

出國報告（出國類別：開會）

## 參加 IEA 舉辦第16屆溫室氣體控制技術 研討會(GHGT-16)

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：王志文、邱維毅

派赴國家/地區：法國/里昂

出國期間：111年10月22日至10月29日

報告日期：111年11月21日



## 摘要

本次出國參加 IEA 所舉辦之第 16 屆溫室氣體控制技術研討會(簡稱 GHGT-16)，共實際聆聽了 22 場次會議(session)，包含開幕式及演講、主題演講、6 場全體性技術會議(Technical Plenary)與閉幕式，除了各種不同會議參與及聽講外，也整理各技術場次的論文摘要，並與部分與會者交換 CCS 相關意見及聯繫資訊，所攜回資料可供本公司 CCUS 團隊工作同仁查閱。

本次聆聽之會議內容包含：運輸、社會溝通、地質封存實例、監測、公眾看法、法規與政策等。並與(1)日本 JCCS 的 Yoshihiro Sawada 先生；(2)ExxonMobil 的 Ganesh R. Dasari 先生；(3)TotalEnergies 公司的 Kakra Koram 先生；及(4)日本環境產業技術研究所(RITE)的中島崇裕博士，分別交流台灣邁向 2050 淨零策略、台灣推動大尺度 CCUS 計畫或建置 CCUS Hub 及自動化 OBS 記錄資料分析方法等議題交流，未來也會持續保持連繫。

CCUS 計畫推動成功與否關鍵因素通常是非技術性問題，建議本公司應積極推動教育宣導與拓展社會溝通、讓民眾了解 CCUS 可能面臨的風險與未減碳所帶來氣候災害的社會與經濟危害，在可控制與防範的風險下，取得民眾支持推動 CCUS 計畫達到淨零。推動 CCUS 計畫聯盟、基金或團隊，攜手共同推動、面對與解決相關問題，積極推動台灣本土產業間的合作聯盟，共同解決碳捕捉技術研發或引進、碳運輸問題探討、碳封存場址評估與建置，才有機會共同面對問題與降低許多不確定性。學習國際現有最新技術與觀念，除了可以避免台灣推動 CCS 可能會經歷太多不必要的錯誤外，更可加速台灣各項進程的推動，才更有機會真正邁向 2050 淨零排放。

## 目次

摘要 .....	I
一、目的 .....	1
二、過程 .....	5
三、具體成效 .....	47
四、心得及建議 .....	48

## 一、目的

為符合我國 2050 年減碳目標、發展本公司碳封存技術與評估國內潛在碳封存場址，本公司近年來積極投入財力、物力與人力進行碳捕捉、再利用與封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, 簡稱 CCUS)相關議題的研發，作為本公司邁向淨零轉型選項之一。其中，碳封存除了可作為本公司邁向淨零轉型之業務目標外，更是影響我國高科技產業在世界貿易競逐上，需要面臨的減碳關鍵議題。即便本公司過往進行油氣探勘與開發生產，積累了國內、外巨量地下地質探勘經驗與知識，對於碳封存場址評估與注儲工程技術的相關研究上，與台灣其他公司相比較已位居領先地位，但仍有許多其他與碳封存相關的領域待學習或是引進國際先進技術，特別是二氧化碳封存、運輸、監測、管理與社會溝通等層面。

本次前往參與的第 16 屆溫室氣體控制技術研討會(GHGT-16)為國際能源署(International Energy Agency, 簡稱 IEA)轄下的溫室氣體研發技術計畫部(IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 簡稱 IEAGHG)所督導舉辦，會議每隔兩年於夥伴成員國輪流舉辦，會議地點遍布於北美、歐洲與亞洲。本會議討論重點聚焦於碳捕捉、再利用與封存(CCUS)等相關領域，屬於碳捕捉與封存技術的國際級關鍵會議，旨在於控制大氣中的溫室氣體含量。

本次會議是第一次在法國舉行，會議中展示法國（及更廣泛的歐洲）在 CCUS 方面的專業知識，並支持歐洲未來的 CCUS 發展，特別是在工業領域的應用方面。會議由 Club CO<sub>2</sub>主辦，法國 ADEME、BRGM、IFP Energies nouvelles 和 TotalEnergies 協辦，選擇在法國第二大都市區（僅次於巴黎），同時也是歐洲2019年票選智慧旅遊城市第一名的里昂來舉辦 GHGT-16。

此次第16屆溫室氣體控制技術研討會之議程內容廣泛，包含12大項議題，分別為：碳捕捉、地質封存、其他封存法、工業排放源、運輸、負排放、二氧化碳再利用、示範、技術評估、公眾看法、政策與法規等項目(圖-1)。

各大項議題又可細分為：

1. 碳捕捉：下一代捕捉技術、環境與營運、燃燒捕捉過程模擬、胺液先導試驗工廠研究、胺官能化吸附劑之成形與測試、化學循環、鈣循環、薄膜吸附、混合式吸附劑、金屬有機框架材料(MOFs)之篩選與商業化。
2. 地質封存：地質與枯竭油氣田注入封存研究、封存成本估算、地球化學研究、封存場址特性、封存容量、機器學習、封存機制、井身結構完整性、商業化封存模擬、地球化學模擬、井孔與洩漏模擬、玄武岩或低孔隙率地層與礦化模型建立、地球化學與孔隙尺度模擬、地球化學角度的生態系統與油井監測、地表分散式聲波感測技術、物理綜合式監測技術、微震監測與二氧化碳激勵生產。
3. 其他封存法：地質封存以外的封存與減碳方法。
4. 工業排放源：脫碳工業、氫能與 CCS(CO<sub>2</sub> Capture and Storage)、鋼鐵業、水泥業。
5. 運輸：二氧化碳的輸送品質(流動保障)、基礎設施及源-匯(碳源至封存場)關聯比對、管線與船舶運輸。
6. 負排放：淨零排放至負排放、直接空氣捕捉(DAC)、生質燃料與 CCS、淨零排放科

技(NET)與 CCU。

7. 二氧化碳利用：二氧化碳礦化、二氧化碳轉化。
8. 示範：封存鏈計畫評估、運轉中碳捕捉示範。
9. 技術評估：封存系統評估、前端工程與設計(FEED)研究、系統觀點、部署模擬、CCS 擴展應用。
10. 公眾看法：溝通-社會科學與能力建立(Capacity Building)。
11. 政策：國際與碳市場、能源系統模擬。
12. 法規：國際與歐盟的法規及標準、美國的法規經驗。

本公司正在致力推動 2050 淨零碳排技術研發，並將 CCUS 列為公司邁向 2050 淨零的重要技術之一，歐洲各國對於 2050 淨零的態度相較其他國家積極，從現有推動計畫中也略知 CCS Network 或是 CCS Hub 的觀念與想法，有機會作為本公司或是台灣借鏡，以網絡或是集中方式協助公司解決南部碳排放源，甚至是協助其他公司進行碳封存以開拓新業務。本次會議的議題除了與本公司研發單位所需了解與學習的理工學門知識高度相關外，也包含公眾看法、社會學分析及運作、各國碳封存政策及市場、國際法規制定現況與執行成果，這些都可以作為本公司在台灣推動 CCUS 的參考依據。

GHGT-16 Programme Overview 23-27 October 2022

Session Time	Number of presentations (20 mins per presentation)	Session	A	B	C	D	E	F	G
Monday 11.20-13.00	5	1	Absorption Next Generation Technologies I	Communications, Social Science, and Capacity Building I	Assessment of full-chain projects	From zero to negative emissions	Decarbonizing industry I	Basalts, low-permeability and mineralisation modelling	Chemical Looping
Monday 14.00-15.40	5	2	Absorption Next Generation Technologies II	Communications, Social Science, and Capacity Building II	Capture demonstration campaigns	DAC I	Hydrogen and CCS	Geochemical and pore-scale modelling	Calcium Looping
Monday 16.10-17.50	5	3	Absorption Next Generation Technologies III	Geological Storage Case Studies I	Panel Discussion 1	DAC II	Iron & Steel	Ecosystem and well monitoring with focus on chemical method	Membranes
Tuesday 09.10-10.50	5	4	Absorption: Environment and Operation I	Depleted reservoirs & injectivity	Panel Discussion 2	Biomass & CCS I	Cement Industry	Distributed Accoustic Sensing - surface deployments	Hybrid sorbents
Tuesday 11.20-13.00	5	5	Absorption: Environment and Operation II	Storage costs	Panel Discussion 3	Biomass & CCS II	CO <sub>2</sub> Mineralisation	Multiphysics monitoring I	MOFs: from screening to commercialization

Tuesday 16.00- 17.40	6	6	Absorption: Environment and Operation III	Geomechanics	Panel Discussion 4	NET & CCU	CO <sub>2</sub> Conversion I	Multiphysics monitoring II	Regulatory Experiences USA
Wednesday 09.10- 11.00	6	7	Post Combustion Capture Process Modelling I	Other Storage	Panel Discussion 5	Assessing storage systems	CO <sub>2</sub> Conversion II	International and Carbon Markets	Decarbonizing industry II
Wednesday 11.20- 13.00	6	8	Post Combustion Capture Process Modelling II	Site characterisation	Panel Discussion 6	FEED studies for power	Wellbore Integrity	Energy System Modelling	Transport - CO <sub>2</sub> Quality
Wednesday 16.00- 17.40	6	9	Amine Pilot Plant Studies I	Storage Capacities	Regulations and Standards - International and EU	System perspectives	Field-scale reservoir modelling	Monitoring microseismicity	Infrastructure & source-sink matching
Thursday 09.00- 10.50	6	10	Amine Pilot Plant Studies II	Machine learning	Geological Storage Case Studies II	Deployment Modelling	Geomechanics modelling	CO <sub>2</sub> -EOR	Pipelines
Thursday 11.20- 13.00	6	11	Amine functionalized sorbents : shaping and testing	Trapping Mechanism	Absorption: Environment and Operation IV	Expanding applications for CCS	Wellbore and leakage modelling	CO <sub>2</sub> -EOR	Shipping

圖-1 第16屆溫室氣體控制技術研討會(GHGT-16)之議程簡表

## 二、過程

### (一)出國行程

出國期間：111 年 10 月 22 日至 29 日，共 8 日

出國行程：

- 1、10 月 22 日(六)至 23 日(日)，自桃園機場搭乘土耳其航空 TK 25 班機至伊斯坦堡機場，於伊斯坦堡機場轉乘土耳其航空 TK 1807 班機抵達法國里昂，23 日下午先前往會議現場報到。
- 2、10 月 24 日(一)至 27 日(四)，參與第 16 屆溫室氣體控制技術研討會(GHGT-16)。
- 3、10 月 28 日(五)至 29 日(六)，自法國里昂搭乘土耳其航空 TK 1807 班機至伊斯坦堡機場，於伊斯坦堡機場轉乘土耳其航空 TK 24 班機返回台灣。

### (二)會議首日(24)與會內容

本日亦是本次會議議程的啟始，由 IEAGHG 主席 Kelly Thambimuthu 先生演講作為開端(圖-2)。Thambimuthu 破題式的指出，CCUS 最重要的目的即在於減少人類使用能源過程中所排放至大氣中的 CO<sub>2</sub>，除了目標直指 2050 年達到淨零排放外，在達成 2050 年的目標後，甚至更要利用直接空氣捕捉(Direct Air Capture 簡稱 DAC)技術，封存人類歷史演進中所排放至大氣內的 CO<sub>2</sub>。而要達成這些目標的最佳方式，就是所有人眾志成城的共同合作，對減少溫室氣體的議題上有共同體認的前提下，思考如何解決因溫室氣體所造成極端氣候的科學技術與方法。



圖-2 IEAGHG 主席 Kelly Thambimuthu 先生揭開會議演講

接著由本次會議主辦國-法國的 IFP Energies nouvelles (IFPEN) 二氧化碳捕捉與封存負責人，亦是法國 ClubCO<sub>2</sub> 主席 Florence DELPRAT-JANNAUD 女士致詞(圖-3)，並介紹法國未來發展 CCS 的藍圖，範圍涵蓋三個法國陸上區域：上法蘭西(Haute de France)、諾曼第(Normandie)與新阿基坦大區(Nouvelle Aquitaine)，其中：上法蘭西區域與諾曼第區域因為鄰近大西洋，可發展成為 CCS Hub。Florence 強調 CCS 與 CCU 是降低溫室氣體最重要的手段，全球必須快速(Faster)、廣泛(Wider)與聯合(Together)發展 CCUS 技術。



圖-3 會議主辦國-法國 ClubCO<sub>2</sub> 主席 Florence DELPRAT-JANNAUD 女士致詞

歡迎致詞後，緊接著分別由聯合國政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 副主席 Thelma Krug 女士、國際能源署 (IEA) 副執行主任 Mary Burce Warlick 女士與 GCCSI (Global CCS Institute) 首席執行長 Jarad Daniels 先生分別發表主題演講。

Thelma Krug 女士說明在本世紀結束前，控制溫室效應於 1.5 或 2 °C 以下目標的可能作法及挑戰，並揭示 CCS 是達成此一目標選項之一，但在執行過程中可能會面臨技術、經濟、制度、生態環境與社會文化的障壁，而政策工具的使用、廣大的公眾支持及技術的革新將有助於減少這些障壁(圖-4)。

Mary Burce Warlick 在其演講中強調，建立一個具全球一制性的法規，將有助於達成淨零碳排的目標，因此，IEA 也將推出碳封存的相關指引，希冀可消除國際間的障礙(圖-5)。

Jarad Daniels 先生在演講中點出，儘管目前全世界已有許多朝向淨零碳排的計畫在執行或規劃中，但總體而言，要達到淨零碳排的目標，則總體碳封存規模應為目前世界上所運行 CCS 計畫的 100 倍。而從事碳封存產業是否可獲利，將是個人或企業組織投

入 CCS 產業的最主要誘因，所以政府是否可藉由法規的修改制定、激勵措施、區域間跨國合作計畫等方式，達到促進 CCS 產業的長期發展，將是達成淨零碳排目標的關鍵手段(圖-6)。

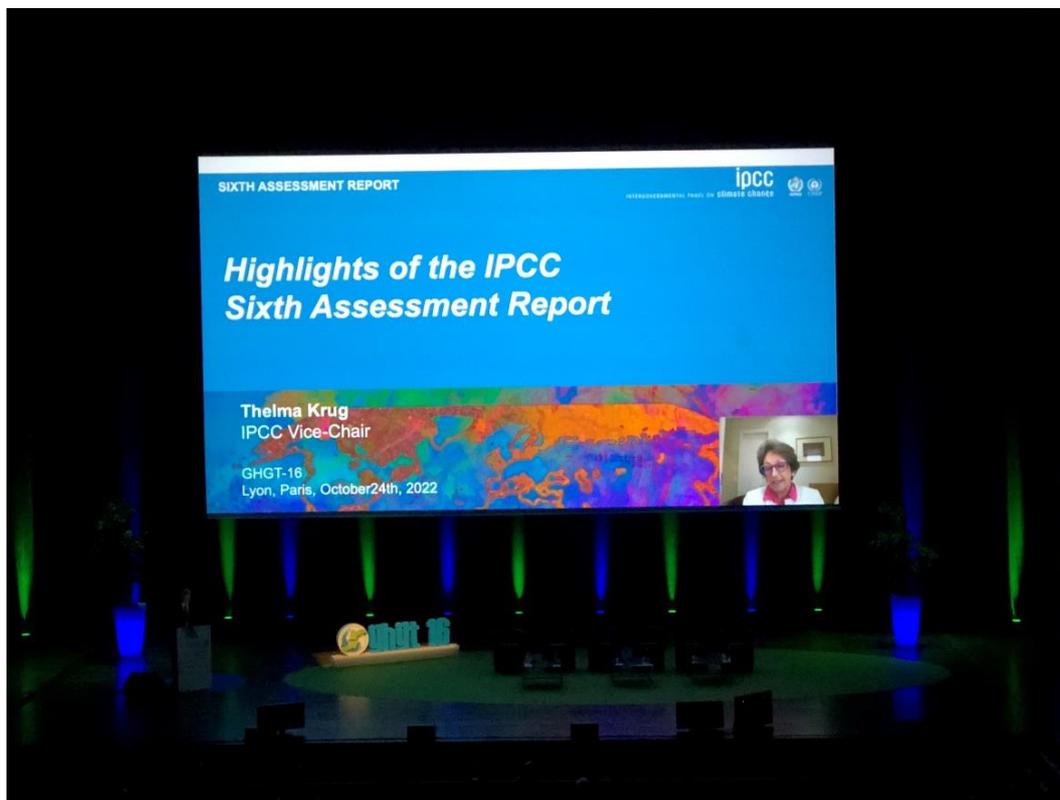


圖-4 Thelma Krug 女士介紹 IPCC 第六次評估報告



圖-5 Mary Burce Warlick 女士說明 IEA 推動 CCS 相關指引



圖-6 Jarad Daniels 先生報告 GCCSI-2022 年最新行動報告

在歡迎致詞與專題演講後，本日議程隨即在各大主題會場展開。本次出國人員分別參加了 1C、1B、2B、2E、3B 與 3C 等主題宣講議程。以下為各議程聆聽報告之概述摘要：

#### 1、Session 1C - Assessments from full-chain projects :

在此議程中，多名講者分別介紹美國 Intermountain West Region(I-West)計畫、瑞典-挪威的 Preem CCS 計畫、瑞典的斯德哥爾摩生質能發電廠碳捕捉計畫、丹麥的 ConsenCUS 計畫與日本的苦小牧計畫。

來自洛斯阿拉莫斯國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory)的 Rajesh Pawar 教授簡介 I-West 計畫的技術規劃路線圖。該研究認為除了建立多種減碳技術的發展外，更要思考區域相關者/社群的需求/機會/擔憂等層面，保持當地社群可獲益(收入及工作機會)的狀態，對於計畫的開展與推進是極為重要的一環。

瑞典查爾摩斯工學院 (Chalmers University of Technology)的博士生 Max Biermann 講解從 Preem CCS 計畫中所習得的經驗。研究目標為希望可於 2035 年完全捕捉 Lysekil 煉油廠所排出的 CO<sub>2</sub> 並船運至北極光的接收站，故展開煉油廠的捕捉先導試驗。除成功利用 Aker Carbon Capture (ACC)所製之吸收劑經 SMR 法從蒸汽甲烷重整器煙氣中捕捉 CO<sub>2</sub>外，更藉由熱管理的方式成功降低成本 33%並減少煉油廠加熱過程中 80% 的碳排。

Petrofac 公司的 Chet Biliyok 簡介將熱碳酸鉀 CO<sub>2</sub> 捕捉技術(Hot Potassium Carbonate,HPC)應用到瑞典斯德哥爾摩 Värtaverket 生質能發電廠的熱電聯產廠方法。Petrofac 公司認為燃燒後捕捉的 HPC 方法可為大規模的 CCUS 解決方案，並且可整合至

現有的廠房設備中，對工廠運作的干擾應最少。由於 CO<sub>2</sub> 的運輸成本可能視不同案場設計而有劇烈變化，因此建議在捕捉端設計時，即應充分考慮不同型態的 CO<sub>2</sub> 捕捉與儲存槽設計，以因應不同的輸送型態與封存場需求，可彈性選擇較具價格競爭性的輸出與封存場。

Sebastian Nis Bay Villadsen 博士為丹麥的 ConsenCUS 計畫的資深計畫經理，其簡報介紹 ConsenCUS 計畫。ConsenCUS 主要目的在於提供工業界達到淨零排放的路線圖，該計畫包含技術創新研發與非技術性項目。目前正由進行丹麥科技大學(DTU)進行先導試驗，建立一個使用電化學原理捕捉 CO<sub>2</sub> 並轉化為有用化學品的示範工廠，預計 2023 年中開始將試驗成果應用在歐洲三大工業基地（丹麥奧爾堡波特蘭的 Rørdal 水泥生產基地、OMV Petrom 的 Petrobrazil 煉油廠和希臘的 Yerakini Mine 菱鎂礦廠）。

來自日本 JCCS 公司的 Daiji Tanase 簡報苦小牧計畫注入期結束後的監測近況。苦小牧計畫主要注入層之一 Moebetsu 層自 2016 年 4 月 6 日至 2019 年 11 月 22 日間共注入 300,012 噸 CO<sub>2</sub>。開始注入後第 2 與第 8 個月分別施行 3D 震測以監測 CO<sub>2</sub> 團塊；注入前中後亦進行了多次的季節性海洋環境監測與持續性的微震監測。但所有監測均無 CO<sub>2</sub> 洩漏或於注入層誘發地震的現象。

## 2、Session 1B -Communications, Social Science, and Capacity Building I：

公眾溝通是推動 CCUS 計畫成功與否的關鍵因素，本場次包含歐洲、美國和日本的相關經驗，從不同角度探討公眾對於負碳技術(BECCS 和 DACCS)和傳統 CCS/CCU 的認知、看法與接受度。

