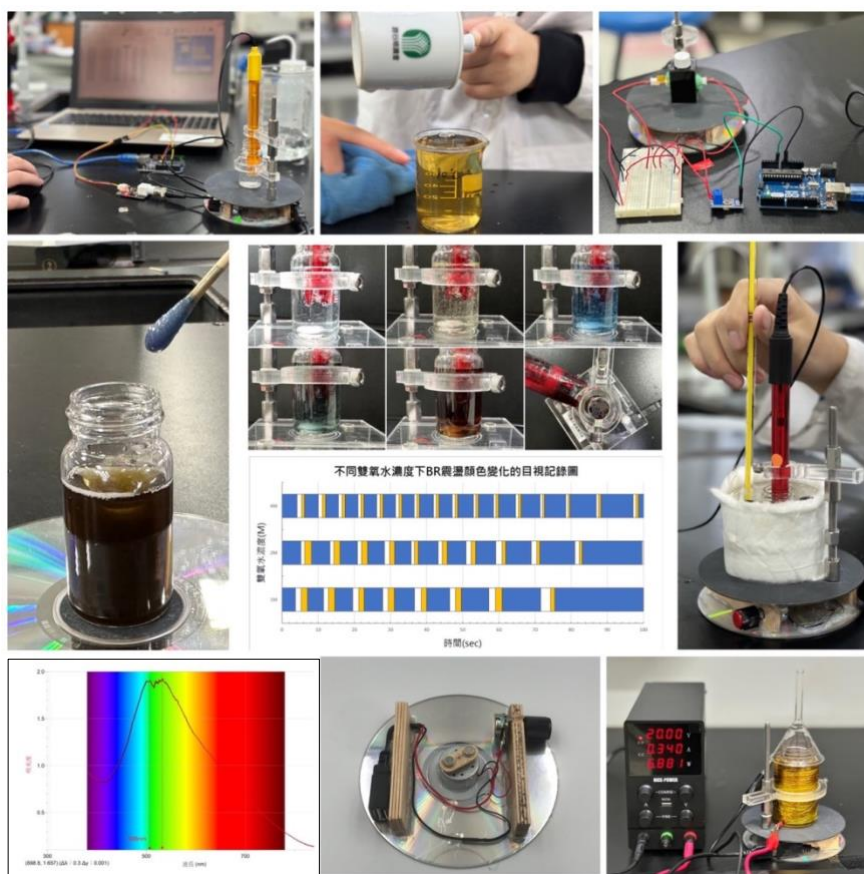


111 年度高級中等學校綠色化學創意競賽 成果報告書

組別(編號)：普通型高級中等學校組(H026)

作品名稱：綠色迴旋曲的鐘碘-BR 振盪的成因探究與台灣茶抗氧化能力的調查評估

關鍵詞：BR 振盪、台灣茶、抗氧化能力



目錄

摘要.....	1
壹、研究動機.....	1
貳、研究目的.....	2
參、研究設備及器材.....	3
肆、研究過程與方法.....	4
伍、研究結果與討論.....	12
陸、結論.....	27
柒、安全注意事項及廢棄物處理.....	29
捌、參考文獻.....	29

表目錄

表1：不同濃度的維生素C體積配置.....	9
表2：180秒內添加不同濃度的維生素C與抑制時間的關係.....	20

圖目錄

圖1：光碟型 USB 可調式電磁攪拌實驗模組.....	6
圖2：可程式光電比色電壓感測暨攪拌模組組件圖(未貼水砂紙)	6
圖3：圖左為漏斗微型電熱氣，圖右與蒸餾裝置圖.....	6
圖4：氣壓偵測裝置圖.....	7
圖5：黃褐色產物的檢測.....	7
圖6：色碼分析裝置，樣本瓶放置在貼上水砂紙的電磁攪拌器上.....	8
圖7：氧化還原電位計偵測振盪反應的實驗裝置圖.....	8
圖8：溫度變因探究實驗過程.....	8
圖9：實驗廢液的減毒與前驅物的提煉回收流程.....	11
圖10：不同雙氧水濃度下 BR 振盪顏色變化的目視記錄圖.....	12
圖11：BR 振盪下溫度隨時間的變化圖.....	12
圖12：BR 振盪下 pH 值隨時間的變化圖.....	13

圖 13：BR 振盪下氣壓隨時間的變化圖.....	13
圖 14：藍色碼與 RGB 色碼總和比值($B/(R+G+B)$)隨時間的變化圖.....	14
圖 15：光電比色法監測 BR 振盪：電壓隨時間的變化圖.....	14
圖 16：ORP 隨時間的變化圖.....	15
圖 17：振盪週期的長短隨振盪次數的變化.....	15
圖 18：不同濃度的 H_2O_2 ，BR 振盪行為的比較.....	16
圖 19：120 秒內振盪週期次數與 H_2O_2 濃度的關係.....	16
圖 20：120 秒內振盪週期次數與丙二酸濃度的關係.....	17
圖 21：不同溫度下振盪 ORP 隨時間的變化圖.....	17
圖 22：ORP 與澱粉的添加量的關係圖.....	18
圖 23：由左而右為 1~5 號比色管，最右邊為空的比色管.....	18
圖 24：DPPH(乙醇)的全光譜掃描.....	19
圖 25：添加不同濃度的維生素 C 下吸光度的變化.....	19
圖 26：添加 0.01M 維生素 C 前後的 ORP 變化.....	20
圖 27：添加不同濃度維生素 C 與 BR 振盪反應抑制時間的關係.....	21
圖 28：五種茶的外觀、茶湯色澤比較.....	21
圖 29：光電比色法與 ORP 法測量包種茶抑制時間的比較.....	22
圖 30：不同稀釋倍數的包種茶與抑制時間的關係.....	22
圖 31：不同濃度的包種茶與抑制時間的線性關係.....	23
圖 32：包種第一~三泡茶抑制效應的比較.....	23
圖 33：各種茶湯第一~三泡茶抑制時間之比較圖.....	24
圖 34：不同沖泡溫度下，五種茶抑制時間的比較圖.....	24
圖 35：不同浸泡時間下，五種茶抑制時間的比較圖.....	25
圖 36：添加美式咖啡對 BR 振盪抑制效應的影響.....	25
圖 37：圖中為電熱式裝置，圖右為漏斗上析出的碘晶體.....	26
圖 38：圖左加入 $Na_2S_2O_3$ 、圖中加入 Na_2CO_3 、圖右為沉澱的錳氧化物.....	26

摘要

本實驗聚焦在 BR 振盪週期性變化動力學研究。使用光碟片、冰棒棍自製光碟型 USB 可調式電磁攪拌實驗模組，可廣泛應用於蒸餾、滴定、醱類發酵等實驗。透過手機結合 RGB 色彩 App，紀錄反應中色碼比值變化。使用 ARDUINO 控制板結合電壓感測器，紀錄光電比色光電流、電壓變化。使用 ARDUINO 控制板結合 ORP 計，紀錄振盪變化，並將此應用於抗氧化調查，以抑制時間作為檢測物抗氧化能力的指標，發現茶湯越濃、沖泡溫度越高、浸泡時間越久，抑制效應越好。除包種茶外，紅茶、烏龍茶第二泡抑制效果最好。測試茶種中，抑制效應最高是紅茶，最低是東方美人茶。透過電熱式兩段式變溫法提煉回收前驅物碘晶體，加入飽和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、 Na_2CO_3 清除殘餘的 I_2 、 H_2O_2 、 H_2SO_4 及 MnO_2 ，實踐廢液減毒減廢綠色化學精神。

壹、研究動機

在社團實作課時，老師安排演示實驗，將兩個盛有透明溶液的 A、B 兩燒杯倒在一起，隨即要同學開始讀秒，約當 20 秒後，原本透明的溶液瞬間變成藍黑色，突來的變化引起同學一陣驚呼！原來這就是所謂的「化學碘鐘」實驗（又稱秒錶實驗）！

後來，「探索化學」的選修課堂上老師帶我們實際進行 BR 振盪反應，並要我們利用手機錄影，在一定時間內，以目測的方式紀錄黃、藍色出現的時間、變化次數，以及反應在什麼時候終止等。因為我們對 BR 振盪的過程，心中仍很多疑問，因此利用這次比賽，希望能對 BR 振盪碘鐘反應有更進一步的瞭解。

經 wiki 及相關連結文獻的說明發現幾個事實：1.振盪實驗發現得早，但非常艱澀、複雜，一直吸引著很多專家參與研究。2. I^- 碘離子濃度呈現週期性變化。3.振盪反應過程涉及自由基的反應。4.當反應結束時，黑褐產物中推測含有碘與碘-澱粉錯合物的存在。5.有學者拿來做食物抗氧化測試（"Briggs-Rauscher reaction", 2022）。而我們最感興趣的點在於反應的「週期性的變化」，以及「食物抗氧化的測試」這兩個部份；因此如何開發監測 BR 振盪反應週期性變化的方法？有哪些變因會影響 BR 振盪速率的快慢？並利用振盪行為的改變調查常見食物的抗氧化力是我們主要努力的三個方向。

茶葉中含有兒茶素等多酚類，普遍的說法中，喝茶能消除自由基，提高身體抗氧化的能力(楊剛顯，2008)；隨著茶葉的品種不同，製作工藝不同，沖泡方式亦不相同，因此在世界各地發展出不同的飲茶文化，就連台灣也因各地獨特的風土環境，孕育出不同的茶種，比如盛行於木柵、石碇、的輕發酵文山包種茶；盛行於新竹峨眉、北埔，以小綠葉蟬叮咬而增添風味的東方美人茶；種植於南投魚池，擁有獨特薄荷、肉桂香氣而聞名的台茶 18 號紅茶（又名

日月潭紅玉)；而南投鹿谷則因盛產高品質的烏龍茶而聞名於世，「半」發酵的烏龍茶，因製茶師傅的手法、技巧不同，發展出風味迥異的台茶烏龍茶；種植於嘉義、南投的台茶 12 號，是以奶香氣著稱的金萱茶，據說發酵程度越低，奶香氣越濃郁。

號稱「抗氧化」能「消滅自由基」的台灣茶如何影響 BR 振盪反應？在高二「探究與實作課」抗氧化能力的檢測實驗中，使用 DPPH 法（盧立章，2002）進行蝶豆花液、綠茶與維生素 C 等物質清除自由基實驗，藉此評估天然食物消除自由基的清除率；也有文獻指出可藉由 BR 振盪反應週期的改變，來調查天然食物抗氧化能力（Gianluca Farusi, 2009），因此本計畫希望能以台灣茶為主方向，透過改良的 BR 振盪反應法，取代傳統使用昂貴 DPPH 分光光譜法（劉宏澤、劉景平，2012），進一步調查台灣茶抗氧化的能力。

本實驗計畫首部曲聚焦在 BR 振盪反應振盪週期監測方法的開發，利用方便取得的材料，如廢光碟、冰棒棍、小馬達、Arduino 數位編程感測組件、手機、免費 App 等，開發各種微型實驗工具，預計導入常用的智慧型手機結合 APP 的色碼分析法（廖旭茂，2019）、Arduino 可程式光電比色電壓感測法、Arduino 可程式氧化還原電位法三種方法，全時監測、紀錄溶液顏色與氧化還原電位的週期性變化。二部曲在於 BR 振盪反應的變因探究，調查不同反應物濃度（如丙二酸、雙氧水等）、澱粉存在與否、溫度等成因對振盪反應週期變化的影響，探究振盪反應的化學動力學；最終曲為調查各種台灣茶對改良 BR 振盪反應週期長短的影響，以期建立一個較安全、便捷、快速的抗氧化指標，積極開拓 BR 振盪碘鐘反應的應用層面。

研究的最後預計利用萃取、中和、還原、沉澱進行廢液的減毒與回收錳化物；嘗試微型電熱式加熱法、昇華純化提煉回收碘晶體。期盼透過努力，優化實驗內容、減少有害、昂貴藥品的使用外，進一步開發成可推廣至全國高中職校園的探究與實作綠色教材；除深化反應動力學的進階課程內容外，更能達到綠色化學永續經營目標。

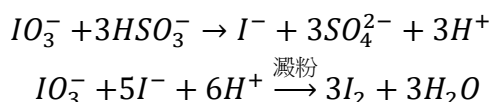
貳、研究目的

- 一、調查微量 BR 振盪碘鐘實驗過程中發生的變化，如酸鹼值的變化、氣壓、溫度的變化，並檢測反應終點黃褐色產物 I_3^- 的存在。
- 二、以錄影回放方式，目視記錄整個振盪個程中，透明、琥珀色、藍黑色發生的時間，並計算固定時間內，化學振盪反應中顏色出現的週期長短與次數。當雙氧水濃度改變時，振盪週期與次數發生何種變化
- 三、透過手機結合 APP 的色碼分析法、Arduino 可程式光電比色電壓感測法、可數位編程的氧化還原電位感測法（ORP meter）三種工具與方法，紀錄並監測顏色振盪的週期性變化；嘗試取代錄影目視法，並比較其中的異同。哪一種方法較為適合用來進行 BR 振盪

的探究與台灣茶抗氧化力的評估調查？

- 四、振盪週期或頻率會發生改變嗎？嘗試以上述氧化還原電位計方法探究各種變因如反應物濃度（丙二酸、雙氧水）、澱粉的存在與否、溫度的不同對 BR 振盪行為的影響。
- 五、常見的抗氧化劑維生素 C 真的能清除自由基嗎？調查俗稱有抗氧化力的維生素 C 與自由基分子 DPPH 反應的結果；利用可見-紫外光分光光譜儀調查不同濃度的維生素 C 清除 DPPH 的程度大小，並嘗試建立數學關係式。維生素 C 可以消除自由基，但可以改變 BR 振盪碘鐘反應的週期嗎？嘗試以可編程式氧化還原電位計方法取代 DPPH 分光光譜分析法，調查不同濃度的維生素 C 下，對 BR 振盪週期延遲的影響，並建立濃度與振盪週期延遲的數學關係式。
- 六、茶葉具有多酚類，具抗氧化力，嘗試比較各種台灣茶對 BR 振盪週期的影響，並評估抗氧化力的大小：以可編程式氧化還原電位計法調查不同發酵程度的包種茶、東方美人茶、紅茶、烏龍茶、金萱茶五種茶種在不同沖泡條件下，如沖泡溫度、沖泡次數、浸泡時間對 BR 振盪周期延遲的影響。嘗試評估最佳抗氧化力的前提下，最適合的泡茶條件。
- 七、比較紅茶、薑黃粉、枸杞、美式咖啡、蝶豆花對 BR 振盪延遲效應的大小，嘗試藉此評估並比較抗氧化力的差異。
- 八、實驗廢液如何處理？廢液中含有少量難溶於水的碘、可溶性的亞錳離子 Mn^{2+} 、三碘離子 I_3^- 、硫酸、以及未反應完的雙氧水等。因碘為先驅化學品，而錳離子是有害重金屬，嘗試以萃取、中和、還原、蒸餾、昇華等適當的方法對廢液進行減毒與提煉回收。
- 九、發展微型綠色化學動力學的探究實驗課程模組，分享推廣。
- 十、原國高中課本實驗方法延伸

