

出國報告（出國類別：開會）

參加挪威 SINTEF 和 NTNU 聯合主辦第  
12 屆特隆赫姆二氧化碳捕捉、運輸和  
封存研討會(TCCS-12)

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：石油開採工程師 沈建豪

派赴國家/地區：挪威

出國期間：112 年 06 月 17 日至 06 月 23 日

報告日期：112 年 07 月 14 日



## 摘要

本次挪威特隆赫姆二氧化碳捕捉、運輸和封存研討會(TCCS-12)，行程表如表一，除可認識碳封存場址評估技術、碳注入前、後監測技術、碳注入前、後流體流動模擬、二氧化碳注儲、運輸技術與系統建置條件外，亦可深入瞭解挪威 Longship 項目，其中包含 Northern Light 計畫負責的二氧化碳運輸及封存項目，做為日後相關技術學習或合作的對象，更進一步從運營者角度思考碳封存整體產業鏈所需的各項要件，提供本公司推動 CCS 之參考。本次會議蒐集了北極光計劃與歐洲碳封存項目現況及未來趨勢發展，學習碳封存實務評估技術及實驗研究方法，深刻體認 CCS 為達到 2050 淨零碳排目標的重要技術之一，瞭解透過跨學科及跨國合作發展 CCS 為常態，最後碳封存場址已有成熟的評估技術及指標，可依據相關的國際規範準則作為國內發展的基準。

表一、主要行程摘述

日期	主要行程概述
06/17(六)-06/18(日)	去程(台灣台北→挪威特隆赫姆)跨日班機
06/19(一)	研討會第一天(Hotel Scandic Nidelven 報到)
06/20(二)	研討會第二天(挪威科技大學(NTNU))
06/21(三)	研討會第三天(挪威科技大學(NTNU))
06/22(四)-06/23(五)	返程(挪威特隆赫姆→台灣台北→苗栗)跨日班機

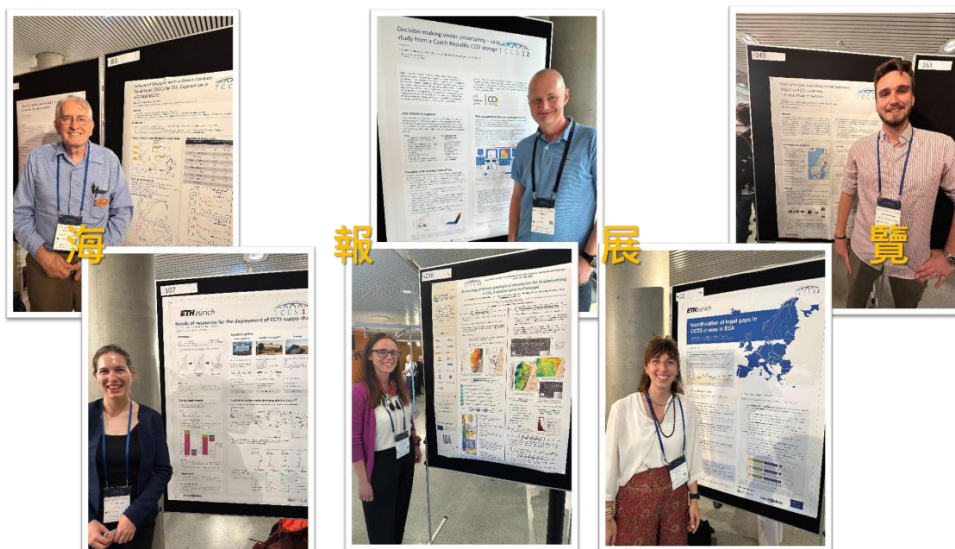
圖一為會場及會議室一隅，圖二為專題演講(keynotes)畫面，圖三研討會海報與作者照片畫面。



圖一、會場及會議室一隅。



圖二、專題演講。



圖三、研討會海報與作者照片。

## 目次

目的.....	6
過程.....	7
具體成效.....	28
心得及建議.....	31

## 目的

本公司配合政府邁向 2050 淨零碳排，已將發展 CCUS 列為公司重要技術之一，特別是碳封存的部分，目前公司也同時推動鐵砧山碳捕存跨部會試驗計劃、桃園濱海碳封存場址評估、台灣西部沿海碳封存場址補充調查與台灣海域碳封存場址調查等各項短中長期目標。

第 12 屆特隆赫姆二氧化碳捕捉、運輸和封存會議(TCCS-12)研討會為挪威科技工業研究院(挪威文:Stiftelsen for industriell og teknisk forskning, SINTEF)及挪威科技大學(挪威文:Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU)聯合主辦，並由挪威 CCS 研究中心(Norwegian CCS Research Centre, NCCS)承辦，SINTEF 為挪威最大的獨立研究機構，宗旨是透過運用知識、研究和創新創造價值，致力於開發新技術並應用於實踐，近年來致力於 CCS 相關技術之研發及應用。NTNU 為坐落特隆赫姆的公立大學，其為挪威最頂尖的工程科技大學，重點發展二氧化碳捕捉及封存技術發展研究。NCCS 為挪威政府、相關行業及研究夥伴共同出資的研究中心，致力於確保挪威於 CCS 領域保持國際領先地位，並支持於北海碳封存項目以及針對挪威 CCS 價值鏈最佳化做出貢獻，確保挪威碳捕捉、運輸及封存 Longship 項目實施。該會議為每隔兩年於挪威特隆赫姆(Trondheim)舉辦，自 2003 年以來，已成為歐洲地區 CCS 技術領先研討會，本次會議超過 600 名專家學者參加，約 150 場口頭報告、6 場平行會議以及超過 100 篇海報展示。

綜觀會議內容著重挪威的 Longship 計畫及 Northern Light 計畫發展外，亦探討碳捕捉、運輸及封存等各項技術、商業模式評估以及公眾與法規層面發展，本公司正在致力推動 2050 淨零碳排，並將 CCUS 列為公司邁向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，本次會議的議題除了與本公司技術部門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相關業務的參考依據。

# 過程

## (一) 112 年 06 月 19 日(星期一)，議程第一日

### 1. 報到及資料蒐集

第一天為會議報到，其地點為 Hotel Scandic Nidelven 舉辦，因應無紙化大會以手機 APP 程式(圖四)提供會議議程摘要及作者資訊搜尋，此次 12 屆特隆赫姆二氧化碳捕捉、運輸和封存研討會，會議期間除早上舉辦專題演講外，每個時段有 6 場平行分組會議(表二)，包含以下議題：碳捕捉、碳運輸、碳封存及監測、CCS 與氢能結合、二氧化碳工業利用及永久儲存、二氧化碳去除(CDR)、國際研發活動、創新技術發展(例如：空氣直接捕捉技術(DAC)及海洋捕捉技術)、二氧化碳新應用、CCS 系統議題、公眾接受度及溝通、政策與法規監管，以及商業模式等項目。

本次會議除專題演講外，設定分組會議參與的主題為封存，海報部分則是包含運輸、封存、國際研發活動及公眾接受度及溝通等議題相關資訊蒐集及交流。



圖四、報到地點及研討會 app 介面



表二、研討會議程(本次會議主要參與封存相關的分組會議)

6/19(一)傍晚	報到及接待會					
6/20(二)早上	專題演講(Keynotes)					報到
6/20(二)下午-1	A1:封存-監測 (Storage-monitoring)	B1:運輸-流動模擬 (Transport-flow modelling)	C1:吸收-降解 (Absorption-degradation)	D1:政策、法規及監管議題 (Policy legal and regulation)	E1:整個系統-整合 (Whole system-integration)	F1:DAC及海洋捕捉 (Direct air capture and oceanic capture)
6/20(二)下午-2	A2:封存-實驗案例 (Storage-experimental studies)	B2:運輸-流動及熱力學 (Transport-flow and thermodynamics)	C2:吸收-排放 (Absorption-emissions)	D2:CCS和氫能 (CCS and Hydrogen)	E2:整個系統-影響及成本 (Whole system-impacts and cost)	F2:不同的捕捉技術 (Various CO2 capture technologies)
6/20(二)下午-3	A3:封存-實驗及模擬案例 (Storage-experimental and modelling studies)	B3:運輸-材料 (Transport-materials)	C3:吸收-降解 (Absorption-degradation)	D3:鈣迴路 (Calcium looping)	E3:整個系統-其他項目 (Whole system-miscellaneous)	F3: CCS花絮 (CCS Tidbits)
6/20(二)下午-4	壁報展示(燃燒後捕捉/富氧燃燒/CCS與氫能結合/二氧化碳利用與永久封存及工業利用/二氧化碳移除(CDR)/運輸/封存/國際研發活動(包含試驗及大規模計劃項目)/新科技/CCS新應用/公眾接受度及溝通/CCS整個系統議題/政策、法規及監管議題/商業模式)					

6/21(三)早上-1	專題演講(Keynotes)					
6/21(三)早上-2	A4:封存-特性及評估 (Storage-characterization and assessment)	B4:運輸-海洋運輸 (Transport-transport by sea)	C4:吸收-試驗 (Absorption-piloting)	D4:國際研發/試驗及大規模項目 (International R&D / pilot / large-scale)	E4:碳捕捉-固體和鈣/化學迴路 (CO2 capture-solids and calcium/chemical looping)	F4:DAC及海洋捕捉 (Direct air capture and oceanic CO2 capture)
6/21(三)下午-1	A5:封存-洩漏及完整性 (Storage-leakage and integrity)	B5:運輸-運輸系統 (Transport-transport systems)	C5:吸收-製程 (Absorption-processes)	D5:CDR及負排放 (CDR and negative emission)	E5:鈣迴路捕捉和富氧燃料 (CLC and Oxy fuel)	F5:CCS整個系統議題及商業模型 (CCS whole system issues and business models (CCUS))
6/21(三)下午-2	A6:封存-潛在場址 (Storage-prospective sites)	B6:運輸-操作及測量 (Transport-operations and measurements)	C6:吸收-融入產業 (Absorption-integration to industry)	D6:碳捕捉-不同技術 (Capture- various technologies)	E6:國際研發/試驗及大規模項目 (International R&D / pilot / large-scale)	F6: 碳捕捉-製程觀念 (CO2 capture - process concepts)

## (二) 112年06月20日(星期二)，議程第二日

### 1. 專題演講

第二天會議於挪威科技大學(NTNU)的 Realfagbygget 會議中心，早上為會議開幕式及專題演講，其中專題演講題目如下：

- 1 - Status 2023: Is there a Case for Climate Optimism?
- 2 - A Global Perspective on CCS
- 3 - Northern Lights – CO<sub>2</sub> transport and storage at scale
- 4 - Realising CCS on waste-to-energy – The road ahead
- 5 - CCS - Ready for a brighter future?
- 6 - The Impact of CCS Research in the Green Transition



首先由卑爾根大學的氣候變遷 Kleiven 主任探討目前因應氣候變遷減碳路徑是否能達到 2050 淨零目標，演講中提到自 1990 年以來超過 41% CO<sub>2</sub> 排放來自化石能源及土地使用改變，累計碳排已超過 1 兆噸 CO<sub>2</sub>，導致因氣候變遷致使旱災、洪水及颶風災害更頻繁及規模更大，儘管減碳議題嚴峻，但對於朝著減碳路徑是逐漸明確的，因為現在有許多經試驗和測試的減少排放方法，以及碳捕捉運輸及封存 (Carbon Capture, Transportation and Storage, CCTS) 的選項可用，但仍需要針對不同的環境條件設計，並擴大規模且廣泛應用。

