

# 屏東縣第 60 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

科 別：生活應用科學科(二)－環保與民生

組 別：國中組

作品名稱：

### 析“金”大法

－探討如何用電解法回收重金屬並且降低廢液中的金屬離子含量

關 鍵 詞：金屬廢液、電解法、中央碳片

編 號：

## 摘要

無論硫酸銅還是硫酸鋅水溶液，金屬銅和金屬鋅的回收效率及析出克數、省能的情形、  
所需的時間都是 5片碳片（含正負兩極）>2片（正負極）碳片。

電解 1000s 後的廢液都以 5 片碳片的電解槽的殘餘液最符合環保署放流水的排放標準。

## 壹、研究動機

許多工廠排放重金屬廢液污染農田、河川的新聞時有耳聞。重金屬污水的污染已造成許多社會上的健康、經濟與生態問題。但是這些重金屬污染物雖然對環境造成危害，卻也是地球上有限的資源。在現今資源濫用、短缺的情況下，所以能否回收重金屬重新再利用的工作已成為重要的課題，我們思考：在現今資源缺乏的環境下，是否能有更好回收這些重金屬的方式，以及使廢水的重金屬離子排放標準可以符合環保署的規定。

## 貳、文獻回顧

過去處理化學廢液的主要方法不外乎下列四大項：化學沉澱法和生物吸附法，雖然處理容易卻無法回收再利用，且需要找地方掩埋，若是掩埋不當，污染物就會滲入土壤和地下水體而造成污染。

若是用傳統電解法或電透析法，可回收但是較耗能。雖然現在有較先進的電解沉積法可以 24hrs 運作，仍然在回收上屬耗能。

表 1 汗水處理設施放流水常用處理重金屬廢液一覽表

方法	化學沉澱法	電解法	生物吸附法	電透析
內容	用酸和鹼調整汗水的 pH 值為 8-9，讓大部分的金屬形成氫氧化合物沉澱，再將這些沉澱的汗泥封罐埋藏	在水溶液中通直流電，在負極處析出金屬原子	利用幾丁質多醣體吸附水溶液中的重金屬離子，之後將這些多醣體封存掩埋。	在水溶液中放置一特殊透膜，通電後可將金屬析出於透膜上
優點	不需耗能，且手續簡單	幾乎可回收金屬重新使用，特別是貴重金屬	不需用耗能，且手續簡單	可回收部分金屬，但是薄膜易阻塞。
缺點	無法回收金屬	耗電費能	無法回收金屬	耗電費能

若是要回收這些金屬，勢必要選擇耗能的方法。我們參考過去的文獻和學長姊做過的實驗，發現電解槽正負兩極之間再放入碳片，在相同耗能下似乎可析出更多的金屬。學長姊們發現在原有的電解槽的大小(15x7.5x4cm<sup>3</sup>)，兩極中間擺放3片碳片可以達到最多的金屬析出，並且較節能，但是這個研究僅針對超高濃度的硫酸銅溶液(0.5M)。

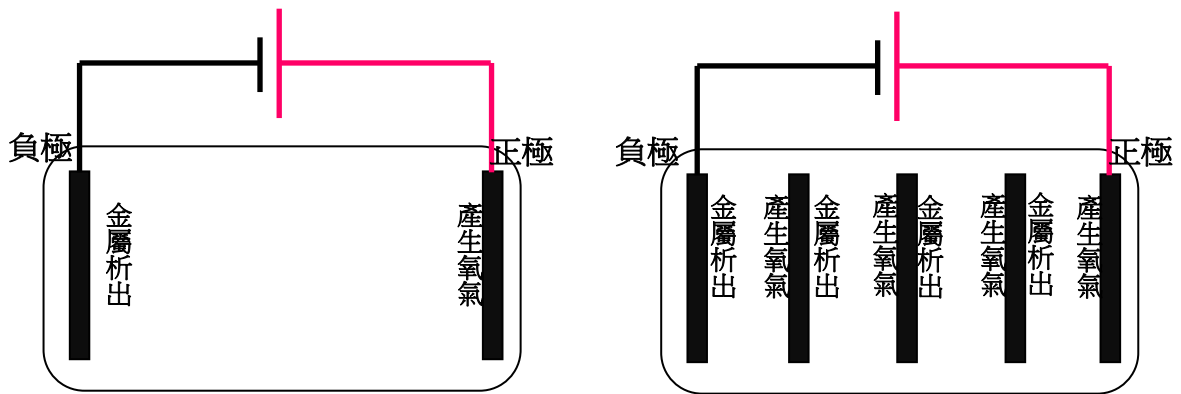


圖 1 學長姊的裝置原理

我們知道九年級自然課本用碳棒當電極電解硫酸銅時，正極會產生氧氣 ( $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 1\text{O}_2 + 4\text{e}^-$ )，負極會有銅原子析出 ( $2\text{Cu}^{2+} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cu}$ )，但是沒有接導線的中間 3 片碳片兩側卻也同時產生氧氣和銅析出，他們當時把這個現象稱為自發性感應電極。根據學長姊的解釋和我們的理解，其可能的機制是中央碳片受到電場感應後，每片碳片的兩側會被極化產生正極和負極，然後碳片的正極那一側開始進行電解水的反應 ( $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 1\text{O}_2 + 4\text{e}^-$ ) 產生氧氣，其中電子順著碳片移動到碳片的另一側--負極，促使水溶液中的銅離子獲得電子而在另一側析出銅原子 ( $2\text{Cu}^{2+} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cu}$ )，而且學長姊的實驗也證明了中間碳片不會溶解變輕。

但是目前汙水處理工廠待處理的廢液濃度似乎較學長姊使用的低很多（銅 272.5mg/L 和鋅 252.mg/L 為例）。因此我們思考這個裝置在實際的情況下是否適用。而且根據以下法規：

表 3 環保署法規

出處	現行法規	以銅離子和鋅離子為例其允許量
環保署放流水的標準	中華民國 103 年 1 月 22 日行政院環境保護署環署水字第 1030005842 號令修正發布第二條條文 第二條 事業、污水下水道系統及建築物污水處理設施之放流水標準，其水質項目及限值如右表	銅 3.0 mg/L
		鋅 5.0 mg/L
環保署飲用水水源水質標準	飲用水管理條例第 6 條：地面水體或地下水體作為社區自設公共給水、包裝水、盛裝水及公私場所供公眾飲用之連續供水固定設備之飲用水水源者，其單一水樣水質應符合右表規定：	銅 1.0 mg/L
		鋅 5.0 mg/L

由上表，環保署規定的放流水排放標準更是嚴苛，所以我們嘗試在一樣的裝置下進行金屬離子回收，找出到底需要耗費多少時間和電能與最佳回收重金屬的方式，使廢水的重金屬離子濃度降低才能符合現行環保署的放流水標準。

## 參、研究目的與問題

根據以上文獻回顧，我們提出以下問題與研究方向：

- 一、探究在水溶液環境通入直流電後，中央位置有無擺放碳片與金屬析出狀況是否有差異？如有差異，這些差異為何？
- 二、探究電解過程中電解時間的長短是否影響金屬的回收量，以嘗試找出最省電能的方式。
- 三、探究電解過程中電解時間的長短是否影響金屬的回收量，以嘗試找出最佳的通電時間
- 四、探究本實驗對於重金屬汙水的處理，是否能有效達到環保署的放流水排放標準。

## 肆、研究設備器材

表 4 設備與器材

實驗器材	鱷魚夾電線	碳片	電源供應器	長方形透明容器	安培計	硫酸銅	硫酸鋅	試管架	試管	刮勺	燒杯	玻棒	滴管
個數	5 (條)	5 (片)	1 (台)	1 (個)	1 (台)	1 (瓶)	1 (瓶)	2 (個)	30 (個)	3 (個)	6 (個)	1 (根)	3 (個)
實驗器材	量筒	pH筆	比色管	分光光度儀	伏特計	飲用水	容(體)積瓶	電子秤	碼錶	漏斗	秤量紙	微量吸管	筆電
個數	2 (個)	1 (支)	數 (個)	1 (台)	1 (台)	無限	4 (個)	1 (台)	1 (個)	3 (個)	3 (張)	2 (支)	1 (台)

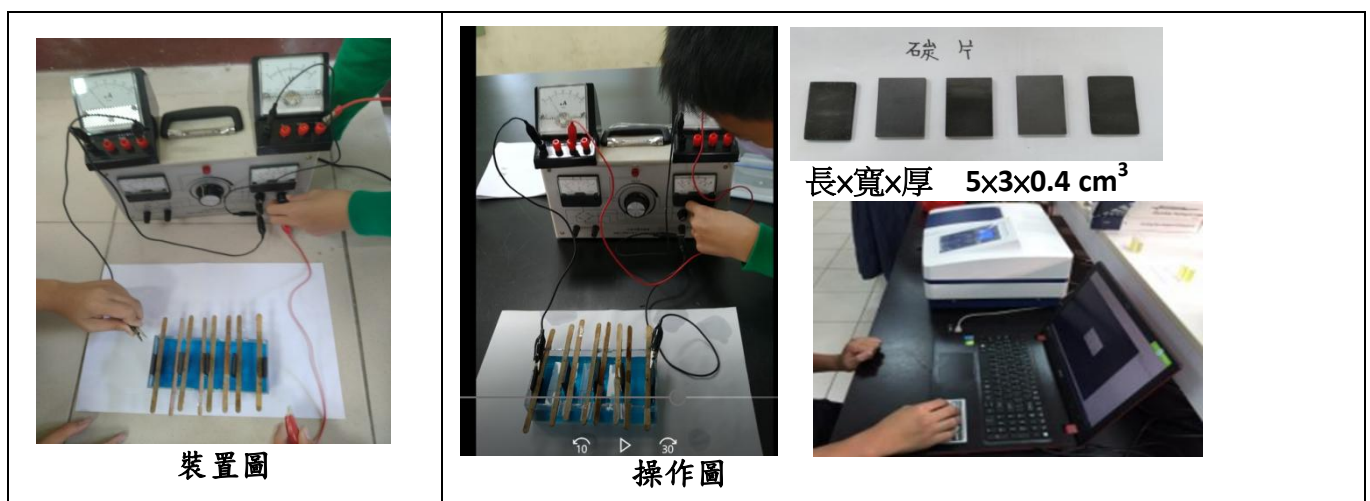


圖 2 實驗裝置

## 伍、研究過程與方法

### 一、金屬離子水溶液配製

1. 硫酸銅水溶液配製:我們以 0.03mg/L 作為主要依據,分別配製 3000mg/L、300mg/L、30mg/L、3mg/L、0.3mg/L 的硫酸銅溶液。
2. 以 3000mg/L 為例,秤取 5.898g 的硫酸銅,也就是將 5.898g 的硫酸銅加入小燒杯中,並加水用玻棒攪拌到完全溶解後,將小燒杯中的硫酸銅水溶倒入 500mL 容積瓶中,加水到畫線處(500mL)即可。
3. 接著配製 300mg/L 時,只要取 50mL 的 3000mg/L 硫酸銅溶液置入容積瓶並加水至 500mL 即可,而 30mg/L、3mg/L、0.3mg/L 一樣如法炮製。
4. 環保署的河川監測法令硫酸鋅以 0.5mg/L 作為主要依據,分別以上述步驟配製 5000mg/L、500mg/L、50mg/L、5mg/L、0.5mg/L

