出國報告（出國類別：開會）

參加國際負碳技術發展相關研討會 (SPE Advances in Integrated Reservoir Modelling and Field Development Conference and 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：阿布達比
出國期間：**114** 年 **05** 月 **31** 日至 **06** 月 **05** 日
報告日期：**114** 年 **06** 月 **16** 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，公司內各單位如探採研究所(以下稱本所)及探採事業部已開始積極推動碳封存相關計畫，碳封存的工作項目大致包含盤點二氧化碳排放源，探勘合適封存二氧化碳的地下儲層，詳細評估儲層特性，與此同時，也要考量地面開發的可行性，同步進行地面灌注設備設計及提出灌注計畫，工作範圍橫跨地表至地下數千米，需要倚靠不同學科領域的專家共同努力方可達成。

本所為了順利推動碳封存計畫以及觀察國際研究趨勢等目的，本次配合「參參加國際負碳技術發展相關研討會」出國計畫，派員赴中東地區阿布達比參與國際性研討會「SPE Advances in Integrated Reservoir Modelling and Field Development Conference and Exhibition」，本次出國任務旨在學習及觀察目前碳封存技術趨勢，本所為中油公司重要的研究單位，以技術支援方式全力協助公司推動碳封存計畫，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。

經過三天議程，本次任務順利達成，研討會發表的文獻雖然仍集中於石油及天然氣礦區，但仍有不少碳封存相關的發表文獻，本報告細部探究的三篇論文，皆聚焦於碳封存場址的技術研究，主題分別是二氧化碳雜質影響、二氧化碳流體-岩石化學反應數值模擬以及三維地質力學模擬，這三項主題皆與本所已進行或是規劃中的研究計畫方向一致，證明本所研究方向與國際趨勢大致相同，雖然這國際文獻的場址特性與本公司自有場址特性不盡相同，但是文獻內使用技術方法及理論依據皆為公開發表驗證，未來若應用於本所的研究計畫，相信可以有效提升研究成果品質，建議未來可以繼續派遣同仁參與國際型研討會，讓公司及同仁持續成長。

目 次

摘 要..... 1
目 次..... 2
壹、 目的..... 3
貳、 過程..... 4
參、 具體成效..... 11
肆、 心得及建議..... 23

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積極推動碳封存相關計畫,碳封存的概念是將二氧化碳灌注至地下岩層，合適的地下岩層須具備相當的孔隙空間以及頂部封阻，此類岩層可以長時間穩定的封存二氧化碳，目的是降低大氣中的二氧化碳濃度，減緩溫室氣體對氣候的衝擊。碳封存的工作項目大致包含盤點二氧化碳排放源，探勘合適封存二氧化碳的地下儲層，詳細評估儲層特性，與此同時，也要考量地面開發的可行性，同步進行地面灌注設備設計及提出灌注計畫，因此碳封存的概念雖然簡易，但工作範圍橫跨地表至地下數千米，需要倚靠不同學科領域的專家共同努力方可達成。

本所為了順利推動碳封存計畫以及觀察國際研究趨勢等目的，本次配合「參參加國際負碳技術發展相關研討會」出國計畫，派員石油開採工程師赴中東地區阿布達比參與國際性研討會「SPE Advances in Integrated Reservoir Modelling and Field Development Conference and Exhibition (以下稱 SPE 阿布達比研討會)」。此研討會由石油工程師協會(Society of Petroleum Engineers, SPE)主辦，會議地點位於阿布達比的能源中心(Abu Dhabi Energy Center)，一共舉行三天會議，其與會成員多來自各國，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碳封存亦有涉及 AI 人工智慧的議題,同時段中有多個會議廳進行論文發表,因此優先參加碳封存相關的論文發表,參與議程包含實驗評估、地質力學及數值模擬。

本次出國任務旨在學習及觀察目前碳封存技術趨勢，本所為中油公司重要的研究單位，以技術支援方式全力協助公司推動碳封存計畫，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 6 天，主要行程為參加 06/02 至 06/04 舉行之 SPE 阿布達比研討會，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
114/05/31(六) 114/06/01(日)	2	桃園機場- 阿布達比	啟程
114/06/02(一) 114/06/04(三)	3	阿布達比	參與研討會
114/06/04(三) 114/06/05(四)	1	阿布達比- 桃園機場	06/04 會議結束當晚返程
合計	6 天		

SPE阿布達比研討會簡介及議程

SPE 阿布達比研討會會場包含報到處(圖 1)、中央展場及多間技術議題演講會議室，中央展場有大約 3 至 4 家贊助廠商(圖 2)進行展示，本次會議的技術議題是在會議室，發表人固定報告時間為 10 分鐘，再開放 5 至 10 分鐘進行現場問答，部分論文以電子海報(圖 3)方式呈現於中央展場，在固定的時段發表人會出席解說研究成果，以螢幕展示投影片呈現，時間上較為彈性，可以進行較長時間的交流。

圖 1、研討會報到處

圖 2、研討會主辦方、贊助商及展示廠商

圖 3、論文海報發表與交流

展示場商最大的攤位為阿布達比國家石油公司(ADNOC)及石油服務公司 SLB，兩者以 AI 為主題進行展示，ADNOC 公司展示其 AR 360 計畫，該計畫是與 SLB 公司合作推動將人工智慧導入油田管理，較顯著的優點在於可以將所有地層資料導入單一平台進行集中管理，相比於傳統工作流程需要反覆切換軟體，AR 360 可以實現在單一平台完成所有工作流程，並且可以利用人工智慧與機器學習協助工程師制定布井計畫，但於現場僅有簡易的影片介紹，並無實際展示該平台的細節，實屬可惜。

SLB 公司則是推廣 Innovation Factori 服務項目，經廠商介紹，此工作項目的緣由是近年來中東地區石油公司，例如 ADNOC，紛紛提出客製化 AI 的需求，最初服務公司提出了各種雲端 AI 服務，讓客戶可以省去花費大量金錢購買高端算力工作站，也可以享受 AI 服務，但中東石油公司基於保密原則不希望將礦區資料上傳至雲端，因此提出本地化及客製化 AI 的需求，本地化指的是將 AI 系統建置在公司內部網域，僅於公司內部使用，可以免除資料外洩等風險，客製化指的是針對不同需求量身訂做運算系統，例如歷史擬合輔助系統(圖 4)，傳統的歷史擬合需要反覆調整參數，運行非常多組參數敏感度分析，經由人為判斷選擇最優的參數組合，這項服務的工作流程須先設定可調參數的不確定性範圍，例如滲透率及孔隙率等，從這些參數範圍中隨機挑選十數組運行數值模擬，以 30 組數值模擬為例，接續透過機器學習，由 AI 判斷可調參數對於 30 組模擬結果的影響度，並直接給出最佳的參數解，過程中可以大幅減少人為判斷或操作的時間。

