

# 高中「亞鐵三明治：二茂鐵實驗」

## 瑪麗居禮科學營課程與實作

周芳妃\*<sup>1</sup>、陳平<sup>2</sup>、鄭晉哲<sup>2</sup>、羅文琪<sup>2</sup>、范智傑<sup>2</sup>、呂家榮<sup>2</sup>

1.臺北市立第一女子高級中學 2.國立臺灣師範大學化學系  
ffchou@gapps.fg.tp.edu.tw

### ■ 前言

鐵與其化合物的應用與人類文明發展息息相關，與鐵元素有關的各種天然物或商業產品皆觸手可得。在大學普化課程與高中化學課程中，鐵元素及其化合物的相關知識是課程中介紹生活重要實例不可或缺的例子，例如：生產氨的哈伯法使用鐵做為催化劑；氯化鐵 ( $\text{FeCl}_3$ ) 是不少化學合成的重要引發劑；英國大笨鐘數字上的普魯士藍染料也含有 (+2) 和 (+3) 氧化態的和亞鐵氰化鐵 ( $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ )。現行課綱的高中選修化學介紹過渡元素之單元內容，以含有鐵元素的血紅素介紹配位化合物，示範實驗也以鐵離子與草酸根形成的錯合物為重點，這些現行課綱高中選修化學的範例皆已觸及有機物與金屬離子結合的化學領域。

本篇內容介紹的實驗設計乃整合 2019 年與 2024 年的「瑪麗居禮科學營」(前身為居禮夫人化學營) 實驗課程(張昭鼎紀念基金會, 2024)。居禮營的實驗設計非常重視強調綠色化學原則，使用輕便可攜式且可重複使用的器材、藥品劑量也大量減少並避免產生難以處理的廢棄溶液。此實驗內容導入 1973 年諾貝爾化學獎的代表性化合物：二茂鐵(Ferrocene,  $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{Fe}$ ，簡寫為  $\text{Fe}(\text{CP})_2$ ) 或稱為二環戊二烯亞鐵(Dicyclopentadienyl iron)，提供學生認識有機金屬化合物以及鐵離子之電子轉移變化，設計照光步驟讓學生觀察有趣的散射現象，並指導學生利用常見的積木和簡單電路元件組裝成測定裝置，以幫助學生學習定量分析的原理。

### ■ 實驗先備知識

#### 一、二茂鐵的簡介

(一) 成為有機金屬化學領域里程碑的二茂鐵

二茂鐵是意外發現的一種有機金屬化合物，外觀為橙黃色固體，其化學結構有如夾心三明治，故暱稱為亞鐵三明治(見圖 1)。1940 年代聯合碳化物公司(Union Carbide) 研究人員曾發現熱的環戊二烯(Cyclopentadiene,  $\text{C}_5\text{H}_6$ ) 蒸氣通過鐵管會出現堵塞管道黃色汙泥，1951

年美國杜肯大學 ( Duquesne University ) Peter L. Pauson 和 Thomas J. Kealy 二人使用氯化鐵和環戊二烯基溴化鎂 ( cyclopentadienyl magnesium bromide ·  $C_5H_5MgBr$  ) 進行實驗，雖未能得到預期產物，但意外得到一種非常穩定的橙黃色固體。同時，英國氧氣公司 ( British Oxygen ) 研究人員 Samuel A. Miller、John A. Tebboth 和 John F. Tremaine 三人將環戊二烯和氮氣的混合氣體通過鐵催化劑時，也獲得了橙黃色的固體。

之後，由 Robert Burns Woodward、Sir Geoffrey Wilkinson 和 Ernst Otto Fischer 經由各種鑑定證據而分別發現二茂鐵的三明治結構。基於這項發現，Fischer 甚至成功合成出二茂鈷和二茂鎳。二茂鐵的發現啟動環戊二烯基環 ( Cyclopentadienyl ring,  $C_5H_5$  ) 和過渡金屬的 $\pi$ 鍵錯合物的化學，進而開創有機金屬化學的新領域。1973 年，Ernst Otto Fischer 和 Sir Geoffrey Wilkinson 因其於有機金屬化學領域開發具有三明治結構化合物的傑出貢獻而獲得諾貝爾化學獎。