英國劍橋大學助理教授 Lucrezia Nava 簡報利害關係人對負碳排技術和實踐 (Negative Emission Technologies and Practices, 簡稱 NETPs 的看法」，發現不同利害關係人對 NETP 的看法存在巨大差異，非政府組織傾向於支持生態解決方案而不是地質解決方案，並且對使用 NETP 來實現歐洲目標持高度懷疑的態度，而私營部門的參與者在總體上對 NETP 更加熱情，特別是涉及產生工業協同效益的技術(例如：BECCS)。本研究所採用的框架明顯影響各種利害關係人的看法，與情感/道德框架相比，採用邏輯/科學框架可以提高對 NETP 的認知，尤其是生態認知框架。對於可能採用道德框架的利害關係人（例如：許多非政府組織）來說，對道德問題的討論會促進對話和其他利害關係人的觀點更加開放，而私營部門則出現反效果。因此，促進就這些問題進行對話至關重要，要讓每一方都認識到哪個框架最受其他利害關係人青睞，並努力調整自己的框架，使其更接近於其他利害關係人的框架，以鼓勵更開放的框架和建設性的對話。

日本九州大學 Kenshi Itaoka 教授簡報公眾對負碳排技術封存的看法，為了探討公眾對負碳排技術封存的看法，包含採行碳捕捉和封存技術的生質能(BECCS)和直接空氣碳捕捉和封存技術(DACCS)，日本在 2021 年進行了一項公眾調查(樣本 n=4000)。問卷調查的目的在評估公眾對 BECCS 和 DACCS 的意識(awareness)、認識(knowledge)、看法(perception)和意見(opinion)，以及對 BECCS 和 DACCS 碳封存的看法和意見。研究預先假設公眾沒有足夠的資訊讓他們對 BECCS 和 DACCS 來表達意見，因此，在回答問題之前先向參與者提供從氣候變化和減緩措施的科學報告中，關於 BECCS 和 DACCS 碳封存、

其他傳統 CCS(包括：化石燃料發電 CCS 和工業 CCS)的相關資訊。大約 35%的受訪者聽說過 CCS，但只有大約 10%的受訪者對這項技術有所了解。因此，即使在向受訪者提供了 CCS 和負碳排相關資訊後，大多數的受訪者對 CCS 技術沒有正面或負面意見也是合理的。無論是負碳排 CCS 還是傳統 CCS，在 CCS 中實施碳封存階段仍然會引起鄰避現象(Not in My Back Yard, 簡稱 NIMBY)。負碳排 CCS 比傳統 CCS 得到更多支持(雖然差異並不大)，且發現對淨排放技術(NET)越支持的人，對於 BECCS 和 DACCS 越積極。研究結果顯示，對 CCS 進行適當的公眾宣傳有可能提高公眾對碳封存的接受度。

德國Fraunhofer ISI的Elisabeth Dütschke博士簡報法國和西班牙民眾對CCUS接受度的調查結果，平均而言，受訪者對CCU比對CCS有更正向情緒，因為，受訪者認為CCU比CCS更具創新性、必要性、經濟性、安全性、且對自然的破壞更少，並且對區域和國家經濟更有好處。從在國家層面而言，超過一半的受訪者會接受CCUS技術在他們的國家發展(其中：CCU有60%的接受度高於CCS的50%接受度)。而西班牙的接受度(CCUS為65%；CCS為54%)高於法國(CCUS為56%；CCS為46%)。接受CCS和CCU的主要個人層面預測因素，包括CCUS發展對經濟影響的積極看法以及先前的支持技術的信念。整體而言，公眾對CCU和CCS的總體評價和接受度，以及不同研究人群之間存在顯著差異，且預測接受度的因素也因研究人群而異。這些研究結果有助於透過跨國研究提高公眾對CCUS技術認知的理解。隨著歐洲CCUS計畫的發展，在國家和地區層面適當地讓公眾參與，可能會對CCUS項目的成功起到至關重要的作用。

美國德州大學奧斯丁分校經濟地質局的 Katherine Romanak 研究科學家簡報監測複雜性對利害關係人接受 CO<sub>2</sub> 地質封存項目的影響，環境監測向利害關係人提供資源(地下水、土壤、大氣、海水以及人類健康和 safety) 受到保護的保證。地質碳封存的安全性對利害關係人至關重要，而環境監測是公眾與項目之間的關鍵連結。研究探討：(1) 利害關係人如何看待環境監測計畫的優化(例如：簡化)，以及(2)在什麼情況下，利害關係人可能更喜歡複雜的、數據豐富的方法，而這些方法對他們來說，在理智上是無法獲得的，並要求他們信任科學家，而這不是利害關係人可以輕鬆學習、理解甚至實施的方法。研究採用 2 x 2 階乘實驗，在實驗中包含訊息複雜性(複雜與簡單)和社會規範(來自科學家的支持與來自社區成員的支持)。受試者被隨機分配到四種情況之一(有科學家支持的複雜訊息；有社區成員支持的複雜訊息；有科學家支持的簡單訊息；有社區成員支持的簡單訊息)。受試者還被問及他們對認知的需求、對科學和科學家的態度、對氣候變化的態度以及對 CCS 的支持。研究樣本來自與墨西哥灣西部接壤的州(德克薩斯州、路易斯安那州、佛羅里達州)的居民，這些州正在計畫在陸上和海上進行二氧化碳地質封存。結果對關鍵利害關係人的公共宣傳工作具有重要意義，還計畫將這些結果與在挪威進行的調查進行比較。

荷蘭研究科學組織 TNO 的 Marit Sprenkeling 科學家簡報利害關係人對監測二氧化碳封存的看法和偏好及其對優化二氧化碳封存項目社會嵌入性的貢獻，針對德國、希臘、荷蘭和挪威對監測系統如何促進 CO<sub>2</sub> 封存項目的社會嵌入研究，四個案例研究在當前 CCS 發展、歷史背景以及石油和天然氣行業經驗手段的監測背景、公眾對 CCS 活動的信任程度以及監測框架的擴展方面各不相同。結果顯示：(1)有兩個國家目前沒有 CCS 計畫，因此重點還沒有放在監測上；(2)基於歐洲監測框架和每個國家/地區的計畫，量身定制

CCS 開發和 CO<sub>2</sub> 封存監測法規；(3)CCS 監測的治理尚未建立；(4)雖然大部分受訪者並不擔心 CCS 的安全和風險，但仍有部分公眾擔心 CO<sub>2</sub> 封存的風險與擔憂脫碳延遲；(5)受訪者提倡讓受信任的第三方參與監測以及監測結果的解釋和交流，且監測結果的溝通以及利害關係人參與監測過程可能會對 CCS 計畫形象產生積極影響；(6)監測數據可用於了解 CO<sub>2</sub> 封存的長期影響，並在 CCS 計畫間共享，以相互學習並共同努力加速推動 CCS 計畫。

### 3、Session 2B - Communications, Social Science and Capacity Building II：

公眾溝通與封存場址監測管理一直是 CCUS 計畫成功與否的關鍵因素，本場次探討利用不同方式進行民眾溝通的經驗、講述封存場址可能承受風險與持續排放溫室氣體的影響、聯合國氣候變遷綱要公約(UNFCCC)對於 CCS 的態度及奈及利亞在世界銀行集團支持下，推動非洲第一個 CCUS 計畫的概述。

英國 CCS 研究中心的 Carys Blunt 經理簡報英國 CCS 研究中心在公眾溝通的經驗，民眾自 2017 年以來免費參加中心舉辦的實體會議，而在 2020 年 COVID-19 流行開始之後，該中心改以網路講座和研討會，以及社交媒體(UKCCSRC 網站)與大量潛在受眾進行交流。透過廣泛 CCS 主題可以了解哪些領域最受關注，以及在過去 5 年中發生的變化程度，還可以推估出針對不同 CCS 主題和不同利害關係人群體的溝通方法。未來 CCS 交流的需求或必要性，已遠遠超過公眾接受度的推動。隨著 CCS 計畫在各地推動越來越廣泛，越來越多的非 CCS 現有角色的人（其中許多是各自領域的專家）必須進行互動，而這些利害關係人可能永遠不會參加 GHGT 或其他 CCS 會議。作者希望本文可幫助 GHGT 會議的與會者，不僅思考如何從這些會議所提供的知識轉移，而且思考需要從 GHGT 會議等活動，向許多其他團體傳達什麼以及如何傳達。

澳洲 Buru Energy 的 Mark Trupp 經理簡報以大尺度 CCS 因應與分擔氣候變遷的風險。由於 CO<sub>2</sub> 地質封存的監測將成為未來 CCS 計畫推動的關鍵因素或阻礙因素，而過於規範或嚴格的監測可能在審查階段就扼殺 CCS 計畫，或是使得計畫成本增高，因此，需要就 CO<sub>2</sub> 封存地點的風險進行各方面的水平對話。因現今大尺度 CCS 計畫的數量仍較傳統激勵採油(EOR)少，造成民眾對新創性大尺度 CCS 計畫接受度產生阻礙。而民眾不願意接受複雜且難以掌握的新流程是可以想像的，但監測管理機構可能會受到社區或政治壓力，在計畫審核與批准流程中必須消除所有風險，雖然這看似合理，但並沒有將 CCS 計畫與繼續排放溫室氣體進行權衡。如何讓 CO<sub>2</sub> 地質封存過程中的所有參與者，包括：計畫支持者、監管者、融資者、當地和更廣泛的社區民眾，更好地理解適度可承擔的風險將如何帶來更好的環境成果。

愛爾蘭科克大學(University College Cork)的 Niall P. Dunphy 博士簡報公眾有效參與 CCS 計畫的實施，提及 CCS 雖被歐盟視為脫碳的關鍵技術之一且提供潛在環境和經濟效益，但因 CCS 需要許多新型基礎設施的建置，只有通過社會認可與降低公眾反對聲浪才能成功實現。雖然 CCS 計畫的規劃和實施階段的主要重點可能是技術和地質方面，但越來越多的人認識到，社會認可在此類計畫的開發和實施中有著至關重要的作用。例如：荷蘭公眾對 Barendrecht CCS 計畫的強烈反對，因“公眾參與失敗”而導致該計畫取消。

美國德州大學奧斯丁分校經濟地質局的 Katherine Romanak 研究科學家簡報聯合國氣候變遷綱要公約(UNFCCC)對於 CCS 的態度，自 2013 年來，IEAGHG 和德克薩斯大學奧斯丁分校(UT)與碳捕捉與封存協會 (CCSA)、Bellona 基金會和國際 CCS 知識中心合作舉辦了幾場 UNFCCC 官方會外活動，開始將 CCS 的技術訊息帶入締約方會議(COP)。有鑑於 CCS 對發展中國家減排的重要性，比較各國的反應也很有意義，居住在範疇 1 國家(大體上等同於發達國家，包括轉型期經濟體)和非範疇 1 國家(大體上等同於發展中國家)的代表，以評估其國家對 CCS 技術的認識/或感知重要性的差異。從 COP24 開始，化石 CCS 和 BECCS 在這段時間內的態度發生了積極的變化。商業和研究 NGO 對 CCS 的看法最為積極，而環境 NGO 的看法最為消極。若與未參加者相比，參加 CCS 會外活動的代表對 CCS 的態度更為積極。若與發達國家相比，發展中國家對 BECCS 訊息的需求和胃口更大，但兩者都存在對訊息的需求。締約方大會上的 CCS 訊息應針對發展中國家代表和環境非政府組織。

奈及利亞國家液化天然氣計畫-副總統辦公室 Victor Richard Osu 博士簡報非洲奈及利亞推動 CCUS 發展，聯邦政府已將 CCUS 確認為支持奈及利亞能源轉型和氣候目標的關鍵技術之一，包括：無條件承諾將排放量比現行減少 20%，並在國際支持下有條件承諾到 2030 年將排放量比現行減少 47%。到 2050 年的目標是成為低碳、氣候適應性強、高增長的循環經濟淨零排放邁進。奈及利亞已在 COP26 會議上承諾到 2060 年實現淨零排放。世界銀行集團在其 CCS 信託基金上支持奈及利亞部分工作計畫，自 2021 年 4 月以來，副總統辦公室(OVP)一直與國際能源署(IEA)合作，以確定符合奈及利亞深度脫碳 CCUS 開發和部署的近期需求和機會。OVP 和 IEA 共同擬定一項多年工作計畫，全面解決 CCUS 開發早期階段問題，包括：(1)辨識與評估碳封存量；(2)排放源、產業群集與二氧化碳封存場的關聯規劃；(3)發展與制定法律和監管框架；(4)技術經濟評估；(5)利害關係人參與；(6)最終完成 CCUS 示範場址建置。

#### 4、Session 2E- Hydrogen and CCS：

本議程共包含三個演講主題，講者分別來自 elementenergy 公司、英國愛丁堡大學與 Air Liquide 公司。

elementenergy 公司的 Conor O'Sullivan 演講內容主要進行 SMR、POX、HEE 等三種低碳排石油製氫法比較，短期而言三種石油製氫法，要產製藍氫都需結合 CCS，所以成本均較灰氫高。但石油製氫法成本較天然氣製氫或煤層製氫來得低，所以若未來石油價格降低，將可有效降低石油製氫法的成本。

愛丁堡大學的 Daniel Mullen 博士生簡報甲烷蒸汽重組(Steam Methane Reforming, SMR)製氫法結合 CCS 達到零碳氫能的成本，其認為零殘餘氣排放(zero residual emission post combustion CO<sub>2</sub> capture)的均化能源成本(Levelized Cost of Energy, LCOE)約為 62 英鎊/ MWh。

Air Liquide 公司 Markus Lesemann 博士認為，傳統 SMRs 製氫較耗能且成本較高，故其公司藉由整合其公司的薄膜捕捉技術於 SMR 製氫流程中，除能有效利用能源外，更可提升約 15%的氫產出及達到 99%的 CO<sub>2</sub> 移除率。

## 5、Session 3B - Geological Storage Case Studies I：

本議程共包含五個演講主題，前三名講者均來自丹麥及格陵蘭地質調查局(GEUS)，後兩名講者則來自美國新墨西哥州的新墨西哥礦業理工學院(New Mexico Tech)與TotalEnergies 公司。

首位講者Ulrik Gregersen先生介紹陸域Stenlille天然氣生產構造的構造地層學與構造演化。Stenlille構造為丹麥第一個陸域CO<sub>2</sub>封存場址，封存目標層為上三疊紀一下侏羅紀的Gassum砂岩。藉由整合歷史鑽井資料與震測資料，研究Stenlille構造的斷層與構造演化，並藉由人工與機器學習共同識別斷層，於不同年代中分別識別出不同的構造走向，亦確定該構造主要受到下方的鹽枕構造發育過程之影響。

第二位講者Kenneth Bredesen介紹北海Nini field藉由逆推模擬鹽水-CO<sub>2</sub>-岩石相互作用的特徵研究。該研究屬於Greensand計畫的一部分，目標是在丹麥近海Siri峽谷的枯竭油田儲存多達8Mta的封存組合，由於目標地層的海綠石含量高達30%，易造成水沖排時之地層損失。為了因應CO<sub>2</sub>注入後可能會引起的地層損失，該研究利用岩心，進行循環注入超臨界CO<sub>2</sub>與鹽水來了解相對滲透率和毛細管壓力的變化，並利用Brooks-Corey擬合滲透率和毛細管壓力實驗結果。

第三位講者為Kenneth Bredesen，其簡介Stenlille構造鹽水層封存場的Gassum地層的定量震測解釋。該研究利用流體取代模擬地層孔隙的甲烷被注入之CO<sub>2</sub>取代後的震測特徵、利用Bayesian震波逆推描繪甲烷儲層的分佈範圍與使用relative震波逆推進行封存層的垂向地層劃分。研究結果顯示，CO<sub>2</sub>佔比80%取代甲烷的震測特性與原始含甲烷地層的特性類似，無顯著差異；Bayesian重合後時間域震測資料震波逆推描繪甲烷儲層的方法可行；relative震波逆推則較Bayesian震波逆推方式可更詳細的解析出地層邊界。

新墨西哥礦業理工學院的William Ampomah則概述位於聖胡安盆地的CarbonSAFE第三階段計畫，此計畫是美國能源部資助的五個大型CO<sub>2</sub>封存項目之一。計畫的目的地是針對新墨西哥州西北部的潛在CO<sub>2</sub>封存組合進行全面性商業規模場址特徵研究，以加速在聖胡安發電站(SJGS)建置碳捕捉和儲存技術。本計畫目前為三年期示範階段的首年，但初步完成了部分井下地質岩芯、電測、井孔影像、地層測試、震測資料與岩石地球物理等資料搜集，亦進行相關解釋與CO<sub>2</sub>封存量預估，後續擬鑽探一口地質井以取得更完整的地下資訊。目前研究成果顯示，聖胡安盆地作為一個大型CO<sub>2</sub>封存場址的成功性極高。

來自TotalEnergies公司的Nicolas Agenet介紹荷蘭近海Aramis計畫，該計畫目前為TotalEnergies、殼牌、荷蘭國營Energiebeheer Nederland(EBN)和荷蘭國有天然氣運輸公司Gasunie共同參與。計畫目的之一為將來自於各地的CO<sub>2</sub>經船運至荷蘭近岸的海域CO<sub>2</sub> Hub，再以管線輸送至海域平台灌注至L4-A與K6-C等兩枯竭氣田構造的地層封存。目前已完成可用於資源評估和地質力學研究的地質模型。前研究強調，相較於傳統油氣生產，CO<sub>2</sub>地質封存依據歐盟指令2009-31規定，需要更為詳細的井與封存組合(封存層、蓋層與斷層)洩漏的風險性評估。

## 6、Session 3C - Panel Discussion 1- Round table on political issues related to CCUS：

本場次以圓桌討論方式探討當前 CCUS 格局的政治層面，參與討論的專家成員包含：

首席成員：法國 Club CO<sub>2</sub> 的 Florence Delprat-Jannaud

小組成員：盧森堡 ArcelorMittal 的 Stéphane Tondo； IFPEN & ANCRE 的 Pierre-Franck Chevet；美國 DOE 的 Jennifer Wilcox；GCCSI 的 Jarad Daniels；Clean Air Task Force 的 Toby Lockwood

全球 CCUS 計畫正在循序漸進的由大規模（每年注入 1-4 百萬噸）的示範項目，迅速推進到與多個分散工業排放源相連的數百萬噸或是上千萬噸等級的封存場址規模。歐洲、北美、中東和亞太地區都有計畫開發重要的源匯中心(source-sink hubs)，源匯中心的概念是連結多個排放源捕捉的碳，透過有系統的運輸規劃(可能共用管線或是船舶等)共同儲存二氧化碳在一個封存場址。而在以源匯中心概念推展大尺度 CCS 計畫的過程中，同時也需要關注和協調許多與政治問題和優先事項等(例如：跨國協議與監測安全等)，以便在受監管的條件下能夠實現暢通無阻的轉運和封存。

### (三)會議第二日(25)與會內容

第二日之議程啟始為兩個技術演講，分別為 TotalEnergies 公司的碳中和與歐洲大陸部門(Carbon Neutrality and Continental Europe)資深副總 Christine Healy 女士及美國能源部化石能源和碳管理辦公室首席副助理秘書(Principal Deputy Assistant Secretary in the Office of Fossil Energy and Carbon Management at USDOE) Jennifer Wilcox 博士宣講。

Christine Healy 女士表示石油與天然氣未來數十年仍舊會佔該公司主要能源收入之一，但是為了達到成為淨零碳排公司的目標，TotalEnergies 公司將透過 Scope1+2(停止常態的燃燒塔燃燒作業、改善能源利用效率、潔淨能源及 CCS)與 Scope 3(自有資產開展 CCS 計畫、提供碳運輸與封存服務)等階段式演進達成目標。但是因為架設 CCS Hub 或為客戶提供碳封存服務所需的投資計畫往往為了達到巨大封存量的目標，而需要十億美元以上的投資規模。而這些 CCS 計畫最重要的是需如期完成以配合各商業客戶期程需求，場址並需具有可持續運作的特性。由於 CCS 計畫屬於長時間投資循環且投資金額龐大，所以確保政府的政策清晰且具延續性，將是降低場址投資風險的關鍵要素。目前全球性的 CCS 商業模式仍舊不明朗，TotalEnergies 希望未來的 CCS 相關投資環境，可以比照北極光計畫(Northern Light)一樣，打破國界與邊界的限制，如此才能看見發展具商業規模 CCS 計畫的曙光(圖-7)。



圖-7 Christine Healy 女士報告 TotalEnergies 未來淨零策略

Jennifer Wilcox 博士則報告美國拜登政府對於碳管理相關的因應對策(圖-8)。在報告前，Jennifer Wilcox 博士先簡介其所任職之政府單位-美國能源部化石能源辦公室(Office of Fossil Energy)為了有效因應碳管理之發展，而更名為能源部化石能源

