

# 中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 化學科

## 團隊合作獎

050214

只（紙）是（式）電池

學校名稱：臺中市立臺中第二高級中等學校

作者：  高二 楊詠蓁  高二 薛宜珊  高二 陳育堂	指導老師：  顏伯昌  楊大緯
---	-----------------------------

關鍵詞：紙電池、鋁電池、離子液體

## 摘要

本研究的紙電池由鋅銅紙電池著手，藉由探討鋅銅紙電池反應環境，我們彙整所有適合放電的條件，得到一個優化鋅銅紙電池。之後為了減少重金屬的使用與延緩水分流失，我們將電解液改為氫氧化鈉凝膠，並在陰極電解液中加入過氧化氫緩解極化現象，得到一個較環保且能長時間使用的鋅紙電池。然而鋅紙電池的電壓值較低，我們將陽極改為鋁片提升電位，製得一次性鋁紙電池，並藉由密封測試探討一次鋁紙電池真正的反應機制。最後我們將電解液改為離子液體，試著將一次鋁紙電池改良成二次鋁紙電池，並探討不同反應環境來提升電壓，得到一個較佳的二次鋁紙電池，但最終測量充電之電能轉換效率發現效果不佳，故在二次鋁紙電池上仍有待繼續研究，以提升其效能。

## 壹、 研究動機

電池的種類隨著時代的變遷追新求變，從最早由銅板與鐵板堆疊而成的伏打電堆為雛形，到現今人手一支智慧手機裡的配件鋰離子電池，展現人們追求輕薄電池的夢想。這促使我們進入電化學的領域，為了減輕電池重量，我們開始上網找相關電池的研究，其中第 58 屆全國科展作品「利用摺紙藝術製作發電裝置」是以紙作為電池基底，藉由簡易的折疊步驟將材料組合在一起，透過特殊的紙流道設計與紙的毛細現象幫助離子流動，形成一款輕薄且可攜性高的紙電池。雖然上述研究提供了非常好的方法來減輕重量，本質上仍與我們所追求的可充式電池有些不同，另外因鋅銅紙電池有以下缺點：

1. 鋅銅電池為一次性電池，電量耗盡後無法再充電使用，只能丟棄。
2. 鋅銅電池的電解液具有重金屬，易造成環境汙染。

於是我們嘗試以高中現有的知識來改良參考資料<sup>[1]</sup>中的紙電池，逐步將鋅銅紙電池改良成鋅紙電池與一次性鋁紙電池，並藉由參考二次鋁電池的發電原理，進一步改良一次鋁紙電池，希望能發展出一款質輕且具環保性的可攜帶式二次鋁紙電池。

## 貳、 研究目的

- 一、紙電池製作與測量
- 二、鋅銅紙電池反應環境探討
- 三、鋅紙電池反應環境探討
- 四、一次鋁紙電池反應環境探討
- 五、二次鋁紙電池反應環境探討
- 六、製作出輕、薄、環保之二次鋁電池

## 參、 研究設備及器材

設備	Arduino、廢電池、蠟燭、凡士林、濾紙、衛生紙、玻璃紙、培養皿、溫度計、電磨棒、研鉢、膠帶、雙面膠、口紅膠、加熱板、直流電源供應器、三用電表、導電度計(PASCO)、電氣絕緣膠帶、熱熔膠、坩鍋、雙頸瓶、磁石、氣球、調節閥、真空器皿、真空馬達、烘箱、熨斗、護貝膜、吹風機
藥品	鋅片、鋅粉、硫酸銅、硫酸鋅、碳粉(2B、4B、6B)、氫氧化鈉、甲基纖維素、水晶膠、雙氧水、氯化亞鈷試紙、乾燥劑、氯化膽鹼、尿素、氯化鋁、乙醇、氫氣

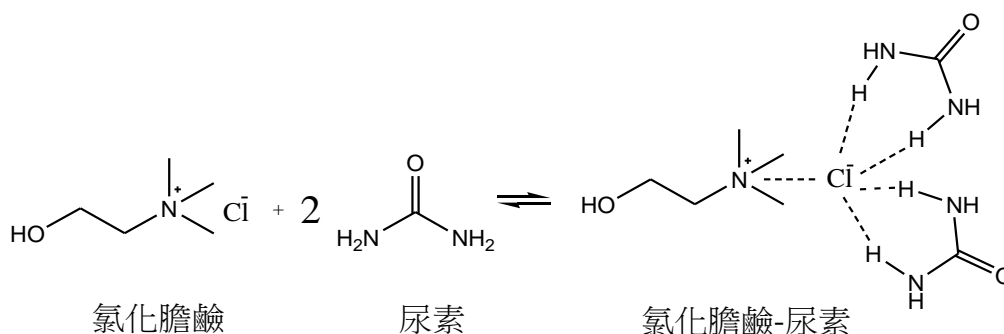
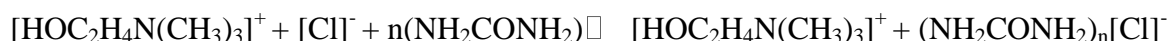
## 肆、 研究過程或方法

### 一、實驗原理

#### (一) 離子液體的簡介(參考資料<sup>[5]</sup>)

離子液體的熔點低於100°C、常溫下呈液態，典型的離子液體由體積較大且非對稱的有機陽離子與有機或無機的陰離子組成，由離子或短暫存在(short-lived)的離子對所構成，而且離子鍵的強度通常比凡得瓦力大很多，因此大部份的鹽類只能在高溫時才呈現液體狀態，有些則是在室溫或室溫以下呈液態離子液體(ionic liquids; ILs)也被視為「綠色溶劑」，原因在於其優越的物理化學性質，如熔點、黏度、密度、導電性、極性、親疏水性及溶解度，皆可藉由改變陰陽離子的結構而有所變化，由於離子液體的合成具有這種靈活之特性，使其應用性大幅提升。

低共融溶劑的形成可描述為：陽離子+陰離子+氫鍵供體 ⇌ 陽離子+配位陰離子。  
氯化膽鹼加尿素形成可表示為：



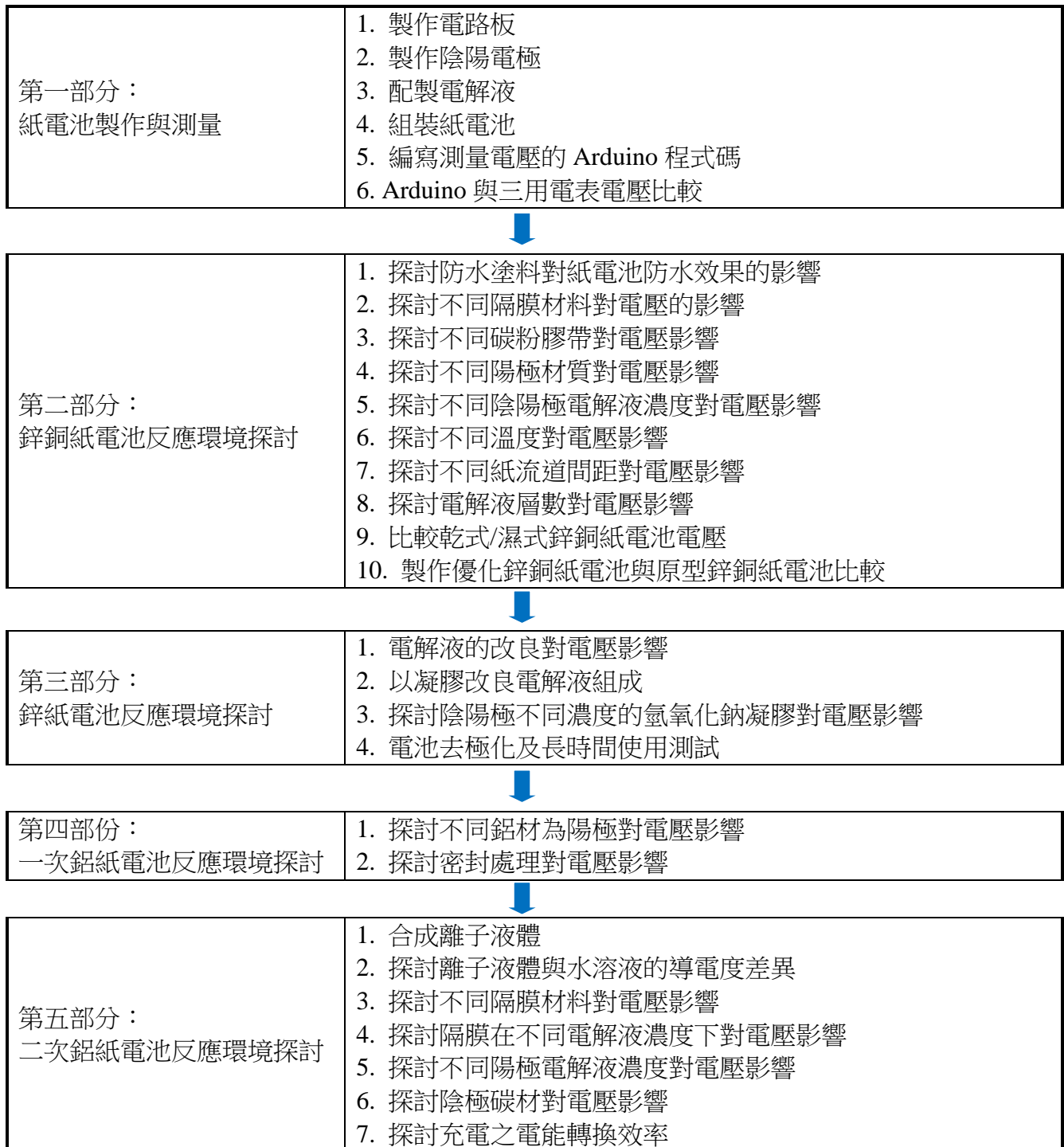
#### (二) 電能轉換效率公式

可使用法拉第電解定律將鋁片質量變化( $\Delta W$ )求出  $\text{Al}^{3+}$  所獲得的電量，再與電源所提供電量(Q)相除，即可求出充電之電能轉換效率。

$$\text{電能轉換效率} = \frac{\text{Al增加mol} \times 3}{\text{電源供給電量(Q)}} \times 100\% = \frac{\frac{\Delta W_{(\text{克})}}{27} \times 3}{\frac{I_{(\text{安培})} \times t_{(\text{秒})}}{96500}}} \times 100\%$$

## 二、實驗流程與裝置圖

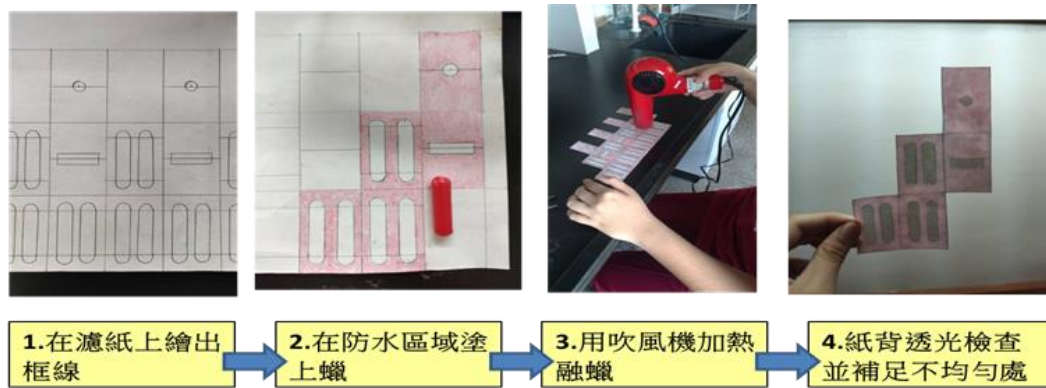
我們首先以參考資料<sup>[1]</sup>的紙電池製作方法作為我們紙電池的初始測試內容，然後再進行改良，由鋅銅紙電池之研究逐步至二次鋁紙電池，研究過程如下所示，共分為五個部分。



### 三、紙電池製作與測量

#### (一) 製作電路板

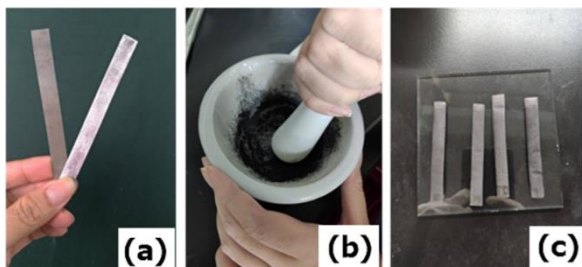
根據參考資料<sup>[1]</sup>，利用噴蠟印表機在濾紙上繪製板型，並用加熱板使蠟浸濕濾紙，以達到防水效果形成所需的紙流道。由於缺少噴蠟印表機，我們決定以人工塗蠟替代，製作電路板的步驟，如圖一所示：



圖一、電路板製作流程圖

#### (二) 製作陰陽電極

1. 製作陽極：使用電磨棒磨去鋅片上的氧化物，如圖二(a)所示
2. 製作陰極：使用研鉢將回收電池中的碳棒磨製碳粉，如圖二(b)所示，並使用衛生紙將碳粉均勻塗抹在膠帶上，背面對貼，製成碳粉膠帶，如圖二(c)所示



圖二、陰陽電極棒

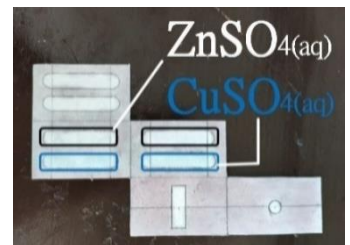
(a)陽極：生鏽鋅片及磨好的鋅片對照圖

(b)製備碳粉

(c)陰極：碳粉膠帶

#### (三) 配製電解液

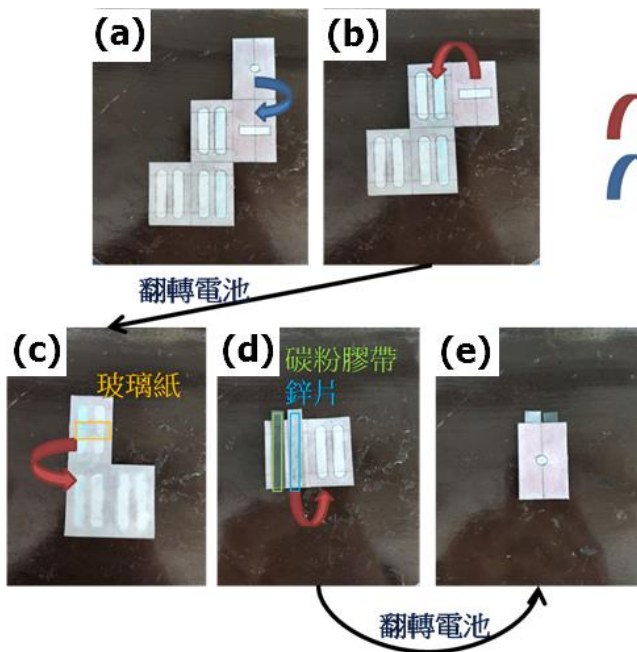
配製 1.0 M 的硫酸銅水溶液與硫酸鋅水溶液各 250 mL，然後在特定紙流道上滴入固定滴數(2 滴)的電解液，以求其乾燥後吸附於濾紙上的離子莫耳數一致，並放置乾燥備用，如圖三所示。



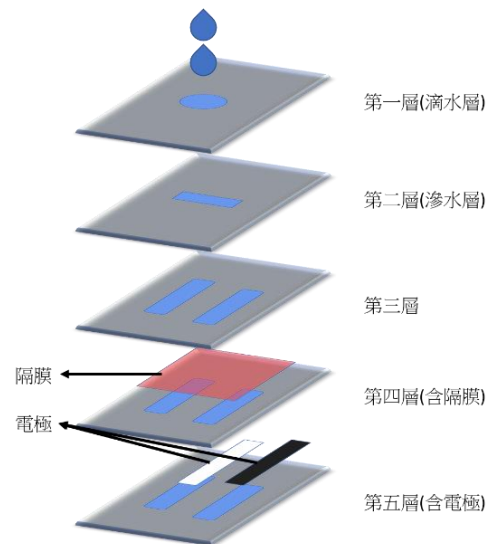
圖三、電解液分布圖

#### (四) 組裝紙電池

依照圖四步驟依序摺紙，其中在第三與第四層之間貼上長 3 公分寬 2 公分的玻璃紙做為隔膜(圖四(c))，並在第四與第五層之間貼電極(圖四(d))，最後用口紅膠黏合(圖四(e))即完成隔膜型紙電池。另外，紙電池結構說明，如圖五。



圖四、紙電池摺疊方法



圖五、紙電池結構

(五) 編寫測量電壓的 Arduino 程式碼(圖六)

Arduino 測電壓原理是利用電路板上的積體電路，將偵測到的電壓與自身的參考電壓做比較，比較後的結果經換算即可得到電壓值。

```

sketch_feb03a$

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  float temp;
  String Data;
  Serial.println("CLEARSHEET");
  Serial.println((String("LABEL,Date,Time,") + String("volt1,volt2,volt3")));
  Data = "";
}

void loop() {
  int V1 = analogRead(A0);
  int V2 = analogRead(A2);
  int V3 = analogRead(A4);
  float volt1 = V1*(5.0 / 1023.0);
  float volt2 = V2*(5.0 / 1023.0);
  float volt3 = V3*(5.0 / 1023.0);
  Data = String("DATA,DATE,TIME,") + String(String(volt1)) + String(",") + String(String(volt2)) + String(",") + String(String(volt3));
  Data = String(Data) ;
  Serial.println(Data);
  Serial.println(volt1);

  Serial.println(volt2);
  Serial.println(volt3);
  delay(60000);
}

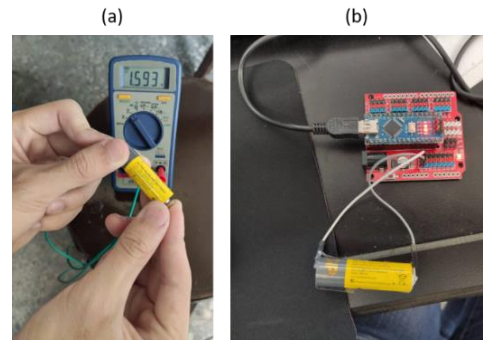
```

圖六、Arduino 程式碼

#### (六) Arduino 與三用電表電壓比較(圖七)

本實驗需長時間測量，因此採用 Arduino 作為測量工具。為確認 Arduino 與三用電表測得的電壓之差異，我們分別使用 Arduino 及三用電表進行測量 1.5 V 乾電池。

**註**：本研究中使用 Arduino 進行電壓的測量。

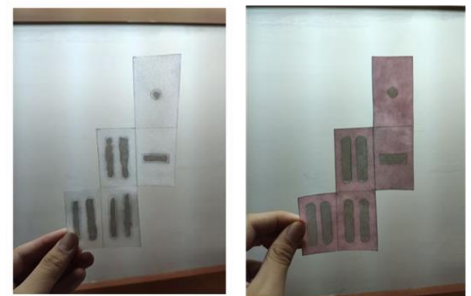


圖七、以(a)三用電表 (b)Arduino 測量 1.5 V 乾電池電壓

#### 四、鋅銅紙電池反應環境探討

##### (一) 探討防水塗料對紙電池防水效果的影響(圖八)

將蠟與凡士林塗在相同樣板的濾紙上，並加熱使其融入濾紙內，直到濾紙完全浸透防水塗料，如圖八所示，並於其上滴水觀察防水效果。



(a) (b)

圖八、塗完防水塗料後的紙電池  
(a)塗抹凡士林 (b)塗抹蠟

##### (二) 探討不同隔膜材料對電壓的影響

###### 1. 玻璃紙先浸濕後乾燥處理步驟(圖九)：

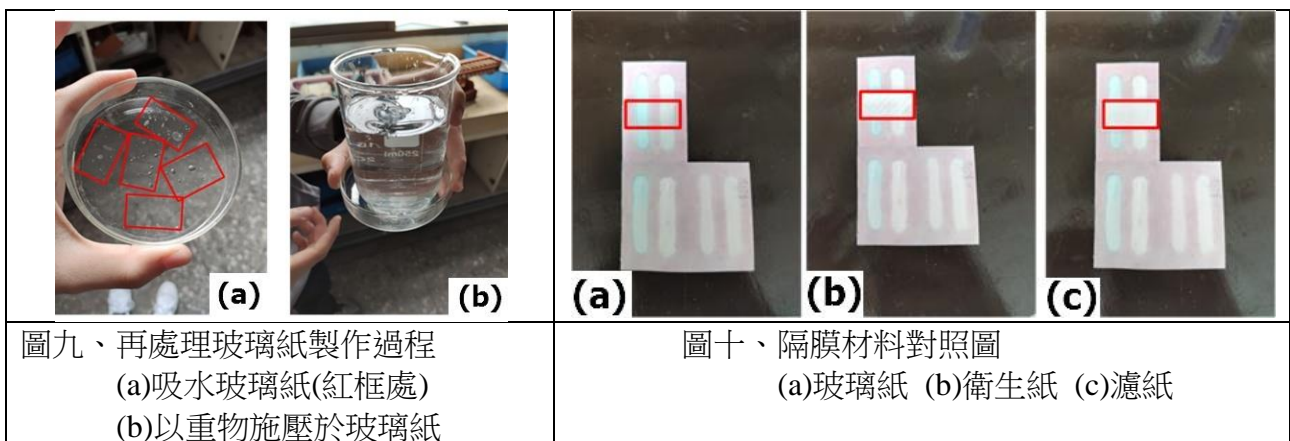
步驟 1：浸泡在水中約 10 分鐘。

步驟 2：將其擦乾並平鋪夾於乾淨的拭鏡紙中，以重物施壓約 1 天使其乾燥平整。

**註**：經以上步驟處理之玻璃紙，本文稱為「再處理玻璃紙」

###### 2. 分別以再處理玻璃紙、乾燥玻璃紙、衛生紙及濾紙當作隔膜，製成電池，如圖十。

(實驗條件參見表一)



圖九、再處理玻璃紙製作過程  
(a)吸水玻璃紙(紅框處)  
(b)以重物施壓於玻璃紙

圖十、隔膜材料對照圖  
(a)玻璃紙 (b)衛生紙 (c)濾紙

(表一)隔膜材質測試的實驗條件

	電極材質	電解質溶液	紙流道間距	隔膜材質 (操縱變因)	溫度	電解液層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0 M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.4 cm	再處理玻璃紙 乾燥玻璃紙 濾紙 衛生紙	28 °C	三層	乾式
陰極	碳棒 碳粉	1.0 M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

註：本文的碳棒為從回收電池中取出的碳棒。

### (三) 探討不同碳粉膠帶對電壓影響

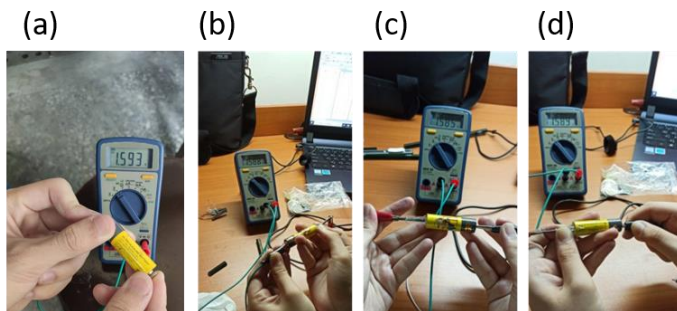
本實驗的實驗條件如表二，以不同成分的筆芯(2B、4B、6B)作為探針測量乾電池電壓，以檢驗碳棒的成分是否會影響電壓。

