

出國報告（出國類別：開會）

SPE 亞太 CCUS 研討會暨展覽 出國人員報告書

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：葉庭瑜 石油開採工程師

派赴國家/地區：馬來西亞吉隆坡

出國期間：114 年 8 月 25 日至 8 月 28 日

報告日期：114 年 9 月 24 日

摘要

本次出國任務在 114 年 8 月 26 至 27 日期間赴馬來西亞吉隆坡，參加由石油工程師學會亞太地區分會(SPE Asia Pacific)及馬來西亞國家石油公司(PETRONAS)共同主辦之 2025 Asia Pacific CCUS Conference(簡稱 2025 APCC)。本次會議以「Commitment to Action: Unlocking the Full Potential of CCUS」為主題，聚焦於二氧化碳捕捉、利用及封存(CCUS)技術的政策、商業模式、工程及監測方面研究。會議議程涵蓋 14 大主題，包括封存場址潛能、注入策略、井設計與完整性、監測驗證(MMV)及跨國合作等。與會期間除聆聽多場技術論文與專題討論外，並參觀六家廠商之展示攤位，了解最新的監測與工程服務技術。透過參與此次會議，不僅能瞭解亞太地區 CCUS 技術的發展趨勢與政策動向，也可借鏡各國實際案例，對我國未來推動碳封存示範計畫及發展策略具重要參考價值。

目次

摘要	1
目次	2
壹、 目的	3
貳、 過程	4
參、 具體成效	14
肆、 心得及建議	27

壹、目的

此次前往馬來西亞參加 2025 Asia Pacific CCUS Conference，其主要目的在於了解亞太地區 CCUS 技術、政策與產業推動上的最新發展，以作為我國未來推動碳封存示範計畫的重要參考。會議的議程設計不僅涵蓋了政策法規和商業模式，也深入探討了地質封存潛能、注入井設計、監測驗證策略及跨國合作，因此能夠從不同角度理解 CCUS 扮演的角色與重要性。透過這次在研討會中與國際專家學者的知識分享與交流，希望能進一步蒐集其他國家或企業在封存場址評估、灌注井風險管理與地面設施設計上的最新方法，做為未來台灣實務環境的參考與借鏡。

貳、過程

本次出國任務為期 4 天，主要行程為參加「2025 Asia Pacific CCUS Conference」，會議共 2 天(8/26 至 8/27)，舉辦地點位於馬來西亞吉隆坡，詳細出國行程如表一所示。

表一、出國行程表

預定起迄日期	天數	到達地點	詳細工作內容
8/25	第一天	台北-吉隆坡	啟程
8/26-8/27	第二天至第三天	吉隆坡	參加 SPE 亞太 CCUS 研討會暨展覽
8/28	第四天	吉隆坡-台北	返程
合計	4 天		

1. SPE 亞太 CCUS 研討會議簡介

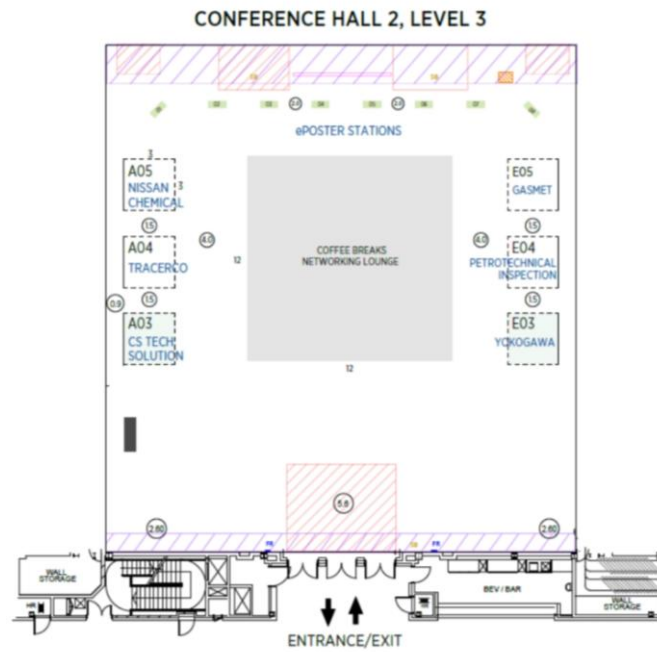
隨著全球對氣候變遷的議題持續受到關注，二氧化碳捕捉、再利用及封存技術 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 已被視為能源轉型與產業減碳過程中的關鍵技術。根據政府間氣候變遷專門委員會 (IPCC) 以及國際能源總署 (IEA) 的情境分析，要在本世紀中實現「淨零碳排」的目標，CCUS 技術在全球減碳中的角色不容忽視，尤其是對於以化石燃料為主要能源結構的國家地區而言，更是不可或缺的一項技術。

本次參加 2025 年 8 月 26 日至 27 日舉辦於馬來西亞吉隆坡的 Asia Pacific CCUS Conference 研討會，主辦方為亞太區石油工程學會 (Society of Petroleum Engineers Asia Pacific)，並由馬來西亞國家石油公司 PETRONAS、日本能源和金屬礦物資源機構 JOGMEC 及印尼國家石油公司 Pertamina 等多家產業共同策劃。會議以「Commitment to Action: Unlocking the Full Potential of CCUS」為主題，著重在亞太地區 CCUS 技術研發到政策、法規、商業模式的整合，藉由專題演講、技術研討、電子海報、展覽與交流等活動，促進跨國與跨領域的合作與知識分享。此次會議吸引來自 20 多個國家的公司代表，參加人員涵蓋政府機關、能源與石化產業公司、學術研究機構等，並設有超過 15 場技術討論會議。該研討會會場設置於吉隆坡會展中心，該地點為吉隆坡地區舉行各種規模會議的大型場所，展場位於市區地帶，交通方便，可搭乘輕軌在距離會場最近車站下車，再步行 5 分鐘即可到達會場，另外，主辦單位在各家公司代表們進行註冊時，提供會場最近的飯店選擇與下訂，提升會議期間往返飯店及會場的便利性。

馬來西亞之所以成為本次會議的主辦地點，深具其特殊意義，馬來西亞是東南亞主要的油氣生產國之一，境內擁有成熟的天然氣產業與完善的基礎設施，同時亦具備潛在的鹽水層與涸竭氣田可作為二氧化碳封存場址。馬國政府從 2020 年以來便積極推動能源轉型計畫，並將 CCUS 技術納入國家減碳策略的核心組成。剛在

今年 8 月，馬來西亞通過《Carbon Capture, utilization and Storage Bill 2025》法規，該法規涵蓋了碳捕捉、運輸、利用及封存的整個價值鏈，此法規的通過也更確立了 CCUS 減碳的重要性及地位。

