

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

團隊合作獎

051908

鹽鹼土的碳封存法則

學校名稱：雲林縣私立揚子高級中學

作者： 高一 吳周祐 高一 謝曜安 高一 莊家旻	指導老師： 陳尚民 劉家齊
---	-----------------------------

關鍵詞：鹽鹼土(Salinized soil)、儲存再利用(CCUS)

摘要

本研究以台灣三大岩類做 CO₂ 吸附實驗，以期能了解其吸附效果。其中以火成岩(Igneous Rock)的玄武岩(Basalt)與石英安山岩(Dacite)；變質岩(Metamorphic Rock)的蛇紋岩(Serpentine)；沉積岩(Sedimentary Rock)的長石砂岩(Arkose)；亦以岩石風化物的鹽鹼化土壤(Salinized soil)作為反應物。由酸鹼度 pH 值、溫度變化 CO₂ 吸收量得知，鹼性土壤封存二氧化碳的效率最高，同時有助於中和鹽鹼化作用，進而改良地質，且 CO₂ 吸附能力與實驗粒徑呈負相關，實驗物中化學成份含的 Ca、Mg 量越多，CO₂ 反應速率愈佳，CO₂ 吸附效果依序為鹽鹼化土壤 > 蛇紋岩 > 長石砂岩 > 玄武岩 > 安山岩。

壹、研究動機

近年來全球暖化造成氣候變遷引起的災難層出不窮，二氧化碳捕獲、封存與再利用(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage, CCUS)技術，成為國際間進行減碳的重要方向。2016 年新聞報導中，冰島利用溫泉與周圍的玄武岩，將 CO₂ 混合溫泉水高壓注入玄武岩(basalt)層內，利用岩石中的鐵鎂礦物(Ferromagnesian Minerals)與 CO₂ 反應，形成碳酸化作用(Carbonation)，再利用矽酸鹽礦物(silicate mineral)中的金屬離子與碳酸根離子形成碳酸鹽礦物，最終將 CO₂ 封存在岩層內。此法引起本團隊極大的興趣，且台灣本身也有台灣碳捕存再利用協會(TCCSUA)組織，再與地球科學老師討論過後，確認其可行性，開始研究台灣適合封存 CO₂ 的岩石種類與方式。

貳、研究目的及研究問題

本研究針對CO₂吸附效果實驗目的分為下列幾點：

- 一、自行製作與設計三項碳酸化的實驗儀器，檢測PH值、重量變化，計算CO₂吸收量。
- 二、研究台灣三大岩石種類與鹽鹼土壤對CO₂吸附效果。
- 三、純水、海水、地下水與實驗樣本混合分析碳酸化的速率。
- 四、塊狀與粉狀的實驗樣本混合液體，對CO₂反應速率之變化測試。
- 五、比較不同溫度變化的岩石混合液體，對pH值、重量變化，計算CO₂吸收量的變化。

參、研究設備及器材

表 1. 研究設備及其用途

			
1-1 筆記本、筆	1-2 數位相機	1-3 筆記型電腦	1-4 石英安山岩
			
1-5 玄武岩	1-6 蛇紋岩	1-7 泥岩	1-8 鹽鹼化土壤
			
1-9 微量天平	1-10 地質錘	1-11 岩相薄片切割機	1-12 PH測量計
			
1-13 研磨機	1-14 岩石偏光顯微鏡	1-15 超音波震盪器	1-16 加熱板
			
1-17 金鋼砂	1-18 實驗手套	1-19 CO ₂ 鋼瓶	1-20 N ₂ 鋼瓶
			
1-21 海水素	1-22 純水製造機	1-23 CO ₂ 控制閥	1-24 玻璃缸
			
1-25 量杯	1-26 幫浦馬達	1-27 滴定管	1-28 EDTA

肆、研究過程或方法及進行步驟

一、研究流程

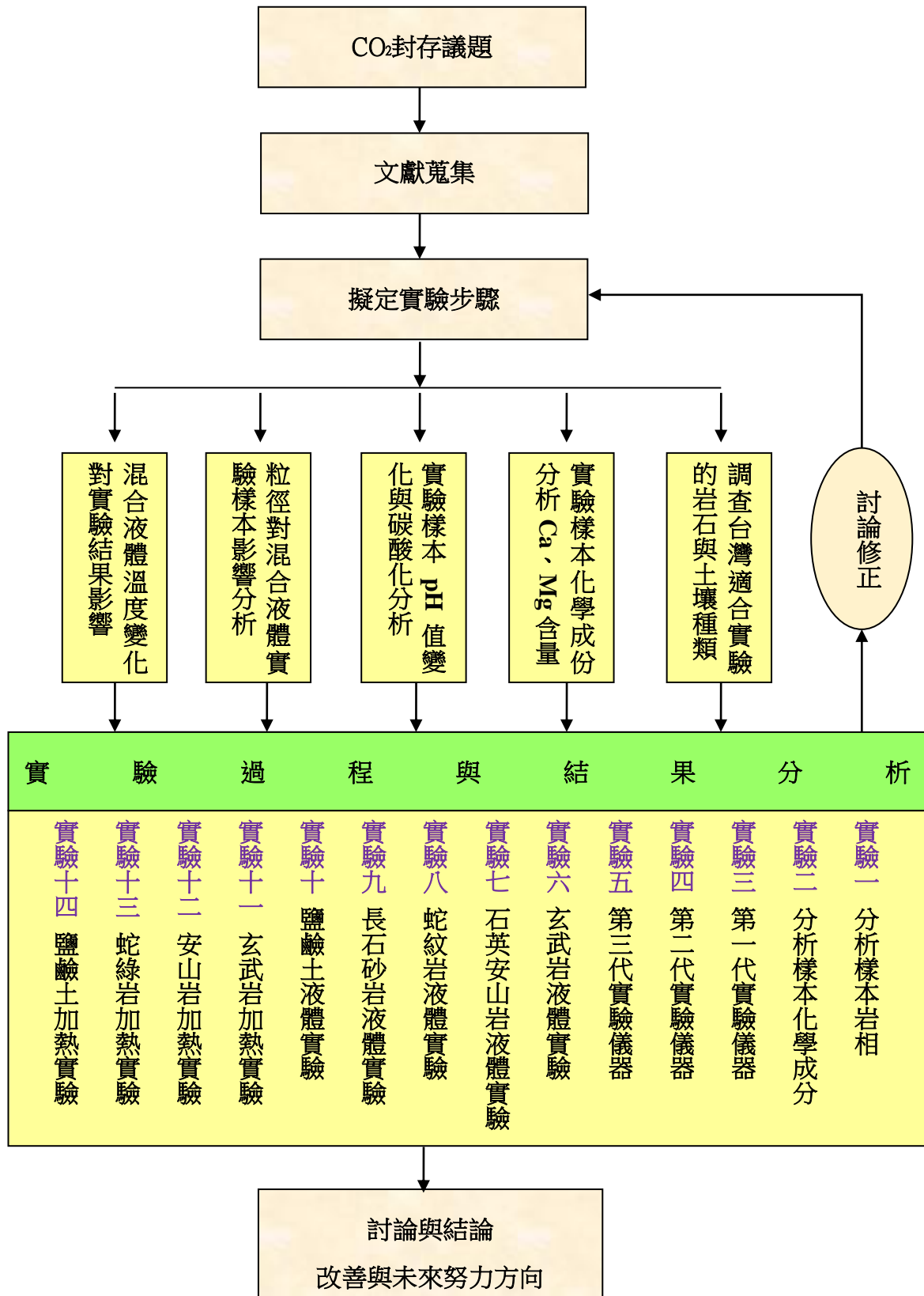


圖1 研究流程圖

二、文獻蒐集

本研究閱讀國內外期刊與論文，彙整與實驗相關內容，並參考前人的研究結果，再進行研究實驗，避免研究重複性與錯誤的實驗發生，以下為本團隊彙整的資料：

Hsien H. Khoo (2011)：對蛇紋石封存二氧化碳進行了生命週期評估。除了碳足跡外，此研究還計算了氫氧化物、硫化物、懸浮微粒等會對環境造成衝擊之主要物質於整個生命週期中之排放量。

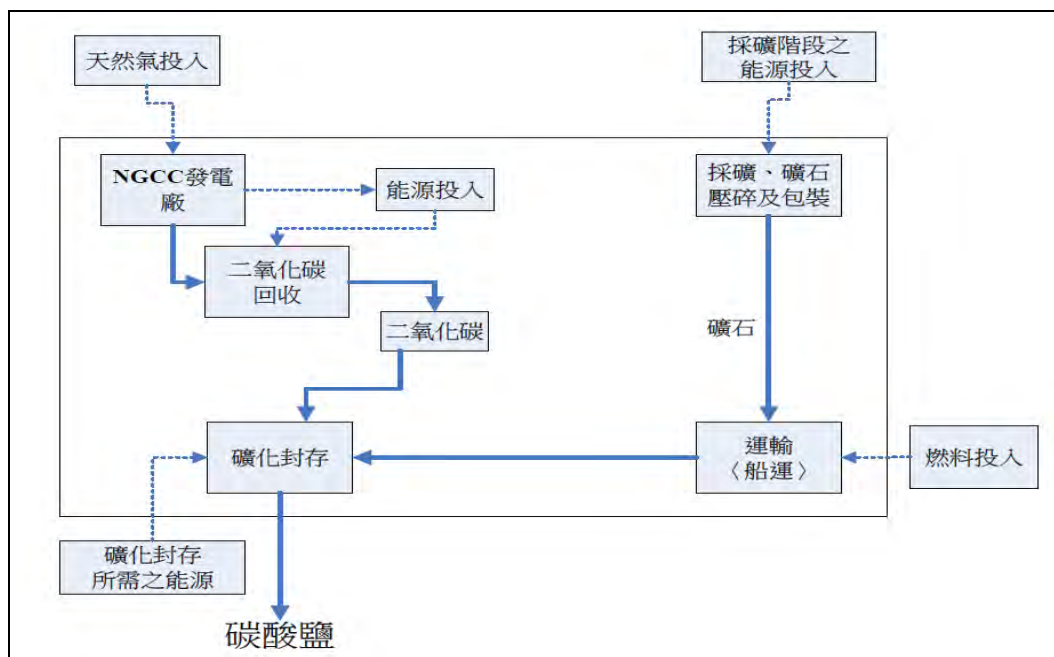


圖 2 研究之系統邊界圖(修改自：Hsien H. Khoo, 2011)

林紹軒(2012)：使用台東縣成功鎮都威山之岩樣，以綠泥石、石英為主並含少量方解石、長石的泥岩，以及嘉武溪岩樣，乃以輝石、長石為主的輝長岩，以 15%CO₂ 混合 85%N₂ 的混合氣體為反應氣體進行實驗，結果反映岩石風化實際參與反應的碳濃度，泥岩結果表明反應為本身碳酸鹽之溶解造成，實際與提供之二氧化碳反應的量甚微。輝長岩樣品則由於本身未含有碳酸鹽成分，因此反應後之碳皆為吸收二氧化碳後的成果。碳酸鹽雖然風化的速率較快、反應的幅度較大，然而究因乃本身的礦物溶解，能吸收的二氧化碳濃度不高，因此碳酸鹽礦物的二氧化碳封存能力較佳。

黃裕峯(2012)：以礦物碳酸化方式做為封存二氧化碳之方法，針對不同地區之蛇紋石，進行礦物碳酸化之試驗，由 TGA 計算得知其碳轉換率，玉里蛇紋石碳轉換率為

最高，達 21.90%，其次是豐田蛇紋石 18.13%，而後分別是瑞穗蛇紋石 14.91%以及鎂肥 12.43%，最低轉換率則是萬榮蛇紋石，只有 4.34%。

張耀文(2013)：利用二氧化碳超臨界流體結合 TTA 螯合劑可萃取土壤中的重金屬，且不同金屬離子間有競爭現象。就總萃取質量而言，其萃取方式適用於多重金屬污染土壤的處理。

吳振宇(2016)使用離子層析儀分析溪水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 各主要離子濃度，並利用電位滴定和 Gran plot 測定檢度，進而換算次碳酸根離子濃度，求得北磺溪流域安山岩化學風化率 $64.02 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ 和二氧化碳消耗率 $11.52 \times 10^6 \text{ mole/km}^2/\text{yr}$ 。

周揚震、徐恆文等(2016)：於科學發展期刊 519 期失序的碳循環報導系列中提到，常見的二氧化碳捕獲方法，可依燃料轉換成熱能與電能的方式，分為燃燒後捕獲、燃燒前捕獲及富氧燃燒 3 類。

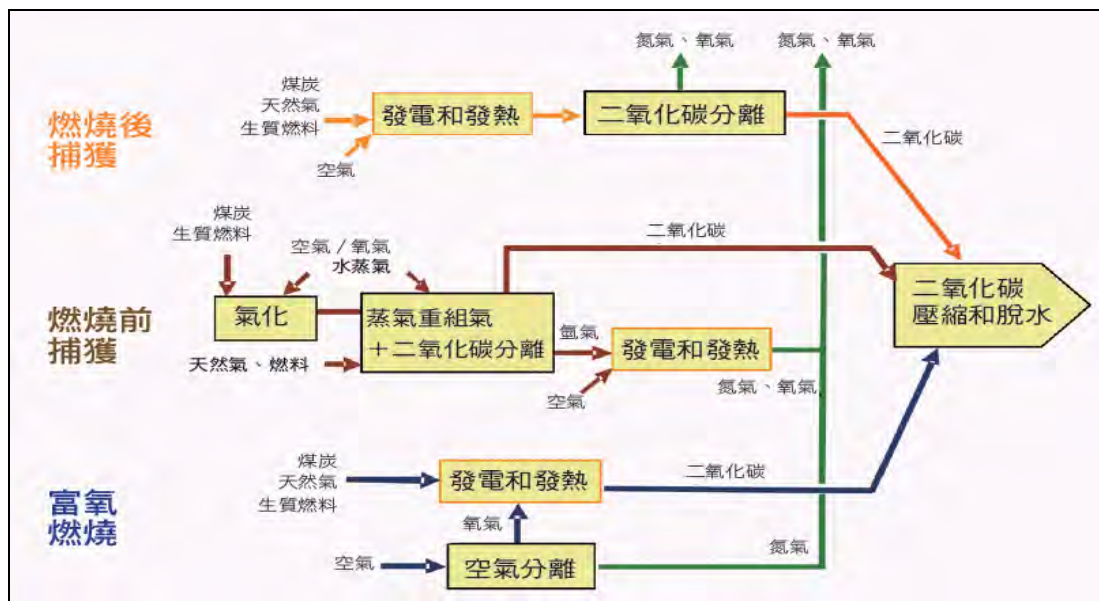


圖 3 二氧化碳捕獲流程示意圖（圖片來源：改繪自 Metz et al., 2015）

本研究文獻蒐集結果顯示，矽酸鹽礦物所組成的岩石有較高的 CO_2 封存能力，而鹽鹼化土壤對 CO_2 封存，尚未有人討論，因此本研究並未與前人文獻重合，為新的觀念與實驗。

三、實驗過程

本團隊主要以自製的固、液、氣三項碳酸化反應設備，探討 CO₂ 的碳吸附量，得出最佳的實驗樣本，再去比較不同水質樣本造成的碳吸附差異，以下為本實驗變因說明：

表 2.本研究實驗變因

實驗變因種類	內容說明
控制變因	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗樣本的粒徑 2. 實驗氣體輸出量 3. 實驗樣本的重量 4. 實驗水體的容量
操作變因	<ol style="list-style-type: none"> 1. 不同種類的實驗樣本(含固、液與氣體) 2. 不同溫度參對碳酸化反應 3. 不同酸鹼度對碳酸化反應
應變變因	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗樣本碳酸化的反應速率 2. 實驗樣本 CO₂ 的碳吸附量變化 3. 反應過程 PH 值變化

本研究整理 CCUS 概念，選取礦物封存(Mineral storage)方式，以自製三相碳酸化設備，針對 PH 值、EC 值與碳酸化程度的反應速率，探討 CO₂ 捕獲、封存與再利用能力。

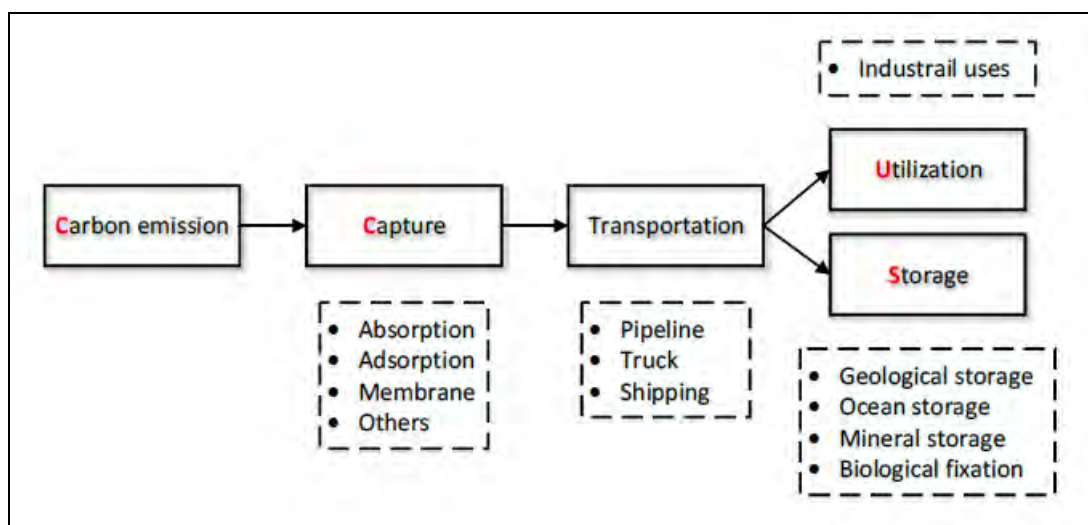


圖 4.CCUS 概念圖修改自 Li et al., (2016)

(一)野外採樣選擇實驗樣本

本研究選擇的岩石樣本以矽酸鹽為主，這是由於矽酸岩本身缺乏碳原子，所有碳酸氫根離子中的碳必須全部來自碳酸。因此對控制空氣中二氧化碳含量方面，矽酸岩的風化作用要比碳酸岩來得重要。以下為本研究選擇之樣本：

