

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學(二)科

052407

鋁試春秋-探討鋁離子電池陰極元件對效率之影響並試做太陽能充電模組

學校名稱：臺中市立文華高級中等學校

作者： 高二 曾柏魁 高二 蔡國宇 高二 蔡致朗	指導老師： 張睿中
---	------------------

關鍵詞：鋁離子電池、插層、活性碳吸附

摘要

鋁離子電池材料的性質優於其他二次電池。我們將 SP-1 和活性碳混合，製成不同比例的陰極，進行充放電測試。結果顯示，SP-1 能增加充放電容量，而活性碳僅增加充電容量。XRD 和拉曼分析顯示，SP-1 具有良好的插層能力，而活性碳的強吸附能力使電子難以從陰極釋放，因此對放電的影響不明顯。

實驗中，我們將電池的充電電壓設為 2.4V，但有些電池只能達到 1.2V。在剪開這些電池後，我們發現其隔離膜上的漿料覆蓋較少，推測是由於 Ni-bar 的厚度使隔離膜與碳紙之間存在空隙。經過調整後，情況有顯著改善。

最後，我們將四個電池組合，透過太陽能板充電，成功使 3V 的馬達運轉，證明我們的太陽能充電模組是可行的。

Abstract

The properties of aluminum-ion battery materials are superior to those of other secondary batteries. We mixed SP-1 and activated carbon to make cathodes with different proportions and conducted charge and discharge tests. The results show that SP-1 can increase charge and discharge capacity, while activated carbon only increases charge capacity. XRD and Raman analysis show that SP-1 has good intercalation ability, while the strong adsorption ability of activated carbon makes it difficult for electrons to be released from the cathode, so the impact on discharge is not obvious.

In the experiment, we set the charging voltage of the battery to 2.4V, but some batteries can only reach 1.2V. After cutting these batteries, we found that the separator membrane had less slurry coverage, presumably due to the gap between the separator membrane and the carbon paper due to the thickness of the Ni-bar. After adjustments, the situation improved significantly.

Finally, we combined four batteries and charged them through the solar panel to successfully run a 3V motor, proving that our solar charging module is feasible.

壹、前言

一、緒論

近年來，電池是現代社會不可或缺的一部分，它為我們的日常生活提供了電力，讓我們可以享受各種電子產品和服務。而電池中的儲能系統，現今多用鉛酸電池或鋰離子電池。

若使用鋰作為電池的陰極材料，會發現其具有一定危險性。因鋰離子電池使用的有機溶劑十分易燃，且鋰金屬本身活性強，故其安全性問題有待加強，且成本昂貴，因此科學家仍在尋找可燃性低、安全性高、成本低、循環穩定性佳的二次電池。鉛酸電池也有鉛電池污染的問題。而鋁在地球中存量豐富，且價格便宜，另外優點還包含其壽命長、充電放電效率高。它唯一缺點就是能量密度不夠高。這反應了石墨的問題，陰極石墨與陽極產生的錯合物 $[AlCl_4]^-$ 縫隙尺度並不符合，這就像要將一個西瓜塞到柳丁的縫隙裡一般困難。且在充放電過程中，碳的表面(鋁電池陰極)會產生突起導致電池壽命減短。因此較多的研究是以鋁金屬作為電池陽極、石墨為電池陰極並透過離子液體作為電解液來組成鋁離子電池，利用這些電極材料的特性和離子液體的性質，使鋁離子電池具有較高的安全性及較好的穩定性，再加上石墨有優良的導電能力，使得離子能夠快速穿梭於正負極中以提升鋁離子的充放電速率。綜合上述所說我們決定深入探討石墨插層和吸附對於鋁電池的效率、壽命之影響，找出最佳充放電比率的鋁離子電池。

最後，我們希望可以找出效果最佳之鋁離子電池的材料組合，將此種電池以串聯或並聯的方式，組成電池模組，並外加太陽能電板藉此製作成太陽能充電模組。我們希望設計出的充電模組，具有易攜帶性、高安全性，為電池的儲能提供一個更好的方案。

二、研究動機

電力在生活中不可或缺，而電池更是會在急難時不可或缺的物品，而太陽能是最好取的便捷資源。因此我們決定自製太陽能充電模組，而在電池中石墨陰極扮演著極其重要的角色。所以我們決定自製電池並透過調整其組成找出最佳效率電池，最後結合太陽能板實現小型充電模組的效果。

三、研究目的

本研究比較石墨材料的電化學性能，發現增加表面積可以增加電容量。有文

獻認為， AlCl_4^- 離子可嵌入石墨層狀結構中，也可吸附於石墨表面。因此，充電容量可能由這兩個現象一同貢獻，所以我們想提高石墨材料的吸附能力，或增加陰極材料的吸附比表面積，藉此觀察是否可提高鋁離子電池的充放電效率。

而以下幾點是我們的研究目的：

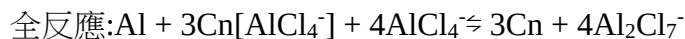
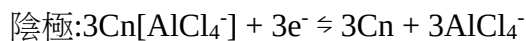
(一) 以不同比率的 SP1:PC 進行充放電實驗，藉此研究陰極材料的吸附比表面積如何，影響電池效率。

(二) 以最佳充放電效率的電池結合太陽能板做出太陽能充電模組。

四、文獻探討

(一) 鋁電池工作原理

鋁離子電池由陽極(Anode)、陰極(Cathode)、隔離膜(Separator)以及電解液(Electrolyte)所組成。在鋁離子電池的放電過程中，鋁金屬發生氧化反應，釋放出鋁離子。鋁離子在電解液中移動到陰極，與石墨發生還原反應，形成 Al_2Cl_7^- 離子。而在充電過程中，上述反應的方向相反。陽極鋁金屬發生還原反應，吸收電子。鋁離子從電解液中嵌入到陰極石墨的層狀結構中。以下為充放電反應機制：



反應向右為放電反應機制,向左為充電反應機制。

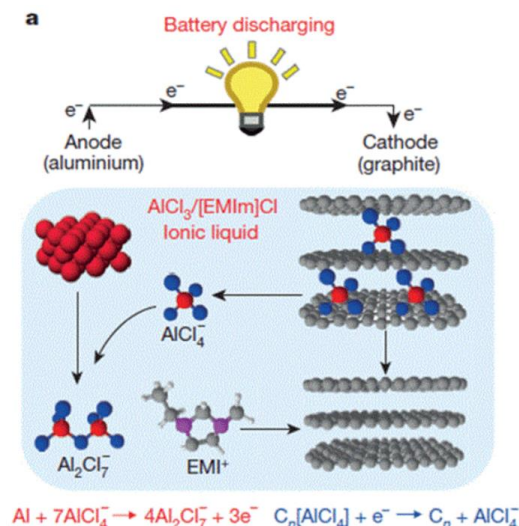


圖 1-1 鋁離池電池工作流程圖
(引用自參考文獻^[9]李天生碩士論文)

(二) 隔離膜

隔離膜在電池中扮演著不可或缺的角色，主要功能是隔開陰極和陽極，防止短路，同時需要具備傳導離子的能力。由於隔離膜不參與激烈的氧化還原反應，因此對電極和電解液要有優越的化學穩定性。隔離膜的厚度、孔隙率、孔徑大小以及電解液的濕潤性都影響電池表現。過厚的隔離膜會增加內部阻力，而孔隙和孔徑大小影響離子傳遞。隔離膜對電解液的吸收也很重要，有助於填滿孔隙，降低內部阻抗，提高離子傳導率。本研究使用隔離膜之規格為厚度 0.68mm、孔徑 2.7 μm 的玻璃纖維，且形狀為直徑 47 毫米之正圓形。

(三) 電解液

在鋁離子電池系統中，電解液的角色包括傳導離子、有效沉積鋁金屬以及可逆地溶解鋁鹽。科學家們致力於開發更多元的電解液以促進鋁電池的進展。1982 年發現的 EMIC- AlCl_3 離子液體成為研究焦點，其組成由有機陽離子和有機陰離子組成，具有不對稱的取代基結構，使其在室溫下保持液態，且相較於有機電解液，具有較低的蒸氣壓、不易揮發、無毒且難燃。

離子液體作為非水溶液電解液，其酸鹼性可以透過陰離子比例調控，進而影響電池性能。根據研究數據， AlCl_3 的莫耳比率影響電解液的酸鹼性，對鋁電極的氧化還原反應產生不同程度的影響。例如，當 $\text{AlCl}_3/\text{EMIC}$ 比例為 1 時，電解液呈現中性，主要陰離子為 AlCl_4^- ；隨著 AlCl_3 增加，電解液呈現酸性，且主要陰離子變為 Al_2Cl_7^- 。在二次鋁電池中，選擇酸性離子液體可提高鋁沉積效率，因為 AlCl_4^- 是正四面體結構，穩定性高；而 Al_2Cl_7^- 則具有高電化學活性，使鋁沉積效率提高。

(四) 鋁離子電池材料介紹

1. 鋁離子電池陽極介紹

鋁金屬是目前電池研究的熱門材料，但其表面容易形成氧化層和枝晶，影響電池性能。氧化層會降低鋁電極的電化學活性，而枝晶則會導致電池短路，目前，改善鋁金屬電極性能的主要方法包括：

- (1) 合金化：在鋁中加入少量的 Sn、Ga、In 等元素，可以減少鈍化層的產生，提高電活性。
- (2) 添加緩蝕劑或使用離子液體電解液：可以減緩鋁金屬的腐蝕。
- (3) 控制電流密度和電解液組分：可以抑制鋁枝晶的生長。

具體而言，在鹼性電解液中，較低的電流密度和 AlCl_4^- 離子有利於平整地沉積鋁金屬。此外，添加 Al_2Cl_7^- 離子也能抑制鋁枝晶的生長。

2. 鋁離子電池陰極介紹

石墨是一種具有高導電性的層狀結構材料，可作為兩性還原嵌入體，被正離子和負離子嵌入。因此，石墨被廣泛用於各種電池系統。以下對本實驗所使用之石墨陰極材料做簡單介紹。

(1) 活性碳(Porous carbon)

活性碳為 2019 年李天生碩士在研究中首次使用，而研究中得知活性碳並不是一個結晶性很好的材料，但其優異的表面特性讓 AlCl_4^- 能夠吸附在材料表面積達到電容量的儲存與釋放。

(2) 天然鱗片石墨

2017 年，Wang 和 Lin 等人將天然鱗片石墨應用於鋁離子電池的陰極材料。在 99mA/g 的電流密度下，天然鱗片石墨的放電電容量可達 110mAh/g 。天然鱗片石墨結構穩定，在不同電流密度下的充放電效率變化不大。即使在 660mA/g 的高電流密度下，天然鱗片石墨也能穩定充放 6000 圈，放電電容量仍有 60mAh/g 。

(五) 離子插層行為介紹

石墨的六方結構是由石墨烯片堆積而成，層與層之間間隙可以存儲客體。客體嵌入不會同時發生在每一層，因為客體需要克服相鄰石墨烯層的凡德瓦力和不同插入層的靜電排斥力。客體更容易嵌入已被插層的石墨烯層，因為客體原子之間的吸引力會使更多客體嵌入同一層，造成還沒被插層的石墨層間不易有客體嵌入。此即為「插層階段機制(stage mechanism)」。

(六) 離子吸附行為介紹

吸附是原子或分子在固體表面聚集的現象，可分為物理吸附和化學吸附。物理吸附是基於凡德瓦力作用的弱相互作用，可逆、多層、作用力較弱；化學吸附是基於化學鍵作用的強相互作用，不可逆、單層、作用力較強。而特性吸附則是化學吸附的一種，特性吸附是電解液中的離子或有機分子在電極表面上發生類似化學鍵的吸附，它與金屬和被吸附物種的特性有關，對雙電層結構和電極反應速率有一定影響。

貳、研究設備及器材

一、實驗藥品

- (一) 天然鱗片石墨(SP-1)：TED PELLA
- (二) 活性碳(porous carbon)：ACS Material, LLC
- (三) 鋁箔(99.9 %)：優必克科技股份有限公司
- (四) 氯化鋁 ($\geq 99.9\%$, anhydrous): Fluka 1- Ethyl-3-methylimidazolium chloride (EMIC-98 %): Ionic Liquid Technologies
- (五) Polyvinylidene fluoride (PVDF): 六和化工股份有限公司
- (六) 氬氣：東洋氣體公司
- (七) 鎳極耳 (Ni bar): 優必克科技股份有限公司
- (八) 導電碳膠帶(W×L 8 mm×20 m, Double Coated): TED PELLA INC
- (九) 鋁塑膜 (Aluminum pouch): 六和化工股份有限公司
- (十) 碳纖維紙: 碳能科技股份有限公司
- (十一) 玻璃纖維隔離膜(pore:2.7 μm , diam:4.7 cm): Whatman international Ltd.

二、儀器設備

真空烘箱 (JOV-40)：博高科儀器股份有限公司 (由作者群拍攝)	微量天平：SHIMADZU (由作者群拍攝)	手套箱：Vigor (由作者群拍攝)	八頻道充放電儀 (BTS-3000n)：深圳市新威爾電子有限公司 (由作者群拍攝)
			

熱封口機 (300HI)： MERCIER (由作者群拍攝)	拉曼光譜儀 (UniDRON)：景鴻 科技有限公司 (由作者群拍攝)	同步輻射光束線 (XRD) (由作者群拍攝)	電磁攪拌器 (由作者群拍攝)
			
磁石加熱攪拌器 (由作者群拍攝)	電化學分析儀 (CV) (由作者群拍攝)		
			

三、儀器原理

(一)八頻道充放電儀 (BTS-3000n)

可提供八個不同頻道進行控制，每個頻道可設定不同的參數模型，透過控制恆流充放電的上限電壓和下限電壓，在恆流條件下，監測其電位隨時間的變化圖，並探討電池的充放電性能，計算其比容量。

(二)電化學分析儀(CV)

循環伏安法(CV)的電位掃描設定可由正電位開始或者是由負電位開始掃描，所示，第一圈由負電位往正電位掃描時為正向掃描(forward)，掃到終點電位後折返往回掃描則為反向掃描(reverse)，並構成一三角波形循環，反之亦然。掃描完後作圖。而透過參數的設定，藉此得知電壓及電流對時間的關係，而後可根據這些資訊針對未知的分析進行定性與定量的研究。

(三)拉曼光譜儀 (UniDRON)

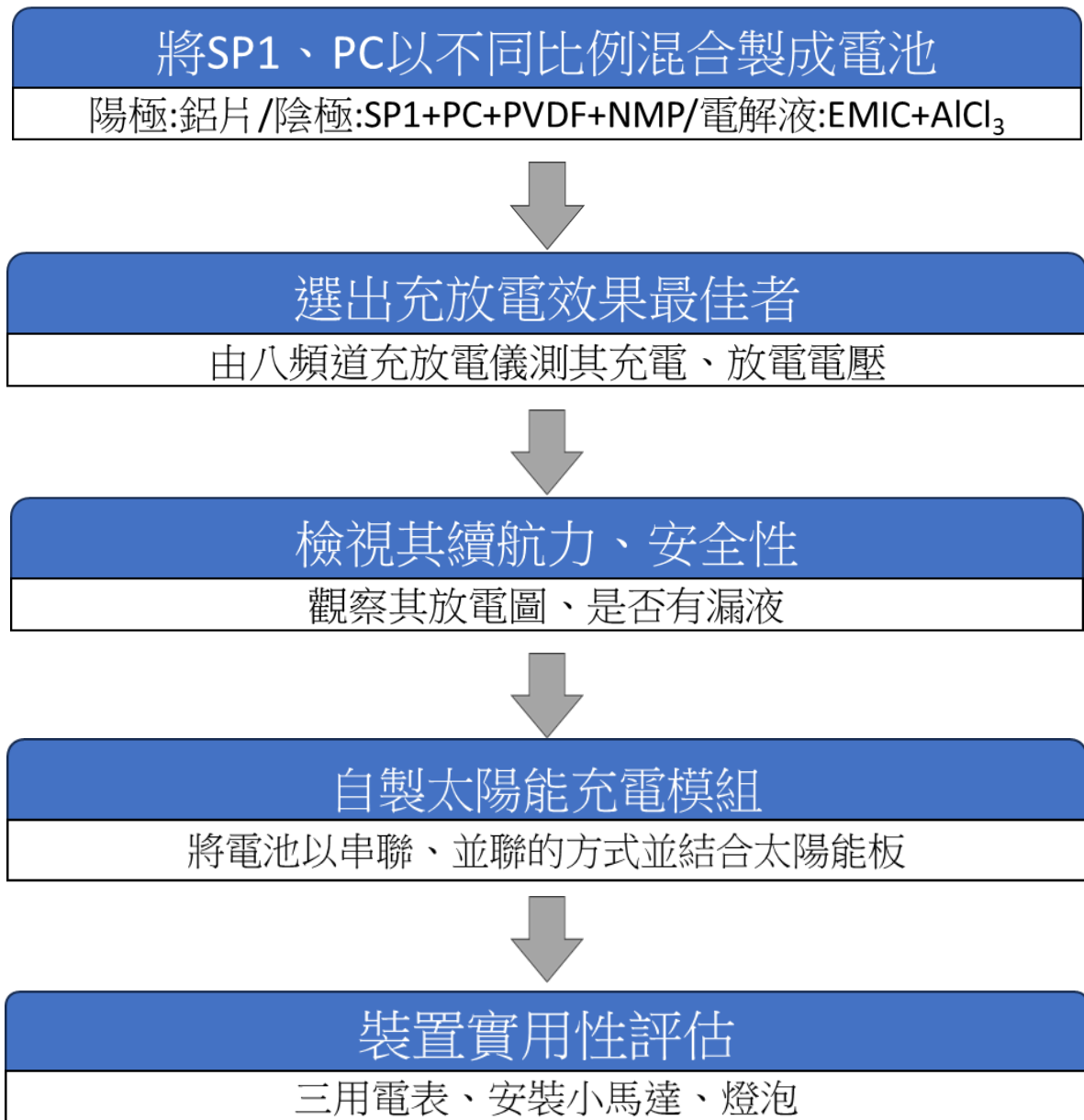
拉曼光譜屬於振動光譜的一種，其原理是利用拉曼散射現象將樣品的光譜進行分析，當激發光源照射到物質上時會產生散射現象，光子與分子碰撞後產生了能量交換，光子由樣品分子獲得能量或傳遞能量給樣品分子，進而改變光頻率，此變化稱為拉曼散射。將訊號在光譜上產生位置變化稱作拉曼位移。由拉曼位移量與譜線的偏振狀態等，可以獲取有關樣品分子結構、振動特性以及分子處於甚麼環境、化合物狀態。

