

簡述國際二氧化碳地質封存監測方法與法規

張志瑋

核能研究所能源經濟及策略研究中心

2016/03

二氧化碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)近年來被認為是重要的溫室氣體減量措施之一，再者 CO₂ 地質封存是 CCS 技術中最後一個步驟，亦為實際使溫室氣體減量的核心技術之一。然而地質封存目前仍有許多爭議，如封存廠址的挑選、注儲後的監測(是否有洩漏風險)及相關法律規範等。目前各國已加緊進行 CCS 產業佈局，並一致認同須更積極地訂立明確法規、環境評估機制、管制規範，否則無法促進 CCS 技術發展，亦無法促使資金投入與計畫施作。本文將針對目前國際間常用的**監測方法**與地質封存的**相關法規**進行簡要說明。

壹、地質封存現行之監測方法

地質封存係指將捕獲之 CO₂ 注入地底下的鹽水層、舊油氣田或是深層煤層等地下構造，以減少大氣中 CO₂。而 CO₂ 地質封存仍存在有洩漏的可能，洩漏係指封存於地底下之 CO₂ 向上移動並洩漏，其可能發生之洩漏途徑如圖 1[1]所示，沿著斷層或岩石裂隙洩漏、注入井或鄰近廢棄井洩漏、經由地下水流流出...等。若 CO₂ 從地下洩漏出來，不僅將 CO₂ 再次釋放回大氣層中，使得溫室氣體減量效果大打折扣，並會影響地下水資源、土壤、植被等，對環境造成二次傷害，因此應用有效的方法監測洩漏，並及早因應，則顯得十分重要。

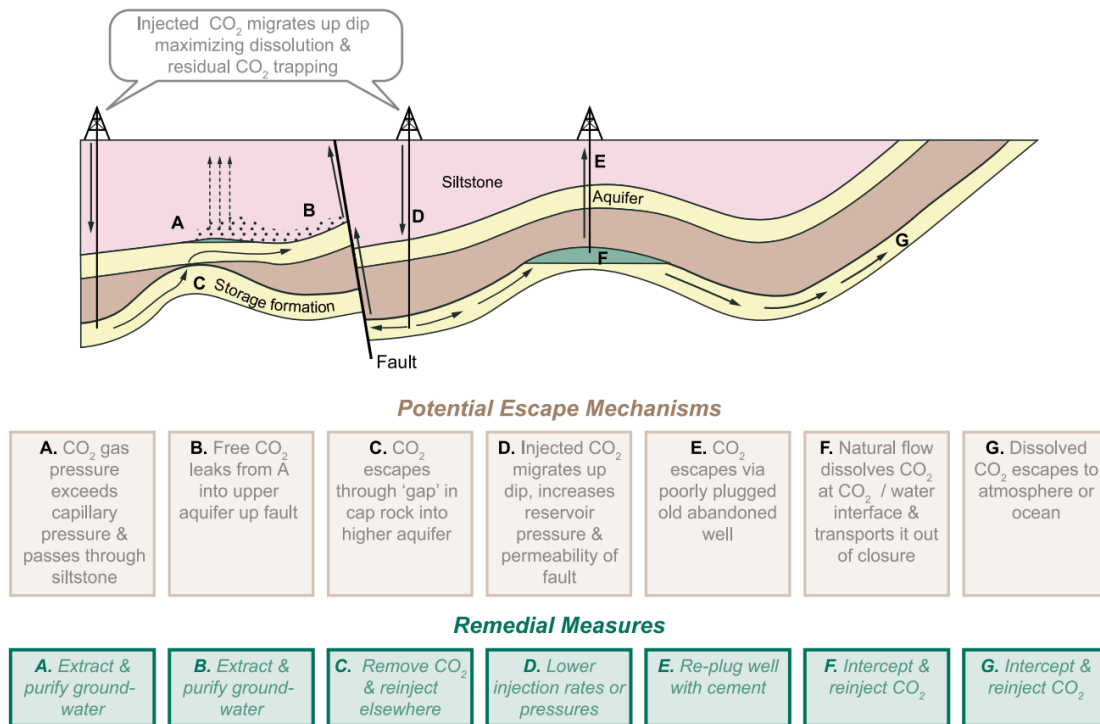


圖 1、二氧化碳封存潛在洩漏途徑

資料來源：IPCC(2005)。

目前已發展多種監測技術，確保 CO₂ 封存之有效性，美國國家能源科技實驗室(National Energy Technology Laboratory, NETL)將現存監測技術依照監測目標與範圍不同分為三類[2]，各類技術如圖 2 所示：

1. 大氣監測技術(Atmospheric Monitoring)
2. 遙測與近地表監測(Remote Sensing and Near-Surface Monitoring)
3. 地下監測(Deep Subsurface Monitoring)

