

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

高級中等學校組 環境學科

團隊合作獎

052612

電來又電去-微型霍夫曼電解在環境中的應用

學校名稱： 臺中市立中港高級中學

作者：	指導老師：
高二 王柏鈞	陳亭安
高二 蔡侑蓁	
高二 胡峻愷	

關鍵詞： 燃料電池、重金屬回收、太陽能發電

## 摘要

本研究設計一款低成本的微型霍夫曼電解水裝置及氫氧燃料電池，僅需約 20~30 毫升的電解液，除了完成各種電解變因的探究，也準確量測法拉第常數及亞佛加厥常數。

因應綠色永續，收集電解產生的潔淨能源氫氣，並研究增加電池放電效果，包括電極直徑、碳棒淬火次數、電極距離、電解質種類與濃度、添加活性碳粉等，充電 5 伏特，時間 5 分鐘後負載馬達轉動 20 分鐘達 4 倍使用時間。進一步利用太陽能作為電力來源，以此為單電池串聯 3 個電池可提供約 5.6 V 電壓，使紅光 LED 持續運作 15 分鐘以上。

利用電解法，可回收溶液中的重金屬銅離子，免去強鹼的使用，回收率的探究發現通入的電流強度愈高、溶液溫度愈低或添加螯合劑，會造成回收率下滑。

## 壹、研究動機

高二在進行自然科學探究與實作的課程時，老師向我們展示霍夫曼的電解水裝置。對於電解裝置好奇之餘，我們察覺市售的裝置不僅價格昂貴，玻璃材質易碎、不易攜帶且使用的化學藥品消耗量也大。此外，我們發現電解過程中，不同電解液陰陽極產生的氫氣與氧氣體積比並非都是 2 比 1，故我們興起了想改造電解器的念頭，並探究電解反應的過程。

為了解決上述問題，我們使用生活中常見的素材（如塑膠培養皿及針筒），設計一款造型上接近霍夫曼電量計的低成本電解水器，不僅容易組裝，也具備方便攜帶，減少化學藥品使用量等優勢，可提供進行電解變因探究的教材。

另外，因應綠色化學減量、減廢的風潮，本研究以綠色環保為出發點，利用電解水<sup>1</sup>得到氫氣及氧氣（電能轉成化學能）；再由氫氣與氧氣產生水（釋放電能），而形成無汙染之微型氫氧環保電池，並計畫結合太陽能發電，將太陽能轉化成潔淨氢能，對氫氧燃料電池之電壓、充電效果及持久性做更進一步之探討。同時本研究亦將電化學電解應用於水中重金屬離子的清除探究，最終規畫利用太陽能作為電力來源，將實驗後的重金屬廢液完全清除，落實重金屬充分回收與綠色永續發展與環境保護的目標。

## 貳、研究目的

- 一、改良霍夫曼電解水器，利用生活中常見的素材，重新設計一款可攜式的微型電解水裝置。
- 二、運用設計的微型電解水裝置，探究 2B 鉛筆芯、迴紋針、碳鋅電池石墨棒及鎳鈸合金四種不同材質的電極，在固定電壓下，陰陽極產物的體積比。
- 三、探究鎳鈸記憶合金電極在不同電解質、濃度、電壓、溶液溫度、電極距離等條件下，陰陽極產物的生成速率與體積比。
- 四、運用電解過程中陰陽極產物的變化，包含體積變化量及金屬還原增重變化量，測量法拉第常數並進一步驗證亞佛加厥常數。
- 五、回收各式廢棄碳鋅電池中的石墨電極，進行控制變因實驗，探討微型氫氧燃料電池在不同電極直徑大小、電極淬火次數、電極距離、電解質種類與濃度等各項變因中，如何影響燃料電池的充電和放電情形。
- 六、探討自製的活性碳粉碳棒作為電極，並改變碳粉量，如何影響氫氧燃料電池的充電和放電情形。
- 七、結合太陽能電池，將太陽能轉化成氢能，探討不同太陽能面板電壓、照射時間等最佳化能量轉換參數，並綜合最佳化的氫氧燃料電池充電和放電情形，進行電池串聯的效能研究。
- 八、回收各式廢棄碳鋅電池中的石墨電極，並運用電化學法回收水中的重金屬，探討銅離子回收率與不同電極直徑大小的關係。
- 九、探究不同電流強度、溶液溫度及螯合劑存在下與銅離子回收率的關係。
- 十、利用太陽能作為電力來源，回收此次科展研究所製造的銅離子廢液。

## 參、研究設備及器材

### 一、實驗器材：

直流電源供應器、數位三用電表、鱷魚夾線、電極（包括 2B 鉛筆芯、迴紋針、鎳鈸合金棒，由台灣銘智公司提供）、1~4 號廢棄碳鋅乾電池、熱熔膠與熱熔膠槍 1 組、塑膠培養皿、1 及 5 毫升塑膠針筒、塑膠三通閥、50 毫升燒杯、珍珠板、木柄鑽子、化妝棉、LED 燈（紅光：2.2 V、白光：3 V）、太陽能專用馬達（電壓 0.5 V，電流 12 mA）、太陽能用小風扇（8 cm，四葉式）、太陽能板（電壓 3 V、4 V、5.5 V）等。

### 二、實驗藥品：

硫酸鈉 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )、硝酸鈉 ( $\text{NaNO}_3$ )、氫氧化鈉 ( $\text{NaOH}$ )、硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )、硫酸鎂 ( $\text{MgSO}_4$ )、碳酸氫鈉 ( $\text{NaHCO}_3$ )、碳酸鈉 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )、氯化鈉 ( $\text{NaCl}$ )、硫酸銅 ( $\text{CuSO}_4$ )、乙二胺四乙酸四鈉 ( $\text{EDTA} - 4\text{Na}^+$ )、活性碳粉 (200 mesh)、陰離子凝集劑 (聚丙烯酸鈉，簡稱 ASAP)。有關 EDTA 與 ASAP 的結構式如下圖所示：

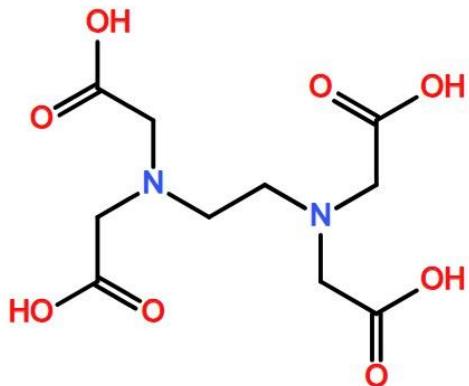


圖 1：EDTA 的結構圖（第一作者自行繪製）

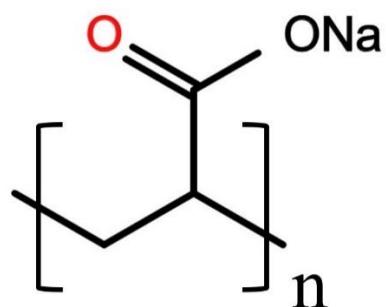


圖 2：ASAP 的結構圖（第一作者自行繪製）

## 肆、研究過程或方法

### 一、微型霍夫曼電解裝置的組裝

利用木柄鑽子在塑膠培養皿底座鑽 2 個孔 → 以熱熔膠固定電極 → 以熱熔膠固定珍珠板於電極兩側 → 將塑膠針筒以熔膠固定於珍珠板上 → 將珍珠板以熔膠固定於培養皿底座 → 裝上三通閥（控制閥一個朝前，一個朝後） → 完成組裝（如圖 3 所示）

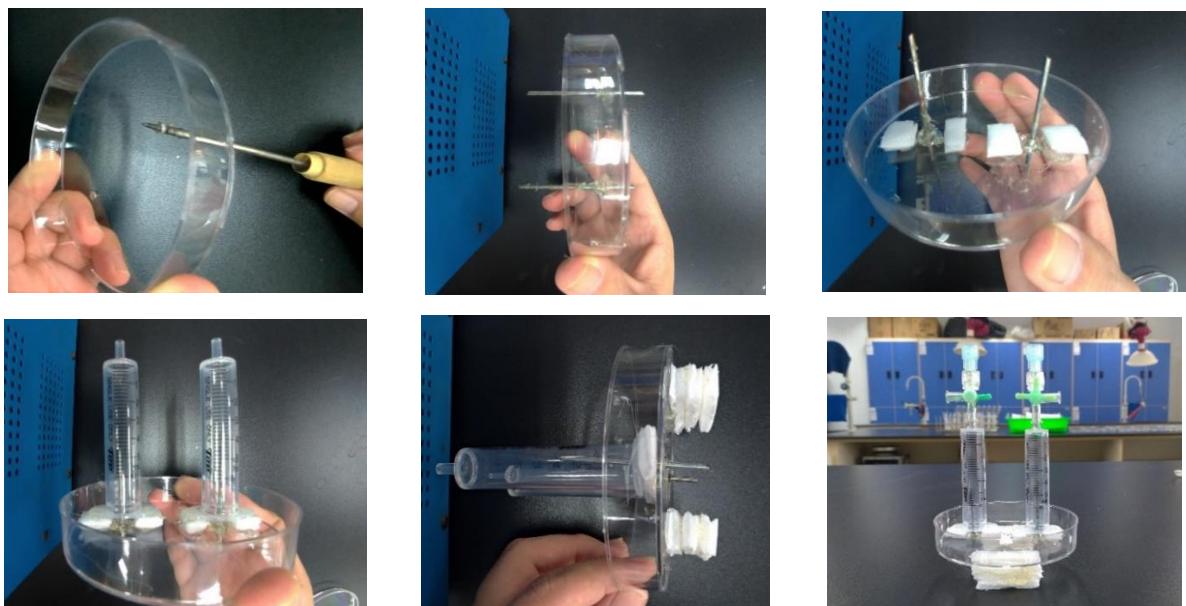


圖 3：微型電解裝置組裝流程圖（第一作者自行拍攝）

### 二、微型電解裝置的電解測試與產物檢驗

#### (一) 電解 0.5 M 的硫酸鈉水溶液，陰陽極反應的觀察及產物的檢驗

實驗結果：陰極產生氫氣，點燃具爆鳴聲、陽極產生氧氣，可使線香燃燒更加旺盛。

其反應式為： $2\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 2\text{H}_2\text{(g)} + \text{O}_2\text{(g)}$

#### (二) 電解 0.5 M 的硫酸銅水溶液，陰陽極反應的觀察及產物的檢驗

實驗結果：陰極產生紅棕色的金屬銅及硫酸、陽極產生氧氣。

其反應式為： $2\text{CuSO}_4\text{(aq)} + 2\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 2\text{Cu(s)} + \text{O}_2\text{(g)} + 2\text{H}_2\text{SO}_4\text{(aq)}$

### 三、電解水陰陽極產物氫氣與氧氣的體積比真的是 2 比 1 嗎？使用生活中常見的電極，比較各種不同電極和電解質溶液的組合下對氫、氧生成體積比的差異。

#### (一) 以 2B 鉛筆芯作為電極，在固定電壓 10 V 下，電解 0.5 M $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{(aq)}$ 、 $\text{NaOH}\text{(aq)}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{(aq)}$ 三種不同酸鹼性的電解液，探討陰陽極產物的體積比。

- (二) 承上，將電極改為迴紋針、碳鋅電池石墨棒及鎳鈸合金其他三種不同材質的電極，在固定電壓 10 V 下，電解三種不同酸鹼性的電解液，探討陰陽極產物的體積比。
- (三) 電極固定為鎳鈸合金，在定電壓 10 V 下，電解 0.5 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ 、 $\text{NaNO}_3(\text{aq})$ 、 $\text{NaOH}(\text{aq})$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ 、 $\text{MgSO}_4(\text{aq})$ 五種不同酸鹼性的電解液，比較陰陽極氣體生成速率與氫、氧體積比的差異。

四、影響電解的因素有哪些？使用鎳鈸記憶合金作為電極，比較各種不同變因組合下氣體生成速率與氫、氧體積比。

- (一) 濃度對電解的影響：

電解 0.2 M、0.4 M、0.5 M、0.6 M、0.8 M、1.0 M 不同濃度的  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，以 10 V 定電壓電解，比較陰陽極產物的生成速率與氫、氧體積比。

- (二) 電壓對電解的影響：

電解 0.5 M 的  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，在 5 V、10 V、15 V、20 V、25 V、30 V 不同電壓下，比較陰陽極產物的生成速率與氫、氧體積比。

- (三) 溶液溫度對電解的影響：

以 10 V 定電壓電解 0.5 M 的  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，在 15.5°C、25.5°C、35.5°C、45.5°C、55.5°C、65.5°C 不同溶液溫度下，比較陰陽極產物的生成速率與氫、氧體積比。

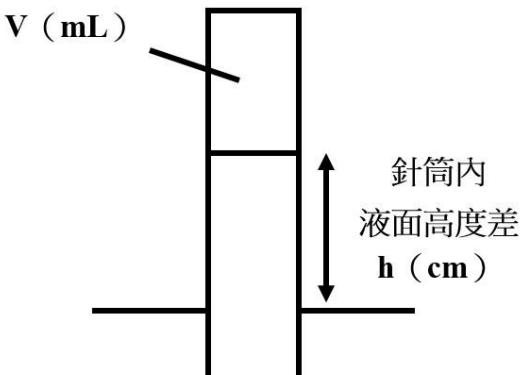
- (四) 電極距離對電解的影響：

電解 0.5 M 的  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，在 2 cm、3 cm、5 cm、6 cm、7 cm 不同距離下，比較陰陽極產物的生成速率與氫、氧體積比。

五、可以利用微型電解裝置驗證法拉第常數及亞佛加厥常數嗎？使用鎳鈸記憶合金作為電極，在定電流下，收集陰陽極氣體體積或銅離子還原增重變化量，推算法拉第電解常數並進一步驗證亞佛加厥常數。

- (一) 紀錄實驗當時的大氣壓力  $P$  (hpa)，室溫  $T$  (K)，並參考該溫度之水蒸氣飽和蒸氣壓  $P^o$  (mm - Hg)、針筒氣體體積  $V$  (mL)、針筒內液面高度差  $h$  (cm)，以定電流 0.24 安培，電解 0.5 M 的硫酸水溶液，收集陰極的氣體  $\text{H}_2$ ，針筒體積為 2 mL，則法拉第常數算法如下式所示：

針筒氣體體積



$$\text{則通入的電子莫耳數} = \frac{\text{I} \times \text{t}}{\text{F}} = 2 \times \frac{\left[ \frac{\text{P}}{1013} - \frac{\text{h}}{1033.6} - \frac{\text{P}^0}{760} \right] \times \text{V}}{\text{R} \times \text{T}},$$

$$\text{F} = \frac{\text{I} \times \text{t} \times \text{R} \times \text{T}}{2 \times \left[ \frac{\text{P}}{1013} - \frac{\text{h}}{1033.6} - \frac{\text{P}^0}{760} \right] \times \text{V}} \quad \dots \dots \text{式1}$$

(二) 在定壓、定電流強度 0.1 安培下，電解 0.5 M 的硫酸水溶液，電解時間為 15、20、25、30、35、40、50 秒，探討在不同通電時間  $t$  與氣體體積變化量  $\Delta V$  的關係，並藉此推算出法拉第常數，下圖為實驗過程圖。

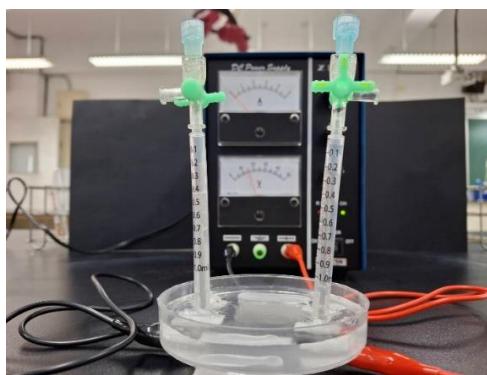


圖 4：微型電解裝置電解過程（第二作者自行拍攝）

(三) 在定壓、定電流強度 0.1 安培下，電解 0.5 M 的硫酸銅水溶液，測量在鎳鈦合金上銅離子還原增重變化量  $\Delta W$  (g) 與通電時間  $t$  的關係。電解時間分別為 30、60、120、150、180、210 秒，則法拉第常數算法如下式 2 所示：



$$\text{則通入的電子莫耳數} = \frac{\text{I} \times \text{t}}{\text{F}} = 2 \times \frac{\Delta \text{W}}{63.55},$$

$$F = \frac{I \times t \times 63.55}{2 \times \Delta W} \dots\dots \text{式 2}$$

(四) 由式 1、2 可知，提供 2 莫耳電子，可得到 1 莫耳的氫氣及銅金屬。因此，亞佛加厥常數 (Avogadro's number,  $N_A$ )，可由電解所提供的電子數 (Z) 及生成氫氣或銅金屬之莫耳數 (n) 求得：

$$N_A = \frac{Z}{2 \times n} = \frac{I \times t}{2 \times n \times 1.6 \times 10^{-19}} \dots\dots \text{式 3}$$

六、可以利用電解產生的氫氣及氧氣進行發電嗎？以廢棄的碳鋅電池中的石墨碳棒作為電極，探討自製的微型氫氧燃料電池在電極粗細、碳棒淬火次數、電極距離、電解質種類、電解質濃度、添加活性碳粉等不同條件下，如何影響氫氧電池的充電和放電情形，並進一步結合太陽能電池，探討不同太陽能面板電壓、照射時間等最佳化能量轉換參數<sup>2</sup>。

#### (一) 微型氫氧燃料電池的製作

1. 取一個 28 mL 的紅蓋藥罐，在瓶蓋上鑿出 2 個電極孔洞。
2. 將石墨碳棒包覆兩層化妝棉後並使用橡皮筋固定，再將碳棒固定於瓶蓋孔洞中。
3. 實驗前，先倒入電解質溶液，再蓋上瓶蓋（勿鎖緊，以利電解時壓力平衡）。
4. 接上直流電源供應器後充電，再進行放電實驗，下圖為實驗過程圖。

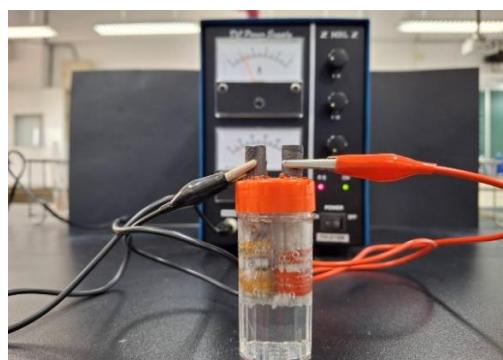


圖 5：微型氫氧燃料電池電解過程（第三作者自行拍攝）

#### (二) 電極粗細對燃料電池放電的影響：

利用廢棄的一、二、三、四號碳鋅乾電池，拆解後得 8 mm、6 mm、4 mm、3 mm 不同電極粗細的石墨棒，另外準備 2 mm 的 2B 鉛筆芯，探討燃料電池放電情形與電極直徑的關係。實驗條件：以定電壓 5 伏特電解 0.5 M NaHCO<sub>3</sub>(aq)，充電時間為 5 min。下圖為拆解完成的乾電池碳棒及 2B 鉛筆芯。

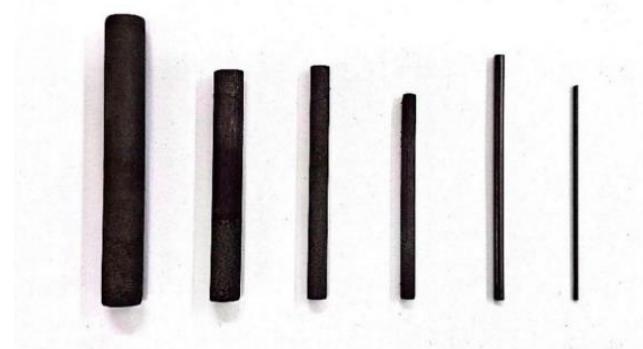


圖 6：由左而右分別是一、二、三、四號電池的碳棒及 2 mm、1 mm 的 2B 鉛筆芯  
(第三作者自行拍攝)

(三) 碳棒淬火次數對燃料電池放電的影響：

改變碳棒淬火次數，分別為未淬火、淬火 5、10、15、20 及 25 次。實驗條件：  
 $\Phi = 8\text{ mm}$  石墨，以定電壓 5 伏特電解  $0.5\text{ M NaHCO}_3(\text{aq})$ ，充電時間為 5 min，負載  
馬達及風扇進行放電比較。

(四) 電極距離對燃料電池放電的影響：

$\Phi = 8\text{ mm}$  石墨，以定電壓 5 伏特電解  $0.5\text{ M NaHCO}_3(\text{aq})$ ，充電時間為 5 min，  
在  $1.5\text{ cm}$ 、 $3\text{ cm}$ 、 $6\text{ cm}$ 、 $10\text{ cm}$ 、 $12\text{ cm}$  不同距離下，負載馬達及風扇進行放電比較。

(五) 電解質種類對燃料電池放電的影響：

$\Phi = 8\text{ mm}$  石墨，充電時間為 5 min，以定電壓 5 伏特電解  $0.5\text{ M}$  不同的電解質，  
改變種類為  $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaOH}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaCl}$  六種水溶液，負載  
馬達及風扇進行充電與放電實驗。

(六) 電解質濃度對燃料電池放電的影響：

$\Phi = 8\text{ mm}$  石墨，充電時間為 5 min，以定電壓 5 伏特電解不同濃度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，  
改變濃度為  $0.1\text{ M}$ 、 $0.25\text{ M}$ 、 $0.5\text{ M}$ 、 $0.75\text{ M}$ 、 $1.0\text{ M}$ ，負載馬達及風扇進行充電與放  
電實驗。

(七) 添加活性碳粉對燃料電池放電的影響：

1. 自製活性碳粉碳棒（正極和負極）： $12\text{ mL }1\text{ M NaOH}$ 、 $0.8\text{ g}$  陰離子凝集劑和不  
同克數的活性碳粉以比例均勻混合後形成碳粉膠體，將此碳粉膠體包覆於  $\Phi =$   
 $8\text{ mm}$  的碳棒外，並用化妝棉將其滾成棒狀，作為電極，如下圖所示。

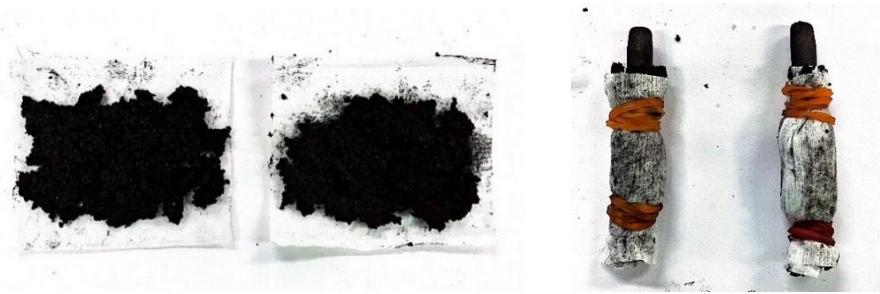


圖 7：圖左為活性碳粉膠體，圖右為滾成棒狀的正負極電極  
(第三作者自行拍攝)

- 充電時間為 5 min，以定電壓 5 伏特電解 0.75 M 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，改變活性碳粉克數為不添加、1.0 g、1.5 g、2.5 g、4.0 g，負載馬達及風扇進行充電與放電實驗。

(八) 太陽能面板電壓對燃料電池放電的影響：

$\Phi = 8 \text{ mm}$  石墨，充電時間為 5 min，以不同面板電壓電解 0.75 M 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，改變電壓為 3 V、4 V、5.5 V，負載馬達及風扇進行充電與放電實驗，如下圖所示。



圖 8：利用太陽能面板將太陽能轉化成氫能（第一作者自行拍攝）

(九) 太陽能面板照射時間對燃料電池放電的影響：

$\Phi = 8 \text{ mm}$  石墨，以太陽能面板電壓 3 伏特電解 0.75 M 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，改變面板照射時間為 1 分鐘、3 分鐘、5 分鐘、9 分鐘、11 分鐘，負載馬達及風扇進行充電與放電實驗。

(十) 太陽能氫氧燃料電池組串聯效能測試：

- 雙電池串聯：

將 2 組微型燃料電池串聯後，連接數位三用電表並接上紅色、白色 LED 燈，測量電壓及電流變化，以及燈泡發光情形。

## 2. 三電池串聯：

將 3 組微型燃料電池串聯後，連接數位三用電表並接上紅色、白色 LED 燈，測量電壓及電流變化，以及燈泡發光情形。

七、可以利用電化學電解法回收水中的重金屬嗎？以廢棄的碳鋅電池中的石墨碳棒作為電極，探究電極粗細、電流強度、溶液溫度以及螯合劑的存在等不同條件下，銅離子清除率的差異。回收銅離子時，因析出的銅金屬部分從電極剝落，故除了測量電極銅金屬增加的重量外，需額外利用抽氣過濾並以酒精清洗收集剝落的銅金屬，再放入烘箱乾燥，放涼後以電子秤紀錄剝落的銅金屬重量，加總後換算析出的銅離子量。

### (一) 電極粗細對銅離子回收率的影響：

利用廢棄的碳鋅乾電池，拆解後得 8 mm、6 mm、4 mm、3 mm 不同電極粗細的石墨棒，另準備 1 mm 的 2B 鉛筆芯，探討銅離子回收率與電極直徑的關係。實驗條件：以定電流 0.4 安培電解 0.5 M CuSO<sub>4</sub>(aq)，時間為 20 min。

### (二) 電流強度對銅離子回收率的影響：

480 庫侖定電量，0.2 A、0.4 A、0.5 A、0.8 及 1.0 A 不同安培下，探討銅離子回收率與電流強度的關係。實驗條件： $\Phi = 8$  mm 石墨，電解 0.5 M CuSO<sub>4</sub>(aq)

### (三) 溶液溫度對銅離子回收率的影響：

$\Phi = 8$  mm 石墨，以定電流 0.4 安培電解 0.5 M 的 CuSO<sub>4</sub>(aq)，時間為 20 min。在 11°C、17°C、25°C、32°C、43°C 不同溶液溫度下，探討銅離子回收率與溶液溫度的關係。

### (四) 融合劑濃度對銅離子回收率的影響：

添加 0 M、0.02 M、0.04 M、0.1 M、0.3 M 不同濃度的 EDTA-4Na<sup>+</sup>，探討銅離子回收率與融合劑濃度的關係。實驗條件： $\Phi = 8$  mm 石墨，以定電流 0.4 安培電解 0.5 M 的 CuSO<sub>4</sub>(aq)，時間為 20 min。

### (五) 結合太陽能面板電解回收本次實驗產生的所有重金屬銅離子：

使用鎳鈦合金作為陽極，銅片為陰極，利用太陽能作為電力來源，回收此次研究所製造的銅離子廢液。

## 伍、研究結果

一、電解水陰陽極產物氫氣與氧氣的體積比真的是 2 比 1 嗎？

(一) 使用生活常見的四種不同材質作為電極，在固定電壓下，電解  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ 、 $\text{NaOH}(\text{aq})$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$  三種不同酸鹼性的電解液，產物的氫氧體積比，相關結果如下表所示：

表 1：電極在不同酸鹼性溶液中的氫氧體積比（第二作者自行繪製）

電極種類	氫/氧體積比 ( $\text{V}_{\text{H}_2}/\text{V}_{\text{O}_2}$ )		
	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{NaOH}$	$\text{H}_2\text{SO}_4$
2B 鉛筆芯	3.33	4.17	3.07
迴紋針	2.01	2.25	2.43
碳鋅電池石墨棒	3.33	1.91	6.13
鎳鈸合金	2.11	1.82	2.02

【結果顯示】：2B 鉛筆芯與碳鋅電池石墨棒作為電極，在不同酸鹼性的電解液中，氫氧體積比與理論值 2.00 皆偏差較大，其中體積比以碳鋅電池石墨棒在硫酸水溶液中的 6.13 最大。迴紋針與鎳鈸合金作為電極，氫氧體積比與理論值皆偏差較小，其中又以鎳鈸合金在不同酸鹼性的電解液中，體積比更接近理論值 2.00。

(二) 以鎳鈸合金作為電極，在定電壓下，電解五種不同酸鹼性的電解液，產物氫氧的生成速率與氫氧體積比，相關結果如下表所示：

表 2：鎳鈸合金在不同電解質中的氣體生成速率與氫氧體積比（第二作者自行繪製）

電解質種類	時間 (sec)	生成速率 (mL/sec)	氫/氧體積比 ( $\text{V}_{\text{H}_2}/\text{V}_{\text{O}_2}$ )
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	388.1	0.00515	2.11
$\text{NaNO}_3$	325.0	0.00615	1.74
$\text{NaOH}$	265.2	0.00754	1.82
$\text{H}_2\text{SO}_4$	106.4	0.01880	2.02
$\text{MgSO}_4$	425.6	0.00470	1.86

