

藍！不藍—碘之秒錶反應及化學波之研究

高中組化學科第一名

高雄高級中學

作者：黃仲達、許晉銘、周宗賢

指導教師：柳信榮

一、研究動機

秒錶反應實驗中，我們研究濃度和溫度二效應對反應速率的影響是利用碘酸根離子 (IO_3^{-1}) 和亞硫酸氫根離子 (HSO_3^{-1}) 作用。

以澱粉為指示劑測定碘分子生成速率，老師告訴我們若藍色出現時間太長，則在亞硫酸氫根離子溶液中加入少許 $N_2S_2O_5$ 或 H_2SO_4 ，反之若藍色出現太快，則將 IO_3^{-1} 離子溶液稀釋，對這些藍色出現的複雜反應我們感到很疑惑，同時由氧化還原電位表得知 H_3AsO_3 亦可還原 IO_3^{-1} ，那麼 H_3AsO_3 與 IO_3^{-1} 反應是否也與秒錶反應相同呢？因此引起我們對這種複雜反應研究的興趣，而自行設計實驗，藉以揭開藍色出現之謎底。

二、研究目的

- (一) 研究 IO_3^{-1} 與 HSO_3^{-1} 或 IO_3^{-1} 與 H_3AsO_3 反應，欲出現藍色，其 $[IO_3^{-1}]$ 與 $[HSO_3^{-1}]$ 或 $[IO_3^{-1}]$ 與 $[H_3AsO_3]$ 之定量關係。
- (二) 瞭解 pH 值變化對秒錶反應之影響。
- (三) 加強對碘滴定觀念之建立。
- (四) 瞭解 IO_3^{-1} 與 HSO_3^{-1} 或 IO_3^{-1} 與 H_3AsO_3 反應自動催化的觀念。
- (五) 進一步探討 IO_3^{-1} 與 H_3AsO_3 反應產生化學波 (chemical waves) 的擴散現象。
- (六) 應用學校之電腦設備，以電腦模擬主要實驗過程，用以說明本

實驗主要步驟，以使用至化學教學，為教學法之改進創新提供一有效之途徑。

(七)利用電腦處理實驗數據、資料、圖形，以達學以致用的目的。

三、研究過程

第一部分：碘酸根離子與亞硫酸氫根離子反應之研究—秒錶反應

(一)碘酸根離子之反應

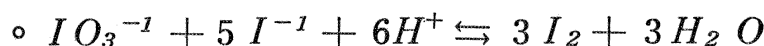
1. IO_3^{-1} 與 I^{-1} 離子反應：

實驗結果：

(1)甲試管有黑褐色沉澱生成，過濾取出固體加入少量水及澱粉粒，則溶液呈深藍色，若取少量此固體加入 CCl_4 ，並振盪之，則溶液呈紫色。

(2)乙試管並無固體生成。

(3)由甲試管生成固體而確認推知此固體是 I_2 ，由此吾人可得一結論，欲使 I^{-1} 及 IO_3^{-1} 反應生成 I_2 ，必須有 H^+ 方可。

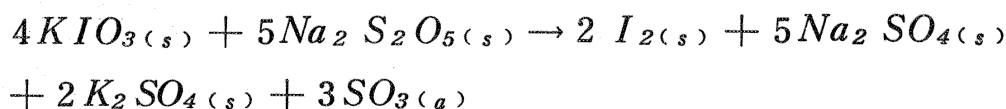


2. 碘酸鉀與集亞硫酸鈉之反應：

實驗結果：

加熱後 45 ~ 50 秒產生棕色，繼續有 I_2 紫色蒸氣生成。此蒸氣在試管之較冷部分凝結成帶光澤之紫黑色固體。

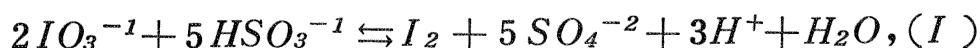
反應方程式為



3. 討論：

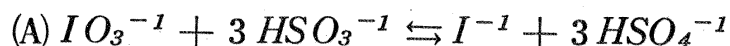
(1)由以上觀察與結論可知； KIO_3 為氧化劑， KI 與 $Na_2S_2O_5$ 為還原劑。

