

# STRIDE-C NEWSLETTER

| 臺大新碳勘科技研究中心

井下二氧化碳感測系統建置與應用

---

深入解析核廢料障壁系統的熱水力演化  
—瑞土地下岩石實驗室的模擬研究

---

Aug. / 2025 / No. 2

臺大新碳勘科技研究中心通訊 第 2 期

NO. 2

# 簡介

## 國立臺灣大學 新碳勘科技研究中心

臺大新碳勘科技研究中心 通訊



**主任**  
劉雅瑄 教授

**副主任**  
林立虹 教授

**岩心資訊數位化組 組長**  
蘇志杰 副教授

**地質調查與監測技術發展組 組長**  
王珮玲 副教授

**人工智慧物聯網運算組 組長**  
郭陳濬 教授

**碳分離與利用組 組長**  
吳紀聖 教授

**淨零水科技組 組長**  
侯嘉洪 教授

**責任編輯**  
許緯豪 博士

親愛的讀者朋友們，

感謝您翻閱本中心第二期的通訊。本期內容共有二篇專文分享中心最近各研究團隊在二氧化碳循環與地下三維模擬方面的成果發表，感謝中心副主任林立虹教授與副研究員郭家瑋博士分享相關成果。

敬祝 平安順心

責任編輯 許緯豪 敬上

INTRODUCTION

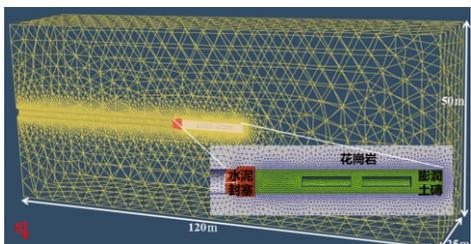
## 目錄

---



### 井下二氧化碳感測系統 建置與應用

doi: 10.30247/STRIDE-C\_NEWSLETTER.202508\_(2).0001



### 深入解析核廢料障壁系統的熱水力演化—瑞土地下岩石實驗室的 模擬研究

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

## 近期消息

---

◆ 臺大新碳勘中心暑期實習課程結業囉

<https://www.facebook.com/share/p/1ErcUwZXfH/>

◆ 臺大地質科學系開設「二氧化碳捕捉、再利用與封存概論」課程

<https://course.ntu.edu.tw/courses/114-1/95043>

◆ 「廢水淨未來：啟動綠色轉型永續藍圖」研討會

<https://www.itriwater.org.tw/Events/More?id=166>

# 井下二氧化碳感測系統建置與應用

doi: 10.30247/STRIDE-C\_NEWSLETTER.202508\_(2).0001



<sup>1,2</sup>林立虹、<sup>1,2</sup>王珮玲、<sup>1</sup>連婉吟

1. 國立臺灣大學 地質科學系暨研究所
2. 國立臺灣大學 新碳勘科技研究中心

化學風化作用調控地質時間尺度的碳循環與氣候變遷，於活動造山帶，快速抬升與侵蝕作用供應大量可反應物質，使得化學風化作用的速度大於大河系統達二到三個數量級以上，成為碳循環的熱區。台灣位處於歐亞大陸與菲律賓海板塊交界，即為典型的代表，過去我們透過採集與分析卑南溪河水化學與微生物族群，發現微生物作用媒介的黃鐵礦氧化，是扮演碳酸鹽風化的關鍵角色，發生於可侵蝕材料（例如河岸沉積物）、產

生大量二氧化碳，加劇溫室效應；我們更利用拉曼光譜分析石墨質有機物，發現岩石源有機物質的風化可區分為兩階段，分別於崩塌堆積與海底峽谷傳輸進行，也排放類似黃鐵礦風化產生的二氧化碳通量，可能對全球尺度碳循環產生重要的影響。