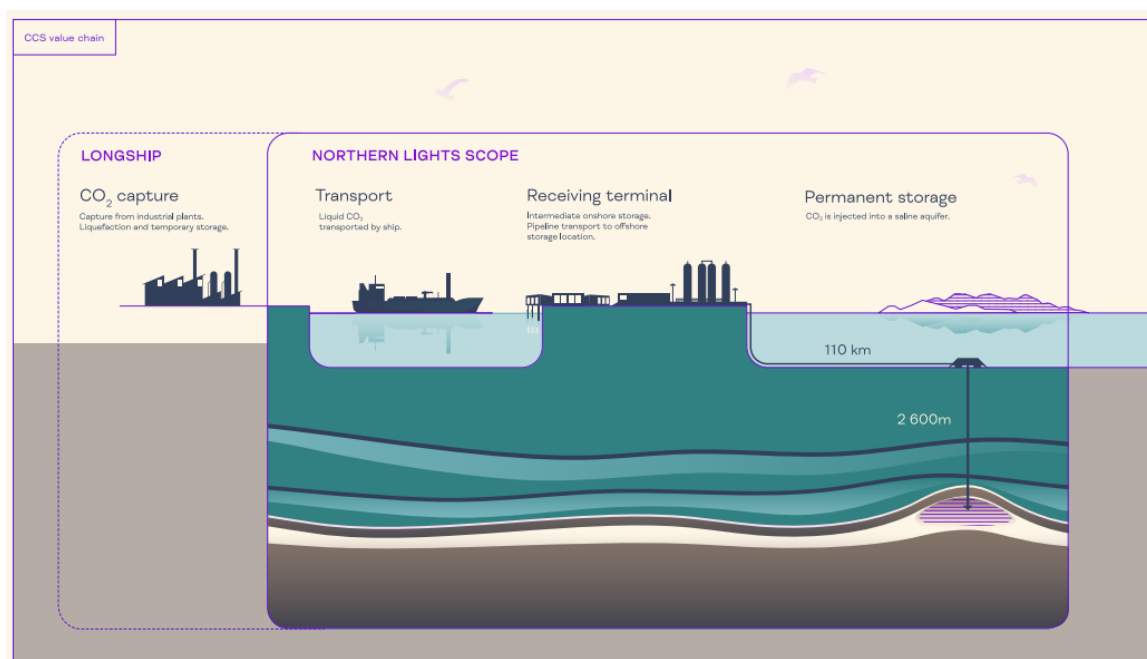
第二個講者為 Global CCS Institute 的執行長 Daniels 先生說明 CCS 的全球展望，CCS 計畫項目從 2022 年的 194 個擴張至 2023 年的 247 個場址項目，37 個運營中 (operation) 場址、20 個正在建造中 (construction)、97 個進階開發中 (advanced development)、103 個初步開發 (early development) 中。然而超過 70% 的商業 CCS 項目主要發展於深部鹽水層及涸竭油氣田，營運中各封存場址之封存能力平均約 1 百萬噸/每年 (mtpa) CO<sub>2</sub>，預計十年內可以翻倍，預估發展中的 CCS network 則預期平均封存能力達 5 mtpa CO<sub>2</sub>。回顧 CCS 發展，儘管自 2017 年以來取得重大進展，仍迫切需積極發展，預期 2050 年，CCS 封存量需求從目前自 1996 年以來累積封存將近 5,000 萬噸擴大到數十億噸。未來 30 年則需要 6,550 億~1.28 兆美元的資本投資，更需政府制定適當的配套政策；工業界大規模建造、擁有和運營 CCS 設施，金融部門將 CCS 納入其投資組合、ESG 和綠色金融分類 (green taxonomies) 中。到 2030 年，更強有力的政策及行動方案至關重要。Global CCS Institute 認為未來全球需要實施以下工作：1. 明確定義 CCS 和 CDR (Carbon dioxide removal) 角色，以達到國家氣候戰略和計劃中淨零碳排目標；2. 創造長期、高價值的二氧化碳封存；3. 支持地質儲量資源評估及評價；4. 制定具體的 CCS 法律及規範；5. 確定 CCS 網絡、運輸和儲存基礎設施的建設機會；6. 通過適當的政策和市場機制促進對 CCS 的投資；方能使得 CCS 得以穩健發展，以達到 2050 年淨零目標。

接著為 Northern Lights 合資公司的常務董事 Jacobsen 先生介紹北極光 (Northern Lights) 計畫目前進展 (內容可詳見 Northern Lights annual report 2022)，其中北極光計畫負責 Longship 大計畫中的運輸 (船運及超過 110 公里的管線) 及封存部分 (圖五)，北極光計畫主要分為兩個階段 (圖六)，階段一目標封存 1.5 百萬噸，並實現 110 公里的管線運輸 CO<sub>2</sub> 及相關接收站及港口建置，將 CO<sub>2</sub> 注入 2,600 公尺深的鹽水層中，以實現安全的地質封存，其中透過兩艘 7,500 立方公尺的 CO<sub>2</sub> 運輸船來輸送液態 CO<sub>2</sub>，階段二目標則是透過 CCS 網絡串聯 CO<sub>2</sub> 捕捉端客戶，實現每年 5 百萬噸的 CO<sub>2</sub> 封存能力。其中，北極光計畫的 CO<sub>2</sub> 接收站將位於挪威西部 Øygarden 市的 Energiparken

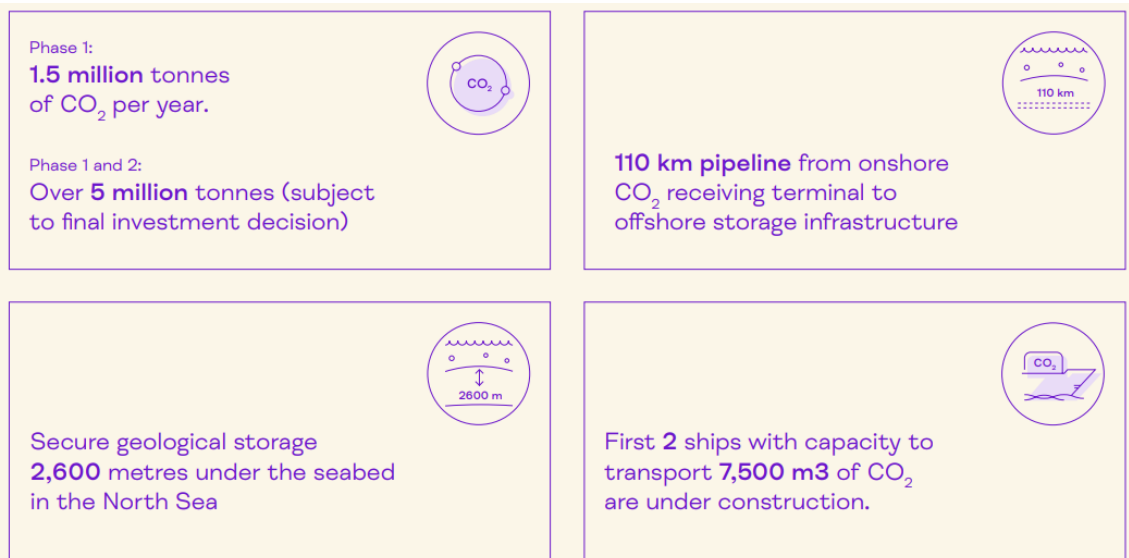
工業區，CO<sub>2</sub>封存系統被命名為 Aurora(圖七)，是 2019 年 1 月頒發的探勘許可證 EL001 的一部分。2020 年 3 月，Eos 佐證井成功完鑽，確認了儲集層特徵和封存能力，2022 年，完成第一期注入井 A-7 AH 和備援井(contingency well)C-1 H 的鑽完井方案，北極光合資公司於 2021 年 3 月成立，預計北極光項目於 2024 年開始營運，目前岸上及離岸設施已完成超過 80%，2 艘液化 CO<sub>2</sub> 船持續在中國建造中，組裝作業由日本 K Line 公司負責，可望在 2024 交貨營運。

北極光計畫為第一個完成的跨境運輸商業合約簽訂計畫(圖八)，分別與荷蘭的 YARA 氨和化肥廠(80 萬噸/年)，丹麥的 Ørsted 生質能源廠(43 萬噸/年)，加上挪威國內的 Norcem 水泥廠(40 萬噸/年)與 Fortum Oslo Varme(FOV)垃圾焚化廠(40 萬噸/年)，總封存量合約超過 1.5 百萬噸/年。除此之外，也積極評估潛在客戶(捕捉端)市場，鎖定北歐的石化、水泥、生質能源、鋼鐵以及 DAC(direct air capture)產業，評估捕捉規模(市場大小)、技術成熟度及預期導入期程(圖九)。

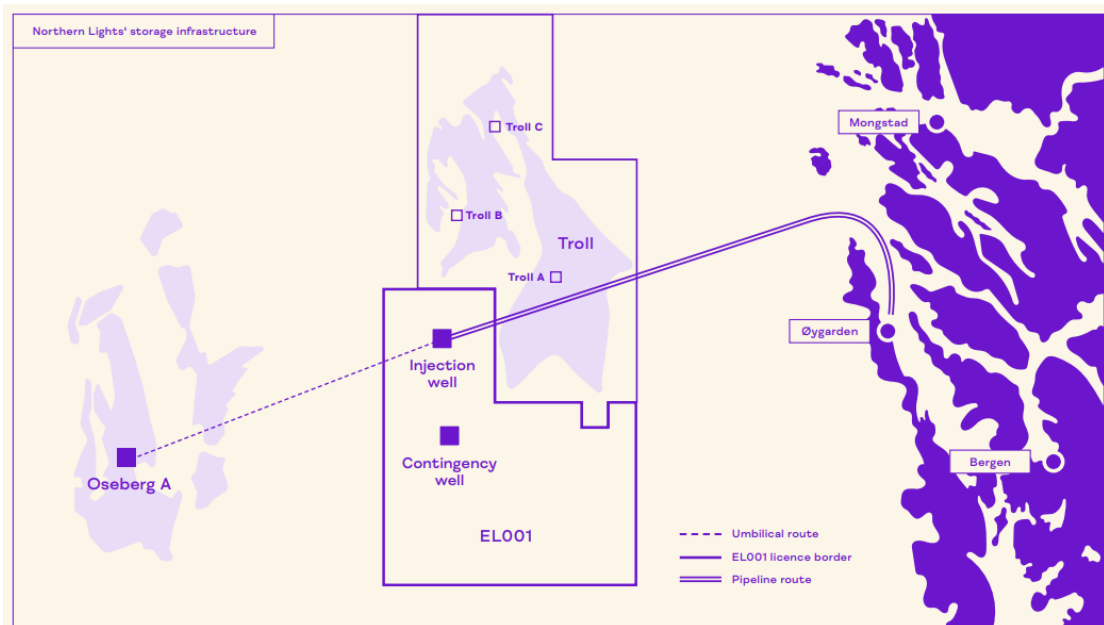
最後 Jacobsen 先生針對歐洲市場如何加速推展 CCS 歸納以下結論：1.CCS 對於難減排產業(Hard-to-abate Sector)脫碳是必要的引進技術。2. 雙邊協議(Bilateral agreements)對於建立跨境市場至關重要。3. 二氧化碳儲存是一種安全且永久的解決方案，對於實現減排目標至關重要。4. CCS 市場正在從商業潛力轉向客戶需求。5. 航運是一種靈活且可擴展的低排放運輸解決方案。其中，「難減排產業」(Hard-to-abate Sector)，泛指鋼鐵、水泥、塑化、運輸等，高能耗、高廢棄產物、且高度仰賴化石燃料的傳統重工業。



