

出國報告（出國類別：開會）

溫室氣體控制技術第 17 屆會議  
(GHGT17)

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：許文嘉（主管）

派赴國家/地區：加拿大艾伯塔省卡加利市

出國期間：113 年 10 月 18 日至 113 年 10 月 27 日

報告日期：113 年 12 月 5 日

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：溫室氣體控制技術第 17 屆會議

頁數 33 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力股份有限公司人力資源處/翁玉靜/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

許文嘉/台灣電力股份有限公司/環境保護處/主管/02-23668639

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：113 年 10 月 18 日至 10 月 27 日

派赴國家/地區：加拿大

報告日期：113 年 12 月 5 日

關鍵詞：淨零排放(NET ZERO)、碳捕捉與封存(Carbon Dioxides Capture and Storage, CCS)、負碳技術(Negative Emissions Technologies, NET)、溫室氣體控制技術研討會 (GHGT)

內容摘要：(二百至三百字)

巴黎協定訂定全球氣溫於世紀末，上升幅度限制在工業革命前 2°C 以內，若要達此目標 2050 年淨零排放為必然之趨勢，世界各國已規劃相關減碳作為，其中碳捕捉與封存技術亦為重要之關鍵角色。為使各國機構與學術單位可交流最新之減碳技術，國際能源總署 (IEA) 每兩年主辦「溫室氣體控制技術研討會」(GHGT)，今(113)年為第 17 屆於加拿大艾柏塔省卡加利市舉辦，特別關注著重於碳捕捉、利用、負排放、儲存、法律和監管、社會認知等議題，透過開閉幕之成功案例分享、主題演講、訪展覽攤位及海報區等，已了解各國相關技術之發展與應用。

本次赴加拿大艾柏塔省卡加利市針對減碳技術進行了解，針對碳捕捉效率提升、封存方式等議題進行交流，相關實務技術策略可提供本公司做為參考。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網

(<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

# 目錄

頁次

壹、出國目的.....	2
貳、開會行程.....	3
參、會議紀要.....	4
一、GHGT17 概述.....	4
二、開幕專題演講.....	8
三、成功案例分享會議-爐邊談話.....	11
四、技術報告.....	12
五、展覽分享.....	26
六、閉幕演講.....	31
肆、心得與建議.....	33

## 壹、出國目的

為達成巴黎協定「將全球平均溫升控制在工業革命前 2°C 水平以內，並期望達成 1.5°C」目標，世界各國陸續訂出淨零排放之規劃，減碳技術之發展等關鍵議題，依據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)推估永續發展情境，碳捕捉利用及封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)為 2040 年至 2050 年主要減碳之應用工具，以捕獲 CO<sub>2</sub> 後進行應用或儲存於深層地質構造，通常以大型排放源(發電廠或工業設施)作為應用對象，近期亦發展直接由大氣中捕捉之技術。

我國氣候變遷因應法於 112 年 2 月 15 日公布實施，其中訂定我國 2050 年淨零排放之目標，為達成此願景，相關部會亦已制定 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫，盤點國內相關技術之應用、地質結構之調查及規劃 2030 年前開發低成本捕捉技術，後續 2030 至 2050 年擴大應用規模，顯示我國對減碳技術之重視。

台電公司(以下簡稱本公司)身為肩負穩定供電責任之綜合電業，對於永續發展及節能減碳義不容辭，於 2010 年開始啟動碳封存計畫，針對國土地層進行深度調查，規劃利用台中發電廠廠區，設置二氧化碳碳封存試驗場址，所蒐研之科學數據，將作為未來大規模商轉計畫之封存評估、環境影響評估及與民眾溝通之重要資料。

「溫室氣體控制技術研討會 GHGT」由國際能源總署主辦並合併其他相關減碳方案會議，每兩年於 IEAGHG 成員國舉行一次，該系列會議在北美、歐洲和亞洲輪流舉辦，今年為第 17 屆於 113 年 10 月 20~24 日在加拿大艾柏塔省卡加利市舉辦，會議中關注碳捕獲、利用和封存之發展對於本公司後續相關研發方向，極具參考價值，故派員前往與會，俾獲取相關資訊。

## 貳、開會行程

前往國家：加拿大

出國日期：113年10月18日至113年10月27日

起迄日	前往國家城市	工作內容
113年10月18日	台北→溫哥華	去程(轉機)
113年10月19日	溫哥華→卡加利	去程
113年10月20日至 10月24日	卡加利	出席研討會 (地點：TELUS 會議中心)
113年10月25日至 10月26日	卡加利→溫哥華	返程(轉機)
113年10月26日至 10月27日	溫哥華→台北	返程

## 參、會議紀要

### 一、 GHGT17 概述

#### (一) GHGT 背景

溫室氣體控制技術（Greenhouse Gas Technology, GHGT）會議是關於溫室氣體減排技術的首要國際會議，於 1997 年成立並由國際能源總署（International Energy Agency, IEA）監管。

IEA 致力於監管化石燃料之活動，同時亦提供國際石油市場及其他能源領域的統計情報，在提升可替代能源（包括可再生能源），理性能源政策以及國際間能源技術合作中具有相當之影響力，而 IEAGHG 之成員國舉行每兩年舉辦控制技術研討會，地點相繼在北美，歐洲及亞洲間輪流舉辦，過去五年舉辦之情形如表 1。

表 1 近五屆 GHGT 辦理之情形

會議	舉辦國家	年
GHGT17	加拿大卡加利	2024
GHGT16	法國里昂	2022
GHGT15	阿聯酋阿布達比	2021
GHGT14	澳洲墨爾本	2018
GHGT13	洛桑，瑞士	2016

GHGT 會議為 CO<sub>2</sub> 捕獲和儲存的主要國際交流會議，每屆參與國家高達 40 個以上，並有上百個代表機構及 1,500 名代表參加，其中主要目的在於淨零排放之目標下，使相關減碳技術得以普及與推廣，在能源轉型過渡期間，不可避免之化石燃料使用中，仍可減緩大氣溫室氣體之濃度提升，從過去 20 幾年之會議發展，會議討論之議題亦趨於多樣且規模不斷擴增，表示世界技術發展之快速及市場需求之增長。

## (二) GHG-17 簡介

本次參與 GHGT 會議為第 17 屆的國際溫室氣體控制技術研討會 (GHGT-17)，於 2024 年 10 月 20 日至 24 日在加拿大艾伯塔省卡加利 TELUS 會議中心舉辦(如圖 1、2、3)，主辦單位為國際能源署(International Energy Agency IEA)、艾伯塔省減排協會 (Emission Reduction Alberta,ERA)。



圖 1、TELUS 會議中心附近之卡加利塔

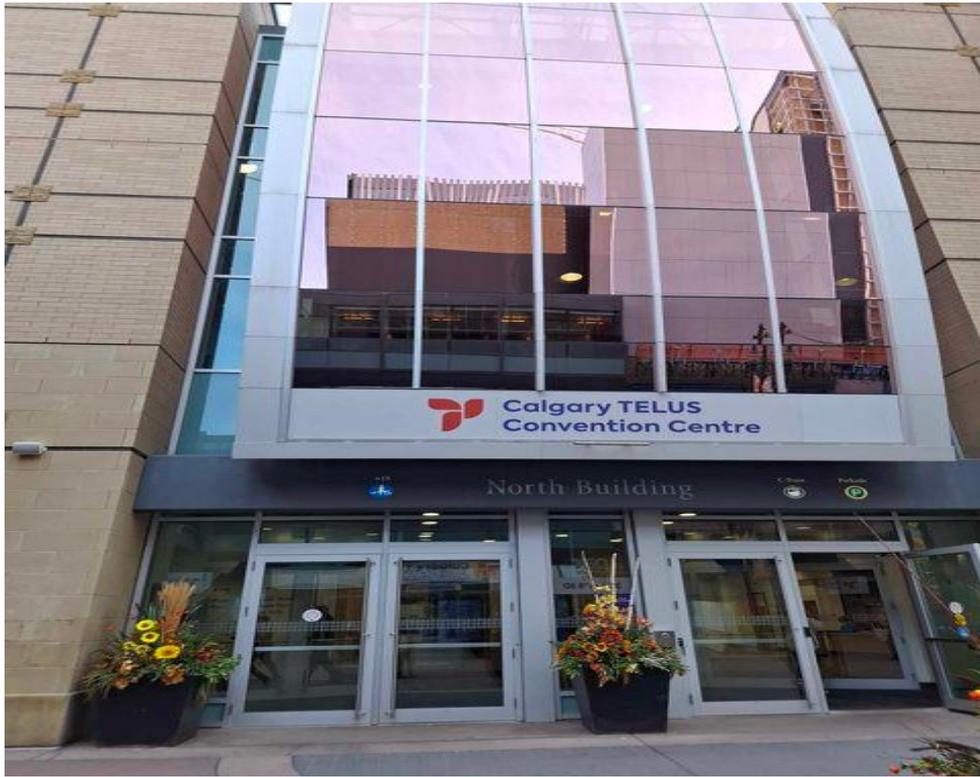


圖 2、TELUS 會議中心北棟



圖 3、TELUS 會議中心南棟

本次會議主題演講與技術全體演講嘉賓包含艾伯塔省環境與保護區部長 Rebecca Schulz、全球 CCS 研究所首席執行官 Jarad Daniels、國際能源總署副執行長 Mary Burce Warlick 及殼牌加拿大公司總裁 Susannah Pierce 等 11 位(如圖 4)



圖 4、會議重點嘉賓<sup>1</sup>

會議整體議程除開閉幕典禮外，亦安排令人關注之技術與業務會議，共分為工業領域、碳捕捉與儲存、技術評估、利用、示範、其他儲存、氣候變遷政策、負排放、法律與監管、交通與基礎、公共認知及商業等 12 項關鍵主題(如圖 5)，主辦方每天同時段安排各項主題，依據與會者之需求參與當中之討論。

<sup>1</sup> <https://ghgt.info/registration/>

A Sessions – Macleod Halls B	B Sessions -Glen Rooms 203 & 204	C Sessions – Glen Rooms 206	D Sessions – Macleod Halls A	E Sessions – Macleod Halls D	F Sessions -Glen rooms 201 & 202	G Sessions – Macleod Halls C
Session 1A – Absorption Next Generation Technologies I	Session 1B – Capacity Building and Social Science	Session 1C – Demonstration of Novel Capture technologies	Session 1D – Carbon Dioxide Removal: Potentials and conditions	Session 1E- CCS- Hydrogen	Session 1F – Near Surface Monitoring	Session 1G – High T Solid Looping
Session 2A – Absorption Next Generation Technologies II	Session 2B – Public Perceptions and Communications	Session 2C – Perspectives from CCs demonstration projects	Session 2D – Exploring feasibility of CDR technologies	Session 2E- CCS in the Steel Industry	Session 2F – Microseismic Monitoring	Session 2G – CO2 Capture in Ships
Session 3A – Absorption: Environment and Operation I	Session 3B – Case Studies I	Panel discussion1-Advancing carbon management in developing countries:World Bank	Session 3D – CDR technology	Session 3E- CCS in the Cement Industry	Session 3F Seismic Monitoring over Life of Project	Session 3G- Membranes & Contactors
Session 4A – Post Combustion Capture Process Modelling I	Session 4B – Injectivity	Panel Discussion 2-Carbon Management Challenge, CEM CSSUS	Session 4D- DAC- Sorbents	Session 4E – CCS in Industry	Session 4F – Optimizing Sparse Seismic Monitoring	Session 4G – MOFs
Session 5A – Post Combustion Capture Process Modelling II	Session 5B – Case Studies II	Panel Discussion 3 -Competition in mitigation and the changing landscape for CCS applications / What can we say about the future for CCS applications?	Session 5D- DAC technology	Session 5E- CDR System Assessment	Session 5F – Novel Monitoring Methods – Tidal and Strain	Session 5G – Sorbent Materials
Session 6A – Absorption: Environment and Operation II	Session 6B – Site Characterisation	Panel Discussion 4 – Is Net Zero Dead: CDR and a Negative transition scenario	Session 6D – Biomass with CCS	Session 6E- "Hard-to-Abate" Assessment	Session 6F – Field-scale Reservoir Modelling I	Session 6G – Enhanced Geothermal and Energy Storage
Session 7A – Amine Pilot Plant Studies I	Session 7B – Storage Capacities	Panel Discussion 5-CO2 Purity Requirements	Session 7D Policy: International	Session 7E – Optimizing Post-Combustion Capture	Session 7F – Field-scale Reservoir Modelling II	Session 7G- Electrochemical CO2 Conversion
Session 8A – Amine Pilot Plant Studies II	Session 8B – Reservoir Engineering	Panel Discussion 6- Trends in research in carbon capture, removals, transport, usage, and storage	Session 8D Policy: National	Session 8E – Comparing Capture Technologies	Session 8F -Geochemical Modelling	Session 8G – CO2 Specifications
Session 9A – Amine Pilot Plant Studies III	Session 9B – Trapping Mechanisms	Session 9C – CDR: Ocean & Rocks	Session 9D – Regulatory	Session 9E – Modeling CCS Networks	Session 9F – Wellbore, Geomechanics, Leakage and Pore-scale Modelling	Session 9G – Shipping as part of the Transport Chain
Session 10A – Biological CO2 Conversions	Session 10B – Other Storage	Session 10C – Perspectives from Integrated and full chain CCS Projects	Session 10D – Basalts and other low permeability reservoirs	Session 10E – Life Cycle Assessment	Session 10F – Wellbore Integrity	Session 10G – Pipelines
Session 11A – Thermochemical CO2 Conversion	Session 11B – CO2-EOR	Session 11C- Lessons learned from Demonstration and FEED Projects	Session 11D- Mineralisation as a Storage Option	Session 11E – Environment, Health and Economy	Session 11F – Risk Management for CO2 Storage	Session 11G – Transport Infrastructure and Source-sink Matching

