

出國報告（出國類別：開會）

赴美國參加低碳倡議技術週及 CCS 技術會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：白庭瑜 地質專員

派赴國家/地區：美國

出國期間：114/6/7-114/6/16

報告日期：114/8/8

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴美國參加低碳倡議技術週及 CCS 技術會議報告

頁數 37 含附件：☐是 ☒否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/翁玉靜/02-2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

白庭瑜/台灣電力公司/綜合研究所/地質專員/02-2681-5424

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：114 年 6 月 7 日至 114 年 6 月 16 日

派赴國家/地區：美國

報告日期：114 年 8 月 8 日

關鍵詞：碳捕捉與封存技術(Carbon Capture and Storage)、低碳倡議(Low Carbon Resources Initiative)

內容摘要：(二百至三百字)

為了加速達成 2050 淨零目標，本公司積極進行國際合作，並自 2024 年 5 月起加入美國電力研究院（Electric Power Research Institute, EPRI）之低碳資源倡議（Low-Carbon Resources Initiative，LCRI），與 EPRI 之間就三項專屬計畫，包含 Energy Hub、CCS 應用評估、以及台電淨零路徑規劃進行合作與研究。本次受 EPRI

邀請，赴西雅圖參加其舉辦之 2025 低碳倡議技術周(2025 LCRI Technical Week)，於會中分享本公司與 EPRI 合作之 CCS 專案初步成果。此外，本次行程亦赴 EPRI 位於 Palo Alto 之辦公室、Calpine 公司、Lawrence Berkely National Laboratory 與 Stanford Center for Carbon Storage 討論碳捕捉與封存相關進度與研究。藉由與多家 公司機構進行討論交流及實廠參訪，了解國際趨勢及經驗，有助本公司淨零相關 策略推動。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網（<https://report.nat.gov.tw/reportwork>）

摘要

為了加速達成 2050 淨零目標，本公司積極進行國際合作，並自 2024 年 5 月起加入美國電力研究院（Electric Power Research Institute, EPRI）之低碳資源倡議（Low-Carbon Resources Initiative，LCRI），與 EPRI 之間就三項專屬計畫，包含 Energy Hub、CCS 應用評估、以及台電淨零路徑規劃進行合作與研究。本次受 EPRI 邀請，赴西雅圖參加其舉辦之 2025 低碳倡議技術周(2025 LCRI Technical Week)，於會中分享本公司與 EPRI 合作之 CCS 專案初步成果。此外，本次行程亦赴 EPRI 位於 Palo Alto 之辦公室、Calpine 公司、Lawrence Berkeley National Laboratory 與 Stanford Center for Carbon Storage 討論碳捕捉與封存相關進度與研究。藉由與多家公司機構進行討論交流及實廠參訪，了解國際趨勢及經驗，有助本公司淨零相關策略推動。

目次

摘要.....	i
目次.....	iii
圖目錄.....	iv
表目錄.....	iv
壹、 出國目的.....	1
貳、 本次出國過程及交流資訊.....	2
一、 與 EPRI 討論碳捕捉	2
二、 Calpine 燃氣碳捕捉電廠參訪	6
三、 LBNL 實驗室交流	10
四、 參加 LCRI Technical Week	15
五、 SCCS 碳封存交流.....	24
六、 Stanford 參訪與碳封存討論	28
參、 心得與建議.....	32
附錄-參考資料	34

圖目錄

圖 1- 1、CCS 產業發展歷史變化。.....	3
圖 1- 2、燃燒後碳捕捉之成本比較。.....	4
圖 1- 3、本公司代表拜訪 EPRI 於 Palo Alto 之辦公室照片。.....	5
圖 2- 1、Calpine 公司簡報之碳捕捉流程。.....	9
圖 3- 1、實驗室設備圖片。.....	14
圖 4- 1、Neil Kern 開場並介紹 LCRI 最新進展。.....	17
圖 4- 2、Jeffery Preece 介紹美國及全球政策最新進展。.....	18
圖 4-3、本公司代表分享 CCS 專案計畫。.....	19
圖 4- 4、英國 HyNET 設施分布圖。.....	20
圖 4- 5、Basque Super Cluster 計畫概念圖。.....	21
圖 4- 6、Dunkerque Industrial Cluster 計畫概念圖。.....	22
圖 5- 1、SCCS 研究範疇。.....	26
圖 5- 2、SCCS 所在校舍。.....	27
圖 6- 1、美國加州地區之 CCS 管線、重點工業場址及不同土地利用情形資訊。.....	29

表目錄

表 1- 1、LCRI Technical Week 議程	15
-------------------------------------	----

壹、 出國目的

本公司加入 EPRI LCRI 專案研究計畫，會員權益除包含台電專屬 3 大計畫(Energy Hub 規劃、台電淨零策略及 CCS 應用評估)、共通性跨領域計畫外，亦包含參與其舉辦之國際性會議。EPRI 來信邀請本公司參與在美國西雅圖舉行之「2025 LCRI Tech Week」，於該會議上分享 CCS 應用評估組相關研究成果，並與其他 LCRI 成員進行技術交流，本會議之各主題設計旨在推動研究成果的技術轉移，並探討如何解決低碳技術部署所面臨的挑戰；此外，本公司亦受 EPRI 邀請，參訪美國燃氣碳捕捉及碳封存研究相關場域，並與當地學者開會交流與討論，預期可協助本公司追蹤全球減碳及為達成淨零目標相關技術發展趨勢及現況，預期透過參加 2025 LCRI Tech Week，深入了解全球發電減碳技術之發展趨勢，並赴相關場域及研究機構開會討論 CCS 相關經驗及技術，學習美國燃氣碳捕捉及碳封存研究相關經驗，作為本公司未來業務推動之參考。

貳、 本次出國過程及交流資訊

一、 與 EPRI 討論碳捕捉

✓ 背景及機構介紹：

美國電力研究院全球最具代表性的獨立非營利能源研究與技術開發機構之一，本公司與其合作已超過 40 年，本公司亦於 2024 年起加入其底下之低碳倡議(Low Carbon Resources Initiative, LCRI)計畫，LCRI 是一項以實現深度脫碳為目標的全球型五年計畫，其號召國際能源、電力、製造業等產學界關鍵利害關係人，致力於加速發展、示範並推廣氫能、氨、生質燃料、合成燃料與 CCS 等低碳技術。LCRI 橫跨生產、儲運、應用全價值鏈，強調共同研發 (RD&D) 與跨界合作，推動未來低碳解決方案，並加速產業落地應用。

- ✓ **參訪與討論過程：**本次赴 EPRI 位於美國加州 Palo Alto 辦公室拜訪 Dr. Abhoyjit Bhowan 討論二氧化碳捕捉，Dr. Abhoyjit Bhowan 向本公司代表介紹由其擔任主持人，並刻正執行中之 P222(Advanced Generation & Carbon Capture and Storage)計畫，P222 為 EPRI 在 CCS 領域研究計畫當中的一項，計畫期間為 2023 年-2028 年，主要聚焦於發電端，包含創新電能循環、富氧燃燒、燃燒前捕獲、以及燃燒後捕獲等碳捕捉技術之研究，以及二氧化碳運輸與封存鄉歸返歸的研究，EPRI 在 CCS 領域有著超過 15 年的經驗，並發展了碳捕捉評估流程技術、以及建立二氧化碳捕捉資料庫、進行創新技術的調查、學術交流與實際案場發展等，目前 EPRI 之相關 CCS 合作計畫包含美國能源部贊助、數個與產業界合作之先導計畫等。

CCS 在最初發展時期的目的定非減碳，而是在油氣產業當中，將生產天然氣時產出的二氧化碳注回油氣田中，以增加油氣產量並提高油氣採收率，例如自 1972 年起，美國得克薩斯州的天然氣處理廠就開始捕集二氧化碳並於鄰近油田注入以促進石油產出。接著，隨著能源危機與氣候意識抬頭，學界與政策界陸續提出將 CCS 作為控制溫室氣體排放的重要策略，並且，隨著國際氣

候談判與減碳目標的明確化，大規模 CCS 示範專案逐步啟動，挪威 Sleipner 天然氣田自 1996 年起成為全球第一個商業運轉、帶有嚴格監測機制的地下二氧化碳封存專案，該計畫每年從含高濃度二氧化碳的天然氣中分離二氧化碳，並注入深部鹽水層當中，儘管該計畫最初執行目的為避免挪威政府於 1991 年所制定的高額碳稅，其在 CCS 的發展歷史當中具有重要意義，並成為全球 CCS 之標竿性計畫。

而自 2000 年代後，隨著減碳壓力增加，CCS 應用範圍由天然氣處理延伸至電廠、水泥、鋼鐵、化工等高碳排產業。各國陸續投入示範與商用計畫，同時國際組織如 IPCC 也將 CCS 明確列入減碳路徑規劃。然而，CCS 的發展也面臨諸多挑戰，包括高昂的設備投資與運維成本、公共接受度、監測機制、長期責任歸屬等問題，導致大多數規劃案未能如期落地執行，統計至 2024 年，雖然全球已累積數十起商業規模專案，但一年捕集量僅約全球二氧化碳排放的千分之一，大多數計畫仍與油氣採收產業相關。而在 2025 年，可以注意到燃煤與燃氣電廠在 CCS 發產產業的捕集量占比變高許多，可以預見未來將以電廠、水泥、鋼鐵、化工等高碳排產業作為 CCS 的發展主力。