圖五、Northern Lights 計畫架構



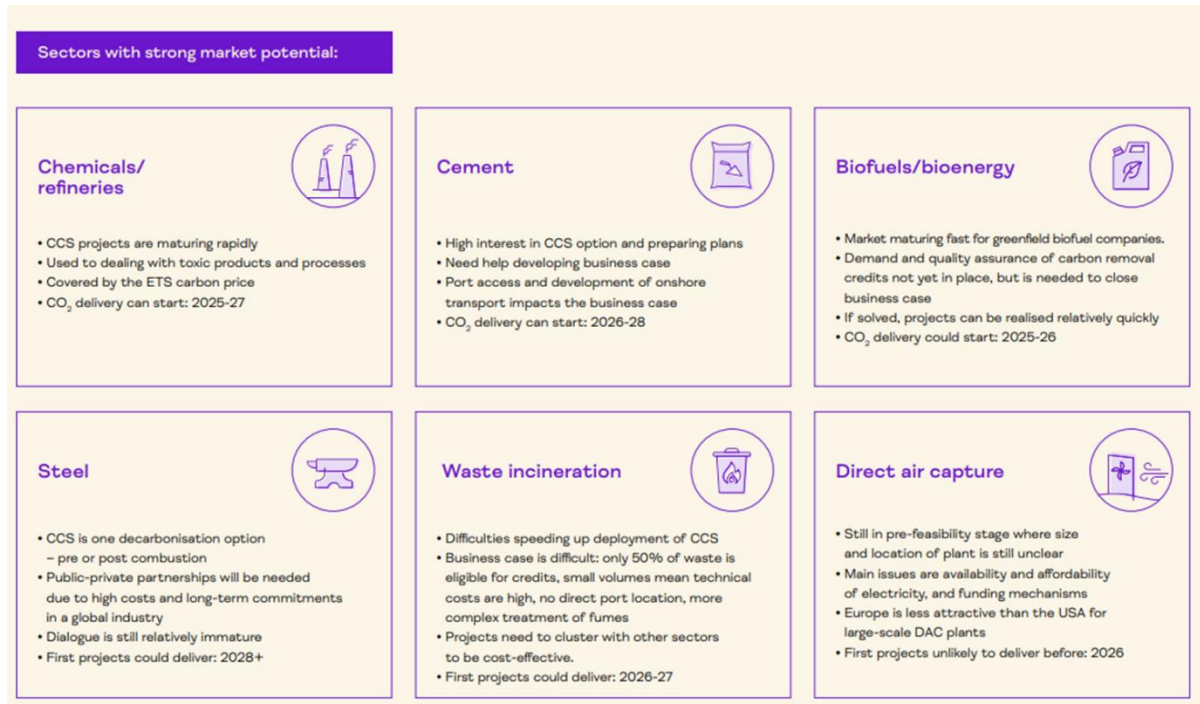
圖六、Northern Lights 計畫發展規劃



圖七、Northern Lights 計畫許可範圍



圖八、Northern Lights 計畫境內及跨境運輸



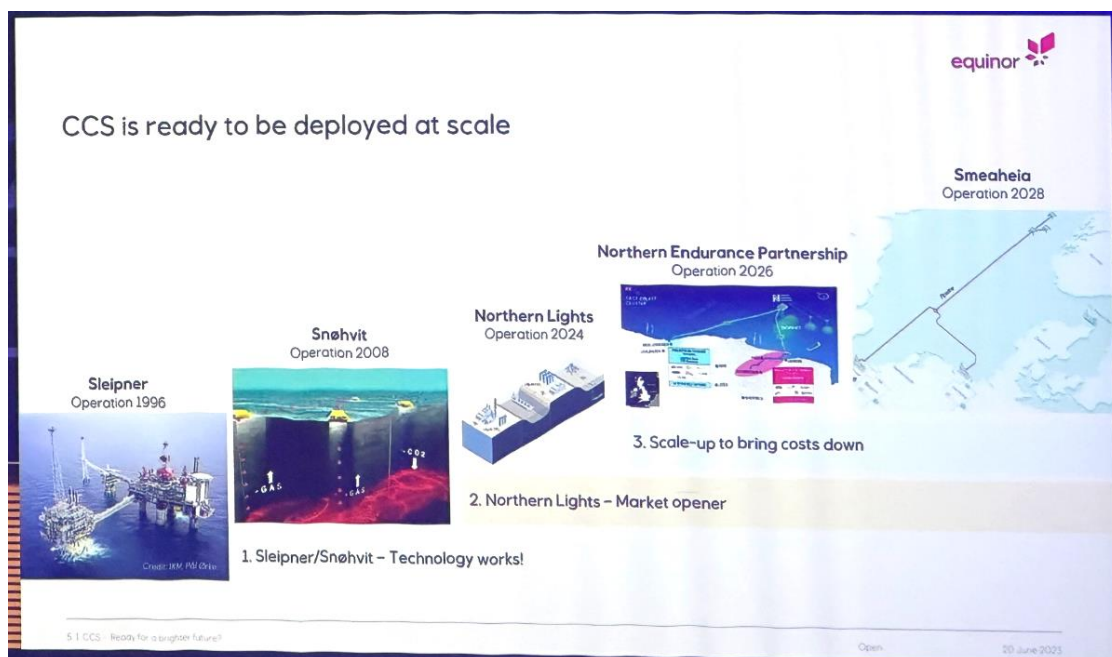
圖九、Northern Lights 計畫潛在客戶(捕捉端)評估

第四個講者為 Hafslund Oslo Celsio 公司的公關長 Hole 先生，該公司是一家再生能源公司，Fortum Oslo Varme(FOV)垃圾焚化廠為奧斯陸(Oslo)提供熱能並提供殘餘廢棄物的最終處理。目標透過廢棄物轉製能源(Waste-to-energy, WtE)結合 CCS 來降低碳排，每年捕捉 40 萬噸二氧化碳，約 90%捕捉率，預計可以複製 500 個 WtE 電廠，但經過一年，因通貨膨脹、變電站、港口設計變更等因素，預算增加 3 億歐元。儘管如此，該公司參與北極光計畫預期可以獲得碳去除 (CDR) 證書 (BECCS) 以及增加碳中和廢棄物服務的入場費，提供淨零塑料證書(Net Zero Plastic Certificates)，發展建置 CO<sub>2</sub> 港口碼頭及 CCS 等相關業務發展。

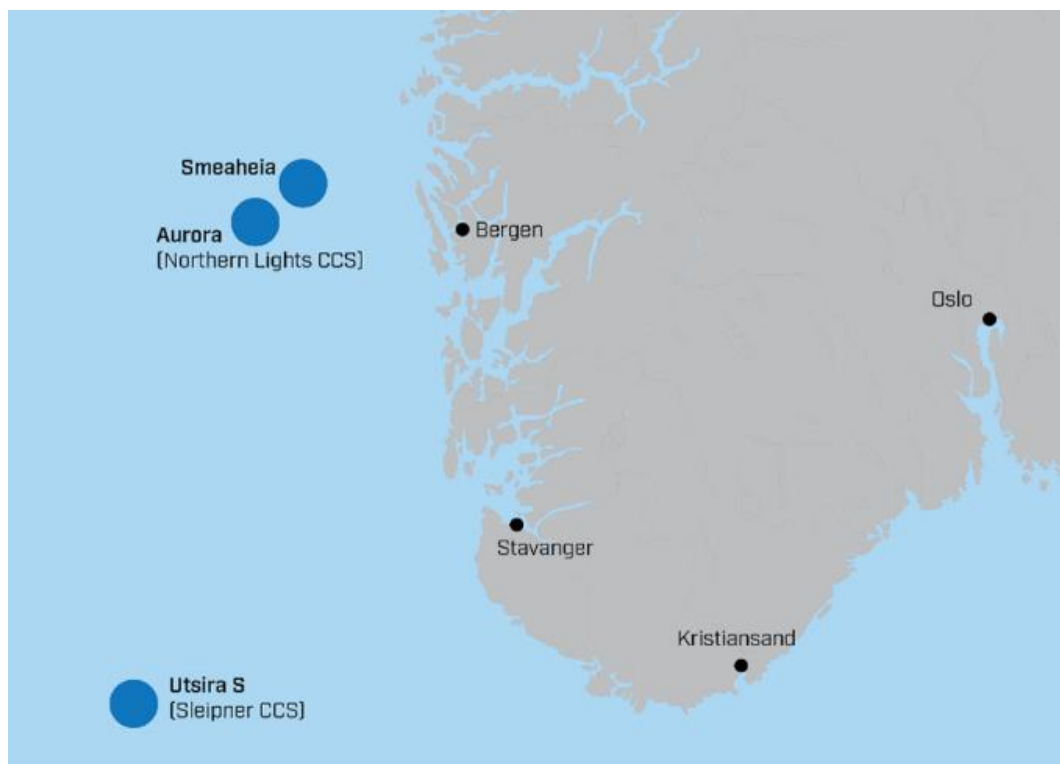
接下來為 Equinor 公司的 CCS 業務副總 Miljeteig 先生，分享該公司針對 CCS 業務規劃，Equinor 是一家擁有石油和天然氣業務的跨國公司和上市公司，涉及 CCS 業務發展很久，從 1996 年開始運營的 Sleipner 計畫、2008 年的 Snøhvit 計畫到預計 2024 年開始運營的 Northern Lights 計畫，以及與英國 BP 公司合作規劃 2026 年上線的 Northern Endurance Partnership(NEP)，顯示其在 CCS 網絡發展的雄心壯志，針對下一個挪威北海的碳封存業務的發展目標鎖定了 Smeaheia 計畫(圖十)，Smeaheia 計畫預計開發 2 mtpa，增加挪威大陸棚架之封存能力及商業性 CO<sub>2</sub> 封存能力。Smeaheia 場址位於北極光計畫的東北方(圖十一)，於 2012 年 Gassnova 公司初步探勘調查，隨後 2016 年 Equinor 接手第二次調查，確定 Smeaheia 場址的地質特性(圖十二)，北部及西部以 Vette 斷層為界，東部以 Øygarden 斷層為界，往南則岩性尖滅，儲層深度在

890~1300 公尺之間，探勘歷程及地質資料公開在網站上 (<https://co2datashare.org/dataset/smeaheia-dataset>)。

上述提到 Longship 項目的 CO<sub>2</sub> 封存設施，北極光計劃從 2024 年起第一階段的注入能力為每年 1.5 百萬噸，並計劃從 2026 年左右將容量發展到每年 5-6 百萬噸。Equinor 規劃透過 Northern Lights+ Smeaheia 兩個計畫減少相當於挪威年排放量一半的 CO<sub>2</sub> 排放量。並申請更多封存許可，來建立廣大的 CCS 網絡，以大幅降低 CCS 價值鏈的成本。

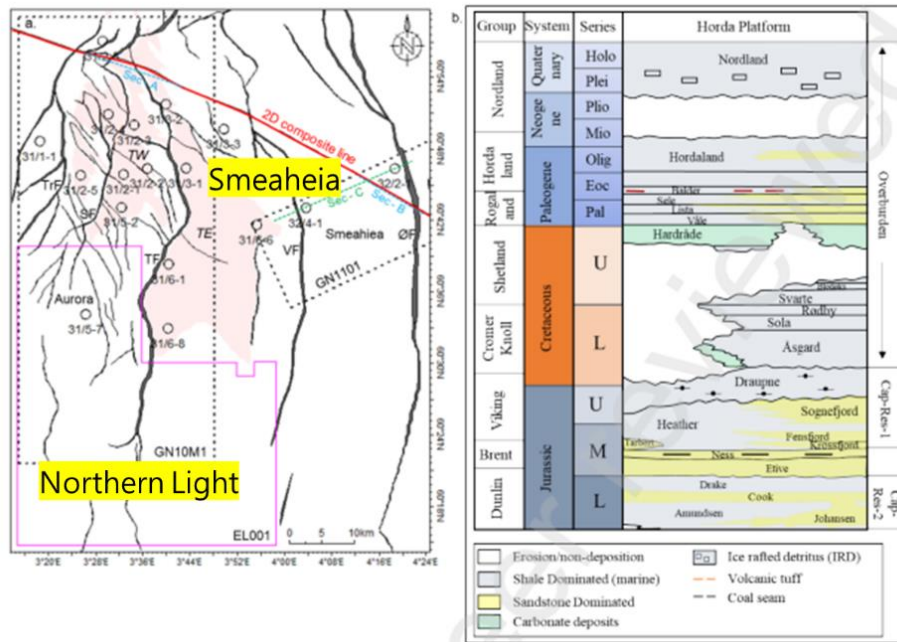


圖十、Equinor 公司的 CCS 業務進展及規劃



圖十一、Smeaheia 計畫位置圖





圖十二、Smeaheia 場址之地層架構

最後一個專題演講講者為 SINTEF 及 NCCS 的研究中心主任 Mølsvik 女士，主要闡述該單位發展 CCS 使命及心路歷程，強調基礎學科能力及探討現象科學的重要，該單位針對 CO<sub>2</sub> 流動問題發展一系列的實驗儀器及試驗規劃，最後緬懷因病去世的同事 Sigurd W. Løvseth 先生在 CO<sub>2</sub> 傳輸現象及雜質影響流動及相關解析模式建立的貢獻，並向對於持續研究 CCS 及鑽研相關學問技術人員致敬。

## 2. 分組會議：

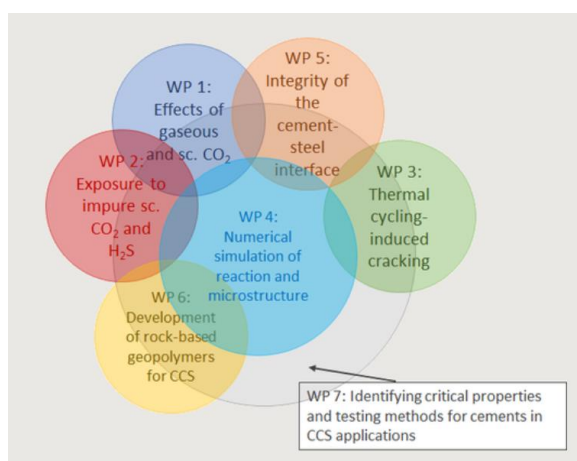
研討會議一般以多個演講主軸分不同演講廳同時舉行，與會聽眾可自行選擇感興趣的題目前往指定會議室聽講，每個分組議題有 2~4 個不等的報告題目，選擇的題目為「Policy legal and regulation」、「Storage-experimental studies」以及「Storage-experimental and modelling studies」，各擇一分享。

首先「Policy legal and regulation」為 Carbfix 公司的 Ragnarsdóttir 律師報告，其中 Carbfix 公司於冰島透過 CO<sub>2</sub> 注入至玄武岩地層加速 CO<sub>2</sub> 礦化反應成碳酸鹽礦物，以達到封存 CO<sub>2</sub> 的目的。Ragnarsdóttir 律師提到 CCS 行業發展目前缺乏保險 (insurance) 介入來管理及擔保 CCS 發展，無法形成具安全性的金融商品，為了推進 CCS 行業發展，必須有保險產品來幫助 CCS 營運之風險管理，但保險業若要參與這個產業，必須對於 CCS 價值鏈及相關技術流程有所了解與認識，不然很難制定合適的保單及產品。保險業切入關鍵在於如何提供更好的 CCS 運營技術能力及安全保證，但從監管角度來看，保險引進對於降低注入及封存的風險費用及責任至關重要。最後期望公私部門一同努力用務實的態度與方法來消除相關的技術或安全疑慮，使得保險業得以引進

