

論地球物理監測技術（與電阻率斷層掃描） 在二氧化碳地質封存的角色

郭綉娟¹、陳建志^{2*}、董天行³、王子賓⁴、何信緯⁵

摘 要

二氧化碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)技術被視為具有減緩氣候變遷的潛力選項。臺灣擁有適合碳封存的地質條件，發展地質碳封存(Geological Carbon Sequestration, GCS)是一個可行的減碳途徑，但目前缺乏實證數據，突顯了展開先導研究與試驗的重要性。

先導研究試驗和綜合監測對於驗證預測模型、最佳化監測策略以及減少長期儲存不確定性具有重要價值。在規劃階段，必須仔細考慮時間和空間尺度，為不同注入階段選擇適當監控技術，並發展整合多尺度模型，準確預測二氧化碳分布。

地球物理勘探技術的應用和整合對於特徵化地質構造、追蹤注入二氧化碳遷移行為及減少不確定性具有參考意義。綜合利用地震、重力、電學和電磁勘探等方法，可提供互補資訊，實現全面可靠監測。其中，延時電阻率斷層掃描(TL-ERT)技術在初期監測值得重視並參考，可提供有效即時視覺化成像監測，不僅作為技術層面科學基線數據，更是風險溝通對話基礎。

透過開放透明的溝通平台，可提高公眾對CCS技術的瞭解和接受度，從而增進利害關係人的參與和支持。發展具成本效益的監測和模擬策略，結合適當風險溝通途徑，是提升CCS技術整體可行性和推廣的關鍵。地球物理監測技術應用整合有助降低地質不確定性，實應審慎規劃嚴格執行，方可最大限度控制碳封存風險，助於利害關係人參與、增進公眾對CCS技術信心，確保環境安全和公眾利益。

關鍵詞：二氧化碳封存，地球物理探測技術，先導試驗，電阻率斷層掃描(ERT)

1. 前 言

全球暖化已成為當前人類社會面臨的嚴峻環境挑戰。大氣中不斷上升的二氧化碳濃度被公認為是導致全球變暖的主要驅動力。為了遏

制氣候變化的惡化趨勢，聯合國環境高峰會和巴黎協定提出了明確的長期目標，要求各國制定減排計畫和期程，將年均溫升幅控制在攝氏1.5度以下。在此背景下，二氧化碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)應運而生，並

¹ 瑞昶科技股份有限公司 副理

² 國立中央大學地球科學系 教授、中華民國地球物理學會 理事長

³ 瑞昶科技股份有限公司 經理

⁴ 霖昌工程有限公司 經理

⁵ 瑞昶科技股份有限公司 工程師

*通訊作者，電話：03-4227151#65609，電郵：chienchi.chen@g.ncu.edu.tw

收到日期: 2024年07月08日

修正日期: 2024年12月16日

接受日期: 2025年02月10日

被視為減緩溫室氣體排放的有效途徑之一。

CCS技術旨在從化石燃料燃燒或工業製程中捕獲二氧化碳，並將其注入地下深層地質構造中長期封存，從而減少其排放至大氣層中。然而，地質碳封存(Geological Carbon Sequestration, GCS)過程猶存在一些潛在風險，如二氧化碳洩漏、誘發地震、改變地下環境和水資源等，這些風險可能衍生出對環境和人類健康之不利影響。也因此，場址選擇和監測技術需確保碳封存計畫的安全性和有效性，並且只有在充分的風險溝通下，贏得公眾之理解和支持，碳封存計畫才得以順利推動與實施。

不同時空尺度下的地質環境變化需要採用直接和間接的觀測與監測方法，以期掌握各個時間點的狀態及監控指標，降低風險並避免意外情況之發生，俾益於CCS計畫的順利運行。在這過程中，地球物理學的監測技術可以發揮關鍵作用，對碳封存區域的地質、地球化學和流體動力學特性，進行定量之科學描述，達到持續監控封存過程、及時發現異常以採取應對措施之目的。是以，對二氧化碳地質封存監測，於不同時期、不同方法之選擇上，時間與空間尺度之優先釐清，方得以根據具體情境，選擇適當的地球物理技術，以發揮其於監測上的關鍵角色。

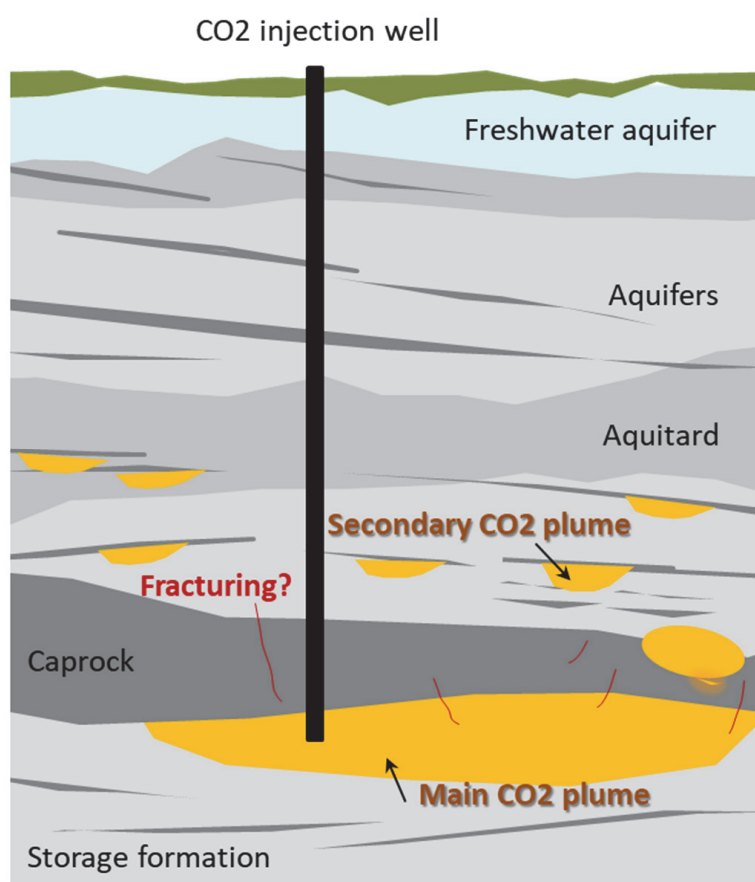
本文將重點探討地球物理監測技術在二氧化碳封存計畫中的應用及其優勢，除介紹常用的地球物理監測(如震測、重力、電力、電磁等)方法外，並剖析它們在識別潛在洩漏路徑、監測二氧化碳遷移和擴散之效益。本文亦欲強調地球物理探測監測技術應用於先導注入試驗中，在降低二氧化碳封存不確定性中扮演的關鍵角色，有助於評估封存區域的完整性和密封性能。本文旨在為二氧化碳封存計畫的安全實施提供技術上之支持，以作為風險溝通之基礎，通過全面審視物探監測技術，從而為實現

