

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 化學科

030201

太陽與化學的對話－太陽能板應用在電化學的
探討

學校名稱：彰化縣立陽明國民中學

作者： 國二 葉 靚 國二 陳盈均 國二 張捷萁	指導老師： 林宏一
---	------------------

關鍵詞：太陽能板、電解水、電解硫酸銅

摘要

本研究探討太陽能板的發電性能及其應用於國中課本內電化學實驗，例如電解水及電解硫酸銅用於銅離子回收等的可行性。研究結果發現太陽能板開路電壓會隨著板面溫度的上升而下降，在太陽下太陽能板開路的電壓平穩，短路電流不隨著照度增加而增加。以 SM5151 串聯的太陽能板為電源用於電解水，氫氣的產生速率是使用直流電源的兩倍，可於 45 分鐘內收集到 8 ml 的氫氣，其效果遠比課本上以三顆乾電池串聯為電源佳。以太陽能板為電源配合設計的裝置電解 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ ，銅在負極上的吸附情形良好，可應用於廢液中銅離子的回收及物品的電鍍。本研究結果顯示以太陽能板發電，除了用於永續能源的教學外，可應用於課本上電化學實驗之改良，還可將實驗搬到教室外陽台上做。

壹、研究動機

石油價格居高不下，連帶影響民生物品價格上揚，在生活上除了愛物、惜物，做好資源回收外，更應善用綠色能源，減少對石油的依賴。在國中自然課程中有許多電化學的實驗，例如水的電解，若能以太陽能板為電源進行實驗，不僅可以節省電能，還可將實驗搬到教室陽台上做，慢慢觀察仔細研究，豈不是一舉兩得。另外，電化學實驗所產生的硫酸銅廢液，若能以太陽能板為電源將銅離子還原成銅原子回收，不僅可避免隨意傾倒造成重金屬污染，同時可節省廢液處理的費用。在老師的鼓勵下，我們嘗試將太陽能板應用到這些電化學實驗，探討其可行性及實用價值。

貳、文獻回顧及研究目的

一、太陽能板的研究

1. 在第 48 屆中小學科展高中組物理科：太陽『矽』希望--太陽電池 的研究，是以**單槍投影機**為光源測量不同照度下，對太陽能電池的短路電流(short circuit current)與開路電壓(open circuit voltage)的影響，發現照度增加時，電壓及電流亦增加；但是單槍投影機的光源照度值改變範圍為：228~640(Lux)，相對於戶下陽光的照度值是偏小的(40000~100000Lux)。因此，有關太陽電池照度值增加對電壓及電流的影響、電流值隨光源入射角度等關係的實驗結果，並一定適用於太陽光下的工作情形；本研究會先針對使用的二種太陽能板測試其在太陽光下的工作表現。
2. 第 50 屆中小學科展高職組機械科---以菲涅爾透鏡改善太陽能板發電功率探討的研究，是以鹵素燈(12V 50W)為光源，比較不同透鏡組合對太陽能板、薄膜型太陽能板發電功率的影響，找出提升太陽能板發電功率的最佳組合。本研究在室內太陽能板的實驗會參照以鹵素燈(12V 50W)為光源，進行 SM5055 和 SM5151 單晶矽太陽能板，測試它們在太陽光下及鹵素燈光下的短路電流、開路電壓與照度值的關係，並做為電解實驗的電源。

3. 中華民國第 48 屆中小學科展國小組自然科—照過來!看我為太陽能板擺 POSE 的研究，探討太陽的高度角和方位角對太陽能板發電量的影響，內容具體詳細。本研究中有關太陽能板戶外的實驗，會參考上述的建議，以自製的裝置儘量考量太陽方位角及高度角的變化，讓太陽能板保有最佳的輸出電功率。

(二) 電解水的研究

1. 第 44 屆中小學科展國中組化學科---改良電解水的裝置並探討電解速率的影響因素，及第 48 屆中小學科展國中組理化科---電解水實驗的深入探討，兩篇研究都有探討影響電解水速率的因素：電極材料的表面積、正負極間的距離、電解液的溫度...等，前者著重於電解水裝置的改良，後者著重於電極材料的改良。本研究則著重於以太陽能板為電源，取代直流電源供應器和乾電池，並找出電解效果最佳的組合。
2. 欲使水電解產生氫氣和氧氣的電壓從標準電位數值估計應為 1.23 伏特；但是外部直流電源所施的電壓恆大於標準電池的電位，例如水電解實際則要高達 2.0 至 2.5 伏特，這是由於電解槽內部電阻等複雜因素影響所致。本研究所使用的太陽能板 SM5055 規格為 **2.5V**、**150mA** 和 SM5151 規格為 **4V**、**75mA**，以單板產生的電壓就足以使水電解。

(三) 電解 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 的研究

1. 第 40 屆中小學科展國中組---電解廢液真是環保的元兇？的研究，研究中利用直接電解 0.05M 體積為 1000mL 的硫酸銅溶液，因使用的負極銅片總表面積較大，通入電解槽的電流值高達 1.4A，**消耗電能甚多**，另用化學沉澱法加入氫氧化鉀使產生氫氧化銅沉澱，也**需要較高濃度(0.1M)的鹼液**，最後結合兩種方法開發出新式二階段廢水處理技術，回收槽中利用布袋蓮吸收銅離子則為環保的作法。
2. 本研究利用太陽能板為電源，比較節能省碳，希望能發展出簡易有效的回收條件和裝置。電解 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 的電壓從標準電位數值估計應為 -0.55 伏特，因此，要讓此反應發生外部直流電源所施的電壓恆大於 0.65 或 0.75 伏特電解反應才易進行。本研究所使用的太陽能板 SM5055(**2.5V 150mA**)產生的電壓足夠使電解反應進行。

(四) 本研究的目的是：

1. 觀察太陽能板在太陽光照射下，**開路電壓**、**短路電流**與照度值的關係。
2. 探討太陽光的**入射角度改變**，對太陽能板的開路電壓與短路電流的影響。
3. 觀察太陽能板在**鹵素燈照射**下，開路電壓、短路電流與其照度值的關係。
4. 以**直流電源供應器**為電源，探討不同的電極電解水時，通電時間與氫氣產生速率的關係。
5. 以**鉑金絲**為電極，探討不同種類的電源電解水時，通電時間與氫氣產生速率的關係。
6. 尋找以太陽能板為電源時，電解水的最佳條件。
7. 以直流電源供應器為電源，探討電極種類、輸入電壓、電極接觸面積對電解 0.1M $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 的**反應速率與析出銅回收率**的比較。
8. 以太陽能板為電源電解 0.1M $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 、**實驗室 CuSO_4 電鍍廢液**，比較析出銅回收率與溶液中剩餘 Cu^{2+} 濃度的比較。

參、實驗材料與方法

一、實驗試劑與溶液

氫氧化鈉(NaOH)	硫酸銅(CuSO ₄)	濃、稀氨水(NH ₄ OH)
0.05M EDTMA 2Na	濃硝酸(HNO ₃)	MX 指示計
銅片(10cm×1cm)	石墨棒	1 號電池回收碳棒

二、儀器與器材

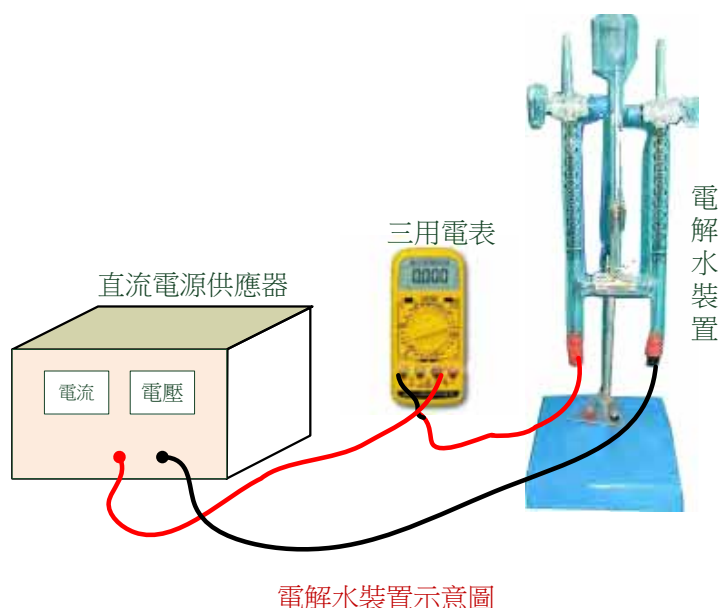
精密電子天平及秤量紙	數位三用電表	數位式電子溫度計
光度計(HOLA MLM-1010)	漏斗及漏斗架	150mL 和 250mL 燒杯
簡易 pH 測定計	電極固定架	高級酸性滴定管
高級量管及安全吸球	酒精燈	三腳架及陶瓷纖維網
磁石攪拌加熱器	鐵架及雙漏斗夾	廣用夾