【結果顯示】：在硫酸鎂溶液中，氫氣生成速率較慢；在硫酸鈉、硝酸鈉、氫氧化鈉、

硫酸中，氫氣生成速率較快，其中，又以硫酸的生成速率最快。氫氣體積比以硝酸鈉 1.74 與理論值偏差最大，硫酸 2.02 最接近理論值 2.00。

二、影響電解變因的探究，使用鎳鈦合金電極作為探討影響電解的因素，變因包括電解質濃度、電壓、溶液溫度及電極距離的不同。

(一) 以定電壓 10 伏特，電解不同濃度的  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，其電解結果如下圖所示：

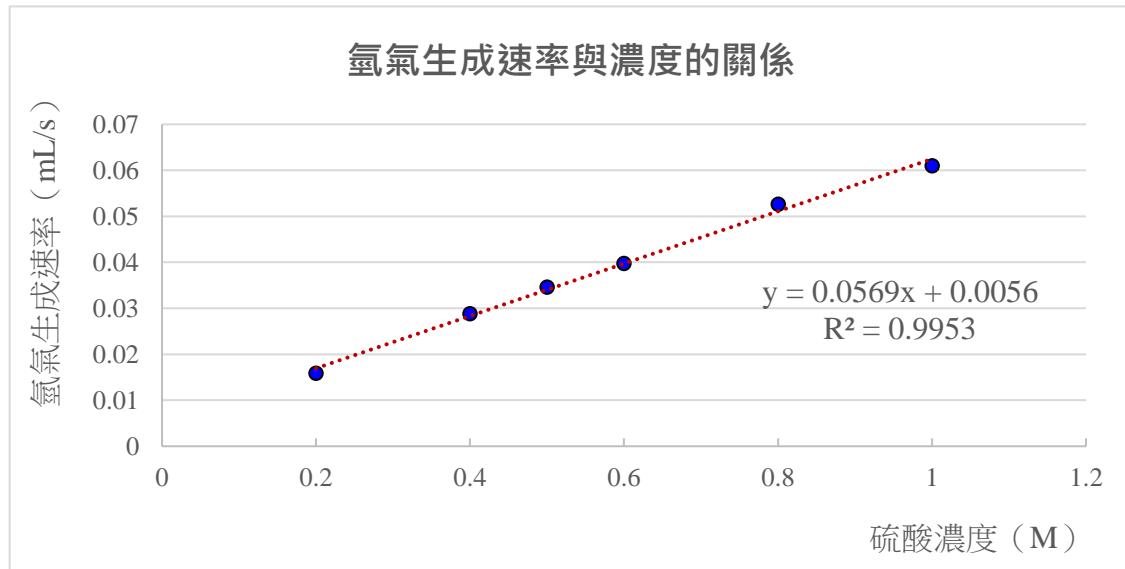


圖 9：氫氣生成速率 (mL/s) 與濃度 (M) 的關係圖（第二作者自行繪製）

【結果顯示】：一般而言，濃度 1.0 M，氫氣的生成速率為 0.0610 mL/s 最快，濃度 0.2 M，生成速率 0.0159 mL/s 最慢。

(二) 電解 0.5 M 的  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，在不同電壓下的電解結果如下圖所示：

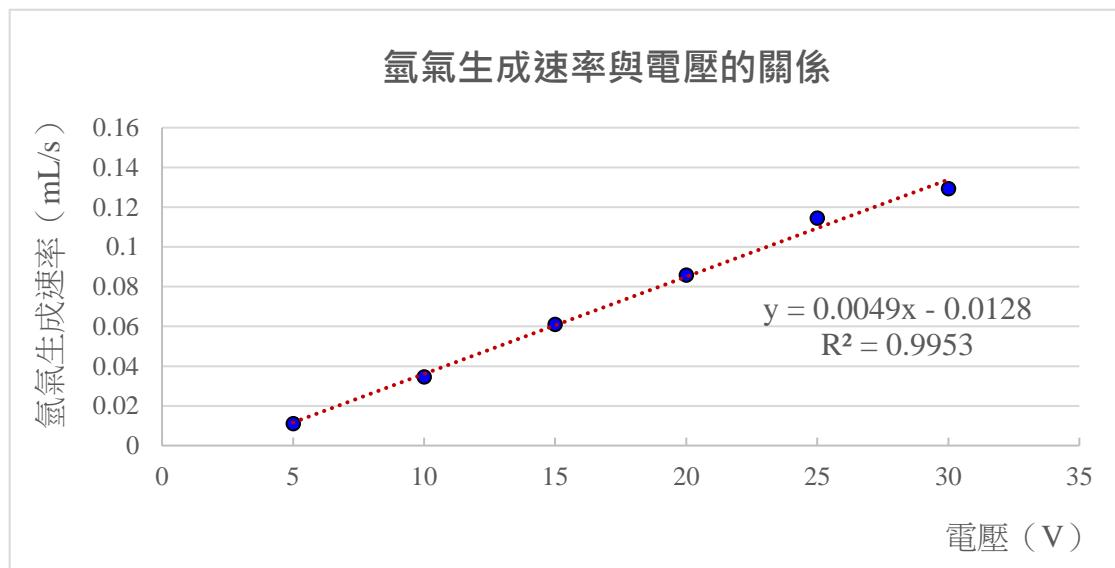


圖 10：氫氣生成速率 (mL/s) 與電壓 (V) 的關係圖（第二作者自行繪製）

【結果顯示】：一般而言，電壓 30V，氫氣的生成速率为 0.1294 mL/s 最快，電壓 5V，生成速率 0.0111 mL/s 最慢；氫氣體積比變化不大，最大 2.22，最小 2.00，平均為 **2.06±0.11**。

(三) 定電壓 10 伏特，電解 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，在不同溶液溫度下的電解結果如下圖所示：

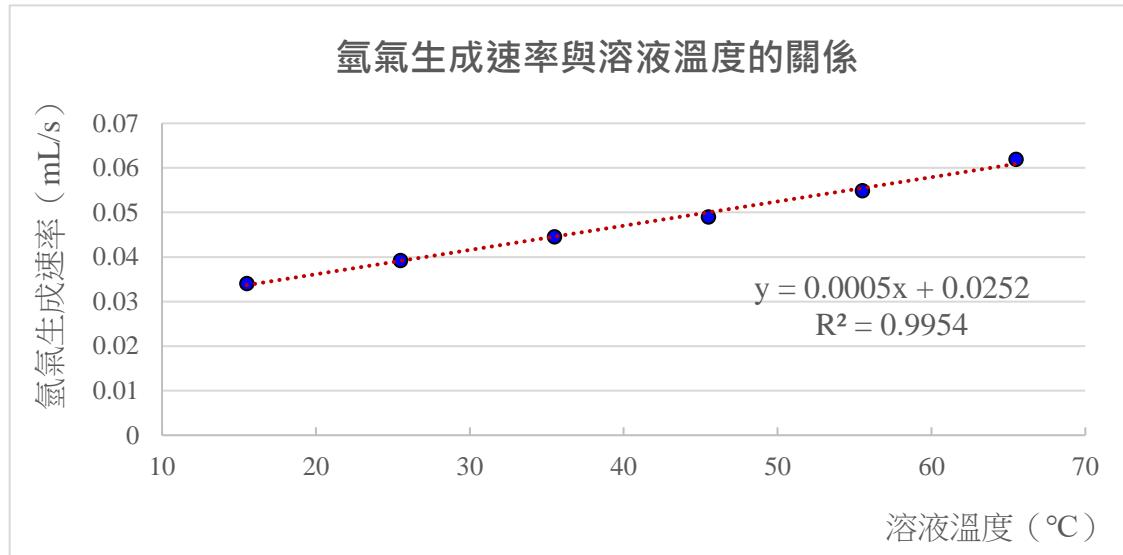


圖 11：氫氣生成速率 (mL/s) 與溶液溫度 (°C) 的關係圖 (第二作者自行繪製)

【結果顯示】：溶液溫度 65.5 °C，氫氣的生成速率为 0.0619 mL/s 最快，溶液溫度 15.5 °C，生成速率 0.0341 mL/s 最慢。

(四) 定電壓 10 伏特，電解 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，在不同距離下的電解結果如下圖所示：

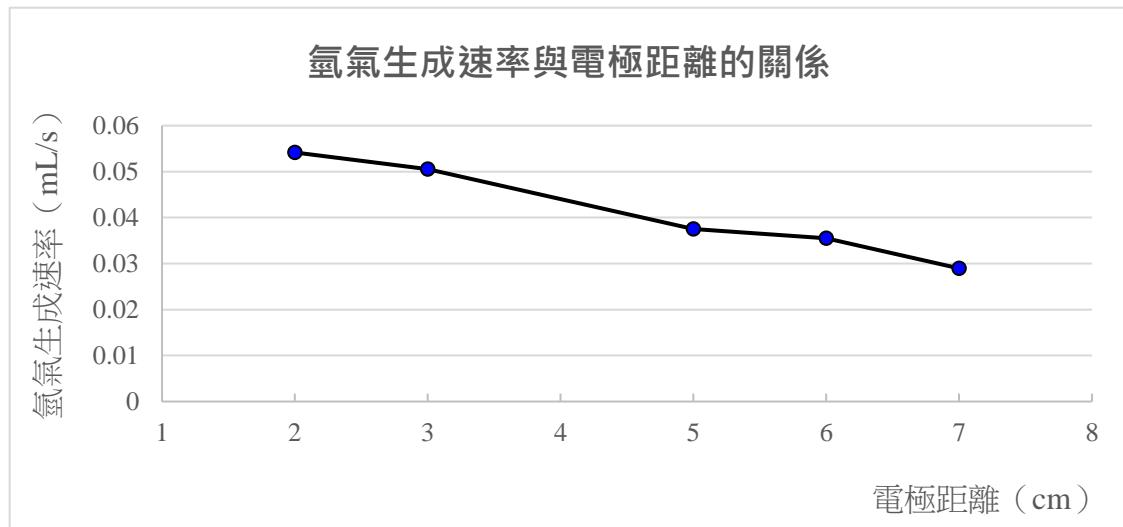


圖 12：氫氣生成速率 (mL/s) 與電極距離 (cm) 的關係圖 (第二作者自行繪製)

【結果顯示】：距離 2 cm 時，氫氣的生成速率为 0.0542 mL/s 最快，距離 7 cm 時，生成速率 0.0289 mL/s 最慢。

### 三、可以利用微型電解裝置驗證法拉第常數及亞佛加厥常數嗎？

(一) 定電流 0.24 安培，收集陰極  $H_2$  氣體 2 mL，水的飽和蒸汽壓為 14.5 mm-Hg (室溫 17°C) 針筒內液面高度差 2.2 cm，經式 1 計算得到 5 個法拉第常數及亞佛加厥常數，實驗數據結果如下表所示：

表 3：定電流 0.24 A 下，法拉第常數及亞佛加厥常數值 (第一作者自行繪製)

次	t (秒)	大氣壓力 (hpa)	F	誤差%	$N_A$	誤差%
1.	68.46	1018.54	97072.6	0.61%	$6.067 \times 10^{23}$	0.73%
2.	65.4	1018.37	94722.9	- 1.83%	$5.920 \times 10^{23}$	- 1.71%
3.	67.44	1018.24	97791.4	1.35%	$6.112 \times 10^{23}$	1.48%
4.	64.54	1018.17	93592.9	- 3.00%	$5.850 \times 10^{23}$	- 2.88%
5.	66.78	1018.15	94825.6	- 1.72%	$5.927 \times 10^{23}$	- 1.60%
平均			95601.1	- 0.92%	$5.975 \times 10^{23}$	- 0.80%

【結果顯示】：法拉第常數 5 次平均值  $95601.1 \pm 1510.3$ ，跟理論值 96485 相當接近，誤差在 1.35% ~ - 3.00%。亞佛加厥常數 5 次平均值  $5.975 \times 10^{23}$ ，跟理論值  $6.023 \times 10^{23}$  誤差在 1.48% ~ - 2.88%。

(二) 在定壓、定電流強度 0.1 安培下，探討陰極  $H_2$  氣體體積變化量  $\Delta V$  與通電時間 t 的關係，實驗數據結果如下表所示：

表 4：氣體體積變化量  $\Delta V$  與通電時間 t 的關係 (第一作者自行繪製)

t (秒)	I (A)	$\Delta V$ (mL)	F	誤差%	$N_A$	誤差%
15	0.1	0.18	99009.6	2.62%	$6.188 \times 10^{23}$	2.74%
20	0.1	0.25	95049.2	- 1.49%	$5.941 \times 10^{23}$	- 1.37%
25	0.1	0.30	99009.6	2.62%	$6.188 \times 10^{23}$	2.74%
30	0.1	0.35	101838.4	5.55%	$6.365 \times 10^{23}$	5.68%
35	0.1	0.43	96707.1	0.23%	$6.044 \times 10^{23}$	0.35%
40	0.1	0.50	95049.2	- 1.49%	$5.941 \times 10^{23}$	- 1.37%

50	0.1	0.65	91393.5	- 5.28%	$5.712 \times 10^{23}$	- 5.16%
	平均		96865.2	0.39%	$6.054 \times 10^{23}$	0.52%

【結果顯示】：法拉第常數平均值  $96865.2 \pm 1847.8$ ，跟理論值誤差在  $5.55\% \sim - 5.28\%$ 。

亞佛加厥常數平均值  $6.054 \times 10^{23}$ ，跟理論值誤差在  $2.74\% \sim - 5.16\%$ 。

至於  $\Delta V$  是否與通電時間  $t$  成線性的正比關係？若以通電時間  $t$  為橫坐標，氫氣的生成量  $\Delta V$  為縱座標作圖，兩者的相關係數達 0.9956，其結果如下圖所示：

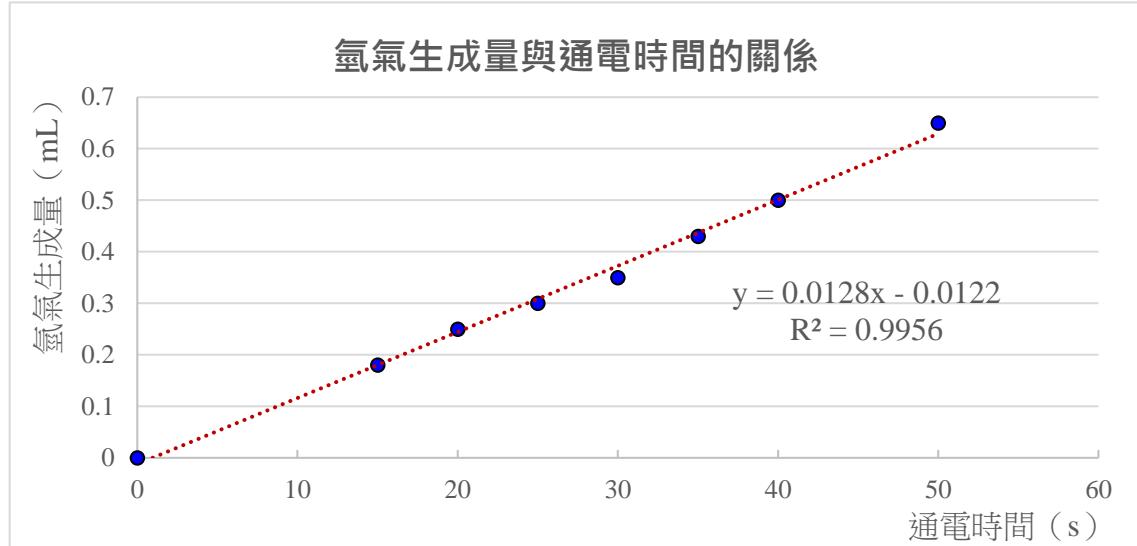


圖 13：定電流 0.1 安培下，氫氣生成量 ( $\Delta V$ ) 與通電時間 ( $t$ ) 的正比關係圖  
(第一作者自行繪製)

(三) 定電流強度 0.1 安培下，測量在鎳鈦合金陰極銅離子還原增加重量  $\Delta W$  與通電時間  $t$  的關係，實驗數據結果如下表所示：

表 5：定電流下，陰極銅離子還原質量變化與通電時間的關係 (第一作者自行繪製)

$t$ (秒)	$W_{\text{電極}}$	$W'_{\text{電極}}$	$\Delta W_{\text{Cu}}$	F	誤差%	$N_A$	誤差%
30	0.9486	0.9496	0.001	95325.0	- 1.20%	$5.958 \times 10^{23}$	- 1.08%
60	0.9913	0.9933	0.002	95325.0	- 1.20%	$5.958 \times 10^{23}$	- 1.08%
120	0.9911	0.9950	0.0039	97769.2	1.33%	$6.111 \times 10^{23}$	1.45%
150	0.9557	0.9605	0.0048	99296.9	2.91%	$6.206 \times 10^{23}$	3.04%
180	0.9555	0.9616	0.0061	93762.3	- 2.82%	$5.860 \times 10^{23}$	- 2.70%
210	0.9914	0.9987	0.0073	91407.5	- 5.26%	$5.713 \times 10^{23}$	- 5.15%

平均	95481.0	- 1.04%	$5.966 \times 10^{23}$	- 0.92%
----	---------	---------	------------------------	---------

【結果顯示】：法拉第常數 5 次平均值  $95481.0 \pm 1357.8$ ，跟理論值誤差在  $2.91\% \sim -5.26\%$ 。亞佛加厥常數 5 次平均值  $5.966 \times 10^{23}$ ，跟理論值誤差在  $3.04\% \sim -5.15\%$ 。至於  $\Delta W$  是否與通電時間  $t$  成線性的正比關係？若以通電時間  $t$  為橫坐標，銅離子還原增加重量  $\Delta W$  為縱座標作圖，兩者的相關係數達 0.9971，其結果如下圖所示：

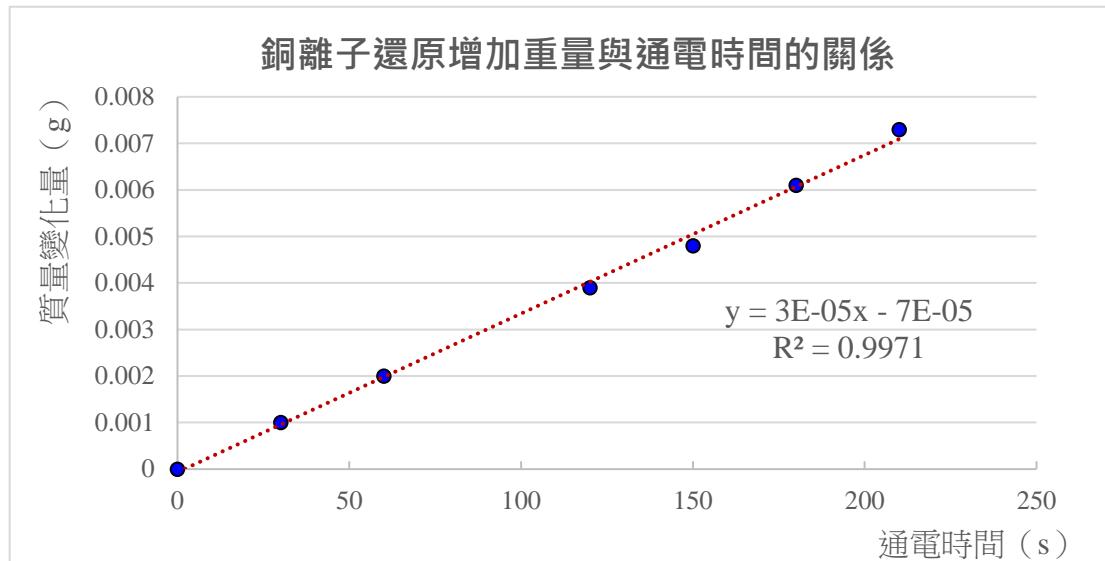


圖 14：定電流 0.1 安培下，質量變化量 ( $\Delta W$ ) 與通電時間 ( $t$ ) 的正比關係圖  
(第一作者自行繪製)

#### 四、可以利用電解產生的氫氣及氧氣進行發電嗎？

(一) 定電壓 5 伏特，充電時間 5 分鐘，不同粗細的石墨電極，電池放電情形如下圖所示：

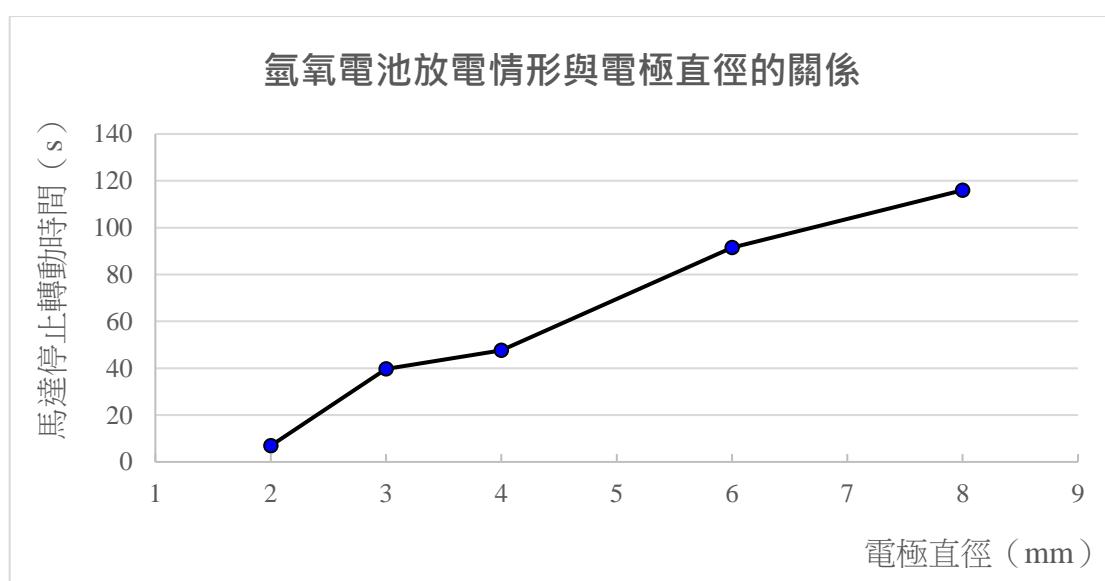


圖 15：氫氧電池放電情形 (s) 與電極直徑 (mm) 的關係圖 (第一作者自行繪製)

【結果顯示】：一般而言，電極直徑 8 mm，馬達轉動時間 116.0 秒最長；電極直徑 2 mm，馬達轉動時間 6.9 秒最短。

(二) 定電壓 5 伏特，充電時間 5 分鐘，改變碳棒淬火的次數，電池放電情形如下圖所示：

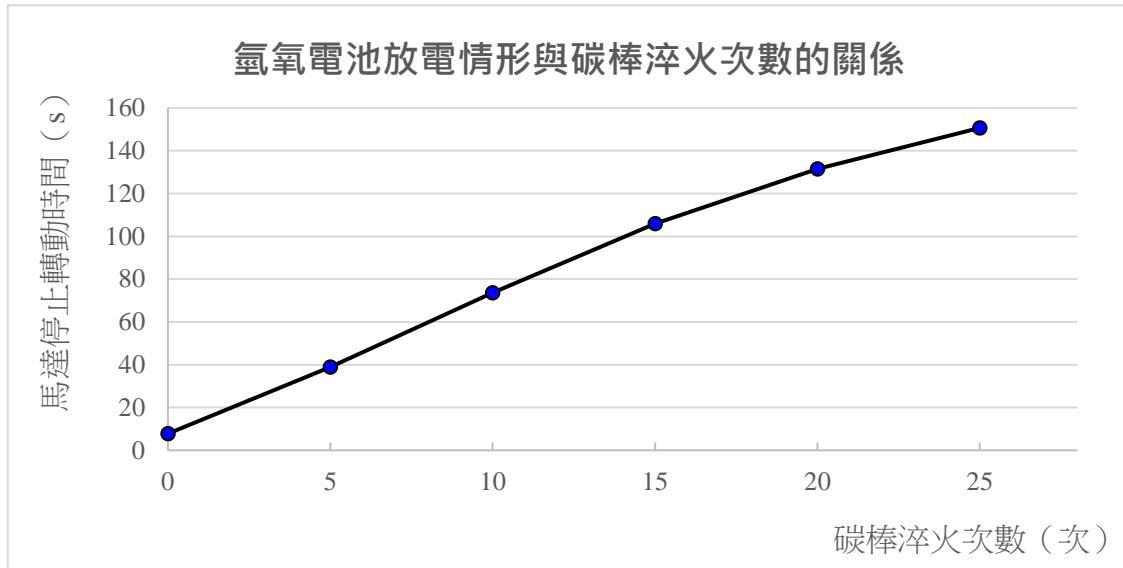


圖 16：氫氧電池放電情形 (s) 與碳棒淬火次數 (次) 的關係圖 (第一作者自行繪製)

【結果顯示】：一般而言，碳棒淬火 25 次，馬達轉動時間 150.7 秒最長；碳棒未淬火，馬達轉動時間 7.8 秒最短。

(三) 定電壓 5 伏特，充電時間 5 分鐘，改變不同電極的距離，電池放電情形如下圖所示：

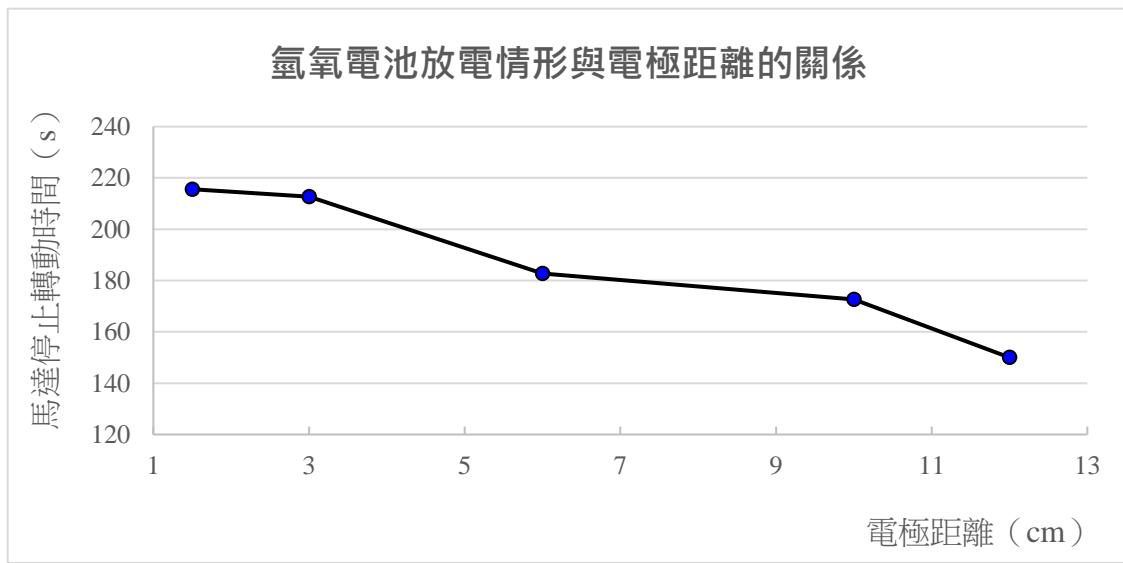


圖 17：氫氧電池放電情形 (s) 與電極距離 (cm) 的關係圖 (第一作者自行繪製)

【結果顯示】：一般而言，電極距離 1.5 cm，馬達轉動時間 215.6 秒最長；電極距離 12 cm，馬達轉動時間 150.0 秒最短。

(四) 定電壓 5 伏特，充電時間 5 分鐘，改變電解質的種類，電池放電情形如下圖所示：

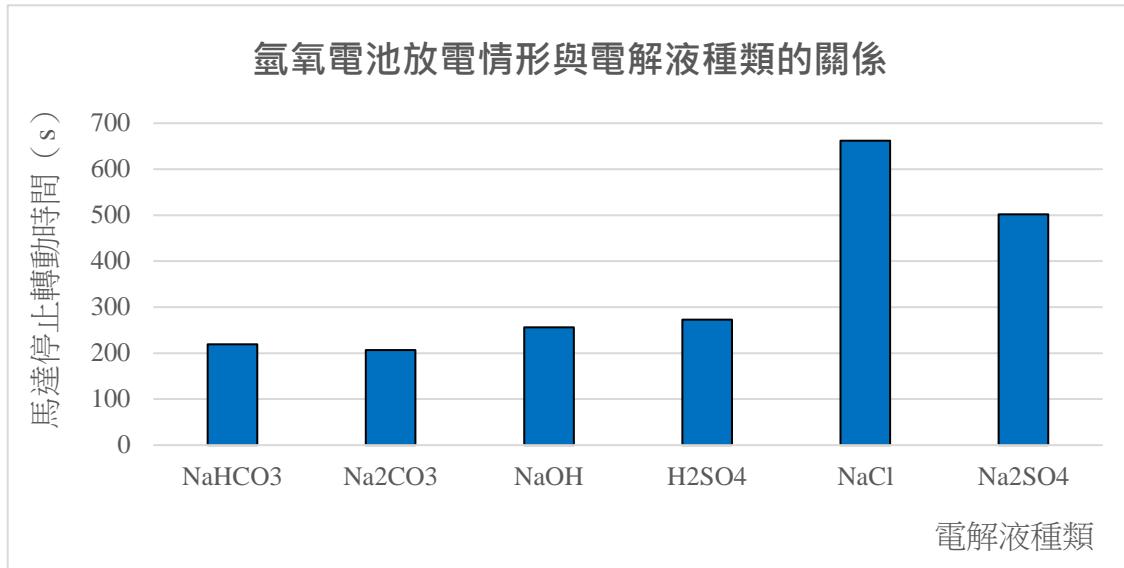


圖 18：氫氧電池放電情形 (s) 與電解質種類的關係圖（第一作者自行繪製）

**【結果顯示】：**在氯化鈉與硫酸鈉溶液中，馬達轉動時間較長；在氫氧化鈉與硫酸溶液中，馬達轉動時間次之；在碳酸氫鈉與碳酸鈉溶液中，馬達轉動時間較短。六種電解液中，以氯化鈉溶液馬達轉動時間 662.0 最長，碳酸鈉溶液馬達轉動時間 206.5 最短。