1. 秒錶實驗（碘鐘）：高二選修化學(二)的秒錶實驗，是利用碘酸鉀與亞硫酸氫鈉在澱粉的存在下的酸性環境中，利用改變碘酸鉀的濃度，以目視法，碼錶計時測量溶液變藍所需要的時間，藉此探討濃度對反應速率的影響，相關反應式如下：



參、研究設備及器材

一、器材：

可程式光電比色電壓感測模組(含簡易光電比色計，相關電子套件購自易儀科技公司)、Auduino 可編程電壓感測器、光碟型電磁攪拌實驗模組(包含光碟片、冰棒棍、可變電阻、

USB 電源插頭、磁石、可調式固定環)、微型電熱式加熱瓶(蒸餾器模組)、數位溫度計、三向閥、針筒、氣壓感測器、pH 計、ARDUINO 可編程氧化還原電位感測器、威尼爾氧化還原電位感測器、分光光度計、20 mL 與 4mL 樣本瓶、安全吸球、5mL 分度吸量管。

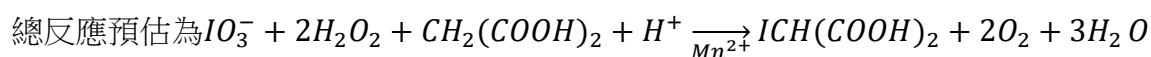
二、藥品：

A 溶液(0.20M 碘酸鉀 + 0.077 M 硫酸)、B 溶液(0.15M 丙二酸 + 0.02M 硫酸亞錳 + 0.03% 可溶性澱粉)、C 溶液(4.0M 雙氧水)、DPPH(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, 簡稱 DPPH)。抗氧化樣品(薑黃粉、乾燥枸杞、乾燥蝶豆花)、茶葉(包種茶、東方美人茶、日月潭紅茶、鹿谷烏龍茶、阿里山金萱茶)。

肆、研究過程與方法

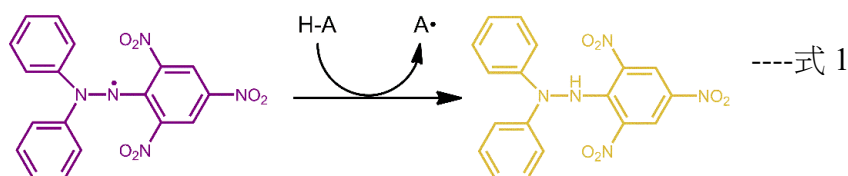
一、實驗原理：

1. BR 振盪反應機構：經文獻探討 (Gianluca Farusi, 2009)，整個反應系統可能涉及自由基與非自由基兩個過程，每個過程都涉及相當多的反應式。自由基過程涉及錳等相關自由基中間物的自動催化反應，可使碘酸根與雙氧水反應生成碘分子與氧氣；而非自由基過程是丙二酸以較緩慢的速率與游離的碘分子作用，還原成碘離子。



2. 氧化還原電位計：由鉑電極與參考電極 Ag/AgCl/KCl 組合成複合電極，可用以測量氧化還原電位 (Oxidation-Reduction Potential, 簡稱 ORP)。ORP 是氧化還原能力的測量指標，代表氧化性或還原性的相對程度，其單位是 mV。本實驗之 ORP 標準溶液 mV 值：222 ± 15mV (25 °C)，可接 arduino 可程式控制板。當振盪反應發生時，電位上升最高點，溶液呈黃色，歷經時間較短；電位自高點下降至低點時，過程溶液呈藍色，歷時較長。
3. 抑制時間 (The inhibition time)：抗氧化劑對 BR 振盪產生的抑制效應 (inhibitory effects)。當加入抗氧化劑後(如多酚類)，會與振盪反應過程中的自由基反應，振盪會被暫時停止，等到下一次振盪再發生時，所經歷的時間即為抑制時間 (Aljović and Gojak-Salimović, 2017)。一般可於溶液藍色(黃色亦可)出現時，隨即加入抗氧化劑，當溶液下一次變藍色(黃色)時，所經歷的時間，即為抑制時間；亦可於振盪時 ORP 電位的最高點時(T₀)加入抗氧化劑，暫停的振盪反應重新開始時第一個振盪最高點出現時(T₁)，兩個時間點的差(T₁-T₀)，即為抑制時間。
4. 自由基清除實驗：在本校自編的高二探究與實作的課程中，使用自由基分子 DPPH

與維生素 C 作用，維生素 C 能使紫色的 DPPH 溶液褪色，藉此探討一些常見的抗氧化劑如蝶豆花對自由基的清除能力；DPPH 自由基的乙醇溶液在波長 508 nm 下有最強吸收值，當 DPPH 自由基與抗氧化物質作用後，抗氧化物質提供氫質子而清除自由基之能力，因而自由基就會失去本身藍紫色的特性而造成吸光值的下降。反應機制為 $\text{DPPH} + \text{AH} \rightarrow \text{DPPH:H} + \text{A}^\cdot$ ，因此藉由測定 508 nm 的吸光值則可判斷樣品抗氧化能力之強弱。DPPH 該藥品相當昂貴，每 0.25 克高達 2 千多元，大量用於實驗教學，實非學校所能負擔。下式為 DPPH 被還原的反應式如式 1。



二、微型實驗器具的製作

1. 光碟型 USB 可調式電磁攪拌實驗模組(圖 1)：是 USB 電源驅動的電磁攪拌器，讓太陽能小馬達轉動，轉軸上安裝一個經裁修的木製冰棒棍，木片兩端各黏貼兩個磁性相反、直徑 6mm 的圓形小磁鐵，當小馬達轉動時，可驅動上方的磁攪拌子；阻抗 500 歐姆的可變電阻可依需求來調整攪拌的速度；為避免光碟片上的反射光，碟片上可黏貼一張#400 的水砂紙；碟片上亦可加裝固定螺桿，作為實驗器皿的夾具等。
2. 可程式光電比色電壓感測模組(圖 2)：可細分三個組件，一是光碟型 USB 可調式電磁攪拌器，二是簡易光電比色計，三是可程式電壓感測器，可接收紀錄來自光電比色計的電壓值；簡易光電比色計(賴新枝、葉世榮, 2017)，利用光電二極體(photodiode SP-1KL)為光強度的偵測器，將通過樣品溶液的不同強度的光轉為電壓訊號；濃度越高，顏色越深，通過的光電流越弱；可程式電壓感測器是利用 ARDUINO 控制板與電壓傳感器，進行數位編程，可連續接收、紀錄來自光電比色計的光電流轉換成的電壓值。本實驗溶液顏色為藍色、無色、琥珀黃依序出現，因此選用黃光 LED 為光源，當溶液呈黃色或無色時，黃光被吸收的少，穿透得多，因此測量到的電壓高；當溶液轉為藍色時，黃光被吸收的多，穿透的少，因此測量到的電壓低。
3. 微型電熱瓶加熱器(含蒸餾裝置)：使用電熱瓶加熱紫色的正己烷含碘萃取液，嘗試在 55~50°C 正己烷的沸點下，使正己烷揮發餾出，結合昇華法來回收碘晶體。首先製作加熱瓶，以鎳鉻鐵電熱線加熱方式，利用寬 1mm 電熱線圈細心地纏繞在 100 毫升的玻璃樣本瓶上，再用耐熱膠帶環繞瓶身，以固定電熱線。完成的模組如圖 3 所示。相關蒸餾器的設計，可參照台灣化學教育期刊(廖旭茂, 2020)。

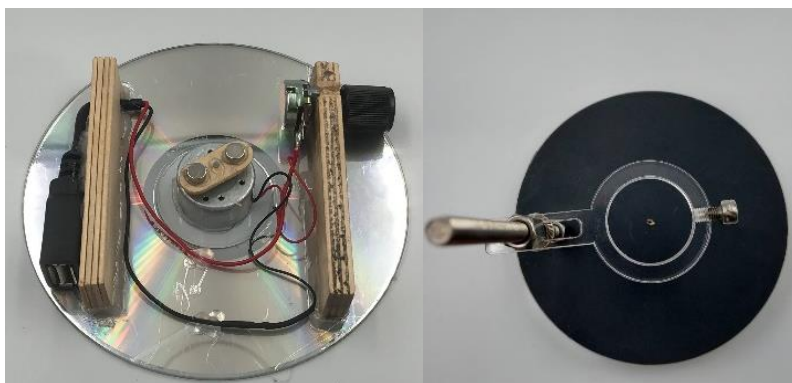


圖 1：光碟型 USB 可調式電磁攪拌實驗模組



圖 2：可程式光電比色電壓感測暨攪拌模組組件圖(未貼水砂紙)

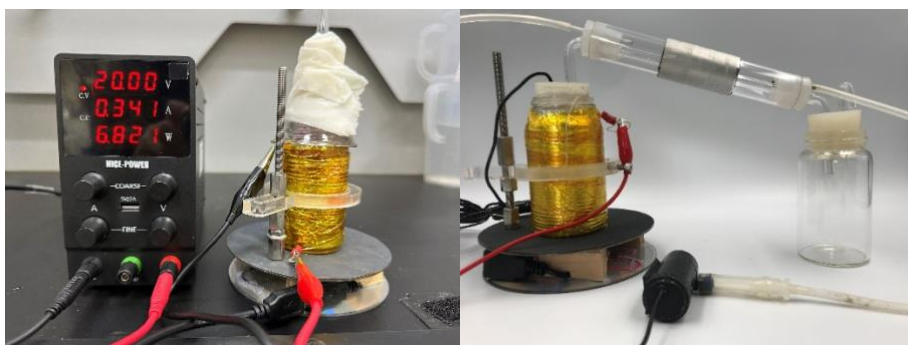


圖 3：圖左為漏斗微型電熱氣，圖右與蒸餾裝置圖

三、BR 振盪反應過程中，顏色呈現反覆性週期性改變外，還發生了那些變化？吸熱或放熱？酸鹼值上升或下降？終點深褐色產物是甚麼？

1. BR 振盪周期的測量：將手機水平放置在手機架上，鏡頭對準一個 20 毫升的玻璃樣本瓶口，樣本瓶放置在光碟型電磁攪拌平台上，瓶中放入一個磁攪拌子；隨後以分度吸量管分別吸取 5 毫升的 A 溶液與 5 毫升的 B 溶液置入樣本瓶中，啟動電源，開始攪拌；接著取一支塑膠針筒，筒內預置 5 毫升的 C 溶液，針筒端將 C 溶液注入樣本瓶內，啟動手機錄影，為時 100 秒，記錄反應過程。接著以錄影回放方式，目視記錄整個振盪個程中透明、琥珀色、藍黑色發生的時間，嘗試以顏色方塊的寬度代表出現的時間，將顏色方塊連接製作目視紀錄圖。
2. 承上，當 H_2O_2 的濃度減少為 2M、1M 時，紀錄反應過程，目視紀錄圖會發生變化？比較不同濃度下，目視紀錄圖的差異。
3. 溫度的測量：承上步驟，將 A、B 兩溶液置入玻璃樣本瓶後，開始攪拌；不鏽鋼數位溫度計插入樣本瓶中，調整高度使數位溫度計的底部不與磁攪拌子接觸，溫度計的訊號線端連接電腦；接著取一支塑膠針筒，筒內預置 5 毫升的 C 溶液，針筒端將雙氧水注入樣本瓶內，開始測量，為時 120 秒，記錄反應過程中溫度的變化。
4. pH 值的測量：反應需加入硫酸，因此監測 pH 值的變化，操作方式與步驟 2 相同，

僅將數位溫度計算換成 pH 計，溶液混合後開始測量，紀錄 120 秒內 pH 值變化。

5. 氣壓的測量：取一個 50mL 的錐形瓶，分別吸取 5 毫升的 A、B 兩溶液，置入瓶內。接著取一個預先鑽孔#5 矽膠塞，將魯爾接頭插入孔中，隨即透過二向閥連結一塑膠針筒，緊塞在錐形瓶口；10mL 針筒吸取 5 毫升的 C 溶液後注入錐形瓶中，取下針筒，換接一個氣壓感測器，開始偵測氣壓變化。圖 4 為氣壓偵測裝置圖。
6. 反應過程琥珀色溶液與終點產物的成分鑑定：承上述步驟，準備一支棉花棒，預先以 0.03% 的澱粉液沾濕，備用。當振盪反應結束時，將棉花棒插入溶液中，觀察棉花棒的顏色變化(圖 5)。



圖 4：氣壓偵測裝置圖

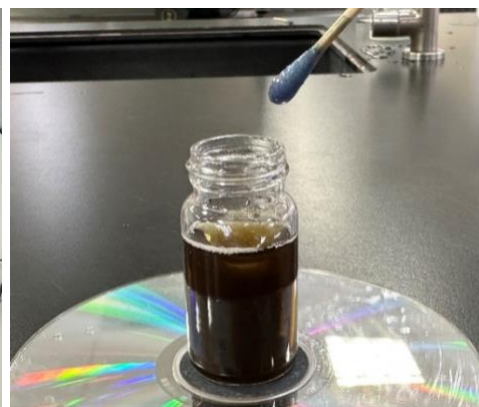


圖 5：黃褐色產物的檢測

四、除錄影目視法外，還有其他方法可以有效地監測 BR 振盪反應中，顏色週期性變化嗎？

1. RGB 色碼分析 App 法 (廖旭茂, 2020)：將安裝 RGB 色碼 APP 的手機水平放置在手機架上，鏡頭對準一個 20 毫升的玻璃樣本瓶身，相關溶液 配置、添加如上述錄影目視監測法。開始啟動手機螢幕錄影，為時 120 秒，記錄反應過程中 RGB 色碼的變化值。相關裝置如圖 6。
2. 可程式光電比色電壓感測法：此次反應溶液的顏色為黃色與藍黑色，因此選用黃光 LED 作為光源(黃色溶液，光穿透)。將組裝好可程式光電比色電壓感測模組後，將 4 毫升的樣本瓶放入自製的黑色比色槽內，接著以吸量管吸取 A、B 兩溶液各 1 毫升，啟動微型攪拌器，並加入 1 毫升的 C 溶液後，開始以 5 次/秒的設定蒐集電壓數據，振盪反應結束後停止數據蒐集，觀測震盪期間電壓的變化。
3. 數位編程氧化還原電位感測法 (簡稱 ORP 法)：BR 振盪反應涉及自由基反應，因此想透過氧化還原電位的調查，監測是否也會產生週期性的變化。溶液添加、配置方法如步驟 1，透過 Arduino 紀錄振盪過程中電位的變化，並與錄影目視法、色碼法、比色法相比較其中的異同。圖 7 為氧化還原電位計實驗裝置圖。



