

出國報告（出國類別：開會）

## 出席 2017 碳捕集、再利用與封存研討會 (2017 CCUS Conference)

服務機關：台灣電力公司營建處

台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：焦中輝 地質組長

楊明偉 資深化學研究專員

派赴國家：美國

出國期間：106 年 4 月 8 日至 106 年 4 月 17 日

報告日期：106 年 6 月 12 日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：出席 2017 碳捕集、再利用與封存研討會(2017 CCUS Conference)

頁數 62 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人資處/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

焦中輝/台電公司/營建處/地質組長

楊明偉/台電公司/綜合研究所/資深化學研究專員

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他（開會）

出國期間：106 年 4 月 8 日至 106 年 4 月 17 日

出國地區：美國

報告日期：106 年 6 月 12 日

分類號/目

關鍵詞：二氧化碳、捕集、提高原油採收率、地質封存、燃煤電廠、安全性

內容摘要：建立二氧化碳捕集、再利用與封存技術(CCUS)為本公司減碳的重要工作，藉由 CCUS 大規模實施可使舊有或新設火力電廠降低二氧化碳排放，以減少環境衝擊與抑制地球溫暖化效應。CCUS 技術大規模實施須考量，工程、經濟、民眾接受度與環境等面向。因此，本公司推動過程中須與國際發展銜接並適時引進新技術。目前國際上有許多 CCUS 大型示範計畫，其發展的過程，是本次出席會議及交流的重點。挪威 TCM 與美國 NCCC 等 CCUS 試驗機構，於本次會議中分享其推動大型 CCUS 計畫之過程與經驗。此外，國際碳捕存法規、各類二氧化碳捕集技術、二氧化碳地質封存技術、二氧化碳再利用技術、整合碳捕存至傳統火力電廠等相關技術之最新進展，亦是本次會議發表重點。本公司於會中發表 1 篇 CCUS 論文，希藉此提升本公司 CCUS 研究計畫之國際能見度與交流。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

## 目 錄

摘要 .....	i
1. 任務目的.....	1
2. 過程.....	2
2.1 2017 CCUS Conference 內容.....	2
2.2 碳捕集技術與電廠整合之最佳調控設計技術.....	8
3. 心得.....	9
3.1 轉淚點-2017 年碳捕捉政策.....	9
3.2 締造歷史-美國主要 CCUS 計畫.....	13
3.3 CCS 辯論議題.....	22
3.4 CCS 全球展望.....	26
3.5 CCS 政策實務.....	28
3.6 二氧化碳捕捉實務.....	31
3.7 二氧化碳地質封存與監測實務.....	41
3.8 二氧化碳再利用實務.....	55
3.9 拼圖-美國 CCS 州際展望.....	59
4. 感想與建議.....	61

## 1. 任務目的

為因應全球氣候變遷議題與落實政府節能減碳之政策目標，本公司大會報指示綜研所與營建處等單位成立相關研究計畫推行二氧化碳捕集與封存(CCS)先導試驗場址之評估與試行等工作。本公司據此已規劃碳捕集與封存發展路徑圖，迄今已完成 3,000 米深鑽地質調查工作。今年亦規畫於台中電廠興建減碳技術園區，以測試二氧化碳捕集技術與本公司電廠之整合性。這些試行計畫皆為火力發電廠大規模捕集與封存二氧化碳作準備，期能實踐低碳發電之目標與任務，並維繫本公司燃煤火力電廠持續運轉。

2017 年二氧化碳捕集、利用與封存研討會(2017 Carbon Capture, Utilization & Storage Conference)為美國二氧化碳捕集與地質封存技術論文發表之重要研討會。該研討會將揭露國際上二氧化碳捕集與封存技術之最新進展。本公司亦應邀與會，並發表” Quantitative risk analysis for triggering earthquake due to CO2 injection in a seismic prone area” 論文。此次研討會於本(2017)年 4 月 10 日~13 日在美國芝加哥召開。為順利推展本公司 CCUS 試行計畫，特指派有關人員參加，俾瞭解二氧化碳捕集與地質封存之最新技術，並藉此機會與具溫室氣體控制實務經驗之專家，進行研討及技術交流，以精進國內二氧化碳捕集與地質封存技術，縮短技術研發時程。

綜研所與營建處分別遴派負責執行二氧化碳捕集與封存計畫各一人，化環室楊明偉資深研究專員與地質組焦中輝組長，前往芝加哥參加此次研討會。另於會後，順道前往位於芝加哥伊利諾理工學院，研討碳捕集技術與電廠整合之最佳調控設計技術，作為本公司火力電廠設置捕集與封存技術之效能風險評估參考，以利本公司後續二氧化碳捕集與地質封存試驗計畫之規劃、推行與完成。

## 2. 過程

### 2.1 2017 CCUS Conference 內容

2017 年二氧化碳捕集、利用與封存研討會(2017 Carbon Capture, Utilization & Storage Conference; 2017 CCUS Conference)為美國二氧化碳捕集與地質封存技術論文發表之重要研討會。2017 CCUS 研討會於 2017 年 4 月 10 日~13 日在美國芝加哥召開；本屆研討會針對國際間二氧化碳捕集與封存技術之大規模進展作討論。

目前國際間有許多二氧化碳捕集與封存示範計畫，其發展過程也是本次會議交流的重點，挪威 TCM 和美國 NCCC 等碳捕集與封存試驗機構也派員與會發表大型 CCUS 計畫之最新進展。

會議內容包含：國際碳捕存法規之最新進展、各類二氧化碳捕集技術、二氧化碳地質封存技術、二氧化碳再利用技術、亦包含如何整合這些碳捕存技術至傳統火力電廠之整合技術發展。

為抑制全球暖化效應，降低能源使用所造成之人為二氧化碳排放，為本世紀人類社會之首要環境考量。由相關研究顯示為達成有效的溫室氣體減量，實施二氧化碳捕集與封存(Carbon Capture and Storage; CCS)技術是不可或缺的一環，沒有 CCS 技術將無法達成抑制全球暖化效應。台灣初級能源供應高度依賴進口，能源使用與國際間溫室氣體之排放管制，將使我國能源使用成本上升，對我國經濟產生巨大衝擊。

因此，及早關切相關減碳技術發展對我國未來經濟發展至為重要。本次會議內容希能提供各與會人士對該等二氧化碳捕集與封存技術，在大規模商業化實施下所可能遇到之挑戰進行交流，以加速大規模實施時程，避免全球氣候繼續暖化，導致更嚴重之生態破壞。

另外，由各國 CCUS 技術發展過程來看，法規和民意接受度將大大影響 CCUS 計畫之進展，民眾關心的環境議題與封存安全性將會影響計畫進展，政府的法規及財務支持是成功的計畫不可或缺的環節。我國在實施 CCUS 技術時應學習國際經驗早日制定相關法規與技術規範，並適時給予開發業者財務支持，始可加速 CCUS 技術於我國早日實施，2017 CCUS Conference 會議時程表如下：

# CCUS 2017

April 10th, 2017 - April 13th, 2017

## CONFERENCE PROGRAM

- **Turning Point: Carbon Capture Policy in 2017** (Track: General Session)  
April 11th, 2017 8:30AM - 9:00AM
- **Making History – Major CCUS Projects in the U.S.** (Track: General Session)  
April 11th, 2017 9:30AM - 11:15PM
- **CCS as a Bipartisan Issue** (Track: General Session)  
April 11th, 2017 1:00PM - 2:15PM
- **CCS From a Global Perspective** (Track: General Session)  
April 11th, 2017 2:45PM - 4:00PM
- **Amine based CO<sub>2</sub> capture developments at the CO<sub>2</sub> Technology Centre Mongstad** (Track: Capture)  
April 12th, 2017 8:00AM - 8:30AM
- **CO<sub>2</sub> injection well containment assurance experiment at The Mont Terri Underground Research Laboratory** (Track: Storage)  
April 12th, 2017 8:00AM - 8:30AM
- **Aquistore: Measurement and Monitoring Research Results after One Year of Injection** (Track: Storage – Monitoring)  
April 12th, 2017 8:00AM - 8:30AM
- **Overview and Status Update of U.S.DOE Fossil energy Carbon Capture & Geologic Storage Major Demonstration Projects** (Track: Utilization)  
April 12th, 2017 8:00AM - 8:30AM
- **Aerosol measurement and mitigation projects at the CO<sub>2</sub> Technology Centre Mongstad** (Track: Capture)  
April 12th, 2017 8:30AM - 9:00AM
- **CO<sub>2</sub> and brine leakage through an abandoned well under geologic carbon storage conditions: impact of well depth, location and permeability** (Track: Storage)  
April 12th, 2017 8:30AM - 9:00AM
- **Time-Lapse 3D Surface Seismic for CO<sub>2</sub> Plume Monitoring in the Illinois Basin - Decatur Project** (Track: Storage – Monitoring)

- April 12th, 2017 8:30AM - 9:00AM
- **Overview of CO2 Use and Reuse Systems Analysis Efforts at U.S. DOE/NETL** (Track: Utilization)  
April 12th, 2017 8:30AM - 9:00AM
  - **Status of Technology Development at the National Carbon Capture Center** (Track: Capture)  
April 12th, 2017 9:00AM - 9:30AM
  - **The Likelihood and Consequences of Blowouts and High Pressure Leaks from CO2 Injection Wells: Implications for CO2 Losses from CCS and CCUS Projects.** (Track: Storage)  
April 12th, 2017 9:00AM - 9:30AM
  - **Quantitative Integration of Time Lapse Seismic Data for Reservoir Simulator Calibration: Illinois Basin - Decatur Project** (Track: Storage - Monitoring)  
April 12th, 2017 9:00AM - 9:30AM
  - **Geochemical Monitoring Survey Results from CO2 EOR at Wellington Field in South Kansas** (Track: Utilization)  
April 12th, 2017 9:00AM - 9:30AM
  - **Technology assessment for cost effective industrial CO2 capture applications** (Track: Capture)  
April 12th, 2017 10:00AM - 10:30AM
  - **Successful Storage of One Million Tonnes of Carbon Dioxide at the Illinois Basin - Decatur Project, Decatur, Illinois** (Track: Storage)  
April 12th, 2017 10:00AM - 10:30AM
  - **Monitoring of Deep CO2 Injection using Electrical Resistivity Tomography** (Track: Storage - Monitoring)  
April 12th, 2017 10:00AM - 10:30AM
  - **Recent Progress in MRCSP Large-Scale CO2-EOR and Storage Research in Depleted Oil Fields in Michigan Basin** (Track: Utilization)  
April 12th, 2017 10:00AM - 10:30AM
  - **Hybrid Process to Capture CO2 With Cold Membranes** (Track: Capture)  
April 12th, 2017 10:30AM - 11:00AM
  - **Design and Operation of a 50 MWe (0.4 MMtonne/yr) CO2 Sequestration Facility** (Track: Storage)  
April 12th, 2017 10:30AM - 11:00AM
  - **Research on Key Technology of the CCS Leakage Warning Based on Spatial Data Mining** (Track: Storage - Monitoring)  
April 12th, 2017 10:30AM - 11:00AM
  - **Potential to Produce Oil and Store CO2 by Applying CO2 Enhanced Oil Recovery to the Residual Oil Zone in the San Andres Formation in Four Counties within the Permian Basin**

- (Track: Utilization)  
 April 12th, 2017 10:30AM - 11:00AM
- **Retrofitting Plants for Carbon Capture and Utilization: Redefining the Carbon Supply Chain**  
 (Track: Capture)  
 April 12th, 2017 11:00AM - 11:30AM
  - **The Plains CO2 Reduction Partnership: CO2 Injection Update and Results of Adaptive Management Approach** (Track: Storage)  
 April 12th, 2017 11:00AM - 11:30AM
  - **Detectability of CO2 and Brine Leakage from Legacy Wells into Aquifers Overlying a CO2 Storage Reservoir** (Track: Storage – Monitoring)  
 April 12th, 2017 11:00AM - 11:30AM
  - **Interpretation of Tracer Experiments during Enhanced Oil Recovery Operations at the Farnsworth Unit Oil Field** (Track: Utilization)  
 April 12th, 2017 11:00AM - 11:30AM
  - **An Integrated Computational Approach to Systematically Design Physical Solvents for CO2-precombustion Capture Application** (Track: Capture)  
 April 12th, 2017 12:30PM - 1:00PM
  - **Constrained Permitting of Pilot and Development Projects for CCS** (Track: Policy)  
 April 12th, 2017 12:30PM - 1:00PM
  - **Monitoring CO2 injection at the Farnsworth EOR field in Texas using joint inversion of time-lapse VSP data** (Track: Storage – Monitoring)  
 April 12th, 2017 12:30PM - 1:00PM
  - **CO2 Absorption in Sorbent-Solvent Suspension and the Interface Region: A Molecular Simulation Study** (Track: Capture)  
 April 12th, 2017 1:00PM - 1:30PM
  - **Development of International (ISO) Standards for Geologic Storage of Carbon Dioxide** (Track: Policy)  
 April 12th, 2017 1:00PM - 1:30PM
  - **Geological Characterization of the Mt. Simon Sandstone for a Regional-Scale Flow Model**  
 (Track: Storage)  
 April 12th, 2017 1:00PM - 1:30PM
  - **Fast detection of induced microseismicity for CO2 injection monitoring** (Track: Storage – Monitoring)  
 April 12th, 2017 1:00PM - 1:30PM
  - **Integration Options for Post-Combustion CO2 Capture Using Molten Carbonate Fuel Cells**  
 (Track: Capture)



- April 12th, 2017 1:30PM - 2:00PM
- **The Role of Standardization for full-scale Deployment of CCS and CO<sub>2</sub>-EOR** (Track: Policy)  
April 12th, 2017 1:30PM - 2:00PM
  - **Joint moment-tensor inversion of microseismic events using finite-difference waveform simulation for tracking the CO<sub>2</sub> plume** (Track: Storage)  
April 12th, 2017 1:30PM - 2:00PM
  - **Potential for CO<sub>2</sub> Storage Cost Reductions with Greater Commercial Deployment** (Track: Storage - Monitoring)  
April 12th, 2017 1:30PM - 2:00PM
  - **CO<sub>2</sub> Capture Project Phase 4 (CCP4) - An update on the CCP4 Capture Program** (Track: Capture)  
April 12th, 2017 2:30PM - 3:00PM
  - **Using experience and analogs to build tool for planning outreach for geologic storage projects** (Track: Policy)  
April 12th, 2017 2:30PM - 3:00PM
  - **Fracture Sealing Potential of Shale-brine Reaction Effluent** (Track: Storage)  
April 12th, 2017 2:30PM - 3:00PM
  - **Development of commercially available process for reducing CO<sub>2</sub> from fossil-fueled plant using a green microalga, *Haematococcus pluvialis*** (Track: Utilization)  
April 12th, 2017 2:30PM - 3:00PM
  - **Technology Overview for Existing Power Plants to meet EPA Proposed CO<sub>2</sub> Emission Reduction Regulations in June 2014** (Track: Capture)  
April 12th, 2017 3:00PM - 3:30PM
  - **Permitting Experiences from the Illinois Basin - Decatur Project Injection Well, CCS#1** (Track: Policy)  
April 12th, 2017 3:00PM - 3:30PM
  - **Factors affecting rock integrity in deep geological CO<sub>2</sub> storage** (Track: Storage)  
April 12th, 2017 3:00PM - 3:30PM
  - **Development of low-cost, highly-selective and scalable electrocatalyst for CO<sub>2</sub> conversion into energy-rich fuels** (Track: Utilization)  
April 12th, 2017 3:00PM - 3:30PM
  - **Cost effective CO<sub>2</sub> capture using BASF's OASE<sup>®</sup> blue novel aqueous amine based technology** (Track: Capture)  
April 12th, 2017 3:30PM - 4:00PM
  - **Trespass Liability for Trans-boundary Migration of Injected CO<sub>2</sub>** (Track: Policy)  
April 12th, 2017 3:30PM - 4:00PM

- **Comparison of CO2 Storage Coefficients from CO2 Enhanced Oil Recovery Using the FE/NETL CO2 Prophet Model and from Saline Storage Using NETL' s CO2-SCREEN Model**  
(Track: Storage)  
April 12th, 2017 3:30PM - 4:00PM
- **Enhanced Electric Power Generation Through Use of CO2 Injection for Heat Mining in Geothermal Reservoirs** (Track: Utilization)  
April 12th, 2017 3:30PM - 4:00PM
- **Puzzle Pieces - State Perspectives** (Track: General Session)  
April 13th, 2017 8:00AM - 9:30AM
- **Funding CCS** (Track: General Session)  
April 13th, 2017 10:00AM - 11:30AM
- **Closing Remarks & Adjourn** (Track: General Session)  
April 13th, 2017 11:30AM - 11:45AM

## 2.2 碳捕集技術與電廠整合之最佳調控設計技術

建立二氧化碳捕集與封存技術為本公司達成國家長期減碳目標之重要工作，本公司既有與新設之火力電廠，未來將依循國家減碳要求加裝大型碳捕集與封存設施。穩定供給我國電力需求是公司營運重要考量，加裝 CCUS 設施於電廠內將增加操作的困難度，要如何與既有之發電設施整合，是公司現階段評估的重點。因此，公司考慮於台中電廠進行小規模的 CCUS 試驗工作，設置減碳技術園區來測試碳捕集與再利用技術。

由於碳捕技術與電廠操作整合是關鍵因素，如何設計有效的調控策略，並搭配合適的設備，需於減碳園區設置前充分考量。為此，本次出國任務期間亦順道前往美國伊利諾理工學院(IIT)進行研討。

IIT 目前正發展適用於傳統火力電廠碳捕集技術之動態調控技術，期藉由先進之調控技術，改善傳統吸收技術之能量耗損，以增進電廠設置 CCS 設施之熱效率。另一方面，由於吸收程序的動態可被調整，亦可針對電網的動態需求來反應。如此，可增加火力機組之動態調控能力，增進將來電網加入大規模間歇性再生能源的穩定性，降低電網之衝擊與風險。

### 3. 心得

於本次出國行程參與 2017 CCUS 會議所見之內容與心得，依各類運用分別介紹如下：

#### 3.1 轉捩點-2017 年碳捕捉政策

氣候與能源解決中心 (C2ES) 是一個獨立，無黨派，非營利的組織。其主要的任務，在致力於推動實用的解決方案，以降低溫室氣體排放，擴大清潔能源，並加強對氣候衝擊的抵禦能力。C2ES 帶動城市、州和國家的決策者，並連同企業和其他利益相關者，成立 C2ES 商業環境領導委員會 (BELC)，促進實際有效的政策，以擠身於世界頂尖環保思想的智囊庫。

茲將 C2ES 2017 年碳捕捉政策扼述如下：

依據 IPCC 分析：如沒有將 CCS 減碳項目納入考量，超過一半的模型，就未能將升溫限制在 2°C；對於那些可能的情境，成本需要上漲 138%。只有實際 CCUS 解決方案，才能實現工業部門的減碳量（約佔美國二氧化碳排放量的 18%）。

有關 CO<sub>2</sub>-EOR 的生命週期分析：

##### 1. 清淨空氣工作團隊分析

- 每桶油的淨儲存效益，為 0.19 公噸二氧化碳的生產（包括石油的排放）。
- 使用電廠二氧化碳的 EOR，淨減少電廠 63% 二氧化碳的注入量或減少 37% 從油生命週期的排放量。

##### 2. 負排放：生物能源與碳捕獲及儲存 (BECCS)。

- 第一步是乙醇工廠的碳捕獲 - ADM (2017)。

有關聯邦政策 45Q 部分：

##### 1. H. R.4622 碳捕獲法案

- 永久性稅收抵免。
- 用作 EOR：30 美元/噸；用作鹽水層存儲：30 美元/噸。
- 電力部門和工業部門之門檻為 150,000 噸。

##### 2. S.3179 碳捕獲再利用與儲存法案(增補前條法案)

- 建設期間第 7 年開始；12 年稅收抵免。
- 用作 EOR 與其他再利：35 美元/噸；用作鹽水層存儲：50 美元/噸。

•工業部門之門檻為 100,000 噸。

3.PABs 與 MLPs 法案

- PABs(Private Activity Bonds)：碳捕獲改進法案 (2017) Senators Portman (R-OH) and Bennet (D-CO), Reps. Curbelo (R-FL)與 Veasey (D-TX)。
- MLPs(Master Limited Partnerships)：Master Limited Partnerships 平等法案。

4.全國煤炭會議 (8 月 2016) CO<sub>2</sub> 構建模塊：評估 CO<sub>2</sub> 再利用選擇方案。

5.美國能源部 (8 月 2016) 碳捕獲、再利用與儲存：氣候變化、經濟競爭力與能源安全。

有關州際政策

1. CO<sub>2</sub>-EOR 的決議如表 3.1-1。

表 3.1-1 CO<sub>2</sub>-EOR 的決議

State Policy: Resolutions on CO <sub>2</sub> -EOR		
Year	Organization	Resolution Highlight(s)
2015	<b>Western Governors' Association</b>	Recognized economic and environmental benefits of CO <sub>2</sub> -EOR; called on Congress to extend and strengthen 45Q tax credit.
2015	<b>Southern States Energy Board</b>	Emphasized need for federal incentives and state policy measures.
2016	<b>National Association of Regulatory Utility Commissioners</b>	Highlighted the economic, energy production and carbon mitigation benefits of CO <sub>2</sub> -EOR, and the importance of state and federal action.

