

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： 高二 王柏鈞 高二 蔡侑蓁 高二 胡峻愷	指導老師： 陳亭安
---	------------------

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¹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），而形成無污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鈦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、探究鎳鈦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、鎳鈦合金棒，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（ Na_2SO_4 ）、硝酸鈉（ NaNO_3 ）、氫氧化鈉（ NaOH ）、硫酸（ H_2SO_4 ）、硫酸鎂（ MgSO_4 ）、碳酸氫鈉（ NaHCO_3 ）、碳酸鈉（ Na_2CO_3 ）、氯化鈉（ NaCl ）、硫酸銅（ 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：

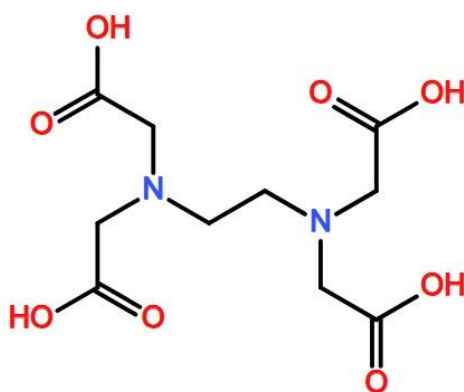


圖 1：EDTA 的結構圖（第一作者自行繪製）

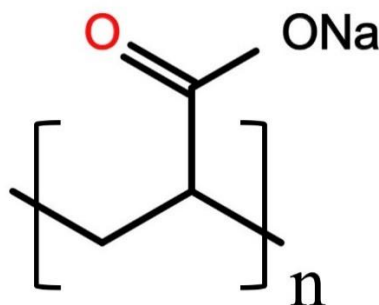


圖 2：ASAP 的結構圖（第一作者自行繪製）

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）

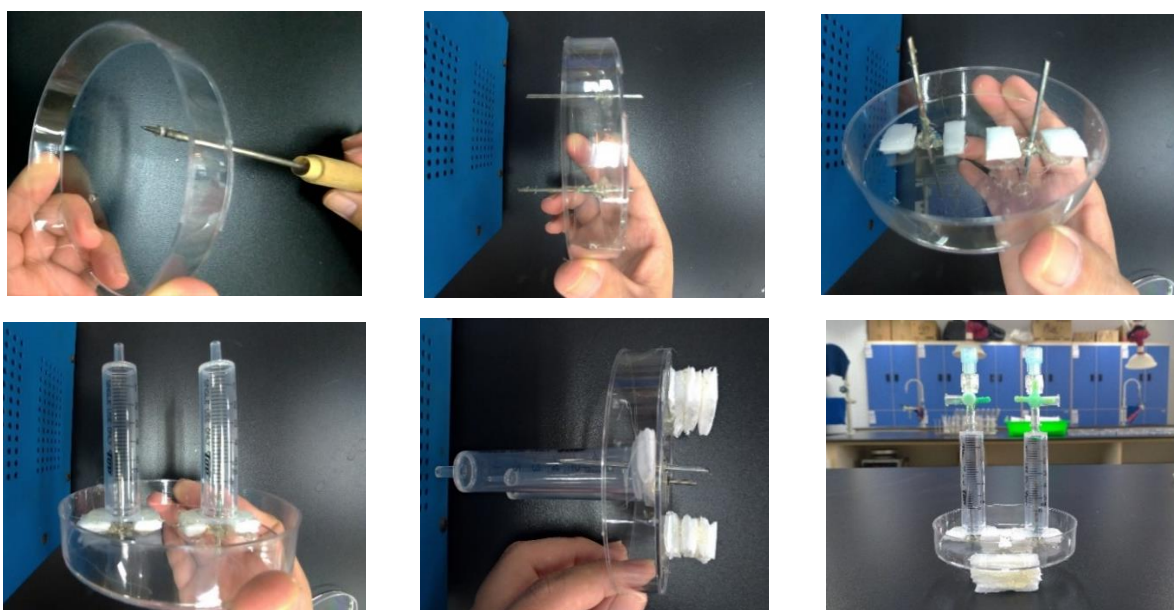


圖 3：微型電解裝置組裝流程圖（第一作者自行拍攝）

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

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

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鈦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) 電極固定為鎳鈦合金，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？使用鎳鈦記憶合金作為電極，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：

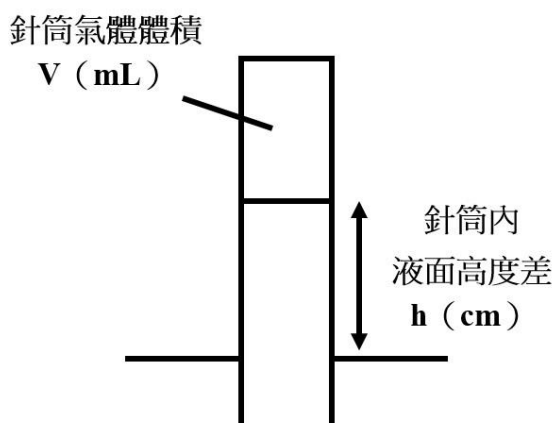
以 10 V 定電壓電解 0.5 M 的 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，在 15.5°C、25.5°C、35.5°C、45.5°C、55.5°C、65.5°C 不同溶液溫度下，比較陰陽極產物的生成速率與氫、氧體積比。

(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？使用鎳鈦記憶合金作為電極，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^0 (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 H_2 ，針筒體積為 2 mL，則法拉第常數算法如下式所示：



$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$ ，通入的電子莫耳數為析出氫氣的兩倍

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

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

(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 ΔV 的關係，並藉此推算出法拉第常數，下圖為實驗過程圖。

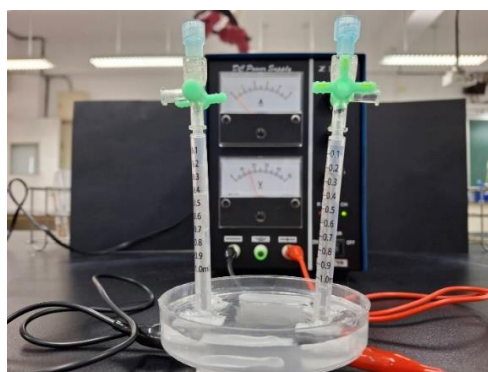


圖 4：微型電解裝置電解過程（第二作者自行拍攝）

(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 ΔW (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：

$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$ ，通入的電子莫耳數為析出銅金屬的兩倍

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

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

(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²。

(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。

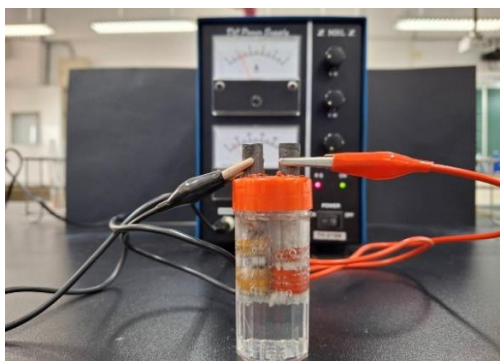


圖 5：微型氫氧燃料電池電解過程（第三作者自行拍攝）

(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 $\text{NaHCO}_3(\text{aq})$ ，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。

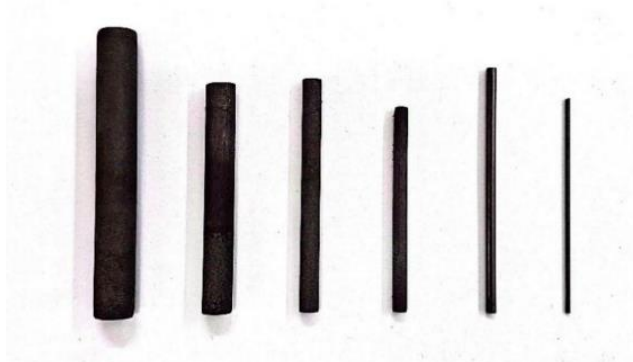


圖 6：由左而右分別是一、二、三、四號電池的碳棒及 2 mm、1 mm 的 2B 鉛筆芯
(第三作者自行拍攝)

(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 M 的 $\text{NaHCO}_3(\text{aq})$ ，充電時間為 5 min，在 1.5 cm、3 cm、6 cm、10 cm、12 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 M 不同的電解質，改變種類為 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 、 NaOH 、 H_2SO_4 、 Na_2SO_4 、 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 M 、 0.25 M 、 0.5 M 、 0.75 M 、 1.0 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 mL 1M NaOH、0.8 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。

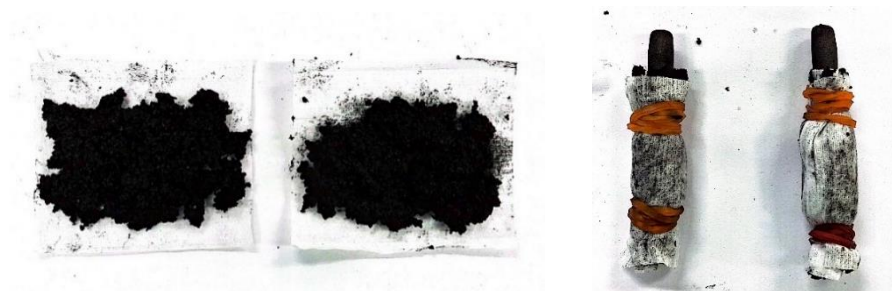


圖 7：圖左為活性碳粉膠體，圖右為滾成棒狀的正負極電極

（第三作者自行拍攝）

2. 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。

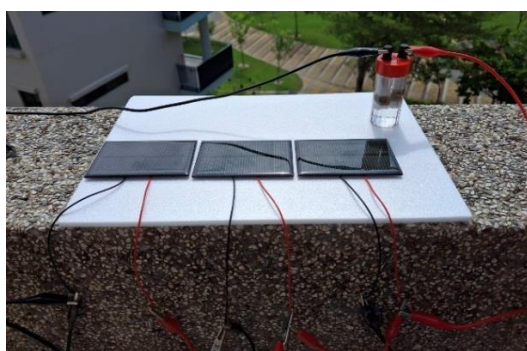


圖 8：利用太陽能面板將太陽能轉化成氫能（第一作者自行拍攝）

(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：

1. 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 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ ，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： $\Phi = 8 \text{ mm}$ 石墨，電解 0.5 M $\text{CuSO}_4(\text{aq})$

(三) 溶液溫度對銅離子回收率的影響：

$\Phi = 8 \text{ mm}$ 石墨，以定電流 0.4 安培電解 0.5 M 的 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ ，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) 螯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^+ ，探討銅離子回收率與螯合劑濃度的關係。實驗條件： $\Phi = 8 \text{ mm}$ 石墨，以定電流 0.4 安培電解 0.5 M 的 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ ，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 ($V_{\text{H}_2}/V_{\text{O}_2}$)		
	Na_2SO_4	NaOH	H_2SO_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
鎳鈦合金	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) 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，產物氫氧的生成速率與氫氧體積比，相關結果如下表所示：

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（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 ($V_{\text{H}_2}/V_{\text{O}_2}$)
Na_2SO_4	388.1	0.00515	2.11
NaNO_3	325.0	0.00615	1.74
NaOH	265.2	0.00754	1.82
H_2SO_4	106.4	0.01880	2.02
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：

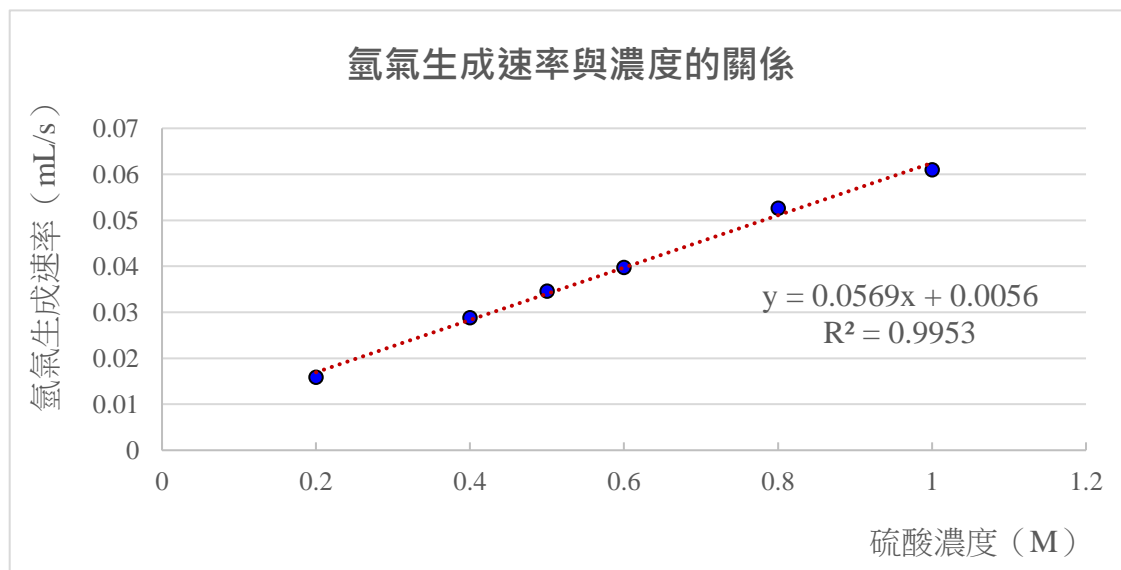


圖 9：氫氣生成速率 (mL/s) 與濃度 (M) 的關係圖 (第二作者自行繪製)

【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：

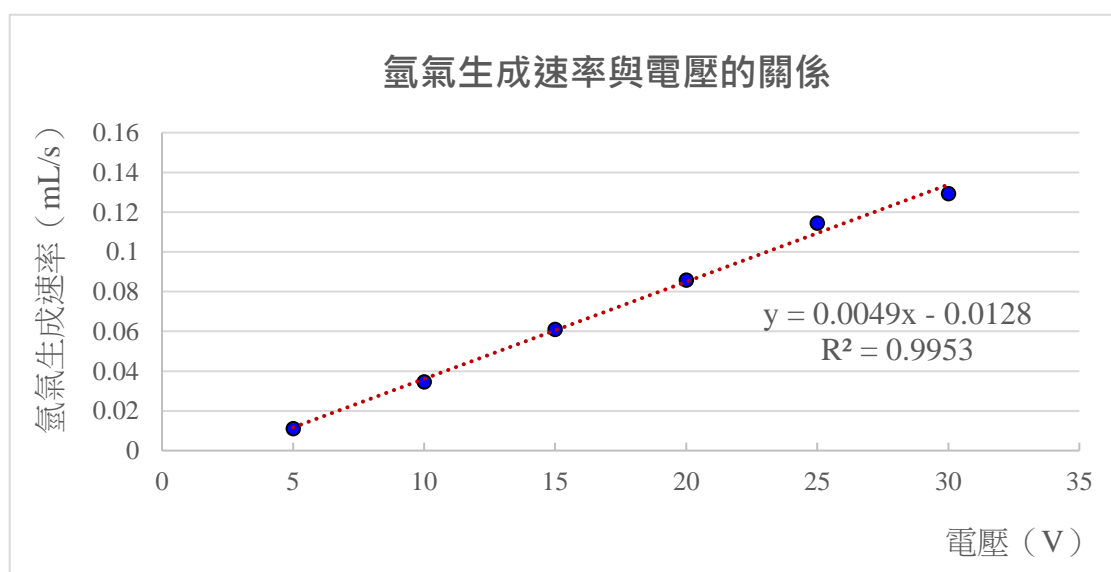


圖 10：氫氣生成速率 (mL/s) 與電壓 (V) 的關係圖 (第二作者自行繪製)

【結果顯示】：一般而言，電壓 30V，氫氣的生成速率為 0.1294 mL/s 最快，電壓 5V，生成速率 0.0111 mL/s 最慢；氫氧體積比變化不大，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 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，在不同溶液溫度下的電解結果如下圖所示：

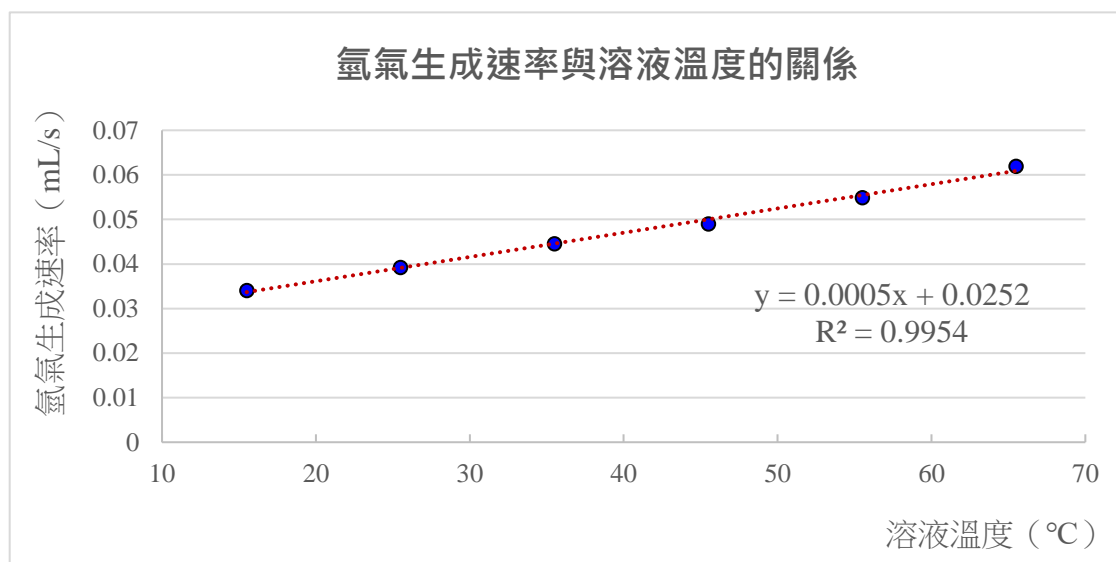


圖 11：氫氣生成速率 (mL/s) 與溶液溫度 (°C) 的關係圖 (第二作者自行繪製)

【結果顯示】：溶液溫度 65.5 °C，氫氣的生成速率為 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 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，在不同距離下的電解結果如下圖所示：

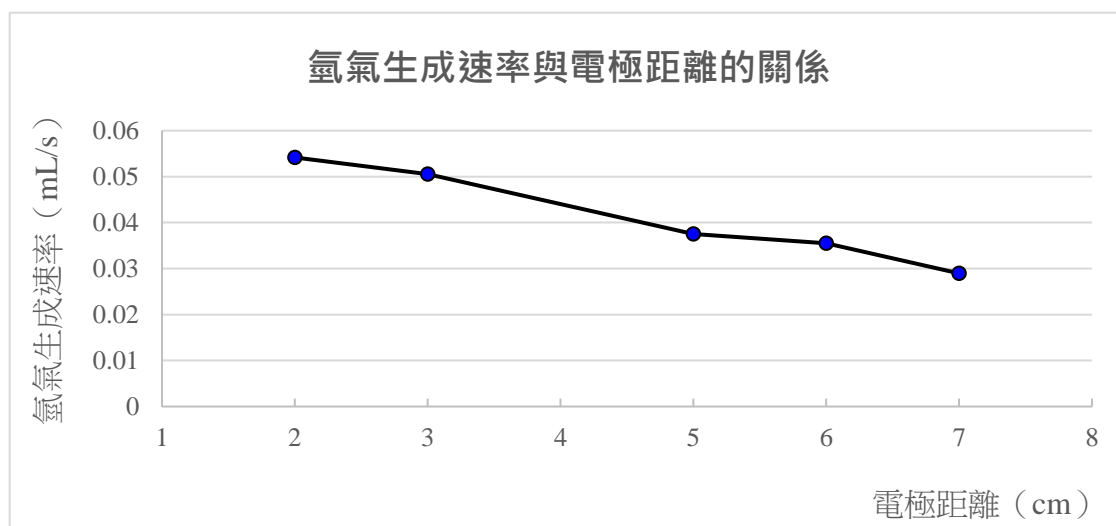


圖 12：氫氣生成速率 (mL/s) 與電極距離 (cm) 的關係圖 (第二作者自行繪製)

【結果顯示】：距離 2 cm 時，氫氣的生成速率為 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 $17^\circ C$ ）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%	6.067×10^{23}	0.73%
2.	65.4	1018.37	94722.9	- 1.83%	5.920×10^{23}	- 1.71%
3.	67.44	1018.24	97791.4	1.35%	6.112×10^{23}	1.48%
4.	64.54	1018.17	93592.9	- 3.00%	5.850×10^{23}	- 2.88%
5.	66.78	1018.15	94825.6	- 1.72%	5.927×10^{23}	- 1.60%
平均			95601.1	- 0.92%	5.975×10^{23}	- 0.80%

【結果顯示】：法拉第常數 5 次平均值 95601.1 ± 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 5.975×10^{23} ，跟理論值 6.023×10^{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 ΔV 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 ΔV 與通電時間 t 的關係（第一作者自行繪製）

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

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

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

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

至於 ΔV 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 ΔV 為縱座標作圖，兩者的相關係數達 0.9956，其結果如下圖所示：

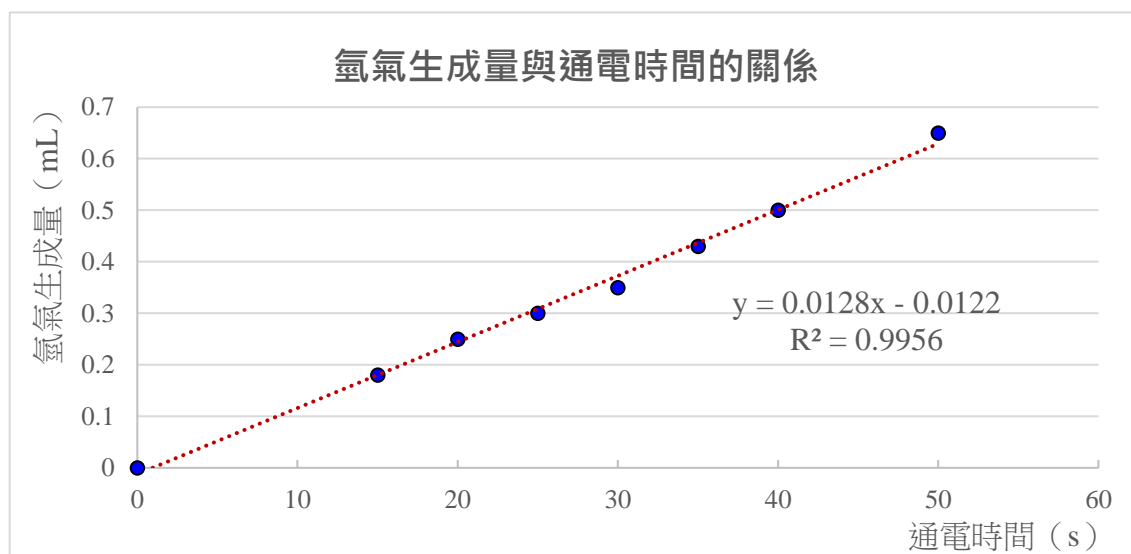


圖 13：定電流 0.1 安培下，氫氣生成量（ ΔV ）與通電時間（ t ）的正比關係圖

（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 ΔW 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)	$W_{\text{電極}}$	$W_{\text{電極}}'$	ΔW_{Cu}	F	誤差%	N_A	誤差%
30	0.9486	0.9496	0.001	95325.0	- 1.20%	5.958×10^{23}	- 1.08%
60	0.9913	0.9933	0.002	95325.0	- 1.20%	5.958×10^{23}	- 1.08%
120	0.9911	0.9950	0.0039	97769.2	1.33%	6.111×10^{23}	1.45%
150	0.9557	0.9605	0.0048	99296.9	2.91%	6.206×10^{23}	3.04%
180	0.9555	0.9616	0.0061	93762.3	- 2.82%	5.860×10^{23}	- 2.70%
210	0.9914	0.9987	0.0073	91407.5	- 5.26%	5.713×10^{23}	- 5.15%