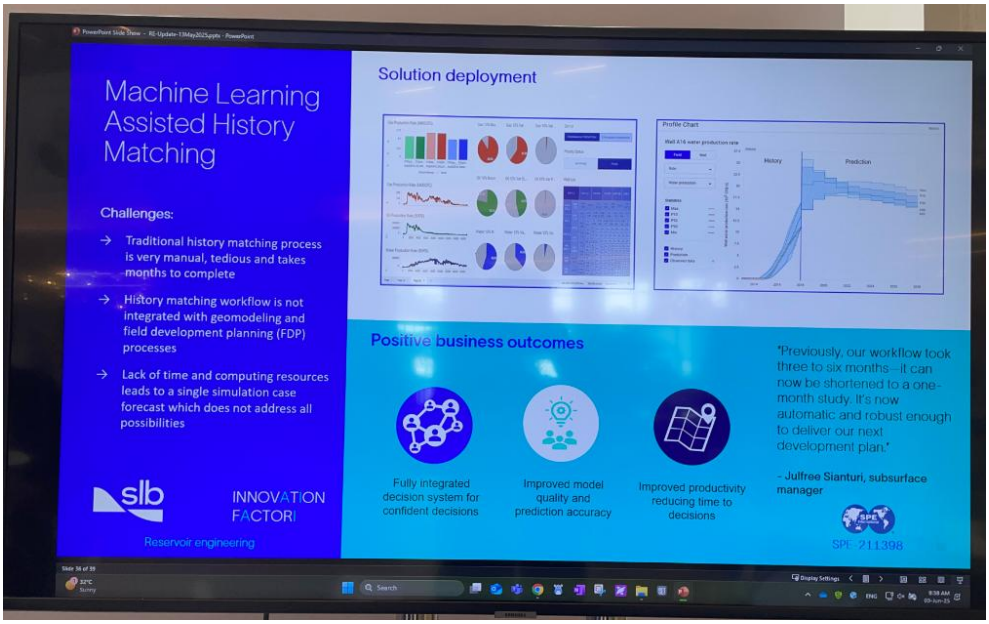


圖 4、歷史擬合機器學習

此外，有另一家 GeoCruiser 公司(又稱北京地航公司)也提出相當有創意的 AI 服務，該公司過去有自行發展地質建模軟體、數值模擬軟體、震測解釋軟體等多套軟體，考量學習多套軟體需要花費相當多的時間成本，近期該公司正在研發一套 AI Agent 系統，使用者僅須透過聊天對話視窗下達指令，AI 系統便會自動開啟並操作各項軟體，最後回饋操作結果，如此便可以省去學習軟體操作的時間。但

是這套系統仍在研發階段，尚未有具體成果，現場展示的是正在開發中的聊天對話視窗(圖 5)，現有功能正在訓練該 AI 模型閱讀礦區生產數據，並給出生產數據的看法及操作建議。

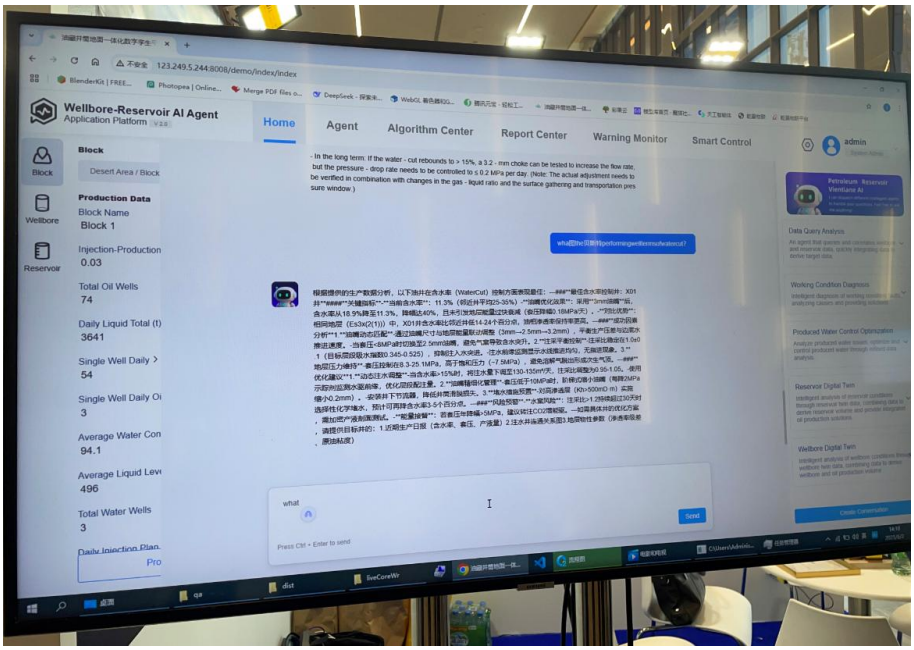


圖 5、AI Agent 系統聊天室窗介面

整體而言雖然展示的廠商不多，但是 5 家廠商中就有 3 家在展示 AI 服務，可以感受到石油業界也受到 AI 風潮的影響，正在積極的將 AI 導入工作之中。

第一天的議程起始於 SPE 主席 Olivier Houzé 的演講，提及 SPE 的未來規劃，內容引用國際能源署(IEA)對於未來碳排放量及氣溫預測，許多國家都有提出減碳政策，導致石油公司逐漸投入碳封存領域以及地熱領域，並提到 SPE 也想發展碳封存版本及地熱版本的蘊藏量規範，石油及天然氣長久以來都是依據 PRMS 規範將蘊藏量或資源量依照佐證程度進行分類，基於此規範的架構，SPE 已經於 2017 年公布初版的碳封存領域 SRMS 規範，目前仍在根據產業發展狀況逐步修正中，在地熱領域 SPE 同樣規劃提出 GRMS 規範(圖 6)，但經過網路搜尋，GRMS 規範目前尚未發布，研判應處於研擬階段。

因應 AI 趨勢，SPE 也在規劃 Energy LLM 項目(圖 7)，已與沙烏地阿拉伯的國家石油公司 Aramco 及軟體公司 i2k Connect 簽訂備忘錄，希望可以打造能源行業的大型語言模型，預期可以更加智能的搜尋 SPE 技術論文資料庫或導覽論文的技術細節。