三、實驗裝置

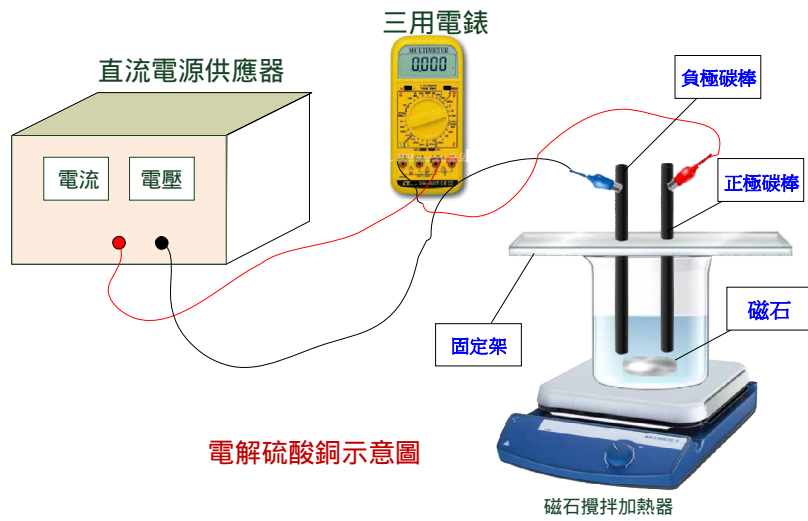
1. 檢測太陽能板的儀器：



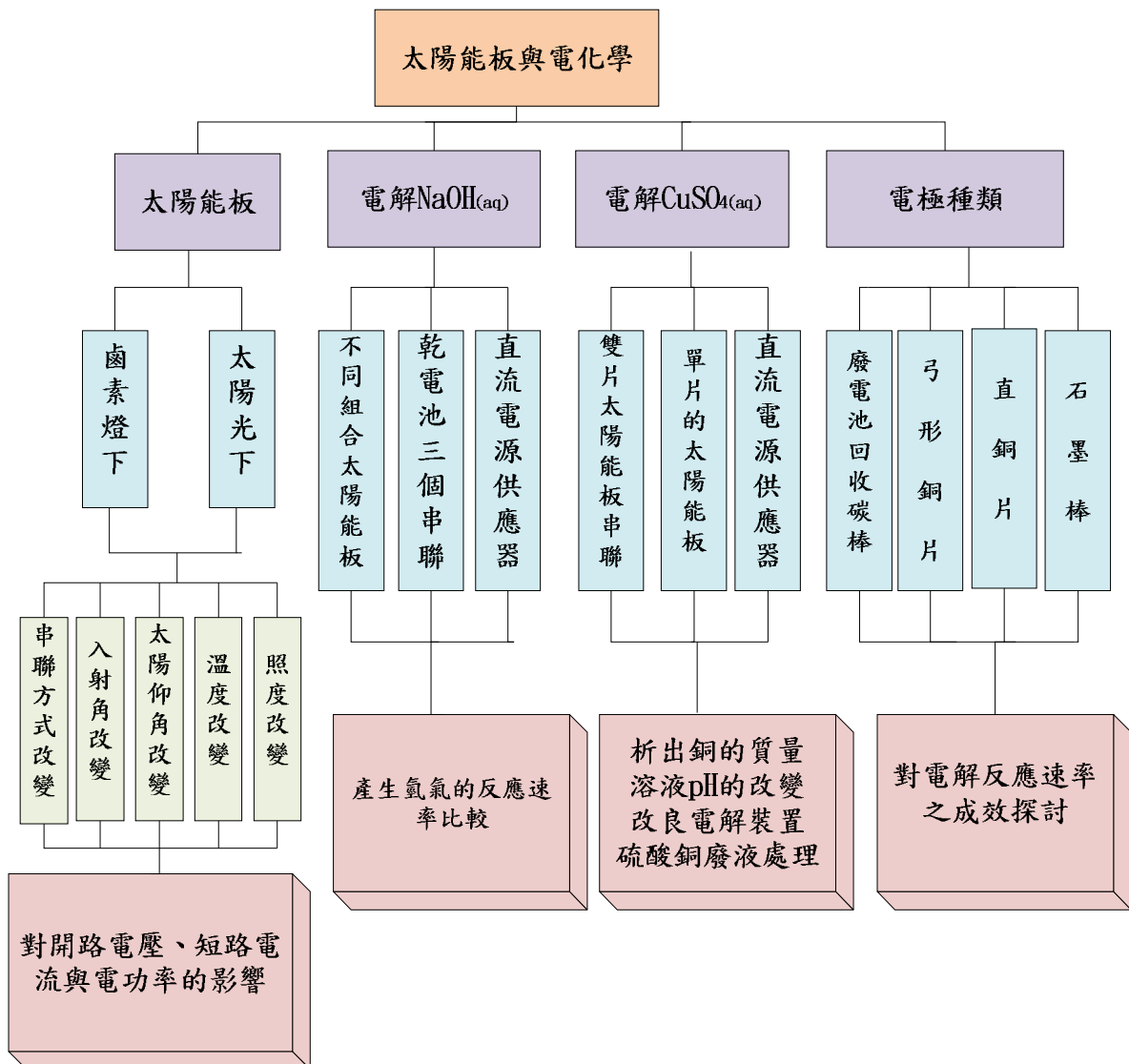
2. 電解水的實驗裝置圖：



3. 電解硫酸銅的實驗裝置圖：



肆、研究方法



一、觀察不同型號的太陽能板在太陽下，開路電壓、短路電流與陽光照度值的關係：

(一) 自製太陽仰角與方位角測量裝置：

1. 為了讓陽光能正面入射太陽能板，本實驗特別自製「**太陽仰角與方位角測量裝置**」，完成裝置(如圖 4)，用來觀測本校不同時間點太陽的仰角(θ)及方位角，測量結果參考附錄一、表 1 所示。與附錄一、表 2 台中地區的資料比對，太陽的仰角和方位角大致相符，但每次實驗前測量太陽的仰角(θ)及方位角耗時較長，並不是便利的作法。
2. 改良的方法是先將太陽能板固定在「**可調式太陽能板支架**」上，讓**支架底座與支架的影子平行重合**(如圖 5)，就能正向面對太陽的方位；再參考附錄一、表 2 太陽的仰角資料，再調整**支架側面的螺絲**使板面與底座的角度等於太陽仰角的餘角($=90 - \text{太陽仰角 } \theta$)再固定，便能使陽光垂直入射太陽能板(如圖 6)。
3. 利用光度計置於太陽能板黏貼處找到此時陽光的最大照度值，再微調**支架側面的螺絲**並加以固定，以此方式尋找太陽正面入射的角度，繼續太陽能板在太陽下的實驗。



圖 4 太陽仰角與方位角測量裝置圖



圖 5 太陽能板支架底座與支架的影子相互重合時，也與木棍影子相互平行



圖 6 調整太陽能板支架側面的螺絲，使角度等於太陽仰角的餘角

(二) 在太陽下，檢測不同的太陽能板的開路電壓、短路電流與陽光照度值的關係：

1. 將太陽能板的正、負端與導線連接，利用膠帶將太陽能板與導線固定在長條形的珍珠板上。珍珠板底部貼上魔鬼氈，讓測量時太陽能板能固定不動。
2. 參考附錄一、表 2 太陽的仰角的資料，利用光度計找到太陽光的最大照度值，固定支架的角度，使太陽光能夠垂直入射太陽能板。
3. 將待測的太陽能板黏貼在支架上方，可開始測量 SM5055、SM5151 太陽能板在不同照度下的開路電壓、短路電流的變化情形(如圖 3)。

(三)探討太陽光的入射角度改變對太陽能板開路電壓與短路電流的影響。

- 1.調整太陽能板支架的角度，使太陽光能夠垂直入射太陽能板，測量此時的開路電壓及短路電流情形。
- 2.將支架往上或往下調整 5° 和 10° ($\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$)，測量 SM5055、SM5151 太陽能板的開路電壓及短路電流。探討改變太陽光入射角度對太陽能板的開路電壓及短路電流的影響。

二、觀察太陽能板在鹵素燈照射下，開路電壓、短路電流與照度值的關係：

- 1.民國 100 年 11~12 月陰雨天數較多，以太陽能板為電源的實驗易受天候的影響而無法實驗，參考前人的作品，本研究也採用鹵素燈為人工光源，以便進行室內太陽能板的相關實驗。
- 2.首先探討在鹵素燈下不同照射距離(分別為 5cm、10cm、15cm)的照度值，根據前面實驗觀察，民國 100 年 10 月~11 月份中午的太陽光照度值範圍為：82508.3~98625(Lux)，找出與太陽光下相當的照射條件。
- 3.在鹵素燈下固定好太陽能板後，調整太陽能板板面至燈泡之間的距離(如圖 7)。
- 4.將光度計置於測量太陽能板處，調整鹵素燈的方向讓最大照度值落於太陽能板板面的正中央(如圖 8)。
- 5.再利用三用電表測量在此距離照射下太陽能板的開路電壓及短路電流隨照射時間的關係(如圖 9)。

		
<p>圖 7 測量鹵素燈與太陽能板間的照射距離</p>	<p>圖 8 調整鹵素燈照光位置，使光度值在太陽能板板面上達到最大數值</p>	<p>圖 9 使用三用電表觀察鹵素燈照射太陽能板，電壓與電流的變化</p>

三、探討不同的電極、不同種類的電源電解水時，通電時間與氫氣產生速率的關係：

- 1.以**鉑金絲**為電極，放入集氣管底端塞緊，將調配好的 0.5M NaOH_(aq)倒入電解實驗裝置，使集氣管內充滿溶液後，再將上方玻璃活栓旋緊以免電解時產生的氣體外洩。
- 2.將直流電源供應器的電壓調整約 5 伏特，開始電解 NaOH_(aq)，測量氫氣體積每增加 0.5 mL 時的時間、電壓、電流與氧氣產生體積，加以記錄直到產生 8 mL 氫氣時結束測量。
- 3.將電極種類改為**石墨棒**與**電池回收碳棒**，重複步驟 1~2，比較不同的電極電解 0.5M NaOH_(aq)時，通電時間與氫氣產生速率的差異。
- 4.將電源改為**三顆 1.5V 乾電池串聯**為電源來電解 0.5M NaOH_(aq)，重複步驟 1~2。
- 5.在鹵素燈下 5 公分，分別找到照度值最大的位置，將兩個太陽能板置於該位置，分別以 SM5055 與 SM5055 串聯、SM5151 與 SM5151 串聯為電源(如圖 10)。重複步驟 1~2 通電電解 0.5M NaOH_(aq)，比較不同種類的電源電解水時，通電時間與氫氣產生速率的差異。
6. 將串聯的太陽能板(SM5055 與 SM5055、SM5151 與 SM5151)固定在可調式太陽能板支架上，找到太陽照度最大值的位置固定，並以兩個串聯的太陽能板為電源(如圖 11)，探討以**電池回收碳棒**代替鉑金絲為電極電解 0.5M NaOH_(aq)時，通電時間與氫氣產生速率的關係。



圖 10 鹵素燈下 5cm，兩個太陽能板 (SM5055、SM5055)串聯為電源電解水



圖 11 太陽下以兩個 SM5055 太陽能板串聯為電源、電池回收碳棒為電極電解水的實驗裝置

四、以不同種類的電極與電源電解 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ ，探討反應速率與銅析出效果的比較。

(一)以直流電源供應器為電源，探討電極種類對 $0.1\text{M CuSO}_4(\text{aq})$ 的電解速率的影響

- 1.以電子天平測量石墨棒的質量，將**石墨棒**以電極固定架固定，配製 200 mL 的 $0.1\text{M CuSO}_4(\text{aq})$ 放入 250 mL 的燒杯中，調整正、負極的石墨棒進入液中的深度為 4cm ，並將磁石轉子放入燒杯中。
- 2.將燒杯放置於電磁加熱攪拌器的平台上，讓轉子以最低速轉動，將 pH 計以鐵架與廣用夾固定， pH 計的電極棒保持於液面下，偵測電解過程中溶液的 pH 值變化(圖 12)。
- 3.以導線將直流電源供應器、三用電表與電解槽串聯，調整輸出的起始電壓為 $2.51\sim 2.55\text{ V}$ 範圍(在室內模擬太陽下 **SM5055 太陽能板**的電壓)。利用三用電表測量並記錄電源輸出電壓、電解槽電壓、電解槽的電流。

- 4.當 pH 值每下降 $0.05\sim 0.1$ 記錄電解時間，並觀察溶液顏色變化、電極表面銅析出的情形。
電解硫酸銅的全反應： $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{Cu}(\text{s})$

電解的反應速率通常可用「在單位時間內，反應物或生成物的變化量」來表示。

即 反應速率可以**溶液 pH 值變化速率**代表 $\propto \frac{\text{pH下降}0.1}{\text{所需時間}}$

- 5.電解 120 分鐘停止通電，將電極晾乾後，測量負極石墨棒的質量，增加的質量即為銅析出的質量，根據下列算式求**銅析出的回收率**。($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 249.69$ 、 $\text{Cu} = 63.55$)

實驗配置的 $200\text{ mL } 0.1\text{M CuSO}_4(\text{aq})$ 中含銅的質量 = $\frac{63.55}{249.69} \times 5(\text{g}) = 1.2726(\text{g})$