平均	95481.0	- 1.04%	5.966×10^{23}	- 0.92%
----	---------	---------	------------------------	---------

【結果顯示】：法拉第常數 5 次平均值 95481.0 ± 1357.8 ，跟理論值誤差在 2.91% ~ - 5.26%。亞佛加厥常數 5 次平均值 5.966×10^{23} ，跟理論值誤差在 3.04% ~ - 5.15%。

至於 ΔW 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 ΔW 為縱座標作圖，兩者的相關係數達 0.9971，其結果如下圖所示：

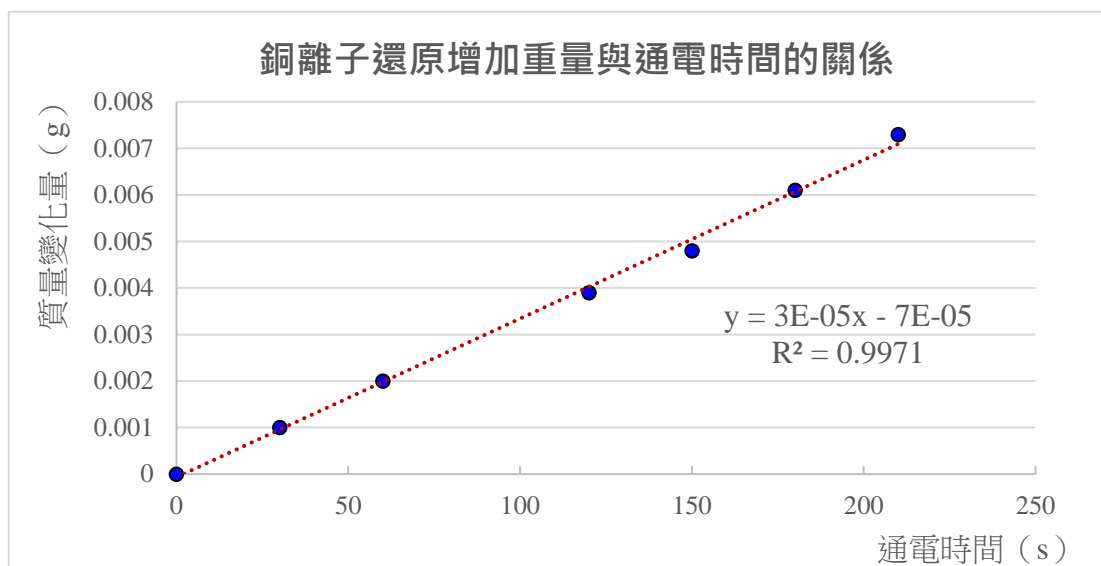


圖 14：定電流 0.1 安培下，質量變化量 (ΔW) 與通電時間 (t) 的正比關係圖

(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：

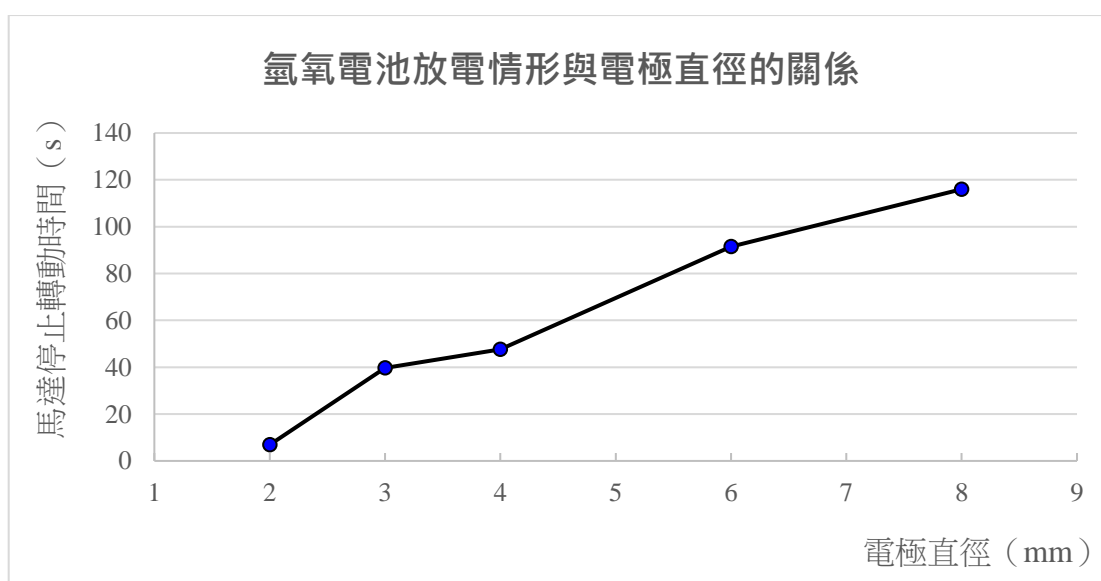


圖 15：氫氧電池放電情形 (s) 與電極直徑 (mm) 的關係圖 (第一作者自行繪製)

【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：

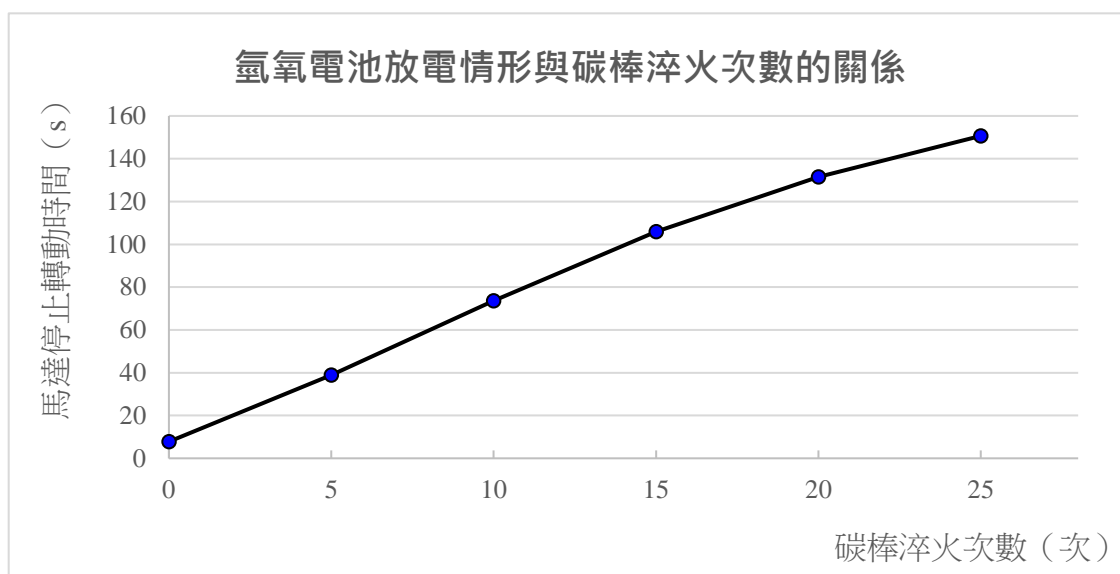


圖 16：氫氧電池放電情形（s）與碳棒淬火次數（次）的關係圖（第一作者自行繪製）

【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：

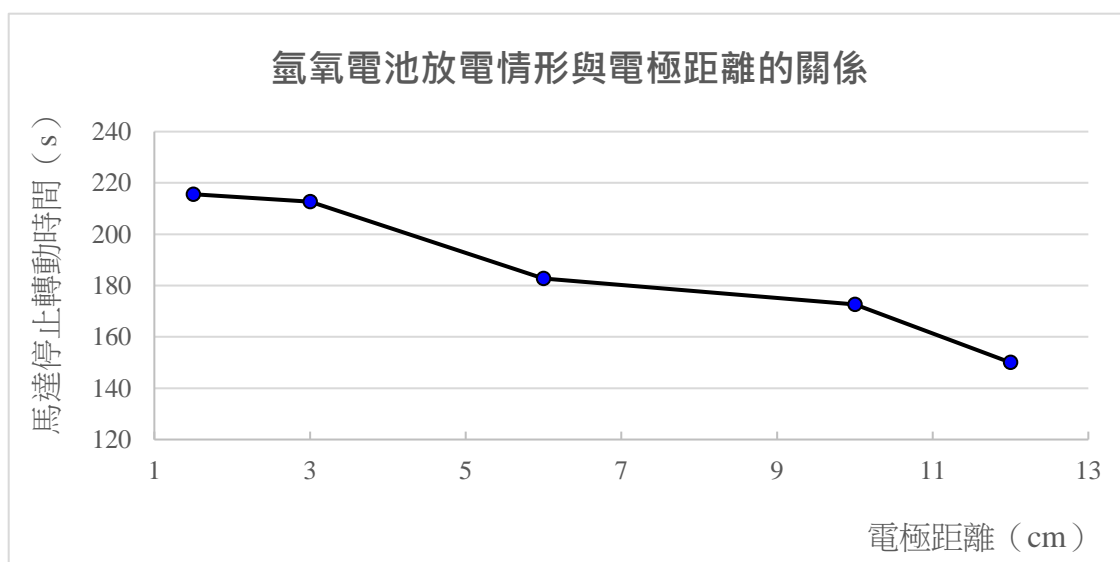


圖 17：氫氧電池放電情形（s）與電極距離（cm）的關係圖（第一作者自行繪製）

【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：

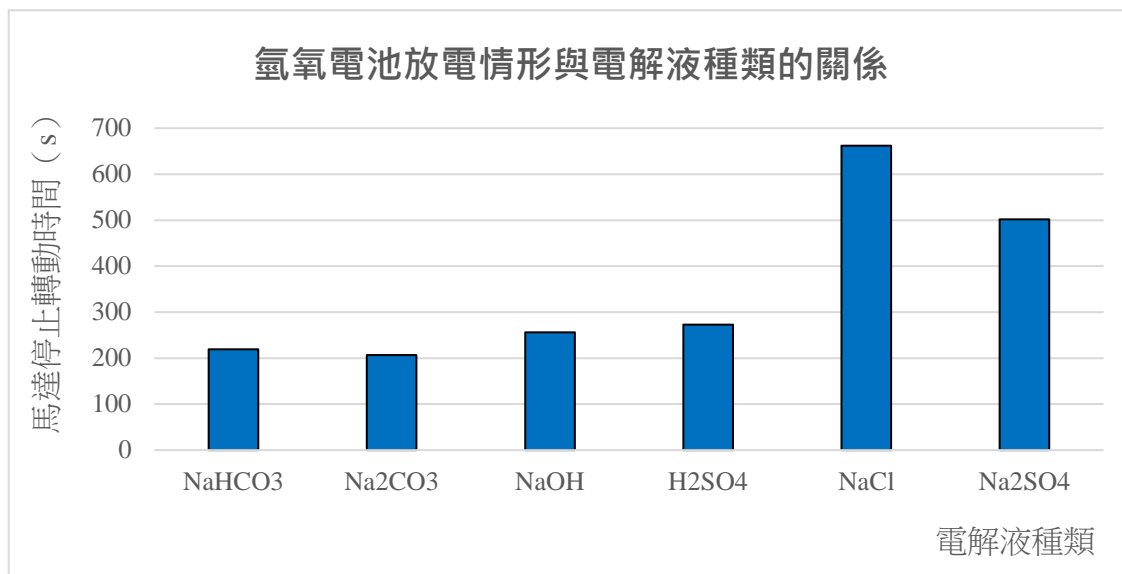


圖 18：氫氧電池放電情形 (s) 與電解質種類的關係圖 (第一作者自行繪製)

【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 Na₂SO₄(aq)，電池放電情形如下圖所示：

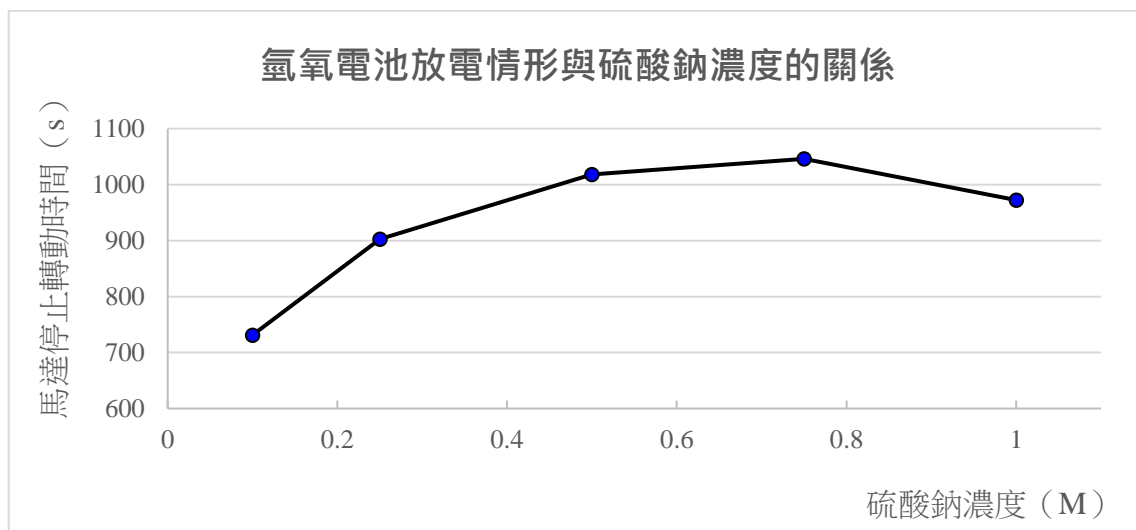


圖 19：氫氧電池放電情形 (s) 與濃度 (M) 的關係圖 (第一作者自行繪製)

