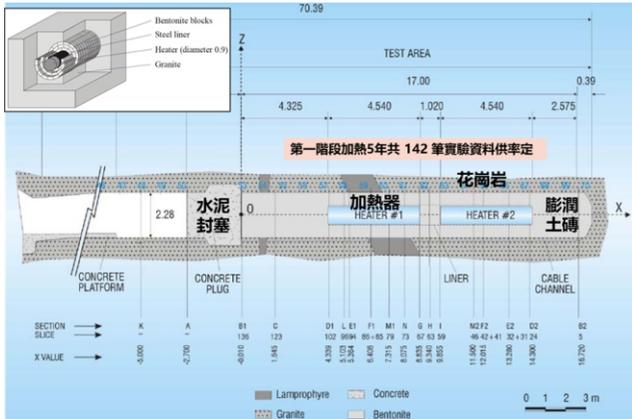
郭家璋

國立臺灣大學 新碳勘科技研究中心

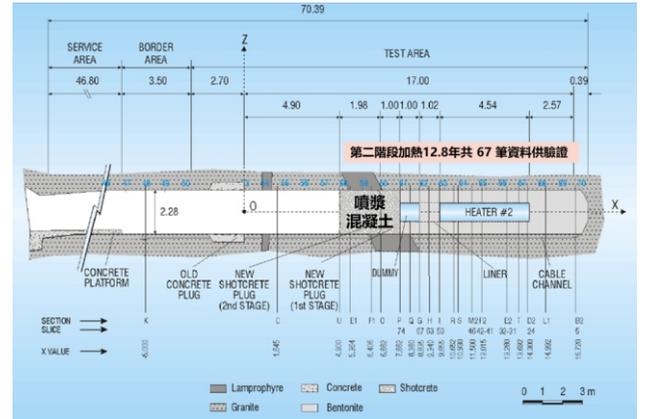
在高階核廢料的最終處置規劃中，地質處置是國際間普遍認可的長期安全解決方案。此策略將核廢料深埋至數百公尺以下，透過多重障壁系統（multi-barrier system）降低放射性物質向地下水體與生物圈遷移的風險。其中，最接近核廢料容器的工程障壁系統（EBS），通常以可膨脹的膨潤土為緩衝與回填材料，其使命是在無人維護的情況下，於數千年至數萬年間持續穩定隔離放射性物質與地層水的接觸。然而，在深部地層中，這些材料將經歷乾燥、加熱、再飽和與

變形等複雜變化，彼此交互影響，形成典型的熱-水-力（THM）耦合行為。理解其演化機制，是確保最終處置場安全性的關鍵。

為深入探討實場條件下的障壁行為，本文針對瑞士 **Grimsel** 地下岩石實驗室中進行的全尺寸實驗—**FEBEX**（**F**ull-scale **E**ngine-**B**arrier **E**Xperiment）—進行三維模擬重建，解析膨潤土障壁在實際條件下的長期演化行為。**FEBEX** 為目前國際上最具代表性的 **EBS** 長期現地試驗之一，持續監測長達 18 年。其核心設計包括兩個模擬熱源（加熱器），



圖一 FEBEX實驗共分兩階段，第一階段的幾何資訊 (圖修改自[2, 3])。



圖二 FEBEX實驗第二階段的幾何資訊 (圖修改自[2, 3])。

包覆壓實膨潤土磚，以觀測溫度、濕度與應力等長期變化(圖一和圖二)。表一顯示 FEBEX 實驗兩階段中層層遞進的的模擬步驟。

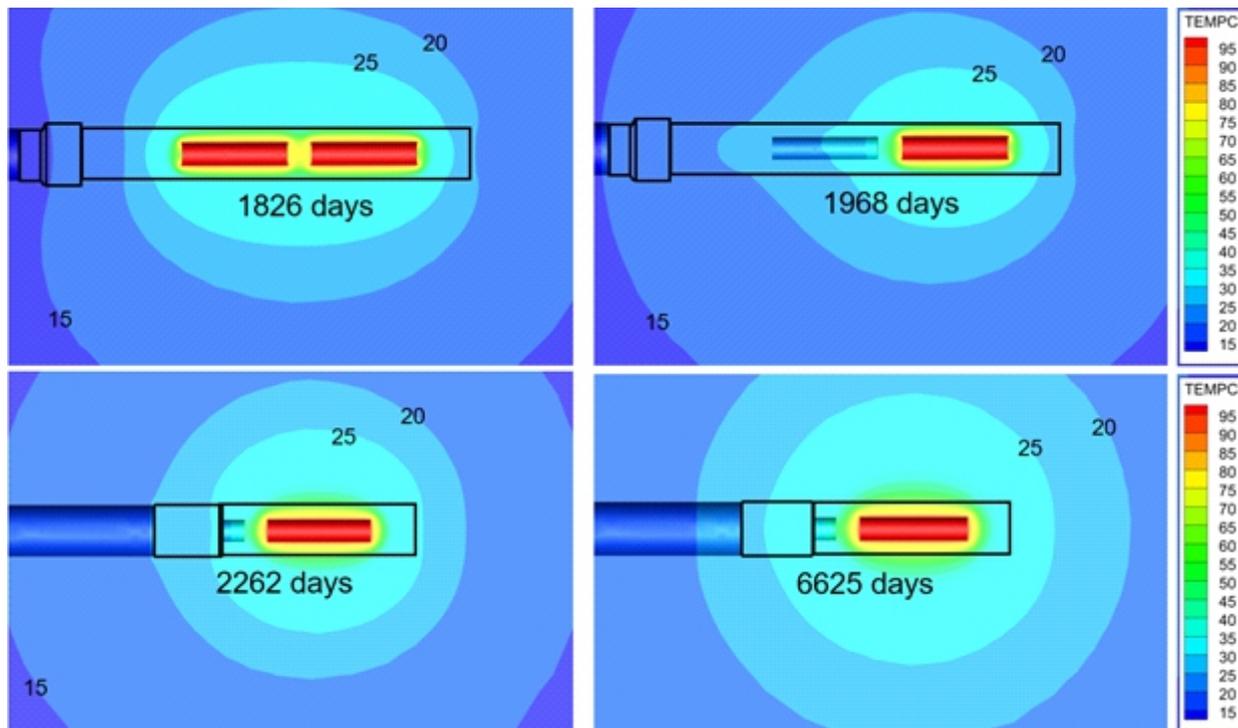
本成果為參與國際合作計畫 DECOVAL-EX-2019 Task D 的延伸成果之一，該任務旨在針對全尺寸工程障壁系統的水 - 力及熱 - 水 - 力耦合行為進行跨國模擬與比較，整體任務成果已由計畫主持人統整發表於國際岩石力學與採礦科學期刊《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》中 [1]。本篇所呈現之模擬工作，則聚焦於 FEBEX 隧道中膨潤土障壁的三維模擬與熱水力機制解析，為該任務台灣參