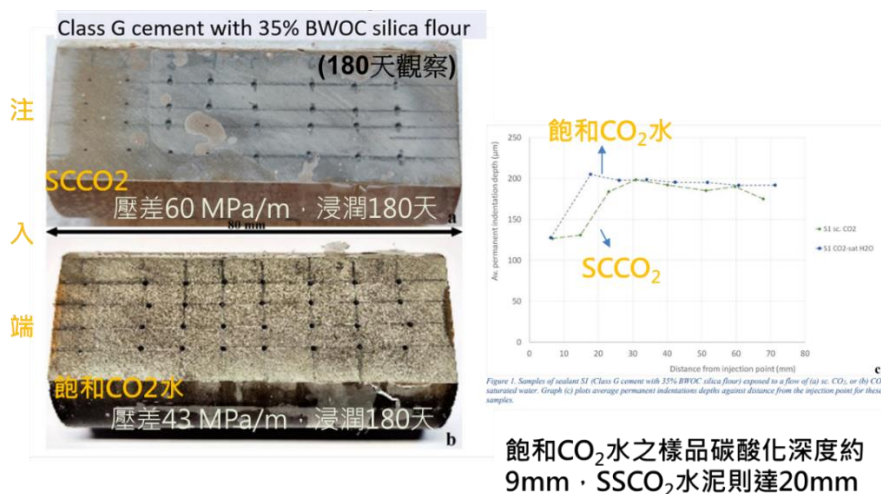


至 CCS 產業，提高更多的商業價值及安全保證。

「Storage-experimental studies」主題則以 IFE 能源技術研究所的 Noort 博士分享 CO<sub>2</sub> 水泥配方研究成果，其研究主題為 Halliburton 公司發起的 CEMENTENGRITE 計畫，探討不同水泥配方的化學性質、熱性質以及與套管複合體的完整度等議題，透過不同的工作包(Work Package)的研究成果來歸納 CO<sub>2</sub> 水泥的關鍵特性為何(圖十三)。Noort 博士主要研究 CO<sub>2</sub> 侵蝕對水泥影響，比較兩種配方於不同注入條件下之侵蝕程度，於 G 級水泥基底以 40% 石英粉替代為例觀察 180 天之侵蝕結果，顯示在飽和 CO<sub>2</sub> 水之樣品碳酸化深度約 9mm，超臨界二氧化碳(SSCO<sub>2</sub>)環境下之侵蝕深度達 20mm。若改成鋁矽酸鈣水泥則有顯著的改善效果，另一場會議 Laskowski et al., Micro-Macro pore evolution of sandstone under SCCO<sub>2</sub> aging 的研究中，透過取相鄰岩心岩心飽和水持續注入超臨界 CO<sub>2</sub> 之力學強度變化，結果顯示單軸抗壓強度明顯弱化，而整體孔隙率也下降(圖十六)，進一步分析其礦物組成，顯示黏土礦物比例下降(溶解)，而在較大孔隙空間有碳酸鹽礦物沉澱跡象(圖十七)。



圖十三、CEMENTENGRITE 計畫架構(<https://www.cementegrity.eu/>)



圖十四、CO<sub>2</sub> 侵蝕對水泥影響(180 天觀察)(G 級水泥部分(40%)石英粉替代)

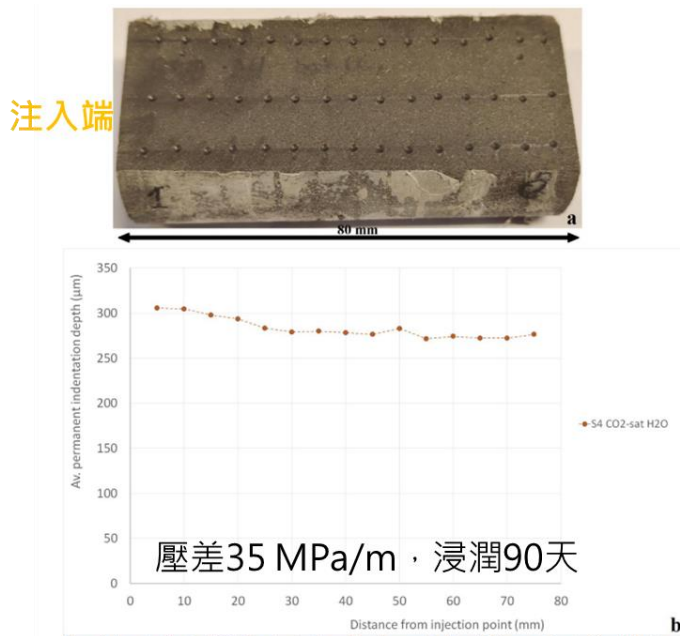


Figure 2. A sample of sealant S4 (calcium aluminate based blend) exposed to a flow of CO<sub>2</sub>-saturated water. Graph (b) plots average permanent indentation depths against distance from the injection point for this sample.

圖十五、CO<sub>2</sub> 侵蝕對水泥影響(9 天觀察)(鋁酸鈣水泥)

力學強度明顯變弱

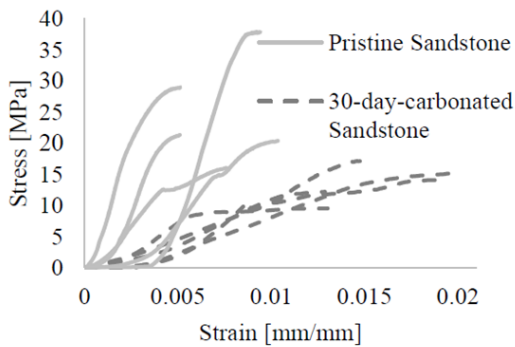


Fig. 1. Stress-Strain curves for tested specimens.

整體孔隙率下降1.2%

黏土礦物溶解

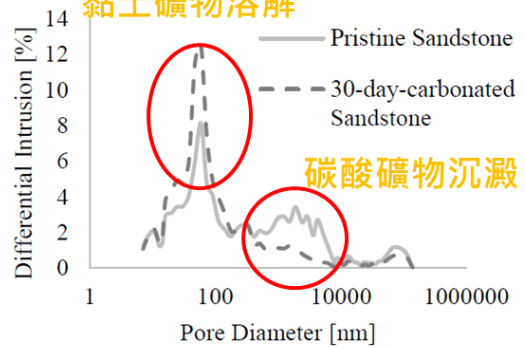
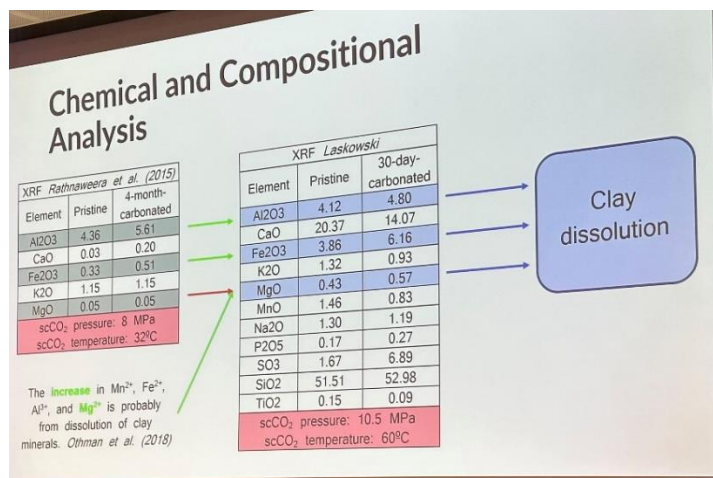


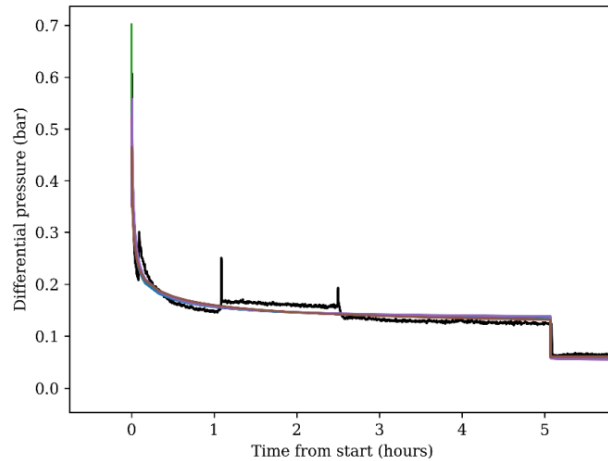
Fig. 2. Pore diameter distribution for tested specimens.

圖十六、岩心飽和水持續注入超臨界 CO<sub>2</sub> 之力學強度變化

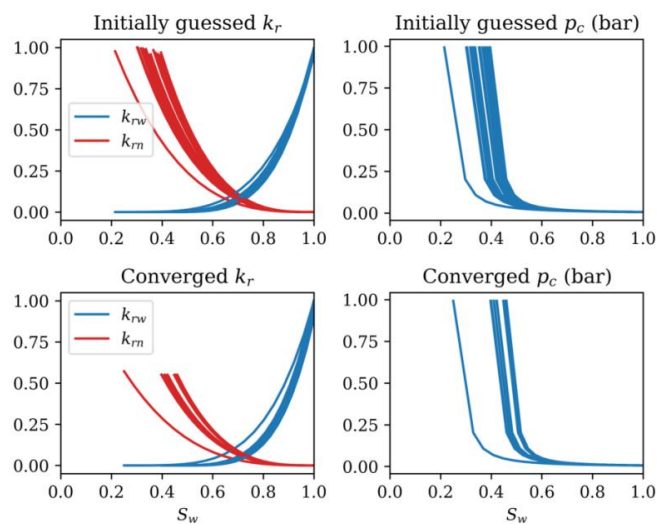


圖十七、礦物組成 XRF 分析

「Storage-experimental and modelling studies」主題則以 GEUS 高級顧問 Andrianove 先生透過 CT 圖像建立數值模型來擬合 CO<sub>2</sub> 沖排實驗以建立相滲曲線，對於 CO<sub>2</sub> 封存，相對滲透率與毛細壓力參數對於其注入能力及封存能力非常重要，可以透過穩態及非穩態的岩心沖排實驗來量測或是擬合參數，但實務上實驗往往是很難得出好的對應實驗結果。本研究以丹麥外海的 Nini 油田的岩心的非穩態的岩心沖排實驗數據為基礎，並以 CT3D 圖像抽取孔隙分布影像建立數值模型以模擬沖排過程，擬合實驗結果計算地層滲透率、毛細壓力及相滲曲線等參數，此研究主要還是依據 Brooks-Corey 方程式的假設條件來擬合各參數。研究過程 Andrianove 先生透過建立的解析工具 (<https://github.com/nikolai-andrianov/coreflood>) 來擬合實驗數值與數值解(圖十八)，研究結果顯示在相滲曲線的建立上仍存在非唯一解，所以必須透過固定毛細壓力參數求解相滲曲線參數，或者固定相滲曲線參數求解毛細壓力參數來比較求解收斂結果，顯示透過固定毛細壓力參數來求解相滲曲線參數有較佳的表現(圖十九)。



圖十八、實驗數值(黑色線)與數值解(紫色線)比對



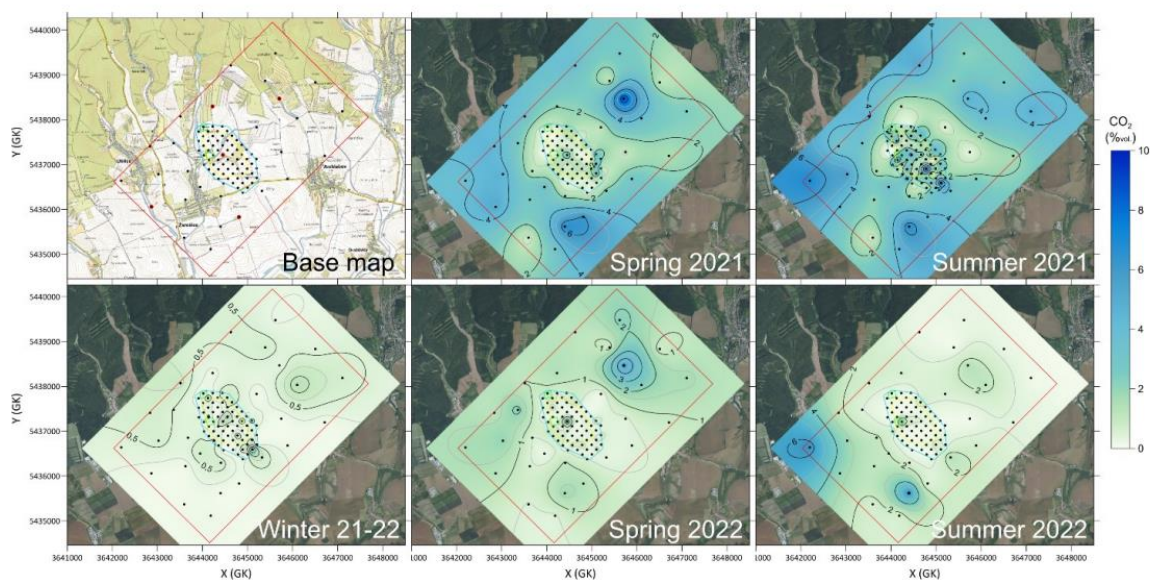
圖十九、比較數值解收斂前後之相滲曲線對比



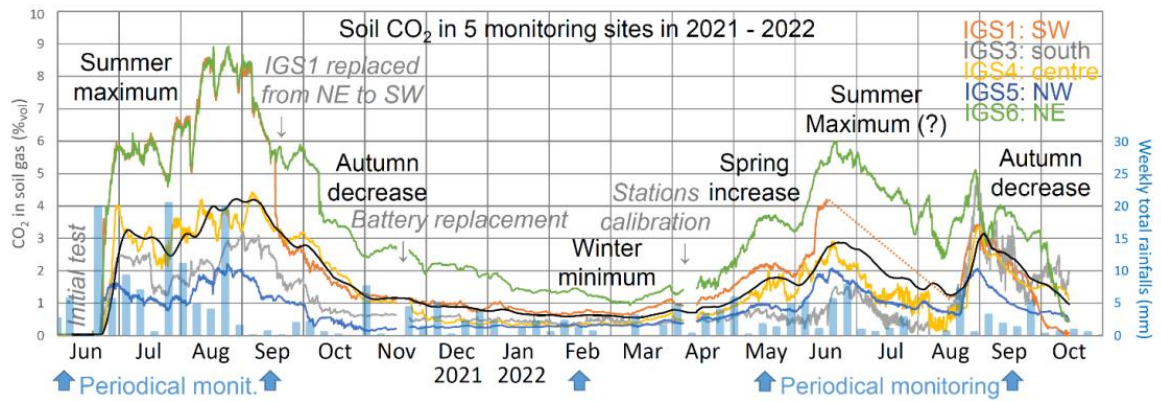
### 3. 海報主題：

本次會議的海報展示主題豐富，包含燃燒後捕捉/富氧燃燒/CCS 與氫能結合/二氧化碳利用與永久封存及工業利用/二氧化碳移除(CDR)/運輸/封存/國際研發活動(包含試驗及大規模計劃項目)/新科技/CCS 新應用/公眾接受度及溝通/CCS 整個系統議題/政策、法規及監管議題/商業模式等，超過 100 篇，在此針對土壤氣監測、離岸封存案例、CO<sub>2</sub> 運輸評估及公眾接受度/溝通等四個題目分享。