### 二、水溶液通電環境的設置

- (一) 選用長方形透明容器。
- (二) 倒入硫酸銅(鋅)水溶液,加到容器高度的三分之二。
- (三) 黏上冰棒棍(固定碳片)。
- (四) 兩支冰棒棍中擺置碳片兩端碳片分別接上直流電源供應器的正極與負極,調整電壓為 20V。
- (五) 安培計(A)與整個電路串連相接、伏特計和電路並聯。
- (六) 打開直流電源供應器調整電壓為 20V,通電時間計時為 200s、400s、600s、800s、1000s,觀測安培計與相關電極的變化,並記錄安培計讀數。
- (七) 實驗結束後,取出溶液,將溶液倒入筆測管並放入分光光度儀,測量水溶液的金屬離子殘餘量。

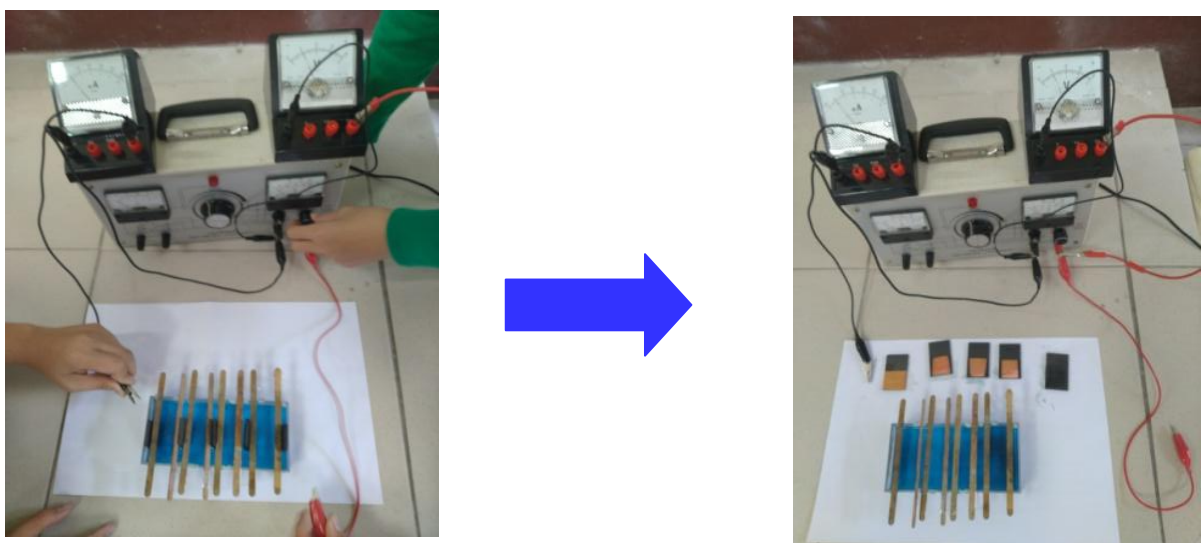
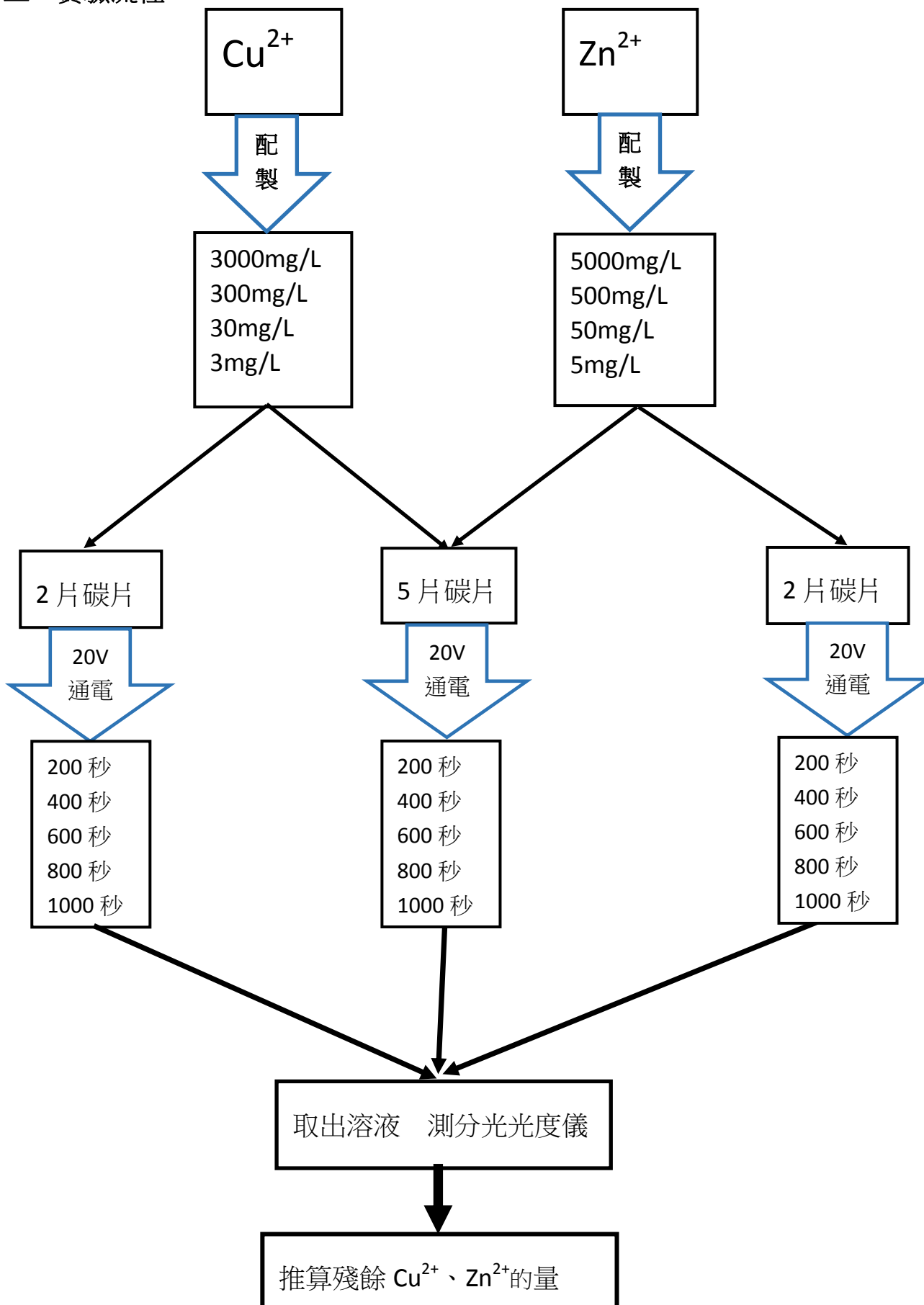


圖 3 實驗結果

### 三、實驗流程



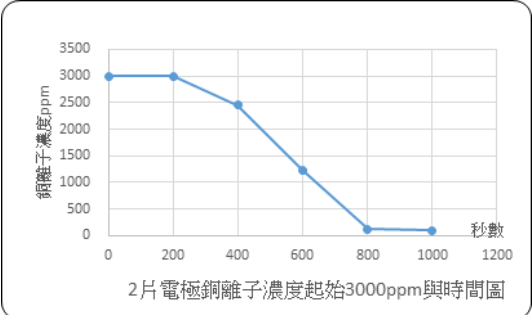
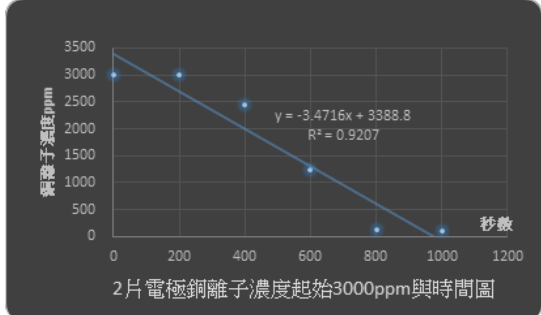
## 陸、研究結果分析與討論

### 一、比較兩片電極在銅離子不同起始濃度的時間變化

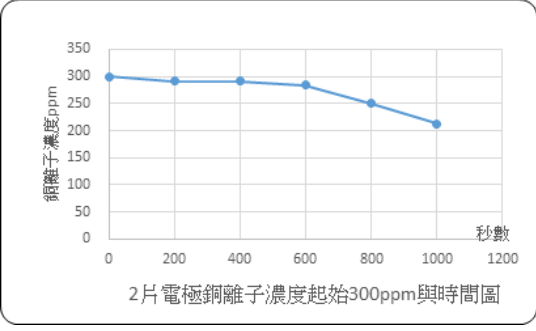
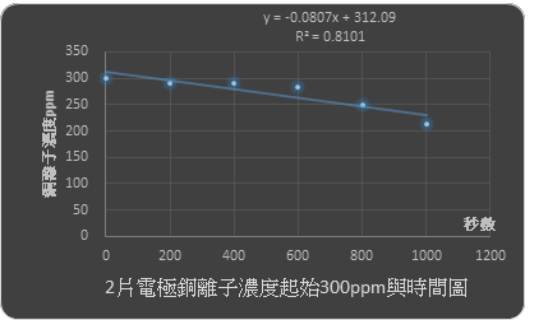
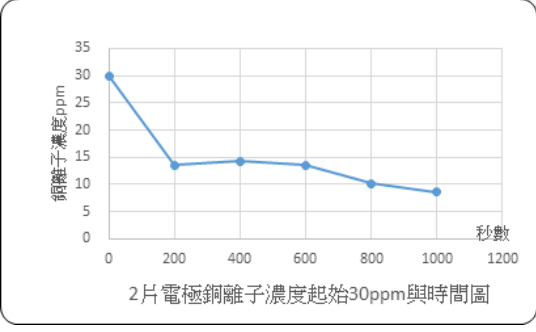
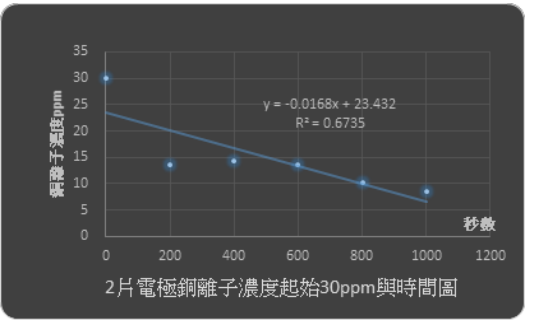
此部分的分析著重於使用兩片碳片電極，於銅離子起始濃度為 3000ppm、300ppm、30ppm 的狀況下，電解 1000 秒的狀況分析，其結果於下表 6-1 以及下圖 6-1~6-6 所示：

表 6-1 比較兩片電極在銅離子不同起始濃度的時間變化

秒數	兩片吸光度值	兩片銅離子濃度(ppm)	兩片吸光度值	兩片銅離子濃度(ppm)	兩片吸光度值	兩片銅離子濃度(ppm)
0	0.7335	3000	0.0861	300	0.0035	30
200	0.7313	2993	0.0712	291	0.0033	14
400	0.6011	2460	0.0712	291	0.0035	14
600	0.3014	1233	0.0695	284	0.0033	14
800	0.0311	127	0.0611	250	0.0025	10
1000	0.0255	104	0.0521	213	0.0021	9