和碳管理辦公室(Office of Fossil Energy and Carbon Management)，所以單位名稱縮寫亦由 DOE-FE 變更為 DOE-FECM。拜登政府主要有四大目標：1. 2030 年達成 50% 碳減量排放目標；2. 2035 年達成電力部門無 CO<sub>2</sub> 排放的目標；3. 具經濟性的淨零碳排最遲於 2050 年達成。為此，FECM 發表了其策略性規劃，主要分為三方面：1. 推動碳管理方法以實現深度脫碳；2. 推動發展可持續能源的先進技術；3. 推動具社群正義性、提供品質的勞動職位、公共及投資者參與。前述各項目的指引並公布於 FECM 的網展上供相關申請人查閱，美國政府近來也通過跨黨基礎建設法(Bipartisan Infrastructure Law)與通膨降低法案(Inflation Reduction Act)藉以刺激美國的創新發展，並希望能加速碳管理相關技術或建設的進程。FECM 也分別就前述兩法案提出規劃，希望在五年內以贊助、借貸或信用貸款方式，發展 6 個碳捕捉示範場址計畫與數個小型先導試驗、4 個直接空氣捕捉(Direct Air Capture, DAC)中心、超過 100 口 CO<sub>2</sub> 封存井、建設新的 CO<sub>2</sub> 輸送管線和運輸網絡。FECM 針對前述兩法案規劃了五年共 6.5 億美元的資助計畫，分別從資助直接空氣捕捉(區域性 DAC Hub、DAC 技術競賽)、CO<sub>2</sub> 利用和儲存(碳儲存驗證和測試、碳再利用計畫)、前端工程研究(碳捕捉技術計畫)與關鍵礦物及材料(稀土元素示範計畫、稀土礦物安全性研究)等四個面向研究或建設。此外，對於如何移除大氣中的 CO<sub>2</sub>，FECM 提出了四種 CO<sub>2</sub> (Carbon Dioxide Removal, CDR) 途徑，分別為：1. 生物性 CDR；2. 化學性 CDR；3. 礦物性 CDR；4. 海洋性 CDR。除了減少 CO<sub>2</sub> 外，FECM 更與潔淨能源示範辦公室(Office of Clean Energy Demonstrations, OCED)合作，共同推動氫樞紐建設(Hydrogen Hub)、碳捕捉示範計畫與大型先導試驗、CO<sub>2</sub> 輸送設施、CO<sub>2</sub> 運輸基礎設施融資和創新計畫借貸賬戶等規劃。在眾多的規劃中，Jennifer Wilcox 博士亦強調，CCS 成功的條件除了技術項目外，最重要的是社群溝通，讓相關社群了解 CCS 各項內涵後，藉由示範場址的展示可進一步的增強社群團體對於 CCS 的信任程度。



圖-8 Jennifer Wilcox 博士報告美國拜登政府對於碳管理相關的因應對策

在專題演講後，隨即前往各主題會場聆聽論文發表。本次出國人員分別參加了 4B、4F、5B、5F、6G 與 6F 等主題宣講議程。以下為各議程聆聽報告之概述：

## 1、Session 4B - Depleted reservoirs & injectivity：

本場次針對地層岩石物理參數建模對團塊移棲模擬、石灰岩異質性對蟲洞形成與流動影響、機率性評估枯竭型地層探封存量、枯竭型氣層的水合物風險及添加富氣組分在低壓油層的二氧化碳沖排增產研究。

Bamshad Nazarian 簡報利用多物理參數建模方式進行 Sleipner 二氧化碳團塊流動模擬研究，該模擬模式是以傳統地質建模為基礎，考量溫度對 CO<sub>2</sub> 相態變化的影響(特別是三相臨界點的膨脹與 CO<sub>2</sub> 密度變化)，以及地層高滲透性和非均質性對二氧化碳溶解度的影響。模擬結果與四維震測顯示的二氧化碳團塊移棲結果相吻合，同時也分析各種不同封存機制的重要性及對 Sleipner CCS 計畫總封存量的貢獻。

Aurélien Randi 簡報岩石異質性對蟲洞傳播動態影響的論證，以多尺度實驗性方法在石灰岩儲層中注入富含 CO<sub>2</sub> 鹽水，研究方法考慮了石灰岩儲層的局部結構因素，評估注入富含 CO<sub>2</sub> 鹽水溶液導致優先溶解路徑的方向，從採石場規模到顆粒間規模，實驗系統包括了岩石的結構和結構非均質性，可以了解樣品中不連續性(例如：微斷層、微裂紋、粒度分佈、晶粒排列…等)分佈與樣品之間的空間關係。實驗結果發現注入富含 CO<sub>2</sub> 鹽水溶液所產生的蟲洞傳播方向與岩石基質的分層明顯一致，且蟲洞僅在具有最高滲透率的單元中發展。此外，與岩石內預先存在的天然裂縫相交的區間，幾乎消耗了所有的反應流體，並充當了蟲洞傳播的排水口。

Alejandro Rodríguez-Martínez 簡報機率性估算枯竭型地層的碳封存量，研究針對每一個儲層都建立三種不同(包含：P10、P50 和 P90)的機率模式，採用熱採收模擬器來表示三個不同模式中的 CO<sub>2</sub> 受到溫度而影響相態變化對注入率的不確定性，由於地下可能影響參數的不確定性降低了，使得注入後的 CO<sub>2</sub> 封存量估算的可靠度提高。

Tuyet-Hang Le Goff 簡報以為流體實驗尺度評估將 CO<sub>2</sub> 注入枯竭型氣層會產生水合物的風險評估，雖然枯竭型氣層的封閉性已證實且基礎設施完整可以降低成本，但將冷的 CO<sub>2</sub> 注入到高度枯竭的氣層中，可能在井筒周圍產生焦耳-湯姆遜效應，使 CO<sub>2</sub> 從液態相變成氣態而導致低溫到極低溫(可能低至 -40°C)現象發生，隨著水合物數量的增加，堵井的風險就越高，因而計畫失敗的風險就越高。研究提出一種評估 CO<sub>2</sub> 水合物形成風險的微流體方法，與標準尺寸的反應器相比體積減少了千分之一，實驗速度更快且測試吞吐量提高了 60 倍，從光學圖像中可以檢測到可視化水合物形成和解離行為。

Lu Jin 簡報添加富氣組分在低壓油層的二氧化碳沖排增產研究，美國有許多深度小於 2000 英尺的低壓油層，在一級採油及注水增產後的採收率仍低於 25%，且注水後的地層壓力常小於 500 psi，添加富氣組分(C2-C4)可以有效降低氣/油界面張力和最小混相壓力，從而在低壓油層條件下使油更容易流動。研究顯示在注入的 CO<sub>2</sub> 中添加富氣組分(例如：C2、C3、C4 或它們的組合)可以提高油氣之間的混相水平，從而在儲層壓力較低時提高 EOR 性能。

## 2、Session 4F - Distributed Acoustic Sensing - surface deployments :

本議程共包含五個演講主題，講者分別來自挪威科技工業研究院(Sintef)、德國亥姆霍茲環境研究中心(Helmholtz)、英國布里斯托(Bristol)大學、日本地球環境產業技術研究機構(RITE)與 Totalenergies 公司。

挪威科技工業研究院的演講因為技術演講的延遲，因此沒能聽到該簡報內容，故在此無法描述。

德國亥姆霍茲環境研究中心的科學家 Uta Koedel 介紹挪威 Svelvik CO<sub>2</sub> 現場實驗室的實驗結果。該實驗室旨在開發和測試用於量化飽和度和壓力的方法，特別是 CO<sub>2</sub> 的監測應用方法。測試場地面積約 300m X 150m，封存層深度大於 38m，由不同比例的夾層砂、粉砂和粘土組成，孔隙度和滲透率跨度差異大。本報告藉由研究井間震測施測監測所注入的 CO<sub>2</sub> 動態，設計包含一口注入井與四口監測井，注入井於注入深度設置壓力和溫度感應器，所有監測井都設置了直通式與螺旋式光纖電纜 (Distributed Acoustic Sensing(DAS)、Distributed Temperature Sensing(DTS)、Distributed Strain Sensing(DSS))、電阻率斷層掃描(ERT)、流體毛細管採樣，以及井下壓力和溫度感應器。現場並配置兩種不同的井下震源 (P 波和 S 波)。實驗結果顯示，井間震測監測數據品質良好且具可重複性，儀器對變化細微的壓力和飽和度變化非常敏感，因此計畫未來可持續研究監測小壓力變化(注水和地潮汐(Earth tide))、CO<sub>2</sub> 團塊監測及羽流監測、CO<sub>2</sub> 沿井洩漏和 CO<sub>2</sub> 溶解監測等現象。

英國布里斯托(Bristol)大學的 Antony Butcher 先生簡報以 DAS 網監測加拿大亞伯達省 CaMI 現場實驗場址的 CO<sub>2</sub> 注入研究。該場址之直通式與螺旋式 DAS 電纜除了設置於井下外，更於地表進行佈設，且地表 DAS 測線同時設置了單分量與三分量受波器 (geophone) 及寬頻地震站，研究目的為比較不同儀器之監測特性與測試比較主動式震測 (人工震源) 及被動震測 (自然震源) 的差異。目前正進行被動和主動式震測的初步分析，研究其用於近地表成像和近地表洩漏檢測的可能。未來將更進一步研究井間資料分析、同區異時震測試驗 (Time-Lapse Seismic)、結合 DAS、傳統受波器、主動和被動震測方式，求取以最大限度地提高資料效力並同時最大限度地降低成本的監測方法。

日本地球環境產業技術研究機構的 Takayuki Miyoshi 博士介紹以 DAS 及受波器監測 CO<sub>2</sub> 團塊的監測法比較。Miyoshi 博士表示 DAS/VSP 是近年來廣泛應用於監測地質封存之 CO<sub>2</sub> 團塊的技術，除能快速且準確地得到地下資訊，更可大幅減少傳統 3D 震測的次數，降低監測成本，但是仍有其技術限制，包含幅度隨入射角增大而衰減的現象與低信噪比，故目前正尋求技術性的突破以求 DAS 所搜集之資料可品質可等同或超越傳統受波器所搜集之震測影像。根據研究，規劃使用 DAS 接收資料時，最好維持入射角小於 50 度以確保振幅品質；縮短 offset、DAS 接收站距設定小於 1m 與提高震源掃描次數 (至少需 20 此以上) 等作為有助於提升 DAS/VSP 信噪比。未來 DAS/VSP 之發展將朝向遠端、高施測頻域、綜合 DAS、DTS 與 DSS 進行 CO<sub>2</sub> 團塊監測發展。

Totalenergies 公司的地物學家 Estelle Rebel 博士簡報題目為「海域 DAS 佈置應用於 CO<sub>2</sub> 封存之主動與被動震測研究」。該講題分別介紹主動震測案例 (Ekofisk 場址與

一個深水場址)；被動震測案例(The Lowestoft)。Estelle Rebel 博士認為，光纖是一種具有多種監測用途的工具，無論是主動或是被動震測都能以同一條光纖進行資料搜集。對於主動式震測而言，雖然具有非常積極的結果，但仍有影像重複性及震幅改進的空間；應用於被動震測則可得到良好的訊號靈敏度，但是仍需思考如何提高定位精準度。DAS 目前技術發展重點，應聚焦於震測資料處理、光纖佈置設計與聯合傳統接收器以改善施測時之波形。

### 3、Session 5B - Storage costs：

本議程主要討論碳封存場址相關成本，包含：碳封存場址初期評估會涉及的成本因子與決策程序、美國伊利諾盆地-迪凱特(Decatur)CCS 計畫(簡稱 IBDP)的相關成本、二氧化碳地質封存監測、報告和驗證相關的成本評估、碳封存工程與經濟學先進封存 CO<sub>2</sub> 工具(A-SCO<sub>2</sub>T)的開發與應用、美國近期商業規模計畫相關法規影響 CO<sub>2</sub> 封存成本的因素。

Susan D. Hovorka 簡報碳封存場址初期評估會涉及的成本因子，雖然碳封存場的成本相較於碳捕捉的建設與營運成本低，但因碳封存仍是一個正在發展中的行業，其初期資金成本依然很高且具有高度不確定性。初期成本包含：(1)鑽井、取岩心、岩心試驗、井下電測、井下取樣、注入能力測試等，以及(2)三維震測施測範圍、二氧化碳團塊移棲區域繪製、封閉系統特性確認等。研究建立一個系統性的決策程序來評估各階段的特徵可行性，包含：大尺度區域封存可行性、縮小到特定區域場址篩選、封存場址的詳細地面特徵與地質封存模擬評估及封存場址申請許可準備等。該決策程序為許可前封存場址評估流程和預算提供指引，讓 CCS 計畫推動能為各國總體減排規劃做出更具戰略性的決策。

Sallie E. Greenberg 簡報美國伊利諾盆地-迪凱特 CCS 計畫(簡稱 IBDP)的相關成本，碳封存和監測成本分析包含種不同情境：情境 A 為每年 100 萬噸(MTPY)乙醇工廠或類似碳來源，含一口注入井和一口監測井；情境 B 為基於國家能源技術實驗室(NETL)成本和性能基準的每年 400 萬噸燃煤電廠胺捕捉計畫，含四口注入井和兩口監測井。每個情境的注入期間為 20 年，IBDP 計畫獲得美國聯邦資金 124 百萬美元補助及 24 百萬美元用於分擔捕捉和運輸成本。在監測和封存總成本上，方案 A 為 57 百萬美元；方案 B 為 107 百萬美元(以上不包含捕捉和運輸成本)。由於 IBDP 是示範型計畫，其成本不能與商業計畫相比，IBDP 的實際成本注入期為 3 年、理論成本是 20 年，且包含注入後 50 年的現場維護估計成本，使得 IBDP 的計畫成本能與商業規模情境相符合。IBDP 計畫在 3 年執行期間，包含碳捕捉、運輸、封儲和監測工作，每噸 CO<sub>2</sub> 的實際成本為 90.42 美元。理論情境下注入 20 年的年化成本為 33.07 美元/噸，情境 A 估算成本為 23.69 美元/噸，情景 B 估算成本為 61.02 美元/噸。

Michael L. Godec 簡報二氧化碳地質封存監測、報告和驗證相關的成本評估，研究內容遵循美國環境保護署(US EPA)溫室氣體報告計畫(GHGRP)中，在 GHGRP (40 CFR 第 98 部分，RR 子部分)的二氧化碳地質封存類別下，制定了美國 EPA 核准的監測、報告和驗證(MRV)計畫，報告內容含監測活動及使用質量平衡法計算的二氧化碳封存量。RR 子部分監測和報告成本是根據兩種不同類型的潛在設施進行估算：(1)美國 EPA 地下注入控制(UIC)計畫第 II 類允許 CO<sub>2</sub> EOR 井計畫；(2)美國 EPA 的 UIC 計畫 第 VI 類允許的

計畫(假設為注入深部鹽水層)。而對於可能增量成本的估算時，需要考慮兩個不同的因素，並且每個因素都可能只與特定場址有關：(1)與每個增加活動而延伸的增加成本有關，以及(2)與活動數量而延伸的增加成本有關。整體而言，考慮可能影響成本增量的活動範圍包括：注入井的數量、注入井深度、注入和注入後監測的時間長短、所需監測的範圍，以及可以利用任何現有監測基礎設施的範圍和條件。

Meng Meng, Bailian Chen 簡報碳封存工程與經濟學先進封存 CO<sub>2</sub> 工具(A-SCO<sub>2</sub>T)的開發與應用，碳封存模擬可用於評估特定地質封存地點的工程參數，包括：封存量、團塊大小和注入率等，但這些計算成本高且評估大量封存地點非常繁瑣。作者提出一種快速篩選鹽水層優勢區的評估工具，使用五個基本地質參數(滲透率、孔隙率、厚度、地熱梯度、深度)，可以快速評估大量鹽水層的整體性能，從注入性能、井設計和經濟性，同時進行敏感性和不確定性分析，證明 A-SCO<sub>2</sub>T 在分析地質參數對碳封存性能的影響，發現地層厚度、深度和滲透率是碳封存操作和經濟性的最重要特徵。作者使用此工具來描述美國和加拿大部分地區的國家碳封存數據庫(NATCARB)中的鹽水盆地，並迅速確定碳封存的最佳位置，覆蓋南達科他州西北部、北達科他州中西部、蒙大拿州東部、薩斯喀徹溫省南部和艾伯塔省西南部。

Michael L. Godec 簡報美國近期商業規模計畫相關法規影響 CO<sub>2</sub> 封存成本的因素，作者在撰寫本文時，只有少數政府資助的小型 CCS 計畫已經完成，因此，成本估算是基於假設的計畫和開發情境，沒有經過任何監管審批程序的審查。從那時起，美國已經宣布並正在推進數十個新的商業計畫，提交了許可申請並獲得了多項監管批准。而影響 CCS 計畫規劃和推動加速的趨勢，主要受到更積極的政府氣候變化優先事項、根據美國國內稅收法第 45Q 條實施激勵措施、各州在 CCS 封存計畫的開發和監管中發揮更積極的作用，以及增加政府支出關於技術開發和示範經費。由於每個計畫的井深、每口井的注入率、所需的監測項目、預期的二氧化碳團塊大小等，都會影響成本。因此，在進行 CO<sub>2</sub> 封存成本估算時，需要考慮兩個不同的因素，每個因素都可能因地點而異：(1)與封存操作中需要進行的每項活動相關的成本，以及(2)每個活動的單位數量。將每單位活動的成本乘以需要考慮的單位數量來估算總封存成本。

#### 4、Session 5F - Multiphysics monitoring I：

本議程共包含五個演講主題，講者分別來自挪威科技工業研究院(Sintef)、德州農工大學、北達科他大學能源與環境研究中心、貝特耳紀念研究所(Battelle Memorial Institute)與伯明罕大學。

挪威科技工業研究院的 Bastien Dupuy 博士研究員介紹地球物理綜合方法應用於觀察 CO<sub>2</sub> 封存特徵與團塊監測應用。監測工作為 CCS 不可或缺的一部分，但產業中不同的角色分別對於監測有不同的要求，場址營運商在乎的是場址的安全、高效、營運的可預測、低風險、低成本且可被公眾所接受；監管單位則關注於場址的有效性和安全性、監測需有效且可預測的了解是否存在遷移及潛在洩漏及是否可量化測量…等監管單位所重視之要點。而地球物理方法則是可提供地下資訊量化的途徑，包含飽和度、孔隙率與孔隙壓力，且可以貝氏定理(Bayes' theorem)評估不確定性(比如：綜合震測的 P 波速度與 CESM 綜合逆推估計地層水飽和度)。該研究以位於北海的 Sleipner 與 Smeaheia

舊天然氣田為標的，藉由所觀測與分析到的震測資料與井下資料，建立儲集層模型並根據該模型模擬 7 種可能觀測到的地球物理相關屬性體，再以不同的屬性體組合嘗試能否逆推得到一開始所建立的儲集層模型。該研究的結論為：1. 單參數的震波逆推不足以可靠地估計任何參數；2. 具有多參數共同參與逆推(比如:來自於 Elastic Full-Waveform Inversion 或 AVO 逆推的 S 波速度): 此類型的逆推對於彈性係數  $K_p$  和剪力模數  $G$  的估計很重要；3. 孔隙度的估計有賴於多種類型的震測資料( $V_p$ 、 $V_s$ )和/或重力測量共同逆推；4.  $CO_2$  飽和度的估計需要電阻率數據(CSEM 或 ERT)的參與逆推。

德州農工大學的 Masahiro Nagao 博士生講解的題目是以高效能深度學習的工作流分析壓力與溫度的分佈，進行  $CO_2$  團塊監測及其不確定性。其目標在於如何藉由機器學習模式，將所觀察到的注入井 BHP、DTS 與壓力分布資訊，轉成預測層的  $CO_2$  飽合度資料，並以視覺化展示地下  $CO_2$  團塊的分佈形貌。研究方法主要包含三個步驟：1. 降低維度；2. 神經網路訓練；3.  $CO_2$  團塊預測。基於該研究所建立之方法，將其應用在屬於美國中西部區域碳封存夥伴聯盟(Midwest Regional Carbon Sequestration Partnership, MRCSP)的密西根州 Otsego county 的 Chester-16 尖礁(Pinnacle Reef)場址，該場址於 2013 年 2 月至 2018 年 9 月曾注入 85,000 噸的  $CO_2$  至枯竭油氣層並留下完整的監測資料，本研究即根據這些監測資料及深度學習方法計算地下  $CO_2$  團塊的變化並與傳統之歷史擬合結果對比。研究結果認為，此種深度學習方法所計算出的  $CO_2$  團塊時序變化，可與歷史擬合流程之結果相匹配。

北達科他大學能源與環境研究中心的資深地物學家 Kris MacLennan 所報告的主題為利用井孔至地表的電磁量測(borehole-to-surface electromagnetics, BSEM)作為  $CO_2$  地質封存主動式儲層管理(active reservoir management, ARM)之可行性評估。ARM 的原理為利用策略性運用  $CO_2$  的注入與地層水的抽出，達到降低蓋層壓力、減少潛在洩漏路徑的壓力、縮小審查範圍與提高注入能力...等目的。該研究認為，由於高濃度鹽水對地層所造成的壓力影響與  $CO_2$  類似，在考慮經濟效益下，遂以鹽水作為注入材料進行實驗，希望藉由實驗驗證 ARM 方法的有效性。高濃度鹽水之監測方式包含示蹤劑、壓力測試、井測與 BSEM 等方式，前三種方式都進能在井中進行量測，但 BSEM 卻可量測到遠離井某段探測深度範圍內的電阻率變化。監測結果顯示 BSEM 方法對微小的電阻率差異具有鑑別度且可成功區分出地層內的高濃度鹹水跟地層水，因次該研究認為 BSEM 的實驗成功可有助於 ARM 的進行。另外，由於 BSEM 的電阻率靈敏度可達  $0.1 \Omega m$ ，故能符合同區異時(Time-lapse)監測的要求，但是前提是電磁源與感測器需足夠精密以量測到細微的變化。本方法以高濃度鹽水進行研究雖獲得成功的實驗結果，但是未來實際應用於 CCS 場址的試驗仍待進一步驗證。