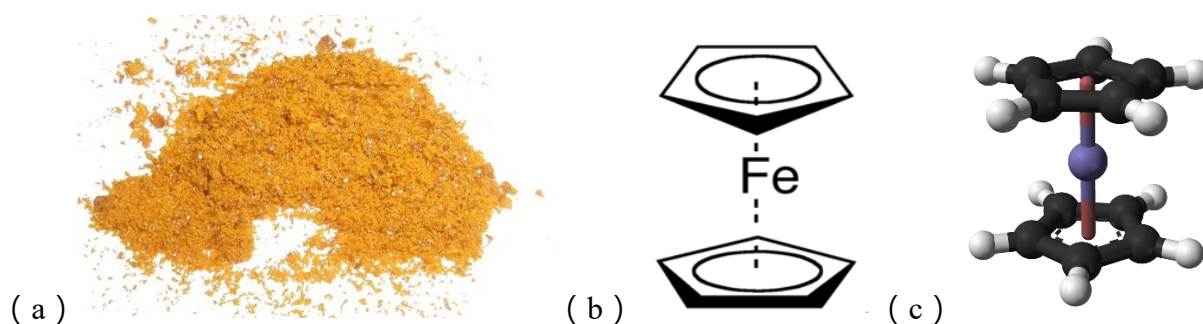


圖 1：二茂鐵的外觀與結構：(a) 橙黃色固體 (b) 結構式 (c) 球與棍型之分子模型  
(引自英文維基百科：Ferrocene · 2024)

## (二) 可促進改善空氣品質的二茂鐵

二茂鐵加熱時容易分解，產生活性含鐵自由基。這些自由基可作為催化劑，在油料燃燒過程中引發鏈鎖反應，導致燃料分子更快氧化。二茂鐵的鐵基自由基可氧化煙灰顆粒，防止其形成和生長。二茂鐵也可降低油料的著火溫度，使油料更容易點燃，燃燒更完全。二茂鐵具有上述多種特性，使其成為有效的燃料添加劑，具有促進油料更快、更完全燃燒的優點，提高燃油經濟性且避免形成煙灰，實現更乾淨的燃燒，大幅減少一氧化碳、碳氫化合物和 PM2.5 微粒等有害污染物的排放。但是二茂鐵作為燃料添加劑，需搭配油料特性找出最佳濃度條件，其潛在缺點是過量添加將使高溫引擎內的氮氣與氧氣化合，增加氮氧化物排放量。

## 二、實驗安全須知

二茂鐵的工業需求很大，生產成本低廉又售價便宜，頗適合推廣於營隊或專題實驗課程，但進行實驗設計與教學工作，務必檢查下列注意事項：

(一) 事先查詢二茂鐵的物質安全資料表，查看 GHS ( Global Harmonized System ) 標示

養成實驗前先查詢化學品的物質安全資料表的習慣，是學習善用化學品與保護實驗安全的基本工作。二茂鐵的物質安全資料表警示語為「危險」，其 GHS 標示有四項 ( 見圖 2 )。



圖 2：二茂鐵的 GHS 標示

(二) 實驗避免事項

1. 避免熱源：二茂鐵是一種可燃固體，必須遠離明火和熱源。
2. 避免吸入粉塵：二茂鐵粉塵可能刺激呼吸道，必須確保通風良好。
3. 避免直接接觸皮膚和眼睛：佩戴適當的防護手套和護目鏡。

(三) 安全處理廢棄物

1. 若無法交給專業廢棄物處理單位時，可採取稀釋處理或吸附處理方式。
2. 在通風良好的環境下進行稀釋時，應使用大量的水，稀釋廢液至較低濃度，降低其毒性後才予排放。
3. 吸附處理方法使用活性炭等吸附劑，吸附廢液中的二茂鐵和其他有機物，吸附後的固體廢物應按照固體廢棄物處理方式進行處理。

