

112 年度氣候變遷創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號	23
隊伍名稱	綠色未來
作品中文名稱	負碳綠電
作品英文名稱	Carbon Negative Green Energy

參賽學校：國立台灣科技大學、國防大學理工學院

指導老師：張家耀 教授、鄭根發 教授

團隊成員：張博原、柯品

目錄

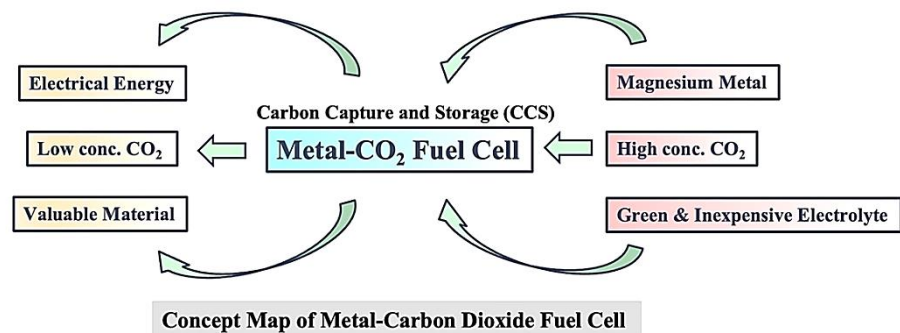
摘要.....	2
Abstract.....	2
一、設計構想及運作說明	3
(一) 構想來源.....	3
(二) 系統運作說明.....	5
1. 工作原理	5
(1) 單顆電池元件.....	5
(2) Mg-CO ₂ 電池串聯系統.....	6
(3) 蠕動幫浦液流裝置系統.....	7
2. 操作說明	7
二、作品說明	9
(一) 作品展示.....	9
1. 鎂-二氧化碳燃料電池.....	9
2. 負碳綠電的空氣清淨除濕機.....	10
(二) 作品材料說明.....	12
1. 自行製備的天然楓香果多孔活性碳.....	12
2. 複合式多孔碳氣體擴散電極	14
3. 以氯化膽鹼深共熔溶劑作為電解質增加放電能量密度	15
(三) 作品實驗數據.....	15
三、創作特點與創意說明	18
四、作品應用範圍及發展潛能	20
五、工作分配	21
六、參考資料	22

摘要

本研究正在開發一種能用於大氣中捕捉二氧化碳的“金屬-燃料電池”，此電池藉由二氧化碳和氧氣作為反應氣體，在吸附捕捉 CO₂ 的同時可轉化為電能，還能將其封存與再利用，是一種低成本、高效率的最佳 CCS 技術方案。

Abstract

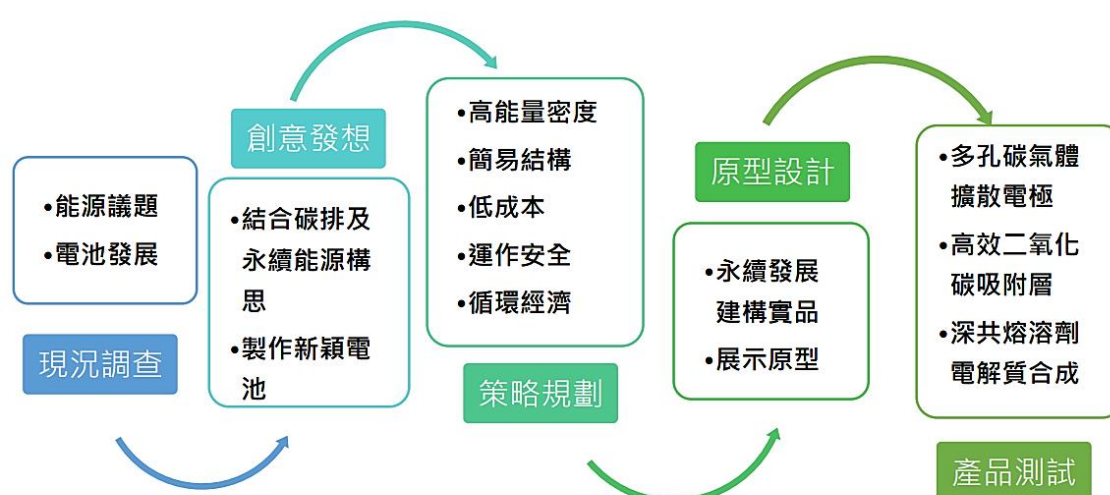
Our research is developing a "metal-fuel battery " that can be used to capture carbon dioxide in the atmosphere. This battery use carbon dioxide and oxygen as a reaction gas, which can be converted into electricity while absorbing and capturing CO₂. It can also be stored and reused. It is a low-cost the best CCS technology solution with low cost and high efficiency.



一、設計構想及運作說明

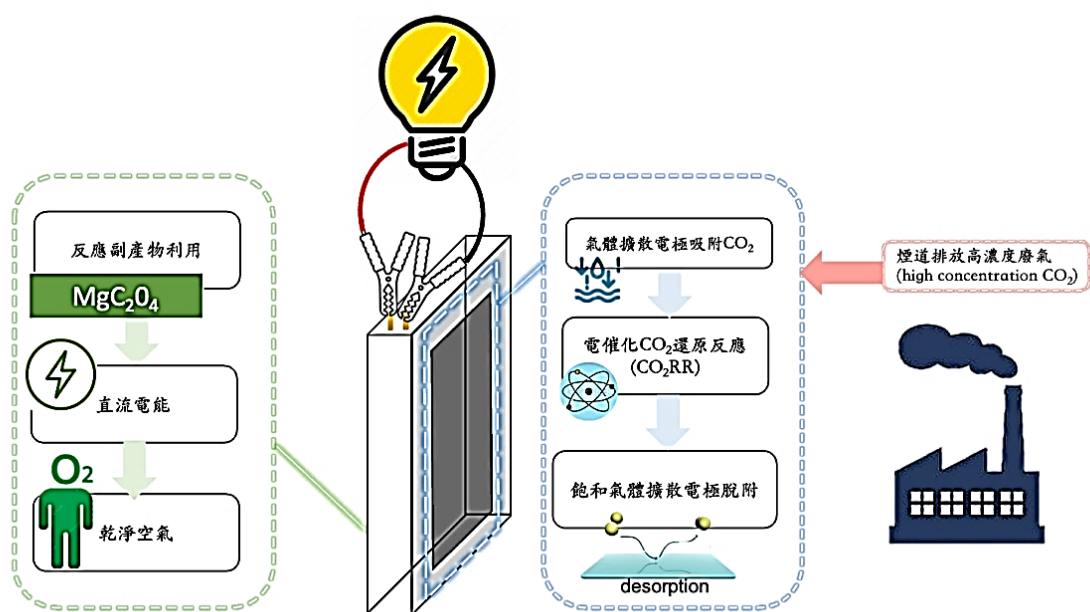
(一)構想來源：[最佳的 CCS 策略就是讓 CO₂ 變成能源](#)