過去探討岩石源有機質降解作用，大都基於間接的代用指標測量（例如河水的溶解銻 (rhenium) 或沈積物碳十四含量），推測流域尺度的氧化通量，再利用基於水力或地

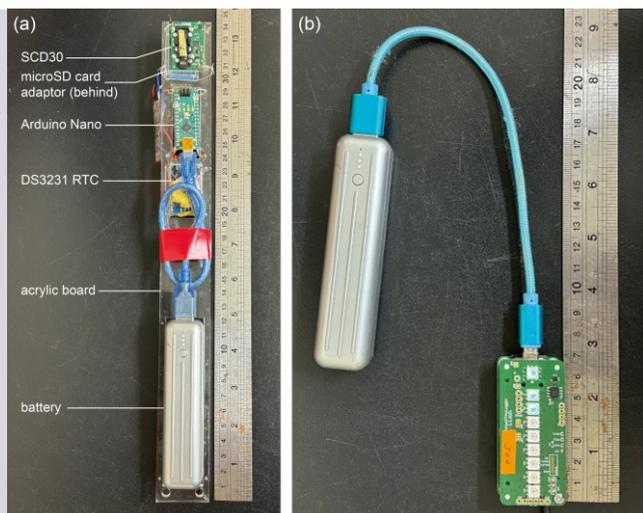
質參數建構的預測模型，放大尺度以獲取全球通量。然而代用指標的分析並不容易去解析發生岩石源有機質氧化作用的精確位置，也無法反應氧化作用的路徑、產生二氧化碳的速率，更不容易探討動力機制扮演的角色為何。體認這樣的知識缺口，過去已有部分研究嘗試利用封閉罩式的循環模式，直接測量地表沈積岩的二氧化碳釋放速率，配合同位素的分析與質量平衡，解析岩石源有機質氧化速率，並探討其與溫度變化的關係。然而活動造山帶的岩石組成中，沈積岩並非唯一的有機質來源，變質岩亦是另一重要組成，內含之有機質受高溫與壓力作用，產生更高成熟度或聚合性 (polymerization) 的形式，其生物之可利用性是否與沈積岩相當，仍多屬未知；變質岩基質的孔隙度十分低，二氧化碳產生與傳輸主要受控於破裂帶的分佈或岩石的結構，與沈積岩孔隙介質的概念迥然不同；深部地下環境可能是低氧或無氧的，有機質的氧化速度與高氧地表環境的速度差異為何？深部地下環境變質岩石的體積遠大於地表環境各類岩石體積總和，其有機質氧化對碳循環的影響為何，亦屬未知。

為了回應部分這些問題，我們設計了井下二氧化碳的感測與採樣系統，運用位於台

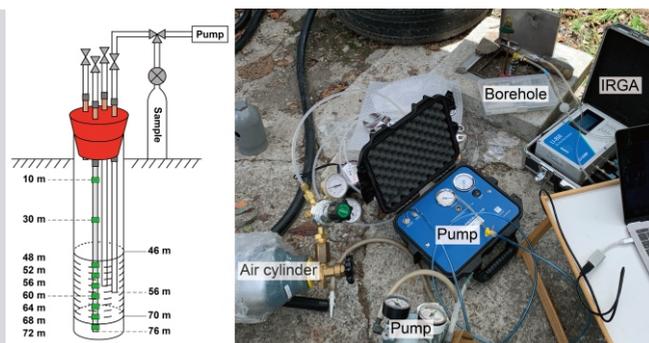
灣東部霧鹿區域的乾井作為測試場域 (圖一)，直接量測地下二氧化碳的排放速率，進而解析岩石源有機質的氧化作用。為了因應井孔大小的限制，我們自行組裝感測系統 (包含紅外線感測、供電、控制、儲存等元件；圖二)，並串連十至十五個感測系統，佈放至井下不同的目標深度，測量由岩層逸散出之二氧化碳累積濃度。我們另外設計閥門控制與井下管路、地表裝置連接，以進行井下空氣置換、主動循環與測量、被動模式測量、大體積樣本採集等工作 (圖三)。

