



淨零碳排的最後一哩路 - 淺談碳封存

台灣中油探採事業部處長 / 楊志成
台灣中油探採事業部副處長 / 李奇峰
台灣中油探採事業部組長 / 曾彥祺

關鍵字：CCUS/CCS、碳封存資源量、碳封存場址、MMV

摘要

目前全球高過八成的能源需求和六成的衣料纖維來自化石燃料^[1]，而人類長期對化石燃料的依賴造成地球溫度逐年上升，2023年舉行的COP28預測，在各國可無條件達成國家自主貢獻（Unconditional Nationally Determined Contributions, NDCs）之情境下，全球距離2030年控制升溫在攝氏1.5度的目標，還差減少排放220億公噸的二氧化碳。鑒於全球地下地層擁有豐沛之碳封存資源量，使原本排放至大氣的二氧化碳可轉向封存於地底，故當前世界各國莫不積極投入碳封存場址之開發，亞太地區中以澳洲最為積極。碳封存技術是將二氧化碳有效封存於地下地層之孔隙中，並透過長期對地表環境及地下地層等各式監測技術，確保灌注過程

操作之安全性及封存穩定性，讓碳回歸至最初蘊藏之處，被認為是除森林碳匯外，在淨零轉型過程中須積極貢獻之負碳（Carbon Negative）技術。

一、前言

自19世紀人類邁入工業化時代以來，溫室效應造成全球平均溫度逐年升高^[5]（圖1），聯合國世界氣象組織（World Meteorological Organization, WMO）提出警告，有98%的機率在未來5年內會出現人類歷史上最熱的年份，並有高達66%的機率全球均溫會升溫超過攝氏1.5度，地球正面臨環境快速惡化且關鍵性的轉變。2015年召開的第21屆聯合國氣候變化大會（21th UN Climate Change Conference, COP21）中通過巴黎協定

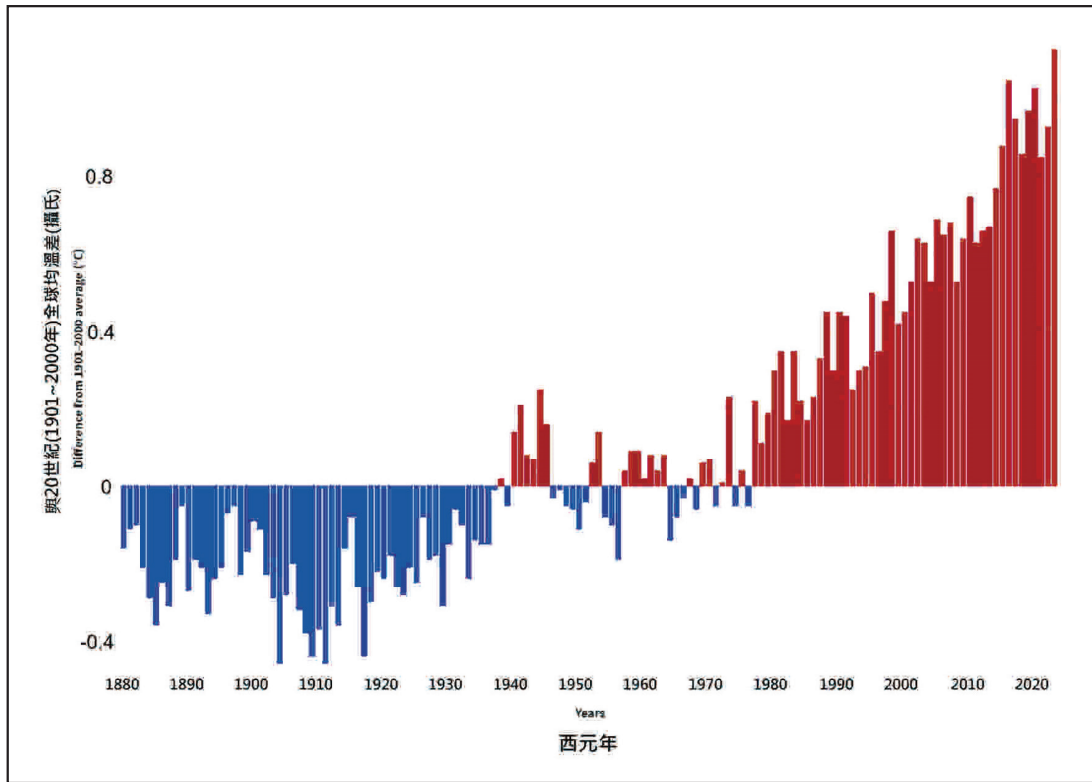


圖 1 全球平均溫度變化 [5]

