

出國報告（出國類別：開會）

**參加碳封存模擬技術相關研討會(SPE  
Europe Energy Conference &  
Exhibition)  
出國人員報告書**

服務機關：台灣中油股份有限公司 探採研究所

姓名職稱：李佳勳 石油開採工程師

派赴國家：義大利

出國期間：113年06月24日至07月01日

報告日期：113年07月12日



## 摘要

台灣中油公司除了長期肩負穩定國內石油及天然氣穩定供應的社會責任，近年來，為配合政府倡導之 2050 淨零排放政策，公司內各單位已開始規劃及研究碳捕捉、利用與封存(CCUS)，其中碳封存的概念涵蓋探勘、選址評估及灌注，與傳統油氣的探採工作流程有一定相似之處，因此碳封存係目前重點研究項目之一。

本所為強化碳封存模擬技術與觀察國際研究趨勢，本次配合「參加碳封存模擬技術相關研討會」出國計畫，派員赴義大利參與國際性研討會「SPE Europe Energy Conference & Exhibition」，本研討會主題為新能源，三天的議程內包含 CCUS、地熱及氫能，本次著重聆聽 CCUS 相關發表論文，包含碳封存的實驗、地質力學模擬技術與研討單井完整性，此部分發表論文主題與本所研究方向一致，其具體成效在於這些發表論文有提供詳細的方法理論及數據，可有效提升公司內相關研究的品質。

經過三天議程，本次任務順利達成，也觀察到國際研討會似乎也面臨能源轉型，有越來越多以新能源為主題的研討會於世界各地舉辦，也建議公司內研究同仁多加參與國際性研討會，除了觀察國際上的研究趨勢，也可以與公司外部的同行領域專家面對面交流，相信對公司同仁而言將會是難得的經驗。執行此次出國計畫收穫良多，希望能將所見所聞轉化為研究動力，提升中油公司技術實力，使相關業務能推動地更加順利。

## 目次

摘要.....	1
目次.....	2
壹、目的.....	3
貳、過程.....	4
參、具體成效.....	10
肆、心得及建議.....	22

## 壹、目的

台灣中油公司(以下稱本公司)長期穩定地供應國內石油與天然氣資源需求，目前已在國內形成相當具規模的石油與石化產業鏈，本公司除了肩負穩定國內油氣供應的社會責任，近年來，為配合政府倡導之 2050 淨零排放政策，公司內各單位如探採研究所(以下稱本所)及探採事業部已開始規劃及研究碳捕獲、利用與封存(Carbon Capture Utilisation and Storage, CCUS)及地熱(Geothermal)，其中碳封存的概念涵蓋探勘、選址評估及灌注，與傳統油氣的探採工作流程有一定相似之處，因此碳封存目前係本所主要推動的研究項目之一。

本所為強化碳封存模擬技術與觀察國際研究趨勢，本次配合「參加碳封存模擬技術相關研討會」出國計畫，派員石油開採工程師赴歐洲義大利參與國際性研討會「SPE Europe Energy Conference & Exhibition (以下稱 SPE 歐洲研討會)」。SPE 歐洲研討會由石油工程師協會(Society of Petroleum Engineers, SPE)主辦，每年度皆在歐洲地區舉辦，此次會議地點位於義大利杜林(Turin, Italy)，一共舉行 3 天會議，其與會成員多來自歐美國家，包含國際油公司、石油服務公司、設備供應商與學術單位，事實上，本研討會發表主題除了 CCUS 亦有涉及地熱以及氫能，皆與本公司業務內容息息相關，惟本次僅派員 1 人參與會議，同時段中有多個會議廳進行論文發表，因此優先參加與 CCUS 相關的主題，參與議程包含井完整性評估、地質力學、岩石-CO<sub>2</sub> 交互作用及人工智慧。

本次出國任務旨在學習及觀察目前 CCUS 相關技術趨勢，國際上已有許多國家推動淨零碳排相關政策，碳封存的技術也在蓬勃發展，本所身為研究單位，幫助公司發展 CCUS 技術責無旁貸，派員參與國際研討會有其必要性及重要性，對於石油工程師而言也是非常寶貴的經驗。

## 貳、過程

本次出國任務為期 7 天及 1 天自費請假，主要行程為參加 06/26 至 06/28 舉行之 SPE 歐洲研討會，詳細出國行程如表 1 所示，研討會簡介及詳細議程如後所述。

表 1 出國行程表

起迄日期	天數	到達地點	詳細工作內容
113.06.24(一) 113.06.25(二)	2	台北-義大利	啟程
113.06.26(三) 113.06.27(四) 113.06.28(五)	3	義大利	參與 SPE 歐洲研討會
113.06.29(六)	1	義大利	自費請假
113.06.30(日) 113.07.01(一)	2	義大利-台北	返程
合計	8 天		

## SPE歐洲研討會簡介及議程

SPE 歐洲研討會今年於義大利杜林舉辦，會議地點位於 Lingotto Congress Centre (圖 1)。會場包含報到處、廠商展場、3 間技術議題演講會議廳與論文海報展示區。論文發表皆位於獨立演講會議廳內進行發表，各項議題約有 4 至 6 篇報告現場口頭演說，口頭演說時間約 10 分鐘，現場人員提出疑問時間約為 3 分鐘，除第三天僅有上午議程外，前兩天論文發表時間分為上午及下午兩個時段，每個時段同時有 3 間會議廳舉辦研究論文發表。

第一天(6/26，圖 2)議程包含單井完整性及材料、淨零碳排能源經濟、氫能生產、地熱探勘的創新科技以及地面設備技術，經篩選議程內容，當日上午及下午皆參加單井完整性及材料的議題，該議題涵蓋生產井或灌注井在整個生命週期內可能產生的風險，例如井下閥件設計、套管水泥劣化、油管破孔以及井下的流動保障等議題，國際石油服務公司 Halliburton 於此發表最新的井下閥件，具有直接拋棄特性，可改善碳足跡的累積；史丹佛大學發表井孔水泥的重要性；杜林理工大學發表對於地下儲氣構造的單井完整性風險評估，發表論文的涵蓋範圍相當廣泛。

### 6/26 上午議程

- **單井完整性及材料(Well Integrity and Materials I)**
- 淨零碳排能源經濟(Net Zero Energy Economics)
- 氫能生產(H<sub>2</sub> Production)

### 6/26 下午議程

- **單井完整性及材料(Well Integrity and Materials II/III)**
- 地熱能源探勘的創新科技與策略(Innovative Technologies and Strategies for Optimized Geothermal Energy Exploration and Extraction)
- 地面設備技術(Plant Conversion)



