

出國報告（出國類別：考察）

二氧化碳攫取和儲存現場實務考察

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：李文台 化學師

劉源隆 化學工程監

許美玉 化學工程監

陳財富 一般工程師

趙德琛 一般工程師

派赴國家：美國

出國期間：95年8月31日至9月11日

報告日期：95年11月6日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：二氧化碳攫取和儲存現場實務考察

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/人事處/陳德隆

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

李文台/台灣電力公司/綜合研究所/化學師/02-80782248

劉源隆/台灣電力公司/台中發電廠/化學工程監/04-26302123

許美玉/台灣電力公司/通霄發電廠/化學工程監/02-23666548

陳財富/台灣電力公司/發電處/一般工程師/02-23666526

趙德琛/台灣電力公司/工安環保處/一般工程師/02-23667224

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：95年8月31日至9月11日 出國地區：美國

報告日期：95年11月6日

分類號/目

關鍵詞：溫室氣體減量技術計畫、二氧化碳攫取、二氧化碳儲存

內容摘要：(二百至三百字)

對於以燃燒化石燃料的火力電廠而言，不可避免將排放大量的二氧化碳，進而直接造成地球溫室效應的日趨嚴重。本公司為我國最主要的電力供應者，不可避免將排放大量的二氧化碳(約占全國排放量三分之一比率)，因而如何因應日趨嚴重的溫室效應，並提出適切的二氧化碳減量策略，實為本公司應肩負的社會責任和義務。

本公司為積極參與國際合作研究，因而參加美國電力研究院(EPRI)P 103 溫室氣體減量技術計畫 (Greenhouse Gas Reduction Options)的合作會員，參加期間為 2005-2007 年。為期加強本公司相關部門(綜研所/台中發電廠/通霄發電廠/發電處/工環處)實際業務負責人員，對於二氧化碳攫取和儲存議題的瞭解，以利後續業務的推動參考；本次有關二氧化碳攫取、再利用和地下層二氧化碳儲存的現場實務考察，包括美國電力研究院研討溫室氣體減量計畫、德州大學化工系二氧化碳攫取技術、Searles Valley Minerals 公司(原 IMC 化學公司) Argus 廠二氧化碳攫取技術及德州經濟地質局(BEG)二氧化碳儲存技術等，藉由本次考察及技術交流合作，可規劃本公司二氧化碳捕捉及固定相關核心技術，包括技術移轉，及本公司二氧化碳捕捉之技術地圖(Roadmap)，提供本公司管理階層因應溫室氣體決策之參考，同時未來於公司內可建立二氧化碳攫取和儲存技術知識社群，提供全公司掌握世界二氧化碳減量技術之發展及應用趨勢。

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

目 錄

一、 目的及任務-----	1
二、 出國行程-----	2
三、 考察內容及心得-----	3
1、 前言-----	3
1.1 全球氣候政策-----	5
1.2 電力研究院溫室氣體減量計畫-----	10
1.3 美國 FutureGen 計畫-----	12
2、 二氧化碳攫取技術-----	13
2.1 二氧化碳攫取技術發展情形-----	13
2.2 德州大學（UTA）化學工程系-----	15
2.3 Searles Valley Minerals 公司（原 IMC 化學公司）-----	22
3、 二氧化碳儲存技術-----	24
3.1 二氧化碳儲存技術發展情形-----	24
3.2 德州經濟地質局(BEG)-----	29
3.3 德州大學（UTA）石油地質工程系-----	34
四、 結論及建議-----	36

一、目的及任務

對於以燃燒化石燃料的火力電廠而言，不可避免將排放大量的二氧化碳，進而直接造成地球溫室效應的日趨嚴重。本公司為我國最主要的電力供應者，不可避免將排放大量的二氧化碳(約占全國排放量三分之一比率)，因而如何因應日趨嚴重的溫室效應，並提出適切的二氧化碳減量策略，實為本公司應肩負的社會責任和義務。

本公司為積極參與國際合作研究，因而參加美國電力研究院(EPRI)P 103 溫室氣體減量技術計畫 (Greenhouse Gas Reduction Options)的合作會員，參加期間為 2005-2007 年。為期加強本公司相關部門(綜研所/台中發電廠/通霄發電廠/發電處/工環處)實際業務負責人員，對於二氧化碳攫取和儲存議題的瞭解，以利後續業務的推動參考； 本次有關二氧化碳攫取、再利用和地下層二氧化碳儲存的現場實務考察，包括美國電力研究院研討溫室氣體減量計畫、德州大學化工系二氧化碳攫取技術、Searles Valley Minerals 公司(原 IMC 化學公司) Argus 廠二氧化碳攫取技術及德州經濟地質局(BEG)二氧化碳儲存技術等，藉由本次考察及技術交流合作，可規劃本公司二氧化碳捕捉及固定相關核心技術，包括技術移轉，及本公司二氧化碳捕捉之技術地圖(Roadmap)，提供本公司管理階層因應溫室氣體決策之參考，同時未來於公司內可建立二氧化碳攫取和儲存技術知識社群，提供全公司掌握世界二氧化碳減量技術之發展及應用趨勢。

二、出國行程

本次赴美國考察二氧化碳攫取和儲存現場實務之行程如下：

- | | |
|------------|------------------------------|
| 8/31 | 往程 (台北---舊金山) |
| 9/1 | 舊金山：赴電力研究院研討溫室氣體減量計畫 |
| 9/2 ~ 9/3 | 假日 |
| 9/4 | 舊金山---奧斯丁 |
| 9/5 | 奧斯丁：赴德州大學化工系研討二氧化碳攫取技術 |
| 9/6 | 奧斯丁：赴經濟地質局二氧化碳儲存現場實務考察 |
| 9/7 | 奧斯丁---洛杉磯--- TRONA |
| 9/8 | TRONA：赴 IMC 化學公司二氧化碳攫取現場實務考察 |
| 9/9 ~ 9/11 | 返程 (TRONA---洛杉磯----台北) |

三、考察內容及心得

1. 前言

分析未來全球能源之供給，將仍以化石燃料為主，其中又以煤的蘊藏及使用量佔大宗，因此如何降低二氧化碳的排放對大氣的影響是關鍵的課題。在因應氣候變遷的策略中，技術發展包括了提升能源效率、發展再生能源、提倡淨煤技術、及碳捕捉與封存（CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage）等各先進國家都在積極研發。

基本上，各種化石燃料在被人類使用前已存在地層中數百萬年以上，科學家相信人類可以仿效自然界儲存化石燃料的機制，將二氧化碳儲存或固化於地層空隙中，CCS 即是在這樣的觀念下形成之技術，其包括下列三個主要成分（詳圖 1）：

1. 捕捉：主要功能係自二氧化碳產生源中分離並濃縮/純化二氧化碳後予以暫時儲存。
2. 輸送：主要功能係將暫時儲存之二氧化碳運送至封存地點。
3. 封存：主要功能係將二氧化碳以高壓灌至地層或海底特定深度的區域，使其永久存放於該處，以控制大氣中溫室氣體含量，避免環境惡化。

CCS 因其提供了一個大量緩和二氧化碳排放的可能性，是國際間認為相當有潛力的二氧化碳減量機制，亦是目前美國、歐盟、澳洲、及日本等國家的研究重點。根據國際能源總署（IEA）的評估顯示，至 2050 年全世界二氧化碳的排放量將因 CCS 的機制減少 25%，故 CCS 將成爲一個關鍵且具經濟效益的技術。預估在 2050 年時，CCS 每年可減少 70 億公噸以上的二氧化碳排放，目前相關研究重點在降低捕捉二氧化碳的成本，及二氧化碳封存安全性考量等。

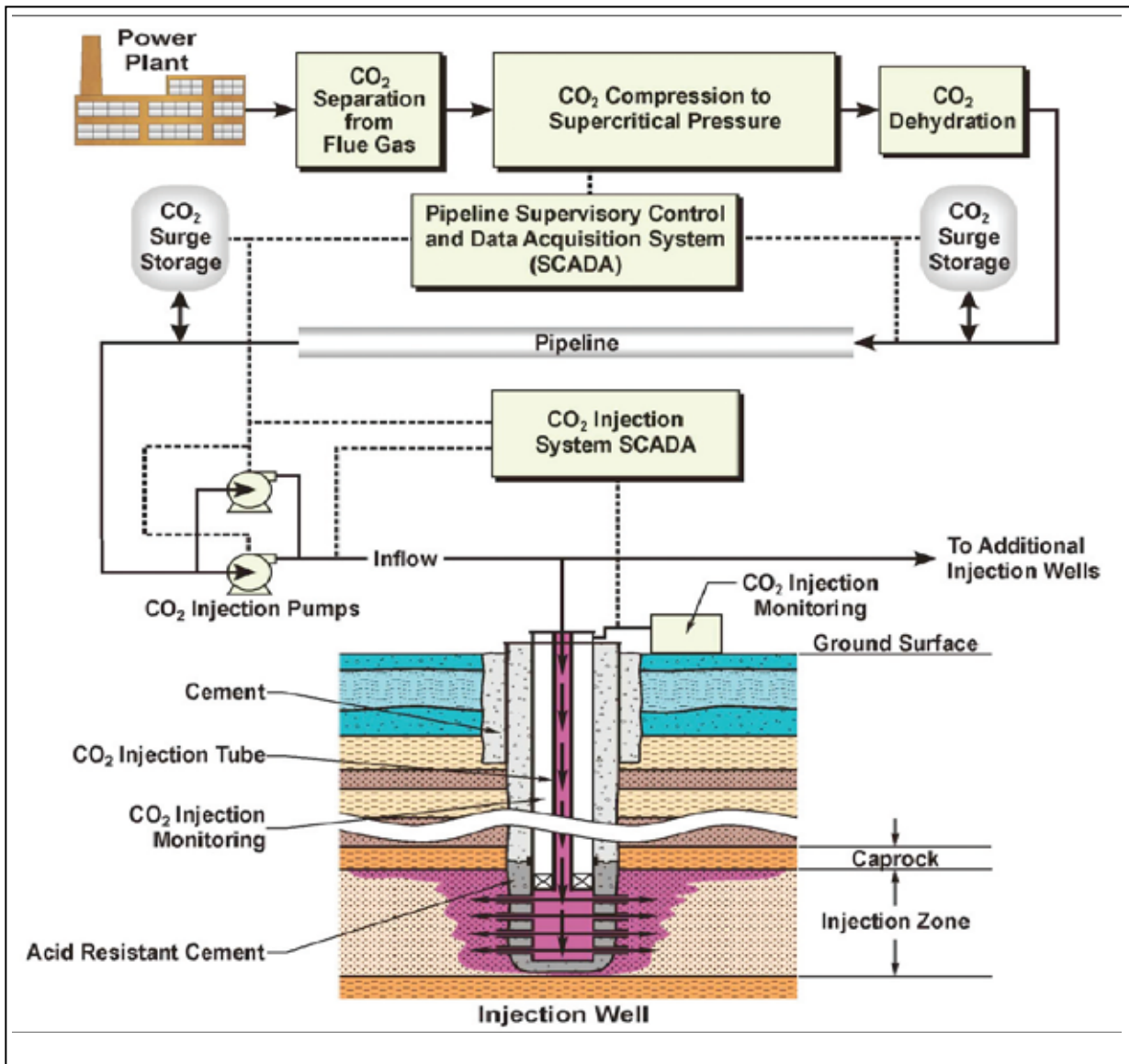
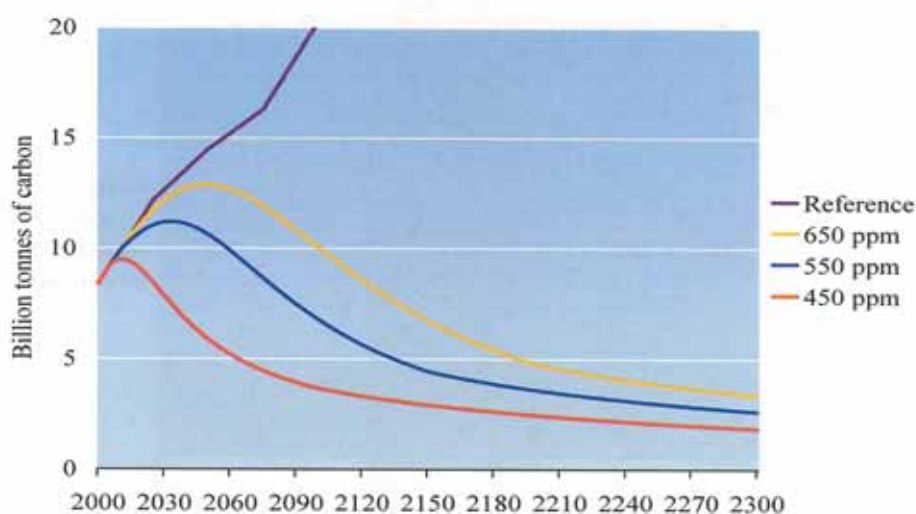