1. 玄武岩(Basalt)：

分布最廣的地區為台灣離島澎湖；本島也有零星的分布，如桃園市角板山、新竹縣馬武督、新北市三峽、土城、台東縣電光與高雄市寶來地區。本研究以角板山玄武岩為實驗樣本。

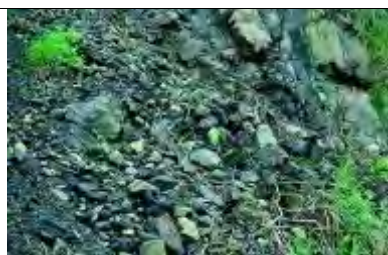


圖 5-1.角板山玄武岩露頭



圖 5-2.玄武岩採樣近照

2. 石英安山岩(Dacite)

台灣的石英安山岩主要分佈在基隆山以東一帶，本研究以金瓜石附近的長仁礦區為採集樣本，基隆山為火成侵入岩體，由於構造運動使得地盤向上抬升、



圖 6-1 石英安山岩露頭



圖 6-2 石英安山岩採樣近照

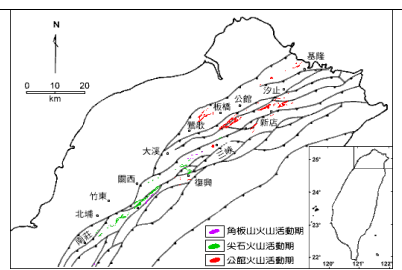


圖 7-1 台灣玄武岩分布區



圖 7-2 台灣石英安山岩分布區

侵蝕，原上部中新世沈積岩受侵蝕作用而出露於地表。因安山岩較周遭沈積岩堅硬且抗風化，因差異侵蝕而形成一個聳立的山頭。以下為本研究玄武岩、石英安山岩分布採樣示意圖：

3. 蛇紋岩(Serpentine)

台灣蛇紋岩分布在東部豐田、萬榮、玉里、瑞穗一帶，由超基性岩石，如橄欖岩中的橄欖石或輝石蛇紋岩化作用 (serpentinization)產生，主要礦物組成

為蛇紋石，次生礦物為磁鐵礦，另含有少量之水鎂石、碳酸鹽、透閃石、綠泥石、滑石、鉻鐵



圖 8-1 萬榮蛇紋岩露頭



圖 8-2 蛇紋岩採樣近照

礦、鉻尖晶石及黃鐵礦等。本研究採集萬榮的蛇紋岩作實驗樣本。

4. 長石砂岩(Arkose)

主要分佈在西部麓山帶及西部丘陵，呈南北帶狀走向，其碎屑粒中含 25%以上長石，且顆粒多具稜角狀。由於長石很容易被風化而消失，因此沈積物必須迅速沈積於地形起伏較大、地殼活動比較活躍的地



圖 9-1 長石砂岩露頭



圖 9-2 長石砂岩採樣近照

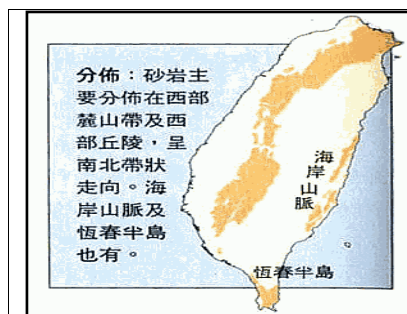


圖 10-1 台灣長石砂岩分布區

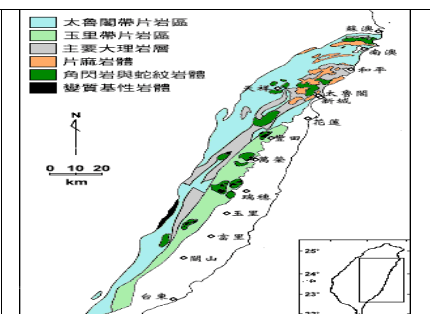


圖 10-2 台灣蛇綠岩分布區

區，才能保存較多的長石顆粒。本研究以和平島的長石砂岩做採樣地點。以下為本研究長石砂岩、蛇紋岩分布採樣地點：

5. 鹽鹼化土壤(Salinized soil)

台灣鹽鹼化土壤，常發生於沿海地區的農田，彰化至台南一帶。除了存在大量鹽分外，鹽分中的氯化鈉所產生的可交換性鈉離子還會提升土壤鹼度，以 PH8.5 為界線，以上稱為鹼土，以下則為鹽土。美國 1975 年土壤分類將鹽鹼土歸併入旱境土，

至少有一個淡色表土層或粘聚層，但不含有氧化物層或灰化層。本研究以雲



圖 11-1 鹽鹼化土壤採樣地點



圖 11-2 鹽鹼化土壤採樣近照

林口湖鄉土壤鹽鹼化的番茄園為採樣點。

(二)樣本岩相與化學成份分析

1. 岩相(實驗一)

本研究透過岩石薄片觀察岩相，首先將岩石手標本切割成符合載玻片大小的尺寸，將岩塊以 AB 膠抽真空後，黏在載玻片上，再以金鋼砂研磨，之後加熱、加壓凝固後，再重複磨切步驟，直到岩礦厚度薄到 $0.03\mu\text{m}$ 為止。本研究岩相部分為岩石薄片觀察，以下為岩石薄片製作過程：

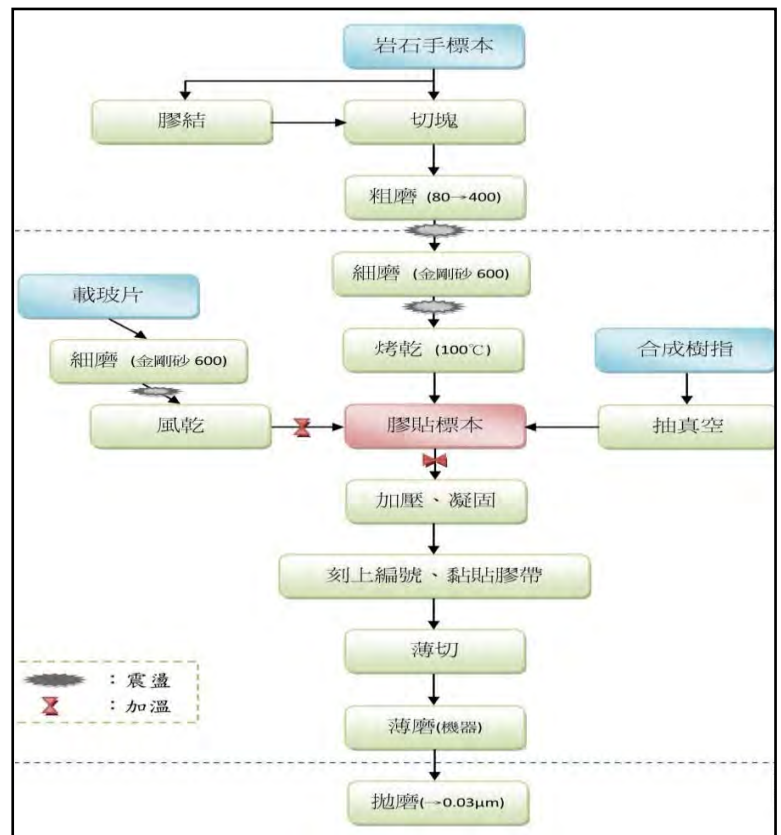
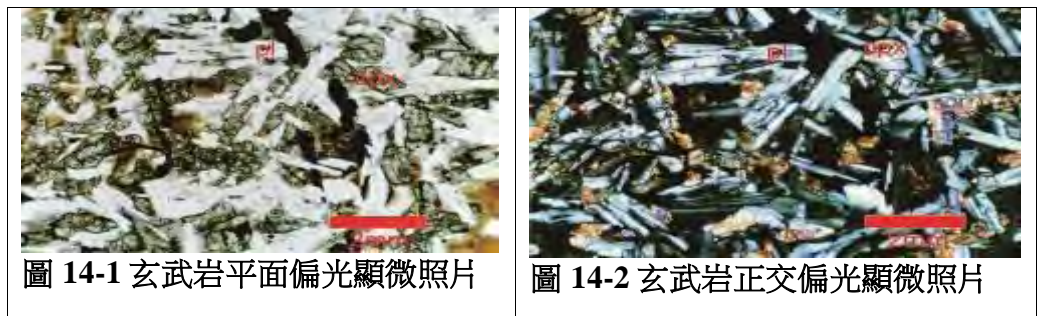


圖 12 岩石薄片製作過程



(1) 玄武岩(岩相)

由玄武岩薄片觀察，主要礦物組合為普通輝石、易變輝石、拉長石-鈉長石，部分區域中可見拉長石與普通輝石具有輻射共生（*radiate intergrowth*）組織，由平面偏光發現空隙中有綠泥石，磁鐵礦充填現象。



(2) 石英安山岩(岩相)

由石英安山岩薄片觀察，主要礦物為斜長石，其中包含中長石、奧長石和拉長石，其中以中長石含量最多。石英則呈現外型渾圓或不規則，石英顆粒內部含有相當多裂隙。

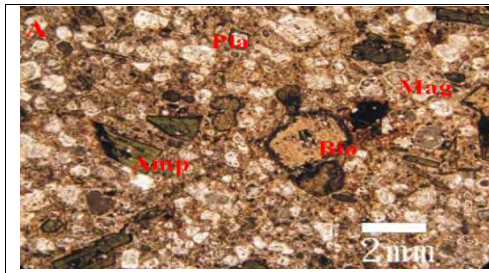


圖 15-1 石英安山岩平面偏光照片

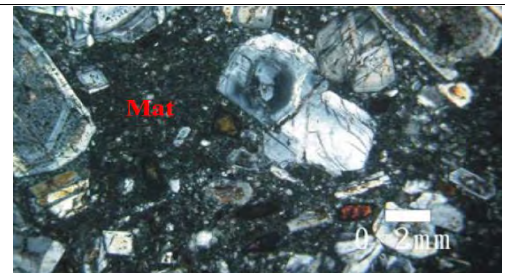


圖 15-2 石英安山岩正交偏光照片

(3) 蛇紋岩(岩相)

由石蛇紋岩薄片觀察，蛇紋岩為熱水蝕變造成的，主要礦物蛇紋石，次生礦物為橄欖石、輝石、角閃石，呈緻密狀、塊狀、纖維狀存在，石榴子石、滑石與方解石共生其中。

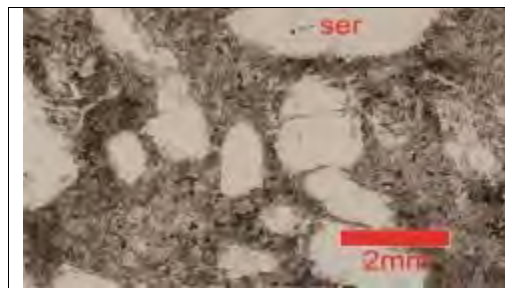


圖 16-1 蛇紋岩平面偏光顯微照片



圖 16-1 蛇紋岩正交偏光顯微照片

(4) 長石砂岩(岩相)

由長石砂岩薄片觀察，組成顆粒以砂粒、岩屑為主，主要礦物為石英、長石；次生礦物有雲母、方解石、鉛石、磁鐵礦、獨居石、磷灰石及黏土礦物。



圖 17-1 長石砂岩平面偏光顯微照片



圖 17-1 長石砂岩正交偏光顯微照片

(5) 鹽鹼化土壤(岩相)

由薄片觀察其組成的岩石碎屑，主要礦物為石英、長石呈他型圓粒狀，次生礦物填充方解石、綠泥石、蒙脫石等黏土礦物，風化程度極高。

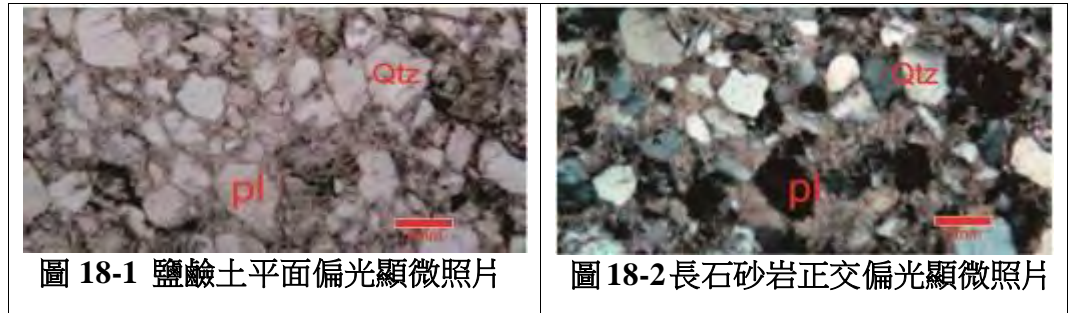


圖 18-1 鹽鹼土平面偏光顯微照片

圖 18-2 長石砂岩正交偏光顯微照片

2. 化學成份(實驗二)

本研究以原子吸收光譜儀(atomic absorption spectroscopy, AA)做全岩分析，其前處理為取分析試樣 0.5 g(過 100 mesh 篩網)，於鐵氟龍燒杯中，依序加入濃硝酸 (HNO_3)5 mL、濃過氯酸 (HClO_4)2 mL、濃氫氟酸 (HF)10 mL 及過飽和硼酸 (H_3BO_3) 10mL。並放置加熱板中，蓋上鐵氟龍玻蓋，加熱至暗色物質消失，冷卻後以 Whatman NO.42 濾紙過定量至 100mL 之鐵氟龍定量瓶中，用原子吸收光譜儀測定溶液中元素。

表 3.實驗樣本全岩分析

岩石種類	玄武岩	石英安山岩	蛇紋岩	長石砂岩	鹽鹼土
SiO_2	47.87%	52.53%	43.47%	68.19%	42.06%
TiO_2	1.08%	1.80%	1.04%	0.46%	0.31%
Al_2O_3	15.55%	13.23%	14.72%	14.78%	14.48%
Fe_2O_3^*	10.32%	15.65%	12.94%	3.16%	5.57%
MnO	0.19%	0.19%	0.3%	0.04%	0.37%
MgO	6.42%	2.33%	9.64%	1.28%	8.37%
CaO	12.31%	6.64%	15.54%	3.40%	27.42%
Na_2O	2.14%	5.52%	0.32%	5.40%	0.02%
K_2O	0.05%	0.20%	0.1%	1.01%	0.01%
P_2O_5	0.09%	0.55%	0.12%	0.09%	0.01%
Total	96.01%	98.64%	96.46%	97.82%	98.60%
L.O.I.	4.04%	0.66%	3.54%	3.10%	2.22%

(三)自製實驗儀器

本研究為計算碳吸附量，自行設計碳酸化實驗儀器，為加速碳酸化反應，本團隊不斷改進儀器的反應速率，以確保實驗能明確顯示樣本間之差異，經改良結果，總共分成下列三代：

1. 第一代反應器(實驗三)

第一代設計理念為以圓形透明壓克力槽做碳酸化反應管柱，其反應全程在常溫常壓下進行。液相溶液使用去離子水、海水與地下水做測試，以 CO₂ 鋼瓶加壓為動力，促使瓶內樣本與混合液體融合，進行碳酸化反應，並監測 pH 值變化。



圖 19.第一代反應器設計圖

2. 第二代反應器(實驗四)

改良第一代單純靠氣體壓力混合液體與樣本反應的方式，使用馬達加速循環與混合效果，並增加 N₂ 增加混合液體碳酸化的速率，利用氣體控制閥調控 CO₂ 及 N₂ 的進氣量比例，並監測 pH 值變化。



圖 20.第二代反應器設計圖

3. 第三代反應器(實驗五)

第三代加入溫度控制器，同時增加一個液體反應槽，實驗加入溫度控制與液體反應量因子，藉以提升實驗樣本對碳酸化的效率。



圖 21.第三代反應器設計圖

(四)混合液體實驗

本研究以實驗樣本分成塊狀(每塊約 2cm^3 大小)、粉狀(約 0.1mm)做反應，稱重 300g ，加入自製反應器中，分別以純水、鹽酸水溶液測試 pH 值與反應後 CO_2 吸附。

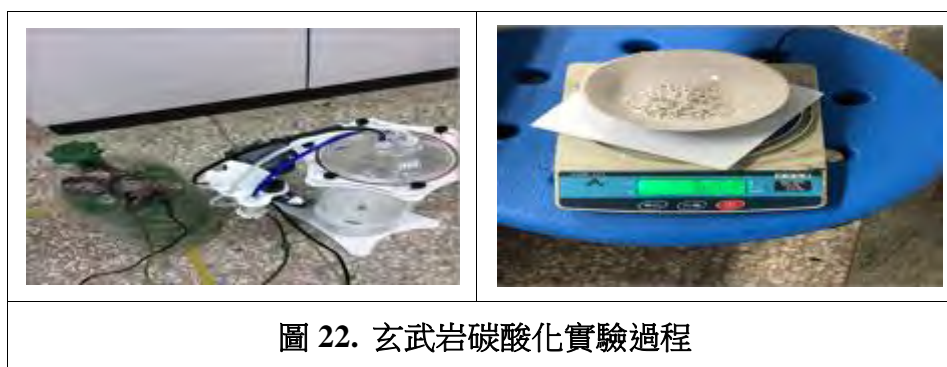
1. 玄武岩混合液體(實驗六)

表 4.玄武岩(Basalt)與純水(Dihydrogen Monoxide)實驗

實驗項目 \ 岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值	7.1	7.2
反應後 pH 值	6.7	6.6
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	293	287
$\text{CO}_{2(\text{g})}$ 吸收量(g)	0.62	1.15

表 5.玄武岩與 pH=6 鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目 \ 岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值	6.1	6.1
反應後 pH 值	5.8	6.0
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	291	281
$\text{CO}_{2(\text{g})}$ 吸收量(g)	0.79	1.68



2. 石英安山岩混合液體(實驗七)

表 6. 石英安山岩(Dacite)與純水(Dihydrogen Monoxide)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		7.0	7.2
反應後 pH 值		6.9	6.8
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		297	292
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.12	0.33