(四) 實驗教學管理

1. 適當設備：確保學生使用適當的安全設備，例如手套、護目鏡和實驗服。
2. 密切監督：在實驗過程中，尤其處理化學品時，密切監督學生。

## ■ 實驗設計

### 一、實驗原理

二茂鐵(II) ( 簡寫為 $[\text{Fe}(\text{CP})_2]^0$  ) 難溶於水，但具有卓越的氧化還原行為，其氧化產物為正

一價二茂鐵(III)陽離子 (簡寫為 $[\text{Fe}(\text{CP})_2]^+$ )，這是一種極其穩定且水溶性的陽離子。上述氧化還原反應是可逆的 (見圖 3)。

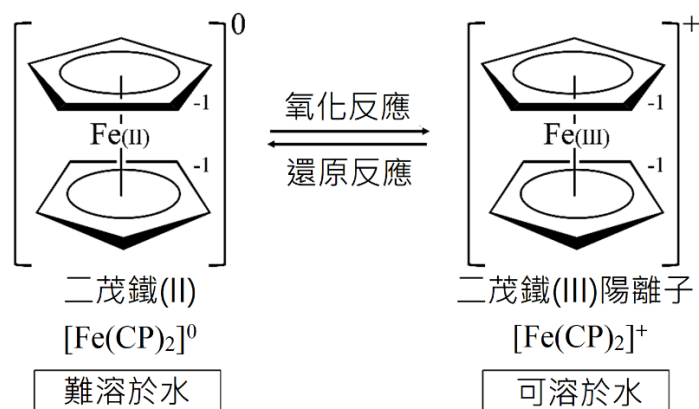


圖 3：二茂鐵(II)與二茂鐵(III)陽離子的可逆反應

本實驗設計中，二茂鐵(II)和硫酸鐵銨 ( $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ ，鐵(III)陽離子的來源) 為反應物，反應過程中發生電子轉移而生成二茂鐵(III)陽離子。反應變化過程中，溶液隨反應逐漸變色，以光束通過溶液觀察散射現象 (見圖 4)。由於二茂鐵(III)陽離子水溶液的散射機制較為複雜，若有搭配適量清潔劑在水中形成的微胞 (mecelle) 構造，以促進油溶性的二茂鐵(II)分子與水溶性的二茂鐵(III)陽離子乳化為膠狀溶液，將更容易觀察不同的散射現象，也可觀察到若改變光源位置，溶液不同深度將呈現不同顏色的有趣現象。建議教師可先進行使用適量清潔劑的示範實驗，透過展示膠狀溶液呈現的漂亮照光成品，幫助學生引起學習動機。示範實驗的簡單操作方法建議如下：將大約 1~2 粒芝麻量 (大約 0.004 克) 的二茂鐵(II)加入小瓶內，再加入 0.1~0.2 M 硫酸鐵銨水溶液大約 5 毫升，及大約 1:10 稀釋的洗碗精水溶液 2~3 滴。蓋好瓶蓋搖晃幾下使溶液乳化均勻，再放到手機的手電筒光源上觀察 (見圖 5)。



圖 4：以光束從下方通過溶液觀察散射與逐漸變色的現象：  
從左到右為二茂鐵(II)變成二茂鐵(III)陽離子的過程



圖 5：改變光源位置，溶液不同深度呈現不同顏色的有趣現象

紫外光-可見光光譜儀測定二茂鐵(III)陽離子之吸收波長為 630 nm (見圖 6)，利用此吸收光譜特性，使用白光 LED 燈結合顏色感測器定量反應形成之二茂鐵(III)陽離子。