【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：

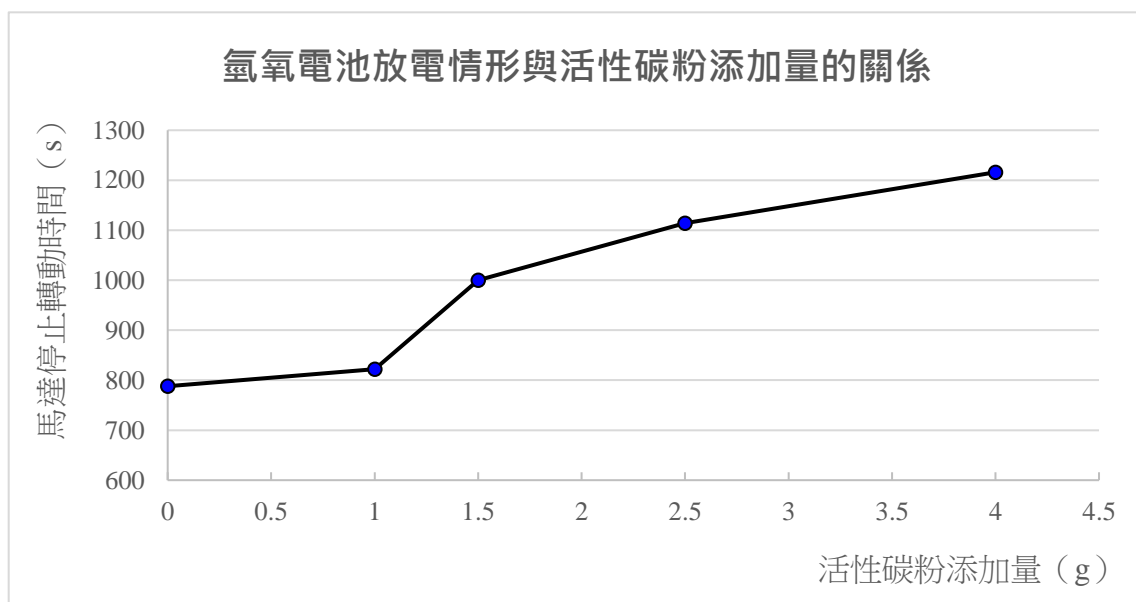


圖 20：氫氧電池放電情形（s）與活性碳粉添加量（g）的關係圖（第一作者自行繪製）

【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：

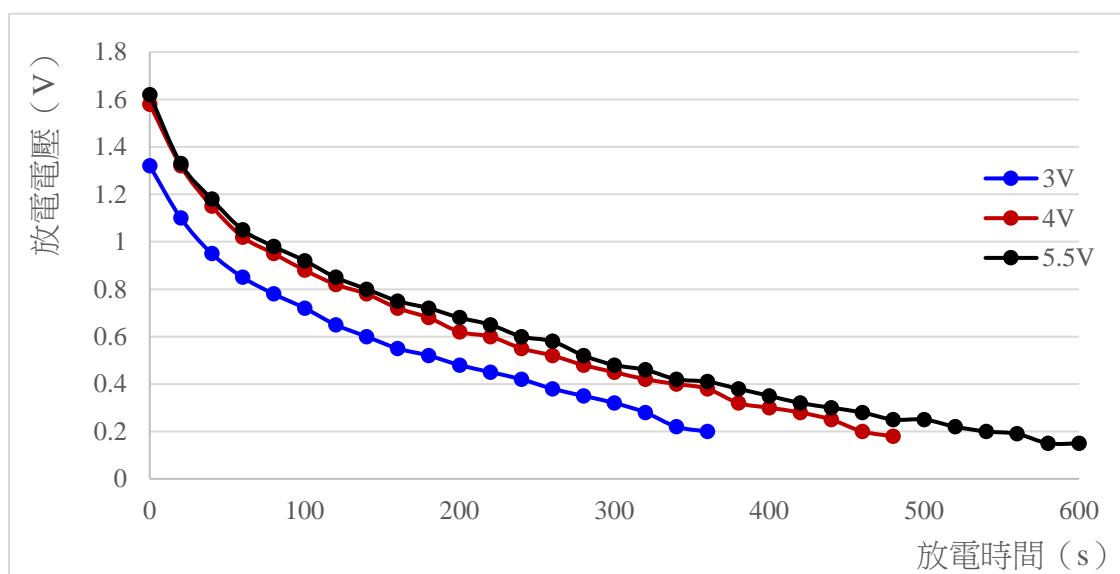


圖 21：不同太陽能面板電壓電解，氫氧電池放電電壓隨時間的變化圖

（放電電壓及放電電流皆由第三作者自行繪製）

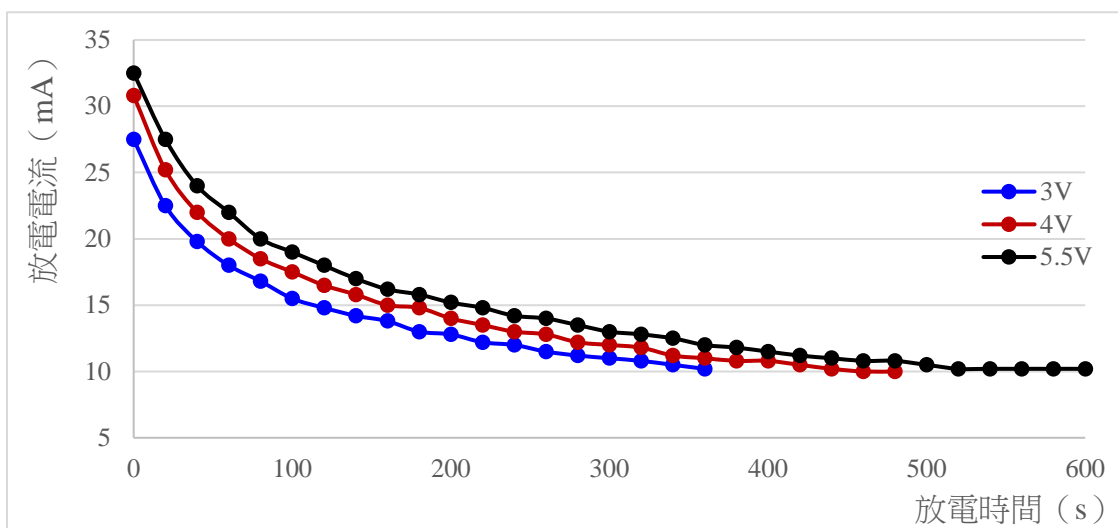


圖 22：不同太陽能面板電壓電解，氫氧電池放電電流隨時間的變化圖

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：

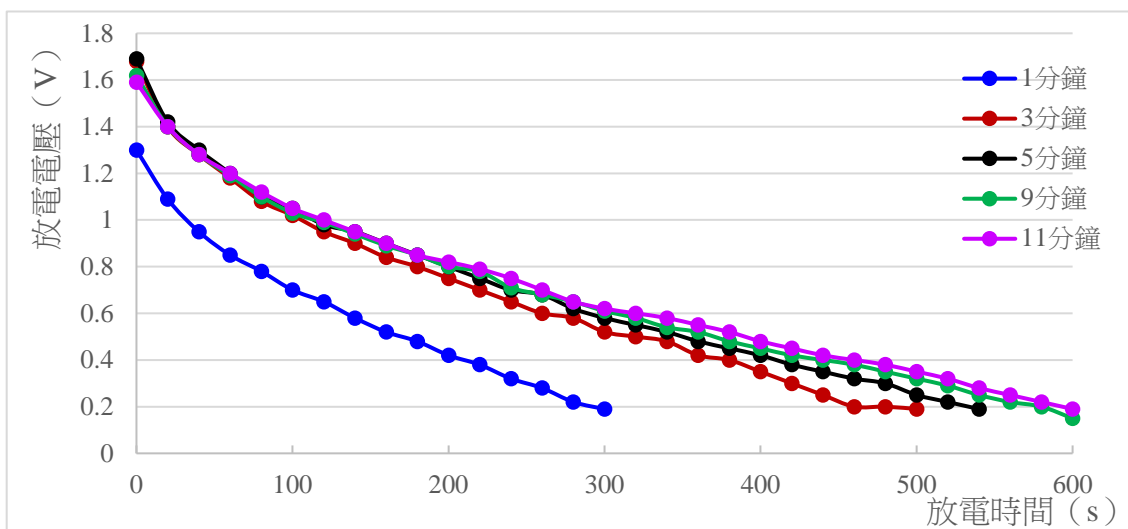


圖 23：不同太陽能面板照射時間，氫氧電池放電電壓隨時間的變化圖

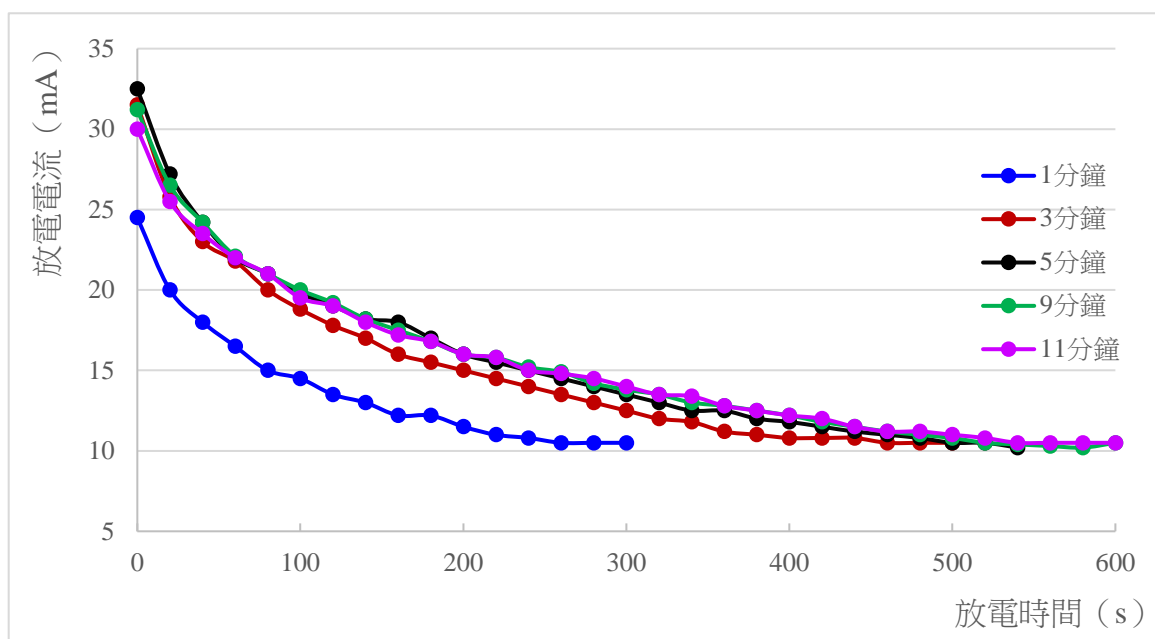


圖 24：不同太陽能面板照射時間，氫氧電池放電電流隨時間的變化圖

（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。

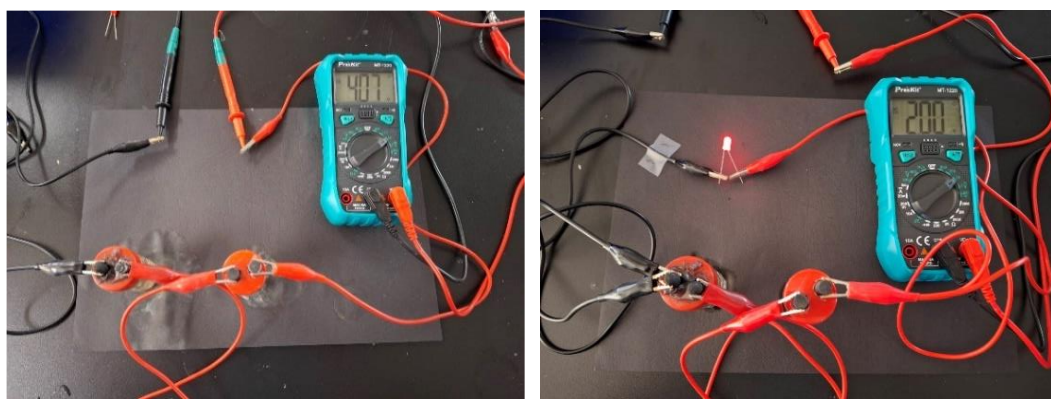


圖 25：左圖為 2 組電池串聯後未接燈泡的電池電壓，右圖為連接燈泡的電壓
(第一、二作者自行拍攝)

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 1.8~2.0 V，電流約 7 mA~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 5.6V，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。

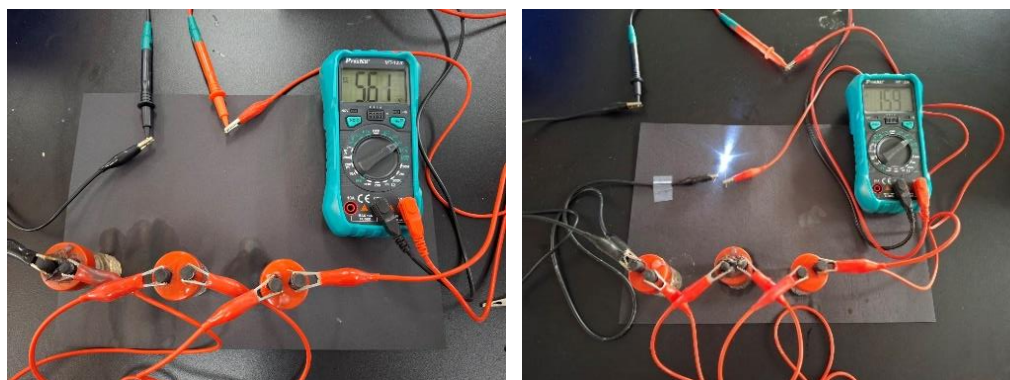


圖 26：左圖為 3 組電池串聯後未接燈泡的電壓，右圖為連接白色燈泡的電壓
(第一、二作者自行拍攝)

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 1.9~2.2 V，電流約 10 mA~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。

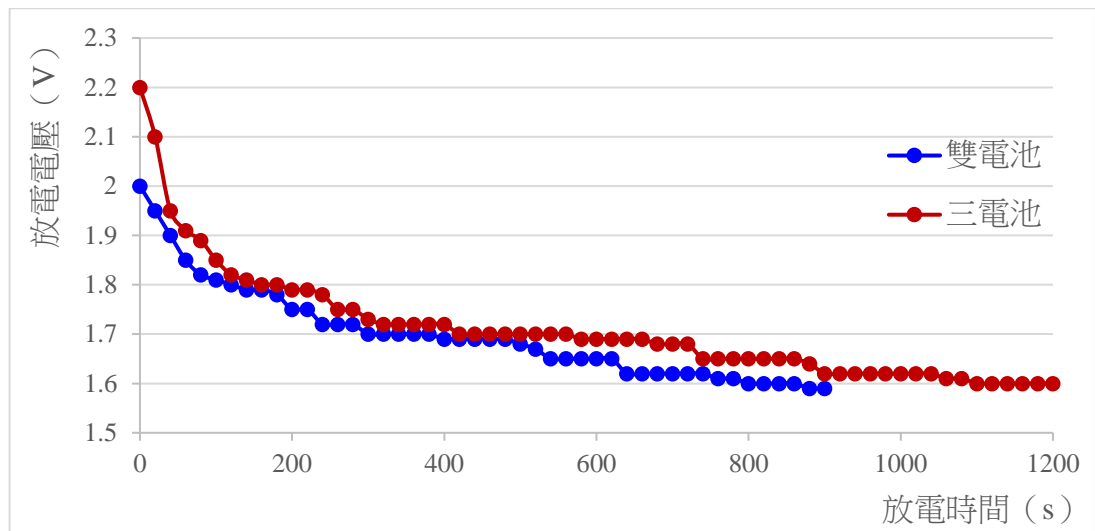


圖 27：串聯效能測試，氫氧電池放電電壓隨時間的變化圖（第二作者自行繪製）

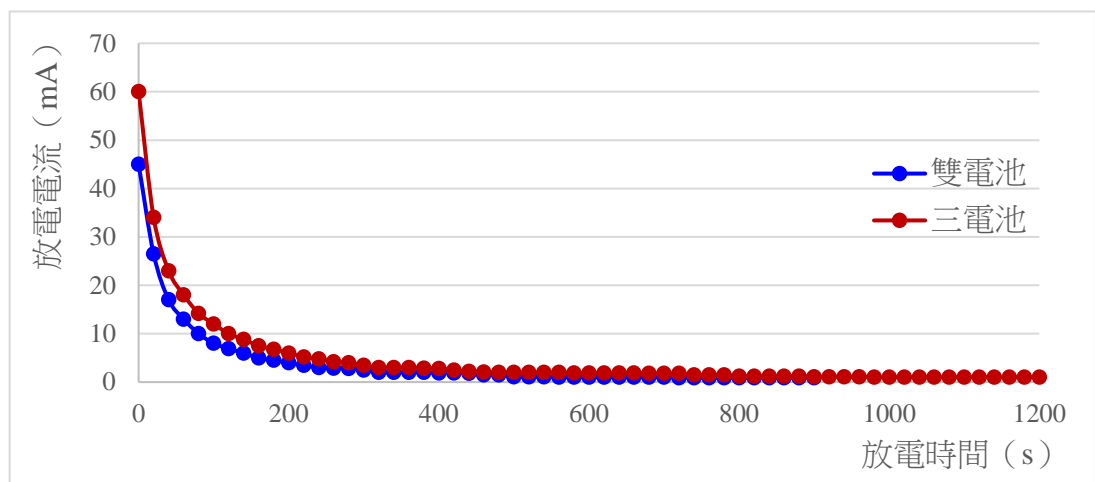


圖 28：串聯效能測試，氫氧電池放電電流隨時間的變化圖（第二作者自行繪製）

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：

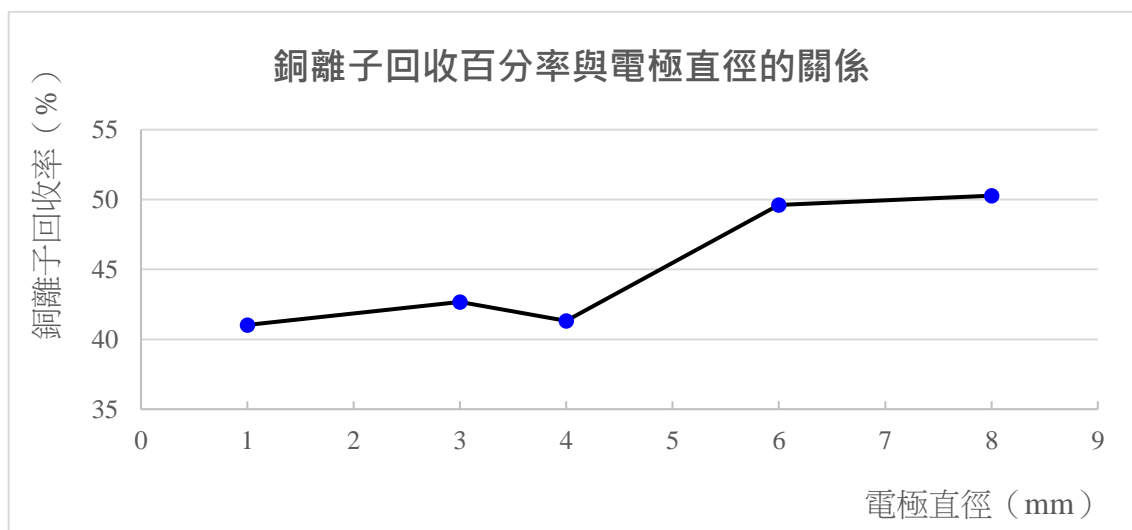


圖 29：銅離子回收率（%）與電極直徑（mm）的關係圖（第三作者自行繪製）

【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：

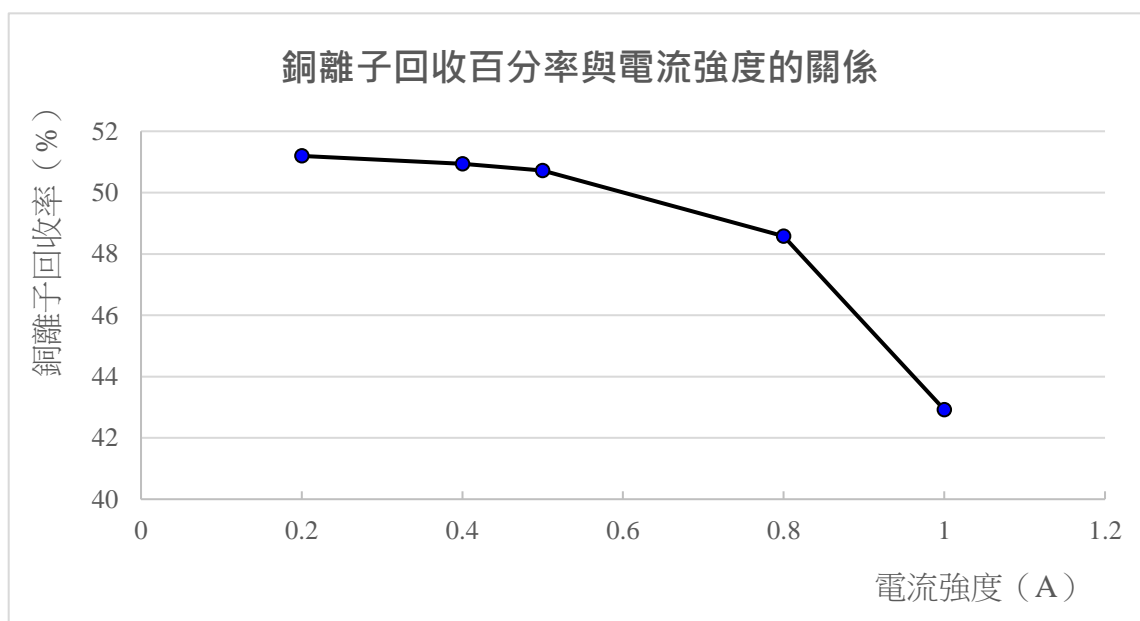


圖 30：銅離子回收率 (%) 與電流強度 (A) 的關係圖 (第三作者自行繪製)

【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：

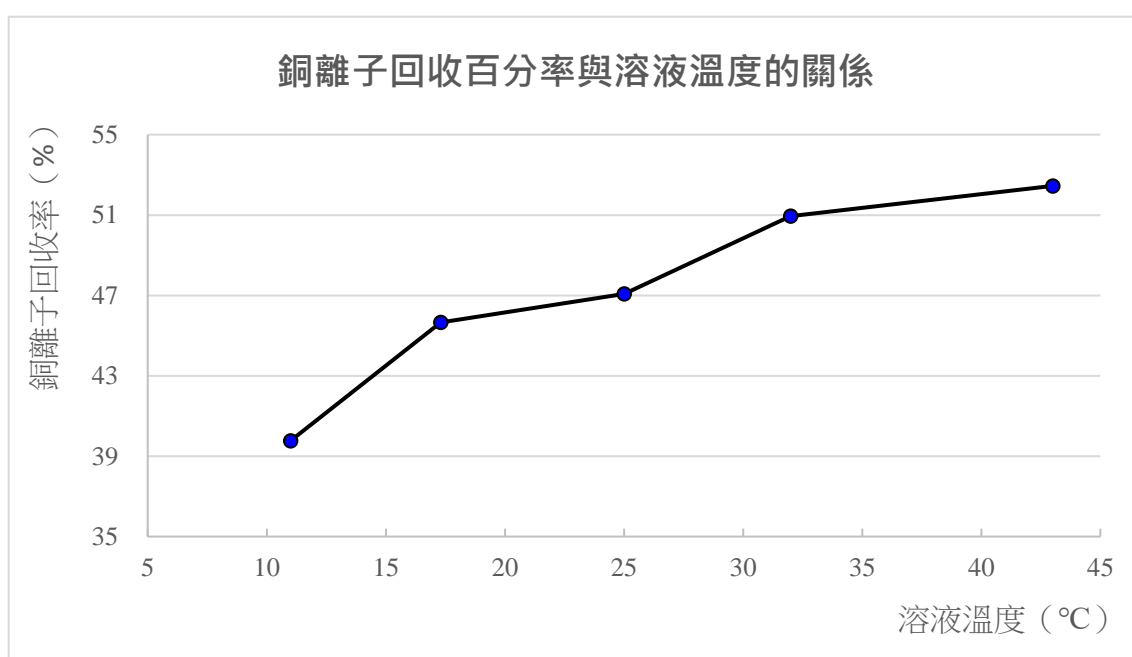


圖 31：銅離子回收率 (%) 與溶液溫度 (°C) 的關係圖 (第三作者自行繪製)

【結果顯示】：一般而言，溶液溫度為 43℃時，銅離子回收百分率 52.45%最高，溶液溫度為 11℃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 EDTA-4Na⁺，銅離子回收率結果如下圖所示：

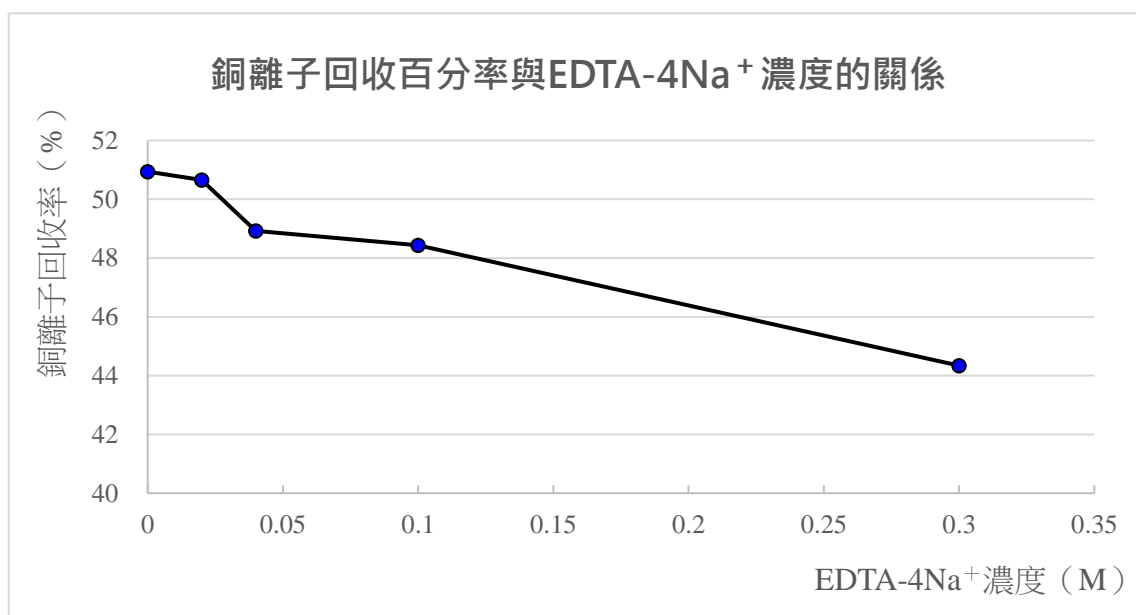


圖 32：銅離子回收率（%）與螯合劑濃度（M）的關係圖（第三作者自行繪製）

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

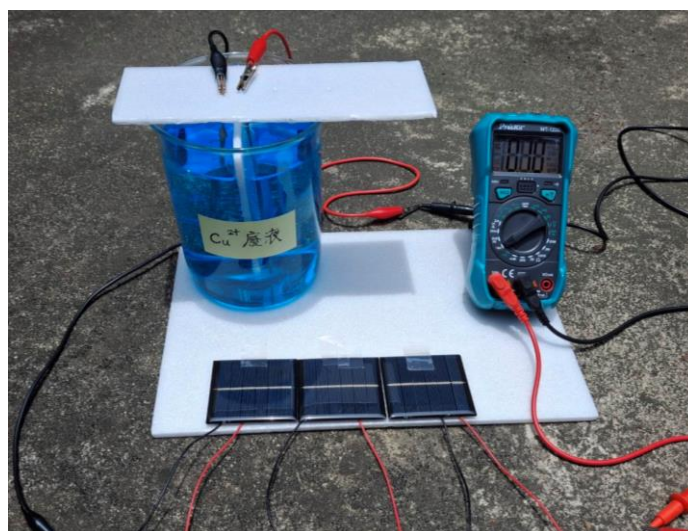
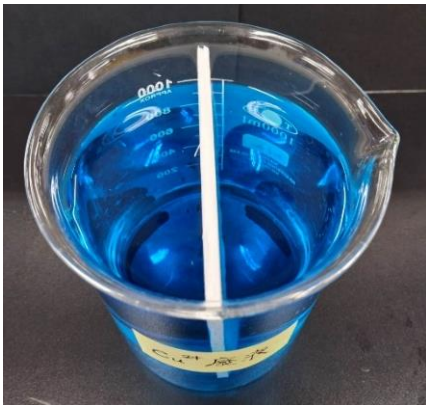
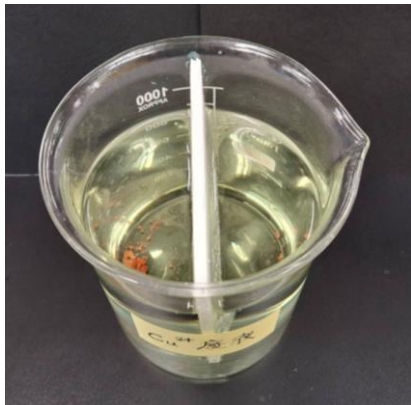
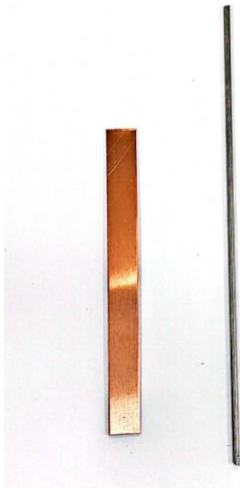



圖 33：銅離子廢液回收裝置（第三作者自行拍攝）

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	 <p>深藍色</p>	 <p>淡黃綠色</p>
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， 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³。

二、影響電解的各變因探討如下：

- (一) **電解質濃度**：結果顯示 H_2SO_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 ± 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±1510.3	- 0.92%	5.975×10 ²³	- 0.80%	0.9956
氣體體積變化量與通 電時間的關係 （0.1 安培定電流）	96865.2±1847.8	0.39%	6.054×10 ²³	0.52%	
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±1357.8	- 1.04%	5.966×10 ²³	- 0.92%	

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⁴，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 Na₂SO₄ 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 Na₂SO₄ 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%。推測原因為照射時間愈長，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 EDTA-4Na⁺時，銅離子回收率最高 50.94%；添加 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 H₂SO₄，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⁵。
- 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 EDTA-4Na^+ 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¹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（Na₂SO₄）、硝酸鈉（NaNO₃）、氫氧化鈉（NaOH）、硫酸（H₂SO₄）、硫酸鎂（MgSO₄）、碳酸氫鈉（NaHCO₃）、碳酸鈉（Na₂CO₃）、氯化鈉（NaCl）、硫酸銅（CuSO₄）、乙二胺四乙酸四鈉（EDTA-4Na⁺）、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