(2)若將 $KIO_3(s)$ 與 $Na_2S_2O_5(s)$ 配成稀溶液，兩者之反應即是秒錶反應之試劑，其淨離子方程式為

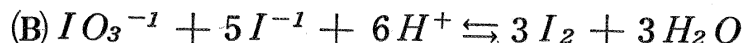


此反應若分爲數步進行：

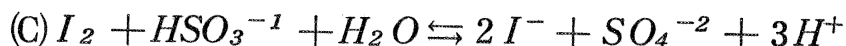
↷ 碘酸根被還原生成碘化物（遲緩）



↷ 碘酸鹽與碘化物反應，生成碘（甚速）



□ I_2 被還原生成 I^{-1} （極速）



(3) 因 2(B) + 5(C) 等於 (A) 之反應，因此推知要有 I_2 生成必需要有過量的 IO_3^{-1} 。

(4) 因 (B) + 3(C) 等於 (A) 之反應，因此推知若溶液中有 HSO_3^{-1} 存在會阻止 I_2 生成，因 HSO_3^{-1} 可以還原 I_2 。

(5) 由上分析我們預測在秒錶反應中，若要有藍色出現，兩溶

液相混後之濃度必需要 $\frac{[IO_3^{-1}]}{[HSO_3^{-1}]} > \frac{1}{3.0}$ 且 IO_3^{-1} 氧

化 I^{-1} 生成 I_2 中必需有 H^+ ，因之 I_2 生成速率即 (B) 反應之速率，可能受到溶液 pH 值之影響，預驗證以上預測是否正確，我們又進行下面的實驗。

(二) 秒錶反應藍色出現時間之測定：

1. $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]}$ 變化與 pH 值變化對速率影響：

(1) 實驗手續：

↷ 配製 0.0025 M KIO_3 ；0.0125 M $Na_2 S_2 O_5$ (HSO_3^{-1} : 0.025 M)；澱粉溶液。

↷ 於 $Na_2 S_2 O_5$ 溶液中滴加 H_2SO_4 調整其 pH 值，以 pH 值計測定之。

□ 混合溶液每組均保持 50 ml，然後依預計之比例相混合。

□ 將 $KIO_3(aq)$ 與 $Na_2 S_2 O_5(aq)$ 相混合，並滴加入澱粉

指示劑，並充分攪拌，然後測定藍色出現時間。

(2)實驗結果：

平 均 值

pH sec 比例	平 均 值								
	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00
1 : 1	2.5	4.1	6.6	10.2	13.5	17.2	20.7	24.5	27.0
1 : 1.5	2.0	3.9	6.1	8.4	13.3	14.7	19.1	21.4	24.4
1 : 2	2.7	4.6	6.8	10.3	14.5	18.8	23.6	24.6	28.8
1 : 2.5	3.7	4.8	6.9	10.8	17.6	23.4	28.8	29.4	34.1
1 : 2.85	4.5	5.2	8.9	12.8	18.3	25.8	30.2	35.4	44.2
1 : 3	5.0	6.2	9.6	14.6	19.6	33.1	35.7	40.6	56.2
1 : 4	8.2	12.4	19.5	33.5	35.8	48.2	54.8	68.6	74.2

(3)實驗結論：

由以上實驗數據知當 $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} \geq \frac{1}{3}$ ，充分攪拌後均

有藍色出現。

當 $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]}$ 比值固定，溶液 pH 值愈大，藍色出現時

間愈長。

固定溶液 pH 值，改變 $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]}$ 比值， $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]}$ 比

值較大者，藍色出現時間有較短傾向。

□ 當 $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} = \frac{1}{3}$ 時，經數秒後，雖有藍色存在，但是