(五) 定電壓 5 伏特，充電時間 5 分鐘，電解不同濃度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，電池放電情形如下圖所示：

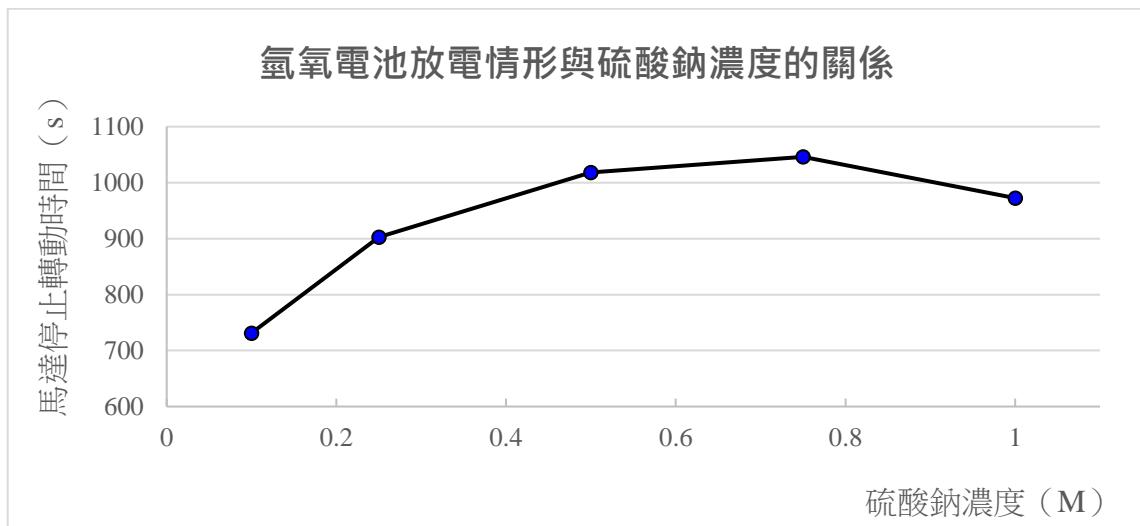


圖 19：氫氧電池放電情形 (s) 與濃度 (M) 的關係圖（第一作者自行繪製）

**【結果顯示】：**硫酸鈉溶液濃度為 0.75 M，馬達轉動時間 1046.0 秒最長；濃度為 0.10 M，馬達轉動時間 731.4 秒最短。

(六) 定電壓 5 伏特，充電時間 5 分鐘，在正負極碳棒中添加不同量的活性碳粉，電池放電情形如下圖所示：

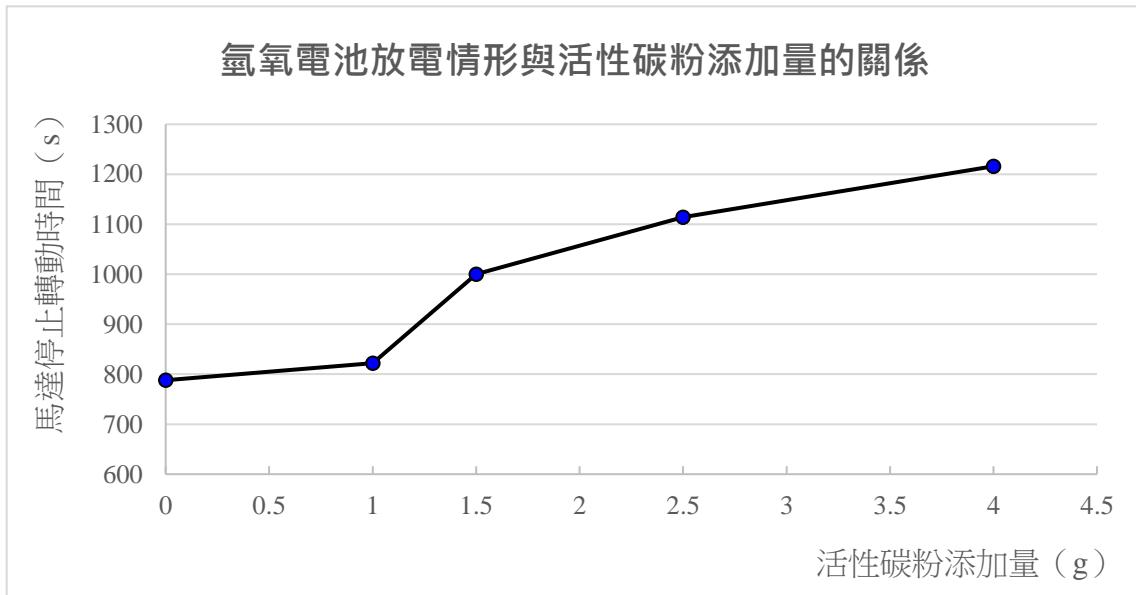


圖 20：氫氧電池放電情形 (s) 與活性碳粉添加量 (g) 的關係圖 (第一作者自行繪製)

**【結果顯示】：**一般而言，活性碳粉添加量為 4 克，馬達轉動時間 1216.0 秒最長，放電時間達 4.05 倍；未添加活性碳粉，馬達轉動時間 788.0 秒最短。

(七) 充電時間 5 分鐘，以不同太陽能面板電壓電解，放電電壓與電流變化情形如圖 21、22，電池電能轉換效率如表 6 所示：

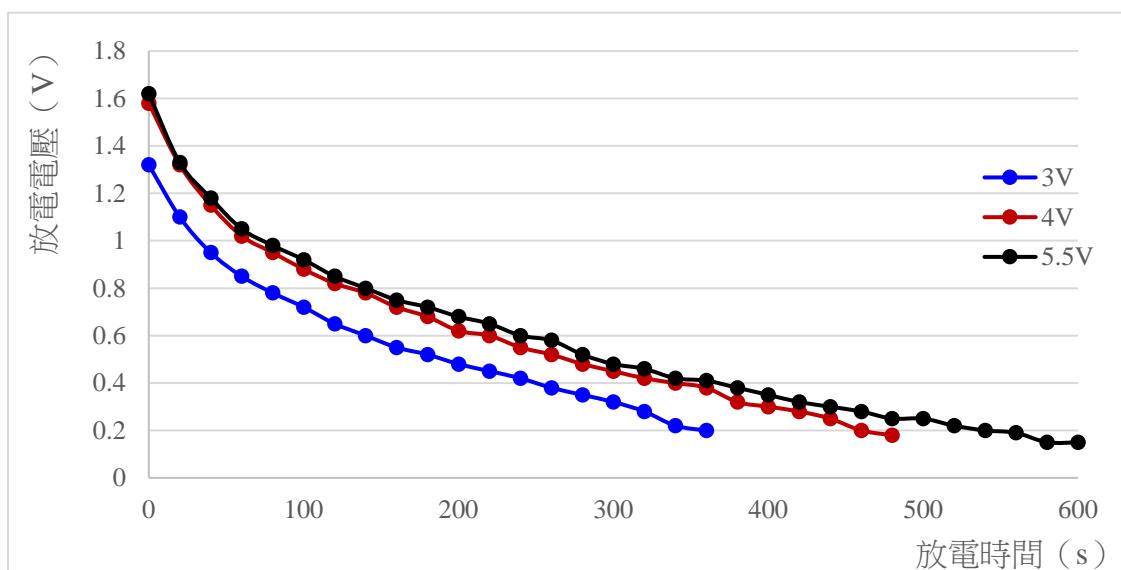


圖 21：不同太陽能面板電壓電解，氫氧電池放電電壓隨時間的變化圖  
(放電電壓及放電電流皆由第三作者自行繪製)

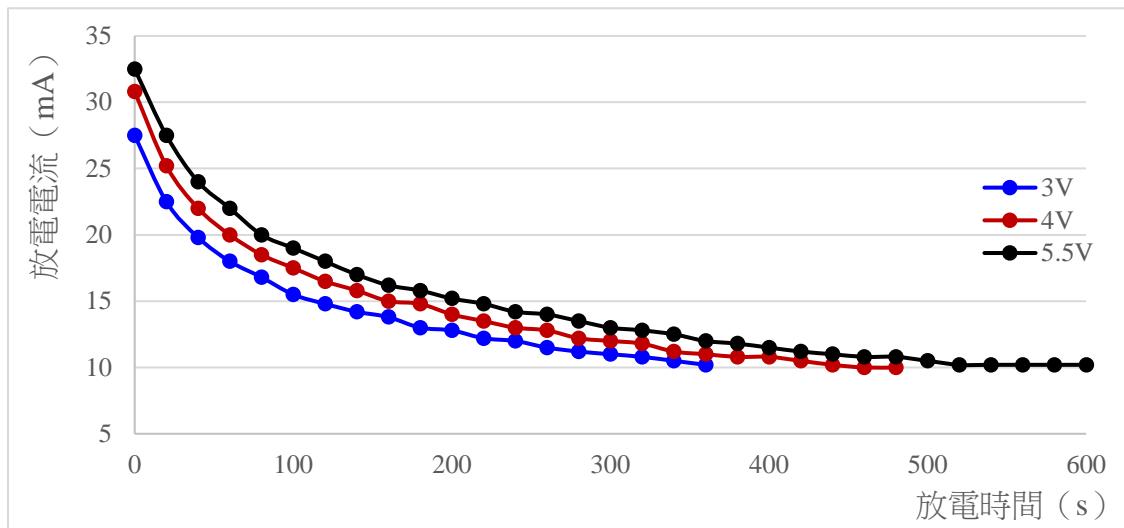


圖 22：不同太陽能面板電壓電解，氫氧電池放電電流隨時間的變化圖

表 6：不同太陽能面板電壓電解，電池電能轉換效能（第三作者自行繪製）

面板電壓 (V)	充電電能 (J)	放電電能 (J)	充放電能轉換 效率 (%)	放電至 0.2V 時間 (秒)
3	55	3.37	6.08%	360
4	152	5.07	3.34%	460
5.5	275	6.04	2.19%	540

【結果顯示】：面板電壓 3 V，電能轉換效率 6.08% 最高，馬達轉動時間 380 秒最短；

面板電壓 5.5 V，電能轉換效率 2.19% 最低，馬達轉動時間 613 秒最長。

(八) 太陽能面板電壓 3 伏特，以不同太陽能面板照射時間電解，放電電壓與電流變化情形如圖 23、24，電池電能轉換效率如表 7 所示：

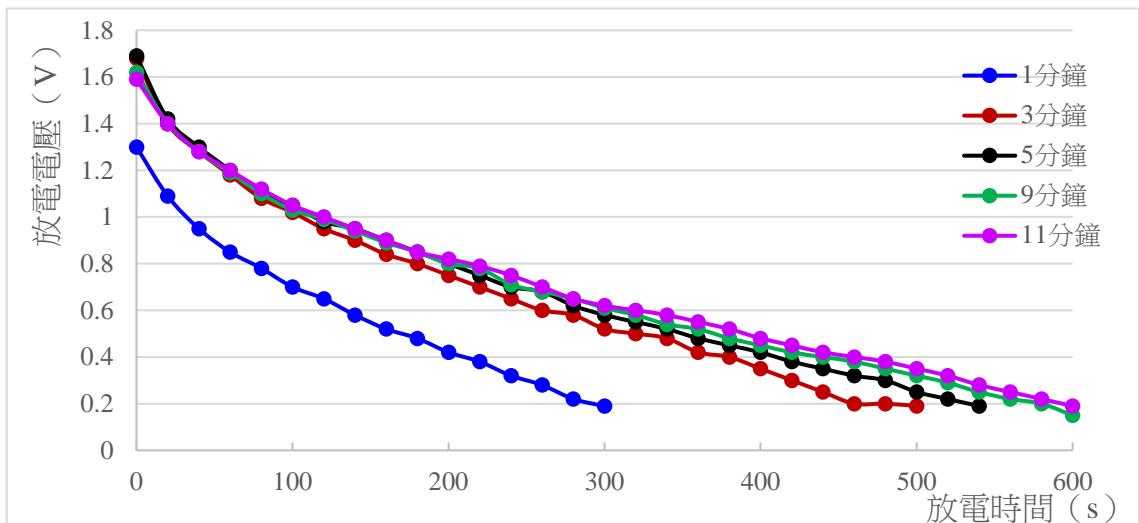


圖 23：不同太陽能面板照射時間，氫氧電池放電電壓隨時間的變化圖

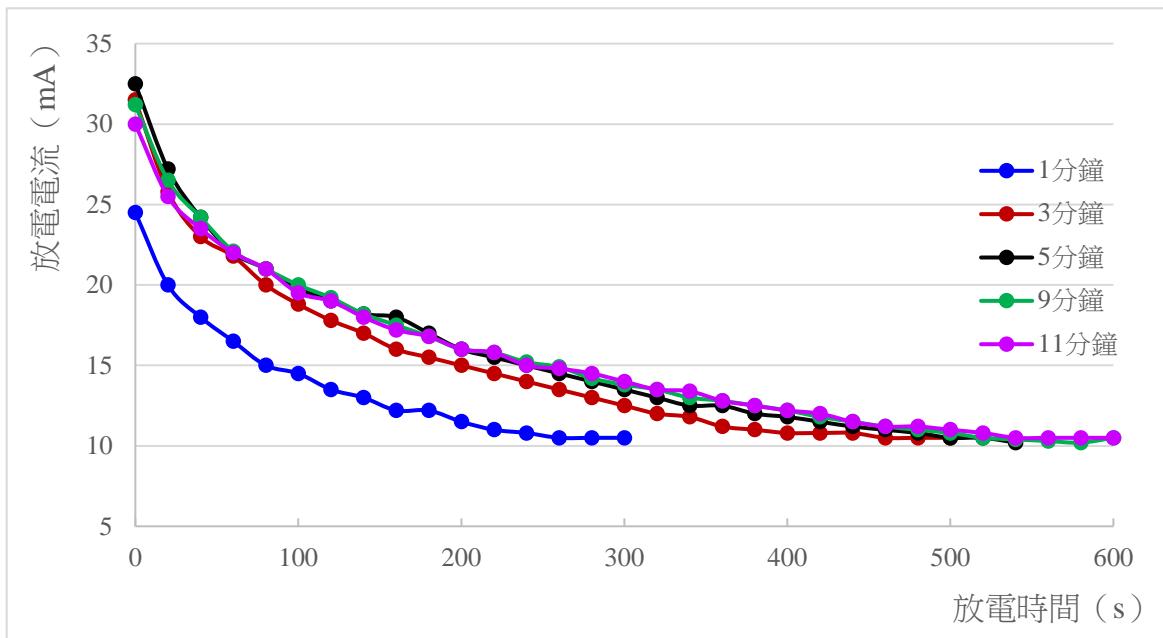


圖 24：不同太陽能面板照射時間，氫氧電池放電電流隨時間的變化圖

(放電電壓及放電電流皆由第三作者自行繪製)

**【結果顯示】：**照射時間 1 分鐘，電能轉換效率 15.38% 最高，馬達轉動時間 300 秒最短；照射時間 11 分鐘，電能轉換效率 3.62% 最低，馬達轉動時間 604 秒最長。

表 7：不同太陽能面板照射時間，電池電能轉換效能（第三作者自行繪製）

照射時間 (min)	充電電能 (J)	放電電能 (J)	充放電能轉換 效率 (%)	放電至 0.2V 時間 (秒)
1	17.9	2.76	15.38%	280
3	51.3	6.10	11.89%	480
5	69.8	6.93	9.93%	540
9	126.6	7.16	5.65%	580
11	200.0	7.23	3.62%	600

### (九) 太陽能微型氫氧燃料電池組串聯效能測試

#### 1. 雙電池串聯：

將 2 組太陽能燃料電池串聯後，測量電壓約為 4.1 V，且可使紅色 LED 燈泡發光，白色 LED 燈泡不發光。紅色 LED 燈泡發光後觀察到電池電壓下降至 2.0 V，測量結果如圖 25。

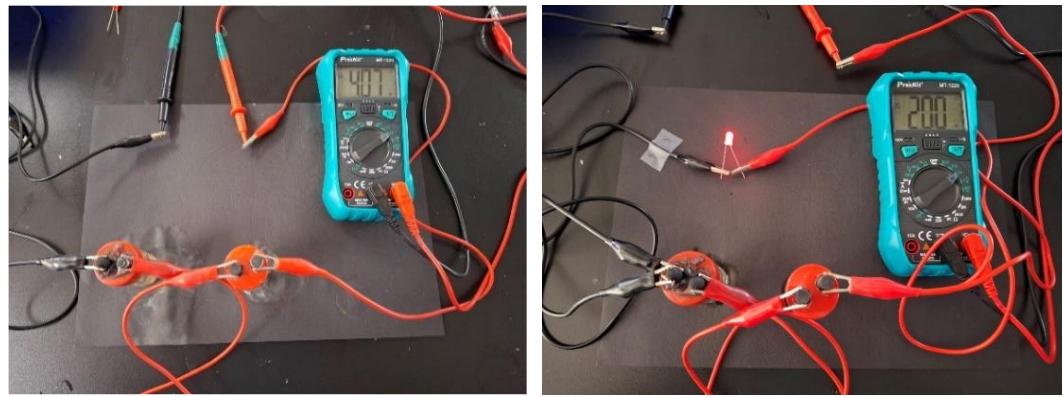


圖 25：左圖為 2 組電池串聯後未接燈泡的電池電壓，右圖為連接燈泡的電壓  
(第一、二作者自行拍攝)

連接數位三用電表，並接上紅色 LED 燈泡，測量電壓及電流變化如圖 27、28。由實驗結果可觀察到電池放電初期電壓約  $1.8 \sim 2.0$  V，電流約  $7$  mA  $\sim 45$  mA，隨著放電時間拉長，約 900 秒 (15 分鐘) 電流接近 0，此時燈泡幾乎熄滅。

## 2. 三電池串聯：

將 3 組太陽能燃料電池串聯後，測量電壓約為 5.6 V，可使紅色及白色 LED 燈泡發光，如圖 26 所示。紅色 LED 燈泡發光後觀察到電池電壓下降至 2.2 V。

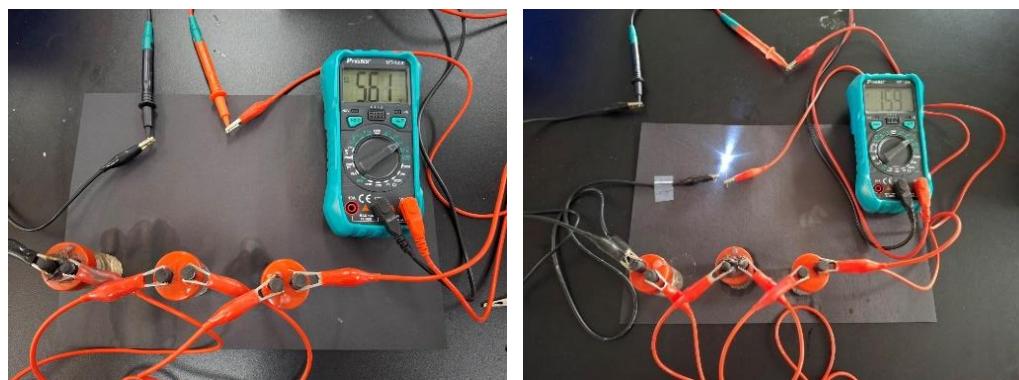


圖 26：左圖為 3 組電池串聯後未接燈泡的電壓，右圖為連接白色燈泡的電壓  
(第一、二作者自行拍攝)

連接數位三用電表，並接上紅色 LED 燈泡，測量電壓及電流變化如圖 27、28。由實驗結果可觀察到電池放電初期電壓約  $1.9 \sim 2.2$  V，電流約  $10$  mA  $\sim 60$  mA，隨著放電時間拉長，約 1200 秒 (20 分鐘) 電流接近 0，此時燈泡幾乎熄滅。

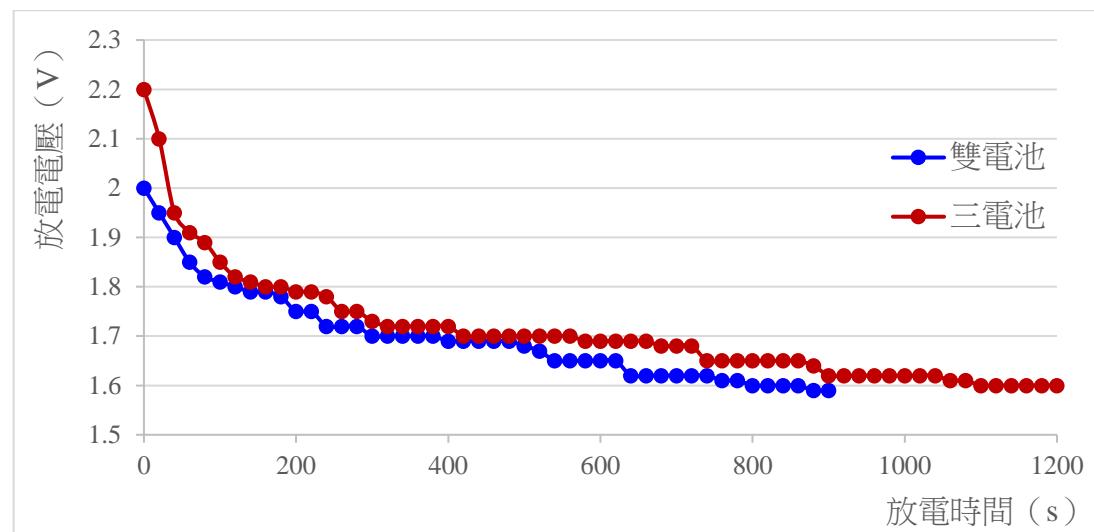


圖 27：串聯效能測試，氫氧電池放電電壓隨時間的變化圖（第二作者自行繪製）

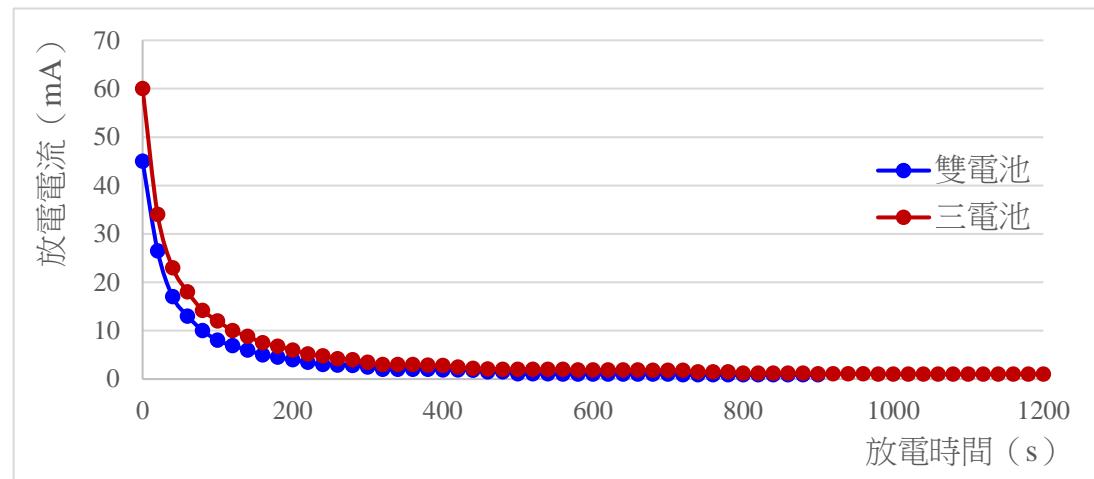


圖 28：串聯效能測試，氫氧電池放電電流隨時間的變化圖（第二作者自行繪製）

## 五、可以利用電化學電解法回收水中的重金屬嗎？

(一) 定電流 0.4 A，不同粗細的電極，銅離子回收率結果如下圖所示：

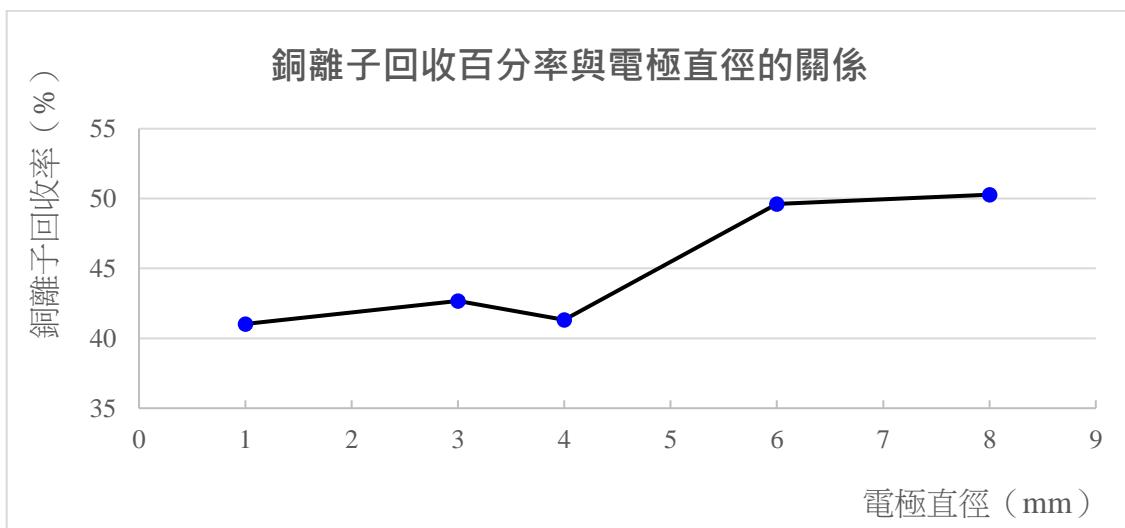


圖 29：銅離子回收率 (%) 與電極直徑 (mm) 的關係圖（第三作者自行繪製）

**【結果顯示】：**石墨棒電極直徑 8 mm，銅離子回收百分率 50.28%最高，鉛筆芯電極直徑 1 mm，銅離子回收百分率 41.03%最低。

(二) 定電量 (480 庫侖)，不同電流強度下，銅離子回收率結果如下圖所示：

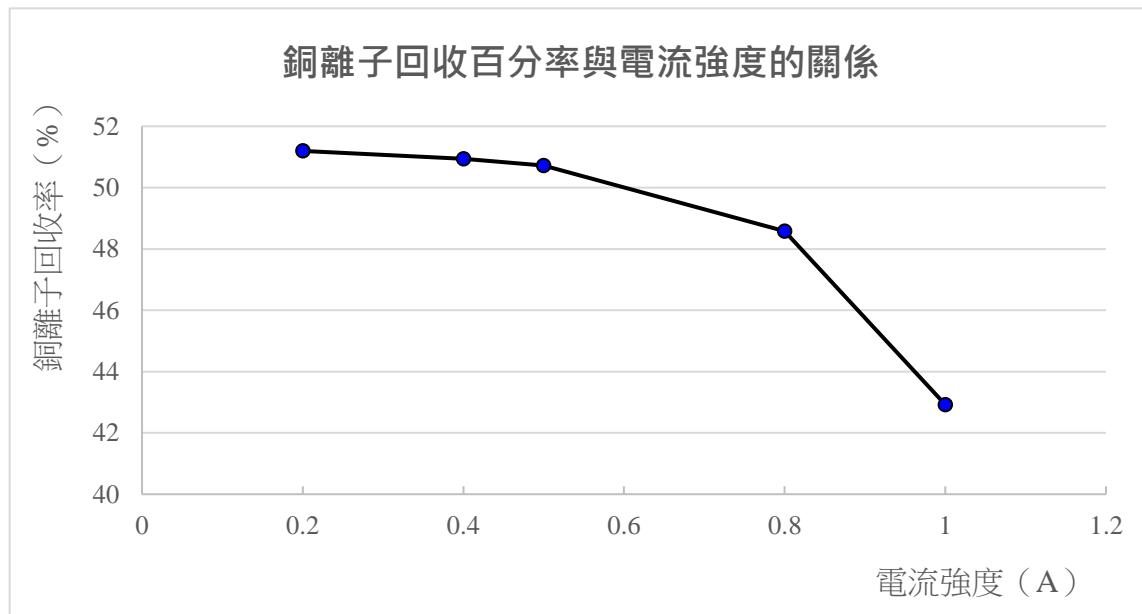


圖 30：銅離子回收率 (%) 與電流強度 (A) 的關係圖 (第三作者自行繪製)

