

# 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 化學科

佳作

050215

一「氮」遇見你，氯化銨與亞硝酸鈉的邂逅

學校名稱：國立宜蘭高級中學

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 作者：<br><br>高二 李軒慈<br><br>高二 林芯嫻<br><br>高二 范開媛 | 指導老師：<br><br>林揚閔<br><br>陳瑞麟 |
|---|-----------------------------|

關鍵詞：反應級數、速率常數、活化能

## 摘要

原理： $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaNO}_2 \Rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$

反應速率： $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^m[\text{NaNO}_2]^n$

活化能： $k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$

本實驗以  $\text{NH}_4\text{Cl}$  及  $\text{NaNO}_2$  的水溶液為主要反應物製造氮氣，測量出此反應之基本數據後，再以  $\text{NH}_4\text{Br}$  或  $\text{KNO}_2$  取代原反應物，探討不同離子、濃度、溫度.....對產生氮氣之反應速率的影響。

實驗中，我們發現溫度及濃度為影響反應速率的主要因素，藉由實驗數據亦可得知此反應  $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^1[\text{NaNO}_2]^1$  為二級反應。再由計算出的反應速率常數，可算出反應活化能，並由此得知反應速率與溫度的關係。均相反應中依碰撞學說所說，反應物濃度愈高，總碰撞次數及有效碰撞的機會愈多，故速率愈快。

## 壹、研究動機

在化學實驗室製備氮氣的實驗過程中，我們使用固體  $\text{NH}_4\text{Cl}$  及  $\text{NaNO}_2$  作為反應物，除了不易混和均勻，反應產生之水也易導致試管爆炸的可能性增加，而且反應速率過快，較容易發生危險。

因此，我們查出先將固體反應物配置成水溶液的方法比較溫和，如此一來，不僅不用考慮反應產生之水所造成的危險性，也可算出反應物濃度與反應速率間的關係。而且在高二下基礎化學中我們學到的化學反應速率課程中，更深入討論濃度、溫度、反應級數、反應速率常數與活化能間的關係。

## 貳、研究目的

- 一、以水溶液態的反應物實驗，減少其危險性
- 二、改善固體反應物無法均勻混和的問題
- 三、探討溫度、濃度與反應速率間的關係
- 四、使用不同的銨鹽、亞硝酸鹽反應，觀察其差異性
- 五、計算速率常數及活化能，並探討之
- 六、研究製造氮氣的實驗納入未來設計新的高中實驗課程

## 參、研究設備與器材

### 1、實驗器材

鐵架、滴定管、鐵夾、溫度計、攪拌子、電磁攪拌器、燒杯、容量瓶、深皿、橡皮管、塞子、廣用試紙、電子天秤、秤量紙、刮勺、硬試管、玻璃棒、黑膠帶

### 二、實驗藥品

氯化銨( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )、亞硝酸鈉( $\text{NaNO}_2$ )、溴化銨( $\text{NH}_4\text{Br}$ )、亞硝酸鉀( $\text{KNO}_2$ )

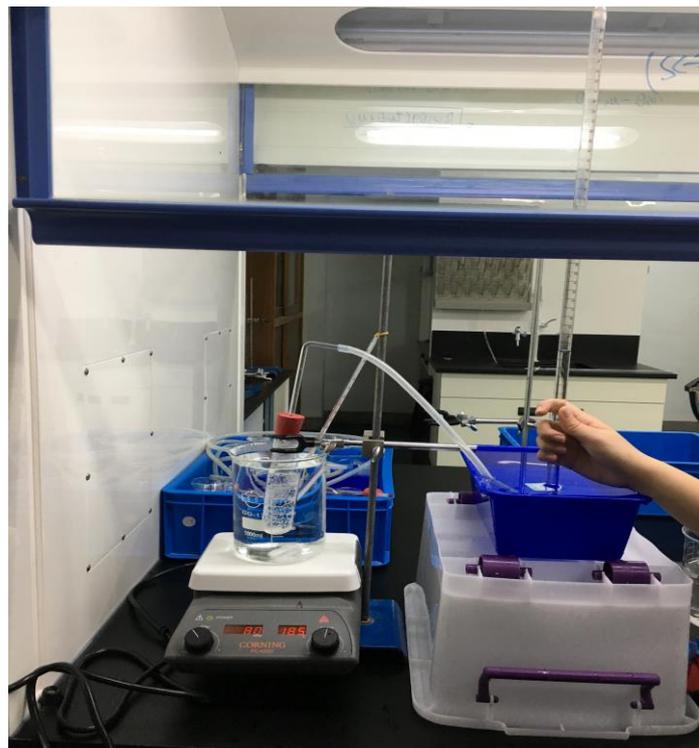
## 肆、研究過程與方法

一、秤取 2.675 克  $\text{NH}_4\text{Cl}$  及 3.45 克  $\text{NaNO}_2$ ，配置成 2M、25mL 溶液(其餘同上)

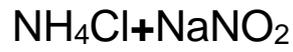
二、將配置好之水溶液與硬試管放置在磁石攪拌器上隔水預熱至實驗所需溫度( $60^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$ 、 $80^\circ\text{C}$ )

三、再將水溶液分別倒入先前預熱之硬試管中混合開始反應，立刻蓋上橡皮塞，等候氣體產生

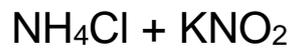
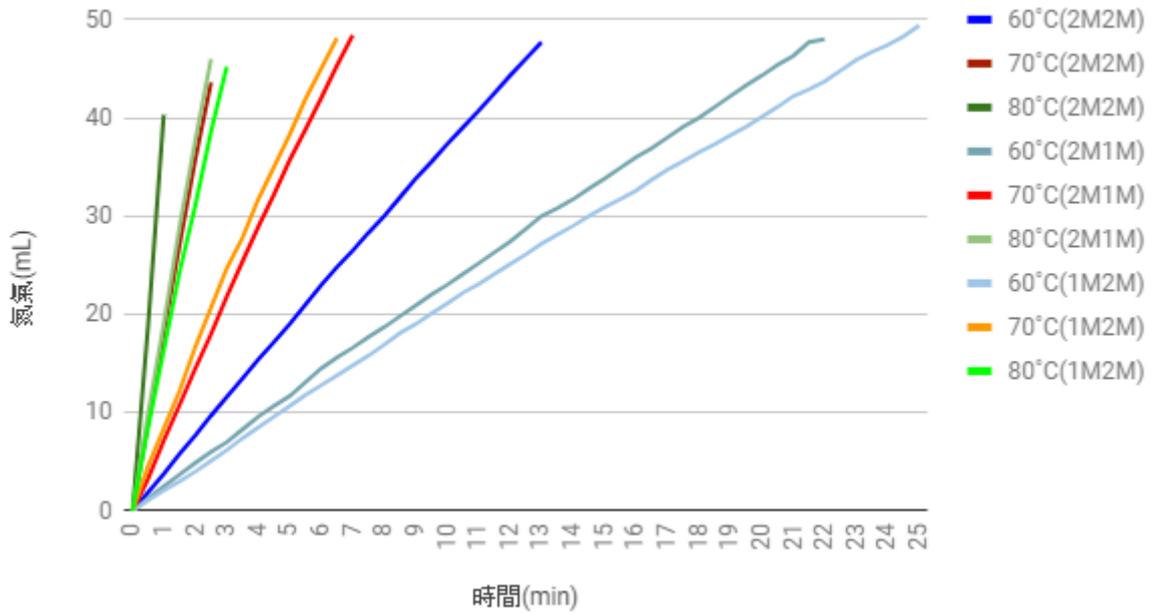
四、使用滴定管收集產生之氣體，記錄氣體產生 50 毫升時所需時間，並觀察濃度與速率間的關係