表 7. 石英安山岩與 pH=6 鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		6.0	6.1
反應後 pH 值		5.7	5.8
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		291	286
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.37	0.58

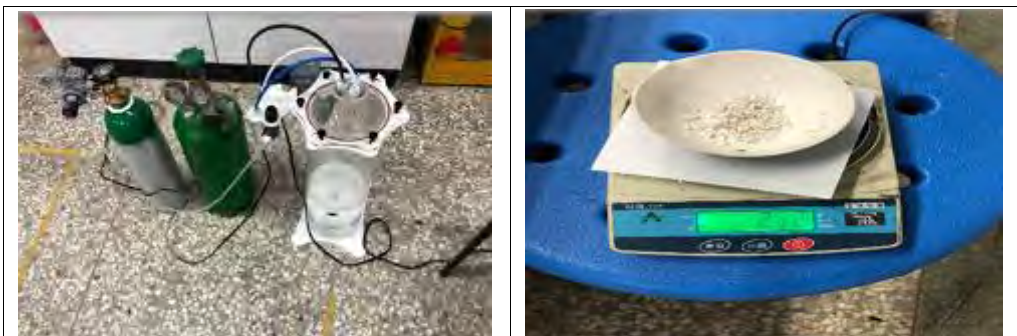


圖 23. 石英安山岩碳酸化實驗過程

3. 蛇紋岩混合液體(實驗八)

表 8. 蛇紋岩(Serpentine)和水(Dihydrogen Monoxide)的實驗

實驗項目 \ 岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值	7.2	7.3
反應後 pH 值	6.0	6.1
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	274	267
CO _{2(g)} 吸收量(g)	3.11	3.94

表 9. 蛇紋岩與 pH=6 鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution) 實驗

實驗項目 \ 岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值	6.1	6.3
反應後 pH 值	6.0	6.1
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	271	260
CO _{2(g)} 吸收量(g)	3.47	4.78

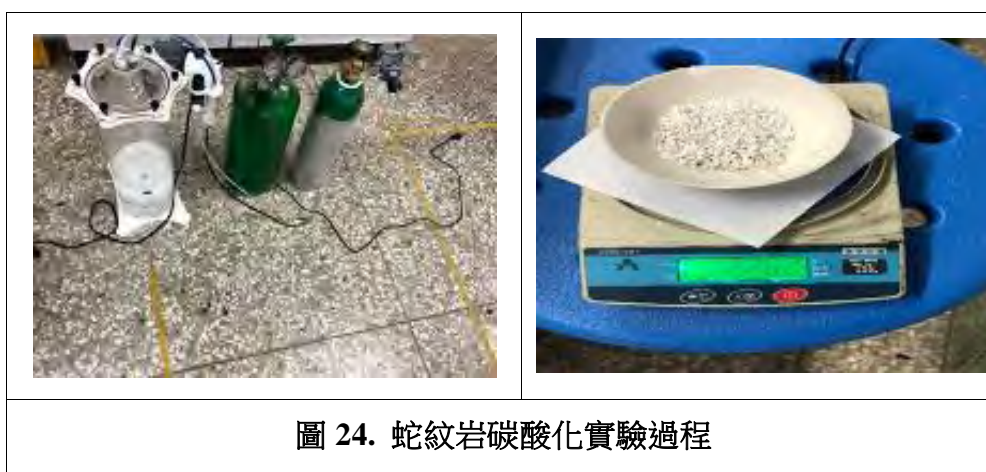


圖 24. 蛇紋岩碳酸化實驗過程

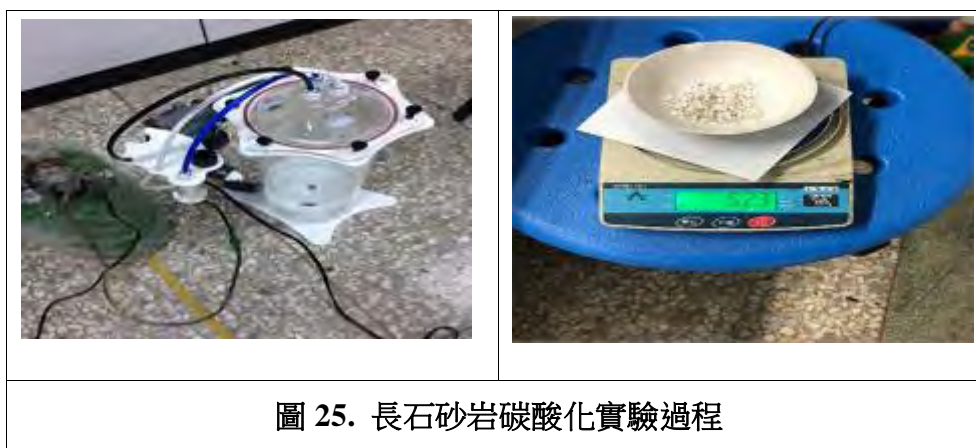
4. 長石砂岩混合液體(實驗九)

表 10.長石砂岩(Arkose)和水(Dihydrogen Monoxide)的實驗

實驗項目 \ 岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值	7.0	7.1
反應後 pH 值	6.8	6.7
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	295	294
CO _{2(g)} 吸收量(g)	0.11	0.13

表 11.長石砂岩和 pH=6 鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目 \ 岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值	6.0	6.1
反應後 pH 值	5.6	5.8
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	289	287
CO _{2(g)} 吸收量(g)	0.24	0.28



5. 鹽鹼化土壤混合液體(實驗十)

表 12.鹽鹼化土壤(Salinized soil)和水(Dihydrogen Monoxide)實驗

實驗項目 \ 岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值	7.2	7.4
反應後 pH 值	6.9	6.3
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	257	249
CO _{2(g)} 吸收量(g)	2.84	3.66

表 13.鹽鹼土與 pH=6 鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目 \ 岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值	6.3	6.4
反應後 pH 值	6.2	6.2
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	242	234
CO _{2(g)} 吸收量(g)	3.83	4.36

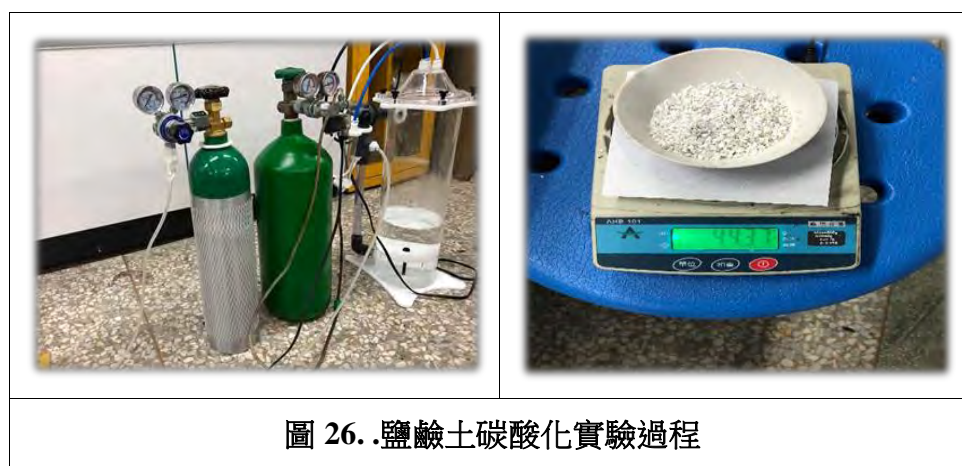


圖 26. .鹽鹼土碳酸化實驗過程

(五)加熱時間的變因實驗

本研究以研磨過之粉狀實驗樣本加入 pH 值=6 的鹽酸水溶液進行反應，其過程如下：

1. 玄武岩加熱時間(實驗十一)

表 14.加熱時間的變應對上玄武岩(Basalt)

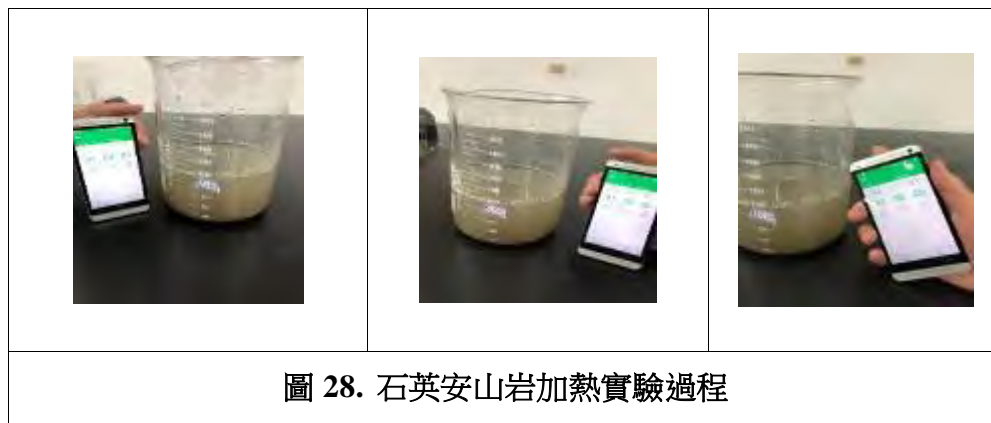
時間 (min)	60	90	120
實驗項目			
反應前 pH 值	6.5	6.6	6.7
反應後 pH 值	6.3	6.4	6.5
實驗前重量(g)	300	300	300
實驗後重量(g)	275	271	266
CO _{2(g)} 吸收量(g)	1.99	2.30	2.70



2. 石英安山岩加熱時間(實驗十二)

表 15.加熱時間的變應對上石英安山岩(Dacite)

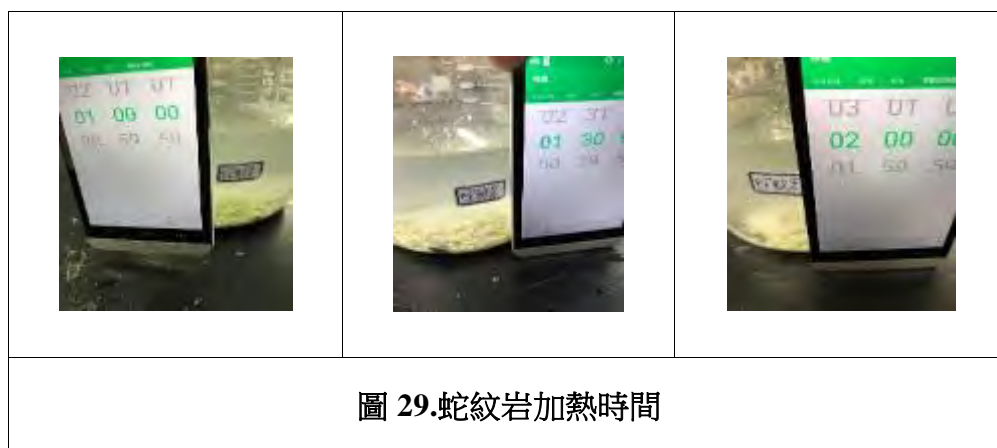
時間 (min)	60	90	120
實驗項目			
反應前 pH 值	6.4	6.5	6.6
反應後 pH 值	6.1	6.2	6.3
實驗前重量(g)	300	300	300
實驗後重量(g)	282	279	275
CO _{2(g)} 吸收量(g)	0.75	0.87	1.04



3. 蛇紋岩加熱時間(實驗十三)

表 16. 加熱時間的變應對上蛇紋岩(Serpentine)

時間 (min)	60	90	120
實驗項目			
反應前 pH 值	6.5	6.6	6.7
反應後 pH 值	6.4	6.5	6.6
實驗前重量(g)	300	300	300
實驗後重量(g)	248	239	228
CO _{2(g)} 吸收量(g)	2.49	2.92	3.44



4. 長石砂岩加熱時間(實驗十四)

表 17.加熱時間的變應對上長石砂岩(Arkose)

實驗項目 \ 時間 (min)	60	90	120
反應前 pH 值	6.4	6.5	6.6
反應後 pH 值	6.1	6.2	6.3
實驗前重量(g)	300	300	300
實驗後重量(g)	283	280	277
CO _{2(g)} 吸收量(g)	0.37	0.44	0.50



表 18.加熱時間的變應對上鹽鹼化土壤(Salinized soil)

實驗項目 \ 時間 (min)	60	90	120
反應前 pH 值	6.7	6.8	6.9
反應後 pH 值	5.9	6.0	6.1
實驗前重量(g)	300	300	300
實驗後重量(g)	215	199	182
CO _{2(g)} 吸收量(g)	4.03	5.01	6.04

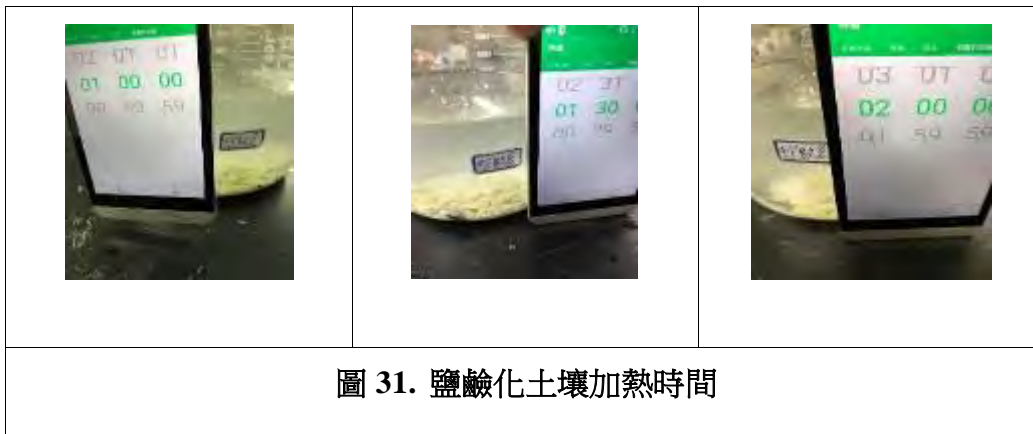


圖 31. 鹽鹼化土壤加熱時間

(六)海水、地下水不同加熱時間測試

本研究實地調查發現，口湖地區實驗樣本鹽鹼化土壤，由地下觀測井資料顯示，有出現海水入侵地下水之情況，因此本實驗採取口湖地區地下水樣本，分別以不同加熱時間做測試，並與實驗室配置濃度 3.5%，比重 1.026 的海水做比較。



圖 32.湖口地下觀測井全貌



圖 33. 觀測井採水樣

表 19.海水(Beine)與地下水的實驗比較(Heating Time : 30 min)

實驗項目 \ 水質種類	海水(Brine)	地下水(Groundwater)
反應前 pH 值	8.4	7.8
反應後 pH 值	7.8	7.7
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	227	239
CO ₂ (g)吸收量(g)	5.07	4.63

表 20.海水(Beine)與地下水(Groundwater)的實驗比較(Heating Time : 60 min)

實驗項目 \ 水質種類	海水(Brine)	地下水(Groundwater)
反應前 pH 值	8.4	7.8
反應後 pH 值	7.8	7.6
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	217	230
CO _{2(g)} 吸收量(g)	6.41	5.32

表 21.海水(Beine)與地下水(Groundwater)的實驗比較(Heating Time : 90 min)

實驗項目 \ 水質種類	海水(Brine)	地下水(Groundwater)
反應前 pH 值	8.4	7.8
反應後 pH 值	7.7	7.6
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	208	221
CO _{2(g)} 吸收量(g)	6.99	5.95

表 22.海水(Beine)與地下水(Groundwater)的實驗比較(Heating Time : 120 min)

實驗項目 \ 水質種類	海水(Brine)	地下水(Groundwater)
反應前 pH 值	8.4	7.8
反應後 pH 值	7.5	7.5
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	197	218
CO _{2(g)} 吸收量(g)	7.96	6.33

