

出國報告（出國類別：開會）

碳封存輸儲工程相關研討會 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：加拿大卡加利

出國期間：113年10月19日至10月27日

報告日期：113年11月20日

摘要

本次出國目的為參與碳封存輸儲工程相關研討會，舉辦地點在加拿大卡加利，會議全名為第 17 屆溫室氣體控制技術研討會(GHGT-17)，GHGT 系列會議是溫室氣體減排技術的主要國際會議，重點關注在碳捕捉、利用及封存。會議期間透過參加許多場次之技術論文會議，瞭解目前溫室氣體減排技術的發展，本報告中摘要數篇研究論文，分別是關於 CCUS 價值鏈與源匯分析、二氧化碳運輸規格、注入性能分析及二氧化碳灌注後 3D 震測監測技術等相關議題。此外，本次出國行程包括以電子海報展示發表論文一篇，發表主題為「Public communication perception and acceptance on CCS - A case study through exhibition activities in Taiwan」，內容為公司同仁在過去參加國內淨零相關展覽，對外推廣 CCUS 技術及問卷分析成果，也藉由研討會的交流了解其他人不同的看法與觀點。

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

本次出國目的為參加第 17 屆溫室氣體控制技術研討會(The 17th Greenhouse Gas Control Technology Conference，以下簡稱 GHGT-17)，本屆研討會議集結了來自全球的專家學者、行業領袖、公司代表和政府部門政策制定相關人員，會議聚焦在碳捕捉、封存及再利用技術(CCUS)、溫室氣體減排技術及氣候變化因應策略等主題展開深入探討、互相交流與分享知識，GHGT 系列會議一直以來是世界上最受歡迎的溫室氣體減排相關研討會。研討會期間，除了參加各場次的技術研討會議之外，另一重點在於 10/22 周二下午的電子海報展示與發表，發表主題為「Public communication perception and acceptance on CCS - A case study through exhibition activities in Taiwan」，內容為本所同仁在過去一年間藉由參加國內淨零轉型展覽，積極對外推廣 CCUS 技術，並進行問卷調查，了解大眾對於 CCUS 技術的認知、支持度與疑慮，分析結果可以做為未來在應用碳封存技術或進行民眾溝通時的背景參考。

研討會主要分為幾個部分進行，展覽部分包含了國際上主流的技術服務顧問公司、研究機構、碳捕捉技術業者、能源或其他溫室氣體減排組織等相關單位，於展場解說最新公司發展動態、展示捕捉及封存技術，並和與會者進行交流；技術論文研討會議包含眾多主題，例如碳捕捉、利用、封存、負碳排技術、法律和監測、社會認知等議題，給予專家學者於各場次分享其研究成果，並進行討論。

貳、過程

本次出國任務為期9天，主要行程為參加「第17屆溫室氣體控制技術研討會」及電子海報發表論文一篇，會議共五天(10/20至10/24)，舉辦地點位於加拿大艾伯塔省南部的卡加利，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
10/19-10/20	第一天至第二天	台北-卡加利	啟程
10/21-10/24	第三天至第六天	卡加利	參加碳封存輸儲工程相關研討會
10/25-10/27	第七天至第九天	卡加利-台北	返程
合計	9天		

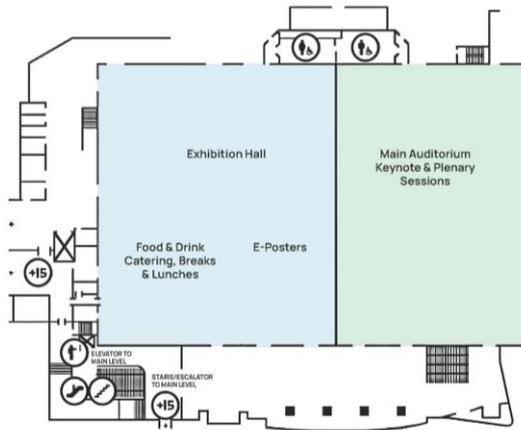
1. 第 17 屆溫室氣體控制技術研討會會議簡介

溫室氣體控制技術研討會(GHGT)系列研討會每兩年在 IEAGHG 成員國(北美、歐洲和亞洲)輪流舉辦，本次訂於加拿大卡加利舉行，從當地時間 10/20(星期日)開始舉行歡迎招待會和提前註冊，然後於 10/21 至 10/24(星期一至星期四)舉行技術研討和商業交流會議。會場設置於 TELUS 會議中心，該地點為卡加利地區舉行各種規模會議的大型場所，展場距離卡加利國際機場約 25 分鐘車程，卡加利市區交通主要以輕軌及公車為主，由於會場就位在市中心，交通方便，可搭乘輕軌在距離會場最近車站下車，再步行 2 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，提供會場附近的飯店選擇與下訂，更加提升會議期間往返飯店及會場的便利性。

GHGT-17 研討會由當地艾伯塔省減排協會(ERA)主辦，研討會主要分三個部分同時或分段進行，會場地圖如圖一及圖二。第一部分為廠商展覽，廠商展覽位在北棟的展覽大廳，包含了國際上主流的技術服務顧問公司、研究機構、碳捕捉技術業者、能源或其他溫室氣體減排組織等相關單位，在現場與參觀者進行專業知識及經驗交流、洽談商業合作機會、介紹產品及技術服務；第二部分為技術論文研討會與商業技術交流，位置在南棟 2 樓及地下 1 樓共 8 個會議廳，論文發表一天有 2~3 個時段，每個時段同時有 7 間會議廳進行不同議題的研究論文發表，每項議題共有 5 篇報告，四天下來有多達 71 場技術研究論文發表；第三部分為電子簡報發表與交流，固定在星期二及星期三的下午 2 點至 4 點進行，地點位於北棟的展覽廳，每篇報告加討論時間為 11 分鐘，每個報告時段同時有 32 篇簡報進行互動式解說與討論。本次研討會論文發表篇數多達 677 篇，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 APP 應用程式免費讓參加會議者下載使用(如圖三)，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。

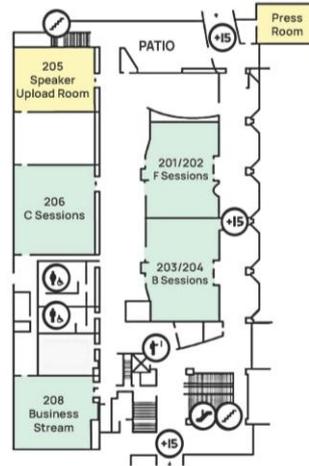
Calgary Telus Convention Centre

North Building
Second Level



Exhibition Halls

South Building
Second Level

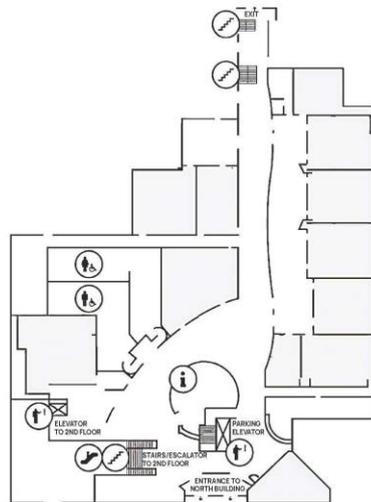


Glen Rooms

圖一、GHGT-17 研討會會場地圖(一)