銅析出的回收率 = $\frac{\text{負極銅析出的質量}}{\text{電解液中含銅的質量}} \times 100\% = \frac{\text{負極銅析出的質量}}{1.2726(\text{g})} \times 100\%$

- 6.另以電子天平測量 $1\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的**直銅片 1** 質量，改以銅片為負極(液下深度為 4cm) 進行電解(圖 13)，其他操作程序如步驟 1~4 中所述。

- 7.電解 120 分鐘後，停止通電，將電極晾乾後，測量負極銅片的質量，增加的質量即為銅析出的質量。



圖 12 以**石墨棒**為電極，直流電源供應器為電源，電解 $0.1\text{M CuSO}_4(\text{aq})$ 裝置圖



圖 13 以**直銅片**為電極，直流電源供應器為電源，電解 $0.1\text{M CuSO}_4(\text{aq})$ 裝置圖

(二) 直流電源供應器為電源，探討改變輸入電壓對 0.1M CuSO_{4(aq)} 電解速率的影響

1. 分別以石墨棒 2、直銅片 2 為負極，電子天平測量負極材料的質量並記錄。其他操作程序如四、步驟 1~7 中所述。
2. 比較通電電解 90 分鐘後，將電極晾乾後，測量負極材料的質量，增加的質量即為銅析出的質量。

(三) 直流電源供應器為電源，探討改變電極接觸面積對 0.1M CuSO_{4(aq)} 的電解速率的影響

1. 將長 10cm 的銅片彎折後以粗銅線焊接在弓形銅片 1 上(圖 14)，以電子天平測量此弓形銅片 1 的質量並記錄。在 250 mL 的燒杯中倒入 200 mL 的 0.1M CuSO_{4(aq)}，正極為石墨棒(液下深度為 4cm)，以電極固定架固定正、負電極，弓形銅片 1 入水 4cm，並將磁石轉子放入燒杯中。其他操作程序如四、步驟 1~7 中所述。
2. 直流電源供應器的輸出電壓固定為 2.5V 左右，電解 120 分鐘後停止通電，將電極晾乾後，測量負極銅片的質量。

(四) 將太陽能板應用於電解 0.1M CuSO_{4(aq)}，比較銅析出質量和 pH 值的變化

1. 將 SM5055 太陽能板固定在「可調式太陽能板支架」上，在戶外陽光下照射為電源，調整太陽能板支架的角度，使太陽光能夠垂直入射太陽能板，進行下列條件電解 0.1M CuSO_{4(aq)} 的實驗：
 - (1) 石墨棒為負極，電解 100mL 的 0.1M CuSO_{4(aq)} (燒杯中)。
 - (2) 銅片為負極，電解 100mL 的 0.1M CuSO_{4(aq)} (燒杯中)。
 - (3) 以直銅片與弓形銅片為負極(圖 15~16)，玻璃瓶為容器增加電極與溶液的接觸面積，電解 200 mL 0.1M CuSO_{4(aq)}。
2. 測量溶液的 pH 值、顏色變化、比較銅析出質量、pH 值的變化與電解時間的關係。
3. 取步驟 1 中(1)(2)電解後的溶液樣本，以 0.05M 的 EDTA 滴定，實驗步驟請參考附錄六，根據滴定後用掉 EDTA 的體積，可以推算電解後溶液中銅離子的濃度。



圖 14 電解後弓形銅片 1 上面銅析出情形



圖 15 玻璃瓶中直銅片與橡皮塞



圖 16 玻璃瓶中弓形銅片與橡皮塞

(五)將太陽能板應用於電解實驗室 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 電鍍廢液，瞭解銅析出質量、溶液中 Cu^{2+} 濃度和 pH 值的變化

1. 以 pH 計測量實驗室 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 電鍍廢液的酸鹼度，取廢液樣本以 0.05M 的 EDTA 進行滴定，根據滴定完成用掉 EDTA 的體積，可以推算 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 電鍍廢液的濃度。
2. 取 200 mL 的實驗室 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 電鍍廢液放入燒杯中，以一般碳棒為電極，SM5055 串聯為電源在太陽下進行電解實驗。測量溶液的 pH 值、顏色變化、比較銅析出質量、pH 值的變化與電解時間的關係。
3. 取電解後的廢液樣本，以 0.05M 的 EDTA 滴定電解後廢液，比較電解前、後 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 電鍍廢液的濃度變化。

伍、實驗結果與討論

一、觀察不同型號的太陽能板在太陽光照射下的開路電壓、短路電流與照度值的關係：

(一) 在太陽下，檢測不同的太陽能板的開路電壓、短路電流與陽光照度值的關係

太陽下照射時，SM5055、SM5151 太陽能板的開路電壓、短路電流與照度值的關係

1. 參考 附錄二、表 1 和表 2 太陽能板在太陽光照射下的資料整理如下表 1~2 及圖 1~2：

表 1：SM5055 在太陽下的照度值與開路電壓、短路電流與電功率值(2.5V、150mA)

太陽照度	平均電壓	平均電流	平均電功率
96800	2.789	159.4	444.57
97100	2.879	169.9	489.14
98200	2.837	171.4	486.262
99900	2.756	152.9	421.40
100000	2.906	142.5	414.11
100200	2.76	129.4	357.14
100200	2.745	141.5	388.42
100300	2.871	151	433.52
99087.50	2.82	152.25	396.92

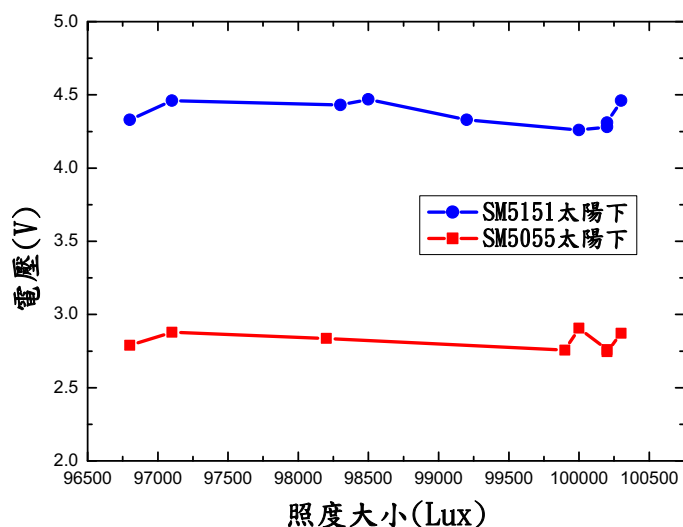


圖 1：SM5055 與 SM5151 陽光下照度值與開路電壓平均值關係

2. 當太陽光照度平均值為：98955.56(Lux) 時：SM5151 的開路電壓是穩定的平均值為：4.37(V)、短路電流不一定會隨著照度值增加而增加其平均值為：75.54(mA)、輸出電功率主要隨短路電流值的大小而改變，其平均值為：330.5(mW)。
3. 當太陽光照度平均值為：99087.50 (Lux) 時：SM5055 的開路電壓是穩定的平均值為：2.82 (V)，短路電流不一定會隨著照度值增加而增加其平均值為：152.25 (mA)，輸出電功率主要隨短路電流值的大小而改變，其平均值為：396.92 (mW)。
4. 兩種太陽能板在太陽光下照射時，開路電壓、短路電流和電功率的平均值均較標示的規格大。

表 2：SM5151 在太陽下的照度值與開路電壓、短路電流與電功率(4V、75mA)

太陽照度	平均電壓	平均電流	平均電功率
96800	4.33	77.2	334.28
97100	4.46	85.9	383.11
98300	4.43	79.4	351.74
98500	4.47	83.1	371.46
99200	4.33	76.3	330.38
100000	4.26	66.9	284.99
100200	4.28	67.6	289.33
100200	4.31	72	310.32
100300	4.46	71.5	318.89
98955.56	4.37	75.54	330.50

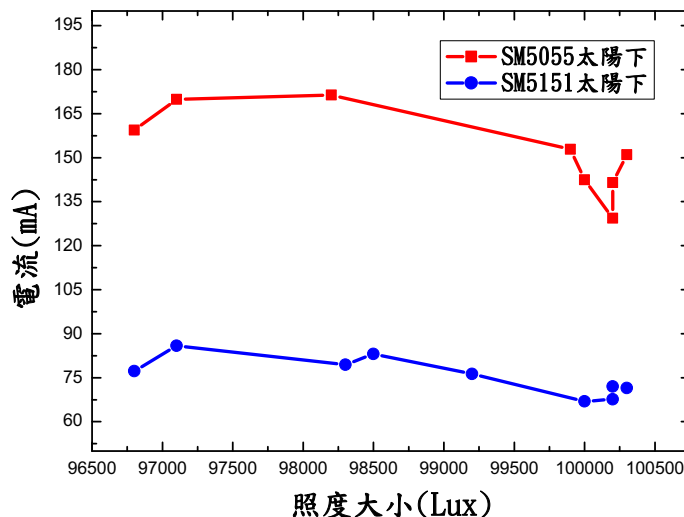


圖 2：SM5055 與 SM5151 陽光下照度值與短路電流平均值關係

(二)探討太陽光的入射角度改變對太陽能板開路電壓與短路電流的影響。

1. SM5151 和 SM5055 太陽能板在不同角度照射與開路電壓、短路電流、電功率的關係圖：

(參考 附錄二、表 3~ 表 5)

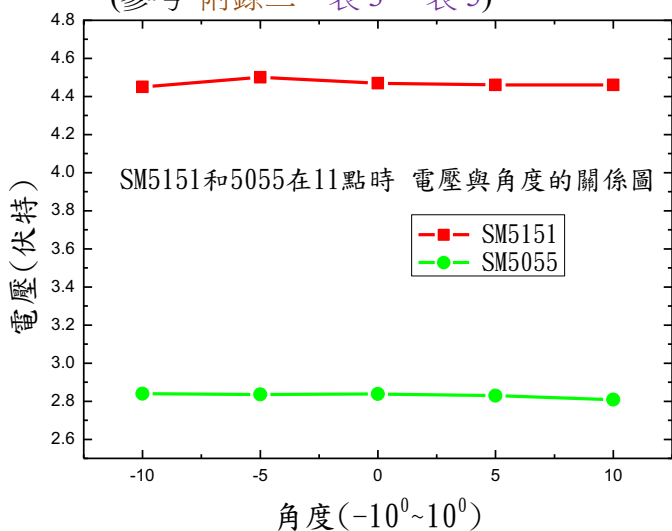


圖 3：改變陽光的入射角對開路電壓的影響

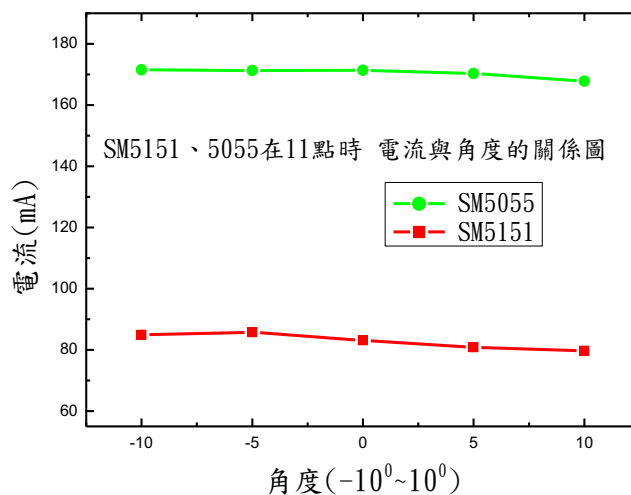


圖 4：改變陽光的入射角對短路電流的影響

結果：上午 11 點，當 SM5151 和 SM5055 太陽能板正對太陽時，將支架往上移動 10 度或往下移動移動 10 度，對太陽能板開路電壓與短路電流影響不大。

