

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 化學科

030203

人人可上手的 Direct Air Capture

學校名稱：桃園市立大成國民中學

作者：	指導老師：
國二 謝羽笙	王思琪
國二 邱靖善	顏綱威
國二 陳詩涵	

關鍵詞：碳捕捉、氫氧化鈣、海綿

摘要

本研究尋找生活中捕捉 CO₂ 的方法，並以 Direct Air Capture(DAC)方式探討影響 CO₂ 吸收效果的各項因素。在測量方式方面，利用導電度檢量線測量較穩定且轉換數值方便，優於空氣品質偵測器或 pH 檢量線；在影響 CO₂ 吸收效果的各項因素中，溶劑以氫氧化鈣效果優於單乙醇胺與醋酸鉀，且氫氧化鈣濃度越高、風速越大，吸收 CO₂ 的效果越好，但周圍 CO₂ 的濃度大小則不影響吸收度；此外，為了探討生活中最佳的 DAC 捕捉方式，以使用清潔海綿(或吸附體孔徑約 250 μ m)浸泡高濃度氫氧化鈣溶液來製作 DAC 捕捉裝置，並放置於有風處，其效果最佳；孔洞過大或過小，吸收效率都會下降；海綿的碳酸鈣回收率為 73.27%。

壹、研究動機

在彈性課程時上到關於全球暖化越來越嚴重，2024 年全球平均氣溫達到 15.1°C，首次升溫超過 1.5 度。根據 Nature 的最新研究，可能等不到 2050 年淨零排放，最早在 2030 年代，北極就會在夏天迎來完全無冰的情況，這些融冰將影響洋流、極圈生態，甚至回過頭來加速暖化的進行，表示減碳力道還要再加強。除了減少碳足跡之外，國際上碳捕捉的研究也進行得如火如荼，但從 2016 年開始，大部分研究皆針對工廠的碳排放進行捕捉，至目前為止已捕獲 300 萬噸 CO₂。但即使針對工廠的碳排放進行碳捕捉後，全球暖化的速度依然不減，根據 IEA(2022)近期也開始有人提出針對大氣中的碳進行捕捉；連世界首富、特斯拉創辦人都砸下重金提出：「誰能找出最佳的碳捕捉技術，就可以成為一億美金獎金得主！」可見減少二氧化碳是多麼迫在眉睫的事。據此，我們思考如何設計人人都可上手的碳捕捉方式。

貳、研究目的

本研究探討不同藥品、測量方式、因素與方式，對於捕捉二氧化碳效率之影響，實驗目的分述如下。

一、探討不同的測量方式

(一) 空氣品質偵測器測量 CO₂ 濃度：探討不同溶劑在不同濃度下吸收 CO₂ 的效果。

1. 【實驗一】不同單乙醇胺濃度吸收 CO₂ 的效果
2. 【實驗二】不同醋酸鉀濃度吸收 CO₂ 的效果
3. 【實驗三】不同氫氧化鈣濃度吸收 CO₂ 的效果

(二) 【實驗四】利用不同濃度 Ca(OH)₂ 的 pH 值製作檢量線

(三) 【實驗五】利用不同濃度 Ca(OH)₂ 的電流製作檢量線

二、探討各種因素對大氣中碳捕捉效率的影響

(一) 【實驗六】不同 CO₂ 濃度對碳捕捉效率的影響

(二) 【實驗七】不同 Ca(OH)₂ 濃度對碳捕捉效率的影響

(三) 【實驗八】不同風速對碳捕捉效率的影響

三、探討室內、室外在不同裝置下對大氣中碳捕捉效率的影響

(一) 【實驗九】盛裝方式放置位置對碳捕捉效率之影響

(二) 【實驗十】氫氧化鈣吸附於不同材質對碳捕捉效率之影響

四、測量碳酸鈣的回收率

【實驗十一】測量培養皿與海綿的碳酸鈣生成量及計算回收率

參、研究設備與器材

表 3- 1 研究設備與器材 (圖源：作者自行拍攝)

			
量筒、燒杯、滴管	培養皿	pH 偵測儀	漏斗式寶特瓶
			
二氧化碳偵測儀	電源供應器	CO ₂ 鋼瓶	一般寶特瓶
			
菜瓜布、海綿、棉花	電子秤	進水閥接頭、墊片	風速計
			
止洩帶、碳棒	電風扇	由左至右：碳酸鈣、氫氧化鈣、鹽酸、醋酸鈉、單乙醇胺	
			
漏斗、濾紙	顯微鏡	烘箱	

肆、研究過程與方法

一、文獻探討

(一) 全球暖化與二氧化碳的濃度相關性

根據國家海洋大氣管理局 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)，全球暖化與二氧化碳的濃度隨著二氧化碳濃度升高，平均溫度也跟著上升(如圖 4-1)。

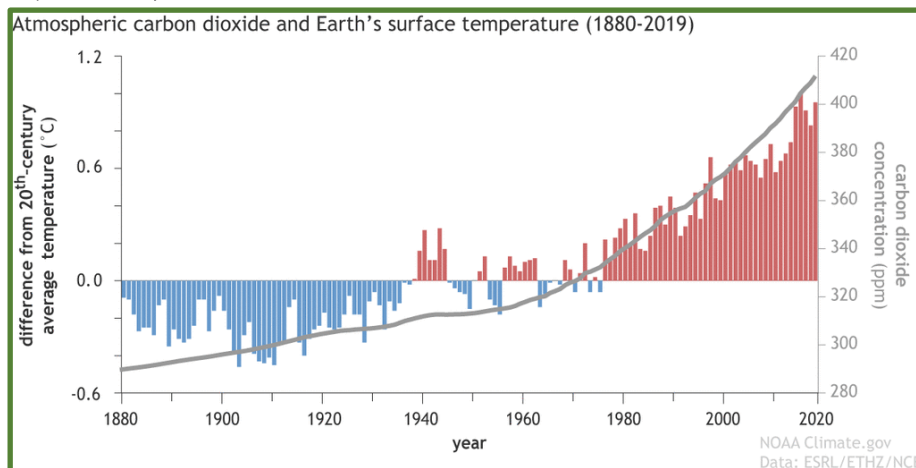


圖 4-1 19- 21 世紀與 20 世紀的平均溫度(13.7°C)差值和二氧化碳排放量的關係圖
(圖源：NOAA Climate.gov)

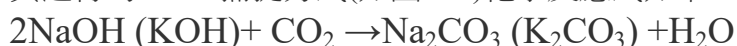
由圖 4-1 得知，隨著二氧化碳濃度升高，平均溫度也跟著上升，代表二氧化碳濃度與溫度有非常明顯的關聯，因此若可著力於減少大氣中的二氧化碳，勢必可減緩全球暖化。

(二) 二氧化碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)與直接空氣捕獲技術(Direct Air Capture, DAC)

1. 二氧化碳捕獲與封存(CCS)：2016 年國際能源總署(International Energy Agency, IEA)提出的《能源技術展望報告》中便提到減碳六大方案之一的 CCS，主要是將化石燃料轉化為能源的過程中，利用捕獲技術將火力發電廠、工廠等排放源所排放的二氧化碳分離，並將其壓縮後，輸送至合適的封存地點進行封存，使二氧化碳與大氣隔絕，減少排放至大氣中的二氧化碳排放量。
2. 隨著全球暖化速度加劇，近幾年 IEA 也提出了碳捕捉、再利用與封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)當中的 DAC 技術，這個技術可以在任何位置直接從大氣中提取 CO_2 ，這與過去集中在發電廠、工廠進行的 CCS 不同。這表示原來人人也都有機會以碳捕捉的方式為減碳行動多盡一份心力，因此從【實驗六】到【實驗十】都以 DAC 進行測試。

(三) 目前常見 DAC 的捕捉方式

根據(Fasihi,2019)「Techno-economic assessment of CO_2 direct air capture plants」，其進行的 DAC 捕捉方式(如圖 4-2)化學反應式如下：



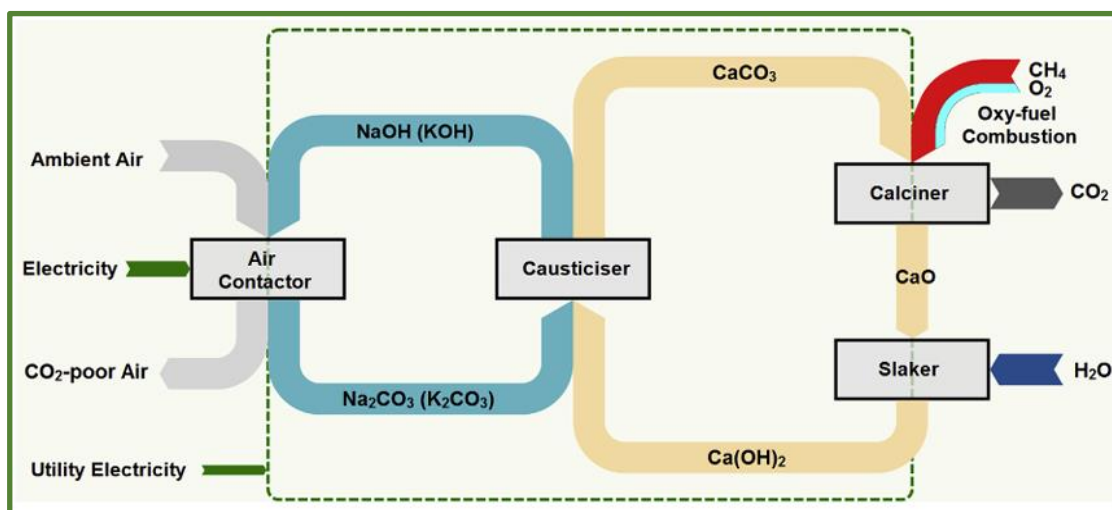


圖 4-2 DAC 捕捉方式示意圖

圖源：文獻四 Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants

若要人人上手，直接使用 Ca(OH)_2 來吸附大氣中的 CO_2 ，除了可以簡化流程外， Ca(OH)_2 的鹼性較弱，相較於使用 NaOH 或 KOH 會更安全。且使用後 CO_2 的儲存形式以穩定、不易溶於水的 CaCO_3 形式儲存，方便收集回收，因此設計【實驗三】。

- (四) 在文獻五「A Critical Review of CO₂ Capture Technologies and Prospects for Clean Power Generation, Energies」當中使用胺溶液（例如：單乙醇胺，簡稱乙醇胺）來吸收二氧化碳。這個過程的化學反應式如下：



其中，單乙醇胺與 CO_2 發生反應生成水溶性鹽，捕捉了二氧化碳。若升溫至 111 °C 時，逆向反應發生，解析出 CO_2 氣體，再生後的胺吸收液可循環使用。

此外，在中華民國第 51 屆中小學科學展覽會國中組化學科的「太陽能二氧化碳捕捉器」報告中，也提到單乙醇胺吸收效果較好，不過此文獻吸收 CO_2 是利用加壓的環境下進行實驗。綜合以上兩個文獻，決定設計【實驗一】探討單乙醇胺對吸收 CO_2 的效果。

- (五) 2022 年工業技術研究院也在月刊中提到，工研院材料與化工研究所所長李宗銘表示，此次工研院與臺塑、成功大學的合作(文獻六)，整合了二氧化碳捕獲、由成功大學提供的觸媒技術，加上製程、料源規格、提純製程的技術設計，共同成功建立煙道氣二氧化碳資源化示範技術。先以高效能吸收劑（醋酸鉀捕獲劑）捕獲工廠煙道所排放氣體中的二氧化碳，再利用工廠餘熱進行分離、純化與再生，可大幅降低能耗，解決二氧化碳捕獲成本過高的缺點，因此設計了【實驗二】。



圖 4-3 神奇碳捕捉海綿

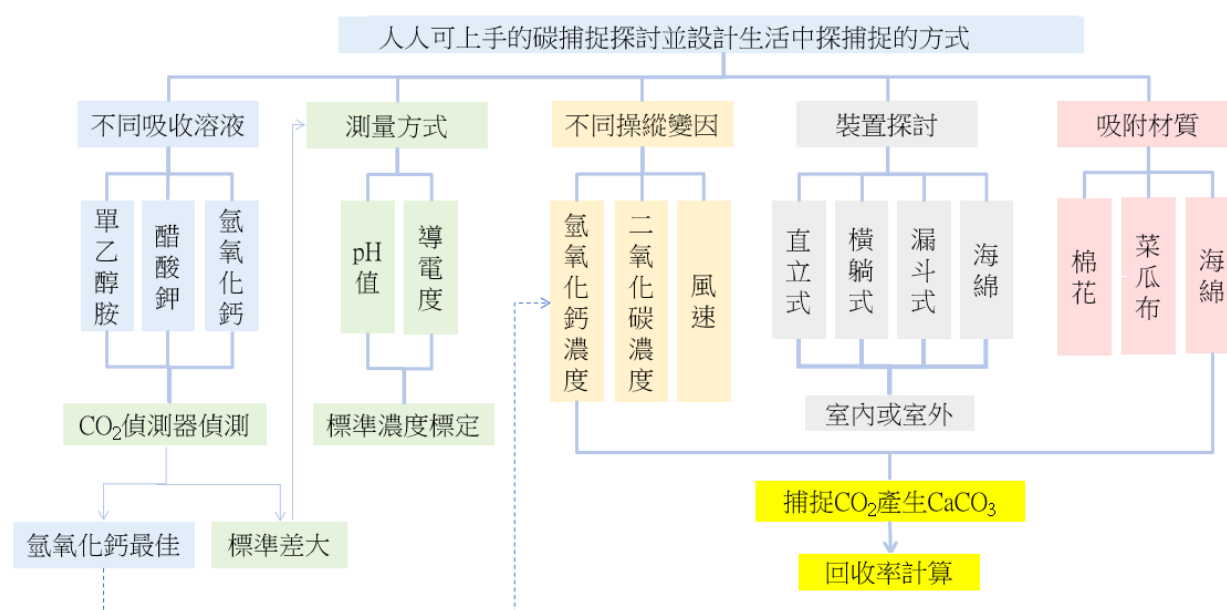
圖源：YouTube (How Heirloom's Direct Air Capture facilities remove carbon dioxide from our atmosphere)

- (六) 2023 年加州新創公司 Heirloom，共同創辦人、研究部門主管麥奎恩（Noah McQueen）說：「Heirloom Carbon 利用天然石灰岩，賦予超能力後將它變成海綿，可吸收大氣中的二氧化碳。然後將海綿擰乾，將二氧化碳永久儲存在地底」。此文獻將天然石灰石變成了神奇捕碳海綿方法是先將石灰石碳酸鈣壓碎高溫鍛

燒，分解為二氧化碳跟氧化鈣，二氧化碳封存到地下，氧化鈣再加水成為氫氧化鈣，就成為吸附二氧化碳的粉末，放在薄薄的托盤垂直組成塔柱形狀，很快就跟大氣中的二氧化碳結合變回石灰石。自然界需要幾年完成的過程，在 Heirloom Carbon 方法中只要 3 天就可以達到，平均每平方公尺可去除 50 噸二氧化碳。而且重複同樣的步驟，就能不斷循環吸碳，將碳儲存到地下或者固化在水泥中變成建材。本研究認為與其複雜地將碳酸鈣製成固態海綿，不如直接將氫氧化鈣溶液吸附在日常用到的清潔海綿，因此在【實驗九】當中利用清潔海綿進行測試。

二、 實驗流程圖

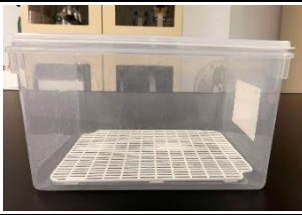


圖源：作者自行編製



三、 前置作業

(七) 觀察箱：由於要做好控制變因，因此必須尋找足夠大的密閉容器，可裝下培養皿及空氣品質偵測器，且方便觀察偵測器的數值變化，因此比對以下裝置，最後決定使用第二代加工作為最終版觀察箱，如表 4-1。

表 4-1 觀察箱

	第一代	第二代	第二代加工(止洩帶)
照片			
優點	空間夠大、透明度高方便觀察，1 個 120 元較便宜。	密合度高，有洩壓裝置，半透明方便觀察。	密合度更高，氣壓較高時，盒子會鼓起來且不會恢復原狀。
缺點	蓋子凹槽無氣密膠條、雖然排水測試無漏水，但氣壓高時，便明顯漏氣。	1 個 420 元較貴，氣壓較高時，盒子會鼓起來又慢慢回復原狀，表示些微漏氣。	X

本表圖源：作者自行拍攝

- (八) 觀察箱進出氣裝置：為了要瞭解 CO_2 濃度對吸收度的影響，改用 CO_2 鋼瓶灌入觀察箱，利用進氣秒數來改變 CO_2 濃度，所以要更確認進出氣的控制，製作以下裝置，如表 4-2。

表 4-2 觀察箱進出氣裝置步驟

第一步	第二步	第三步
		
在觀察箱兩側打洞，洞的高度為培養皿的 4 倍高。	組裝進水閥接頭、墊片讓洞氣密。	兩側接上橡皮管，避免灌入氣體過高而爆開。

本表圖源：作者自行拍攝

四、實驗設計與步驟

(一) 【實驗一】不同單乙醇胺濃度吸收 CO_2 的效果

- 說明：根據文獻五，探討不同單乙醇胺濃度吸收二氧化碳之效果。
- 裝置介紹：觀察箱中放置二氧化碳偵測器與盛裝單乙醇胺的培養皿，另再放一個裝有定量碳酸鈣的培養皿，藉由加入鹽酸來製造二氧化碳(如圖 4-4)。
- 控制變因
 - 二氧化碳生產量： CaCO_3 12g、 HCl 4M, 60mL。
 - 單乙醇胺溶液總體積 50 mL。
 - 吸收時間 20 分鐘、相同放置位子(如圖 4-4)，同步反應於同一日完成。
- 操縱變因：單乙醇胺(乙醇胺)濃度。
- 應變變因： CO_2 濃度(ppm)。
- 實驗步驟
 - 將空氣品質偵測器放入觀察箱，並記錄 CO_2 初始濃度。
 - 配置單乙醇胺與水的質量比分別為 3:1、2:1、1:1 溶液，並在觀察箱中放置單乙醇胺 50mL 及碳酸鈣的培養皿。
 - 將鹽酸倒入碳酸鈣培養皿後立即蓋上觀察箱。
 - 開始計時後，前 5 分鐘每分鐘測量一次 CO_2 濃度，5 分鐘過後改為每五分鐘測量一次，直到 20 分鐘為止；並重複 3 次相同條件的實驗。



