

以地下封存方式進行二氧化碳減量之可行性探討

范振暉¹、宣大衡²

摘要

自工業革命以來，因為大量使用化石能源，使得溫室氣體(Green House Gas)之排放日益增加，其嚴重程度已對地球環境生態產生極大的影響。聯合國乃於1992年通過『氣候變化綱要公約』，目的在控制溫室氣體濃度，減緩地球的暖化現象。1997年通過『京都議定書』，協議『附件一國家』須於2008~2012年將溫室氣體之排放量減至比1990年更低的水準(平均減少5.2%)。『京都議定書』於2005年2月16日生效，我國雖然非受規範的對象，但受到衝擊在所難免，因此各種可能減量措施的實施實刻不容緩。

二氧化碳排放減量除了提高能源效率、鼓勵使用低碳能源、開發新能源以及替代能源之外，地下封存為目前技術上最為可行之處理方式。目前多國均投入相當龐大的資源進行二氧化碳地下封存的準備及相關研究工作。根據工業技術研究院的資料，2003年我國的二氧化碳排放量已經達到256百萬公噸，名列世界排行第22位，減量的壓力將愈來愈大。有鑑於國外之經驗，地下封存為可行的減量方法，惟因封存構造之探尋及前置準備相當費時，應儘速著手進行相關研究及探勘工作，避免因施行二氧化碳減量而導致妨礙國家整體之經濟發展。

關鍵詞：溫室效應、全球暖化、地下封存。

ABSTRACT

The Green House Gas emission has been rapidly increasing ever since the Industrial Revolution in the late 19th century due to the massive usage of the fossil fuels. Because the impact is worldwide, the "United Nation's Framework Convention on Climate Change, UNFCCC" was signed in 1992. It is aiming to effectively control the concentration of the GHG and thus restrain the global warming. The "Kyoto Protocol" proposed in 1997 states that those countries listed in the ANNEX I have to reduce their CO₂ emission to the amount less than that of 1990. The Kyoto Protocol finally became effect on February 16th 2005. Although Taiwan is not one of those who need to react to the protocol at this stage, however, it is not possible to avoid the impact under the present global economic.

There are several ways to reduce CO₂ emission, among which geological sequestration is the most technically viable one. Geological sequestration is to inject CO₂ into the appropriate underground structures like saline aquifer, depleted oil and gas reservoirs or coal bed at depth. Many countries are putting in a great deal of efforts in the preparation and related research of geological sequestration of CO₂. Data show that the CO₂ emission of Taiwan in 2003 is 256 Mt/yr, the 22nd largest emission country. Therefore, Taiwan has to actively respond to the Kyoto protocol. With successful experiences that other countries gained, geological sequestration of CO₂ can be an effective way to reduce emission. However, finding appropriate structure and preparation prior to sequestration are time consuming, and therefore, it'd be better to commence the related research and investigation of potential structures as soon as possible. It is hoped that by doing this it would help to minimize the economic impact resulting from CO₂ emission reduction.

Keywords: Greenhouse effect, Global warming, Geological sequestration.

¹ 中國石油股份有限公司探採研究所研究員

² 中國石油股份有限公司探採事業部技術室副主任

一、前言

「京都議定書」在今年 2 月 16 日正式生效，附件一榜上的 36 個工業國家立即受到 CO₂ 排放減量的規範，均須於 2008~2012 年間，降低 5 種溫室氣體排放量達到相當於 1990 年以下水準，其影響之深遠，恐不亞於工業革命。隨著「京都議定書」正式生效，國際間與議定書中明訂的清潔發展機制(CDM, Clean Development Mechanism)、排放交易制度(ET, Emissions Trading)及共同減量(JI, Joint Implementation provisions)等 3 大減量機制相關活動愈趨熱絡，各國莫不陸續制定各種機制或訂定法規，採取各種手段從多方面同時進行，以期達到排放減量目的。