(四) 同步輻射光束線(XRD)

X 光繞射儀利用加速電子撞擊金屬靶材，產生 X 射線。這些 X 射線照射在材料表面上，由於不同晶體結構的晶面間距(d)差異，只有在 X 光入射角度滿足條件時，才會發生建設性干涉。在此條件下，探測器可接收到較強的繞射光束訊號，而這一現象主要受晶胞的形狀、大小和對稱性的影響，因此不同材料或結構將在不同的角度產生建設性干涉。光繞射實驗提供兩項重要訊息：一是繞射峰的位置，二是繞射峰的強度。第一項訊息提供晶體的晶胞形狀和大小（即晶格參數）的資訊；第二項訊息則提供晶體內部組成原子種類及位置的資訊。每種晶體的這兩項資料各不相同，即不同的晶體化合物會產生其獨特的組合的繞射圖譜。因此，通過分析這些圖譜並與資料庫比對，我們能夠推論出材料晶體的排列結構、晶體排列方式以及奈米晶粒的大小。此外，作為一種非破壞性的分析儀器，X 光繞射分析在評估材料特性方面具有重要的應用價值。

參、研究過程及方法

一、研究流程圖



(由第二作者繪製)

二、材料製備

(一) 陰極的製備

1.配置漿料:將 SP1 與 PC 以 10:0、3:7、5:5、7:3、0:10 的比例分別測量，並倒入樣本瓶中。再各自加入 0.01 克的 PVDF、2 毫升的 NMP 及磁攪拌子，蓋好並用止洩帶固定，放上電磁攪拌器讓其充分混合 2 小時。

混合比例 (SP1:PC) 原料	10:0	7:3	5:5	3:7	0:10
SP1	0.0912mg	0.0633mg	0.0451mg	0.0273mg	0mg
PC	0mg	0.0269mg	0.0457mg	0.0631mg	0.0896mg

表 3-1 漿料的實際混合比例(由第二作者繪製)

2.電極片製備: 裁 2*2.3 平方公分的碳纖維紙五張，並記錄其重量，用培養皿盛裝，再放置於磁石加熱攪拌器上，使用微量吸管吸取 220 微升的漿料滴在碳紙上，並用不同漿料重複五次，而後加熱兩個小時，待其冷卻再秤重。

$$\text{真實重量} = \text{測量重量} - \text{碳纖維紙重量} * (100 - \text{黏著劑含量})\%$$

圖 3-1 不含黏著劑的石墨電極真實重量之計算方法(由第二作者繪製)

(二) 電解液製備

將秤量紙放入微量天秤後歸零，量取所需要的 EMIC 和 AlCl_3 ，並將 EMIC 先加入樣本瓶中，再將含有 EMIC 的樣本平放上電磁攪拌器攪拌，而後將 AlCl_3 緩慢加入樣本瓶中，待 AlCl_3 完全加入後，再將樣本瓶放置於磁攪拌器上攪拌三十分鐘使其均勻混合。

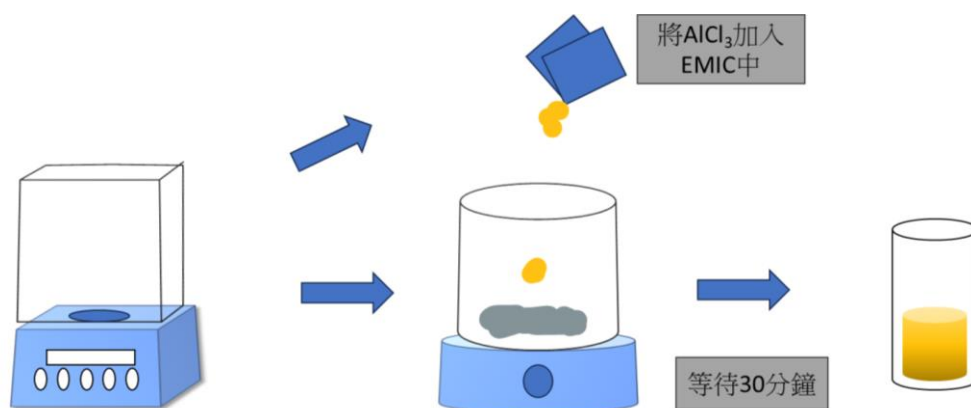


圖 3-2 電解液製備示意圖(由第二作者繪製)

電池顆數	EMIC	AlCl ₃
1	1.78g	2.08g
2	3.56g	4.16g
3	5.34g	6.24g
4	7.12g	8.32g
5	8.9g	10.4g
6	10.68g	12.48g

表 3-2 電解液配方(由第二作者繪製)

(三) 鋁包的製作與組裝

- 1.裁切 11*16 平方公分的鋁塑膜，將其對折成 11*8 平方公分後攤開。
2. 剪一 2*2.3 的導電碳膠，對好位置後，黏在鋁塑膜中間偏上方，將 Ni-bar 貼在碳膠左側，並將導電碳膠之膜黏回去。
- 3.剪一 1*2.3 的導電碳膠，將 Ni-bar 黏上後對齊方才黏的 Ni-bar，盡量使兩 Ni-bar 接近但不接觸的方式黏於另一半的鋁塑膜。
- 4.將導電碳膠之膜全部撕開，並將已經滴上漿料的碳片黏上後對折。
5. 利用熱封機將邊緊密封合，留下底部開口，接著把電池送進手套箱中。
6. 用乳頭滴管吸取適量的電解液，滴入鋁包，使隔離膜浸於電解液中，即可利用熱封機將其封裝，並送出手套箱，而後進行充放電測試。

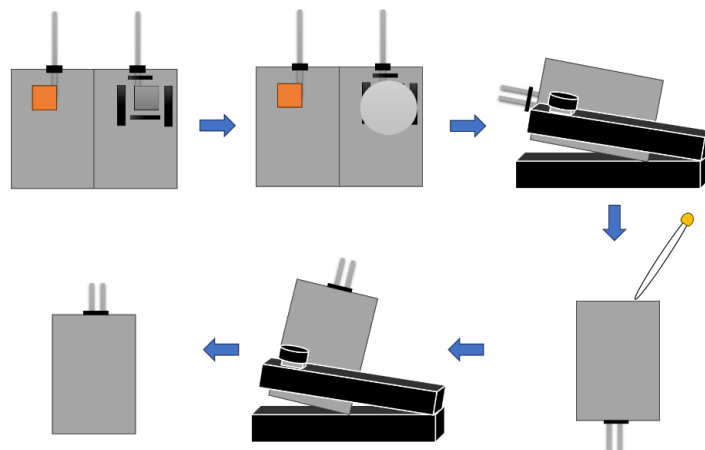


圖 3-4 鋁包的製作與組裝示意圖(由第三作者繪製)

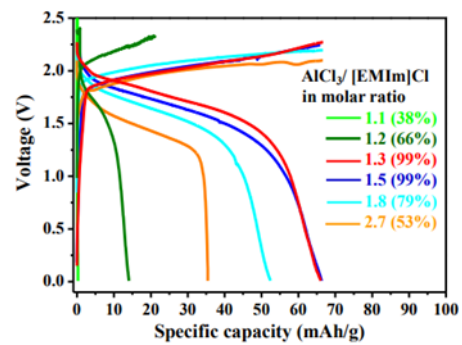


圖 3-3 不同電解液比例下的電化學測試(引用參考文獻^[9]李天生碩士論文)

(四) 太陽能充電模組的製作與組裝

- 1.裁切麻將尺為略寬於鋁包的寬度
- 2.再將裁切過後的麻將尺打洞
- 3.將麻將尺兩兩之間夾入鋁包
- 4.鎖緊螺絲另一端用螺帽固定
- 5.將多個鋁包的陰極陽極個別焊接
- 6.將太能板正極接電池陽極、負極接電池陰極形成串聯

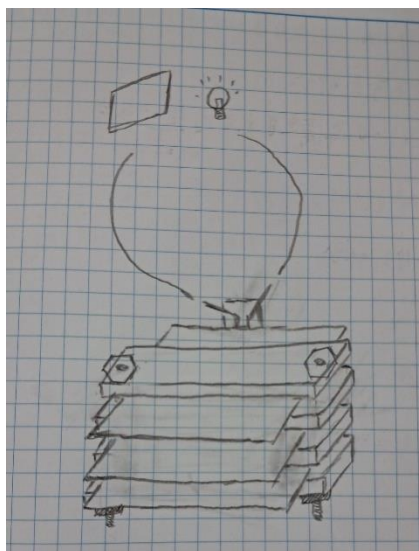


圖 3-5 第一代太陽能充電模組草圖(由第二作者繪製)

三、材料鑑定與分析

(一) X 光繞射儀(XRD)

1.實驗參數

實驗使用東海大學化學系 X 光繞射儀，將電壓設置於 40kV，電流設置於 15mA，並設置角度介於 3 到 90 度之間，使其每分鐘的移動角度為 15 度。

2.樣品製備

將待測物的粉末黏在膠帶中間，並將膠帶兩側黏在 XRD 專用樣品容器上。

(二)拉曼光譜分析儀

1.實驗參數

實驗使用東海大學化學系拉曼光譜分析儀，每 3 秒曝光 1 張，曝光 10 張為一個週期，並取其平均，且要將圖表中心軸設置於 2000cm^{-1} 。

2.樣品製備

把 SP1 和活性碳磨成粉末，用蓋玻片壓平後拿開蓋玻片，而後放上載臺觀測。

(三)電化學分析儀

1.實驗參數

實驗使用東海大學化學系電化學分析儀，最低電位設 0.5V，最高電位設 2.4V，掃描速率為 0.05V/s，跑三次反應一個循環。

2.樣品製備

將工作電極(WE)夾住鋁包陰極，輔助電極(CE)及參考電極(RE)夾住鋁包陽極，而後進行分析。

四、電池充放電測試

將組好的鋁包電池，以兩塊壓克力板加壓電池，使陽極、隔離膜及陰極緊緊貼合，將其壓緊並用長尾夾固定。再將充放電儀的電極連接 Ni-bar，從開路電位開始充電，以定電流的方式，設定的電流密度充電到截止電壓，再放電至截止電壓，並設定時間避免電池發生因達不到截止電壓而一直執行同樣步驟，重複上述的步驟進行充放電測試。

肆、研究結果與討論

一、材料分析

(一)XRD 鑑定

由圖 4-1 可知，SP-1 的特徵峰很明顯，而活性碳幾乎沒有特徵峰，由此可推測 SP-1 的結晶性很好，所以 SP-1 較容易插層，而相較之下，活性碳幾乎沒有結晶性，得知活性碳非晶質碳，本身不具晶格結構，因此較容易進行吸附而非插層。

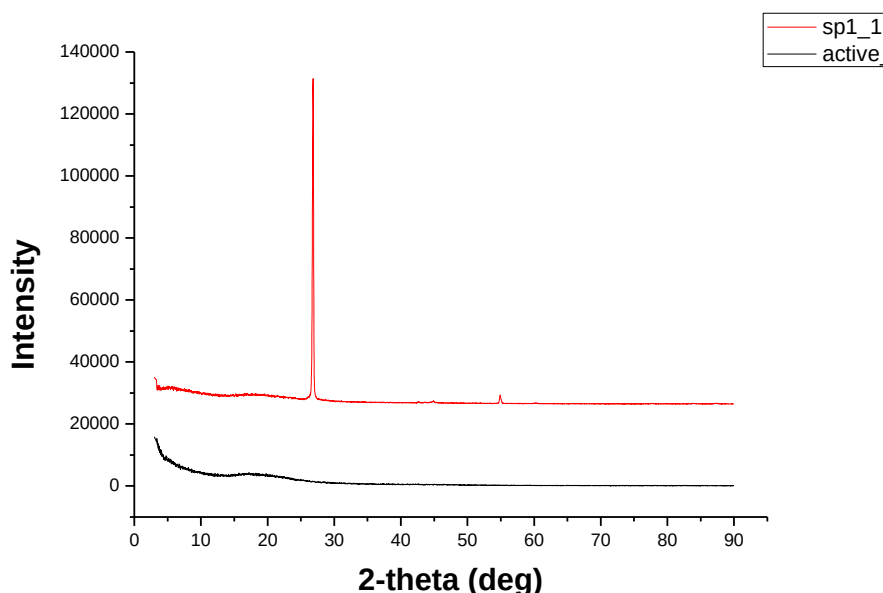


圖 4-1 SP-1 與 PC 的 XRD 鑑定圖(由第一作者製作)

(二)拉曼光譜鑑定

由之前的文獻可知，石墨顆粒的大小及結晶完整性會影響四氯鋁酸根離子的插層效果，因此我們比較石墨的缺陷峰 D band(約在 1350 cm^{-1} 左右)和主要特徵峰 G band(出現在 1580 cm^{-1} 附近)，D/G(I_D/I_G)之比被當作石墨結晶度的指標，其中 D-band 代表石墨缺陷、非晶型碳或是石墨邊緣結構所產生的訊號；而 G-band 則是代表碳原子的平面 sp^2 鍵結振動所產生的訊號。 I_D/I_G 值越大代表 C 原子晶體的缺陷比較多，結晶性也越不完整，導致插層效果較不佳。

我們將 SP-1 和活性碳得拉曼製成圖，並算其 I_D/I_G 值，結合圖 4-3 及表 4-1 可知:活性碳的缺陷較 SP-1 更多，因此 SP-1 比活性碳更容易插層。

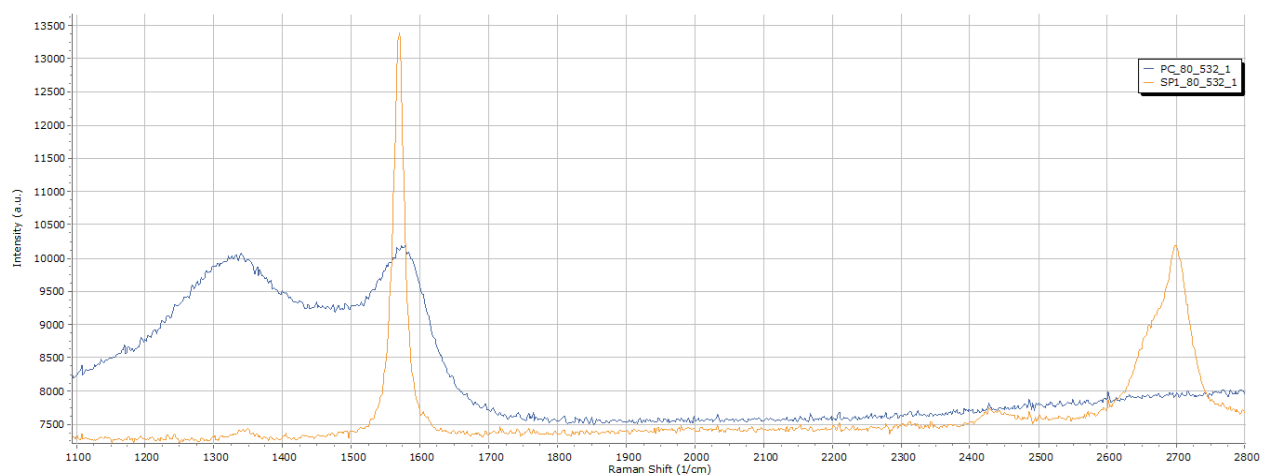


圖 4-2 SP-1 與活性碳之拉曼光譜比較圖(由第一作者製作)