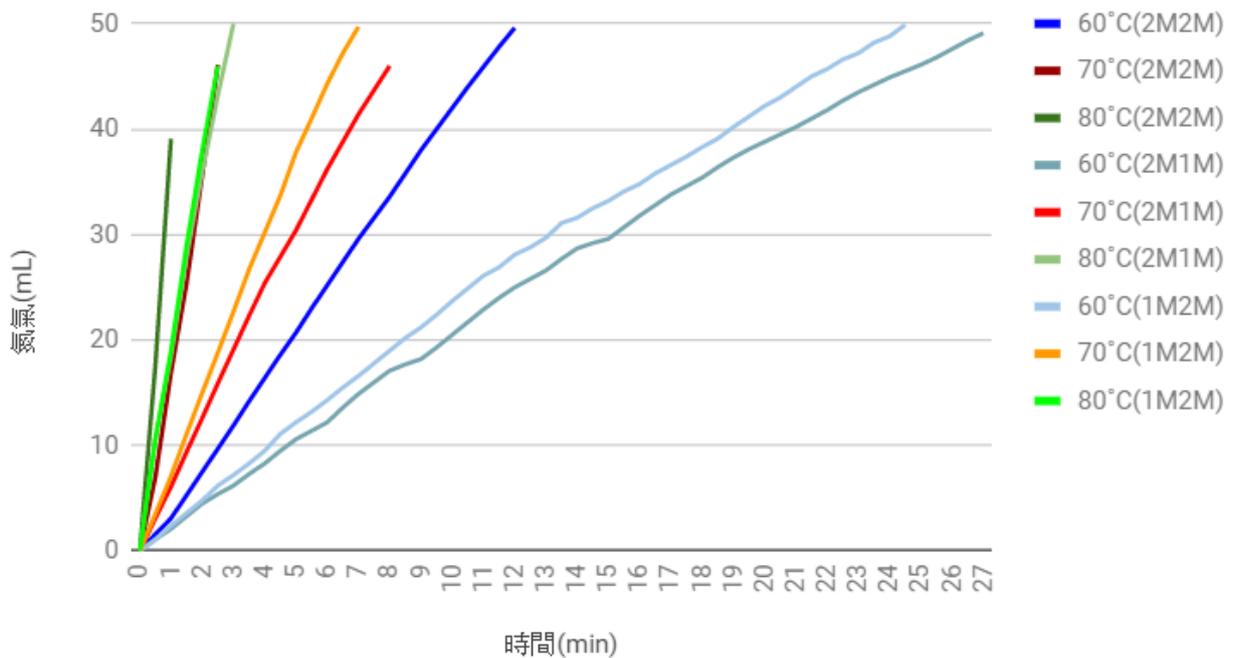
## 伍、研究結果



氮氣生成速率

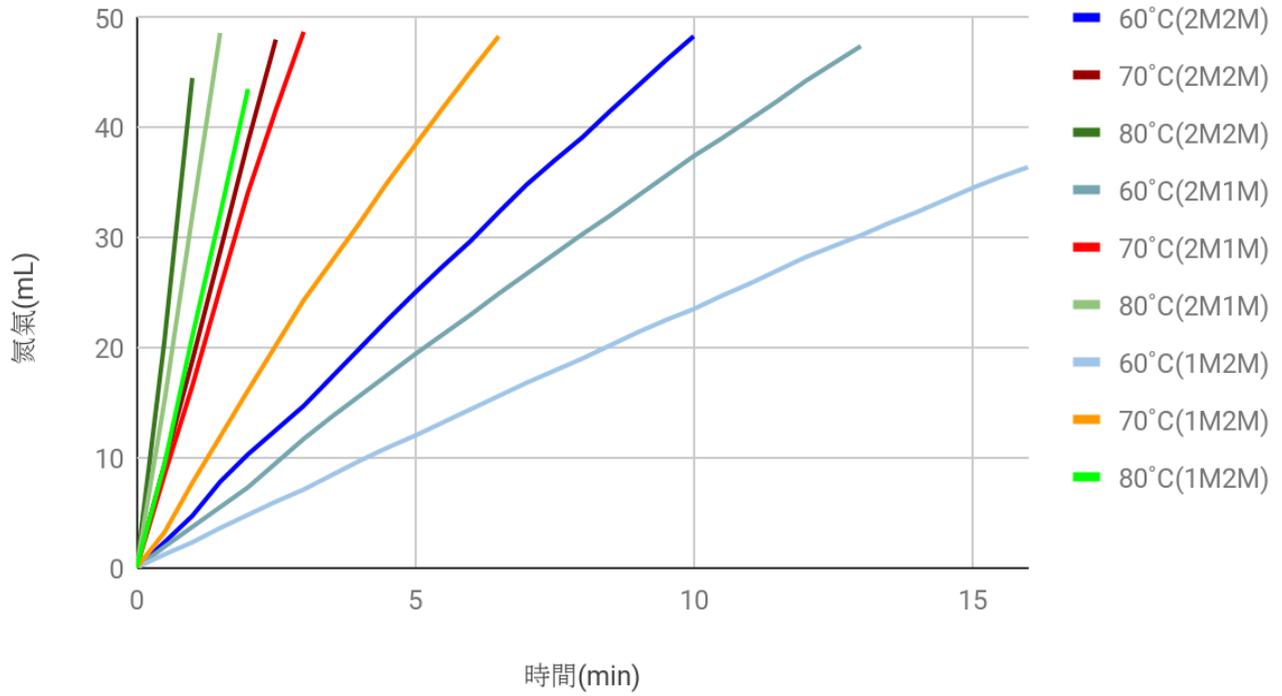


氮氣生成速率



## NH<sub>4</sub>Br + NaNO<sub>2</sub>

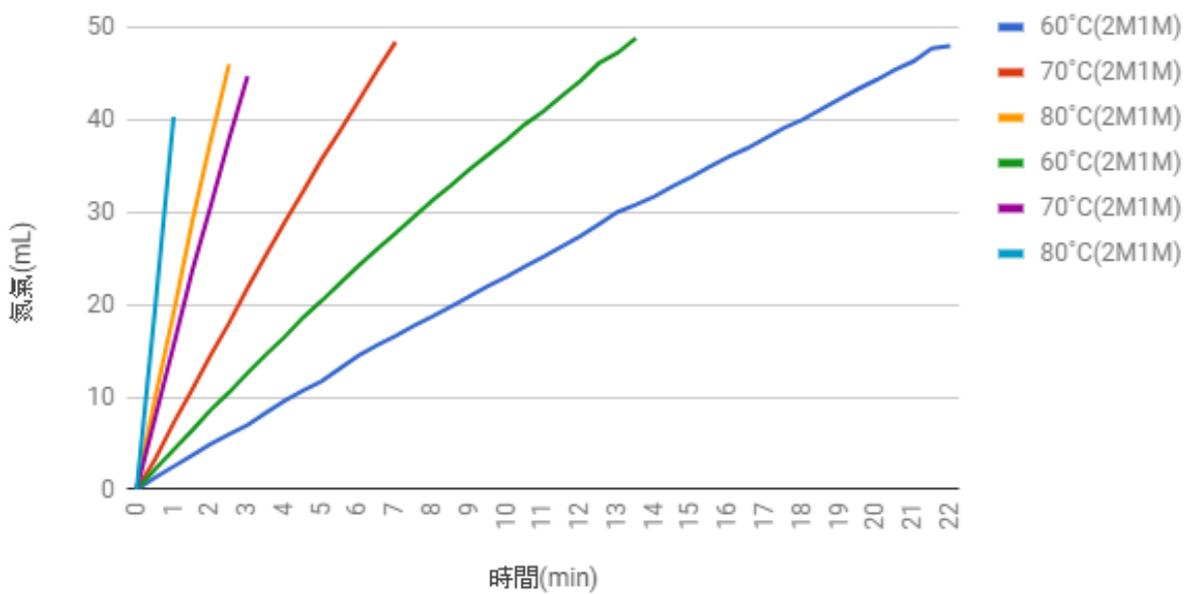
氮氣的生成速率



## NH<sub>4</sub>Br + KNO<sub>2</sub>

氮氣生成速率

NH<sub>4</sub>Cl 2M NaNO<sub>2</sub> 1M/NH<sub>4</sub>Cl 2M KNO<sub>2</sub> 1M 疊圖

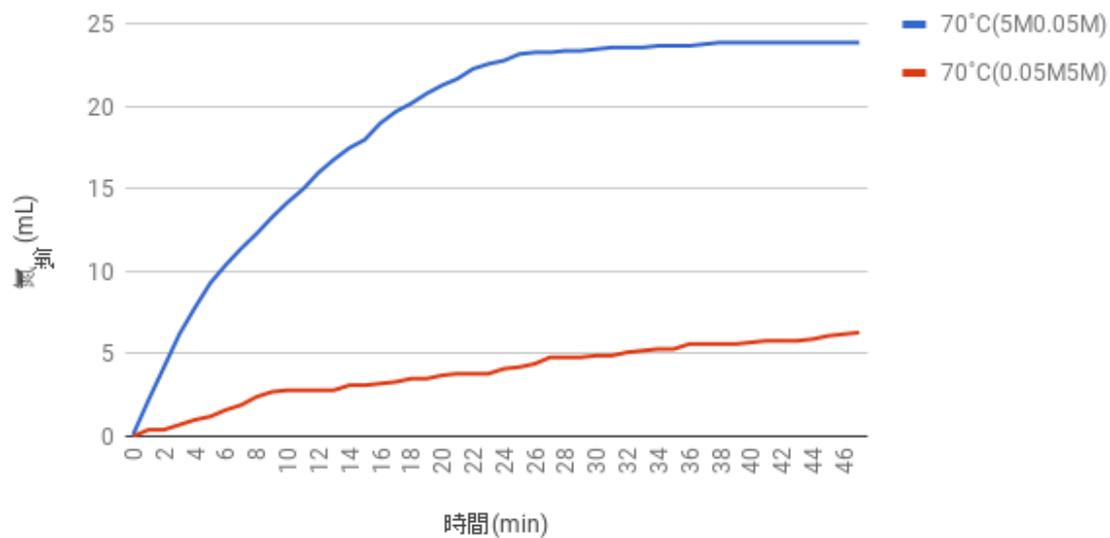


反應物濃度 100 : 1 (NH<sub>4</sub>Cl : 5M NaNO<sub>2</sub> : 0.05M)(70°C)

反應物濃度 1 : 100 (NH<sub>4</sub>Cl : 0.05M NaNO<sub>2</sub> : 5M)(70°C)

### 氮氣生成速率

NH<sub>4</sub>Cl 5M NaNO<sub>2</sub> 0.05M / NH<sub>4</sub>Cl 0.05M NaNO<sub>2</sub> 5M 疊圖