全球暖化、氣候變遷、溫室氣體排放，是本世紀以來持續被重視的問題，這些議題已然深植在每個人心中，減碳成為了全民共識。由於森林、土壤和海洋皆可作為 CO₂ 的天然碳吸儲庫 (Carbon Sink)，但近年已逐漸飽合，因此就現行化石燃料廢氣而言，在尚未排放到大氣之前，就先把 CO₂ 捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)，是國際公認可行且有效的減碳手段。目前工業上二氧化碳的捕獲技術主要包括有膜分離、化學吸收和物理吸附等，但這些方法都可能由於成本高、耗用較多能源或是效能不佳，因而無法達到符合經濟效益的商轉規模。而“可呼吸”的金屬-二氧化碳燃料電池(Metal-CO₂ batteries)在運作過程中，主要是藉由活性金屬與二氧化碳的氧化還原反應產生電能，並形成金屬碳酸鹽或碳酸氫鹽，如果此放電形成的產物 Cn (n ≥ 2)，則可進行再生產以濃縮 CO₂ 轉化成其他化學物質，形同將 CO₂ 捕獲/轉化為電能和可再生利用的化學品，此新穎方法不僅減少了對傳統化石燃料的依賴，還能夠捕捉二氧化碳[1-4]作為清潔的儲能裝置，朝向更加經濟、環保與可持續性方向發展，本研究創意構想歷程如圖一所示。



圖一、研究創意構想歷程圖

目前幾種已開發的「Metal-CO₂ 燃料電池」，在陽極是選用活性較大的金屬(如鋰、鈉、鎂...等)，來提供相對較高的工作電壓和能量密度。由於鋰的反應活性最高，因此 Li-CO₂ 電池是最早發展的金屬二氧化碳電池，但是 Li-CO₂ 電池需要在無水條件下進行操作，否則會有爆炸燃燒危險，這點限制了它廣面應用的發展性[5]。Na-CO₂ 電池發展較晚，它顯示出與 Li-CO₂ 電池相似的特性，包括高能量密度和高負標準還原電位，成本卻相對較低[6]，但同樣有遇水爆炸燃燒的危險。相比之下，鎂的熔點高(650°C)，表示它有較高的安全性，此外鎂的毒性低，生物相容性高，而且它在地球的地殼中是第八豐富的元素，約佔 2% 質量，具有經濟優勢和環保安全性，因此開發成金屬燃料電池，對於 CO₂ 的捕獲、封存與儲能的應用，顯示出無限發展前景[7]。在全球暖化的今天，各國政府都在競相減少碳的排放、發展綠色供應鏈。基於此，本創意作品的主要工作目標定位為：從空氣捕獲二氧化碳並轉換成電能的「Mg-CO₂ 燃料電池」，這是一個負碳綠電的電池，目標將以「一次電池」來實現，即捕獲的 CO₂ 將不再從充電過程中被釋放，因此陰極反應是不需要可逆的。此一氣呵成二氧化碳捕集、封存、儲能與回收的負碳技術，符合綠色環保與能量再生的循環理念(如圖二所示)。

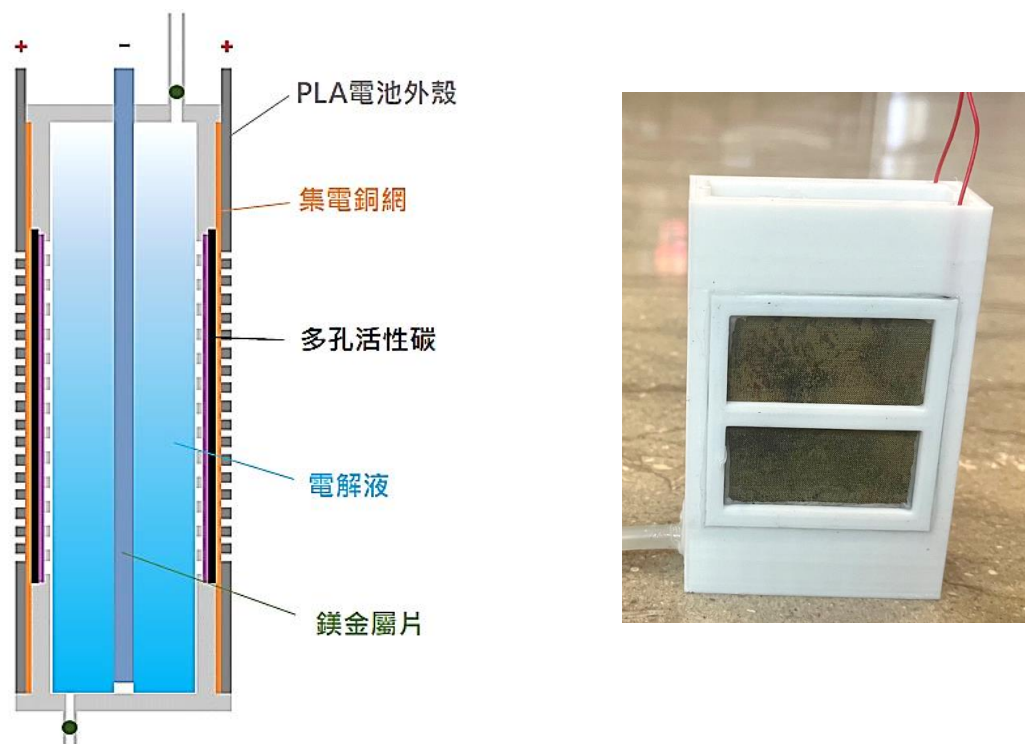


圖二、「Mg-CO₂ 燃料電池」運作循環構想圖

(二) 系統運作說明

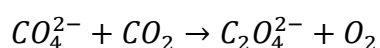
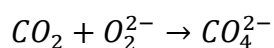
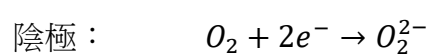
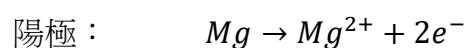
1. 工作原理

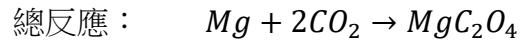
(1) 單顆電池元件



圖三、「Mg-CO₂ 燃料電池」構造剖面圖(左)及成品圖(右)

「鎂-二氧化碳燃料電池」在運作過程中，主要是藉由活性金屬鎂與二氧化碳的氧化還原反應產生電能。電池的基本構造分別為陽極、陰極與中間電解液，放電時陽極鎂金屬氧化放出電子，此時電子通過電路到達陰極多孔碳電極，則會與氧氣、水和二氧化碳形成草酸根離子，碳本身不參與反應只是提供反應的活性位置，因此不會損失。草酸根離子最後會穿越中間電解質與金屬鎂離子結合形成草酸鎂。整體反應就形同是將 CO₂ 捕獲並轉化為電能的儲能裝置。以下是 Mg-CO₂ 燃料電池的反應化學方程式：