鑽探獲取的岩心顯示，此井孔穿越約七公尺厚的表層崩積層、三十餘公尺厚多裂隙黑色片岩、二十餘公尺厚的破碎黑色片岩 (圖四)、約二十公尺厚的多裂隙黑色片岩，其中開篩段設置於井孔下半段的破碎與多裂隙帶 (46-70公尺)，因此於系統的實地測試中，我們佈放較高密度的感測系統於開篩段，以直接量測岩層逸散氣體累積。

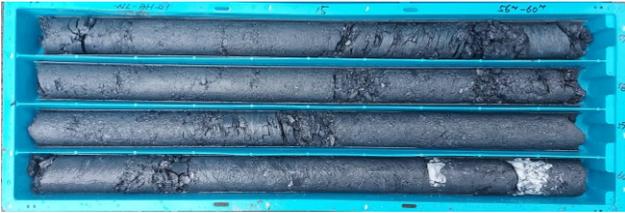
我們的結果顯示，若運用被動模式 (即無氣體循環)，井下不同深度累積二十小時的氣體濃度變化，呈現迥然不同的樣貌，於破碎帶的氣體累積是漸進持續的，呈現弧形的累積曲線；而於多裂隙帶，則多呈現階梯式的遞增；多裂隙帶的累積速率顯著的高於



圖二：二氧化碳感測系統。左圖為自行組裝的感測系統，右圖則是市售感測設備，兩套系統均使用相同型號的二氧化碳紅外線感測器模組，量測範圍為0至40,000 ppm，二者具相同偵測表現，野外測量中將其混合串連並佈放至井下。



圖三：測量佈置示意圖與野外實景。左圖為串連感測系統佈設於井下不同目標深度之示意圖，右圖為野外測量實景。實驗過程中，會先進行井下空氣置換，隨後採用主動循環測量模式或被動測量模式，紀錄二氧化碳自岩層逸散之累積濃度，最後進行大體積樣本採集。



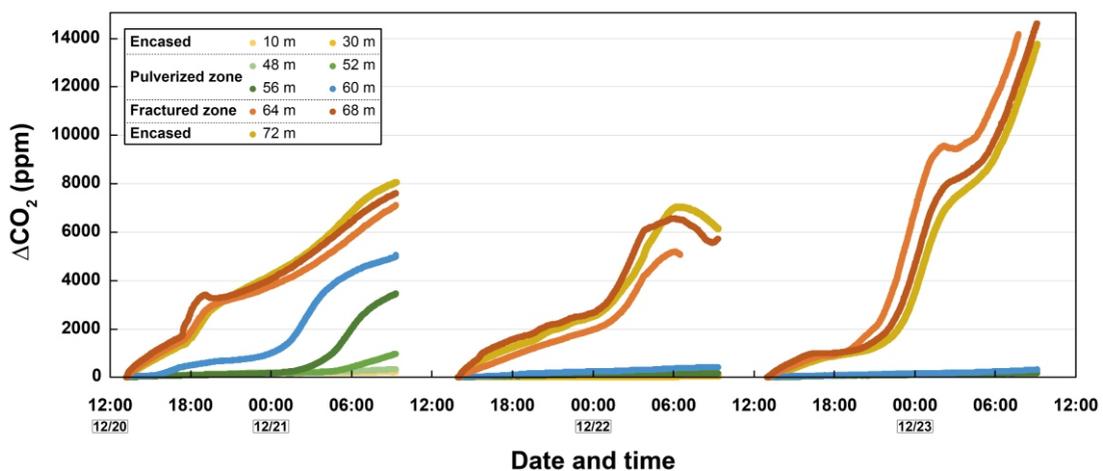
圖四：破碎黑色片岩。岩體由未膠結的細碎顆粒組成，粒徑大小不一，介於粉砂至小礫石之間。