	I_D/I_G 比值
SP-1	0.0309
PC	0.9591

表 4-1 SP-1 與活性碳的 I_D/I_G 比值(由第一作者製作)

二、充放電循環測試

(一)大比例測試

我們用恆定電流的模式進行充放電循環，恆定電流設為 0.0003A，充電上限電壓為 2.2V，放電下限電壓為 0.5V，並將數據繪製成充放電曲線圖，觀察不同比率混合的 SP-1:PC 的電容量。

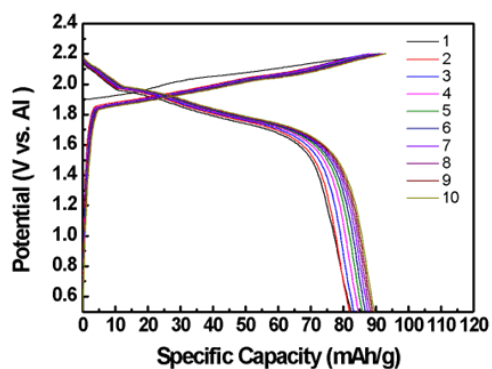


圖 4-3 SP-1:PC=10:0 之充放電圖

(由第一作者製作)

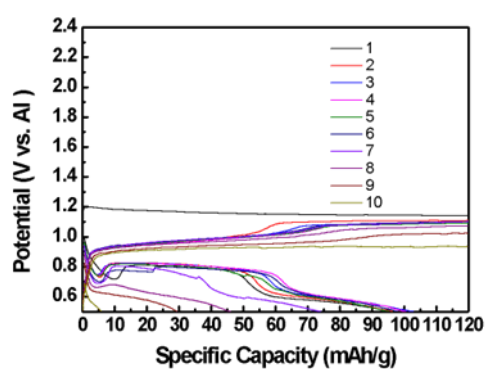


圖 4-4 SP-1:PC=7:3 之充放電圖

(由第一作者製作)

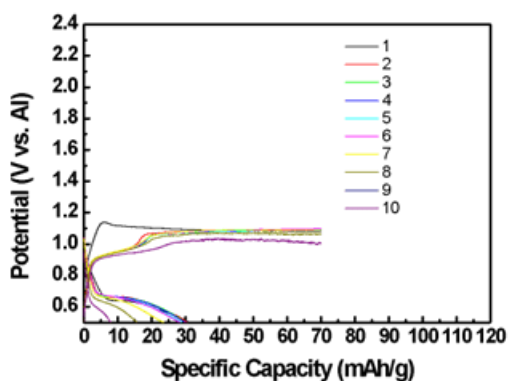


圖 4-5 SP-1:PC=5:5 之充放電圖

(由第一作者製作)

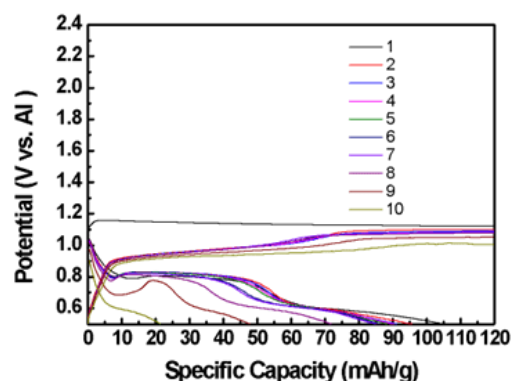


圖 4-6 SP-1:PC=3:7 之充放電圖

(由第一作者製作)

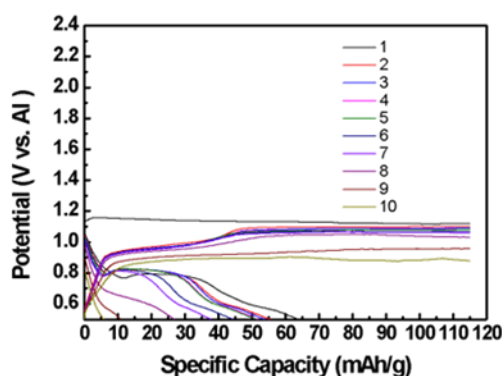


圖 4-7 SP-1:PC=0:10 之充放電圖

(由第一作者製作)

由上述 7:3 和 3:7 的充放電取線圖可知，在石墨中加入活性碳能有效增加電容量，然而我們卻無法在 5:5 的充放電圖中發現這樣的趨勢，我們推測可能是鋁包內的物質產生不一樣的化學反應，導致 5:5 的充放電曲線圖沒有如預期的趨勢呈現，也有可能是活性碳與 SP-1 石墨以比率將近 1:1 的方式混合之後，會使材料無法穩定的附著在碳紙基材上，而使 5:5 的材料在充放電的循環中，漿料提早從碳紙基材上剝落，我們也在電池充放電循環結束之後剪開鋁包，亦有觀察到材料沉積於隔離膜的現象，此現象將在之後章節討論。此外，有活性碳附著之電池的上限電壓皆不超過 1.2V，我們原先推測吸附和插層會相互影響，而吸附會將該被插層的 AlCl_4 搶走，但在我們利用電化學分析來觀察鋁包在充放電時所發生之反應之後，這個觀點將被推翻，而此部分將在之後章節討論。此外，我們從上列的充放電循環圖中也觀察到，加入活性碳之後，對於充電容量是有所貢獻的，但對於放電容量卻沒有太大的助益，在含有 SP-1 的材料當中，其放電容量大約都可達到 100mAh/g，接近並超越純 SP-1 材料的

90mAh/g，但若是觀察僅含活性碳的材料，則發現其放電容量不到 70mAh/g，也因此加入活性碳的材料中，雖然充電容量都有顯著的增長，但放電容量卻沒有太大的提升，使得庫倫效率皆低於僅含 SP-1 的材料，這說明了活性碳的添加，雖然可以透過吸附的方式容納更多的四氯鋁酸根離子，但在放電時活性碳卻沒辦法有效地將全部的四氯鋁酸根離子脫附而釋放回電解質中。

(二)精準比例測試

經歷上述的比例測試後，發現最佳比為 SP-1:PC=10:0，但我們想探究在加入極少活性碳的條件下電池是否有更好的表現，故此節以更精細的比例來進行討論。以及調整電壓測試鋁包電池之下限電壓。並設恆定電流設為 0.0003A，充電上限電壓為 2.2V，放電下限電壓為 0.3V，並將數據繪製成充放電曲線圖，觀察不同比率混合的 SP-1:PC 的電容量。

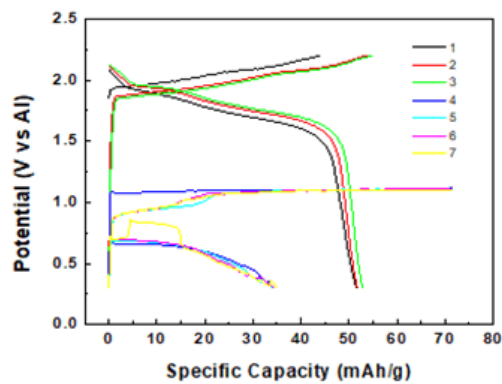


圖 4-8 SP-1:PC=9.9:0.1

(由第一作者製作)

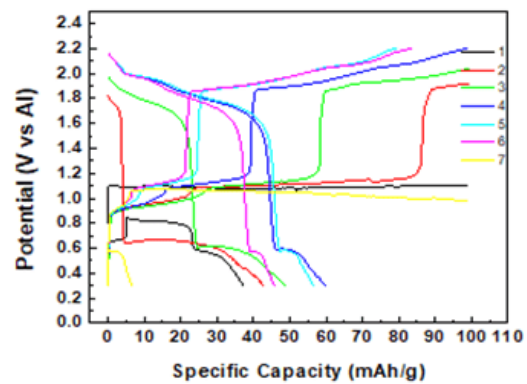


圖 4-9 SP-1:PC=9.8:0.2

(由第一作者製作)

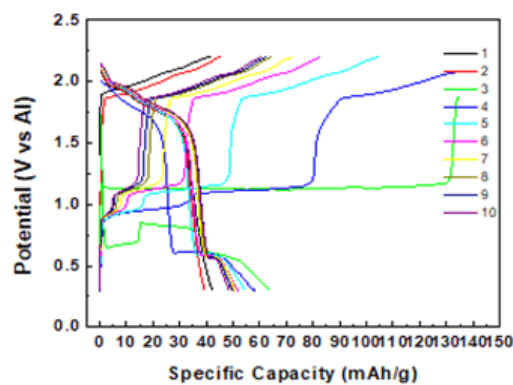


圖 4-10 SP-1:PC=9.5:0.5

(由第一作者製作)

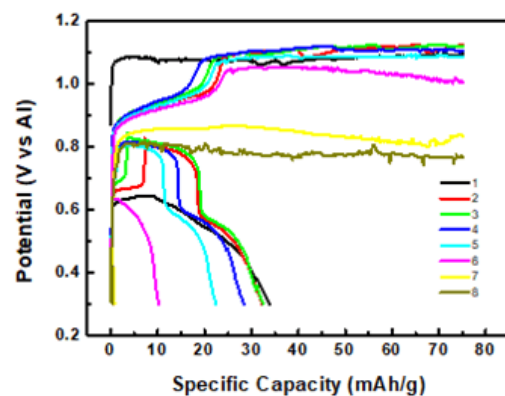


圖 4-11 SP-1:PC=9:1

(由第一作者製作)

此次的充放電圖普遍不穩定，我們可將此不穩定分為二者，分別為曲線的不穩定(曲線不規則抖動)以及充放電圈數的不穩定(前後圈數的差異性)。

曲線的不穩定我們推測是因為活性碳。觀察得知，活性碳的加入雖然可使電池充電容量升高，但卻會使電池充放電曲線不穩定。而由上圖可以發現，電壓在達到 1.0-1.2V 附近，其曲線會有不規則抖動，且有不規則抖動之曲線其電壓往往只能達到 1.2V 以下，故我們推測可能是出現不如我們預期之反應，這點將在下一節進行討論。

最後，以上述四張圖比較其曲線穩定度、電壓、電容量及庫倫效率，得出最佳比例為 SP-1:PC=9.9:0.1，但其在電容量表現仍低於 SP-1:PC=10:0。

1. 充放電圈數的不穩定

上節提到充放電圈數的不穩定，我們推測可能是因為下限電壓太低。而經過多次試驗後，我們推測鋁包電池所用 Ni-Bar 所能承受之最低電壓為 0.5V。而低於 0.5V 之電壓會導致 Ni-Bar 本身參與反應，故我們推測這是使我們充放電圈數不穩定之原因。而我們也利用 SP-1:PC=10:0 之電池作下限電壓不同的充放電測試，結果與我們的推測吻合。

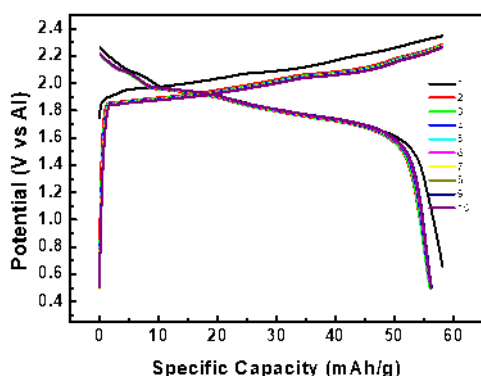


圖 4-12 下限電壓為 0.5V 的電池，可以發現其充放電圈數穩定。(由第一作者製作)

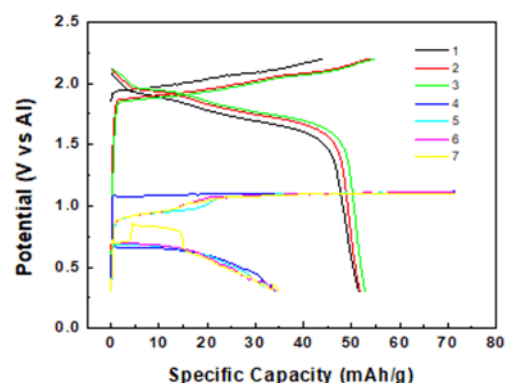


圖 4-13 下限電壓為 0.3V 的電池，可以發現其只有前幾圈具穩定的曲線。(由第一作者製作)

2. 曲線的不穩定

我們推測在電壓 1.2V 左右會發生一個我們沒有預期的反應，故我們利用 CV 來觀察在此期間鋁包之反應。我們分別對純 SP-1 與純 PC 進行電化學分析。

(1)純 SP-1 分析

觀察圖 4-15 可以發現，充電時約在電壓 2.0V 處有明顯反應，而放電則是從 2.5V 至 1.5V 處逐漸下降，在這幾點上，SP-1:PC=10:0 之 CV 和充放電圖基本吻合，沒有產生其他反應的跡象。

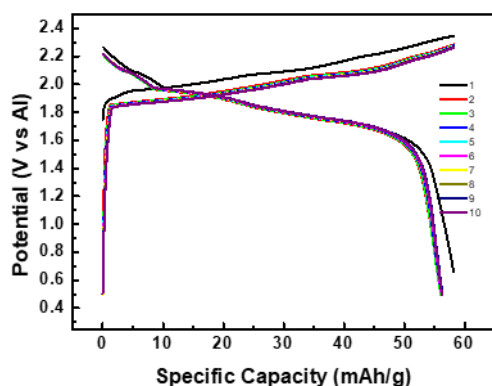


圖 4-14 SP-1:PC=10:0 之充放電圖

(由第一作者製作)

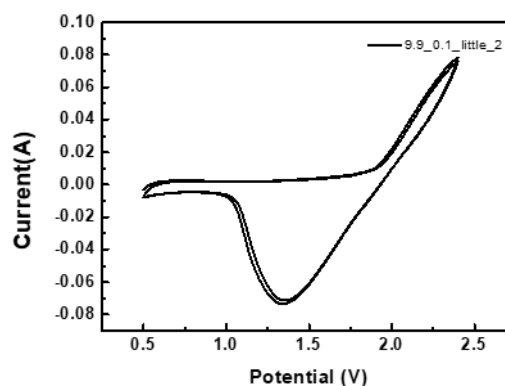


圖 4-15 SP-1:PC=10:0 之電化學分析

(由第一作者製作)

(2)純 PC 分析

觀察下列三張圖可以發現，純 PC 之充放電圖在初始幾圈和後續圈數會有明顯差別，而對照其 CV 後可以發現，圖 4-17 之曲線圖基本符合活性碳吸附物質之斜率，但在圖 4-18 可以發現，在約 1.2V 處有一反應峰，我們得知這裡發生了一個化學反應，而這個化學反應並不是我們最初所預期的，因此我們推翻之前認為吸附將原本該被插層的 AlCl_4 搶走導致電壓反應不佳的論點，而新論點則是我們推測我們所使用之活性碳內混有其他物質，而這個物質在 1.2V 時反應，並競爭本該吸附及插層的電子，進而導致電壓表現不如預期。另外，此反應在 CV 中第一至三圈未出現，而在第四至六圈才出現的表現也符合我們的鋁包在加入活性碳之後其初始圈數與後續圈數有極大差異的結果。

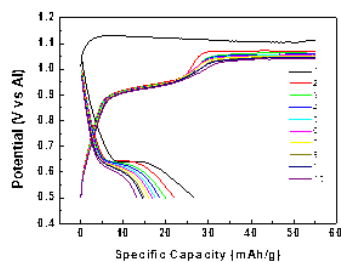


圖 4-16 SP-1:PC=0:10 之充放電圖(由第一作者製作)

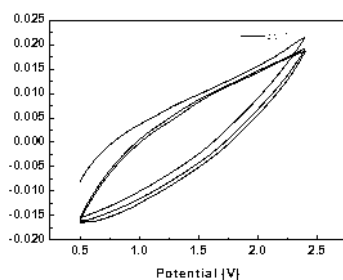


圖 4-17 SP-1:PC=0:10 之第一至三圈的電化學分析(由第一作者製作)

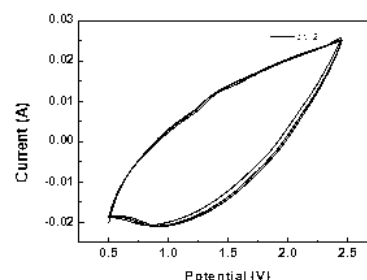


圖 4-18 SP-1:PC=0:10 之第四至六的電化學分析(由第一作者製作)