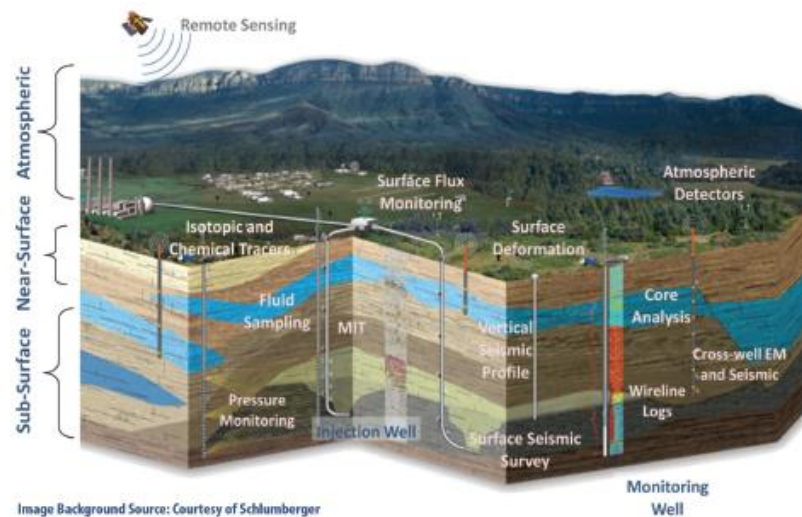


圖 2、地質封存監測方法

資料來源：NETL(2011)。

另外，全球 CCS 研究院(Global Carbon Capture and Storage Institute, GCCSI)亦將現行常見的封存監測技術與其應用整理如表 1，列出已應用於商轉場址、研發階段及前導試驗的封存監測技術[10]

表 1、封存監測與其應用

	監測範圍 與目標 (NETL)	儲氣層 CO2 監測	封存 完整性	地表狀況 監測	應用於 商轉廠	研發及 前導試驗	代表計畫
4D 震測成像	地下監測	○	○		○	○	Sleipner, Norway
微震測勘	地下監測	○	○		○	○	Weyburn, Canada
注入井壓力 監測	地下監測	○	○		○	○	Snøhvit, Norway
地表形變 (InSAR)	近地表 監測	○	○		○	○	In Salah, Algeria
土壤氣體 化學分析	近地表 監測			○	○	○	Weyburn, Canada
化學示蹤 劑	近地表 監測	○	○	○	○	○	In Salah, Algeria
跨孔電阻 掃描	地下監測	○	○			○	Ketzin, Germany
井下壓力 和溫度	地下監測	○	○			○	Aquistore, Canada
井下流體 化學測量	地下監測	○	○			○	Otway, Australia
垂直震測	地下監測	○	○			○	Decatur, US
地表重力	近地表 監測	○				○	Sleipner, Norway

資料來源：GCCSI(2014)，核研所整理。

監測方法選擇取決於封存場址的地質條件、作業需求、各國法律規範，並研擬監測項目，國際能源總署溫室氣體研發計畫(IEA Greenhouse Gas, IEAGHG)在網站上提供篩選監測方法的工具 Monitoring Selection Tool[3]，可依照 CO₂ 注入速率、時間、場址性質、監測目標、計畫階段等條件進行監測技術篩選與評估。

以下將以國際上已運作之 CCS 計畫為例，並簡要說明其應用之監測技術與結果：

一、Sleipner¹計畫

(一)3D-4D 震測成像：即便 CO₂ 為超臨界態，此技術仍可探測到地層不同位置 CO₂

累積的情形，可偵測的最小量級為 1 公尺[4]

(二)重力測量：用於估算 CO₂ 體積與質量，其數據可供震測探勘作為補充與驗證

[5]，Sleipner 計畫共佈置了 30 個監測點，並探測出 CO₂ 運移的範圍²[6]。

二、Weyburn³計畫

(一)3D-4D 震測成像：每年進行一次，震測對於 CO₂ 濃度在於 5%~10%最為敏感，

故適合用於監測 CO₂ 運移的前鋒[7]

(二)土壤氣體：進行近地表之土壤氣體採樣，確保 CO₂ 未洩漏至地表，共有 360

個監測點，未發現異常狀況⁴[7]。

三、In Salah 計畫

¹每年注入 1 百萬噸 CO₂，截至 2014 年已注入 15 百萬噸，自海上天然氣田的開採過程中分離出 CO₂ 後，注入鹽水層中。

² 探測到的密度為 530± 65kg/m³，此為 CO₂ 注入的結果。

³ 每年注入 3 百萬噸，目前已經注入超過 25 百萬噸，本計畫屬於增進採油(EOR) (GCCSI, 2014)。

⁴ 結果顯示 CO₂ 與 O₂ 的濃度變化都在自然土壤氣體濃度的變化範圍內。

(一)示蹤劑：應用 3 種全氟碳化物做為示蹤劑，示蹤劑將注入 CO₂ 與背景值區分，可用於證明 CO₂ 運移的方向及範圍[8]

