

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 化學科

050205

「導數」計時 ~由連續導電度的變化探討離子的
反應速率

學校名稱：新北市私立格致高級中學

作者： 高二 駱宣妤 高二 蔡依庭	指導老師： 蘇正昌 簡茂潭
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：導電度、反應速率、奈米硫

摘要

高中介紹各種反應的速率比較，但卻缺少實際觀察各種反應快慢的方式；本研究發現，可藉由連續導電度測量，從導電度的變化曲線中，觀察到各種離子反應在過程中的離子變化特徵，也可以找到準確的反應終結時間，並做定性及定量上的運用。文獻曾以硫沉澱的濁度，測奈米硫的反應速率，但此法測的是氧化還原與沉澱速率之和；但由連續導電度圖，則可單純的得到氧化還原反應的速率。透過取樣時間的適當設計，可觀察到每種離子反應的導電度波動都很獨特，相同的離子反應，導電度曲線的起伏很相似，可做為鑑別離子反應類型之用。從秒錶實驗的導電度圖中，還可看出兩個反應機構的交替過程。在反應速率的研究及教學上，連續導電度法提供了簡便而準確的方法。

壹、研究動機

高中化學課程學習到反應速率的章節〔一〕，老師帶領我們做奈米硫的實驗〔二〕，以硫沉澱遮蔽燒杯底部十字的方式，比較不同濃度下的反應速率。實驗結束後，老師提及這個方法實際上測到的速率，是氧化還原反應及硫沉澱的兩種速率之和，且以肉眼觀察也不夠客觀，於是我們想找出是否有其他更科學且簡便的方式可以單獨測得此實驗的氧化還原速率。

我們想利用電導度計，去連續測定各種離子反應的導電度（Conductivity）變化，藉以觀察反應過程中離子數的消長狀況，並從中找出反應終結時的時間，藉以修正用肉眼觀察的傳統方法。

我們也以「連續導電度」去測定數種高中課程中常見的幾種離子反應（Ion reaction），包括酸鹼中和、沉澱及氧化還原反應，想藉由連續導電度圖的波動狀況，去觀察反應過程中離子的變化特徵，並比較各種離子反應的快慢。

另外，高中課程提及界面活性劑具有保護奈米硫的作用，會延緩奈米硫變大顆，我們很好奇界面活性劑是否也會因此延緩沉澱反應的進行，因此針對有沉澱物的反應，也加入了界面活性劑做為操作變因。

@傳統方法上，以奈米硫遮蔽杯底十字的時間，作為反應速率在比較上的依據。
 @但以肉眼觀察不夠科學，且量測到的時間是離子反應速率加上沉澱速率之和。

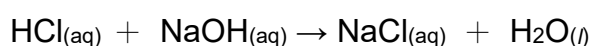
@由廷得耳效應可以觀測到，加入界面活性劑後，會延緩奈米硫顆粒變大的時間。



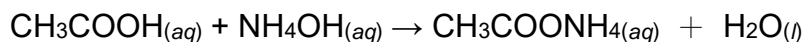
貳、研究目的

離子反應可以藉由導電度的變化測定反應速率，我們找出數種高中課程中常見的離子反應，包括酸鹼中和、沉澱及氧化還原反應，以高、低兩種「離子濃度」作為操作變因，奈米硫及沉澱的實驗則再加入清潔劑作為變因，測定在離子的反應過程中，「連續導電度」的變化，目的是要從「連續導電度」的變化中，觀察各種離子反應的導電度變化曲線，從中找出「反應結束的時間」，藉此可以更簡便而精確地利用於反應速率的探討與比較。以下是本研究選定的七種離子反應項目：

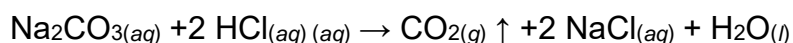
研究一、強酸強鹼的中和反應



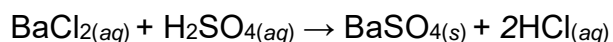
研究二、弱酸弱鹼的中和反應



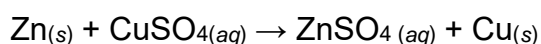
研究三、酸鹼中和且生成氣體的反應



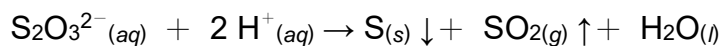
研究四、沉澱反應



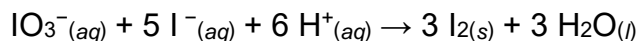
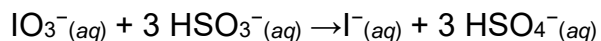
研究五、簡單氧化還原反應 ~ 鋅銅電池的反應



研究六、氧化還原且有沉澱的反應 ~ 奈米硫實驗



研究七、氧化還原且碘滴定法 ~ 秒錶實驗 (碘鐘實驗)



參、研究設備及器材

設備	電導度計、磁力攪拌器
材料	清潔劑 (白熊洗碗精，陰離子界面活性劑)
藥品	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、 BaCl_2 、 KIO_3 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 、 Na_2CO_3 、 NaOH 、 鋅粉、 $\text{HCl}(\text{aq})$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ 、 $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq})$ 、 $\text{NH}_3(\text{aq})$

肆、研究過程或方法

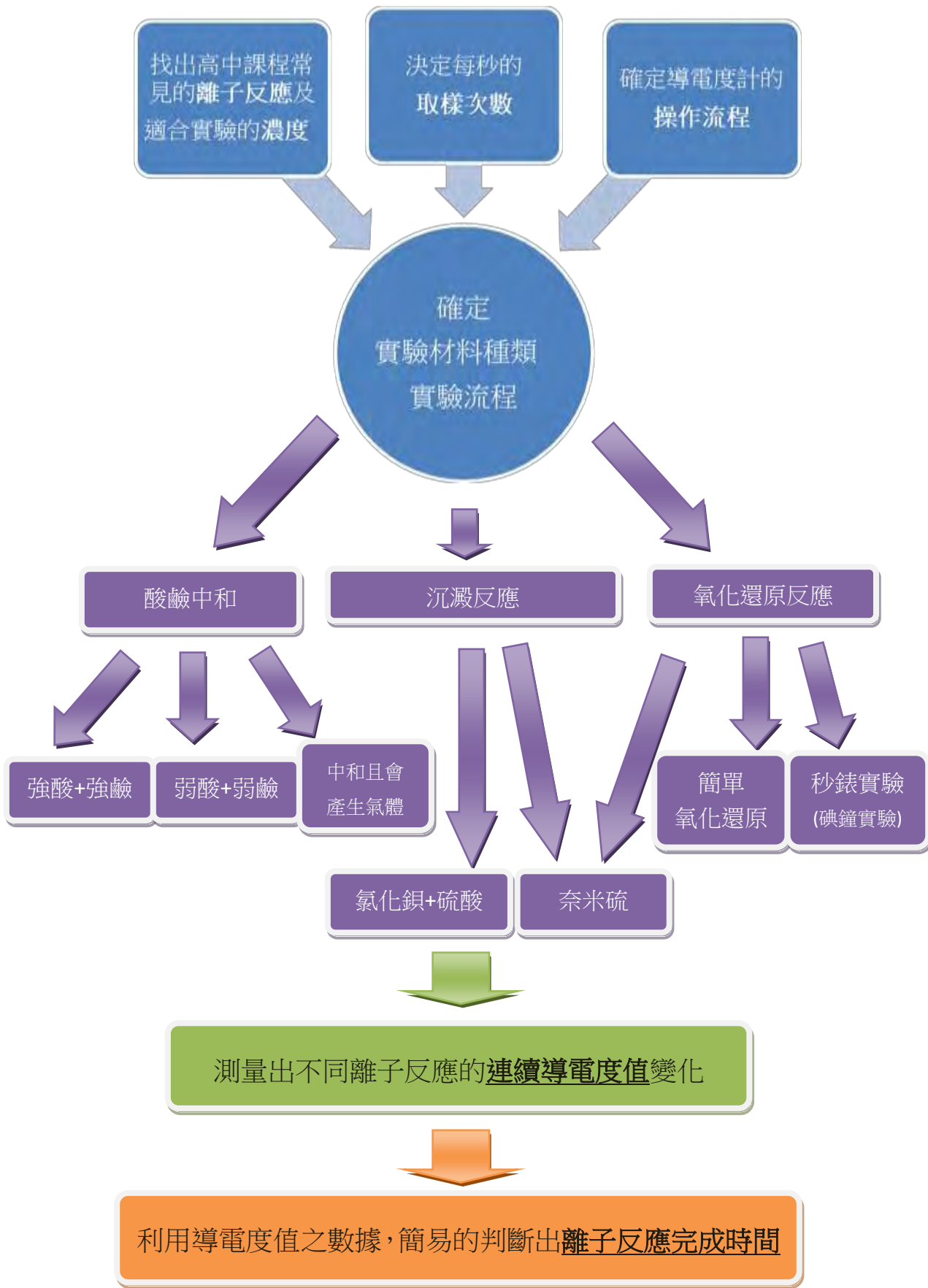
前置作業：

1.設計測定導電度的裝置與步驟。電導度計及磁石攪拌機的裝置如下。



2.測試各組實驗適合操作的濃度及電導度計取樣的時間間格，反應快者，每秒取樣 100 次；反應慢者，每秒鐘或每分鐘取樣 1 次。

一、流程圖：



二、文獻探究：

(一).奈米硫實驗：

硫代硫酸鈉與鹽酸反應會產生固體硫，傳統的方式是利用十字遮蔽法測定反應時間，藉由固體硫完全遮住杯底十字的方式測定反應速率，但此法因為是以肉眼觀察而誤差大。科展文獻〔三〕中，作者以自組光敏電池連結蜂鳴器的設備，去偵測奈米硫沉澱的透光度，以代替肉眼對奈米硫的觀察，但此法還是以固體硫做為觀察速率的焦點，兩種方式都只代表硫沉澱量及粒徑大小已到達足以遮蔽的等級，並不表示化學反應本身已達反應的終止，若是硫的產量太少，還會有不足以遮蔽的問題，且測到的是氧化還原與沉澱反應的速率之和。連續導電度法則可單獨測得氧化還原反應的速率，即使是稀薄溶液也能適用。

高中課程及文獻〔四〕當中都有提到，界面活性劑具有保護奈米硫的作用，會延緩奈米硫變大顆。我們想用連續導電度法，觀察界面活性劑是否也會讓離子沉澱反應變慢。

(二).利用電導度計測反應速率：

文獻〔五〕利用電導度計，檢測出電導度值去找出反應速率，但此實驗僅探討沉澱反應，而採點的方式則是測幾種沉澱反應在實驗的前、中、後三個電導度值，來找出反應速率。但過程中的實際電導度波動究竟如何？最後的電導度值是如何被確認是真的已反應完成？卻不得而知。連續導電度的曲線，可以觀察到整個反應歷程的離子變化，確認出反應終結的時間，且只要是跟離子相關的反應都可以運用此法，不限於沉澱反應。

(三).不同類型的離子反應速率的比較：

高中教材提到，在反應類型的本質上，若是反應時涉及化學鍵的破壞愈多，則反應速率愈慢，因此在反應速率的排序是：酸鹼中和 > 沉澱反應 > 簡單氧化還原 > 複雜氧化還原反應；然而這樣的陳述對於初學者而言，會感到有些抽象。由於離子的導電度與溶液中離子的數量有關，因此我們預期，藉由追蹤離子反應過程中連續導電度的變化，應可以具體比較出不同類型的離子反應速率及反應特性，提供教學上簡易而可行的輔助。

三、步驟：

- (一).不同濃度的兩種反應物各 40mL 相混，統一先放入某一溶液到燒杯，置磁力攪拌器上，再將酸液倒入杯中，同時啟動電導度計測導電度。(倒入順序不同，曲線波動可能不同)
- (二).研究一 ~ 研究五的電導度計設定每 1 秒鐘取樣 100 次，研究六為每 1 分鐘取樣 1 次，研究七則設定每 1 秒鐘取樣 1 次，連續取樣到導電度值達穩定為止。
- (三).比較不同濃度下，化學反應過程中的連續導電度變化。
- (四).研究四及六加入清潔劑做比較。
- (五).研究六的奈米硫實驗，另以傳統的十字遮蔽法測定遮蔽時間以做比較。
- (六).研究七的秒錶實驗，另以傳統的澱粉指示劑法測定反應變色的時間以做比較。

四、各項實驗採用的離子濃度

研究一、強酸強鹼的中和反應 (每秒取樣 100 次)	
0.1M HCl + 0.1 M NaOH	0.01M HCl + 0.1 M NaOH
研究二、弱酸弱鹼的中和反應 (每秒取樣 100 次)	
0.1M CH ₃ COOH + 1 M NH ₄ OH	0.1M CH ₃ COOH + 0.1 M NH ₄ OH
研究三、酸鹼中和且生成氣體的反應 (每秒取樣 100 次)	
0.1M Na ₂ CO ₃ + 0.01M H ₂ SO ₄	0.01M Na ₂ CO ₃ + 0.01M H ₂ SO ₄
研究四、沉澱反應 (每秒取樣 100 次)	
0.01M H ₂ SO ₄ + 0.01M BaCl ₂	0.01M H ₂ SO ₄ + 0.001M BaCl ₂
0.01M H ₂ SO ₄ + 0.001M BaCl ₂ +清潔劑 3 滴	
研究五、簡單氧化還原反應 (每秒取樣 100 次)	
2 克鋅粉，與 0.1M CuSO ₄ 水溶液	2 克鋅粉，與 0.01M CuSO ₄ 水溶液
研究六、氧化還原且有沉澱的反應 ~ 奈米硫實驗 (每分取樣 1 次)	
0.2M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl	0.02M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl
0.02M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl+清潔劑 3 滴	
研究七、氧化還原且碘滴定法 ~ 秒錶實驗 (每秒取樣 1 次)	
0.02M KIO ₃ + 0.004M NaHSO ₃	0.002M KIO ₃ + 0.004M NaHSO ₃

伍、研究結果

實驗前想法：

一. 推測

- (一)、從導電度的取樣過程中，可以由導電度值的不再改變，簡單而清楚地判斷出反應結束的時間，進而算出反應速率。
- (二)、藉由連續導電圖的曲線變化，能觀察出反應過程中的離子消長特徵，並比較出各種類型的離子反應快慢。
- (三)、溶液濃度愈高，粒子的碰撞頻率愈大，反應速率就愈快，反應結束的時間會較快。
- (四)、界面活性劑會延緩奈米硫的顆粒變大顆，推測添加清潔劑後，可能會影響其他沉澱反應的進行。
- (五)、在奈米硫的實驗中，連續導電度法比傳統的十字遮蔽法及濁度透光法，更能掌握反應結束的時間。

一、強酸強鹼的中和反應 $\sim \text{HCl}_{(aq)} + \text{NaOH}_{(aq)} \rightarrow \text{NaCl}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$

圖 1、不同濃度的強酸強鹼中和反應之導電度變化 (300 秒內作圖)