圖 1 研討會會場入口



圖 2 第一天與會演講廳

第二天(6/27，圖 3)議程包含二氧化碳封存之地質力學、碳封存、進階強化採油技術、二氧化碳封存礦區經驗與應用、二氧化碳-岩石交互作用及地下天然氣儲氣窖。職本年度恰好身為地質力學研究計畫之主持人，計畫目標係自行建立力學耦合模擬技術，故上午選擇參加地質力學場次，該議題包含許多碳封存地質力學模擬的最新研究，包含模擬循環注氣下井孔周遭流動行為、更新 TOUGH 力學耦合模擬軟體、蓋岩拉張破壞(Tensile Failure)關鍵因子分析及斷層封閉構造力學耦合模擬等。

下午場次則是選擇二氧化碳-岩石交互作用議程參與，原因係考量本所目前負責規劃碳封存相關的岩心試驗，現行規劃中有設計岩心樣品浸泡鹽水及二氧化碳飽和鹽水，以浸泡後樣品進行一般試驗及力學試驗，可協助釐清樣品接觸二氧化碳與否是否會造成物理性質變化，該場次發表論文係以類似概念探討岩石接觸二氧化碳後對化學性質是否有變化，與上述業務具有直接關聯性。實際上，本日的其他場次議程亦跟石油開採工程師息息相關，惟時間上無法同時參與不同演講廳的發表，僅能優先挑選與現行業務最相關的場次，實屬可惜。

#### 第二天(6/27)上午議程

- 二氧化碳封存之地質力學(Geomechanics in CO<sub>2</sub> Storage)
- 碳捕捉、利用與封存(CCUS)
- 進階強化採油技術(Advanced Techniques for Enhanced Oil Recovery)

#### 第二天(6/27)下午議程

- 二氧化碳封存-礦區經驗與應用(CO<sub>2</sub> Storage - Field Experience and Applications)
- 二氧化碳封存-岩石交互作用(CO<sub>2</sub> - Rocks Interactions)
- 地下天然氣儲氣窖(Underground Natural Gas Storage)



圖 3 第二天與會演講廳

第三天(6/28)議程包含機器學習、儲氫技術、永續發展及油氣田管理，考量近期國際上 AI 議題正在發酵，基於好奇心選擇參加機器學習、AI 及數位化之議程，內容包含以神經網路評估地層特性並降低不確定性，以機器學習法進行歷史擬合及預測等，許多傳統的工作流程似乎都可以進行數位化或自動化。

### 第三天(6/28)上午議程

- **機器學習、AI 及數位化(Machine Learning, AI and Digitalisation I)**
- 儲氫技術-物理、生物及化學作用(H<sub>2</sub> Storage I - Physical, Biological and Chemical Processes)
- 永續發展(Sustainability)
- 油氣田管理(Carbon Efficient Reservoir Management)

本次會議另有部分發表論文被安排以紙本海報形式呈現，紙本海報展覽於開放式大廳(圖 4)，作者可以近距離地與聽眾解說交流，此區域討論氣氛明顯比會議

廳內還要熱絡，作者可以沒有時間限制地與有興趣與會者展開較為深入的討論，與會者提出問題也不會像在演講廳內較為拘束，整體而言在此區域的交流效果十分顯著，較為可惜的是 3 天的議程皆展示相同的海報論文。

整體而言，此次舉辦的 SPE 歐洲能源會議規模略小於於美國舉辦的 SPE 年會規模，但仍可見識到歐洲對於 CCUS 研究的重心，例如第一天有 3 個時段的議程在研討單井完整性，可見投稿論文中對於單井風險的研究比例較高，本公司現階段仍規劃階段，尚未鑽井及營運場址，對於單井的風險評估較偏向於完井設計或管材選用，主因是目前仍缺少實際灌注資料，未來若有實際灌注資料即可進行相關研究。另一方面，地質力學以及岩石-CO<sub>2</sub> 交互作用這兩個主題罕見地擁有單獨的議程，這個現象在傳統油氣領域中並不常見，過往的 SPE 油氣研討會中這兩個主題通常依附於強化採油(EOR)議題之下，本研討會將這兩個主題獨立為議程，可見投稿論文中有一定研究數量著重於此，此現象與本所目前研究方向一致，為本所的研究業務方向提供一定信心。



圖 4、會場內海報展示區域

## 參、具體成效

SPE 歐洲研討會發表論文眾多，以下篩選 3 篇與實驗以及數值模擬技術相關的論文進行細部研討，以下篩選論文有提供詳細的方法理論及數據，可有效提升公司內相關研究的品質。

### SPE-220054-MS

#### **The Role of Wellbore Cement in Energy Transition: CO<sub>2</sub> Storage and Emissions**

T. Vanorio, A. ElGamal, and D. Geremia, Stanford Rock Physics and Geomaterials Laboratory, Stanford University, Stanford, CA, USA

此篇論文為美國史丹佛大學 Rock Physics and Geomaterials Laboratory 實驗室發表，CO<sub>2</sub> 灌注過程中套管水泥是評估單井完整性中非常重要的一環，會因 CO<sub>2</sub> 溶於地層水導致環境 pH 下降以及 CO<sub>2</sub> 長期與水泥材料接觸，使水泥性質產生變化。本論文主要將水泥材料暴露於 CO<sub>2</sub> 中，並評估孔隙率、滲透率、強度及破壞機制的影響。樣品以 I 型及 G 型波特蘭水泥為基底，經過 28 天養護後將樣品乾燥至質量恆定為止。多組不同含水量的樣品被安排暴露於氣態及超臨界態 CO<sub>2</sub>，暴露於氣態 CO<sub>2</sub> 的樣品在平均壓力 5 MPa 及 22 °C 環境溫度下維持 17 天，期間量測氣體滲透率。暴露於超臨界態 CO<sub>2</sub> 接觸的樣品則在平均壓力 5 MPa 及 55 °C 環境溫度下維持 28 天，然後評估孔隙率、Klinkenberg 滲透率、應力-應變關係、強度及超聲波 AE 事件次數的變化。結果顯示，樣品暴露於 CO<sub>2</sub> 後滲透率產生明顯下降，含水量越高的樣品滲透率下降越明顯，甚至可以超過 1 個對數區間(圖 5 左)，與其他前人文獻有類似的結果。若以 SEM 電子顯微鏡檢視，顯示水泥在暴露於 CO<sub>2</sub> 後，於孔隙間產生明顯的碳酸鈣沉澱(圖 5 中及右)，此為明顯的方解石礦化反應(Calcite mineralization)，孔隙率從 34.1 % 下降至 30.6 %，其破壞強度從 89 MPa 上升至 96 MPa(圖 5)，但 AE 次數也明顯上升，代表偵測到的裂縫比暴露前更多，有脆化的現象，這些性質變化可能來自於水泥與 CO<sub>2</sub> 接觸後會造成方解石礦化反應有關。

