

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 化學科

佳作

030203

『它抓得住我』--利用自發性感應電極與磁場作用提高重金屬廢液回收效率研究--

學校名稱：屏東縣立明正國民中學

作者： 國二 周侑利 國二 趙昱傑 國二 王鼎言	指導老師： 陳盈吉 鍾梅英
---	-----------------------------

關鍵詞：自發性感應電極、右手開掌定則、
重金屬廢液回收

摘要

使用電解法進行重金屬廢液回收被人詬病之處是高耗能，高成本。但本實驗使用硫酸銅水溶液為實驗藥品，利用所發現的**自發性感應電極與外加磁場裝置**，在電解槽中放入中央平行碳片與外加磁場，與對照組相較最高可達到**17.09 倍的回收量**，且耗能也僅為對照組的**7.99%**，**提高了 92.01% 的能源使用率**；同時發現外加磁場強度越強、中央碳片數量越多可提高整體的銅原子回收量與降低耗能；此外，可利用右手開掌定則解釋為何可增加銅原子的回收量與降低整體耗能、增加整體裝置的電流等現象。本實驗所設計的裝置可作為重金屬廢水處理的重要參考。另研究中也測得中央自發性感應電極所產生電位差，可提供自發性感應電極發生機制的重要依據。

壹、 研究動機與相關文獻探討自發性感應電極介紹

在去年與前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，而且去年的學長姐利用所發現的現象進行了金屬水溶液中的金屬離子回收，得到高回收率與低耗能的實驗結果。

在之前兩屆的學長姐研究中已經確定可以利用自發性感應電極(中央外加3片平行碳片)在相同的耗能下，將銅離子回收率提高到5倍(或是減少84%能源的損耗)，可是是否有更好的回收設計與效果呢？若是在整個裝置之中加入外來的磁場，是否會增加回收的效率呢？

貳、 相關文獻

一、 自發性感應電極現象

為何會有自發性感應電極的產生呢？根據學長姐請問化學系的大學教授，教授們也沒有提出完整的理論，根據討論結果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 1-1 所示：

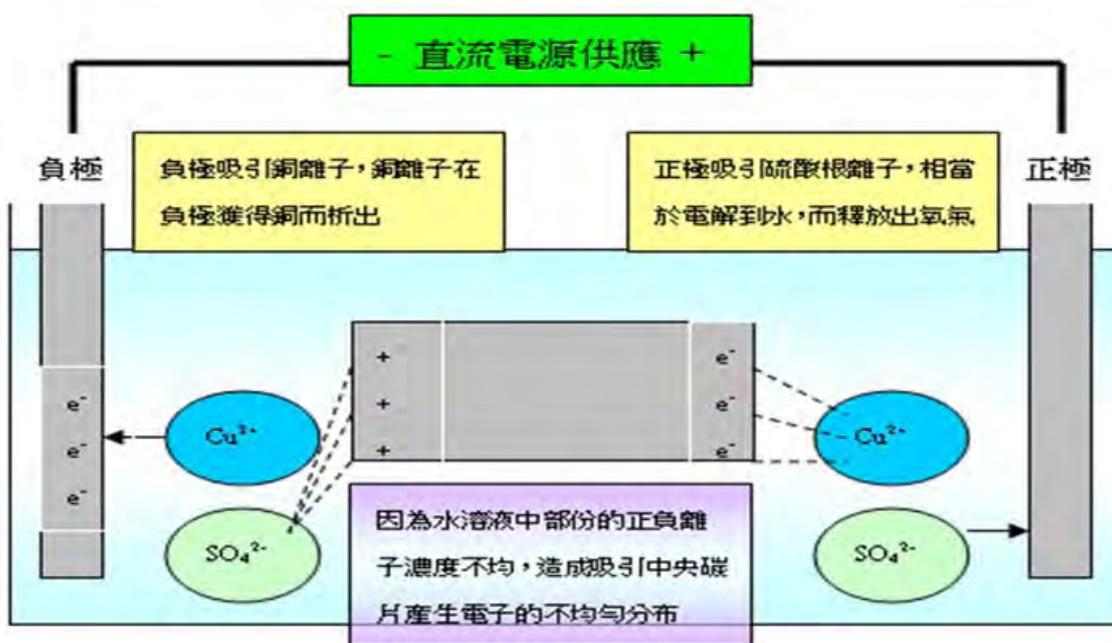


圖 1-1 離子障礙造成中央碳片自發性感應電極的產生
(取自 2011, 第 52 屆全國科展國中組化學科—金來瘋)

在離子障礙的解釋中，通電的瞬間造成中央碳片兩側的正、負離子分布不均，導致中央碳片因為離子濃度分布不均而感應產生偽正極和偽負極。在我們的研究觀測之中，中央碳片上的偽正極產生氧氣(電解水所產生)，而偽負極則析出紅色的銅原子(銅離子還原成為銅原子)。

整個反應的過程中涉及到電子的轉移，根據學長姐的解釋和我們的理解，可能機制為中央碳片感應出偽正極之後，開始進行電解水的反應 ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 1\text{O}_2 + 4\text{e}^-$)，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。(取自 2011, 第 52 屆全國科展國中組化學科—金來瘋)

二、右手開掌定則與離子移動速度

右手開掌定則說明在某一磁場中，電流方向會因磁場的影響而朝某一方向偏轉，此時磁場方向、電流方向、受力方向等三者會互相垂直(如右圖 1-2 所示)，亦即說在水溶液中，正、負離子會因為磁場存在的關係，在通電之後會有移動方向偏移的狀況，第 46 屆全國中小學科展中辜禹仁等人所作的研究說明了電解槽中電解質不同濃度，會產生不同的離子遷移速度，且推論出當電解質濃度越大，解離後正、負離子的吸引牽制作用也越強，使得離子在固定電場下的遷移速度減小，證明了離子移動速度會受到通電後產生磁場的影響。

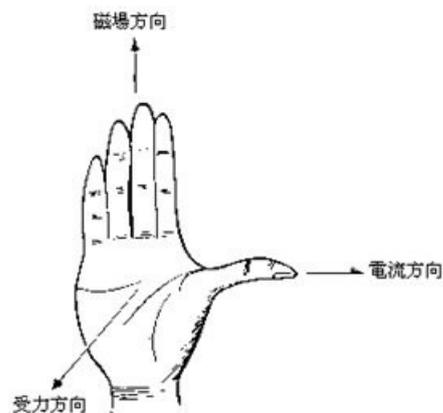


圖 1-2 右手開掌定則--取自
http://content.edu.tw/junior/phy_chem/ty_1k/sir/content/cph9/cph93/cph93-2.htm

三、文獻探討對於本研究的啟發

1. 自發性感應電極現象的發生機制可能可以使用離子障礙暫為說明，但是學長姐的實驗過程中僅能證明中央的外加碳片上的確有電子流動，卻沒有測得中央碳片(導體)若要是能讓電子流動，需要兩端的電位差存在，本研究團隊希望可以在此次的實驗中測得中央外加碳片是否具有電位差？
2. 在電解槽內通電，正、負離子的移動相當於電流或電子流；根據電磁感應原理，當電流通過(離子移動)的時候會產生感應磁場，這些電解槽中的感應磁場強度大小應該為何呢？這些感應磁場是否會影響離子的移動？是否會影響銅離子的還原析出呢？
3. 磁場的存在會導致離子的移動產生方向偏移，若是我們能夠在電解槽外圍增加外來磁場，在水溶液中移動的正、負離子是否會更具有方向的規律性？是否可以增加整體的銅原子回收量呢？

參、研究目的與問題

本研究延續使用自發性感應電極的現象，並在電解槽外加入圓形棒狀磁鐵，來試探是否可以增加重金屬廢液的回收效果，其主要研究目的有以下四點(以下皆在中央放置額外碳片，在有自發性感應電極的狀態下進行)：

- 目的 1：探究電解槽當通電的時候，正離子與負離子移動的時候的磁場變化
- 目的 2：探究電解槽周圍外加磁場，磁場對於重金屬廢液回收的效率
- 目的 3：探究電解槽周圍外加磁場的強弱對於重金屬廢液回收的效率
- 目的 4：中央外加碳片兩端的電位差存在探究，並探討在外加磁場狀況下其中央碳片兩端的電位差是否有所差異？

根據本研究目的，共衍生出以下的研究問題：

- 一、1 電解槽通電的時候，正、負離子移動的時候是否會產生磁場？

- 2 若有產生磁場，其磁場變化與強度為何？
- 二、1 若電解槽外有外加磁場存在，重金屬廢液的回收效果是否有提高？
2 若有提高，則中央碳片數量越多，其回收效果是否越高？
- 三、1 若電解槽外有外加磁場存在，外加磁場的強弱對於重金屬廢液的回收效果是否有影響？
2 若有影響，則回收效果的差異為何？中央碳片的數量是否也會影響回收的效果？
- 四、1 中央碳片是否具有電位差？
2 若中央碳片具有電位差，在外加磁場大小是否會影響電位差的大小？

肆、 研究設備與器材

本使用所使用的設備如下：安培計、鱷魚夾電線、0.5M 硫酸銅水溶液、碳片數片、電源供應器、數位式三用電表、照相機、圓形棒狀磁鐵、烤箱。

伍、 研究方法與設計

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還原成銅金屬的分析，配置 0.5M 的硫酸銅（ CuSO_4 ）備用。