2. CO<sub>2</sub>-EOR 部署工作群，如表 3.1-2。

表 3.1-2 CO<sub>2</sub>-EOR 部署工作群

State Policy: CO <sub>2</sub> -EOR Deployment Work Group	Arkansas	Colorado	Indiana
	Kansas	Kentucky	Mississippi
	Montana	New Mexico	Ohio
	Oklahoma	Pennsylvania	Texas
	Utah	Wyoming	

- 於 2015 年懷俄明州 (WY) 州長米德與蒙大那 (MT) 州長布洛克，召集會議以評估實現州際潛在 CO<sub>2</sub>-EOR 的戰略。
- 來自 14 個州私營利益部門與二氧化碳政策專家的代表。
- 不同身分的州參與者，包括州長、公務員、內閣秘書/助理秘書、公用事業委員、機構與委員會職工。
- 2016 年 CO<sub>2</sub>-EOR 部署工作群拚版示意如圖 3.1-1。
- 2017 年 CO<sub>2</sub>-EOR 部署工作群管線網發展白皮書如圖 3.1-2。
- 州際法律、法規和獎勵措施分布如圖 3.1-3。



圖 3.1-1 2016 年 CO<sub>2</sub>-EOR 部署工作群拚版示意



圖 3.1-2 部署工作群管線網發展白皮書

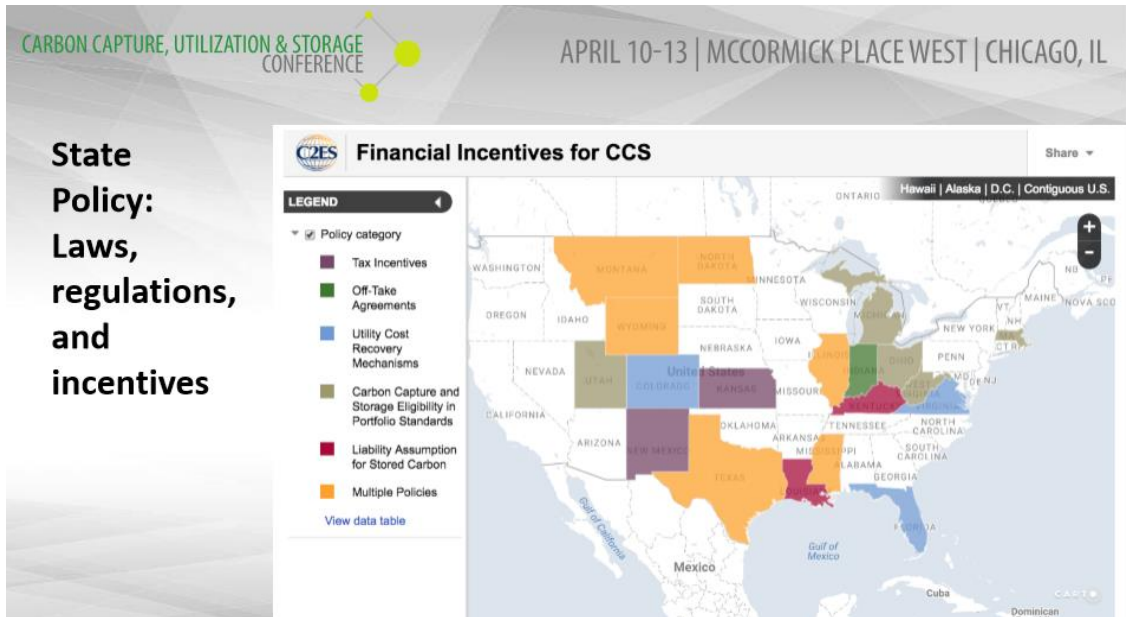


圖 3.1-3 州際法律、法規和獎勵措施分布圖

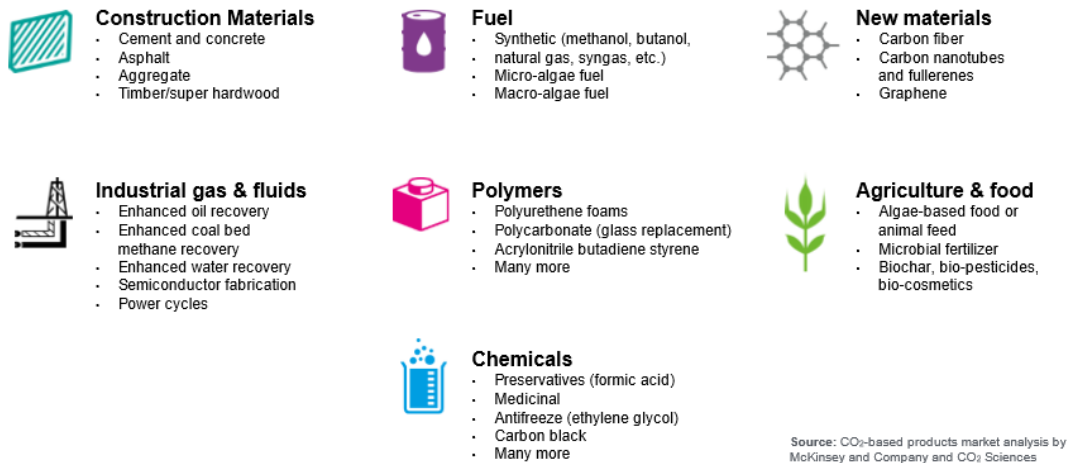
展望未來：二氧化碳再利用如圖 3.1-4-3.1-5。

The slide is titled "Looking Ahead: CO2 Utilization" and is part of the Carbon Capture, Utilization & Storage Conference. It features a list of milestones and a photo of the Carbon XPrize Team semi-finalists. The milestones are:

- Oct. 2016: 27 Semifinalist Teams Announced
- Nov. 2017: 2 \$2.5 million Prizes announced
- Mar. 2020: 2 \$7.5 million Grand Prizes announced

The photo shows a group of people, with the text overlay: "CARBON XPRIZE TEAM SEMI-FINALISTS TO TRANSFORM CO2 WASTE INTO BUILDING MATERIALS, BIOFUELS AND TOOTHPASTE".

圖 3.1-4 二氧化碳再利用 1/2



THE GLOBAL  
CO<sub>2</sub> INITIATIVE

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.1-5 二氧化碳再利用 2/2

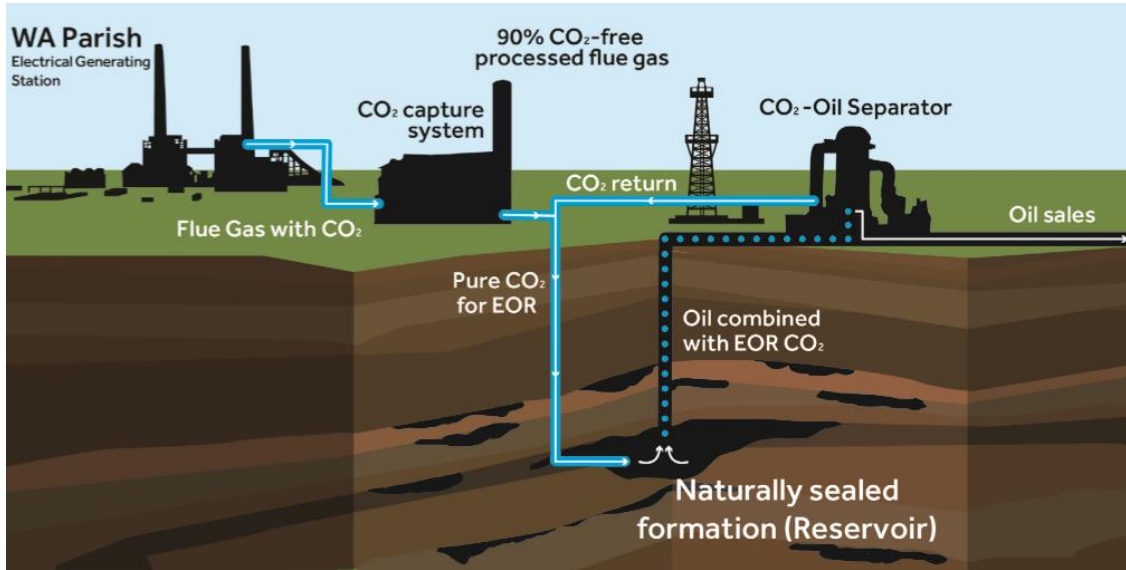
### 3.2 締造歷史-美國主要 CCUS 計畫

#### 1. Petra Nova 碳捕獲計畫

本計畫已於 2016 年 12 月 29 日在預定的時程與預算下，達成商業規模的碳捕獲量。茲將其內容扼述如下：

- 在 640MW 燃煤發電廠之燃燒後煙氣中滌除出 240MWe 等效 CO<sub>2</sub>。
- 每年捕獲 CO<sub>2</sub> 約 160 萬噸。
- 捕獲的 CO<sub>2</sub> 用於德州西部牧場油田，作 EOR 石油增產，每天注存 CO<sub>2</sub> 約 5,200 噸。
- 將捕獲的 CO<sub>2</sub> 轉化為原油的過程，可分為 5 大部分，如圖 3.2-1, 3.2-2。





(Project Finance International Yearbook, 2015)

圖 3.2-1 WA Parish 燃煤發電廠捕獲的 CO<sub>2</sub> 用於 West Ranch 油田作 EOR 石油增產  
示意圖

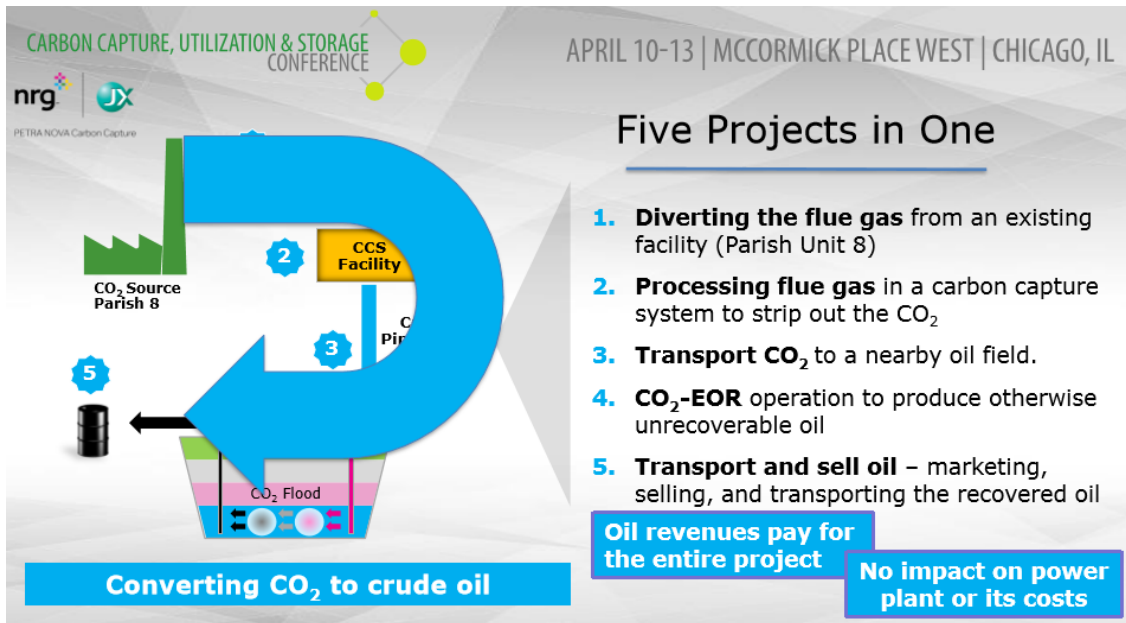


圖 3.2-2 捕獲的 CO<sub>2</sub> 轉化為原油的過程可分為 5 大部分

• Petra Nova 碳捕獲場，如圖 3.2-3。



圖 3.2-3 Petra Nova 碳捕獲場設施現地布置概況

- 從 WA Parish 到 West Ranch CO<sub>2</sub> 輸送管線長約 160 公里，如圖 3.2-4。

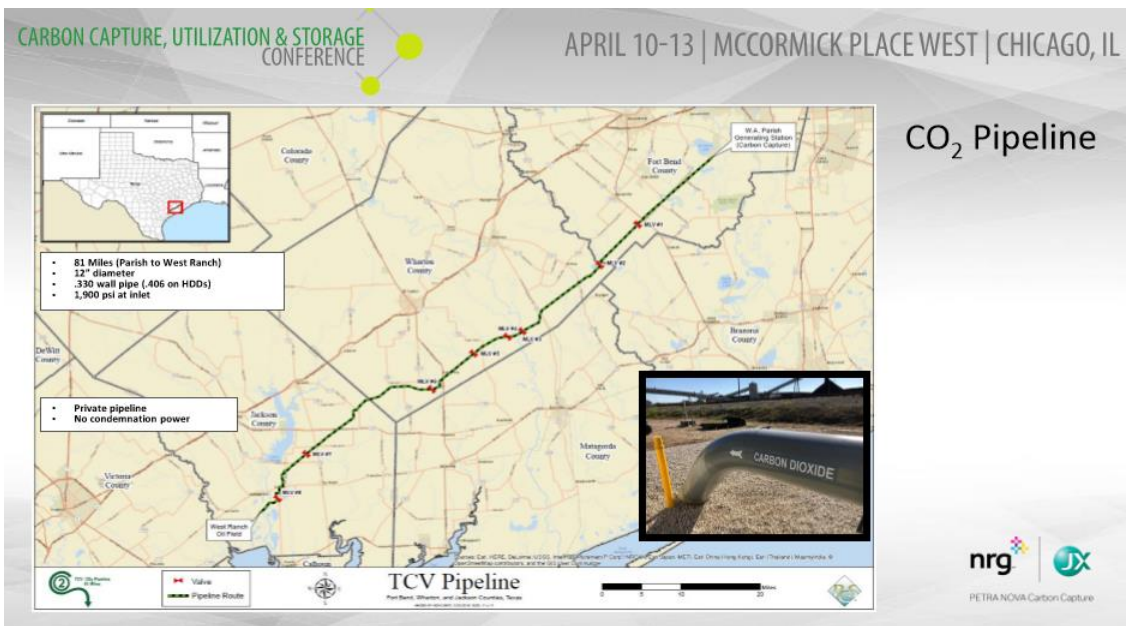


圖 3.2-4 WA Parish 到 West Ranch CO<sub>2</sub> 輸送管線路徑

- West Ranch 油田 EOR 場址從 2016 年至 2020 年 CO<sub>2</sub> 注入井與石油生產井以 4:1 配置開發布置，如圖 3.2-5, 3.2-6。

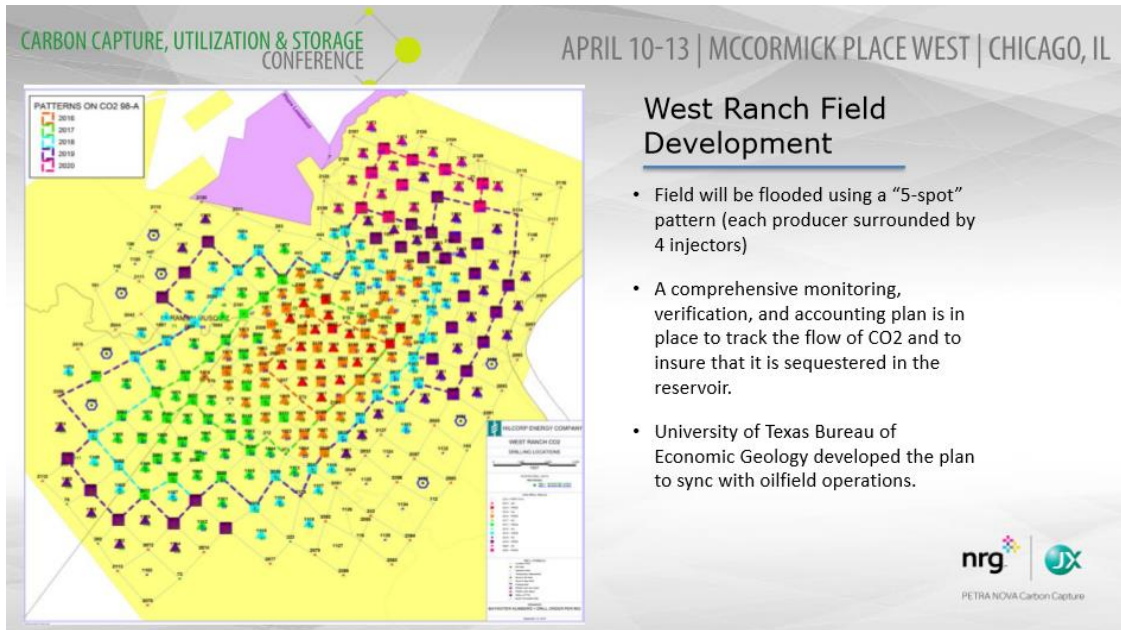


圖 3.2-5 West Ranch 油田 EOR 場址 CO<sub>2</sub> 注入井與石油生產井開發規劃布置



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.2-6 West Ranch 油田 EOR 鑽井場址中心設施

- Petra Nova 計畫合作夥伴暨分工組織架構，如圖 3.2-7。

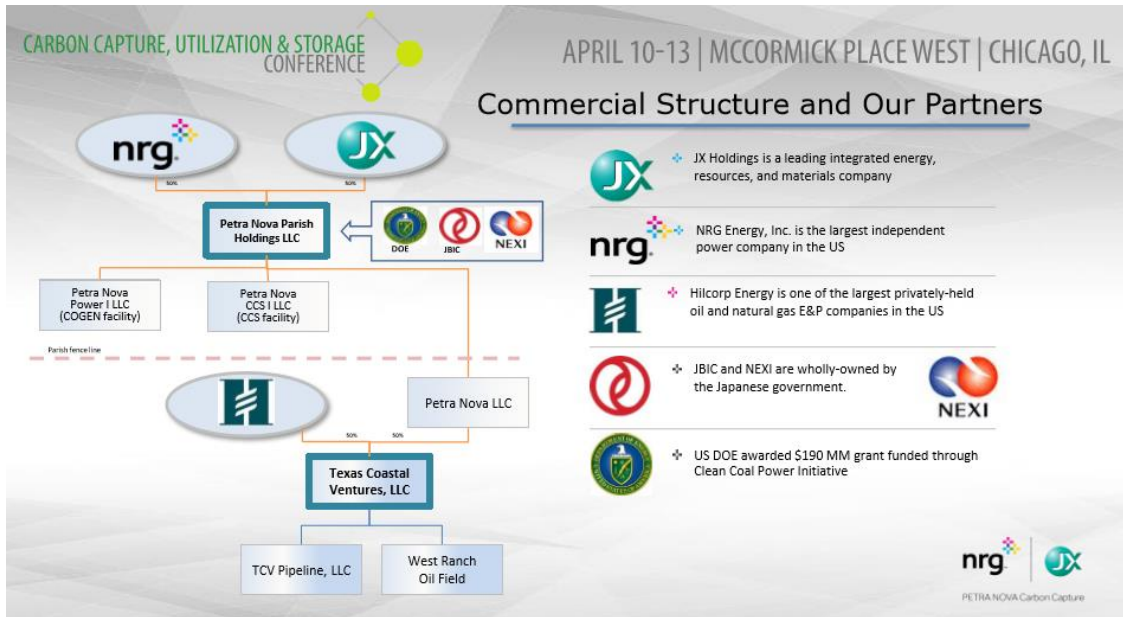


圖 3.2-7 Petra Nova 計畫合作夥伴暨組織架構

## 2. 伊利諾州主要的 CCUS 計畫

本計畫邁向成功路之條件如下：

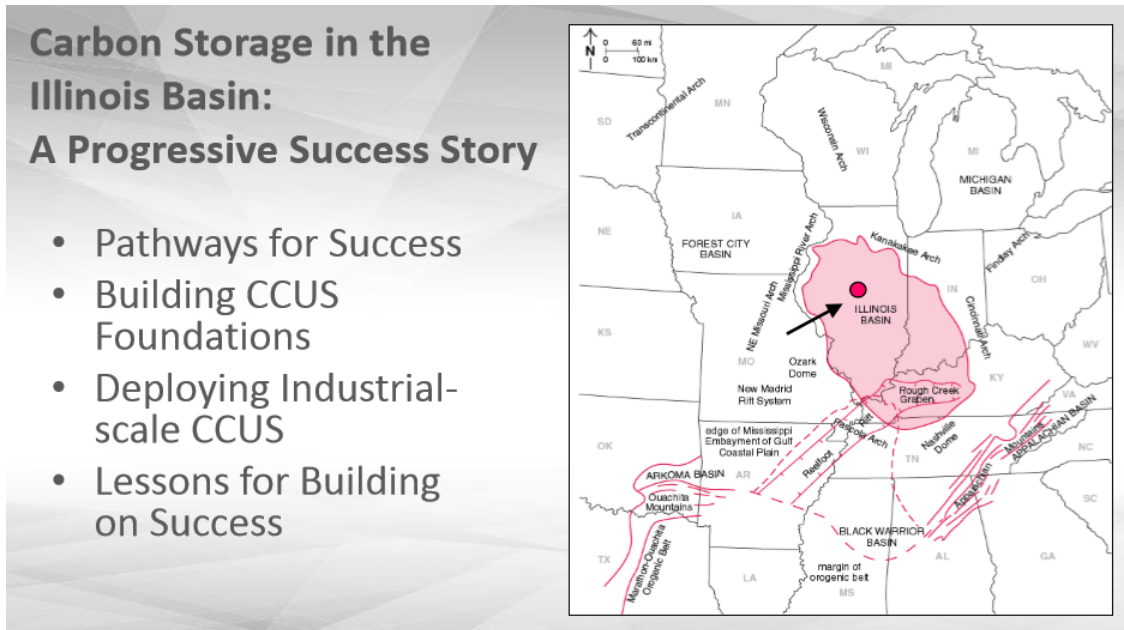
- 形成良好的伙伴關係
- 建立堅實的商業案例
- 利用資源與資訊
- 向他人學習
- 吸收當地與區域的專家
- 歡迎更多研究人員
- 選擇最佳條件的地質區
- 維護區域資產

本計畫合作夥伴，如圖 3.2-8。



圖 3.2-8 伊利諾州 CCUS 計畫合作夥伴

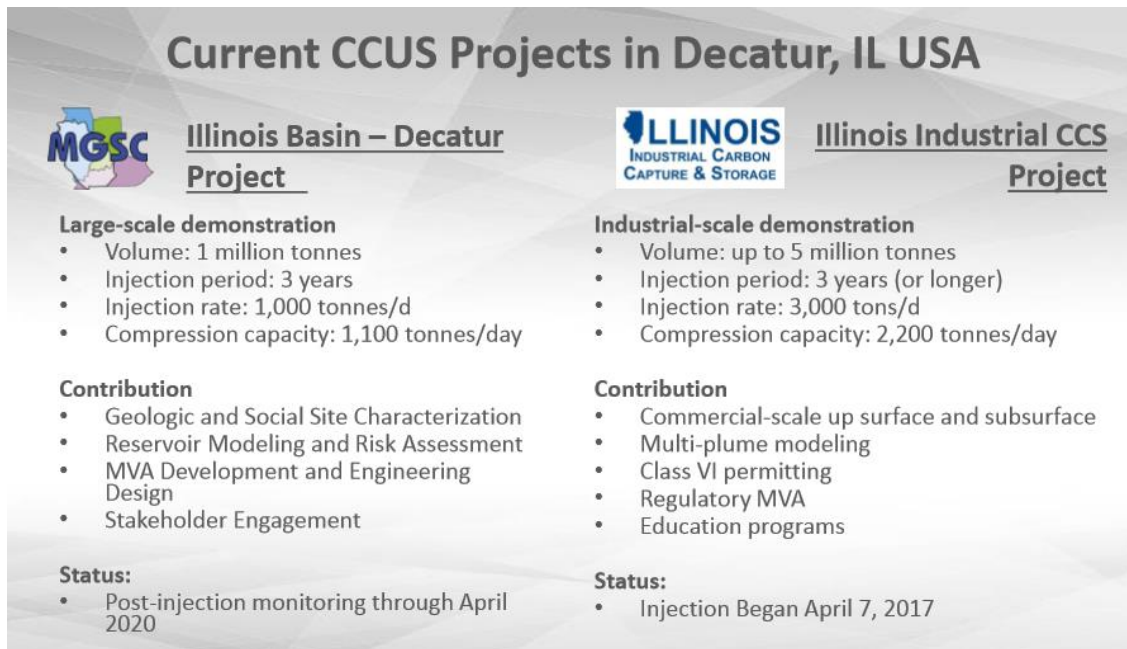
本計畫碳封存區位在伊利諾盆地內，如圖 3.2-9。



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.2-9 伊利諾盆地內碳封存計畫地區

於美國伊利諾州 Decatur 地區目前進行的 CCUS 兩大計畫，分別為 Illinois Basin – Decatur Project 與 Illinois Industrial CCS Project。兩者主要的內容，如圖 3.2-10。其位置與布置，如圖 3.2-11。



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.2-10 美國伊利諾州 Decatur 目前進行的 CCUS 兩大計畫內容