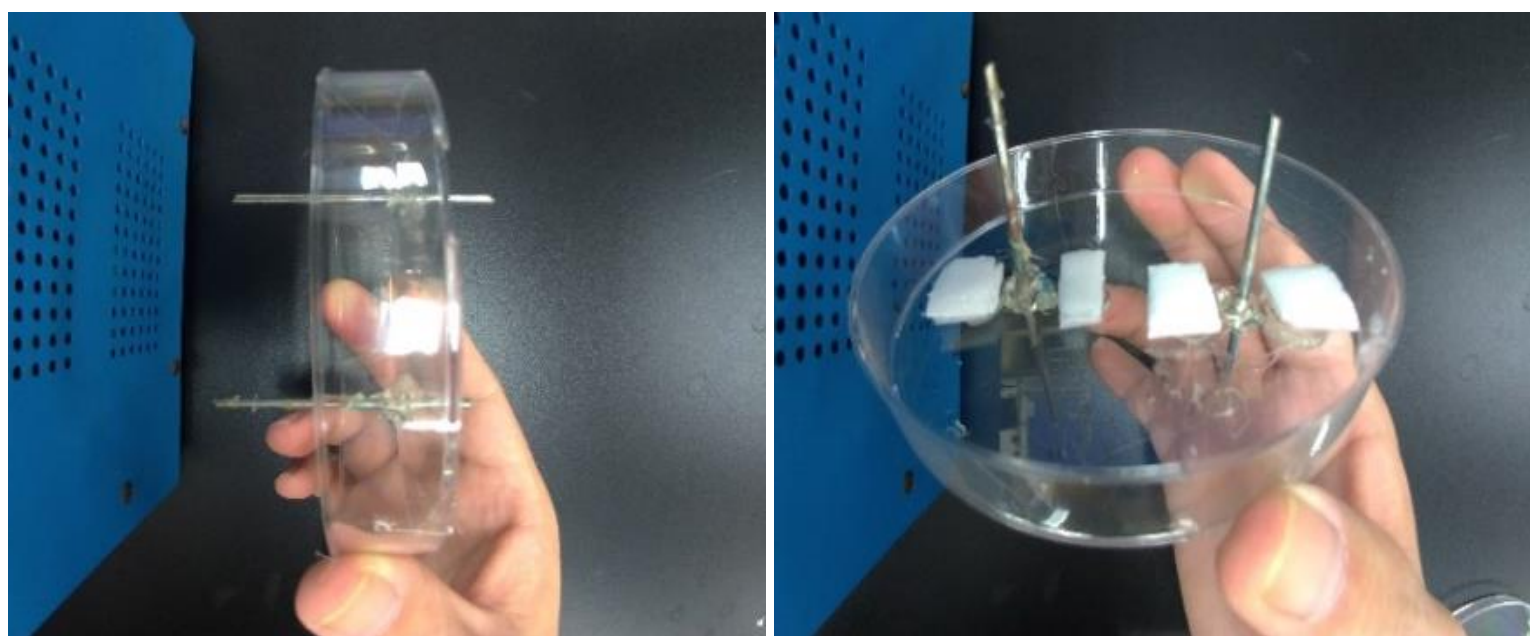


圖2：以熱熔膠固定電極

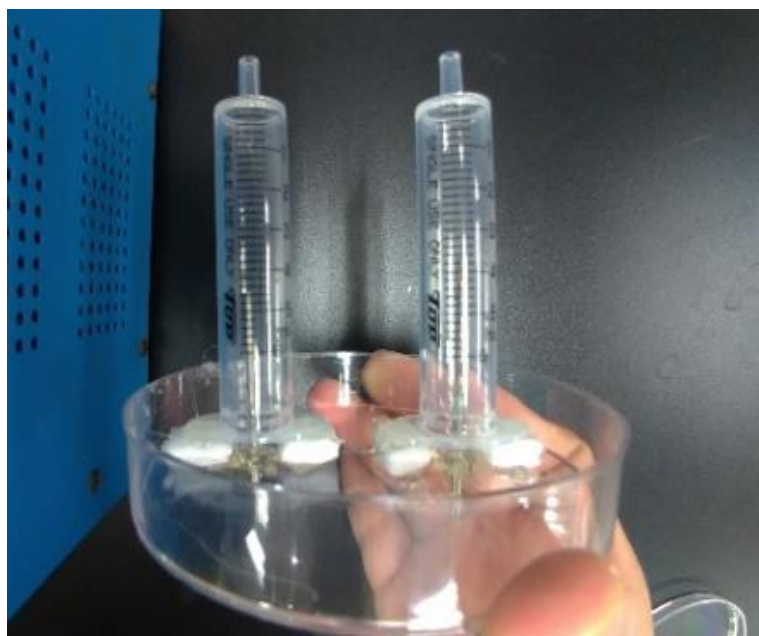


圖3：固定氣體收集塑膠針筒

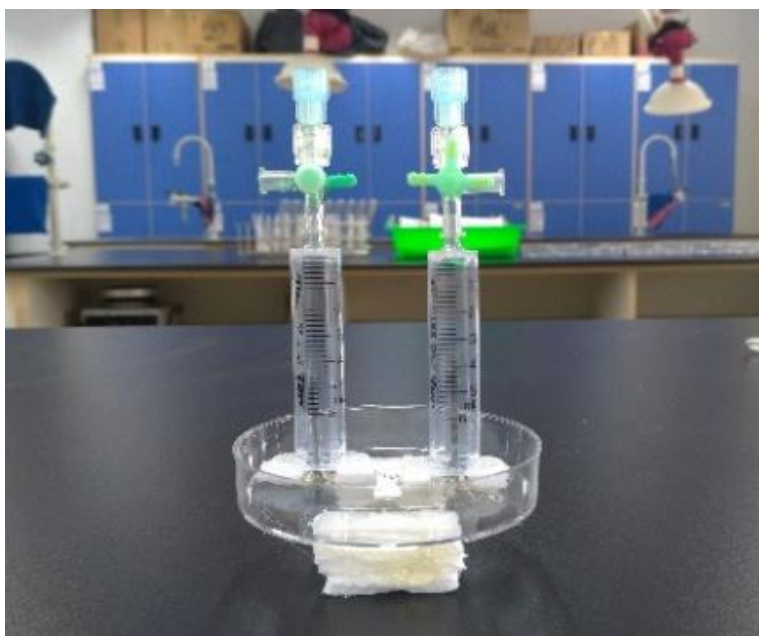
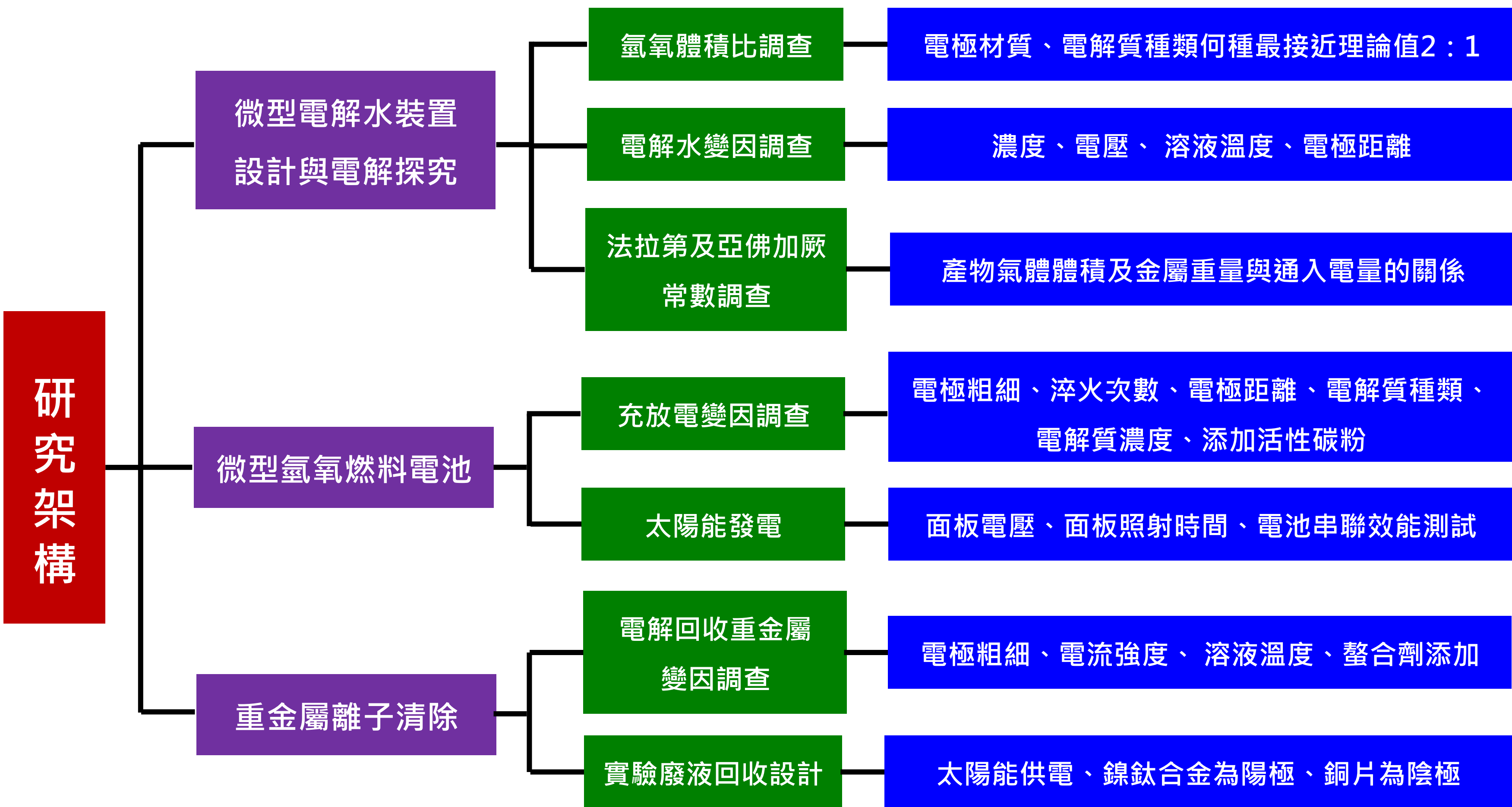


圖4：完成組裝的微型電解水裝置

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²，將太陽能轉化成氢能，並回收此次探究所製造的銅廢液。研究架構如右所示。



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，產物氫氧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³，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 _{H₂} /V _{O₂} ）		
	Na ₂ SO ₄	NaOH	H ₂ 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 _{H₂} /V _{O₂} ）
Na ₂ SO ₄	388.1	0.00515	2.11
NaNO ₃	325.0	0.00615	1.74
NaOH	265.2	0.00754	1.82
H ₂ SO ₄	106.4	0.01880	2.02
MgSO ₄	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H₂SO₄(aq)，其電解結果如下圖所示。【結果顯示】：H₂SO₄濃度愈高，氫氣生成速率愈快，濃度愈低，生成速率愈慢。

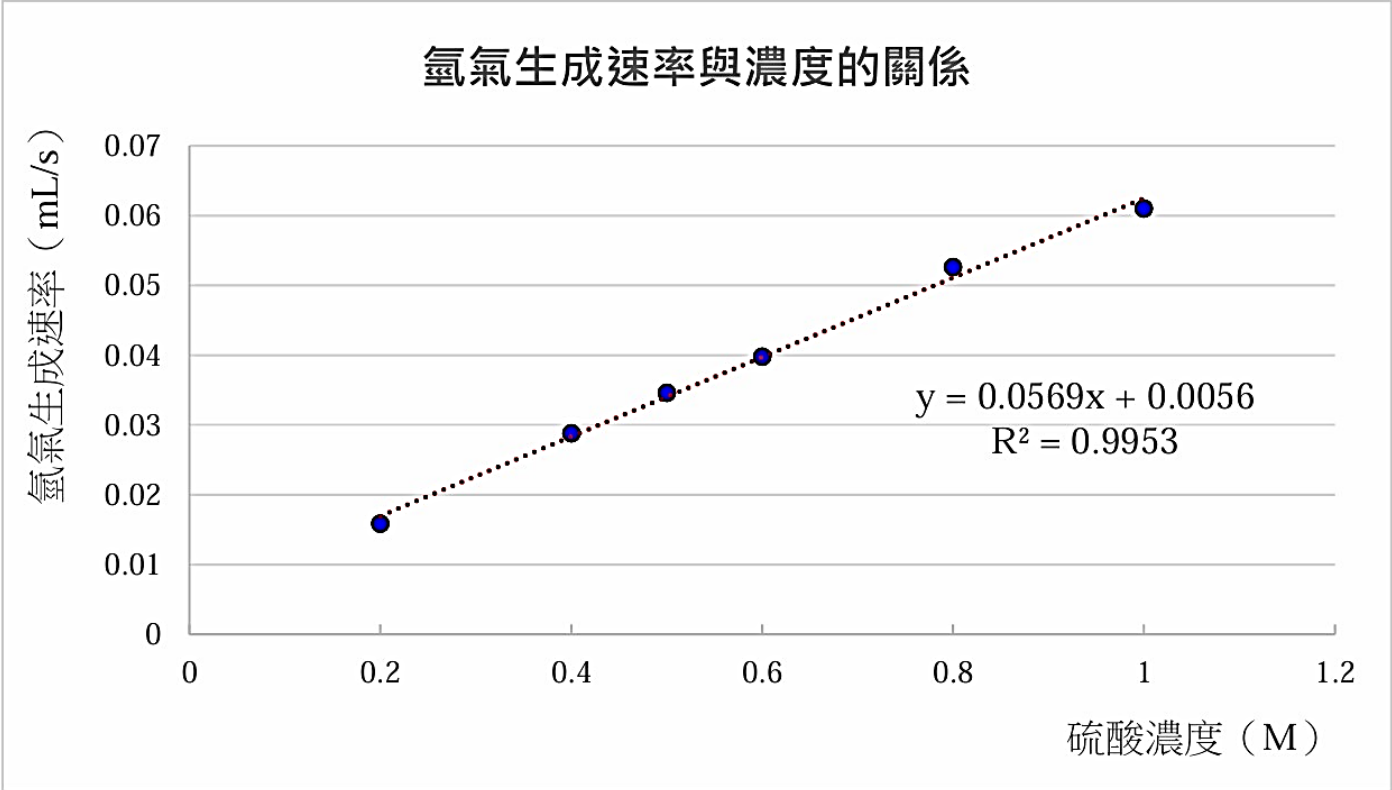


圖5：氫氣生成速率（mL/s）與濃度（M）的關係圖

(二) 電解0.5 M的H₂SO₄(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。

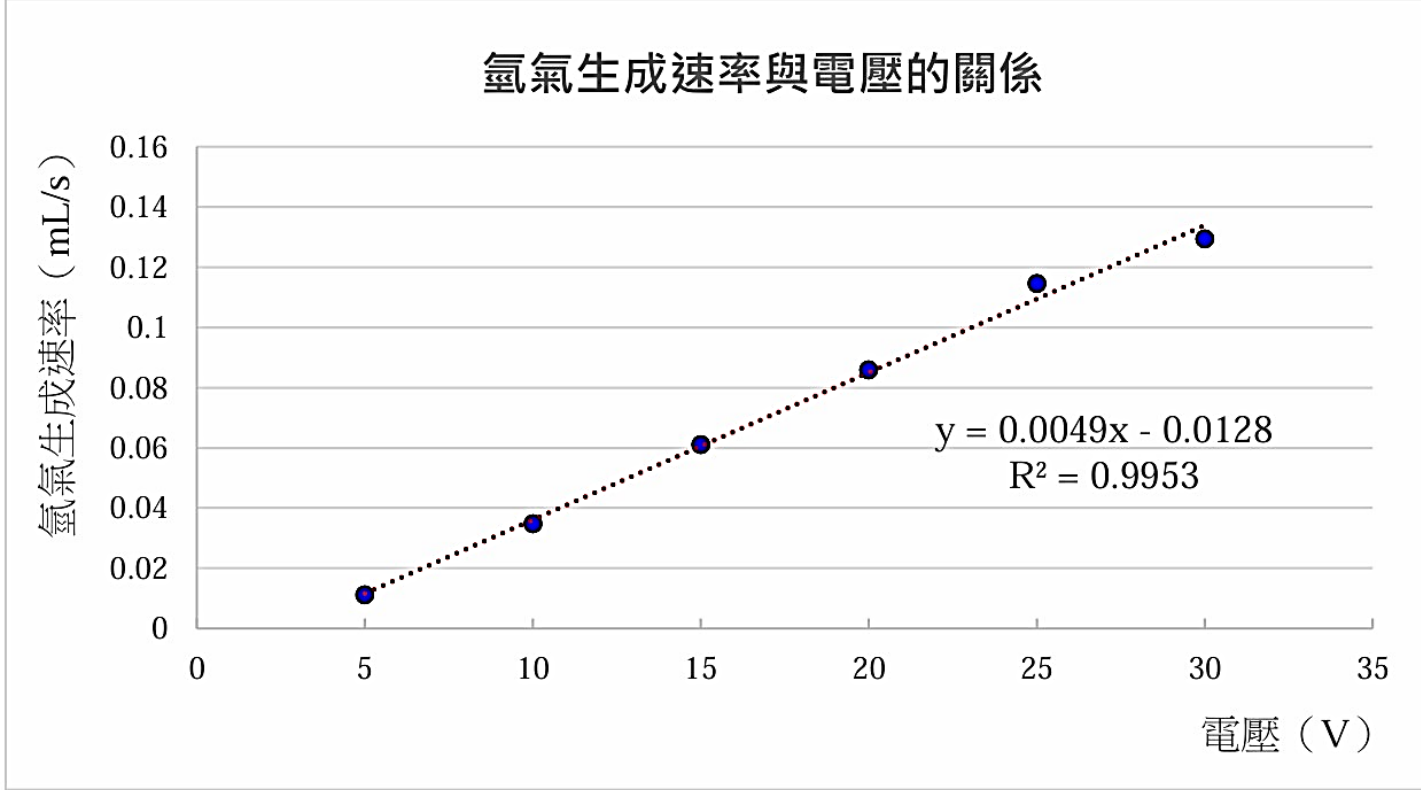


圖6：氫氣生成速率（mL/s）與電壓（V）的關係圖

(三) 定電壓，電解0.5 M的H₂SO₄(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。

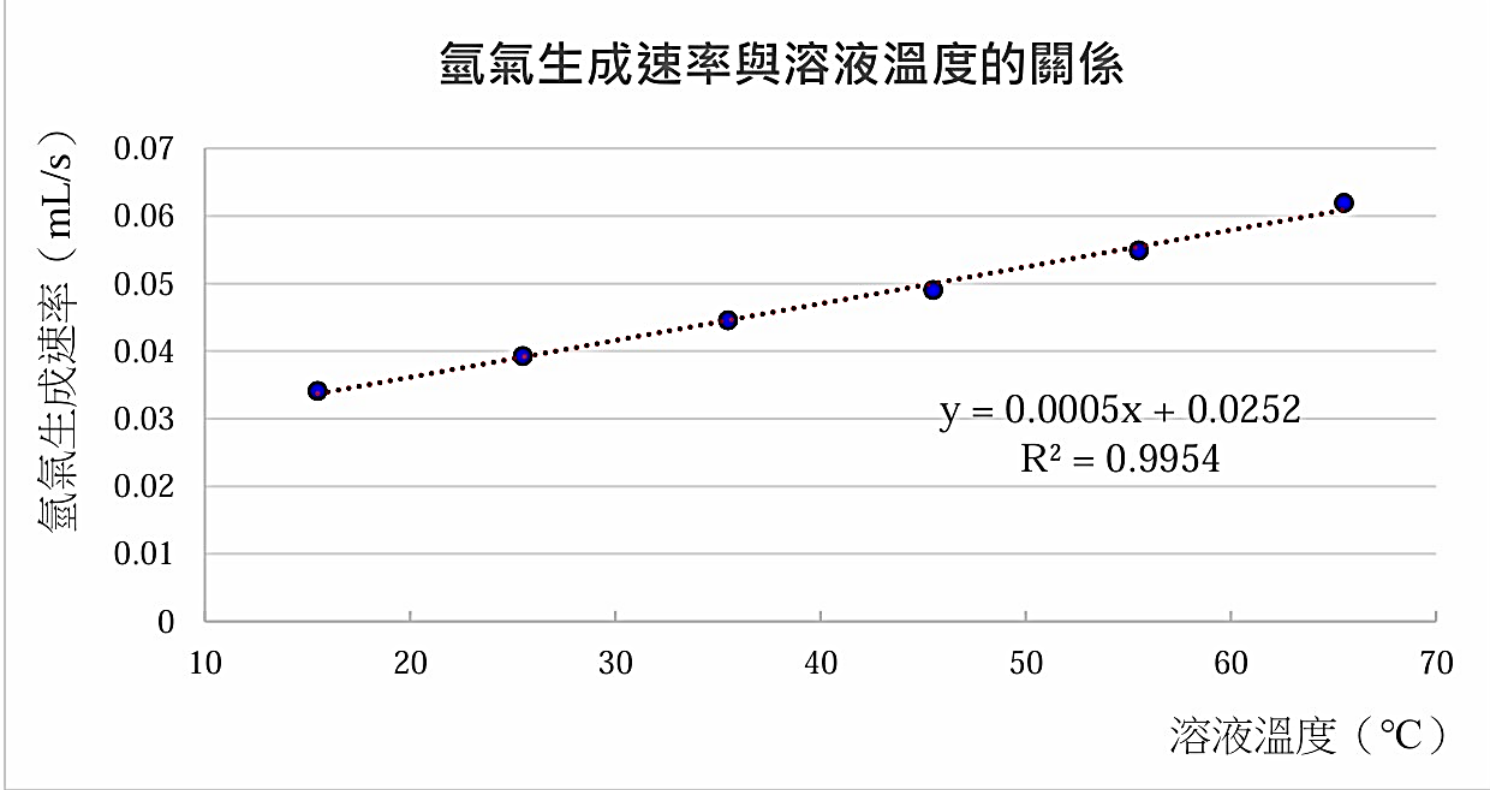


圖7：氫氣生成速率（mL/s）與溶液溫度（℃）的關係圖

(四) 定電壓10伏特，電解0.5 M的H₂SO₄(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。

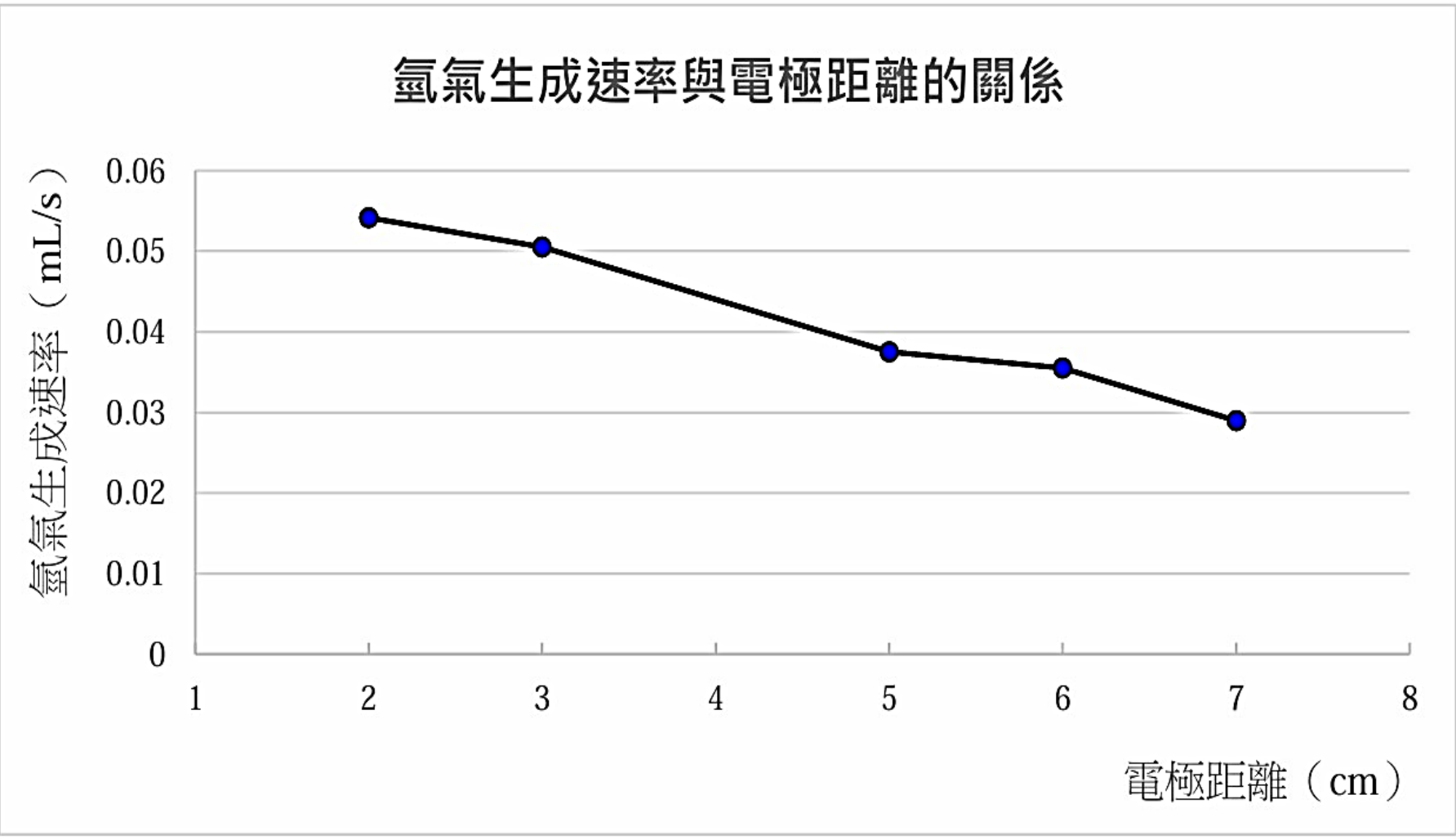


圖8：氫氣生成速率 (mL/s) 與電極距離 (cm) 的關係圖

(圖5～圖8來源：第二作者自行繪製)