Asia Pacific CCUS Conference 研討會議設有專題演講(Panel sessions)、技術研討(Technical sessions)、海報展示(e-Poster sessions)及廠商展覽，技術論文發表一天有 2~4 個時段，每個時段同時有 3 間會議室進行不同議題的研究論文發表，每項議題共有 4 篇報告，技術研討共有多達 60 篇論文發表。電子海報發表和廠商展覽規劃在同一個空間進行(如圖一)，電子海報固定安排在每日上午及下午的休息時間進行，本次參加的會議展覽規模較小，僅有六家廠商參與，主要涵蓋監測、檢測與工程技術服務等領域，包括：Nissan Chemical(提供功能性材料與化學品技術服務)、Tracerco(油氣及 CCUS 相關的監測技術)、CS Tech Solution(工程數位化的技術服務)、亞太 Gasmet Technologies(氣體分析與監測系統)、Yokogawa(工業自動化與監控系統)以及 Petrotechnical Inspection(油氣產業檢驗與技術服務)。本次研討會技術論文發表篇數多達 100 篇(口說+電子海報)，主辦單位已於會議前開放口頭報告論文摘要電子檔提供與會者下載。研討會另有 Swapcard APP 應用程式免費讓參加者加入本次會議資訊與介面(如圖二)，其介面簡單明瞭，大會時常會運用此 APP 推播通知演講資訊及公告相關訊息，在技術論文研討會部分，個人可以依據有興趣之議題加入自己的時程表。



圖一、研討會會場地圖



圖二、APCC 研討會之手機應用程式

2. SPE 亞太 CCUS 研討會議程介紹

本次參加會議議程，主辦單位首先邀請了幾個國際組織或油氣能源公司進行政策與商業化策略專題大會，探討 CCUS 在亞太區的法規框架、經濟性及跨境合作的潛能，隨後的技術研討會議共有 15 場，每一場有 4 篇論文分享，會議議程如圖三。

Conference Programme Schedule

Time	Conference Hall 1, Level 3	Meeting Room 306, Level 3	Meeting Room 305, Level 3	Meeting Room 304, Level 3
Tuesday, 26 August 2025				
0900-1000 hours	Opening and Keynote Session			
1000-1030 hours	Coffee Break - Conference Halls 2-3, Level 3			
1030-1200 hours	Executive Plenary Session Commitment to Action: Unlocking the Full Potential of CCUS			
1200-1400 hours	Networking Luncheon - Conference Halls 2-3, Level 3			
1300-1330 hours	Knowledge Sharing ePoster Session 1 - Conference Halls 2-3, Level 3			
1400-1530 hours	Panel Session 1 Building the CCS Backbone: CO2 Transportation and Infrastructure	Technical Session 1 CCS/CCUS Policy, Commercialisation, and Project Financing	Technical Session 2 Unlocking CO2 Storage Potential in Geological Formations	Technical Session 3 Addressing CCS Well Integrity Risks
1530-1600 hours	Knowledge Sharing ePoster Session 2 and Coffee Break - Conference Halls 2-3, Level 3			
1600-1730 hours	Panel Session 2 Financial Pathways and Carbon Credits: Unlocking CCUS Market Volumes	Technical Session 4 Innovations in CO2 Capture and Transportation: Enhancing Efficiency and Scalability	Technical Session 5 Injection Strategies and Risk Management	Technical Session 6 Innovations in CCUS Well Design
1730-1830 hours	Welcome Reception - Conference Halls 2-3, Level 3			
Wednesday, 27 August 2025				
0900-1030 hours	Panel Session 3 Managing CCUS: Risk and Liabilities	Technical Session 7 CCS/CCUS and EOR/EGR I	Technical Session 8 Enhancing CCUS Well Performance through Design, Barriers, and Materials	
1030-1100 hours	Knowledge Sharing ePoster Session 3 and Coffee Break - Conference Halls 2-3, Level 3			
1100-1230 hours	Panel Session 4 Harmonising Policy, Public Acceptance and Regional Synergy: Advancing CCUS for Global Impact	Technical Session 9 CCS/CCUS and EOR/EGR II	Technical Session 10 Ensuring Integrity: MMV Strategies for CCS Operations	
1230-1400 hours	Networking Luncheon - Conference Halls 2-3, Level 3			
1315-1345 hours	Knowledge Sharing ePoster Session 4 - Conference Halls 2-3, Level 3			
1400-1530 hours	Panel Session 5 Technologies, Digitalisation and Utilisation	Technical Session 11 Integrated CCS/CCUS Projects	Technical Session 12 Safeguarding CCS: Containment Risks Management	
1530-1600 hours	Knowledge Sharing ePoster Session 5 and Coffee Break - Conference Halls 2-3, Level 3			
1600-1730 hours	Technical Session 13 Collaboration and Integration in CCUS Projects Implementation	Technical Session 14 CCUS Technologies and Strategies	Technical Session 15 Decarbonisation Strategies: Effective Carbon and Methane Management	

圖三、Asia Pacific CCUS Conference 研討會議程

研討會的主題及內容相當豐富，具體包括以下 14 個主題：

- CCS/CCUS Policy, Commercialization, and Project Financing(CCS/CCUS 政策、商業化與計劃經濟效益)：探討政策制定、法規、商業模式與投資策略，確保 CCUS 計畫能獲得市場與財務方面支持。
- Unlocking CO₂ Storage Potential in Geological Formations(解鎖地質構造中的碳封存潛能)：研究深部鹽水層與生產末期油氣田等地質構造的封存潛力，提升前期場址篩選與封存量評估。
- Addressing CCS Well Integrity Risks(CCS 井完整性與風險)：聚焦在井的完整性議題，包括封隔材料、井筒完整性維護及避免 CO₂ 洩漏的工程措

施。

- Innovations in CO₂ Capture and Transportation: Enhancing Efficiency and Scalability(CO₂捕捉與運輸創新：提升效率與規模化)：介紹碳捕捉與運輸的新興技術，強調效率提升、能耗降低及規模化。
- Injection Strategies and Risk Management(注入策略與風險管理)：討論不同注入方案與操作參數，並評估相關地質風險與監測方法。
- Innovations in CCUS Well Design(CCUS 井設計)：探討 CCUS 井設計的創新概念與材料應用，提升注入井的壽命與安全性。
- CCS/CCUS and EOR/EGR：研究 CO₂ 在 EOR 與 EGR 的應用，兼顧封存與增產效益。
- Enhancing CCUS Well Performance through Design, Barriers, and Materials(透過設計、防護與材料提升CCUS井性能)：強調透過井筒設計、保護機制與材料的運用來提升井效能。
- Ensuring Integrity: MMV Strategies for CCS Operations(確保完整性：CCS 運作中的監測、測量與驗證)：探討監測、測量與驗證(MMV)技術，以確保長期封存安全與法規要求。
- Integrated CCS/CCUS Projects(整合型 CCS/CCUS 計畫)：分享跨產業、跨鏈的計畫案例，包括從捕捉、運輸到封存的整合。
- Safeguarding CCS: Containment Risks Management(CCS 注儲風險管理)：聚焦在封存完整性與注入能力的管理，降低洩漏造成的環境風險。
- Collaboration and Integration in CCUS Projects Implementation(CCUS 專案推動中的合作與整合)：強調國際與產業間合作，推動 CCUS 計畫落實在地化與技術共享。
- CCUS Technologies and Strategies(CCUS 技術與策略)：全面檢視最新 CCUS 技術趨勢與應用策略，加速技術成熟與應用。
- Decarbonization Strategies: Effective Carbon and Methane