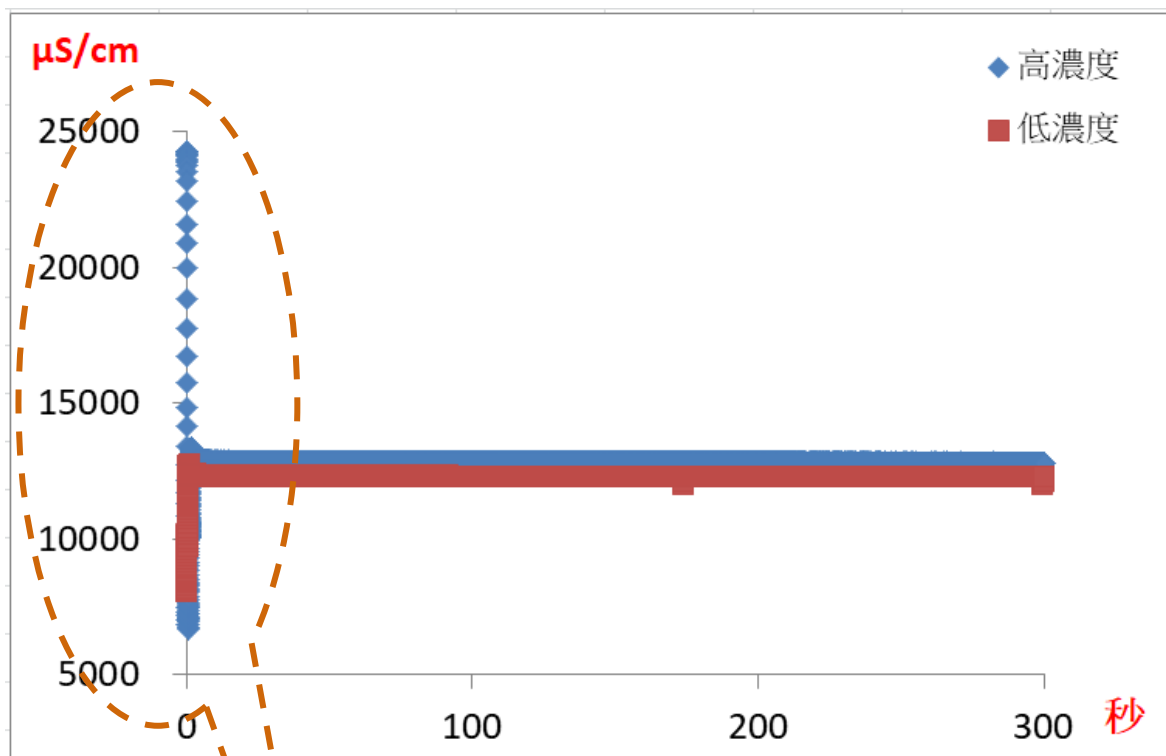
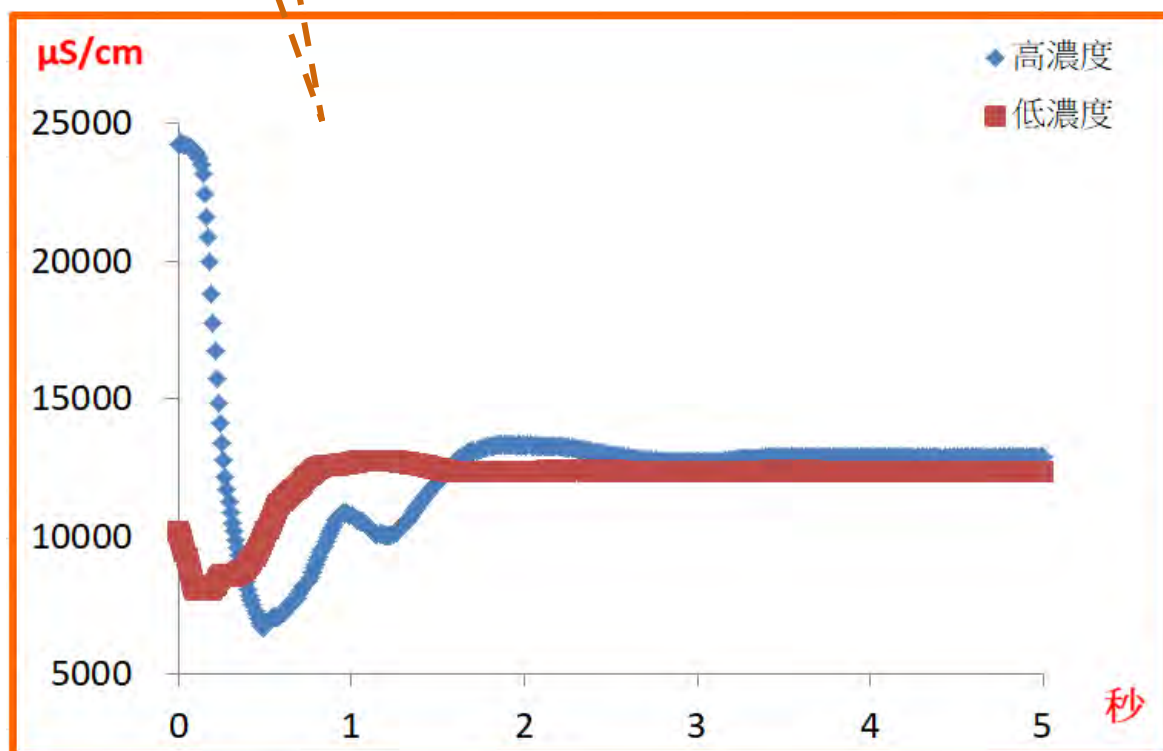


圖 2、不同濃度的強酸強鹼中和反應之連續導電度變化 (前 5 秒內放大作圖)



(一) 相混反應前的溶液導電度：

溶液	導電度值($\mu\text{S}/\text{cm}$)
純水	13
0.1M HCl	30599
0.01M HCl	8347
0.1 M NaOH	23622

*將兩溶液同體積相混，濃度會因此減半。

(二) 數據：(每秒取樣 100 次，連續取樣 300 秒)

0.1M HCl + 0.1 M NaOH	0.01M HCl + 0.1 M NaOH
反應完成的時間: 約 3.28 秒內	反應完成的時間: 約 1.59 秒內

(三) 結果分析：

- 1.兩種濃度的中和反應，導電度在 1 秒內就已大幅度的下降，高濃度的初期導電度變化震盪較劇烈，但低濃度者較快達到平衡，兩條曲線的波動趨勢很相似。
- 2.高濃度的中和反應在 3.28 秒後，導電度幾乎不再改變。
- 3.低濃度的中和反應在 1.59 秒後，導電度已沒什麼變化。
- 4.兩條曲線的前幾個取樣點的高低不太一致，研判是人為將溶液相混與操作儀器時，兩者在時間的同步上，所產生的操作誤差。尤其是每秒取樣 100 點的曲線會較明顯。
- 5.因為低濃度為 0.01 M HCl 與 0.1 M NaOH 的反應，反應後還遺留很多的 NaOH，推測是這樣的因素，讓兩條曲線在平衡時的線條很相近。

二、弱酸弱鹼的中和反應 $\sim \text{CH}_3\text{COOH}_{(aq)} + \text{NH}_4\text{OH}_{(aq)} \rightarrow \text{CH}_3\text{COONH}_4_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$

圖 3、不同濃度的弱酸弱鹼中和實驗之導電度變化 (300 秒內作圖)

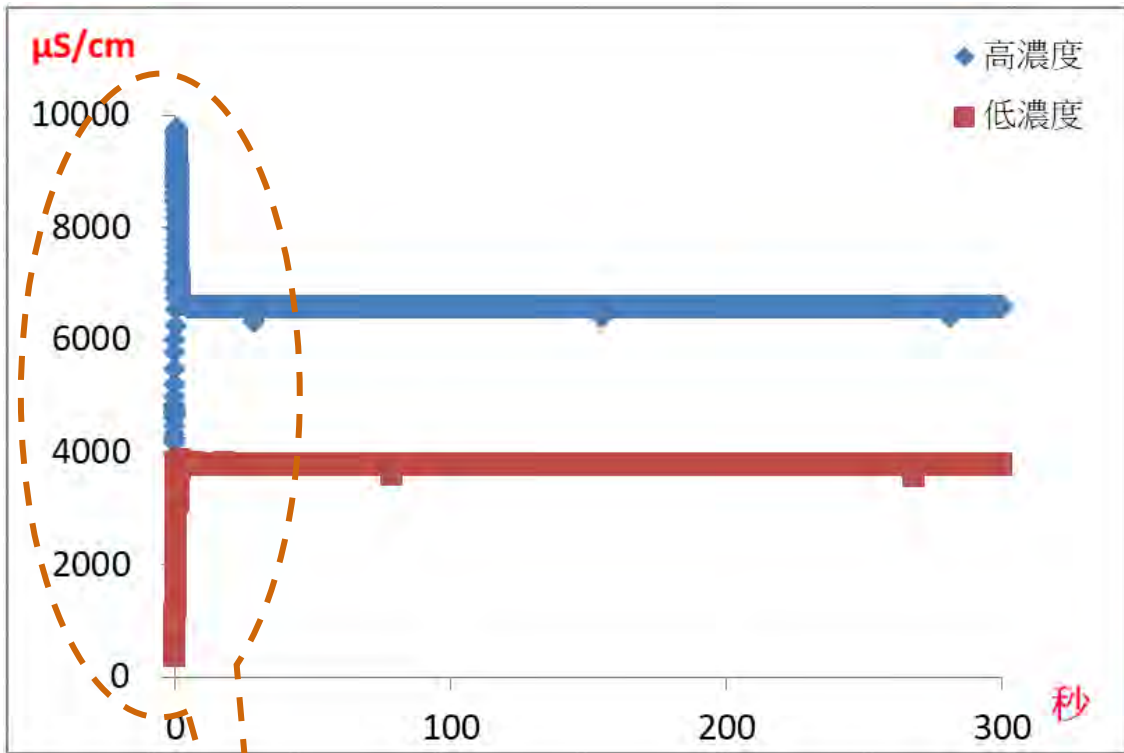
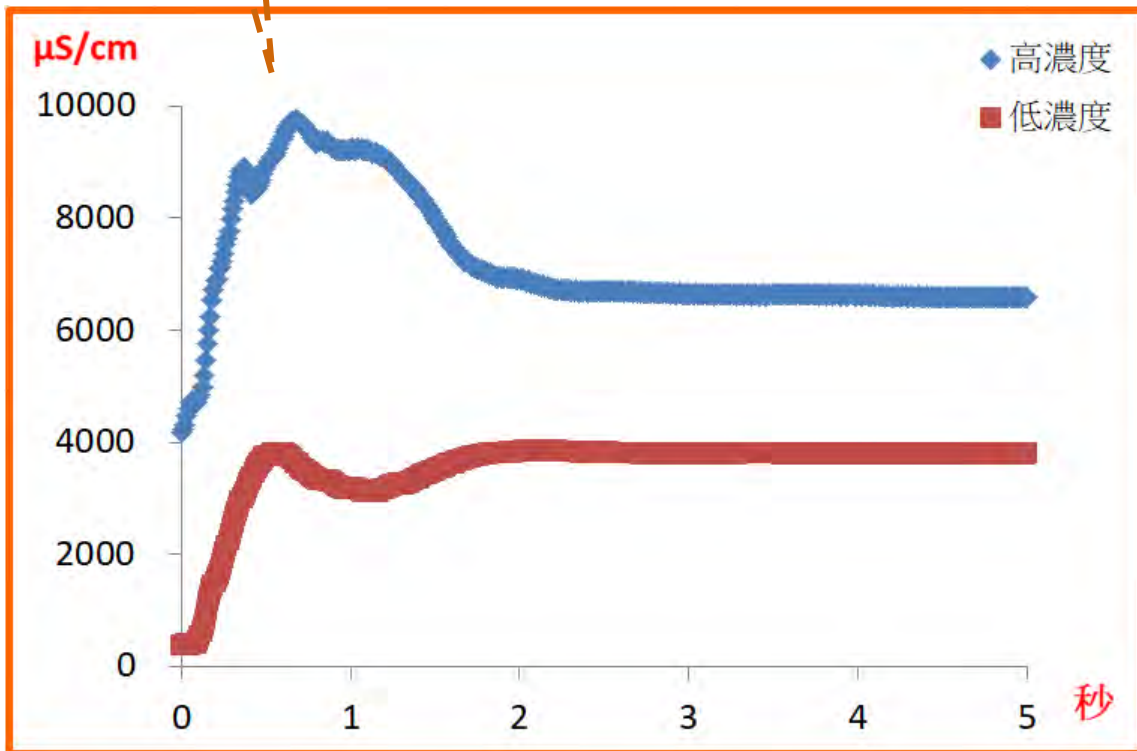


圖 4、不同濃度的弱酸弱鹼中和實驗之連續導電度變化 (5 秒內放大作圖)



(一) 相混反應前的溶液導電度

溶液	導電度值($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.1M CH_3COOH	650
1 M NH_4OH	1227
0.1 M NH_4OH	377

*將兩溶液同體積相混，濃度會因此減半。

(二) 數據 (每秒取樣 100 次，連續取樣 300 秒)

0.1M CH_3COOH + 1 M NH_4OH	0.1M CH_3COOH + 0.1 M NH_4OH
反應完成的時間: 約 2.92 秒內	反應完成的時間: 約 2.63 秒內

(三) 結果分析：

- 1.弱酸弱鹼的反應，2 秒內有大幅度的變化，高濃度者初期上升較快，但低濃度者的導電度較快達到平衡。
- 2.高濃度溶液的導電度在 2.92 秒後，即達到平衡。
- 3.低濃度溶液的導電度在 2.63 秒後，不再變化。
4. CH_3COOH 及 NH_4OH 的解離度很低，因此初期的導電度由低往上攀升，反應後的產物為 $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ，是強電解質，因此反應終結時的導電度值比反應初期還要高，且平衡時兩條曲線也因為 $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 及剩餘 NH_4OH 的濃度差異而拉大。

三、酸鹼中和且生成氣體的反應

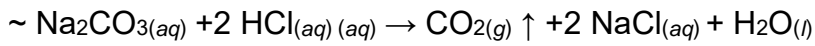


圖 5、不同濃度的碳酸鈉與鹽酸中和反應之連續導電度變化 (300 秒內作圖)

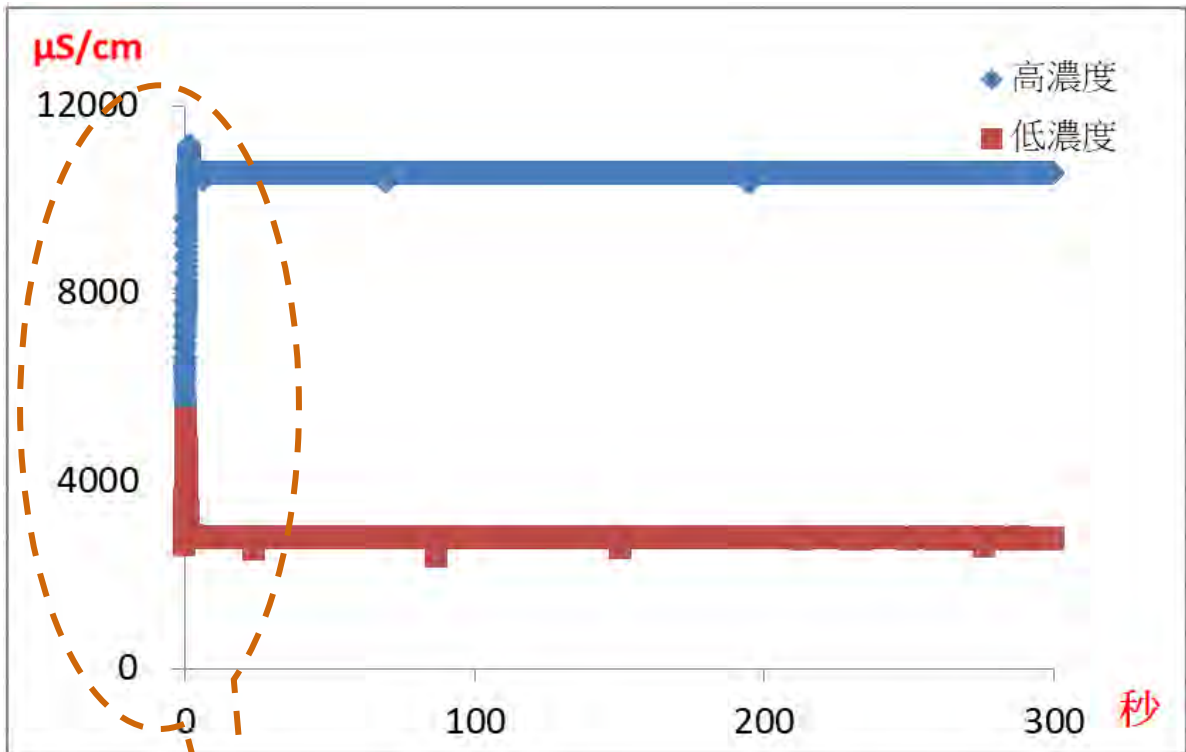
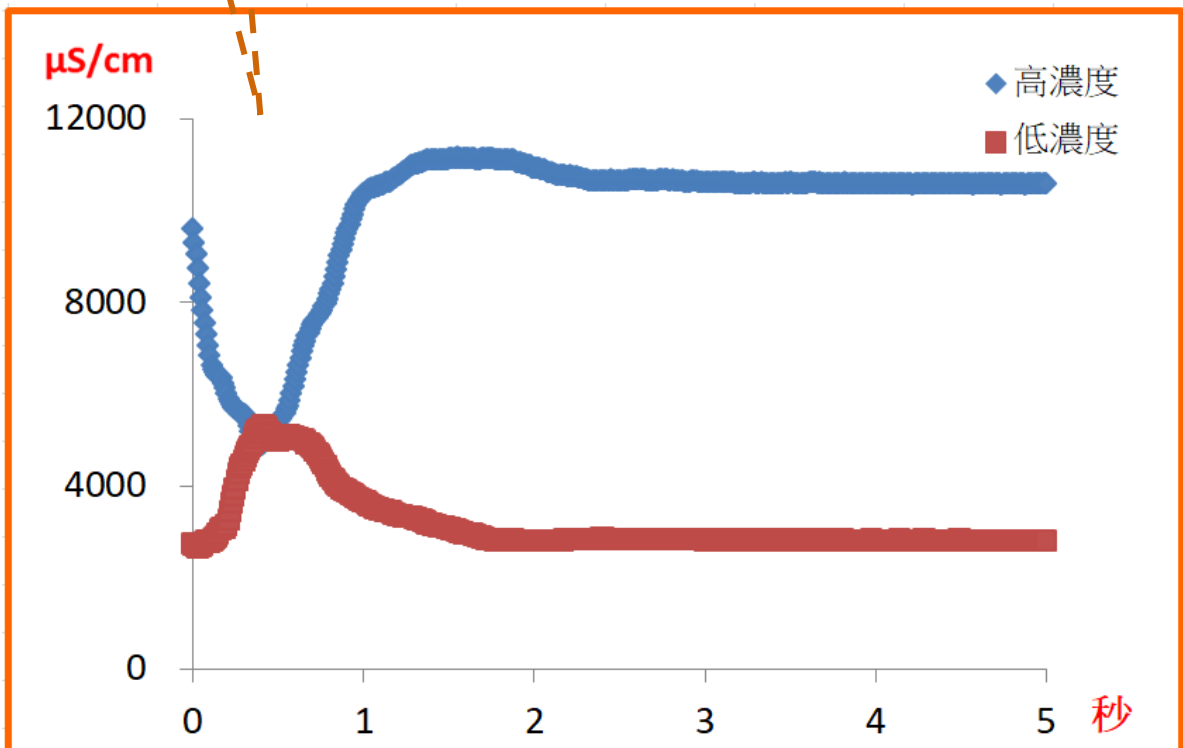