圖 1. CCS 構成示意圖 (source: Battelle, 2006. <http://www.battelle.org/gtsp>)

1.1 全球氣候政策

自 2004 年 11 月 5 日俄羅斯總理普汀簽字批准加入締約國，2005 年 2 月 16 日起京都議定書正式生效，溫室氣體的管制議題突然變成一熱門且嚴肅的課題，溫室氣體係指二氧化碳(CO₂)、氧化亞氮(N₂O)、甲烷(CH₄)、氫氟氯碳化物類(CFCs, HFCs, HCFCs)、全氟碳化物(PFCs)及六氟化硫(SF₆)等六種，惟其中仍以 CO₂ 占絕大比例。

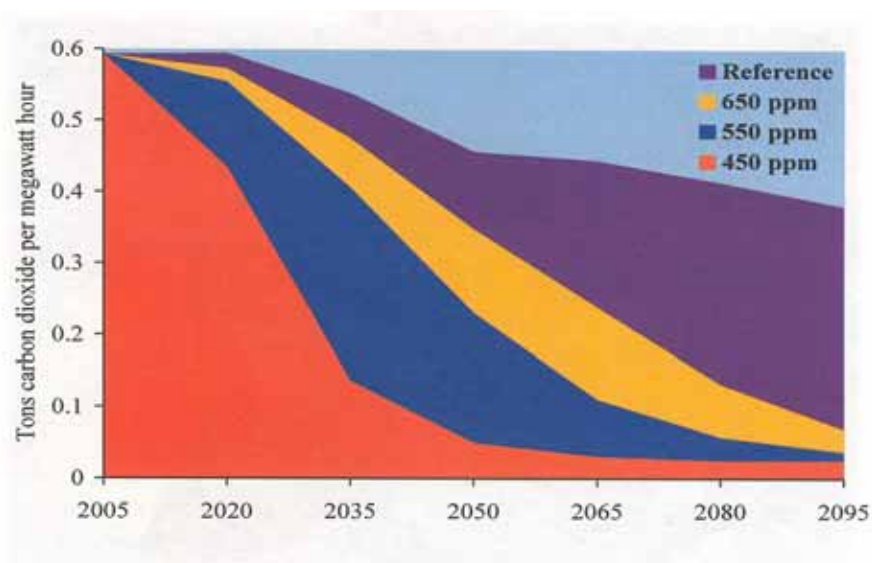
由於全球的經濟發展需求及化石燃料的大量使用，大氣中 CO₂ 的濃度由 1958 年約 315ppm 左右，至 2003 年已上升至超過 370ppm，未來大氣的穩定目標值如何訂定，使氣候暖化造成的不可逆環境變化不再繼續惡化，同時財務成本也是全世界可承受的，即是一項挑戰，但為了能進行推估，目前暫以 450ppm、550ppm、650ppm 為目標值進行分析（圖 2）。



✓ Source: EPRI (Electric Power Research Institute), 2005: Program on technology innovation: Electric technology in a carbon-constrained world. *Technical Report. 1013041*. December.

圖 2. 大氣不同 CO₂ 濃度的軌跡

美國加州因應 CO₂ 的氣候政策，設定目標為 2020 年 CO₂ 排放量降到 1990 年水準，且再生能源使用佔 33%，紐約則希望 2020 年 CO₂ 排放比 1990 年時少 10%。根據 EPRI 的研究資料，若以 CO₂ 550ppm 為大氣穩定值目標，則至本世紀末電力部門的排放強度需降至 100g CO₂ /KWH 以下，使用燃料的型態亦幾乎完全改變(圖 3、4)，2003 年在美國電力部門 CO₂ 排放佔 39%，至本世紀末預料將降至 15% 以下。由此可見在 CO₂ 問題上電力部門會比其他工業部門或住宅、運輸部門，先面臨較大的壓力，此係因電力部門有較大排放量及較為集中的特性，因此如能提高能源效率，使用低碳燃料，或轉換燃料為再生能源或其他替代能源(如核能、氫能...等)，以及發展之捕捉與儲存技術亦較能達經濟規模，才可達到較顯著的減量效果，不過若僅管制電力部門排除其他能源使用者，則消費者的替代效用，將使管制成本提高，且亦無法達到大氣 CO₂ 穩定的目標值。



Source: EPRI (Electric Power Research Institute), 2005: [previously unpublished model outputs from analyses documented in] Program on technology innovation: Electric technology in a carbon-constrained world. *Technical Report, 1013041*, December.

圖 3. 大氣不同 CO₂ 濃度—電力部門排放強度

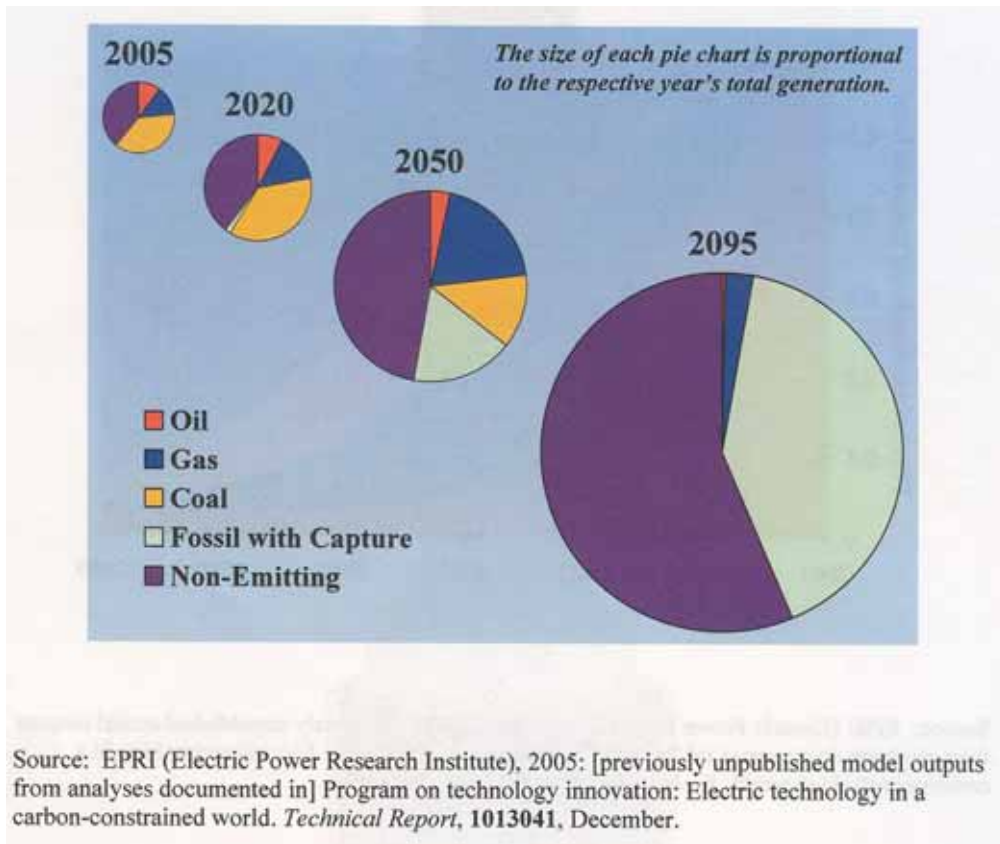


圖 4. 大氣 CO2 濃度 550 ppm 下發電業的燃料型態

再者預估至 2030 年開發中國家 CO₂ 排放量將超過已開發國家，尤其是中國大陸 CO₂ 排放量，更是大幅成長（圖 5），然開發中國家藉由新的能源技術提高能源效率，CO₂ 的減量具較佳之成本效益，因此如能由已開發國家來協助開發中國家進行配合減量，對全球環境成本而言最低，否則密集工業為獲取更高利潤，將會明顯轉往這些不具減量義務的國家，以降低成本，屆時全球的 CO₂ 目標值將永遠無法達成。