(Paris Agreement)，明確提出要努力將全球均溫升幅限制在攝氏1.5度之內的目標，而造成溫室效應的原因是人類大量排放溫室氣體 (Greenhouse Gases, GHGs) 於大氣中，溫室氣體主要包括：二氧化碳 (CO₂)、氧化亞氮 (N₂O)、甲烷 (CH₄)、氫氟碳化物 (HFCs)、全氟碳化物 (PFCs)、六氟化硫 (SF₆) 等6種主要氣體，其中以二氧化碳含量最多，主要來自化石燃料的使用。為有效減少大氣中的二氧化碳，需要各國採取能源轉型及各式減碳技術，依2020年國際能源總署 (International Energy Agency, IEA) 推估之

永續發展情境，「製程技術性能改進」與「再生能源」為2020年至2040年主要減碳技術；「碳捕捉利用及封存 (CCUS)」與「氫能」則為2040年至2050年之減碳關鍵技術^[12]，其中全球CCUS減碳量要從現今的每年4千萬公噸提升至每年56億公噸，是兩個數量級的提升。我國政府也在2022年3月正式公布「2050淨零排放政策路徑及策略總說明」^[13]，其中CCUS被名列為淨零轉型的12項關鍵戰略之一，顯示我國須開始逐步建立自身之CCUS技術。



二、碳封存資源量

CCUS技術中，捕捉（Capture）和利用（Utilization）技術屬於化學工業，而封存（Storage）技術一般是指地質封存，著重於地球科學和資源工程等學科。碳封存技術起源自1970年代油氣工業對油氣田的激勵生產（Enhanced oil recovery, EOR）措施，是透過灌注井將二氧化碳灌注在地層壓力因生產而下降的油氣生產層中，來提高生產井的油氣產量。直至1996年，挪威石油公司Statoil（現更名為Equinor）首次在無油氣生產的鹽水層（Saline aquifer, SA）中，成功灌注並封存二氧化碳，此事件之成功不但將碳封存領域拓展至EOR以外，更讓人們思考除了油氣田構造外，包含鹽水層的全球碳封存潛能共有多少？

根據石油及天然氣氣候倡議組織（Oil and Gas Climate Initiative, OGCI）之二氧化碳封存資源目錄第三週期報告指出，全球之碳封存資源量可達13.9兆公噸^[7]（圖2），此封存量遠高於2022年全球能源燃燒及工業製程造成的368億公噸排放量^[4]（圖3），顯示碳封存確實有資格成為全球達成淨零碳排的關鍵負碳技術，亦肩負將肥料、鋼鐵、水泥和石化等產業難以減排的二氧化碳封存於地下地層的任務（Granger, 2023），故在不遠之將來，碳封存資源量（Storage resource）將成為各國或各企業完成能源轉型後，進一步達成碳中和的必要需求資源，而台灣西部海域地底下適合封存二氧化碳的鹽水層，初估具有460億公噸的碳封存資源量^[12]，值得研究開發。

類別	全球碳封存資源量 (Gt)	已開發或評估中的碳封存資源量(Gt)
已封存量	0.043	0.043
已開發量	0.211	0.211
待開發量	577	66.3
待發現量	13377	30.0
總和	13954	96.6

圖2 全球碳封存資源量 [7]