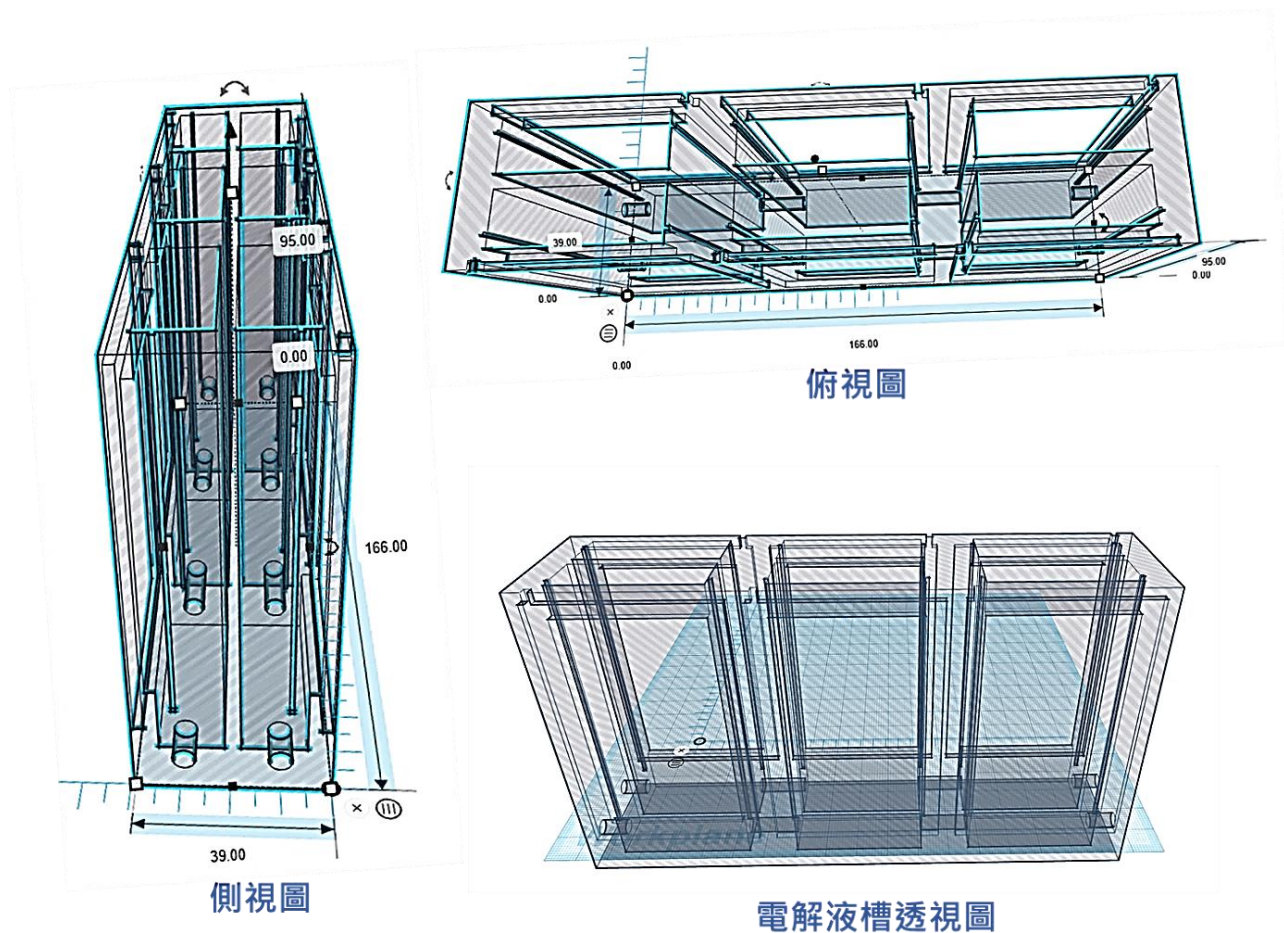




單顆電池放電大開路電壓 (Open circuit voltage, V_{oc}) 是 1.6 伏特，最大短路電流 (Short circuit current, I_{sc}) 可達 1.5 安培，但放電電流和放電深度會影響電壓變化。

(2) Mg-CO₂ 電池串聯系統

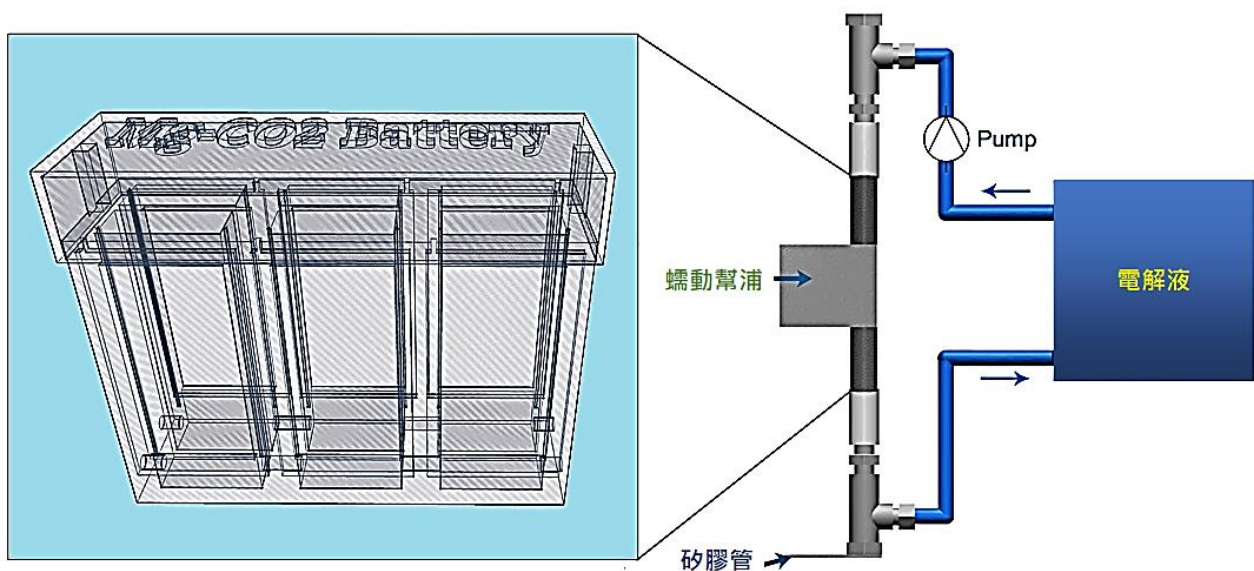
為了讓電池運作時能產生較高的工作電壓，性能更穩定，因此將電池進行串聯，在自然大氣環境下捕捉二氧化碳放電時，可輸出 10W 功率。電池陽極選用的是鎂金屬，金屬鎂毒性小、對環境友好，除此之外，鎂離子是海水中的重要成分，做為能量的供應不虞匱乏。



圖四、「Mg-CO₂ 燃料電池」六顆電池串聯系統構造剖面圖

(3) 蠕動幫浦液流裝置系統

本系統能捕捉空氣中二氧化碳而進行發電，在「淨化」空氣的過程，大氣中的 CO_2 會被多孔碳氣體擴散電極吸附、濃縮、聚集，此時再與陽極氧化放出的電子結合，就會自然進行電化學反應生成草酸鹽予以封存。理論上整個系統只有金屬鎂會被消耗，但反應生成物草酸鎂會堆積沉澱在電解液中，一但時間久了就會造成阻塞，為了要將此草酸鎂不溶物帶出，因此在整個系統需安裝蠕動幫浦液流裝置(如圖五)，以液體流動帶出反應生成物與輸送新鮮的電解液。