二、 水溶液通電環境的設置

1. 選用長方形透明容器（長：23.5 cm，寬：7.8 cm，高：4.1 cm）

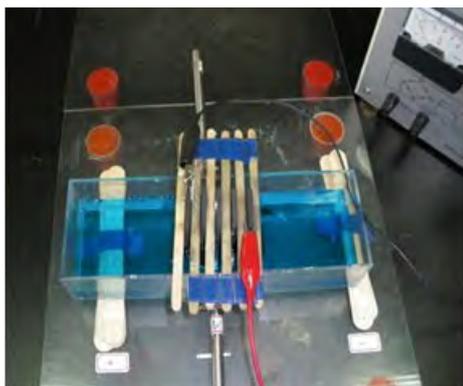


圖 5-1



圖 5-2

2. 中央擺置碳片（實驗重複中央無碳片、中央一片碳片、中央兩片碳片、中央三片碳片），兩電極也為碳片。
3. 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（圖 5-1）。
4. 安培計(mA)與整個電路串聯相接（圖 5-2）。
5. 水溶液為 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。
6. 打開直流電源供應器，通電時間計時為 50 秒，觀測檢流計變化與相關電極的變化，並記錄安培計讀數。

7. 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（依序測量中央無碳片、中央一片碳片、中央兩片碳片、中央三片碳片等各種不同條件下的銅析出量）。

三、離子流動的時候的磁場檢測

此部份因為本校無法有足夠經費購得測量磁場強度的高斯計，所以我們想到使用實驗室常見的指北針，先將裝置放置於南北向的方向(與指北針靜置時同方向)，之後通電測量中央碳片附近的指北針偏轉角度，作為正、負離子在移動之時與中央碳片數量相關的磁場強度（如圖 5-3）。

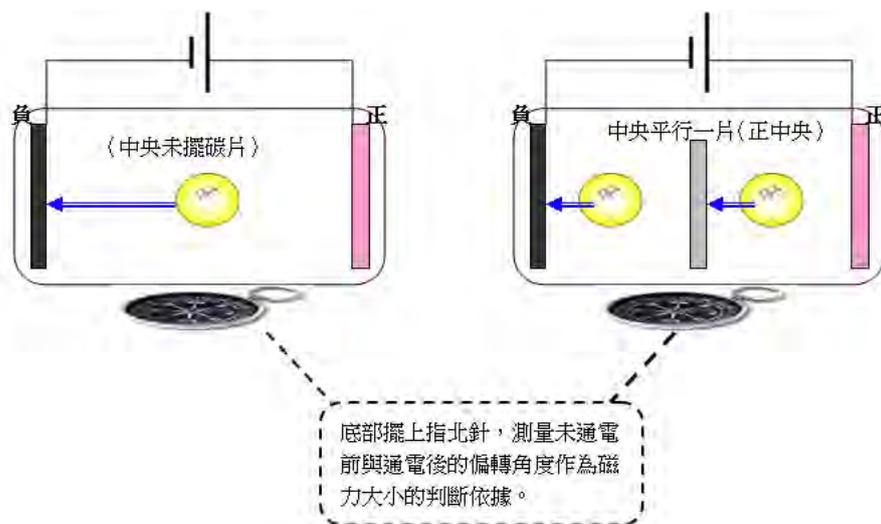


圖 5-3 正負離子移動時產生的磁場測量裝置圖

四、外加磁場設計

實驗中我們預計設計在電解槽前後加上強磁場、弱磁場來進行析出量的相關比較，因為沒有高斯計的測量協助，我們仍使用指北針進行測量。在操作上我們先將實驗裝置如下圖 5-4 所示，兩極碳片方向與中央底部指北針方向皆和地磁同方向，之後將圓形棒狀磁鐵的 NS 以兩種距離假設在裝置的南北方，定義若使指北針偏轉 180 度則為強磁場，若使指北針偏轉 60 度則為弱磁場。

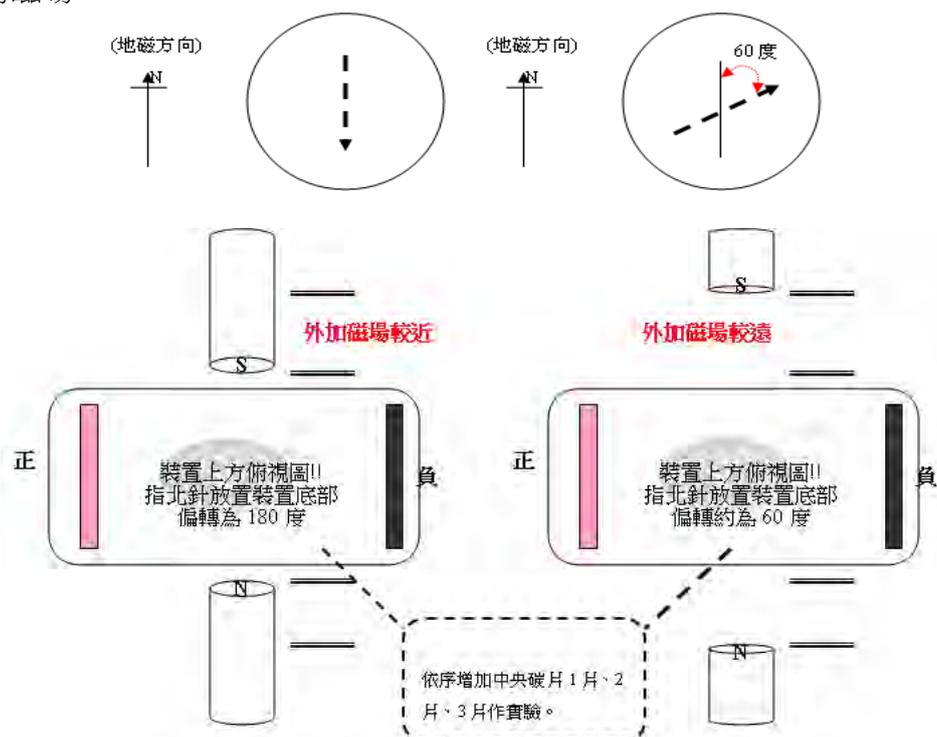


圖 5-4 強磁場、弱磁場假設裝置圖

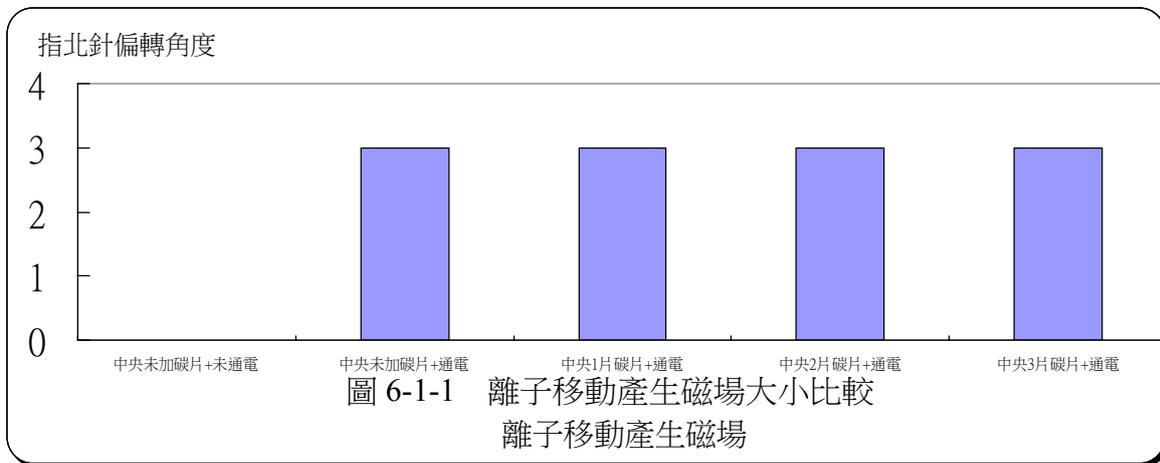
陸、 研究結果與討論

一、 離子流動時候的磁場大小

本部份的實驗先將指北針假設在電解槽的底部(與地磁同方向)，在兩側的碳片電即通電之後，依序測量不同中央外加碳片的數量下，其指北針偏轉的角度作為測量離子流動時所產生的磁場強度比較，結果如下表 6-1-1 與圖 6-1-1 所示。

表 6-1-1

通電狀況	未通電	通電			
碳片狀況	中央未加碳片	中央未加碳片	中央 1 片碳片	中央 2 片碳片	中央 3 片碳片
指北針偏轉角度	0 度	2.9 度	3.0 度	3.1 度	3.0 度



如以上資料所示，

- (一) 無論中央是否有外加碳片，整個裝置在通電之後都會使指北針產生偏轉，表示溶液中的正負離子再移動的時候會產生暫時性的磁場，而且磁場的強度較弱(僅讓指北針偏轉小角度)。例外中央碳片的數量多寡對磁針偏轉角度差異似乎不大。
- (二) 中央不放碳片與 1、2、3 片碳片所產生的磁場大小約略相同，僅與通電與否有關。

二、 外加磁場與自發性感應電極對於金屬銅原子的回收分析

表 6-2-1

組別	對照組	實驗組			
	不加磁場	SN (外加磁場)	SN (外加磁場)	SN (外加磁場)	SN (外加磁場)
	中間無碳片	中間無碳片	中間 1 碳片	中間 2 碳片	中間 3 碳片
負極銅重(g)	0.021	0.051	0.048	0.048	0.050
中央銅重(g)	0.000	0.000	0.054	0.186	0.257
析出總銅重(g)	0.021	0.051	0.102	0.234	0.307
回收效率比較 (%) (以對照組為基礎比較)	100%	242.82%	485.71%	1114.29%	1461.90%