聯合國環境高峰會和巴黎協定制定的長期減排目標做出貢獻，助力應對全球氣候變化挑戰。

2. 地球物理探勘技術在二氧化碳地質封存的監測應用

震測探勘(seismic survey)為CCS跨井監測技術之先驅，最早(於1999年)震測探勘時間序列調查(time-lapse)現地實場監測為挪威Sleipner計畫。該計畫持續至2017年期間，進行10次三維地震勘測和4次重力勘測，以持續監測方式瞭解二氧化碳注入於地層中的擴散情況(Chadwick *et al.*, 2010; Chadwick and Noy, 2015; Furre *et al.*, 2017)。近年震測探勘時間序列調查研究重點在二次二氧化碳團塊前緣監測(secondary CO₂ plumes - defined as those CO₂ plumes accumulating outside the intended storage reservoir)，其定義為在預定儲集層之外累積的二氧化碳團塊移棲的監測能力，對於防止二氧化碳意外遷移到地下水資源以及風險和責任管理不可或缺。

二次二氧化碳團塊前緣監測之敏感性分析係以評估堆積厚度、飽和度以及多個深度處堆積的存在的影響，這意味著注入後期所監測影像的二氧化碳體積比注入初期時期小得多，示意如圖1，含有二氧化碳的區域的大小必須足以產生可解釋的訊號(Wang *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2018)。因此，二氧化碳注入後期之監測設計需考量到所需要監測空間範圍之尺度精度、目標監測物分辨率要求、所採用地球物理監測技術(如震測、重力、電力、電磁)的敏感性及現場環境條件的不確定性風險等綜合因素，才能優化監測技術的組合運用和設置，對注入後期的各式地球物理監測技術的配置設計和管理作出最適安排，以保證監測的精確性和可靠性(Lumley, 2021; IEAGHG, 2020; Gasperikova *et*



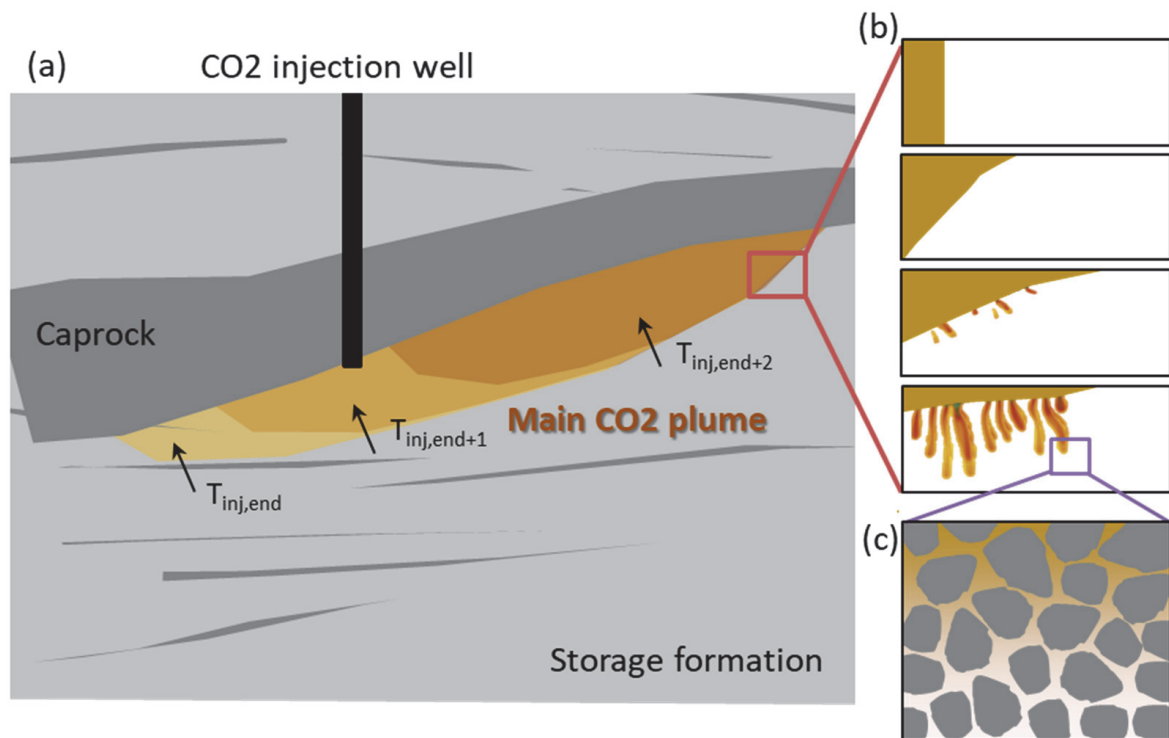
資料來源：修自Birkholzer *et al.*, 2015

圖1 二氧化碳地質封存及在預定儲集層之外累積二氧化碳團塊概念剖面圖

al., 2022)。

於宏觀尺度上，在地質二氧化碳注入封存過程中，注入二氧化碳會優先通過高滲透性砂岩移動(*migration*)，繞過低滲透性砂岩和頁岩而形成優勢流徑(*channeling*)；持續注入過程中，二氧化碳流徑通道增大，於毛細作用和浮力作用下，注入的二氧化碳趨向上升，驅使二氧化碳侵入低滲透率砂岩進行局部封存(*invasion*)，於儲集層頂部擴散和累積，如圖2(a)所示。由於地層中多相流體黏度和流動性的顯著差異，二氧化碳傾向繞過低滲透區域，沿高滲透通道形成多尺度指狀紊流(*viscous fingering*)，如圖2(b)所示；於孔隙尺度上，由於儲集層介質異質性，二氧化碳可能在低滲透層、連通性較差的區域附近，流動緩慢、滯留而發生擴散現象(*spreading*)，如圖2(c)所示。

由於注入的二氧化碳(非濕潤相)逐漸取代原有地層流體(濕潤相、如鹽水)在岩層孔隙中的位置，這種多相流體汲取及渲排(*imbibition and drainage*)的動態物理過程會改變了流體在地層中的分布狀態。隨著二氧化碳團塊移棲，流體分布的變化會導致岩層各個區域的相對滲透率發生改變。相對滲透率決定了該區域對應流體的有效滲透率大小，意味著之前的優勢流徑可能不再是二氧化碳最容易流動的路徑，新的高滲透率區域可能會成為新的優勢流徑。因此掌握初次注入二氧化碳的優勢流徑很重要，因為這將影響二氧化碳在地層中的初始擴散和遷移方向。此外，隨著注入壓力增加，二氧化碳最終可能突破這些低滲透區(*breakthrough*)，繼續在高滲透區移動。突破過程的發生，意味著二氧化碳團塊的範圍擴大，注入效率得到提



註：圖(a)中，二氧化碳沿高滲透通道上升，侵入低滲透砂岩，並在頂部累積。圖(b)，由於黏度差異，二氧化碳傾向形成多尺度指狀紊流繞過低滲透區域。圖(c)，在孔隙尺度上，二氧化碳可能在低滲透區域附近緩慢流動並發生擴散。

資料來源：修自De Paoli, 2021.