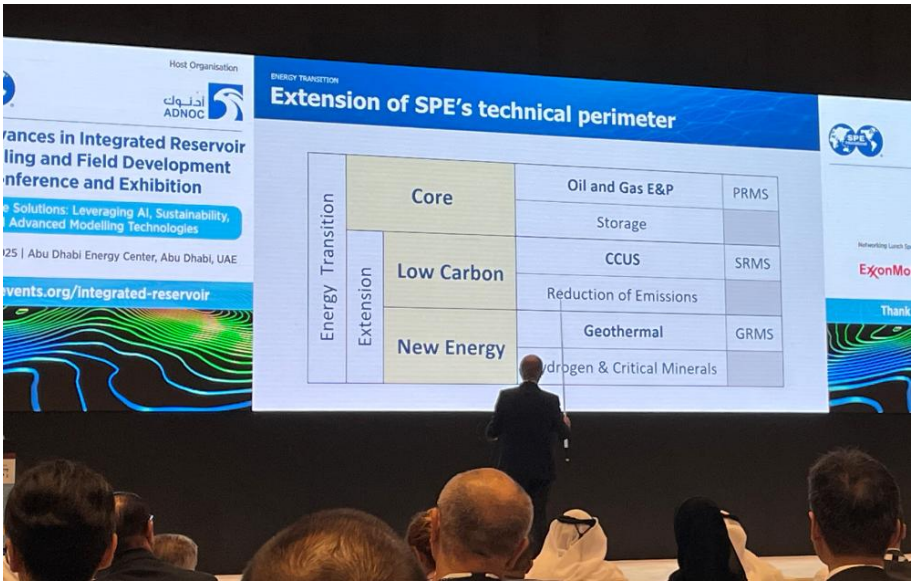


圖 6、SRMS 及 GRMS 規劃

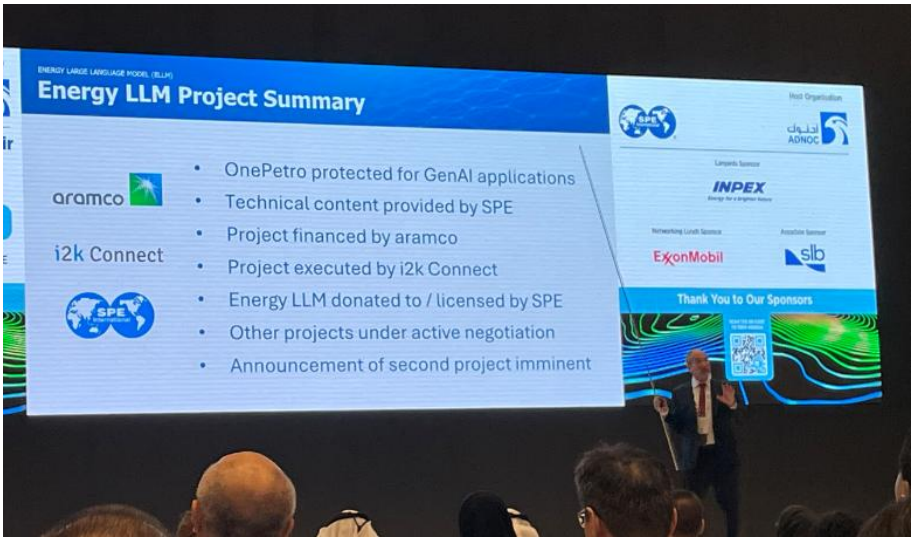


圖 7、Energy LLM 計畫

本次研討會與過往 SPE 研討會一樣，在技術論文發表之餘會穿插一些專題討論，形式上會有 1 位主持人以及數位行業內的專家人員在台上透過問答方式討論特定主題，同時也開放觀眾向台上的專家互動，其中有一場專題討論的內容較為有趣，該場專題題目為「以人工智慧與數據分析重塑油氣田開發(Transforming Field Development with AI and Data Analytics)」，參與討論的專家有 ADNOC 公司岩石物理專家、AI 公司創辦人及 INPEX 公司資深人員，開頭先討論 ADNOC 公司及 INPEX 公司是在什麼樣的原因開始嘗試使用 AI，ADNOC 公司提到公司經過數十年的發展，早已有規模非常龐大的礦區資產，其中有許多礦區已投產超過數十年，這些資料量體實在太過龐大，如果有某些礦區需要增產或修井的時候，時常需要

閱讀大量的歷史資料，所以他們開始嘗試應用 AI 來彙整這些資料，能更有效率的管理礦區資料； INPEX 公司表示過去確實較少使用 AI，此專家的專業領域是在實驗室，實驗室曾經嘗試使用 AI 預估實驗結果，雖然不符合實驗精神，但過去有做過嘗試；主持人的下一個問題是在使用 AI 的過程中是否有遇到挑戰，ADNOC 公司回覆現在使用 AI 工具的最大挑戰是如何創造獲利，目前的 AI 應用大多是在節省時間、流程自動化以及增加效率，這些優點會被公司認為是節省成本，但不屬於創造獲利，因此在這一點上仍然存在瓶頸。AI 公司針對此回答進行補充，AI 已經開始應用在優化油田生產，例如歷史擬合、井位規劃或是生產策略調整等，雖然人們往往不這麼覺得，但這些因為 AI 所新增的蘊藏量都應該要屬於額外獲利。

ADNOC 公司繼續提到另一個挑戰是地質、地物、鑽井及生產等石油專業人員與 AI 專業人員的合作，這兩種專業人員通常不屬於同一家公司，異業合作產生了很多預期以外的溝通問題，導致專案進度落後。AI 公司補充，這在 AI 發展初期確實是一個很大的挑戰，但目前有越來越多的石油專業人員轉換跑道，加入 AI 公司專門服務石油公司，所以這個問題應該會逐漸得到改善。

主持人接續提出一個比較開放式的問題，可能也是很多專業人員曾經想過的問題，請問 AI 有沒有機會取代人類的工作，ADNOC 公司及 INPEX 公司都表示，現今的 AI 程度還不足以完全取代長期訓練的專業人員，但 AI 公司則表示這件事未來有可能會發生，AI 能無時間限制的學習，也可以在下班時間繼續工作，這個優點人類無法匹敵。在討論此問題時，有許多台下與會人員也發表看法，大多數人的看法都認為無法取代或不能取代，其中一位的說法令人印象深刻，他說 AI 需要很大量的數據或案例去學習，還不一定能完成訓練，但是人類不用，人類只需要一次的教訓(Lesson learned)，例如解雇或降薪，就可以非常迅速的學習到失敗經驗，這點 AI 也無法比擬。

雖然展場以及專題的部分探討許多 AI 事宜，但研討會的技術論文發表仍以石油及碳封存領為主，每項專業領域會有約 5 篇論文口頭發表，因這些主題會在同一時間內的不同會議室同時報告，無法全部聆聽，此次行程依據論文標題和所內業務的相似性進行挑選，CCUS 與負碳技術應用(CCUS and Decarbonisation Applications)、儲層評估及地質力學(Formation Evaluation and Geomechanics)、歷史

擬合及不確定性分析(History Matching and Uncertainty Analysis)以及場址發展技術(Advances in Field Development)進行聆聽，從論文中汲取的知識及成果詳如下一章節敘述。

參、具體成效

SPE 阿布達比研討會發表論文眾多，以下篩選三篇技術論文，皆以碳封存場址為研究背景且技術主題與本所業務直接相關，進行細部研討後，未來可以將相關理論或技術應用於研究中。

SPE-225647-MS

Carbon Storage in Depleted Oil Reservoirs: Experimental Investigation of CO_2 Impurities Impact

此篇論文以實驗方法探討二氧化碳雜質對於灌注至枯竭油氣層可能產生的影響。在理論研究上，我們經常於灌注氣體為 100%二氧化碳的假設條件下進行推論或計算，但是實務上，經由工程手段捕捉的二氧化碳幾乎都會含有雜質，因此妥善處理與應對這些雜質，對於增進採油(EOR)及碳封存應用而言均有顯著影響。這些雜質會改變二氧化碳與地層原油間的物理與化學反應，進而影響溶解度、相態行為、黏度降低與注入流動等關鍵特性，Bachu(2009)的研究說明碳氫化合物、氮氣、一氧化碳、氧氣等雜質會改變二氧化碳的物理及熱力學性質，進而對碳封存量產生正面或負面影響，實際結果取決於雜質濃度與儲層特性。因此，本研究針對氮氣與甲烷對二氧化碳在油中溶解度及擴散性進行探討，並且研究在不同溫度及壓力下，灌注二氧化碳後油品的相態行為變化。

本研究使用來自美國德州 Eagle Ford 油田的枯竭油藏樣品，其為輕成分已經完全揮發的死油(Dead oil)，並設計了 3 種氣體配方注入油樣進行比較，分別為(1) 100% 二氧化碳；(2) 90%二氧化碳及 10%雜質；(3) 71%二氧化碳及雜質，雜質成分與比例如表 1 所示。

