

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：開會)

## 參加溫室氣體控制技術研討會(IEA GHGT11)

服務機關：台灣電力公司

出國人職稱：化學工程師、機械工程師

姓名：楊明偉、陳景林

出國地區：日本

出國日期：101年11月17日至11月23日

報告日期：102年1月20日

## 行政院及所屬各機關出國報告審核表

出國報告名稱：參加溫室氣體控制技術研討會(IEA GHGT11)	
出國計畫主辦機關名稱：台灣電力公司	
出國人姓名/職稱/服務單位：楊明偉/化學工程師/綜合研究所 陳景林/機械工程師/綜合研究所	
出國計畫  主辦機關  審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2. 格式完整 <input checked="" type="checkbox"/> 3. 內容充實完備. <input checked="" type="checkbox"/> 4. 建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 5. 送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6. 送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7. 退回補正，原因： <input type="checkbox"/> (1)不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> (2)以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容以 <input type="checkbox"/> (3)內容空洞簡略容 <input type="checkbox"/> (4)未依行政院所屬各機關出國報告規格辦理 <input type="checkbox"/> (5)未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 8. 其他處理意見
層轉機關  審核意見	<input type="checkbox"/> 同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 退回補正，原因：_____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 其他處理意見：

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

報告人：	單 位	主 管 處	總 經 理
	：	：	：
	主 管	主 管	副 總 經 理

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加溫室氣體控制技術研討會(IEA GHGT11)

頁數 33 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

楊明偉/台灣電力公司/綜合研究所/化學工程師/ (02) 26815424#2243

陳景林/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/ (02) 26815424#2210

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：101 年 11 月 17 日至 11 月 23 日

出國地區：日本

報告日期：102 年 1 月 16 日

分類號/目

關鍵詞：二氧化碳捕獲、封存、風險評估

內容摘要：(二百至三百字)

深地層封存二氧化碳被認為是人類面臨大量二氧化碳減量最有效的方法之一，世界各國均積極加強研究發展。本次 GHGT-11CCS 會議在京都召開，出席人員約八、九百人，為 CCS 非常盛大的大型會議。

本報告介紹國際間著名之大型二氧化碳捕獲與封存示範計畫之最新發展，碳捕獲部份包含：TCM、MHI 及 KM-CDR；地質封存部份包含：SECARB、Mountaineer 及歐盟之 CO2ReMoVe 計畫。這些大規模之示範成果已驗證二氧化碳捕獲處理與地質封存技術是可行的，業者也以其測試的結果做進一步的技術改善，以達成促使大規模的二氧化碳捕獲程序與地質封存得以在全球推廣以降低溫室氣體之排放量。

此外，本報告並介紹二氧化碳地質封存之監測與模擬活動的最新發展，以確保二氧化碳地質封存安全性，並以風險評估方式提昇二氧化碳地質封存之長期安全性。

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

# 目 錄

出國報告書審核表

出國報告書提要

目 錄	I
圖 目 錄	II
表 目 錄	III
第 壹 章 前 言	1
1-1、出 國 緣 由	1
1-2、出 國 目 的	2
1-3、出 國 行 程	2
第 貳 章 二 氧 化 碳 捕 獲 技 術	6
2-1、ACC醇胺吸收技術	6
2-2、MHI醇胺吸收技術	12
2-3、KM-CDR技術	14
第 參 章 二 氧 化 碳 深 地 層 封 存 技 術	16
3-1、SECARB Anthropogenic Test	12
3-2、Mountaineer封存計畫	23
3-3、歐盟CO2ReMoVe地層監測與模擬計畫	28
第 肆 章 感 想 與 建 議	33

# 圖 目 錄

圖 1-1 京都國際會議館位置圖	3
圖 1-2 京都國際會議館	3
圖 1-3 大會報到	4
圖 1-4 大會迎賓晚宴	4
圖 1-5 開會期間中場休息	5
圖 2-1 胺醇吸收廠吸收器和再生器	7
圖 2-2 二氧化碳捕獲效率	8
圖 2-3 以線上 FTIR 量測吸收器出口的 MEA 濃度	9
圖 2-4 Alstom 公司的冷氨法	11
圖 2-5 冷氨法流程圖	11
圖 2-6 SECARB CCS 示範計畫之完整流程圖	13
圖 2-7 捕獲工廠在運轉期間的空照圖	14
圖 2-8 Plant Barry 的 500TPD KM-CDR 流程	14
圖 3-1 CO <sub>2</sub> 運輸管路圖	18
圖 3-2 D-9-7#2 井口的水平式 ESP 注入泵	19
圖 3-3 灌注速率與累積灌注量	20
圖 3-4 儲集層與注入區之數值模型	26
圖 3-5 井下的壓力觀測值	30

# 表 目 錄

表 2-1 為相關製程參數之測驗結果	15
表 3-1 MVA 測試與頻率	21
表 3-2 CCS II 封存計畫提出的監測計畫	27
表 3-3 CO2ReMoVe 研究之二氧化碳封存場址	28

# 一、前言

## 1-1、 出國緣由

本公司為我國最主要的電力供應者，其二氧化碳排放量約占全國排放量三分之一，故如何因應日趨嚴重的全球暖化問題，進而提出因應的二氧化碳減量策略，實為本公司當前迫切的研究課題。基於倫敦公約(London Convention)已通過利用離岸海底深地層進行二氧化碳封存的修法，因而利用離岸深地層進行二氧化碳封存，已成為合法可行的二氧化碳封存減量對策。我國周邊為海洋所環繞，故利用離岸深地層進行二氧化碳封存，將屬理想的因應對策。為此，本公司大會報(96年第21次大會報)已指示建立二氧化碳封存潛能評估能力的核心技術。依據上述大會報之指示，經相關單位開會協商茲分工如下：開發處負責地質資料庫建置；綜研所負責場址封存潛能評估相關模式的建立。據此，綜研所研提深地層二氧化碳封存之長程計畫，擬與國外先進的研究機構，以合作交流的方式建立深地層二氧化碳封存之評估及分析技術(包括：封存場址的篩選準則、二氧化碳注入、遷移、地物與地化反應模擬分析、監測技術及風險評估等)，繼而可作為本公司針對深地層二氧化碳封存議題的因應對策參考，並期達成建立深地層二氧化碳封存評估能力之目標。

本公司業已選定彰濱工業區做為二氧化碳深地層封存之試驗場址(pilot test)，預計民國104年進行1萬噸的二氧化碳灌注試驗，目前正進行3,000公尺深之鑽孔及岩心取樣之工作。

## 1-2、 出國目的

建立二氧化碳捕獲與封存技術為本公司減碳的重要目標，為此本公司大會報指示綜研所與開發處等單位成立相關研究計畫推行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獲與封存發展路徑圖，正執行地質探測井深鑽與岩層特性研究計畫中。為順利推行二氧化碳捕獲與深地層封存試行工作，故參加國際能源總署（IEA）所舉辦之溫室氣體控制技術研討會（GHGT 11）並發表多篇論文，以提升本公司研究計畫之國際能見度，並與國際專家進行技術交流。會議內容包含國際間二氧化碳捕獲與封存等技術與各項試行計畫之最新進展，可作為本公司火力電廠設置捕獲技術與二氧化碳深地層封存試行計畫的參考，對本公司減少二氧化碳等溫室氣體排放極有助益。

## 1-3、 出國行程

本次出國開會期間為 101.11.17~101.11.23，共計 7 天。民國 101 年 11 月 17 日分別搭乘華航及長榮班機抵達大阪國際機場，當日轉搭 HARUKA JR Express 抵達京都，翌日起向大會報到並參加 GHGT-11 會議；11 月 19~22 日參加 GHGT-11 會議；11 月 23 日分別搭乘華航及長榮班機返回台北。此次開會地點在京都國際會議館舉行，由京都車站搭乘烏丸線地鐵可直達會館，京都國際會館位置如圖 1-1 所示；京都國際會議館如圖 1-2 所示。11 月 18 日大會報到情形如圖 1-3 所示；11 月 21