三、隔離膜對電池效率之影響

由前述的實驗中，我們發現部分的電池並沒有辦法順利將充放電循環的圈數完整跑完（如 SP-1:PC=5:5 的材料），因此我們剪開鋁包電池，並將表現較佳者與表現較差者作比較，發現表現較差者其隔離膜上黑色附著物面積較小，而表現較佳者其黑色附著物面積較大。我們將此情況拍攝下來和其充放電圖作比較，並繪製成下表格。由下表格，可知隔離膜上的黑色附著物較少者，上限電壓可充至 1.2V，而黑色附著物較多者，上限電壓則可充至 2.2V。因此我們推測黑色附著物為漿料上的石墨或活性碳沉積在隔離膜上，而沉積多寡則可對應其陰極參與反應的接觸面積。

而比較後發現，充放電效果較差者的隔離膜上漿料分布剛好對應 Ni-bar 的寬度，因此我們推測漿料上的石墨或活性碳沉積多寡，是因為 Ni-bar 本身具有厚度，導致碳紙無法完全覆蓋在隔離膜上，而這段間距會導致我們在製作鋁包時不慎混入其他氣體，進而發生不如我們預期的其他反應，例如水的電解電壓為 1.23 伏特，與我們觀察到部分未有效運作的電池的充電平台電壓接近。

於是我們決定盡可能讓隔離膜覆蓋在石墨上，在製作鋁包時我們用力壓緊隔離膜，充電之前也用塑膠板和長尾夾來壓緊隔離膜與石墨電極，經過這些處理後我們測量出的數據上限電壓達到 2.4V 的機率由 20% 上升至 60%，而關於部分陰極材料所製成之電池仍未有效運作的問題，我們推測可能是由其他原因導致，像是上一章節所提到之活性碳的加入使電池混入其他物質，皆有可能對造成電池沖放的表現不如預期。

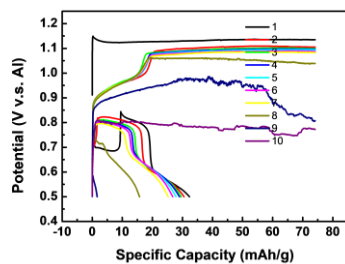


圖 4-19 隔離膜與碳紙有空隙的鋁包，其電壓在 1.2V。(由第一作者製作)

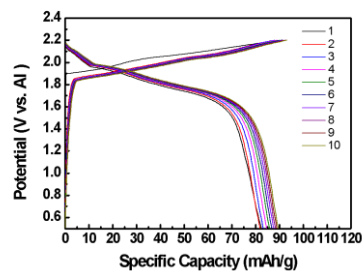


圖 4-20 隔離膜緊貼碳紙的鋁包，其充電電壓可達到 2.4V。(由第一作者製作)



圖 4-21 隔離膜與碳只有空隙的鋁包，剪開後隔離膜只有與 Ni-bar 接觸的地方有漿料。(由作者群拍攝)

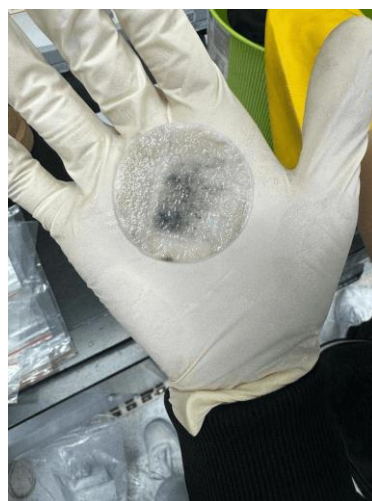


圖 4-22 隔離膜緊貼碳紙的鋁包，剪開後隔離膜的大小約符合整張碳紙的大小。(由作者群拍攝)



圖 4-23 我們用塑膠板加長尾夾緊緊夾住碳紙與隔離膜的位置。(由作者群拍攝)



圖 4-24 剪開電池取出隔離膜，可以觀察到是否反應成功。(由作者群拍攝)

四、太陽能充電模組

我們選擇 SP-1:PC=10:0 之鋁包合成太陽能充電模組，而為了避免鋁包電池內正負電極相距太遠，影響到充放電效率的問題，我們用麻將尺、螺絲與螺帽製作了鋁包固定模組，並透過焊接的方式連接正負極，而充電則使用功率 0.6W 之太陽能板。鋁包固定裝置不僅壓縮鋁包，使其中正負極更加接近，同時也解決了鋁包電池不易攜帶等缺點。而我們的模組可分為第一代及第二代，以下會利用三用電表、充放電儀、小馬達及小燈泡對其進行介紹，並在最後對我們自製的模組及市面上的大型儲能電池作比較。

(一)第一代充電模組

第一代充電模組我們使用三包鋁包進行並聯，圖 4-25 為自製鋁包固定裝置，而圖 4-26 為成品。

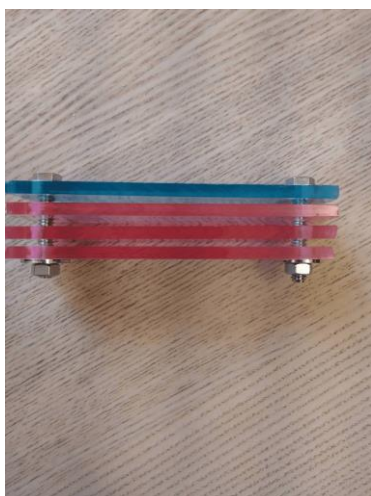


圖 4-25 麻將尺加上螺絲螺帽鎖緊，將鋁包放進去之後再將螺絲鎖更緊，縮緊隔離膜與碳紙距離。(由第三作者製作)

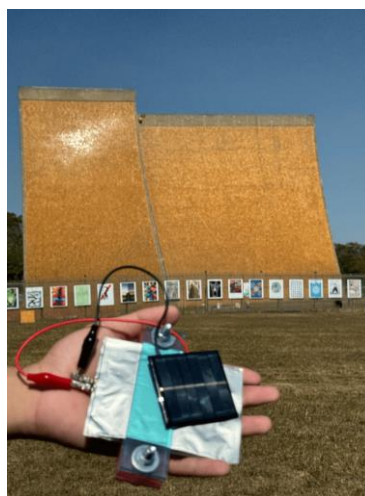


圖 4-26 第一代模組製作完成，並在戶外進行充電的過程。(由作者群拍攝)

1. 實際充放電測試

透過 6×5.5 平方公分的太陽能板充電，我們的充電模組可使一顆 2.5V 的燈泡亮起來，而 3V 的馬達則運轉不起來，因此我們得知模組最大電壓應是 2.5V 到 3V 之間。而我們是透過並聯的方式將電池連接，故每顆電池的輸出電壓為 2.5V 上下，與充放電測試的結果吻合。



圖 4-27 充電模組放置一個月之後並進行正常充放電，電壓約穩定維持 1.2V 左右。(由作者群拍攝)

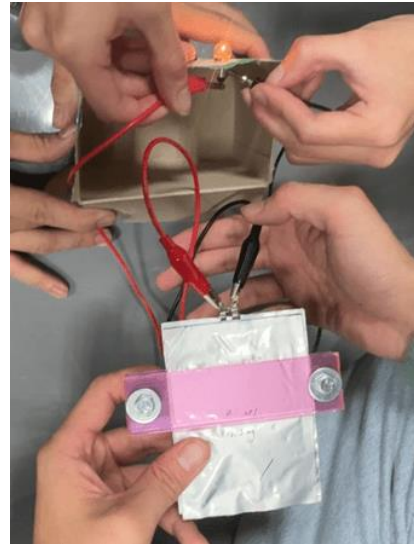


圖 4-28 充電模組充了兩個小時之後可以讓 2.5V 燈泡亮 1 分鐘左右。(由作者群拍攝)

2. 三用電表測量

根據圖 4-29，我們可以推得以下觀點：

- (1) 每天晚上充電模組下降的電壓，可以發現第三天至第四天的晚上，電壓下降明顯變少，故推測充電模組逐漸穩定。
- (2) 第三天出現 2.5V 充電後電壓卻下降情形，推測可能是充電模組最大容量為 2.5V，或是內部電池出現老化現象。
- (3) 第三天的充電速度較快，且總電壓也較高。推測內部電池在充放電過程中活化了，或是在充放電過程中使已被插層的石墨層變多，使其更容易且更多的容納 AlCl_4^- 。

Day1	1hr	1.8V	60mA	做好電池直接充
↓ 放置19hr，電壓下降至0.4V				
Day2	2hr	2.0V	60mA	測量前有先用燈泡放電
↓ 放置2hr，電壓下降至1.6V				
Day2	2hr	2.4V	60mA	充好直接測
↓ 放置18hr，電壓下降至0.98V				
Day3	1.5hr	2.5V	60mA	充好直接測
↓ 未間隔				
Day3	2hr	2.2V	57mA	充好直接測
↓ 放置19hr，電壓下降至2V				
Day4	2hr	2.5V	55mA	充好直接測

圖 4-29 三用電表的測量圖，依序是天數、充電時間、電壓、電流、備註
(由第二作者製作)

(二)第二代充電模組

第二代充電模組我們主要對電壓、電容量及模組體積進行優化，我們一樣利用 SP-1:PC=10:0 之鋁包進行組裝。這次我們將兩顆鋁包串聯為一單位，並將兩單位(兩組串聯之鋁包)的鋁包進行並聯，藉此提升其充電模組電壓及電容量。在模組體積方面，我們將鋁包大小縮小，使鋁包固定裝置體積縮小，進而讓模組整體縮小。以下對模組、模組放電及鋁包大小對效率之影響進行介紹。但是由於時辰問題，我們有部分數據缺失，將在後續展板進行完善。



圖 4-30 左邊為第一代充電模組，右邊為第二代充電模組，兩者在體積上有明顯差異。(由作者群拍攝)



圖 4-31 第二代充電模組加上太陽能板進行充電的過程。(由作者群拍攝)

1. 實際放電測試

透過 9×6 平方公分的太陽能板充電，第二代模組成功讓馬達運轉，但本次鋁包有漏液問題且因時辰關係無法重做，故我們並未進行長時間充電，將鋁包合成模組後僅進行短時間的充放電。而透過充放電圖得知鋁包在做好後其自帶電壓為 $1.8V$ 左右，故我們的模組可讓馬達運轉也證明串聯的焊接是成功的。至於充放電數據將會在展板進行完善。

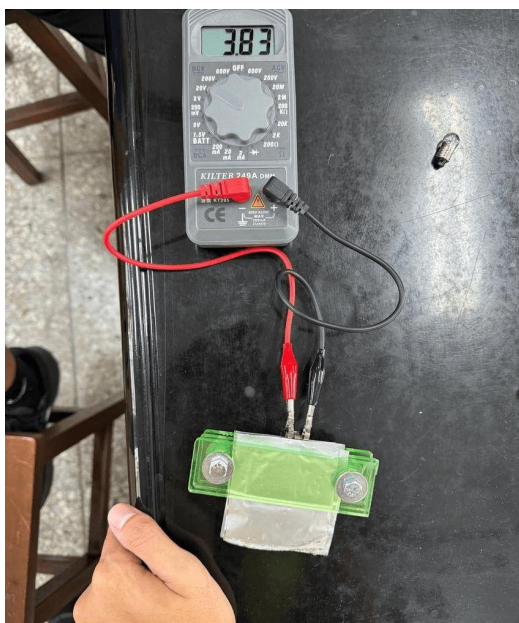


圖 4-32 透過三用電表測電壓為 $3.83V$ ，得知焊接成功讓鋁包串聯。(由作者群拍攝)

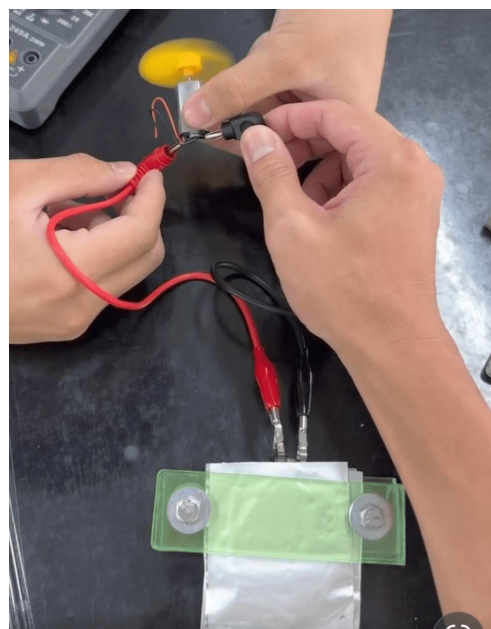


圖 4-33 第二代模組成功讓馬達運轉，達到 $3V$ 以上的電壓。(由作者群拍攝)

2. 鋁包大小對效率之比較

第一代模組採用 11×16 大小之鋁包，第二代則採用 7×12 大小之鋁包，以下是 $SP-1:PC=9.9:0.1$ 之鋁包在兩種大小上的充放電測試，透過圖 4-34 及圖 4-35 比較，可以得知縮小鋁包對於其電壓並無影響，但在電容量方面則略有下降，但這點可以透過連接更多鋁包來解決。而我們第一代模組用了三顆鋁包，總重量為 $147g$ ；第二代則用了四顆鋁包，總重量為 $102.2g$ ，計算其儲能效果第二代優於第一代。故縮小鋁包雖讓電容量減少，但以模組來說，縮小體積利大於弊。但由於時辰問題，我們沒有實際測得 $SP-1:PC=10:0$ 之鋁包比較，只能由 $SP-1:PC=9.9:0.1$ 之鋁包推測，在理論上兩者結果應相同。

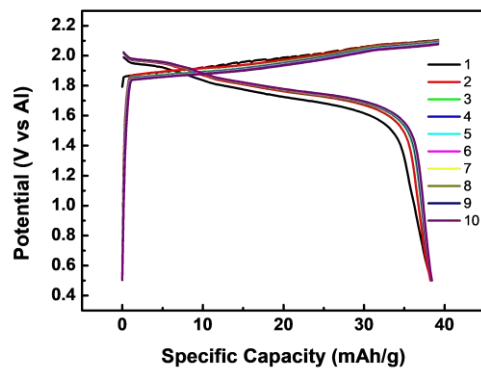


圖 4-34 7*12 之鋁包的充放電圖(由第一作者製作)

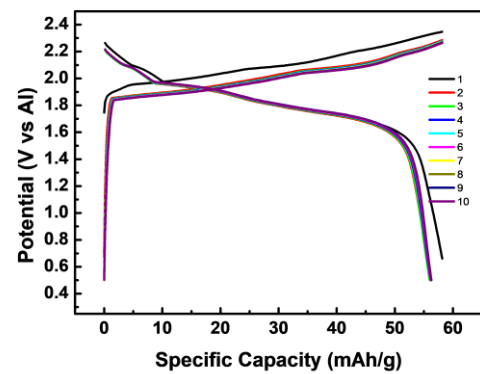


圖 4-35 11*16 之鋁包的充放電圖(由第一作者製作)

(三)儲能效率比較

我們將市面上車用鉛酸電池與自製模組作比較，利用電容量除以電池重來算其比值，並就其比值對儲能效率作比較。市面上電容量的單位為 Ah(電流 A * 放電時間 h)，故我們先將充放電圖 mAh/g 換算為 Ah，然後在用此電容量除以模組重量得出比值並進行比較。但由於時辰問題，無法對第二代模組進行充放電分析，這邊採用圖 4-3 之 SP-1:PC=10:0 之電容量來計算其理論值，在實際上因鋁包縮小會減少電容量，故實際數據會比理論值要稍微減少，後續數據會在展板完善。計算後得知，第二代模組的比值為 0.0414Ah/kg，而鉛酸電池我們用規格為 35Ah、含液重量為 10kg 之規格來計算，可以得知其比值為 3.5Ah/kg，比較後發現我們自製的模組在儲能效率方面遠低於市面上的大型鉛酸電池。

伍、結論

在 SP-1:PC 的比較中我們發現，3:7 和 7:3 的充電容量比 10:0 的多了 25mAh/g，而 0:10 比 10:0 的多了 20mAh/g，但 3:7 比 7:3 放電容量只多 5mAh/g，甚至 0:10 的放電容量比 7:3 少了 35mAh/g 以及比 10:0 的少了 25mAh/g，因此推測活性碳的加入可以透過吸附的方式使碳紙容納更多的四氯鋁酸根離子，有效提高充電容量。但活性碳可能無法有效的使四氯鋁酸根離子釋放回電解質，故放電容量並未有明顯提升，甚至在 0:10 出現放電容量下降現象。

而比較 SP-1:PC=10:0 與另外四張充放電圖，可發現只有 10:0 的電池容量達到 2.2V，其餘皆在 1.2V，結合 SP-1 與 PC 之 CV 得知電池在進行充放電時，約在電壓為 1.2V 附近會有一個未知反應將電子搶走，使其吸附和插層無法順利進行，而推測是活性碳內混有未知物質導致這個反應發生。

在最佳比例之鋁包部分，透過大比例測試及精準比例測試得知，在混合 SP-1 與活性碳之比例中，充放電最佳者為 SP-1:PC=9.9:0.1，但其在電容量方面仍不如 SP-1:PC=10:0 之鋁包，故目前最佳效率仍為純 SP-1 之鋁包。

