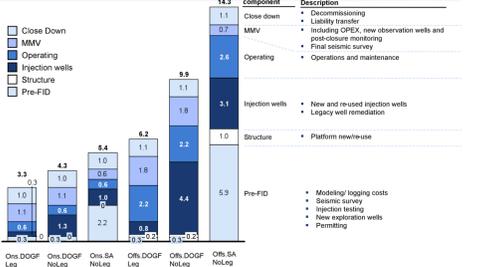


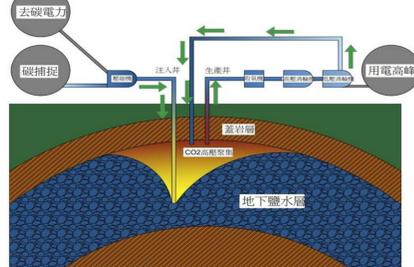
研究簡介及目的

為應對全球氣候變遷與2050淨零排放目標，地質碳封存 (Geological Carbon Storage, GCS) 是關鍵的減碳技術，然而GCS場址的建置與營運成本高昂(圖一)，限制了其在臺灣廣泛應用。

本研究探討利用地質碳封存場址進行壓縮空氣儲能(Compressed Air Energy Storage, CAES)之應用，以封存之二氧化碳取代傳統壓縮空氣儲能中的空氣，為碳封存基礎設施提供加值應用，將其從單純的環境成本中心轉變為兼具儲能效益的資產。本研究透過數值模擬方法，建立背斜構造地質模型，模擬二氧化碳在離峰電力時段被壓縮注入儲集層，待用電高峰時段將高壓二氧化碳採出，經渦輪機膨脹發電，並使用去碳電力將捕捉的二氧化碳及發電後之二氧化碳注回地底的完整循環過程(圖二)，重點分析儲層壓力變化、系統穩定性、封存效率，並計算整個系統的能量轉換效率與經濟效益，以評估此聯合技術的可行性。



圖一、不同類型碳封存場址之單位封存成本
IEAGHG The Costs of CO₂ Storage



圖二、GCS與CAES聯合技術示意圖

研究方法

為模擬CO₂在地下含水層中的注入、遷移與生產的複雜過程，因此本研究採用數值模擬方法進行，使用的數值模擬軟體為加拿大Computer Modelling Group Ltd.(CMG)所開發的GEM模擬器。

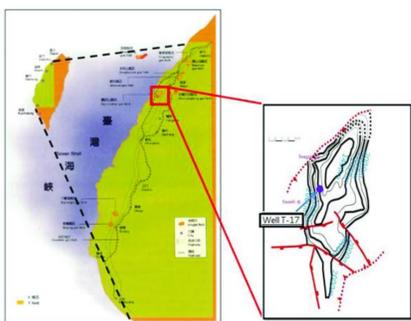
GEM是一套能處理多相、多成分、非等溫與反應性流體行為的高階組合物儲層數值模擬軟體，特別適用於處理CO₂-鹽水-岩石系統中的孔隙尺度複雜流動行為、毛細壓力、溶解度驅動機制。



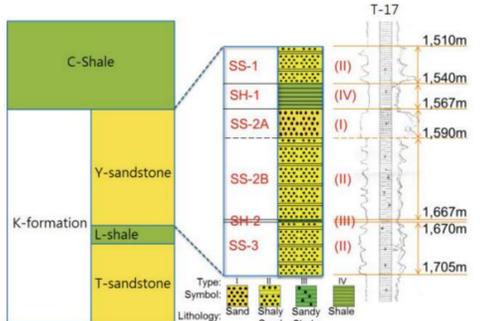
區域地質概述

本研究的儲層為位於台灣西北部T-地區的Y-砂岩層(圖三)，Y-砂岩層是K-砂岩層的一部分，K-砂岩層分為三個層段：Y-砂岩層、L-頁岩層和T-砂岩層，Y-砂岩層是K-砂岩層的頂層，其上覆蓋著不透水的C-頁岩層，C-頁岩層厚約300米，滲透性極低，因此被認為是良好的蓋層，在二氧化碳注入Y-砂岩層進行封存後，可以防止二氧化碳洩漏。Y-砂岩層下方是S-頁岩層，被視為二氧化碳封存層(即Y-砂岩層)的不透水下邊界，有助於為注入的二氧化碳提供安全封存。

