

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 化學科

第三名

030202

『金來瘋』—金屬廢液利用電解法提高回收效率  
與節能大小的探討—

學校名稱：屏東縣立明正國民中學

作者：  國二 劉惟安  國二 劉惟平  國二 趙伯宣	指導老師：  鍾梅英  陳盈吉
---	-----------------------------

關鍵詞：氧化還原、汙水處理、回收效率

# 研究摘要

本研究在電解槽中額外放入中央碳片進行硫酸銅水溶液電解，發現文獻中沒有探究到的自發性感應電極現象，且可提高金屬的回收量高達對照組的五倍(耗能僅需對照組的 14%)，其主要發現如下：

- (1) 中央碳片會出現自發性感應電極(偽正極和偽負極)；偽正極產生氧氣、偽負極則會析出金屬銅。
- (2) 若改變中央碳片的排列方式，會影響銅金屬總體析出量。以平行排列的析出效果優於垂直排列。
- (3) 試圖建立中央碳片之串聯與並聯的理論類比，可初步成功解釋析出量與效率的差異。
- (4) 若電解槽中央擺置碳片，最高可讓每克銅析出的能量降至原來的 14% (同樣耗能下，析出量最高可提高五倍)，建議可應用到金屬廢水的回收設計上，達到低耗能高回收的效果。

# 壹、 研究動機

我們在做電解質水溶液導電時，發現接負極的碳棒會有金屬析出，接正極的碳棒會有氣泡冒出。老師說那是正負極在進行電解反應，我們對於不同的鹽類水溶液在通入直流電後，產生不同的現象感到好奇。在目前許多工廠排放物中，重金屬廢水的比例很高，前幾天才又傳出重金屬廢液污染農田的新聞。所以我們思考：在現今資源短缺的環境下，是否有更好回收這些重金屬的方式。我們參考以前的文獻和過去學長姊做過的實驗，發現電解槽兩極之間擺放碳片，在相同耗能下似乎可析出更多的金屬，所以我們嘗試在相似耗能下，碳片擺放的方式和片數是否可析出更多金屬量。

# 貳、 研究目的與問題

- 一、 探究在水溶液環境通入直流電後，中央位置擺放碳片的數量與金屬析出狀況是否有所有差異？若有差異，這些差異為何？
- 二、 探究在水溶液環境通入直流電後，中央擺放碳片位置與金屬析出狀況是否有所有差異？若有差異，這些差異為何？
- 三、 是否可發展相關解釋（理論或想法）來回應上述問題？
- 四、 探究通電對於重金屬汙水的處理是否有所助益。

# 參、 文獻探討與分析

本文獻探討與分析著重於兩大部分，首先為現行重金屬廢液回收的方式，二為物質的氧化能力差異，第三則為自發性的感應電極（暫時電極化），其結果與內容如下。

## 一、 重金屬廢液回收

重金屬汙水的污染已經造成許多社會上的健康問題、經濟問題與生態問題，所以回收重金屬的工作已經是非常重要的課題，根據我們所搜尋的文獻中，我們整理出如何回收廢水中的重金屬，大致上有以下四種方法，請見下表 3-1 所示。

表 3-1 重金屬廢水回收金屬之方法整理表

方法	內容說明	優點	缺點
傳統電解法	在水溶液中通電，在負極處析出金屬原子	可以回收金屬，重新使用	能源消耗，耗電費能
化學沉澱法	在汙水中加入降低水溶液 pH 的化合物，待水溶液 pH 約為 8-9 時，大部分的金屬形成氫氧化化合物沉澱，再將這些沉澱的汙泥封罐埋藏。	不需耗能，手續簡單	無法回收這些金屬
電透膜分析	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	有部分的金屬可以直接回收使用	能源消耗，耗電費能
生物吸附法	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。	不需耗能，手續簡單	無法回收這些金屬

在上表中我們發現這些方法都可以去除水中的重金屬，可是在化學沉澱法、生物吸附法兩種方法中，這些回收的金屬無法重新使用，幾乎都是以掩埋封存的方式處理，雖然這兩種方法不需消耗能源，可是卻無法回收使用。反觀傳統電解法與電透膜方法是以耗能的方式進行回收，雖然消耗能源卻可回收金屬繼續使用。我們認為是以上的四種常見方式各有優缺點，而且優缺點互補。

## 二、 物質的氧化能力

我們的實驗在開始之前有先去請教之前做金屬樹的學長姐，她們提及金屬的氧化能力不同，所以會造成不同的放出電子與獲得電子的能力(氧化還原)，而氧化與還原的定義以電子的微觀層次來看，我們整理出下表 3-2 來顯示。氧化與還原反應是同時進行，物質失去電子之後（氧化），這些電子必定會有其他物質所吸收（還原）。

表 3-2 氧化還原定義與常見的物質氧化能力比較

現象	氧化	還原
定義	失去電子	得到電子
常見氧化能力大小比較	K > Na > Ca > Mg > Al > C > Zn > Fe > Pb > Cu > Hg > Ag > Pt > Au	

## 三、 自發性感應電極(暫時電極化)

在去年學長姐的研究中我們發現她們所使用的碳片作為兩側電極，在硫酸銅水溶液中央放置碳片，結果發現在兩側碳電極通電的時候，中央碳片自己產生了偽正極與偽負極現象，這種中央碳片自發性的感應電極現象，我們沒有查閱到相關的文獻，不過學長姐有去請問化學系的大學教授，推測產生原因可能為『離子障礙』所產生，其過程解釋可能如下圖 3-1 所示：

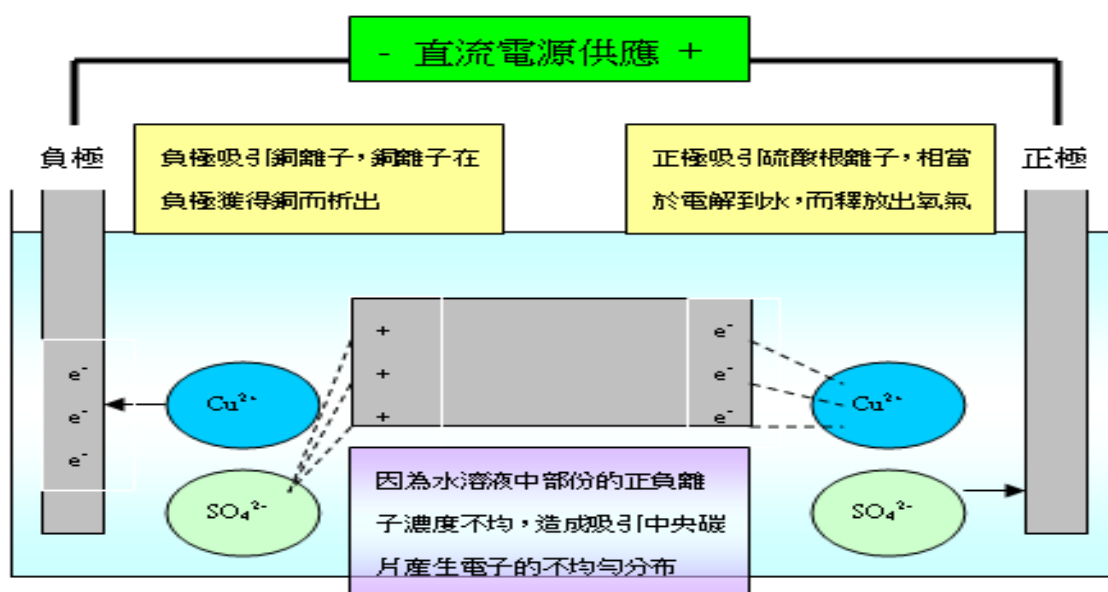


圖 3-1 離子障礙造成中央碳片自發性感應電極的產生

在離子障礙的解釋中，中央碳片兩側的正負離子分布不均，導致中央碳片被感應產生偽正極和偽負極，所以在中央碳片上也可看到偽正極進行電解水而產生氧氣，偽負極則進行銅離子還原成爲銅原子的反應，這其中也牽涉到了電子的轉移，我們的想法認爲中央碳片的偽正極產生之後，進行電解水的反應 ( $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 1\text{O}_2 + 4\text{e}^-$ )，其中電子順著中央碳片移動到偽負極，促使水溶液中的銅離子獲得電子而析出銅原子 ( $2\text{Cu}^{2+} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cu}$ )，而且學長姐的實驗也證明了中央碳片不會溶解變輕卻也能夠提供銅離子還原時所需的電子來源，這個來源就是偽正極電解水所產生的電子。

在以上的研究文獻中，令我們很好奇的是若是中央碳片的電極是自發性產生的，那麼中央碳片的數量與擺放方式是否會影響整體銅原子的回收呢？若是可以在相似耗能的狀況下，回收銅原子的效率是否會因爲中央碳片的設置而有所提升呢？所以我們以去年學長姐的研究結果爲基礎，繼續延伸完成今年的實驗。

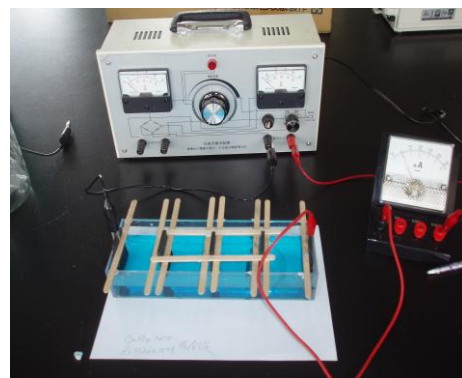
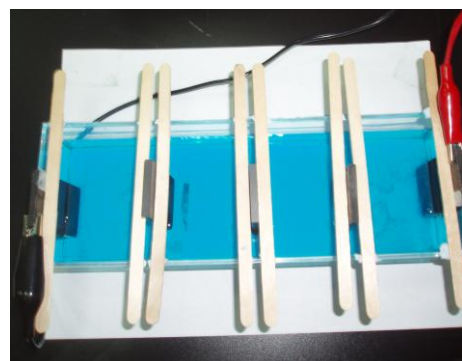
## 肆、 研究設備與方法

### 一、 離子溶液的配製

本實驗中選擇以常見的硫酸銅溶液進行銅離子的還原分析，配置 0.5M 的硫酸銅 ( $\text{CuSO}_4$ ) 備用。

### 二、 水溶液通電環境的設置

- (一) 選用長方形透明容器 (長: 23.5 cm, 寬: 7.8 cm, 高: 4.1 cm)
- (二) 中央擺置碳片，兩電極也爲碳片。
- (三) 兩端碳片分別接上直流電源供應器的正極與負極，調整電壓爲 20V。
- (四) 微電流計 ( $\mu\text{A}$ ) 與整個電路串聯相接。
- (五) 水溶液爲 0.5M 的硫酸銅水溶液，並將硫酸銅水溶液加到容器高度的一半。
- (六) 打開直流電源供應器，通電時間計時爲 100 秒，觀測檢流計變化與相關電極的變化，並記錄安培計。
- (七) 實驗結束後，測量中央碳片上析出的銅金屬量與負極上所析出的銅金屬量。