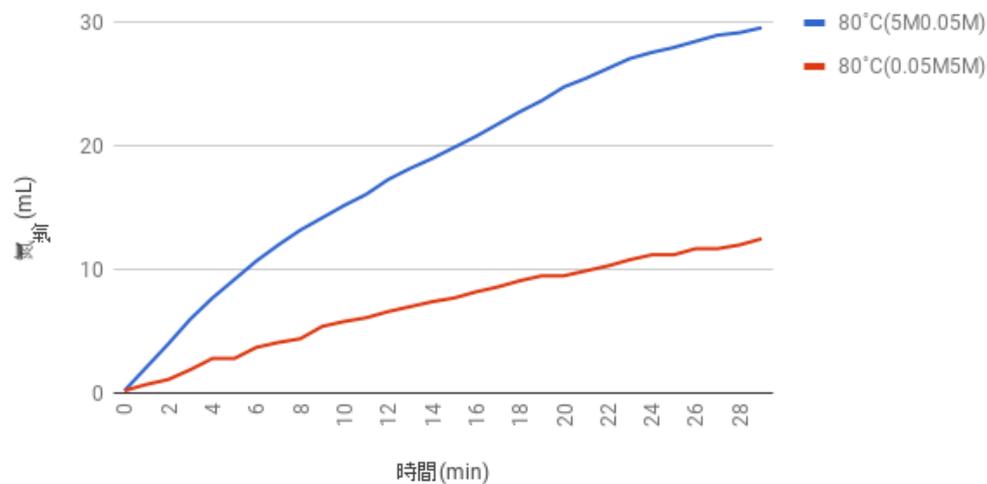


反應物濃度 100:1 (NH<sub>4</sub>Cl:5M NaNO<sub>2</sub>:0.05M)(80°C)

反應物濃度 1:100 (NH<sub>4</sub>Cl:0.05M NaNO<sub>2</sub>:5M)(80°C)

### 氮氣的生成速率

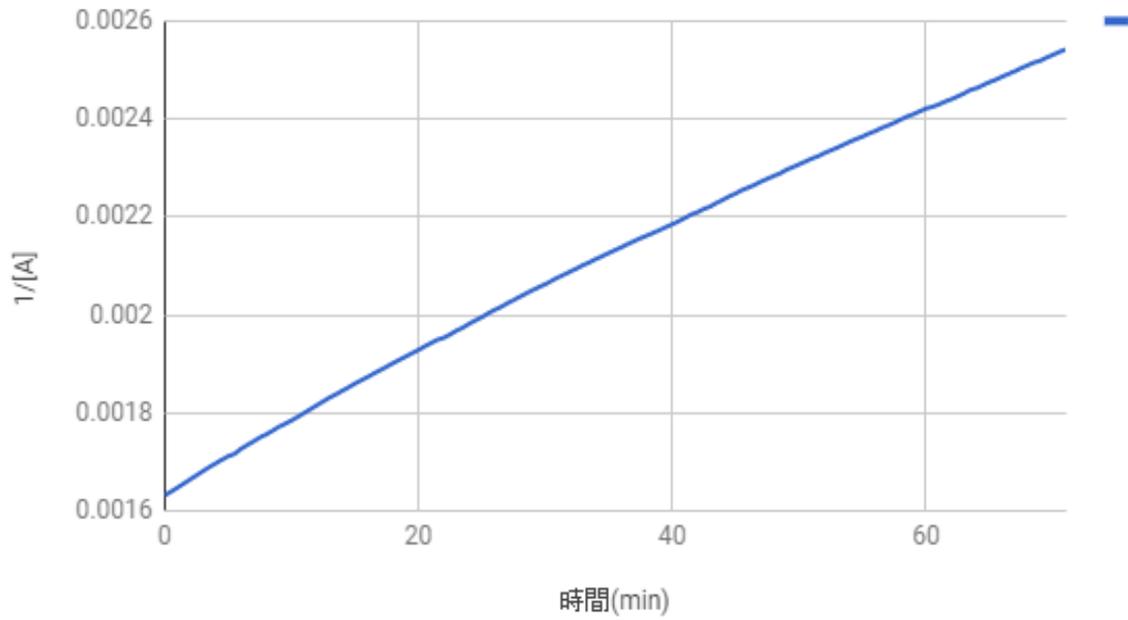
NH<sub>4</sub>Cl 5M NaNO<sub>2</sub> 0.05M / NH<sub>4</sub>Cl 0.05M NaNO<sub>2</sub> 5M 疊圖