圖 6、不同濃度的碳酸鈉與鹽酸中和反應之連續導電度變化 (5 秒內放大作圖)



(一) 相混反應前的溶液導電度

溶液	導電度值($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.01M HCl	8347
0.1M Na₂CO₃	18148
0.01M Na₂CO₃	2342

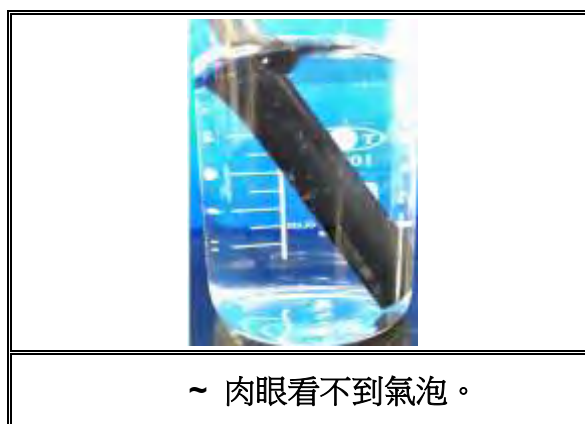
*將兩溶液同體積相混，濃度會因此減半。

(二) 數據 (每秒取樣 100 次，連續取樣 300 秒)

0.1M Na₂CO₃ + 0.01M HCl	0.01M Na₂CO₃ + 0.01M HCl
反應完成的時間: 3.68 秒內	反應完成的時間: 1.75 秒內

(三) 結果分析：

- 1.碳酸鹽與鹽酸的反應，兩種濃度都在 2 秒內有劇烈的導電度變化。
- 2.不管濃或是稀溶液，肉眼都觀察不到氣泡(CO₂)的生成，推測在磁石攪拌的過程中，CO₂ 又反應成碳酸或是氣體太少而看不到。
- 3.高濃度者的導電度變化較劇烈，但較慢達到平衡。
- 4.雖然過程中導電度值出現上下擺盪，但反應終結時的導電度值，卻與初始的導電度值相近似，顯示此反應在反應前及反應後的離子數量差不多，印證到整個反應式中，反應物及生成物的離子解離特性，頗為吻合。



四、沉澱反應

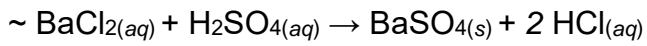


圖 7、不同濃度及加入清潔劑的沉澱反應之連續導電度變化 (600 秒內作圖)

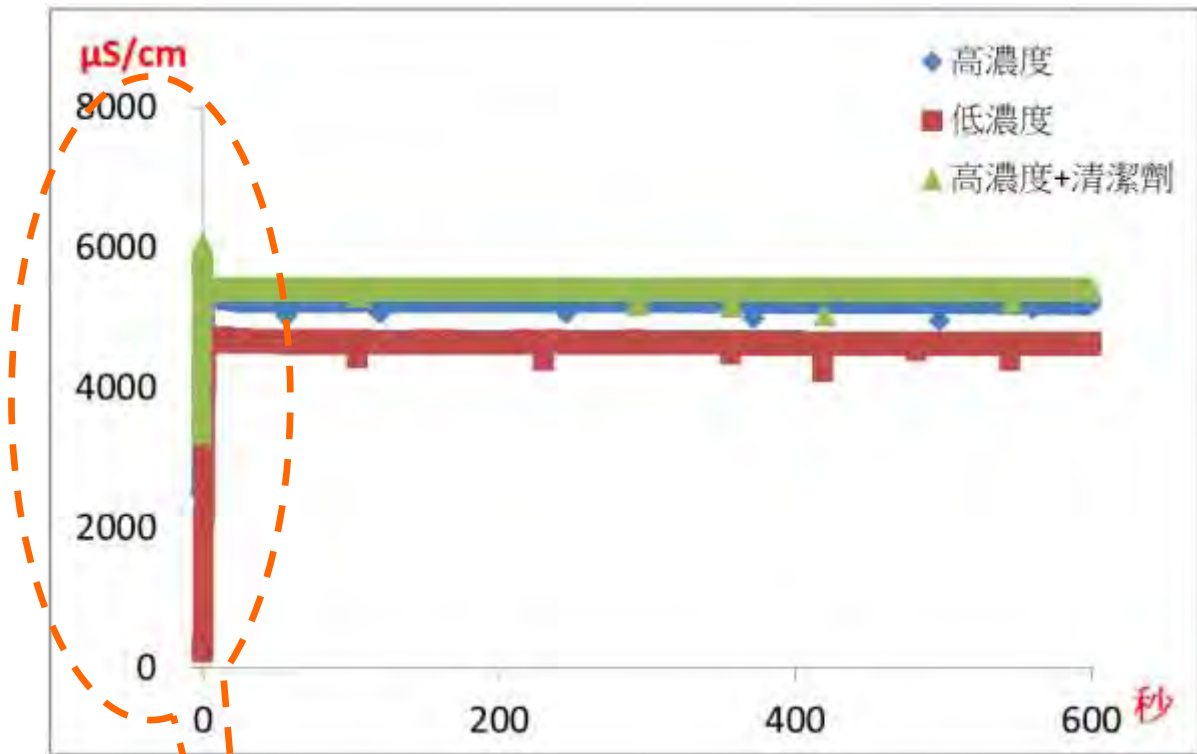
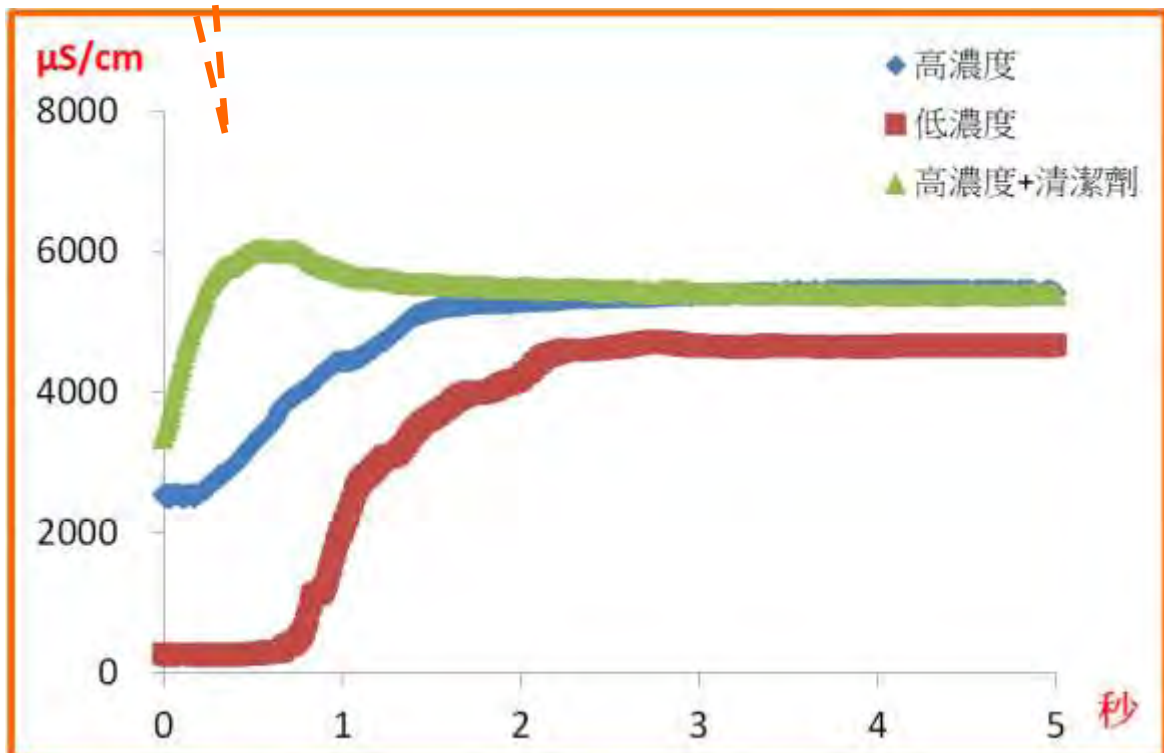


圖 8、不同濃度及加入清潔劑的沉澱反應之連續導電度變化 (5 秒內放大作圖)



(一) 相混反應前的溶液導電度：

溶液	導電度值($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.01M BaCl_2	2076
0.001M BaCl_2	181
0.01M H_2SO_4	9008

*將兩溶液同體積相混，濃度會因此減半。

(二) 數據：(每秒取樣 100 次，連續取樣 600 秒)

0.01M BaCl_2 + 0.01M H_2SO_4	0.001M BaCl_2 + 0.01M H_2SO_4	0.01M BaCl_2 + 0.01M H_2SO_4 + 清潔劑 3 滴
反應完成的時間: 約 2.10 秒內	反應完成的時間: 約 2.51 秒內	反應完成的時間: 2.08 秒內

(三) 結果分析：

- 1.以硫酸倒入 BaCl_2 溶液中，此沉澱反應的導電度由下往上增加，約在 2 秒以後逐步平緩。高濃度者的導電度在 2.10 秒後平衡，低濃度者在 2.51 秒後反應結束。
- 2.高濃度初期的反應速率較快，但高、低濃度的終結時間相差不多，推測是因為此類反應速率很快，因此兩種濃度終結的時間差異不明顯。
- 3.加入清潔劑會提高導電度，從電導度數值上，加入清潔劑似乎使沉澱反應更為快速，但由於這是極快的反應，因此推測這樣的曲線變化，還不足以說明清潔劑會影響反應速率。



五、簡單氧化還原反應 (鋅銅電池的反應)

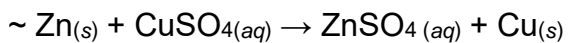


圖 9、不同濃度的氧化還原反應之連續導電度變化 (1000 秒內作圖)

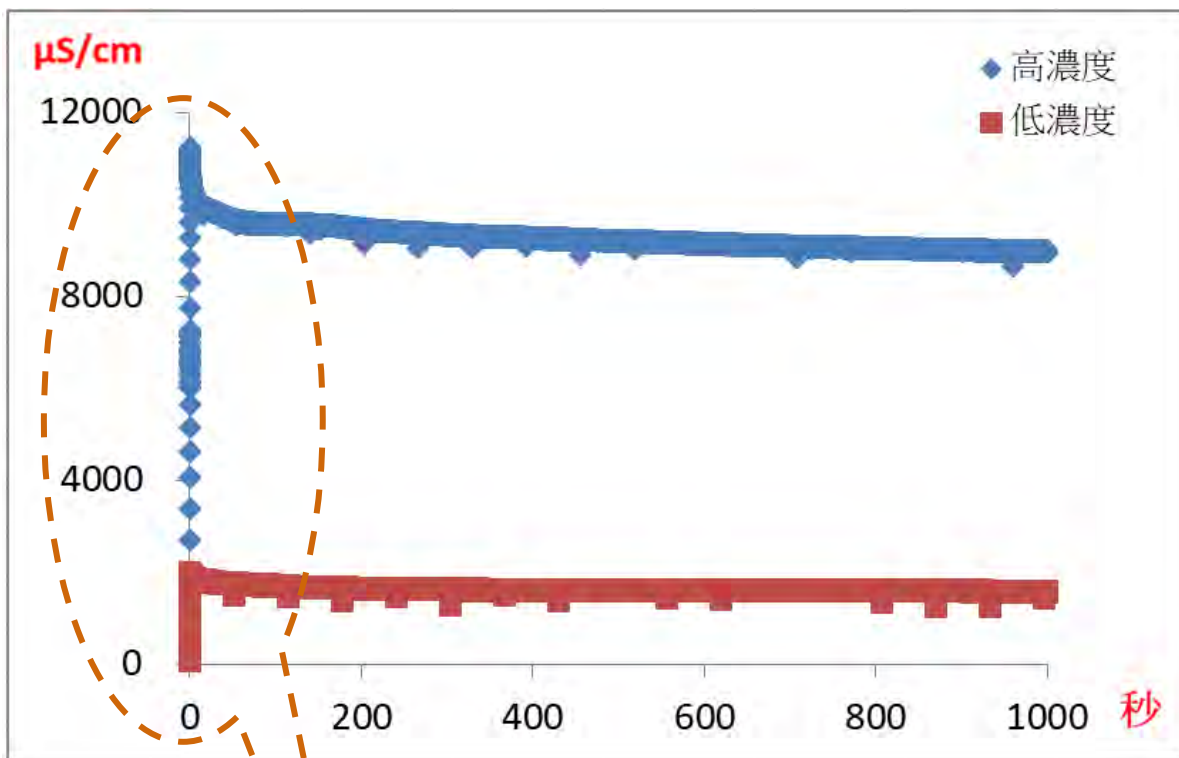
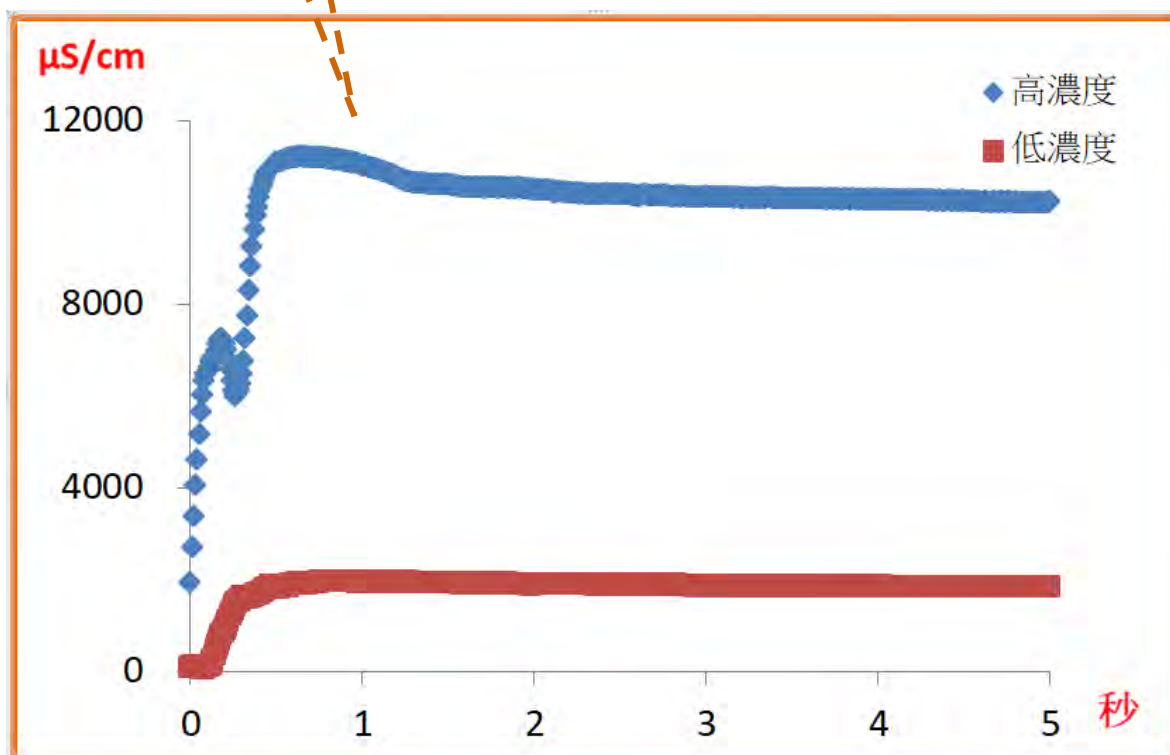


圖 10、不同濃度的氧化還原反應之連續導電度變化 (5 秒內放大作圖)