Management(減碳策略：有效的減碳與甲烷管理)：討論減碳與甲烷排放管理策略，用以支持能源轉型與實現淨零目標。

技術論文發表共有 15 場，由於無法全盤參與全部議程，在眾多研究論文主題取捨之下，僅能篩選出與公司或個人近年業務較相關及其他感興趣之議題聆聽。

3. SPE 亞太 CCUS 研討會議參與過程

研討會前一天(8/25)中午 12 點到下午 6 點開放報到，與會人員可以在正式技術論壇開始之前就先完成報到程序並領取個人名牌、手冊及會議相關資料。研討會技術論壇正式於星期二(8/26)進行，每天的研究論文發表有二至四個時段，在中場的休息時間，可自由至電子海報區聆聽有興趣之論文，或到展覽區了解相關技術資訊(圖四~圖六為會場及展覽區情景)。



圖四、研討會會議室



圖五、展覽區



圖六、會場一景

在第一天的開幕式，主持人為PETRONAS碳管理部門的負責人Emry Hisham Yusoff，在開場時強調 CCUS 技術已經不再是未來選項，而是當下實現淨零排放與能源轉型的必要行動。馬來西亞政府與 PETRONAS 亦將 CCUS 技術列入國家能源政策規畫的

核心，希望透過法規確立與資金支持下使計畫可行性與商業性大幅提升。開幕式亦邀請了 SPE、馬來西亞經濟部、日本金屬和能源安全組織以及印尼國家石油公司 Pertamina 等公司代表進行簡短演講，對於 CCUS 技術的發展現況討論到目前主要障礙包括：高昂的前期資本支出，以及投資者對風險的不確定性，使得政策與商業模式成為目前發展趨勢的重點，例如法規、碳價機制、跨鍊合作等。

在第一天的專題討論大會，主持人與演講者包含來自 Baker Hughes、JAPEx、Medco Energi、以及 PETRONAS 的高階主管，在主持人的引導下，分享了不同公司對於 CCUS 技術的看法與規劃(圖七)，演講者分享了各自國家或單位的成功案例或商業模式，展示不同區域與政策環境下如何落實碳捕捉、運輸及封存計畫。最後，也特別強調各國法規與政策發展的重要性、穩定且透明的監測系統，不僅能提升社會民眾的信任度，也能保障投資方的信心，成為推動 CCUS 計畫能持續向前的關鍵。

此外，在本次會議期間，亞太區石油工程師學會(SPE Asia Pacific)與馬來西亞人力資源發展公司(Human Resource Development Corporation, HRD Corp)正式簽署合作備忘錄(MoU)，如圖八。此合作用意在強化馬來西亞能源產業的人力資本與技術能力，特別是關於 CCUS 領域的人才培育，此合作同時與馬來西亞國家能源轉型藍圖相呼應，將有助於鞏固馬來西亞的區域 CCUS 技術地位，並提升能源轉型與淨零排放領域的競爭力。

在參加完第一天的專題大會後，隨即前往各會議室聆聽論文簡報，由於技術研討主題涵蓋範圍廣，同時間有多個場次進行簡報，因此必須在會前規劃欲參與之場次，避免錯失聆聽簡報的時機。技術論文的參與心得，將著重在「具體成效」章節中說明。



圖七、8/26 專題討論大會



圖八、SPE 與 HRD 簽署合作備忘錄

參、具體成效

本次藉由參與研討會，篩選並參加和公司近年業務較相關或個人感興趣之議題，以下節錄報告重點。

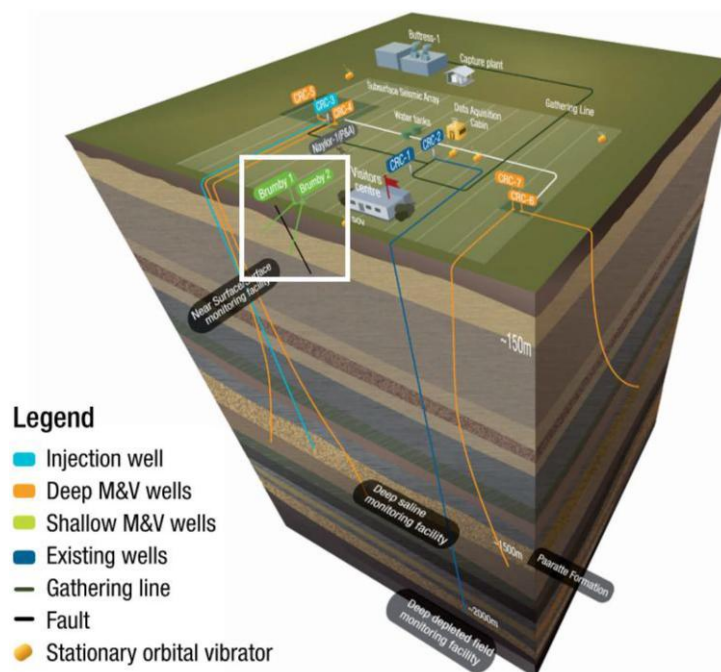
(1)論文篇名：CO₂ Injection in Faulted Formations: Insights from the Otway Shallow Fault Project (斷層帶二氧化碳注入研究：澳洲 Otway 淺層斷層計畫之啟發)

重點摘要：此篇研究針對斷層帶進行二氧化碳注入的實驗，提供了十分前瞻且具突破性的成果。研究的核心問題在於：斷層究竟是二氧化碳封存的「風險洩漏通道」，還是有條件下仍能安全利用的構造邊界？傳統上，多數封存場址在選址階段會盡量避開斷層，然而該篇研究則試圖以實地驗證其真實的風險與行為。