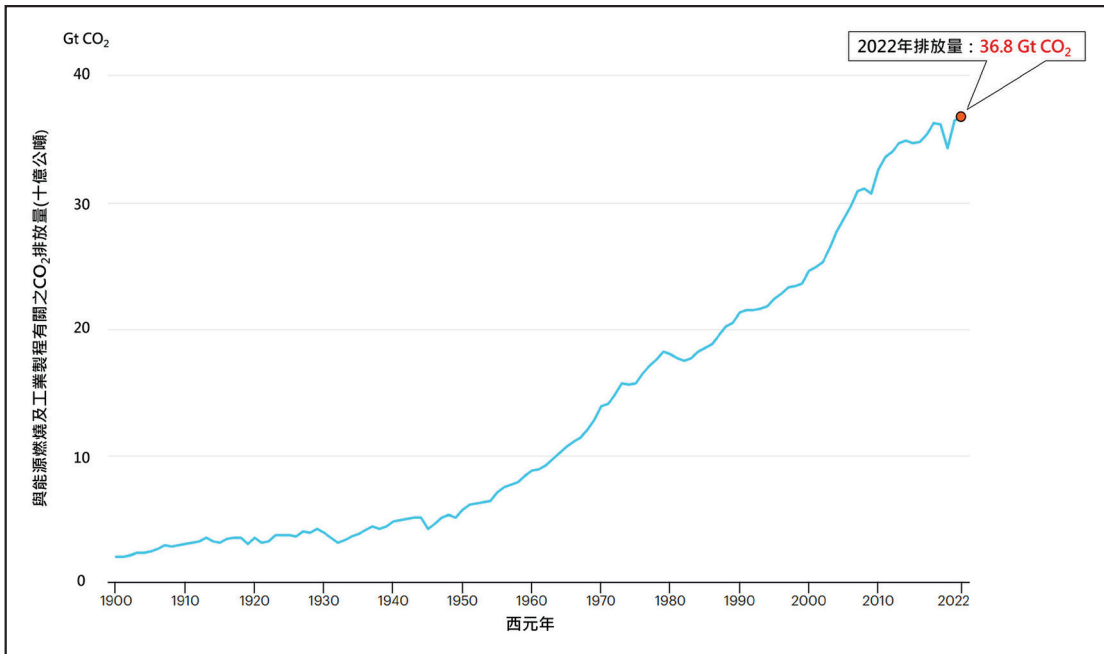


圖 3 全球與能源燃燒和工業製程有關之二氧化碳排放量 [4]

碳封存資源量指的是地層可以封存多少重量或體積的二氧化碳，該地層可以是已知或待被發現的地層，而碳封存資源量之多寡，決定於地層岩石中，顆粒與顆粒之間擁有的孔隙體積 (Pore volume) 大小。為了使碳封存資源量的定義在國際各碳封存場址 (Storage site) 間具有一致標準，石油工程師協會 (Society of Petroleum Engineers, SPE) 透過多年與聯合國歐洲經濟委員會 (United Nations Economic Commission for Europe, UNECE) 合作，仿效行之多年的石油資源管理系統 (Petroleum Resources Management System, PRMS)，建立了碳封存資源量管理系統 (CO₂ Storage Resource Management System, SRMS)，用來說明不

同碳封存場址在探勘或開發階段之資源量^[9]。

根據SRMS，同一個碳封存場址在不同的探勘和開發階段，會有不同類型的碳封存資源量 (圖4)，以下簡介SRMS各類型碳封存資源量之定義：

1 總碳封存資源量 (Total storage resources)

是所有碳封存資源量的總合，包含已發現和未發現之碳封存資源量，總碳封存資源量可以想像成地下地層內所有孔隙體積可以存放二氧化碳的量。

2. 已發現之碳封存資源量

(Discovered storage resources)