(一) 相混反應前的溶液導電度：

溶液	導電度值($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.1M CuSO_4	10801
0.01M CuSO_4	1971

*將兩溶液同體積相混，濃度會因此減半。

(二) 數據：(每秒取樣 1 次，連續取樣 1000 秒)

Zn(s) + 0.1M CuSO_4	Zn(s) + 0.01M CuSO_4
反應完成的時間: 約 929.37 秒	反應完成的時間: 約 845.20 秒

(三) 結果分析：

- 1.此反應是將鋅粉撒入 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 中，兩種濃度的 $\text{CuSO}_4(\text{aq})$ 導電度值，在 1 秒左右的變化較大，顯示初期的反應速率很快，高濃度者在最初 1 秒的平均反應速率較快。
- 2.過了 2 秒後，導電度呈緩慢下降，從圖形看來，線條雖看似乎緩，但由數據看，低濃度者在 845 秒後已不再下降，但高濃度者，則到 929 秒，數據才不再下降。
- 3.反應過程中，可由肉眼看出藍色的銅離子，顏色持續變淡，但 1000 秒的實驗過程中，藍色已幾乎看不出來，但仍有 Zn 粉剩下來。
- 4.此為非勻相反應，鋅粉顆粒在過程中逐漸變小， Cu^{2+} 離子濃度又逐漸變稀，推測是因為這樣的因素，讓兩者的反應時間延續許久才完全反應終結。
- 5.從反應式看起來，反應前後的離子數量應該不變，然而導電度曲線圖卻是由低往上升高，推測是因為 CuSO_4 及 ZnSO_4 在不同濃度下的解離度不相同所致。

六、氧化還原且有沉澱的反應 (奈米硫實驗)

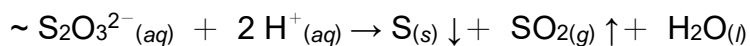
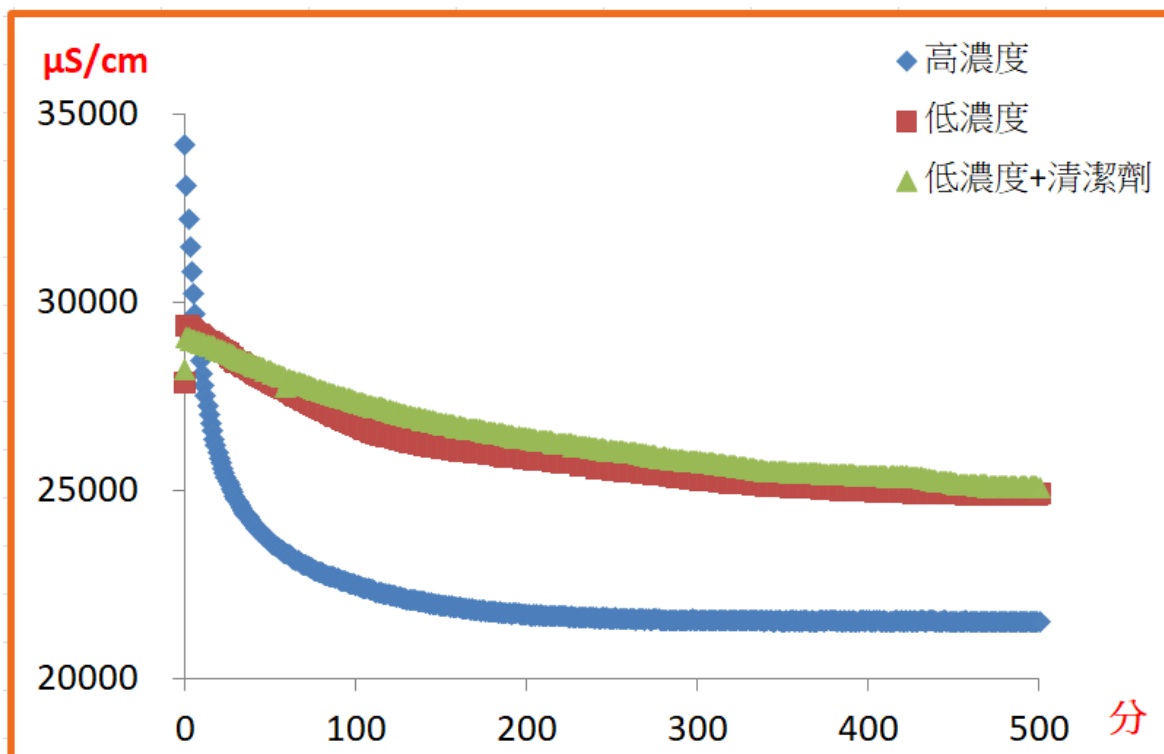


圖 11、不同濃度及加入清潔劑的奈米硫實驗之連續導電度變化 (530 分內作圖)



(一) 相混反應前的溶液導電度

溶液	導電度值($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.2M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	30400
0.02M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	4121
0.15M HCl	34952

*將兩溶液同體積相混，濃度會因此減半。

(二) 數據 (每分鐘取樣 1 次，分別連續取樣 530 分鐘)

0.2M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + 0.15M HCl	0.02M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + 0.15M HCl	0.02M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + 0.15M HCl + 清潔劑 3 滴
反應完成的時間: 約 518 分	反應完成的時間: 約 456 分	反應完成的時間: 約 477 分

(三) 以傳統的十字遮蔽法測速率與連續導電度法做比較




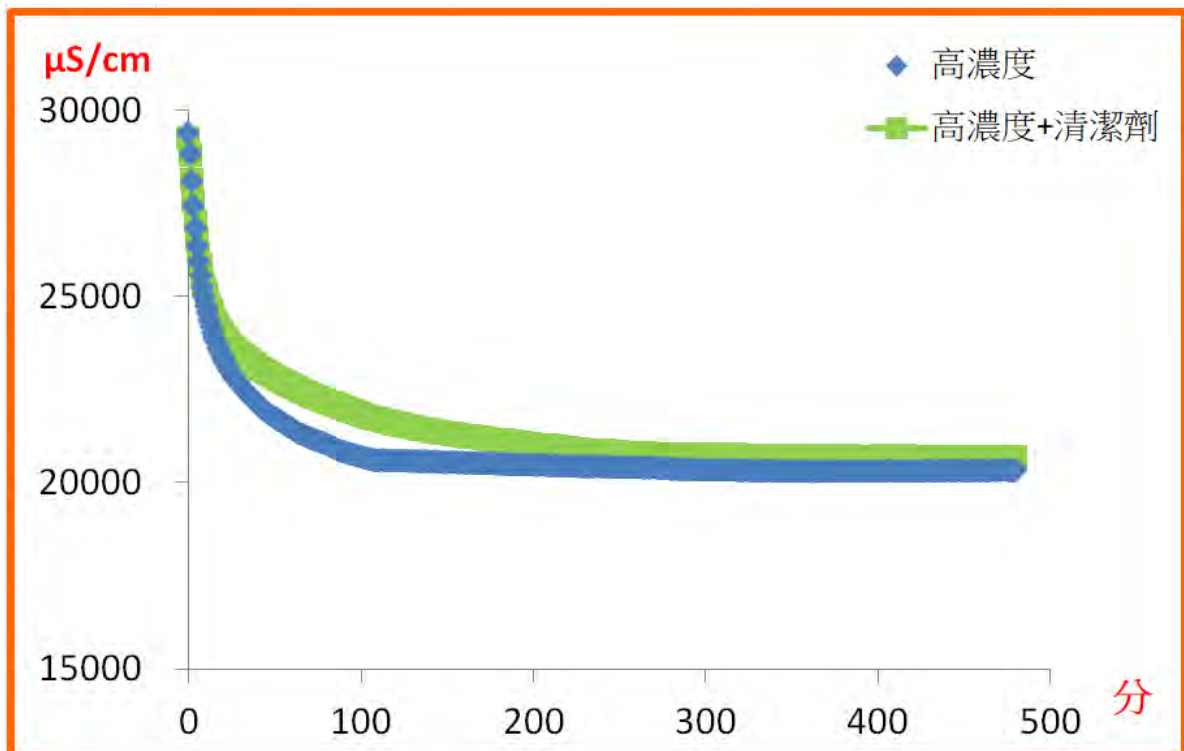
0.2M Na₂S₂O₃ + 0.15M HCl	0.2M Na₂S₂O₃ + 0.15M HCl + 清潔劑 3 滴	0.02M Na₂S₂O₃ + 0.15M HCl
遮蔽完成的時間: 約 30 秒	遮蔽完成的時間: 約 332 秒	超過 9 小時 仍未遮蔽
兩者速率相差約 10 倍		濃度太稀時無法測
		

圖 12、高濃度及加入清潔劑的奈米硫實驗之連續導電度變化 (480 分內作圖)



(四)結果分析：

- 1.濃度低者，花了約 8 小時，導電度才不再下降。
- 2.濃度高的溶液，初期導電度變化很快，但反應結束須更久，超過 8 小時，約 518 分後才反應完成。
- 3.加入清潔劑會延緩奈米硫變大顆，且會提高溶液的導電度，最後反應終結的時間較為延後，在 477 分結束反應，但從連續導電度看來，加入清潔劑對此反應速率造成的影響並不明顯。
- 4.但若以傳統的十字遮蔽法來看，加入清潔劑後，測出的時間幾近是沒加清潔劑的 10 倍，顯示十字遮蔽法藉由固體硫沉澱去觀測此反應速率的方式，只能定性的呈現固態硫顆粒遮蔽十字的時間的快慢，但用在反應速率的計算上就不適當了。
- 5.以傳統的十字遮蔽法測反應時間，低濃度的項目超過 9 小時都還無法將十字遮蔽，顯示此濃度的奈米硫產量，不足以將十字遮蔽，凸顯出十字遮蔽法的侷限之處。

七、氧化還原且碘滴定法 ~ 秒錶實驗

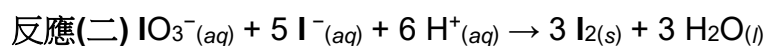
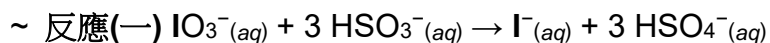
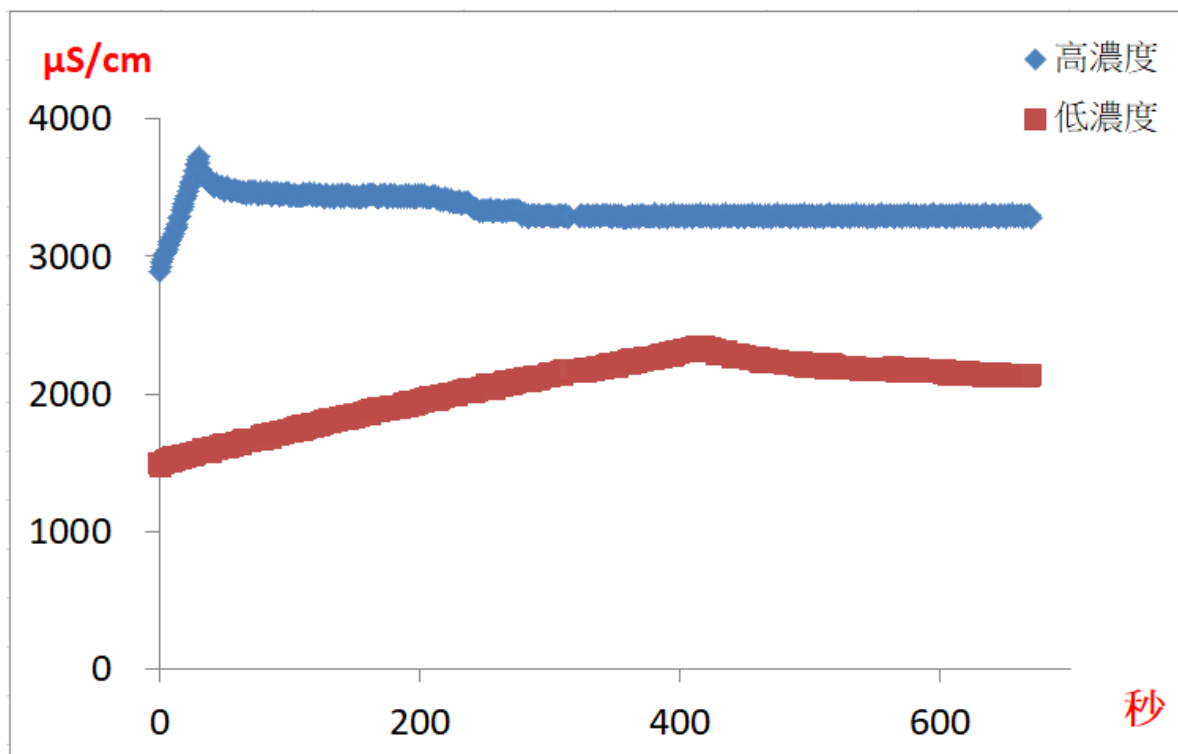


圖 13、不同濃度的秒錶實驗之連續導電度變化 (700 秒內作圖)




(一) 相混反應前的溶液導電度：

溶液	導電度值($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.02M KIO_3	2940
0.002M KIO_3	229
0.004M NaHSO_3	3626

*將兩溶液同體積相混，濃度會因此減半。

(二) 數據：(每分鐘取樣 1 次，連續取樣 700 秒)

1. 以連續導電度法與傳統澱粉指示劑法作比較：

0.02M KIO₃ + 0.004M NaHSO₃	0.002M KIO₃ + 0.004M NaHSO₃
導電度值最高時 的時間： 30 秒 (反應二開始的時間)	導電度值最高時 的時間： 391 秒 (反應二開始的時間)
澱粉指示劑變藍色 的時間： 29 秒	澱粉指示劑變藍色 的時間： 423 秒
	

2. 連續導電度法，兩個連續步驟完成的時間：

0.02M KIO₃ + 0.004M NaHSO₃	0.002M KIO₃ + 0.004M NaHSO₃
約 279 分	約 668 分

(三) 結果分析：

1. 導電度值最高時的時間，代表反應二已經開始。
2. 澱粉指示劑呈現藍色，代表 I₂ 已經生成，亦即反應二已經開始。
3. 比較連續導電度法與傳統澱粉指示劑法，兩種測速率的方式，所呈現出的時間雖然不同，但很接近。
4. 濃度高者在 30 秒即達到最高點，低濃度者在 391 秒才達最高點，顯示低濃度者反應速率較慢。
5. 濃度高者，整體反應終結的時間是 279 秒；低濃度者則是在 668 秒後，導電度才達穩定。

陸、 討 論

一、從連續導電度曲線變化，可以清楚呈現離子在反應過程中的變化，並找到反應結束時間：

- (一).透過採樣時間間隔的適當設定，就可藉以觀察到各種離子反應的導電度值變化。
- (二).即使是反應極快的中和反應，以每秒採樣 100 點的取樣設計之下，也可以看出過程中，離子變化的差異。
- (三)從導電度值的不再改變，可以確定出反應終結的時間。

二、每種離子反應的連續導電度曲線變化皆有其獨特性：

- (一).同一離子反應，雖然濃度不同，但導電度曲線的變化會很相似。
- (二).不同的反應式，即使屬於同類型的反應，導電度曲線的高低變化卻不一樣。例如三種酸鹼中和反應的圖形皆不同，兩種氧化還原反應的圖形也不同。
- (三).連續導電度曲線的獨特性，或許未來可以累積成資料庫，作為鑑別離子反應的用途。

三、連續導電度圖在反應速率的議題中，可方便作為離子反應在定性及定量上的分析比較：

- (一).酸鹼中和反應牽涉的鍵結破壞很少，反應極快，研究中的三種中和反應，即使是高濃度溶液，也在 2 秒左右就已反應完成。
- (二).沉澱反應也很快，也約莫 2 秒即可完成，但奈米硫因為涉及到沉澱及電子得失，所以反應就顯得很慢，高濃度者甚至到 8 小時以上。
- (三).高中課程中，提到反應速率的快慢，是酸鹼中和最快，沉澱反應次之，氧化還原排第三，且反應涉及的化學鍵愈多，反應愈慢；教材上所陳述的離子反應速率上的比較，可在連續導電度圖中，簡單而清楚的獲得了印證。
- (四).從連續導電圖的起伏變化，也可從中分析離子反應中，離子數量的增減情形，由於各種離子化合物在不同濃度下的解離度並不同，因此導電度值與溶液濃度沒有成正比，但仍可以藉由校正曲線的製作，去對應出不同濃度下的導線度值，再去做定量上的討論。例如 0.1M CuSO_4 導電度值是 $10801\mu\text{S}/\text{cm}$ ，0.01M CuSO_4 是 $1971\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

四、濃度愈濃，初期的反應速率愈快，但反應終結所需的時間卻愈長：

- (一).濃度愈濃，粒子的有效碰撞頻率愈大，所以反應速率快。
- (二).濃度愈濃，粒子愈多，但反應到後期時，粒子數量漸減，反應速率逐漸變慢，整體花費的時間卻更長，此點跟我們研究前的預期不太一樣。