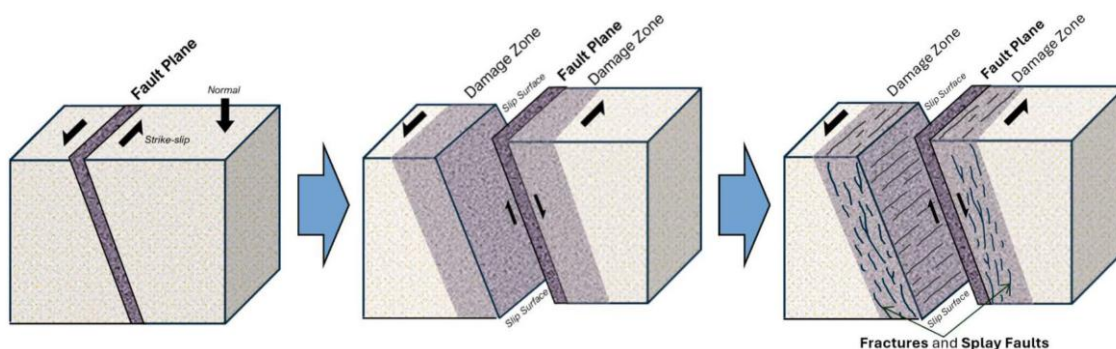
此篇研究從 2016 年開始規劃，選定於澳洲 Otway 地區淺層斷層進行控制性灌注試驗(圖九)，透過鑽取多口井(包括注入井與監測井)，並配合一系列灌注測試與數值模擬，在 2024 年正式將 16 噸氣態 CO₂ 灌注到地底下 80 公尺深處，注入速率約每天 1~2 噸。此研究及實驗過程中設置多種監測技術，涵蓋反向垂直震測剖面(Reverse VSP)、光纖、地表氣體通量監測及土壤氣體採樣等，透過這些高解析度的監測工具，能夠即時追蹤 CO₂ 的移棲與壓力變化。

實驗結果顯示，CO₂ 注入一日後就溢散至地表，遠遠超過模擬預測。而該研究指出，氣體的主要移棲路徑並非只有沿著主斷層面，而是經由次級斷層(splay faults)與裂隙快速流竄。結果顯示斷層並非單一結構面，而是異質性極高的複雜系統(圖十)，若以傳統方式將斷層視為單一平面，將難以準確模擬其在二氧化碳注入下的行為。此篇研究透過在模型中加入寬度約 1 公尺、具高滲透性的次級斷層，才能夠成功重現並觀測到氣體的移棲速度，另外也證明了小尺度構造在風險評估中的重要性。

從這篇研究的實驗與結果，讓我們了解到封存場址的安全性評估不應該只停留在「避開斷層」的保守原則，若未來場址的資料充足，應著重場址異質性的調查與建模。這篇在 Otway 進行的實驗應該是在全球少數關於 CO₂ 在斷層帶移棲的實際研究，台灣地質環境斷層分布密集，許多潛在封存場址不可避免地與斷層分布相互交錯，若僅以「完全避開斷層」作為前期場址篩選標準，可能大幅縮減潛在的儲存空間，該案例也提醒我們在模擬與風險管理中，必須重視小尺度構造與斷層帶異質性的影響。此外，該研究中採用光纖、微震監測與 VSP 技術等，提供了高解析度的監測方式，對台灣未來規劃碳封存場址的監測系統與設計具借鏡意義。



圖九、Otway 淺層斷層注入計畫場址示意圖



圖十、複雜的斷層帶演化示意圖

(2)論文篇名：Triggering Mechanisms and Mitigation Strategies of CO₂ Injection-Induced Seismicity in the Canada Weyburn Field (加拿大 Weyburn 油田 CO₂ 注入誘發地震之觸發機制與緩解策略)

重點摘要：本研究以加拿大著名的 Weyburn 油田為案例，探討二氧化碳注入過程中可能引發的地震活動。隨著全球 CCUS 計畫數量持續增長，CO₂ 注入造成的應力變化與誘發地震的風險，逐漸成為社會大眾高度關注的議題。本篇研究指出，加拿大 Weyburn 油田自 2000 年起進行大規模注入 CO₂ 強化採油與封存計畫，累計注入量已超過 3,000 萬噸，監測數據相對完整，因而成為注入誘發地震的理想研究區域。

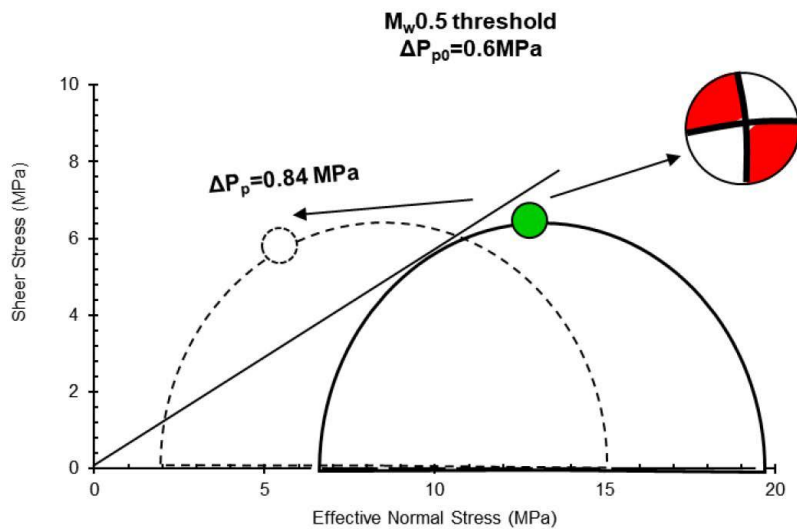
Weyburn 油田位於加拿大薩斯喀徹溫省，主要封存層為深部碳酸鹽岩與砂岩層，上覆厚層頁岩作為蓋層。長期的 CO₂ 注入造成了局部的孔隙壓力上升，可能誘發斷層再活動或微地震活動。該篇研究透過歷年地震資料、井下壓力監測與數值模擬，歸納出幾種可能的誘發機制：(一)注入壓力傳導至未出露地表的斷層帶，造成剪應力超過臨界值；(二)孔隙壓力升高導致有效應力降低(圖十一)，進而引發構造弱面滑動；(三)長期注入造成區域性應力重新分布。

在因應對策方面，該研究提出多項建議：(一)控制注入速率與壓力，避免瞬間壓力尖峰導致斷層不穩定；(二)分散注入點，減少單一井對局部構造應力累積的影響；(三)建立動態監測與預警系統，包括微地震監測與設置井下壓力感測器，以便及早發現異常並調整注入計畫。該研究強調透過「注入策略 + 實時(Real-time)監測 + 模型預測」等方面措施，可有效降低誘發地震的風險。

台灣地質構造複雜、斷層密集，未來若進行 CO₂ 注入，潛在的誘發地震風險不可忽視。從 Weyburn 的經驗，誘發地震並非一定導致災害，但需要完整的監測體系與風險管理，才能確保場址安全與取得社會大眾的信任。其次，該篇研究提出的注入速率控制與分散注入策略，可作為台灣未來規劃封存場址時的重要設計原則。

例如在陸域鹽水層封存示範中，應避免單井高強度注入，改以多井分布與低速長期注入方式，降低對地應力場的擾動。

最後，Weyburn 油田建立的微地震監測網與動態預警機制，為台灣的監測、測量與驗證(MMV)系統設計提供了具體範例。未來台灣在規劃示範場域時，應將地震監測納入 MMV 的核心架構，以符合國際趨勢並提升社會接受度。