圖 6：色碼分析裝置，樣本瓶放置在貼上水砂紙的電磁攪拌器上

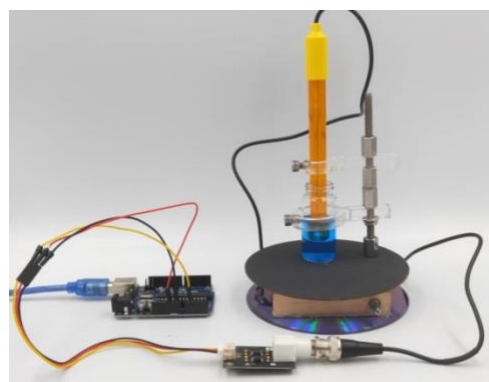


圖 7：氧化還原電位計偵測振盪反應的實驗裝置圖

五、振盪週期長短會發生改變嗎？嘗試以上述可程式氧化還原電位計法（簡稱 ORP 法）或光電比色法探究各種變因如反應物濃度（碘酸鉀、丙二酸、雙氧水、硫酸亞錳）、澱粉的存在與否、溫度、以及酸鹼值的不同對 BR 振盪次數與週期長短的影響。

1. 雙氧水（C 液）濃度的變因探究：A、B 兩液的濃度為控制變因，維持不變，將雙氧水的濃度由 4.0 改為 2.0M、1.0M、0.5M，分別進行 BR 振盪反應，以 ORP 法，測量 120 秒內振盪次數及振盪週期的變化。
2. 丙二酸（B 液）濃度變因探究：因為振盪反應中，碘分子的消耗速與與丙二酸的濃度有關（Gianluca Farusi, 2009），因此 A、C 兩液的濃度為控制變因，維持不變，將丙二酸的濃度由 0.15M 改為 0.20M、0.10M、0.075、0.05M，分別進行 BR 振盪反應，以 ORP 法，測量 120 秒內振盪次數及振盪週期的變化。
3. 溫度的變因探究：A、B、C 三液的濃度為控制變因，將反應樣本瓶置入 100 毫升燒杯容器以水浴法分別將溫度調整為 10°C、20°C、40°C，燒杯以厚玻璃纖維布包裹保溫，進行 BR 振盪反應。以 ORP 法，測量 120 秒內振盪次數及振盪週期的變化。圖 8 為 ORP 測定實驗裝置圖。
4. 指示劑澱粉的存在與否會對 BR 振盪反應造成影響嗎？比較無添加澱粉、添加 0.03%、添加 0.3%的澱粉下，以 ORP 法，測量 120 秒內振盪次數及振盪週期變化。

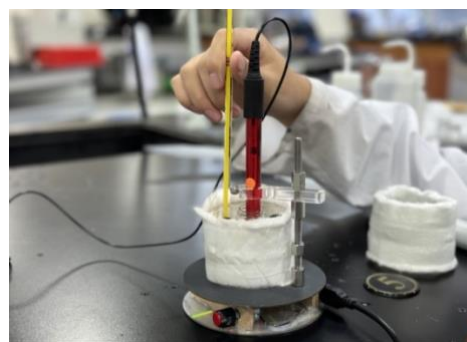


圖 8：溫度變因探究實驗過程

六、抗氧化劑維生素 C 能與紫色的自由基分子 DPPH 反應嗎？當添加的維生素 C 濃度改變時，DPPH 溶液會發生什麼變化？嘗試建立濃度與自由基清除率的數學關係式；維生素 C 會抑制 BR 振盪碘鐘反應嗎？當添加維生素 C 濃度改變時，對 BR 振盪抑制的時間會發生關係為何？嘗試建立濃度與振盪週期延遲的數學關係式。

1. 添加標示五個清潔且乾燥的試管為 1~5。以 2 毫升的分度吸量管分別吸取濃度為 1.0mM 的維生素 C 溶液 0.4、0.8、1.2、1.6mL 分別置入 2~5 號試管中，接著一另支吸量管分別吸取 2、1.6、1.2、0.8、0.4 mL 蒸餾水分別置入 1~5 試管中，配置 0~0.8mM 不同濃度的維生素 C。添加的維生素 C、蒸餾水體積列於下表：

表 1：不同濃度的維生素 C 體積配置

試管編號	1mM 維生素 C(mL)	蒸餾水(mL)	維生素 C(mM)
1	0.0	2.0	0
2	0.4	1.6	0.2
3	0.8	1.2	0.4
4	1.2	0.8	0.6
5	1.6	0.4	0.8

- 取一比色管 1，加入濃度為 0.5mM 的 DPPH 紫色溶液 2.0 毫升與試管 1 溶液，均勻混合，觀察溶液的變化；隨後再取比色管 2~5，分別加入濃度為 0.5mM 的 DPPH 紫色溶液 2.0 毫升與試管 2~5 溶液，均勻混合後。將比色管 1~5 置於暗處 30 分鐘，充分反應後取出後，觀察顏色的變化。
2. 製作維生素消除自由基的檢量線：用紙巾將所有比色液槽外部擦拭乾淨。待分光光度計暖機、以空白比色槽校正後，將比色管 1 的標準溶液放置於比色槽縫後，開始全光譜掃描。當完成全光譜掃描後，嘗試在光譜上區域中找出吸光率最大值。
 3. 添加的維生素 C 的濃度與吸光度的關係：吸光度最大值的波長掃描，分別將比色管 2~5 置入比色槽縫，蒐集收光度，吸光度與濃度之間的關係為何？
 4. 若將 A、B、C 三溶液均稀釋 1/2，為優化後的 BR 振盪實驗，原實驗中加入 0.5 毫升 0.01M 的維生素 C 後，以 ORP 法監測反應的進行，則振盪抑制時間為多少？比較添加前後振盪行為的變化？
 5. 承上，依序加入 0.5 毫升 0.02M、0.06M、1.0M、1.5M、2.0M 的維生素 C 溶液後，比較加入維生素 C 量的差異對 BR 振盪振盪抑制時間的影響，並建立濃度與延遲週期的數學關係式。

七、怎麼泡出最具抗氧化力的台灣茶？分別以 ORP 法與光電比色法，比較監測實驗結果，評估哪一種方法較適合用來監測發生抑制效應的 BR 振盪反應呢？比較包種茶、東方美人茶、紅茶、凍頂烏龍茶以及金萱茶，五種不同茶種外觀的差異、以及在不同沖泡條件下，五種茶對 BR 振盪抑制效應的大小，並藉抑制時間的長短，評估抗氧化力的高低。

1. 五種茶外觀比較：

各取五種茶葉少許，比較外觀與顏色；接著各秤取 3 克茶葉，置入容量約 150 毫升的標準杯中，沖入 100°C 沸水，浸泡 5 分鐘後，過濾出茶湯後，比較茶湯的顏色。

2. 哪一種方法較適當？

取 3 克的文山包種茶葉，置入容量約 150 毫升的標準杯中，沖入 100°C，浸泡 5 分鐘冷卻後，吸取茶湯 0.5 毫升，稀釋濃度為原茶湯的 1/20，添加至優化後的 BR 振盪反應中，以 ORP 感測法調查振盪反應抑制時間的長短，並觀察振盪期間溶液的顏色變化。承上，若將監測方法改為可程式光電比色法，加入稀釋包種茶茶湯，調查振盪反應抑制時間的長短。以較兩種方法的實驗結果的差異，並評估哪一種方法較適合用來監測受抑制的 BR 振盪反應？

3. 越濃越抗氧化嗎？

取 3 克的文山包種茶葉，置入容量約 150 毫升的標準杯中，沖入 100°C，浸泡 5 分鐘冷卻後，吸取茶湯 0.5 毫升，添加至優化後的 BR 振盪反應中，以 ORP 感測法調查振盪反應抑制時間的長短。承上，依序將茶湯稀釋為 1/5、1/10、1/20，各取 0.5 毫升添加至優化後 BR 振盪反應中，以 ORP 法監測振盪行為的差異，並比較不同濃度間抑制時間的長短。

4. 哪一泡最抗氧化？

承步驟 1，取 3 克的文山包種茶葉，置入容量約 150 毫升的標準杯中，以熱開水浸泡 5 分鐘後，將茶湯倒至燒杯中，為第一泡茶；再以 100°C 熱開水沖泡原標準杯中沖泡過的一次包種茶葉，浸泡 5 分鐘後，將茶湯倒至燒杯中，即為第二泡茶；重複上述步驟，再以 100°C 熱開水沖泡原標準杯中沖泡過的二次包種茶葉，浸泡 5 分鐘後，將茶湯倒至燒杯中，即為第三泡茶。分別 1 毫升針筒吸取三個燒杯中的茶湯，稀釋濃度為 1/20 後，各吸取 0.5 毫升後依序加入優化的 BR 振盪反應中，以 ORP 法調查、比較第一~三泡包種茶湯對振盪反應抑制時間的長短。承上，依序沖泡的東方美人茶、日月潭的紅茶、鹿谷的凍頂烏龍茶以及阿里山的金萱茶，重複上述步驟，調查並觀測振盪反應的抑制時間。比較五種茶，在不同沖泡次數，振盪行為的差異與抑制效應的長短，並藉此評估五種茶湯抗氧化的高低。

5. 茶葉的沖泡溫度越高，抗氧化能力越強？

承步驟 1，相同沖泡條件下，改變沖泡溫度由 100°C 降為 80、60°C，比較不同溫度沖泡下，茶湯的添加對 BR 振盪行為延遲的影響。調查並比較不同溫度沖泡下，五種茶湯抑制時間的長短，並藉此評估五種茶湯抗氧化的高低。

6. 茶葉浸泡越久越抗氧化？

同步驟 1，分別以 1 毫升針筒吸取以 100°C 熱水浸泡過 5 分鐘、15 分鐘、30 分鐘後的同一包種茶湯各 0.5 毫升，並將吸取的茶湯稀釋濃度為 1/20，加入優化的 BR 振盪反應中，以 ORP 法調查振盪反應抑制時間的長短，試比較浸泡時間的長短，對抑制時間的影響。並藉此評估各茶湯抗氧化的關係。承上，依序沖泡、北埔的東方美人茶、日月潭的紅茶、鹿谷的凍頂烏龍茶以及阿里山的金萱茶，重複上述步驟，調查並觀測振盪反應的抑制時間。比較五種茶，在不同浸泡時間下，抑制效應的差異，並藉此評估各茶湯抗氧化力的高低。

7. 文獻上說義式咖啡的抗氧力很強 (Gianluca Farusi, 2009)，嘗試透過 ORP 感測法，比較枸杞、薑黃、蝶豆花、美式咖啡、日月潭紅茶對振盪反應抑制時間的長短，並藉此評估各食物抗氧化力的高低。

八、實驗廢液如何處理？反應達終點時，溶液推測有難溶於水的碘、可溶性的亞錳離子、三碘離子 I_3^- 、硫酸、雙氧水的存在，因此廢液必須進行減毒與回收，相關預定步驟如下：

1. 萃取分離：將 90 毫升深褐色的廢液與 30 毫升正己烷置入分液漏斗，上下搖晃，進行萃取，其中大部分三碘離子會分解出碘分子，觀察兩層溶液的變化。
2. 電熱昇華：打開分液漏斗閥門，分離水相廢液與紫色的正己烷溶液。使用微型電熱模組，加熱含碘的正己烷溶液，嘗試在 50~60°C 將正己烷揮發，在電熱瓶中回收粗製的碘。接著提高溫度，使碘昇華，於電熱瓶上方的玻璃漏斗上方凝華析出。
3. 還原：以滴管吸取飽和的硫代硫酸鈉溶液，滴入燒杯中的廢液，觀察溶液顏色是否發生變化？繼續滴加至顏色透明，不再回復為止。過程中的氣泡應該是何種氣體？
4. 中和：以滴管吸取飽和碳酸鈉溶液，滴入上述步驟 C 燒杯中，以玻棒攪拌溶液，觀察溶液顏色的變化；持續添加碳酸鈉溶液，與攪拌，至氣泡消失為止。
5. 步驟 E_過濾：靜置並過濾溶液，回收沉澱物錳的氧化物。右圖 9 為實驗流程圖。

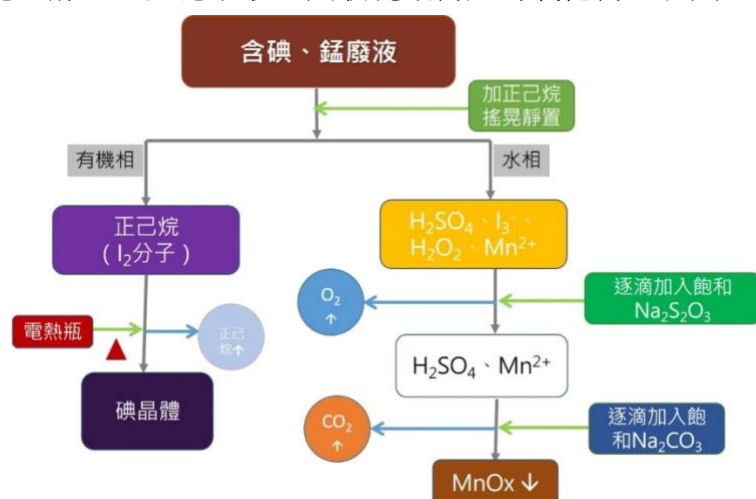


圖 9：實驗廢液的減毒與前驅物的提煉回收流程

伍、研究結果與討論

一、BR 振盪反應過程現象的觀察顏色：呈現反覆性週期性改變外，還發生了那些變化？是吸熱或放熱？酸鹼值上升或下降？深褐色產物是甚麼？

1. 以錄影回放目視觀測紀錄 BR 振盪周期性的變化：

實驗發現：添加 4M 的雙氧水後，BR 振盪剛開始是藍色，慢慢變為無色，隨後變回琥珀色，接著很快又變回藍色，周而復始，大概是 15~16 個週期後，反應不再變化，溶液最後呈深褐色。在 100 秒內的監測得到，4M(15 次)>2M(9 次)>1M(7 次)。不同濃度 H_2O_2 下，振盪顏色變化的目視記錄圖如下：