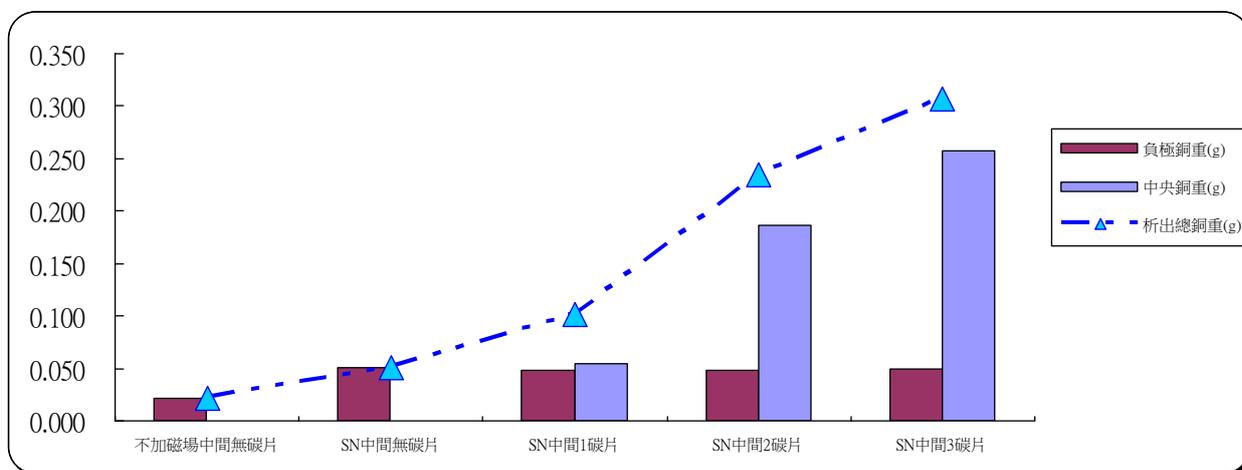


圖 6-1-2 外加磁場與中央碳片數量對於回收銅重的比較

由以上資料分析中可發現，

- (一) 若有外加磁場的狀況下，無論中央是否有外加平行碳片，其整體析出的銅重都會比沒有外加磁場的多；
- (二) 有外加磁場的狀況下，發現中央有外加碳片的數量越多，整體析出的銅重就越多，這呼應了學長姐的自發性感應電極可以增加回收效率的研究。
- (三) 若以對照組的回收銅重做為基準，則外加磁場不加中央碳片可增加回收率約 2.42 倍；若在外加磁場下，中央額外加碳片，則可增加回收率 4.85 倍，最高可達 14.61 倍。

由以上的研究結果，顯示本研究所採取的外加磁場做法，搭配中央自發性感應電極的產生更能擴大的回收的效率。之前學長姐的研究在中央添加三片額外的平行碳片時，可達對照組回收量的 5 倍，而我們此次額外添加磁場，僅需中央一片平行碳片即可達到 4.85 倍的回收，若外加中央碳片達到三片且有磁場作用下，回收率更高達 14.61 倍。顯示外加磁場可更有效率促使銅金屬的回收。至於外加磁力的強弱是否有所影響，請看下段分析。

三、 外加磁場強弱與自發性感應電極對於金屬銅原子的回收分析

本階段的研究將圓形棒狀磁鐵依靠近實驗裝置的遠近，定義為 SN 強磁場、SN 弱磁場如下圖所示，同時比較中央不加碳片、1 片碳片、2 片碳片、3 片碳片的銅金屬回收量比較，其結果如接下來所整理。

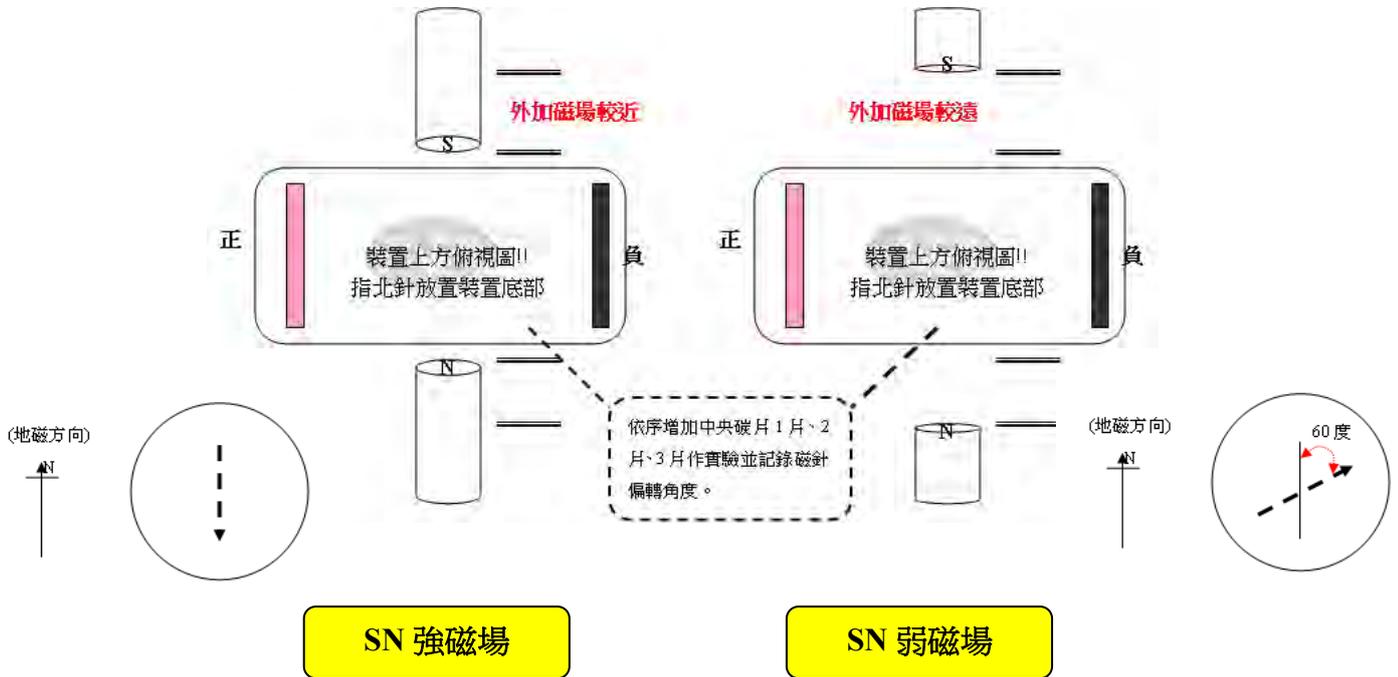


表 6-3-1 SN 強磁場與 SN 弱磁場對於銅原子回收的比較

組別	對照組	實驗組			
	不加磁場	SN 弱磁場	SN 弱磁場	SN 弱磁場	SN 弱磁場
	中間無碳片	中間無碳片	中間 1 碳片	中間 2 碳片	中間 3 碳片
負極銅重(g)	0.021	0.051	0.048	0.048	0.050
中央銅重(g)	0.000	0.000	0.054	0.186	0.257
析出總銅重(g)	0.021	0.051	0.102	0.234	0.307
回收效率比較 (%) (以對照組為基礎比較)	100%	242.82%	485.71%	1114.29%	1461.90%
組別	不加磁場	SN 強磁場	SN 強磁場	SN 強磁場	SN 強磁場
	中間無碳片	中間無碳片	中間 1 碳片	中間 2 碳片	中間 3 碳片
	負極銅重(g)	0.021	0.085	0.088	0.091
中央銅重(g)	0.000	0.000	0.050	0.207	0.269
析出總銅重(g)	0.021	0.085	0.138	0.308	0.359
回收效率比較 (%) (以對照組為基礎比較)	100%	404.76%	657.14%	1466.67%	1709.52%