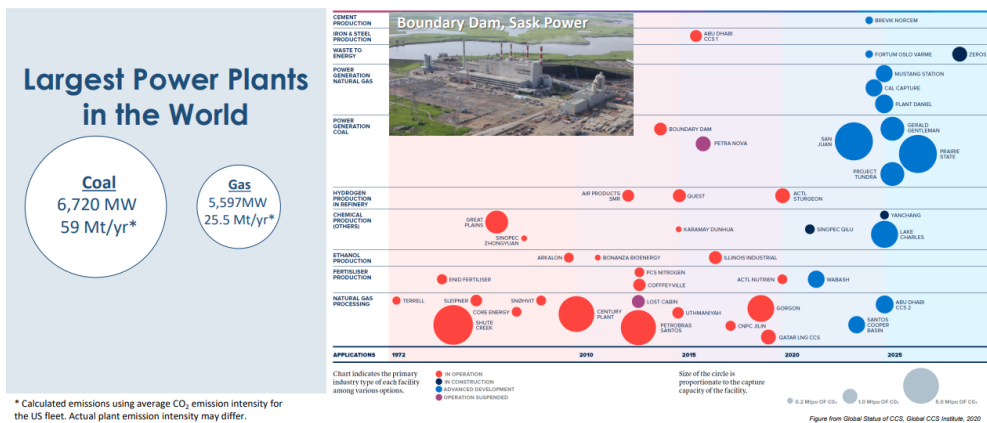


圖 1-1、CCS 產業發展歷史變化^[1]。

在燃煤電廠的碳捕捉技術當中，相較於燃燒前捕捉與富氧燃燒等技術，目前國際上大多以燃燒後捕捉作為 CCS 的技術主力，在國際上亦有商轉規模之計畫執行(如 Boundary Dam 及 Petra Nova)，技術發展具有一定的成熟度。其中 Boundary Dam 計畫每年捕捉 100 萬噸的二氧化碳，利用 Shell Cansolv 碳捕

捉流程，並將捕捉到的二氧化碳分別透過長 41 英里以及長 1.2 英里的管線運送至 Weyburn 油田以及 Aquistore 進行地質封存；而 Petra Nova 計畫每年捕捉 140 萬噸的二氧化碳，並運用三菱重工之碳捕捉技術，最後透過 82 英里的管線運送至 West Ranch 油田進行封存，本計畫約自 2016 年底至 2017 年初開始執行，雖然於 2020 年因為油價下跌暫時中止，但於 2023 年重新開始執行。

相較於燃煤電廠碳捕捉技術的成熟度，燃氣電廠碳捕捉技術之成熟度相對較低，國際上目前僅有一商轉計畫執行當中(BNEF CCS Database)，燃煤與燃氣電廠相較起來，尾氣二氧化碳濃度較低，約為燃煤電廠的三成；燃煤電廠之煙氣會依序經過選擇性催化還原、靜電集塵、脫硫等預處理設備，去除灰塵和有害成分，最後進入二氧化碳捕捉系統，而燃氣電廠因為電廠尾氣較為潔淨，預處理程序較為簡化。

而在成本方面的比較，進行燃氣碳捕捉的成本大約是燃煤碳捕捉的 1.5-2 倍，而 EPRI 的研究目標即是減少 CCS 的成本花費以及對於產業的風險，使 CCS 的投資不再那麼遙不可及，加速淨零目標。

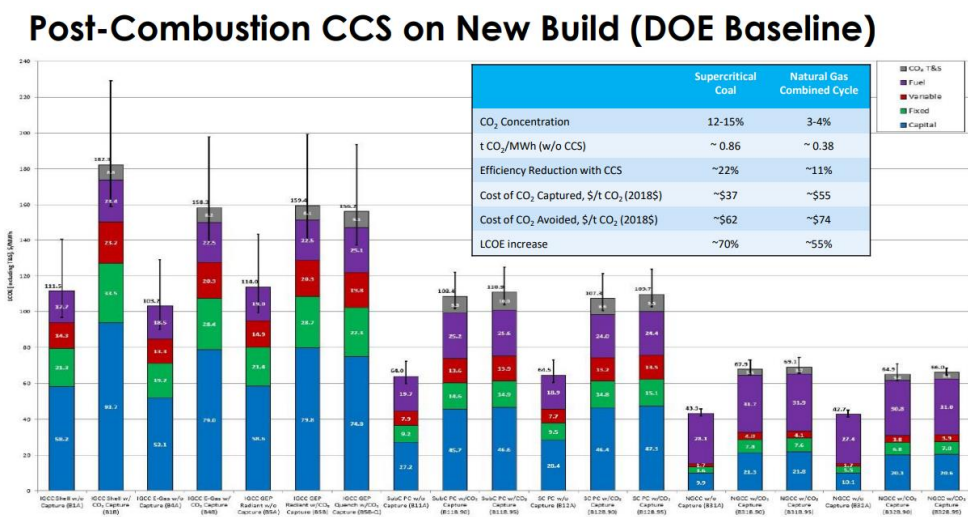


圖 1- 2、燃燒後碳捕捉之成本比較^[2]。

另外，Dr. Abhoyjit Bhowan 也向本公司代表介紹其正在協助執行的 TechWatch 計畫，該計畫主要目的為，在全球碳管理研發（R&D）領域當中盤點與了解各類技術的發展現況，找出技術與知識的缺口，並協助聚焦後續的研發資源投入，加

速關鍵技術的佈局與落地；而在研究價值部分，TechWatch 強調能夠帶來即時、可靠的全球研發動態追蹤，特別針對碳基電力技術的碳管理解決方案，協助產業掌握第一手研發脈動與上下游合作趨勢，提升決策的科學依據。

此外，亦包含天然氣複循環機組提升尾氣二氧化碳濃度的研究，結合廢氣再循環（EGR），其能將部份電廠尾氣（煙氣）重新導回燃燒區，有效提升廢氣中二氧化碳（二氧化碳）濃度。例如，傳統 NGCC 煙氣二氧化碳體積濃度約 4%，利用 EGR 後可提升至 7%以上，有效提高下游捕集的經濟性。

本公司代表亦於此討論中分享本公司 CCS 目標與現況資訊，因美國具有 CCS 之評估經驗，作為全球 CCS 的領頭羊，EPRI 旗下之 P222 計畫內容值得本公司進行後續 CCS 之評估參考。



圖 1- 3、本公司代表拜訪 EPRI 於 Palo Alto 之辦公室照片。

二、 Calpine 燃氣碳捕捉電廠參訪

- 背景及機構介紹：

Calpine Corporation 是美國最大的天然氣與地熱發電公司，公司總部位於德州休士頓，擁有超過 40 年的電力產業經驗，營運遍及全美 22 個州及加拿大，旗下營運 79 座電廠，總裝置容量約 27,000 兆瓦，足以供應約 2,700 萬戶家庭用電。其業務涵蓋發電、批發電力銷售以及透過子公司 Calpine Energy Solutions 和 Champion Energy 進行電力零售。Calpine 積極投入碳捕捉與封存技術，並營運 Baytown 與 Sutter CCS 計畫，更為美國知名 The Geysers 地熱計畫之營運公司，在支援電網穩定性、整合再生能源方面扮演關鍵角色

本公司積極布局 2050 淨零規劃，並將陸續興建燃氣機組以替代即將退役之燃煤機組，燃氣機組作為 2050 淨零布局之下的基載電力來源，勢必得搭配 CCS 技術以達成淨零，本次參訪 Calpine 公司之 Project Enterprise，有助本公司學習其燃氣碳捕捉技術經驗。

- Baytown CCS 計畫:

Baytown CCS 計畫由 Calpine 公司於德州 Baytown 能源中心推動，是美國首個在天然氣複循環發電廠全面實施 CCS 技術的示範計畫。該計畫利用 Shell 的 CANSOLV 燃燒後捕捉技術，目標每年捕捉約 200 萬公噸二氧化碳，捕捉率達 95%。捕獲的二氧化碳將透過管線運輸並永久封存於德州墨西哥灣沿岸的鹽水層中，並可能用於油氣增產（EOR）。該計畫結合熱整合系統，有效利用廢熱來降低能源消耗，進一步提升碳捕捉過程的經濟性和環境效益。此外，Baytown CCS 也引入數位即時監測技術，包括微震監測系統，能在二氧化碳注入前、注入期間及注入後持續追蹤地下儲層的安全狀況，偵測可能的地層變動或泄漏風險，確保封存過程的安全可靠，並符合美國環境保護署（EPA）地下注入規範。Baytown 能源中心總裝置容量約 810MW，其中約 450MW 的低碳電力和蒸汽將

