

114 年度氣候變遷創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號+名稱	碳先封 013
作品中文名稱	礦化封存實現碳中和的創新技術探索
作品英文名稱	Deep Rock Exploration: Innovative Technology for Carbon Neutrality through Mineralization

參賽學校：國立宜蘭大學、國立臺灣大學

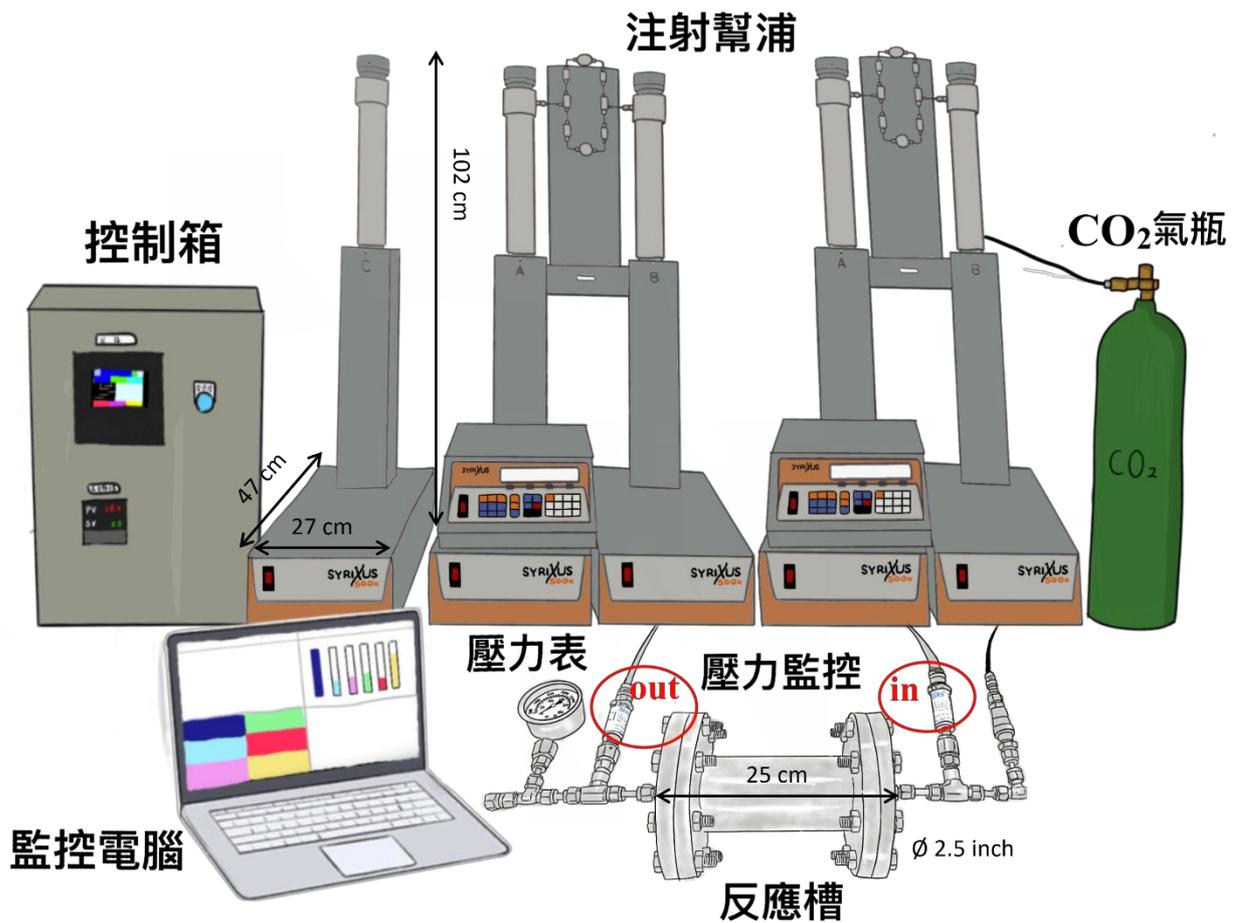
指導老師：楊汶達 助理教授

團隊成員：郭芷晴、廖庭渝、張宸唯

目錄

作品示意圖.....	1
1. 摘要.....	2
1.1 中文摘要.....	2
1.2 英文摘要.....	2
2. 設計構想.....	3
3. 作品材料及說明.....	5
3.1 灌注實驗岩心.....	5
3.2 自動灌注系統實驗設備.....	7
4. 創作特點及創意說明.....	10
5. 作品應用範圍及發展潛能.....	13
5.1 解決問題與技術價值.....	13
5.1.1 CCS 捕捉後的二氧化碳封存.....	13
5.1.2 澎湖海水淡化廠廢棄濃鹽排水再利用.....	13
5.1.3 設備技術.....	14
5.2 發展潛能.....	14
5.2.1 礦化量估算.....	14
5.2.2 應用潛力.....	15
5.2.3 發展優劣.....	15
6. 工作分配.....	16
實作成品照片.....	17
參考資料.....	18

作品示意圖



本作品以 5 台針筒幫浦、灌注反應槽、監控電腦及控制箱組成，每個針筒幫浦為 102 × 27 × 47 (cm)、灌注反應槽之反應腔體依岩心尺寸設計，直徑 2.5 吋長度為 15 公分。幫浦可反應壓力、灌注流速與高濃鹽水與二氧化碳之比例。

1. 摘要

1.1 中文摘要

因應氣候變遷與淨零碳排目標，本研究模擬超臨界二氧化碳與濃鹽廢水灌注玄武岩，促進礦化反應並評估固碳效率。此技術結合台灣地質特性，具應對氣候變遷與碳交易潛力，為企業提供經濟與環保兼具的解決方案。

1.2 英文摘要

In response to climate change and net-zero goals, this study simulates injecting supercritical CO₂ and brine into basalt to enhance mineralization and assess carbon storage efficiency. Leveraging Taiwan's geological features, this technique offers high potential for climate mitigation and carbon trading, providing cost-effective, eco-friendly solutions for industries.

2. 設計構想

雖全球平均溫度上升在地質尺度上是必然的結果，然而因工業迅速發展，全球溫室氣體之排放量自 1970 年至 2022 年以極快的速率增加(圖 1)，使得全球氣候變遷問題日益嚴重，影響地球及所有生物的永續。淨零碳排便成為近年各國欲努力之目標，即將人為排放量降低，並且透過自然碳匯及負碳技術 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS; Carbon Capture and Storage, CCS) 與人為排放抵銷。自第 26 屆聯合國氣候變遷大會 (Conference of the parties, COP26)，格拉斯哥氣候協議便已要求提交 2050 低碳發展策略，在 COP28 更是進行第一次全球盤點 (First Global Stocktake, GST)，檢視 2015 年 (COP25) 通過的巴黎協議 (Paris Agreement) 結果。我國亦提出 2050 年淨零轉型之目標，預計以能源、產業、生活及社會等四大轉型，以科技研發及氣候法治之基礎，制定計劃落實轉型，本研究便為發展負碳的技術及台灣碳封存之調查。