圖 5、12 項關鍵主題<sup>2</sup>

## 二、開幕專題演講

GHGT17 之開幕由卡加利灰鷹度假村賓客服務經理 Colleen Waskewitch Runner 為會議進行祝福祈禱(如圖 6)，並感謝參與者對全球氣候變遷議題之重視。

<sup>2</sup> <https://ghgt.info/programme-agenda/>



圖 6、開幕祈禱

接續國際能源總署副執行長 Mary Burce Warlick 強調 2023 年全球氣溫上升已達到 1.5°C 之閾值，對於未來巴黎協定之目標已無退路，惟按世界各國之減碳規劃，其雄心仍不足。化石燃料需求預計將在本十年末達到頂峰，而為達成淨零排放之目標，最為關鍵之碳捕捉與碳移除技術預計於 2030 年倍加速應用(如圖 7)。

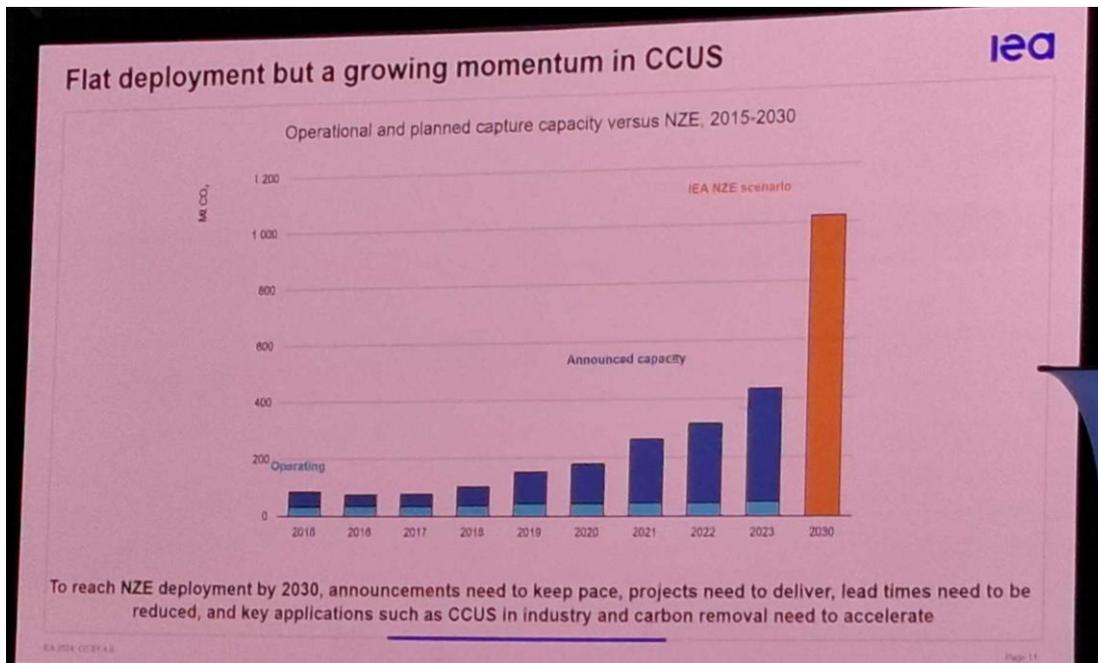


圖 7、IEA 預估 2030 年碳捕捉技術發展

開幕來賓牛津大學地球系統科學 Myles Allen 教授指出，若以碳預算之角度評估，目前世界所排放之 CO<sub>2</sub> 將超出地球所承受之能力，而因人類無法立即淘汰化石燃料來實現氣候目

標，故 CCUS 是所知永久消除 CO<sub>2</sub> 唯一方法，目前只有 0.1% 之 CO<sub>2</sub> 儲存於地質圈中，此比例需要大幅增長，到 2100 年達到 30% 或 1 兆噸 CO<sub>2</sub> (如圖 8)。

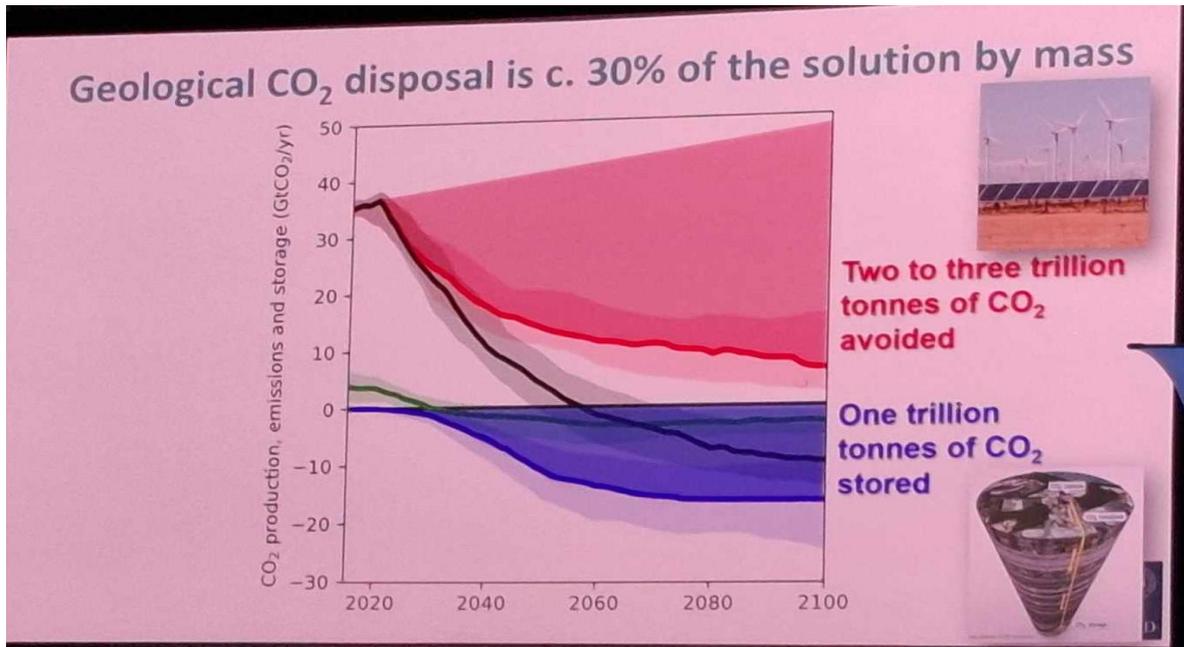


圖 8、地質碳儲存應達之目標

另 Myles 教授亦針對碳定價制度提出見解，認為排放交易計畫 (ETS) 具有單位成本高或開發時間長的技術之缺點，恐難以有效減少碳排，僅讓碳排變得更加昂貴，然而若制度上採以企業排碳就必須封存一定比例之碳量，所稱「碳回收義務 Carbon Takeback Obligation, CTBO」之政策可能是更好的方法 (詳圖 9)，以兼顧政府目標與企業經營。

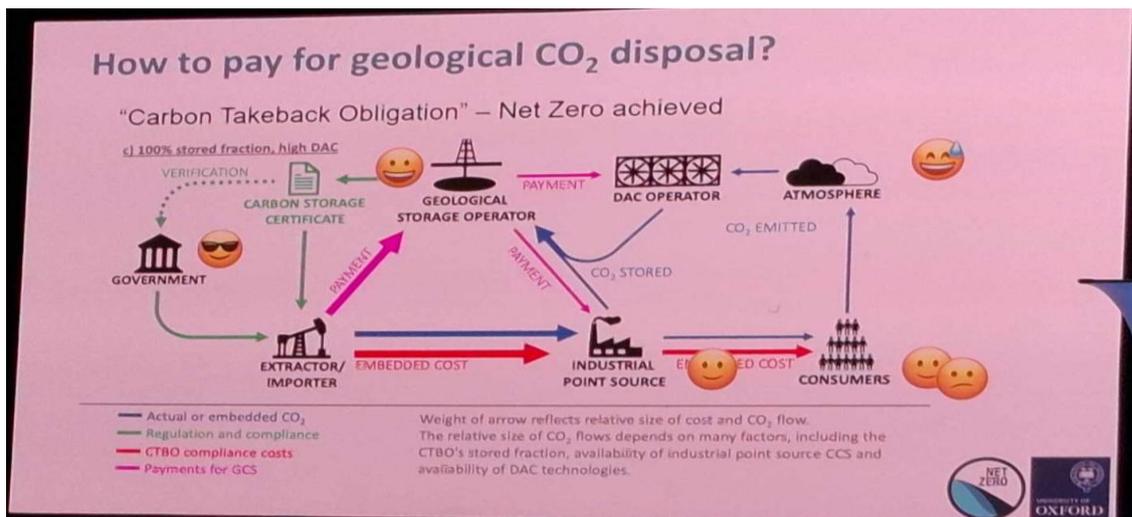


圖 9、CTBO 流程說明

另外，來賓全球 CCS 研究所執行長 Jarad Daniels 強調，CCUS 之部署與發展難以單打獨鬥，須採行跨企業甚至跨國之合作策略，目前有 50 個設施運作、44 個計畫規劃中及

628 個計劃管線正在籌備中，累計捕捉容量達 416Mt，目前 CCS 之立法在多個國家已取得進展，包括歐洲、美國、日本、中東、及中國。

### 三、 成功案例分享會議-爐邊談話

為使參與會眾學習成功案例，由加拿大碳管理公司總裁 Neil Wildgust 主持，並邀請西北資本首席熱力學學家 Ian MacGregor、Enhance Energy 公司事務副總裁 Candice Paton、殼牌加拿大公司地下儲存團隊負責人 Carrie Rowe，共同分享開發碳捕獲和封存設施及建造艾伯塔省碳幹線之經驗(如圖 10)。