經過數分鐘後，溶液變成無色。

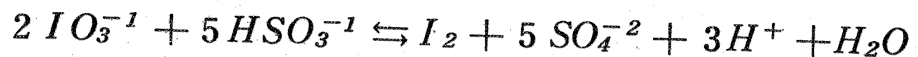
(4) 討論：

△ 當 IO_3^- 過量時， IO_3^- 會氧化 HSO_3^- ，生成 I^- ， I^- 逐漸累積達足夠量的程度時，則有 $IO_3^- + 5I^- + 6H^+ \rightarrow 3I_2 + 3H_2O$ (B) 之反應發生，故實驗時可以看到突然

出現深藍色，在實驗中， $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} = \frac{1}{1}$ ， $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} = \frac{1}{1.5}$ ， $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} = \frac{1}{2}$ 均為 IO_3^- 過量之情形。

△ $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} = \frac{1}{2.5}$ ， IO_3^- 與 HSO_3^- 均不過量，亦有

藍色出現能符合計量方程式



□ $\frac{1}{2.5} > \frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} > \frac{1}{3.0}$ ； IO_3^- 完全作用後，生成 I_2

，再與多餘 HSO_3^- 反應，若仍然有 I_2 存在有藍色出現。

□ 當 HSO_3^- 過量時；(C) 反應較 (B) 反應快，故只要溶液中有 HSO_3^- 存在，即可進行 (C) 反應 $I_2 + HSO_3^- + H_2O \rightleftharpoons 2I^- + SO_4^{2-} + 3H^+$ ； I_2 由 (B) 反應式生成，但很快在 (C) 反應中消耗，故藍色只有短暫出現。

△ 當 HSO_3^- 過量時，(A) 之反應 $IO_3^- + 3HSO_3^- \rightarrow I^- + 3HSO_4^-$ 分為 (B) 步驟與 (C) 步驟進行，(B) 步驟為速率決定步驟；在 (A) 中生成之 I^- 可以加速 (B) 的反應，這種反

應叫自動催化反應。

由以上討論我們可以了解秒錶反應若藍色出現時間太長，加入少許 $Na_2 S_2 O_5$ ；因 $Na_2 S_2 O_5 + H_2 O \rightarrow 2 NaHSO_3$ ，增加的 $[HSO_3^-]$ 促使更多的 I^- 生成，來催化 $IO_3^- + 5 I^- + 6 H^+ \rightleftharpoons 3 I_2 + 3 H_2 O$ 反應，而加入少許 $H_2 SO_4$ ，降低 pH 值，增加 $[H^+]$ 亦可加速 I_2 生成。

2. IO_3^- 與 HSO_3^- 反應過程中 I_2 濃度定量測定：

(1) 0.1 N I_2 及 0.1 N $Na_2 S_2 O_3$ 標定與配製

在天平上稱出 13 克碘結晶，置碘及 40 g KI 及少量的水在瓷鉢碾製直到完全溶解，稀釋成一升。溶解 25 g $Na_2 S_2 O_3 \cdot 5 H_2 O$ 配成一升水溶液。

自天平稱出 0.1029 克及 0.1036 克之 KIO_3 二份，溶解於 50 ml 的水，並加入 10 ml 含 3 克 KI 的溶液，加 20 ml 6 N 之 $H_2 SO_4$ ，稀釋至 150 ml。自滴定管滴下硫代硫酸鈉，直到游離碘的顏色接近消失為止，然後加 5 ml 的澱粉溶液，滴定碘 - 澱粉藍色消失。

標定結果： I_2 濃度：0.0964 N， $Na_2 S_2 O_3$ 濃度 0.1037 N。

(2) 利用光電比色計測定 I_2 濃度

測定原理：

(1) Lambert's 定律：

單色光線進入吸收性溶液其強度隨著光線在溶液中進行長度的增加而指數性的減低。

$$\log \frac{I_0}{I} = k_1 \ell :$$

I_0 ：進入溶液之光線強度。

I ：經溶液而射出之光線強度。

k_1 ：常數與光波長及溶液本質、濃度有關。

ℓ ：光線所經過吸收性溶液的長度。

(2) Beer's 定律：

單色光強度會隨吸收物質濃度的增加而指數性減少。

$$\log \frac{I_0}{I} = k_2 C :$$

k_2 : 常數由光波長, 溶液本質與光線所經吸收性溶液的距離來決定。

(r) *Beer-Lambert* 定律 :