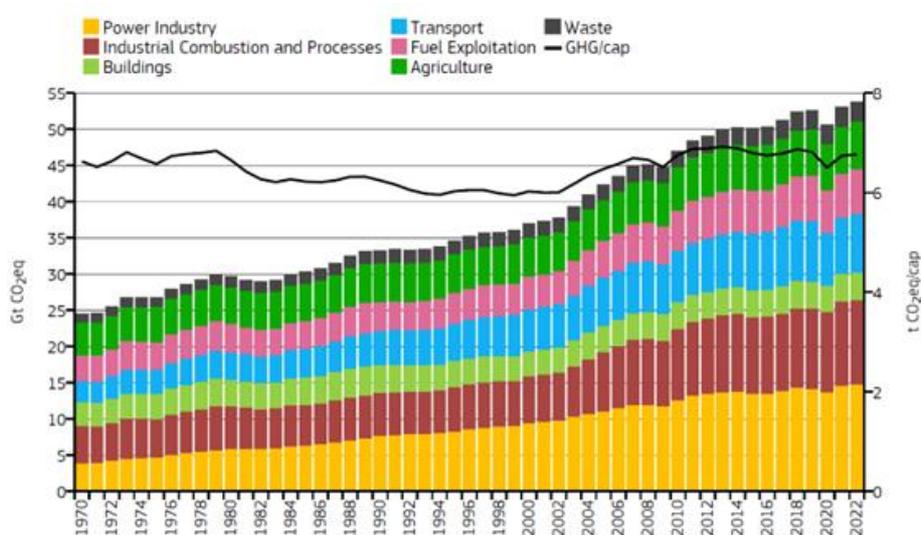


圖 1、全球溫室氣體排放量 (Crippa *et al.*, 2023)

碳捕捉、再利用與封存 (CCUS) 有多樣的應用，因此國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 及北歐能源研究中心 (Nordic Energy Research, NER) 表示 CCUS 為 2030 年後降低工業二氧化碳排放量的重要技術 (McLaughlin *et al.*, 2023)。碳封存技術可分為地質封存、海洋封存、礦化封存三類 (IPCC, 2005)，地質封存風險較低且最具可行性 (Aminu *et al.*, 2017)。海洋封存因海水體龐大，所以有較大儲存空間，但具有洩漏而影響環境的風險以及較高的成本 (Huijgen *et al.*, 2003)。礦化封存是目前最安全的封存技術，但是反應時間相當緩慢 (Teir, 2008)。

進行礦化封存，二氧化碳溶於水中形成碳酸根，與二價金屬離子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+}) 反應形成碳酸鹽沉澱，而玄武岩的組成中，約有 25% 之鈣、鎂及鐵氧化物，提供較油氣儲庫高的反應性，且地表含量高使之成為更有潛力作為碳封存之環境 (Gislason and Oelkers, 2014; Lin, 2016)。若以地質封存方式，要達到與礦化封存相同安全程度需要數萬年 (IPCC, 2005)，若將二氧化碳與水混和注入玄武岩，兩年內轉化率可達 95% (Matter *et al.*, 2013)。

雖使用淡水與二氧化碳混合可獲得很高的轉換率，但淡水為珍貴資源，因此本研究擬以廢棄濃鹽水與二氧化碳混合，在超臨界流體的狀態下，透過不同方法如調整濃鹽水及二氧化碳比例、溫度

碳先封

壓力條件灌注至岩心設備中，並於實驗過程中取出濃鹽水進行成分分析，藉此了解各條件下對加速礦化技術之影響，找出最佳加速礦化條件。

本團隊創意構想源自常用於材料反應之水熱合成法 (autoclave hydrothermal method)，透過不鏽鋼反應釜設計與改良，結合高壓灌注幫浦的特性，設計出連續灌注高壓反應釜，創意構想如圖 2 所示，係利用岩心及二氧化碳、濃鹽排水在工作溫度 (常溫至 100°C) 以及壓力(常壓至 5,000 psi) 條件下進行反應，模擬深度約 2,000 公尺的二氧化碳儲集層的各项反應條件及反應過程中的礦化封存反應趨勢，用以取得最佳化灌注條件以及加速二氧化碳礦化速率。

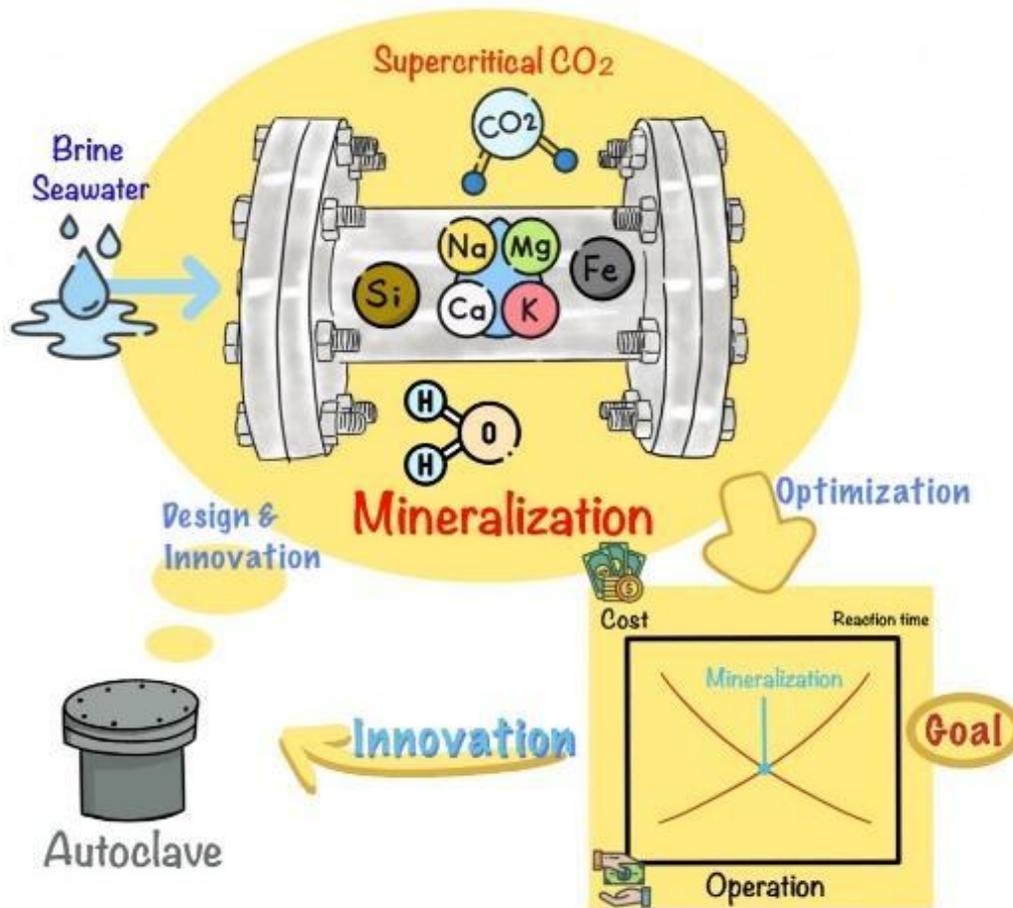


圖 2、創意構想示意圖

3. 作品材料及說明

3.1 灌注實驗岩心

選定地礦中心於澎湖所鑽取之 7 處共 42 段 (如圖 3 至圖 6 所示) 進行自動灌注系統礦化實驗反應，觀察實驗過程中岩心及廢棄濃鹽排水與二氧化碳混合的超臨界態混合多相流之變化。玄武岩取樣地點為澎湖白沙鄉 (圖 3) 紅點標示處，之後需要進行岩石前處理包括切塊、研磨成 15 cm 長岩心柱才可用來進行高壓實驗。