(二) 定電流0.1 A，電解0.5 M的H₂SO₄(aq)，探討陰極H₂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6.05×10²³，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。

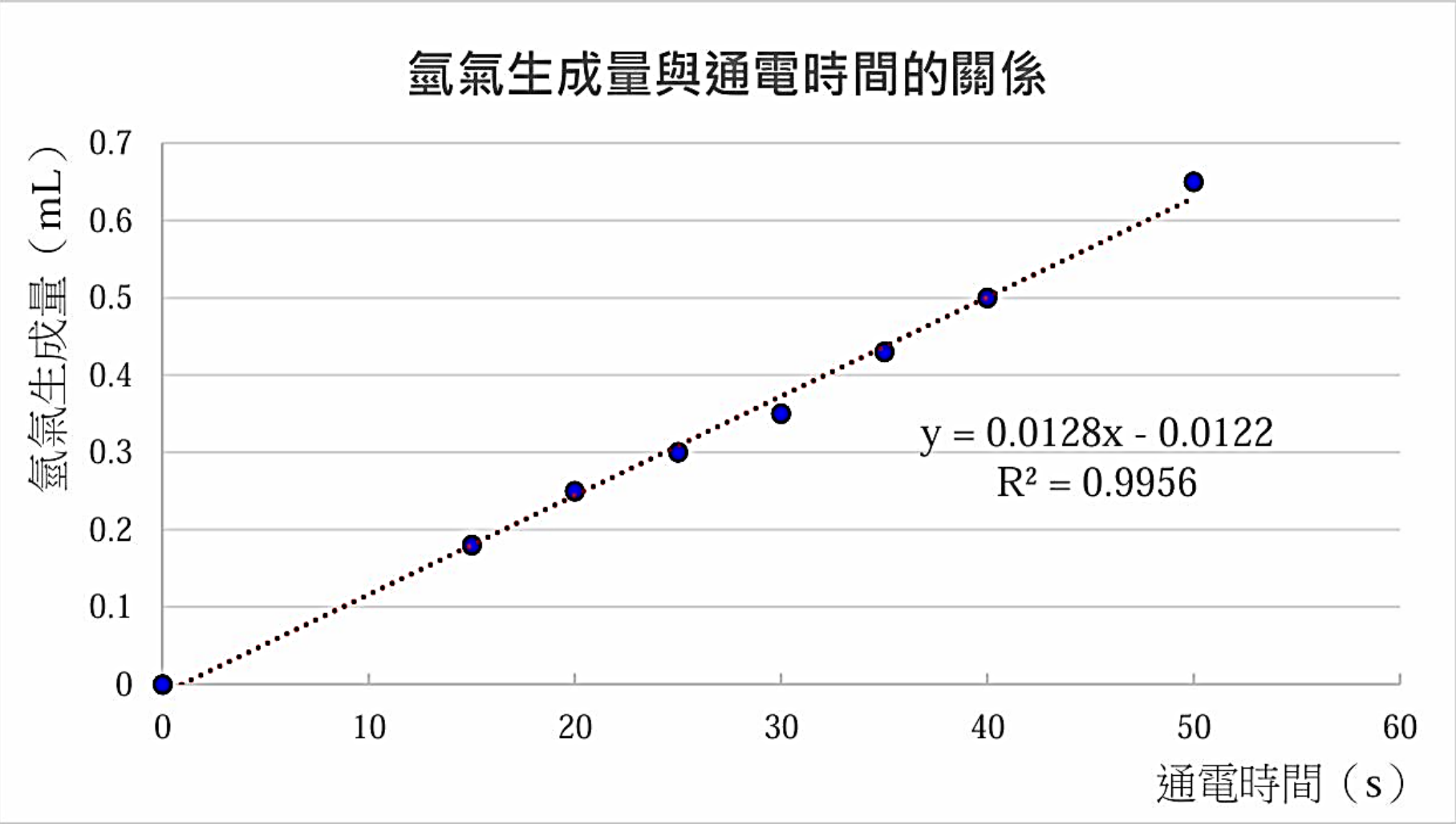


圖9：定電流0.1 A，氫氣生成量與通電時間的正比關係圖

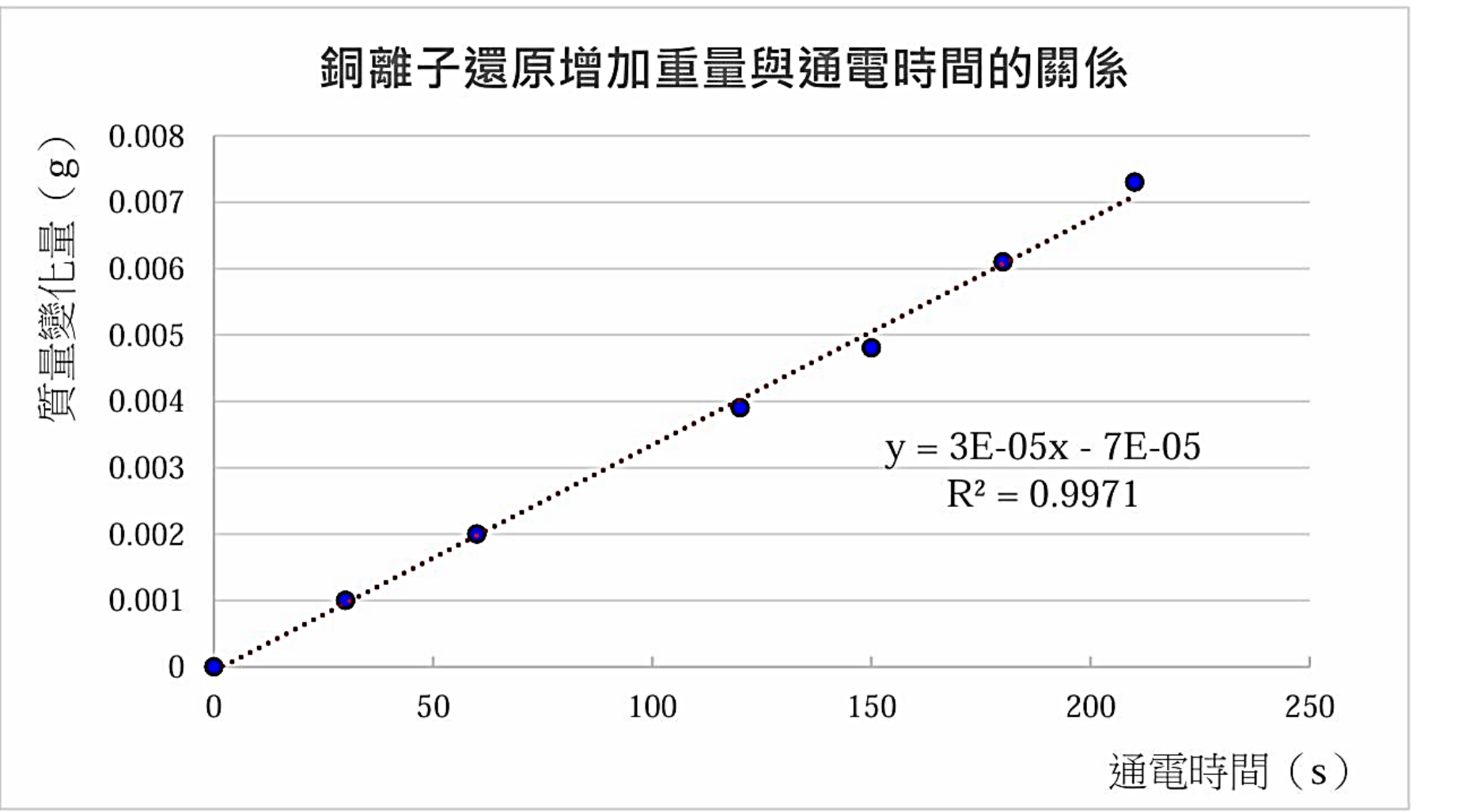


圖10：定電流0.1 A，質量變化量與通電時間的正比關係圖

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 _A	6.07×10 ²³	5.92×10 ²³	6.11×10 ²³	5.85×10 ²³	5.93×10 ²³	5.98×10 ²³	－ 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

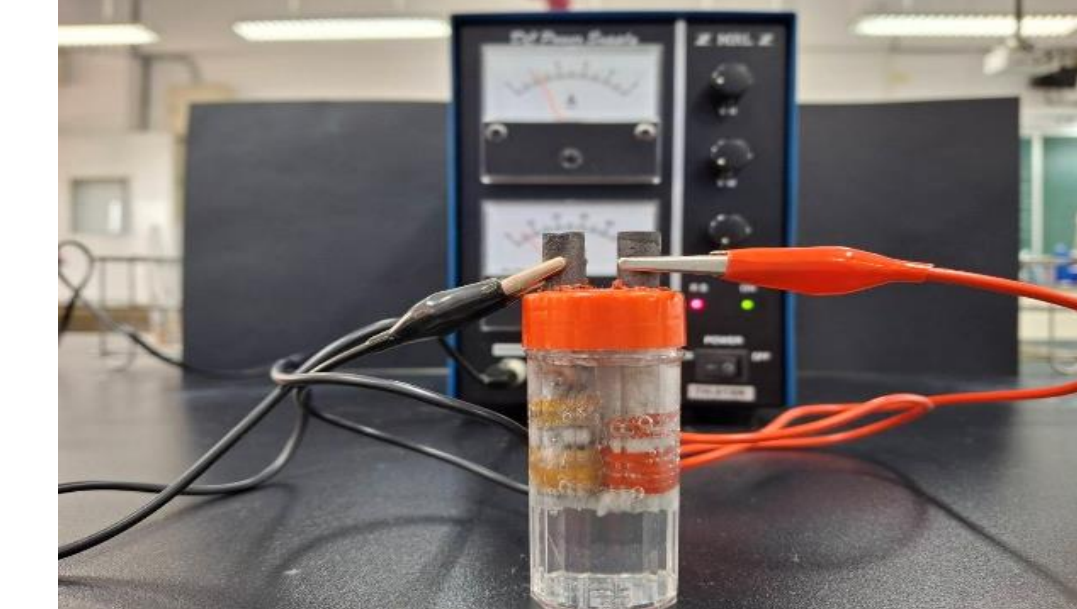


圖12：微型氫氧燃料電池電解過程

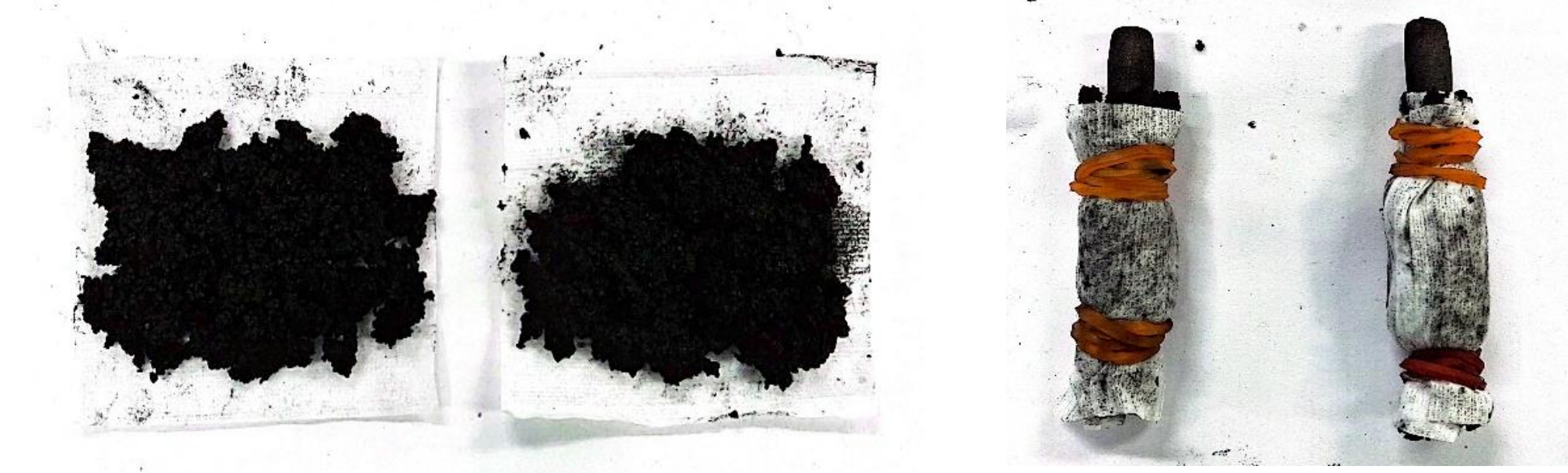


圖13：圖左為活性碳粉膠體，圖右為滾成棒狀的正負極電極芯

(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。

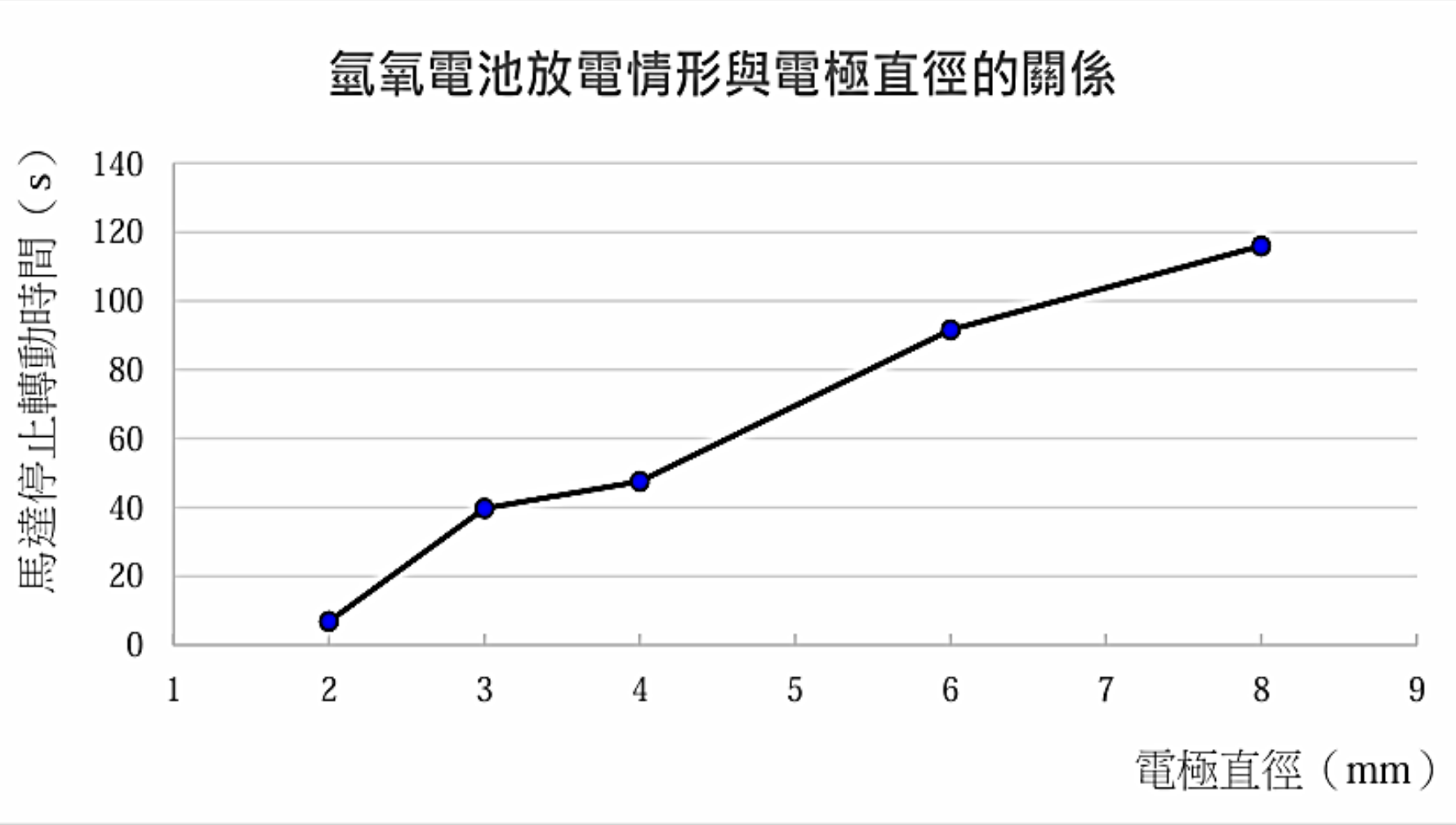


圖14：電池放電情形 (s) 與電極直徑 (mm) 的關係圖

(二) 定電壓5伏特，充電時間5分鐘，改變碳棒淬火的次數⁴，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。

