

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 化學科

佳作

040205

Light up! 飛行石的光燦

學校名稱： 國立宜蘭高級中學

作者： 高二 王紹宇 高二 邱煒茹 高二 葉栢睿 高二 顏蕙珊	指導老師： 游春祥
---	--------------

關鍵詞：化學發光、Luminol(C₈H₇N₃O₂)

壹、 摘要：

Luminol 化學放光反應受到不同因子的影響。放光物質(Luminol)、氧化劑(H_2O_2)、催化劑($K_3Fe(CN)_6$ 、 $K_4Fe(CN)_6$)、混合濃度變化下放光趨勢不盡相同；溫度、添加不同濃度強鹼、不同種類之金屬離子、洋菜混合溶液各有程度不一之影響；將推廣至食品氧化劑殘留之檢驗。

貳、 實驗動機：

上學期專題研究課，上到了各式各樣的「隱形墨水」。其中有一種是由 Luminol 溶液及其他物質反應的「化學發光」墨水最令大家感到興趣，然而每次畫出的青藍色光芒亮度及持久度皆不一致。好奇的我們決定探討各反應物及變因的影響，企圖了解這如飛行石般美麗的神秘冷光。

參、 實驗目的：

探討不同的變因(ex.溫度、濃度、離子....等)對 luminol 發光強度及時間的影響，尋找其反應之定性定量特質，並推廣應用。

肆、 實驗器材設備：

器材類：

器材名稱	規格	器材名稱	規格
吸量管	1、5、10ml	注射針筒	6ml
燒杯		橡皮管	
量筒	10ml	滴管	
標準試管	13ml	定量瓶	100ml
U形管		數位相機	
橡皮塞		手電筒	
Excel		Word	
DataStudio		GLX 偏光計	
恆溫槽			

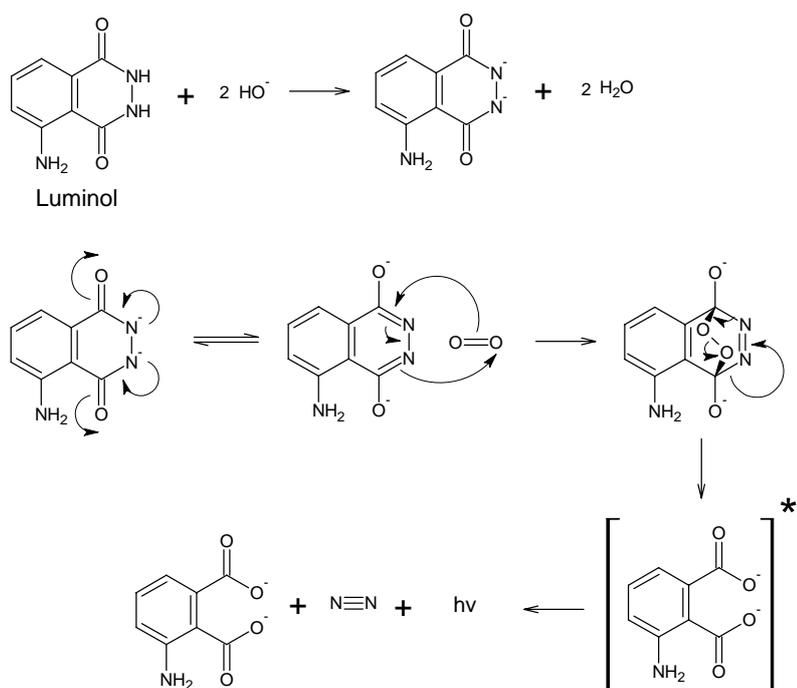
藥品類：

(一)	Luminol($C_8H_7N_3O_2$)	$K_3Fe(CN)_6$	$K_4Fe(CN)_6$
	35% H_2O_2	NaOH	
(二)	NaOH	KOH	NaCl
	KCl	$NaNO_3$	KNO_3
	$Ca(OH)_2$	$Ba(OH)_2$	$MgCl_2$
	$CaCl_2$	$BaCl_2$	$Ba(NO_3)_2$
	NH_4Cl	$(NH_4)_2SO_4$	NH_4OH
(三)	$Cr_4(SO_4)_5(OH)_2$	K_2CrO_4	$K_2Cr_2O_7$
	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	$MnSO_4 \cdot nH_2O$	$FeCl_2$
	$FeSO_4$	$FeCl_3$	$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$
	$NiSO_4 \cdot 6H_2O$	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	$ZnCl_2$
	$NH_3(aq)$	$NaNO_2$	

伍、文獻探討：

化學冷光的定義為發光分子(通常具共振結構)經由化學反應的過程而放射出光(通常在可見光或遠紅線的波長範圍)。當化學反應產生足夠的能量時，就能誘導電子由基態躍遷到激發態，而電子由激發態回到基態時，所伴隨放射出的光稱之為化學冷光。一般而言，化學冷光的反應主要為下列兩種機制：直接化學冷光法及間接的化學冷光法，在間接的化學冷光反應中，反應所產生的激發態產物並非光的放射者，而使將能量轉移給螢光接受著，然後產生光的放射，故被稱為感光性化學冷光。化學冷光反應中，通常使用兩種試劑(發光物質及氧化物)，將兩者反應後形成產物或中間體，再藉由催化劑將產物或中間體之電子激發至激發態，當電子由激發態回到基態時而伴隨放光。Luminol($C_8H_7N_3O_2$)是最常使用的化學冷光試劑之一。在鹼性水溶液中，Luminol 可被催化劑氧化成激發態分子，此分子隨後放光回到基態。放射波長大約在 425nm，放射光為藍色，並有氮及水等副產物產生，其反應過程如圖 1 所示。在 Luminol 化學冷光系統，以使用 Luminol/過氧化氫和催化劑/鹼性水溶液(OH⁻)的組成最為普通。而催化劑的種類(例如：過氧化酶、過渡金屬(如 Fe²⁺、Fe³⁺...等)及其錯合物(如 Fe(CN)₆³⁻、Cu(NH₃)₆²⁺...等)會影響 Luminol 化學冷光的產生。

圖 1 Luminol 的化學反應過程



陸、研究項目：

- 一、探討 Luminol($C_8H_7N_3O_2$)濃度對其發光的影響
- 二、探討 H_2O_2 濃度對其發光的影響
- 三、探討 $K_3Fe(CN)_6$ 濃度對其發光的影響
- 四、探討 NaOH 濃度對其發光的影響
- 五、探討溫度對其發光的影響
- 六、改以 $K_4Fe(CN)_6$ 代替 $K_3Fe(CN)_6$ ，並改變其濃度，探討其影響
- 七、探討不同比例之 $K_3Fe(CN)_6$ 及 $K_4Fe(CN)_6$ 混合溶液對發光的影響

採 A, B 管模式進行實驗。其中：

A—Luminol($C_8H_7N_3O_2$)及 NaOH(造成鹼性環境使 Luminol 溶解)

B—催化劑($K_3Fe(CN)_6$)及氧化劑(H_2O_2)之混合液

註：C—不同之離子溶液

捌、實驗方法與結果：

一、探討 Luminol 濃度對其發光的影響

(一)實驗方法：

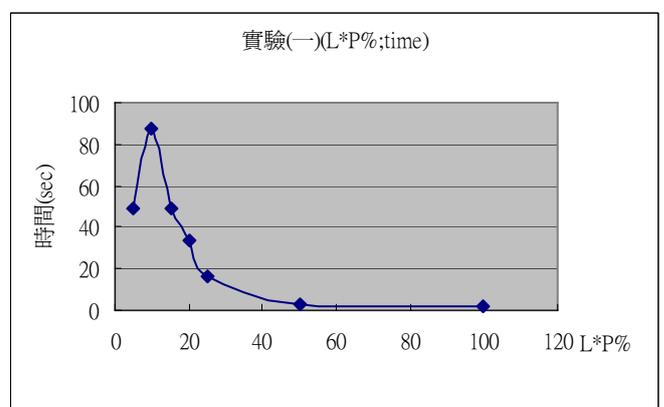
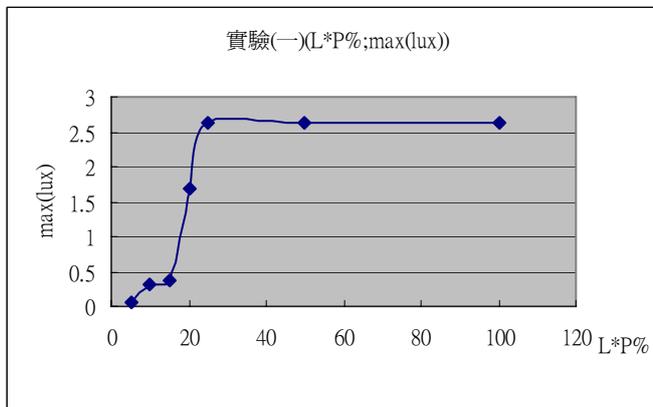
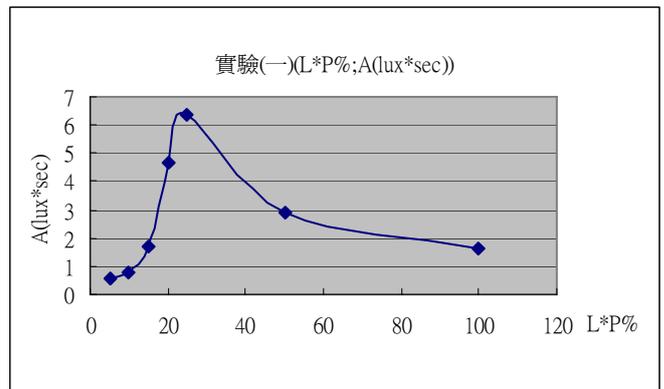
A 液：不同濃度之 luminol 溶液 1ml(L : luminol 0.8g+ H_2O 50ml +0.5M NaOH 20ml)

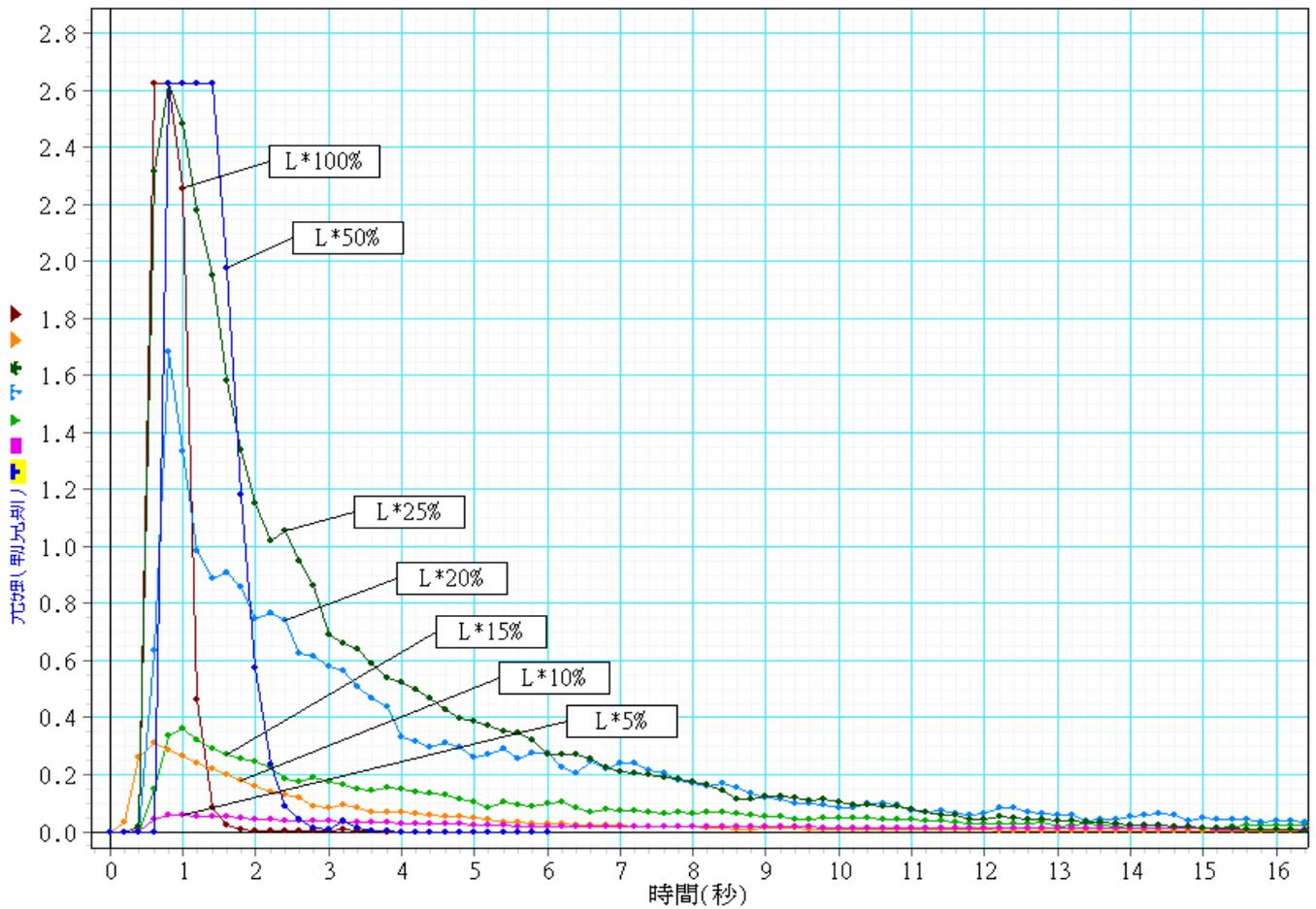
B 液：0.1M $K_3Fe(CN)_6$ 0.5ml +0.25% H_2O_2 0.5ml