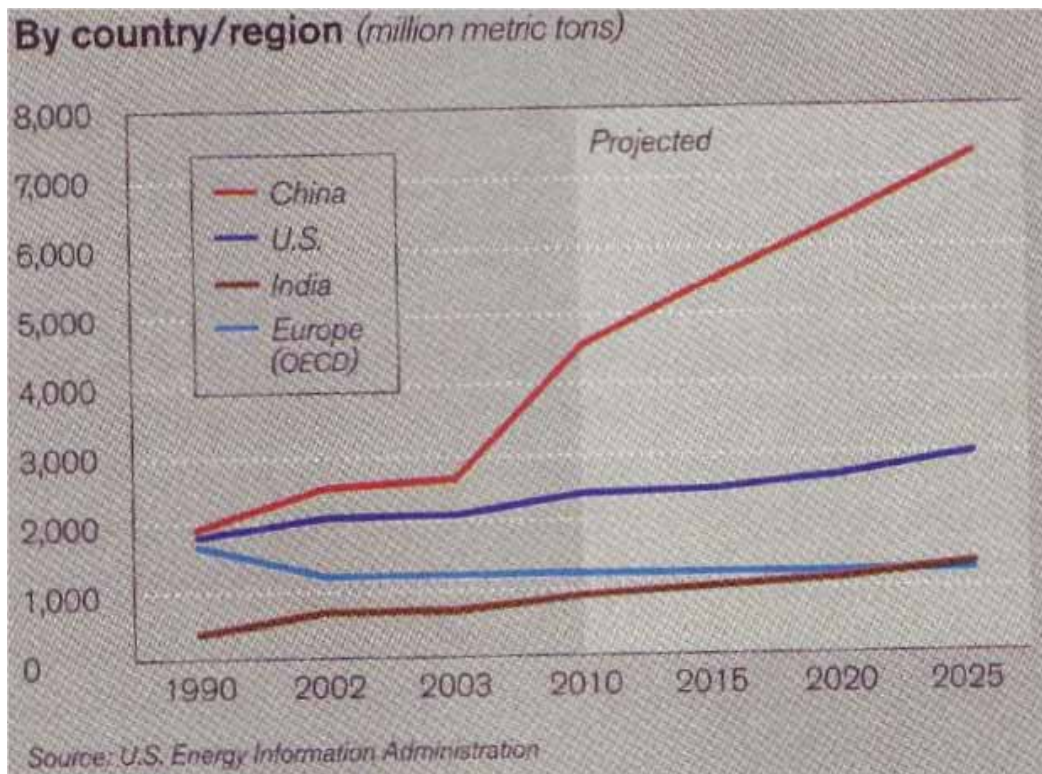


圖 5. 預估至 2025 年開發中國家與已開發國家之 CO₂ 排放量

綜言之，目前的氣候政策走向如下：

1. 現有大氣的穩定目標值均係暫定，或許不可逆環境變化遠高於預期，最終仍需視環境惡化程度，由全球專家做預估及修正。
2. 氣候政策對能源的供給者與使用者必將會產生一些質變，未來能源成本提高、替代能源使用、能源效率、使消費者對能源使用的選擇將隨之改變。
3. 未來具減量義務的部門，無法靠自身的設備及能源耗用方式，達到減量實績目標時，只有透過京都議定書中的清潔發展機制（CDM），或排放交易（ET）取得額度。目前歐盟、美國、加拿大均已有 CO₂ 排放交易的市場，惟近兩年由於天然氣價格變動大，間接使 CO₂ 排放交易價格大幅變動，以歐盟市場（EU-ETS）為例，價格約介於 7~30 歐元 / 噸 CO₂（圖 6）。
4. 京都議定書中，開發中國家雖未具減量義務，但至 2030 年開發中國家排放量將超過已開發國家，但具較低成本效益機會，只有共同參與減量，全球的氣候政策方能達成目標。
5. 電力部門攸關 CCS（二氧化碳捕捉與儲存）技術發展與應用，尤其在能源燃料型態轉換將無可避免。

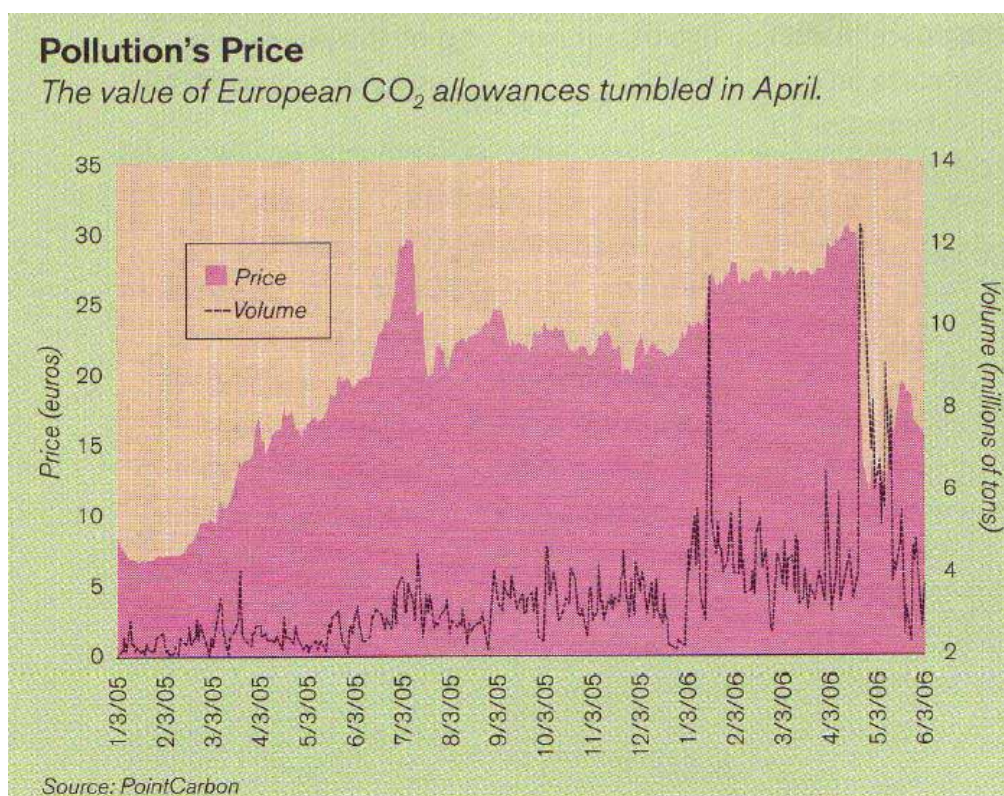


圖 6. 歐盟市場（EU-ETS）CO₂ 排放交易價格變動情形

1.2 電力研究院溫室氣體減量計畫

本公司為積極參與國際合作研究，因而參加美國電力研究院(EPRI)有關溫室氣體減量技術計畫中，P 103 溫室氣體減量技術計畫 (Greenhouse Gas Reduction Options) 的合作會員，參加期間為 2005-2007 年。

本計畫主要內容包括：

- 1.二氧化碳捕捉及儲存之技術發展及評估。
- 2.因應氣候變化之全球能源技術策略。
- 3.二氧化碳儲存場址之評估及執行。
- 4.市場機制分析。
- 5.因應溫室氣體決策機制。

本計畫主要預期效益包括：

- 1.掌握世界二氧化碳減量技術之發展及應用，包括二氧化碳捕捉技術、二氧化碳注射技術、二氧化碳儲存場址和監測技術。
- 2.藉由技術交流合作，建立本所二氧化碳捕捉及固定相關核心技術，包括技術移轉。
- 3.建立本公司二氧化碳捕捉之技術地圖 (Roadmap)
- 4.提供本公司管理階層因應溫室氣體決策之參考。

下列資料為本計畫所獲得溫室氣體減量技術計畫之相關資訊，本公司可藉由公司內網路搜尋二氧化碳捕捉技術、二氧化碳注射技術、二氧化碳儲存場址和監測技術等相關計畫成果，藉以掌握世界二氧化碳減量技術之發展及應用。

2006 Activities/Deliverables from Program 103

- Technology assessment and analysis in the context of climate policy
 - Global Energy Technology Strategy Program (GTSP):
 - Released summary document on carbon capture and storage in May
 - Will release an overview of climate and technology later in 2006
 - US Climate Change Science Program will release technology document based on analyses of EPRI (Richels), GTSP (Edmonds) and MIT (Reilly).
 - EPRI will revise and extend analyses of electric technologies in a carbon-constrained world.
- Terrestrial carbon sequestration
 - Will likely focus on a guidebook for developing terrestrial sequestration projects

Proposed 2006 Activities/Deliverables from Program 103 Falls in 4 Categories (continued)

- Climate policy/emissions trading
 - Will conduct annual workshop with IEA/IETA in September (Paris)
 - Developing report on cost caps in trading policies
 - Testified to US Senate on Climate Policy in April
 - Developing primer on climate policy for release in late 2006 or early 2007
- Risk management/decision support
 - Focusing on the value of existing generation and choices for new generation given climate policy uncertainty
 - Examining option value of capture retrofit and the decision to retrofit or retire plants
 - Examining in detail GHG reduction investment choices (e.g., biomass, solar, wind, forestry)

1.3 美國 FutureGen 計畫

美國 FutureGen 計畫以氫能研究及二氧化碳為目的，建立世界第一座零污染電廠，即設計、建造及運轉 275MW 原型廠可同時產生電力及氫氣，並收集與儲存二氧化碳，每年可減量 1~2 百萬噸二氧化碳，本計畫整合先進煤氣化技術、煤產氫技術、發電及二氧化碳收集及儲存技術，計劃若能順利成功，將可以保證地球上最大而且分佈最廣的煤礦資源，可提供非常潔淨的能源。本計畫預計將於 2012 年正式運轉，此計劃之原型廠設計主要以廣大煤資源投入先進氣化爐，產生之焦炭、TAR、CHAR、經由噴入之水蒸氣經化學反應產生一氧化碳及氫氣，然後經由氣體清淨處理後將所含之硫份排入灰渣中。經由二氧化碳分離系統將二氧化碳排入地下儲槽中安定化處理。剩下含高度氫氣氣體(含有部份一氧化碳)進入 SOFC 燃料電池進行發電及產氫，亦可直接通入氣渦輪機及汽渦輪機進行發電。氫氣可提供交通運輸及石油精煉廠運用，圖 7 為 FutureGen 計畫 IGCC 技術示意圖。

本計畫預算：

- FutureGen 計畫之總預算約為九億五千萬美金
- 其中 26%(約 2 億 5 千萬美金)將由工業界提供
- 美國能源部亦期望從國外資源提供 8 千萬美金
- 美國能源部在 2004 年約收到 9 佰萬美金
- 2005 年有 1 仟 8 佰萬美金
- 2006 年有預期約為同樣數字

FutureGen 計畫之執行時程及內容包含四個階段：

- 計畫定義，基礎建立及國家能源政策法規修正(2004-2008)
- 原型廠細部設計及建造(2007-2011)
- 原型廠試車及正式運轉(2011-2015)
- 實場監測及數據分樣(2015-2018)

Integrated Gasification Combined Cycle Technology Suited for Improving Environmental Quality

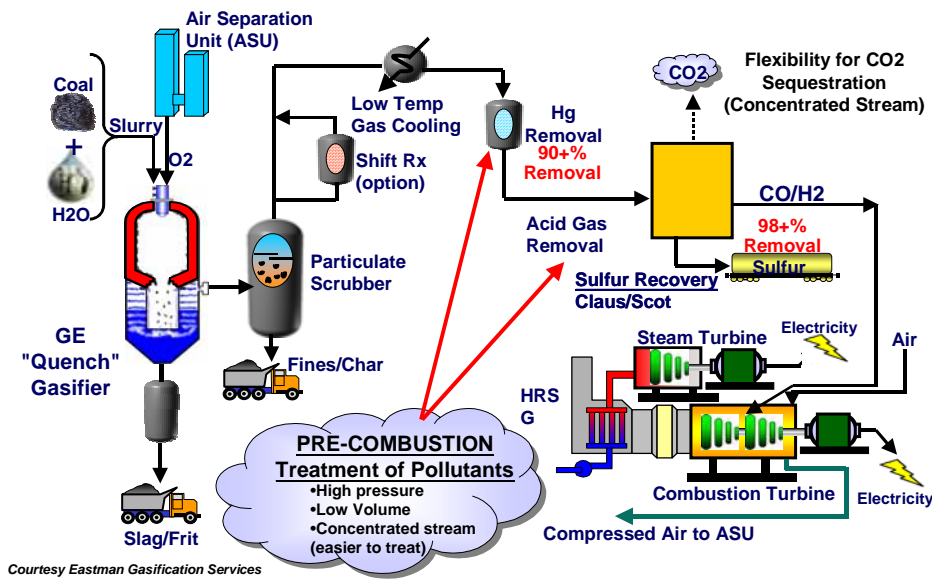


圖 7 FutureGen 計畫 IGCC 技術

2、二氧化碳攫取技術

2.1 二氧化碳攫取技術發展情形

2.1.1 燃燒前捕捉

二氧化碳捕捉 (capture) 可分為燃燒前 (pre-combustion) 捕捉、燃燒後 (post-combustion) 捕捉、固定 (fixation) 等方式，燃燒前捕捉係先將燃料氣化，其次將氣體中的 CO₂ 予以分離，送到壓縮與儲存系統，氣體中的一氧化碳及氫氣則送到鍋爐燃燒，燃燒時可使用氧氣替代空氣當助燃劑，即所謂的富氧燃燒。