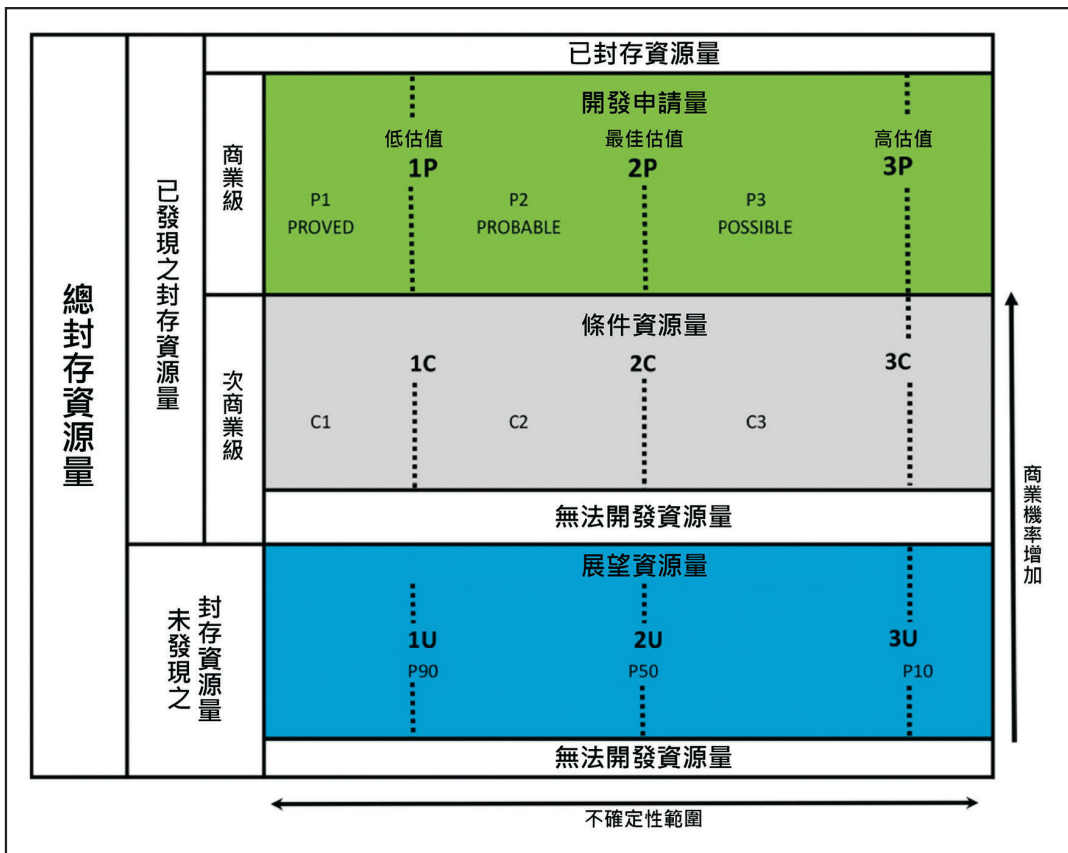


圖 4 SRMS 碳封存資源量分類框架。橫軸為封存量不確定性範圍，縱軸為可商業化機會，或場址達到商轉前之不同階段 [9]

已發現的碳封存資源量是指地層的碳封存潛能已經被評估確定，可以細分成已封存量（Stored）、地層已經特性分析（Characterized）且用於開發計畫申請量（Capacity）及地層已經特性分析但尚未足以被商業開發的條件資源量（Contingent storage resource）等三類。

3. 未發現之碳封存資源量 （Undiscovered storage resource）

未發現之碳封存資源量表示該地層的碳封存潛能尚未被評估確定，屬於地層的碳封存潛能還未被發現、或已發現但尚未經特性分析的展望資源量（Prospective storage resources）。

4. 無法開發之碳封存資源量 （Inaccessible storage resources）

在已發現和未發現之碳封存資源量中，皆存在一部分的無法開發之碳封存資源量，



指的是該地層受限於當地環境或社會的限制，而無法被開發成為碳封存場址，例如：地層上方為人口稠密的都市區、無法執行鑽井工程之地區或地層屬於當地法規禁止進行二氧化碳灌注的低鹽度飲用水層等。此部分無法動用的封存資源量，在未來法規或環境改變、或場址開發工程技術進步時，仍有機會轉為已發現和未發現之碳封存資源量。

為了賦予上述不同定義之碳封存資源量商業價值，並說明碳封存場址在探勘或開發階段所持有的資源量情境，SRMS把地層已經特性分析且用於開發計畫的申請量（Capacity）視為商業級碳封存資源量

（Commercial storage resources），因其已符合：地層已被發現且經特性分析、地層可滿足計畫需要的二氧化碳灌注率（Injection rate）、碳封存場址開發計畫屬商業級及場址現存之碳封存資源量保持在開發計畫申請量之上等四個條件；另外，也將條件資源量（Contingent storage resources）視為次商業級碳封存資源量（Sub-commercial storage resources），表示該資源量的動用，還須克服至少一個以上的開發條件，這些待克服的條件可能有：區域尚無灌注二氧化碳之需求、主管機關尚未批准碳封存許可、碳封存場址開發規模尚未達商業級或計畫的價值尚不足以被開發等；而展望資源量