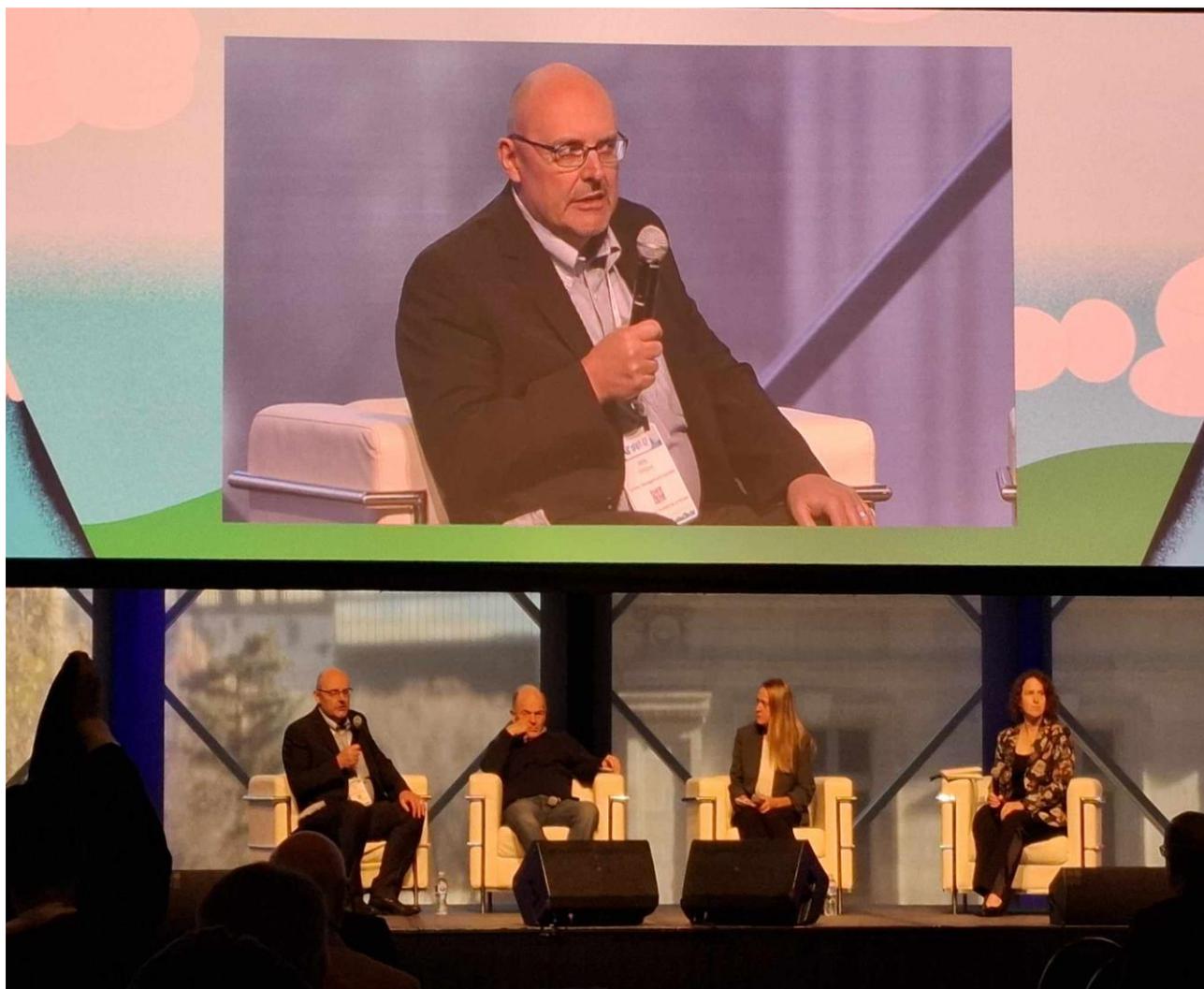


圖 10、爐邊會議

各方交談中表示艾伯塔省是 CCUS 領域的領導者之一，其中艾伯塔省碳幹線(Alberta Carbon Trunk Line ,ACTL)為世界上最大 CO<sub>2</sub> 輸送管道(如圖 11)，由 Wolf Midstream 營運，長 240 公里於 2020 年 7 月竣工，該管線從艾伯塔省工業中心地帶之排放源，將 CO<sub>2</sub> 運輸

到阿爾伯塔省中部和南部，儲存於 Enhance Energy (ACTL 運用和封存之所有者和營運商)擁有之儲存庫，用於提高石油採收率 (EOR)，每年可運輸多達 1460 萬噸 CO<sub>2</sub> (相當於 260 萬輛汽車)，不僅可以消除大氣中的溫室氣體並減少加拿大的碳足跡，還可以利用捕獲的 CO<sub>2</sub> 重振輕質油工業，創造艾伯塔省數千個新就業機會。

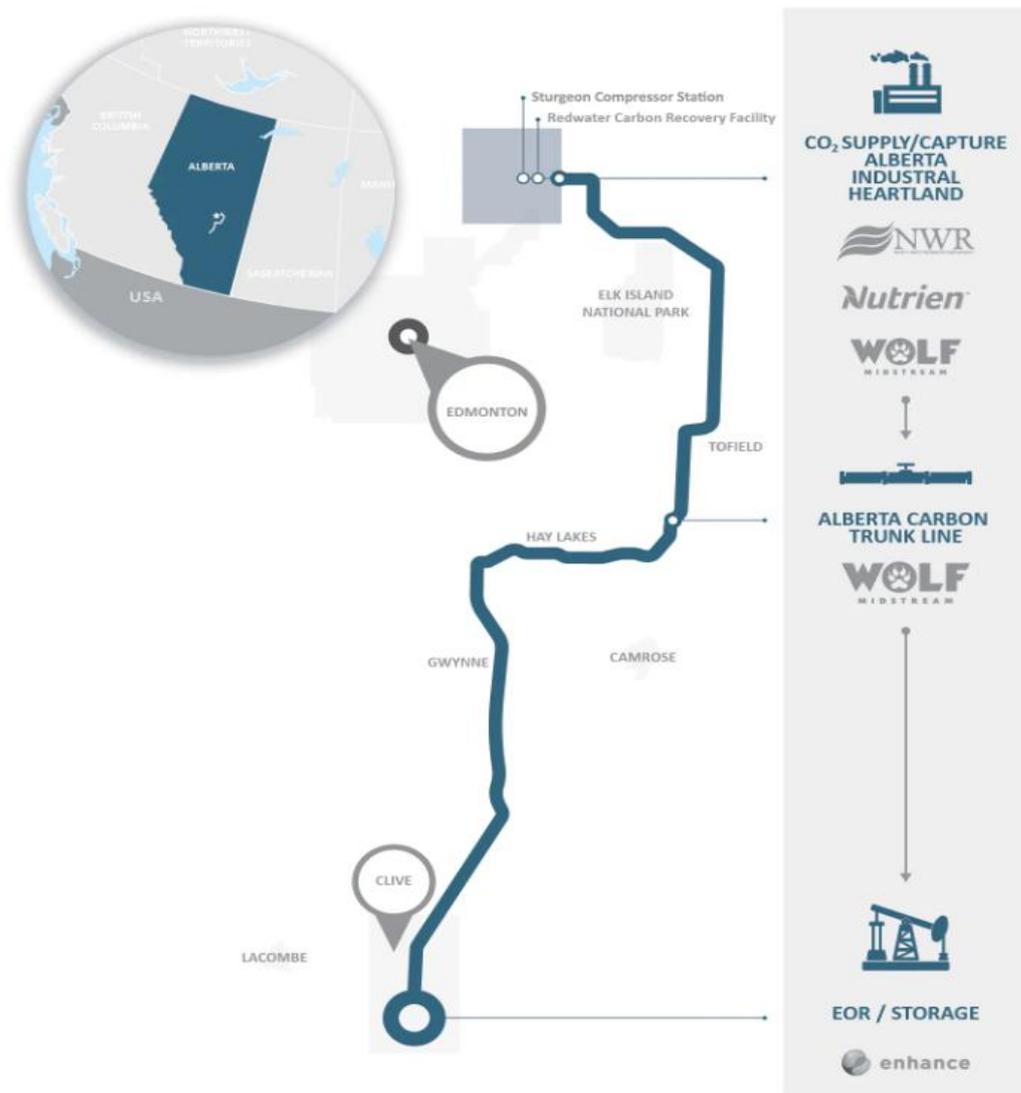


圖 11、Alberta Carbon Trunk Line 分布圖<sup>3</sup>

#### 四、 技術報告

CCUS 技術主要是將化石燃料轉化為能源的過程中，於排放源將 CO<sub>2</sub> 捕捉並將其濃縮(純化)後，輸送至合適儲存地點進行封存或進行再利用，以直接減少排放至大氣中的 CO<sub>2</sub> 排放量，其中較為常見之過程分為「吸收」、「吸收液再生」、「運送」及「儲存」或「利用」，被

<sup>3</sup> <https://edmontonglobal.ca/news/new-carbon-solution-in-alberta-delivers-use-for-industrial-emissions/>

IEA 視為與再生能源、生物能源和氫能一起作為應對氣候變遷的四大支柱之一。

除以排放源作為碳捕捉之對象外，直接空氣捕捉（Direct Air Capture, DAC）為碳移除中較為被關注之技術，利用化學吸附或吸收技術，捕捉並分離出大氣中 CO<sub>2</sub>，然後將其永久封存或重新利用。

因本次會議同一時段分在 8 個會議室進行不同議題的報告及討論，無法逐一前往交流；考量本公司已於台中發電廠建置減碳技術園區，未來趨勢可能著重於「DAC 應用」、「BECCS 之應用」、「洩漏監測」及「其他技術與政策發展」，故本次就前述主題進行摘錄。

#### (一) DAC 應用

DAC 作為一項新興技術，主要挑戰來自於環境空氣中二氧化碳濃度極低（約 410 ppm）。因此，過去 DAC 液體吸附劑主要是氫氧化鈉或氫氧化鈣水溶液，能夠快速、選擇性地結合 CO<sub>2</sub> 的強鹼性溶液，以下將針對相關發展進行重點摘述。

##### 1. 利用電化學突破碳捕捉障礙

單靠溫室氣體減量已難以達到限制溫升 1.5<sup>0</sup>C 之目標，必須大量部署碳移除 (Carbon dioxide removal, CDR) 設備，鑑於單一的 CDR 策略難以有效，故多樣化的 CDR 策略組合至關重要，在美國洛杉磯之 RMI (Rocky Mountain Institute) 研究所發布之應用創新路線圖中，訂定 32 種 CDR 方法，而以電化學直接空氣捕捉經評估是一種有前途的途徑(如圖 12)，主要分為「電解」、「雙極膜電滲析」、「過渡金屬氧化還原」和「氧化還原活性載體」等 4 個過程，適用於 DAC、間接水捕獲(IWC) 或混合去除 CO<sub>2</sub> 等情形。其特點是高效率、完全電氣化的潛力和成本競爭力，其三種主要應用方式如下：