測量乾電池電壓(圖十一)的步驟如下：

步驟 1：首先以鱷魚夾直接測量乾電池電壓。

步驟 2：再將鱷魚夾接上 2B 筆芯作為探針，再去測量乾電池電壓

步驟 3：重複步驟 2，但將筆芯改為 4B、6B 進行測量。



圖十一、乾電池連接三用電表  
(a)直接測量  
(b)連接 2B  
(c)連接 4B  
(d)連接 6B

(表二) 碳粉膠帶(陰極)之碳粉材質測試的實驗條件

	電極材質 (操縱變因)	電解質溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0 M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.4 cm	衛生紙	28 °C	三層	乾式
陰極	碳棒、2B、 4B、6B 之碳粉	1.0 M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

### (四) 探討不同陽極材質對電壓影響

我們比照碳粉膠帶的做法做了鋅粉膠帶，使用鋅片及鋅粉進行測試及比較兩者效果差異，陰陽極的電解液皆為 1.0 M，並使用 4B 碳粉做為陰極電極，電池進行操作的溫度為 28 °C。(實驗條件參見表四)



(表三)原型鋅銅紙電池的組成

	電極	電解液溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	防水層	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.4 公分	衛生紙	蠟	三層	乾式
陰極	4B 碳粉	1.0M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

註：本文將以上組成的鋅銅電池稱「原型鋅銅紙電池」

(表四)改變陽極的材質測試的實驗條件

	電極材質 (操縱變因)	電解質溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片、鋅粉	1.0 M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.4 cm	衛生紙	28 °C	三層	乾式
陰極	4B 碳粉	1.0 M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

#### (五) 探討不同陰陽極電解液濃度對電壓影響

改變電解液濃度的實驗分為兩部分，溫度皆為 28 °C。(實驗條件參見表五、六)

(表五)改變陰極電解液濃度測試的實驗條件

	電極材質	電解質溶液 (操縱變因)	紙流道 間距	隔膜 材質	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0 M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.4 cm	衛生紙	28 °C	三層	乾式
陰極	4B 碳粉	1.0 M、0.5 M、 0.2M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

(表六)改變陽極電解液濃度測試的實驗條件

	電極材質	電解質溶液 (操縱變因)	紙流道 間距	隔膜 材質	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0 M、0.5 M、 0.2M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.4 cm	衛生紙	28 °C	三層	乾式
陰極	4B 碳粉	1.0 M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

#### (六) 探討不同溫度對電壓影響

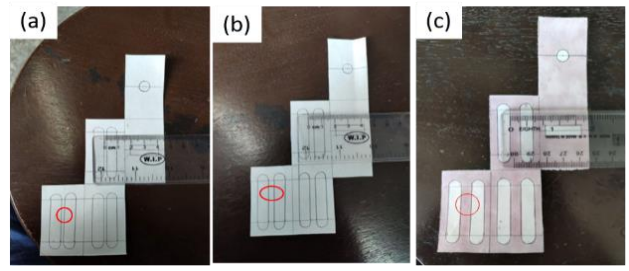
我們為了探討溫度對電池反應的影響，我們使用 3 個原型鋅銅紙電池，分別置於溫度 28 °C、38 °C、48 °C 的加熱板上進行測量。(實驗條件參見表七)

(表七)改變溫度測試的實驗條件

	電極 材質	電解質溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	溫度 (操縱變因)	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0 M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.4 cm	衛生紙	28 °C、38 °C、48 °C	三層	乾式
陰極	4B 碳粉	1.0 M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

(七) 探討不同紙流道間距對電壓影響

為求能更早達到平衡電壓，在本實驗中測試了紙流道的距離，紙流道的距離如圖十二紅圈所示，我們將紙流道的距離從原型紙電池的 0.4 cm 出發，各增減 0.2 cm 製成不同距離的紙電池。(實驗條件參見表八)



圖十二、紙流道距離比較圖

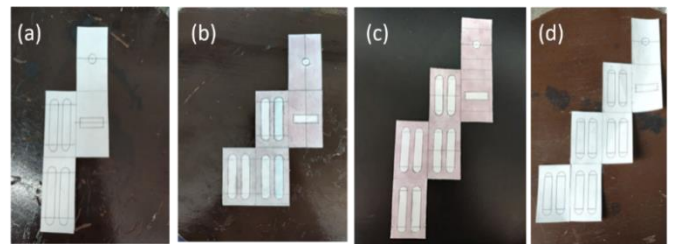
(a) 0.2 cm (b) 0.4 cm (c) 0.6 cm

(表八) 探討紙流道間距對電壓影響的實驗條件

	電極材質	電解質溶液	紙流道間距 (操縱變因)	隔膜 材質	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0 M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.2 cm、0.4 cm、 0.6 cm	衛生紙	28 °C	三層	乾式
陰極	4B 碳粉	1.0 M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

(八) 探討電解液層數對電壓影響

為了探討電解液層數是否會對電壓造成影響，我們將電池的電解液層依照原型紙電池的標準，增減層數做檢測(圖十三)，其餘控制變因與原型紙電池相同。



圖十三、電路板增減比較圖

(a)二層 (b)三層(原型) (c)四層 (d)五層

(實驗條件參見表九)

(表九)增減電解液層測試的實驗條件

	電極 材質	電解質溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	溫度	電解液層數 (操縱變因)	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0 M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.4 cm	衛生紙	28 °C	二層、三層、 四層、五層	乾式
陰極	4B 碳粉	1.0 M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

(九) 比較乾式/濕式鋅銅紙電池電壓

由於前面的電池都需要一段時間才能達到穩定電壓，為求能更快達到穩定電壓，我們決定不將電解液乾燥，使電池內部保持濕潤的狀態下進行測量。

(十) 製作優化鋅銅紙電池與原型鋅銅紙電池比較

根據以上實驗結果，我們依下列(表十)組成優化鋅銅紙電池，並在 28 °C 下測量優化鋅銅紙電池電壓並與原型鋅銅紙電池比較。

(表十)優化鋅銅紙電池的組成

	電極	電解液溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	防水層	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0M ZnSO <sub>4(aq)</sub>	0.2 公分	衛生紙	蠟	二層	濕式
陰極	4B 碳粉	1.0M CuSO <sub>4(aq)</sub>					

註：黑框處為優化鋅銅紙電池與原型鋅銅紙電池結構(表三)相異處

## 五、鋅紙電池反應環境探討

### (一) 電解液的改良對電壓影響

使用優化鋅銅紙電池的結構與配置，但將原本使用的電解質 ZnSO<sub>4(aq)</sub>及 CuSO<sub>4(aq)</sub>改為不具重金屬且易取得的 NaOH<sub>(aq)</sub>，檢測鋅紙電池電壓並與優化鋅銅紙電池比較。(鋅紙電池組成參見表十一)

(表十一)鋅紙電池的組成

	電極	電解液溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	防水層	電解液 層數	乾式/ 濕式
陽極	鋅片	1.0 M NaOH <sub>(aq)</sub>	0.2 公分	衛生紙	蠟	二層	濕式
陰極	4B 碳粉	1.0 M NaOH <sub>(aq)</sub>					

註：黑框處為鋅紙電池與優化鋅銅紙電池結構(表十)相異處

### (二) 以凝膠改良電解液組成

選用甲基纖維素與水晶膠兩種製作凝膠的材料，依以下比例製出六種 NaOH 凝膠狀電解液：

1. 甲基纖維素：分別取 1.0、2.0、3.0 克與 1.0 M NaOH<sub>(aq)</sub> 50 mL
2. 水晶膠：分別取 1.0、2.0、3.0 克與 1.0 M NaOH<sub>(aq)</sub> 50 mL

再將凝膠電解質裝入針筒內，並擠出 0.1 克的凝膠於每條紙流道上。

### (三) 探討陰陽極不同濃度的氫氧化鈉凝膠對電壓影響

我們藉由改變電解液濃度來提升電壓，欲求出最佳電解質濃度比例。

(實驗條件參見表十二)

(表十二) 陰陽極不同濃度的 NaOH 凝膠對電壓影響實驗條件

	電極材質	電解質溶液(操縱變因) NaOH <sub>(aq)</sub> 凝膠			紙流道 間距	隔膜 材質	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式
		(1)0.1 M	(2)1.0 M	(3)1.0 M					
陽極	鋅片	(1)0.1 M	(2)1.0 M	(3)1.0 M	0.2 cm	衛生紙	28 °C	二層	濕式
陰極	4B 碳粉	(1)1.0 M	(2)0.1 M	(3)1.0 M					

## (四) 電池去極化及長時間使用測試

本實驗在陰極電解液中加入 0.2 mL 35% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 做為去極劑，電解液經由上述實驗的改良，我們以陽極濃度為 0.1 M NaOH 凝膠，陰極濃度為 1.0 M NaOH 凝膠，並以有無添加 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 當操作變因，進行長時間的紙電池測試。

## 六、一次鋁紙電池反應環境探討

## (一) 探討不同鋁材為陽極對電壓影響

本實驗將陽極改為鋁材，並選用回收鋁罐裁下的鋁片與鋁箔作比較，藉由比較兩者的電壓大小來決定鋁紙電池的陽極材料，並與鋅紙電池進行比對。

(實驗條件參見表十三)

(表十三)改變陽極材質測試的實驗條件

	電極材質 (操縱變因)	電解質溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式	密封/ 開放
陰極	4B 碳粉	1.0 M NaOH <sub>(aq)</sub> 凝膠 + 35 % H <sub>2</sub> O <sub>2(aq)</sub>						

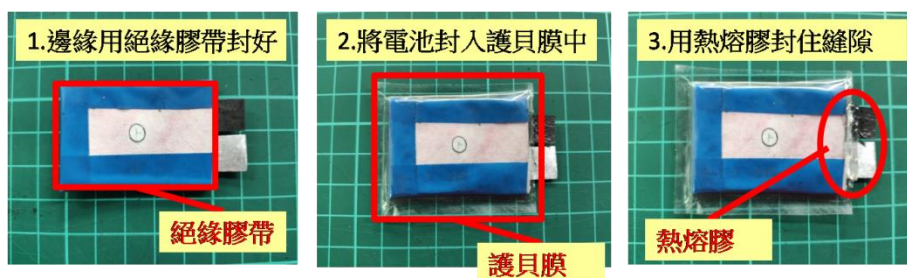
## (二) 探討密封處理對電壓影響

紙電池長時間使用，水分易散失，導致電池保濕效果變差，於是藉由將電池做密封處理，延緩水分流失的速度，以求電壓能夠長期維持。另外，空氣中的氧氣是否參與反應而影響電池電壓，故將電池密封做長時間放電。(實驗條件參見表十四) 密封處理過程(參見圖十四)如下：

步驟 1：用電氣絕緣膠帶包覆電池邊源，防止電解液外漏與電池鬆脫。

步驟 2：將護貝膜裁成能包覆電池的大小，將一次性紙電池夾入護貝膜，兩極需突出邊界，並用熨斗將邊緣熨過。

步驟 3：用熱熔膠封住電極板與護貝膜的縫隙，防止空氣通入膜內。(圖十四)



圖十四、密封性電池模型圖

(表十四)密封式與開放式電池的實驗條件

	電極材質	電解質溶液	紙流道間距	隔膜材質	溫度	電解液層數	乾式/濕式	密封/開放 (操縱變因)
陽極	鋁片	0.1 M NaOH <sub>(aq)</sub> 凝膠 +35 % H <sub>2</sub> O <sub>2(aq)</sub>	0.2 cm	衛生紙	28 °C	二層	濕式	密封/ 開放
陰極	4B 碳粉	1.0 M NaOH <sub>(aq)</sub> 凝膠 + 35 % H <sub>2</sub> O <sub>2(aq)</sub>						

## 七、二次鋁紙電池反應環境探討

### (一) 合成離子液體

由於之前所探討的電池為水溶液，充電時可能進行電解水反應生成氫氣，具危險性且無法充電，故改用離子液體作為二次鋁紙電池的電解質。

#### 1. 配製離子液體 A(氯化膽鹼/尿素=1/2)：

根據參考資料<sup>[5]</sup>，將氯化膽鹼與尿素以莫耳數比 1:2 的比例倒入雙頸瓶後，加入磁石攪拌，並於上方放置一氫氣球，使氫氣充滿雙頸瓶且加以密封以避免水氣進入，並在室溫下持續攪拌至反應物由固態變為液態。(圖十五)

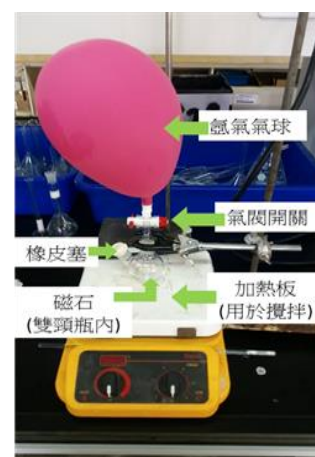
**註：**本文將以上步驟製成的離子液體稱為**離子液體 A**，並以 A<sub>(IL)</sub>表示。

#### 2. 配製 0.1 M、0.5 M 及 1.0 M 氯化鋁離子液體(AlCl<sub>3(IL)</sub>)：

步驟 1：將氯化鋁置入烘箱 80 °C，烘一小時。

步驟 2：取 20 mL 離子液體 A 置入雙頸瓶中，秤取上述 2.66 克氯化鋁加入其中，加入磁石攪拌並等待至其溶解，配製出 1.0 M AlCl<sub>3(IL)</sub>。

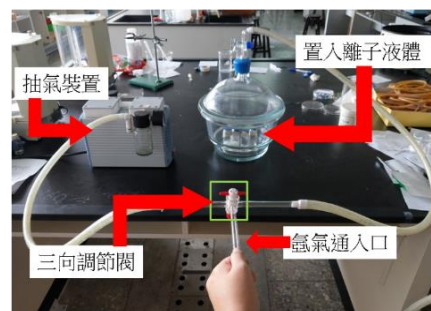
步驟 3:取適量的 1.0 M AlCl<sub>3(IL)</sub>加入離子液體 A 稀釋成 0.1 M 及 0.5 M AlCl<sub>3(IL)</sub>。



圖十五、配置離子液體之器材簡圖

### 3. 保存離子液體：

使用注射針筒將上述各離子液體吸取置入樣品瓶，放入真空裝置內保存。(圖十六)



圖十六、真空裝置簡圖

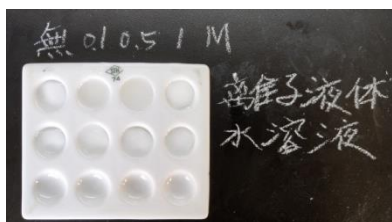
### (二) 探討離子液體與水溶液的導電度差異

因離子液體黏稠性高，故測其導電度並與水溶液電解質導電度做比較，實驗步驟如下：

步驟 1：各取 1 毫升待測水溶液與離子液體置於瓷反應盤。

步驟 2：以導電度計測量蒸餾水、0.1 M  $\text{AlCl}_3(\text{aq})$ 、0.5 M  $\text{AlCl}_3(\text{aq})$  及 1.0 M  $\text{AlCl}_3(\text{aq})$  之導電度。

步驟 3：以導電度計測量離子液體 A、0.1 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ 、0.5 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$  及 1.0 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$  之導電度。(圖十七、圖十八)



圖十七、待測水溶液與離子液體置於瓷反應盤



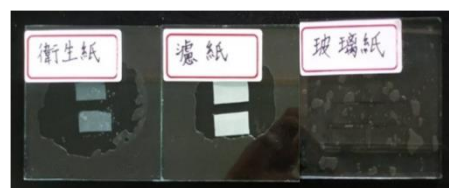
圖十八、檢測導電度過程圖

### (三) 探討不同隔膜材料對電壓影響

1. 分別將 3.0 cm×2.0 cm 的衛生紙、濾紙、玻璃紙與離子液體 A 置於兩玻璃片夾層內兩個小時，使隔膜完全浸濕在離子液體 A 中。(圖十九)

2. 取上述各種隔膜製成二次鋁紙電池。

(實驗條件參見表十五)

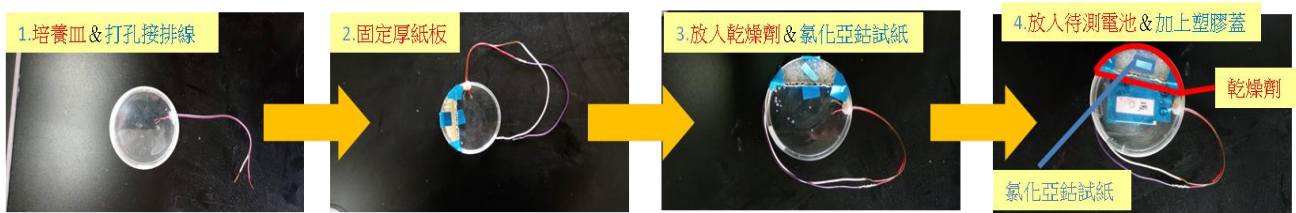


圖十九、不同材料之隔膜浸濕於離子液體

(表十五)不同隔膜材料測試的實驗條件

	電極材質	電解質溶液	紙流道間距	隔膜材質(操縱變因)	隔膜之離子液體	溫度	電解液層數	乾式/濕式	密封/開放
陽極	鋁片	0.1 M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$	0.2 cm	衛生紙	離子液體 A	28 °C	二層	濕式	開放
陰極	4B 碳粉	1.0 M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$		濾紙 玻璃紙					

3. 因離子液體易吸收水氣，故將上述各電池置入含有乾燥劑之培養皿內，再偵測電壓。(圖二十)



圖二十、製作乾燥裝置培養皿之流程圖

(四) 探討隔膜在不同電解液濃度下對電壓影響

1. 分別將 3.0 cm×2.0 cm 的衛生紙浸泡在離子液體 A、0.1 M AlCl<sub>3(IL)</sub>、0.5 M AlCl<sub>3(IL)</sub> 及 1.0 M AlCl<sub>3(IL)</sub> 兩個小時。
2. 取上述各種隔膜製成二次鋁紙電池。(實驗條件參見表十六)

(表十六) 浸泡隔膜之離子液體濃度測試的實驗條件

	電極材質	電解質溶液	紙流道間距	隔膜材質	隔膜之離子液體濃度(操縱變因)	溫度	電解液層數	乾式/濕式	密封/開放
陽極	鋁片	0.1 M AlCl <sub>3(IL)</sub>	0.2 cm	衛生紙	離子液體 A 0.1 M AlCl <sub>3(IL)</sub> 0.5 M AlCl <sub>3(IL)</sub> 1.0 M AlCl <sub>3(IL)</sub>	28 °C	二層	濕式	開放
陰極	4B 碳粉	1.0 M AlCl <sub>3(IL)</sub>							

3. 將上述各電池置入含有乾燥劑之培養皿內，再偵測電壓。

(五) 探討不同陽極電解液濃度對電壓影響

1. 改變陽極電解質濃度，使陰陽兩極電解液產生不同的濃度差，並製成二次鋁電池。(實驗條件參見表十七)

(表十七) 改變陽極電解液濃度測試的實驗條件

	電極材質	電解質溶液(操縱變因)	紙流道間距	隔膜材質	隔膜之離子液體	溫度	電解液層數	乾式/濕式	密封/開放
陽極	鋁片	離子液體 A 0.1 M AlCl <sub>3(IL)</sub> 0.5 M AlCl <sub>3(IL)</sub> 1.0 M AlCl <sub>3(IL)</sub>	0.2 cm	衛生紙	離子液體 A	28 °C	二層	濕式	開放
陰極	4B 碳粉	1.0 M AlCl <sub>3(IL)</sub>							

2. 將上述各電池置入含有乾燥劑之培養皿內，再偵測電壓。

(六) 探討陰極碳材對電壓影響

1. 將 4B 碳粉倒入坩堝內，並以氫氣將坩堝內空氣排出，蓋上鍋蓋。
2. 將坩堝置入 270 °C 的烘箱，各加熱三小時和五小時。
3. 將烘過的碳粉製成碳粉膠帶並組裝成電池，與未烘的碳粉膠帶電池作電壓比較。

(實驗條件參見表十八)

(表十八)改變陰極碳材的實驗條件

	電極材質 (操縱變因)	電解質 溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	隔膜之 離子液體	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式	密封/ 開放
陽極	鋁片	0.1 M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$	0.2 cm	衛生紙	離子液體 A	28 °C	二層	濕式	開放
陰極	(1)未烘 (2)烘 3 hr (3)烘 5 hr 之 4B 碳粉	1.0 M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$							

(七) 探討充電之電能轉換效率

1. 製作「優化二次鋁紙電池」：根據以上實驗結果，我們依下列(表十九)組成優化紙電池。

(表十九)優化二次鋁紙電池的組成

	電極材質 (操縱變因)	電解質 溶液	紙流道 間距	隔膜 材質	隔膜之 離子液體	溫度	電解液 層數	乾式/ 濕式	密封/ 開放
陽極	鋁片	0.1 M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$	0.2 cm	衛生紙	離子液體 A	28 °C	二層	濕式	開放
陰極	未烘 之 4B 碳粉	1.0 M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$							

2. 優化二次鋁紙電池持續放電六小時後
3. 取出電池中的陽極鋁片，以乙醇洗去鋁片上的離子液體，乾燥後稱重( $W_1$ )。
4. 再將鋁片裝回原本鋁電池，再以直流電源提供 1 mA 電流，充電六小時。(圖二十一)
5. 充電完畢後，再取出電池中的陽極鋁片，以乙醇洗去鋁片上的離子液體，乾燥後稱重( $W_2$ )。
6. 算出步驟 3 與步驟 5 的鋁片的質量差 ( $\Delta W = W_2 - W_1$ )