圖十一、孔隙壓力增加將導致有效應力降低

(3)論文篇名：Safely Managing Carbon Capture and Storage Injection Risks in Legacy Production Wells (在既有生產井中安全管理碳捕捉與封存注入風險)

重點摘要：這篇論文主要討論如何在既有的舊油氣井(Legacy wells)中安全進行二氧化碳灌注試驗。由於這些井通常年代久遠、設計時並沒有考慮到其井口操作壓力受限且地層壓力極低等問題，無法以常見的密相或超臨界相(dense/supercritical phase)方式注入，因此在使用時會面臨一系列風險，例如：

- 井筒完整性風險：水泥環和套管可能因老化或與 CO₂ 接觸後腐蝕而降低強度。
- 溫度效應：CO₂ 在減壓或相變過程中會快速降溫，造成乾冰或水合物形成，堵塞管道或損壞井筒。

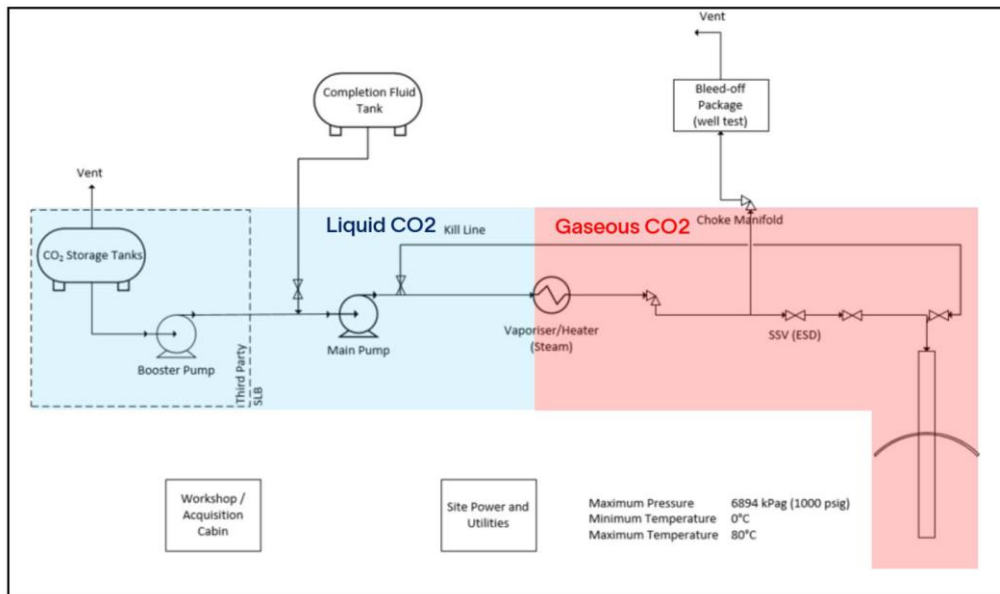
- 壓力控制問題：井口和地層壓力可能不足以支持高壓灌注，若控制不好可能導致井筒破壞或地層破裂。

為了應對這些問題，此篇研究設計了一套低成本、可移動的地面處理設備系統(圖十二)，其特色包括：

1. 在地面加熱並氣化液態 CO₂，避免乾冰與低溫問題。
2. 使用多套泵浦(增壓泵浦+主泵)與節流閥(choke)控制壓力和流量，確保井筒在安全操作範圍內。
3. 導入模擬分析(流動模擬與風險分析)來預測 CO₂ 移棲行為，並設計應變措施。

實際測試結果顯示，這套方法能夠在既有井中成功注入 CO₂，過程中沒有發生井筒損壞或堵塞，且數據與模擬預測相符，證明了這種方式的可行性。研究最後也建議未來可導入更先進的監測工具(如分布式光纖感測)，以進一步提升對井筒內流動與溫度變化的掌握。

對台灣而言，未來若規劃利用舊井進行碳封存，必須要重視井筒完整性與風險管理，不能直接套用過去的油氣井設計；且井口壓力與注入方式需要因地制宜，在台灣若用老井做示範，應該考慮多井分流、低速注入，並加裝地面加熱與壓力控制設備。最後，監測是非常關鍵一環，需要從注入初期就建立完善的壓力、溫度與流量監測系統，並逐步導入更高解析度的監測技術。



圖十二、地面處理與注入系統流程圖

(4)論文篇名：Thermal, Hydraulic, Mechanical, and Chemical Interactions in CO₂ Injection for Depleted Gas Reservoirs: A Study on Korea's CCS Project
(枯竭氣田二氧化碳注入之熱-水-力-化學交互作用：韓國 CCS 計畫研究)

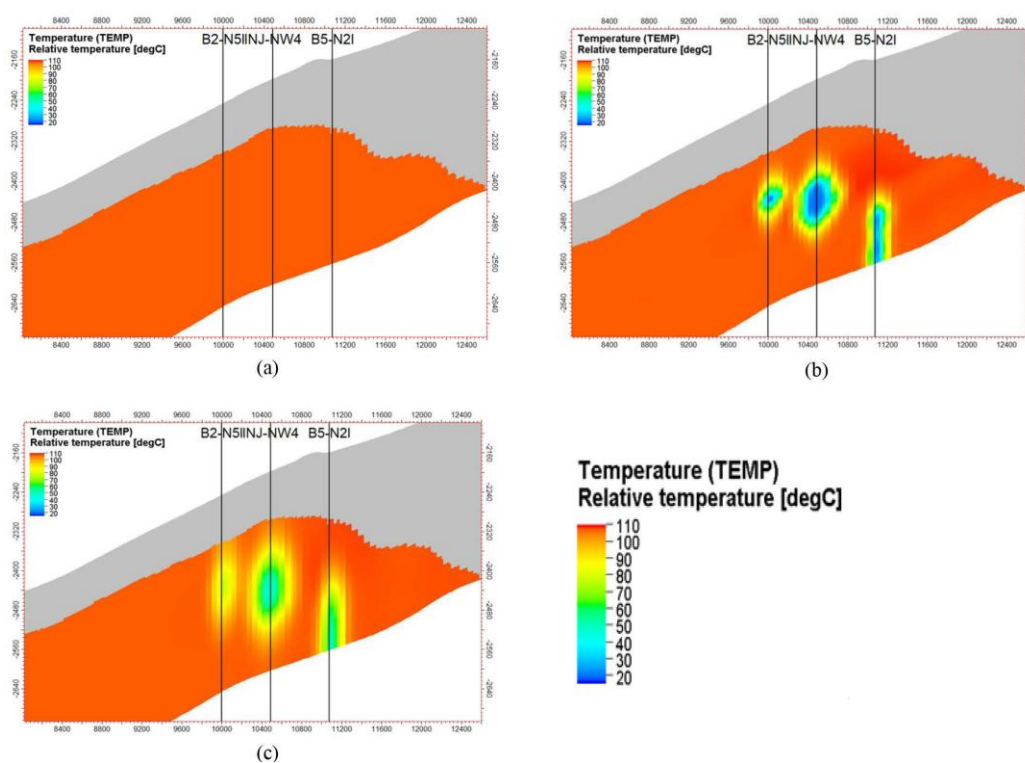
重點摘要：這篇研究以韓國東海一號涸竭氣田(Donghae-1)為案例，探討在進行二氧化碳封存時，必須同時考慮熱效應、水力行為、岩石力學反應與化學作用，也就是所謂的 THMC 耦合分析。該氣田位於韓國東部外海，深度約 2,300 至 2,600 公尺，過去已開發超過 17 年，現在規劃轉型為全國第一個大型 CCS 示範場址，每年注入規模可達 120 萬噸二氧化碳。