(1) 電化學 CO<sub>2</sub> 捕獲和釋放：即 CO<sub>2</sub> 捕獲和釋放均發生在電化學電池內部。

(2) 電化學 CO<sub>2</sub> 釋放：電化學僅用於 CO<sub>2</sub> 釋放。

(3) 輸入的電化學預處理，用於產生酸和鹼等反應物：即去除 CO<sub>2</sub> 需要額外處理。

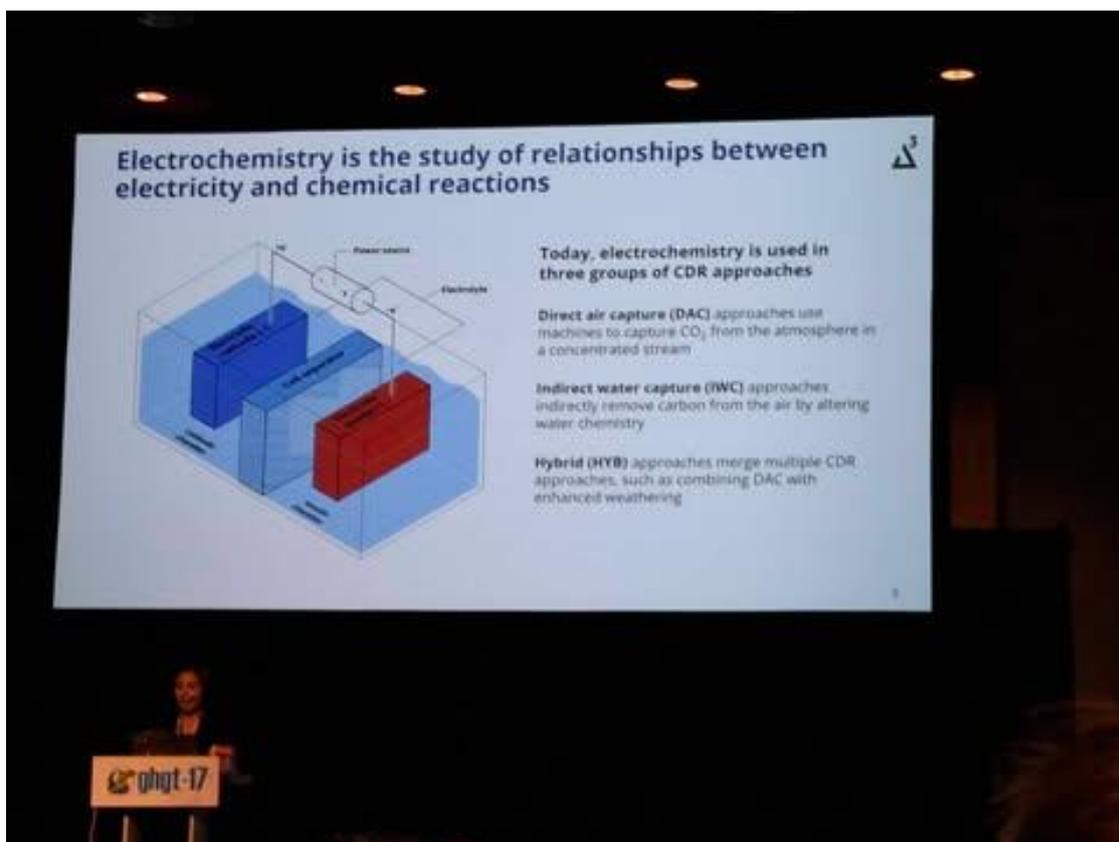


圖 12、電化學圖示

電化學 CDR 之應用可帶來持久性、可驗證性和土地需求之組合多樣化、減少能源需求及其他工業帶來突破影響(例如綠氫產品及廢水處理)。

## 2. 胺基液體吸附劑於 DAC 之性能分析

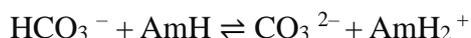
胺基液體吸附劑可被視為水性鹼性氫氧化物之替代品，因為該吸附劑可保持相同捕捉效率，而反應溫度通常低於 100°C，因此需要較少的再生能量，惟胺基液體迄今尚未用於商業 DAC，主因為吸附劑的高揮發性，須透過實驗和技術經濟分析對使用水性胺吸附劑進行空中二氧化碳捕獲進行評估。

義大利有機金屬化合物化學研究所 (ICCOM) 研究不同類型的胺基，包括伯胺、仲胺和叔胺、烷基胺、烷醇胺、位阻胺和二胺，各類胺基可以單獨或以混合物的形式進行評估，以便結合不同物種的最佳性能，瞭解液體吸附劑捕捉大氣二氧化碳之化學特性，為 DAC 設計更有效率、更永續的吸附劑，主要化學反應式如下。

- 氨基甲酸酯（僅限伯胺和仲胺，不適用於叔胺）



- 碳酸氫根和碳酸根離子（僅在水中，不在有機稀釋劑中）



經研究結果如下

- (1) 含水無阻礙伯胺(Aqueous unhindered primary amines)為 DAC 最有效的 CO<sub>2</sub> 吸附劑，與鹼性氢氧化物的性能相符。
- (2) 氨基甲酸酯(amine carbamates)的快速形成推動有效之 CO<sub>2</sub> 捕獲。
- (3) 胺水溶液的性能優於相應的有機稀釋劑（如 EG/PrOH 和 DEGMME）溶液。

### 3. DAC(Direct air capture)之優化

固體吸附劑 DAC 具有易於擴展和在低再生溫度下捕獲高純度 CO<sub>2</sub> 的能力等優點，然而其成本目前高達 600-1,000 歐元/噸 CO<sub>2</sub>，仍然是大規模部署的重大障礙。芬蘭技術研究中心以評估各種製程參數對基於吸附劑影響 DAC 系統性能，參數包括生產力、能源消耗、系統規模和二氧化碳捕集成本。主要目的是確定最有影響力之參數，並確定可提高性能的配置，特別關注最大限度地降低 CO<sub>2</sub> 捕捉成本。

生產率、工作能力及循環時間相互關聯之分析結果如下。

- (1) 若透過更高的溫度波動、更薄的吸附劑填料以及更快的進料和吹掃流速可以實現最佳生產率。
- (2) 透過仔細控制解吸壓力和蒸汽吹掃速率，將單位能耗降至最低，突顯了電力和熱量需求之間的權衡。
- (3) 更高的生產率和高效的空間利用推動了系統尺寸和成本的降低，在本研究之最佳條件組合下，成本低至 350-400 歐元/tCO<sub>2</sub>(詳圖 13)。然而，次優參數組合可能會使成本超過 1,000 歐元/tCO<sub>2</sub>，這凸顯了仔細的系統設計和操作調整的必要性。
- (4) 對最低成本情境之分析，能源和吸附劑相關的營運支出在總成本中占主導地位。

綜上所述，吸附劑材料、熱管理和資本支出減少的進一步改進對於增強 DAC 系統的經濟可行性至關重要。這項研究為優化 DAC 系統提供了通用的建模框架和有用的見解，為經濟上可行的大規模二氧化碳去除鋪平了道路。然而，若要將成本降低到約 200 € / tCO<sub>2</sub> 以下，資本支出及相關費用的減少融資成本也是必要的。

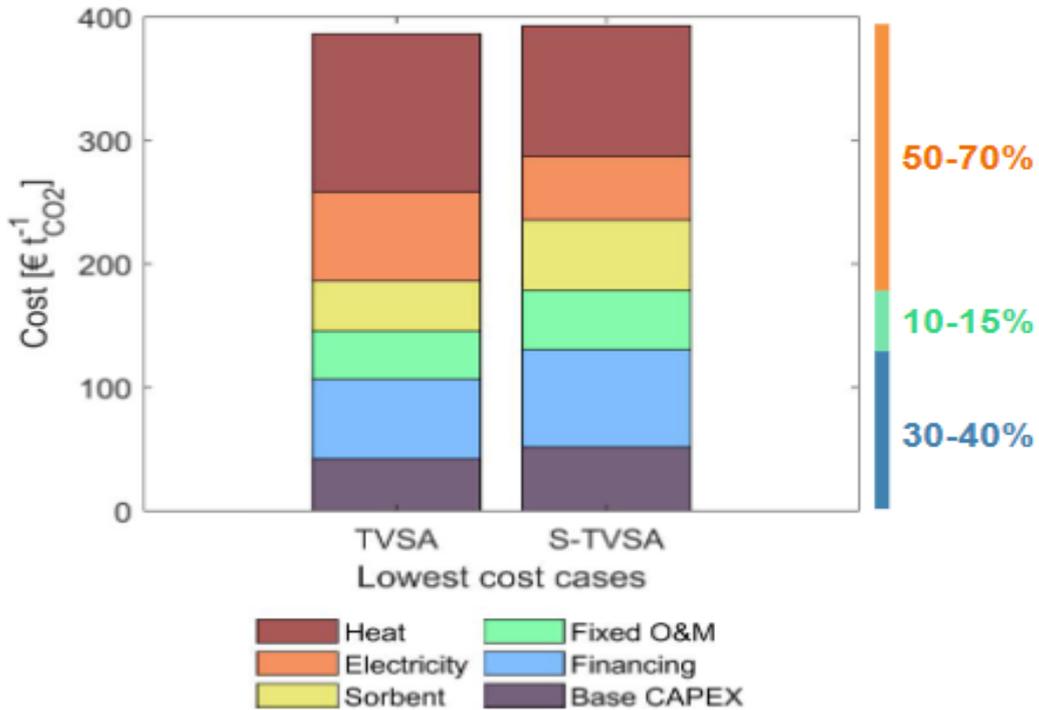


圖 13、成本分析<sup>4</sup>

## (二) BECCS 之應用

Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) 是結合生物能源、碳捕捉與封存 (CCS) 技術之減碳策略，亦屬負排碳技術一種(如圖 14)，藉由生物之生長捕捉大氣之 CO<sub>2</sub>，後續被當作生質能利用時，通過燃燒、熱裂解或其他轉化方法，將其中之生物能以電能、熱能、生物燃料釋放出來被人們所使用，故對於大氣中不會額外增加碳排，惟具有高耗時及高管理成本之缺點，亦需要廣大面積土地及充沛之水量支持運作，而當生質能需求大增時，將可能導致樹木被濫伐，同時亦可能破壞動植物的棲息地，故此有部分專業人士認為若貿然推廣此技術，可能會帶來重大的經濟、技術和社會問題，威脅全球糧食安全和人權，並產生不可逆轉之損害。

<sup>4</sup>[https://my.ltb.io/index.html?utm\\_campaign=website&utm\\_medium=email&utm\\_source=sendgrid.com#/showcase/g hgt](https://my.ltb.io/index.html?utm_campaign=website&utm_medium=email&utm_source=sendgrid.com#/showcase/g hgt)