**【結果顯示】：**通入的電流強度為 0.2 安培時，銅離子回收百分率 51.20%最高，電流強度為 1.0 安培時，銅離子回收百分率 42.92%最低。

(三) 定電流 0.4 A，改變不同溶液的溫度，銅離子回收率結果如下圖所示：

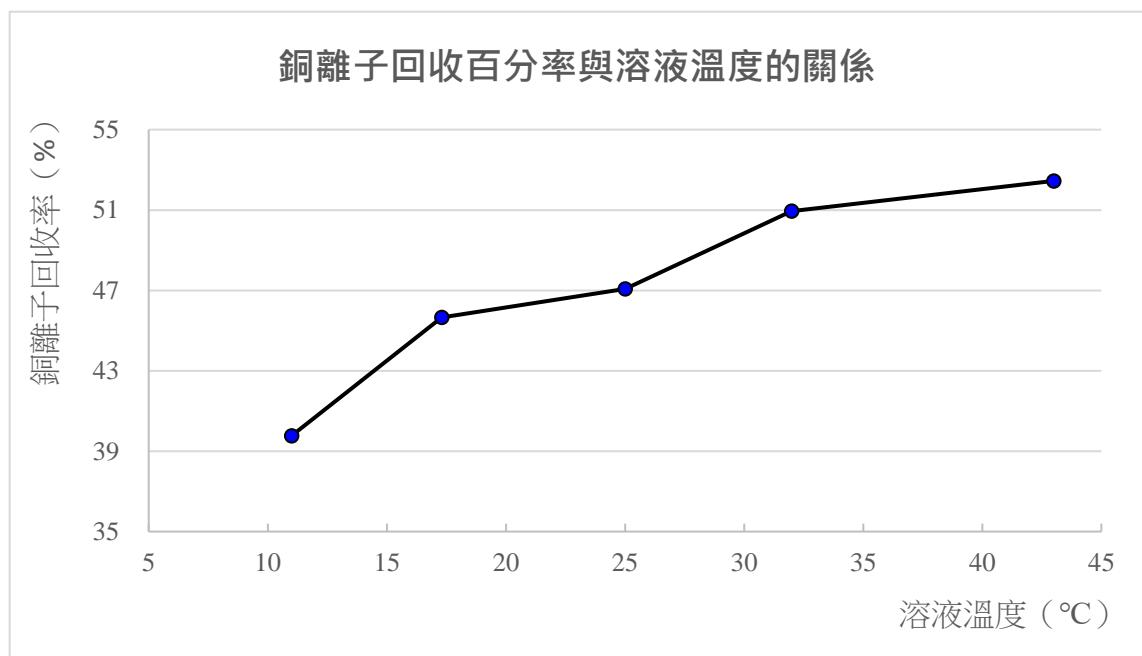


圖 31：銅離子回收率 (%) 與溶液溫度 (°C) 的關係圖 (第三作者自行繪製)

【結果顯示】：一般而言，溶液溫度為 43°C 時，銅離子回收百分率 52.45% 最高，溶液溫度為 11°C 時，銅離子回收百分率 39.77% 最低。

(四) 定電流 0.4 A，添加不同濃度的螯合劑  $\text{EDTA-4Na}^+$ ，銅離子回收率結果如下圖所示：

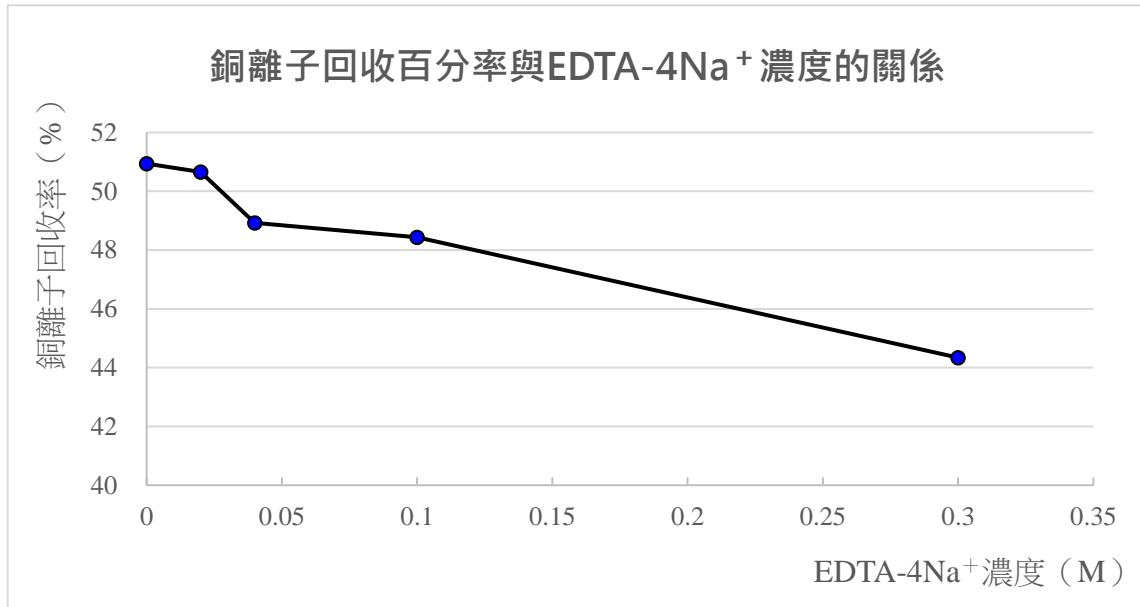


圖 32：銅離子回收率 (%) 與螯合劑濃度 (M) 的關係圖（第三作者自行繪製）

【結果顯示】：一般而言，未添加  $\text{EDTA-4Na}^+$  時，銅離子回收百分率 50.94% 最高，添加 0.3 M 的  $\text{EDTA-4Na}^+$  時，銅離子回收百分率 44.34% 最低。

(五) 利用太陽能作為電力來源，回收此次探究所製造的硫酸銅廢液：

使用鎳鈦合金作為陽極，銅片為陰極，結合太陽能面板提供電能，下圖為回收銅離子廢液的裝置。

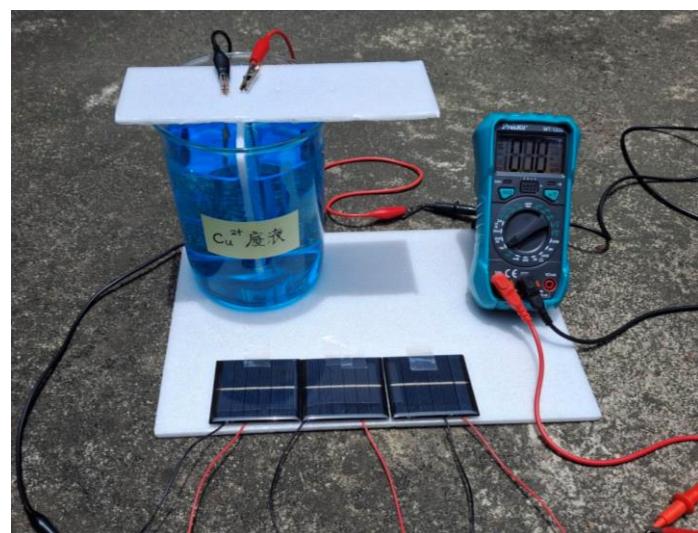
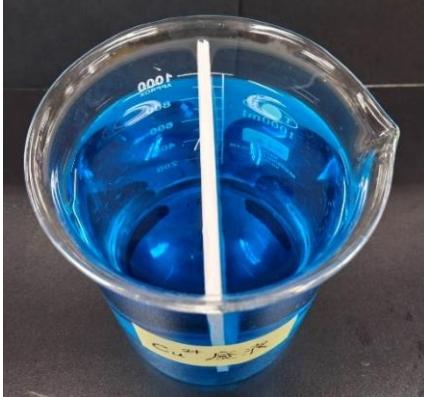
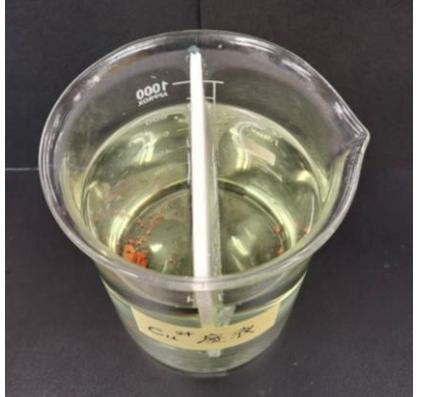
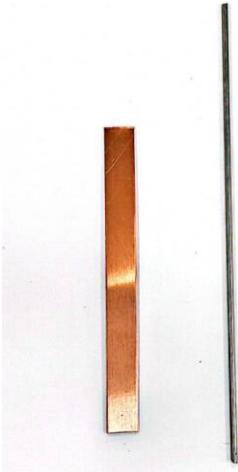


圖 33：銅離子廢液回收裝置（第三作者自行拍攝）

廢液的體積為 1000 毫升，濃度約為 0.15 M，銅離子廢液反應前後的結果如下表所示。

表 8：銅離子廢液回收前後的變化情形（第一、三作者自行拍攝及繪製）

變化 性質	電解前	電解後
溶液顏色		
	深藍色	淡黃綠色
電極外觀		
pH 值	2.84	0.63
濃度 (M)	0.15	0.00 (微量)

【結果顯示】：陽光充足時，太陽能面板能提供電解電流維持在 0.10 安培左右，根據法拉第電解定律，估計完全回收廢液中的銅離子時間理論需 80.4 小時，實際因受到每日太陽光照度的不同，最終須花費更長的電解時間才能使溶液完全變為淡黃綠色。電解期間陽極鎳鈦合金產生氧氣氣泡，陰極則隨電解時間之增長，鍍上厚厚的銅金屬，且未觀察到氫氣氣泡的生成。

## 陸、討論

一、電解水陰陽極產物氫氣與氧氣的體積比真的是 2 比 1 嗎？

- (一) 使用不同材質作為電極，氫氧體積比以碳鋅電池石墨電極在酸性溶液中 6.13 最大，2B 鉛筆芯電極在鹼性溶液中 4.17 次之。觀察石墨電解過程中，陽極附近會有碳的剝落產生黑色粉末，推論陽極電極可能發生氧化反應，產生副反應，致使氧氣的生成量降低，氫氧體積比變大。迴紋針與鎳鈦合金作為電極，氫氧體積比與理論值皆偏差較小，其中又以鎳鈦合金在不同酸鹼性的電解液中，體積比更接近理論值 2.00。
- (二) 鎳鈦合金在定電壓下，電解不同酸鹼性的電解液，以硫酸的氫氣生成速率最快，為所有電解質速率平均值的 2.63 倍。氫氧體積比以硝酸鈉 1.74 與理論值偏差最大，硫酸 2.02 最接近理論值 2.00。根據文獻顯示與推論， $\text{NO}_3^-$  在陰極亦會發生還原反應，使得氫氣的生成量降低，氫氧體積比變小<sup>3</sup>。

二、影響電解的各變因探討如下：

- (一) **電解質濃度**：結果顯示  $\text{H}_2\text{SO}_4$  濃度 1.0 M，氫氣的生成速率最快，濃度 0.2 M，生成速率最慢，生成速率與溶液濃度成高度相關（相關係數 0.9953），推論濃度愈高，離子濃度亦較高，在定電壓下，因溶液導電度高，使得電流也較高，生成速率愈快。
- (二) **電壓比較**：結果顯示電壓 30V，氫氣的生成速率最快，電壓 5V，生成速率最慢，生成速率與電壓成高度相關（相關係數 0.9953）。氫氧體積比平均為  $2.06 \pm 0.11$ 。
- (三) **溶液溫度**：結果顯示溶液溫度 65.5°C，氫氣的生成速率最快，溶液溫度 15.5°C，生成速率最慢，生成速率與溶液溫度成高度相關（相關係數 0.9954），推論溶液溫度愈高，離子移動速率較快，使得氫氣生成速率愈快。
- (四) **電極距離**：距離 2 cm 時，氫氣的生成速率最快，距離 7 cm 時，生成速率最慢，生成速率與電極距離成負相關。推測電極距離愈大時，離子移動的阻力愈大，電流愈低，氫氣生成速率愈慢。

三、可以利用微型電解裝置驗證法拉第常數及亞佛加厥常數嗎？以不同條件驗證法拉第常數及亞佛加厥常數，其結果整理如表 9，從實驗結果可準確量測法拉第常數及亞佛加厥常數，顯示此微型電解裝置的可靠性、實用性。

表 9：不同條件驗證法拉第常數及亞佛加厥常數（第一作者自行繪製）

實驗方法	F	誤差%	$N_A$	誤差%	相關係數
收集固定體積的氫氣 (0.24 安培定電流)	$95601.1 \pm 1510.3$	- 0.92%	$5.975 \times 10^{23}$	- 0.80%	
氣體體積變化量與通 電時間的關係 (0.1 安培定電流)	$96865.2 \pm 1847.8$	0.39%	$6.054 \times 10^{23}$	0.52%	0.9956
銅離子還原增加重量 與通電時間的關係 (0.1 安培定電流)	$95481.0 \pm 1357.8$	- 1.04%	$5.966 \times 10^{23}$	- 0.92%	0.9971

四、可以利用電解產生的氫氣及氧氣進行發電嗎？放電情形與各變因探討如下：

- (一) **電極直徑**：定電壓下，結果顯示電極直徑愈大，馬達轉動時間愈長；直徑愈小，馬達轉動時間愈短。推論電極的粗細影響氫氧氣體吸附量的多寡，接觸面積大者，氫氧氣體吸附量愈多，能使馬達轉動時間愈長。
- (二) **碳棒淬火次數**：定電壓下，結果顯示淬火次數愈多，馬達轉動時間愈長；淬火次數愈少，馬達轉動時間愈短。推論淬火次數的多寡，會影響電極的導電性，淬火次數愈多者，碳棒的導電性愈佳<sup>4</sup>，有助於氫氧氣體的產生，能使馬達轉動時間愈長。
- (三) **電極距離**：定電壓下，電極距離愈短，馬達轉動時間愈長；距離愈長，馬達轉動時間愈短。推論電極的距離影響氫氧氣體的生成速率，距離愈長者，離子移動的阻力愈大，電流愈低，氫氧氣體生成量較少，能使馬達轉動時間愈短。
- (四) **電解液種類**：比較同濃度 0.5 M 六種電解液使馬達轉動時間的長短，結果顯示 NaCl 及 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 較長，推論應該與離子濃度高，溶液導電度高，氫氧氣體生成量較多有關，促使馬達轉動時間愈長。雖然 NaCl 能使馬達轉動時間最長，但電解的同時亦會產生有毒的氣體氯氣，對環境並不友善，故後續以 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 作為電解液進行變因探討。
- (五) **電解質濃度**：定電壓下，馬達轉動時間大致隨濃度增加而變長，推論濃度愈高，溶液導電度高，有助於氫氧氣體的產生，能使馬達轉動時間愈長。
- (六) **活性碳粉添加量**：定電壓 5 伏特，增加活性碳粉量有助於提升馬達轉動時間。推論活性碳粉量愈多，增加電極周圍的表面積，有利於氫氧氣體的吸附。實驗結果顯示

充電時間 5 分鐘，可放電使馬達轉動 20 分鐘達 4 倍使用時間。

(七) **太陽能面板電壓**：面板電壓 3 V，電能轉換效率較高 6.08%，馬達轉動時間 380 秒最短；面板電壓 5.5 V，電能轉換效率最低 2.19%。推論電壓較低產生氫氣速率較慢，吸附比率較高；電壓較高氫氣的吸附較差，造成電能的浪費。

(八) **太陽能面板照射時間**：太陽光照射時間 1 分鐘，電能轉換效率較高 15.38%，馬達轉動時間最短；照射時間 11 分鐘，電能轉換效率最低 3.62%。推測因為照射時間愈長，會因氣體產生較多無法完全吸附而利用，導致轉換效率下降。

(九) **串聯效能測試**：雙電池及三電池串連後，測量電壓分別約為 4.1 V 及 5.6 V。連接數位三用電表，並接上紅色 LED，當電池電壓愈高時，提供的電流也愈大，其電功率也愈高，雙電池及三電池串連可分別供電單一紅色 LED 約 10 分鐘及 15 分鐘。

五、可以利用電化學電解法回收水中的重金屬嗎？

(一) **電極直徑**：定電流下，顯示電極直徑愈大，銅離子回收率愈高；直徑愈小，回收率愈低。推論電極的粗細影響接觸面積，接觸面積大者，有利於銅離子的析出與回收。

(二) **電流強度**：定電量下，顯示電流強度愈高，銅離子回收率愈低，電流強度愈低時，回收率愈高。觀察電解過程中，電壓愈高，電極附近有較多氫氣氣泡的生成，氫氣的產生，會抑制銅離子的析出量，推論因此造成回收率的下滑。

(三) **溶液溫度**：定電流下，溶液溫度愈高，銅離子回收率愈高 52.45%；溫度愈小，回收率愈低 39.77%。推論溶液溫度愈高，離子移動速率較快，使得銅離子的析出量增加。

(四) **螯合劑濃度**：未添加  $\text{EDTA-4Na}^+$  時，銅離子回收率最高 50.94%；添加  $\text{EDTA-4Na}^+$  濃度愈高時，銅離子回收率愈低 44.34%。推論螯合劑的添加，會形成穩定的銅離子錯合物，並阻礙銅離子在電極還原析出，導致回收率降低。

(五) **銅廢液回收探討**：電解法能有效回收水中的銅離子廢液，免去強鹼沉澱劑的使用。電解過程會產生  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ， $\text{H}^+$  濃度增加，致使溶液 pH 值從 2.84 變為 0.63 更為酸性。

## 柒、結論

一、以生活中常見的素材製作一款低成本微型霍夫曼電解裝置，不僅擺脫傳統玻璃材質易脆、

不易攜帶、大量使用化學電解液的缺點。每次實驗僅需約 30 毫升的電解液，並能準確測量法拉第常數及亞佛加厥常數，是綠色環保的好輔具。

二、影響電解的各變因中硫酸濃度、電壓及溶液溫度愈高，導電度愈高，氫氣生成速率愈快。

另外，電極距離愈近時，離子移動的阻力愈小，氫氣的生成速率也較快，反之則生成速率愈慢。關於氫氧體積比與理論值誤差相比，顯示  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$  (0.02) <  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$  (0.11) <  $\text{NaOH}(\text{aq})$  (0.18)，氫氧化鈉最大，硫酸最小，顯示鈦合金電極在酸性溶液中較為穩定。

三、氫氣是潔淨能源，本研究設計的簡易微型燃料電池，每次僅需 20 毫升的硫酸鈉電解液，並透過各變因的探討有效提高馬達轉動時間。此外，太陽能面板照射時間長或充電電壓大，會因氣體產生較多或快而無法完全吸附利用，充放電能轉換率反而降低。將太陽能燃料電池串聯成雙電池及三電池，產生的電壓分別為 4.1 V 及 5.6 V，皆可使紅光 LED 燈泡持續運作 10 分鐘以上，對於太陽能與氫能的結合，將對綠色能源有更進一步的發展<sup>5</sup>。

四、利用電解回收水中銅離子的各變因探討，電極直徑及溶液溫度愈高，電流強度愈低及不添加  $\text{EDTA-4Na}^+$  融合劑時，銅離子的回收率愈高，有助於銅離子的析出與回收。結合太陽光為電力來源，能回收本次科展探究所製造的銅廢液，免去大量強鹼沉澱劑的使用。

## 捌、參考文獻資料

1. Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*, 8, 13793-13813.
2. 陳冠廷(2013)。太陽能氫氧燃料電池系統之特性探討。國立虎尾科技大學機械與機電工程研究所碩士論文。
3. Kim, K., Paik, S. H., & Rhee, C. K. (2021). Water Electrolysis Accompanied by Side Reactions. *Journal of Chemical Education*, 98(7), 2381–2386.
4. 吳萬隆、黃寶鈿，簡易氫氧燃料電池的設計與教學應用。科學教育月刊。2005 年 7 月，280 期，頁 36–40。
5. Singla, M. K., Nijhawan, P. & Oberoi, A. S. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 15607-15626.

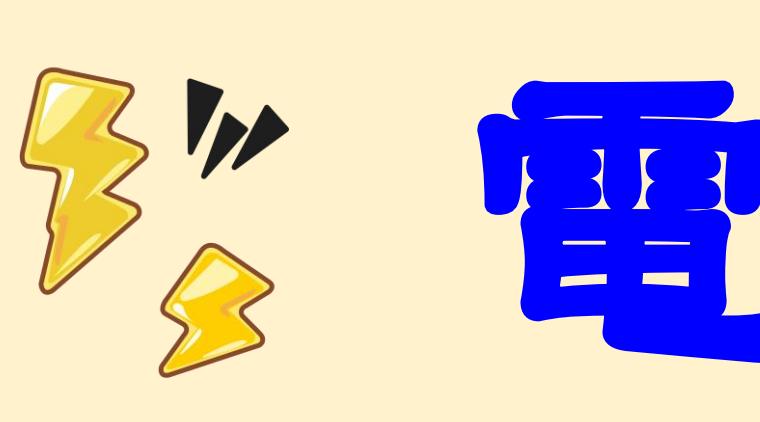
## 【評語】052612

本作品以自設的微型霍夫曼電解水裝置及氫氧燃料電池，以20~30毫升的電解液，除完成各種電解變因的探究，也可準確量測法拉第常數及亞佛加厥常數。本研究亦嘗試以電解法回收溶液中銅離子。並使用太陽能作為電力來源。研究內容多元，若能收斂主題，將可讓研究內容更聚焦，產生結果更具衝擊力。

相關建議與問題如下：

1. 專有名詞要先寫英文全名佐以簡寫，後面內文才能以簡寫貫穿全文。
2. 水的氧化物非僅有  $O_2$ ，也會產生 OH 自由基或  $H_2O_2$ ，可以考慮 side effect 對產  $O_2$  的影響。

作品海報



電來又電去



微型霍夫曼電解在環境中的應用

# 摘要

本研究設計一款低成本的微型霍夫曼電解水裝置及氫氧燃料電池，僅需約20~30毫升的電解液，除了完成各種電解變因的探究，也準確量測法拉第常數及亞佛加厥常數。

因應綠色永續，收集電解產生的潔淨能源氫氣，並研究增加電池放電效果，包括電極直徑、碳棒淬火次數、電極距離、電解質種類與濃度、添加活性碳粉等，充電5伏特，時間5分鐘後負載馬達轉動20分鐘達4倍使用時間。進一步利用太陽能作為電力來源，串聯3個單電池可提供約5.6 V電壓，使紅光LED持續運作15分鐘以上。

利用電解法，可回收溶液中的重金屬銅離子，免去強鹼的使用，回收率的探究發現通入的電流強度愈高、溶液溫度愈低或添加螯合劑，會造成回收率下滑。

## 壹、研究動機

因應綠色化學減量、減廢的風潮，我們發現市售的霍夫曼電解水裝置不僅價格昂貴，玻璃材質易碎、不易攜帶且使用的化學藥品消耗量也大等問題，興起了想改造電解器，並將電解原理應用於環境的念頭。在老師的指導下，我們使用生活中容易取得的素材，製作一款堅固、方便攜帶，減少化學藥品使用量的低成本微型電解水器。不僅提供電解變因的探究，也利用電解水<sup>1</sup>得到的氫氣及氧氣釋放電能，形成無汙染之微型氫氧環保電池，並計畫結合太陽能發電，將太陽能轉化成潔淨氫能，對氫氧燃料電池之電壓、充電效果及持久性做更進一步之探討；同時亦將電化學電解應用於水中重金屬離子的清除探究，落實重金屬充分回收與環境保育綠色永續的目標。

## 貳、研究設備及器材

- 一. 實驗器材：直流電源供應器、數位三用電表、鱷魚夾線、電極（包括2B鉛筆芯、迴紋針、鎳鈦合金棒）、1~4號廢棄碳鋅乾電池、熱熔膠與熱熔膠槍1組、塑膠培養皿、1及5毫升塑膠針筒、塑膠三通閥、50毫升燒杯、珍珠板、木柄鑽子、化妝棉、LED燈（紅光：2.2 V、白光：3 V）、太陽能專用馬達（電壓0.5 V、電流12 mA）、太陽能用小風扇（8 cm，四葉式）、太陽能板（電壓3 V、4 V、5.5 V）。
- 二. 實驗藥品：硫酸鈉（Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）、硝酸鈉（NaNO<sub>3</sub>）、氫氧化鈉（NaOH）、硫酸（H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）、硫酸鎂（MgSO<sub>4</sub>）、碳酸氫鈉（NaHCO<sub>3</sub>）、碳酸鈉（Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>）、氯化鈉（NaCl）、硫酸銅（CuSO<sub>4</sub>）、乙二胺四乙酸四鈉（EDTA-4Na<sup>+</sup>）、活性碳粉（200 mesh）、陰離子凝集劑（聚丙烯酸鈉，簡稱ASAP）。

## 參、研究過程與方法

### 一. 微型霍夫曼電解裝置的組裝流程：

電解槽底座鑽孔 → 固定電極 → 固定氣體收集塑膠針筒 → 裝上三通閥（控制閥一個朝前，一個朝後）→ 組裝完成。相關過程如圖1、2為電極安裝、圖3為固定塑膠針筒、圖4為完成組裝的微型電解裝置。（圖1~圖4來源：第一作者自行拍攝）