圖 4-4 將鹽酸倒入觀察箱
圖源：作者自行拍攝

(二) 【實驗二】不同醋酸鉀濃度吸收 CO_2 的效果

- 說明：根據文獻六，探討不同醋酸鉀濃度吸收二氧化碳之效果。
- 裝置介紹：同實驗一，吸收溶液改為醋酸鉀。
- 控制變因
 - 二氧化碳生產量： CaCO_3 12g、 HCl 4M, 60mL。
 - 配置飽和醋酸鉀溶液(溶解度：200g/100g 水)，再取飽和液與水的體積比分別為 3:1、2:1、1:1 溶液，並在觀察箱中放置醋酸鉀 50mL 及碳酸鈣的培養皿。

- (3) 吸收時間 20 分鐘、相同放置位子(如圖 4-4)，同步反應於同一日完成。
4. 操縱變因：醋酸鉀濃度。
5. 應變變因：CO₂ 濃度(ppm)。
6. 實驗步驟：將吸收溶劑改為醋酸鉀，其他步驟與實驗一相同。

(三) 【實驗三】不同氫氧化鈣濃度吸收 CO₂ 的效果

1. 說明：根據文獻四，瞭解不同氫氧化鈣濃度吸收二氧化碳之效果。
2. 裝置介紹：同實驗一，吸收溶液改為醋酸鉀。。
3. 控制變因：
 - (1) 二氧化碳生產量：CaCO₃12g、HCl,4M,60mL。
 - (2) 氫氧化鈣溶液總體積 50 mL。
 - (3) 吸收時間 20 分鐘、相同放置位子(如圖 4-4)，同步反應於同一日完成。
4. 操縱變因：氫氧化鈣濃度(使用飽和氫氧化鈣溶液再加水進行稀釋)。
5. 應變變因：CO₂ 濃度(ppm)。
6. 實驗步驟：吸收溶劑改為氫氧化鈣(溶解度：0.185g/100g 水)，其他步驟與實驗二相同。

(四) 【實驗四】利用不同濃度 Ca(OH)₂ 的 pH 值製作檢量線

1. 說明：利用 Ca(OH)₂ 消耗後，pH 會下降的性質，在製作解氫氧化鈣濃度 pH 值的檢量線。
2. 裝置介紹：使用 pH 測量計測量。
3. 控制變因：
 - (1) 氫氧化鈣溶液體積：50 mL。
 - (2) 吸收二氧化碳時間 24 小時、放置位子、測量時間一致同步進行以減少誤差。
4. 操縱變因：氫氧化鈣濃度。
5. 應變變因：pH 值數值。
6. 實驗步驟
 - (1) 將不同濃度氫氧化鈣倒入培養皿。
 - (2) 24 小時後，測量各溶液的 pH 值(如圖 4-5)。



圖 4-5 測量溶液 pH 值
(圖源：作者自行拍攝)

表 4-3 電極裝置圖

實際照片	示意圖

圖源：作者自行拍攝編製

(五) 【實驗五】利用不同濃度 Ca(OH)₂ 的電流製作檢量線

1. 說明：氫氧化鈣吸收 CO₂ 反應式：

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$
 Ca(OH)₂ 是強鹼，溶於水後易解離，溶液導電性高，但若與 CO₂ 反應後，產物 CaCO₃ 和 H₂O 皆不是電解質，導電性下降，因此利用這個性質來檢測 Ca(OH)₂ 剩餘的濃度。本實驗則是用 Ca(OH)₂ 標準溶液來製作導電度的檢量線。
2. 裝置介紹：將 50mL 氫氧化鈣放入燒杯，並利用電極裝置(如表 4-3)測量其導電度。
3. 控制變因
 - (1) 電極裝置：兩碳棒間距離 1.00 cm、碳棒圓徑 0.85 cm、沒入液面深度 3.00 cm。
 - (2) 氫氧化鈣溶液體積：50 mL。
 - (3) 吸收二氧化碳時間：24 小時。



圖 4-6 測量導電度
(圖源：作者自行拍攝)

- (4) 其他：放置位子、測量時間一致同步進行以控制周圍溫度、測量時間以減少誤差。
4. 操縱變因：氫氧化鈣濃度。
5. 應變變因：電流大小。
6. 實驗步驟
 - (1) 將不同濃度氫氧化鈣倒入培養皿反應 24 小時。
 - (2) 將吸收一天二氧化碳的氫氧化鈣到入燒杯測量電流(如圖 4-6)。

(六) 【實驗六】不同 CO₂ 濃度對碳捕捉效率的影響

1. 說明：為了加速反應速率，以便快速瞭解影響氫氧化鈣碳捕捉的效率，設計高 CO₂ 濃度對氫氧化鈣碳捕捉效率的影響。為避免灌入後氣壓過大而影響氣體灌入量，在灌入 CO₂ 時，出氣管會同步打開。
2. 裝置介紹：盛裝氫氧化鈣的培養皿，放入裝有進出氣裝置的觀察箱。
3. 控制變因
 - (1) 氫氧化鈣濃度 100%、體積：50 mL。
 - (2) 二氧化碳的灌入量：2 kgf/cm²(如表 4-4)。
 - (3) 吸收時間 5 分鐘、放置位子如右圖，吸收時間 20 分鐘、相同放置位子，同步反應於同一日完成。
4. 操縱變因：二氧化碳灌入觀察箱的秒數。
5. 應變變因：導電度電流。
6. 實驗步驟
 - (1) 將盛裝氫氧化鈣的培養皿，放入進出氣裝置(如表 4-4)，蓋上觀察箱。
 - (2) 將二氧化碳從橡皮管灌入觀察箱。
 - (3) 夾緊橡皮管，靜置 5 分鐘。
 - (4) 測量氫氧化鈣電流與 pH 值。

表 4-4 放入進出氣裝置(圖源：作者自行拍攝)

二氧化碳的灌入氣壓	灌入時，出氣管開通	灌入完畢時，入氣、出氣管同時密閉
		

(七) 【實驗七】不同氫氧化鈣濃度對碳捕捉效率的影響

1. 說明：以直接空氣捕獲技術(DAC)進行測試，瞭解氫氧化鈣濃度對碳捕捉效率的影響。
2. 裝置介紹：將 50mL 氫氧化鈣放入培養皿。
3. 控制變因
 - (1) 二氧化碳濃度(皆為大氣濃度)。
 - (2) 氫氧化鈣溶液體積 50 mL。
 - (3) 吸收時間 24 小時、位置一致、同步反應於同一日完成以減少誤差。
4. 操縱變因：氫氧化鈣濃度。
5. 應變變因：氫氧化鈣電流與 pH 值。
6. 實驗步驟：

- (1) 將配置完成的氫氧化鈣水溶液倒入培養皿。
- (2) 將培養皿放置於陰涼通風處反應 24 小時。
- (3) 將反應過後的氫氧化鈣水溶液到入燒杯(不取沉澱 CaCO_3)。
- (4) 測量氫氧化鈣電流與 pH 值。

(八) 【實驗八】不同風速對碳捕捉效率的影響

1. 說明：根據直接空氣捕獲技術(DAC)，探討不同風速對氫氧化鈣碳捕捉效率的影響。
2. 裝置介紹：盛裝氫氧化鈣的培養皿，放置於不同風速處(如圖 4-7)。
3. 控制變因
 - (1) 氫氧化鈣濃度 100%、體積 50 mL。
 - (2) 與風扇距離、放置位子與周圍溫度。
 - (3) 吸收時間：30 分鐘。
 - (4) 同步反應於同一日完成。
4. 操縱變因：風速大小。
5. 應變變因：氫氧化鈣電流與 pH 值。
6. 實驗步驟
 - (1) 將盛裝氫氧化鈣的培養皿，放至於風扇出風口前方(如圖 4-7)。
 - (2) 啟動風扇後，靜置 30 分鐘，測量氫氧化鈣電流與 pH 值。



圖 4-7 風速裝置
(圖源：作者自行拍攝)

(九) 【實驗九】盛裝方式放置位置對碳捕捉效率之影響

1. 說明：根據直接空氣捕獲技術(DAC)，探討不同盛裝容器對氫氧化鈣碳捕捉效率的影響。且根據【實驗八】的結果，風速會增加吸收效果，利用白努力定律(如圖 4-8)，因此設計漏斗式寶特瓶(如圖 4-9)增加風速以增加 CO_2 吸收量。
2. 裝置介紹
 - (1) 自製容器寶特瓶直立式、橫躺式(如圖 4-10、圖 4-11)，並在瓶身上方打兩個洞，以平衡內外氣壓，空氣才吹得進去。
 - (2) 自製漏斗式寶特瓶：將寶特瓶前半部切斷，並倒置放進瓶身，用熱熔膠黏三個邊，留第四邊(「此面朝上」那面)以方便倒出(如圖 4-12)。
 - (3) 清潔海綿吸收完氫氧化鈣溶液後，放置培養皿上(如圖 4-13)。

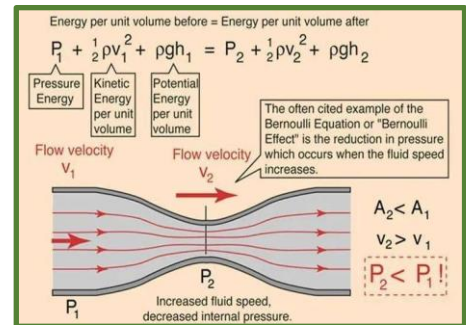


圖 4-8 白努力定律
圖源：Liquip 釋出公有領域

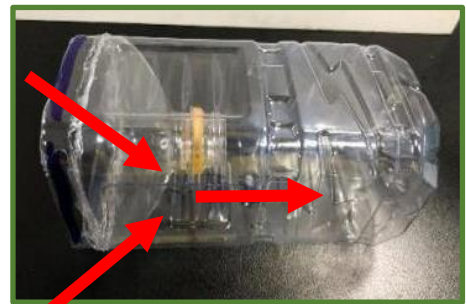


圖 4-9 漏斗式裝置示意圖
(圖源：作者自行拍攝)

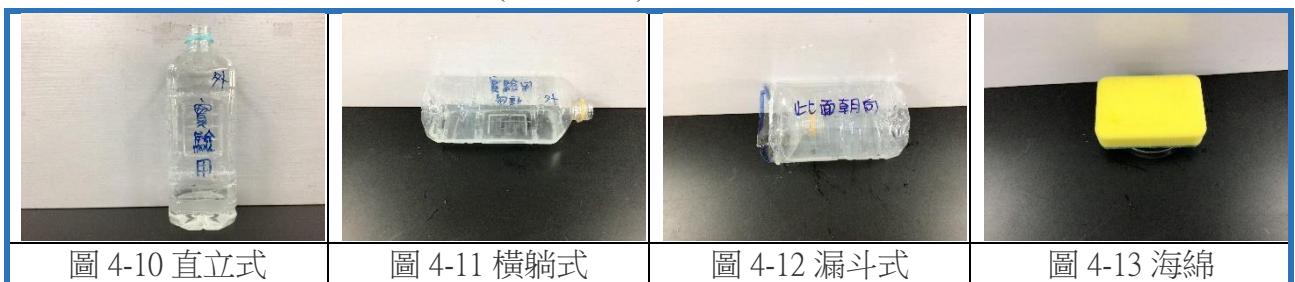


圖 4-10 直立式

圖 4-11 橫躺式

圖 4-12 漏斗式

圖 4-13 海綿

(圖源：作者自行拍攝)

3. 控制變因

- (1) 氫氧化鈣濃度 100%。
- (2) 氫氧化鈣總體積：測試一塊海綿在不會滴的情況下可吸取氫氧化鈣水溶液的最大量，得約為 152mL，本次實驗氫氧化鈣溶液控制 150mL。
- (3) 檢測時間：24 小時。
- (4) 其他：同步反應於同一日完成。

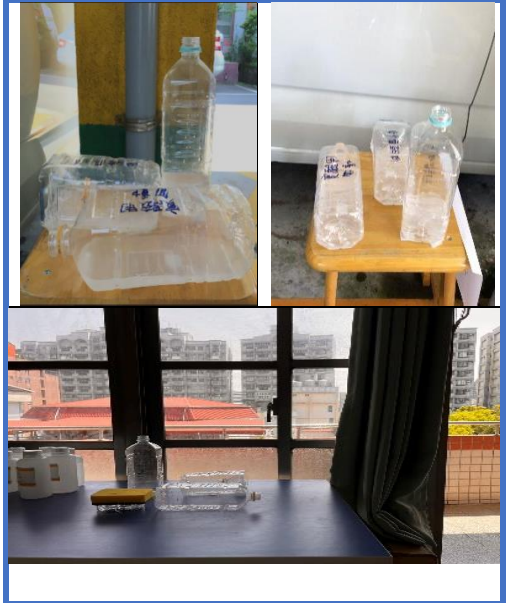
4. 操縱變因：氫氧化鈣盛裝方式。

5. 應變變因：氫氧化鈣電流與 pH 值。

6. 實驗步驟

- (1) 將氫氧化鈣溶液 150mL 分別倒入三種不同的寶特瓶各兩組。
- (2) 將海綿吸飽 150mL，並放置培養皿上，此裝置各兩組。
- (3) 放置室內與室外(如表 4-5)各一組，每一組包含寶特瓶橫躺式、直立式漏斗式、清潔海綿各一個。
- (4) 靜置一天後，將氫氧化鈣倒置量筒記錄殘留量，並測量氫氧化鈣電流與 pH 值。

表 4-5 室外與室內放置位置(圖源：自行拍攝)



(十) 【實驗十】氫氧化鈣吸附於不同材質對碳捕捉效率之影響

1. 說明：根據【實驗九】的結果，探討是否孔隙越多，與二氧化碳的接觸面積越大，吸收效果就越好。因此找尋生活中不同孔隙大小的清潔海綿、菜瓜布和棉花，作為實驗用品。

2. 控制變因

- (1) 氫氧化鈣濃度 100%、氫氧化鈣總體積：100 mL。
- (2) 檢測時間：一天。
- (3) 其他：同步反應於同一日完成。

3. 操縱變因：氫氧化鈣吸收材質。

4. 應變變因：氫氧化鈣電流與 pH 值。

5. 實驗步驟

- (1) 準備三杯 100mL 氫氧化鈣分別倒入不同吸收材質(如圖 4-14~圖 4-16)。



圖 4-14 海綿



圖 4-15 菜瓜布



圖 4-16 棉花

(圖源：作者自行拍攝)

- (2) 按壓吸附物，使 100mL 氫氧化鈣被完全吸收。
- (3) 將吸 100 mL 氫氧化鈣之材質放置於培養皿上。
- (4) 靜置 24 小時後，將氫氧化鈣擠進燒杯記錄殘留量。
- (5) 測量氫氧化鈣電流與 pH 值。

(十一) 【實驗十一】測量培養皿與海綿的碳酸鈣生成量及計算回收率

- 說明：為了驗證圖 4-17 的<2>實驗反應產生足夠之 CaCO_3 生成量，還要使鈣循環能持續有效反應，進而達到鈣循環回收目的，故本實驗 11-1 以十個培養皿為容器進行實驗；實驗 11-2 以十個海綿作為吸附材質進行實驗，因此探討碳酸鈣生成量及回收率。

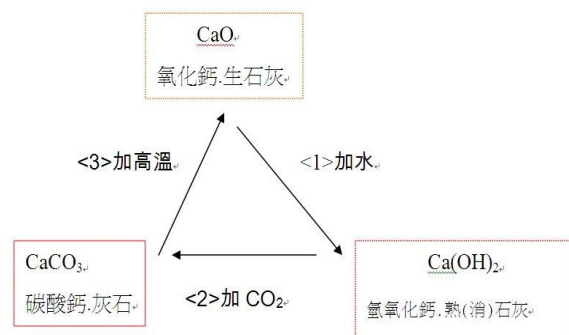


圖 4-17 鈣循環示意圖

圖源: science-forest 生熟石灰和灰石的三角關係

- 控制變因
 - 氫氧化鈣濃度 100 %、氫氧化鈣總體積 50 mL。
 - 反應時間：24 小時。
 - 其他：同步反應於同一日完成。
- 應變變因：碳酸鈣生成量。
- 實驗步驟
 - 準備十個培養皿分別盛裝 50 mL 氫氧化鈣。
 - 靜置一天後，實驗 11-2 增加將海綿浸泡水中並按壓 5 次的步驟(實驗 11-1 無)，將溶液使用濾紙過濾出碳酸鈣，並利用大量蒸餾水沖洗，減少氫氧化鈣濃度，減少誤差。
 - 把濾紙攤開，內側朝上，並用蒸餾水把 CaCO_3 沖洗到底下的燒杯裡。
 - 利用烘乾機以 150°C 的溫度、每 10 分鐘檢查一次，直到完全烘乾整個燒杯為止。
 - 利用電子秤測量其質量，並減去烘乾後空燒杯之平均質量，計算 CaCO_3 生成量及回收率。
 - 完全反應回收率算法
 - 完全反應理想值生成量計算法
氫氧化鈣與二氧化碳反應的化學反應式為 $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ， Ca(OH)_2 溶解度：0.174g/100mL，因為使用 50mL，所以溶液中 Ca(OH)_2 含有 0.087g，等同 $0.0012\text{mol} = \frac{0.087}{74}$ 。因為反應係數比=1:1= $\text{mole}_{\text{Ca(OH)}_2}:\text{mole}_{\text{CaCO}_3}$ ，所以 CaCO_3 為 0.0012mol， CaCO_3 質量=0.0012mol \times 100 = **0.12g**。由氫氧化鈣濃度變化量了解氫氧化鈣消耗多少莫耳，氫氧化鈣與碳酸鈣係數為 1：1，所以氫氧化鈣消耗多少莫耳，碳酸鈣就用去多少莫耳，藉此了解碳酸鈣生成量之理想生成量
 - 本實驗理想生成量計算法
利用電流推知 Ca(OH)_2 反應率%，再乘 CaCO_3 生成質量，公式為 $0.12 \times \text{Ca(OH)}_2 \text{反應率} \times 100\%$
 - 回收率計算公式： $\frac{\text{實際生成量}}{\text{理想生成量}}$

伍、研究結果

一、【實驗一】不同單乙醇胺濃度吸收 CO₂ 的效果

- (一) 控制變因：二氧化碳生產量、吸收時間 20 分鐘、放置位置、風速、溫度、容器、藥品體積。
- (二) 操縱變因：單乙醇胺濃度。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-1、圖 5-1

表 5-1 實驗一數據

與水比例 \ 分鐘	0	1	2	3	4	5	10	15	20
1:1(50%)	443.3	1697.0	2170.7	2811.0	3339.3	3325.3	3680.7	4143.0	4340.7
標準差	2.5	396.0	500.1	426.4	605.1	562.9	1518.7	1409.7	1142.0
2:1(67%)	442.7	1619.0	2043.0	2713.0	3011.7	3394.0	4476.7	4601.7	4799.0
標準差	2.9	214.7	482.8	399.7	550.4	420.9	692.1	581.0	348.1
3:1(75%)	443.7	1455.0	1679.0	1844.3	2199.3	2365.3	3037.3	3693.0	4010.3
標準差	2.1	113.9	334.9	654.4	474.4	187.0	811.3	1065.7	1133.3