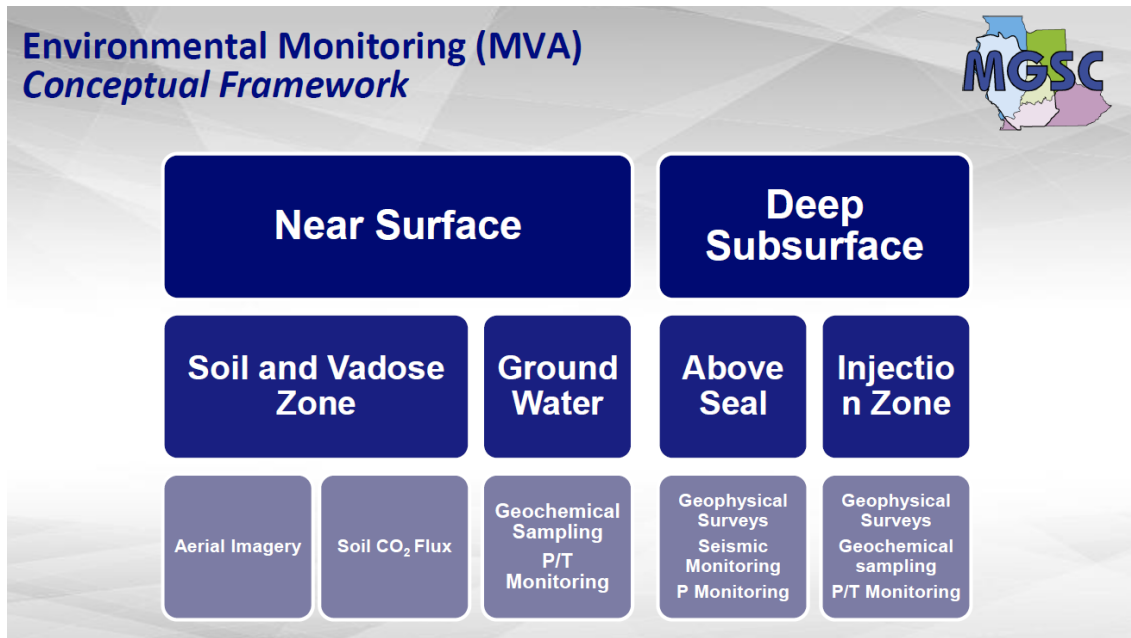


(CCUS Conference, 2017)

圖 3.2-11 美國伊利諾州 Decatur 目前進行的 CCUS 兩大計畫位置與布置

Illinois Basin – Decatur Project (IBDP)進展：

- 運營注入：本計畫於 2011-2014 年 11 月完成美國首個從生物燃料設備捕集 CO<sub>2</sub>，並注入及封存於地下深部鹽水層 100 萬噸的規模。
- 注入後在 MGSC 密集監測下將持續到 2020 年。其環境監測（MVA）概念式框架，如圖 3.2-12。

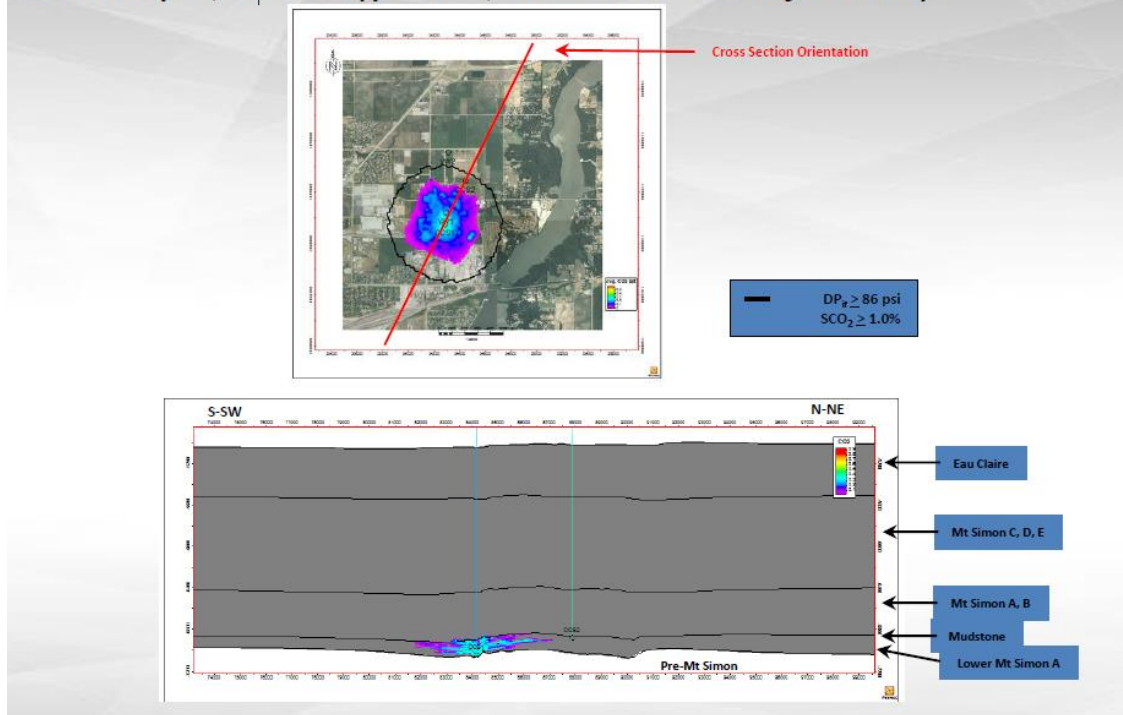


(CCUS Conference, 2017)

圖 3.2-12 MGSC 密集環境監測（MVA）概念式框架

- 於 2015 年 1 月 1 日（第 3 年，CCS1 注射結束）監測 CO<sub>2</sub> 注入流與飽和度平面與橫剖面之移棲範圍，如圖 3.2-13。

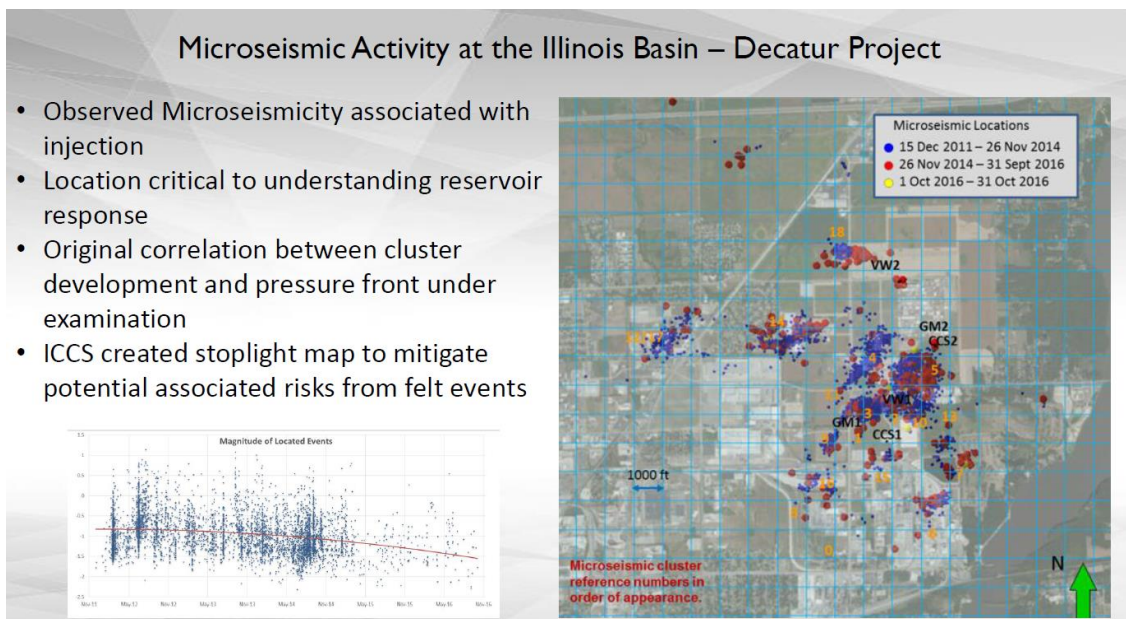
## Extent of Plume & Saturation Cross Section January 1, 2015 (year 3, end of CCS1 injection)



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.2-13 CCS1 灌注結束後監測 CO<sub>2</sub> 注入流與飽和度平面與橫剖面之移棲範圍

- 觀察到伊利諾盆地 Decatur 微地震活動與 CO<sub>2</sub> 注入相關的微小反應，如圖 3.2-14。

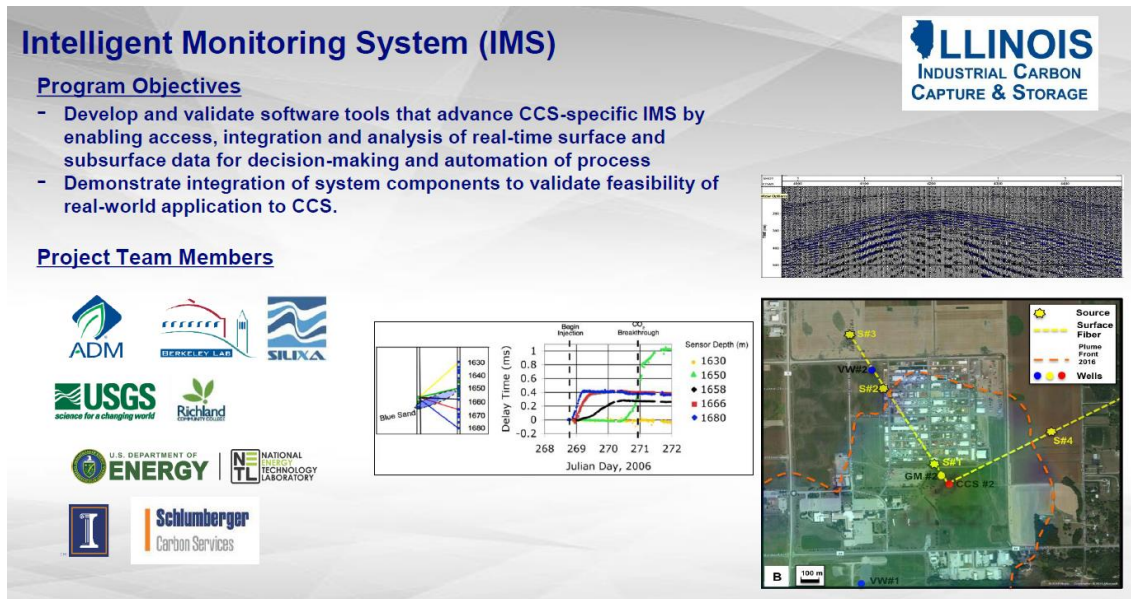


(CCUS Conference, 2017)

圖 3.2-14 伊利諾盆地 Decatur 地區與 CO<sub>2</sub> 注入相關的微地震活動

### Illinois Industrial CCS Project 進展：

- 本計畫是第一個向 USEPA 申請審查第六類許可證的案件，其過程如下：2011 年 7 月 25 日提交 UIC VI 類許可申請；2014 年 12 月 28 日頒發的最終許可證；2017 年 1 月 19 日頒發的最終修改許可。
- 運營注入：本計畫於 2017 年 4 月 7 日開始注入，以階段性增加注入率。
- 本計畫採用 Intelligent Monitoring System (IMS) 即時地表與地下監控系統，如圖 3.2-15。



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.2-15 Illinois Industrial CCS Project 畫採用 IMS 即時監控系統

Illinois Basin Decatur Project與Illinois Industrial CCS Project兩計畫之CO<sub>2</sub>注入，分別為1 MT與3-5.5 MT，未來Carbon SAFE將發展為>50 MT。

美國伊利諾州將發展成為 CCUS 自然資源和智能資本之集中區域和全球測試平台，如圖 3.2-16。



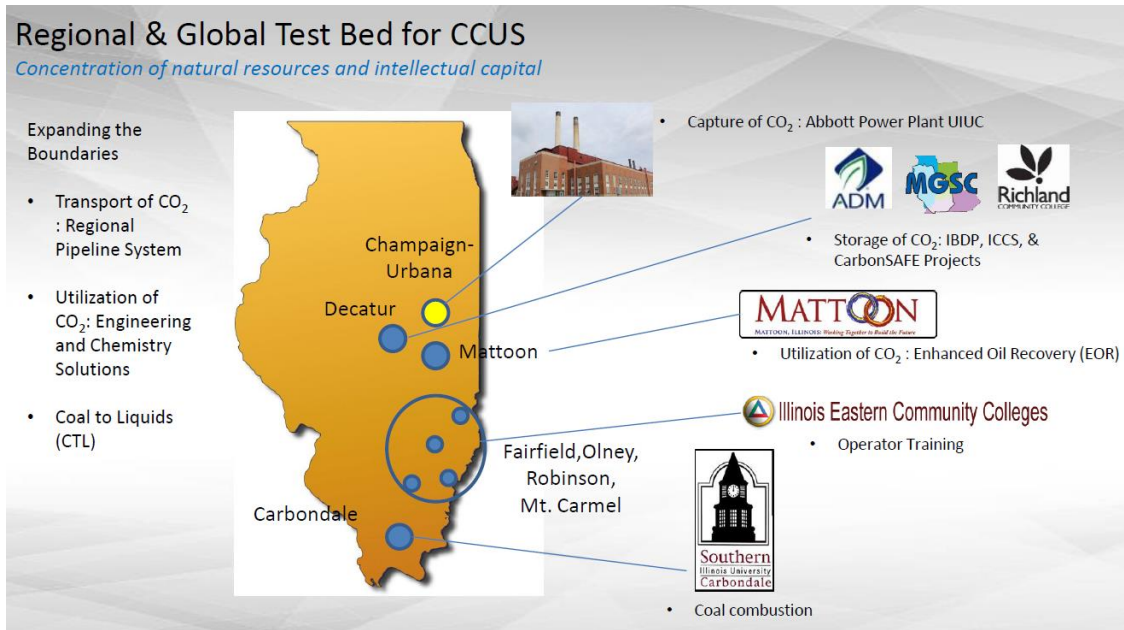


圖 3.2-16 伊利諾州 CCUS 發展區域與全球測試平台類型暨機構分布示意

### 3.3 CCS 辯論議題

在許多情況下，CCUS 是一項支持正反雙方議題通道的努力。我們將從各面向探討，作為支持 CCUS 的論據，並討論其所需要的，使各方共同努力實現這一重要技術的政策平衡。茲將有關議題討論內容扼要述如下：

推展保守的碳捕獲政策：

清晰路徑基金會(Clear Path Foundation)是一個 501c (3) 非營利組織。其工作項目包括：教育保守的政策制定者有關於能源系統知識，掌理研究業務，並向具有相似目標的組織提供研究經費。該基金會的使命，是加速保守的潔淨能源解決方案。美國的能源政策，必須以自由市場為基礎，而不是大政府。

其專注於推展有關潔淨及基載技術(如核能、淨煤、天然氣和水力)的政策解決方案。

重新架構的信息:CCS 為高成本減輕的選擇; CCUS 為低成本減輕的選擇; EOR 為經濟機會。

CCS 作為環境控制不受歡迎，為潔淨能源計劃的合法挑戰，美國各州表達的意見，如圖 3.3-1；但 EOR 却得到廣泛的興趣，如圖 3.3-2。

### CCS is unpopular as an environmental control



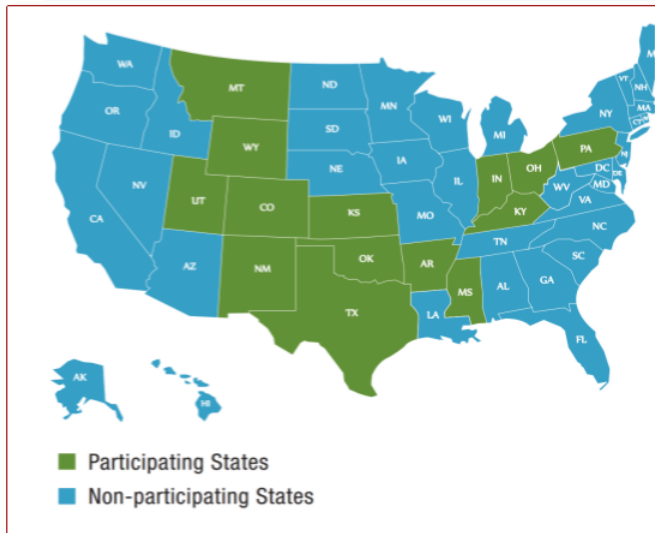
“EPA cannot rely on **experimental and costly technology** that threatens hard-working West Virginians whose livelihoods are dependent upon the coal industry”

– Patrick Morrissey, West Virginia Attorney General

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.3-1 美國各州對 CCS 作為環境控制不受歡迎表達意見情形

### ... but enhanced oil recovery has widespread interest



“CO<sub>2</sub>-EOR enhances our nation’s **energy and economic security** by lessening our dependence on foreign oil, often imported from unstable and hostile areas, and **reducing our trade deficit** by keeping dollars currently spent on oil imports at work in the U.S. economy”

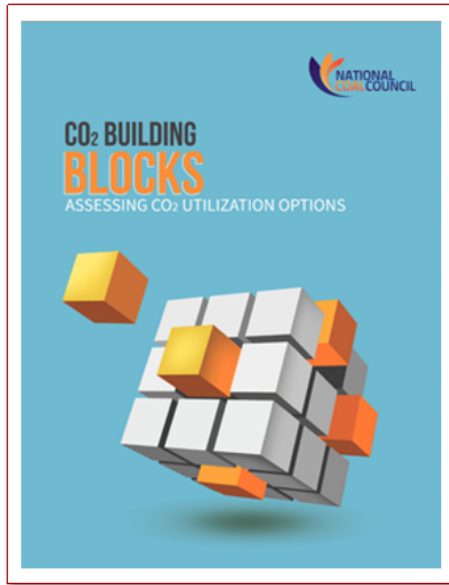
– Governors Matt Mead (WY) and Steve Bullock (MT)

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.3-2 美國各州對 EOR 參與否表達廣泛的興趣情形

首先將碳捕獲重新排列到經濟上，如圖 3.3-3。到 2030 年，可以通過 CO<sub>2</sub>-EOR 來支持 375,000 個工作。美國在擁有先進技術下，每年原油產量從約 35 億桶可增至 100 多億桶；石油的進口可以減少 1/3；約 1.4 萬億美元挹注入政府財政內。

## Reframing carbon capture to economics first



**Economy:** "With the benefit of this RD&D, the market for CO<sub>2</sub> (from the EOR industry) would more than double – from 11 billion metric tons with today's technologies to a potential of 24 billion metric tons with 'next generation' technology"

**VS**

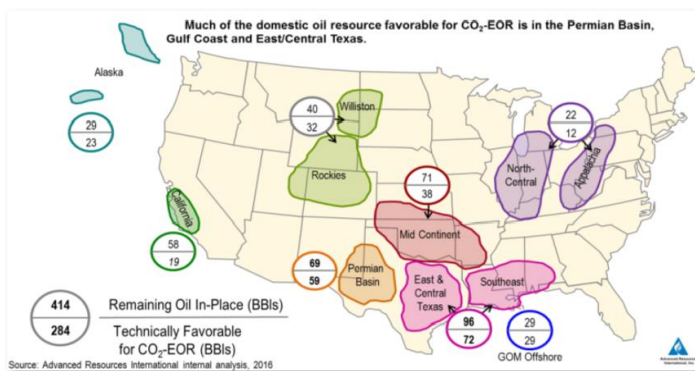
**Environment:** "...CCUS technologies for all fossil fuels will have to be deployed in the near term to achieve U.S. and global climate objectives"

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.3-3 首先將碳捕獲重新排列到經濟上

美國具有 CO<sub>2</sub>-EOR 潛力的州域分布，如圖 3.3-4。大部分適合作 CO<sub>2</sub>-EOR 的地方油田，主要分布在二疊紀盆地、德州中部及東部與墨西哥灣沿岸。NRG 的 Petra Nova 電廠 CO<sub>2</sub> 捕獲，將會增加德州的石油生產場從每天 300 桶提高到 15000 桶，是 50 倍的增加。因此，美國提高石油開採潛力的收益估算約 5.67 兆美元，如圖 3.3-5。美國 CO<sub>2</sub>-EOR 之 CO<sub>2</sub> 每噸生產及注入價格與提高石油開採生產桶數，對應及停損界線，如圖 3.3-6。

## Regional distribution of CO<sub>2</sub>- EOR potential



NRG's Petra Nova facility will increase oil production from a Texas field from 300 barrels per day to up to 15,000 barrels per day, a 50-fold increase



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.3-4 美國具有 CO<sub>2</sub>-EOR 潛力的州域分布與增估計數量

	Revenues
CO2 Capture and Transporters	\$1.21 trillion
State, Local and Federal Treasuries	\$1.13 trillion
CO2-EOR Investors (including Return on Capital)	\$1.27 trillion
General Economy and Mineral Owners	\$2.06 trillion
<b>Total</b>	<b>\$5.67 trillion</b>

“... the technology used to produce this additional oil will help maintain U.S. leadership in oil production technology, creating opportunities around the world for U.S. companies”

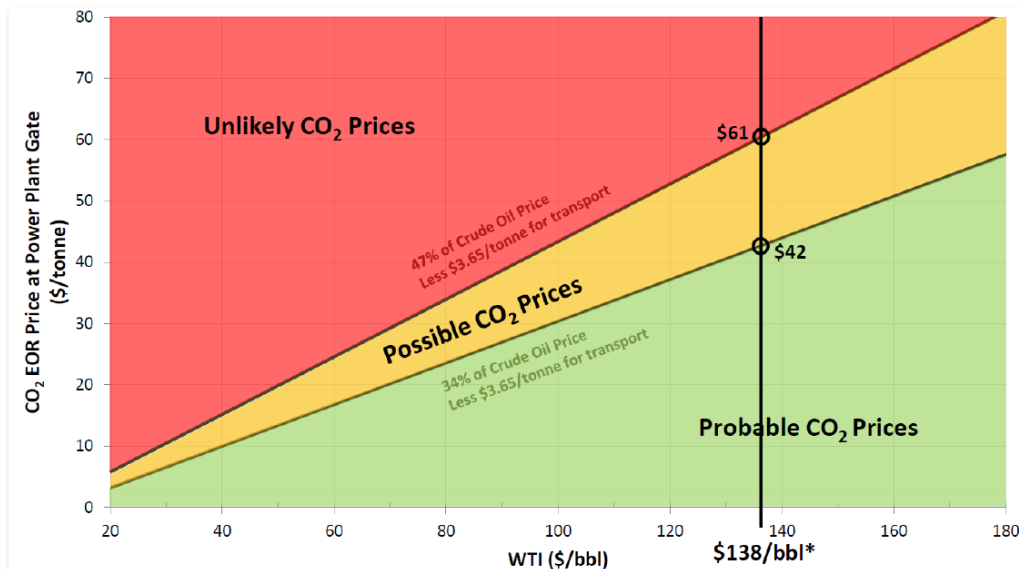
– United States Chamber of Commerce

\* At \$70 per barrel of oil

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.3-5 美國提高石油開採潛力收益的估算數量一覽

### What's stopping us?



Source: NETL

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.3-6 美國 EOR 之 CO<sub>2</sub> 每噸生產及注入價格與石油生產桶數，對應及停損界線

美國聯邦研發和企業協調一致雄心勃勃的目標，推進 4 大不同先進的碳捕獲技術示範計畫，於 2027 年將達到商業尺度。每個計畫必須達到有利可圖捕獲與銷售。其大部分碳排放，可獲得私營部門融資，並支持美國能源生產。