圖2 二氧化碳地質封存中的遷移、侵入和擴散行為

高，有利於二氧化碳在儲層中的擴散和封存；但另一方面，也增加了二氧化碳向上或向地表洩漏之風險，對於封存的長期安全性帶來一定的隱憂。

3. 地物監測在降低二氧化碳封存不確定性

二氧化碳地質封存項目中，可靠的潛能評估和預測是關鍵。二氧化碳注入先前的現場特徵監測方法與注入二氧化碳時所使用的方法或適合注入後監測的方法均不同，各階段應有其對應於注入量體於空間、時間尺度上之監測必要性。然而，由於涉及諸多不確定參數，預測的可靠性仍是一大挑戰。

傳統震測為在地表製造人工震波，藉由

與地層間的速度差異，接收震波反射，並於「同中點疊加」(Common Depth Point, CDP)，可以得到地下結構影像。透過地層間震波的走時監測，可以得到地層間P、S波速度及P波品質因子Q等參數，而這些物理參數與二氧化碳飽和度、孔隙率、滲透率、地層黏土含量等地層特徵相關聯，透過其他井下量測技術(如 Reservoir Saturation Tools, RST, logging)可以對其進一步解析。由於地層中二氧化碳氣體增加，會導致P波速度及Q值顯著降低，進而導致量測敏感度上升，在衰減層析成像中透過震波頻率偏移方法及頻譜比方法，皆可用於評估Q值的可靠性，兩種方法在低訊噪比下(Signal-to-noise ratio, SNR = 20 dB)效果良好，而在訊噪比較高時(SNR = 6 dB)，頻率偏移方法比頻譜比好。另外一種震測方法是微震源定位技術

(microseismic monitoring)，這方法是透過發生於地層內部的微地震及事先置於地層間的地震儀，藉由地層注入過程中產生的微小地震訊號，透過事先布設的地震儀陣列接收這些微震訊號，經過適當的訊號處理與定位演算法，可以重建出這些微震源的空間位置分布，可以用於判斷二氧化碳遷移情形。相較於主動源震測，微震源定位是被動式監測，不需要人為產生震源，只需佈設足夠密集的地震儀陣列即可。但它的探測深度通常較主動源震測有限，適用於較淺的地層監測。兩種方法可視實際需求互相搭配運用，全面掌握地層的結構與流體遷移狀況。

重力監測在二氧化碳地質儲存中的應用有其局限性。重力監測主要受到地表位移效應和地下質量變化兩大因素的影響，即使將重力儀放置在地下，仍會受到場址雜訊、地球潮汐、極移、海洋負載、大氣壓力、地下水文及儀器偏移等多種雜訊的干擾，需要進行過濾。在此前提下，不同雜訊過濾方式會導致一定程度的不確定性，低於一定水準的地下密度變化無法被準確檢測。重力監測的性能主要依賴於與地下流體遷移相關的大範圍質量平衡隨時間的變化影響，因此，重力監測更適用於追蹤大範圍二氧化碳團塊的質量遷移，而非精確定位小範圍的變化。整體來說，重力監測雖然受到多種干擾因素的影響，但對於監測大尺度的二氧化碳質量遷移情況仍具有一定價值，可作為其他監測技術(如地震、電磁等)的有效補充。

電測方法又可細分為地表地電阻率斷層掃描(surface Electrical Resistivity Tomography, surface ERT)、井下跨孔電阻率斷層掃描(cross-hole Electrical Resistivity Tomography, CHERT)及綜合兩者的井地電阻率斷層掃描(surface-downhole Electrical Resistivity Tomography, SDERT)等三種方式，其中以surface ERT覆蓋

範圍最廣，但探測深度有限；CHERT由於電極在地下，解析度較高，但安裝工程複雜且技術門檻高；SDERT結合了地表和井下的優點，可追蹤大範圍二氧化碳遷移，但容易受地表雜訊影響。其中，CHERT電極系統需與鑽井套管工程同步進行安裝，越深的井越複雜，需使用特殊絕緣外殼避免短路；在適當深度，也可使用高強度塑膠管材(如HDPE)代替金屬套管安裝電極。SDERT具備前兩方法的優點，與CHERT同步比較，該方法可進一步追蹤大範圍二氧化碳團塊移棲行為，然而，數據易受地表訊噪比影響，可優化井地電極排列的方式予以克服，針對感興趣目標區獲得不同深度的二氧化碳遷移延時數據，對二氧化碳的大範圍遷移情況進行有效監控。ERT是一種靈活且成本相對較低的監測技術，可根據現場條件和監測需求選擇不同模式，但也需要注意每種模式的局限性，合理部署並結合其他監測手段，以獲得更準確的監測結果。

電磁監測是一種成本相對較低的方法，在二氧化碳地質儲存的長期監測中具有重要作用，需要合理選擇和運用。電磁可分為大地電磁法(Magnetotelluric method)、磁電阻率法(Magnetometric Resistivity Method)及控源電磁法(Controlled Source EM)等，其中大地電磁法是被動源方法，利用地球自然磁場探測地層電阻率結構，探測深度大但垂直分辨率較低，且易受人為設施和頻率死區影響，需大量數據處理；磁電阻率法是主動源方法，發射電流脈衝產生二次磁場，易受地層異質性和地形影響，探測深度有限；控源電磁法發射特定頻率電磁波，可長期監測地下電性變化，避免頻率死區問題，可進一步優化監測陣列中的發射器和接收器位置可以使來自感興趣區域的測量訊號最大化，一旦時序電場幅度差異數據出現且超過歷次現場調查經驗設定檢測閾值(detection

threshold)，可能代表出現新的二氧化碳團塊之移棲現象。是以，該監測技術適用於注入後期大面積範圍監測。

整個二氧化碳封存監控計畫需要具備兩大核心能力：一是準確預測注入過程和二氧化碳團塊在地下的移棲分布，為模擬分析提供依據；二是有效監控注入過程，通過先導試驗驗證預測模型、優化監控技術參數、評估計畫整體之經濟性與安全性。若二氧化碳儲集層於在儲油層中，灌注過程中，壓力、時間及二氧化碳與油水的交替影響，二氧化碳與礦物、地層水和原油之間的複雜物理和化學作用會導致二氧化碳的地質儲存量變化。有鑑於不同時期不同形式的二氧化碳封存量及其影響因素都會發生變化，從而導致二氧化碳地質封存量的動態變化。因此，先導試驗對於降低不確定性扮演著核心角色。