伍、結果與討論

一、本研究各實驗樣品混合純水與 pH=6 的鹽酸水溶液後的重量變化

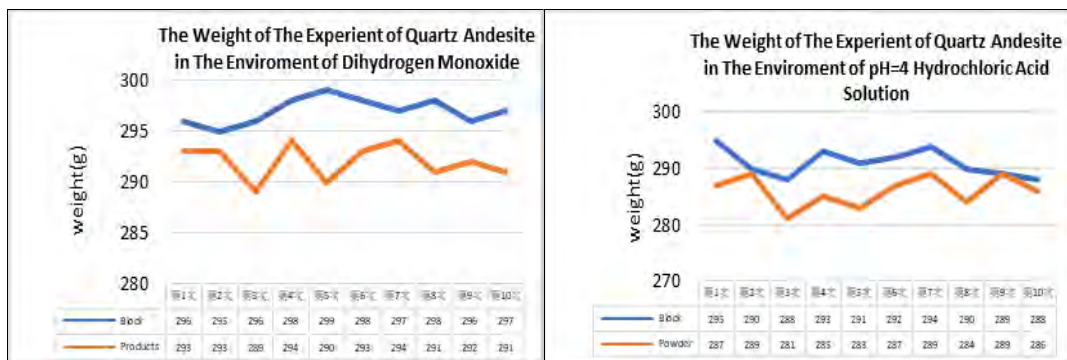


圖 34.安山岩塊狀與粉狀重量變化

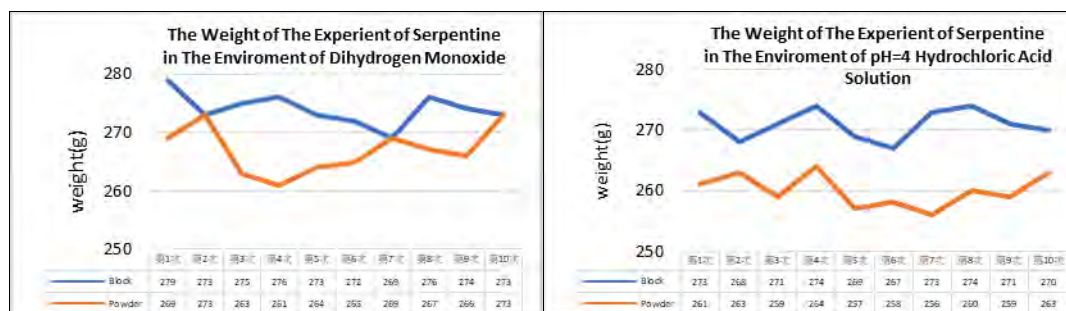


圖 35.蛇紋岩塊狀與粉狀重量變化

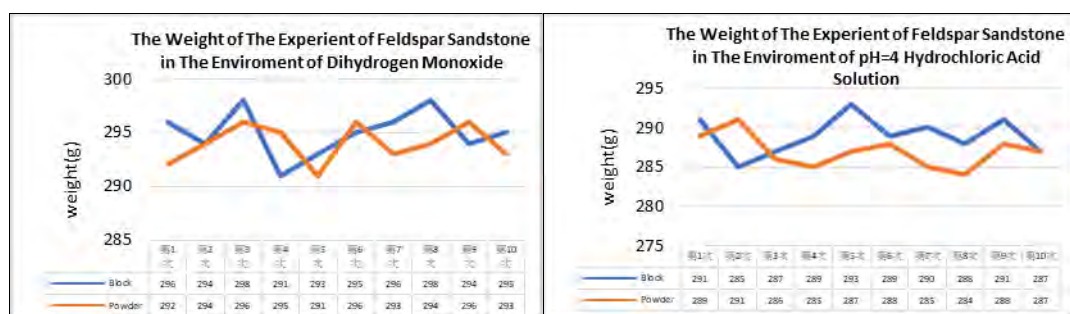


圖 36.長石砂岩塊狀與粉狀重量變化

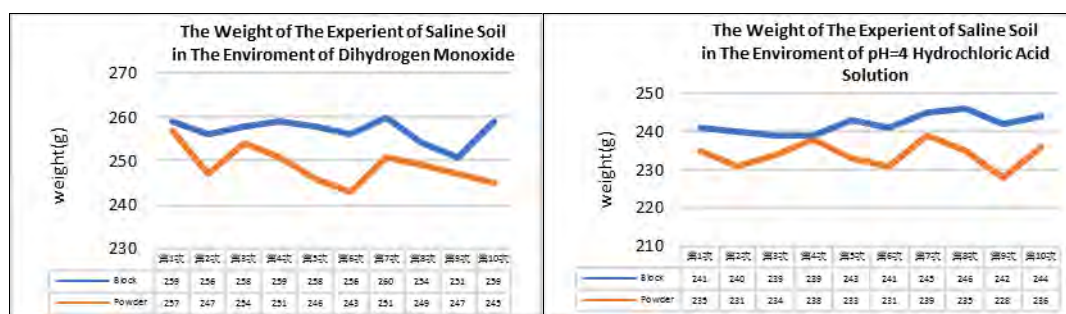
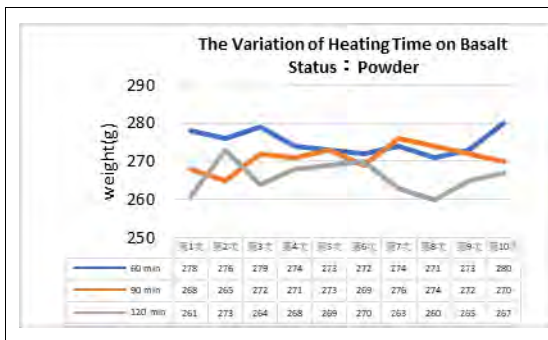


圖 37.鹽鹼化土壤塊狀與粉狀重量變化

由上述實驗中可以的知兩樣結果：

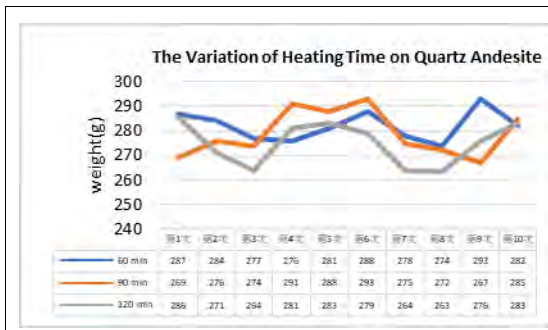
- (一)在酸性環境中，反應物的 Ca^{2+} 與 Mg^{2+} 解離量增加，進而造成 $\text{CO}_2(\text{g})$ 的吸收量增加，由此可知，水溶液的 pH 值將對反應物與 $\text{CO}_2(\text{g})$ 吸收結果產生影響。
- (二)在非勻相反應中，改變反應物表面積大小增加了對 $\text{CO}_2(\text{g})$ 吸收量，但影響略小於改變水溶液 pH 值時的實驗結果。

二、本研究各實驗樣品加熱變化



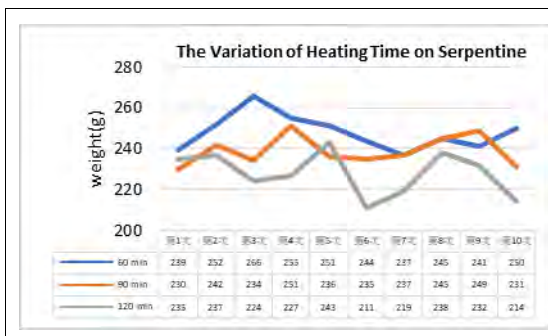
起初，可以明顯的看見加熱時間對整個反應影響，但到 90 min 之後，發現時間的影響慢慢變得微弱，所以在 120min 之後就停止了實驗，避免對環境造成不必要的浪費。

圖 38.玄武岩粉狀加熱



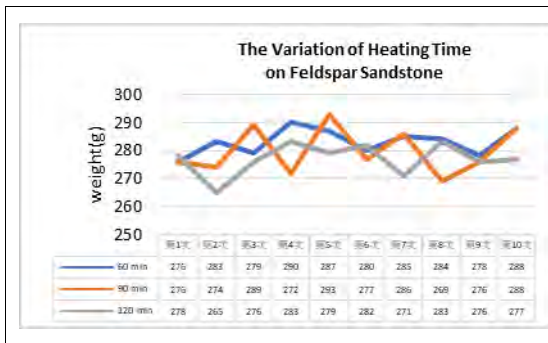
起初，加熱時間在 60 min 時，發現 $\text{CO}_2(\text{g})$ 的吸收量並無明顯增加，但 120min 時，可見變化明顯，這也表示 120 min 時，石英安山岩的 $\text{CO}_2(\text{g})$ 吸收量增加了。

圖 39.石英安山岩粉狀加熱



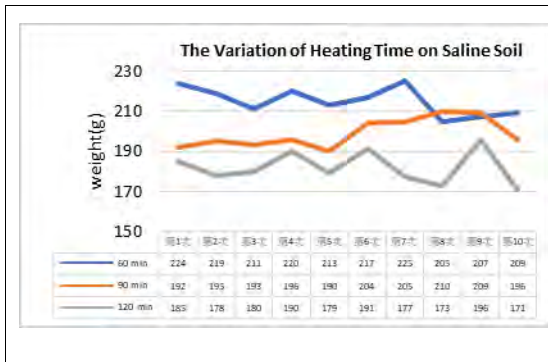
起初，由數據圖可知：60 與 90 min 的實驗差距甚微，但 120 min 石的反應量卻遠遠大於前述的實驗，所以可以知曉蛇紋岩在加熱時間增加的過程中， $\text{CO}_2(\text{g})$ 的吸收量也增加。

圖 40.蛇紋岩粉狀加熱



在多次實驗中可以得知：加熱時間對長石砂岩的反影影響並不大，所以在 120 min 時取消了實驗。

圖 41.長石砂岩粉狀加熱



所有實驗中可以看見加熱時間對反應的影響甚巨，但 120 min 之後，加熱時間的影響開始減緩，所以本實驗艇只於加熱時間為 120 min 時，也在此實驗中取得了最佳的反應結果。

圖 42.鹽鹼化土壤粉狀加熱

三、海水與地下水的比較：

為了節省實驗的時間在本實驗使用前幾項實驗中吸收效果最佳的粉狀的鹽鹼化土壤，發現使用海水的吸收率>地下水的吸收率，至於為什麼會這樣在討論會有所解釋。



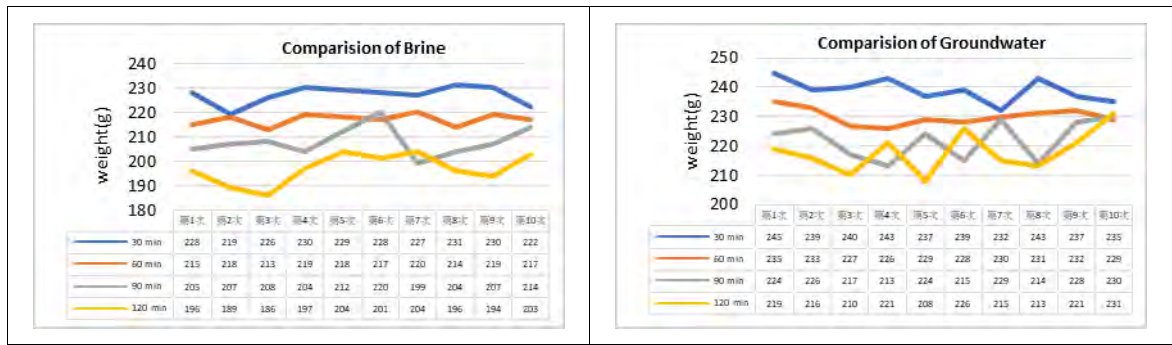


圖 43.海水與地下水的實測數據

四、實驗中 $\text{CaCO}_3(s)$ 與 $\text{MgCO}_3(s)$ 得比較數據

針對不同的反應物所沉澱的物質去分析發現主要是碳酸鎂與碳酸鈣，因為每個反應物所含的鈣鎂離子量不一，所以我們對個別生成物的碳酸鎂與碳酸鈣進一步的計算得出下列圖表：

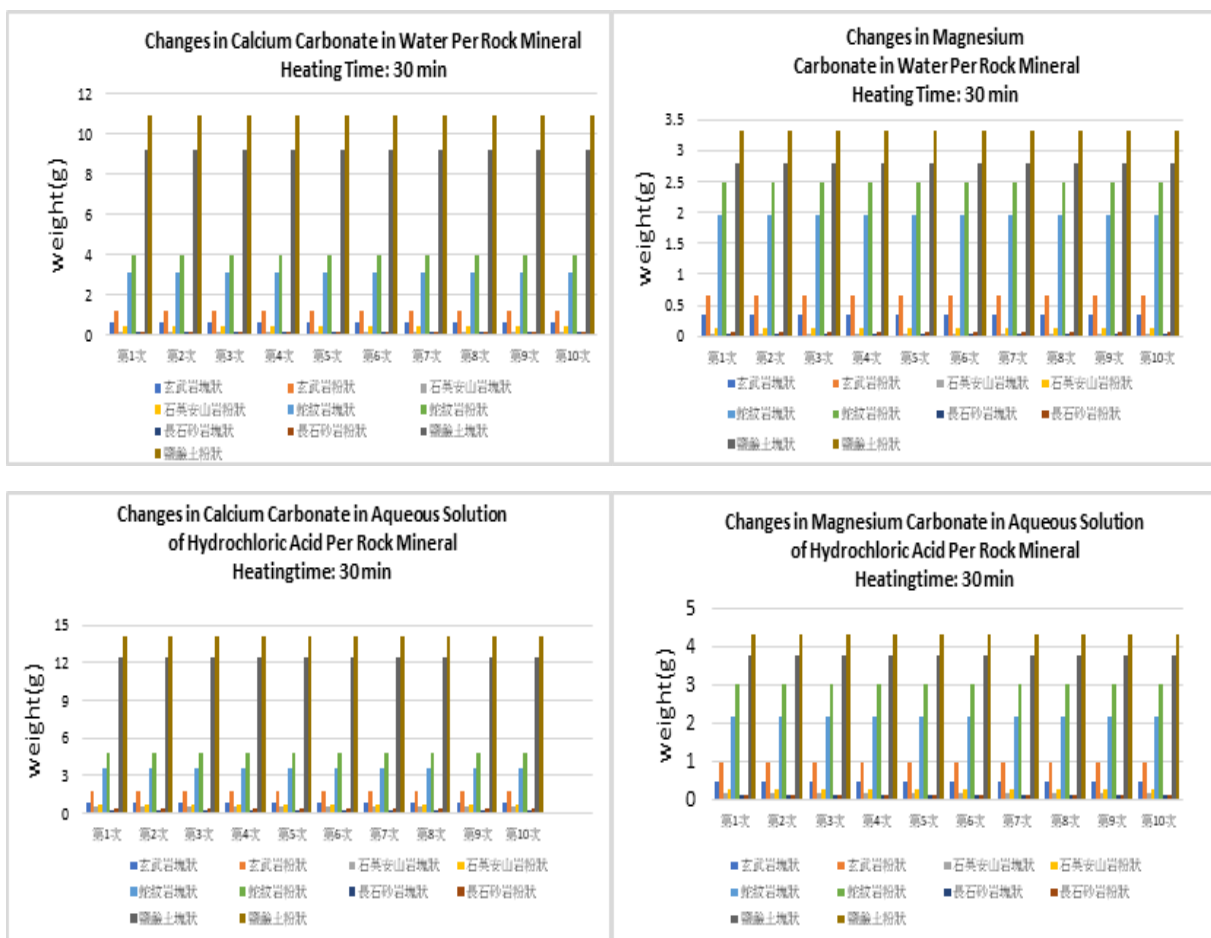


圖 44. $\text{CaCO}_3(s)$ 與 $\text{MgCO}_3(s)$ 得比較數據

從塊狀(Block)與粉狀(Powder)反應物的實驗中可以發現增加石頭的接觸面積可以讓各個在討論了這兩大項實驗後們想到前面只加熱三十分鐘會不會岩石的解離反應尚未結束，為此我們再多做了一項不同解離時間對於反應物解離的影響，也得到了**本次研究最好的結果，粉狀鹽鹼土(Saline Soil)在酸性環境反應時間為 120 分鐘解離了 182 克的物質。**接著，再找出最佳反應物--鹽鹼土(Saline Soil)後，我們開始針對自製的裝置做討論。

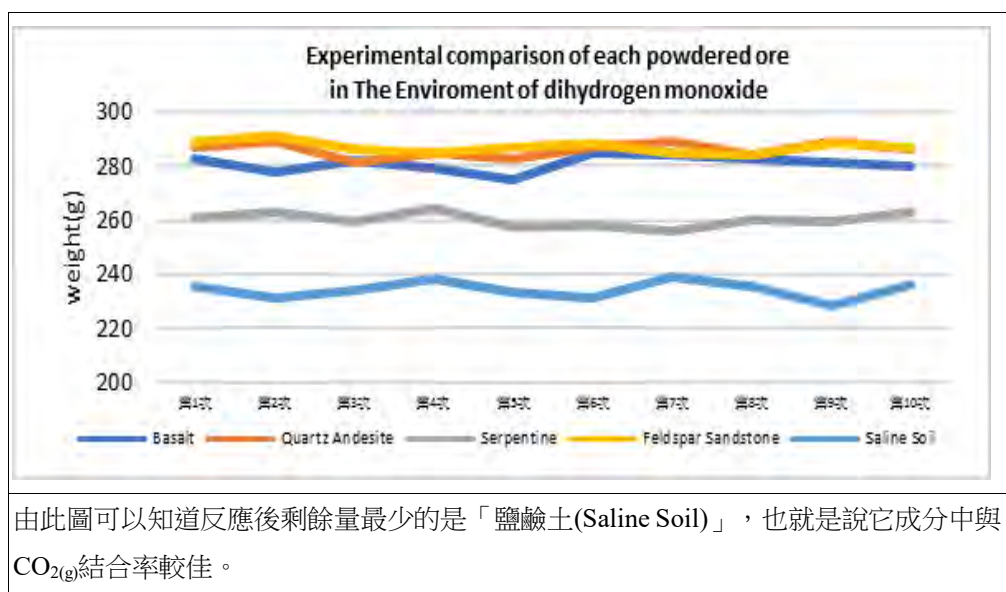


圖 45.鹽鹼土(Saline Soil) CO_{2(g)}結合率

五、自製實驗設備討論

第一代裝置的重點主要是放在方便添加二氧化碳的設計因此效率上並無明顯的提升，但透過這個裝置我們能以較輕鬆的方式充入二氧化碳；**第二代**我們就將重點放在了增加效率上，透過通入氮氣使裝置中的壓力提升藉此增加二氧化碳的溶水性，確保水溶液中的鈣鎂離子而完全的與碳酸根產生碳酸鈣及碳酸鎂沉澱；**第三代**時對裝置多加裝了循環的裝置、電熱板以及恆溫儀讓整個實驗時溫度都能隨時讓掌控。

將這一系列的實驗完成後，將吸收效果最好的鹽鹼土拿去與口湖鄉的地下水與海水進行實驗得到了使用海水的吸收效率大於地下水。

海水中本身就含有豐富的微量元素：鈉、鉀、鎂、鈣、鋁、氯、溴、硼、氟及硫酸根、碳酸根，其中鎂鈣離子更是影響本實驗主要的因素因此在海水與地下水的實驗中海水所得到的吸收效率較二氧化碳佳。但在地下水的實驗中我們發現，實驗前透過參考文獻所假設的結果是地下水含有地的礦物質雖然不如海水但一定多於實驗用的 R.O.水可是實驗後所得到的數據跟此假設有所出入因此我們在對地下水的實驗做更進一步的討論。