### 3.4 CCS 全球展望

全球 CCS 研究機構主要的任務，是以增進公眾了解及接受碳捕存、碳捕存的政策支持與碳捕存的商業機會等方式，加速全球 CCS 發展和部署。

CCS 在低碳技術組合中至關重要，如圖 3.4-1。於 2017 年 1 月依地區或國家的大型 CCS 設施統計，如表 3.4-1。全球主要 CCS 設施發展的分布，如圖 3.4-2。

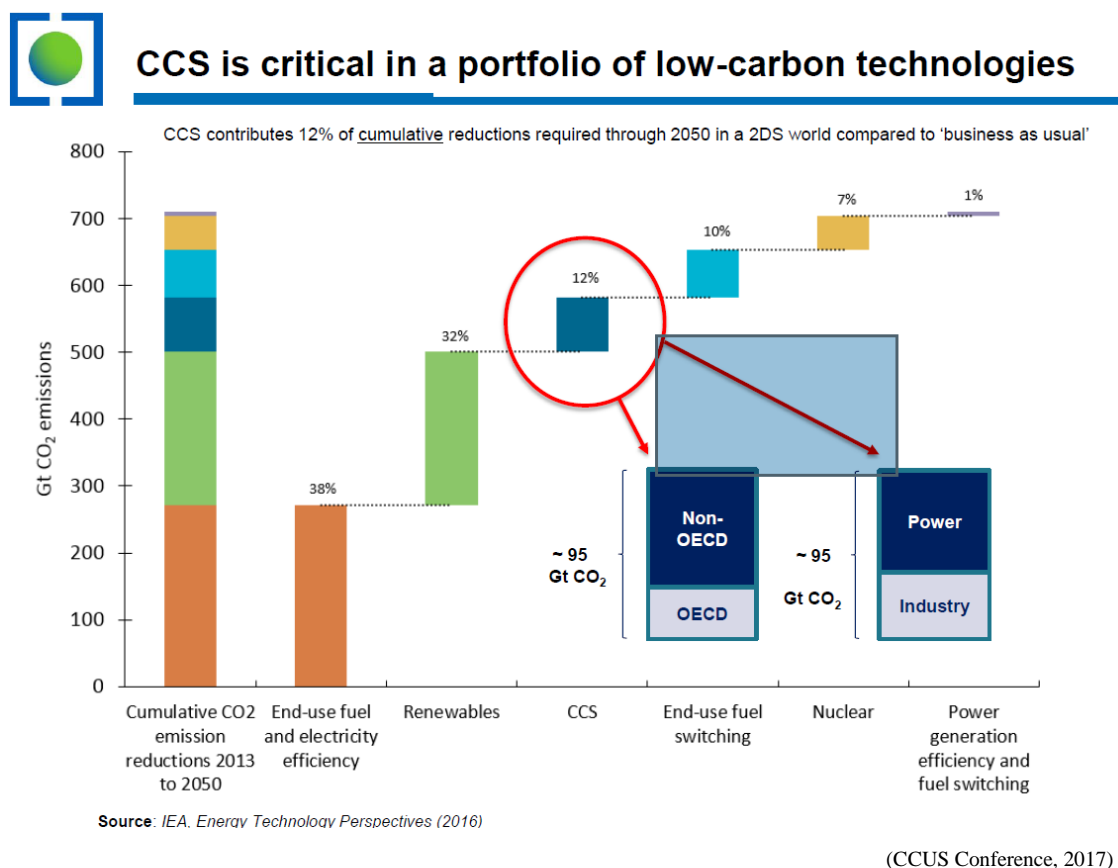


圖 3.4-1 CCS 在低碳技術組合中佔 12%

表 3.4-1 2017 年 1 月全球地區或國家的大型 CCS 設施統計



## Large-scale CCS facilities by region or country – January 2017

	Early planning	Advanced planning	Construction	Operation	Total
North America	1	1	3	12	17
China	5	2	1	-	8
Europe	2	1	-	2	5
Gulf Cooperation Council	-	-	-	2	2
Rest of World*	3	1	1	1	6
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>17</b>	<b>38</b>

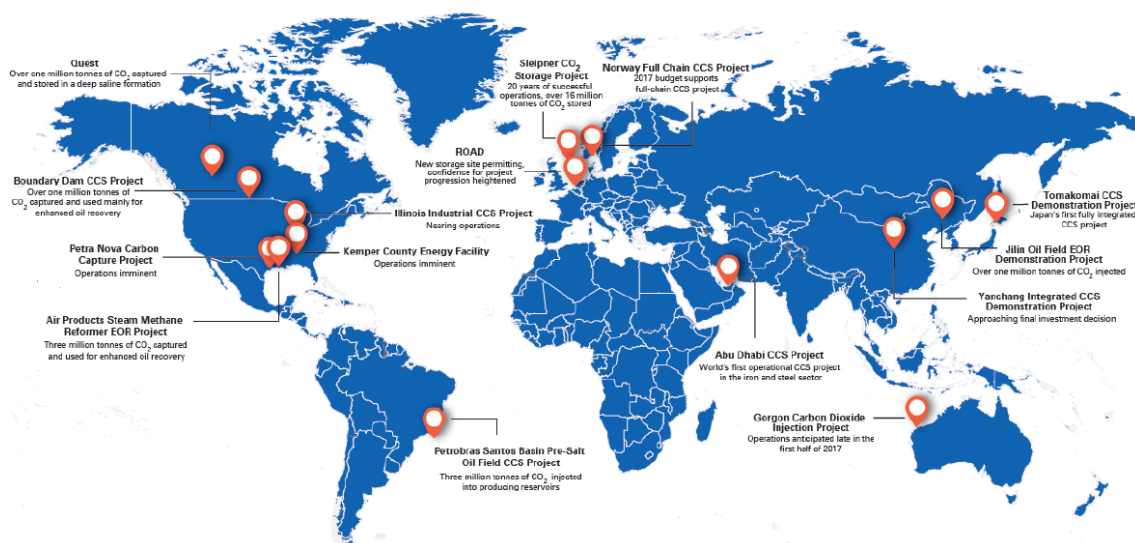
\* Includes facilities in Australia, Brazil and South Korea.

North America dominates – three of the four facilities in construction soon to be operational, China has most facilities in planning, facility pipeline needs replenishment

(CCUS Conference, 2017)



## Key CCS facility developments globally



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.4-2 全球主要 CCS 設施發展的分布

### 3.5 CCS 政策實務

CCS 和 CO<sub>2</sub>-EOR 全尺度部署標準化的角色

國際標準化組織技術委員會結構(ISO TC265 Structure)組成，如圖 3.5-1；ISO TC265 會員組織，如圖 3.5-2。

第六組針對 EOR 問題提出標準：本標準適用於人為生產的二氧化碳，注入到用於油和其他烴類（CO<sub>2</sub>- EOR）的增強回收操作中，尋求確認 EOR 的 CO<sub>2</sub> 數量為長期安全性存儲。

本標準有助於 CCS 和 CO<sub>2</sub>-EOR 的部署，主要因素為降低成本，知識傳承，工業指導原則代替強制政策驅動的架構，啟用二氧化碳交易方案等誘因，公共與私人之風險分擔，解明法律與法規的挑戰。

未來迫切需要 CCS 與進一步 CCUS 之部署，CO<sub>2</sub>-EOR 可以作為 CCS 的催化劑，標準化能有助於商業化和全球之部署，技術和法規方面的差異，是影響標準過程、範圍與內容之關鍵因素。

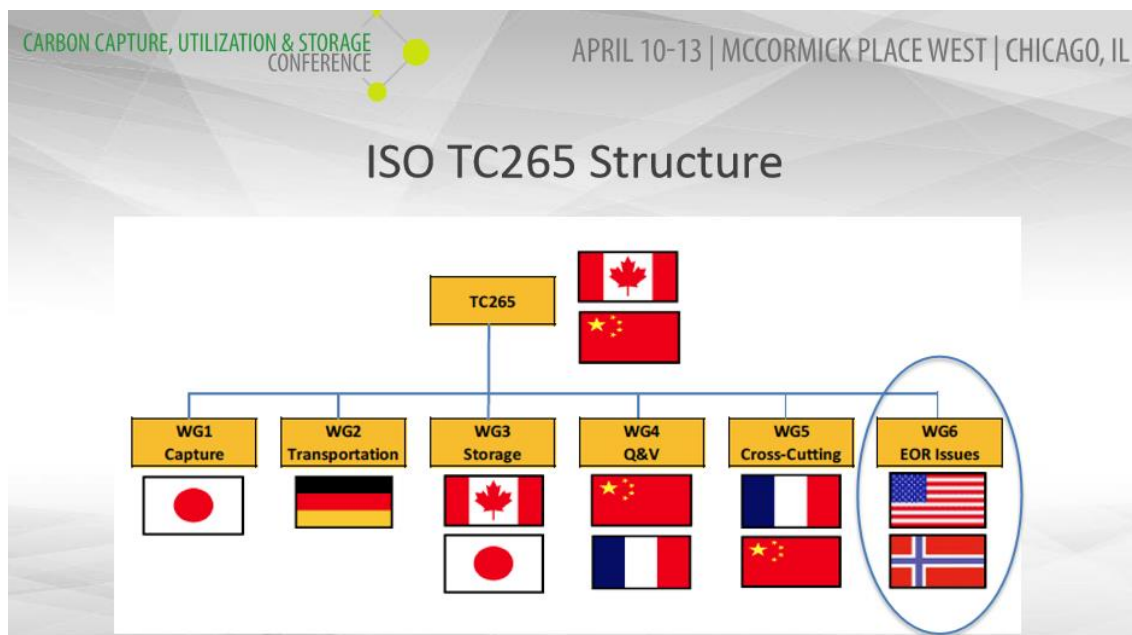


圖 3.5-1 ISO TC265 Structure 各國工作組組織一覽

### Membership of ISO TC265

Countries		Liaisons
P- Participating	O- Observing	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Member bodies that want to <b>play an active role</b></li> <li>• Have <b>obligation to vote</b></li> <li>• Also <b>identify experts to contribute</b></li> <li>• Provide <b>national delegations</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Those who <b>wish to follow</b></li> <li>• Can still <b>make contributions</b></li> <li>• But <b>do not want to commit</b></li> <li>• Open to ISO Member bodies and Correspondent members</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• International organizations</li> <li>• Internal liaisons (committee-to-committee)</li> <li>• Participation or information</li> <li>• Helps to <b>ensure wider acceptance, do not have a vote, bring expertise</b></li> </ul>

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.5-2 ISO TC265 會員組織與職掌

ISO 不寫標準，技術委員會編寫標準，成員國批准標準，會員國採用 ISO 標準。ISO 不影響技術內容。

ISO TC265 正制定國際 CCS 標準。其目的為緩解公眾對安全的擔憂，促進遵守監管流程，簡化審批，主流的引導實務。ISO CCS 跨越國際邊界，專業技術是國際性的，計畫經營者是跨國的，協調一致是有利的，必須承各國的差異性。

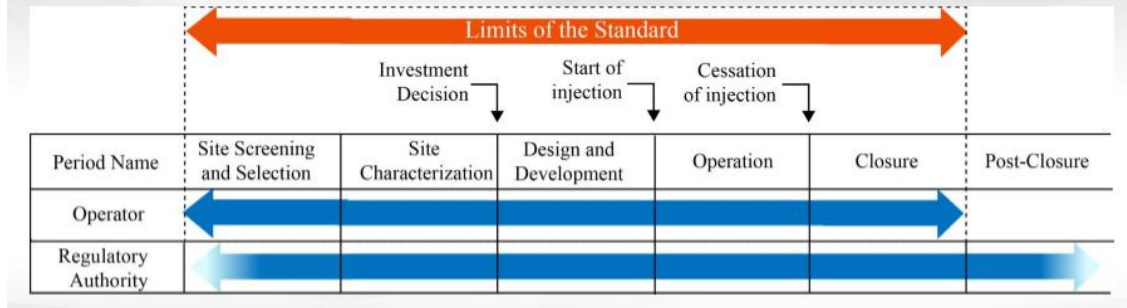
ISO TC265 的目標，為提供支持國際溫室氣體(GHG)減排技術以符合工業最佳操作，確保 CCS 計畫對未來世代是安全的，達成共識一致的規則和指導條列以協助技術開發，不一定是規範性的，特別是在迅速發展的技術領域（如 Capture）以避免阻礙創新。

ISO TC265 的內容，包括 CO<sub>2</sub> 捕獲，運輸和地質儲存（CCS）領域之設計、施工、運行、環境規劃與管理、風險管理、量化監測與驗證以及相關活動之標準化。

ISO 27914 的範圍，是有關 CO<sub>2</sub> 地質儲存，建立對 CO<sub>2</sub> 注入流地質儲存之要求與建議，適用於陸地與海域，對每個計畫確認場址選擇與管理都是獨一的，不適用於 CO<sub>2</sub>-EOR。該標準的地質儲存計畫生命週期限定，如圖 3.5-3。



# Storage Project Life-Cycle



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.5-3 CO<sub>2</sub> 地質儲存計畫生命週期

工業界回饋到該標準，可提供指導和期望標準以降低計畫的生命週期成本；通過基準工作增進計畫理解；將最佳的實踐應用在開發設計與品質，並將風險評估與 M&V 整合，以確認關注的特定領域；從石油與天然氣工業學習，直接適用在互補的技術、資源和設備上。

### 3.6 二氧化碳捕捉實務

#### 挪威 TCM 發展現況

挪威的 CO<sub>2</sub> Technology Centre Mongstad (TCM) 是由政府與相關業者共同組成的試驗中心，致力於降低 CCS 的技術與財務風險，希望藉由該中心進行大規模試驗來加速全球二氧化碳捕集與封存技術早日大規模實施。(圖 3.6-1)



圖 3.6-1 挪威 TCM 的發展目標

TCM 經由測試碳捕集技術來降低大規模實施所會面臨的技術、環境、與財務風險，TCM 提供碳捕集技術開發商一個共同的測試平台，讓個別廠商的碳捕集技術可以在同一環境下測試與改善，希望藉此促進全球 CCS 技術的快速發展。

自成立以來 TCM 已完成多項醇胺捕集技術的測試(如圖 3.6-2)，相關的技術廠商也在中心發展更新的技術，改善能耗與成本。

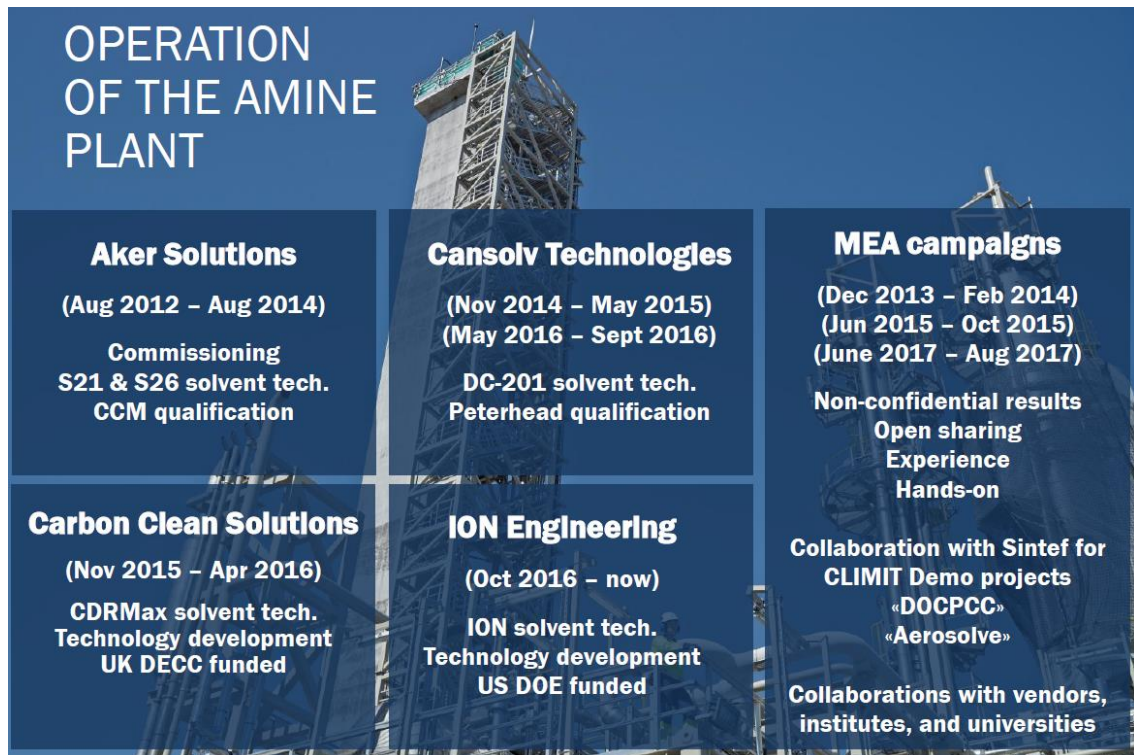


圖 3.6-2 TCM 測試的醇胺捕集技術

TCM 的醇胺捕集技術測試廠是由 Aker Solutions 和 Kværner 設計及興建，以通用且具彈性的設計來測試 30 wt% MEA 類的溶劑吸收程序。吸收塔是以混凝土興建之長方體塔，塔內以 PP 襯裡以減少腐蝕。並有三種結構化填充料可供測試，吸收塔上方亦安裝水洗塔以降低溶劑逸散。

因分析與測試需要，吸收塔出口設有等速採樣裝置 (isokinetic sampling facilities) 來收集出口物質流的成分。也在吸收塔各部分加裝了各式線上監測儀器，以分析程序流程參數與物質成分的變化情況。

氣提塔有兩種不同直徑的設計，可應用於不同的溶劑循環速率以及不同 CO<sub>2</sub> 濃度的煙氣。TCM 醇胺捕集技術測試廠的程序流程如圖 3.6-3

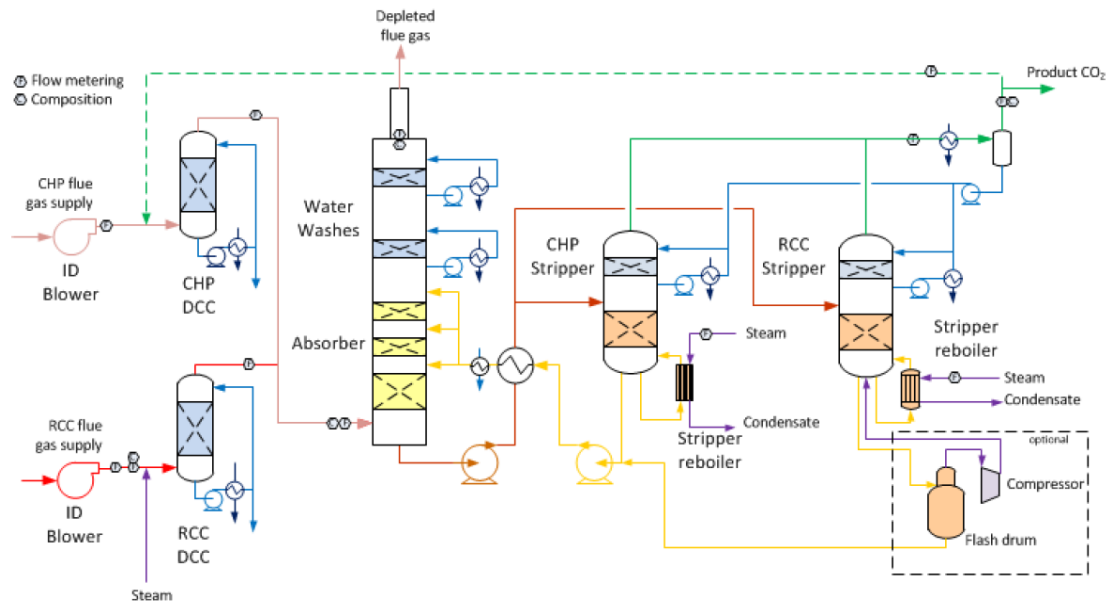


圖 3.6-3 TCM 醇胺捕集技術測試廠的程序流程圖

在降低技術風險上，TCM 於醇胺捕集技術與冷氫捕集技術上已經測試超過 25,000 小時，並以獲致豐富的運轉經驗。對於碳捕集程序的操作、啟動、停機有豐富的知識與經驗，並且寫成相關文件做知識累積。相關線上儀器的選擇及設置、實驗室分析技術、以及製造廠的技術規範也累積相當經驗。

為了理解碳捕集技術大型化的風險，TCM 根據試驗成果已發展相關的模擬工具。這些工具可以用數值化分析評估煙氣組成對 CO<sub>2</sub> 捕集技術的影響。由於溶劑需要長期使用，TCM 也進行了詳盡的溶劑劣化產物分析，並嘗試找出合適的再生程序以降低溶劑使用成本(如圖 3.6-4)。