$$\log \frac{I_0}{I} = kCl :$$

k : 常數, 由光線波長和溶液本質來決定。

$$(c) Cu = \frac{Ru \times Cs}{Rs} :$$

Cu : 未知溶液濃度。

Cs : 標準溶液

Ru : 未知溶液吸收度

Rs : 標準溶液吸收度

♀ 實驗手續 :

(1) 配製 $0.0125 M Na_2 S_2 O_5$ 與 $0.025 M KIO_3$ 。

(2) 選擇適當波長 (5400 \AA)

(3) 測定 I_2 標準溶液的吸收度。

(4) 取 $0.0125 M Na_2 S_2 O_5$ $25ml$ 與 $0.025 M KIO_3$ $25ml$ 相混合, 並攪拌之。

(5) 每隔固定時間取出溶液置入比色管由光電比色計測定吸收度 (*Absorbance*) 並記錄讀數。

(6) 另取 $0.0125 M$ 之 $Na_2 S_2 O_5$ $40 ml$ 與 $10 ml$ $0.025 M KIO_3$ 相混合, 以相同方法測定吸收度。

□ 實驗結果與數據 : (略)

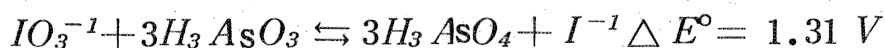
3. 討論 :

(1) 由 I_2 濃度定量測定, 當 IO_3^{-1} 過量時, $\frac{[IO_3^{-1}]}{[HSO_3^{-1}]} > \frac{1}{2.5}$

， I_2 濃度逐漸增加，達到一定值後，不再增加，由此定量數據可以支持反應： $2 IO_3^{-1} + 5 HSO_3^{-1} \rightleftharpoons I_2 + 5 SO_4^{-2} + 3 H^+ + H_2O$ ，分成數步進行的推測： $IO_3^{-1} + 3 HSO_3^{-1} \rightarrow I^{-1} + 3 HSO_4^{-1}$ (A)，由(A)式生成 I^{-1} ，然後由(B)式反應生成 I_2 ， $IO_3^{-1} + 5 I^{-1} + 6 H^+ \rightleftharpoons 3 I_2 + 3 H_2O$ ，當 HSO_3^{-1} 耗盡，無 I^{-1} 繼續生成故 I_2 濃度保持定值。

(2)若 HSO_3^{-1} 過量，在(B)式反應生成 I_2 ， $IO_3^{-1} + 5 I^{-1} + 6 H^+ \rightleftharpoons 3 I_2 + 3 H_2O$ ，隨即消耗在(C)式的反應： $I_2 + H_2O + HSO_3^{-1} \rightleftharpoons 2 I^{-1} + SO_4^{-2} + 3 H^+$ ，故 I_2 濃度迅速降低，因此對(B)式反應慢，而(C)式反應快的推斷是合理的。

(3)由氧化還原電位表知：



故推知 $H_3 AsO_3$ 亦能還原 IO_3^{-1} ，因此我們想利用前述反應原理應用到 IO_3^{-1} 與 $H_3 AsO_3$ 之反應，故我們又做了下面一段新的實驗。

第二部份：碘酸根離子與亞砷酸 ($H_3 AsO_3$) 反應之研究—化學波 (chemical waves)

(\rightarrow) IO_3^{-1} 與 $H_3 AsO_3$ 反應藍色出現時間之測定

1. $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]}$ 變化與 pH 值變化對速率的影響：

(1)實驗結論：

由以上實驗數據，當 $\frac{[IO_3^-]}{[H_3 AsO_3]} \geq \frac{1}{3}$ 經充分攪拌均

有藍色突然出現。

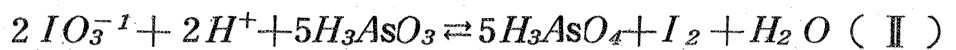
♀ 當 $\frac{[IO_3^-]}{[H_3AsO_3]}$ 比值固定，溶液 pH 值愈大，藍色出現時間愈長。