五、加入清潔劑對沉澱反應的影響不顯著：

- (一).加入清潔劑使導電度提高，但曲線的波動卻沒有明顯的差別。
- (二).清潔劑具有物理性的包覆及干擾作用，會延緩奈米硫變大顆，明顯增長十字遮蔽的時間；但從連續導電度看來，界面活性劑對離子沉澱反應的影響不大，因此顛覆原先的推測，但這也彰顯連續導電度法對奈米硫實驗的測量，比十字遮蔽法更為準確。

六、在奈米硫的實驗中，連續導電度法，比傳統的十字遮蔽法及透光度法，更可以明確找到反應終結的時間：

- (一).無論是十字遮蔽法或是透光度法，測到的都是氧化還原加上沉澱反應的時間之和，連續導電度法則可以直接量測到氧化還原的時間。
- (二).十字遮蔽法及文獻中的透光度法，都是透過固態硫的生成而測得時間，然而一但硫的沉澱量太少時，就會有遮蔽度不足的問題，且這兩種方式測得的時間，都只是固態硫恰把十字或是光線遮蔽的時間，不是反應真正結束的時間。
- (三).以肉眼觀察沉澱量、氣泡的產生或是顏色變化，都會有很大誤差，但連續導電度法卻是用更科學的方式，確認出反應結束時間。

七、具有數個反應機構的反應式，可以在連續導電度的變化圖中獲得印證：

- (一).秒錶實驗涉及兩個連續反應機構，在連續導電度的圖形中，可以看出兩個明顯不同的曲線圖形相互銜接。
- (二).導電度值達最高時，代表反應二已經開始，但卻不表示反應一已結束，因此反應一的反應終結時間就無法判定。若不是因為反應一產生的 I^- 會跟自己的 IO_3^- 反應，導電度值不會因此開始下降。
- (三).以傳統的澱粉指示劑變色來觀察秒錶實驗反應二的進行，測出的時間很接近電導度計測試的結果，但以儀器測速率會更精準。

(四).達高點之後的所有導電度，包含了反應一及反應二所有離子的總和，所以秒錶實驗只能比較出高點之前的反應速率快慢，當反應二的曲線開始出現後，就看不到反應一的持續變化了。

八、連續導電度法的限制：

(一).導電度測定速率的限制之一，是濃度過高的溶液，會因為電導度值太高，超過儀器可以量測的範圍，以致無法量測。此限制或可透過溶液的稀釋，或是未來針對電導度計感測頭的改良而予以解決。

(二).具有反應機構的離子反應式，雖然可以在連續導電度曲線變化中看出相關反應的銜接，但卻無法找出此類反應中單一反應式的確實完成時間，然而還是可以在曲線的波動及曲線轉折上，得到定性上的解釋。

柒、 結 論

一、藉由**連續導電度**的測定，我們不但可以看到離子數的**變化歷程**，也能利用導電度值的不再改變，簡單而**清楚的判斷出反應結束的時間**，並計算出反應速率。

二、每種離子反應的**連續導電度圖**都有其**獨特性**，即使反應極快的酸鹼中和及沉澱反應，也能透過每秒取樣 100 次的取樣設定，作**定性與定量上的探討**。

三、溶液濃度較高者，初期的反應都較為快速，但因為**反應物較多**，所以通常**需要花比較多的時間才能反應終結**。

四、利用連續導電度進行奈米硫的實驗，**能單純的測出氧化還原反應完成的時間**，並且比利用肉眼觀測硫沉澱的方式來的精確許多，同時，也能補足傳統十字遮蔽法及透光法中，因為濃度太稀，硫沉澱不足以將光遮蔽而致使實驗失效的缺點。

五、在秒錶實驗當中，連續導電度法不但比傳統的澱粉指示劑法更能精準的判斷出反應完成的時間，同時也能從導電度圖中，**清楚呈現出此反應是由兩個反應機構所組成**，從中並可以找到第二階段反應開始的時間。

六、只要是跟離子有關的反應，都可以運用**連續導電度圖**，作教學及研究上的應用。

捌、參考資料及其他

- 一. 陳秋炳(2016)。《第二章、反應速率》。高中基礎化學(三)。翰林出版社。
- 二. 陳秋炳(2017)。《第八章、化學的應用與發展》。高中選修化學(下)。翰林出版社。
- 三. 中華民國第 51 屆中小學科學展覽會化學科最佳團隊合作獎。「硫晶」歲月—自製偵測器探討硫代硫酸鈉與鹽酸之反應速率。新竹市立光華國民中學。葉亦心等。
- 四. 臺灣 2002 年國際科學展覽會化學科第一名。界面活性劑對硫奈米微粒形成機制的影響。臺北市立第一女子高級中學。李祐慈。
- 五. 中華民國第 53 屆中小學科學展覽會。非「硫」不可？新北市立五峰國民中學。陳願之等。
- 六. 其他

(一) 電導度的測定原理 (國立高雄應用科技大學。物理化學實驗。液體導電度測定。)

1. 導電度之大小為水中電解質含量多寡之指標，代表水溶液導電之能力。

2. 導電度 (Conductivity) 為將電流通過 1 cm^2 截面積，長 1 cm 之液柱時，電阻 (Resistance) 之倒數，單位為姆歐/公分 (mho / cm)，導電度較小時以其 10^{-3} 或 10^{-6} 表示，記為 mmho / cm 或 $\mu\text{mho} / \text{cm}$ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) 。

(二) 七項研究的部分實驗數據：

研究一、強酸強鹼的中和反應 $\sim \text{HCl}_{(aq)} + \text{NaOH}_{(aq)} \rightarrow \text{NaCl}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$

0.1M HCl + 0.1 M NaOH		0.01M HCl + 0.1 M NaOH	
秒	導電度 $\mu\text{S}/\text{cm}$	秒	導電度 $\mu\text{S}/\text{cm}$
0	24262	0	10137
0.01	24273	0.01	10013
~	~	~	~
0.05	24194	1.59	12327
~	~	~	~
3.28	12835	1.67	12339
3.29	12847	1.68	12339
反應完成的時間： 約 3.28 秒內		反應完成的時間： 約 1.59 秒內	

研究二、弱酸弱鹼的中和反應

0.1M CH ₃ COOH + 1 M NH ₄ OH		0.1M CH ₃ COOH + 0.1 M NH ₄ OH	
秒	導電度 μS/cm	秒	導電度 μS/cm
0	4165	0	371
0.01	4243	0.01	359
~	~	~	~
2.91	6671	2.63	3803
2.92	6648	2.64	3792
~	~	~	~
3.03	6648	2.73	3803
3.04	6660	2.74	3781
反應完成的時間： 約 2.92 秒 內		反應完成的時間： 約 2.63 秒 內	

研究三、酸鹼中和且生成氣體的反應

0.1M Na ₂ CO ₃ + 0.01M HCl		0.01M Na ₂ CO ₃ + 0.01M HCl	
秒	導電度 μS/cm	秒	導電度 μS/cm
0	9618	0	2719
0.01	9302	0.01	2696
~	~	~	~
3.67	10611	1.74	2821
3.68	10589	1.75	2810
~	~	~	~
3.86	10589	2.17	2798
3.87	10578	2.18	2810
反應完成的時間： 約 3.68 秒 內		反應完成的時間： 約 1.75 秒 內	

(部分數據省略)

研究四、沉澱反應

0.01M BaCl ₂ + 0.01M H ₂ SO ₄		0.001M BaCl ₂ + 0.01M H ₂ SO ₄		0.01M BaCl ₂ + 0.01M H ₂ SO ₄ + 清潔劑 3 滴	
秒	導電度 μS/cm	秒	導電度 μS/cm	秒	導電度 μS/cm
0	2538	0	271	0	3343
0.01	2493	0.01	248	0.01	3433
~	~	~	~	~	~
2.08	5293	2.49	4624	2.08	5474
2.1	5304	2.51	4635	2.09	5474
~	~	~	~	~	~
2.22	5304	3.02	4658	2.36	5474
反應完成的時間： 約 2.10 秒 內		反應完成的時間： 約 2.51 秒 內		反應完成的時間： 約 2.08 秒 內	

研究五、簡單氧化還原反應 (鋅銅電池的反應)

Zn(s) + 0.1M CuSO ₄		Zn(s) + 0.01M CuSO ₄	
秒	導電度 μS/cm	秒	導電度 μS/cm
0	1951	0	100
0.01	2696	0.01	111
~	~	~	~
929.36	8997	845.19	1601
929.37	8974	845.20	1579
~	~	~	~
999.98	8974	999.97	1579
反應完成的時間： 約 929.37 秒		反應完成的時間： 845.20 秒	

(部分數據省略)

研究六、氧化還原且有沉澱的反應（奈米硫實驗）

0.2M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl		0.02M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl		0.02M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl + 清潔劑 3 滴	
分	導電度 μS/cm	分	導電度 μS/cm	分	導電度 μS/cm
0	34219	0	27856	0	28217
1	33100	1	29370	1	29076
~	~	~	~	~	~
518	21447	456	24872	477	25098
~	~	~	~	~	~
529	21447	530	24872	525	25098
反應完成的時間： 518 分		反應完成的時間： 456 分		反應完成的時間： 477 分	

研究七、氧化還原且碘滴定法 ~ 秒錶實驗

0.02M KIO ₃ + 0.004M NaHSO ₃		0.002M KIO ₃ + 0.004 MNaHSO ₃	
秒	導電度 μS/cm	秒	導電度 μS/cm
0	2889	0	1487
1	2923	1	1465
~	~	~	~
30	3726 (最高)	391	2302 (最高)
~	~	~	~
279	3296 (低點)	668	2120 (低點)
~	~	~	~
700	3296	696	2120
兩個連續反應完成的 時間： 279 分		兩個連續反應完成的 時間： 668 分	

(部分數據省略)

【評語】 050205

導電實驗簡單容易執行，很適合高中生動手做，但創意稍嫌不足。除了反應結束點外，反應動力學的推導亦可再進一步探討，數據分析可再深入。濃度擴散及電極極化都可能造成偵測靈敏度的限制，亦可考慮電流的量測。

『導』數計時

~由連續導電度的變化探討離子的反應速率

前言

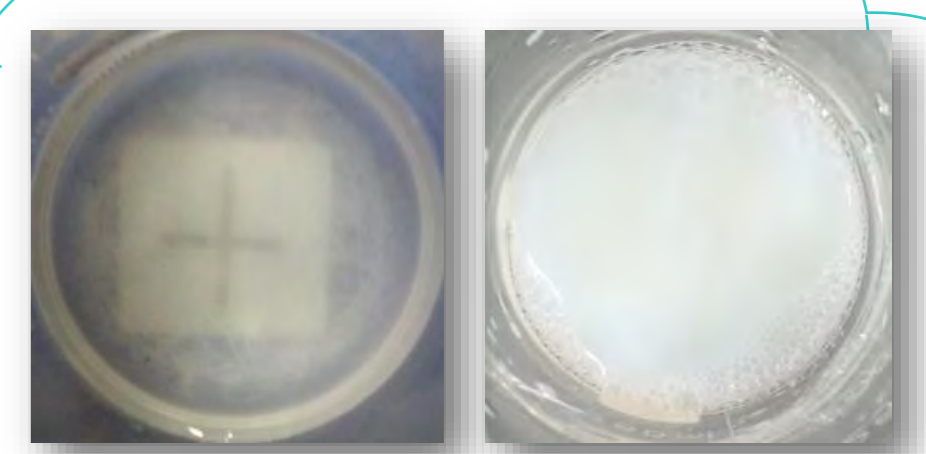
高中介紹各種反應的速率比較，但卻缺少實際觀察各種反應快慢的方式；本研究發現，可藉由**連續導電度**測量，從導電度的變化曲線中，觀察到各種離子反應在過程中的離子變化特徵，也可以**找到準確的反應終結時間**，並做定性及定量上的運用。

研究動機來自老師帶領我們做奈米硫的實驗，以硫沉澱遮蔽燒杯底部十字的方式，比較不同濃度下的反應速率；實驗結束後，老師提及這個方法實際上測到的速率，是氧化還原反應及硫沉澱的兩種速率之和，於是我們想利用電導度計，去連續測定此實驗的導電度變化，找出單純氧化還原反應終結時的時間，進而算出反應速率，我們也以此法測量高中化學涉及的**幾種常見的離子反應**，以做比較。

透過取樣時間的適當設計，可觀察到每種離子反應的導電度波動都很獨特，相同的離子反應，導電度曲線的起伏很相似，可做為**鑑別離子反應類型之用**。從秒錶實驗的導電度圖中，還可看出**兩個反應機構的交替過程**。

另外，文獻提及，界面活性劑具有保護奈米硫的作用，會延緩奈米硫變大顆，我們想知道界面活性劑是否也會因此延緩沉澱反應的進行，因此針對有沉澱物的反應，也加入了界面活性劑做為變因。研究結果發現，在反應速率的研究及教學上，**連續導電度法提供了簡便而準確的方法**。

使用藥品



化學式	HCL	NaOH	H ₂ SO ₄	NH ₄ OH	Na ₂ CO ₃	BaCl ₂	CuSO ₄	Na ₂ S ₂ O ₃	CH ₃ COOH	Zn	KIO ₃	NaHSO ₃
毒性	造成眼睛、鼻子、喉嚨、支氣管及皮膚之刺激感							食入造成噁心、嘔吐	高濃度溶液或純醋酸會引起深度灼傷	造成發燒噁心嘔吐 心血管失調	造成眼睛嚴重刺激	長期暴露可能引起敏感、結膜炎
外觀(常溫下)	無色液體	白色顆粒狀	無色液體	無色液體	無色至白色粉末	無色固體結晶	白色或藍色固體	無色固體	無色液體	灰色粉塵	無色液體	白色固體

設備&藥品

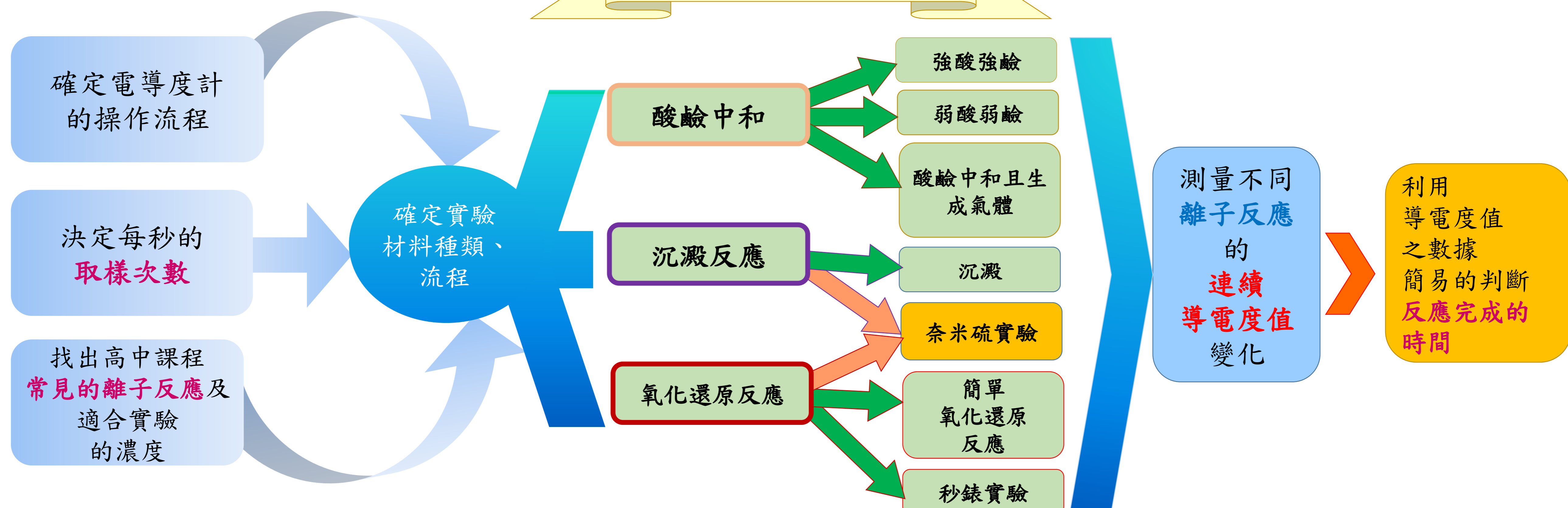
設備	電導度計、磁力攪拌器(右圖所示)
材料	清潔劑(白熊洗碗精, 陰離子界面活性劑)



電導度計(探針)

電導度計(主螢幕)