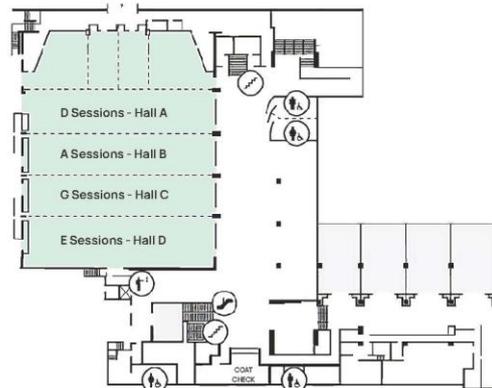
Calgary Telus Convention Centre

North Building
Main Level



Telus Rooms

South Building
Lower Level



Macleod Halls

圖二、GHGT-17 研討會會場地圖(二)



圖三、GHGT-17 研討會之手機應用程式

2. 第 17 屆溫室氣體控制技術研討會議程介紹

研討會主題內容相當豐富，具體包括以下幾個主要領域：

- 碳捕捉技術
 1. 最新的碳捕捉技術：針對燃煤、天然氣發電廠及工業設施的捕捉技術，如化學吸收、物理吸附及薄膜分離技術。
 2. 低成本和高效能的技術研發：包括捕捉系統的優化和新材料的應用。
- 二氧化碳封存
 1. 地質封存(GCS)：包括枯竭油氣田、深部鹽水層和煤層氣場址的二氧化碳注入與封存。
 2. 儲層監測與管理：使用 3D/4D 震測、分布式光纖技術(DTS)等方法監測儲

層的壓力、溫度及二氧化碳流動行為。

3. 儲存容量與封存安全性評估：儲層容量最大化的同時確保長期穩定性。

- 二氧化碳運輸與基礎設施

1. 管線和船舶運輸：涵蓋二氧化碳在液態和超臨界狀態下的運輸技術及挑戰。

2. 流動保障與基礎設施設計：探討管線中的相變、壓力變化及安全風險。

- 風險與環境影響

1. 廢棄井風險：研究廢棄井對儲層封閉性的影響及二氧化碳遷移的風險評估。

2. 誘發地震與斷層再活化：二氧化碳注入過程中誘發的地震活動及其對周邊地質結構的影響。

- 模型與模擬技術

1. 熱-水-力學耦合模型 (THM)：模擬儲層內二氧化碳的流動、相變及地質力學行為。

2. 多尺度、多物理場模型整合：從微觀孔隙結構到場址規模的行為模擬。

- 政策、經濟與社會影響

1. CCS 商業模式與政策框架：探討政策支持、財務激勵措施和市場機制對 CCS 發展的影響。

2. 公眾接受與社會影響：分析 CCS 的公眾認知和接受度，以及如何提升計畫的透明度和信任度。

- 跨學科合作與國際項目

1. 全球 CCS 項目實施進展：分享不同國家和地區在 CCS 領域的最新進展與經驗。

2. 跨學科技術合作：促進學術界、工業界和政策制定者之間的合作。

研究論文發表四天下來有高達 71 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，以下為本人參與之主題與場次：

(一)計畫生命周期的震測技術(Seismic Monitoring Over Life of Project)

(二)灌注能力(Injectivity)

(三)難減排產業評估('Hard to Abate' Assessment)

(四)場址特徵分析(Site Characterization)

(五)場址規模之儲集層模擬(Field-scale Reservoir Modelling)

(六)二氧化碳流體規範(CO₂ Specifications)

(七)井、地質力學、洩漏及孔隙尺度模擬(Wellbore, Geomechanics, Leakage and Pore-scale Modelling)

(八)管線運輸(Pipelines)

(九)運輸基礎建設及源-匯分析 Transport Infrastructure and Source-Sink Matching

3. 第 17 屆溫室氣體控制技術研討會參與過程

研討會第一天(10/20)下午大約兩點開放報到，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，第一天晚上大會舉行歡迎茶會，提供各方公司代表及與會人員交流認識的機會。研討會技術論壇正式在隔日的星期一(10/21)進行，每天的研究論文發表有兩至三個時段，在研討會的休息時間，至電子簡報區聆聽有興趣之論文，或到展覽區了解最新的技術資訊(圖四~圖六為會場及展覽區情景)。在第一天開幕式中，艾伯塔省減排協會(ERA)首席執行長 Justin Riemer 及卡加利灰鷹渡假村服務經理 Colleen Waskewitch Runner 先對 GHGT-17 的與會者表示歡迎，並為會議提供了祈福儀式。

Justin 隨後簡要介紹了艾伯塔省在 CCUS 方面的發展，提及艾伯塔省的二氧化碳輸送管線(Alberta Carbon Trunk Line, 簡稱 ACTL)是世界上最大的二氧化碳管線，工業部門目前正在進行大量投資，以克服 CCUS 在經濟面的挑戰。此外，有 11 個 CCUS 前端工程和設計(FEED)研究計畫正在進行中，其中一部分已接近完成，然而，需要更多的政策支持和完備的監測作業才能啟動更多進一步的 CCUS 計畫。國際能源總署(IEA)副執行長 Mary Burce Warlick 強調，去年全球氣溫創下歷史新高，暫時達到了攝氏 1.5 度的閾值，化石燃料需求預計將在本世紀末達到高峰，而再生能源的發展速度將快於政府設定的目標，也強調 CCUS 是在潔淨能源轉型中實現負排放、低碳氫化合物等其他產品的催化劑。最後，全球碳捕存協會(GCCSI)執行長 Jarad Daniels 說明，跨鍊合作是全球 CCUS 計畫實現的關鍵，目前已有 50 個設施正在運營，44 個設施正在建設中，628 個設施正在籌備中，然而，距離實現地質封存減碳的目標還有一段距離須努力。

除了第一天的開幕式外，每天早上第一個議程邀請各領域專家分享及討論當前減碳議題(全體會議)，研討會第二天全體會議的兩位演講者分別是殼牌公司(Shell)CCS 開發部門總經理 Onno van Kessel 及世界銀行集團永續發展項目負責人 Natalia Kulichenko-Lotz，Onno 介紹了將 CCS 從 MT 規模提升到 GT 規模所面臨的技術挑戰，而 Natalia 則談到了將 CCS 引進發展中國家與經濟方面所面臨的問題。要有效率地透過 CCS 實現減碳，需要有完備的法令和監測系統架構、建立細部儲層資源特徵的描述，並制定國家和地方碳管理策略和政策、大規模融資和新的投資機制以支援溫室氣體減排技術。

研討會第三天全體會議的兩位演講者分別是來自美國能源部(DOE)的 Sarah Forbes 和全球水泥和混凝土協會(GCCA)的 Claude Lorea 分享關於碳管理和 CCUS 有效運用的看法。美國能源部致力於碳源的捕捉技術商業化，目標是以每噸 100 美元以下的價格捕捉十億噸級的二氧化碳。此外，Claude 討論到水泥行業脫碳發展，由於水泥是全球使用最廣泛的材料之一，隨著水泥的需求成長，減少其碳足