圖 3、澎湖海淡廠及岩心取樣地點

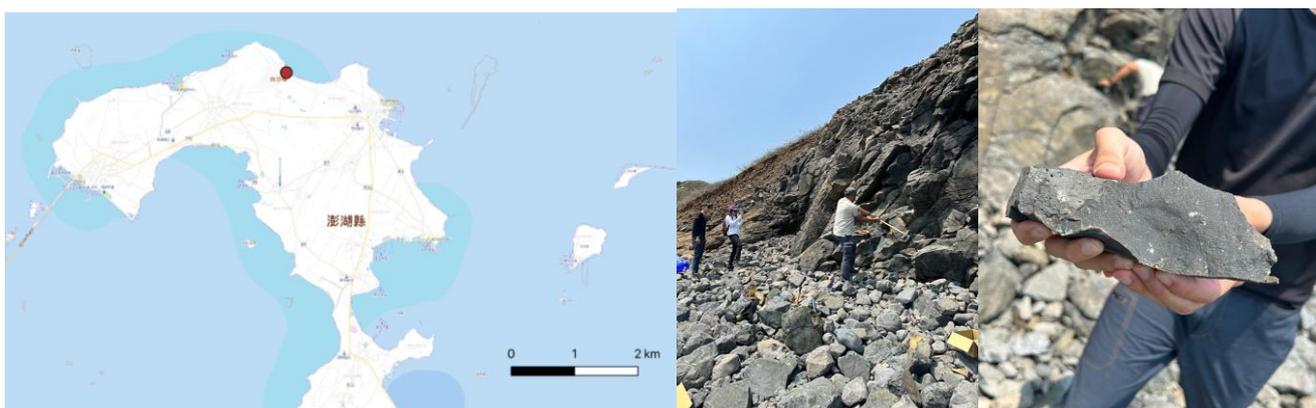
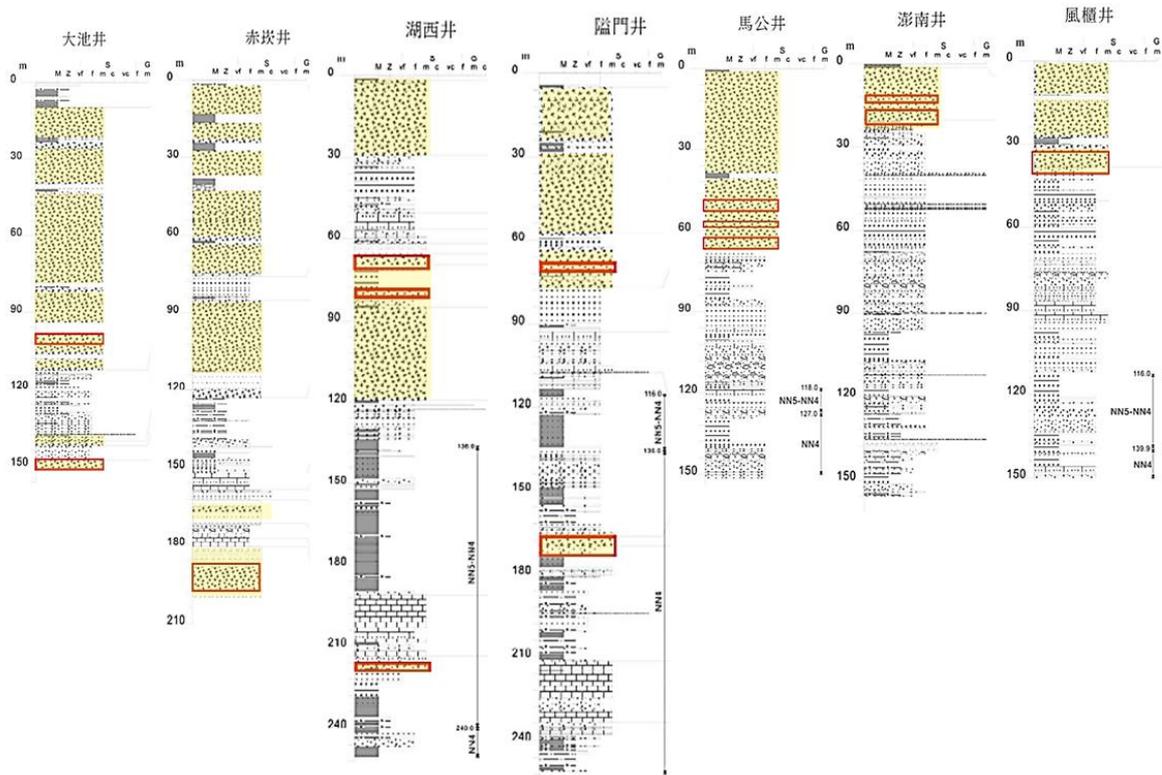


圖 4、(左) 紅點為澎湖玄武岩取樣地點；(中)(右) 澎湖玄武岩採樣紀錄



玄武岩分布也是潛在場址

圖 5、澎湖群島 2003 年水文觀測井岩心柱狀圖 (黃色標記玄武岩分布，為潛在封存深度；紅色則為本研究取樣深度)



圖 6、(左) 岩心保存箱，以馬公井為例；(右) 截取 15 公分之馬公井岩心段照片

本研究將所使用的玄武岩經過標準化前處理後的粉末，送樣至中研院地球所燒製為玻璃餅後上機分析，其分析結果如表 1；依照玄武岩化學組成分類法 (TAS diagram) 與前人文獻的分類法 (MacDonald and Katsura, 1964) 由二氧化矽重量百分比 (SiO_2 wt%) 對上氧化鈉與氧化鉀總合重量百分比 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ wt%) 進行投圖後，再依照 Irvine & Baragar 於 1971 年所發表的文章，可將火成岩細

分為鹼性系列 (Alkaline) 與次鹼性系列 (Sub-alkaline) 的分隔線，從投圖與分析結果可以觀察本研究所使之玄武岩為大多為次鹼性玄武岩 (Sub-alkaline basalt)，見圖 7。

表 1、馬公(MG)、隘門(AM)、湖西(HX) 岩心 X 射線螢光分析結果

wt%	MG_65to66	AM_168to169	HX_66to67
SiO ₂	45.41	49.93	46.74
TiO ₂	3.77	2.48	3.04
Al ₂ O ₃	15.1	14.1	13.5
Fe ₂ O ₃	15.0	12.2	13.2
MnO	0.244	0.151	0.221
MgO	9.88	7.53	11.5
CaO	8.11	9.45	8.46
Na ₂ O	0.863	2.90	1.19
K ₂ O	0.528	1.05	1.42
P ₂ O ₅	0.772	0.424	0.588