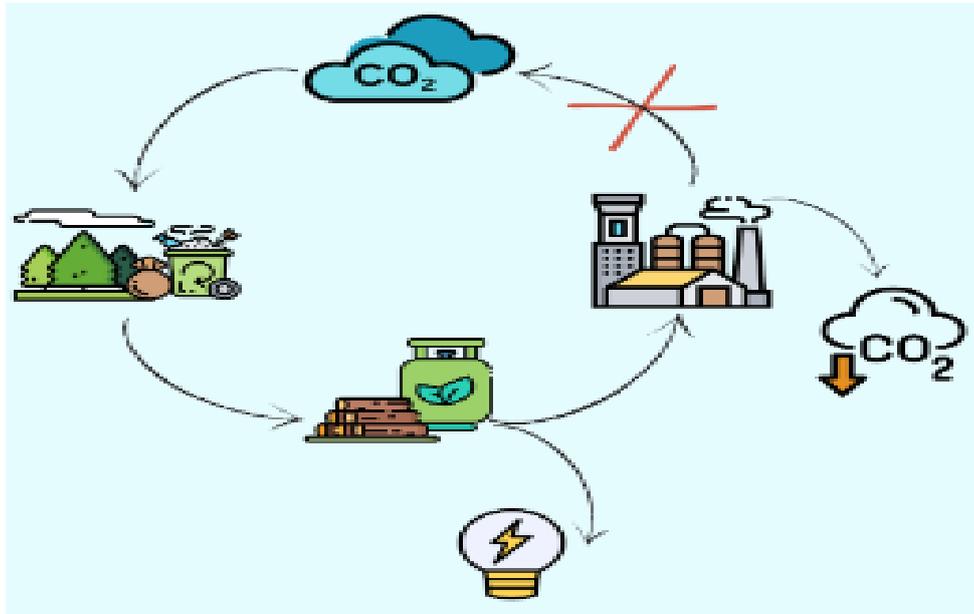


圖 14、BECCS 概念圖<sup>5</sup>

1. BECCS 於水泥與石灰業之應用

依據全球水泥與混凝土協會 2050 年淨零路線圖中，石灰和水泥脫碳之貢獻約佔全球排放量 9%(如圖 15)。

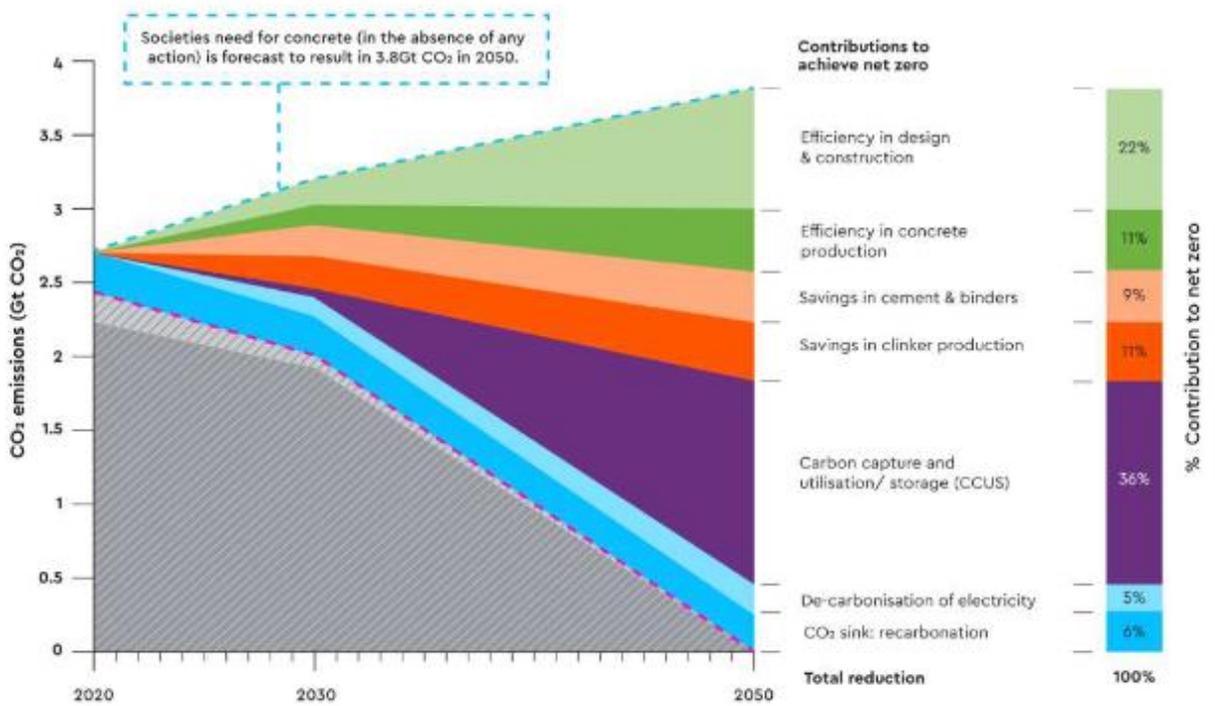


圖 15、淨零排放之貢獻分布<sup>6</sup>

<sup>5</sup>[https://my.ltb.io/index.html?utm\\_campaign=website&utm\\_medium=email&utm\\_source=sendgrid.com#/showcase/ghg](https://my.ltb.io/index.html?utm_campaign=website&utm_medium=email&utm_source=sendgrid.com#/showcase/ghg)

英國雪菲爾大學(University of Sheffield)指出，水泥與石灰(CaO)之 80-90%排放量來自石灰石(limestone)熱分解，若在加熱階段納入生質能，並於排碳過程以 CCUS 技術捕捉 CO<sub>2</sub>，則可實現負碳情形(如圖 16)，然而生質能亦可以氫能、電氣化或廢棄物衍生燃料取代，可產生同樣之效果。而此製程具備使石灰和水泥的生產脫碳之潛力，並可利用後端之廢棄物(CO<sub>2</sub>和灰燼)促進循環經濟。

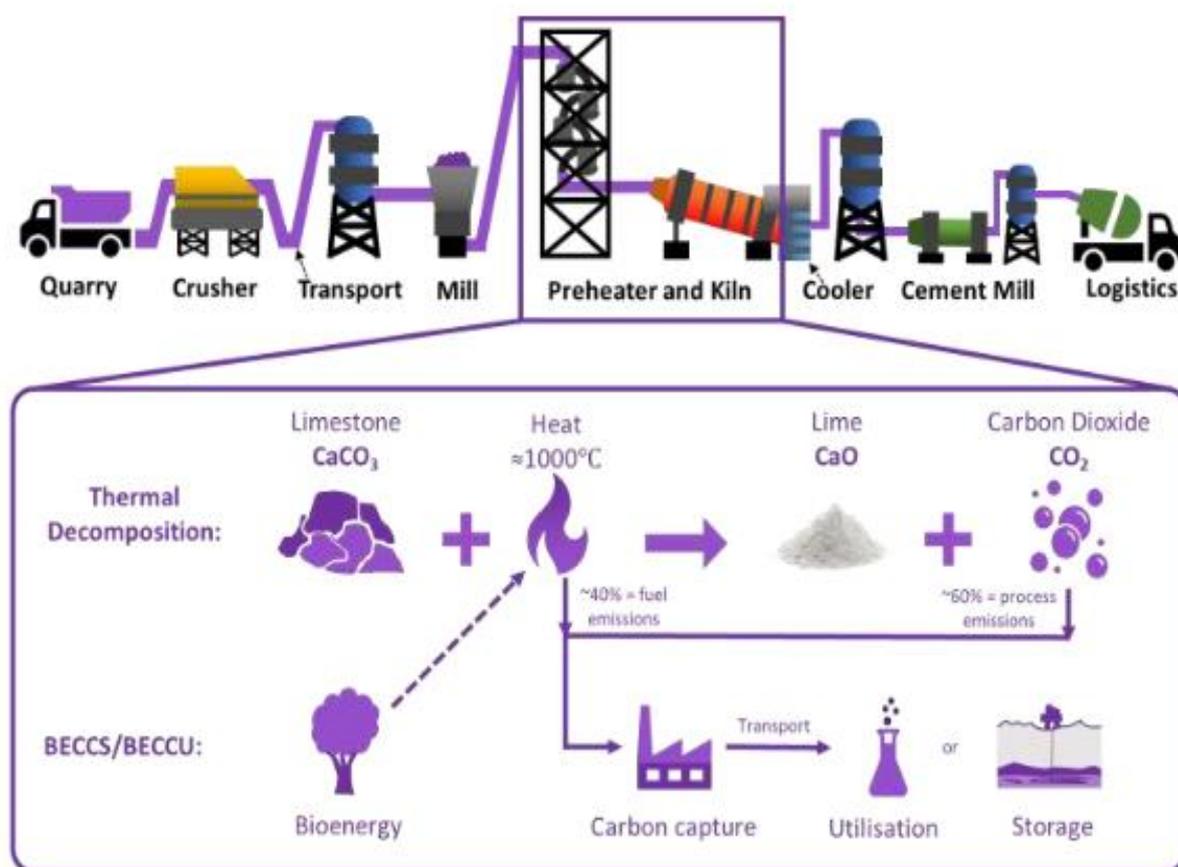


圖 16、石灰石負碳流程<sup>7</sup>

水泥與石灰製成採用生質能技術可望於 2050 年實踐負排碳，未來工作關注之重點如下：

- (1)商業規模 BECCS 水泥工廠示範建置。
- (2)製程中生物二氧化碳和灰分產物之監管。

<sup>6</sup>[https://my.ltb.io/index.html?utm\\_campaign=website&utm\\_medium=email&utm\\_source=sendgrid.com#/showcase/g hgt](https://my.ltb.io/index.html?utm_campaign=website&utm_medium=email&utm_source=sendgrid.com#/showcase/g hgt)

<sup>7</sup>[https://my.ltb.io/index.html?utm\\_campaign=website&utm\\_medium=email&utm\\_source=sendgrid.com#/showcase/g hgt](https://my.ltb.io/index.html?utm_campaign=website&utm_medium=email&utm_source=sendgrid.com#/showcase/g hgt)

(2)經濟評估與降低成本。

## 2. BECCS 與電力及低碳燃料之產業連結

生質能源具備同時生產電力與有效產品之潛力 (Biomass to useful products, 簡稱 BECCS-to-X) 如圖 17, 例如生產氫氣 (BECCS-to-H<sub>2</sub>) 和可持續航空燃料 (BECCS-to-SAF), 而與費托製程(Fischer-Tropsch process, FT)燃料 (244-397 英鎊/MWh) 相比, BECCS-to-H<sub>2</sub> 之成本 (184 英鎊/MWh) 較低。

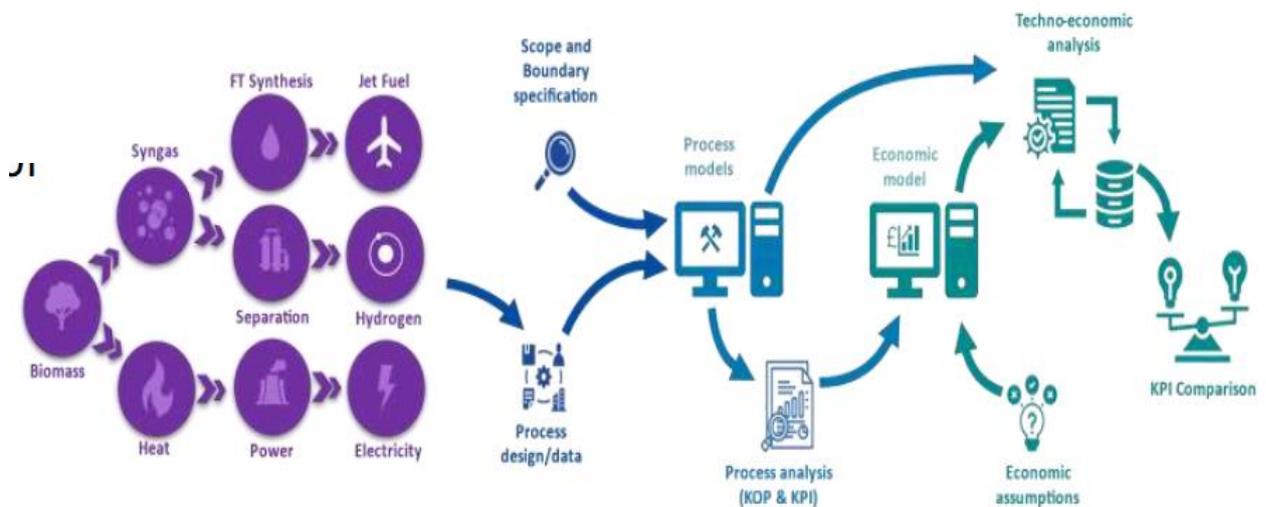


圖 17、BECCS-to-X 的流程說明和研究技術經濟比較的專案概述<sup>8</sup>

謝菲爾德大學以「生物質氣化」、「熱回收蒸汽發生器」、「汽輪機」、「水煤氣轉換」、「合成氣清潔」、「H<sub>2</sub>之變壓吸附」及「費托 (FT) 反應器」(費托製程：將一氧化碳和氫氣混合物 (稱為合成氣) 轉化為液態碳氫化合物) 為元件製作過程評估模型，以分析各項 BECCS-to-X 進行比較，其結論如下：

- (1) BECCS-to-H<sub>2</sub> 於熱基礎(thermal basis)方面，具備良好表現、更高之效率及低能耗之優勢。
- (2) BECCS-to-SAF 於品質基礎(mass basis)方面，具備更好地執行率及較低碳排避免成本(Cost of CO<sub>2</sub> Avoided, CCA)之優勢。
- (3) 未來規劃應朝擴大經濟規模並更加掌握外在因素之影響(如有限的脫碳方案和政府補助)