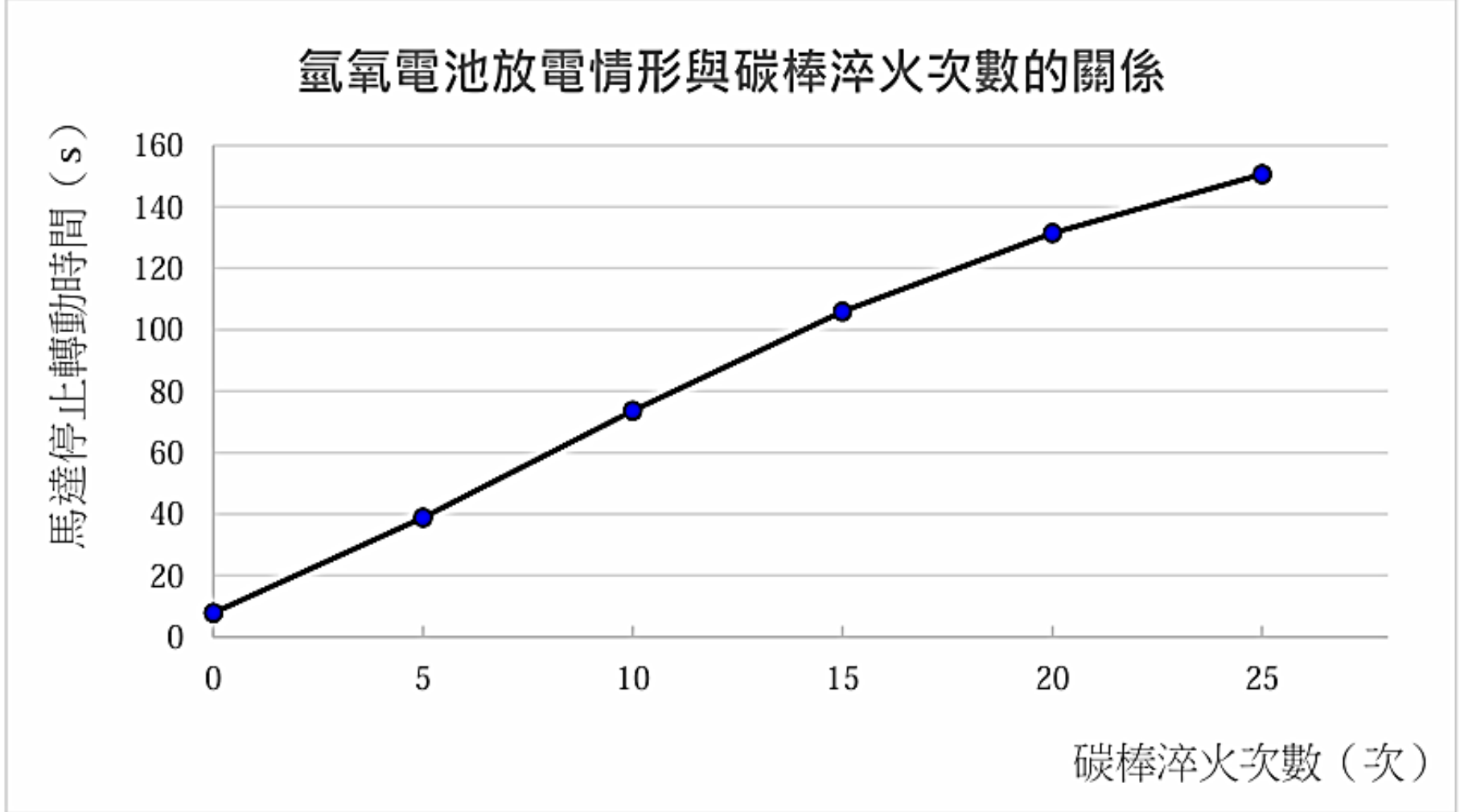


圖15：電池放電情形 (s) 與碳棒淬火次數 (次) 的關係圖

(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。

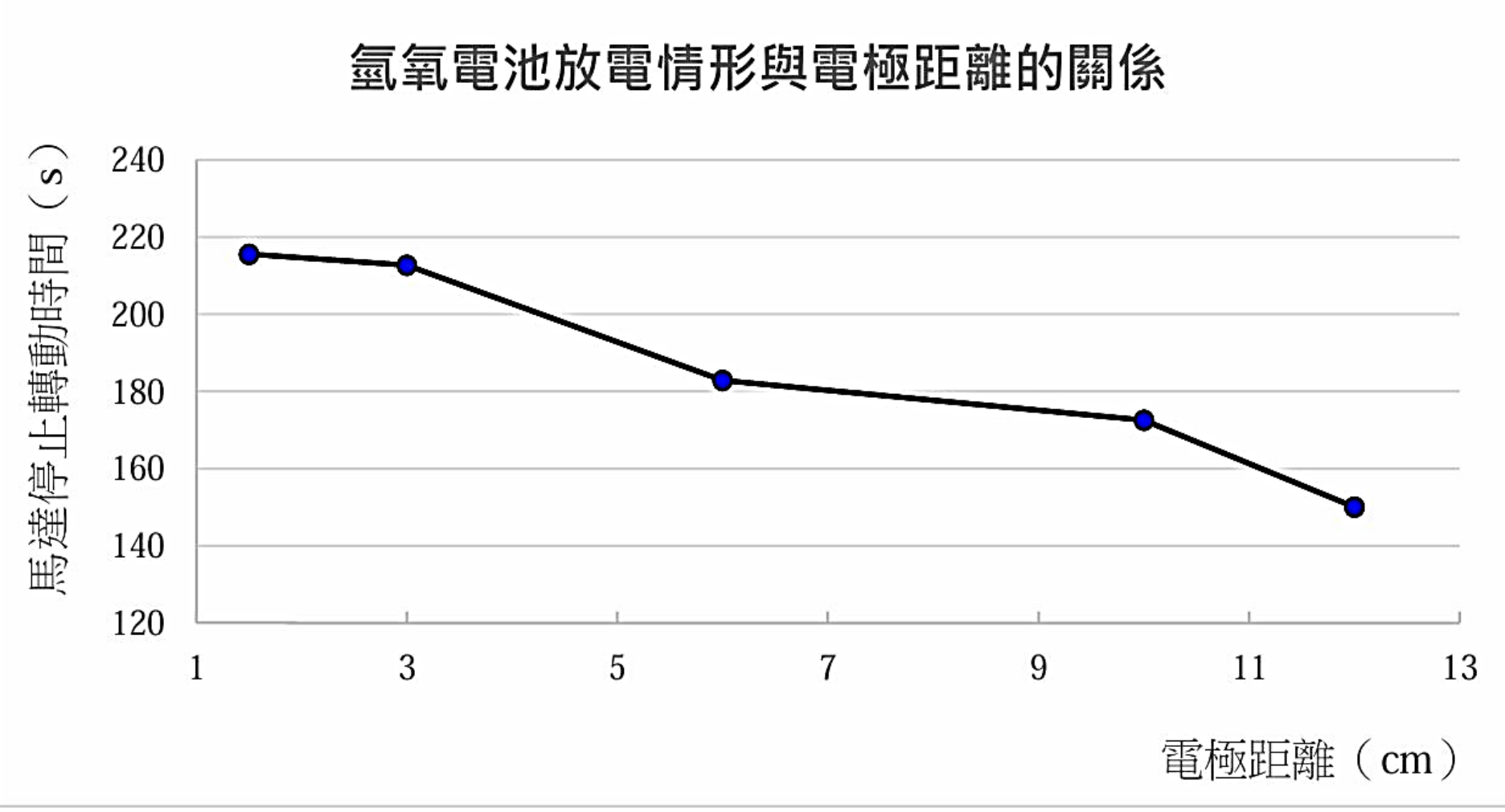


圖16：電池放電情形 (s) 與電極距離 (cm) 的關係圖

(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。

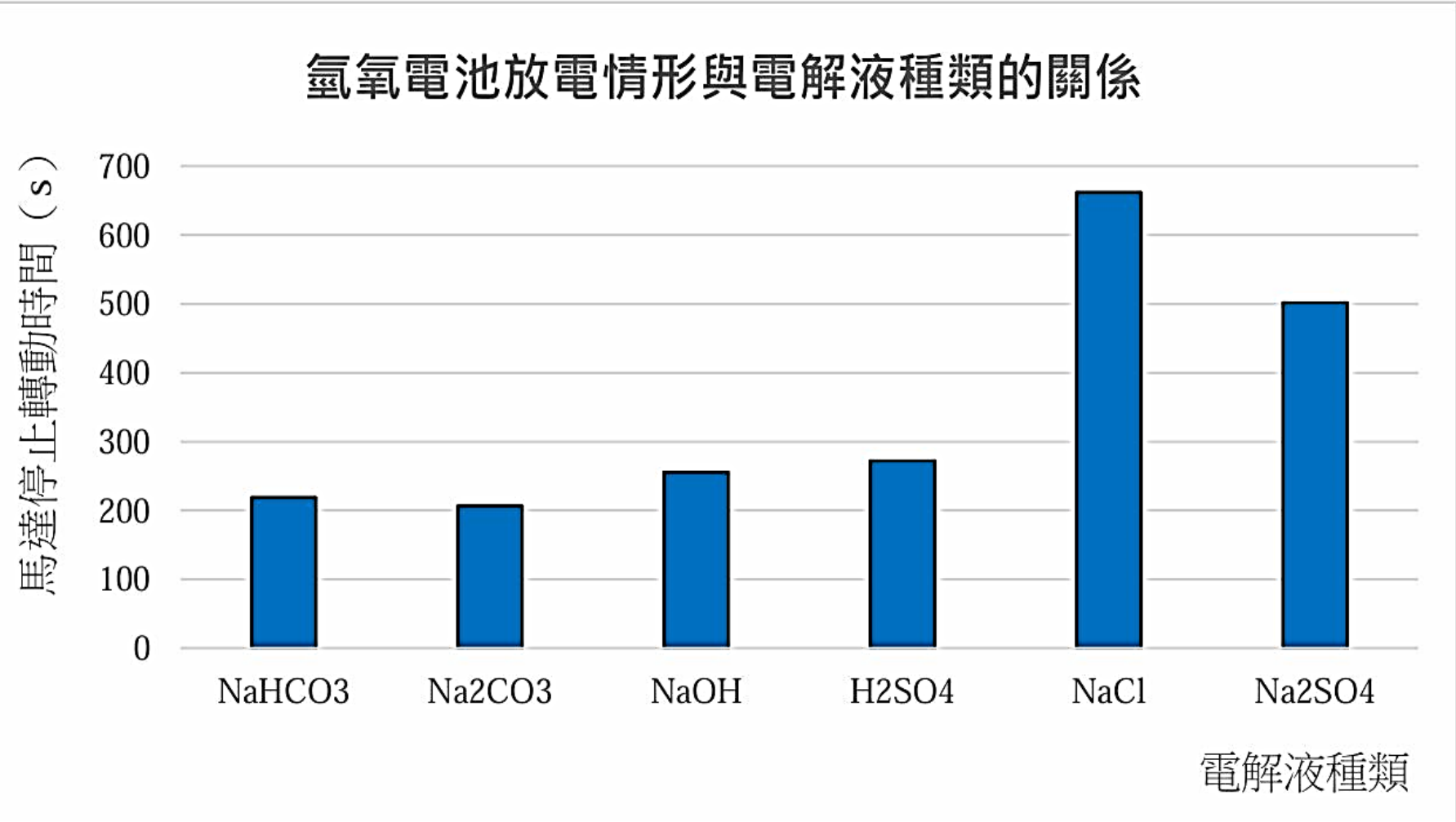


圖17：氫氧電池放電情形 (s) 與電解質種類的關係圖

(五) 定電壓充電時間5分鐘，電解不同濃度的Na₂SO₄(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。

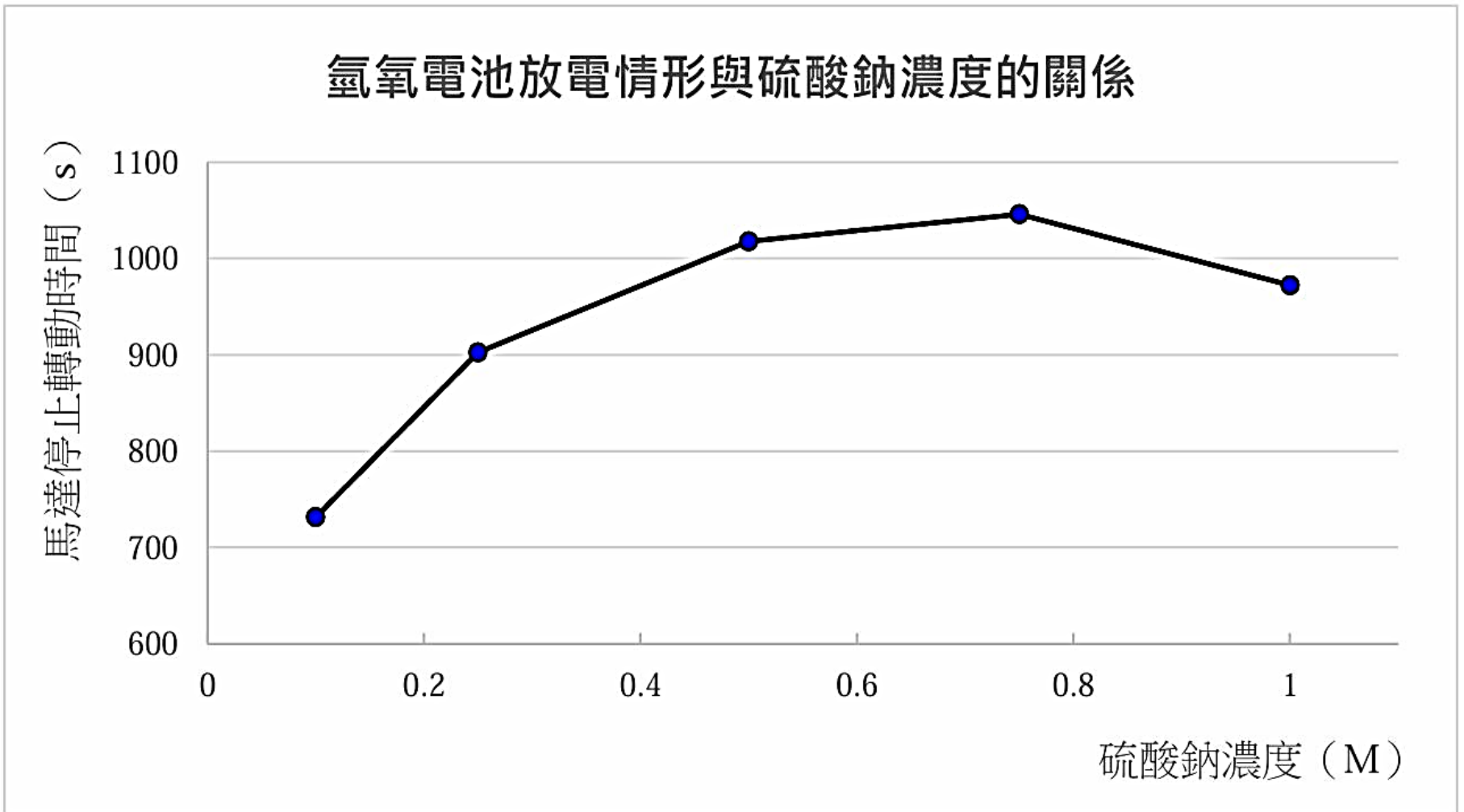


圖18：氫氧電池放電情形 (s) 與濃度 (M) 的關係圖

(六) 定電壓充電時間5分鐘，碳棒中添加不同量的活性碳粉，放電情形如下圖所示。【結果顯示】：活性碳粉添加量愈多，馬達轉動時間愈長；未添加活性碳粉，馬達轉動時間最短。

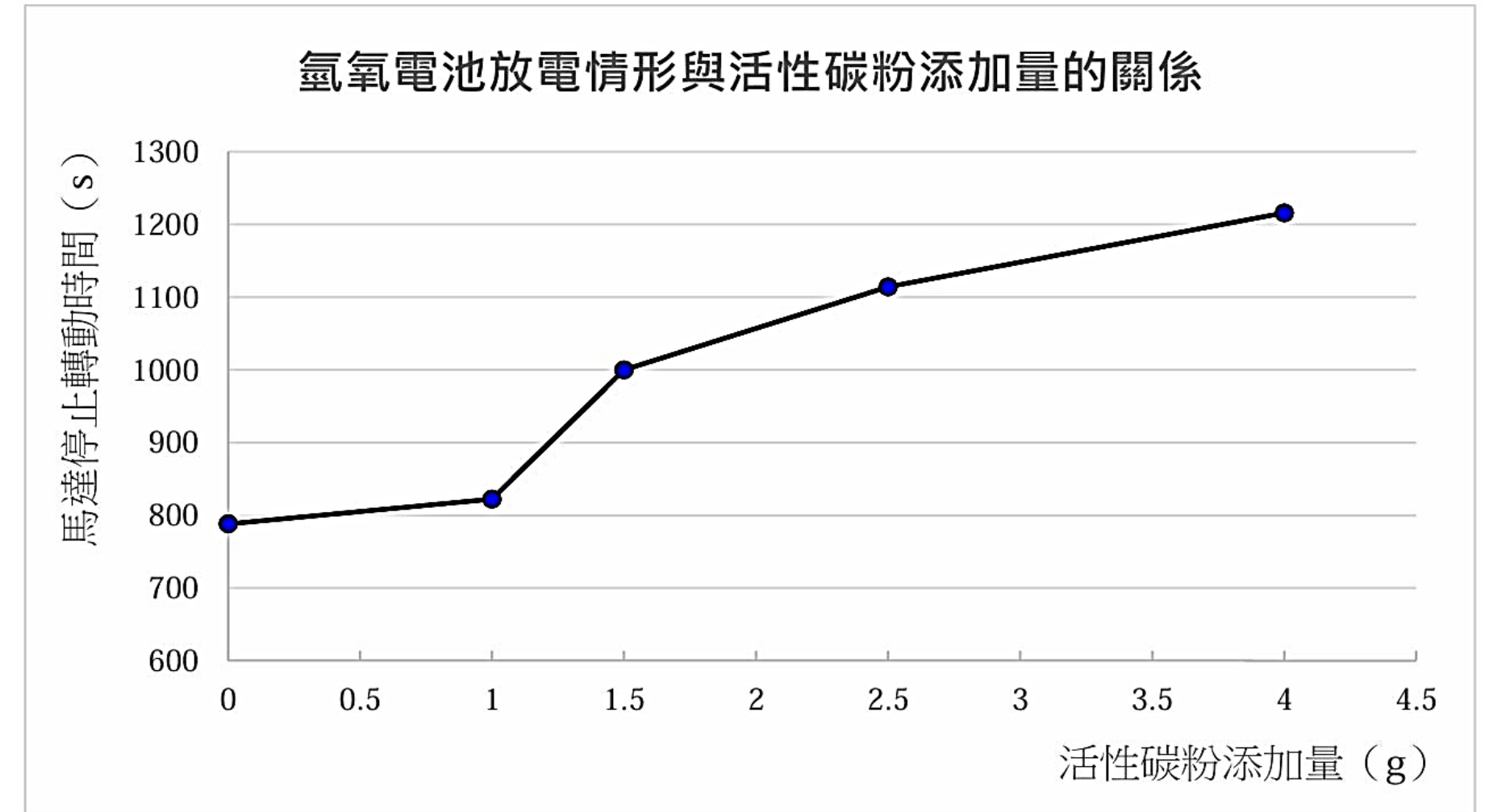


圖19：電池放電情形 (s) 與活性碳粉添加量 (g) 的關係圖
(圖14～圖20來源：第一作者自行繪製及拍攝)

(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。

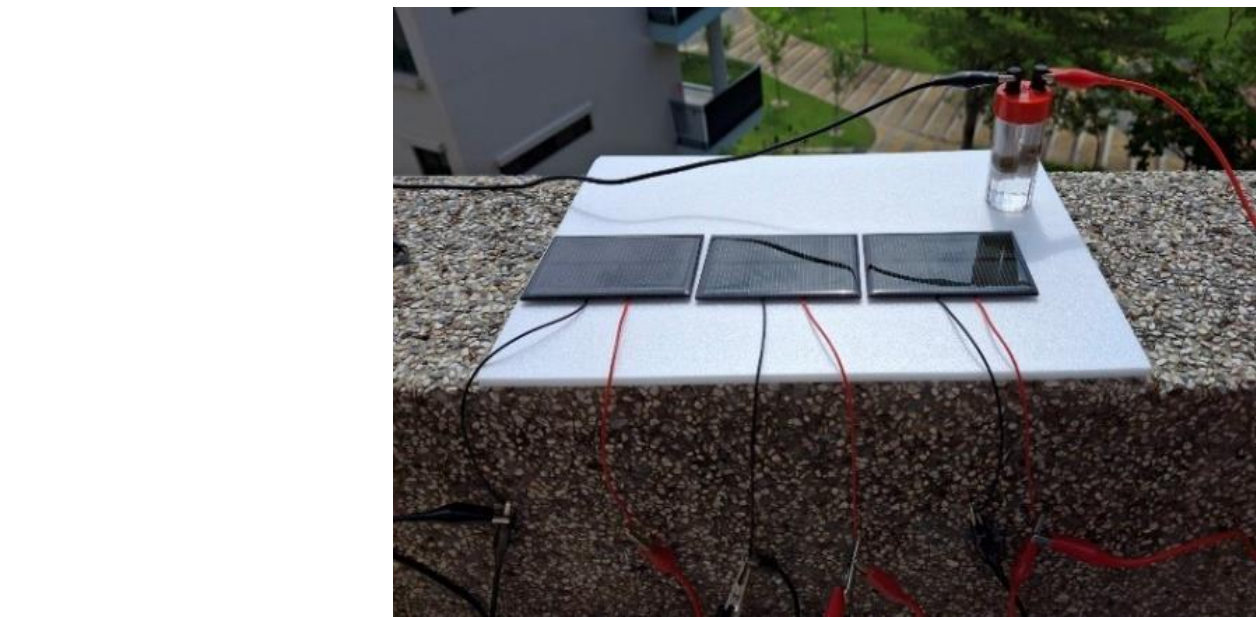


圖20：利用太陽能面板將太陽能轉化成氫能

表4：不同太陽能面板電壓電解，電池電能轉換效能

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

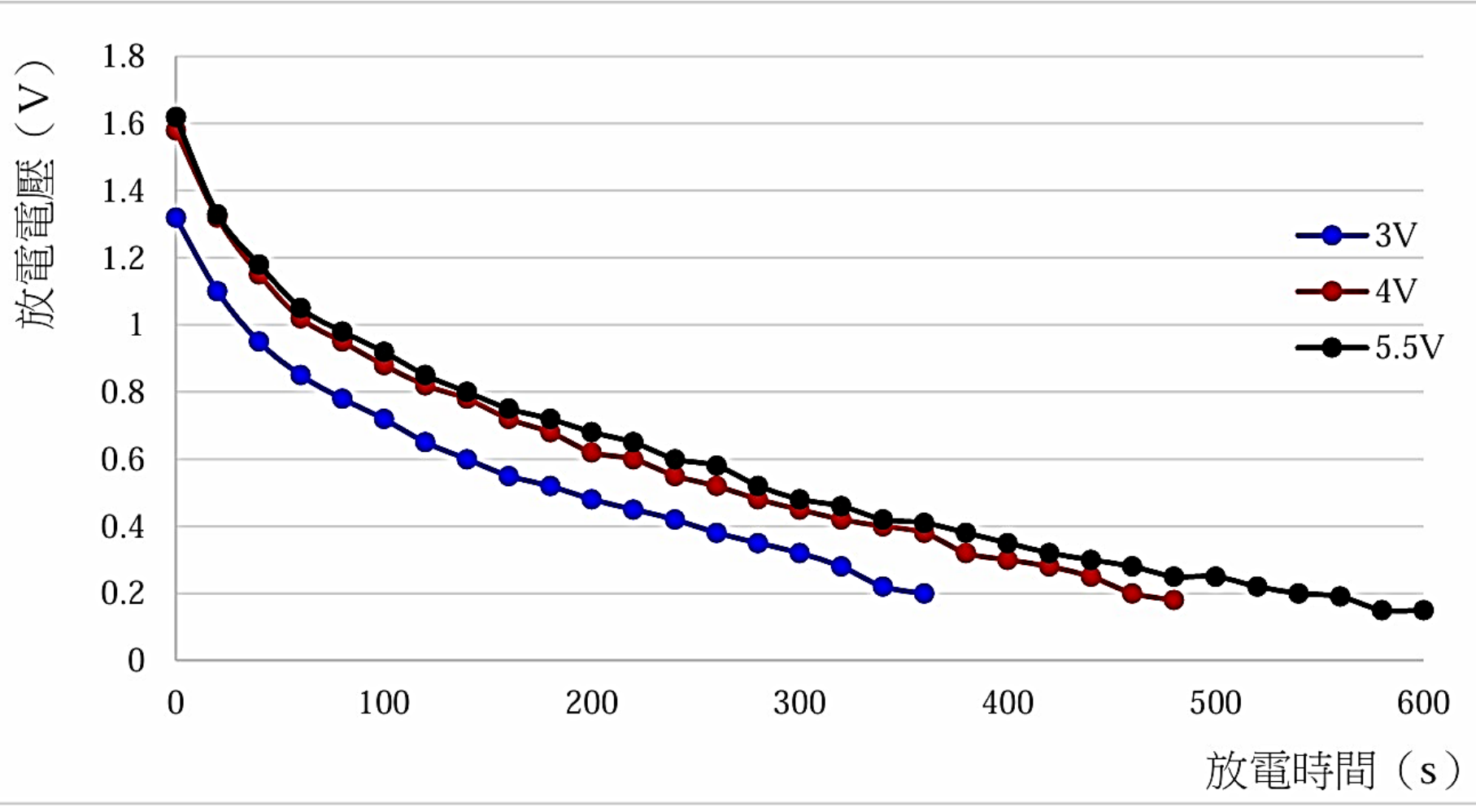


圖21：不同面板電壓電解，電池放電電壓隨時間的變化圖

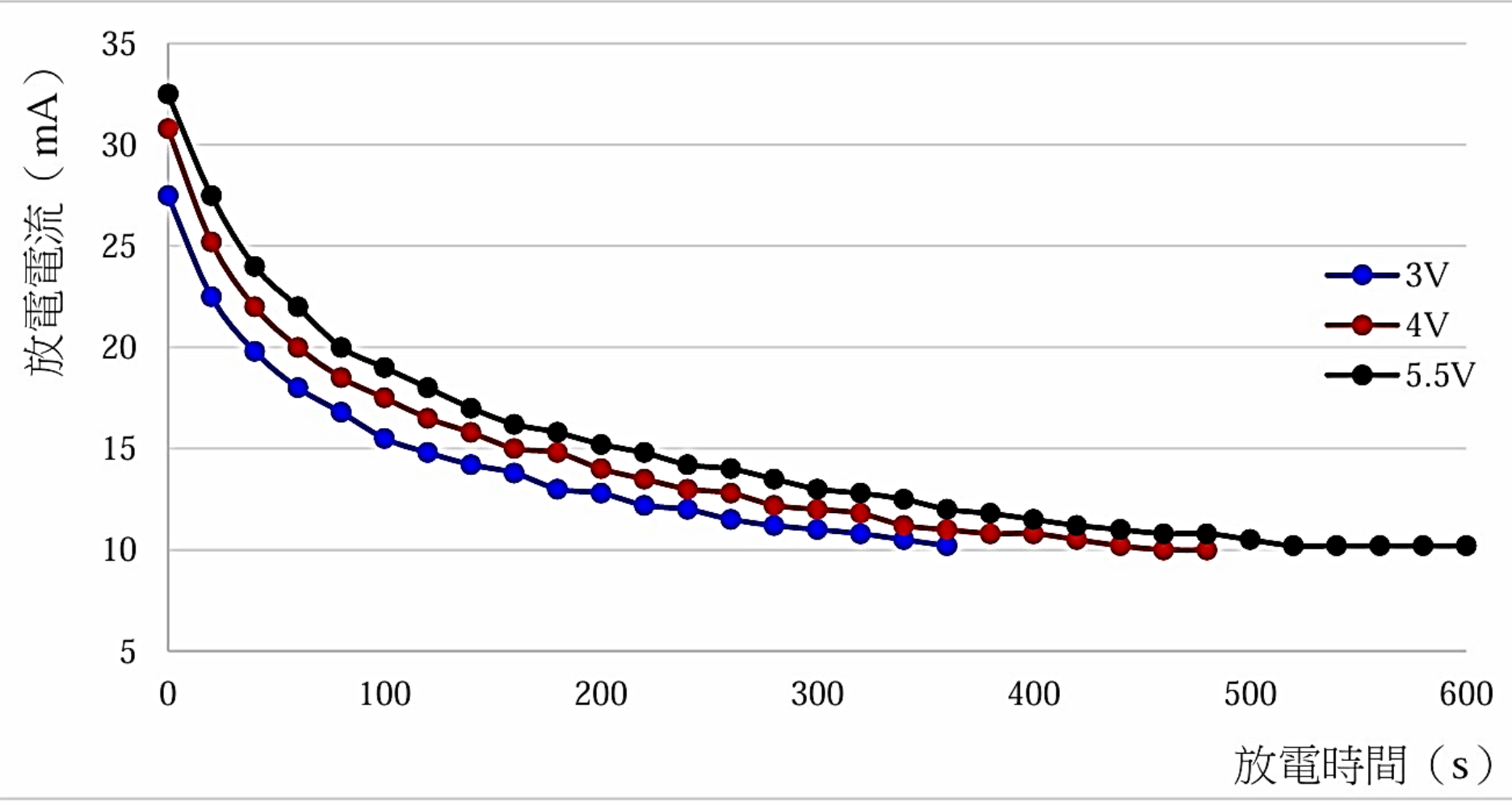


圖22：不同面板電壓電解，電池放電電流隨時間的變化圖

(表4及圖21、圖22來源：第三作者自行繪製)