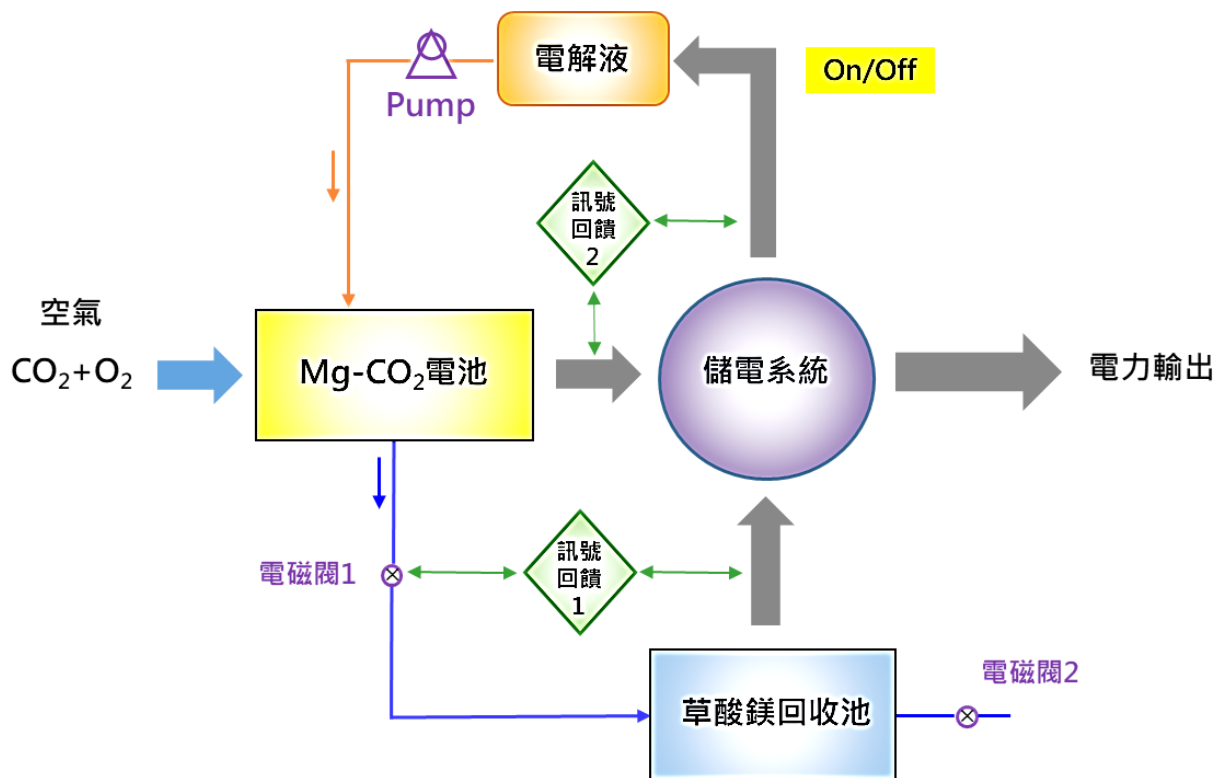
圖五、「Mg-CO₂ 燃料電池」蠕動幫浦液流裝置系統結構圖

2.操作說明

本作品之操作流程如圖六所示，針對各步驟進行詳細解說：

1. Step 1：開啟總電源
2. Step 2：第一顆繼電器開啟啟動蠕動泵浦
3. Step 3：固定流速輸送電解液進入電池電解槽

4. Step 4：到達設定目標體積後，輸送電解液蠕動泵浦關閉
5. Step 5：電池進行電化學反應放出電流，將電力自動升壓儲入鋰電池
6. Step 6：定時四小時後，開啟第二顆繼電器啟動蠕動泵浦，將電池內部反應後的電解液輸出
7. Step 7：待電解槽內電解液輸出完後，第一顆繼電器自動開啟，啟動蠕動泵輸送新鮮電解液進入電池電解槽
8. Step 8：反覆迴圈自動操作 Step6、7
9. Step 9：CO₂ 濃度感測器監測系統



圖六、「Mg-CO₂ 燃料電池」系統操作流程圖

二、作品說明

(一) 作品展示

1. 鎂-二氧化碳燃料電池

根據設計條件選用 PLA 聚乳酸塑膠材料製作電池外殼，首先利用 Autodesk Tinkercad 繪製 3D 系統模型(如圖七)，再依照所繪製之圖面進行 3D 列印，再依相關零組件及蠕動幫浦進行系統建置(如圖八)，外殼零組件安裝與架設，整體系統尺寸為寬 170mm、高 119mm 及深 43mm，成品圖如圖九所示。



圖七、「Mg-CO₂ 燃料電池」3D 系統模型圖



圖八、「Mg-CO₂ 燃料電池」細部零件圖



圖九、「Mg-CO₂ 燃料電池」成品外觀圖

2. 「負碳綠電」空氣清淨除濕機

氣候變遷勢必改變氣溫、降雨與空氣品質，而空氣中的溫、濕度與空氣品質正是影響健康的主要因素，所以保持室內環境良好的空氣品質對人們的健康至關重要。有鑑於此，我們將「Mg-CO₂ 燃料電池」所產生負碳綠電，用來開發作為空氣清淨除濕機的電源，實際驗證評估 Mg-CO₂ 燃料電池持久性與穩定度，以提升此技術未來商業化應用的可能性，讓室內空氣除濕淨化一次搞定。「負碳綠電」的空氣清淨除濕機成品外觀圖如圖十所示，其中各部功能說明如下：

1. 電源開關
2. 空氣中二氧化碳濃度螢幕顯示
3. 空氣溫度，濕度 LCD 高亮度螢幕顯示
4. 「Mg-CO₂ 燃料電池」輸出電壓、電流螢幕顯示
5. 蠕動幫浦輸送/出電解液
6. 12 吋吸氣風扇吸風口(活性碳過濾棉淨化空氣)

7. 半導體致冷晶片與散熱鋁鰭片

8. Mg-CO₂ 燃料電池



圖十、「負碳綠電」的空氣清淨除濕機成品圖

(二) 作品材料說明

Mg-CO₂ 燃料電池可利用原料的選擇性非常重要，不僅取決於 CO₂ 捕獲能力、產生電能量功率密度，還取決於電池的製備和運行成本，故選擇適當的多孔活性碳、催化劑和電解質材料至關重要。依此分別敘述如下：

1.自行製備的天然楓香果多孔活性碳

CO₂ 吸附劑商業活性碳容易粉塵飛揚導致環境與健康問題，現有良技術是通過活性碳粉末與粘合劑混合塑模產生活性碳單塊，但此技術方法是不利的，因為額外的加工步驟會降低活性碳總體活性，同時阻塞活性碳的孔隙率。而活性泡沫碳是具有多孔碳結構，其獨特的 3D 多孔結構和優異的性能，如低密度、高電導率、高吸附和大表面積等，使其可為 CO₂ 吸/脫附系統材料提供技術支持。

台灣楓香樹(學名 *Liquidambar formosana*) 是喜歡陽光的樹種，在台灣公園綠地、街道和學校都有普遍栽種，其球形的蒴果在秋冬季節時自然掉落，因此容易取得適合作為多孔活性碳的天然生物基碳材(如圖十一)。以水熱法製備的天然楓香果活性碳，在摻雜奈米金屬銅作為氣體擴散電極的催化劑後，不僅可有效提高燃料電池放電容量密度，也大幅增加二氧化碳的吸附能力，使得此電池在低濃度的大氣環境下即能捕捉二氧化碳發電。經過我們的努力，目前以天然楓香果製備多孔活性碳捕捉二氧化碳的能力，已達美國能源部規定商業化 CO₂ 吸附量值 (88mg/g 吸附劑)的二倍(如圖十二)。