在部分未能有效運作的電池中，剪開電池我們發現 Ni-bar 的厚度會讓碳紙與隔離膜之間有空隙，進而跑入空氣或是水進行副反應，導致其電壓表現不如預期。而後我們透過外部加工使隔離膜更為貼緊後此情況有明顯改善。

最後，我們的太陽能充電模組考量上述幾點，製作出第一代充電模組，第一代模組的電壓約在 2.5V 上下，而儲能效率約為 0.0216Ah/kg。而透過實驗我們得知鋁包的縮小可提升模組之儲能效率，並改變電池連接方式使電壓達到更大，綜上所述，設計出第二代模組，第二代模組可讓 3V 之馬達運轉，且其理論之儲能效率為 0.0414Ah/kg。

陸、未來展望

目前市售電池的電壓約為 3-4V，而我們自製的充電模組電壓上限可達 3V 以上，與市面上電池的較大的差異為電容量，就第一代模組來說，其只能維持 2.5V 的燈泡亮起一分鐘。故我們希望改善電池的結構來增加總電量。

在電池本身方面，我們希望持續地找出 SP-1 與活性碳的最佳比，使其插層和吸附產生兼容性的同時，其電容量能夠超過純 SP-1 電池。並且針對活性碳內未知物質進行研究，找出其為何種物質，解決加入活性碳時反應就不穩定的問題。而我們在縮小鋁包體積的同時，發現縮小體積亦會增加鋁包漏液的機率，故未來希望找出找出可以讓 7×12 之鋁包運作且不會漏液之電解液量。

若將市面上電池分為小型便攜電池及大型儲能電池。就小型便攜電池而論，我們的太陽能充電模組體積過大，因此我們希望在保證電池效率的前提下使充電模組盡量縮小。把隔離膜替換成更小的尺寸，增加陰陽極的大小使其反應面積增加，盡可能的縮小電池的體積。並且在充電模組內部加裝固定器避免隔離膜在使用中脫落，增加電池的穩定性。而就大型儲能電池而論，我們希望改善電池的結構來增加總電量，使其儲能效率上升。

我們經由 SP-1 與活性碳配比結果，發現活性碳比率愈多吸附能力愈強電容量也會增加，但電池庫倫效率也會隨之減弱，我們推測是因為 SP-1 的減少使得電子插層數降低，我們接下來希望尋找到其他具有吸附能力而不影響到庫倫效率的物質，進而替代活性碳，加入到我們未來的鋁電池充放電模組中。

若以鋁電池和鉛酸電池作比較，鋁電池的能量密度與鉛酸電池相當，鋁電池有安全性高、壽命長、材料豐富等優點，所以未來有可能取代鉛酸電池。但目前我們自製之模組其能量密度太低，故我們希望透過石墨陰極的改善來解決能量密度的問題，做出穩定且高效的大型儲能電池。

柒、參考文獻資料

- 1.Grjotheim, K.; Matiasovsky, K., *Acta Chem. Scand.* 1980, 34, 666-670.
- 2.Fellner, P.; Chrenková-Paučírová, M.; Matiašovský, K., *Surf. Coat. Technol.* 1981, 14 (2), 101-108.
- 3.Lin, M.-C.; Gong, M.; Lu, B.; Wu, Y.; Wang, D.-Y.; Guan, M.; Angell, M.; Chen, C.; Yang, J.; Hwang, B.-J., *Nature* 2015, 520 (7547), 324.
- 4.Wang, D.-Y.; Wei, C.-Y.; Lin, M.-C.; Pan, C.-J.; Chou, H.-L.; Chen, H.-A.; Gong, M.; Wu, Y.; Yuan, C.; Angell, M., *Nat. Commun.* 2017, 8, 14283.
- 5.Chen, H., et al., *Adv. Mater.*, 2017, 29(12), 1605958
- 6.Gale, R.; Osteryoung, R., *Inorg. Chem.* 1979, 18 (6), 1603-1605.
- 7.林芳慶, 碩士論文. 國立中央大學 2013.
- 8.魏川育, 碩士論文. 國立臺灣師範大學 2015.
- 9.李天生, 碩士論文. 東海大學 2019.

【評語】 052407

本作品利用天然鱗片石墨 SP-1 及多孔活性碳 PC 混合製作陰極、鋁片陽極、離子液體 EMIC+AlCl₃ 電解液、玻璃纖維隔離膜製備鋁離子電池，探討不同比例 SP-1 及 PC 混合製作陰極，對所組裝鋁離子電池充放電測試時電容量及庫倫效率之影響。實驗結果發現，純 SP-1 陰極鋁離子電池之庫倫效率最高，加入活性碳之陰極鋁離子電池，充電比電容增加，但放電比電容增加有限，驗證多孔活性碳可吸附更多四氯鋁酸根離子，增加充電比電容，但放電時活性碳所吸附四氯鋁酸根離子不易釋放，導致放電比電容沒有明顯提升，進而獲得充放電效率及電容量之最佳 SP-1:PC 混合比例。作者詳細描述實驗設備與器材使用，熟知儀器操作原理。但是，宜進行多孔活性碳比表面積、孔徑分佈及表面官能基等物化性質量測分析，深入探討含活性碳陰極對所組裝鋁離子電池，其充放電測試所得比電容之影響，以及評估鋁離子電池效率與太陽能充電模組之實務應用可行性。

作品簡報

鋁

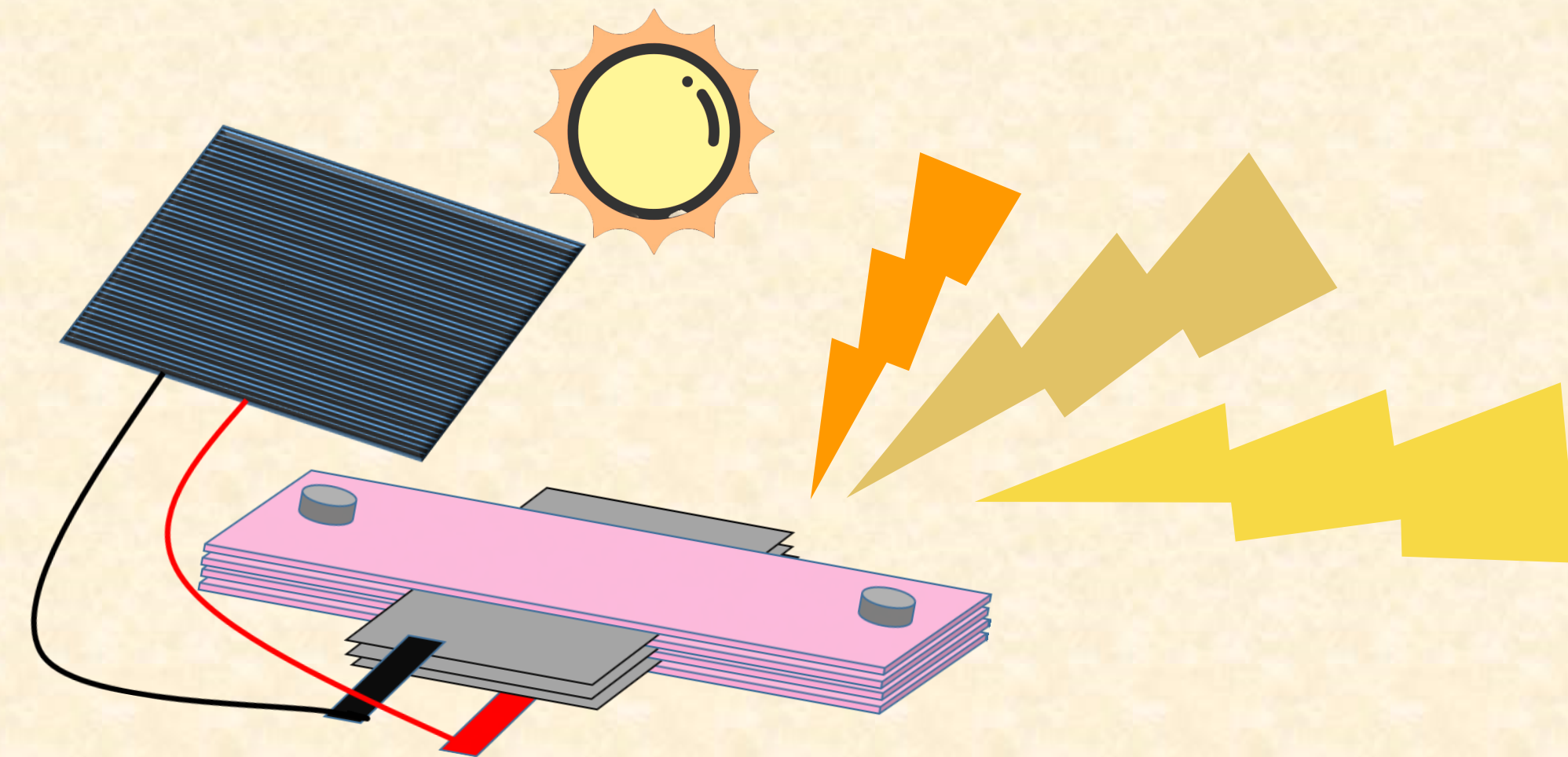
試

春

秋

-探討鋁離子電池陰極元件

對效率之影響並試做太陽能充電模組



研究動機

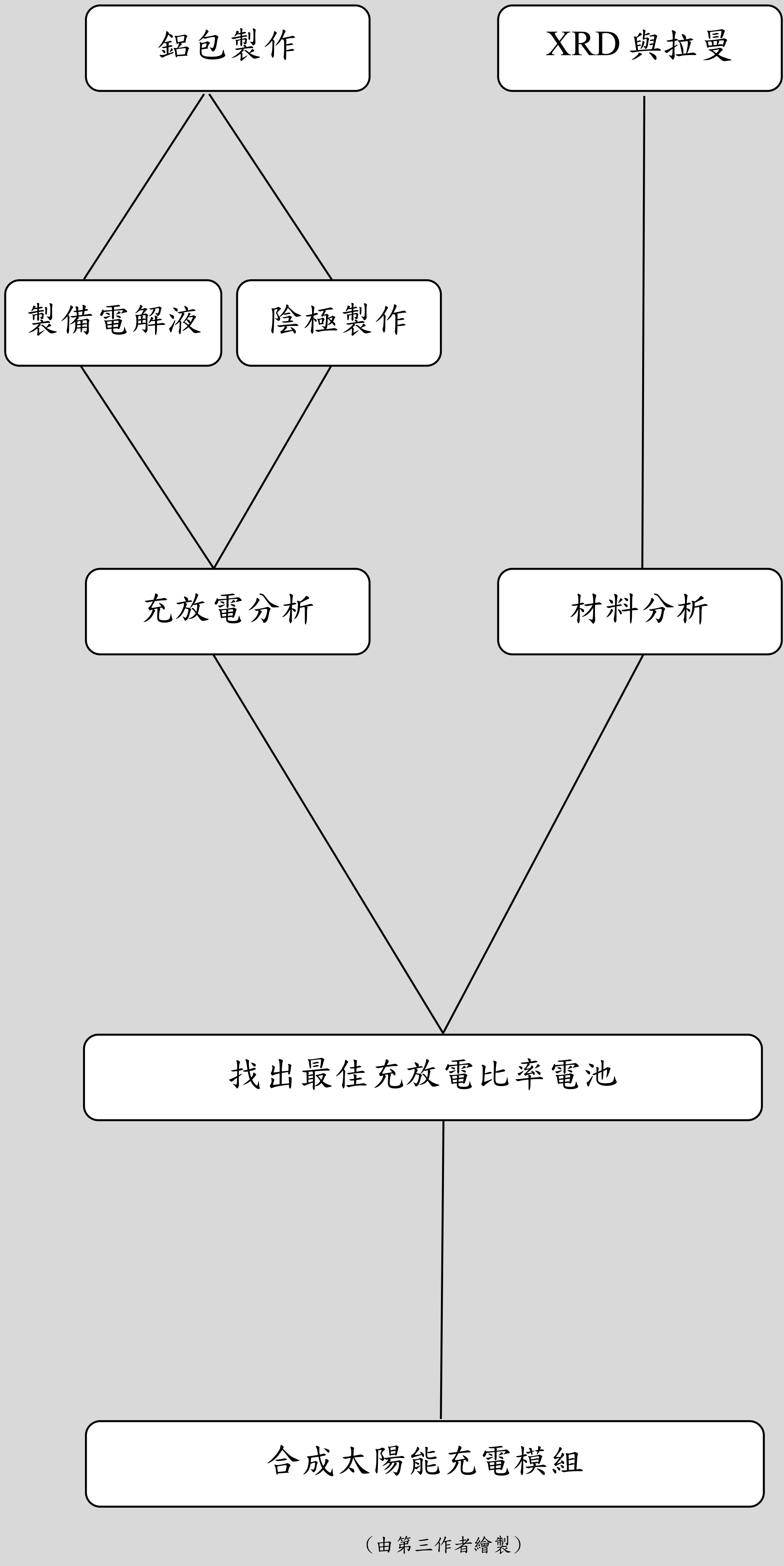
電力在生活中不可或缺，電池更是在急難時不可或缺的物品。由於太陽能雖然是最好取得便捷資源，但太陽能的收集及儲存需仰賴穩定且便宜的充電電池，鋁離子電池即具有上述的優點。而在電池中石墨陰極扮演著極其重要的角色。所以我們決定自製電池並透過調整其石墨陰極材料組成找出最佳效率電池，最後結合太陽能板實現小型充電模組的效果。

研究目的

- 1.以不同比率的 SP1:PC 進行充放電實驗，藉此研究陰極材料的吸附比表面積如何影響電池效率。
- 2.以最佳充放電效率的電池結合太陽能板做出太陽能充電模組。