歐盟的碳排放交易市場已於 2005 年元月 1 日正式上路，包括能源業、鋼鐵業、水泥業及紙漿造紙業等 4 大產業、涵蓋歐盟 12,000 家企業均須加入碳排放交易；經濟合作發展組織(OECD)中的丹麥、英國、加拿大、日本、挪威、瑞士、韓國等國亦已計劃實施排放交易制度；此外大型跨國企業諸如 BP、SHELL 亦建立其集團內部的排放交易，位於美國芝加哥的排放交易中心(CCX)則是一個提供北美地區企業自願性參與的機構。

許多國家對再生能源的使用與推廣亦相當積極，根據歐洲風力聯盟(EWEA)估計，至 2010 年全歐的風力發電量將達到 75GW，約占總電力需求 5.5%；西班牙政府強制要求新建房屋必須裝設太陽能面板；而法國政府則計劃從 2005 年開始以二氧化碳排放量作為對小客車徵稅或退稅的依據。

日本在「京都議定書」中的減量目標為將 2008-2012 年間的平均排放量降為較 1990 年之排放量(12.4 億噸 CO₂ 當量)再減 6%；日本政府深具溫室氣體減量的企圖心，將以國內減量、森林吸收、清潔發展機制及購買排放權等方式達成。2004 年 9 月，Sumitomo 公司開始向聯合國進行在印度從事氟氯碳化物(CFCS)減量專案而產生 5 百萬 CFCS 減量的註冊作業，成為全球在 CDM 機制下第一家註冊轉移排放

信用額度的公司。

與台灣同屬新興工業國家的南韓，為全球溫室氣體排放第 9 的國家，雖未被要求在 2008-2012 第一階段管制期減量，卻預期自 2013 年起將被要求加入減量義務，因而展現對自願性減量推動的高度誠意。繼與墨西哥於 2004 年底簽訂合作備忘錄，合作內容包括重要產業的排放計算、減量方面的科學與技術資訊交流，以及為調適減量壓力的政策制定架構；南韓也與加拿大就包括 CDM 在內的各種減量行動進行長期合作；另與美國政府達成協議，加入以美國為首的 14 國甲烷減量計畫；同時韓國政府也決定加入氫經濟的國際合作計畫，發展應用氫與燃料電池科技。

美國雖未批准京都議定書，今年對各項減量方案與排放交易的參與投入，境內有 28 州制定溫室氣體減量策略、行動方案及減量目標；以紐澤西為例，其減量目標為 2005 年較 1990 年的排放基準少 3.5%；新漢普夏州則要求火力電廠在 2006 年的排放必須降到 1990 年的標準。

在這一波 CO₂ 減量風潮下，各國多半從制度、法規及經濟面著手，成效有賴長時間觀察。再生能源或新能源的研究開發雖為研究重點，但距離商業化應用乃至有效降低 CO₂ 排放，仍有相當距離；不論太陽能、風能或潮汐發電，也都還有相當技術瓶頸待突破，因此在現階段減量措施中並未能發揮太大作用。

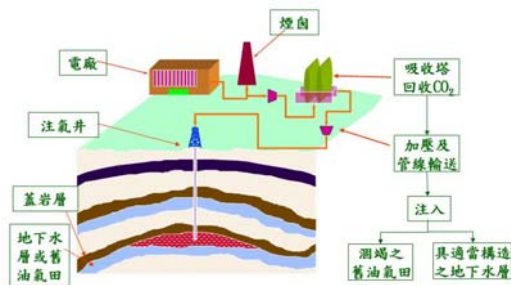
二、CO₂ 地下封存

對於已產生之 CO₂，現階段絕大多數減量或再利用措施，或因其量有限、或因成本過高、或因減量過程中將產生更大量 CO₂，多處於起步發展階段。事實上，CO₂ 多來自化石能源，有道是：「從那裡來，回那裡去」。地下封存符合自然生態循環，為最兼具技術、經濟可行性者。

早在 1915 年，加拿大即已嘗試利用舊氣田儲存天然氣，1916 年美國紐約州水牛城南方 Zoar 舊氣田被開發成為全球首座地下儲氣窖，迄今尚在營運中，而目前全球已有 595 座以上地下儲氣窖。利用已涸竭之