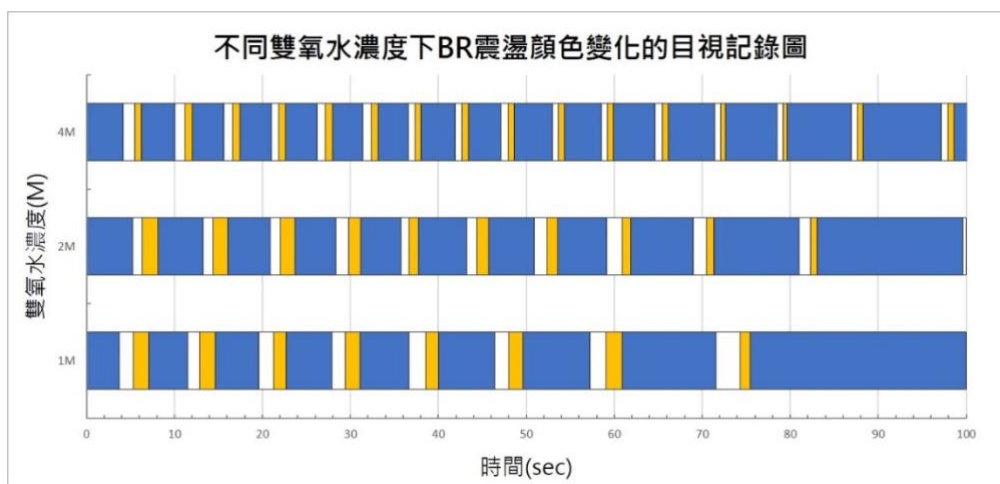


圖 10：不同雙氧水濃度下 BR 振盪顏色變化的目視記錄圖

【推測】：反應接近終了，反應物濃度因消耗而降低，振盪速率變慢。添加的 H_2O_2 的濃度越高，振盪週期越短，頻率越高；振盪頻率與 H_2O_2 的濃度呈正相關。

2. 反應過程溫度的監測：

實驗發現：120 秒內，溫度漸漸升高約 1°C 。振盪過程的溫度變化如下圖所示：

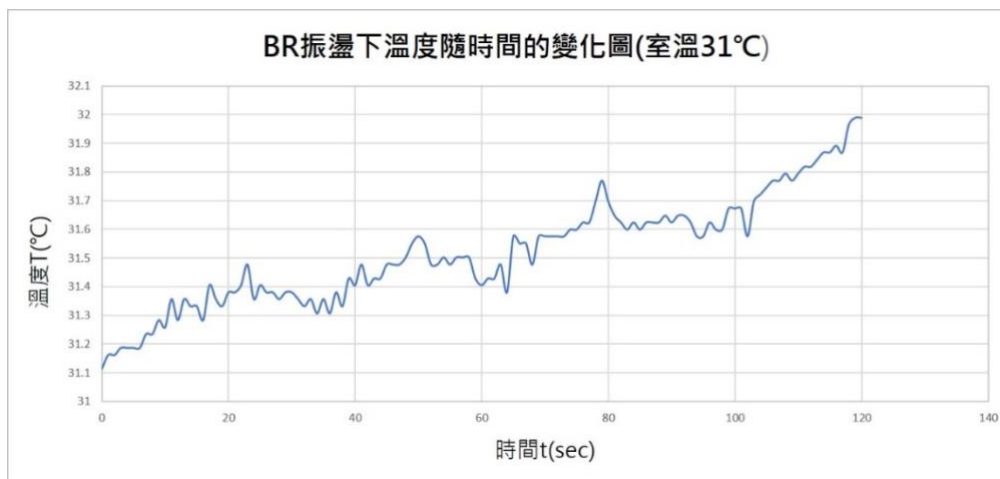


圖 11：BR 振盪下溫度隨時間的變化圖

【推測】：BR 振盪牽涉到自由基的反應，又屬於自發的氧化還原過程，放熱反應推測是合理的。

3. 反應過程 pH 值的監測

實驗發現：120 秒內，酸鹼值振盪走低，溶液變酸。下圖 pH 值的變化圖。

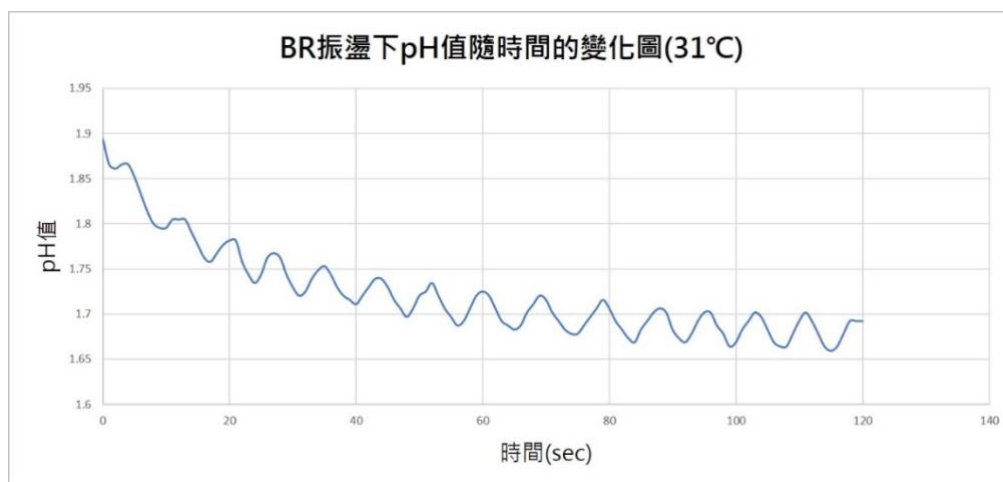


圖 12：BR 振盪下 pH 值隨時間的變化圖

【推測】：BR 振盪過程中，生成氫離子，使得 pH 值下降。

4. 反應過程氣壓的監測

實驗發現：120 秒的振盪過程，容器內氣壓越來越高。氣壓變化如下圖所示：

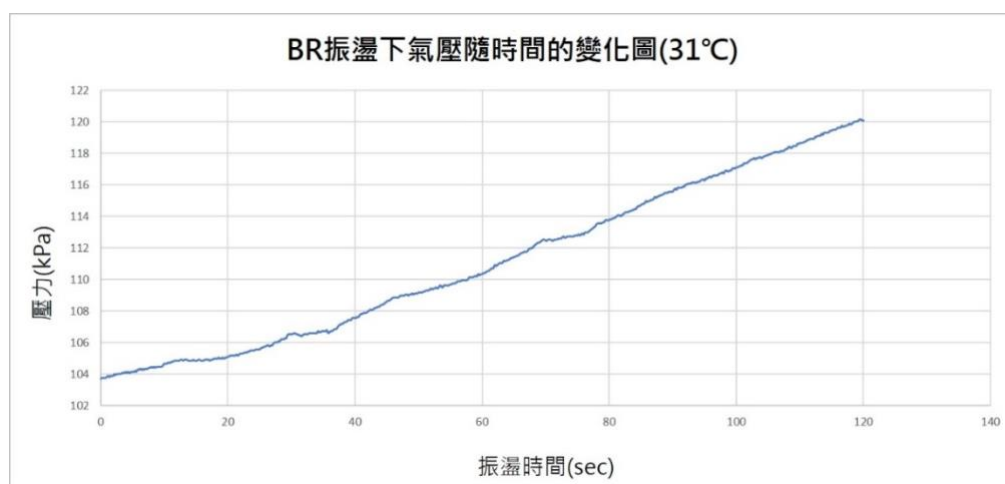


圖 13：BR 振盪下氣壓隨時間的變化圖

【推測】：振盪過程中，有氣體產生，因其中涉及 H_2O_2 的分解，推測其中含有 O_2 。

5. 反應終點深褐色產物的成分鑑定

實驗發現：以預先沾濕澱粉液的棉花棒去沾拭實驗溶液，棉花棒呈藍黑色(圖 5)。

【推測】：深褐色溶液中應該含有 I_3^- 。

二、除錄影目視法外，監測 BR 振盪反應中顏色週期性變化的方法，包含 RGB 色碼分析 App 法、可程式光電比色電壓感測法、數位編程的氧化還原電位感測法三種方法的比較：

1. 利用 RGB 色碼分析 App 法，記錄 120 秒反應過程中 RGB 色碼的變化值。

實驗發現：藍、無、琥珀黃三個顏色呈現週期性變化，藍色的區塊的 $B/(R+G+B)$ 比值較高，約介於 4.20~4.73 之間，黃色的區塊的藍色色碼值與藍綠紅三色碼總和的比值 $B/(R+G+B)$ 較低，約介於 2.85~3.15 之間。色碼比值隨時間的變化如下圖所示：

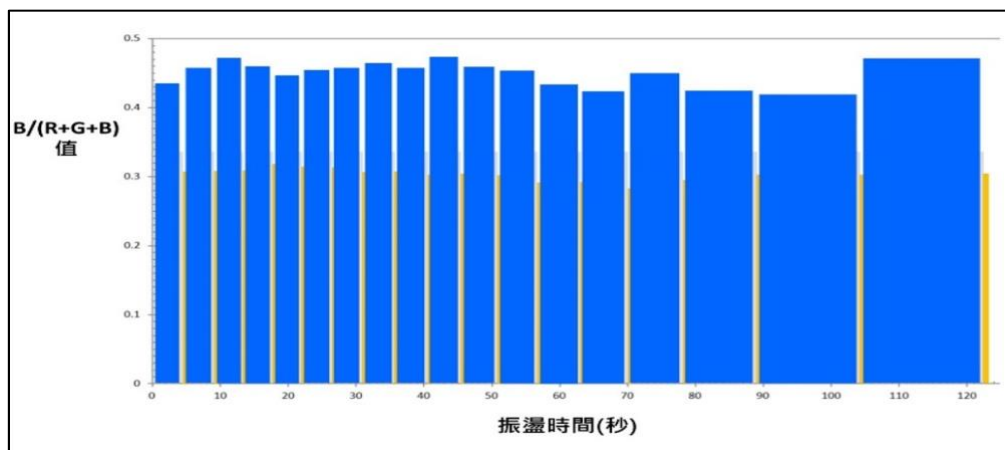


圖 14：藍色碼與 RGB 色碼總和比值($B/(R+G+B)$)隨時間的變化圖

【推測】：BR 振盪過程中，藍色狀態的時間較長，碘分子的生成與消耗速率較為緩慢。反應終了，反應物消耗，濃度降低，振盪速率變慢。

2. 利用可程式光電比色電壓感測法，記錄 120 秒反應過程中電壓的變化值。

實驗發現：光電二極體偵測的光強度轉化成電壓，振盪過程中呈現週期性變化，以 ARDUINO 電位計量測的電壓介於 0.00V~2.00V 之間。下圖為光電比色法監測 BR 振盪中，光電壓隨時間的變化圖。

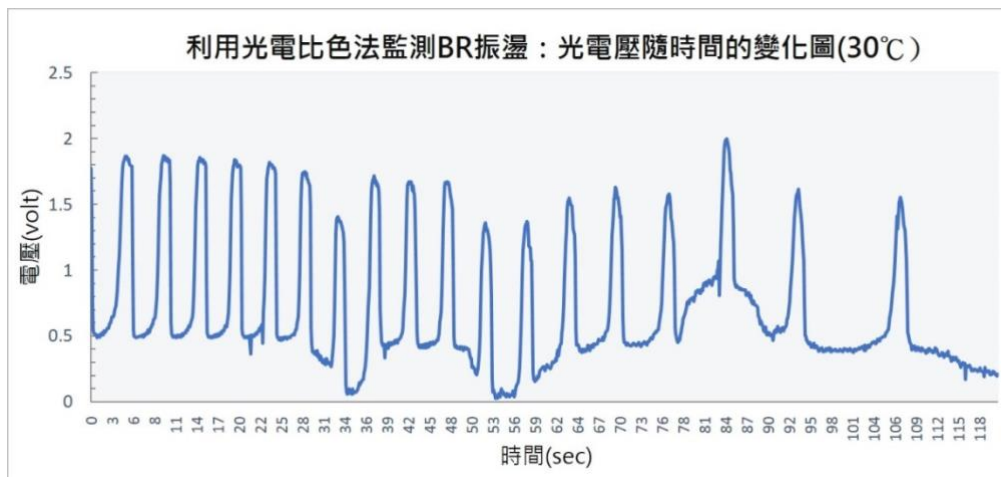


圖 15：光電比色法監測 BR 振盪：電壓隨時間的變化圖

【推測】：BR 振盪過程中以黃色燈泡作為光源，當溶液呈黃色時，黃光大部分穿透溶液，光電二極體轉換的光電流強，掛載固定電阻下，光電壓亦高；當溶液呈藍色時，黃光大部分被溶液吸收，光電二極體轉換的光電流強度弱，掛載固定電阻下，光電壓亦偏低；因此判定波峰為黃色，波谷區為藍色。振盪終了，振盪速率變慢，週期拉長，最終溶液呈不透光的混濁深綠褐色，因此光電壓下降。

3. 利用數位編程的氧化還原電位計(ORPmeter)，記錄 120 秒反應過程中 ORP 的變化。

實驗發現：溶液呈琥珀黃時，ORP 在波峰高點，當溶液轉為藍色時，ORP 下降至波谷區駐留；振盪過程中顏色、ORP 呈現週期性變化，約介 645~700mV 之間。振盪結束前，振盪速率變慢，週期拉長，當溶液呈現深褐時，ORP 振盪停止。下圖 16、17 分別為 ORP 隨時間的變化圖、與振盪過程周期長短的變化。