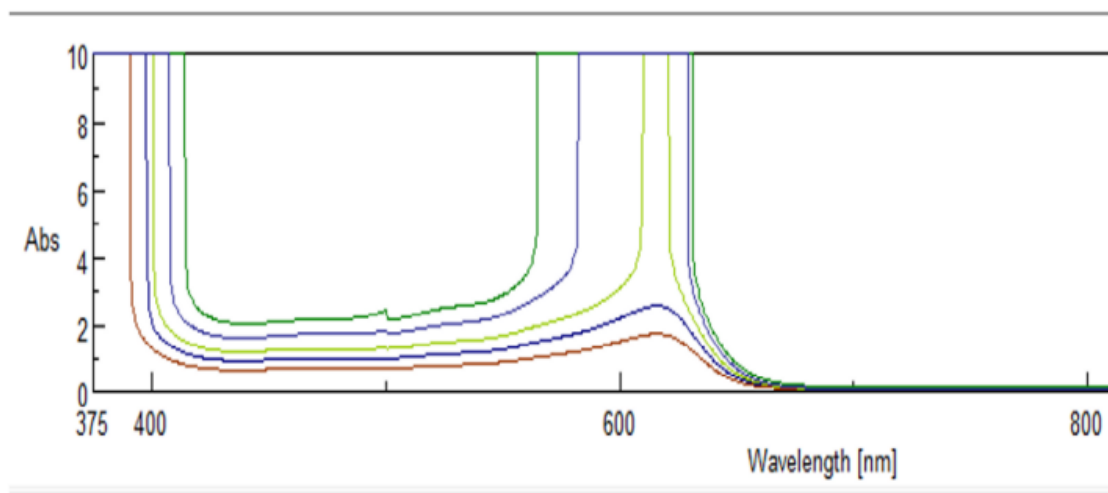


圖 6：二茂鐵(III)陽離子之吸收光譜圖

## 二、實驗器材與藥品

為了提供不受場地限制的實作實驗或示範實驗，本實驗設計採用輕便可攜式、不易破裂且可反覆使用的塑膠器材，藥品劑量也調整至非常微量，實驗完畢產生的廢棄溶液可採取大量水稀釋再排放的處理模式(見表 1)。使用 24 格多孔盤(細胞培養盤)做為迷你試管架，尖底有蓋塑膠離心管做為試管，可將試管與小樣品瓶穩定放置在多孔盤上(見圖 7)。

表 1 實驗器材與藥品 (下列正己烷溶劑可改用去漬油替代)

0.005 M 二茂鐵正己烷溶液	30 mL	正己烷	30 mL
0.2 M 硫酸鐵銨水溶液	50 mL	水	20 mL
二茂鐵	0.004 g * 2	未知二茂鐵	1管
尖底有蓋塑膠試管	8個	小樣品瓶	7個
塑膠滴管	5支	24格多孔盤	1個
1 mL針筒	2支	電池	2顆
白色LED裝置	1組	三用電錶	1個
電池盒	1個	黑色樂高積木盒子	1個
紅色光感測元件	1個	鱷魚夾	2條