供應鄰近的 Covestro 化工廠及德州電網。本計畫分階段推進，第一階段曾獲得美國能源部清潔能源示範辦公室（OCED）提供高達 2.7 億美元的聯邦資金支持，涵蓋前端工程設計（FEED）、許可申請、環境評估及人才培訓等工作；後續階段則包含了細部設計、施工、試營運、正式營運等工作。該計畫同時與當地社區合作，創造多個全職工作機會及長期高薪就業，推動多元企業參與人才培育。Baytown CCS 不僅是美國南部工業區減碳的關鍵示範，也彰顯 CCS 技術在電力與重工業領域對於淨零排放的重要潛力。

- Sutter 計畫:

Sutter Decarbonization Project 由 Calpine 公司主導，位於加州 Sutter County 的 Sutter Energy Center，是一項商業規模的 CCS 示範計畫，旨在支援加州 2030 年及 2050 年淨零碳排目標。該計畫將改造現有 550 兆瓦的天然氣複循環發電廠，採用 ION Clean Energy 的燃燒後碳捕捉技術，目標捕捉 95% 的二氧化碳排放量，每年約可捕捉 175 萬公噸二氧化碳，減少電廠的碳足跡。

捕獲的二氧化碳與 1PointFive Sequestration 公司合作，將透過新建約 15 英里的管線運輸至位於加州 Sutter County 的薩克拉門托盆地南側，Late Cretaceous 時期的 Starkey 砂岩地層進行封存，封存場址距離 Sutter 發電廠約 24 至 27 公里，為一深部鹽水層，具備良好的封存能力與地質穩定性，適合長期安全封存二氧化碳。整個 CCS 流程包括從燃氣發電機組排放端捕捉二氧化碳，經過壓縮、乾燥和淨化處理後，通過管線輸送至地下儲層注入，並利用地質監測技術持續追蹤二氧化碳團塊的動向及封存完整性，確保封存過程安全無虞。

技術特色方面，Sutter 計畫結合高效能的燃燒後吸收系統與空氣冷卻設施，有效降低能源消耗；採用嚴格的環境監控和安全管理機制，確保地下封存的長期穩定性。該計畫與地方電力公用事業 SMUD 合作，透過購電協議支持低碳電力供應，並積極進行社區參與與環境影響評估，保障地方利益與資訊透明。

Sutter 計畫不僅是加州能源轉型的重要里程碑，也是美國 CCS 技術商業化典範。它結合創新技術、嚴格監控與社區合作，推動可靠的低碳發電解決方案，

為實現淨零碳排奠定堅實基礎。

- **參訪與討論過程：**本次赴 Calpine 公司位於 Pittsburg 之 Los Medanos Energy Center 參訪其燃氣碳捕捉廠先導計畫 Project Enterprise，Calpine 公司由 Alfred Torres、Barbara McBride 以及其溶劑提供商 ION Clean Energy 之資深工程師接待，參訪首先於 Los Medanos Energy Center 之貨櫃屋當中觀看安全宣導影片，並由 Calpine 人員介紹其公司、碳捕捉原理、其底下執行中之 CCS 計畫，接著便往外移動至碳捕捉設施進行參訪，由於 Calpine 人員表示電廠內禁止攝影，本文僅以文字進行敘述。

Calpine 公司的 Project Enterprise 於 2024 年 9 月開始進行，目前已累積運轉將近一年，其利用 ION Clean Energy 開發的 ICE-31 溶劑，採用燃燒後捕捉與化學吸收法，每日可捕捉約 10 噸二氧化碳。ICE-31 溶劑在實際運作中展現出高效能與穩定性，其碳捕捉效率穩定維持在 95% 以上，溶劑在高氧含量和含氮氧化物（NO_x）嚴苛排放環境下仍具極佳的抗氧化能力，在長達 4,000 小時運轉測試結果顯示溶劑降解率極低，如此可以延長溶劑使用壽命並降低運維成本；ICE-31 再生時的能耗也較傳統溶劑大幅下降，最低可達 2.6 GJ/噸二氧化碳，減少了碳捕捉過程的能耗負擔。

Project Enterprise 在計畫前期曾使用 ICE-21 溶劑進行碳捕捉，但在高氧化及長時間運行環境下，ICE-21 出現溶劑部分降解問題，影響系統穩定性與增加更換頻率。與之相比，ICE-31 在抗氧化穩定性上明顯優於 ICE-21，長期運行後降解顯著減少，且溶劑與氨的揮發排放更低，能耗也較 ICE-21 低，因此 Calpine 和 ION Clean Energy 共同決定改採用 ICE-31 溶劑，以提高整體碳捕捉效率與經濟效益，並確保示範計畫達成最佳的技術驗證效果。

惟因目前這個計畫做為碳捕捉技術示範場域，目前尚無二氧化碳的封存規劃，捕捉後的二氧化碳目前釋放回大氣當中。Calpine 人員表示，此示範廠的核心目標在於驗證碳捕捉技術本身的穩定性與操作可行性，積累實際運行數據，

為未來可能的商業規模碳封存做準備。

另外，由於因美國能源政策之變動，美國能源部(Department of Energy, DOE)以不符合經濟效益與未能達到國家安全或能源安全標準為由，於今年 5 月底取消對多個碳捕捉與封存計畫的資金補助，這之中就包含 Calpine 公司的 Sutter 以及 Baytown CCS 計畫，不過，據該公司人員表示，儘管 DOE 取消對上述計畫的補助，Calpine 仍將持續投入資金進行研究，作為美國首個於燃氣電廠全面實施 CCS 技術的示範計畫，Sutter 及 Baytown 計畫受到的政府資金影響，不僅可能降低產業界對類似 CCS 計畫的信心，也對美國實現其氣候目標和推動低碳能源轉型構成挑戰。

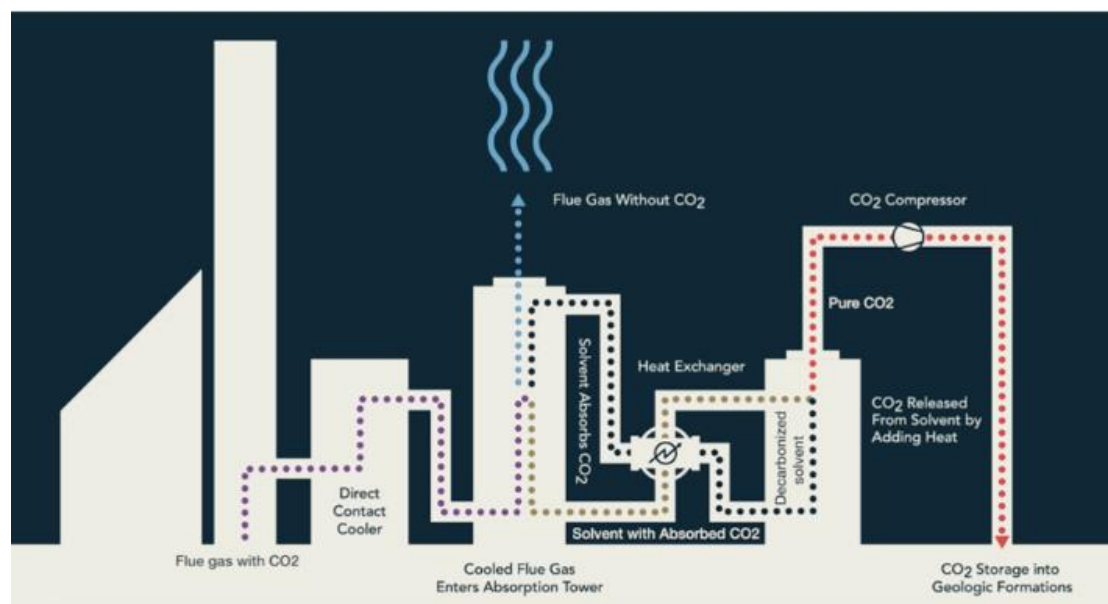


圖 2- 1、Calpine 公司簡報之碳捕捉流程^[3]。

三、 LBNL 實驗室交流

- 背景及機構介紹：

美國勞倫斯柏克萊國家實驗室（Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL）長期致力於推動能源轉型與地層碳封存領域的研究與實務應用，積極扮演連結科學研究與現地操作之間的重要橋樑。其地球科學部門深耕於二氧化碳封存、多尺度地層模擬、地質監測與長期風險管理等關鍵議題，並透過與美國能源部（DOE）及海內外研究機構、產業界之合作，推動一系列場址實驗與數值平台開發，目標在於提升碳封存技術的可靠性與安全性。

在地層異質性高度變化的情境下，LBNL 特別關注封存行為之空間差異與時間演變，並聚焦於多物理量觀測與反演方法之開發，藉以提升對二氧化碳在地下遷移過程的解析能力。該實驗室亦投入地下監測技術的發展，包括微震與壓力傳感、地球物理成像以及光學纖維感測等先進技術，使碳封存過程之不確定性可有效被降低。此外，LBNL 長期參與包括 Illinois Basin 與 Sacramento Basin 等多個封存場址的實驗與模擬工作，作為評估潛在封存場址之物理可行性與環境風險的重要依據。

為了強化知識傳遞與國際經驗交流，LBNL 也積極參與多項國際合作計畫，並與 CO2CRC、SCCS 等單位共同推動場址監測技術之驗證與標準化，在支持政策制定與風險溝通層面亦提供實質貢獻。透過結合實驗設計、場址資料與演算法發展，LBNL 持續致力於縮短研究成果與實地應用之落差，是碳封存領域中不可或缺的重要技術推手。