油氣層儲氣，不僅儲存量大，且儲層位於地下數百至數千公尺處，並已存在數百萬年以上，安全性高，對環境之衝擊小；此外自 1970 年代起，石油工業界即發展出一套「強化採油」(EOR; Enhanced Oil Recovery) 技術，以天然氣或 CO₂ 注入生產末期油田，以排掃殘存於儲油層孔隙中之石油而提高採收率；利用同樣的原理，有人提出以地下封存方式貯存 CO₂ 以達到排放減量的目的。

所謂地下封存，係將 CO₂ 注入地下水層、舊油氣田或深層煤層等地下構造，藉由地層之封閉與吸附，予以長期封存(圖一)。美國、加拿大、英、法、德、荷蘭、挪威等國均投入相當龐大的資源進行 CO₂ 地下封存之準備及相關研究工作。在挪威北海首先嘗試之地下封存計畫成功之後，於美國、加拿大、荷蘭、德國、澳洲等多處均有不同規模的地下封存計畫進行。



圖一 CO₂ 地下封存示意圖

三、國際 CO₂ 地下封存相關發展

1996 年，挪威國家石油公司 (Statoil) 將 CO₂ 注入北海之地下水層，每年注入量為 100 萬公噸。挪威是最早實施課征碳稅的少數國家之一，Statoil 於北海之 Sleipner West 油氣田，所產天然氣含有約 9.5% 之 CO₂，在供應市場之前必須予以脫除。為免支付龐大碳稅，Statoil 於 1996 年首度嘗試將所脫除 (採 MEA 方法) 之 CO₂ 注入位於該油氣層上方的地下水層 (Utsira Formation)，水層深度約 800~1,000 公尺，厚度 200~300 公尺，估計可儲存 CO₂ 600*10⁹ 公噸。由於此為首次以封存 CO₂ 於地下水層為目的之計畫，受到全世界的高度重視，共有包括歐盟、挪威、英國、丹麥、荷蘭等 13 個公司或機構參與；開始擠注後，Statoil

利用四維震測技術持續監測注入氣體之分佈與動向，分析資料顯示，所注入 CO₂ 於該水層內高區形成之氣泡 (Gas bubble) 並未逸散。Statoil 宣稱此一地下封存計畫之成本較挪威政府所課征之碳稅為低。該計畫自 1996 年開始注氣，迄今已注入 CO₂ 約 700 萬公噸，計畫將持續注氣至 2020 年。後續研究重點將轉移到監測技術以及模擬 CO₂ 之移棲。

EnCana 公司、加拿大 Saskatchewan 省資源局、國際能源總署 (IEA) 及石油工業界於 1999 年起聯合執行一擠注 CO₂ 增產石油計畫，將美國北達科塔州煤炭氣化廠排放之廢氣 (含 96% CO₂、4% H₂S 及 N₂)，經 330 公里管線輸送至 Weyburn 油田，注入深約 1400 m、厚度 300 m 之碳酸岩儲油層。該計畫於 2000 年 9 月開始注氣，注入量為每日 5,000 公噸，至 2004 年 3 月，累積注入 CO₂ 量逾 400 萬噸；在未注氣前，油產率為 10,000 bbl/D，估計至 2008 年產率可望達到 30,000 bbl/D，而 CO₂ 注入量於計畫結束時將達到 22*10⁶ 公噸。

1989 年起，加拿大計有超過 20 個案致力將由天然氣中分離出來的酸氣 (成份為 H₂S 及 CO₂) 注入地層中，作為廢氣的最終儲存場址。加拿大 Alberta 地調所已完成對西加拿大的沉積盆地進行 CO₂ 地下封存之可行性評估以及固定排放源 (如電廠、煉油廠) 廠址分佈調查。下一階段將陸續展開各盆地內適當構造之精查、安全性評估、封存量評估等工作。

美國德州經濟地質局自 1990 年起著手建立舊油氣田及地下水層可供電廠封存 CO₂ 之地質資料庫。1997 年起，美國 Battelle Memorial Institute 與 DOE, BP, American Electric Power and Ohio Coal Development Office 進行有關 CO₂ 地下封存技術之研究。2000 年起，美國工業界開始一聯合研究計畫，為期 3 年半，總研究經費 2,600 萬美元，主要研究方向包括：CO₂ 分離、地下封存及監測以及證實地下封存之安全性與效益性。2002 年，在美國 DOE 主導下，由數家能源產業公司及服務公司聯合進行一合作研究計畫。該計畫目的在評估位於主要 CO₂ 排放源附近之儲氣層特性及儲存 CO₂ 潛能，選定之廠址位於俄亥俄州