日大會所舉辦的迎賓晚宴現場如圖 1-4 所示;開會期間中場休息如圖 1-5 所示。



圖1-1 京都國際會議館位置圖



圖1-2 京都國際會議館



圖1-3 大會報到



圖1-4 大會迎賓晚宴

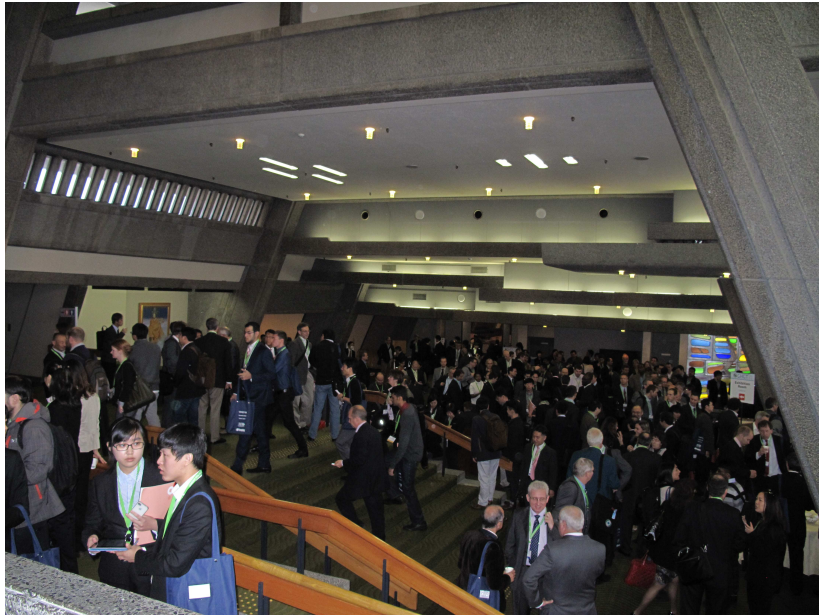


圖1-5 開會期間中場休息

詳細行程如下：

11/17	台北→大阪→京都
11/18~22	GHGT-11 會議
11/23	京都→大阪→台北

## 二、二氧化碳捕獲技術

### 2-1 ACC 醇胺吸收技術

CO<sub>2</sub> Technology Centre Mongstad (TCM)是目前世界上最大的二氧化碳捕獲測試中心，致力於測試與改善現有的二氧化碳捕獲處理技術。TCM 裡的醇胺吸收廠在 2012 年的第二季上線進行二氧化碳捕獲測試。在 TCM 裡有兩座捕獲廠，一座利用 Aker Clean Carbon(ACC)設計的醇胺技術，另一座利用 Alstom 設計的冷氫技術。

這兩種技術皆以兩種不同來源的尾氣進行測試。其中一種尾氣來自附近煉油廠 (Mongstad Refinery) 的重油煤裂器 (Residue Fluid Catalytic Cracker ; RFCC)，來自 RFCC 的尾氣除了是典型煉油廠排放氣體，其組成與特性亦類似燃煤電廠所排釋之煙氣；另一種煙氣源自 Mongstad 的汽電共生廠 (Combined Heat and Power plant ; CHP)。

#### 吸收器和再生器配置

ACC 醇胺吸收廠的吸收器、再生器與其附屬設備之設計容量以捕獲煙氣中 85% 的二氧化碳為基準，其附屬設備主要用以提供吸收廠之用水需求，並以相關之淨化設備進一步處理通過吸收器之尾氣，使得尾氣在離開排放口時含有最少的醇胺與醇胺的降解物。

為研究吸收器內的流體分佈情況，ACC 醇胺吸收廠亦安裝了 60 個溫度感測器、伽瑪射線與氣體組成分析儀等線上分析儀器。其中，伽瑪射線提供了塔內流動狀態之及時掃描，由掃描結果顯示在連續操作過程中沒有出現流體之異常分佈，證明了煙氣與醇胺吸收劑在通過吸收器有良好的流體分布，接觸效果良好並可維持其吸收效能。

為了移除排釋尾氣內的醇胺及其降解物，每一組吸收器安裝了兩組水洗器。每組水洗器包含了三米的填充塔、一個液體貯存槽、泵和冷卻器等。最上方的填充塔為洗滌區用來去除尾氣內的醇胺及其降解物，並且於其上方安裝兩個除霧器防止塔內液滴逸散。經過淨化後的尾氣中醇胺含量極低，通常低於 1ppm。

為了讓 TCM 的醇胺吸收廠適用於的兩種二氧化碳濃度之不同煙氣，醇胺吸收廠安裝了兩個形式之氣提器（脫附器）。這兩種氣提器分別為：平板式再沸器與管殼式再沸器。圖 2-1 為 TCM 的醇胺吸收廠之立體模型圖，圖內並標示吸收與再生區段。



圖 2-1 胺醇吸收廠吸收器和再生器

## 初步測試結果

**二氧化碳捕獲效率：**由於 TCM 正在安裝後的啟始運轉階段，維持一定或進一步提升二氧化碳捕獲效率並不是目前工作重點。如圖 2-2 所示，在這段操作期間捕獲效率維持在 68%至 100%之間。然而，從這段時間的操作經驗也已驗證捕獲效率是可以維持在設定水準下，並可實現且維持 85%至 90%的捕獲效率。

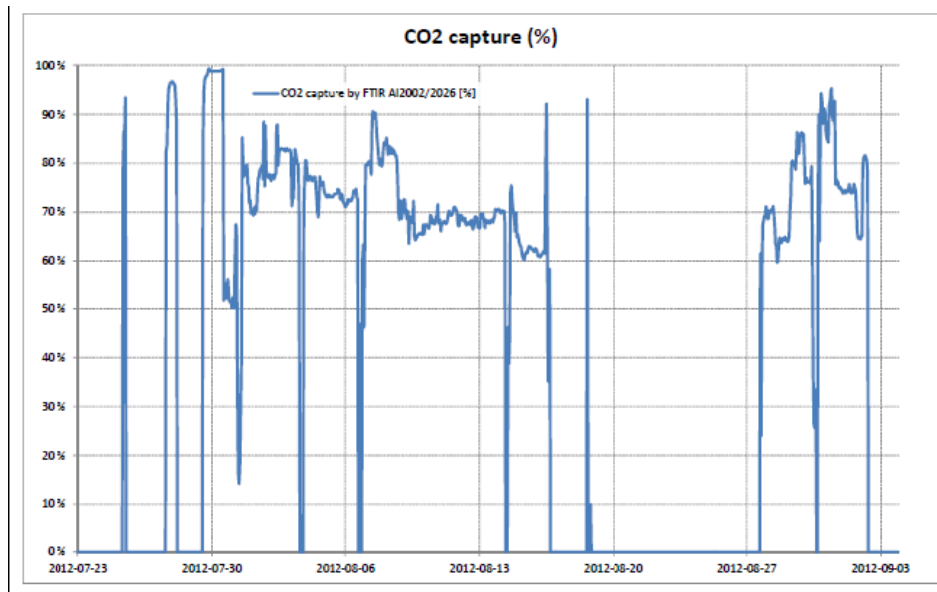


圖 2-2 二氧化碳捕獲效率

**能源消耗：**由初步的試驗結果來看，ACC 的醇胺吸收廠的能源消耗量為 4.1 到 5 MJ/kg CO<sub>2</sub>，約與其他以 MEA 為吸收劑之二氧化碳捕獲程序相似。

**廢氣排放：**TCM ACC 醇胺吸收廠目前的首要工作是進行排放至大氣的污染物監測工作，並且抑低其污染物排放量。目前醇胺吸收廠的排放監測主要是依賴線上設備、煙道等速採樣至實驗室分析。利用線上

FTIR 設備可連續量測尾氣成分與組成，在圖 2-3 顯示在測試期間尾氣內的 MEA 濃度。由結果顯示在這段操作期間內，MEA 的排放量比預期濃度低，並且也低於排放承諾值。圖 2-3 內的點表示以等速採樣配合實驗室分析的結果，從圖中可看出實驗室測量的結果與線上設備的報告值符合，顯示 TCM ACC 醇胺吸收廠所安裝的線上監測儀器之準確度符合需求，可以提供準確之數據做進一步的程序改良工作。