本文中有探討另一個實驗室正在測試中由火山灰組成的水泥配方縮寫為 LEM，但文中並無透露其詳細成分，相對於一般的水泥添加劑 SCM 為更低碳排放的材料，測試結果顯示添加一般水泥添加劑 SCM 的樣品密度較大，滲透率很低，

且強度隨著 SCM 比例變化非常顯著，抗壓強度約為 37.8 Mpa 至 87.8 Mpa。改成添加 LEM 後，其水泥密度下降，滲透率上升，但水泥抗壓強度仍可維持約 30 MPa 至 46 MPa，是一種具有潛力的新配方。

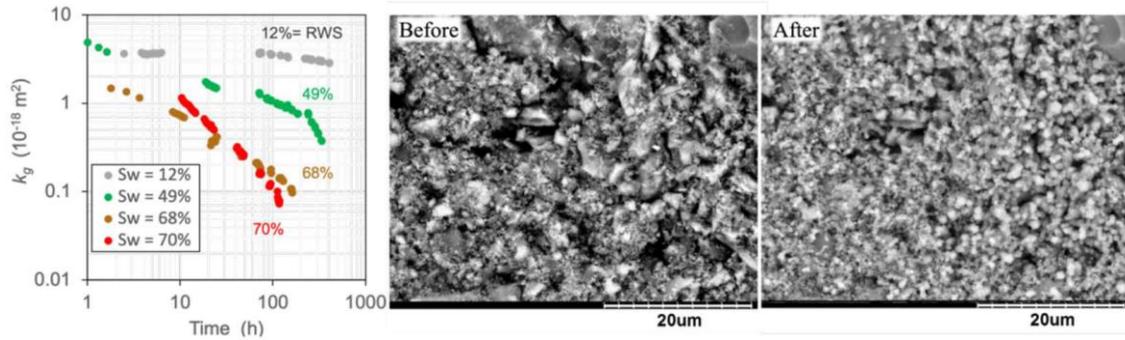


圖 5 樣品檢驗成果(左)滲透率變化及實驗前(中)後(右)SEM 照片

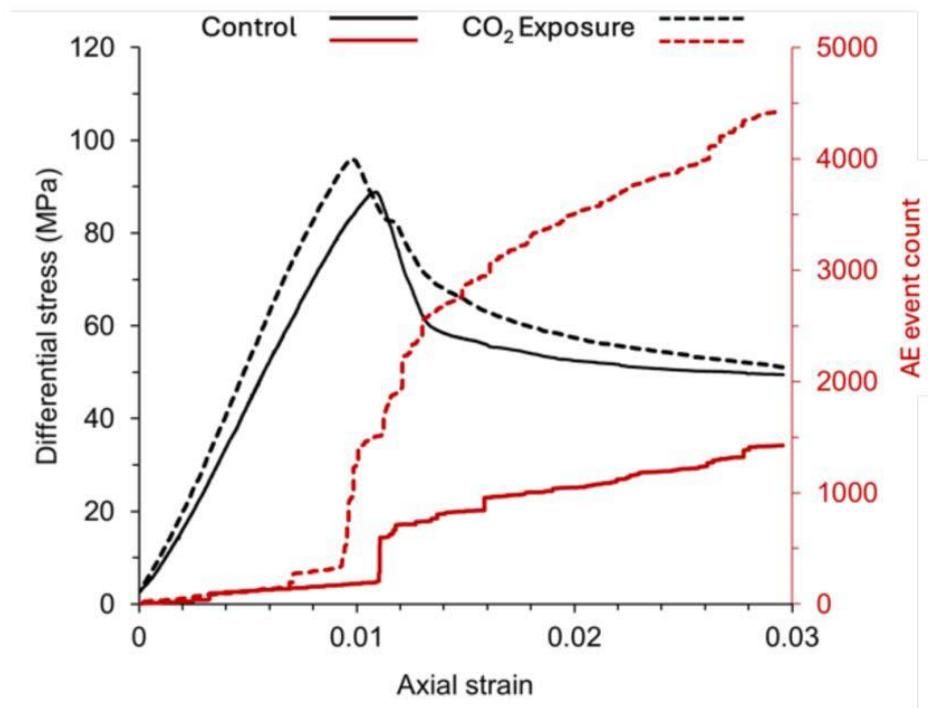


圖 6 樣品暴露 CO<sub>2</sub> 前後性質差異

## **Critical Parameters for Caprock Tensile Failure Induced by CO<sub>2</sub> Injection Into Aquifers**

A. Gillioz, Geo2X SA, Yverdon-les-Bains, Switzerland; F. Verga and C. Deangeli, Politecnico di Torino, Turin, Italy

本篇論文由杜林理工大學發表，旨在以數值模擬方式探討影響蓋岩層破裂風險的關鍵因素。一般而言，蓋岩層的完整性會考量延展性(Ductility)、壓縮度(Compressibility)、強度(Strength)及波速(Sonic velocity)等 4 個簡易因子，經過簡易分類後(圖 7)，即使石鹽(Halite)、泥岩及有機頁岩的抗剪強度不如較堅硬跟較脆性的岩石，仍因延展性較佳，可以承受較大的塑性應變，較適合做為蓋岩層。在蓋岩流動性方面，若有較低的滲透率或毛細進入壓力(Capillary entry pressure)高於 CO<sub>2</sub> 上浮壓力，也可以避免 CO<sub>2</sub> 突破蓋岩層。在應力方面，若在含水層注入 CO<sub>2</sub>，孔隙壓力開始上升，含水層體積會有膨脹趨勢，然而周圍的岩石約束了側向上的膨脹，使膨脹傾向於垂直方向，可能造成地表或海床隆起；另一方面，注入後注入層的總水平應力會上升，此系統為了跟遠場應力達到靜態平衡，會導致上覆岩層及下覆岩層的總水平應力下降，如圖 8 所示，這個現象會增加上覆及下覆岩層產生拉張破壞(Tensile failure)或水力破裂(Hydraulic fracturing)，大幅增加 CO<sub>2</sub> 洩漏的風險，順帶一提，拉張破壞被定義發生於最小水平主應力小於等於抗張強度時發生，因此，若能提升最小水平主應力，則拉張破壞的風險也會隨之下降。