# REDUCING TECHNICAL RISK EXAMPLES

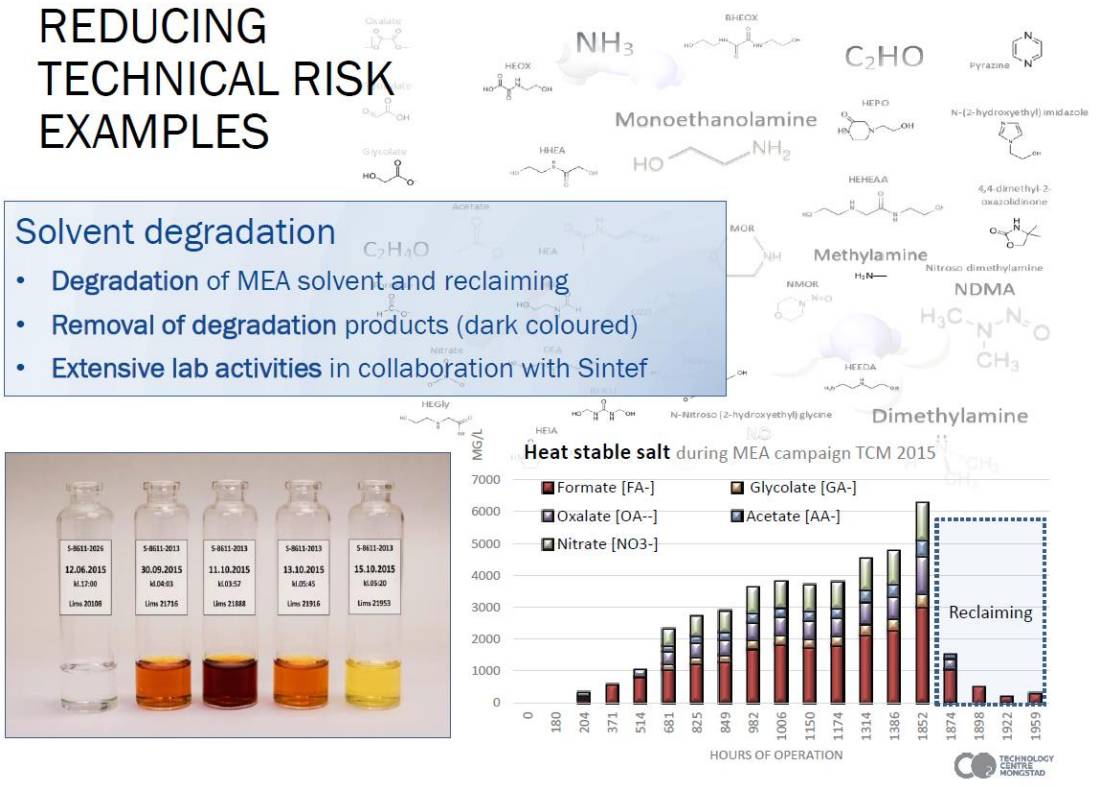


圖 3.6-4 TCM 醇胺捕集技術的溶劑劣化分析

為理解醇胺捕集技術溶劑逸散所造成的環境影響並降低其環境風險，TCM 也從溶劑化學反應與大氣擴散等途徑來驗證溶劑逸散的環境效應(圖 3.6-5)。

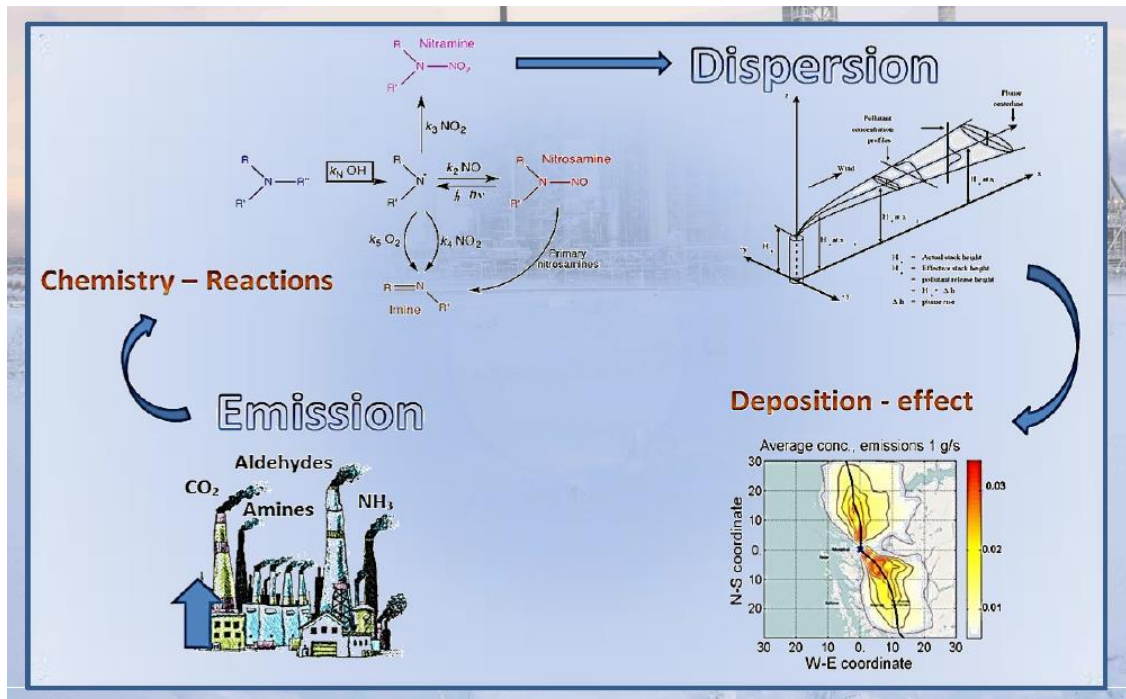


圖 3.6-5 醇胺捕集技術的溶劑逸散機構與擴散途徑

由 TCM 進行的研究顯示醇胺逸散與 SO<sub>3</sub> aerosol 形成有很大的關聯性，煙氣內如果有 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> mist aerosol 形成將導致非常高濃度的醇胺逸散，根據這項發現 TCM 現正開發合適的過濾與淨化裝置來抑制醇胺逸散問題。

在降低財務成本上，TCM 也根據碳捕集試驗的成果進行捕集設施建造方法的研究，內容包含吸收塔建造材質對溶劑的化學抵抗性，以降低設備腐蝕現象發生增加使用壽命，目前陸續完成幾種吸收塔內襯材料的評估。

TCM 也研究以模組化設計製造或現地建造等工法來降低建造成本，透過模擬工具也進行了真實煙氣條件的大型商業捕集廠的效能與成本評估，以降低未來設置時的財務風險。

二氧化碳捕集廠的程序複雜，在商轉規模下須同時調控吸收塔、氣提塔、熱交換器、水洗塔、溶劑再生與淨化等單元。需要一個有效且反應快速的控制系統來使這些單元程序互相搭配良好，TCM 在測試過程中也針對系統的調控性需求進行研究，期望能開發出合適的整廠控制策略及最佳化的控制系統。

在 TCM 進行的二氧化碳捕集試驗分為：供應商試驗(vendor campaign)、業主試驗(owner campaign)等兩類。

供應商試驗是由捕集程序供應商(vendor)來進行，vendor 於試驗進行前與 TCM 簽訂合約，雙方依據合約內容在一段時間內進行研究與試驗，通常是由 TCM 負責捕集廠與實驗室的日常運轉，vendor 負責進行碳捕集試驗、能耗分析、溶劑劣化分析、溶劑逸散研究等測試工作。最終由 vendor 進行報告和相關研究工作，在 vendor campaign 的模式下，vendor 可以利用這些研究和報告內容在全球市場下推廣其碳捕集技術。

業主試驗是由業主(TCM)自主完成，通常是利用公開的溶劑(如: MEA)進行試驗，由於這些試驗是由 TCM 自主完成，測試結果獨立客觀，成果可用於建立碳捕集方法的效能基線(baseline)，可用於和各個供應商的測試成果比對，也藉此加速碳捕集技術的發展(圖 3.6-6)。

# TCM DA TEST CAMPAIGNS

## Typical Vendor campaign

- Governed by a Test Agreement
- Access to the plant for a certain time slot
- Vendor responsible for test program, usually;
  - Investigation of energy consumption, degradation, emissions, corrosions, etc.
- TCM responsible for plant and lab operations
- Close collaboration between vendor and TCM staff, and others e.g.:
  - Sintef (laboratory)
  - Elec. Pow. Res. Inst. (ind. verifications)
  - Uni. of Oslo (operations of mass specs.)
- Vendor responsible for reporting as defined per Test Agreement
- Results to be used by owners for planning and evaluation of CO<sub>2</sub> capture projects worldwide

## Typical Owners campaign

- Based on open source solvent, e.g. MEA
- TCM (owners) responsible for test program, execution and reporting
- Creating independently verified baseline results
- Close collaboration with governments, research institutes, and universities
- Scientific dissemination of results




圖 3.6-6 TCM 碳捕集試驗分類

TCM 完成的業主試驗是和美國 EPRI 合作，測試內容是以 MEA 為溶劑來吸收煙氣內的二氧化碳。測試內容包含：能耗分析、逸散物分析等議題(圖 3.6-7)。

# TCM DA TEST CAMPAIGNS EXAMPLES

## MEA Owners campaign

- Establishing independently verified baseline results, MEA solvent system
- US based Electric Power Research Institute (EPRI)
  - Verification protocol
  - Test execution
  - Independent data treatment and reporting

Parameter	Results
Gas turbine flue gas	60.000 Sm <sup>3</sup> /hr
CO <sub>2</sub> capture rate	~85%
CO <sub>2</sub> content in/out (dry)	~3.8 / ~0.5%
Energy penalty	3.5 GJ/t CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> produced	3350 kg/hr
MEA degradation rate	~1.4 kg MEA / t CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> mass balance	100 ±0.5 %

Component	Results
MEA	0.02 ppmv
Ammonia	15 ppmv
Acetaldehyde	0.2 ppmv
Formaldehyde	0.5 ppmv
Total nitrosamines	< 0.00008 mg/m <sup>3</sup>
Total nitramines	< 0.0002 mg/m <sup>3</sup>

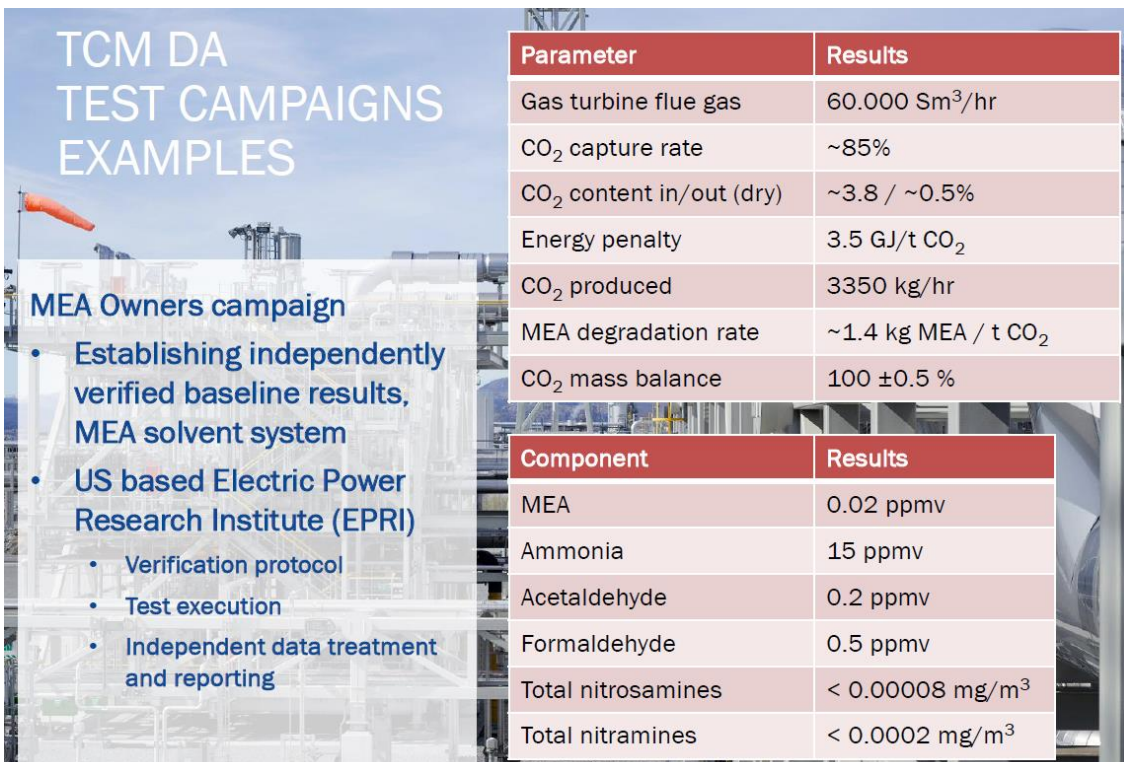


圖 3.6-7 TCM 完成的業主試驗

除了二氧化碳捕集試驗之外，TCM 也進行了二氧化碳再利用技術的測試工作，目前利用捕集下來的二氧化碳於光合反應器內來進行藻類的養殖，並研究藻類做為魚類飼料的可行性(圖 3.6-8)。

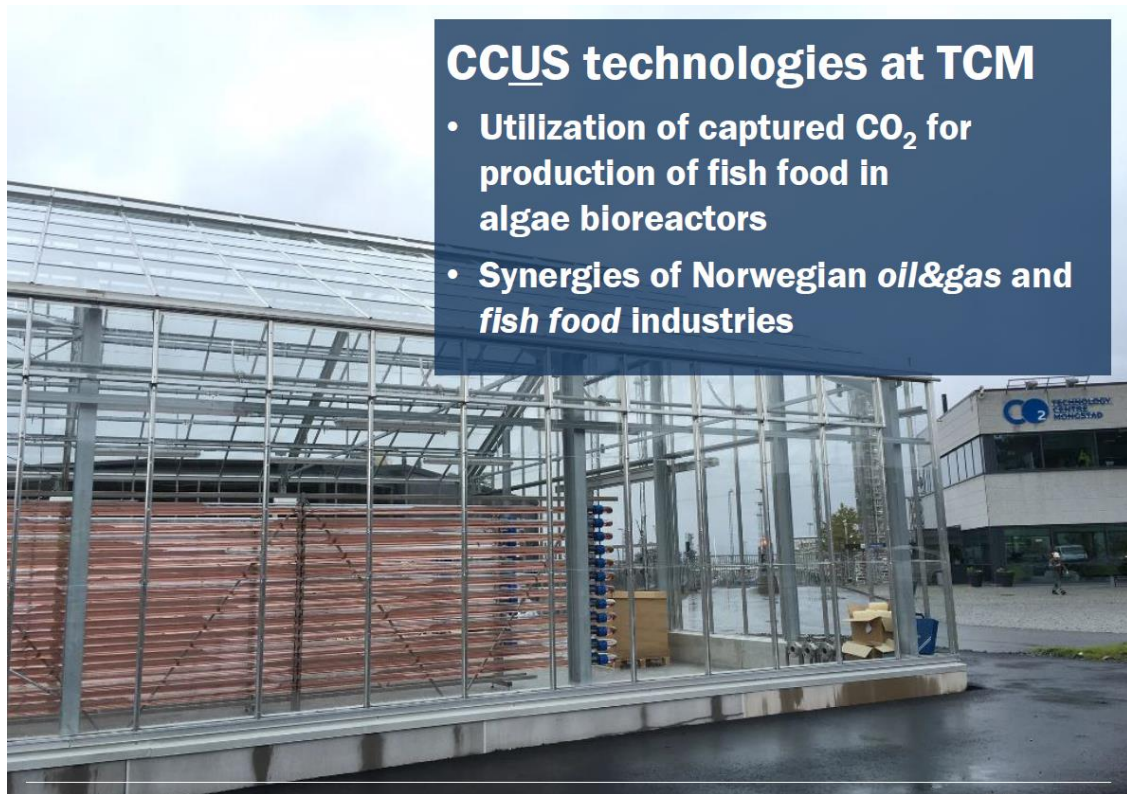


圖 3.6-8 TCM 的二氧化碳再利用試驗

TCM 測試的成果也透過 ITCN (International Test Centre Network) 分享知識與經驗，希望能加速國際間碳捕集技術的發展，大規模實施相關技術以降低溫室效應對全球氣候變遷的影響。

TCM 也透過參與相關的國際研討會、於國際期刊發表相關論文、國際合作等方式宣傳其研究成果，也是為了加速全球碳捕集技術的佈署與實施。

### 美國 NCCC 發展現況

美國能源部為了加速碳捕集技術發展於阿拉巴馬州成立了 National Carbon Capture Center (NCCC)，NCCC 由 Southern Company 負責管理與經營，合作夥伴包含：US DOE、National Energy Technology Laboratory (NETL)、Electric Power Research Institute (EPRI)、煤炭工業業者等研究機構與相關工業界夥伴。



與 TCM 相同，NCCC 提供程序供應商在真實的煙氣條件下進行相關開發工作，測試的煙氣包含鍋爐燃燒後的煙氣、汽化爐的合成氣等不同來源(圖 3.6-9)。

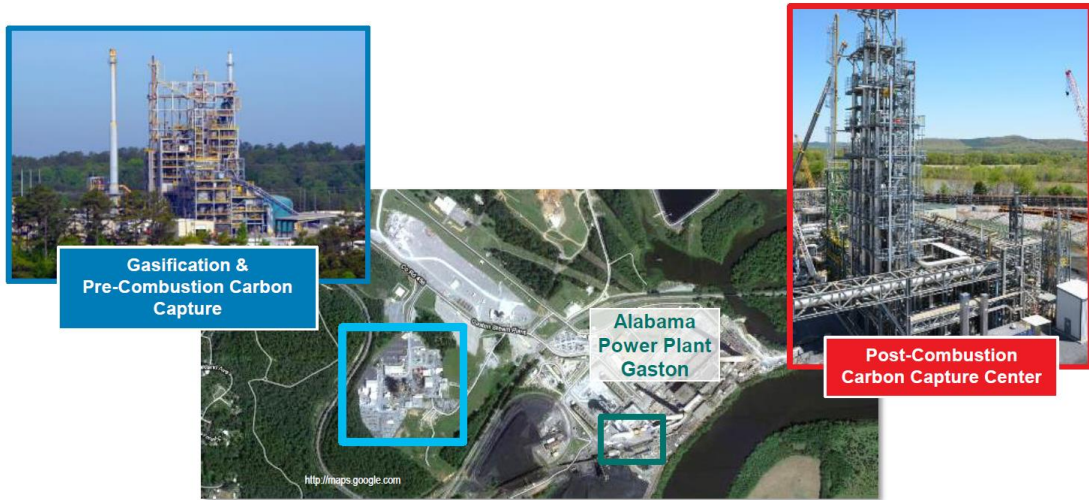


圖 3.6-9 美國 NCCC 測試場域

NCCC 更設置不同規模的煙氣出口來測試不同規模的程序，彈性的設計與操作條件也可以提供給學研單位，進行先進碳捕集程序的開發工作(圖 3.6-10)。

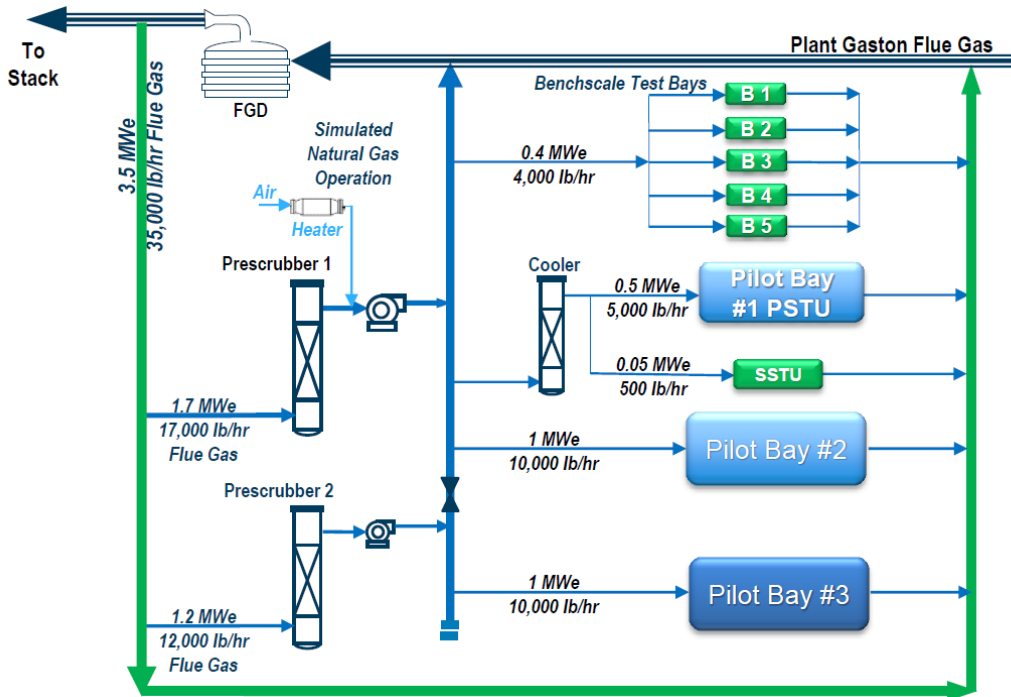


圖 3.6-10 NCCC 燃燒後捕集技術測試廠配置

在小規模的 Bench-Scale 測試區最多可以容納 5 個供應商分別進行不同試驗，Bench-Scale 最主要是測試還在早期開發階段的程序，可以利用真實的煙氣來測試捕集技術的效能，並對於其逸散物評估環境影響性(圖 3.6-11)。

## PC4 Bench-Scale

- Simultaneous operation of up to five developers' test units
- Slipstream Solvent Test Unit (SSTU) for solvents in early development
- SSTU also used for solvent emissions studies and emission mitigation processes
- Flue gas/utilities and gas analysis systems operating independently of PC4 pilot-scale area

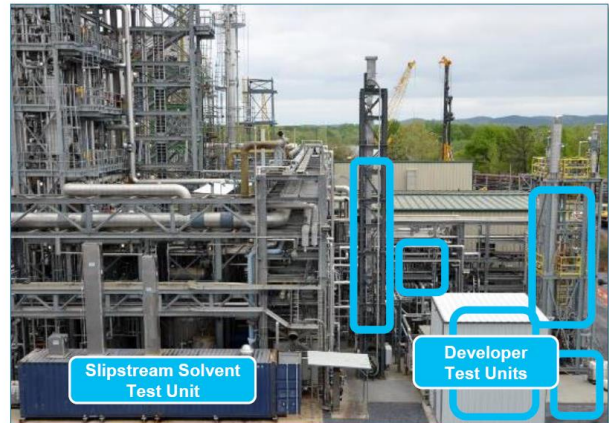


圖 3.6-11 NCCC 的 Bench-Scale 測試區

NCCC 另外設有 Pilot-Scale 的測試區，在 Pilot-Scale 測試區可以針對各個程序供應商的需求，客製化調整操作環境與條件，這部分測試的規模比 Bench-Scale 稍大，但也可用於溶劑逸散與降解產物的分析與研究(圖 3.6-12)。

- Simultaneous operation of developer test units and Pilot Solvent Test Unit (PSTU)
- PSTU offers flexible operation to match developers' planned commercial configuration
- PSTU also supports solvent emissions and degradation studies



圖 3.6-12 NCCC 的 Pilot-Scale 測試區

在燃燒後捕集技術的測試方面，NCCC 已完成超過 47,000 小時的測試，超過 20 程序開發商的燃燒後捕集程序在 NCCC 測試完成。

於 Pilot-Scale 測試也超過 14,000 小時，對於個別程序的質量與能量平衡分析也進行相關研究，利用這些成果也支援 DOE 進程序模擬工具與軟體的開發工作，以利用於碳捕集程序的放大，降低大型化商用程序的財務風險。

NCCC 與 TCM 同是 ITCN 的一員，其測試的成果也透過 ITCN 分享知識與經驗，希望能加速國際間碳捕集技術的發展(圖 3.6-13)。

### International Test Center Network Members



圖 3.6-13 ITCN 成員

### 3.7 二氧化碳地質封存與監測實務

有關二氧化碳地質封存部分：

#### 1. 蒙特利爾地下研究實驗室進行的二氧化碳注入井週邊水泥固封確保實驗

- 本實驗的重點是緩解有關 CO<sub>2</sub> 注入井週邊水泥固封系統之壓力洩漏，如圖 3.7-1。
- 其目標是開發新型密封劑類型 CO<sub>2</sub> 洩漏修補能力，如圖 3.7-2，俾能最終在現地使用。