陸、結論

在本次的實驗中我們總共使用了五種反應物進行實驗並且改變反應物的狀態去比較個別二氧化碳的吸收率，以下為本研究結論：

- 一、本研究發現到只要水中所含的鈣鎂離子越多所沉澱的碳酸鈣與碳酸鎂的也跟著提高，因此透過將岩石磨成粉或加入酸促使岩石解離出更多鎂鈣離子與二氧化碳形成鹽類沉澱藉此封存二氧化碳，本次研究最好的結果，粉狀鹽鹼土(Saline Soil)在酸性環境反應時間為 120 分鐘解離了 182 克的物質。
- 二、本團隊在找出存效率最好的反應物後，針對反應流程自製實驗裝置，讓反應進行能更加順暢，也將此裝置進行了三次的改良以確保整體實驗流程能讓反應物發揮最大的效能。在這三次的改良當中，第二代較第一代加速了吸收的效率從原本的一小時半縮至一小時，第三代則縮至半小時。
- 三、由實驗得知，沿海地帶的鹽鹼土壤捕捉封存二氧化碳效率最高，很適合做台灣碳封存環境。在本團隊研究實驗中發現鈣和鎂離子是重要捕捉二氧化碳重要的因素，而鹽鹼土的鎂含量占 8.37%而鈣含量占 27.42%是所有反應物中含量最高的。
- 四、本實驗於鄰近鄉鎮口湖鄉的地下觀測井，使用受到海水污染的地下水與土壤來進行本實驗，實驗後發現確實能有效的改變土壤過鹼化的問題，也更加的確認了本實驗的可行性。在本實驗中利用 300g 的鹽鹼土去與海水與地下水做反應，把鹽鹼土從原本的 PH7~PH8 降至 PH5~PH6。

柒、未來展望

台電沿海的火力方電廠，因地緣性可利用此種方式，將 CO₂ 高壓注入鹽鹼土與地下水正下方深處的新鮮岩盤封存，若發生 CO₂ 溢漏可由上部的鹽鹼土與地下水捕捉吸附，增加封存的安全性，且沿海四周季風強盛，種種因子對地上生物與人類生活影響甚小，且鹽鹼土與受海水污染的地下水捕捉 CO₂ 後，可有效改善鹽鹼化土壤與地下水問題，同時不會對環境造成二次的傷害，更重要的是現今全球暖化的問題日益嚴重而本實驗在過程中，正是不斷的消耗二氧化碳將其捕捉封存，對台灣(TCCSUA)組織推廣的減碳助益良多。

捌、參考資料 (文獻) 及其他

1. Suthar, S.,2009, “Bioremediation of agriculture wastes through vermicomposting,” *Bioremediation journal*, Vol. 78, No. 1, pp. 1428-1439.
2. Anoop Yadav, Garg, V. K., 2011, “Recycling of organic wastes by employing *Eisenia fetida*,” *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 3, pp. 2874-2880.
3. 余秉澤(2014)。「以還原碓廢棄材料捕捉二氧化碳之研究」。國立中央大學環境工程研究所碩士論文。
4. 吳振宇(2016)。「北碓溪安山岩流域化學風化率和對大氣二氧化碳消耗率」。中國文化大學化學系應用化學碩士論文。
5. 林紹軒(2012)。「矽酸鹽加速風化封存二氧化碳」。國立成功大學地球科學系博士論文。
6. 徐恆文,陳威丞,張名惠,周揚震(2016)。「鈣迴路捕獲二氧化碳技術」。台灣能源期刊. 2014, 1(2), 145-155.。
7. 黃至弘, 談駿嵩(2014)。「CCUS 技術發展」, 碳捕存與再利用。技師報, 第938 期。
8. 黃裕峯(2012)。「利用礦物碳酸化法探討不同地區蛇紋石之二氧化碳封存能力」。國立屏東科技大學環境工程與科學系碩士論文。
9. 張耀文(2013)。「利用螯合劑搭配超臨界流體萃取土壤重金屬之研究」。輔英科技大學環境工程與科學系碩士論文。

【評語】 051908

本研究討論有關不同岩類吸附二氧化碳的問題，很實用的題目，內容具深度，報告內容具體。本研究關懷臺灣 CO₂ 的利用與封存，實驗各種不同岩種對 CO₂ 的吸收能力，依其結果，研究者提出方案建議火力發電廠，利用臺灣的礦石吸收 CO₂，降低溫室效應的形成速度。

摘要

本研究以台灣三大岩類CO₂吸附實驗，以期能了解其吸附效果。其中以火成岩(Igneous Rock)的玄武岩(Basalt)與石英安山岩(Dacite)；變質岩(Metamorphic Rock)的蛇紋岩(Serpentine)；沉積岩(Sedimentary Rock)的長石砂岩(Arkose)；亦以岩石風化物的鹽鹼化土壤(Salinized soil)作為反應物。由酸鹼度pH值、溫度變化CO₂吸收量得知，鹼性土壤封存二氧化碳的效率最高，同時有助於中和鹽鹼化作用，進而改良地質，且CO₂吸附能力與實驗粒徑呈負相關，實驗物中化學成份含的Ca、Mg量越多，CO₂反應速率愈佳，CO₂吸附效果依序為鹽鹼化土壤 > 蛇紋岩 > 長石砂岩 > 玄武岩 > 安山岩。

壹、研究動機

近年來全球暖化造成氣候變遷引起的災難層出不窮，二氧化碳捕獲、封存與再利用(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage, CCUS)技術，成為國際間進行減碳的重要方向。2016年新聞報導中，冰島利用溫泉與周圍的玄武岩，將CO₂混合溫泉水高壓注入玄武岩(basalt)層內，利用岩石中的鐵鎂礦物(Ferromagnesian Minerals)與CO₂反應，形成碳酸化作用(Carbonation)，再利用矽酸鹽礦物(silicate mineral)中的金屬離子與碳酸根離子形成碳酸鹽礦物，最終將CO₂封存在岩層內。此法引起本團隊極大的興趣，且台灣本身也有台灣碳捕獲與封存協會(TCCSUA)組織，再與地球科學老師討論過後，確認其可行性，開始研究台灣適合封存CO₂的岩石種類與方式。

貳、研究目的及研究問題

- 本研究針對CO₂吸附效果實驗目的分為下列幾點：
- 一、自行製作與設計三項碳酸化的實驗儀器，檢測PH值、重量變化，計算CO₂吸收量。
 - 二、研究台灣三大岩石種類與鹽鹼化土壤對CO₂吸附效果。
 - 三、純水、海水、地下水與實驗樣本混合分析碳酸化的速率。
 - 四、塊狀與粉狀的實驗樣本混合液體，對CO₂反應速率之變化測試。
 - 五、比較不同溫度變化的岩石混合液體，對PH值、重量變化，計算CO₂吸收量的變化。

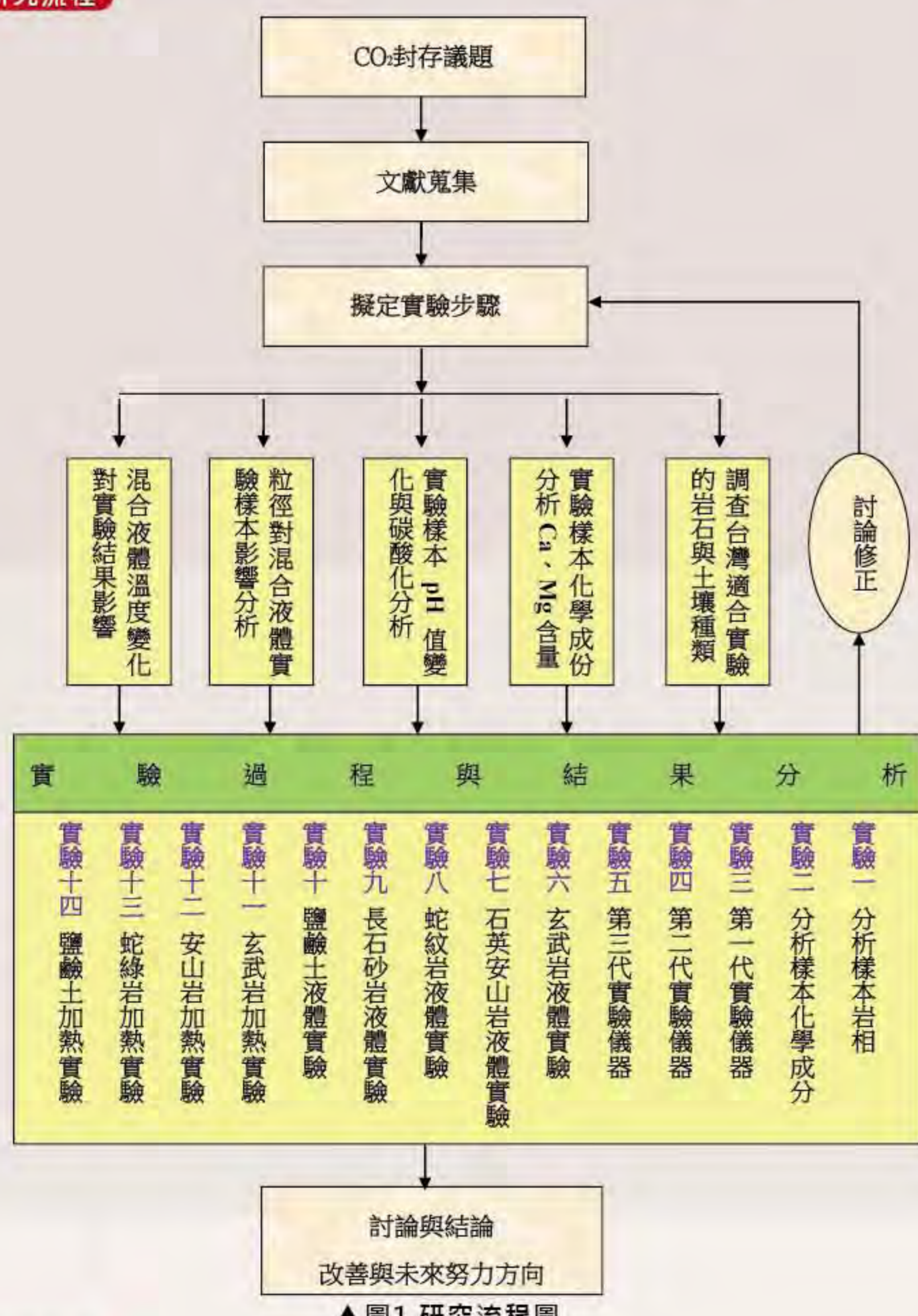
參、研究設備及器材

表1. 研究設備及其用途

1-1 筆記本-筆	1-2 數位相機	1-3 筆記型電腦	1-4 石英安山岩
1-5 玄武岩	1-6 蛇紋岩	1-7 泥岩	1-8 鹽鹼化土壤
1-9 微量天平	1-10 地質錘	1-11 岩相薄片切磨機	1-12 PH測量計
1-13 研磨機	1-14 岩石薄片顯微鏡	1-15 超音波清洗器	1-16 加熱板
1-17 金鋼砂	1-18 實驗手套	1-19 CO ₂ 鋼瓶	1-20 N ₂ 鋼瓶
1-21 海水葉	1-22 純水製造機	1-23 CO ₂ 控制閥	1-24 玻璃缸
1-25 量杯	1-26 幫浦馬達	1-27 滴定管	1-28 EDTA

肆、研究過程或方法及進行步驟

一、研究流程

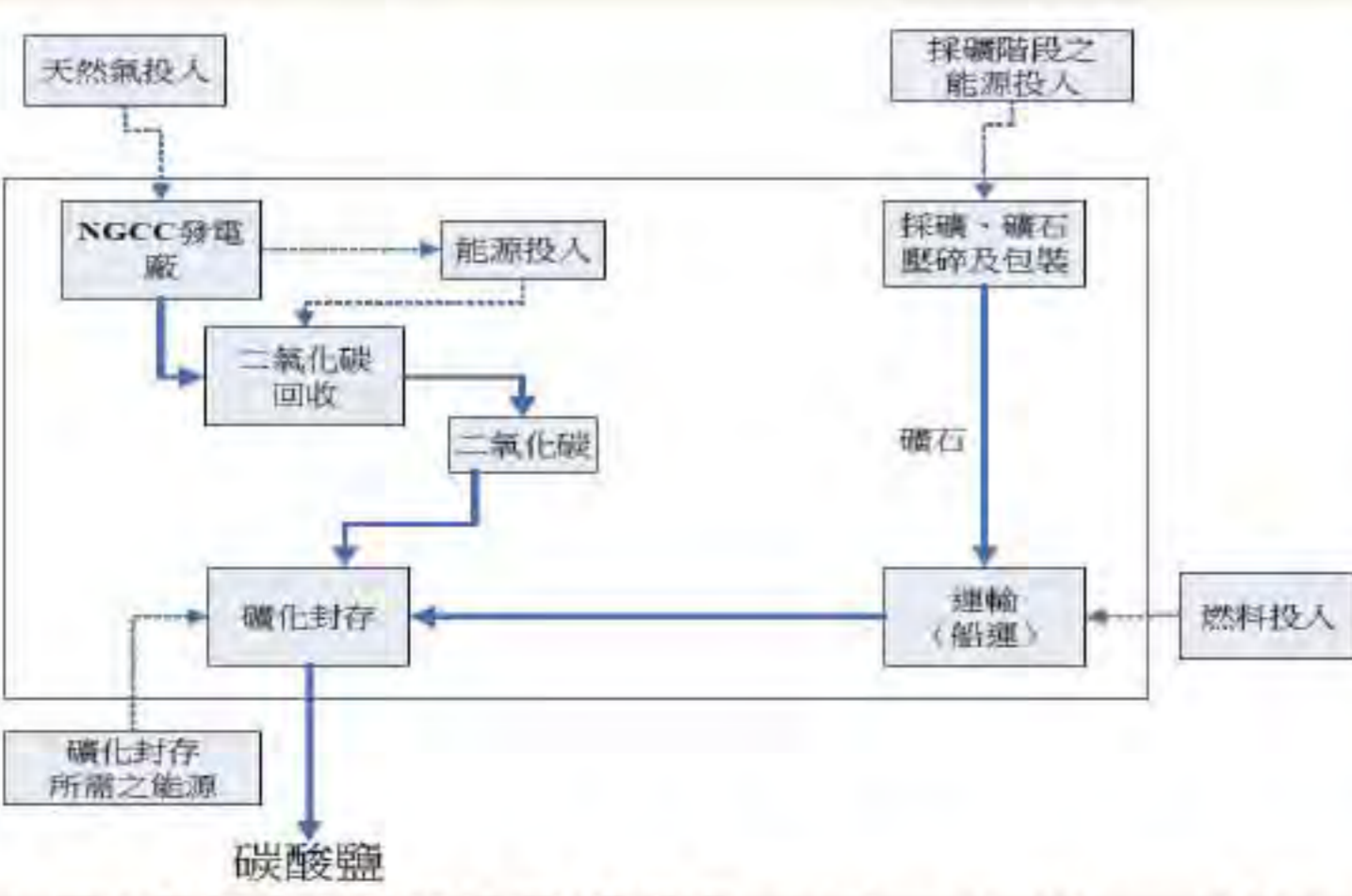


▲圖1 研究流程圖

二、文獻蒐集

本研究閱讀國內外期刊與論文，彙整與實驗相關內容，並參考前人的研究結果，再進行研究實驗，避免研究重複性與錯誤的實驗發生，以下為本團隊彙整的資料：

Hsien H. Khoo (2011)：對蛇紋石封存二氧化碳進行了生命週期評估。除了碳足跡外，此研究還計算了氮氧化物、硫化物、懸浮微粒等會對環境造成衝擊之主要物質於整個生命週期中之排放量。



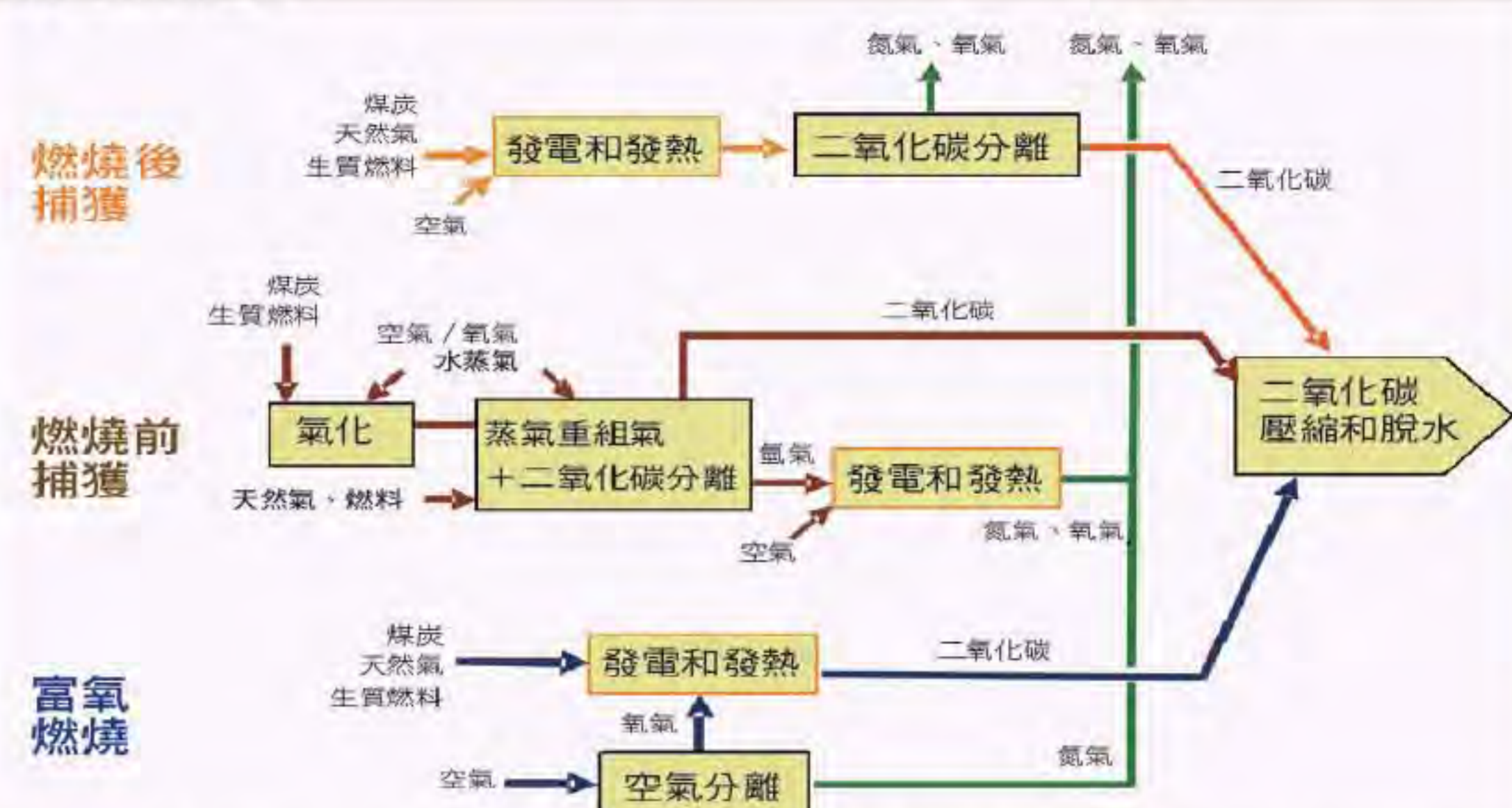
林紹軒(2012)：使用台東縣成功鎮都威山之岩樣，以綠泥石、石英為主並含少量方解石、長石的泥岩，以及嘉武溪岩樣，乃以輝石、長石為主的輝長岩，以15%CO₂混合85%N₂的混合氣體為反應氣體進行實驗，結果反映岩石風化實際參與反應的碳濃度，泥岩結果表明反應為本身碳酸鹽之溶解造成，實際與提供之二氧化碳反應的量甚微。輝長岩樣則由於本身未含有碳酸鹽成分，因此反應後之碳皆為吸收二氧化碳後之成果。碳酸鹽雖然風化的速率較快、反應的幅度較大，然而究因乃本身的礦物溶解，能吸收的二氧化碳濃度不高，因此矽酸鹽礦物的二氧化碳封存能力較佳。