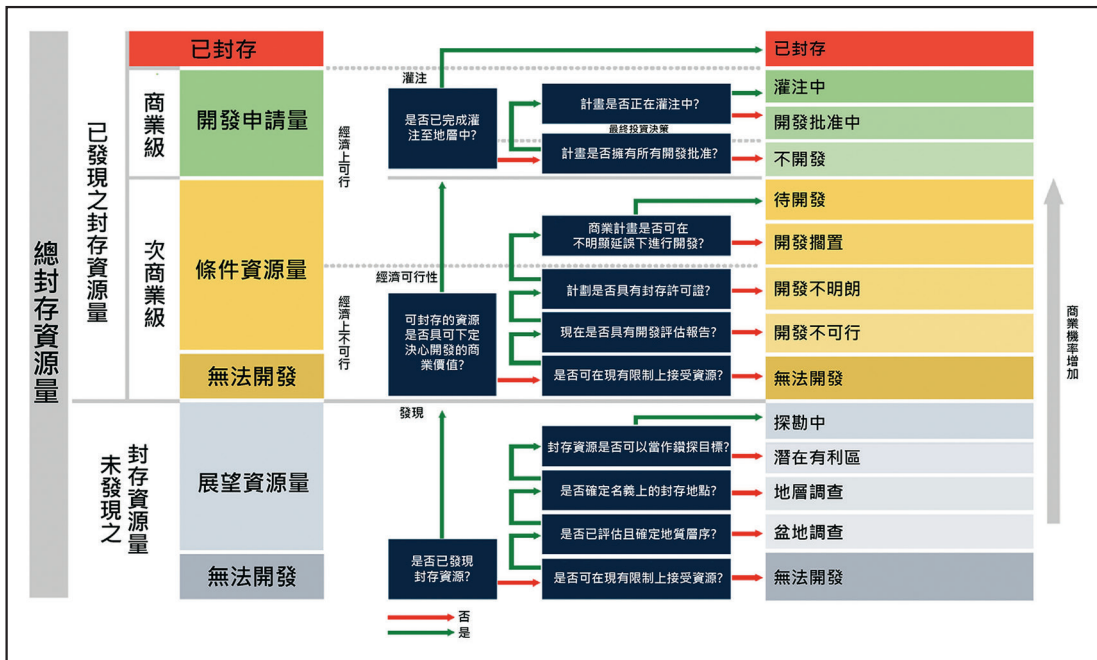


圖 5 SRMS 各類型碳封存資源量所對應之開發計畫成熟度或情境 [7][9]

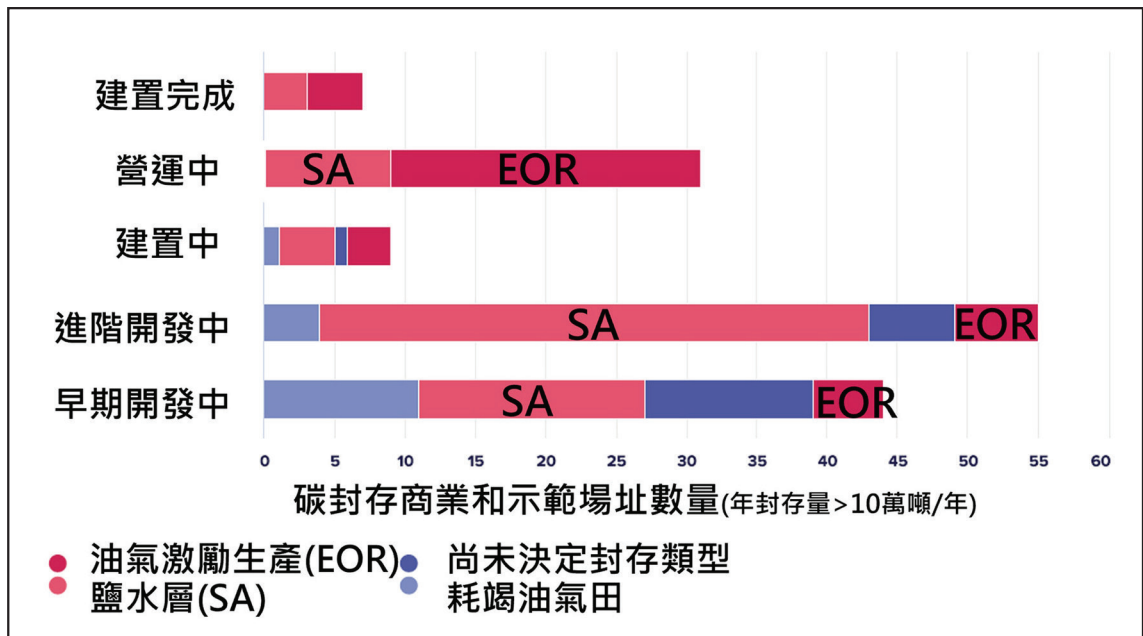


圖 6 2022 年 10 月全球碳封存場址營運或開發數量 [2]

(Prospective storage resources) 則尚屬於場址探勘階段之情境 (圖5)。評估一場址在不同探勘或開發階段之碳封存資源量類型的過程，其實等同於在評估該場址的封存安全性。未來，各國或各企業持有的碳封存場址在計算或提報資源量時，SPE建議採用商業級碳封存資源量 (圖4之綠色類型) 來進行計量，而該商業級碳封存資源量之定義，亦類似於國際油氣田生產或礦冶開採所稱之蘊藏量 (Reserves)。

三、國際碳封存現況與技術發展

鑒於有效拓展碳封存資源量，加速減少石化燃料和工業製程上的碳排，截至2022年

10月，全球共有196個商業級碳封存場址正在營運或開發中 (圖6)，其中以歐洲和北美的EOR與鹽水層場址為大宗^[2] (圖7)，而澳洲在亞太地區的場址開發數量處於領先地位，許多碳捕捉及封存 (CCS) 計畫項目正在蓬勃發展中，例如位於澳洲西部的Gorgon CCS計畫已進入營運階段，每年碳封存量可達4百萬公噸^[1]，其他如Santos公司經營的Moomba CCS計畫，是位於澳洲南部內陸的Cooper盆地內，預計每年可封存1.7百萬噸二氧化碳^[8]。在工程上，由於Moomba CCS計畫所在的Cooper盆地油氣田中含有高濃度的二氧化碳，開發建置的油氣井必須採用抗酸合金套管與抗酸水泥來生產油氣，這也使經營者Santos公司擁有大量實務經驗來應對碳封存計