(a) 台灣楓香樹



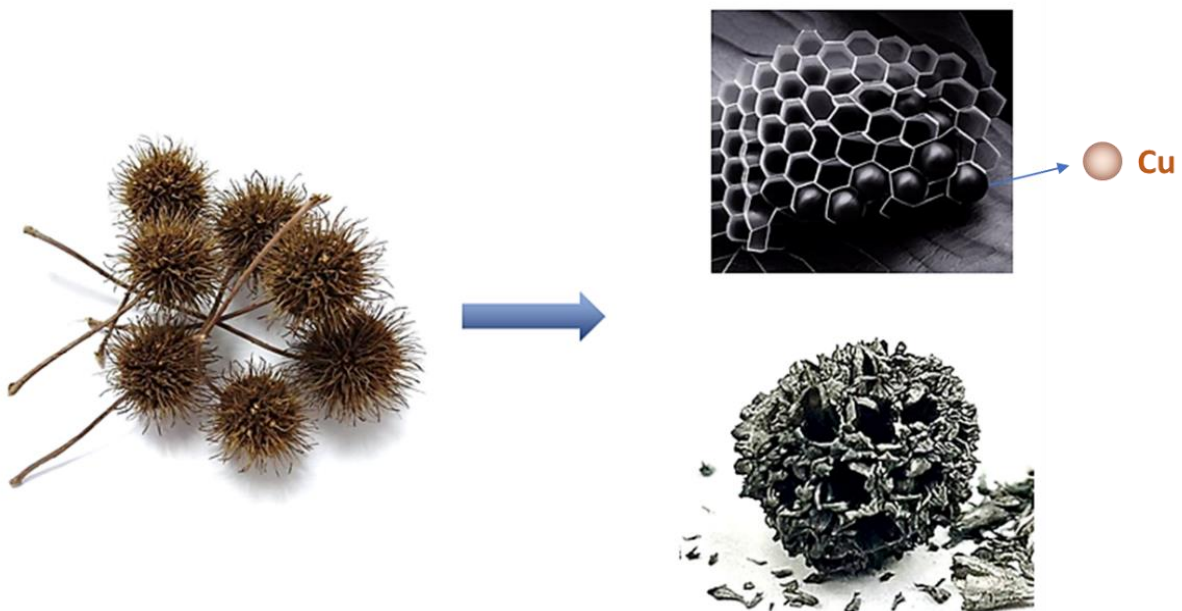
(b) 自然掉落的楓香果



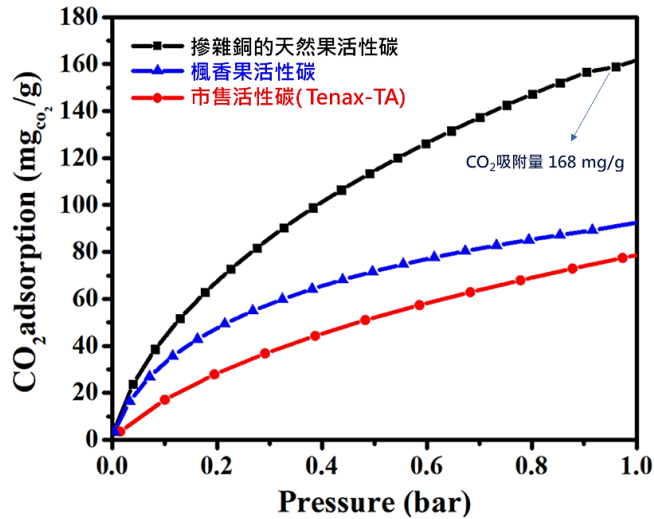
(c) 球形的蒴果



(d) 水熱法摻雜奈米銅顆粒製備的天然楓香果活性碳



圖十一、以台灣楓香樹蒴果作為多孔活性碳的天然生物基碳材



圖十二、比較不同活性碳吸附 CO₂ 效率之表面孔隙分析(BET)圖

2.複合式多孔碳氣體擴散電極

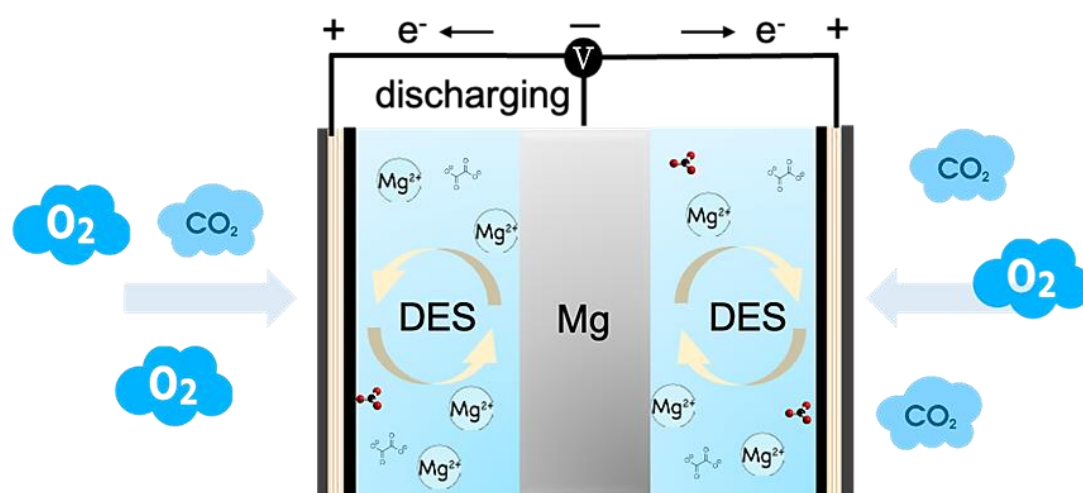
碳氣凝膠 (Carbon Aerogel) 一直顯示出多功能應用的巨大潛力，三維(3D) 碳基氣凝膠由於其高孔隙率、高比表面積、低密度、高導電性和化學惰性而得到廣泛研究[8]。本研究團隊結合以上優點，將上述開發的天然楓香果活性碳研磨成細粉，與聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 水溶液混合成為碳凝膠後，再將其塗佈於高導電性銅網，製備出高效率的多孔性氣體擴散電極(成品圖如圖十三)。這是一種新興的材料開發，除了可提高 CO₂ 的吸附性，也更進一步催化提升電化學反應，加大電池的放電電流與功率。



圖十三、多孔性氣體擴散電極成品圖

3.以氯化膽鹼深共熔溶劑作為電解質增加放電能量密度

本研究作品「Mg-CO₂ 燃料電池」在電解質是將甘油與氯化膽鹼(Choline chloride)以 10 : 1 莫耳比混合，作為不具毒性、環境友善與低成本的深共熔溶劑(Deep-Eutectic Solvent, DES) [9]，來取代價格昂貴的非水系電解質-離子液體(Ion Liquid)，電池內部結構圖如圖十四。由於 DES 催化反應不及水溶性電解液，經過我們的測試與研究後，發現於只要在氯化膽鹼 DES 中加入雙(三氟甲磺酰亞胺)鎂(MgTFSI₂)鹽類能就大幅提升 CO₂ 還原反應的性能，TFSI 陰離子通過與鎂的沉積物反應，在整個沉積反應中發揮關鍵作用，使得金屬鎂片在與電解質接觸後表面不會產生鈍化[10]。