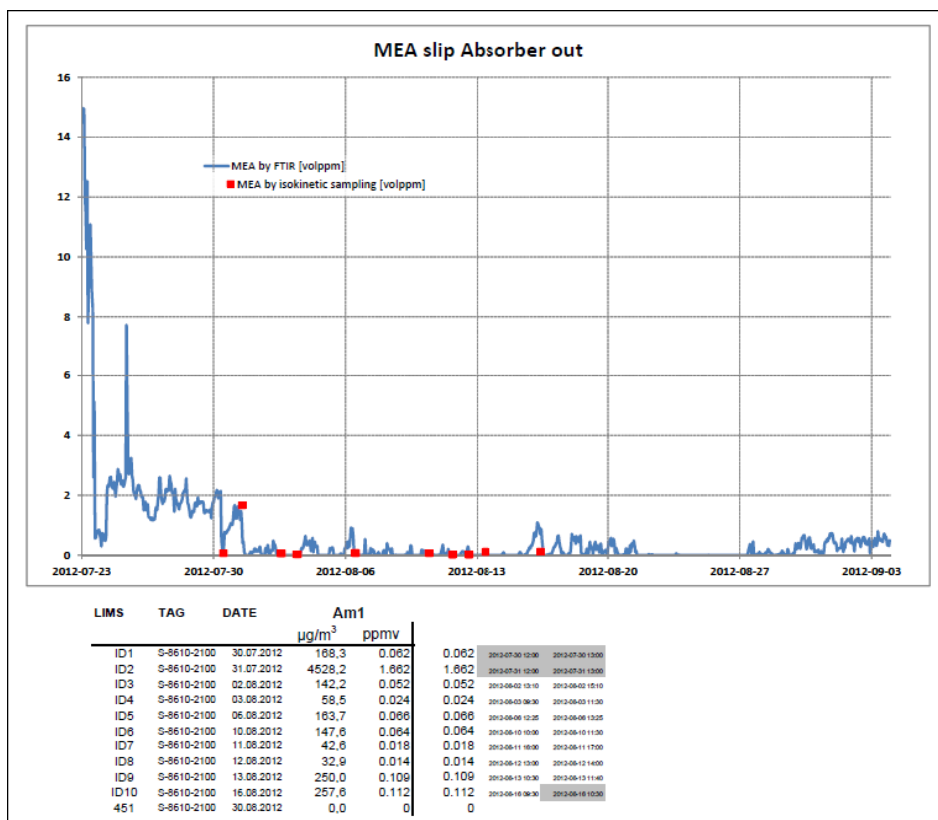


圖 2-3 以線上 FTIR 量測吸收器出口的 MEA 濃度

## 冷氨吸收技術

Alstom 公司的冷氨法 (Chilled Ammonia Process; CAP) 曾在全球各地先導測試與示範計劃中運用，以下敘述各計畫所得的重要結果；特別是有關於設置於 Technology Center Mongstad (TCM) 的 CAP 測試廠之測

試結果。TCM 是由 Gassnoa, Statoil, Shell 和 Sasoil 共同出資成立的。

經由美國電力公司的 Mountaineer 廠的試驗計畫 Alstom 公司在燃煤電廠成功應用了 CAP 技術，Mountaineer 的試驗計畫展示了 CAP 技術的可適用性與競爭力，跟隨 Mountaineer 成功應用 CAP 後，TCM 進一步設置 CAP 大型示範廠，TCM 設置的 CAP 在 2012 年完成並開始運作。

為了達到足夠且有意義的二氧化碳減量，有需要去開發可應用於新電廠與即有舊電廠的二氧化碳捕獲技術，開發工作須不斷透過製程改善與成本降低來達成推廣二氧化碳減量技術。

在眾多二氧化碳捕獲技術裡，燃燒後捕獲裡使用冷氨法（CAP）被認為是最有前景的技術之一。CAP 程序在常壓低溫下操作，本法使用碳酸銨溶液為吸收劑去吸收煙氣裡的 CO<sub>2</sub>。不同於其他技術，氨溶液呈現高度穩定性，吸收性能也不會被煙氣中的微量氧或酸性成份影響。CAP 程序消耗了較低的能源，因此也節省了電廠運用本技術進行二氧化碳捕獲的營運成本（OPEX）。本法因為在低溫下操作，可利用其他捕獲技術無法利用之低品級廢熱源，因此避免無謂的能源消耗。由於 CAP 排放出的氣體與廢液都是無毒的，所以也不需額外的處理設備。

CAP 程序提供了操作彈性和能力，可因應電廠日常的負載變動需求，通常傳統電廠每日負載變動區間約為 25~100%，CAP 可因應這種負載變動而且不會破壞 CAP 程序的操作。氨是一種常見且廣泛使用的化學藥品，CAP 廠裡的氨也須依既定的法規申請許可，這些許可包含廢棄處理之許可。而 CAP 設施裡產生的副產品為液態硫酸銨，可做為肥料等商品販售。

在不同的 CO<sub>2</sub> 捕獲技術裡，壓縮 CO<sub>2</sub> 的耗能佔捕獲程序總能耗相當大的部份，而 CAP 程序可回收較高壓力之 CO<sub>2</sub>，從而可顯著降低 CO<sub>2</sub>



壓縮設備的耗能。Alstom 冷氨法操作程序如圖 2-4 所示；冷氨程序吸收二氧化碳之詳細流程圖如圖 2-5 所示。

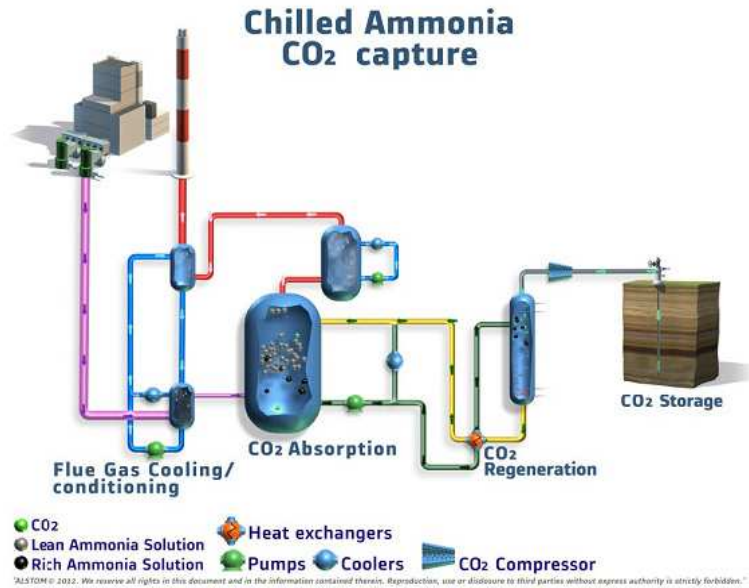


圖 2-4 Alstom 公司的冷氨法

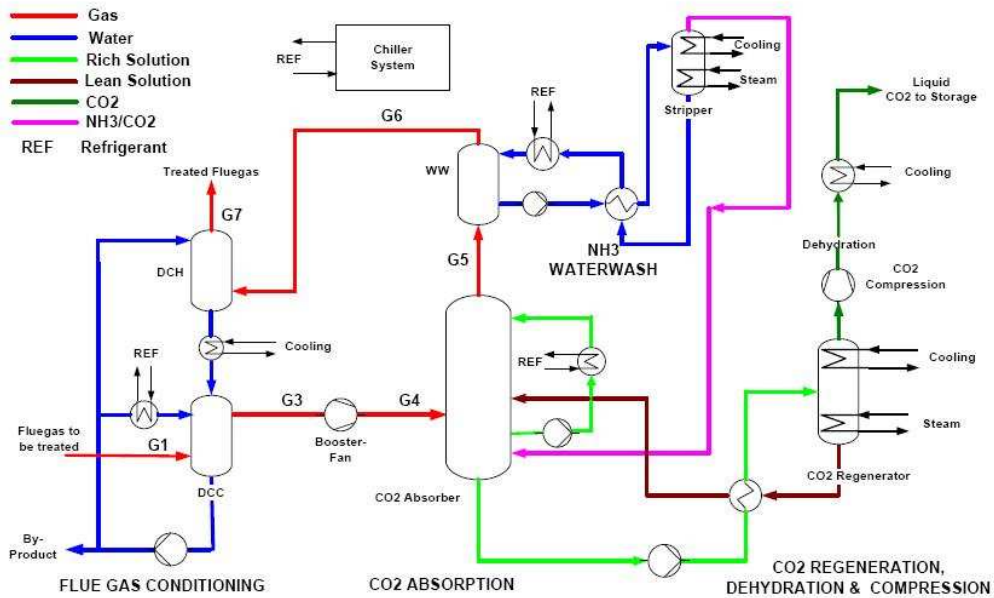


圖 2-5 冷氨法流程圖

## 2-2 MHI 醇胺吸收技術

2011年6月 Southern Company 和三菱重工(MHI)成功的在阿拉巴馬電力公司的 Plant Barry 燃煤電廠啟動了世界上最大的二氧化碳捕獲工廠，並且達成 500 TPD 的全載運轉。以下為 MHI 的醇胺吸收技術操作經驗與運轉結果，包含了 MHI 公司在大规模商業運轉之累積經驗，這些結果著重於燃煤電廠之示範運轉之經驗。