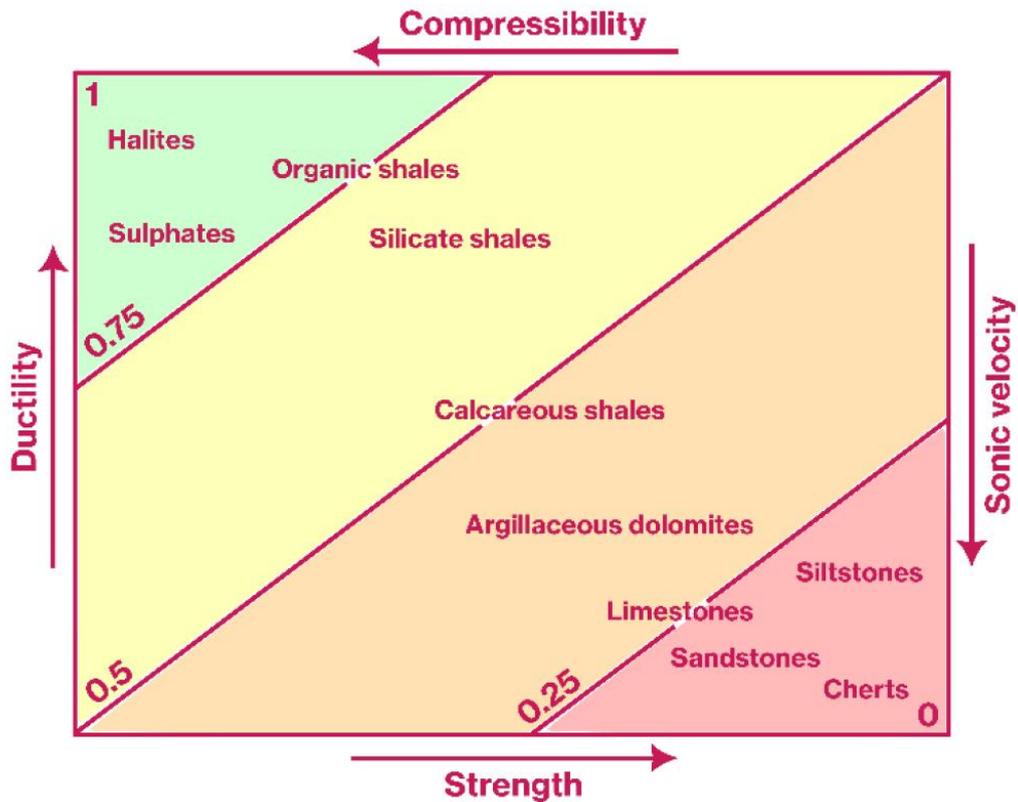


圖 7 蓋岩完整性及岩性分布(左上角為較佳的蓋岩，右下角為較差的蓋岩)

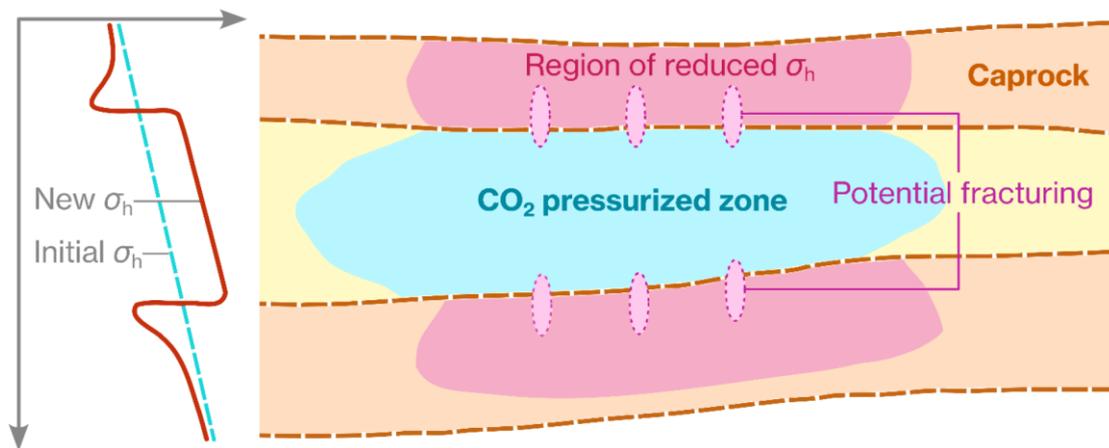


圖 8 二氧化碳注入後最小水平主應力變化

本研究使用 CMG 公司的 GEM 模擬器進行數值模擬，首先建立擬二維模型 (Quasi-2D model, 圖 9)，圖中黃色為注入層，紅色為蓋岩層，藍色為觀察層；網格水平方向尺寸近井處設定為 100m x 100m，在一定距離後逐漸放大至 500m x 500m，注入層網格垂直方向尺寸為 7.6m，蓋層網格厚度為 4.5m，觀察層網格厚度為 15.25m，初始壓力設定為 25.9 MPa @2,429m，其壓力梯度近似於靜水壓力

梯度，應力參數及流動參數初始設定如表 2 及表 3 所示，此外，為了著重於探討影響應力的因子，毛細壓力及化學反應並無納入數值模擬中。

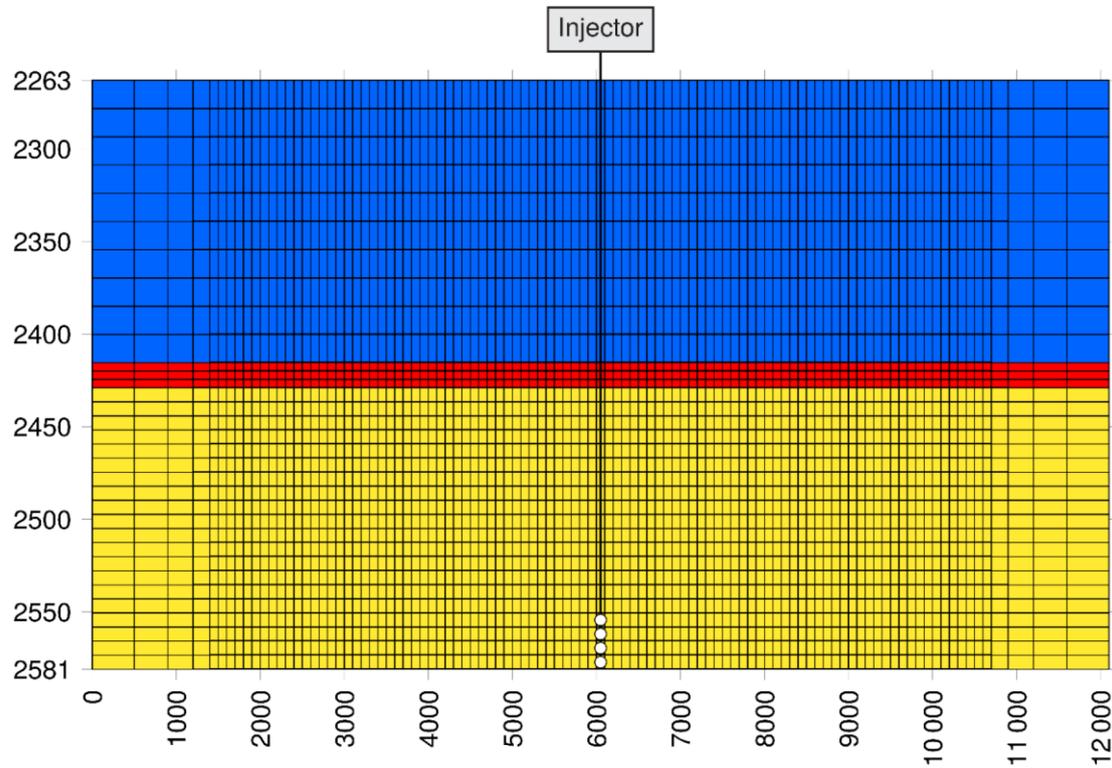


圖 9 簡易模型剖面圖(圖上單位為公尺)