圖 3.7-1 CO<sub>2</sub> 注入井週邊水泥固封系統洩漏途徑

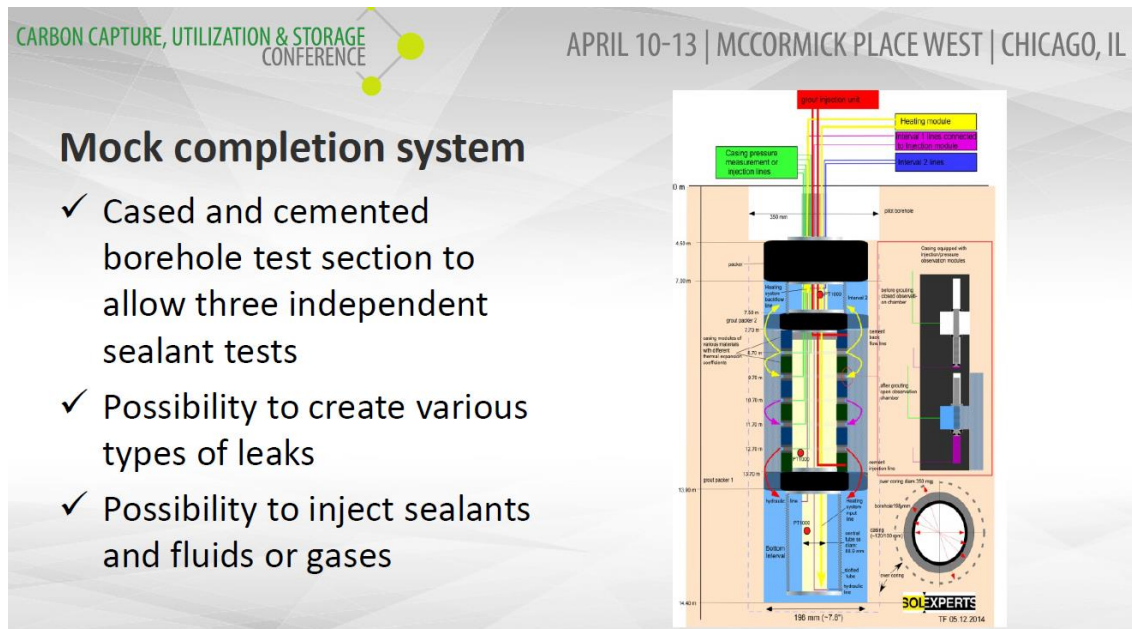


圖 3.7-2 在套管和水泥鑽孔試驗段可能產生各種類型的洩漏，注入密封劑的可能性

#### 2. 二氧化碳捕獲計畫(CCP)-第四階段(2014-2018)

- 本計畫之第四階段工作，是為石油與天然氣工業 CO<sub>2</sub> 儲存計畫發展之進階 CCS 技術布置與知識。其組織架構，如圖 3.7-3。

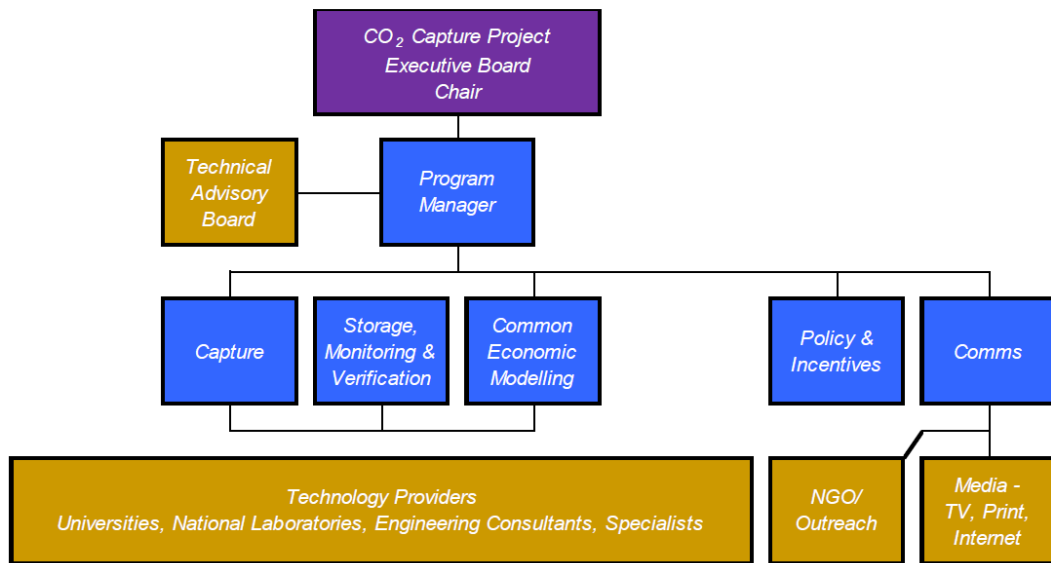


圖 3.7-3 CCP Phase 4 組織架構暨工

- 本計畫之研究，展現政策和獎勵計畫從 CO<sub>2</sub> EOR 轉換到 CO<sub>2</sub> 儲存的最佳實踐
- 本計畫研究之成果，美國陸地場址（高滲透性墨西哥灣沿岸儲存層和低滲透性二疊紀盆地儲存層）CO<sub>2</sub> 儲存成本分別為鹽水層儲存 9 美元/噸，EOR 轉換儲存 26 美元/噸。
- SMV 成本高達鹽水儲存項目總成本的 50%，EOR 轉換儲存項目總成本的 25%。
- 井的可注入性是儲存成本的主要決定因素，需作可注性的改進。
- 顯著成本與監控相關，但大量擴展體積、新技術與降低頻率，可以進一步降低成本。
- CO<sub>2</sub> EOR 項目吸收 CCS 捕獲成本，因為 CO<sub>2</sub> 用於商業目的。因此，通過 EOR 消除 CO<sub>2</sub> 捕獲成本，大大提高了 CCS 的財務可行性。

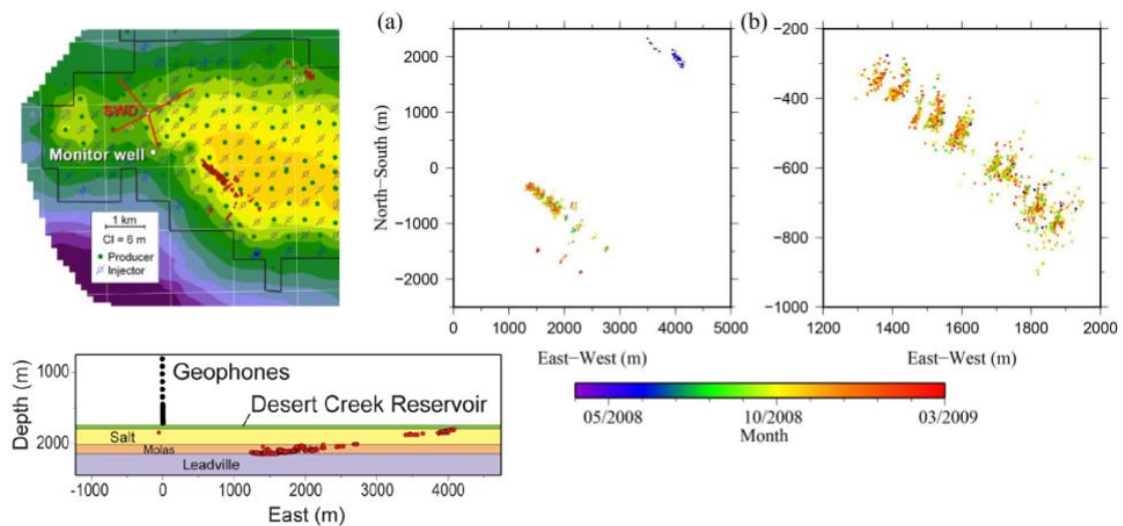
3.使用有限差分地震波形模擬改進微震事件之力矩張量統合反演

- 本研究之目的，為進行 CO<sub>2</sub> 地質碳儲存之微震監測，減少用單孔地震檢波

器陣列獲取微震數據之力矩張量/焦點機制反演不確定性。

- 力矩張量/焦點機制可闡明應力狀態，識別斷裂帶，從應力誘發事件中區分出流體誘導的事件
- 以在微震事件發生的位置，繪出等壓力圖/碳流前緣，檢測及標定斷層的活動性，鑑別潛在的 CO<sub>2</sub> 洩漏。
- 本研究應用於猶他州 Aneth EOR 場址，採取於 2007-2009 年 CO<sub>2</sub> 注入期間，在深度 800m-1700m 單孔埋設 23 個地震檢波，接收到的微震數據進行處理分析。
- 其結果顯示，有限差分波場模擬能夠更好地將合成與真實的微震波形相匹配。
- 由事件位置和焦點機制得出平行裂縫帶，經判釋為先前已存在的 7 組走向平移滑動斷裂，並由 CLVDs 顯示，可能係孔隙水壓誘發微震，如圖 3.7-4 與圖 3.7-5。

### Microseismic events at the reservoir basement

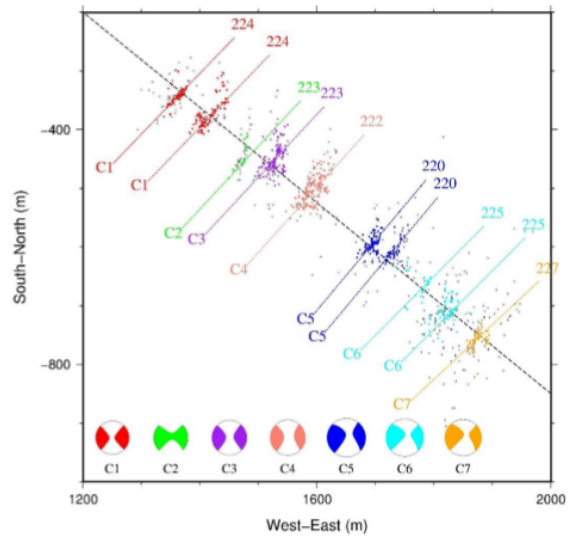


(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-4 微震事件發生在儲存層下方的基岩層

## Pre-existing fracture zones?

- Strike-slip focal mechanisms: inconsistent with the injection-induced stress change
- Pore pressure induces microseismicity



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-5 微震事件發生在 CO<sub>2</sub> 注入前已存在的 7 組走向平移滑動斷裂

4. 使用 FE/NETL Prophet 模型和使用 NETL CO<sub>2</sub>-SCREEN 模型分別進行 CO<sub>2</sub>EOR 與 Saline Storage 推演獲得之 CO<sub>2</sub> 儲存係數比較

- CO<sub>2</sub> 儲存係數是由 CO<sub>2</sub> 佔據岩層可用孔隙空間的分數（類似 CO<sub>2</sub> 的飽和度）。
- 本研究應用於幾乎相同的地層，分別進行前述兩種方法計算儲存係數作比較。
- 在 FE/NETL Prophet 模型中使用流線和流管解決多相流方程，並將含油層作分層計算，如圖 3.7-6。其計算結果繪製成圖，如圖 3.7-7。

## Why is CO<sub>2</sub> Prophet so Efficient at Extracting Oil?

- Stream tubes model net pay
- CO<sub>2</sub> is very mobile
  - Can diffuse/disperse/displace into portions of gross pay outside net pay
  - Can migrate into parts of the formation outside of the gross pay
- Residual saturation of CO<sub>2</sub> not transparently modeled
- CO<sub>2</sub> solubility in water not included

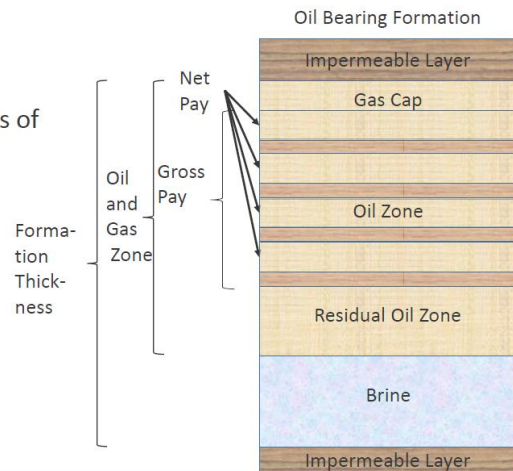
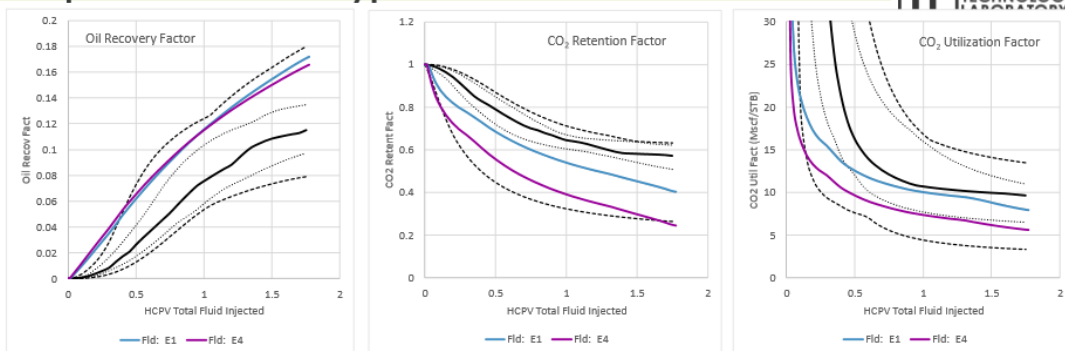


圖 3.7-6 含油層分層包括上部及下部不透水層

## Comparison of Versions 1 and 2 of FE/NETL CO<sub>2</sub> Prophet Model for a Typical Permian Basin Oil Field



- Black lines are 10<sup>th</sup>, 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup>, 75<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> percentiles from Azzolina analysis of CO<sub>2</sub> EOR field data
- Purple line is from original FE/NETL CO<sub>2</sub> Prophet Model (version 1)
- Blue line is from modified FE/NETL CO<sub>2</sub> Prophet Model (version 2)
- Oil Recov Fact: Oil prod as frac of OOIP
- CO<sub>2</sub> Ret Fact: Frac inject CO<sub>2</sub> that is not prod
- CO<sub>2</sub> Util Fact: Purch CO<sub>2</sub>/Oil prod

圖 3.7-7 FE/NETL Prophet 模型模擬計算出 Oil Recov CO<sub>2</sub> Ret CO<sub>2</sub> Util 等因子

- 在 NETL CO<sub>2</sub>-SCREEN 模型，是基於 Excel 的模型，用於從 CO<sub>2</sub> 鹽水儲存中估算存儲在地層中 CO<sub>2</sub> 的質量，主要設計用於估算 CO<sub>2</sub> 的盆地尺度儲存。
- 輸入可以調整以估計 CO<sub>2</sub> 的現地儲存
- 關鍵輸入是 CO<sub>2</sub> 儲存係數，這些由查詢表或使用者的輸入確定
- 查找表值基於：岩石類型（例如碎屑，白雲石，碳酸鹽）、沉積歷史、構造（例如，圓頂，背斜，平坦）



- 使用蒙特卡羅方法來評估 CO<sub>2</sub> 儲存估計的不確定性。
- 其計算結果繪製成表，如表 3.7-1。

表 3.7-1 NETL CO<sub>2</sub>-SCREEN 模型輸入不同 CO<sub>2</sub> 儲存係數計算出之結果

<b>StrmtbFlow and CO<sub>2</sub>-SCREEN Results</b>						
Results for StrmtbFlow						
Category	Main Pay			Main Pay and ROZ		
	WAG wat chs	WAG CO <sub>2</sub> chs	"Pure" CO <sub>2</sub>	WAG wat chs	WAG CO <sub>2</sub> chs	"Pure" CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> in Reservoir (Mtonne)	147	206	223	190	266	289
CO <sub>2</sub> saturation in net pay	0.181	0.285	0.298	0.181	0.285	0.298
Percent of CO <sub>2</sub> in net pay	56%	63%	60%	56%	63%	60%
CO <sub>2</sub> storage coefficient	0.131	0.183	0.198	0.169	0.236	0.256

Results for CO <sub>2</sub> -SCREEN						
Category	Domal Structure			Flat Structure		
	P <sub>10</sub>	P <sub>50</sub>	P <sub>90</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>50</sub>	P <sub>90</sub>
CO <sub>2</sub> in Reservoir (Mtonne)	128	164	206	68	75	82
CO <sub>2</sub> storage coefficient	0.115	0.146	0.184	0.061	0.067	0.073

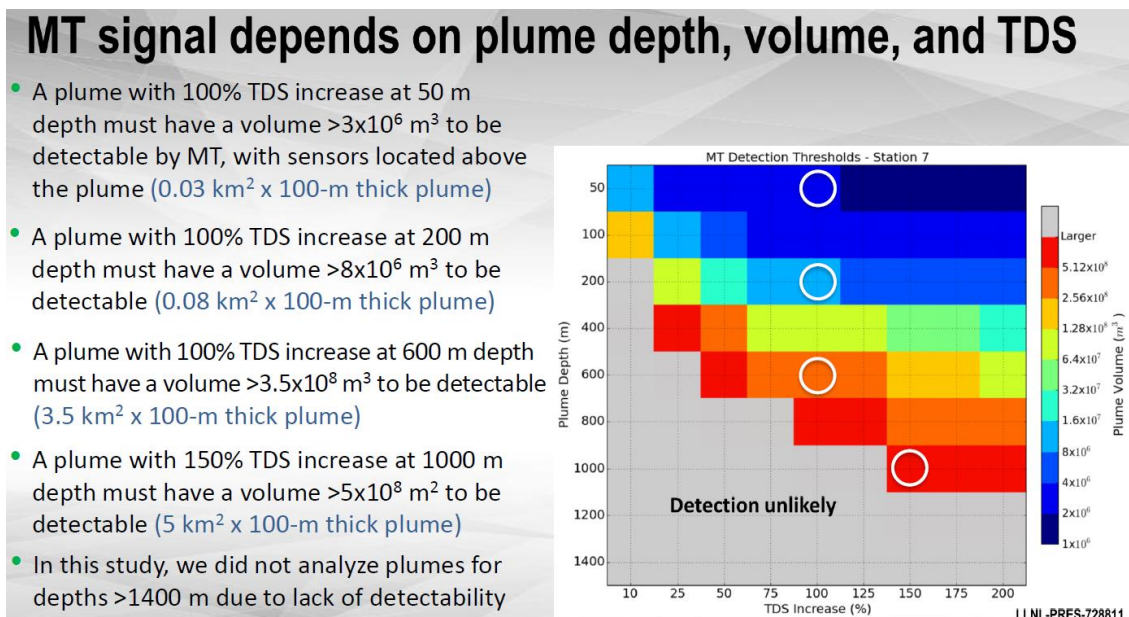
- 其計算結果如表 3.7-1。
- 經過觀察可歸納出：
  - 通過 CO<sub>2</sub>EOR 與水追逐之 CO<sub>2</sub> 儲存可與通過圓頂構造之 CO<sub>2</sub> 鹽水儲存相當；CO<sub>2</sub> 儲存以平坦構造的鹽水儲存量為最低；如使用 CO<sub>2</sub>EOR 與 CO<sub>2</sub> 追逐或使用幾乎純淨的 CO<sub>2</sub> 注入，其 CO<sub>2</sub> 儲存量是更大；在概念上，CO<sub>2</sub>EOR 應具有最高的 CO<sub>2</sub> 儲存與 CO<sub>2</sub> 儲存係數，因 CO<sub>2</sub>EOR 可以清除油和水，而以 CO<sub>2</sub> 替代，正如 CO<sub>2</sub> 鹽水儲存必須置換水以儲存 CO<sub>2</sub>；如從殘油帶(ROZ)生產驅出油之 CO<sub>2</sub> 儲存量將大於 CO<sub>2</sub>EOR 之 CO<sub>2</sub> 儲存量。

有關二氧化碳地質監測部分：

- 1.CO<sub>2</sub> 與鹽水洩漏從遺產井進入覆蓋於 CO<sub>2</sub> 儲存層上方含水層之檢測性
  - 本計畫採用地球物理之大地電磁法(MT)，在地表布置感測器陣列，並依據洩漏的 CO<sub>2</sub> 與鹽水溶解在含水層中離子濃度變化，量測大地之導電性。
  - MT 量測到的信號，主要基於 CO<sub>2</sub> PLUM 的深度、體積與溶解固體總

量如圖 3.7-6。

- 鑽孔的滲透率與滲漏段位置，是影響 CO<sub>2</sub> PLUM 大小與可偵測性之主要因素。
- 滲漏 CO<sub>2</sub> PLUM 大小與可偵測性，隨注入井距離變大而變小。
- 上浮力允許部分滲漏 CO<sub>2</sub> PLUM 達到可滲透的淺層，可藉 MT 法偵測到。



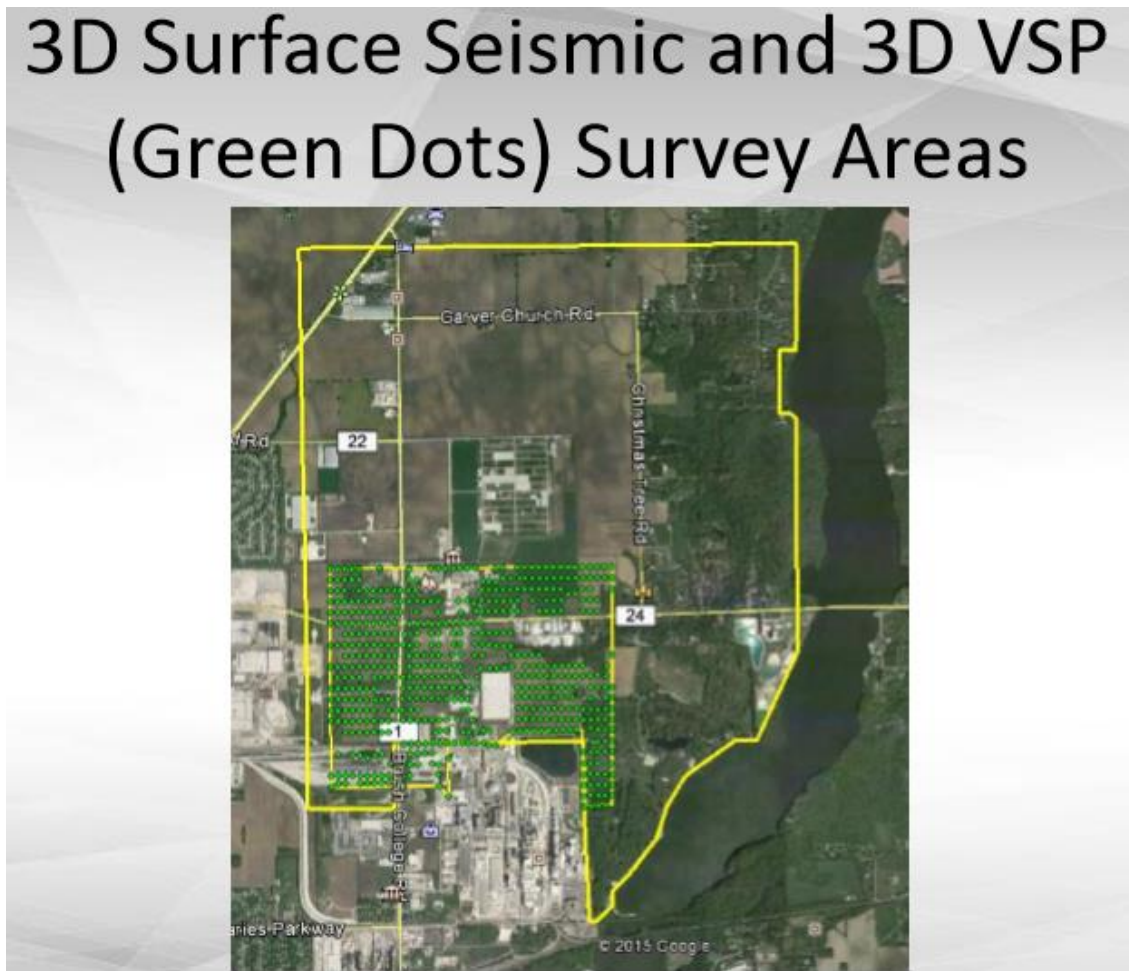
(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-6 MT 的信號，基於 CO<sub>2</sub> PLUM 的深度、體積與溶解固體總量

