

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 化學科

第二名

080208

高壓「碳」究、「碳」為觀止——以牡蠣殼加壓溶解進行化學固碳之可行性研究

學校名稱：澎湖縣馬公市馬公國民小學

作者：	指導老師：
小六 湯文聰	陳河開
小六 陳晞	林鈺琿
小五 歐芸榛	
小四 曾子齊	

關鍵詞：固碳、牡蠣殼、碳酸鈣

高壓「碳」究、「碳」為觀止—以牡蠣殼加壓溶解進行化學固碳之可行性研究

摘要

本研究旨在探討廢棄牡蠣殼（主成分 CaCO_3 ）在模擬加壓環境下與二氧化碳及水反應，進行化學固碳（ $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ）的可行性，並連結深海高壓環境有助於穩定碳酸氫鈣的概念。研究小組設計實驗裝置（包含固碳反應艙、二氧化碳集氣筒、未反應二氧化碳收集筒）模擬壓力，探討反應時間、牡蠣殼粉用量、初始壓力、水溶液種類、混合方式及溫度等變因，並以二氧化碳氣體體積減少量作為觀察指標。

研究結果顯示，牡蠣殼粉確實能與 CO_2 進行化學反應，反應量顯著高於單純的 CO_2 物理溶解。進一步實驗發現，提高壓力、降低溫度、加強混合（每 5 分鐘攪拌）及延長反應時間均能提升 CO_2 總反應量。然而，在本實驗條件與時間範圍內（最長 60 分鐘），3 克牡蠣殼粉的效果優於 6 克及 9 克，且純水效果優於海水。本研究驗證了牡蠣殼加壓固碳的可行性，並模擬深海環境來找出反應效率的關鍵因素。研究小組進一步發想深海牡蠣殼固碳系統，為此廢棄物再利用及深海固碳概念提出創意規劃。

壹、研究動機

近年來，全球暖化和氣候變遷的新聞常常出現，課本也教我們，大氣中過多的二氧化碳 (CO₂) 是造成地球發燒的主要原因之一。世界各國的科學家們都在尋找減少二氧化碳（減碳）的方法。其中「碳捕獲與封存」被認為是重要的技術。我們因此開始思考，有沒有可能是利用生活周遭的材料，來幫忙捕捉二氧化碳呢？

由於台灣四面環海，民眾喜愛享用牡蠣這種海鮮佳餚，無論是餐廳或家裡都很常見。但目前對於所產生大量的牡蠣殼廢棄物仍然缺乏有效再利用的方法。雖然有些藝術家會利用牡蠣殼創作，也有研究將它們摻在建築用料等方面，但現況仍是被視為廢棄物而堆疊棄置。我們查詢到牡蠣殼的主要成分是「碳酸鈣」(CaCO₃)，這跟大理石、石灰石很像，又聯想到自然奇景鐘乳石洞，水和二氧化碳可以溶解岩石（碳酸鈣），形成含有碳酸氫鈣的水溶液。思考是否可以反過來利用這個原理：讓主要成分是碳酸鈣的廢棄牡蠣殼，與水和二氧化碳反應，將二氧化碳轉化成溶解在水中的碳酸氫鈣 (Ca(HCO₃)₂)，達到「固碳」的效果呢？

我們進一步查閱資料發現，溶解在水中的碳酸氫鈣非常不穩定，容易再轉變為碳酸鈣與二氧化碳。但如果這個反應發生在壓力非常大的深海環境中，高壓有助於讓生成的碳酸氫鈣更穩定地溶解在海水中，比較不容易再變回二氧化碳釋放出來，這樣或許就能實現更長久的「二氧化碳封存」。

為了驗證這個「廢棄物再利用」結合「深海壓力固碳」的想法是否可行，我們設計了一套利用針筒模擬加壓環境的實驗裝置，想要實際探討：在模擬的壓力條件下，廢棄牡蠣殼粉末是否真的能有效吸收二氧化碳？以及哪些因素影響反應的效果？我們希望透過這個研究，初步了解利用牡蠣殼在高壓水中進行固碳的可行性。

貳、研究目的

- 一、探討牡蠣殼粉與二氧化碳在加壓環境下反應時，反應時間對二氧化碳反應量的影響。
- 二、探討在固定水量和反應時間下，牡蠣殼粉重量對二氧化碳反應量的影響。
- 三、探討初始壓力大小對二氧化碳反應量的影響。
- 四、比較牡蠣殼粉在不同水溶液中與二氧化碳反應的效果差異。
- 五、探討在反應過程中攪拌方式對二氧化碳反應量的影響。
- 六、探討不同環境溫度下，牡蠣殼粉對二氧化碳反應效果的影響。

參、文獻探討

一、藍碳的趨勢

為了幫地球降溫，科學家們一直在尋找可以吸收二氧化碳的「碳倉庫」，稱為「碳匯」。根據資料，可以把碳匯大致分成三種類型：森林裡的樹木和植物幫忙儲存的碳，叫做「綠碳」；埋在泥土裡的碳，叫做「黃碳」；而由海洋和海岸邊的紅樹林、海草幫忙儲存的碳，就是「藍碳」。在這三種顏色的碳倉庫中，「藍碳」的儲碳潛力最佳。整個海洋就像一塊巨大的海綿，吸收的二氧化碳遠比陸地上的森林還多。例如，海岸邊的紅樹林，每一片差不多大小的土地，儲存碳的能力可能是陸地森林的好幾倍；也讓我們知道，開發和利用海洋來儲存二氧化碳，是一個值得長期發展的方向。

我們的研究靈感，一部分也來自大自然的藍碳。我們想到，能不能模仿大自然的方法？例如鐘乳石洞的例子：含有二氧化碳的雨水，會慢慢溶解石灰岩，把碳變成溶解在水裡的物質帶走；時間久了，這些物質又會慢慢變回石頭，形成漂亮的鐘乳石。這個過程給了我們一個想法：我們能不能利用廢棄的牡蠣殼（成分和石灰岩很像）來當作二氧化碳作用的場所？把它變成可以穩定存在海裡的物質？這個方法和紅樹林直接吸收二氧化碳的方式不太一樣，是一種人工設計的、新的「藍碳」工程。我們希望透過這個研究，為幫助海洋儲存更多碳，提供一個創新的想法。

二、亨利定律

亨利定律（Henry's Law）是英國化學家威廉·亨利提出的化學定律。其定義為：「在固定溫度下，氣體在液體中的溶解度與該氣體在液體上方的分壓成正比」。也就是說，我們對氣體施加的壓力越大，能溶解到水裡的氣體就越多。以汽水為例，工廠利用高壓將大量的二氧化碳壓入水中，當打開瓶蓋的瞬間，壓力釋放，二氧化碳的溶解度下降，多餘的氣體便會以氣泡的形式湧出。

然而這個定律也解釋了為什麼不能單純地將二氧化碳直接加壓注入深海進行封存。這樣做雖然能利用深海的高壓讓二氧化碳溶解，但主要有兩個問題：第一，大量的二氧化碳溶解會形成碳酸，造成嚴重的局部海洋酸化；第二，如果這團富含二氧化碳的海水因洋流上湧而壓力降低，溶解的二氧化碳就會根據亨利定律再次散失回大氣中，導致固碳失敗。因此，本研究的關鍵在於不僅是「溶解」二氧化碳，而是要讓溶解後的二氧化碳與牡蠣殼粉「反應」，將其轉化為更穩定的反應物。因此本實驗以二氧化碳加壓至反應艙，正是應用亨利定律來創造一個有利於二氧化碳溶解的環境，以促進後續的化學反應，進而達成更有效的固碳。

三、勒沙特列原理

勒沙特列原理（Le Chatelier's principle），又稱「平衡移動原理」，它幫助我們預測化學反應的方向。如同玩蹺蹺板的遊戲，當蹺蹺板左右兩邊重量一樣時，就達到了「平衡」。當改變了某一邊的重量或推力，蹺蹺板就會失去平衡，並自動朝著能「抵銷」這個改變的方向移動，直到找到新的平衡點。而本研究的核心化學反應是一個可以雙向進行的「可逆反應」： $\text{牡蠣殼(固態)} + \text{水(液態)} + \text{二氧化碳(氣態)} \rightleftharpoons \text{碳酸氫鈣(水溶液)}$

這個反應就像化學蹺蹺板，根據勒沙特列原理，我們可以預測以下幾點：

- **壓力**：如果我們「增加壓力」，就像左邊反應式促進向右反應，反應會朝著右邊移動，產生更多的碳酸氫鈣。因此，我們推測**壓力越高，固碳效果越好**。
- **溫度**：化學反應有些會吸熱，有些會放熱。如果這個反應向右進行是放熱的，那麼「降低溫度」（把熱量拿走），反應為了補充熱量，就會努力朝右邊移動。反之，如果反應是吸熱的，則需要「提高溫度」。由於二氧化碳溶解於水是放熱反應，我們初步推測整個固碳反應也可能是放熱的，因此**降低溫度可能有利於固碳**。
- **濃度**：二氧化碳是左邊的反應物之一。如果我們不斷加入二氧化碳，讓水中的二氧化碳「濃度」變高，為了消耗掉多餘的二氧化碳，反應就會朝右邊移動，產生更多的碳酸氫鈣。

綜合以上推論，要讓牡蠣殼粉持續朝著「固碳」（產生碳酸氫鈣）的方向反應，我們必須**持續提供一個讓平衡被打破的條件**。將維持反應平衡持續向右移動，達成最佳固碳效果的關鍵因素。本研究的實驗設計，可以根據這個原理來設計變因。

(一) 有關固碳技術研究

為了瞭解目前對於固碳主題的研究趨勢，我們查詢了國立臺灣科學教育館的歷屆中小學科學展覽會優秀作品資料庫。從中我們發現，許多作品對尋找生活化、低成本，甚至是廢棄物再利用的固碳材料，設計了各種實驗。我們整理了幾件相關作品，以作為我們研究設計的參考與比較。

表 1 近 5 年固碳主題相關科展作品分析（圖片/照片來源：研究團隊自製）

屆數	作品名稱	固碳方法簡述	固碳類型	研究主要結果簡述
第 61 屆 (國中組)	碳為觀止-回收式生物炭吸附光解膠囊	將花生菱殼、雞骨龍蝦等廢棄物製成生物炭，並建立標準化吸附流程探討參數，最後製成回收式生物炭球。	物理吸附 固碳	動物炭經酸洗可提升吸附率，雞骨炭潛力超越市售活性炭；生物炭也能吸附鉛離子；並結合光觸媒讓炭球可再生重複使用。
第 64 屆 (國中組)	不要「碳」氣！自製氣瓶探究碳捕捉材料的吸附效能	自製 CO ₂ 氣瓶，以碳酸氫鹽指示劑顏色變化量化 CO ₂ ，探討矽膠乾燥劑、活性碳等材料的物理吸附效能，並測試加熱脫附的可行性。	物理吸附 固碳	成功自製穩定氣瓶並建立以指示劑量化 CO ₂ 的實驗模式。比較不同材料後發現，破碎活性炭每公克吸附效能最佳，且材料具重複吸脫附潛力。

屆數	作品名稱	固碳方法簡述	固碳類型	研究主要結果簡述
第 64 屆 (國小組)	捕碳成鈣 鈉麼厲害	以 NaOH 吸收 CO ₂ 生成 Na ₂ CO ₃ ，再加入 Ca(OH) ₂ 沉澱出 CaCO ₃ ，建立可重複使用之捕碳循環裝置，並以光阻法測定碳酸鈣生成量。	化學沉澱 固碳	證實該反應流程可有效捕捉空氣中 CO ₂ 並生成可觀的碳酸鈣沉澱，裝置可重複使用，具備環保教具及碳循環概念推廣潛力。

綜合研究發展，先前科展對固碳議題的探討，多以**物理吸附法**與常壓下的**化學沉澱法**為主，反應條件也大多在常溫常壓範圍內。

我們嘗試模擬**深海高壓**的條件，將牡蠣殼粉與水及二氧化碳反應，形成**可溶性的碳酸氫鈣**，這屬於一種另一種的**化學溶解封存工程技術**。我們的研究方法兼具「廢棄物再利用」與「人工藍碳化」的特性，希望透過探討高壓這個關鍵變因，為固碳研究帶來不同的實驗內容。

(二) 牡蠣殼的相關應用

除了探討固碳技術外，我們也特別針對「牡蠣殼」為關鍵字，查詢了歷屆科展的相關作品，發現許多作品發揮創意，試圖將這種常見的廢棄物變為有用的資源。

表 2 歷屆牡蠣殼主題相關科展作品分析（圖片/照片來源：研究團隊自製）

屆數	作品名稱	應用方法簡述	相關類型	研究主要結果簡述
第 51 屆 (高職組)	牡蠣在環境中對重金屬之吸附及減碳交應探討	將牡蠣殼與溶有 CO ₂ 的水反應，測量 pH 變化與碳酸鹽生成，並同時測試其對重金屬離子的吸附能力。	化學反應型固碳 (與重金屬吸附)	證實牡蠣殼可與水中 CO ₂ 反應提升 pH、生成穩定碳酸鹽，且具有吸附銅、鉛等重金屬的能力，展現環保雙效潛力。
第 52 屆 (國小組)	垃圾變黃金～廚房裡隨手可得的滅火器	將牡蠣殼粉與醋酸混合產生 CO ₂ 氣體，用於製作滅火器。該反應為碳酸	碳循環應用研究	顯示牡蠣殼可作為製氣材料安全有效替代傳統小蘇打，兼具滅

屆數	作品名稱	應用方法簡述	相關類型	研究主要結果簡述
		鈣釋放 CO ₂ 的逆過程，但呈現碳循環轉換意涵。		火教育與廢物利用價值。
第 55 屆 (高中組)	牡蠣殼粉與稻殼灰製瓷磚用釉之研究	以牡蠣殼粉與稻殼灰配製低溫釉藥，評估其表面品質與實用性；牡蠣殼中碳酸鈣被固定於陶瓷釉中。	建材封存型固碳	成功開發具良好光澤與穩定性的綠色釉藥配方，牡蠣殼作為可替代天然礦物的釉料來源具可行性。
第 64 屆 (國中組)	金雞牡”——廢棄牡蠣殼製作重金屬吸收發泡煉石之研究	牡蠣殼經煅燒並與其他材料混合成發泡煉石，於鹼性環境下吸附 CO ₂ 並同時吸附重金屬。	物理吸附與化學碳酸鹽混合型固碳	煅燒後牡蠣殼具有高比表面積與鹼性特性，可有效吸附 HCO ₃ ⁻ 與重金屬離子，具備多重環保功能與可再利用性。
第 64 屆 (國中組)	淨菱碳排の蚵學研究	將煅燒牡蠣殼（CaO）與生物炭混合製成建材，以食品級膠黏劑黏合，封存碳於材料中並減少水泥使用。	建材型碳封存	成功製成透水且耐壓的建材，牡蠣殼與生物炭均能穩定封存碳，展現減碳潛力與循環經濟應用價值。

從這些研究中我們發現，牡蠣殼的應用非常多元，不僅能用於吸附重金屬、製作環保建材，甚至可以當作滅火器的原料。其中，有許多研究都利用了牡蠣殼的鹼性特質，或者透過高溫燒來改變其物理化學性質，進而達到固碳或特定功能。但這些研究的歷程較為複雜，讓我們思考：除了這些應用，牡蠣殼是否能直接在更接近其自然來源的「海洋」環境中，扮演更積極的固碳角色？也達到廢棄物再利用的目標。

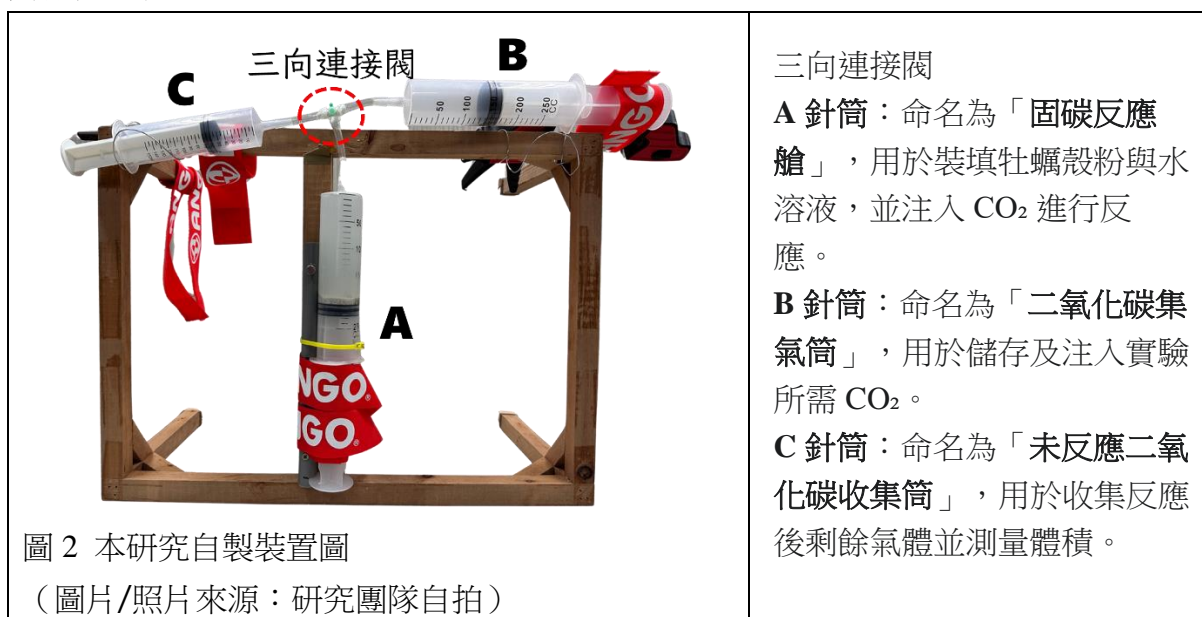
綜合上述分析，我們呈現研究的心智圖，做為我們的思考脈絡。



圖 1 本研究思考脈絡（圖片/照片來源：研究團隊自製）

肆、研究設備與器材

一、實驗核心裝置：



註：利用三向閥連接 A(固碳反應艙)、B(二氧化碳集氣筒)、C(未反應二氧化碳收集筒) 三支針筒，其中 A 針筒為主要反應容器

二、實驗藥品與材料：

- 廢棄牡蠣殼 (已完成清洗、烘乾、研磨成粉末)