燃燒前捕捉具有下列優點：

1. CO₂ 分壓高較易分離。
2. CO₂ 分離已成功商業化應用於 H₂/NH₃ 系統，對燃料氣化後 CO₂ 的分離，技術上可行。
3. 煙氣量及其他二次污染物的量降低。

其缺點則有：

1. 機組複雜度高。
2. 鍋爐廠家尚不熟悉這種設備。
3. 目前應用於發電的可靠度仍低。

至於採用富氧燃燒則具有下列優點：

1. 大量降低 NO_x 排放。
2. 燃燒時熱傳及熱回收效率較高。
3. 燃氣量及其他二次污染物量降低。

但缺點則為：

1. 氧氣分離成本高。
2. 目前僅有小型氣渦輪機經驗。

2.1.2 燃燒後捕捉

本次現場考察集中於燃燒後捕捉的課題，並未參訪燃燒前捕捉（如 IGCC）部分，故以下就參訪單位的情況提出報告。

燃燒後捕捉具有下列優點：

1. 現有燃燒技術、方式仍可沿用。
2. 現有機組或新機組均可增設或是新設該項設備。
3. 已在小型的機組試驗可行。

缺點則包括：

1. 能源消耗量非常高。
2. 採用化學吸收方式的溶劑會有衰退現象，需適時補充。

燃燒後捕捉採用方式包括物理方式、化學方式、薄膜分離、冷凍分離、固定化等方式，本次參訪單位有美國電力研究院 (EPRI)、AUSTIN 德州大學、加州 TRONA 的 IMC Chemicals 公司 Argus 廠等。

2.2 德州大學 (UTA) 化學工程系

目前化學吸收法以採用乙醇胺 (MEA) 當吸收劑為主流，基本流程如圖 8，燃氣經冷卻後進入吸收塔，與吸收劑 (MEA) 採用逆向流 (countercurrent) 接觸，操作溫度一般不會超過 60°C ，富含 CO_2 的溶液則送至再生塔再生，由於化學溶劑是以形成化學鍵的方式，將廢氣中的 CO_2 除去，因此在操作壓力上可較物理吸收劑為低，惟在再生溶劑時需加熱，因而能量消耗佔該程序成本中相當大的比例。另外燃氣進入吸收塔前，除 CO_2 外，尚含有硫氧化物、氮氧化物、飛灰等，這些污染物會影響溶劑性能造成 CO_2 吸收量降低，故須先行去除，因此許多研究集中於如何降低能源消耗及吸收劑衰退 (degradation) 現象。

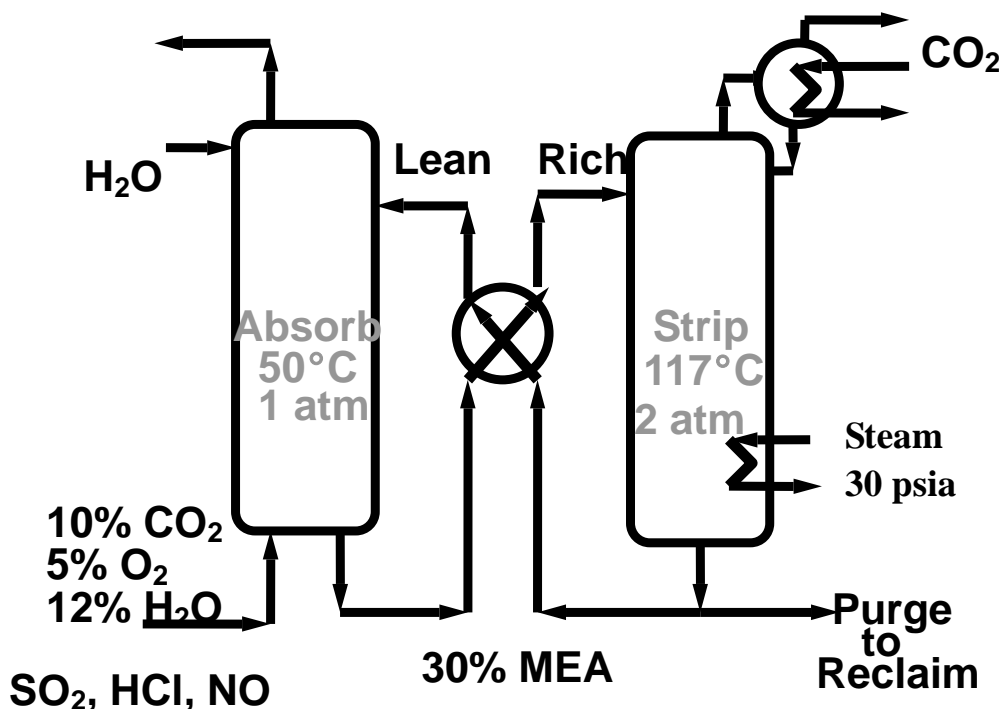


圖 8 採用 MEA 吸收劑之簡單流程

(1)吸收劑方面：

- A.反應速率：由於 CO₂ 的吸收反應係由氣相到液相的質量傳遞過程，反應速率快可得到較佳的 CO₂ 移除效果，或減少吸收液在吸收塔的滯留時間，通常反應速率快慢，依序為一級醇胺、二級醇胺、三級醇胺，德州大學（以下簡稱 UT）進行中之研究，以 MEA/PZ、K₂CO₃/PZ 的組合為主（註：PZ 為 piperazine）。
- B.吸收容量：高吸收容量代表吸收劑的單位用量可以降低（假設反應速率相同的條件下），但吸收容量與反應速率兩者難以兼得，例如三級醇胺雖反應速率低於一級、二級醇胺，但吸收容量則優於該兩者。進行中的研究亦以 MEA/PZ、K₂CO₃/PZ 等不同的濃度組合為主。
- C.吸收劑的衰退（degradation）現象：吸收劑在吸收及再生過程中，因溫度、聚合、氧化作用，可能會造成部分吸收劑反應、分解衰退成其他化學物質。以 MEA 為例，其衰退後的產物包括氨、甲醛、乙醛、甲酸、乙酸、草酸等物質（如圖 9、10），所產生的影響，包括廢水、廢棄物等環境處理問題、設備腐蝕、經濟上的損失（吸收 CO₂ 的容量降低、補充新藥品等），研究的方向包括不同吸收劑衰退機制（mechanism）、溫度、氣體流量的影響等（如圖 11、12）。