SECARB 示範計畫以阿拉巴馬電力公司的 Plant Barry 燃煤電廠之煙氣進行之 500 TPD CO<sub>2</sub> 捕獲與封存示範計畫，本計畫是世界上最大的整合型二氧化碳捕獲與封存(CCS)計畫。本計畫包含了二氧化碳捕獲、運輸、壓縮與封存等單元，圖 2-6 顯示本示範計畫內各個程序之流程。圖左為 Plant Barry 燃煤電廠的 5 號機，5 號機為 770MW 的超臨界燃煤鍋爐，Plant Barry 燃煤電廠原先已安裝之環保設備包含：選擇性催化還原反應器(SCR)以控制氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、靜電集塵器(ESP)控制粒狀物、濕式排煙脫硫裝置(FGD)以控制 SO<sub>x</sub>。

本計畫從 FGD 下游分流相當於 25MW 之煙氣量進入 CO<sub>2</sub> 捕獲廠，圖 2-6 右邊顯示了 CCS 示範計畫新設之各個單元包括：CO<sub>2</sub> 捕獲廠、CO<sub>2</sub> 壓縮廠、CO<sub>2</sub> 除水設備與地質封存注入設施。

示範計畫的 CO<sub>2</sub> 捕獲部分主要由 Southern Company、三菱重工(MHI)與幾個較小的第三方公司出資，但其中也包含了美國電力科學研究院 (EPRI)。

捕獲廠部分計畫由南方公司和美國三菱重工 (MHIA) 合作執行，從捕獲廠捕獲的二氧化碳隨後經由運輸管道傳輸至 Citronelle 油田封

存。地質封存部分計畫由 Southeastern Regional Carbon Sequestration Partnership (SECARB) 負責管理

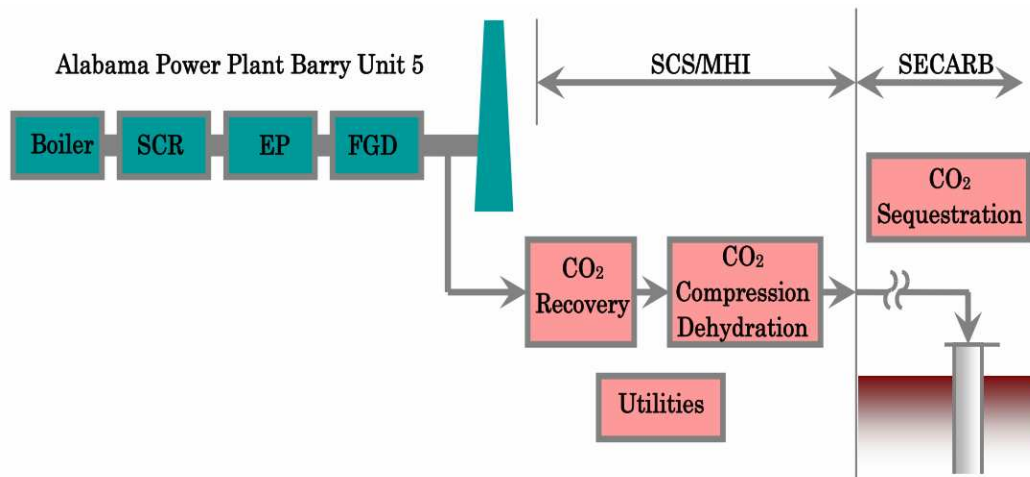


圖 2-6 SECARB CCS 示範計畫之完整流程圖

二氧化碳捕獲工廠的概述如下：該廠利用 MHI 的 KM-CDR 技術，吸收劑為 MHI 專有的醇胺溶劑 KS-1，該廠入口端煙氣之設計基準為二氧化碳濃度 10.1 mol% (wet basis)。設計容量為處理 25MW 的煙氣，相當於 73,805 SCFM 的煙氣流量，預期可移除 500 TPD 的二氧化碳，捕獲效率為 90%。

捕獲工廠於 2011 年 6 月 2 日成功啟動並且達到穩定的全載運轉，圖 2-7 為捕獲工廠在運轉期間的空照圖，捕獲工廠佔地約 300 英尺長，150 英尺寬。



圖 2-7 捕獲工廠在運轉期間的空照圖

### 2-3 KM-CDR 技術

MHI 的 KM-CDR 技術是一個先進、有效的商用二氧化碳捕獲程序，低能耗與價格競爭力可運用於各類工業程序。圖 2-8 為 Plant Barry 燃煤電廠之 500 TPD KM-CDR 流程，CO<sub>2</sub> 吸收程序利用立體障礙醇胺溶劑 (KS-1)。

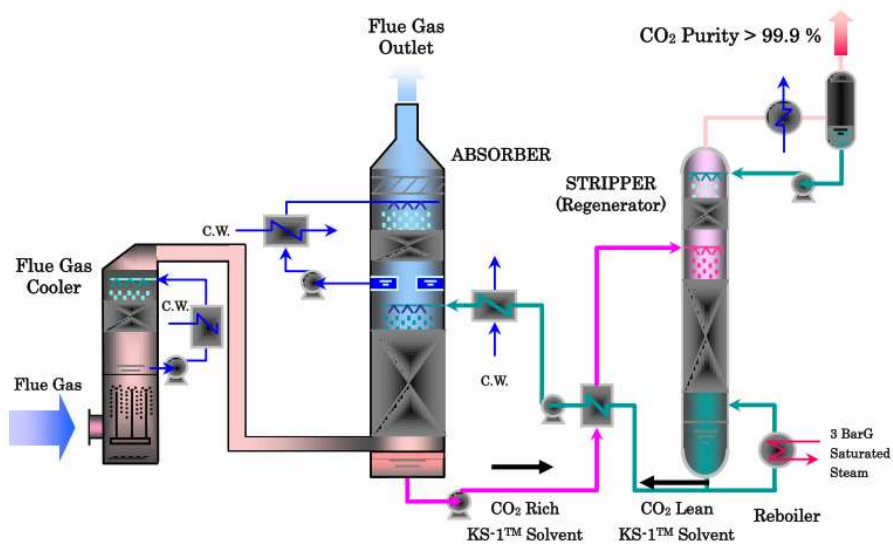


圖 2-8 Plant Barry 的 500TPD KM-CDR 流程

該 500 TPD CO<sub>2</sub> 捕獲廠已成功於 2011 年 6 月 2 日啟動，隨即進行相關測試活動。隨著運轉數據的收集、分析與判讀數據之相關流程參數也被確定。目前已開始進行尾氣之監測活動，以分析排釋至大氣之尾氣中的二氧化碳與其他污染物之濃度，以確認其符合排放管道之標準。表 2-1 為相關製程參數之測驗結果。

表 2-1 為相關製程參數之測驗結果

		Base Case	High Efficiency Case	High Load Case
Flue gas condition	Flow rate [Nm <sup>3</sup> /hr]	109,000	112,000	116,000
	CO <sub>2</sub> concentration at the Quencher Inlet [vol.% (w)]	10.8	10.5	10.8
Operation Results	CO <sub>2</sub> Capture rate [MTPD]	<b>505</b>	<b>509</b>	<b>543</b>
	CO <sub>2</sub> removal efficiency [%]	<b>91</b>	<b>91</b>	<b>91</b>
	Steam Consumption [ton-steam/ton-CO <sub>2</sub> ]	0.98	0.95	1.02

### 三、二氧化碳深地層封存技術

#### 3-1 SECARB Anthropogenic Test

美國能源部 (DOE) 以驗證深地層 CO<sub>2</sub> 注入、封存和監控等方法，來做為降低二氧化碳排放量之方法。DOE 努力推動碳封存技術驗證，部署必要的基礎設施和合作框架。因此，美國能源部設立了 7 個區域碳封存合作夥伴 (RCSPs)。東南地區碳封存合作夥伴 (SECARB)，是南方能源局 (SSEB) 所領導組織，它代表美國東南部 13 個洲。SECARB 之「人為試驗計劃」(SECARB Anthropogenic Test R&D project) 部署了一個示範性之 CO<sub>2</sub> 捕獲、運輸與地質封存和監測之整合計劃。