## 二級反應

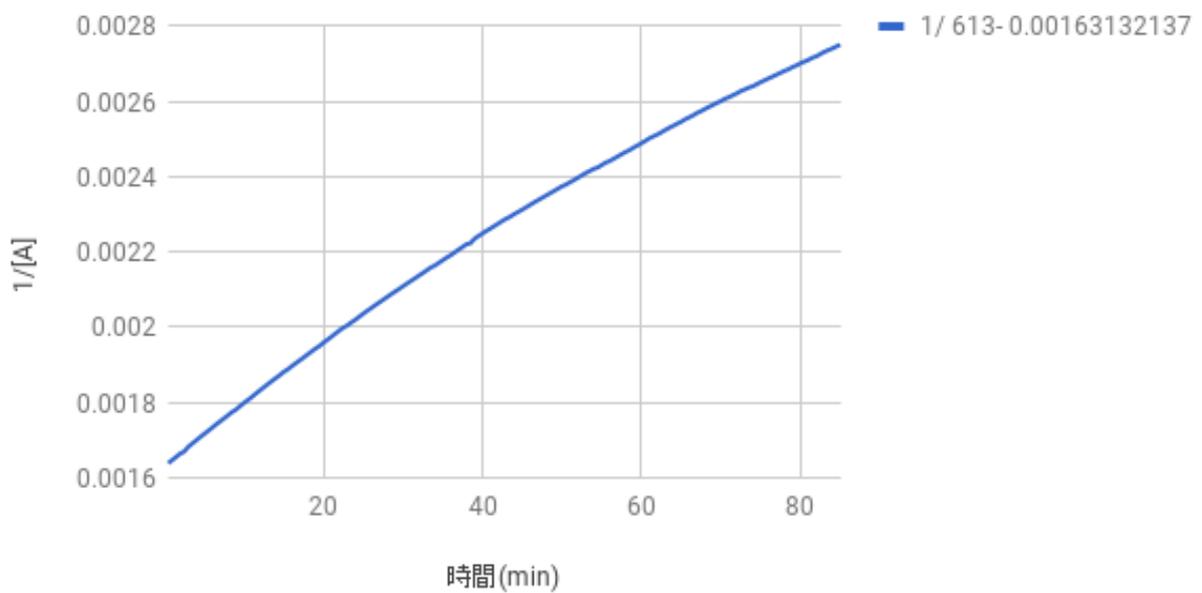
### 二級反應

70°C NH<sub>4</sub>Cl 1M +NaNO<sub>2</sub> 2M



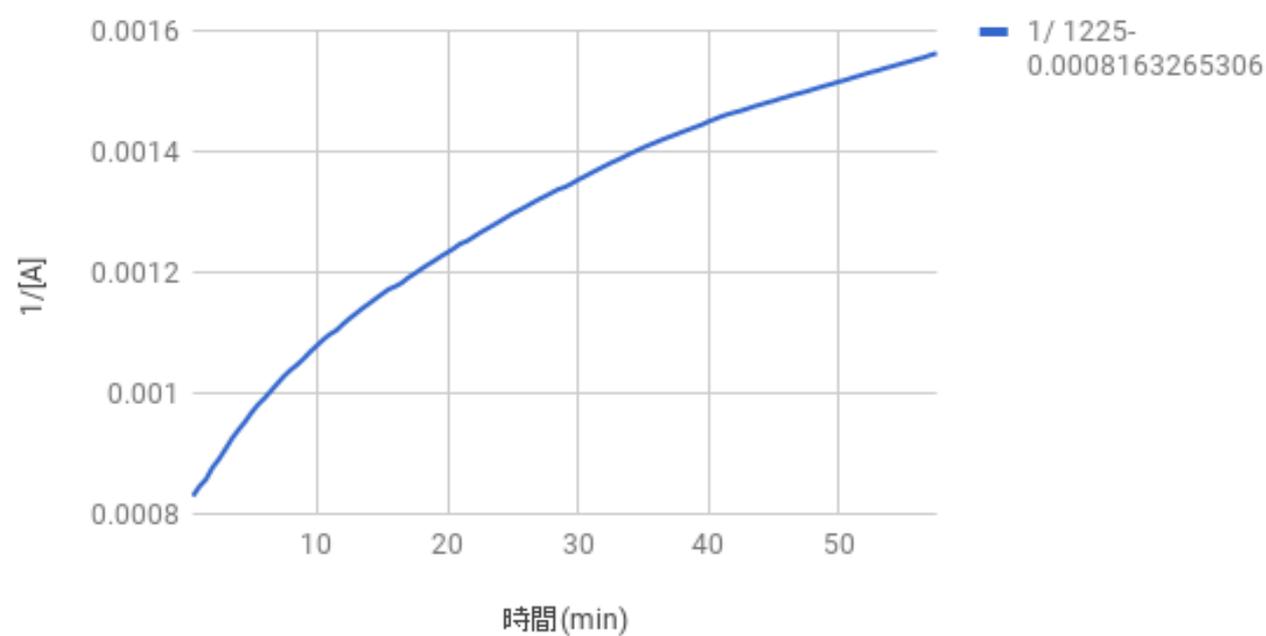
### 二級反應

70°C NH<sub>4</sub>Cl 2M +NaNO<sub>2</sub> 1M



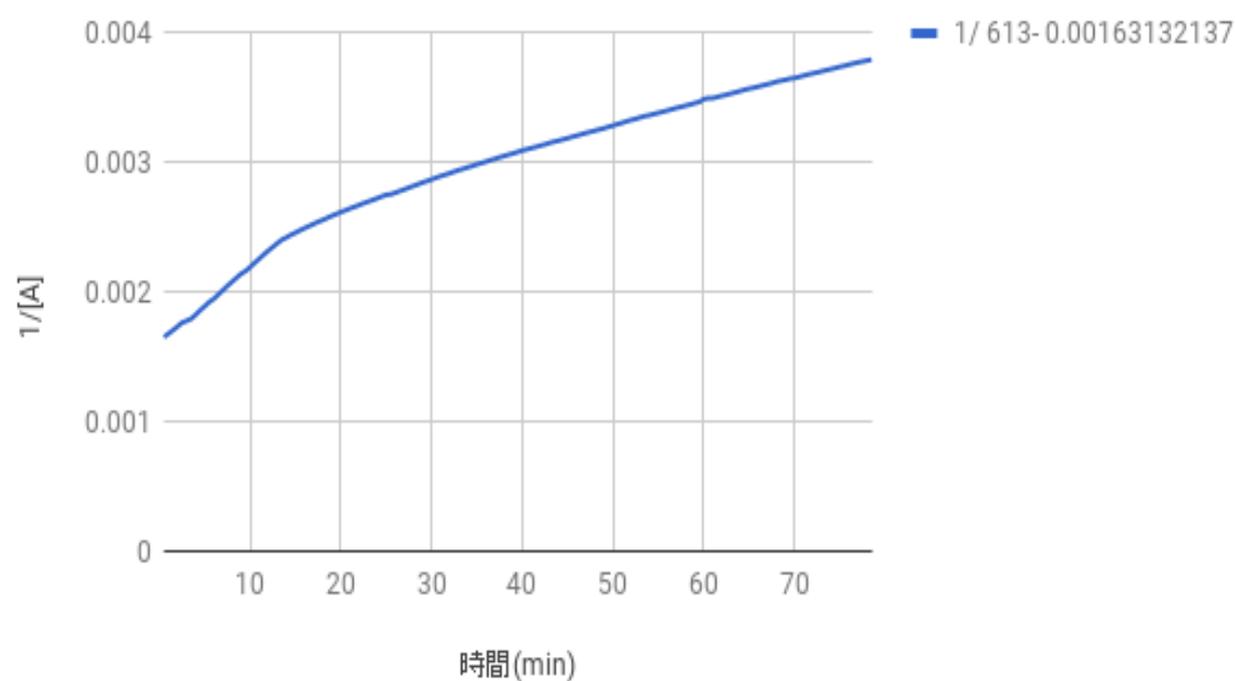
## 二級反應

80°C NH<sub>4</sub>Cl 2M + NaNO<sub>2</sub> 2M



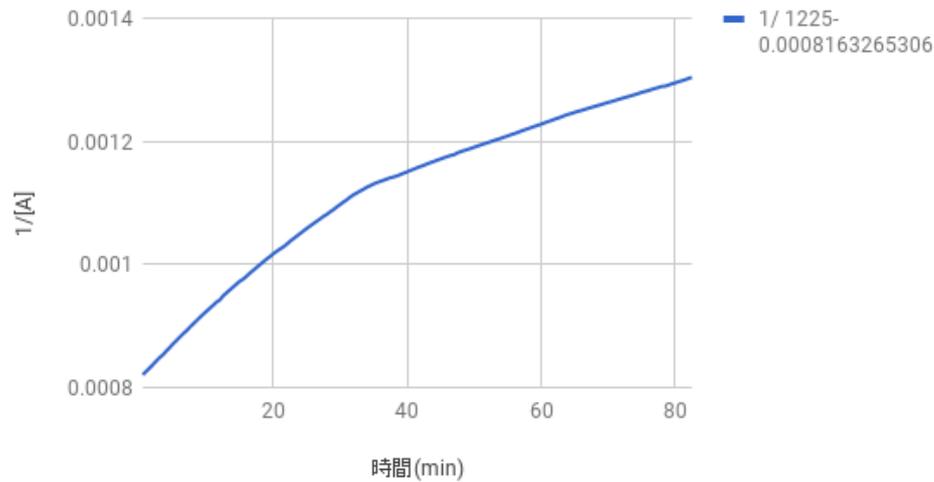
## 二級反應

80°C NH<sub>4</sub>Cl 1M + NaNO<sub>2</sub> 2M



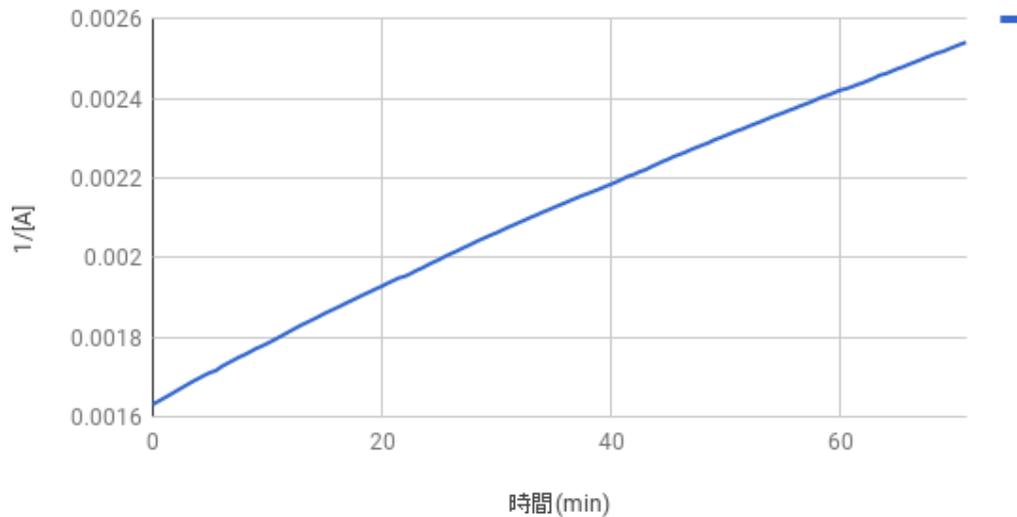
## 二級反應

70°C NH<sub>4</sub>Cl 2M + NaNO<sub>2</sub> 2M



## 二級反應

70°C NH<sub>4</sub>Cl 1M + NaNO<sub>2</sub> 2M



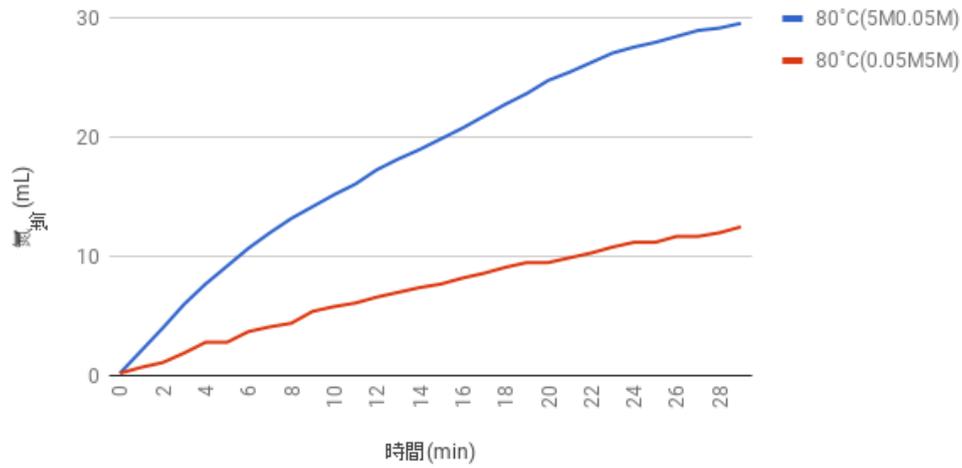
## 陸、討論

一、實際使用固體實驗，發現在安裝實驗器材時，確實較困難，且實驗過程中須以酒精燈來回加熱，增加實驗之危險性，此外，也須在過程中避免小水滴回流，以避免試管因突然的降溫爆裂。

二、實驗中，銨鹽的濃度為主要控制氣體產生量者，因比較同溫(80°C)下，反應物濃度 100:1 之實驗，即使最高可反應之濃度皆為 0.05M，在同時間時，銨鹽濃度為 5M 的實驗產生之氮氣體積為銨鹽濃度為 0.05 時多。(如下圖)

### 氮氣的生成速率

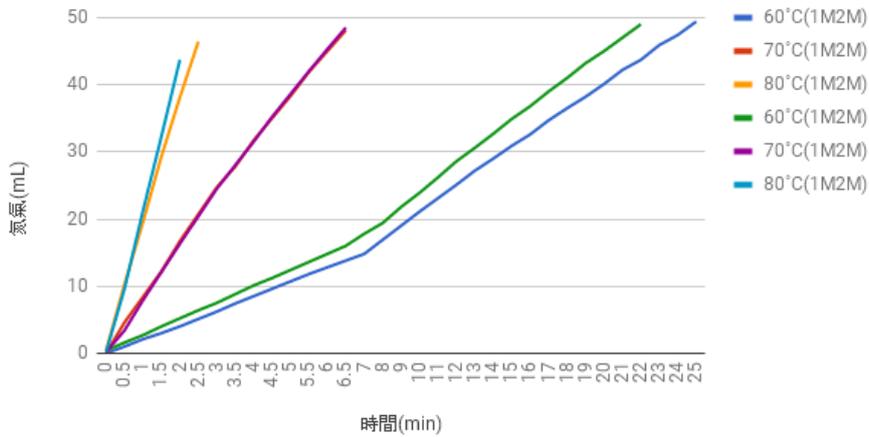
NH<sub>4</sub>Cl 5M NaNO<sub>2</sub> 0.05M / NH<sub>4</sub>Cl 0.05M NaNO<sub>2</sub> 5M 疊圖