根據地球物理測井分析，Y-砂岩為砂頁岩層序地層，自上而下可劃分出5個主要層位(圖四)：SS-1(頂層砂岩孔隙率0.15)、SH-1(第一層頁岩孔隙0.025)、SS-2(中層砂岩)、SH-2(第二層頁岩孔隙率0.05)和SS-3(底層砂岩孔隙率0.15)。SS-2層依岩性特徵再細分為SS-2A(SS-2上段孔隙率0.2)和SS-2B(SS-2下段孔隙率0.15)。SS-1、SS-2B和SS-3層的岩性均為泥質砂岩，SS-2A為砂岩。



圖三、Y-砂岩層位置與結構圖



圖四、Y-砂岩層構造示意圖

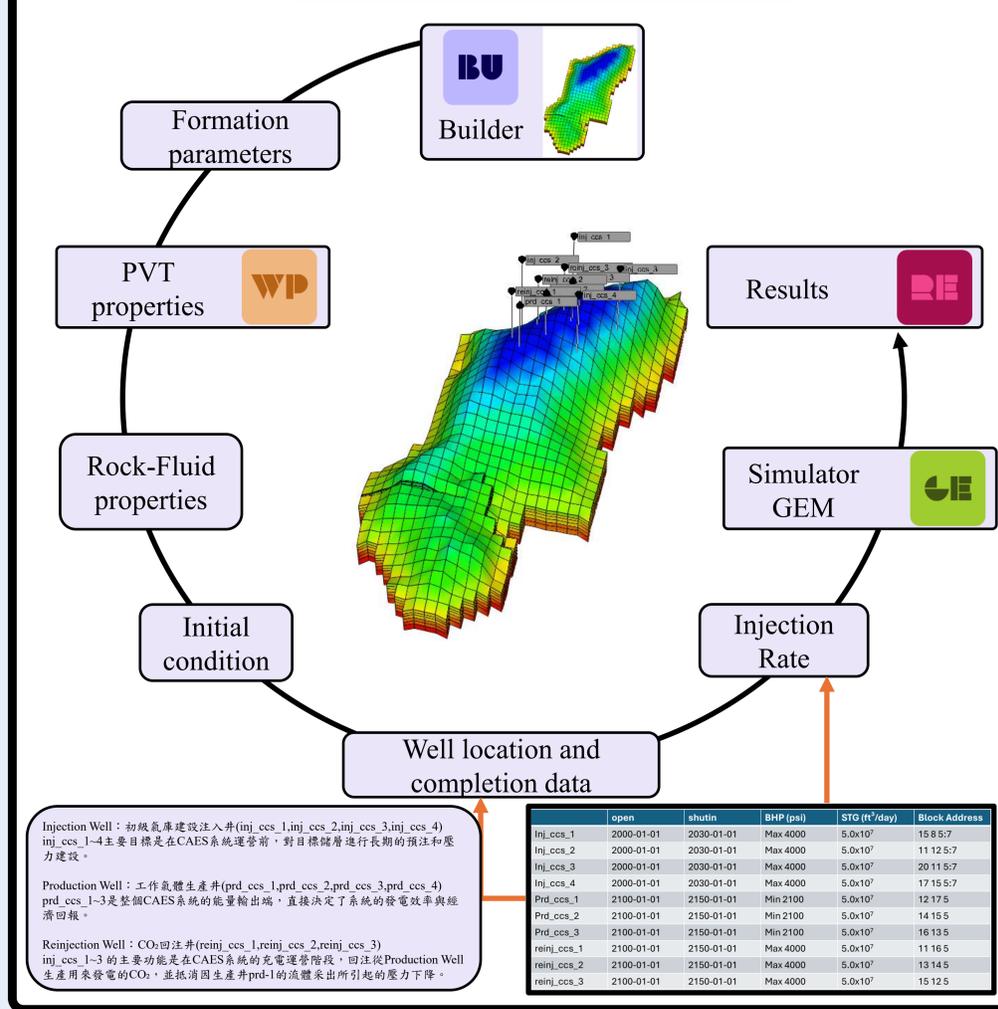
預期成果

- 獲得地質碳封存與壓縮空氣儲能聯合技術之模擬結果
- 提出聯合技術之可行性及應用方法。
- 產出聯合系統之發電效能
- 擬定適用於臺灣的地質場址篩選標準。

參考資料

- European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants (ZEP), & IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). (2011). The costs of CO₂ storage: Post-demonstration CCS in the EU. ZEP.
- Hsieh, B.-Z., Wu, C.-Y., Tseng, C.-C., Chen, T.-L., & Lin, Z.-S. (2013). Safety-based injection strategy for carbon dioxide geological sequestration in a deep saline aquifer with complex sandstone-shale sequences: A case study from Taiwan. Energy Procedia, 37, 4698-4711.
- Rabi, A. M., Radulovic, J., & Buick, J. M. (2023). Comprehensive review of compressed air energy storage (CAES) technologies. Thermo, 3(1), 104-126.