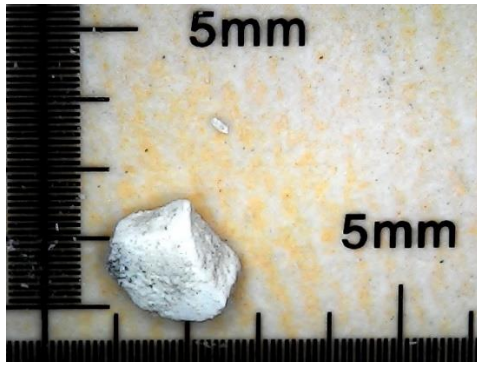


圖 3 牡蠣顆粒圖（牡蠣殼粉取自某縣市政府水試所之研磨成品）

（圖片/照片來源：研究團隊自拍）

- 二氧化碳氣體 (利用小蘇打混合檸檬酸，以排水集氣法收集)
- 純水、自來水、海水

三、觀察測量指標（應變變因）：二氧化碳氣體體積減少量（測量轉移至 C 針筒的最終氣體體積，與初始注入量比較）

伍、研究方法與步驟

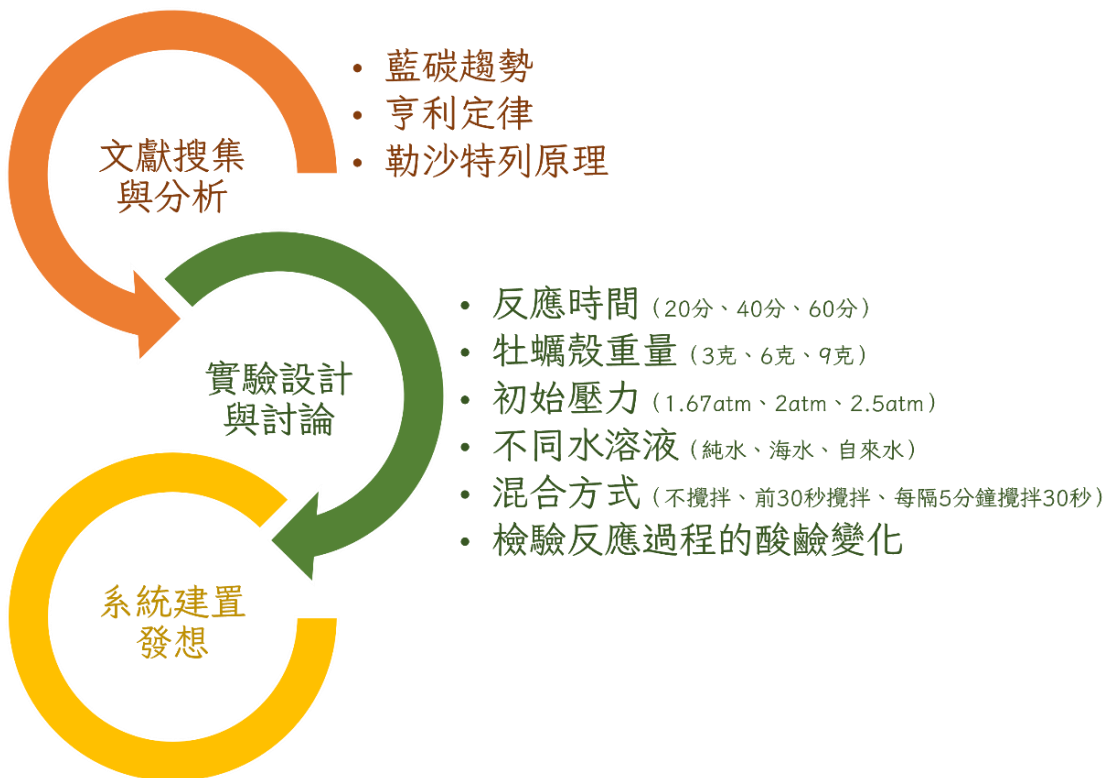
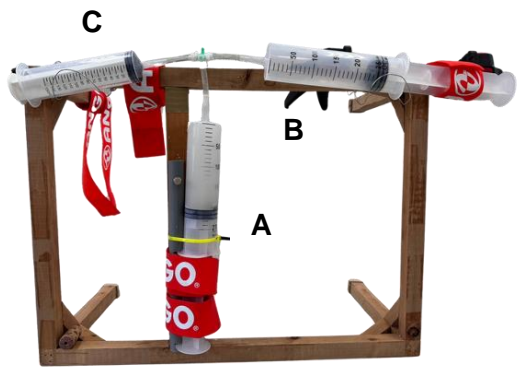
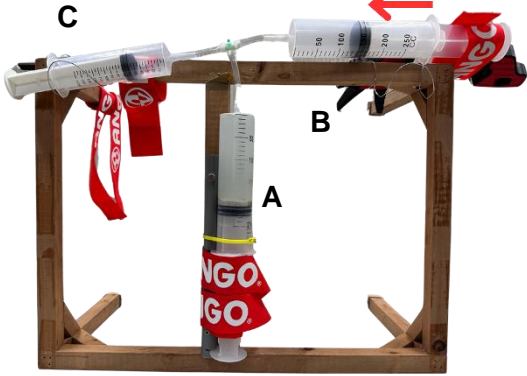


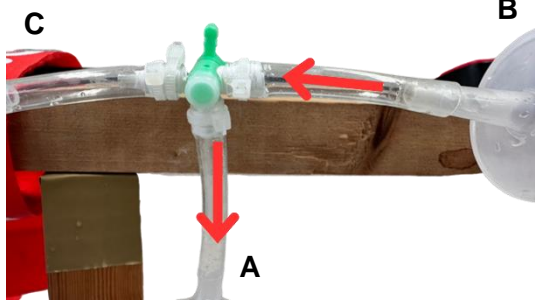
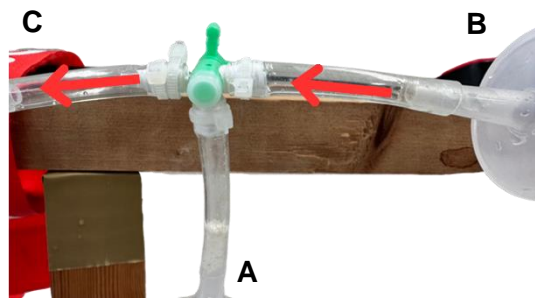
圖 4 研究流程圖（圖片/照片來源：研究團隊自製）

為了探討深海高壓環境下，牡蠣殼粉之固碳效果，分為以下實驗設計：

活動一、探討反應時間對二氧化碳作用量的影響

- 目的：了解牡蠣殼粉與二氧化碳在高壓環境下反應，反應時間對 CO_2 反應量的影響。
- 研究方法：
 - 操縱變因：反應時間（設定為 20 分鐘、40 分鐘、60 分鐘）。
 - 控制變因：牡蠣殼粉 3 克、純水 200 mL、初始 CO_2 注入量（固定從 B 針筒注入 100 mL，根據波以耳定律換算高壓約為 1.67atm）、反應溫度（固定約 $27 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ）、混合方式（每 5 分鐘以磁鐵隔空上下攪拌 30 秒）。
 - 實驗步驟簡述：
 - （1）針筒的活塞兩側塗抹凡士林確保氣密。在 A 針筒（固碳反應艙）放入 3 克牡蠣殼粉與 200 mL 純水，從 B 針筒（二氧化碳集氣筒）注入 100 mL CO_2 並加壓。
 - （2）隨即用肥皂水塗抹在三向閥及針筒接頭處，檢查是否有氣泡產生以確認無漏氣。
 - （3）反應期間每 5 分鐘攪拌 30 秒。分別等待總反應時間 20、40、60 分鐘後，將剩餘氣體轉移至 C 針筒（未反應二氧化碳收集筒）測量體積。同時進行無牡蠣殼粉的對照組實驗。實驗流程圖如下。

 <p>圖 5 實驗流程 1（反應物未連通） （圖片/照片來源：研究團隊自拍）</p>	 <p>圖 6 實驗流程 2（反應開始） （圖片/照片來源：研究團隊自拍）</p>
三針筒以三向聯接閥連接	開始時，連接閥開通 A、B 針筒，利用木工夾緩慢注入 100mL CO_2

 <p>圖 7 二氧化碳參與反應路徑說明 (圖片/照片來源：研究團隊自拍)</p>	 <p>圖 8 反應結束後，未反應二氧化碳收集路徑 (圖片/照片來源：研究團隊自拍)</p>
<p>使 CO₂ 進入 A 針筒反應槽參與固碳作用</p>	<p>作用時間過後，開通 B、C 針筒，讓多餘的 CO₂ 藉由壓力排放至 C 針筒。B 針筒保持不動。</p>

活動二、探討牡蠣殼粉用量對二氧化碳作用量的影響

- 研究目的：了解在固定水量和反應時間下，牡蠣殼粉用量多寡對二氧化碳作用量的影響。
- 研究方法：
 - 操縱變因：牡蠣殼粉用量（設定為 3 克、6 克、9 克）。
 - 控制變因：純水 200 mL、初始 CO₂ 注入量（固定注入 100 mL）、反應時間（固定為 20 分鐘、40 分鐘、60 分鐘）、反應溫度（固定約 27±0.5℃）、混合方式（同活動一）。
 - 實驗步驟簡述：在 A 針筒放入不同質量的牡蠣殼粉與 200 mL 純水，其餘步驟同活動一。

活動三、探討初始壓力對二氧化碳作用量的影響

- 研究目的：了解初始施加的壓力大小對二氧化碳作用量的影響。
- 研究方法：
 - 操縱變因：初始 CO₂ 注入量（例如設定從 B 針筒分別注入 100 mL、150 mL、200 mL，以此代表不同的初始壓力，根據波以耳定律約為 1.67atm、2atm、2.5atm）。
 - 控制變因：牡蠣殼粉 3 克、純水 200 mL、反應時間固定為 20 分鐘、反應溫度（固定約 27±0.5℃）、混合方式（同活動一）。
 - 實驗步驟簡述：在 A 針筒放入 3 克牡蠣殼粉與 200 mL 純水，從 B 針筒注入不同

體積的 CO₂ 並加壓。其餘步驟同活動一。

活動四、探討不同水溶液對二氧化碳作用量的影響

- 研究目的：比較牡蠣殼粉在不同水溶液（純水、自來水、海水）中反應二氧化碳的效果差異。
- 研究方法：
 - 操縱變因：水溶液種類（使用 200 mL 的純水、自來水、海水）。
 - 控制變因：牡蠣殼粉 3 克、初始 CO₂ 注入量（固定注入 100 mL）、反應時間（固定為 20 分鐘）、反應溫度（固定為固定約 27±0.5℃）、混合方式（同活動一）。
 - 實驗步驟簡述：在 A 針筒放入 3 克牡蠣殼粉與 200 mL 不同的水溶液，從 B 針筒注入 100 mL CO₂ 並加壓。其餘同活動一。

活動五、探討混合方式對二氧化碳作用量的影響

- 研究目的：了解在反應過程中不同的混合方式對二氧化碳作用量的影響。
- 研究方法：
 - 操縱變因：混合方式（設定為「完全靜置」、「僅初始攪拌混合 30 秒」、「每 5 分鐘攪拌 30 秒」）。
 - 控制變因：牡蠣殼粉 3 克、純水 200 mL、初始 CO₂ 注入量（固定注入 100 mL）、反應時間（固定為 20 分鐘）、反應溫度（固定約 27±0.5℃）。
 - 實驗步驟簡述：在 A 針筒放入 3 克牡蠣殼粉與 200 mL 純水，從 B 針筒注入 100 mL CO₂ 並加壓，採用三種不同的混合方式分別測試 20 分鐘內的固碳效果。

活動六、探討反應溫度對二氧化碳作用量的影響

- 研究目的：了解環境溫度對牡蠣殼粉吸收二氧化碳效果的影響。
- 研究方法：
 - 操縱變因：反應溫度（設定為 4~9℃ (使用冰水浴)、15°~18℃、室溫 (記錄實際溫度)）。
 - 控制變因：牡蠣殼粉 3 克、純水 200 mL、初始 CO₂ 注入量（固定注入 100 mL）、反應時間（固定為 20 分鐘）、混合方式（固定為每 5 分鐘攪拌 30 秒混合）。
 - 實驗步驟簡述：將 A 針筒置於不同溫度的水浴環境，實驗前取出，從 B 針筒注入 100 mL CO₂ 並加壓。反應 20 分鐘後，將剩餘氣體轉移至 C 針筒（未反應二氧化碳收集筒）測量體積與終止時溫度。

陸、研究結果

基準對照 1：二氧化碳在 1atm 下與牡蠣殼粉的化學反應量

為了驗證牡蠣殼粉是否在二氧化碳與水的混合環境中，是否已具有固碳效果，我們利用 2 支針筒以塑膠軟管連接，底部針筒放入 3g 牡蠣殼粉與 200mL 純水，上方則放置 100mL 的 CO₂。將上方針筒內的 CO₂ 打入下方牡蠣殼粉與水的混合溶液後，靜置 20 分鐘。觀察下方針筒的活塞的移動情形。



圖 9 基準對照實驗裝置（圖片/照片來源：研究團隊自拍）
註：將上方針筒裝 100mL CO₂，注入到下方的針筒（原裝有 200mL 純水與 3g 牡蠣殼粉）。



圖 10 基準對照實驗結果（圖片/照片來源：研究團隊自拍）
註：活塞至 300mL 處上升至約 290mL 處（反應量 80mL），代表在 1atm 下，牡蠣殼粉與 CO₂ 與水即產生反應，使 CO₂ 體積變少。

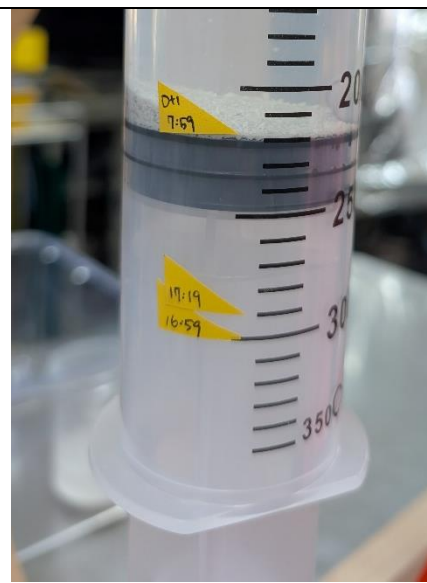


圖 11 基準對照實驗結果（圖片/照片來源：研究團隊自拍）
註：經過了 15 個小時在 1atm 之下，仍舊持續跟 CO₂ 產生作用（反應量達 80mL）。

基準對照 2：二氧化碳在純水中的物理溶解量

為了瞭解 CO₂ 單純溶解於水中的量，我們進行了對照實驗。在標準條件下（200mL 純水、初始注入 100mL CO₂ 代表約 1.67atm 壓力、反應 20 分鐘、每 5 分鐘攪拌 30 秒、室溫 27±0.5°C），觀察到二氧化碳因物理溶解於水中而造成的體積減少量約為 **15 mL**。這個數值將作為後續實驗比較牡蠣殼粉與 CO₂ 化學反應的標準。

一、探討反應時間對二氧化碳作用量的影響

(一) 不同反應時間點的反應量比較

在固定條件下，測量不同反應時間點的二氧化碳總反應量，結果如表 3。

表 3 不同反應時間點之二氧化碳作用量比較

反應時間 (min)	總作用 CO ₂ 體積 (mL)				增加的 CO ₂ 作用量(mL)
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均(mL)	
20	28	28	25	27±1.7	27
40	42	40	39	40±1.5	13
60	48	45	46	46±1.5	7