黃裕峯(2012)：以礦物碳酸化方式做為封存二氧化碳之方法，針對不同地區之蛇紋石，進行礦物碳酸化之試驗，由TGA計算得知其碳轉換率，玉里蛇紋石碳轉換率為最高，達21.90%，其次是豐田蛇紋石18.13%，而後分別是瑞穗蛇紋石14.91%以及錕肥12.43%，最低轉換率則是萬榮蛇紋石，只有4.34%。

張耀文(2013)：利用二氧化碳超臨界流體結合TTA整合劑可萃取土壤中的重金屬，且不同金屬離子間有競爭現象。就總萃取質量而言，其萃取方式適用於多重金屬污染土壤的處理。

吳振宇(2016)：使用離子層析儀分析淡水中的Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻各主要離子濃度，並利用電位滴定和Gran plot測定檢度，進而換算碳酸根離子濃度，求得北碇溪流域安山岩化學風化率64.02 t/km²/yr 和二氧化碳消耗率11.52 x 10⁶ mole/km²/yr。

周揚震、徐恆文等(2016)：於科學發展期刊519期失序的碳循環報導系列中提及，常見的二氧化碳捕獲方法，可依燃料轉換成熱能與電能的方式，分為燃燒後捕獲、燃燒前捕獲及富氧燃燒3類。



▲圖3 二氧化碳捕獲流程示意圖(圖片來源: 改繪自Metz et al., 2015)

本研究文獻蒐集結果顯示，矽酸鹽礦物所組成的岩石有較高的CO₂封存能力，而鹽鹼化土壤對CO₂封存，尚無人討論，因此本研究並未與前人文獻重合，為新的觀念與實驗。

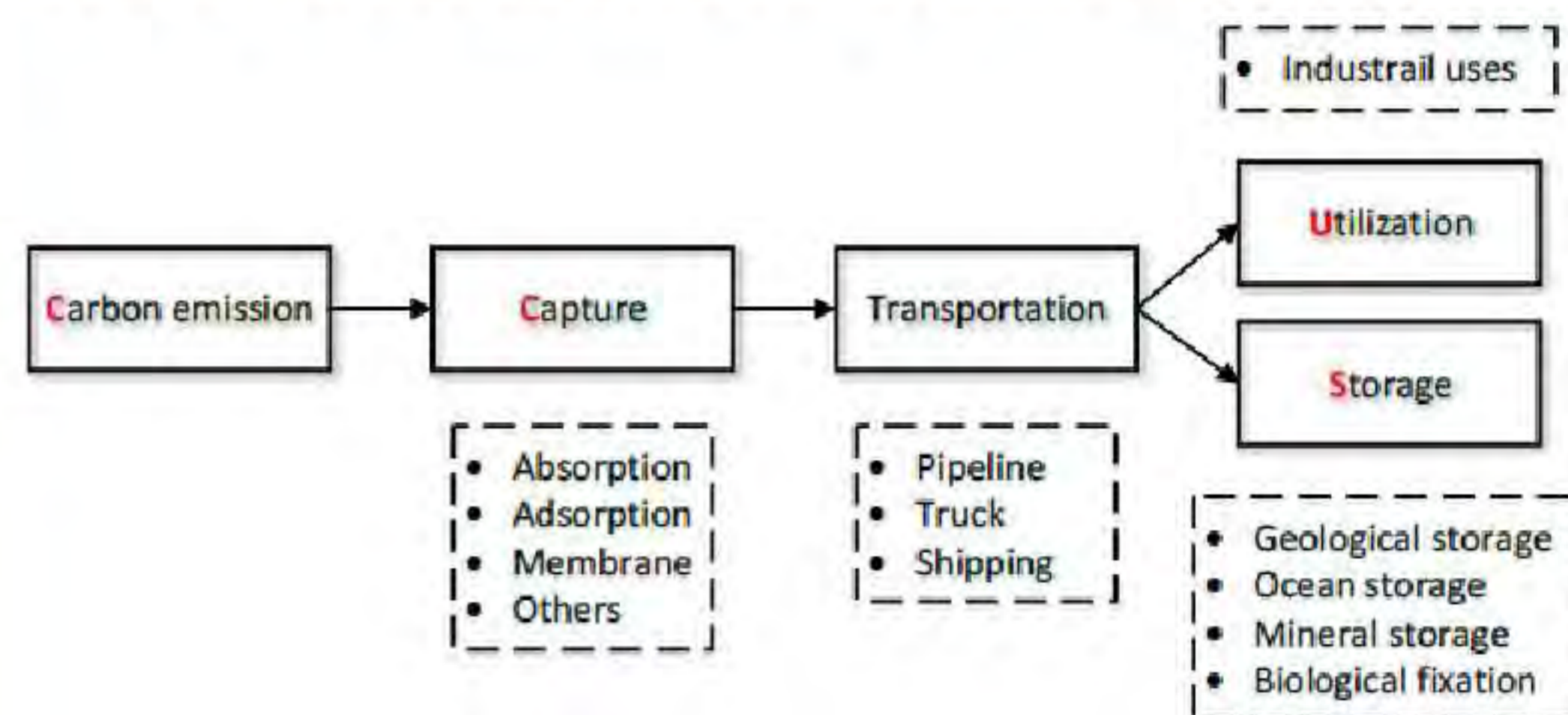
三、實驗過程

本團隊主要以自製的固、液、氣三項碳酸化反應設備，探討CO₂的碳吸附量，得出最佳的實驗樣本，再去比較不同水質樣本造成的碳吸附差異，以下為本實驗變因說明：

表2. 本研究實驗變因

實驗變因種類	內容說明
控制變因	1. 實驗樣本的粒徑 2. 實驗氣體輸出量 3. 實驗樣本的重量 4. 實驗水體的容量
操作變因	1. 不同種類的實驗本(含固、液與氣體) 2. 不同溫度參對碳酸化反應 3. 不同酸鹼度對碳酸化反應
應變變因	1. 實驗樣本碳酸化的反應速率 2. 實驗樣本CO ₂ 的碳吸附量變化 3. 反應過程PH值變化

本研究整理CCUS概念，選取礦物封存(Mineral storage)方式，以自製三相碳酸化設備，針對PH值、EC值與碳酸化程度的反應速率，探討CO₂捕獲、封存與再利用能力。



▲圖4 CCUS概念圖修改自Li et al., (2016)

(一)野外採樣選擇實驗樣本

本研究選擇的岩石樣本以矽酸鹽為主，這是由於矽酸岩本身缺乏碳原子，所有碳酸根離子中的碳必須全部來自碳酸。因此對控制空氣中二氧化碳含量方面，矽酸岩的風化作用要比碳酸岩來得重要。以下為本研究選擇之樣本：

1. 玄武岩(Basalt)：

分布最廣的地區為台灣離島澎湖；本島也有零星的分布，如桃園市角板山、新竹縣馬武督、新北市三峽、土城市寶來地區。本研究以角板山玄武岩為實驗樣本。



2. 石英安山岩(Dacite)

台灣的石英安山岩主要分佈在基隆山以東一帶，本研究以金瓜石附近的第一長仁礦區為採集樣本，基隆山為火成侵入岩體，由於構造運動使得地盤向上抬升、侵蝕，原上部中新世沈積岩受侵蝕作用而出露於地表。因安山岩較周圍沈積岩堅硬且抗風化，因差異侵蝕而形成一個聳立的山頭。以下為本研究玄武岩、石英安山岩分布採樣示意圖：



3. 蛇紋岩(Serpentine)

灣蛇紋岩分布在東部豐田、萬榮、玉里、瑞穗一帶，由超基性岩石，如橄欖岩中的橄欖石或輝石蛇紋岩化作用(serpentinization)產生，主要礦物組成為蛇紋石，次要礦物為磁鐵礦，另含有少量之水鎂石、碳酸鹽、透閃石、綠泥石、滑石、鉻鐵礦、鉻尖晶石及黃鐵礦等。本研究採集萬榮的蛇紋岩作為實驗樣本。



4. 長石砂岩(Arkose)

主要分佈在西部麓山帶及西部丘陵，呈南北帶狀走向，其碎屑粒中含25%以上長石，且顆粒多具稜角狀。由於長石很容易被風化而消失，因此沈積物必須迅速沈積於地形起伏較大、地殼活動比較活躍的地區，才能保存較多的長石顆粒。本研究以和平島的長石砂岩做採樣地點。以下為本研究長石砂岩、蛇紋岩分布採樣地點：



3. 蛇紋岩加熱時間(實驗十三)

表16.加熱時間的變應對上蛇紋岩(Serpentine)

實驗項目	時間 (min)	60	90	120
反應前 pH 值		6.5	6.6	6.7
反應後 pH 值		6.4	6.5	6.6
實驗前重量(g)		300	300	300
實驗後重量(g)		248	239	228
CO ₂ (g)吸收量(g)		2.49	2.92	3.44



▲圖29.蛇紋岩加熱時間

4. 長石砂岩加熱時間(實驗十四)

表17.加熱時間的變應對上長石砂岩(Arkose)

實驗項目	時間 (min)	60	90	120
反應前 pH 值		6.4	6.5	6.6
反應後 pH 值		6.1	6.2	6.3
實驗前重量(g)		300	300	300
實驗後重量(g)		283	280	277
CO ₂ (g)吸收量(g)		0.37	0.44	0.50



▲圖30.長石砂岩加熱時間

表18.加熱時間的變應對上鹽鹼化土壤(Salinized soil)

實驗項目	時間 (min)	60	90	120
反應前 pH 值		6.7	6.8	6.9
反應後 pH 值		5.9	6.0	6.1
實驗前重量(g)		300	300	300
實驗後重量(g)		215	199	182
CO ₂ (g)吸收量(g)		4.03	5.01	6.04



▲圖31.鹽鹼化土壤加熱時間

(六) 海水、地下水不同加熱時間測試

本研究實地調查發現，口湖地區實驗樣本鹽鹼化土壤，由地下觀測井資料顯示，有出現海水入侵地下水之情況，因此本實驗採取口湖地區地下水樣本，分別以不同加熱時間做測試，並與實驗室配置濃度3.5%，比重1.026的海水做比較。



圖32.湖口地下觀測井全貌



圖33.觀測井採水樣

表19.海水(Beine)與地下水(Groundwater)的實驗比較(Heating Time : 30 min)

水質種類	海水(Brine)	地下水(Groundwater)
反應前pH值	8.4	7.8
反應後pH值	7.8	7.7
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	227	239
CO ₂ (g)吸收量(g)	5.07	4.63

表20.海水(Beine)與地下水(Groundwater)的實驗比較(Heating Time : 60 min)

水質種類	海水(Brine)	地下水(Groundwater)
反應前pH值	8.4	7.8
反應後pH值	7.8	7.7
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	227	239
CO ₂ (g)吸收量(g)	5.07	4.63

表21.海水(Beine)與地下水(Groundwater)的實驗比較(Heating Time : 90 min)

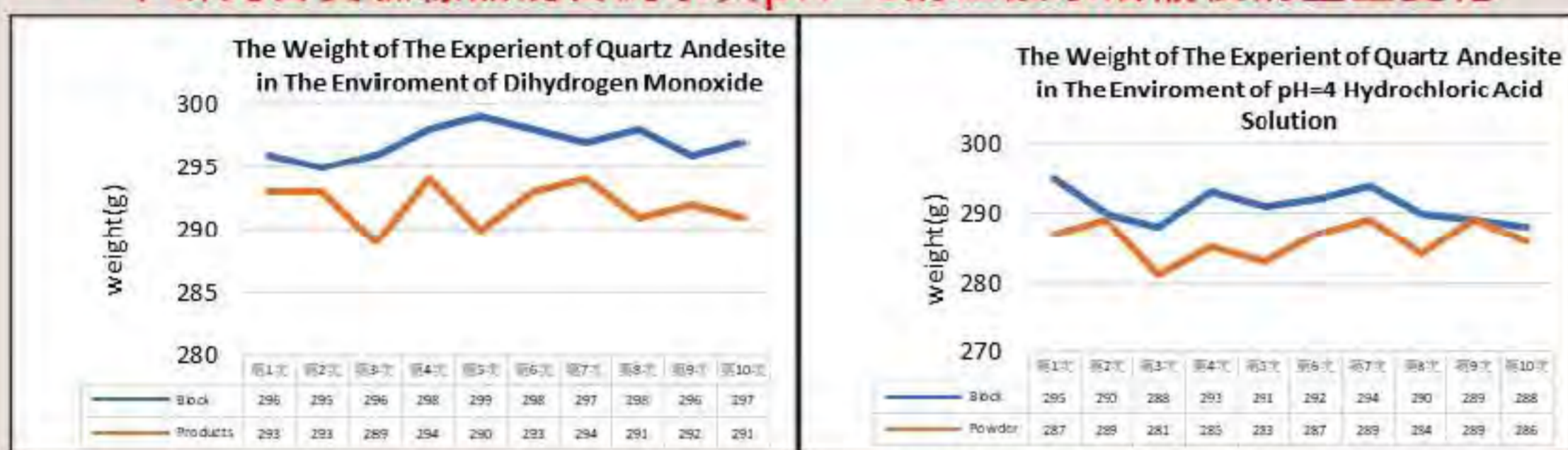
水質種類	海水(Brine)	地下水(Groundwater)
反應前pH值	8.4	7.8
反應後pH值	7.8	7.7
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	227	239
CO ₂ (g)吸收量(g)	5.07	4.63

表22.海水(Beine)與地下水(Groundwater)的實驗比較(Heating Time : 120 min)

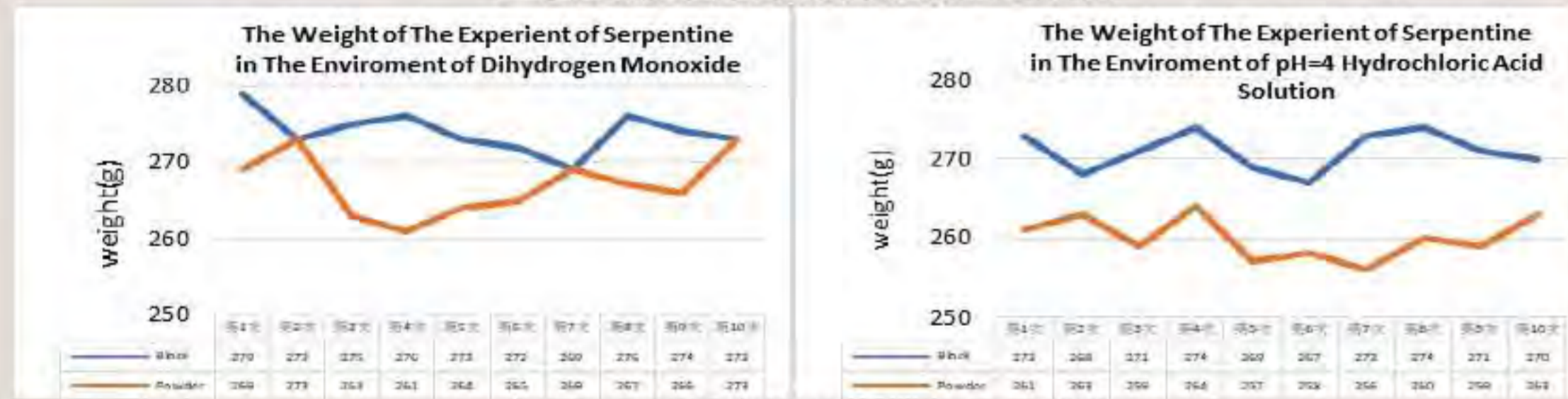
水質種類	海水(Brine)	地下水(Groundwater)
反應前pH值	8.4	7.8
反應後pH值	7.8	7.7
實驗前重量(g)	300	300
實驗後重量(g)	227	239
CO ₂ (g)吸收量(g)	5.07	4.63