(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)

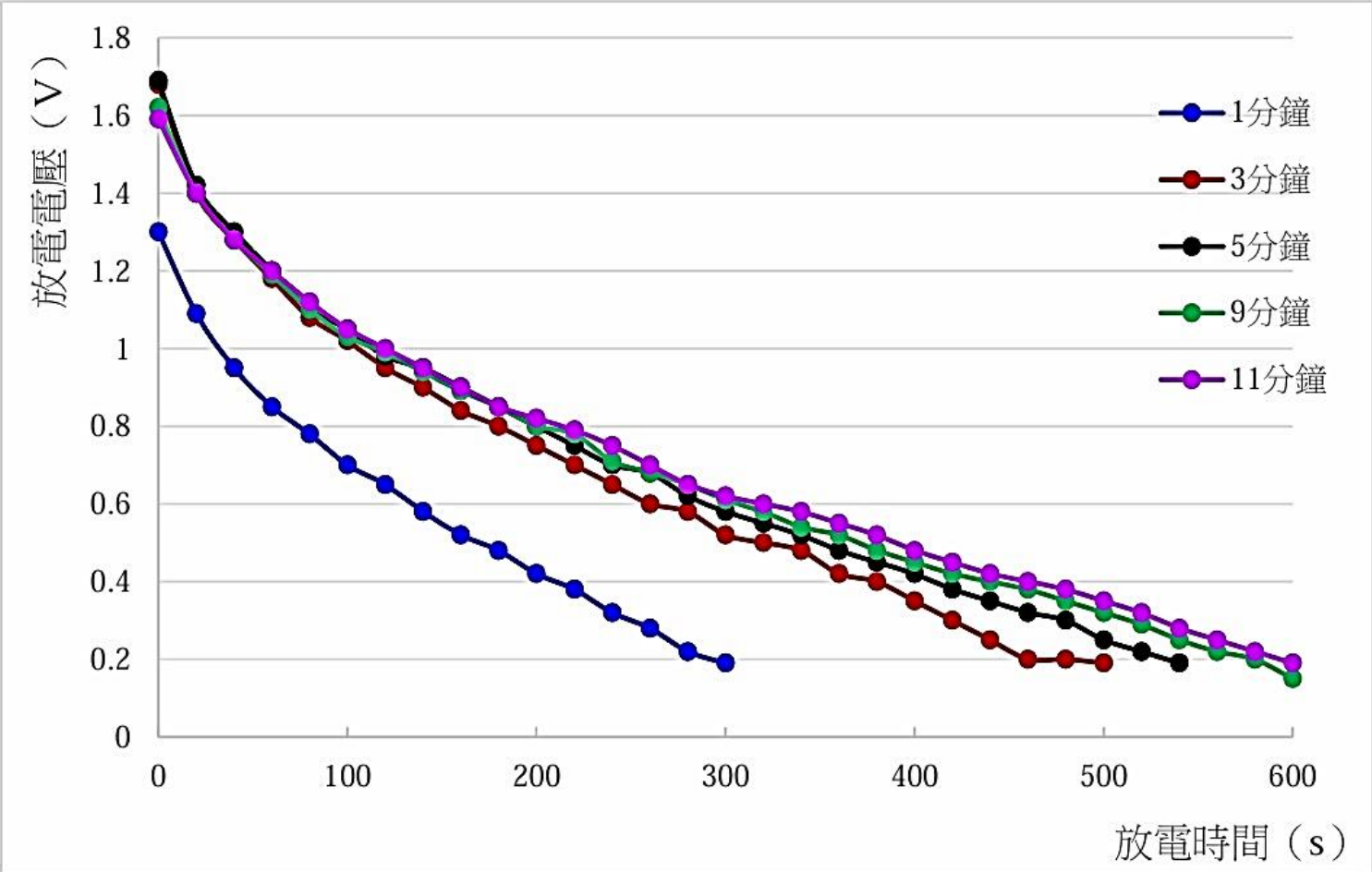


圖23：不同照射時間，電池放電電壓隨時間的變化圖

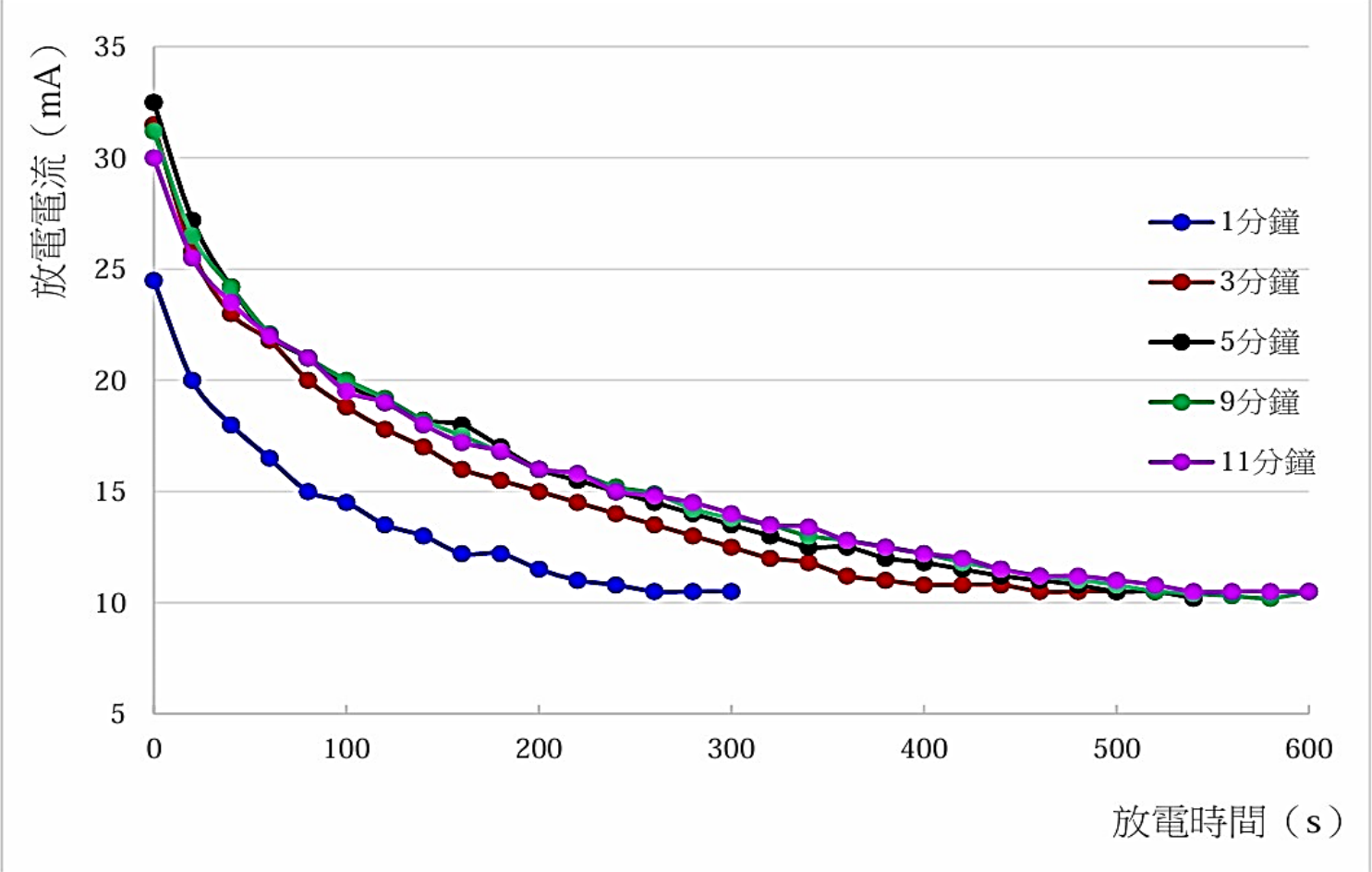


圖24：不同照射時間，電池放電電流隨時間的變化圖

(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。

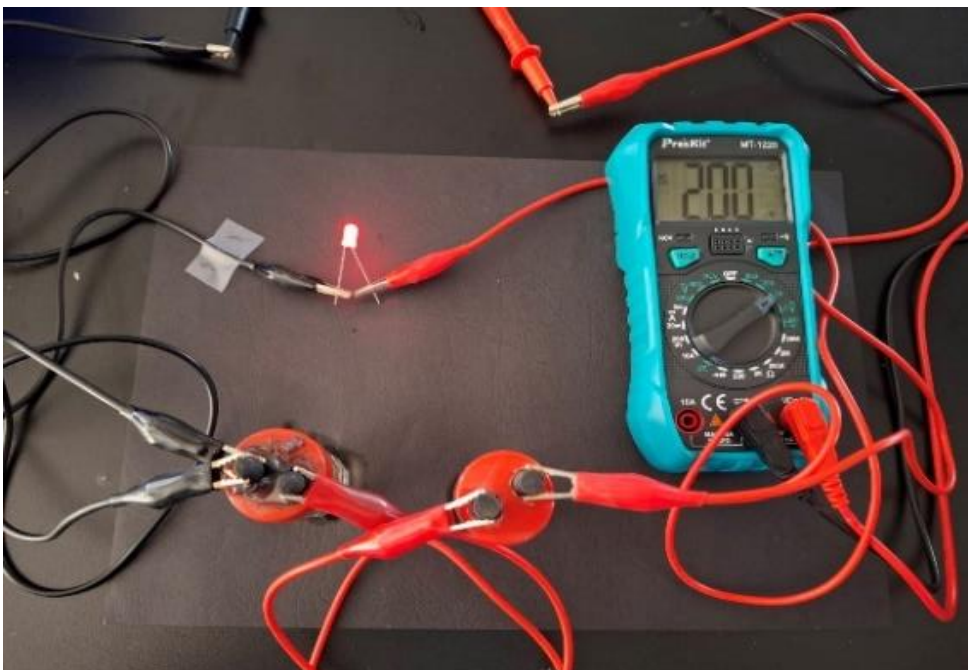
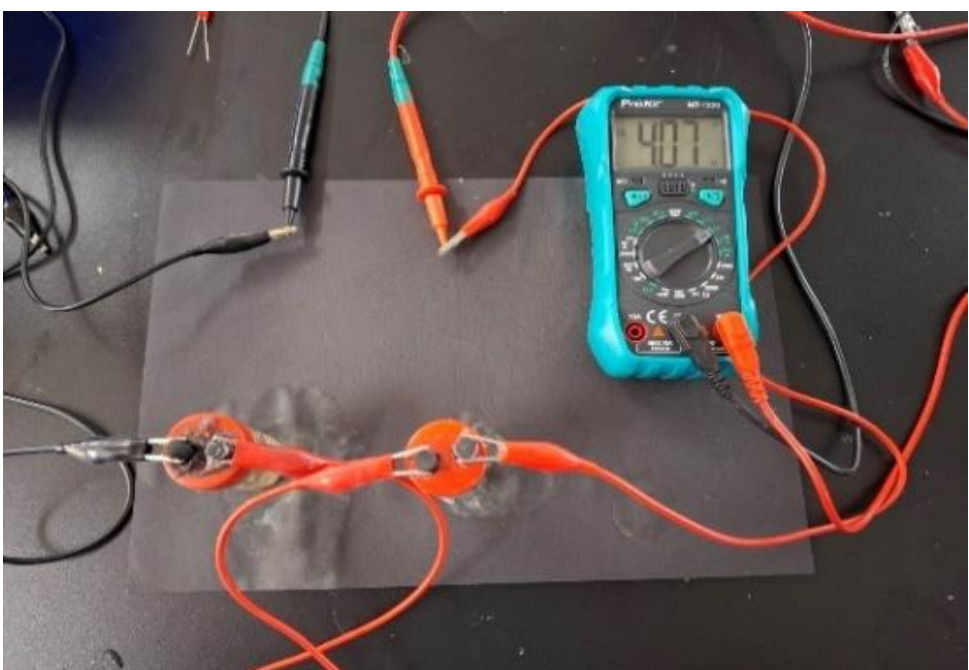


圖25：圖左為雙電池串聯後的電池電壓（未接LED），圖右為連接紅色LED的電壓

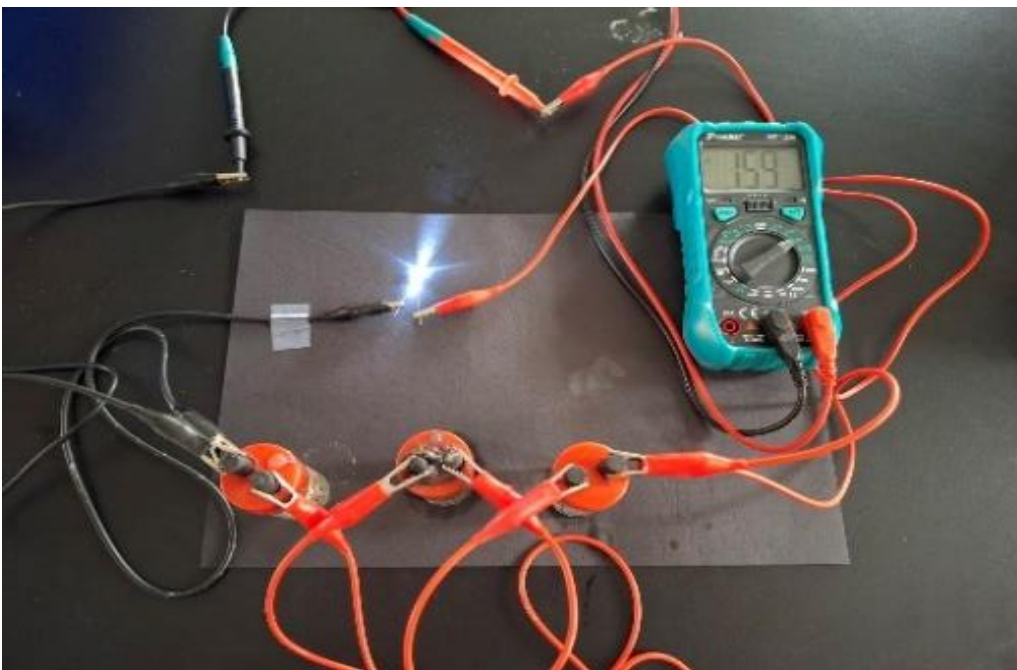
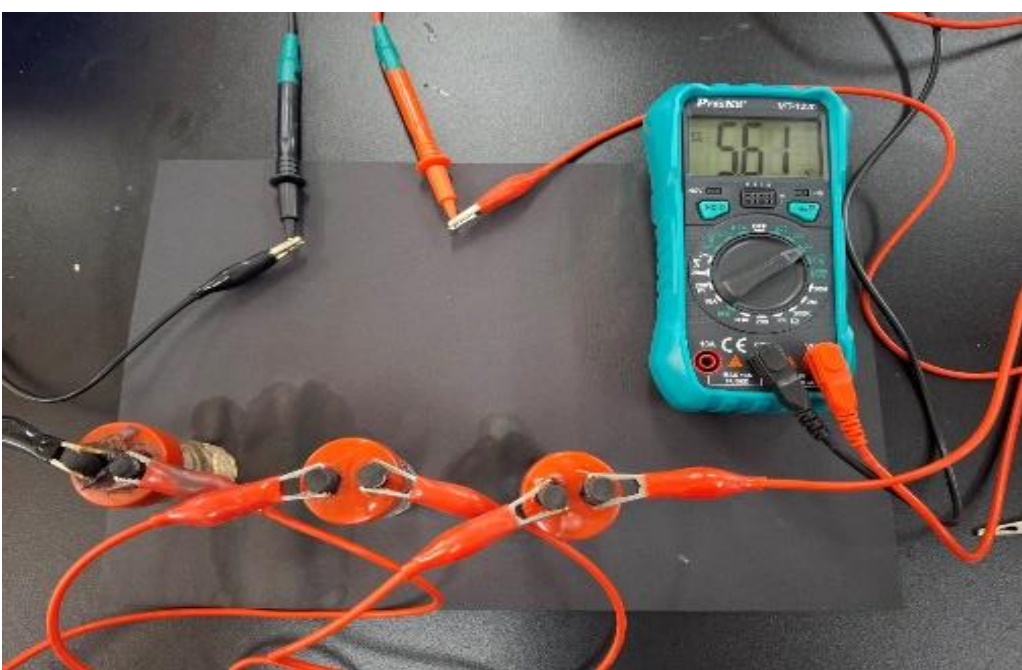


圖26：圖左為三電池串聯後的電池電壓（未接LED），圖右為連接白色LED的電壓
(圖25~圖26來源：第一、二作者自行拍攝)