這個計劃由南方公司規劃，本計劃中阿拉巴馬電力公司負責向人們示範 CO<sub>2</sub> 捕獲、運輸和封存技術之整合。捕獲廠址在 Bucks 的 James M. Barry Electric Generating Plant (Plant Barry)，利用由美國三菱重工 (MHIA) 授權之技術。該捕獲設施可處理相當於 25MW 之煙氣，Plant Barry 利用美國三菱重工授權的醇胺捕獲技術進行燃燒後捕捉。廠區捕獲的 CO<sub>2</sub> 將透過輸送管運到 Alabama Citronelle 的 Citronelle Dome 進行深鹽水層封存，本計劃已於 2012 年第三季開始運轉，每天補捉將近 550 公噸之 CO<sub>2</sub> (相當於 25MW 的電廠) 並進行地質封存。封存目標地層是 Paluxy formation 之下部，深度為 2865 米 (9400 英尺)。

運輸和灌注作業將持續一到兩年。地下監控將被實施直到 2017 年，以追蹤地下 CO<sub>2</sub> 團塊遷移和監控洩漏行為。這個計劃將是美國第一個大規模的全整合之商業型燃煤捕獲和封存計劃。以下將討論本計劃最新結

果，包括申請許可之努力，地質背景資料分析和封存場地內貯集層的模擬分析，描述計劃執行者如何透過這些研究活動達成計劃設定之目標。

SECARB 計畫的第三階段進行「人為」二氧化碳之注入測試 (Anthropogenic Test)，從 Plant Barry 捕獲廠捕獲之二氧化碳經壓縮後以管線輸送至封存場，此管線由 Plant Barry 捕獲廠輸送至約 12 哩遠的 Citronelle 油田，Denbury Resource 負責運輸管線之建造和運轉，二氧化碳之輸送管線由 4" 碳鋼管組成，管內 CO<sub>2</sub> 純度 >97% CO<sub>2</sub>(乾基)。管線操作條件為 115°F 與 1500psig，水分 <30 lb H<sub>2</sub>O/MMSCF，H<sub>2</sub>S <20ppm。管線內 CO<sub>2</sub> 的品質定期由 Plant Barry 廠外閥門取樣分析，封存場址在 Citronelle 油田。

Citronelle 油田位在 Citronelle Dome 結構為巨大鹽心背斜，因為本身為油田已長期封存油氣於其內，證明其結構內沒有斷層等缺陷，亦無地震活動影響封閉性。Citronelle Dome 是一個良好而大容量的 CO<sub>2</sub> 封存地點。

CO<sub>2</sub> 曾由 Denbury Resource 注入兩年，注入至 Citronelle 油田內約 9500 英尺深的 Paluxy Formation 內封存。本計畫之封存場地下之 Paluxy Formation 近 2 哩深，其中包含 1100 英尺沙岩，並夾有沙岩和頁岩互層。Paluxy Formation 上方具有完整的不透水頁岩、黏土作為蓋層，可避免 Paluxy Formation 封存的 CO<sub>2</sub> 向由上方遷移。

本計畫於 2011 年 11 月，獲阿拉巴馬環境管理部門(ADEM)核發 UIC Class V 注入許可，Class V 許可允許執行實驗性質之二氧化碳封存計畫。Class V 許可項目下需要實行相關之監測技術包含：地表 CO<sub>2</sub> 監測、注入監控、井孔壓力監測、定期採樣分析地下水組成變化。

此計畫預計在數年間於 Citronelle 油田持續注入超過 100,000 噸的 CO<sub>2</sub>，

注入時的運轉紀錄與完成注入後的後續監測工作，將收集大量數據以應用未來的更大型計畫。未來，本計畫可能會依據許可項目完成後而關閉，或由 Denbury Resource 再申請 EOR 許可再度使用。至 2012 年 9 月

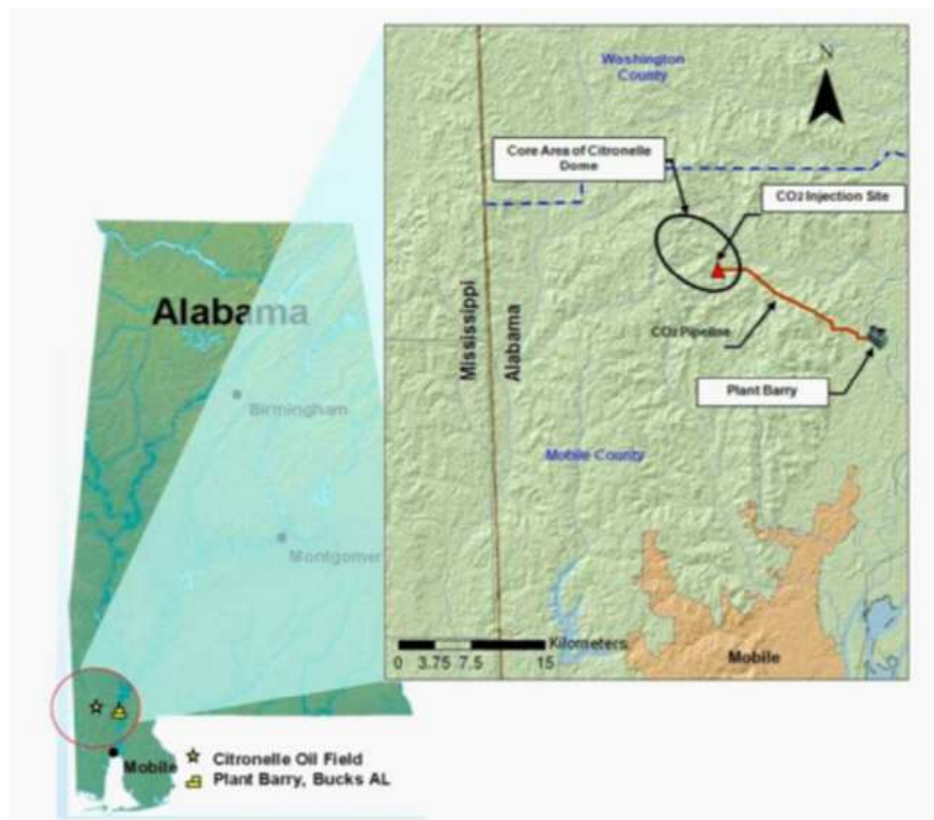


圖 3-1 CO<sub>2</sub> 運輸管路圖

底，已有 10,000 噸 CO<sub>2</sub> 被注入封存在 Paluxy Formation，圖 3-1 顯示在 Denbury Resource 建造的 CO<sub>2</sub> 運輸管路圖，從 Plant Barry 廠捕捉 CO<sub>2</sub> 至 Citronelle 油田大約 12 哩。

圖 3-1 從 Plant Barry 廠至 Citronelle 油田之 CO<sub>2</sub> 運輸管路圖

在 Plant Barry 電廠執行的 CO<sub>2</sub> 捕捉的技術是 MHIA KM-CDR 程序，它利用專有的 KS-1 溶劑來達成高 CO<sub>2</sub> 捕獲率並減少能耗。CO<sub>2</sub> 之捕捉和壓



縮區是一個完全整合且連續式的操作單元，並利用代表性的設備來展示三菱重工的生產製造、優化技術與放大本程序之能力。捕捉工作已自2011年7月開始操作，是美國最大的燃煤電廠捕獲示範計劃，此廠設計為每天可捕捉550噸。

本計劃建造一條CO<sub>2</sub>管線，該管線經由CO<sub>2</sub>捕捉設施到Citronelle Field的注入點，總長約19公里（12英里）。該管線沿現有之輸電線路平行布設，管線佔地約6.5米寬，跨越9個地主的土地。注入井與地表設施已設置完成在 Denbury Onshore公司的土地上，並由Denbury負責運轉，管線已在2011年11月完成水壓測試。計劃過程中歷經：場址選擇、鑽井、注入許可申請、注入場與注入操作、CO<sub>2</sub>監測與查核和計量（MVA）等工作。圖3-2為D-9-7#2井口的水平式ESP注入泵；圖3-3為灌注速率與累積灌注量。