捷克地質調查局的 Jirman 博士研究捷克境內 Zar-3 CO<sub>2</sub> 試驗場的土壤氣監測的成果分享，Zar-3 油氣田於 2001 年被發現，現進入生產開發末期，因有豐富的地質及工程資料，作為 CO<sub>2</sub> 試驗評估場址，於 2021~2022 年共有 95 個土壤氣體採樣(包含 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、O<sub>2</sub> 以及石油氣體)，採樣深度約 80 公分，另外設置 5 個固定站採樣，以採取土壤氣成分隨季節性變化觀察以作為本場址的背景資料(圖二十)。結果顯示，土壤中的 CO<sub>2</sub> 含量隨著季節起伏大，春季增加、夏季最高、秋季減少、冬季最低的趨勢清晰可見(圖二十一)，但年度對比上，2021 年夏季達 9%Vol，而 2020 年為 6%Vol 仍有差異，初步推論為受到植被及生物活動所影響，而各個探頭測點的差異主要來自土壤性質、地下水位和原生植被造成。氣候造成的季節溫度及總雨量變化可能影響當地的植被及生物活動，進而影響土壤中的 CO<sub>2</sub> 含量，而大氣壓力變化則影響不大，最後透過多年度的監測背景變化資料建立，可以做為未來監測洩漏的門檻值設定參考。

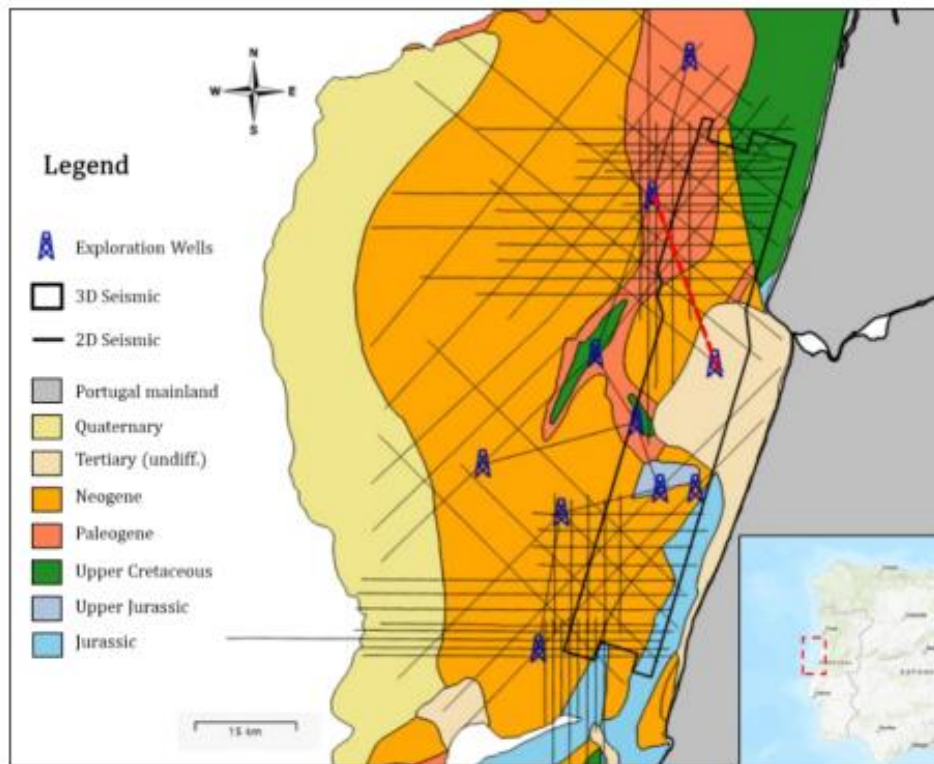


圖二十、Zar-3 場址之土壤氣 CO<sub>2</sub> 含量分布等值圖(2021~2022)



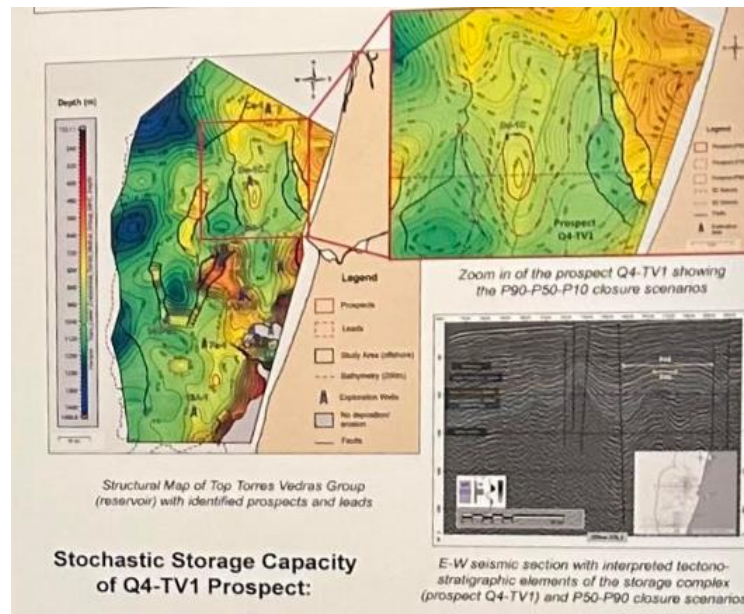
圖二十一、Zar-3 場址之土壤氣 CO<sub>2</sub> 含量季節性變化(5 個固定站點)

葡萄牙的埃武拉大學 (University of Évora) 的 Caeiro 博士由歐盟補助的 PilotSTRATEGY 計畫評估葡萄牙離岸潛在的 CO<sub>2</sub> 封存場址潛能，根據以往的地球物理數據及油氣探勘調查資料，鎖定 Lusitanian 盆地來找尋合適的封存潛力(圖二十二)，該盆地之理論封存量評估為 26 億噸，接著根據現有的地質條件篩選出盆地內的 Q4-TV1 背斜構造，該構造面積約 25 平方公里、厚度約 30 公尺、孔隙率 21%、淨砂比 66%、地層壓力 10 MPa，地層溫度 38°C，封存效率因子 6.1%，透過體積法加上蒙地卡羅評估，預期平均封存量為 11 百萬噸，P90 為 2 百萬噸，P50 為 9 百萬噸，P10 為 23 百萬噸，後續仍需要更多的靜態及動態模型來降低封存不確定性，提高封存資源評估可信度。



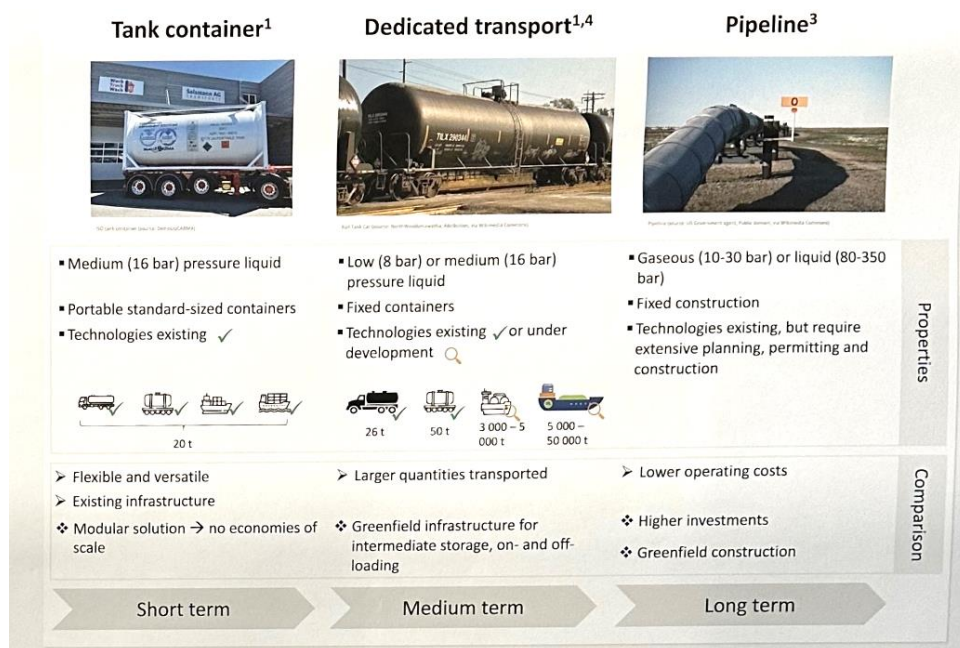
圖二十二、葡萄牙外海之 Lusitanian 盆地及震測線分布





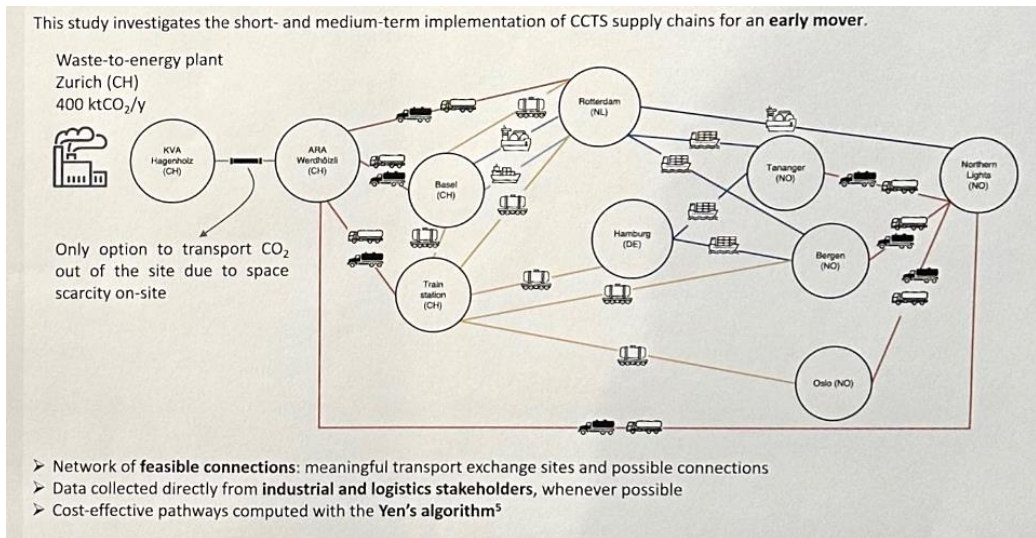
圖二十三、Lusitanian 盆地中的潛在封存構造

蘇黎世聯邦理工大學的 Oeuvary 博士介紹，CO<sub>2</sub> 跨境運輸議題，初期或是小運量可使用小尺寸的罐裝集裝箱(tank container)運輸、專用運輸(dedicated transport)以及管線(pipeline)，運量及成本隨之增加，研究中比較三者的運輸特性及優劣(圖二十四)，以蘇黎世的垃圾焚化廠為例，每年捕捉 40 萬噸 CO<sub>2</sub> 如何透過最佳的運輸組合來將 CO<sub>2</sub> 輸送至北海的北極光計畫封存場(圖二十五)，研究出最佳的運輸組合以降低運輸成本，比較不同運輸組合的成本、運輸週期及運輸活動的 CO<sub>2</sub> 排放量佔比，結果顯示在特定的運輸組合下均化成本約 80~170 歐元/噸(約 2,800~6,000 新台幣/噸)，本研究中運輸會額外增加約 10~15%的碳排。

