

由二氧化碳減排看二氧化碳捕獲與封存技術發展

▶▶▶ 歐陽湘——工業技術研究院綠能與環境研究所 正研究員兼總主持人

▶▶▶ 廖啓雯——工業技術研究院綠能與環境研究所 研究員

我國 1990 年 CO₂ 的排放量為 113 百萬噸，至 2005 年超過 261 百萬噸，約佔全球總排放量之 1%，世界排名第 22 位。我國雖然不是「京都議定書」附件一的簽約國，但因經濟實力的影響動見觀瞻，加上外貿為台灣總體經濟成長的主要動力，當國際間致力於減少溫室氣體排放以抑制全球暖化趨勢，尤其歐美及 G8 會員國紛紛積極投入二氧化碳減量與捕獲封存技術發展之同時，將來碳稅、碳交易或對非減碳標籤產品的設限，極可能成為國際間對減碳不力國家的一種貿易處罰或制裁之手段，屆時台灣的外銷產品若受限將無法自外於這樣的減量壓力。

為了避免溫室氣體排放問題成為我國經貿的絆腳石，並考量國家的能源永續與安全，節能減碳與低碳能源是台灣必要的選項；行政院於 2008 年 6 月通過「永續能源政策綱領」，其中揭示政府將

加強推動節約能源、提升能源效率、增加使用再生能源、強化低碳能源用於發電的占比等措施，另外也將二氧化碳捕獲與封存技術納為減排的重要手段。此永續能源政策綱領中也首次訂定了我國二氧化碳排放的減量政策目標：2016-2020 年間回到 2008 年排放量（與 2005 年排放量相當），2025 年回到 2000 年之排放量（215 百萬噸）。

CCS 技術為減排重要手段

二氧化碳捕獲與封存（CO₂ Capture and Storage, CCS）技術主要是在將化石燃料轉化為能源的過程中，利用相關捕獲技術將 CO₂ 分離出來，再經過壓縮、輸送至特定地點進行封存，是目前國際間公認技術可行性最高，最接近實用與產業化的二氧化碳排放減量技術，也是目前國際間推行綠色新政的重要指標技術。

鄰近各國中，南韓政府甫於 2010 年 7 月宣布，未來 10 年內將投入 19.2 億美元於 CCS 的技術發展；日本政府從 2008 年起的 5 年期間預計投入 80 億美元來加速推動潔淨能源與減碳的各項方案，更率先結合產業界成立 Japan CCS Company 來進行大規模的 CCS 計畫；中國大陸的 863 計畫在 2008 至 2010 年對於 CCS 技術的投入約為 3 億人民幣，除了扶植本土 CCS 產業（如華能集團石洞口捕獲示範廠投入約 1.5 億人民幣）之外，也積極與美歐日澳等先進國家合作發展 CCS 技術。

先進國家中，美國能源部計畫在 7 個區域聯盟投入 4.5 億美金進行 CCS 示範試驗；歐盟預計將投入約 14 億美金在歐洲各國建立 13 個大型 CCS 示範計畫；英國政府更宣佈新建燃煤電廠必須為 CCS-Ready 電廠；澳洲政府的 CCS 旗艦計畫亦將投入 20 億澳幣，興建 2-4 個整合型 CCS 示範廠。由整個國際情勢看來，我國推動 CCS 技術發展與示範計畫不僅具有指標性的宣示意義，亦應列為政府節能減碳的重要標竿計畫之一，以提高我國溫室氣體減量之國際形象及能見度。

CCS 技術與國際研發重點

CCS 技術是由二氧化碳捕獲、運輸及封存三大環節所組成，即在能源生產及使用過程中，利用二氧化碳捕獲技術將 CO₂

從排放源中分離出來，經過濃縮及壓縮後，輸送至特定地點進行封存。

二氧化碳捕獲

二氧化碳捕獲技術基本上分為燃燒後捕獲、燃燒前捕獲及富氧燃燒三大類，由於捕獲部分佔整個 CCS 費用的 2/3 甚至達到 70%，因此國際間主要以「提高捕獲效率及規模，並降低捕獲成本」為重點研發方向。燃燒後捕獲技術主要應用於燃燒鍋爐及氣渦輪發電設施，其優點在於可應用於既有電廠進行機組改裝，導入速度較快。但由於煙道氣體中的 CO₂ 濃度低，燃燒後的二氧化碳捕獲技術費用偏高，因此現階段研發重點主要集中於降低燃燒後捕獲的技術成本。目前燃燒後捕獲技術以已商業化之醇胺化學吸收法為主，但成本與能源耗用偏高，其使用也多侷限於油氣及石化產業，因此欲大規模應用於燃煤電廠的二氧化碳捕獲，開發低能耗的新技術仍是全球努力的方向。