破碎帶的累積速率（圖五）。若運用主動循環的模式，即透過地表氣體光譜儀的內建幫浦驅動，進行封閉罩式的循環達二至三小時，無論那種岩層組構特徵，氣體累積皆呈現漸進持續的累積曲線，如同被動模式般，多裂隙帶的累積速率顯著的高於破碎帶的累積速率，且兩者皆高於對應至被動模式的累積速率。這樣的結果顯示，被動模式的測量，較能反應現地的氣體釋放速率，並有助於解析變質岩層高度不均質或不均向的特徵。主動循環模式的測量，雖然歷時較短，卻可能造成通量的高估，且無法獲取岩層內部的特徵。

我們也透過現地測試，搜集數個一公升體積的氣體樣本，進行同位素分析，透過端

成分設定與質量平衡模型，岩石源有機物氧化作用的貢獻比例，可達整體氣體的 50% 以上；若將被動模式的結果進一步計算，可得通量達 1–300 mgC/m<sup>2</sup>/d，考慮上述比例，則與地表沈積岩有機質氧化作用貢獻速率相仿。雖然我們測得的井內通量，仍須額外考慮地下氣體傳輸，才可獲取較接近真實的氧化速率，但這些成果仍顯示變質岩的有機質是得以被生物降解，產生大量二氧化碳。特別於活動造山帶，快速抬升與侵蝕作用，得以持續提供大量變質岩至地表或較淺的地下環境，透過微生物作用將『難用』的有機質氧化，並貢獻溫室效應。

這樣感測系統的應用，提供了解析多項岩層氣體的產生與傳輸參數，為未來量化模型奠定良好的基礎。這類型的應用亦可以進一步擴充至其他地下或地表環境的二氧化碳監測與樣本搜集，或搭配其他感測器，提供高時頻的時序測量資料，以建構造山帶的碳循環觀測網。