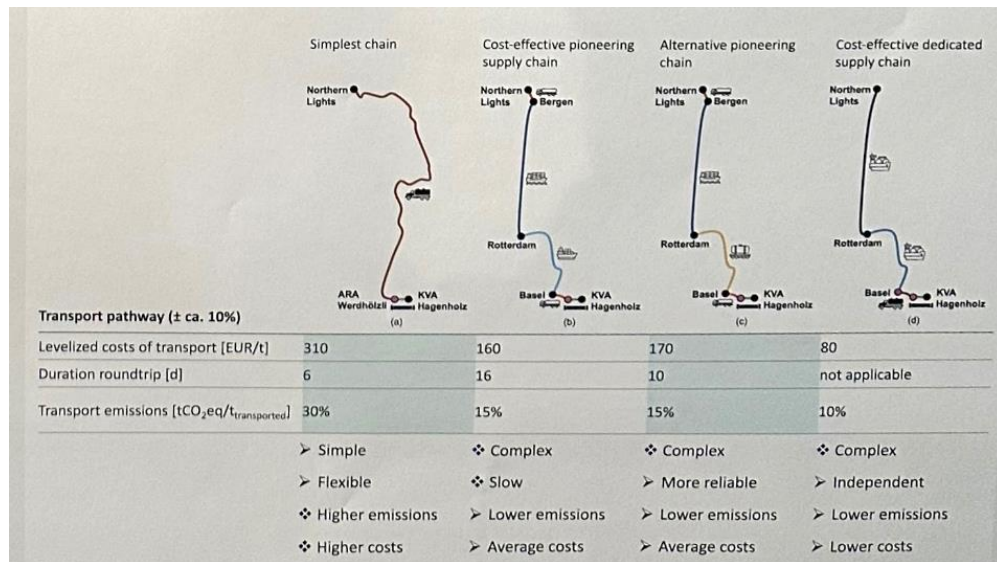


圖二十四、不同運輸方式的特性及優劣





圖二十五、碳捕捉工廠到封存場的運輸組合



圖二十六、不同運輸組合下的計算結果

德國 Fraunhofer IAO 公司 Berbegal 先生研究當前社會公眾對 CCUS 實施的看法是什麼，人們對此有何擔憂，人們對此有何評論以及談論的程度。透過民眾調查和社交媒體(Twitter)關鍵字分析研究，民眾調查結果顯示 60%對於 CCUS 看法正向、無意見占 21%，持負面看法則有 19%，其中正面看法主要認為可以降低能源生產對於環境的影響(占 47%)，持負面看法則有 77%的人認為 CCUS 是漂綠(greenwashing)作為，受訪者認為需要更多的氣候友善作為及研發工作進展，另外超過 70%的受訪者認為需要增加資訊透明度及提供更多資訊給公眾。然而在社交媒體分析中，顯示 43%對於 CCUS 看法正向、無意見占 5%，持負面看法則有 43%，正面看法認為 CCUS 可以降低氣候變遷風險，而持負面看法則一樣認為漂綠。常見的正向推文詞句為減排(emission-reduction)、淨零(net-zero)以及扮演重要的角色(play-important-role)，負面的推文詞句則有錯誤的解方(false-solution)、碳捕捉騙局(capture-scam)、昂貴且浪費時間(expensive-

waste-time)、碳捕捉無作用(capture-doesn't work)，該研究對於提高公眾意識及全民參與非常有價值，同時也可以作為 CCUS 行業發展的關鍵信息。

## (二)112年06月21日(星期三)，議程第三日

### 1. 專題演講

本日專題演講及上屆 CCS 講座得主的演講題目如下：

1.The role of CCS and CDR to tackle the climate crisis: a needed change of perspective

2.Safe design and operation of CO<sub>2</sub> transport systems – experimental and modelling aspects

3.How can CO<sub>2</sub> storage become a multibillion-euro industry within a decade?

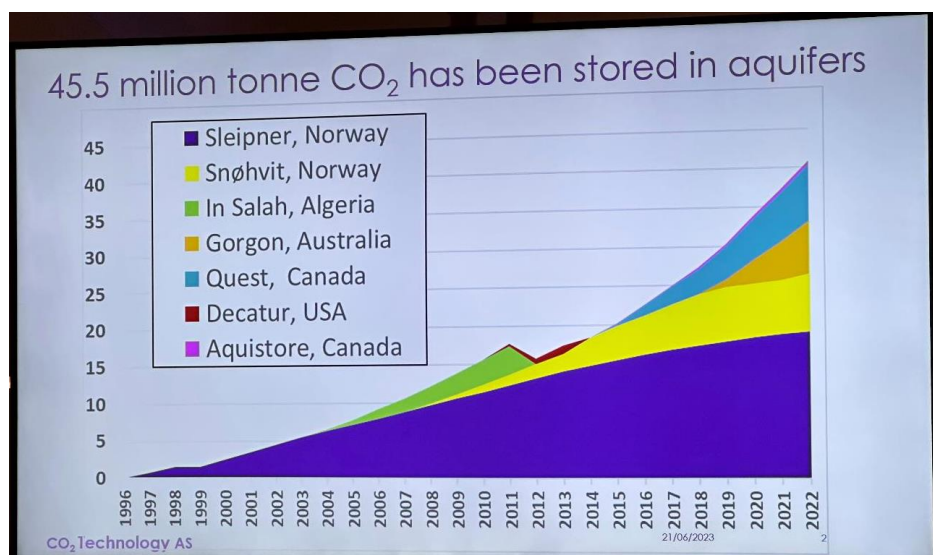
4.SINTEF and NTNU CCS Award winner's lecture

首先由蘇黎世聯邦理工學院的 Mazzotti 教授探討 CCS 及 CDR 在應對氣候危機扮演的角色，油氣產業年碳排超過 3 億噸，但是目前各油氣公司承諾的 CCS 於 2035 約 15~30 百萬噸/年，是遠遠少於所製造的排放量。所以 CCS 和 CDR 對於達成淨零碳排的目標是重要技術之一，認為現階段應部屬最便宜的技術並持續沿學習曲線發展，但是 CCS 與 CDR 對於氣候緊急狀態並不是好的解決方案，因需要長時間的基礎設施建置，最簡單有效的方法就是減少化石燃料使用來達到降低碳排，然而他認為油氣產業公司在持續生產化石燃料破壞氣候同時依賴政府補貼來發展 CCS 業務是不可取的，但也重視油氣公司在 CCS 和 CDR 解決方案的扮演角色，應採取氣候行動而非漂綠的方式應對。

接著 SINTEF 的首席科學家 Munkejord 則分享 CO<sub>2</sub> 傳輸系統的研究發現與心得，因為碳捕捉的方式不同，捕捉下來的流體除了 CO<sub>2</sub> 外還有許多煙道氣之類的雜質，進而改變流體的性質(飽和壓力、密度、波速及黏滯度)，透過與純 CO<sub>2</sub> 性質，流體流動性改變主要受密度差異所導致。除透過實驗來發展解析模式以描述流體性質外，SINTEF 有個全尺寸的實驗設施來評估評估二氧化碳管線斷裂過程，透過量測減壓波波速(decompression wave speed)用來評估二氧化碳管線裂縫擴散過程，未來將發展 CO<sub>2</sub> 混合物(CO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>等)之預測破壞模型。

最後一個專題演講題目由 SINTEF 另外一位首席科學家 Lindeberg 來講述 CO<sub>2</sub> 封存如何在十年內成為價值數十億歐元的產業？首先，從 1996 年以來已經累計超過 45.5 百萬噸 CO<sub>2</sub> 被封存在鹽水層中(圖二十七)，如同前面的講者所示 CCS 對於淨零碳排目標是重要的發展技術，但是未來的封存場址開發勢必引起公司間的競爭及相互影響，例如北極光計畫旁邊還有 Smeaheia 及 Luna 等碳封存計畫場址，從盆地尺度及地層延伸

架構來看，彼此間很難不受影響，講者認為應思考大框架的 CCS 開發，以挪威外海的 Utsira formation 整合開發評估為例，認為 Utsira formation 最佳化可鑽 210 注入井，可達到 1.3 億噸/每年的注入能力，但礦區內小的許可開發可能會阻礙有效的開發。



圖二十七、累積 CO<sub>2</sub> 封存量隨時間變化

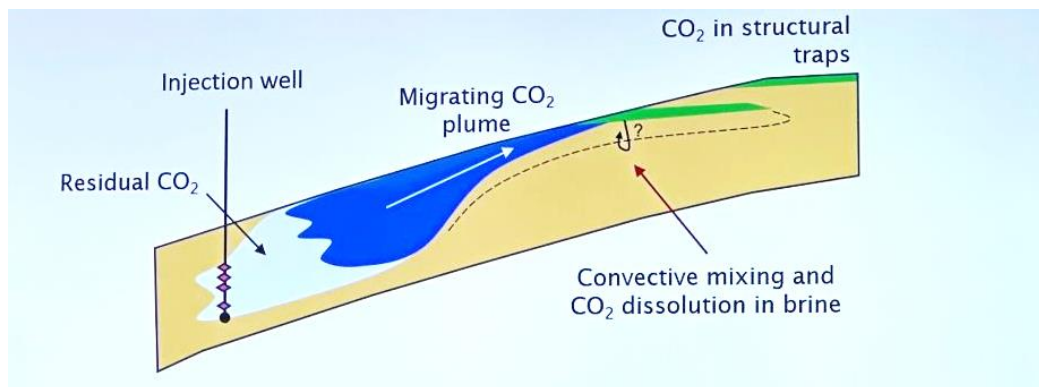
CCS 獲獎者演講則由 NTNU 的 Ringrose 教授分享(圖二十八)如何利用鹽水層加速朝著數十億噸封存 CO<sub>2</sub> 發展。其中，離岸鹽水層提供充沛的封存容量，假設其為主要目標，則需要超過 12000 口井二氧化碳注入井(2050 年時)，來封存達到氣候變遷目標。則 2030 年每個 CCS 網絡需要超過 200 口井，2040 年則每個網絡需要超過 1,000 口井。認為目前的百萬噸等級的封存計畫已是很好的技術證明，讓我們認識到 CO<sub>2</sub> 團塊移動發展受流體密度(浮力)的影響往地層高區移動然後被緻密的蓋岩層阻隔住，隨之殘餘氣機制將後端 CO<sub>2</sub> 束縛於孔隙中，隨後的溶解及礦化機制使得 CO<sub>2</sub> 永久封存在地層中(圖二十九)，加上監測的數據來持續學習驗證理論以及幫助模型驗證及校正。碳封存系統關注的議題有封存量(Capacity)、注入能力(Injectivity)及封阻性(Containment)，而擴大注儲規模則需要考慮三件因素，1. 封存效率 (Efficiency of storage)、2. 擴張(壓力) Expansion (pressure)，以及 3. 地震(Earthquakes) (圖三十)，封存效率涉及到儲層管理及注入井配置，進而反映在系統壓力的擴散及變化，最後地震風險評估是選址和安全評估重要組成部分。了解誘發地震活動對於儲存操作和長期儲存完整性非常重要。誘發地震的實際風險非常低且可控，但與附近構造事件的錯誤關聯令人擔憂。所以如何朝著發展更大規模的碳封存方向，講者認為在 CCS hubs 內開發多個封存場，發展並使用便宜又智能的井解決方案，最佳化每口井的注入量，儲層壓力管理透過地層壓力變化及地質力學變化管理最佳化，使用先進且經濟高效的監控系統以建立信



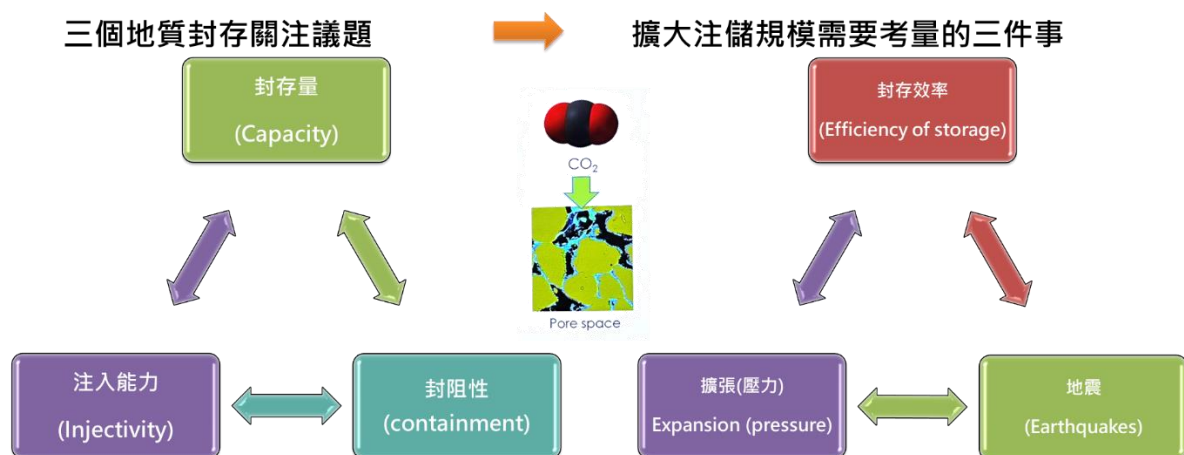
心並向利害關係人提供保證(圖三十一)。



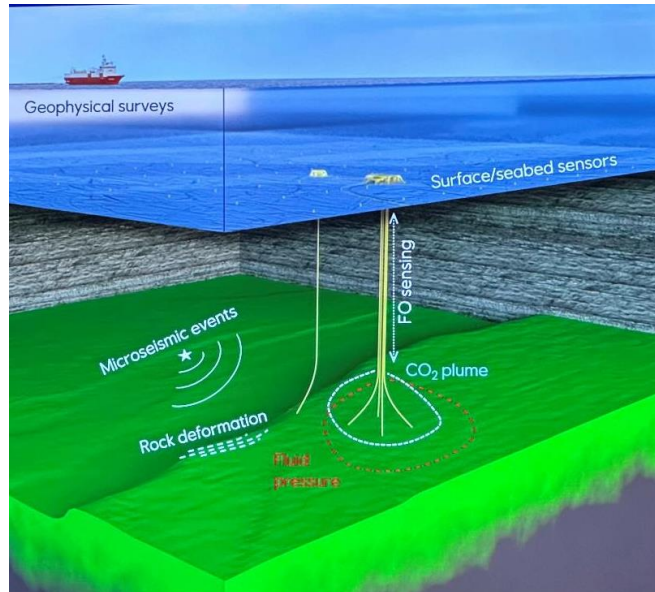
圖二十八、NTNU 的 Ringrose 教授獲得 2022 年研討會 CCS 論文獎