□ 固定溶液 pH 值改變 $\frac{[IO_3^-]}{[H_3AsO_3]}$ 比值， $\frac{[IO_3^-]}{[H_3AsO_3]}$ 比值較大者，藍色出現時間有較短傾向。

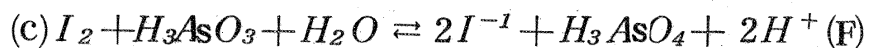
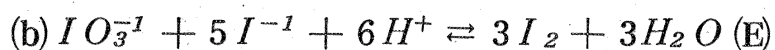
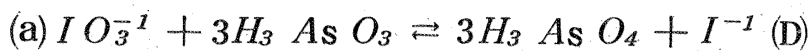
□ 當 $\frac{[IO_3^-]}{[H_3AsO_3]} = \frac{1}{3}$ 時，經數秒後，雖然有藍色存在，但經數分鐘後，溶液變成無色。

(2) 討論：

♣ 由實驗觀察知 H_3AsO_3 與 IO_3^- 之反應與秒錶反應相似，故 IO_3^- 與 H_3AsO_3 之反應產生藍色之化學方程式可為：



此反應亦可解釋為如下進行：



♀ 若 IO_3^- 過量，淨結果是進行 (II) 之反應，故有藍色生成，但若 H_3AsO_3 過量，淨結果進行 (D) 之反應，故無藍色生成。但 I_2 在 (E) 式生成後，隨即消耗於 (F) 式，且 (E) 式為速率決定步驟。

2. IO_3^- 與 H_3AsO_3 反應過程中 I_2 濃度定量測定：

(1) 討論：

♣ $\frac{[IO_3^-]}{[H_3AsO_3]} > \frac{1}{2.5}$ ， I_2 濃度逐漸增加，達到一定值

後不再增加了，由此定量數據，可以支持反應 $2 IO_3^- + 2 H^+ + 5 H_3 A_5 O_3 \rightleftharpoons 5 H_3 A_5 O_4 + I_2 + H_2 O$ ，分成數步進行的推測： $IO_3^- + 3 H_3 A_5 O_3 \rightleftharpoons I^- + 3 H_3 A_5 O_4$ (D)；由(D)式生成 I^- 然後由(E)式反應生成 I_2 ： $IO_3^- + 5 I^- + 6 H^+ \rightleftharpoons 3 I_2 + 3 H_2 O$ ，當 $H_3 A_5 O_3$ 耗盡，無 I^- 繼續生成，故 I_2 濃度保持定值。

♀若 $H_3 A_5 O_3$ 過量，在(E)式反應生成 I_2 ，隨即消耗在(F)式的反應： $I_2 + H_3 A_5 O_3 + H_2 O \rightleftharpoons 2 I^- + H_3 A_5 O_4 + 2 H^+$ ，故 I_2 濃度會降低，因此對(E)式反應慢而(F)式反應較快的推論是正確的。

□以上所作各種實驗觀察，無論是 IO_3^- 與 HSO_3^- 反應或是 IO_3^- 與 $H_3 A_5 O_3$ 反應均在燒杯中經強烈攪拌發生，且兩種反應極為相似，我們又想到這種複雜反應，混合均勻後，不再繼續攪拌，而將溶液靜置於細管或量筒中，所發生現象是否相同呢？我們為要觀察這些現象，又作了下面的實驗。

(一) IO_3^- 氧化 $H_3 A_5 O_3$ 產生碘化學波 (*chemical waves*) 研究

1. 碘化學波生成之定性觀察：

(1) 實驗手續：

♂ 0.006 M 之 KIO_3 10 ml 與 0.01 M 之 $N_5 A_5 O_2$ ($pH = 2.3$) 10 ml 相混合，加入澱粉溶液，攪拌均勻後，傾入量筒中，靜置數分鐘，觀察現象。