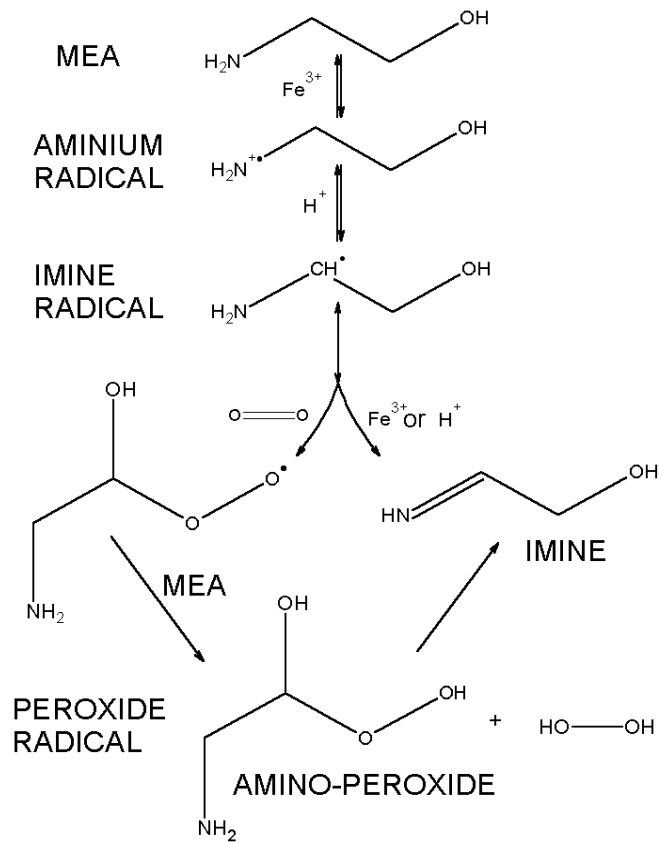


圖 9. MEA 衰退機制

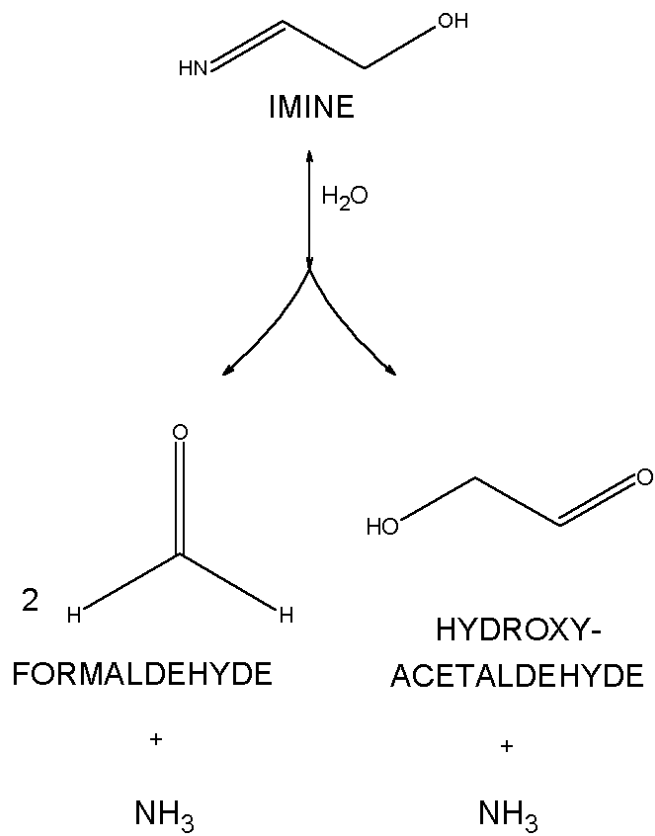


圖 10. Imine 水解機制

High Gas Flow Degradation Apparatus

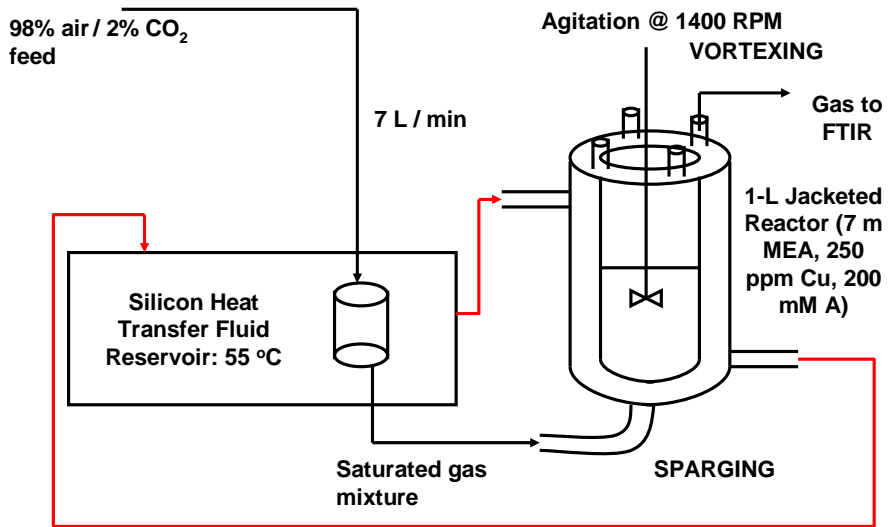


圖 11 高氣體流速劣化試驗裝置

Low Gas Flow Degradation Apparatus

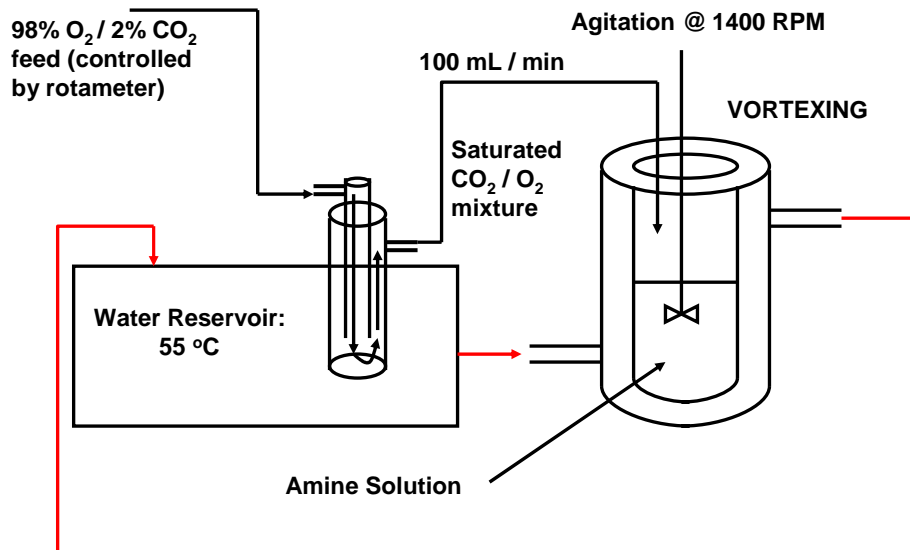


圖 12 低氣體流速劣化試驗裝置

(2)再生程序方面：

吸收劑與 CO₂ 的反應為可逆反應，吸收塔出口富含 CO₂ 溶液，須經再生程序將吸收劑回收再使用，雖然一級醇胺類（MEA）的反應性最強，但再生時所需之熱量亦最高，對 MEA 而言，所需熱量約 825BTU/LB CO₂，二級醇胺則約 650BTU/LB CO₂，三級醇胺則更再次之；由於再生程序消耗相當多的能源，因此如何降低耗能，成為再生程序重要的一環，目前研究的方向，主要為壓力變動再生或蒸氣加熱再生。

(3)氣體與液體的接觸方式：

接觸方式不同牽涉到耗能的高低、反應的快慢，不同的方式各有不同的優缺點，目前發展中的製程，大部分均使用填充床（packing），填充物可分為不規則填充物（random packing）及結構化填充物（structured packing）兩大類，結構化填充具有壓降小、操作容量大的優點，但投資成本高，不規則填充成本較低、壓降則較結構化填充稍高。

(4)目前初步研究結果與未來的研究方向：

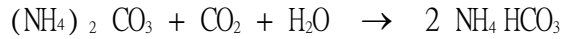
- A. 對單一吸收劑反應速率而言，PZ（piperazine）吸收效果最好，MEA 次之。但考慮不同醇胺之特性、降低腐蝕和因揮發所造成之損耗，及再生耗能考量，目前發展方向係使用多個醇胺配方，在未來獲得重大突破前，仍以 MEA/PZ 的混合液吸收效果最好，未來的研究包括如何增快 CO₂ 的質傳速率，提高 MEA/PZ 的吸收容量。
- B. NO_x、Fe²⁺、Cu²⁺ 會催化 CO₂ 與氧氣反應，造成吸收劑衰退，未來的研究包括如何減少 NO_x、Fe²⁺、Cu²⁺、降低 MEA 與氧氣的接觸時間，加入其他物質減緩該催化反應等。
- C. 雖然採加熱再生方式耗能相當大，但綜合壓力變動再生與加熱再生的各項實驗結果，目前加熱再生仍優於壓力變動再生，惟如何減少耗能仍為主要目標。
- D. 目前 MEA 的再生溫度約 120°C，超過 130°C 對 MEA 有不良影響，未來朝向不同吸收劑及不同濃度的組合、吸收劑衰退現象的防止改善、氣/液比

接觸效率的提升、再生方法的改善或組合等方式來降低 CO₂ 的捕捉成本。

另有關 EPRI 未來的冷卻式氨水程序 (Chilled Ammonia process) 計畫：

本冷卻式氨水程序流程示意圖詳如圖 13，係以氨水做吸收劑化學反應如下：

下：



該程序之最佳操作溫度為 2~16°C (35~60 F)，故大幅降低耗能為最大利基，能源耗用及成本約為 MEA 之 35~40% (如表一、二)，惟反應速率慢及氨水揮發性高是目前遭遇最大瓶頸。雖然並非所有的研究單位都看好這個程序，但是至少已有 20 個單位已同意加入這項研究基金，興建一座 5MW 的 Pilot Plant，預定於 2007 年第三季初開始運轉，屆時該程序的優劣及競爭性應可更為明瞭。

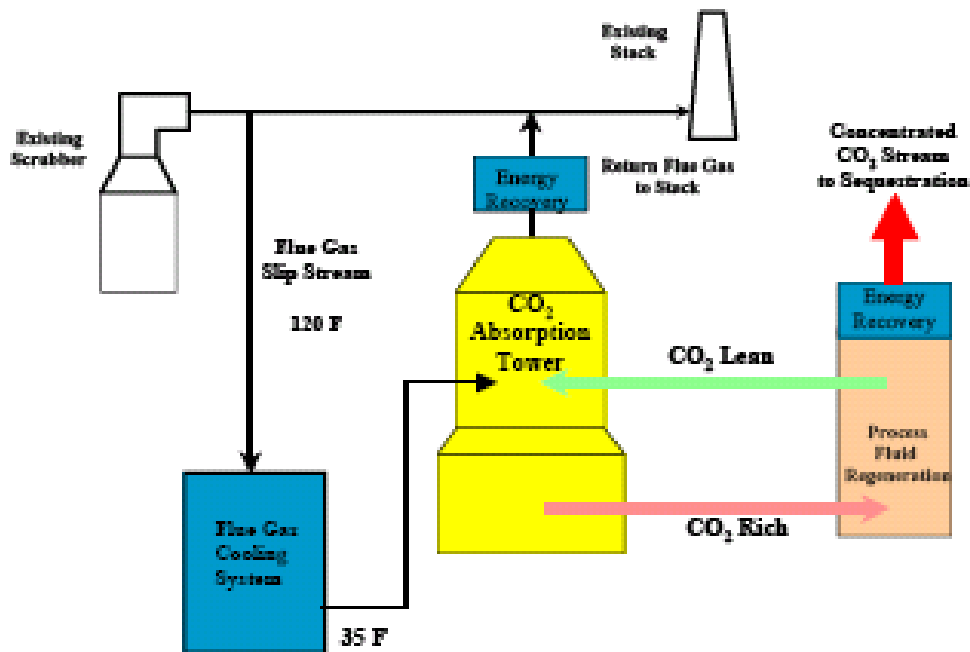


圖 13. EPRI 的冷卻式氨水程序

表一 冷卻式氨水程序性能預測分析表

Used Parsons Study for Basis	Supercritical PC Without CO2 Removal	Supercritical PC With MEA CO2 Removal	Supercritical PC With NH3 CO2 Removal
LP Steam extraction, lb/hr	0	1,220,000	270,000
Power Loss, KWE	0	90,000	20,000
GROSS POWER, KWE	491,000	402,000	471,300
AUXILIARY LOAD, KWE			
Induced Draft Fan	5,000	19,900	10,000
Pumping CO2 system,	0	1,900	5,000
Chillers	0	0	8,900
CO2 compressor	0	30,000	9,500
NET POWER OUTPUT	462,000	330,000	415,000
% POWER REDUCTION		29	10

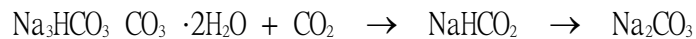
表二 冷卻式氨水程序成本預測分析表

Used Parsons Study for basis	Supercritical PC without CO2 removal	Supercritical PC with MEA CO2 Removal	Supercritical PC with NH3 CO2 removal
Levelized cost of Power, c/KWh	5.15	8.56	6.50
% increase		66	26
Avoided Cost, \$/ton CO2	Base	51	20

2.3 Searles Valley Minerals 公司（原 IMC 化學公司）

Argus 廠由 Kerr McGee Chemical 公司於 1978 年建造，該公司於 1990 年將所擁有的工廠、土地及 Searles Dry Lakebed 的租借權等賣給 North American Chemical 公司，後來於 1998 年 IMC 全球集團又將 North American Chemical 公司買下，並創立了 IMC Chemicals 公司。

Argus 廠是目前 CO₂ 捕捉唯一商業化且最大的工廠，該廠有兩座 26 MW 燃煤鍋爐，燃氣中之 CO₂ 使用 MEA 吸收，吸收液再生重複使用，再生塔出口 CO₂ 濃度可達 99% 以上，直接使用於工廠的製程中製造碳酸鈉，其示意程序（方程式未平衡）如下：



其原料 Na₃HCO₃ · CO₃ · 2H₂O 取自當地的 Searles Dry Lakebed（註：TRONA 為該礦的名稱亦為當地地名），據 EPRI 之說明資料，每天 CO₂ 用量可達 800 噸。雖然工廠經多年長期運轉有點老舊，但是卻亦證明以 MEA 吸收 CO₂ 實務面的可行性。圖 14 為 Trona-Argus 碳酸鈉製造廠，圖 15 為碳酸鈉製造流程，圖 16 為 Searles Dry Lake 地下資源分佈圖