以滴管吸取 B 液滴入 A 管，使用 GLX 測量其反應情形並紀錄之。

(二)實驗結果：

(1ml)	A(lux*s)	max(lux)	time(sec)
L*100%	1.62	2.62	2.00
L*50%	2.93	2.62	3.20
L*25%	6.34	2.62	16.60
L*20%	4.64	1.69	33.60
L*15%	1.72	0.36	48.60
L*10%	0.81	0.31	87.40
L*5%	0.60	0.06	48.60





(三)實驗內容：

A 在 25%時出現最大值，大致為一拋物線，最大值在 25%以上都達到 2.62，之後隨濃度下降而下降。時間大致上濃度愈低愈久，但濃度低時強度也弱，應為反應較不強烈致使時間拖長。最高濃度放光不佳。

二、探討 H₂O₂ 濃度對其發光影響

(一)實驗方法：

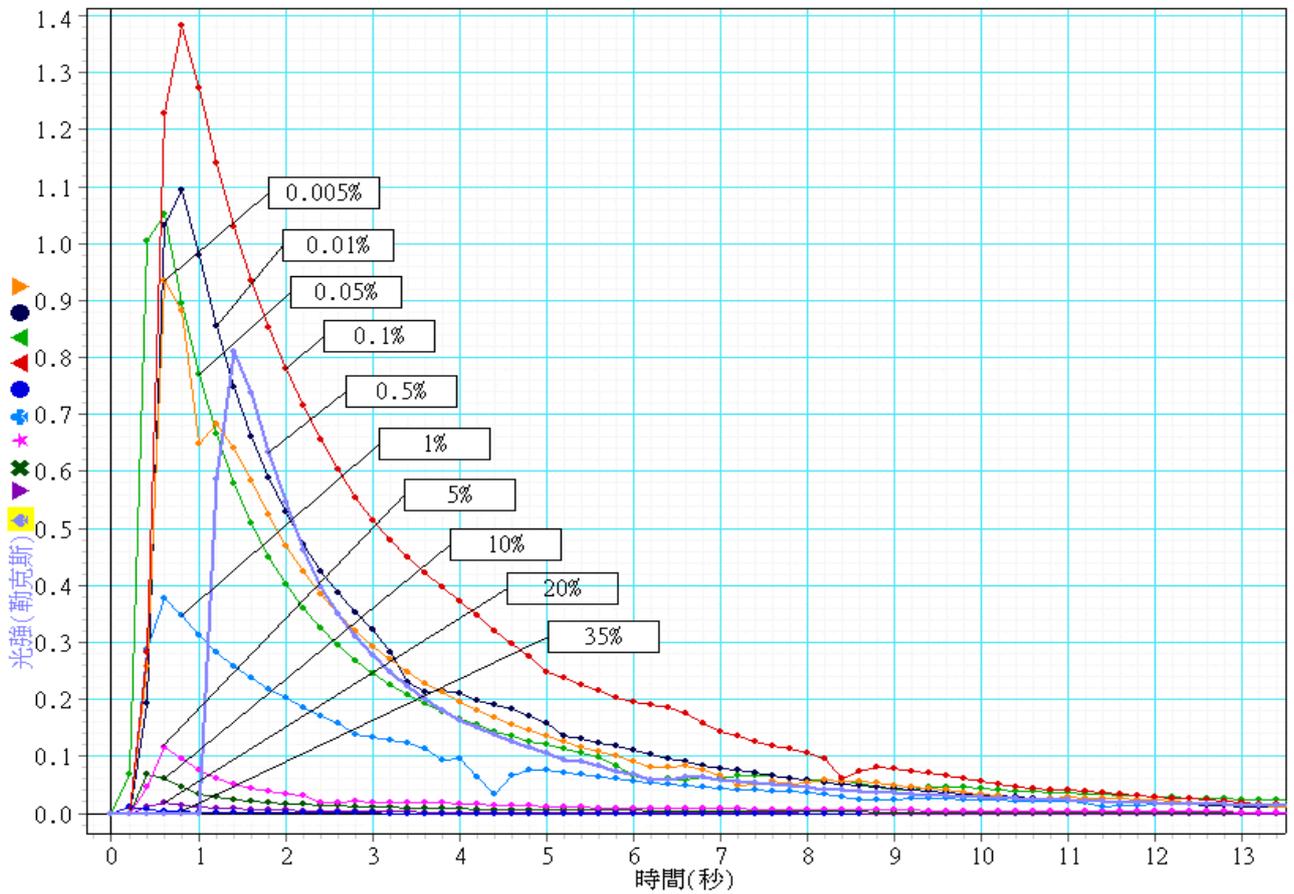
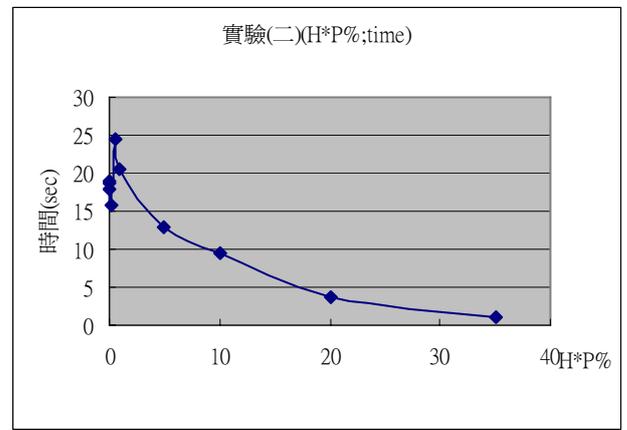
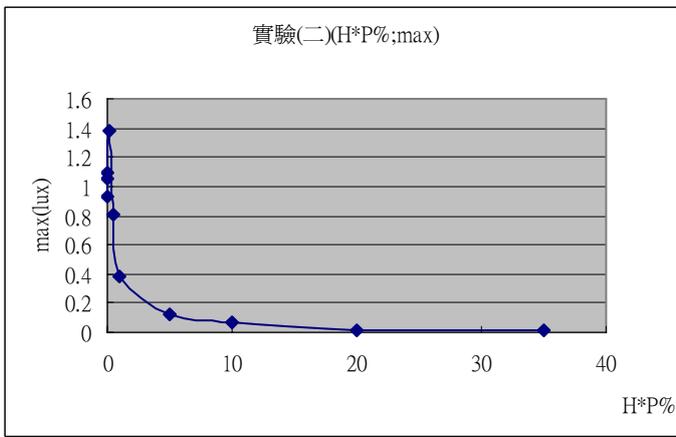
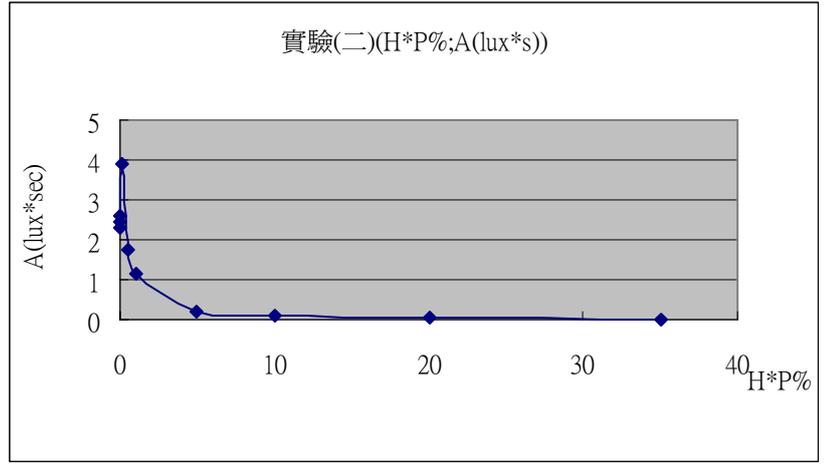
A 液：25%L1ml

B 液：0.1M K₃Fe(CN)₆ 0.5ml +各濃度之 H₂O₂ 0.5ml

以滴管吸取 B 液滴入 A 管，使用 GLX 測量其反應情形並紀錄之。

(二)實驗結果：

(0.5ml)	A(lux*s)	max(lux)	time(sec)
35%	0.0072	0.01	1.0
20%	0.0271	0.02	3.6
10%	0.1160	0.07	9.4
5%	0.2190	0.12	13.0
1%	1.1400	0.38	20.4
0.50%	1.7700	0.81	24.6
0.10%	3.8900	1.38	15.8
0.05%	2.4700	1.05	19.0
0.01%	2.6000	1.09	17.8
0.01%	2.3100	0.93	18.8



(三)實驗內容：

H₂O₂ 之放光時間大於 1%時漸減，小於 1%大致上都至少有 15s，但最大強度及總照度之最大值皆出現在 0.1%。

三、探討 K₃Fe(CN)₆ 濃度對其發光的影響

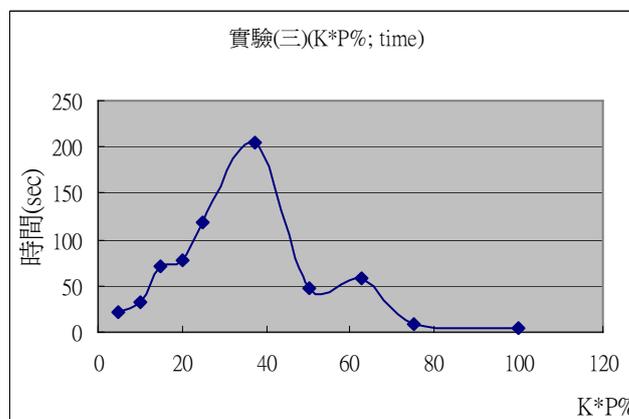
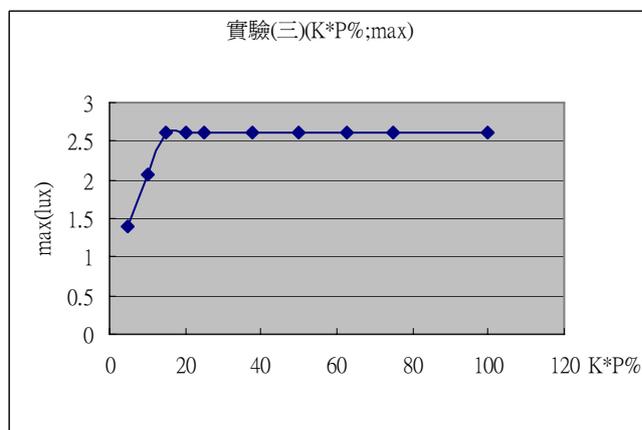
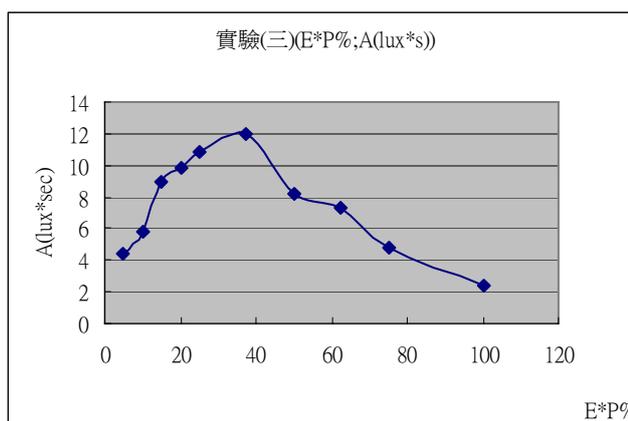
(一)實驗方法：

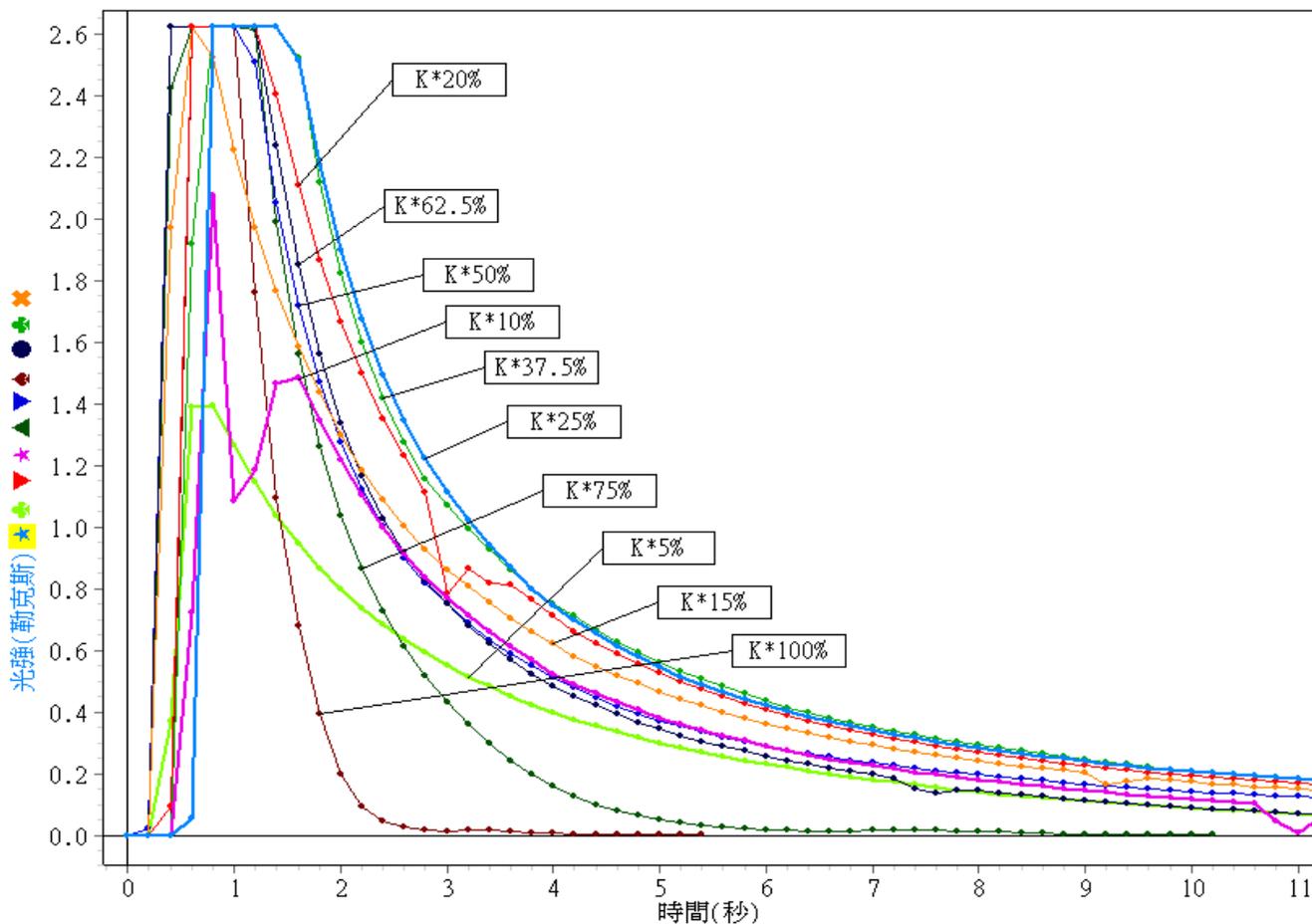
A 液：25% L1ml

B 液：0.1% H₂O₂1ml；各濃度之 K₃Fe(CN)₆1ml (K：8g/100ml)；混合為 2ml 取 1ml 反應以滴管吸取 B 液滴入 A 管，使用 GLX 測量其反應情形並紀錄之。