該篇研究利用 SLB 的 INTERSECT 流體模擬與 VISAGE 岩石力學模擬器，並搭配實驗室岩心試驗數據，模擬不同情境下的二氧化碳注入行為。模擬顯示，在注入初期，由於注入的二氧化碳溫度僅約 20°C，遠低於地層溫度 107°C，再加上壓力驟降引發的焦耳-湯姆森效應，使得井筒附近的地層一度出現高達 90°C 的劇烈降溫(圖十三)。不過隨著注入持續進行，地層溫度逐漸回升，並未造成永久性的破壞。即使考慮二氧化碳與礦物反應導致岩石強度下降的情境，模擬結果仍顯示應力狀態低於莫爾庫倫破壞準則，斷層與地層保持穩定，沒有發生滑動或裂縫擴展的情況，

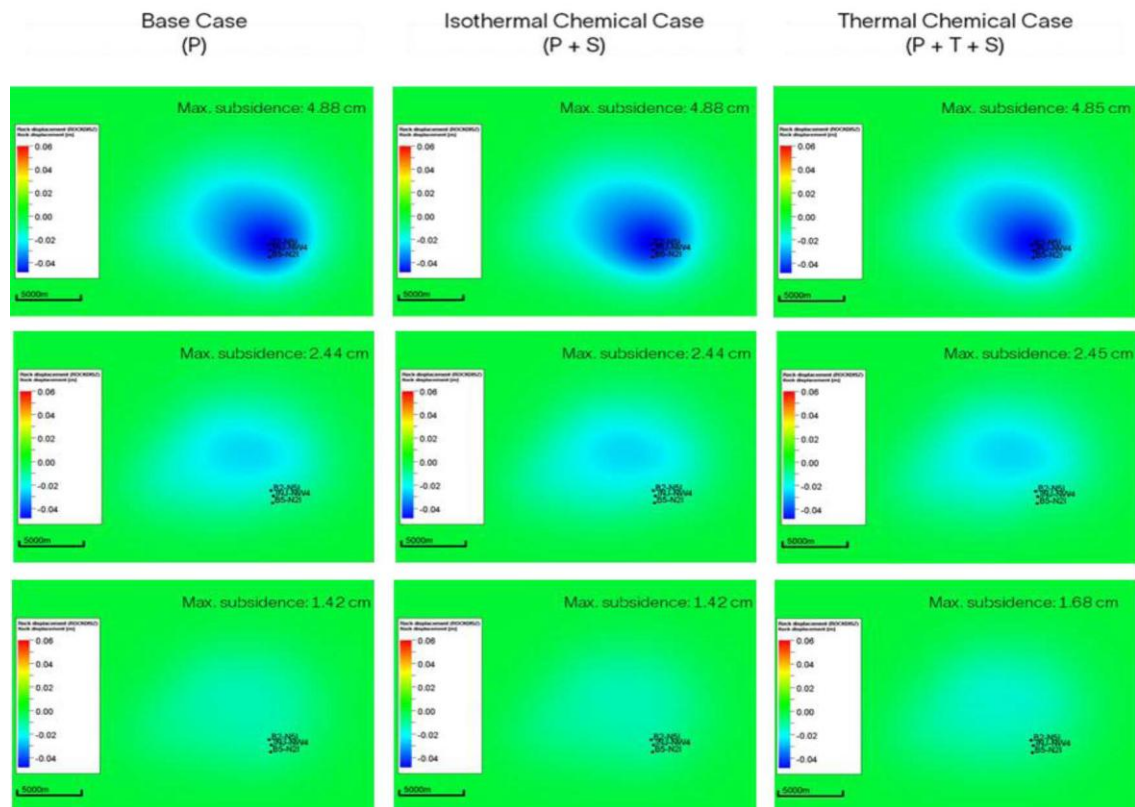
至於地表沉陷量的模擬幅度約小於兩公分，也在可接受範圍內(圖十四)。

這篇研究結果證實了東海一號氣田具備長期封存二氧化碳的可行性，並且亦凸顯 THMC 耦合模擬的重要性，若僅依賴單一的流體或力學模擬，可能會忽略低溫效應或化學作用所帶來的潛在風險，而全面性的分析才能更真實反映地層在二氧化碳注入下的反應。

未來國內在規劃進行任何碳封存作業時，除了傳統的流體模擬外，也應納入岩石的力學與化學變化，並透過岩心實驗取得必要的參數。同時，井口與井筒附近的低溫效應必須特別注意，因為這些區域最容易承受熱應力影響。最後，地表沉陷量監測應納入封存場址的監測計畫，確保不會對地表或沿岸環境造成影響。



圖十三、CO₂ 注入期間井筒附近溫度變化(a)注入剛開始(b)注入結束(c)監測結束



圖十四、地表沉陷量模擬結果

(5)論文篇名：Surface Facility Concept Selection for Optimal Carbon Dioxide Injection Using Integrated Modeling Approach (以整合式建模方法進行二氧化碳注入地面設施概念選擇之研究)

重點摘要：這篇研究聚焦在如何設計最佳化的地面注入設施，以處理透過低壓液態 CO₂ 船運(LCO₂ carriers)輸送至陸上處理站的每年 100 萬噸的 CO₂。該篇研究指出，由於液態 CO₂ 從船舶卸載時處於極低溫(-50°C)與低壓(約 7 bara)狀態，必須經過加熱與增壓，才能達到管線與注入井入口所需的臨界或超臨界條件，因此，該研究提出了三種增壓概念(boosting concepts)(圖十五)：