♀ 0.003 M 之 KIO_3 10 ml 與 0.02 M 之 $N_5 A_5 O_2$ ($pH = 2.3$) 加入了澱粉溶液攪拌均勻後，傾入乙量筒中，靜置並觀察，(量筒口徑 19 mm)。

(2) 實驗結果：

♂ 甲量筒頂部有藍色環出現，慢慢向下移動，好像波的前進，故稱為化學波 (*chemical waves*) 且深藍色的液柱亦逐漸增長，最後伸展到底部，整個溶液最後呈深藍

色。

♀ 在乙量筒頂部亦有深藍色很細的環出現，且向下移動，但藍色細環保持一定寬度，在環的上面是無色，當擴散到底部後就消失了。

□ 經過數次重複實驗觀察，發現亦有少數情形由底部形成藍色雲狀物，向上延伸，若在乙量筒中，藍色很快消失溶液變無色，若在甲量筒中，則很快溶液均變成藍色。

(3) 討論：

♂ 甲量筒中係 IO_3^- 過量之情形，由前述實驗知最後生成物必為 I_2 ，因此在量筒中，化學波經過的區域，會有藍色出現，且藍色液柱逐漸增長。

♀ 乙量筒中係 H_3AsO_3 過量之情形，由前述實驗知只要有 I_2 則幾乎隨即反應轉變成無色的 I^- ，所以不會像甲量筒中，有藍色液柱逐漸成長的現象。

□ 化學藍色波之形成可能是由於自動催化反應與 I^- 擴散交互作用之結果。

□ 化學藍色波經常由頂部開始形成，可能與自動催化反應中 I^- 與空氣中 O_2 的接觸有關。

2. 碘化學波前進速率的定量觀察：

(1) $[IO_3^-]$ 之影響：

♂ 實驗手續：

$[IO_3^-]$ 改變，而 $[H_3AsO_3]$ 與 pH 值保持不變於各種情形觀察碘化學波前進移動的速率。

♀ 實驗結果與數據：(略)

(2) $[H_3AsO_3]$ 之影響：

♂ 實驗手續：

改變 $[H_3AsO_3]$ 而 $[IO_3^-]$ 與 pH 保持不變，於各種情形觀察碘化學波前進移動的速率。兩種溶液各取 10 ml，混合均勻後傾入口徑 17 mm 之量筒，並記錄時間。

♀ 實驗結果與數據：(略)

(3) 改變 $[H_3AsO_3]$ 與 $[IO_3^-]$ 之影響：

↵ 實驗手續：

將 $[IO_3^-] : [NaAsO_2] = 3 : 5$ 之二溶液以等體積混合，且 pH 值調節為 2.30，以 pH 計測之，然後倒入口徑 1 cm 長 15 cm 之量筒，使液柱之長度 10 cm，在管外每一格 1 cm，劃一刻度，共作三組實驗然後測定波前進的距離。

♀ 實驗結果與數據：(略)

(4) 改變 $[IO_3^-]$ 與 pH 值之影響：(量筒口徑 12 mm)

↵ 實驗手續：

將 $[H_3AsO_3]$ 保持不變；在特定之每一種 pH 值之下，變化 $[IO_3^-]$ ，來測定波的速率 ($cm \setminus min$)。

♀ 實驗結果與數據：(略)

(5) 討論：

↵ 在四個實驗中可以看出，當碘的藍色波生成後，有加速移動的現象。而且經過相同時間， $[IO_3^-]$ 愈大，則波前位置愈遠。

♀ 當其他因素保持不變，若 $[H_3AsO_3]$ 增加，碘的藍色波生成後，亦有加速移動之現象。

□ 當 $[H_3AsO_3]$ 與 $[IO_3^-]$ 均同時變大時，波的前進速率會更快，圖中曲線 (Ⅲ) 的變化最大，由此可見藍色波的成長與反應 $IO_3^- + 5I^- + 6H^+ \rightarrow I_2 + 3H_2O$ ，生成 I_2 的速率有關。