伍、結果與討論

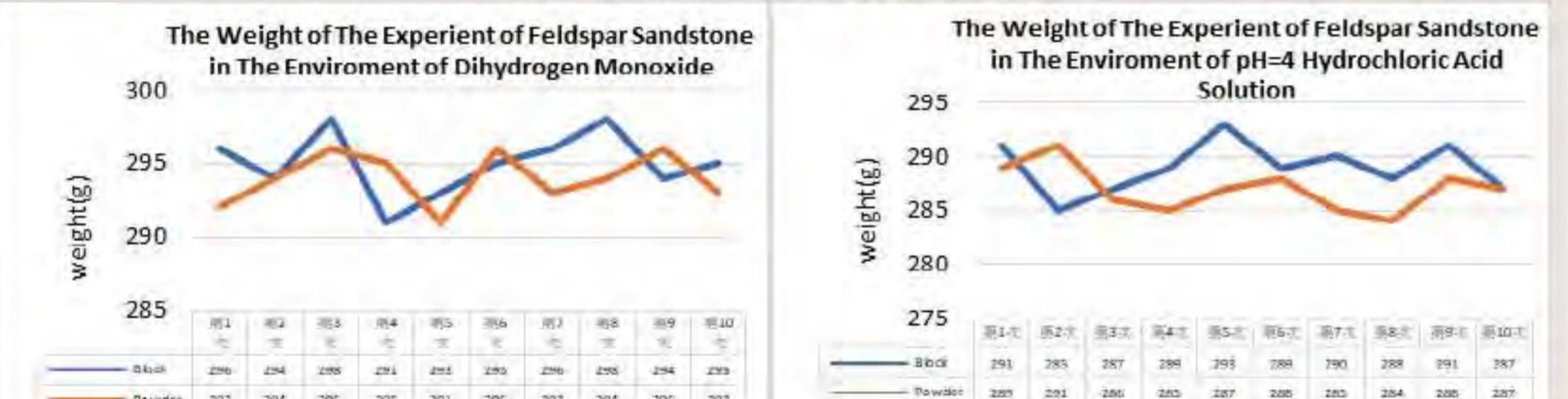
一、本研究各實驗樣品混合純水與pH=6的鹽酸水溶液後的重量變化



▲圖34.安山岩塊狀與粉狀重量變化



▲圖35.蛇紋岩塊狀與粉狀重量變化



▲圖36.長石砂岩塊狀與粉狀重量變化



▲圖37.鹽鹼化土壤塊狀與粉狀重量變化

由上述實驗中可以的知兩樣結果：
 (一)在酸性環境中，反應物的Ca²⁺與Mg²⁺解離量增加，進而造成CO₂(g)的吸收量增加，由此可知，水溶液的pH值將對反應物與CO₂(g)吸收結果產生影響。
 (二)在非勻相反應中，改變反應物表面積大小增加了對CO₂(g)吸收量，但影響略小於改變水溶液pH值時的實驗結果。

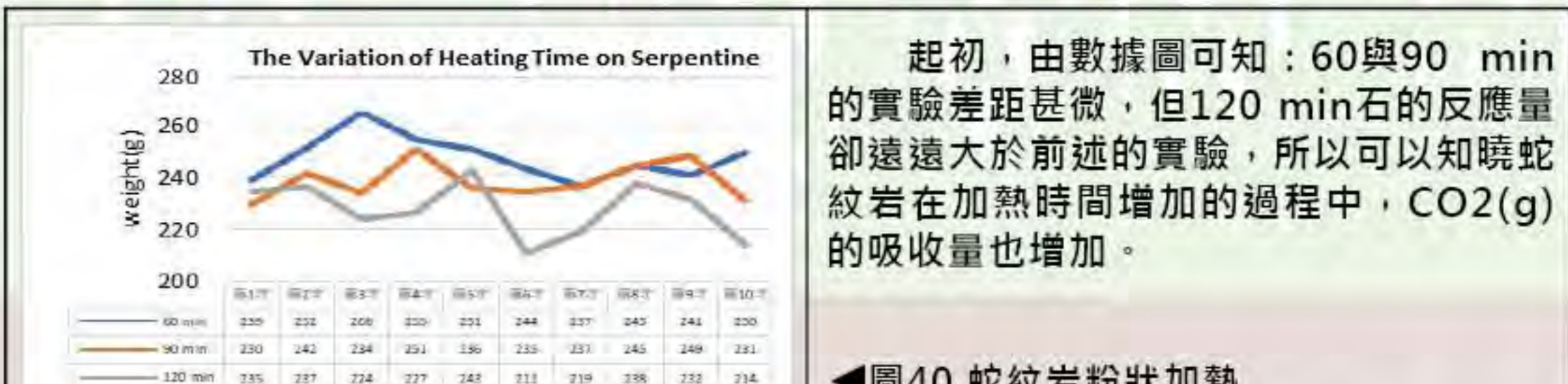
二、本研究各實驗樣品加熱變化



▲圖38.玄武岩粉狀加熱



▲圖39.石英安山岩粉狀加熱



起初，由數據圖可知：60與90 min的實驗差距甚微，但120 min石的反應量卻遠遠大於前述的實驗，所以可以知曉蛇紋岩在加熱時間增加的過程中，CO₂(g)的吸收量也增加。

▲圖40.蛇紋岩粉狀加熱



在多次實驗中可以得知：加熱時間對長石砂岩的反影響並不大，所以在120 min時取消了實驗。

▲圖41.長石砂岩粉狀加熱

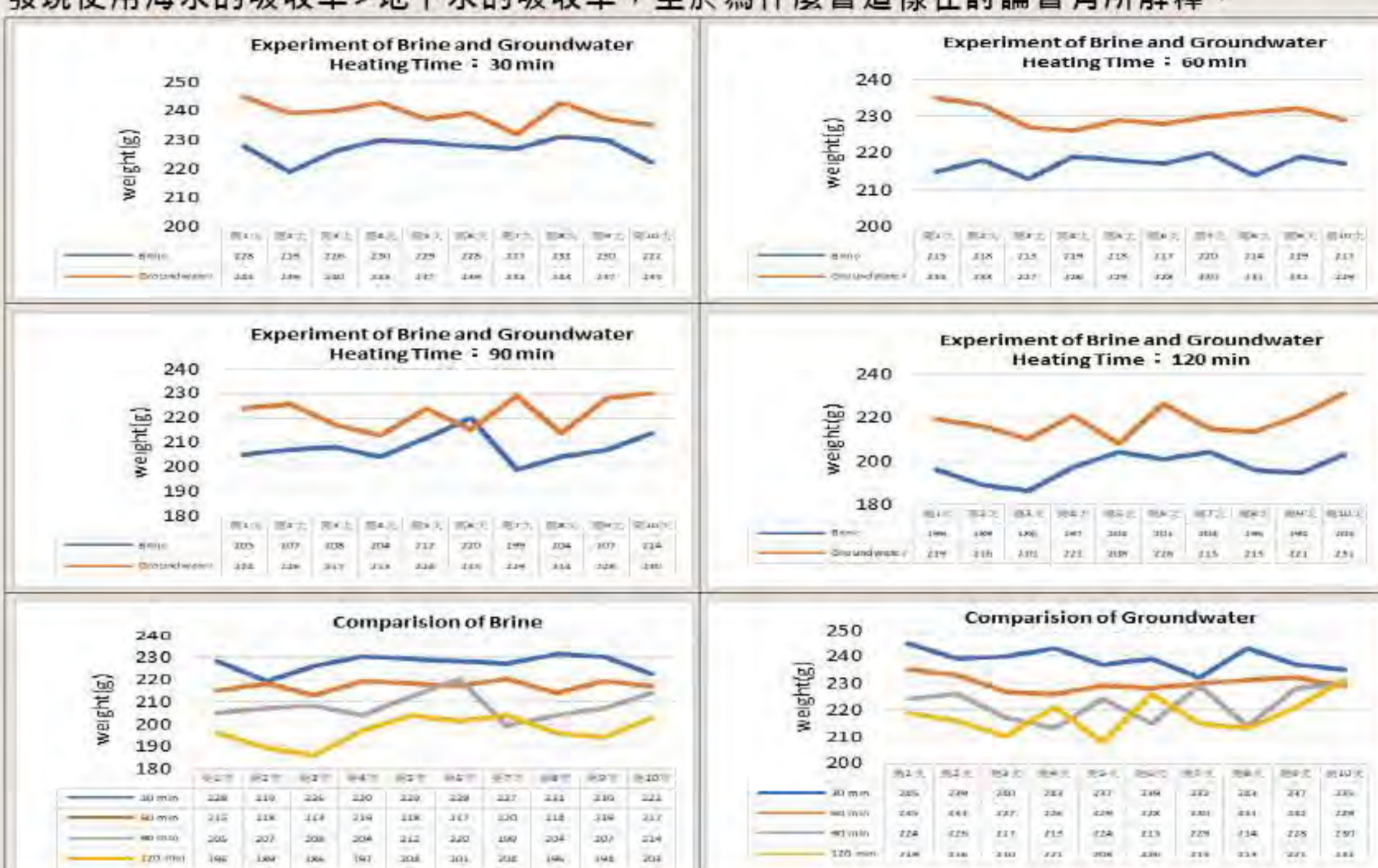


所有實驗中可以看出見加熱時間對反應的影響甚巨，但120 min之後，加熱時間的影響開始減緩，所以本實驗僅只於加熱時間為120 min時，也在此實驗中取得了最佳的反應結果。

▲圖42.鹽鹼化土壤粉狀加熱

三、海水與地下水的比較：

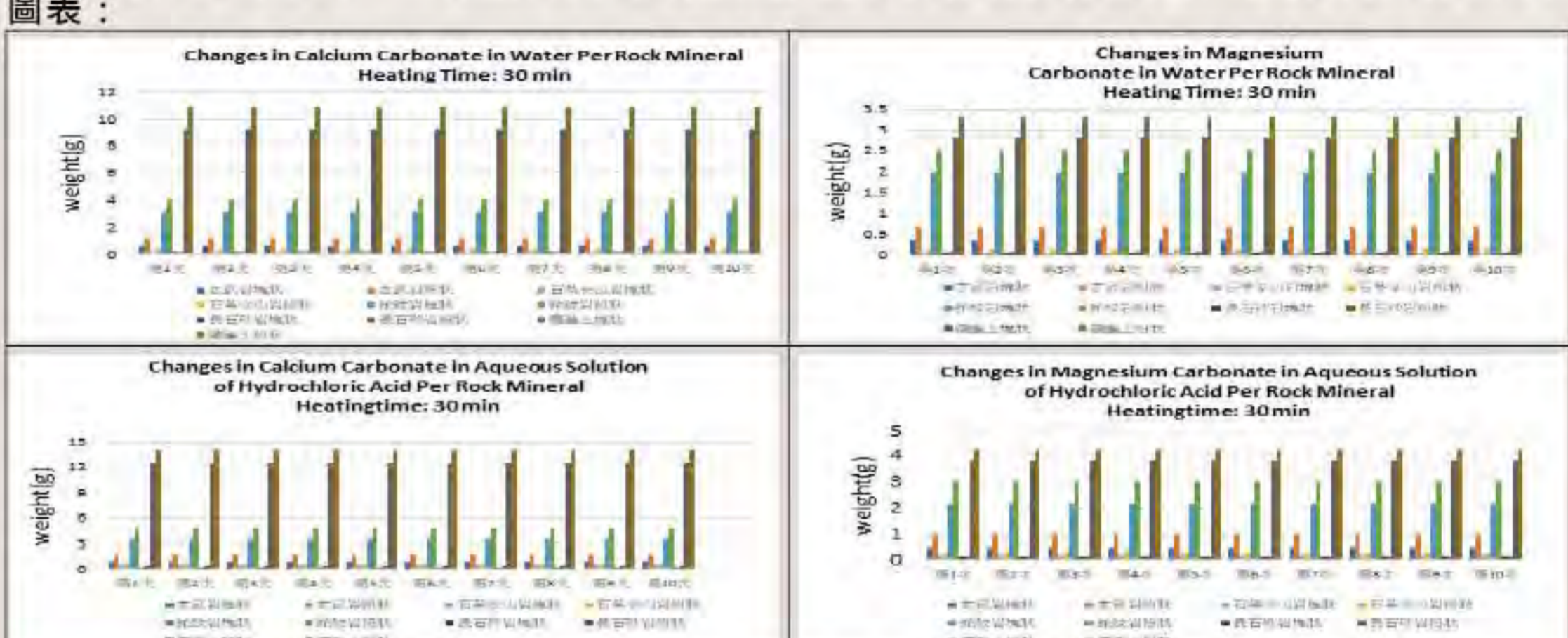
為了節省實驗的時間在本實驗使用前幾項實驗中吸收效果最佳的粉狀的鹽鹼化土壤，發現使用海水的吸收率>地下水的吸收率，至於為什麼會這樣在討論會有所解釋。



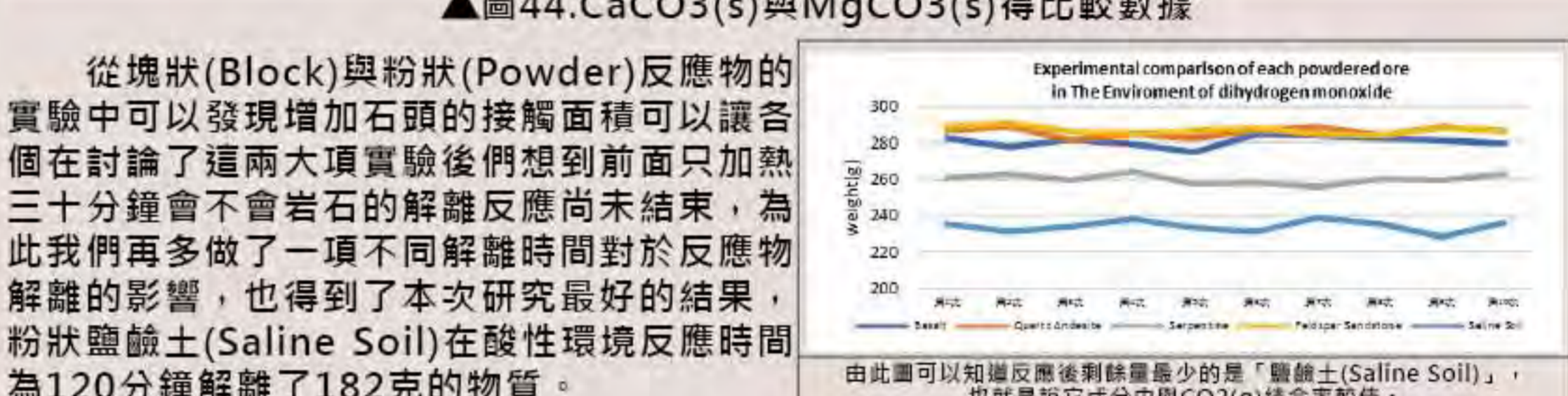
▲圖43.海水與地下水的實測數據

四、實驗中CaCO₃(s)與MgCO₃(s)得比較數據

針對不同的反應物所沉澱的物質去分析發現主要是碳酸鎂與碳酸鈣，因為每個反應物所含的鈣鎂離子量不一，所以我們對個別生成物的碳酸鎂與碳酸鈣進一步的計算得出下列圖表：



▲圖44.CaCO₃(s)與MgCO₃(s)得比較數據



▲圖45.鹽鹼土(Saline Soil) CO₂(g)結合率

從塊狀(Block)與粉狀(Powder)反應物的實驗中可以發現增加石頭的接觸面積可以讓各個在討論了這兩大項實驗後們想到前面只加熱三十分鐘會不會岩石的解離反應尚未結束，為此我們再多做了一項不同解離時間對於反應物解離的影響，也得到了本次研究最好的結果，粉狀鹽鹼土(Saline Soil)在酸性環境反應時間為120分鐘解離了182克的物質。

五、自製實驗設備討論

第一代裝置的重點主要是放在方便添加二氧化碳的設計因此效率上並無明顯的提升，但透過這個裝置我們能以較輕鬆的方式充入二氧化碳；第二代我們就將重點放在了增加效率上，透過通入氮氣使裝置中的壓力提升藉此增加二氧化碳的溶解性，確保水溶液中的鈣鎂離子而完全的與碳酸根產生碳酸鈣及碳酸鎂沉澱；第三代時對裝置多加裝了循環的裝置、電熱板以及恆溫儀讓整個實驗時溫度都能隨時讓掌控。

將這一系列的實驗完成後，將吸收效果最好的鹽鹼土拿去與口湖鄉的地下水與海水進行實驗得到了使用海水的吸收效率大於地下水。

海水中本身就含有豐富的微量元素：鈉、鉀、鎂、鈣、鋁、氯、溴、硼、氟及硫酸根、碳酸根，其中鎂離子更是影響本實驗主要的因素因此在海水與地下水的實驗中海水所得到的吸收效率較二氧化碳佳。但在地下水的實驗中我們發現，實驗前透過參考文獻所假設的結果是地下水含有地的礦物質雖然不如海水但一定多於實驗用的R.O.水可是實驗後所得到的數據跟此假設有所出入因此我們在對地下水的實驗做更進一步的討論。

陸、結論

在本次的實驗中我們總共使用了五種反應物進行實驗並且改變反應物的狀態去比較個別二氧化碳的吸收率，以下為本研究結論：

- 一、本研究發現到只要水所含有的鈣鎂離子越多所沉澱的碳酸鈣與碳酸鎂的也跟著提高，因此透過將岩石磨成粉或加入酸促使岩石解離出更多鎂離子與二氧化碳形成碳酸沉澱藉此封存二氧化碳，本次研究最好的結果，粉狀鹽鹼土(Saline Soil)在酸性環境反應時間為120分鐘解離了182克的物質。
- 二、本團隊在找出存效率最好的反應物後，針對反應流程自製實驗裝置，讓反應進行能更加順暢，也將此裝置進行了三次的改良以確保整體實驗流程能讓反應物發揮最大的效能。在這三次的改良當中，第二代較第一代加速了吸收的效率從原本的一小時半縮至一小時，第三代則縮至半小時。
- 三、由實驗得知，沿海地帶的鹽鹼土壤捕捉封存二氧化碳效率最高，很適合做台灣碳封存環境。在本團隊研究實驗中發現鈣和鎂離子是重要捕捉二氧化碳重要的因素，而鹽鹼土的鎂含量占8.37%而鈉含量占27.42%是所有反應物中含量最高的。
- 四、本實驗於鄰近湖濱口湖鄉的地下觀測井，使用受到海水污染的地下水與土壤來進行本實驗，實驗後發現確實能有效的改變土壤過鹼化的問題，也更加的確認了本實驗的可行性。在本實驗中利用300g的鹽鹼土去與海水與地下水做反應，把鹽鹼土從原本的PH7~PH8降至PH5~PH6。