(二)實驗結果：

(1ml)	A(lux*s)	max	time(sec)
K*100%	2.45	2.62	4.00
K*75%	4.78	2.62	9.40
K*62.5%	7.28	2.62	57.40
K*50%	8.19	2.62	48.20
K*37.5%	12.00	2.62	204.00
K*25%	10.80	2.62	117.60
K*20%	9.89	2.62	77.00
K*15%	8.96	2.62	70.60
K*10%	5.78	2.07	32.00
K*5%	4.43	1.39	22.60





(三)實驗內容：

$K_3Fe(CN)_6$ 以 37.5% 效果最好，呈現一拋物線；最大值只要大於 10% 都有 2 lux.；時間上 37.5% 也最佳，濃度過大過小時，時間皆縮短。總言之，37.5% 時間最久，強度最強。

四、探討 NaOH 濃度對其發光的影響

(一)實驗方法：

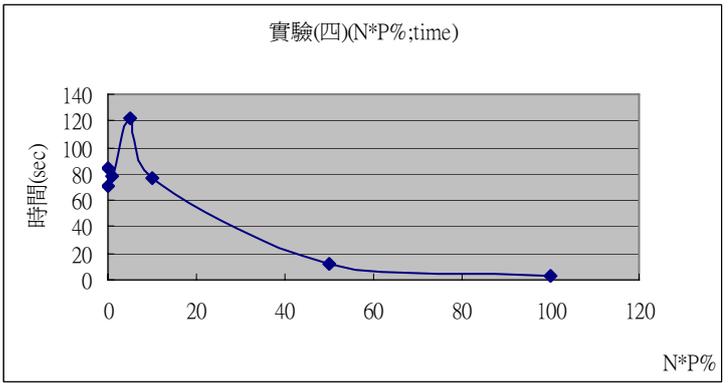
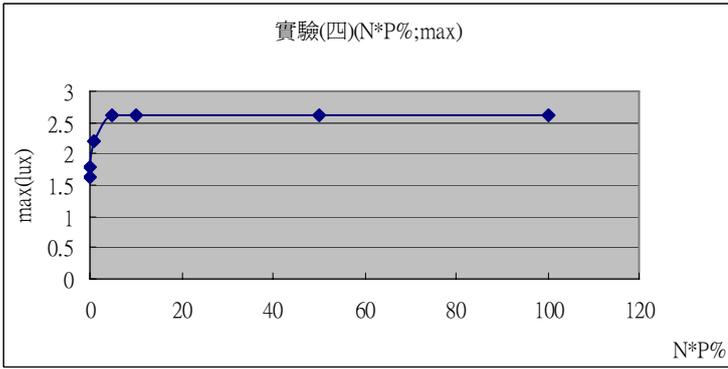
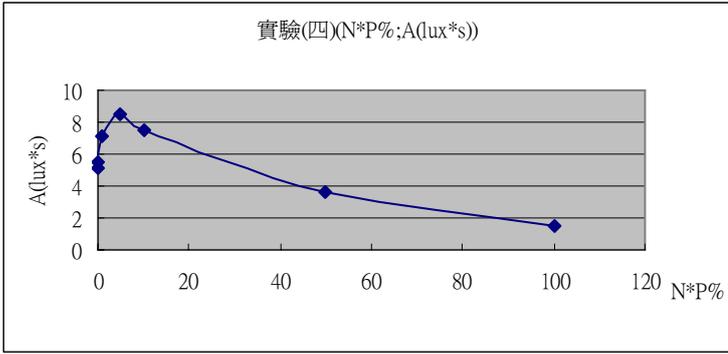
A 液：25% L0.5ml + 各濃度之 NaOH 0.5ml (N=1M)

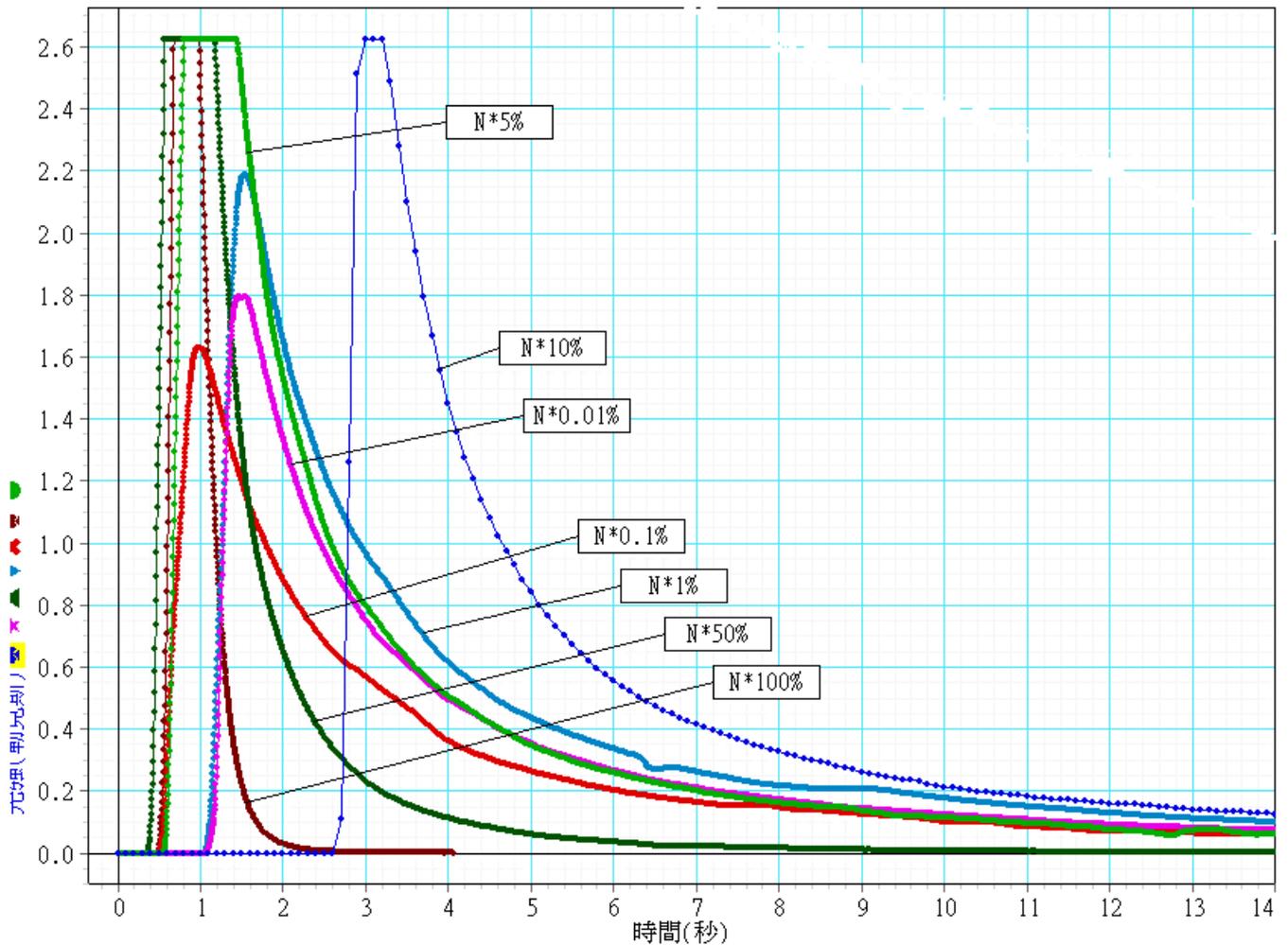
B 液： $K_3Fe(CN)_6$ 37.5% (3g/100ml) 0.5ml + H_2O_2 0.1% 0.5ml

以滴管吸取 B 液滴入 A 管，使用 GLX 測量其反應情形並紀錄之。

(二)實驗結果：

0.5ml	A(lux*s)	max	time(sec)
N*100%	1.56	2.62	2.49
N*50%	3.64	2.62	12.28
N*10%	7.44	2.62	77.00
N*5%	8.49	2.62	121.40
N*1%	7.15	2.19	78.98
N*0.1%	5.17	1.63	84.37
N*0.01%	5.56	1.79	70.59





(三)實驗內容：

NaOH 之最大強度隨濃度降低而下降，總照度及放光時間之高峰皆為 5%。

五、探討溫度對其發光的影響

(一)實驗方法：

A 液：25%L1ml

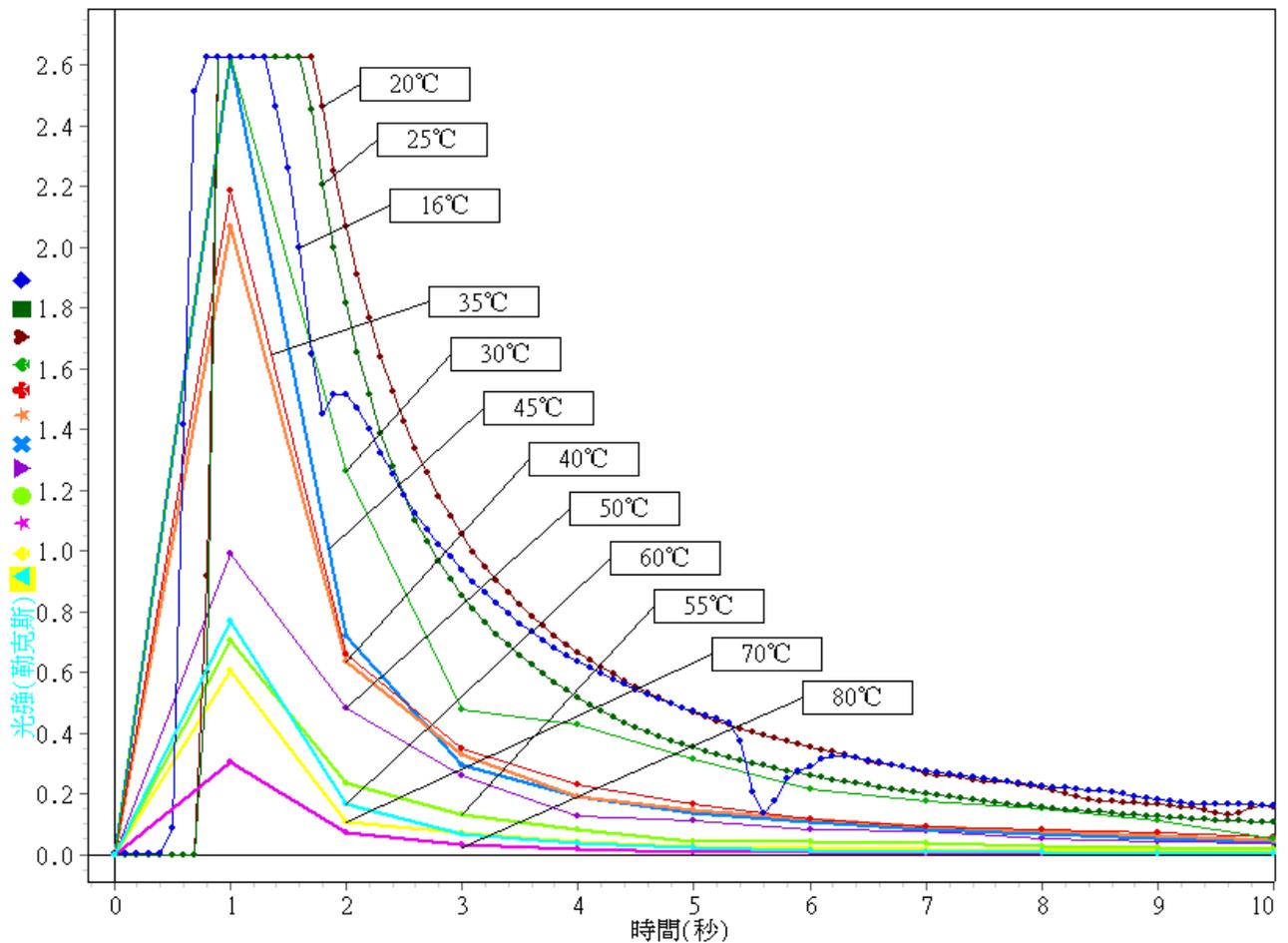
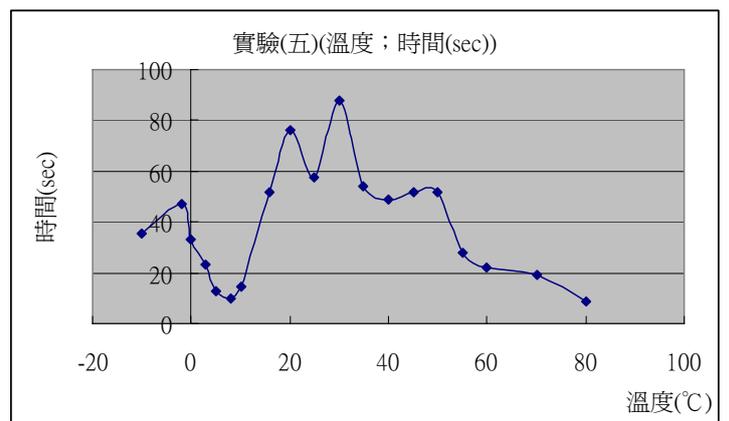
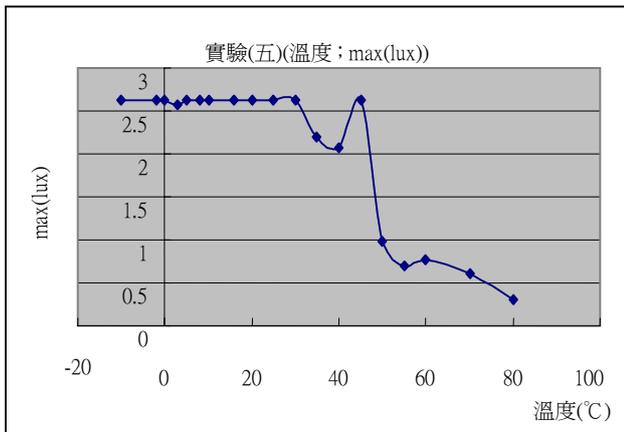
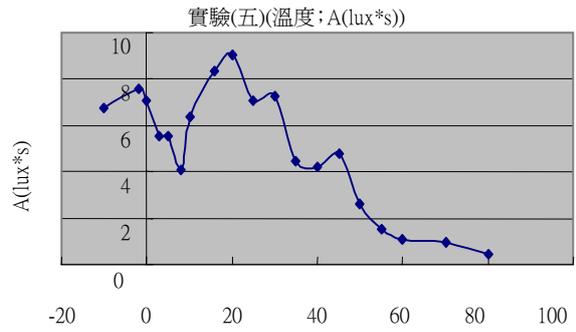
B 液：K₃Fe(CN)₆37.5%(3g/100ml)0.5ml+ H₂O₂0.1%0.5ml