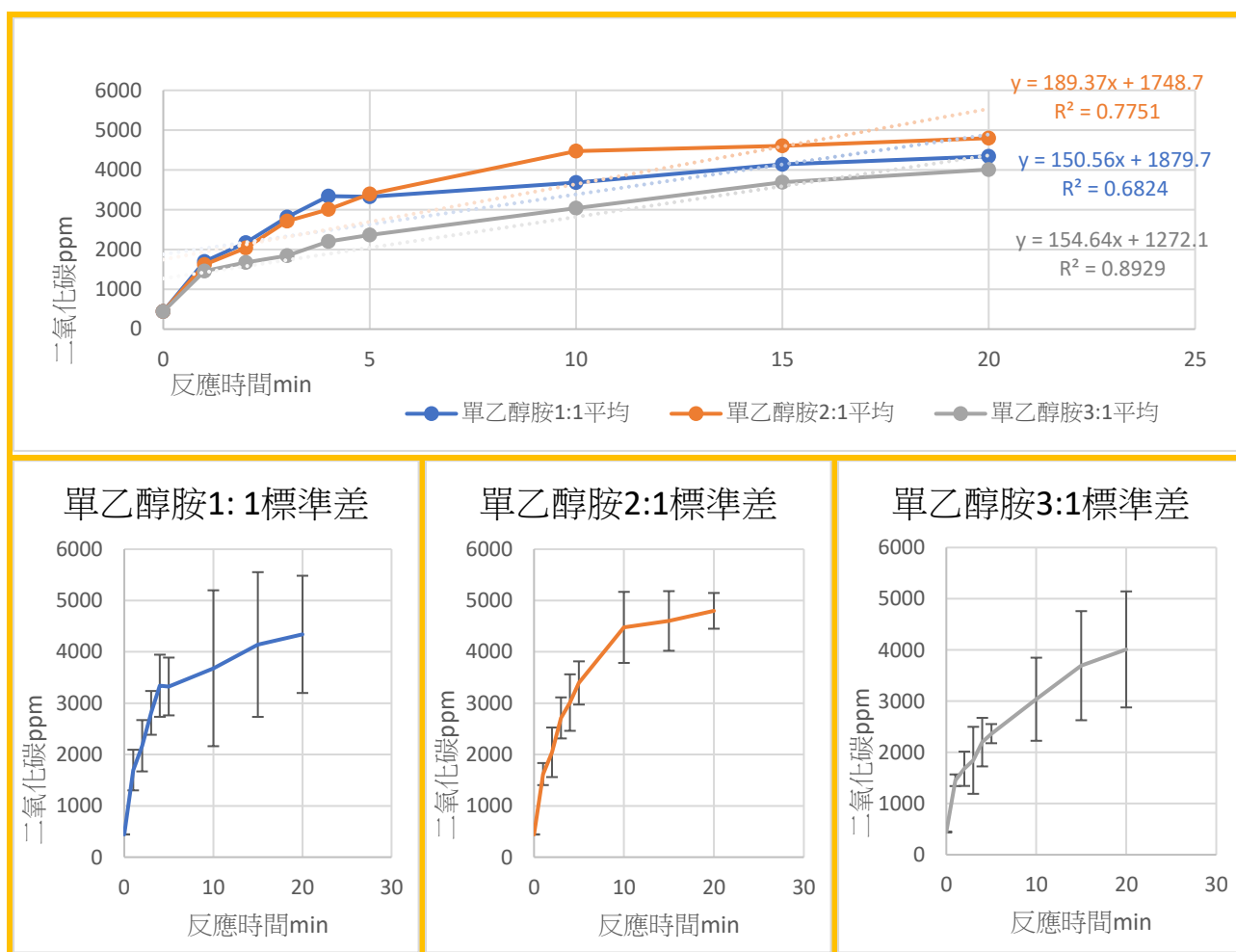


圖 5-1 不同單乙醇胺濃度反應時間剩餘 CO₂ 的濃度 (圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

1. 吸收效果為 75% > 50% > 67%，表示濃度與吸收度無明顯關係。
2. 高濃度的單乙醇胺吸收效率最高。
3. 無論單乙醇胺濃度為何實驗誤差皆極大（標準差最高達 1518.70）。

二、【實驗二】不同醋酸鉀濃度吸收 CO₂ 的效果

- (一) 控制變因：二氧化碳生產量、吸收時間 20 分鐘、放置位置、風速、溫度、容器、藥品體積。
- (二) 操縱變因：醋酸鉀濃度。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-2、圖 5-2

表 5-2 實驗二數據

與水比例 \ 分鐘	初始	1	2	3	4	5	10	15	20
1:1(50%)	441.7	1689.0	1816.0	2818.7	2976.0	3331.3	4297.3	4593.3	4875.0
標準差	1.2	308.9	311.5	327.1	354.6	377.2	488.1	758.3	1121.4
2:1(67%)	442.7	1577.0	1930.3	2927.3	3022.7	3330.7	3964.7	4481.7	4765.3
標準差	2.1	362.0	322.3	362.1	354.2	386.1	644.3	727.0	406.5
3:1(75%)	441.7	1610.0	1795.3	1815.7	1845.0	1865.0	1951.3	2374.0	2983.0
標準差	1.2	316.4	403.4	292.4	327.4	388.4	564.0	521.7	216.5

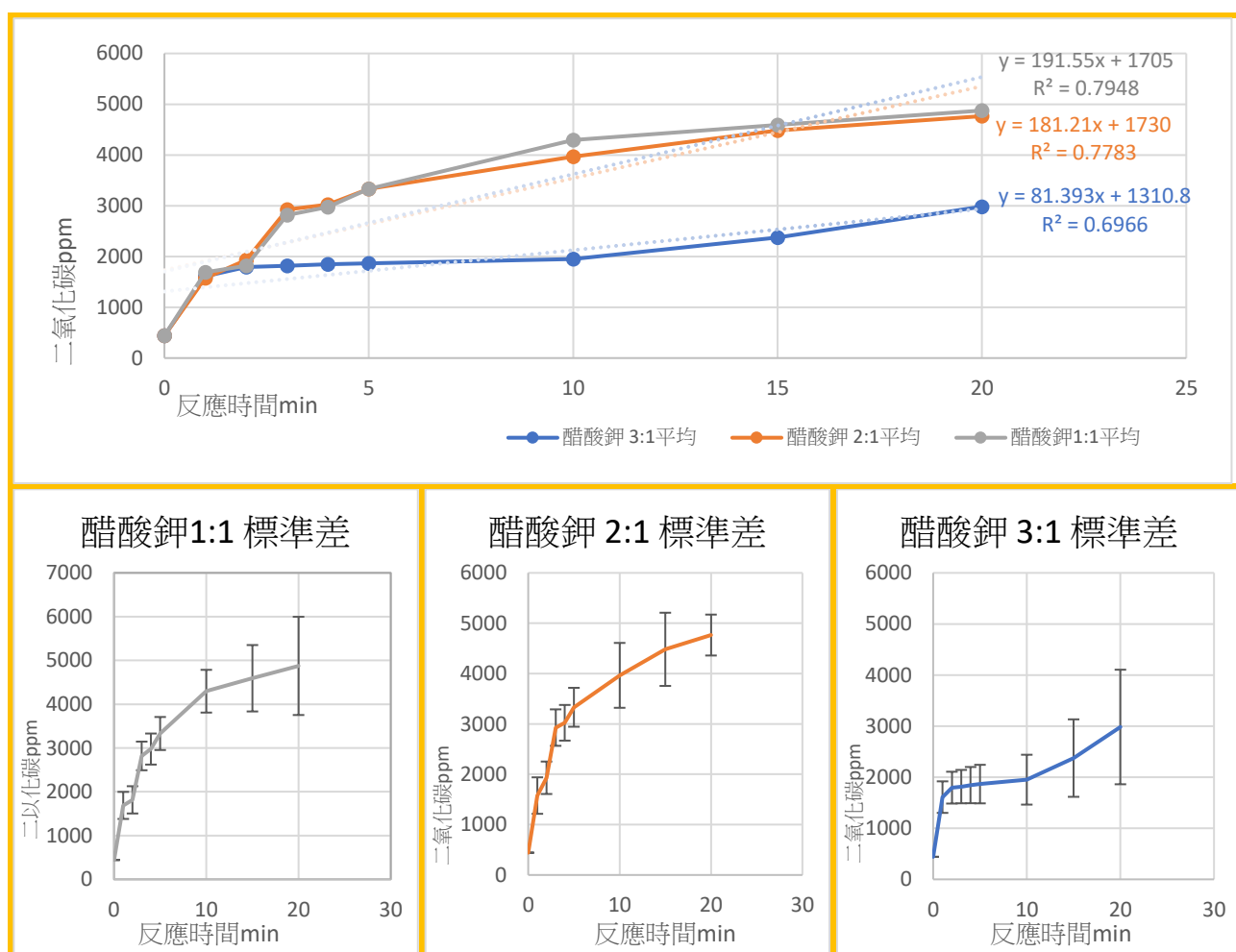


圖 5-2 不同醋酸鉀濃度反應時間剩餘 CO₂ 的濃度 (圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

1. 醋酸鉀濃度 75% 吸收效果最好，濃度 50% 和 66.67% 的吸收效果幾乎相同。
2. 不論濃度為何實驗誤差皆極大（標準差最高達 1121.4）。

三、【實驗三】不同氫氧化鈣濃度吸收 CO₂ 的效果

- (一) 控制變因：二氧化碳生產量、吸收時間 20 分鐘、放置位置、風速、溫度、容器，藥品體積。
- (二) 操縱變因：氫氧化鈣濃度。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-3、圖 5-3

表 5-3 實驗三數據

與水比例 \ 分鐘	初始	1	2	3	4	5	10	15	20
1:1(50%)	443.3	923.3	1013.0	1223.0	1655.0	2396.3	3092.3	3635.3	4002.3
標準差	2.5	112.1	178.2	248.7	273.8	377.0	511.1	527.4	217.2
2:1(67%)	444.00	825.67	1014.00	1457.33	1580.33	1934.33	2253.67	3240.67	3496
標準差	1.7	25.1	109.0	190.1	317.2	392.2	328.3	326.4	367.0
3:1(75%)	442.3	795.3	1279.7	1186.7	1468.3	1524.0	1462.3	1681.7	1667.3
標準差	3.2	32.0	199.8	147.6	260.4	365.8	286.9	151.4	105.2

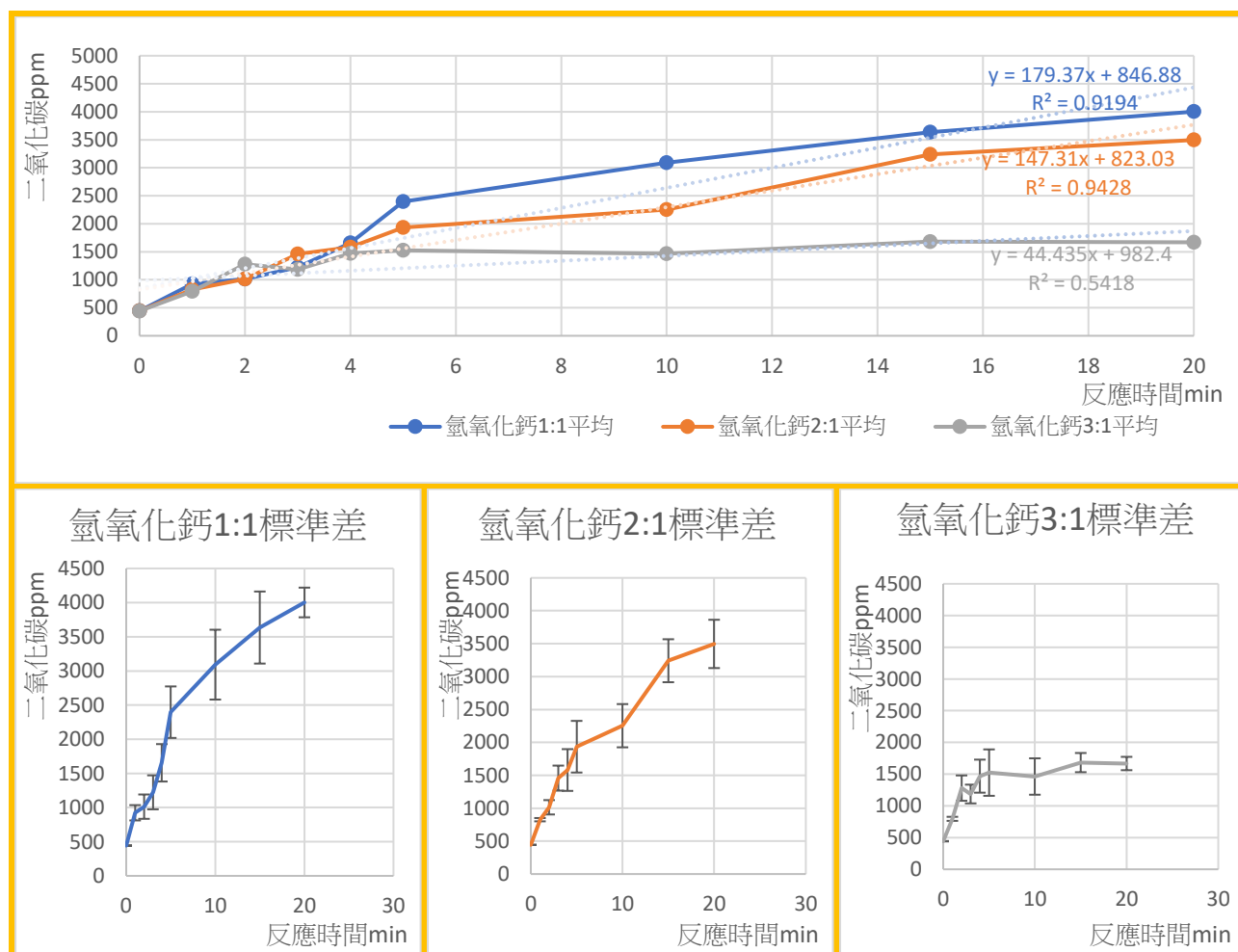


圖 5-3 不同氫氧化鈣濃度反應時間剩餘 CO₂ 的濃度 (圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

1. 氫氧化鈣濃度 75% 的吸收效果依序為 75% > 66.67% > 50%，可知氫氧化鈣濃度與二氧化碳吸收效果呈正相關，濃度越高，吸收效果越好。
2. 不論濃度為何實驗誤差皆極大（標準差最高達 527.4）。

四、【實驗四】利用不同濃度 Ca(OH)_2 的 pH 值製作檢量線

- (一) 控制變因：藥品種類、藥品體積 50mL、吸收時間 24 小時、放置位置、風速、溫度、容器。
- (二) 操縱變因：氫氧化鈣濃度。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-4、圖 5-4

表 5-4 實驗四數據

濃度%	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	1
pH 值	12.747	12.733	12.693	12.677	12.647	12.607	12.583	12.497	12.327	12.047	10.823
標準差	0.031	0.021	0.015	0.038	0.021	0.025	0.015	0.025	0.047	0.112	0.126

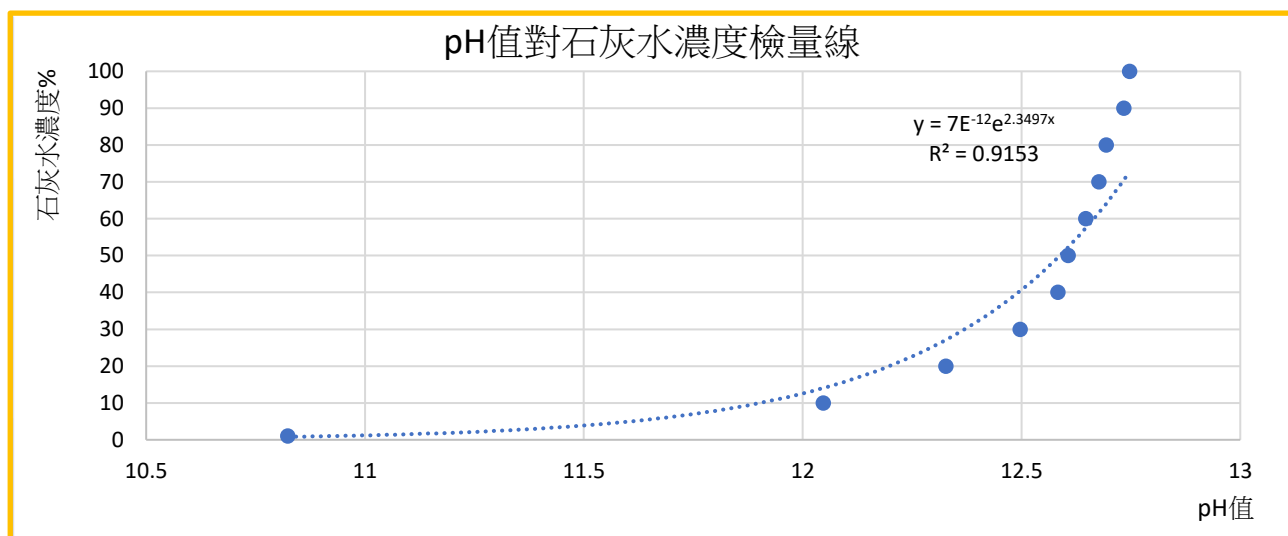


圖 5-4 pH 值對石灰水濃度作圖(圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

1. pH 的公式如下：

$$pH = -\log [H^+] = \log \frac{1}{[H^+]}$$

根據公式再對照圖 5-4，pH 值與濃度呈指數關係。

2. 反應後，pH 值下降，表示氫氧化鈣吸收了二氧化碳。可知 pH 值的變化可以反映二氧化碳的吸收量，pH 值下降越多，亦即吸收的二氧化碳越多。

五、【實驗五】利用不同濃度 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的導電度製作檢量線

- (一) 控制變因：藥品種類、藥品體積 50mL、吸收時間 24 小時、放置位置、風速、溫度、容器。
- (二) 操縱變因：藥品濃度。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-5、圖 5-5

表 5-5 實驗五數據

濃度%	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	1
I	0.660	0.607	0.573	0.457	0.427	0.337	0.273	0.193	0.153	0.090	0.023
標準差	0.026	0.021	0.040	0.032	0.025	0.042	0.049	0.042	0.035	0.040	0.015