起始銅離子濃度	濃度—時間變化圖	相關係數分析圖
3000ppm	 <p>圖 6-1</p>	 <p>圖 6-2</p>
	<p>➤ 3000ppm 的銅離子起始濃度，在經過 800 秒電解之後，濃度下降至 127ppm，幾乎維持水平不變化，到 1000 秒的時候濃度約為 104ppm。</p>	<p>➤ 若以線性迴歸進行分析，發現其直線 <math>R^2</math> 約為.9207，屬於高度相關的直線。</p> <p>➤ 可是若以圖 6-1 而言，線性回歸似乎只位於 200-800 秒之間。</p>



300ppm	 <p>圖 6-3</p>	 <p>圖 6-4</p>
30ppm	 <p>圖 6-5</p>	 <p>圖 6-6</p>

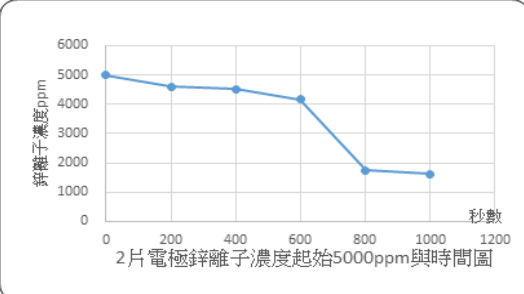
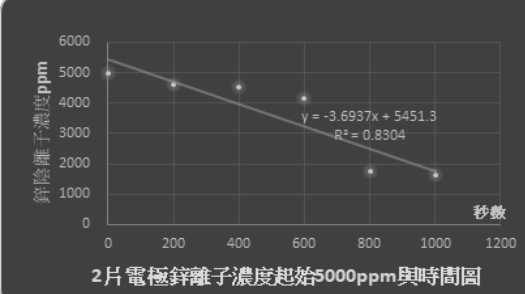
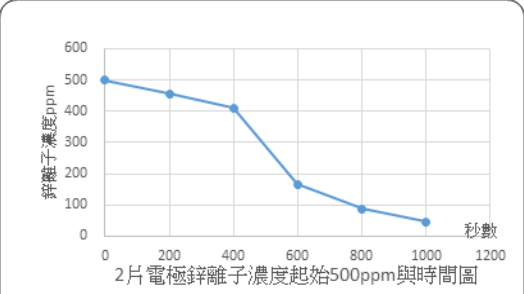
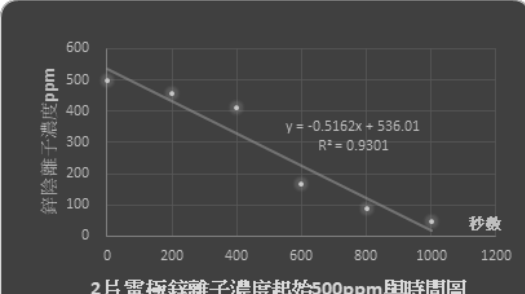
此段分析發現在兩片碳片電極的狀況下，電解 1000 秒都會讓溶液中的銅離子濃度下降，效果為低濃度 30ppm>高濃度 3000ppm>中濃度 300ppm。可是根據水利署公告的自來水排放標準，在兩片電極的狀況下，電解 1000 秒都無法達到 3ppm 以下。

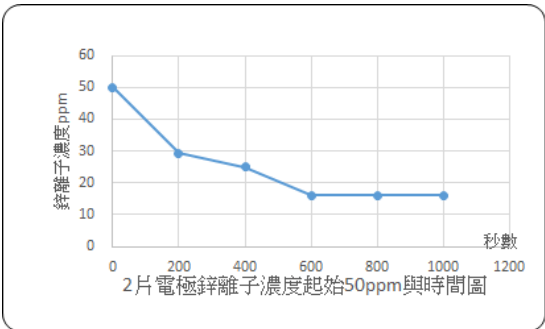
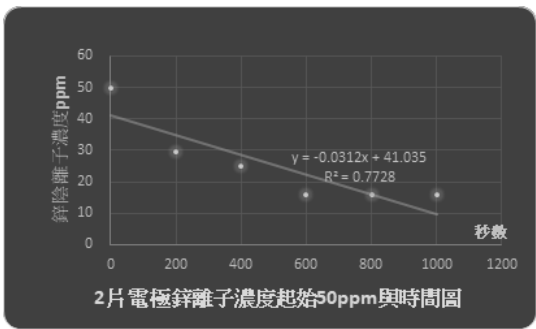
## 二、比較兩片電極在鋅金屬離子不同起始濃度的變化

此段分析著重於在兩片碳片電極下，不同起始濃度的鋅離子溶液在經過 1000 秒的電解之後，其濃度變化為何?結果如下表 6-2 與圖 6-7~6-14 所示。

表 6-2 比較兩片電極在鋅離子不同起始濃度的時間變化

秒數	兩片 吸光度值	兩片鋅離子 濃度(ppm)	兩片 吸光度值	兩片鋅離子 濃度(ppm)	兩片 吸光度值	兩片鋅離子 濃度(ppm)
0	0.1189	5000	0.0188	500	0.0060	50
200	0.1088	4600	0.0154	455	0.0058	29
400	0.1068	4511	0.0144	411	0.0057	25
600	0.0989	4160	0.0089	167	0.0055	16
800	0.0444	1742	0.0071	87	0.0055	16
1000	0.0415	1613	0.0062	47	0.0055	16

起始 鋅離子 濃度	濃度—時間變化圖	相關係數分析圖
5000ppm	 <p>2片電極鋅離子濃度起始5000ppm與時間圖</p> <p>圖 6-7</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 根據結果圖形，發現在 600 秒之後濃度會快速下降。</li> <li>➤ 至 1000 秒止，鋅離子濃度約為 1613ppm。</li> </ul>	 <p>2片電極鋅離子濃度起始5000ppm與時間圖</p> <p>圖 6-8</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸進行直線分析，發現 <math>R^2</math> 約為.8304，屬於中強度直線相關。</li> <li>➤ 可是若搭配圖 6-7，發現 600-800 秒之間有大量下降的狀況。</li> </ul>
500ppm	 <p>2片電極鋅離子濃度起始500ppm與時間圖</p> <p>圖 6-9</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 根據圖形結果，在 400-600 秒間濃度有大量下降之狀況。</li> </ul>	 <p>2片電極鋅離子濃度起始500ppm與時間圖</p> <p>圖 6-10</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸進行直線分析，發現 <math>R^2</math> 約為.9301，屬於強度直線相關。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 電解 1000 秒之後，鋅離子濃度約為 47ppm。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 可是搭配圖型 6-9，在 400-600 秒間濃度有大量下降之狀況。</li> </ul>
50ppm	 <p>圖 6-11</p>	 <p>圖 6-12</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 電解 0-600 秒的時候濃度有大量下降的狀況。</li> <li>➤ 電解 600 至 1000 秒止，鋅離子濃度維持為 16ppm。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸進行直線分析，發現 <math>R^2</math> 約為.7728，屬於中強度直線相關。</li> <li>➤ 若回到圖 6-11，發現 0-600 秒的時候有下降狀況，可是 600-1000 秒之間維持水平。</li> </ul>

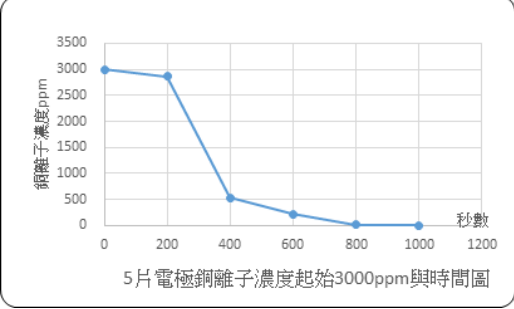
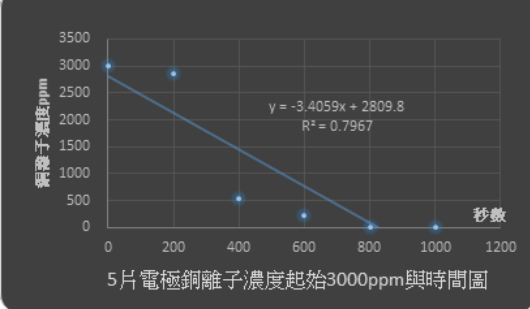
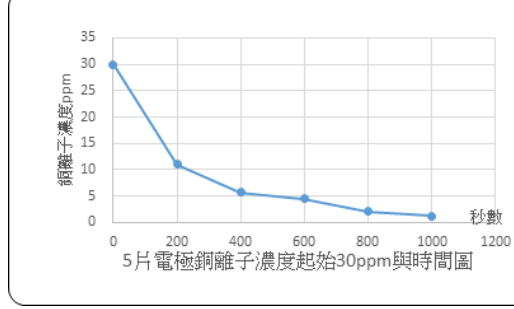
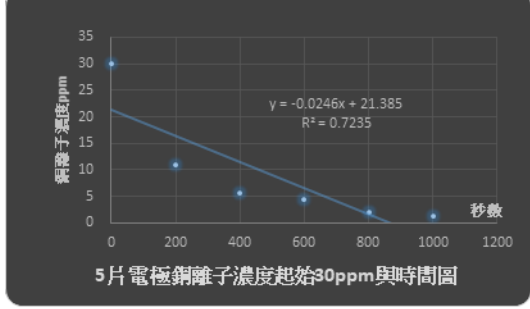
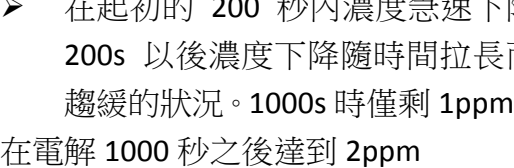
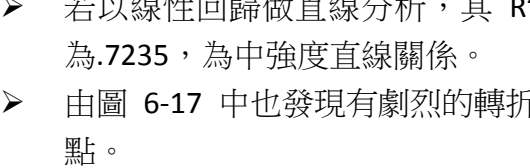
此段分析可發現在使用兩片碳片電極的狀況下，都會使起始濃度為 5000ppm、500ppm、50ppm 的鋅離子濃度下降，若以電解 1000 秒只知最後濃度成效，則降低鋅離子濃度的效果為 50ppm>500ppm>5000ppm。直線回歸分析上都在中度相關的直線，可是圖形中卻顯示都有個轉折點。若根據水利署公告的自來水排放標準，則三種濃度在兩片碳片電極電解 1000 秒內，都無法達到 5ppm 的排放標準。

### 三、比較五片電極在銅金屬離子不同起始濃度的變化

此段分析以總數五片碳片電極進行分析，點解銅離子於起始濃度 3000ppm、300ppm、30ppm 的濃度改變。結果如下表表 6-3 與圖 6-13~6-18 所示：

表 6-3 比較五片電極在銅離子不同起始濃度的時間變化

秒數	五片吸光度值	五片銅離子濃度(ppm)	五片吸光度值	五片銅離子濃度(ppm)	五片吸光度值	五片銅離子濃度(ppm)
0	0.7335	3000	0.0861	300	0.0035	30
200	0.7001	2865	0.0749	280	0.0027	11
400	0.1299	532	0.0548	224	0.0014	6
600	0.0551	225	0.0115	47	0.0011	5
800	0.0041	17	0.0007	3	0.0005	2
1000	0.0005	2	0.0004	2	0.0003	1