## 3. 生質能應用於熱電共生之 CCS 設備

<sup>8</sup> <https://my.ltb.io/index.html#/showcase/ghgt>

生質能燃燒熱電共生(Combined Heat and Power, CHP)具多項優勢備受關注，包括提高能源效率和減少碳排放，對於各領域之產業而言相當具有吸引力，而非營利組織國際 CCS 知識中心(INTERNATIONAL CCS KNOWLEDGE CENTRE )持續利用最新的知識和經驗協助客戶降低成本以加速全球碳捕捉技術之佈署，本次針對紙漿和造紙業引進上述技術進行敏感度相關研究分析，其範疇為「燃燒過程氨基進行碳捕捉之效率」、「生質能對煙氣和二氧化碳之影響」及「成本計算」，並獲得以下結論：

- (1) 生質能之品質與類型將嚴重影響熱電共生廠之規模與工程成本。
- (2) 若工廠之二氧化碳排放量越高，則更具規模之熱電共生廠輔助。
- (3) 擴大碳捕獲能力會顯著增加資本成本。
- (4) 透過降低生質能之消耗（如燃燒前進行乾燥）則可顯著節省燃料成本。
- (5) 紙漿和造紙範例研究之敏感度分析如圖 18，以淨現值分析結果而言，最敏感之參數為碳定價，接續則為資本及燃料價格。

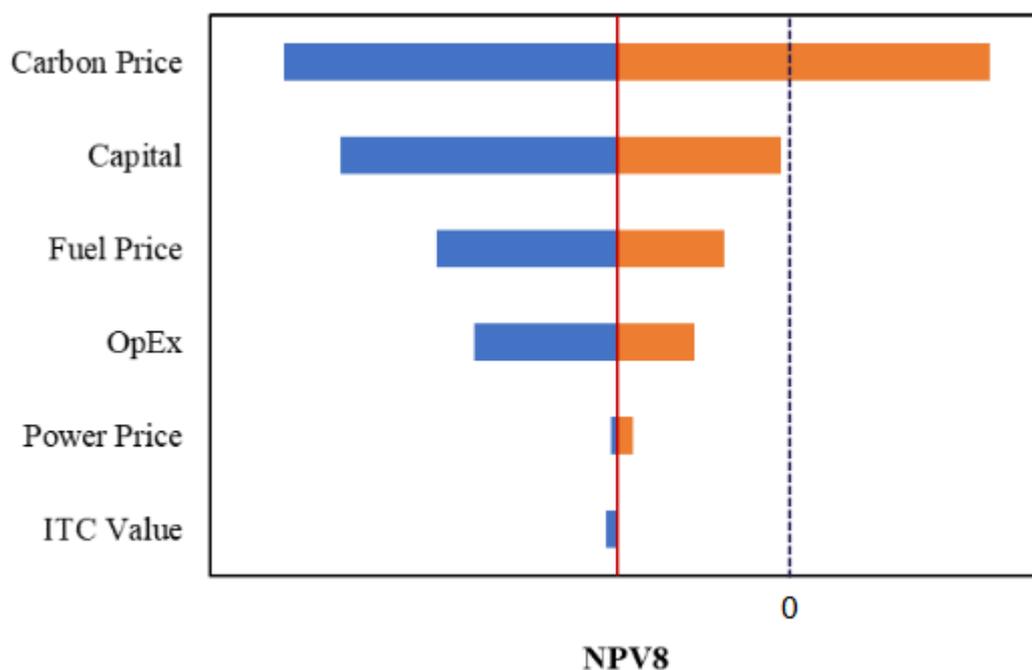


圖 18、淨現值分析圖<sup>9</sup>

### (三) 洩漏監測

#### 1. 以氫氣監測 CCS 之洩漏

因 CCS 將 CO<sub>2</sub> 封存於在地表中，故監測從地下之洩漏為各界關注之議題，然 CO<sub>2</sub> 亦以

<sup>9</sup> <https://my.ltb.io/index.html#/showcase/ghgt>

自然方式存於大氣、土壤中，其濃度隨天氣和其他條件而波動，因此 CO<sub>2</sub> 的背景濃度不斷變化難以區分從地下洩漏或屬自然變化。

日本九州大學觀察煉油廠和其他氫氣生產設施產生之 CO<sub>2</sub> 須與氫氣分離，因此分離後之 CO<sub>2</sub> 含有微量氫氣（小於 1%），因大氣中氫氣含量極低且由於分子大小、擴散係數和水中溶解度等性質的差異，氫氣可以比 CO<sub>2</sub> 更快流過地下孔隙空間洩漏，藉此特徵可透過監測地表之氫氣來預測二氧化碳洩漏的方法。

透過九州大學校園內安裝井(深度分別為 5 m、20 m 和 100 m)，將氣體混合物 (H<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=0.5:49.5:50.0) 注入地下，經監測儀器顯示，氫氣往往比 CO<sub>2</sub> 更早被檢測到(如圖 19)，隨著注入流量的增加，兩種氣體之間被偵測之時間差趨於減少。

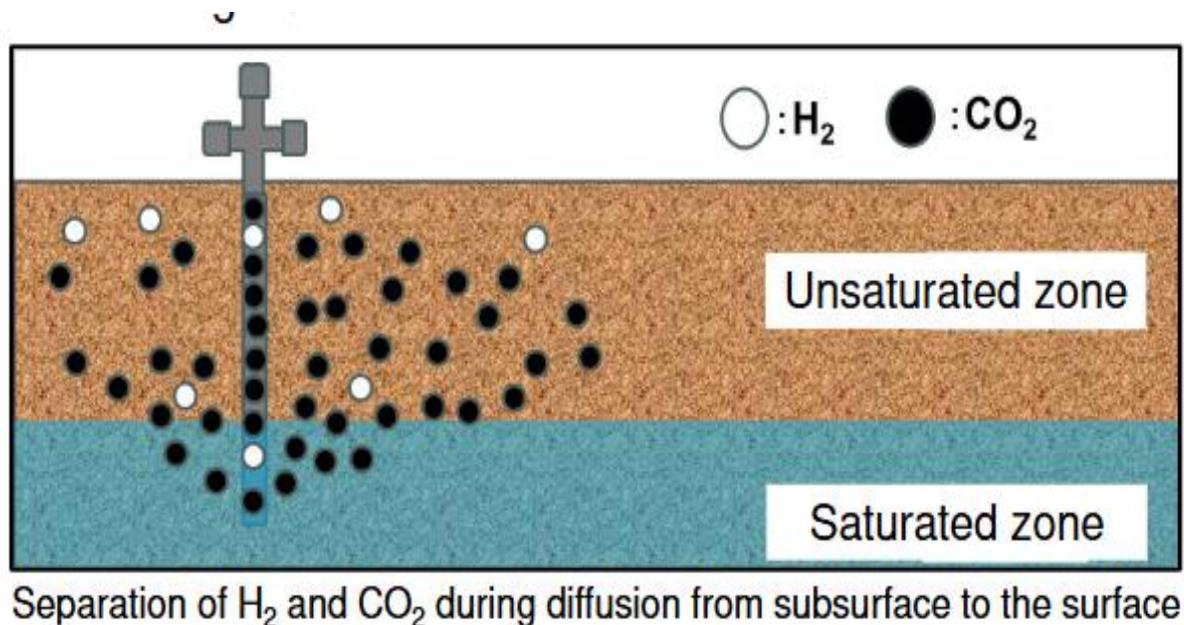


圖 19、氫氣與 CO<sub>2</sub> 擴散示意圖<sup>10</sup>

此實驗得知若地質越緊密，氫氣與 CO<sub>2</sub> 被檢測之時間差越大，若同時被檢測到亦可確定為洩漏。

## 2. 利用機器人學習技術監測海底含水層之 CCS 洩漏

海底含水層為 CO<sub>2</sub> 儲存地點之選項，而可能存在著因地震而導致 CO<sub>2</sub> 滲入海洋的潛在風險(如圖 20)，因此監測海水 CO<sub>2</sub> 之濃度變化以確定海洋中是否發生滲漏問題極其重要。

<sup>10</sup> <https://my.ltb.io/index.html#/showcase/ghgt>

機器學習(machine learning, ML)可使電腦自動學習演算法，從資料蒐集中獲得其規律，是預測、分類和識別等數據分析非常有效之工具，而東京大學利用機器學習，透過 CO<sub>2</sub> 濃度之線性指標，輸入相關參數來訓練 ML 模型並對海水資料進行分類，並以量測海底 CO<sub>2</sub> 相關濃度，訓練偵測洩漏（異常）數據。

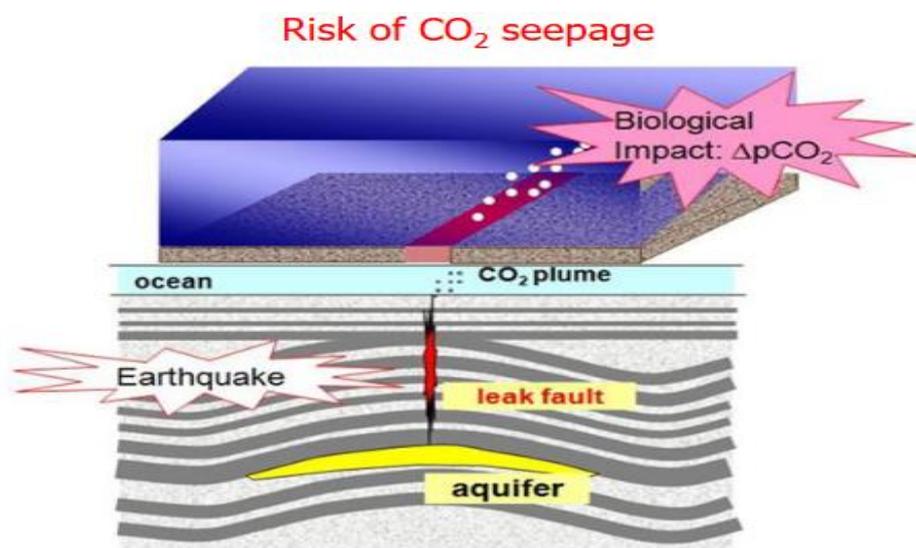


圖 20、CO<sub>2</sub> 滲入海水示意圖<sup>11</sup>

依據東京大學之研究結果，以機器學習預測洩漏之情形仍存在誤報之可能性，異常資料之訓練不足為本次研究最大之問題，後續須進行更多訓練數據以獲得更加穩定之正確資料。

### 3. 以地表溫度監測 CO<sub>2</sub> 洩漏

廢棄井是 CO<sub>2</sub> 從儲存庫洩出的潛在途徑之一。路易斯安那州立大學研究監測地表或近地表溫度作為識別 CO<sub>2</sub> 洩漏井的工具的可行性，利用密封井筒-儲層耦合數值模擬工具進行建模，確定溫度與舊井是否密封時之反應差異，其中井眼僅在地表被水泥塞堵塞，故模擬過程將須考量水泥塞之情況，其相關運作條件如下：

- (1) 以具有密封面水泥塞的井眼做為基線。
- (2) 考慮到密封與洩漏的水泥塞，近表面溫度訊號差異。
- (3) 改變井眼的洩漏能力，以研究洩漏嚴重程度如何影響溫度訊號。

#### 實體模型設定

路易斯安那州立大學以密封井筒及洩漏井筒進行實驗比對，量測 CO<sub>2</sub> 移動過程中井內

<sup>11</sup> <https://my.ltb.io/index.html#/showcase/ghgt>

底部、中部及頂部之壓力變化，綜觀而言，隨著 CO<sub>2</sub> 向上運移，整個井孔的壓力顯著增加，此外，在較淺處壓力力變化最為顯著。

密封井筒中遷移之 CO<sub>2</sub> 和因相流變化之鹽水產生自然對流，經實驗觀測在密閉井筒中部，較冷的鹽水和較熱的二氧化碳流動產生溫度較大之起伏變化，於頂部（密封塞正下方），由於溫暖的 CO<sub>2</sub> 從儲層向上遷移，溫度略有增加 0.5°C；另一方面，在井眼底部，觀察到溫度下降 1.4°C(如圖 21)，這是由於較冷的鹽水從井眼上部區域向下流動。