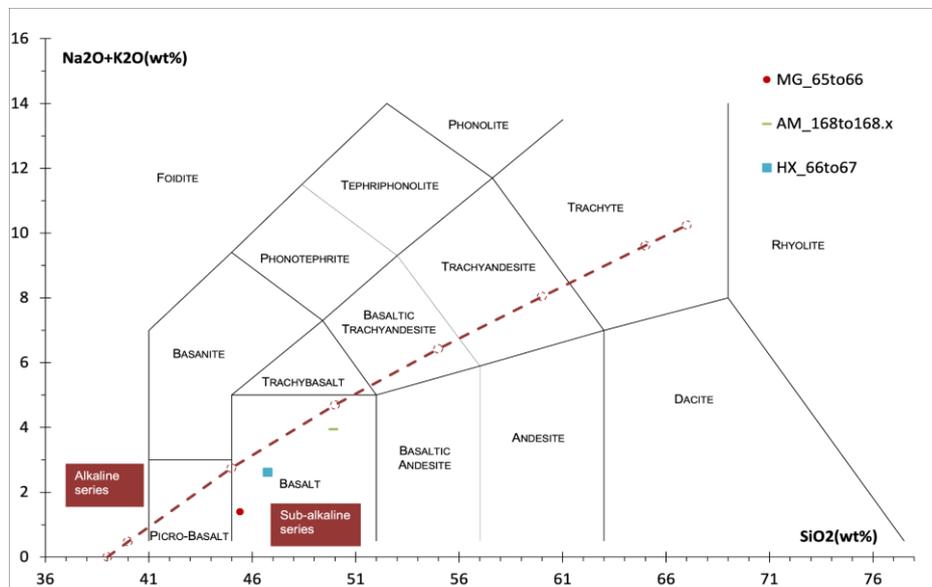


圖 7、本研究所使用的玄武岩 TAS 化學性質分類

3.2 自動灌注系統實驗設備

因此作品為模擬灌注條件所做之創新設計 (圖 8)，目前仍在測試階段，包含反應槽之設計、反應壓力、灌注流速等操作條件，正分別進行調整及改良。此系統設計及配置已申請專利，除了在研究上達到創新與進步外，未來還能在產業上有所應用。本系統之個別設備及其設定如下：

1. 注射幫浦：最高可操作達到 5,000 psi (345 bar)，以平均地壓梯度為 270 bar/km 估算，此系統可操作達 1.3 km 深部地層環境，又以澎湖為例，平均玄武岩富集層深度約為 0.8 km。而台灣將廢棄濃鹽排水及二氧化碳在超臨界流體 (150 bar, 60°C) 的狀態下灌入反應槽。

2. 反應槽：內直徑為 2.5 吋，長度為 15 cm 之不鏽鋼腔體 (不鏽鋼高溫高壓反應槽)，可將 2.5 吋岩心放入並將系統封閉，進行灌注實驗 (core flooding)。
3. 控制箱：可監控進出口之壓力及溫度及控制反應槽內部溫度，並依實驗者之需求設定取樣時間頻率，於實驗過程中自動進行數據記錄。
4. 壓力監控：電子壓力錶安裝於進流側及出流側，由控制箱及監控電腦確認壓力數據並自動記錄在電腦程式中；物理壓力錶則安裝於出流側，可直接讀取數值進行監測並保護設備。
5. 溫度監控：溫度感測器連接於控制箱，可即時讀取不鏽鋼高溫高壓反應槽之進出口溫度。
6. 監控電腦：安裝軟體並自動將數據紀錄在程式中，並提供遠端操作之選項，可隨時、隨地進行實驗監測。
7. 流體取樣口：在反應槽出口端設置閥件便可在反應過程中取樣。

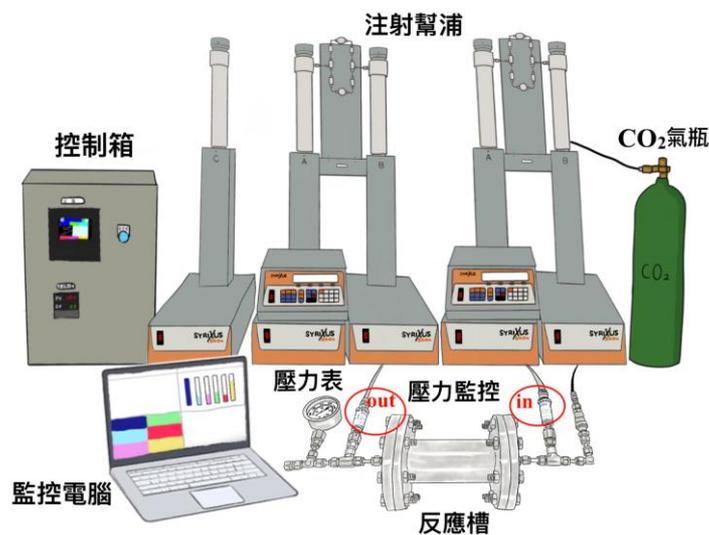


圖 8、加速礦化封存反應設備示意圖

利用碳封存技術達到淨零碳排是政策中重要的一環。現行碳封存研究多注重在台西與台南盆地的沉積岩層進行地質封存，然台灣人口稠密且地震頻繁，較適合的封存方式是將 CO₂ 灌注於海域或臺灣西部濱海的海岸平原區底下的未受褶皺變形的地層當中 (林等人, 2014)。而澎湖群島位於臺灣西部海域，屬於前陸盆地 (Sahoo *et al.*, 2018)，由大量玄武岩組成，其高孔隙率且有大量的氣孔狀構造之特性，可作為礦化封存時 CO₂ 結晶的生長空間，達到快速礦化之效果。

本研究模擬二氧化碳灌注至玄武岩中進行礦化封存，並以固碳量的量化為主要目標。透過模擬

封存深度的溫壓條件，使二氧化碳以超臨界流體狀態與廢棄濃鹽排水混合，灌注至玄武岩岩心，促進礦化反應。當二氧化碳與水混合後，會形成碳酸根離子，其中一部分會與玄武岩中的鐵、鎂、鈣等離子結合，形成碳酸鹽類沉澱並封存，另一部分則促使玄武岩中更多的鐵、鎂、鈣離子溶出，進一步與碳酸根結合，達到持續增強固碳量的效果。本研究探討以海水淡化產生的廢棄濃鹽排水替代淡水作為反應介質的可行性，避免與工業及民生用水競爭，並解決海水淡化廠廢水排放的相關問題。具體實驗將設計多組條件，透過圖 9(左) 所示的方式，調整濃鹽排水與二氧化碳的比例、溫度與壓力條件，將混合物灌注至岩心設備中進行反應。實驗過程中，將藉由圖 9(右) 觀測不同條件下岩心、濃鹽水與二氧化碳的相互作用，並利用測量最終形成的碳酸鹽量，定量評估各實驗條件下的固碳效率，找出最佳的加速礦化條件，為地質碳封存技術提供具體指引。