柒、未來展望

台電沿海的火力發電廠，因地緣性可利用此種方式，將CO₂高壓注入鹽鹼土與地下水正下方深處的新鮮岩盤封存，若發生CO₂溢漏可由上部的鹽鹼土與地下水捕捉吸附，增加封存的安全性，且沿海四周季風強盛，種種因子對地上生物與人類生活影響甚小，且鹽鹼土與受海水污染的地下水捕捉CO₂後，可有效改善鹽鹼化土壤與地下水問題，同時不會對環境造成二次的傷害，更重要的是現今全球暖化的問題日益嚴重而本實驗在過程中，正是不斷的消耗二氧化碳將其捕捉封存，對台灣(TCCSUA)組織推廣的減碳助益良多。

捌、參考資料(文獻)及其他

- 1.Suthar, S.,2009, "Bioremediation of agriculture wastes through vermicomposting," Bioremediation journal, Vol. 78, No. 1, pp. 1428-1439.
- 2.Anoop Yadav, Garg, V. K., 2011, "Recycling of organic wastes by employing Eisenia fetida," Bioresource Technology, Vol. 102, No. 3, pp. 2874-2880.
- 3.余秉彥(2014).「以還原廢棄材料捕捉二氧化碳之研究」。國立中央大學環境工程研究所碩士論文。
- 4.吳振宇(2016)。北碇溪安山岩流域化學風化率和大氣二氧化碳消耗率。中國文化大學化學系應用化學碩士論文。
- 5.林紹軒(2012)。矽酸鹽加速風化封存二氧化碳。國立成功大學地球科學系博士論文。
- 6.徐恆文,陳威丞,張名惠,周揚震(2016)。鈣迴路捕獲二氧化碳技術。台灣能源期刊。2014, 1(2), 145-155。
- 7.黃至弘,談駿濤(2014)。「CCUS 技術發展」, 碳捕存與再利用。技師報, 第938 期。
- 8.黃裕華(2012)。利用礦物碳酸化法探討不同地區蛇紋石之二氧化碳封存能力。國立屏東科技大學環境工程與科學系碩士論文。
- 9.羅麗文(2013)。利用整合劑搭配超臨界流體萃取土壤重金屬之研究。輔英科技大學環境工程與科學系碩士論文。

5. 鹽鹼化土壤(Salinized soil)

台灣鹽鹼化土壤，常發生於沿海地區的農田，彰化至台南一帶。除了存在大量鹽分外，鹽分中的氯化鈉所產生的可交換性鈉離子還會提升土壤鹼度，以PH8.5為界線，以上稱為鹼土，以下則為鹽土。美國1975年土壤分類將鹽鹼土歸併入旱境土，至少有一個淡色表土層或粘聚層，但不含有氧化物層或灰化層。本研究以雲林口湖鄉土壤鹽鹼化的番茄園為採樣點。



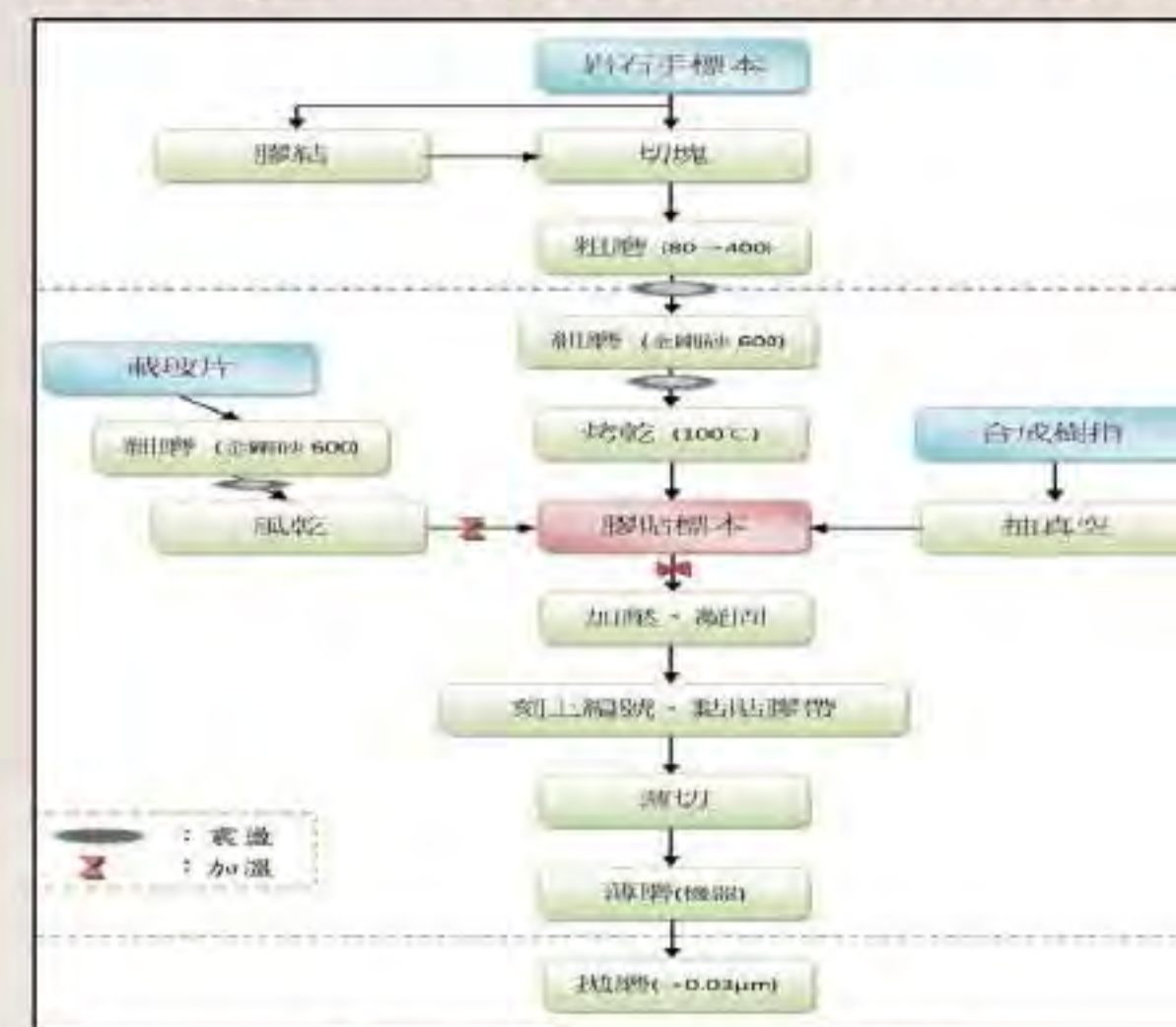
圖11-1 鹽鹼化土壤採樣地點

圖11-2 鹽鹼化土壤採樣近照

(二) 樣本岩相與化學成份分析

1. 岩相(實驗一)

本研究透過岩石薄片觀察岩相，首先將岩石手標本切割成符合載玻片大小的尺寸，將岩塊以AB膠真空空後，黏在載玻片上，再以金鋼砂研磨，之後加熱、加壓凝固後，再重複磨切步驟，直到岩塊厚度薄到0.03μm為止。本研究岩相部分為岩石薄片觀察，以下為岩石薄片製作過程：



▲圖12 岩石薄片製作過程

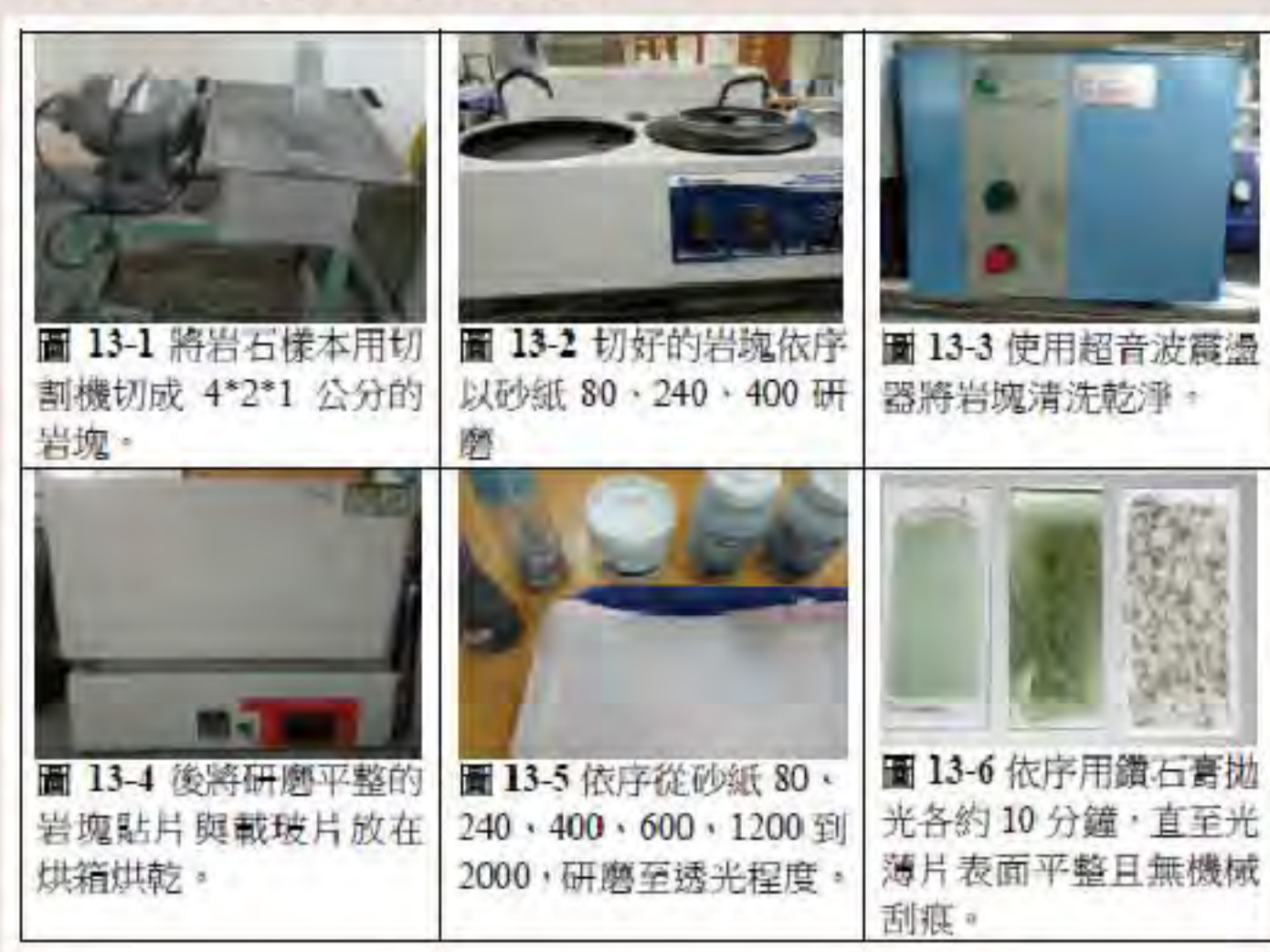


圖13-1 將岩石樣本用切割機切成 4*2*1 公分的岩塊。圖13-2 切好的岩塊依序以砂紙 80、240、400 研磨。圖13-3 使用超音波震盪器將岩塊清洗乾淨。圖13-4 後將研磨平整的岩塊黏貼於載玻片放在烘箱烘乾。圖13-5 依序從砂紙 80、240、400、600、1200 到 2000，研磨至透光程度。圖13-6 依序用鑽石拋光各約 10 分鐘，直至光薄片表面平整且無機械刮痕。

(四) 混合液體實驗

本研究以實驗樣本分成塊狀(每塊約2cm3大小)、粉狀(約0.1mm)做反應，稱重300g，加入自製反應器中，分別以純水、鹽酸水溶液測試pH值與反應後CO2吸收。

1. 玄武岩混合液體(實驗六)

表4. 玄武岩(Basalt)與純水(Dihydrogen Monoxide)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		7.1	7.2
反應後 pH 值		6.7	6.6
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		293	287
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.62	1.15



▲圖22. 玄武岩碳酸化實驗過程

表5. 玄武岩與pH=6鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		6.1	6.1
反應後 pH 值		5.8	6.0
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		291	281
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.79	1.68



▲圖23. 石英安山岩碳酸化實驗過程

表6. 石英安山岩(Dacite)與純水(Dihydrogen Monoxide)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		7.0	7.2
反應後 pH 值		6.9	6.8
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		297	292
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.12	0.33



▲圖24. 蛇紋岩碳酸化實驗過程

表7. 石英安山岩與pH=6鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		6.0	6.1
反應後 pH 值		5.7	5.8
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		291	286
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.37	0.58



3. 蛇紋岩混合液體(實驗八)

表8. 蛇紋岩(Serpentine)和水(Dihydrogen Monoxide)的實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		7.2	7.3
反應後 pH 值		6.0	6.1
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		274	267
CO _{2(g)} 吸收量(g)		3.11	3.94



▲圖26. 蛇紋岩碳酸化實驗過程

表9. 蛇紋岩與pH=6鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		6.1	6.3
反應後 pH 值		6.0	6.1
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		271	260
CO _{2(g)} 吸收量(g)		3.47	4.78



4. 長石砂岩混合液體(實驗九)

表10. 長石砂岩(Arkose)和水(Dihydrogen Monoxide)的實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		7.0	7.1
反應後 pH 值		6.8	6.7
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		295	294
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.11	0.13



▲圖28. 長石砂岩碳酸化實驗過程

表11. 長石砂岩和pH=6鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		6.0	6.1
反應後 pH 值		5.6	5.8
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		289	287
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.24	0.28



5. 鹽鹼化土壤混合液體(實驗十)

表12. 鹽鹼化土壤(Salinized soil)和水(Dihydrogen Monoxide)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		7.2	7.4
反應後 pH 值		6.9	6.3
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		257	249
CO _{2(g)} 吸收量(g)		2.84	3.66



▲圖30. 鹽鹼土碳酸化實驗過程

表13. 鹽鹼土與pH=6鹽酸水溶液(Hydrochloric Acid Solution)實驗

實驗項目	岩石顆粒	塊狀(Block)	粉狀(Powder)
反應前 pH 值		6.3	6.4
反應後 pH 值		6.2	6.2
實驗前重量(g)		300	300
實驗後重量(g)		242	234
CO _{2(g)} 吸收量(g)		3.83	4.36



(五) 加熱時間的變因實驗

本研究以研磨之粉狀實驗樣本加入pH=6的鹽酸水溶液進行反應，其過程如下：

1. 玄武岩加熱時間(實驗十一)

表14. 加熱時間的變應對上玄武岩(Basalt)

實驗項目	時間 (min)	60	90	120
反應前 pH 值		6.5	6.6	6.7
反應後 pH 值		6.3	6.4	6.5
實驗前重量(g)		300	300	300
實驗後重量(g)		275	271	266
CO _{2(g)} 吸收量(g)		1.99	2.30	2.70



▲圖27. 玄武岩加熱實驗過程

2. 石英安山岩加熱時間(實驗十二)

表15. 加熱時間的變應對上石英安山岩(Dacite)

實驗項目	時間 (min)	60	90	120
反應前 pH 值		6.4	6.5	6.6
反應後 pH 值		6.1	6.2	6.3
實驗前重量(g)		300	300	300
實驗後重量(g)		282	279	275
CO _{2(g)} 吸收量(g)		0.75	0.87	1.04



▲圖28. 石英安山岩加熱實驗過程

2. 化學成份(實驗二)

本研究以原子吸收光譜儀(atomic absorption spectroscopy, AA)做全岩分析，其前處理為取分析試樣 0.5 g(過100 mesh 篩網)，於鐵氟龍燒杯中，依序加入濃硝酸 (HNO₃)5 mL、濃過氯酸 (HClO₄)2 mL、濃氫氟酸 (HF)10 mL及過飽和硼酸 (H₃BO₃) 10mL。並放置加熱板中，蓋上鐵氟龍玻璃蓋，加熱至暗色物質消失，冷卻後以 Whatman NO.42 濾紙過濾至100mL 之鐵氟龍定量瓶中，用原子吸收光譜儀測定溶液中元素。

表3. 實驗樣本全岩分析

岩石種類	玄武岩	石英安山岩	蛇紋岩	長石砂岩	鹽鹼土
SiO ₂	47.87%	52.53%	43.47%	68.19%	42.06%
TiO ₂	1.08%	1.80%	1.04%	0.46%	0.31%
Al ₂ O ₃	15.55%	13.23%	14.72%	14.78%	14.48%
Fe ₂ O ₃	10.32%	15.65%	12.94%	3.16%	5.57%
MnO	0.19%	0.19%	0.3%	0.04%	0.37%
MgO	6.42%	2.33%	9.64%	1.28%	8.37%
CaO	12.31%	6.64%	15.54%	3.40%	27.42%
Na ₂ O	2.14%	5.52%	0.32%	5.40%	0.02%
K ₂ O	0.05%	0.20%	0.1%	1.01%	0.01%
P ₂ O ₅	0.09%	0.55%	0.12%	0.09%	0.01%
Total	96.01%	98.64%	96.46%	97.82%	98.60%
L.O.I	4.04%	0.66%	3.54%	3.10%	2.22%

(三) 自製實驗儀器

本研究為計算碳吸附量，自行設計碳酸化實驗儀器，為加速碳酸化反應，本團隊不斷改進儀器的反應速率，以確保實驗能明確顯示樣本間之差異，經改良結果，總共分成下列三代：

1. 第一代反應器(實驗三)

第一代設計理念為以圓形透明壓克力槽做碳酸化反應管柱，其反應全程在常溫常壓下進行。液相溶液使用去離子水、海水與地下水做測試，以CO₂鋼瓶加壓為動力，促使瓶內樣本與混合液體融合，進行碳酸化反應，並監測pH值變化。



►圖19. 第一代反應器設計圖

2. 第二代反應器(實驗四)

改良第一代單純靠氣體壓力混合液體與樣本反應的方式，使用馬達加速循環與混合效果，並增加N₂增加混合液體碳酸化的速率，利用氣體控制閥調控CO₂及N₂的進氣量比例，並監測pH值變化。



►圖20. 第二代反應器設計圖

3. 第三代反應器(實驗五)

第三代加入溫度控制器，同時增加一個液體反應槽，實驗加入溫度控制與液體反應因子，藉以提升實驗樣本對碳酸化的效率。



►圖21. 第三代反應器設計圖