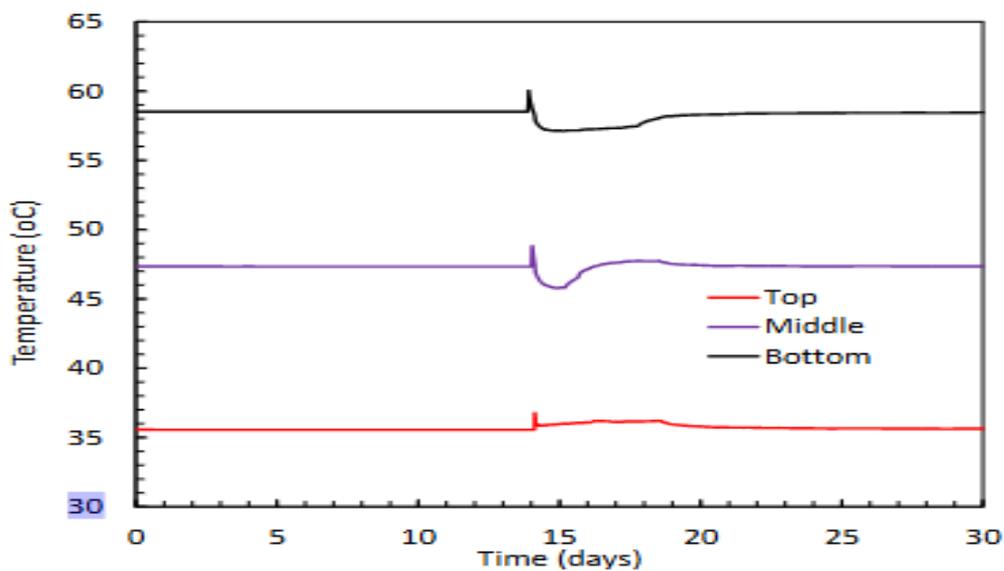


圖 21、密封井筒溫度變化圖<sup>12</sup>

在洩漏井筒中，若洩漏率顯著增加可能導致溫度顯著下降，並最終導致水合物形成，依據實驗數據，在洩漏井之整個過程都觀察到冷卻(如圖 22)，溫度反應程度取決於鹽水和二氧化碳流速、速度、飽和度的演變以及壓力變化。

<sup>12</sup> <https://my.ltb.io/index.html#/showcase/ghgt>

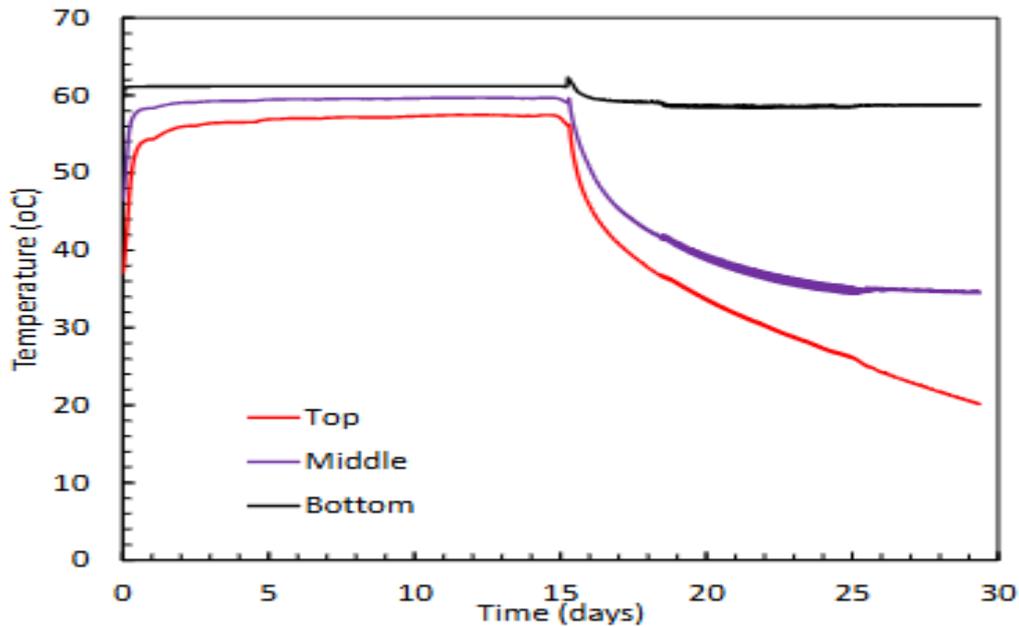


圖 22、洩漏井筒溫度變化圖<sup>13</sup>

#### (四) 其他技術與政策發展

##### 1. 高效率運輸之解決方案

為確保 CCS 之擴大佈署，須在二氧化碳排放源與碳匯之間建立具成本效應之運輸連結，特別是對於距離封存地點較遠之內陸。位於挪威之 SINTEF 能源研究中心採用擷取地理資料(Extract geographical data,QGIS)之方式，並以「專用卡車」、「專用火車」、「專用駁船」及「岸上管線密集」4 個模式進行評估，其中「專用卡車」及「專用火車」兩種模式的成本取決於距離，而「專用駁船」及「岸上管線密集」則與距離、品質有關，位於德國之威廉港(如圖 23)被該研究中心視為具有潛力之示範案例。

<sup>13</sup> <https://my.ltb.io/index.html#/showcase/ghgt>

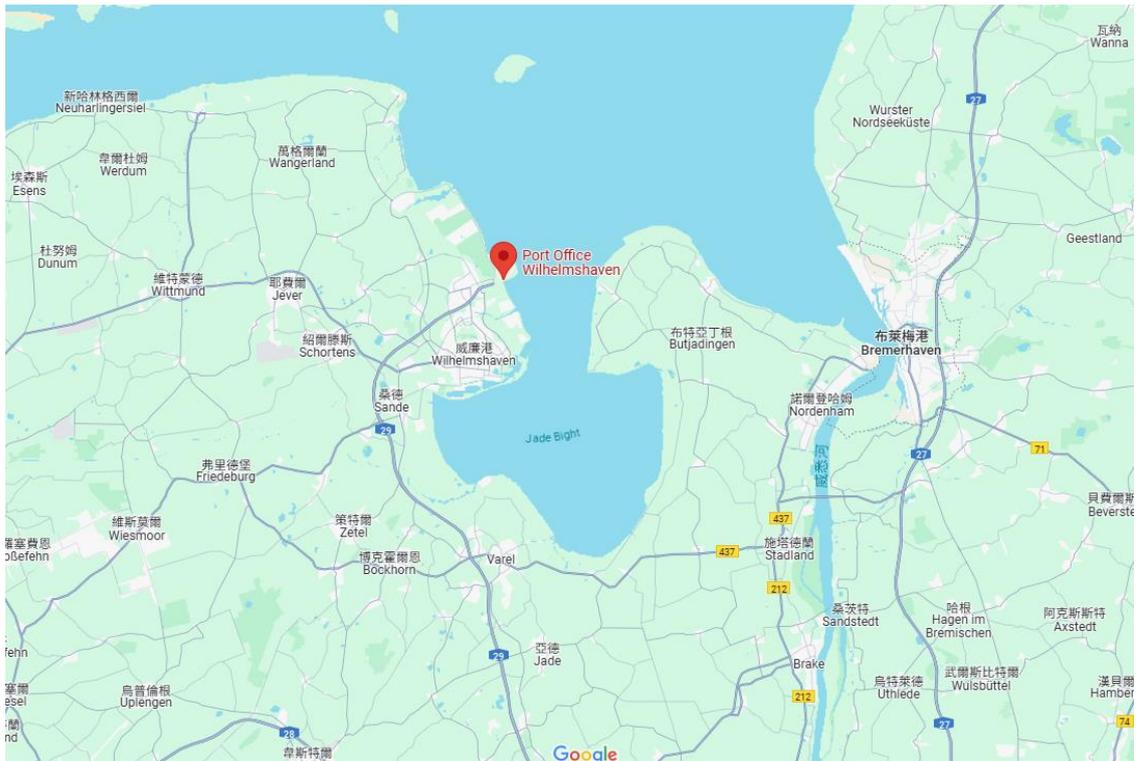


圖 23、威廉港所在位置圖<sup>14</sup>

SINTEF 能源研究中心利用地理資料建構公路、鐵路、水利、管網之分布圖資，再應用成本函數建構成本網絡，並以套圖疊加之方式找出最佳模式如圖 24，其情境主因為每年產能 0.5 M 噸及 1 M 噸、有或無管線等 4 個，分析結果如下：

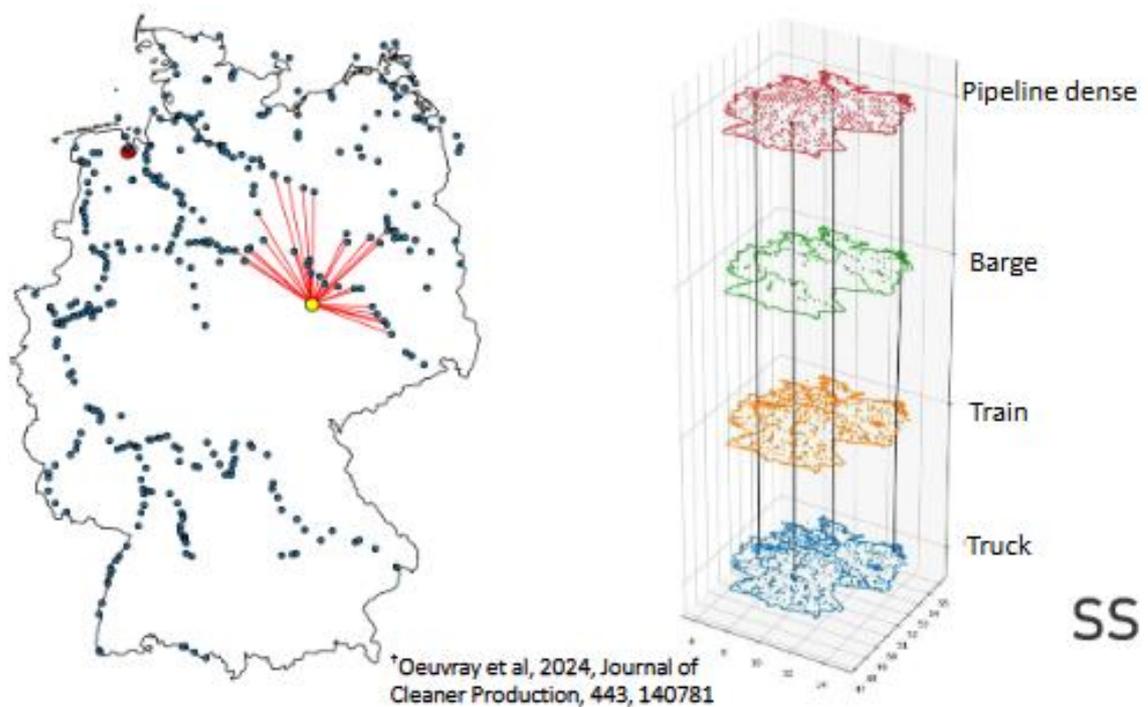


圖 24、套圖最佳化之示意圖<sup>15</sup>

<sup>14</sup> FROM GOOGLE MAP

### (1) 成本方面

- A. 有管線較無管線之成本為低。
- B. 有管道的場景並搭配每年 1 Mt 產能更可降低成本。

### (2) 運輸方面

- A. 有管道情境下，每年產能 0.5M 噸可採用多種運輸方式，惟產能若擴增至每年 1M 噸，較適合僅採用管道方式。
- B. 無管道情境下，所使用之各項模式之組合基本上相同，惟河流周圍存在一些差異之主因在於運力較大，增大對船舶之依賴。

### (3) 德國威廉港之模擬結果

- A. 單水槽運輸最具成本效益的方法。
- B. CO<sub>2</sub> 運輸能力和技術可用性可能影響此研究之預期變化。
- C. 此研究採取之方法具較高彈性，範圍從特定地區到整個國家層級皆可適用。