研究過程與方法

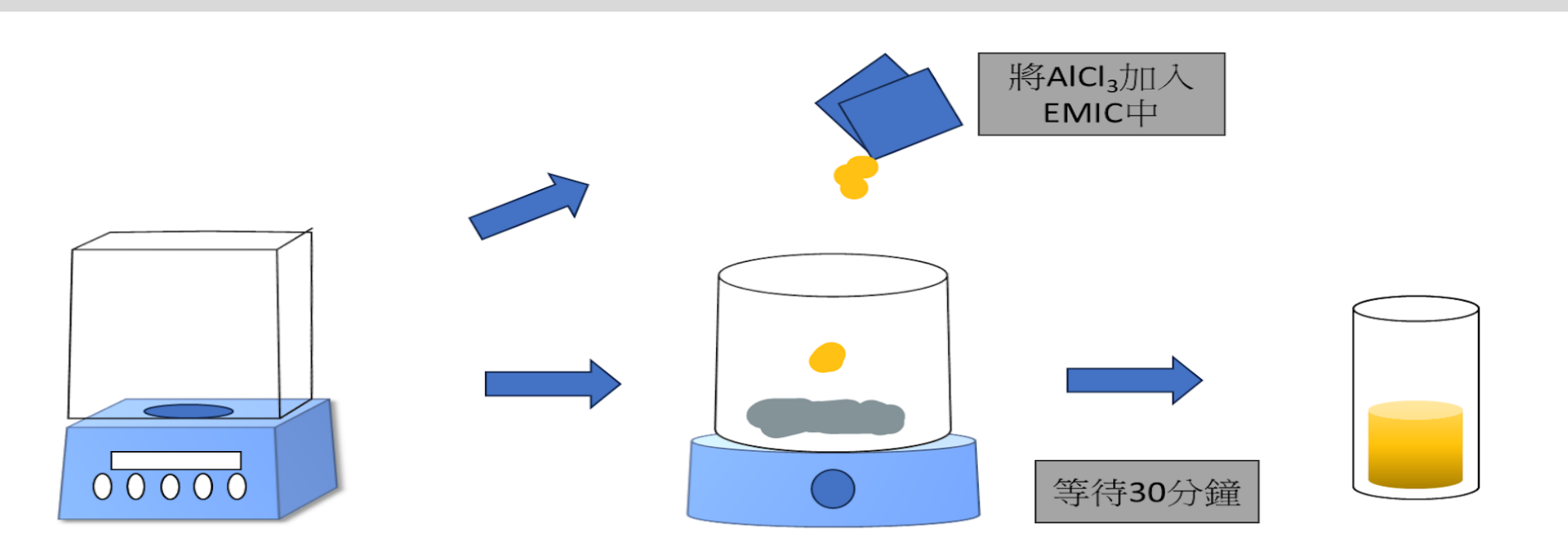
流程圖



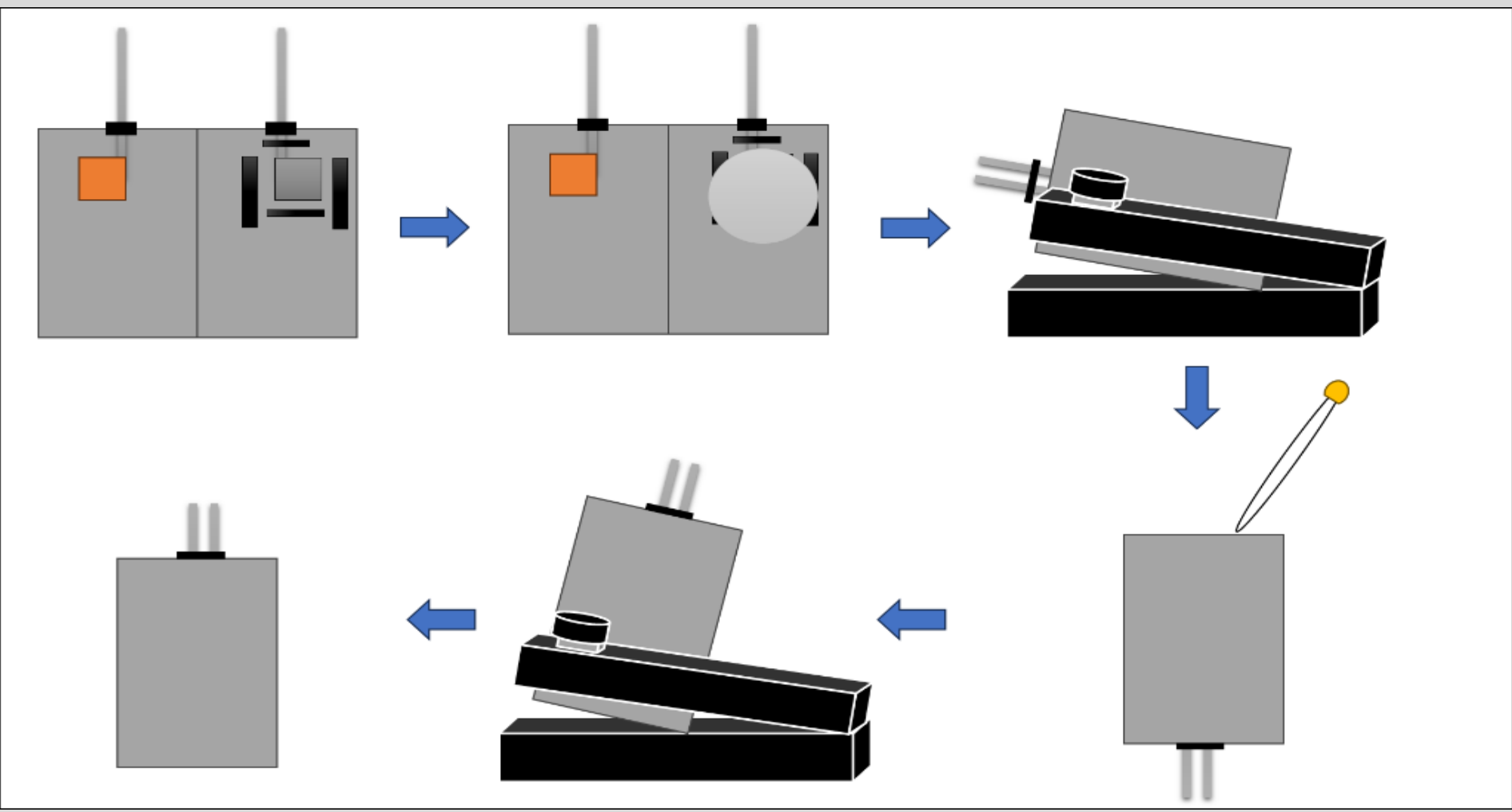
電解液製備

將秤量紙放入微量天秤後歸零，量取所需要的 EMIC 和 AlCl_3 ，並將 EMIC 先加入樣本瓶中，再將含有 EMIC 的樣本瓶放上電磁攪拌器攪拌，而後將 AlCl_3 緩慢加入樣本瓶中，待 AlCl_3 完全加入後，再將樣本瓶放置於電磁攪拌器上攪拌三十分鐘使其均勻混合。

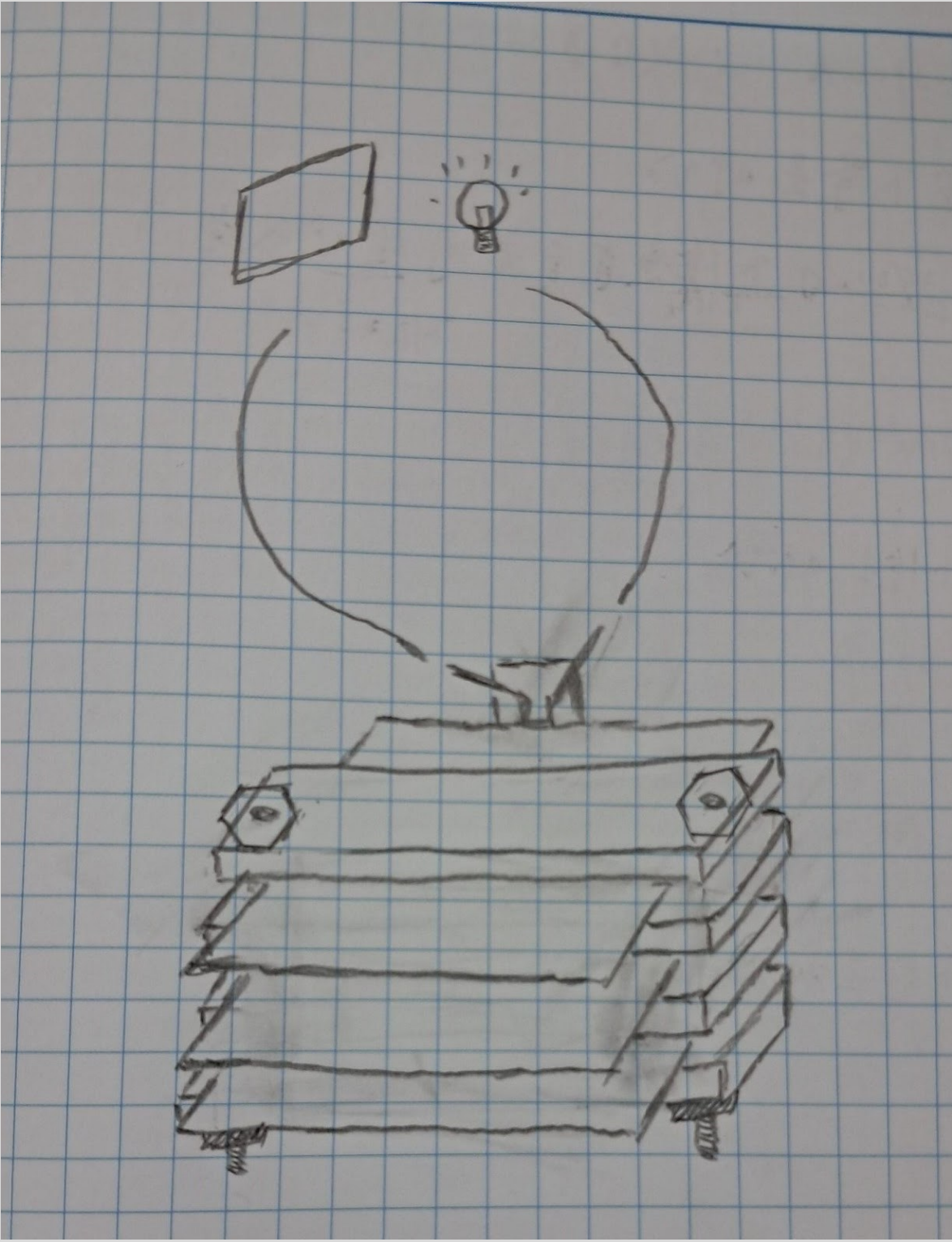
實驗示意圖



製備電解液示意圖 (由第二作者繪製)



鋁包製作示意圖 (由第三作者繪製)



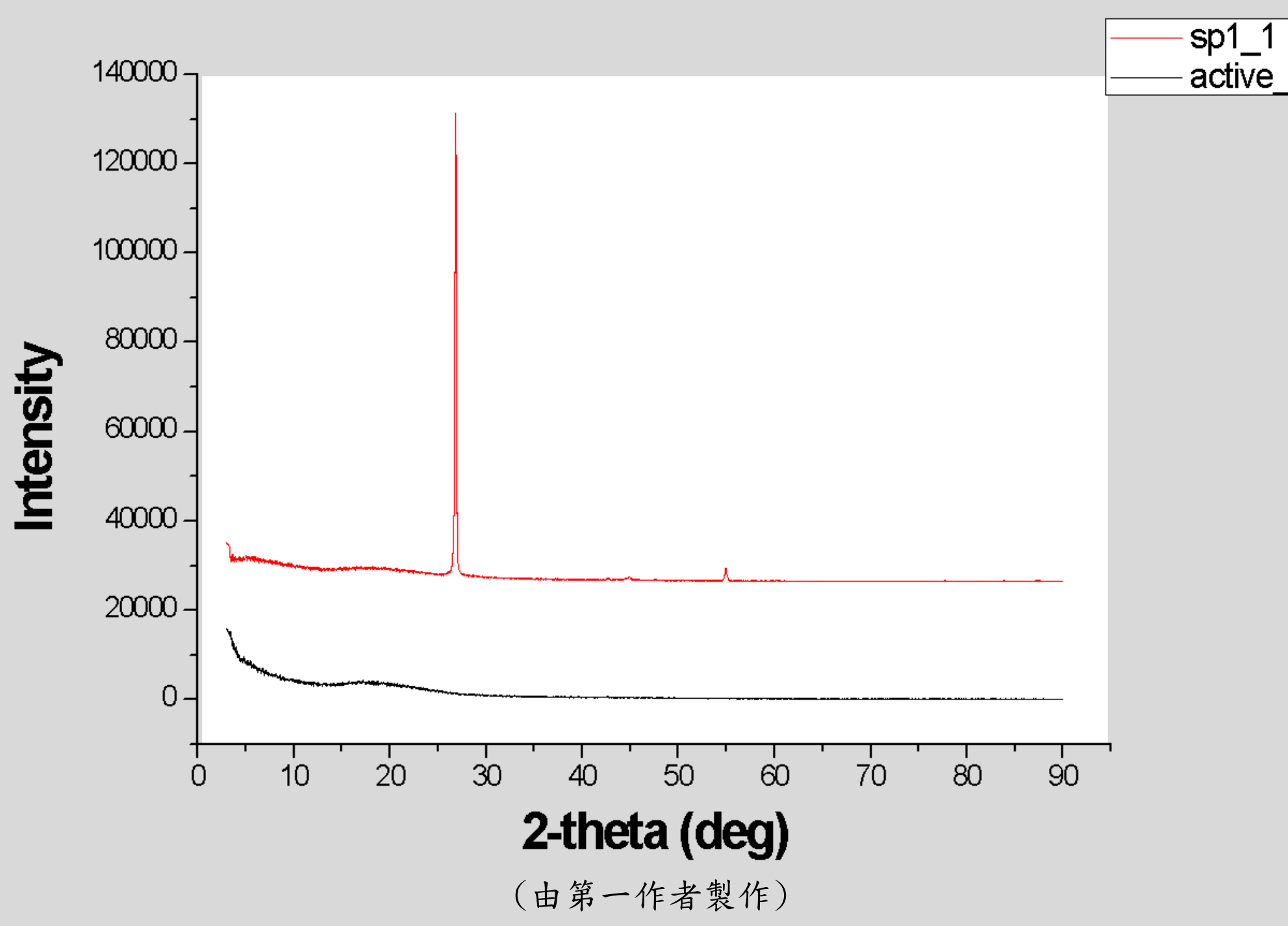
太陽能充電模組圖 (由第二作者繪製)

陰極製備

- 1.配置漿料:將 SP-1 與 PC 以 10:0、7:3、5:5、3:7、0:10 的比例分別測量，並倒入樣本瓶中。再各自加入 0.01 克的 PVDF、2 毫升的 NMP 及磁攪拌子，蓋好並用止洩帶固定，放上電磁攪拌器讓其充分混合 2 小時。
- 2.電極片製備:裁 2 * 2.3 平方公分的碳纖維紙五張，並記錄其重量，用培養皿盛裝，再放置於磁石加熱攪拌器上，使用微量吸管吸取 220 微升的漿料滴在碳紙上，並用不同漿料重複五次，而後加熱兩個小時，待其冷卻再秤重。