貝特耳紀念研究所是世界上最大的獨立研究機構，該機構的技術主管兼地質能源模擬與分析家 Srikanta Mishra 博士介紹經由瞬態壓力和速率數據，偵測  $CO_2$  團塊前緣之一種快速且低廉的技術。飽和  $CO_2$  前緣的移動常常伴隨著壓力的同步變化，但是飽和  $CO_2$  的資料往往難以取得，所以 Srikanta Mishra 博士認為可以經由分析井下監測常用的壓力數據來了解飽和  $CO_2$  的移動趨勢，並藉由模擬軟體的開發來呈現壓力變化與  $CO_2$  團塊移動的狀況，如此一來可大幅降低監測的花費。該研究認為若已知某口距離注入井距離 ( $r$ ) 的監測井從開始注入到  $CO_2$  團塊移動至該井的時間與壓力變化，可根據連續壓力紀錄

資料推測注入井至該監測井的壓力(P)隨距注入井半徑(r)與時間(t)變化的函數  $P(r, t)$  並轉換為  $P(r^2/t)$ ，再分析觀測井壓力變化的地層水/CO<sub>2</sub> 轉折點，可知道該井處確切的  $r^2/t$ ，如此一來就能估計 CO<sub>2</sub> 團塊接續移棲至某個時間點時的距注入井半徑為何(假設團塊移棲速率相同)。

伯明罕大學的研究員 Jamie Vovrosh 博士為本 Session 最後一位講者，其介紹如何應用量子重力儀的重力梯度測量於 CCS 的監測與調查。該研究所使用的量子重力儀為受英國碳捕捉與儲存研究中心(UK Carbon Capture and Storage Research Centre, UKCCSRC) 與工程與物理科學研究委員會(Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC)補助伯明罕大學及英國地質調查局(British Geological Survey)共同研發之儀器，目的在於研究量子重力儀用於監測近地表二氧化碳、注入/洩漏測試方面的潛力。未來將規劃於 GeoEnergy Test Bed (GTS) 實驗場址進行實驗，該場址是個由 BGS、諾丁漢大學和其他機構共同開發的場地。具有多個井孔，專門設計用於監測通過天然地下通道的流體流動(液體或氣體)。該研究實驗於兩個星期內注入 5 噸的 CO<sub>2</sub> 至距地表 6 至 15 公尺深的地底，觀察 CO<sub>2</sub> 往上穿越地下水層並溢散至地表的過程。根據模擬結果推算，目前產製出的量子重力儀精度為 1 uGal (=  $1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )，精度已貼近前述試驗場的測試需求，預計下一代的量子重力儀性能會更符合需求。Jamie Vovrosh 博士強調，由於重力數值靈敏度隨深度增加而急劇降低的因素，重力儀並不適合用來監測封存層的 CO<sub>2</sub> 變化，僅可用於提供 4D 震測、電阻層析成像(Resistivity Tomography)和大地電磁測量的輔助解釋使用。

## 5、Session 6G -Regulatory Experiences USA：

本議程探討美國地下注入的監管經驗，包含：美國西南部大型 CO<sub>2</sub> 注入計畫中舊井洩漏定量風險評估支持許可證申請、CCS 地下注入控制程序的監管：是祝福還是詛咒？影響美國近期 CCS 計畫開發的法規和驅動因素、二氧化碳減排夥伴關係：打破 CCUS 的障礙、注入含二氧化碳鹽水地質封存的監管考量。

Rajesh Pawar 簡報美國西南部大型 CO<sub>2</sub> 注入計畫，利用舊井洩漏定量風險評估結果以支持許可證申請通過，美國能源部(US DOE)目前資助多個 CCS 計畫，這些計畫正在申請大規模(累計超過 50 萬噸)二氧化碳注入和封存計畫開發許可。由 CCS 計畫經營人提出開發 UIC-VI 井許可申請，該計畫申請將提交給美國環境保護署(US-EPA)的地下注入控制(UIC)進行審查，而 UIC-VI 地下注入井是專門為 CO<sub>2</sub> 注入地質封存而設計，VI 類許可證申請的主要要求之一，是需要證明二氧化碳注入作業不會導致地下飲用水源(USDW)受到危害。如果評估過程確定確實存在洩漏風險的井，則許可證申請人必須在獲得注入 CO<sub>2</sub> 許可之前，確定已針對洩漏風險井採取適當的改善措施，以確保這些井不會成為流體流動(或洩漏)的管道。

Ingvild Ombudstvedt 簡報 CCS 地下注入控制程序的監管：是祝福還是詛咒？美國是世界上將二氧化碳注入地下歷史最悠久的國家，主要是透過二氧化碳強化油氣採收。然而，專門為封存二氧化碳而注入的歷史則短得多，因此，很少有支持 CCS 商業發展的監管框架，而二氧化碳封存同時受聯邦和州政府的法律約束，這兩套框架迄今仍有待充分協調。美國根據安全飲用水法案(SDWA)和地下注入控制(UIC)計畫對地質封存 CO<sub>2</sub> 進行監

管。其中，UIC-II 類為 CO<sub>2</sub>-EOR 注入井和 UIC-VI 類為 CO<sub>2</sub> 地質封存的監管。在聯邦法和州法的雙重製度下，州法通常對財產權具有決定性作用。因此，州法律管轄關於 CO<sub>2</sub> 注入特定儲層和孔隙空間的獲取、擁有、使用和相關責任等重要問題。因計畫所在地將嚴重影響長期責任的可預測性，而利害關係人通常需要與專門從事該特定州許可制度下的顧問合作以確保他們滿足所有要求，這使商業和監管利害關係人有著微妙的關係。無論如何，美國許多州都缺乏完善的法律制度來管理 VI 類計畫，並不是所有問題都可以在框架、許可制度或指南中得到解決。

Andrew Duguid 簡報影響美國近期 CCS 計畫開發的法規和驅動因素，到 2026 年，美國(US)聯邦稅收抵免(45Q)的二氧化碳封存補助從每公噸 20 美元增加到每公噸 50 美元，這推動了高純度二氧化碳來源的捕捉計畫浪潮，包括乙醇工廠、化肥廠和氣體處理設施。除了聯邦稅收抵免外，加州低碳燃料標準(LCFS) 向加州市場銷售燃料提供額外補貼，由每公噸 150 美元增加至 200 美元。由於 45Q 法案可抵免稅收，使得乙醇工廠的碳捕捉和封存計畫具有經濟性，根據工廠 CO<sub>2</sub> 來源規模，除了捕捉和封存之外，還有一些項目可以負擔與管道相關的費用。天然氣處理廠可能在鹽水層封存方面具有優勢，因為他們可能有資格取得注入 UIC-VI 類的許可。這是因為生產天然氣中的 CO<sub>2</sub> 被認為是油氣田的廢物，不會有相同的建設和監測要求，可降低封存成本。在這種稅收抵免下，低二氧化碳濃度(例如：燃煤或燃氣發電廠)也有機會推動 CCS 計畫。無論計畫類型如何，每個開發計畫都必須經過兩個聯邦強制程序才能獲得聯邦稅收抵免。此外，生物燃料工廠必須增加額外的加州強制性流程，才有資格獲得加州信用。

Kevin C. Connors 簡報二氧化碳減排夥伴關係(PCOR)：打破 CCUS 的障礙，PCOR 夥伴關係區域包括美國十個州和加拿大平原上游和北美西北部地區的四個省。基於豐富的化石燃料資源、大規模的人為 CO<sub>2</sub> 排放源和潛在地質封存場址，提供基礎設施開發和廣泛 CCUS 推動所需的基本要素。PCOR 合作夥伴關係正在努力評估該地區的 CO<sub>2</sub> 封存機會與優先順序，同時努力解決最有希望的封存場址可能會面臨的技術、監管和環境挑戰。同時，PCOR 夥伴關係也向政策制定者和公眾通報 CO<sub>2</sub> 來源、封存策略和封存機會。隨著美國聯邦 45Q 稅收抵免和相關激勵措施的商業驅動因素結合，人們對在非含烴地質構造中開發商業碳捕捉和封存計畫(即鹽水層封存)的興趣顯著增加。截至 2021 年底，PCOR 合作夥伴區域內有六個商業 CCUS 業務：兩個計畫位於加拿大，三個計畫在美國，一個屬跨境計畫。PCOR 合作夥伴地區已經宣布了十個商業 CCUS 計畫，並在 2026 年之前開始建設或注入運營。

Robert Van Voorhees 簡報注入含二氧化碳鹽水地質封存的監管考量，在鹽水層碳封存中，很少思考將碳溶解於鹽水後注入。注入的流體將由鹽水和人為捕捉的二氧化碳組成，兩者都在水相中，根據深度的鹽度、壓力和溫度條件，二氧化碳質量分數約 1%-5%之間。先將 CO<sub>2</sub> 溶解到鹽水中再注入地層有幾個優點：(1)注入過程的溶解封存因 CO<sub>2</sub> 溶解到鹽水中後注入(簡稱 CBI) 沒有游離相 CO<sub>2</sub> 團塊。(2)CBI 消除了鹽水相和超臨界 CO<sub>2</sub> 相之間的流體壓縮差異，且注入後的壓力平衡不受兩相流的抑制。該過程降低了儲層中 CO<sub>2</sub> 的流動性，並導致碳酸化鹽水密度與天然儲層流體相似，從而大大降低了與注入的 CO<sub>2</sub> 的垂直和橫向流動性以及限制區域上的地質力學應力相關的風險。假設 2%的質量分率(mass fraction)，估計每年可以使用 CBI 技術地質封存 5000 萬噸 CO<sub>2</sub>。而在現

行監管框架下，捕捉的 CO<sub>2</sub> 的來源會有特定要求的適用性，特別是對可用於注入碳酸鹽水注入井的分類。在其他情況下，要注入的流體組成可能會影響現有監管框架內容，研究建議未來建立或修訂二氧化碳流體地質封存的監管框架時，必須提供必要的靈活性和適應性，以適應新興的碳封存技術和方法。

## 6、Session 6F -Multiphysics monitoring II：

本議程共包含五個演講主題，講者分別來自澳洲 CO<sub>2</sub>CRC、澳洲聯邦科學與工業研究組織 (CSIRO)、澳洲科廷大學與挪威大地工程研究所 (Norwegian Geotechnical Institute, NGI)。

澳洲 CO<sub>2</sub>CRC 資深營運與第三階段經理 Paul Barraclough 先生簡報 CO<sub>2</sub>CRC 第三階段計畫總結，題目是為 CCS 監測提供創新解決方案。CO<sub>2</sub>CRC 的 Otway 國際測試中心營運 15 年來共注入 10 萬噸 CO<sub>2</sub> 於地底，研發與實驗了許多可應用於商業尺度 CCS 的技術。此第三階段的計畫目的在於開發符合工業界需求的高解析度 CO<sub>2</sub> 團塊地下監測技術，研發重點著重於最佳化效率與成本。根據研究目標，於第三階段時鑽鑿了 4 口監測井、1 口注入井及再注入 15,000 噸 CO<sub>2</sub>，並且試驗了壓力層析成像 (Pressure Tomography)、整合永久性震源 (Surface Orbital Vibrators, SOV) 與井下 DAS 的同區異時 VSP、壓力逆推、被動震測與地潮汐等研究項目。總結而言，第三階段的試驗證明了所實驗的監測方式可符合監測要求與低環境影響的目標，所有從本階段中得到的經驗除可用於後續轉移相關系統和技術至工業界外，更有助於訂定商業營運所需的相關 CCS 技術應用程序。

澳洲聯邦科學與工業研究組織的科學家 Samuel Jackson 博士簡介 CO<sub>2</sub>CRC 第三階段內的研究項目-同區異時 VSP 壓力層析成像技術應用於 CO<sub>2</sub> 團塊移棲監測。研究方法同時進行多井間壓力測試以得到水文地質的相關資訊，如：滲透率、孔隙率與 CO<sub>2</sub> 飽和度。本試驗是應用同區異時 VSP 壓力層析成像技術於現地地下 CO<sub>2</sub> 移棲監測的首例，分別於 CO<sub>2</sub> 已注入 5kt、10 kt 與 15 kt 時，在不同井輪流進行鹽水注入實驗，並藉由分析各井的連續壓力紀錄逆推地下 CO<sub>2</sub> 團塊的位置。實驗藉由與 4D 震測影像對比結果顯示，Otway 試驗場中的壓力層析成像可以定位出 CO<sub>2</sub> 團塊的位置，最小的可偵測團塊質量約為 4.5kt，但是可定位的最小團塊質量約為 10kt。本研究的論文即將發表，未來將可查詢得到更詳細的研究內容。

澳洲科廷大學的 Roman Pevzner 教授，一樣簡介 CO<sub>2</sub>CRC 第三階段內的研究項目之一-以多井 DAS 與 VSP 監測小尺度的 CO<sub>2</sub> 注入過程。相較於傳統 4D 震測的高花費與處理耗時，永久式的固定式震源、接收器陣列與自動化紀錄的主、被動震測是降低花費的關鍵技術之一。藉由在 Otway 場址的永久接收器陣列和自動採集允許連續記錄井下和地面 DAS 數據。經分析此些接收陣列與連續紀錄，偵測到在該場址第 2C 和第 3 注入階段所引發的一些較小的誘發地震 (規模約在 -2 和 0 之間)，但是這些地震不會對封存場產生任何重大風險。除誘發的地震之外，另監測到約十倍誘發地震數量的自然地震，並利用這些自然地震的紀錄數據監測 CO<sub>2</sub> 團塊的移棲。本研究顯示，以永久性震源結合 DAS 的 VSP 持續性的同區異時監測，可以成功的追蹤 CO<sub>2</sub> 團塊移棲，且資料搜集與處理均為全自動流程，至今已處理千兆位元組的資料 (PB)。由於近兩年 COVID-19 肺炎疫情的影響，加上本研究設備 (DAS/SOV) 均早已設計為無人操作介面，促成了本研究計畫遠端採集與監

測的技術發展。Roman Pevzner 教授認為，本套設備應可符合絕大部分場址的震測監測需求。

澳洲聯邦科學與工業研究組織的首席科學家 Charles Jenkins 博士簡介利用 CO2CRC 的資料進行地潮汐觀測。地潮汐與海水潮汐一樣源自於地、月與太陽相對位置所造成的地下壓力的變化，藉由將 CO<sub>2</sub> 注入壓力監測的資料中去除灌注趨勢後，可顯示每 12 與 24 小時反應地潮汐的趨勢變化。但即便可觀察到地潮汐的現象，根據目前的均質模型均無法模擬與解釋這樣的變化，未來應有更多的研究以提取團塊監測資料中所隱含的資訊。Charles Jenkins 博士認為，地潮汐的資訊可能可作為預警 CO<sub>2</sub> 團塊抵達目標區域的可能工具之。

挪威大地工程研究所的資深研究員 Bahman Bohloli 講解的題目為利用 InSAR 與應變感應光纖(DSS)於陸域及海域的 CCS 場址監測。本計畫的目的在於提出更有效與更經濟的方式進行大區域的地變形量測，除藉由模型與地變形趨勢模擬 DSS 的佈設方式，模擬、估計與量測封存層的壓力和 CO<sub>2</sub> 團塊的移棲，並設計陸域與海域的 DSS 實驗(包含無錨定、環狀錨定與矩形錨定等三種)來觀察地變形抬升在不同區域的應力狀況與 DSS 接收到的，希望可藉此達到及早預測的目標。研究結果顯示，DSS 光纖在埋設於地表下 20-40 公分、無錨定且上覆水泥的狀態時可獲得較佳的量測資料，且此監測方法能應用於低變形量(1m 範圍內有 0.1m 的抬升量)的區域。模擬方法方面，本研究認為 Geertsma 解析模型可有適用於計算任意儲層幾何形狀、厚度、深度和多層複雜地質系統的儲層變形，地質力學模擬方法能藉由地變形揭示封存層的表現、地下斷層(封閉型/開放排水型)性質與地質結構的特性。

#### (四)會議第三日(26)與會內容

第三日之議程啟始為兩個技術演講，分別為英國的碳捕捉和儲存協會(The Carbon Capture & Storage Association, CCSA) 首席執行長 Ruth Herbert 女士及埃克森美孚公司低碳解決方案高級副總裁 Matt Crocker 先生。

Ruth Herbert 女士演講主題為「clusters and business models」，其內容主要集中於介紹英國碳封存相關政策(圖-9)。英國的 CCUS 策略在 2021 年有了重大的變革，因為英國政府為了因應淨零排放而提出了包含減碳策略與氫能策略的規劃，意圖在 2030 年達到 CO<sub>2</sub> 年捕捉量 22 百萬噸的目標，並於 2035 年擴大至年捕捉量 53 百萬噸。為了達成此目的，目前之 CCS 基礎設施基金總額為 10 億英鎊，希望在 2020 年代中可建設完成兩個 CCUS 群集(cluster)且於 2030 年前再完成另外兩個 CCUS 群集的設置氫能策略部分，目前計有 2.4 億英鎊的淨零氫能基金，規劃在 2025 年前達到 1GW 的藍氫發電目標。根據 2020 年英國政府在第六次淨零碳排預算平衡路徑規劃(6th Carbon Budget Balanced Net Zero Pathway)中，2050 年之 CO<sub>2</sub> 每年封儲量應為 104 百萬噸。



圖-9 Ruth Herbert 女士演講 clusters and business models

但是目前回顧該 2020 年之路徑規劃，可以發現實際進度已落後規劃一年之期程。因此，政府目前積極的推動與淨零碳排規劃策略相關的各項政府/企業合作計畫，包含 Back The SCO<sub>2</sub>TTISH CLUSTER、EAST CO<sub>2</sub>AST CLUSTER、V NET ZERO HUMBER CLUSTER、DelphiNus、HyNet 與 South West Industrial Cluster(SWIC)等位於英國工業心臟地帶的 CCUS 群集計畫。且為了趕上碳封存目標，英國政府規劃了一系列新的碳封存區域的競標案，封存許可證將於 2023 年初頒發，期望最早在 2027 年進行首次注入，新地點可能有助於達成 2030 年目標，每年可儲存 3000 萬噸 CO<sub>2</sub>。碳封存產業的發展亟需成熟且可持續獲利的商

業模式，英國政府設計了使用者付費模式(User Pays model)、運輸與倉儲公司(Transport & Storage Company, T&SCo)、包裹式政府支援(Government Support Package, GSP)、與政府監管制度(Economic Regulatory Regime, ERR)等模式，意在讓進行 CCS 建設的公司可在資金收入、法規保護與可預測的透明監管制度下健全發展。在此些模式下，英國政府更規劃了電力 CCUS 的可調度電力協議(Dispatchable Power Agreement, DPA)、工業碳捕捉合約(Industrial Carbon Capture, ICC)、碳捕捉服務(Carbon Capture as a Service, CaaS)等相關協議或合約的設計建議。英國政府所推行的相關政策目的即在於營造一個具有吸引力的投資環境。

Matt Crocker 先生的演講形式以座談方式進行，藉由主持人的提問與 Matt Crocker 先生的回覆，讓與會者了解埃克森美孚公司在淨零碳排的相關規劃。該公司認為氫能發展會是減碳的關鍵且亦會是未來的主流能源之一，而藍氫產業的發展將是能源轉型中重要的一環，因此該公司目前已實際參與了包含法國、比利時、荷蘭與英國等多個合作計畫，規劃在藉由結合 CCS 達到產製藍氫的目的。其強調埃克森美孚公司是一家具有堅實技術後盾的公司，特別是在傳統油氣產業鍊成熟的德州休士頓地區，刻正與多家公司展開技術開發合作計畫，有助於陸域及海域的碳封存計畫執行。Matt Crocker 先生表示，未來碳封存計畫將不限於單一場址，而是朝向多儲存場址聯合開發的模式前進，因此規模會遠大於以往的單一場址範圍，而埃克森美孚公司有能力和信心達成淨零碳排相關業務的建設目標。