研究過程&方法



研究結果

實驗前想法：

- (一)、從導電度的取樣過程中，可以由導電度值的不再改變，簡單而清楚地判斷出反應結束的時間，進而算出平均反應速率。
- (二)、藉由反應結束的時間，能比較各種類型的離子反應快慢。
- (三)、溶液濃度愈高，粒子的碰撞頻率愈大，反應速率就愈快，反應結束的時間會較快。
- (四)、界面活性劑會延緩奈米硫的顆粒變大顆，**推測**添加清潔劑後，可能會影響其他沉澱反應的進行。

一、氧化還原且有沉澱的反應 (奈米硫實驗)



反應完成時間：

0.02M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl	約477分
0.02M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl	約456分
0.2 M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl	約518分

◎綠色標記為加入清潔劑 (3滴)

和傳統方式比較

0.2M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl	0.2M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl + 清潔劑3滴	0.02M Na ₂ S ₂ O ₃ + 0.15M HCl
遮蔽完成的時間：約30秒	遮蔽完成的時間：約332秒	超過9小時仍未遮蔽
兩者速率相差約10倍		濃度太稀時無法測

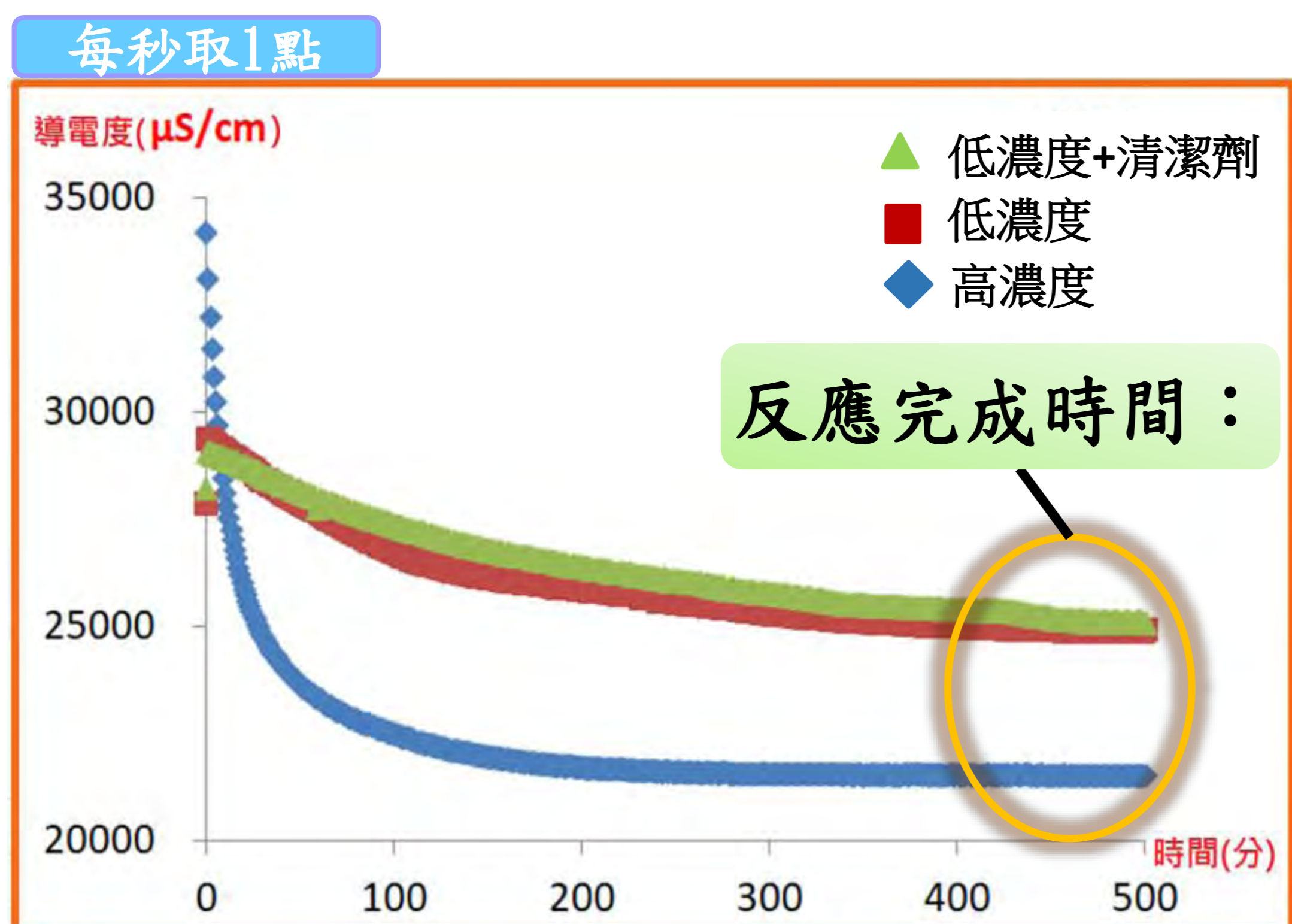


圖1-1、不同濃度及加入潔劑的奈米硫實驗之導電度變化

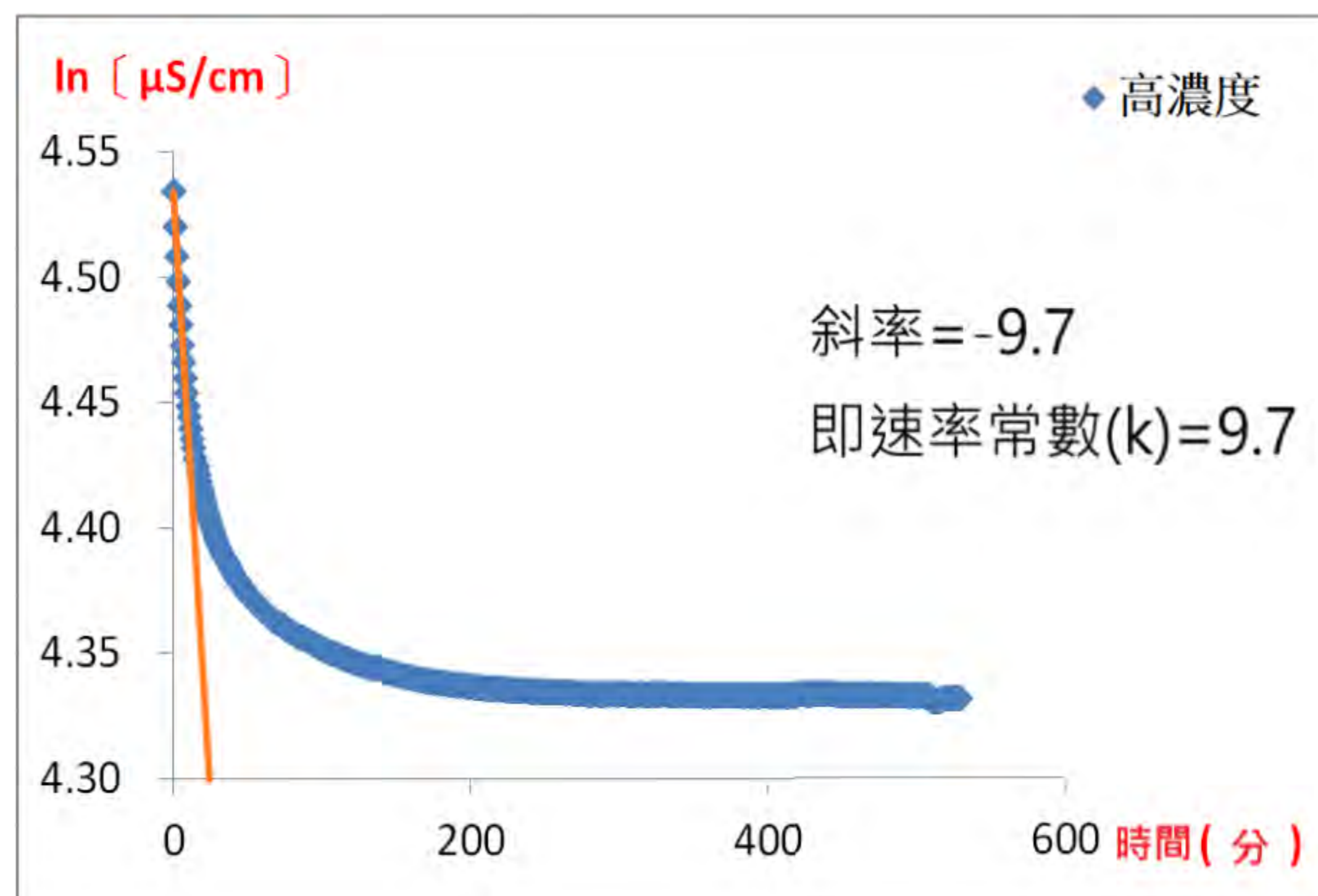
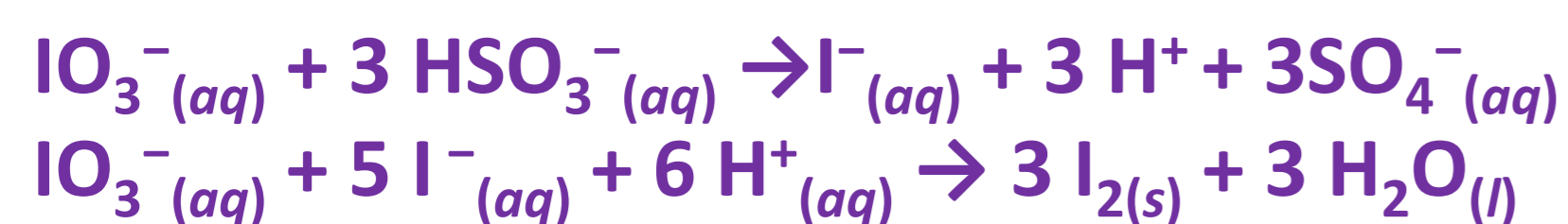


圖1-2、由連續導電度曲線試算一級反應的速率常數(k)

二、氧化還原且碘滴定法 ~ 秒錶實驗



反應完成時間：

0.02 M KIO ₃ + 0.004M NaHSO ₃	約279秒
0.002M KIO ₃ + 0.004M NaHSO ₃	約668秒

和傳統方式比較

	連續導電度法	傳統方式比較
0.02M KIO ₃ + 0.004M NaHSO ₃	導電度值最高時的時間：30秒 (即反應一開始的時間)	澱粉指示劑變藍色的時間：29秒
0.002M KIO ₃ + 0.004M NaHSO ₃	導電度值最高時的時間：391秒 (即反應一開始的時間)	澱粉指示劑變藍色的時間：423秒

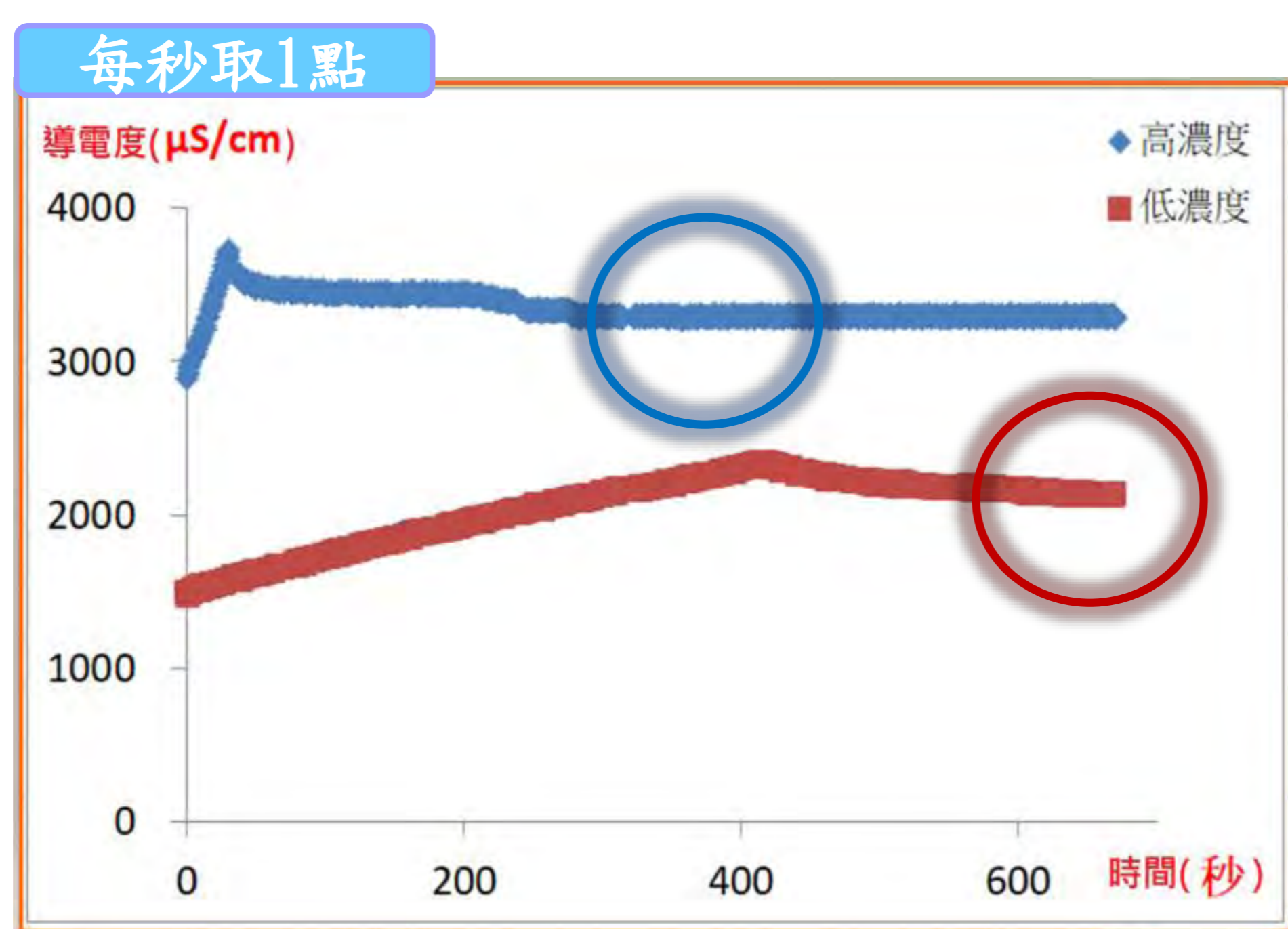
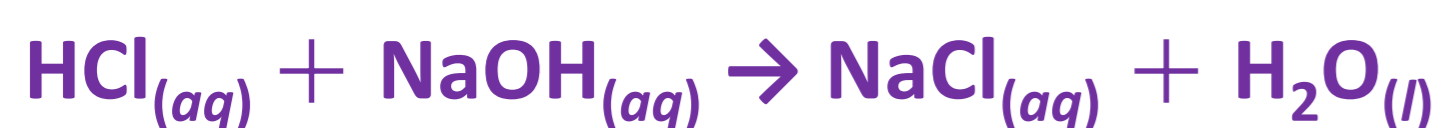