表 2 網格內力學參數初始設定

Property	Symbol	Monitoring layer	Caprock	Aquifer	Unit
Rock constitutive law	-	Drucker-Prager	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
Young's modulus	$E$	0.86	5	5	GPa
Poisson's ratio	$\nu$	0.3	0.25	0.25	-
Rock compressibility	$c_r$	$1.28 \times 10^{-6}$	$1.28 \times 10^{-5}$	$1.28 \times 10^{-6}$	kPa <sup>-1</sup>
Cohesion	$c'$	689.5	689.5	689.5	MPa
Friction angle	$\beta'$	30	30	30	deg
Biot's coefficient	$\alpha$	1	1	1	-

表 3 網格內流動參數初始設定

Property	Symbol	Monitoring layer	Caprock	Aquifer	Unit
Matrix horizontal permeability	$k_{hm}$	20	$10^{-7}$	15	mD
Matrix porosity	$\phi_m$	0.13	0.13	0.13	-
Matrix anisotropy ratio	$k_{vm}/k_{hm}$	0.25	0.25	0.25	-
Fracture horizontal permeability	$k_{hf}$	-	$10^{-7}$	-	mD
Fracture porosity	$\phi_f$	-	0.13	-	-
Fracture anisotropy ratio	$k_{yf}/k_{hf}$	-	0.25	-	-

簡易模型建立後即進行敏感度分析，共有 22 個參數進行調整，涵蓋不同地層的網格屬性、注入設定及模擬設定，二氧化碳會持續注入至注入點上方的蓋層觀察到第一個拉張破壞為止，並以當下時間點的累積注入二氧化碳重量至做為比較依據，22 個參數的敏感度分析如圖 10 所示。在含水層中，基岩滲透率產生最大的影響，滲透率從 15 mD 調整為 30 mD，可注入二氧化碳重量從 68 kt 大幅上升至 592 kt，除此之外，含水層的楊氏模數及泊松比對結果的影響也很顯著，較高的數值可以注入較多的二氧化碳，其中楊氏模數在超過 15 GPa 影響變弱；蓋層的敏感度分析與含水層的趨勢略有不同，蓋岩的楊氏模數與泊松比越低反而可以提高累積注入量，特別是楊氏模數具有相當顯著的影響，但同樣地，在達到一定的數值後(以本分析而言為 7.5 GPa)，這個負面影響的變化將會趨緩。事實上在低脆性的情境中(楊氏模數=2.5 GPa)，蓋岩的破裂會延展的較緩慢，相反地，在高脆性的情境中(楊氏模數>12.5 GPa)，蓋岩的破裂會延展的非常迅速。另一方面，影響累積注入量最顯著的因子其實是注入井數量，在調整注入數量時，本研究將單一井的注入速率平均分配到額外的注入井，結果顯示在 2 口井的情境中累積注入量為原先的 11 倍。根據本研究結果，理想的蓋岩層應具有較低的楊氏模數及泊松比，且較傾向於具有延展性；理想的含水層應具有較高的滲透率；以及增加注入井的數量可以有效避免蓋岩層的拉張破壞。