在專題演講後，各主題會場即展開各分項論文發表。本次出國人員分別參加了 7B、7F、8B、8G、9G 與 9F 等主題宣講議程。以下為各議程聆聽報告之概述：

### 1、Session 7B - Other Storage：

本議程共包含五個演講主題，講者分別來自美國肯塔基大學、加拿大石油技術研究中心、美國伊利諾伊州地質調查局、日本地球環境產業技術研究機構與加拿大滑鐵盧大學。

隸屬於肯塔基大學的肯塔基州地質調查局地震學家 Seth Carpenter 簡報目標為誘發地震潛能的大尺度地質特徵及其對美國中、東部 CCUS 場址的衝擊。基於與美國能源部(DOE)的合約，貝特耳紀念研究所和伊利諾伊州地質調查局(Illinois State Geological Survey, ISGS)正在領導中西部地區碳倡議(Midwest Regional Carbon Initiative, MRCI)，這是一項旨在加速 CCUS 發展的區域協作倡議，主要參與者為美國中西部和中北部的 20 個州。本研究即包含於該倡議中的一項研究工作，目的在評估與 CCUS 相關活動誘發地震的可能性、其潛在危害及其影響(風險)。現階段而言，因民眾普遍了解石油和天然氣廢水注入會誘發地震，該倡議認為應有必要進行研究以減輕民眾的擔憂和促進未來 CCUS 場址的安全。由於 DOE 已訂定與地質封存相關之震測風險分析指引，因此本研究針對該指引中之部分內容展開分析，分別包含：評估歷史和現今地震活動、斷層識別和表徵描述、應力場的表徵、模擬斷層滑移潛力和敏感性、誘發地震活動潛力區域的測繪。Seth Carpenter 地震學家表示目前本計畫已經完成彙整和評估了歷史和現今地震活動資料與應力場指標資料庫，並測試了一種評估斷層滑動潛力和敏感性的方法。下一步研究將包括：對地震活動數據進行更詳細的分析、應力數據逆推以識別

應力場、應力嚴重集中斷層群的識別和表徵，以及對可能易受影響的區域進行區域排名。

加拿大石油技術研究中心的 Zeinab Movahedzadeh 專案計畫協調員簡介基於整合性二氧化碳封存計畫的測量、監測和驗證(Measurement Monitoring and Verification, MMV)技術評估。該簡報簡介 Boundary Dam Carbon Capture Facility 專案的相關內容，並描述該如何進行 MMV 的規劃。MMV 的目的分別為：1. 展示注入 CO<sub>2</sub> 的封阻性和一致性；2. 管理根據該計畫之風險管理計畫所辨識出的風險；3. 搜集任何可以用在確認實際狀況、用於更新模型或模擬之資料；4. 使長期不確定性得以移轉；5. 滿足法規所規定的任何監督管理要求。為達到前述目的，MMV 的規定須橫跨以下各內容：地質狀況、監督管理的要求、場址的風險評估、計畫生命週期的再審查與檢視、利害相關者和當地居民疑慮的解決方案、新技術與傳統技術的整合、降低成本與提高收益的方案、結合實際數據進行不同階段的調整和推展。根據應用 MMV 於 Boundary Dam Carbon Capture Facility 專案的結果，本簡報於結論中特別強調：1. 地質條件和場址的選擇是 CCS 計畫成功的關鍵；2. CCS 計畫的運行一定要進行風險分析；3. 井下 DTC 與環空監測試對於評估井的完整性非常重要；環境監測有益於公眾參與；4. 應專注於可降低成本並提高經濟效益的技術(場址中最為昂貴的花費分別為 3D 震測、井間震測、重力測量、EM(Electron magnetic) 測量與井況完整性電測)。

伊利諾伊州地質調查局的構造地質學家 Sherilyn Williams-stroud 簡報聚焦於如何應用誘發地震監測資料於地下構造解釋，所參考的資料來自於伊利諾州 Decatur 封存場址。該簡報除簡述 Decatur 封存場址外，亦展示注入所誘發地震之時序、定位資訊及震測資料中識別出的斷層，兩者的匹配程度，藉由分析破裂機制與推測破裂面，本研究發現多數破裂面的強度均小於原本依據莫爾庫倫破壞試驗準則(Mohr-Coulomb criteria)所預測的強度(破裂面的內摩擦角約為 12°；實驗室試驗出的內磨擦角約為 42°)，本研究猜測此不相符的原因可能是地球化學的反應所造成。誘發地震的分析結果顯示，震測解釋所解釋之封存層中的斷層，原本極具不確定性(因為成像不清楚)，雖經對比誘發地震的震源分析可以降低某些斷層解釋的不確定性，但多數誘發地震並不位於震測解釋之斷層位置。此外，觀察發生於蓋層及基盤內的誘發地震及團塊移棲過程，部分基盤地震與 CO<sub>2</sub> 團塊抵達的時序相近，指示這些發生於基盤的地震應受 CO<sub>2</sub> 團塊之影響而致。

地球環境產業技術研究機構的首席研究員薛自求(Ziqiu Xue)博士主題為應用光纖描繪 CO<sub>2</sub> 團塊與壓力前緣以評估斷層穩定性，但實際上簡報內容涵蓋層面更為廣泛，共計介紹四個案場的光纖應用。目前應用於監測之光纖計有 DAS、DTS 與 DSS/DFOSS(Distributed Fiber Optic Strain Sensing)，其中 DTS 與 DFOSS 主要用於壓力、CO<sub>2</sub> 前緣、蓋層與井完整性監測；而 DAS 主要應用於 DAS/VSP CO<sub>2</sub> 監測、微震與地震監測。薛博士先簡介以光纖及 X 光斷層掃描(X-Ray Computed Tomography)觀測岩芯尺度的 CO<sub>2</sub> 注入實驗，目的在於了解 CO<sub>2</sub> 團塊於封存穿越至蓋層的變化及 CO<sub>2</sub> 飽和度/DSS 間的關係。接著簡介井下 DSS 應用於鄰近新鑽井之鑽井液滲流監測(Solid Earth, 10.5194/se-11-2487-2020)。在距新鑽孔的兩個不同距離(約 3 和 9 m)的觀察井中，顯示使用 DSS 可以反應淺層含水層內之微小的應變變化(~20  $\mu\epsilon$ )，揭示因鑽井引起的流體力學變形的分層模式，此研究也指示利用 DSS 可進行井下微小洩漏檢測以確蓋層和井

的完整性。第三個介紹的案例為利用 DSS 觀測頁岩層中斷層滑動行為的研究(Solid Earth, 10.1029/2021JB022432)，研究證明 DSSDSS 對縱向和剪切應變敏感且能用於檢測出斷層活動，測量結果表示斷層剪切集中在斷層帶的頂部和底部界面，斷裂帶本身變形很小。最後一個案例為 RITE 與 CO<sub>2</sub>CRC 共同合作之斷層逸散監測，計利用 DAS、DTS 與 DSS 觀察地下 CO<sub>2</sub> 注入並經斷層逸散的過程，目前正處於基線測量階段，明年度將進行注入實驗，並結合光纖、DAS/VSP、InSAR/DSS 進行監測研究。薛博士總結其簡報，建議碳封存地點必須要佈設光纖監測系統，以追蹤 CO<sub>2</sub> 的移棲並確保地質儲存的持續性。光纖是既有效又先進的監測技術，除可用於降低量測成本和不確定性且滿足法規要求外，亦可替場址經營者帶來以下好處：1. 測量與注入 CO<sub>2</sub> 相關的關鍵地下參數；2. 為即時決策和流程最佳化提供井下和封存層的測量；3. 進行注入後 CO<sub>2</sub> 去向的長期監測。

滑鐵盧大學 Iouri leonenko 副教授簡介以解析法最佳化分析鹽水層同步 CO<sub>2</sub> 注入與鹽水生產過程。該研究假設一數值模型，以改變矩形注入與抽水井之數量比例、井距和每噸 CO<sub>2</sub> 注入費用的方式，模擬地下封存層可封存之 CO<sub>2</sub> 數量與淨收入。其模擬結果顯示增加同步鹽水生產可顯著提高 CO<sub>2</sub> 存儲容量和淨收入，Iouri leonenko 副教授認為該研究所開發的分析方法允許對數千種設計參數組合進行快速且經濟實惠的逐案評估，但由於本研究方法為解析法，因此僅能定性描述參數間的關係，每個技術(井距、注入/抽水井比例)或經濟(淨收入)的計算結果都反應/隱含了許多因素的相互作用，唯此研究方式無法定量設計參數間的相關性或建立經驗法則。此研究後續將持續討論：1. 建立由水平井組成的二氧化碳封存計畫設計分析模型；2. 確定不同注入/生產井網的效果，並在最佳化算法中新增一個視個案決定理想井網的函數；3. 評估該模型在非均質含水層中的性能並相應地調整模型。

## 2、Session 7F - Policy - International and Carbon Markets：

本議程主要探討國際減碳政策與碳市場現況，包含巴黎協定第 6 條下的 CCS、碳封存單位和碳封存義務的政策方法回顧、澳洲實現淨零排放的途徑：CCUS 的任務、歐洲大規模推動 CCS 計畫還缺少什麼呢？以及國際合作如何促進 CCUS 研究和創新。

德國Carbon Counts公司Gregory Cook資深顧問簡報巴黎協定第6條下的CCS，為國際碳市場奠定了基礎，也為簽署方合作實現其國家自主貢獻(NDC)中設定的減緩目標提供了基礎。由所有締約國提交國家自主承諾的目標(或貢獻)，以實現將全球氣溫上升幅度控制在遠低於工業化水平前2°C以內，並努力將上升幅度限制在1.5°C以內。締約國必須至少每五年更新一次其國家自主貢獻，目標逐步變得更加雄心勃勃。在2021年於格拉斯哥舉行的COP26會議上，關於第6條的規則獲得通過，儘管仍有大量工作需要詳細說明，如何最終將它們轉變為功能性碳市場。幾乎所有模擬實現全球淨零排放的路徑，包括國際能源署(IEA)和政府間氣候變化專門委員會(IPCC)，都預見到地質封存的重要性。例如，國際能源署的淨零排放情景(IEA 2021)設想到2050年全球每年封存7.6 Gt CO<sub>2</sub>，封存來自化石燃料、生物燃料、工業過程和直接空氣捕捉的CO<sub>2</sub>。

德國Carbon Counts公司Paul Zakkoura博士簡報碳封存單位和碳封存義務的政策方法回顧，迄今大型碳排放源(或近年直接從空氣中)碳捕捉和地質封存CO<sub>2</sub>的政策，獎勵政策幾乎都在避免CO<sub>2</sub>排放或CO<sub>2</sub>捕捉，但對於封存CO<sub>2</sub>的經濟激勵極少。因此，地質CO<sub>2</sub>封

存場以及各排放源連接基礎設施，需要各項激勵計畫支持下進行開發和運營。例如，CCS 應用於排放交易系統或碳稅機制，則CCS經營人可以分別獲得免除和放棄CO<sub>2</sub>排放權或繳納碳稅。捕捉生質燃料排放的CO<sub>2</sub>或直接從空氣中捕捉先前排放的CO<sub>2</sub>，也可以取得負碳排放信用(或稅收抵免)。近年來已提出了幾種解決的方法，包括：(1)碳差價合約、(2)對碳排放者提出碳封存義務、(3)或為化石能源的碳生產商或供應商建立碳封存義務。碳封存經營人可以獲得碳封存單元(Carbon Storage Unit, CSU)，而這些碳封存單元可以出售給化石燃料生產商，抵消他們生產的化石燃料中所含的碳。因此，可以建立平行的激勵措施，鼓勵有能力的參與者開發和營運地質CO<sub>2</sub>封存場，以及鼓勵參與者碳捕捉和制訂碳價格激勵措施。

澳洲坎培拉氣候變遷、能源、環境與水資源部 Jocelyn Taylor 經理簡報澳洲實現淨零排放的途徑：CCUS 的任務，澳洲正在採取一系列作法，以期到 2050 年實現溫室氣體淨零排放。特別是 CCS 和 CCU 幫助澳洲工業和企業提供了一條實現脫碳途徑，CCS 是一種潛在的途徑，澳洲非常適合大規模部署 CCS，以促進澳洲二氧化碳減排並協助鄰近國家減排。具體措施包括：(1)實施強有力的立法和監管框架來管理海上和陸上地質封存活動；(2)為示範和商業型 CCS 計畫提供支持；(3)建立排放績效標準和方法以核發澳洲碳信用額度；(4)支持涵蓋 CCS 價值鏈各個方面的研發活動，並為國際 CCS 業界做出貢獻。

挪威 Carbon Limits 公司 Manon Simon 女士簡報歐洲大規模推動 CCS 計畫還缺少什麼呢？近年來，歐洲宣布了許多大型 CCS 計畫，除了挪威的 Sleipner 和 Snøhvit 之外，許多計畫在開始之前就被放棄了，很少有人開始運營。究竟歐洲大規模推動 CCS 計畫以幫助實現工業和發電的氣候目標還缺少什麼？Carbon Limits 首先研究調查了 CCS 資金需求與未來幾年已宣布可用公共資金之間的潛在差距；其次分析評估了已開發碳封存量與捕捉計畫封存需求之間的潛在差距；第三項分析比較了分配給再生能源計畫和 CCS 計畫的資金，即每噸減排所花費的資金差距。到 2030 年，非營利性 CCS 計畫的資金需求將是可用公共資金的兩倍，如果計畫損失完全由公共支持來彌補，未來十年將高達 104 億歐元。且目前已宣布在 2030 年的碳捕捉量有 187 百萬噸，其中 100 百萬噸已有專用封存場址，但其餘的 87 百萬噸只能依賴其他第三方開發封存量或空間。在資金方面，Porthos 和 Longship 的計畫資金約為風能和太陽能的 35-50%，也僅是生物能源的一半以下。分配給 CCS 計畫的總預算也往往比分配給再生能源的公共資金要有限得多。然而，從溫室氣體的角度來看，為減排成本最低的減排方案提供資金，並為大型 CCS 計畫的開發提供足夠的資金會更有利。

挪威研究院 Aage Stangeland 特別顧問簡報國際合作如何促進 CCUS 研究和創新，加速 CCUS 技術合作(Accelerating CCUS Technologies, ACT)是一項跨國計畫，目的是透過聯合合作與創新研究活動以加速 CCUS 技術研發，促進 CO<sub>2</sub>捕捉、再利用和封存(CCUS)的實現。目前有 16 個國家或地區(加拿大亞伯達省、丹麥、法國、德國、希臘、印度、意大利、荷蘭、挪威、羅馬尼亞、西班牙、瑞士、土耳其、英國、和美國)的參與且參與國家或地區數量穩步增加中。此外，北歐能源研究中心也是 ACT 的成員，代表所有北歐國家。ACT 於 2016 年成立 ERA-Net Cofund 是一項共同行動基金，目的在支持公私合作夥伴關係(P2P)，包括歐盟成員國之間的聯合計畫倡議，以準備、設計、實施和協調聯合

活動以及建立網路結構與歐盟補充跨國提案的融資。ACT 已經進行了三次成功的號召，第一次號召(2016 年)是從參與合作夥伴和歐盟委員會籌集資金；第二次和第三次號召(分別在 2018 年和 2020 年)由參與的國家資助機構自主資助。這三次號召共資助了 33 個計畫，支持總金額接近 1 億歐元。ACT 所支持的研究和創新計畫已經取得了與工業大型 CCUS 計畫高度相關的成果，例如挪威的 Longship、荷蘭的 Porthos 和蘇格蘭的 CCU 群集。ACT 不僅在聯盟組織的年度知識共享研討會期間合作，而且在計畫本身的組織活動中共享富有成果的知識平台。ACT 歡迎歐洲以外的新合作夥伴加入這一合作，為全球 CCUS 社區創造更多價值，並為全球溫室氣體減排做出有意義的貢獻。

### 3、Session 8B - Site characterisation :

本議程共包含五個演講主題，講者分別來自美國德州大學奧斯汀分校經濟地質局、美國北達科他大學能源與環境研究中心、挪威奧斯陸大學與 Carbon Solutions LLC 公司。

德州大學奧斯汀分校經濟地質局的 Alex Bump 博士講解主題為枯竭油氣田的 CO<sub>2</sub> 封存開發標準。該簡報共統合分析與整理了 10 個枯竭油氣田轉為 CO<sub>2</sub> 封存的案例，就優點而言，一般認為舊油氣田有以下幾項優點：以證實的儲層與封阻、豐富的現有數據(包括油藏動態)、已存在的土地、可重新使用的基礎設施、與新建開發相比，成本更低、開發時間更短、風險更低。但若經仔細思考，舊油氣田的常見的缺點為：枯竭油氣田的定義廣泛、儲層可能不適合存儲需求、增加壓力可能會產生新的封阻風險、傳統油井為潛在的洩漏點、基礎設施可能無法(容易的)重複使用。為了有效的評估到底怎樣的舊油氣田可稱為適合 CO<sub>2</sub> 封存的候選場址，本研究引用 IEAGHG 於 2022 年 1 月發佈的「Criteria for Depleted Reservoirs to be Developed for CO<sub>2</sub> Storage」指引及參考前人經驗，建立場址評估要素的篩選表格，該表格濃縮五項應考慮的要素於單張頁面中，包含：用於存儲的地下參數、應用於 CO<sub>2</sub>-EOR 的地下參數、封存安全性、基礎設施、公眾接受度和監管單位的批准...等，且每項要素都有相對應的細項條件表格可供分類查閱。該研究根據案例研究的成果，提出以下幾點結論：1. 殘餘碳氫化合物的存在對封存能力和注入能力的影響很小；2. 枯竭油田的壓力(部分)反映了邊界條件，若將封存容量最大化則傾向於建設開放式邊界的封存場，但若最大化安全性與最小化監控設置則傾向於建設封閉邊界的封存場；3. 可繼承使用的基礎設施可能是資產或負債，因此需要逐案評估；4. 篩選場址時，應優考慮場址建設的目標和優先事項(例如，成本、安全、容量等)，並依據指引篩選，以得出評價較高的場址。

北達科他大學能源與環境研究中心的首席科學家 Matthew Belobraydic 先生的簡報主軸為經由技術與地質力學的思考角度探討多層次的 CO<sub>2</sub> 封存。相較於丹封存層的場址而言，多層次的 CO<sub>2</sub> 封存同時存在多個儲存地層，需要整合投資和監控設備，並且可能產生 CO<sub>2</sub> 團塊間的相互影響。為了從力學角度了解多層次封存可能產生的影響，該研究建立了數值模型，分別模擬 Inyan Kara 與 Broom Creek 等兩封存層單獨與共同注入 CO<sub>2</sub> 時，在有熱應力及無熱應力的狀況下之壓力變化。模擬結果顯示，無論有無熱應力影響，無論是單層注入或兩層同時注入 CO<sub>2</sub>，Inyan Kara 和 Broom Creek 層均具有地質力學隔離特徵，注入產生的壓力並未跨越地層至上部封存層造成壓力連通。本研究未來將持續

精進模擬流程，考慮耦合流體模擬、地球化學和地質力學研究，並整合更全面的輸入條件，包含斷層、天然裂縫、垂直熱傳導與熱對流。此外，在熱應力條件部分應增加考慮熱應力所造成的滲透率增強、應力引起的孔隙壓力和破壞後的力學行為等狀況。

北達科他大學能源與環境研究中心的 Thomas P. McGuire 先生代替原定的 Arelys Salazar Hernandez 女士進行報告，報告主軸為特定案場 CO<sub>2</sub> 注入測試井模擬計算的關鍵重要性-以 Tundra SGS 為例。Tundra 計畫旨在在北達科他州建造世界上最大的碳捕捉設施，正在設計創新技術，以捕捉 Milton R. Young 發電廠站任一發電機產生的 90% 的二氧化碳。本計畫藉由預定封存場址的兩口鑽井，得到 Broom Creek 與 Deadwood 目標封存層的井測、岩芯、MDTs 與注入試驗的資料，將這些資料用於模型的輸入，並以 Computer Modeling Group(GEM)的組成份油藏模擬模組進行 CO<sub>2</sub> 注入數值模擬。藉由比較原始模型內地層滲透率(參考岩芯試驗，例如：Broom Creek 層岩芯約 8~80mD)及地層注入試驗所求取的滲透率(例如：Broom Creek 層~4.48D)，可知實際地層滲透率應為岩芯滲透率的 5 倍。故該研究修改其模型內容，並在較為保守的前提下設定模型地層滲透率為岩芯試驗的 2.5 倍，重新模擬並評估注入井應設置數量(相較於原始模型，注入井數量減少約 1/2)。此種模型滲透率的調整方式，可協助決定所需注入井的數量以降低成本，且同時減少經由井孔洩漏的風險、過多監測設備的設置、後續監測分析與設備維護成本。

挪威奧斯陸大學的博士研究員 Md Jamilur Rahman 先生簡介北海北部 Aurora 潛在 CO<sub>2</sub> 儲存場內上部 Amundsen 頁岩的側向分佈。該研究認為，壓力管理對於 CO<sub>2</sub> 的注入效率十分重要，缺乏壓力管理可能會顯著降低儲存效率，特別是封存層中存在細顆粒組成之地層時。因此本研究針對 Longship 計畫中 Northern Light 項目的 Aurora CO<sub>2</sub> 封存場作為研究目標，經由石油物理(Petrophysics)、岩石物理(Rockphysics)與震波逆推等分析方式了解介於 Cook 和 Johansen 砂岩之間的 Amundsen 頁岩分佈形貌。該研究結果顯示，Amundsen 頁岩橫向連續性不佳，呈現間斷分佈的形貌，因此該頁岩並未完全阻隔 Cook 及 Johansen 砂岩。預估未來注入到 Johansen 砂岩中的 CO<sub>2</sub> 將沿地層上傾方向往北遷移並可能向上移棲到 Cook 砂岩中。