圖二十九、注入 CO<sub>2</sub> 移動與封存機制介入情況



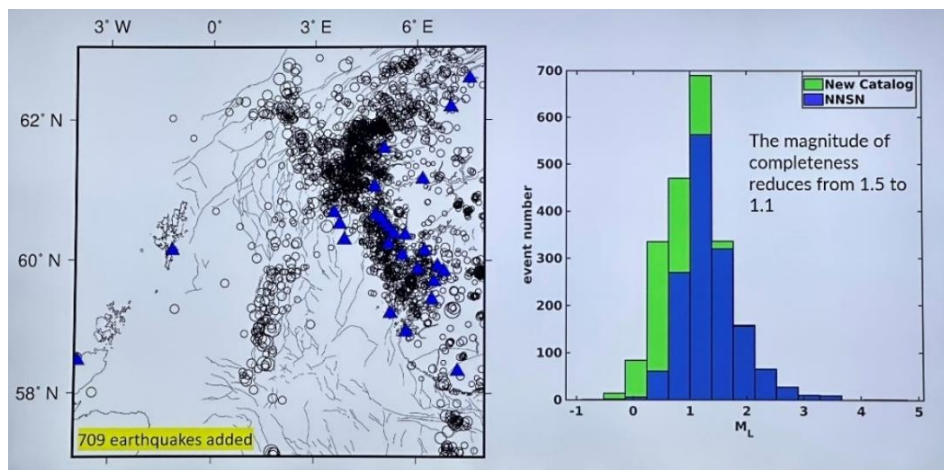
圖三十、碳封存規注議題及規模擴大需考量的因素



圖三十一、擴大碳封存規模示意圖

## 2.分組會議：

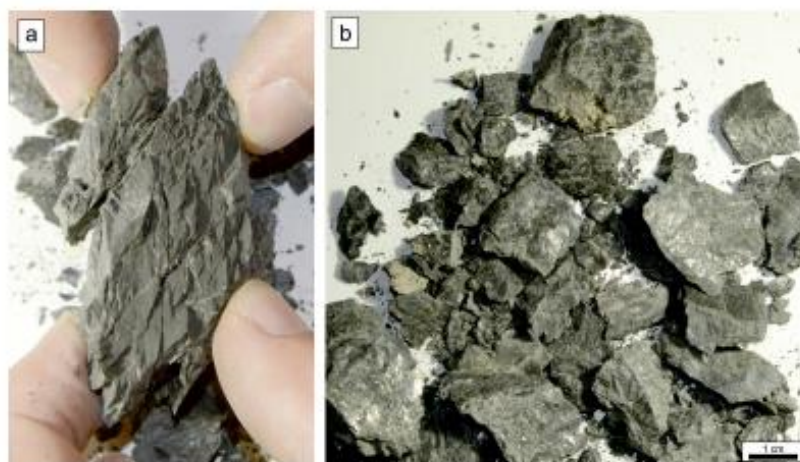
本日分組會議選擇的題目為「Storage - characterization and assessment」、  
 「Storage - leakage and integrity」以及「Storage - prospective sites」，茲簡  
 介如下，「Storage - characterization and assessment」主題中，卑爾根大學 Shiddiqi  
 博士分享利用 2021-2022 年間在挪威外海建置三個海底地震儀(OBS)站點的地震監測成  
 果，透過 OBS 建置可以收到封存場所在位置的微小地震，可偵測到芮氏規模-1~2 的微  
 小地震(圖三十二)，另外結合陸地的地震站資料對比可以有效地區分人為地震與自然  
 地震，這在地震調查對於未來由於二氧化碳注入導致地震活動發生變化至關重要。



圖三十二、挪威外海 OBS 監測地震成果

「Storage - leakage and integrity」主題中，瑞士地質調查局 Nussbaum 博士  
 利用 Mont Terri 地下實驗室，在已知斷層剖面下來研究 Opalinus Clay 透過注入 CO<sub>2</sub>  
 來使得斷層再活動來觀察斷層活動對於蓋岩行為影響，其中設置光纖傳感計、主動地

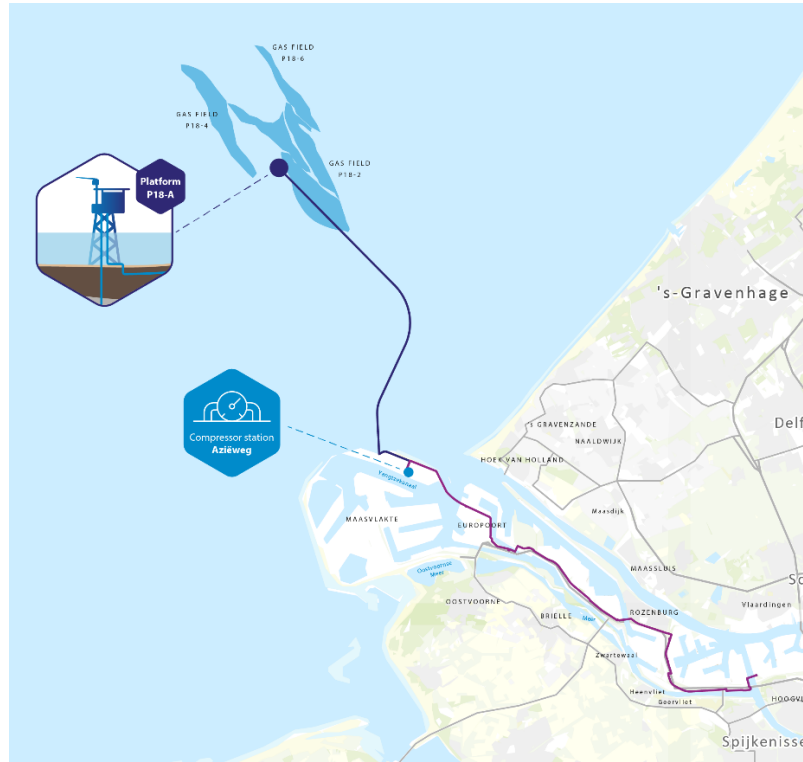
震成像系統及壓力監測等工具來觀察，研究表明斷層帶形成 0.3~3 公尺後的粗糙體，含有鱗片狀黏土(圖三十三)，代表形成過程經歷脆性—韌性的變形過程，也有產生些許潛變行為，而潛變方向會往粗糙體平行方向滑動，幾乎不會沒有記錄到地震活動。接著透過地質模型模擬顯示，粗糙體在斷層表面上產生顯著的應力不均勻性，在斷層表面上它們似乎更容易張開而不是滑動，最後，Mont Terri 斷層激活實驗強調了將斷層材料的應力路徑、結構歷史和岩性等綜合因素重要性，以更好地評估滲漏風險可能。



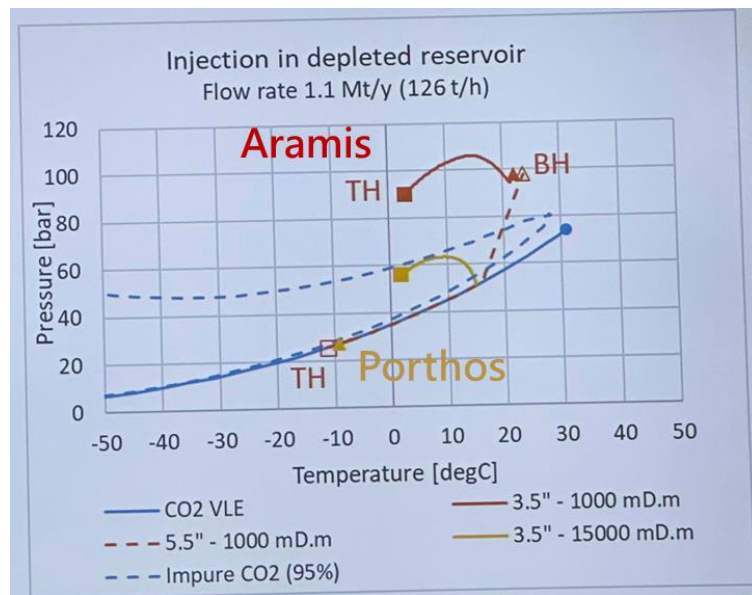
圖三十三、a 完整的鱗狀黏土樣品，b 鬆散的樣品

「Storage - prospective sites」主題中，荷蘭的 EBN B.V. 公司的 Schiferli 先生介紹荷蘭外海 Porthos 計劃及 Aramis 舊氣田封存二氧化碳聯合輸送評估案例，Porthos 計畫是將二氧化碳運輸至離岸的 P18 舊氣田(圖三十四)，因地層經過生產，儘管地層深 3,500 公尺，但目前地層壓力僅 17 bar，氣田離岸約 20 公里，利用低壓管線蒐集 CO<sub>2</sub> 至匯集站然後加壓輸送至高壓海管至海上注入井平台，但 Aramis 舊氣田在 Porthos 計劃北邊，且其地層壓力更高(20bar)，超過 100 公里的管線，故需要評估聯合輸送條件，首先因為 Porthos 地層壓力過低導致注入至地層時之溫壓落於 CO<sub>2</sub> 兩相區內(圖三十五)，需要提高壓力超過 50 bar 或是加熱設施來降低水合物形成風險，而 Aramis 地層溫壓則沒有相對應的風險，但是兩者合併開發考慮管線長途運輸所需的壓力條件來看，對於長途運輸二氧化碳不實際(與 Aramis 結合成 CCS network)，無法長途保溫，需要很大的加熱器，並且是需要考慮暫態行為的影響，開關井操作及升溫前之二氧化碳溫度仍是低溫，仍有風險。針對利用既有油氣井作為注入井之探討，舊氣井不符合 CO<sub>2</sub> 注入條件設計，注入時有現有完井液結凍風險以及熱應力比遠高於原始設計。低井頭溫度導致水合物形成，有潛在因水合物形成堵塞造成重大損害，若存在水分時，溫度低於 15 °C 時存在風險，而風險隨著鹽度增加而降低。所以針對 Porthos 建議溫度控制為井頭溫度 > 0 °C 以避免環孔結冰，井底溫度 > 15 °C 以避免水合物形成。





圖三十四、荷蘭 Porthos 舊氣田位置圖



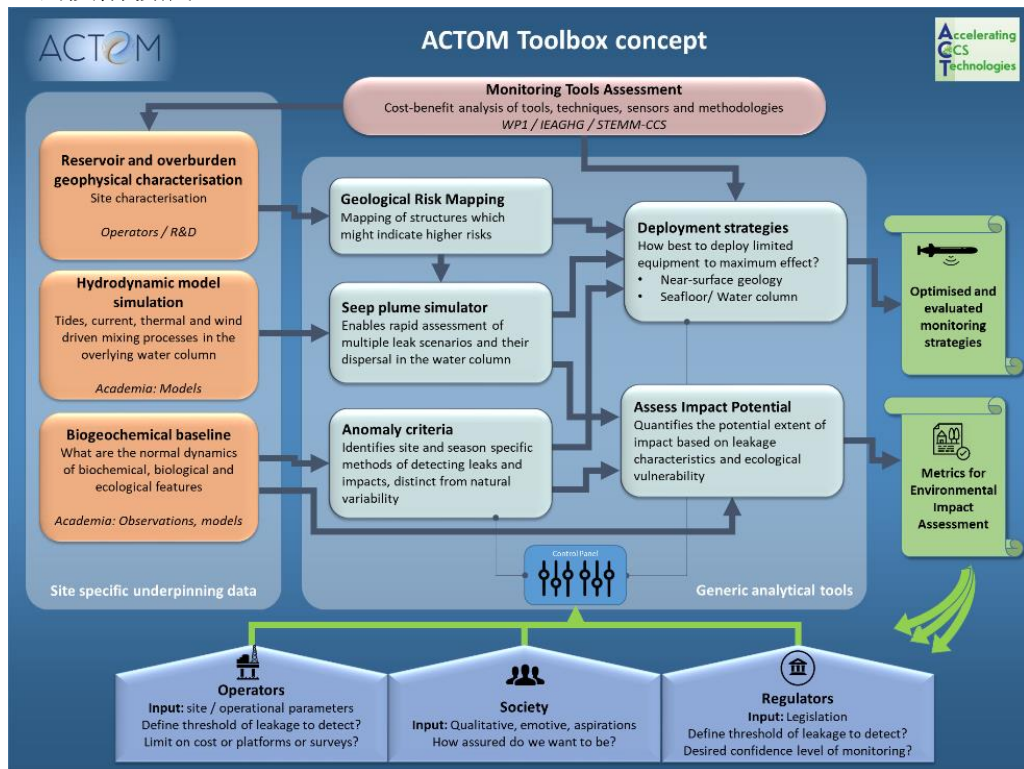
圖三十五、荷蘭 Porthos 及 Aramis 舊氣田之地層溫壓對應 CO<sub>2</sub> 相圖

## 具體成效

本公司配合政府邁向 2050 淨零碳排各項技術盤點，已將發展 CCUS 列為公司重要技術之一，特別是碳封存的部分，目前公司也同時推動鐵砧山碳捕存跨部會試驗計劃、桃園濱海碳封存場址評估、台灣西部沿海碳封存場址補充調查與台灣海域碳封存場址調查等各項工作，參與此次挪威 TCCS-12 研討會，有以下幾點具體成效說明：