三、在反應物濃度(銨鹽皆 2M，亞硝酸鈉 1M)及溫度相同的條件下，由實驗可發現不同銨鹽對於反應速率的影響不大。

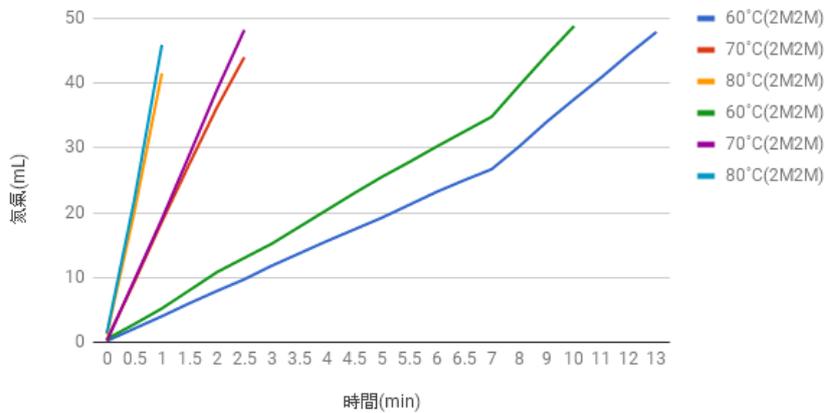
### 氮氣生成速率

NH<sub>4</sub>Cl 1M NaNO<sub>2</sub> 2M / NH<sub>4</sub>Br 1M NaNO<sub>2</sub> 2M 疊圖

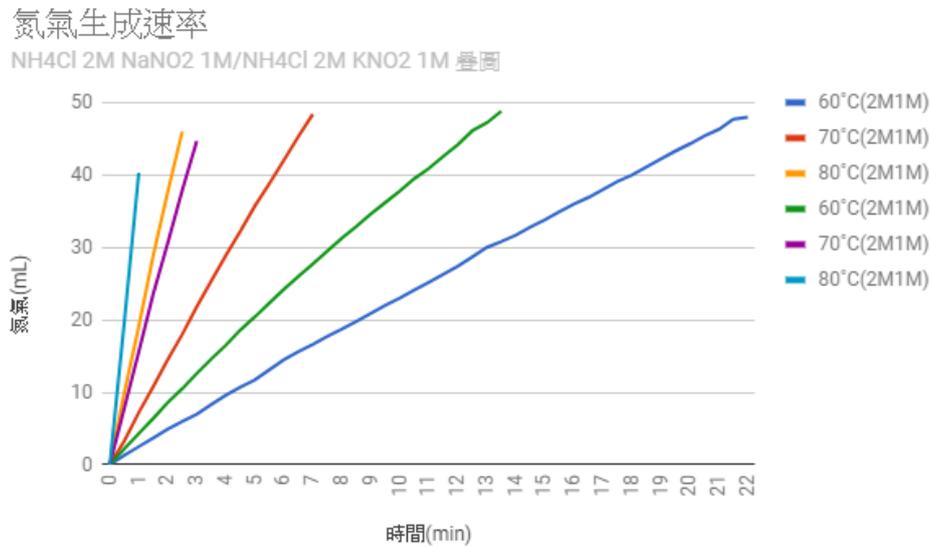


### 氮氣生成速率

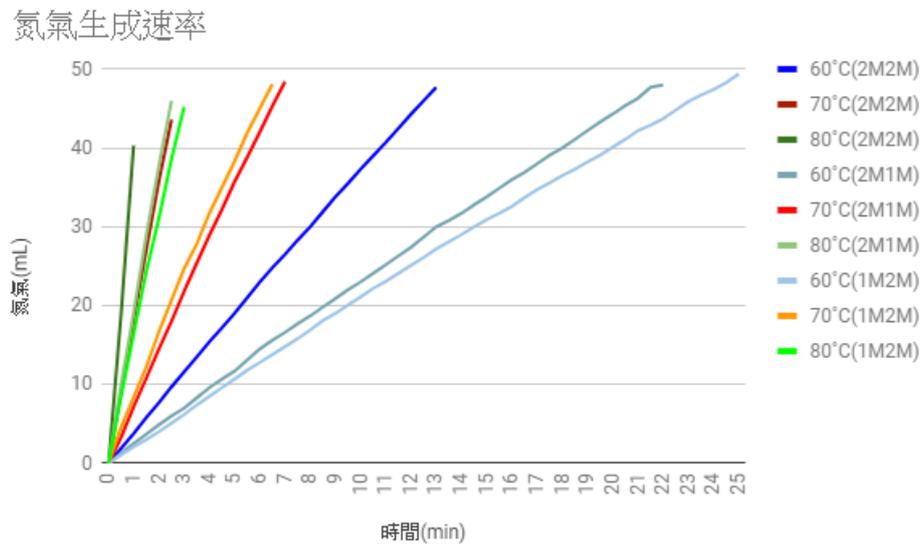
NH<sub>4</sub>Cl 2M NaNO<sub>2</sub> 2M / NH<sub>4</sub>Br 2M NaNO<sub>2</sub> 2M 疊圖



四、由相同銨鹽的反應疊圖中，我們發現使用不同種類的亞硝酸鹽，並不會對反應速率造成太顯著的影響。



五、NH<sub>4</sub>Cl+NaNO<sub>2</sub> 的反應圖中，將 60°C(2M2M)比較 60°C(2M1M)及 60°C(1M2M)的反應時間，可發現其速率相差一倍，因此推測出其為一級反應。



六、反應速率是由反應機構中最慢的反應式所決定，由於 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>皆為一級反應，故我們推測其反應速率的主要因素為 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ↔ NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 相互碰撞所造成。

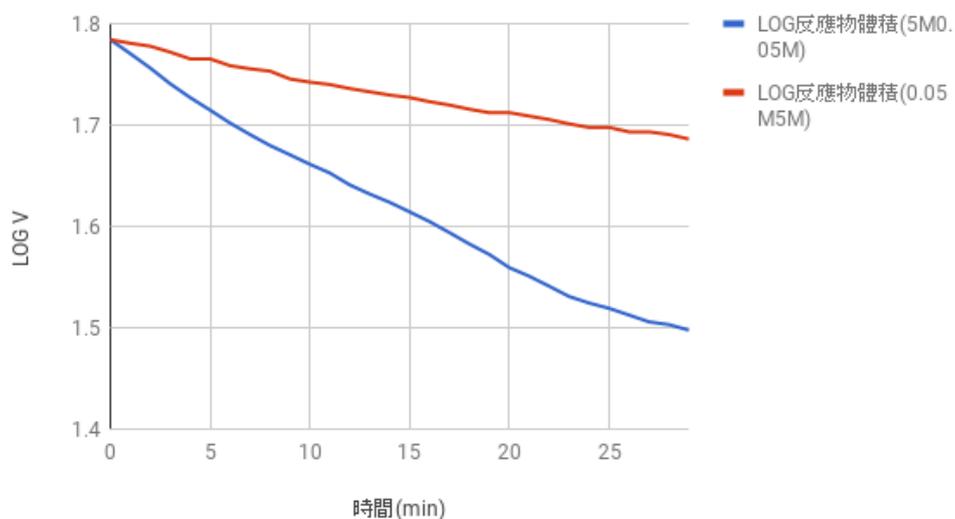
七、溫度可影響反應速率常數，溫度越高，反應速率常數愈大，反之，則愈小。

八、藉由實驗數據，我們觀察到溫度越高，活化能有些微下降的趨勢，由於活化能與低限能能量相等、意義不同，活化能為位能，而低限能為動能，雖位能並不會因溫度而改變，但動能可因溫度改變而震盪，因而造成活化能的變化。

九、由反應物濃度的倒數與時間做圖，可得一正斜率直線，故可得知此反應為二級反應。

十、由氯化銨或亞硝酸鈉其一的濃度為絕對多數時，濃度高者的濃度變化不大，故可視為零級反應，進而造成整個反應呈現偽一級反應。

反應物濃度100:1及1:100



## 柒、結論

一、溶液狀態下的反應物降低使用固體實驗時的危險性

二、由兩反應物之級數皆為 **1**，並由其中一反應物濃度為絕對多數的實驗中，可知反應各自為一級，可證明總反應為二級。

二級反應(second order reaction)： $R=k[\text{NH}_4\text{Cl}]^1[\text{NaNO}_2]^1$

三、由實驗證明，反應速率常數受溫度影響，因而影響反應進行的快慢。

四、低限能可能因溫度變動而發生震盪，雖低限能與活化能之能量相同，但活化能本身不隨溫度變化

五、由討論中改變濃度及溫度變因的各疊圖中，我們由其數據發現溫度、濃度皆能造成反應結果顯著的影響。

六、反應機構中，我們推測 $[\text{NH}_4^+] \leftrightarrow [\text{NO}_2^-]$ 在反應中的碰撞速率，為決定實驗反應步驟的主要因素。

## 捌、未來展望

在固體實驗安全性的考量下，盼能將製造氮氣的實驗納入未來設計新的高中實驗課程。

## 玖、參考資料及其他

反應級數－維基百科 [https://zh.m.wikipedia.org/zh-](https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8F%8D%E5%BA%94%E7%BA%A7)

[tw/%E5%8F%8D%E5%BA%94%E7%BA%A7](https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8F%8D%E5%BA%94%E7%BA%A7)

實驗一氮氣的製備與反應 <https://www.youtube.com/watch?v=D89VOyDLPy0&t=146s>

臺灣科學教育館 <https://twsf.ntsec.gov.tw/Article.aspx?a=41&lang=1>

反應級數 <http://natural.cms.hk.edu.tw/senior/chem/h2text/7-1>

活化能 <http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=40809>

化學反應速率 [http://www.mingdao.edu.tw/physics/pdf/matter\\_06.pdf](http://www.mingdao.edu.tw/physics/pdf/matter_06.pdf)

二級反應 [http://www.wikiwand.com/zh-](http://www.wikiwand.com/zh-tw/%E4%BA%8C%E7%B4%9A%E5%8F%8D%E6%87%89#/%E7%AC%AC%E4%B8%80%E7%A7%8D%E6%83%85%E5%86%B5)