- 參訪與討論過程：

本次參訪 LBNL 之碳封存計畫部門，由 David Alumbaugh 博士接待，David Alumbaugh 博士向本公司代表介紹 LBNL 在碳封存領域的相關業務、研究以及歷史，最後移動至 Geosciences Measurement Facility(GMF)實驗室進行參訪，在

介紹 LBNL 時，David Alumbaugh 博士分享研究計畫之歷史發展，其發展已超過 40 餘年，自 1977 年起，Berkeley Lab 便開始從事地熱模擬與地震成像研究，持續累積對地層流體力學、岩石物理以及多尺度地球系統過程的知識與經驗。其中著名的成果包括 TOUGH 系列程式，這一套模擬軟體可用於模擬水、氣體與熱在地層介質中的傳輸，目前廣泛應用於地熱、碳封存與地下水傳輸等領域；進入 21 世紀後，LBNL 將研究重點聚焦於「安全、長期碳封存」與「監測與風險管理」。目前實驗室專注的幾個核心研究主題包括：

- 提升碳封存安全與效率：透過多種物理與化學作用，如結構性與殘餘封存、溶解封存與礦化封存，加強二氧化碳（二氧化碳）在地層中的穩定封存效果。
- 跨尺度地層監測技術開發：包含表層地震監測、井中光纖分布聲波感測（DAS）、電磁成像（CSEM）、微地震事件監測（MEQ）等，並透過層析成像與被動噪訊分析，對碳封存區域進行連續動態監測。
- 應用機器學習與高效能運算：結合數據驅動方法與物理模型，實現近即時的儲層性質反演與危險識別。例如 Fracture Visualization Tool 可以藉由訓練模型即時辨識微地震中的斷層活動，提升操作安全。
- 地震與洩漏風險評估：LBNL 是 NATIONAL RISK ASSESSMENT PARTNERSHIP（NRAP）的重要成員之一，負責研究井洩漏、斷層誘發地震、地下水污染等風險來源，並建立從井場到盆地尺度的耦合地力模擬環境，以支援政策與容許設計。

研究團隊亦設計並應用自主多物理量、多尺度監測系統（Rapid Acquisition and Processing System, RAPS），整合地震、電磁、井中光纖等影像資料，開發即時風險預警與決策支援工具。此外，LBNL 也自行開發 SMART Well Test Interpreter 套件，運用機器學習方法協助詮釋井筒壓力與流量變化資料，有效估算儲層孔隙度、透水性等因子。

除了傳統的碳封存方法之外，LBNL 也正參與數項創新減碳計畫，包括：

- 海底玄武岩礦化作用研究：與夏威夷大學與加州大學柏克萊分校合作，探討在海底死火山玄武岩層中注入二氧化碳是否可觸發碳酸鹽礦物形成，以長期穩定封存二氧化碳。
- 社區導向的氣候治理試點—CALDAC (Community Alliance for Direct Air Capture)：此專案整合直接空氣捕集技術 (DAC)、碳利用、地質封存、再生能源與水資源管理，並由 UC Berkeley 及 LBNL 所共同領導。
- 增強型風化作用測試平台：透過施用含鎂矽酸鹽的土壤添加劑，加速風化反應以吸收大氣中的二氧化碳，目前正在進行原位風化速率與長期碳匯測試。

過去四年內，LBNL 參與了美國多州碳封存研究與實證場址的建設與監測，包括伊利諾州的 One Earth Energy CarbonSAFE 計畫、懷俄明州的 Dry Fork Station，以及與加拿大合作的 CaMI 實驗場。此外，LBNL 也於 FSC、GOMCarb、SMART、CCSMR 等多項 DOE 專案中發揮關鍵技術影響力。

之後隨即移動至 GMF 實驗室進行參訪，該實驗室內設有多項用於碳封存監測之設備以及儀器，以下一一進行介紹：

1. ARCTIC TRAM

- ✓ 設備簡介：「北極纜車」是一台能在苔原地區自動行駛的軌道平台，裝備多種遙測儀器。
- ✓ 主要用途：專為觀測高緯度地區（如北極苔原）的氣候變遷與陸地-大氣交互作用設計。由於地面環境惡劣且人工取樣困難，這套設備可自動沿長達 120 米的軌道往返運作，利用多光譜相機與多種感測器，高頻率地收集地面溫度、植被狀態、能量與水分通量等資訊。
- ✓ 特色優勢：能大幅提升對北極等極端環境的連續性觀測能力，並提供高時間與空間解析的寶貴資料，對氣候變遷及陸地碳循環研究具有重要意義。

2. DARK FIBER

- ✓ 設備簡介：Dark Fiber 指的是利用未啟用的光纖電纜進行分布式聲學感測（Distributed Acoustic Sensing, DAS）。
- ✓ 主要用途：研究團隊將分布於地表或地下的光纖「啟動」，監測其沿線受到的微小震動與變形，以便偵測地層結構、地震活動、溫度變化、流體流動甚至交通動態等。
- ✓ 特色優勢：此技術可廣泛覆蓋大範圍區域，非侵入性、成本低且解析度高，近年逐漸成為數位地球監測的重要手段。GMF 亦將這類技術與新穎的硬體整合，用於監測各種地球科學應用現場，提升地下與地表觀測網的時空解析能力。

3. DEEP SOIL WARMING

- ✓ 設備簡介：深層土壤加熱系統，能控制並模擬地表下不同深度的土壤溫度環境。
- ✓ 主要用途：用於研究全球暖化對土壤碳循環的影響。尤其是因為土壤儲碳量龐大，加熱可促進有機碳分解，進一步釐清土壤在碳循環中的正、負反饋作用。GMF 設計出可精準控制至 90 公分深度的土壤加熱裝置，並配合現場氣體通量與各類環境參數的監測。
- ✓ 特色優勢：設備能實現對不同深度及時間尺度的溫度控制，幫助科學家理解地下碳動態與氣候變遷的真實交互模式，關鍵於未來碳預算與氣候模型精進。

4. SIMFIP

- ✓ 設備簡介：SIMFIP（Step-Rate Injection Method for Fracture In-Situ Properties）為井下原位裂隙監測儀器。
- ✓ 主要用途：專為增強型地熱系統（EGS）或其他需要精細監測岩體裂縫活動的場域設計。SIMFIP 能夠在鑽井中監控岩層流體流動、壓力變化，以及實時量測裂縫的開合狀態。

- ✓ 特色優勢：能以單一井口快速進行裂隙流體流動、滲透性與孔隙度等多參數同步測量，大幅提升野外地熱能與地層監測研究的效率與精度。

5. SURFACE ORBITAL VIBRATORS

- ✓ 設備簡介：地表軌道振動儀（Surface Orbital Vibrators, SOV），是一種創新的地震波源產生設備。
- ✓ 主要用途：結合分布式聲學感測（DAS）持續監控地下結構，SOV 可於地表產生可重複、頻寬可控的震動源，持續對地下介質進行能量「掃描」，捕捉其時變改變（如裂縫擴展、含水層變動等）。
- ✓ 特色優勢：能長時間、自動化執行高密度地震影像、因固定於地表數據重複性高，支援更具時效性的地下監測與決策，另據 David Alumbaugh 博士所述，該設備最深可探測地下七公里深之地層資訊。

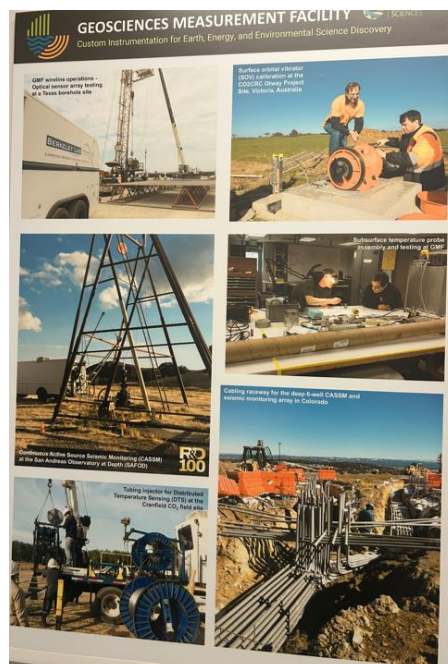


圖 3- 1、實驗室設備實場應用圖片^[4]。

四、 參加 LCRI Technical Week

- 背景及會議介紹：

- LCRI 簡介：LCRI 是一場由 EPRI 與 GTI Energy 聯手發起的五年期國際聯盟型研發計畫。LCRI 計畫自 2023 年以來，已集結逾 50 家來自世界各地的公用事業公司、製程能源業者與設備供應商，包括美國、日本、歐洲及亞洲多國的龍頭企業。計畫核心為協同推動氫能、氨、生質燃料、合成燃料與 CCS 等低碳技術的全價值鏈技術發展。現階段，LCRI 已完成一系列技術盤點、示範場域規劃及共通性技術資料庫建置，橫跨發電、運輸、工業的試驗與分析，加速關鍵技術由早期驗證邁向大規模產業落地實踐。