取適量熱水至入恆溫槽中，調節並維持其溫度。從最高溫度依序降溫測試。A、B 管先行置入槽中，水浴五分鐘使其等溫。以滴管吸取 B 液滴入 A 管，使用 GLX 測量其反應情形並紀錄之。

(二)實驗結果：

°C	A(lux*s)	max	time(sec)	°C	A(lux*s)	max	time(sec)
80	0.453	0.30	9.0	40	4.210	2.07	49.0
70	0.968	0.61	19.0	35	4.490	2.19	54.0
60	1.090	0.77	22.0	30	7.290	2.62	88.0
55	1.510	0.70	28.0	25	7.040	2.62	57.7
50	2.620	0.99	52.0	20	9.030	2.62	76.0
45	4.800	2.62	52.0	16	8.360	2.62	51.6

溫度再下降:			
°c	A(lux*s)	max	time(sec)
20	4.70	2.62	10.2
15	5.49	2.62	14.0
10	6.36	2.62	14.8
8	4.06	2.62	9.6
5	5.54	2.62	13.0
3	5.55	2.58	23.2
0	7.07	2.62	33.0
-2	7.59	2.62	47.2
-5	2.19	2.62	13.0
-10	6.76	2.62	35.2



(三)實驗內容：

低於 45°C 時開始出現大於 2.0 lux 之最大值，30°C 有最長放光時間，溫度高時時間縮短；總照度量趨勢上，溫度越低效果越佳，如 20°C 達到最大值；大於 70°C 時皆低於 1.0 lux。另外，45°C 及 50°C 之間在總照度量、最大照度及 GLX 圖上皆有一差距。

六、改以 $K_4Fe(CN)_6$ 代替 $K_3Fe(CN)_6$ ，並改變其濃度，探討其影響

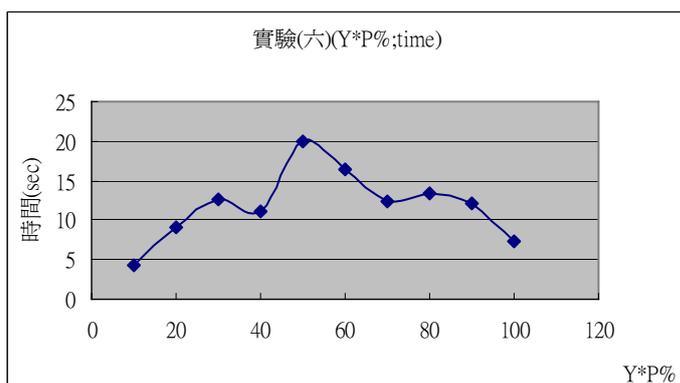
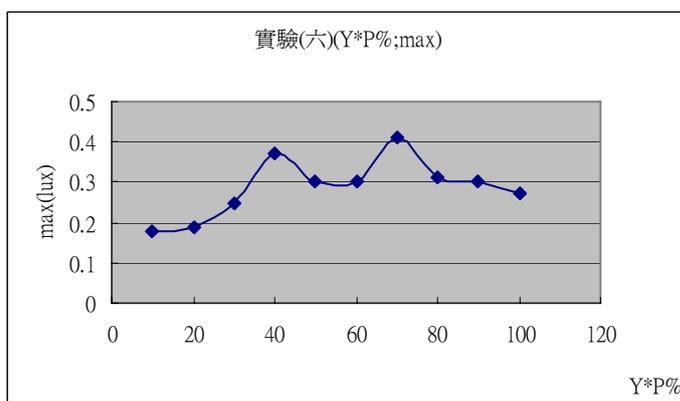
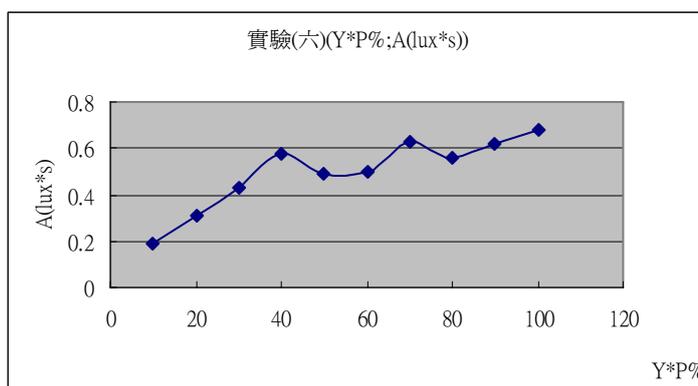
(一)實驗方法：

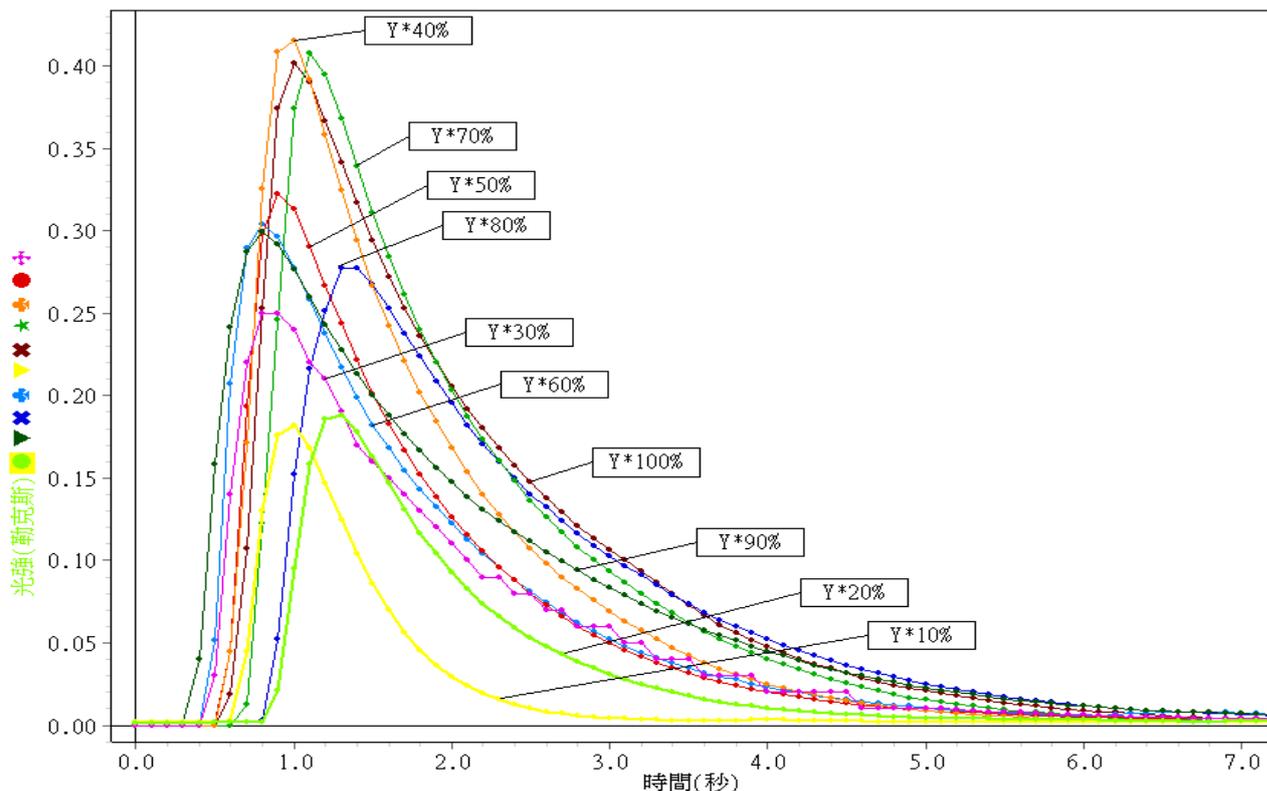
A 液：25% L1ml

B 液：0.1% H_2O_2 1ml；各濃度之 $K_4Fe(CN)_6$ 1ml (Y：1g/100ml)；混合為 2ml 取 1ml 反應以滴管吸取 B 液滴入 A 管，使用 GLX 測量其反應情形並紀錄之。

(二)實驗結果：

	A(lux*s)	max	time(sec)
Y*100%	0.679	0.27	7.30
Y*90%	0.621	0.30	12.00
Y*80%	0.558	0.31	13.30
Y*70%	0.632	0.41	12.40
Y*60%	0.499	0.30	16.40
Y*50%	0.488	0.30	20.00
Y*40%	0.577	0.37	11.20
Y*30%	0.434	0.25	12.70
Y*20%	0.311	0.19	9.20
Y*10%	0.193	0.18	4.40





(三)實驗內容：

其中，三類數據都有超過一個以上的高峰，於是我們重複實驗了數次，但各次的升降趨勢不盡相同，轉折處出現之位置也不同，其中原因尚待研究。但普遍來說以 $K_4Fe(CN)_6$ 代替後各項表現皆不佳，總照度亮及最大放光強度皆未大於 1.0，推測 $K_4Fe(CN)_6$ 並非良好催化劑。