表 1、3 種實驗氣體成分

Compound	Pure CO_2	90%-mix	71%-mix
CO_2	100%	90.05%	71.48%
N_2	-	6.96%	19.86%
CH_4	-	2.98%	8.66%

首先，先將實驗氣樣注入測試瓶(PVT Cell)，再將油樣注入測試瓶，並維持壓力 3,000 psi 及溫度 200°F，測試瓶維持封閉狀態，讓二氧化碳逐漸擴散(Diffuse)至

油中直至系統達到平衡，等待過程中藉由測試瓶內的攝影機拍攝，分析流體體積以釐清平衡過程的動態行為。系統平衡後，移除未溶解的氣樣，油樣進行定質量膨脹試驗(Constant Mass Expansion, CME)，求得泡點壓力、氣油比、壓縮度及相對體積等，最終再以氣相層析儀(Gas Chromatography, GC)進行組成分析，分析注氣後的油品組成變化。

結果顯示，二氧化碳包含的雜質甲烷及氮氣會明顯影響氣體在此油樣的溶解度(Solubility)及擴散度(Diffusion)，100%二氧化碳的溶解速率最高，達成平衡時間為 154 分鐘，系統平衡壓力為 2,133.88 psia；90%二氧化碳的溶解速率較慢，但仍快於 71%二氧化碳，71%二氧化碳的溶解速率最慢，需耗時 186 分鐘，且平衡壓力也最高，達 2,479.03 psia。

CME 試驗結果如圖 8，90% 二氧化碳與 100% 二氧化碳具有相似的趨勢，即溫度越高，飽和壓力與體積膨脹越大。90%二氧化碳的泡點壓力略高，說明雜質存在會抑制相穩定性，需更高壓力才能達到飽和狀態，但 71%二氧化碳的泡點壓力顯著較低，這可能是因為氣體溶解度較低，以及壓力衰減過程中氣液交互作用較弱所導致。

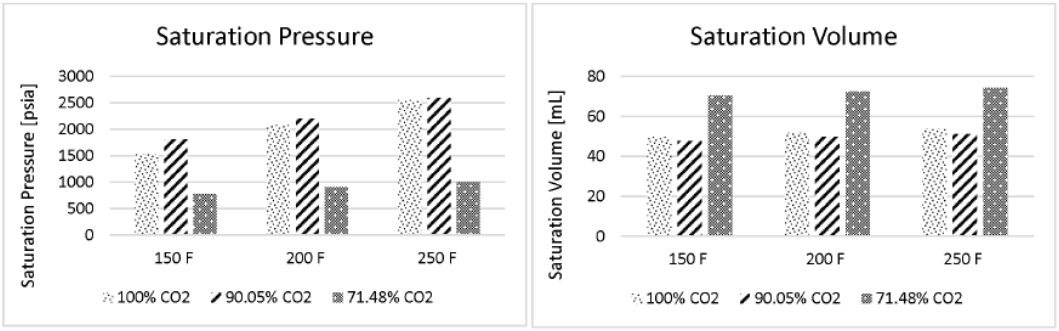


圖 8、CME 試驗之泡點壓力(左)及飽和體積(右)

GC 分析顯示，在實驗條件下於油樣中注入二氧化碳，會改變油中烴類的組成，二氧化碳高碳鏈烴分解(Break)為較短的碳鏈。如表 2 所示，原始油樣中約有 25%的 C_{15+}烴類(指 C_{16}、C_{20}、C_{21}及 C_{36})，而加入 100%二氧化碳後的混合物中，最高碳鏈只剩 C_{15}；同時，額外加入甲烷後，高碳鏈烴類比例及最高碳鏈將再次下降，90%二氧化碳的情境下，最高碳鏈為 C_{12}；70%二氧化碳的情境下最高碳鏈為 C_{10}，如表 3。

表 2、原始油樣 (注氣前) GC 檢測結果

Compound	Mole %	Compound	Mole %
C_5H_{12}	9.14	C_9H_{12}	2.53
C_6H_{12}	3.42	C_9H_{20}	2.27
C_6H_{14}	1.26	$C_{10}H_{22}$	6.21
C_7H_{16}	9.25	$C_{11}H_{24}$	8.34
C_7H_{14}	0.89	$C_{12}H_{26}$	11.8
$C_7H_{13}Br$	0.63	$C_{14}H_{30}$	4.18
C_7H_8	2.52	$C_{15}H_{28}$	5.18
C_8H_{10}	5.31	$C_{16}H_{34}$	12.56
C_9H_{20}	0.76	$C_{20}H_{42}$	3.42
C_9H_{18}	1.77	$C_{21}H_{44}$	1.52
C_9H_{12}	2.53	$C_{36}H_{74}$	7.04

表 3、注氣後油樣 GC 檢測結果

100% CO2			
Retention Time	Formula	Mass	Composition
1.28	C5H12	72	1.887056
1.47	C7H16	100	16.35364
1.52	C8H18	114	8.068879
1.606	C6H14	86	24.26251
1.606	C7H14	98	9.064472
1.742	C9H18	126	9.423343
1.742	C10H20	140	9.423343
1.92	C6H12	84	13.51239
1.92	C8H16	112	4.089045
2.447	C11H22	154	0.553672
4.98	C10H22	142	0.441922
9.9	C13H28	184	0.452081
11.37	C15H32	212	0.596848
14.2	C14H30	198	1.870801

90% CO2			
Retention Time	Formula	Mass	Percent
1.277	C5H12	72	2.012861
1.469	C7H16	100	7.717501
1.469	C6H14	86	26.24593
1.52	C8H18	114	9.264352
1.611	C12H20	164	9.816919
1.74	C9H18	126	10.2081
1.74	C10H20	140	10.2081
1.74	C8H16	112	10.2081
1.92	C6H12	84	4.54562
1.92	C7H14	98	4.54562
1.92	C12H24	168	4.54562
2.44	C11H22	154	0.681285

71% CO2			
Retention Time	Formula	Mass	Percent
1.27	C5H12	72	2.408535
1.465	C6H14	86	19.60207
1.52	C8H18	114	10.8155
1.596	C9H20	128	11.52235
1.69	C7H16	100	10.31154
1.74	C9H18	126	11.89214
1.74	C10H20	140	11.89214
1.92	C6H12	84	5.370116
1.92	C8H16	112	16.18561

本研究證實甲烷及氮氣雜質對二氧化碳在黑油中的溶解與擴散行為具有顯著影響，二氧化碳純度下降會降低其溶解效率並改變油品相行為。本公司目前評估中的場址多屬鹽水層，並非枯竭油氣層，但上述研究成果凸顯灌注氣體雜質比例的重要性，可做為日後篩選場址及評估時的重要參考。

SPE-225321-MS

High-Performance Modeling of Rock-Fluid Interactions Driven by Chemical Alterations in Mineral CO_2 Storage

本篇論文旨在探討二氧化碳封存中岩石-流體交互作用的高效率數值模擬。完整的二氧化碳封存行為，須在多相態及多組份系統中準確地模擬流體流動，同時考慮化學與相態變化，與可變形、具反應性的母岩(Host rock)之間的熱交互作用，尤其是在碳酸鹽岩地層中，因為其含有大量的亞穩定(Metastable)礦物，更易發生礦物置換與再結晶現象，準確的模擬是不可或缺的重要項目。