圖2-1、不同濃度的秒錶實驗之導電度變化



三、強酸強鹼的中和反應



反應完成時間：

0.1M HCl + 0.1 M NaOH	約3.28秒
0.01M HCl + 0.1 M NaOH	約1.59秒

四、弱酸弱鹼的中和反應



反應完成時間：

0.1M CH ₃ COOH + 1 M NH ₄ OH	約2.92秒
0.1M CH ₃ COOH + 0.1 M NH ₄ OH	約2.63秒

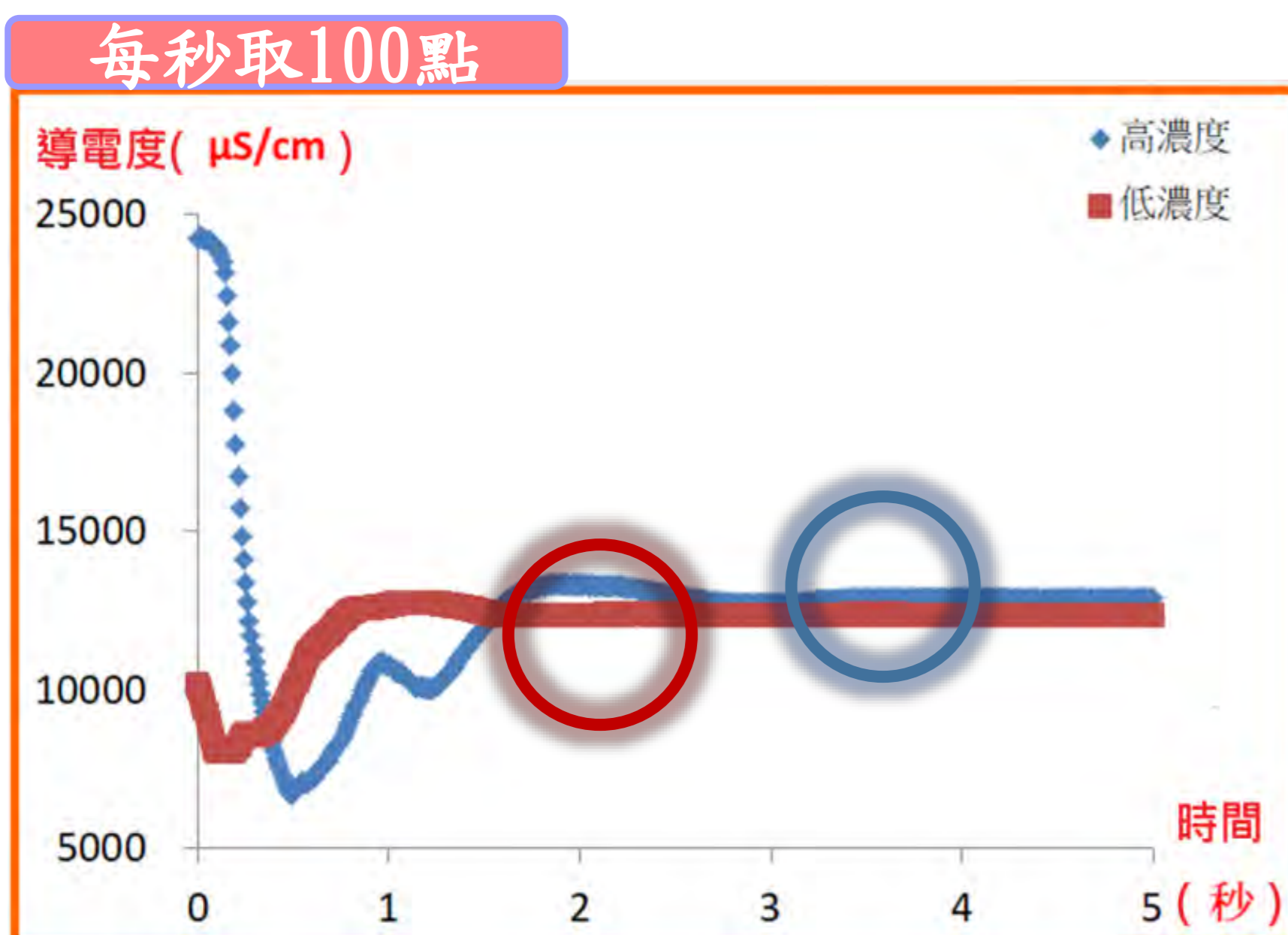


圖3-1、不同濃度的強酸強鹼中和反應之導電度變化 (前5秒內放大作圖)

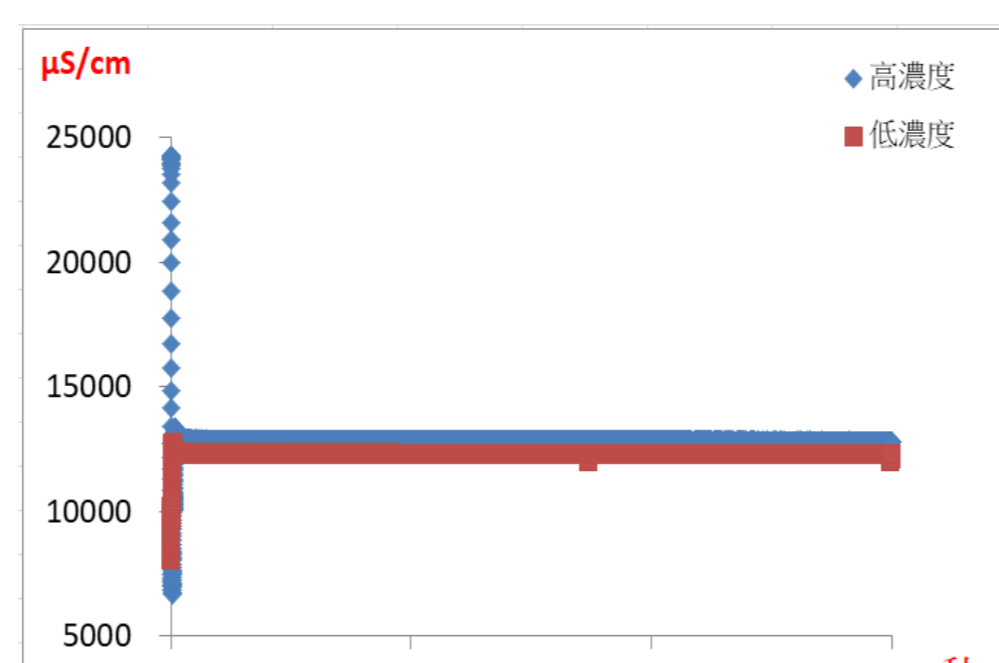


圖3-2、不同濃度的強酸強鹼中和反應之導電度變化 (300秒內作圖)

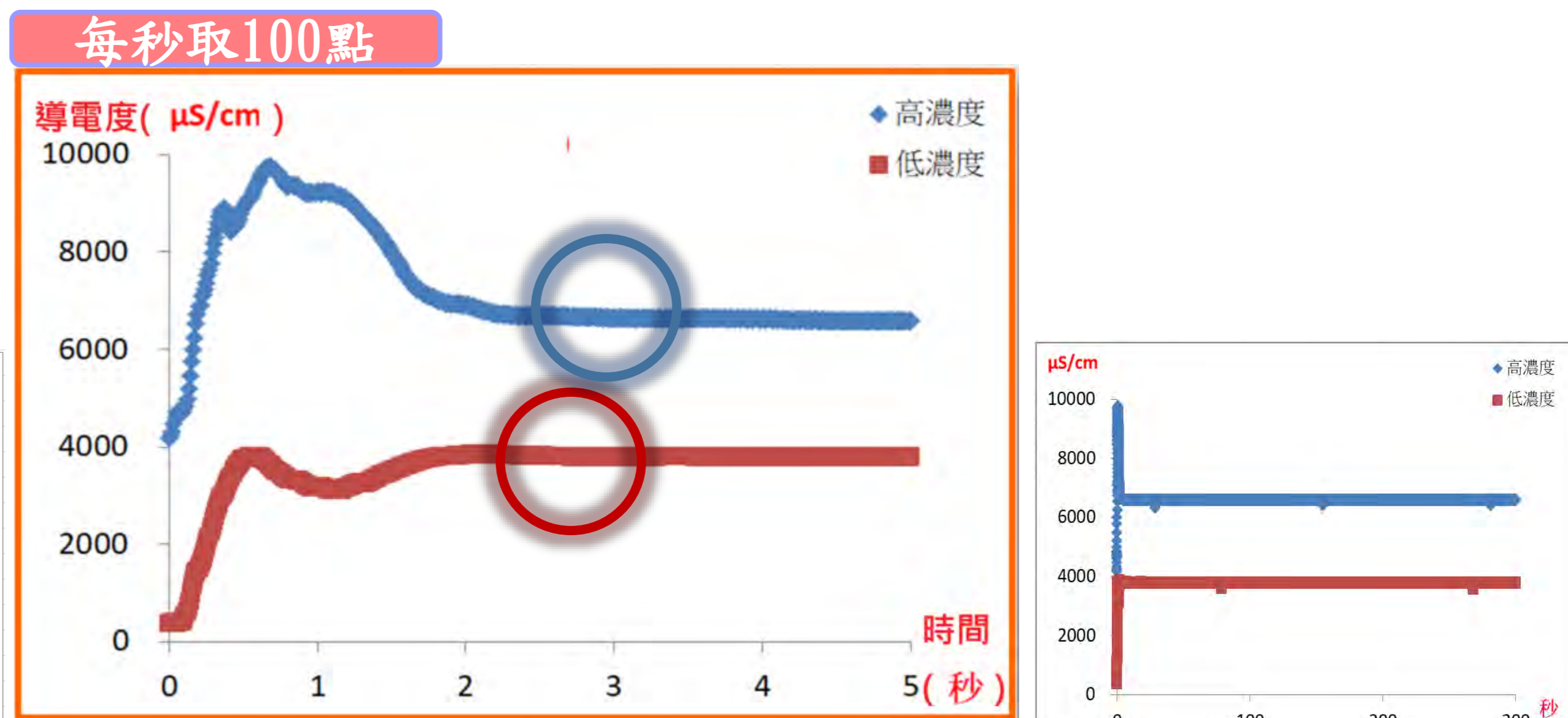


圖4-1、不同濃度的弱酸弱鹼中和反應之導電度變化

五、酸鹼中和且生成氣體的反應



反應完成時間：

0.1 M Na_2CO_3 + 0.01M HCl	約3.68秒
0.01M Na_2CO_3 + 0.01M HCl	約1.75秒

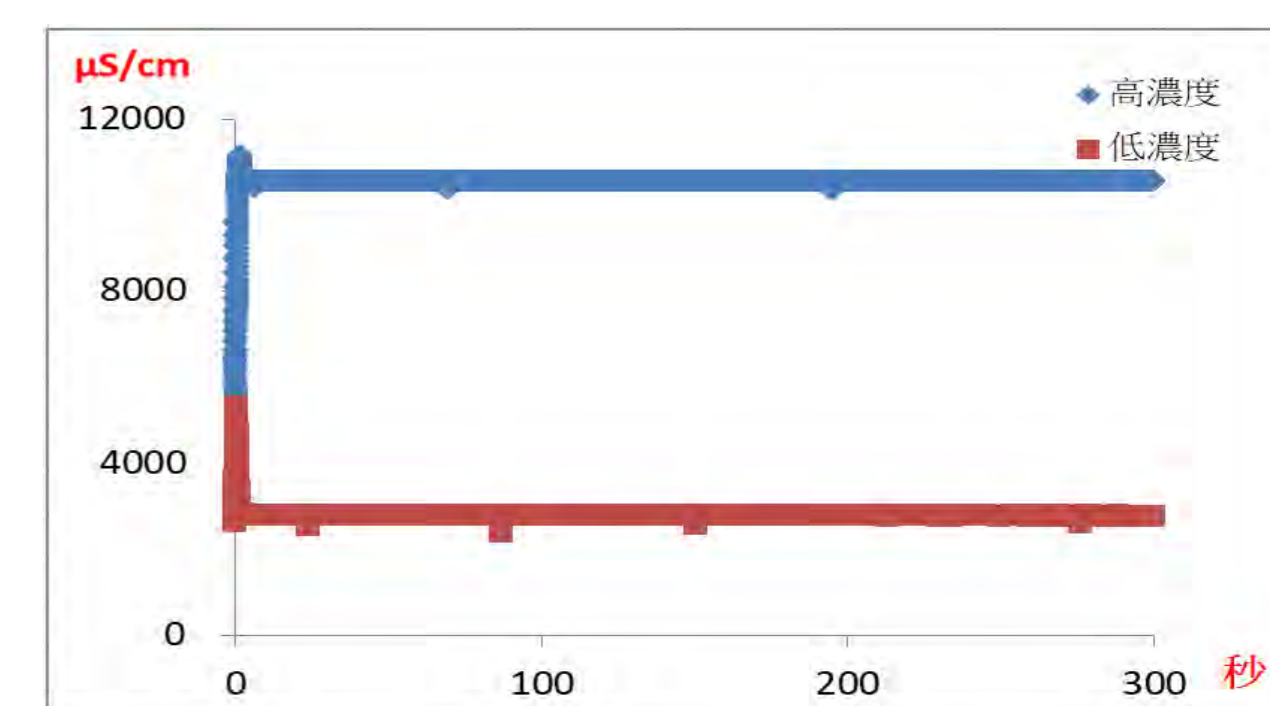
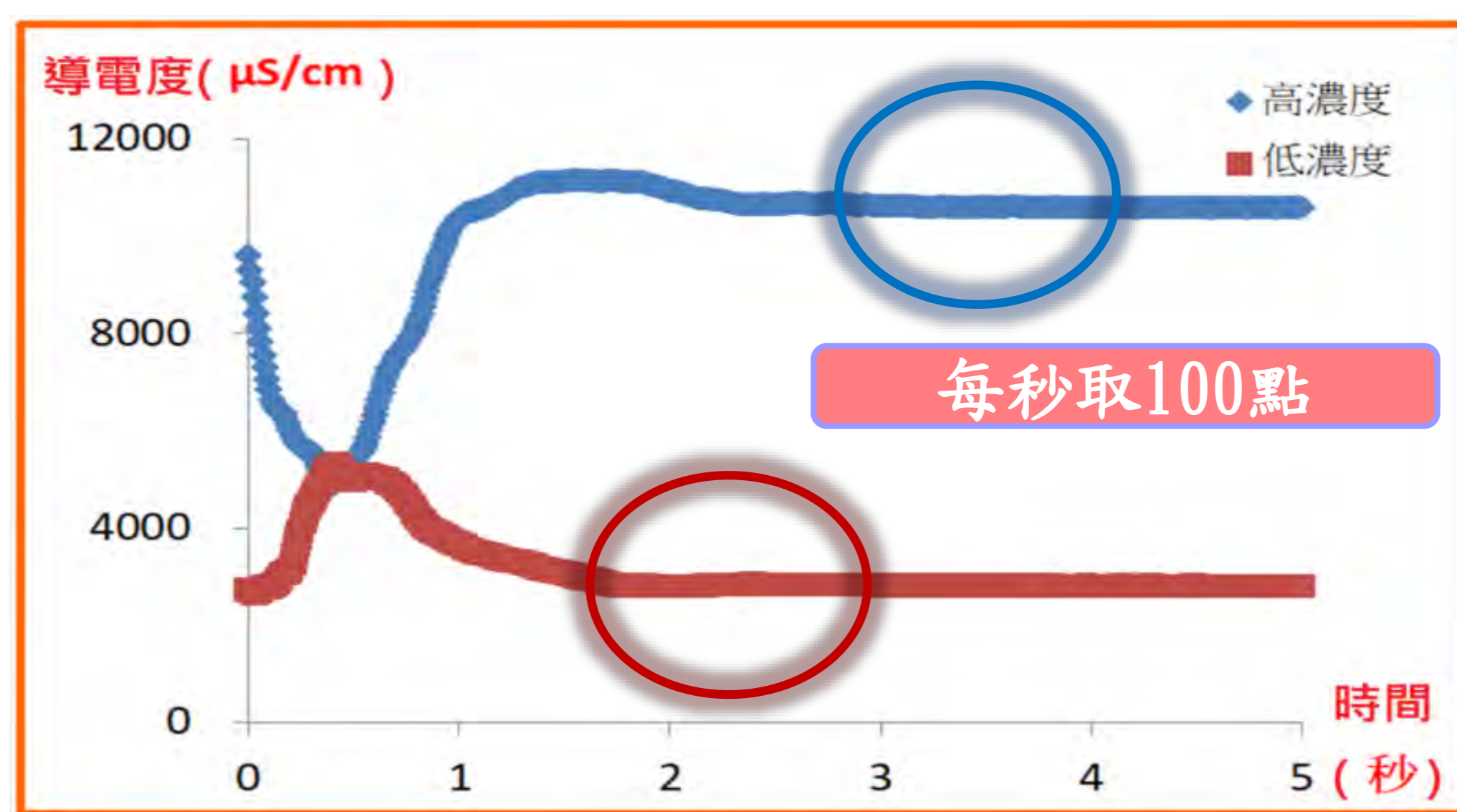
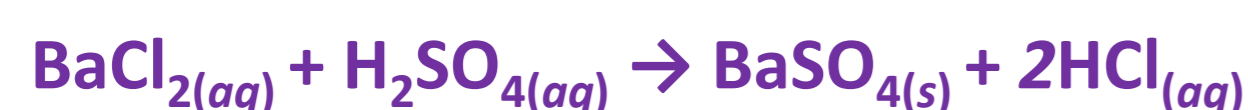


圖5-1、不同濃度的碳酸鈉與鹽酸中和反應之導電度變化

六、沉澱反應



反應完成時間：

0.01 M BaCl_2 + 0.01M H_2SO_4	約2.08秒
0.01 M BaCl_2 + 0.01M H_2SO_4	約2.10秒
0.001M BaCl_2 + 0.01M H_2SO_4	約2.51秒

◎綠色標記為加入清潔劑(3滴)