圖二十一、優化二次鋁紙電池  
充電過程圖



## 伍、 研究結果

### 一、 紙電池製作與測量

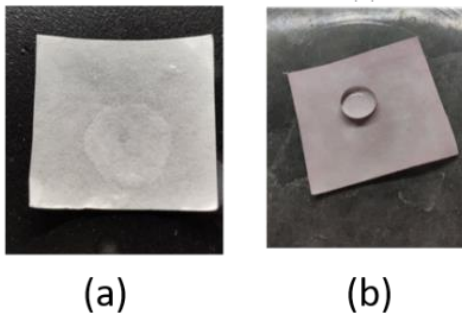
#### (一) Arduino 與三用電表電壓比較

表二十、三用電表及 Arduino 測量市售 1.5 V 電池電壓之結果

	三用電表	Arduino
市售 1.5 V 電池	1.6 V	1.72 V

### 二、 鋅銅紙電池反應環境探討

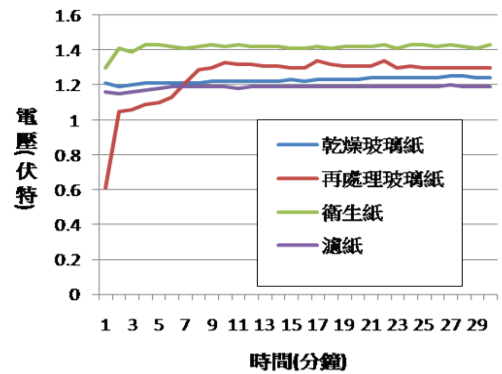
#### (一) 探討防水塗料對紙電池防水效果的影響



圖二十二、防水塗層比較圖

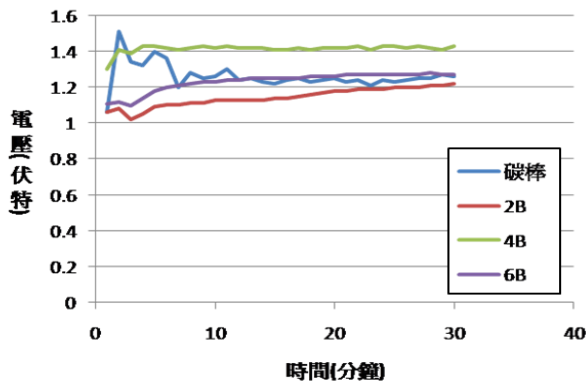
圖(a)滲水的凡士林濾紙  
圖(b)不透水的塗蠟濾紙

#### (二) 探討不同隔膜材料對電壓的影響



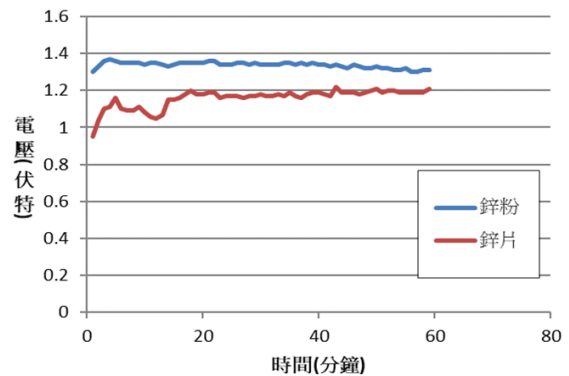
圖二十三、不同種隔膜對電池電壓影響

#### (三) 探討不同碳粉膠帶對電壓影響



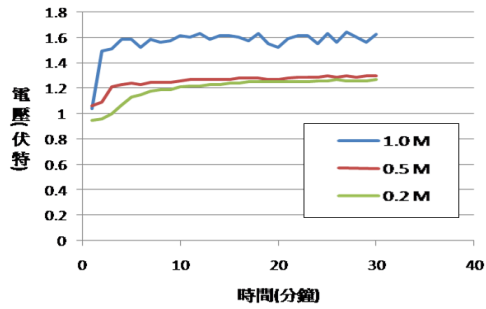
圖二十四、不同碳粉膠帶對電壓的影響

#### (四) 探討不同陽極材質對電壓影響

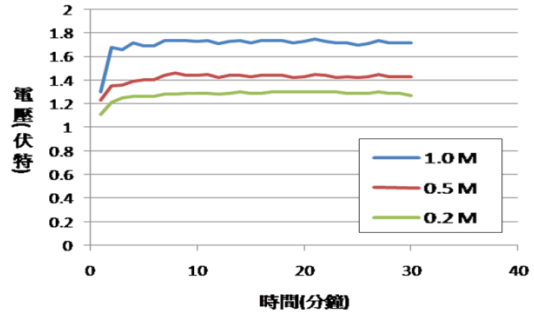


圖二十五、不同陽極材質對電壓影響

(五) 探討不同陰陽極電解液濃度對電壓影響

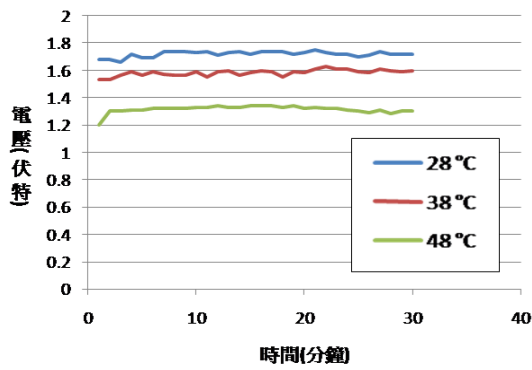


圖二十六、不同濃度的陰極電解液比較



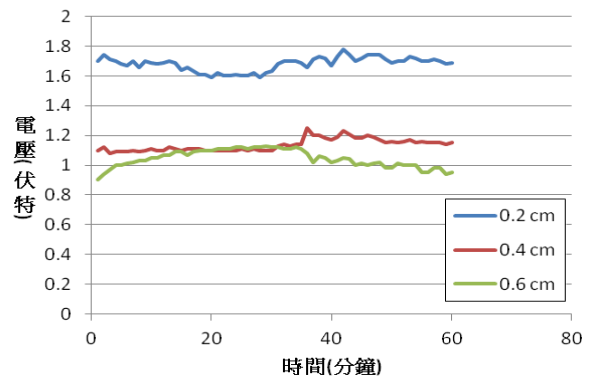
圖二十七、不同濃度的陽極電解液比較

(六) 探討不同溫度對電壓影響



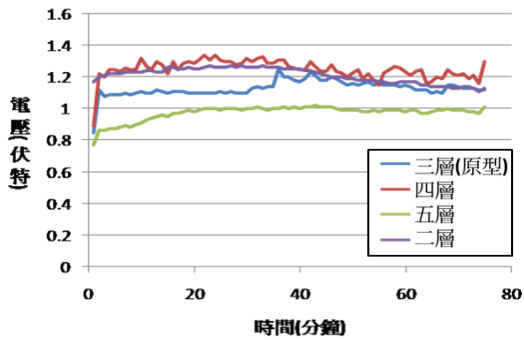
圖二十八、不同溫度下對電池電壓的比較

(七) 探討不同紙流道間距對電壓影響



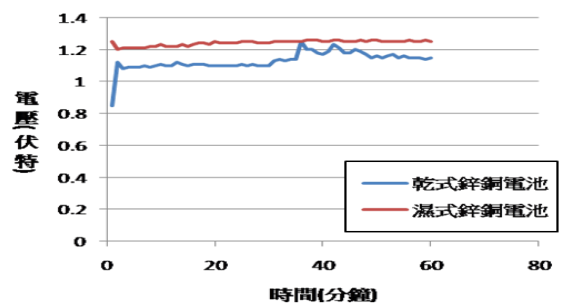
圖二十九、不同紙流道間距的電壓比較

(八) 探討電解液層數對電壓影響



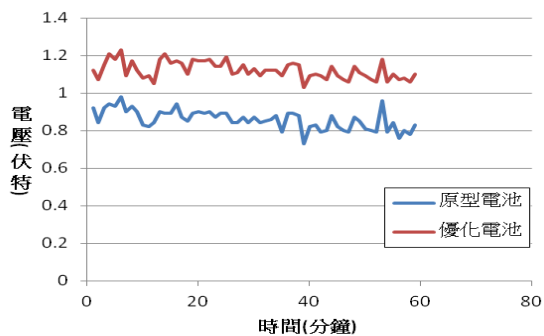
圖三十、增減電解液層電池電壓比較圖

(九) 比較乾式/濕式鋅銅紙電池電壓



圖三十一、濕鋅銅電池電壓圖

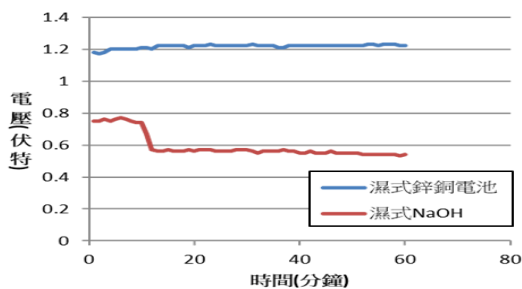
(十) 製作優化鋅銅紙電池與鋅銅原型紙電池比較



圖三十二、優化紙電池與原型紙電池比較

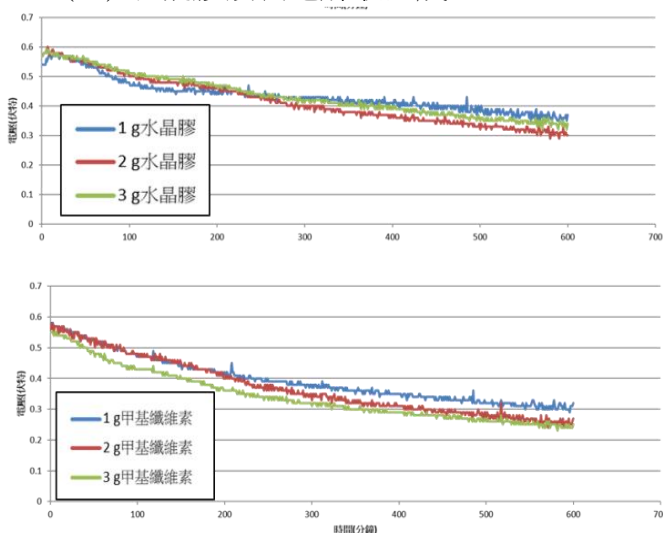
三、鋅紙電池反應環境探討

(一) 電解液的改良對電壓影響



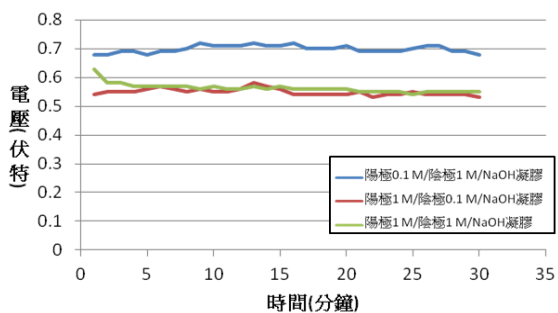
圖三十三、不同電解液之電池電壓

(二) 以凝膠改良電解液組成



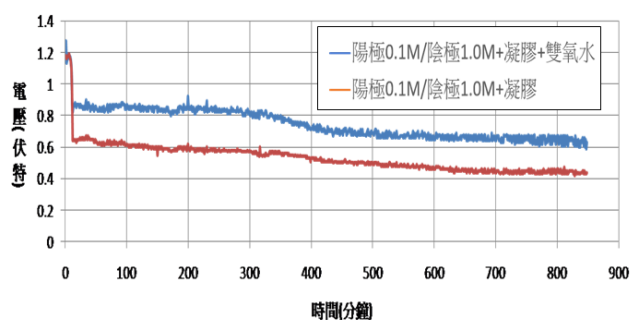
圖三十四、不同凝膠及不同組成比例的實驗結果

(三) 探討陰陽極不同濃度的氫氧化鈉凝膠對電壓影響



圖三十五、陰陽極不同濃度的氫氧化鈉凝膠對電壓的影響

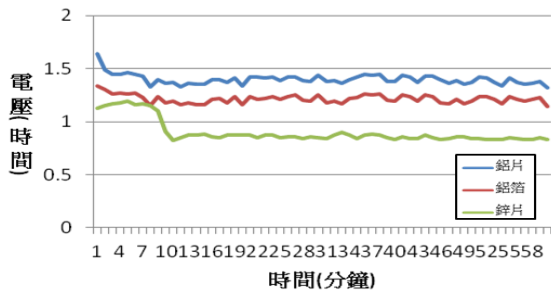
(四) 電池去極化及使用時間測試



圖三十六、電極去極化及使用時間測試

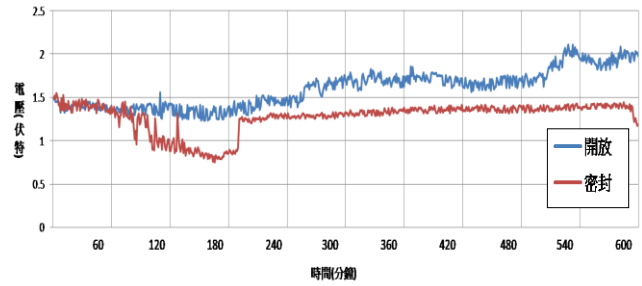
#### 四、一次鋁紙電池反應環境探討

##### (一) 探討不同鋁材為陽極對電壓影響



圖三十七、鋅電池與不同鋁材的一次鋁紙電池對電壓的比較

##### (二) 探討密封處理對電壓影響



圖三十八、開放式與密封式的一次鋁紙電池對電壓影響

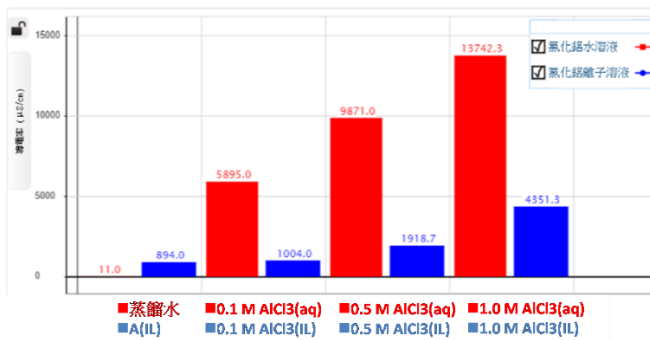
#### 五、二次鋁電池反應環境探討

##### (一) 合成離子液體



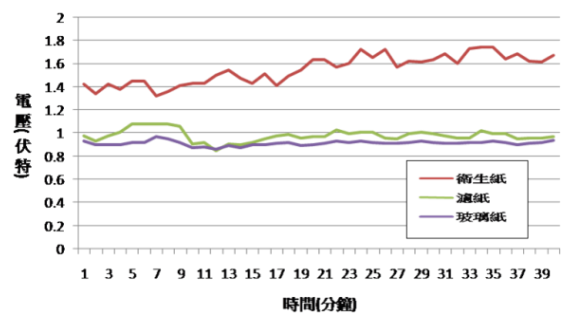
圖三十九、離子液體 A、0.1 M AlCl<sub>3</sub>(IL)、0.5 M AlCl<sub>3</sub>(IL) 及 1.0 M AlCl<sub>3</sub>(IL)

##### (二) 探討離子液體與水溶液的導電度差異



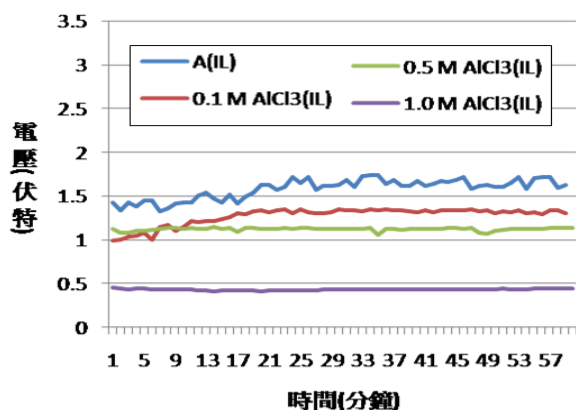
圖四十、不同濃度的氯化鋁水溶液與離子液體之導電度比較

##### (三) 探討不同隔膜材料對電壓影響



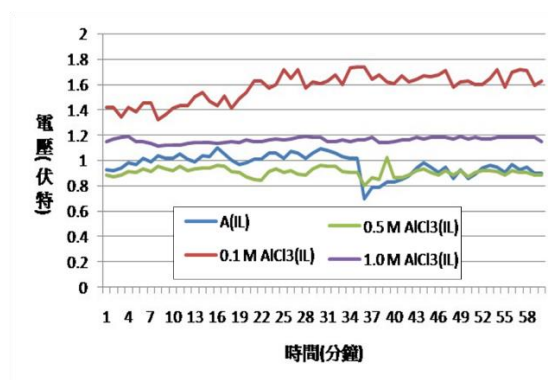
圖四十一、不同隔膜材質對電壓影響

(四) 探討隔膜在不同電解液濃度下對電壓影響



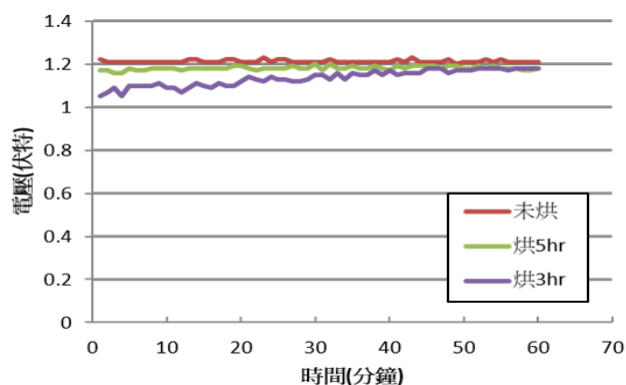
圖四十二、隔膜浸泡在不同電解質濃度對電壓影響

(五) 探討不同陽極電解液濃度對電壓影響



圖四十三、不同陽極電解質濃度對電壓影響

(六) 探討陰極碳材對電壓影響



圖四十四、不同烘烤時間下的碳材與未烘的碳材對電壓影響

(七) 探討充電之電能轉換效率

表二十一、優化二次鋁紙電池第一次充電之鋁片質量變化

充電電壓(V)	充電電流(I)	充電時間(t)	鋁片質量變化( $\Delta W$ )
9.4 V	1.0 mA	6 小時	增重 0.0002 克

## 陸、 討論

### 一、紙電池製作與測量

#### (一) 三用電表與 Arduino 的比較測試(參見表二十)

由表二十得知 Arduino 測得的電壓值高於三用電表 0.12 V，且可以長時間進行測量。因此我們將這差異視為系統誤差並以 Arduino 進行後續的研究。

### 二、鋅銅紙電池反應環境探討

#### (一) 探討防水塗料對紙電池防水效果的影響(參見圖二十二)

本實驗中，觀察兩種塗料在濾紙上呈現的效果，我們發現凡士林融化後的流動性較佳，容易浸濕我們不想防水的區域，且表面有殘留的凡士林，易在拿取時沾附到手上，而染到未防水的區域。相反的是，蠟融於濾紙的情況比凡士林好，其控制性較佳，只要在加熱前將多餘的蠟刮除，就不會有蠟越過未防水區的情況，且表面即使有殘留的蠟，也只是凝固於濾紙表面，不會影響後續組裝電池的操作。

#### (二) 探討不同隔膜材料對電壓的影響 (參見圖二十三)

由圖二十三可知玻璃紙於第 21 分鐘達穩定電壓值 1.24 V，衛生紙於第 11 分鐘達穩定電壓值 1.26 V，濾紙於第 6 分鐘達穩定電壓值 1.19 V。

衛生紙達穩定電壓的速度適中，且最後穩定的電壓值最高。推測原因是衛生紙相較於玻璃紙和濾紙，水在紙面上的擴散面積大，更能幫助離子交流，有助於更快速穩定電壓，使電池反應完全，以達到反應物高使用率。

濾紙達穩定電壓的速度最快，但最後的穩定電壓值卻是最低，推測原因是濾紙的厚度在本實驗使用微量水的情況下，反而會阻礙離子交流，造成有過多離子殘留在厚厚的濾紙層中，因此濾紙雖然能有快速穩定電壓的作用，但是其缺點是反應物使用率不高，導致反應不完全。

但不論玻璃紙有無經吸水處理，達穩定電壓的速度皆較上述兩者慢。此外，吸水後的玻璃紙電池電壓較乾燥的玻璃紙電池高，推測玻璃紙本身吸水過後，藉由纖維孔隙撐大，而改善其滲透速度，使其電壓升高。

我們評比的重點是求得一種隔膜能使電池電壓快速穩定，並使電池反應完全，以達到最高電壓值。吸水後的玻璃紙的確有快速提高電壓的作用，但在實驗後段與未吸水的玻璃紙相差不大，且就快速穩定電壓而言，並沒有提升的效果，仍然不及衛生紙的電壓高且穩定。要能夠快速穩定電壓需要能夠減少阻礙離子交流，因此衛生紙是我們最終選擇的隔膜材料。

### (三) 探討不同碳粉膠帶對電壓影響(參見圖二十四、表二十二)

由圖二十四可知碳棒碳粉、2B 碳粉、4B 碳粉與 6B 碳粉的電壓值依序約為 1.2 V、1.1 V、1.4 V、1.2V。

本實驗中我們發現 4B 碳粉膠帶可提供最平穩且最高電壓，這結果和參考資料<sup>[2]</sup>中 6B 可得最高電壓不同，因此我們決定以使用 Arduino 與三用電表檢測不同碳棒再次進行市售乾電池的電壓測量，結果如表二十二，發現不同碳棒材質對於電壓的影響並不大，其原因推測為碳棒的材質較均勻。而碳粉膠帶的電壓較不一致，可能是因為以人工的方式將膠帶塗上碳粉，而碳粉的均勻程度影響了最終電壓的測量。最後結合碳棒及碳粉的測試，我們選用 4B 作為我們的碳粉材料並進行後續的實驗。

表二十二、使用 Arduino 與三用電表連接不同筆芯檢測乾電池的電壓

	市售 1.5 V 乾電池	2B	4B	6B
三用電表	1.6V	1.588 V	1.585 V	1.589V
Arduino	1.72 V	1.71 V	1.71 V	1.71V

### (四) 探討不同陽極材質對電壓影響(參見圖二十五)

在本實驗中，發現將陽極改為鋅粉可以提高電壓且較快達到穩定電壓，原因可能是鋅粉接觸面積較大，反應速率較快，因此能更快達到穩定電壓，然而電壓整體變化卻是比鋅片更快呈現下降，可能是因為鋅粉和氧氣的接觸面積大，更容易氧化使得電壓比鋅片更快下降，為了可以得到更長效的電池我們決定還是以鋅片做為我們的陽極材質並進行後續的實驗。

### (五) 探討不同陰陽極電解液濃度對電壓影響(參見圖二十六、二十七)

本實驗觀察到電解液濃度與電壓大小呈正相關，原因為附著在電路板上的離子多寡會造成穩定電壓的變動，我們的實驗是以人工方式用吹風機吹乾的在紙流道的電解質溶液，並於實驗時滴水使電解質能在使用時才溶於水中以確保非使用期間不會有離子交換，這使得我們無法準確得知反應時的離子濃度，因此不適合使用能斯特方程式來進行討論。在本討論中，我們就以原始滴進濾紙中的溶液濃度作探討。

根據實驗結果，可觀察到陰陽兩極電解液原始濃度越大，測得的電壓值皆越大，並測得陰陽電解液的濃度皆在 1.0 M 時可以達到最大穩定電壓，推測的原因可能是在我們的電池中只有少許的水，離子濃度越高，離子在兩極移動交換的比率就越高，所以造成在陰陽極濃度都較高的情況下電壓比較高。

#### (六) 探討不同溫度對電壓影響(參見圖二十八)

實驗結果如圖二十八所示，28 °C、38 °C、48 °C 時的穩定電壓依序約為 1.4 V、1.22 V、0.86 V，整體來說電壓隨著溫度上升，值越來越小。因為電池放電為放熱反應，高溫的狀態下不利於放電，本結果符合熱力學高溫不利放熱反應的預測趨勢。因在 28 °C 時電壓的表現效果較佳，因此我們決定以 28 °C 作為後續研究的環境溫度。

#### (七) 探討不同紙流道間距對電壓影響(參見圖二十九)

我們發現當紙流道間距為 0.2 cm 時可以得到最高的電壓，推測是因為紙流道間距縮短使得內電阻降低，進而讓電池能夠釋放出更高的電壓。

#### (八) 探討電解液層數對電壓影響(參見圖三十)

發現加一層與減一層的電壓 (約 1.2 V) 均比正常版(約 0.98 V) 高，推測原因為電壓的增減與離子的移動性有關，又水滴能滲透的層數會影響電池達穩定電壓的時間，我們的電極棒均置於倒數兩層間，多加兩層電解液層後，水反而較不易達到電極棒導致電壓下降，穩定的也較慢。考慮到環保的因素，我們決定選擇減一層電解液的電池作為我們的最佳電池。

#### (九) 比較乾式/濕式鋅銅紙電池電壓(參見圖三十一)

實驗結果如圖三十一所示，濕式鋅銅紙電池的電壓和乾式鋅銅紙電池電壓相比，除了更快達到穩定電壓外，在相對長時間(一小時)的測試下可以得到較乾式紙鋅銅電池穩定的電壓，推測濕式紙電池的離子流動性較高，導電度更佳。

#### (十) 製作優化鋅銅紙電池與原型鋅銅紙電池比較(參見圖三十二)

我們將上述實驗的最佳結果彙整後，做出一個優化鋅銅紙電池，其電壓約為 1.1 V，比原型鋅銅紙電池的電壓還高，且其電壓穩定性也和原型鋅銅紙電池不相上下。

### 三、鋅紙電池反應環境探討

#### (一) 電解液的改良對電壓影響(參見圖三十三)

由圖三十三得知使用  $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$  電解液的電壓較濕式鋅銅紙電池(優化鋅銅紙電池)還要低，推測原因是使用氫氧化鈉做為電解質時，陰極產生氫氣了極化現象，因此造成電壓不穩定反應式為：
$$\text{Zn} + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_4^{2-} + \text{H}_2$$