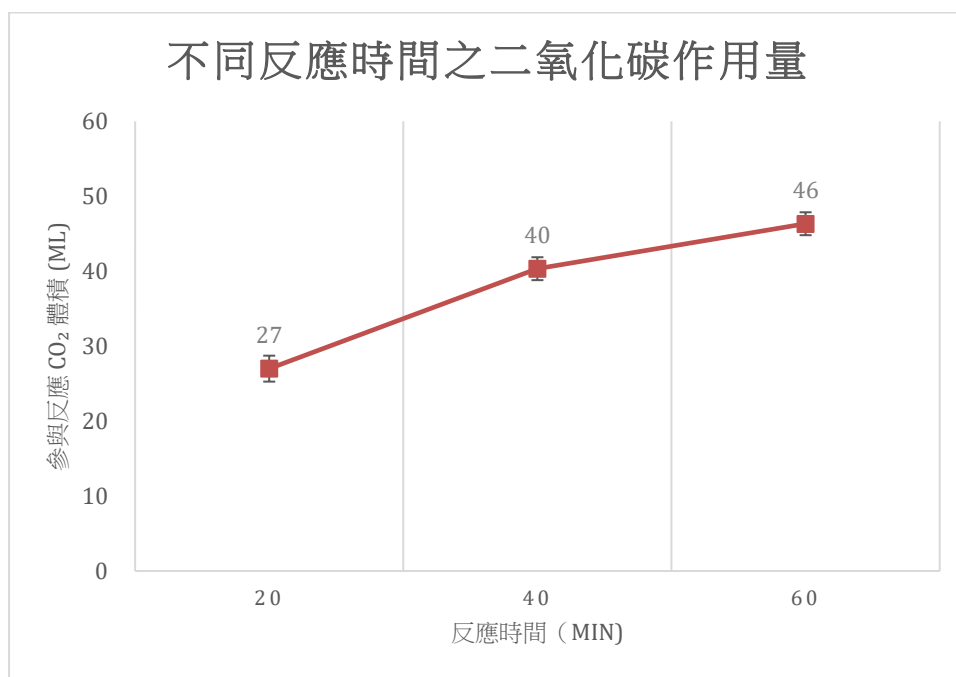


圖 12 不同反應時間之二氧化碳作用量（圖片/照片來源：研究團隊自製）

註：初始壓力為 1.67atm(注入 100mLCO₂)

(註：總反應 CO₂ 體積為觀察記錄值。推估化學反應反應量 = 總反應量 - 對照組物理溶解量【27-15=12】。20 分鐘後的化學反應用掉 CO₂約 12mL)

實驗結果顯示，隨著反應時間從 20 分鐘延長至 60 分鐘，總反應的二氧化碳體積持續增加，但增加的速率逐漸減緩。即使在 20 分鐘時，總反應量 (27mL) 已明顯高於純物理溶解量 (約 15mL)，顯示化學反應確實發生並貢獻了約 12mL 的反應量。

結果顯示，隨著反應的時間愈久，牡蠣殼粉與溶解在水的二氧化碳作用的量就愈多，

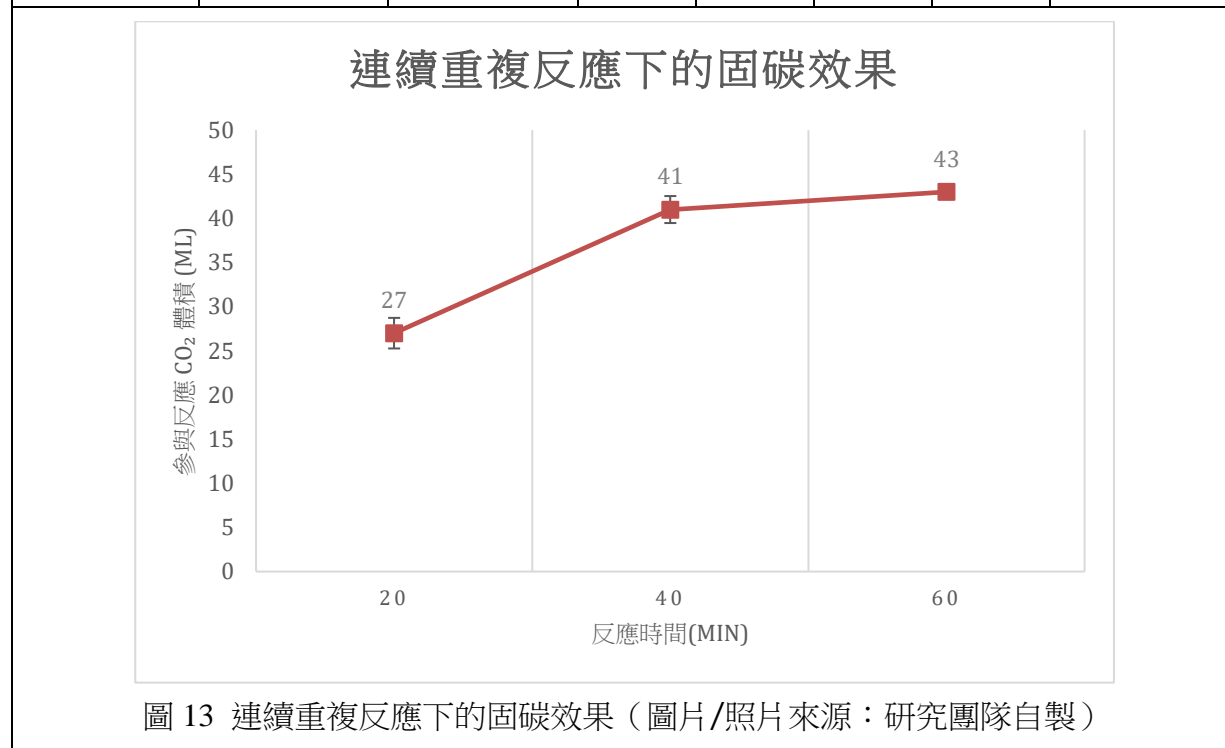
但隨著時間拉長，增加的 CO_2 反應量折線圖變得較平緩。

(二) 連續重複反應的反應效果

為了驗證是否能夠反覆將同一批 CO_2 重覆壓入參與反應的 A 針筒內，研究小組每 20 分鐘測量一次反應剩餘的二氧化碳容量（在 C 針筒內），回推至 B 針筒後，再依相同的初始壓力條件（以波以耳定律換算約 1.67atm ）壓注剩餘的二氧化碳。重覆 2 次後，觀察連續反應區間的反應情況，如表 4。

表 4 連續重複反應之二氧化碳反應效果

反應區間 (Interval)	累積反應時間 (min)	區間初始 壓入 CO_2 體積 (mL)	區間反應 CO_2 體積 (mL)				累積反應 CO_2 體積 (mL)
			第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均	
0-20 min	20	~100	28	28	25	27 ± 1.7	27
20-40 min	40	~90	13	12	15	14 ± 1.5	41
40-60 min	60	~82	1	2	2	2 ± 0.6	43



註：初始壓力為 1.67atm (注入 100mLCO_2)

實驗結果顯示，同一批 CO_2 反覆壓入 A 針筒，所獲得的 CO_2 反應體積與表 3 約略相同，呈現反應時間愈久，參與作用的 CO_2 就愈多。

二、探討牡蠣殼粉用量與反應時間對二氧化碳反應量的影響

為了檢驗牡蠣殼粉重量與 CO₂作用量之關聯，研究小組針對 3 克、6 克 與 9 克 牡蠣殼粉，進行了 20、40 與 60 分鐘的實驗。結果整理表 5。

表 5 不同牡蠣殼粉用量與反應時間之二氧化碳作用量比較

牡蠣殼粉用量 (g)	反應 20 分鐘 總作用 CO ₂ (mL)				反應 40 分鐘 總作用 CO ₂ (mL)				反應 60 分鐘 總作用 CO ₂ (mL)			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均
3	26	28	26	27±1.2	38	40	42	40±2.0	46	48	46	47±1.2
6	23	25	25	24±1.2	28	28	30	29±1.2	38	38	40	39±1.2
9	20	22	22	21±1.2	34	34	36	35±1.2	40	40	42	41±1.2

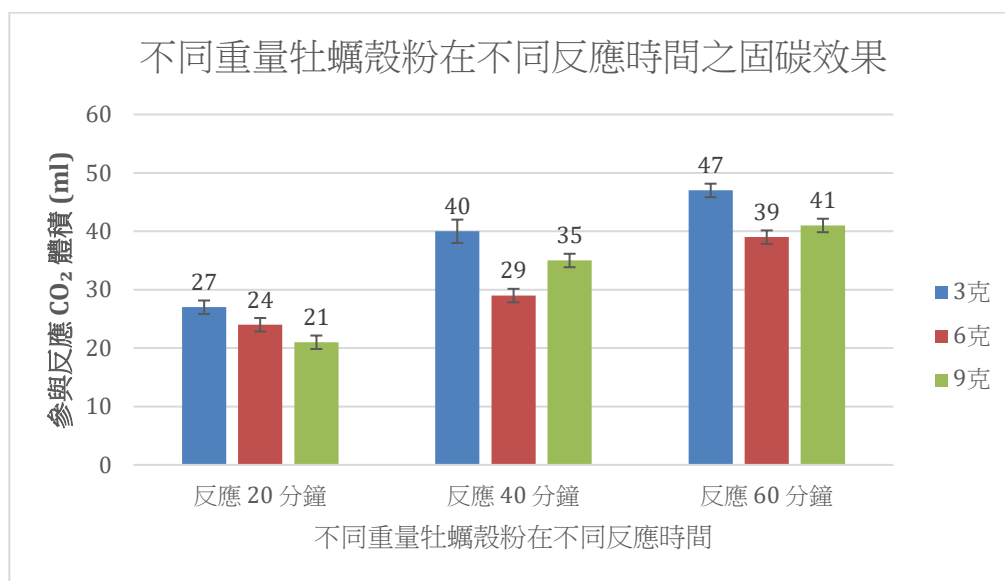


圖 14 反應時間對不同重量牡蠣殼粉之固碳效果（圖片/照片來源：研究團隊自製）

比較不同用量和時間的結果：

1. **時間因素**：對於 3 克、6 克和 9 克的牡蠣殼粉，增加反應時間能顯著增加二氧化碳的總作用量，證明了 20 分鐘的反應時間並未達到飽和作用。
2. **用量因素（短期 vs 長期）**：
 - 在 20 分鐘時，3 克的效果最好 (27mL)，6 克 (24mL) 和 9 克 (21mL) 效果反而較

差。

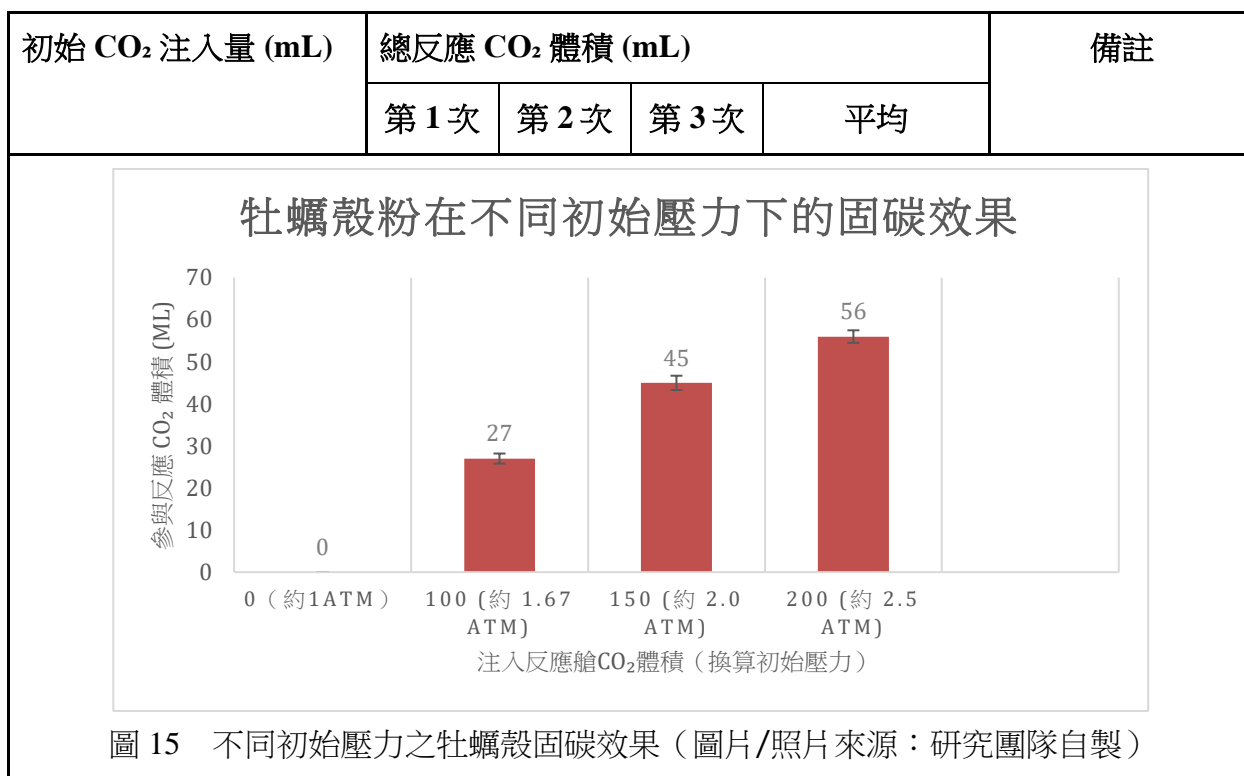
- 在 **40 分鐘**時，3 克的效果依然最好 (40mL)，但 9 克 (34mL) 的反應量已經超過了 6 克 (29mL)。
 - 在 **60 分鐘**時，3 克的效果仍然最好 (47mL)，9 克 (41mL) 和 6 克 (39mL) 的反應量雖然都增加了，但仍未超過 3 克的反應量。
3. **推測原因**：在實驗條件下，3 克的牡蠣殼粉在 60 分鐘內似乎達到了最佳的反應效果。6 克和 9 克的反應總量雖然隨時間增加，但始終沒有超過 3 克。這可能代表：
- **牡蠣殼粉與 CO₂不容易混合**：我們觀察到，加入太多牡蠣殼粉後，針筒裡的混合物變得比較「濃稠」，就算攪拌攪拌，裡面的水和二氧化碳氣體可能比較難流動，也不容易接觸到所有的牡蠣殼粉表面，可能讓反應速度變慢了。
 - **反應的比例關係有極限**：太多牡蠣殼粉時，在有限的針筒裡，二氧化碳不容易完全與牡蠣殼表面進行反應，影響反應速度。過多的固體在有限的空間和混合條件下，反而不利於達到最大反應速率。
 - **實驗誤差**：除了以上二個思考，也應考慮實驗誤差對數據比較的影響。

三、探討初始壓力對二氧化碳作用量的影響

根據亨利定律，液面的分壓會影響氣體溶解的程度，本實驗以不同的初始 CO₂ 注入量代表不同的初始壓力值，雖然可以利用波以耳定律換算概數，但仍以注入量做為不同反應初始壓力的代表。結果如表 6。

表 6 不同初始壓力 (CO₂注入量) 之二氧化碳作用量比較

初始 CO ₂ 注入量 (mL)	總反應 CO ₂ 體積 (mL)				備註
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均	
0 (約 1atm)	0	0	0	0	對照組
100 (約 1.67 atm)	26	28	26	27±1.2	連接三向閥門與針筒的軟管，管內空氣不計
150 (約 2.0 atm)	43	44	47	45±2.1	
200 (約 2.5 atm)	54	56	57	56±1.5	



實驗結果顯示，在固定反應時間內，當初始注入的二氧化碳體積增加（初始壓力增加）時，總參與反應的二氧化碳體積也隨之增加（例如注入 100mL 的 CO₂，較注入 200mL CO₂之總參與反應量從 27mL 增加至 42mL）。代表較高的 CO₂壓力會提高其在水中的物理溶解度和化學反應驅動力，進而促進與牡蠣殼粉的反應。另外，對照組為 1atm 下的自然反應，連通二氧化碳集氣筒（B 針筒）與固碳反應艙（A 針筒），但不施加額外壓力下的反應，20 分鐘內是沒有 CO₂與牡蠣殼粉產與反應的。

四、探討不同水溶液對二氧化碳作用量的影響

在固定條件，使用純水、自來水、海水做為反應的溶劑，觀察 CO₂作用量的變化。

表 7 不同水溶液種類之二氧化碳作用量比較

3g 牡蠣殼粉 200mL 純水	總參與反應 CO ₂ 體積 (mL)							
	1.67atm				2atm			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均
水溶液種類								
純水	26	28	26	27±1.2	43	44	47	45±2.1

3g 牡蠣殼粉 200mL 純水	總參與反應 CO ₂ 體積 (mL)							
	1.67atm				2atm			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均
自來水	23	27	24	25±1.7	34	31	36	34±2.0
海水	19	18	16	18±1.2	32	31	35	33±1.8