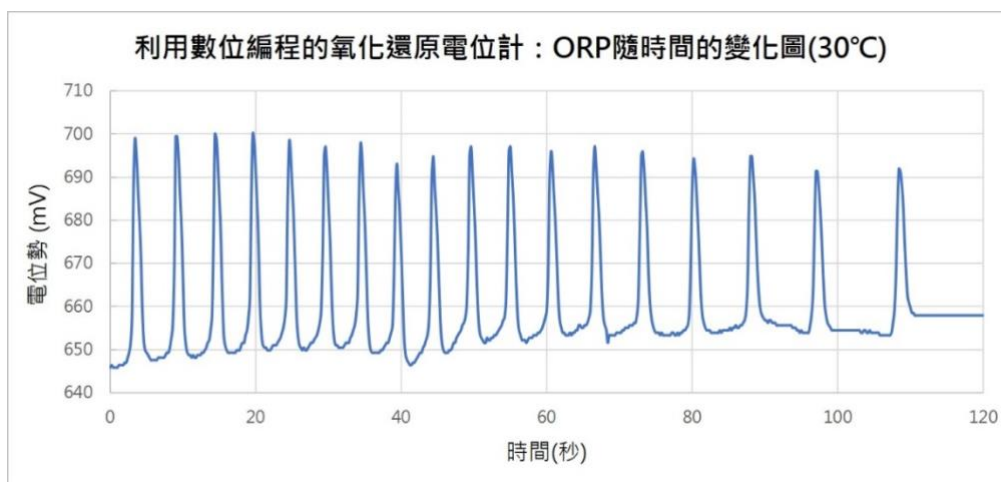


圖 16：ORP 隨時間的變化圖

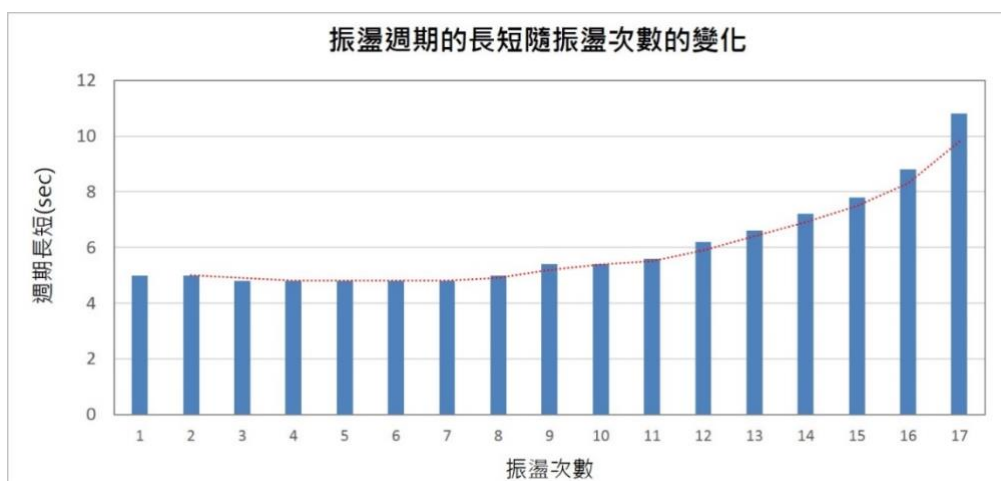


圖 17：振盪週期的長短隨振盪次數的變化

【推測】：ORP 上升至高峰，呈現黃褐色，應該是三碘離子濃度的增加；ORP 至高峰下滑過程時，呈現藍色，應該是碘離子生成碘分子，碘分子與碘離子快速結合成

三碘離子，三碘離子與澱粉錯合，溶液變為藍色；振盪反應的後半期，每一周期時間拉長應該與反應物濃度下降，速率變慢有關。

三、振盪週期長短會發生改變嗎？探究各種變因對 BR 振盪行為(振盪週期、次數等)的影響。

1. 雙氧水濃度的變因探究：將雙氧水的濃度由 4.0M 改為 2.0M、1.0M、0.5M，以 ORP 感測法，測量 120 秒內振盪次數及振盪週期的變化。

實驗發現：濃度越低，第一次振盪起步時間越晚，振盪週期時間拉得越長，振盪次數越少，振幅越大；濃度越高，振盪越快，振盪週期越短(速度越快)，振盪次數越多，振幅越小。不同濃度的 H_2O_2 下，縱座標為 ORP(mV)，橫坐標為時間(sec)，BR 振盪模式如下圖所示：

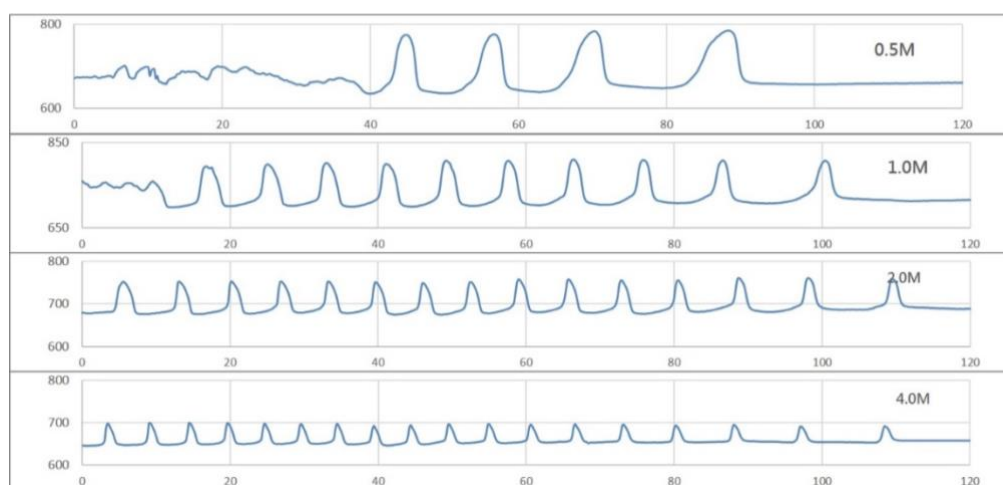


圖 18：不同濃度的 H_2O_2 ，BR 振盪行為的比較

若以濃度與振盪次數作圖，可以發現 120 秒內的振盪次數： $4\text{M} > 2\text{M} > 1\text{M} > 0.5\text{M}$ 。下圖為 120 秒內振盪週期次數與雙氧水濃度的關係。

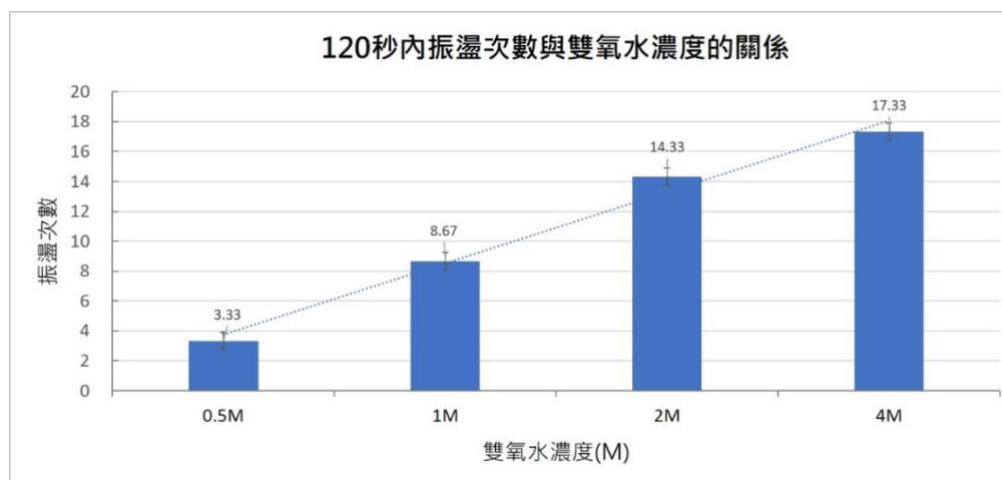


圖 19：120 秒內振盪週期次數與 H_2O_2 濃度的關係

【推測】： H_2O_2 濃度越高，振盪速率越快。

2. 丙二酸〔B 液〕濃度變因探究：

實驗發現：隨丙二酸濃度的增加，120 秒內的振盪頻率增加，週期縮短；120 秒內的振盪次數的多寡為 0.3M (21 次) > 0.15M (17 次) > 0.075M (8 次) > 0.03M (3 次)。下圖為濃度與振盪次數的關係。

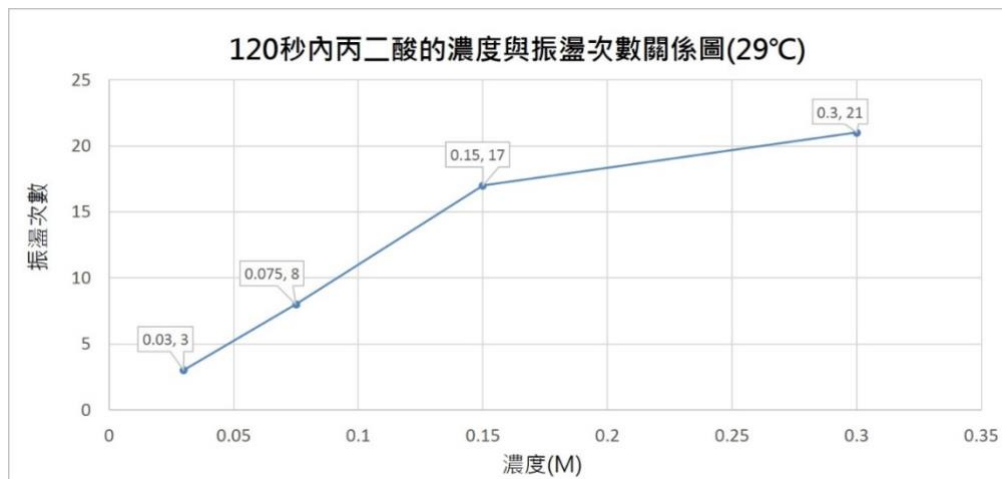


圖 20：120 秒內振盪週期次數與丙二酸濃度的關係

【推測】：丙二酸的濃度越高，振盪頻率越快；碘酸鉀濃度為 0.2M，0.15M 以下，丙二酸的濃度與振盪次數有較好的線性關係。

3. 溫度變因探究：將溫度調整為 10°C、25°C、40°C，測量 180 秒內振盪過程的變化。

實驗發現：隨溫度的增加，180 秒內的振盪頻率增加，週期縮短，振幅變小；120 秒內的振盪次數的多寡為 40°C (20 次) > 25°C (13 次) > 10°C (1 次)。下圖為濃度與振盪次數的關係。下圖為不同溫度下，BR 振盪 ORP 隨時間的變化。

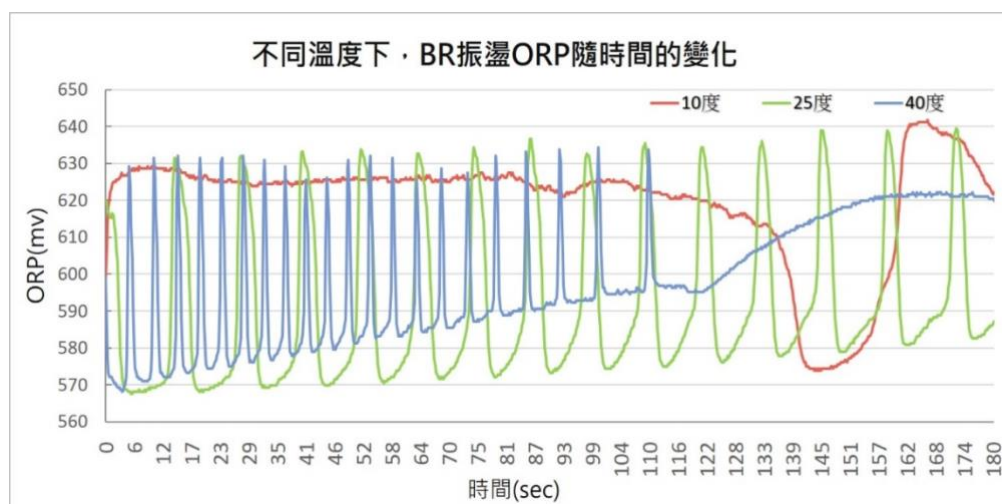


圖 21：不同溫度下振盪 ORP 隨時間的變化圖

【推測】：溫度降低，分子動能降低，反應速率變慢，振盪週期拉長；溫度升高，分子動能升高，反應速率變快，振盪週期縮短。

4. 指示劑澱粉的探究：比較無添加澱粉、添加 0.03%、添加 0.3%的澱粉條件下，，測量 180 秒內振盪過程的變化。

實驗發現：振盪次數與振盪時間隨澱粉添加濃度的增加而增加，振盪週期時間長度亦是如此。ORP 與澱粉的添加量的關係如下圖所示：

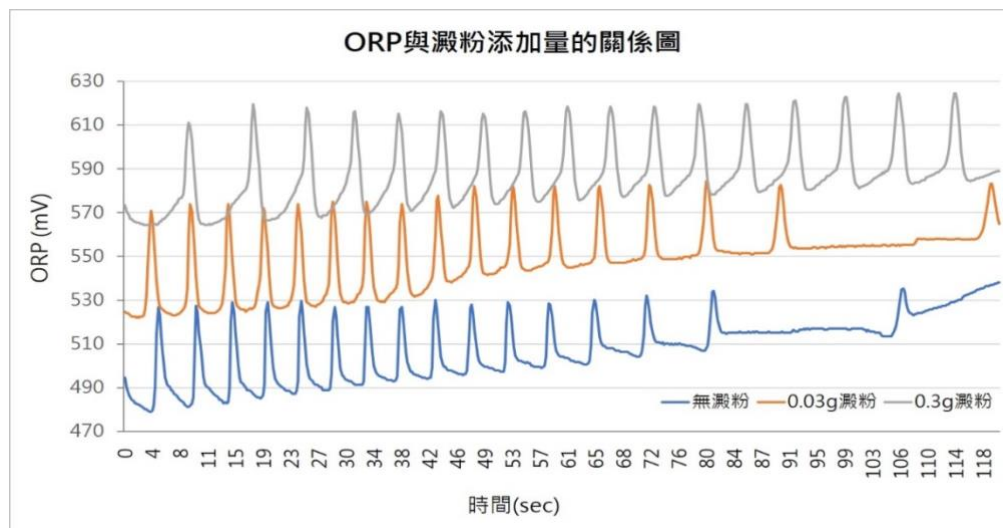


圖 22：ORP 與澱粉的添加量的關係圖

【推測】：與不含澱粉的混合物相比，存在澱粉的情況下，振盪時間變久，週期時間也拉長。推測澱粉與三碘離子錯合延遲了碘分子還原丙二酸的速率有關。

四、維生素 C 宣稱可與自由基作用，用於自由基的清除，嘗試建立維生素 C 濃度與自由基分子 DPPH 清除率的數學關係式；維生素 C 抑制 BR 振盪碘鐘反應嗎？試建立濃度與振盪週期延遲的數學關係式。