七、探討不同比例之 $K_3Fe(CN)_6$ 及 $K_4Fe(CN)_6$ 混合溶液對發光的影響

(一)實驗方法：

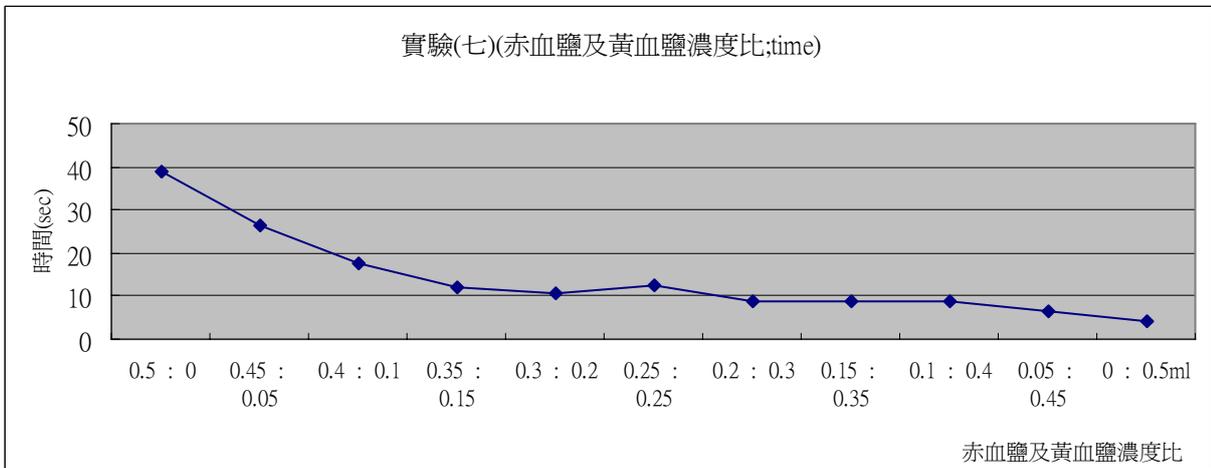
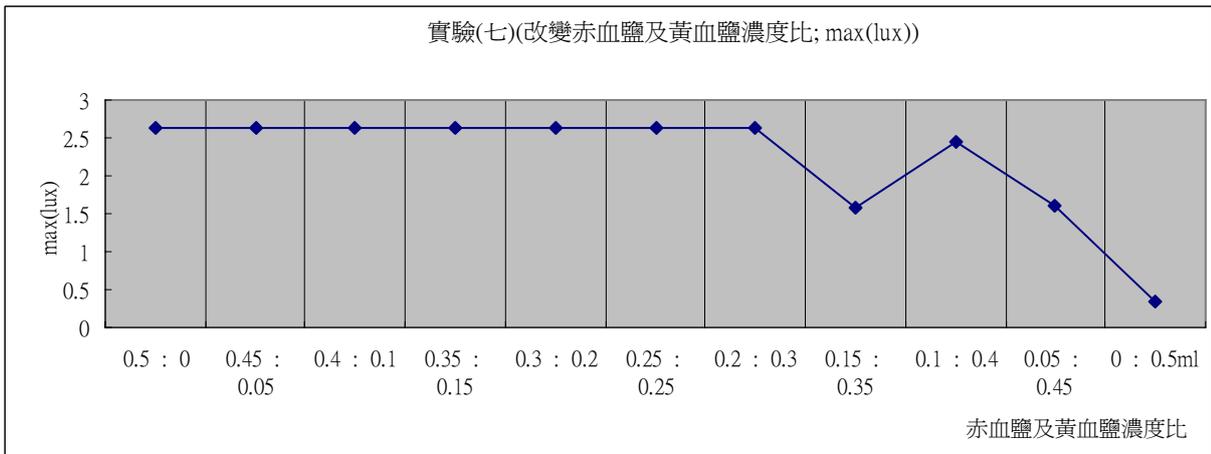
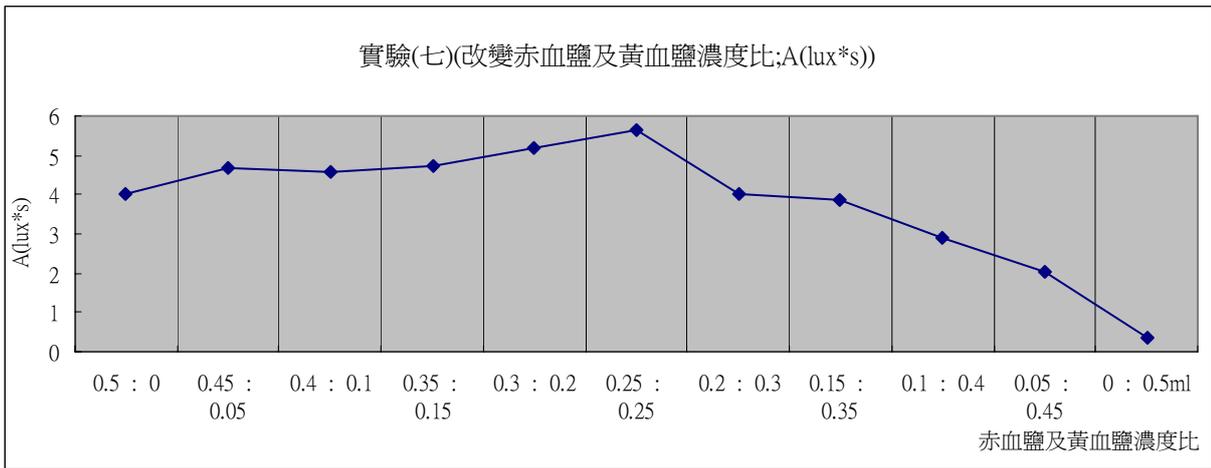
A 液：25%L1ml

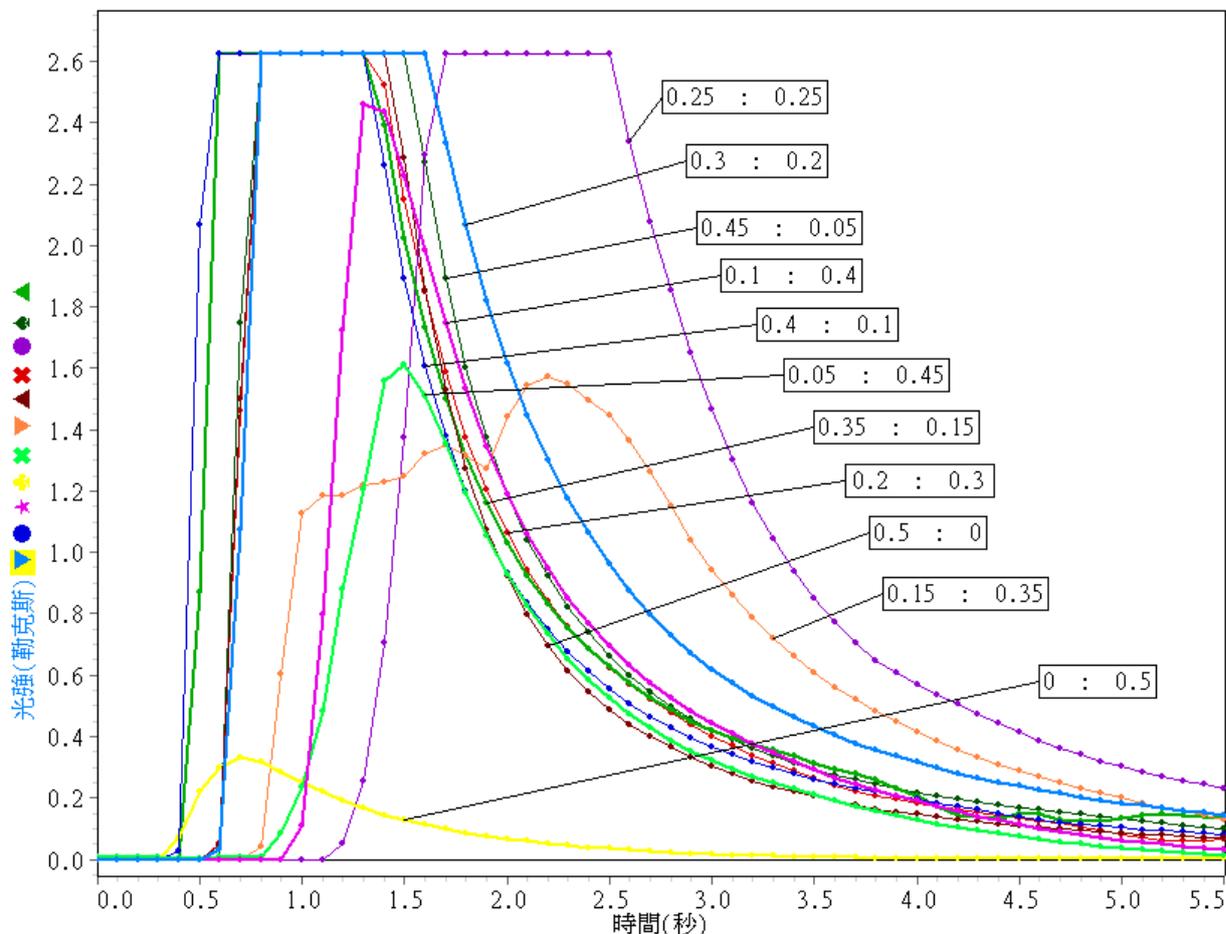
B 液： $K_3Fe(CN)_6$ 和 $K_4Fe(CN)_6$ 混合濃度 0.5ml+ H_2O_2 0.1%0.5ml

以滴管吸取 B 液滴入 A 管，使用 GLX 測量其反應情形並紀錄之。

(二)實驗結果：

V 比(ml)(赤:黃)	A(lux*s)	max	time(sec)
0.5 : 0	4.04	2.62	38.80
0.45 : 0.05	4.69	2.62	26.40
0.4 : 0.1	4.58	2.62	17.50
0.35 : 0.15	4.71	2.62	12.20
0.3 : 0.2	5.21	2.62	10.60
0.25 : 0.25	5.62	2.62	12.40
0.2 : 0.3	4.03	2.62	9.00
0.15 : 0.35	3.88	1.57	8.90
0.1 : 0.4	2.90	2.46	8.80
0.05 : 0.45	2.03	1.61	6.30
0 : 0.5ml	0.35	0.33	4.10





(三)實驗內容：

總照度量上為體積 1:1 時最佳，呈拋物線； $K_4Fe(CN)_6$ 比例越高時間越短，最大照度上 $K_3Fe(CN)_6$ 比值只要有 0.4 以上都可達到 2.62 lux。

八、加入 IA、IIA 離子溶液

(一)實驗方法：

A 液：25%L1ml

B 液：37.5%(3g/100ml) $K_3Fe(CN)_6$ 0.5ml+0.1% H_2O_2 0.5ml

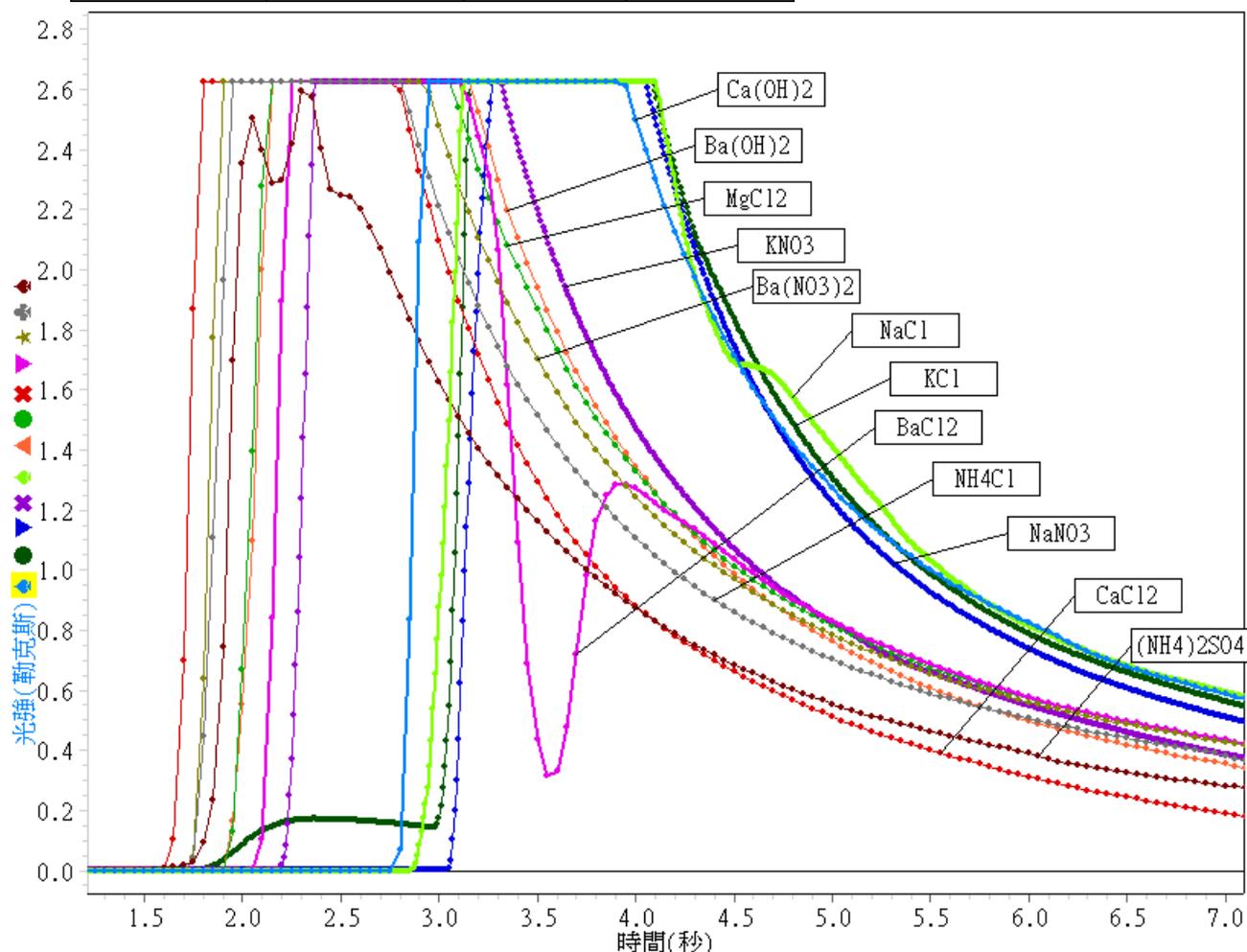
C 液：0.1M IA、IIA 離子溶液

C 約於 B 滴入 A 管後 2 秒緊接加入，使用 GLX 測量其反應情形並紀錄之。

(二)實驗結果：

化合物	A(lux*s)	Max	time(sec)
NaCl	10.80	2.62	238.92
KCl	6.79	2.62	29.07
NaNO ₃	8.25	2.62	44.39
KNO ₃	7.87	2.62	85.76
Ca(OH) ₂	10.10	2.62	64.80
Ba(OH) ₂	7.80	2.62	30.05
MgCl ₂	11.00	2.62	227.70
CaCl ₂	9.72	2.62	132.15