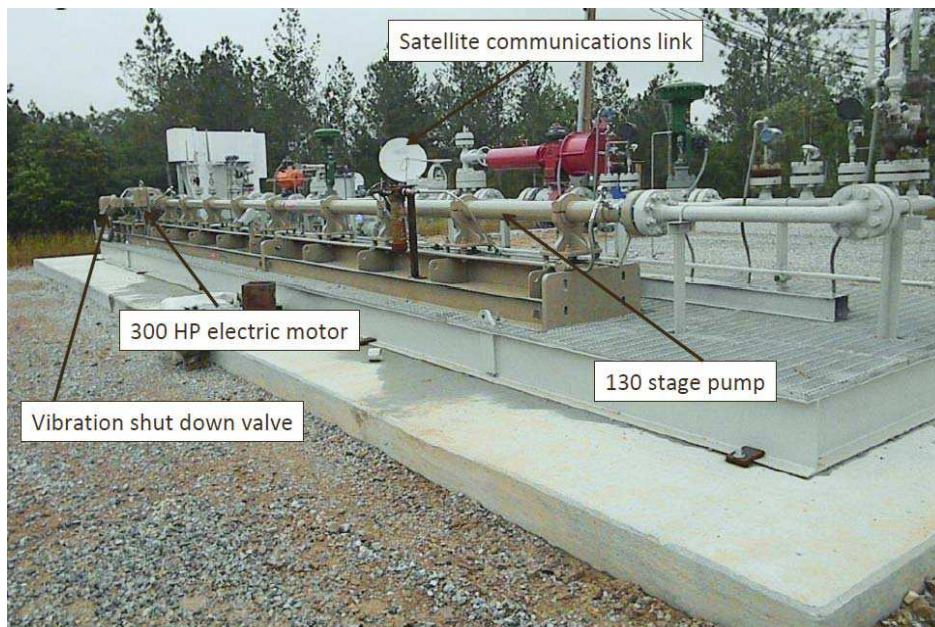


圖 3-2 D-9-7#2 井口的水平式 ESP 注入泵

圖 3-3 為灌注速率和到目前為止的累積灌注量，自 2012 年 8 月 20

開始灌注以來，已有超過 13,000 公噸的 CO<sub>2</sub> 經由 CO<sub>2</sub> 管線輸送並且被注入到 Citronelle Dome 的 Paluxy formation 封存。灌注管之壓力為 1250~1450psi。

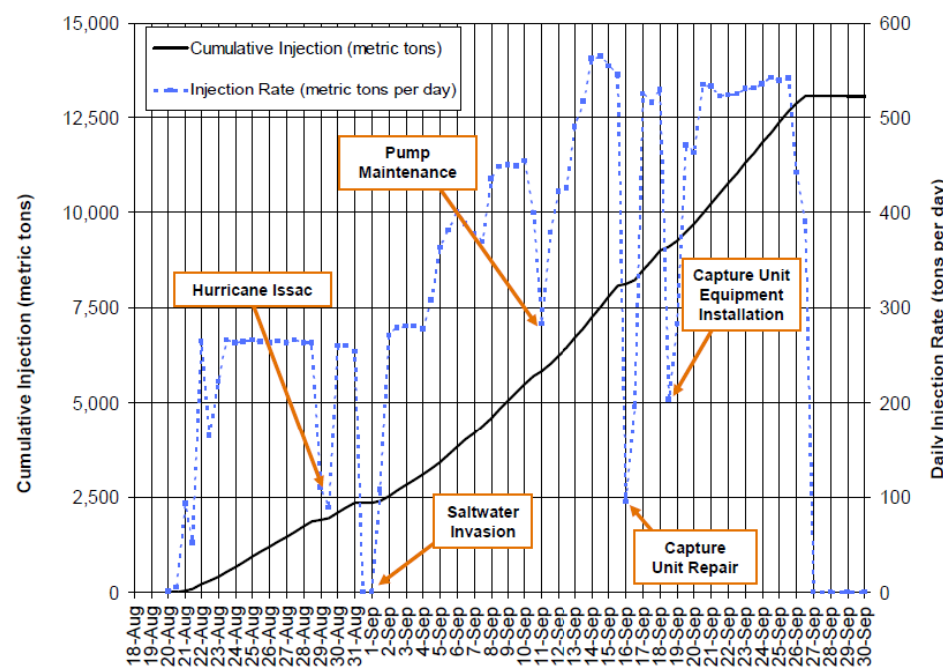


圖3-3. 灌注速率與累積灌注量。(單位：公噸)

### CO<sub>2</sub>監測，查核和計量 (MVA)

本計劃之 MVA 之策略目的是為了降低風險，並確保 CO<sub>2</sub> 注入的安全、並經由：1.確保井口的完整性、2.保證安全的 CO<sub>2</sub> 的注入作業、3.檢驗 CO<sub>2</sub> 團塊位置與遷移、4.監測任何 CO<sub>2</sub> 的洩露、5.測試監測工具來獲得完整性的資訊。本計畫也週期性檢驗注入 CO<sub>2</sub> 之化學組成。MVA 程序包含了各種地表、淺層和深層地層的監測方法(表 3-1)。表中所列之測試方法與目的簡述如下：

表3-1. MVA測試與頻率

測量技術	測量參數	應用	頻率
儲存層與上方岩層之壓力監測	井下壓力計	評估注射區之壓力分布與完整性。透過監測上方岩層之壓力來監測偵測洩漏。	注入操作期間連續執行，注入後每年執行
套管脈衝中子記錄	鹽水換置量/CO <sub>2</sub> 飽和度為中子捕獲率之函數	量化在井附近的滲透性CO <sub>2</sub> 的飽和度。展示CO <sub>2</sub> 團塊遷移和監測下層的洩露	背景分析一次、灌注時每年、注入後每半年
Time-lapse seismic (crosswell and/or vertical seismic profiling)	CO <sub>2</sub> 會改變背景量測之結果	CO <sub>2</sub> 團塊的垂直和水平方向分佈	背景分析一次、注入後一次
儲存層地下水採樣	從注入區採加壓流體樣品，分析pH和陽離子與陰離子	CO <sub>2</sub> 注入對注入區所產生的地化性質改變	注入時每半年，注入後每年
飲用地下水層(USDW)監測	鹼度, DIC, DOC, 陰陽離子	監測USDWs地化性質改變是淺層CO <sub>2</sub> 洩漏之指標	每一季
注入井環井壓力與井壓監測	壓力錶安裝在井口以監測套管外殼與管內壓力	環井壓力是井筒完整型的指標，以確保不會超出最大注入壓力	注入操作期間與注入後持續進行
土壤CO <sub>2</sub> 通量	土壤所排放的通量	監測從土壤表面排放CO <sub>2</sub> 異常增加量，是CO <sub>2</sub> 洩漏的指標	每一季

Perfluorocarbon 示蹤劑 (PFTs) 試驗和分析	在地面監測穿透到深井之示蹤劑的增加量	監測在井孔附近追蹤劑的累積有可能是CO <sub>2</sub> 的垂直洩漏	背景分析一次，每年執行
注入井機械完整性測試	放射性追蹤劑測試、環形壓力測試、噪音或溫度記錄	確保CO <sub>2</sub> 注入井內部與外部的完整性	注入前一次，注入期間每年一次至注井工作結束
注入壓力	注入井管線與套管壓力	確保符合最大壓力限制、監測管線和套管壓力防止洩漏	整個注入時期
灌注CO <sub>2</sub> 之組成	氣體成份、有機物和金屬	確認注入物滿足UIC承諾與管線運輸的純度要求	背景分析、每月監測主要氣體成份；每半年測試金屬成份，有機物成份分析只在燃料改變或捕捉方法改變時進行

### 3-2 Mountaineer 封存計畫

美國電力公司 Mountaineer 電廠規劃利用之前小規模注入驗證試驗之結果，並配合新測試井之儲存層地質數據，設計一個每年灌注 1.5 百萬噸之二氧化碳封存系統。前期之初步評估顯示，在銅脊白雲石層(Ridge Dolomite layer)具有高可注入性，本區域之大致可滿足本計畫設置兩個注入井和相關的監測井之需求。監測計畫包括注入井、中間介質與淺地層的壓力監測、流體監測、測井紀錄、微震波監測、地面排放、抗腐蝕性和機械完整性之評估。本計畫的成本估算顯示，地質封存部分概占整體(包括：捕獲、運輸和封存)二氧化碳捕獲與封存成本的 20%，但是封存部分的成本不確定性很大，會隨地質的不確定性而調整。

2009 年底，美國能源局(DOE)選擇了美國電力公司(AEP)在 West Virginia 的 Mountaineer 電廠來示範商業規模的大型碳捕捉封存系統(CCS)，計畫規模為每年捕獲與地質封存約 1.5 百萬噸的 CO<sub>2</sub>。整個計劃統稱 CCSII 計畫，目標為建造和運轉一個商業化規模的 CCS 系統，計畫內使用 Alstom 公司冷氦技術來處理 235MWe 煙氣；本計畫分四個階段執行：第一階段：計畫定義(2010-2011)、第二階段：設計和許可申請(2011-2012)、第三階段：施工和啟動(2013-2015)及第四階段：運轉(2015-2019)。