- 議程及演講摘要：

本次會議分三天舉行，自 6/10(二)-6/12(四)，議程如下表所示：

表 1- 1、LCRI Technical Week 議程^[4]。

Pacific Time (PST)	Tuesday, June 10th	Wednesday, June 11th	Thursday, June 12th
7:00 - 8:00 AM	Breakfast	Breakfast	Breakfast
8:00 - 9:45 AM	LCRI Plenary: Demystifying & Derisking the Energy Transition	Net-Zero Industrial Clusters & Sector Coupling Power-to-Fuels: Electrolysis, Integration, & eFuels	Industrial & Mobility Decarbonization Electrolyzer Lifecycle Management Tools
9:45 - 10:15 AM	Break	Break	Break
10:15 AM - 12:00 PM	LCRI Demonstration Projects: R&D to Action	Environmental, Health, & Climate Aspects of Low-Carbon Technologies Natural Gas Decarbonization & Negative Emission Technologies	Safety Insights and Best Practices for Low-Carbon Fuels Leveraging Low-Carbon Fuels for Resiliency
12:00 - 1:00 PM	Lunch/Networking	Lunch/Networking	Lunch/Networking
1:00 - 2:45 PM	Industry Perspectives into Navigating the Energy Transition	Economics of Low-Carbon Technology Pathways and Sector-Coupling Low-Carbon Fuels for Resilient Power Generation	Adjourn
2:45 - 3:15 PM	Break	Break	
3:15 - 5:00 PM	International Perspectives on the Energy Transition Hydrogen & CO2 Storage and Transport	Measuring & Quantifying Community Benefits Renewable Fuels Supply, Logistics & Sector Coupling	
5:30 - 7:30 PM		LCRI Member Reception	

第一天有三項共通/政策性議題進行討論，重點在於能源轉型的綜整概觀，首先由 EPRI LCRI 計畫總負責人 Neil Kern 以及副總裁 Jeffery Preece 進行 LCRI 各項共通性計畫之最近進展報告及美國最新淨零政策發展，其中包含正式宣告本公司之「MW 級氫能儲能計畫」正式成為 LCRI 其中一個共通性專案計畫一事，隨後的議程聚焦於示範計畫的研發與實踐，從技術創新到實際落地，探討如何將前沿技術導入現有產業；接著由數位產業界代表分享能源轉型過程中的觀點與實際挑戰，讓與會者能夠更貼近產業現場，縮短理論與實際應用之間的

距離；最後，自下午起正式進入技術討論環節，每個場次同時就兩項不同議題進行分享與討論，議程包含能源轉型的國際觀點以及氫氣、二氧化碳的運輸封存主題。本公司代表亦於本日下午之氫氣與二氧化碳輸送之議題進行本公司與EPRI在LCRI CCS 專案計畫之分享。

在Neil Kern的演講當中，其提及多元燃料的策略不僅對降低可能的風險有好處，也可以同時照顧到經濟、電力可靠以及環境永續三個重要目標，LCRI計畫成立到現在，已經累積超過 580 項公開研究與合作成果，跟全球超過 100 家產官學組織協作，透過集資和經驗交流，讓每一個加入的組織都能放大資源影響力，也累積了約 7.75 億美元的總經費規模，證明這個計畫已經成為業界推進低碳倡議的重要推手。

本計畫現階段重點放在「怎麼讓已有的能源基礎設施更有效再利用」、「怎麼加強和在地社區的合作」，以及「提升整個能源系統的效率」；比較短期的規劃內容，則有像是如分析可再生天然氣在美國各地的開發潛力、調查生質燃料怎麼從生產地送到最終用戶、以及真實的示範計畫像田納西河流域管理局合成柴油試驗；最後在中長期發展上，則看重於氫能的生產與使用、能量載體的創新運用、天然氣與電力系統的深度整合，以及未來更多跨部門的技術彈性。

而在政策和資金方面，Neil Kern 也有重點說明美國政府這幾十年來提供的資源。其中提到，美國聯邦法律像 1990 年代的《能源法案》、2005 年的重要修法、到最近的基建法案和減通膨法案，提供了像稅收減免、專案投資補助等多重工具，這對推動氫能、碳捕集和再生資源都產生很大的助力；在產業結構上，Neil Kern 補充說明，美國電力業在 2024 年時已經有 52.5GW 之潔淨發電容量，而到 2050 年，淨零碳排放目標下，會需要更多太陽能、風能、先進電池、核電、甚至結合 CCS 技術的燃氣發電機組，形成既環保又可穩定供應的能量組合。最後，Neil Kern 說明面對法規變動、產業挑戰以及社會需求的快速變化時，持續保持多樣化的技術與資源選擇，將是產業創造競爭力和韌性的關鍵。



圖 4- 1、Neil Kern 開場並介紹 LCRI 最新進展。

在 Jeffery 的演講當中提到，美國的法規體系及其政策推動現況成為重要議題。從政策演進脈絡展開，回顧過去三十多年來美國聯邦層級對低碳燃料與能源轉型的支持，並介紹了從 1990 年代《清潔空氣法修正案》、2005 年能源政策法案到近期的《基礎建設法案》（IIJA）及《減通膨法案》（IRA）等關鍵法規。這些法規不僅設計了多樣化的稅收抵減機制，如著名的 45Q 碳捕集稅額優惠，更大幅推動潔淨能源技術的研發資金與示範專案，並引入直接支付與可轉讓稅額制度，顯示政府在支持產業加速減碳轉型上的積極角色。

再來，Jeffery 的演講進一步剖析美國環境保護署（EPA）對發電與工業排放規範的歷史演進，從 2009 年將溫室氣體納入《清潔空氣法》開始，到 2015 年的《清潔電力計畫》提出首個全國性減排標準，雖歷經調整與挑戰，最新政策要求更加嚴格，要求燃煤與燃氣電廠加強減碳措施，法規執行的強度有所提升。全美 50 個州中已有 18 州制定明確的淨零排放或潔淨電力法令，並且，多家公用事業公司自發設定 2030 至 2050 年碳中和目標，顯示出政府、地方與產業三管齊下的推動態勢。



圖 4- 2、Jeffery Preece 介紹美國及全球政策最新進展。

在下午的「二氧化碳及氫氣的運輸與儲存」議題當中，有來自巴西 Eneva 公司的代表及 EPRI 成員分享其之間的合作計畫內容與階段性成果，Eneva 作為巴西最大的私營綜合能源公司，業務涵蓋天然氣探勘、發電到再生能源，並已將「脫碳」視為核心發展策略，因此積極評估大規模部署 CCS 的可行性。此合作計畫於巴西南部規劃 CCS 運輸管路，自碳捕捉開始，本計畫盤點各地之碳源，並規劃運輸管路與評估封存潛能與成本，最後找出最富和成本與經濟效益的 CCS 方案，其模擬出多種情境並得出在巴西進行 CCS 具有經濟潛力等結論，本研究案使用之方法論可供未來 CCS 評估參考。



圖 4-3、本公司代表分享 CCS 專案計畫。

第二天則深入到低碳技術和多元應用情境之探討。上午議題涵蓋產業耦合、綠能應用及負排放技術的發展，加強產學間對新興減碳途徑之理解。與會講者解析天然氣減碳、電解水製綠氫等實用技術在健康、環境與氣候治理的潛力影響。下午則是低碳經濟與彈性電力系統的建構，討論供應鏈管理、碳足跡評估、社區參與與韌性架構設計等。

在第二天上午之淨零聚落報告當中，EPRI 報告代表先介紹何謂淨零產業聚落以及產業耦合（Sector Coupling）：淨零產業聚落的核心思想是產業耦合，係在一個特定地理區域內，將不同的能源生產部門（如電力）與消費部門（如工業、交通、建築）緊密地連結起來。整個聚落的運作仰賴電氣化、碳捕捉利用與封存（CCUS）、以及氢能等關鍵技術的整合，其以太陽能、風力等無碳電力為基礎，並搭配裝有碳捕捉設備的可調度火力發電，確保能源供應的穩定性外，生產出的多餘電力可以透過電解水製氫，並將捕捉下來的二氧化碳與氫氣結合生產甲烷，生產出的低碳能源又可以供發電產業或是其它有需求的產業使用，從而實現跨部門的深度減碳，這樣做的目的是為了善用該區域的獨特資源與優勢，共同建立一個高效、低碳、且具經濟效益的新能源市場。除此之外，

EPRI 報告代表也介紹了國際上現有的淨零產業聚落計畫，包含：

英國 HyNET 計畫，位於英格蘭西北部與威爾斯北部地區，其從該地區的水泥、煉油、化工等能源密集型工廠捕獲二氧化碳排放。接著，透過新建及改造的管線網絡，將這些二氧化碳運輸到利物浦灣外海，永久封存在海底的枯竭天然氣田之中，計畫的另一個目標是生產低碳氫氣，提供給工業部門取代天然氣，或用於發電和交通運輸，從源頭減少碳排，此計畫預計在 2030 年前達成每年一千萬噸的減碳量，並預計於 2028 年開始營運。