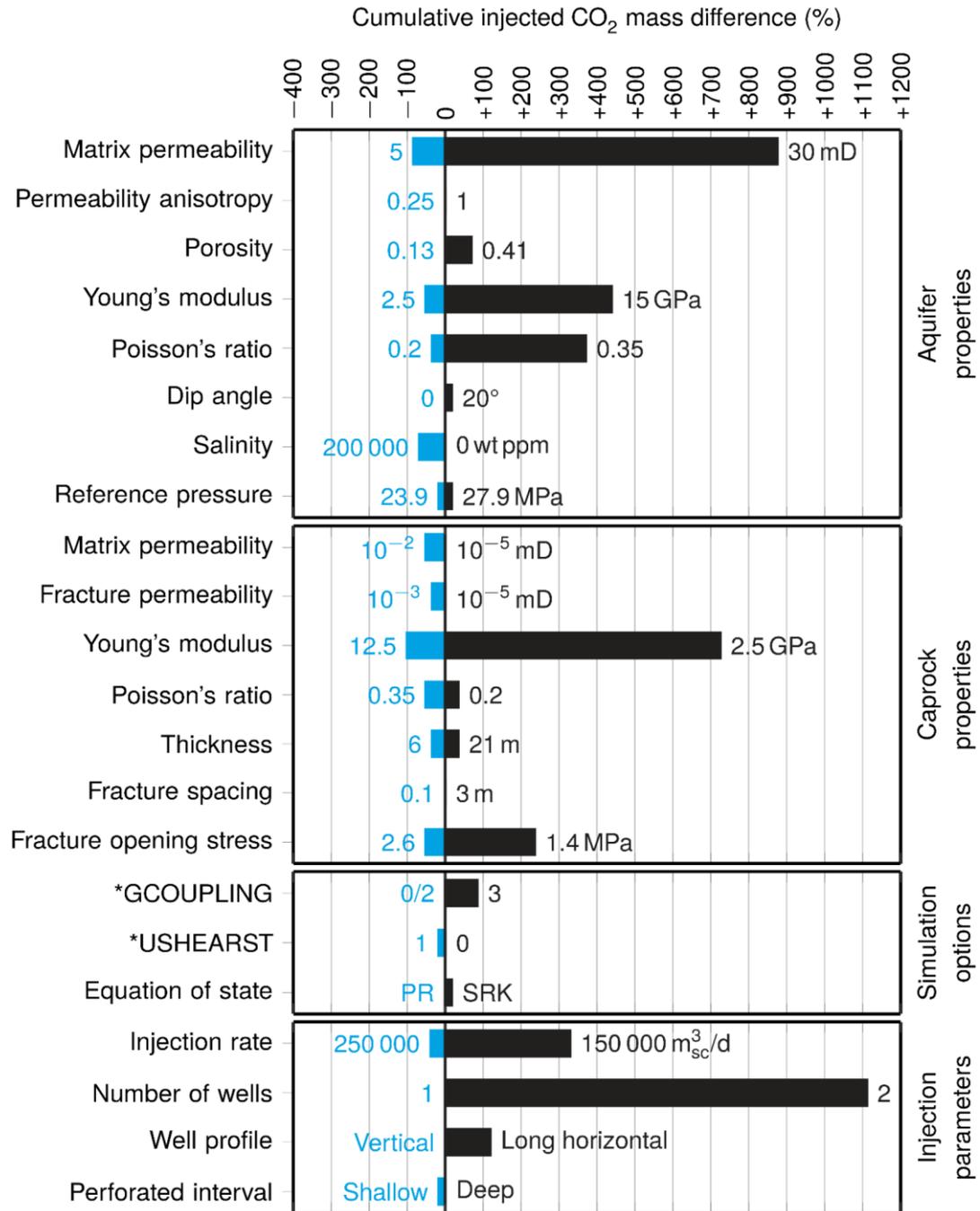


圖 10 敏感度分析成果圖

SPE-220159-MS

## **Coupled Flow and Wellbore-Integrity Geomechanical Effects During Continuous and Cyclic CO<sub>2</sub> Injection**

G. Lee, Technical University Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Germany; Y. Barreto, Wintershall Dea AG, Kassel, Germany; M. Amro, T. Nassan, and H. Alkan, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany; J. Solbakken and N. Zamani, NORCE Norwegian Research Centre AS, Bergen, Norway; O. Burachok, Wintershall Dea AG, Kassel, Germany

本篇論文由德國克勞斯塔爾工業大學發表，分為兩大部份，首先，本研究參考由弗萊貝格礦業大學 (TU Bergakademie Freiberg, TUBAF) 進行的套管-水泥循環降溫的實驗設置及實驗結果，實驗樣品為套管-水泥-橡膠的圓柱樣品，注入低溫二氧化碳至-6 至-9°C，量測套管內側與橡膠外側的溫度變化，實驗證實在冷卻循環下，套管內及橡膠外側溫度有明顯落差，但並無發生破壞。

本研究參照上述實驗，以 CMG 公司的 GEM 模擬器仿照實驗裝置建立 3D 模型，進行熱力耦合模擬並歷史擬合實驗結果，歷史擬合完成後證實該模擬器可以還原實驗現象；第二部份，建立地層尺度的 2D 模型，網格材質包含套管、水泥、蓋岩及儲層，進行熱-水-力耦合數值模擬，並觀察網格中破壞風險安全係數隨時間的變化。本研究中，破壞風險安全係數包含 SF 及 TSF，SF 係基於莫爾庫倫破壞理論(圖 13)造成的剪切破壞(Shear failure)，TSF 則描述拉張破壞(Tensile failure)。SF 若越接近 0 代表越容易發生剪切破壞，該情形代表有效應力莫爾圓越接近破壞包絡線；TSF 同樣也是越接近 0 越容易發生拉張破壞，該情形代表莫爾圓的最小水平主應力越接近圖 11 的原點位置，SF 及 TSF 計算式如圖 12 所示。

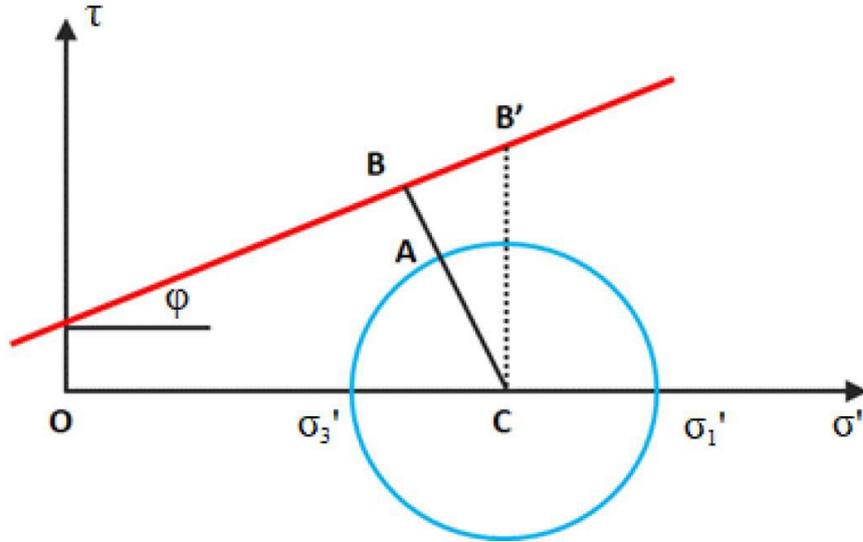


圖 11 莫爾-庫倫破壞準則示意圖

$$SF = 1 - (\text{minimum}(1, CA / CB))$$

$$CA = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$$

$$CB = \cos(\varphi) \cdot CB'$$

$$TSF = \frac{\sigma'_3}{\sigma_3}$$

圖 12 本研究破壞風險安全係數 SF 及 TSF

圖 13 為仿照實驗裝置建立的 3D 模型，模型中心包含兩口井注入井及生產井，用注入及生產二氧化碳實現反覆冷卻循環效果，由內而外的網格包含套管、水泥、絕緣層(如實驗的橡膠)及邊界，各材質的初始輸入參數如表 4 所示，經過 CMOST 模組不確定性分析後完成歷史擬合(圖 14)，主要調整參數係將水泥材質之孔隙率下降約 10 倍，證實該模擬器可以用來模擬井筒完整性的評估，後續將進一步模擬地層尺度下包含地層及井筒材質的數值模擬。