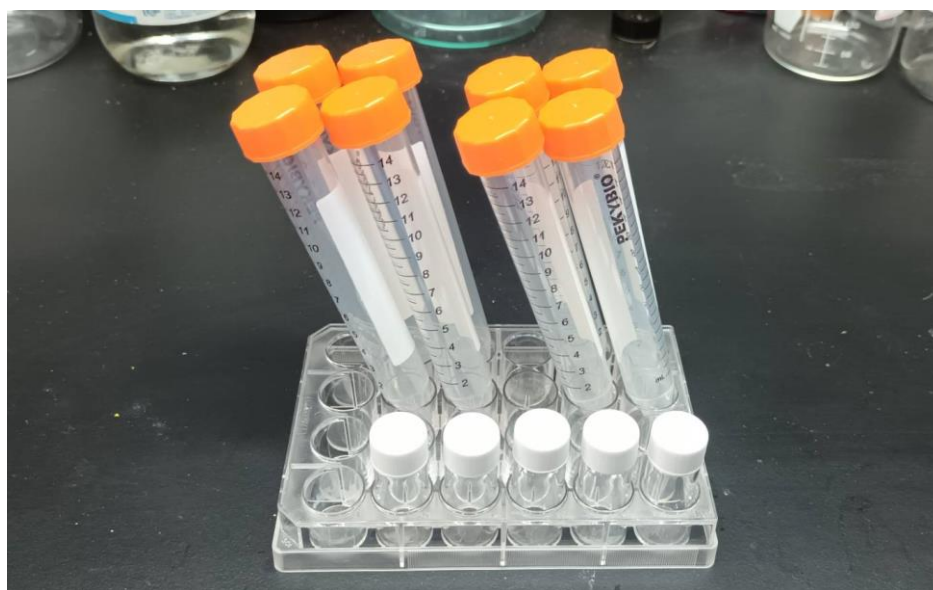


圖 7：尖底有蓋塑膠離心管做為試管，使用 24 格多孔盤 (細胞培養盤) 做為迷你試管架。

### 三、實驗步驟

#### (一) 第一階段實驗：二茂鐵之氧化還原實驗

1. 配製二茂鐵溶液。秤重 2 份 0.004 克的二茂鐵，置入於 A、B 尖底試管內。用滴管加入溶劑，A 試管加入去離子水，B 試管加入正己烷，均至刻度 5 毫升，搖晃使二茂鐵(II)溶解，記錄二茂鐵的溶解情況及溶液顏色。
2. 配製 0.2 M 硫酸鐵銨溶液。將硫酸鐵銨溶液分別用滴管加入 A、B 尖底試管中，加至刻度

- 10 毫升。此時 B 試管內可看到上層是黃色的二茂鐵(II)正己烷溶液，下層是無色的硫酸鐵銨水溶液。
- 搖晃 A、B 兩試管使二茂鐵(II)與硫酸鐵銨完全反應，形成二茂鐵(III)陽離子。每搖晃三下邊停下來觀察顏色，記錄反應時溶液的顏色變化與反應時間。繼續多次搖晃試管，使試管內溶液由黃色混濁到轉為有特殊顏色的透明溶液。
  - 用滴管取出試管中含有二茂鐵(III)陽離子的下層溶液（水層）到小樣品瓶觀察，以手機光源照射每個溶液底部。



圖 8：以手機光源照射每個溶液底部

## (二) 第二階段實驗：二茂鐵(III)陽離子定量實驗

- 配製五種不同濃度的二茂鐵(II)溶液，配製方法如下列說明。於學習單表格先填入配製方法後，再配製 0.005 M、0.0025 M、0.001 M、0.0007 M、0.0004 M 均 5 毫升。從大樣品瓶用針筒取出適量 0.005 M 的二茂鐵(II)溶液，在五支不同的尖底試管中，再用滴管吸取己烷稀釋至刻度 5 毫升。
- 用滴管分別將 0.2 M 硫酸鐵銨溶液 5 毫升加入至步驟 1 的五支尖底試管中。此時可看到上層是黃色的二茂鐵(II)正己烷溶液，下層是無色的硫酸鐵銨水溶液。
- 搖晃五支加蓋鎖緊的試管，使二茂鐵(II)與硫酸鐵銨反應，搖晃至二茂鐵完全與硫酸鐵銨完全反應，溶液由黃色混濁到轉為有特殊顏色的透明溶液。
- 利用塑膠滴管吸取每支試管中含有二茂鐵(III)陽離子的下層溶液（水層）3 毫升，放入不同的小樣品瓶中（見圖 9）。