數值模擬流程



研究流程

CO₂壓縮儲能容之地質模型建立

將構造圖數位化後，將欲研究的構造建立成網格系統，接下來在各網格內輸入所需的各項參數，分別為：地層參數(地層孔隙率、滲透率)、流體壓力-體積-溫度 (PVT) 參數、岩石流體特性 (相對滲透率、毛細壓力等)、地層初始狀態參數 (地層初始溫度、地層初始壓力、孔隙內物質之飽和度)。完成上述設定後，進行完井設計以及生產條件設定，即完成數值計算模式。

二氧化碳封存及生產模擬計算

注入井以特定的注入率及注入時間向儲集層注入CO₂，注入井的位置設置在構造的低區，注入的CO₂利用流體密度差所產生的驅動力將向構造高區移動，在構造高區聚集後，將地層水置換在外，形成一個具備集層壓力的二氧化碳儲氣容。

生產井的配置主要是以位於構造高區為考量，實際的穿孔區需要視上一步驟的CO₂儲能容的累積體積而定，回注井則設置在生產井附近，在合宜的產氣率之下，將所封存的CO₂當作壓力能的工作流體，利用一口或多口生產井將高壓的CO₂生產至地表，再回注於儲集層，並推估其發電效率。

生產井與地面發電廠之發電量

為評估本聯合技術的能量轉換可行性，建立了一套基於理想氣體假設的熱力學模型。其中，壓縮與膨脹的核心過程均採用理想等熵模型作為分析基礎，並引入效率參數以貼近實際工況。

壓縮階段：耗功計算

在理想等熵壓縮中，單位質量的CO₂所需的功 (w_c) 可由焓變計算： $\Delta h_c = C_p(T_{out} - T_{in})$

其中 T_{out} 為等熵壓縮後的出口溫度，可由下式計算： $T_{out} = T_{in}(p_{out}/p_{in})^{(\gamma-1)/\gamma}$

考量到壓縮機的實際效率 (η_c)，實際消耗的總功率為： $P_{compressor} = (\dot{m} \times \Delta h_c) / \eta_c$

其中， \dot{m} : 質量流率 (kg/s), C_p : CO₂定壓比熱 (約 850 J/kg·K), γ : CO₂比熱比, T_{out} : 壓縮機出口溫度 (K), T_{in} : 壓縮機入口溫度 (K), p_{out} : 壓縮機入口壓力 (Pa), p_{in} : 壓縮機出口壓力 (Pa), η_c : 壓縮機效率

膨脹階段：發電功率計算

在理想等熵膨脹中，單位質量的CO₂可釋放的最大焓降 (Δh_e) 為： $\Delta h_e = C_p(T_{in} - T_{out})$

其中 T_{out} 為等熵膨脹後的出口溫度，可由下式計算： $T_{out} = T_{in}(p_{out}/p_{in})^{(\gamma-1)/\gamma}$

考量到渦輪機與發電機的實際效率 (η_t)，實際輸出的總電功率為： $P_{electric} = \dot{m} \times \Delta h_e \times \eta_t \times \eta_g$

總效率是膨脹機與發電機效率的乘積： $\eta_{total} = \eta_t \times \eta_g$

其中， \dot{m} : 質量流率 (kg/s), T_{out} : 渦輪機出口溫度 (K), T_{in} : 渦輪機入口溫度 (K), p_{in} : 渦輪機入口壓力 (Pa), p_{out} : 渦輪機出口壓力 (Pa), η_t : 渦輪機效率, η_g : 發電機效率

系統可行性評估

本技術的整體可行性，最終由往返效率 (Round-Trip Efficiency, RTE) 來評估，其定義為輸出電能與輸入耗能的比值： $RTE = (\text{輸出的總電能}) / (\text{壓縮消耗的總電能}) = P_{electric} / P_{compressor}$