跡的需求也在成長，因此，根據 GCCA 的淨零路線，水泥產業所需達到的減碳比例 (36%，約 1.3 Gt) 將依賴 CCS 技術，GCCA 將持續推動 CCUS 國際合作以實現永續淨零目標。

在參加完每天第一場的全體會議後，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。

本次參加 GHGT-17 研討會以電子海報形式發表論文一篇，題目為：「Public communication perception and acceptance on CCS - A case study through exhibition activities in Taiwan」，內容為本所同仁在過去一到兩年間製作了 CCUS 互動模型及相關推廣用素材，藉由參加國內淨零轉型展覽，積極對外推廣 CCUS 技術，並進行問卷調查，了解大眾對於 CCUS 技術的認知、支持度與疑慮。電子海報的發表時間安排在星期二(10/22)下午 2:00~2:11，每位發表者在規定時間內簡要式講解發表內容，進行說明與問答(圖七)，在進行講解時，前來聆聽的大多是關注在相同主題(Public perception and communications of CCS)的人員，其中有兩位對我的簡報內容提出疑問與建議，由於簡報時間有限，無法在時間內進行完整討論的部分，可以在會後進行充分的交流。

最後一天閉幕式 IEAGHG 總經理 Tim Dixon 感謝全體的參與及分享對減碳議題的支持，並提到本次會議是目前為止規模最大的一次，有來自 47 個國家共 1,547 名與會者參加，其中有超過 350 場口頭報告和 500 場電子海報展示。最後透露 GHGT-18 將於 2026 年在澳洲伯斯市舉行，澳洲能源 Brendan Beck 表示，澳洲在 CCS 技術方面擁有 20 年的研發經驗和兩個正在運作的大型計畫(包括 Gorgon 及 Moomba 計畫)，2026 年必定會有許多更新與見解，請大家拭目以待。



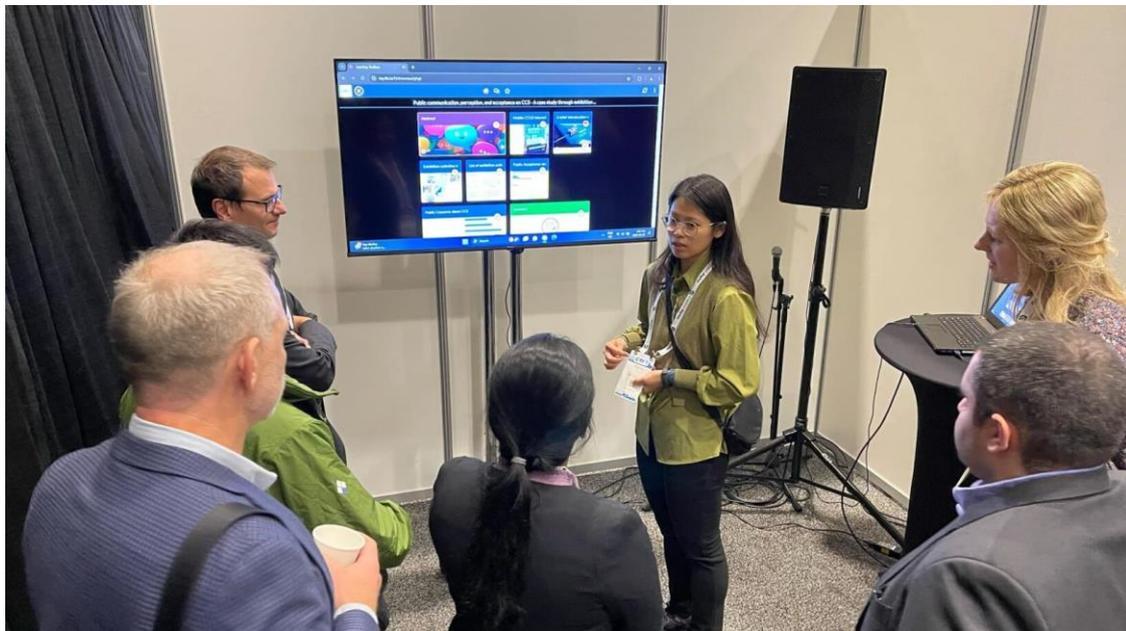
圖四、展覽區入口處



圖五、展覽區



圖六、會場一景



圖七、進行海報發表

參、具體成效

二氧化碳封存技術中的運輸環節是一項複雜的工程挑戰，要將捕捉到的二氧化碳從排放源運輸至封存地點，過程中必須克服多項技術和經濟上的困難。首先，二氧化碳的物理性質決定了其運輸需要特定的條件，為了提高運輸效率，二氧化碳通常被壓縮成液態或超臨界態，在此狀態下，必須維持高壓或低溫環境，以確保其穩定性與低體積。然而，高壓與低溫環境對運輸設備的設計是一項挑戰，管線和儲存設備需要使用特殊材料製造，能夠耐高壓和防止腐蝕。另外，長距離運輸中，管線內部的壓力波動亦可能引發安全事故，例如管線破裂，因此需要搭配嚴格的壓力控制和監測技術。

一般來說，二氧化碳的運輸最常見是透過管線、船舶或槽車的方式，在基礎設施方面，管線鋪設的初始成本非常高，且往往受限於複雜地形或人口稠密區域，因此不僅增加了技術難度，也可能引發當地居民的反彈；如果選擇使用船舶運輸，港口和液化二氧化碳儲存設施的建設成本亦不可忽視；槽車運輸僅適用於陸域的地形，雖然機動性較高、不受地形限制，但其載運量有限，大量運輸下所需要的能源及產生的污染亦不可小覷。這些基礎設施的建設不僅涉及資金投入，還需要克服環境影響評估和土地使用許可等法規障礙。

在安全層面，二氧化碳是一種無色無味的氣體，但在高濃度下具有窒息性，洩漏事故可能對人類和環境造成嚴重危害。尤其是在人口密集區域，如果發生二氧化碳管線洩漏，後果可能難以平息，因此，需要建立完善的風險管理機制，包括定期的設備檢查、洩漏監測系統和應急計劃，以最大限度地降低事故發生的可能性。

經濟性也是二氧化碳運輸的主要挑戰之一，許多二氧化碳的排放源與封存地點相距甚遠，使得長距離運輸的成本高昂，尤其是在捕捉量規模較小的情況下，運輸的經濟性無法具有成本效益，管線運輸系統的建設需要巨額的初始投資，若

無足夠的碳源提供，投資報酬率可能不具吸引力。

最後，法規和政策的不確定性也是二氧化碳運輸的重點，不同國家或地區對於二氧化碳運輸的法規標準可能存在差異，包括運輸許可、環境影響評估以及事故責任歸屬等問題，缺乏統一的政策制度可能導致計畫推展，甚至影響 CCS 技術的整體發展。