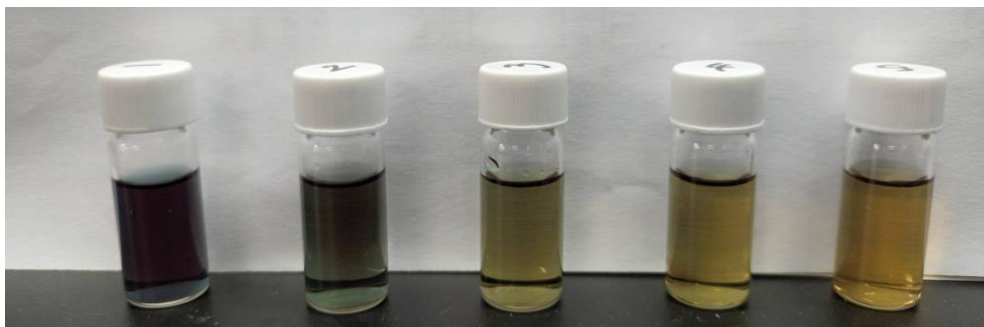


圖 9：不同濃度的二茂鐵(III)陽離子水溶液

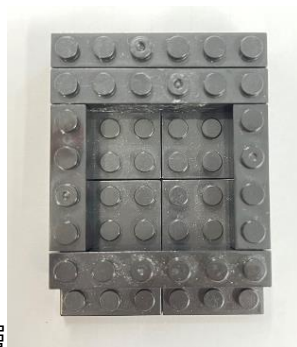
5. 架設以白光 LED 光源及紅色光感測元件做成簡易感測裝置，使用黑色樂高積木製作暗室，呈現讓溶液由正面照光且顏色感測器可從反面接收溶液放光的空間（見圖 10 與表 2）。



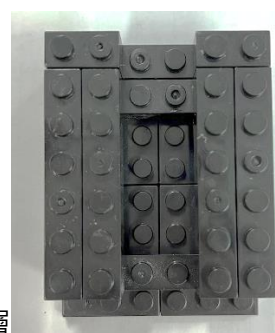
圖 10：以白光 LED 光源及紅色光感測元件做成簡易感測裝置，使用黑色樂高積木製作暗室

表 2：暗室和感測裝置的組裝方法

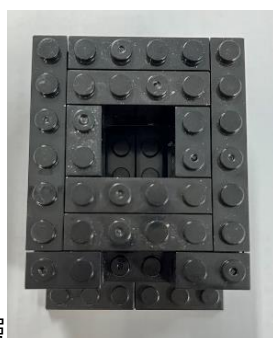
- (1) 暗室：從底座開始組裝積木



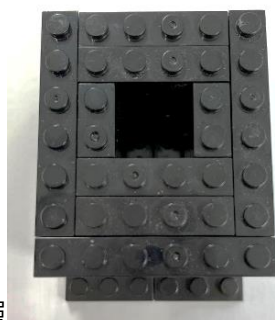
第一層



第二層

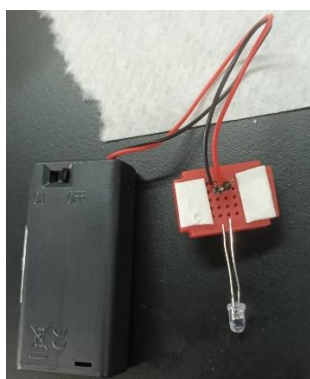


第三層



第四層

(2) 以白光 LED 為光源，



白色 LED 長腳為正極，短腳為負極



電池盒紅線為正極，黑線為負極

- 將步驟 4 的每個溶液放入步驟 5 的暗室空間中，當感測裝置接收到穿透溶液的光線時，會將光強度轉換成電壓輸出至三用電表，三用電表再將電壓轉換成實際數值，當溶液放入暗室空間時，溶液會吸收 630 nm 之光線（紅色光波段），使透過溶液的紅色光強度下降，經由紅色光感測元件轉換成電壓值，紀錄放入不同溶液時的電壓大小。
- 將每個溶液的二茂鐵濃度與電壓大小以 Excel 作圖，繪製一條檢量線並標記回歸直線以及相關係數。可參考電壓與濃度的檢量線範例（見圖 11）。
- 領取一管未知濃度的二茂鐵(III)陽離子溶液，重複步驟 2 至 7，使用步驟 8 繪製的檢量線，