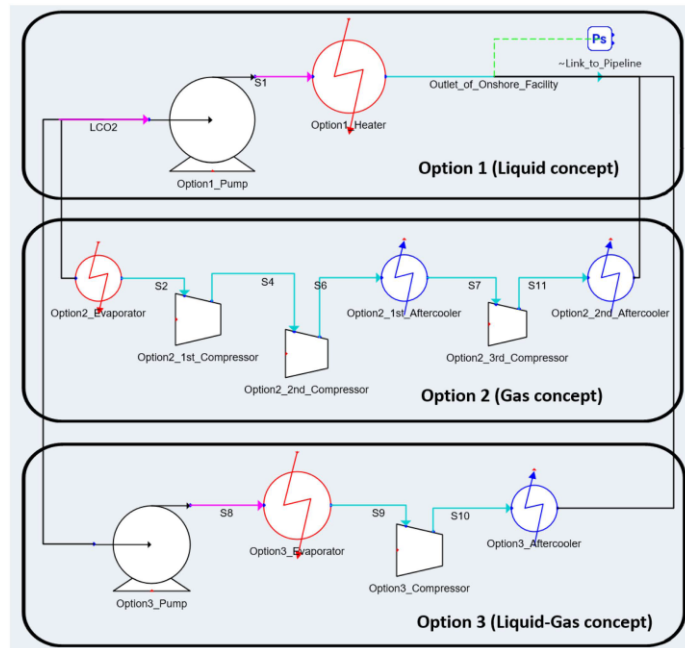
- 液態流程(liquid concept)：保持液相狀態，先以泵浦升壓，再利用加熱器升溫至 40°C。
- 氣態流程(gas concept)：將 LCO₂ 汽化，再透過多級壓縮與冷卻達成目標條

件。

- 液-氣混合流程(Liquid-gas concept)：先用泵浦升壓，再蒸發為氣態後進行壓縮。

透過整合式設備建模(integrated asset modeling)，將地面設施、管線與地下儲層注入行為模擬納入單一模型，比起傳統分開模擬，更能精準反映操作條件的交互影響。模擬結果顯示，三種增壓方案均能滿足封存需求，但液態流程的能耗最低，比氣態與液-氣混合流程更具效率，此外，研究發現熱交換器(加熱過程)是其中能耗的主要來源。進一步模擬顯示，在注入後期(儲層壓力由 120 bara 增加至 200bara)，將井口溫度由 40°C 調降至 15°C，可使整體能耗降低約 33%，且仍能維持超臨界態，符合輸送與注入要求，這證明操作條件可隨場址壓力演化動態調整，以獲得最佳能源效率。總體而言，這篇研究展示了整合設備建模於 CCS 地面設施概念設計與操作優化上的價值，不僅能減少能耗、提升系統穩定性，還能降低建模錯誤與人工作業負擔。

未來台灣若需考慮跨境或遠距 CO₂ 運輸，液態 CO₂ 船運將會是主要的運輸方式，該篇研究針對低壓液態 CO₂ 運輸與地面處理的設計提出具體分析，對台灣在思考跨境封存價值鏈上有直接參考價值。此外，若未來需接收來自捕捉端或進口的低溫液態 CO₂，在設計上應特別注意加熱系統的效率與成本，甚至可考慮利用現有的工業餘熱或再生能源來降低能耗。



圖十五、三種地面設施增壓設計概念比較

(6)論文篇名：Integrated Modelling and Approach for Carbon Capture and Storage Wells Design and MMV Philosophy(碳捕捉與封存井設計與監測驗證規劃的整合建模研究)

重點摘要：這篇論文是馬來西亞國家石油公司(PETRONAS)做的一個案例研究，研究利用工廠產生多餘的二氧化碳注入到涸竭氣田，作為碳封存場址，由於使用舊油氣井作為注入井，因此研究的重點放在：井設計要怎麼安全，以及如何監測注入過程。

此篇研究透過模擬方式測試了井在不同情境下的表現，例如：啟動注入、突然停井或壓力快速下降等情境，並特別注意井筒內部的安全閥(SCSSV)的設置深度。模擬結果顯示，將安全閥設在較深的地方，有助於減少壓降所引起的低溫效應，避免金屬或水泥因過冷而受損。

研究內容針對可能影響注入作業的流動保障議題進行評估(圖十六)，包含：

- 瀝青質沉澱：過去氣層處於生產末期，模擬結果顯示二氧化碳注入壓力很低，

不會引發瀝青質沉澱問題。

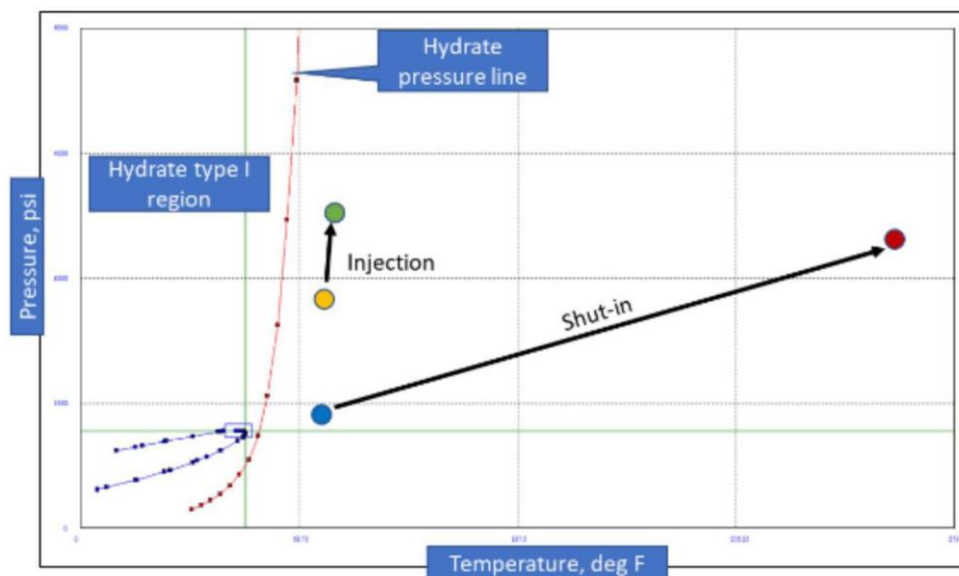
- 水合物形成：模擬顯示在現有條件下不會發生，但必須嚴格控制二氧化碳的含水量，並準備好注入甲醇做為應急措施。
- 鹽類沉澱：二氧化碳長期注入可能會讓井口附近的水分蒸發，留下鹽分沉澱。然而模擬結果顯示，其影響的範圍很小，在 27 年的注入期間僅影響井周圍 30~40 公尺，孔隙率變化不到 1%，不至於影響注入能力。

最後，研究將上述模擬成果納入 MMV 規劃，建議在井內安裝永久光纖感測器與壓力計，以進行即時監測，並配合地表與海床監測措施，確保二氧化碳在全生命週期中的封存完整性與環境安全

本篇重點包含如下：

1. 將井筒安全和流動風險一起考慮，更能有效避免意外發生。
2. 此篇研究之瀝青質、水合物及鹽類沉澱的風險都很低，可以靠監測和預防措施控制。
3. 監測系統必須在前期就完整規劃與設計，特別是井口與井下的壓力和溫度監控，才能保證長期封存的安全。

本篇研究針對流動保障的議題，提醒未來在規劃注入井時，不僅要關注灌注能力，也必須事先評估可能的沉澱或水合物風險。尤其是水合物形成與鹽類沉澱，雖然風險通常有限，但仍需透過控制 CO₂ 純度與含水量，以及設計應急措施(如甲醇注入)，以確保長期運行的穩定性。