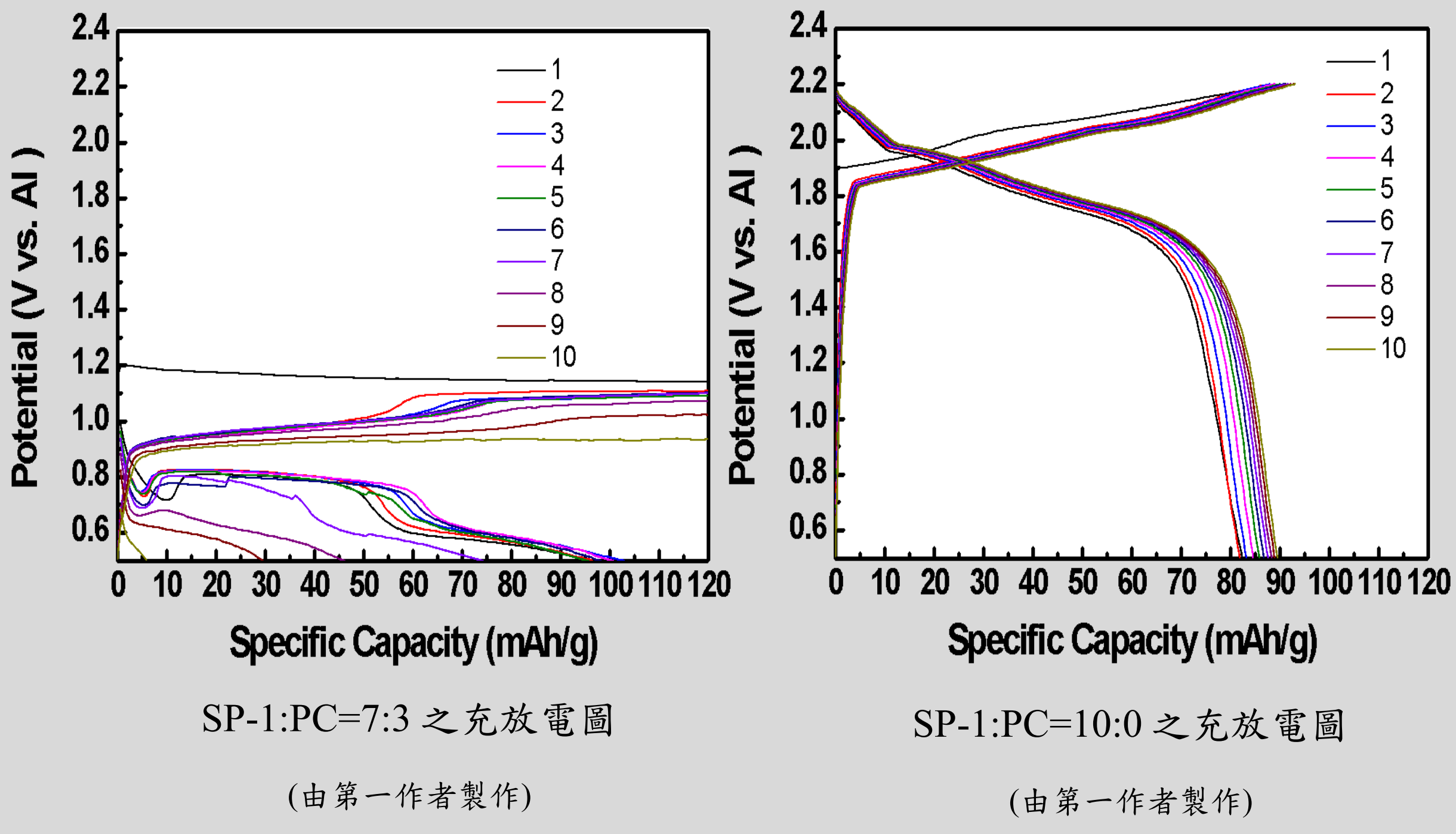
結果與討論

材料鑑定



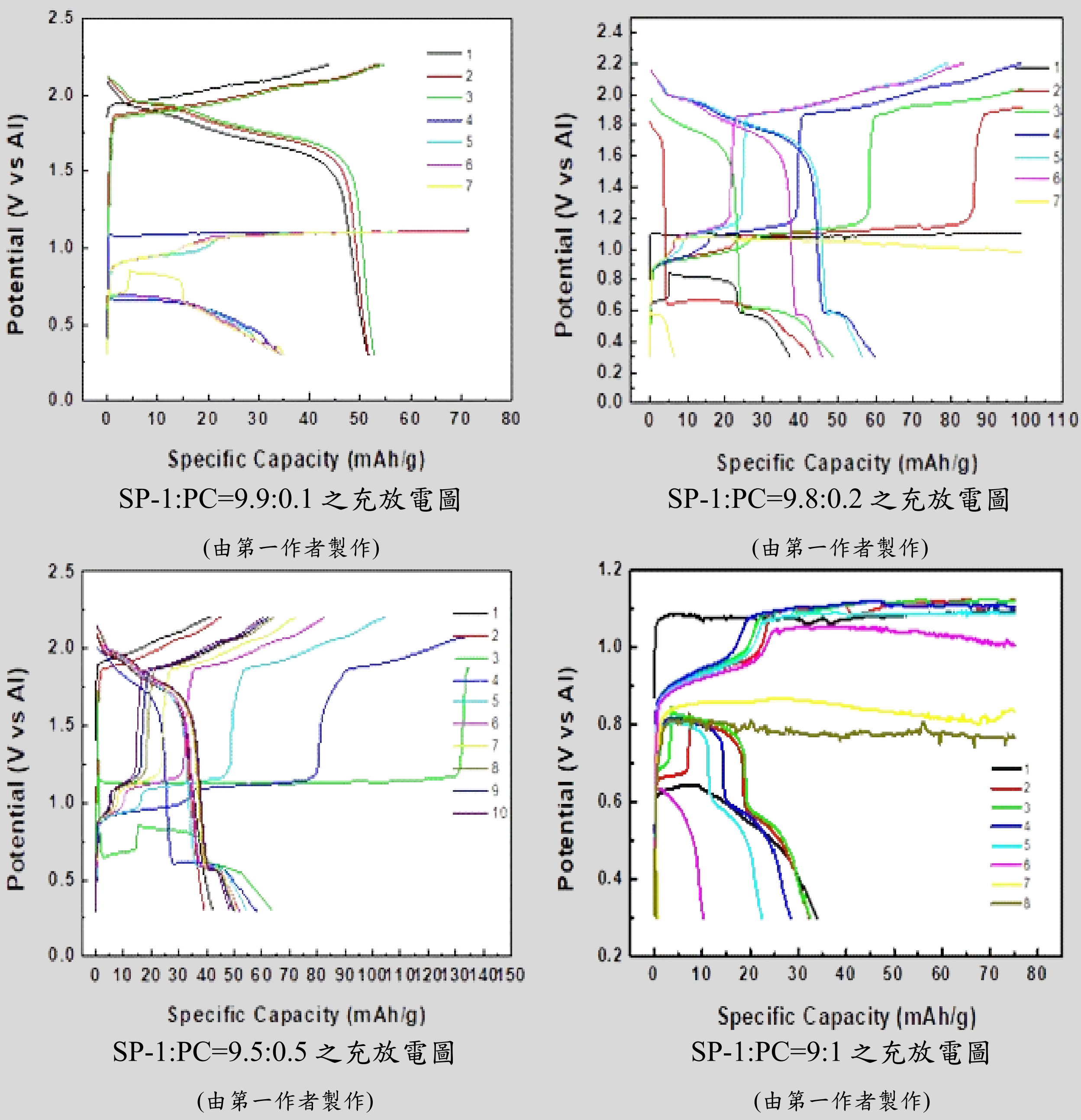
上圖是 XRD 分析圖，SP-1 的特徵峰明顯而活性碳幾乎沒有特徵峰，可知 SP-1 的結晶性良好。故 SP-1 為容易插層的晶質碳，而活性碳為非晶質碳，此現象在拉曼光譜分析亦可得相同結果。

大比例測試



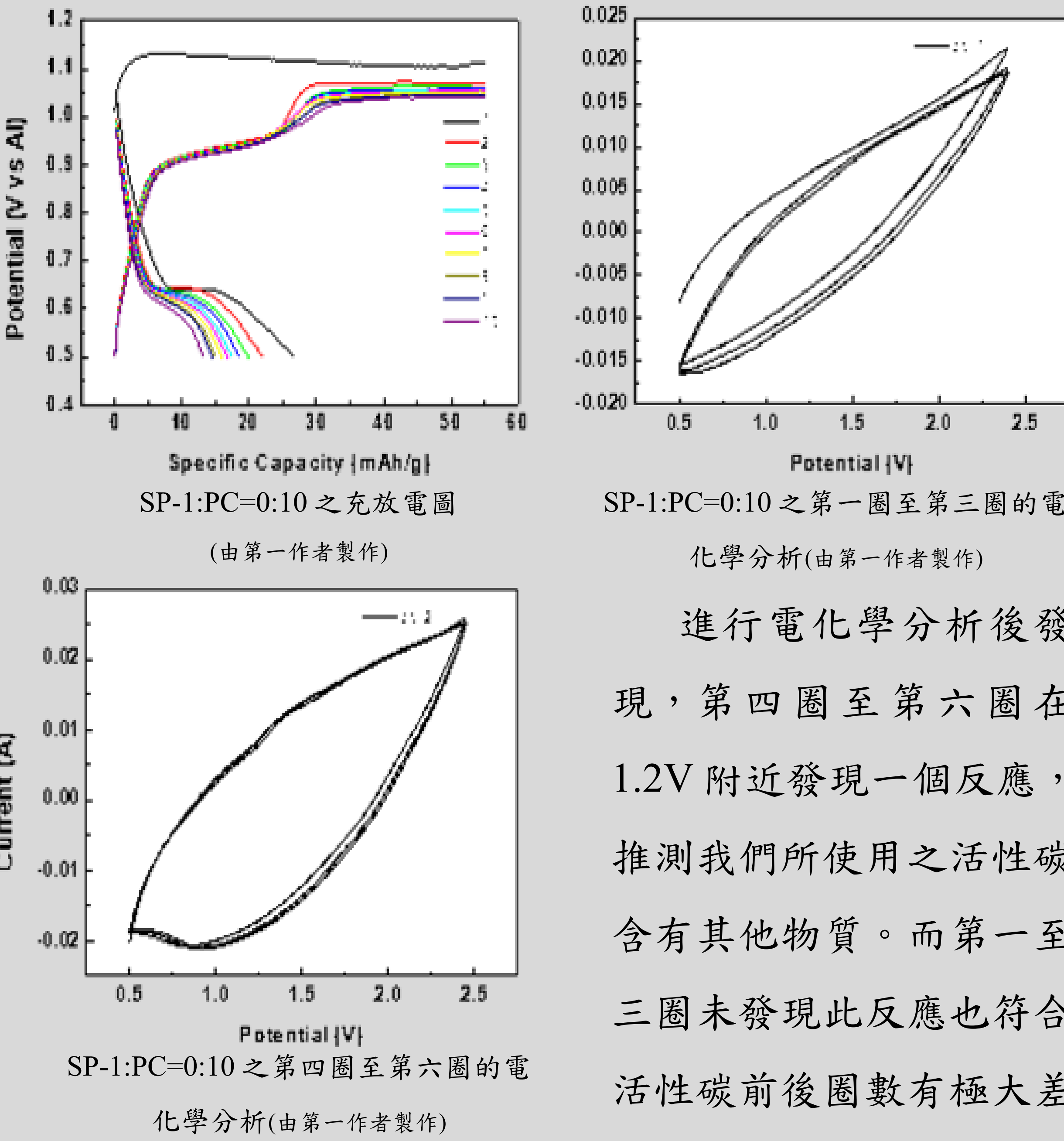
- 1.在石墨中加入活性碳能有效增加電容量。
- 2.有活性碳附著之電池上限電壓皆不超過 1.2V。
- 3.活性碳的加入對於充電電壓有顯著貢獻，但對於放電電壓的影響卻不明顯。

精準比例測試



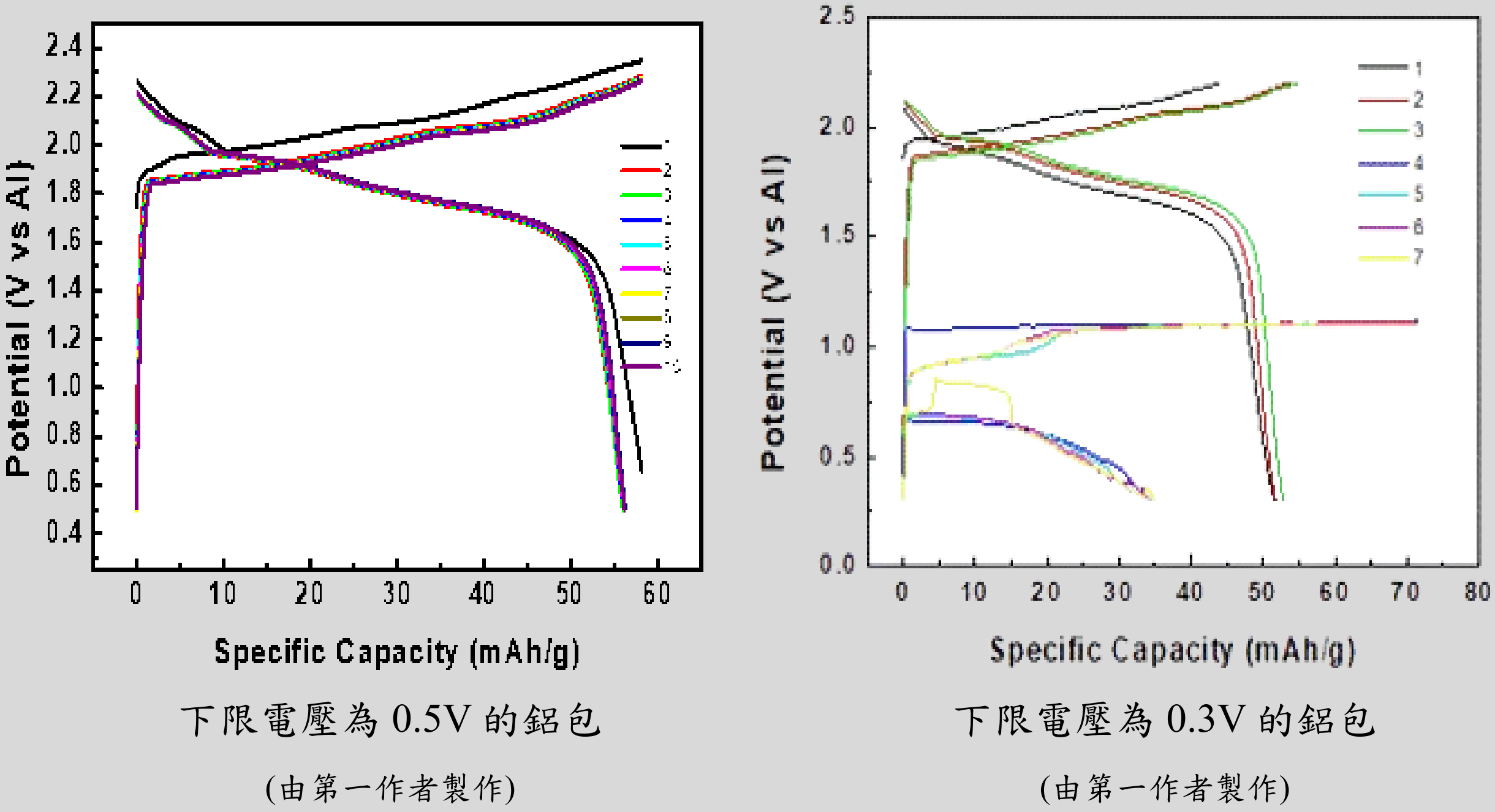
相較於大比例，這次充放電的下限電壓我們設 0.3V，發現充放電圖普遍不穩定。而我們將此不穩定現象分為曲線的不穩定及充放電圈數的不穩定，並進行探討。

曲線的不穩定



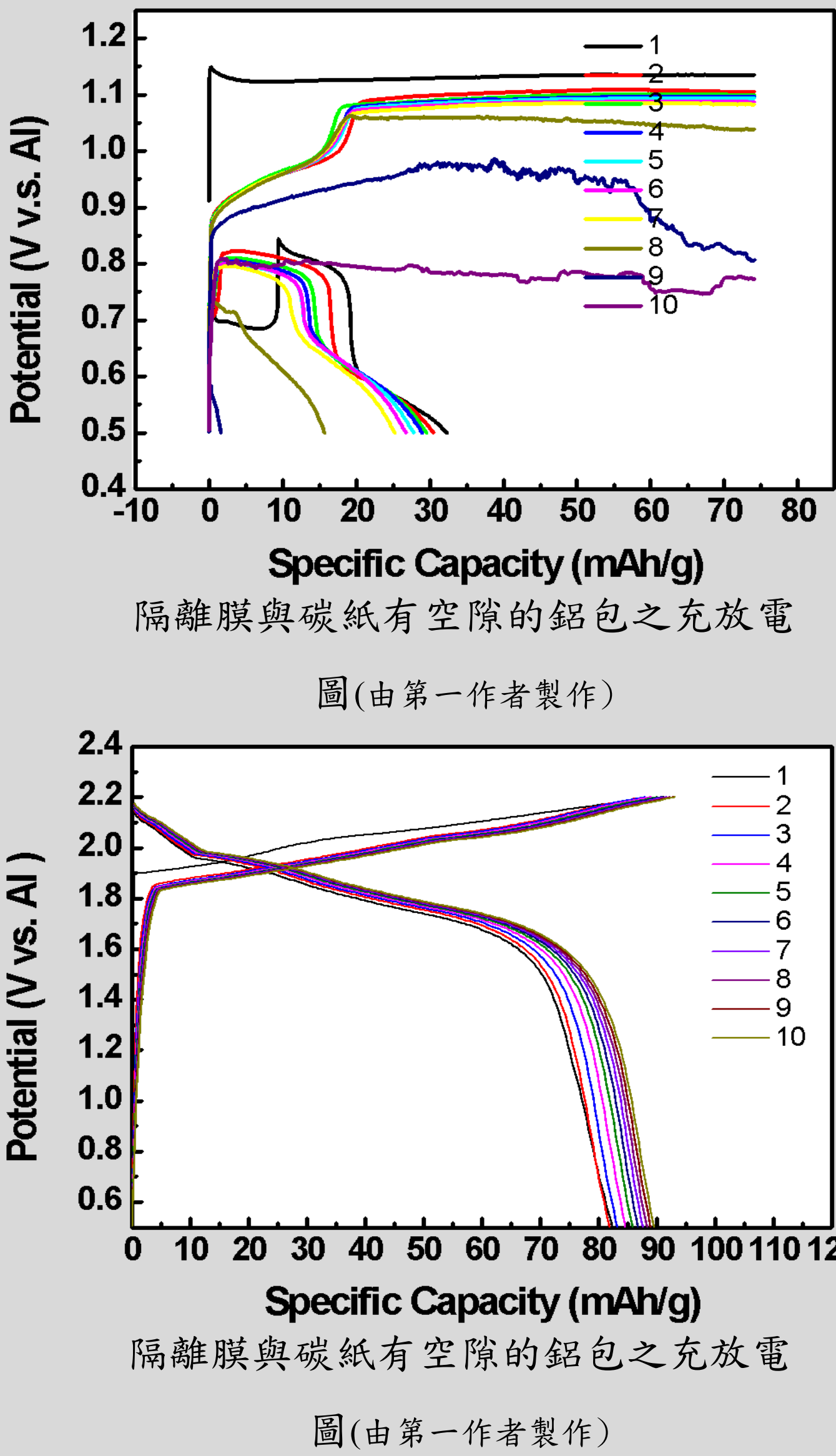
進行電化學分析後發現，第四圈至第六圈在 1.2V 附近發現一個反應，推測我們所使用之活性碳含有其他物質。而第一至三圈未發現此反應也符合活性碳前後圈數有極大差異的特徵。

充放電圈數的不穩定



經過多次試驗，我們發現下限電壓只要低於 0.5V，充放電圈數的表現就會極不穩定。故我們推測鋁包所使用的 Ni-bar 可承受之最低電壓為 0.5V，低於 0.5V 會使 Ni-bar 參與反應。