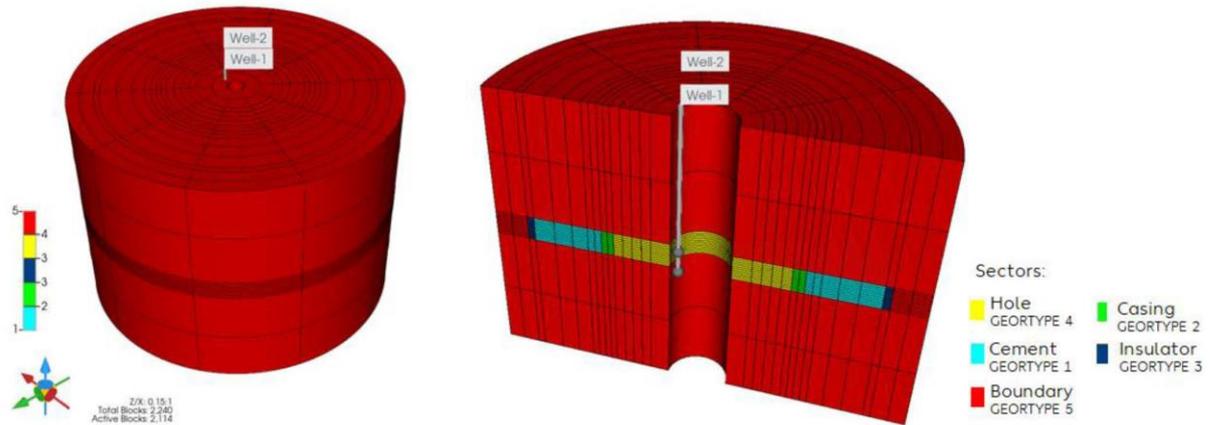


圖 13 實驗尺度 3D 模型

表 4 實驗尺度 3D 模型初始參數

Properties	Casing (Steel)	Cement	Insulator
Density (kg/m3)	8000	2300	1400
Compressibility (1/kPa)	7.2e-9	7.2e-8	8.95e-6
Thermal Expansion coefficient (1/K)	12e-6	13e-6	160e-6
Thermal Conductivity (W/mK)	50	1.25	0.25
Specific Heat Capacity (J/m3K)	3.6e6	3.7e6	1.7e6
Young Modulus (GPa)	200	25	0.0067
Poisson's Ratio (-)	0.26	0.2	0.49
Dimensions (m)	0.076m-0.084m	0.084-0.145m	0.145-0.151m
Porosity (-)	1e-6	0.01	1e-6
Permeability (mD)	0	0.001338	0

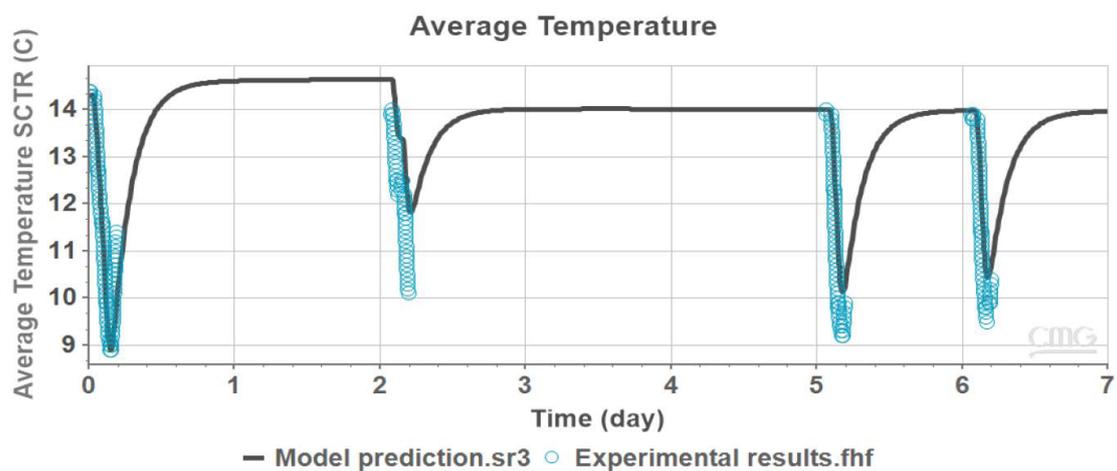


圖 14 實驗尺度 3D 模型歷史擬合成果

地層尺度 2D 模型(圖 15)係基於 Dan North Sea 的鹽水層進行建立，網格材質包含套管、水泥、儲層、穿孔、粉砂岩 1、粉砂岩 2 及蓋岩，各材質之參數參數如表 5，初始壓力為 187 bar @ 1708m，初始溫度為 60°C，地層注入溫度為 20°C，持續注入之地層壓力限為 250 bar。

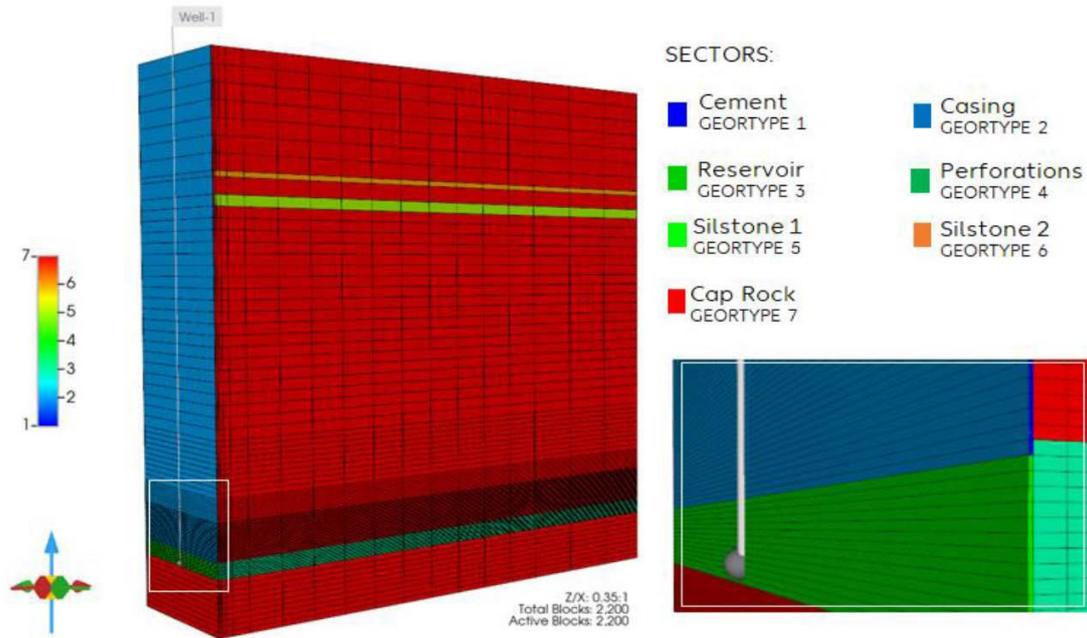


圖 15 地層尺度 2D 模型

表 5 地層尺度 2D 模型使用參數

Properties	Casing (Steel)	Cement	Reservoir	Caprock
Density (kg/m <sup>3</sup> )	8000	2300	2123	2400
Compressibility (1/kPa)	7.2e-9	7.2e-8	1.59e-6	1.45e-6
Thermal Exp coef (1/K)	12e-6	13e-6	11e-6	10e-6
Thermal Conductivity (W/mK)	50	1.25	2	1.67
Specific Heat Capacity (J/m <sup>3</sup> K)	3.6e6	3.7e6	1.95e6	1.84e6
Young Modulus (GPa)	200	25	19	2.76
Poisson's Ratio (-)	0.26	0.2	0.2	0.28
Porosity (-)	1e-6	0.01	0.34	0.15
Permeability (mD)	0	0.001338	700	0.0001
Experimental Param. C (-)	N/A	300	8	19