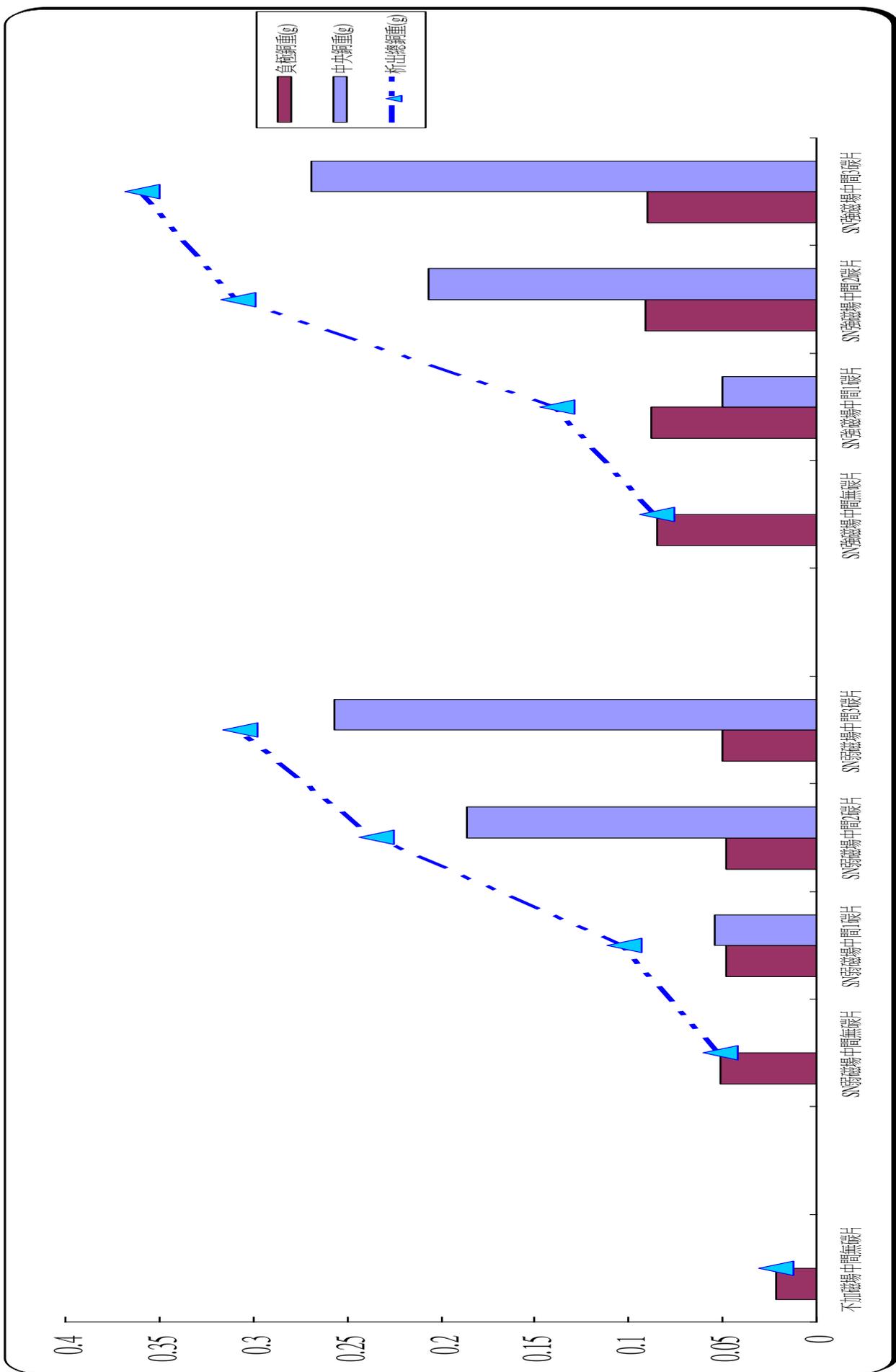


圖 6-3-2 SN 弱磁場、SN 強磁場與中央破片數量對於銅原子的回收量比較圖

由資料中可清楚發現下列數點：

- (一) **SN 弱磁場、SN 強磁場在同樣碳片裝置下，都優於對照組的回收量。**
- (二) 於同樣時間內與在中央碳片無放入下，SN 弱磁場的銅回收量約為對照組的 2.42 倍；SN 強磁場的銅回收量約為對照組的 4.04 倍。顯示**強磁場的回收量更高。**
- (三) 於同樣時間內與在中央 1 片平行碳片置入下，SN 弱磁場的銅回收量約為對照組的 4.85 倍；SN 強磁場的銅回收量約為對照組的 6.57 倍。顯示**強磁場的回收量更高。**
- (四) 於同樣時間內與在中央 2 片平行碳片置入下，SN 弱磁場的銅回收量約為對照組的 11.14 倍；SN 強磁場的銅回收量約為對照組的 14.66 倍。顯示**強磁場的回收量更高。**
- (五) 於同樣時間內與在中央 3 片平行碳片置入下，SN 弱磁場的銅回收量約為對照組的 14.61 倍；**SN 強磁場的銅回收量約為對照組的 17.09 倍。**顯示**強磁場的回收量更高。**

在分析至今，我們都非常訝異，學長姐的自發性感應電極在中央三片平行碳片的裝置下已經可達到對照組 5 倍的回收量，而我們在外加強磁場的狀況下竟然高達 17.09 的回收量，顯示我們所選用的方式可大大增高回收。接著我們在實驗的數據中也有發現，當外加磁場與中央碳片數量不同的時候，其整體電流大小也不同，這可能也會造成每公克銅析出的耗能不同？析出量雖然多了，可是會不會比較節能呢？請看下段的分析。

四、銅原子回收耗能分析

此段分析之中，我們將對照組(不加磁場與中央碳片)、SN 弱磁場、SN 強磁場與中央碳片數量的數據整理如下表，並利用電功率($P=VI$)計算出 50 秒內的電耗能($E=P t=I V t$)，再算出每析出一克銅的電耗能焦耳、1 焦耳可以析出多少克銅來作耗能分析比較。

表 6-4-1

組別	不加磁場	SN 弱磁場	SN 弱磁場	SN 弱磁場	SN 弱磁場
	中間無碳片	中間無碳片	中間 1 碳片	中間 2 碳片	中間 3 碳片
負極銅重(g)	0.021	0.051	0.048	0.048	0.050
中央銅重(g)	0.000	0.000	0.054	0.186	0.257
析出總銅重(g)	0.021	0.051	0.102	0.234	0.307
50 秒內回收百分率 (相對對照組)	100%	242.86%	485.71%	1114.29%	1461.90%
整體電流大小(mA)	1500.0	1550.0	1730.0	1930.0	2030.0
50 秒內的電功率(W)	30.000	31.000	34.600	38.600	40.600
50 秒內的電耗能(J)	1500	1550	1730	1930	2030
平均析出 1 克銅的耗能(J)	71428.57	30392.16	16960.78	8247.86	6612.38
耗能百分比%	100.00%	42.55%	23.75%	11.55%	9.26%
1J 電析出銅重(g)	1.40×10^{-5}	3.30×10^{-5}	5.90×10^{-5}	12.1×10^{-5}	15.2×10^{-5}
組別	不加磁場	SN 強磁場	SN 強磁場	SN 強磁場	SN 強磁場
	中間無碳片	中間無碳片	中間 1 碳片	中間 2 碳片	中間 3 碳片
負極銅重(g)		0.085	0.088	0.091	0.090
中央銅重(g)		0.000	0.050	0.207	0.269
析出總銅重(g)		0.085	0.138	0.308	0.359
50 秒內回收百分率 (相對對照組)		404.76%	657.14%	1466.67%	1709.52%
整體電流大小(mA)		1550	1750	1900	2050
50 秒內的電功率(W)		30.000	35.000	38.000	41.000
50 秒內的電耗能(J)		1500	1750	1900	2050
平均析出 1 克銅的耗能(J)		17647.06	12681.16	6168.83	5710.31
耗能百分比%		24.71%	17.75%	8.64%	7.99%
1J 電析出銅重(g)		5.70×10^{-5}	7.89×10^{-5}	16.2×10^{-5}	17.5×10^{-5}