### 三、 水溶液中央碳片的排列方向與數量放置

此部分我們研究中的硫酸銅電解槽正極與負極皆為碳片，而中央碳片共分為兩種排放：垂直排放與平行排放，其數量與放置關係如下圖 4-2、圖 4-3 所整理。

#### (一) 中央碳片—平行排列

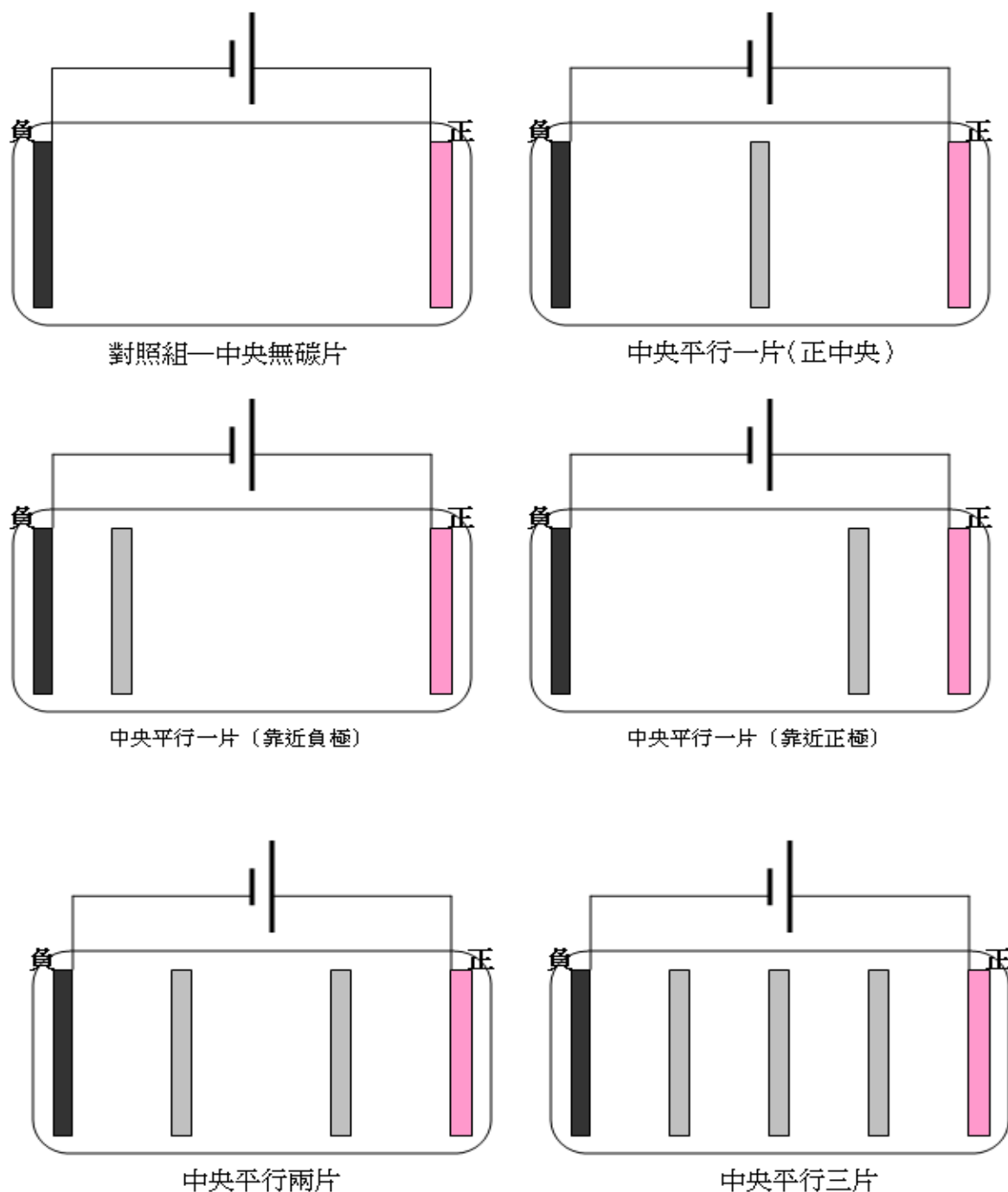


圖 4-2 中央碳片平行排放與數量配置圖

## (二) 中央碳片—垂直排列

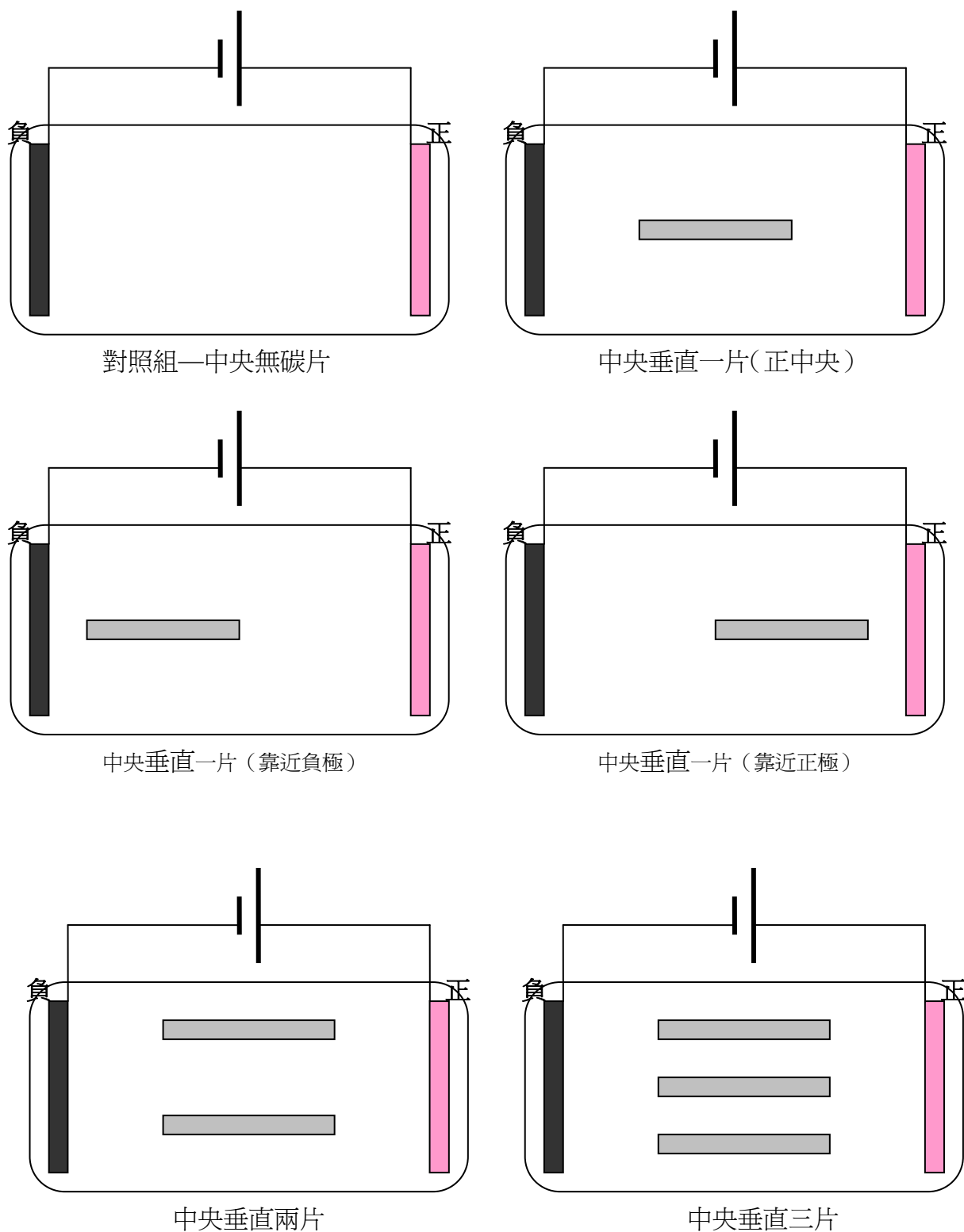


圖 4-3 中央碳片垂直排放與數量配置圖

## 伍、 結果分析與討論

### 一、 中央碳片自發性電極化的現象

此部分的分析主要是探究在電解槽中若放置中央碳片，中央碳片在未接觸任何電線的狀況下，自行產生的電極化現象，形成偽正極和偽負極的兩端而各自進行電解水產生氧氣和得到電子析出銅的狀況。我們的實驗設置很多組，我們以平行三片碳片與垂直三片碳片為例進行說明，以下為我們的實驗結果。