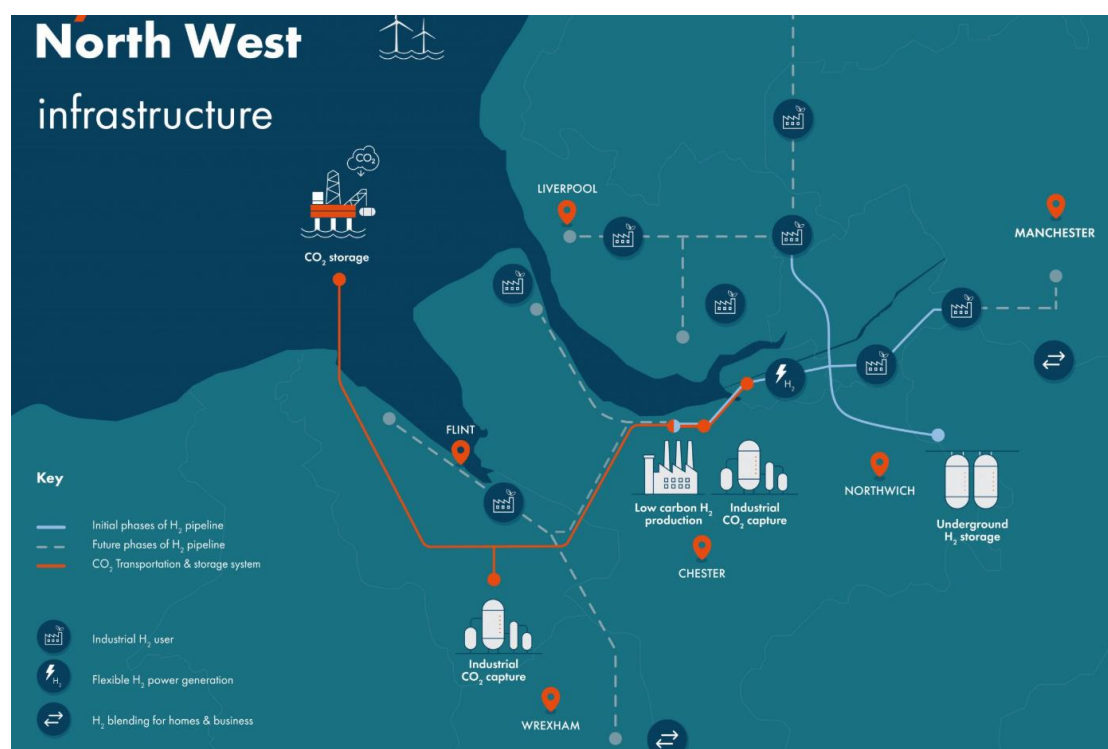


圖 4- 4、英國 HyNET 設施分布圖^[5]。

西班牙的 Basque Super Cluster 計畫，係為一項由政府主導的公私協力計畫，旨在整合該地區 16 個工業聚落的力量，共同應對 2050 年淨零挑戰。此計畫由巴斯克政府透過 SPRI 公司與 Iberdrola 及 Petronor 共同合作，透過產業耦合，優先針對煉油、鋼鐵、水泥等高耗能產業，推動能源效率提升與供應鏈脫碳。整個計畫以發展綠氫和碳捕集技術為兩大技術主軸，並透過建立「巴斯克氢能走廊」等目標，打造一個完整的低碳技術生態系，此計畫的目標是將巴斯克轉型為歐洲能源效率的標竿，並將脫碳挑戰轉化為技術創新與經濟發展的新契機。

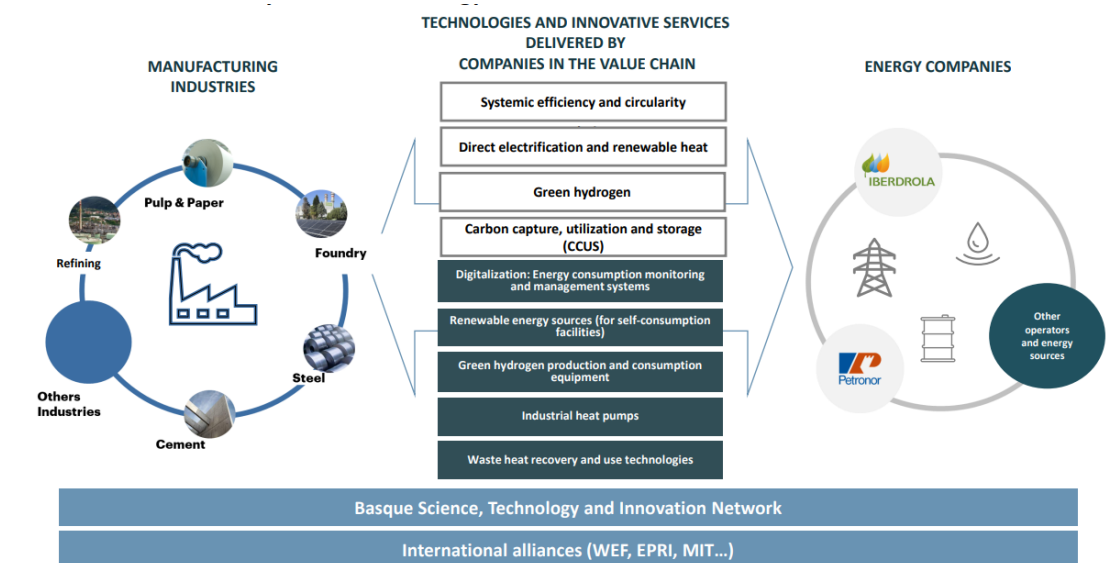


圖 4- 5、Basque Super Cluster 計畫概念圖^[6]。

法國的 Dunkerque Industrial Cluster 計畫，本計畫位於法國北部港口城市敦克爾克，是法國鋼鐵、化工、水泥和能源工業的重鎮，其工業排放約佔全國工業二氧化碳排放的 21%。計畫旨在減少現存工業聚落的碳排放，在 2030 年前達成聚落內工業二氧化碳排放較基準年（2015 年）減少約 30%的目標，並在 2050 年達成全區淨零排放。其整合多家龍頭企業（如 ArcelorMittal、Air Liquide、TotalEnergies 等）和地方政府，共同致力打造低碳經濟，使用到的技術包含廢熱回收、發電、製氫以及二氧化碳的再利用以及封存，並有獲得政府補助，是歐洲工業淨零產業聚落的經典案例。



圖 4-6、Dunkerque Industrial Cluster 計畫概念圖^[7]。

在接續的天然氣減碳與負排放技術議題當中，演講內容橫跨傳統天然氣製氫、可再生天然氣（RNG）、熱裂解（pyrolysis）以及碳中和的評估與政策脈絡，討論天然氣相關低碳技術實現零碳經濟的潛力與挑戰。在傳統天然氣製氫方面，EPRI 代表提及由於燃料成本的降低，以甲烷蒸汽重組以及自發熱重組來說，在二氧化碳捕捉率提高（98%）的情況下，對製氫成本影響越小；熱裂解技術方面，EPRI 代表指出目前各類熱解法不僅可以低成本製氫，還能生成固態碳副產品，這些副產品在全球新興產業有廣大市場，有機會促進負碳經濟的規模發展；而在可再生天然氣部分，若將氫氣與 RNG 結合供應，整體燃料碳足跡將大幅下降，有望成為長期能源脫碳策略的重要一環。

第三天則強調產業應用與前瞻整合，關注低碳燃料在工業與交通領域的減碳實踐。上午兩場專題分別聚焦於工業脫碳與交通運輸系統的新世代減碳方案，以及電解水製氫全生命週期管理工具的介紹，隨後議程延伸至環境安全規範、產業最佳實務案例展示及基礎韌性應用，邀請資深專家剖析國際運行經驗與未來趨勢，幫助參與者系統掌握低碳產業轉型重點。

在工業減碳的議題當中，EPRI 代表分享碳捕捉技術的概覽、富氧燃燒技

術的角色以及 LCRI 在工業碳捕捉方面的相關研究介紹，EPRI 代表提及，尾氣內二氧化碳的濃度是決定碳捕捉成本的關鍵，並且在目前以胺基溶劑作為主流捕捉溶劑的化學吸收法的情景之下，若是點源排放規模低於一定規模，捕集成本將過高導致回收的碳權價值難以支應整體投資。針對這樣的產業困境，EPRI 代表進一步探討新興減碳解法，例如薄膜分離、冷凍分離、固體吸附等新型碳捕集方案，其優點是可分階段模組化部署、可針對較小規模源點靈活調整，但技術成熟度（TRL）尚待持續提升與示範；而富氧燃燒也是碳捕集技術亮點之一，此法能夠將燃燒後煙道氣中二氧化碳濃度提升至 20%以上，大幅降低捕集難度和成本，並同步提升爐體熱效率。在鋁熔煉等產業的計畫中，這類技術已可實現碳捕集與廢熱回收雙重效益。在美國，每年點排放超過前述規模二氧化碳的工業設址約有 900 餘個，占總排量六成；中小排放源約 5000 餘個，佔總排放量的兩成，對這些中小排放源來說，傳統碳捕集經濟性欠佳，因此需政策推動分散式、低本新興捕集技術，可能成為這些中小排放源的減碳解方。