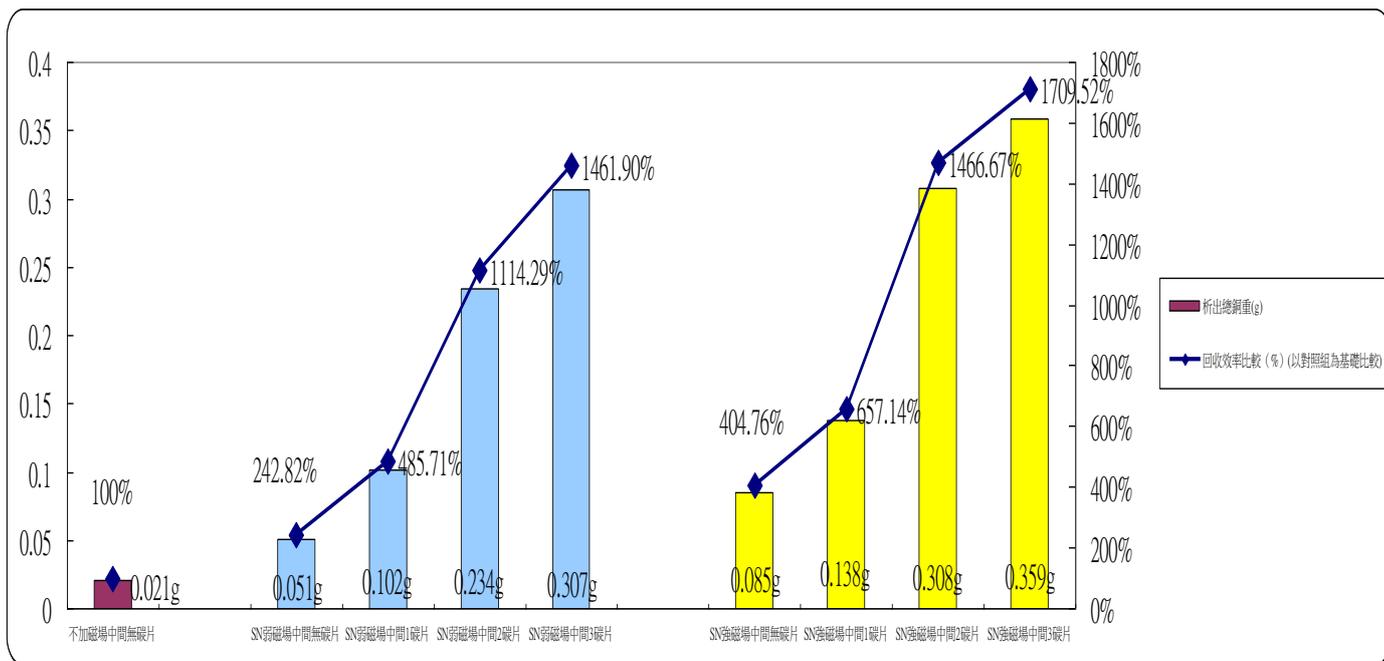


圖 6-4-1 析出總銅重比較、相對於對照組的回收率比較

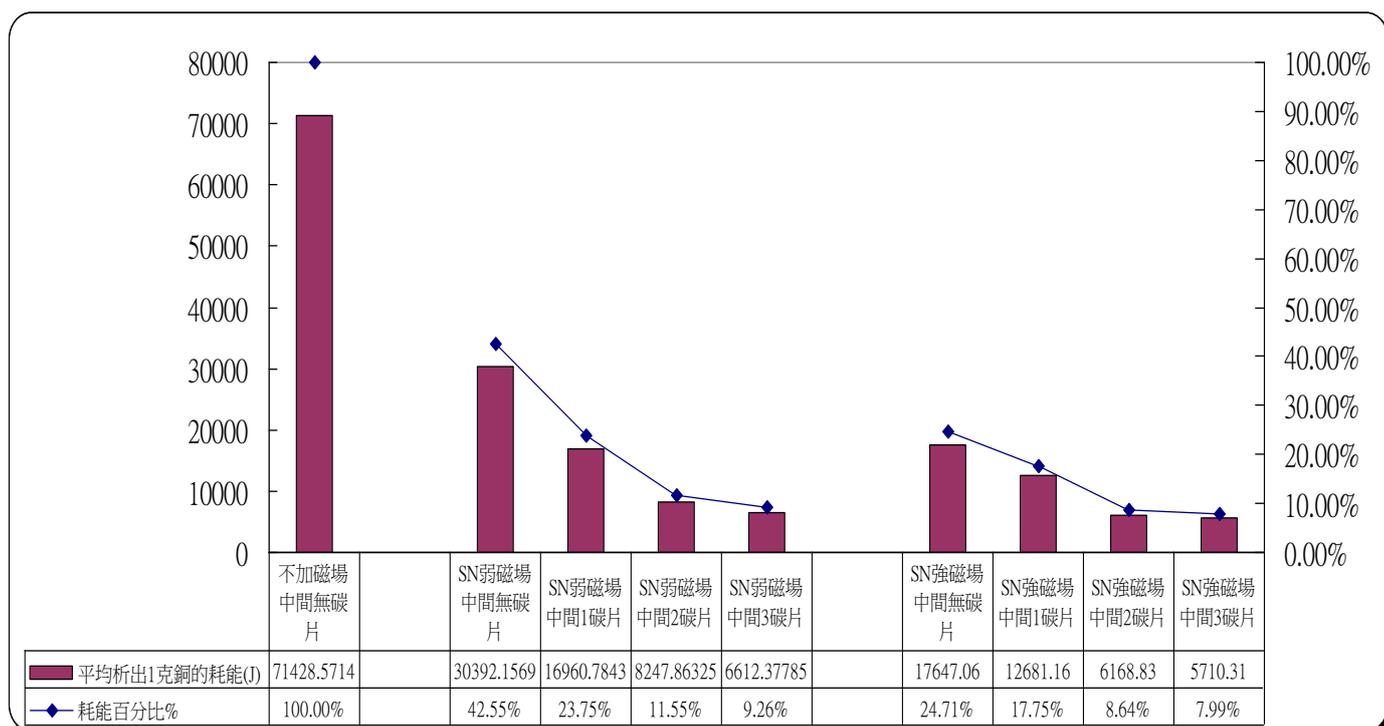


圖 6-4-2 平均析出 1 克銅所耗電能焦耳與耗能百分比比較

由以上資料可發現：

(一) 若利用相同時間於 50 秒內的銅原子回收質量，則可得以下結果

1. 在中央放置三片碳片且有外加 SN 弱磁場 (0.307g) 的狀況下，同樣時間內與不加磁場中間無碳片的回收銅金屬 (0.021g) 重量比較，可高達 14.61 倍的銅原子回收；

2. 在中央放置三片碳片且有外加 SN 強磁場 (0.359g) 的狀況下，同樣時間內與不加磁場中間無碳片的回收銅金屬 (0.021g) 重量比較，可高達 17.09 倍的銅原子回收。

(二) 若利用電功率與通電 50 秒內的耗能與回收銅金屬質量，算出每克的銅原子析出的耗能比，則得到下列結果:

1. 外加 SN 弱磁場且三片碳片的耗能僅需無中央碳片無外加磁場(對照組)的 9.26%，亦即在同樣的析出重量下，可節省 90.74%的能源使用率；
2. 外加 SN 弱磁場且三片碳片的耗能僅需無中央碳片無外加磁場(對照組)的 7.99%，亦即在同樣的析出重量下，可節省 92.01%的能源使用率；

學長姐去年的研究中並沒有外加磁場，而且在中央加置三片平行碳片之後才達到回收量為對照組的 5 倍(能源使用率為對照組的 14%，節能 86%)；而目前我們的研究發現只要在兩片碳片且外加 SN 弱磁場的狀況下，可達到相同節能狀況，但是回收量即可達到對照組的 11.4 倍(能源使用率為對照組的 11.55%，節能 88.45%)。而且更於外加 SN 強磁場且中央三片碳片的狀況下，在同樣時間內可增加對照組的 17.09 倍回收量，且僅需對照組 7.99%的能源，節能約有 92.01%。經由實驗分析我們得知，本實驗中所外加的磁場處理與自發性感應電極搭配，更可以提高回收率與能源的轉換率。

五、 裝置電流大小分析

此段分析中，我們將各種不同狀況下的電流大小作出比較分析，結果於下表 6-5-1 與圖 6-5-1 所示。

表 6-5-1

組別	不加磁場	SN (外加弱磁場)	SN (外加弱磁場)	SN (外加弱磁場)	SN (外加弱磁場)
	中間無碳片	中間無碳片	中間 1 碳片	中間 2 碳片	中間 3 碳片
電流比較(mA)	1500	1550	1730	1930	2030
組別	不加磁場	SN (外加強磁場)	SN (外加強磁場)	SN (外加強磁場)	SN (外加強磁場)
	中間無碳片	中間無碳片	中間 1 碳片	中間 2 碳片	中間 3 碳片
電流比較(mA)		1550	1750	1900	2050

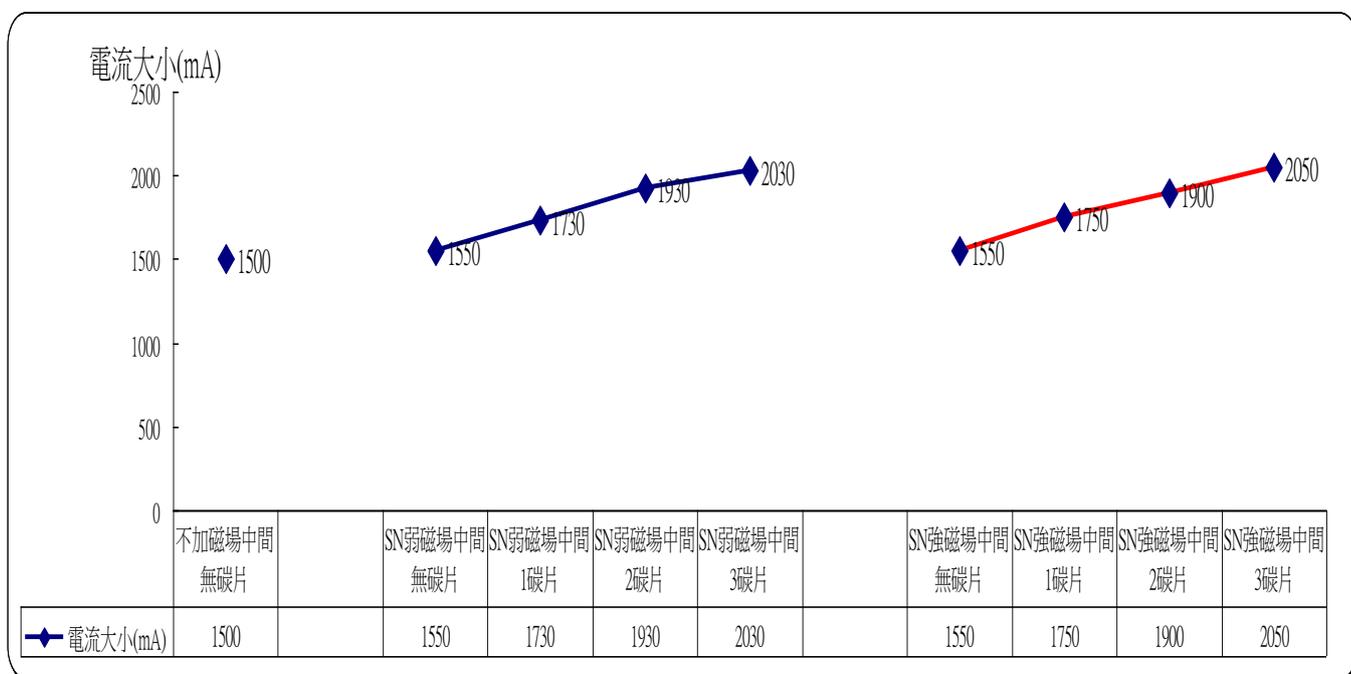


圖 6-5-1 各種裝置下的電流大小比較

由此段資料分析中可發現以下幾點：

- (一) 中央碳片的數量越多，其電流越大；
- (二) 若中央無碳片的狀況下，無外加磁場、SN 弱磁場、SN 強磁場的電流相當，沒有太大差異；
- (三) 在有外加磁場狀況下，SN 弱磁場、SN 強磁場的電流大小在無碳片、1 片碳片、2 片碳片、3 片碳片的電流大小相當，無多大差異。

得到這樣的結果，我們根據學長姐去年的資料顯示中央碳片的數量越多，可能造成整體的電阻越大，造成整體的電流應該要下降；可是我們卻得到相反的結果，這結果讓我們陷入苦思，是否與外加磁場有關係呢？我們在綜合討論的地方有更進一步的討論。