(二)微震探勘：監測地質封存蓋層之完整性

(三)地表形變：應用孔徑雷達干涉測量(InSAR)技術，監測地表形變的遙感技術，被認為是成本效益較高的技術，偵測結果發現，注入井周圍地表隆起速率約為 7mm/年，附近的天然氣井周邊約為 4mm/年的下陷量[9]⁵

(四)生態系統監測：觀測注入井附近植被在注入前與注入後之變化

貳、國際地質封存相關法規

為確保 CO₂ 地質封存之有效性，除了必須具備可行之監測技術外，仍須仰賴明確的法規，針對 CO₂ 封存活動進行有效規範，例如：訂立 CO₂ 監測標準、提供政策誘因、明確的權責劃分等，由此才能促進 CCS 技術佈署及資金投入。以下將列出國外重要公約與法規，做為我國未來立法之借鏡。

一、國際公約

(一)倫敦公約及議定書

以管理和控制海洋傾倒廢棄物的國際公約，2006 年通過一修正案，原禁止 CO₂ 向海洋傾倒，改為允許在海床底下的地層構造封存。但 CO₂ 海底封存仍須符合三個條件：1. CO₂ 只能封存於海底地質構造中；2. 注入的氣體主成分為 CO₂，不得

⁵ 據統計台灣玉山每年隆起約 5~6 公分。水利署，嚴重地層下陷地區劃設作業規範，定義嚴重地層下陷為 10cm/年以上。

參入其他物質；3. 無論長、短期封存，皆須對海洋環境以無害的方式進行。[11]

(二)東北大西洋環境保護公約(OSPAR)

原禁止 CO₂ 在海床底下進行地質層封存，於 2007 修改解禁，但仍禁止 CO₂ 放置於水層及海床上，CO₂ 需永久封存於海洋地質結構中。[11]

(三)ISO/TC265

ISO/TC265 於 2012 年正式成立，致力於建立 CCS 的標準程序，從捕獲、運輸、封存相關活動與計畫施作標準，使 CCS 計畫可安全運轉、有效進行風險管理，促使大眾可接受 CCS 為可靠且安全的氣候變遷調適工具，其依照不同進行階段分成 6 組工作小組，迄今已執行過 4 次會議，並預計於 2017 年可完成所有工作小組之 ISO 標準[10]。

二、美國[12]

(一)美國潔淨能源與安全法案(American Clean Energy and Security Act)

該法案對 CCS 規範包含策略擬定及 CCS 封存場址選定，對 CCS 示範及早期部屬規範的四項特色為：(1)透過非營利、非官方組織來完成 CCS 示範及早期佈屬工作(2)對先行者進行補助(3)提供資金徵收的標準與強制力(4)受到行政部門、國會及公眾的同時監督。

(二)美國飲用水安全法(Safe Drinking Water Act -Underground Injection Control)

美國環保署(USEPA)於 2010 年 11 月公告飲用水安全法(SDWA)之地底灌注管理方案新增第六類井(Class VI)，特別用於規範 CO₂ 注入地質層之管理，分別列出地質

封存不同階段之相關規範，如下：

1. 注入場址適當性(Appropriateness of Injection Sites)

場址選定的重要地質條件，如：足夠深度(800 公尺以下)、面積、厚度、孔隙和滲透性、良好的密封構造...等。

2. 注入井區域域檢測(Area of Review)

注入後地層壓力變化與 CO₂ 流動監測及模擬

3. 注入井之建造(Injection Well Construction)

注入管線與封井水泥等材料需考量 CO₂ 及地質特性，並且須證明建材與技術能保障飲用水安全與公眾健康。

4. 灌注井營運和監測計畫(Well Operation and Monitoring Program)

紀錄平均和最大注入速率與壓力、每日及累積之注入量等相關營運計畫，並監測井的內外壓力與流體流動變化及 CO₂ 造成的影響。

5. 場址封閉(Site Closure)

確認封存地棄置和關閉不會影響地下飲用水資源。

三、澳洲[12]

澳洲其立法分為中央聯邦與地方省兩個等級，中央聯邦政府建立離岸石油與溫室氣體封存法規(Offshore Petroleum and Greenhouse Gas Storage Act, OPGGS)，並於離岸石油法(Offshore Petroleum Act)中新增近海地質封存規定，採取執照發

放方式⁶，且聯邦政府定期公布離岸探勘面積，開發者對於探勘、灌注與封存階段皆必須申請許可並涵蓋健康、安全和環境之要求。

澳洲的維多利亞省溫室氣體地質封存法(Greenhouse Gas Geological Sequestration Act)，為世界上第一部專門監管陸域 CCS 的法律，適用於維多利亞省陸上區域，規定包含，土地使用之相關規定、授權申請、施作計畫、社區諮詢、公眾參與、資訊揭露、稽查與相關責任歸屬。