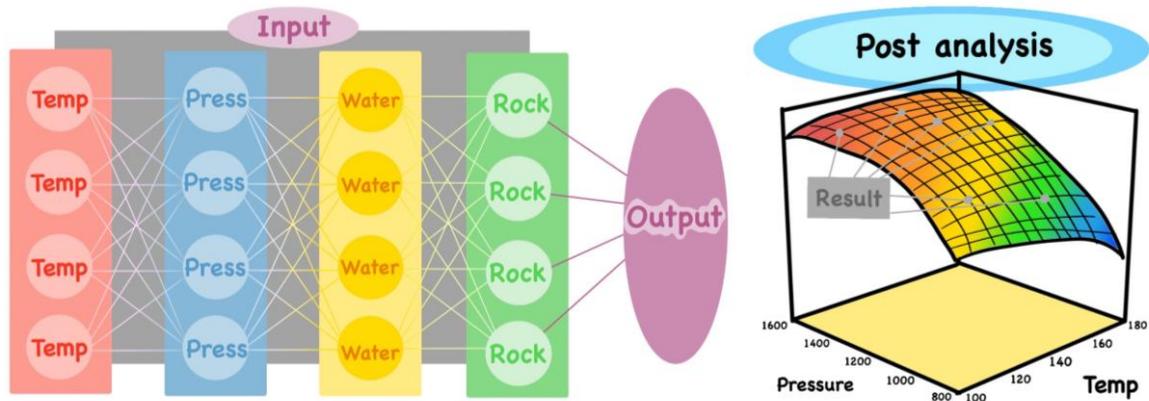


圖 9、(左)實驗調控之參數;(右)模擬結果比對曲面圖

同時討論能否將海水淡化後產生的廢棄濃鹽排水取代淡水，在負碳下的地質礦化封存，無需與工業、民生競爭淡水資源，並解決與民生用途息息相關的海淡廠廢水問題。

4. 創作特點及創意說明

2005 年 IPCC 指出地質封存的四種機制及其安全性，反應初期 1~10 年由構造和地層封存占主導，藉由物理結構(斷層或岩層等)將二氧化碳困於特定區域；中期 10~1,000 年由殘餘封存主導，將二氧化碳固定於岩石孔隙中；長期 1,000~10,000 年溶解封存，使二氧化碳溶解於地下水中形成碳酸；超長期 10,000 年以上礦化封存，二氧化碳和地下礦物反應形成穩定態碳酸鹽礦物 (IPCC, 2005)。根據本研究之實驗技術，使用高壓的二氧化碳及海淡廠廢棄濃鹽排水混合注入澎湖玄武岩中，模擬在實際地層環境中進行的溶解及礦化反應，確保二氧化碳的長期穩定及安全。

Sahoo 團隊利用 3D 地震數據中識別底部模擬反射 (Bottom-Simulating Reflection, BSR) 得出，圖 10 澎湖地區地溫梯度為 40°C/km (Sahoo *et al.*, 2018)，。根據文獻指出澎湖盆地 1,100 公尺以下有玄武岩分布 (Wu *et al.*, 2023)，本研究假設玄武岩深度為 1,500 公尺，地層溫度約為 60°C，地層壓力約 147 bar，因此設計實驗壓力為 150 bar 有利於將流體打入地底。實驗條件下 (150 bar, 60°C) 二氧化碳混合廢棄濃鹽排水已達超臨界流體，此時二氧化碳的密度 (kg/m^3)、動力粘度 (Ns/m^2)、運動速度 ($10^6 \text{m}^2/\text{s}$) 及擴散係數 ($10^6 \text{m}^2/\text{s}$) 皆介於氣體和液體之間，比普通液體有更高的壓縮性、更好的轉移速率。此流體可藉由玄武岩中大量孔隙擴散至四周在孔洞內溶解並礦化使二氧化碳固定於岩石中。

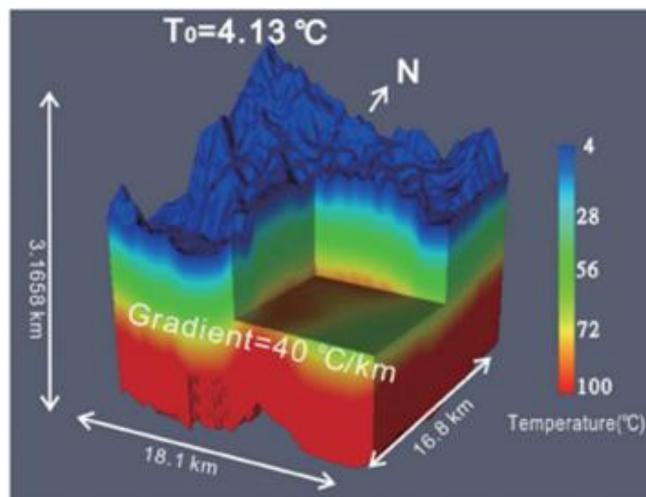


圖 10、澎湖 3D 建模溫度場 (Sahoo *et al.*, 2018)

世界上第一個商業 CCUS 於 1996 年挪威北海 Sleipner 天然氣田實施，此計畫決定將二氧化碳儲存於海床下 1,000 m 的 Utsira 砂岩地層 (鹽水層) 中，方法是往地底灌注超臨界態二氧化碳利用砂岩作儲層，頁岩層作蓋層，使二氧化碳困於封閉構造。模擬結果得知灌注後二氧化碳將溶解於水中並下沉，有助於地質封存機制中的溶解及礦化封存。CarbFix 計畫利用電廠每年生產 40,000 噸 CO₂ 和 12,000 噸 H₂S 進行灌注，由於地層屬於玻璃質玄武岩，含有大量鈣、鎂和鐵礦物可提供礦化時所需離子，溶解態的碳酸不具有浮力移棲回地表，因此不需蓋層封閉儲層。當碳固定於碳酸鹽礦物中後相對穩定，基本上不具洩漏風險 (Snæbjörnsdóttir *et al.*, 2018)。

表 2 結合上述兩項計畫及本研究，Sleipner 顯示地質封存於碳封存技術上的可行性，其中又以 CarbFix 所使用的玄武岩為更有效率且安全的材料，其中玄武岩在地表擁有很高的含量且台灣亦有玄武岩的分布，因此實驗利用海淡廠處理後的高鹽度廢棄濃鹽排水與二氧化碳以超臨界相態注入玄武岩，除了可將廢棄濃鹽排水再利用降低排放可能造成的環境衝擊且減少淡水資源消耗，藉由全新設

計的灌注系統，找到最適合溫壓及廢棄濃鹽排水、二氧化碳最佳配比，以達加速礦化之效果。

表 2、國際商業運行 CCS 與本研究之差異

項目	Sleipner	CarbFix
位置	挪威	冰島
岩石種類	砂岩	玻璃質玄武岩
灌注物質	水	水+H ₂ S
儲集深度(公尺)	800 - 1,000	400 - 800
主要機制	構造和地質封存	溶解和礦化