考慮一般市售電池會使用澱粉將電解質及其他填充物作成糊狀物，我們決定使用凝膠與加入去極劑來改良，因此我們將先尋找凝膠的最佳比例，再加入去極劑。



## (二) 以凝膠改良電解液組成(參見圖三十四)

在以水晶膠為凝膠的實驗中，電壓大小並非隨著水晶膠增加而電壓下降，而是以 2 克的組成比例電壓最低，推測原因可能是在配製水晶膠凝膠的過程中，水晶膠溶解地不夠均勻，用針筒塗上紙流道後不能讓凝膠均勻地分布。而甲基纖維素則呈現一定的規律性(量越多則電壓越低)，且以 1 克甲基纖維素最高，推測甲基纖維素形成凝膠後無結塊的情形發生，故決定以 50 mL 1.0 M NaOH<sub>(aq)</sub>加入 1 克甲基纖維素作為後續凝膠的比例。

觀看整體的電壓變化趨勢後，我們發現不管是哪種凝膠組成的電池，電壓均會一直下降，我們認為這是因為極化現象造成的，為了解決極化現象我們將在後續實驗中再次進行電解液的改良及測試。

## (三) 探討陰陽極不同濃度的氫氧化鈉凝膠對電壓影響(參見圖三十五)

本實驗中發現當陽極為 0.1 M 氫氧化鈉及陰極為 1.0 M 氫氧化鈉時，可以得到更高的電壓。我們發現陽極濃度小而陰極濃度大的電池電壓最高，且由於使用凝膠作為電解液，故可以符合能斯特方程式的預測，我們將選用陽極 0.1 M、陰極 1.0 M 的氫氧化鈉凝膠紙電池作為後續去極化與長時間使用測試之電池。

## (四) 電池去極化及長時間使用測試(參見圖三十六)

本實驗中，加入雙氧水的氫氧化鈉凝膠紙電池電壓較大，約為 0.8 V，比未加入雙氧水的紙電池電壓(0.6 V)高，且在長時間使用後仍可以維持相對穩定的電壓，證實雙氧水確實能夠幫助解決極化現象，並達到更佳電壓的效果。

# 四、一次鋁紙電池反應環境探討

## (一) 探討不同鋁材為陽極對電壓影響(參見圖三十七)

本實驗中，不同鋁材的一次鋁紙電池的電壓皆高於鋅紙電池，其原因為鋁的氧化電位較鋅高，而鋁片作陽極的電池電壓(約 1.77 V)較鋁箔作陽極的電池電壓(約 1.39 V)高，推測原因為鋁箔不易去除表面的氧化鋁，且鋁箔中的含鋁量較低，故放電時，受表面的氧化鋁與其他雜質之影響，而使鋁箔作陽極的電池之電壓值較低。因此我們採用鋁片做為鋁紙電池之陽極材料。

## (二) 探討密封處理對電壓影響(參見圖三十八)

本實驗中，密封式的電池放電前三小時的電壓逐漸下降，但在第三個小時後開始上升，且電壓成呈現平穩狀態。而開放式的電池電壓先平穩後逐步上升。

從實驗結果進一步探討一次鋁紙電池的反應機制，由結果得知密封式的電池前三小時電壓逐漸下降，三小時後電壓上升至 1.4 V 且趨於平穩。推測密封式電池於

前三小時氧氣有參與反應(A 反應)，隨著密封空間中的氧氣減少，電壓逐漸下降；而第三小時後，其穩定電壓 1.4 V 較符合 B 反應，也就是鋁片改與氫氧化鈉反應生成氫氣。而開放式電池電壓因空氣中的氧氣持續反應，使得電壓逐漸上升至 2 V。故推測在未密封時，兩極反應物為鋁與氧氣(反應式  $4Al + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3$ )，但電池密封後，兩極反應物則為鋁與氫氧化鈉(反應式  $2Al + 2OH^- + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_4^- + 3H_2$ )。

A 反應 (氧氣參與反應)(參考資料 <sup>[4]</sup> )	B 反應 (氧氣不參與反應)
陽極： $Al + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3 + 3e^- E^{\circ} = 2.31 V$	陽極： $Al + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_4^- + 3e^- E^{\circ} = 2.33 V$
陰極： $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- E^{\circ} = 0.4 V$	陰極： $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- E^{\circ} = -0.83 V$
全： $4Al + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3 E_{cell}^{\circ} = 2.71 V$	全： $2Al + 2OH^- + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_4^- + 3H_2 E_{cell}^{\circ} = 1.5 V$

## 五、二次鋁紙電池反應環境探討

### (一) 合成離子液體(參見圖三十九)

離子液體 A 呈透明無色，但隨氯化鋁濃度增加，其外觀逐漸成白色混濁。

### (二) 探討離子液體與水溶液的導電度差異(參見圖四十)

本實驗中，水溶液與離子液體之導電度皆隨著氯化鋁的濃度增加而上升，而離子液體的導電度皆較水溶液差，導電度的變化程度小於水溶液。離子液體的黏滯性隨著氯化鋁濃度越高，其黏滯性越大。但由於我們欲製作可充電式的電池，若以水溶液作電解液，則在充電時會進行電解水的反應，而非放電之逆反應，使該電池不可充電。因此使用離子液體作電解液，雖然導電度不比水溶液好，但可以藉由加入適量的氯化鋁以控制離子液體的黏滯性，並增加導電度。

### (三) 探討不同隔膜材料對電壓影響(參見圖四十一、表二十三)

本實驗中衛生紙作隔膜的二次鋁電池電壓較大(約 1.6 V)，其餘兩者隔膜之二次鋁電池電壓較低且相近(約 0.95 V)，我們推測電池電壓與離子液體 A 在不同隔膜的毛細作用有關。於是我們滴入一滴離子液體 A 於不同隔膜材質上，並測試其毛細作用(表二十三)，結果顯示毛細作用：衛生紙>濾紙>玻璃紙，和圖四十一的電壓趨勢相同，這結果符合我們的推論。

表二十三、離子液體 A 於不同隔膜材質上的毛細作用

滴入時間 \ 隔膜材質	剛滴入	滴入1分鐘	滴入9分鐘	滴入13分鐘
衛生紙	直徑 0.7 (cm)	迅速擴散至整張衛生紙		
濾紙	直徑 0.7 (cm)	直徑 0.8 (cm)	直徑 1.2 (cm)	擴散至整張濾紙
玻璃紙	直徑 0.7 (cm)	直徑 0.7 (cm)	直徑 0.75 (cm)	直徑 0.75 (cm)

註：上述實驗為各滴一滴 A<sub>(IL)</sub>至不同隔膜中心，並測量 A<sub>(IL)</sub>往外流動的直徑與時間

(四) 探討隔膜在不同電解液濃度下對電壓影響(參見圖四十二、表二十四)

本實驗中，浸泡在離子液體 A 中隔膜的電池電壓較大(約 2.10 V)，其餘電壓分別為 0.1 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ (約 1.34 V)、0.5 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ (約 1.13 V)和 1.0 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ (約 0.43 V)，上述電壓隨氯化鋁濃度增加而下降。我們推測  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ 濃度越高，其黏滯性越大，在隔膜上的毛細作用越差(參考表二十四)，使得離子移動速率降低，電解液的導電率差，導致電壓越低，故我們選用離子液體 A 作為浸泡隔膜的電解質濃度進行後續實驗。

表二十四、不同離子液體在衛生紙上的毛細作用

濃度	A(IL)	0.1M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$	0.5M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$	1M $\text{AlCl}_3(\text{IL})$
時間(秒)	60	70	90	100

註：上述實驗為各滴一滴離子液體至衛生紙中心，然後測量離子液體至衛生紙邊緣所需時間

(五) 探討不同陽極電解液濃度對電壓影響(參見圖四十三)

本實驗中，以陽極電解質濃度為 0.1 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ 的電池電壓較大(約 1.59 V)，其餘電壓分別為 1.0 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ (約 1.16 V)、離子液體 A(約 0.97 V)和 0.5 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ (約 0.91 V)，電壓下降的原因推測有二：

1. 陽極電解液含有高濃度的  $\text{Al}^{3+}$ ，會使得陽極氧化後的  $\text{Al}^{3+}$ 移動被阻礙而造成電壓下降，如 1.0 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ 的電壓較低。
2. 陽極電解液中沒有  $\text{Al}^{3+}$ ，則因離子液體導電度下降，造成電壓下降，如離子液體 A 的電壓較低。

故我們選用 0.1 M  $\text{AlCl}_3(\text{IL})$ 為陽極電解質濃度進行後續實驗。

(六) 探討陰極碳材對電壓影響(參見圖四十四)

根據參考文獻<sup>[3]</sup>，碳材若具有孔洞性結構，可增加電池電壓，於是本實驗將 4B 碳粉分別在 270 °C 烘烤 3 與 5 小時，再製成電池，發現電壓並無顯著差異。推測溫度不夠高，無法製得類似活性碳的孔洞結構。

(七) 探討充電之電能轉換效率(參見表二十一)

將數據帶入電能轉換效率公式，
$$\frac{\frac{2.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-3}} \times 3}{96500} \times 100\% = 9.93\%$$

充電之電能轉換效率不佳，推測有兩個原因：

1. 根據參考資料<sup>[5]</sup>，離子液體 A 的工作電位窗為 5.0 V，而本實驗充電電壓為 9.4 V，表示充電時電壓過大，可能造成以下兩項影響：
  - (1) 造成離子液體 A 可能進行氧化還原反應，使得陰極反應並非完全由鋁離子還原成鋁金屬，導致充電之電能轉換效率不佳。
  - (2) 鋁離子還原速度過快，導致鋁金屬為瞬時成核，無法還原成晶格較完整的鋁金屬，也可能導致轉換效率變差。
2. 由於本實驗並非在完全隔絕氧氣以及水氣的狀態下進行，推測還原成鋁金屬時，電極表面可能產生氧化鋁，使金屬鋁較不易附著，而在下一次放電時也並非是結晶良好的鋁金屬，故轉換效率不如預期的好。

針對以上兩原因，可分別藉由調整電流或電壓進行進行充電，並改良實驗環境，或製造密封度更好的電池，以避免氧氣或水氣的影響，進而提升電池的效能。

## 柒、結論

- 一、在鋅銅紙電池環境測試中，我們得到了當使用蠟作為防水層，4B 碳粉、鋅片、濃度皆為 1.0 M 陰陽極電解液、紙流道距離為 0.2 cm、未乾燥電解液的組成可以得到較佳的結果，同時由增減電解液層的實驗得知，減少層數除了可以增加電壓，還可令電池更輕薄。
- 二、在鋅紙電池環境測試中，我們延續鋅銅紙電池的構造，但將原本含重金屬電解液改為易取得且較環保的氫氧化鈉，但放電時產生極化現象，因此我們在配製電解液凝膠時多加入雙氧水以解決極化現象，結果發現電壓有明顯改善。
- 三、在一次性鋁紙電池環境測試中，我們延續鋅紙電池的構造，但將陽極更改為鋁片，電壓有顯著上升(由 0.8 V 上升至 1.77 V)。並藉由密封性實驗結果得知，密封的電池其電壓先降後升，藉由此結果探討該電池的反應機制，推測在未密封時，兩極反應物為鋁與氧氣(反應式為  $4Al + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3$ )，但電池密封後，兩極反應物則為鋁與氫氧化鈉(反應式為  $2Al + 2OH^- + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_4^- + 3H_2$ )。
- 四、在二次性鋁紙電池環境測試中，我們延續一次性鋁紙電池的構造，為了避免充電時發生電解水的反應，故將水溶液電解液改為離子液體。另外，將陽極電極為鋁片、陰極電極為未烘之 4B 碳粉膠帶、陽極電解液為 0.1 M  $AlCl_3(l)$ 、陰極電解液為 1.0 M  $AlCl_3(l)$ 、隔膜電解液為離子液體 A，隔膜材質為衛生紙組成二次優化鋁紙電池，並測得二次優化紙鋁電池的電壓大於 1.59 V，但在充電後，測其充電之電能轉換效率約為 9.93%，轉換效率不如預期的好。

## 捌、未來展望

本研究的初衷是運用高中的知識打造一個輕薄且環保的紙電池，我們從紙電池的結構著手，將相關文獻與自我發想的探討因素一一試驗，才彙整出適合紙電池反應的環境。我們將鋅銅紙電池逐步邁向鋅紙電池，雖然我們的研究結果不夠精深，但討論範圍廣闊且實驗記錄詳實，過程中我們結合了重複文獻的作法與日常生活中帶給我們的啟發，一次次改良實驗步驟，也試著去結合生活科技類的 **Arduino**，並隨著我們的實驗需求發想有趣的裝置(例如密封裝置、電池密封處理等)。而在準備全國科展的一個多月以來，我們再次嘗試將鋅紙電池製成一次鋁紙電池與二次鋁紙電池，起初的發想並不是為了補足研究，而是熱衷於發掘電化學，秉持著我們的理念走別人沒有走過的路。即便最終的結果不盡我們所想，在這短暫的時間裡，我們仍然收穫到實驗屏障待給我們的歷練，期望有朝一日我們能夠拿下鋁電池這門高深的學問。

當研究二次鋁紙電池時，看了許多關於鋁電池的文獻後，發覺有許多可探討的變因，而因時間有限，於是我們只做一些基本的探討，日後希望再針對以下兩點做深入的探討：

- 一、在探討陰極碳材的測試中，測得的二次性鋁紙電池電壓並無隨著烘烤時間增長而有明顯改變，未來可改變碳材材料(例如石墨粉、活性碳...等)、加熱溫度與加熱時間，並使用電子顯微鏡觀測碳粉的結構與電池電壓之關係。
- 二、由於製得二次鋁紙電池的充電之電能轉換效率不佳，希望日後能完成以下兩點：
  1. 本實驗使用低成本生物可分解的離子液體(氯化膽鹼與尿素之莫耳數比為 1:2)，並非為目前二次鋁電池之主流電解液，日後將嘗試參考文獻<sup>[6]</sup>中提到的離子液體 **EMIC**。
  2. 改良實驗環境，或者製造密封度更好的電池，以避免氧氣或水氣的影響。

## 玖、參考資料及其他

一、第五十七屆中小學科展—利用摺紙藝術製作發電裝置：

<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/57/pdf/030207.pdf>

二、第五十三屆中小學科展—電池漆與電池紙

<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/53/pdf/030215.pdf>

三、2018年台灣國際科學展覽會優勝作品專輯—使用低成本生物可分解離子液體電解質之鋁空氣二次電池

四、鄭永銘（2015年04月08日）·淺談鋁電池·取自

<https://www.masters.tw/22721/%E6%B7%BA%E8%AB%87%E9%8B%81%E9%9B%BB%E6%B1%A0>

五、第56屆國立暨縣(市)公私立高級中等學校第三區科學展覽會—綠世界-離子液體的探討與應用

六、楊昌中與江建志等人（2018年12月05日）·鋁電池發展現況及前景·取自

<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=35617>

## 【評語】 050214

藉由優化鋅銅紙電池反應環境，得到一個較環保且能長時間使用的鋅紙電池。實驗紮實豐富，成果豐碩，在作品解說上，充分發揮團隊精神，一氣呵成，可圈可點。應可在介紹時清楚闡述與 57 屆作品的異同，改進的重點，以及達到的成效。另外，可進一步利用電子顯微鏡的微觀觀察，作為進一步改進材料在電解質包覆與可逆性的成效具體指標。

# 摘要

本研究從鋅銅紙電池著手，藉由探討不同反應環境以提升電壓，得到一個優化鋅銅紙電池。為了減少重金屬污染與延緩水分流失，我們將電解液改為氫氧化鈉凝膠，並在陰極電解液中加入過氧化氫緩解極化現象，得到一個較環保且使用壽命較長的鋅紙電池。而鋅紙電池的電壓值較低，藉由將陽極改為鋁片提升電位，並利用密封測試探討一次鋁紙電池的反應機制。最後將電解液改為離子液體，試著將一次鋁紙電池改良成二次鋁紙電池，並探討不同反應環境來提升電壓，得到一個較佳的二次鋁紙電池，但最終測量電能轉換效率發現效果不佳，故在二次鋁紙電池上仍有待繼續研究，以提升其效能。

## 壹、研究動機

科技必須不斷進步以滿足人類的需求，我們在享受科技帶來的便利之際，需要考慮這些方便是否破壞環境，進而造成人類的不便。在這進退兩難的局面下，我們如何兼顧科技提升與維護環境，達到滿足需求與環境負荷量的平衡點，於是我們上網找相關電池的研究，其中第58屆全國科展作品「利用摺紙藝術製作發電裝置」<sup>[1]</sup>是以紙作為電池基底，藉由簡易的折疊步驟將材料組合在一起，透過特殊的紙流道設計與紙的毛細現象，形成一款輕薄且可攜性高的紙電池。雖然上述研究提供了非常好的方法來減輕重量，本質上仍與我們所追求的可充電電池有些不同，另外因鋅銅紙電池有以下缺點：

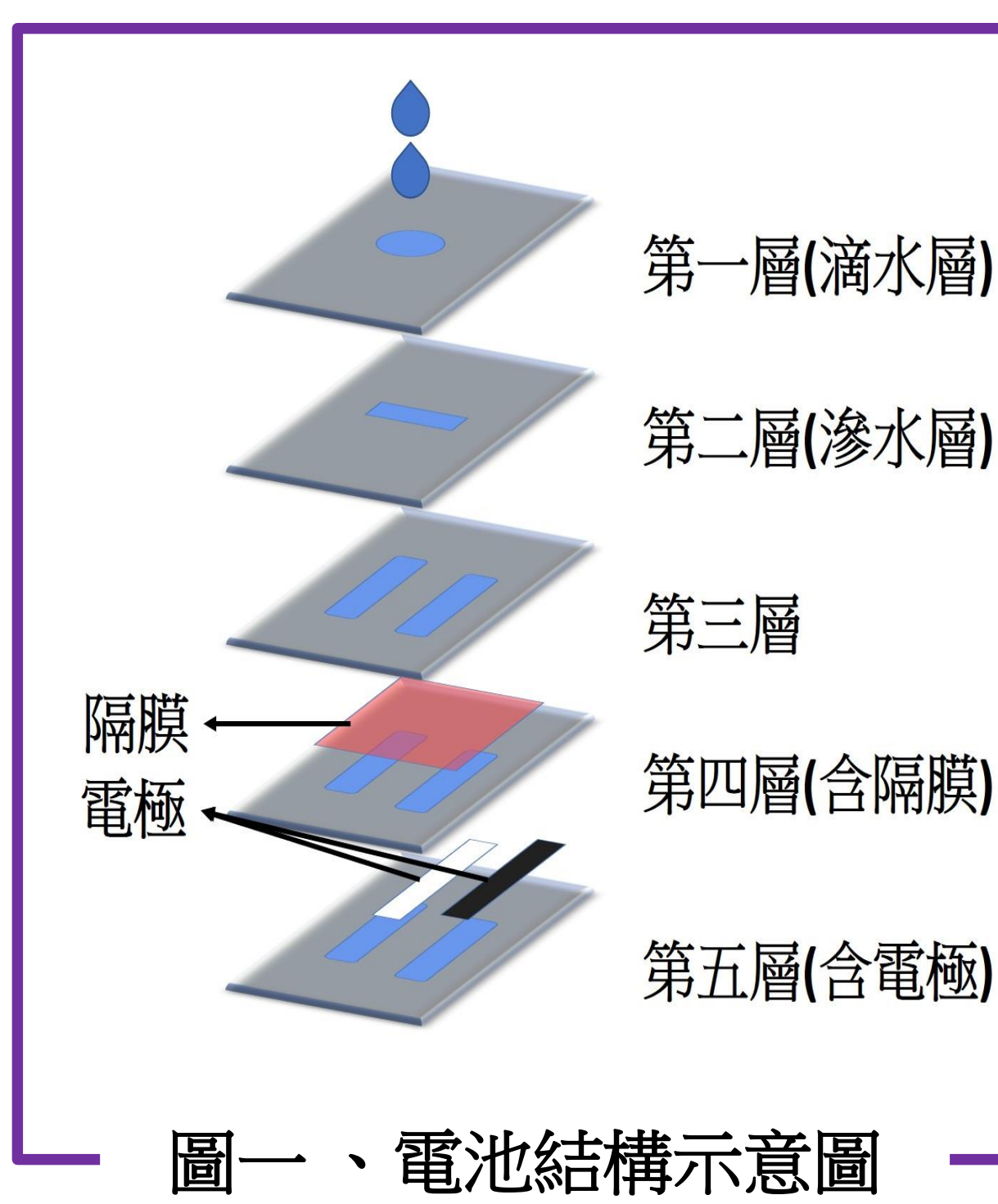
- 一. 鋅銅電池為一次性電池，電量耗盡後無法再充電使用，只能丟棄。
- 二. 鋅銅電池的電解液具有重金屬，易造成環境汙染。

於是我們嘗試以高中現有的知識來改良第58屆全國科展作品中的紙電池，逐步將鋅銅紙電池改良成鋅紙電池與一次性鋁紙電池，並藉由參考二次鋁電池的發電原理，進一步改良一次鋁紙電池，希望能發展出一款質輕且具環保性的可攜帶式二次鋁紙電池。

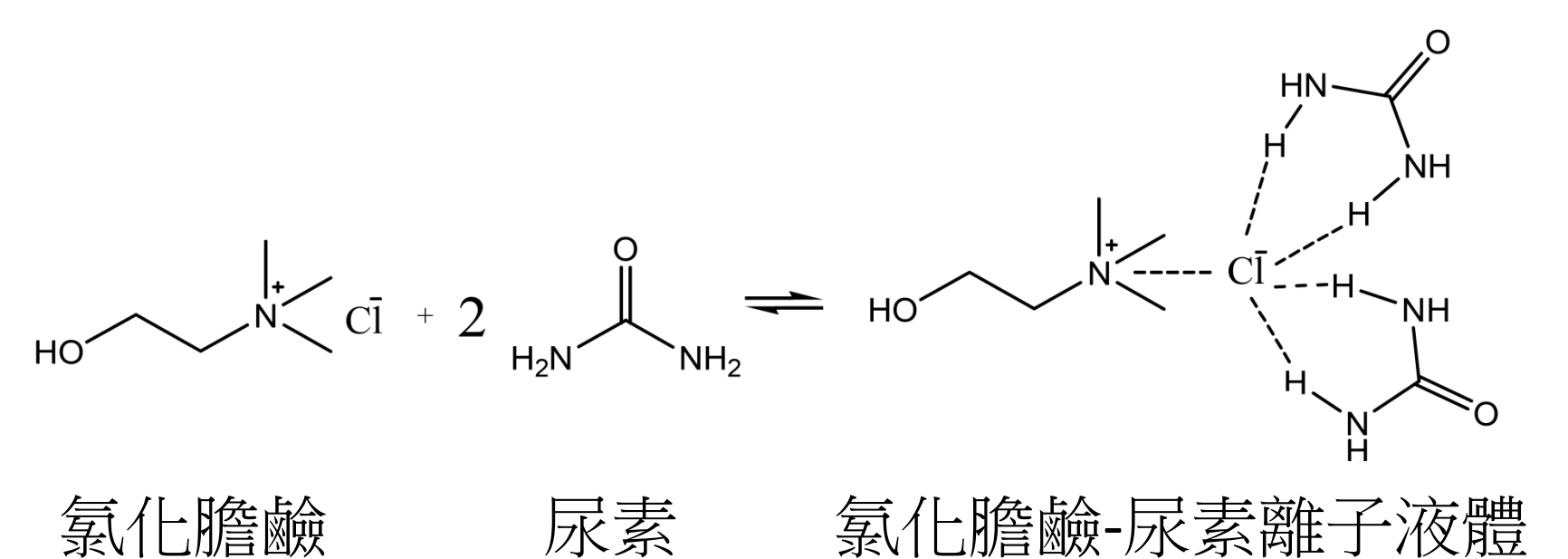
## 貳、研究目的

- 一、紙電池製作與測量
- 二、探討鋅銅紙電池反應環境
- 三、探討鋅紙電池反應環境
- 四、探討一次鋁電池反應環境
- 五、探討二次鋁電池反應環境
- 六、製作輕薄環保二次鋁電池