## 2. 伊利諾盆地 DECATUR 計畫 CO<sub>2</sub> 監測之時空三維地表震測

- 從 2011/11/17 至 2014/11/26/，將近一百萬噸 CO<sub>2</sub> (~1,102 噸/天)被注入到 2140 公尺深度的 Mt. Simon Sandstone，該計畫目前處於後監測期。
- 本計畫監測注入期間與注入後，目標儲存層內 CO<sub>2</sub> 含量，以及蓋層完整性。
- 注入前和注入後監測儲存層內 CO<sub>2</sub> 流之發展與移動須符合美國環保部門“第六類地下注入控制法規”。
- 為符合規定，實施了一些技術，如 3D 垂直震測剖面 (VSP) 與 3D 地表震測，如圖 3.7-7。

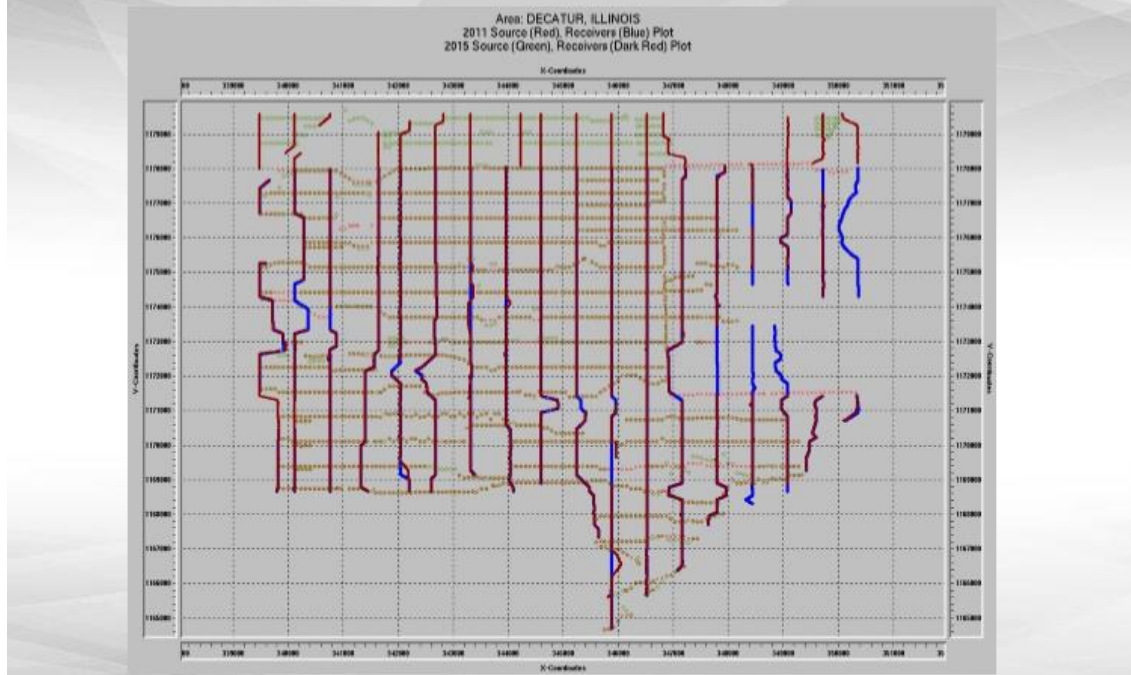
- 本計畫進行了兩次 3D 地表震測 (2011 年基線與 2015 年監測)，並作處理及分析，如圖 3.7-8。
- 基線調查進行廣泛的調查評估與設計 (SED)，然後重複進行監測調查，以考慮到一些震源和接收點之移動。



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-7 3D VSP(綠色點部分)與 3D 地表震測範圍

# Survey Map 2011 and 2015 Overlay

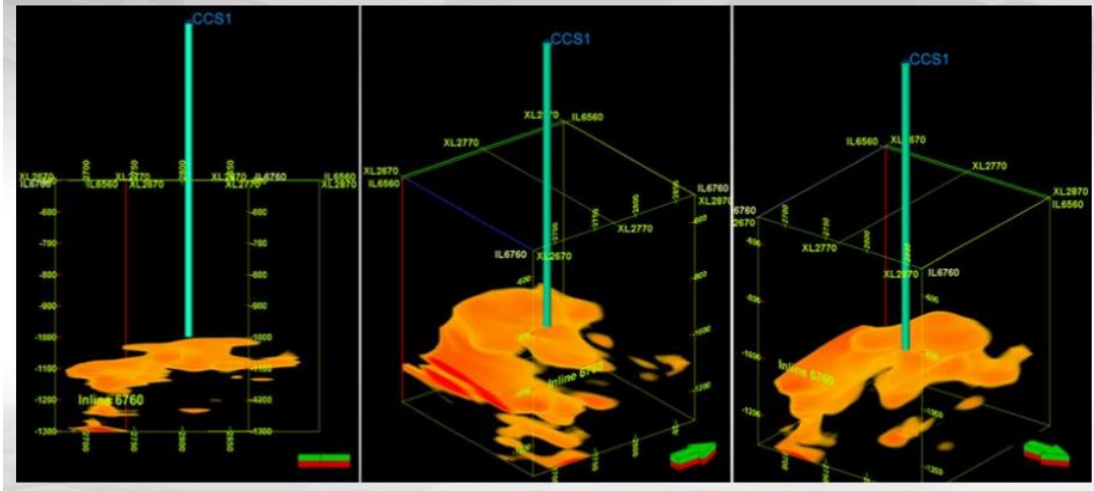


(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-8 3D 2011 與 2015 地表震測線相疊合情形

- 超臨界狀態的  $\text{CO}_2$  將取代注入帶周圍岩石中的鹽水，以增加某些地層邊界之震波阻抗對比，減慢波速並增加到達時間，這將導致低於注入帶之反射波接收器，於稍後時間在堆疊部分出現。
- 3D 地表震測經處理及分析後，結果顯示  $\text{CO}_2$  注入取代帶周圍岩石中的鹽水情形，如圖 3.7-9。

## Displacement Field (Zoomed)



(CCUS Conference, 2017)

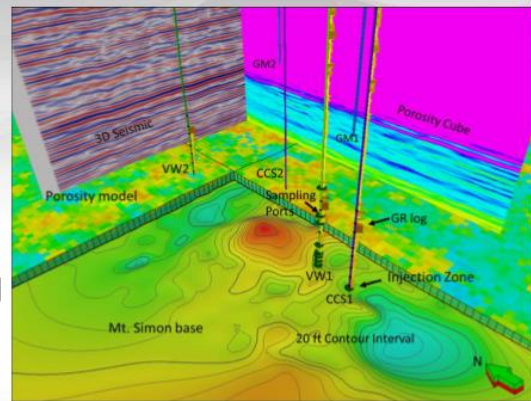
圖 3.7-9 3D 地表震測結果顯示 CO<sub>2</sub> 注入取代帶周圍岩石中的鹽水情形

### 3. 伊利諾盆地 DECATUR 計畫定量整合時空三維地表震測數據用於儲存層模擬器校準

- 本研究的動機，是從 IBDP 計畫監測與準確建置注入 CO<sub>2</sub> 團塊流模型開始。
- CO<sub>2</sub> 團塊流模型可運用在運營規劃，符合法規與科學研究等方面。
- CO<sub>2</sub> 團塊流可使用“直接”與“間接”方法作監測。
- 時空三維地表震測數據提供具有成本效益的間接空間監測涵蓋。
- 作為間接測量，該震測必須與較高成本與稀疏的直接測量數據，結合使用。
- 所有可用的直接和間接測量值，都應整合到校準儲存層模型中。
- 從儲存層模擬推進至岩石物理建模，驗證匹配及評估震測檢測的極限，如圖 3.7-10。

## Static Geologic Modeling

- High resolution static geologic model created.  
(Integration of 3D seismic data, geophysical logs, and core)
- Geologic structure and stratigraphy interpreted.  
(3D seismic volume)
- Porosity distributed by co-simulation of well logs with inverted seismic impedance.
- Permeability distributed by co-simulation of well logs. (ELAN\* advanced multimineral log analysis), with porosity using correlations from core and well logs.

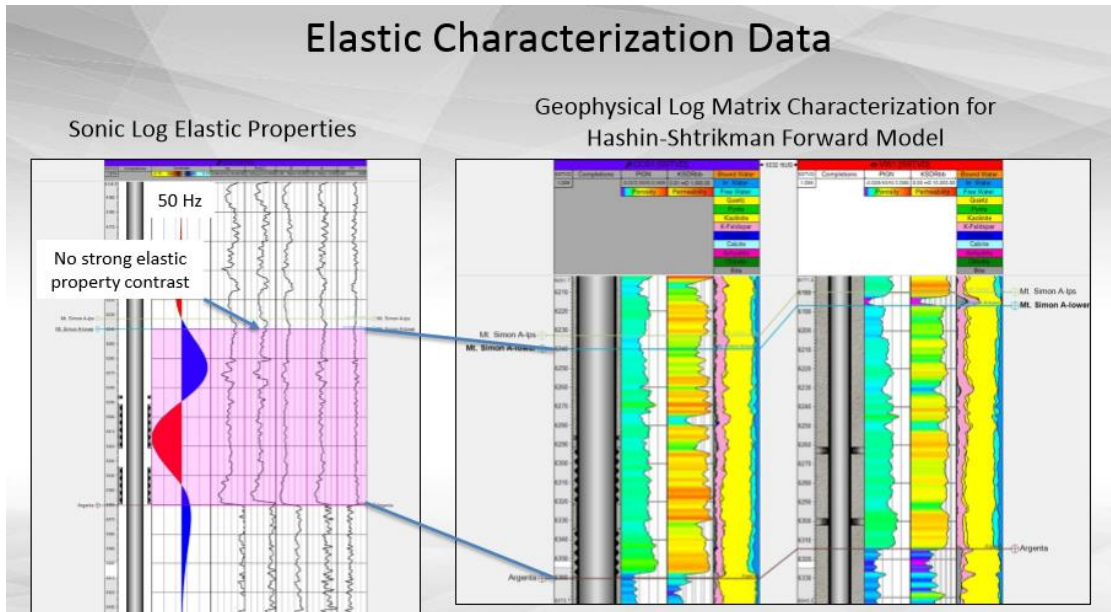


- Static model ~30 miles x 30 miles
- Horizontal grid resolution of 150 feet x 150 feet.
- Vertical resolution is variable, averaging 3.8 feet.
- Static model had 906 million cells (prior to cropping and scale-up for simulation).

(CCUS Conference, 2017)

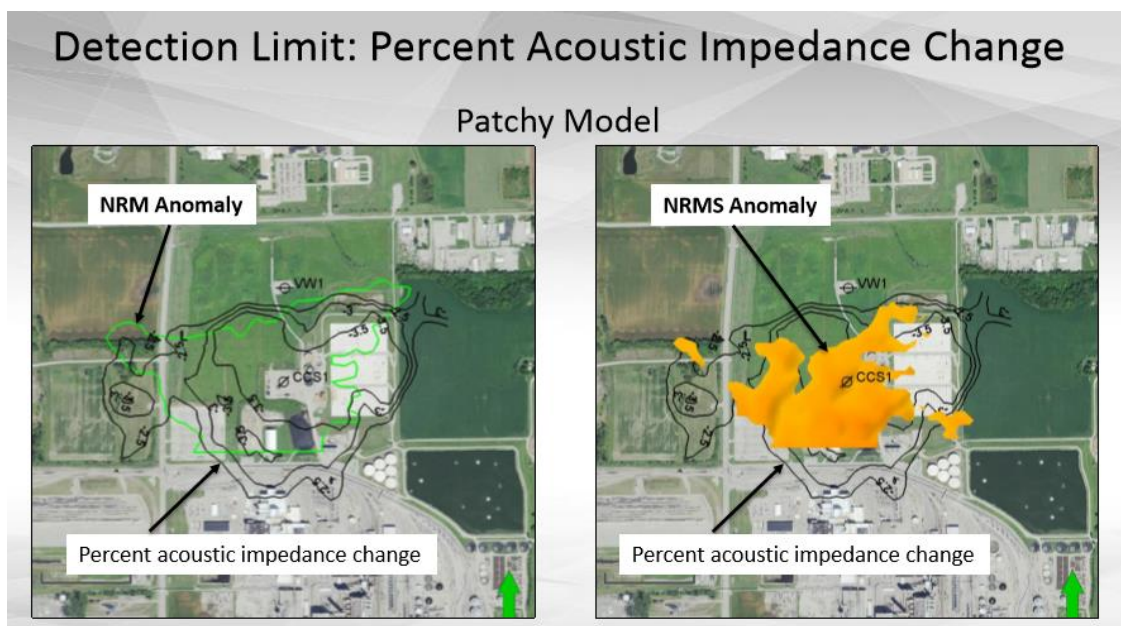
圖 3.7-10 直接和間接測量值整合建置成靜態地質模型

- 時空三維地表震測檢測的極限，主要有兩大因素：CO<sub>2</sub> 團塊流薄且低飽和  
部分(<40 ~50 feet)不會檢測到；由現場特定條件決定，包括：儲存層深度、  
震測頻寬與信號/噪訊比特徵、儲存層與流體彈性特性、CO<sub>2</sub> 團塊流幾何形  
狀。
- 從儲存層模擬模型開始，推進至 CO<sub>2</sub> 注入前後儲存層彈性特徵之建模驗  
證，鹽水屬性及 CO<sub>2</sub> 特性建立，參考流體熱力學和運輸性能數據庫，岩石  
屬性包含 ELAN 礦物分數與岩石模量數據庫，Hashin-Shtrikman 混合平均，  
Gassmann 與 Patchy 模型流體替代，如圖 3.7-11。



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-11 彈性特徵資料作為 Hashin-Shtrikman 前進模型使用



(CCUS Conference, 2017)

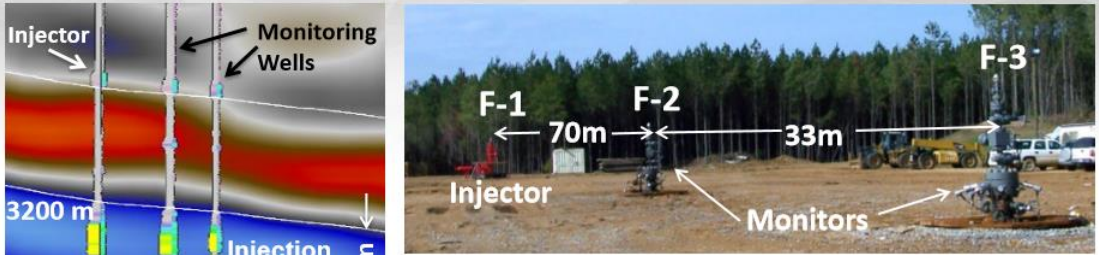
圖 3.7-12 檢測極限聲阻抗變化百分比之 Patchy Model

#### 4. 使用電阻層析成像掃描深部鹽水 CO<sub>2</sub> 注入監測

- 本研究著重在美國密西西比州 Cranfield EOR 與鹽水 CO<sub>2</sub> 儲存之大型商業規模 (1 Mt/年) 注入計畫第 3 階段之詳細區域研究 (DAS)，如圖 3.7-13。
- 本研究為目前世界上最深的電阻層析成像 (ERT) 監測系統，以追蹤儲存層中 CO<sub>2</sub> 團塊流動與飽和度變化，如圖 3.7-14。

- ERT 可以監測水飽和度、鹽度 (TDS) 與溫度的變化，如圖 3.7-15。

### Detailed Area of Study (DAS) for evaluation of CO<sub>2</sub> storage in saline aquifer and study of monitoring methods



The diagram on the left shows a cross-section of the subsurface with an injector well and monitoring wells. The injection zone is highlighted in blue and is 25m thick, located at a depth of 3200 m. The field photo on the right shows the surface layout with wells F-1 (Injector), F-2 (Monitors), and F-3 (Monitors). Distances are marked as 70m between F-1 and F-2, and 33m between F-2 and F-3.

- The injection well F1 is located in the downdip water leg below the oil-water contact
- CO<sub>2</sub> injection through F1 into a deep saline aquifer began on 12/1/2009

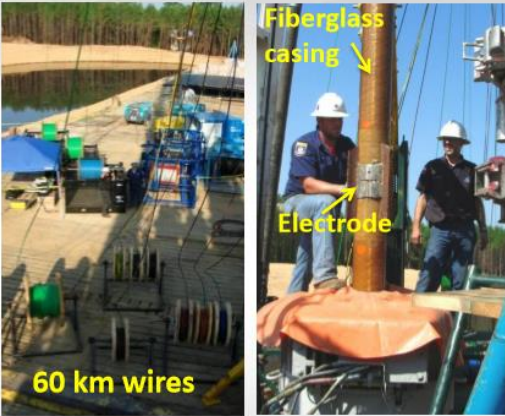
LLNL-PRES-728698

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-13 詳細區域研究 (DAS) 評估鹽水層中 CO<sub>2</sub> 儲存監測布置說明

### The world's deepest electrical resistivity tomography (ERT) monitoring system was deployed to track CO<sub>2</sub> movement and saturation change in the reservoir

- 21 Electrodes and 60 km wires were deployed at 3200 m (10,000 ft) depth
- Hostile environment for ERT: pH=3, 122°C (252°F), 4520 PSI (31 MPa), TDS=156,000 mg/L
- Stainless steel electrodes were mounted on the outside of fiberglass well casing and grouted in place permanently



The photos show the deployment of the ERT system. The left photo shows a large coil of 60 km wires. The right photo shows workers installing stainless steel electrodes on a fiberglass casing.

LLNL-PRES-728698

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-14 目前世界上最深的電阻層析成像 (ERT) 監測系統現地布置情形



## ERT can monitor changes in water saturation, salinity (TDS) and temperature

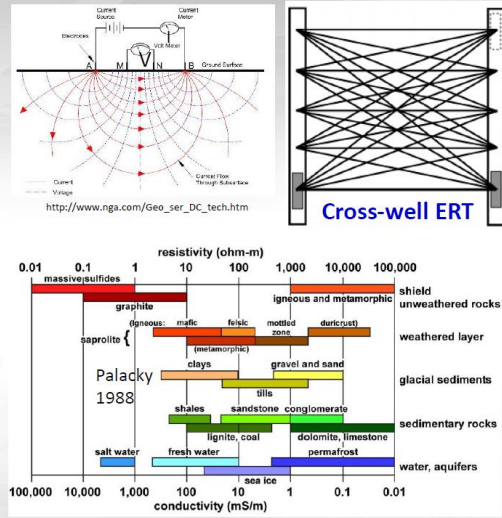
Archie (1942): formation bulk resistivity is a function of porosity ( $\phi$ ), pore water resistivity ( $\rho_w$ ) and water saturation ( $S_w$ ).  $a$ ,  $m$  and  $n$  are empirical constants

$$\rho = \frac{a \cdot \phi^{-m} \cdot \rho_w}{S_w^n}$$

Supercritical  $\text{CO}_2$  displaces brine and reduces water saturation.  $\text{CO}_2$  saturation ( $S_{\text{CO}_2}$ ) is estimated from the ratio of baseline resistivity ( $\rho_0$ ) to monitor resistivity ( $\rho$ )

$$S_{\text{CO}_2} = 1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1/n}$$

LLNL-PRES-728698



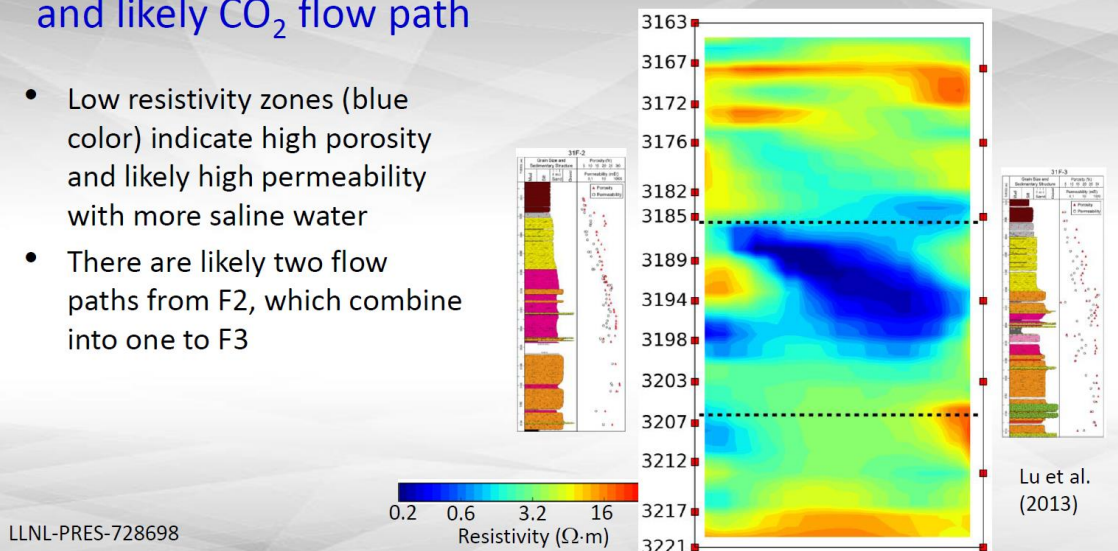
(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-15 ERT 監測水飽和度、鹽度 (TDS) 與溫度變化之理論與公式

- 基線電阻率模型顯示，儲存層異質性和可能的  $\text{CO}_2$  流動路徑，如圖 3.7-16。
- 經過前 100 天 ERT 監測， $\text{CO}_2$  團塊流成長及遷移，與  $\text{CO}_2$  飽和度變化，顯示在每日斷層圖像上，如圖 3.7-17。

## Baseline resistivity models show reservoir heterogeneity and likely $\text{CO}_2$ flow path

- Low resistivity zones (blue color) indicate high porosity and likely high permeability with more saline water
- There are likely two flow paths from F2, which combine into one to F3

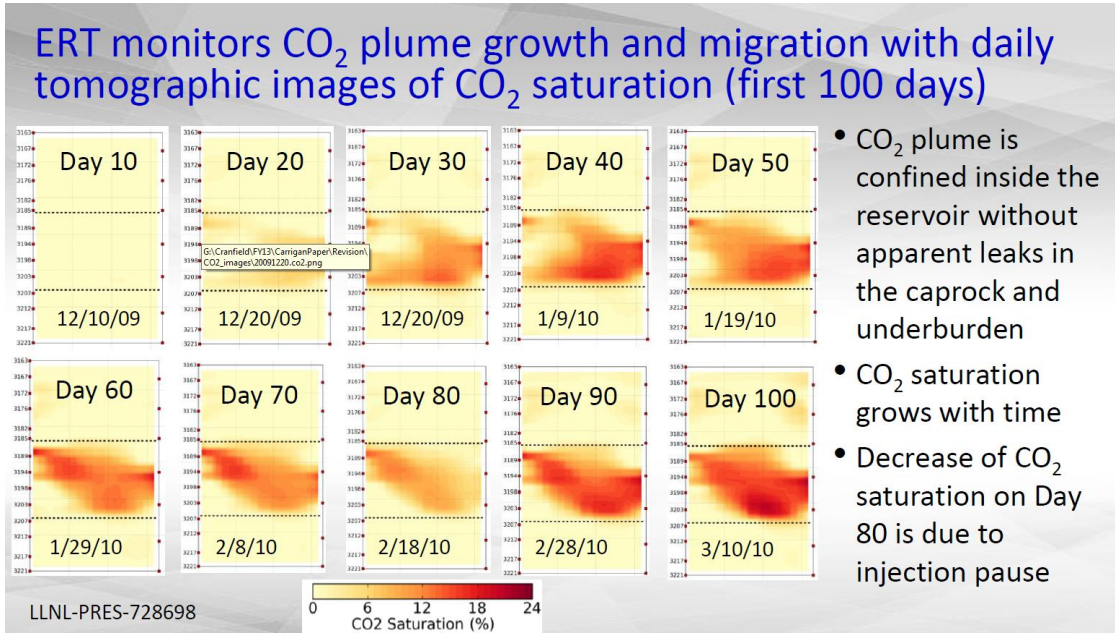


LLNL-PRES-728698

Lu et al. (2013)