## 2. CO<sub>2</sub> 運送至鄰近油田之作法

因將 CO<sub>2</sub> 儲存於陸地之地層所付出之成本較低，惟將可能遭受當地居民反對之聲浪，難以受到大眾之支持，故採海上 CO<sub>2</sub> 封存為歐洲國家較為關注方式，因此研究從沿海地區運送 CO<sub>2</sub> 到封存場相關路線、成本及潛力為相關機構研究之探討目標。

為克服運送 CO<sub>2</sub> 到海上封存場之交通、成本之相關問題，SINTEF 能源研究中心建置相關模型，其中使用者可依需求自行輸入沿海位置和相關儲存區域，該模型將評估地理環境並優化運送路線，以及進行 CO<sub>2</sub> 運輸的技術和成本評估。

## 五、 展覽分享

### (一) 枯竭油井再利用

通用能源回收公司(General Energy Recovery INC, GERI) 是一家加拿大能源轉型技術公司，提供增強型重油回收解決方案，以同時回收更多石油並減少溫室氣體排放。在採油之過程中，將高壓蒸氣注入油藏以降低油的黏度，因使用傳統蒸氣將產生大量溫室氣體排放至大氣中，而 GERI 在井下共同注入蒸汽和相關燃燒廢氣(如 CO<sub>2</sub>)，以提高採油效率，並永久儲存大量 CO<sub>2</sub> 在地層中。

---

<sup>15</sup> <https://my.ltb.io/index.html#/showcase/ghgt>

位於艾伯塔省勞埃德明斯特西區附近之油井由於已枯竭，於 2013 年停止採集，而於 2020 年 7 月，GERI 於上述油井注入蒸汽（以加熱和流動重油）與燃燒廢氣（以對油藏重新加壓），蒸氣和燃燒廢氣連續共注入 22 天，該井已重新裝備並投入生產，其廠區模型詳圖 25，灌注流程詳圖 26。



圖 25、GERI 廠區模型圖

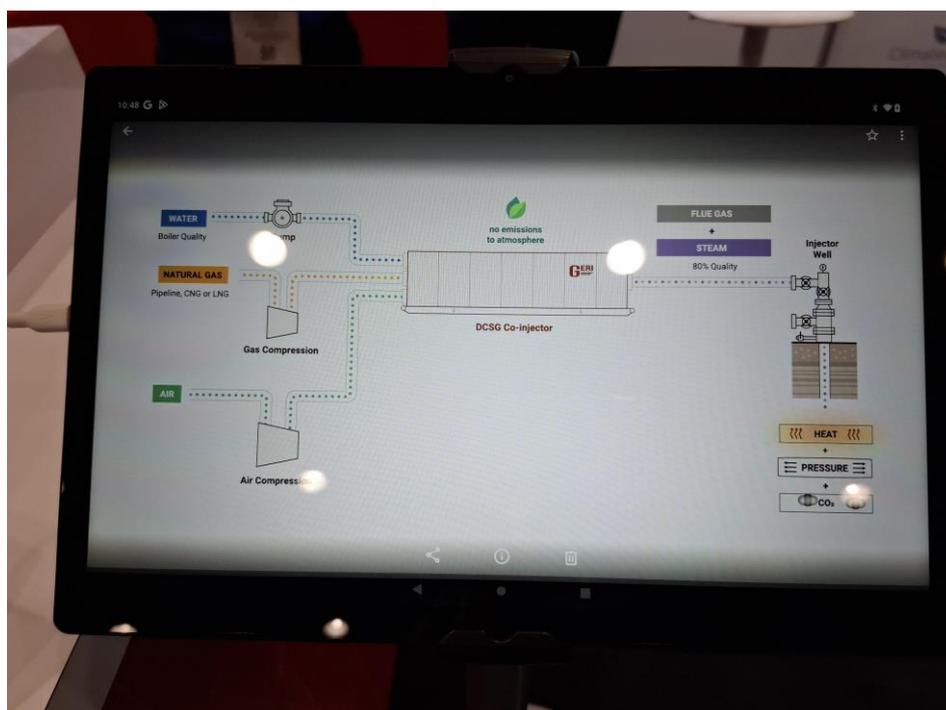


圖 26、灌注流程圖

## (二) 碳捕捉與儲存之多層防護系統

Pathways Alliance 為加拿大著名之油砂公司，其中亦建造碳捕捉儲存系統，發展安全系統大致分為三層(現場模型如圖 27、28)如下

### 1. 第一層：識別和預防風險

風險管理從設計階段開始，一直持續到施工和營運。工程師和其他專家必須在這些計劃中納入多種安全措施。

### 2. 第二層：監控

CO<sub>2</sub> 運輸網路和儲存中心將有多個監測點，沿著地下運輸管道、注入點和向下進入儲存中心，任何異常活動都會立即觸發警報。

### 3. 第三層：回應計劃

若管道監測系統感知到壓力或溫度的變化，將立即觸發反應，隔離欄會封鎖受影響的管道部分並阻止 CO<sub>2</sub> 的流動，同時向地面操作員發出警報。



圖 27、CCS 多層防護系統模型圖(地表)

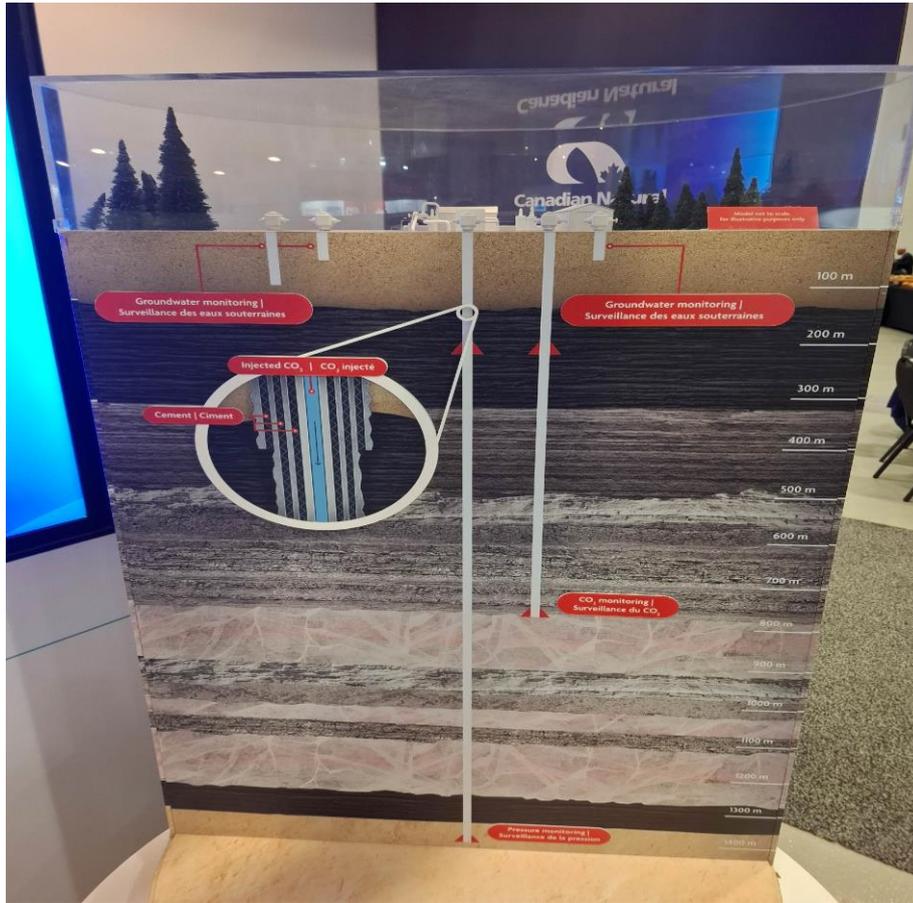


圖 28、CCS 多層防護系統模型圖(地層)

而在展覽攤位中，Pathways Alliance 亦放置 CCS 儲存層與封存層之樣本，供現場來賓觸摸與體驗如圖 29、30。



圖 29、CCS 儲存層岩石



圖 30、CCS 封存層岩石

### (三) 地震監測

地震監測對於 CCS 儲存場址是重要且不可或缺的部分，加拿大 nanometrics 儀器公司致力於整合地震相關解決方案，以深厚的網路設計專業知識和資料處理能力，開發奈米等級之測量儀器，這次於展場中展示最新型號 Trillium 360(如圖 31)，具有輕便可攜帶性、低耗能、低噪音、易於部署直接淺埋之特性，是當地、區域和遠震研究之理想選擇。



圖 31、Trillium 360 監測儀器

## 六、 閉幕演講

GHGT17 於 113 年 10 月 24 日舉行閉幕，IEAGHG 聯合主席 Tim Dixon 對於來賓之參與表達感謝(如圖 32)，並提及本次研討會為迄今為止規模最大的一次，來自 47 個國家及 1547 名與會者參加，希望會眾於未來持續在 ChatGPT 中補充 CCS 資料內容，以讓社會大眾明瞭相關技術之發展，並減緩社會衝擊。Tim Dixon 期望所有人在離開時，都能帶著新的想法甚至受到創新啟發，並且要記住「好行星很難找到」。



圖 32、Tim Dixon 發表感言<sup>16</sup>

下一屆 GHGT18 預定於 2026 年在澳洲珀斯市舉行，現場以澳洲短尾袋鼠之人偶歡迎大家屆時蒞臨(詳圖 33)。



圖 33、GHGT-18 短尾矮袋鼠<sup>17</sup>

<sup>16</sup> <https://ieaghg.org/news/ghgt-17-closing-plenary/>

<sup>17</sup> <https://ieaghg.org/news/ghgt-17-closing-plenary/>

## 肆、心得與建議

經本次赴加拿大卡加利參與第 17 屆溫室氣體控制技術研討會(GHGT17)之過程，經過完整四天不同之主題探討，初步了解國際溫室氣體捕捉與封存技術之發展與應用。目前全球平均氣溫上升已逼近 1.5°C，世界各地因極端氣候所發生之災難已接連頻傳，減碳行動刻不容緩，在淨零轉型之國際共識下但無法立即擺脫化石燃料需求之前提下，CCS 技術已具備其必要性，惟此技術應用跨及各項領域且專業度極高，目前發展之最大阻礙仍是成本問題，以下就本次參與會議提出心得與建議：

- 一、CCS 技術之工作涉及各項領域，依據加拿大艾柏塔省之規畫，係由政府部門主導並投入大量資金，方完成建造世界最大 CO<sub>2</sub> 輸送管道艾伯塔省碳幹線(Alberta Carbon Trunk Line ,ACTL)，故此政府之支持係為國家相關技術發展之關鍵。
- 二、CCS 廣泛應用之最大阻礙，仍舊在於其成本過大，企業發展初期仍需政府之資金補助，以降低營運成本，依據我國「氣候變遷因應法」第 33 條第 1 項第 4 款規定，溫室氣體管理基金之用途為補助及獎勵事業投資溫室氣體減量技術，故本公司未來發展相關技術應可依此法爭取經費。
- 三、CCS 最具爭議及受阻礙之部分仍屬封存階段，其安全問題為社會大眾關心之議題，相關知識推廣及社會溝通尤為重要，因此，本公司可參與相關展覽加強對外宣導以降低未來開發之衝擊。
- 四、我國國發會公布淨零中期戰略 2030 年減碳目標為 24%(±1%)，並於 2050 年達成淨零排放目標，其中訂定火力發電加裝 CCUS 占整體電力約 20-27%，可見未來碳捕捉技術應用之需求，惟我國市場潛力較其他國家較小，如何擴大外商投資之誘因為政府未來之考驗，而未來技術本土化亦為必然趨勢，建議本公司可先行引進最新技術進行示範應用，培養自身施作 CCUS 之能力。
- 五、加拿大艾柏塔省已建造世界最大之碳運輸幹線，惟本公司仍處於建造示範案例之階段，宜及早加速後續發展，以跟上國際發展之腳步。