表二 CO₂回收及地下封存之成本概估

項目	費用(US\$)
煙道氣中 CO ₂ 回收	20~60 美元/公噸
CO ₂ 加壓及管線輸送， 以 100 km 為基準	8~11 美元/公噸
CO ₂ 擠注	廢油氣層：0.5~3 美元/公噸
	地下水層(1,500m 深)：2~7 美元 /公噸/
合計	30~78 美元/公噸

(OGJ, May 2000. & SPE 39686)

五、國內封存潛能

為控制 CO₂ 排放，政府採行增加天然氣發電比例、加強使用再生能源、推動節約能源、提高家電用品能源標準、加強執行能源查核、CO₂ 總量管制等策略；研擬中之策略則包括：碳稅、能源稅、CO₂ 排放權交易、評估參與國際性京都彈性機制之可行性等。我國雖非聯合國會員國，然以出口導向之經濟體系，勢將無法避免國際壓力與下游廠商之約束，未來將面對何種局面，雖尚難預料，但 CO₂ 排放將受到限制則無庸置疑，甚至將成為企業經營者必須考慮之成本。

即使上述措施均順利推動，而且成效良好，顯然仍難符合 CO₂ 減量之目標。以此趨勢估計，縱使以 2000 年為基準，2010 年之減量目標仍將超過目標 1 億噸已上，勢將面對國際社會之貿易制裁壓力或支付金額龐大之碳排放費用，嚴重影響我國長遠經濟發展；此一差距有賴新技術之開發與研究，以回收、封存及再利用 CO₂，進而達到減量目的。

以台灣而言，四面環海，東部海域海底陡峭，數公里即可到達深海，海底封存方法儲存量最大，但目前仍處於研究階段，CO₂ 是否可在深海長期且穩定封存、其對環境之影響程度等，尚待日後研究證實。相對於海底封存，廢礦坑、舊氣田與水層封存之技術可行性則早已獲得證實，惟台灣缺乏完整且具規模之廢礦坑，此項暫不考慮；回顧台灣天然氣之生產始於日據時期，產量逾 400 億立方公尺，其中大半產自鐵鈷

山氣田，而鐵鈷山氣田已擔負進口 LNG 注儲調節之角色，暫不考慮。此外，西南部平原構造多屬張裂性斷層所造成的拖曳褶皺構造，構造面積小，難具經濟價值；麓山帶中較大之牛山背斜構造、小梅背斜構造、八卦山背斜構造等，僅牛山背斜淺層曾產天然氣，另二者均無生產油氣記錄，是否封閉良好，尚待進一步研究；出磺坑、錦水、永和山等背斜構造為已知較佳者；另日據時代鑽井數多，淺層套管水泥封固作業簡陋，可能形成安全問題，注儲深度以較深地層為主。依此原則，歸納可能列入評估之舊有氣田其相關地層產量（如附表），以地質觀點而言，注入與原產量相近之 CO₂，地層壓力承擔應無問題，至於是否可注入大量之 CO₂，尚須就儲集層深度、壓力、孔隙率、滲透率、厚度及可注儲量等配合注儲地點進一步評估。

六、所費不高卻需時甚久，水層探勘工作急待展開

CO₂ 地下封存固以利用舊氣田最為經濟，因舊氣田歷經多年探勘與生產，地下地質與相關物性已有深入了解，封存 CO₂ 所需開發時間因而較短；但國內舊氣田有限，規模不大，生產層較深，用以封存 CO₂ 時所需操作成本較高；開發地下水層轉為 CO₂ 地下封存之用，所涉及技術及所需人才，均與油氣探採工作相似。一般而言，可用於封存 CO₂ 之水層，其面積與容量可能超過舊氣田 10 倍以上，因此，水層之探勘應為急待展開之工作。