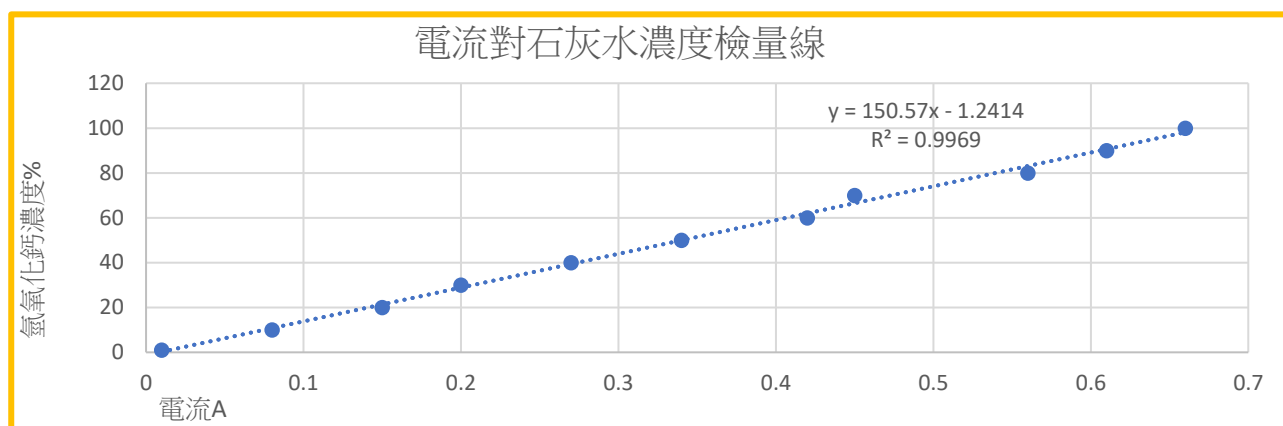


圖 5-5 導電度對石灰水濃度作圖(圖源：作者自行製作)

(四) 實驗結果

1. 氫氧化鈣濃度越高，導電度（電流）越高，且導電度與濃度呈正相關，所得線性函數為 $y(\text{濃度}) = 150.57x(\text{電流}) - 1.2414$ 。
2. 反應後，若導電度下降，表示氫氧化鈣吸收了二氧化碳，可知導電度值的變化可以反映二氧化碳的吸收量。導電度下降越多，表示吸收的二氧化碳越多;因此，後續實驗只需測量導電度即可推算出二氧化碳的吸收量，簡化實驗流程。

六、【實驗六】不同 CO₂ 濃度對碳捕捉效率的影響

- (一) 控制變因：藥品種類、藥品體積 50mL、吸收時間 24 小時、風速、溫度、容器、藥品濃度。
- (二) 操縱變因：灌入二氧化碳時間。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-6、圖 5-6

表 5-6 實驗六數據

秒數	1	2	3	4	5	10
電流	0.367	0.373	0.327	0.370	0.397	0.317
標準差	0.045	0.031	0.047	0.020	0.021	0.025
反應後濃度%	54.24	55.23	48.33	54.74	58.68	46.85
效率值	2.727	2.679	3.061	2.703	2.521	3.158

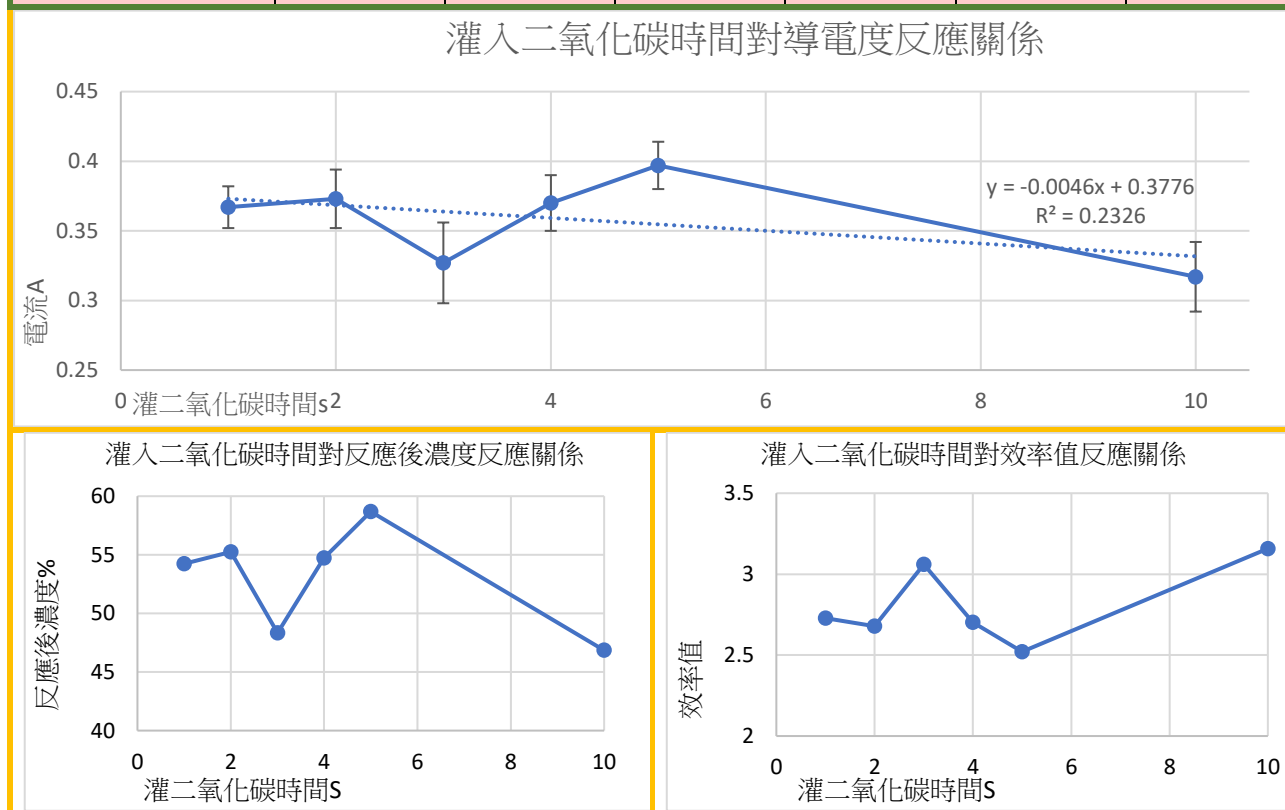


圖 5-6 在不同二氧化碳濃度測得各種數值作圖(圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

根據實驗結果，不論灌入多久的二氧化碳，電流值皆落在 0.3~0.4 之間，表示灌入二氧化碳時間的長短，對效率值沒有差異。

七、【實驗七】不同氫氧化鈣濃度對碳捕捉效率的影響

- (一) 控制變因：藥品種類、藥品體積 50mL、吸收時間 24 小時、放置位置、風速、溫度、容器。
- (二) 操縱變因：氫氧化鈣濃度。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-7、圖 5-7

表 5-7 實驗七數據

氫氧化鈣濃度	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
I	0.03	0.023	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.017	0.013	0.01
標準差	0.004	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.001	0.001
反應後濃度%	4.44	3.45	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.47	1.97	1.48
效率值	33.33	42.86	50	50	50	50	50	60	75	100

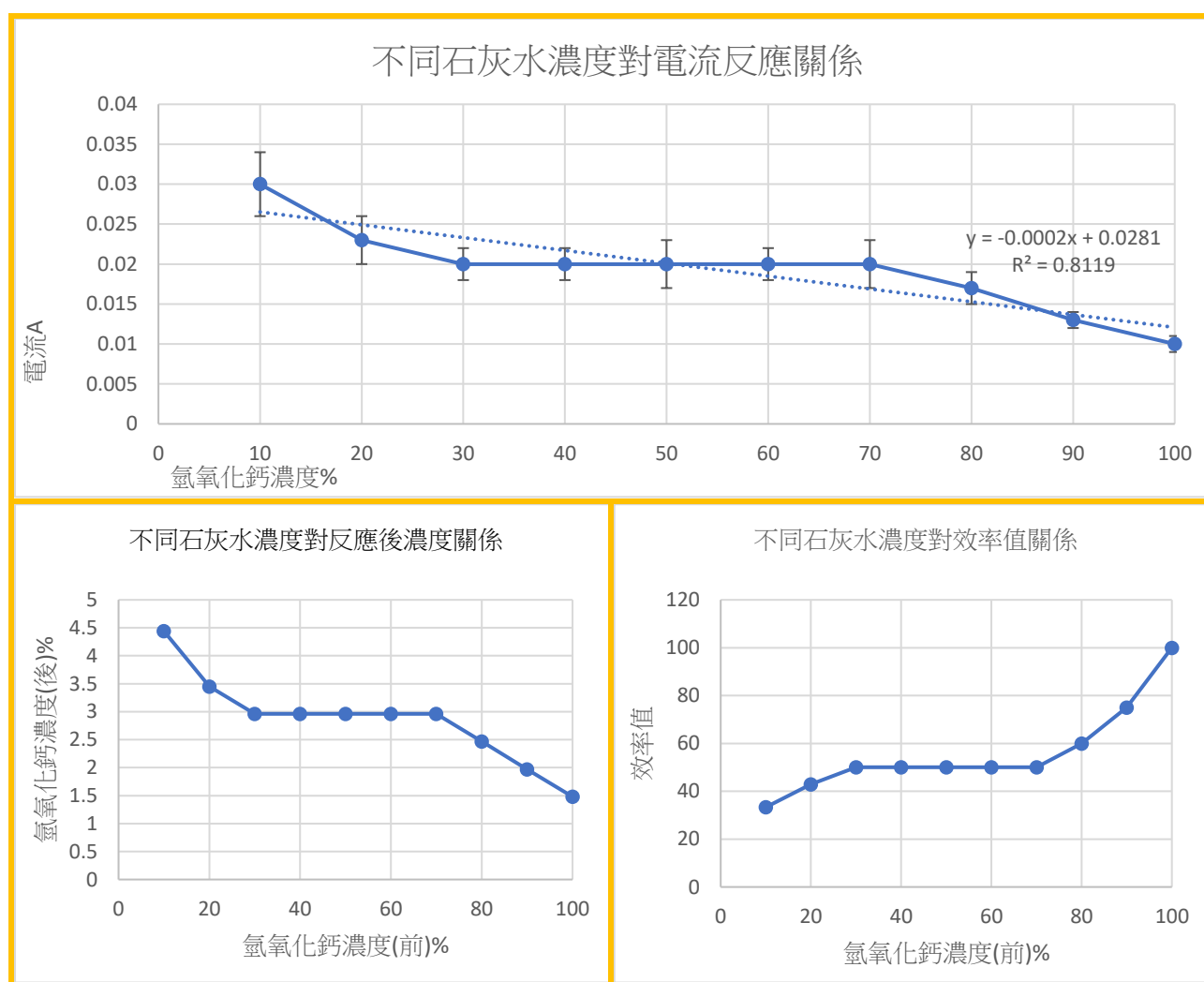


圖 5-7 石灰水濃度對 pH 值及電流作圖(圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

1. 導電性大小依序: 10%>20%>30%=40%=50%=60%=70%>80%=90%>100%。
2. 氫氧化鈣濃度越高，導電度較低，效率值較高，表示二氧化碳吸收較好。

八、【實驗八】不同風速對碳捕捉效率的影響

- (一) 控制變因：藥品種類、藥品體積 50mL、藥品濃度、吸收時間 24 小時、容器、放置位置、溫度。
- (二) 操縱變因：風速大小。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-8、圖 5-8

圖 5-8 實驗八數據

風速 m/s	3.6	2.3	1.8	1.2
電流	0.48	0.49	0.51	0.59
標準差	0.018	0.016	0.023	0.017
反應後濃度(%)	71.49	73.96	74.95	87.27
效率值	2.06	2.00	1.97	1.69

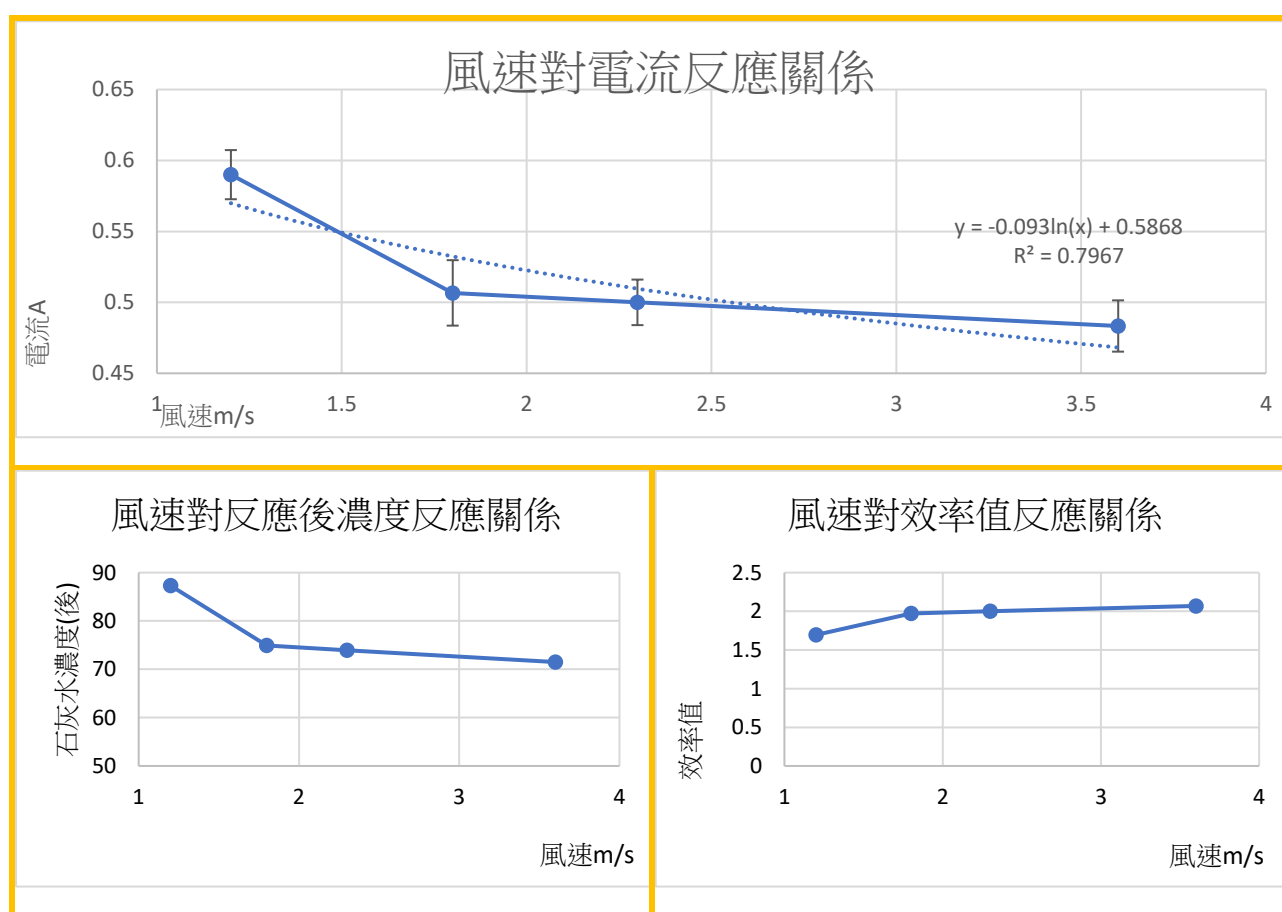


圖 5-8 在不同風速下測得各種數值作圖(圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

- 風較強有助於碳捕捉的效率。
- 發現當風速對導電度是線性關係時 $R^2=0.6$ ，具有 60%解釋能力，而如果是對數關係大約是 $R^2 = 0.7967$ ，具有 79.67%解釋能力，較線性關係時，具更高解釋能力，推論風速對碳捕捉是成對數關係，而不是線性關係。

九、【實驗九】盛裝方式放置位置對碳捕捉效率之影響

- (一) 控制變因：藥品種類、藥品體積 150mL、藥品濃度、吸收時間、容器。
- (二) 操縱變因：盛裝方式放置位置(室內、室外)。
- (三) 實驗結果：數據與圖表如表 5-9 圖 5-9

表 5-9 實驗九數據

	內橫躺式	外橫躺式	內直立式	外直立式	內海綿	外海綿	內漏斗式	外漏斗式
pH 值	12.61	12.33	12.61	12.58	8.82	8.58	12.61	12.60
標準差	0.036	0.057	0.025	0.070	0.085	0.030	0.036	0.032
I	0.150	0.163	0.156	0.150	0.033	0.033	0.146	0.140
標準差	0.013	0.010	0.011	0.012	0.012	0.013	0.011	0.010
反應後濃度%	22.190	24.162	23.176	22.190	4.931	4.931	21.696	20.710
效率值	6.667	6.122	6.383	6.667	30.000	30.000	6.818	7.143