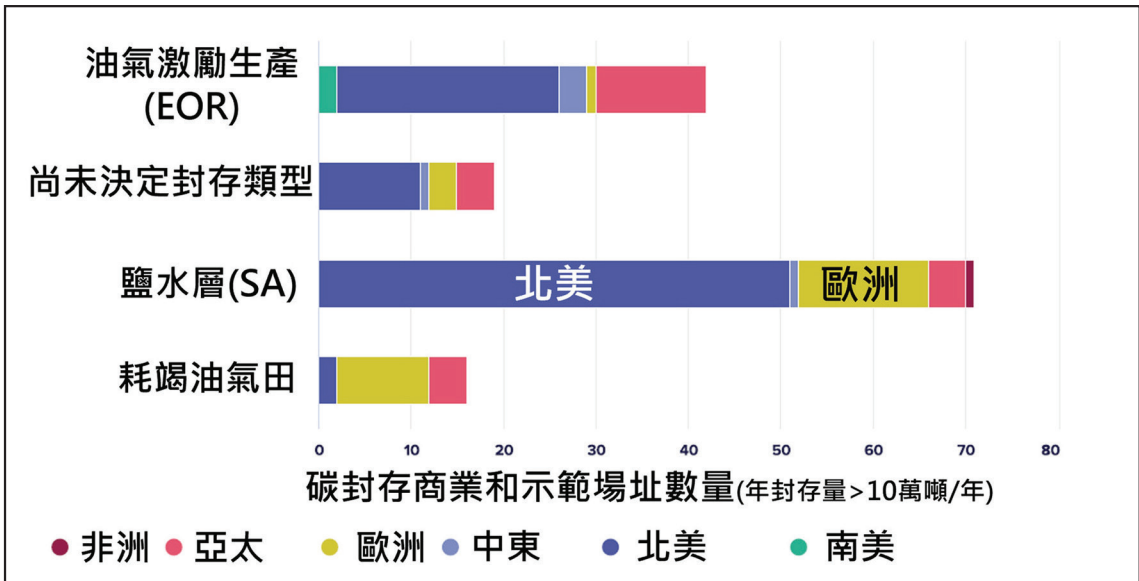


圖 7 2022 年 10 月全球碳封存場址分布 [2]

畫中，二氧化碳於灌注過程可能造成的酸蝕風險。綜合地質、碳源和工程上之優勢，使得計畫經營者Santos公司能以較低成本及較高效率來推動CCS計畫^[10]。

澳洲在CCS計畫的啟動上，是從申請溫室氣體（GHGs）許可證開始，目前推動中的計畫將陸續於數年至數十年後開始灌注，這些迅速增加的碳封存場址考驗著澳洲政府對計畫的審查、批准和監管^[8]，因此在法規措施方面，需要建立並提供企業、政府監管部門與社會大眾間良好的溝通平台，在確保能如期執行CCS計畫，達成迅速減碳目標的同時，也能獲得地區民眾對碳封存技術之信任，而計畫推動過程中對二氧化碳灌注前後的量測、監測及驗證（Measurement-Monitor-

Verification, MMV）方案，最能說明該碳封存場址之安全性。

四、量測、監測及驗證（MMV）

MMV是碳封存計畫中證明場址安全性和落實商業級封存的必要工作項目之一，其中量測和監測是確保二氧化碳灌注及封存過程中，不因過度灌注造成現地環境之破壞，驗證則是將監測結果與灌注前之模擬預測進行對比，確認是否具一致性並作為已封存量（Stored）之認證。整體而言，MMV的目的在於防範因碳封存而可能面臨的環境風險，保障地面及地下環境之安全，以及進行封存狀況評估並提供證據檢驗該場址適合執行碳

封存。為達上述目的，必須收集或量測足夠週期的環境數據，對地面儲存設施、灌注設備（泵或壓縮機）、灌注井等周圍區域進行監測，分析並識別灌注及封存過程中的操作及地質風險，掌握二氧化碳異常變化之先兆並提前擬定相應的風險管理對策^[3]。