二、觀察太陽能板在鹵素燈照射下，開路電壓、短路電流與其照度值的關係：

(一)尋找鹵素燈下何種照射距離時，其照度值與中午時戶外太陽光相當：(附錄三、表 1~表 2)

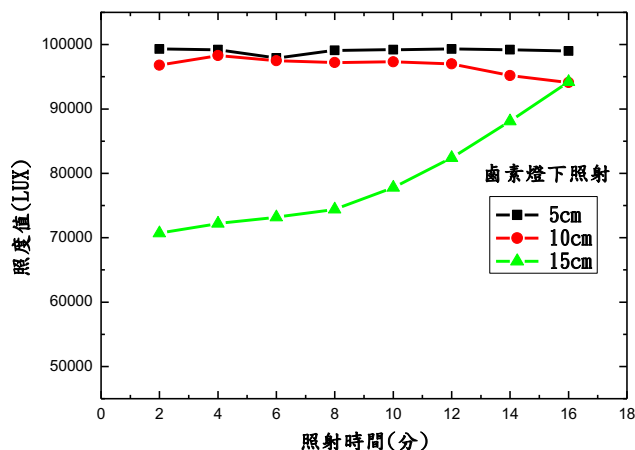


圖 5：不同照射距離時，鹵素燈的照度值與照射時間的關係圖

結果：

在鹵素燈下 5cm 的照射距離，照度值 (100000 Lux) 較接近上午 10:00~13:00 太陽光的照度值。因此，在實驗室內有關太陽能板的實驗會以此條件為人工光源，實驗結果以作為戶外太陽光下實驗的對照組。

(二)觀察太陽能板在鹵素燈照射下，開路電壓、短路電流與照度值的關係(附錄三、表 3~6)

1. SM5055 太陽能板(2.5V、150mA)在不同照射距離下，開路電壓、短路電流與照射時間的關係。

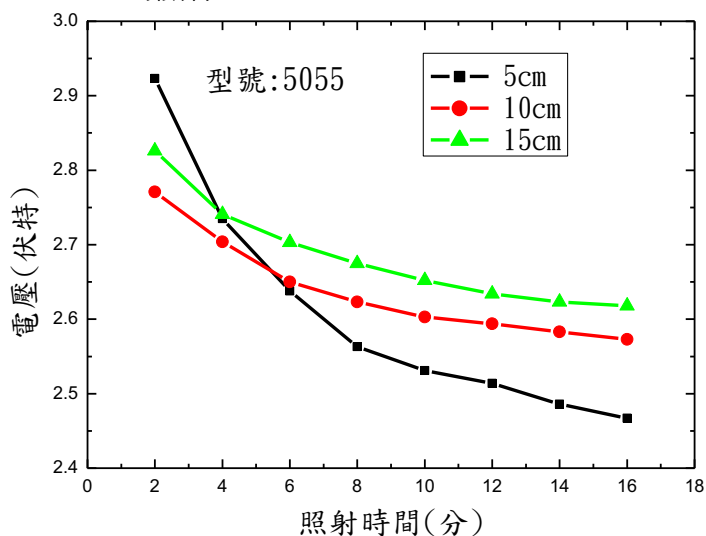


圖 6：SM5055 開路電壓與通電時間的關係圖

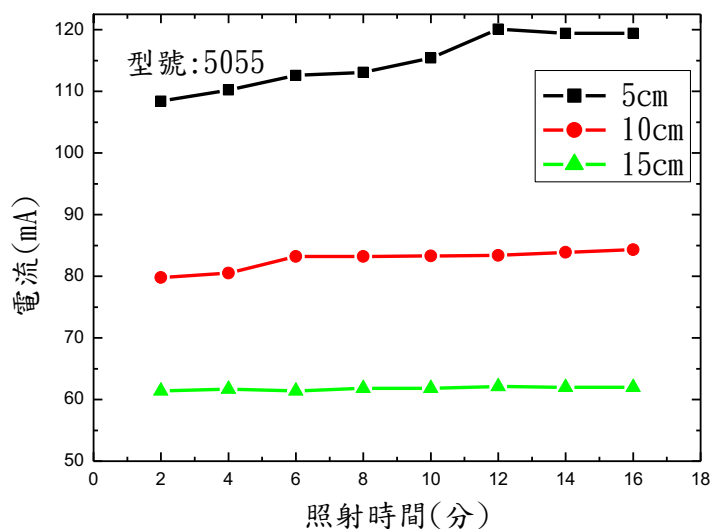


圖 7：SM5055 短路電流與通電時間的關係圖

結果：

- (1) 在 5cm 下照射，起始開路電壓最大但下降明顯(下降約 0.46V)，可能是因為距離鹵素燈較近，板面溫度上升時，不利於開路電壓的輸出。在 10、15cm 下照射時，開路電壓值雖略為下降但都在 2.5V 以上，短路電流值起伏並不大。
- (2) 在 5cm 下照射時的短路電流值最大，大於 110mA 但仍比標示值低。

2. SM5151 太陽能板(4V、75mA)在不同照射距離下，開路電壓、短路電流與照射時間的關係

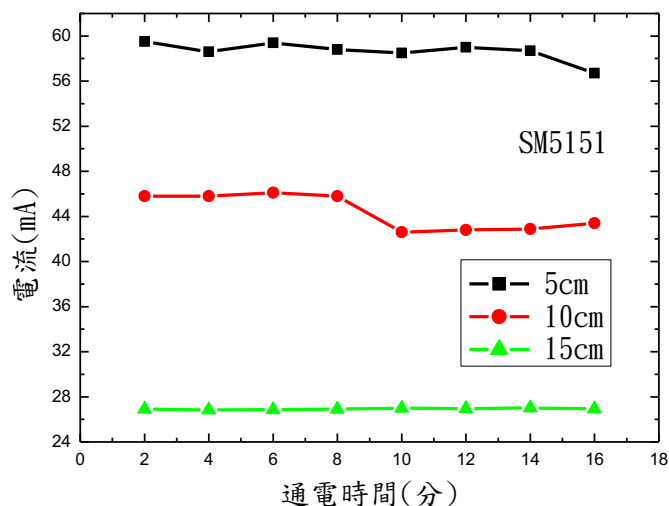
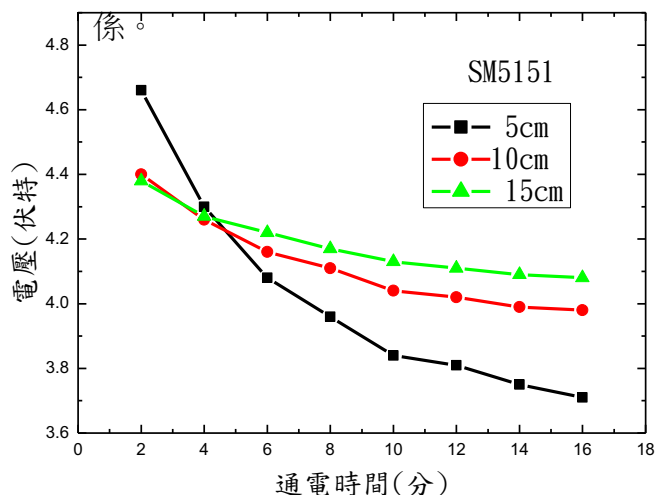


圖 8：SM5151 開路電壓與通電時間的關係圖

圖 9：SM5151 短路電流與通電時間的關係圖

結果：

- (1)在 5cm 下照射，SM5151 的起始開路電壓最大，但下降明顯(下降 1.0V)，更可肯定近距離照射下，板面溫度上升不利於開路電壓的輸出。
- (2)在 5cm 下照射的短路電流值最大，大於 56mA 但仍比標示值低。

(三)在鹵素燈照射下，不同型號太陽能板的溫度對輸出電功率間的關係(請參考 附錄二)

1. 鹵素燈下 5cm、10cm、15cm 照射：溫度對 SM5055、SM5151 太陽能板電功率的影響

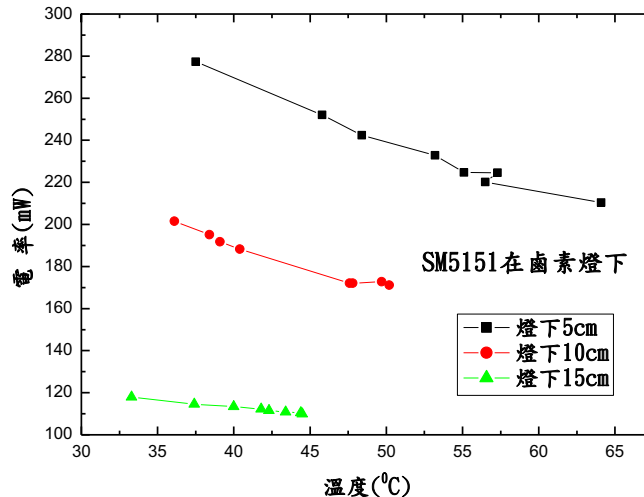
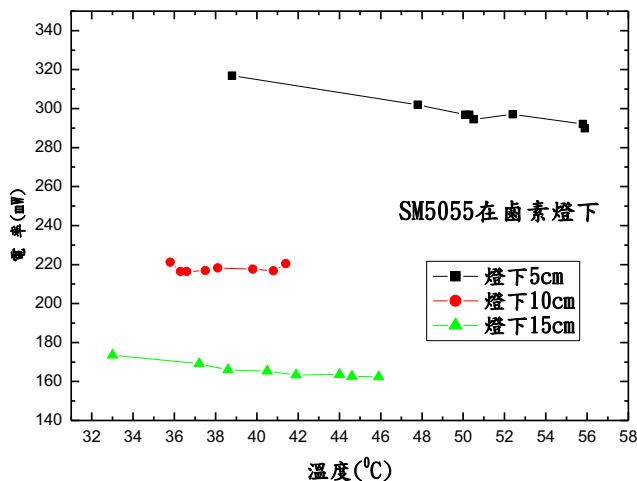


圖 10：SM5055 的溫度與輸出電功率

圖 11：SM5151 的溫度與輸出電功率

結果：在鹵素燈下 5 cm，SM5055 和 SM5151 的輸出電功率會隨板面溫度的上升而下降，主要是因短路電流下降所致；當太陽能板離鹵素燈越遠時，或板面溫度上升較小時，太陽能板的輸出電功率就較為平穩。

三、探討不同的電極、不同種類的電源電解水時，通電時間與氫氣產生速率的關係：

(參考 附錄四 表 1 ~ 表 6)