綜合上述，二氧化碳運輸在技術、經濟和政策層面上面臨許多問題與挑戰，要克服這些挑戰，需要政府、企業和研究機構的共同合作，透過技術創新降低運輸成本、政策及資金的捕捉促進基礎設施建設，以及建立完善的監測與管理框架，才能推動二氧化碳封存技術的廣泛應用，以因應全球氣候變化。

本次藉由參與研討會，著重在出國主題：「碳封存輸儲工程」領域之相關研究及了解時下熱門議題，並篩選出與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。

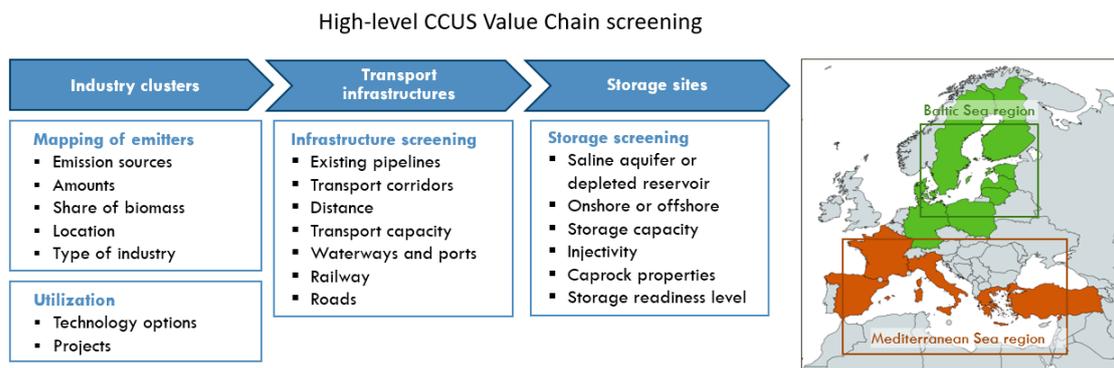
(1)論文篇名：A framework for regional high-level technical screening of promising CCUS value chains (碳捕捉、利用與封存(CCUS)價值鏈的高階篩選架構)

重點摘要：為了加速歐洲各地的 CCUS 發展，CCUS ZEN 計畫透過聯繫歐洲各地的相關利益方，識別出具有發展潛力的價值鏈，在該研究中，重點篩選對象為波羅的海和地中海兩個地區。CCUS 價值鏈篩選內容分為技術面和非技術面，前者聚焦於排放源、封存地點、運輸設施、再利用與再生能源，後者則包括利益相關者的需求、政策法規、氣候對策及資金支持(如圖八)。

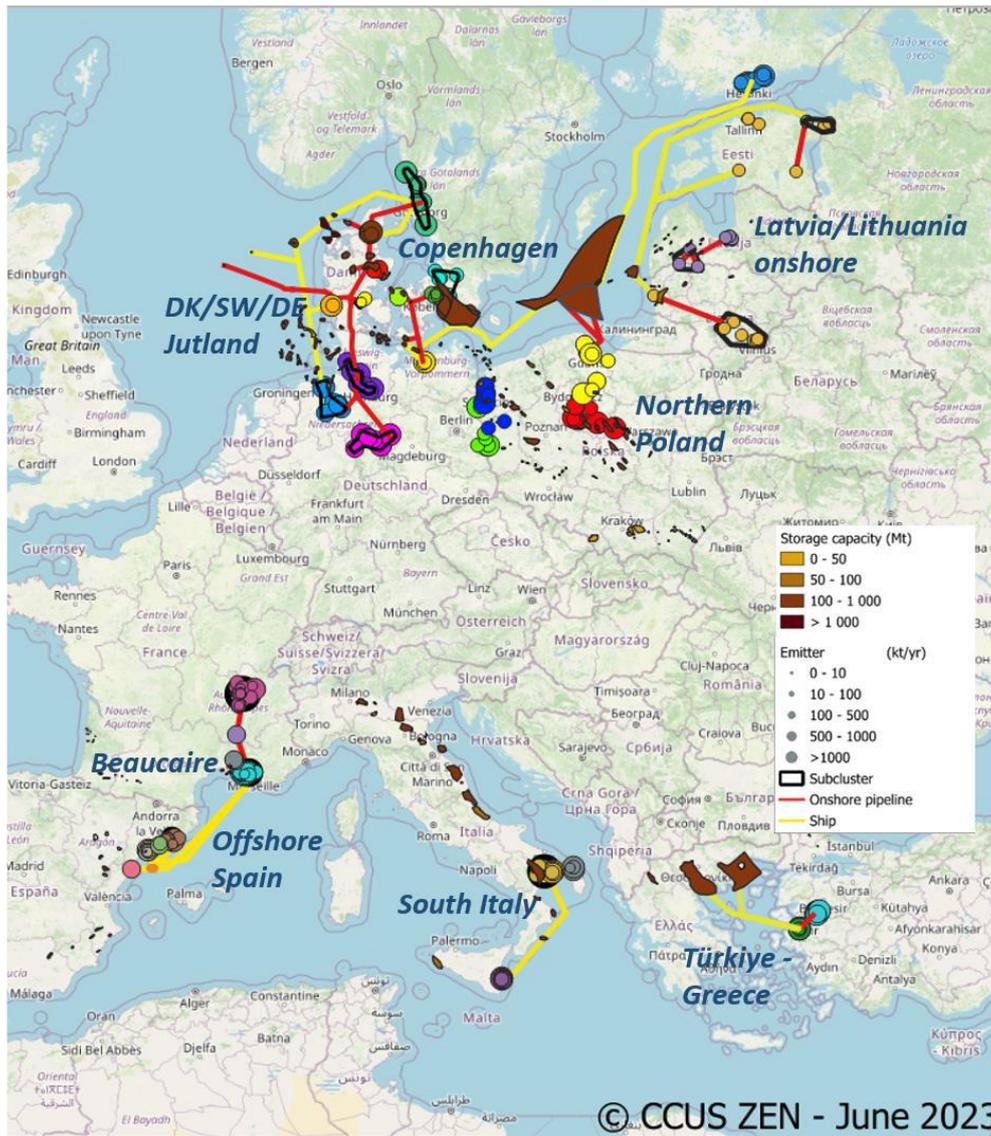
在排放源的篩選中，碳捕捉相關數據主要來自 CaptureMap 平台，該研究透過分析每個地區的二氧化碳排放情況，識別出潛在的二氧化碳來源，在工業排放密集的地區(Industrial cluster)，來自不同工業設施產生的二氧化碳可集中至捕捉中心(hub)，然後統一運送至封存地點。即便是單一的排放源，也可能成為潛在

價值鏈組成的一部分，這取決於其排放量、地理位置以及產業類型等因素；封存地點的篩選則利用公開數據，對深層鹽水層和枯竭油氣田進行評估，確定其封存量；運輸基礎設施的分析則依據現有的二氧化碳運輸方式，包括管線、船運甚至是鐵路和公路運輸，利用專門的數據平台和工具，如 CO2LOS 和 PCI Transparency Platform 識別不同運輸方式的可行性，並設計多種運輸方案以適應不同的地理環境和技術條件；此外，CCUS ZEN 計畫還探討了二氧化碳的再利用潛力，並結合可再生能源資源，分析了如何將 CCUS 技術與當地再生能源發展相結合。