Carbon Solutions LLC 公司的科學家 Jonathan Ogland-Hand 博士簡介該公司的 SCO<sub>2</sub>T<sup>PRO</sup> 模擬技術(以 Julia 程式語言編寫)，該模擬方法結合了 CO<sub>2</sub> 封存的動態物理特性以模擬地下鹽水層中的 CO<sub>2</sub> 封存樣貌。Jonathan Ogland-Hand 博士表示 SCO<sub>2</sub>T<sup>PRO</sup> 藉由 CO<sub>2</sub> 注入與團塊力學的降階模型，並整合經濟數據計算，可快速計算(每秒完成 1000 次的實現(realization))注入、存儲量和成本。相較於美國能源部化石能源辦公室(Office of Fossil Energy, FE。現已更名為 FECM，見第二日技術之技術演講)與美國能源部國家能源技術實驗室(National Energy Technology Laboratory, NETL)所建立的 CSSC(CO<sub>2</sub> Saline Storage Cost Model)儲存成本模型(為基於 Excel 的模型，根據計畫管理、財務、活動成本和地質評估等四個模組估算將 CO<sub>2</sub> 封存在陸域深層鹽水層的第一年盈虧平衡價格)，SCO<sub>2</sub>T<sup>PRO</sup> 的成本及封存量模擬結果及運算時間均為 CSSC 之一半。Jonathan Ogland-Hand 博士認為此差異來自於 SCO<sub>2</sub>T<sup>PRO</sup> 中新的 STOMP(Simulation of Transport Over Multiple Phases)數據訓練法可更真實地反應二氧化碳注入狀況、能引入現場取得的精細地質數據且編寫的程式語言計算更為快速。總而言之，該公司推薦各界使用其

SCO<sub>2</sub>T<sup>PRO</sup>模擬技術。

#### 4、Session 8G - Transport - CO<sub>2</sub> Quality :

本議程主要探討二氧化碳中的雜質，包含：雜質對富含 CO<sub>2</sub> 的熱物理性質的影響、CO<sub>2</sub> 雜質和添加劑對 CCS 熱物理性質的影響：黏度和密度測量、超靈敏檢測 CO<sub>2</sub> 中的雜質、密態、超臨界態和多組分 CCS 運輸條件下使用科里奧利流量計(Coriolis Meter)性能的實驗研究、用於測量 CO<sub>2</sub> 雜質的壓縮和液化裝置。

英國海華大學(Heriot Watt University)水合物、流動保障與相平衡研究團隊 P. Ahmadi 博士簡報雜質對富含 CO<sub>2</sub> 的熱物理性質的影響，工廠碳捕捉後的二氧化碳雜質可能有 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、H<sub>2</sub>O、He、O<sub>2</sub>、Ar、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 等，這些都會改變純 CO<sub>2</sub> 流體的熱物理性質，例如，臨界點、相包絡線和水合物區域等影響可能很大。研究探討文獻中三個主要問題。首先是與 CCUS 應用相關的壓力、溫度和摩爾分數在文獻數據上存在的差距；其次，在公開文獻中都沒有發現 CO<sub>2</sub> 與某些雜質(例如 NH<sub>3</sub>、乙醛、胺類)的混合物的數據；最後，無論雜質類型如何，一些熱物理性質(例如，焦耳-湯姆森、熱容)的文獻數據都很少。基於文獻數據很少，作者團隊建立資料庫並定期更新，包括由聯合工業計畫(JIP)實驗的測量結果，也都公開發表新實驗數據。

挪威科技大學(NTNU)Bahareh Khosravi 博士候選人簡報 CO<sub>2</sub> 雜質和添加劑對 CCS 熱物理性質的影響：黏度和密度測量，ImpreCCS 計畫位於挪威 CCS 研究中心(NCCS)內，合作夥伴包含 SINTEF Energy Research (SER)、NTNU、西澳大利亞大學和 NORCE。ImpreCCS 研究計畫的目的是透過在 CO<sub>2</sub> 運輸和封存的條件下，取得有關純 CO<sub>2</sub> 和富含 CO<sub>2</sub> 的混合物以及相關雜質和添加劑的關鍵黏度和密度特性，以降低 CCS 成本和風險，新的實驗數據可應用於地下碳封存模擬工具的共同流體和條件的模型。實驗設備包括一個改良的雙毛細管黏度計，可在較大的壓力和溫度範圍內實現高性能。裝置中還有一個密度計，該密度計可在相同的溫度和壓力控制下，能夠在運動黏度和動態黏度間進行精確轉換。實驗程序的測量透過毛細管的壓降，該壓降與層流的流量和黏度成正比。實驗裝置的設計涵蓋 - 60°C 至 150°C 的溫度和高達 1000 bar 的壓力，以及純液態、超臨界或氣態。

挪威奧斯陸大學(University of Oslo)化學系 Armin Wisthaler 教授簡報超靈敏檢測 CO<sub>2</sub> 中的雜質，CO<sub>2</sub> 可以在簡單的酸鹼反應中用胺進行化學捕捉，而 CO<sub>2</sub> 是一種酸性氣體，與本質上呈鹼性的胺反應生成鹽，因此，CO<sub>2</sub> 仍以氨基甲酸鹽或碳酸氫鹽的形式結合。來自工業和發電來源的煙道氣含有其他酸性氣體，例如 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 或 H<sub>2</sub>S 氣體也會在胺處理廠中被捕捉。此外，胺類會發生熱分解和氧化分解，形成 NH<sub>3</sub>、小分子醛類(例如：甲醛或乙醛)或揮發性亞硝酸胺等氣體。因此，胺廠產生的 CO<sub>2</sub> 並不純淨。包含無機和有機雜質，即使經過額外的純化步驟，這些雜質仍以 ppt 到 ppm 的含量存在。其中一些雜質可能會對 CO<sub>2</sub> 的運輸和再利用產生不利影響。例如，已知雜質如 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 對不銹鋼製成的運輸系統有害，會導致腐蝕或形成固體物質。奧斯陸大學大氣化學小組率先使用線質譜法(質子轉移反應飛行時間質譜法 PTR-ToF-MS)，測量來自胺廠排放至大氣中尾氣的痕跡量。直接對待分析氣體進行採樣，分析結果時顯示低至 ppt 級的有機和無機氣體的痕跡量。

英國海華大學碳解決方案研究中心( Research Centre for Carbon Solutions)J. Jimba博士班研究生簡報密態(Dense Phase)、超臨界態和多組分CCS運輸條件下使用科里奧利流量計性能的實驗研究，科里奧利計量技術沒有直接的雷諾數限制，可以直接測量質量、流量，同時還具有處理多組分流體的能力。雖然科里奧利流量計不受流體密度的影響，但它適用於流體特性(溫度和壓力)也未知，且它的性能尚未在CCS計量中得到充分證明。因此，例如，科里奧利流量計的測量精度是否符合運輸條件下的CO<sub>2</sub>流量測量要求，這一點尚未確定。本研究設計工業規模的科里奧利流量計、建造並測試了重力校準設備。使用單一組分液態CO<sub>2</sub>平均不確定度為0.11%，這與科里奧利計量技術的測量不確定度規範一致。而相比之下，在兩相條件下的類似研究中發現了較大的錯誤。雖然這是預料之中的，但本研究能夠將誤差的測量不確定度調整為1.5-2%。單一組分CO<sub>2</sub>記錄的誤差完全在歐盟/英國排放交易系統(ETS)規定的最大允許誤差(MPE) 2.5%範圍內，說明科里奧利計量技術在CCS運輸應用中，對CO<sub>2</sub>流量測量具有良好的前景。

挪威 SINTEF Industry 的 Thor Mejdell 資深研究科學家簡報用於測量 CO<sub>2</sub> 雜質的壓縮和液化裝置，二氧化碳雜質對於二氧化碳的運輸、封存和再利用至關重要。例如，北極光計畫除了嚴格限制排放尾氣中的 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 等化合物外，還對胺類和胺類降解物進行了限值。胺和氨的運輸含量≤10 ppm，醛類等降解物含量≤ 20 ppm。位於挪威特隆赫姆 Tiller 的 CO<sub>2</sub> 實驗室是一個裝備精良的測試設施，用於開發燃燒後 CO<sub>2</sub> 捕捉技術，同時也是一個用於尾氣處理、分析和排放研究的實驗室。實驗設備含 CO<sub>2</sub> 壓縮和液化裝置(CCLU)，可對捕捉過程中產生的 CO<sub>2</sub> 進行液化，以辨別和量化 CO<sub>2</sub> 中的雜質。將在液化前的 CO<sub>2</sub> 氣體乾燥後取樣並分析雜質。此外，也分析每一個壓縮機分離水後的液體樣本。

## 5、Session 9F - Monitoring microseismicity :

本議程共包含五個演講主題，講者分別來自挪威地震研究中心、挪威國家石油公司、Silixa Ltd 公司與地球環境產業技術研究機構。

挪威地震研究中心的資深地球物理研究員 Bettina Petra Goertz-Allmann 簡介加拿大艾伯塔省 Quest CCS 計畫的有效微震監測。微震監測除了可建立注入初期的封存層響應外，其所觀測到的地震也可顯示因注入所引起的流體移動路徑及應力傳遞現象。即便有越來越多的微震監測應用成功案例，但是相關的標準作業及解決方案流程仍未建立，多數狀況下都是為個案所設計的微震監測。因此，為了使微震監測發展成為一種強大、具成本效益、可廣為社會所接受之驗證大規模 CO<sub>2</sub> 封閉完整性的技術，ACT(Accelerating CCS Technologies)共同基金資助本(ENSURE)計畫的執行。該計畫藉由參與位於加拿大 Quest CCS 計畫，研究微震監測相關技術。Quest CCS 計畫共有三口注入井，位於中央的注入井設有 DAS 與一組包含 8 顆受波器的陣列，地表設置了 17 組受波器次陣列(總共有 153 個 node)。監測結果顯示所有的地震都發生於封存層下的基盤內。根據微震監測與資料分析結果，該研究認為垂直向長跨距的井下接受器(例如：DAS)對於降低地震定位深度不確定性極為重要，且 DAS 可補足複雜地震波場所需的重要資訊；水平向的接收陣列則有助於減少地震定位的橫向不確定性，並可作為劃定/縮小受注入影響區域的範圍。此外，設置於注入井附近的感應器對於減少地震的誤判有其重要性，可根據所記錄到的注入訊號決定自動偵測地震事件門檻值；地表次陣列的設置同樣有益於決定地震事

件偵測門檻的數值，但地表站的位置選定需要詳細評估以免接收到過多的雜訊。

挪威國家石油公司暨挪威科技大學(NTNU)的 Philip Ringrose 教授簡報在 Horda 海上平台注入 CO<sub>2</sub> 之前的背景地震活動監測-HNET 計畫。地震風險評估是選擇安全選址的重要一環，了解背景地震有助於識別注入活動誘發地震的可能性。注入前的監測可降低後續發生自然地震時，被誤解為注入誘發地震的質疑。HNET 計畫正是為了因應 Longship 計畫中 Northern Light 項目注入場址(Horda 海上平台)之區域背景地震測量而提出，HNET 計畫自 2018 年啟動至 2024 年 CO<sub>2</sub> 開始注入前結束，分階段設置海域受波器(offshore geophone)、陸域觀測網(HNAR Array, 2020)與投放 OBS(2021)。搜集資料後，藉由結合各陣列資料處理和單站紀錄地震標定以提高地震的定位精度並解算震源機制。目前的研究結果顯示：1.Horda 海上平台鄰近區域的地震屬於正常的構造活動，Gutenberg-Richter 經驗式的 b 值為 1(此關係式決定大地震與小地震比例，例如 b=1 代表 ML=2 的地震頻率是 ML=3 的 10 倍)；2.Horda 海上平台鄰近區域具有 2 組最大水平應力，包含西北-東南與東-西向；3.海域 OBS、陸域 HNAR 觀測網及挪威國家地震觀測網(Norwegian National Seismic Network, NNSN。寬頻地震站)綜合進行地震分析帶來多項技術演進，包含更寬的方位角覆蓋率(azimuth)、利用陣列處理法改善地震偵測門檻值及更加精準的地震定位。

Silixa Ltd 公司的資深地球物理學家 Anna Stork 博士簡介藉由被動和主動的震波監測 CO<sub>2</sub> 注入：以冰島 Hellisheiði 地熱田為例。Silixa Ltd 為一家光纖開發公司，目前正進行 CO<sub>2</sub> 地質封存與地熱能源開發相結合之計畫(Synergetic Utilisation of CO<sub>2</sub> storage Coupled with geothermal Energy Deployment, SUCCEED)。該計畫希望為的地熱-CO<sub>2</sub> 封存場提供最先進、具有成本效益和低環境影響的監測技術，因此正在進行一系列技術測試與研究，其中即包含本研究。儘管地熱發電為低 CO<sub>2</sub> 排放的發電方式，但是地下熱液的產出仍會伴隨著部分 CO<sub>2</sub>，電廠希望結合 CO<sub>2</sub> 地質封存達到淨零排放的目標。試驗廠址 Hellisheiði 地熱田一年約可捕捉 12,000 噸的 CO<sub>2</sub>，預計將 CO<sub>2</sub> 重新注入至地下 700 公尺深的玄武岩內，以礦化封存的方式封存 CO<sub>2</sub>。本研究主要研究目標為測試兩種監測技術：1. 電動直線同步馬達(Electric linear synchronous motor, LSM)震盪震源(E-vibe)；2. 表面螺旋纏繞光纖(Helically Wound fibre-optic Cable, HWC)的 DAS 測試，此類型光纖提升了 P 波的偵測能力。除以主動震源測試光纖性能外，更測試被動震源與光纖搭配監測的可行性，並結合傳統受波器作為驗證參考。試驗結果驗證了受波器和 DAS 記錄具一致性，且 HWC 紀錄的 P 波響應良好，證明 DAS 可用於微震監測。另外，藉由測試 E-vibe 震源，確認 E-vibe 可作為良好的 P 波波源。未來將進一步應用本測試方法於土耳其的地熱場，並測試主動震源地同區異時應用、深部地層成相與被動震源之 DAC 紀錄資料處理方法。

地球環境產業技術研究機構的副首席研究員 Takahiro Nakajima 博士簡報淺水區 CO<sub>2</sub> 地質場址之微震觀測和同區異時調查混合監測系統的研發。為了達成 CO<sub>2</sub> 安全的地質儲存，地震監測是最有效的方法，但監測方法必須盡量符合經濟效益。為了實現有效又經濟的監測目的，Takahiro Nakajima 博士的研究團隊開發了一種使用海底電纜(OBC)的海上混合監控系統，並藉由苦小牧案例展示該 OBC 系統用於海上微震監測和震波勘測的結果。佈設於苦小牧海域的 OBC 總長度 2.4 公里，計有 48 個接收器單元，每個單元

內包含三分量地震儀與水壓計，各單元間距 50 公尺，OBC 以埋設於海床下之方式鋪設，其幾何形貌類似兩個向上箭頭(^^)。微震監測應用方面，監測系統仿造增強型地熱系統 (of Enhanced Geothermal System, EGS) 的紅綠燈概念，藉以向社會展示監測狀況與獲得社會的認可。微震監測系統偵測地震的方法為 Sequentially Discounting Auto-Regressive (SDAR) 法，該方法能作為設置地震自動識別門檻值參考，除可應用於海域微震監測自動識別系統外，亦可用於陸域微震監測。而地震定位則使用 HYPOMH 震源計算程序，本研究認為 Hiratsuka 陣列能進行微震的詳細地震定位。震波測勘應用方面，以震源間距 40m 進行矩形炸測可得到 20m 間距的網格胞尺寸 (bin size)，完成採集的資料為仿三維 (pseudo 3D) 震測資料體，但由於 OBC 佈設方式，會於三維資料體頂部產生資料陰影帶 (Shadow Zone)，因此 Takahiro Nakajima 博士建議未來 OBC 佈設方式須經詳細規劃後再決定纜線鋪設幾何。由於 OBC 具四分量接收能力，故可分別得到 P-P 及 P-Sv 震測資料，兩資料相互比較就能得到地層內具流體特徵位置，藉以定位 CO<sub>2</sub> 團塊與同區異時移棲狀況。Takahiro Nakajima 博士強調，本研究開發的監測系統是一個非常有前景的即用型工具，能以較低成本在淺海環境監測 CO<sub>2</sub> 地質封存的成效。

挪威國家石油公司的首席地球物理研究員 Roya Dehghan-Niri 博士報告海域 CO<sub>2</sub> 封存的地球物理監測工具之最佳化。監測費用中以 4D 震測之花費佔比最高，因此各方研究均戮力探詢未來可應用於更大場址、更安全、更快速且更具經濟效益的地物監測方法，本研究基於該單位經驗分別簡介可應用於未來場址監測的方法，包含：迷你拖纜 (Mini-streamers)、4D-DAS-VSP、高效能的全波形逆推 (Efficient Full Waveform Inversion) 與被動震測監測。未來封存場址可能因海上設備或水深的影響，使得傳統長支距 3D 震測難以於設備間或淺水區進行施測，因此迷你拖纜成為更具運作彈性、有經濟效益、適應淺水區域且淺部影像解析度優良的施測選擇，但根據於挪威北海 Sleipner CO<sub>2</sub> 封存場的測試結果，該技術目前仍有海床複反射與深部成相不佳的問題待克服。井下 DAS-VSP 的優點在於施測極具經濟效益、高垂向分辨率及可同時應用於主被動震測監測，但未來仍須開發更高效力的去噪演算法及討論本技術應用於近井成像和監測的潛力。稀疏資料 (Sparse Data) 全波形逆推過往曾被應用於北海 Sleipner CO<sub>2</sub> 封存場，但結果並未盡理想，未來若能達到真的稀疏節點可能逆推結果會更佳。被動震測監測目的為藉由自動檢測、定位和報告 CO<sub>2</sub> 儲存地點及其周圍的地震活動以建立 CO<sub>2</sub> 場址的早期預警系統，目前該技術已實際應用在北海的 Horda 海上平台之地震監測。Roya Dehghan-Niri 博士表示將持續精進此四項技術以達到快速、經濟及最佳化的監測效果。

## 6、Session 9G - Transport - Infrastructure & source-sink matching :

本議程探討碳排放源到封存場間的運輸問題，包含：美國西部山區 CO<sub>2</sub> 基礎運輸設施建模、東南亞推動管線和船舶進行 CO<sub>2</sub> 源匯的運輸成本優化、美國 Heartland Greenway 計畫建設面臨的挑戰、CCS 價值鏈優化懷俄明州的美國稅收抵免收入、政策影響 CO<sub>2</sub> 捕捉和運輸基礎設施的成本最優—以瑞典為案例研究。

美國洛斯阿拉莫斯國家實驗室地球與環境科學部 (Earth and Environmental Sciences Division, Los Alamos National Laboratory, USA) 的 Bailian Chen 科學家簡報美國西部山區 CO<sub>2</sub> 基礎運輸設施建模，美國能源部資助的 Intermountain West

Energy Sustainability & Transitions (I-WEST)計畫正在制定區域技術路線圖來解決能源轉型挑戰，以實現 Intermountain 西部地區在未來 15 年內實現碳中和與經濟上可持續能源系統的轉型(包括六個州：亞利桑那州、科羅拉多州、蒙大拿州、新墨西哥州、猶他州和懷俄明州)。為了在未來 15 年內實現脫碳，碳捕捉、再利用和封存(CCUS)是需要的重要技術之一，這需要一個比現有管網更大的 CO<sub>2</sub> 運輸管線網路。I-WEST 的 CCS 建模團隊利用開源 CCUS 基礎設施建模軟體 SimCCS，進行未來幾十年推動 CCUS 計畫，為所有符合 45Q 排放源實現區域淨零排放目標，年二氧化碳排放量約為 2.2 億噸。I-WEST 地區的深部鹽水層和含油氣儲層(透過 CO<sub>2</sub> 提高石油採收率)都被考慮用來進行 CO<sub>2</sub> 地質封存，因此，規劃未來單相管網和以單相為基礎管網，作為一系列 CCUS 管網發展的參考。

美國 ExxonMobil 公司 Ganeswara R Dasari 地球物理學家簡報東南亞推動管線和船舶進行 CO<sub>2</sub> 源匯的運輸成本優化，研究首先評估枯竭油氣田的 CO<sub>2</sub> 封存能力。其次，評估三種新加坡不同規模 CO<sub>2</sub> 來源的運輸方案，包含陸上和海上管線以及船舶的組合。第三，使用油氣礦區的生產率計算 CO<sub>2</sub> 注入率。最後，計算航運和管道運輸中的其他主要成本，包括壓縮、脫水、管線、裝載碼頭、海上封存場和注入設施。研究假設新加坡的二氧化碳排放量將從位於裕廊島(Jurong Island)的單一港口碼頭出口。再利用點對點網路系統，將其與鄰國的現場規模封存場配對，形成許多源匯組合。採用簡化的篩選過程來初步評估三個計畫情境的最佳選擇，將 1、2 和 5 百萬噸/年的 CO<sub>2</sub> 運輸和封存到每個封存地點。