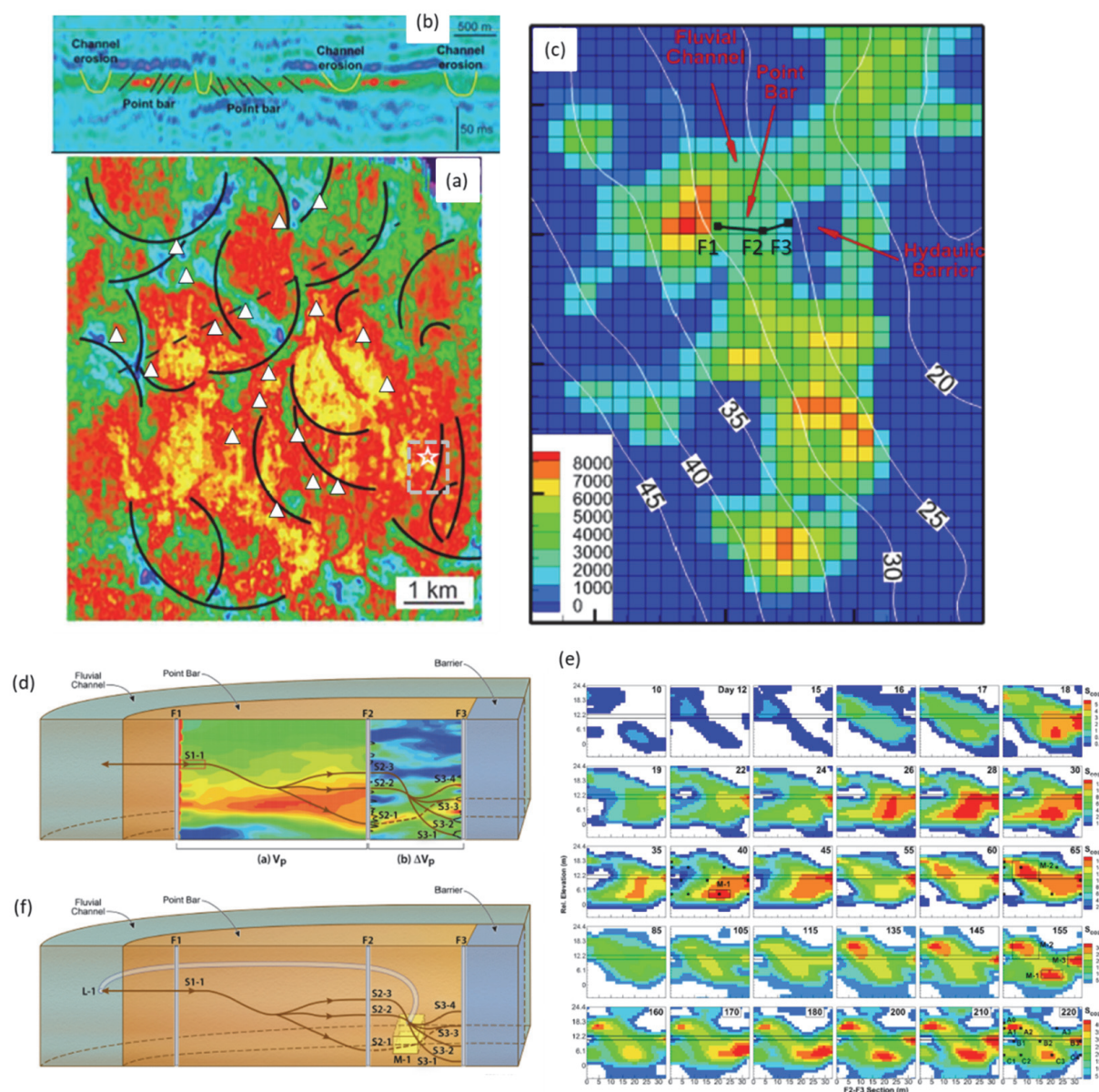
在二氧化碳地質封存的先導試驗階段，不同地球物理監測技術都扮演著重要的角色，幫助降低不確定性。但從整體來看，井下跨孔時間序列地電阻影像剖面法(Time-Lapse CHERT, TL-CHERT)或許是最為關鍵的技術。TL-CHERT具有較高的垂直分辨率，能夠精細監測二氧化碳在地層中的遷移和分布情況，這對於校準預測模型、研究二氧化碳濃度時空分布特徵關係重大。由於發射端和接收端均位於地下，TL-CHERT可以維持長期不間斷的監測，適合密切追蹤注入過程中關鍵參數(如壓力、二氧化碳飽和度等)的動態變化。TL-CHERT數據可用於確定安全的注入壓力上限，評估注入工程的風險，這是先導試驗中不容忽視的關鍵核心任務。與其他方法相比，TL-CHERT監測結果能直接驗證預測模型的準確性並優化監測方案，為後續大規模注入提供依據。

密西西比州Cranfield場址進行的長期二氧化碳注入與儲存監測和分析項目，採用了多種

創新的地球物理監測技術，提供了寶貴的實證數據，收集並整合了不同注入時期的時間序列地電阻影像數據，與其他相關監測數據整合分析，如圖3所示。於注入初期，利用地電阻影像技術，研究人員能夠掌握監測小規模二氧化碳飽和度成像動態，再針對不同規模批次的二氧化碳注入量，進行了注入前、中、後的逐日時序監測，以及其在空間和時間上的相關性變化，如圖3(e)所示，顯示主要流動通道之二氧化碳移棲路徑，結合跨孔震測探勘成像及井測技術(溫度/壓力量測、流體採樣等)繪製場址概念模式，據以描繪三維河道場址概念示意如圖3(d,f)所示，進而透過地表地震探勘成像、後期地電阻影像及示蹤劑測試等技術成像擴大為中型尺度如圖3(c)所示，最後透過地表地震探勘成像成大型尺度如圖3(a,b)所示。於監測結果顯示，實際場址的地層異質性對二氧化碳封存效率和殘餘捕集有顯著影響(Zhou *et al.*, 2020)。這些監測數據有助於解釋在注入和儲存過程中可能發生的一系列重要過程，強調了在二氧化碳地質封存過程中，準確描述和量化地層異質性的重要性，以確保封存的安全性和效率。