本研究簡化 Khakimova 與 Podladchikov (2024)的耦合 H-M-C 模型，H 代表流體流動，M 代表地質力學，C 代表化學反應，三者之間能夠達成耦合模擬的模型，並使用平行運算架構及高效的 GPU 加速運算。本文聚焦於岩石-流體交互作用中的化學變化，流體指的是超臨界二氧化碳-鹽水與二氧化碳-二氧化硫-一氧化氮-鹽水，實際反應過程中可能有超過 100 種水相物種與礦物於系統平衡下溶解，本研究應用於模擬 100%二氧化碳或含二氧化硫和一氧化氮雜質的二氧化碳注入碳酸鹽儲層的情境作為模擬範例。

此一維模型設定儲層深度為 2,000 公尺，溫度為 60˚C，壓力為 10 MPa (約 1450 pisa)，初始孔隙率為 0.3，此模擬考量的元素包括鉀(K)、鈉(Na)、鋁(Al)、鐵(Fe)、矽(Si)、鎂(Mg)、鈣(Ca)、碳(C)、氫(H)、硫(S)、氯(Cl)及氧(O)，二氧化碳由模型的左側邊界注入，隨著流體與岩石產生化學反應，逐漸形成新礦物，改變母岩性質，圖 9 為在平衡狀態下的礦物相分布以及二氧化碳於水相及礦物相的濃度分布，本模型可計算礦物包含方解石(Calcite)，顯著含量的石英(Quartz)、硬石膏(Anhydrite)、雲母(Muscovite)、白雲石(Dolomite)、綠泥石(Chlorite)及高嶺石(Kaolinite)，值得一提的是，礦物相分佈與水相物種分佈皆非預設，而是透過同時計算得出，可涵蓋 205 種礦物相、5 種氣體及 116 種水相物質。

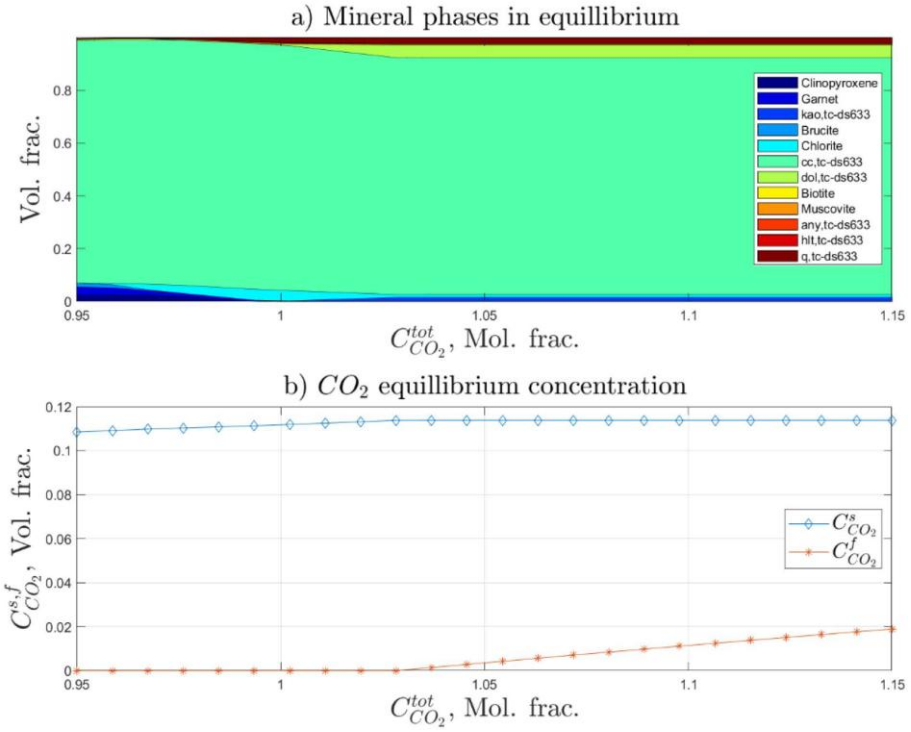


圖 9、一維模型礦物相分布(上)以及二氧化碳在水相及礦物相的濃度分布(下)

圖 10 所展示的數值模擬結果，聚焦於在雜質含量較低的條件下，儲層中礦物相與二氧化碳濃度於注入後第 46 天的表現。圖 10(a)顯示反應前緣的發展與推進過程，左側表示反應前緣通過後的礦物相分佈，右側則為岩石的初始狀態。此圖說明了二氧化碳與儲層岩石反應時，礦物相如何變化；圖 10(b) 呈現了鹽水中二氧化碳濃度分佈，反應前緣處(左側)固體相中二氧化碳濃度明顯較高，顯示礦物反應正在消耗二氧化碳，導致反應前緣的固體相二氧化碳濃度明顯上升；圖 10(c) 展示了各礦物相的相對體積分佈，為了視覺效果此圖扣除最大比例的方解石，顯示方解石與綠泥石轉變為白雲石與高嶺石的反應十分明顯；圖 10(d) 則呈現了流體與固體中二氧化碳濃度的平衡關係圖，紅線表示等溫線(Isotherm)，等溫線上的顯著跳動對應到反應前緣的急劇形成。

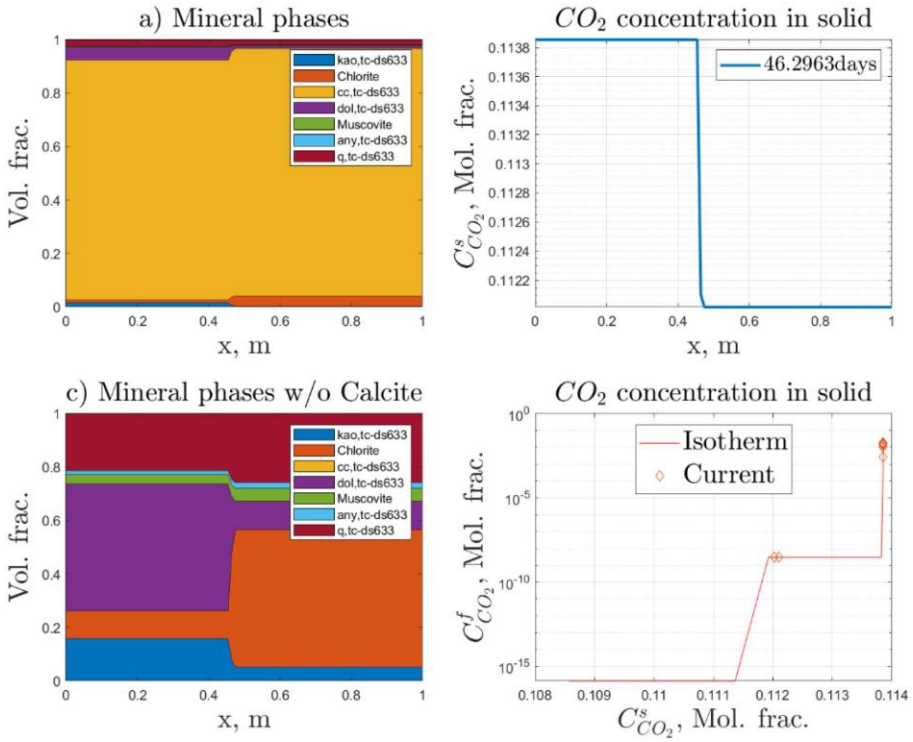


圖 10、注入後第 46 天模擬結果(a 左上)礦物相分布 (b 右上) 礦物相內二氧化碳濃度 (c 左下) 礦物相分布(扣除方解石) (d 右下) 礦物相內二氧化碳濃度等溫線