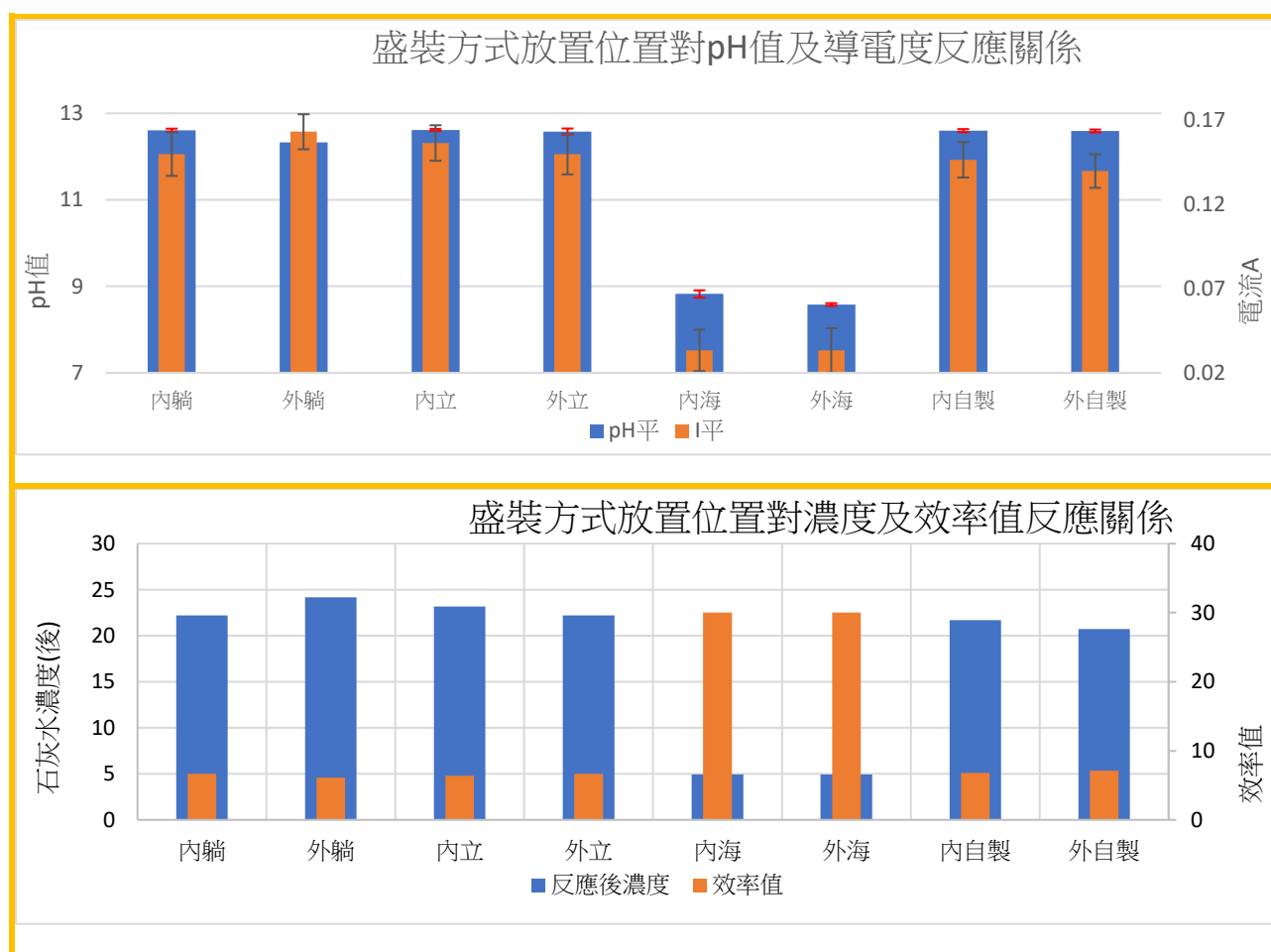


圖 5-9 盛裝方式放置位置實驗數據(圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

1. 室內與室外結果並無差異。
2. 海綿效果最佳，其次為漏斗式，直立式與橫躺式差異不大。
3. 海綿殘留量最少，其他依序為漏斗式、直立式與橫躺式。

十、【實驗十】氫氧化鈣吸附於不同材質對碳捕捉效率之影響

- (一) 控制變因：藥品種類、藥品體積 150mL、藥品濃度、吸收時間、擺放位置。
- (二) 操縱變因：石灰水吸收材質。
- (三) 實驗結果：數據如表 5-10、圖 5-10

表 5-10 實驗時數據

吸收材質	海綿	菜瓜布	棉花
pH 值	8.19	8.13	9.05
標準差	0.248	0.132	0.236
I	0.03	0.039	0.044
標準差	0.002	0.003	0.003
反應後濃度	4.43	5.71	6.65
效率值	33.3	25.8	22.7

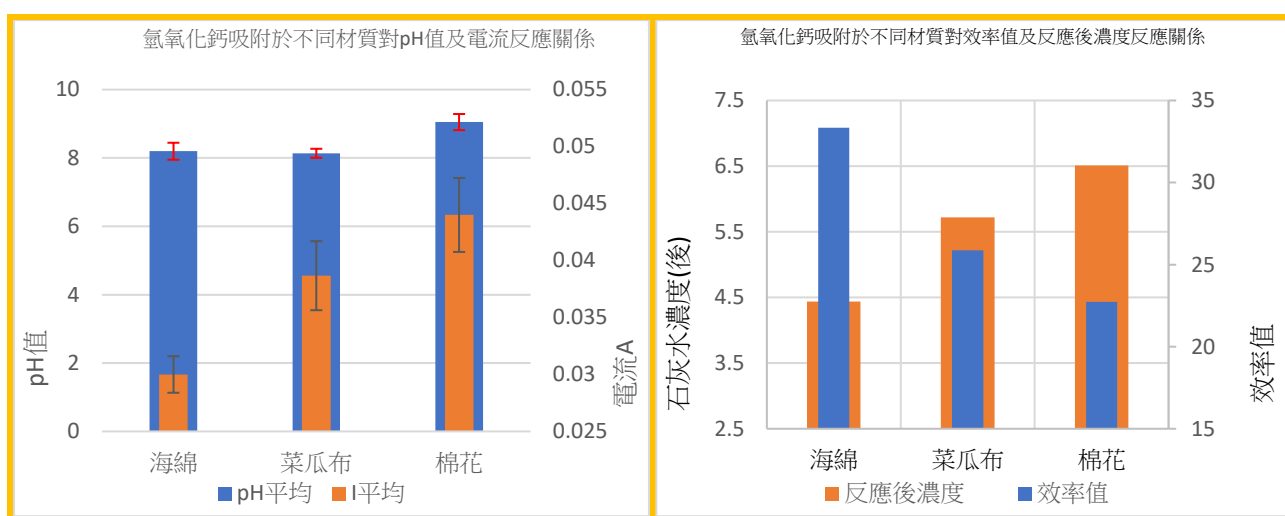


圖 5-10 氫氧化鈣吸附材質實驗數據(圖源：作者自行製作)

(四) 結果說明

清潔海綿吸收效果最好，菜瓜布效果次之，棉花效果最差。

十一、【實驗十一】測量碳酸鈣生成量及計算回收率

(一) 控制變因：藥品種類、藥品體積 50 mL、藥品濃度、吸收時間、擺放位置。

(二) 實驗結果：數據如表 5-11

5 次實驗空燒杯烘乾後平均質量

$$162.69\text{g}=(162.75+162.68+162.64+162.71+162.67)/5。$$

表 5-11

實驗	編號 1	編號 2	編號 3	編號 4	編號 5	平均	標準差
11-1 以培養皿 為容器	十組培養皿總質量	163.25	163.27	163.28	163.30	163.28	0.0162
	十組碳酸鈣質量	0.960	0.980	0.990	1.010	0.990	0.018
	每組碳酸鈣質量	0.096	0.098	0.099	0.101	0.099	0.002
11-2 以清潔海 綿吸附	十組海綿總質量	163.13	163.07	163.22	163.04	163.17	0.065
	十組碳酸鈣質量	0.840	0.780	0.930	0.750	0.880	0.065
	每組碳酸鈣質量	0.084	0.078	0.093	0.075	0.088	0.007

(三) 實驗結果：

1、 培養皿此實驗理論生成質量： $0.12 \times 98.51\%$ (反應後濃度) = $0.1182(g)$ 。

培養皿中碳酸鈣回收率： $0.0989 \div 0.1182 \times 100\% = 83.67\%$ 。

2、 培養皿此實驗理論生成質量： $0.12 \times 95.1\%$ (反應後濃度) = $0.1141(g)$ 。

海綿中碳酸鈣回收率： $0.0836 \div 0.1141 \times 100\% = 73.27\%$ 。

陸、研究討論

一、【實驗一】單乙醇胺濃度與吸收 CO₂ 之反應關係

(一) 實驗結果顯示，吸收效果為 75% > 50% > 67%，濃度與吸收效果無明顯相關性，但高濃度較有明顯差異。

1. 單乙醇胺吸收 CO₂ 的反應式如下：



推測當反應要進行時，CO₂ 需同時與兩個單乙醇胺進行碰撞，才有機會反應，而空氣中的 CO₂ 濃度約只有 0.04%，因此在高濃度時，吸收才有明顯效果。

2. 文獻五中提到用高濃度單乙醇胺進行 CO₂ 捕捉效果會更佳，也印證了此結果。

(二) 單乙醇胺探捕捉數據的標準差極大。

單乙醇胺碳捕捉的數據標準差最大達到 1518，表示數據不穩定。

(三) 單乙醇胺水溶液較濃稠，液體流動性較低，因此與 CO₂ 的碰撞機率較不穩定，所以沒有明顯規律。

二、【實驗二】醋酸鉀濃度與吸收 CO₂ 之反應關係

濃度愈高吸收 CO₂ 效率有提升，但無明顯規律，推測結果如下。

- (一) 醋酸鉀水溶液較濃稠，液體流動性較低(如圖 6-1)，因此與 CO₂ 的碰撞機率較不穩定，所以沒有明顯規律。
- (二) 接觸面積限制：培養皿面積小，醋酸鉀與二氧化碳的接觸面積有限，可能只有表層完成反應，導致吸收量無明顯差異。

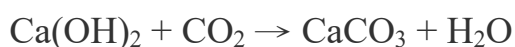


圖 6-1 醋酸鉀所配置的溶液較為濃稠
(圖源：作者自行拍攝)

三、【實驗三】氫氧化鈣濃度與吸收 CO₂ 之反應關係

- (一) 氫氧化鈣濃度越高，CO₂ 吸收效果越好。

1. 氫氧化鈣吸收 CO₂ 的反應式如下：



其溶液流動性佳，較易與空氣中的 CO₂ 碰撞，雖然溶解度只有 0.185g/100mL，但吸收效果卻很好。

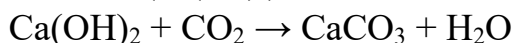
2. 增加氫氧化鈣莫耳數：氫氧化鈣濃度提高，莫耳數增加，反應所需的二氧化碳量更多，導致二氧化碳濃度降低較明顯。

四、【實驗一】至【實驗三】綜合討論

- (一) 比較三者最高濃度的吸收效果，以氫氧化鈣最好，分析原因如下。

1. 化學反應機制差異

- (1) 單乙醇胺 (HOCH₂CH₂NH₂) 吸收二氧化碳為可逆反應，一旦達平衡就無法再吸收。
- (2) 根據 Tsai(2021) 醋酸鉀 (CH₃COOK) 進行吸附時有搭配催化劑技術及製程技術，但此技術未公布，因此在未添加催化劑的情況下吸收效果不佳。
- (3) 氫氧化鈣 (Ca(OH)₂) 和二氧化碳直接反應生成碳酸鈣沉澱，反應式：



因為碳酸鈣生成後會沉澱，促使平衡持續向生成產物方向移動，反應效率高。

2. 氫氧化鈣的鹼性較強

測量三種溶劑與水的比例為 3:1 時 pH 值如表 6-1。

表 6-1 三種溶劑 pH 值對照

吸收溶液	單乙醇胺	醋酸鉀	氫氧化鈣
pH 值	11.92	8.13	12.68

氫氧化鈣水溶液 pH 值較高，能更有效促進二氧化碳進行酸鹼中和反應。

3. 結論：氫氧化鈣的吸收效果最好，主要是因為反應生成碳酸鈣沉澱，驅動反應平衡持續進行，再加上強鹼性的優勢，吸收二氧化碳的能力就更明顯了。

- (二) 標準差皆過大：為了瞭解造成標準差過大的因素為何，進行了對照組的實驗，結果如表 6-2、圖 6-2。

表 6-2 對照組數據

分鐘	0	1	2	3	4	5	10	15	20
對照 1	446	3775	3511	3775	3981	4045	3968	4767	5000
對照 2	444	1328	1135	1328	1355	1493	1717	2941	3897
對照 3	444	745	943	1203	1054	2209	2170	3428	3977
平均	444.7	1949.3	1863.0	2102.0	2130.0	2582.3	2618.3	3712.0	4291.3
標準差	1.2	1607.7	1430.4	1450.2	1610.1	1316.3	1190.6	945.5	615.0

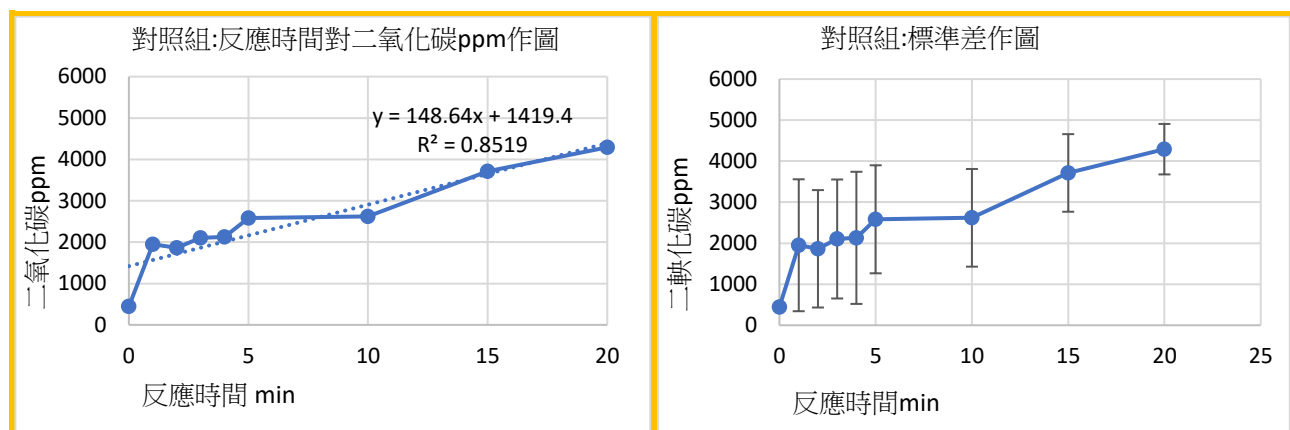


圖 6-2 對照組(圖源：作者自行製作)

1. 0~5 分鐘標準差特別大
 - (1) 鹽酸與碳酸鈣為異相反應，鹽酸的流速與碳酸鈣粉末接觸情形很容易影響反應速率，但皆以人工方式倒入鹽酸，可能導致流速快慢不一。
 - (2) 鹽酸加碳酸鈣產生二氧化碳的速率過快，氣體在容器中持續流動，造成數據高度不穩定。
 2. 即使經過 20 分鐘，標準差仍大，為 615.0，認為空氣品質偵測在較高 CO₂ 濃度的環境下，其偵測數值不穩定，這會使未來在探討各項變因時造成較大的誤差。
- (三) 修正實驗找尋新的測量方式：因為【實驗一】~【實驗三】的標準差過大，加上製造 CO₂ 的反應速率可能會影響偵測結果，於是決定更改測量方式，設計了【實驗四】與【實驗五】。

五、【實驗四】利用不同濃度 Ca(OH)₂ 的 pH 值製作檢量線

- (一) pH 值與吸收效果：pH 值的變化可以反映二氧化碳的吸收量。而藉由 pH 公式：

$$pH = -\log [H^+] = \log \frac{1}{[H^+]}$$

可推得，如果氫氧化鈣吸收了二氧化碳 pH 值將會下降。pH 值下降越多，表示吸收的二氧化碳越多。

- (二) 檢量線應用：由於 pH 值與氫氧化鈣濃度的檢量線為指數關係，因此較不方便適用，且高濃度的氫氧化鈣 pH 值很接近，若拿此檢量線做對照，較易產生誤差。

六、【實驗五】利用導電度中的電流製作氫氧化鈣不同濃度的檢量線

- (一) 導電度與吸收效果：導電度下降越多，表示吸收的二氧化碳越多。
- (二) 檢量線應用：藉由建立導電度與氫氧化鈣濃度的檢量線，後續實驗只需測量導電度即可推算出二氧化碳的吸收量。
- (三) 標準液之反應後濃度及效率值演算法：
 1. 反應後濃度：根據實驗結果，所得的線性函數為 $y=150.57x-1.2414$ ，其中 y =濃度， x =電流，接下來將根據此公式來求得實驗反應後石灰水之濃度。
 2. 效率值：由於反應後電流較高，代表吸收到的二氧化碳量較少，反之電流較低，則吸收效果較佳，兩者呈負相關，因此**定義電流之倒數等於效率值**，且這個數值是用來比對的，而不是真正的數值。

七、【實驗四】至【實驗五】綜合討論

pH 值與導電度各有其優缺點，在低濃度時，pH 值變化量較大，但易受溫度影響，需重新校準。相較之下，導電度測量快速、穩定，且與濃度呈線性關係，分析直觀；然而，導電度測量過久會造成電解，影響溶液性質，且對電極要求較高。

根據表 6-1 優缺點分析，【實驗六】~【實驗八】只進行導電度的測量，【實驗九】~【實驗十】因不可空因素較多，為了雙重確認，pH 值及導電度都會進行測量。

表 6-1 利用 pH 值與導電度來進行測量的優缺點

	pH 值	導電度
優點	在低濃度時，其變化較明顯。	1. 測量速度快，且數據較穩定。 2. 導電度與濃度呈線性關係，數據分析更加直觀。
缺點	當溫度不同時，誤差較大，數據不穩定。	測量導電度時會造成電解，影響溶液性質，因此測量停留時間不可過長。

八、【實驗六】不同 CO₂ 濃度對碳捕捉效率的影響

- (一) 無論灌入多久的二氧化碳，導電 I 值皆落在 0.3~0.4 之間，表示灌入二氧化碳時間的長短，對效率值沒有差異。本研究推論實驗中 CO₂ 氣體(氣相)要與 Ca(OH)₂ 溶液(液相)進行碰撞才能反應，然而在高 CO₂ 濃度環境中，表面會快速形成一層 CaCO₃ 薄膜，(如圖 6-3)，而薄膜阻絕了氣相與液相的碰撞，導致電流皆落在 0.3~0.4 之間。

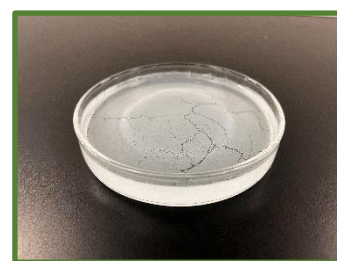


圖 6-3 Ca(OH)₂ 溶液表面會快速形成一層 CaCO₃ 薄膜
(圖源：自行拍攝)

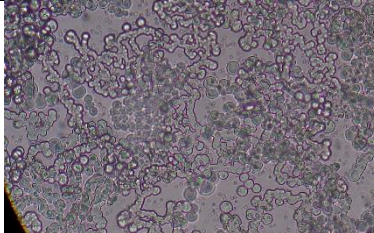
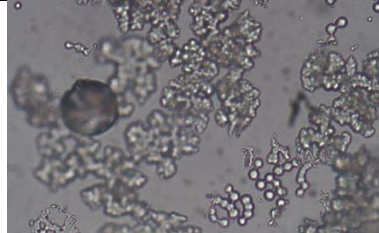
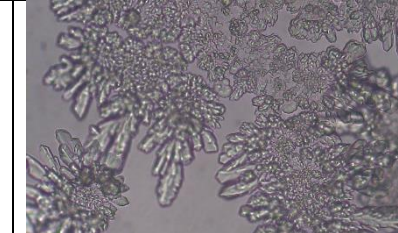
- (二) 後續實驗改善方式
 1. 直接在大氣中進行 DAC 捕捉，無須以高濃度 CO₂ 來加快反應速率，直接模擬實際應用場景。
 2. 增加反應時間，以便看出各項操縱變因所造成的差異。