(一)探討以不同種類的電極電解水時，通電時間與氫氣產生速率的關係：

1.實驗條件：鉑金絲長 2.03cm 石墨棒直徑 R：7.4mm×30mm 回收碳棒 R：7.1mm×30mm

2.關係圖：

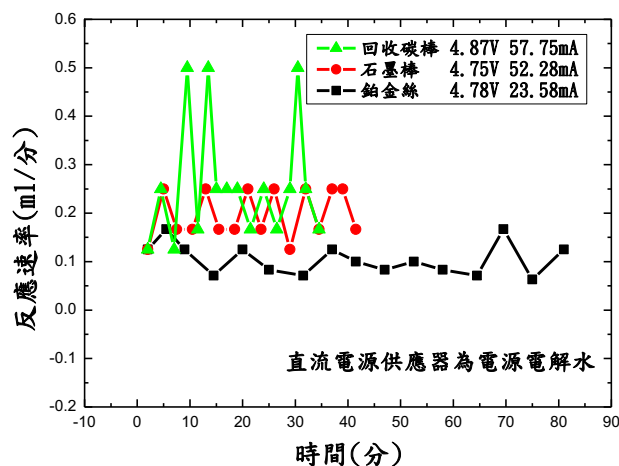
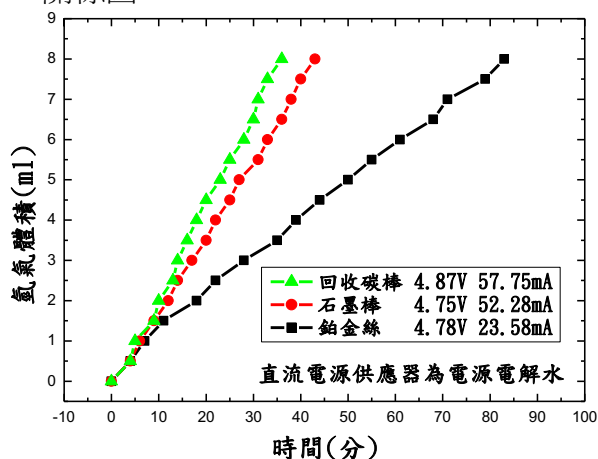


圖 12：產生 H₂ 體積與反應時間的關係

圖 13：產生 H₂ 的反應速率與時間點的關係

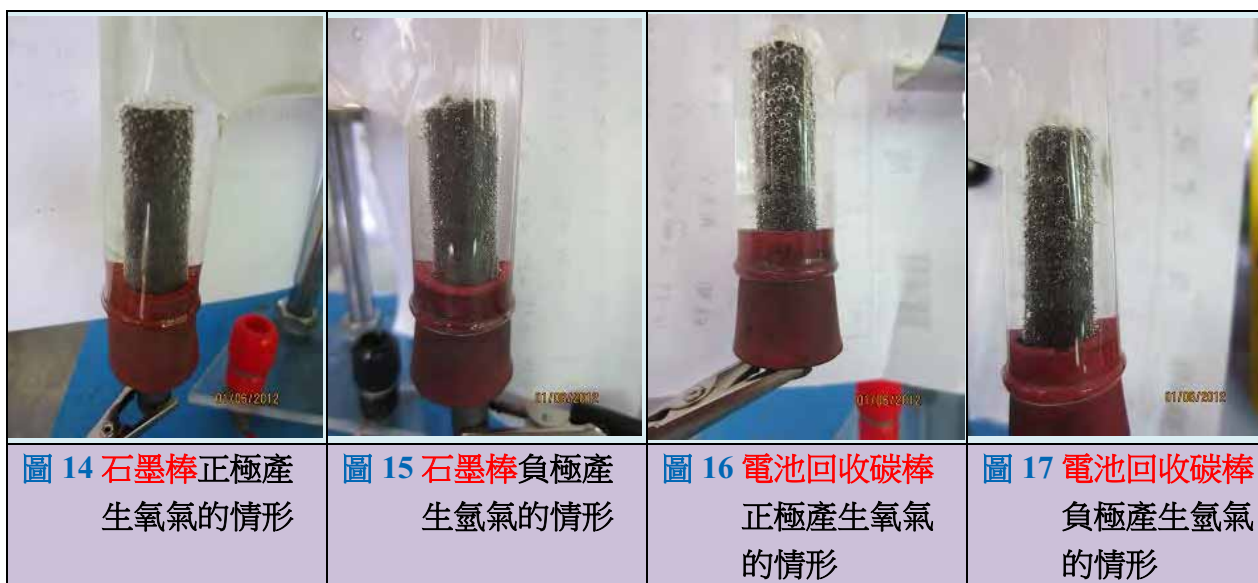


圖 14 石墨棒正極產生氧氣的情形

圖 15 石墨棒負極產生氫氣的情形

圖 16 電池回收碳棒正極產生氧氣的情形

圖 17 電池回收碳棒負極產生氫氣的情形

3.結果：

- (1)在相同的電壓下，三種電極電解 0.5M NaOH_(aq)產生氫氣產生速率是：**電池回收碳棒 > 石墨棒 > 鉑金絲**。
- (2)電池回收碳棒、石墨棒雖然**氫氣產生速率較快**，缺點是電解過程中**電極上易吸附氣泡** (如圖 14~17)，**造成反應速率值跳動幅度較大**(如圖 19)，不像鉑金絲為電極時氣泡綿密不斷，有較穩定的反應速率。因此以下有關不同種電源間電解水速率的比較，將採用鉑金絲進行實驗。

(二)探討以室內不同種類的電源電解水時，通電時間與氫氣產生速率的關係：

(請參考 附錄四 表 7~ 表 12)

1.實驗條件：均以**鉑金絲**為電極，進行電解水的實驗。

2.關係圖：

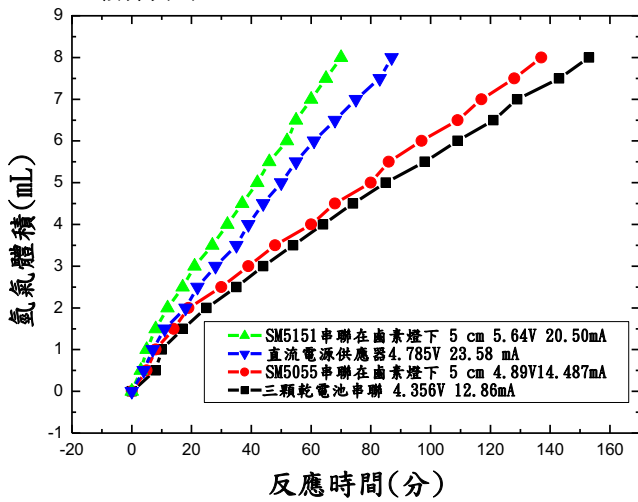


圖 18：產生 H₂ 體積與反應時間的關係

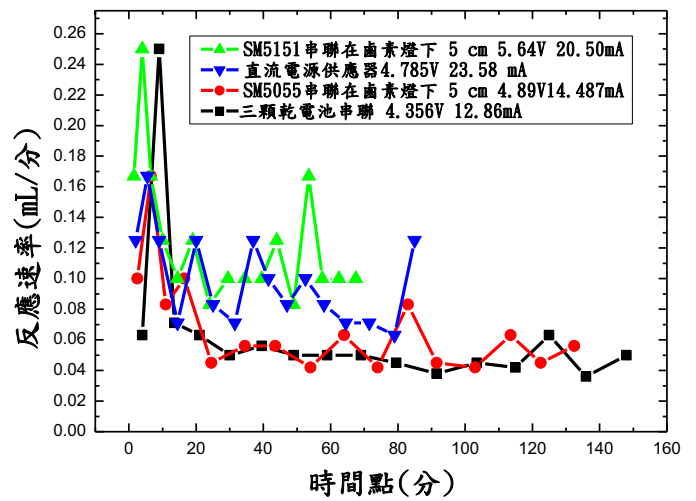


圖 19：產生 H₂ 的反應速率與時間點的關係

3.結果：

- (1) 以三顆 1.5V 乾電池串聯為電源電解水，是課本中常用的方式，由表可知此方式是所有條件下效果最差的，值得課本編輯者參考改進。
- (2) 在鹵素燈下 5cm 照射下時，SM5151 串聯電解效果較直流電源供應器的效果佳。

(三)戶外太陽下以串聯的太陽能板為電源，探討通電時間與氫氣產生速率的關係：

1.實驗條件：(請參考 附錄四 表 13~ 表 18)

2.關係圖：

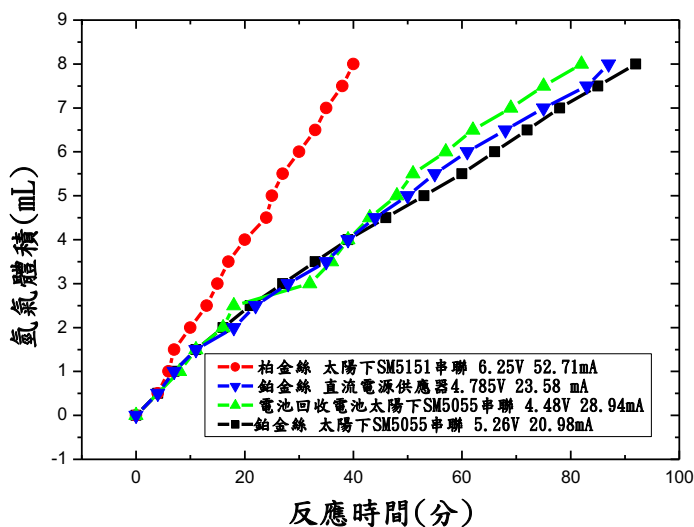


圖 20：產生 H₂ 體積與反應時間的關係

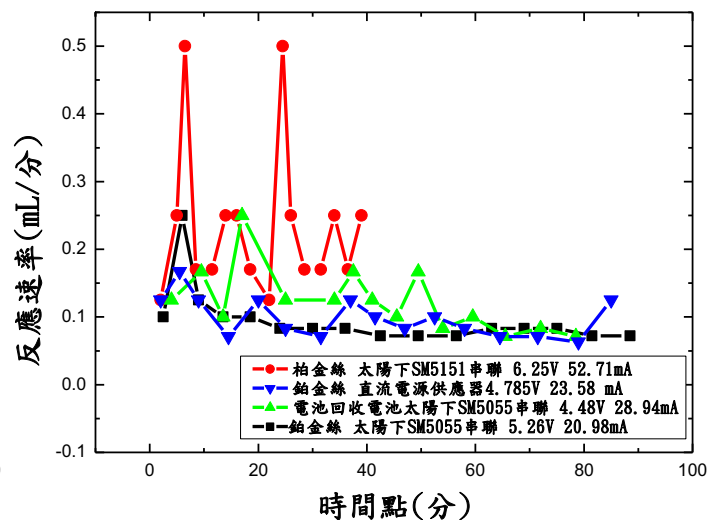


圖 21：產生 H₂ 的反應速率與時間點的關係

3.以 SM5055 與 SM5055 太陽能板串聯為電源，電池回收碳棒為電極實驗過程：



圖 22 實驗裝置圖

圖 23 負極：電池回收碳棒

圖 24 電池回收碳棒電解水

4.結果：

(1)以不同組合的電源電解水時，探討通電時間與氫氣產生速率的比較：

表 4：不同組合的電源電解水時，電解槽的電壓、電流及氫氣產生時間與速率比較

電解槽條件與結果		電壓(V)	電流(mA)	產生 8ml H ₂ 所需時間(分)	平均反應速率(mL/分)
直流電源供應器(鉑金絲為電極)		4.785	23.58	83	0.10525
鹵素燈下 5cm (鉑金絲為電極)	SM5055 串聯	4.89	14.487	137	0.0680
	SM5151 串聯	5.02	26.23	70	0.1245
戶外太陽下 (回收碳棒為電極)	SM5055 串聯	4.81	28.94	82	0.1200
戶外太陽下 (鉑金絲為電極)	SM5055 串聯	5.26	20.98	92	0.0960
	SM5151 串聯	6.25	52.71	40	0.2360