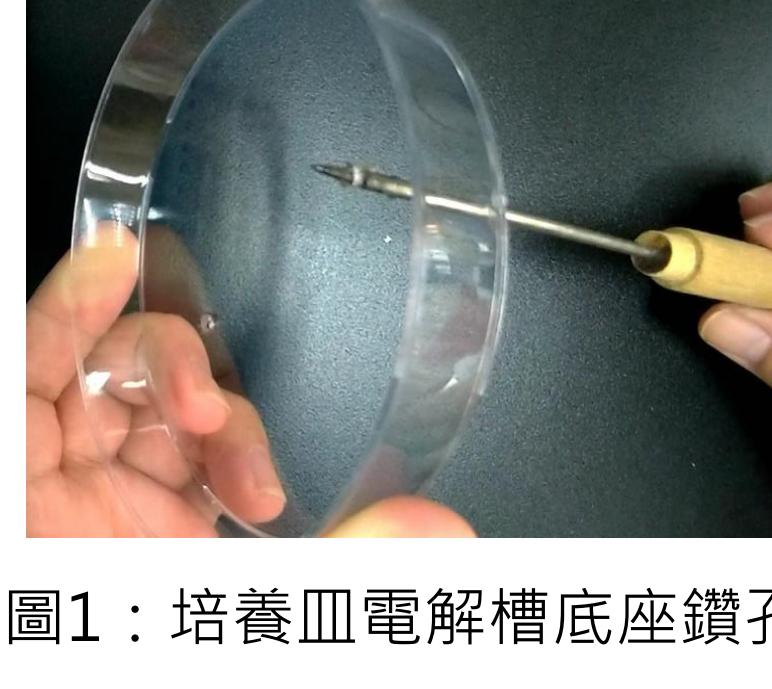


圖1：培養皿電解槽底座鑽孔



圖2：以熱熔膠固定電極

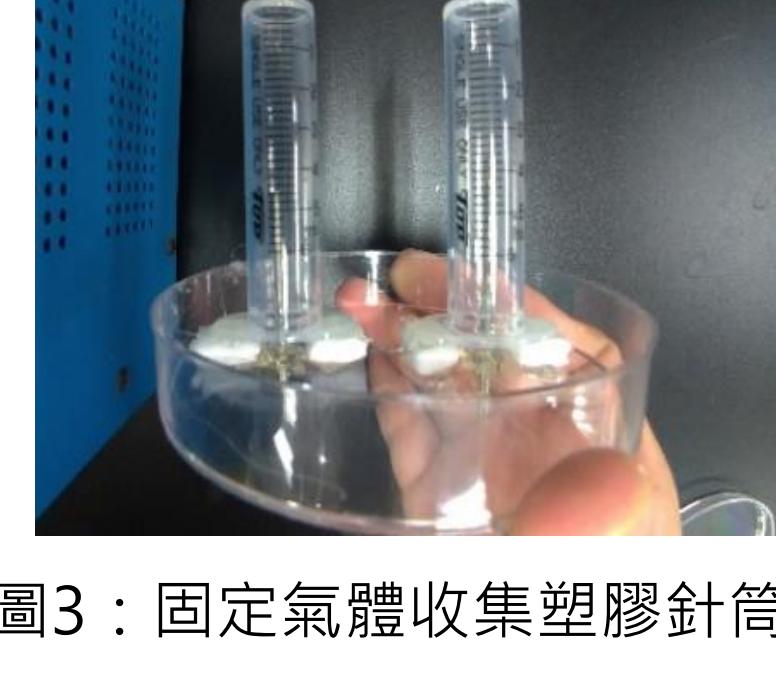


圖3：固定氣體收集塑膠針筒

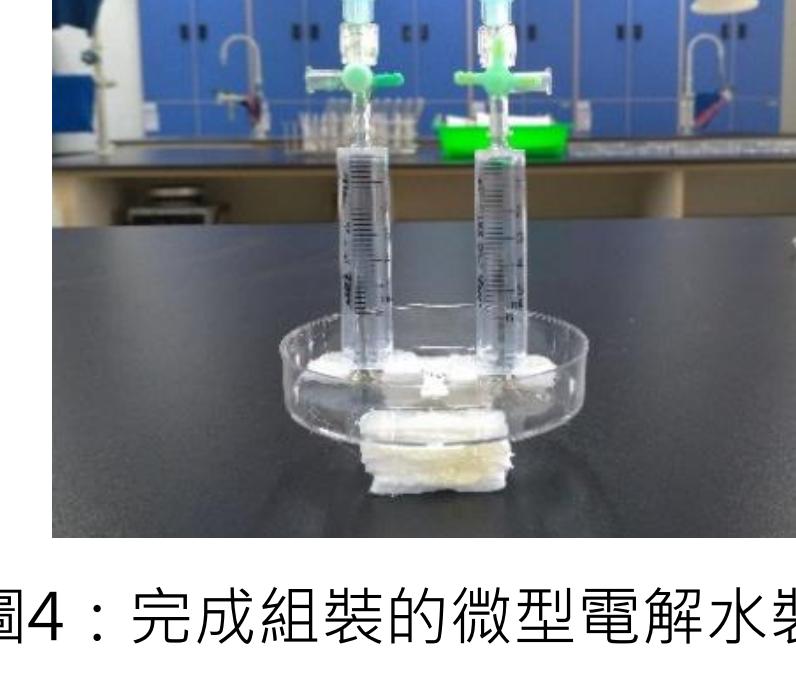
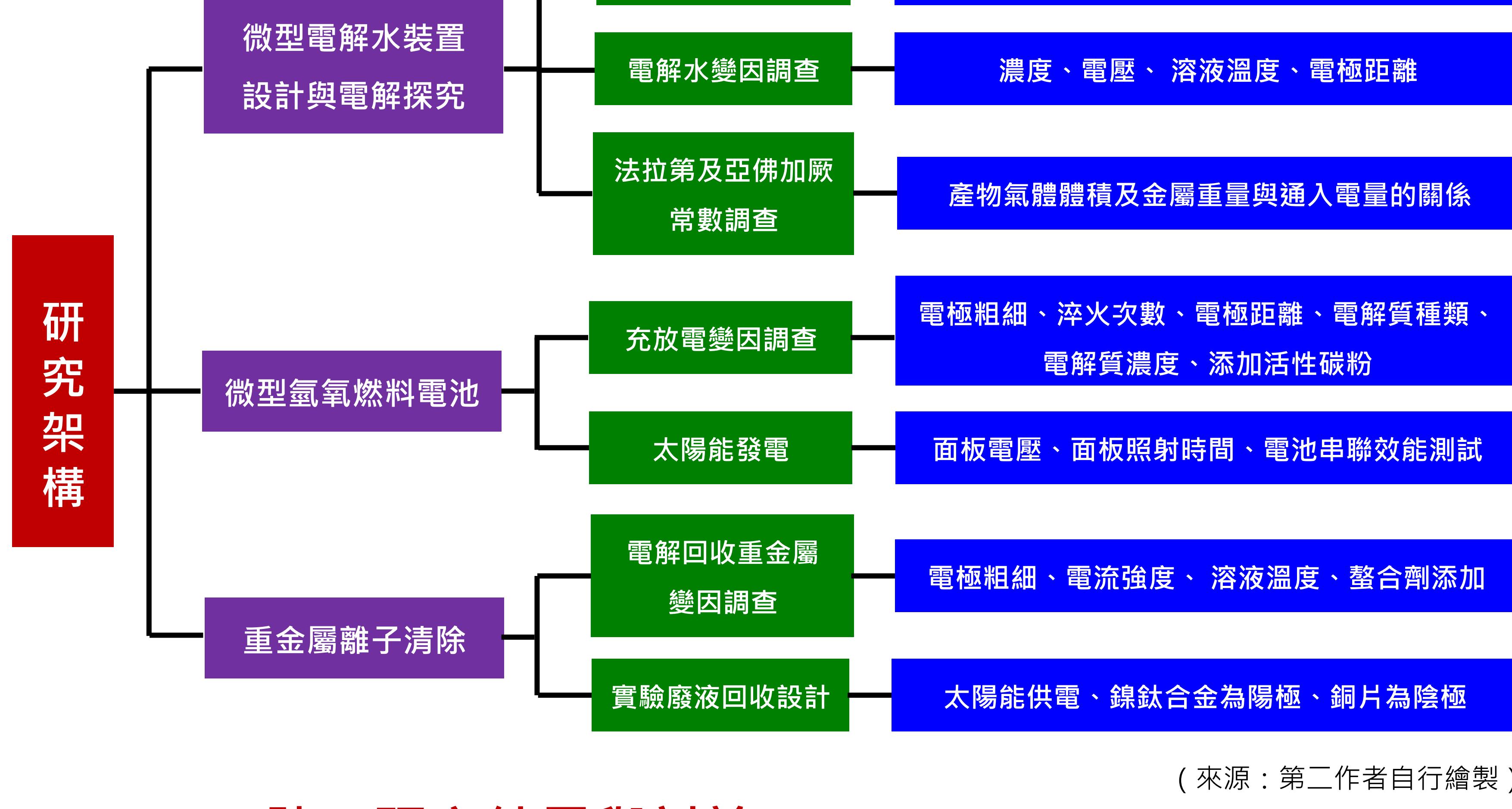


圖4：完成組裝的微型電解水裝置

### 二. 研究架構與環境應用：

運用微型電解水裝置，可進行多項變因探究：包括不同電解質電解產物的檢測；探討不同電極材質在酸鹼性溶液電解下，陰陽極產物的生成速率與體積比。利用收集陰極氣體體積的變化及銅離子還原增重變化量，推算法拉第電解常數並進一步驗證亞佛加厥常數。探討自製的微型氫氧燃料電池在不同變因下，如何影響氫氧電池的充電和放電情形。運用電解法探究不同條件下，銅離子清除率的差異。結合太陽能發電<sup>2</sup>，將太陽能轉化成氫能，並回收此次研究所製造的銅廢液。研究架構如右所示。



（來源：第二作者自行繪製）

## 肆、研究結果與討論

### 一. 電解水陰陽極產物氫氣與氧氣的體積比真的是2比1嗎？在固定電壓下，調查四種不同材質作為電極，電解不同酸鹼性的電解液，產物的氫氧體積比，結果如表1所示。

以鎳鈦合金作為電極，在定電壓下，電解五種不同酸鹼性的電解液，產物氫氣的生成速率與氫氧體積比，結果如表2所示。

【結果顯示】：2B鉛筆芯與碳鋅電池石墨棒作為電極，氫氧體積比與理論值2.00皆偏差較大，其中以碳鋅電池石墨棒在硫酸水溶液中的6.13最大；迴紋針與鎳鈦合金作為電極，氫氧體積比與理論值皆偏差較小，其中以鎳鈦合金更接近理論值。另外，以鎳鈦合金作為電極，在硫酸鎂溶液中，氫氣生成速率較慢；在硫酸水溶液中的生成速率最快。氫氧體積比以硝酸鈉1.74與理論值偏差最大<sup>3</sup>，硫酸2.02最接近理論值2.00。

（表1~表2來源：第二作者自行繪製）

表1：不同電極在酸鹼性溶液中的氫氧體積比

電極種類	氫/氧體積比 (V <sub>H<sub>2</sub></sub> /V <sub>O<sub>2</sub></sub> )		
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
2B 鉛筆芯	3.33	4.17	3.07
迴紋針	2.01	2.25	2.43
碳鋅電池石墨棒	3.33	1.91	6.13
鎳鈦合金	2.11	1.82	2.02

表2：鎳鈦合金在不同電解質中的氣體生成速率與氫氧體積比

電解質種類	時間 (sec)	生成速率 (mL/sec)	氫/氧體積比 (V <sub>H<sub>2</sub></sub> /V <sub>O<sub>2</sub></sub> )
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	388.1	0.00515	2.11
NaNO <sub>3</sub>	325.0	0.00615	1.74
NaOH	265.2	0.00754	1.82
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	106.4	0.01880	2.02
MgSO <sub>4</sub>	425.6	0.00470	1.86

### 二. 影響電解變因的探究，使用鎳鈦合金電極作為探討影響電解的因素，變因包括電解質濃度、電壓、溶液溫度及電極距離的不同。

(一) 定電壓10伏特，電解不同濃度的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，其電解結果如下圖所示。【結果顯示】：H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>濃度愈高，氫氣生成速率愈快，濃度愈低，生成速率愈慢。

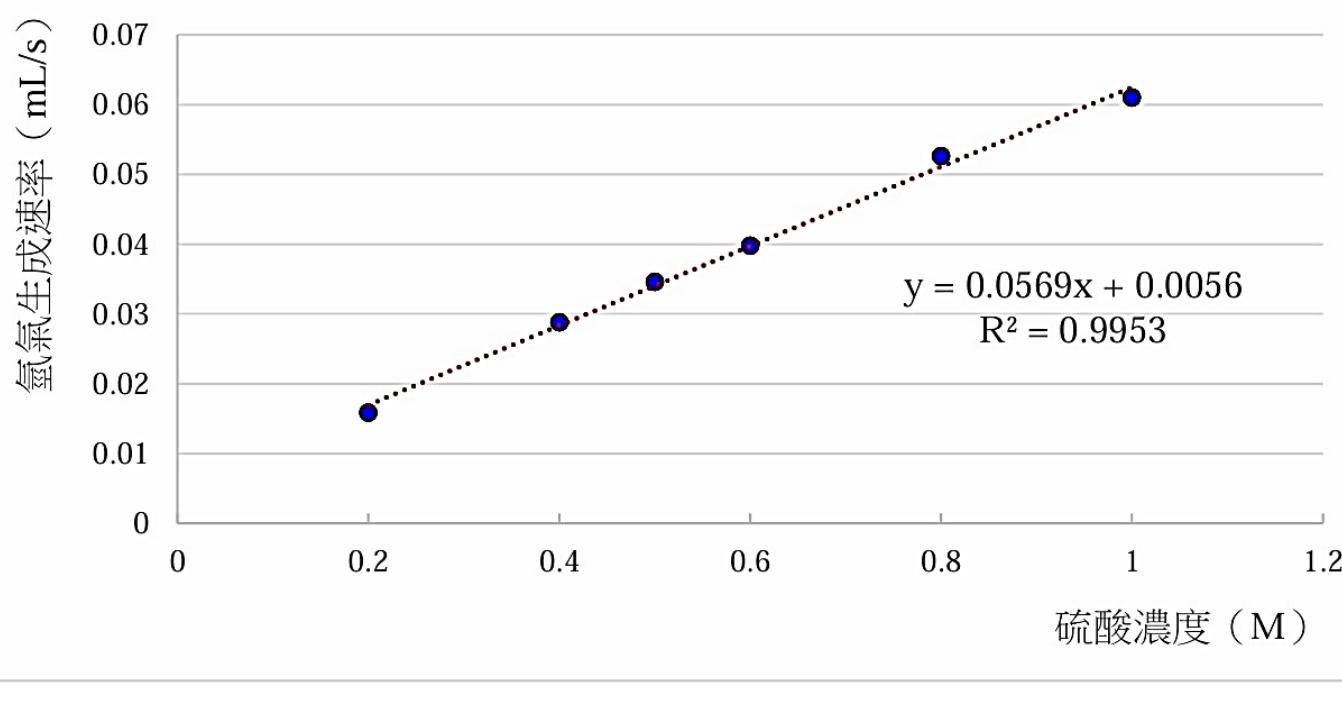


圖5：氫氣生成速率 (mL/s) 與濃度 (M) 的關係圖

(二) 電解0.5 M的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，在不同電壓下的電解結果如下圖所示。【結果顯示】：電壓愈高，氫氣生成速率愈快，電壓愈低，生成速率愈慢。

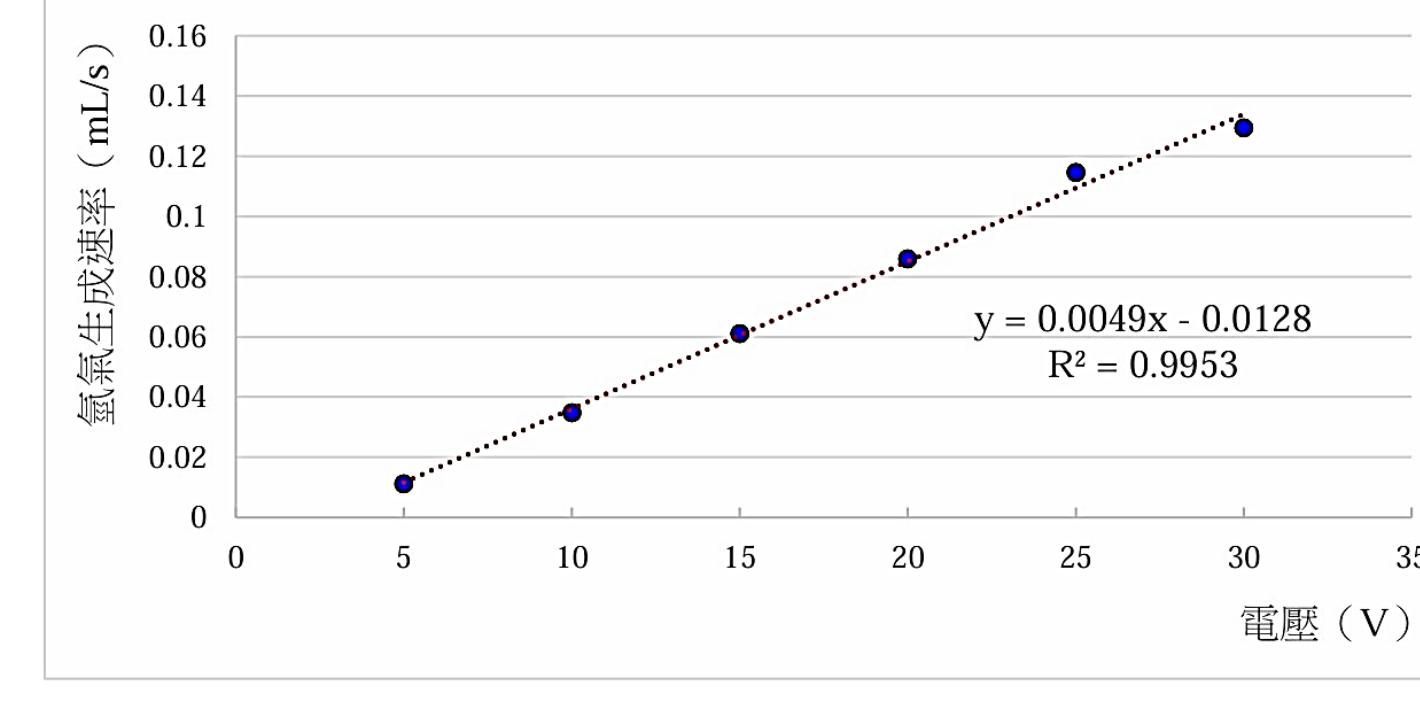


圖6：氫氣生成速率 (mL/s) 與電壓 (V) 的關係圖

(三) 定電壓，電解0.5 M的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，在不同溫度下電解結果如下圖所示。【結果顯示】：溫度愈高，氫氣的生成速率愈快，溫度愈低，生成速率愈慢。

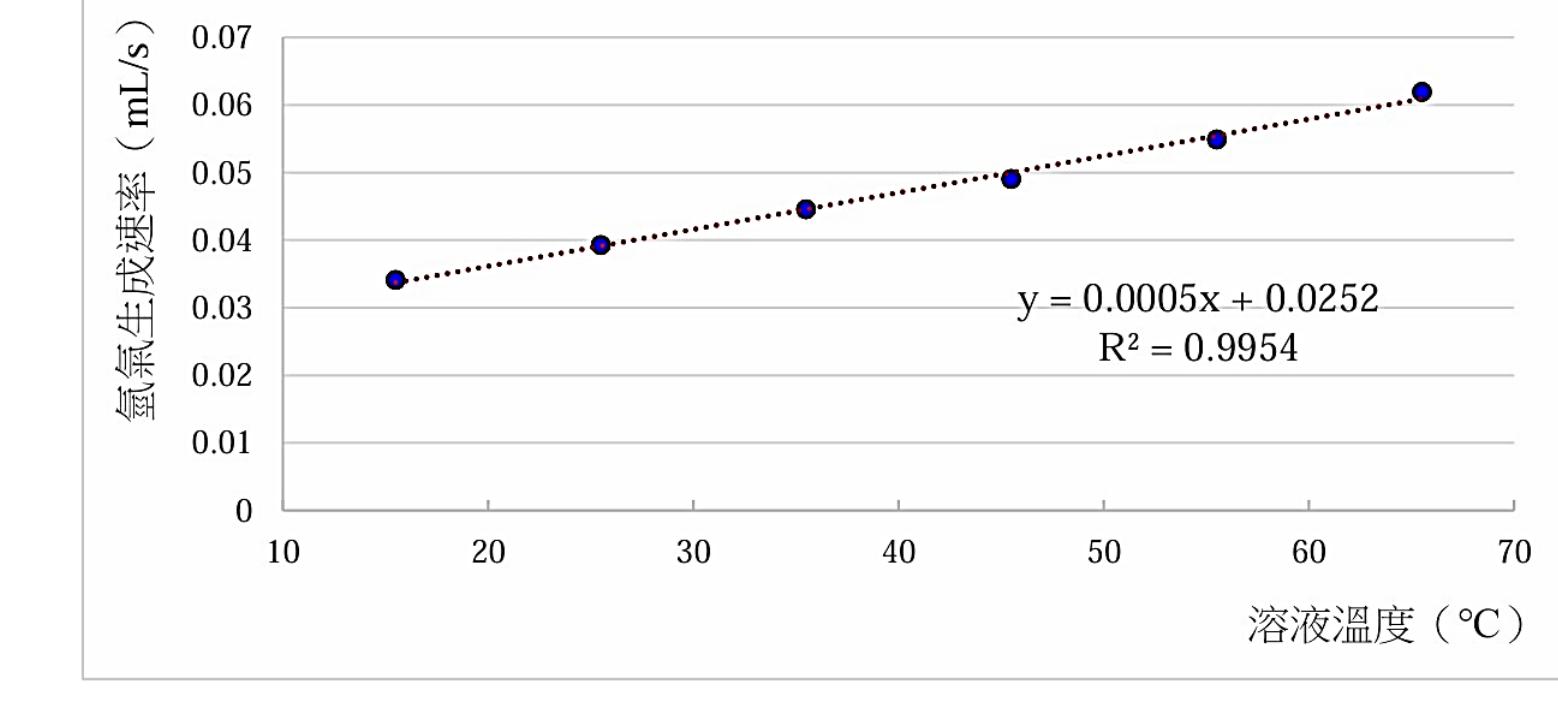


圖7：氫氣生成速率 (mL/s) 與溶液溫度 (°C) 的關係圖

(四) 定電壓10伏特，電解0.5 M的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，在不同距離下的電解結果如下圖所示。【結果顯示】：電極距離愈近，氫氣的生成速率愈快；距離愈遠，生成速率愈慢。

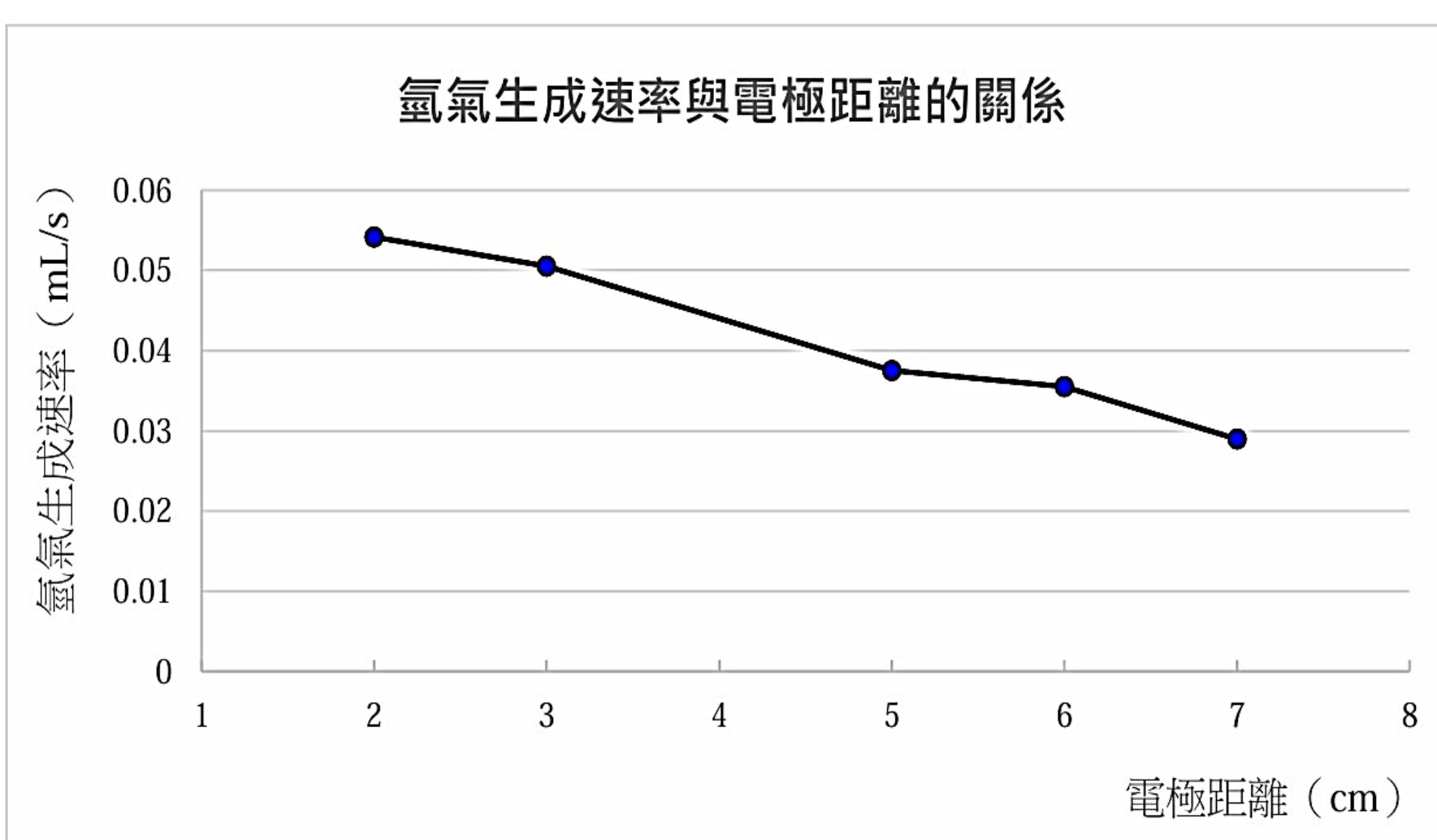


圖8：氫氣生成速率 (mL/s) 與電極距離 (cm) 的關係圖

(圖5～圖8來源：第二作者自行繪製)

### 三. 可以利用微型電解裝置驗證法拉第常數及亞佛加厥常數嗎？

(一) 定電流0.24安培，電解0.5 M的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，收集陰極H<sub>2</sub>氣體2 mL (室溫17°C，水的飽和蒸汽壓為14.5 mm-Hg；針筒內液面高度差2.2 cm)，藉此推算法拉第常數及亞佛加厥常數，相關數據如表3所示。

【結果顯示】：法拉第常數5次平均值95601.1±1510.3，跟理論值96485誤差在-0.92%以內。亞佛加厥常數5次平均值5.98×10<sup>23</sup>，跟理論值6.02×10<sup>23</sup>誤差在-0.80%以內。

(圖9～圖10來源：第一作者自行繪製)

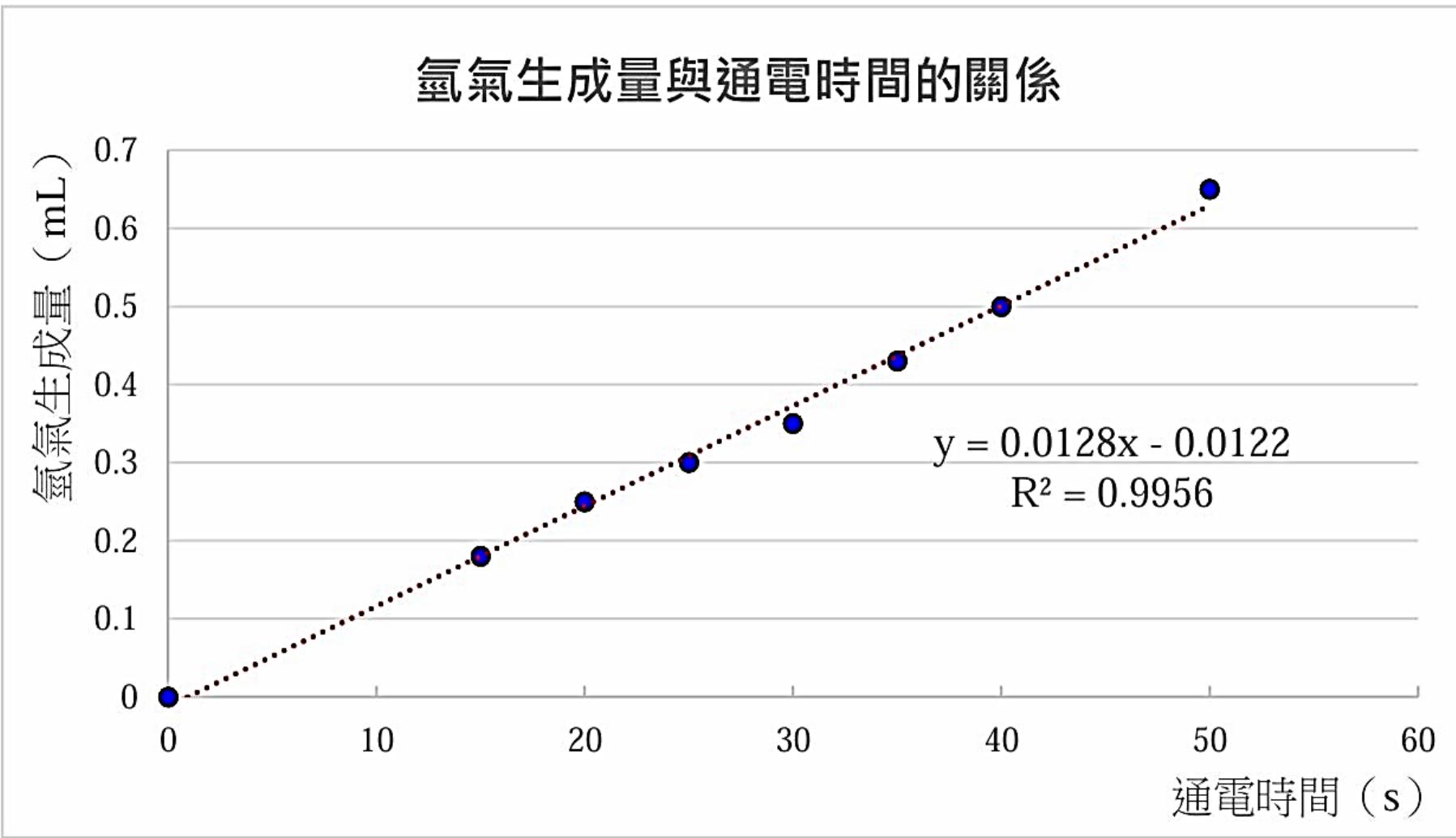


圖9：定電流0.1 A，氫氣生成量與通電時間的正比關係圖

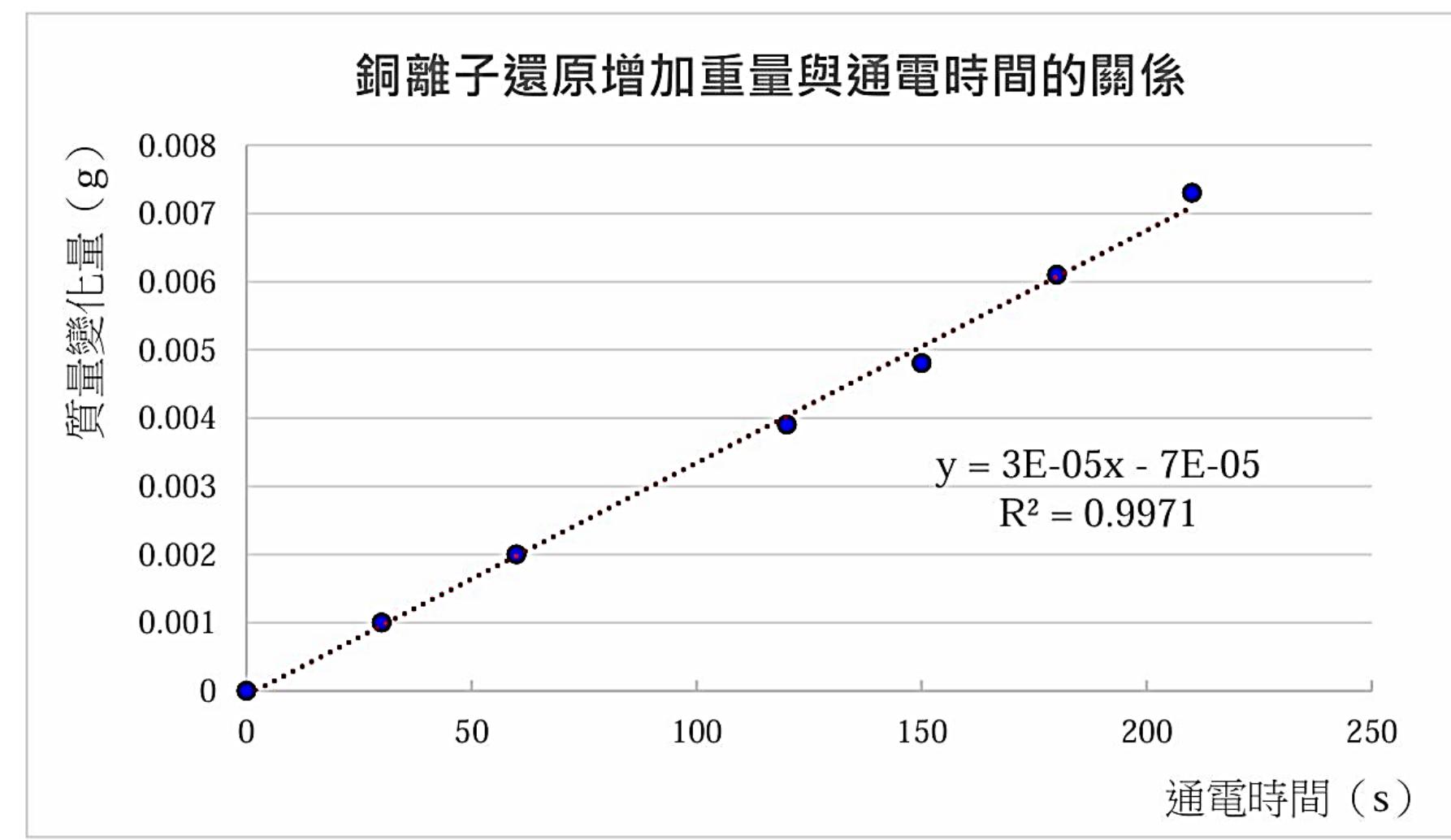


圖10：定電流0.1 A，質量變化量與通電時間的正比關係圖

(二) 定電流0.1 A，電解0.5 M的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，探討陰極H<sub>2</sub>氣體體積變化量ΔV與通電時間t的關係。