## 參、研究原理



圖一、電池結構示意圖



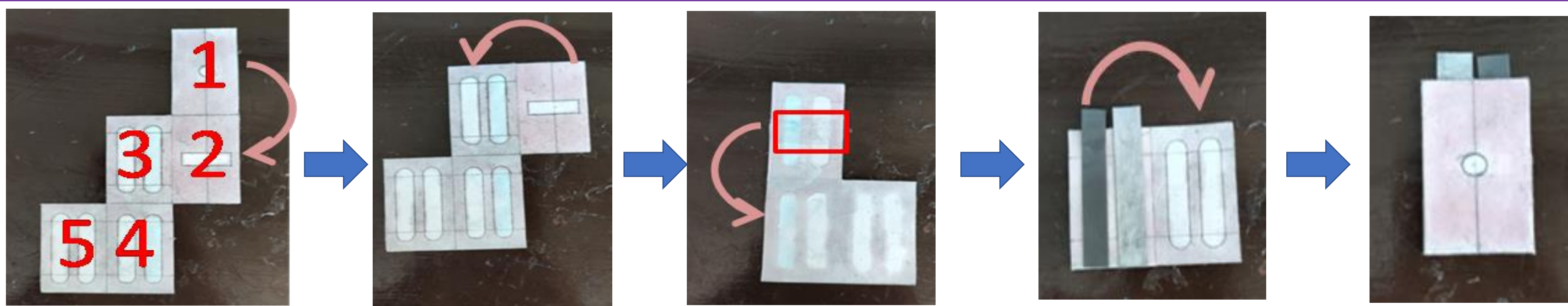
圖二、合成氯化膽鹼-尿素離子液體(簡稱為A<sub>(IL)</sub>)之反應式

$$\frac{\text{Al增加mol} \times 3}{\text{電源供給電量(Q)}} \times 100\% = \frac{\frac{\Delta W_{\text{(克)}}}{27} \times 3}{\frac{I_{\text{(安培)}} \times t_{\text{(秒)}}}{96500}}} \times 100\%$$

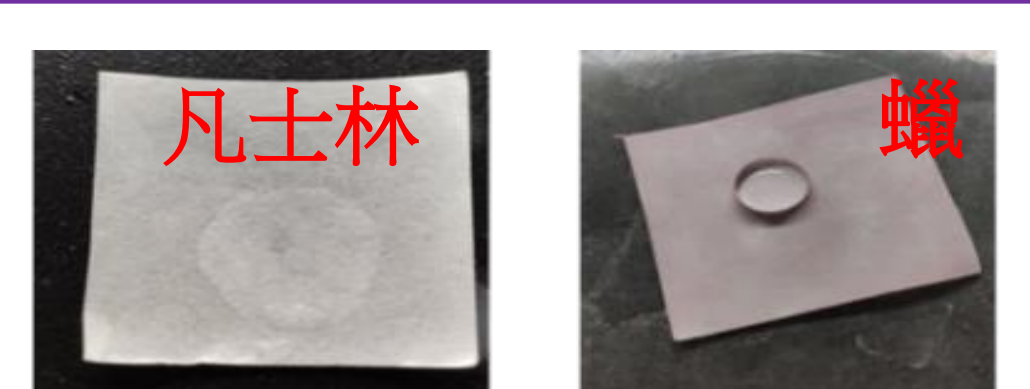
圖三、電能轉化效率公式

## 肆、研究過程及方法

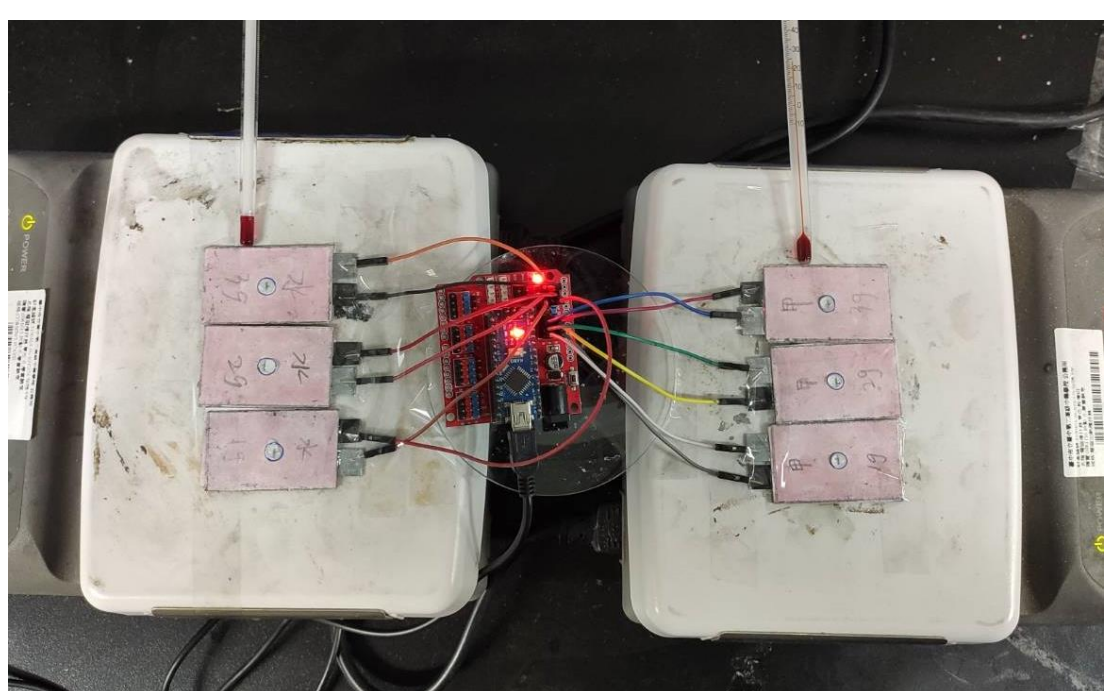
### 一、紙電池製作與測量



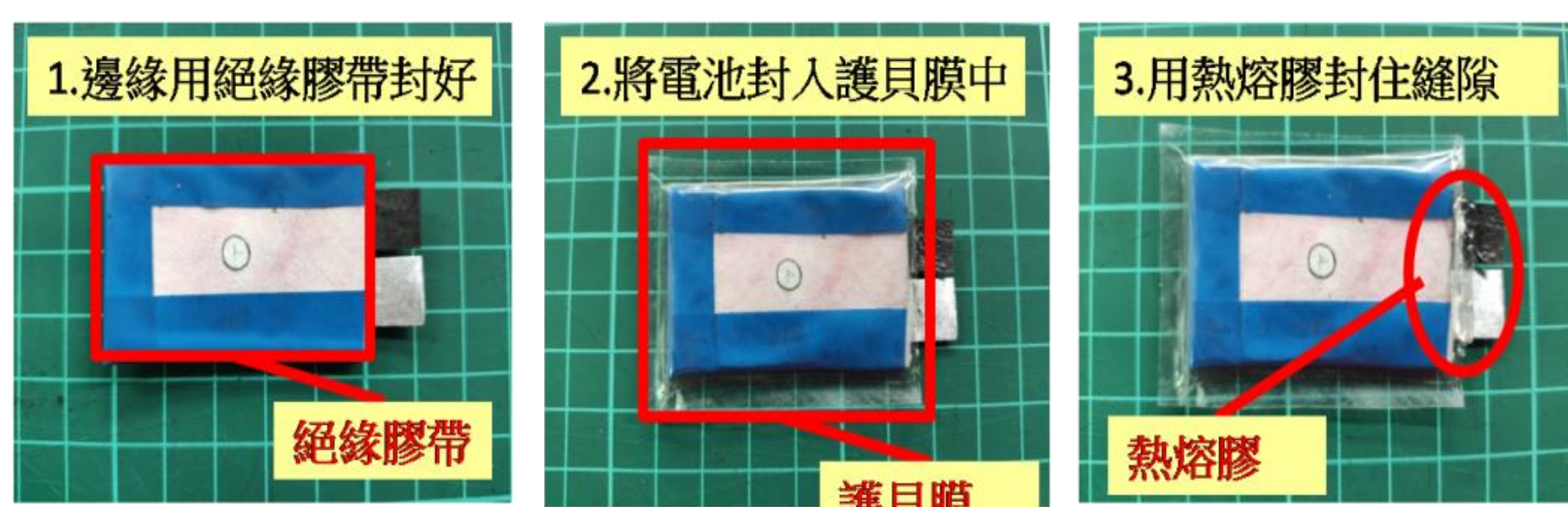
圖四、紙電池摺疊方法



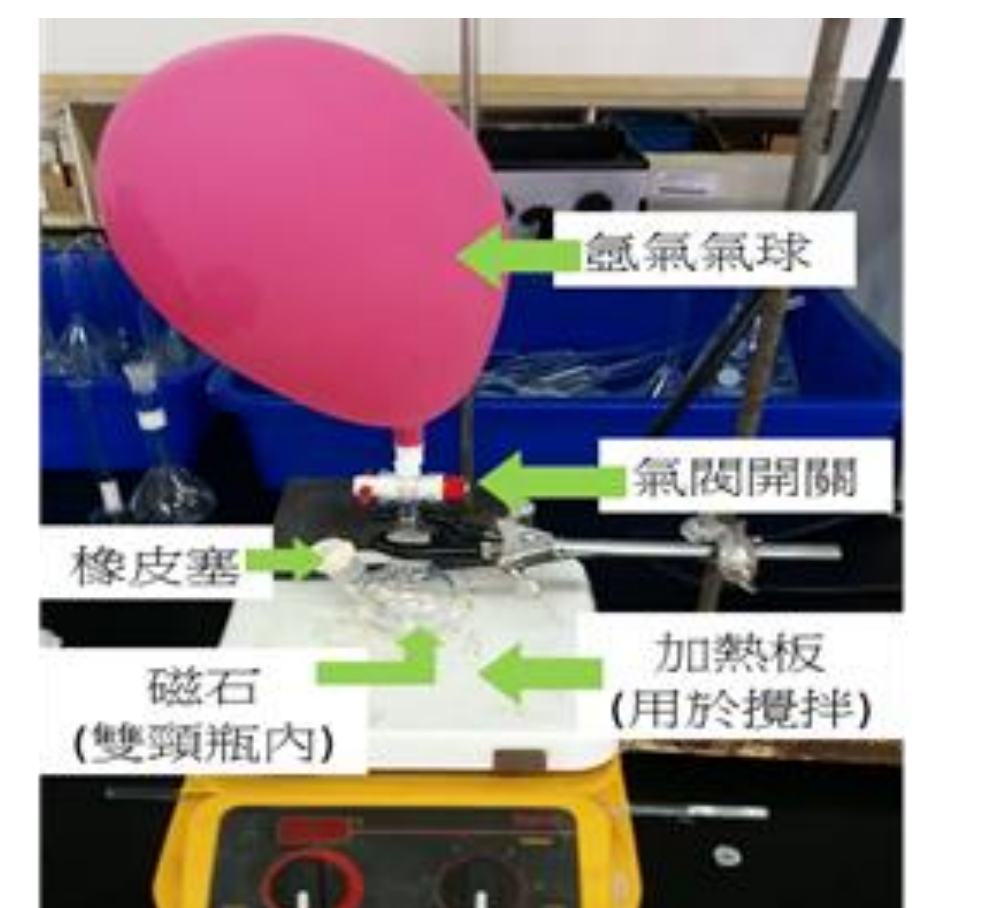
圖五、防水塗層比較圖



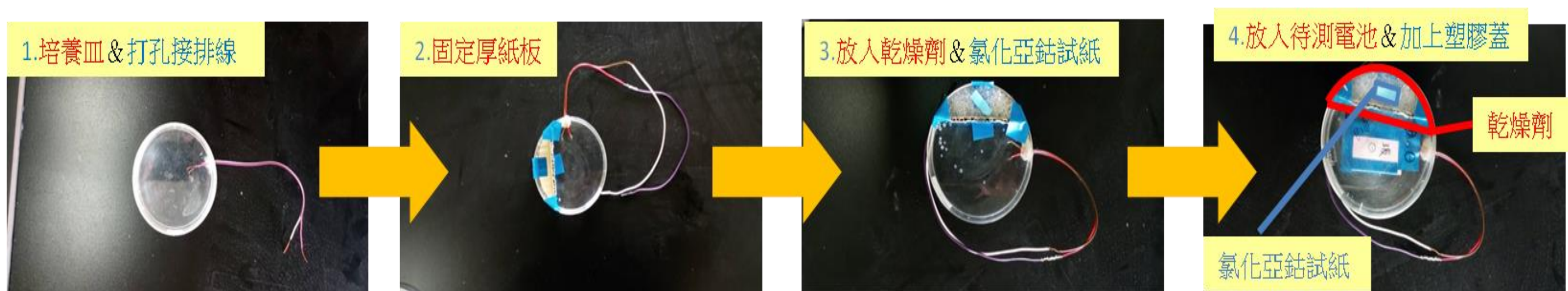
圖六、Arduino測量紙電池電壓



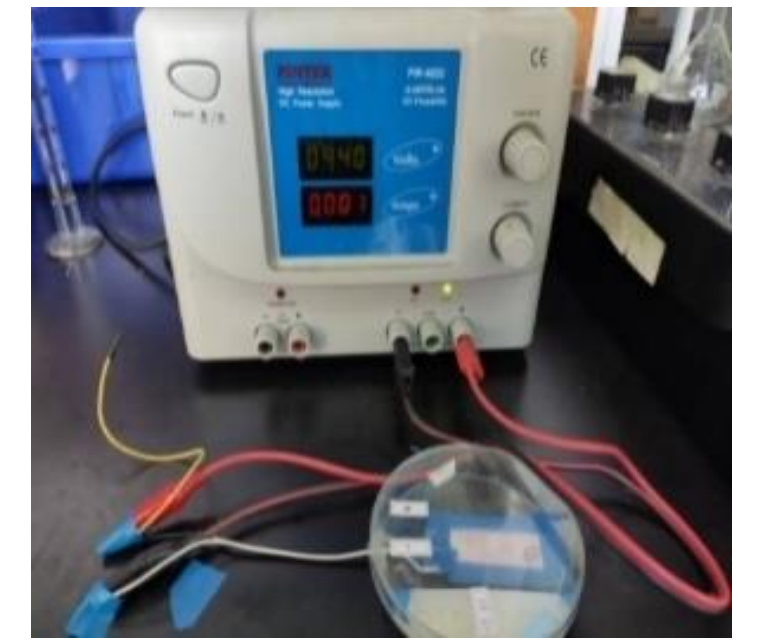
圖七、密封性電池模型圖



圖八、合成離子液體裝置圖



圖九、製作乾燥裝置培養皿之流程圖



圖十、二次鋁電池充電裝置

### 二、紙電池變因探討

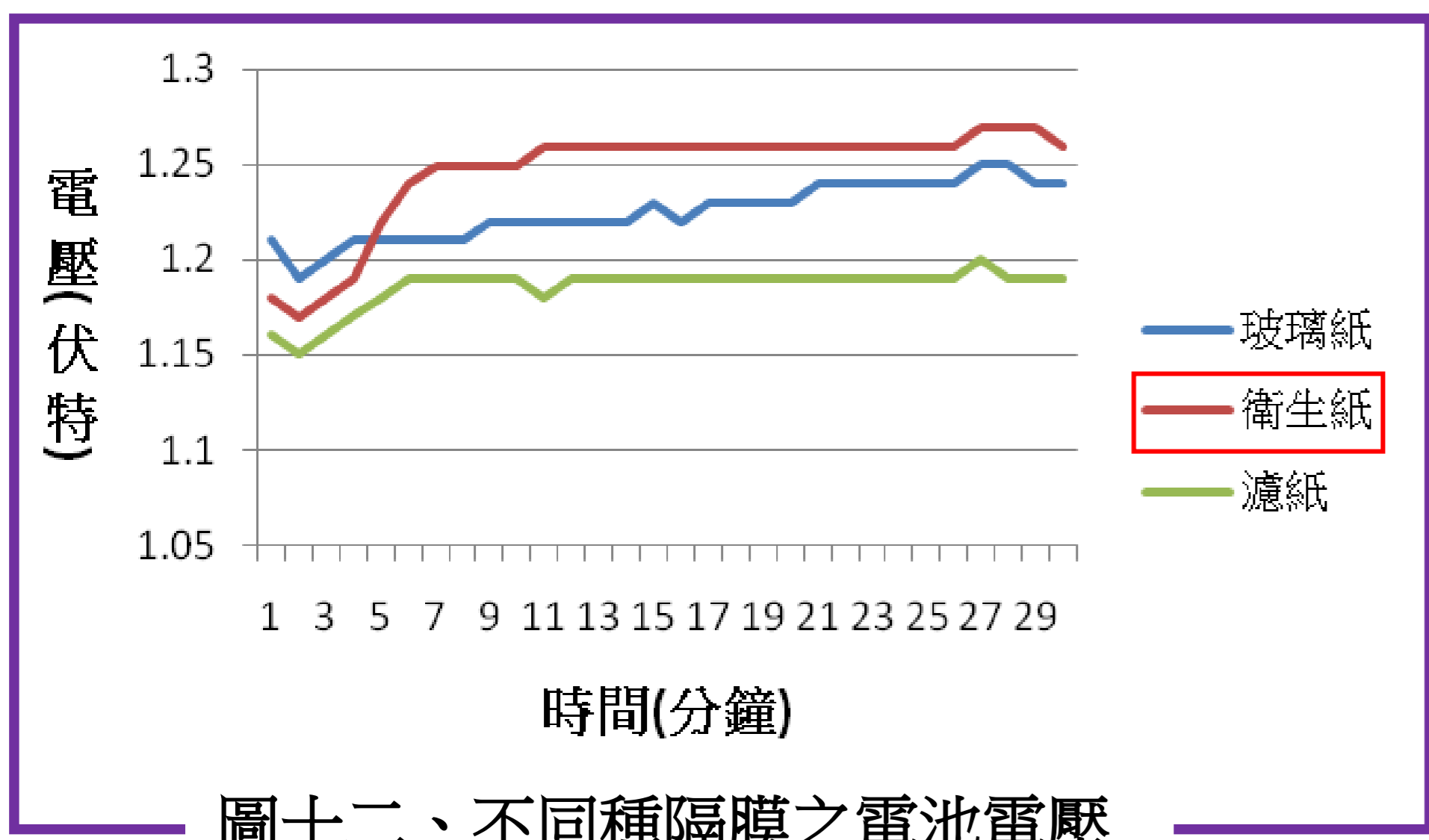
	電極材質	電解質溶液	紙流道間距	隔膜材質	隔膜之離子液體	溫度	電解液層數	乾式/濕式	密封/開放
鋅銅紙電池	●	●	●	●		●	●	●	
鋅紙電池		●							
一次鋁紙電池	●								●
二次鋁紙電池	●	●		●	●				