這篇研究篩選出了 15 條潛在的 CCUS 價值鏈，其中 8 條被認為最具發展潛力(如圖九)，適合進一步研究和開發，相信這些價值鏈評估結果可以為歐洲有效幫助加速工業減碳進程。



圖八、CCUS 價值鏈篩選架構



圖九、CCSU ZEN 計畫中篩選 8 條具有發展潛力的 CCUS 價值鏈

(2)論文篇名：Industrial Decarbonization Pathways and Their Implications for Environmental Justice Communities (工業減碳路徑及其對環境的影響)

重點摘要：隨著美國致力於實現淨零排放目標，工業部門的減碳成為其中關鍵的議題，尤其對於水泥、石化和造紙等難以減排的行業來說，達成上更具挑戰，然而，CCS 技術被認為是這些行業減少碳排放的重要解決方案。此篇論文探討了 CCS 基礎設施在美國有效運行所需的成本及地理分布，並分析其對環境的影響。

為模擬 CCS 在工業領域的應用，該研究使用 SimCCS^{PRO} 軟體，對二氧化碳捕捉、管線運輸、地質封存的成本和地理分布進行綜合評估。設計七個減碳情境，碳捕捉目標從每年 100Mt 到 618Mt 不等，並根據捕捉、運輸及封存成本尋求最佳基礎設施的配置。

成本分析研究結果如表二所示，CCS 基礎設施的總成本因捕捉量情境的不同而有顯著變化，捕捉成本從 US\$38.38/tCO₂ 增加到 US\$58.98/tCO₂，佔總成本增幅的 78%；運輸成本也有所增加，從 US\$9.88/t CO₂ 升至 US\$15.63/t CO₂，佔總成本增幅的 22%；而封存成本變化最小。

不同情境下，低捕捉成本的二氧化碳排放源優先納入 CCS 基礎設施網絡。在較低捕捉量下，造紙業和乙醇生產排放源占比超過 20%。當捕捉量提高至涵蓋所有工業排放源時，煉油和紙漿造紙行業分別占 21%和 19%。

CCS 基礎設施的建置對環境及社區可能產生深層影響，特別是在過去曾經面臨經濟或環境危害的社區中。為評估這些影響，研究中使用四項環境正義指標，將每個碳源的 CCS 基礎設施與人口普查區域內的環境正義數據進行比對。結果顯示，不同 CCS 設施對環境社區的影響程度不同。捕捉設施對社區的影響最大，其次是運輸系統，而封存地點的影響相對較小。這些設施的建設可能給社區環境帶來風險，包括影響人體健康及土地使用情形改變等。

該論文指出，在規劃 CCS 基礎設施時，需特別關注對環境的影響，以確保碳封存活動不會進一步加劇社會的不安或風險，未來政策應強調提高社區參與度，使環境正義社區能夠在 CCS 計畫決策中發聲；對受影響的社區提供資金支持和健康保障；加強對 CCS 基礎設施的環境和社會影響評估，確保設施安全運營。

表二、不同減碳情境下的成本分析結果

Annual Capture Amount (MtCO ₂ /yr)	# Streams	# Sinks	Network Length (km)	Total Cost (\$/tCO ₂)	Source Cost (\$/tCO ₂)	Transport Cost (\$/tCO ₂)	Sink Cost (\$/tCO ₂)
100	300	116	6528.94	55.03	38.38	9.88	6.77
200	427	116	5005.20	65.53	53.77	5.23	6.53
300	670	136	9234.81	69.04	55.89	6.47	6.67
400	987	182	14680.58	69.41	56.77	5.84	6.80
500	1296	209	26846.25	76.19	58.06	11.40	6.74
600	1693	257	43060.44	78.88	58.85	13.30	6.73
618.091	1874	298	54684.29	81.46	58.98	15.63	6.84

(3)論文篇名：Monitoring systems for CO₂ transport pipelines: a review of optimisation problems and methods (二氧化碳運輸管線監測系統：最佳化解決方案回顧)

重點摘要：在未來可能的 CCS 大規模運作中，管線被認為是陸上二氧化碳運輸最經濟且安全的方式，然而，由於 CCS 成本高昂且二氧化碳具有潛在風險，因此需要有效的管線監測系統，以確保營運安全。現有大部分文獻主要基於天然氣及石油的輸送進行討論，對於二氧化碳管線輸送因其特殊性則少有探討。因此，該篇研究透過系統性回顧與分析，針對過去在非二氧化碳管線系統上進行研究，探討了管線監測與控制的改良設計等問題。

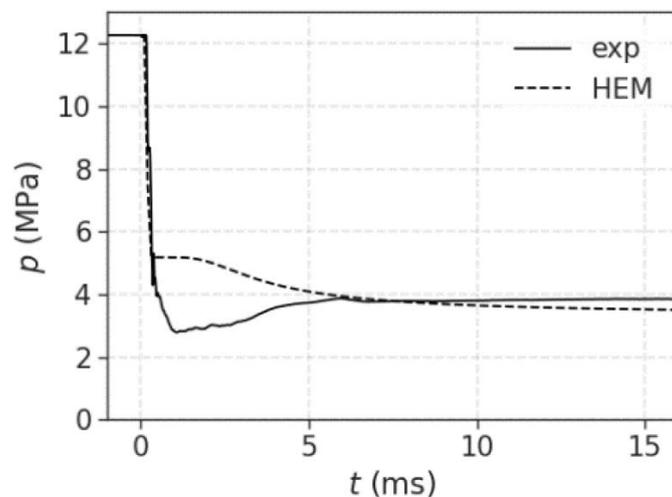
該文獻最後總結了未來研究應專注於二氧化碳管線監測的改良方向，包括：

- 感測器技術的開發與應用：針對二氧化碳的特性，設計更精確的測量和監控設備，以滿足不同操作條件下的需求。
- 環境風險與社會影響：在確保安全性與成本效益的同時，兼顧環境風險與社會影響。
- 實時監測(Real-time monitoring)與數據分析：引進智慧化的數據處理與分析技術(如 AI 和物聯網)，實現對於管線運作的即時監測和風險控制。

(4)論文篇名：Non-equilibrium effects during the sudden depressurization of CO₂ in a pipe (二氧化碳在管線中突發降壓過程中的非平衡效應)

重點摘要：在碳捕存技術中，二氧化碳管線的流動模型非常重要，尤其對於大量輸送的管線中，二氧化碳通常會以液態或超臨界態輸送，若發生突然減壓，例如管線破裂、破洞或壓力釋放閥被開啟，二氧化碳會產生閃蒸現象(flashing)，即因壓力降低而沸騰的現象。因此，需要精確模擬這樣的過程，以因應安全評估及管線的風險分析。