五、SCCS 碳封存交流

● 背景及機構介紹：

史丹佛碳封存中心 (Stanford Center for Carbon Storage, SCCS) 作為全球碳捕捉與封存 (CCS) 領域的頂尖研究機構，隸屬於美國加州史丹佛大學能源科學與工程學院。SCCS 秉持跨領域精神，其研究範疇涵蓋最微觀的孔隙尺度到區域規模，深入探討二氧化碳在地層中的流動、化學反應與長期封存行為。這包括對流體物理學、地球化學、先進監測技術、複雜數值模擬分析，乃至於相關政策與經濟效益評估的全面研究。

SCCS 的核心研究方向聚焦於多尺度分析，旨在理解二氧化碳如何滲透、發生化學反應並安全地儲存在地下深處。同時，中心也積極發展地層監測技術，追蹤二氧化碳在地下的分佈與遷移，確保整個封存過程的安全性與可靠性。在地球化學方面，SCCS 深入探究二氧化碳與地層岩石、流體之間的交互作用，對於評估長期封存的穩定性至關重要。為了預測二氧化碳注入後的物理與化學變化，SCCS 運用先進的數值模擬與模型建構，為場址設計和風險評估提供科學依據。此外，中心也特別關注碳封存技術在不同政策與市場情境下的可行性與經濟效益，為決策者提供全面的分析。

SCCS 的跨領域研究團隊結合了地質學、工程學、環境科學、政策與經濟等多元領域的頂尖專家，共同推動創新合作，其積極與全球產業、政府單位以及國際研究機構展開密切合作，將最新的研究成果轉化為實際應用，並促進相關政策的有效推動。SCCS 在推動美國加州乃至全球的 CCS 發展中扮演著關鍵角色，協助制定技術標準與政策建議，並定期舉辦國際研討會，促進全球範圍內的知識交流與合作。透過提供碩博士生與研究人員的跨領域訓練，SCCS 也為全球培養了新一代的碳管理專業人才。

SCCS 致力於建立學術界與產業界之間的合作關係，也積極舉辦關於地層封存安全、地震風險管理等主題的國際工作坊，旨在縮短學術與實際場域應用

之間的距離，是推動 CCS 重要的力量推手。近期其亦與美國西北太平洋國家實驗室(Pacific Northwest National Laboratory)、澳洲 CO2CRC 舉辦了線上工作坊，旨在就澳洲 Otway 場址之二氧化碳最新監測結果進行討論，由於該場址之地層具異質性，短距離之內之地層性質變化劇烈，為了克服這樣的困難，SCCS 與美國其他機構合作，試圖發展並驗證在高度地層異質性區域進行二氧化碳地質封存不同尺度監測的方法與技術。

● 討論經過

本次拜訪 SCCS 之中心主任 Sarah Dawn Saltzer 博士，其介紹了 SCCS 的核心工作以及研究重點，SCCS 隸屬於史丹佛大學能源科學與工程學院，該中心面臨的挑戰是透過詳細的專注研究以及對全球正在開發的 CCS 計畫提供技術支持，來推進負責任地質注入捕獲二氧化碳的科學知識基礎，其主要關注於二氧化碳封存之相關研究，另有涉及點源捕捉(Point-Source Capture)、生物質能碳捕捉與封存(BECCS)和直接空氣捕捉(DACCS)等領域。其目標在於提供國家和國際層面、技術、政策和社區參與的協助，加速達成減碳目標，並包含發展先進的儲集層模擬和相關能力，以實現二氧化碳團塊追蹤、確定最佳注入與監測與策略、以及對二氧化碳封存計畫進行風險評估，包括地震影響、引發斷層活動和斷層洩漏，以及對審查區域(AoR)的影響等等。

CCS/CCUS

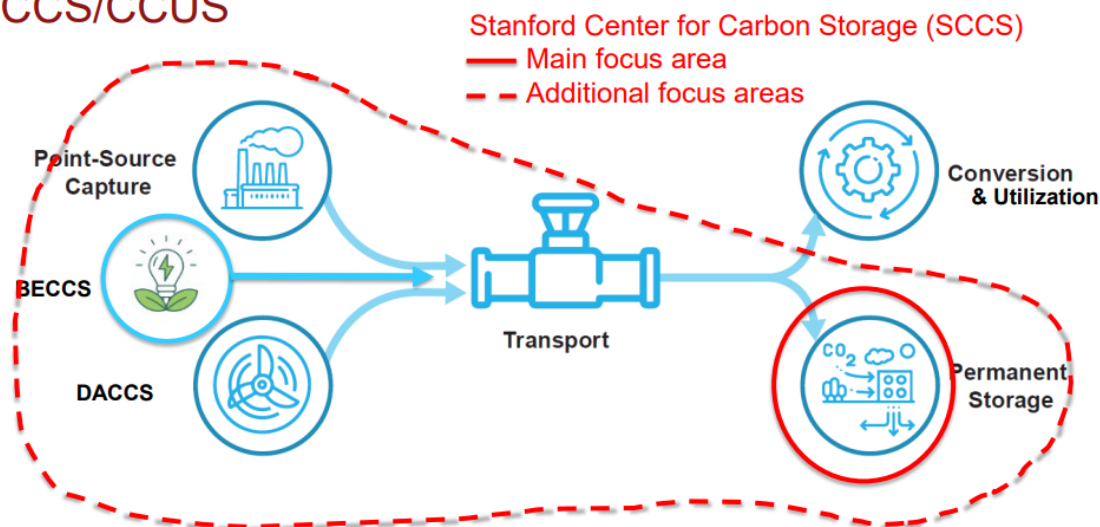


圖 5- 1、SCCS 研究範疇^[8]。

在研究重點方面，SCCS 研究涵蓋了多個面向，於以下列點說明：

- **區域研究與分析：**開發包括二氧化碳和氫氣選址與條件篩選流程、加州 CCS 機會評估、對加州 Sutter CCS 和 Tulare County 等 CCS 計畫的機會評估、軟沉積環境下進行二氧化碳封存的議題分析、加州的碳中和路徑等。
- **監測、測量與驗證 (MMV)：**優化監測井位置以追蹤二氧化碳團塊並盡興洩漏監測。
- **孔隙到岩心尺度分析：**進行二氧化碳流動和傳輸的實驗研究、地球化學反應分析、殘餘封存實驗室規模測試以及封閉完整性評估。
- **模型與模擬：**開發耦合地質力學和地球化學模型的先進儲集工程技術、用於 CCS 的深度學習建模套件(CCSnet)以及運用反演算精進用於洩漏與團塊監測之儲集層壓力監測計點位。
- **技術經濟學與政策分析：**評估新技術(BECCS、DAC)之規模放大衝擊並進行溫室氣體生命週期排放評估。
- **與 CCS 計畫相關的壓力和地震活動：**旨在最小化審查區域並試圖最小化斷層再活化作用與地震危害度分析。
- **氫能：**包含地質儲氫條件評估與美國加州氫氣儲存地點評估。

■ **二氧化碳捕捉經濟評估:**二氧化碳捕捉流程模擬、與藍氫於綠能之探討。

近期，SCCS 發展一些新的計畫，例如評估二氧化碳運輸活動安全性、加州在 2045 前達到每年封存 100 萬噸二氧化碳之路徑探討、碳捕捉廠改裝之額外負載模擬，以及與 Global CCS Institute 合作開發「全球碳管理學院」等。此外，SCCS 參與的贊助研究項目還包括 Sutter CCS 計畫的蓋層封閉性評估和 MRV 計劃設計，以及 Tulare County 碳封存計畫的地質力學評估，另也有和 CalCCS 計畫以及 CO2CRC 等機構合作。

最後，Sarah 博士說明了 SCCS 的聯盟計畫，採用「產業聯盟模式」，為會員提供最新研究成果、參與史丹佛大學活動的機會、與其他會員公司的交流網、招聘史丹佛畢業生和博士後研究員的途徑，以及年度會議等權益。中心提供多種合作模式，包括聯盟計畫、贊助研究和捐贈，以促進與外部機構的合作，共同應對氣候變遷的挑戰。



圖 5- 2、SCCS 所在校舍。

六、 Stanford 參訪與碳封存討論

● 過程及交流資訊：

本次與 EPRI 人員討論碳封存，EPRI 代表並介紹其底下 P222 計畫之封存部分，並額外進行地熱計畫之介紹。在碳封存的部分，由於自不同碳源捕捉下來的二氧化碳可能會先儲存在同一個儲槽裡再進行運輸，若是各個碳源提供之二氧化碳純度或品質不一，用來運輸的設備可能面臨耗損，或是發生預期之外的化學反應而導致結垢，因此統一二氧化碳的輸送條件極為重要。在 P222 計畫當中，EPRI 欲解決用於輸送的二氧化碳規格的相關問題，例如規格的基準為何、若是限制了二氧化碳的條件，是否會增加捕捉端所需的成本，又或是說二氧化碳氣體是否需要經過部分淨化等議題，透過文獻回顧以及研究使不同產業提供之二氧化碳達到輸送標準的氣體處理技術，希望可以使二氧化碳在更安全、節省成本的情況之下進行運輸與封存。