#### 碳封存計畫成果

Mountaineer 場址位在阿巴拉契亞(Appalachian)盆地，大約有 3km 向東南方輕微傾斜(1-2 度)之沉積層，之上覆蓋有前寒武紀火成岩(Precambrian igneous rocks)。CCSII 計畫以先前在此場址進行之兩個先導計畫為基礎，設計相關的地質封存工作。

在 2003-2007 年 DOE 已資助 Battelle 進行封存場址特性調查計畫，同時 AEP 也資助一個捕獲系統之驗證工具(PVF)開發計畫。封存計畫在當地兩個深鹽水層進行二氧化碳的注入及監測工作，而 PVF 計畫包括：使用 Alstom 之冷氨技術安裝和運轉一個 20MWe 二氧化碳捕獲系統。DOE 資助計畫範圍包括：震測調查和鑽探井(AEP-1)開發，已確定 Rose Run Sandstone 和 Copper Ridge Dolomite 具封存二氧化碳潛力。PVF 系統於 2007-2009 年建造，並成功運轉到 2011 年中。累積約有 37,000 噸二氧化碳被注入到此場址，2012 年 10 月至目前正在執行注入後監測工作。本計畫系統包括兩個注入井，其中 AEP-1 注入到 Copper Ridge Dolomite、AEP-2 注入到 Rose Run 砂岩層，並包含三個監測井(MW-1、MW-2、MW-3)。兩個注入區地質描述為：Rose Run 約在 2350m 深，包含薄層砂岩和白雲岩區。Copper Ridge 約在 2500m 深，200m 厚白雲岩層下半部有薄 vuggy 互層，下半部岩層具有高孔隙度和高滲透性。

PVF 運轉數據顯示，Rose Run Sandstone 因為滲透性低和破裂壓力也相對較低，所以可注性也較低。相較而言，Copper Ridge 具有高滲透性，注入區壓力集聚也低，附近也沒有地質缺陷來阻礙注入。PVF 計畫期間所收集場址特性和監測數據，已顯示 Copper Ridge 比 Rose Run Sandstone 更適合注入二氧化碳封存。

CCS II 計畫之第一階段工作包括利用：震測數據、鑽井、井測、岩心試驗和驗證井、儲集層模擬、系統設計和成本評估等方法評估當地與區域內之地質條件；更詳細資訊在 AEP 給 DOE 第一階段初步設計報告內以公開給大眾了解。

CCSII 的二氧化碳封存計畫之目的在努力減少地質不確定性，並發展一套從：許可申請、建造、運轉和監測一系列有效且可信賴的流程，並發展一套從計畫初期之試驗成果到進行後續成本估算的有效方法。

## 大規模地質調查

然而，因為附近區域缺乏其他探測井，對於商業規模的地質封存場所所需的地質連續性資料還是不足。因此，本計畫準備在離 PVF 井遠 3 km 處另外設置一個 2705 m 深的測試井(BA-02)，該井的設計為監測井。另外，在此一區域內也進行了 40 km 長的 2D 反射震測線來確定區域內之地質結構。BA-02 的地質顯示，這區地質與 PVF 區相似，主要成分包括厚的頁岩和碳酸岩。這些地質資料是透過 gamma 射線、中子、密度、電阻率、偶極聲波、元素光譜和核磁共振等方法全面性評估範圍內的岩石特性。

候選注入區更近一步透過靜態和動態流量記錄、鑽桿地層測試和小型注入測試來評估該區域的水文特性。測試過程中發現，井下流量記錄具有低成本的優勢，也是確定注入區注入特性的有效方法之一。在 BA-02 儲存層測試的結果與 PVF 井的相似，結果也顯示 Copper Ridge 之可注入性比 Rose Run Sandstone 大 100 倍。

## 二氧化碳封存模型開發

本計畫使用 STOMP 程式進行二氧化碳封存模型開發與評估，如圖 3-4 所示。本模型利用 PVF 井得到的地質數據、從 BA-02 初步鑽探資料來建立。本模型將用以分析井位最佳化佈置、二氧化碳團塊移動和地層內壓力變化之分析，並用以建立相關的配置和擬定合適的注入計畫。

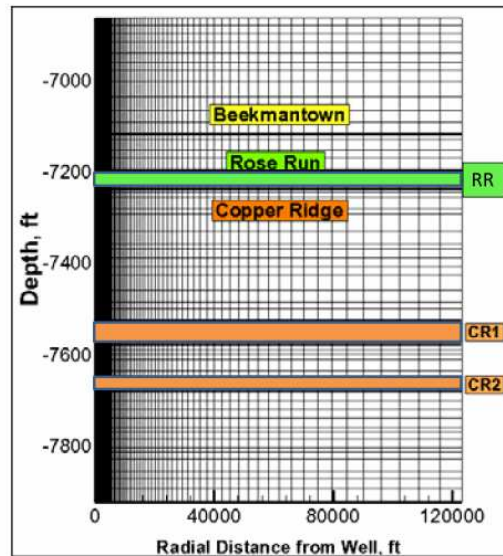


圖 3-4 儲集層與注入區之數值模型

### 注入許可申請

本計畫將申請美國環保署之地下注入管制計畫之第六類井(UIC Class VI)，其歸類為商用 CCS 井。必需的監測計畫包括井的壓力監測、深井內、中間地帶、淺層地下水的流體監測。其他監測項目包括：週期性壓力變化、微震監測、土壤通量、腐蝕性、機械完整性測試和定期井測，詳列於表 3-2。

表 3-2 CCS II 封存計畫提出的監測計畫

監測和測試方法	背景測試頻率	注入階段頻率
	注入前頻率	1-5 年
每季二氧化碳注入井流體採樣和分析	無	X X X X
注入速率、壓力、溫度之監測	無	連續性
環孔壓力和流率	無	
井材料的腐蝕監測	無	X X X X



外部機械完整性測試(MIT)	X	X
壓力 Fall-Off 測試	無	X
飲用地下水層監測	>1 年 (每季)	X X X X
中間地層之地下水品質和壓力監測	X	X
微震監測與注入所引起破裂監測	≥1 個月	連續性
PNC 紀錄以偵測之二氧化碳	X	X
注入流體之化學監測	X	X
儲存層注入區之壓力監測	≥3 個月	連續性
數值模擬	X	X
地表排放量	1-2 年(a)	X X X X

X：表示單次採樣/調查事件 (a)頻率為每季或每月

## 成本估計

本計畫整體之成本估計總額為 1065 百萬美元(在 99.5%信賴區間下)。其中包括：固定資產成本(825 百萬美元)、價格變動成本(71 百萬美元)、風險應變成本(103 百萬美元)、運轉維護成本(66 百萬美元)；封存部分成本約為整體成本之 20%。

## 計畫現狀

在 2011 年 7 月，AEP 決定將這個計畫擱置。因為目前缺乏相關之氣候法規、碳排放價格不明，使得本計畫的所投資的成本面臨無法回收的困境。然而，在過去的十年間由這個場址所獲得之地質資料、運轉經驗、監測紀錄、與工程建

造和成本評估的經驗，仍然對其他 CCS 計畫是一個有用的參考，並可作為未來在這區域內更進一步發展 CCS 的基礎。

### 3-3 歐盟 CO2ReMoVe 地層監測與模擬計畫

Time-lapse 震測(Time-lapse seismic)和壓力監測(圖 3-5)證目標深地層作為二氧化碳儲存場的關鍵技術。而且，各計畫的特性調查、運轉、監測各階段所收集的資料，也將成為該場址停止注入後將責任移給政府當局重要查核事項。

因此，歐盟 CO2ReMoVe 計畫的一個重要部分是執行一個長達六年期的專案，致力於建模、監測和驗證工作的查核活動。這個專案已於：SLEIPNER（挪威）、In Salah（阿爾及利亞）、Ketzin（德國）、Weyburn（加拿大）、K12-B（荷蘭）和 Snøhvit（挪威）執行並獲取相當多經驗（表 3-3）

這個計畫在 2012 年 2 月終止，目的在根據實際經驗來提供安全和有效封存二氧化碳的有效工具。在這個專案中，著重於在實際二氧化碳封存計畫中實測這些工具。CO2ReMoVe 已經發展一套整合性、且經實地驗證過的工具組合，用以評估封存效能、並可進行風險評估、監測計畫評估以減少二氧化碳封存場之不確定性。