圖 14 Trona-Argus 碳酸鈉製造廠

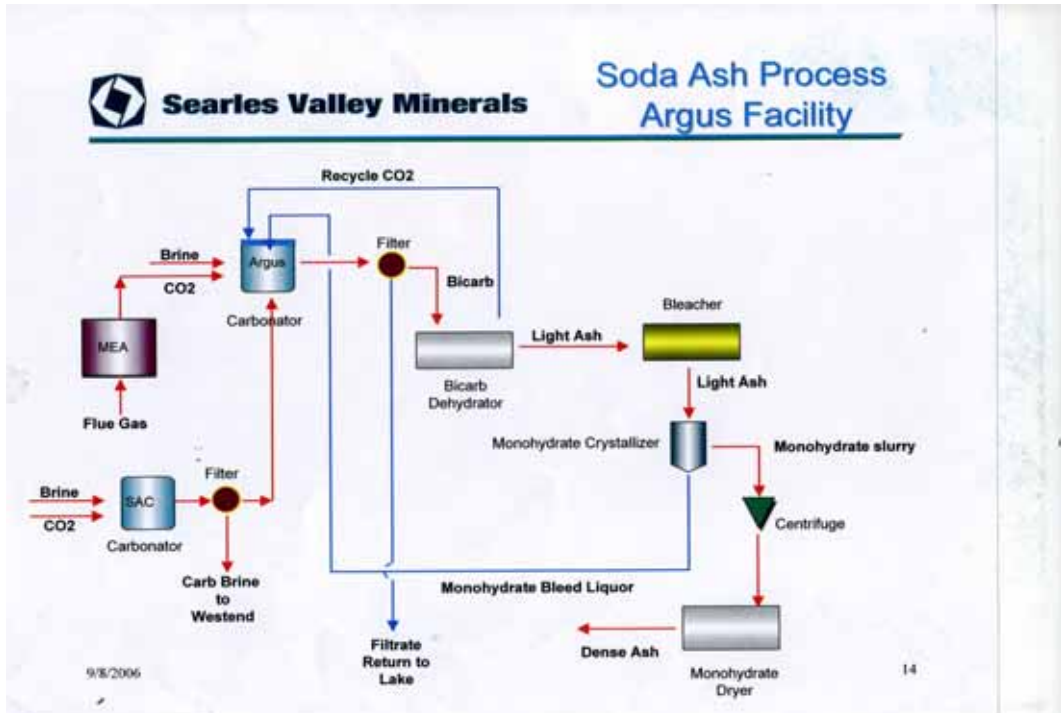


圖 15 碳酸鈉製造流程

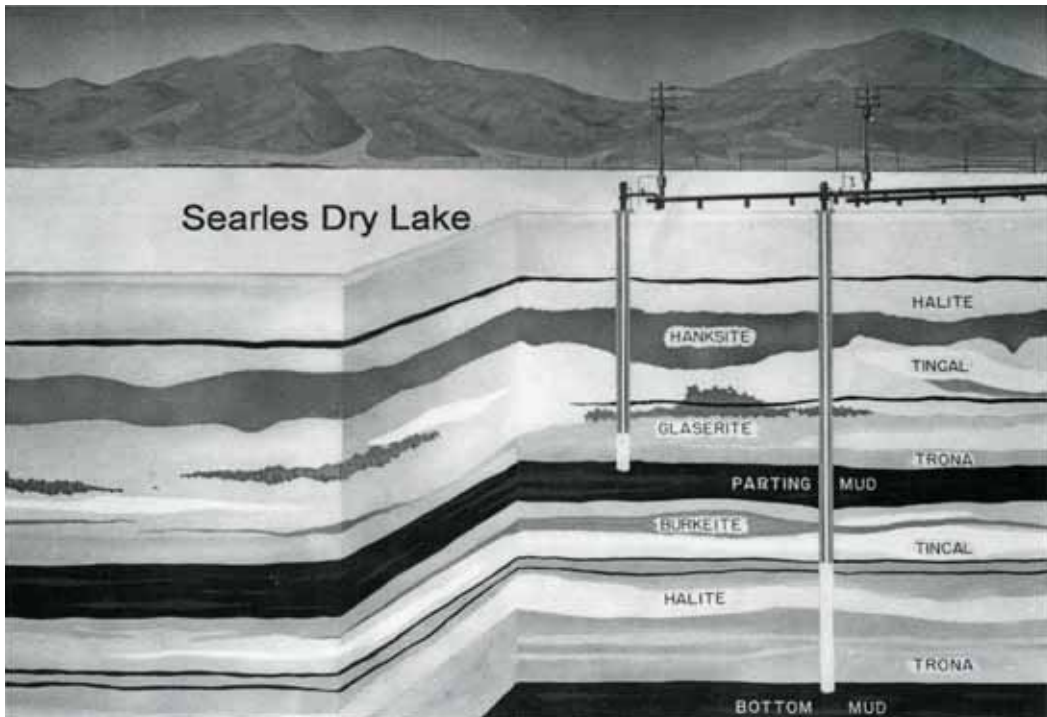


圖 16 Searles Dry Lake 地下資源分佈圖

3、二氧化碳儲存技術

3.1 二氧化碳儲存技術發展情形

3.1.1 二氧化碳封存技術探討

目前許多研究指出，大氣中二氧化碳濃度必須維持在 550ppm，甚至在 450ppm 之下，以避免全球氣候變遷所帶來的災難。若要將大氣中的二氧化碳濃度控制在可接受的程度，必須要將燃燒所排放的二氧化碳集中儲存，依據 IPCC 於 2005 年之估計，如欲將二氧化碳封存以維持大氣中穩定的濃度，全球地質媒介可以封存 2 兆公噸以上。

二氧化碳封存主要可分為地表封存、地質封存、海洋封存、及期待有突破性的相關技術出現（見圖 17）；地質封存早已成熟運用在於油氣田的增量生產（Enhanced Oil Recovery, EOR），惟如 Frio 計畫更深層（Deep Saline Aquifer）的封存則是較新的技術，而海洋封存因對海洋生態的影響尚未明朗，目前進行研究的國家主要為日本、韓國等環海國家。有關 CCS 各部份組成之技術發展狀況，可由表三中得到初步的了解。

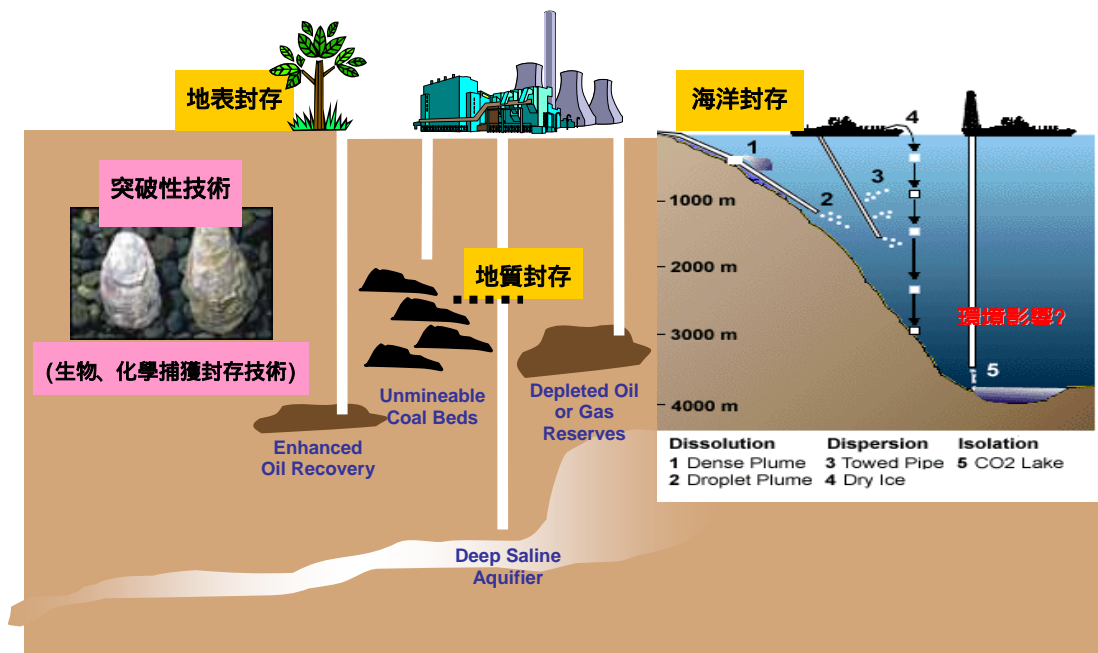


圖 17. 二氧化碳封存技術類別

表三. CCS 系統構成部份的技術發展現況(source: IPCC)

CCS 組分	CCS 技術	研究階段	示範階段	在一定條件下經濟可行	成熟化市場
捕捉	燃燒後			V	
	燃燒前			V	
	氧燃料燃燒		V		
	工業分離				V
運輸	管道				V
	船運			V	
地質封存	強化採油 (EOR)				V
	天然氣或石油層			V	
	塩水層 (Saline formation)			V	
	提高煤層甲烷氣採收率 (ECBM)		V		
海洋封存	直接注入 (溶解型)	V			
	直接注入 (湖泊型)	V			

就地質封存的技術而言，依據 IEA 之估計，以深鹽水層的潛力最大，預估可儲放到 2050 年所排放 20~50%的二氧化碳（400~10,000 Gt），但也有高度的不確定性（見圖 18）。

發展地質封存技術的關鍵因子包括下列項目：

- 降低成本
- 運輸距離短(降低運輸成本)
- 構造調查與潛能評估
- 封存後之監測
- 地質形貌
- 位置、深度
- 圈合面積

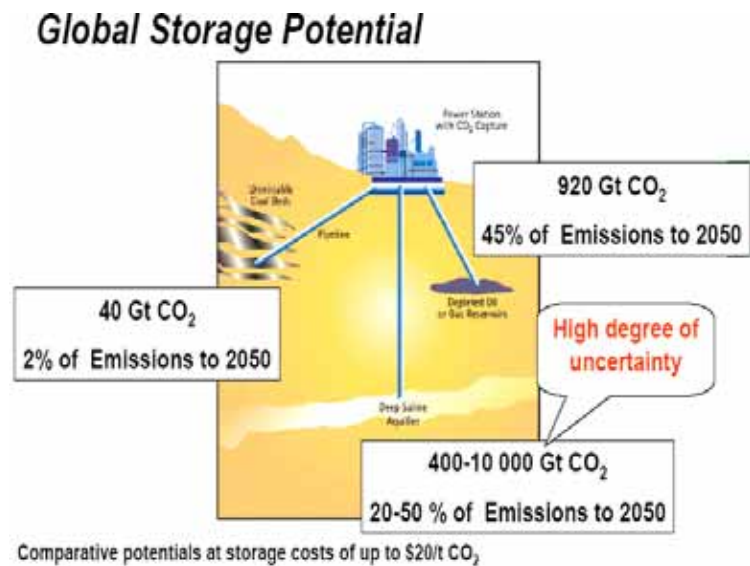


圖 18. 全球地質封存潛力預估(source: IEA)

上述成本並非單純針對封存技術，事實上，在整個 CCS 過程中，最大部份的經費用於 CO₂ 捕捉，由表四可看出，降低 CO₂ 捕捉成本將使得發展 CCS 的可行性（經濟誘因）提高。

表四. CCS 技術成本(for power plant)

A	項目	費用(USD/ton CO ₂)
	Capture from flue gas	20 ~ 60
	CO ₂ transpotation per 100 km	8 ~ 11
	CO ₂ injection: Depleted reservoir	0.5 ~ 3
	CO ₂ injection: Aquifer (1,500m)	2 ~ 7
	小計	30 ~ 78
B	項目	費用(USD/ton CO ₂)
	Capture from flue gas	15 ~ 75
	CO ₂ transpotation	1 ~ 8
	Pipeline/tanker/250 km	
	Geological storage	0.5 ~ 8
	小計	16 ~ 91
Source	A: (1)2000 年荷蘭經濟部之評估 (2)2000 年美國 Battelle Memorial Institute B: IPCC Carbon Dioxide Capture and Storage (2005)	