數值模擬結果顯示，在空間分布上，不論在儲層頂部或是蓋層底部，距離井筒越近的地方，溫度越低，地層溫度約 60°C，近井筒處約 45°C；SF 及 TSF 皆低於距離井筒越遠的地方(圖 16)，代表靠近井筒的地方破壞風險較高，且 TSF 小於 SF，代表拉張破壞風險高於剪切破壞風險。另一方面，本研究比較靠近注入井的網格{3,1,85}以及距離井筒距離約 140m 的網格{20,1,85}(圖 17)，近井網格之 SF 及 TSF 從注入開始就有下降趨勢，在 9 個月後溫度差超過 10°C 且壓力超過 230 bar 後數值有明顯再次下降；反觀遠井網格溫度始終與地層溫度相當，沒有明顯降溫，且 SF 及 TSF 都沒有明顯下降趨勢。整體而言，在本研究條件下，拉張破壞風險明顯高於剪切破壞風險，且可能好發於儲層內近井筒的地方。

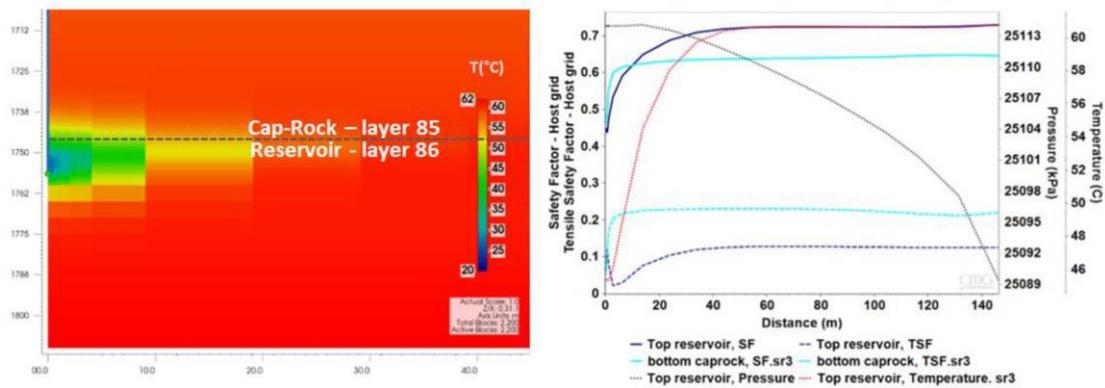


圖 16 蓋層底部及儲層頂部 SF 及 TSF 與井距離的變化

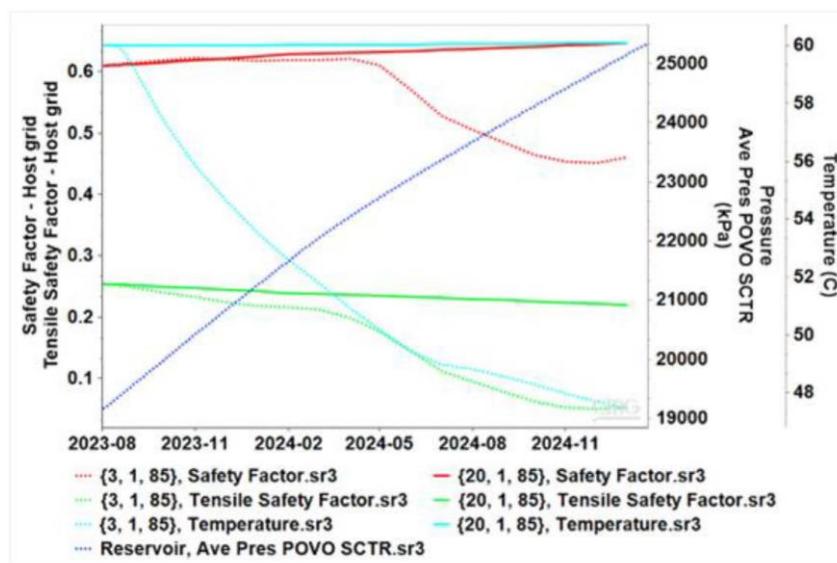


圖 17 近井網格{3,1,85}及遠井網格{20,1,85}之 SF 及 TSF 隨時間變化

## 肆、心得及建議

本次出國參加 SPE 歐洲研討會，提出以下幾點心得與建議：

### 一、研討會發表論文與本所研究方向趨勢相似，有助提升本所研究品質

上面 3 篇摘錄較詳細的論文恰好與本所近年的研究方向具有直接關聯性，且這些發表論文有提供詳細的方法理論及數據，可有效提升公司內相關研究的品質。事實上，本研討會的論文範疇相當廣泛，但本公司尚未正式營運碳封存場址或地熱場址，現階段仍偏重於前期研究，例如本所同樣有進行二氧化碳注入的數值模擬，但著重探討封存量及封存範圍等，尚未涉及注入後的單井完整性研究。相信未來本公司正式經營相關場址後，研究方向亦可以更加廣泛，跟上國際趨勢腳步。

### 二、鼓勵同仁參與國際性研討會，促進交流與提升公司能見度

現階段公司正在逐步建立碳封存及地熱相關技術，在國內本公司可處於領先地位，但在國外已有許多場址及案例已在營運階段，儘管在營運初期不太會公開發表文獻，但隨著時間推移，在營運成熟後相信在國際研討會上將會有更多的場址文獻被公開發表，建議公司內研究同仁可以多參加國際性研討會，現場與國際專家學者面對面交流，提升自身眼界與公司能見度。

### 三、國際研討會主題逐漸聚焦新能源轉型，建議持續參與

此次 SPE 歐洲研討集中討論 CCUS、地熱及氫能，顯示國際研討會主題已日漸多元化，且新能源已能夠獨立成為研討會的主題。此外，在 SPE 的規劃中，預計 114 年會在東京及馬來西亞分別舉辦以 CCUS 為主題的小型交流會(Workshop)及大型國際性研討會，建議本所未來持續派員參與國際性研討會議。

#### 四、強化外語能力，建議參展前觀看相關主題外語影片以培養語感

參加國外研討會具有相當多好處，例如與國外專家面對面交流，但是這些好處必須建立在一定的基礎語言能力上，本次出差地點為義大利，該國的主流語言為義大利文，當地人士在講英文時會有一定的口音，這些口音在國內自學英文時相當少見，個人發現在一些常用的字眼上，口音的影響不大，仍然可以辨識及進行交流，但在一些專業或少見的用詞上，口音的影響就非常顯著，會嚴重影響聆聽論文的學習效果，建議往後同仁在出國前可以先自行聆聽與研討會主題有關的外語影片，提前培養語感，以提升參加研討會的效果。