#### (一) 中央垂直三片碳片的分析

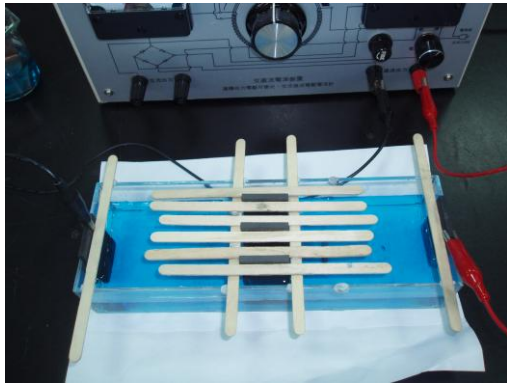


圖 5-1A 中央垂直三片配置圖

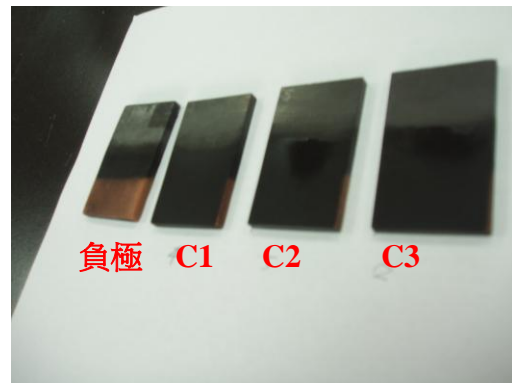


圖 5-1B 中央垂直三片銅析出狀況

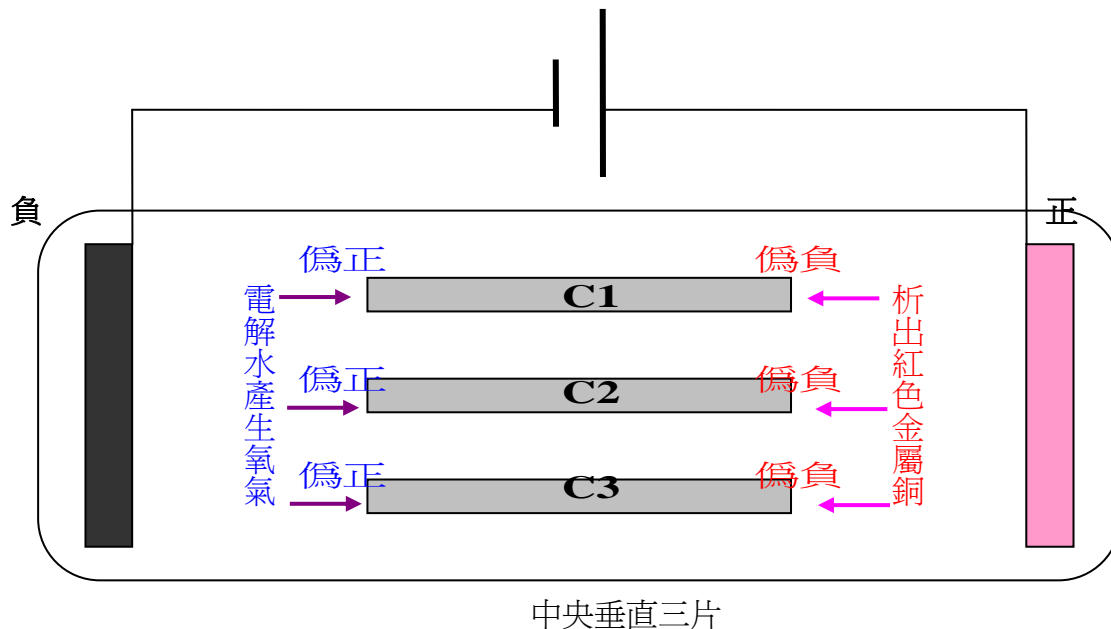


圖 5-1C 中央垂直三片電解模式圖

在上圖 5-1-C 的模式圖中，清楚發現三片垂直的中央碳片靠近正極的地方都自行感應產生偽負極，並在此處進行還原反應析出銅原子；而在靠近負極的左側都自行感應產生偽正極，進行電解水的氧化反應產生氧氣。得到這樣自發性感應電極的結果，我們認為在溶液中



離子的受到正、負極的影響而向兩側移動，中央碳片兩側的正負離子濃度不同而造成感應，這種自發性的感應電極在文獻中並沒有發現類似的例子，那麼在中央平行三片碳片的狀況下，其自發感應電極的情形為何呢？請看以下分析。

## (二) 中央平行三片碳片的分析

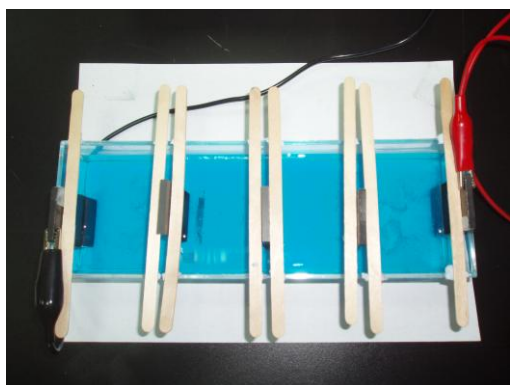


圖 5-2A 中央平行碳片三片裝置

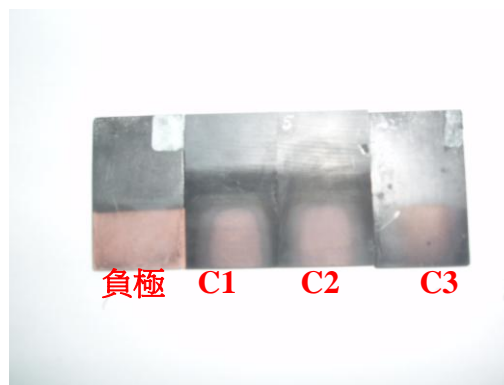
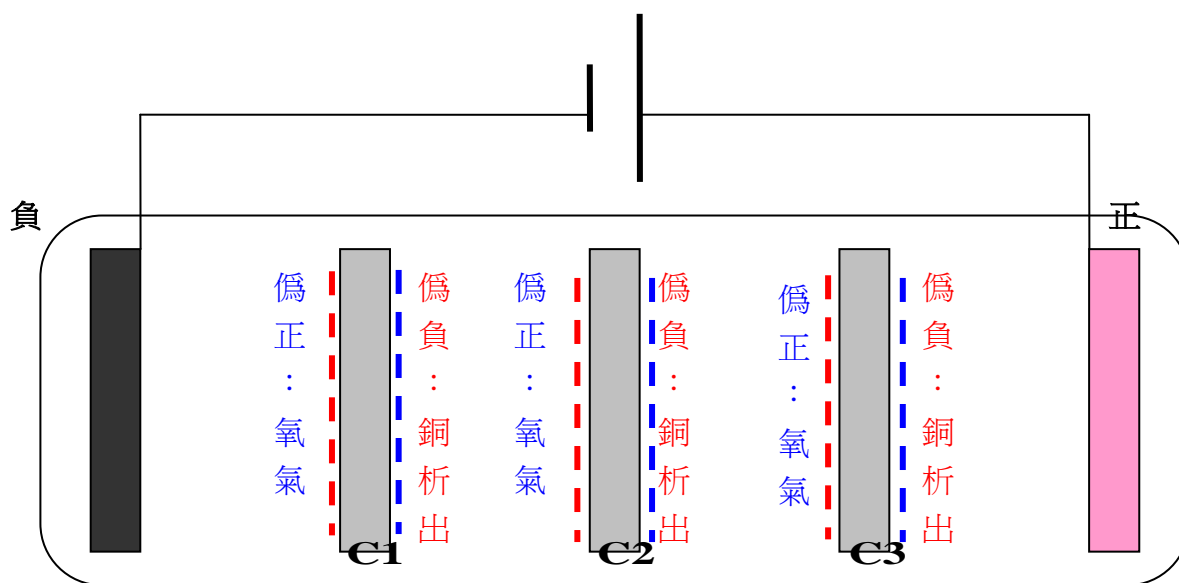


圖 5-2B 中央平行碳片三片銅析出狀況



中央平行三片

圖 5-2C 中央平行碳片三片結果模式圖

在上圖 5-2C 的結果模式圖中，可以發現三片中央平行碳片的左側都自行感應產生偽正極，而右側都自行感應產生偽負極，這樣的結果與垂直放置三片碳片的結果相似。這兩個裝置的中央碳片在沒有直接接觸到電線的狀況下，都可以自行感應產生偽正極和偽負極，這現象讓我們感到非常有趣，而不同數量的中央碳片與放置方式會不會造成銅原子量的差異呢？我們接著做了下一個實驗與分析。

## 二、 中央『平行碳片』與銅原子析出量的關係分析

### (一) 分析一：中央平行碳片一片的位置與裝置中，中央碳片與負極的銅原子析出量比較

此段研究中我們是以中央擺放一片平行碳片，分別探討中央碳片靠近負極、正中央與靠近正極等三者不同位置的負極析出量與中央碳片的析出量是否有所差異，其結果如下所示：

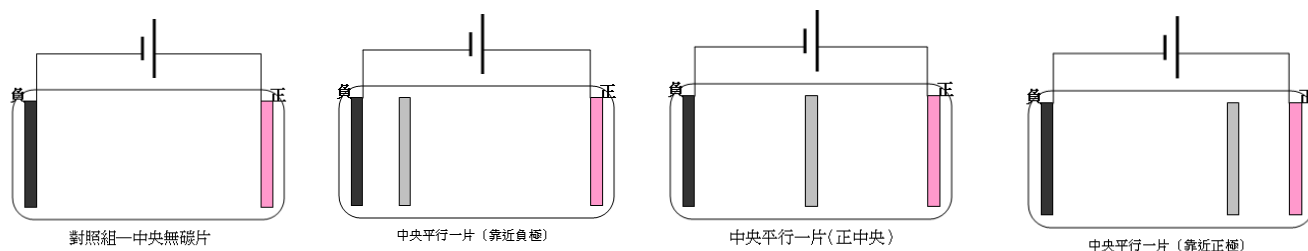
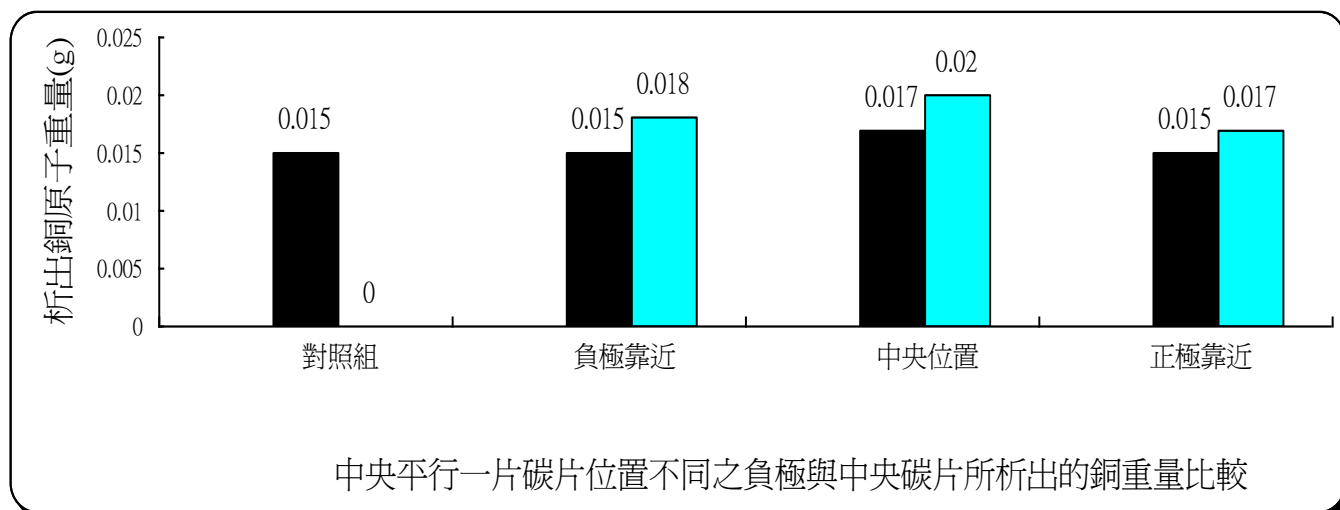


表 5-1 中央平行碳片與其銅原子的析出量比較

組別	對照組	負極靠近	中央位置	正極靠近
負極析出銅重量 (圖中黑色部份)	0.015g	0.017g	0.017g	0.015g
中央碳片析出銅重 (圖中藍色部份)	0.000g	0.018g	0.020g	0.017g
銅總析出量 (負極+中央碳片)	0.015 g	0.035 g	0.037 g	0.032 g