六、中央碳片的電位差分析

在這次的實驗中我們也想要探討中央碳片能夠有偽正極產生氧氣，偽負極有銅原子析出，表示中央碳片的兩側必定存在電位差，而這些電位差的大小為何呢？是否與中央碳片的數量、外加磁場強弱有關呢？結果分析請看下列表 6-6-1 和圖 6-6-1 所示。

表 6-6-1 中央碳片在不同磁場強度下的平均電位差

	無磁場中央 1 碳片	無磁場中央 2 碳片	無磁場中央 3 碳片
平均測得中央碳片電位差(v)	0.409	0.728	0.7747
	弱磁場中央 1 碳片	弱磁場中央 2 碳片	弱磁場中央 3 碳片
平均測得中央碳片電位差(v)	0.52	0.8375	1.001
	強磁場中央 1 碳片	強磁場中央 2 碳片	強磁場中央 3 碳片
平均測得中央碳片電位差(v)	0.64	0.9565	1.121

註：中央碳片若為 2 片或 2 片以上，則測得每片電位差後採整體中央碳片的平均值計算

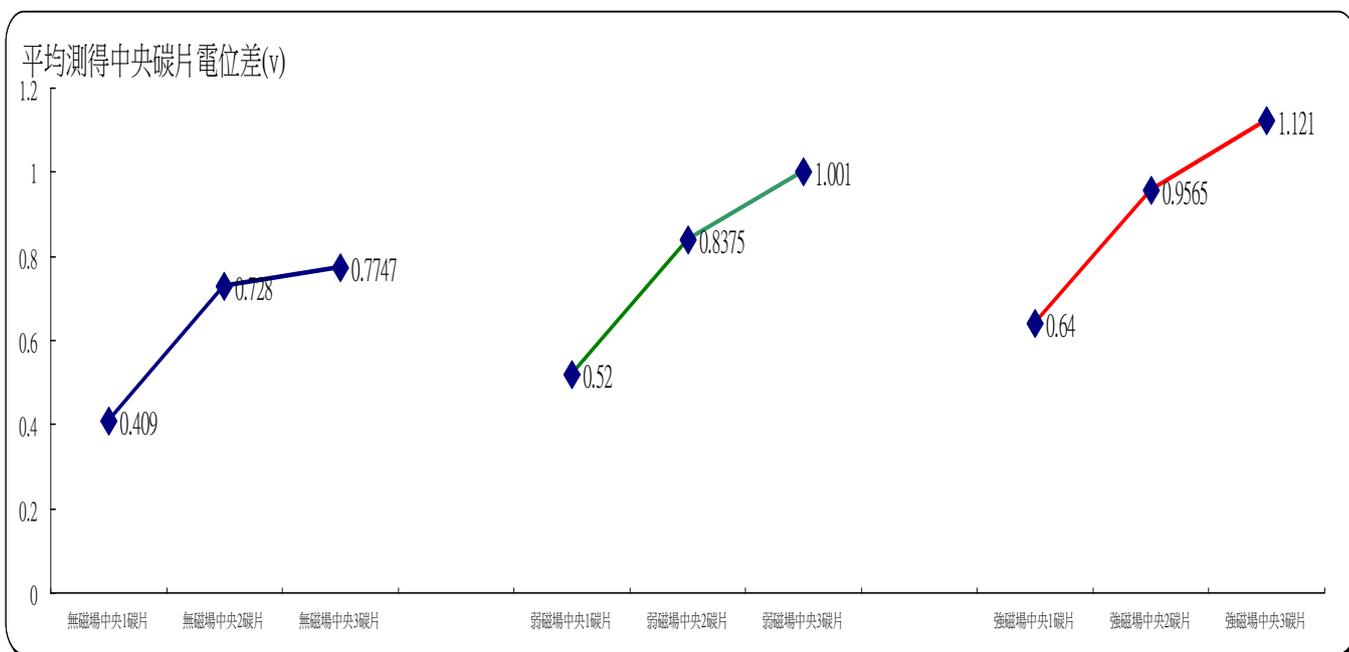


圖 6-6-1 中央碳片在不同磁場強度下的平均電位差

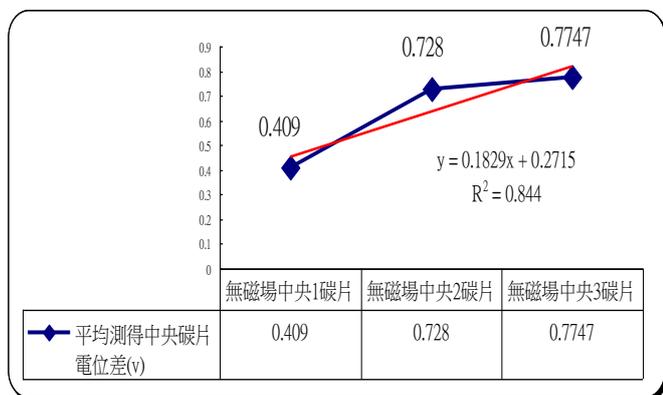


圖 6-6-2

無磁場狀況下中央碳片數量與其碳片平均電位差線性迴歸

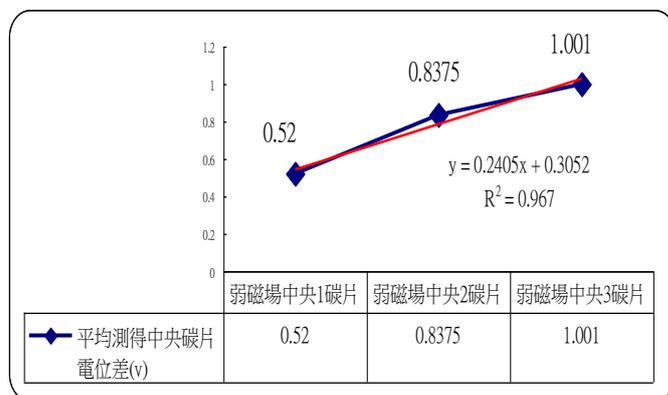


圖 6-6-3

弱磁場狀況下中央碳片數量與其碳片平均電位差線性迴歸

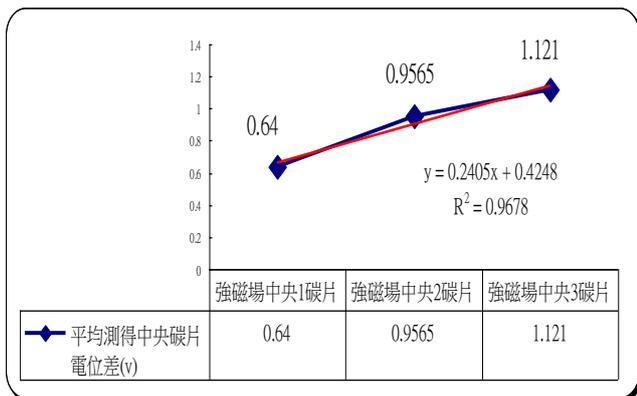


圖 6-6-4

強磁場狀況下中央碳片數量與其碳片平均電位差線性迴歸

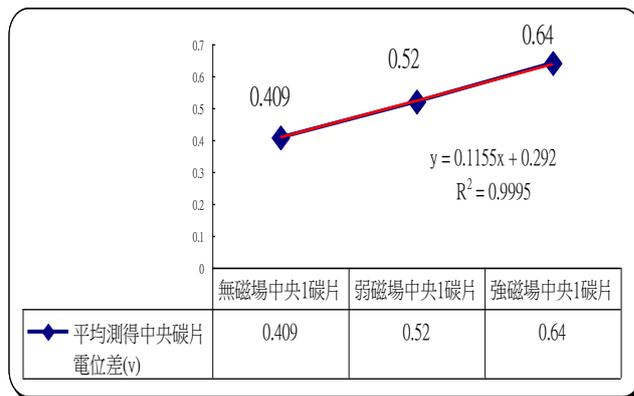


圖 6-6-5

中央 1 片外加碳片狀況下
磁場強度與其碳片平均電位差線性迴歸

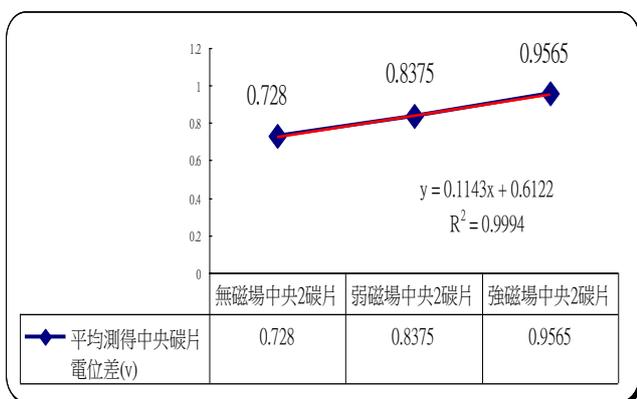


圖 6-6-6

中央 2 片外加碳片狀況下
磁場強度與其碳片平均電位差線性迴歸

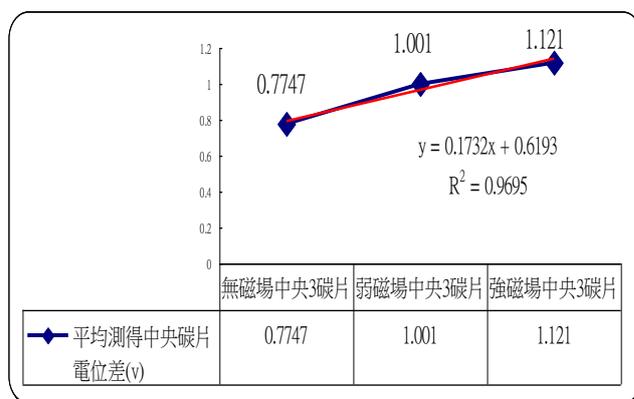


圖 6-6-7

中央 3 片外加碳片狀況下
磁場強度與其碳片平均電位差線性迴歸

在資料的結果分析上，可以得到下列幾點結果：

- (一)無磁場的狀況下，中央碳片越多，中央碳片的平均電位差大致上而言越大($R^2 = .844$)。
- (二)弱磁場的狀況下，中央碳片越多，中央碳片的平均電位差也隨之越大($R^2 = .967$)。
- (三)強磁場的狀況下，中央碳片越多，中央碳片的平均電位差也隨之越大($R^2 = .967$)。
- (四)在中央皆為 1 片外加碳片狀況下，電位差比較為強磁場 > 弱磁場 > 無磁場($R^2 = .999$)。
- (五)在中央皆為 2 片外加碳片狀況下，電位差比較為強磁場 > 弱磁場 > 無磁場($R^2 = .999$)。
- (六)在中央皆為 3 片外加碳片狀況下，電位差比較為強磁場 > 弱磁場 > 無磁場($R^2 = .969$)。