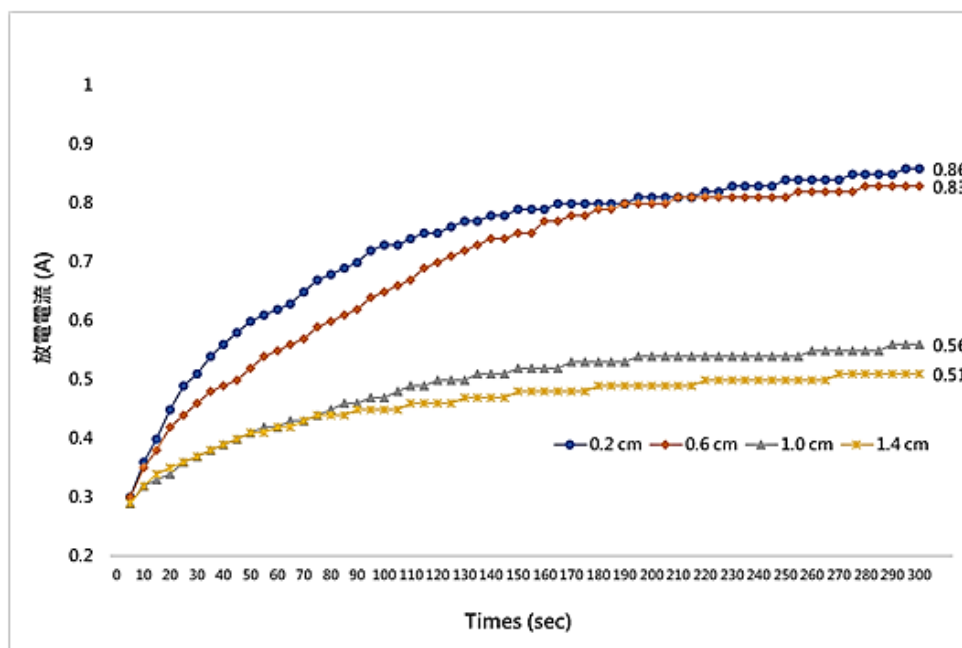


圖十四、Mg-CO₂ 燃料電池內部電解質結構圖

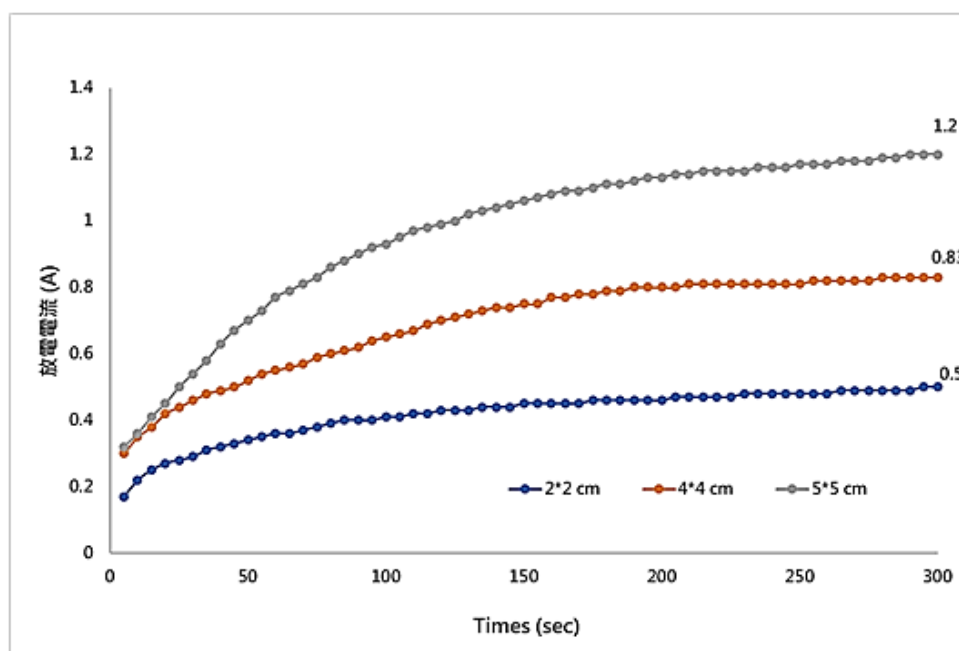
(三) 作品實驗數據

本作品「Mg-CO₂ 燃料電池」單顆電池組裝完成後，首先針對金屬鎂片與多孔碳電極的相對距離作放電短路電流測試，實驗結果發現隨著距離增加，放電電流會隨之減低(如圖十五)，但距離相距 0.2 公分與 0.6 公分時，最大短路電流相差不多(0.03 安培)。為了考量電解液在電解槽中的流動性，因此將電池中的陽極與陰極距離設定為 0.6 公分。接著進行探討多孔碳氣體擴散電極的面積與放電電流關係，實驗結果證實如同預期的當氣體擴散電極面積增加時，放電

電流亦隨之加大，但增加的曲線卻不是線性上升(如圖十六)。此現象推測應該是多孔碳氣體擴散電極的內電阻所造成，也就是電池內部存在對電流的阻礙作用。因此我們在製作多孔碳氣體擴散電極時將其面積設定為 5*5 公分，當需要更大電力輸出時，則採用電池串聯的方式來提高電壓，以減少電能損耗。