中央平行一片碳片位置不同之負極與中央碳片所析出的銅重量比較

圖 5-3 中央平行碳片與其銅原子的析出量比較

由圖中可發現中央平行碳片擺放的位置不同，其負極所析出的銅重量相似，而且中央平行碳片上所析出的銅原子質量也相當，其結果顯示

- (1) 中央擺放一片碳片或是不擺放碳片，其負極所析出的銅原子質量相近，負極不會因為中央擺放一片平行碳片有所有不同。

(2) 中央平行一片碳片的擺放位置不會影響該中央碳片的析出量。

**(二) 分析二：中央平行碳片一片、兩片與三片裝置中負極、中央碳片與總裝置中的銅原子析出量比較**

此段實驗設計是以中央擺放一片、兩片與三片平行碳片，探討中央平行碳片的擺放數量對於負極析出量與中央碳片的析出量是否有所差異，其結果如下所示：

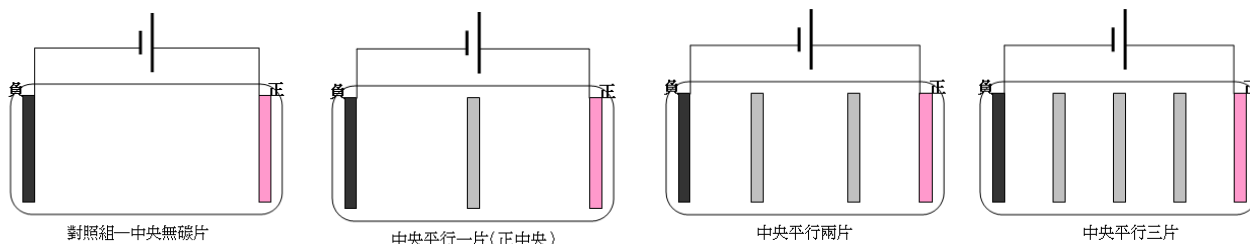


表 5-2 中央平行一片、兩片與三片碳片對於負極、中央碳片與裝置中總析出銅重分析

組別	對照組	中央平行一片	中央平行兩片	中央平行三片
負極析出銅重量 (圖中紫色部份)	0.015g	0.017g	0.018g	0.019g
中央碳片析出總銅重 (圖中黃色部份)	0.000g	0.021g	0.0235g	0.057g
析中總銅重→負極+中央碳片 (圖中藍色部份)	0.015g	0.038g	0.0415g	0.076g
與對照組比較之析出銅倍率	100%	253%	277%	507%

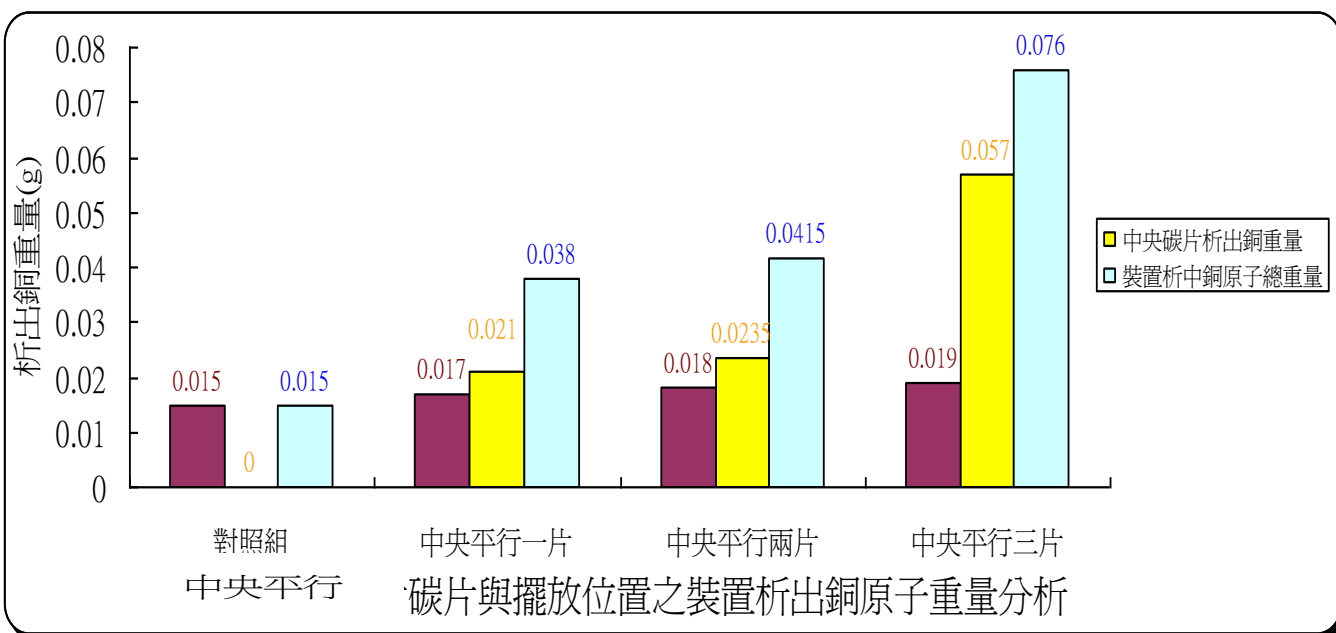


圖 5-4 中央平行一片、兩片與三片碳片對於負極、中央碳片與裝置中總析出銅重分析  
由資料分析中，我們可以得到以下結果：

- (1) 負極所析出的銅量相當，不會因中央碳片的有無和數量多寡而有差異。
- (2) 若中央放置平行碳片，則中央碳片上會有額外的銅原子析出。
- (3) 平行一片與平行兩片的中央碳片析出銅的質量相當，但是平行放置三片中央碳片銅析出量卻突然加倍。
- (4) 中央平行碳片的數量與裝置中銅總析出量(中央碳片+負極)依序為：平行三片 > 平行兩片 = 平行一片 > 無中央平行碳片(對照組)。
- (5) 若以對照組的負極析出量為對照比較，則中央平行兩片與平行一片所析出的量約為對照組的 2.5 倍，而放置平行三片的析出量則為對照組的 5 倍左右，顯示中央放置平行碳片，的確有助於溶液中的銅離子大量還原成為銅原子。

在以上的結果中，實驗至此我們可以清楚知道中間碳片放置的與否會影響整體的析出量，而且負極的析出量不受影響，也就是說中央碳片所析出的銅原子是額外的，中央碳片的自發性電極化有助於水溶液中的金屬離子析出。但是在結果中，我們覺得很有趣的地方是為何平行三片的總析出量會突然飆高呢？我們推測可能是平行三片擺放之後，造成四個電解區域的區隔，這四個電解區域各自進行銅的析出，所以析出量會優於對照組高達五倍之多。

### 三、 中央『垂直碳片』與銅原子析出量的關係分析

分析一：中央垂直碳片一片的位置與裝置中，中央碳片與負極的銅原子析出量比較

此段研究中我們是以中央擺放一片垂直碳片，分別探討中央碳片靠近負極、正中央與靠近正極等三者不同位置的負極析出量與中央碳片的析出量是否有所差異，其結果如下所示：

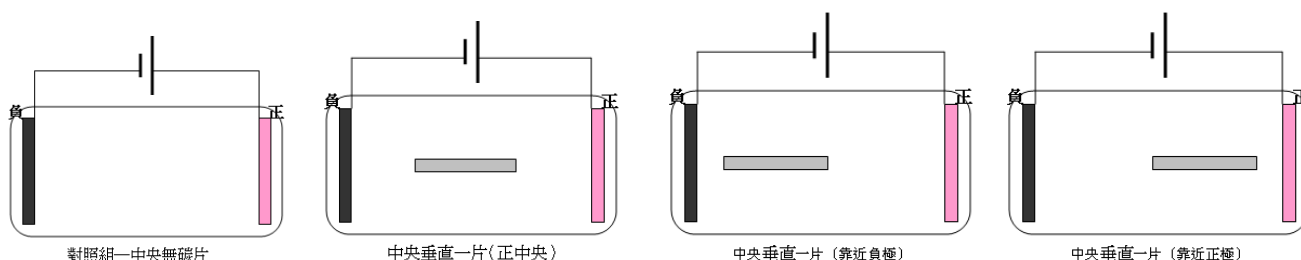
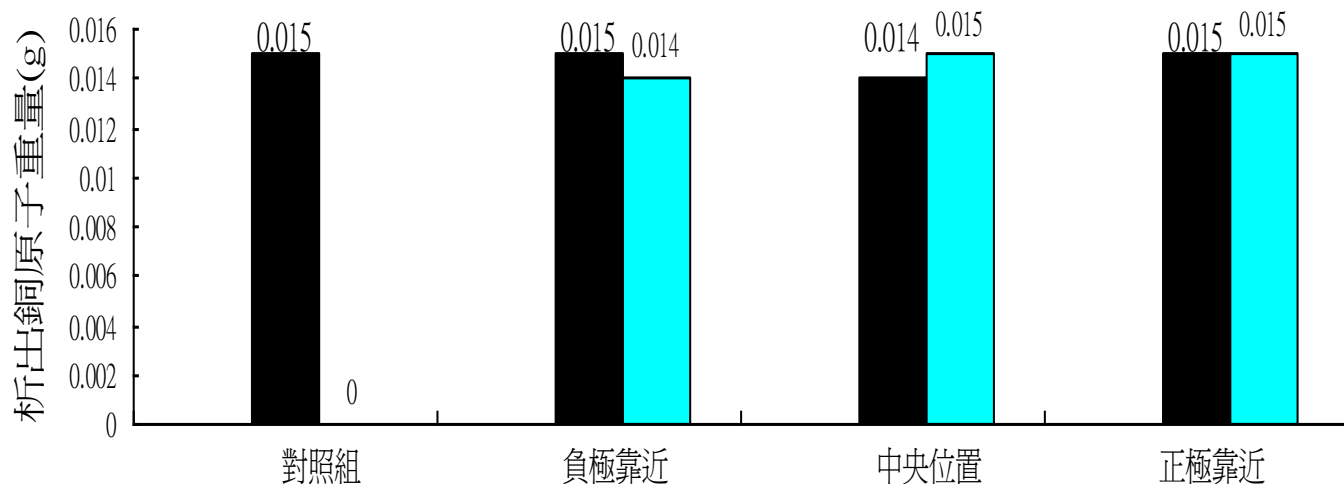


表 5-3 中央垂直一片碳片的銅原子析出量比較

組別	對照組	負極靠近	中央位置	正極靠近
負極析出銅重量 (圖中黑色部份)	0.015g	0.015g	0.014g	0.015g
中央碳片析出銅重 (圖中藍色部份)	0.000g	0.014g	0.015g	0.015g
銅總析出量	0.015g	0.029g	0.029g	0.030g



中央垂直一片碳片位置不同之負極所析出的銅重量比較

圖 5-5 中央垂直一片碳片的銅原子析出量比較

由上圖結果中，可察覺中央垂直一片碳片擺放的位置不同，其負極所析出的銅重量相似，而且中央垂直碳片上所析出的銅原子量也相當，其結果顯示

- (1) 中央擺放一片碳片或是不擺放碳片，其負極所析出的銅原子量相近，負極不會因為中央擺放一片垂直碳片有所有不同。
- (2) 中央垂直一片碳片的位置擺放不會影響該中央碳片的析出量。