4. 時間序列地電阻影像剖面法在二氧化碳地質封存初期監測中的價值

除震測探勘時間序列調查為CCS監測初期發展之外，早期二氧化碳注入現地實場亦同步發展使用其他成熟的非震技術，CHERT亦是國際上CCS監測技術發展的重點項目。CHERT調查首次長期評估是在德國Ketzin場址進行的(Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2016)，用於監測600公尺深度的儲集層。永久井下配合地表ERT陣列運作7年多，其中注入二氧化碳時間為5年。另一個ERT部署成功的一個例子是密西西



註：圖(a)中，底圖為大尺度之時移地震震幅差數據(time-lapse seismic amplitude differences)，符號三角形為注入井、黑弧線為低滲透區如水力屏障位置、虛線為圖(b)施測位置、星號方框為圖(c)試驗模場範圍。圖(c)中，底圖為中尺度之時移地震震幅差數據，指出主要二氧化碳團塊移棲之一個主要通道及三個次要通道，及低滲透區如通道內部彎曲處(point bar)及水力屏障(hydraulic barrier)位置，圖中黑線為圖(d)剖面位置，黑點分別代表F1, F2及F3口井。圖(d)中，底圖為小尺度F1-F2-F3井跨孔震測數據(crosswell seismic inversions)，結合不同物探技術指出不同井間之小規模通道。圖(e)中為F2-F3井之跨井地電阻逐日數據，顯示二氧化碳隨汲取及渲排(imbibition and drainage)過程之飽和度隨時間變化，紀錄了二氧化碳在地層中的分布狀態。圖(f)中，隨著二氧化碳團塊移棲現象，發展出本場址傳輸系統(Fluvial Channel-point bar-barrier)概念模式。

資料來源：修自Zhou *et al.*, 2020.

圖3 密西西比州Cranfield場址不同尺度場址概念模式圖

比州Cranfield場址(Carrigan *et al.*, 2013)，實驗性CHERT系統成功運行了1年多，在超過3,000公尺的深度、二氧化碳注入量約100萬噸之監測

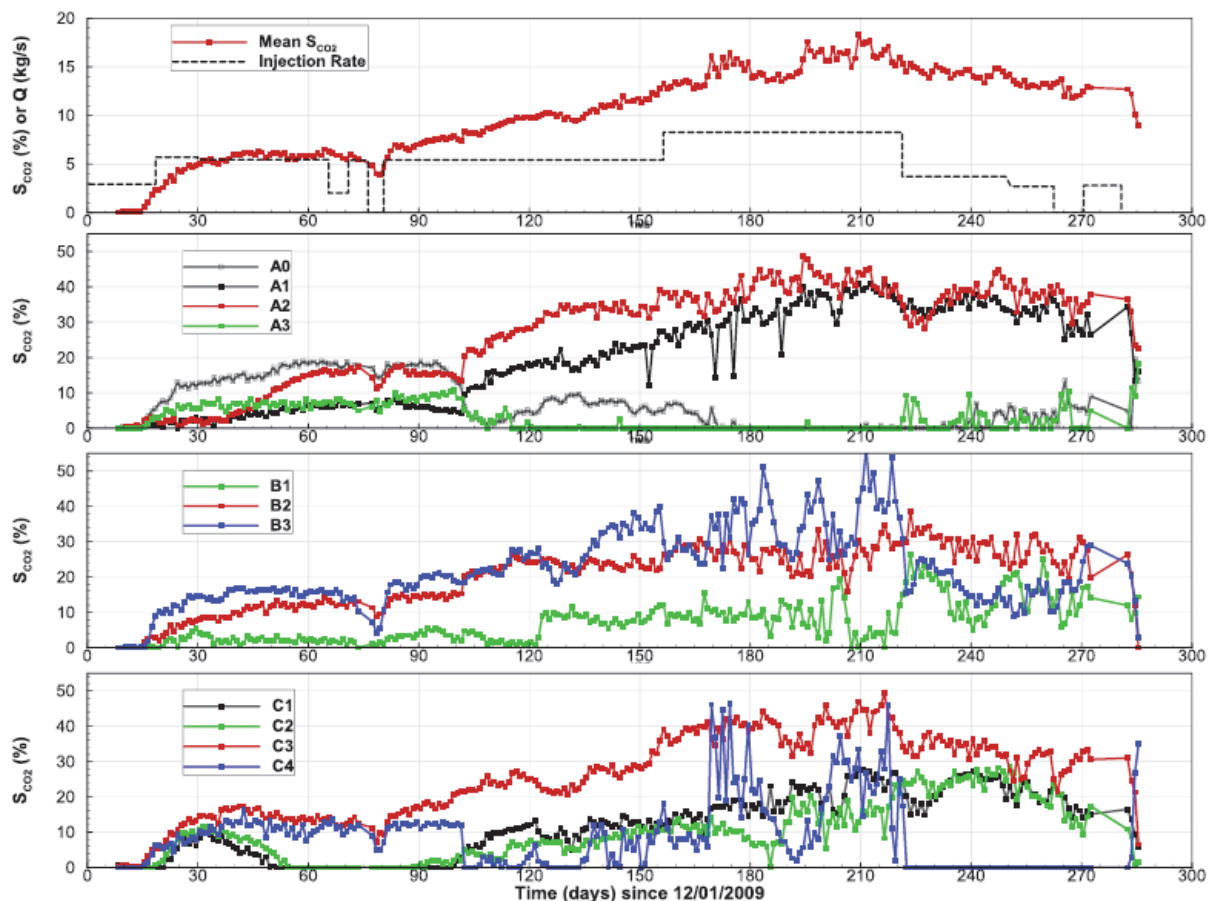
期間獲得了時間序列地電阻影像剖面結果。這兩個場址實場注入計畫都證明了CHERT在小規模地下影像中的價值，因為時間序列地電阻影

像剖面之成像技術可掌握注入初期所感興趣的目標物二氧化碳於地層中的飽和度與傳輸流布之優勢流徑。

圖4顯示了CO₂地質封存計畫之CHERT時序分析觀測結果，透過CHERT選定11個觀測網格(如圖3(e)中A0~A3、B1~B3、C1~C4等)不同位置和地質條件下CO₂飽和度隨時間的變化，以及與注入率的關係，顯示了最大CO₂飽和度 ≥ 0.1 的活躍單元格的平均SCO₂值和CO₂注入率；圖5顯示CHERT衍生的CO₂飽和度逐日影像，顯示動態CTSB (Capillary Trapping and Snap-off Behavior)機制在不同操作階段(注入、汲取、停止注入操作)下，CO₂在地下的分布變化。其