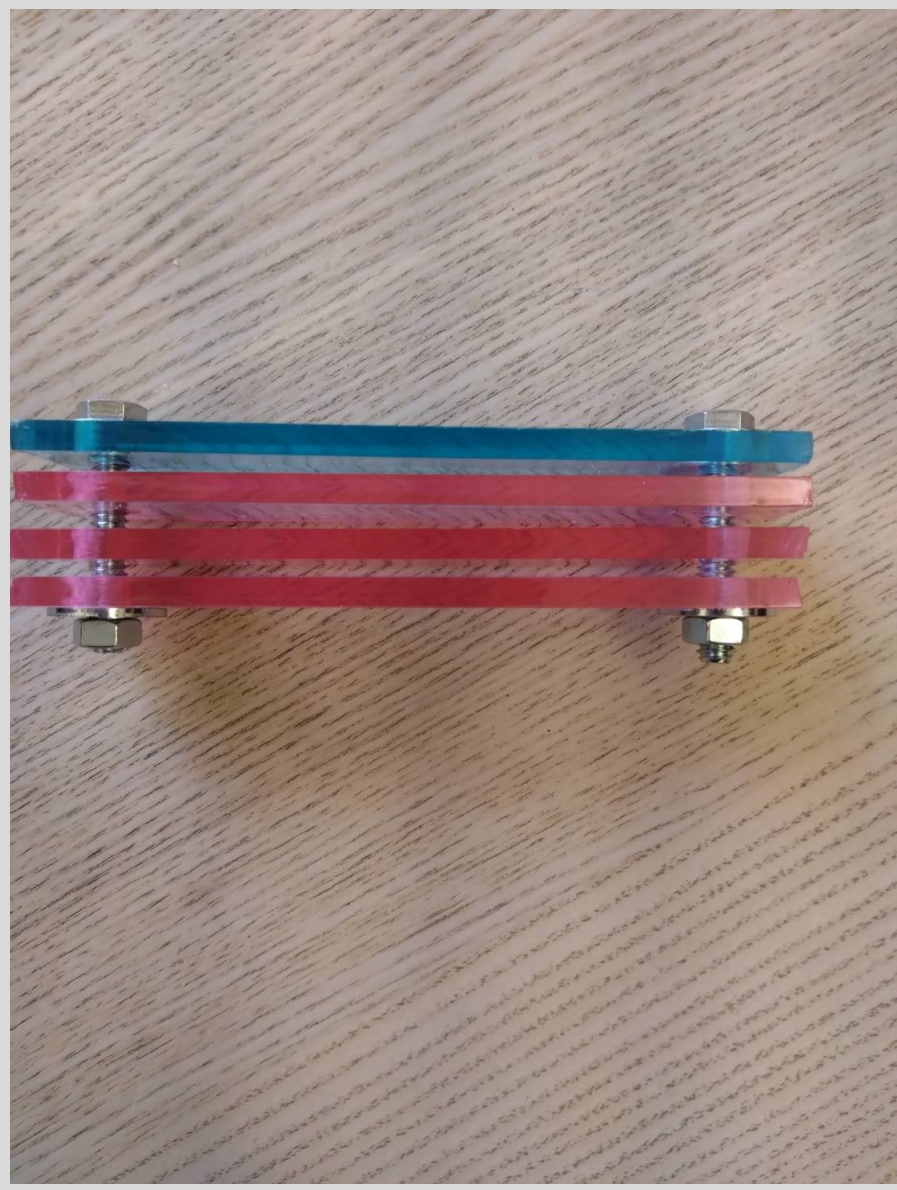
隔離膜對電池效率之影響



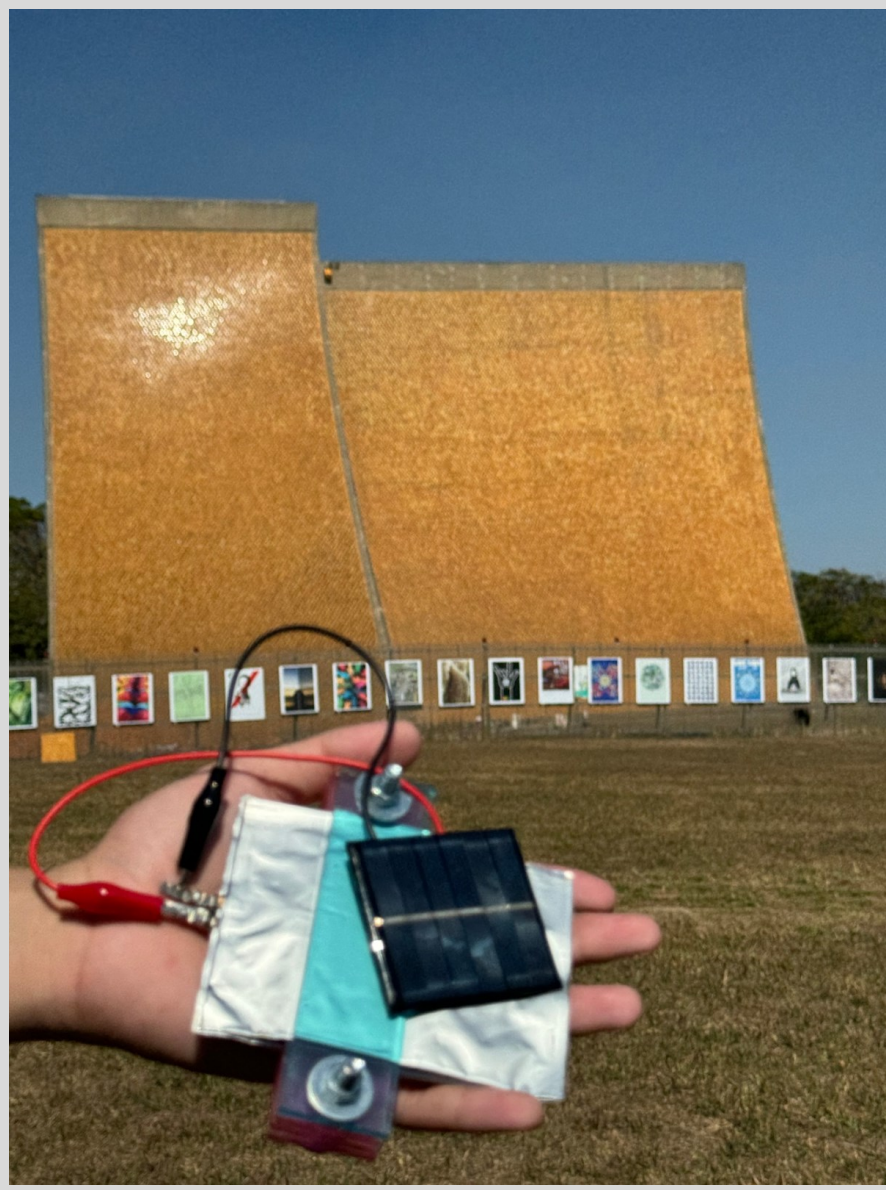
隔離膜與碳紙有無貼緊與充放電有明顯關聯，目前我們採用加壓的方式來使碳紙與隔離膜貼緊。

太陽能充電模組

第一代充電模組



自製的鋁包固定裝置圖
(由第三作者製作)



第一代模組在戶外充電圖
(由作者群拍攝)

我們用麻將尺、螺絲與螺帽製作了鋁包固定裝置(左圖)，壓縮鋁包以解決正負極相距太遠而影響充放電效率的問題，同時改善鋁包電池不易攜帶的缺點。



三用電表測量第一代模組圖
(由作者群拍攝)



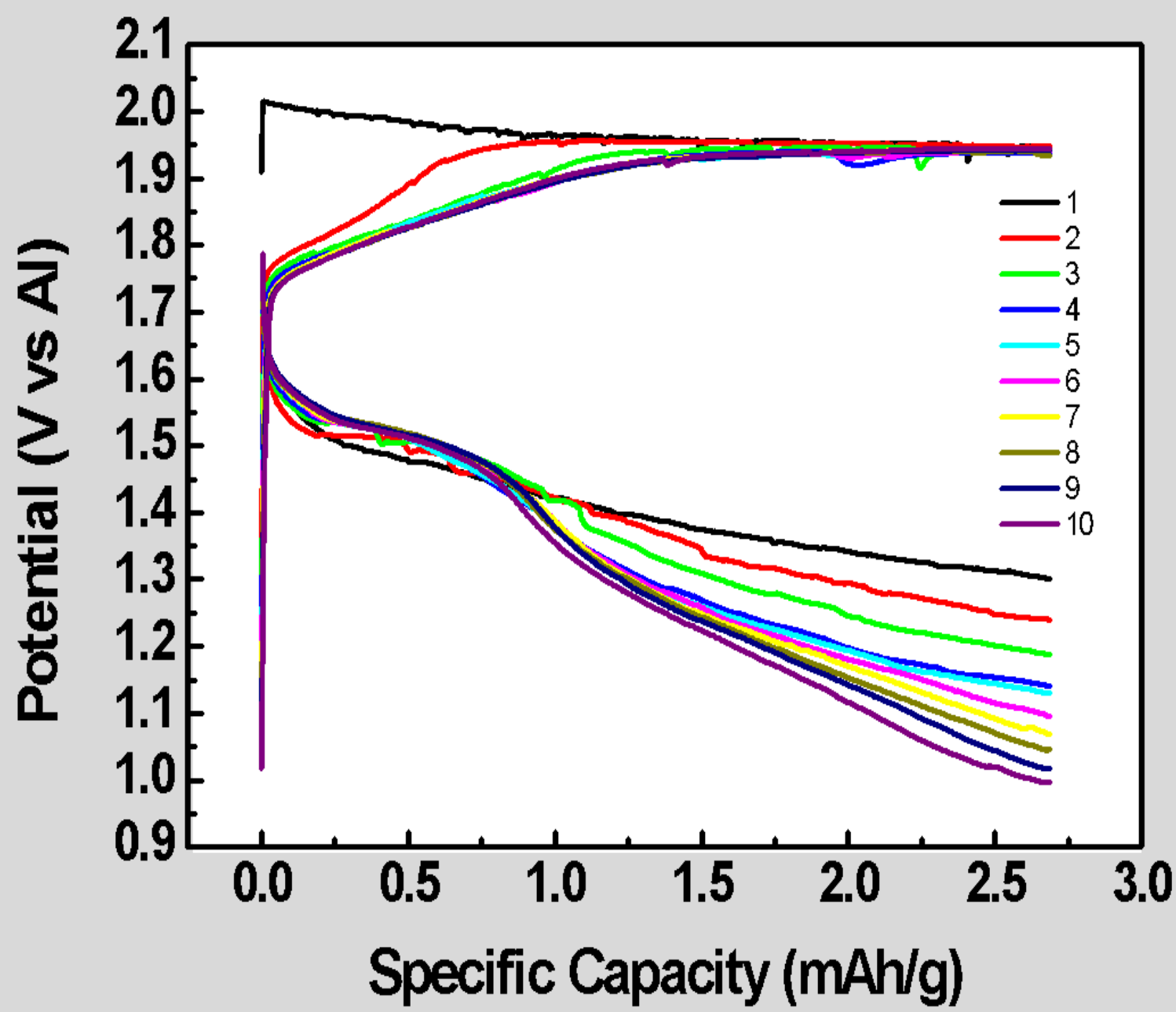
第一代模組使 2.5V 燈泡亮起
(由作者群拍攝)

充電模組可使一顆 2.5V 的燈泡亮起，但 3V 的馬達卻無法啟動，故最大電壓應在二者之間。而我們透過並聯連接電池，故每顆電池的電壓為 2.5V 上下，與我們的充放電測試結果吻合。

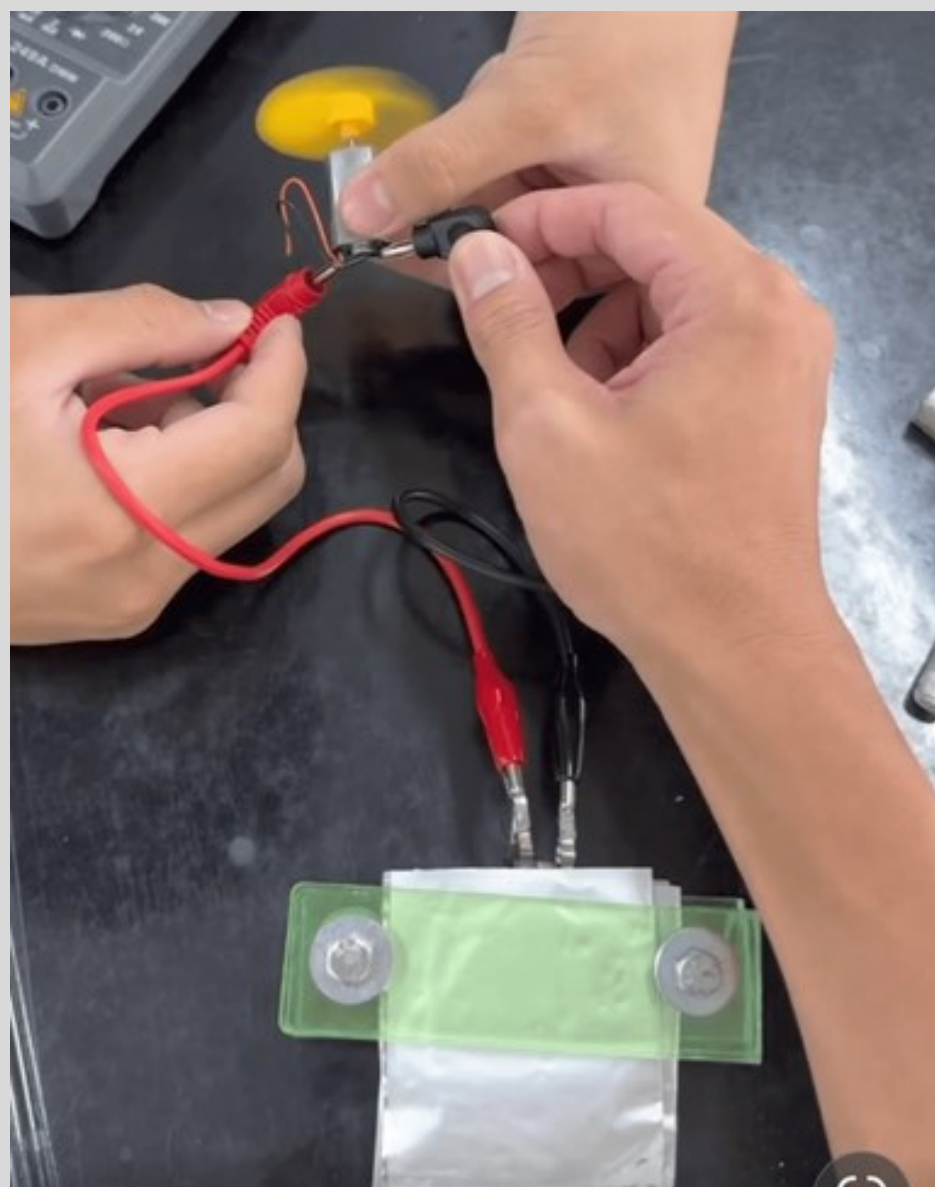
第二代充電模組



第一代、第二代模組大小示意圖
(由作者群拍攝)



第二代模組之充放電圖(由第一作者製作)



第二代模組使馬達運轉
(由作者群拍攝)

充放電圖結果與我們實際使用三用電表測量有很大不同，我們推測我們尚未釐清充放電儀的參數設置在多顆電池並串聯上與單顆電池的差異。而經三用電表測量模組電壓最大可達 6V，但會下降至 4V 才穩定，這也與我們理論值不同，而我們推測並串聯對於電池的影響並不如我們所預期。最後，最新模組仍有漏液的情況，也可能是造成充放電表現並不理想的原因。以目前觀測到的數據而言，雖然模組尚未達到我們原先預期的表現，但第二代模組在儲能效率上已優於第一代。

結論

活性碳的加入可以透過吸附的方式使碳紙容納更多的四氯鋁酸根離子，有效提高充電容量。但活性碳可能無法有效的使四氯鋁酸根離子釋放回電解質，故放電容量並未有明顯提升，甚至在 SP-1:PC=0:10 出現放電容量下降現象。此外我們發現碳紙與隔離膜之間有空隙、充放電時的下限電壓及活性碳內的未知物質，皆會對電池充放電表現有所影響，而目前所得出的最佳比例仍為 SP-1:PC=10:0。最後我們將三個鋁包結合麻將尺將其緊緊壓縮達到加固效果並使其並聯，結合太陽能板做出第一代模組，成功使燈泡亮起。並以此為基準改良出第二代模組，而第二代的電壓與電容量皆優於第一代。最後計算兩者之儲能效率，第二代也優於第一代模組。

未來展望

- 1.選用其他碳材與 SP-1 進行配比，以找出可讓吸附及插層共存的物質及其比例。
- 2.對活性碳進行研究，找出內部含有何種物質影響反應。
- 3.找出 7 * 12 之鋁包的電解液適配量，使鋁包能正常運作且不漏液。
- 4.釐清並串聯對於電池之表現的影響，並找出充放電儀的合適參數，使其表現更貼近於理論值。
- 5.持續改量模組的體積與重量，使其儲能效率愈發貼近市面上之大型儲能電池。

參考文獻

1. Lin, M.-C.; Gong, M.; Lu, B.; Wu, Y.; Wang, D.-Y.; Guan, M.; Angell, M.; Chen, C.; Yang, J.; Hwang, B.-J., Nature 2015, 520 (7547), 324.
2. Wang, D.-Y.; Wei, C.-Y.; Lin, M.-C.; Pan, C.-J.; Chou, H.-L.; Chen, H.-A.; Gong, M.; Wu, Y.; Yuan, C.; Angell, M., Nat. Commun. 2017, 8, 14283.
3. 李天生，碩士論文，東海大學 2019.