圖 11 展示在雜質較低的系統條件下，於注氣後第 46 天的重要結果。圖 11(a) 呈現孔隙率分佈圖，說明反應前緣推進對孔隙度的影響。圖左側為反應前緣通過後的孔隙度分佈，右側則為反應發生前的初始孔隙度。結果顯示反應前緣會導致孔隙度略為下降，但變化不大，說明整體模擬期間內孔隙度未出現顯著降低；圖 11(b)呈現固體相中二氧化碳濃度的分佈，該濃度曲線顯示二氧化碳於水中的移棲程度；圖 11(c)呈現 pH 分佈圖。在反應前緣附近，pH 發生劇烈變化，該區域為礦物反應與二氧化碳溶解最活躍的區段。反應前緣影響區域的 pH 明顯下降，顯示此處因解離反應而產生酸性條件，超出該區域後，pH 恢復穩定，反映出反應前緣通過後已達成平衡狀態；圖 11(d) 呈現幾個主要水相物質的分佈情形，在反應前緣附近呈現明顯的濃度峰值變化。

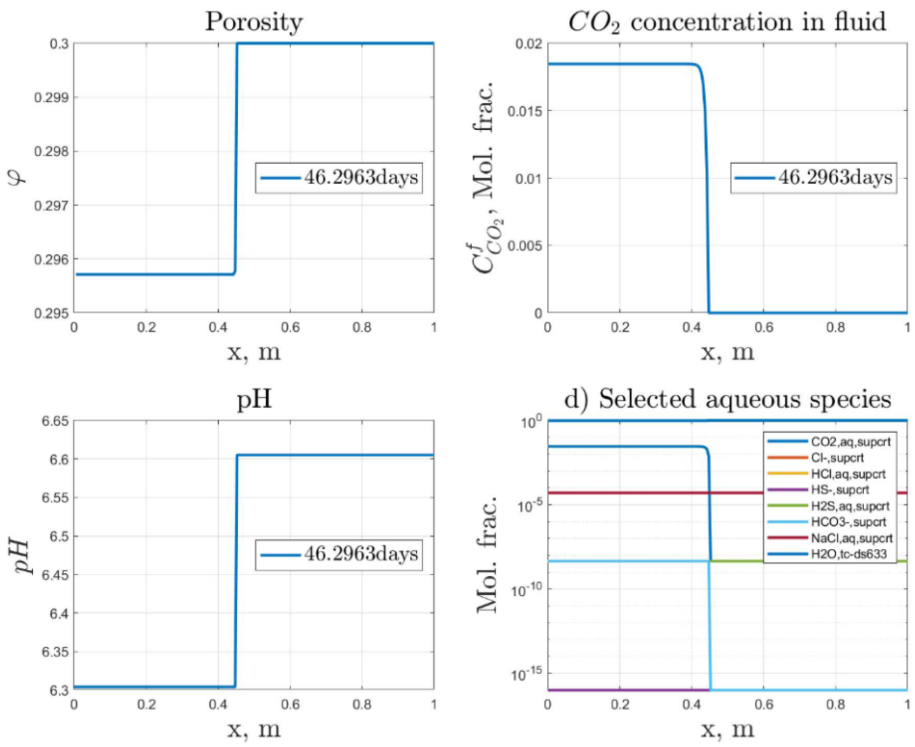


圖 11、注入後第 46 天模擬成果，(a 左上)孔隙率分布 (b 右上)水相二氧化碳濃度分布 (c 左下)pH 值分布 (d 右下)水相物質分布

模擬結果顯示，將二氧化碳注入以方解石為主的碳酸鹽儲層，會導致有限程度的白雲石化作用，並因綠泥石含量的減少而伴隨孔隙度的些微下降。在碳酸鹽儲層的岩石基質中，二氧化碳具有一定程度的礦物封存潛力，但規模有限。模擬中的反應前緣呈現尖銳且突變的界線，而非漸進式過渡區，這主要由達西流動所決定，和岩石滲透率產生的壓力梯度直接相關。當純二氧化碳注入鹽水時，會與水形成碳酸(H_2CO_3)，導致流體 pH 顯著下降。像 二氧化硫 與一氧化氮 這類雜質注入水中時，亦會形成亞硫酸(H_2SO_3)或硝酸(HNO_3)，進一步降低流體 pH 值。儘管如此，我們的模擬結果顯示，岩石基質中的礦物具有強烈的酸鹼緩衝效應，使 pH 僅由初始的 6.6 降至 6.3。

模型能考慮二氧化碳與雜質的影響，並採用全面性的化學模擬方法，成為預測二氧化碳封存行為的極具價值之工具。透過精確掌握反應性流體流動與地下動態的複雜性，本模型促進二氧化碳封存優化，提供關鍵技術突破。

SPE-225288-MS

Stress Barrier Characterization and Application for Engineering Sweet Spot Prediction in Deep Shale Gas Reservoirs

這篇是針對四川盆地內頁岩氣礦區進行應力屏障(Stress barrier)評估，因頁岩氣儲層非常緻密，需要透過水力液裂(Hydraulic fracturing)工法於岩層中創造人工裂隙，使天然氣能夠流動並生產。應力屏障(Stress barrier)是指在頁岩氣儲層垂直方向上出現的地層或岩性變化區域，其具有顯著較高的最小水平主應力，足以限制裂縫的垂直延伸，使裂縫偏向水平方向擴展，此現象的好處是可以將裂縫限制在特定儲層區段內，避免液裂液外洩至上覆岩層或下伏岩層。本研究使用一維及三維地質應力模型，針對該礦區的應力進行研究，分析應力屏障分布，應力屏障以下的區域能夠有效限制裂縫的發展，可以藉此篩選較佳的液裂施作區間。

四川盆地的龍馬溪頁岩具有明顯的各向異性特性，使用等向性方法所計算的原位應力通常與實際場地觀測不一致，因此使用橫向等向性模型(Transverse Isotropic Model)在描述頁岩地層中的力學參數方面更為準確。本研究使用經驗公式以及岩心試驗結果，於單井尺度上良好的推求應力參數，建立一維地質力學模型，例如楊氏模數、泊松比、垂直應力、最大水平主應力及最小水平主應力，此研究更細緻的區分垂直向與水平向的楊氏模數及泊松比，以顯示該礦區的異向性，如圖 12 所示。後續將一維地質力學轉變為三維地質力學模型，使用高斯隨機方法模擬三維楊氏模數與泊松比特性，並以震測反演所得之聲阻抗作為三維趨勢立方體。考慮到因各向異性導致的垂直井與水平井之間的聲波速度差異，將水平井的聲波測井曲線垂直化以反應各向異性參數。據此建立大致遵循震測資料趨勢的三維聲波速度屬性模型。再使用 Bowers' unloading formula 公式根據聲波速度計算三維孔隙壓力模型，並以現地試驗 DFIT (Diagnostic Fracture Injection Test)資料進行校正。最後，利用非線性有限元素模擬方法對三維應力場進行建模，模型包含非均質應力的大小與方向分布。研究區的三軸應力主要屬於走滑型應力狀態