實驗顯示，在突然減壓過程中，液態的二氧化碳壓力可能會短暫降至飽和壓力以下，出現壓力下沉(pressure undershoot)現象(如圖十)，伴隨液體過熱(superheat)，這種非平衡相變會進一步影響管線破裂的風險。



圖十、實驗測量管線中的壓力變化

該篇研究基於實驗數據，探討閃蒸現象的非平衡效應，並將其流體動力學模型(homogeneous flashing model, HFM)與傳統的均質鬆弛模型(homogeneous relaxation model, HRM)進行比較，分析發現 HFM 透過考慮氣泡生成、成長及合併的機制，大幅減少了对調整參數的依賴，相較於 HRM 的表現，HFM 則提供了更準確且一致的結果。

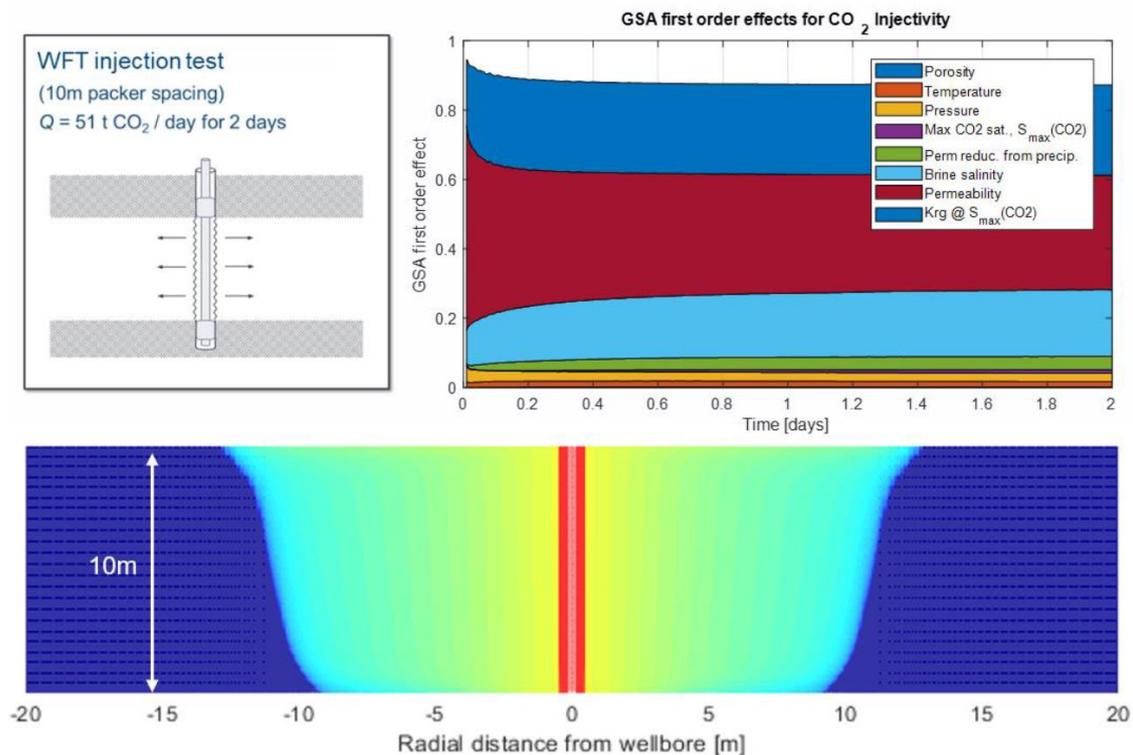
實驗結果顯示，大量輸送的二氧化碳管線在運行時會經歷顯著的壓力下陷和過熱現象，進一步強調在 CCS 應用中精確建模非平衡效應的重要性。這不僅提升了对現場狀況的了解，亦為未來二氧化碳流動保障方面的應用提供了關鍵理論基礎。

(5)論文篇名：A New Method for CO₂ Injectivity Evaluation: Feasibility Modeling and Sensitivity Analysis (二氧化碳注入能力評估新方法：模擬與敏感度分析)

重點摘要：在進行鹽水層封存過程中，注入性能直接影響封存的效率與安全性，然而現有的注入性能評估方法存在多種限制，例如：傳統的現場試驗成本高昂且操作複雜，通常需要數月甚至數年的時間。另外透過注水測試的間接方法雖然更快，但未能充分考慮到二氧化碳、鹽水及岩石之間的物理及化學相互作用，評估的準確程度性有限。

為了解決這些問題，該文獻(SLB 公司)提出了一種快速進行二氧化碳注入測試的新方法，該方法使用電纜地層測試工具 WFT(wireline formation testing tool，以下簡稱 WFT)，在井內隔離多個地層區段，並注入二氧化碳，再透過井下壓力計測量壓力變化，能夠在短時間內獲取精確的注入數據。測試所需的二氧化碳量顯著相較傳統更低，每次測試僅需 10 至 200 噸，且所需時間從數小時到數天不等(如圖十一)。

研究透過熱-水-力學耦合模型模擬不同的鹽水層封存條件，並進行敏感度分析，以識別影響注入性能的主要參數。模擬結果顯示，短期測試的主要控制參數(如相對滲透率和鹽沉澱現象)與長期注入性評估的一致性，證明了其提出的快速測試工具的代表性。此外，WFT 工具的測試結果還能與近井模型結合，將區間測試資料外推至全井範圍的注入性評估。



圖十一、WFT 測試工具示意圖(左上)；參數敏感度分析(右上)；(下)模擬注入兩天後之二氧化碳飽和度分布

(6) 論文篇名：Assessment of CO2 injection induced fault reactivation and reservoir performance conformance at the In Salah CO2 storage site (在 In Salah 碳封存場址之二氧化碳注入引發的斷層滑動與儲層一致性評估)

重點摘要：In Salah CCS 計畫從 2004 年到 2011 年期間成功注入了超過 380 萬噸的二氧化碳，由於封存層的低滲透性(大約 10 mD)，該計畫採用水平井(KB-501、KB-502 和 KB-503 共三口井)來提升注入能力。然而，儲層內部存在複雜的流體動力學與地質力學交互作用，尤其 KB-502 井與一條斷層的相互截切，使得斷層再活動與否成為影響封存安全的重要因素。為了解二氧化碳注入行為對斷層再活動的影響，該研究採用了三維耦合地質力學模型。使用 ECLIPSE 300 和 FLAC3 軟體模擬流體流動與岩層應力之間的相互作用。模型考慮了斷層滑動現象導致的滲透率變化，並針對岩石內聚力、內摩擦角及裂縫膨脹角等參數的敏感度進行了深入分析。最後結論，儘管斷層滑動可能導致滲透率增加與影響二氧化碳的移棲，但儲