中，特別觀察了中尺度、小尺度等規模流動和特定觀測點的CO₂飽和度變化，這種數據對於理解CO₂在地下的分布和遷移模式非常重要。

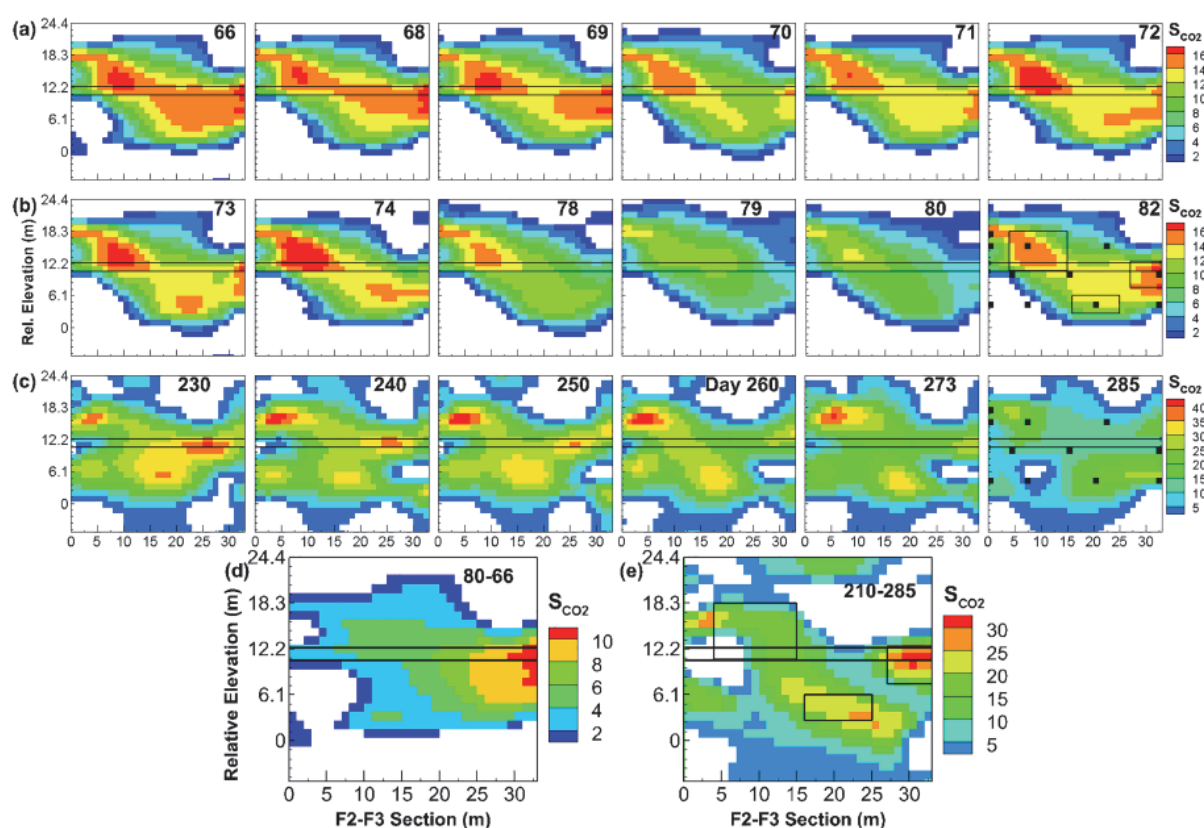
在碳捕獲與封存(CCS)項目中，多孔介質中流體運移過程是CO₂地質封存的一種重要機制，理解這些現象有助於優化CCS項目的設計和操作，優化注入策略，例如通過交替注入CO₂和水來增強捕獲效果，可顯著增加CO₂的儲存安全性和容量。二氧化碳注入的主要目的是長期儲存，必須確保地層的完整性。透過高壓注入於儲集層，注入速率(每小時注入的二氧化碳體積)需嚴謹控制，必須能有效監控注入過程，以確保能將儲集層中的流體擠走，尤其是



註：在11個選定單元格(A0~A3、B1~B3及C1~C4)的ERT衍生CO₂飽和度時間序列，這些單元格代表鄰近F2井(A0, A1, C1, 如黑線)和F3井(B3, C4, 如藍線)，相對低滲透性位置(A3, B1, C2, 如綠線)，以及小型和中型流動通道位置(A2, B2, C3, 如紅線)。這些單元格的位置如圖3(e)所示。

資料來源：Zhou *et al.*, 2020.

圖4 以CHERT時序分析監測計算CO₂飽和度分析



註：跨井地電阻逐日數據顯示了動態CTSB過程：(a,b)初期汲取現象。(c)伴隨注入率降低和停止注入之長期汲取現象。(d,e)上述(a,b及b,c)過程之時序(time-lapse) CO₂飽和度分析。黑色矩形表示中等規模流動通道(M-1、M-2和M-3)，黑色符號表示圖3(e)中所選之時間序列單元格。

資料來源：Zhou *et al.*, 2020.

圖5 於灌注前中後CHERT時序分析監測

在低滲透性地層中，注入速率過高可能導致注入點壓力增加，需要隨時監控注入壓力及注入流量(流速)，以避免對於地層造成過度劈裂、抬昇等不可逆之破壞過程。此外，儲集層的條件(如溫度、壓力、體積、濃度等)，以及可能發生在鑽井附近的礦物溶解和沉澱過程，都會導致注入速率的增加或減少。因此，基於地電阻影像能夠評估對於特定目標物二氧化碳之監控目標的優點(例如初期注入篩段位置、注入區域影響範圍與注入量大小、注入區域增長速率等)，相關專業評估工具如DREAM (Designs for Risk Evaluation and Management)已將ERT影像功能優點應用於檢測二氧化碳監控程序中，該技術所能提供的監測重點是注入初期關鍵參數

的優化(Gasperikova *et al.*, 2020)。

5. 時間與空間尺度對二氧化碳地質封存監測時期方法的選擇

相關監測文獻已經陸續討論針對注入後期監測二氧化碳地質封存的地球物理技術的能力和限制。Gasperikova *et al.* (2022)以二氧化碳每年2.5公噸的速度注入，持續了60年的模擬結果，於時間與空間尺度上的監測頻率進一步探討，指出二次二氧化碳團塊前緣的大小需要15年才能增加一倍，於後期25年內之二氧化碳團塊前緣之橫向增長約500公尺，二氧化碳團塊