1. 不同濃度的維生素 C 與 0.5mM DPPH 紫色溶液於暗室中反應 30 分鐘後的變化為？

實驗發現：維生素 C 濃度越高，紫色越淡。下圖為比色管內溶液的顏色變化。

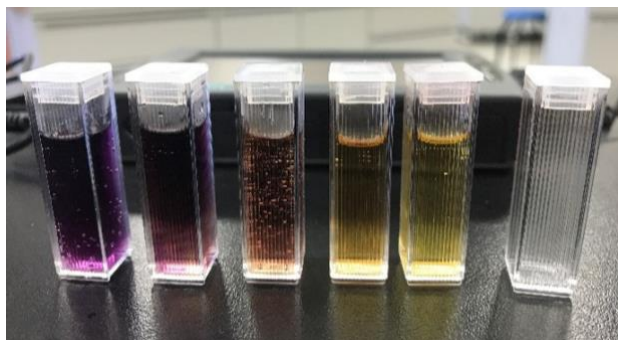


圖 23：由左而右為 1~5 號比色管，最右邊為空的比色管

【推測】：維生素 C 濃度越高能與越多的 DPPH 分子作用，紫色消褪越明顯。

2. 分光光度計全光譜掃描，找出吸光率最大值。

實驗發現：最大吸收波長約大 508、517nm。DPPH（乙醇）全光譜掃描圖如下。

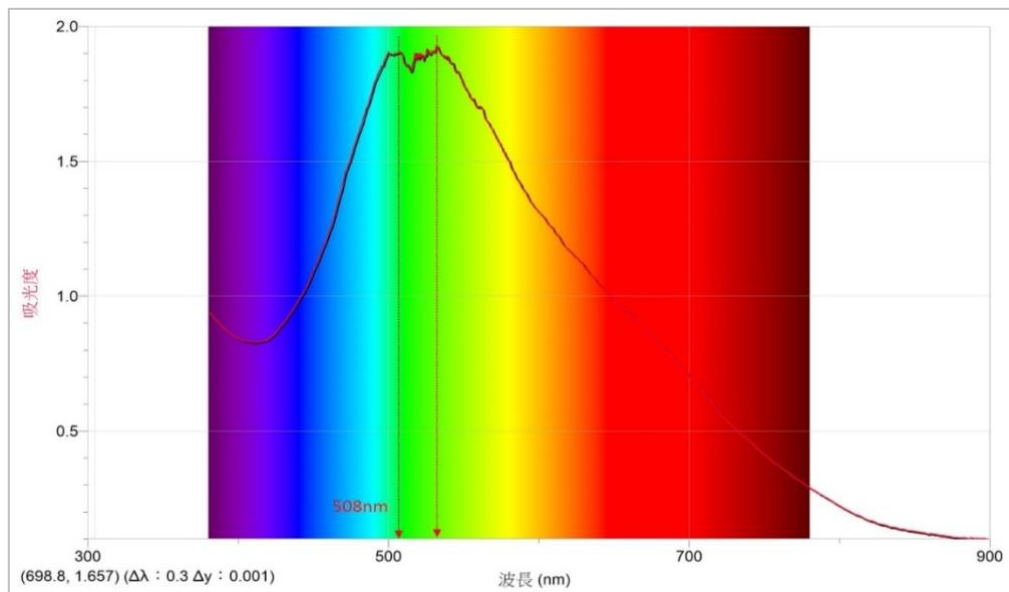


圖 24：DPPH(乙醇)的全光譜掃描

【推測】：本實驗採 508nm 的吸收峰，進行檢量線的製作

3. 添加的維生素 C 的濃度與吸光度的關係：

實驗發現：添加的維生素濃度越高，紫色褪色越明顯，吸收度越低；線性方程式為吸光度 $y = -1.5C + 1.95$ ，C 為濃度。相關係數 0.994。濃度與吸收度的關係圖如下。

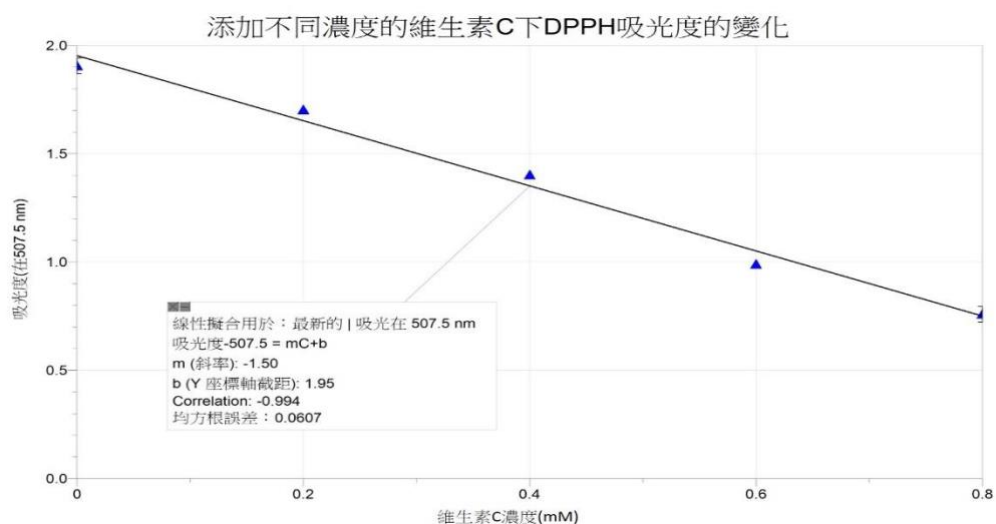


圖 25：添加不同濃度的維生素 C 下吸光度的變化

【推測】：濃度與吸光度的減少量呈高度相關，抗氧化物與 DPPH 反應後的溶液，測得的吸光度可帶入此檢量線，推算自由基清除力。

4. 比較添加入 0.5 毫升 0.01M 的維生素 C 前後，振盪行為發生的變化？

實驗發現：加入維生素 C 後，振盪時間延長，周期亦拉長，120 秒內得振盪次數由 10 次減為 6 次。下圖為添加維生素 C 與空白實驗之比較。

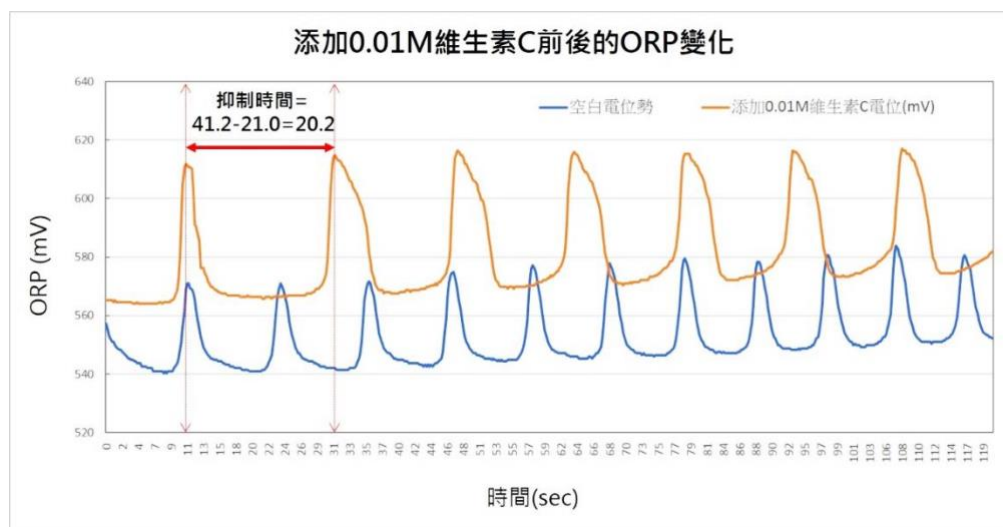


圖 26：添加 0.01M 維生素 C 前後的 ORP 變化

【推測】：空白實驗第一次振盪周期時間 12.4 秒，當添加維生素 C 後，振盪周期延遲至 20.2 秒，明顯發生了振盪抑制效應，振盪時間拉長，周期亦拉長。

5. 添加不同濃度的維生素 C 溶液後，比較濃度差異對 BR 振盪抑制時間的影響，並建立濃度與延遲週期的數學關係式。

實驗發現：加入維生素 C 後，振盪時間延長，抑制時間亦延長。每個實驗重複三次，之後計算平均值與標準差，結果如下表所示。

表 2：180 秒內添加不同濃度的維生素 C 與抑制時間的關係

維生素 C 濃度(M)	抑制時間(秒)
0.01	18.5 ± 1.24
0.02	21.9 ± 0.44
0.06	31.2 ± 0.93
0.10	44.0 ± 1.33
0.15	56.5 ± 1.24
0.20	78.0 ± 1.07

【推測】：添加的維生素 C 越多，可與反應中越多的自由基反應，濃度因而下降，延緩振盪速率，抑制時間因而拉長，經數據處理可得兩者的關係為二項式 $y = 1.842x^2 - 1.063x + 17.463$ ，($R^2 = 0.998$)。下圖為維生素 C 濃度與抑制時間的關係：

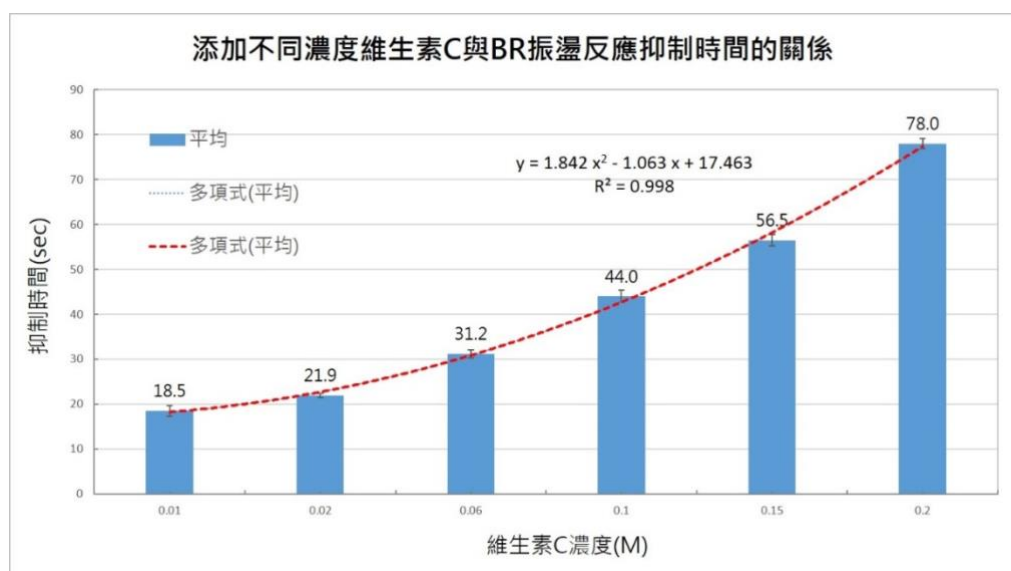


圖 27：添加不同濃度維生素 C 與 BR 振盪反應抑制時間的關係

五、怎麼泡出最抗氧化力的台灣茶？分別以 ORP 感測法與光電比色法，比較監測實驗結果，評估哪一種方法較適合用來監測，並比較包種茶、東方美人茶、日月潭紅茶、凍頂烏龍茶；金萱茶五種不同茶種、外觀(含顏色、狀態、茶湯)、不同發酵程度的台灣茶抗氧化力的大小。

1. 外觀、顏色、茶湯的比較：包種茶屬於輕度發酵茶，外觀為條狀、捲曲，顏色呈墨綠色，茶湯為黃綠色；東方美人茶為重度發酵茶，茶菁多為幼嫩茶芽，顏色呈白、綠黃、紅褐相間，茶湯為橙紅色；日月潭紅茶，屬於全發酵茶，外觀為條狀、捲曲，顏色呈暗黑色，茶湯為金紅色；此次實驗採用的烏龍茶，屬發酵程度較高的碳焙烏龍茶，其外觀緊結成球形，顏色呈暗紅，茶湯呈橙紅色；阿里山金萱茶，屬於輕度發酵茶，外觀緊結成圓球狀，顏色呈翠綠色，茶湯為淡綠色。(農委會茶葉改良場，2023) 下圖為五種茶的外觀、茶湯色澤比較。



圖 28：五種茶的外觀、茶湯色澤比較

2. 哪一種方法較適當？以文山包種茶為例（原茶湯，濃度稀釋為 1/20，取 0.5 ml）。

實驗發現：當加入包種茶湯後，利用 ORP 的方法，振盪反應暫停，溶液呈無色，直到 844 秒後開始振盪，顏色維持無色，隨後漸漸變藍，約 200 秒後，顏色恢復至原來藍色，抑制時間為 802.8 秒；而光電比色法加入包種茶湯後，遲至第 1068 秒才出現光電壓的波谷，抑制時間為 1050.8 秒。相關比較，如下圖所示。

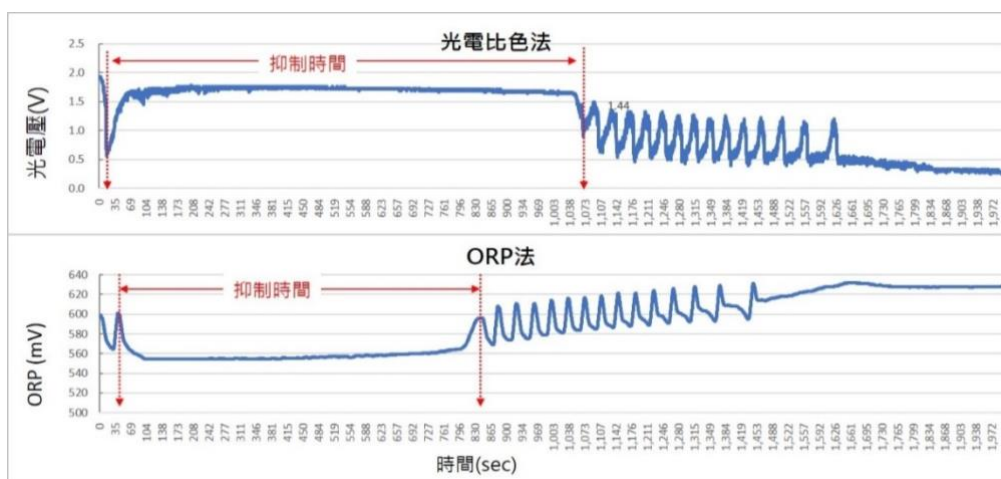


圖 29：光電比色法與 ORP 法測量包種茶抑制時間的比較

【推測】：抑制效應結束顏色由無色慢慢漸藍色，光電比色法是偵測顏色的變化，若顏色太淡，光電比色法不夠靈敏，無法偵測振盪反應的進行；直到 1068 秒後，振盪的波谷電壓慢慢走低，代表溶液的藍色越來越深。光電比色法的 1050.8 秒與 ORP 法 802.8 相比，ORP 法較能提早、並精確地完整監測抑制效應過程。

3. 越濃越抗氧化嗎？比較包種茶原茶湯、原茶湯體積稀釋為 5、10、20 倍，各取 0.5 毫升添加至 BR 振盪反應中，觀察振盪行為的差異，並比較抑制時間的大小。

實驗發現：當加入包種茶湯後，振盪反應暫停，溶液呈無色，加入的茶湯越濃，抑制時間越長，抑制時間長短順序：原茶湯(18973)>稀釋 5 倍(4909 秒)>稀釋 10 倍(1492 秒)>稀釋 20 倍(647 秒)。下圖為茶湯濃度與抑制時間關係。