燃燒前捕獲技術則以氣化技術搭配 CO₂ 捕獲技術最受矚目，氣化技術係在高溫爐中產生以 CO 及 H₂ 為主的合成氣，一般係利用水蒸汽與 CO 反應轉化成 H₂ 與 CO₂，再透過氣體分離裝置將 H₂ 與 CO₂ 分離。分離濃縮之 H₂ 可直接用於發電或利用儲氫技術進行其他能源利用，而高濃度之 CO₂ 則可進行封存。

目前屬於實驗階段中的技術尚包括較具前瞻性的薄膜分離法及化學迴路法。薄膜分離技術可用於產氫製程中 H_2 與 CO_2 的分離，加拿大、日本和美國等國將其列為 CO_2 捕獲技術推動策略中的重點工作之一。近年來快速發展的化學迴路燃燒或氯化技術，乃是利用金屬氧化物提供燃燒或氯化所需之 O_2 來源，以氧化及還原迴路取代傳統燃燒或氯化方式，若用於燃燒時可直接產出高純度 CO_2 ，而用於氯化時則可生產氫氣並同時分離出高純度的 CO_2 。

二氧化碳輸送

二氧化碳輸送技術是 CCS 技術供應鏈中商業化程度最高的部份，可分為陸域運輸及離岸（海域）運輸。目前國際間運輸技術主要以管線為主，亦有車載或船載方式，須視捕獲與封存地點間之既有設施以及輸送成本而定；一般而言，後兩種運輸方式對於大規模的 CCS 計畫較不具經濟效益。由於 Enhanced Oil Recovery (EOR) 技術的盛行，美國及加拿大境內有超過 5 千公里的運輸管線；歐盟則有以鐵路搭配船載的輸送規劃；而台灣亦有建造陸上及離岸長距離天然氣輸送管線的經驗。基本上，輸送距離在 300 公里範圍內以管線運輸的成本最具競爭性。而台灣南北長約 400 公里，若以西部沈積盆地作為封存場址，則均落在經濟可行區間內，

因此管線運輸應是台灣發展 CCS 技術的可能最佳選擇；若二氧化碳捕獲與封存地點鄰近有港口或碼頭可用，則可考慮長距離船載、短距離管線輸送之搭配方案。

二氧化碳封存

二氧化碳封存技術亦有地質封存、海洋封存及礦化封存等三大選項，但海洋封存已被倫敦公約所否決，而礦化封存因反應速率緩慢，短期內難具經濟效益，因此國際間普遍的共識是，以地質封存為現階段發展的最佳選項。在地質封存技術中，又可分為 CO_2 -EOR、 CO_2 -EGR、廢棄油氣田、深部地下鹽水層及難開採煤層等選項，其中 CO_2 -EOR 屬於已商業化技術，係將 CO_2 注入生產能力衰竭低落的油田，將油田中殘存的油氣擠注開採出來（如知名的 Weyburn 案例）；而國內則有中油公司利用鐵鈷山構造作為天然氣儲氣窖的實務經驗。至於深部地下鹽水層則以挪威 Sleipner 案例最為知名，其利用深層地下鹽水層進行 CO_2 地質封存亦累積有 10 年以上經驗，因此其技術成熟度亦具備相當基礎。而以擠注天然氣為主的 CO_2 -EGR 技術，以及難開採煤層的 CO_2 注儲- CH_4 生產則尚處於實驗示範階段。

就技術發展角度而言，地質封存所牽涉到的注儲技術相對較為成熟，因此目前國際間所著眼的技術發展重點為，地質封

存場址選擇與風險評估，二氧化碳注儲量測、監測、驗證技術(Measurement, Monitor, Verification, 簡稱 MMV) 以及功能安全評估技術(Performance/Safety Assessment, 簡稱 PA/SA)。

