

台灣二氧化碳地質封存潛能 及安全性

▶▶▶ 林殿順 —— 國立中央大學地球科學系 副教授

二氧化碳地質封存是可行的 技術嗎？

為 減緩全球暖化及其可能造成的地球環境衝擊與生態改變，2009 年的「哥本哈根協議」建議全球暖化程度應控制在攝氏兩度內。跨政府氣候變遷研究小組（IPCC）於 2007 年研究報告，指出要將大氣增溫控制於「可接受的範圍」，需於 2020 年時全球排碳量開始下降。

國際能源總署（IEA）估計於 2050 年時，二氧化碳捕獲與封存（Carbon Capture and Storage, 簡稱 CCS）技術，將可達到全球 19% 的 CO₂ 減量貢獻。可見「碳捕捉與封存」是有效的 CO₂ 減量方式之一，而各國正積極努力發展此技術。二氧化碳捕獲與封存是指於 CO₂ 固定排放源（如燃煤發電廠），將 CO₂ 捕獲後，以管線將加壓成液態的 CO₂ 運送至陸上或海域 CO₂ 注儲場，再將 CO₂ 注入地表下（或海床下）至少深於 800 公尺

的高孔隙岩層內（如砂岩），使得 CO₂ 得以長久駐留於岩石孔隙中與大氣隔離，達到 CO₂ 減量目的。目前世界已有數個商業運轉的 CO₂ 地質封存實例。如於挪威外海的 Sleipner、Snohvit 二氣田，以及阿爾及利亞的 In Salah 氣田，其生產的天然氣含有大量 CO₂。石油公司將產出的 CO₂ 分離、純化後，再將其灌注於較淺的鹽水層砂岩中。

這些氣田每年各約封存 1 百萬噸 CO₂，尤其是 Sleipner 氣田，早於 1996 年即已開始灌注 CO₂。另外，石油公司也經常將 CO₂ 灌注於即將枯竭的石油儲集層中，以增加石油的產量，此技術稱 CO₂ 石油增產（Enhanced Oil Recovery, EOR）。如加拿大的 Weyburn 油田（其 CO₂ 管線長達 300 公里）以及已有約 30 年 CO₂-EOR 歷史的美國西德州油田。

上述例子所灌注的 CO₂，雖然不是捕獲自燃煤發電廠，但卻告訴我們 CO₂ 地質封存是可大量封存 CO₂ 的可行技術。

二氧化碳灌注於地下後，如何封存於地下岩層內？

根據 IPCC 建議，良好的 CO₂ 地質封存場址包括：枯竭油氣田、封閉構造、煤層、開放鹽水層等。二氧化碳於灌注井井口加壓後，以高於岩層岩壓的壓力，注入深於 800 公尺的岩層孔隙中。靠近 CO₂ 注入點的岩層，因 CO₂ 灌注壓力高於岩壓，注入的 CO₂ 將會推開原本充填於岩層孔隙中的地層水，使得灌注點附近的大部分孔隙被二氧化碳填滿。於灌注點處的 CO₂ 呈類似於液態的超臨界相態，其密度較地層水低，當 CO₂ 遠離灌注點且灌注壓力影響小時，此處的 CO₂ 將會往上漂浮、移棲，直到碰到厚層緻密的蓋岩（一般為頁岩），才會停止往上移棲，並開始往儲集層兩旁移棲。最後 CO₂ 將移棲至封閉構造的最高點（如背斜構造的軸部），或受到側向滲透性差的岩石阻擋（如厚層斷層泥），而停止移棲並長久駐留於地下。

此封閉型態類似石油與天然氣的構造或地層封存機制，我們稱為「二氧化碳封閉構造封存」。若 CO₂ 儲集層於側向延伸上並沒有形成封閉，二氧化碳將持續沿著蓋層下方的儲集層頂部，繼續往鄰近高區移棲。遠離 CO₂ 灌注點的 CO₂ 移棲速率約為每年數十公分。據此計算，若 CO₂ 於岩層中側向移棲 10 公里，約需數萬年的時間。此封存機制稱為「水力封存」。