美國目前針對 CCS 相關技術研發重點在於：

- CO₂ 捕捉技術
- CO₂ 封存技術(地表與地質)
- CO₂ 封存監測與驗證技術
- CO₂ 捕捉與封存突破性技術
- 技術整合及國際合作計畫

基於其國內二氧化碳排放居全球首位，投入減量技術開發之態度相當積極，2004 年投入資源即高達新台幣 45 億元，惟對於發展海洋封存之立場，因有下列考量，尚未進行研究：

- 對海洋生態，尤其是底棲性生物之衝擊尚無明確評估。
- 海底地震或地層滑動造成之擾動，可能造成瞬間大量釋放，釀成災害。
- 就美國立場，地質封存已擁有廣大之空間，無需進行海洋封存。

3.1.2 我國二氧化碳封存技術發展現況

我國為海島型國家，地狹人稠，可供進行二氧化碳地質封存的區域並不多，因此，考量注儲二氧化碳的順序以舊氣田之生產層(如鐵鈷山)為優先，其次是舊氣田之生產層之上、下水層，最後為其他構造之水層（見右圖 19）。

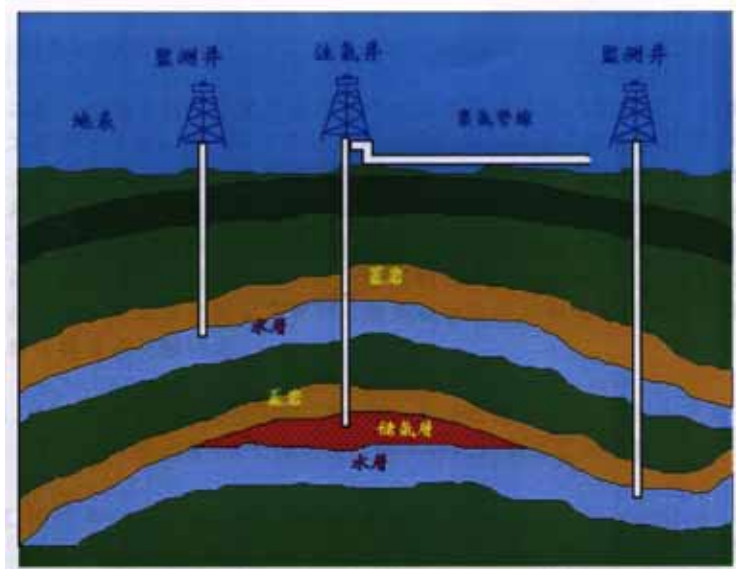


圖 19. 我國發展 CO₂ 封存之考量地質示意圖

使用鐵鈷山儲氣窖的優點包括：

- 儲存量龐大

台灣累計產氣量達 400 億立方公尺，大半產自鐵鈷山，目前為進口 LNG 注儲調節之用

- 建置費用低廉

- 注存深部地層，安全性高

依據中油公司初步調查結果顯示，除桃竹地區有幾個構造具有 CO₂ 地質封存條件，南部八掌溪砂岩之潛能構造或水層，尤其是海域部份之深地下構造或水層，值得進一步測勘及研究。

針對二氧化碳封存技術，我國可說是尚未投入相關研發資源，目前唯有鐵鈷山天然氣地下貯氣窖之操作實務經驗，可供日後 CO₂ 地質封存作業參考。

未來技術發展重點則應朝下列方向進行：

- 封存潛能調查

- 封存監測與驗證技術

- 封存設施建構技術及開發規範

- 地質封存前導試驗地質封存經濟可行性與風險評估

3.2 德州經濟地質局(BEG)

如果說 Steven Bryant 教授在研究二氧化碳地質封存的理論，那麼 Susan Hovorka 女士即是將理論化為實際行動的人。9 月 6 日我們前往附屬於德州大學奧斯汀分校的經濟地質局 (Bureau of Economic Geology, BEG) 拜會，因為那裡正進行一項二氧化碳地質封存的先導計畫「Frio Brine Pilot」，而 Susan Hovorka 女士正是該計畫主持人。

BEG 建於 1909 年，前身為 Texas Geological Survey and the Texas Mineral Survey，目前為德州大學奧斯汀分校之研究單位（與主校區距約 30 分鐘車程，見圖 20），提供地質調查及石油技術給聯邦、州政府及地方主管機關。其研究範疇包含：

- 化石能源
- 地質科學/環境議題
- CO₂ Sequestration

其他由政府或私人所投入/主導的研究計畫為了長期執行關於二氧化碳地質封存研發策略與計畫，BEG 於 2003 年成立一個 Gulf Coast Carbon Center (GCCC)，結合數家大型企業如 BP、Chevron、Entergy、Kinder Morgan、Marathon、NRG、Praxair 及 Schlumberger 等。



圖 20. BEG 與 UT Austin 之相關位置

二氧化碳地質封存先導計畫「Frio Brine Pilot」,係在休士頓東北方 50 公里處的 South Liberty 油田區，將二氧化碳注入深度 5,050 英尺的鹽水層中（圖 21、圖 22），以便觀測其後續狀況；第 1 期計畫（Frio I）自 2004 年 10 月 4 日起連續注入 1,600 公噸的二氧化碳，隨即進行長時間監測（至 2006 年中結束）。其目標包括：

- 測試 CO₂ 是否能安全地儲存於地下鹽水砂岩層中，最終目的在大量封存 CO₂
- 使用不同的監測技術，量測注入地下之 CO₂ 分布狀況
- 展現所使用之概念與數值模式的正確性
- 為未來大規模 CO₂ 封存之工作建立經驗

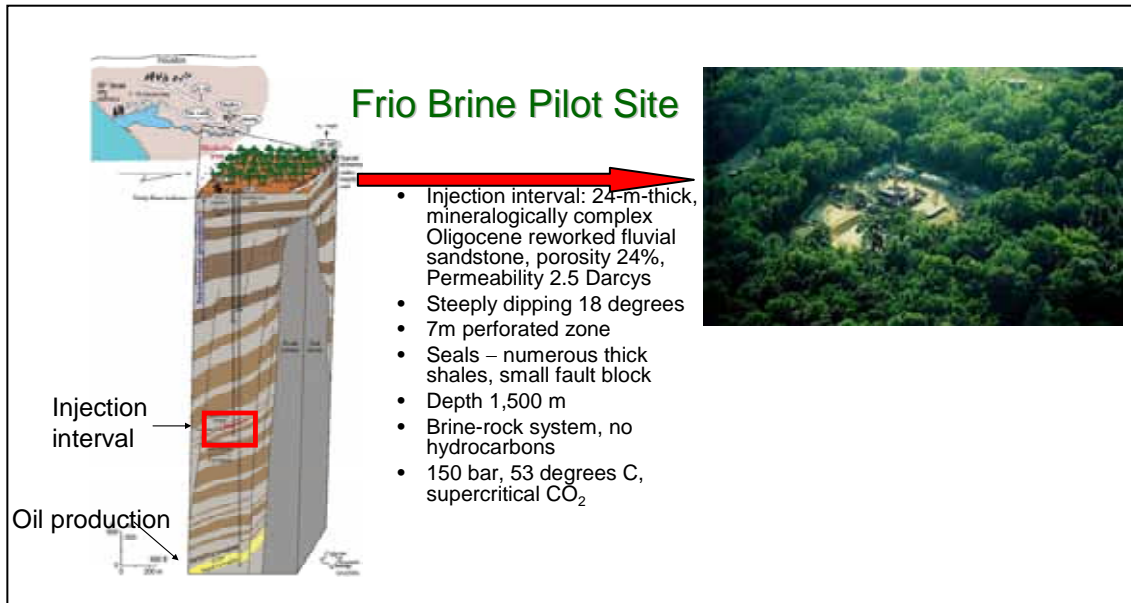


圖 21. Frio Brine Pilot 位置示意圖

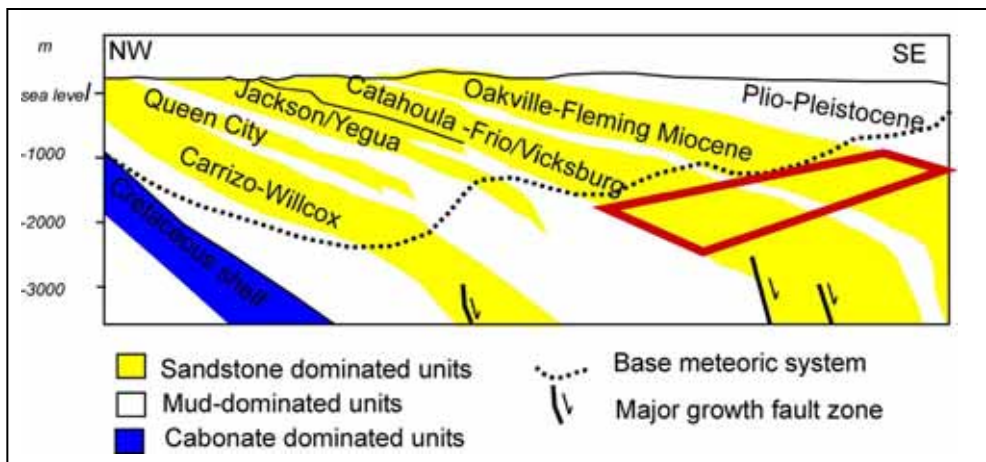


圖 22. Frio 計畫 CO₂ 注入區塊之地層橫斷面

Frio I 的總費用約 6 百萬美元，其中 4.14 百萬美元由美國能源部（DOE）贊助，在試驗區設有一口注入井與一口觀測井，二井相距約 100 英尺，CO₂ 來源則是產自附近的煉油廠及化學工廠，以槽車運送至試驗地（圖 23、圖 24）。