[tw/%E4%BA%8C%E7%B4%9A%E5%8F%8D%E6%87%89#/%E7%AC%AC%E4%B8%80%E7%A7%8D%E6%83%85%E5%86%B5](http://www.wikiwand.com/zh-tw/%E4%BA%8C%E7%B4%9A%E5%8F%8D%E6%87%89#/%E7%AC%AC%E4%B8%80%E7%A7%8D%E6%83%85%E5%86%B5)

## 拾、附錄



|            |         |      |       |      |      |
|------------|---------|------|-------|------|------|
| 60°C(2M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5   | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.2  |       | 4    |      |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5   | 3    | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 7.9  |       | 11.8 |      |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5   | 5    | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 15.6 |       | 19.2 |      |
|            | 時間(min) | 6    | 6.5   | 7    | 8    |
|            | 體積(mL)  | 23.2 |       | 26.7 | 30.2 |
|            | 時間(min) | 9    | 10    | 11   | 12   |
|            | 體積(mL)  | 34   | 37.5  | 40.9 | 44.5 |
|            | 時間(min) | 13   | 13:49 |      | 6    |
|            | 體積(mL)  | 47.9 | 50    |      |      |

|            |         |      |     |      |      |
|------------|---------|------|-----|------|------|
| 70°C(2M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5 | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.4  | 9.3 | 18.6 | 27.5 |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5 | 2:53 |      |
|            | 體積(mL)  | 36.2 | 44  | 50   |      |

|            |         |     |      |      |      |
|------------|---------|-----|------|------|------|
| 80°C(2M2M) | 時間(min) | 0   | 0.5  | 1    | 1:13 |
|            | 體積(mL)  | 1.2 | 20.1 | 41.5 | 50   |

|            |         |      |      |      |      |
|------------|---------|------|------|------|------|
| 60°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.2  |      | 2.7  |      |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 5.1  |      | 7.2  |      |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5    | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 9.8  |      | 11.9 |      |
|            | 時間(min) | 6    | 6.5  | 7    | 8    |
|            | 體積(mL)  | 14.7 |      | 16.8 | 18.9 |
|            | 時間(min) | 9    | 10   | 11   | 12   |
|            | 體積(mL)  | 21.1 | 23.2 | 25.4 | 27.6 |

|  |         |      |      |          |      |
|--|---------|------|------|----------|------|
|  | 時間(min) | 13   | 14   | 15       | 16   |
|  | 體積(mL)  | 30.2 | 31.9 | 34       | 36.2 |
|  | 時間(min) | 17   | 18   | 19       | 20   |
|  | 體積(mL)  | 38.2 | 40.2 | 42.4     | 44.5 |
|  | 時間(min) | 21   | 22   | 22:39.17 |      |
|  | 體積(mL)  | 46.5 | 48.2 | 50       |      |

|            |         |      |      |         |      |
|------------|---------|------|------|---------|------|
| 70°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1       | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0    | 4.6  | 8.4     | 12.2 |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3       | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 16.7 | 20.7 | 24.7    | 27.8 |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5       | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 31.7 | 35   | 38.3    | 41.9 |
|            | 時間(min) | 6    | 6.5  | 6:45.92 |      |
|            | 體積(mL)  | 45   | 48.1 | 50      |      |

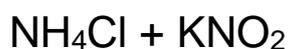
|            |         |      |      |         |      |
|------------|---------|------|------|---------|------|
| 80°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1       | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.4  | 10.3 | 19.5    | 29.3 |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 2:43.87 |      |
|            | 體積(mL)  | 38.1 | 46.4 | 50      |      |

|            |         |      |      |      |      |
|------------|---------|------|------|------|------|
| 60°C(1M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0    |      | 2.1  |      |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 4    |      | 6.2  |      |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5    | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 8.5  |      | 10.7 |      |
|            | 時間(min) | 6    | 6.5  | 7    | 8    |
|            | 體積(mL)  | 12.8 |      | 14.8 | 16.9 |
|            | 時間(min) | 9    | 10   | 11   | 12   |
|            | 體積(mL)  | 19   | 21.1 | 23.1 | 25.1 |
|            | 時間(min) | 13   | 14   | 15   | 16   |
|            | 體積(mL)  | 27.2 | 29   | 30.9 | 32.6 |
|            | 時間(min) | 17   | 18   | 19   | 20   |
|            | 體積(mL)  | 34.7 | 36.5 | 38.2 | 40.1 |
|            | 時間(min) | 21   | 22   | 23   | 24   |
|            | 體積(mL)  | 42.2 | 43.7 | 45.9 | 47.4 |

|  |         |      |          |  |  |
|--|---------|------|----------|--|--|
|  | 時間(min) | 25   | 25:35.22 |  |  |
|  | 體積(mL)  | 49.4 | 50       |  |  |

|            |         |      |      |      |         |
|------------|---------|------|------|------|---------|
| 70°C(1M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5     |
|            | 體積(mL)  | 0    | 3.3  | 7.2  | 10.8    |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3.5     |
|            | 體積(mL)  | 14.5 | 18   | 21.8 | 25.4    |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5    | 5.5     |
|            | 體積(mL)  | 28.9 | 32.2 | 35.7 | 38.8    |
|            | 時間(min) | 6    | 6.5  | 7    | 7:45.84 |
|            | 體積(mL)  | 42   | 45.3 | 48.4 | 50      |

|            |         |      |      |      |         |
|------------|---------|------|------|------|---------|
| 80°C(1M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5     |
|            | 體積(mL)  | 0    | 8.5  | 16.4 | 24.3    |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3:22.95 |
|            | 體積(mL)  | 31.1 | 38.6 | 45.2 | 50      |



|            |         |       |      |      |      |
|------------|---------|-------|------|------|------|
| 60°C(2M2M) | 時間(min) | 0     | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.2   |      | 3.3  |      |
|            | 時間(min) | 2     | 2.5  | 3    | 4    |
|            | 體積(mL)  | 7.7   |      | 12.1 | 16.6 |
|            | 時間(min) | 5     | 6    | 7    | 8    |
|            | 體積(mL)  | 20.9  | 25.4 | 29.8 | 33.8 |
|            | 時間(min) | 9     | 10   | 11   | 12   |
|            | 體積(mL)  | 38.2  | 42.2 | 46.1 | 49.8 |
|            | 時間(min) | 12:05 |      |      |      |
|            | 體積(mL)  | 50    |      |      |      |

|            |         |      |      |      |      |
|------------|---------|------|------|------|------|
| 70°C(2M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.2  | 7.2  | 17.1 | 25.6 |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 2:42 |      |
|            | 體積(mL)  | 35.8 | 46.3 | 50   |      |

|            |         |     |      |      |         |
|------------|---------|-----|------|------|---------|
| 80°C(2M2M) | 時間(min) | 0   | 0.5  | 1    | 1:14.29 |
|            | 體積(mL)  | 0.3 | 17.9 | 39.4 | 50      |

|            |         |      |      |      |          |
|------------|---------|------|------|------|----------|
| 60°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5      |
|            | 體積(mL)  | 0.4  |      | 2.5  |          |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 4        |
|            | 體積(mL)  | 4.9  |      | 6.6  | 8.7      |
|            | 時間(min) | 5    | 6    | 7    | 8        |
|            | 體積(mL)  | 11   | 12.6 | 15.3 | 17.5     |
|            | 時間(min) | 9    | 10   | 11   | 12       |
|            | 體積(mL)  | 18.6 | 19.6 | 23.3 | 25.4     |
|            | 時間(min) | 13   | 14   | 15   | 16       |
|            | 體積(mL)  | 27   | 29.1 | 30   | 32.2     |
|            | 時間(min) | 17   | 18   | 19   | 20       |
|            | 體積(mL)  | 34.2 | 35.8 | 37.7 | 39.2     |
|            | 時間(min) | 21   | 22   | 23   | 24       |
|            | 體積(mL)  | 40.6 | 42.2 | 43.9 | 45.3     |
|            | 時間(min) | 25   | 26   | 27   | 27:31.09 |
|            | 體積(mL)  | 46.5 | 48   | 49.5 | 50       |

|            |         |      |      |      |      |
|------------|---------|------|------|------|------|
| 70°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(ML)  | 0.5  |      | 6.6  |      |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 4    |
|            | 體積(ML)  | 13.1 |      | 19.6 | 25.9 |
|            | 時間(min) | 5    | 6    | 7    | 8    |
|            | 體積(mL)  | 30.9 | 36.7 | 41.9 | 46.5 |
|            | 時間(min) | 8:48 |      |      |      |
|            | 體積(mL)  | 50   |      |      |      |

|            |         |      |      |      |      |
|------------|---------|------|------|------|------|
| 80°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0    | 10.7 | 18.4 | 27.9 |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    |      |
|            | 體積(mL)  | 35.9 | 43.2 | 50   |      |

|            |         |   |     |     |     |
|------------|---------|---|-----|-----|-----|
| 60°C(1M2M) | 時間(min) | 0 | 0.5 | 1   | 1.5 |
|            | 體積(mL)  | 0 |     | 1.6 |     |
|            | 時間(min) | 2 | 2.5 | 3   | 4   |

|  |         |      |      |      |          |
|--|---------|------|------|------|----------|
|  | 體積(mL)  | 4.4  |      | 7.8  | 10.9     |
|  | 時間(min) | 5    | 6    | 7    | 8        |
|  | 體積(mL)  | 14.2 | 17.6 | 20.7 | 24.1     |
|  | 時間(min) | 9    | 10   | 11   | 12       |
|  | 體積(mL)  | 27.2 | 30.6 | 34.3 | 37.7     |
|  | 時間(min) | 13   | 14   | 15   | 15:33.89 |
|  | 體積(mL)  | 41.4 | 44.3 | 47.7 | 50       |

|            |         |          |      |      |      |
|------------|---------|----------|------|------|------|
| 70°C(1M2M) | 時間(min) | 0        | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0        |      | 4.2  |      |
|            | 時間(min) | 2        | 2.5  | 3    | 4    |
|            | 體積(mL)  | 9.3      |      | 13.6 | 18.1 |
|            | 時間(min) | 5        | 6    | 7    | 8    |
|            | 體積(mL)  | 22.5     | 26.5 | 30.2 | 34.2 |
|            | 時間(min) | 9        | 10   | 11   | 12   |
|            | 體積(mL)  | 37.4     | 40.9 | 44.3 | 47.2 |
|            | 時間(min) | 12:51.81 |      |      |      |
|            | 體積(mL)  | 50       |      |      |      |

|            |         |     |      |      |      |         |
|------------|---------|-----|------|------|------|---------|
| 80°C(1M2M) | 時間(min) | 0   | 0.5  | 1    | 1.5  | 1:30.01 |
|            | 體積(mL)  | 0.4 | 16.6 | 33.6 | 49.4 | 50      |