(2)以鉑金絲為電極，在戶外太陽下以 SM5151 串聯的太陽能板為電源電解水時，氫氣產生速率是直流電源供應器的兩倍，且在 45 分鐘（一節課時間）內，便可收集到 8 ml 的氫氣，相當具有實用性。

(3)以回收碳棒為電極，在戶外太陽下以 SM5055 串聯為電源電解水，表 4 上數據顯示氫氣產生速率與直流電源供應器(鉑金絲為電極)相當，但由附錄四、表 5 可知在電解 50 分鐘後因為雲層遮住陽光(照度值劇減)，造成電解的速率減慢；由圖 20~21 中前 50 分鐘的表現推論，其實際的電解效果應該優於直流電源供應器。

四、以不同種類的電極與電源電解 $\text{CuSO}_{4(aq)}$ ，探討反應速率與銅析出效果的比較。

(一)以直流電源供應器為電源，探討電極種類對 $0.1\text{M CuSO}_{4(aq)}$ 的電解速率的影響

1、改變負極的電極種類：

(1) 石墨棒 1 實驗條件：請參考附錄五 表 1 ~ 表 2

(2) 直銅片 1 實驗條件：請參考附錄五 表 3 ~ 表 4

2.數據整理：

	電解前	電解 130 分後	負極質量增加	平均速率
石墨棒 1 質量(g)	14.08	14.19	0.11	0.00085(g/分)
溶液的 pH 值	3.12	2.05	1.007	0.0148(1/分)

	電解前	電解 99 分後	負極質量增加	平均速率
直銅片 1 質量(g)	3.47	3.6197	0.1497	0.00151(g/分)
溶液的 pH 值	3.48	2.30	1.18	0.0177(1/分)

項目分析 電極種類	通電 時間(分)	溶液 pH 值平均變化速率(1/分)			析出銅 質量(g)	銅析出的 回收率(%)
		40 分前	40 分後	全程		
石墨棒 1(2.5V 燒杯)	130	0.0199	0.0060	0.0148	0.11	8.64
直銅片 1(2.5V 燒杯)	99	0.0226	0.0070	0.0177	0.1497	11.76

3.關係圖與圖片說明：

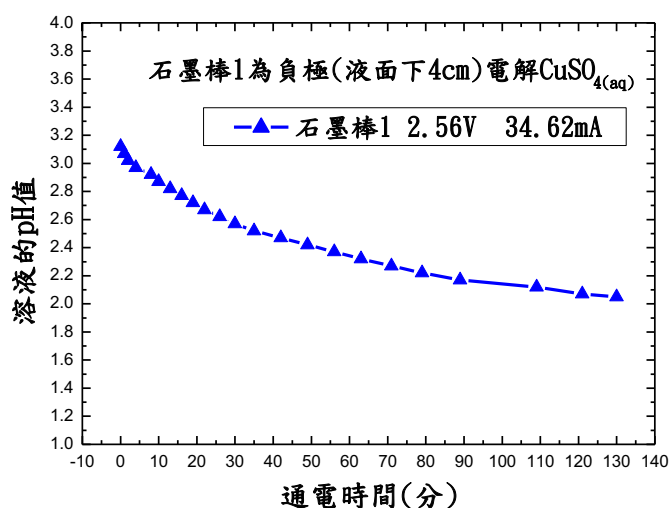


圖 25 以石墨棒 1 為電極，溶液的 pH 值與通電時間的關係

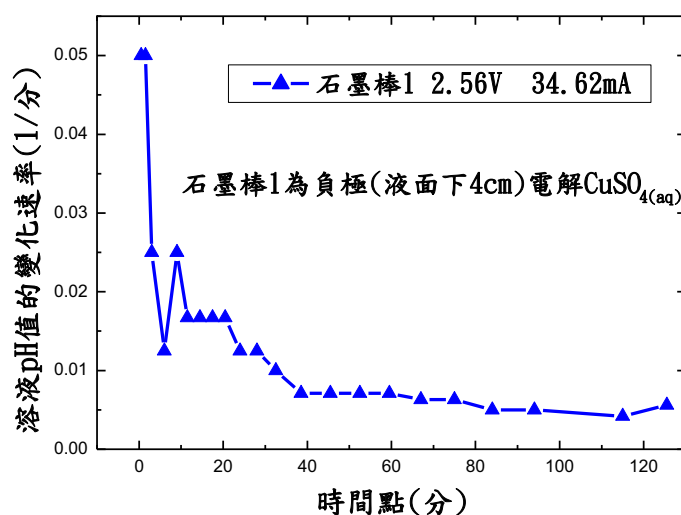


圖 26 以石墨棒 1 為電極，溶液 pH 值變化速率與時間的關係

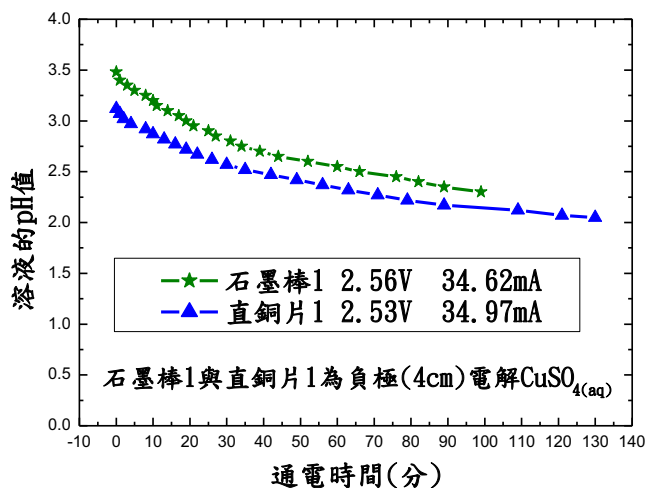


圖 27 以直銅片 1 取代石墨棒為電極，溶液的 pH 值與通電時間的關係

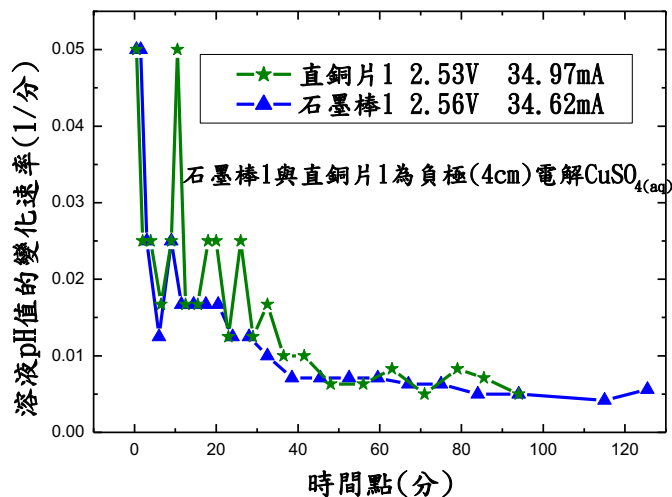


圖 28 以直銅片 1 取代石墨棒為電極，溶液 pH 值變化速率與時間的關係



4. 結果：

- (1) 由圖 25 的關係曲線隨電解時間增加而逐漸趨向水平，可知銅析出與溶解反應逐漸達到平衡狀態。
- (2) 由圖 26 中在電解 40 分後溶液 pH 值變化速率逐漸保持在 0.0071~0.0050(1/分)間。
- (3) 使用石墨棒電解 $\text{CuSO}_{4(\text{aq})}$ ，石墨棒上的銅原子吸附力情形良好，(如圖 29)：但卻不易處理，所以希望可以找出取代石墨棒的負極材料來電解 $\text{CuSO}_{4(\text{aq})}$ 。
- (4) 由圖 27~28 中可知：電解在 0~40 分鐘間溶液的 pH 值下降速率直銅片 1 較快，電解 40 分後則與石墨棒趨於相同，約保持定值在 0.0063~0.0050(1/分)間。
- (5) 當輸入電壓相當時，以直銅片取代石墨棒為電極電解 $\text{CuSO}_{4(\text{aq})}$ ，兩者的效果相當，並不會因為直銅片的表面積小於石墨棒，而減弱電解的速率；在銅片上析出銅同質性高，簡單處理後又可重複使用，且銅析出的回收率較佳，是取代石墨棒的良好負極材料。

(二)直流電源供應器為電源，探討改變輸入電壓對 0.1M CuSO_{4(aq)} 的電解速率的影響

1.改變輸入電壓的實驗：(正、負電極均入水 4cm)

(1) 負極為直銅片 2 (4.26V 燒杯)：實驗條件參考附錄五 表 5~ 表 6

(2) 負極為石墨棒 2(4.05V 燒杯)：實驗條件參考附錄五 表 7~ 表 8

2. 數據整理：

	電解前	電解 91 分後	負極質量增加	平均速率
直銅片 2 質量(g)	3.9018	4.3879(105 分)	0.4861	0.00463(g/分)
溶液的 pH 值	3.37	2.22(91 分)	1.15	0.0247(1/分)

[註]電解至 91~105 分鐘間 pH 值由 2.22 劇降至 0.89，故求 pH 值的變化速率時不列入。

	電解前	電解 121 分後	負極質量增加	平均速率
石墨棒 2 質量(g)	14.0024	14.3283	0.3259	0.00272(g/分)
溶液的 pH 值	3.7	1.91	1.79	0.0207(1/分)

電極種類	分析項目	通電 時間(分)	溶液 pH 值平均變化速率(1 /分)			析出銅 質量(g)	銅析出的 回收率(%)
			40 分前	40 分後	全程		
石墨棒 1(2.5V 燒杯)		130	0.0199	0.0060	0.0148	0.1100	8.64
石墨棒 2(4.05V 燒杯)		121	0.0295	0.0113	0.0207	0.3259	25.61
直銅片 1(2.5V 燒杯)		99	0.0226	0.0070	0.0177	0.1497	11.76
直銅片 2 (4.26V 燒杯)		91	0.0300	0.0163	0.0247	0.4861	38.20