圖十一、紙電池變因探討圖

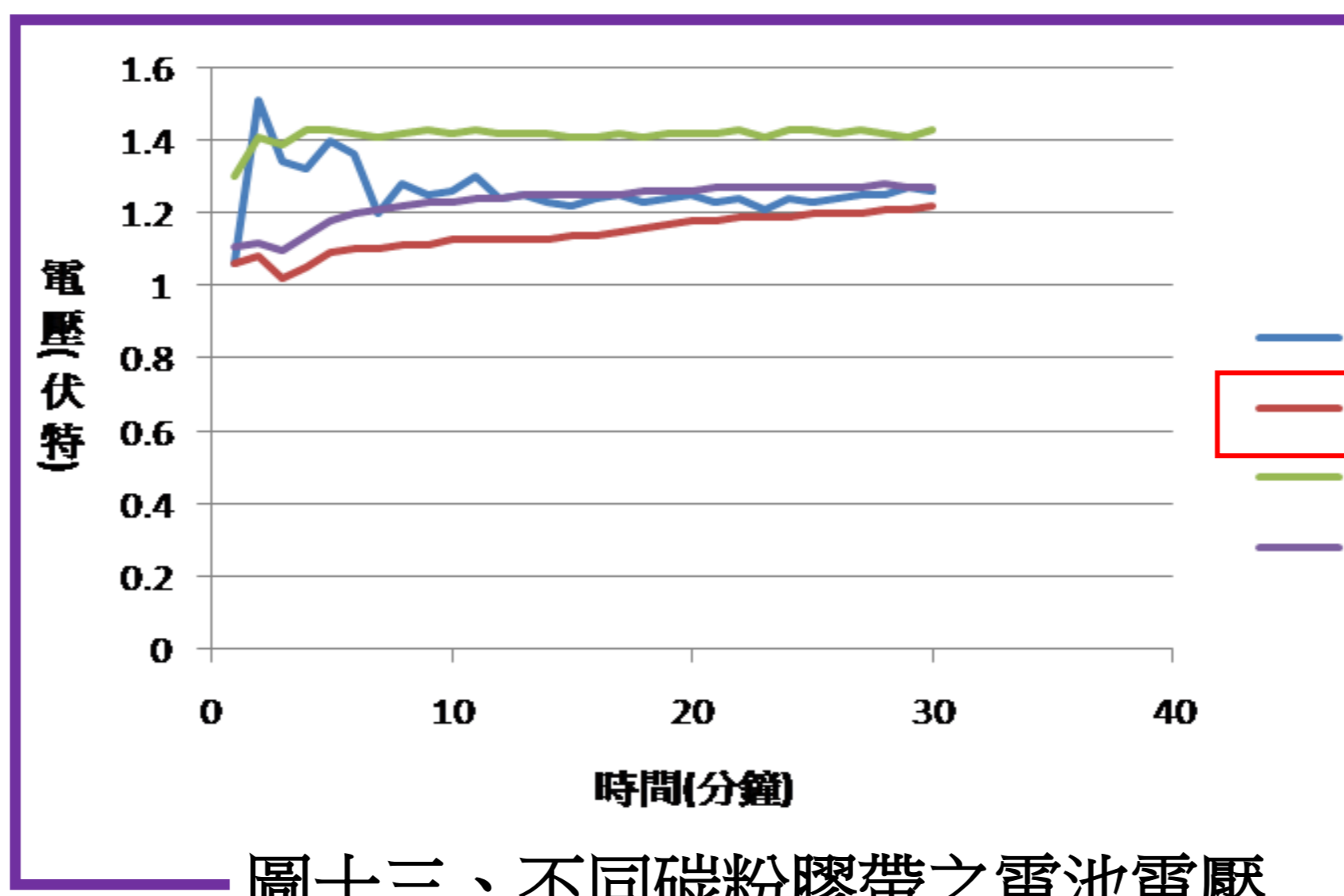


# 伍、研究結果與討論

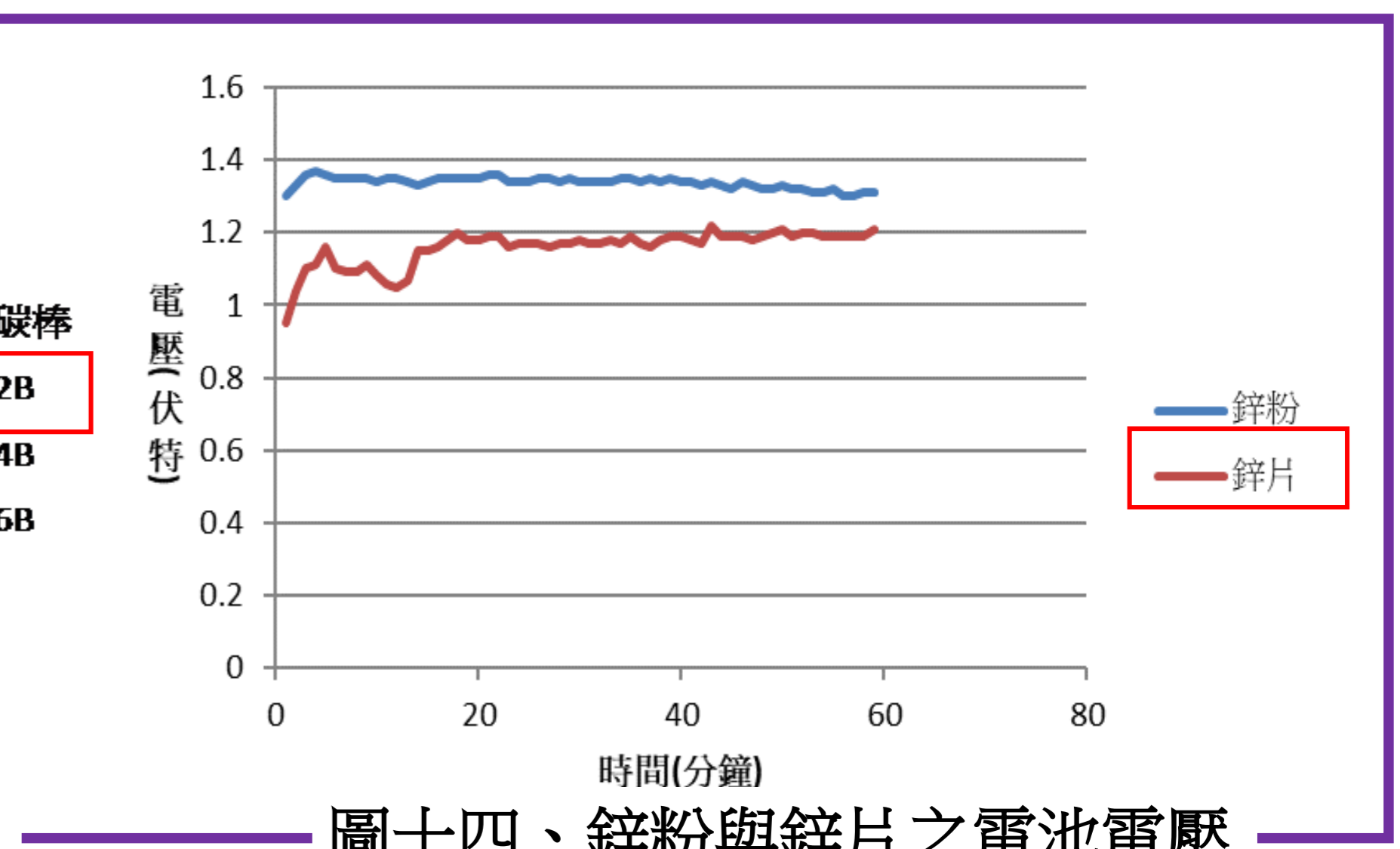
## 一、探討鋅銅紙電池反應環境



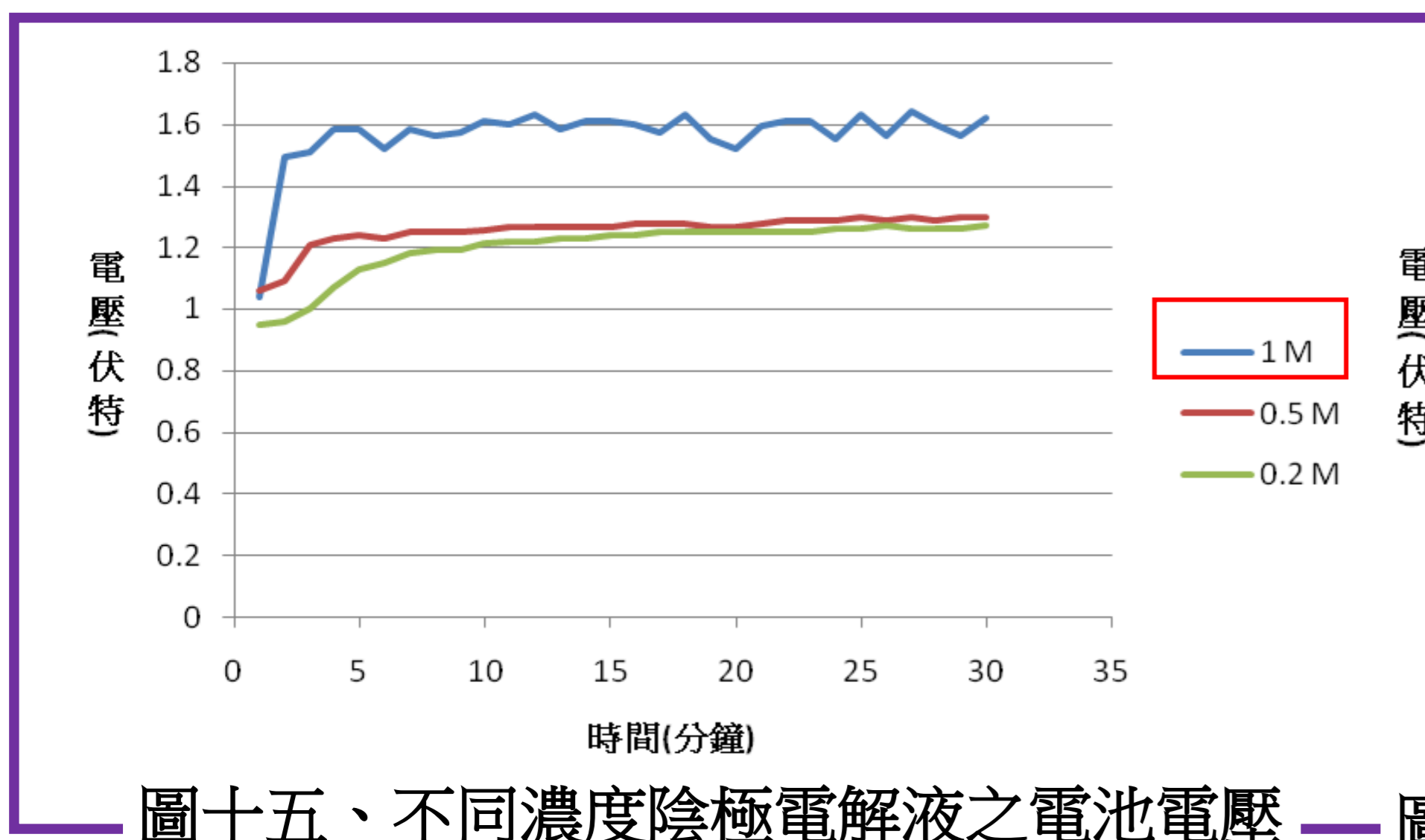
圖十二、不同種隔膜之電池電壓



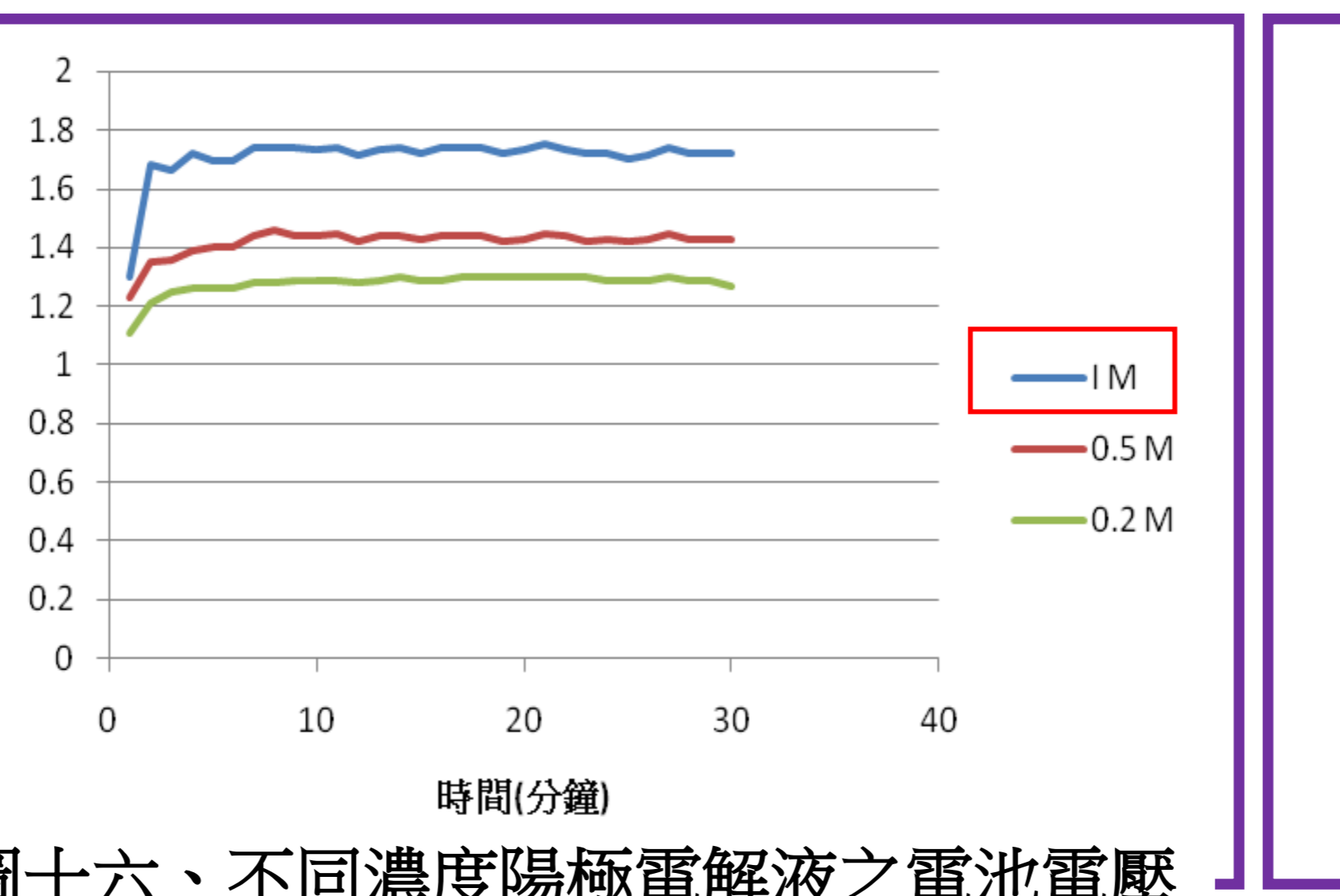
圖十三、不同碳粉膠帶之電池電壓



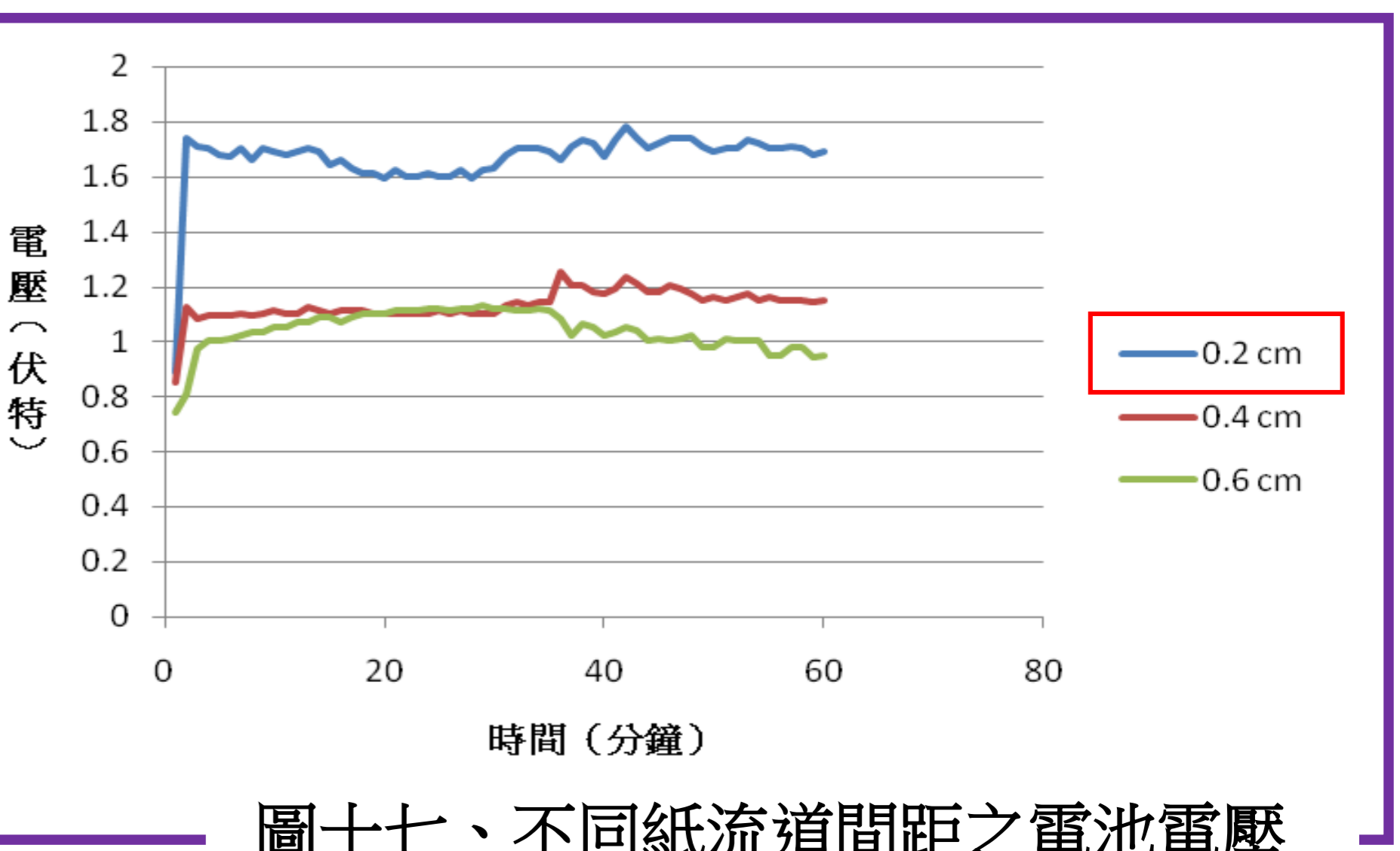
圖十四、鋅粉與鋅片之電池電壓



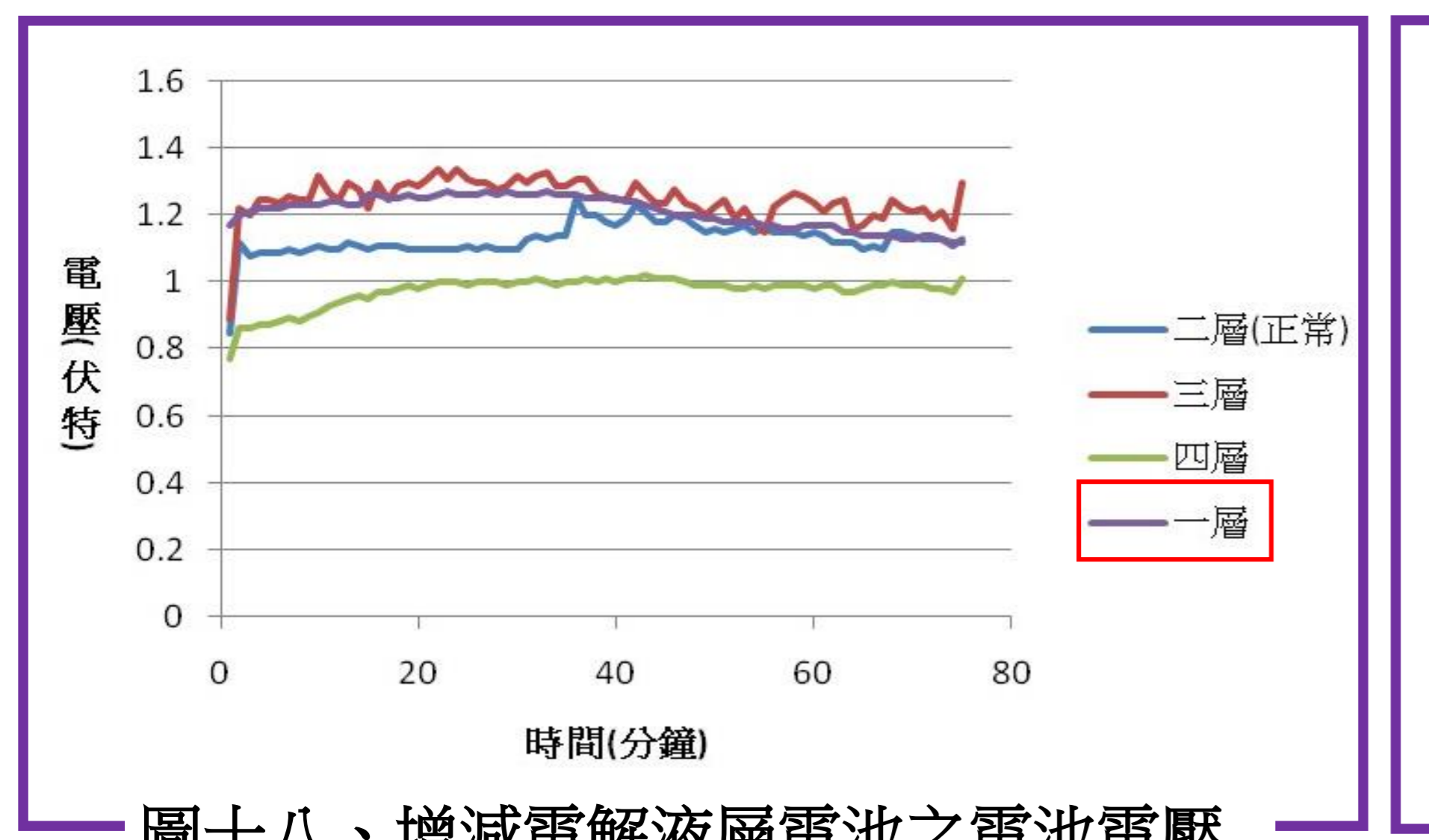
圖十五、不同濃度陰極電解液之電池電壓



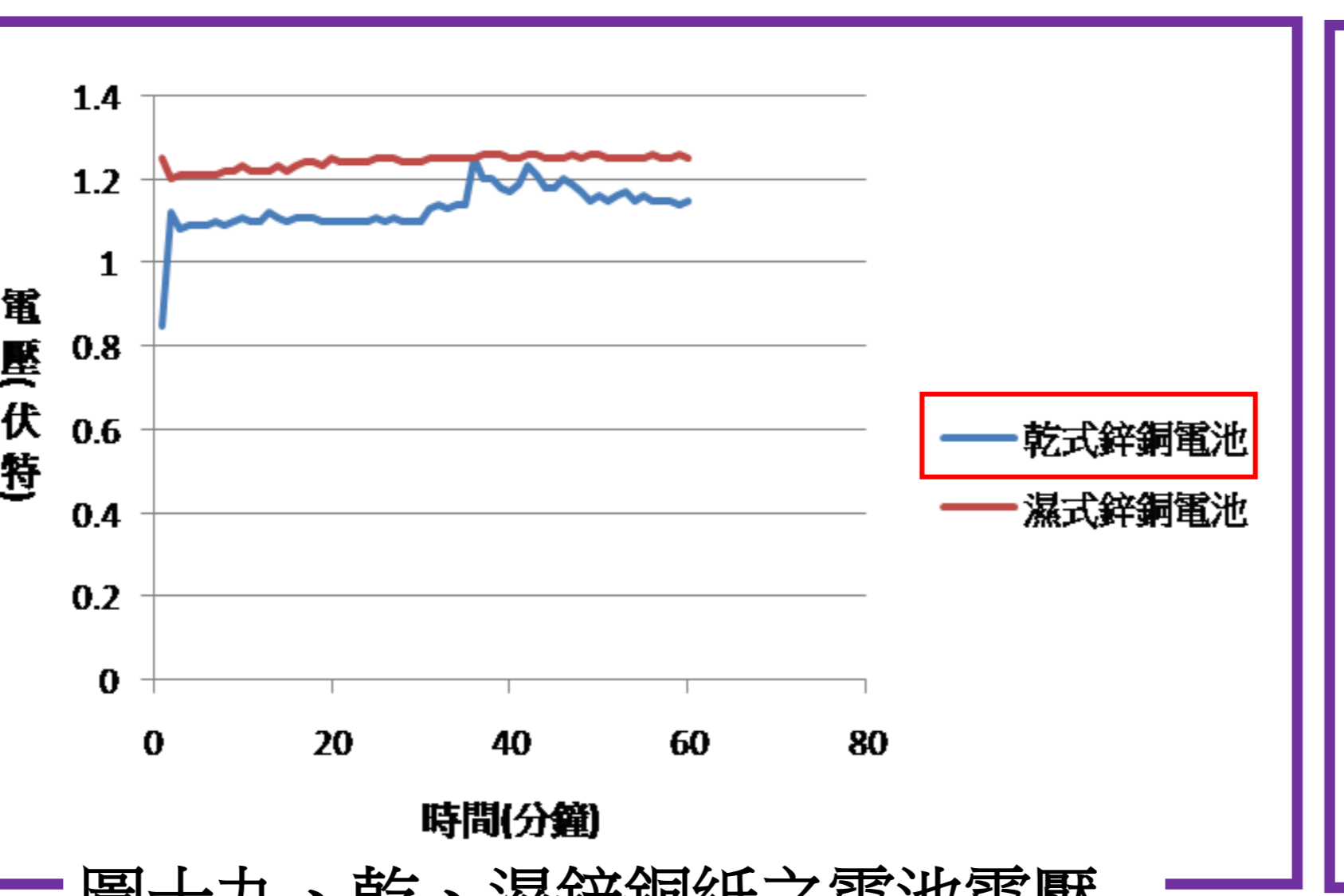
圖十六、不同濃度陽極電解液之電池電壓



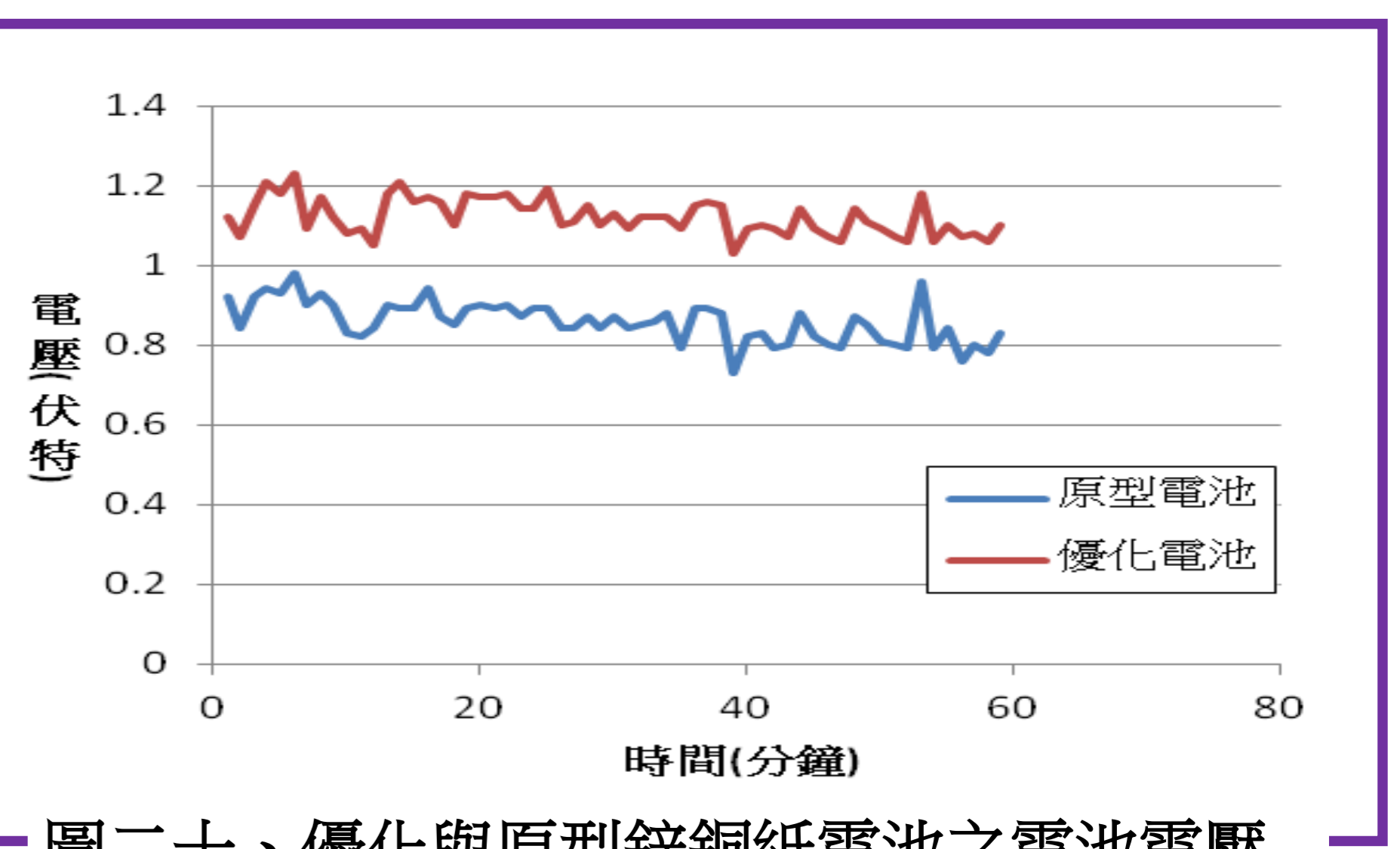
圖十七、不同紙流道間距之電池電壓



圖十八、增減電解液層電池之電池電壓



圖十九、乾、濕鋅銅紙之電池電壓

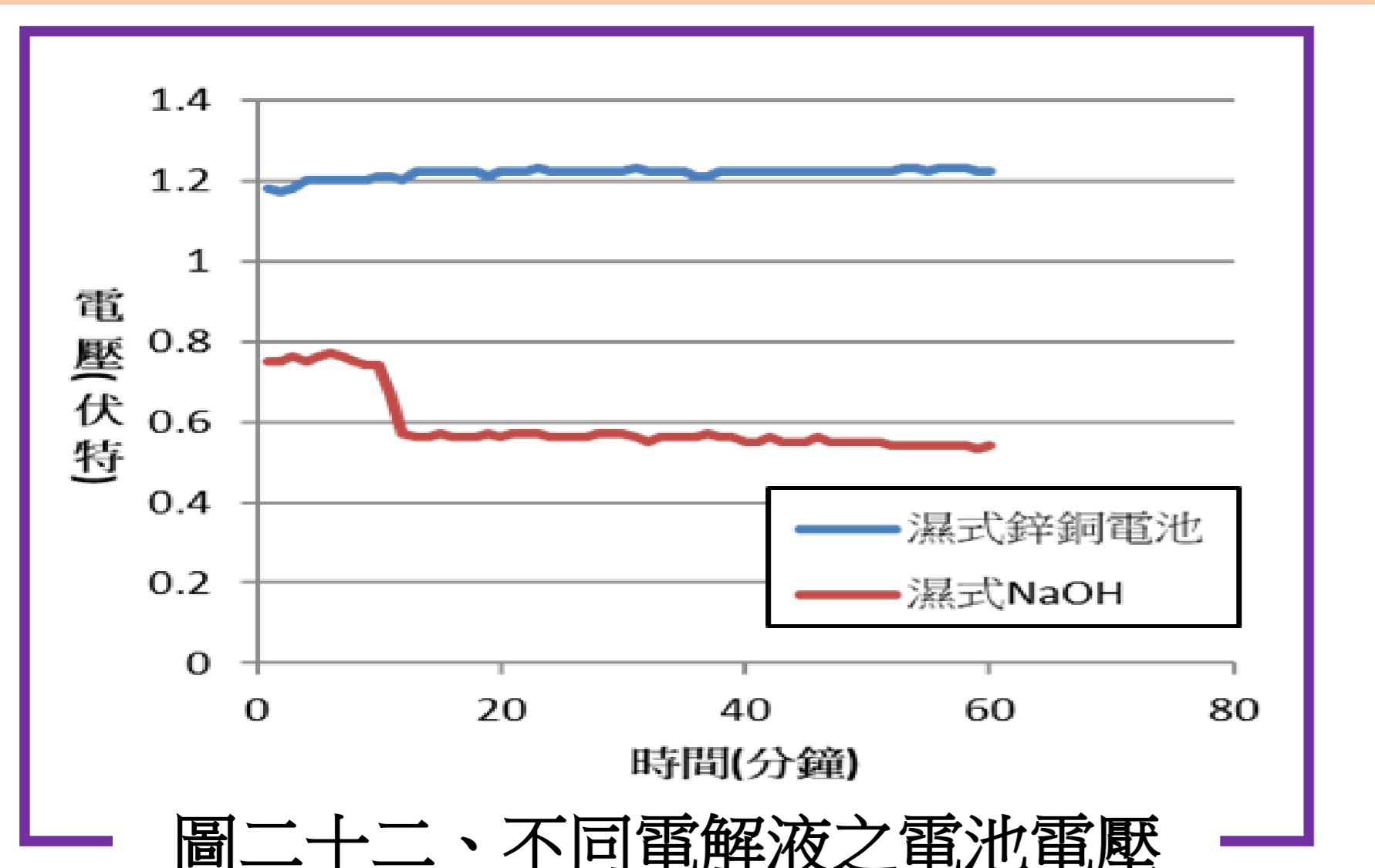


圖二十、優化與原型鋅銅紙電池之電池電壓

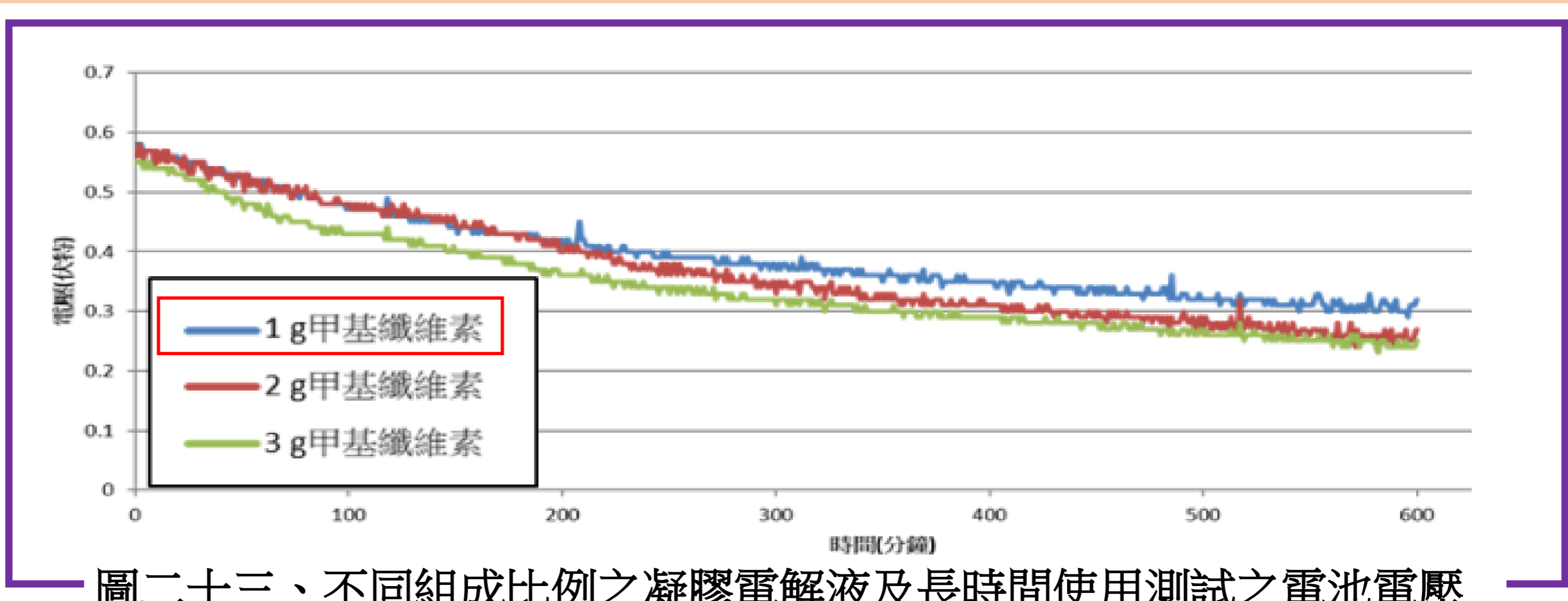
	電極	電解液溶液	紙流道間距	隔膜材質	防水層	電解液層數	乾式/濕式
陽極	鋅片	1.0M ZnSO <sub>4</sub> (aq)	0.2 公分 (0.4 公分)	衛生紙	蠟	二層 (三層)	濕式 (乾式)
陰極	4B 碳粉	1.0M CuSO <sub>4</sub> (aq)					

圖二十一、優化鋅銅與原型鋅銅紙電池組成比較 (註：黑框處為兩者電池結構之相異處，紅色字為原型)