圖十六、水合物形成之溫壓變化相圖

(7)論文篇名：The Cost of Carbon: Sensitivity Analysis and Emission Reduction Potential Through CCS(碳成本：透過碳捕捉與封存進行敏感度分析與減碳潛力研究)

重點摘要：這篇研究由 PETRONAS 發表，主要探討碳定價(carbon pricing)對石油天然氣產業經濟性與減碳策略的影響，並評估 CCS 在降低財務風險與淨零碳排目標中的角色。

全球目前已有超過 75 種碳定價機制運作，然而，碳價區間差異極大(1~139 美元/噸 CO₂e)，使企業必須透過內部碳價來預先評估計畫的經濟風險。

該篇研究利用 PETRONAS 的 Annual Review of Petroleum Resources 資料基礎下，模擬不同碳價情境計畫的淨現值(NPV)與經濟極限(EL)的影響(圖十七)：

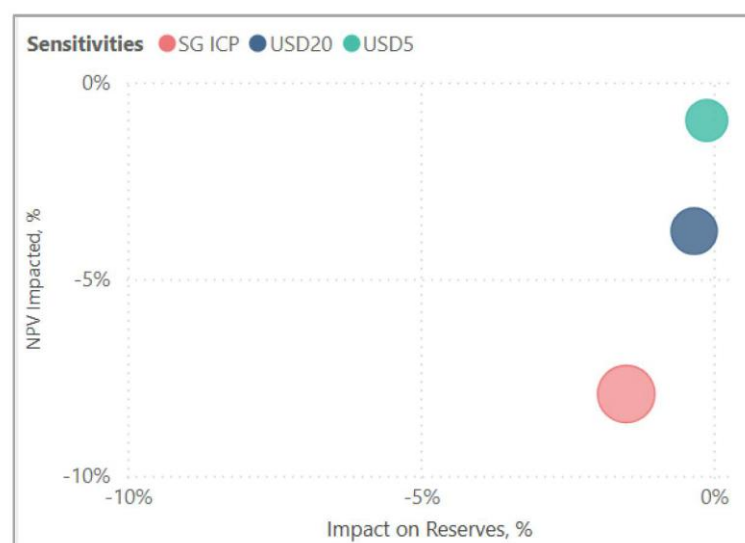
- 低碳價(5 美元/噸 CO₂e)：NPV 減幅約 1%，對封存量影響不大。
- 高碳價(20 美元/噸 CO₂e)：NPV 減幅達 3.8%。
- 新加坡碳價模式(逐步調升至 58 美元/噸 CO₂e)：NPV 減幅最高可達 8%，對高 CO₂封存量的計畫影響尤其顯著。

除了經濟面影響，該研究也比較了不同減碳手法的單位碳成本：

- CCS：低於 20 美元/噸 CO₂e，最具成本效益，貢獻約 79%的減碳潛能。
- 能源效率與電氣化：成本最高，佔比約 12%。
- 排空與燃燒減量：成本稍低於電氣化，但減碳效果有限(僅佔 9%)。
- 其他措施：影響尚小，非主要減碳手法。

研究指出 CCS 在大型排放源(如天然氣處理廠)中具有獨特優勢，既可以規模化運作，也能有效降低碳價帶來的財務衝擊，特別對其公司(PETRONAS)而言是達成 2050 淨零碳排的關鍵手段之一。

本篇研究重點在於，雖然碳價的變化對儲量評估影響有限，但對 CCS 專案計畫經濟性(尤其是淨現值)有著顯著的衝擊；碳價越高，計畫 NPV 的下降幅度也越大。在眾多減碳措施中，碳捕捉及封存(CCS)展現出最佳的成本效益與規模化潛力，單位碳成本低於 20 美元/噸 CO₂e，且可貢獻近八成的減碳潛力，遠優於電氣化或燃燒減量等策略。因此，CCS 不僅是因應環境變遷與政策需求的核心技術，也是企業在面對未來碳價上升時降低財務風險、維持專案競爭力的重要途徑。



圖十七、不同碳價情境下對專案淨現值的影響

肆、心得及建議

1. 本次奉派參加 2025 Asia Pacific CCUS Conference，深刻感受到亞太地區各國對 CCUS 技術的高度重視，以及推動淨零轉型的決心。會議議程廣泛涵蓋政策、商業模式、井筒設計、封存場址潛能與監測驗證等完整價值鏈，建議未來參與此類國際會議時，可提前規劃行程並善用會議 APP 或電子日程，以確保重點場次不會錯過。
2. 本次展覽規模較小，共有六家廠商參展，主題多聚焦於監測檢測、工程技術服務及碳捕捉相關應用。相較於大型油氣會議的展覽規模，反而能有更多時間與廠商深入交流，建議未來可安排具碳捕捉與監測技術背景的同仁參加，以強化國際技術交流與合作的可能性。
3. 健全的政策與法規是確保投資與計畫可行性的核心基礎，馬來西亞在 2025 年通過 CCUS 法案，建立場址許可、跨境運輸及長期監測的規範，顯示制度支持對計畫推動的重要性，建議我國亦應及早著手規劃專法。
4. 在技術論文發表部分，從中選擇個人感興趣的主題聆聽，內容涵蓋 CCS 斷層複雜性與風險、既有生產井注入風險管理、THMC 耦合模擬、地面設施設計整合以及碳定價敏感度分析等議題。這些研究特別強調跨領域整合與風險管理的重要性，對台灣未來封存示範計畫而言，提醒我們需在注入能力評估之外，同步建立監測驗證系統與風險因應措施，以確保封存安全性與建立社會大眾的信任。
5. 會議期間，SPE 與馬來西亞人力資源發展公司(HRD Corp)簽署合作備忘錄，以推動 CCUS 領域人才培育與技術交流為目標，展現馬來西亞的政策支持與產業發展決心。此舉對台灣深具啟發性，顯示除了推動 CCUS 技術研發與資金投入外，專業人才培養及企業的亦是成功關鍵。

6. 透過參與本次會議汲取了亞太地區 CCUS 發展的最新趨勢與實務經驗，建議公司未來持續派員參與國際會議，以掌握全球脈動；並藉由跨國案例的學習，強化國內 CCS 示範計畫在法規、技術、監測與長期規劃上的完整性。也藉由這次的經驗，鼓勵同仁把握機會參與國際研討會，並嘗試投稿國際會議期刊，有機會在台面上發表研究內容，瞭解不同人的看法與觀點，或許會激發更多火花。
7. 在國際研討會上，外文能力是作為交流的一項基本技能，無論在聆聽論文發表、會議期間與人交談、與廠商洽談，甚至是研討會時間之外的生活大小事，無時無刻都需要用到英文，因此建議未來有機會參與國際研討會的同仁，多充實英文能力，使出國任務發揮最大價值。