【結果顯示】：法拉第常數平均值96865.2±1847.8，跟理論值誤差在0.39%以內。亞佛加厥常數平均值6.05×10<sup>23</sup>，跟理論值誤差在0.52%以內。以通電時間t為橫坐標，氫氣的生成量ΔV為縱座標作圖，兩者的相關係數達0.9956，其結果如圖9所示。

(三) 定電流0.1 A，電解0.5 M的CuSO<sub>4</sub>(aq)，探討陰極銅離子還原增加重量ΔW與通電時間t的關係。【結果顯示】：法拉第常數平均值95481.0±1357.8，跟理論值誤差在-1.04%以內。亞佛加厥常數平均值5.97×10<sup>23</sup>，跟理論值誤差在-0.92%以內。以通電時間t為橫坐標，銅離子還原增加重量ΔW為縱座標作圖，兩者的相關係數達0.9971，其結果如圖10所示。

表3：定電流0.24安培下，法拉第常數及亞佛加厥常數值

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均值	誤差
常數 F	97072.6	94722.9	97791.4	93592.9	94825.6	95601.1	- 0.92%
常數 N <sub>A</sub>	6.07×10 <sup>23</sup>	5.92×10 <sup>23</sup>	6.11×10 <sup>23</sup>	5.85×10 <sup>23</sup>	5.93×10 <sup>23</sup>	5.98×10 <sup>23</sup>	- 0.80%

(來源：第一作者自行繪製)

四. 可以利用電解產生的潔淨能源氫氣進行發電嗎？使用碳鋅電池石墨棒電極（圖11）作為探討氫氧燃料電池充電和放電情形（圖12），變因包括電極粗細、碳棒淬火次數、電極距離、電解質種類與濃度、添加活性碳粉量（圖13）、太陽能面板電壓及面板照射時間的不同。綜合最佳化氫氧燃料電池的放電情形，並進行電池組串聯的效能研究。（圖11～圖13來源：第三作者自行拍攝）

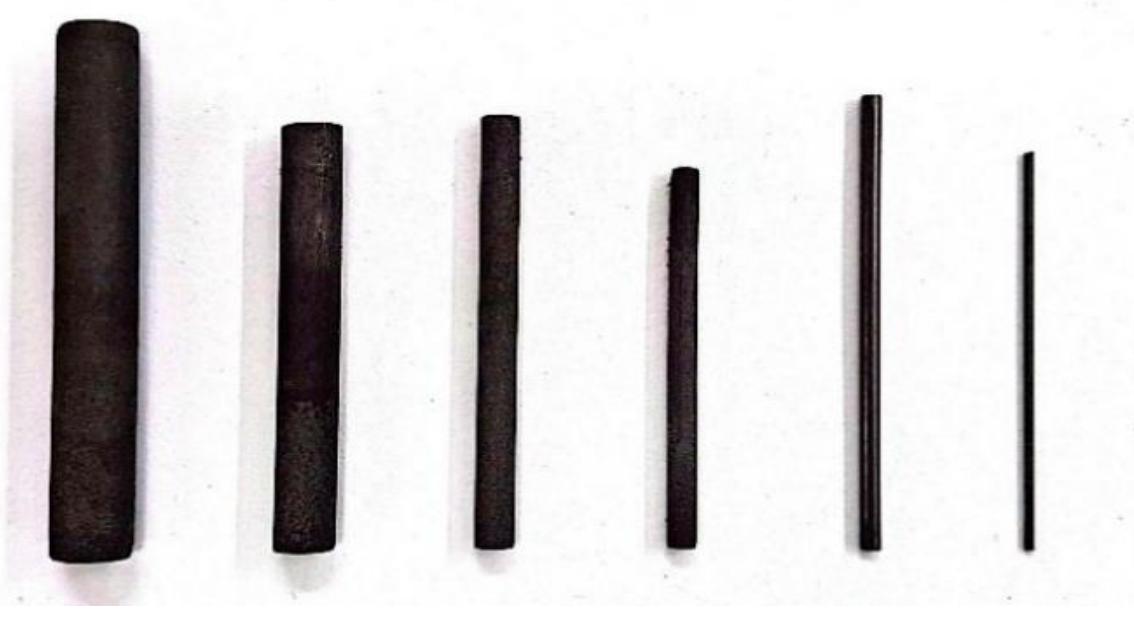


圖11：不同粗細的乾電池碳棒及2B鉛筆芯

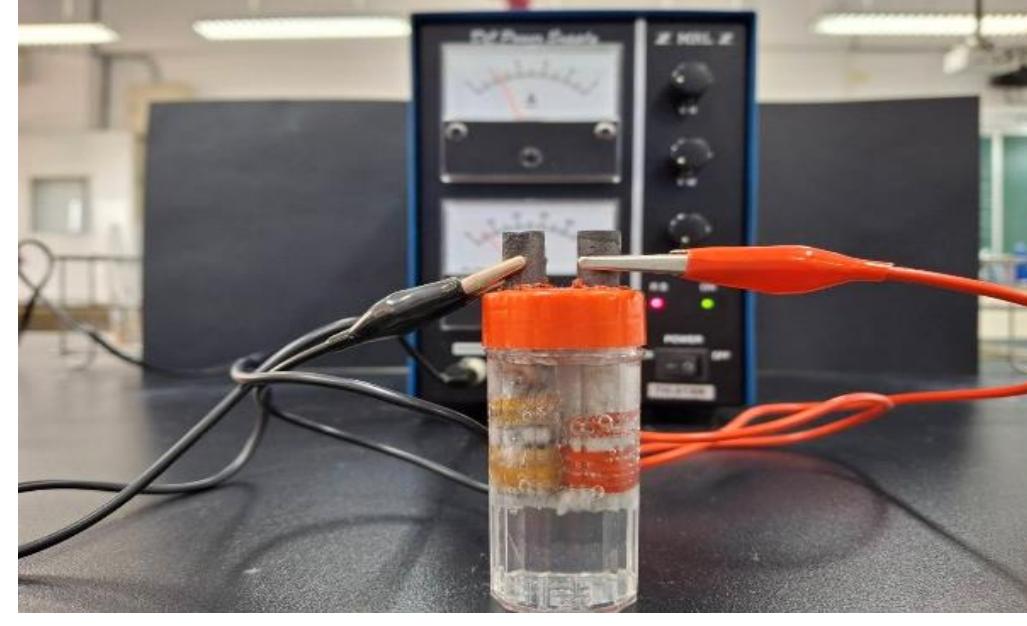


圖12：微型氫氧燃料電池電解過程

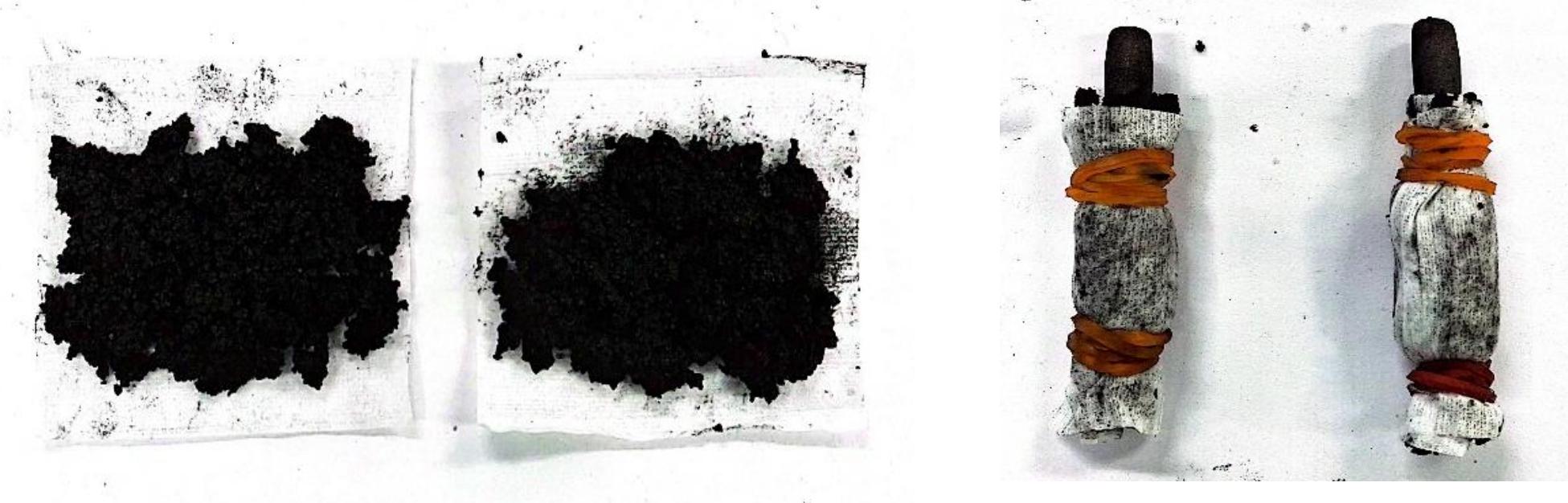


圖13：圖左為活性碳粉膠體，圖右為滾成棒狀的正負極電極芯

(一) 定電壓5伏特，充電時間5分鐘，不同粗細的石墨電極，電池放電情形如下圖所示。【結果顯示】：電極直徑愈大，馬達轉動時間愈長；電極直徑愈小，馬達轉動時間愈短。

(二) 定電壓5伏特，充電時間5分鐘，改變碳棒淬火的次數<sup>4</sup>，電池放電情形如下圖所示。【結果顯示】：碳棒淬火次數愈多，轉動時間愈長；未淬火，馬達轉動時間最短。

(三) 定電壓5伏特，充電時間5分鐘，改變不同電極的距離，電池放電情形如下圖所示。【結果顯示】：電極距離愈近，馬達轉動時間愈長；電極距離愈遠，馬達轉動時間愈短。

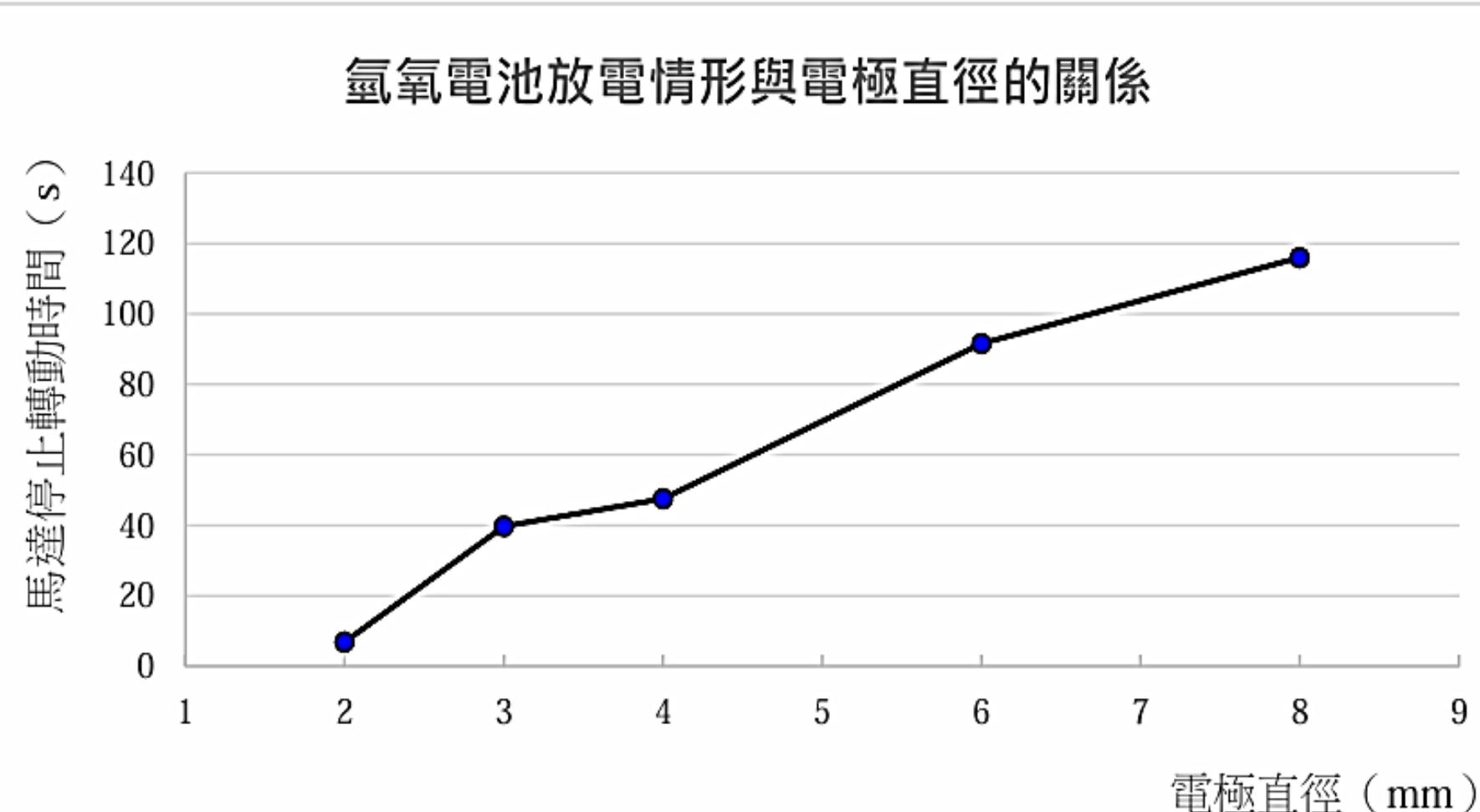


圖14：電池放電情形 (s) 與電極直徑 (mm) 的關係圖

(四) 定電壓5伏特，充電時間5分鐘，改變電解質的種類，電池放電情形如下圖所示。【結果顯示】：氯化鈉溶液馬達轉動時間662.0最長，碳酸鈉溶液轉動時間206.5最短。

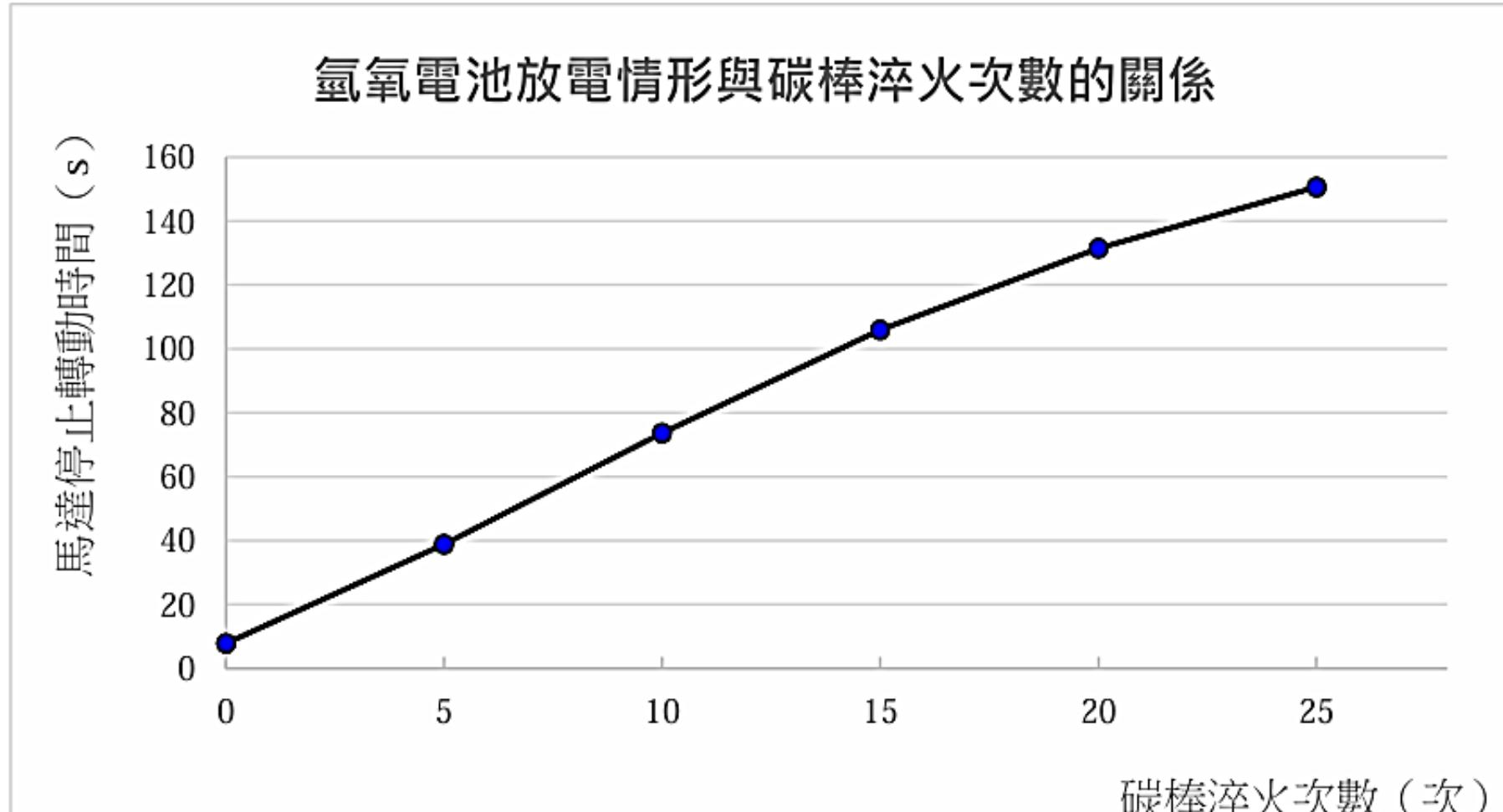


圖15：電池放電情形 (s) 與碳棒淬火次數 (次) 的關係圖

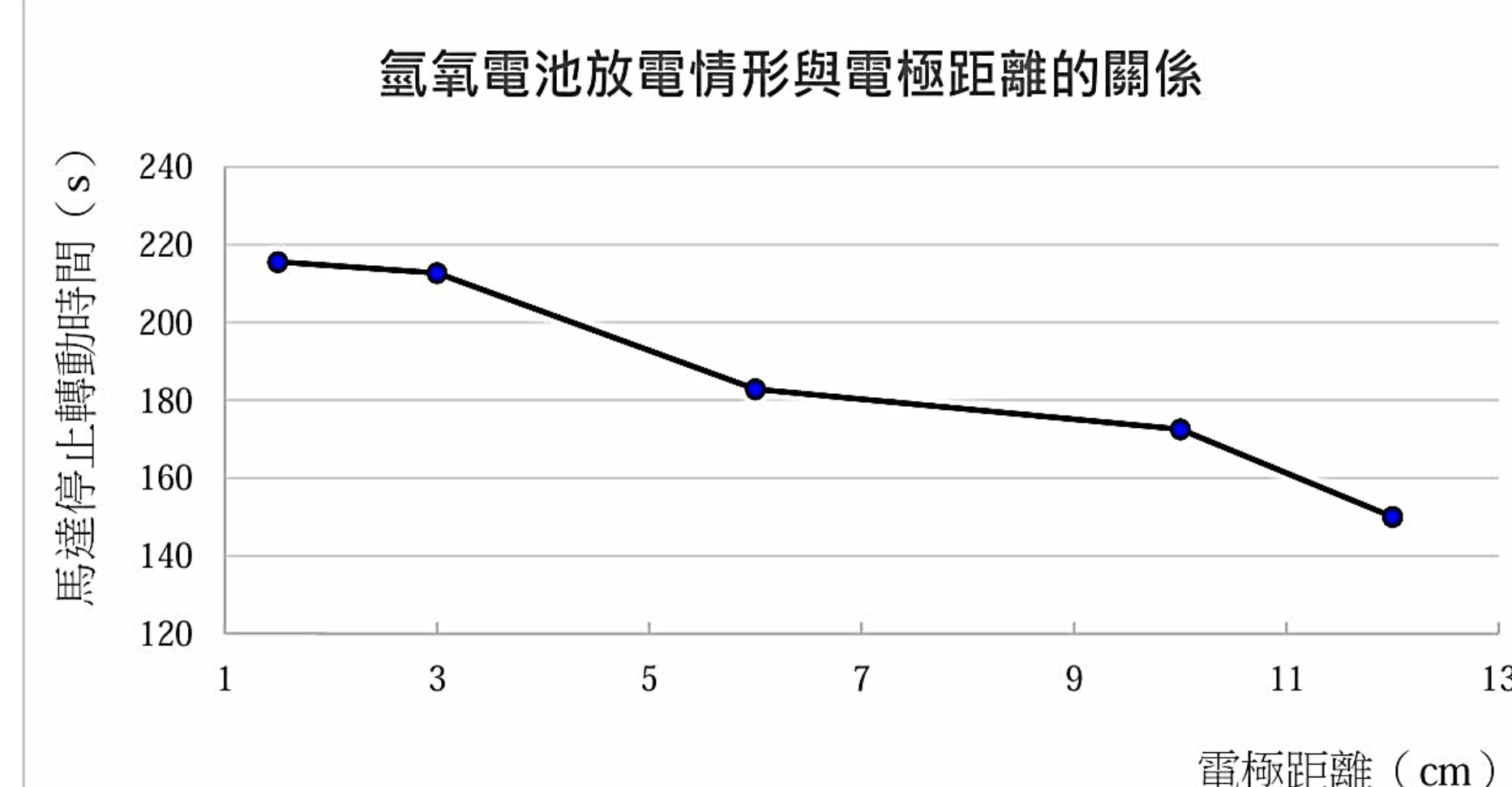


圖16：電池放電情形 (s) 與電極距離 (cm) 的關係圖

(五) 定電壓充電時間5分鐘，電解不同濃度的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(aq)，放電情形如下圖所示。【結果顯示】：濃度為0.75 M，馬達轉動時間最長；濃度為0.10 M，馬達轉動時間最短。