由於 CO₂ 地質封存之目的，是將 CO₂ 滯留於地下岩層、與大氣隔離至少達數千之久，即可達到溫室氣體減量目的，因此並不需要將 CO₂「永久」封存於地下。如此，側向不封閉的鹽水層，也可成為良好的 CO₂ 儲集層，我們稱此封存型式為「二氧化碳開放鹽水層封存」。

上述兩類封存型式，於 CO₂ 移棲路徑，部分的 CO₂ 分子會吸附於礦物顆粒表面，無法再流動，此機制稱為「殘餘氣封存」。再者，二氧化碳進入岩石孔隙內時，部分 CO₂ 即開始溶解於地層水中，此機制稱為「溶解封存」。因溶有 CO₂ 的地層水密度較一般地層水大，使得溶解的 CO₂ 往地下深處流動，有利 CO₂ 地質封存。二氧化碳也會與岩石內的礦物產生反應，稱為「礦化封存」。

上述三種機制，可進一步將 CO₂「永久」滯留於地層中，但需要較長的時間（如幾百至幾千年）才能發揮較大功效。根據文獻報導，歷經約數千年，大部分灌注的 CO₂ 將於移棲的路徑中溶解於地層水內，而達到有效封存的目的。

如何選擇二氧化碳封存場址？

選擇二氧化碳封存場址是二氧化碳地質封存能否成功的關鍵因素。我們需考慮下列因素：（一）二氧化碳封存量（考慮儲集層溫度、壓力、面積、孔隙體積

等)；(二) 儲集層可灌注性(考慮儲集層孔隙率、滲透率、厚度等)；(三) 二氧化碳封存有效性(考慮蓋層及斷層封阻性、地層水流動趨勢、地震影響程度等)；(四) 地面場址適合性(考慮場址與 CO₂ 來源之距離、水深、距離人口密集區遠近等)；

(五) 其他天然資源(灌注的 CO₂ 應不影響地下油氣田以及人類使用的地下水資源層等)。經考慮上述條件後，我國至少有四種二氧化碳地質封存模式，分別為 (A) 陸上封閉構造、(B) 濱海開放鹽水層、(C) 海域開放鹽水層、(D) 海域封閉構造等。

首先，我們考慮二氧化碳可封存量、儲集層可灌注性及封存有效性等條件。台灣西部麓山帶、平原區及台灣海峽下方的岩石，為厚達約 8 公里的沈積岩。此沈積岩經常為厚層的高孔隙砂岩及緻密的頁岩交替出現。於 CO₂ 封存深度(地面或海床下 800-3,500 公尺深)，有多組交替出現的厚層砂、頁岩，可成為可灌注性高的 CO₂ 儲集層及封阻良好的蓋層。如此一來，莫非台灣到處都是良好的 CO₂ 封存場址？

事實並非如此，若考慮其他因素，我們認為陸上 (A) 與海域 (D) 的封閉構造以及濱海區 (B) 及海域 (C) 的開放鹽水層等場址，是較好的 CO₂ 地質封存模式。完整的封閉構造可近乎「永久」將二

氧化碳封存於構造內。台灣陸上自 1959 至 2009 年，於各油氣構造累計生產凝結油 2,798 萬桶、483 億立方公尺的天然氣，顯示油氣構造可成為良好的 CO₂ 封存場址。陸上的油氣構造皆位於地震帶內，但天然氣仍能儲聚於封閉構造內、沒有滲漏，顯見若其他條件配合，地震帶內的封閉構造仍可成為良好的 CO₂ 封存場址。