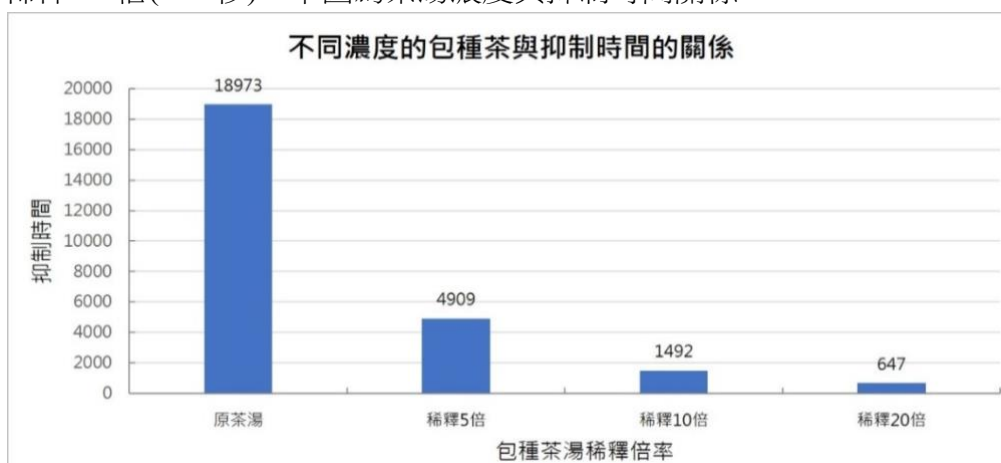


圖 30：不同稀釋倍數的包種茶與抑制時間的關係

【推測】：茶湯的濃度越高，抑制效果越明顯，抗氧化能力也越好，此結果與文獻中使用 DPPH 自由基清除法的測試結果相同(楊剛顯，2008)。濃度與抑制時間成高度相關，兩者關係如下圖所示。

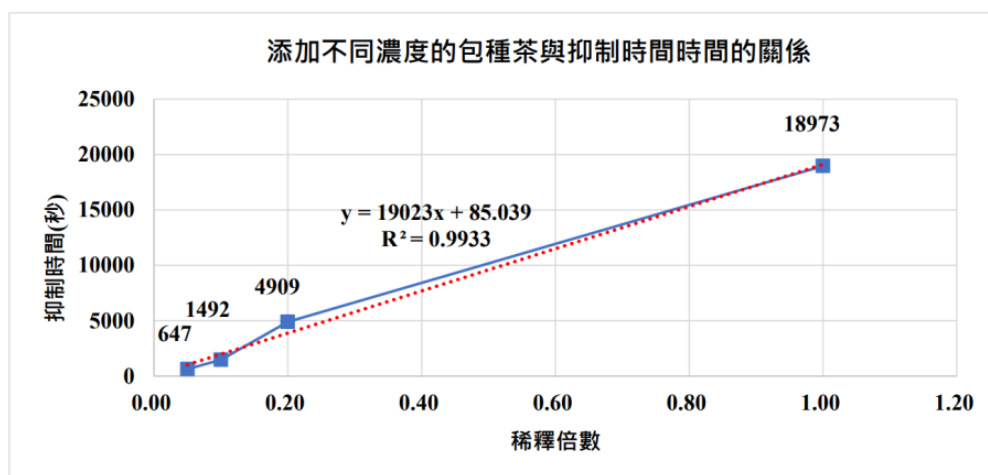


圖 31：不同濃度的包種茶與抑制時間的線性關係。圖中 x 軸 1.00 代表原茶湯，0.2 代表稀釋 5 倍，0.1 代表稀釋 10 倍，0.05 代表稀釋 20 倍。

4. 哪一泡最抗氧化？100°C熱開水沖泡包種茶葉，浸泡 5 分鐘後，將茶湯倒至燒杯中，重複步驟連續三次得一~三泡茶。分別 1 毫升針筒吸取三個燒杯中的茶湯，稀釋濃度為 1/20 後，吸取個別茶湯 0.5 毫升後依序加入振盪反應中，調查第一~三泡振盪行為的差異。承上，重複上述步驟，比較五種茶，在不同沖泡次數，振盪行為的差異與抑制效應的長短，並評估五種茶湯抗氧化的關係。

實驗發現I：當加入第一~三包種茶湯後，振盪反應皆暫停，溶液呈無色，加入的第一泡茶湯，抑制時間最長。抑制時間長短順序：第一泡(597.2)>第二泡(522.2 秒)>第三泡(401.8 秒)。下圖為包種茶第一~三泡與抑制時間的關係。

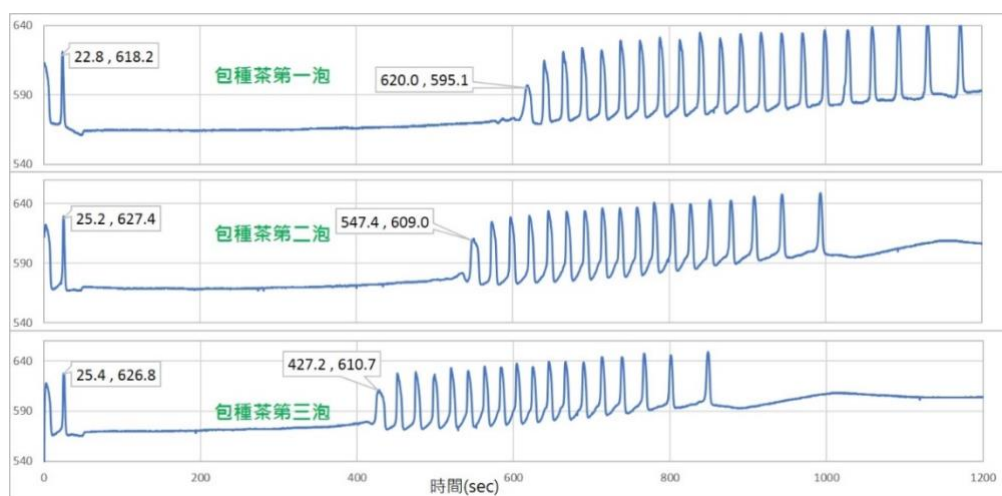


圖 32：包種第一~三泡茶抑制效應的比較

實驗發現II：五種茶中，第一泡茶，抑制時間以日月潭紅茶 1039 秒最長，北埔東方美人茶 422 秒最短，五種茶的抑制時間長短，分別為紅茶(1039 秒)>金萱茶(669 秒)>烏龍茶(658 秒)>包種茶(597 秒)>東方美人茶(422 秒)；第二泡茶的抑制時間大小：紅茶>烏龍茶>金萱茶>包種茶>東方美人茶；第三泡茶抑制時間大小：烏龍茶>金萱茶>包種茶>東方美人茶>紅茶。第三泡茶的抑制時間都是最短的。下圖為添加五種茶第一~三泡抑制時間的比較。

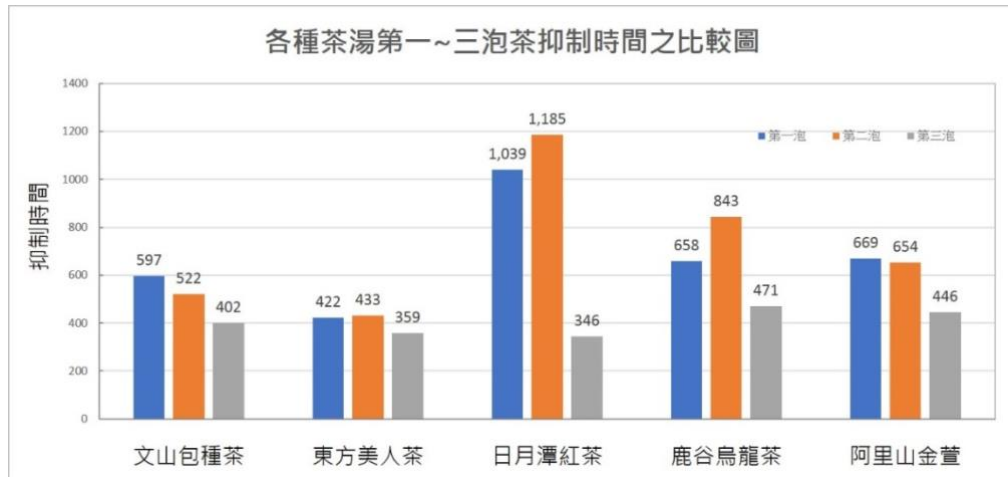


圖 33：各種茶湯第一~三泡茶抑制時間之比較圖

【推測】：除包種茶、金萱茶外，第二泡的抑制效果都大於第一泡，推測沖泡時間較短，茶葉未充分泡開，第二泡茶葉充分泡開後，致使第二泡茶湯的抑制效果較佳；所有茶的第三泡因茶葉已泡開過，致使殘留的抗氧化物明顯降低。

5. 茶葉的沖泡溫度越高，抗氧化能力越強？

實驗發現：五種茶中，100°C沖泡下，抑制時間以日月潭紅茶 993 秒最長，北埔東方美人茶 391 秒最短。沖泡溫度越高，茶湯的抑制效應越好，時間越長。五種茶都是 100°C > 80°C > 60°C。下圖為不同沖泡溫度下，五種茶抑制時間的比較圖。

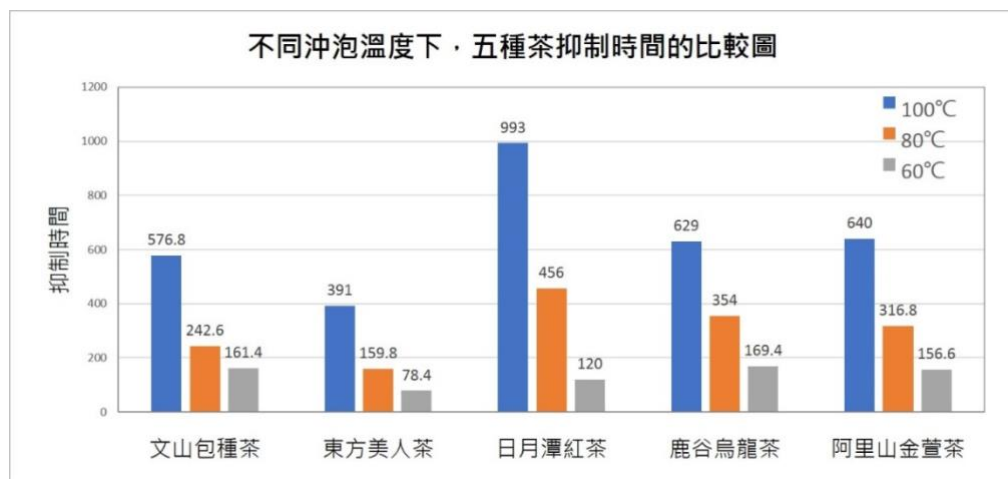


圖 34：不同沖泡溫度下，五種茶抑制時間的比較圖

【推測】：溫度越高，對茶葉中的抗氧化成分萃取效果越好。

6. 茶葉浸泡時間越久越抗氧化？

實驗發現：五種茶中，浸泡時間越久，添加後對振盪反應的抑制時間越長，五種茶都是浸泡 30 min > 15min > 5min。下圖為五種茶浸泡時間與抑制時間的比較。

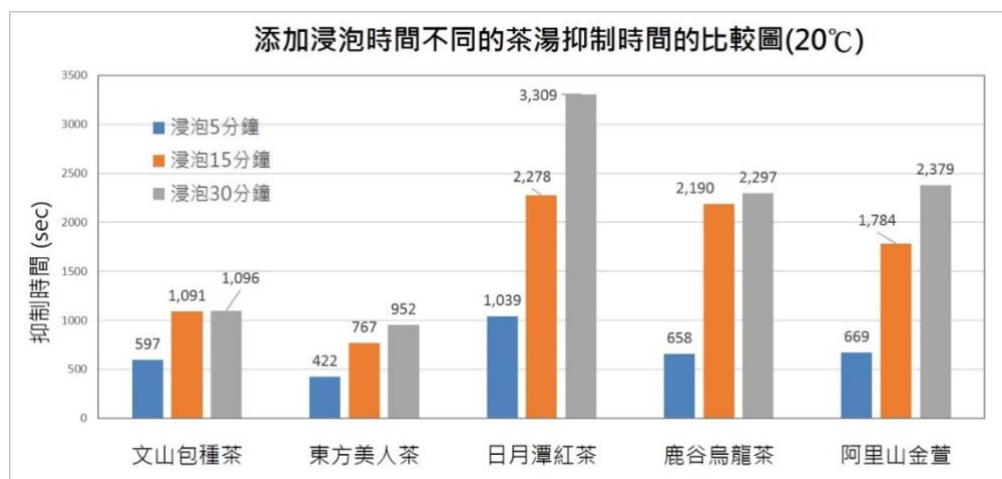


圖 35：不同浸泡時間下，五種茶抑制時間的比較圖

【推測】：浸泡時間越久，茶湯對 BR 振盪反應的抑制效應越高，推測時間越長，萃取出來的抗氧化成分越多；浸泡 30 分鐘的茶湯對 BR 振盪反應的抑制效應最高的是紅茶，東方美人茶最低。

7. 比較生活中常見具抗氧化的食品，如枸杞、薑黃、蝶豆花、美式咖啡、日月潭紅茶的抗氧化力。

實驗發現：在室溫 15.2°C 下，抑制效應的高低為美式咖啡(8927.8)紅茶(466.0 秒)>薑黃粉(50.2 秒)>蝶豆花(34.6 秒)>維生素 C(32.6 秒)>空白(加水，29.2 秒)。咖啡的抑制效果明顯高出其他抗氧化物。下圖為添加咖啡後 ORP 隨時間的變化圖。