對我國 CCS 技術研發之建議

台灣若要快速導入燃燒後二氧化碳捕獲技術，建議可結合國內現有研發能量，進行小規模示範系統建立，同時選擇合適之既有發電廠進行機組改裝及系統整合驗證，確保我國現有火力發電廠進行有效 CO₂ 減量排放之選項。此外，建議可選取近商業化利基技術，結合國際重要研發單位之研發能量進行重點合作，若能有效突破 CO₂ 捕獲成本瓶頸，則有機會切入利基市場。

在燃燒前捕獲技術部份，可分為大型系統(如 IGCC 電廠)及中小型氣化系統(工業區氣化廠)；由於國際大廠已具備大型系統商業化技術能力，未來火力發電廠之大型氣化系統可考慮以直接技術引進為主，建議國內相關研發工作以建立技術評估及引進能力為重點；而中小型氣化系統因具多元化應用優勢，具備市場潛力，建議可投入中小型煤炭氣化本土技術發展。

至於較具前瞻性之捕獲技術，例如化學迴路法與薄膜法，則可透過國際合作管

道進行共同研究，尋求突破性的進展。

運輸技術是 CCS 技術供應鏈中相當成熟的部份，台灣亦有建造陸上及離岸長距離天然氣輸送管線的經驗。若以西部濱海沈積盆地作為封存場址，二氧化碳管線運輸是台灣發展 CCS 的可能最佳選擇；若捕獲與封存地點鄰近均有港口或碼頭設施，則將來亦可考量海上船運-陸上管線輸送之方式進行。

至於二氧化碳封存技術，國際間針對 EOR 部分進行之二氧化碳注儲操作已累積十數年經驗，而國內中油公司亦有鐵鈷山天然儲氣窖的實務經驗，挪威 StateOil 的 Sleipner 計畫利用深地下鹽水層進行 CO₂ 地質封存亦已累積 10 年以上經驗，換言之，二氧化碳地質封存技術已具備相當基礎。台灣西部具有巨厚的沈積盆地，是國內深地下鹽水層分布的重要地區，其二氧化碳注儲潛能遠大於廢棄油氣田，因此應是我國未來 CO₂ 地質封存的主要標的。由上面的論述來看，廢棄油氣田及深地下鹽水層是台灣可以考慮的地質封存選項，但以前者為輔後者為主。

我國 CCS 技術發展 Roadmap 之芻議

CCS 技術發展最終需以實用化與產業化為依歸，在其正式進入商業化運轉階段之前，必須經過技術研發準備、評

估及確認封存潛能、並由小規模 CCS 試驗，逐步放大至中大尺度 CCS 示範運轉操作驗證等步驟。歐美等先進國家已規劃在 2014~2020 年間啟動 CCS 技術商業運轉，屆時國際間的減量壓力勢必大增，對於目前呈現相當幅度技術落差的台灣而言，迎頭趕上顯然是一刻不容緩的艱鉅挑戰；另外，考量配合政府的「永續能源政策綱領」各階段施政目標，乃以地質封存技術為基礎，搭配燃燒後捕獲及燃燒前捕獲等兩大發展主軸，研擬台灣 CCS 技術推動及發展進程藍圖，以逐步達成下列建議的期程目標：(1) 2012-14 年完成小規模 CCS 示範試驗，包括每小時 1 噸之燃燒後 CO₂ 捕獲先導型試驗廠，以及每年 1 萬噸的注儲封存試驗場；(2) 2016-18 年完成中尺度 CCS 示範試驗，包括每年 10 萬噸級之燃燒後 CO₂ 捕獲中尺度示範試驗廠，以及每年 10 萬噸級的地質封存試驗場；(3) 2020 年完成一座全載商轉機組 CCS 廠之規劃，並完成每年 100 萬噸級之大尺度 CCS 地質封存示範場；(4) 2025 年全面展開推動工業級的 CCS 計畫，逐步達到數十個百萬噸級的減量需求。