分析至此，大致上可以發現若是中央碳片數量越多且磁強強度越大，則可能造成中央碳片的平均電位差增加（直線線性迴歸結果顯示大都達到.967 以上）。得到這樣的結果我們推測中央碳片內所感應產生的電位差若越大，越能夠傳遞更多量電子，讓偽負極得到更多的銅原子析出，進而增加整體的銅原子析出量，達到更高效率的回收方式。

柒、綜合討論

一、為何『外加磁場』會增加整體銅原子析出量，進而增加能源使用率，減少能源消耗呢？

- (一) 我們的想法是可能是因為外加磁力的狀況下，讓銅離子在水溶液中的移動方向更具有規則，移動的混亂程度因為受到外加磁場的影響而受到限制，因此可以更有效率的析出。
- (二) 根據右手開掌定則的定律，當電流方向、磁場方向互相垂直的時候，移動中的正離子會受到某一方向垂直的作用力而向該處移動，如右圖 7-1 所示。在部份科展研究中也證實的水溶液中的正離子、負離子在有外加磁場的狀況下會產生偏移，本實驗也得到相似的結果。(7-2 說明)
- (三) 本實驗在裝置的前後使用圓形棒狀磁鐵提供 N 極與 S 極的磁場，再根據正極、負極的位置，可建構出與右手開掌定則相同的裝置，如下圖所示：

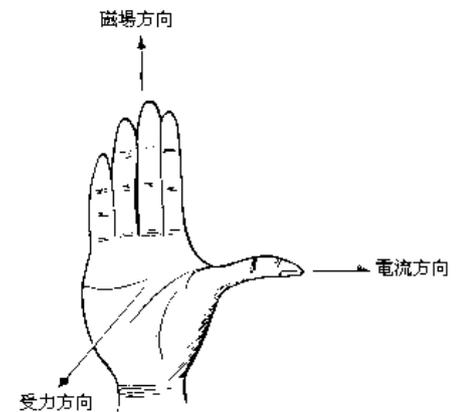


圖 7-1 右手開掌定則--取自
http://content.edu.tw/junior/phy_chem/ty_1k/sir/content/cph9/cph93/cph93-2.htm

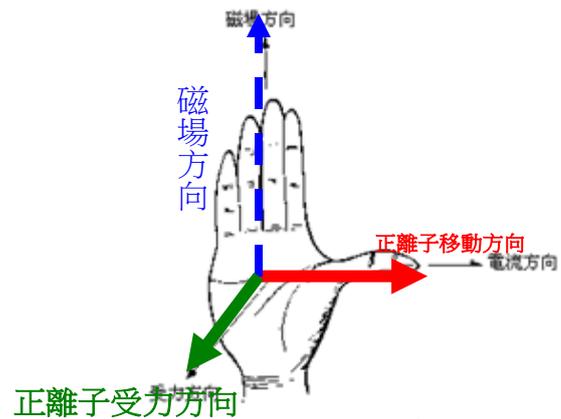
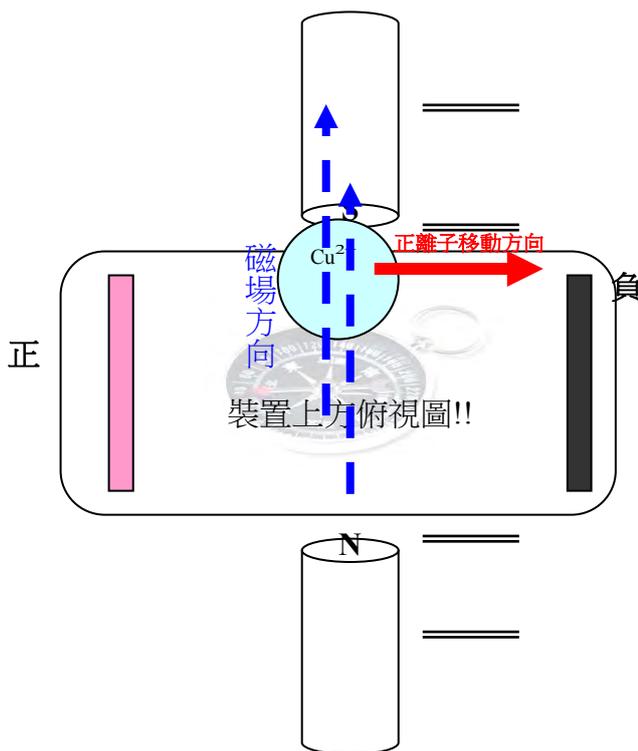
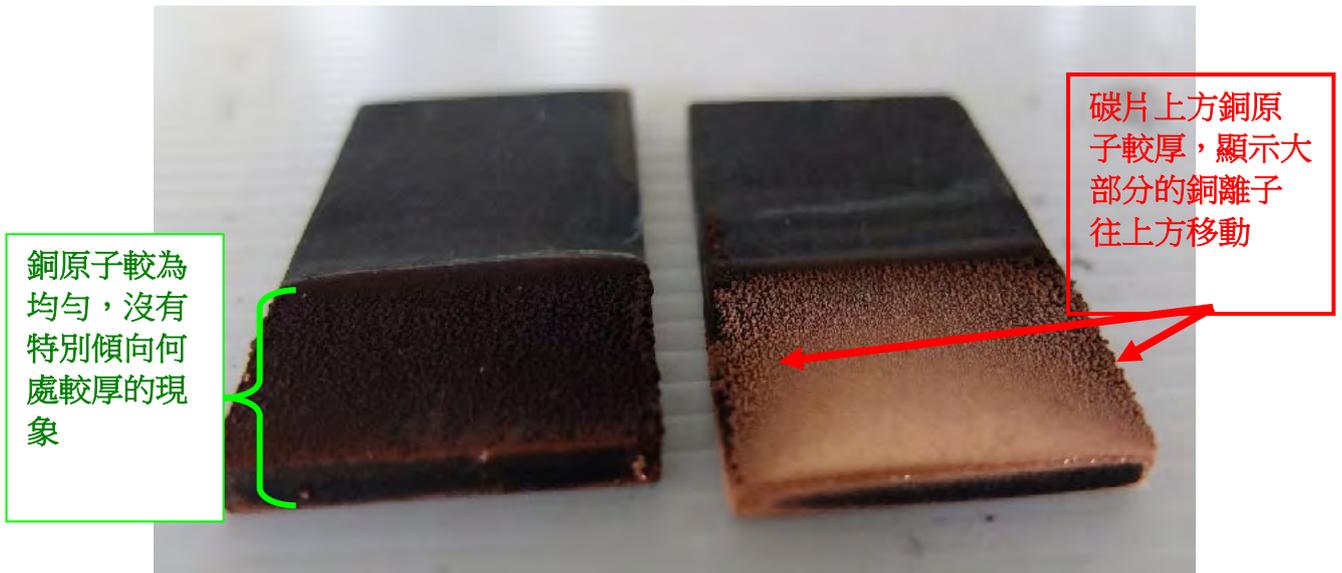


圖 7-2 實驗裝置與右手開掌對應圖

根據我們的實驗裝置，硫酸銅水溶液中的銅離子(正離子)受到磁場的影響，會偏上方移動，因為這樣的磁場限制，導致這些銅原子大部份往負極上方析出，因此形成較有秩序的移動，降低了混亂程度(圖 7-4A、7-4B)。這是我們推測為何外加磁場較能有效增加析出的主要原因。

- (四) 在實際的觀察上，我們拍攝到了外加磁場之負極碳片上面的銅原子析出相較於沒有外加磁場的負極碳片更不均勻，有集中在碳片上方的趨勢，如下圖 7-3 所示。得到這樣的結果，讓我們的推測可能更具有正確的解釋。