四、英國[13]

英國針對 CCS 之特性修改現有法規，而非建立對 CCS 之專屬法規，相關法規主要有能源法(Energy Act)、石油法(Petroleum Act)、土地規劃法(Planning Act)、以及環評、安全衛生各相關法規，制定一系列之二氧化碳封存管制規範(The Storage of Carbon Dioxide Regulation)及修訂條例，用以規範機關相關權責、探勘階段執照發放與申請、營運階段封存執照許可(包含環境許可)、營運人義務、場址關閉以及財務安全、環境損害防止與補救規則、閉井或除役後之責任轉移。

五、台灣

我國於 2015 年 6 月通過「溫室氣體減量及管理法」，長期減碳目標為 2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年的一半，可見我國的溫室氣體減量決心，但對於 CCS 並未設立專屬法規。我國目前有環境影響評估法、水污染整治法、土壤及地下水污染整治法等可能相關之管制法規，這些法規中未能明確針對 CCS 對環境

⁶評估許可證(Assessment Permit)、租賃證(Holding Lease)和注入執照(Injection License)。

影響與執照核發制定監管規範，也因此我國 CCS 發展無法規可以依循，亦缺乏政策誘因，在尚未能有明確法規時，廠商投入資本意願降低，使得 CCS 全程發展相對國際落後。

參、總結

IEA 在研究報告[14]中指出，全球要實現溫升控制於 2°C 內，則必須將大氣中的 CO₂ 濃度控制在 450ppm 以內(450 情境)，2050 年的溫室氣體需比 2010 年減排 50%，而 CCS 的減排貢獻占 19%，CCS 技術被視為連接低碳轉型與未來替代能源的橋接技術。而地質封存更是落實 CCS 的最後一階段，封存計畫的實踐並防止洩漏，則是減少大氣中 CO₂ 的關鍵，但其中仍具相當不確定性與風險，必須要有完整且適當監測機制與方法，國際上已有許多封存計畫實際運作，並建立全程的最佳操作手冊(Best Practice Manuals, BPM)[15]，可做為我國在建立 CCS 計畫管理標準時參考。另外在制定 CCS 相關法律與規範時仍需透明公開，例如：美國 EPA 相關條文建立時有公開討論機制，並於網站詳細且公開回覆大眾的質疑，澳洲更明文規定需有公眾參與及資訊透明；唯有健全且透明公開的法規與政策才能取信於民，使得 CCS 得以實施。

參考文獻

1. IPCC, (2005), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage.
2. National Energy technology Laboratory, NETL(2011), Carbon Sequestration Program: Technical Program Plan- Enhancing the Success of Carbon Capture and Storage Technologies Applied Research and Development from Lab –to Large-Field Scale.
3. IEAGHG, IEAGHG monitoring selection tool,
<http://www.ieaghg.org/ccs-resources/monitoring-selection-tool1>
4. Torp, Tore A., Gale, John. (2004) , Demonstrating Storage of CO₂ In Geological Reservoirs: The Sleipner And Sacs Projects, *Energy*
5. Bellona, (2007), Carbon Dioxide Storage: Geological Security and Environmental Issues-Case Study on the Sleipner Gas field in Norway
6. Alnes, Havard , Eiken, Ola, Stenvold, Torkjell., (2008) Monitoring Gas Production and CO₂ Injection at the Sleipner field Using Time-lapse Gravimetry.
7. British Geological Survey(2005), The IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project, *Fuel Processing Technology* 86 (2005) 1547 – 1568
8. Ringrose, Philip, Atbi, Mason, David, et al.(2011) An Experimental Investigation of Trace Element Dissolution in Carbon Dioxide: Applications to the Geological Storage of CO₂. *Chemical Geology*, 289 (2011) 224–234
9. Onumaa, Takumi, Ohkawab, Shiro.(2009) Detection of surface deformation related with CO₂ injection by DInSAR at In Salah, Algeria, *Energy Procedia* (2009) 2177–2184
10. GCCSI (2014), The Global Status of CCS
11. 行政院環保署-推動碳捕存技術資訊網 <http://ccs.gov2.tw/>
12. 國科會能源國家型計劃(2012)，台灣二氧化碳捕獲與地質封存管制法規之芻議
13. 吳妍儂，李明珊，高銘志(2012)，英國近年碳捕集與封存立法架構之初探，*中*

興工程季刊，第 116 期，PP.85-9

14. IEA, World Energy Outlook 2014, 2014
15. CO2CRC, (2011), A review of existing best practice manuals for carbon dioxide storage and regulation