**分析二：中央垂直碳片一片、兩片與三片裝置中負極、中央碳片與總裝置中的銅原子析出量比較**

此段實驗設計是以中央擺放一片、兩片與三片垂直碳片，探討中央垂直碳片的擺放數量對於負極析出量與中央碳片的析出量是否有所差異，其結果如下所示：

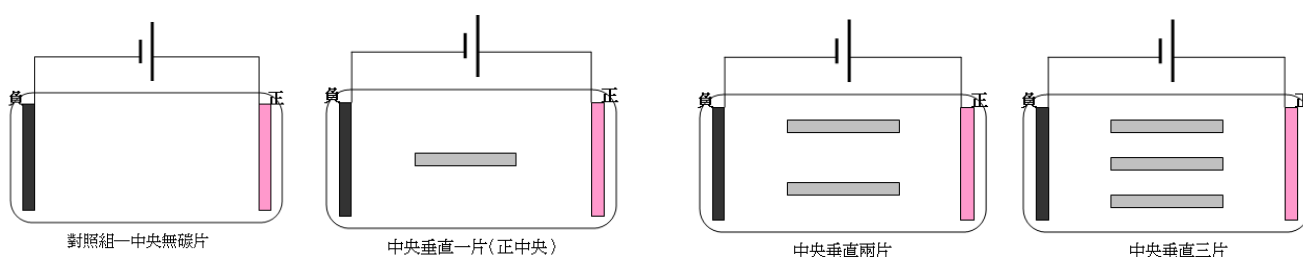


表 5-4 中央垂直一片、兩片與三片碳片對於負極、中央垂直碳片與裝置中總析出銅重分析

組別	對照組	中央垂直一片	中央垂直兩片	中央垂直三片
負極析出銅重量 (圖中紫色部份)	0.015g	0.014g	0.018g	0.017g
中央垂直碳片析出總銅重 (圖中黃色部份)	0.000g	0.015g	0.0355g	0.038g
析中總銅重→負極+中央垂直碳片(圖中藍色部份)	0.015g	0.029g	0.0535g	0.055g
與對照組比較之析出銅倍率	100%	193%	357%	367%

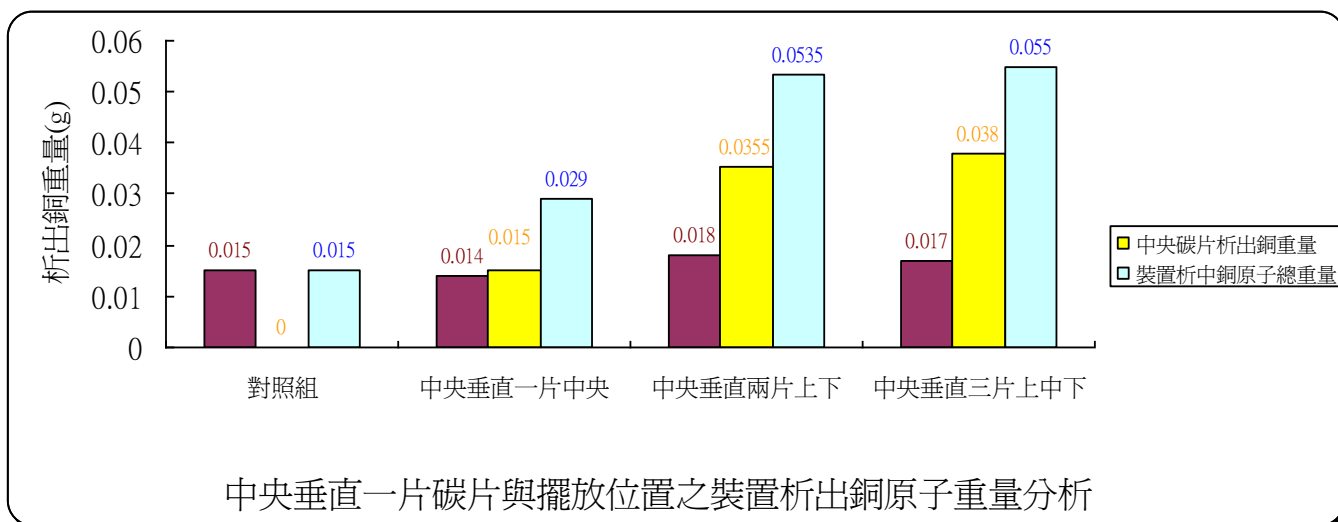


圖 5-6 中央垂直一片、兩片與三片碳片對於負極、中央垂直碳片與裝置中總析出銅重分析

由實驗結果中，我們發現了以下的結果：

- (1) 中央擺放垂直碳片，無論一片、兩片或三片，其負極的析出銅質量相似。
- (2) 中央垂直碳片所析出銅的總質量依序為：三片 $\approx$ 兩片 $>$ 一片 $>$ 中央無碳片，顯示中央若擺放碳片，則會增加整體的銅析出量。
- (3) 若以對照組的負極上的銅析出量為比較值，則中央垂直兩片和三片的總體析出量約為對照組的 3.5 倍，中央垂直一片的整體析出量約為對照組的 1.9 倍，由此顯示：中央若擺放碳片，都會提高整體的銅析出量。

分析至此，我們大致上得到同一個結論，那就是中央擺放碳片與否的確會影響整體的析出量，而且中央碳片上的析出量是額外的，這樣的方式可能可以應用到提高金屬廢液的回收效率上。另外我們也發現一個在中央垂直三片的結果，中間那一片的析出量比上下兩側的碳片析出量低，而且彼此的析出量上側：中側：下側約為 3：2：3，這樣的現象讓我們很好奇，所以在後面的綜合討論中，會有更詳盡的說明與解釋。

#### 四、 中央平行碳片與垂直碳片的比較

此部分的分析我們著重於中央碳片的數量與擺放方式對於負極銅的析出量、中央碳片的析出量與總體析出銅量三大部份做互相的比較，其結果如下表 5-5 和圖 5-7 所示。

表 5-5 中央碳片數量與擺放位置對於銅析出量比較

組別	對照組	平 1	平 2	平 3	垂 1	垂 2	垂 3
負極析出銅量 (紫色圖示)	0.015g	0.017g	0.018g	0.019g	0.014g	0.018g	0.017g
中央碳片總析出銅量 (藍色圖示)	0.000g	0.021g	0.0235g	0.057g	0.015g	0.0355g	0.038g
總體析出銅量 (紅色虛線圖示)	0.015g	0.038g	0.0415g	0.076g	0.029g	0.0535g	0.055g

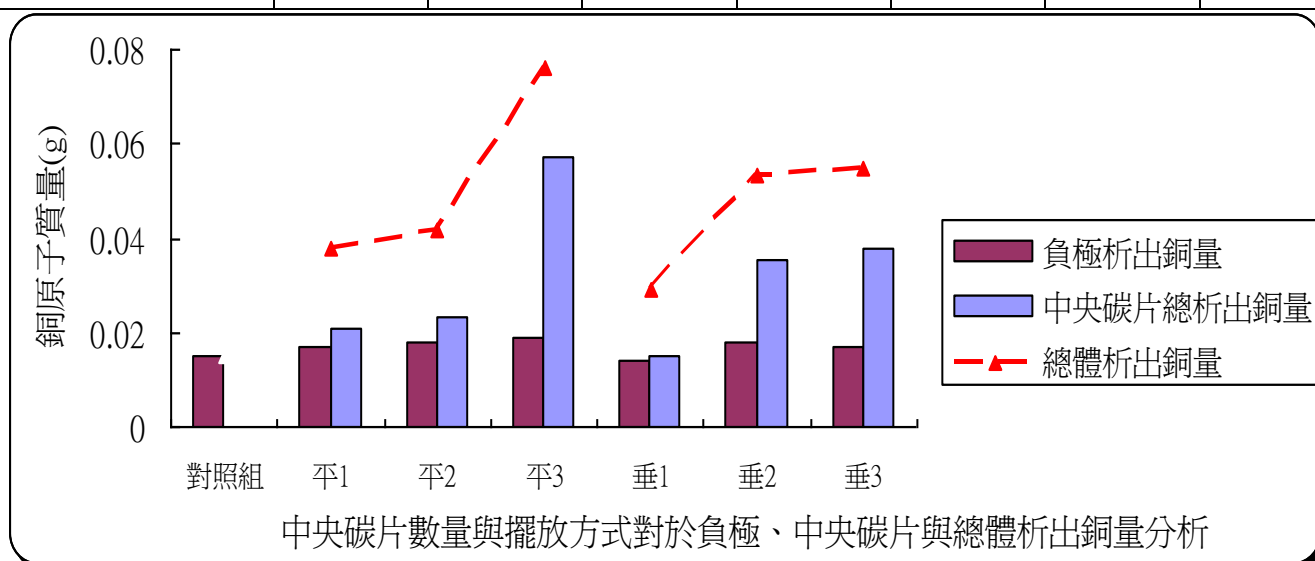


表 5-7 中央碳片數量與擺放位置對於銅析出量比較

由圖中我們清楚可發現，若跟對照組比較起來，無論中央碳片的擺放位置或是數量多寡，中央碳片的存在的確可以提高整體銅原子的析出量，這樣的結果對於設計在傳統電解回收金屬廢液的效率可大大提升。另外平行三片的中央碳片擺放方式是效率最好的，而垂直排列方式在兩片與三片的效果相當，似乎在這樣的排列方式下，會出現最大析出值。

分析至此，我們統整其他的收集資料後發現，在不同的中央碳片數量與位置排列狀況下（已經固定 20 伏特、100 秒通電時間），電源供應器所顯示的整體電流值不同，若根據電功率(P)與通電時間(秒)的乘積算出總體的所需電能(焦耳)，即可用來比較析出每克銅所消耗的電能，所以我們根據這樣的想法，進行以下電能與析出銅量的比較分析。另外若根據歐姆定律( $R = V / I$ )的概念，在固定 V 的狀況下，I 與 R 呈現反比關係，顯示不同的中央碳片數量與排放位置會影響整體裝置的電阻值，於是我們在老師的指導下先學習的簡單歐姆定律與電功率、電能等相關概念與計算後，進行接下來的析出耗能分析與提出一個文獻中沒有提及的『串聯與並聯類比理論』，希望可以為我們研究的新發現給予適當的解釋。



## 五、 銅原子析出耗能的比較分析

此段分析我們統整之前所測的總電流、總電壓、總析出銅重(中央碳片+負極)，利用電能( $E$ ) = 電功率( $P$ ) $\times$ 時間(秒)的公式，計算出析出每克銅所需的能量比較，其結果如下表 5-6 和圖 5-8、圖 5-9、圖 5-10 所示。