圖五：被動模式下二氧化碳的累積濃度變化。圖中呈現三次隔夜測量的濃度累積結果，橘紅色曲線代表多裂隙帶的變化，藍綠色曲線則代表破碎帶的濃度變化。

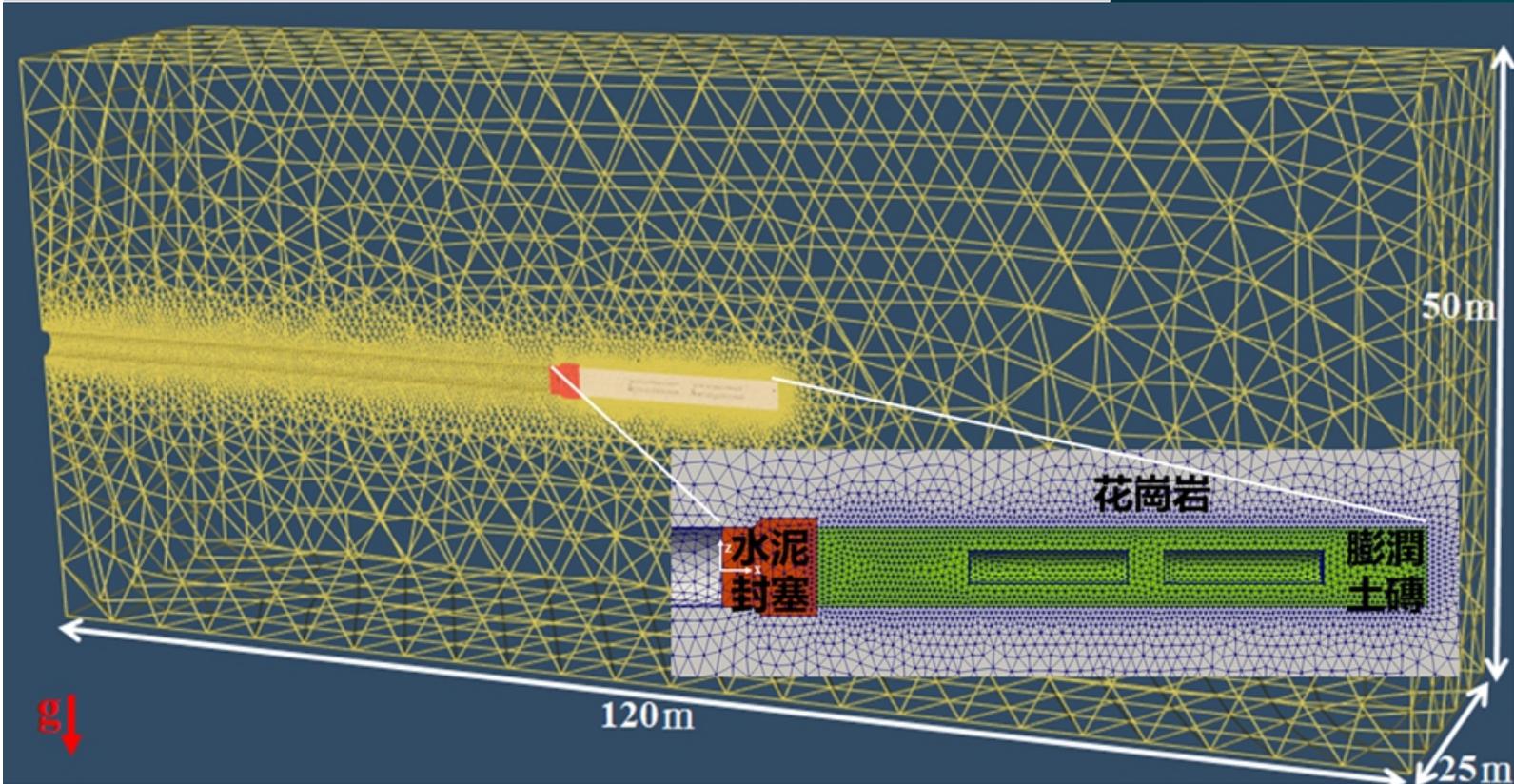
#### 論文來源：

Lien, W.-Y., Chen, R., Tsai, J.-F., Chen, J.-N., Lin, L.-H., and Wang, P.-L. (2025) A novel design for continuous measurement of CO<sub>2</sub> from deep remineralization of petrogenic organic carbon. *Vadose Zone*, e70020.

<https://doi.org/10.1002/vzj2.70020>.

# 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



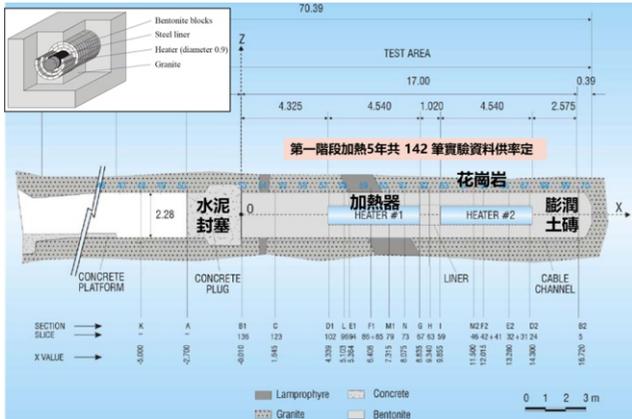
郭家璋

國立臺灣大學 新碳勘科技研究中心

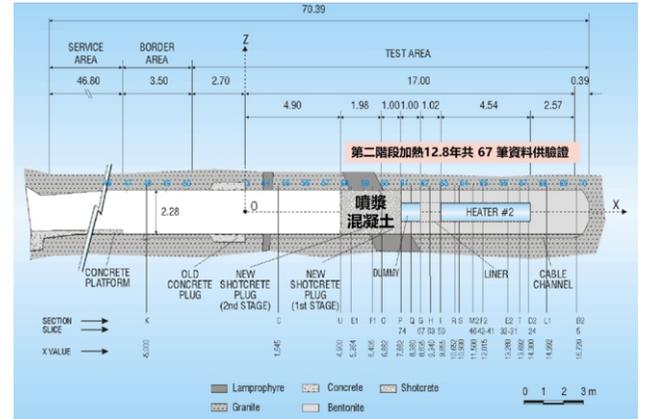
在高階核廢料的最終處置規劃中，地質處置是國際間普遍認可的長期安全解決方案。此策略將核廢料深埋至數百公尺以下，透過多重障壁系統（multi-barrier system）降低放射性物質向地下水體與生物圈遷移的風險。其中，最接近核廢料容器的工程障壁系統（EBS），通常以可膨脹的膨潤土為緩衝與回填材料，其使命是在無人維護的情況下，於數千年至數萬年間持續穩定隔離放射性物質與地層水的接觸。然而，在深部地層中，這些材料將經歷乾燥、加熱、再飽和與