與團隊的具體貢獻，成果也已刊登於國際岩石力學與採礦科學期刊[2]。模擬採用由台灣團隊開發與修改的 HYDROGEOCHEM 5.3 (台灣電力公司專用版) 模擬工具進行，探討膨潤土吸水行為 (再飽和)、熱傳導與非飽和水力傳輸機制，以及熱 - 水耦合下應力與變形的時空變化。

模擬結果成功重現多項關鍵現象，包括軸向與徑向的溫度場演化；再飽和過程中相對濕度與含水量的分布變化；材料膨脹與總應力隨時間的變化趨勢；加熱器熱功率的逐步衰減等。簡而言之，靠近加熱器的溫度最高，熱效應可延伸數公尺，長期加熱使 $25^{\circ}\text{C}$ 等溫線延伸至約 $4.5\text{m}$  (圖三)；相對濕度由外

表一 FEBEX 實驗第一階段和第二階段的模擬步驟。

Stage number	Stage	Start time (day)	Duration (days)
1-1	Tunnel excavation period	-522	387
1-2	Instant emplacement and stay	-135	135
1-3	Heating phase 1: (turn on Heater #1 and #2)	0	53
	Heating temperature from 12 to $97^{\circ}\text{C}$		
1-4	Heating phase 1: constant Heating temperature $97^{\circ}\text{C}$	53	1773
1-5	Cooling phase 1: turn off Heater #1	1827	34
1-6	First dismantling	1861	107
2-1	Heating phase 2: Heater #2 heating	1968	4657
2-2	Cooling phase 2: turn off Heater #2	6626	92
2-3	Final dismantling	6717	0



圖三FEBEX溫度分布變化(a)第一階段加熱結束(約第5年)；(b)第一階段拆除加熱器#1後(約第5.4年)；(c)第二階段加熱進行中(約第6.2年)；(d)第二階段加熱結束(約第18年)。

圍岩石向膨潤土中心緩慢滲入，中心區域飽和最晚；膨潤土靠近外圍岩石處的總應力約5MPa，加熱器附近最低約2MPa，並隨時間趨於穩定。這些模擬結果與長期實測資料高度一致，展示模型再現屏障系統關鍵物理過程的可靠性，且有助於理解膨潤土障壁在真實場址下的演化行為與控制機制。

即使系統複雜、過程緩慢，透過物理建模與高品質數據整合，仍可有效掌握地下工程障壁材料的長期行為。尤其在設計與評估EBS成效時，結合現地長期監測與THM耦合模擬，可提供更具科學性的安全驗證路徑。

\*\*本研究採用之HYDROGEOCHEM模擬工具，適用於單相變飽和流體行為的數值模擬。本研究建立的耦合分析流程與模擬策略，已展現其在處理地下複雜過程中的可行性與延展性，對於放射性廢棄物處置、深層地熱、含水層熱儲存等地下工程應用，提供重要參考與應用潛力。

#### 參考文獻：

Antonio Gens\*, J. Alcoverro, Radim Blaheta, Martin Hasal, Zdeněk Michalec, Yusuke Takayama, Changsoo Lee, Jaewon Lee, Geon Young Kim, Chia-Wei Kuo, Wan-Jung Kuo, Chung-Yi Lin, HM and THM interactions in bentonite engineered barriers for nuclear waste disposal, 2021, IJRMMS\_2020\_425R1, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (IJRMMS) in a virtual special issue for DECOVALEX-2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104572>

Chia-Wei Kuo\*, Wan-Jung Kuo, and Chung-Yi Lin, 2025. Investigation of Physical Mechanisms behind Full-Scale Engineered Barrier Systems through Coupled Thermal-Hydraulic-Mechanical (THM) Simulations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106155>

B´arcena I, Fuentes-Cantillana JL, García-Siñeriz JL. Dismantling of the Heater 1 at the FEBEX “In Situ” Test. Description of Operations. 2003.