起始銅離子濃度	濃度—時間變化圖	相關係數分析圖
3000ppm	 <p style="text-align: center;">圖 6-13</p>	 <p style="text-align: center;">圖 6-14</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 在起初的 200 秒內濃度雖緩慢下降，但是 200~400 秒之間濃度有急速下降的狀況。</li> <li>➤ 在電解 800 秒之後達到 2ppm。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸做直線分析，其 <math>R^2</math> 為.7967，為中強度直線關係。</li> <li>➤ 由圖 6-13 中發現有劇烈的轉折點。</li> </ul>
300ppm	 <p style="text-align: center;">圖 6-15</p>	 <p style="text-align: center;">圖 6-16</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 在起初的 200 秒內濃度雖緩慢下降 200~400s 開始快速下降，400~600 秒之間濃度有急速下降的狀況。</li> <li>➤ 在電解 800 秒之後達到 2ppm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸做直線分析，其 <math>R^2</math> 為.7967，為中強度直線關係。</li> <li>➤ 由圖 6-15 中發現有劇烈的轉折點。</li> </ul>
30ppm	 <p style="text-align: center;">圖 6-17</p>	 <p style="text-align: center;">圖 6-18</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 在起初的 200 秒內濃度急速下降 200s 以後濃度下降隨時間拉長而趨緩的狀況。1000s 時僅剩 1ppm。在電解 1000 秒之後達到 2ppm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸做直線分析，其 <math>R^2</math> 為.7235，為中強度直線關係。</li> <li>➤ 由圖 6-17 中也發現有劇烈的轉折點。</li> </ul>

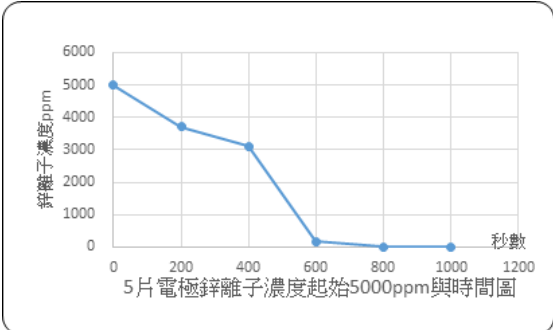
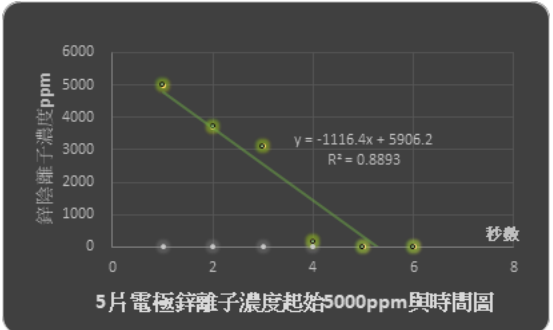
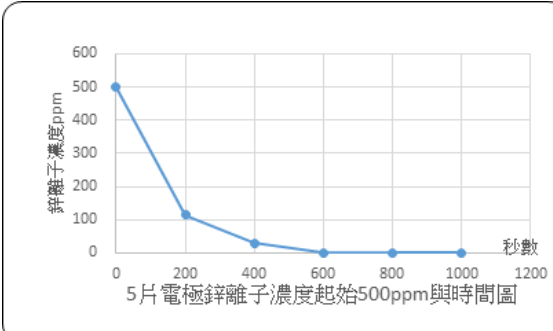
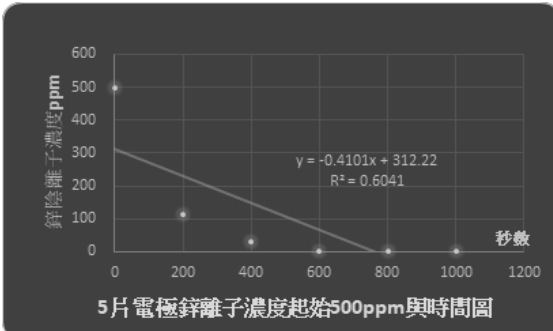
此段分析中發現五片碳片電極在 200-600 秒會有大量濃度下降的狀況，且達到排放標準 3ppm 的時間為 30ppm(800 秒)>300ppm(800 秒)>3000ppm(1000 秒)。在線性回歸分析上都呈現中強度相關的直線關係，可是結果中都發現有明顯的轉折點。

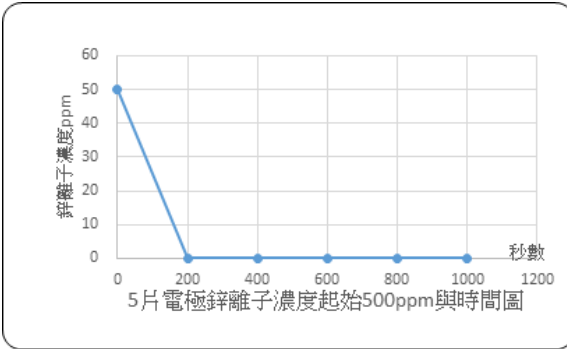
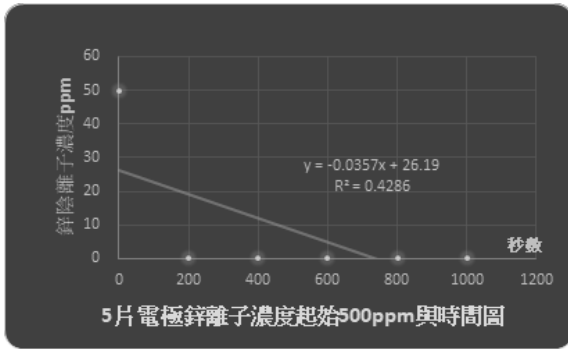
#### 四、比較五片電極在鋅金屬離子不同起始濃度的變化

此段分析聚焦在以五片碳片為電極進行鋅離子在不同起始濃度下的濃度降解狀況，其結果如下表 6-4 和圖 6-19~6-24 所示：

表 6-4 比較五片電極在鋅離子不同起始濃度的時間變化

秒數	兩片 吸光度值	兩片鋅離子 濃度(ppm)	兩片 吸光度值	兩片鋅離子 濃度(ppm)	兩片 吸光度值	兩片鋅離子 濃度(ppm)
0	0.1189	5000	0.0188	500	0.0060	50
200	0.0887	3708	0.0077	114	0.0050	0
400	0.0754	3118	0.0058	29	0.0030	0
600	0.0089	167	0.0019	0	0.0010	0
800	0.0012	0	0.0008	0	0.0001	0
1000	0.0008	0	0.0001	0	0.0001	0

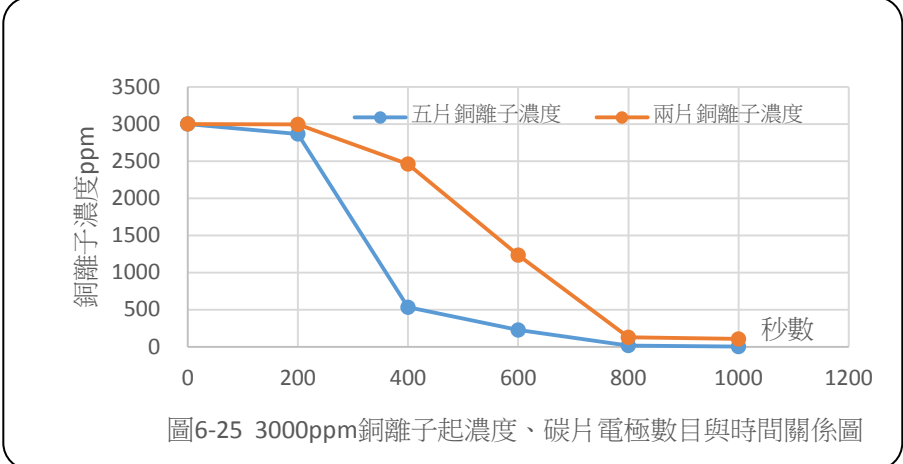
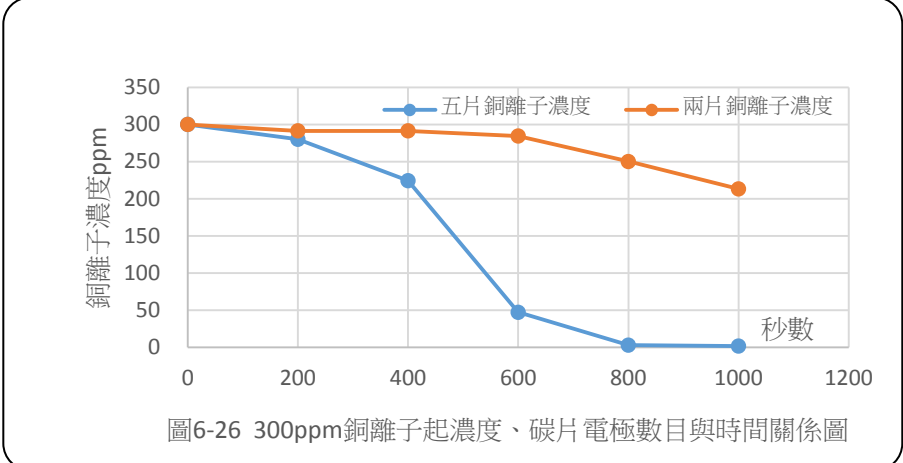
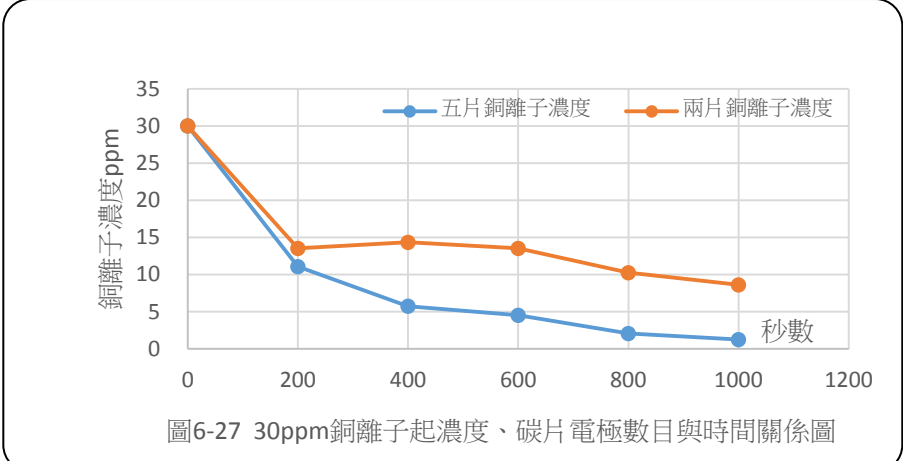
起始 鋅離子 濃度	濃度—時間變化圖	相關係數分析圖
5000ppm	 <p>圖 6-19</p>	 <p>圖 6-20</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 0~400 秒、400~600 秒之間有急速下降的狀況。</li> <li>➤ 在電解 800 秒之後達到 0ppm。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸做直線分析，其 R2 為.8893，為中強度直線關係。</li> <li>➤ 可是圖 6-19 中發現有劇烈的轉折點。</li> </ul>
500ppm	 <p>圖 6-21</p>	 <p>圖 6-22</p>