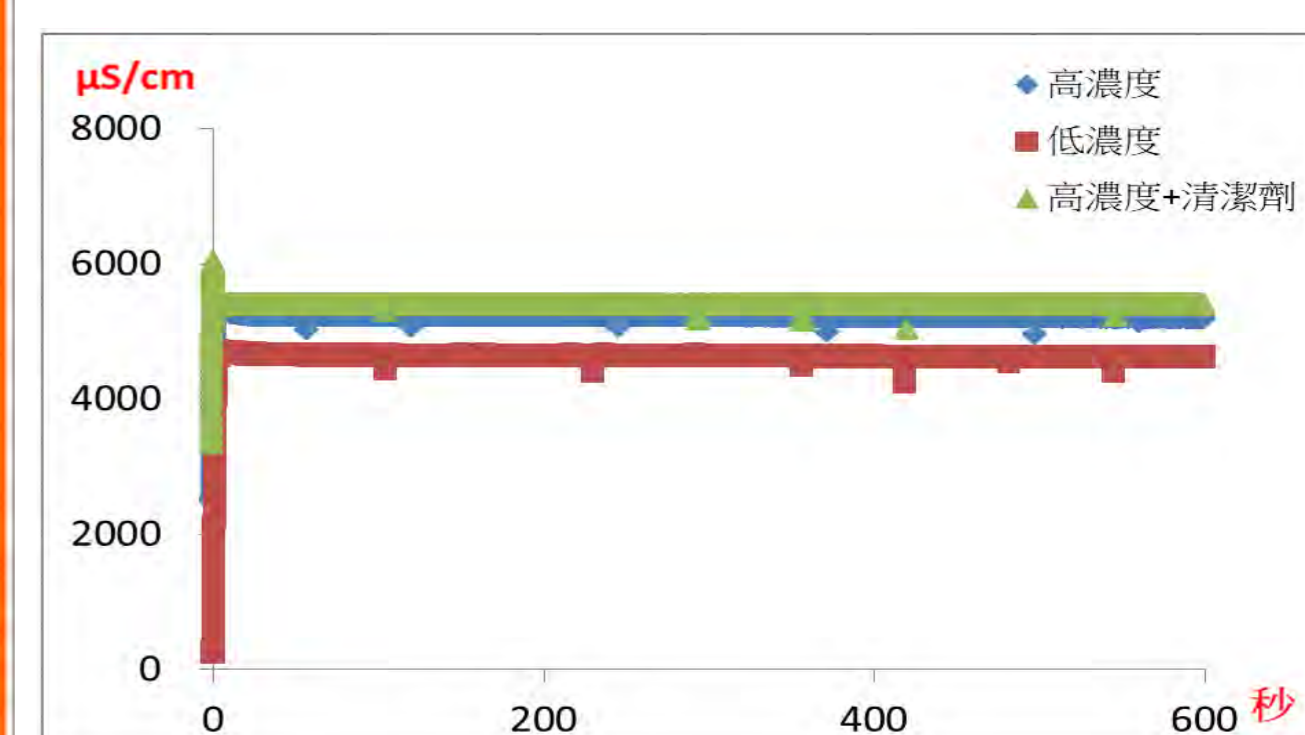
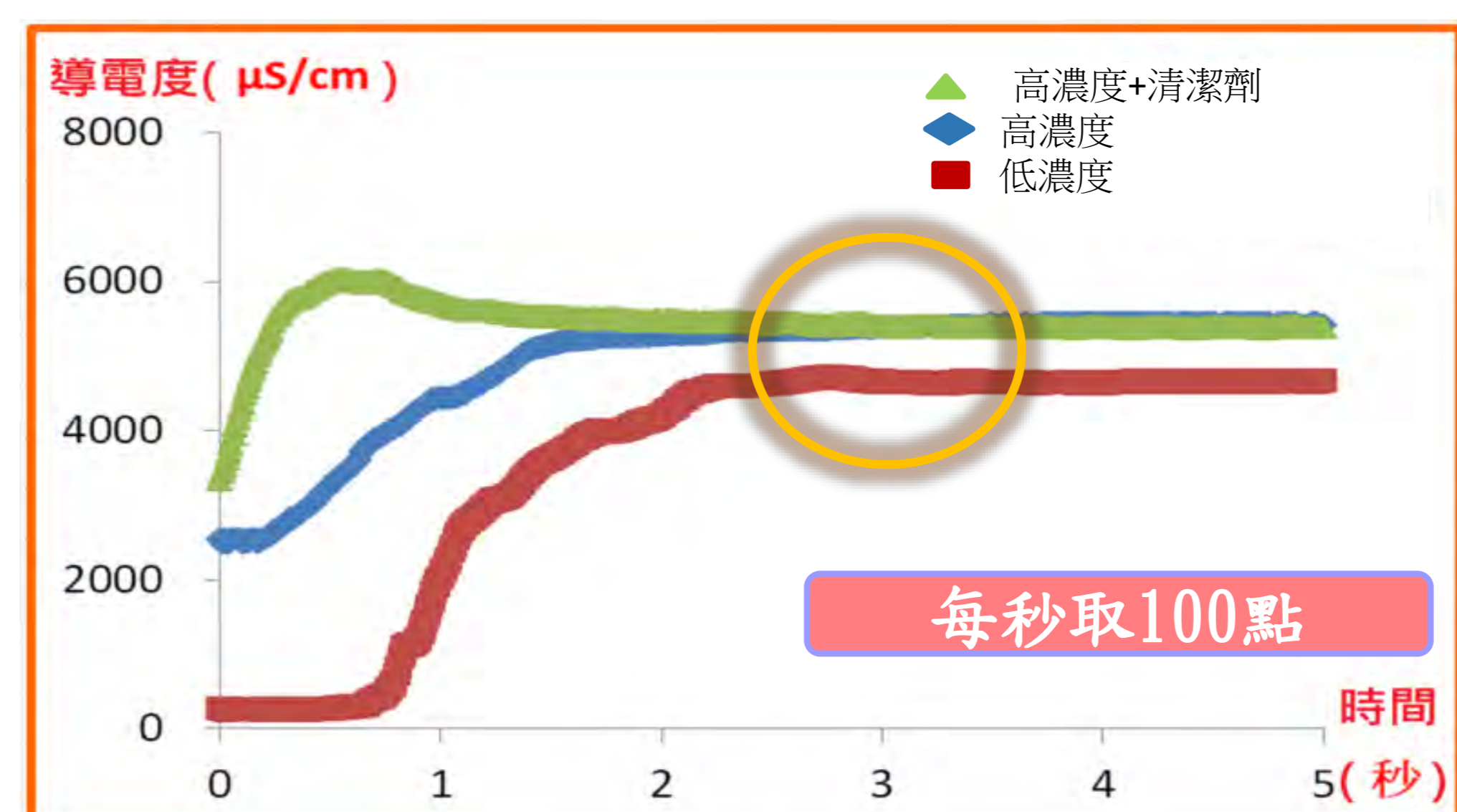


圖6-1、不同濃度的碳酸鈉與鹽酸中和反應之導電度變化

七、簡單氧化還原反應 (鋅銅電池的反應)



反應完成時間：

$\text{Zn}(\text{s})$ + 0.1M CuSO_4	約929.37秒
$\text{Zn}(\text{s})$ + 0.01M CuSO_4	約845.20秒

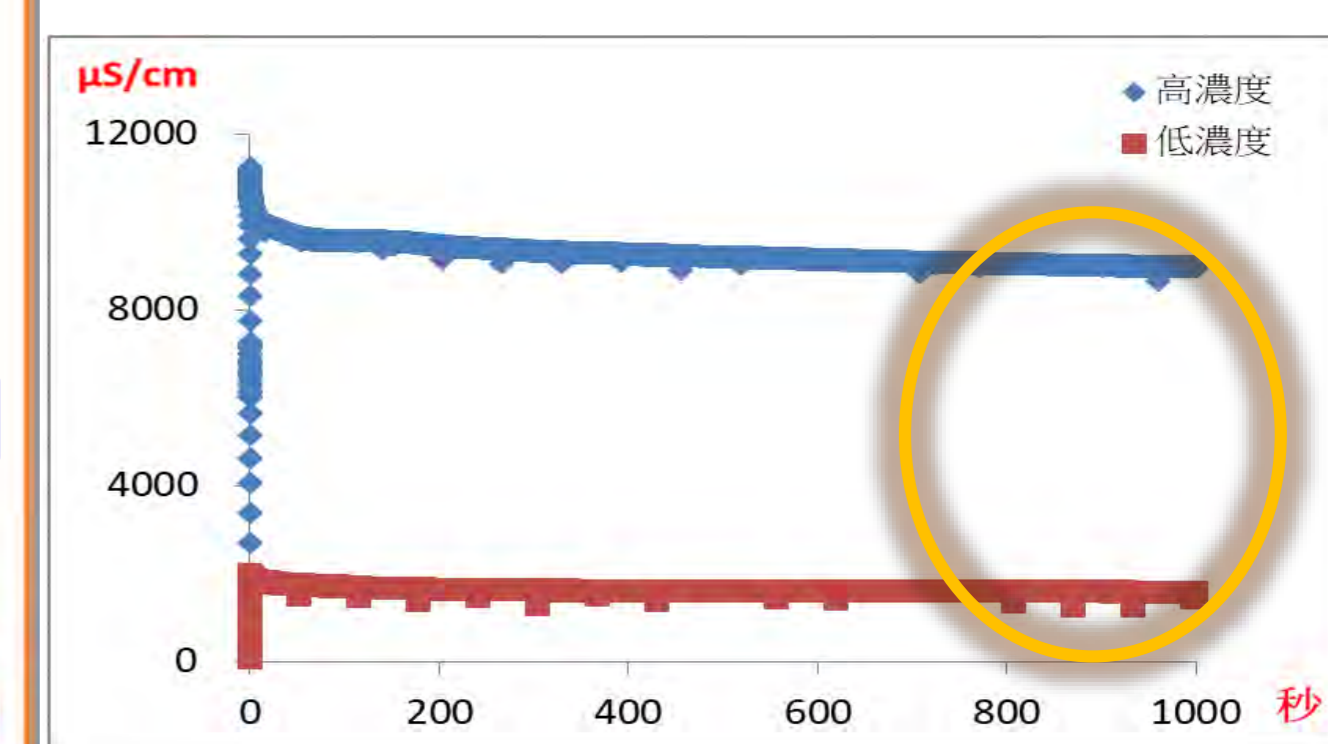
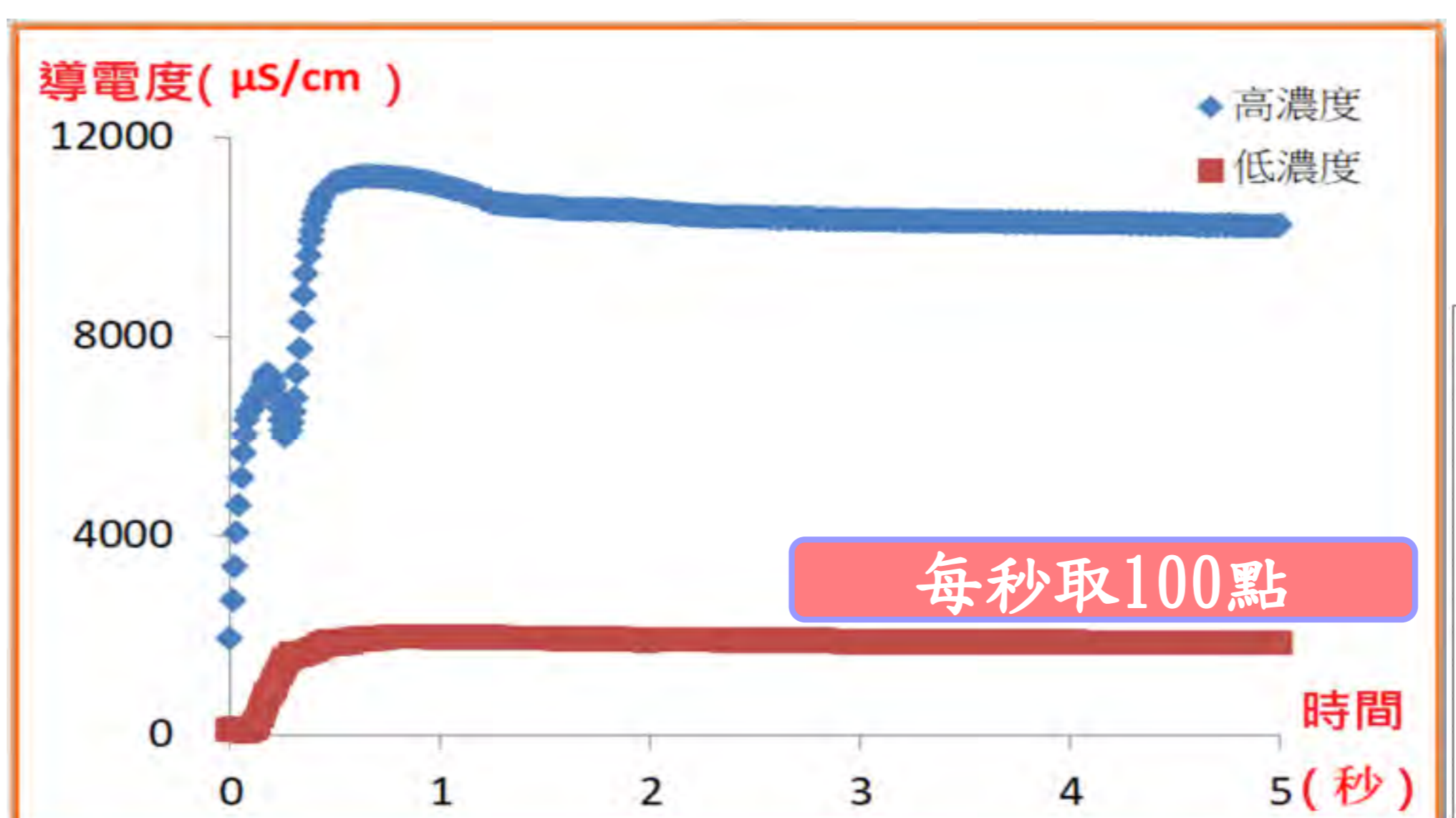


圖7-1、不同濃度的氧化還原反應之導電度變化

討論

- 一、從連續導電度曲線變化，可以清楚呈現離子在反應過程中的變化，並找到**反應結束時間**。
- 二、每種離子反應的連續導電度曲線變化皆**有其獨特性**，未來或可建立成圖形資料庫，作為**鑑別離子反應類型**之用。
- 三、連續導電度圖在反應速率的議題中，可方便作為離子反應在定性及定量上的分析比較，**酸鹼及沉澱反應**約莫2秒即可完成反應，氧化還原反應涉及的化學鍵破壞較多，反應可能超過8小時。
- 四、溶液**濃度較高者**，**初期的反應都較為快速**，但因為反應物較多，所以通常需要花比較多的時間才能反應終結。
- 五、加入**清潔劑**，並沒有對沉澱反應的終結時間，造成明顯的影響。
- 六、在**奈米硫**的實驗中，連續導電度法，比傳統的十字遮蔽法及透光度法，更可以明確找到反應終結的時間，可以**取代傳統方法**。
- 七、具有**數個反應機構**的反應式，可以在連續導電度的變化圖中獲得印證。
- 八、連續導電度法的限制：

- (一). 電導度值太高時，會超過儀器可以量測的範圍，以致無法量測。此限制或可透過溶液的稀釋，或是未來針對電導度計感測頭的改良而予以解決。
- (二). 具有反應機構的離子反應式，雖然可以在連續導電度曲線變化中看出相關反應的銜接，但卻無法找出此類反應中單一反應式的確實完成時間，然而還是可以在曲線的波動及曲線轉折上，得到定性上的解釋。

結論

- 一、藉由**連續導電度**的測定，我們能利用導電度值的不再改變，簡單而**清楚的判斷出反應結束的時間**，並計算出反應速率。
- 二、每種離子反應的**連續導電度圖都有其獨特性**，即使反應極快的酸鹼中和及沉澱反應，也能透過每秒取樣100次的取樣設定，**作定性與定量上的探討**。
- 三、濃度愈濃，初期的反應速率愈快，但反應終結所需的時間卻愈長。
- 四、利用連續導電度進行奈米硫的實驗，**能單純的測出氧化還原反應完成的時間**，也能補足傳統十字遮蔽法及透光度法中，因為濃度太稀，硫沉澱不足以將光遮蔽而致使實驗失效的缺點。
- 五、將清潔劑加入沉澱反應中，對於反應速率，沒有明顯的影響。
- 六、在秒錶實驗當中，連續導電度法不但比傳統的澱粉指示劑法更能精準的判斷出反應完成的時間，同時也能從導電度圖中，**清楚呈現出此反應是由兩個反應機構所組成**，從中並可以找到第二階段反應開始的時間。
- 七、只要是**跟離子有關的反應**，都可以運用**連續導電度圖**，作教學及研究上的應用。

參考資料

- 一、陳秋炳(2016)。《第二章、反應速率》。高中基礎化學(三)。翰林出版社。
- 二、陳秋炳(2017)。《第三章、液體與溶液》。高中選修化學(上)。翰林出版社。
- 三、中華民國第51屆中小學科學展覽會化學科最佳團隊合作獎。「**硫晶**」歲月—自製偵測器探討硫代硫酸鈉與鹽酸之反應速率。新竹市立光華國民中學。葉亦心等。
- 四、臺灣2002年國際科學展覽會化學科第一名。界面活性劑對硫奈米微粒形成機制的影響。臺北市立第一女子高級中學。李祐慈。