## NH<sub>4</sub>Br NaNO<sub>2</sub>

|            |         |      |      |          |      |
|------------|---------|------|------|----------|------|
| 60°C(2M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1        | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.5  |      | 5.2      |      |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3        | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 10.8 |      | 15.2     |      |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5        | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 20.4 |      | 25.5     |      |
|            | 時間(min) | 6    | 6.5  | 7        | 8    |
|            | 體積(mL)  | 30.2 |      | 34.8     | 39.6 |
|            | 時間(min) | 9    | 10   | 10:15.99 |      |
|            | 體積(mL)  | 44.3 | 48.8 | 50       |      |

|            |         |     |     |    |      |
|------------|---------|-----|-----|----|------|
| 70°C(2M2M) | 時間(min) | 0   | 0.5 | 1  | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.2 | 9.6 | 19 | 28.9 |

|  |         |      |      |      |  |
|--|---------|------|------|------|--|
|  | 時間(min) | 2    | 2.5  | 2:35 |  |
|  | 體積(mL)  | 38.9 | 48.2 | 50   |  |

|            |         |     |     |      |         |
|------------|---------|-----|-----|------|---------|
| 80°C(2M2M) | 時間(min) | 0   | 0.5 | 1    | 1:05.64 |
|            | 體積(mL)  | 1.4 | 22  | 45.9 | 50      |

|            |         |      |          |      |      |
|------------|---------|------|----------|------|------|
| 60°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5      | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0    |          | 3.7  |      |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5      | 3    | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 7.3  |          | 11.7 |      |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5      | 5    | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 15.6 |          | 19.4 |      |
|            | 時間(min) | 6    | 3.5      | 7    | 8    |
|            | 體積(mL)  | 23   |          | 26.7 | 30.3 |
|            | 時間(min) | 9    | 10       | 11   | 12   |
|            | 體積(mL)  | 33.8 | 37.4     | 40.7 | 44.2 |
|            | 時間(min) | 13   | 13:43.83 |      |      |
|            | 體積(mL)  | 47.4 | 50       |      |      |

|            |         |      |      |      |         |
|------------|---------|------|------|------|---------|
| 70°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5     |
|            | 體積(mL)  | 0.1  | 8.5  | 16.6 | 25.5    |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3:05.33 |
|            | 體積(mL)  | 34.2 | 41.7 | 48.8 | 50      |

|            |         |     |      |      |      |      |
|------------|---------|-----|------|------|------|------|
| 80°C(2M1M) | 時間(min) | 0   | 0.5  | 1    | 1.5  | 1:33 |
|            | 體積(mL)  | 0.2 | 15.3 | 32.2 | 48.8 | 50   |

|            |         |      |      |      |      |
|------------|---------|------|------|------|------|
| 60°C(1M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.4  |      | 2.7  |      |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 5.2  |      | 7.5  |      |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5    | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 10.1 |      | 12.4 |      |
|            | 時間(min) | 6    | 6.5  | 7    | 8    |
|            | 體積(mL)  | 14.8 |      | 17.2 | 19.4 |
|            | 時間(min) | 9    | 10   | 11   | 12   |
|            | 體積(mL)  | 21.8 | 23.9 | 26.2 | 28.6 |
|            | 時間(min) | 13   | 14   | 15   | 16   |

|  |         |      |      |          |      |
|--|---------|------|------|----------|------|
|  | 體積(mL)  | 30.6 | 32.7 | 34.9     | 36.8 |
|  | 時間(min) | 17   | 18   | 19       | 20   |
|  | 體積(mL)  | 39   | 41   | 43.2     | 45   |
|  | 時間(min) | 21   | 22   | 22:36.74 |      |
|  | 體積(mL)  | 47   | 49   | 50       |      |

|            |         |      |      |         |      |
|------------|---------|------|------|---------|------|
| 70°C(1M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1       | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.2  | 3.4  | 7.9     | 12.1 |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3       | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 16.3 | 20.4 | 24.5    | 28   |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5       | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 31.5 | 35.2 | 38.6    | 42   |
|            | 時間(min) | 6    | 6.5  | 6:43.47 |      |
|            | 體積(mL)  | 45.3 | 48.5 | 50      |      |

|            |         |      |         |      |      |
|------------|---------|------|---------|------|------|
| 80°C(1M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5     | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.2  | 9.6     | 21.2 | 32.3 |
|            | 時間(min) | 2    | 2:19.45 |      |      |
|            | 體積(mL)  | 43.7 | 50      |      |      |

## NH<sub>4</sub>Br + KNO<sub>2</sub>

|            |         |      |         |      |      |
|------------|---------|------|---------|------|------|
| 60°C(2M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5     | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0    | 4       | 7.9  | 12.6 |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5     | 3    | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 16.5 | 21.1    | 25.7 | 29.7 |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5     | 5    | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 33.4 | 37.4    | 41.4 | 45.4 |
|            | 時間(min) | 6    | 6:10.13 |      |      |
|            | 體積(mL)  | 48.7 | 50      |      |      |

|            |         |     |      |      |      |         |
|------------|---------|-----|------|------|------|---------|
| 70°C(2M2M) | 時間(min) | 0   | 0.5  | 1    | 1.5  | 1:57.69 |
|            | 體積(mL)  | 0.2 | 12.1 | 25.2 | 38.4 | 50      |

|            |         |     |      |          |
|------------|---------|-----|------|----------|
| 80°C(2M2M) | 時間(min) | 0   | 0.5  | 40.53(s) |
|            | 體積(mL)  | 0.5 | 38.5 | 50       |

|            |         |      |      |      |         |
|------------|---------|------|------|------|---------|
| 60°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5     |
|            | 體積(mL)  | 0.1  |      | 6.4  |         |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3.5     |
|            | 體積(mL)  | 13.1 |      | 19   |         |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5    | 5.5     |
|            | 體積(mL)  | 24.5 |      | 31.1 |         |
|            | 時間(min) | 6    | 7    | 8    | 8:30.14 |
|            | 體積(mL)  | 36.7 | 41.9 | 46.8 | 50      |

|            |         |      |      |      |         |
|------------|---------|------|------|------|---------|
| 70°C(2M1M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5     |
|            | 體積(mL)  | 0.3  |      | 15.9 | 23.9    |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3:26.10 |
|            | 體積(mL)  | 30.9 | 38.2 | 45   | 50      |

|            |         |     |      |      |         |
|------------|---------|-----|------|------|---------|
| 80°C(2M1M) | 時間(min) | 0   | 0.5  | 1    | 1:10.28 |
|            | 體積(mL)  | 1.4 | 20.8 | 41.7 |         |

|            |         |          |      |      |      |
|------------|---------|----------|------|------|------|
| 60°C(1M2M) | 時間(min) | 0        | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0        |      | 3    |      |
|            | 時間(min) | 2        | 2.5  | 3    | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 6.1      |      | 9.6  |      |
|            | 時間(min) | 4        | 4.5  | 5    | 5.5  |
|            | 體積(mL)  | 12.8     |      | 16.1 |      |
|            | 時間(min) | 6        | 7    | 8    | 9    |
|            | 體積(mL)  | 19.5     | 22.5 | 25.9 | 28.9 |
|            | 時間(min) | 10       | 11   | 12   | 13   |
|            | 體積(mL)  | 32.2     | 35.3 | 38   | 40.6 |
|            | 時間(min) | 14       | 15   | 16   | 17   |
|            | 體積(mL)  | 42.5     | 45.3 | 47.5 | 49.6 |
|            | 時間(min) | 17:12.28 |      |      |      |
|            | 體積(mL)  | 50       |      |      |      |

|            |         |      |      |      |      |
|------------|---------|------|------|------|------|
| 70°C(1M2M) | 時間(min) | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  |
|            | 體積(mL)  | 0.2  | 4.7  | 9.9  | 14.9 |
|            | 時間(min) | 2    | 2.5  | 3    | 3.5  |
|            | 體積(mL)  | 20.2 | 25.5 | 30.6 | 35.7 |
|            | 時間(min) | 4    | 4.5  | 5    | 5:03 |
|            | 體積(mL)  | 40.2 | 45.2 | 49.8 | 50   |

|            |         |   |     |      |      |      |
|------------|---------|---|-----|------|------|------|
| 80°C(1M2M) | 時間(min) | 0 | 0.5 | 1    | 1.5  | 1:59 |
|            | 體積(mL)  | 0 | 13  | 26.5 | 38.7 | 50   |