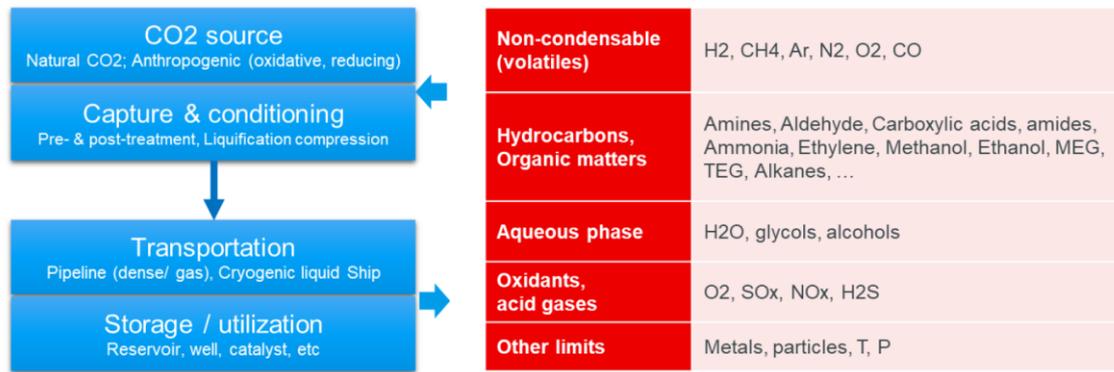
層封存效果好，二氧化碳仍能有效留在目標儲層內。

該篇研究主要的討論如下：

- 斷層再活動的時間：在 50 次模擬中，有 37 次出現了斷層滑動。斷層再活動時間主要集中在 51 至 102 天之間，顯示了二氧化碳注入初期壓力累積對斷層滑移觸發的效應。
- 二氧化碳移棲行為：模擬顯示大部分二氧化碳仍保留在儲層中，說明儲層具有良好的封存能力，即便發生斷層滑動，二氧化碳的移棲風險仍在可控範圍內。
- 壓力造成滲透率變化：隨著斷層滑動，滲透率的增加導致井底壓力明顯下降，顯示了斷層滑動對儲層壓力控制的影響。

(7)論文篇名：CO2 Specifications: review of status and challenges in CO2 transport and storage hubs (二氧化碳規範：二氧化碳運輸與儲存中心的現狀與挑戰回顧)

重點摘要：在 CCUS 價值鏈中，二氧化碳規格是決定其流體成分組成的重要元素。規格設定不僅影響運輸、封存和利用的安全性與經濟性，也決定了捕捉業者的技術需求，特別是在多種碳源對多封存地點的大規模 CCS Hub 中，例如挪威 Northern Lights 計畫、荷蘭 Aramis 計畫和丹麥 Bifrost 計畫，二氧化碳流體中的雜質種類繁多，交叉污染和多種變化影響增加了規格設計的難度。



圖十二、影響 CCUS 價值鏈之二氧化碳流體中的雜質種類

該研究將二氧化碳流體中的雜質分為五大類(圖十二)，並針對每種類的來源、影響和限制進行探討：

- 非凝結性氣體(Non-condensable)：包括氫氣和一氧化碳等氣體，這些成分會影響二氧化碳的泡點壓力，尤其在液態二氧化碳船運中，高濃度氫氣會顯著提高壓力需求，增加資本支出和運營支出。在管線運輸中，氫氣和一氧化碳等氣體總量通常限制在 3~5%，對流體特性的影響相對較小，但仍需考量壓力變化和管線設計的安全性。
- 碳氫化合物與有機物：例如重碳氫化合物和胺類化合物，主要會影響氣相管線運輸的露點壓力；在船運中，可能與二氧化碳反應生成酸類或結晶固體，因而對其運作和健康環境產生影響。
- 水相：水分會與二氧化碳形成碳酸，導致腐蝕風險；此外，水分也可能與其他成分反應形成水合物，影響系統性的操作。根據不同運輸模式，水分含量限制為 30ppm(船運)、50~100ppm(管線)及 500~600ppm(無氧密閉系統)。
- 酸性氣體與氧化劑：酸性氣體如硫化氫和二氧化氮可與水反應形成強酸，對運輸系統構成嚴重的腐蝕行為，此外，二氧化氮還有可能促進固體硫或硫酸生成，因此需要特別限制濃度。

- 其他限制：金屬如汞、鎘和鉍可能導致設備腐蝕或健康危害風險，因此需根據其溶解度限制濃度，此外，固體粒子可能影響注入性能，需要避免在脫水設備或管線中累積。

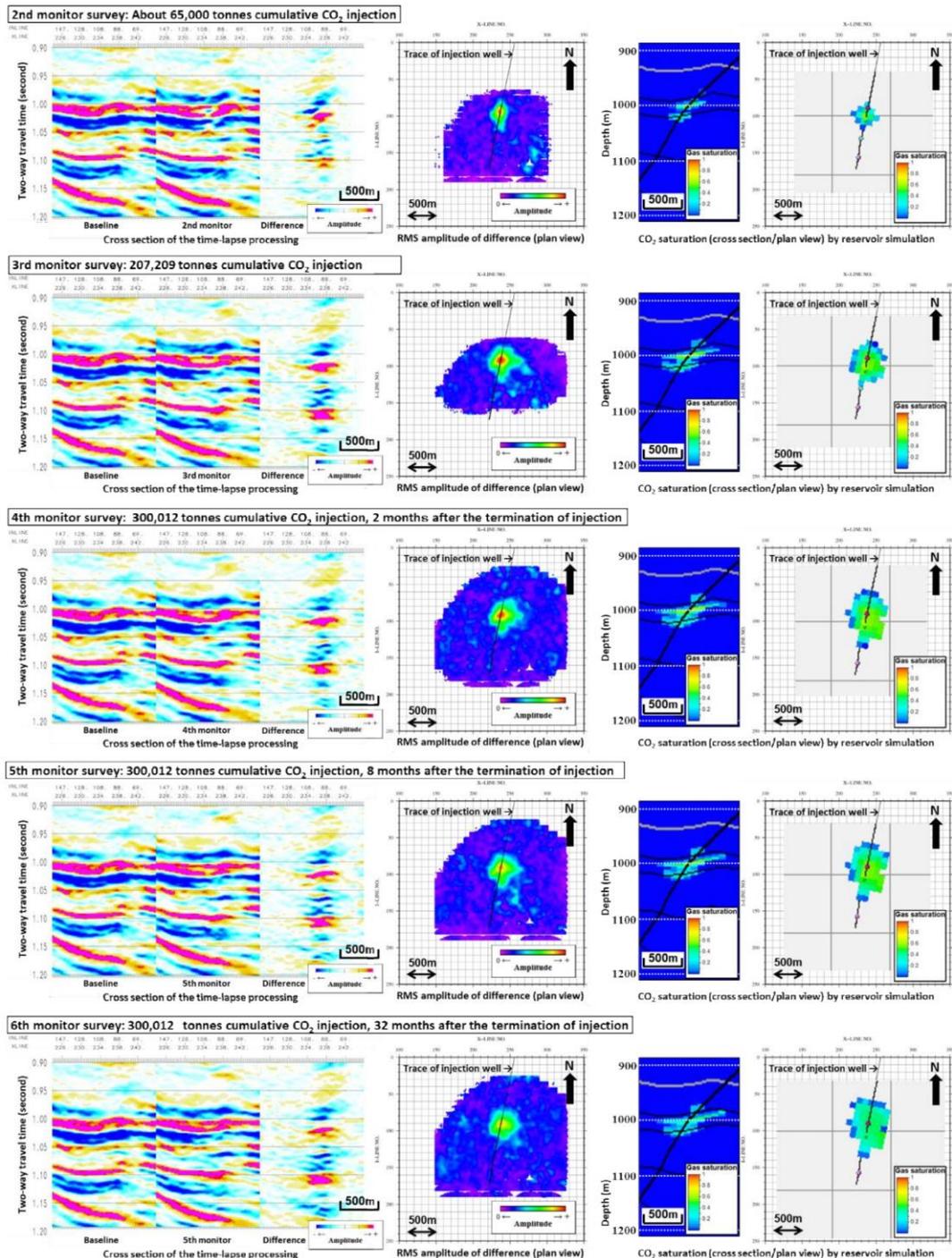
(8)論文篇名：Progress of the post-injection seismic survey of the Tomakomai CCS Demonstration Project (苫小牧 CCS 示範計畫注入後期震波測勘進度更新)