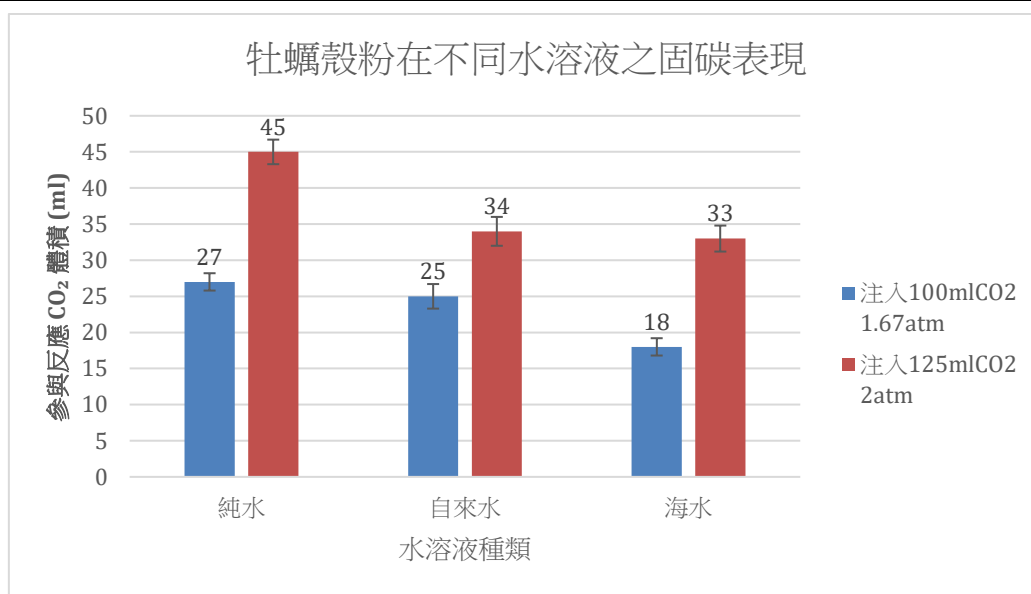


圖 16 不同水溶液之固碳效果（圖片/照片來源：研究團隊自製）

實驗結果顯示，在 20 分鐘的反應時間內，使用純水時總參與反應的二氧化碳體積最多；其次是自來水，而使用海水時總參與反應的二氧化碳體積最少。顯示在本實驗條件下，海水中存在的鹽分或其他離子似乎抑制了 CO₂ 的反應速率或短期內的化學反應程度。未來不適合在海底進行固碳的第一階段反應。這與我們預設的假設—海水可能提高碳酸鈣平衡溶解度的情況有所不同，值得進一步再探究。

五、探討混合方式對二氧化碳作用量的影響

在固定條件，採用不同的混合方式，觀察 CO₂ 作用量的變化，結果如表 8。

表 8 不同混合方式之二氧化碳作用量比較

3g 牡蠣殼粉 200mL 純水	總參與反應 CO ₂ 體積 (mL)							
	1.67atm				2atm			
混合方式	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均
完全靜置	18	20	21	20±1.5	28	29	32	30±2.1
僅初始攪拌混合 30 秒	18	20	20	20±1.2	34	37	33	35±2.1
每 5 分鐘攪拌 30 秒	26	28	26	27±1.2	43	44	47	45±2.1

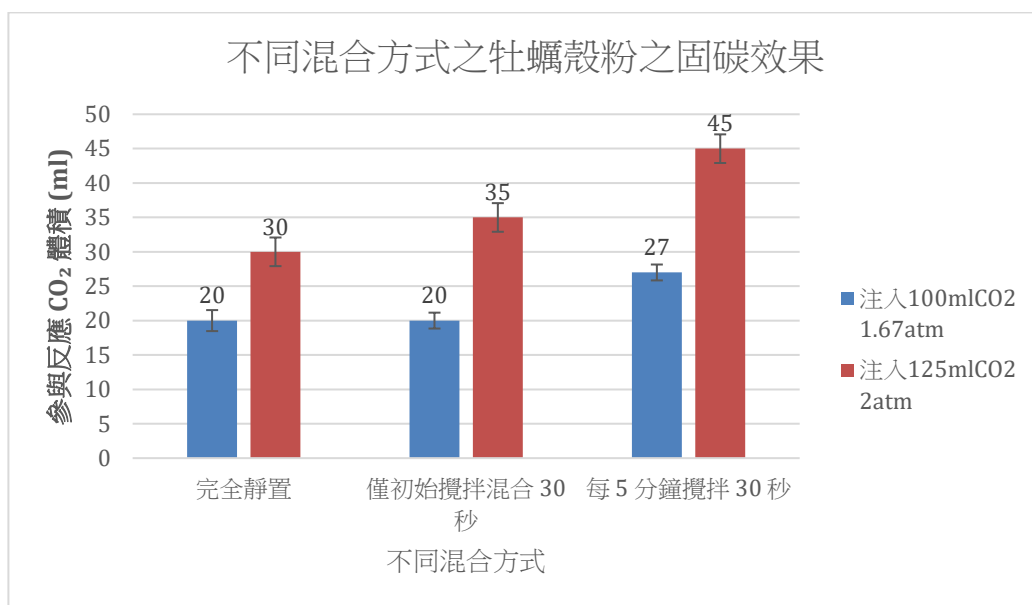


圖 17 不同混合方式產生之固碳效果（圖片/照片來源：研究團隊自製）

實驗結果顯示，採取「固定時間攪拌」的混合方式，總參與反應量則明顯大於其他二種。代表持續或週期性的混合將可以促進氣體溶解、增加液體與固體反應物接觸，提高二氧化碳在固定時間內的反應效果。

六、探討反應溫度對二氧化碳作用量的影響

本實驗探討不同初始反應溫度對二氧化碳作用量的影響。固定條件為：3 克牡蠣殼粉、200mL 水溶液、初始注入 100mL CO₂（約 1.67atm）、反應 20 分鐘、每 5 分鐘攪拌 30 秒。實驗觀察到反應過程中溫度會略有變化。

表 9 不同反應溫度與水溶液之二氧化碳作用量比較

水溶液種類	初始溫度 (°C)	結束溫度 (°C)				總參與反應 CO ₂ 體積 (mL)			
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均
(對照組) 純水	30.0	30.0				20			
純水	15.0	16.9	17.8	18.2	17.6±0.7	20	21	24	22±2.1
純水	8.5	11.5	14.0	16.5	14.0±2.5	25	24	27	25±1.7
(對照組) 海水	30.0	30.0				18			
海水	16.0	15.6	18.1	20.6	18.1±2.5	20	19	22	20±1.5
海水	8.5	11.8	13.6	14.9	13.4±1.6	19	20	23	21±2.1

牡蠣殼粉在不同初始溫度的固碳效果

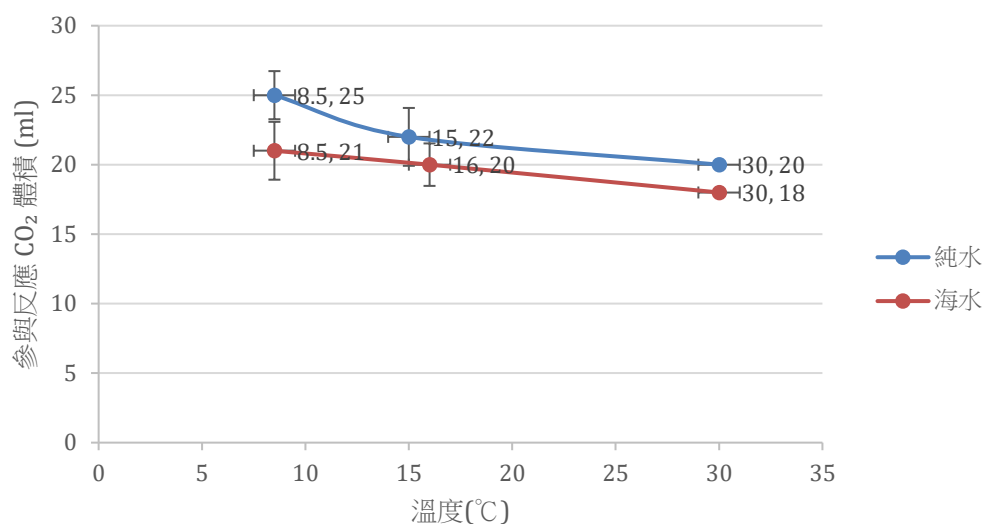


圖 18 不同初始溫度下的牡蠣殼粉固碳效果（圖片/照片來源：研究團隊自製）





實驗結果顯示，無論是純水還是海水，較低的初始反應溫度（約 8.5°C）比較高的溫度（15-16°C 或 30°C）能在 20 分鐘內與更多的二氧化碳反應。這與我們查到的資料一致：低溫有利於二氧化碳的溶解，也可能更有利於碳酸鈣溶解生成碳酸氫鈣的反應平衡。

比較相同溫度範圍下的純水和海水，純水的反應效果仍然略優於海水。

由於整個實驗過程很難保持反應作用的恆溫，低溫組反應後溫度有所上升，可能與環境熱傳播或反應/溶解過程放熱有關（雖然 $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 的反應常被認為是吸熱，但溶解過程可能放熱）。

七、探討反應過程的酸鹼性變化

由於 CO_2 溶解在水中會呈現酸性，本研究的固碳反應物是否也會呈現酸性，導致排入海洋而有影響海水酸鹼值的疑慮，研究小組在實驗時添加了 10 滴廣用酸鹼指示劑(根據說明書建議用量)。觀察結果如下：

純水		
	圖 19 純水環境牡蠣殼粉固碳反應前之酸鹼值（圖片/照片來源：研究團隊自製） 註：初始注入 CO_2 時的顏色（偏藍），對照 pH 值色卡約為 pH 7.6 (弱鹼性)	圖 20 純水環境牡蠣殼粉固碳反應後之酸鹼值（圖片/照片來源：研究團隊自製） 註：結束實驗時之反應槽顏色，由藍色轉變為混濁的綠色，對照 pH 值色卡約為 pH 6.6 。
海水		
	圖 21 海水環境牡蠣殼粉固碳反應前之酸鹼值（圖片/照片來源：研究團隊自製）	圖 22 海水環境牡蠣殼粉固碳反應後之酸鹼值（圖片/照片來源：研究團隊自製）

自製)	自製)
註：初始注入 CO ₂ 時的顏色，偏綠色，對照 pH 值色卡約為 pH 7.0 (接近中性)	註：結束實驗時之反應槽顏色，由顏色變化不大

初步觀察與推論： 無論是純水還是海水，加入牡蠣殼粉後，再注入二氧化碳並加壓反應 20 分鐘，溶液混合指示劑顯示的顏色是偏綠色。代表 **pH 值均下降**，趨向酸性。由於我們已經知道二氧化碳溶解於水形成碳酸 (H₂CO₃)，即使碳酸會與牡蠣殼粉 (CaCO₃) 反應生成碳酸氫鈣 (Ca(HCO₃)₂)，整體溶液的酸鹼性仍然會因為碳酸的存在而增加。指示劑的顏色變化可證明二氧化碳的加入確實改變了溶液的化學性質，並引發了酸鹼變化。其次，我們微型實驗的結果，顏色的變化並未明顯，約呈現中性偏弱酸。

柒、討論

一、牡蠣殼粉的化學反應效果

本研究設定對照組（僅使用純水，不含牡蠣殼粉）來測量二氧化碳單純在水中的物理溶解量。在本實驗一般條件下（注入 100mL CO₂，反應 20 分鐘，每 5 分鐘攪拌 30 秒），我們觀察到 CO₂ 在純水中的物理溶解量約為 **15 mL**。對比 3 克的牡蠣殼粉實驗結果，觀察到的總反應量平均為 **27 mL**，這顯著高於對照組的 15 mL。

兩者差值（27 mL - 15 mL = **12 mL**）可以主要證明牡蠣殼粉（主要成分 CaCO₃）與二氧化碳、水之間發生的化學反應（ $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca(HCO}_3)_2$ ）所額外消耗的二氧化碳量。在本實驗的模擬壓力條件下，牡蠣殼粉確實能與二氧化碳及水發生化學反應，進一步與二氧化碳反應，而不僅僅是物理溶解。

二、實驗誤差與控制

- (一) 體積量測誤差：本實驗採用的針筒，最小刻度為 10mL，研究小組觀察至個位數值，此為觀察估計值，是 CO₂體積量測的主要誤差來源。為控制此誤差，每組實驗均進行多次測量並記錄。
- (二) 氣密程度控制：每次加壓後均以肥皂水檢查三向閥及針筒接頭處的氣密性，確保未鎖緊或老化可能漏氣所帶來的觀察誤差。
- (三) 溫度控制：在進行室溫實驗時，研究小組盡力將環境溫度控制在 27°C 左右，以減少溫度波動對結果的影響。對於低溫實驗，雖然使用了低溫水浴法，但反應過程中的溫度變化仍可能帶來些微誤差。
- (四) 混合方式標準化：為了使混合效果盡可能一致，實驗中採用了固定的攪拌方向與頻率

（每 5 分鐘以磁鐵上下攪拌 30 秒），但每次手動攪拌的力道與均勻度仍可能存在細微差異，是潛在的誤差來源。

三、各變因對牡蠣殼粉固碳效果之影響分析

- **壓力影響：**根據研究結果（活動三），在 20 分鐘內，較高的初始壓力可以與更多的二氧化碳反應。（從 100mL 注入反應 27mL，到 200mL 注入反應 56mL）。證明壓力升高會增加 CO₂ 在水中的溶解度，提高反應物濃度，加速反應速率並可能提高短時間內的反應量。
- **溫度影響：**根據研究結果（活動六），在 20 分鐘內，較低的溫度（8.5°C）能反應更多的二氧化碳，無論在純水或海水中皆是如此。證明低溫大幅增加了 CO₂ 的物理溶解度，同時也可能更有利於 CaCO₃ 溶解生成 Ca(HCO₃)₂ 的反應平衡，其效果超過了低溫可能導致的反應速率減慢。
- **攪拌加速反應：**根據研究結果（活動五），持續的混合能顯著增加 CO₂ 作用量。代表充份混合可以促進 CO₂ 與固體牡蠣殼粉接觸，提高反應速率。
- **牡蠣殼粉用量影響：**根據研究結果（活動二），在 20 分鐘內，3 克牡蠣殼粉的反應效果最好，增加到 6 克和 9 克效果反而下降。但延長反應時間至 60 分鐘後，雖然 3 克的效果仍然最佳 (47mL)，但 9 克 (41mL) 和 6 克 (39mL) 的反應量大幅增加，且 9 克略優於 6 克。這顯示 3 克可能是這個實驗中，短期反應速率的最佳平衡點；而過多的粉末在 60 分鐘內的作用量，仍可能因漿液過於濃稠、混合效率降低而導致與 CO₂ 作用量的速率較慢。研究小組推測在本實驗裝置與混合條件下，可能存在一個操作上的最佳固液比，而非單純的越多越好。
- **水溶液種類影響：**根據研究結果（活動四），在 20 分鐘內，純水的固碳效果 (27mL) > 自來水 (25mL) > 海水 (18mL)。這與研究者原先預期海水中的礦物鹽類可能促進反應不同。查詢資料後發現，可能的原因包括：
 - **鹽析效應 (Salting-out Effect)：**鹽類的存在會降低 CO₂ 在水中的溶解度，使得溶解到水裡參與反應的 CO₂ 變少。
 - **動力學抑制 (Kinetic Inhibition)：**海水中某些離子（如鎂離子 Mg²⁺、硫酸根 SO₄²⁻、磷酸根 PO₄³⁻ 等）可能會吸附在碳酸鈣（牡蠣殼粉）的表面，阻礙其溶解，從而降低了整體反應速率。。

四、固碳過程酸鹼性變化觀察

根據實驗結果，反應槽的固碳產物會隨著二氧化碳溶在水溶液中而轉變為酸性。雖然實驗中觀察到的酸鹼變化幅度不大，但是經過我們查詢資料後得知，可能因為牡蠣殼粉因為參與反應，本身就具有減緩酸鹼變化的能力。也代表著如果把反應的固碳產物直接排放到海洋裡，還是必須考量會有海洋酸化的風險，這個部分的研究值得再設計大型的實驗來驗證。

五、運用深海高壓於廢棄牡蠣殼粉固碳之可行性探討

根據實驗結果，壓力、溫度、混合方式等變因都會影響 CO_2 作用量反應效果。以所查到的資料顯示，牡蠣殼粉在海水與二氧化碳作用後，產生的碳酸氫鈣在常壓下是相當不穩定的，但是如果處在高壓環境中（如深海），則是可以保持穩定狀態。這也就讓研究者發想一個可能性：利用高壓將二氧化碳溶解在海水中，並且加入廢棄牡蠣殼粉攪拌反應，將碳封存成碳酸氫鈣的形態，再將此溶液傳送到深海海床排放。利用海床洋流穩定且高壓、低溫的環境，讓溶解後的碳酸氫鈣得以長期穩定存在，使廢棄的牡蠣殼粉發揮固碳的效用。未來若要實現此概念，可思考建造一個優化的「固碳反應系統」。整體架構可設想為包含「二氧化碳回收系統」、「牡蠣殼回收反應系統」、「固碳產物拋放系統」三大循環利用部分。基於本研究的啟發，我們構想的系統流程如下：