判斷與記錄此溶液的濃度應為何？

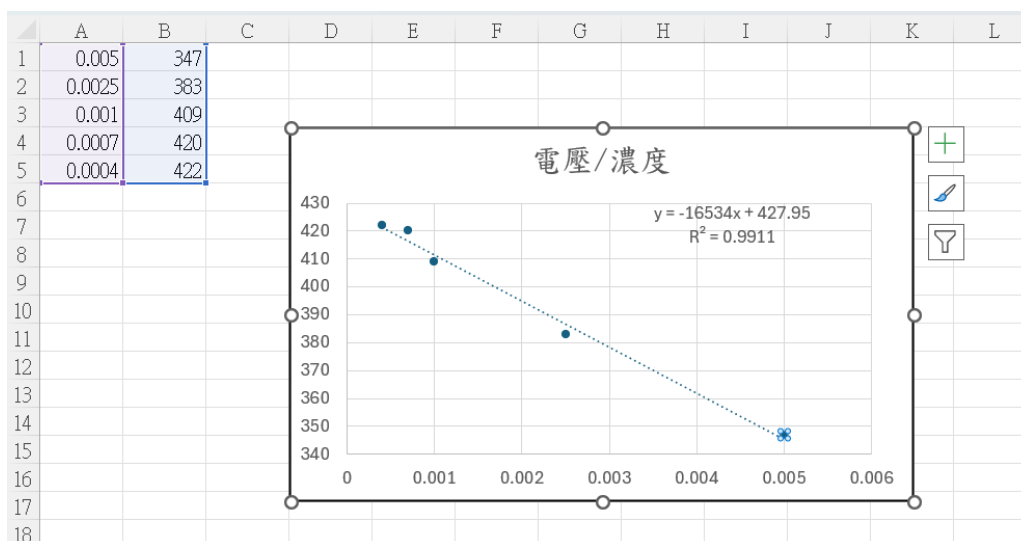


圖 11：電壓與濃度的檢量線範例

#### 四、實驗記錄與討論

##### (一) 第一階段實驗：二茂鐵之氧化還原實驗

1. 實驗過程中，哪一個溶劑（水或正己烷）較好溶解二茂鐵(II)？為什麼？
2. 硫酸鐵銨與二茂鐵(II)在實驗中何者為還原劑何者為氧化劑？
3. 二茂鐵(II)與硫酸鐵銨反應後溶液由什麼顏色轉變成什麼顏色？將反應後的溶液照光後由什麼顏色轉變成什麼顏色？
4. 在此實驗中，搖晃一段時間後，二茂鐵(II)固體以及正己烷溶劑中的顏色會消失，在此情況下二茂鐵(II)與硫酸鐵銨誰是限量試劑？
5. 在此實驗中 A 試管及 B 試管何者為勻相反應何者為非勻相反應？哪一試管硫酸鐵銨及二茂鐵(II)反應較快？為什麼？

##### (二) 第二階段實驗：二茂鐵(III)陽離子定量實驗

1. 如何利用 0.005 M 二茂鐵(II)正己烷溶液與正己烷溶劑配製出各為 5 毫升之不同濃度的二茂鐵(II)溶液？
2. 為什麼需要使用黑色樂高積木製作暗室，其用意為何？
3. 填入各濃度量測出之電壓，並寫下於 excel 中作圖得到之檢量線以及迴歸係數  $R^2$ 。另外說明在檢量線中， $R^2$  值代表什麼？