表 3-3 CO2ReMoVe 研究之二氧化碳封存場址

場址名稱	儲集層	深度(m)	每年注入量估計值 (百萬噸)	位置
In Salah	砂岩(鹽水層)	~1,950	0.6	Algeria
Sleipner	砂(鹽水層)	~800	0.9	Norwegian Sea
Snøhvit	砂岩(鹽水層)	~2,700	0.4	Barents Sea
Ketzin	砂岩(鹽水層)	~630	0.01	Germany

K12-B	砂岩(鹽水層)	~3,800	0.01	North Sea
Weyburn	石灰石/白雲岩 (耗竭油田)	~1,370	2.4	Canada

## CO2 團塊移棲和遏制

從 CO2ReMoVe 的結果顯示二氧化碳可以被安全而有效的封存，且建立公眾對長期封存二氧化碳之信心。

### 不確定性分析

背景資料調查與重複執行震測可增進對儲集層非均質性的了解，亦可更精確掌握地下二氧化碳團塊之遷移特性，這些調查工作對鹽水層封存特別重要。因為以往油氣開發者的地質調查工作很少針對鹽水層，所以目前鹽水層的地質資料十分貧乏。

目前各國的二氧化碳封存計畫，目標儲集層一開始是不確定的。所以，計畫初期對一系列可能的儲存層進行調查是較佳的選擇，而非僅調查單一儲存層。

二氧化碳封存的不確定性來自包括：地質變異、不完整的地質資訊、觀測值的量測誤差、對封存機制不瞭解、和專家判斷的主觀性。

然而，這些不確定性並不同於二氧化碳封存不安全、或二氧化碳封存無效、也不表示會發生風險。透過不確定性分析，風險可以被妥適管理，或再施予合適的預防或矯正措施來降低危害。

封存系統的不確定性，與可能造成的風險，可藉一系列的資訊來分析包括：監測數據、過去經驗和從不同性能評估工具獲得的資訊。

在整個二氧化碳封存計畫中，需要隨時與計畫各類關係人維持對話，以確定他們對這些不確定性與風險的了解與計畫開發者一致，也同意計畫開發者對這些風險之管理方法，各類關係人通常包含：當地居民、政府機構與區域組織

等。

為了實現這些目標，CO2ReMoVe 目前已開發一個層次分明的文件，敘明風險評估方法與步驟。該方法使用決策樹管理，並完成一個名為 CO2TESLA-Excel 之軟體。利用決策樹來記錄場內各種會影響儲存場址未來行為之各種證據包括：各項監測數據、流程模擬程式之輸出、儲集層模擬、系統模式和地質力學模型。

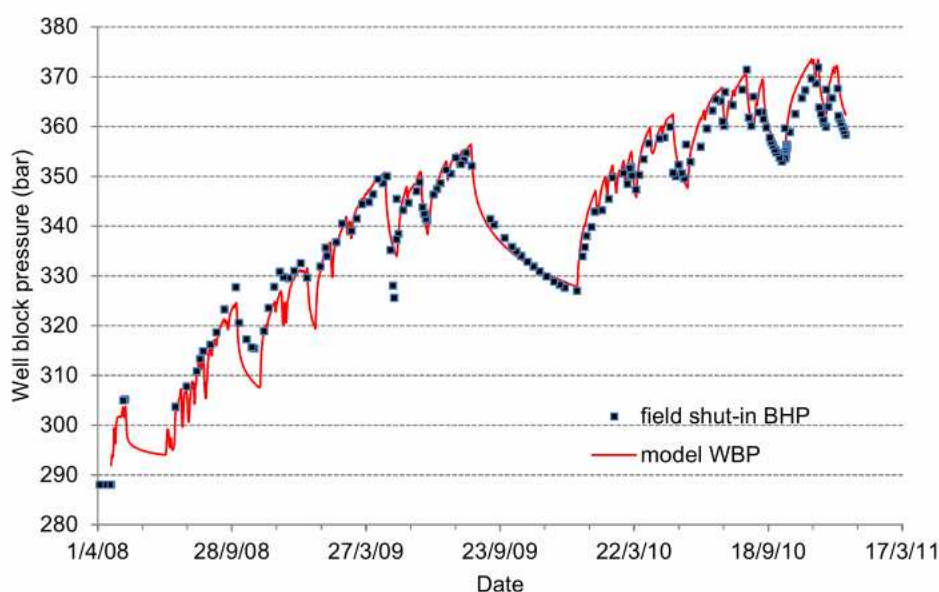


圖 3-5 井下的壓力觀測值

### 監測和查核活動

CO2ReMoVe 查核活動顯示，即使當二氧化碳被安全的儲存場址亦被有效監測，監測結果總是與模式預測有著不同程度的偏差。當資料量累積，可能出現許多對於儲存場複雜性的新見解。隨著時間的推移，監測和管理計畫須具備彈性。

例如，In Sala 三維震波採集計畫也由衛星圖資得到新資訊，因此該計畫再

增加了淺層地下水監測項目，而非僅止於表面水取樣。這個經驗告訴我們，場址管理計畫必要維持彈性以因應必須的改變。

## CO2ReMoVe 查核活動之結論與建議

1、CO2CARE 認為下列項目可用於驗證有無洩漏：(1)儲存層壓力發展須與數值模式評估一致、(2)監測計畫不得檢測到任何洩漏的跡象、(3)定期以震測或其他適當的方法來證明二氧化碳團塊封存在儲集層內、(4)井的完整性驗證(機械變形、套管或水泥老化、水泥鍵結強度)。

2、對於模式預測有以下幾項需要認清：(1)從計畫一開始要認清模式預測具有不確定、(2)預測未來行為須考慮不確定性、(3)建立各類行為與偵測結果的可接受範圍。

3、CO2ReMoVe 於 In Salah 計畫使用各種儲存層模擬，和系統模式進行長期評估。結果發現，沒有任何一個工具認為本計畫場址整體長期安全性有問題。運轉階段期間之監測計畫，更可進一步用來預測長期行為。歐盟 CO2ReMoVe 計畫針對場址長期效能評估建議下列工作：(1)壓力監測紀錄和模式預測相符、(2)團塊移動和模式預測相符。

4、場址壓力變化和團塊移動之驗證，是商業規模 CO2 封存場監測和查核工作之核心要務。根據場址特性，須增加使用不同監測項目驗證。在 Sleipner，團塊移動和蓋層影像是最重要的參數。在 In Salah，儲存層壓力、微震測和地表變形是關鍵項目。在 Snøhvit，壓力發展和團塊移動是主要監測項目。

雖然二氧化碳封存有很大程度依賴石油和天然氣工業的技術，二氧化碳封存也有新挑戰。In Salah 或 Weyburn，需要結合比油氣工業更大範圍數據和技術；整合儲存層和蓋層特性、水層資訊、土壤氣體、微生物學和衛星數據等，遠超出油氣工業正常作法。

在某場址合適的監測技術可能不適用於其他場址，所以沒有一套全部可通用的監測計畫。在實務上，兩個主要的監測技術十分重要：井下壓力與溫度測量、time-lapse 震測。這些工具能確定儲存層壓力改變，也可以校正模式所預測之二氧化碳團塊移動情形。因此，結合監測與模擬可以提供二氧化碳封存過程中詳細的資料，同時對不可預知的行為提早提出警訊。

## 四、感想與建議

- 1、二氧化碳捕獲技術目前仍以 post combustion capture 為主，惟捕獲成本仍很高 (\$40~\$100/噸)，需降至\$20/噸才有商業化之可能。
- 2、井下壓力、溫度測量與 time-lapse 震測技術非常重要，這些工具能確定儲存層壓力改變，亦可校正模式所預測之二氧化碳團塊移動情形。故結合監測與模擬技術可提供二氧化碳封存過程中詳細的資料，同時對不可預知的行為提早提出警訊。
- 3、本公司目前 CCS 進度係在鑽孔及岩心取樣之階段，俟地質鑽探完成後，下階段為達成環評之需要，應參考國外封存場址之實際運轉經驗，建立國內的監測及風險評估之技術。
- 4、此次參加 GHGT-11 CCS 國際會議，可展示國內 CCS 之研究成果及擴大國際視野，並藉此機會與歐洲、美國、日本及大陸等專家進行技術交流，達到與國際接軌之目的。