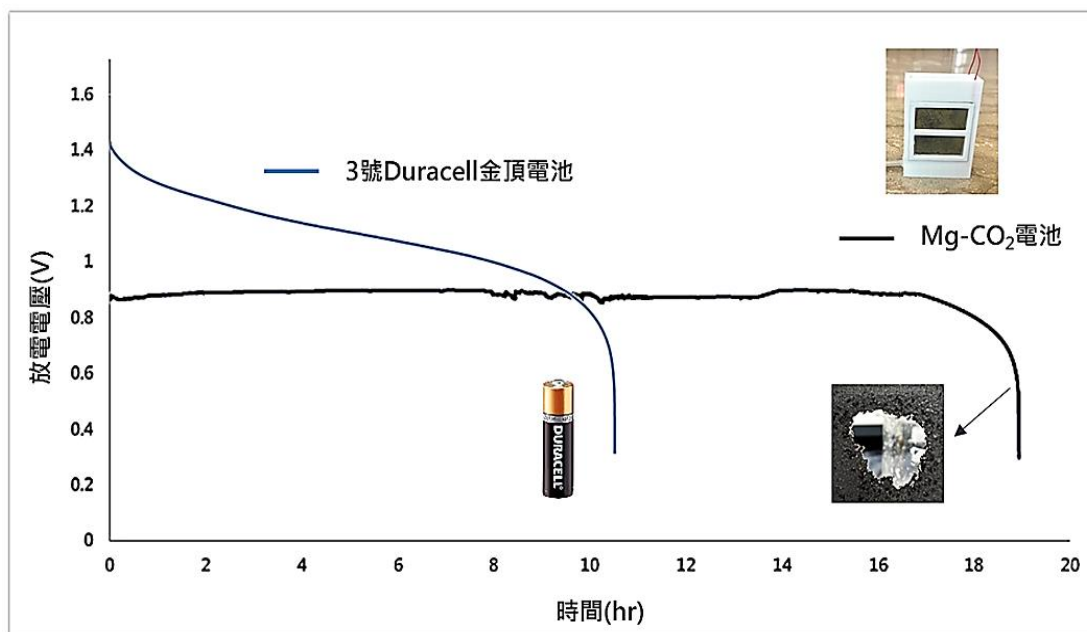


圖十五、Mg-CO₂ 燃料電池鎂片與多孔碳電極距離之放電電流測試圖



圖十六、Mg-CO₂ 燃料電池不同多孔碳電極面積之放電電流測試圖

接著進行電池 200 mW 之定功率電容量放電測試，我們使用市售的 3 號 Duracell 金頂電池作為對照組，實驗結果如圖十七所示，金頂電池雖然一開始有較高的放電電壓(1.42 V)，但隨著時間增加，放電電壓不斷下降，最後在 10 小時候電量耗盡，其電池的電容量為 $200 \text{ mW} \times 10 \text{ hr} = 2000 \text{ mWh}$ ，與電池外殼標示 2200 mWh 相差不多。而 Mg-CO₂ 燃料電池一開始由於電池極化影響較為嚴重，放電電壓僅有 0.9 V，但電壓值卻很穩定，經過 18 小時候電壓才迅速降低，檢查金屬鎂片，發現鎂片已被反應侵蝕穿透，經計算電池的電容量為 $200 \text{ mW} \times 18 \text{ hr} = 3600 \text{ mWh}$ ，約為 3 號金頂電池電容量的 1.8 倍，而且此時只要更換金屬鎂片燃料後，就能立即回復電力。



圖十七、Mg-CO₂ 燃料電池與金頂電池於 200 mW 定功率放電之電容量測試

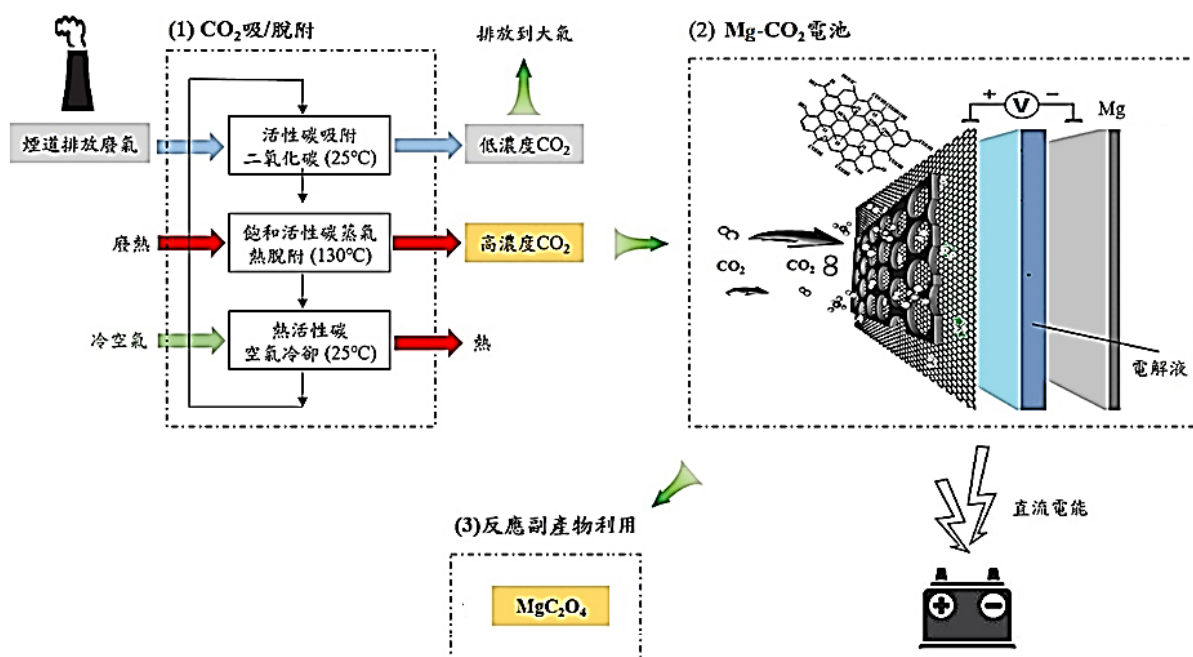
三、創作特點與創意說明

溫室氣體大量排放造成了全球暖化，氣候劇烈變遷的影響已是本世紀最被重視的問題，因此減碳和能源議題成為了全民共識。碳捕集與封存（簡稱 CCS）是指收集與封存二氧化碳的技術，目的在積極減少大氣層中 CO_2 的濃度。而電化學二氧化碳轉化技術已是目前解決此問題的新寵，不但創造了新的經濟驅動力，同時也為人類提供更清潔與可持續性的替代能源。本研究團隊基於此理念，著手開發一種能於空氣中捕捉二氧化碳的“可呼吸燃料電池”，即使目標氣體僅佔大氣中極少的比例，依然有用。此創新的「金屬-二氧化碳燃料電池」在呼吸空氣的過程中，會將 CO_2 吸附並同時轉化為電能和可再生利用的化學品，不僅能達到捕捉 CO_2 的目的，還能將其封存與再利用，減少對傳統化石燃料的依賴，朝向更經濟與更環保的方向發展，是一種低成本、高效率的最佳 CCS 技術方案。

「鎂-二氧化碳燃料電池」在放電運作過程中，陽極鎂金屬氧化放出電子，此電子通過電路到達陰極多孔碳電極時，則會與氧氣、水和二氧化碳形成草酸根離子，碳本身不參與反應只是提供反應的活性位置，因此不會損失。草酸根離子最後會穿越中間電解質與金屬鎂離子結合形成草酸鎂。整體反應就形同是將 CO_2 捕獲並轉化為電能的清潔儲能裝置。「鎂-二氧化碳電池」在原料的選擇性非常重要，不僅取決於 CO_2 捕獲能力、產生電能量功率密度，還取決於電池的製備和運行成本。目前製備電池的陰極氣體擴散電極，往往需要添加鉑、鈱等貴金屬催化劑來提高電池性能，但這些催化劑的價格通常很高，是導致「金屬-二氧化碳電池」難以與其他類型電池競爭的主要原因。所以本研究團隊針對此瓶頸提出了最創新技術研發，我們選用了台灣的原生樹種「楓香樹」的果實作為天然生物基碳材，因為楓香樹是喜歡陽光的樹種，在台灣公園綠地、街道和學校都有普遍栽種，其球形的蒴果在秋冬季節時自然掉落，因此容易取得。以水熱法製備的天然楓香果活性碳摻雜奈米金屬銅作為氣體擴散電極，不僅可有效提高燃料電池放電容量密度，也大幅增加二氧化碳的吸附能力，使得此電池在低濃度的大氣環境下即能捕捉二氧化碳發電。經過我們大量時間的研究投入，目前楓香果活性碳氣體擴散

電極已能在實驗室以標準化方法製造出來，生產技術相當具有成本效益，估計是商業化多孔碳氣體電極成本的 1/10，而電池捕捉二氧化碳的能力也遠過美國能源部規定的商業標準值，未來邁向全面商用化的商機大。