3.關係圖與圖片說明：

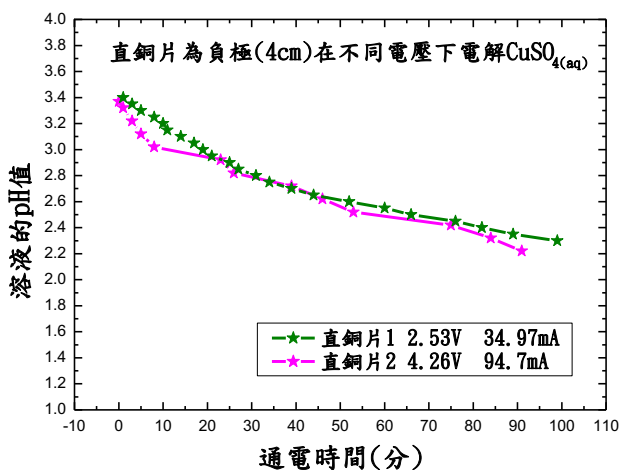


圖 32 以直銅片 2 為負極，改變輸入電壓時，溶液 pH 值與通電時間的關係

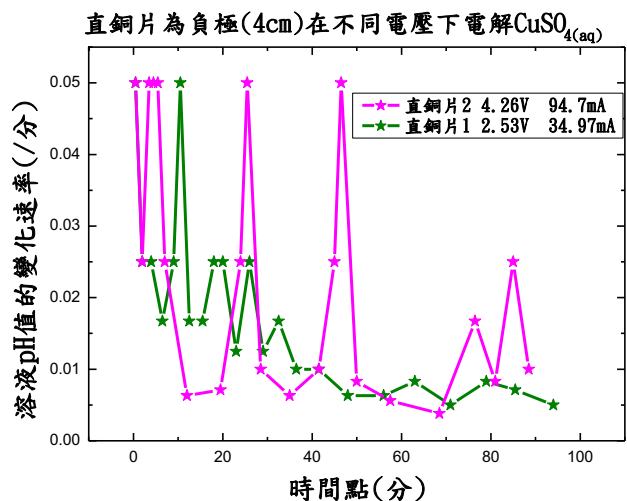


圖 33 以直銅片 2 為負極，改變輸入電壓時，溶液 pH 值變化速率與時間的關係

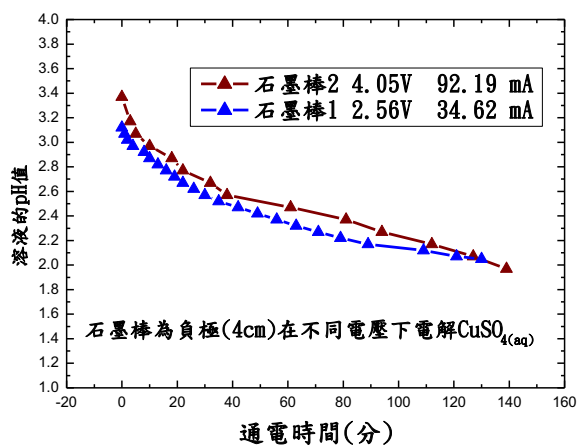


圖 34 以石墨棒 1 與石墨棒 2 為負極，改變輸入電壓時溶液的 pH 值與通電時間的關係

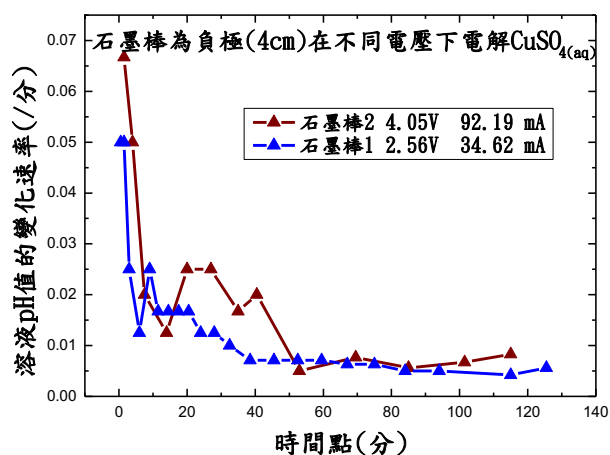


圖 35 以石墨棒 1 與石墨棒 2 為負極，改變輸入電壓時，溶液 pH 值變化速率與時間的關係

<p>圖 36：電解後銅片上析出的銅顆粒較大。</p>	<p>圖 37：電解後杯底有少許碳黑掉落。</p>	<p>圖 38：陰乾後，粗顆粒的銅會使銅片呈現黑色。</p>
<p>圖 39：在 pH 值降到 2.23 時，溶液顏色開始有變綠現象。</p>	<p>圖 40：電解 121 分後負極碳棒上銅的吸附均勻，正極石墨棒則有劣化的現象。</p>	<p>圖 41：電解後有碳黑掉落。</p>

(3)結果：

- ①由圖 32~35 關係曲線可知：將輸入電壓由 2.53V 提升至 4.26V 時，不論是以直銅片或石墨棒為負極，溶液 pH 值變化速率均大幅提升，析出銅的回收率增加為 2.53V 時的 3 倍左右；且直銅片 2 仍然優於石墨棒 2，證明採用直銅片作為硫酸銅廢液電解回收的負極材料，電解的效果會比較好。
- ②輸入電壓提升至 4.05V 時，電解後銅片上析出的銅顆粒較大，陰乾後粗顆粒的銅會使銅片呈現黑色。另外，正極石墨棒則有劣化的現象，會有少量的碳黑掉落溶液中，且電解後溶液顏色有變黃綠色的現象。

(三)直流電源供應器為電源，探討改變電極接觸面積對 0.1M CuSO_{4(aq)} 的電解速率的影響

1.實驗條件：參考附錄五 表 9~ 表 10(石墨棒及弓形銅片 1 入水 4cm)

2.數據整理與關係圖：

	電解前	電解 123 分後	負極質量增加	平均速率
弓形銅片 1 質量(g)	4.2962	4.3904	0.0942	0.00077(g/分)
溶液的 pH 值	3.47	2.25	1.22	0.0942(1/分)

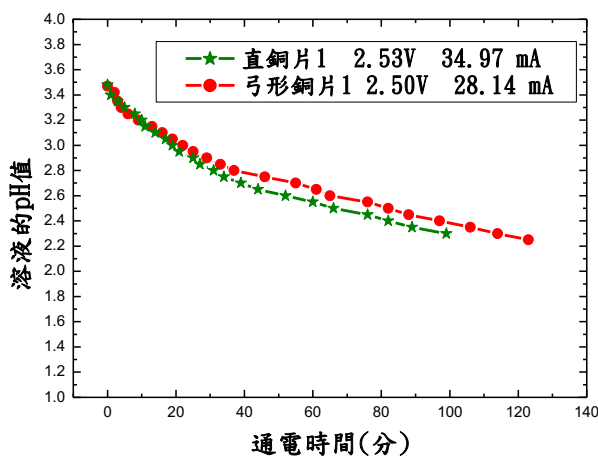


圖 42 以弓形銅片 1 與直銅片 1 為負極，在相同輸入電壓時溶液的 pH 值與通電時間的關係

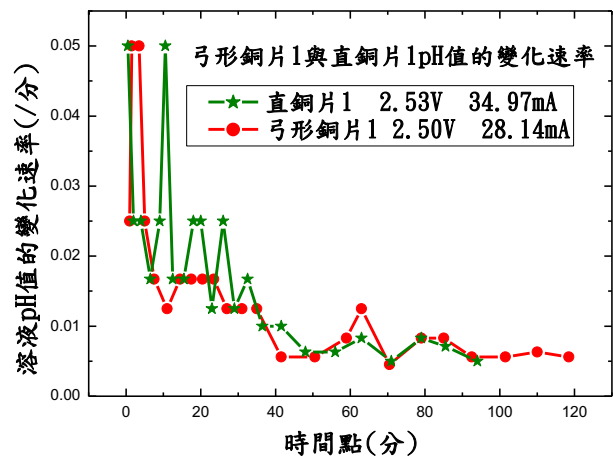


圖 43 以弓形銅片 1 與直銅片 1 為負極，在相同輸入電壓時，溶液 pH 值變化速率與時間的關係

3.結果：

- ①由圖 42~43 關係曲線可知：在相同輸入電壓時，在電解 0~40 分鐘間，弓形銅片 1 的 pH 值變化速率較直銅片 1 為小，但在電解 40 分鐘後則與直銅片 1 相當，增加銅片電極與溶液的接觸面積，在目前的條件下並沒有提升反應速率的效果。
- ②電解 40 分鐘後溶液 pH 值的變化速率逐漸平穩保持平均值為 0.0056(1/分)上下。

③反應速率的比較：

電極種類 \ 分析項目	通電時間(分)	溶液 pH 值平均變化速率(/分)			析出銅質量(g)	銅析出的回收率(%)
		40 分前	40 分後	全程		
直銅片 1(2.5V 燒杯)	99	0.0226	0.0070	0.0177	0.1497	11.76
弓形銅片 1 (2.5V 燒杯)	123	0.0206	0.0071	0.0150	0.0942	7.40

(四)將太陽能板應用於電解 0.1M CuSO_{4(aq)}，比較銅析出質量、溶液中 Cu²⁺濃度和 pH 值的變化

1.太陽下 SM5055 為電源，以燒杯為容器，石墨棒為負極，電解 0.1M CuSO_{4(aq)} 的情形

(1)實驗條件：參考附錄五 表 11 (石墨棒入水 3.3cm)

輸入平均電壓(V)	2.58	正、負極間的距離	2.4cm	析出銅的回收率 = 13.52%
電解槽平均電流(mA)	52.48	照度值平均	97580(Lux)	
	電解前	電解 190 分後	負極質量增加	平均速率
石墨棒質量(g)	14.02g	14.192	0.172	0.0009 (g/分)
溶液的 pH 值	3.5	0.3	3.2	0.01684(1/分)

(2)數據整理與關係圖：

		
圖 44：電解 130 分鐘溶液顏色變綠	圖 45：電解 190 分鐘後正極有少量碳黑掉落，溶液顏色變深綠色。	圖 46：電解 190 分鐘後石墨棒有一層銅析出均勻並無掉落的情形

(3)結果：輸入電壓在 2.5V，當電解時間超過 2 小時後正極石墨棒易劣化而產生碳黑掉落，電解時間增長(190 分)，溶液顏色會變深綠色。因溶液顏色深且混濁，故不進行 EDTA 滴定檢測電解後溶液中銅離子的濃度。

2. 太陽下 **SM5055** 為電源，以燒杯為容器，直銅片為負極，電解 0.1M CuSO_{4(aq)} 的情形

(1) 實驗條件：參考附錄五 表 12 (石墨棒入水 3.3cm，銅片入水 3.3cm)

輸入平均電壓	2.57 (V)	正、負極間的距離	2.4cm	析出銅的回收
電解槽平均電流	41.76(mA)	照度值平均	100000(Lux)	率 = 12.10 %
	電解前	電解 181 分後	負極質量增加	平均速率
直銅片質量(g)	3.466g	3.62	0.154	0.00085 (g/分)
溶液的 pH 值	3.5	1.6	1.9	0.01050(1/分)

(2) 觀察情形：如下圖 47~49 所示。



(3) 結果：

- ① 同樣電解條件下，石墨棒為負極電解 190 分後負極質量增加 0.172g，析出銅的回收率 = 13.52%；直銅片為負極電解 181 分後負極質量增加 0.154g，析出銅的回收率 = 12.10 %。石墨棒和直銅片為負極銅析出的平均速率大致相等。
- ② 以 0.05M 的 EDTA 滴定電解後溶液，EDTA 滴入體積平均值 = 0.8mL，推算得銅離子濃度約為 0.04M，電解後銅離子濃度減為原先的 2/5 倍。