於地層頂部積聚體積僅膨脹約10%。在這種情況下，沒有必要進行頻繁的監控活動，建議於大規模注入監測後期，以較低調查成本的延時電磁和重力調查可以根據場地特定條件以滾動式修正，如經過幾次調查確認二次二氧化碳團塊移棲前緣穩定後，下次調查的間隔會增加監測頻率之作法來進行，以延時電磁和/或重力勘測中觀察到的超出預期變化的訊號可作為啟動高精度調查如地震勘測之必要。

美國國家環境保護署(Environmental Protection Agency, EPA)採用了三合系統(Triad Approach)作為其環境評估調查監測策略，主要包括三個組成部分：系統規劃(systematic planing)、動態工作策略(dynamic work strategic)和即時分析技術(real-time measurement)。三合系統的心理理念是在整個調查過程中，持續進行數據收集、分析和技術應用，以確保及時做出適當的決策，旨在以更具成本效益和技術效率的方式進行環境評估調查工作。CCS監測品質可應用三合系統之調查策略與觀念，綜合使用多種地球物理監測技術可以互補不足，考慮震測、重力、電力和電磁技術等各種地球物理監測技術都對不同的地下特性敏感能力，如震測速度取決於體積模量、切變模量和密度，而重力反應取決於密度，電阻率對流體性質的變化敏感等。這些地球物理探測技術都對地層特性(例如孔隙度、孔隙流體和流體飽和度)的變化敏感，需結合採樣及成分分析，將所需數據進行彙整，透過數值模擬方法進行評估與校準，據以提高量化評估和預測二氧化碳團塊移棲流佈的準確性。

在實際應用中，在規劃二氧化碳地質封存項目的調查監測工作時，需要綜合考慮以下幾個關鍵因素：(1)探測目標-根據監測的具體目的(如洩漏檢測、封存空間特性等)選擇適當技術，於系統規劃階段確定評估和調查的目標、

範圍和初步方法。(2)地質條件-不同地質環境對各種地球物理探測技術的適用性不同，需要根據現場條件權衡，需動態工作策略則根據現場情況和新數據進行持續調整。(3)成本預算-在既定預算下，權衡選擇性價比較高的技術組合，包括各種現場即時分析工具，用於快速獲取和解釋數據。二氧化碳封存監測工作時需要的系統性、靈活性和經濟性。是以，借鏡國外調查監測經驗，採用三合系統調查策略與觀念，允許根據現場情況動態調整工作計畫，根據具體的探測目標、地質條件和建置施作等因素來權衡選擇合適的技術組合，彙整各式物探技術應用於CCS監測之技術規劃重點、注意事項及限制與適用時機如表1，從而最大限度地提高效率 and 降低成本，以期能縮短二氧化碳地質封存項目之調查及監測所需時間及節省經費，以提高整體監測之有效性。

6. 結論與建議

碳捕捉與地質封存技術的推廣確實面臨著社會接受度的重大挑戰。早期苗栗永和山碳封存計畫遭遇的民眾反對聲浪，突顯了風險溝通與社會參與在此過程中的關鍵性。民眾對二氧化碳外洩或誘發地震等潛在風險存有合理疑慮，這需要透過規劃階段的詳實預測模擬和注入先導試驗設計來有效評估和管控。值得重視的是，注入先導試驗不僅可校準預測模型、確定安全注入參數，更重要的是能掌握初始注入的關鍵監控數據，其間如跨井電阻率成像技術能精確解析灌注初期井孔週邊小區域的二氧化碳團塊空間樣態，對地層注入作業初期的掌控尤具有重要參考價值。後續的即時性成像化監測資訊的透明公開，更有助於主動解答民眾疑慮，建立民眾對相關作業的信任關係。

事實上，在注入前中後的各個階段，需要

表1 各式物探技術應用於CCS監測技術規劃重點及適用時機

技術	技術規劃重點	注意事項及限制	應用時機
震測	能夠探測地層的速度和密度變化，對於物性變化大的區域較為敏感，透過高頻震波在非固相介質中的快速衰減特性，可以獲得高分辨率的地下結構圖像，判斷地層間孔隙的飽和狀態。	僅透過震測難以解釋數據，需搭配其他物探方法或資訊；當地層物性變化較小時，震波頻率和震幅的變化就不太敏感，難以清楚偵測到變化。初期階段，由於注入量有限，造成物性變化不大，因此震測的解析度和精度會較低；在複雜地質條件下，解釋數據可能較為困難。	適用於灌注前基線調查、灌注中期或後期注入量測。適合大規模、大範圍注入量測並結合其他方法互相補充，以獲得最佳效果。
重力	對密度變化非常敏感；不需要人工源，對環境影響較小；設置成本較低，固定後無需維護，即可長時間測量，並對於大範圍質量追蹤準確度較高，可用於加強資料信心程度。	分辨率相對較低；受到地表地形和地質構造的影響較大。受多項天然及人為因素影響，在過濾的過程中，會受限雜訊的強度，導致資料精度受影響。	適合大規模、大範圍注入量測並結合其他方法互相補充，以獲得最佳效果。
電測	對於流體變化較為敏感，可透過地表、井下等不同位置的設置，針對廣、深等區域進行針對性的量測；直接以電阻率分布轉換為二氧化碳飽和度，注入形成過程據以成像化。	地表及井下的地電阻方法具有不同的限制，前者難以長時間穩定維持，後者需要在鑽井中佈設電極陣列，對鑽井作業和儀器要求技術門檻較高。	適用於灌注前基線調查、灌注初期或後續週期性不同規模批次注入量測。應用於先導試驗、大規模初期、中期注入監測。
電磁	對電阻率變化敏感，可以探測流體性質；操作相對簡單，量測成本低，得以量測不同深度區域的電性變化。	受限於地表天然及人為噪音影響，然而資料解釋及判斷上較為困難，且具備非唯一性，同時在垂直方向上的辨識度較差，在某些頻率上會出現頻率死區，需以其他方法(採用多頻率)進行克服。	適合大規模、大範圍注入量測並結合其他方法互相補充，以獲得最佳效果。