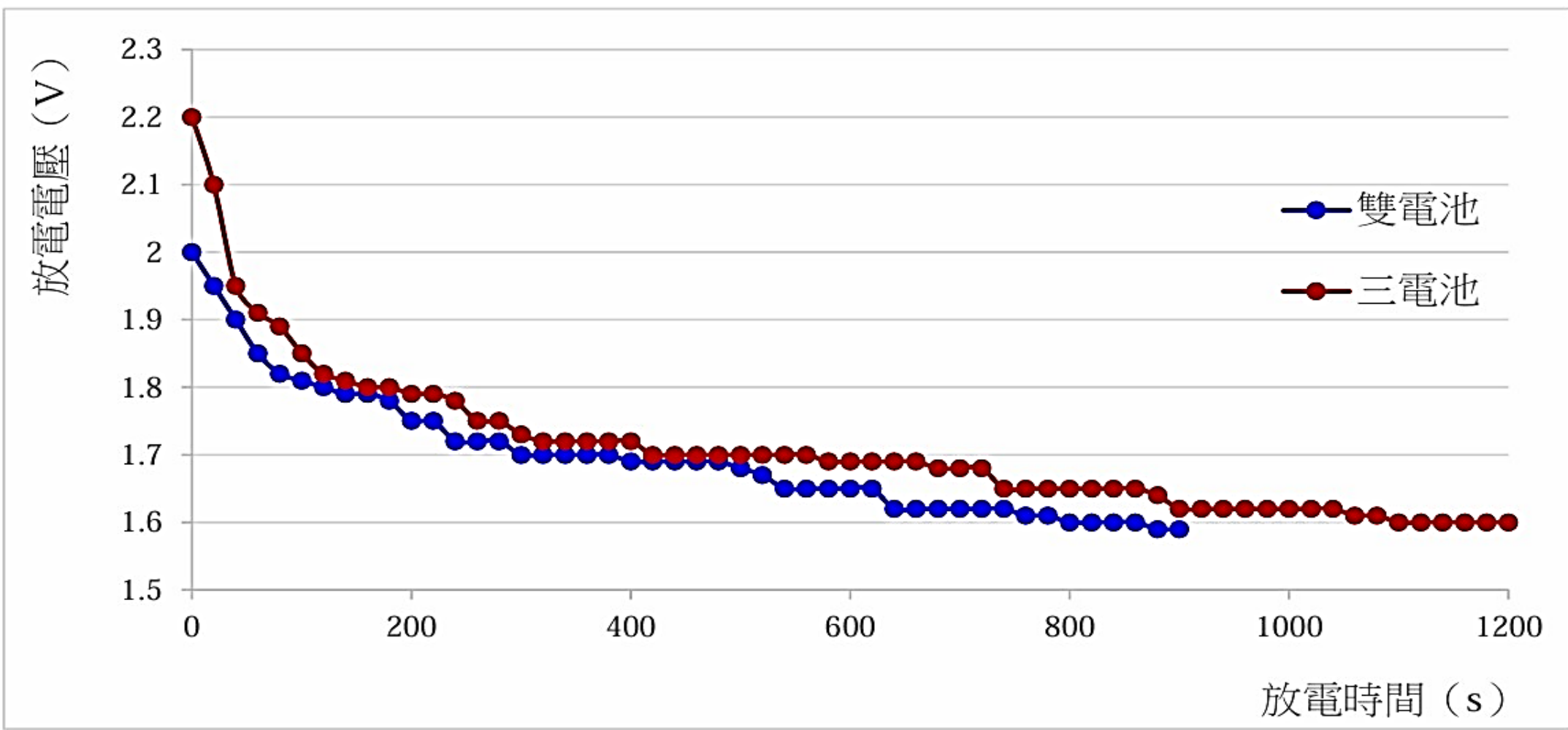


圖27：氫氧燃料電池串聯放電電壓隨時間的變化圖

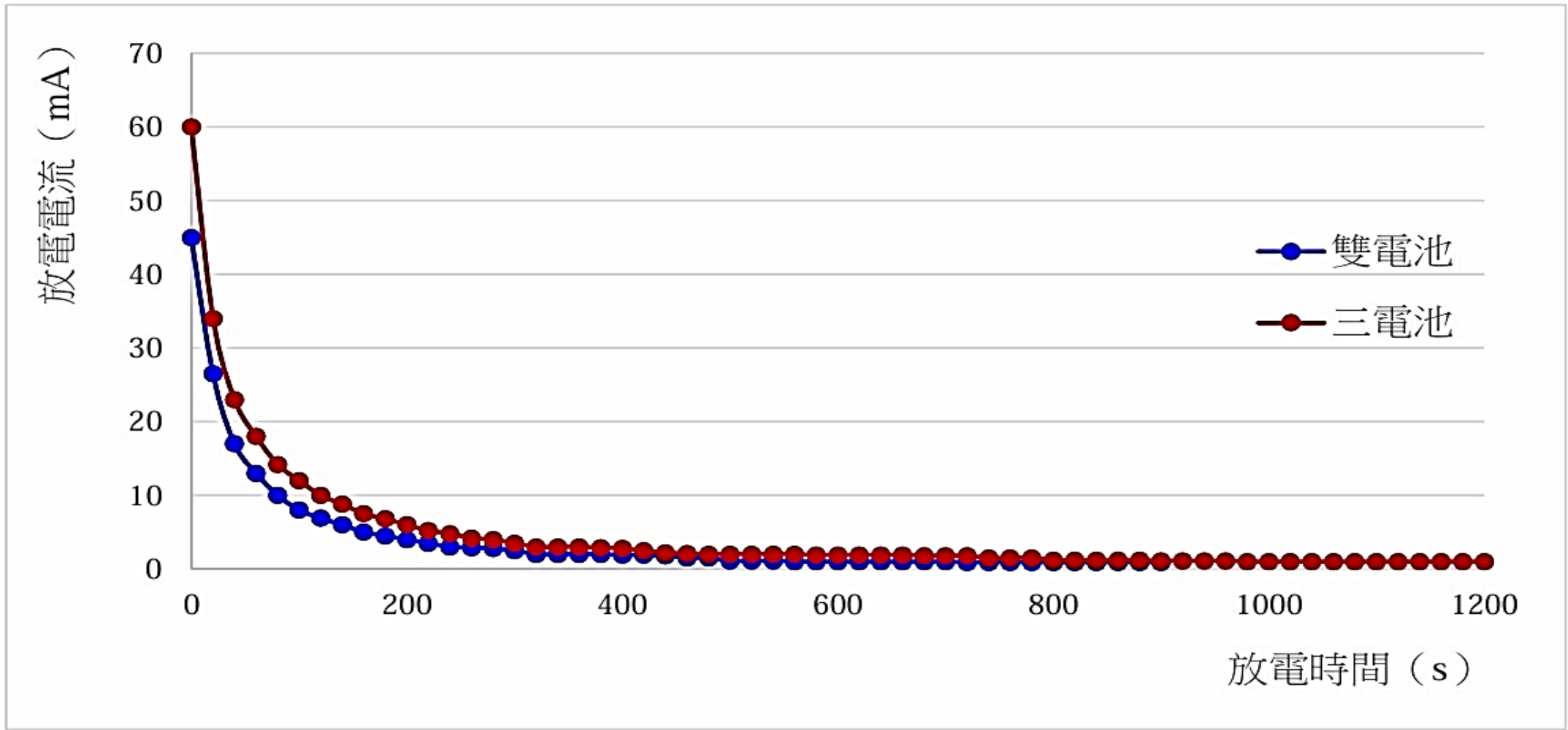


圖28：氫氧燃料電池串聯放電電流隨時間的變化圖

(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 CuSO₄(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。

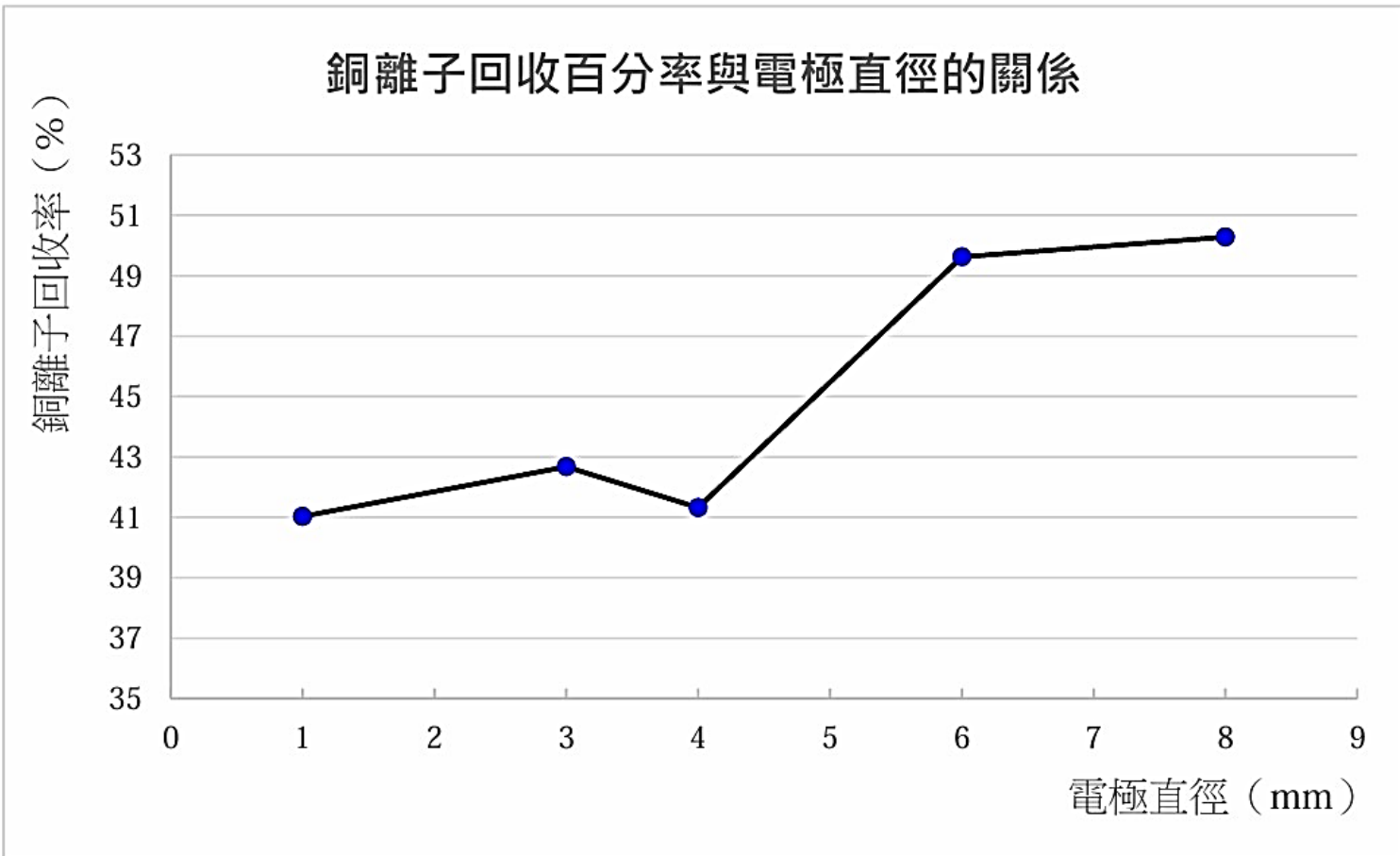


圖29：銅離子回收率與電極直徑 (mm) 的關係圖

(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。

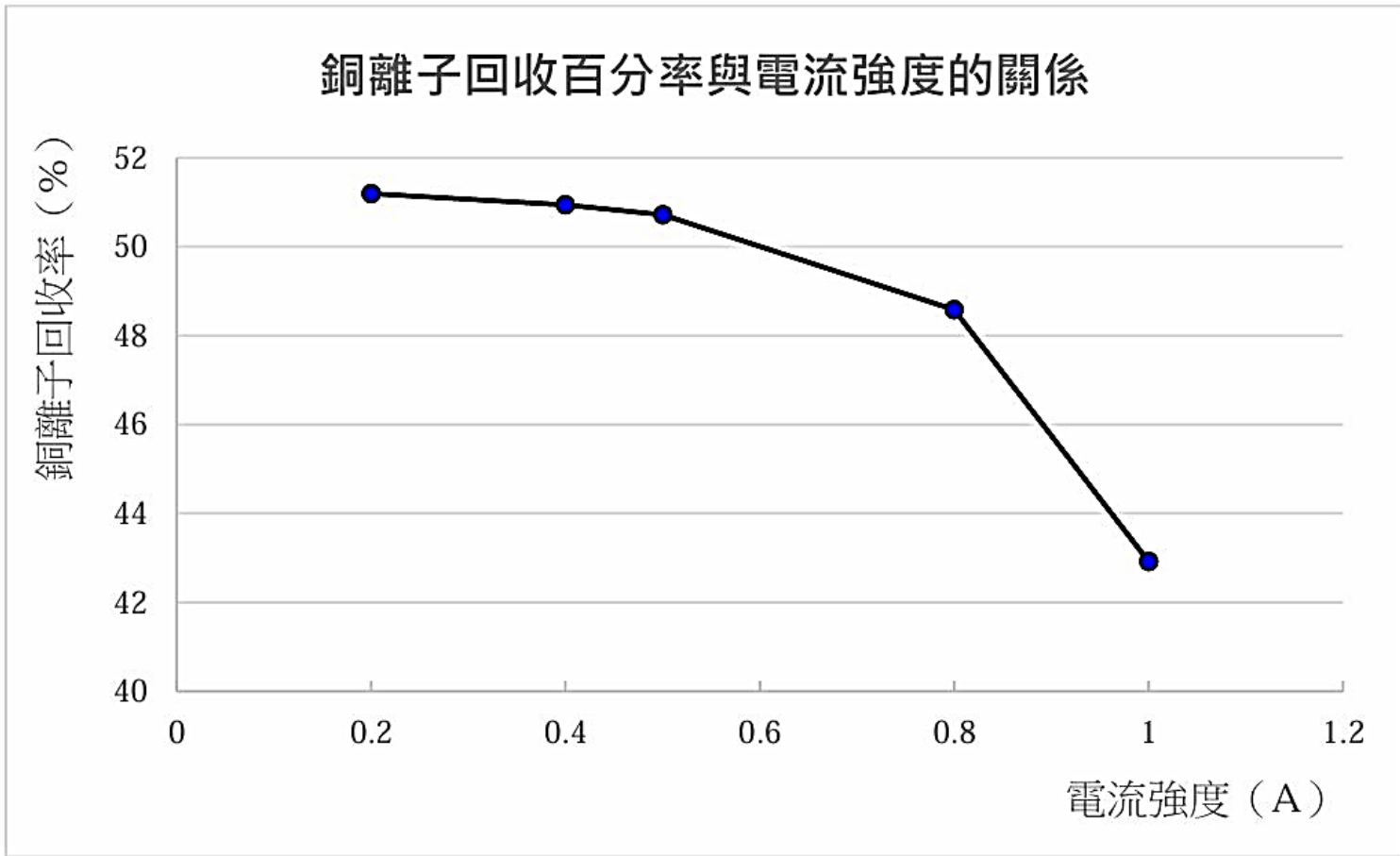


圖30：銅離子回收率與電流強度 (A) 的關係圖

(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。

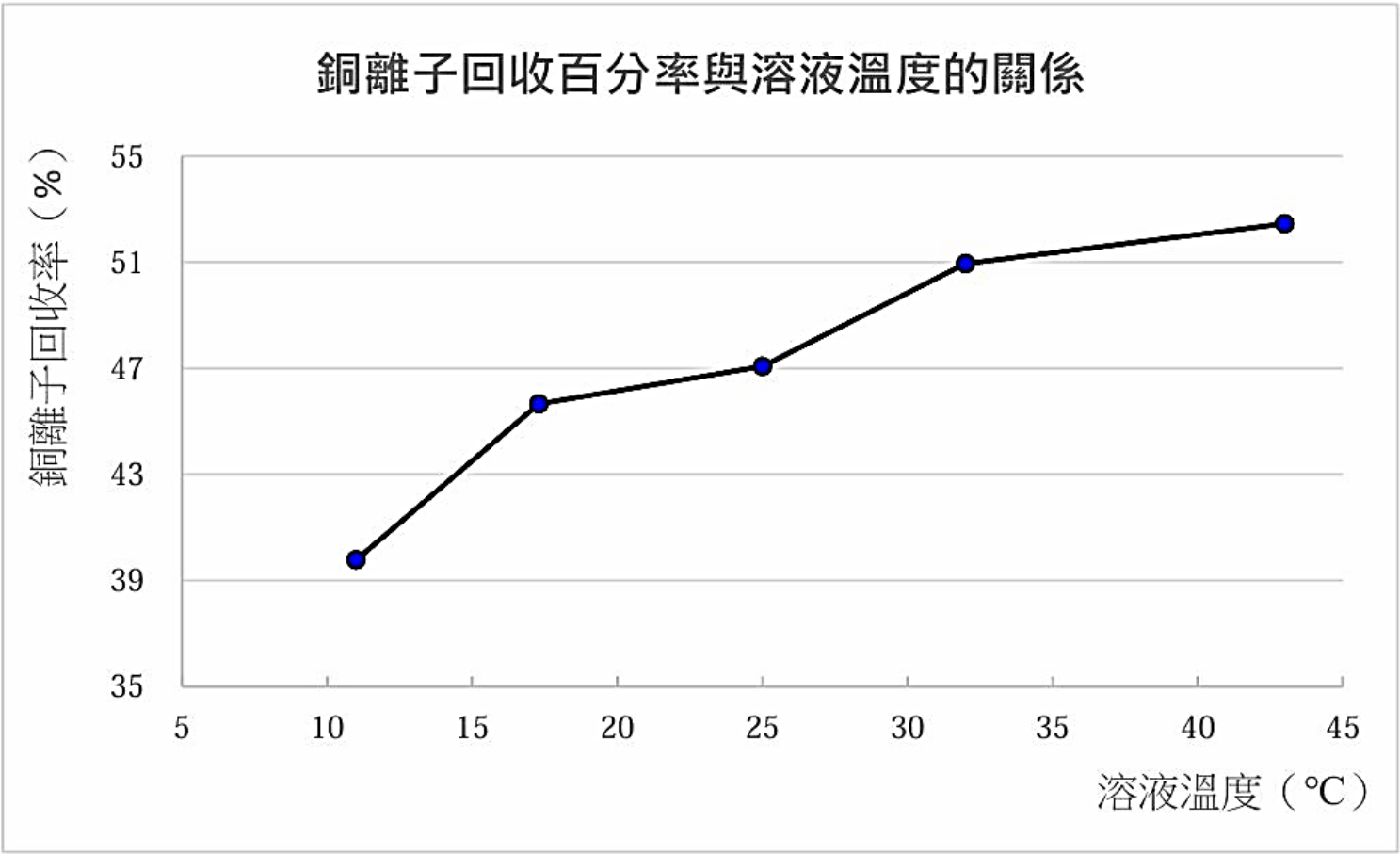


圖31：銅離子回收率與溶液溫度 (°C) 的關係圖

(四) 定電流0.4 A，添加不同濃度的螯合劑EDTA-4Na⁺，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。

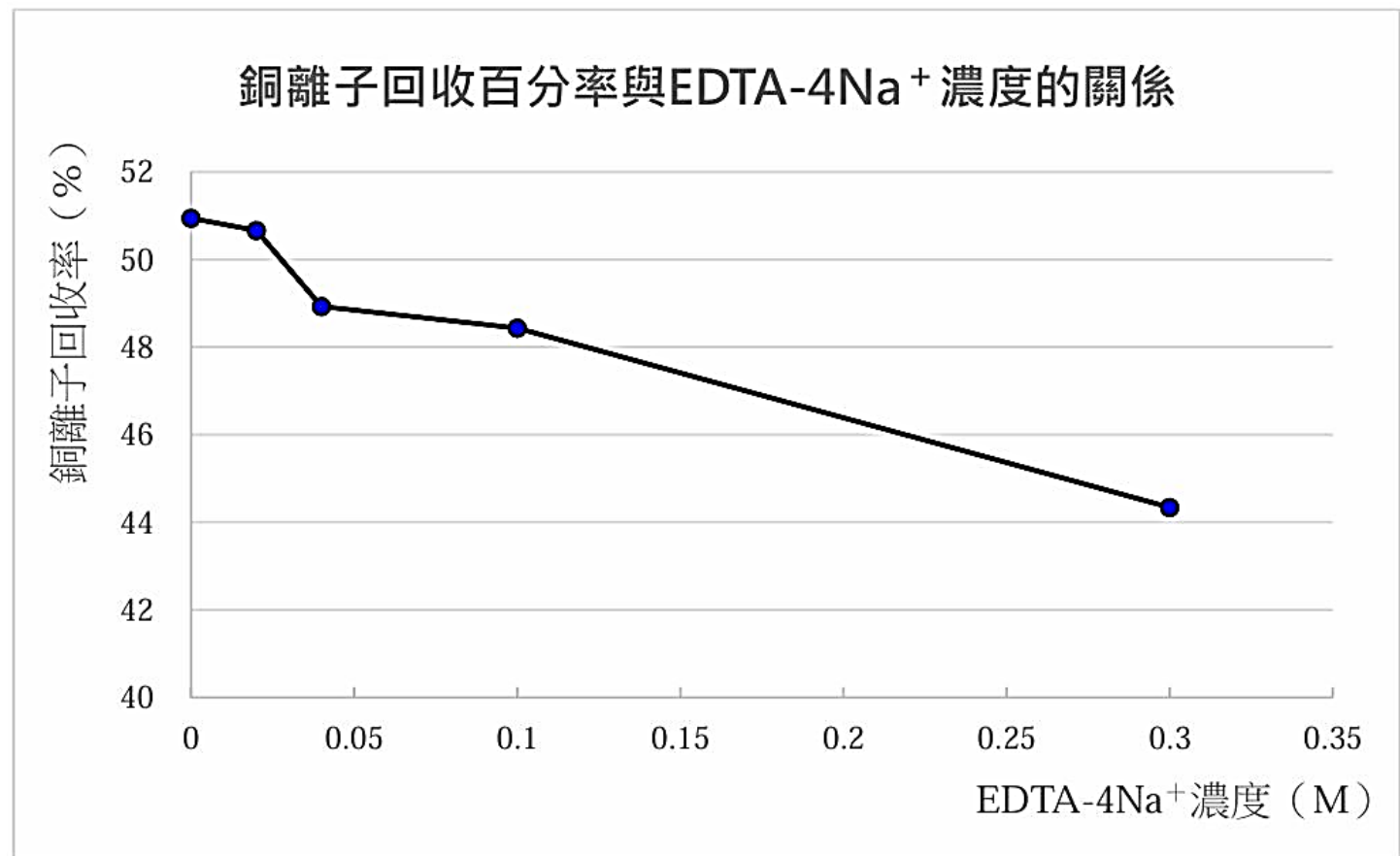
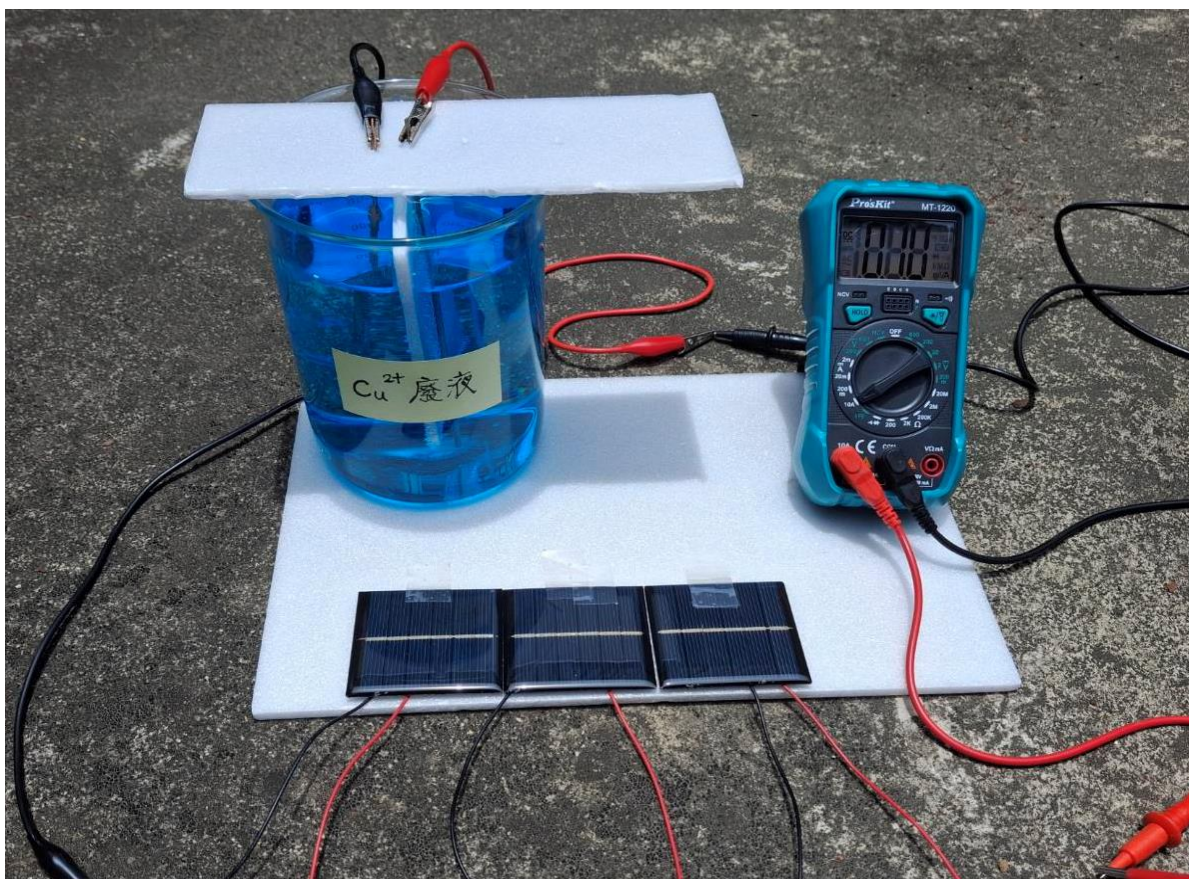


圖32：銅離子回收率與螯合劑濃度 (M) 的關係圖

(五) 利用太陽能作為電力來源（電流約0.10 A），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，圖33為銅離子廢液回收前後的變化情形。【結果顯示】：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。



變化 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⁵。
- 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。結合太陽能為電力來源，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。

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。
- 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.