	<p>圖 6-21</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 0~200 秒內濃度急速下降，200 秒時濃度已經下降至 114ppm。</li> <li>➤ 電解 600 秒的時候已經達到排放標準，測得為 0ppm。</li> </ul>	<p>圖 6-22</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸做直線分析，其 R2 為.6041，為中度直線關係。</li> <li>➤ 線性關係不明顯，可搭配圖 6-21 中一開始有劇烈的轉折點。</li> </ul>
50ppm	 <p>5片電極鋅離子濃度起始500ppm與時間圖</p> <p>圖 6-23</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 一開始電解 200 秒內，已經達到排放標準，測得為 0ppm。</li> </ul>	 <p>5片電極鋅離子濃度起始500ppm與時間圖</p> <p>圖 6-24</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 若以線性回歸做直線分析，其 R2 為.4286，為弱度直線關係。</li> <li>➤ 線性關係不明顯，可搭配圖 6-23 中一開始有劇烈的轉折點。</li> </ul>

分析此段，達到排放標準的效果 50ppm(200 秒)>500ppm(600 秒)>5000ppm(800 秒)，且在一開始都有劇烈的轉折下降。線性回歸的分析上其為中弱相關，可能與有劇烈的轉折點有關。

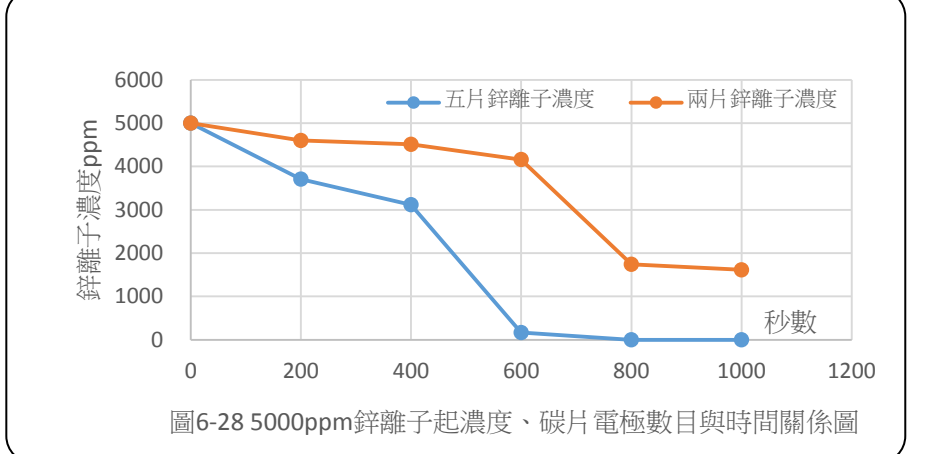
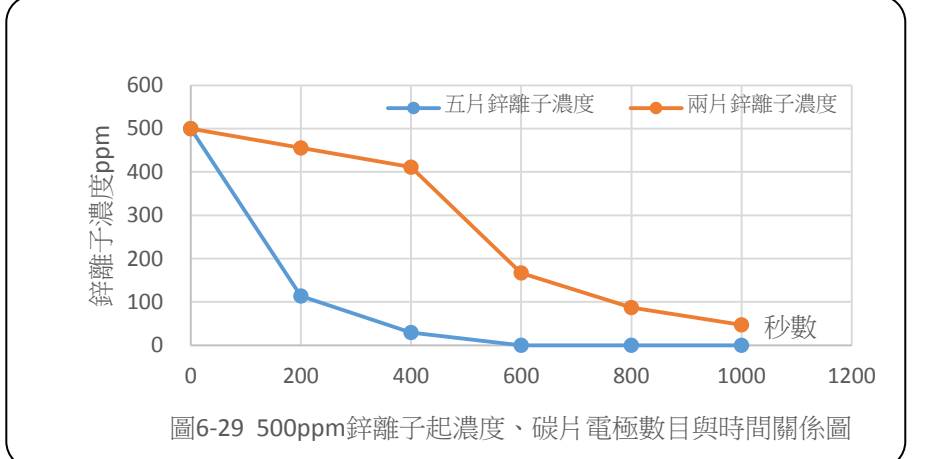
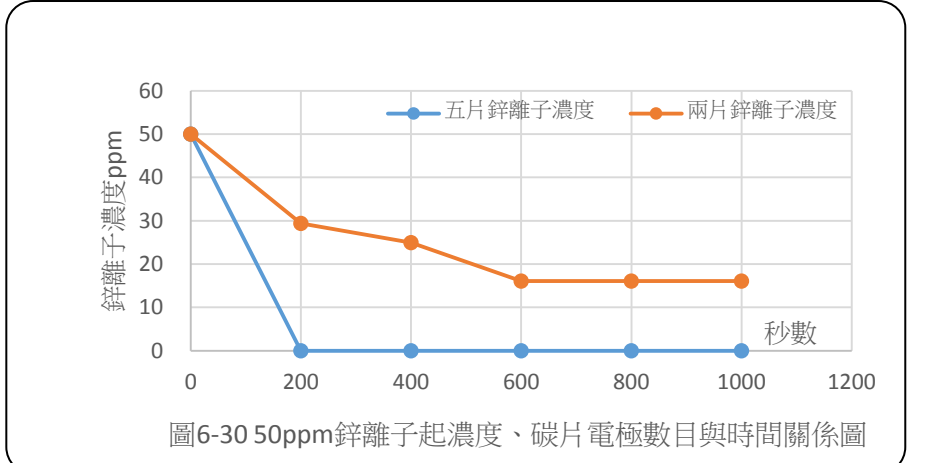
## 五、比較兩片、五片碳片電極對於不同起始濃度的銅離子濃度降解情形

此段分析聚焦於同時比較兩片碳棒電極以及五片碳棒電極在處理不同銅離子濃度的降解結果，結果如下圖 6-25~6-27 所示：

結果	說明																					
 <p>圖6-25 3000ppm銅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖</p> <table border="1"> <caption>圖6-25 3000ppm銅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖數據</caption> <thead> <tr> <th>秒數</th> <th>五片銅離子濃度 (ppm)</th> <th>兩片銅離子濃度 (ppm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>3000</td> <td>3000</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>2800</td> <td>2950</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>500</td> <td>2400</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>200</td> <td>1200</td> </tr> <tr> <td>800</td> <td>50</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>0</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table>	秒數	五片銅離子濃度 (ppm)	兩片銅離子濃度 (ppm)	0	3000	3000	200	2800	2950	400	500	2400	600	200	1200	800	50	100	1000	0	50	<p>對於 3000ppm 的銅離子水溶液而言，五片電極的在 400 秒內已經大量降解濃度，最後<u>五片電極可降解到排放標準</u>。</p>
秒數	五片銅離子濃度 (ppm)	兩片銅離子濃度 (ppm)																				
0	3000	3000																				
200	2800	2950																				
400	500	2400																				
600	200	1200																				
800	50	100																				
1000	0	50																				
 <p>圖6-26 300ppm銅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖</p> <table border="1"> <caption>圖6-26 300ppm銅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖數據</caption> <thead> <tr> <th>秒數</th> <th>五片銅離子濃度 (ppm)</th> <th>兩片銅離子濃度 (ppm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>280</td> <td>290</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>220</td> <td>285</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>50</td> <td>280</td> </tr> <tr> <td>800</td> <td>5</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>0</td> <td>210</td> </tr> </tbody> </table>	秒數	五片銅離子濃度 (ppm)	兩片銅離子濃度 (ppm)	0	300	300	200	280	290	400	220	285	600	50	280	800	5	250	1000	0	210	<p>對於 300ppm 的銅離子水溶液而言，兩片電極的降解狀況不佳，可是<u>五片電極最後可將濃度降低到排放標準</u>。</p>
秒數	五片銅離子濃度 (ppm)	兩片銅離子濃度 (ppm)																				
0	300	300																				
200	280	290																				
400	220	285																				
600	50	280																				
800	5	250																				
1000	0	210																				
 <p>圖6-27 30ppm銅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖</p> <table border="1"> <caption>圖6-27 30ppm銅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖數據</caption> <thead> <tr> <th>秒數</th> <th>五片銅離子濃度 (ppm)</th> <th>兩片銅離子濃度 (ppm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>30</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>10</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>5</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>4</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>800</td> <td>2</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>1</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	秒數	五片銅離子濃度 (ppm)	兩片銅離子濃度 (ppm)	0	30	30	200	10	13	400	5	14	600	4	13	800	2	10	1000	1	8	<p>對於 30ppm 的銅離子水溶液而言，兩片和五片都會降解濃度，可是五片的效果優於兩片電極的。也只有<u>五片電極的最後可達到排放標準</u>。</p>
秒數	五片銅離子濃度 (ppm)	兩片銅離子濃度 (ppm)																				
0	30	30																				
200	10	13																				
400	5	14																				
600	4	13																				
800	2	10																				
1000	1	8																				

## 六、比較兩片、五片碳片電極對於不同起始濃度的鋅離子濃度降解情形

此段分析聚焦於同時比較兩片碳棒電極以及五片碳棒電極在處理不同鋅離子濃度的降解結果，結果如下圖 6-28~6-30 所示：

結果	說明
 <p>圖6-28 5000ppm鋅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖</p>	<p>對於 5000ppm 的鋅離子水溶液而言，五片電極的效果優於兩片電極，也<u>只有五片電極的最後結果可達到排放標準。</u></p>
 <p>圖6-29 500ppm鋅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖</p>	<p>對於 500ppm 的鋅離子水溶液而言，五片電極的效果優於兩片電極，在 <b>600</b> 秒即達到可達到排放標準。</p>
 <p>圖6-30 50ppm鋅離子起濃度、碳片電極數目與時間關係圖</p>	<p>對於 50ppm 的鋅離子水溶液而言，五片電極的效果優於兩片電極，在 <u>200 秒內</u> 可達到排放標準。</p>

## 七、比較兩片、五片碳片電極對銅原子的析出量

此段聚焦於同時比較兩片碳棒電極以及五片碳棒電極在處理不同銅離子還原成為銅原子(析出銅原子質量)進行分析，結果如下圖 6-31~6-33 所示：



結果

說明

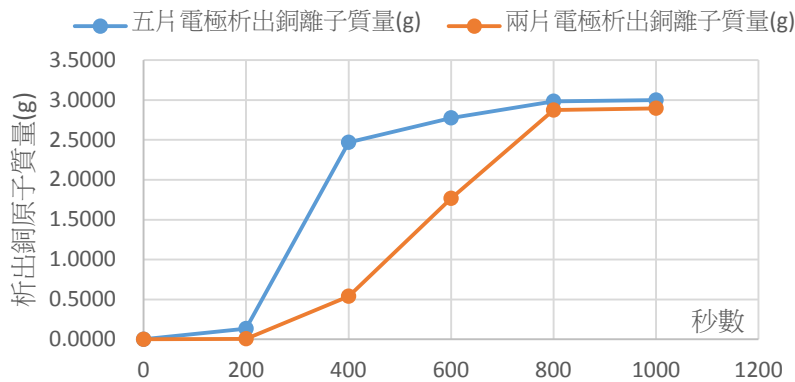


圖6-31 起始濃度3000ppm、不同片數電極、時間與析出銅原子質量(g)比較

在銅離子 3000ppm 的狀況下，兩種電極最後的效果相差不大，可是五片電極的效果較為快速而明顯，且最後 1000 秒的結果，五片電極的銅原子析出量為兩片電極的 **1.03** 倍。