圖 11 (左) 為碳酸鈣的相圖，早期碳酸鈣沉積相關的研究，多著重在操作條件，透過調整離子濃度及酸鹼值，了解水中二氧化碳溶解度以及碳酸氫根、碳酸根的生成等水化學反應行為。如果可以掌握結晶成核的關鍵條件，便可有效促進結晶成長，進一步達到加速二氧化碳於水中與廢濃鹽水中二價金屬離子以及核種之岩心 (岩石礦物) 反應的礦化途徑。此外，溶液中的鈉或是岩石中的鋁離子等，亦可貢獻系統中一定的鹼度，使二氧化碳與之生成碳酸氫根鹽類，最終轉變成為 NaAlCO₃(OH)₂，表示於下列反應式一式-1 中，此一途徑表示水中各項金屬離子，均有可能成為二氧化碳礦化封存的結晶成和離子來源。圖 11 (右) 為礦化封存機制之示意圖，將超臨界二氧化碳與廢棄濃鹽水混合注入岩心，除可能由玄武岩所溶解出的二價鈣、鎂、鐵離子外，濃鹽水也提供高濃度的鈣及鎂進入系統，而後與二氧化碳反應礦化沉澱，本研究透過調整注入過程中之各項參數，找出最佳加速礦化之條件。

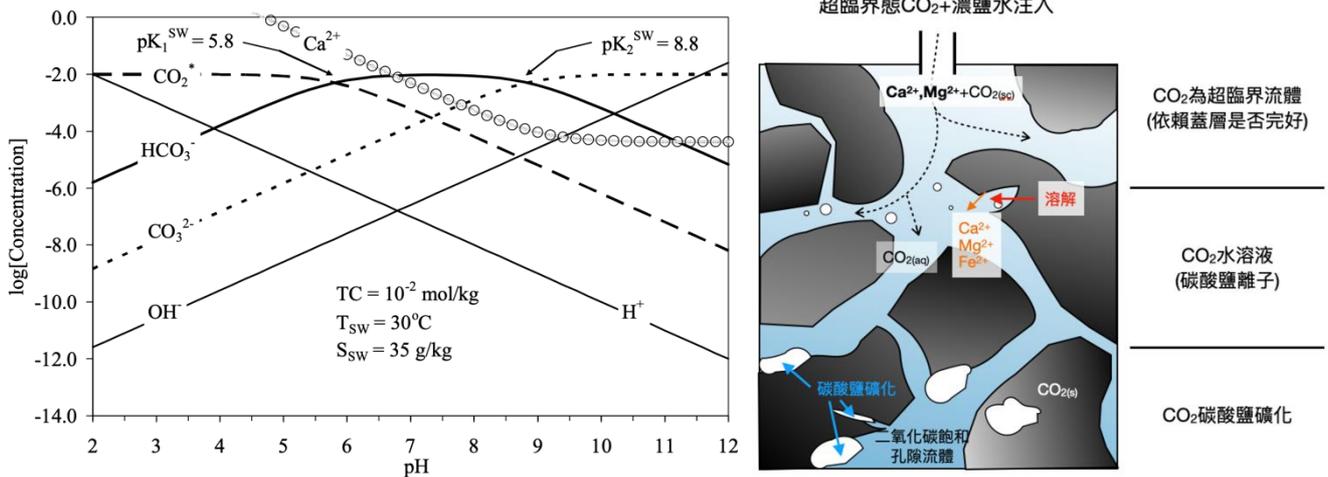


圖 11、(左) 碳酸鈣的相圖 (Eid Al-Rawajfeh, 2007)；(右) 礦化封存機制圖 (修改自 Nisbet, 2024)

本作品串接多個高壓灌注系統，可不間斷地將反應濃鹽水與超臨界態二氧化碳以固定壓力或固定流速注入反應槽內，與岩心進行礦化反應。根據 Sun *et al.* (2016) 之整理，岩心灌注實驗多使用砂岩、大理岩、頁岩等岩性之材料進行，此方法需透過蓋層將二氧化碳封閉在地層中，而本作品以二價金屬離子較高的玄武岩岩心進行實驗，玄武岩中的金屬離子可提供二氧化碳沉澱之反應材料，解決可能因缺乏蓋層而散逸的問題。本研究將以超臨界二氧化碳 ($T_c=31.1$ 和 $P_c=7.39$ MPa (Simmrock *et*

al., 1986)) 及廢棄濃鹽排水以奈米微氣泡灌注傳輸技術引入反應槽中與玄武岩岩心進行反應可加速濃鹽水及二氧化碳進入孔隙中，並在反應器中保持固定溫壓，以模擬實際於 1,500 公尺的岩層灌注過程中的反應過程，可增強二氧化碳礦化速率。

本作品以廢棄濃鹽水取代淡水作為與二氧化碳混合之流體，因其高鈣、鎂含量，可提供除玄武岩岩心本身所含的金屬離子，加速礦化反應，且同時降低淡水資源之負擔並解決廢棄濃鹽水排放之問題。除此之外，以奈米泡泡增加質傳，透過改變混合多相流之狀態，增加接觸表面積再加速礦化反應。

5. 作品應用範圍及發展潛能

5.1 解決問題與技術價值

5.1.1 CCS 捕捉後的二氧化碳封存

根據經濟部統計，台灣在 2022 年共排放約 258 百萬噸二氧化碳，超過 1990 年排放量的兩倍。隨著日益增加的碳排放量，自 2008 年台電已開始投入溶劑吸收技術、固態吸附技術等碳捕捉技術，2017 至 2022 年進行地質探查井調查、技術測試與減碳園區規劃，2023 至 2025 年進行碳捕捉與碳封存試驗，2026 至 2035 年進入示範階段。2022 年，經濟部、環保署、國科會所提出《2050 淨零轉型關鍵戰略「碳捕捉、利用及封存」行動計畫草案》中，期望透過 CCUS 在 2030 年達成 1.74 至 4.6 百萬噸碳封存，並在 2050 年達成 40.2 百萬噸之封存量。並且在同年，經濟部提出了《二氧化碳捕捉及封存試驗計畫》，可見藉由負碳技術解決碳排放問題的急迫性與重要性。因此，若能於澎湖玄武岩層進行碳封存，將能使用更安全、快速的方法進行碳封存。

5.1.2 澎湖海水淡化廠廢棄濃鹽排水再利用

澎湖由 90 座大小島嶼組成，面積僅 141 km²，年雨量約 1,000 mm 但蒸發量卻多達 1,600 mm，由於平均海拔 20 m 使得地形無法形成溪流，降雨後無法儲存至地表，造成水資源匱乏的問題。自古以來澎湖嘗試過許多方法獲得淡水，像水庫、地下水等等，但都不是長久之計，因此 1995 年台灣首次供應民生用水的澎湖海水淡化廠啟用，利用逆滲透 (Reverse Osmosis, RO) 技術將海水過濾、擠壓後分離出 40% 的過濾水和 60% 的高鹽分廢棄濃鹽排水，此後海水淡化成為澎湖主要淡水來源，圖 12 為 112 年澎湖現有海水淡化廠供水情形，其中總實際供水量為 723 萬立方公尺，廢棄濃鹽排水總量約為 1,304 萬立方公尺。通常廢棄濃鹽排水會經由排放管送回海中稀釋，然而根據 Cooley & Ajami (2014) 研究，由於廢棄濃鹽排水通常鹽度為海水兩倍，密度較大，因此排入海中後會沉入底部，造成海底鹽度上升，並減少水中溶氧量 (Hodges *et al.*, 2011; Spigel, 2008)，進而影響海底生物生存。因此，若能使用廢棄濃鹽排水作為礦化封存之運送流體，除了有助於負碳技術發展還能減少海淡場對海洋生態的影響。