(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-16 基線電阻率模型顯示儲存層異質性與可能的  $\text{CO}_2$  流動路徑



(CCUS Conference, 2017)

圖 3.7-17 ERT 監測 CO<sub>2</sub> 團塊流成長及遷移，與 CO<sub>2</sub> 飽和度變化情形

### 3.8 二氧化碳再利用實務

美國能源部主要碳捕獲與地質封存示計畫概況與狀況更新

目前美國 CCS 示範計畫有 4 處，地點與成本分配金額，如圖 3.8-1。

#### Project Locations & Cost Share

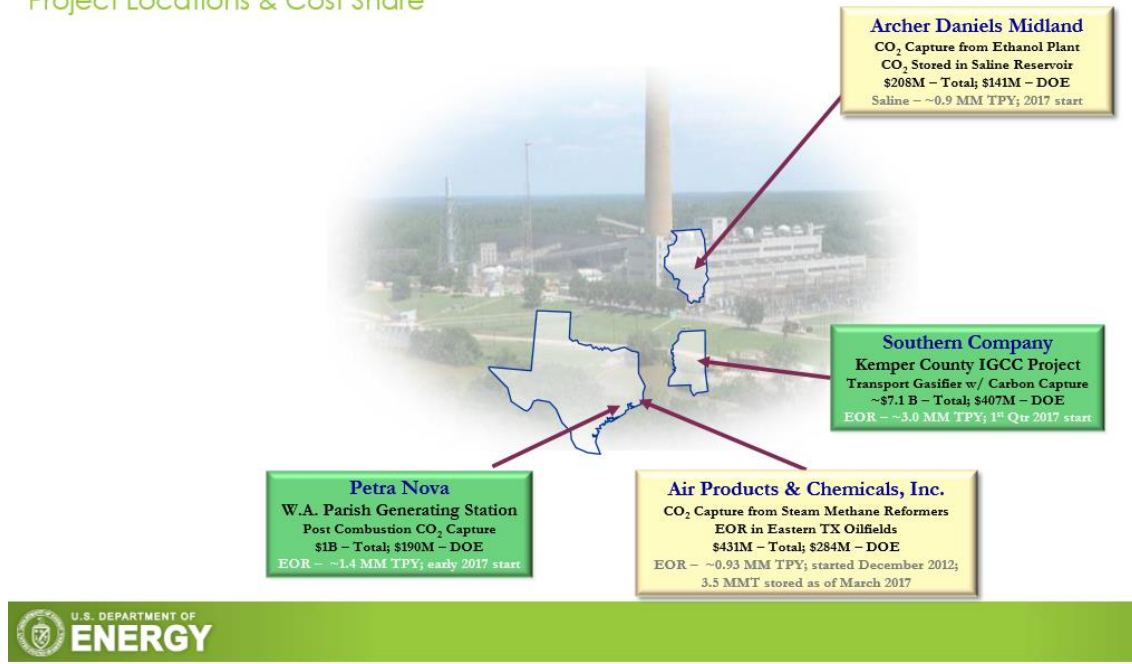


圖 3.8-1 美國 CCS 示範計畫有地點與成本分配

有關二氧化碳再利用部分：

1. 在 Farnsworth 單位油田(FWU) CO<sub>2</sub> EOR 運轉期間示踪實驗的解釋

- FWU EOR 從使用純水注入轉變為交替 CO<sub>2</sub> 和純水 (WAG) 注入。其循環率為~6-10 個月。
- FWU 第 3 代地質模型有 13 層及 8 個不同的水力流單元。
- South Western Partnership (SWP) 之示踪項目，有井間示踪劑實驗，特微化儲存層中多流體流動行為，檢測 CO<sub>2</sub> 之任何洩漏。
- 示踪劑種類具有無反應性，可溶於氣相 (perfluorocarbon 示踪劑，PFT) 或水溶相 (naphthalene sulfonate 示踪劑，NST)。於不同期間各注入井使用示踪劑之種類，如表 3.8-1。
- FWU 西半側 5 井點圖案布置標明示踪劑注入井及監測井之位置，如圖 3.8-2。

表 3.8-1 不同期間各注入井使用示踪劑之種類

Date	Tracer		Soluble Phase	Injection Well
May 2014	1,6-naphthalenedisulfonic acid	1,6-NDS	aqueous	#13-13
May 2014	1,3,6 naphthalenetrisulfonic acid	1,3,6-NTS	aqueous	#13-10A
May 2014	1,5-naphthalenedisulfonic acid	1,5-NDS	aqueous	#13-5
May 2015	perfluoro-1,3,5-trimethylcyclohexane	PTCH	gas	#13-13
Oct 2015	2,7-naphthalenedisulfonic acid	2,7-NDS	aqueous	#14-1
Nov 2015	perfluoro-1,2-dimethylcyclobutane	PDCB	gas	#13-10A
May 2016	perfluoromethylcyclohexane	PMCH	gas	#13-1
May 2016	perfluoroethylcyclohexane	PECH	gas	#13-3



## Location of Tracer Injections/Monitoring

- Injection into active 5-spot patterns in the western half during CO<sub>2</sub> flood or water flood
- Sampling/monitoring
  - Production wells
  - USDW (Ogallala aquifer)
  - Atmosphere

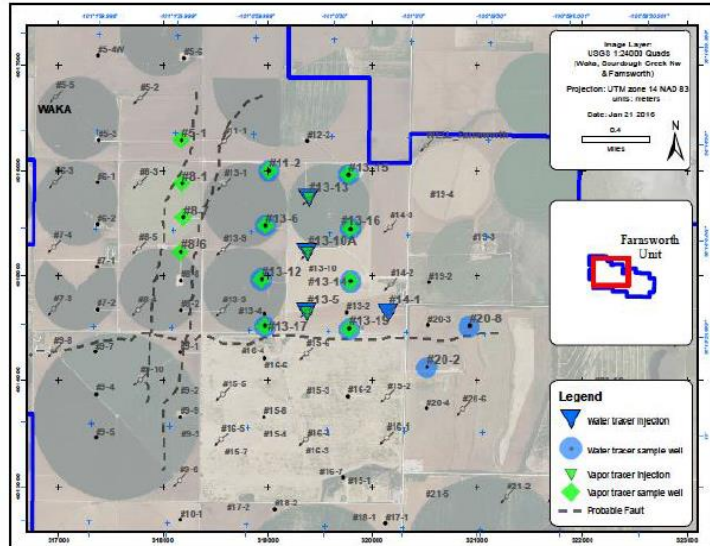


圖 3.8-2 FWU 西半側 5 井點圖案布置與示踪劑注入井及監測井之位置

- 本研究採用 STOMP-EOR 數值模擬器，進行示踪實驗建模，並將其結果，作為支持評估儲存層中流動行為之驗證理解，如圖 3.8-3~3.8-5。

## STOMP-EOR Tracer Simulations: #13-10A

- Initial conditions on May 2, 2014
- History matching (pore pressure, aqueous saturation, temperature, and total mole fraction of the pseudo components) → STOMP-EOR

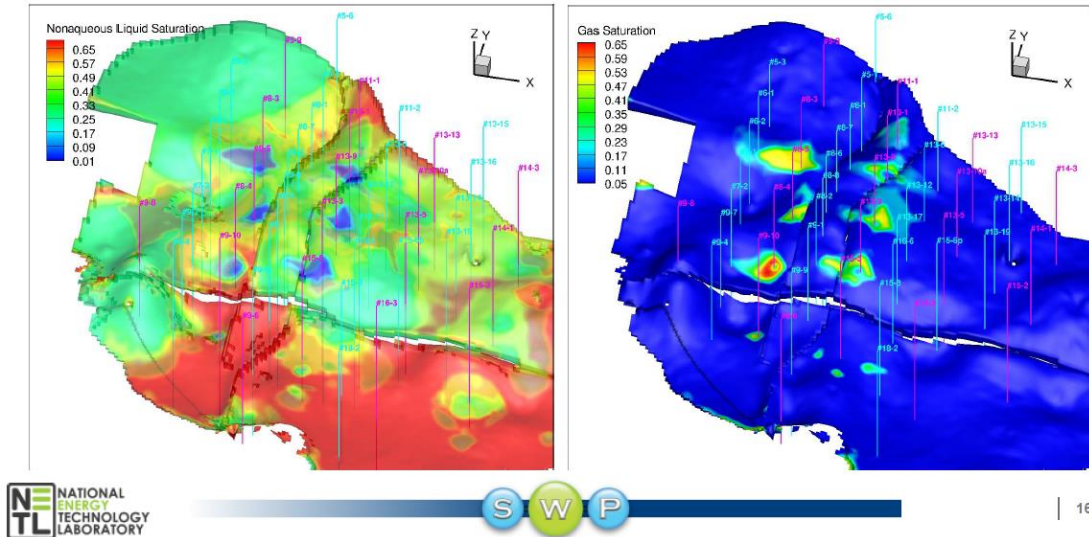
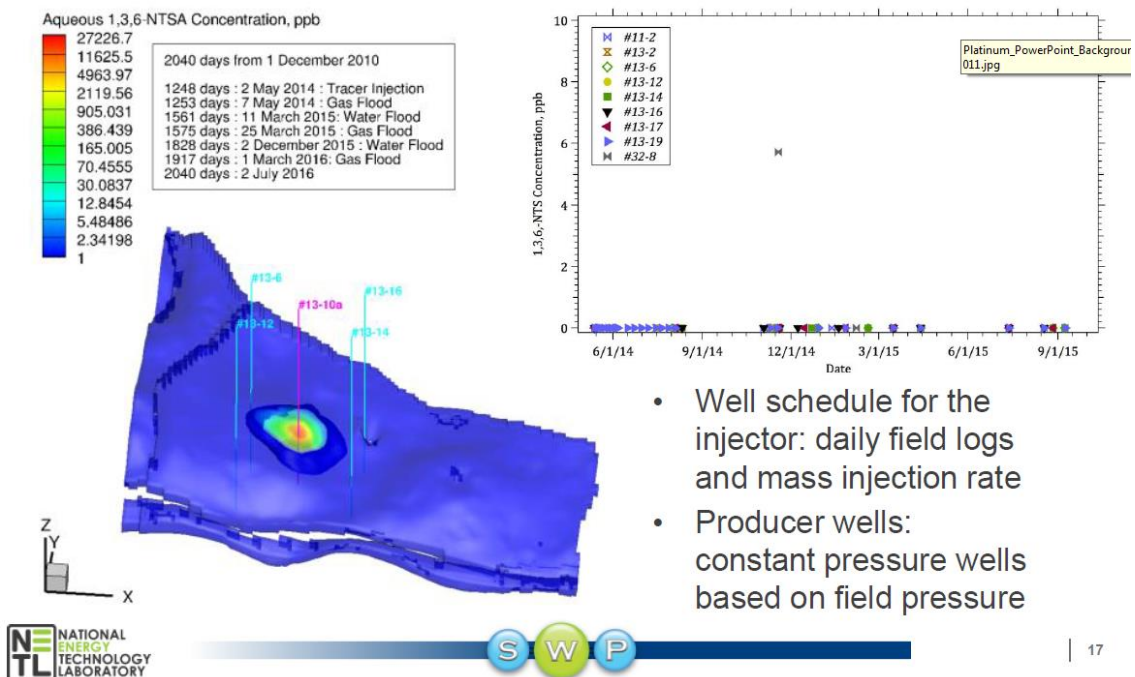


圖 3.8-3 FWU 西半側#13-10A 注入井 STOMP-EOR 初始數值模擬

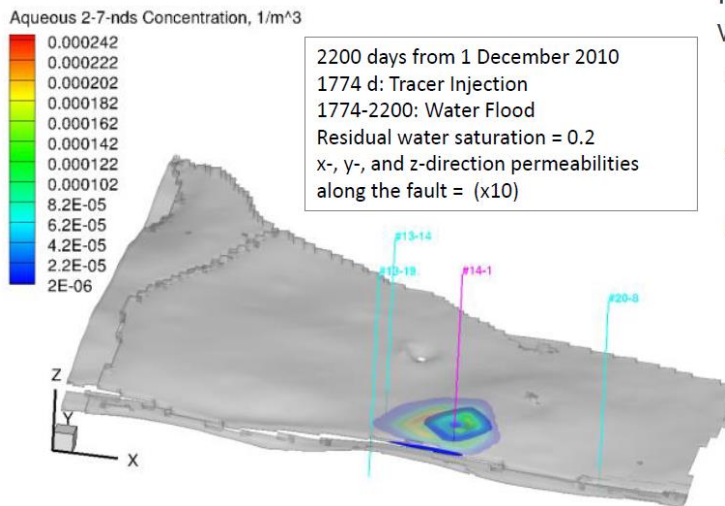
## STOMP-EOR Tracer Simulations: #13-10A



- Well schedule for the injector: daily field logs and mass injection rate
- Producer wells: constant pressure wells based on field pressure

圖 3.8-4 #13-10A 注入井 STOMP-EOR 示踪實驗數值模擬

## STOMP-EOR Tracer Simulations: #14-1



- Flow around injection well #14-1, depends on:
  - Residual water saturation
  - Effect of fault damage zone
  - Matching production values on all three wells

圖 3.8-5 #14-1 注入井 STOMP-EOR 示踪實驗數值模擬包含斷層帶之影響

### 3.9 拼圖-美國 CCS 州際展望

無論美國聯邦政府作出什麼情況，幾個州都將自己定位為 CCUS 領域之領導者。大平原研究機構近期發表的“將拼圖拼湊在一起”報告，闡述了其中一些州的努力以及國家一級工作人員的支持。在此特舉懷俄明(Wyoming) 州為例，概述其領導倡議以支持 CCUS 的成長。

懷俄明州面積大約 98,000 平方英里，是美國第十大州。惟其人口僅約 50 萬人，為全國最少的一州。該州的煤炭含硫量低，為美國最大的生產商。Powder River Basin (PRB) 生產的煤，運到全美約 35 個州，供應約 200 座火力發廠。該州的石油，為美國第八大生產商，有許多成熟油田，具備 500 個儲存層可作 CO<sub>2</sub>-EOR，潛力巨大。該州的天燃氣為美國第三大生產商，儲量超過 35 萬億立方英尺。

懷俄明州二氧化碳管理的機構，有 UW - SER - 高灣研究機構、CMI - DOE，Carbon SAFE Grant、EORI - WY EOR 發展的地面工作、ENDOW - 利用 WY 豐富的自然資源，努力實現經濟多元化。該州 CO<sub>2</sub> 輸送管線路廊計

畫倡議，如圖 3.9-1。

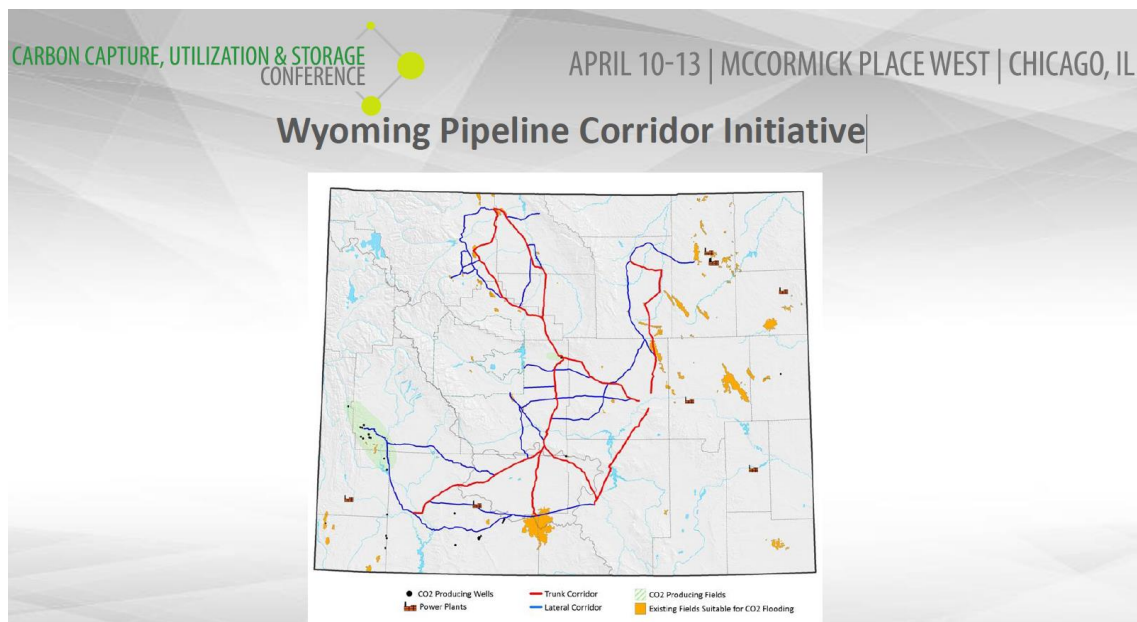


圖 3.9-1 懷俄明州 CO<sub>2</sub> 輸送管線路廊計畫倡議布置網

CCS 州際區域和國家努力項目總結如下：

- 西部州長協會作出決議
- 與蒙大拿州共同召集多州組成 CO<sub>2</sub>-EOR 工作群組
- 出版州際拚圖報告
- 撰寫支持 45Q 稅收抵免的信函
- 提出管線倡議報告
- 繼續及支持 CCUS 與 CO<sub>2</sub> 輸送管線基礎設施開發

由於懷俄明州嚴重依賴化石能源生產，獲得結論如下：

- 該州支持及體現工業與環境需求平衡之發展。
- 該州堅決支持工作群組的報告內描述之倡議措施，將使參與各州能更佳利用 CCUS 技術，俾符合參與各州平衡之發展方式。
- 參與各州將繼續支持 CCUS 的成長，通過向外拓展與協調努力。

#### 4. 感想與建議

- (1) 本次參加 2017 CCUS 國際研討會，發現美國有些獨立、無黨派、非營利的組織，如氣候與能源解決中心 (C2ES)，連同企業和其他利益相關者，致力推動降低溫室氣體排放、擴大清潔能源實用的解決方案，帶動城市、州和國家的決策者，促進實際有效的政策(如 2017 年碳捕捉政策)，成為利益相關者、業界、政府、甚至世界頂尖環保思想的智囊庫。我國目前正在推動溫室氣體排放減碳策略，相關的事業機構、法人組織、NGO 與政府部門，宜應參考該等組織提出實際有效的策略與方針，經研商形成共識後，及早由政府推動訂定國內 CCUS 具體可行之減碳策略，儘速發展 CCUS 計畫，以期達成政府所訂定之減碳目標。
- (2) 美國現正進行的主要 CCUS 計畫，大多將捕獲的 CO<sub>2</sub> 用管線輸送至油田，作 EOR 石油增產，如 Petra Nova 碳捕獲計畫等，目前已達到每年捕獲及注入 CO<sub>2</sub> 約百萬噸商業化等級，使石油生產量增加數倍，除可抵免 CO<sub>2</sub> 捕獲及注入的費用，尚可帶來很大的經濟效益。當 EOR 石油增產枯竭時，該油田尚可用來作為儲存 CO<sub>2</sub> 的空間。因此，CO<sub>2</sub>-EOR 可以作為 CCS 的催化劑。此外，前述的主要 CCUS 計畫，美國 DOE 皆佔有很大%經費的支助，俾發展 CO<sub>2</sub>-EOR 必要的注入、儲存及監測技術，並據以訂定各類更加完備的法規標準。我國油氣礦產匱乏，無發展 CO<sub>2</sub>-EOR 的條件，但擁有發展 CCS 的條件。環保部門至今尚未訂出 CCS 法規，可供業界遵循；能源部門亦無補助業界發展 CCS 前瞻計畫的經費。政府現已將未來燃煤發電的比例定在 30% 或 50%，如不採取 CCS 選項，實無法達成政府所訂定的減碳目標。目前我國發展 CCS 的利基條件，可利用進口天然氣與煤碳價差的優勢進行。當務之急，擬建請政府宜及早訂定 CCS 試範計畫免環評的規定及獎勵補助業界發展 CCS 技術的辦法。
- (3) 挪威 TCM 和美國 NCCC 都進行了碳捕集試驗與研究，這些試驗成果也加速相關技術的發展，由這些成功案例顯示，逐步由小規模進行技術驗證與程序改良，可以有效降低大規模實施的風險。本公司現階段需思考於公司既有之火力電廠引進相關技術開始進行試驗工作。
- (4) 本次 2017 CCUS 國際研討會中，發表有關 CO<sub>2</sub> 地質封存 (CGS) 與監測驗證 (M&V) 之論文，大多以達到每年捕獲及注儲 CO<sub>2</sub> 約百萬噸案例經驗與成果分享，足見 CGS 邁向商業化階段是可預期的、監測技術是可行的，以及其安全性是可控制的。該等先進之研發技術，可適時引進國內，作為本公司現正推動的「CO<sub>2</sub> 地質封存先導試驗場址地質調查及技術研發」之參用，將有助於先導試驗 CO<sub>2</sub> 捕獲、注入及監測技術建立，使該試驗能順利完成，並期能邁向下一驗證階段。



- (5) 於本次 2017 CCUS 國際研討會壁報論文展示會，本公司與中興顧問社共同發表一篇論文，題目為"Quantitative risk analysis for triggering earthquake due to CO<sub>2</sub> injection in a seismic prone area"。在會場中遇到一位相識多年的朋友美國 LBNL Dr. Curtis M. Oldenburg。他向我們表達很認同我們發表的論文，同時也很謙虛的表示，他近年來在此領域研究的成果，並介紹我們研讀一篇 LBNL 同仁與他共同發表的論文。當我們研讀完該論文後，發覺受益良多，不僅是在微地震領域研究項目的多元化，在安全評估方面亦注重到民眾心理感受的層面，值得為我國進行 CGS 微地震研究發展方向的參考。此外，在大會場中遇到另一位相識多年的朋友，美國 Battelle Dr. Neeraj Gupta。當我們向他詢問他們公司近年來，在美國能源部 7 個資助區域合作夥伴關係之一 MRCSP，進行 CCUS 計畫有關地質儲存之發展現況，他很誠懇的邀請我們參加他在會場中發表的一場演講，講題為"Recent Progress in MRCSP Large-Scale CO<sub>2</sub>-EOR and Storage Research in Depleted Oil Fields in Michigan Basin"。我們發覺他們的研發工作，目前較趨向於 Utilization 之 CO<sub>2</sub>-EOR 部分，惟大尺度開發高解析的新技術，仍將可作為本公司 CCS 試範計畫可行性規劃研究的參考。
- (6) CCUS 成功推行需要民眾支持，公司推動相關的碳捕集、再利用與封存試驗計畫需考慮民中接受度，於計畫初期需要擬妥相關方案與教育宣導策略和資料，增進社會各界與民眾對於 CCUS 的認知和接受度十分重要。目前我國對於如何以碳捕集與封存技術來抑制碳排放的認識不多，希政府主管部門加強相關的教育與宣導工作，讓我國的碳捕存的先導計畫與示範計畫可以得到民眾支持。