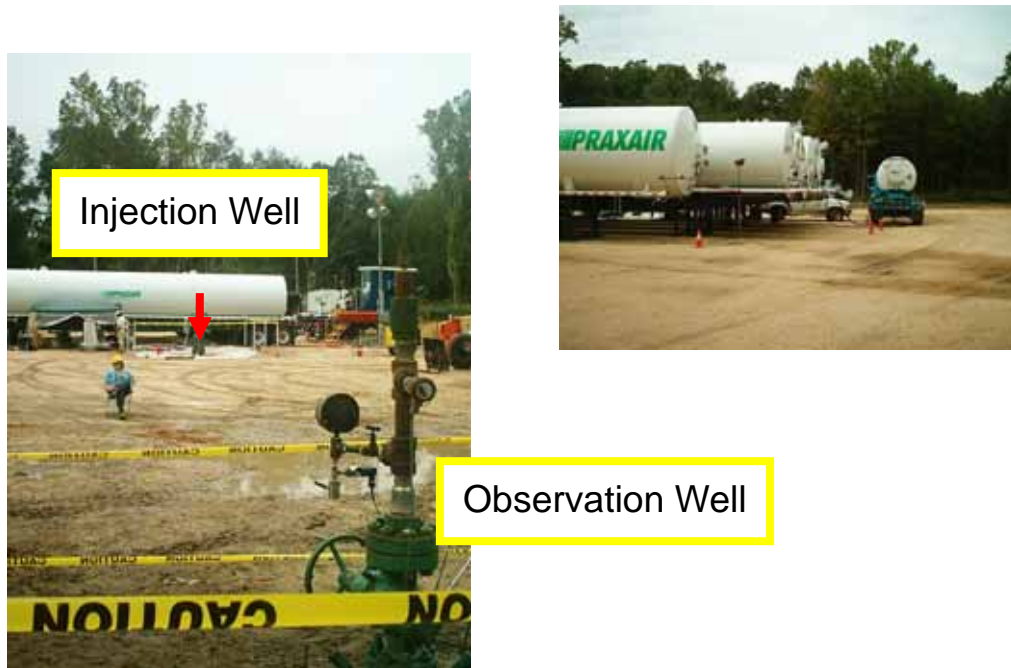


圖 23. CO₂ 運送與注入井、觀測井位置圖

Monitoring at Frio Pilot

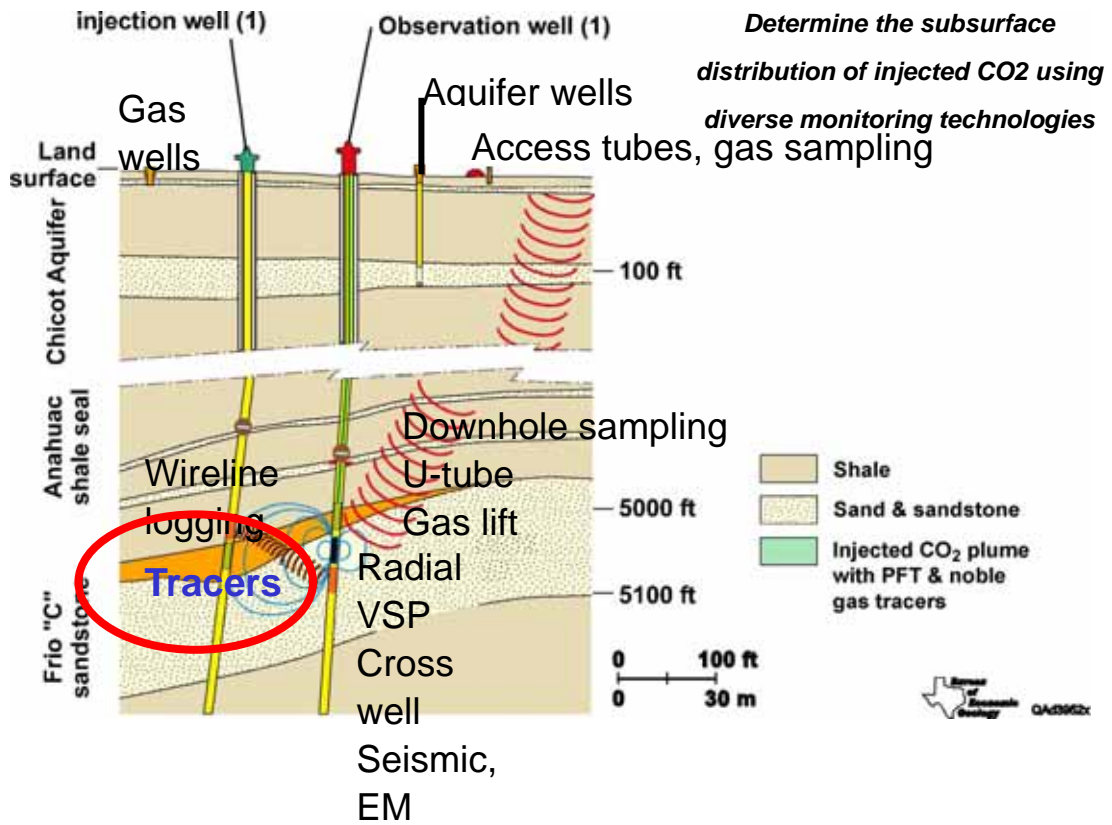


圖 24. Frio 計畫監測示意圖

經過長期監測，主要結果顯示：

- 鹽水層中液體化學性質：pH
值原為近中性狀態，在 CO₂ 注入後下降，但隨著鹽水的中和作用，又回升至 6.0 左右（見圖 25）。
- 地下監測：未發現有 CO₂ 洩漏。
- 地面監測：未發現有 CO₂ 洩漏。

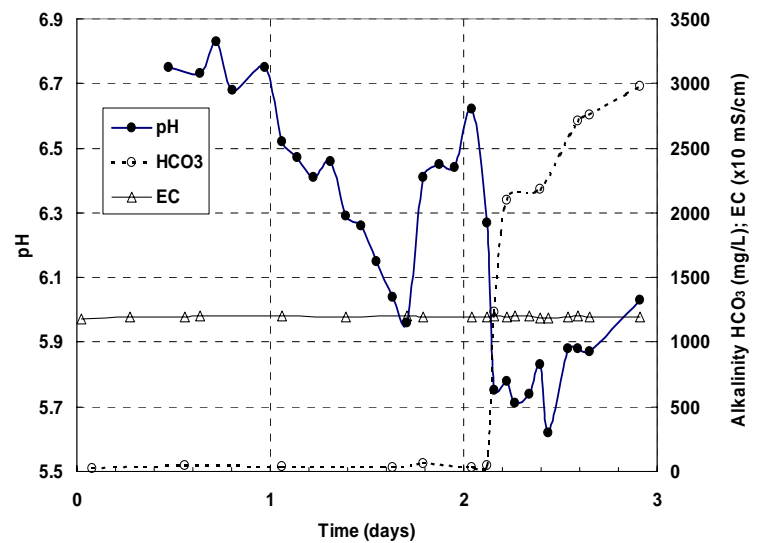


圖 25. Frio I 監測鹽水層中液體化學性質紀錄

經過近 2 年的時間後，2006 年 8 月，BEG 進行了 Frio 先導計畫第 2 期作業，總經費為 2 百萬美元，在同區域、不同性質的鹽水層、深度較 Frio I 多 400 英尺，7 天內注入了約 700 公噸的二氧化碳，並如同第 1 期計畫，將進行一段期間的嚴密觀測後，作為後續計畫執行之參考。

3.3 德州大學（UTA）石油地質工程系

9 月 5 日上午在拜訪過德州大學化工系的 Gary Rochelle 教授後，下午到石油與地質系統工程系拜訪 Steven Bryant 教授（圖 2）。Bryant 教授的研究方向為二氧化碳進行地質封存的相關領域，為此於系內成立了「石油與地質系統工程中心」

(Center for Petroleum and Geosystems Engineering)，成員包括 Chevron、Texaco、ExxonMobil、及 Enitecnologie 等公司，進行「二氧化碳地質封存」(Geological CO₂ Storage) 計畫，內容包括下列項目：

- 確認地下封存的主要反應機制
- 提升對上述機制的了解程度
- 將實際進行地下含水層儲存作業之相關數據量化
- 建立 CO₂ 洩漏風險評估架構

至目前為止，該計畫初步成果與結論如下：

- 計畫順利開展
 - 發表 3 篇論文、5 篇報告、4 場演講
 - 與經濟地質局 (BEG) 合作進行試驗
 - 獲石油及軟體等產業支持，以及電力業、保險公司等關注
- 在可忽略的風險下進行地質封存是可行的
 - CO₂ 注儲後，自然的程序會減少可移動的 CO₂ 量
 - 減少可移動 CO₂ 量的時間依封存點含水層的特性而定
- 使永久儲存最大化將導入交易制度

四、結論及建議

1. 化石燃料在未來數十年中仍為能源主要來源，且國際 CCS 技術仍在持續發展階段，因此國內投入 CCS 研發尚有努力空間，政府可整合學術界及產業界(主要能源大戶，如台電、中油、中鋼及石化業)，建立 CCS 研發聯盟組織，建立技術發展路徑圖，並積極規劃本公司二氧化碳捕捉之技術地圖，提供本公司管理階層因應溫室氣體決策之參考。
2. 無論國內溫室氣體相關法案是否會經立法院通過，CO₂ 排放的議題對本公司會比其他部門先面臨較大壓力，台灣雖無法參與聯合國的許多討論或機制，惟建議仍應設法突破困境，參與國際清潔發展機制，或藉由排放交易等國際認可的方式取得額度。
3. 本公司溫室氣體盤查已進行一年多，未來將進行第三者驗證，盤查及稽核確認後基準年的排放數據後，方能使未來逐年比較，了解節約能源或效率提升的減量效果。
4. 本公司綜研所應建立二氧化碳攫取和儲存技術知識社群，其成員由本公司各相關單位組成，包括綜研所、工環處、發電處、開發處及核後端處等，以掌握世界二氧化碳減量技術之發展及應用趨勢。
5. CO₂ 的捕捉與儲存研究非一蹴可及，各國無不成立龐大的基金從事研究，建議擇機建議政府由空污費提撥一定比例，成立基金專用於 CCS 研究，以擴大國內研究規模。
6. 燃料及效率是 CO₂ 的排放關鍵因素，對未來超臨界鍋爐、再生能源或潔淨能源（如氫能、淨煤技術）應用於發電之技術，應多加關注及派人研習，以建立相關技術資料。
7. 為減少氣候暖化及達成全球 CO₂ 穩定目標值，CO₂ 捕捉的技術發展在未來應會有突破性的發展及應用，本公司應擴大參與國際機構或國內外研究單位有關 CO₂ 捕捉的研究，俾取得較廣及較深入技術資訊，作為未來高層決策處理 CO₂ 問題之參考。

8. 美國 CO₂ 儲存主要為地質封存，與日本及韓國大力發展海洋封存方向迥異，我國自然環境與日本及韓國較接近，可進一步與日本 RITE 及 CRIEPI 等研究機構瞭解其發展情形。
9. 二氧化碳封存技術並非解決溫室效應的萬靈丹，它僅能治標、無法治本；隨著時代的進步，提升能源效率、發展替代能源、及注重資源節約等都必須走在 CCS 技術之前。人類過度開發的行為必須節制，地球本身方得以調養生息，回覆其原來的機制。
10. 二氧化碳地質封存技術已應用於油氣探採作業，可以有效緩和大氣中二氧化碳濃度，並成為未來新興市場，但目前單獨操作成本仍很高，國際積極研發中(美國、歐盟、日本、澳洲…)，台灣地狹人稠，可供二氧化碳地質封存的區域並不多，因此本公司是否應投入此一領域，應審慎評估。
11. 二氧化碳地質封存在技術與成本上非主要問題，有待克服降低二氧化碳捕捉之成本，及找到規模和地理位置適當的地下構造。本公司未來燃煤火力發電量將隨經濟成長而增加，在無法參與國際減量機制的情形下，二氧化碳地質封存將成為減量最有效益的方式，建議加強有關二氧化碳捕捉技術之研發，並待上述評估為可行後投入經費與國內外相關機構合作，以利未來降低 CO₂ 減量成本。
12. 本公司綜研所扮演研發角色，可在原有不錯成果為基礎加強 CCS 研發經費及人力之投入，並積極參與國際合作，掌握最新發展技術與趨勢。
13. 本次返國後綜研所可與德州大學化工系及德州經濟地質局密切保持連繫，並評估與其合作之可能性。