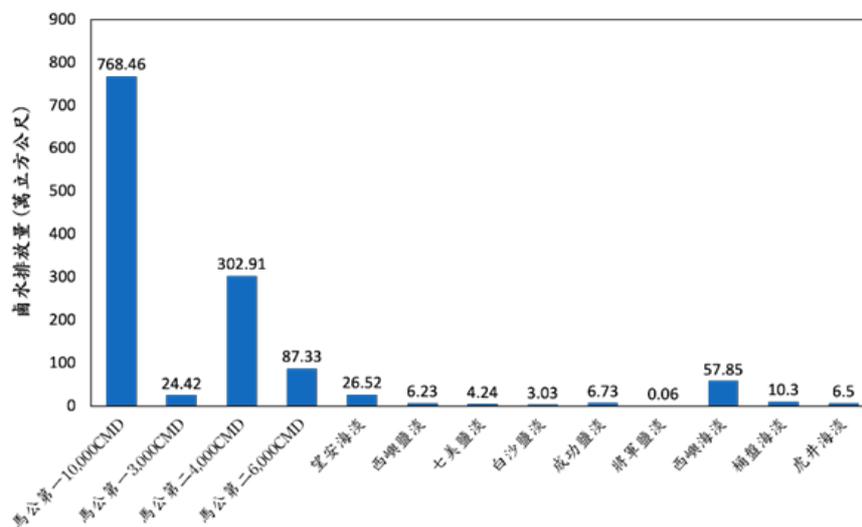


圖 12、澎湖現有海水淡化廠概況 (經濟部水利署，2024)

5.1.3 設備技術

現今台灣負碳技術以地質封存為主，本作品希望討論礦化封存應用於台灣的可行性，利用澎湖海淡廠廢棄濃鹽排水混合二氧化碳以超臨界流體狀態注入澎湖鹼性玄武岩中，透過調整廢棄濃鹽排水及二氧化碳之比例、溫壓控制等參數，觀測岩石與流體反應前後之變化，因此設計全自動化操作系統及遠端監測，控制幫浦壓縮流體灌注至反應槽與即時溫壓紀錄，可於實驗過程中進行液體採樣檢測反應過程中的液體成分變化。

5.2 發展潛能

5.2.1 礦化量估算

假設本作品設計之實驗可達成將灌注入反應槽的二氧化碳完全轉換為碳酸鹽，可以下式-2 進行封存量之估算：

$$M_0 = \rho \times A \times h \times (1 - \phi) \text{ 式-2}$$

式中 M_0 為玄武岩質量， ρ 為密度、 A 為封存面積、 h 為封存厚度、 ϕ 為孔隙率。本研究所設計之反應槽直徑 6.35~6.4 cm、長度 15 cm，體積 (3.2*3.2*3.14*15=482.3 mL)，若玄武岩密度及孔隙率以文獻中的平均值 9.949 g/cm³、7.84% 計算 (Hyndman and Drury, 1977)，反應槽可封存之玄武岩質量約 1.31 kg。

若將封存尺度以澎湖玄武岩之地層做估算，密度 (2.804~3.010 g/cm³, mean 2.949 g/cm³, Hyndman and Drury (1977))、封存面積 (澎湖群島面積 127 km², 陳培源與張卯生, 1995)、 h 為封存厚度 (中新世漁翁島群下段最厚約 70 m, 陳培源與張卯生, 1995)、 ϕ 為孔隙率 (1.7%~24.5%, mean 7.84%, Hyndman and Drury (1977))。玄武岩質量 $M_{0max}=2.949 \text{ g/cm}^3 \times 127 \text{ km}^3 \times 70 \text{ m} \times (1-1.7\%) = 2.5771 \times 10^{11} \text{ t}$ ； $M_{0min}=2.949 \text{ g/cm}^3 \times 127 \text{ km}^3 \times 70 \text{ m} \times (1-24.5\%) = 1.9794 \times 10^{11} \text{ t}$ 。假設 $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgO} \rightarrow \text{MgCO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe} + 3\text{CO}_2 \rightarrow 3\text{FeCO}_3$ (Mendoza *et al.*, 2019) 全部反應，則封存量試算如下表 2 所示。

表 2、二氧化碳封存量估算

封存量估算		CaO		MgO		Fe ₂ O ₃		總封存量	
MG_65to66	XRF (%)	8.11		9.88		15.0		7.63	5.86
	封存量(× 10 ⁹ t)	1.64	1.26	2.80	2.15	3.19	2.45		
AM_168to169	XRF (%)	9.45		7.53		12.2		6.64	5.10
	封存量(× 10 ⁹ t)	1.91	1.47	2.14	1.64	2.59	1.99		
HX_66to67	XRF (%)	8.46		11.5		13.2		7.78	5.98
	封存量(× 10 ⁹ t)	1.71	1.32	3.26	2.50	2.81	2.16		

以表中最佳 HX_66to67 為例，封存潛力可達 $7.78 \times 10^9 \text{ t}$ ，若以每噸 500 元計，有望省下 3.9 兆元的碳費。另，張嘉福 (2012) 針對鐵砧山構造桂竹林層進行的封存潛能進行評估，文獻中以蒙地卡羅法進行式-3 中各參數之估算，評估該場址之封存潛能平均可達 $6.4 \times 10^7 \text{ t}$ ，最高則可達 $1 \times 10^8 \text{ t}$ 。

構造封存潛能 = 構造面積 × 儲集層厚度 × 孔隙率 × 氣體體積因子 × 掃排效率 × CO₂ 飽和度 式-3

近年，鹽水層亦為封存場址之選址重點，以下式-4 進行封存潛能估算，以林殿順等 (2023) 之計算，桃竹苗區、中彰雲區及嘉南區三區域之總封存潛力約為 3.9×10^{10} t。

$$G_{CO_2} = A_t \times h_g \times \phi_{tot} \times \rho \times E_{saline} \quad \text{式-4}$$

A_t 為貯存面積、 h_g 為貯存厚度、 ϕ_{tot} 為孔隙率、 ρ 為密度、 E_{saline} 為封存係數，數值範圍 0.4~5.5% (Goodman *et al.*, 2011)。

5.2.2 應用潛力

本技術具備廣泛且跨領域的應用潛力，涵蓋以下四大層面：

1. 離島與沿海工業地區碳封存應用：澎湖群島與台灣西南部沿海地區皆具備廣泛分布之玄武岩地層與完善之海水淡化設施，可無縫接軌導入本系統進行碳封存。對於天然資源有限、需自建能源與水源的離島地區而言，本技術兼顧碳減排與水資源整合，具高度應用價值。
2. 高碳排工業（如鋼鐵、水泥、電力）碳中和整合方案：本系統能與現有碳捕捉技術（如 MEA 溶劑吸收）整合，將捕捉後之純 CO₂ 經濃縮壓縮後注入玄武岩層，實現「源頭捕捉 + 原地封存」的一站式解方，適合空間有限、需本地封存的重工業區域。
3. 海水淡化廠副產品再利用與綠色轉型：海水淡化產生的大量高鹽廢水長期以來為環保爭議之源，導入本技術可將濃鹽水轉化為反應介質，與 CO₂ 協同反應，轉化為碳酸鹽沉澱，形成「負碳副產物」，創造海淡廠與封存系統雙向整合新模式。
4. 國際碳權市場與 ESG 工具：在全球碳費與碳權交易快速興起的背景下，台灣極需具有科學量化基礎的碳減排方案。本技術經礦化轉化量可量測、可預測性，未來可作為企業碳中和之「永久封存工具」，同時提供環境、社會與治理 (ESG) 指標中「碳責任履行」的具體證明。