BaCl ₂	6.37	2.62	15.80
Ba(NO ₃) ₂	10.40	2.62	95.95
NH ₄ Cl	9.34	2.62	93.20
(NH ₄) ₂ SO ₄	6.33	2.62	44.30



(三)實驗內容：

發現數據並無明顯影響且都很接近，無顯著差距，規律性不強，所以我們推測 IA、IIA 金屬離子對其反應無顯著影響。

九、加入不同過渡金屬離子溶液(H₂O 做配位子):

(一)實驗方法：

以下這部分的實驗(包括三種配位子)，我們都將之分為四個部分：(一)離子先行加入 A 管中、(二)離子先行加入 B 管中、(三)離子於反應時同時加入、(四)離子於反應後 1~2 秒再加入；其中，(一)(二)之混合液有部分已先行反應，故以下我們將較偏重於(三)(四)之討論及歸納。

PART 1：A—L*25% 1ml+各溶液(0.1M)0.5ml

B—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1%H₂O₂0.5ml

取 B 管滴入 A 管

PART 2：A—L*25% 1ml

B—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1%H₂O₂0.5ml+各溶液(0.1M)0.5ml

取 B 管滴入 A 管

PART 3 : A—L*25% 1ml

B—各溶液(0.1M)0.5ml

C—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1%H₂O₂0.5ml

取 B , C 同時加入 A 管

PART 4 : A—L*25% 1ml

B—各溶液(0.1M)0.5ml

C—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1%H₂O₂0.5ml

C 約於 B 滴入 A 管後 2 秒緊接加入

(二)實驗結果 :

PART 1 :

化合物	aq.原色	A 液色	A(lux*s)	max	time(sec)
Cr(H ₂ O) ₆ ³⁺	深綠	淡綠	8.61	2.57	178.40
CrO ₄ ²⁻	黃	黃			
Cr ₂ O ₇ ²⁻	深橘	黃	0.99	0.56	23.40
[Mn(H ₂ O) ₆]Cl ₂	透明	淡棕	0.10	0.26	1.20
[Mn(H ₂ O) ₆]SO ₄	透明	淡棕	0.30	0.65	1.80
[Fe(H ₂ O) ₆]Cl ₃	胡蘿蔔色	深胡蘿蔔	2.05	1.39	9.60
[Fe(H ₂ O) ₆]Cl ₂	棕色	深綠	0.15	0.21	4.60
[Fe(H ₂ O) ₆]SO ₄	橘茶色	暗咖啡	0.00	0.00	0.00
[Co(H ₂ O) ₆](NO ₃) ₂	淡桃紅色	深藍(灰濁)	0.40	0.56	5.40
[Ni(H ₂ O) ₄]SO ₄	淡綠	淡綠小濁	0.66	0.87	4.40
[Cu(H ₂ O) ₄]SO ₄	淡藍	灰綠濁	0.04	0.13	0.20
[Zn(H ₂ O) ₄]Cl ₂	濁白	濁白	8.61	2.57	178.40

PART 2 :

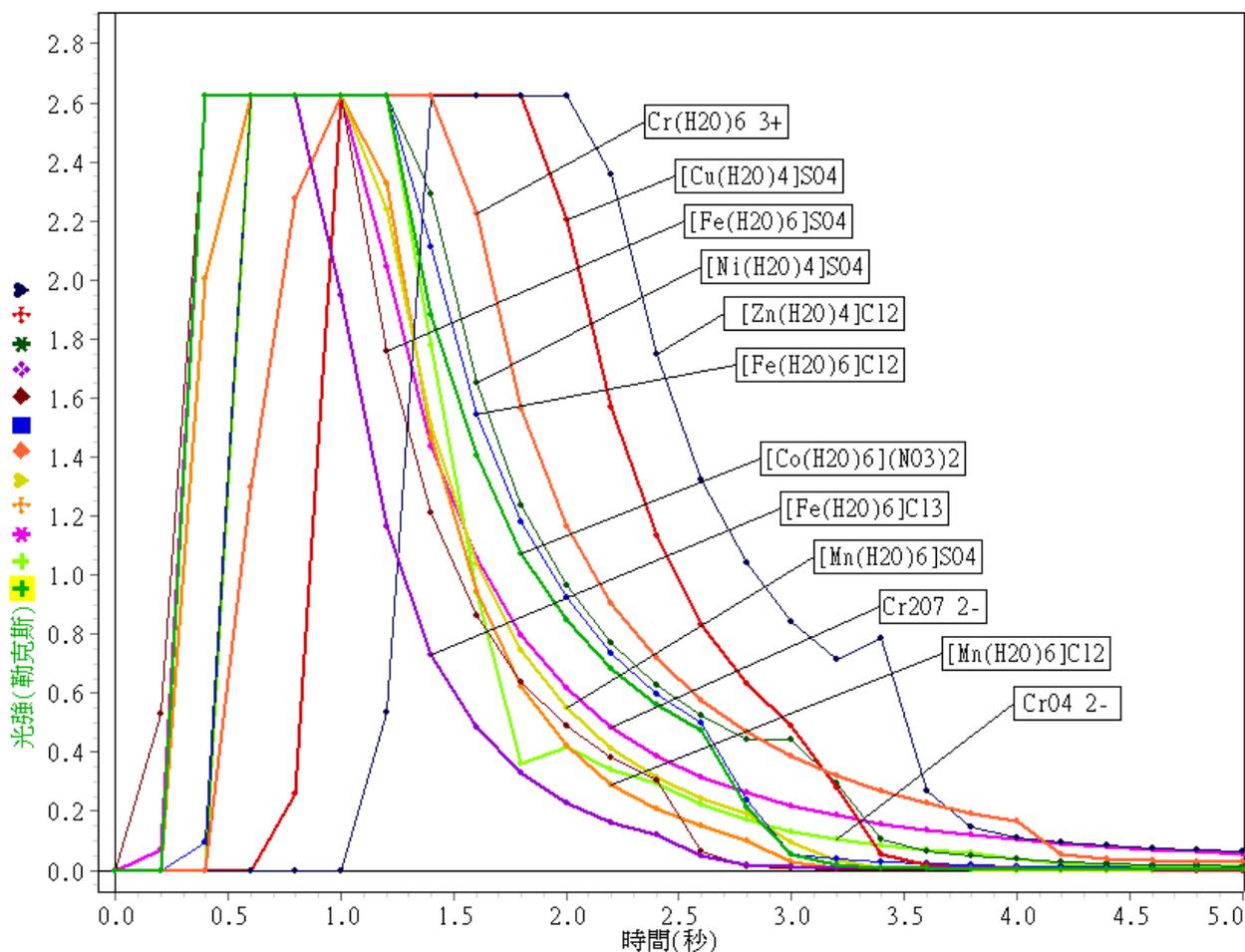
化合物	B 液色	A(lux*s)	max	time(sec)
Cr(H ₂ O) ₆ ³⁺	綠	3.82	2.620	3.60
CrO ₄ ²⁻	黃	2.27	2.270	11.20
Cr ₂ O ₇ ²⁻	橘	0.01	0.030	1.00
[Mn(H ₂ O) ₆]Cl ₂	咖啡	0.03	0.070	1.00
[Mn(H ₂ O) ₆]SO ₄	咖啡	0.03	0.070	1.20
[Fe(H ₂ O) ₆]Cl ₃	深藍	0.52	0.640	6.20
[Fe(H ₂ O) ₆]Cl ₂	深藍	0.02	0.030	1.40
[Fe(H ₂ O) ₆]SO ₄	深藍	0.00	0.004	0.60
[Co(H ₂ O) ₆](NO ₃) ₂	褐色	0.37	0.530	4.20
[Ni(H ₂ O) ₄]SO ₄	茶色	1.30	1.740	14.60
[Cu(H ₂ O) ₄]SO ₄	咖啡+綠	0.32	0.620	1.60
[Zn(H ₂ O) ₄]Cl ₂	乳黃	1.41	1.780	8.20

PART 3 :

化合物	A(lux*s)	Max	time(sec)
$\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$	4.18	2.62	17.80
CrO_4^{2-}	2.92	2.62	14.80
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	0.76	2.62	4.40
$[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_2$	1.10	2.62	1.40
$[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{SO}_4$	1.41	2.62	2.00
$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_3$	3.23	1.82	16.20
$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_2$	1.19	0.52	15.60
$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{SO}_4$	1.07	2.10	8.00
$[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6](\text{NO}_3)_2$	1.49	2.09	3.20
$[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SO}_4$	1.11	2.62	8.40
$[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SO}_4$	0.40	1.56	1.00
$[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Cl}_2$	1.48	2.62	8.00

PART 4 :

化合物	A(lux*s)	Max	time(sec)
$\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$	4.32	2.62	20.00
CrO_4^{2-}	3.13	2.62	7.80
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	3.89	2.62	6.40
$[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_2$	3.29	2.62	3.40
$[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{SO}_4$	3.58	2.62	3.40
$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_3$	2.64	2.62	5.80
$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_2$	3.74	2.62	7.60
$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{SO}_4$	3.35	2.62	3.60
$[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6](\text{NO}_3)_2$	4.07	2.62	4.20
$[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SO}_4$	4.03	2.62	7.00
$[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SO}_4$	4.12	2.62	3.60
$[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Cl}_2$	4.38	2.62	17.80



此圖為 PART 4(過渡金屬離子再發光後 2 秒加入)之 GLX 圖

(三)實驗內容：

從 PART 4(過渡金屬離子再發光後 2 秒加入)的數據中， $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ 和 $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Cl}_2$ 時間長以外，其他的過渡金屬離子加入後，光強訊號很快就降到 0 lux。

十、加入不同過渡金屬離子溶液(NH_3 做配位子)

(一)實驗方法：

PART 1：A—L*25% 1ml+各溶液(0.1M)0.25ml+6.6% NH_4OH 0.25ml

B—37.5%(3g/100ml) $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0.5ml+0.1% H_2O_2 0.5ml

取 B 管滴入 A 管

PART 2：A—L*25% 1ml

B—37.5%(3g/100ml) $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0.5ml+0.1% H_2O_2 0.5ml+各溶液(0.1M)0.25ml+6.6% NH_4OH 0.25ml

取 B 管滴入 A 管

PART 3：A—L*25% 1ml

B—各溶液(0.1M)0.25ml+6.6% NH_4OH 0.25ml

C—37.5%(3g/100ml) $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0.5ml+0.1% H_2O_2 0.5ml

取 B，C 同時加入 A 管

PART 4：A—L*25% 1ml

B—各溶液(0.1M)0.25ml+6.6%NH₄OH0.25ml

C—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1%H₂O₂0.5ml

C 約於 B 滴入 A 管後 2 秒緊接加入

(二)實驗結果：

PART 1：

化合物	a.q.原色	A 液色	A(lux*s)	max	time(sec)
Cr(NH ₃) ₆ ³⁺	淡藍		6.72	2.62	51.20
CrO ₄ ²⁻	黃		3.50	2.62	18.20
Cr ₂ O ₇ ²⁻	黃		2.00	1.14	15.60
[Mn(NH ₃) ₆]Cl ₂	土黃		0.24	0.45	3.20
[Mn(NH ₃) ₆]SO ₄	土黃		0.44	0.57	3.80
[Fe(NH ₃) ₆]Cl ₃	橘		3.01	2.03	16.80
[Fe(NH ₃) ₆]Cl ₂	黑		0.78	0.41	12.00
[Fe(NH ₃) ₆]SO ₄	橘紅				
[Co(NH ₃) ₆](NO ₃) ₂	綠	淡棕	0.63	1.05	4.80
[Ni(NH ₃) ₄]SO ₄	淡藍	小濁白	2.44	2.10	21.80
[Cu(NH ₃) ₄]SO ₄	深藍	黑	0.00	0.00	0.60
[Zn(NH ₃) ₄]Cl ₂	透明		4.06	2.62	20.40

PART 2：

化合物	A(lux*s)	Max	time(sec)
Cr(NH ₃) ₆ ³⁺	0.4760	0.32000	21.00
CrO ₄ ²⁻	0.1570	0.08000	13.20
Cr ₂ O ₇ ²⁻	0.0277	0.03000	2.40
[Mn(NH ₃) ₆]Cl ₂	0.0020	0.00385	0.40
[Mn(NH ₃) ₆]SO ₄	0.0028	0.00577	0.80
[Fe(NH ₃) ₆]Cl ₃	0.1100	0.03000	11.45
[Fe(NH ₃) ₆]Cl ₂	0.0464	0.03000	5.40
[Fe(NH ₃) ₆]SO ₄	0.0210	0.02000	3.00
[Co(NH ₃) ₆](NO ₃) ₂	0.0023	0.00385	0.80
[Ni(NH ₃) ₄]SO ₄	0.3820	0.12000	21.80
[Cu(NH ₃) ₄]SO ₄	0.0111	0.02000	1.40
[Zn(NH ₃) ₄]Cl ₂	0.2820	0.11000	20.80