- (一) 前處理系統：將收集到的廢棄牡蠣殼進行洗淨、絞碎研磨成適當大小的粉末。
- (二) 加壓反應系統：將處理好的牡蠣殼粉與海水（或純水溶液），另從實驗中找出最佳的固液比，置入一個可加壓的「模擬海底壓力反應槽」中，打造足夠堅固之鋼製反應槽。
- (三) 氣體注入系統：將捕獲的高濃度二氧化碳氣體（來自二氧化碳回收系統）充入反應槽中，達到預設的壓力，壓力值與投放海床的深度壓力相同。
- (四) 反應與產出：在反應槽中進行充分混合與反應，使牡蠣殼（碳酸鈣）與二氧化碳作用生成富含碳酸氫鈣的溶液（固碳產物）。
- (五) 深海投放系統：
 - 1. 將反應完成後的固碳產物溶液（包含未反應完的牡蠣殼漿液），連同反應艙鋼筒轉移至運輸裝置，利用船舶運輸至投放場。
 - 2. 以機械手壁調掛至海底，投放到預定深度的海底。
 - 3. 投放時，由於反應艙內壓力與外部海床所在壓力相同，利用機械手臂打開投放。
 - 4. 隨著系統的履帶運送，投放完的反應艙隨著履帶返回水面。
- (六) 反應槽回收系統：若採用批次反應槽，則需將空的反應槽從水面再回收至船舶。
- (七) 循環操作：重複步驟 1 至 6，進行下一輪的固碳程序。

研究小組設計的系統概念圖如下：

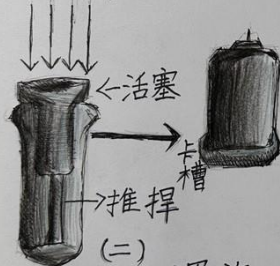
步驟說明：

(一) 高壓反應槽的

防護蓋打開

由碳產物利用動力

自然落地至海底保存



(二)

投入深海

活塞受深海壓力

推動推桿

推桿再推開防護卡槽

高壓反應槽

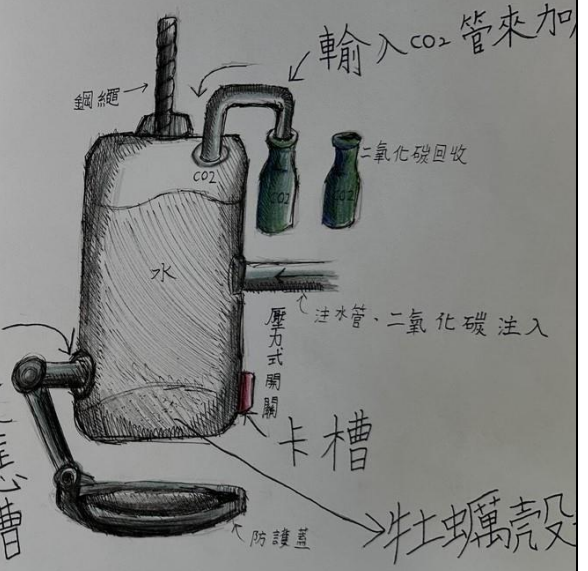


圖 22 陸上固碳反應艙示意圖（圖片/照片來源：研究團隊自製）

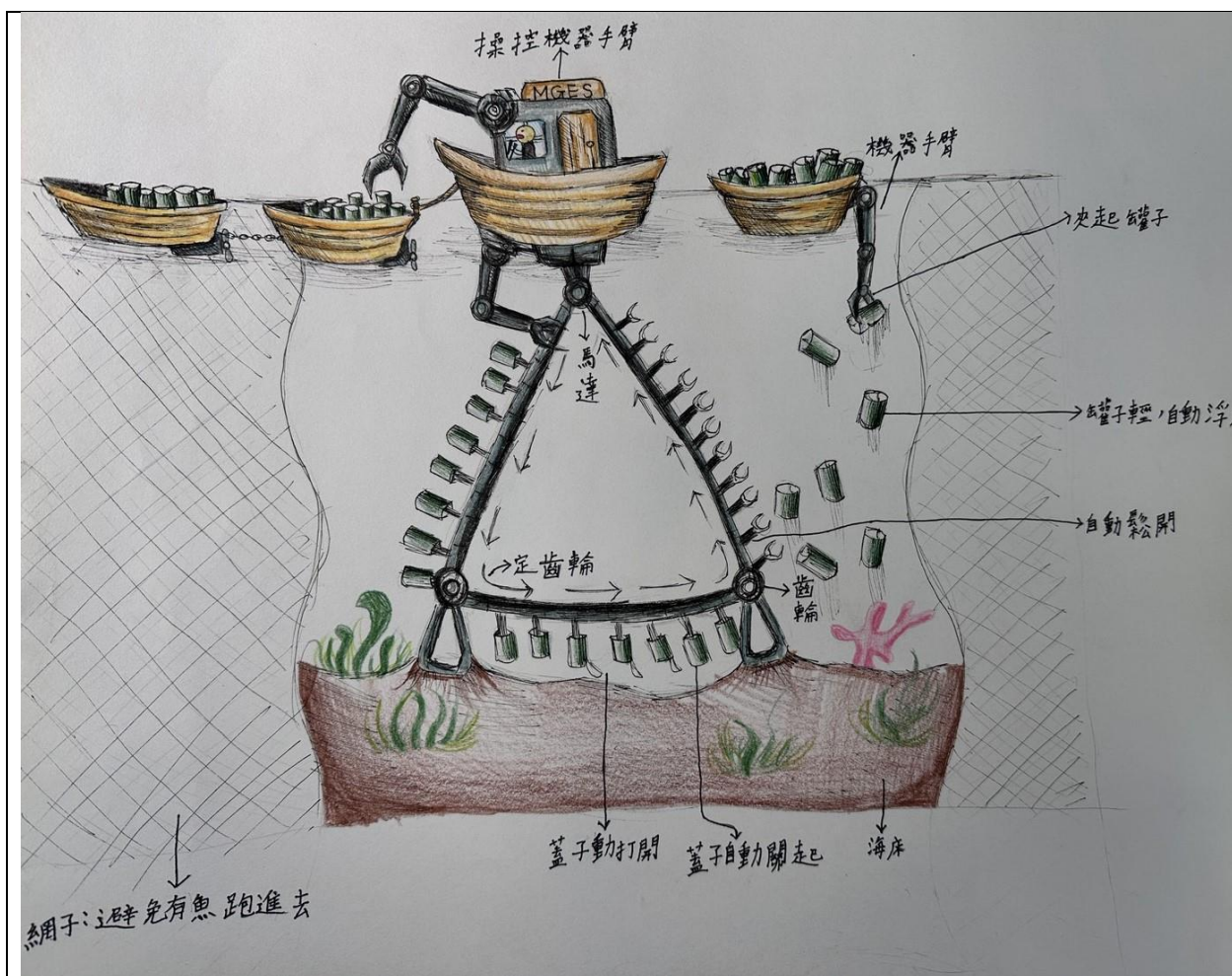


圖 23 深放投放系統運作示意圖（圖片/照片來源：研究團隊自製）

選擇排放的深海地點時，需確保其壓力和溫度足以維持碳酸氫鈣的穩定性。要特別注意的是，排放的深海環境必須具有足夠高的壓力和低溫環境，以確保排出的碳酸氫鈣溶液能維持穩定，並避免溶解其中的二氧化碳因壓力降低而溢出，造成局部海洋酸化。排放機制本身則需克服外部壓力（例如使用內部氣壓推力系統）。

捌、結論

- 一、本研究以針筒裝置模擬加壓環境，並藉由實驗證實，廢棄牡蠣殼粉能與水及二氧化碳發生化學反應，參與反應的 CO_2 量證明此方法具有化學固碳的可行性。
- 二、「提高初始壓力」、「降低反應溫度」、「延長反應時間」以及「加強混合」都能有效增加牡蠣殼粉與二氧化碳反應的總量。其中，低溫和高壓效果尤其明顯。
- 三、在本實驗條件下，牡蠣殼粉用量並非越多越能固碳。過多的牡蠣殼粉可能因混合效率

降低等因素，導致短期反應速率下降。本實驗數據之最佳固液比為 3 克牡蠣殼粉加入 200mL 的純水。

- 四、水溶液種類對固碳效果有顯著影響。在 20 分鐘的反應時間，純水效果最好，自來水次之，海水效果最差。
- 五、二氧化碳作用量隨著時間增加而減緩，結果顯示若要追求更高的固碳效率，需要更長的反應時間或更高的壓力。
- 六、利用廢棄牡蠣殼在加壓、低溫、良好混合的條件下與二氧化碳反應，是具有潛力的固碳方法。

玖、參考文獻

- 一、泛科學院（2023 年 10 月 10 日）。**溫室效應有救了？把二氧化碳埋進地底吧！** ft. 台灣中油 [影片]。YouTube。 <https://youtu.be/B58HUp5JWdY>
- 二、泛科學院（2024 年 3 月 15 日）。**減碳速度太慢？現在已經能主動把二氧化碳抓下來！？抓下來的二氧化碳又去了哪裡？** ft. 經濟部能源署 [影片]。YouTube。 <https://youtu.be/cVUcn8rwWfI>
- 三、信望愛文教基金會（2011 年 12 月 2 日）。**化學基礎講義：壓力與溶解度的關係（亨利定律）**。
https://resource.learnmode.net/upload/file_7/7d2e35058fc48fe4d48adef2e8dc50f743525624（查詢日期：2025 年 3 月 2 日）
- 四、周金城（2025 年 3 月 4 日）。**二氧化碳教學探究：探究二氧化碳氣體與水的作用-氣體溶解和逸散與 pH 值變化**。**臺灣化學教育**，59，取自
<https://chemed.chemistry.org.tw/%E4%BA%8C%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%A2%B3%E6%95%99%E5%AD%B8%E6%8E%A2%E7%A9%B6%EF%BC%9A%E6%8E%A2%E7%A9%B6%E4%BA%8C%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%A2%B3%E6%B0%A3%E9%AB%94%E8%88%87%E6%B0%B4%E7%9A%84%E4%BD%9C%E7%94%A8/>（查詢日期：2025 年 3 月 2 日）
- 五、海廢變黃金-牡蠣殼環保再利用（2023 年 11 月 1 日）。**海廢變黃金-牡蠣殼環保再利用**。<https://www.tnet.org.tw/Article/Detail/37699>（查詢日期：2025 年 3 月 25 日）
- 六、國立臺灣科學教育館（2019）。**碳為觀止—回收式生物炭吸附光解膠囊？** 第 61 屆全國中小學科學展覽會，國中組化學科。
<https://www.ntsec.edu.tw/article/FileAtt.ashx?id=14724>
- 七、國立臺灣科學教育館（2022）。**不要「碳」氣！自製氣瓶探究碳捕捉材料的吸附效能**。第 64 屆全國中小學科學展覽會，國中組化學科。
<https://www.ntsec.edu.tw/article/FileAtt.ashx?id=17072>
- 八、國立臺灣科學教育館（2022）。**捕碳成鈣 鈉麼厲害**。第 64 屆全國中小學科學展覽會，國小組化學科。<https://www.ntsec.edu.tw/article/FileAtt.ashx?id=16992>

- 九、國立臺灣科學教育館（2012）。牡蠣在環境中對重金屬之吸附及減碳效應探討。第 51 屆全國中小學科學展覽會，高職組農業及生物科技科。
<https://www.ntsec.edu.tw/article/FileAtt.ashx?id=7831>
- 十、國立臺灣科學教育館（2013）。垃圾變黃金～廚房裡隨手可得的滅火器。第 52 屆全國中小學科學展覽會，國小組化學科。
<https://www.ntsec.edu.tw/article/FileAtt.ashx?id=8170>
- 十一、國立臺灣科學教育館（2016）。牡蠣殼粉與稻殼灰製瓷磚用釉之研究。第 55 屆全國中小學科學展覽會，高中組生活與應用科學科。
<https://www.ntsec.edu.tw/article/FileAtt.ashx?id=10528>
- 十二、國立臺灣科學教育館（2024）。金雞“牡”——廢棄牡蠣殼製作重金屬吸收發泡煉石之研究。第 64 屆全國中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學(三)科。
<https://www.ntsec.edu.tw/article/FileAtt.ashx?id=17342>
- 十三、國立臺灣科學教育館（2024）。淨菱碳排の蚵學研究。第 64 屆全國中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學(三)科。
<https://www.ntsec.edu.tw/article/FileAtt.ashx?id=17343>
- 十四、張名惠、謝佩珊、黃國璋、廖啟雯（2016）。二氧化碳溶解封存技術發展。工業污染防治, 138, 87 - 104。
- 十五、柳婉郁（2022 年 8 月 22 日）。三分鐘帶你看懂綠碳、藍碳、黃碳。綠學院 Green Impact。 <https://www.greenimpact.cc/Articles/detail?cid=1&id=458>

【評語】 080208

1. 作品關注氣候變遷與二氧化碳減排，結合「碳捕捉與封存」議題，具有高度環境關懷及科學性。
2. 該實驗裝置非常簡單，以針筒模擬高壓環境，製作簡便且能達到觀察效果，利於推廣為小型科普教學實驗。
3. 每個實驗均能進行三重複，並計算標準偏差，同時在作圖上也能夠將誤差範圍標示出來，值得肯定。
4. 在論文中有討論到可能的誤差來源和控制方法，這是一般作品少見的優點。
5. 僅概念性提出深海拋放方案，未考量如海洋生態風險、酸化影響、實際設備能耗等討論。

作品海報

高壓碳究 碳為觀止

應用牡蠣殼加壓溶解進行化學固碳之可行性研究

摘要

本研究旨在探討廢棄牡蠣殼在模擬環境下，結合水與二氧化碳進行化學固碳($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)的可行性，並連結深海海床高壓低溫能穩定固碳產物的概念，提出藍碳工程構想。透過模擬裝置，系統性探討壓力、溫度、反應物比例等變因對固碳效率的影響。

研究結果顯示，牡蠣殼粉具有化學固碳能力。增加壓力、降低溫度、充分混合及延長反應時間，均有效提升 CO_2 反應量。在本實驗條件下，3 克牡蠣殼粉與 200 毫升純水為最佳固液比，使 CO_2 反應量較其他固液比多，且純水環境優於海水。

研究者歸納影響反應的關鍵因素，提出一深海固碳系統發想，包含陸上固碳作用程序與深海海床之投放系統，打造穩定儲碳的藍碳工程。

壹、研究動機

高壓「碳」究 「碳」為觀止

減緩全球暖化
儲碳減碳至關重要

固碳技術成本高昂

碳循環中的綠、黃、藍三種碳匯

海洋儲碳的藍碳潛力

鐘乳石形成的逆想

在地牡蠣殼廢棄物再利用

碳酸鈣與溶在水裡的二氧化碳反應

固碳產物常溫常壓不穩定

影響牡蠣殼粉固碳作用變因

溫度

壓力

反應物重量

反應時間

水溶液種類

混合方式

促進固碳反應的變因組合

深海海床做為儲放環境

探討影響反應平衡的因素

深海儲碳構想

深海高壓低溫環境助於穩定固碳反應物

牡蠣殼粉深海儲碳的構想

陸上固碳系統

海床拋放系統

貳、研究目的

- 一.探討**初始壓力**大小對二氧化碳反應量的影響。
- 二.探討不同環境**溫度**下，牡蠣殼粉對二氧化碳反應效果的影響。
- 三.探討在加壓環境下反應時，**反應時間**對牡蠣殼粉與二氧化碳反應量的影響。
- 四.探討在固定水量和反應時間下，**牡蠣殼粉重量**對二氧化碳反應量的影響。
- 五.比較牡蠣殼粉在**不同水溶液**中與二氧化碳反應的效果差異。
- 六.探討在反應過程中**攪拌混合方式**對二氧化碳反應量的影響。