	第一瓶	第二瓶	第三瓶	EDTA 滴入體積平均值
EDTA 滴入體積(mL)	0.7	0.8	0.9	0.8

3. 太陽下 **SM5055** 為電源，以玻璃瓶為容器，直銅片與弓形銅片為負極，電解 0.1M CuSO_{4(aq)} 的情形：

以玻璃瓶為容器倒入 200mL 0.1M CuSO_{4(aq)}，可增加電極與溶液的接觸面積，再分別以直銅片與弓形銅片為負極，個別連接 **SM5055 太陽能板** 為電源在太陽下進行電解實驗，如圖 50 所示，太陽下電解相同時間的實驗結果：

(1)實驗條件：實驗裝置圖如圖 50。

①以直銅片為負極：(請參考附錄五 表 13~表 14)

②以弓形銅片為負極時：(參考附錄五 表 15 ~ 16)

輸入平均電壓(V)	2.43	正、負極間的距離(cm)	1.5	照度平均值(Lux)
電解槽平均電流(mA)	60.88	直銅片入水表面積(cm ²)	6.8	98544
	電解前	電解 120 分後	負極質量增加	平均速率
直銅片質量(g)	2.572	2.6976	0.1256	0.00105 (g/分)

輸入平均電壓(V)	2.14	正、負極間的距離(cm)	1.5	照度平均值(Lux)
電解槽平均電流(mA)	76.81	弓形銅片表面積(cm ²)	8.91 cm ²	98544
	電解前	電解 120 分後	負極質量增加	平均速率
弓形銅片質量(g)	4.19	4.5372	0.3472	0.00289 (g/分)

(2)觀察情形：如圖 51 所示。如圖 52 所示。



圖 50 實驗裝置圖



圖 51：電解後：銅片上銅析出的情形。



圖 52：弓形銅片上銅原子析出情形

(3)結果：如下表所示，電解時間相同時，相同照度值下(平均值：98544 Lux)，增加電極與溶液的接觸面積，可以增加電解的反應速率及銅析出的回收率。

①銅回收率比較：弓形銅片 > 直銅片

項目 電極種類	輸出平均 電壓(V)	電解槽平 均電壓(V)	電解槽平 均電流(mA)	電解時間 (分)	析出銅的 質量(g)	銅析出 回收率(%)
直銅片	2.43	1.72	60.88	120	0.1256	9.87
弓形銅片	2.14	1.83	76.81	120	0.3472	27.28

②溶液 pH 值下降平均速率比較：弓形銅片 > 直銅片

項目 電極種類	電解前的 pH 值	電解槽下降 的 pH 值	所需時間 (分)	pH 值 下降值	pH 值下降平 均速率(1/分)
直銅片	3.5	2.1	90	1.4	0.0156
弓形銅片	3.6	1.8	90	1.8	0.02

[註]電解 90 分鐘後溶液的 pH 值不再下降，故以 90 分為電解時間，計算 pH 值下降平均速率

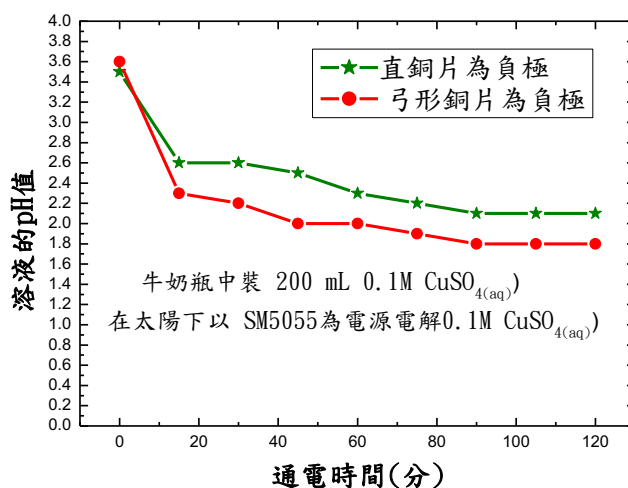


圖 53：直銅片與弓形銅片為負極，溶液 pH 值與通電時間關係圖

③以 0.05M 的 EDTA 滴定電解後溶液，EDTA 滴入體積平均值 = 1.2mL，推算得銅離子濃度約為 0.06M，電解後銅離子濃度減為原先的 3/5 倍。

	第一瓶	第二瓶	第三瓶	EDTA 滴入體積平均值
EDTA 滴入體積(mL)	1.1	1.2	1.3	1.2

(五)將太陽能板應用於電解實驗室 CuSO₄ 電鍍廢液，析出銅質量與電解液 pH 值的變化

(請參考附錄五 表 17)

1.以 pH 計測量實驗室 CuSO_{4(aq)} 電鍍廢液 pH=3.2，以 0.05M 的 EDTA 滴定 CuSO_{4(aq)} 電鍍廢液，EDTA 滴入體積平均值 = 3.63mL，推算得銅離子濃度約為 0.1825M。

	第一瓶	第二瓶	第三瓶	EDTA 滴入體積平均值
EDTA 滴入體積(mL)	3.75	3.55	3.6	3.63

2.以石墨棒為電極，SM5055 串聯在太陽下電解 CuSO_{4(aq)}：

(1)實驗條件：燒杯中裝 200 mL CuSO₄ 電鍍廢液

	電解前	電解 120 分後	負極質量增加	平均速率
石墨棒質量(g)	12.46	12.60	0.14	0.00117 (g/分)
溶液的 pH 值	3.4	0	3.4	0.02833(/分)

(2)實驗過程：

		
圖 54：電解 63 分鐘杯底無碳黑及銅掉落。	圖 55：電解 120 分鐘後正極有少量碳黑掉落，溶液顏色變為略呈黃綠色。	圖 56：電解 120 分鐘後石墨棒上銅析出層厚而粗糙。

(3)結果：

- ①輸入平均電壓在 3.0 V、電解時間不超過 2 小時，正極只有少量碳黑掉落，溶液顏色變為略呈黃綠色。
- ②以 0.05M 的 EDTA 滴定電解後溶液，EDTA 滴入體積平均值 = 1.83mL，推算得銅離子濃度約為 0.092M，電解後銅離子濃度減為原先的 1/2 倍。

	第一瓶	第二瓶	第三瓶	EDTA 滴入體積平均值
EDTA 滴入體積(mL)	2.0	1.4	2.1	1.83

陸、結論

太陽光是地球生命的主要能量來源，光合作用可視為自然界電解水的反應，植物藉由葉綠體將水分解為氧氣與氫能；使用太陽能板為電源進行電解實驗，可以擺脫人工電源的束縛，將化學實驗回歸大自然中進行，不僅節能減碳，又能給學習者對綠能教具有另一番新的體驗，這也是我們想要達成的目標。本研究的幾個重要結果如下：

1. 只要不是陰雨天，在上午 10:00~下午 3:00 間，參考中天太陽仰角固定好支架的角度，太陽仰角變化在 20 度內，對太陽能板開路電壓與短路電流影響不大，故太陽能板可作為電解實驗的穩定電源。另外，在鹵素燈下 5 cm 照射，輸出電壓會隨板面溫度的上升而下降，電流則略為上升；戶外時，太陽能板輸出電壓表現平穩，但輸出電流不一定會隨著陽光照度值增加而增加，都值得進一步深入研究。
2. 以鉑金絲為電極時，在戶外太陽下以 SM5151 串聯的太陽能板為電源電解水時，氫氣產生速率是直流電源供應器的兩倍，在 45 分鐘（一節課時間）內，便可收集到 8 ml 的氫氣，相當具有實用性。即使以電壓較低的 SM5055 串聯為電源，以回收碳棒為電極時，其電解效果也與直流電源供應器（鉑金絲為電極）相當，可進一步設計成簡易的綠能教具供教學使用。至於課本中常用以三顆 1.5V 乾電池串聯為電源電解水，反而是所有條件中效果最差的，值得課本編輯者參考改進。

3. 電解 0.1M CuSO_{4(aq)} 的實驗重要發現：

- (1) 以直銅片取代石墨棒是良好的負極材料，銅析出的回收率也較佳，且只要簡單處理便可重複使用。正極石墨棒在電壓 4V 以上、電解時間超過 2 小時，易劣化而產生碳黑掉落，且溶液顏色漸呈黃綠色，類似有銅綠生成的現象。
- (2) 太陽下以 SM5055 為電源，負極由直銅片改為弓形銅片，容器由燒杯改為玻璃瓶，增加電極與溶液的接觸面積，析出銅的回收率可增為原先的 3 倍。故以玻璃瓶為容器、弓形銅片為負極，搭配太陽能板為電源，應該是處理實驗室硫酸銅廢液的最佳組合。
- (3) 研究中嘗試將太陽能板應用於實驗室 CuSO_{4(aq)} 電鍍廢液的處理，先以 EDTA 滴定推算出廢液濃度，電解後以同樣的方法推算出銅離子濃度，發現電解後銅離子濃度減為原先的 1/2 倍，已得到初步的成效。其實電解後的液體以 NaOH 調整至 pH=3~4，仍可再以電解法析出更多的銅，限於篇幅的關係呈列在本報告中。

太陽能板應用於電化學實驗，會受限於天氣與場地的影響，及實驗裝置必須避免人員碰觸以免傾倒，除此之外，以太陽能板為電源進行電化學實驗，不僅裝置簡易且具有實用性，更可達到節能減碳的效用，值得加以推廣。

柒、參考文獻

- 一、中華民國第 48 屆中小學科展高中組物理科：太陽『矽』希望--太陽電池
- 二、中華民國第 48 屆中小學科展國小組自然科—照過來!看我為太陽能板擺 POSE
- 三、中華民國第 50 屆中小學科展高職組機械科—以菲涅爾透鏡改善太陽能板發電功率探討
- 四、中華民國第 44 屆中小學科展國中組化學科--改良電解水的裝置並探討電解速率的影響因素
- 五、中華民國第 48 屆中小學科展國中組理化科---電解水實驗的深入探討
- 六、中華民國第 40 屆中小學科展國中組---電解廢液真是環保的元兇？
- 七、高級中學化學第二冊 國立臺灣師範大學科學教育中心主編，國立編譯館出版(民國 82 年 1 月八版)
- 八、賴文榮 審定 黃文輝主編(2009)。分析化學。台北縣：新文京開發出版有限公司
- 九、「台灣四季仰角與方位角」：<http://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/astronomy/cdata/season.htm>
- 十、維基百科 鹵素燈 <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%A4%E7%B4%A0%E7%81%AF>
- 十一、維基百科 電解 <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%94%B5%E8%A7%A3>

【評語】 030201

本實驗使用太陽矽板提供能源製作成電池，變化電池的電極材質、組裝設計等，進行氫氣的反應速率量測與銅質量析出等實驗。作者用心在各樣電池的設計，獲得不少可信賴的數據。但因此實驗的一些學理皆已知曉，且相關的實驗很多，因此不易在比賽中突出。若作者在實驗的同時，也能探討背後的意義與根據，則研究的成果將更佳。