人類對化石燃料的依賴越深，排放到大氣中的二氧化碳也就越多，此種溫室氣體造成全球暖化與氣候劇烈變遷已是個迫在眉睫的問題，多項研究指出，若單只是想消極減少二氧化碳排放量是不夠的，需要更積極捕集大氣中既有的 CO_2 ，才能有效地減緩地球溫度的上升。而本研究團隊所開發的「鎂-二氧化碳電池」具有捕捉 CO_2 、發電和儲能到一個集成系統的潛力，我們期望未來能結合到大型工廠的煙道，將排放的廢氣大幅減少 CO_2 濃度(如圖十八)。在「淨化」廢氣的過程中， CO_2 將被濃縮、聚集，載流放電時再轉換成草酸鹽予以封存，讓「鎂-二氧化碳電池」扮演成一個清淨機的角色，發揮出發電、儲能的最佳效益，朝向更加經濟、環保與可持續性方向發展。



圖十八、「Mg-CO₂ 燃料電池」減少工廠煙道廢氣 CO₂ 濃度並產生電能

「Mg-CO₂ 燃料電池」由於多方面的應用發展優勢，使其成為目前最受矚目的明星能源，本研究創作特點如下：

1. 能於大氣中自動捕捉二氧化碳發電，是一種低成本、高效率 CCS 技術方案
2. 常溫常壓下即可操作，不需外在的壓力平衡設計
3. 電池重量輕、電池電容量大，Mg-CO₂ 燃料電池有別於原電池，優點在於透過穩定供應鎂燃料和 CO₂、O₂ 來源，即可持續不間斷的提供穩定電力
4. 具有良好的環保性，其產生電能後，主要產物為草酸鎂，而這草酸鎂經處理後可開發作為氯氧鎂水泥(Magnesium Oxychloride Cement)再使用，符合綠色環保循環經濟理念

四、作品應用範圍及發展潛能

石化燃料的燃燒是 CO₂ 排放的主要來源，此外二氧化碳亦是人體呼吸作用所產生的氣體，當人群聚集、空氣不流通時，就會導致室內二氧化碳濃度過高，例如車站、百貨公司、賣場、門窗緊閉的教室、或是人擠人的遊樂中心。因此在上述空氣中 CO₂ 濃度高的場域中，皆適合以「Mg-CO₂ 燃料電池」來運轉發電，並可達到降低二氧化碳濃度一舉兩得的目的。

「Mg-CO₂ 燃料電池」是一種新型的高能量密度電池，它的陽極使用金屬鎂，陰極使用碳材料，空氣中的氧氣和二氧化碳在此反應生成草酸鹽和電能。這種電池有較高的能量密度，並且具有低成本、高效率和低環境影響等優點，因此更廣泛的應用範圍概述如下：

1. 純電動車和混合動力車：「Mg-CO₂ 燃料電池」具有高能量密度和輕量化的優點，可作為新型的車用電池。
2. 儲能系統：「Mg-CO₂ 燃料電池」可以與太陽能電池板和風力發電機等可再生能源系統結合，形成儲能系統，提供可再生能源的穩定供應。
3. 移動電源：「Mg-CO₂ 燃料電池」具有低成本、高能量密度和長壽命等優點，可以作為移動電源使用，例如手機、平板電腦等。

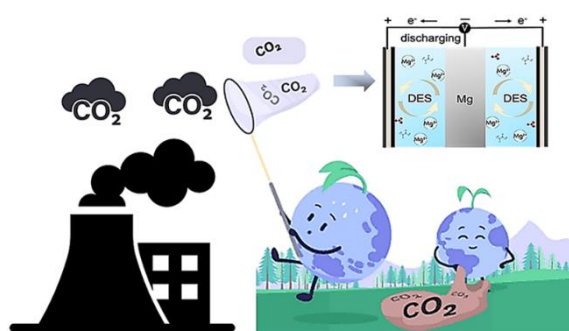
4. 航空航天：「Mg-CO₂ 燃料電池」的高能量密度和輕量化優點，使其成為航空航天領域中的應用熱點，例如無人機、載人太空船等。
5. 環境保護：「Mg-CO₂ 燃料電池」可以利用二氧化碳等廢氣進行電化學反應，減少對環境的污染，因此具有很大的應用潛力。

「Mg-CO₂ 燃料電池」具有廣泛的應用範圍和發展潛能，未來或許將會成為新型的高效能源技術之一。但仍有些技術及挑戰有待克服：

1. 提高能量密度：「Mg-CO₂ 燃料電池」能量密度已經相當高，但是未來還有進一步提升的空間，例如新型金屬材料和碳材料，以提高電池的能量密度。
2. 提高效率：目前「Mg-CO₂ 燃料電池」的效率還有待提高，未來的研究將會致力於提高電池的效率，減少能量損失。
3. 降低成本：「Mg-CO₂ 燃料電池」的成本雖然已經相對較低，但是在大規模應用中，仍需要進一步降低成本。目前全世界尚無金屬-二氧化碳燃料電池的商業化產品，但此燃料電池的熱潮卻已成為炙熱的焦點。我們相信「Mg-CO₂ 燃料電池」將隨著產品的演進及消費習慣的改變而進入各領域，未來將會成為能源技術發展的重要方向之一。

五、工作分配

組員姓名	工作事項
張博原	設計發想、系統測試、作品書撰寫、機構製圖
柯品	部件加工、海報製作、數據分析



六、參考資料

- [1] Egan, D. R. P.; Low, C. T. J.; Walsh, F. C. J. *Phys. Sources* 2011, 196, 5725.
- [2] Rosen, B. A.; Salehi-Khojin, A.; Thorson, M. R.; Zhu, W.; Whipple, D. T.; Paul, J. A. *Science* 2011, 334, 643.
- [3] Zhang, S.; Kang P, Ubnoske, S.; Brennaman, M. K.; Song, N.; House, R. L.; Glass, J. T.; Meyer, T. J. *J. Am. Chem. Soc.* 2014, 136, 7845.
- [4] Gao, S.; Lin, Y.; Jiao, X. C.; Sun, Y. F.; Luo, Q. Q.; Zhang, W. H.; Li, D. Q.; Yang, J. L.; Xie, Y. *Nature* 2016, 529, 68.
- [5] Zhang, Z.; Wang, X. G.; Zhang, X.; Xie, Z. J.; Chen, Y. N.; Ma, L. P.; Peng, Z. Q.; Zhou, Z. *Adv. Sci.* 2018, 5, 2198
- [6] Hu, X.; Sun, J.; Li, Z.; Zhao, Q.; Chen, C.; Chen, J. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, 55, 6482.
- [7] Das, S. K.; Xu, S.; Archer, L. A. *Electrochem. Commun.* 2013, 27, 59.
- [8] Lee, J. H.; Park, S. J. A review. *Carbon*. 2020, 163, 1.
- [9] Florindo, C., Oliveira, F. S., Rebelo, L. P. N., Fernandes, A. M., & Marrucho, I. M. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2, 2416.
- [10] Shterenberg, I., Salama, M., Yoo, H. D., Gofer, Y., Park, J. B., Sun, Y. K., & Aurbach, D. (2015). *Journal of The Electrochemical Society*, 162, A7118.