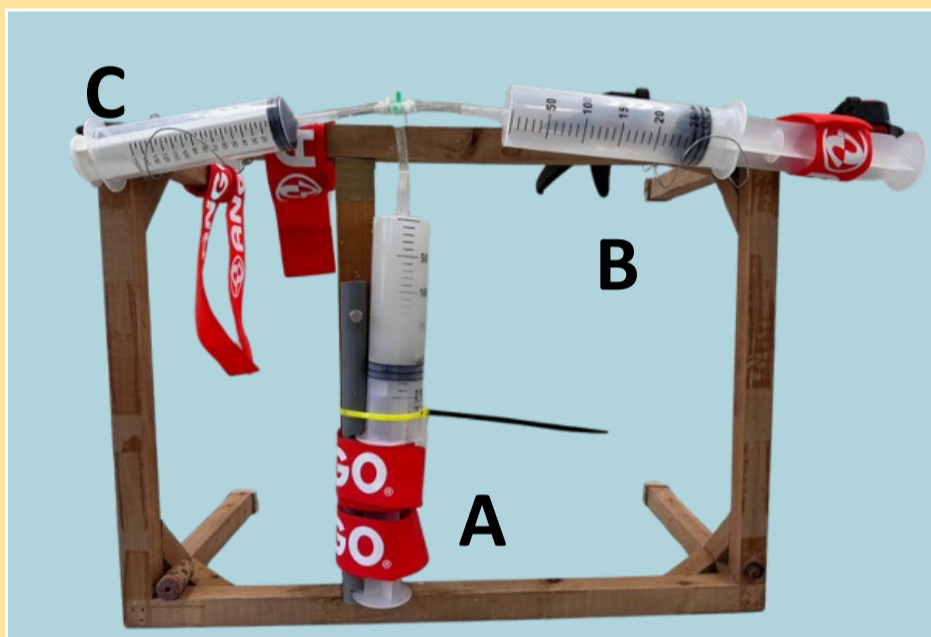
參、文獻探討

- a)藍碳工程的潛力：海洋佔全球面積 71%，維持既有的海洋碳循環外，**開發和利用海洋來儲碳**，應不限於紅樹林、海草與藻類等植物的復育工程。本研究提出人工藍碳設計：利用牡蠣殼粉與加壓 CO_2 反應，促進碳酸氫鈣生成以封存碳。
- b)亨利定律：「固定溫度下，氣體在液體中的溶解度與氣體在液體上方的分壓成正比」。深海壓力能夠使 CO_2 在海水的溶解度增加，但也容易因洋流上湧而溢出。
- c)勒沙特列原理：本研究反應式 $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 是可逆反應，研究者根據勒沙特列原理，探討哪些反應環境的調控，能使平衡反應再向右反應？以及**維持穩定生成物的變因**，據此設計實驗。
- d)歷史研究：
 - (1)固碳主題相關作品，多以物理吸附法與常壓下的化學沉澱法為主。
 - (2)以牡蠣殼的主題研究，多以牡蠣殼粉處理後添加至其他材料，做為建材或吸附重金屬等用途，僅有 1 件有觸及減碳效應—養殖牡蠣重量變化試算固碳效果。本研究探討牡蠣殼在高壓環境下與 CO_2 反應的可行性。

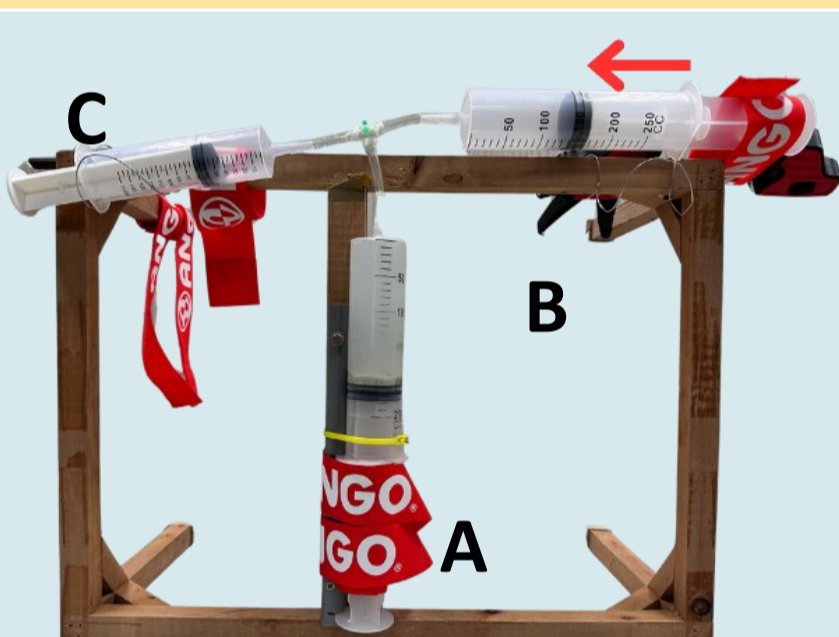
肆、研究設備與器材

伍、研究方法與步驟

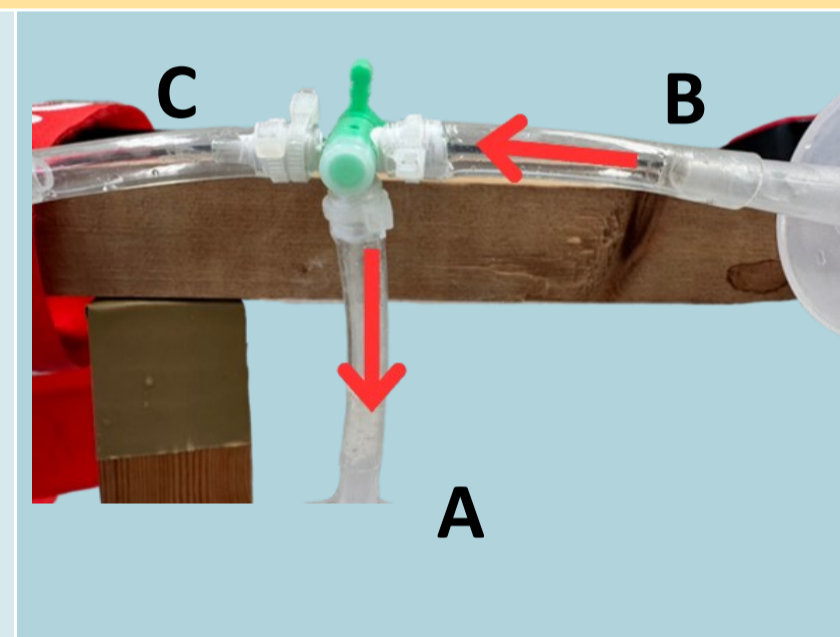
- 實驗步驟簡述（如右表）
- 本研究探討變因：反應時間、牡蠣殼粉重量、初始壓力、溶液種類、攪拌混合方式、反應溫度
- 測量指標（應變變因）：二氧化碳氣體體積減少量（測量轉移至 C 針筒的最終氣體體積，與初始注入量比較）



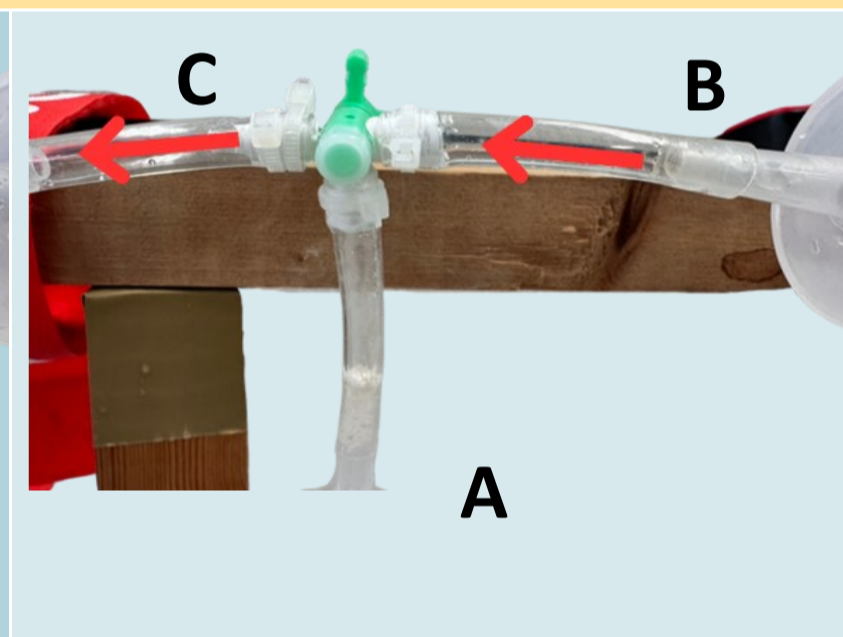
1.三個針筒以三向閥連接



2.開始時，連接閥開通 A、B 針筒，利用木工夾緩慢注入 100mL CO_2



3.使 CO_2 進入 A 針筒反應槽參與固碳作用



4.作用時間過後，開通 B、C 針筒，讓多餘的 CO_2 藉由壓力排放至 C 針筒。

陸、研究結果



基準對照 1： CO_2 在常壓下與牡蠣殼粉的化學反應量 20 分鐘內，活塞自 300mL 上升至約 290mL，代表在常壓下，牡蠣殼粉與 CO_2 與水就會產生反應，使 CO_2 體積變少。

基準對照 2： 二氧化碳在純水中的物理溶解量

200mL 純水、初始注入 100mL CO_2 （約 1.67atm 壓力）、反應 20 分鐘、每 5 分鐘攪拌 30 秒、室溫 $27 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ）， CO_2 物理溶解於水中的體積減少量約為 15 mL。

一、探討反應時間對二氧化碳作用量的影響

(一) 不同反應時間點的作用量比較

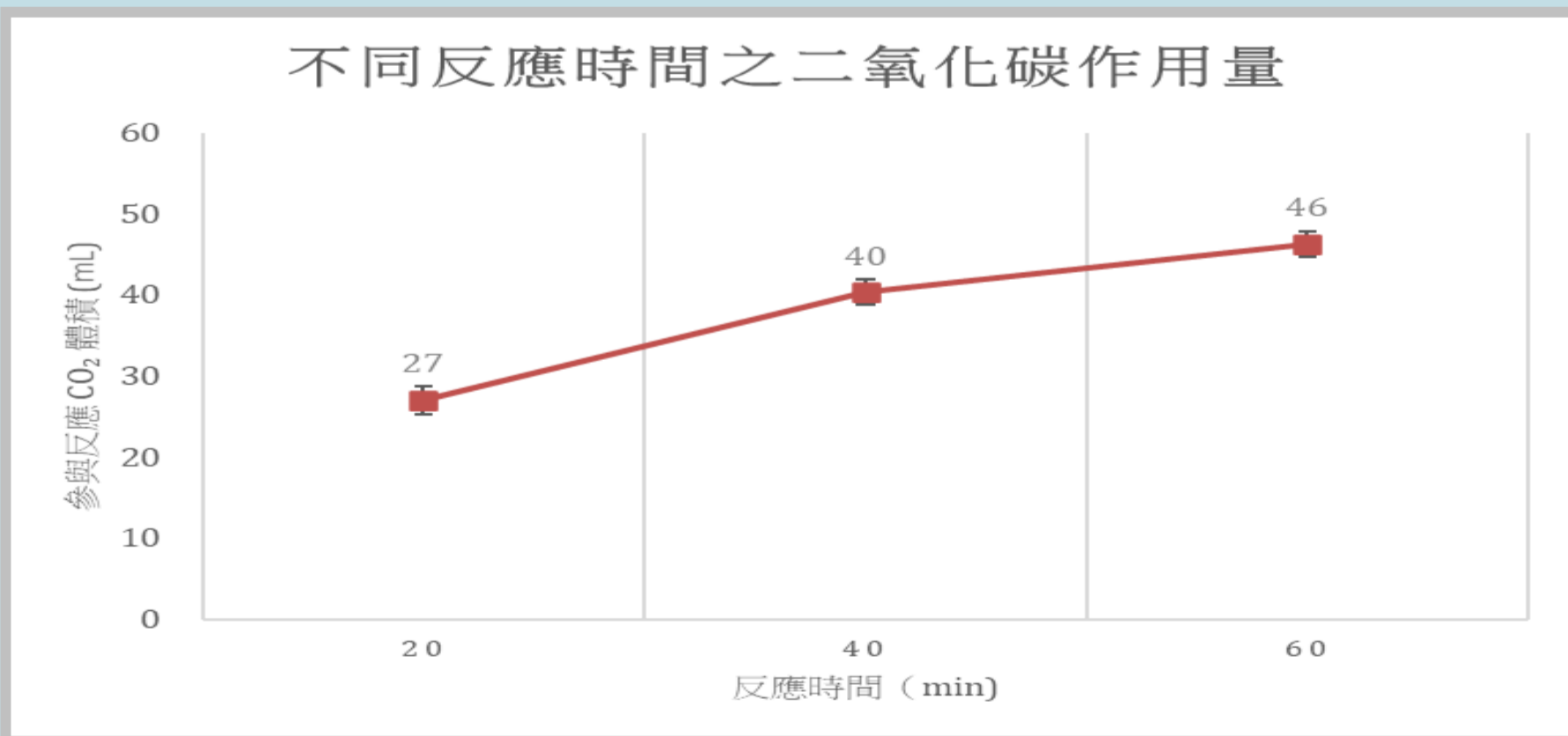


圖 1 不同反應時間點之二氧化碳作用量比較

（註：總反應 CO_2 體積為觀察記錄值。推估化學反應量 = 總反應量 - 對照組物理溶解量【27-15=12】。20 分鐘後的共有 CO_2 約 12mL 參與化學反應）

(二) 連續重複反應的固碳效果

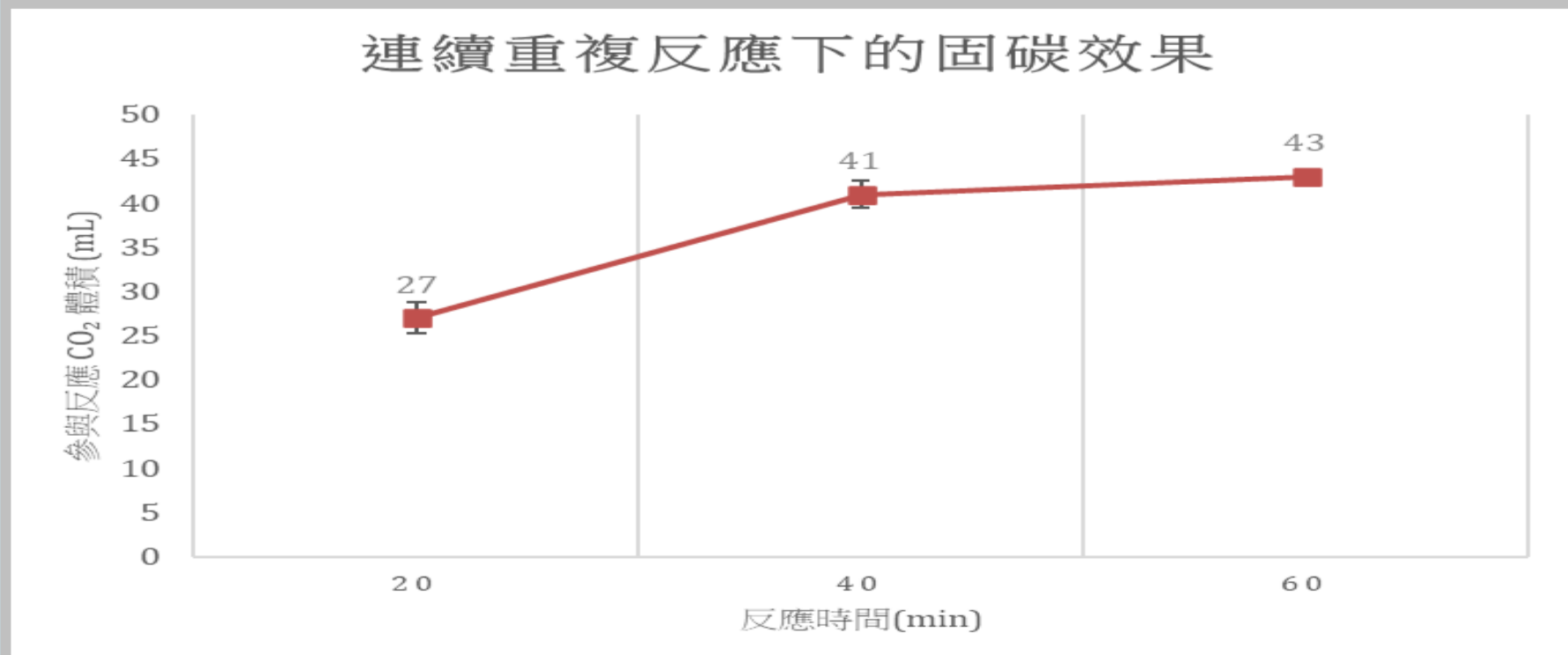


圖 2 連續重複反應之二氧化碳反應效果

100mL CO_2 反覆壓入 A 針筒，參與反應的 CO_2 體積與圖 1 約略相同，代表反應時間愈久，參與作用的 CO_2 就愈多，但隨著時間拉長，增加的 CO_2 反應量折線圖變得較平緩。