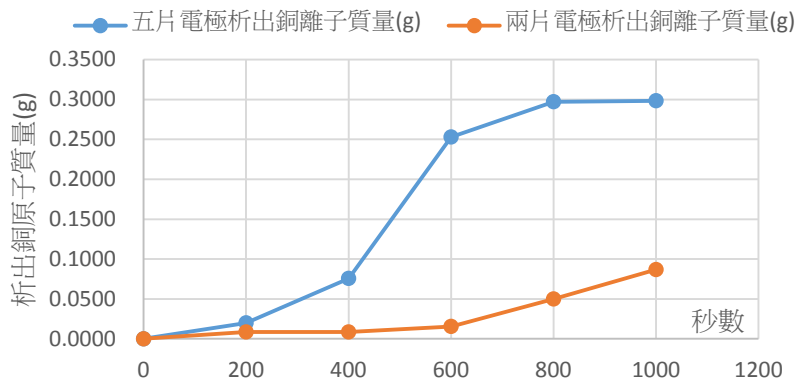


圖6-32 起始濃度300ppm、不同片數電極、時間與析出銅原子質量(g)比較

在銅離子 300ppm 的濃度下，五片電極優於兩片電極，最後 1000 秒的結果五片電極的銅原子析出量為兩片電極的 **3.44** 倍。

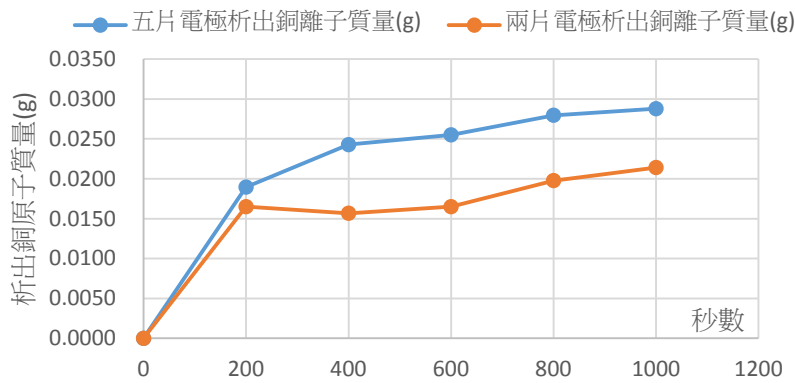


圖6-33 起始濃度30ppm、不同片數電極、時間與析出銅原子質量(g)比較

在銅離子 30ppm 的濃度下，五片效果優於兩片電極效果，最後 1000 秒的五片電極銅原子析出量為兩片電極的 **1.34** 倍。

## 八、比較兩片、五片碳片電極對鋅原子的析出量

此段聚焦於同時比較兩片碳棒電極以及五片碳棒電極在處理不同鋅離子還原成為鋅原子(析出鋅原子質量)進行分析，結果如下圖 6-34~6-36 所示：

結果	說明																					
<p style="text-align: center;">結果</p> <p style="text-align: center;">析出銅原子質量(g)</p> <p style="text-align: center;">秒數</p> <p style="text-align: center;">起始濃度5000ppm、不同片數電極、時間與析出銅原子質量(g)比較</p> <table border="1" style="display: none;"> <caption>5000ppm 起始濃度數據</caption> <thead> <tr> <th>時間 (秒)</th> <th>五片電極析出質量 (g)</th> <th>兩片電極析出質量 (g)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr> <tr><td>200</td><td>1.3000</td><td>0.4000</td></tr> <tr><td>400</td><td>1.9000</td><td>0.5000</td></tr> <tr><td>600</td><td>4.8000</td><td>0.9000</td></tr> <tr><td>800</td><td>4.9000</td><td>3.2000</td></tr> <tr><td>1000</td><td>4.9000</td><td>3.4000</td></tr> </tbody> </table>	時間 (秒)	五片電極析出質量 (g)	兩片電極析出質量 (g)	0	0.0000	0.0000	200	1.3000	0.4000	400	1.9000	0.5000	600	4.8000	0.9000	800	4.9000	3.2000	1000	4.9000	3.4000	<p>對於 5000ppm 的鋅離子水溶液濃度，五片電極效果優於兩片電極，最後 1000 秒的五片電極鋅原子析出量約為兩片電極鋅原子析出量的 <b>1.48</b> 倍。</p>
時間 (秒)	五片電極析出質量 (g)	兩片電極析出質量 (g)																				
0	0.0000	0.0000																				
200	1.3000	0.4000																				
400	1.9000	0.5000																				
600	4.8000	0.9000																				
800	4.9000	3.2000																				
1000	4.9000	3.4000																				
<p style="text-align: center;">析出銅原子質量(g)</p> <p style="text-align: center;">秒數</p> <p style="text-align: center;">起始濃度500ppm、不同片數電極、時間與析出銅原子質量(g)比較</p> <table border="1" style="display: none;"> <caption>500ppm 起始濃度數據</caption> <thead> <tr> <th>時間 (秒)</th> <th>五片電極析出質量 (g)</th> <th>兩片電極析出質量 (g)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr> <tr><td>200</td><td>0.3800</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>400</td><td>0.4700</td><td>0.0900</td></tr> <tr><td>600</td><td>0.5000</td><td>0.3300</td></tr> <tr><td>800</td><td>0.5000</td><td>0.4100</td></tr> <tr><td>1000</td><td>0.5000</td><td>0.4500</td></tr> </tbody> </table>	時間 (秒)	五片電極析出質量 (g)	兩片電極析出質量 (g)	0	0.0000	0.0000	200	0.3800	0.0500	400	0.4700	0.0900	600	0.5000	0.3300	800	0.5000	0.4100	1000	0.5000	0.4500	<p>對於 500ppm 的鋅離子水溶液濃度，五片電極效果優於兩片電極，最後 1000 秒的五片電極鋅原子析出量約為兩片電極鋅原子析出量的 <b>1.1</b> 倍。</p>
時間 (秒)	五片電極析出質量 (g)	兩片電極析出質量 (g)																				
0	0.0000	0.0000																				
200	0.3800	0.0500																				
400	0.4700	0.0900																				
600	0.5000	0.3300																				
800	0.5000	0.4100																				
1000	0.5000	0.4500																				
<p style="text-align: center;">析出銅原子質量(g)</p> <p style="text-align: center;">秒數</p> <p style="text-align: center;">起始濃度50ppm、不同片數電極、時間與析出銅原子質量(g)比較</p> <table border="1" style="display: none;"> <caption>50ppm 起始濃度數據</caption> <thead> <tr> <th>時間 (秒)</th> <th>五片電極析出質量 (g)</th> <th>兩片電極析出質量 (g)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr> <tr><td>200</td><td>0.0500</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>400</td><td>0.0500</td><td>0.0250</td></tr> <tr><td>600</td><td>0.0500</td><td>0.0340</td></tr> <tr><td>800</td><td>0.0500</td><td>0.0340</td></tr> <tr><td>1000</td><td>0.0500</td><td>0.0340</td></tr> </tbody> </table>	時間 (秒)	五片電極析出質量 (g)	兩片電極析出質量 (g)	0	0.0000	0.0000	200	0.0500	0.0200	400	0.0500	0.0250	600	0.0500	0.0340	800	0.0500	0.0340	1000	0.0500	0.0340	<p>對於 50ppm 的鋅離子水溶液濃度，五片電極效果優於兩片電極，最後 1000 秒的五片電極鋅原子析出量約為兩片電極鋅原子析出量的 <b>1.47</b> 倍。</p>
時間 (秒)	五片電極析出質量 (g)	兩片電極析出質量 (g)																				
0	0.0000	0.0000																				
200	0.0500	0.0200																				
400	0.0500	0.0250																				
600	0.0500	0.0340																				
800	0.0500	0.0340																				
1000	0.0500	0.0340																				

## 九、比較兩片、五片碳片電極對銅原子的析出量之耗能分析

進行以上分析之後，發現五片電極對於銅原子的析出優於兩片電極的銅原子析出量，可是會不會比較消耗能量呢？我們紀錄過程中的電壓  $V$  (固定為 20 伏特)、當時電流  $I$  (毫安培換算成為安培)，換算成為電功率  $P = \text{電壓}(V) * \text{電流}(I)$ ，然後經過 1000 秒的時候換算成為所耗能量焦耳。焦耳計算為電功率  $(P) * 1000$  秒。之後再將耗能/析出的銅原子量，算出若析出一克的銅原子所需的耗能比較，其結果如下表和圖所示。

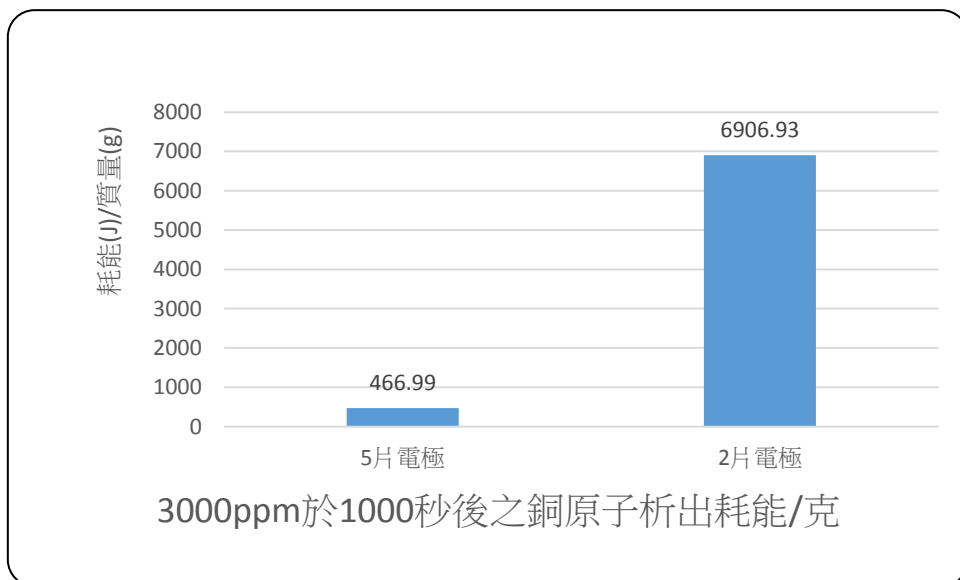
(一)3000ppm 銅離子濃度

表 6-5 3000 ppm 銅離子濃度不同電極析出 1 克銅原子之耗能比較表

秒數	吸光度 值五片	五片電 極析出 銅原子 質量(g)	電流 $I$ (mA)	電壓(V)	電功率 $(P)=VI$	消耗能量 $(J)=Pt=VI t$	析出每 克銅原 子所耗 能量(J)
1000	0.0005	2.9980	70.0	20.0	1.40	1400.00	466.99
秒數	吸光度 值兩片	兩片電 極析出 銅原子 質量(g)	電流 $I$ (mA)	電壓(V)	電功率 $(P)=VI$	消耗能量 $(J)=Pt=VI t$	析出每 克銅原 子所耗 能量(J)
1000	0.0255	2.8956	1000.00	20.0	20.00	20000.00	6906.93