美國 Advanced Resources International 公司 Andrew Duguid 副總經理簡報美國 Heartland Greenway 計畫建設面臨的挑戰，由於美國最新聯邦稅收抵免為在鹽水層中每公噸碳封存為 50 美元，且加州低碳燃料標準(LCFS)計畫抵免的金額為每公噸超過 200 美元，這創造了一個有利於在美國生質燃料工廠發展商業碳捕捉和封存的環境。然而，許多生質燃料(例如：玉米)生產州的部分地區在地質條件上不利於碳封存。因此，Heartland Greenway 樞紐計畫每年從五個州的生質燃料和化肥廠，沿著 2100 公里的管線將 10 至 1500 萬噸二氧化碳輸送到位於伊利諾斯州中部的西蒙山砂岩封存。管道的跨度、CO<sub>2</sub> 排放源相對於封存地點的位置以及封存地點的規模都帶來挑戰，且因為不同利害相關人的數量增加。農民、土地所有者和利害相關人可以直接從計畫中獲益，使得這些人有可能支持該計畫執行。生質燃料工廠普遍受到農民的歡迎，因為他們購買糧食並協助支撐糧食價格。

英國倫敦帝國大學化工系潔淨能源處理實驗室 Matthias Mersch 研究助理簡報 CCS 價值鏈優化懷俄明州的美國稅收抵免收入，懷俄明州因為擁有大量以煤為基礎的碳密集型發電系統和多個潛在的地質碳封存地點，特別適合推動 CCS 計畫。CCS 被視為煤炭行業未來發展的機會，該行業在 2015 年貢獻了懷俄明州生產總值的 14%，且當地利害關係人強有力的支持 CCS，因此，各種 CCS 計畫目前正在進行或已經完成。CarbonSAFE 計畫是推動 Dry Fork 發電站運營 CCS 設施，目前正處於施工前的場址特徵描述階段，對 Rock Springs Uplift 在內的各種封存層進行前期可行性研究。埃克森美孚在 LaBarge 場址營運一座從天然氣中分離二氧化碳捕捉的工廠，並將二氧化碳直接進入管線進行 EOR，並持續拓展碳捕捉能力。本研究優化整個州的 CCS 基礎設施，包括選擇在哪些地點建置碳捕捉場和哪些封存地點，以及確定最佳的 CO<sub>2</sub> 運輸基礎設施。

瑞士查爾摩斯理工大學(Chalmers University of Technology)Sebastian Karlsson 博士班研究生簡報政策影響 CO<sub>2</sub> 捕捉和運輸基礎設施的成本最優—以瑞典為案例研究，瑞典政府根據《巴黎協定》提出的目標，設定了到 2045 年實現溫室氣體淨零排放並實現淨負排放的目標。碳捕捉和封存(CCS)和生質能源與碳捕捉和封存(BECCS)已確定為減排技術組合中的關鍵解決方案。與依賴化石燃料發電的國家相比，瑞典能源部門的二氧化碳排放量較低，這是因為大規模使用水力和核能發電，以及森林工業燃燒殘渣的區域供熱(DH)佔比很高。瑞典化石 CO<sub>2</sub> 碳排放的主要來源，包括：煉油廠、水泥廠、鋼鐵廠、化工廠和垃圾焚燒發電廠(WTE)。此外，還有幾個大規模的生質燃料 CO<sub>2</sub> 排放源，主要由製漿造紙廠和區域供熱系統中的一些大型生質基熱電聯產(CHP)廠組成。

## (五)會議第四日(27)與會內容

第四日之議程啟始為兩個技術演講，分別為澳洲 CO2CRC 首席執行長 Matthias Raab 先生與印尼萬隆理工學院二氧化碳和燃燒氣體利用中心經理 Mohammad Rachmat Sule 先生。

Matthias Raab 先生演講主題為「CCS in Australia's transition to a low emissions future」(圖-10)。CO2CRC 為 CCS 相關研究應用的世界性領導者，該組織藉由商業化示範場址與技術研發，希望可加速 CCS 商業化進程，而為了達成此目的，CO2CRC 結合跨國的學界研究單位、工業界與政府進行共同研究，經由 CCS 的可證實性、安全性、可靠性與必要性，實現即時的、永久的與大規模的碳減排或氣候效益。在 CCS 成本方面，澳洲希望藉由突破性科技研究，降低 CCS 成本，目前 CO2CRC 經由 Otway 第三期試驗，已經在監測研究方面試驗出更具經濟效益的 CO<sub>2</sub> 團塊監測方法，藉由整合井下震測、地表永久式(Surface Orbital Vibrators, SOV)與 DAS，可大幅降低 CO<sub>2</sub> 團塊之井間監測施測時間，將傳統 3D 震測所需數週的施測時間縮短至 2 日，且監測費用可大幅下降達 85%。

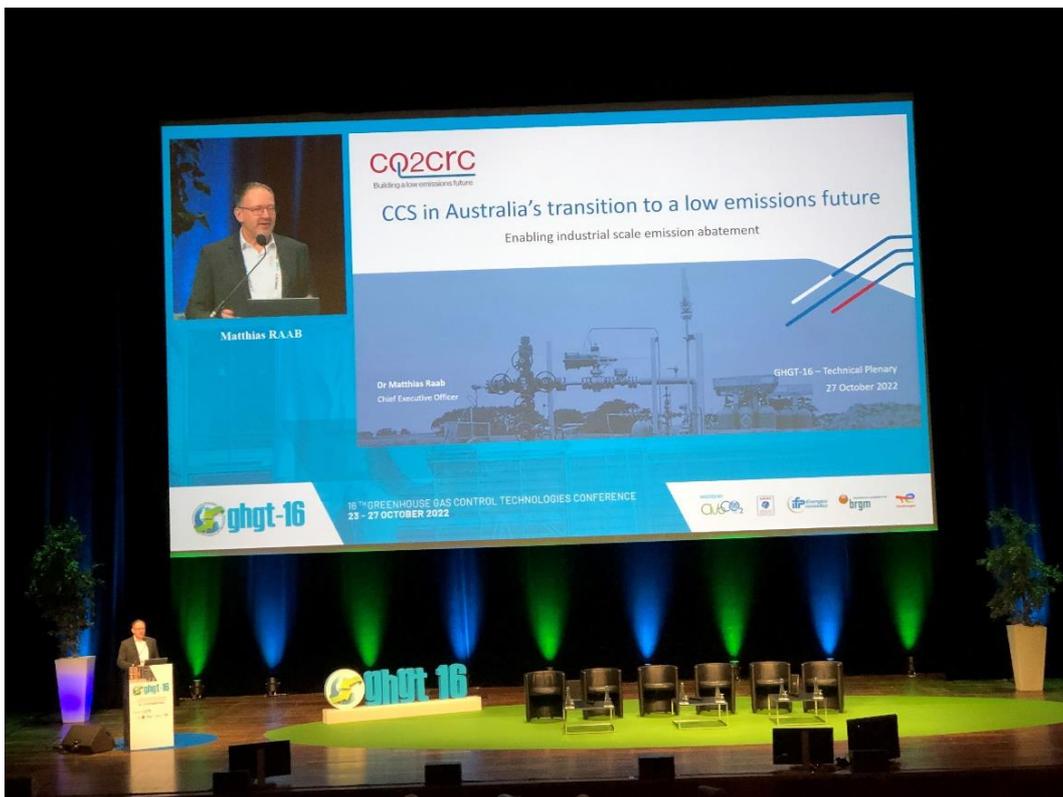


圖-10 Matthias Raab 先生演講 CCS in Australia's transition to a low emissions future

下一步，CO2CRC 將積極研究先進注入技術，以提高 CO<sub>2</sub> 溶解率、孔隙穿透率，減少 CO<sub>2</sub> 微氣泡生成而降低注入率、低壓注入與延遲 CO<sub>2</sub> 突破時間等研究。雖然天然氣輸出為澳洲的主要收入之一，但澳洲同時也是個強烈依賴石油進口的國家(90%石油)，澳洲希望未來除了販售天然氣外，藉由 CCS 注入技術的領先發展，能為客戶提供 CCS 服務(如：Bayu-Undan 海上封存)；更希望同時藉由 CO<sub>2</sub> EOR 技術的應用，增強該國自有石油生產

及緩解潛在國安問題(如：Cooper basin 與 Surat basin)。目前澳洲 CCS 的各項相關研究及計畫如同海嘯般排山倒海而來，若能良好的整合各領域，則未來可預期，排放 CO<sub>2</sub> 的花費將高於 CCS 之花費，亦即 CCS 將成為具備經濟性商業模式。Matthias Raab 先生表示 CO<sub>2</sub>CRC 目前已經為下一個階段的演進做好準備，包含 DACCS 與氫能儲氣窖的可行性研究，澳洲作為一個創新強國，有能力、也有意願接受任何突破性或創新性科技。

Mohammad Rachmat Sule 先生演講題目為「The Role and Commercialization of CCS/CCUS in Meeting Indonesia's Net Zero Emission Target」(圖-11)，演講重點分別為 1.介紹印尼 CCS/CCUS 現況與潛能；2.介紹印尼目前為因應 CCS/CCUS 產業發展而修改的礦業法規與合約草案。因印尼自有生產中油氣田礦區且 CO<sub>2</sub> 排放源鄰近油氣田，所以印尼對於 CCS/CCUS 的發展目標著重於整合 CO<sub>2</sub>-EOR 與油氣生產，目前全印尼計有 15 個進行中的 CCS/CCUS 計畫。



圖-11 Mohammad Rachmat Sule 先生演講 The Role and Commercialization of CCS/CCUS in Meeting Indonesia's Net Zero Emission Target

為了因應 CCS/CCUS 與油氣業的發展，印尼政府目前已完成與 CCU/CCUS 相關之礦業法的草案擬定，並且將草案內容提供給相關的投資者。內容包含 CCU/CCUS 發展相關支援、CCU/CCUS 於油氣生產區域的商業模式、外部 CO<sub>2</sub> 輸入源的開放、CCU/CCUS 價格的機會、技術層面相關的法規、標準、工程實務與場址特徵等各層面規範。Mohammad Rachmat Sule 先生更介紹了目前印尼政府所草擬的 CCU/CCUS 礦區申請流程和分擘合約 (Production Sharing Contract, PSC) 架構，該草案正於印尼政府各部門間進行討論。在法規擬定外，印尼政府正整合資源建立團隊以描繪印尼個區域具碳封存潛能的潛勢圖資系統，並預計於 11 月開始該團隊的運行。Mohammad Rachmat Sule 先生強調，技術、安全性、經濟與法規面的國際合作對於印尼的 CCU/CCUS 發展至關重要，印尼政府亦歡

迎任何的合作機會。

在專題演講後，各主題會場即展開各分項論文發表。本次出國人員分別參加了 10C、10G、11E 與 11G 等主題宣講議程。以下為各議程聆聽報告之概述：

### 1、Session 10C - Geological Storage Case Studies II：

本議程共包含五個演講主題，講者分別來 BP 公司、捷克地質調查局、荷蘭應用科學研究組織(TNO)、丹麥及格陵蘭地質調查局(GEUS)與美國地質調查局(USGS)。

BP 公司的 CO<sub>2</sub> 封存顧問 Tony Espie 博士發表題目為「經由技術加速建置千兆噸級二氧化碳儲存場的機會」。由於 CO<sub>2</sub> 封存需求的大增，很快的此產業將面臨年封存量目標擴大至千兆噸等級的目標，案場的擴大將使以往工業界採用 3D/4D 震測這種花費昂貴的監測技術，勢必將更加不符合經濟效益。因此 BP 公司認為建立哨點測量概念(concept of sentinel measurements)的監控流程有助於降低成本。該概念為在關鍵區位設立監測設備，藉由較低的空間監測密度，但提高監測頻率並結合多種監測技術(單源-單接收震測、EM、Vector Gravity、Pressure tomography、Passive Seismic)，以改善監測門檻，並搭配新的、成本更低的 CO<sub>2</sub> 量測、監測與驗證(Measurement、Monitor、Verification，MMV)、異質性尺度模型與模擬系統建置，將成為未來技術研發的主軸。

捷克地質調查局的 Vit Hladik 研究員講解捷克共和國東南部成熟油氣田的 CO<sub>2</sub> 封存試驗評估。Zar-3 油田是捷克東南部一個枯竭油氣田，目前被認為是捷克境內最有希望成為 CO<sub>2</sub> 儲存場的場址之一，目前已完成存儲綜合體的 3D 地質模型、地質力學和地球化學特性評估、CO<sub>2</sub> 注入動態建模和模擬、CO<sub>2</sub> 儲存相關的風險評估與現場監測計畫制定，目前正在進行評估未來場址開發的相關策略及設計。該廠址目前遇到最大的兩個問題分別為：1、原本預計封存來自俄羅斯的 CO<sub>2</sub>，但因俄羅斯入侵烏克蘭戰爭而有變數，計畫正討論變更 CO<sub>2</sub> 來源為 DAC；2、油田的氣頂仍然存在且構造中仍有剩餘油，如何由石油生產轉換為 CO<sub>2</sub> 封存的相關管理政策不明確，且若以 CO<sub>2</sub>-EOR 的方式，該計畫將會失去獲得公共資助的資格。

荷蘭應用科學研究組織的 Suzanne Hurter 資深科學家介紹澳大利亞昆士蘭蘇拉特(Surat)深部含水層評估計畫。該計畫預計設計 CCS Hub 於 Surat 場址，預估該場址具有 3Gt 的 CO<sub>2</sub> 封存潛能，目前正在討論場址設計的相關內容，包含 Hub 設計規模、捕捉與運輸(C&T)投資的規模及階段該如何正確的規劃、如何避免建設超過或低於需求的 C&T 容量、可持續注入量的可信度是多少等問題。Suzanne Hurter 建議，在場址規劃時，應該根據對場址的信心、不確定性、場址與注入年限和規模進行詳細的動態分析以了解該建設的裝置容量。Suzanne Hurter 強調，雖然動態模擬並不便宜，但是比起建置了錯誤的裝置所花的冤枉錢來說，便宜許多。

丹麥及格陵蘭地質調查局的 Florian Smit 研究員講解丹麥 Stenlille CCS 計畫利用震測地形學分析目標封存層-Gassum 層的封存層特徵研究與改善。Stenlille 場址目前為丹麥 Gas Storage Denmark A/S 所經營兩個天然氣地下儲氣窖的其中之一，已營運超過 30 年，具備豐富的地下地質資料。該計畫目前整合井下資料、2D 與 3D 震測資料進行沉積相、震測地層、震測地形、斷層與裂隙識別等研究。後續將持續進行 2D 震測解

釋、震測地形描繪、地熱能源探勘、低震測覆蓋率地區模型建立研究、2D 震測資料施測 (2022-2024) 與沉積相模式順推模擬等研究工作，目的在於幫助擬定 2025 年預計鑽鑿之 1 至 2 口示範注入井井位。

美國地質調查局的 Sean Brennan 地質研究員則介紹該單位所評估的 CO<sub>2</sub> 儲存量流程及系統介面。該系統的建置目的為：1、確定有意算其 CO<sub>2</sub> 封存資源以達成其氣候目標的國家，特別是新興經濟體；2、與評估全球 CO<sub>2</sub> 地質儲存資源相關的多邊組織和國際倡議合作，促進國際 CO<sub>2</sub> 儲存評估，關注重點一樣是在新興經濟體。其所評估的封存量限制於 SPE 2017 所定義之 Undiscovered Storage Resources-Prospective Storage Resources 範圍。針對前述目標，USGS 規劃了搜集(Phase I)、評估(Phase II)與報告(Phase III)等三階段工作，目前已將北美相關資料搜集成果將放置於 <https://co2public.er.usgs.gov/viewer/>，未來 USGS 將透過持續與跨國組織合作、識別具潛能國家、以大規模評估和經過驗證之方式執行本計畫。

## 2、Session 10G - Transport - Pipelines：

本議程探討管線運輸議題，包含：應對大規模二氧化碳管線挑戰、以 CO<sub>2</sub> 運輸管線上壓縮 CO<sub>2</sub> 儲能、近水平管線中 CO<sub>2</sub> 兩相流建模、CO<sub>2</sub> 多相流誘發振動、用於典型住宅二氧化碳滲透的解析室內遮蔽模型的適用性和優化。

美國 CARBON SOLUTIONS LLC 公司 Carl J. Talsma 研究科學家簡報應對大規模二氧化碳管線挑戰，美國能源轉型的目標是每年去除數十億噸二氧化碳。在全球範圍內，能源轉型需要每年通過碳捕捉和封存(CCS)數十億噸二氧化碳。僅就美國而言，從每年去化 100 百萬噸到 1 億萬噸等級，需要比美國目前石油基礎設施更大規模上推廣 CCS 技術。例如，普林斯頓大學的美國淨零排放研究計畫，當規模達每年 0.9-17 億噸二氧化碳時，在約 1,000 個不同設施中捕捉二氧化碳，需要 106,000 至 110,000 公里的州際公路和管線網路。以這種規模運輸二氧化碳是一項巨大的挑戰，包含：(1)時機：推動 CCS 的迫切需要(例如：美國 2035 和 2050 目標)；(2)規模：建設二氧化碳運輸管線達 10 萬公里以上；(3)敏感性：社區居民反對在美國建造任何新管線，包括石油、天然氣和其他產品。

美國伊利諾伊大學香檳分校(University of Illinois at Urbana-Champaign) Sebastiano Giardinella 助理研究科學家簡報以 CO<sub>2</sub> 運輸管線上壓縮 CO<sub>2</sub> 儲能，天然氣管網及其樞紐、壓縮、減壓站及儲存場，可以成為未來建置 CO<sub>2</sub> 運輸模型之參考。假設 CO<sub>2</sub> 以不同的壓力透過管線運輸，壓縮站將氣體壓力提高到經濟可行的水平，減壓站再減壓以進入人口稠密地區或輸送給用戶。系統中不同點的這些壓力變化也創造了另一個機會，就是通過壓縮氣體儲能(CGES)與電網的潛在協同作用來穩定 CO<sub>2</sub>。CGES 是一種新的儲能技術，其操作方式是在非高峰期增加控制體積內的可壓縮氣體的壓力，並在需求高峰期透過與發電機耦合的渦輪膨脹機將氣體庫存排放到較低壓力。CGES 的目的是因再生能源的增加會帶來規劃挑戰，以實現低成本、長期儲能，期望進一步使電網脫碳。

挪威 Equinor 公司 Zhilin Yang 專家簡報近水平管線中 CO<sub>2</sub> 兩相流建模，允許碳兩相流管線運輸和注入，可以促進和降低低壓封存地層中的封存成本。現有的商業流動保證

工具是在實驗室研究的基礎上開發的，並根據油氣運輸管線和生產系統的運作數據進行調整。相信這些流動保證工具中的許多物理模型仍然適用於 CO<sub>2</sub> 運輸和注入的某些條件。然而，CO<sub>2</sub> 和碳氫化合物流體在熱力學和物理性質上有巨大差異，這兩種不同流體系統的主要流動行為是不同的。研究針對 CO<sub>2</sub> 兩相流的現有兩相流建模概念進行了評估，包含：漂移通量模型、雙流體模型和多場模型。CO<sub>2</sub> 兩相流的實驗觀測是建模概念選擇的基礎，結果發現漂移通量模型和雙流體模型的組合，是涵蓋 CO<sub>2</sub> 流動所有物理行為並且在數值上穩健的最有效方式。根據實驗觀察，氣泡的產生是近水平管線中兩相 CO<sub>2</sub> 流動的主要現象。發現氣泡產生的擴散類型是預測氣泡夾帶，和分層氣液到完全分散氣泡流之間流態轉變的好方法。在完全分散的流動中，滑移關係由漂移-通量模型處理，摩擦壓力梯度由混合模型建模。研究使用的模型考慮了混合強度對滑移的影響以及氣泡存在對壁面剪應力的影響。當前模型可以預測氣泡流和分層流之間流態的平滑過渡，也可以很好地預測中等規模實驗室的總持液量和壓力梯度。

荷蘭 TNO 公司 Stefan Belfroid 研究工程師簡報 CO<sub>2</sub> 多相流誘發振動，為了解決這個問題，在 45 和 55 bar 下對單相液體和多相流進行流量和振動測量。液體速度最高可達 4 m/s，氣體速度最高可達 12 m/s，導致“無滑移滯留”範圍為 0.03 至 1。總共測量了 93 種流動組合，從層流到氣泡流。振動本身通過 4 個三軸加速度計測量，應力通過 4 個應變儀測量。在較高的速率下，測得的振動和測得的混合物密度，確實暗示了低滑移率和更多混合流條件。在重建的力學頻譜中，沒有明顯的清晰波或段塞頻率，並且該頻譜更類似於單相條件。然而，測得的振動仍然顯示出相應單相流振幅的 2-3 倍，高壓氣體/水模型代表多相 CO<sub>2</sub>。討論了 CO<sub>2</sub> 注入過程中流動引起的振動方面，括管線末端振動或蒸汽坍塌等因素。