重點摘要：苫小牧 CCS 示範計畫(Tomakomai CCS Demonstration Project)是一個備受世界矚目的碳封存示範計畫，地點位於日本北海道的苫小牧市，屬於濱海封存場址(灌注井設置在臨海地區，井程往海域方向鑽井)，該計劃自 2012 年啟動以來，已進行超過 11 年的研究與監測(正式灌注二氧化碳在 2016~2019 年間)。該計畫目的在驗證二氧化碳的長期儲存安全性，並通過一系列的地球物理震波測勘技術，追蹤二氧化碳在地下儲層中的行為，特別是在二氧化碳注入後的動態變化。

這篇研究利用了多種震波測勘技術，包括 2D、3D 及 Mini-3D 震波測勘，對二氧化碳在地下儲層中的行為進行監測。研究透過對照基線數據與不同階段的監測數據，特別是注入後的時間推移(Time-lapse)數據，來觀察二氧化碳的動態變化，監測範圍涵蓋了 Moebetsu 層(深度約 1,000~1,200 公尺)和 Takinoue 層(深度約 2,400~3,000 公尺)，主要集中觀察 Moebetsu 層的二氧化碳注入與封存行為。

研究分析顯示，震測結果觀察到的二氧化碳注入行為與儲層模擬的預測結果高度一致，尤其是在 0.97~1.05 秒的 travel time 範圍內，震測處理結果顯示有明顯的振幅異常(anomaly)，反映二氧化碳在儲層中擴散及滲透的行為，亦可表示二氧化碳有效地封存在 Moebetsu 層中。此外，隨著二氧化碳注入量增加，異常區域也有逐漸擴展的趨勢，尤其在 65,000 噸~207,209 噸注入的過程中，然而，隨著注入量達到 300,012 噸後，變化相較不明顯，推估部分二氧化碳已經溶解於地層水中。最後，在注入結束後的第 2 個月、5 個月及 32 個月，二氧化碳的變化變得

微小，但其在儲層中的封存狀態仍然是穩定的，並未顯示出滲漏或其他異常情況（如圖十三）。隨著監測技術的進步，對儲層內微小變化的檢測能力與需求將持續增加，提升監測的精細度可為未來 CCS 計畫的管理和風險評估提供更加準確的數據參考。



圖十三、苦小牧 CCS 示範計畫震測結果與模擬結果比較

肆、心得及建議

1. 本次奉派參加第 17 屆溫室氣體控制技術研討會，為期四天的議程下來，深刻感受到國際上對於減碳議題的重視及推動氣候行動目標的決心，會議期間來自各方的產業界、學術研究界及相關單位聚集在此交流並分享最新趨勢及技術。技術論文研討會的主題涵蓋範圍廣，同時間有 7 個會議廳進行簡報，由於報告場次多，建議在研討會前就依據公布的議程預先規劃好時間表，提早到現場了解各會議廳分布位置，以免錯失聆聽演講的時機，另外，可以預先下載研討會 APP，方便查看議程及規劃，並即時接收大會的通知訊息。
2. GHGT 系列會議為國際上探討控制溫室氣體和減碳技術議題最為熱門的研討會，藉由參與此次會議，蒐集 CCUS 技術的最新發展或趨勢，並了解世界各地正在規劃或進行的 CCS 計畫進度，本公司在過去一兩年因應政府淨零減碳政策啟動 CCS 短、中、長期的計畫目標，未來可能面臨到許多工程端(注儲操作的效益)、經濟面(CCS 成本效益)、CCS 計畫介面歸屬(二氧化碳運輸)等問題，若要提高規模成為商業性計畫或發展 CCUS Hub，更需要關注國際上的發展動態，從中學習，因此建議持續派員參與未來的 GHGT 系列會議。
3. 相較於過去參加的油氣產業大型研討會，本次參加的會議主要集中在減碳及溫室氣體控制的相關議題，因此展覽商的規模及單位數量少很多，可以有充裕的時間走訪每一個廠商攤位，了解其技術最新發展賣點或發展方向，總結下來，本次展覽商大多偏向技術服務公司、碳捕捉技術公司、能源或其他溫室氣體減排組織等相關單位，由於本公司執行碳捕捉規劃或研究業務集中在石化及煉製部門，建議未來增加碳捕捉相關領域背景人員參加，以擴展更多交流及合作機會。

4. 在 GHGT-17 技術論文發表部分，從中選擇個人感興趣的主題聆聽，在 CCUS 價值鏈源匯分析(source-sink mapping)，國外的做法與國內大同小異，都是藉由識別出潛在的碳源、地理與人口的分析，運輸的基礎設施選擇，最後是碳封存場址的篩選與評估，重點在於是否能夠全面性的掌握其中資訊，然而現在有許多的分析商提供更細部整合性的資訊(例如：Capture Map)，可以在進行 CCUS 計畫提供有用的訊息。在 CCS 運輸方面，尤其是邁向大規模運量的管線運輸方式，許多文獻都提及二氧化碳規格的影響及安全性的問題，在未來的管線運輸監測方面，需要重點放在開發更精確的測量和監控設備；注重環境風險與社會影響以及引進智慧化實時監測與數據分析等方面。另外，SLB 公司提出快速進行二氧化碳注入測試的新工具，能夠在短時間內獲取精確的注入數據，且測試所需的二氧化碳量顯著相較傳統方法低，未來在本公司進行 CCS 場實際灌注前，若時程規劃允許，建議進行注入測試，或與技術服務公司研討新型工具的應用，未來可透過模擬進行敏感度分析，快速識別出影響注入性能的主要參數。
5. 國際性的研討會集結了來自世界各地減碳技術的專家學者，是一個知識與經驗交流、切磋的難得機會，本次在研討會中以電子海報形式發表論文一篇，難得有機會在國際的研討會上展示研究分析成果，以及在過去一兩年間製作 CCUS 技術推廣的相關成果與努力，雖然無法實體展示 CCUS 互動模型，不過透過影片展示方式也很吸引大家的目光。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。
6. 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儕，多充實英文能力，使出國任務發揮最大價值。