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-**r**ed **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。

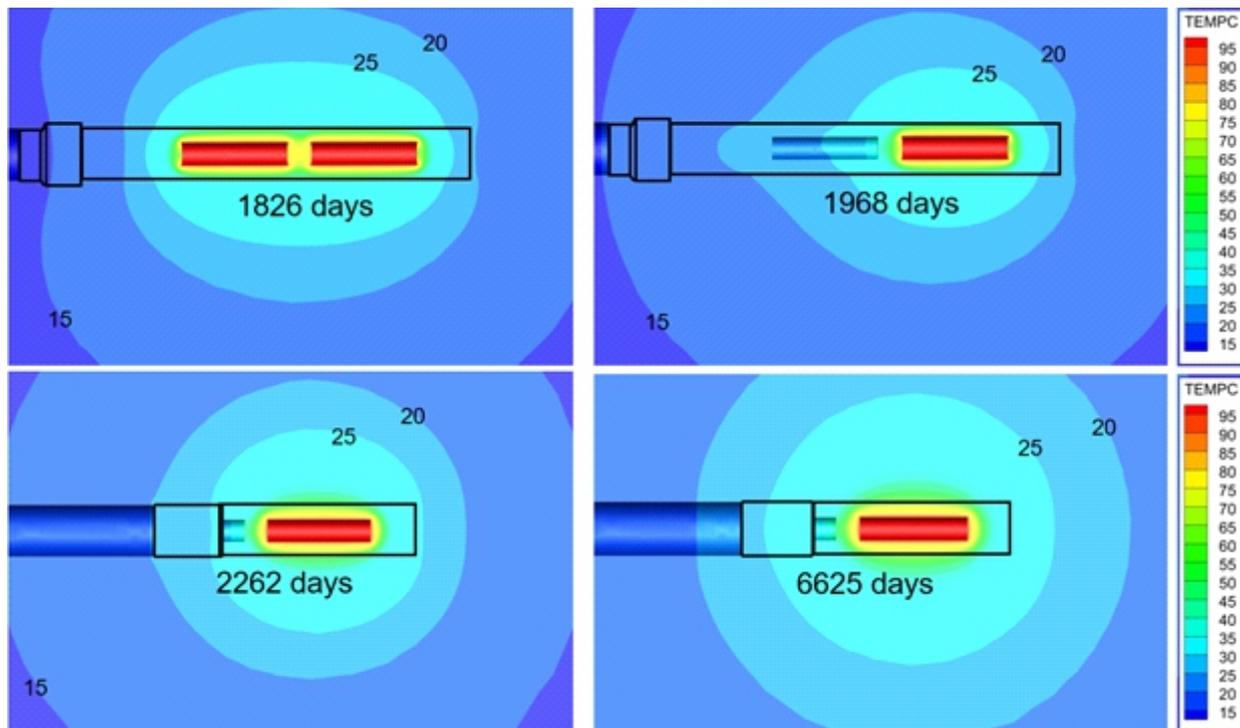
本成果為參與國際合作計畫 DECOVAL-EX-2019 Task D 的延伸成果之一，該任務旨在針對全尺寸工程障壁系統的水 - 力及熱 - 水 - 力耦合行為進行跨國模擬與比較，整體任務成果已由計畫主持人統整發表於國際岩石力學與採礦科學期刊《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》中 [1]。本篇所呈現之模擬工作，則聚焦於 FEBEX 隧道中膨潤土障壁的三維模擬與熱水力機制解析，為該任務台灣參

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.