無磁場下的負極銅原子析出

SN 磁場下的負極銅原子析出

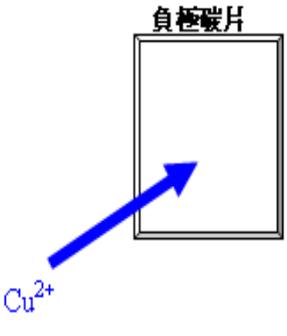
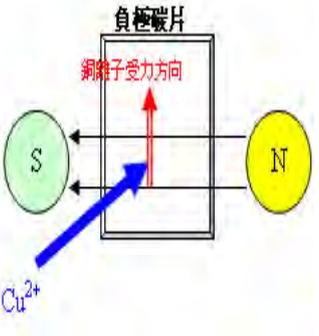
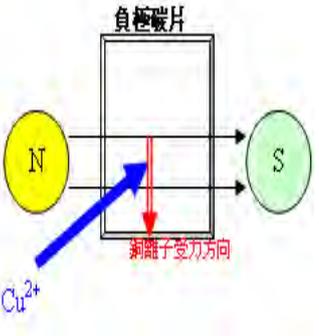
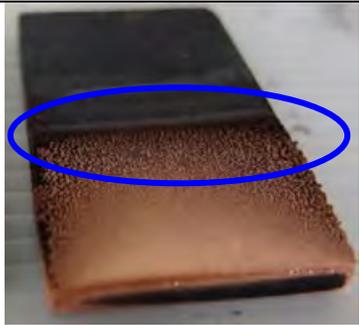
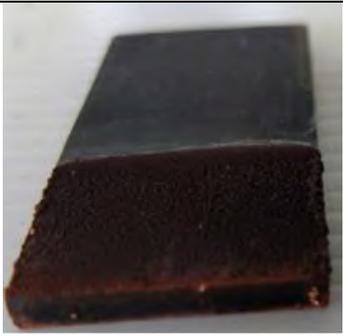
註 未加磁場的銅原子附著在碳片上較薄，且放置時間較久，已經發生氧化產生黑色的氧化銅。

圖 7-3 無磁場和外加磁場的負極碳片之銅原子析出比較

二、 若將外加磁場的 SN 方向轉換，結果會有所差異嗎？

我們思考到一個問題，若是將 SN 的方向顛倒成為 NS 方向，那麼根據右手開掌定則的預測，實際觀察到負極碳片上的銅原子分布會有上下不均勻的狀況出現嗎？其結果如下表 7-1 所示。

表 7-1 SN 磁場、NS 磁場方向對中央碳片銅原子分布的比較

	無外加磁場的負極碳片	有外加磁場的負極碳片	
裝置與理論預測	 <p>負極碳片</p>	 <p>負極碳片</p> <p>銅離子受力方向</p>	 <p>負極碳片</p> <p>銅離子受力方向</p>
	負極碳片上的銅原子應該接近平均分布	負極碳片上的銅原子應該在上方的析出量較多	負極碳片上的銅原子應該在下方的析出量較多
實際觀察狀況 (通電 600 秒)			
實際觀察狀況 (通電 1200 秒)			
實際狀況描述	<ul style="list-style-type: none"> ■ 通電 200 秒較通電 100 秒的銅原子較多也較厚。 ■ 但是大都均勻分布，無特別集中上方或下方狀況。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 通電 200 秒較通電 100 秒的銅原子較多也較厚。 ■ 大都集中上方分布。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 通電 200 秒較通電 100 秒的銅原子較多也較厚。 ■ 大都於下方分布。

如表 7-1 所整理的實驗結果，可以清楚發現若將 SN 方向轉變成為 NS 方向，銅原子於負極碳片上的析出集中狀況也會有所改變，顯示外加磁場的方向的確會影響銅離子的移動偏向，也可能會限制銅離子的移動方向而讓整體的離子移動更具有方向的規律與更有秩序。

三、 中央碳片的數量越多，電阻越大，根據 $V=IR$ 的理論，整體電流應該會變小。為何在外加磁場的狀況下電流會更大呢？

- (一) 根據去年學長姐在中央平行碳片的數量與電流的研究上，發現中央若放置平行碳片，其擺放數量越多相當於電阻的串聯，在固定電壓的狀況下，整體的電阻越大，相對的整體的電流就越小。可是在我們今年的研究數據中卻發現，在外加磁場與固定電壓的狀況下，中央平行碳片的數量越多(至多僅到三片)，其整體電流越大，顯示整體的電阻變小，這樣的研究結果與學長姐所得的結論不同。
- (二) 我們討論過後，認為在外加磁場的狀況下為何會降低整體的電阻，可能跟水溶液中離子的移動受到外加磁場的影響而變得更有秩序，減少了很多混亂的碰撞，所以可能會造成整體電阻變小，電流變大的狀況。如下圖所示 7-4 所示。

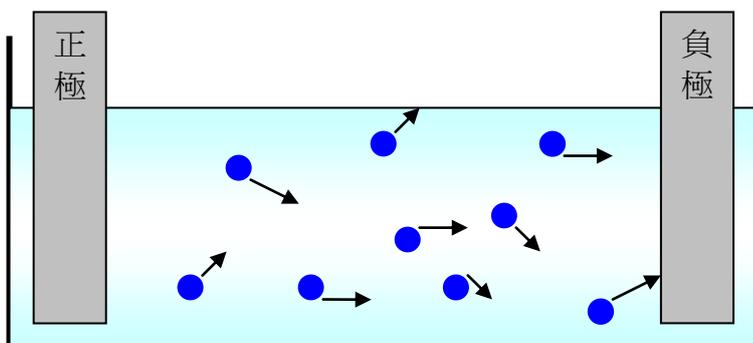


圖 7-4A

未加磁場狀況下，銅離子移動較無秩序，較為混亂，可能造成電阻值提高

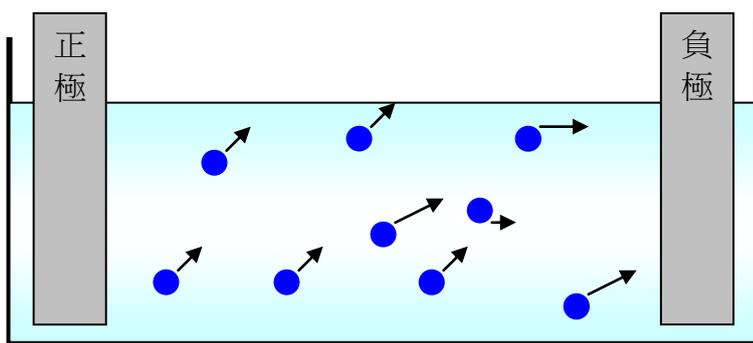


圖 7-4B

外加 SN 磁場狀況下，銅離子移動較有秩序，大都朝同一方向移動，可能造成電阻值降低，回收率增加

捌、 研究結論

- 一、當在電解槽中通電的時候，正、負離子移動會產生磁場；在本實驗中的所產生的磁場強度約使指北針偏轉約為 3 度左右；同時中央放置平行碳片與否，不會影響通電的時候所產生的離子磁場強度。
- 二、若電解槽中央放置平行碳片，會增加整體的銅原子回收量，也可以降低耗能。
- 三、若電解槽中央放置平行碳片與增加外加磁場，則更大量增加整體銅原子的回收量；這些回收量與耗電量的大小，根據實驗結果應該和外加磁場強度、中央平行碳片數量有關。
 - (一) 外加 SN 磁場強度越強，整體回收率會提高。
 - (二) 中央平行碳片數量越多(至多到三片)，所產生的自發性感應電極現象會讓整體回收率會提高。
 - (三) 外加 SN 弱磁場與搭配中央平行碳片(自發性感應電極)，中央平行碳片越多(至多到三片)，回收量越多；在 SN 弱磁場與中央三片平行碳片，通電 50 秒狀況下，至多可以增加回收量高達對照組的 14.61 倍，消耗電能僅需對照組的 9.26%，可節省 90.74%的電能。
 - (四) 外加 SN 強磁場與搭配中央平行碳片(自發性感應電極)，中央平行碳片越多(至多到三片)，回收量越多；在 SN 強磁場與中央三片平行碳片，通電 50 秒狀況下，至多可以增加回收量高達對照組的 17.09 倍，消耗電能僅需對照組的 7.99%，可節省 92.01%的電能。
- 四、中央碳片的數量愈多且磁場強度越強，則中央碳片的平均電位差越大，顯示中央碳片具有越高的電位差可讓電子更易流動，增加析出的效率。
- 五、在外加磁場的狀況下，中央平行碳片數量越多(至多三片)，其整體裝置電流越大。推測可能原因為外加磁場影響水溶液中的離子流動，依右手開掌定則推論，磁場限制了正離子的移動方向，讓水溶液中的離子移動較有秩序，因此增加了回收量與降低電能消耗。
- 六、使用中央平行碳片所產生的自發性感應電極與外加 SN 磁場，可大大增加整體的銅原子析出量與降低耗能，節省更多電能。我們的設計是個非常節省能源的方式，希望以後有機會可以真正落實於廢水汙染的設計上，讓廢水處理更節約能源。

玖、 參考文獻

- 國科會高瞻計畫平台，<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=3196>
- 右手開掌圖片：http://content.edu.tw/junior/phy_chem/ty_lk/sir/content/cph9/cph93/cph93-2.htm
- 李佳錚、廖仲崙、陳姿吟，一閃一閃亮金晶，中華民國第 51 屆國中小科展化學組入選作品
- 劉惟安、劉惟平、趙伯宣，金來瘋，探究金屬廢液利用電解法提高回收率與節能大小的探討，中華民國第 52 屆國中小科展化學組第三名
- 辜禹仁、鄭祐杰、陳守中、蔡允中，磁場中的離子轉速—探討硫酸銅水溶液濃度與離子遷移速度關係，中華民國第 46 屆國中小科展化學組第一名

【評語】 030203

利用磁鐵與電極中加平行碳片，探討銅離子析出量的影響，有創意，但平行碳片的加入已有多人探討過，唯磁鐵的方位、磁場大小、為何會產生影響等，可以多加研究。