4. 未知濃度的二茂鐵溶液濃度為何？完成計算後與教師詢問正確答案並計算實驗誤差。

## ■ 結語

本次介紹二茂鐵實驗，不僅「亞鐵三明治」名稱引人聯想，更希望將近代化學研發的新材料導入高中課程；另安排跨領域的實驗技能，巧思設計使用易取得的積木製作感測裝置，並結合化學定量分析的數據處理方法。自 2011 國際化學年起，十多年來主辦單位每年 7 月整合多方資源，共同辦理高中生「瑪麗居禮科學營」，研習教師約 20~30 人，學生學員約 100 人，甄選自至少四十所高中職校；入選學員遍布國內各校、皆喜愛科學研究並有具體事蹟。居禮營的實驗課程設計宗旨：希望為國內高中師生引入與諾貝爾化學獎或國際化學奧林匹亞競賽有關的創新實驗設計，並提供高中自然科教師擴展指導科展題材與實驗技術的參考。每年居禮營的實驗安排堅持為 2 人一組，每次營隊中至少 60 組師生人員同步實驗。在有限資源和工作人力之下，主辦單位每年為此龐大營隊進行實驗課程之設計和執行，期能引領與會師生認同：唯有設計出符合綠色環保之實驗才是永續之道。

## ■ 參考文獻

張昭鼎紀念基金會 (2024)。瑪麗居禮科學營 (原居禮夫人高中化學營)。

<https://cctmf.org.tw/campcurie/>

Ferrocene (2024, Nov. 11). In *Wikipedia, the free encyclopedia*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Ferrocene>

## ■ 附錄

### 實驗記錄與討論之參考答案

(一) 第一階段實驗：二茂鐵之氧化還原實驗

1. 實驗過程中，哪一個溶劑 (水或正己烷) 較好溶解二茂鐵(II)？為什麼？

**答**：正己烷。二茂鐵(II)是非極性化合物，難溶於水，屬於油溶性物質。

2. 硫酸鐵銨與二茂鐵(II)在實驗中何者為還原劑何者為氧化劑？

**答**：硫酸鐵銨是氧化劑，其所含的鐵(III)離子得到電子變成鐵(II)離子。二茂鐵(II)為還原劑，所含的鐵(II)離子失去電子變成鐵(III)離子。

3. 二茂鐵(II)與硫酸鐵銨反應後溶液由什麼顏色轉變成什麼顏色？將反應後的溶液照光後由什麼顏色轉變成什麼顏色？

答：溶液由黃色轉變成藍色，照光後，因光源位置不同，可觀察到紅色、藍色或紫色。

4. 在此實驗中，搖晃一段時間後，二茂鐵(II)固體以及正己烷溶劑中的顏色會消失，在此情況下二茂鐵(II)與硫酸鐵銨誰是限量試劑？

答：二茂鐵(II)固體是限量試劑。

5. 在此實驗中 A 試管及 B 試管何者為勻相反應何者為非勻相反應？哪一試管硫酸鐵銨及二茂鐵(II)反應較快？為什麼？

答：兩者皆為非勻相反應。A 試管是二茂鐵(II)固體和水溶液中的鐵(III)離子發生反應。B 試管是上層正己烷中的二茂鐵(II)和下層水中的鐵(III)離子發生反應。

## (二) 第二階段實驗：二茂鐵(III)陽離子定量實驗

1. 如何利用 0.005 M 二茂鐵(II)正己烷溶液與正己烷溶劑配製出各為 5 毫升之不同濃度的二茂鐵(II)溶液？答：

配置濃度	大樣品瓶 0.005 M (毫升)	正己烷 (毫升)
0.005 M	5.0	0
0.0025 M	2.5	2.5
0.001 M	1.0	4.0
0.0007 M	0.7	4.3
0.0004 M	0.4	4.6

2. 為什麼需要使用黑色樂高積木製作暗室，其用意為何？

答：暗室用於遮住外界環境的光線，避免干擾。積木方便組裝和拆卸，又可重複使用。

3. 填入各濃度量測出之電壓，並寫下於 excel 中作圖得到之檢量線以及迴歸係數  $R^2$ 。另外說明在檢量線中， $R^2$  值代表什麼？

答：依據現場而定各濃度量測出之電壓。 $R^2$  值介於 0 和 1 之間， $R^2$  值越高，表示檢量線的可靠性越高。

4. 未知濃度的二茂鐵溶液濃度為何？完成計算後與教師詢問正確答案並計算實驗誤差。

答：依據現場而定。