二氧化碳進行灌注前會先進行背景基線調查，目的為與灌注後的量測數據對比，瞭解二氧化碳灌注造成的影響；灌注過程中持續監測並確保儲集層及蓋層之完整性；灌注後進行長期監測，確保二氧化碳安全封存於地層內。目前有多種工具和技術可用於監測

灌注於地下的二氧化碳（圖8），即時提供二氧化碳團塊的封存狀況及溫度與壓力異常警示，以便迅速採取風險管理對策，這些監測方法大致可分成大氣監測；近地表之土壤、地下水/海洋及遙測監測；地下儲集層及蓋層動態之溫壓、聲波振動及微震監測；地下二氧化碳團塊之井間震測、井間電阻率層析成像（Cross-hole electrical resistivity tomography）和四維反射震測等^[6]。

大氣監測針對灌注井周遭環境進行有系統且持續之二氧化碳濃度量測，瞭解碳封存場址是否有二氧化碳外洩的現象發生；地下

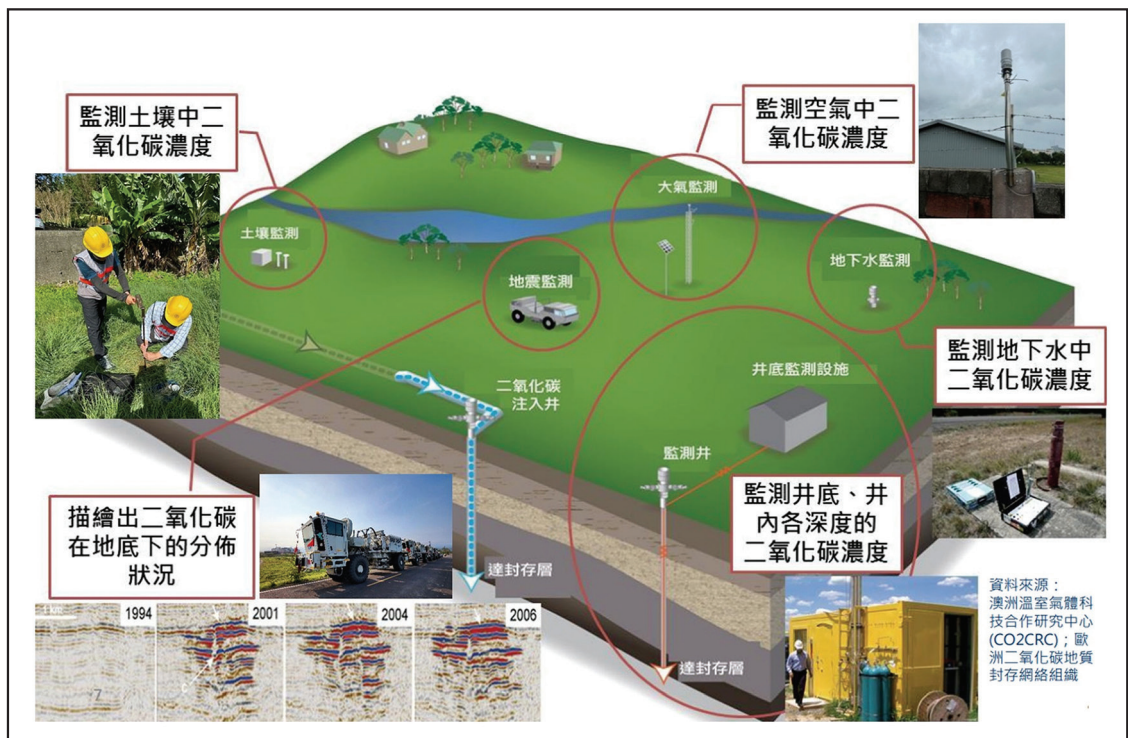


圖 8 各式碳封存監測技術示意圖修改自 [11]



水/海洋監測於地下水含水層或海水進行流體採樣後於實驗室進行分析，測定二氧化碳溶解度、碳酸氫鹽、碳酸根等陰陽離子以及pH值等項目，用以瞭解封存之二氧化碳是否有侵入地下水含水層或海洋之情事；土壤監測則測量土壤pH值是否降低或鹽度增加等，因封存在地下的二氧化碳若發生洩漏時，會與土壤中的礦物反應，使土壤酸化，而鹽水層中的鹽水隨著二氧化碳進入土壤後，將使土壤的鹽度增加，改變土壤中土壤氣的組成及土壤表面的二氧化碳通量。