在析出 1 克的銅原子質量下的耗能比較：

$$\text{五片電極}/\text{兩片電極} = 466.99/6906.93 = \mathbf{6.76\%}$$



(二)300ppm 銅離子濃度

表 6-6 300 ppm 銅離子濃度不同電極析出 1 克銅原子之耗能比較表

秒數	吸光度 值五片	五片電 極析出 銅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	稀出每克 銅原子所 耗能量(J)
1000	0.0004	0.2984	40.0	20.0	0.80	800.00	2681.30
秒數	吸光度 值兩片	兩片電 極析出 銅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	稀出每克 銅原子所 耗能量(J)
1000	0.0521	0.0868	1000.00	20.0	20.00	20000.00	230465.86

在析出 1 克的銅原子質量下的耗能比較：

五片電極/兩片電極 = 2681.30/230465.86= **1.16%**

300ppm於1000秒後之銅原子析出耗能/克

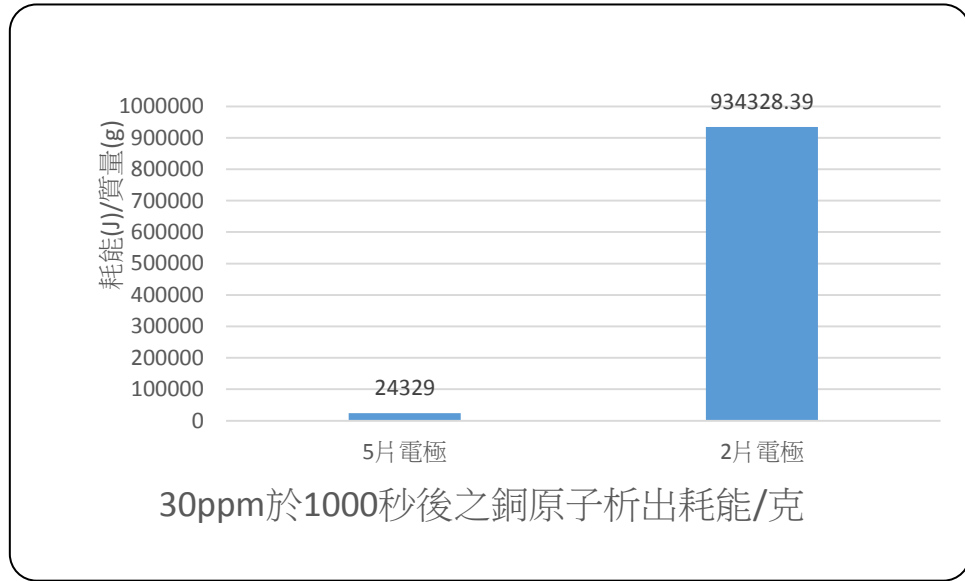
(二)30ppm 銅離子濃度

表 6-7 30 ppm 銅離子濃度不同電極析出 1 克銅原子之耗能比較表

秒數	吸光度 值五片	五片電 極析出 銅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	稀出每克 銅原子所 耗能量(J)
1000	0.0003	0.0288	35.0	20.0	0.70	700.00	24329.00
秒數	吸光度 值兩片	兩片電 極析出 銅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	稀出每克 銅原子所 耗能量(J)
1000	0.0021	0.0214	1000.00	20.0	20.00	20000.00	934328.39

在析出 1 克的銅原子質量下的耗能比較：

$$\text{五片電極/兩片電極} = 24329.00/934328.39 = \mathbf{2.60\%}$$



## 十、比較兩片、五片碳片電極對鋅原子的析出量之耗能分析

進行以上分析之後，發現五片電極對於鋅原子的析出優於兩片電極的鋅原子析出量，可是會不會比較消耗能量呢？我們根據上段內容的計算方式，算出若析出一克的鋅原子所需的耗能比較，其結果如下表 6-8~6-10 所示。

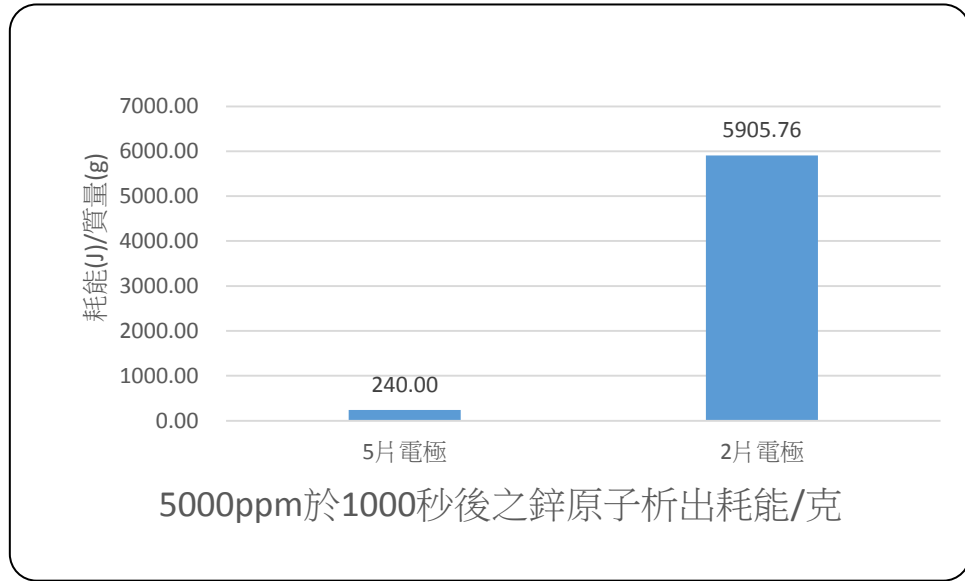
(一)5000ppm 鋅離子濃度

表 6-8 3000 ppm 銅離子濃度不同電極析出 1 克銅原子之耗能比較表

秒數	吸光度 值五片	五片電 極析出 鋅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	稀出每 克鋅原 子所耗 能量(J)
1000	0.0008	5.0000	60.0	20.0	1.20	1200.00	240.00
秒數	吸光度 值兩片	兩片電 極析出 鋅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	稀出每 克銅原 子所耗 能量(J)
1000	0.0415	3.3865	1000.00	20.0	20.00	20000.00	5905.76

在析出 1 克的鋅原子質量下的耗能比較：

$$\text{五片電極/兩片電極} = 240.00/5905.76 = \mathbf{4.06\%}$$



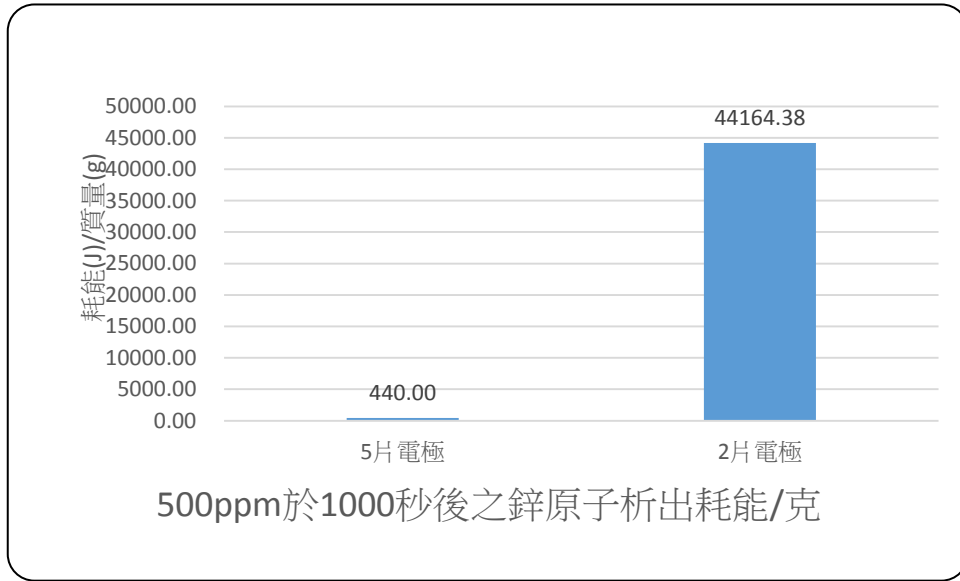
(二)500ppm 鋅離子濃度

表 6-9 500 ppm 鋅離子濃度不同電極析出 1 克銅原子之耗能比較表

秒數	吸光度 值五片	五片電 極析出 鋅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	析出每 克鋅原 子所耗 能量(J)
1000	0.0001	0.5000	11.0	20.0	0.22	220.00	440.00
秒數	吸光度 值兩片	兩片電 極析出 鋅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	析出每 克銅原 子所耗 能量(J)
1000	0.0062	0.4529	1000.00	20.0	20.00	20000.00	44164.38

在析出 1 克的鋅原子質量下的耗能比較：

五片電極/兩片電極 =  $440.00/44164.38=1.00\%$



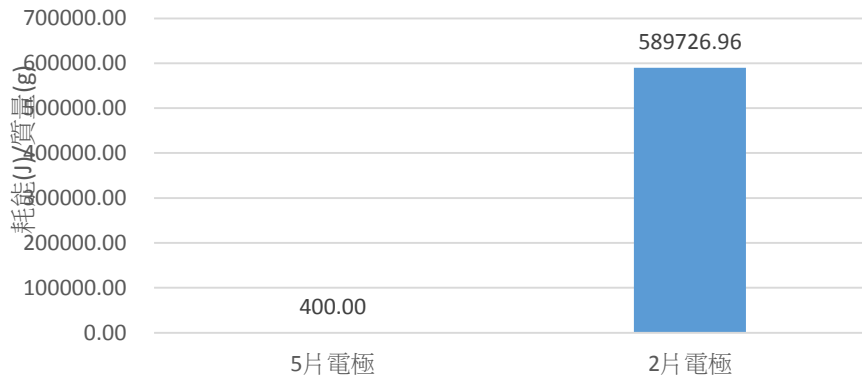
(三)50ppm 鋅離子濃度

表 6-10 50 ppm 鋅離子濃度不同電極析出 1 克銅原子之耗能比較表

秒數	吸光度 值五片	五片電 極析出 鋅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	析出每克 鋅原子所 耗能量(J)
1000	0.0001	0.0500	10.0	20.0	0.20	200.00	4000.00
秒數	吸光度 值兩片	兩片電 極析出 鋅原子 質量(g)	電流 I(mA)	電壓(V)	電功率 (P)=VI	消耗能量 (J)=Pt=VI <sub>t</sub>	析出每克 銅原子所 耗能量(J)
1000	0.0055	0.0339	1000.00	20.0	20.00	20000.00	589726.96

在析出 1 克的鋅原子質量下的耗能比較：

$$\text{五片電極/兩片電極} = 400.00/589726.96 = \mathbf{0.07\%}$$



50pm於1000秒後之鋅原子析出耗能/克



## 柒、綜合討論

### 一、 在不同時間下，五片碳片電極的析出水中金屬離子效果是否皆優於兩片碳片電極？

為了回答這個問題，我們將不同起始濃度的銅離子、鋅離子水溶液於 200 秒、400 秒、600 秒、800 秒與 1000 秒的五片電極/兩片電極所析出的原子質量進行倍數比較，結果如下表 7-1 所示。