九、【實驗七】不同氫氧化鈣濃度對碳捕捉效率的影響

氫氧化鈣濃度越高吸收二氧化碳效果越好

- (一) 氫氧化鈣濃度越高，表示表層液體與空氣中 CO_2 的碰撞機會越多。
- (二) 反應效果：碰撞機會越大，反應越好，因此後續實驗都將會使用飽和氫氧化鈣溶液，但 CO_2 吸收量卻比【實驗六】多，若形成薄膜的話，就不會阻擋 CO_2 的吸收量嗎？因此利用顯微鏡 400 倍倍率，來了解薄膜的變化，如表 6-4。

表 6-4 靜置不同時間的薄膜 400 倍放大圖(圖源：自行拍攝)

時間	1 小時	2 小時	6 小時
照片			

隨著時間碳酸鈣的結晶雖然越來越大，但結晶間的空隙也會拉開，使得空氣中的二氧化碳仍有機會與氫氧化鈣進行反應。

十、【實驗八】不同風速對碳捕捉效率的影響

- (一) 風速越強，吸收效率越高，推論風速可以增加二氧化碳與氫氧化鈣的碰撞頻率，提升反應速率。
- (二) 風速與吸收效率呈對數關係，亦即隨著風速增加，效率提升逐漸趨緩，推測風速增加會提升水分蒸發速率，影響了二氧化碳與氫氧化鈣的碰撞。

十一、探討各種因素對大氣中碳捕捉效率的影響綜合分析

- (一) 二氧化碳濃度：即使高濃度的二氧化碳，吸收效率無明顯提升，且在低濃度 CO_2 甚至在自然環境中，即有效果。
- (二) 氫氧化鈣濃度：濃度越高，吸收效率越好，100%的氫氧化鈣適合用於大氣中二氧化碳的捕捉。
- (三) 風速：風速越強，吸收效率越高，且風速與導電度呈對數關係。

十二、綜合【實驗六】、【實驗七】、【實驗八】以上三點設計了【實驗九】

- (一) 藉【實驗六】選擇直接從大氣中進行 DAC 碳捕捉。
- (二) 藉【實驗七】選用濃度 100%的氫氧化鈣。
- (三) 藉【實驗八】設計室內與室外的實驗，推測室外風速較大，可提高吸收效率；並利用白努力定律，設計自製裝置(漏斗式寶特瓶)以增強風速觀察吸收效率。

十三、【實驗九】盛裝方式放置位置對碳捕捉效率之影響

- (一) 室內與室外結果並無差異
根據交通部中央氣象署所查詢桃園當天風速為蒲福氏風級 2 級，根據表 6-5 也就是風速約 1.6~3.3m/s，理論上室外的吸收效率應高於室內。

表 6-5 風速對照表

蒲福氏風級數	0	1	2	3	4	5
對照風速 m/s	0~0.2	0.3~1.5	1.6~3.3	3.4~5.4	5.5~7.9	8.0~10.7

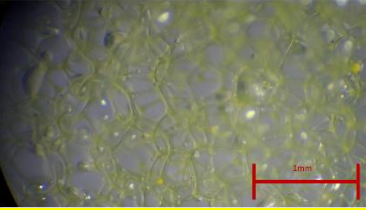

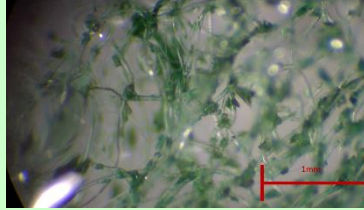
但結果不明顯，室內與室外結果並無差異，分析其因如下。

1. 【實驗八】用培養皿進行實驗，而【實驗九】的寶特瓶瓶口較小，即使有風要灌入也不容易。
 2. 為避免校園學生或汽機車碰撞，室外擺放在牆邊的車棚下方；室內則擺放教室門邊，學生進出有風，導致室外與室內風速可能差異不大。
- (二) 海綿效果最佳，其次為漏斗式，直立式與橫躺式差異不大；海綿殘留量最少，其他依序為漏斗式、直立式與橫躺式。
1. 海綿吸收效果明顯優於其他三者，認為海綿的孔洞多，提高與空氣中 CO_2 的碰撞機會，但蒸發量較大，且未來若探討回收率，可能較不易回收，進而探討孔隙大小對 CO_2 的吸收效果及殘留量影響。
 2. 漏斗式效率值略高於直立式與橫躺式，推測雖然風速會增加吸收度，但漏斗口向瓶內壓縮，造成接觸面積下降，因此並沒有明顯得提升吸收效果。

十四、【實驗十】氫氧化鈣吸附於不同材質對碳捕捉效率之影響

- (一) 根據【實驗十】結果，為了探討孔隙大小與實驗結果的關係，因此利用 45 倍解剖顯微鏡拍攝吸水後的清潔海綿、棉花與菜瓜布(如表 6-6)。

表 6-6 操作顯微鏡觀察孔洞之大小及比對(圖源：自行拍攝)

	海綿	棉花	菜瓜布
照片			
最大	540 μm	175 μm	730 μm
最小	86 μm	12 μm	63 μm
中位數	250 μm	67 μm	218 μm
平均	313 μm	93.5 μm	396.5 μm

註 1:因孔洞為不規則，無法直接測量其面積，所以在表 6-6 是直接測量孔洞對角線。

- (二) 測量三種吸附材質的保液量：取質量為 4.2g 的棉花、海綿與菜瓜布，測量其的保液量如圖 6-4，結果如表 6-7。

表 6-7 不同吸附材質的保液量與溶液殘留量

	海綿	棉花	菜瓜布
保液量(mL)	80.8	64.1	44.0
三天後的殘留量(mL) 殘留百分比(%)	11.4(14.1%)	13.2(20.6%)	0(0%)

1. 海綿的多孔結構與透風性：海綿有許多具有足夠支撐力的小孔洞，這些孔隙讓氫氧化鈣溶液可以攜帶到更多與 CO_2 的接觸面，增加碰撞機會。相比之下菜瓜布的孔隙較大，而棉花則因吸收溶液後嚴重塌陷(如表 6-8)，導致孔隙被水分填滿；此外，從三天後液體殘留量是棉花最高，推測由於空氣不易進入，所以水分不易蒸發。



圖 6-4 測量保液量
(圖源：自行拍攝)

表 6-8 棉花吸水前後比對(圖源：自行拍攝)

	吸收溶液前	吸收溶液後
高度	約 8.00cm	約 3.00cm
照片		

2. 保液量較高
 - (1) 海綿本身吸水性非常強，能夠把更多溶液牢牢保持在結構中，提供更多的反應劑以供吸收二氧化碳。
 - (2) 棉花纖維細，但因為疏水性較差或者容易被壓縮，保液量比海綿少。
 - (3) 菜瓜布的孔隙較大且結構剛性高，沒有海綿那麼能攜帶液體。
3. 結論：海綿在這種應用中效果最好，應該是因為它能夠保持更多氫氧化鈣溶液，提供更多的反應面積，並且促進空氣中的二氧化碳和溶液的接觸。這些綜合作用，**海綿效果最好**。

十五、【實驗十一】測量碳酸鈣生成量及計算回收率

(一) 實驗可行性

無論在培養皿或海綿的情況下，回收率都高達 73.27% 甚至 83.67%，表示反應在不同環境中皆具有良好的反應效率；且對反應條件具高度適應性，反應效率穩定。

(二) 培養皿回收率比海綿高

1. 海綿本身因孔洞較多增加反應面積，吸收二氧化碳效率較培養皿佳，但在孔洞內反應，無論在何種方式下，反應完成的碳酸鈣都還是會有部分沉積於孔洞之中。
2. 相較於培養皿，還須增加將海綿浸泡水中並按壓 5 次的步驟，過程較繁複所以耗損較多。

(三) 實驗應用性

培養皿因程序簡單與回收損耗較低具較高的實用性與操作便利性，若要以永續儲存為目的最為適合，但若重視吸收效率與碳捕捉表現，海綿仍具有潛在應用價值，希望能在進一步優化清洗可望提升整體應用效益。

柒、結論

一、本研究使用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 為反應物的理由

依據【實驗一】~【實驗三】發現 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 對吸收 CO_2 效果最佳。

- (一) 【實驗一】單乙醇胺濃度與吸收度無明顯相關性。
- (二) 【實驗二】高濃度的醋酸鉀對二氧化碳吸收效率較高。
- (三) 【實驗三】氫氧化鈣吸收 CO_2 的效果，是三種吸收劑當中最佳，且氫氧化鈣濃度越高，吸收效果越好。
- (四) 【實驗一】~【實驗三】的空氣品質偵測器，測量 CO_2 的濃度，數據穩定度低。

二、測量方式以導電度為主 pH 值為輔

藉由不同測量方式的優缺點分析發現如下。

- (一) 【實驗四】利用 pH 值(x)製作氫氧化鈣不同濃度(y)的檢量線，其關係式為 $y = 6 \times 10^{-12} e^{2.359x}$ 。
- (二) 【實驗五】利用導電度中的電流(x)製作氫氧化鈣不同濃度(y)的檢量線，其關係式為 $y = 150.57x - 1.2414$ 。
- (三) 【實驗四】與【實驗五】結論
 1. pH 值檢量線：適合用於低濃度，其變化較顯著，但易受溫度變化影響。
 2. 導電度檢量線：數據穩定且為線性函數，適合用於分析二氧化碳吸收量。
 3. 兩種檢量線各有優缺點，結合使用可以提高實驗的準確性和效率。
 4. 將導電度的電流直取倒數，定義為效率值。

三、提高 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度與風速能增加吸收效率

依據各種因素對大氣中碳捕捉效率的影響發現如下。

- (一) 【實驗六】環境中二氧化碳濃度提升對提高吸收效率無顯著差異。
- (二) 【實驗七】氫氧化鈣濃度與二氧化碳吸收效率呈正相關，濃度越高，吸收效果越好。
- (三) 【實驗八】風速與電流值呈對數關係，風速的提升有助於加快反應速率，但提升的效率會逐漸趨緩。

四、善用海綿特性能最佳化碳捕捉

藉由室內與室外在不同裝置下對大氣中碳捕捉效率的影響。

- (一) 【實驗九】室內、室外結果差異不大；清潔海綿因與空氣的接觸面積大，吸收效果明顯；漏斗式略優於直立式與橫躺式。
- (二) 【實驗十】不同吸收材質-清潔海綿因表面積大且孔隙適中，吸收效果最佳，蒸發量最少；菜瓜布吸收效果次之，但蒸發量最大；棉花因吸飽後孔隙堵塞，吸收效果最差。

五、輔以培養皿作為碳捕捉永續儲存方式最佳

依據海綿與培養皿碳捕捉後碳酸鈣生成量的多寡

- (一) 【實驗十一】培養皿回收率為 83.67%；海綿回收率為 73.27%，效率穩定。
- (二) 海綿反應後碳酸鈣易沉積於孔洞中，回收率略低於培養皿。
- (三) 培養皿適合永續儲存應用；海綿吸收效率佳，應優化清洗流程。

綜上所述，進行 DAC 技術最佳 CO_2 捕捉效率裝置與條件為：**使用清潔海綿(或吸附體孔徑約 $313\mu\text{m}$)浸泡高濃度氫氧化鈣溶液後，放置於有風處**，其效果最佳。

捌、參考文獻

一、臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺

<https://www.newton.com.tw/wiki/%E7%A2%B3%E6%8D%95%E6%8D%89>

二、從 CCS 進階 CCUS 實現綠能循環經濟-工業技術與資訊月刊-出版品-新聞中心-工業技術研究院

三、IEA (2022). Direct Air Capture, 2025 年 6 月 7 日 擷取自：<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>

四、Fasihi, Mahdi; Efimova, Olga; Breyer, Christian. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. Journal of Cleaner Production. 2019-07-01, 224

五、A Critical Review of CO₂ Capture Technologies and Prospects for Clean Power Generation, Energies, pp

六、Tsai, Chang-Yi, A Study of Performance and Model of CO₂ Capture Using Potassium Acetate Aqueous Solution and CO₂ Methanation by Ni-Fe Catalyst for Pilot Plant. 2021-08-07

七、王知桓, 毛馨慈, 陳恩伶(2011)太陽能二氧化碳捕捉器, 中華民國第 51 屆中小學科學展覽會國中組化學科, 擷取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/51/pdf/030208.pdf>

本篇研究照片來源，除了文獻引用之外，其餘照片皆由作者自行拍攝與製作。

【評語】 030203

本研究探討以 Direct Air Capture (DAC) 技術從日常環境中捕捉 CO₂，並分析影響吸收效率的因素。結果顯示，導電度檢量線為最佳測量方式；氫氧化鈣為最有效溶劑，濃度與風速增加均能提升吸收效果，而環境中 CO₂濃度影響不大。以孔徑約 250 μm 的海綿浸泡高濃度氫氧化鈣並放置於通風處，為最佳捕捉方式。

1. 本作品有許多實驗裝置的設計也極附巧思，實驗的數據量相當的龐大，可見同學們投入了相當的時間做研究，數據的整理以及圖表的呈現相當的具有水準。
2. 在實驗結果的討論上略為簡短，可以提供深入的思考方向，對於氣體液體交換的效率可以有更多的實驗設計及研究，例如魚缸當中的發泡時可以增加交換效率。
3. 用顯微鏡來觀察孔洞大小以解釋海綿孔洞大小與吸附 CO₂量之關係也過度簡化，顯微鏡(沒寫倍率)看不到的細微孔洞，也會吸附 CO₂。

4. 就全球而言，本實驗室的構想是以氫氧化鈣形成碳酸鈣，如果回收使用則是變成二氧化碳濃縮的一個機制，若能結合二氧化碳儲存的一些知識可以寫出更完整的結論。

作品海報



人人可上手的

Direct Air Capture

背景圖源：聯合國糧食及農業組織

摘要

本研究欲找出人人可上手的DAC方式，並探討影響CO₂吸收效果的各项因素。結果顯示：

一. 氫氧化鈣的吸收效果優於單乙醇胺與醋酸鉀

二. 測量方式以導電度為主，pH值為輔

三. 提高氫氧化鈣濃度與風速能增加吸收效率

四. 善用海綿的空隙大小、保液性與支撐性，作為最佳的溶劑吸附材質。

研究動機

在彈性課程時上到關於全球暖化越來越嚴重，2024年全球平均氣溫達到15.1°C，首次升溫超過1.5度。根據Nature的最新研究，可能等不到2050淨零排放，最早在2030年代，北極就會在夏天迎來完全無冰的情況，這些融冰將影響洋流、極圈生態，甚至回過頭來加速暖化的進行，表示我們的減碳力道還要再加強。除了減少碳足跡之外，國際上碳捕捉的研究也進行得如火如荼，但從2016年開始，大部分研究皆針對工廠的碳排放進行捕捉，至目前為止已捕獲300萬噸CO₂。但即使針對工廠的碳排放進行碳捕捉後，全球暖化的速度依然不減，近期也開始有人提出針對大氣中的碳進行捕捉，因此我們決定試試，如何設計人人都可上手的碳捕捉方式。連世界首富、特斯拉創辦人都砸下重金提出：「誰能找出最佳碳捕捉技術，就可以成為一億美金獎金得主！」可見減少二氧化碳是多麼迫在眉睫的事。

研究目的

- 探討不同溶劑在不同濃度下吸收CO₂的效果
- 【實驗一】不同單乙醇胺濃度吸收CO₂的效果
- 【實驗二】不同醋酸鉀濃度吸收CO₂的效果
- 【實驗三】氫氧化鈣吸收CO₂的效果
- 探討不同測量方式
- 【實驗四】利用pH值製作氫氧化鈣不同濃度的檢量線
- 【實驗五】利用導電度中的電流與電功率製作氫氧化鈣不同濃度的檢量線
- 探討各種因素對碳捕捉效率的影響
- 【實驗六】不同CO₂濃度對碳捕捉效率的影響
- 【實驗七】不同氫氧化鈣濃度對碳捕捉效率的影響
- 【實驗八】不同風速對碳捕捉效率的影響
- 探討室內外在不同裝置下對大氣中碳捕捉效率的影響
- 【實驗九】不同盛裝方式-寶特瓶躺著、立著、漏斗式、清潔海綿
- 【實驗十】不同吸附材質-清潔海綿、菜瓜布、棉花
- 測量碳酸鈣的回收率

文獻探討

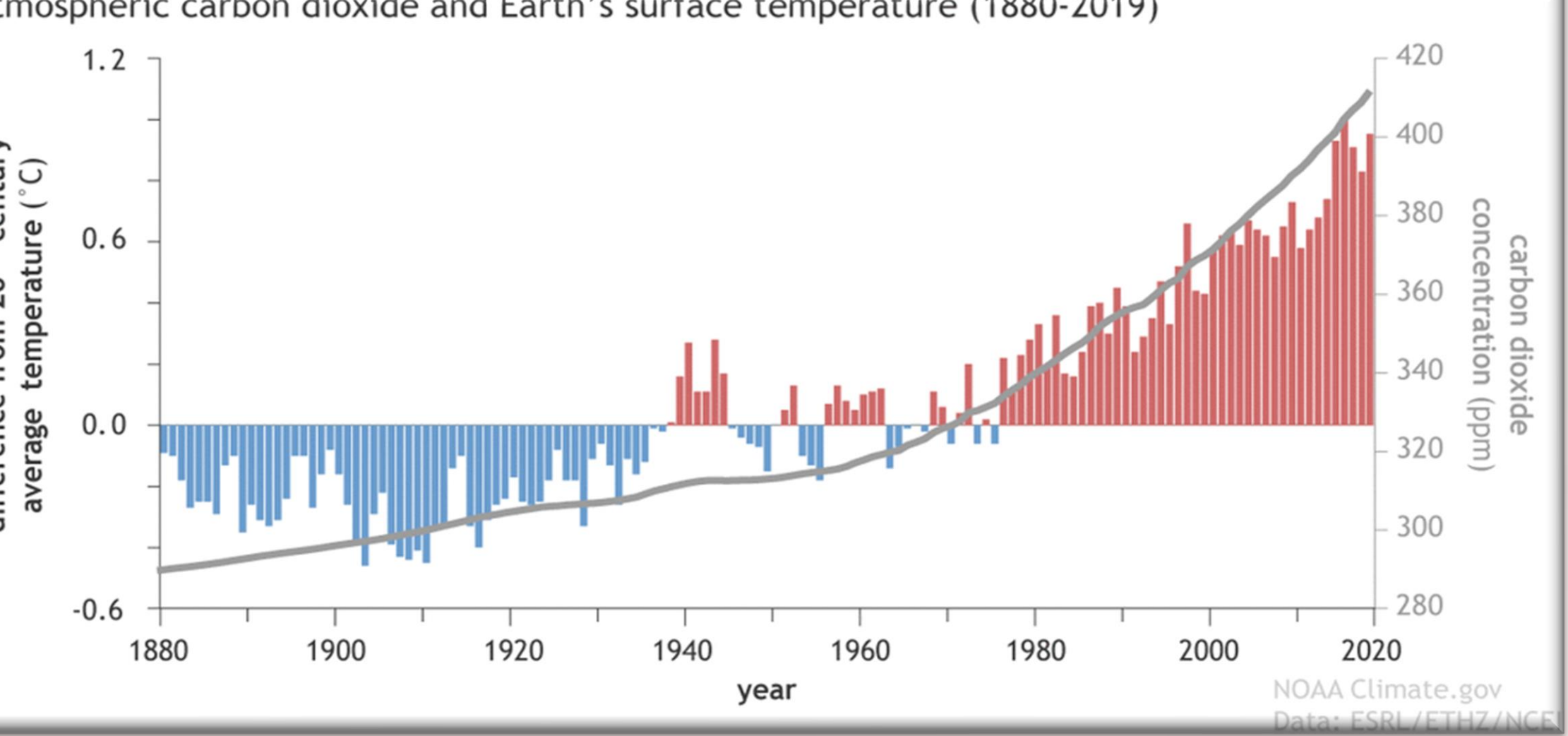


圖1 19- 21世紀的平均溫度(13.7°C)差值和二氧化碳排放量的關係圖 (圖源：NOAA Climate.gov)