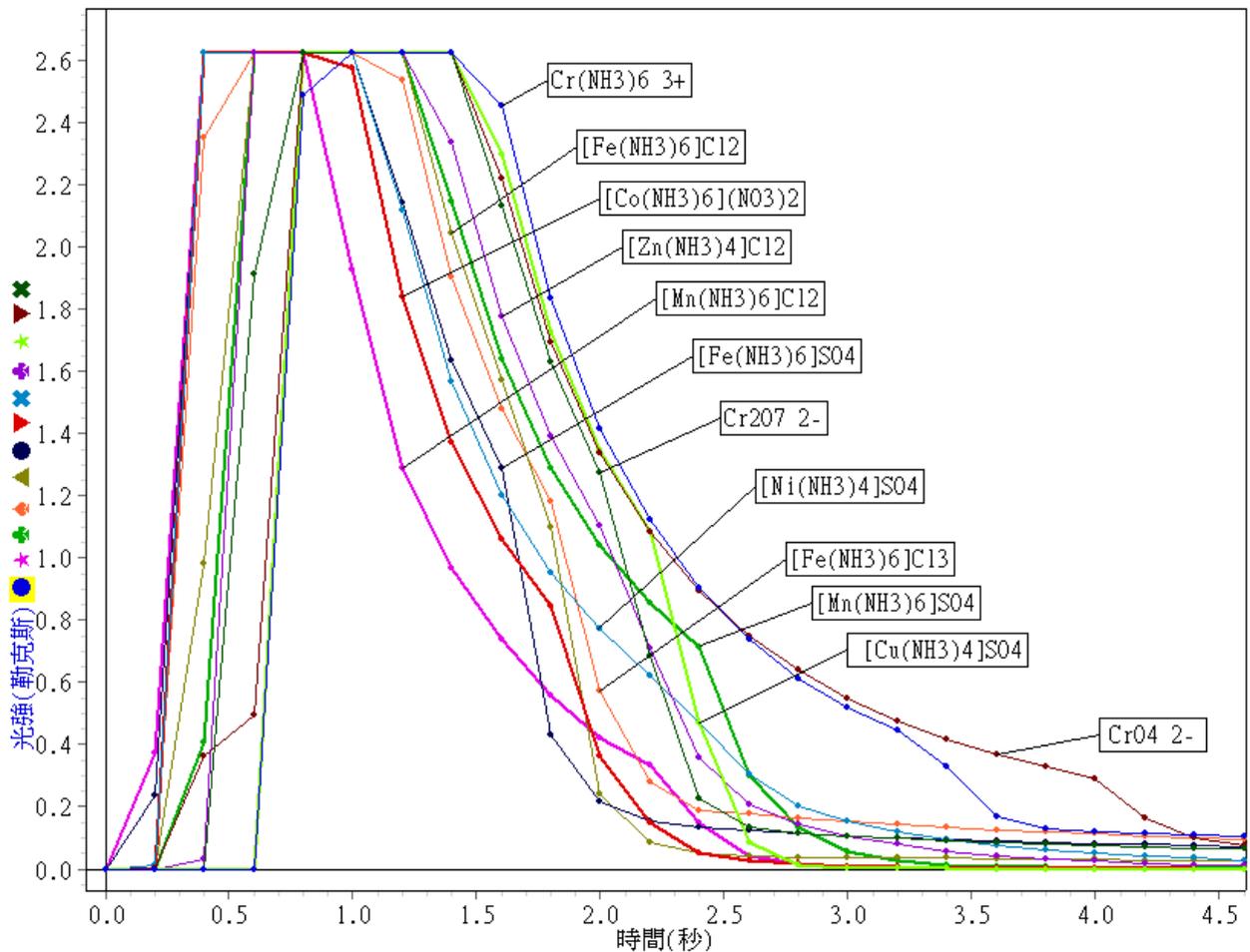
PART 3：

化合物	A(lux*s)	Max	time(sec)
Cr(NH ₃) ₆ ³⁺	5.100	2.62	24.60
CrO ₄ ²⁻	2.160	2.62	9.20
Cr ₂ O ₇ ²⁻	1.620	1.09	8.60
[Mn(NH ₃) ₆]Cl ₂	0.426	0.80	3.20

[Mn(NH ₃) ₆]SO ₄	0.883	1.60	4.20
[Fe(NH ₃) ₆]Cl ₃	3.170	2.04	12.00
[Fe(NH ₃) ₆]Cl ₂	0.840	0.54	11.60
[Fe(NH ₃) ₆]SO ₄	2.450	1.69	17.40
[Co(NH ₃) ₆](NO ₃) ₂	0.416	0.89	2.80
[Ni(NH ₃) ₄]SO ₄	0.883	2.01	6.80
[Cu(NH ₃) ₄]SO ₄	0.250	0.08	1.00
[Zn(NH ₃) ₄]Cl ₂	3.850	2.62	15.00

PART 4 :

化合物	A(lux*s)	max	time(sec)
Cr(NH ₃) ₆ ³⁺	4.71	2.62	24.80
CrO ₄ ²⁻	4.84	2.62	22.20
Cr ₂ O ₇ ²⁻	4.08	2.62	17.40
[Mn(NH ₃) ₆]Cl ₂	2.94	2.62	3.60
[Mn(NH ₃) ₆]SO ₄	3.83	2.62	4.00
[Fe(NH ₃) ₆]Cl ₃	4.44	2.62	27.40
[Fe(NH ₃) ₆]Cl ₂	3.45	2.62	21.20
[Fe(NH ₃) ₆]SO ₄	3.81	2.62	34.20
[Co(NH ₃) ₆](NO ₃) ₂	3.24	2.62	3.60
[Ni(NH ₃) ₄]SO ₄	3.93	2.62	11.40
[Cu(NH ₃) ₄]SO ₄	3.51	2.62	2.60
[Zn(NH ₃) ₄]Cl ₂	3.80	2.62	15.00



此圖為 PART 4(過渡金屬離子再發光後 2 秒加入)之 GLX 圖

(三)實驗內容：

從 PART 4(過渡金屬離子再發光後 2 秒加入)的數據中， $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ 、 CrO_4^{2-} 、 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 、 $[\text{Fe}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ 、 $[\text{Fe}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$ 、 $[\text{Fe}(\text{NH}_3)_6]\text{SO}_4$ 、 $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Cl}_2$ 時間長以外，其他的過渡金屬離子加入後，光強訊號很快就降到 0 lux。

十一、加入不同過渡金屬離子溶液(NO_2^- 做配位子)

(一)實驗方法：

PART 1：A—L*25% 1ml+各溶液(0.1M)0.25ml+1MNaNO₂0.25ml

B—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1% H₂O₂0.5ml

取 B 管滴入 A 管

PART 2：A—L*25% 1ml

B—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1% H₂O₂0.5ml+各溶液

(0.1M)0.25ml+1MNaNO₂0.25ml

取 B 管滴入 A 管

PART 3：A—L*25% 1ml

B—各溶液(0.1M)0.25ml+1MNaNO₂0.25ml

C—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1% H₂O₂0.5ml

取 B，C 同時加入 A 管

PART 4 : A—L*25% 1ml

B—各溶液(0.1M)0.25ml+1MNaNO₂0.25ml

C—37.5%(3g/100ml)K₃Fe(CN)₆0.5ml+0.1%H₂O₂0.5ml

C 約於 B 滴入 A 管後 2 秒緊接加入

(二)實驗結果：

PART 1 :

化合物	A(lux*s)	Max	time(sec)
Cr(NO ₂) ₆ ³⁺	4.36	2.62	23.00
[Mn(NO ₂) ₆]Cl ₂	0.67	1.05	5.00
[Mn(NO ₂) ₆]SO ₄	0.84	0.91	6.40
[Fe(NO ₂) ₆]Cl ₃	3.13	1.71	47.40
[Fe(NO ₂) ₆]Cl ₂	0.88	0.55	21.40
[Fe(NO ₂) ₆]SO ₄	1.40	0.55	23.20
[Co(NO ₂) ₆](NO ₃) ₂	4.00	2.62	23.80
[Ni(NO ₂) ₄]SO ₄	0.84	1.14	5.80
[Cu(NO ₂) ₄]SO ₄	0.07	0.15	1.20
[Zn(NO ₂) ₄]Cl ₂	4.22	2.61	39.80

PART 2 :

化合物	B 液色	A(lux*s)	max	time(sec)
Cr(NO ₂) ₆ ³⁺	黃	0.6910	1.1600	11.0
[Mn(NO ₂) ₆]Cl ₂	淡咖	0.0098	0.0100	1.0
[Mn(NO ₂) ₆]SO ₄	淡咖	0.0092	0.0096	1.4
[Fe(NO ₂) ₆]Cl ₃	墨綠(藍)	0.0215	0.0300	1.2
[Fe(NO ₂) ₆]Cl ₂	綠(藍)	0.0088	0.1000	0.6
[Fe(NO ₂) ₆]SO ₄	墨綠(藍)	0.0077	0.0100	0.4
[Co(NO ₂) ₆](NO ₃) ₂	黃	5.1900	2.6200	43.6
[Ni(NO ₂) ₄]SO ₄	深棕	0.3370	0.3900	6.4
[Cu(NO ₂) ₄]SO ₄	淺棕	0.0008	0.0032	0.2
[Zn(NO ₂) ₄]Cl ₂	乳黃	0.0418	0.0500	2.3

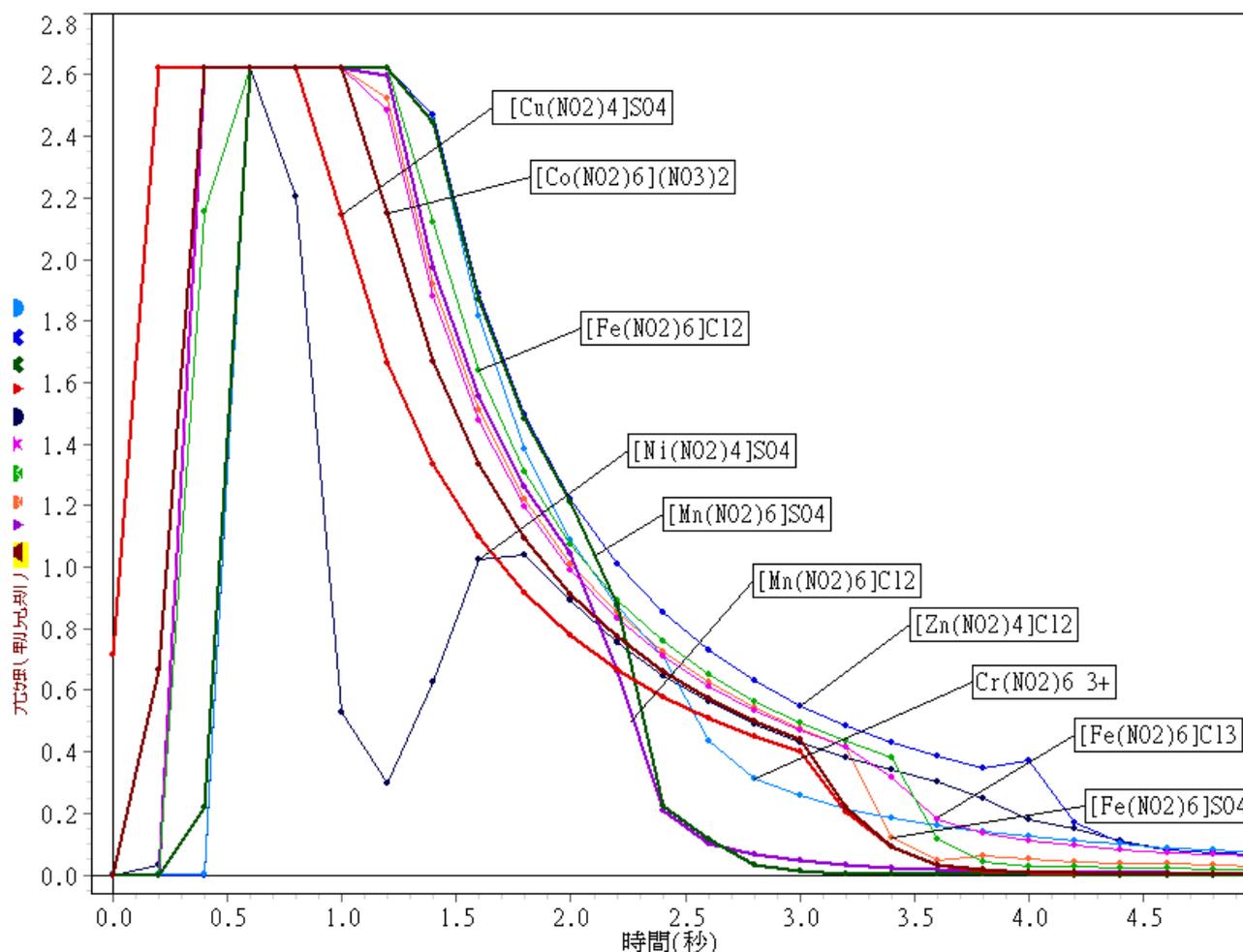
PART 3 :

化合物	C 液色	A(lux*s)	max	time(sec)
Cr(NO ₂) ₆ ³⁺		5.63	2.62	41.40
[Mn(NO ₂) ₆]Cl ₂		0.72	2.62	1.60
[Mn(NO ₂) ₆]SO ₄		0.36	1.27	1.20
[Fe(NO ₂) ₆]Cl ₃		3.53	2.62	9.40
[Fe(NO ₂) ₆]Cl ₂		1.77	2.62	11.80
[Fe(NO ₂) ₆]SO ₄		1.79	2.62	13.40
[Co(NO ₂) ₆](NO ₃) ₂		0.31	0.56	3.00

[Ni(NO ₂) ₄]SO ₄		1.90	2.62	13.60
[Cu(NO ₂) ₄]SO ₄		0.71	1.93	1.80
[Zn(NO ₂) ₄]Cl ₂		4.70	2.45	23.00

PART 4 :