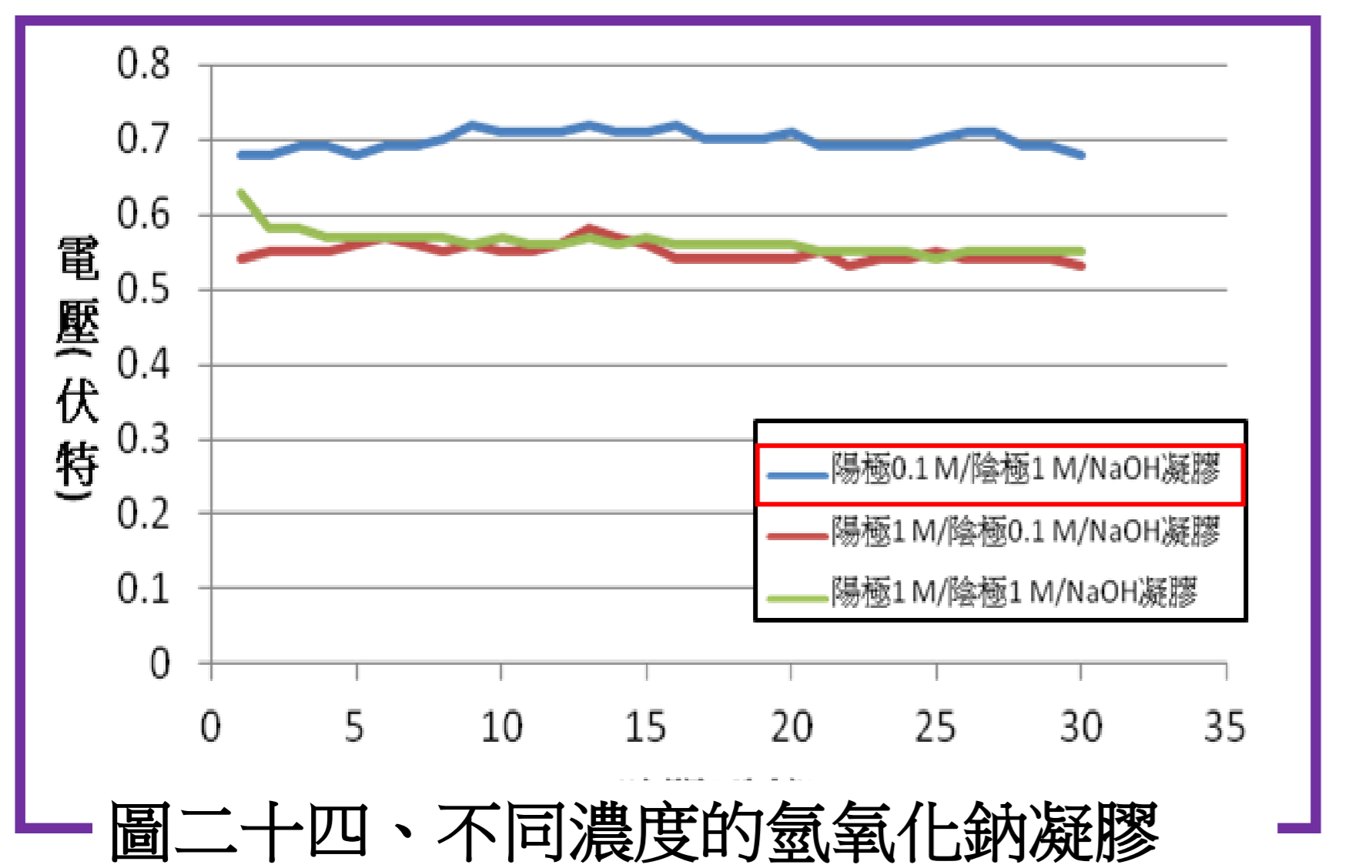
## 二、探討鋅紙電池反應環境



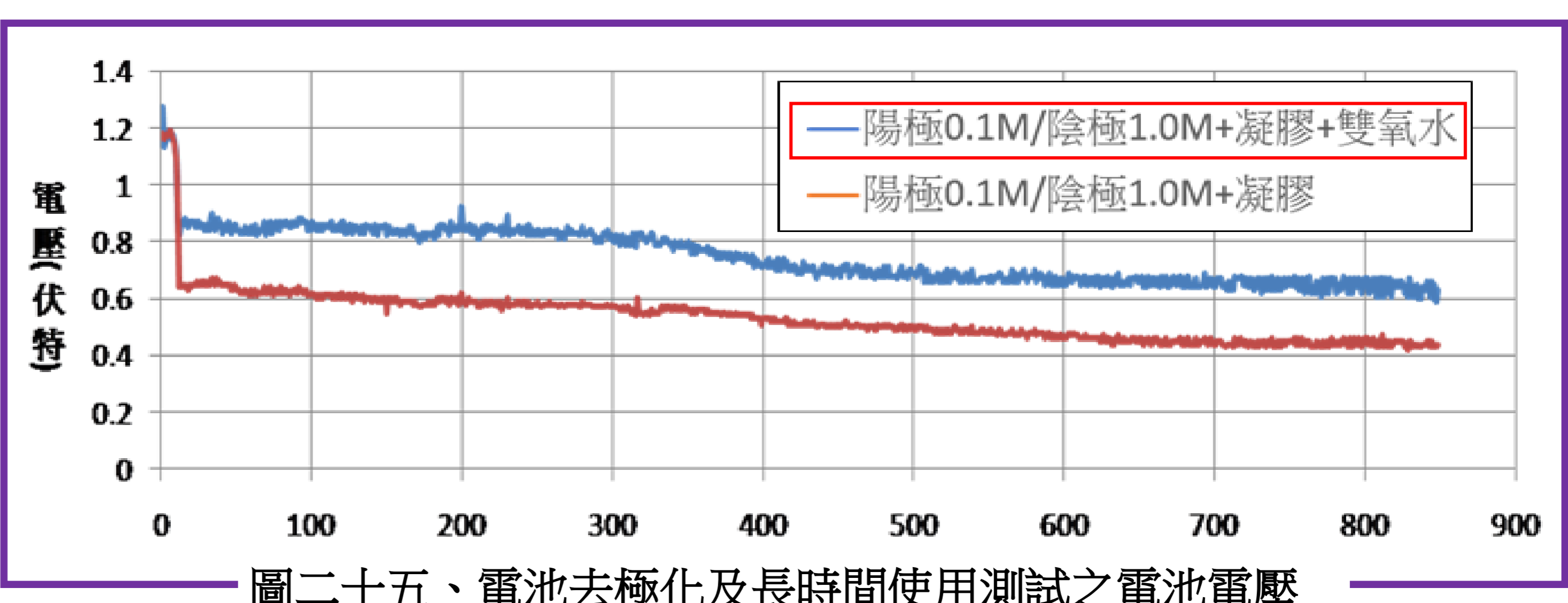
圖二十二、不同電解液之電池電壓



圖二十三、不同組成比例之凝膠電解液及長時間使用測試之電池電壓

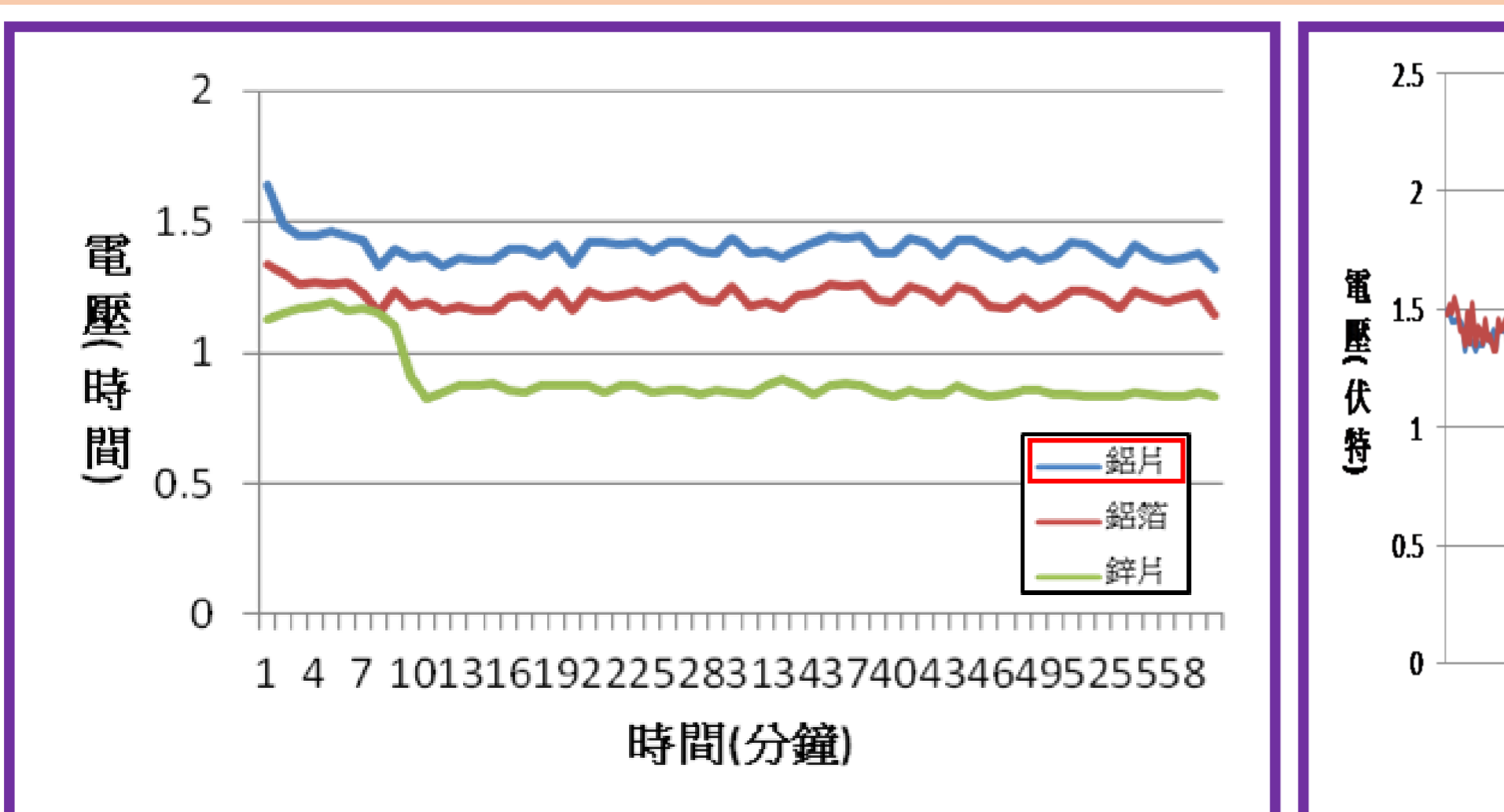


圖二十四、不同濃度的氫氧化鈉凝膠之電池電壓

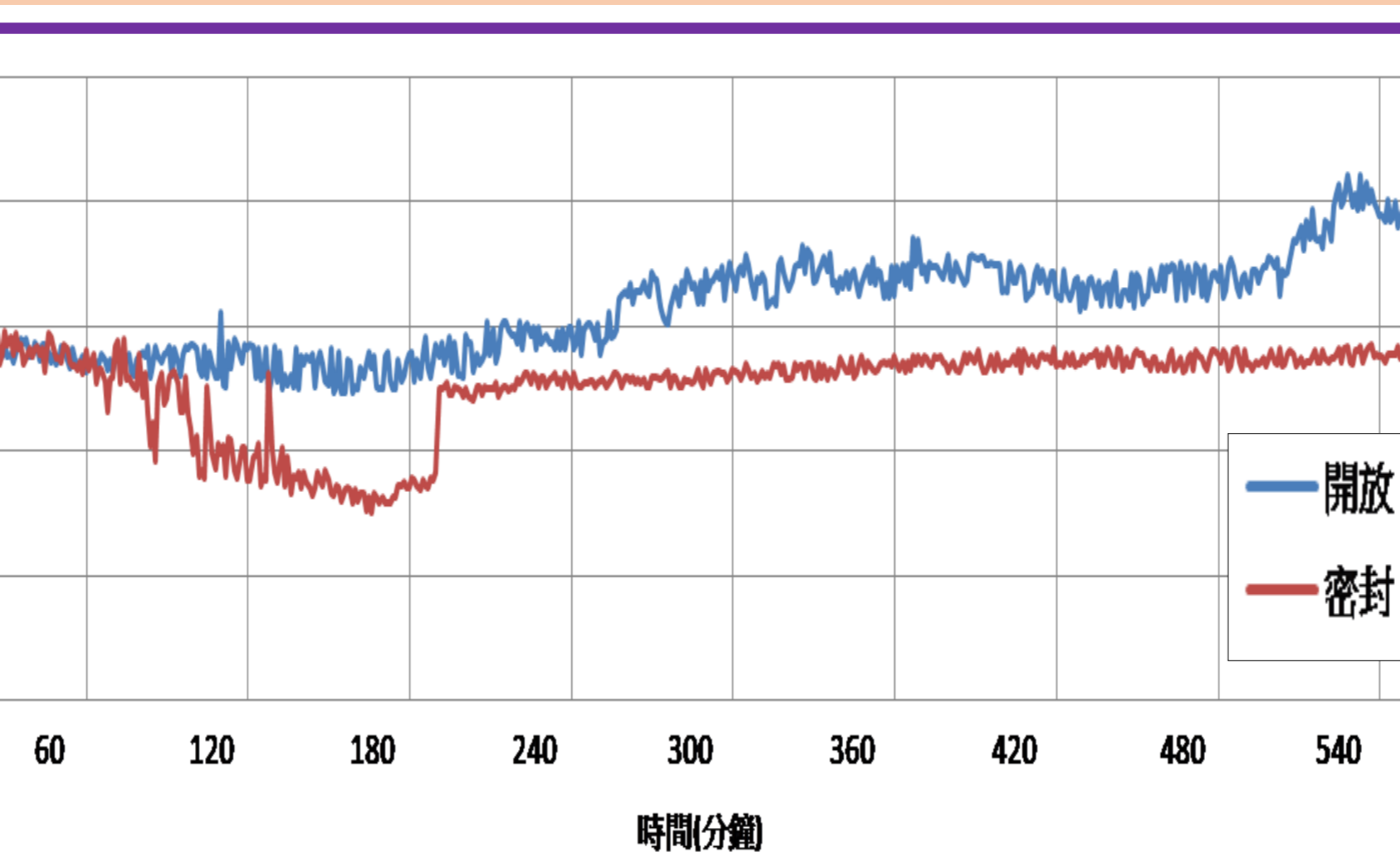


圖二十五、電池去極化及長時間使用測試之電池電壓

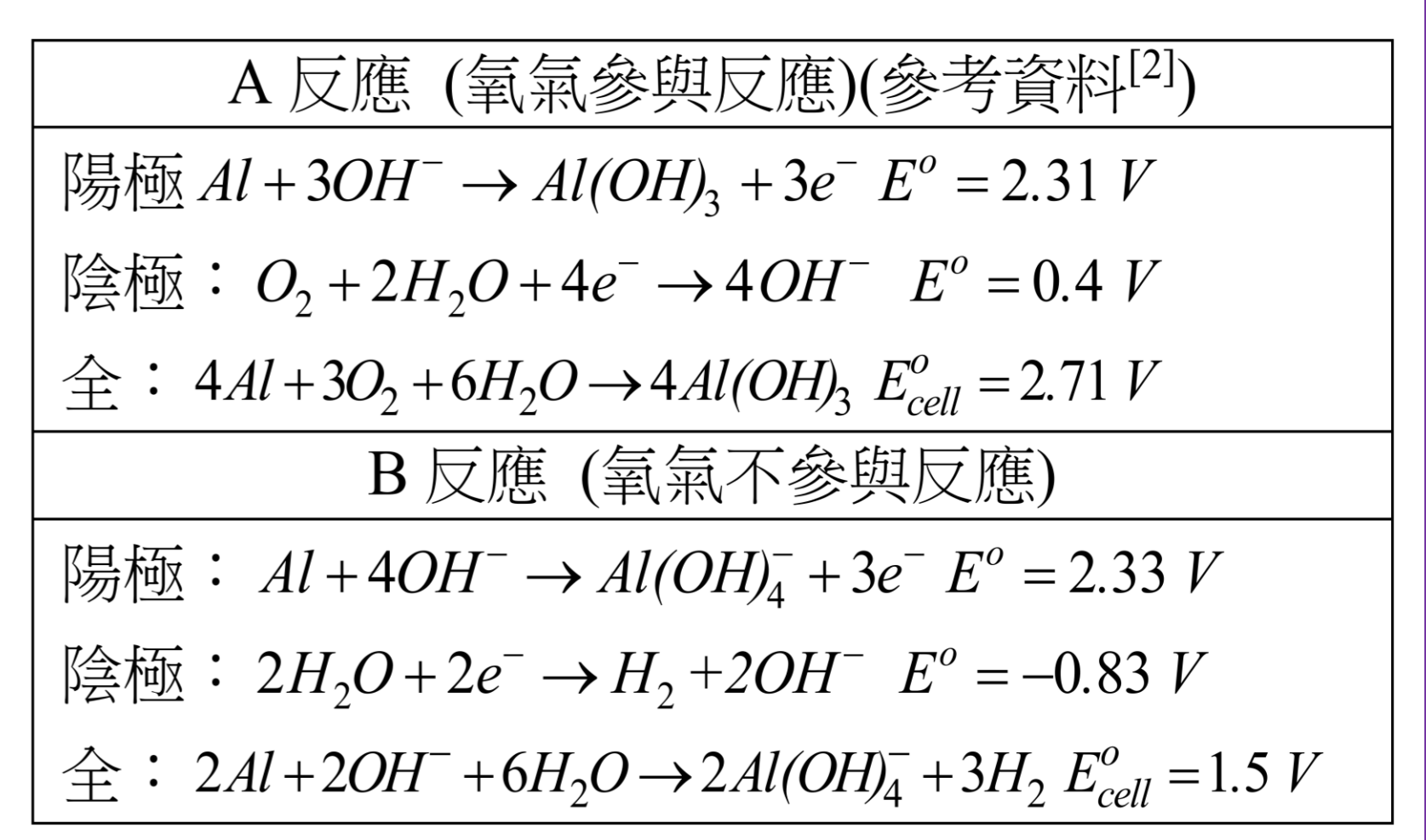
## 三、探討一次鋁紙電池反應環境



圖二十六、鋅電池與一次鋁電池(不同鋁材)之電壓比較

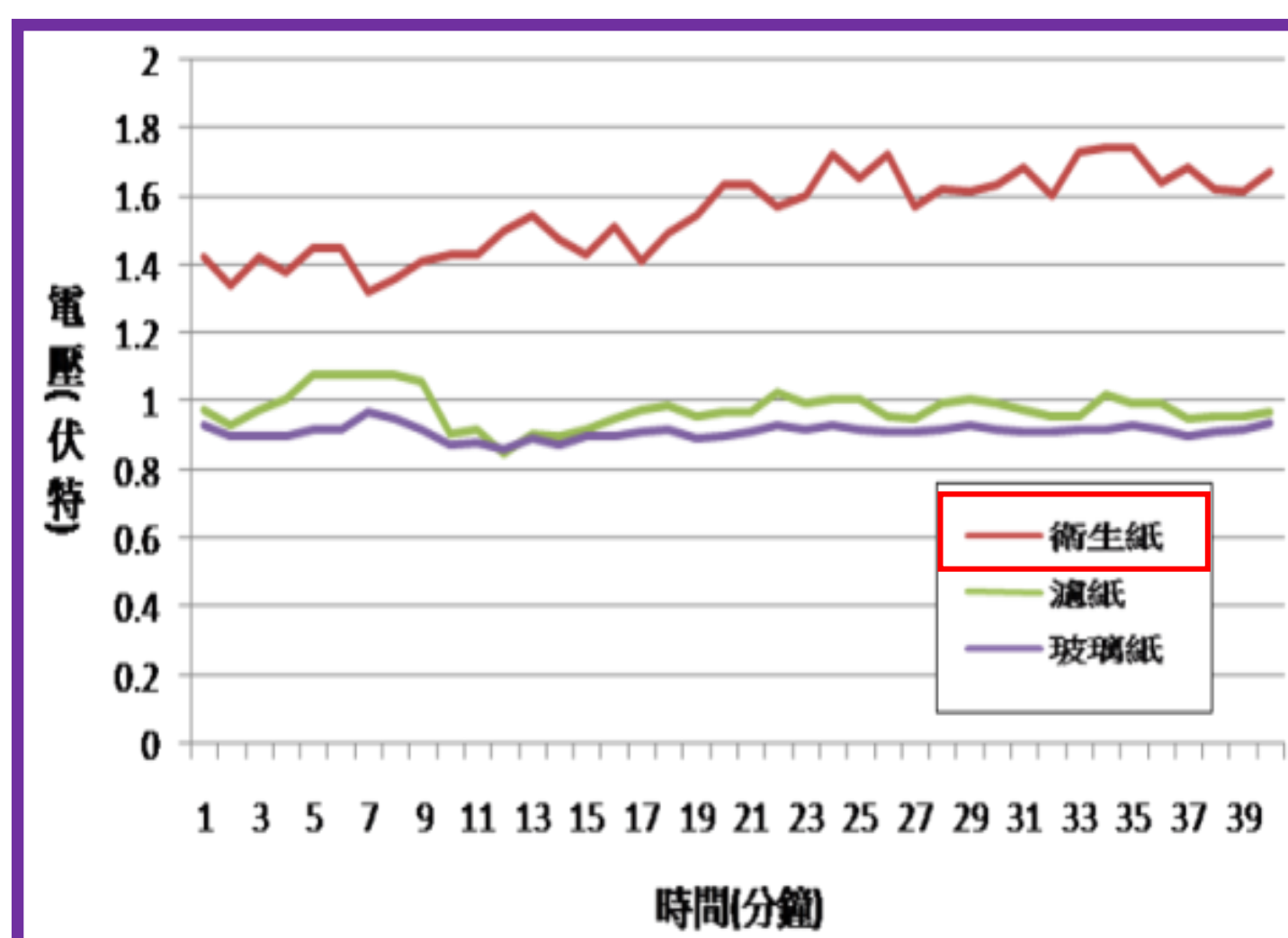


圖二十七、一次鋁電池(開放式與密封式)之電壓比較



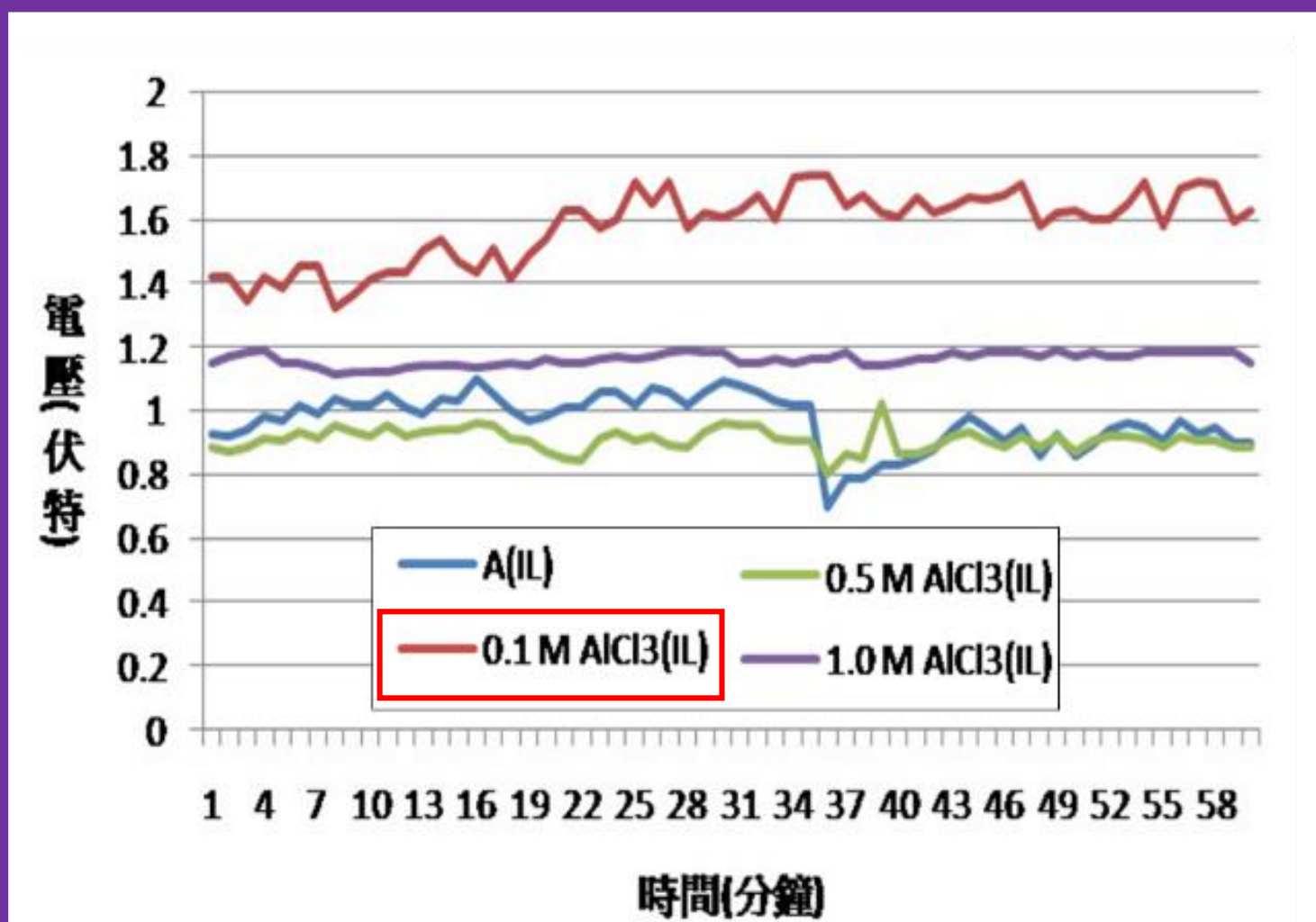
圖二十八、一次鋁電池之反應機制

## 四、探討二次鋁紙電池反應環境



滴入時間	剛滴入	滴入1分鐘	滴入9分鐘	滴入13分鐘
隔膜材質				
衛生紙	直徑 0.7 (cm)	迅速擴散至整張衛生紙		
濾紙	直徑 0.7 (cm)	直徑 0.8 (cm)	直徑 1.2 (cm)	擴散至整張濾紙
玻璃紙	直徑 0.7 (cm)	直徑 0.7 (cm)	直徑 0.75 (cm)	直徑 0.75 (cm)

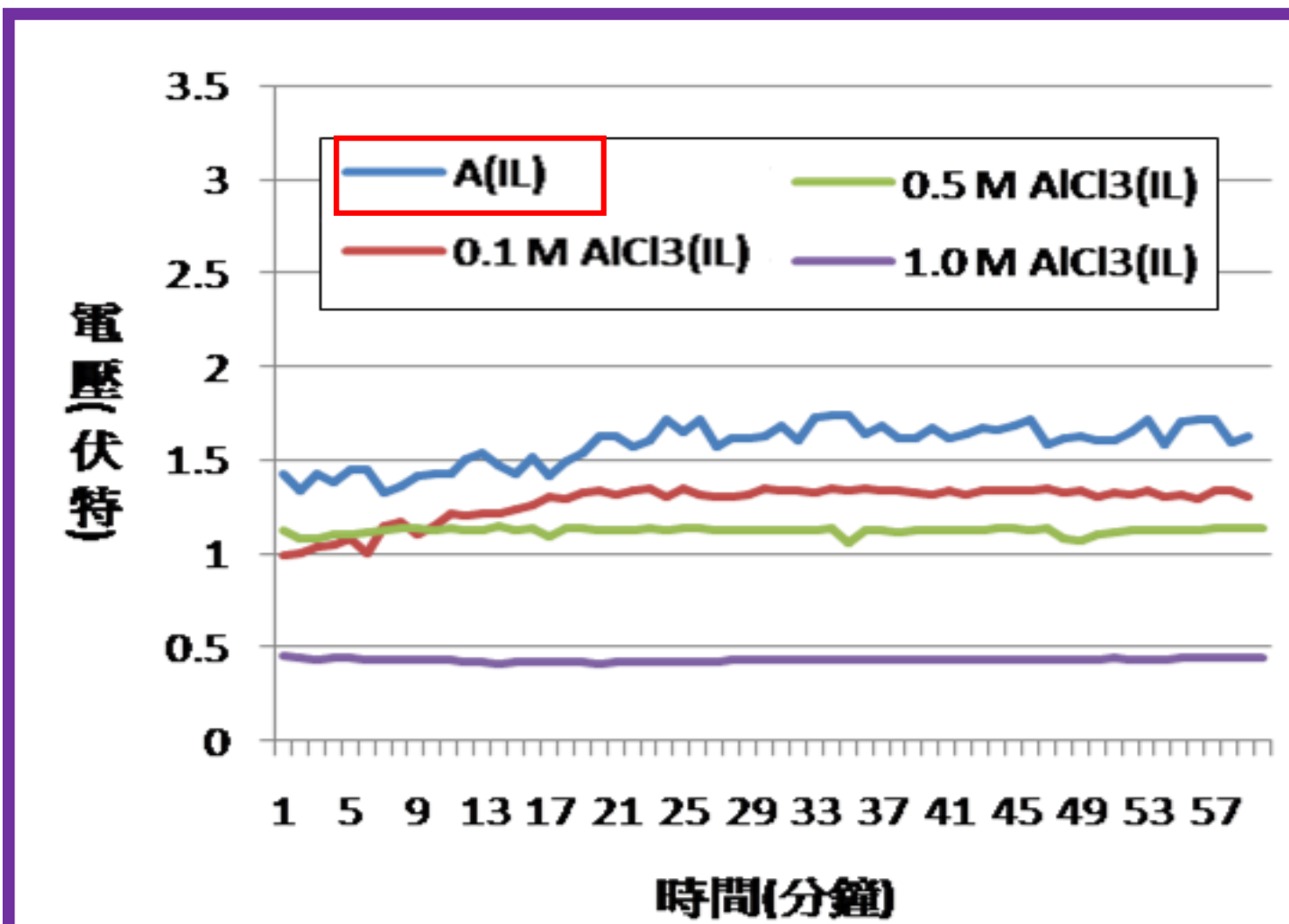
註：上述實驗為各滴一滴 $A_{(IL)}$ 至不同隔膜中心，並測量 $A_{(IL)}$ 往外流動的直徑與時間



圖二十九、不同隔膜材質之電池電壓

圖三十、離子液體A於不同隔膜材質上的毛細作用

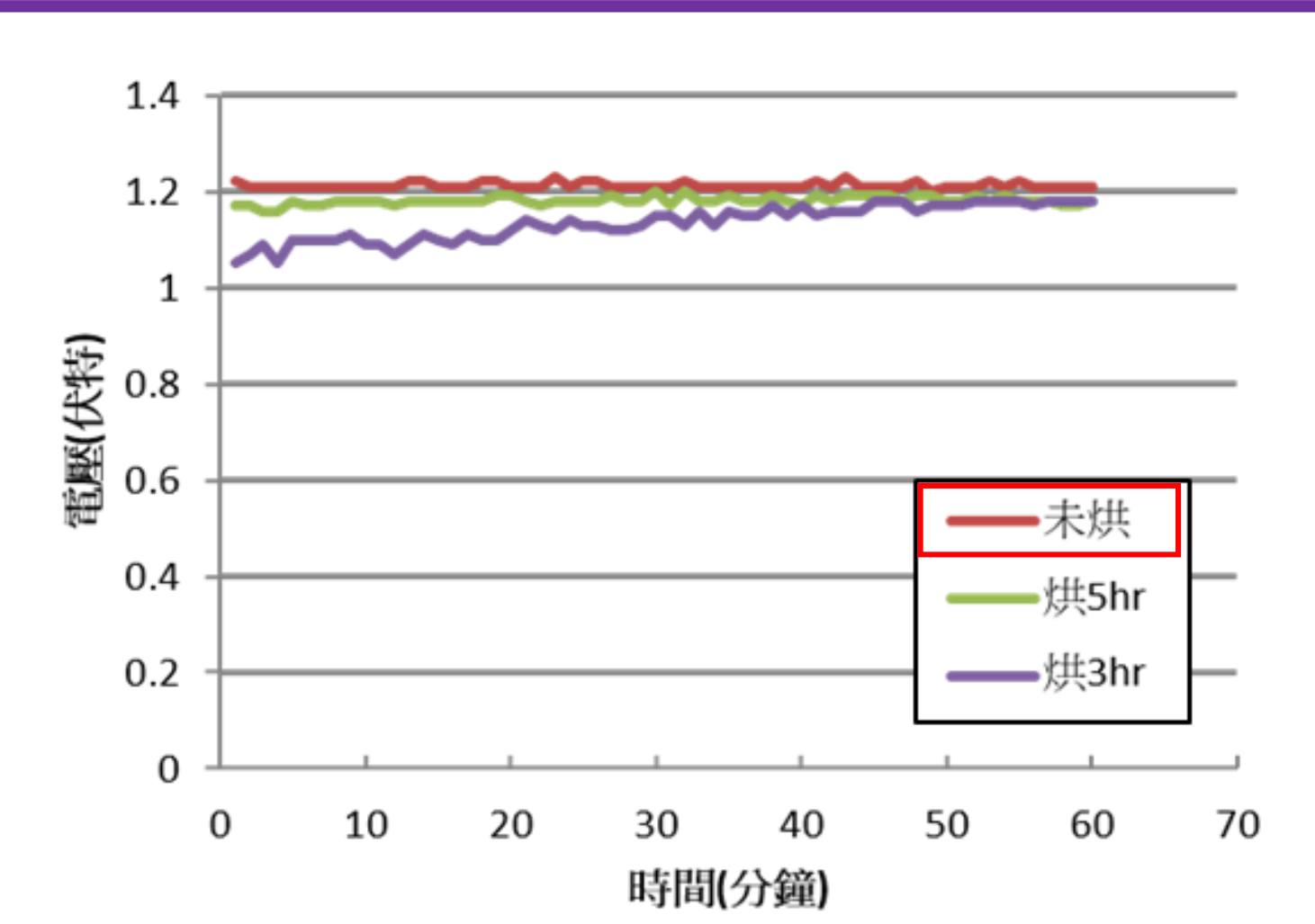
圖三十三、不同陽極電解液濃度之電池電壓



圖三十一、衛生紙隔膜浸泡在不同電解質濃度之電池電壓

濃度	$A_{(IL)}$	$0.1M AlCl_3(IL)$	$0.5M AlCl_3(IL)$	$1M AlCl_3(IL)$
時間(秒)	60	70	90	100

註：上述實驗為各滴一滴離子液體至衛生紙中心，然後測量離子液體至衛生紙邊緣所需時間



圖三十四、在270°C，不同燒結時間下的碳材之電池電壓

電極材質 (操縱變因)	電解質溶液	紙流道間距	隔膜材質	隔膜之離子液體	溫度	電解液層數	乾式/濕式	密封/開放
陽極	鋁片	0.2 cm	衛生紙	離子液體 A	28 °C	二層	濕式	開放
陰極	未烘之4B 碳粉							

充電電壓(V)	充電電流(I)	充電時間(t)
9.4 V	1.0 mA	6 小時

$$\frac{2.0 \times 10^{-4}}{27} \times 3 \times 100\% = 9.93\%$$

圖三十五、優化二次鋁紙電池第一次充電之電能轉換效率