二、探討牡蠣殼粉用量與反應時間對二氧化碳反應量的影響

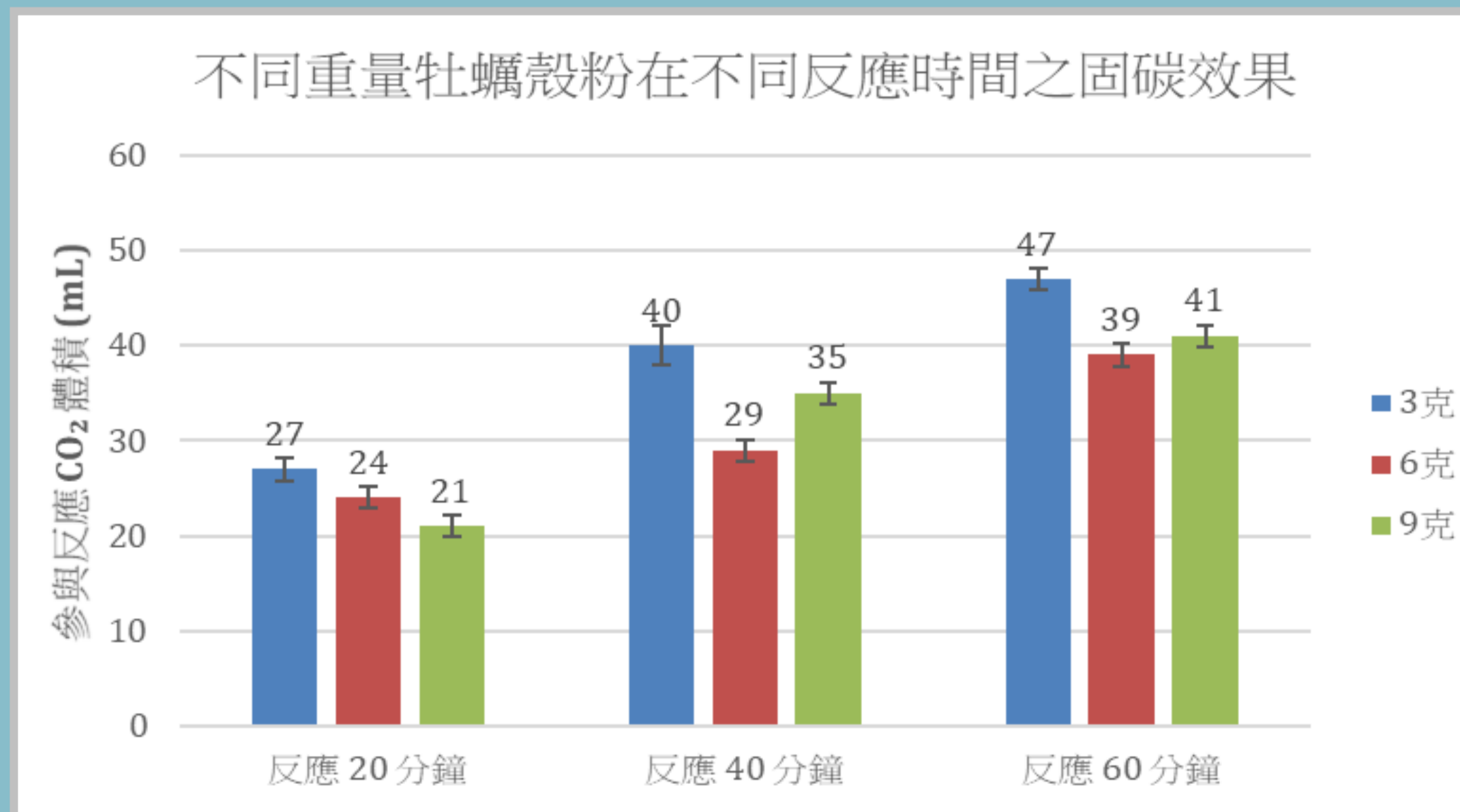


圖 3 不同牡蠣殼粉用量與反應時間之二氧化碳作用量比較

比較不同用量和時間的結果：

- 時間因素：增加反應時間能顯著增加二氧化碳的總作用量，20 分鐘未達到飽和作用。
- 用量因素（短期 vs 長期）：
3 種反應時間皆顯示 3 克的效果最好。
- 推測原因：
 - 牡蠣殼粉與 CO_2 不容易混合：太多牡蠣殼粉，針筒裡的混合物變得比較「濃稠」，水和二氧化碳氣體比較難流動，不容易與牡蠣殼粉表面充份作用。
 - 反應的比例關係有極限：過多的固體在有限的空間，不利於達到最大反應速率。

三、 探討初始壓力對二氧化碳作用量的影響

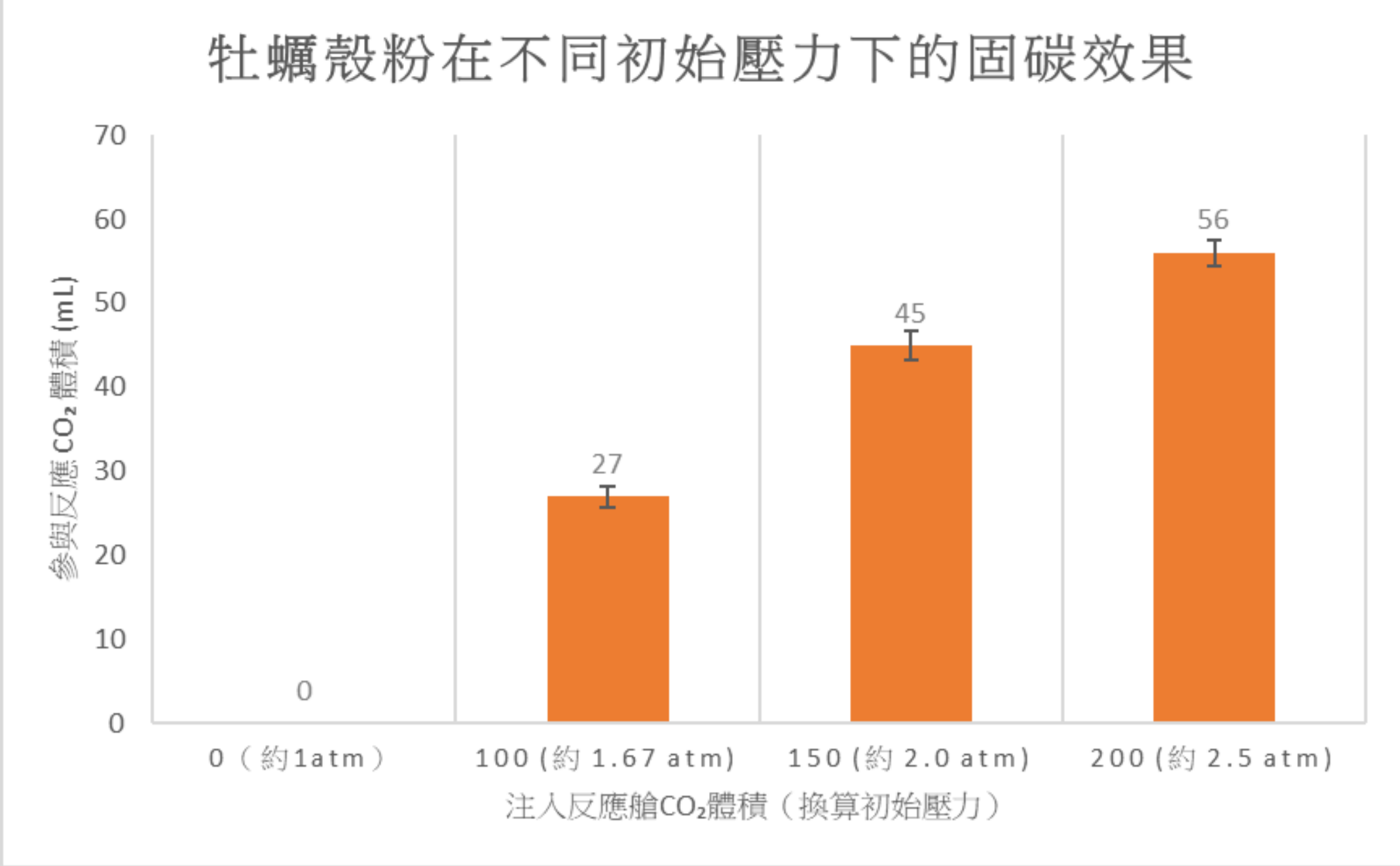


圖 4 不同初始壓力 (CO₂注入量) 之二氧化碳作用量比較
註：連接三向閥門與針筒的軟管，管內空氣不計

實驗結果顯示，較高的初始壓力會提高 CO₂在水中的物理溶解度和化學反應驅動力，進而促進與牡蠣殼粉的反應。
對照組為 1atm 下的自然反應，連通二氧化碳集氣筒 (B 針筒) 與固碳反應艙 (A 針筒)，但不施加額外壓力的結果，20 分鐘與牡蠣殼粉產生反應的 CO₂為 0mL (推測原因：接觸面積太小)。