英國紐卡索大學(Newcastle University)工學院 B. Wetenhall 講師簡報用於典型住宅二氧化碳滲透的解析室內遮蔽模型的適用性和優化，前人文獻已建立一個基於風和浮力驅動通風的分析滲透模型，以及計算流體動力學(CFD)滲透模型，可用於預測從陸上 CO<sub>2</sub> 管線洩漏後 CO<sub>2</sub> 暴露對建築物居住者的影響。分析模型的工作原理是自然通風，其中，流動是由風和建築物內部與周圍環境之間的壓力差和建築物內的溫差引起的浮力效應驅動的。CFD CO<sub>2</sub> 滲透模型是使用 STAR-CCM+(2016 年)和雷諾平均納維-斯托克斯(RANS)方程所建立的。CFD 模型與解析模型使用相同的輸入，這兩個模型產生了相似的結果，並且它們傾向於稍微高估封閉空間內的 CO<sub>2</sub> 濃度。將解析模型的結果與一組代表性案例研究的 CFD 模型的結果進行比較，研究了解析模型對更接近住宅的建築物幾何形狀和更廣泛條件的適用性。也嘗試優化模型中使用的參數。在 30 個測試案例中，探討影響 CO<sub>2</sub> 通風率的關鍵參數：風速、開口的面積和高度、內部溫度以及建築物的高度、寬度和長度。

### 3、Session 11E - Wellbore and leakage modelling :

本議程共包含五個演講主題，講者分別來自美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)、挪威大地工程研究所、挪威研究中心(NORCE)、澳洲 CO<sub>2</sub>CRC 與澳洲聯邦科學與工業研究組織(CSIRO)。

美國勞倫斯伯克利國家實驗室的專任科學家 Abdullah Cihan 博士講解經蓋層壓力

消散減低超壓 CO<sub>2</sub> 封存層中鹽水洩漏的概念與作用。研究結果認為，即便在沒有任何外部流體注入的狀況下，超壓含水層自身可能就會發生流體洩漏。如果沒有極低滲透性的隔水層(aquifers)和/或活躍的超壓源，自然系統中的地層超壓持續時間不可能超過地質尺度。持續加壓源的存在可能會導致鹽水通過洩漏井持續洩漏至淡水含水層。在上覆和/或下伏隔水層(aquifers)中非零滲透率的壓力消散可能會降低經由井的滲漏率。綜合而言之，超壓狀態在時間尺度拉長的狀況下，鹽水一定會穿透隔水層或由井路徑滲漏，但若隔水層之滲透率越大，則經由井路徑洩漏的機會越低。

挪威大地工程研究所的 Elin Skurtveit 博士生介紹斷層風險評估工作流程更新應用於挪威海域 Horda 平台下 Vette 斷層帶研究。該研究目的在於更新對於斷層洩漏的 CO<sub>2</sub> 封存風險、量化不確定性與模擬經斷層流動的流體特性。研究區域位於挪威近海的 Vette 斷層帶，藉由量化不確定性(斷層解釋、地層受斷層彎曲程度、斷層斷距與寬度、上覆地層岩性)，模擬經斷層滲漏模型的不同參數狀況(斷層滲透率、不確定性模擬、經斷層雙相流體流動)下的鹽水層滲漏狀況。其結論為，沿 Vette 斷層帶計算的鹽水洩漏率非常小。

CO<sub>2</sub>CRC 的 Eric Tenthorey 博士發表 Otway CCS 計畫的斷層注入實驗：斷層分析模擬結果。由於在 Otway 場址具地表淺處發現斷層，故設計模型研究地下 80 公尺處注入 CO<sub>2</sub> 並觀察 CO<sub>2</sub> 是如何經由斷層洩漏至地表，以求未來預測地表可能發生洩漏的位置與設計更好的監測策略。研究共分為三階段，階段一(2016-17)目的為找出斷層，階段二(2018-21)目的為實驗場地評估和地下採樣，階段三(2023-24)則是控制下施放實驗的執行和操作。目前已藉由兩口鑽井採樣得到岩石與斷層的標本，完成岩石力學、岩石滲透率、礦物分析、斷層延伸、斷層厚度與斷層滲透率等分析，並藉由數值模擬模擬 30 噸 CO<sub>2</sub> 注入後的移棲狀況，結果顯示洩漏至地表的 CO<sub>2</sub> 可能為線性排列而非點狀分佈且 CO<sub>2</sub> 洩漏至地表的位置可能無法直接指示地下實際的洩漏點。

澳洲聯邦科學與工業研究組織的 Karsten Michael 博士簡報題目為二氧化碳井間歇泉的模擬、限制和影響。因 CO<sub>2</sub> 在合適的條件下，於地下遇到開放鑽孔時，壓力的積累可能會導致井發生間歇泉似的週期性地噴發(CO<sub>2</sub> 和地層水)。本研究實際觀察注入 38 噸 CO<sub>2</sub> 至距井約 70m 之深度 340 公尺的地層內，藉由井下 DAS 與 DTS 的觀測記錄，了解氣體由井噴發的過程，並建立一個模型嘗試重建 CO<sub>2</sub> 誘導的井噴過程。CO<sub>2</sub> 灌注後三日於井口發生了實際的間歇性噴發，並於 DAS 及 DTS 中紀錄到完整過程。但模型之模擬結果與實際狀況並不完全符合，研究者認為可能是邊界條件設置或熱狀態差異的因素所致，有待進一步的研究。

#### 4、Session 11G- Transport - Shipping :

本議程主要探討船舶運輸二氧化碳，包含：低壓二氧化碳運輸中非平衡過程和操作下乾冰形成的動力學、低壓 CO<sub>2</sub> 船舶運輸技術規範、日本 CO<sub>2</sub> 船舶運輸技術研發與示範、尋找低壓二氧化碳運輸的最佳溫壓甜蜜點、浮動式 CO<sub>2</sub> 裝載/接收站。

日本御茶水女子大學(Ochanomizu University)Yoshihito Mori教授簡報低壓二氧化碳運輸中非平衡過程和操作下乾冰形成的動力學，目前液化CO<sub>2</sub>在中溫中壓(-20 °C，2.0

MPa)下進行運輸，而低溫低壓(-30~-50 °C，1.2~0.58 MPa)運輸是實現低成本大尺度CO<sub>2</sub>運輸的關鍵。對於低溫低壓液化CO<sub>2</sub>，由於接近三相點，使得乾冰堵塞的風險增加，因此，有必要探討乾冰形成的動力學，建立安全可靠的優化運輸技術。考慮到液化碳船舶航行過程中的裝卸、擺動、流動的產生和熱量的流入導致壓力和溫度的時空不均勻性的範圍很大。試驗容器以一定的尺寸的液化表面(即自由界面)，而不是完全充滿液化CO<sub>2</sub>。空間不均勻性(例如：自由界面)是非平衡不可逆過程中非線性的重要因素。在通過溫度和壓力控制狀態變化時，關注自由界面處乾冰形成的同時，利用傳感器直接觀察溫度和壓力的時間變化以及乾冰形成的趨勢。未來也會針對CO<sub>2</sub>中所含雜質的影響進行探討。

挪威 DNV 公司 Gabriele Notaroa 資深工程師簡報低壓 CO<sub>2</sub> 船舶運輸技術規範，目前液態二氧化碳(LCO<sub>2</sub>)與其他氣體(液化石油氣、液化天然氣)一樣，在壓力下以半冷凍液體船舶運輸，但具有不同的特性，這對船舶設計和液化碳裝卸產生了一些挑戰。純 CO<sub>2</sub> 的三相點位於 5.12 bar 和 -56.6 °C，因此，不能在壓力低於三相點(乾冰)的情況下以液體形式運輸。LCO<sub>2</sub> 的密度是 LPG 和 LNG 的兩倍以上。目前，船舶運輸 CO<sub>2</sub> 的規模較小(食品級 CO<sub>2</sub>)，壓力屬中等(即 -28 °C 時約 15 bar)。中等壓力價值鏈的風險有限，因其技術成熟且相對於 CO<sub>2</sub> 三相點的壓力裕度很大。北極光第一期計畫也是採用中壓二氧化碳船舶運輸方案，最大載貨量在 7500 立方公尺內。為了可預見用於 CCS 二氧化碳船舶運輸需求的增加，將朝著更大的船舶和運輸量發展。其中，低壓傳輸系統(-49 °C 時約 7 bar)也是一種潛在的方案。與中等壓力相比，壓力降低可增加貨物容量並降低運輸成本。低壓 CO<sub>2</sub> 船舶運輸技術規範預計在 2023 年上半年完成。

日本 JCCS 的 Yoshihiro Sawada 總經理簡報日本 CO<sub>2</sub> 船舶運輸技術研發與示範，日本 JCCS 已在 2020 完成液化 CO<sub>2</sub> 船舶運輸可行性研究，以日本排放源到苫小牧 CCS 場址的年運輸需求 100 萬噸為例，初步設計了運輸船和陸上設備設施。初步開發、設計每年 10,000 噸的船舶運輸系統，以解決已確定的問題並將知識與社會聯繫起來。可行性研究分為：運輸船、裝運碼頭、收貨碼頭三部分進行。每個部分的共同技術是液化 CO<sub>2</sub> 的溫度和壓力條件。研究探討(a)中溫中壓(約 -20 °C，2 MPa)的特性，這是目前的液化 CO<sub>2</sub> 儲運技術；(b)低溫低壓(約 -50 °C，1 MPa)，由於儲槽厚度的減少，可能降低儲槽建置成本，但也擔心乾冰的形成，包含接近 CO<sub>2</sub> 三相點技術開發。長期以 2030 年前後 CCUS 的計畫推動為目標，以 100 萬噸/年的規模共同研發將 CO<sub>2</sub> 從排放源運輸到再利用或封存地點的運輸技術，這將導致 CO<sub>2</sub> 的長距離/大量運輸的成本降低，目的在透過示範和相關研究建立液化 CO<sub>2</sub> 的船舶運輸技術。

挪威 SINTEF Industry 公司 Ragnhild Skagestad 資深研究科學家簡報尋找低壓二氧化碳運輸的最佳溫壓甜蜜點，現今 CO<sub>2</sub> 船舶運輸是採用相對較小的船舶(1000-3000 噸)在中等壓力下進行。而在 CO<sub>2</sub>LOS II 計畫中，發現低壓(約 7-10 bar)可能更適合大型運輸船(3 萬噸以上)，因為可以利用相同的船舶尺寸獲得更大的運輸量。低壓傳輸條件需要更高技術的壓力控制，因為它的溫、壓在三相點附近。如果不希望有液態 CO<sub>2</sub> 釋放到大氣中，無論壓力條件如何，其效果基本相同。本研究建議設計低壓 CO<sub>2</sub> 船舶的最佳壓力，同時考慮有效的運輸量和成本與保持安全的操作窗口，低壓限制範圍為 7 barg 以防止形成乾冰。船舶運輸壓力的選擇不僅影響船舶，還影響液化、出口碼頭、中間儲存、裝卸、進口碼頭、中間儲存和注入前的預處理。

挪威 Brevik 工程公司 Karin Knudsen 部門經理簡報浮動式 CO<sub>2</sub> 裝載/接收站，浮動碼頭被視為“陸上碼頭”替代品的原因有很多。一個明顯的主要原因是主要港口的土地面積通常有限且昂貴。如果碼頭可以利用海域，則可能會降低成本和所需面積。在船舶運輸鏈中設計浮動碼頭的其他原因可能是：(1)深水碼頭有限，浮動碼頭可提供深水停靠；(2)浮動碼頭是一個專用碼頭，因此，達到更高的規律性；(3)浮動碼頭可作為一個完整的單元，在造船廠建造和調試；(4)可以重新規畫浮動碼頭，浮動碼頭可包括不同的設施並具有不同的位置。浮動碼頭的建置還有幾個方面需要進行探討，包含：(1)研究熟悉的案例(包括陸上案例)以製定浮動碼頭的設計基礎，並確定關鍵要素和尺寸；(2)調查與 FSRU 整合的可能性；(3)以模塊化工具，擴展所選解決方案以滿足不同的運輸、封存和液化量；(4)調查包括水電在內的船舶停靠和連接設施安排；(5)設計兩種漂浮物配置；(6)研究浮動碼頭的岸電連接設計，包括用於裝載的液態 CO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 氣體返回和必要的公用設施；(7)評估選定浮動碼頭的成本。

### 三、具體成效

本出國案共實際聆聽了 22 場次會議(session)，並完整參加了開幕、主題演講、6 場全體性技術會議(Technical Plenary)與閉幕式，除了各種不同會議的參與及聽講外，更整理各技術場次的論文摘要，還與部分與會者交換 CCS 相關意見及聯繫資訊。所攜回資料已整理完畢，可供本公司有志於 CCUS 工作之同仁查閱。

所聆聽之會議內容包含運輸、社會溝通、地質封存實例、監測、公眾看法、法規與政策等，各個講者所分享的經驗都可做為台灣推動 CCUS 的參考，特別是法規政策、監測技術與規劃及公眾溝通等方面。而跟與部分會者交換意見內容如下：

1. 與日本 JCCS 的 Yoshihiro Sawada 總經理交流日本苫小牧 2030 年 1 百萬噸 CCUS 計畫，在前往參加此次會議之前，已經有先跟 Sawada 總經理進行過一次視訊會議，此次特別針對液化二氧化碳船舶運輸與規畫與 Sawada 總經理進行交流，並向 Sawada 總經理說明台灣推動大尺度 CCUS 計畫的構想，以及未來運輸方式很可能需要參考日本現有規劃，Sawada 總經理也表得台日友好關係，很樂意與中油公司未來就相關運輸議題進行交流與討論。
2. 與 ExxonMobil 公司的 Ganesh R. Dasari 先生討論 CCS Hub 與 CCS Network 的議題，Dasari 先生在會議中介紹新加坡工業捕捉碳後運輸至鄰近馬來西亞或印尼封存的模式，他也了解 ExxonMobil 公司有意願參加台灣的 CCS 計畫，向 Dasari 先生說明台灣推動 CCS Hub 與 CCS Network 的計畫構想，而 Dasari 先生表示願意提供他的經驗與相關經濟評估所需參數，共同推動台灣 CCS Hub 與 CCS Network 的計畫。
3. 與 TotalEnergies 公司的 Kakra Koram 先生交流台灣邁向 2050 淨零策略，包含推動 CCUS 與地熱規劃，Koram 先生表達 TotalEnergies 公司對於參與台灣大尺度 CCUS 計畫的高度興趣，並願意向 TotalEnergies 公司說明台灣在 CCUS 計畫推動內容，包含建置台灣成為東北亞第一個 CCUS Hub 等，Koram 先生亦表達未來會持續保持連繫。
4. 與日本環境產業技術研究所 (RITE) 的中島崇裕博士討論自動化 OBS 記錄資料分析方法，了解目前該單位已建立自動辨識技術應用於分析苫小牧場址監測資料。中島博士表示，該技術除海域場址應用外，未來亦可配合陸域場址資料進行參數調整及系統發展。關於該技術，若有相關疑問或興趣，中島博士歡迎後續再行聯繫及交流。

上述交流議題對於台灣推動大尺度 CCUS 計畫會有幫助，由於台灣四面環海且潛在碳封存場址與主要碳排放源都位於台灣西部沿海，台灣在碳運輸管線建置不易推動下，液化碳船舶運輸先行成為不可獲缺的選項。另外，監測技術對於濱海地區也具有挑戰，參考日本苫小牧場址監測規劃與設備等經驗，也都可以作為台灣的參考。此外，本次會議強調國際合作(包含：區域或全球)共同推動 CCUS 計畫，這不僅是達到 2050 年淨零的關鍵，更可結合各國經驗與技術發展以達到降低成本與區域合作發展。

## 四、心得及建議

1. 本次 GHGT-16 詳細的議程及摘要內容，建議參加會議人員可先將有興趣的會議內容與摘要下載留存。在本出國報告撰寫時，藉由現場筆記及所拍攝之簡報檔，不僅可詳實確認聽講時之認知是否有誤，亦如同再次回到現場以慢速重播所參與報告的細節，影像檔案對本報告的正確呈現助益極大。
2. 下次 GHGT-17 將在兩年後於加拿大卡加利(Calgary)舉辦，建議可將本公司推動 CCUS 相關計畫成果投稿至 GHGT-17，讓國際各大石油、能源公司、機構或組織都能夠了解台灣推動 CCUS 的近況，也有助於國外公司的投資與提升台灣實質推動淨零碳排的形象。由於 GHGT 會議所涉及的領域相當廣泛，建議本公司可以多派不同領域人員參與是項會議。
3. 從歐洲各國民眾溝通的經驗發現，民眾對於甚麼 CCU 或 CCS 並不甚了解，更不要談民眾是否支持以 CCU 或 CCS 作為淨零減碳的手段之一。然而，世界各國或國際機構已經將 CCUS 列為淨零的重要減碳技術，台灣有必要優先著手推動 CCUS 相關教育宣導，並讓民眾了解 CCUS 可能面臨的風險與未減碳所帶來氣候災害的社會與經濟危害，在可防範的風險下，取得民眾支持推動 CCUS 計畫達到淨零。
4. CCS 計畫推動成功與否關鍵因素通常是非技術性問題，其中，最重要的環節為社會溝通，本次會議中各相關專家雲集，成功的社會溝通(尤其是地方意見領袖或社群團體)是 CCS 場址建置成功與否的關鍵要素。因此，建議本公司應積極推動教育宣導與拓展社會溝通，藉由教育宣導與社會溝通的機會進行更直接的疑慮交流，以達到社會大眾廣泛接受 CCS 概念並支持場址建置的目的。
5. 台灣西部具有寬廣的前陸盆地，地層傾斜方向由台灣西部陸域往台灣海峽上傾，且具有多套潛在碳封存地層，因此目前廣泛認為具碳封存潛能。根據 JCCS 的報告內容，由於日本目前的法規，並無規定 CO<sub>2</sub> 封存場址的監測時限，所有場址均須無限期地進行監測，此為日本 CCS 之封存場址發展的主要限制，台灣可抓緊此機會積極開發台灣西部前陸盆地碳封存場址，若成功，除可解決台灣自身工業排碳源的問題，則亦有轉型為東北亞或東亞碳封存場址的可能性。
6. 地下 CO<sub>2</sub> 監測費用最高昂者即為 3D 震測，但經本次會議內相關監測議題簡報內容可發現，3D 震測整合使用 DAS/DTS/DSS 等光纖技術、DAS/VSP、固定式震源站、同區異時(Time-lapse)震測與井間震測可大幅減低監測費用並提高監測頻率，建議可持續追蹤此領域之科技演進，以作為本公司後續發展 CCS 場址之監測規劃參考。另，光纖監測同時用應用於微震監測，但因連續性監測資料搜集所累積之龐大資料在資料處理上可能耗費鉅大之人力物力，所以常常造成資料處理與微震辨識的困難，但根據本會議中日本地球環境產業技術研究機構所報告之 DAS 監測資料自動識別微震技術及其他報告之 AI 應用於資料處理實驗，或許此難處將在不久後的未來可獲得解決，故亦可持續追蹤光纖監測應用於微震監測的領域發展。
7. CCS 場址建置前，建立詳盡的地質模型(岩性、斷層特性、地質力學、岩石地球物理)

且進行動態模擬與風險評估(包含封存組合)對於場址相關儲運及灌注工程設計極為重要，而這些模型都有賴於詳細的地下資料搜集與分析，建議未來台灣建置 CCS 場址前，除搜集既有地下地質資訊外，更需鑽鑿地質井並盡量全口取芯，如此可提供較為詳盡的地層資料用於封存層或上覆蓋岩等之岩相、岩象、岩石力學實驗、孔隙率、滲透率、潤濕性、岩石化學反應等實驗分析，作為地質模型建立的依據。

8. 綜觀台灣碳排放源與潛在碳封存場址的區域配置，以管線和船舶運輸二氧化碳是未來可能的趨勢，而碳運輸需要考量到雜質含量對液化二氧化碳運輸熱力學影響、兩相流流動、乾冰形成等問題。特別是針對大尺度 CCS 船舶運輸需要特別探討上述問題，這些在目前都還僅是在實驗室尺度下進行，並在未來持續配合各國計畫執行，以中、小規模(每年 10 萬噸以下)進行實證，再拓展到未來的大尺度運輸(超過 1 百萬噸/年)。例如：日本苫小牧計畫除了配合實驗室尺度外，預計 2024 年以每年 1 萬噸試驗先試行，再逐步拓展到 2030 年的每年 100 萬噸。
9. 歐洲積極推動跨國碳封存計畫，會牽涉到跨國間的運輸與法律問題，而歐洲各國有許多推動 CCUS 計畫的聯盟、基金、團隊都再攜手共同推動、面對與解決相關問題。台灣迄今在 CCUS 計畫的推動上仍屬於各別公司進行，雖然已經有跟國際公司進行討論與研議合作，但應更積極推動台灣本土產業間的合作聯盟，共同解決碳捕捉技術研發或引進、碳運輸問題探討、碳封存場址評估與建置，才有機會共同面對問題與降低許多不確定性。
10. 由於 CCS 計畫涉及多方且複雜，未來 CCS 計畫經營方式也會是台灣的挑戰，以類似目前石油天然氣的交易方式，個別場址有不同的封存價格與 CO<sub>2</sub> 接收樣態，或能在 CO<sub>2</sub> 的捕捉、暫存與輸送端就設計更為寬容的 CO<sub>2</sub> 規範(包含：相態、溫壓、雜質等)，以減少整個 CCS 價值鏈中的初期建置成本。
11. 積極推動與國際 CCS 聯盟、基金或計畫進行合作與交流，引進國際現有最新技術與觀念，除了可以避免台灣推動 CCS 可能會經歷太多不必要的錯誤外，更可加速台灣各項進程的推動，才更有機會真正邁向 2050 淨零排放。