結果分析中發現在任何的時段，五片電極所析出的金屬原子量都大於兩片電極，所以可說五片電極的效果都優於兩片電極。

種類	濃度	結果
銅離子→ 銅原子	3000ppm	<p>5/2片電極析出銅原子質量倍數</p> <p>起始濃度3000ppm，5片/2片析出銅原子質量倍數比較</p>
	300ppm	<p>5/2片電極析出銅原子質量倍數</p> <p>起始濃度30ppm，5片/2片析出銅原子質量倍數比較</p>

	30ppm	<p>5/2片電極析出銅原子質量倍數</p> <p>起始濃度300ppm，5片/2片析出銅原子質量倍數比較</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>時間 (秒)</th> <th>析出銅原子質量倍數</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0秒</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>200秒</td><td>2.32</td></tr> <tr><td>400秒</td><td>8.79</td></tr> <tr><td>600秒</td><td>16.24</td></tr> <tr><td>800秒</td><td>5.95</td></tr> <tr><td>1000秒</td><td>3.44</td></tr> </tbody> </table>	時間 (秒)	析出銅原子質量倍數	0秒	0.00	200秒	2.32	400秒	8.79	600秒	16.24	800秒	5.95	1000秒	3.44
時間 (秒)	析出銅原子質量倍數															
0秒	0.00															
200秒	2.32															
400秒	8.79															
600秒	16.24															
800秒	5.95															
1000秒	3.44															
鋅離子→ 鋅原子	5000ppm	<p>5/2片電極析出銅原子質量倍數</p> <p>起始濃度5000ppm，5片/2片析出銅原子質量倍數比較</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>時間 (秒)</th> <th>析出銅原子質量倍數</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0秒</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>200秒</td><td>3.23</td></tr> <tr><td>400秒</td><td>3.85</td></tr> <tr><td>600秒</td><td>5.76</td></tr> <tr><td>800秒</td><td>1.53</td></tr> <tr><td>1000秒</td><td>1.48</td></tr> </tbody> </table>	時間 (秒)	析出銅原子質量倍數	0秒	0.00	200秒	3.23	400秒	3.85	600秒	5.76	800秒	1.53	1000秒	1.48
	時間 (秒)	析出銅原子質量倍數														
	0秒	0.00														
	200秒	3.23														
400秒	3.85															
600秒	5.76															
800秒	1.53															
1000秒	1.48															
500ppm	<p>5/2片電極析出銅原子質量倍數</p> <p>起始濃度500ppm，5片/2片析出銅原子質量倍數比較</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>時間 (秒)</th> <th>析出銅原子質量倍數</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0秒</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>200秒</td><td>8.66</td></tr> <tr><td>400秒</td><td>5.29</td></tr> <tr><td>600秒</td><td>1.50</td></tr> <tr><td>800秒</td><td>1.21</td></tr> <tr><td>1000秒</td><td>1.10</td></tr> </tbody> </table>	時間 (秒)	析出銅原子質量倍數	0秒	0.00	200秒	8.66	400秒	5.29	600秒	1.50	800秒	1.21	1000秒	1.10	
時間 (秒)	析出銅原子質量倍數															
0秒	0.00															
200秒	8.66															
400秒	5.29															
600秒	1.50															
800秒	1.21															
1000秒	1.10															
50ppm	<p>5/2片電極析出銅原子質量倍數</p> <p>起始濃度50ppm，5片/2片析出銅原子質量倍數比較</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>時間 (秒)</th> <th>析出銅原子質量倍數</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0秒</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>200秒</td><td>2.43</td></tr> <tr><td>400秒</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>600秒</td><td>1.47</td></tr> <tr><td>800秒</td><td>1.47</td></tr> <tr><td>1000秒</td><td>1.47</td></tr> </tbody> </table>	時間 (秒)	析出銅原子質量倍數	0秒	0.00	200秒	2.43	400秒	2.00	600秒	1.47	800秒	1.47	1000秒	1.47	
時間 (秒)	析出銅原子質量倍數															
0秒	0.00															
200秒	2.43															
400秒	2.00															
600秒	1.47															
800秒	1.47															
1000秒	1.47															

## 二、 在不同時間下，五片碳片電極的所節省的能源是否皆優於兩片碳片電極?

在耗能方面，我們整理表 6-5~6-10，得到表 6-11 我們驚異的發現竟然可以節省這麼多電能。我們認為這跟電解槽的大小有關，我們的電解槽很小（15cm\*7.5cm\*4cm），每片碳片的距離只有 5cm，而且電解液裡雜質少，有利於金屬離子移動，才会有這樣的好效能。

表 7-1 5 片碳片/2 片碳片的電解下，析出每克金屬原子的耗能百分比

銅 3000ppm	銅 300ppm	銅 30ppm
<b>6.76%</b>	<b>1.16%</b>	<b>2.60%</b>
鋅 5000ppm	鋅 500ppm	鋅 50ppm
<b>4.06%</b>	<b>1.00%</b>	<b>0.07%</b>

但是由此可知，不論電解槽的大小，只要電解槽的中間放置碳片，就有利於回收重金屬，使水體的金屬離子降低。

## 三、 五片碳片電極的所節省的時間是否皆優於兩片碳片電極?

我們整理表 6-1 和表 6-3 得到表 7-2，在兩片碳片的電解下，不論是高濃度的還是低濃度的離子，經過 1000s 的通電後，水溶液的金屬離子濃度都沒辦法達到環保署的放流水的排放標準

表 7-2 兩片碳片通電後的殘餘離子濃度

兩片碳片	3000ppm 通電 1000s 後吸光度值	殘餘離子濃度(ppm)	300ppm 通電 1000s 後吸光度值	殘餘離子濃度(ppm))	30ppm 通電 1000s 後吸光度值	殘餘離子濃度(ppm)
銅離子 1000s	0.0255	<b>104</b>	0.0521	<b>213</b>	0.0021	<b>9</b>
兩片碳片	5000ppm 通電 1000s 後吸光度值	殘餘離子濃度(ppm)	500ppm 通電 1000s 後吸光度值	殘餘離子濃度(ppm))	50ppm 通電 1000s 後吸光度值	殘餘離子濃度(ppm)
鋅離子 1000s	0.0415	<b>1613</b>	0.0062	<b>47</b>	0.0055	<b>16</b>

由我們整理節錄以上資料得表 7-3，五片碳片的裝置，很明顯地，不論是  $\text{Cu}^{2+}$  或是  $\text{Zn}^{2+}$  五片碳片清除力都優於二片，有趣的是  $\text{Cu}^{2+}$ ，300ppm 和 30ppm 在 800s 時就能將其降到環保署放流水標準，3000ppm 只需要 1000s 就可達標。30ppm 只需到 1000s 才能符合飲用水源水質標準。相較  $\text{Zn}^{2+}$  5000ppm，只需 800s 就測不到了。500ppm 只需要 600s。50ppm 的只需要 200s 分光光度儀就測不到了， $\text{Zn}^{2+}$  的效率實在令我們驚奇，引起我們未來將繼續探討的動力。

表 7-3 五片碳片通電後的殘餘離子濃度

五片碳片	3000ppm 通電吸光度值	殘餘離子濃度(ppm)	300ppm 通電吸光度值	殘餘離子濃度(ppm))	30ppm 通電吸光度值	殘餘離子濃度(ppm)
銅離子 800 秒	0.0041	17	0.0007	3	0.0005	2
銅離子 1000 秒	0.0005	2	0.0004	2	0.0003	1
五片碳片	5000ppm 通電吸光度值	殘餘離子濃度(ppm)	500ppm 通電吸光度值	殘餘離子濃度(ppm))	50ppm 通電吸光度值	殘餘離子濃度(ppm)
鋅離子 200 秒	0.0887	3708	0.0077	114	0.0050	0
鋅離子 600 秒	0.0089	167	0.0019	0	0.0010	0
鋅離子 800 秒	0.0012	0	0.0008	0	0.0001	0
鋅離子 1000 秒	0.0008	0	0.0001	0	0.0001	0

所以，有五片碳片的電解槽，回收金屬和減低水中金屬離子的效能較佳。

#### 四、 本實驗對於重金屬汙水的處理，是否能有效達到環保署的流放水排放標準。

從前一項分析，我們發現中央有碳片的電解槽，真的有機會可以讓電鍍廢液達到流放水的排放標準。甚至於可能連環保署的飲用水的標準也能達標。 $\text{Cu}^{2+}$ 300ppm 和 30ppm1000s 就達標了。 $\text{Zn}^{2+}$ 則 50ppm 200s 就達標，500ppm 和 5000ppm 只需要 600s。

## 捌、研究結論

一、無論是硫酸銅還是硫酸鋅水溶液，金屬銅和金屬鋅的回收效率：

5 片碳片（正負兩極+中間 3 片）>2 片（正負極）碳片。

二、無論是硫酸銅還是硫酸鋅水溶液，金屬銅和金屬鋅回收的耗能的情形：

5 片碳片（正負兩極+中間 3 片）<2 片（正負極）碳片。

三、無論是硫酸銅還是硫酸鋅水溶液，金屬銅和金屬鋅回收的所需的時間：

5 片碳片（正負兩極+中間 3 片）<2 片（正負極）碳片。

四、電解後的廢液以 5 片碳片的設備的殘餘液最符合環保署放流水的排放標準。

五、未來發展的可能性：

我們用了學長姊們的裝置發現，重金屬離子的確是可以在低濃度下被中央碳片和負極碳片析出。雖然低濃度下所耗費的電能較多，但是加了中央碳片之後的析出效果比只有負極碳片的效果多很多。而且過去文獻關於電解沉積法，他們所使用的電極必須經過挑選，不同的廢液用不同的電極。甚至於用昂貴的惰性電極，而我們只需要用價格便宜的碳片就可以了。電解任何廢液幾乎都可以使用。根據學姊的實驗發現：碳片數的多寡受限於電解槽大小，但片數多的確可以增加金屬析出率，中央碳片擺放的片數可依照電解槽的大小作增減，找出最佳效率，碳片的面積大小也可以自行調整，面積越大析出的金屬應該更多。

為了追求更有效且更便宜的器材，我們曾使用石墨紙和備長炭做電極代替中央碳片，石墨紙泡水久了會爛爛的，備長炭很便宜也可以使用，但是備長炭細微的孔隙較多，效率比較差、耗電更多。

## 玖、參考文獻

1. 廢水金屬處理回收簡介，侯萬善 [http://ebooks.lib.ntu.edu.tw/1\\_file/moeaidb/012553/a03b042.pdf](http://ebooks.lib.ntu.edu.tw/1_file/moeaidb/012553/a03b042.pdf)
2. 環保署放流水標準 <https://www.moeaidb.gov.tw/iphw/tucheng/park/file20.pdf>
3. 飲用水水源水質標準 <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=00040018>
4. 國中自然與生活科技第 6 冊，第一章第 5 節，電流的化學效應，翰林版
5. [http://ocw.aca.ntu.edu.tw/ocw\\_files/099S125/ch11.pdf](http://ocw.aca.ntu.edu.tw/ocw_files/099S125/ch11.pdf)
6. <https://smallcollation.blogspot.com/2013/08/redox-potential.html#gsc.tab=0>
7. 趙伯宣等，中華民國第 52 屆科展化學科 第三名