## 陸、結論

- 在鋅銅紙電池環境測試中，我們得到了當使用蠟作為防水層，4B 碳粉、鋅片、濃度皆為 1.0 M 陰陽極電解液、紙流道距離為 0.2 cm、未乾燥電解液的組成可以得到較佳的結果，同時由增減電解液層的實驗得知，減少層數除了可以增加電壓，還可令電池更輕薄。
- 在鋅紙電池環境測試中，我們延續鋅銅紙電池的構造，但將原本含重金屬電解液改為易取得且較環保的氫氧化鈉凝膠，而在放電時卻產生極化現象，因此我們在配製電解液凝膠時多加入雙氧水以解決極化現象，結果發現電壓有明顯改善。
- 在一次性鋁紙電池環境測試中，我們延續鋅紙電池的構造，但將陽極更改為鋁片，電壓有顯著上升(由 0.8 V 上升至 1.77 V)。並藉由密封性實驗結果得知，密封的電池其電壓先降後升，藉由此結果探討該電池的反應機制，推測在未密封時，兩極反應物為鋁與氧氣(反應式為  $4Al + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3$ )，但電池密封後，兩極反應物則為鋁與氫氧化鈉(反應式為  $2Al + 2OH^- + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_4^- + 3H_2$ )。
- 在二次性鋁紙電池環境測試中，我們延續一次性鋁紙電池的構造，為了避免充電時發生電解水的反應，故將水溶液電解液改為離子液體。另外，將陽極電極為鋁片、陰極電極為未烘之 4B 碳粉膠帶、陽極電解液為 0.1 M  $AlCl_3(IL)$ 、陰極電解液為 1.0 M  $AlCl_3(IL)$ 、隔膜電解液為離子液體  $A_{(IL)}$ ，隔膜材質為衛生紙組成二次優化鋁紙電池，並測得二次優化鋁紙電池的電壓大於 1.59 V，但在充電後，測其充電之電能轉換效率約為 9.93%，轉換效率不如預期的好。

## 柒、未來與展望

- 在探討陰極碳材的測試中，測得的二次性鋁紙電池電壓並無隨著烘烤時間增長而有明顯改變，未來可參考文獻<sup>[3]</sup>，改變碳材材料(例如石墨粉、活性碳...等)、加熱溫度與加熱時間，並使用電子顯微鏡觀測碳粉的結構與電池電壓之關係。
- 由於製得二次鋁紙電池的電能轉換效率不佳，希望日後能完成以下兩點：
  - 本實驗使用低成本生物可分解的離子液體(氯化膽鹼與尿素之莫耳數比為 1:2)，並非目前二次鋁電池之主流電解液，日後將嘗試參考文獻<sup>[4]</sup>中提到的離子液體 EMIC。
  - 改良實驗環境，或者製造密封度更好的電池，以避免氧氣或水氣的影響。

## 捌、參考資料

- 第五十七屆中小學科展—利用摺紙藝術製作發電裝置：<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/57/pdf/030207.pdf>
- 鄭永銘(2015年04月08日)·淺談鋁電池·取自 <https://reurl.cc/vDZzRo>
- 2018年台灣國際科學展覽會優勝作品專輯—使用低成本生物可分解離子液體電解質之鋁空氣二次電池
- 楊昌中與江建志等人(2018年12月05日)·鋁電池發展現況及前景·取自 <https://reurl.cc/z8da96>