第51屆中小學科學展覽會國中組化學科的「太陽能二氧化碳捕捉器」報告中，提到單乙醇胺吸收效果較好。

吸收CO ₂ 的溶劑	特性(優點)
單乙醇胺	易溶於水、弱鹼
醋酸鉀	工研院最新發現、鹼性更弱、可循環再生
氫氧化鈣	強鹼但溶解度低、成本低

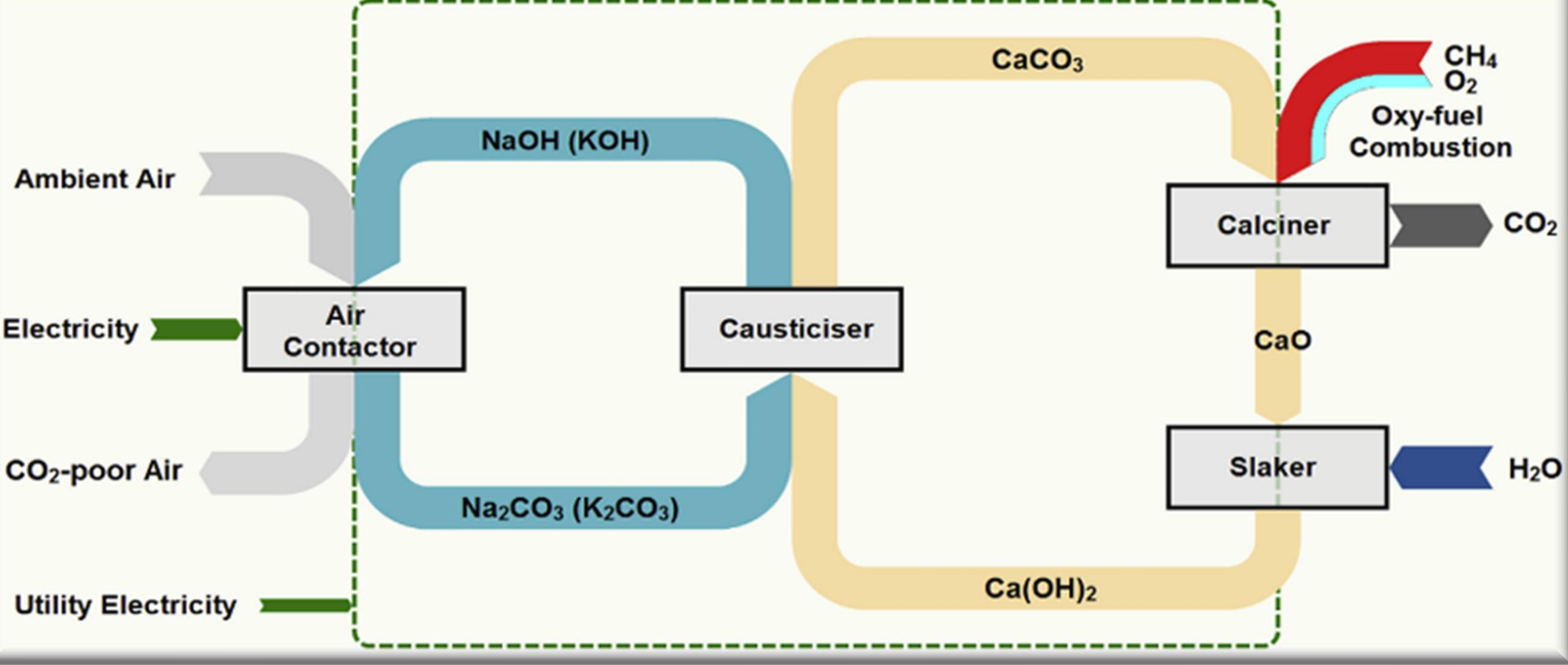


圖2圖源:文獻四 Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants

目前常見直接空氣捕獲技術(Direct Air Capture, DAC)的捕捉方式

一、氫氧化鈉吸收CO₂

$$2\text{NaOH (KOH)} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 (\text{K}_2\text{CO}_3) + \text{H}_2\text{O}$$

二、氫氧化鈣還原氫氧化鈉

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 (\text{K}_2\text{CO}_3) + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{NaOH}$$

三、碳酸鈣進入循環集中收集CO₂並再生：

$$\text{CaCO}_3 \xrightarrow{\Delta} \text{CaO} + \text{CO}_2$$
$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$$

研究器材

(圖源：皆為作者自行拍攝)

烘箱	電子顯微鏡	電源供應器	CO ₂ 鋼瓶	CO ₂ 偵測器	最終版觀察箱	吸附材質、寶特瓶	pH計

表1 研究器材

研究流程圖

探討影響碳捕捉的各種因素並設計生活中人人可上手的碳捕捉方式

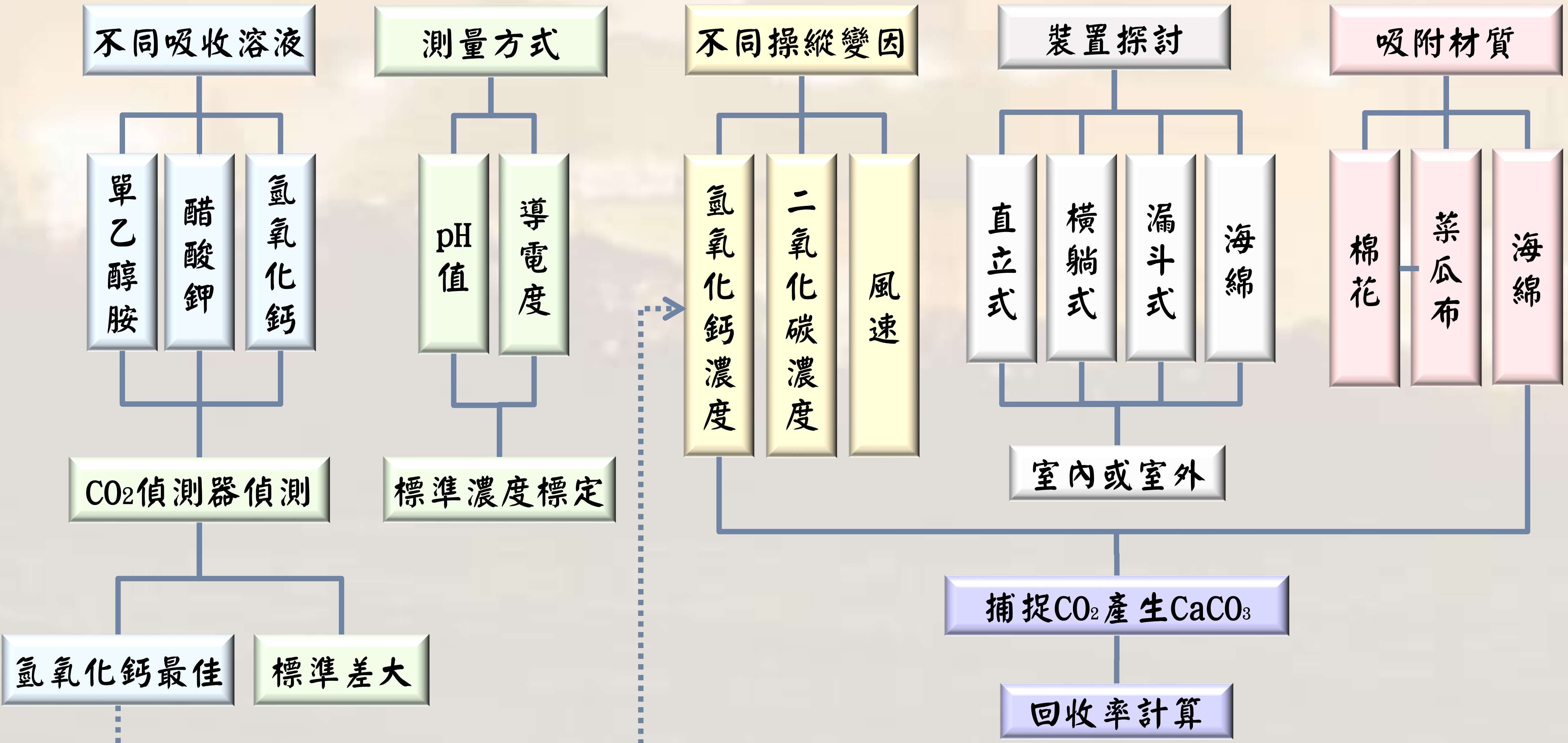
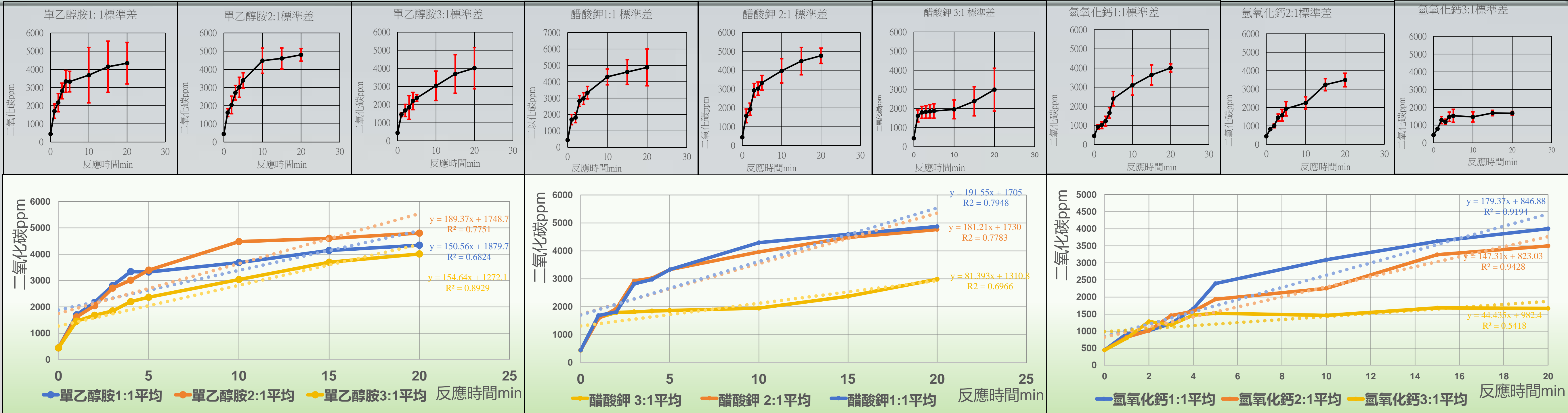


圖3流程圖 (作者自行編製)

研究過程、結果及討論

探討不同溶劑在不同濃度下吸收CO₂的效果

【實驗一】不同單乙醇胺濃度吸收CO₂的效果【實驗二】不同醋酸鉀濃度吸收CO₂的效果【實驗三】不同氫氧化鈣濃度吸收CO₂的效果



結果與討論

- 一.三種溶劑皆**高濃度**，吸收效果最好。
- 二.**氫氧化鈣**吸收效果為三者中最佳，原因如下：

1.**化學反應機制差異**
 - 單乙醇胺為可逆反應： $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NHCOO}^- + \text{H}^+$
 - 醋酸鉀 (CH_3COOK) 需搭配**催化劑**及製程技術，但技術未公開。
 - 氫氧化鈣反應生成碳酸鈣沉澱： $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{H}_2\text{O}$ 促使平衡持續向生成產物方向移動，反應效率高。

2.**鹼性強弱**
- 三.**誤差大**：製造CO₂方式不穩定，改用**鋼瓶**控制CO₂濃度；空氣品質偵測器數值不穩定，須找尋**新的測量方式**。

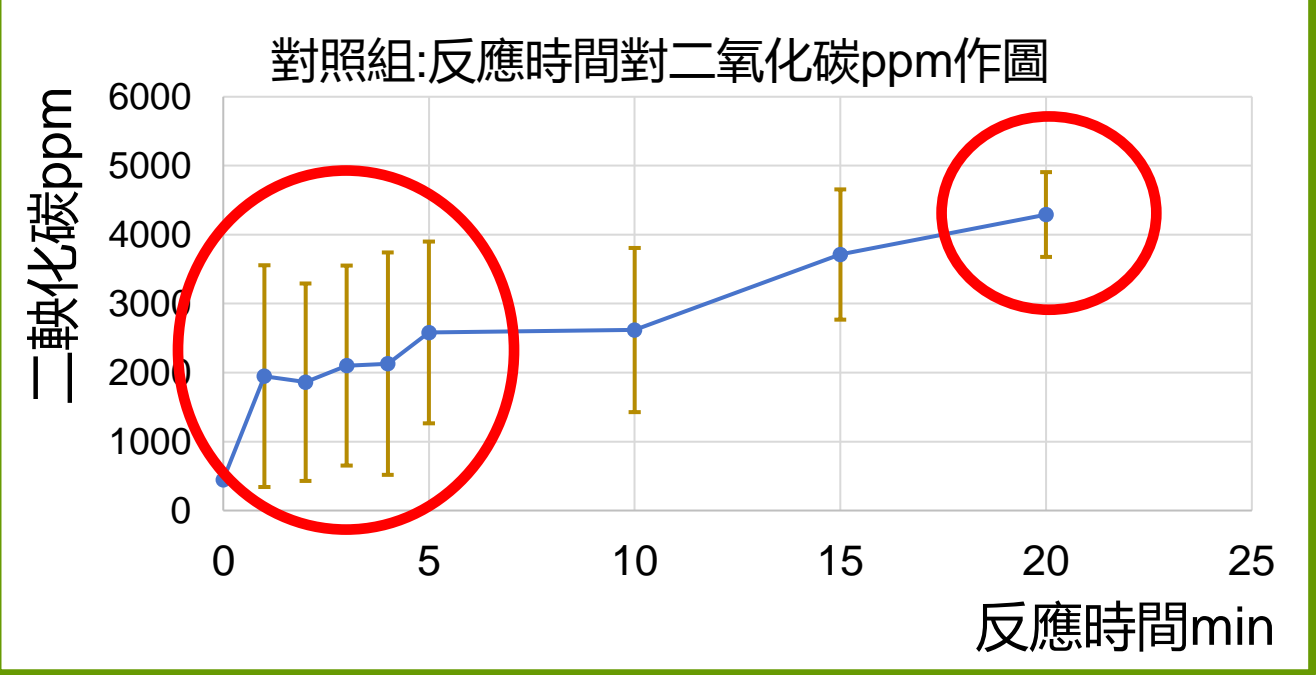
溶劑種類	單乙醇胺	醋酸鉀	氫氧化鈣
pH值	11.92	8.13	12.68

表2 三種溶劑pH值

分鐘	0	1	2	3	4	5	10	15	20
對照1	446.0	3775.0	3511.0	3775.0	3981.0	4045.0	3968.0	4767.0	5000.0
對照2	444.0	1328.0	1135.0	1328.0	1355.0	1493.0	1717.0	2941.0	3897.0
對照3	444.0	745.0	943.0	1203.0	1054.0	2209.0	2170.0	3428.0	3977.0
平均	444.7	1949.3	1863.0	2102.0	2130.0	2582.3	2618.3	3712.0	4291.3
標準差	1.2	1607.7	1430.4	1450.2	1610.1	1316.3	1190.6	945.5	615.0

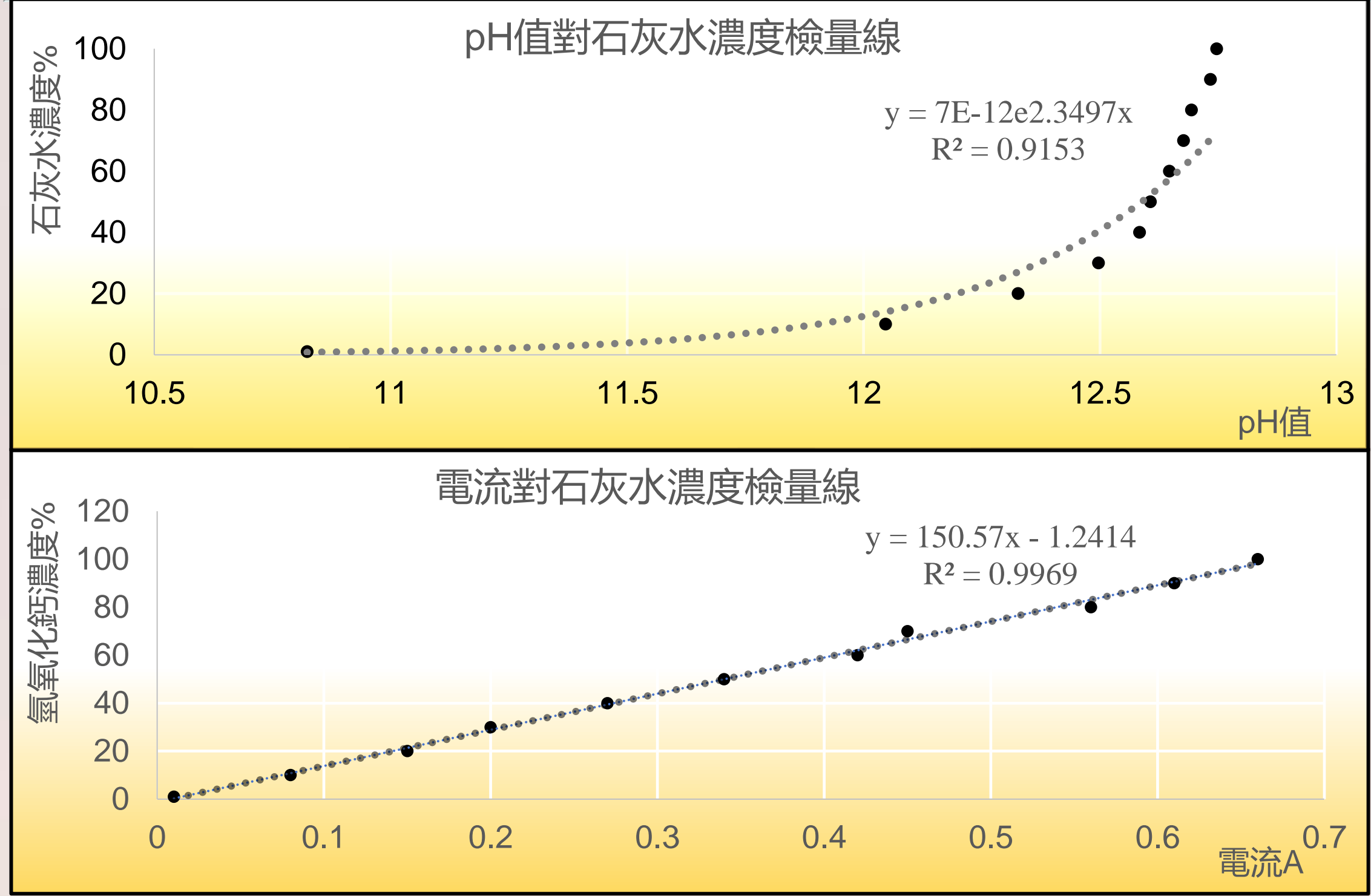


圖4 實驗一到三裝置 (圖源：自行拍攝)