(Strike-Slip)，其應力序關係為最大水平主應力 > 上覆應力 > 最小水平主應力。最小水平主應力的梯度約為 24 kPa/m (約 3.48 psi/m)。現地應力的大小受到深度影響顯著，整體範圍約在 80 MPa 至 100 MPa (約 11,600 – 14,500 psia) 之間，最大及最小水平應力差約為 13 至 15 MPa (約 1,885 – 2,175 psia)，其最小水平應力場三維分布如圖 13 所示。

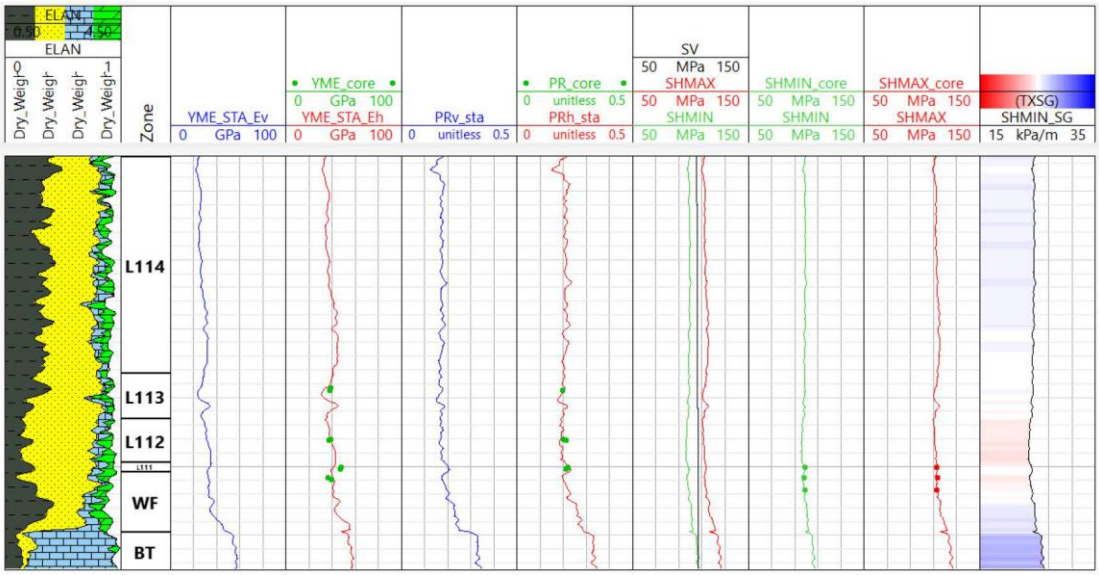


圖 12、一維地質力學模型成果

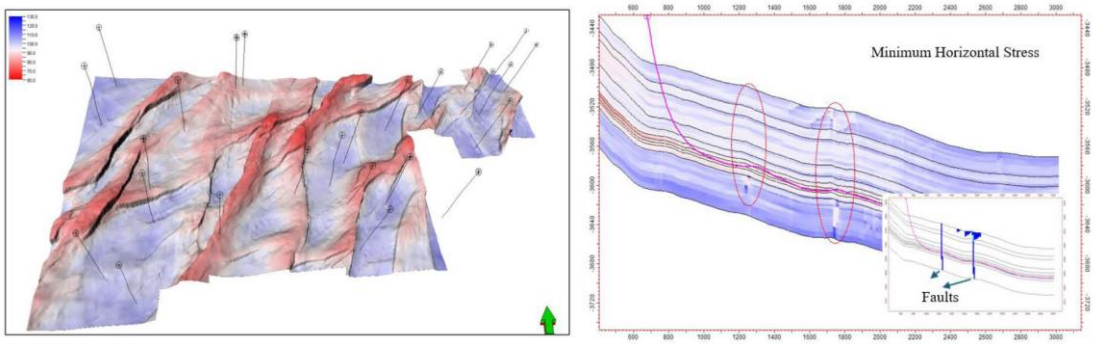


圖 13、最小水平主應力分布(數值由高至低依序為藍色-白色-紅色)

接續進行應力屏障分析，在垂直方向上，如圖 14 所示，一維地質力學模型指出在 L111 及 L112 下方的 Baot 層為具有較高的現地應力的碳酸鹽岩層，能夠有效限制裂縫的向下延伸，而在 L111 及 L112 上方，靠近 L113 與 L114 交界處，因黏土含量增加，最小水平應力顯著上升，會提升 3 至 5 MPa

(約 435–725 psia)，形成厚度約 2 至 3 公尺的應力屏障，如將此屏障於三維空間中展示則如圖 15 所示，若在屏障區域的下方進行液裂，便能有效限制裂縫往垂直方向擴展，以控制裂縫分布。