表 5-5 總電流、總電壓、總析出銅重與電能比較表

裝置	中央無碳片 +負極析出	中央垂直碳 片1片 +負極析出	中央垂直碳 片2片 +負極析出	中央垂直碳 片3片 +負極析出	中央平行碳 片1片 +負極析出	中央平行碳 片2片 +負極析出	中央平行碳 片3片 +負極析出
銅析出總質量	0.015g	0.029g	0.0535g	0.055g	0.038g	0.0415g	0.076g
總電流	0.25A	0.28A	0.32A	0.38A	0.25A	0.20A	0.18A
總電壓	20V	20V	20V	20V	20V	20V	20V
電功率 $P=IV$	5W	5.6W	6.4W	7.6W	5W	4W	3.6W
100 秒內 消耗能量 $E=P\times t$	500J	560J	640J	760J	500J	400J	360J
析出耗能	約 33333J/g	約 19310J/g	約 11963J/g	約 13818J/g	約 13158J/g	約 9639J/g	約 4737J/g
與對照組的 耗能百分比	100 %	57.9%	35.9 %	41.5 %	39.5%	28.9 %	14.2 %
與對照組比 較之析出銅 百分比	100 %	193%	357%	367%	253%	277%	507%

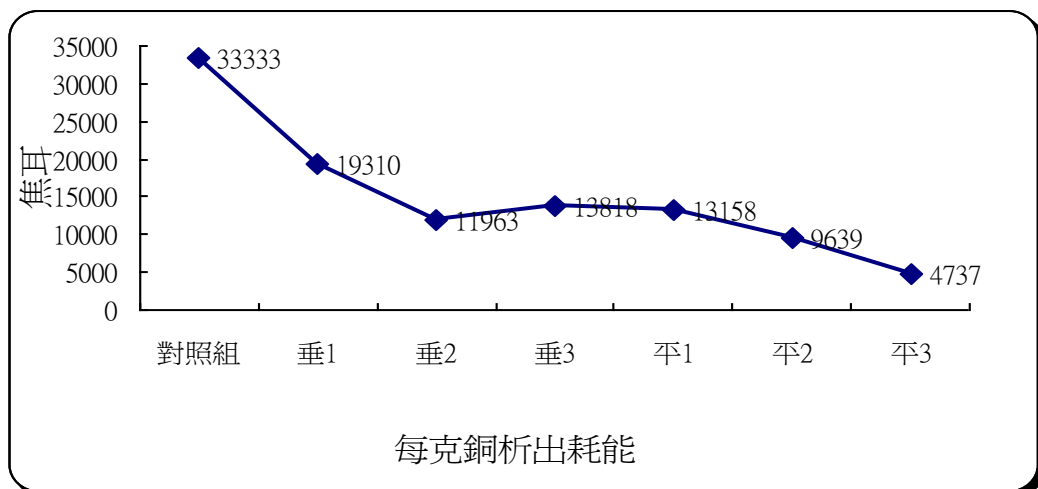


圖 5-7 不同裝置下每克銅析出的耗能比較

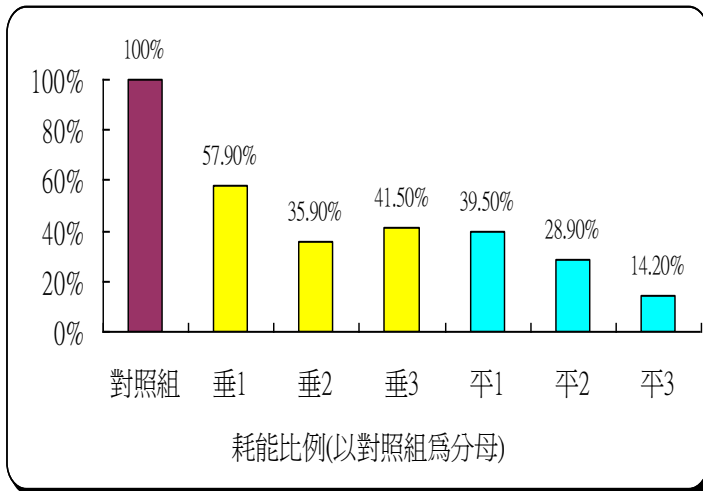


圖 5-8 不同裝置下析出銅的耗能百分比例  
(以對照組所消耗的能量為分母比較)

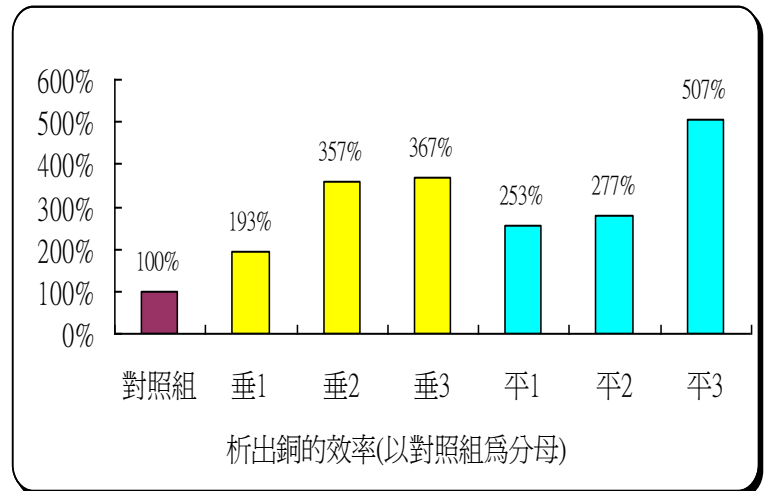


圖 5-9 不同裝置下析出銅的效率百分比例  
(以對照組所產生的銅量為分母比較)

由以上的分析結果，我們大致上得到三個結論：

- (一) 中央放置一片碳片時（無論是垂直或平行）銅金屬總析出量，均較中央無碳片（對照組）總析出量多出一倍強。但每一克銅析出所需消耗的能量，幾乎低於對照組的一半或一半以上。
- (二) 碳片垂直擺放時，一片、兩片或三片的耗能都少於對照組，而析出量最多可達對照組的 3.5 倍左右，顯示中央垂直擺放碳片，有助於增加整體銅原子的析出量，加快回收效率與降低耗能。
- (三) 碳片平行擺放時，碳片片數越多更能降低能量消耗，平行三片時耗能最少，約為對照組的 14.2%，銅析出量多達對照組的五倍，這樣的結果令人振奮！

分析至此，有一個一致的結果出現，那就是中央碳片的有無的確會影響整體的析出量，但是擺放方式與數量會影響結果，我們想探繼續探討這個問題，為何不同的擺放方式與數量會造成整體電流值的改變？這些電流值的改變應該是使整體析出量改變的主要原因之一，於是接下來我們要繼續分析這些電流變化與擺放數量、位置之間的關係。

## 六、 串聯與並聯的理論對應解釋

表 5-6 不同裝置與中央碳片數量、整體電流的紀錄

		對照組	中央碳片 1 片	中央碳片 2 片	中央碳片 3 片
中央平行 碳片	總電流	0.25A	0.25A	0.20A	0.18A
	總析出銅重 (負極+中央碳片)	0.015g	0.038g	0.0415g	0.076g
中央垂直 碳片	總電流	0.25A	0.28A	0.32A	0.38A
	總析出銅重 (負極+中央碳片)	0.015g	0.029g	0.0535g	0.055g

【20V 通電 100 秒】

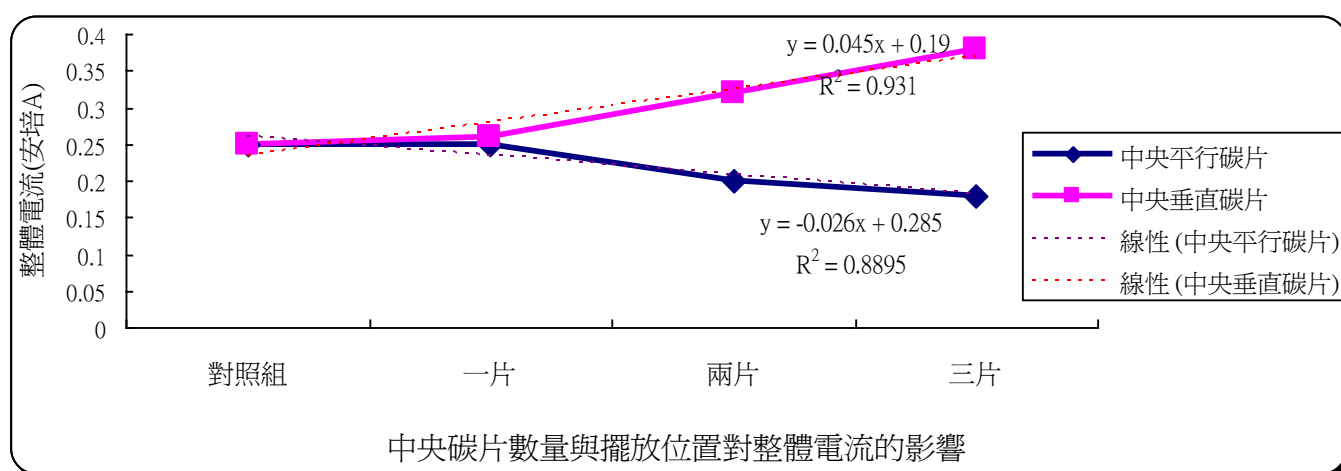


圖 5-10 中央碳片數量與擺放位置對總體電流的影響

由以上結果顯示：

- (1) 由總電流量的變化來看，平行擺放的和對照組比較，通過的電流量隨著碳片增加而遞減。  
垂直擺放的和對照組比較，通過的電流量隨著碳片增加而遞增。
- (2) 兩條線性關係似乎呈現特定的直線比例關係，其中中央平行碳片的數量越多，電流越大，其線性關係為直線， $R^2$  高達.931，屬於高度正相關；而中央垂直碳片的數量越多，整體電流越小，其線性關係的  $R^2$  也達.889，屬於高度相關。

這樣的結果分析下來，讓我們曾經陷入無法分析的窘境，後來在老師的指點下，我們試圖建構出一套類似電阻串聯與並聯的理論，來解釋中央碳片擺放位置與數量對於電流的影響，其可能理論如下所圖所示。

### (一) 中央碳片平行放置—電阻串聯

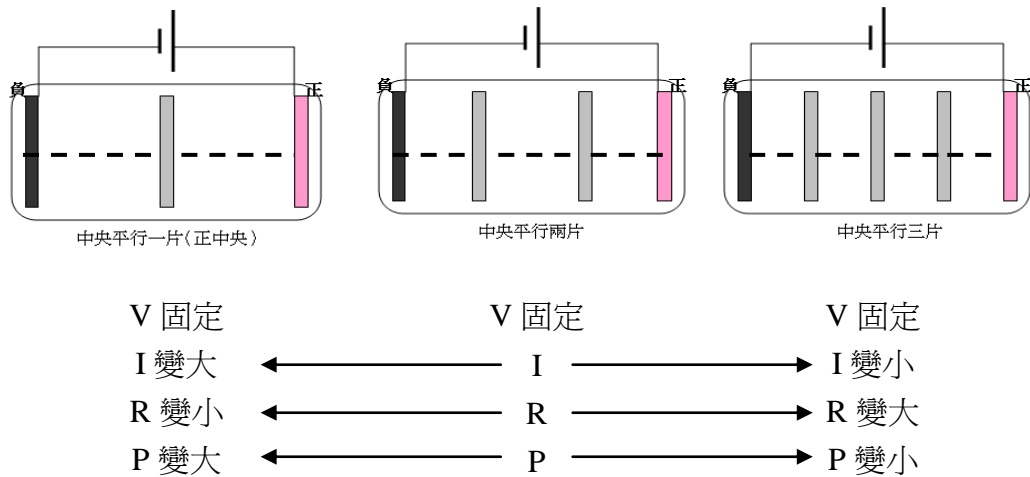


圖 5-11 中央平行碳片之串聯關係模式圖

中央碳片平行擺放類似電阻的串聯，串聯平行碳片越多，電阻值越大。根據所提供的電壓是固定的條件，總電阻越大，其總電流越小，在我們的實驗結果中，有觀察到這樣的數據出現。