探討不同測量方式

【實驗四】利用pH值製作氫氧化鈣不同濃度的檢量線【實驗五】利用導電度值製作氫氧化鈣不同濃度的檢量線



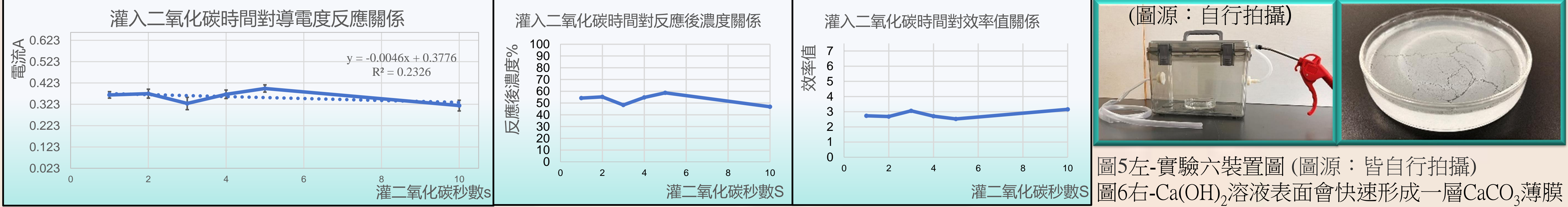
結果與討論

種類	pH值	導電度
函數	指數函數	線型函數
優點	在低濃度時，其變化較顯著。	導電度測量 不易受溫度影響 ， 數據穩定 。線性關係，數據分析更加直觀。
缺點	誤差較大，溫度改變須重新校準，花時間且數據較不穩定。	測量會電解，影響溶液性質，因此測量 停留時間不可過長 。

- 一.後續實驗皆利用測量電流大小，來推算溶液剩餘濃度。
- 二.由於實驗後，氫氧化鈣濃度越低，電流越小，卻表示吸收CO₂效果越好，因此我們將定義**電流之倒數**為**效率值**，來說明吸收效果。

探討各種因素對碳捕捉效率的影響

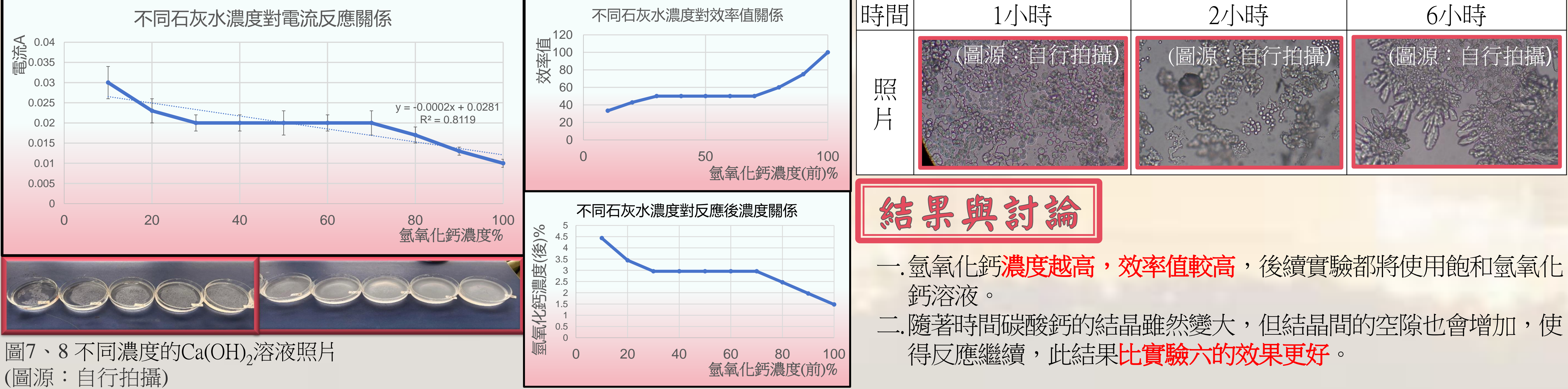
【實驗六】不同二氧化碳濃度對碳捕捉效率的影響



結果與討論

- 一.灌入二氧化碳時間的長短，與效率值沒有差異，可能因為在高CO₂濃度環境中，表面會快速**形成一層碳酸鈣薄膜**，使得CO₂不易再與溶液中的氫氧化鈣碰撞，導致電流皆落在0.3~0.4之間。
- 二.後續實驗將直接在**進行大氣中的CO₂捕捉**，無須以高濃度CO₂來加快反應速率，直接模擬實際應用場景。
- 三.後續實驗**增加反應時間**，以便看出各項操縱變因所造成的差異。

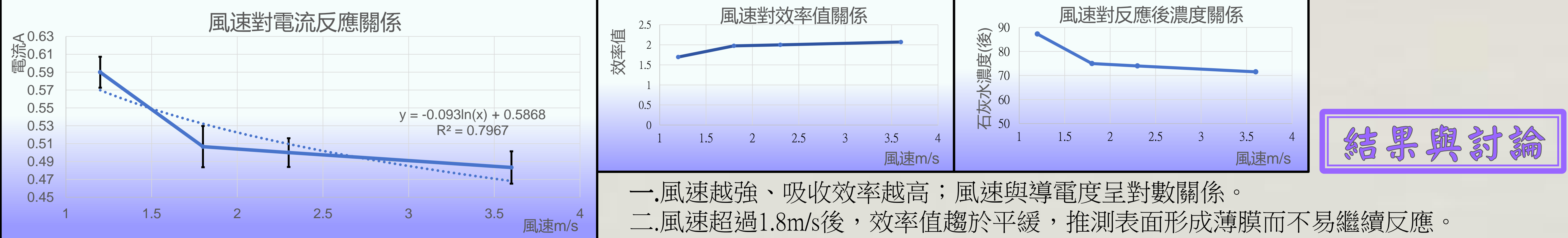
【實驗七】不同氫氧化鈣濃度對碳捕捉效率的影響



結果與討論

- 一.氫氧化鈣**濃度越高**，**效率值較高**，後續實驗都將使用飽和氫氧化鈣溶液。
- 二.隨著時間碳酸鈣的結晶雖然變大，但結晶間的空隙也會增加，使得反應繼續，此結果**比實驗六的效果更好**。

【實驗八】不同風速對碳捕捉效率的影響



結果與討論

- 一.風速越強，吸收效率越高；風速與導電度呈對數關係。
- 二.風速超過1.8m/s後，效率值趨於平緩，推測表面形成薄膜而不易繼續反應。

探討室內外在不同裝置下對大氣中碳捕捉效率的影響

【實驗九】不同盛裝方式與不同位置-寶特瓶橫躺、直立、自製漏斗式、清潔海綿分別於室內外

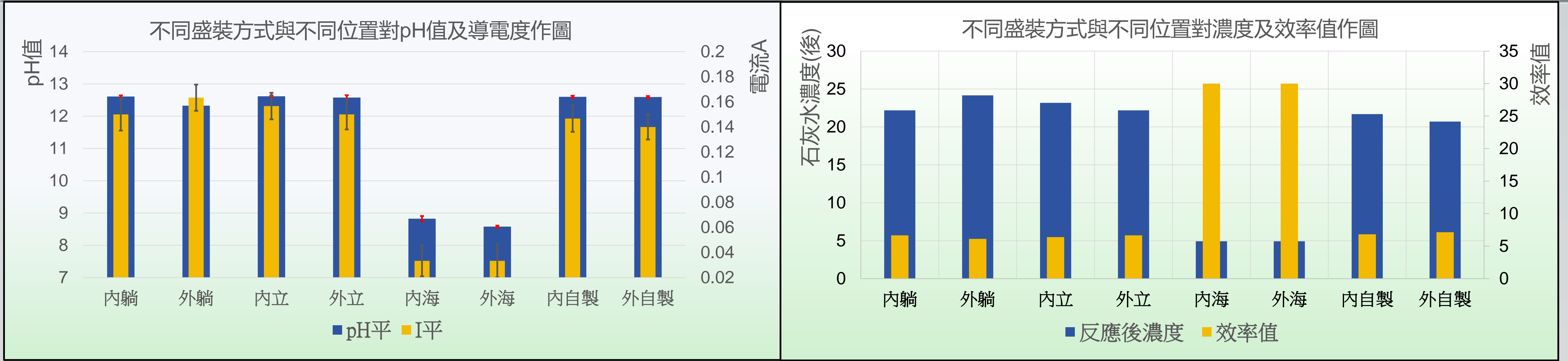


圖10 盛裝方式及位置
(六張照片皆為作者自行拍攝)

結果與討論

- 一. 室內外差異不明顯：
根據中央氣象署資料，本地室外風速為2級
- | 蒲福氏風級數 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 對照風速m/s | 0~0.2 | 0.3~1.5 | 1.6~3.3 | 3.4~5.4 | 5.5~7.9 | 8.0~10.7 |
- 二. 吸收效率，海綿>自製漏斗式>直立式=橫躺式
- 三. 寶特瓶因瓶口小，即使有風也不易灌入。
- 四. 海綿因大部分溶液集中在內部，導致外界風速影響不大。
- 五. 海綿吸收效果明顯優於其他三者，認為海綿的孔洞多，與空氣中二氧化碳的接觸面積大，提高碰撞機會，但蒸發量較大，不知是否容易回收，因此設計【實驗十一】。

表4 風速對照表

【實驗十】不同吸收材質-清潔海綿、菜瓜布、棉花

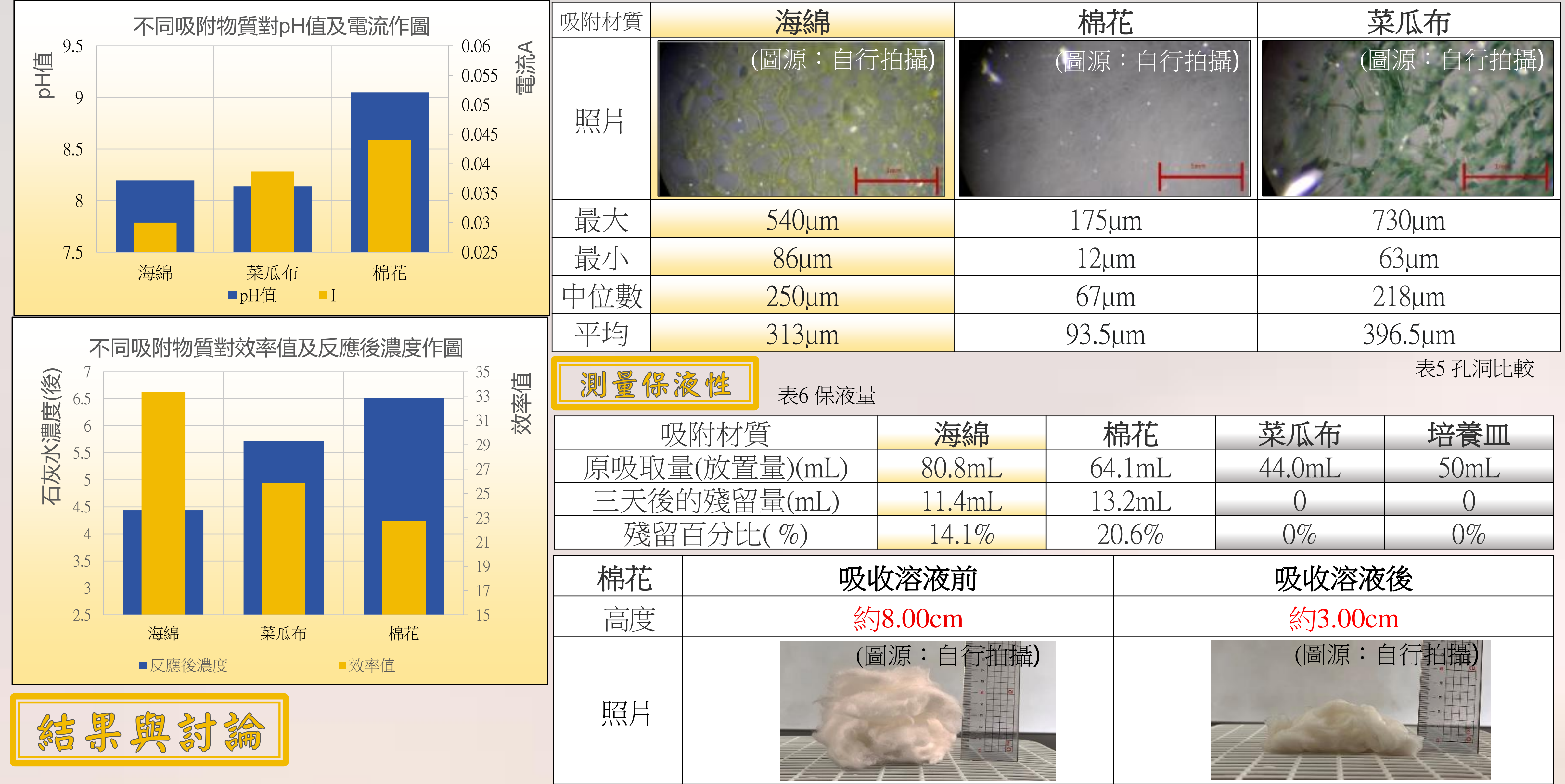


表5 孔洞比較

表6 保液量

表7 塌陷實驗

結果與討論

- 一.吸收效果：海綿>菜瓜布> 棉花。
- 二.菜瓜布的孔徑大小較大，導致保液性不佳，因此吸收效果不好。
- 三.棉花雖然孔徑大小較小，保液性也較高，但因為吸水後結構塌陷，二氧化碳無法進入孔隙，導致反應的接觸面積下降。
- 四.海綿保液性高，結構支撐度強，提供更多的反應面積，使得空氣中的二氧化碳和溶液的接觸，海綿效果最好。

【實驗十一】測量碳酸鈣生成量及計算回收率

結果與討論

- 一.培養皿回收率較海綿高，反應完成的碳酸鈣都還是會有部分沉積於孔洞之中。
- 二.但兩者回收率皆達7成以上。

表8 塌陷實驗

結論

本研究使用Ca(OH)₂為反應物之理由

- 【實驗一】單乙醇胺濃度與吸收度無明顯相關性。
- 【實驗二】高濃度的醋酸鉀對二氧化碳吸收效率較高。
- 【實驗三】氫氧化鈣吸收CO₂的效果，是三種吸收劑當中最
佳，且濃度越高，吸收效果越好。

測量方式以導電度為主，pH值為輔

- 【實驗四】pH值檢量線：適合用於低濃度，其變化較顯著，但易受溫度變化影響。
- 【實驗五】導電度檢量線：數據穩定且為線性函數，適合用於分析二氧化碳吸收量，且定義為效率值為導電度的倒數。

提高Ca(OH)₂濃度與風速能增加吸收效率

- 【實驗六】二氧化碳濃度提升對提高吸收效率無明顯差異。
- 【實驗七】氫氧化鈣濃度與二氧化碳吸收效率呈正相關。
- 【實驗八】風速與電流值呈對數關係，風速的提升有助於加快反應速率。

使用海綿吸附溶劑的碳捕捉效果較溶劑放於保特瓶內佳

- 【實驗九】室內、室外結果差異不大；清潔海綿因與空氣的接觸面積大，吸收效果明顯。
- 【實驗十】不同吸收材質-清潔海綿因表面積大、孔隙適中、支撐性加、保液性良好，吸收效果最佳；菜瓜布吸收效果次之；棉花因吸飽後孔隙堵塞，吸收效果最差。

海綿與培養皿回收率皆有七成以上

- 【實驗十一】海綿反應後碳酸鈣易沉積於孔洞中，回收率略低於培養皿，但仍有七成以上。培養皿則因蒸發量大，所以整體效果仍以海綿較佳。

總結論

進行DAC技術最佳CO₂捕捉效率裝置與條件為：
使用清潔海綿浸泡飽和氫氧化鈣溶液後，放置於有風處，其效果最佳。

參考文獻

1. 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺<https://reurl.cc/5KKnQXz>

2. 從CCS進階CCUS 實現綠能循環經濟-工業技術與資訊月刊-出版品-新聞中心-工業技術研究院 <https://reurl.cc/eMYgYb>

3. IEA (2022). Direct Air Capture, 2025年6月7日 擷取自：<https://reurl.cc/j90eG2>

4. Fasihi, Mahdi; Efimova, Olga; Breyer, Christian. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. Journal of Cleaner Production. 2019-07-01, 224 <https://reurl.cc/K8go0m>

5. A Critical Review of CO₂ Capture Technologies and Prospects for Clean Power Generation,Energies <https://reurl.cc/VYVonZ>

6. Tsai, Chang-Yi .A Study of Performance and Model of CO₂ Capture Using Potassium Acetate Aqueous Solution and CO₂ Methanation by Ni-Fe Catalyst for Pilot Plant. 2021-08-07 <https://reurl.cc/VYVocy>

7. 王知桓, 毛馨慈, 陳恩伶(2011)太陽能二氧化碳捕捉器, 中華民國第51屆中小學科學展覽會國中組化學科<https://reurl.cc/LaGoLL>

本篇研究照片來源，除了文獻引用之外，其餘照片皆由作者自行拍攝與製作。