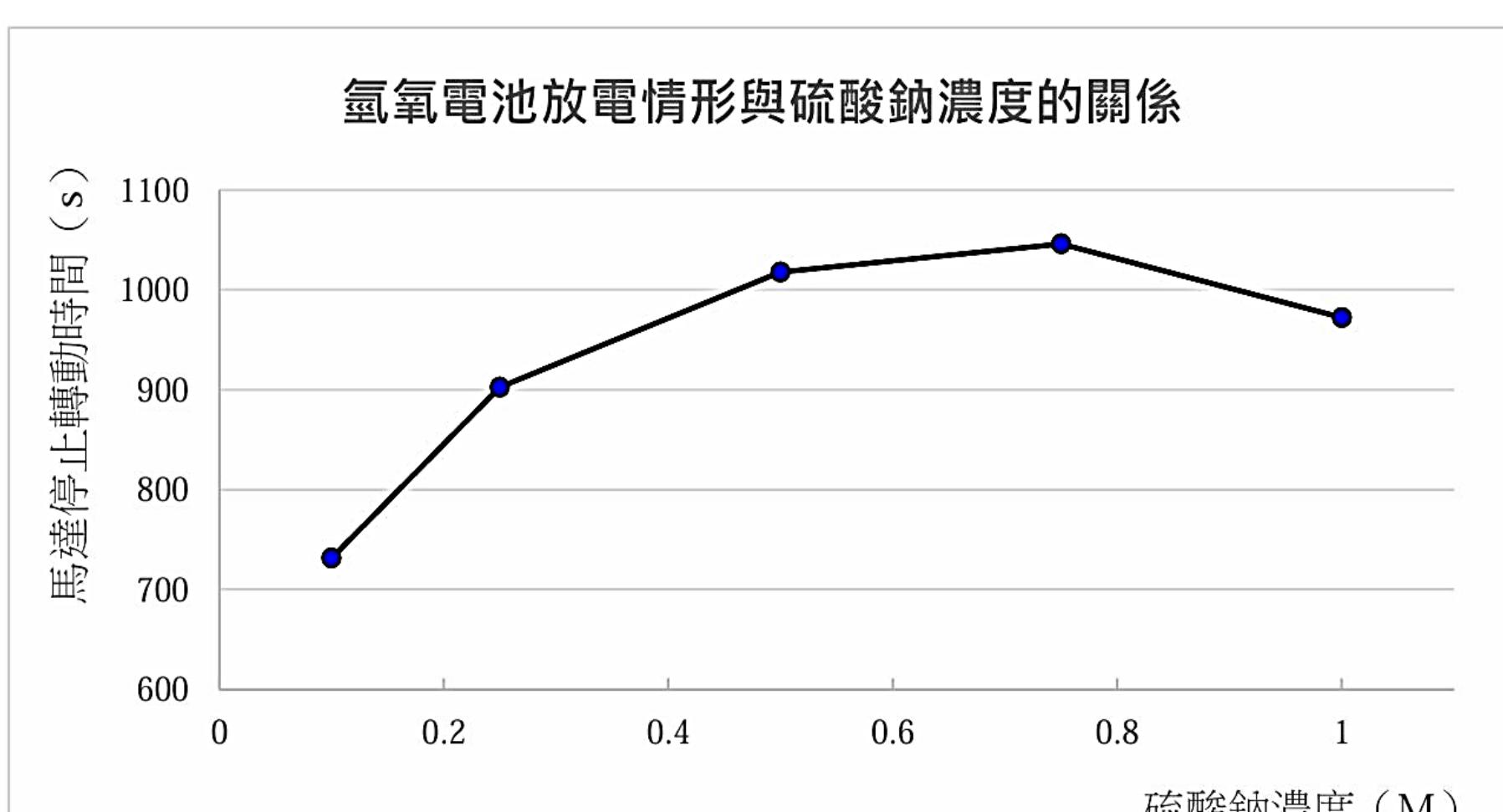


圖17：氫氧電池放電情形 (s) 與電解質種類的關係圖

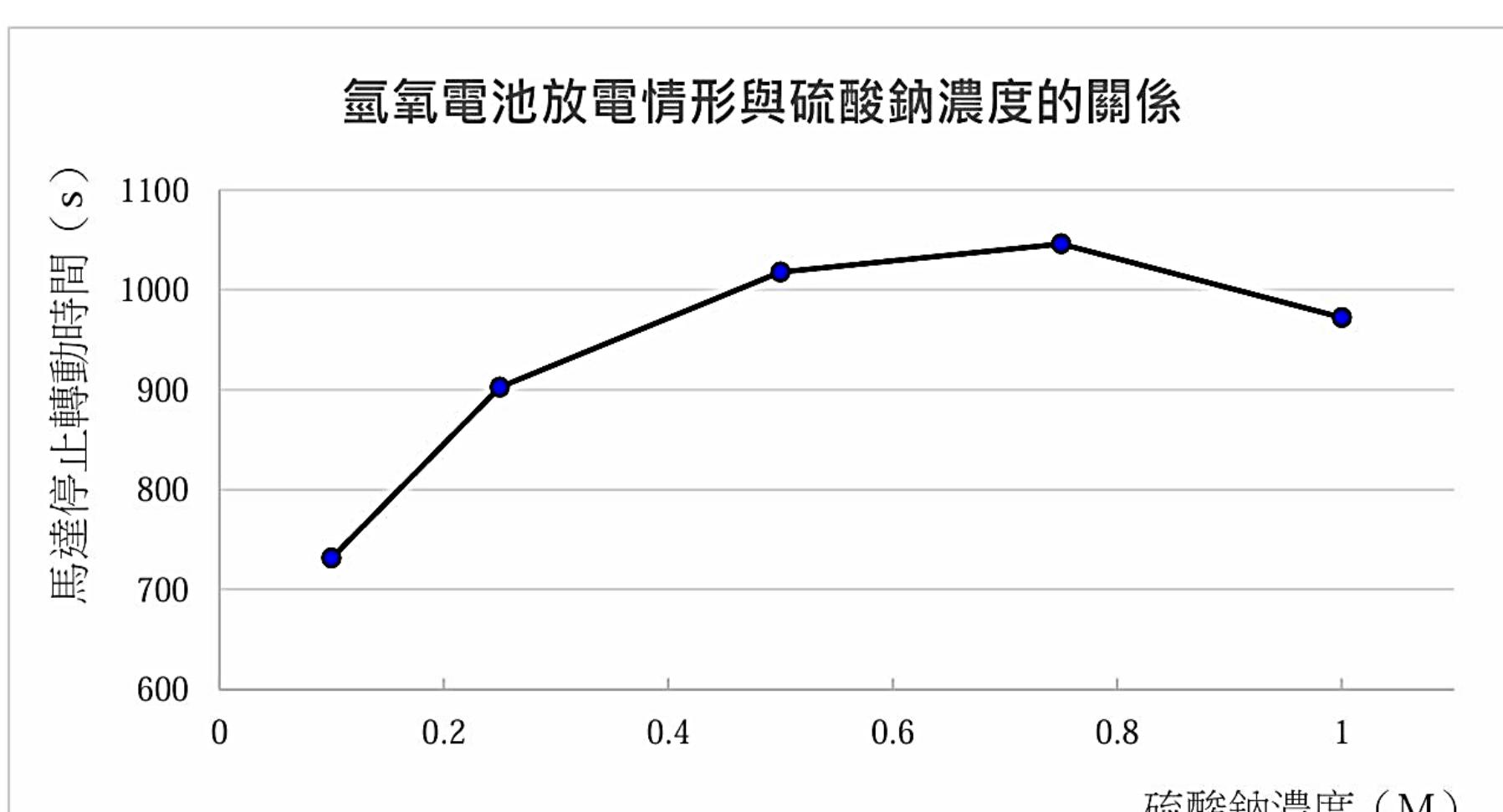


圖18：氫氧電池放電情形 (s) 與濃度 (M) 的關係圖

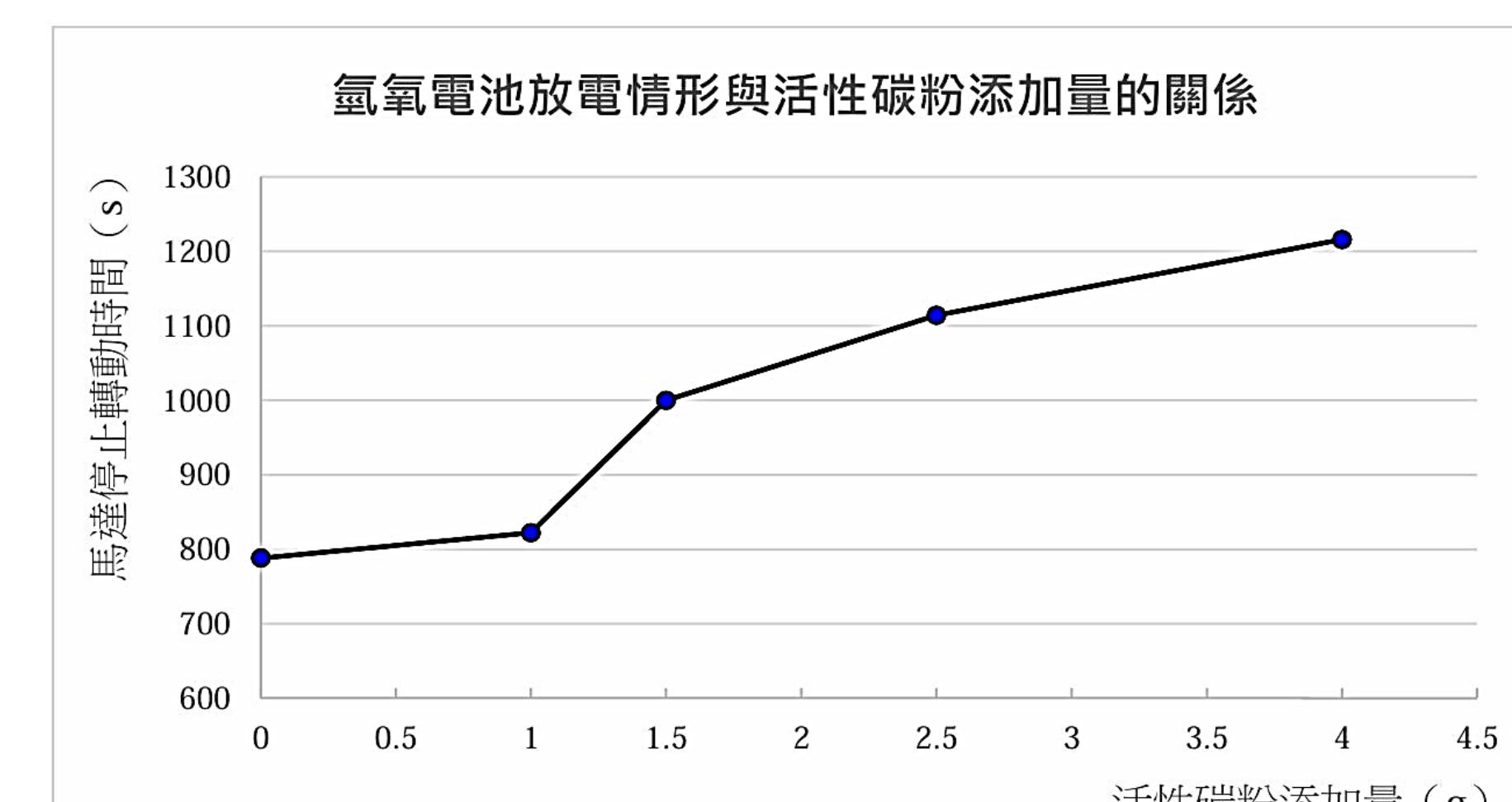


圖19：電池放電情形 (s) 與活性碳粉添加量 (g) 的關係圖

(圖14～圖20來源：第一作者自行繪製及拍攝)

(七) 充電時間5分鐘，以不同太陽能面板電壓電解（圖20），放電電壓與電流變化情形如圖21、22，電池電能轉換效率如表4所示。

【結果顯示】：面板電壓3 V，電能轉換效率6.08%最高，馬達轉動時間380秒最短；面板電壓5.5 V，電能轉換效率2.19%最低，馬達轉動時間613秒最長。

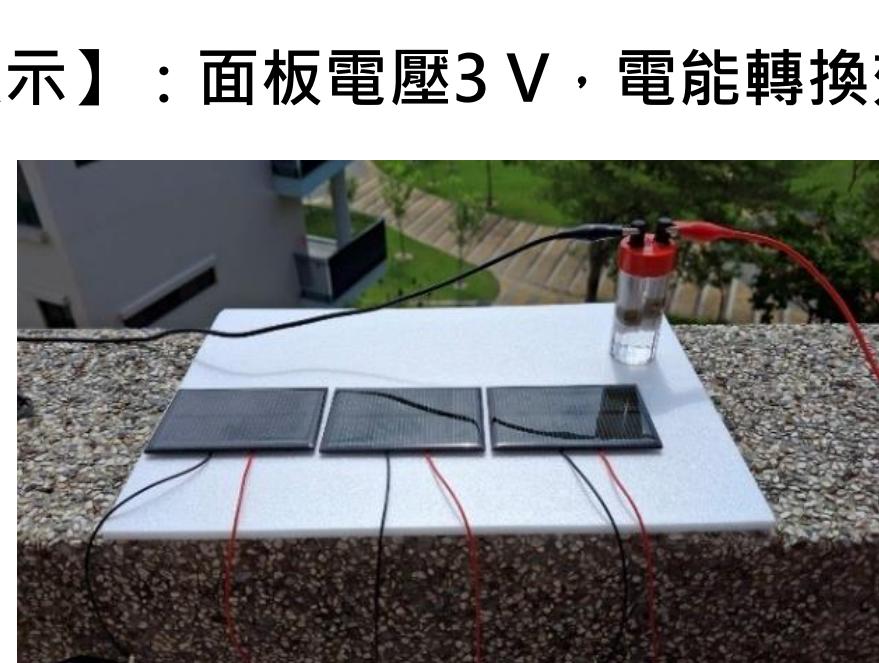


圖20：利用太陽能面板將太陽能轉化成氫能

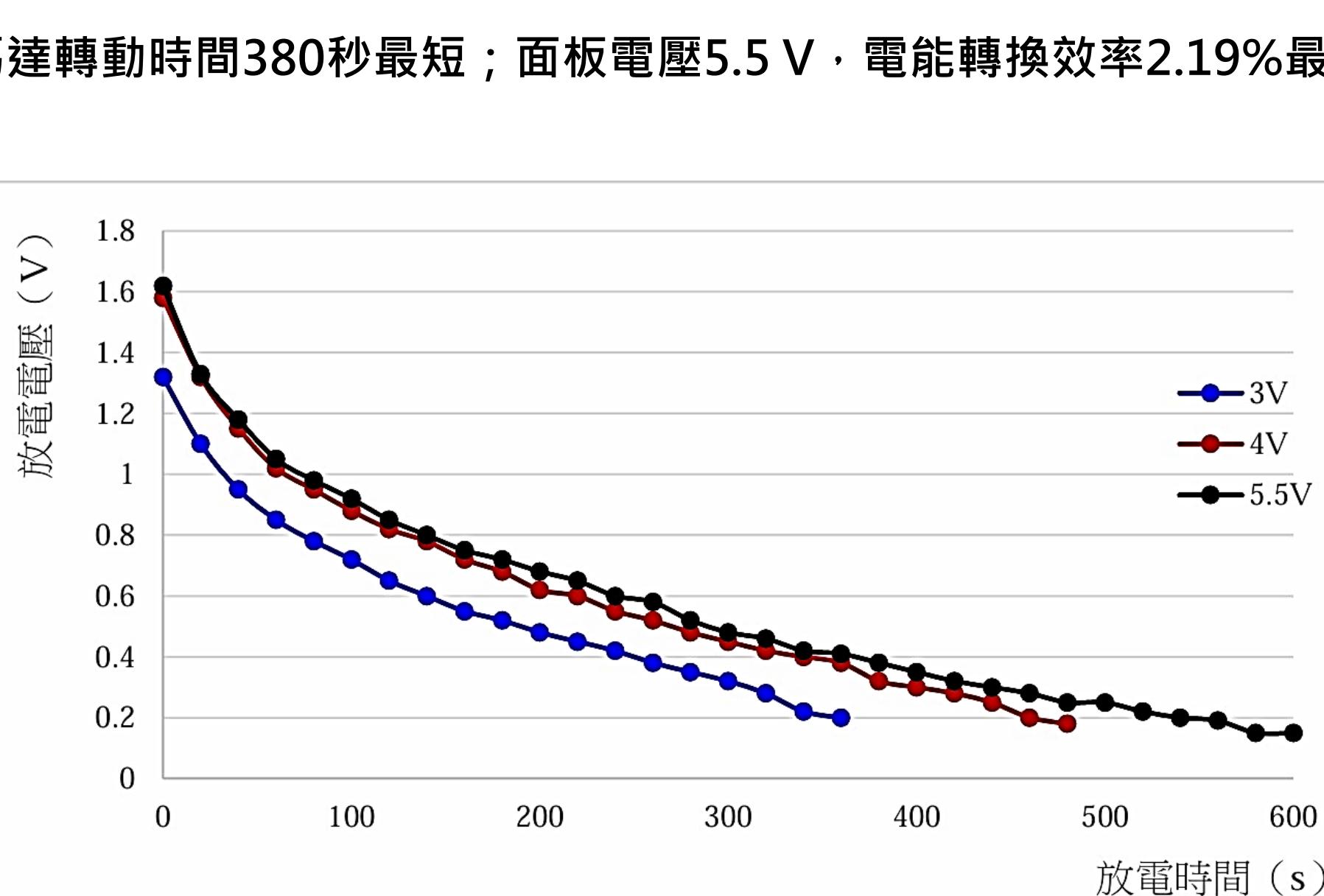


圖21：不同面板電壓電解，電池放電電壓隨時間的變化圖

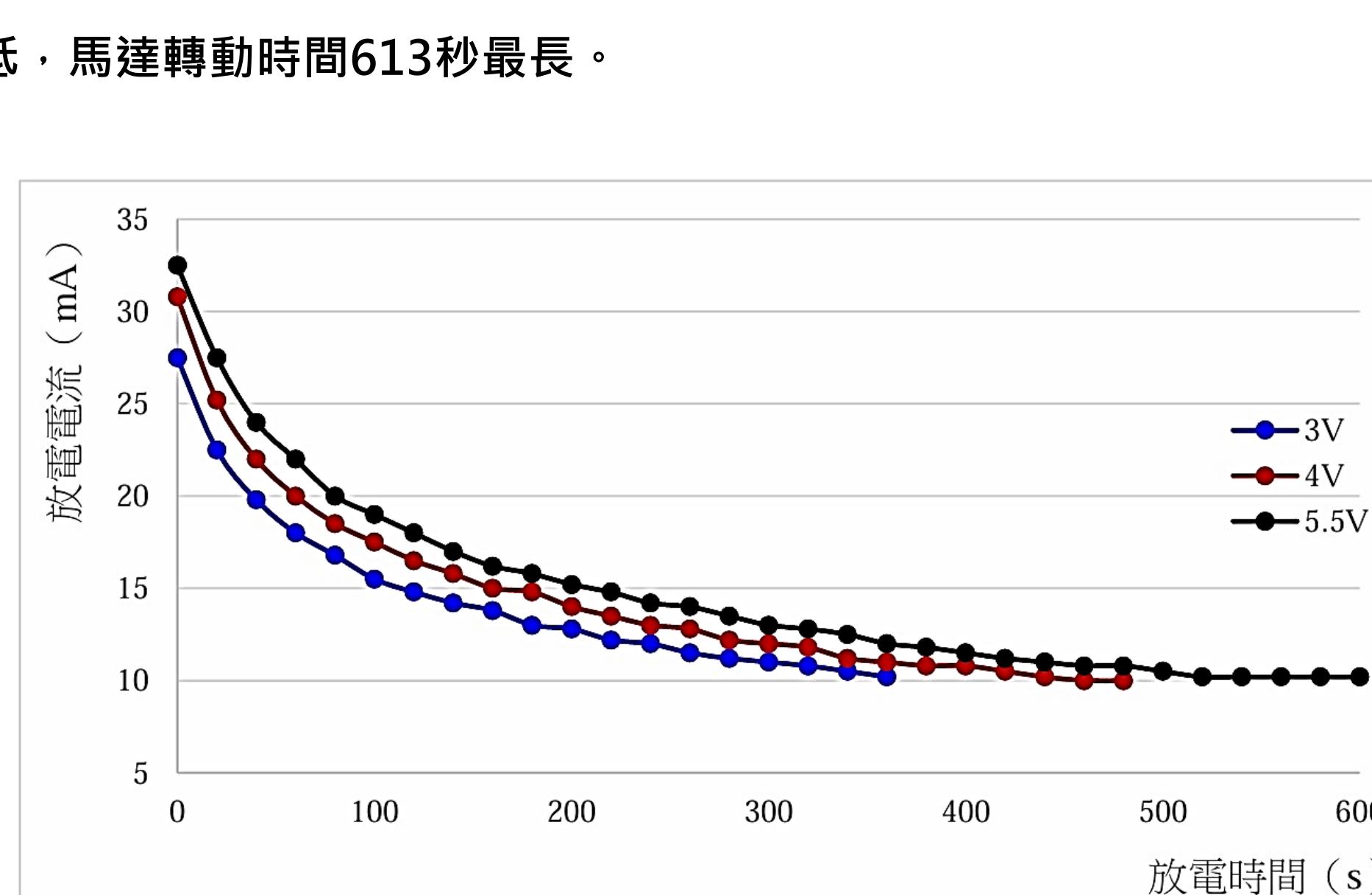


圖22：不同面板電壓電解，電池放電電流隨時間的變化圖

(表4及圖21、圖22來源：第三作者自行繪製)

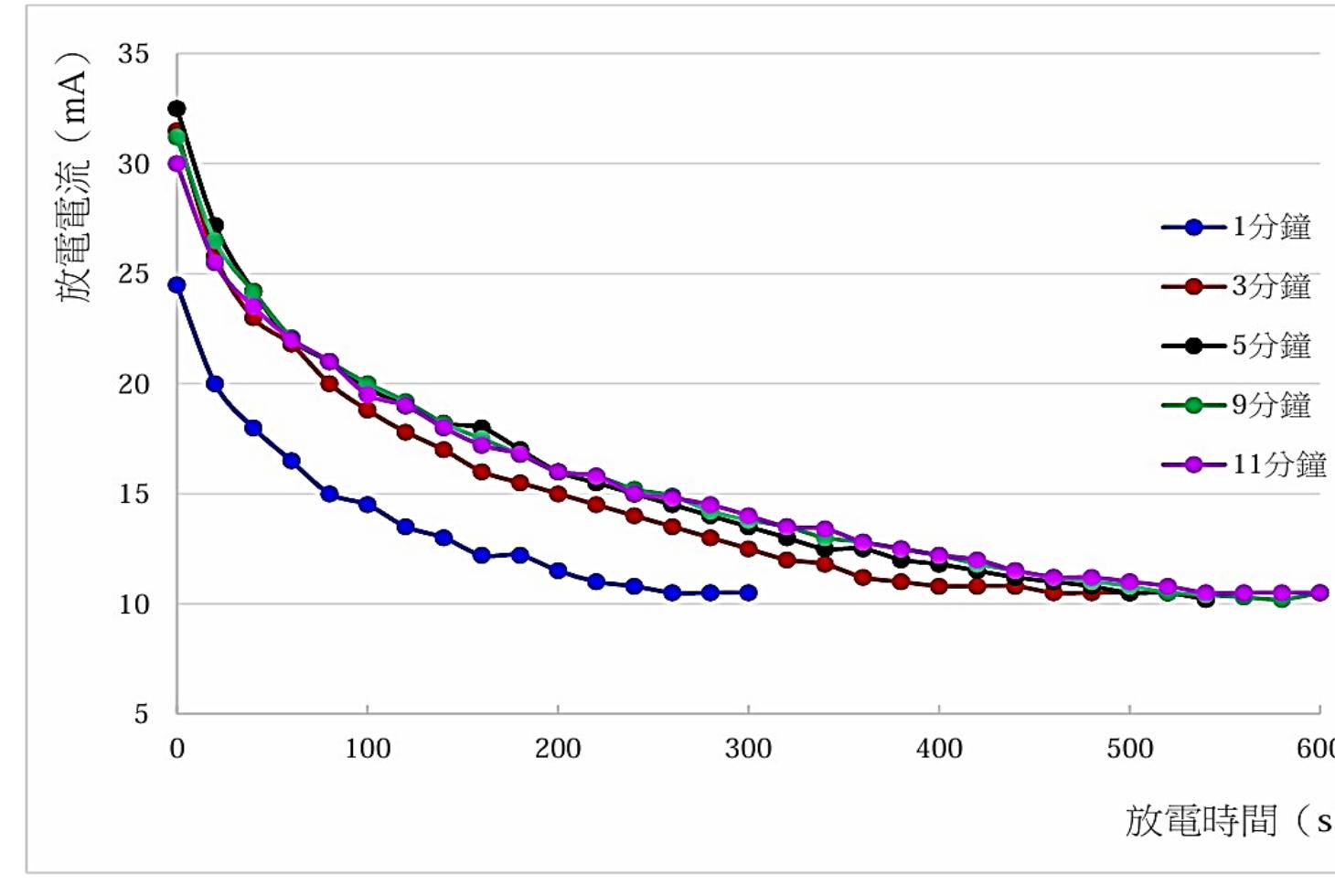
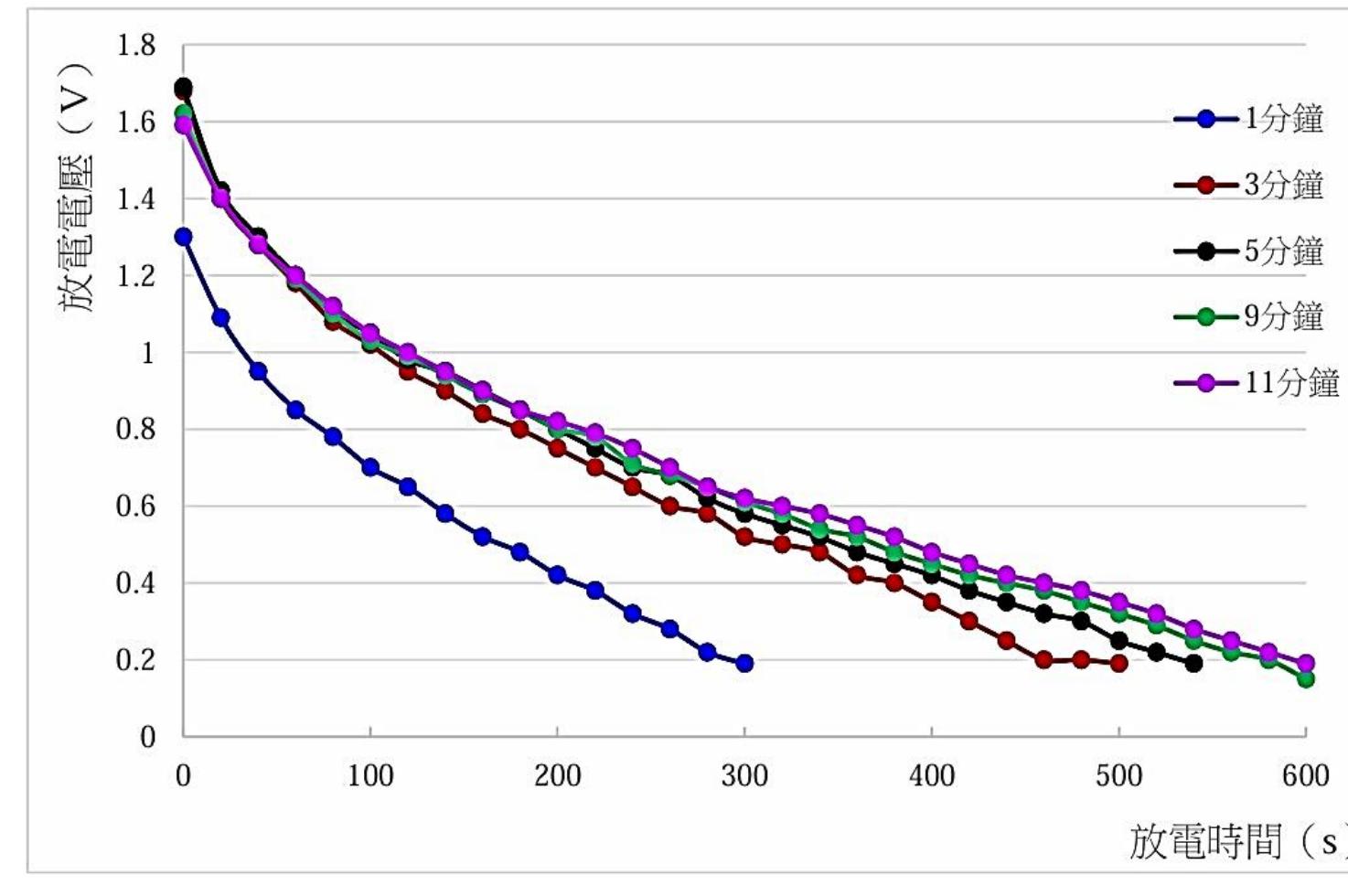
面板電壓 (V)	充電電能 (J)	放電電能 (J)	充放電能轉換效率 (%)	放電至 0.2V 時間 (秒)
3	55	3.37	6.08%	360
4	152	5.07	3.34%	460
5.5	275	6.04	2.19%	540

(八) 太陽能面板電壓3伏特，以不同太陽能面板照射時間電解，放電電壓與電流變化情形如圖23、24，電池電能轉換效率如表5所示。

【結果顯示】：照射時間1分鐘，電能轉換效率15.38%最高，馬達轉動時間300秒最短；照射時間11分鐘，電能轉換效率3.62%最低，馬達轉動時間604秒最長。

表5：不同太陽能面板照射時間，電池電能轉換效能

照射時間 (min)	充電電能 (J)	放電電能 (J)	充放電能轉換 效率 (%)	放電至 0.2V 時間 (秒)
1	17.9	2.76	15.38%	280
3	51.3	6.10	11.89%	480
5	69.8	6.93	9.93%	540
9	126.6	7.16	5.65%	580
11	200.0	7.23	3.62%	600



(表5及圖23、圖24來源：第三作者自行繪製)

圖23：不同照射時間，電池放電電壓隨時間的變化圖

圖24：不同照射時間，電池放電電流隨時間的變化圖

(九) 太陽能微型氫氧燃料電池組串聯效能測試，將最佳化燃料電池組串聯後，連接數位三用電表並接上紅色、白色LED燈，測量電壓及電流變化，以及燈泡發光情形。

【結果顯示】：雙電池及三電池串連後，電壓分別為4.1 V及5.6 V。連接紅色LED，當電池電壓愈高時，其電功率也愈高，可分別供電紅色LED約10分鐘及15分鐘。



圖25：圖左為雙電池串聯後的電池電壓 (未接LED)，圖右為連接紅色LED的電壓



圖26：圖左為三電池串聯後的電池電壓 (未接LED)，圖右為連接白色LED的電壓

(圖25~圖26來源：第一、二作者自行拍攝)