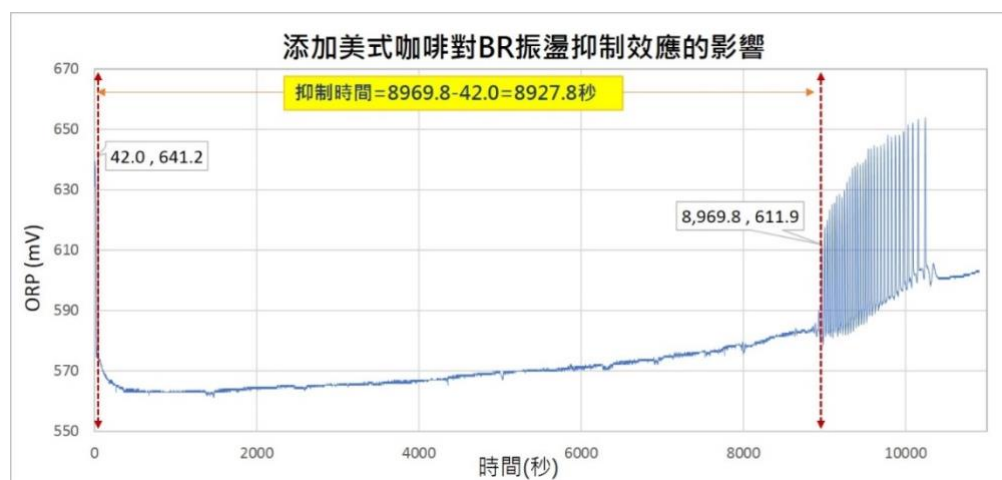


圖 36：添加美式咖啡對 BR 振盪抑制效應的影響

【推測】：咖啡中因含有濃度較高的咖啡多酚-綠原酸 (chlorogenic acid)，故能對 BR 振盪反應產生明顯高於其他抗氧化物的抑制效應。(何汶珊，2019)

六、實驗廢液如何處理？反應達終點時，溶液推測有難溶於水的碘、可溶性的亞錳離子、三碘離子 I_3^- 、硫酸、雙氧水的減毒與回收。

1. 碘的提煉回收：將分液漏斗正己烷的碘溶液置入電熱瓶中進行蒸餾分離，但實驗發現使用 60~65°C 電熱式蒸餾法難以完全地將兩者分離，收集瓶中無法收集到無色的正己烷；之後改變方法，將玻璃漏斗放置在電熱瓶，上覆沾濕冰水的白紗布，以 50°C 下低溫加熱，讓正己烷揮發；待正己烷揮發後，隨即提高電壓，使電熱瓶溫度升高，讓電熱瓶中的碘昇華，並使碘蒸氣於漏斗上凝華析出。下圖為碘的回收。



圖 37：圖中為電熱式裝置，圖右為漏斗上析出的碘晶體

2. 溶液的減毒：自分液漏斗流出的廢液，逐滴滴入飽和硫代硫酸鈉溶液 $Na_2S_2O_3$ 約 1 毫升後， $Na_2S_2O_3$ 將碘分子還原成為碘離子，溶液的顏色轉為透明無色，過程中並產生氣泡，預估是部分未反應完的 H_2O_2 催化分解產生 O_2 所致；隨後再滴入飽和的碳酸鈉溶液 Na_2CO_3 ，溶液產生的褐色的泡沫變多，預估是溶液中殘留的硫酸被鹼性的碳酸鈉中和，產生的 CO_2 氣體所致。靜置後溶液變透明，杯底發現難溶於水的棕色沉澱，預估是錳的氧化物或氫氧化物。相關反應式及反應過程圖如下所示：

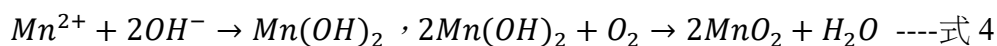
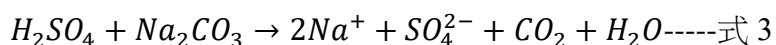
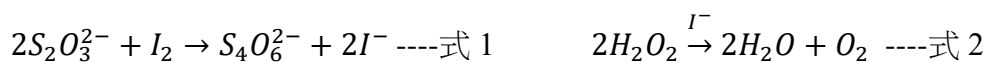


圖 38：圖左加入 $Na_2S_2O_3$ 、圖中加入 Na_2CO_3 、圖右為沉澱的錳氧化物

陸、結論

- 一、使用回收的光碟片、冰棒棍製作的光碟型 USB 可調式電磁攪拌實驗模組，可驅動 5~150 毫升的溶液攪拌；可應用於 BR 振盪反應、碘鐘秒錶實驗、蒸餾、滴定、醱類發酵中可有效均勻攪拌溶液、趕跑反應產生的氣體。節電、低廉、方便、安全的特性可普遍應用於中小學酸鹼中和等入班實驗上。
- 二、BR 振盪反應過程現象的觀察中，顏色呈現反覆性週期性，振盪中無色、黃出現的時間較短，藍色出現的時間較長；以錄影目視法紀錄發現： H_2O_2 的濃度越高，振盪週期越短，次數越高， $4\text{M}(15 \text{ 次}) > 2\text{M}(9 \text{ 次}) > 1\text{M}(7 \text{ 次})$ 。BR 振盪反應過程屬於放熱反應；反應產生氫離子，溶液酸鹼值變酸；因有氣體產生，氣壓逐漸增加；實驗結束深褐色的溶液可使澱粉液產生藍黑色，應該是三碘離子；反應後溶液上方漂浮有紫色色固體，經正己烷萃取，應該是反應產生游離的碘分子。
- 三、尋找有效地監測 BR 振盪反應中，顏色週期性的方法中，實驗得知：120 秒內，氣溫 30°C 下，色碼 APP 法（17 次）、光電比色模組（17 次）、可程式氧化還原電位計法（17 次）振盪頻率一致，皆可取代人工費時的目視錄影回放法，用於監控 BR 振盪周期性的變化；色碼 APP 法中藍色的區塊的藍色色碼值與藍綠紅三色碼總和的比值 $B/(R+G+B)$ 較高，約介於 4.20~4.73 之間，黃色的區塊的藍色色碼值與藍綠紅三色碼總和的比值 $B/(R+G+B)$ 較低，約介於 2.85~3.15 之間；惟色碼 APP 法，亦須耗時進行龐大的人工數據登錄處理，APP 效能仍有改善空間。而可程式光電比色法，選用黃色 LED 光源為藍色的互補色，可有效偵測實驗溶液顏色週期性的變化，惟抑制效應存在時，抑制後開始振盪時，溶液顏色太淡，光電比色法不夠靈敏，較不適用；在實驗室欠缺碘離子選擇性電極下，可程式氧化還原電位計法是監測完整實驗過程的最適合的方法。
- 四、探究各種變因對 BR 振盪週期、次數的影響中實驗中得到：
 1. 雙氧水濃度越高，振盪越快，次數越多，振盪的振幅越小，振盪週期越短；振盪次數： $4\text{M} > 2\text{M} > 1\text{M} > 0.5\text{M}$ 。
 2. 丙二酸的濃度越高，振盪頻率越快；丙二酸濃度 0.15M 以下，濃度與振盪次數有較好的線性關係。
 3. 溫度降低，分子動能降低，反應速率變慢，振盪週期拉長；溫度升高，分子動能升高，反應速率變快，振盪週期縮短。120 秒內的振盪次數的多寡為 $40^\circ\text{C}(20 \text{ 次}) > 25^\circ\text{C}(13 \text{ 次}) > 10^\circ\text{C}(1 \text{ 次})$ 。
 4. 添加澱粉濃度越高，振盪時間變久，週期時間也拉長。澱粉與三碘離子錯合延遲了碘

分子還原丙二酸的速率有關，澱粉不僅僅是扮演反應中碘的指示劑而已；經文獻搜尋發現，澱粉可能充當碘和碘化物的儲藏庫；澱粉的存在，澱粉與三碘離子的錯合平衡須列入考慮，從而改變 BR 振盪反應的動力學(L. I. Csepei & Cs. Bolla , 2015)。

五、維生素 C，用於自由基的清除的實驗中得到：

1. DPPH 分光比色法得到：維生素 C 濃度越高，紫色 DPPH 溶液褪色越明顯；DPPH(乙醇)的全光譜掃描，採 508nm 的吸收峰，進行檢量線的製作，得到線性方程式為吸光度 $y = -1.5C + 1.95$ ，C 為濃度，相關係數 0.994。帶入此式可得到抗氧化食物相對於維生素 C 自由基的清除能力。
2. BR 振盪 ORP 感測法得到：添加的維生素 C 越多，可與反應中越多的自由基反應，濃度因而下降，延緩振盪速率，抑制時間因而拉長，經數據處理可得兩者的關係為二項式 $y = 1.842x^2 - 1.063x + 17.463$ ，($R^2 = 0.998$)。當添加的維生素 C 濃度超過 0.25M 時，振盪反應隨即停止，溶液呈深褐色，推測過量的維生素 C 與氧化劑完全反應，使振盪反應中止；濃度若低於 0.01M，則抑制效應與蒸餾水相當；其抑制時間約介於 18~78 秒之間，範圍不寬，抑制效應低，除非將高抑制效應的抗氧化物再稀釋，否則不見得適用所有抗氧化物的比較。

六、怎麼泡出最抗氧化力的台灣茶的實驗得到：

1. 五種台灣茶，茶葉品種不同、地理環境（經緯度、海拔、氣候等）不同、發酵程度與烘焙方法皆有差異，會影響到茶葉與生俱來抗氧化物，如多酚類的含量，進而得到不同的實驗結果。
2. 光電比色法是偵測顏色的變化，若顏色太淡，光電比色法不夠靈敏，無法偵測振盪反應的進行，ORP 法較能提早、並精確地完整監測抑制效應過程。
3. 茶湯濃度與抑制時間的實驗得到，濃度越高（包種茶），抑制效果越明顯。濃度與抑制時間成高度相關。
4. 哪一泡最抗氧化的實驗結果得知：以包種茶為例，抑制時間長短順序：第一泡(597.2)>第二泡(522.2 秒)>第三泡(401.8 秒)。除包種茶外，紅茶、烏龍茶等第二泡的抑制效果都大於第一泡，推測沖泡時間較短，茶葉未充分泡開，抗氧化物未完全溶出，第二泡茶葉充分泡開後，致使第二泡茶湯的抑制效果較佳；所有茶的第三泡因茶葉已泡開過，致使殘留的抗氧化物明顯降低。五種茶中以紅茶的第二泡抑制效果最佳（1185 秒），其次是烏龍茶的第二泡（843 秒），實驗結果某些程度符合民間第二泡較較好的說法。

5. 茶葉的沖泡溫度對抑制時間的實驗得知：五種台灣茶中，溫度越高，對茶葉中的抗氧化成分萃取效果越好。五種茶中，100°C沖泡下，抑制時間以日月潭紅茶 993 秒最長，北埔東方美人茶 391 秒最短。
6. 茶葉浸泡時間對抑制時間的實驗調查得知：浸泡時間越久，茶湯對 BR 振盪反應的抑制效應越高，推測時間越長，萃取出的抗氧化成分越多；浸泡 30 分鐘的茶湯對 BR 振盪反應的抑制效應最高的是紅茶，東方美人茶最低。惟浸泡時間太久，溶出的單寧苦澀味偏重，較不適合飲用。
7. 比較生活中常見具抗氧化的食品對 BR 振盪抑制效果實驗中發現：抑制效應的高低為美式咖啡(8927.8)紅茶(466.0 秒)>薑黃粉(50.2 秒)>蝶豆花(34.6 秒)>維生素 C(32.6 秒)>空白(加水，29.2 秒)。咖啡的抑制效果明顯高出其他抗氧化物，這可能咖啡豆中含有濃度較高的咖啡多酚-綠原酸(chlorogenic acid)有關(何汶珊，2019)國人喝咖啡的風氣鼎盛，相關抗氧化的研究，值得進一步的探討。
8. BR 振盪的反應環境大概在 pH 值在 1.6~1.9 之間，與人類胃液的酸鹼值相近，確實有效模擬食物在人體內真實狀況，可作為食物抗氧化力監測的參考。
9. 實驗廢液的處理實驗得知：透過電熱式蒸餾法不易分離正己烷與碘晶體，需要利用更低的溫度，先揮發正己烷溶劑，再使用較高溫度，收集受熱昇華的碘蒸氣；兩段式變溫作法，提煉速度較為緩慢，但可回收前驅物碘晶體。選擇加入飽和硫代硫酸鈉、碳酸鈉可有效清除殘餘的碘、雙氧水、硫酸及回收錳氧化物，進行廢液減毒。

柒、安全注意事項及廢棄物處理

- 一、以利剪修剪冰棒棍時、熱熔膠槍膠合木片光碟片時、烙鐵錫焊電線時，務必戴上布手套，以免割燙傷；若操作廢液處理時，有氣體產物生成，務必戴上安全眼鏡。
- 二、廢液依本實驗建議方法進行減毒、前驅物碘晶體的提煉、回收，其他的依規定傾倒置廢液回收桶。

捌、參考文獻

1. 何汶珊(2019)。咖啡豆綠原酸之最適超臨界操作條件(13-14、73-74 頁)。國立嘉義大學食品科學系暨研究所碩士論文。
2. 楊剛顯(2008)。永康山茶的綠茶化學成分與抗氧化能力之研究(16-19、30-31、78 頁)。國立臺灣海洋大學食品科學系碩士論文。

3. 廖旭茂、林翊菲、陳淳煜(2020)。利用智慧型手機結合 App 探究化學平衡移動。台灣化學教育電子期刊 第 37 期。
4. 廖旭茂(2020)。綠色創客-3：微型電熱式蒸餾器的設計與製作。台灣化學教育電子期刊 第 40 期。
5. 劉宏澤、劉景平、賴永昌(2012)。葉位與採收期對葉菜甘藷葉片之總酚含量及 DPPH 自由基清除能力之影響。台灣農藝學會會刊 第九卷 (第二期) 98-107 頁
6. 盧立章(2002)。不同季節與地區產台灣蜂膠之抗菌活性及其 DPPH 自由基清除能力(28-29、57-59 頁)。國立台灣大學食品科技研究所碩士論文。
7. 賴新枝、葉世榮(2017)。科學探究與實作。易儀科技有限公司。
8. Aljović, I., Gojak-Salimović, S(2017). Evaluation of the antioxidant activity of ferulic, homovanillic and vanillic acids using the Briggs-Rauscher oscillating reaction method. Bulletin of the Chemists and Technologists of Bosnia and Herzegovina. Issue 49 : 35–38.
9. Gianluca farusi(2009).Looking for Antioxidant Food.*Science in School*, 13 : 39–43.
10. L. I. Csepei and Cs. Bolla(2015). “Is starch only a visual indicator for iodine in the Briggs-Rauscher oscillating reaction?” *Studia UBB Chemia*, 2(60), 187–199.
11. 台灣特色茶。行政院農委會茶葉改良場。取自 <https://www.tres.gov.tw/ws.php?id=1496>
12. 易光輝、張袁瑗(2017)。以清除 DPPH 自由基檢測精油成份中十四種醛類與醇類之抗氧化力研究。弘光學報 (第 54 期) 101-114 頁 取自 <http://localhost/handle/123456789/1709>
13. Briggs–Rauscher Reaction。(2022)。WIKIPEDIA。
取自 https://en.wikipedia.org/wiki/Briggs%E2%80%93Rauscher_reaction