□ 由波前進平均速率測定， pH 值較低者， $[IO_3^-]$ 較大者，其速率愈快，且 pH 值較大時， $[IO_3^-]$ 變化影響較不顯著，反之 pH 較小時， $[IO_3^-]$ 變化影響較大，由此現象，亦可再證實 I_2 生成對 pH 值極為敏感，與攪拌狀態觀察者相同。由此可見 I_2 生成反應 $IO_3^- + 5I^- + 6H^+ \rightarrow I_2 + 3H_2O$ 與 I_2 之消耗反應： $I_2 + H_3$

$AsO_3 + H_2O \rightarrow 2I^- + H_3AsO_4 + 2H^+$ 均與 pH 值有關，在較低 pH 值中即較大 $[H^+]$ 時較利於 I_2 存在。

3. 兩液相界面上化學波形成之觀察：

I_2 可以溶解在非極性溶劑，因此我們想到如果在 KIO_3 與 H_3AsO_3 混合溶液中加入一定量非極性溶劑，量筒中之溶液必呈現兩個液相，此時 I_2 之化學波是否能出現，若能出現化學波是從那裏形成呢？我們爲了要再了解這個現象，因此進行下面的實驗。

(1) 實驗手續：

↵ 取 $0.006 M KIO_3$ 與 $0.001 M NaAsO_2$ ($pH = 1.8$) 溶液各 $12.5 ml$ 相混合，加入澱粉溶液，攪拌均勻，傾入量筒中，並在液面上加 $3 ml$ 苯，靜置觀察現象並測定波前之距離與平均波速。

↵ 用相同方法，液面改加沙拉油， CCl_4 ， $C_6H_5CH_3$ ， C_6H_{12} （環己烷）。

(2) 實驗結果：

↵ 每種狀況均有 I_2 化學波形成，頂端加有 C_6H_6 ，或是沙拉油， $C_6H_5CH_3$ ， C_6H_{12} 者藍色化學波均由兩液相界面開始形成，然後慢慢向下擴散前進。

↵ 頂端加有 C_6H_6 ，沙拉油， $C_6H_5CH_3$ ， $C_6H_5CH_3$ ， C_6H_{12} 者化學波開始出現之時間較長。

□ 加 CCl_4 者，因 CCl_4 在底層，兩相界面在下方，當藍色波由頂端形成後，不久，在兩相界面亦有藍色波形成，而漸向上移動，且在 CCl_4 層中紫色出現，漸加深。

□ 各狀況藍色波出現時間不相同；頂端加有沙拉油， C_6H_6 ， $C_6H_5CH_3$ ， C_6H_{12} 者平均波速很相近；約經 $15min$ 後，各量筒均變成藍色。

↵ 用煮沸過的蒸餾水配製溶液，相同之實驗手續，觀察化學形成，結果，不加非極性溶劑者，化學波出現時間需 $4'30''$ ，全部變藍色需 $15'30''$ 。

(3)討論：

- ㄅ 若非極性的 I_2 在溶液中形成後，有移向空氣—水交界面，以便形成藍色波，則溶液頂端加上非極性的物質，會阻碍藍色波形成，因此藍色出現時間應該較長，而我們所觀察者亦是如此。
- ㄆ 由上述實驗觀察藍色波有在兩相界面形成出現之規律性，頂端不加者是在空氣—水交界面（氣相液相界面）形成；加有非極性物質者，在極性與非極性兩液相界面形成。
- ㄇ 當藍色波形成後平均速度大致相似，且全部變藍色所需時間亦相近。
- ㄏ 加入 CCl_4 者因 CCl_4 層在底層故，藍色出現時間與不加者相似，且波的平均波速亦相近，所以我們可以知道 I_2 化學波形成與空氣接觸有關。
- ㄏ 將溶液中溶解氣體驅除，會阻止藍色波形成且藍色波之平均波速亦較慢，由此實驗觀察 I_2 化學波之形成與擴散亦可能與溶解在水中之 O_2 有關。