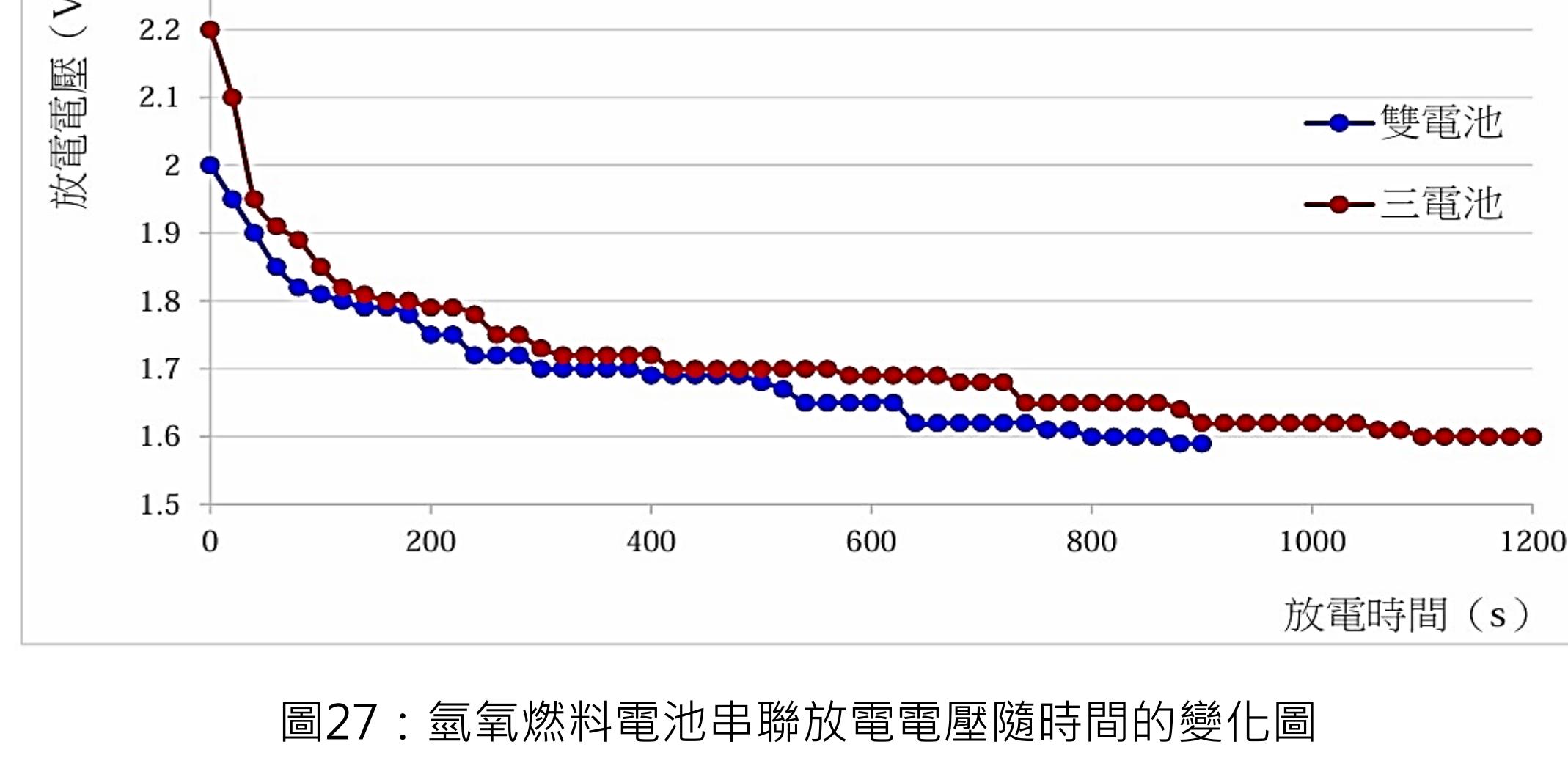


圖27：氫氧燃料電池串聯放電電壓隨時間的變化圖

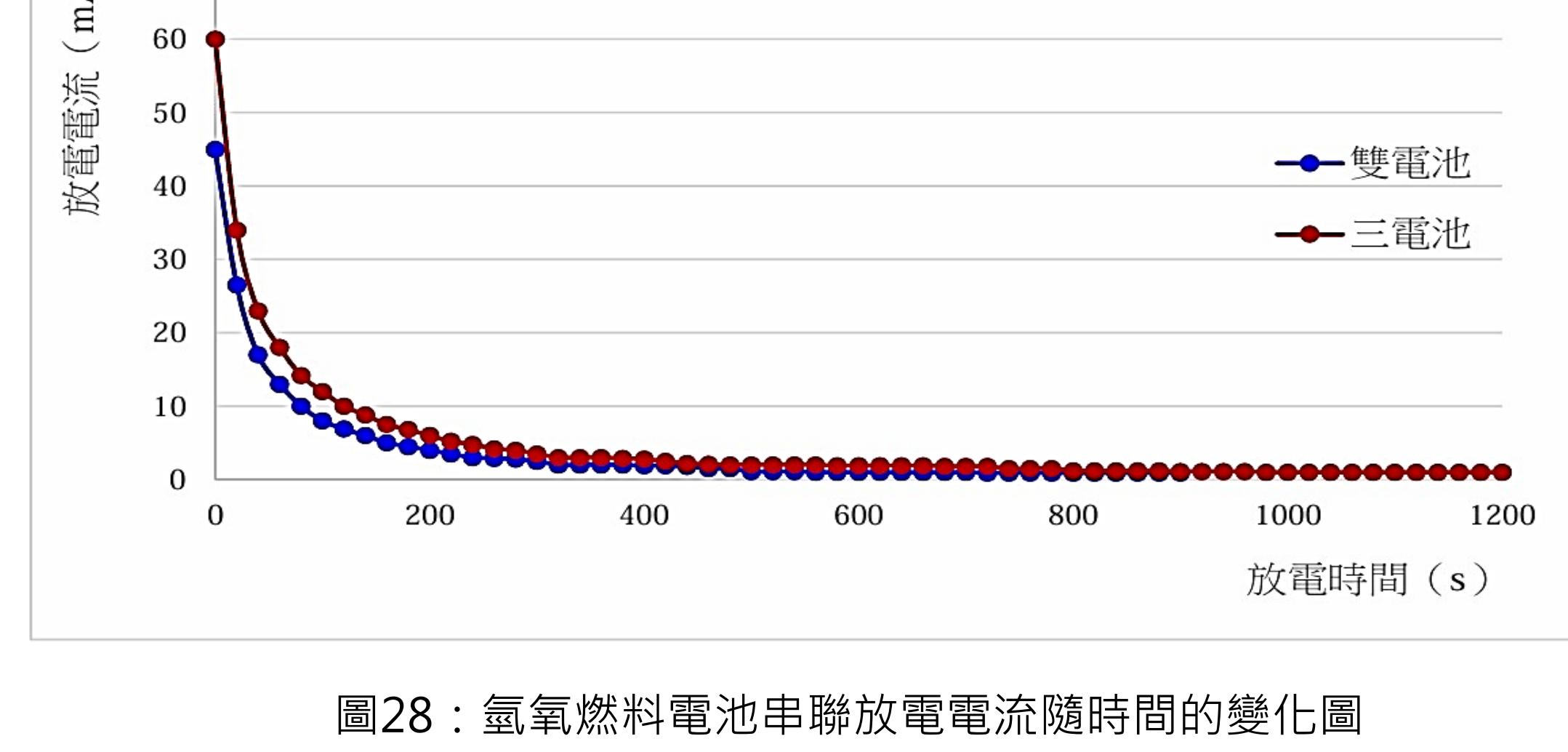


圖28：氫氧燃料電池串聯放電電流隨時間的變化圖

(圖27~圖28來源：第二作者自行繪製)

## 五. 可以利用電化學電解法回收水中的重金屬嗎？電解 0.5 M CuSO<sub>4</sub>(aq)，探討銅離子清除率的差異，變因包括電極粗細、電流強度、溶液溫度以及螯合劑存在等因素。

(一) 定電流0.4 A，不同粗細的電極，銅離子回收率如

下圖。【結果顯示】：電極直徑愈長，銅離子回收率愈高，電極直徑愈短，回收率愈低。

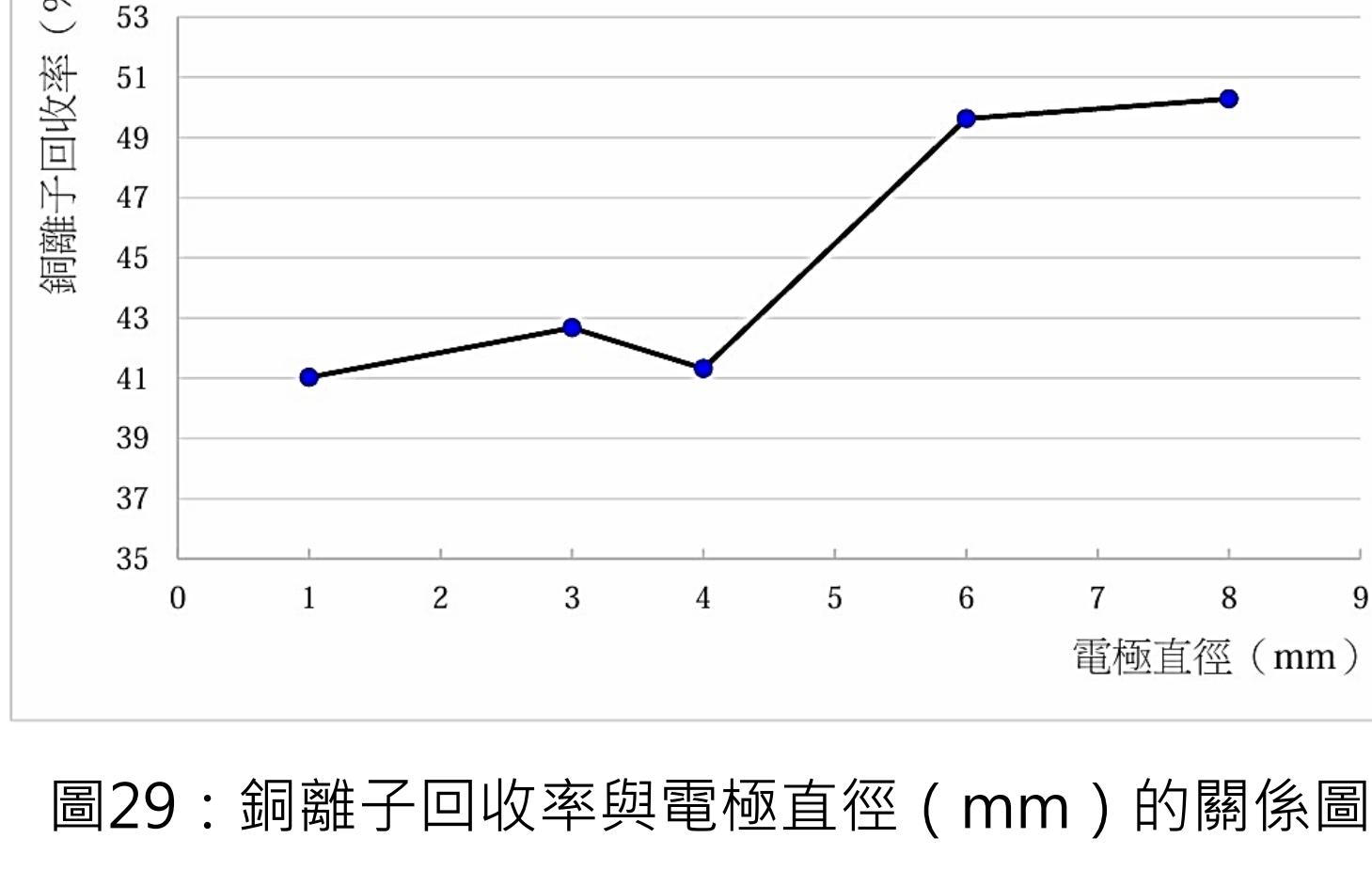


圖29：銅離子回收率與電極直徑 (mm) 的關係圖

(二) 定電量480庫侖，不同電流強度下，銅離子回收率

如下圖。【結果顯示】：通入的電流強度愈弱，銅離子回收率愈高，電流強度愈強，回收率愈低。

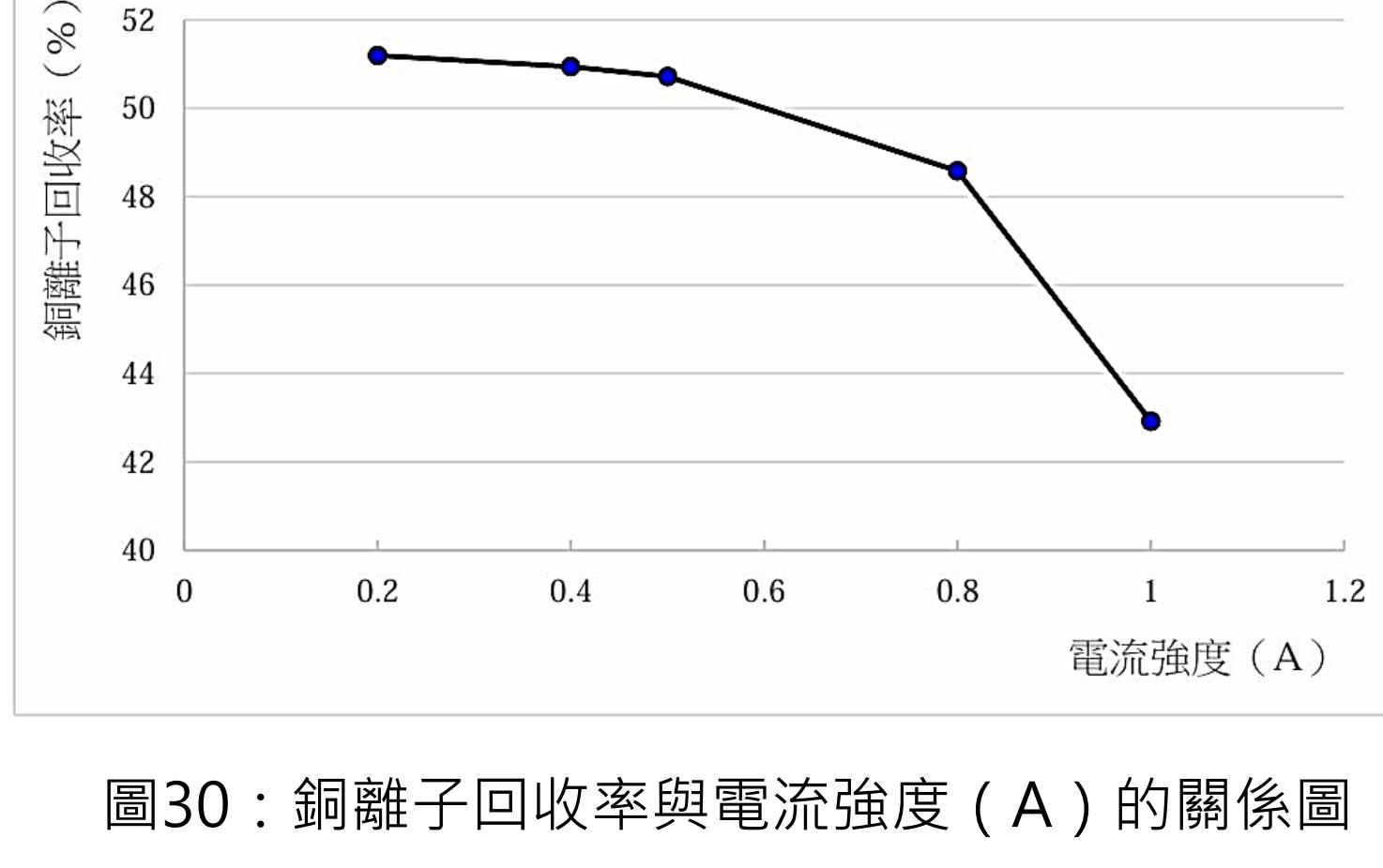


圖30：銅離子回收率與電流強度 (A) 的關係圖

(三) 定電流0.4 A，改變溶液的溫度，銅離子回收率結果如下圖。【結果顯示】：溶液溫度愈高，銅離子

回收率愈高，溶液溫度愈低，回收率愈低。

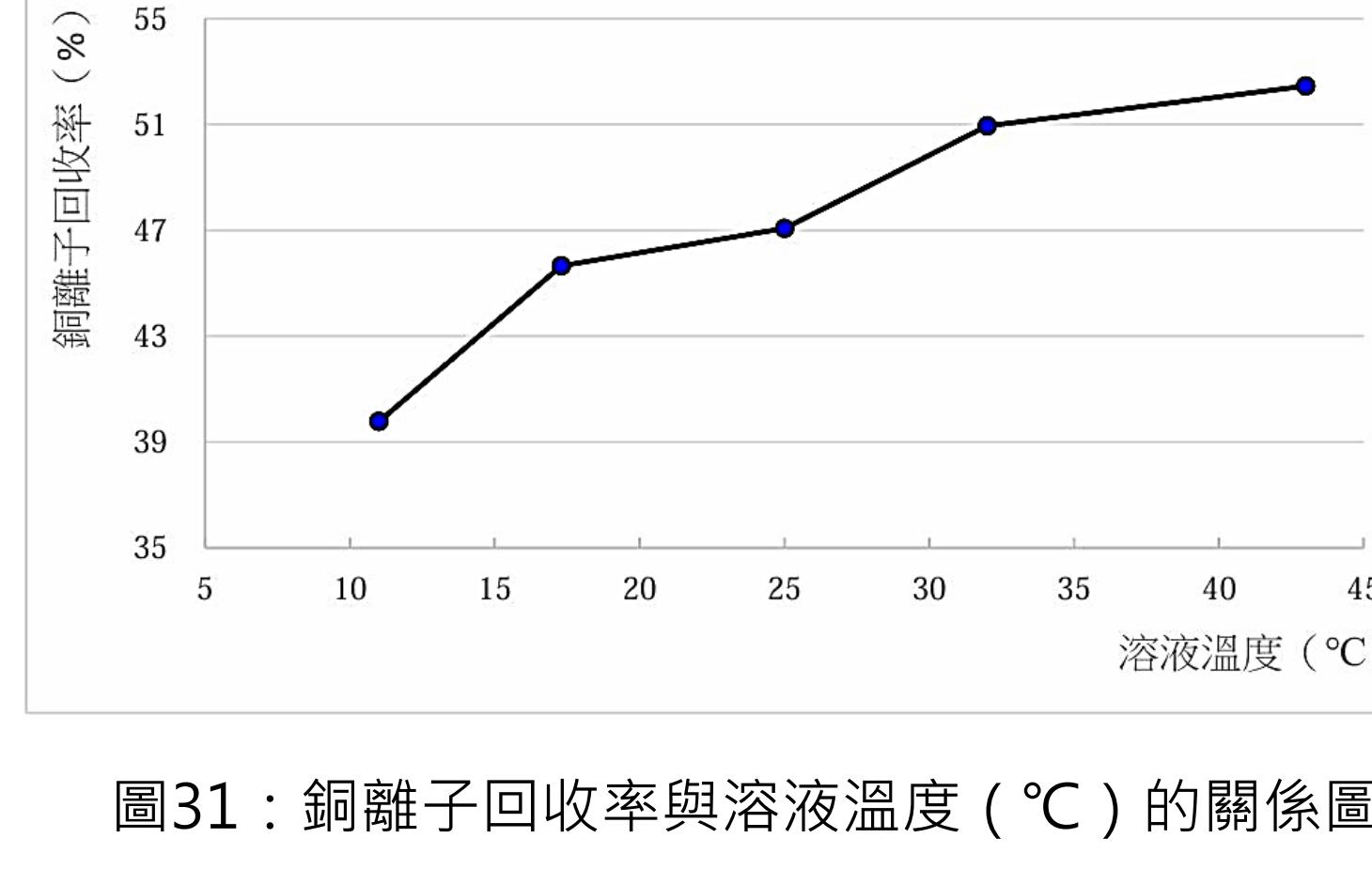


圖31：銅離子回收率與溶液溫度 (°C) 的關係圖

(四) 定電流0.4 A，添加不同濃度的螯合劑EDTA-4Na<sup>+</sup>，

銅離子回收率如下圖。【結果顯示】：未添加時，銅離子回收率最高，添加濃度愈高，回收率愈低。

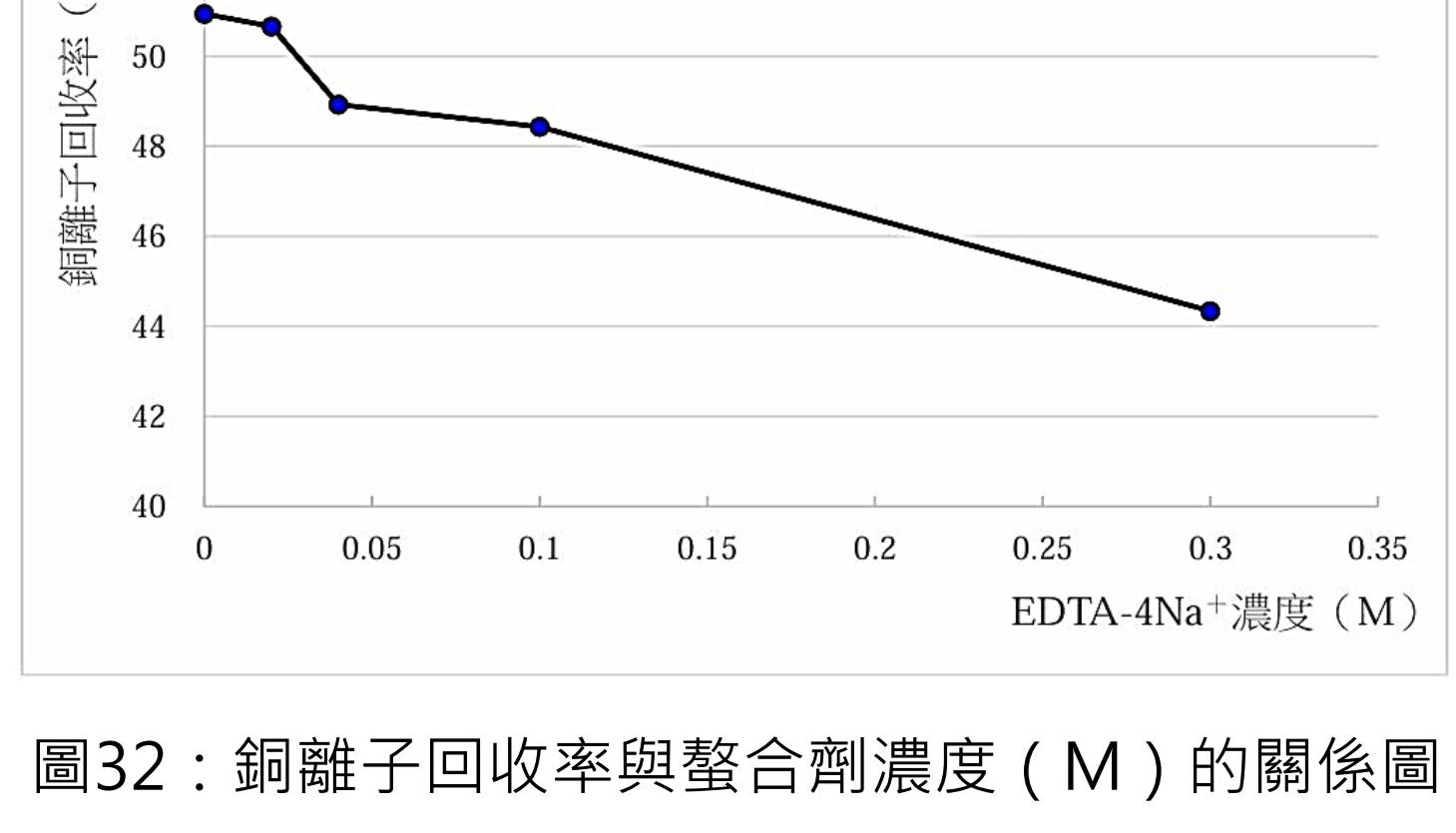
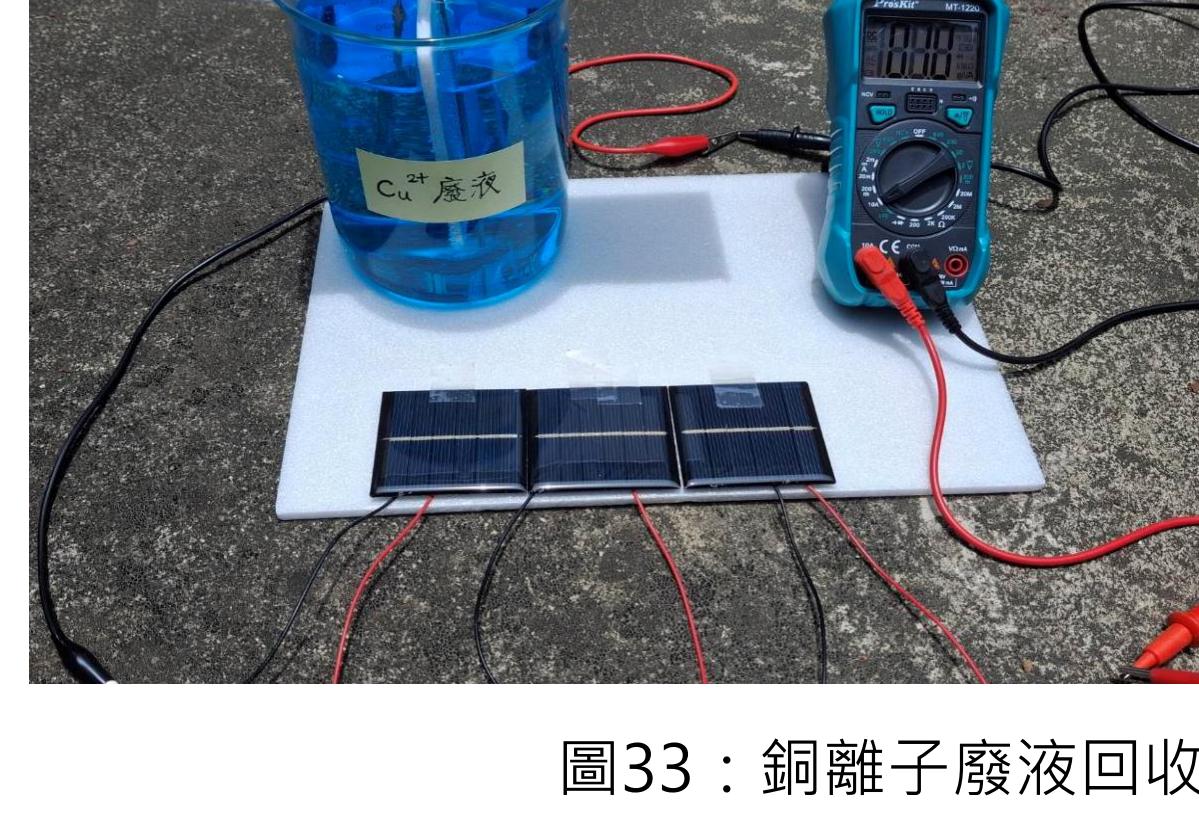


圖32：銅離子回收率與螯合劑濃度 (M) 的關係圖



變性 性質	電解前	電解後
溶液顏色		
電極外觀		
pH 值	2.84	0.63
濃度 (M)	0.15	0.00 (微量)

圖33：銅離子廢液回收裝置及電解前後比較 (圖29~圖33來源：第三作者自行繪製)

## 伍、結論

- 以生活中常見的素材製作一款低成本微型霍夫曼電解裝置，不僅擺脫傳統玻璃材質易脆、不易攜帶、大量使用化學電解液的缺點。每次實驗僅需約30毫升的電解液，並能準確測量法拉第常數及亞佛加厥常數，是綠色環保的好輔具。
- 影響電解的各變因中硫酸濃度、電壓及溶液溫度愈高，導電度愈高，氫氣生成速率愈快。另外，電極距離愈近時，離子移動的阻力愈小，氫氣的生成速率也較快，反之則生成速率愈慢。關於氫氣體積比與理論值2.00誤差相比，氫氧化鈉最大 (0.18)，硫酸最小 (0.02)，顯示鈦合金電極在酸性溶液中較為穩定。
- 氫氣是潔淨能源，本研究設計的簡易微型氫氧燃料電池，每次實驗僅需約20毫升的硫酸鈉電解液，並透過各變因的探討有效提高馬達轉動時間。此外，太陽能面板照射時間長或充電電壓大，會因氣體產生較多或快而無法完全吸附利用，充放電能轉換率反而降低。將太陽能燃料電池串聯成雙電池及三電池，產生的電壓分別為4.1 V及5.6 V，皆可使紅光LED燈泡持續運作10分鐘以上，對於太陽能與氫能的結合，將對綠色能源有更進一步的發展<sup>5</sup>。
- 利用電化學電解回收水中銅離子的變因探討，電極直徑及溶液溫度愈高，電流強度愈低及不添加螯合劑時，銅離子的回收率愈高，有助於銅離子的析出與回收。結合太陽光為電力來源，能回收本次科展探研究所製造的銅廢液，免去大量強鹼沉澱劑的使用。

## 陸、參考文獻

- Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*, 8, 13793-13813.
- 陳冠廷(2013)。太陽能氫氧燃料電池系統之特性探討。國立虎尾科技大學機械與機電工程研究所碩士論文。
- Kim, K., Paik, S. H., & Rhee, C. K. (2021). Water Electrolysis Accompanied by Side Reactions. *Journal of Chemical Education*, 98(7), 2381-2386.
- 吳萬隆、黃寶鈞，簡易氫氧燃料電池的設計與教學應用。科學教育月刊。2005年7月，280期，頁36-40。
- Singla, M. K., Nijhawan, P. & Oberoi, A. S. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 15607-15626.