1. CCS 為達到 2050 淨零碳排目標的重要技術之一，無論是 IEA 淨零碳排路徑或是在會議中學者提到 CCS 需要積極發展的技術，其中目前世界各國或是產業界所承諾的碳封存量能仍是實際排碳量的個位數，隨著未來政策及經濟激勵，預期各國後續 CCS 目標將擴大占比，隨著前端捕捉端及 DAC 發展成熟，碳封存的量能勢必需要急起直追，而且各國發展的碳封存目標為離岸深部鹽水層，那未來封存許可申請及封存場址間勢必產生競爭，但為能有效且最大化開發則需要從盆地尺度實施，會中學者也期望挪威外海的 Utsira 能過盆地尺度的開發規劃及 CCS 網絡串聯能成為第一個達到數十億等級的封存場域。
2. 成功蒐集歐洲碳封存計劃發展及目前關注議題，挪威北極光計劃為全世界第一個商業碳封存服務計劃，目前已完成境內及跨境運輸商業合約的簽訂，預期 2024 年正式營運，後續 Smeaheia 計畫接著 2028 年上線，顯示在北海擴大發展 CCS 業務藍圖。這也代表碳封存從單一場址特性、注入能力及封存系統議題擴大至碳運輸與封存場如何橋接，延伸出不同輸運方式特性與優劣、流體之流動保障、儲卸設施及港口建置、商業合約、各國適法性，甚至經濟性等議題。除此之外，CCS 延伸議題到至各國境內 CO<sub>2</sub> 不同來源彙集接著與境外的封存場連接以形成所謂的 CCS 聚落(cluster)與網絡(network)，進而促成跨國合作研究計劃或聯盟的發展。
3. 透過跨學科及跨國合作發展 CCS 為常態，光是碳封存關注的議題涵蓋流體性質、注入能力、封存系統安全性、地震監測及完井水泥材料特性變化等，涉及多個學科專業領域議題，全面技術發展及驗證為當務之急，故歐盟透過 ACT(Accelerating CCS technologies) 計劃來補助多個 CCS 相關研究計劃，開展跨學科領域及多面向研究計劃，譬如 CEMENTTEGRITY 計劃探討不同水泥配方受 CO<sub>2</sub> 影響下之化學性質、熱性質以及與套管複合體的完整度變化研究，透過不同的工作包(Work Package)的研究成果來歸納評估合適 CO<sub>2</sub> 完井水泥材料之關鍵特性為何。SHARP 計劃由挪威、英國、荷蘭、丹麥及印度共 5 國研究地質力學機制、現地應力場建立、地震監測及風險評估，並分享彼此的研究成果。

HNET 計劃則是針對北極光計劃中的封存場域（挪威北海 Horda 平台區域）實施地震監測網絡的基線調查，該計劃建置地震監測網絡外也嘗試找出發展新的監測技術。ACTOM 計劃則是由歐洲及美國跨學科發展的離岸碳封存開發支援決策工具(decision support tool)（圖三十六），致力於推進海上監測及環境影響評估，以確保正確評估離岸碳封存場開發工作。而聯合研究機構方面，則有 CO2GeoNet 其是歐洲二氧化碳地質封存科學機構，為非營利科學組織，由 21 個歐洲國家的 27 個研究機構組成，聯合研究、培訓、科學建議、資訊傳播，以在地質封存方面研究發揮著寶貴且獨立的作用。ECCSEL 則為歐洲二氧化碳捕獲和儲存實驗室基礎設施（ECCSEL）是一個分佈式研究基礎設施，旨在加強歐洲在二氧化碳捕捉、利用、運輸和儲存領域的科學、技術發展、創新和教育。最後期望透過跨國及多學科的聯合研究來驗證技術及實現具經濟性的封存及監測技術發展。



圖三十六、ACTOM 決策工具評估框架

(<https://www.pml.ac.uk/science/projects/ACTOM-Decision-Support-Tool>)

4. 碳封存場址已有成熟的評估技術及指標，目前世界各國已有許多的年注儲百萬的等級的封存場址(例如挪威的 Sleipner、澳洲的 Gorgon 以及加拿大的 Quest) 營運或是建置中，透過這些場址營運對於碳封存技術已有相對的技術驗證及可性度，CCS 國際標準也發布(CO<sub>2</sub>捕捉可參照 ISO-27919-1，CO<sub>2</sub>管線運輸則可參照 ISO-27913，CO<sub>2</sub>地質封存則是 ISO-27914)可作為參考依據，此外英國地質調

查局(British Geological Survey)於 2021 年提出了碳封存準備水平(Storage Readiness Levels, SRLS)框架(圖三十七)，可針對潛在二氧化碳封存地點實施全面性技術評估、許可依據和計劃實施進度，以及二氧化碳封存操作尚待完成的工作為何，這些標準及評估框架對於不管是計劃執行單位或是主管事業機關，或是相關利益關係團體隨著計劃成熟度發展下，有助於在相同的技術平台得到充分討論及監督。

SRL number	Description/title of SRL	Stages and thresholds in the storage site permitting process	Stages and thresholds in technical appraisal & project planning
SRL 1	First-pass assessment of storage capacity at country-wide or basin scales	Gathering information for an exploration permit, if needed*	Technical appraisal
SRL 2	Site identified as theoretical capacity		
SRL 3	Screening study to identify an individual storage site & an initial storage project concept		
SRL 4	Storage site validated by desktop studies & storage project concept updated		
SRL 5	Storage site validated by detailed analyses, then in a 'real world' setting	Exploration permit	Well confirmation, if needed* Outline planning for development Technical risk reduction completed
SRL 6	Storage site integrated into a feasible CCS project concept or in a portfolio of sites (contingent storage resources)	Planning & plan iteration for a storage permit ♦	
SRL 7	Storage site is permit ready or permitted	Storage permit ♦ application & iteration	Project planning & permitting iterations
SRL 8	Commissioning of the storage site and test injection in an operational environment	Storage permit ♦ required Injection permit application, if needed	All planning work completed Construction & testing
SRL 9	Storage site on injection	Injection permit	Site construction completed Operation & monitoring

♦ Equivalent of storage permit relevant to national jurisdiction

圖三十七、碳封存準備水平(SRLS)框架

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583621001547>)

- 透過蒐集與會歐洲 CCS 相關技術發展，學習到的碳封存實務評估技術及實驗研究方法，相關資訊已提供本所研究同仁參考，可做為未來國內發展相關評估技術之基礎，另不同產業鏈整合及民眾溝通議題，亦可作為本公司建立國內的社會溝通管道、碳鏈商業整合模式的經營參考。
- 會議中主要與歐洲(包含挪威、瑞典、瑞士、葡萄牙以及波蘭等國)的研究機構人員交流技術及心得分享，交談間瞭解碳封存受到鄰避效應與區域政治風險(俄烏戰爭)的影響，目前以離岸鹽水層封存為主要目標，故跨國合作與跨境運輸成目前關注研究之一，也透漏未來在相關議題有研究合作交流機會。

## 心得及建議

藉由本次會議瞭解北極光計劃進展及歐洲碳封存及相關研究計畫發展，吸取國際經驗來增進產業發展認知及技術視野為參加研討會的目的，深刻體驗歐洲各國在 CCS/CCTS 研究發展的科學精神以及未來趨勢，重點心得如下：

1. 碳封存議題上，目前主要關注題目有封存量及場址評估、封存效率與成本、監測、環境影響評估、法律/政策/社會議題，以及最終長期監測及責任，這些研究題目反映了二氧化碳鹽水層封存技術的多個方面，為確保安全、可持續和有效的二氧化碳減排。不同的研究機構、學術界和政府部門都在致力於這些議題的研究和技術發展。
2. 未來氣候目標明確下，CCS 對於難減排產業(Hard-to-abate Sector)是必須，串聯石化、鋼鐵及水泥廠具相對高碳排及化石燃料依賴的產業形成 CCS 網絡，需要跨足到不同產業公司去接洽了解，並透過探討各個捕捉端到封存場間的輸運方式及流體規格要求，加上離岸封存場發展趨勢下，船運及管線運輸議題會持續發酵，針對捕捉端經由不同運輸方式到碳封存場址的價值鏈的檢點及最佳化是必須的。然而碳封存場域的封存量開發隨著客戶需求增加將加速，年注 CO<sub>2</sub> 百萬噸等級的場域開發經驗可作為技術驗證，後續須思考整個盆地尺度的開發以及範圍內的開發商整合，這將影響未來 CCS 網絡發展。
3. 碳封存場建置及營運發展方面，提高封存效率、儲層管理及具經濟性的監測方法，對於降低管理成本、風險以及建立產業信心至關重要，對於民眾溝通方面，資訊透明度為一直所詬病的地方，除產官學研一起努力來妥善揭露相關技術資訊，但思考 CCS 為民眾陌生的技術，應朝著氣候變遷議題及科學知識傳遞方式來讓民眾認識及了解 CCS 技術的重要性及必要性。
4. 歐洲針對碳封存技術議題，例如水泥材料性質或地震監測題目，往往透過聯合研究計畫方式來整合專家資源來探討及歸納關鍵特性，並釐清未來發展目標，此方面是國內可以借鏡的，以往都是點對點的產學合作交流及委託執行，但如何建立技術平台來串連產官學研以提供資源及充分討論，藉以擬定工作項目及方向，是需要深刻思考及付諸行動的。
5. 最後在未來碳封存研究方面，封存系統的注入能力、封存量及封阻性仍為重要的課題及研究方向，進一步擴展到注儲操作溫壓評估、流動保障(管線流動行為及雜質對 CO<sub>2</sub> 流動性質影響)、水泥及完井材料評估、地質力學模擬及評估、儲層壓力管理等方面，都是未來可以深入發展的題目。

儘管國內 CCS 發展尚處萌芽階段，但為達 2050 淨零碳排目標，相關技術發展刻不容緩，其中針對碳封存相關發展，提供以下建議：

1. 利用技術發展來降低風險是需要持續投入研究的，例如深化儲集層特性分析，本單位對於儲集層的基本性質試驗(岩性描述、孔滲試驗、孔隙結構觀察及岩石礦物分析等)技術成熟，可以進一步發展流動性實驗(CO<sub>2</sub> 沖排研究)或其他物性試驗(超聲波、岩石力學、電性檢測等)評估技術。封存效率最佳化研究，針對目標碳封存場透過數值模擬等方法評估最佳封存效率，包括最佳注入壓力、



注入速率和 CO<sub>2</sub> 不同封存機制之移棲行為等，以提高 CO<sub>2</sub> 封存的效果。地層穩定性評估，開發地質力學評估模組以研究儲集層因注入行為之地層穩定性評估，考慮潛變、地震活動和地層壓力變化等因素，以確保 CO<sub>2</sub> 的安全封存和防止洩漏。注入井設計評估，研究注入井的最佳設計和位置，包括井體構造、水泥完井技術和井口設施等，以確保有效的二氧化碳注入和阻隔。監測技術開發，開發先進且便宜的監測技術，包括地震監測、地下水和地層或土壤氣體監測、微震監測等，以追蹤 CO<sub>2</sub> 在地層中的移棲變化情況。洩漏風險評估模型來研究二氧化碳洩漏的可能性、洩漏速率和洩漏路徑，以制定相應的風險管理策略。

2. 未來碳封存場址開發，除可透過國際合作方式引進國外成熟的評估及開發技術外，也可以成立技術平台來整合國內產官學研界，擬定具體的工作目標及範疇，以發展關鍵技術或釐清探討的議題方向。
3. 法規及監管制度仍需釐清，儘管政府已發布氣候變遷因應法但相關的細則或執行辦法尚未完善，對於想要發展 CCS 技術的企業仍處觀望階段，研究制定相關的監管框架、法律法規和規章，以確保二氧化碳封存項目的合規性和法律遵從性，政策透明度提高，勢必可以加速國內相關產業推動。
4. 公眾溝通與社會責任是一體兩面，如何提高資訊透明度及提升國內普羅大眾對於 CCS 意識是相當重要的課題，建議可以與公民團體合作，派遣具 CCS 技術專業人員與不同團體代表思辨交流，從中了解公眾最關注的議題為何？另一方面，積極與潛在場址鄰近的學校機關及社區團體接觸，傳達對抗氣候變遷使命及公民可作為，並讓在地居民參與討論及活動宣導，形成地方共識凝聚由下而上的氣候行動，促進 CCS 發展及完善社會責任。
5. 最後，人才與時間的重要性，全球已明顯感受升溫的影響，極端氣候事件帶來的衝擊將不可避免，CCS 設施建置及相關領域人才培養需要時間，其中人才更是在少子化下成稀缺資源，人才培育可透過鎖定關鍵技術發展並擬定多年期的產學合作計畫，透過培養 CCS 產業內各個環節的要角，另透過此方式讓學子了解 CCS 產業工作內容，可助散播該技術及相關資訊給年輕世代，亦逐步提升民眾認知。

針對 CCS/CCU/CCUS/CCTS 產業發展，會因公司切入業務不同而有不同論述，但最重要關鍵在於如何從碳捕捉端經由適當的運輸方式串聯至碳封存場址，過程中涉及不同產業合作及跨空間尺度的流體轉換及業務連接，如何在過程中確保安全及風險管理，以達到永久將 CO<sub>2</sub> 封存至地層中，這將是國內技術發展的關鍵。而碳封存的成功與否取決於這些要素的有效實施和適當監管，提升產業信心度及公眾溝通將是未來重要課題之一。