### (一) 中央碳片垂直放置—電阻並聯

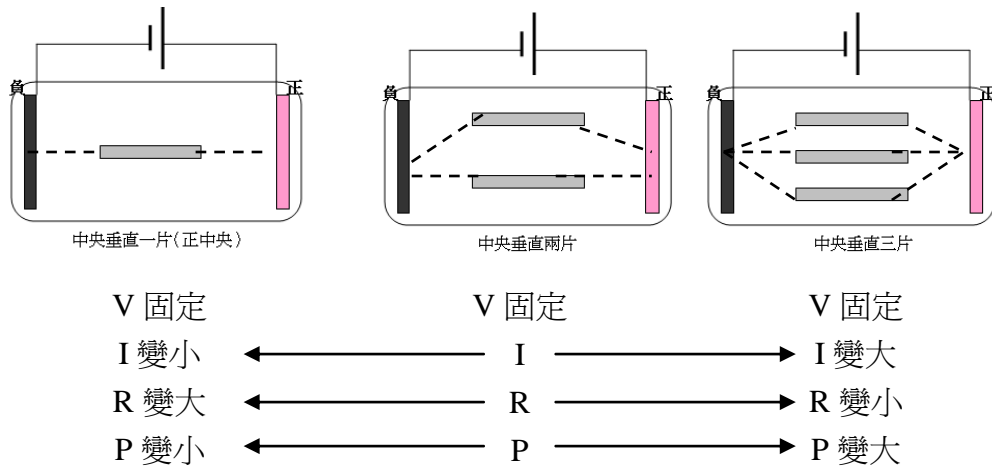


圖 5-12 中央垂直碳片之並聯關係模式圖

中央碳片垂直擺放類似電阻的並聯，並聯垂直碳片越多，總電阻值越小。根據所提供的電壓是固定的條件，總電阻越小，其總電流越大。雖然並聯越多垂直碳片的電功率增加，同一時間內所消耗的總電能也會增加，可是其伴隨所析出的銅原子量卻是對照組的 1.9 倍~3.7 倍之多，單位析出銅克數所消耗的能源也為對照組的一半到四成之間，所以相對是減能的。

## 陸、 綜合討論

### 一、 在電解槽中，碳片擺放的位置、方式和數量，對銅的整體析出量，是否有影響？

- (1) 在僅有一片碳片時，不管碳片擺放是靠近正極、放中間還是靠近負極，都不影響銅的析出量。但是平行擺放的析出量優於垂直擺放。
- (2) 不論碳片擺放方式，碳片數量越多，的確可增加銅金屬的回收量。平行擺放優於垂直擺放，由實驗結果顯示，垂直擺放的碳片會出現銅析出的量達到最大值的現象，故無法因碳片數量增加而增加銅的析出。而平行三片時銅析出量多達對照組的 507%，優於垂直三片時的 367%。

### 二、 通入相同的電壓，中央碳片擺放的方式是否會影響電流大小？

- (1) 碳片平行擺放時，電流隨著碳片數量的遞增而下降，顯示電解槽整體電阻增加，中央碳片將電解槽區隔出數個電解區域，其排列情形類似串聯電路。
- (2) 碳片垂直擺放時，電流隨著碳片數量的遞增而增加，顯示電解槽整體電阻減小，中央碳片的排列情形和並聯電路相似。

### 三、 中央碳片的排列方式的不同，是否可使回收每公克的銅所需的能量降低，因而節省電能？

實驗結果顯示：

- (1) 無論中央碳片如何擺放，相同的銅回收量所消耗的電能皆低於對照組。中央碳片數目越多越節能。
- (2) 在相同條件下，中央平行碳片擺放的方式較垂直擺放方式更為節能，且二者皆擺放三片時，中央平行碳片三片擺放的方式較對照組最高省能可多達 85%，優於垂直三片的 60%。

### 四、 為何平行排放三片中央碳片裝置的組別，其析出效果最佳呢？

- (一) 我們推測在電解槽中，碳片平行擺放，造成四個電解區域的區隔，這四個電解區域類似電器串聯在電路中，並在各自區域進行銅的析出。
- (二) 另外一方面由實驗結果發現：在電源所提供的電壓固定時，中央碳片平行擺放數量越多，所通過的電流反而遞減，表示電流阻力增加，依歐姆定律：電壓 V 固定時，電阻 R 和電流 I 成反比，電流越小所造成的電功率越低，代表每秒鐘消耗的能量較低，也較為節能。而中央碳片垂直擺放數量越多，所通過的電流反而增加，表示電阻下降，與並聯電路類似，在節省能源上較不如平行擺放的佳。
- (三) 由碳片擺放方式發現，以平行擺放的碳片銅的析出量較垂直擺放的多，我們初步認定是因銅離子移動時，平行擺放的阻礙較大，即接觸面積較大可攔截較多的銅離子形成銅原子，而且實驗中發現碳片數越多所需的電流越少，因此較節省電能。

## 五、 如何去驗證中央碳片與水溶液離子流動時的垂直接觸面積會影響銅金屬的析出量呢？

要去驗證這個方法很簡單，只要改變中央碳片的大小即可完成驗證，可是我們的研究經費已經沒有錢了，無法定購新規格的碳片。可是我們經由討論後，想到可以改變平行中央碳片的角度，造成中央碳片與離子流動的垂直接觸面積有特定的角度關係，其所得結果如下所示：

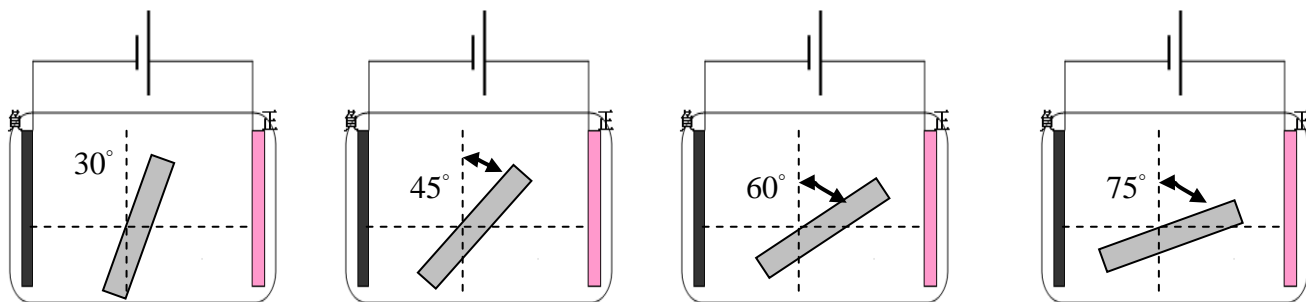


圖 6-1(A)——各種不同角度的中央碳片排列

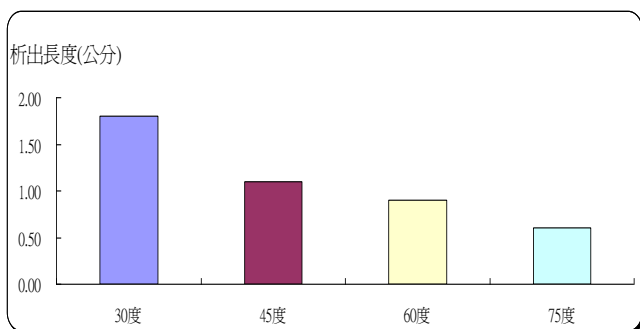


圖 6-1(B)不同中央碳片角度所析出的銅金屬長度

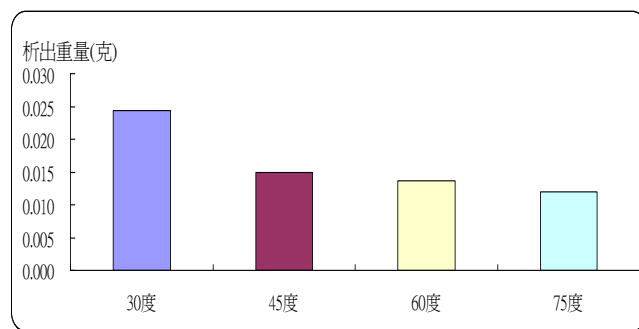


圖 6-1(C) 不同中央碳片角度的銅析出量

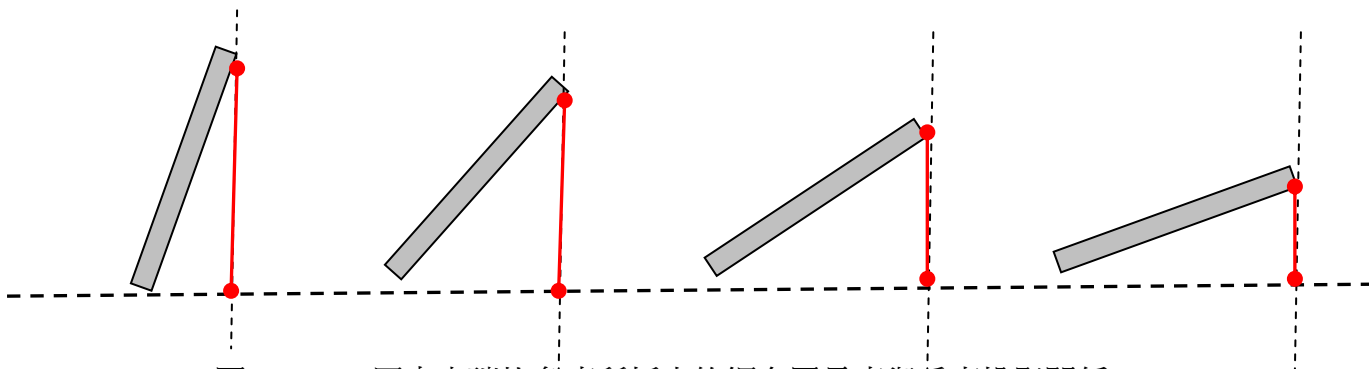
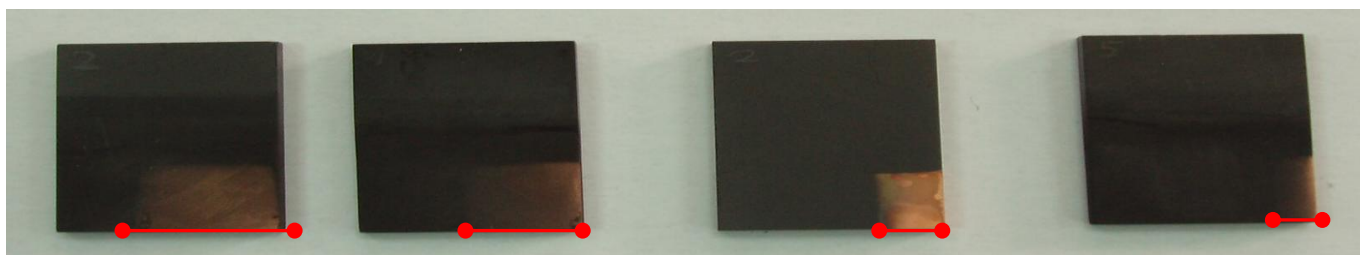