5.2.3 發展優劣

根據文獻及本研究之估算，礦化封存及鹽水層封存之潛力皆可做為未來負碳發展的重點。透過地質碳封存技術將二氧化碳永久儲存在玄武岩中，是減緩全球暖化的重要方法之一。玄武岩具有豐富的鈣、鎂、鐵等元素，能與二氧化碳反應生成穩定的碳酸鹽礦物。然而，目前的挑戰在於提升碳封存的效率並降低相關成本。我們的實驗旨在優化礦化反應，包括調整二氧化碳的注入壓力及廢棄濃鹽排水流速，以縮短反應時間並提升礦物生成量，從而降低過程成本與企業碳費負擔。

本作品目前仍在測試階段，但擁有新穎技術及完善設備 (圖 13)，即使反應條件仍需時間進行測試，依然具有很高的潛力提供未來碳封存之參考依據。雖反應條件依選址條件改變而異，但可透過本作品所使用的設備及反應槽再設計、調整，模擬封存位置之反應狀況，藉此了解在不同環境下的封存情況及反應趨勢。



圖 13、本作品 SWOT 分析

6. 工作分配

組員姓名	工作事項
郭芷晴	作品說明書、實驗架設
廖庭渝	作品說明書、實驗架設、影片
張宸唯	實驗架設、影片

破先封

實作成品照片



參考資料

- Aminu, M. D., Nabavi, S. A., Rochelle, C. A., & Manovic, V. (2017). A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, 208, 1389-1419.
- Cooley, H., & Ajami, N. (2014). Key issues for seawater desalination in California. *The World's Water*, 93–121. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-483-3_6
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E., GHG emissions of all world countries, *Publications Office of the European Union*, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/953332, JRC134504.
- Eid Al-Rawajfeh, A. (2007). Modeling of alkaline scale formation in falling film horizontal-tube multiple-effect distillers. *Desalination*, 205(1–3), 124–139. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.044>
- Gislason, S. R., & Oelkers, E. H. (2014). Carbon storage in basalt. *Science*, 344(6182), 373–374. <https://doi.org/10.1126/science.1250828>
- Hodges, B.R., J.E. Furnans, and P.S. Kulis. (2011). “Thin-Layer Gravity Current with Implications for Desalination Brine Disposal.” *Journal of Hydraulic Engineering* 137: 356-371.
- Huijgen, W. J. J., & Comans, R. N. J. (2003). Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. Literature Review. <https://inis.iaea.org/search/34066562>
- Hyndman, R. D., & Drury, M. J. (1977). Physical properties of basalts, gabbros, and ultramafic rocks from DSDP leg 37. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*. https://doi.org/10.2973/dsdp_proc.37.113.1977
- IPCC. (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- Lin, L.-H. (2016). 二氧化碳封存的終極選擇 – 玄武岩？ . 中華民國地質學會 . https://www.gst.org.tw/cht/fridgeo_detial.php?serial=11
- Macdonald, G.A. and Katsura, T. (1964). Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petrology* 5(1): 82-133.
- Matter, J. M., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Oelkers, E. H., Gislason, S. R., Aradóttir, E. S., ... & Broecker, W. S. (2016). Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 352(6291), 1312- 1314.
- McLaughlin, H., Littlefield, A. A., Menefee, M., Kinzer, A., Hull, T., Sovacool, B. K., Bazilian, M. D., Kim, J., & Griffiths, S. (2023). Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications

- for a Carbon Reliant World. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 177, 113215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113215>
- Mendoza, E.Y.M.; Santos, A.S.; López, E.V.; Drozd, V.; Durygin, A.; Chen, J.; Saxena, S.K. Iron oxides as efficient sorbents for CO₂ capture. *J. Mater. Res. Technol.* 2019, 8, 2944–2956.
- Nisbet, H. (2024). *Trapped in minerals underground: The future for CO₂?*. Energy Frontier Research Center | Community Website. <https://www.energyfrontier.us/content/trapped-minerals-underground-future-co2>
- Sahoo, S. K., Chi, W. C., Han, W. C., Chen, L., Liu, C. S., & Wang, Y. (2018). Estimating the composition of gas hydrate using 3D seismic data from Penghu Canyon, offshore Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 29(2), 105- 115.<http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/419429>
- Simmrock, K. H., Janowsky, R., & Ohnsorge, A. (1986). Critical data of pure substances.
- Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Gislason, S. R., Galeczka, I. M., & Oelkers, E. H. (2018). Reaction path modelling of in-situ mineralisation of CO₂ at the CarbFix site at Hellisheidi, SW-Iceland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220, 348- 366.<https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.09.053>
- Spigel, R. (2008). “Review of Studies Relating to the Discharge from the Perth Seawater Desalination Plant in Cockburn Sound.” National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd.
- Sun, Y., Li, Q., Yang, D., & Liu, X. (2016). Laboratory core flooding experimental systems for CO₂ geosequestration: An updated review over the past decade. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(1), 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.001>
- Teir, S. (2008). Fixation of carbon dioxide by producing carbonates from minerals and steelmaking slags. Teknillinen korkeakoulu.
- Wu, P.-R., Yang, K.-M., Wang, P.-C., Lee, C.-J., & Wu, J.-C. (2023). Normal fault evolution in the Penghu Basin, a paleogene rift basin in Western Taiwan Strait: A test of fault growth models. *Tectonophysics*, 868, 230115. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230115>
- 林殿順、徐偉啾、林哲銓、蔡宜伶、楊雅梅、陳新翰. (2023). 二氧化碳地質封存：我國減碳機會與挑戰. *土木水利*. 50(6). [https://10.6653/MoCICHE.202312_50\(6\).0010](https://10.6653/MoCICHE.202312_50(6).0010)
- 林殿順、楊健男、李科豎、中興工程顧問社、臺灣經濟研究院、淨煤主軸計畫作業室 (2014)。《台灣二氧化碳地質封存潛能地圖集》。桃園：行政院原子能委員會核能研究所。
- 陳培源、張卯生. (1995). 澎湖群島之地質與地史 (資料來源：國家圖書館 臺灣記憶 <https://tm.ncl.edu.tw/>)
- 顏一勤, 李寄嶼. (2017). 澎湖群島 [臺灣地質圖幅及說明書 1/50,000] 第二版. https://twgeoref.gsmma.gov.tw/GipOpenWeb/wSite/ct?xItem=200633&ctNode=333&mp=106&idPath=326_332_333

碳先封

張嘉福. (2012). 苗栗鐵砧山氣田淺層構造震測解釋與二氧化碳封存量評估。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，桃園市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/uu5bey>