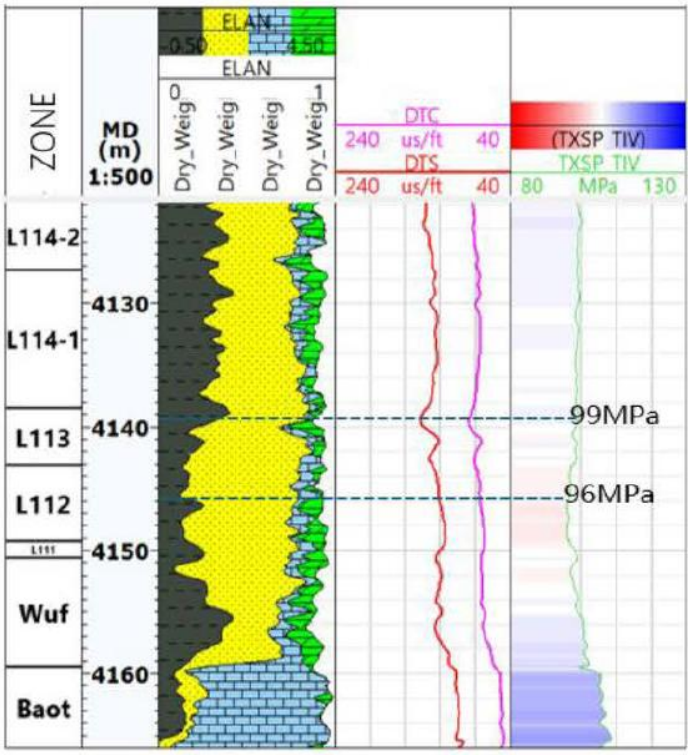


圖 14、應力屏障介於 L113 與 L114 之間，大小約 3 至 5MPa

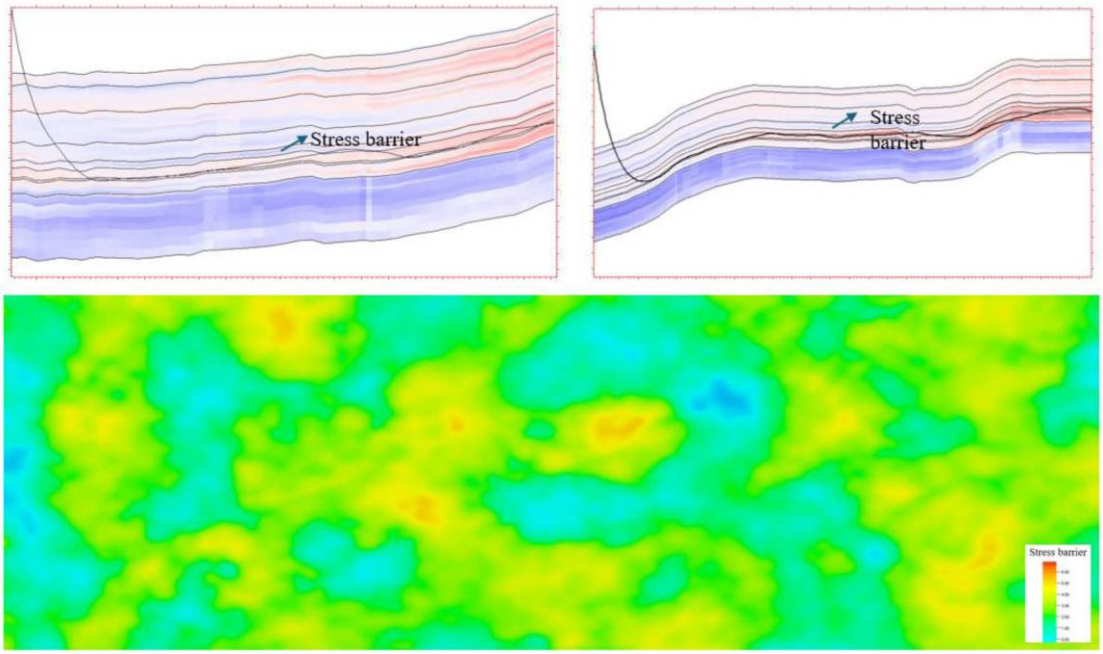


圖 15、應力屏障三維空間分布

在本研究中，於不同應力屏障(3 MPa、4 MPa 及 5 MPa)條件下進行液裂模擬，設計考量了液裂階段間距、穿孔方向、泵注速率與支撐劑強度等參數，以模擬實際的液裂作業，並考慮了地層屬性與力學參數。模擬結果顯示(圖 16)：

在 3 MPa 的應力屏障，裂縫高度約為 45 公尺，裂縫長度約為 200 至 300 公尺；在 4 MPa 的應力屏障，裂縫高度約為 30 至 40 公尺，裂縫長度可達 250 至 350 公尺；當應力屏障達到 5 MPa 時，裂縫高度下降至 20 至 30 公尺，但長度可延伸至 300 至 400 公尺。

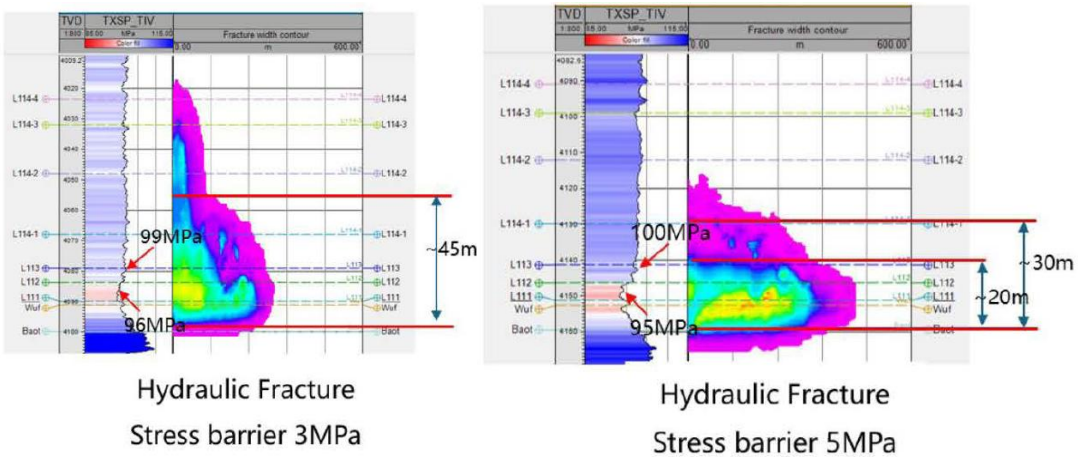
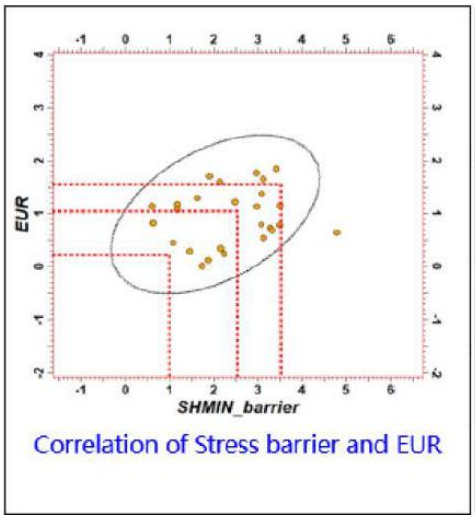


圖 16、3 Mpa 及 5 Mpa 應力屏障限制下液裂裂隙的差異

除了應力屏障之外，本研究還選取了脆性(Brittleness)與孔隙壓力(Pore pressure)作為熱點區域評估的優先指標，將脆性、應力屏障及孔隙壓力對最終可採量(EUR)進行比較分析，結果顯示脆性與 EUR 的相關性最佳，其次為應力屏障，再者為孔隙壓力。圖 17 為應力屏障與 EUR 的相關性與權重配置。



Stress Barrier Contribute to Engineering Sweet Spot	
Value (MPa)	Weight (%)
3.5	80
2.5	60
1.0	20

圖 16、應力屏障與 EUR 的相關性

肆、心得及建議

本次出國參加 SPE 阿布達比研討會，提出以下幾點心得與建議：

一、本所研究方向與國際趨勢相似，參考文獻理論提升研究品質

本報告細部探究的三篇論文，主題分別是二氧化碳雜質影響、二氧化碳流體-岩石化學反應數值模擬以及三維地質力學模擬，這三項主題皆與本所近年已進行或是規劃中的研究計畫方向一致，證明本所研究方向與國際趨勢大致相同，雖然這國際文獻的礦區特性與本公司自有礦區的特性大相逕庭，但是文獻內使用技術方法及理論依據已經過公開發表，未來若應用於本所的研究計畫，相信可以有效提升研究成果品質。

二、促進交流有助於解決公司業務難題

現階段公司正在逐步推動碳封存及地熱業務，推動過程中勢必會遭遇許多預期之外的技術難題，若要解決此難題，大致可以參考國際場址的真實案例或是委託具有經驗的外國廠商提供技術支援，參加國際型研討會就是最有效率的方法之一，在研討會上可以直接與國際專家學者面對面交流，討論場址開發與克服難題的經驗，或許就能從中找到解決方案，既能幫助公司處理業務難題同時也可以提升公司的能見度。

三、石油研討會主題逐漸多元並橫跨 AI 領域，建議持續派員參與

此次 SPE 阿布達比研討會議發表的論文仍以石油天然氣礦區為多數，但已逐漸有包含碳封存、地熱及 AI 等相關領域的發表，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，建議本所未來持續派員參與國際性研討會議。

四、持續強化外語聽力能力，盡力克服當地口音

參加國外研討會具有相當多好處，但必須建立在一定的基礎語言能力上，本次出差地點為阿布達比，因當地有許多印度裔人士，其口語英文夾雜非常濃厚的口音，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具有當地口音的外語影片，提前培養語感，以提升參加研討會的效果。