根據台灣中油公司估計，陸上各封閉構造共可封存約 28 億噸的二氧化碳。

另外，因台灣山脈的重壓，使得台灣西部平原區以及台灣海峽下方的沈積岩往山脈方向(東方)傾斜約 1-5 度。這個斜度，將造成灌注於開放(即於側向沒有封閉)鹽水層的 CO₂ 往西移棲。若將 CO₂ 灌注於陸上濱海區，二氧化碳將往海峽方向移動，遠離台灣島，減低 CO₂ 滲漏至地表影響生態及造成人類安全疑慮的機會。若於陸上濱海區鑽水平井至 CO₂ 儲集層(模式 B2)，則 CO₂ 地下注入點將處於台灣海峽、遠離海岸數公里處，增加 CO₂ 封存之安全性。海域開放鹽水層(模式 C)的封存模式類似於前述的濱海開放鹽水層封存，只是封存場址位於海上，操作成本可能增加，但封存安全性卻提升。

根據經濟部能源局委託工業技術研究院，評估濱海區與海峽近岸區的開放鹽水層 CO₂ 封存量約為 48 至 317 億噸、台

灣海峽開放鹽水層則可封存約 90 至 680 億噸 CO₂。

評估結果顯示，台灣的開放鹽水層二氧化碳封存甚具潛力。若再考慮上述選址條件的地面場址適合性及其他天然資源問題。台灣燃煤火力發電廠皆位於西部或北部濱海，若於電廠附近尋找適當的濱海鹽水層封存場址，並利用水平鑽井方式，將 CO₂ 注入點置於海域，應是不錯的選擇。若僅考量 CO₂ 外洩所造成的生態環境及人類安全性考量，應以遠離台灣島的海域封存場址為首選，但其封存及監測成本應較陸上封存場址高。

二氧化碳封存安全與安全性監測

二氧化碳灌注於地下岩層後，往何處移棲或聚集？是否有二氧化碳穿過蓋層，往上滲漏至淺層人類所利用的地下水層或空氣中？若 CO₂ 滲漏量較大，則無法有效封存二氧化碳。若外洩至地表，可能造成生態破壞或人類安全的疑慮。二氧化碳不是毒氣，但空氣中若含 5% 以上的二氧化碳（目前大氣中二氧化碳含量為 0.0390%，即 390 ppm），可造成生命危害。二氧化碳灌注期間及灌注停止後的數十年間，應收集各項資料，監測灌注之 CO₂ 於儲集層的移動或擴散方向、是否有

CO₂ 穿過蓋層而進入較淺的岩石孔隙中、是否有 CO₂ 滲漏至人類利用的地下水層或地表土壤（若地質封存場址為海域，則為海床沈積物）、二氧化碳是否滲漏至海水中、是否滲漏至大氣中等。即所謂的 MMV（Measurements, Monitoring and Verification，測量、監測和驗證）技術。若於監測過程中發現 CO₂ 滲漏，即應採取相關措施，確保封存安全及有效性。

我國具有優勢的 CO₂ 地質封存潛能。於陸上的枯竭油氣田及封閉構造，估計 CO₂ 封存量可達 28 億噸、於濱海區及台灣海峽之開放鹽水層封存，預估可封存 CO₂ 達 138~997 億噸。灌入濱海區及海域鹽水層封存場址之 CO₂ 將往海域（往西）方向移棲，遠離台灣島，增加 CO₂ 封存之安全性。

根據 2010 年環保署提出的「我國溫室氣體適當減量行動（NAMAs）建議方案」，到 2020 年將 CO₂ 排放量降低至 2005 年排放量、2025 年降低 CO₂ 排放量至 2000 年水準。若以我國高經濟成長率計算，環保署預估於 2020 年 CO₂ 基線（Business as Usual, BAU）排放量為 467 萬公噸，比 2005 年多出 210 百萬公噸，即 2020 年 CO₂ 需減量約 45%，才可回到 2005 水準。如此巨量的減碳目標，二氧化碳地質封存應可成為重要的減碳方法之一。