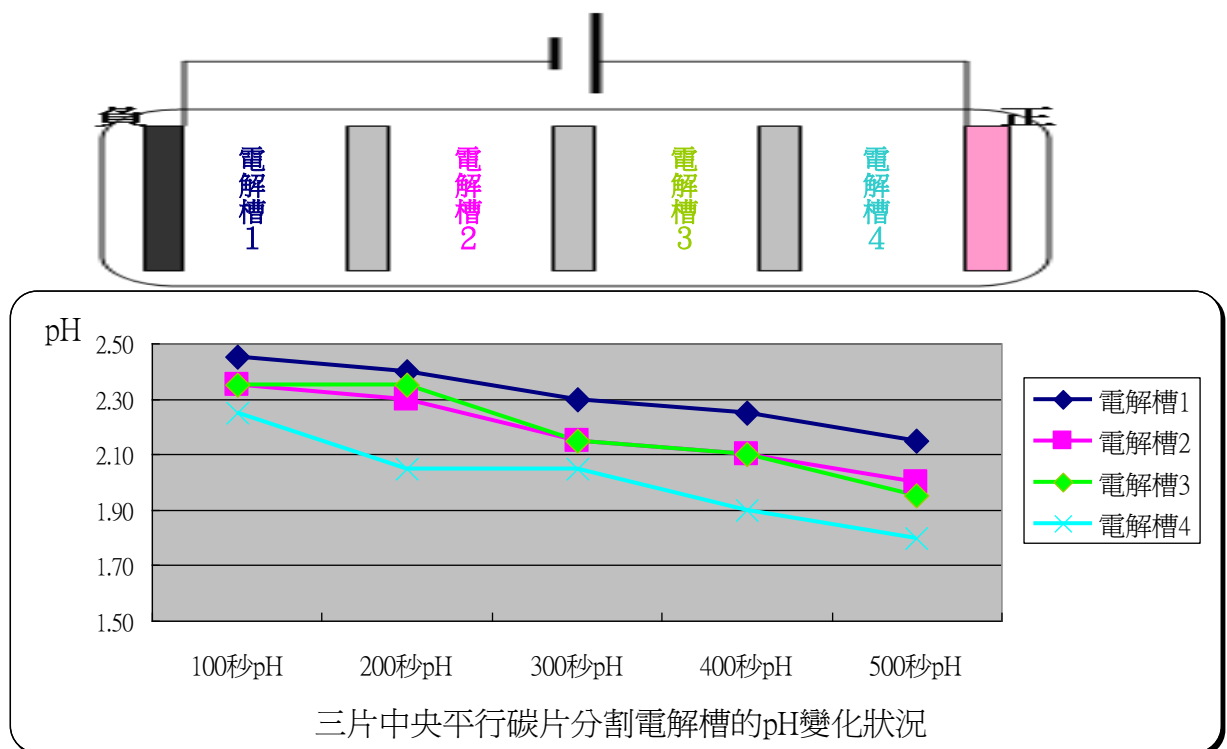
圖 6-1(D)-- 同中央碳片角度所析出的銅金屬長度與垂直投影關係

由結果中可發現，越接近中央碳片垂直排列的角度，碳片上析出的長度越短且析出量也越少，顯示中央碳片與電解槽中離子流動的垂直接觸面積，應該有直接的關係存在。且我們在分析上，發現若把旋轉角度後的原來碳片長度當做是直角三角形的斜邊，則銅金屬在碳片上析出的長度符合畢氏定理。

## 六、 平行放置三片中央碳片時，為何中央碳片的偽負極析出量會優於兩側？

三片碳片平行擺放，造成四個電解區域的區隔，靠近正極和負極的碳片受到正負極感應產生偽正和偽負的情形很明顯，故銅離子析出快且效率高；而中間碳片因距離正負極較遠，受到的感應較不如左右兩側的碳片，況且在被區隔的此區域中銅離子要往兩旁移動較不易，因此在相同時間內中間的那塊碳片銅析出效率慢且較少，但是卻十分均勻地平鋪在碳片上，是左右兩側所不及的，但是都可使後面的銅原子加速析出，造成中間的碳片上的銅原子析出量較兩側多。

## 七、 平行放置三片中央碳片時，其分割出的四個電解槽其 pH 的變化情形如何？可能代表何種意義呢？



由上圖中可以發現，所有電解槽中的 pH 值隨著通電時間的增加皆有下降的趨勢，我們推測應該是正極與偽正極電解水產生的  $H^+$  導致水質酸化，同時也驗證了正極與偽正極電解水可提供中央碳片析出銅時所需要的電子來源。而為何電解槽 4 的 pH 會最小呢？應該是直接接電源供應器的正極碳片(非感應所產生的)的電解水效果最佳，所以水質酸化最嚴重。



## 八、中央垂直碳片 3 片的擺置，為何上中下的偽負極析出銅量約為 3:2:3？

當中央碳片三片擺置時，將容器的寬度平均分成了四等分形成四條離子通道，除了上下兩片碳片的外側獨享通過該側的銅離子形成銅原子，而且此二者內側也 1:1 地分享了通過中間碳片兩側的離子通道內的銅離子，因此造成上下兩片碳片析出銅的質量較中間多而形成銅的質量比為 3:2:3。

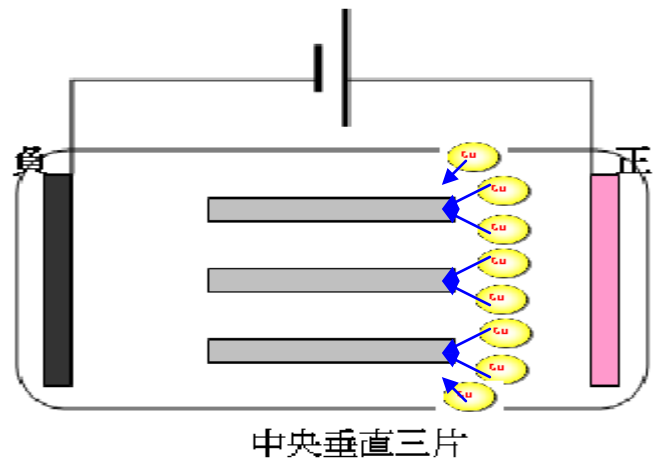


圖 6-3 垂直三片的析出量模式圖

## 九、使用過的碳片的處理方式為何？

若碳片使用壽命到了，也可回收再製或焚毀，不會造成環境污染。

## 柒、 研究結論

- 一、若在電解水溶液中央放碳片，中央碳片也會出現類似暫時電極化的偽正極和偽負極出現。其中偽正極會產生氧氣，而偽負極則會析出金屬。
- 二、電解槽內若中央擺放有碳片，則會增加整體的銅金屬析出量。
  - (一) 在中央僅有一片碳片時，無論將碳片位置靠近正極、中間或負極，對銅的析出量均影響不大；但是碳片平行擺放方式（2.53 倍）的析出量優於垂直擺放方式（1.9 倍）。
  - (二) 在中央擺放兩片碳片時，碳片平行擺放方式（3.6 倍）的析出量優於垂直擺放方式（2.8 倍）。
  - (三) 在中央擺放三片碳片時，碳片平行擺放方式（5.1 倍）的析出量優於垂直擺放方式（3.7 倍）。
- 三、不論碳片擺放方式如何，中央碳片數量越多，可增加銅金屬的回收量，而平行擺放的回收量優於垂直擺放。平行三片時銅析出量多達對照組的 507%，耗能也最少，約為對照組的 14.2 %。
- 四、中央碳片三片平行排列的時候：
  - (一) 以中間片所析出的銅量最多，兩側析出的銅量較少且相當。推測原因可能是正中間碳片所感應的自發性電極強度較弱，導致一開始可均勻的在碳片上析出均勻銅，而讓溶液中的銅離子可均勻在附著上而增加析出量；而兩側碳片由於較靠近正極和負極，一開始感應強度強，加上碳片表面可能有凹凸不平現象，造成銅一開始會附著在較為突出之處而導致後來的銅黏附不均的現象而降低析出量。



- (二) 電解槽可分為四個區域，四個區域同時進行各自的析出，所以可以解釋三片的析出量較大。
- (三) 四個區域的電解槽的 pH 值會隨著電解時間而逐漸降低，顯示正極和偽正極電解水而產生氫離子，使的水溶液逐漸酸化。此也可解釋中央碳片上使銅離子轉變成爲銅原子所需的電子，由水分解所產生。

- 五、中央碳片三片垂直排列時，上側碳片：中間碳片：下側碳片所析出的銅量約爲 3：2：3，推測可能和這三片垂直碳片所接觸溶液的面積有關。
- 六、中央碳片的擺放方式本研究建立串聯與並聯的理論類比，可初步解釋析出量與效率的差異。
- (一) 碳片平行擺放時，其排列情形類似串聯電路，電流隨著碳片數量的遞增而下降，顯示電解槽整體電阻增加。
- (二) 碳片垂直擺放時，和並聯電路相似，電流隨著碳片數量的遞增而增加，顯示電解槽整體電阻減小。
- 七、銅金屬的析出量與中央碳片的擺放角度有關；若中央碳片與電解液離子流動的方向越接近垂直，其析出量越大。
- 八、在相近耗能的狀況下，電解水溶液中央若擺置碳片，會讓整體回收的金屬量提高，建議可應用到金屬廢水的回收設計上。若是碳片使用壽命到了，也可回收再製或焚毀，不會造成環境污染。

## 捌、 參考文獻

國科會高瞻計畫平台，<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=3196>

康峻誠等，金屬的氧化還原再探討，東石高中，中華民國第 32 屆高中化學科展優勝

張志忠等，金屬的氧化還原，東石高中，中華民國第 31 屆高中化學科展優勝

李佳錚等，一閃一閃亮晶晶，明正國中，中華民國第 51 屆國中小科展化學組入選作品

## 【評語】 030202

本實驗在電池中安插平行或垂直的碳棒，如此可促成銅離子更有效的析出，節省電力且裝置方式類似串聯或並聯電池，但總電壓不變。本實驗具有創意，並且可行性很高，作者可進一步量測電極與偽電極之間的電壓，若電壓低於電解銅離子的電位差，則不能有效的析出銅離子因此期間的電位差可能不完全類似串、並聯的行為。