未來 CCS 技術推動主軸

未來我國 CCS 技術推動工作應環繞三個主軸：(1) 進行與二氧化碳捕獲與地質封存直接相關的技術發展工作；(2) 進

行二氧化碳捕獲以及地質封存的示範試驗；以及(3) 國際合作，以提升國內 CCS 技術層次並加速各項目標的達成。二氧化碳捕獲技術發展宜選擇已有實驗室測試規模基礎且具有尺度放大潛能的項目來進行，並藉由資源與人力的延續集中，且透過國際合作，來加速我國 CCS 技術建立與驗證應用的期程。

工業技術研究院在經濟部能源局委託計畫的支持下，已於 2007 年正式投入 CCS 技術的研發工作，優先投入的項目有煤炭氣化技術、二氧化碳物理吸附的 solid sorbents，以及化學迴路等技術；而化學吸收的醇胺技術與薄膜分離技術因國內已有部份學界資源投入，因此列為計畫的重要觀察項目，同時密切注意其國際發展狀況；二氧化碳地質封存技術發展，則考量國與國間自然條件之地域性差異，現階段以場址調查與潛能評估、注儲與二氧化碳團塊遷移模擬，以及封存監測與驗證技術為研發重點。

經濟部於 2010 年元月 18 日成立了 CCS 技術研發聯盟，目的在整合經濟部內及台電、中油、中鋼等相關單位之能量與資源，來共同加速推動 CCS 的研發與示範試驗工作。環保署也於今年 2 月中旬成立跨部會的 CCS 策略聯盟；國科會能源國家型計畫目前也正積極推動一項淨煤主軸計畫，足見 CCS 技術在國內已受到

相當程度的重視。

二氧化碳捕獲與封存技術發展歷程中，技術驗證或示範試驗是必經的步驟。綜觀歐盟、美國、澳洲、日本各國都在進行或推動 CCS 的示範計畫 (Pilot Project or Demonstration Project)，可為明證。台灣未來推動 CCS 技術發展與示範試驗計畫，宜以大型固定排放源為主要對象，引其煙道氣來進行 CO₂ 捕獲技術測試、驗證、與尺度放大，由於捕獲技術的流程可複製，使用的參數可視煙道氣之特性調整，因此不用太擔心地點問題；然而，地質封存示範試驗則須考量地域問題 (包括地質條件、儲集地層與封閉蓋層的特性等)，建議可採雙軌併行的方式來進行，亦即分別測試本土的油氣封閉構造，以及深部鹽水層的注儲特性與行為。進行此種示範試驗不僅可以提供一個技術發展與技術驗證的平台，更提供一個「做中學」以及問題發掘與經驗累積的寶貴過程，同時示範試驗也提供了一個實體可作為公眾宣導與溝通的媒介。

期待 CCS 技術的成功推動

選擇一個天然油氣封閉構造作為小規模 CO₂ 封存示範試驗的場址，是一較穩健的策略性作法，通常具有這樣一個構造的地點都已累積有相當多的地表與

地下的調查資料，因此可以省下一筆可觀的調查費用並縮短建置的時間，加以有天然封閉構造的加持，風險相對較低，示範試驗成功的機率自然高，透過參觀成功的示範試驗也容易消除社會各階層的疑慮，提升公眾接受度。一般而言，採行在油氣構造進行 CO₂ 封存示範的做法，估計僅須 3 至 4 年的時間，完成技術發展與測試之後，並可作為前期的 CO₂ 地質封存場址；同一時間在另一軌道上，則應積極進行 CO₂ 封存於深部鹽水層的技術研發，並推動 CO₂ 注儲於鹽水層的示範試驗工作，以因應未來國內 CO₂ 地質封存的長遠需求。

我國「永續能源政策綱領」已將二氧化碳捕獲與封存技術納為減排的重要手段，初期的技術發展與示範驗證，固然需要政府積極投入資源以發揮領頭羊之功效，但就中、長期而言，CCS 技術的實用化與產業化仍須植基於政府的政策法規與市場機制架構之上，這樣我國的各項減碳目標方有落實的機會。

放眼未來，台灣若能成功的推動 CCS 技術，當有助於大幅降低我國二氧化碳排放量，並可確保國人在新源時代到來之前的過渡期間，得以持續使用潔淨的化石能源，進而追求穩定的經濟發展。