另外在碳封存的部分也有一些相關的計畫，EPRI 代表介紹了其在面對碳封存之社會溝通議題的研究，由於碳封存相關的設施(如運輸管線、鑽井工程、封存場選址等)容易受到當地居民的反對，具有民眾接受度方面的挑戰，因此，民眾溝通對碳封存專案來說至關重要。首先，需要先釐清鄰近的社區居民最常見的擔憂議題，以及目前開發者與研究者利用甚麼方法去解決這些問題，再來則是尋找能夠同時兼顧產業發展與居民權益的替代方案。這個計畫的工作重點包括辨認現有有效的居民溝通策略、分析運輸與封存專案帶來的經濟效益，以及進一步開發可減輕鄰近社區疑慮的方法。

以美國加州地區為例，下圖整合既有與規劃中二氧化碳管線、重點工業場址及不同土地利用情形資訊，並指出油氣田分布、城市區域及各項基礎設施位置所在，使潛在的民眾溝通群體位置一目瞭然。透過本計畫的社會議題的分析與交流經驗總結，有助於提升對臨近社區關切議題的理解與回應能力，並將經驗轉化為後續選址、溝通及風險管理的實務參考。

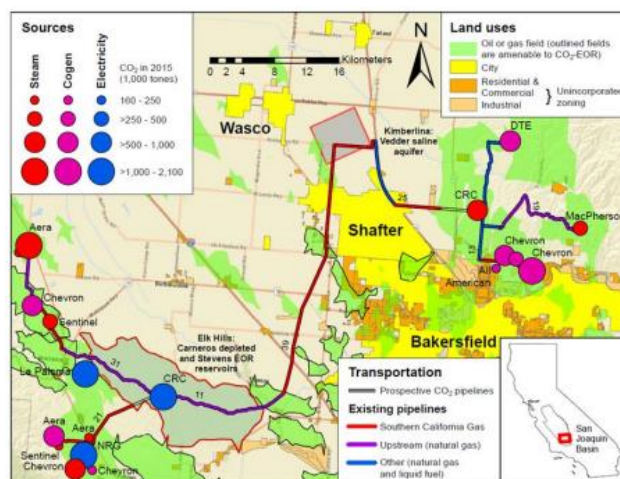


圖 6- 1、美國加州地區之 CCS 管線、重點工業場址及不同土地利用情形資訊 [9]。

而除了碳封存以外，由於地熱與碳封存領域接近、需要的地質調查技術類似，EPRI 代表額外介紹了其底下之地熱興趣小組(Geothermal Interest Group)，這個小組致力於提供一個匯集技術專業的論壇，針對傳統地熱、增強型地熱 (EGS)、新型先進地熱系統等主題，進行焦點性的技術討論。本小組在初期對所有會員與非會員開放，並鼓勵業界、學術界與政府單位加入，共同討論地熱之發展現況，並從中學習各自經驗。目前北美已經有超過 40 間公司參與，其中大部分來自電力產業；而在國際上亦有超過 20 間機構參與，包含來自拉丁美洲、歐洲及亞洲之公司或公部門，產業則包含能源管理、油氣勘探、發電、天然氣生產、地質研究、新興低碳技術等多元領域。

本小組第一年以掌握現有技術發展現況、盤點及優先排序研究需求為主，協助尋找推進地熱應用的技術突破口。第二年進一步聚焦於具體的技術評估及協作型 R&D 計畫，鼓勵產學研三方深入合作，加速關鍵地熱技術的開發與落地應用。第三年則預計轉型為付費制，持續進行產業整合資源的深耕。

研究領域則涵蓋多種面向，從基礎地質分析到深入系統應用，皆有豐富的發展與跨領域合作，大致可分為以下幾種：

1. 地質與地下資源評估

- 針對地層結構、熱儲層分布與潛力進行地質調查與建模，評估不同區域的地熱資源儲量與適用性。
- 進行地球物理探測、地球化學分析與地層數值模擬，建立熱儲層與井場規劃的依據。

2. 地熱儲層工程與模擬

- 進行儲層物理、熱液流動與化學反應的高精度模擬。
- 研究增強型地熱系統（EGS）的建置技術，如人工裂縫誘導、儲層反應監測、流體循環最佳化等。
- 強化水力壓裂、流體補注與熱能開採等核心參數的耦合模擬，提升資源回收率與操作安全性。

3. 井筒與材料工程

- 研發耐極端環境的新型井筒材料，分析長期運作下之腐蝕、機械強度與密封完整性。
- 實施井筒智能化監測，預防井漏、管損與長周期維護問題，確保地熱生產系統運作效率。

4. 地震、誘發地震與環境風險評估

- 強化地熱專案施作過程中的地震活動監控，建立誘發地震的預警機制與風險管理策略。
- 以多元感測儀器（如分布式光纖、地震波分析等）即時動態監測，並分析抽注水作業對周邊地層與地表環境的潛在影響。
- 評估儲層壓力變化、地層沉陷與水資源利用的相關生態與社區風險。

5. 系統整合、經濟分析與應用評估

- 進行地熱發電廠與溫控系統的設計最佳化，探討地熱能源於電力、區域供熱、農業溫室等多元應用模式。
- 研究全系統生命周期成本、能源效益、減碳潛力與技術可擴展性。

- 評估新興應用（如地熱熱泵、地熱-氫能耦合、社區型地熱方案）於城市與產業減碳策略中的角色定位。

6. 國際合作與標準化推動

- 參與國際地熱機構與工程標準制定，推動跨國技術交流、示範專案與創新平台建設。
- 結合多國經驗，持續強化模組化設計、工程施作技術與監測驗證方法的標準化與普及推廣

集合了多個領域以及機構成員的研究資源，EPRI 與其合作夥伴之計畫有部分獲得美國能源部補助，而在未來，EPRI 也將在鑽探技術、結垢與腐蝕問題等議題進行深入研究與探討。

參、心得與建議

本次赴美國參加 LCRI Technical Week 並赴 Calpine、LBNL、SCCS 等 CCS 相關機構進行技術討論與交流，了解與學習美國 CCS 相關機構執行計畫之方向與經驗，心得建議綜整於以下：

- 一、綜整 SCCS 與 LBNL 之方向與經驗，可知對於研究機構來說，在碳封存領域可以數值模擬與環境監測作為兩大主軸進行發展，數值模擬有助於在計畫前期作為進行地層、二氧化碳移棲範圍與風險評估的科學依據，供決策者參考並調整計畫內容；而監測則在計畫執行期間追蹤並驗證二氧化碳團塊分布及可能的異常行為，並將結果回饋至數值模擬，藉由數值模擬與環境監測成果的互相回饋，可提供更精準的預測成果及更具參考性的二氧化碳注入策略，對於計畫的風險管控十分重要。再者，儘管碳封存計畫在台灣尚未有執行中的商轉或示範計畫，在具有初步既有地質資料的情形之下，數值模擬與環境監測依然是可以發展的方向，運用蒐集到的資料與數據建立環境背景基線值，可作為二氧化碳灌注時之參考依據，值得本公司參考。
- 二、二氧化碳封存在推動時最需要面對民眾接受度以及法規的挑戰，建議在計畫初期及盤點相關利害關係人並進行溝通與協調，有助降低碳封存計畫推動之阻力；另由於台灣碳封存管理辦法尚未公布，法規細項尚未明確，提前了解各國法規方向有助釐清未來法規可能著重的議題方向，藉此做好準備並在法規公佈時得以及時因應。
- 三、在碳捕捉方面，經由本次拜訪得知在美國能源部取消對多個碳捕捉計畫資金補助的情形之下，儘管仍有計畫持續蒐集資金，期望維持計畫營運所需(如 Calpine 公司之 Sutter 計畫)，亦有計畫在此影響之下因無法補足資金缺口而提前中止執行。反映出碳捕捉相關產業由於資金的龐大需求，仍高度仰賴政策支持與公部門資金補助，為碳捕捉計畫在美

國發展要面臨的重大挑戰，儘管碳捕捉計畫在美國發展受挫，這些計畫未來的發展情形仍值得本公司關注，並可能成為本公司未來燃氣CCS的參考資料。

附錄-參考資料

- [1] Global CCS Institute. (2020). Global status of CCS report: 2020. Global CCS Institute.
- [2] U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. (2022). DOE/NETL carbon capture, utilization, storage, and transport (CCUS&T) compendium (DOE/NETL-2023/4320).
- [3] Calpine. (n.d.). Carbon Capture and Sequestration (CCS).
- [4] Electric Power Research Institute. (2025). LCRI Tech Week -JUNE2025, Agenda.
- [5] HyNet. (n.d.). About HyNet North West.
- [6] SPRI. (2023). Net-Zero Basque Industrial SuperCluster.
- [7] Dunkerque l'Énergie Créative. (n.d.). Why Dunkirk is becoming the key territory of decarbonised industry and electric mobility?
- [8] Stanford Center for Carbon Storage(2025). Meeting Presentation between TPRI and SCCS °
- [9] Electric Power Research Institute(2025). Meeting Presentation between TPRI and EPRI °