化合物	C 液色	A(lux*s)	max	time(sec)
Cr(NO ₂) ₆ ³⁺		4.37	2.62	14.00
[Mn(NO ₂) ₆]Cl ₂		4.03	2.62	5.20
[Mn(NO ₂) ₆]SO ₄		3.80	2.62	3.40
[Fe(NO ₂) ₆]Cl ₃	(有蒸氣)	4.79	2.62	13.20
[Fe(NO ₂) ₆]Cl ₂	棕(有蒸氣)	4.69	2.62	9.40
[Fe(NO ₂) ₆]SO ₄	(有蒸氣)	4.61	2.62	9.20
[Co(NO ₂) ₆](NO ₃) ₂		4.33	2.62	4.60
[Ni(NO ₂) ₄]SO ₄		3.44	2.62	11.40
[Cu(NO ₂) ₄]SO ₄	綠	4.35	2.62	4.65
[Zn(NO ₂) ₄]Cl ₂		5.08	2.62	22.40



此圖為 PART 4(過渡金屬離子再發光後 2 秒加入)之 GLX 圖

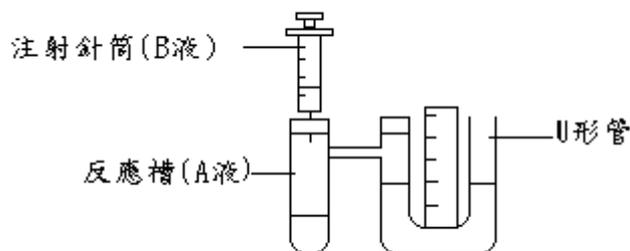
(三)實驗內容：

從 PART 4(過渡金屬離子再發光後 2 秒加入)的數據中，[Cr(NO₂)₆]³⁺、[Fe(NO₂)₆]³⁺、

$[\text{Fe}(\text{NO}_2)_6]^{4-}$ 、 $[\text{Ni}(\text{NO}_2)_4]^{2-}$ 、 $[\text{Zn}(\text{NO}_2)_4]^{2-}$ 時間長以外，其他的過渡金屬離子加入後，光強訊號很快就降到 0 lux。

十二、蒐集反應產生之副產物 N_2 並以理想氣體方程式換求反應產率

(一)實驗方法：



氣體實驗裝置圖

(二)實驗內容：

針對蒐集 N_2 的實驗，我們在過程中發現幾個必須改進的問題：首先，因實驗時我們暫時以液面停止下降 5min 為反應終點，但可能反應其實仍在微弱緩慢進行中；另外，目前的反應槽系統有些微漏氣現象（結束測量後一陣子發現液面回升），必須改進裝置再重複實驗。每次在實驗準備時，需花許多時間校正液面高（兩管等高），也有再改善的空間。

十三、Luminol—洋菜混合溶液對其發光之影響

(一)實驗方法：

取 50ml 之蒸餾水，加入洋菜粉加熱溶解，並分裝為六管，每管含洋菜溶液 2ml 及 25% luminol 1ml 於分管後 5、10、15、20、25、30 分後加入 B 管溶液觀察攝影，並紀錄之。

(二)實驗結果：

參照附件(影片)。

(三)實驗內容：

1. 濃度小時需要超過 30 分鐘才能凝結，如：0.1、0.2g。
2. 濃度大時無法均勻反應，滲透緩慢，搖晃後可再往下滲一些，如：0.6、0.7g；但到 0.8、0.9、1.0g 時搖晃後則無下滲，皆浮在最上層，且只有薄薄一層與溶在洋菜溶液裡的 luminol 反應。
3. 發現 0.6g 凝固時間 5 分鐘其軟硬程度良好，可適度延長期發光時間。
4. 實驗過程中，發現洋菜凝固後，此反應所產生之 N_2 被困在裡面，充分證明了其有氣體的產生。其中氣泡的量及分佈和有效反應區域及量成相關性：稠度較低者氣泡較均勻，表面凝固者氣泡大多集中於洋菜凍表層。
5. 實驗結果中，接近我們所求的條件範圍不大。後大部分的組別都因洋菜膠結過硬，B 液無法下滲反應，反而使時間縮減。適宜形成膠結的條件大致為 0.5~0.6g，5~10min。

十四、食品氧化劑殘留之檢驗

以市場中販售之豆類製品(豆干、干絲)、乾貨(蝦米、金針)等為採樣對象。

實驗組:取不經煮沸樣品適量，均勻倒上 6ml 之 $K_3Fe(CN)_6$ 溶液

對照組:取已煮沸樣品適量，均勻倒上 6ml 之 $K_3Fe(CN)_6$ 溶液

在同時倒入 6ml 之 L，觀察其發光強度及時間。

實驗組之放光強度及時間均大於對照組，其中干絲兩組間有明顯差別，推測樣品的確有氧化劑殘留。今後將逐步推廣至食品氧化劑殘留之檢驗。

玖、討論：

- 一、實驗結果並非濃度越大總照度量($lux \cdot S$)越大。在實驗設計時可能有其中一項控制變因不足量，以至於操縱之反應物在濃度過大時反應不完全，也可能是在高濃度情況下不利於其放光的穩定進行。如當光到最大照度時，衰退的情形 $\left| \frac{-\Delta lux}{\Delta t} \right|$ 正相關於 Luminol 濃度，濃度越大，照度下降越快；濃度小則反之。
- 二、我們多次進行調整 $K_4Fe(CN)_6$ 之測試，總照度及放光時間皆呈現不穩定之情況，趨勢不盡相同，必須再詳加實驗探討。採用出現最多次的趨勢加以討論：最大強度大致上有三個集中的區域，但衰減斜率上大致類似。
- 三、Luminol 方面，25%為總照度之高峰。最大放光強度隨濃度下降而下降；放光時間上，濃度越低時間較長，比較下濃度低時雖放光較久，但其強度也相對較弱；照度衰減的情形和濃度有關：達到最大強度前之斜率除 5%較緩外無明顯差異；達最大強度後，濃度大時衰減急速，濃度降下時其斜率漸大而趨緩，衰退的情形 $\left| \frac{-\Delta lux}{\Delta t} \right|$ 正相關於 Luminol 濃度。100%及 50%照度直接陡直降下，2~3s 即測無訊號，但濃度下降後之他組逐漸平緩，5%濃度之光強度皆在 0.1lux 以下，上下變化不大。
- 四、 $K_3Fe(CN)_6$ 濃度大於 15%時皆有 2.62 之放光強度；總照度及放光時間之高峰皆出現在 37.5%，小於 37.5%時間漸減；放光強度衰減之趨勢，濃度越大降弱情形越急，100%折線極陡，但 75%即逐漸緩下。衰退情形 $\left| \frac{-\Delta lux}{\Delta t} \right|$ 正相關於 $K_3Fe(CN)_6$ 濃度。
- 五、 H_2O_2 之放光時間大於 1%時漸減；但最大強度及總照度之最大值皆出現在 0.1%，濃度大時其強度不但無法爬高且爬升折線極為平緩，推測可能是因為 H_2O_2 含有氫鍵，濃度太大反而影響反應，使之受阻。濃度介於 0.005~0.5%之間趨勢大略相同，但 0.1%較為突出。
- 六、NaOH 之最大強度隨濃度而下降；總照度及放光時間之高峰皆為 5%。100%時斜率陡且於 2s 後訊號微弱，0.1%趨勢最緩。衰退的情形 $\left| \frac{-\Delta lux}{\Delta t} \right|$ 正相關於 NaOH 濃度。
- 七、 $K_4Fe(CN)_6$ 及 $K_3Fe(CN)_6$ 混合添加時，全部為 $K_3Fe(CN)_6$ 時可得最長放光時間，但當兩者等體積混合時可得最大總照度量，單獨添加 $K_4Fe(CN)_6$ 時效果不是很佳，但 1:1 混合後不但沒有因稀釋而影響原 $K_3Fe(CN)_6$ 之總照度量，反而出現了比單獨添加 $K_3Fe(CN)_6$ 時還大之總照度量。這種比例組合之放光情形出乎原先推測之結果，是個頗特殊的發現，其中原因值得再探究。在最大強度上，(赤血鹽：黃血鹽)=(1:1)及(3:2)時最大強度維持長達 1s 之久；隨著黃血鹽比例增加，max 也逐漸下降。(0:5)相較於他組強度有極大差距，大部份的比例組合在後期衰退情況類似。
- 八、在改變溫度的影響上，溫度低於 45°C 時開始出現大於 2.0 之最大強度；最長放光時間則為 30°C 之 88s；在總照度量上之最大值出現於實驗之最低溫 16°C；最大強度分布隨溫度上升而下降。溫度可影響其放光強度的爬升：16、20、25°C 三組皆快速上升，溫度高者爬升

趨勢較小，達最大照度後：溫度較高者衰退趨勢較緩但訊息較早衰弱；溫度較低者前期極遽衰退，但逐漸平緩而延長放光時距。大致而言，不論 $\frac{\Delta lux}{\Delta t}$ 和 $|\frac{-\Delta lux}{\Delta t}|$ 皆正相關於溫度高低。溫度太高則總照度及放光時間皆不佳，可知 Luminol 之放光反應不適宜在高溫中進行，推測有幾個原因：水浴時，高溫可能致使發光物之結構出現了改變，使反應能力變弱；或者溫度高時分子所具備動能上升，碰撞機會增加，較快結束反應，但電子的躍遷也受到影響。

九、目前實驗中各控制變因之濃度皆取其為操縱變因時所測出最佳值，但無法確定其他濃度是否和操縱變因搭配會產生它種趨勢，若有足夠時間，有再從事各反應物交叉濃度測試必要。

十、我們將數種不同 IA、IIA 金屬化合物加入反應溶液，並測量其總照度量及放光時間，發現數據無顯著差距，規律性不強，所以我們推測 IA、IIA 金屬離子對其反應無顯著影響。

十一、挑 NO_2^- (強場)、 NH_3 (中強場)、 H_2O (弱場) 作配位基，分別實驗之。導因可能為氫氧化物沉澱：

加入過渡金屬離子，會和 OH 生成氫氧化物沉澱，沉澱粒子可能吸收放出之光或遮蔽住。但因為配位子強度差異影響沉澱多寡，和沉澱顆粒顏色，使得光遭遮蔽。

拾、結論：

- 一、luminol 之濃度高至 25% 時即可達 2.62 之最大放光強度，之後隨濃度下降而下降。濃度過高或過低皆會降低總照度量。時間大致上濃度愈低愈久，但濃度低時強度也弱。
- 二、 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 濃度實驗中之總照度量及放光時間之高峰皆在 37.5%。濃度愈大或愈小皆下降，濃度愈大降弱情形愈急。
- 三、 H_2O_2 最大強度及總照度之 Max. 皆出現在 0.1%，濃度大時時間縮短且強度較難爬升。
- 四、NaOH 之最大強度隨濃度下降而下降，總照度及放光時間之高峰皆為 5%。
- 五、 $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 及 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 混合添加時，全部為 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 時可得最長放光時間，單獨添加 $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 時效果較不好。但當兩者某濃度混合時可得最大總照度量，這種比例組合之放光情形出乎原先推測之結果，是個頗特殊的發現，其中原因值得再探究。
- 六、 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 的情況不規律，且總照度量及最大值皆未超過 1.0，可能 $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 並非良好催化劑。
- 七、luminol 之放光反應適宜在低溫中進行，總照度量趨勢上，溫度越低效果越佳，如 16°C 達到最大值；大於 70°C 時皆低於 1.0 lux。另外， 45°C 及 50°C 之間在總照度量、最大照度及 GLX 圖上皆有一差距。
- 八、不具 d 軌域自由電子的 IA、IIA 金屬離子，不對 Luminol 發光機制造成影響。
- 九、洋菜溶液的濃度及凝固時間對 Luminol 發光有一定程度的影響，發現在 0.5g 至 0.6g 凝固時間 5 到 6 分鐘效果較佳。
- 十、經過初步檢驗，食品的確有氧化劑殘留的現象。干絲實驗組的光強度較大且時間較長，顯示其表面可能有殘留。

拾壹、展望：

在進行不同濃度反應物的實驗時，觀察有某些情況下 Luminol 的光會出現一些不太一樣的顏色變化一如出現較為偏綠的光芒；除此之外，有些金屬離子的添加也會小幅改變其放光之色澤，可能各變因除影響照度外，也會影響其電子能量造成放射波長之變化。

最初我們嘗試以直接觀察的方式測量放光時間，但不甚客觀準確。目前我們以 GLX 測量反應時是以該光微弱至儀器無法偵測($\text{lux}=0.0$)為結束反應，但實際上試管中仍有微光，限於設備我們目前無法完整的紀錄整個放光時距及變化。

在膠態溶液方面，未來改進方向包括凝結劑種類改變，尋找更客觀量化的方式以及凝結造型的創新與應用。

做 N_2 的實驗後，我們討論到了環境氣體的影響—反應溶液中的溶氣量及氣體種類是否也是一項因子，值得再繼續向下研究。

目前，部分檢驗食品之採樣樣本中有氧化劑之殘留。未來欲把檢驗結果量化，包括以改變未加氧化劑之食品浸泡氧化劑之時間長短、濃度等方式找出檢測濃度下限；同時還可將不同浸泡之結果和市面商品比對，綜合推測市面加工的浸泡方式。反應物於樣本表面淋附均勻程度及樣本本身表面差異為 GLX 檢測欲克服的問題。

拾貳、參考資料：

- 一、基礎物理 南一書局
- 二、楊寶旺教授主編 龍騰高中物質化學(上)第四章-原子結構
- 三、楊寶旺教授主編 龍騰高中物質化學(上)第八章-氧化還原反應

評語

040205 Light up! 飛行路的光燦

利用傳統，且最易取得的化學發光(Luminal)，的發光原理，及發光的靈敏度，定性檢驗，本系統發光不可或缺的 H_2O_2 ，活性自由基 OH 或 OOH^- ...鮮白食品，可惜僅止於已在學界探究百年的動力控制系統！未達到原來想要達到的目標。但其契而不捨的研究精神，仍屬佳作之列！