井下溫壓及振動監測可利用永久井下溫壓計 (Permanent downhole Pressure and Temperature Gauges, PT gauges)、分散式溫度傳感 (Distributed Temperature Sensing, DTS) 和分散式聲波傳感 (Distributed Acoustic Sensing, DAS) 進行，井口數據可確認灌注井之完整性與灌注率；井身至井底數據可供二氧化碳是否洩露及偵測其水力傳導性與移棲擴散情況。井間震測和井間電阻率層析成像之目的為追蹤二氧化碳團塊於地層之移棲行為。四維反射震測為現今油氣田生產之重要地球物理方法，是利用人工震源產生震波，經地下地層界面反射後返回至地表或海面之受波器接收，處理後分析油氣田在不同時期的地下流體變化。二氧化碳灌注地層後亦屬於流體改變，會使震測之振幅或頻率發生變化，藉由不同時期之震測屬性分析，可顯示二氧化碳隨時間之移棲情形及範圍，同時也能驗證封存事實。

五、結論

人類開始大量使用化石燃料至今已達200年，要在30年內改變能源使用模式進而達成淨零碳排實屬不易，但2023年12月13日結束的第28屆聯合國氣候變化大會 (COP28) 決議文件中指出，有近200個與會國承諾進行能源轉型、脫離化石燃料 (Transitioning away from fossil fuels)，將淘汰無效率的化石燃料補貼，以公正、有序、公平及科學為基礎，在未來十年內加速行動，以利在2050年實現淨零排放。COP28的決議宣言顯示國際已明確承認人類需逐漸擺脫使用化石燃料的習慣，加速減少排放到大氣的溫室氣體煙囪，讓地球戒菸。

由人類過往的經驗來看，溫室效應等危機的發生總是伴隨轉機，因為環境的困境會催生著科技進步，例如在以馬車為主要運輸工具的19世紀，每天街道上的大量馬糞清理一直是英國市政上的難題，但也造就了後續亨利福特 (Henry Ford) 創立福特汽車取代馬力，使汽車運輸至今仍為地面運輸之主力；120年前的萊特兄弟 (Wright brothers) 所駕駛的飛機，雖只以每小時11公里的速度，在離地10英尺的空中飛行了12秒，卻是開創後來人類能在太空飛行並登陸月球之先河^[1]；以往分別造成酸雨和臭氧層破洞的過量二氧化硫和氟氯碳化物排放，至今也獲得改善。綜上，CCS是除了自然碳匯外，當前唯一能將過往已排放至大氣的二氧化碳安全



處置之方法，其中之碳封存技術源自於石油工業，能將二氧化碳導入地下地層內，最終形成固態之碳酸鹽類礦物而封存，雖然當前在國際間，CCS或CCUS在成本上還有突破之空間，完整的商業價值鏈也在持續孕育中，還無法像經歷百年發展的汽車和飛機之經濟模式般便利且可負擔，但如同COP28決議所提，預估未來十年內各國將會大量佈署並開發碳封存場址，加大邁向淨零碳排最後一哩路之步伐。

參考文獻

1. Dale Granger (2023) CO2CRC' s Reservoir is Half-Full and Rising, CCS Solution, PESA News First Quarter.
2. Global CCS Institute (2022) 2022 Global Status of CCS report.
3. Government of Alberta (2022) Monitoring, Measurement and Verification Principles and Objectives for CO2 Sequestration Projects. Alberta Energy.
4. International Energy Agency (2023) CO2 Emissions in 2022. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
5. Lindsey, R. Dahlman, L. (2023) Climate Change: Global Temperature. NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>.
6. National Energy Technology Laboratory (NETL) (2017) BEST PRACTICES: Operations for Geologic Storage Projects (2017 Revised Edition).
7. OGCI (2022) CO2 Storage Resource Catalogue Cycle 3 Report. https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2023/04/CSRC_Cycle_3_Main_Report_Final.pdf
8. Raab, M. and O' Brien, G. (2023) Carbon capture and storage' s role within Australia' s energy transition: necessary, safe, and reliable. The APPEA Journal 63, S419-S422. <https://doi.org/10.1071/AJ22042>
9. Society of Petroleum Engineers (2017) CO2 Storage Resource Management System.
10. Western, A. (2023) Carbon capture and storage – a safe and reliable monitoring and verification plan developed using oil and gas industry core skill sets. The APPEA Journal 63, S468-S472. <https://doi.org/10.1071/AJ22267>
11. 台灣碳捕存再利用協會 (2016)，民眾溝通對碳捕捉及封存之重要性。
12. 經濟部 (2022)，2050 淨零排放路徑關鍵戰略：戰略6—碳捕捉利用及封存；政府科技發展計畫 (2018)，第二期能源國家型科技計畫總期程績效報告 - 減碳淨煤主軸中心小組 / 主軸。
13. 國家發展委員會 (2022)，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。