四、研究總結論

(一) IO_3^- 氧化 HSO_3^- 或氧化 H_3AsO_3 之反應，以澱粉為指示劑

要有深藍色出現且不消失之條件為 $\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} > \frac{1}{3.0}$ 或是

$\frac{[IO_3^-]}{[H_3AsO_3]} > \frac{1}{3.0}$ 意即 IO_3^- 要過量。

(二) 若 $\frac{1}{2.5} > \frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} > \frac{1}{3.0}$ 當 IO_3^- 完全作用生成 I_2 與多

餘 HSO_3^- 再反應，仍有 I_2 存在，則有藍色出現。

(三) IO_3^- 氧化 HSO_3^- 或氧化 H_3AsO_3 之反應以澱粉為指示劑，若

$$\frac{[IO_3^-]}{[HSO_3^-]} \leq \frac{1}{3.0} \quad \text{或} \quad \frac{[IO_3^-]}{[H_3AsO_3]} \leq \frac{1}{3.0} \quad \text{亦有藍色出現，但}$$

不久藍色會消失，意即還原劑 HSO_3^- 或 H_3AsO_3 過量。

(四)下列反應式： $IO_3^- + 5I^- + 6H^+ \rightleftharpoons I_2 + 3H_2O$ ； $HSO_3^- + I_2 + H_2O \rightleftharpoons HSO_3^- + 2I^- + 2H^+$ ； $H_3AsO_3 + I_2 + H_2O \rightleftharpoons H_3AsO_4 + 2I^- + 2H^+$ ，涉及 IO_3^- 與 HSO_3^- ， H_3AsO_3 之氧化還原反應，由平衡原理知，在酸中利於 I_2 之生成，因此證實了 pH 值亦可以決定秒錶反應中藍色出現的快慢，同理在沒有強烈攪拌之下產生碘之化學藍色波亦有同樣現象。

(五)本實驗使我們瞭解了 I^- 在 IO_3^- 氧化 HSO_3^- 或 IO_3^- 氧化 H_3AsO_3 反應過程，自動催化 (= *autocatalytic*) 中所扮演角色的重要性。

(六) I_2 藍色化學波常在兩相界面形成，在頂端形成時，是出現在空氣與水交界面，若頂端有非極性物質存在時，發生在兩液相的交界面。

(七)將溶液中之氣體驅除，使藍色波形成時間增長，且擴散速率亦較慢，由此推知碘化學波形成可能與溶液中之 O_2 有關。

(八)本實驗使我們意外觀察到 IO_3^- 氧化 H_3AsO_3 產生化學波運動的現象，此現象可能涉及化學反應與擴散的交互作用。但若要完全解釋化學波的傳導就必須要有 $IO_3^- + 5I^- + 6H^+ \rightleftharpoons 3I_2 + 3H_2O$ 與 $H_3AsO_3 + I_2 + H_2O \rightleftharpoons H_3AsO_4 + 2I^- + 2H^+$ 兩個反應的反應機構。由反應機構的基本作用來探討。

今後希望能再利用課餘時間繼續研究這個有趣碘的化學波。

(九)本實驗之主要步驟用電腦模擬實驗過程，並處理實驗數據、資料、圖形，以達學以致用之目的。

五、參考資料：

(一)高中化學課本

東華書局印行

(二)高中化學實驗

東華書局印行

- (三)高中化學教師手冊 東華書局印行
(四)定量化學分析 朱文聰譯 徐氏基金會出版
(五)儀器分析原理 邱承美編著；科文出版社出版
(六)*Journal of Chemical Education* Volume 60 Number 6
June 1983
(七)生物化學實驗：國興編輯委員會編 新竹黎明書店

評語：本件作品對碘之秒錶反應做了頗詳盡而有系統的探討。實驗觀察甚為細微對化學波現象的發現與探討提供了一個有趣的研究題目。高中學生能從實驗中發現問題並進而探討學理並利用電腦模擬實驗過程與資料整理以創新的方式加強對碘滴定觀念的建立與了解。