中國石油公司在台灣地區從事探勘活動數十年，自亦累積部分經驗與資訊。從可能用於封存 CO₂ 之水層應有較佳孔隙率與滲透率，深度多超過 1,000 公尺，其蓋層應以錦水頁岩為主，注儲層則為其下之砂岩層等條件看來，以平鎮構造、湖口—楊梅構造及坑子口構造等值得展開進一步測勘；海域部分雖然探勘與開發費用較高，如能發現較大構造，仍有其價值。又依據荷蘭政府所作費用分析，顯示 CO₂ 回收再注入地下封存，主要費用係發生在分離、純化及回收階段，約占 70% 以上，其餘 30% 費用又以管線設施為大宗，擠注費用僅占 10% 以下，尚包括操作費用與封存地層之開發費用；依此估算，每一立方公尺封存容量之探勘

與開發投資約 0.1~0.25 元。縱使 CO₂ 封存所需探勘與開發之投資占整體費用比例不高，然而地底下的世界深不可測，自地下水層之調查、探勘、施工至注儲費時長達 6~10 年，係一長期性工作，實需及早規劃。

進而言之，封存構造調查及其潛能評估需耗費數年之久，政府宜仿照國土規劃，全面調查台灣及其鄰近海域可供封存 CO₂ 之地下構造，適時引進並改進回收、純化技術，選擇具潛能構造進行進一步鑽探以推估地下構造封存潛能，建立相關監測技術並進行先導型試驗，封存脫除純化所得之 CO₂，以降低因 CO₂ 減量造成之經濟衝擊，並作為未來能源政策規劃之依據。由本公司主導之「雲林石化科技園區合資計畫」在園區規劃、設備與製程上均已考慮 CO₂ 排放問題，在二期擴建時計劃增建 2 部發電機組，屆時可配合設計，將 CO₂ 收集並純化後注入地下封存。

總之，若欲維持國內經濟持續成長，CO₂ 地下封存勢在必行。CO₂ 儲層之開發與油氣田開發類似，儘管技術早已存在，費時卻是無法避免的；CO₂ 排放未受限制前所有減量措施似乎皆無經濟效益，但如今日未開始準備，當排放需付費時，這一段準備時間仍是必須的，因此地下水層之調查、探勘實需及早規劃。

參考文獻

- Hitchon, Brian (Editor) "Aquifer Disposal of Carbon Dioxide", Geoscience Publishing Ltd, Sherwood Park, Alberta, Canada, 1996
- Torp, Tore "Final Technical Report of SACS – Saline Aquifer CO₂ Storage", 2000.
- Bashu, S & Stewart, S "Geological Sequestration of Anthropogenic Carbon Dioxide in the Western Canada Sedimentary Basin: Suitability Analysis" in JCPT, Feb. 2002, Volume 41, No. 2.
- Bruant, R.G. et al, "Safe Storage of CO₂ in Deep Saline Aquifers", in June 1, 2002/ Environmental Science & Technology, American Chemical Society.
- Masaki, Lijima, "A Feasible New Flue Gas CO₂ Recovery Technology for Enhanced Oil Recovery", SPE 39686, 1998.
- Steven, Scott H. & Gale, John, "Geologic CO₂ Sequestration", OGJ May 2000.
- IEA Greenhouse Gas Programme (website : www.ieagreen.org.uk)
- Hovorka, A.D. et al., "Evaluation of Brine-Bearing Sands of the Frio Formation, Upper Texas Gulf Coast for Geological Sequestration of CO₂", Proceedings of the First National Conference on Carbon Sequestration, 2001.
- Doughty, C. et al., "Capacity Investigation of Brine-Bearing Sands of the Frio Formation for Geological Sequestration of CO₂", Proceedings of the First National Conference on Carbon Sequestration, 2001.
- 曲新生等，『出席聯合國氣候變化綱要公約 (UNFCCC) 第七次締約國會議 (COP 7) 報告』，2001
- 張海國等，『桃園新竹地區小構造作貯氣窖利用之可行性初步評估』調查報告，1997
- 魏聲焜等，『台南高雄地區小構造作貯氣窖利用之可行性初步評估』調查報告，1997