四、 探討不同水溶液對二氧化碳作用量的影響

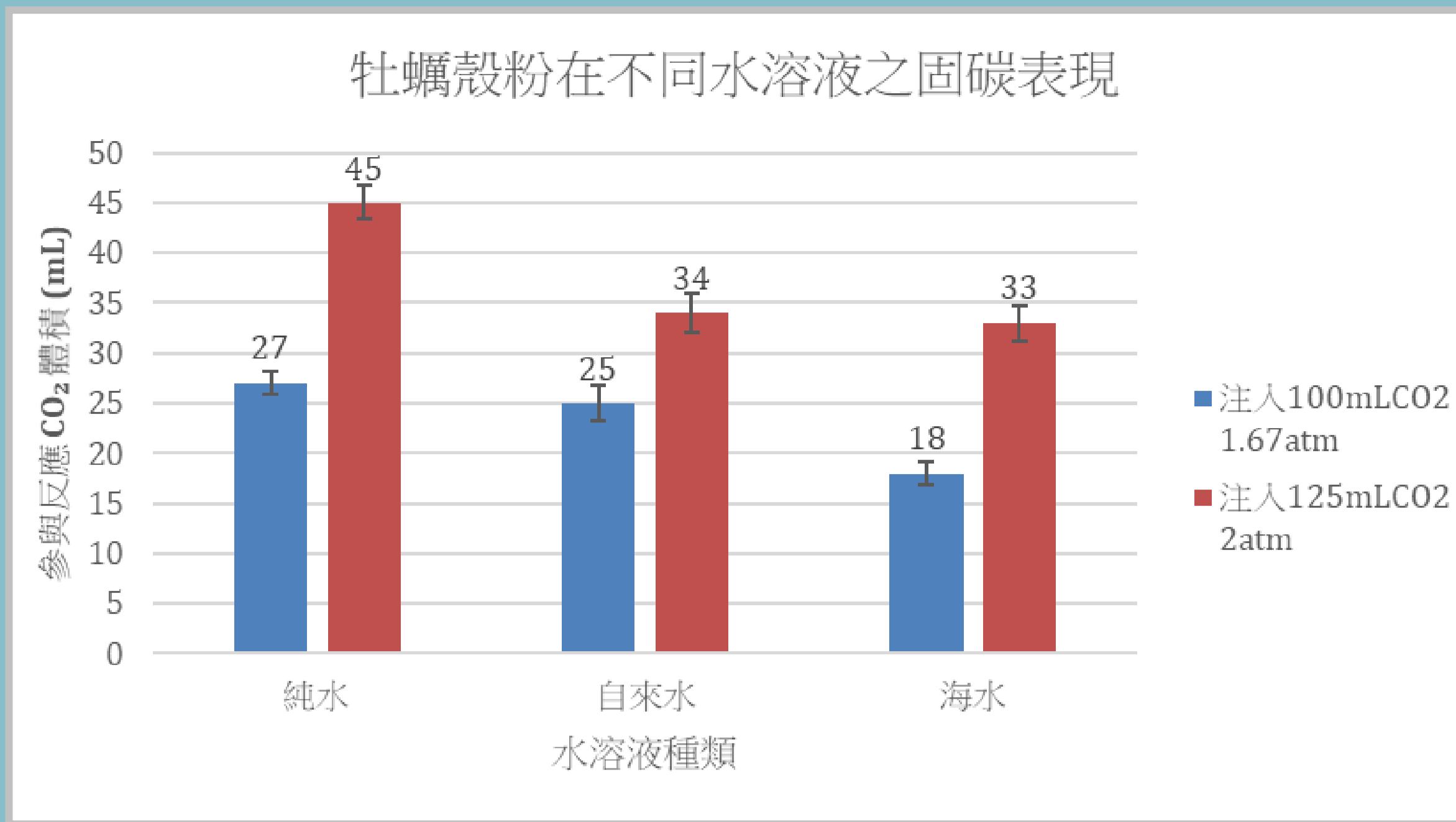


圖 5 不同水溶液種類之二氧化碳作用量比較

實驗結果顯示，在 20 分鐘的反應時間內，使用純水時總反應 CO₂體積最多；海水總反應 CO₂體積最少。

五、 探討混合方式對二氧化碳作用量的影響

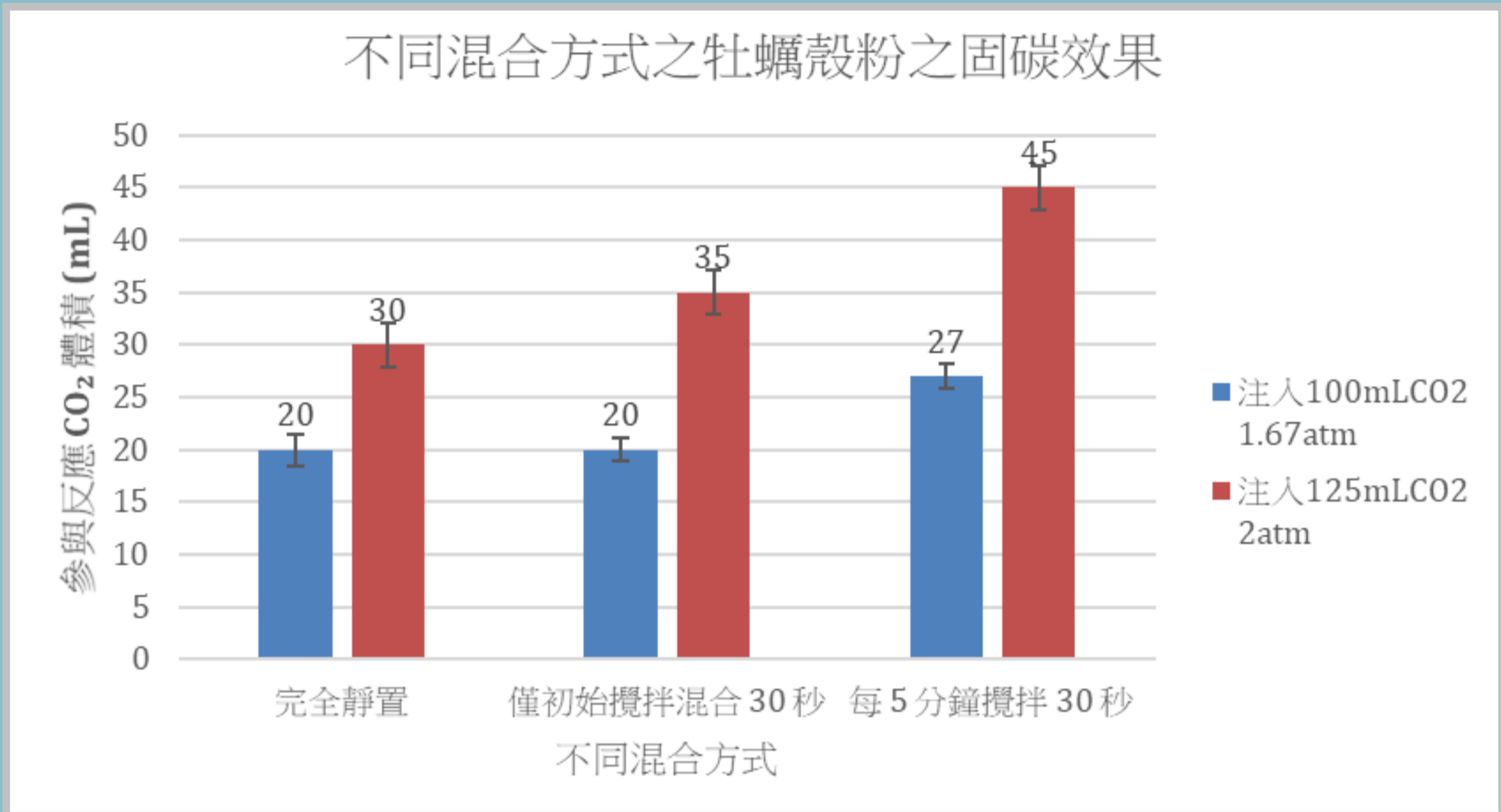


圖 6 不同混合方式之二氧化碳作用量比較

結果顯示，採取「固定時間攪拌」的混合方式，參與反應 CO₂較多。代表持續或週期性的混合可以促進溶解、增加液體與固體反應物接觸機會，提高 CO₂反應量。

六、 探討反應溫度對二氧化碳作用量的影響

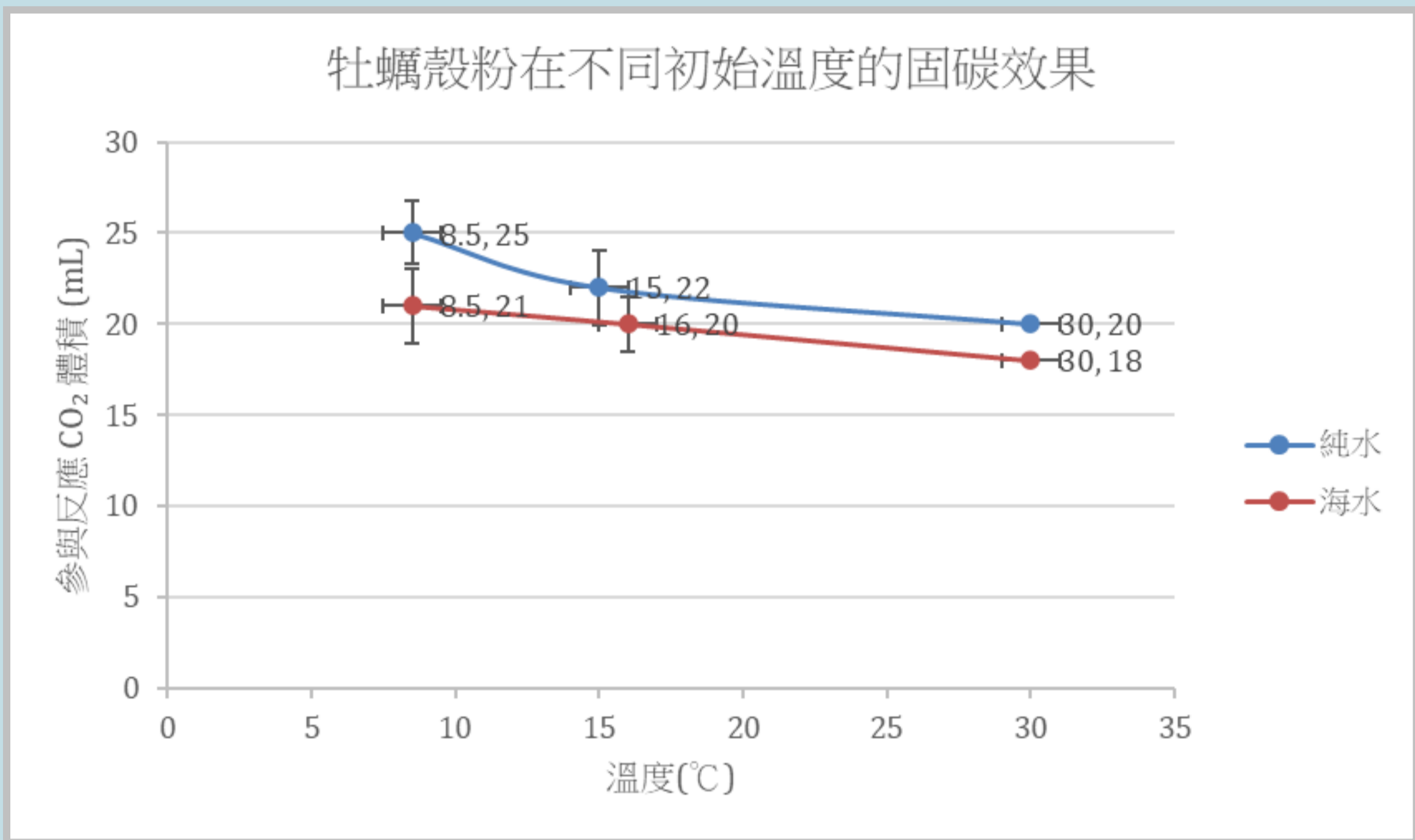


圖 7 不同反應溫度與水溶液之二氧化碳作用量比較

結果顯示，純水與海水，較低的初始反應溫度 (約 8.5°C) 能在 20 分鐘與更多的 CO₂反應。符合勒沙特列原理，低溫有利向右邊反應，增加 CO₂的反應量，也更有利於碳酸鈣溶解生成碳酸氫鈣的反應平衡。由於整個實驗過程很難保持反應作用的恆溫，低溫組反應後溫度有所上升，與環境熱傳播或反應/溶解過程放熱有關。

七、 探討反應過程的酸鹼性變化

由於 CO₂溶解在水中會呈現酸性，本研究的固碳反應物是否也會呈現酸性，導致排入海洋而有影響海水酸鹼值的疑慮，研究小組在實驗時添加了 10 滴廣用酸鹼指示劑(說明書建議用量)。觀察結果如下：

純水		海水	
初始注入 CO ₂ 時的顏色 (偏藍)，對照 pH 值色卡約為 pH 7.6 (弱鹼性)		初始注入 CO ₂ 時的顏色，偏綠色，對照 pH 值色卡約為 pH 7.0 (接近中性)	
結束實驗時之反應槽顏色，由藍色轉轉變為混濁的綠色，對照 pH 值色卡約為 pH 6.6。		結束實驗時之反應槽顏色，顏色變化不大	

初步觀察與推論： 無論是純水還是海水，指示劑的顏色變化可證明反應的過程確實改變了溶液的化學性質，並引發了酸鹼變化，溶液混合指示劑顯示的顏色是偏綠色。代表 pH 值均下降，趨向弱酸性。

柒、討論

一、 牡蠣殼粉的化學反應效果

在常溫常壓下，牡蠣殼粉與水在 20 分鐘內能與 CO₂產生作用 (密閉針筒活塞上升)。測量 CO₂在高壓(1.67atm)下對純水的物理溶解量，也證明 CO₂在牡蠣殼粉 (主要成分 CaCO₃) 與水混合物之間發生的化學反應 (CaCO₃ + H₂O + CO₂ ⇌ Ca(HCO₃)₂) 存在。在本實驗的模擬壓力條件下，牡蠣殼粉確實能與二氧化碳及水發生化學反應，進一步與二氧化碳反應，而不僅僅是物理溶解。

二、 實驗誤差與控制

- (一) 體積量測誤差控制：每組實驗均進行多次測量並記錄。
- (二) 氣密程度控制：以肥皂水檢查三向閥及針筒接頭處的氣密性。
- (三) 溫度控制：在進行室溫實驗時，將環境溫度控制在 27°C 左右，以減少溫度波動對結果的影響。對於低溫實驗，雖然使用了低溫水浴法，但反應過程中的溫度變化仍帶來些微誤差。
- (四) 混合方式標準化：採用固定的攪拌方向與頻率 (每 5 分鐘以磁鐵上下攪拌 30 秒)。

三、各變因對牡蠣殼粉固碳效果之影響分析

- 反應時間：反應速率隨時間推移減緩，代表若要追求更高的固碳效率，需要更長的反應時間。
- 壓力影響：根據研究結果，壓力升高會提高反應物濃度，加速反應速率並提高短時間內的反應量。
- 溫度影響：研究數據證明低溫環境促進 CO₂ 的反應，同時也更利於 CaCO₃ 溶解生成 Ca(HCO₃)₂ 的反應平衡，其效果超過了低溫可能導致的減慢效應。
- 攪拌加速反應：根據研究結果，充份混合可以促進 CO₂與固體牡蠣殼粉接觸，在相同時間內可以增加反應量。
- 牡蠣殼粉用量影響：根據研究結果，3 克牡蠣殼粉的反應效果最好。研究小組推測 3 克是這個實驗操作上的最佳固液比，短期反應速率的最佳平衡點；過多的粉末在 60 分鐘內的作用量，因漿液過於濃稠、混合效率降低而導致與 CO₂作用量的速率較慢。
- 水溶液種類影響：在 20 分鐘內，純水的固碳效果 (27mL) > 自來水 (25mL) > 海水 (18mL)。與本研究預期海水中的礦物鹽類促進反應不同。查詢資料後歸納原因包括：
 - ◆ 鹽析效應 (Salting-out Effect)：鹽類的存在會降低 CO₂ 在水中的溶解度，使得溶解到水裡參與反應的 CO₂ 變少。
 - ◆ 動力學抑制 (Kinetic Inhibition)：海水中某些離子 (如鎂離子 Mg²⁺、硫酸根 SO₄²⁻、磷酸根 PO₄³⁻ 等) 會吸附在牡蠣殼粉的表面，阻礙溶解，降低了整體反應速率。已有相關科展作品探討牡蠣殼對於淨化水質可供證明。

四、固碳過程酸鹼性變化觀察

反應槽的固碳產物會隨著二氧化碳溶在水溶液中而轉變為弱酸性，而非單純 CO₂ 溶解在水中的酸化。經查詢資料，推測為牡蠣殼粉參與反應，減緩酸鹼變化的能力。但考量把固碳產物直接排放到海洋產生酸化的風險，這個部分應再設計大型的實驗來驗證。

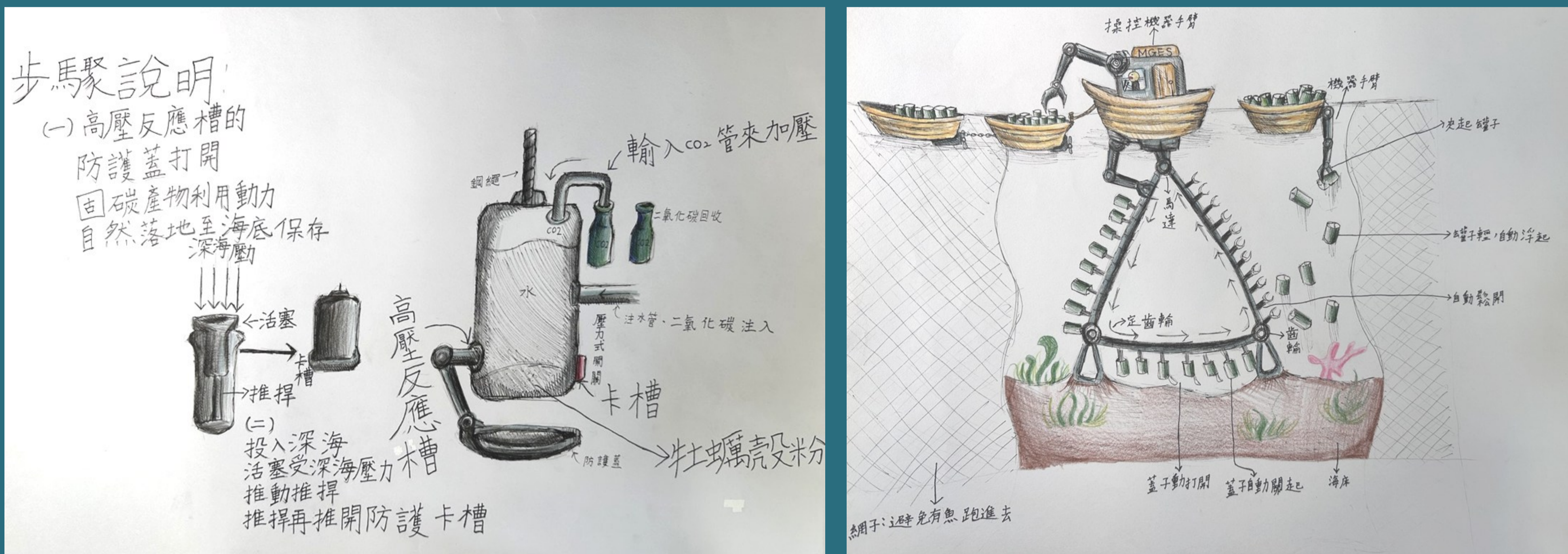
五、運用深海高壓於廢棄牡蠣殼粉固碳之可行性探討

根據實驗結果，壓力、溫度、混合方式、反應時間等變因會影響作用量反應效果。以澎湖海床為例，外圍 (離岸 10-30 公里) 水深約 20-50 公尺，估算水下海床大約是 3~6atm，遠大於研究的實驗值。因此，在陸地上將 CO₂注入廢棄牡蠣殼粉與水的混合物並攪拌，維持高壓狀態，以利 CO₂形成碳酸氫等固碳反應物的形態，再將反應物傳送到區域內海床排放。利用海床洋流穩定且高壓、低溫的環境，讓固碳反應物得以長期穩定存在，使廢棄的牡蠣殼粉發揮固碳的效用。更進一步思考，這些處於深海高壓、低溫環境中的固碳反應物，**隨著漫長的地質時間推演，與其他海洋沉積物結合，最終重新形成碳酸鹽岩 (如石灰岩)，成為沉積岩的一部分，這恰好符合地球工程學理論將碳長久封存回地球岩石圈的理念**，實現真正意義上的藍碳循環與封存。

本研究發想之系統可設想為包含「固碳系統」、「反應艙輸送及回收系統」、「固碳產物拋放系統」三大循環利用部分。基於研究結果的啟發，系統流程如下：

- 1)前處理系統：將收集到的廢棄牡蠣殼進行洗淨、絞碎研磨成適當大小的粉末。
- 2)加壓反應系統：將處理好的牡蠣殼粉與純水，依最佳的固液比，置入一個可加壓的「模擬海底壓力反應槽」中。
- 3)氣體注入系統：將高濃度 CO₂充入反應槽中，達到預設的壓力。
- 4)反應與產出：反應槽中充分混合與反應，使牡蠣殼粉與 CO₂應用生成富含碳酸氫鈣、碳酸氫根等的固碳產物。
- 5)深海投放系統：將反應完成後的固碳產物溶液轉移至運輸裝置，隨著纜繩拉至海床，並經由機器手臂投放。
- 6)反應槽回收系統：若採用批次反應槽，則需將空的反應槽回收至水面。
- 7)循環操作：重複步驟 1 至 6，進行下一輪的固碳程序。

研究小組設計的系統概念圖如下：



- 註 1：排放的深海環境必須具有足夠高的壓力和低溫環境，以確保排出的固碳反應物能維持穩定，並避免溶解其中的二氧化碳因壓力降低而溢出，造成局部海洋酸化。
- 註 2：排放機制如使用內部氣壓推力系統或由外部機械手臂打開。

捌、結論

- 一、本研究以模擬實驗證實，廢棄牡蠣殼粉與水及二氧化碳反應，具有化學固碳的可行性，也是符合藍碳理念的一種應用，本研究據此提出深海投放廢棄牡蠣殼粉的系統模型。
- 二、「提高初始壓力」、「降低反應溫度」、「延長反應時間」以及「加強混合」能有效增加牡蠣殼粉與二氧化碳反應的總量。其中，低溫和高壓效果尤其明顯。
- 三、牡蠣殼粉並非越多越具固碳效果。本研究之最佳固液比為 3 克牡蠣殼粉加入 200mL 的純水。
- 四、水溶液種類對固碳效果有顯著影響，本研究結果顯示純水效果較自來水、海水好，代表本系統之固碳反應階段適合在陸地上實施。
- 五、本研究產生的固碳反應物呈現弱酸性，本方法是否會影響海洋酸鹼性，應再進一步做更大型的實驗來檢視。

玖、參考文獻

- 1) 泛科學院 (2023 年 10 月 10 日)。溫室效應有救了？把二氧化碳埋進地底吧！ft. 台灣中油 [影片]。YouTube。https://youtu.be/B58HUp5JWdY
- 2) 泛科學院 (2024 年 3 月 15 日)。減碳速度太慢？現在已經能主動把二氧化碳抓下來！？抓下來的二氧化碳又去了哪裡？ft. 經濟部能源署 [影片]。YouTube。https://youtu.be/cVUcn8rWfI
- 3) 周金城 (2025 年 3 月 4 日)。二氧化碳教學探究：探究二氧化碳氣體與水的作用-氣體溶解和逸散與 pH 值變化。臺灣化學教育，59，取自 https://chemed.chemistry.org.tw (查詢日期：2025 年 3 月 2 日)
- 4) 海廢變黃金-牡蠣殼環保再利用 (2023 年 11 月 1 日)。海廢變黃金-牡蠣殼環保再利用。https://www.tnet.org.tw/Article/Detail/37699 (查詢日期：2025 年 3 月 25 日)
- 5) 柳婉郁 (2022 年 8 月 22 日)。三分鐘帶你看懂綠碳、藍碳、黃碳。綠學院 Green Impact。https://www.greenimpact.cc/Articles/detail?cid=1&id=458
- 6)、歷年科展作品 (取自國立臺灣科學教育館網站)
 - 碳為觀止—回收式生物炭吸附光解膠囊？第 61 屆全國中小學科學展覽會，國中組化學科。
 - 不要「碳」氣！自製氣瓶探究碳捕捉材料的吸附效能。第 64 屆全國中小學科學展覽會，國中組化學科。
 - 捕碳成鈣 鈉麼厲害。第 64 屆全國中小學科學展覽會，國小組化學科。
 - 牡蠣在環境中對重金屬之吸附及減碳效應探討。第 51 屆全國中小學科學展覽會，高職組農業及生物科技科。
 - 垃圾變黃金～廚房裡隨手可得的滅火器。第 52 屆全國中小學科學展覽會，國小組化學科。
 - 牡蠣殼粉與稻殼灰製瓷磚用釉之研究。第 55 屆全國中小學科學展覽會，高中組生活與應用科學科。
 - 金雞「牡」—廢棄牡蠣殼製作重金屬吸收發泡煉石之研究。第 64 屆全國中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學(三)科。
 - 淨菱碳排的蚵學研究。第 64 屆全國中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學(三)科。