資料來源：本研究彙整。

綜合運用震測、重力、電力、電磁等多種地球物理監測技術，以最大程度降低工程之不確定性。只有透過多重技術的相互印證，並透明公開監測結果，方能有效傳達風險管控的決心與

能力，進而贏得社會大眾的理解與支持。風險溝通與社會參與絕非權宜之計，而是碳捕捉與封存技術能否成功推廣的關鍵所在。

參考文獻

- Birkholzer, J. T., C. Oldenburg and Q. Zhou, 2015. CO₂ Migration and Pressure Evolution in Deep Saline Aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 203-220. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.03.022>
- Carrigan C. R., X. Yang, D. J. LaBrecque, D. Larsen, D. Freeman, A. L. Ramirez, W. Daily, R. Aines, R. Newmark, J. Friedmann and S. Hovorka, 2013. Electrical resistance tomographic monitoring of CO₂ movement in deep geologic reservoirs. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18, 401-408.
- Chadwick, A., G. Williams, N. Delepine, V. Clochard, K. Labat, S. Sturton, M.-L. Buddensiek, M. Dillen, M. Nickel, A. L. Lima, R. Arts, F. Neele and G. Rossi, 2010. Quantitative Analysis of Time-Lapse Seismic Monitoring Data at the Sleipner CO₂ Storage Operation. *Lead. Edge*, 29, 170-177.
- Chadwick, R. A. and D. J. Noy, 2015. Underground CO₂ storage: demonstrating regulatory conformance by convergence of history-matched modeled and observed CO₂ plume behavior using Sleipner time-lapse seismics. *Greenhouse Gas Sci Technol*, 5, 305-322.
- Furre, A. K., O. Eiken, H. Alnes, J. N. Vevatne and A. F. Kiær, 2017. 20 Years of Monitoring CO₂-injection at Sleipner. *Energy Procedia*, 114, 3916-3926.
- De Paoli, M., 2021. Influence of reservoir properties on the dynamics of a migrating current of carbon dioxide. *Physics of Fluids*, 33(1), 016602.
- Gasperikova, E., D. Appriou, A. Bonneville, Z. Feng, L. Huang, K. Gao, X. Yang and T. Daley, 2022. Sensitivity of geophysical techniques for monitoring secondary CO₂ storage plumes. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 114.
- Gasperikova, E., T. Daley, D. Appriou, A. Bonneville, Z. Feng, L. Huang, X. Yang, Z. Wang, R. Dilmore and K. Gao, 2020. Detection Thresholds and Sensitivities of Geophysical Techniques for CO₂ Plume Monitoring; NRAP-TRS-I-001-2020; DOE. NETL-2021.2638; NRAP Technical Report Series; U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory: Pittsburgh, PA.
- IEAGHG, 2020. Monitoring and modelling of CO₂ storage: the potential for improving the cost-benefit ratio of reducing risk, IEA/CON/19/255, IEA greenhouse gas R&D Programme.
- Lumley, D., 2021. Long-Term Seismic Monitoring of CO₂ Sequestration Projects for 50-100 Years. AGU, New Orleans. December 12-17.
- Wang, Z., W. Harbert, R. Dilmore and L. Huang, 2018. Modeling of time-lapse seismic monitoring using CO₂ leakage simulations for a model CO₂ storage site with realistic geology: application in assessment of early leak-detection capabilities. *Int. J. Greenh. Gas Control*, 76, 39-52.
- Yang, Y. M., R. M. Dilmore, G. S. Bromhal and M. J. Small, 2018. Toward an adaptive monitoring design for leakage risk – closing the loop of monitoring and modeling. *Int. J. Greenh. Gas Control*, 76, 125-141.

Zhou, Q., X. Yang, R. Zhang, S. A. Hosseini, J. B. Ajo-Franklin, B. M. Freifeld, T. M. Daley and S. D. Hovorka, 2020. Dynamic processes of CO₂ storage in the field: 1. Multiscale

and multipath channeling of CO₂ flow in the hierarchical fluvial reservoir at Cranfield, Mississippi. *Water Resources Research*, 56.

The Role of Geophysical Exploration Techniques in Geological Carbon Sequestration

Hsiu-Chuan Kuo¹ Chien-Chih Chen^{2*} Tien-Hsing Tung³
Tzu-Pin Wang⁴ Hsin-Wei Ho⁵

ABSTRACT

Carbon Capture and Storage (CCS) has emerged as a promising technology for mitigating climate change by reducing anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emissions. Geological formations in Taiwan and the surrounding Taiwan Strait possess favorable characteristics for CO₂ sequestration, making Geological Carbon Sequestration (GCS) a viable option for reducing the nation's carbon footprint. However, a lack of empirical data and pilot studies on CO₂ storage in Taiwan's subsurface environments poses challenges for regulatory development and risk assessment. This underscores the urgency and importance of conducting comprehensive pilot research and experiments.

Pilot injection tests and monitoring programs are invaluable for validating predictive models of CO₂ plume migration, optimizing monitoring strategies, and reducing uncertainties associated with long-term storage. During the planning phase, temporal and spatial scales must be carefully considered when selecting appropriate monitoring techniques for different stages of the injection process. The operational evaluation of predictive simulations and monitoring solutions is crucial for ensuring the successful implementation of CCS projects. Different injection stages necessitate varying monitoring technology requirements, and the development of integrated multi-scale models is essential for accurately predicting the distribution of injected CO₂.

The application and integration of geophysical exploration and monitoring technologies are vital for characterizing geological structures, tracking the migration behavior of injected CO₂, and reducing uncertainties. The comprehensive utilization of seismic, gravity, electrical, and electromagnetic methods can provide complementary information, enabling comprehensive and reliable CO₂ sequestration monitoring. Notably, the time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) technique holds great potential for initial monitoring of geological CO₂ storage, offering effective and immediate visual imaging. It not only serves as scientific baseline data at the technical level but also serves as the basis for risk communication dialogue.

Through an open and transparent communication platform, the public's understanding and acceptance of CCS technology can be improved, enhancing thereby stakeholder participation and support. Developing cost-effective monitoring and simulation strategies, combined with appropriate risk communication channels, is key to improving the overall feasibility and promotion of CCS technology. The integration of geophysical monitoring technology applications can help reduce geological uncertainty and should be carefully planned and strictly implemented to maximize the control of carbon sequestration risks, help stakeholders participate, increase public confidence in CCS technology, and ensure environmental safety and public interests.

Keywords: Geological Carbon Sequestration, Geophysical Exploration, Pilot Trials, Electrical Resistivity Tomography.

¹Deputy manager, Apollo Technology Co., Ltd.

²Professor, Department of Earth Sciences, National Central University; Chairman, Chinese Taipei Geophysical Society.

³Manager, Apollo Technology Co., Ltd.

⁴Manager, Geophysical Technology & Engineering Co., Ltd.

⁵Engineer, Apollo Technology Co., Ltd.

*Corresponding Author, Phone: +886-3-422-7151#65609, E-mail: chienchih.chen@g.ncu.edu.tw

Received Date: July 08, 2024

Revised Date: December 16, 2024

Accepted Date: January 10, 2025