**反應物濃度 100:1**  
(NH<sub>4</sub>Cl:5M NaNO<sub>2</sub>:0.05M)(70°C)

|               |         |      |      |      |      |      |      |
|---------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| 70°C(5M0.05M) | 時間(min) | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|               | 體積(mL)  | 0.1  | 2.2  | 4.2  | 6.2  | 7.8  | 9.3  |
|               | 時間(min) | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|               | 體積(mL)  | 10.4 | 11.4 | 12.3 | 13.3 | 14.2 | 15   |
|               | 時間(min) | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   |
|               | 體積(mL)  | 16   | 16.8 | 17.5 | 18   | 19   | 19.7 |
|               | 時間(min) | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   |
|               | 體積(mL)  | 20.2 | 20.8 | 21.3 | 21.7 | 22.3 | 22.6 |
|               | 時間(min) | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   |
|               | 體積(mL)  | 22.8 | 23.2 | 23.3 | 23.3 | 23.4 | 23.4 |
|               | 時間(min) | 30   | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   |
|               | 體積(mL)  | 23.5 | 23.6 | 23.6 | 23.6 | 23.7 | 23.7 |
|               | 時間(min) | 36   | 37   | 38   | 39   | 40   | 41   |
|               | 體積(mL)  | 23.7 | 23.8 | 23.9 | 23.9 | 23.9 | 23.9 |
|               | 時間(min) | 42   | 43   | 44   | 45   | 46   | 47   |
|               | 體積(mL)  | 23.9 | 23.9 | 23.9 | 23.9 | 23.9 | 23.9 |

**反應物濃度 1:100**  
(NH<sub>4</sub>Cl:0.05M NaNO<sub>2</sub>:5M)(70°C)

|                |         |     |     |     |     |     |     |
|----------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 70°C(0.05M 5M) | 時間(min) | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
|                | 體積(mL)  | 0   | 0.4 | 0.4 | 0.7 | 1   | 1.2 |
|                | 時間(min) | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
|                | 體積(mL)  | 1.6 | 1.9 | 2.4 | 2.7 | 2.8 | 2.8 |
|                | 時間(min) | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  |
|                | 體積(mL)  | 2.8 | 2.8 | 3.1 | 3.1 | 3.2 | 3.3 |
|                | 時間(min) | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  |
|                | 體積(mL)  | 3.5 | 3.5 | 3.7 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
|                | 時間(min) | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  |

|  |         |     |     |     |     |     |     |
|--|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | 體積(mL)  | 4.1 | 4.2 | 4.4 | 4.8 | 4.8 | 4.8 |
|  | 時間(min) | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  |
|  | 體積(mL)  | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.3 |
|  | 時間(min) | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  |
|  | 體積(mL)  | 5.6 | 5.6 | 5.6 | 5.6 | 5.7 | 5.8 |
|  | 時間(min) | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  |
|  | 體積(mL)  | 5.8 | 5.8 | 5.9 | 6.1 | 6.2 | 6.3 |

**反應物濃度 100:1**  
(NH<sub>4</sub>Cl:5M NaNO<sub>2</sub>:0.05M)(80°C)

|               |         |      |      |      |      |      |      |
|---------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| 80°C(5M0.05M) | 時間(min) | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|               | 體積(mL)  | 0.2  | 2.1  | 4    | 6    | 7.7  | 9.2  |
|               | 時間(min) | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|               | 體積(mL)  | 10.7 | 12   | 13.2 | 14.2 | 15.2 | 16.1 |
|               | 時間(min) | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   |
|               | 體積(mL)  | 17.3 | 18.2 | 19   | 19.9 | 20.8 | 21.8 |
|               | 時間(min) | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   |
|               | 體積(mL)  | 22.8 | 23.7 | 24.8 | 25.5 | 26.3 | 27.1 |
|               | 時間(min) | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   |
|               | 體積(mL)  | 27.6 | 28   | 28.5 | 29   | 29.2 | 29.6 |

**反應物濃度 1:100**  
(NH<sub>4</sub>Cl:0.05M NaNO<sub>2</sub>:5M)(80°C)

|               |         |     |     |     |     |      |      |
|---------------|---------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 80°C(0.05M5M) | 時間(min) | 0   | 1   | 2   | 3   | 4    | 5    |
|               | 體積(mL)  | 0.2 | 0.7 | 1.1 | 1.9 | 2.8  | 2.8  |
|               | 時間(min) | 6   | 7   | 8   | 9   | 10   | 11   |
|               | 體積(mL)  | 3.7 | 4.1 | 4.4 | 5.4 | 5.8  | 6.1  |
|               | 時間(min) | 12  | 13  | 14  | 15  | 16   | 17   |
|               | 體積(mL)  | 6.6 | 7   | 7.4 | 7.7 | 8.2  | 8.6  |
|               | 時間(min) | 18  | 19  | 20  | 21  | 22   | 23   |
|               | 體積(mL)  | 9.1 | 9.5 | 9.5 | 9.9 | 10.3 | 10.8 |

|  |         |      |      |      |      |    |      |
|--|---------|------|------|------|------|----|------|
|  | 時間(min) | 24   | 25   | 26   | 27   | 28 | 29   |
|  | 體積(mL)  | 11.2 | 11.2 | 11.7 | 11.7 | 12 | 12.5 |

**反應物濃度 100:1**  
(NH<sub>4</sub>Cl:5M NaNO<sub>2</sub>:0.05M)(80°C)

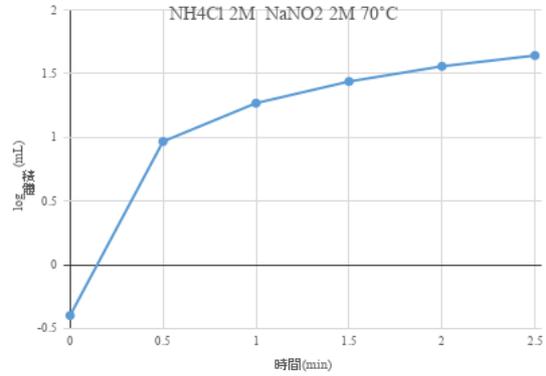
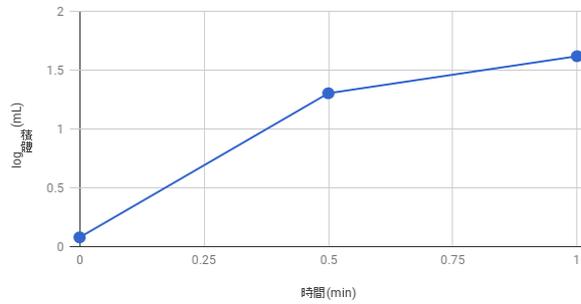
|               |         |      |      |      |      |      |      |
|---------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| 80°C(5M0.05M) | 時間(min) | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|               | 體積(mL)  | 0.2  | 2.1  | 4    | 6    | 7.7  | 9.2  |
|               | 時間(min) | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|               | 體積(mL)  | 10.7 | 12   | 13.2 | 14.2 | 15.2 | 16.1 |
|               | 時間(min) | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   |
|               | 體積(mL)  | 17.3 | 18.2 | 19   | 19.9 | 20.8 | 21.8 |
|               | 時間(min) | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   |
|               | 體積(mL)  | 22.8 | 23.7 | 24.8 | 25.5 | 26.3 | 27.1 |
|               | 時間(min) | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   |
|               | 體積(mL)  | 27.6 | 28   | 28.5 | 29   | 29.2 | 29.6 |

**反應物濃度 1:100**  
(NH<sub>4</sub>Cl:0.05M NaNO<sub>2</sub>:5M)(80°C)

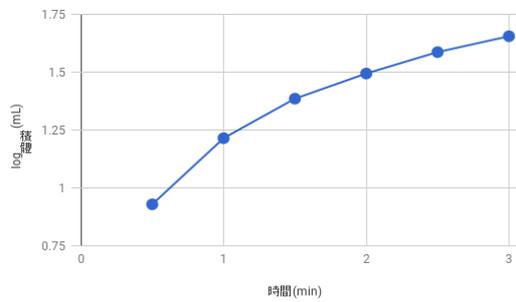
|               |         |      |      |      |      |      |      |
|---------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| 80°C(0.05M5M) | 時間(min) | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|               | 體積(mL)  | 0.2  | 0.7  | 1.1  | 1.9  | 2.8  | 2.8  |
|               | 時間(min) | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|               | 體積(mL)  | 3.7  | 4.1  | 4.4  | 5.4  | 5.8  | 6.1  |
|               | 時間(min) | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   |
|               | 體積(mL)  | 6.6  | 7    | 7.4  | 7.7  | 8.2  | 8.6  |
|               | 時間(min) | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   |
|               | 體積(mL)  | 9.1  | 9.5  | 9.5  | 9.9  | 10.3 | 10.8 |
|               | 時間(min) | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   |
|               | 體積(mL)  | 11.2 | 11.2 | 11.7 | 11.7 | 12   | 12.5 |

## LOG 體積(mL):時間(min)

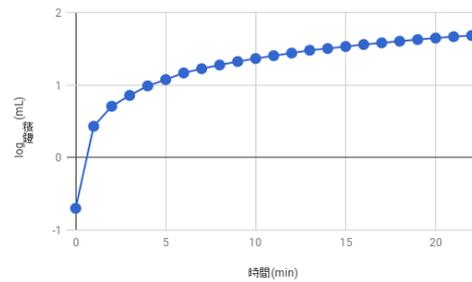
NH4Cl 2M NaNO2 2M 80°C



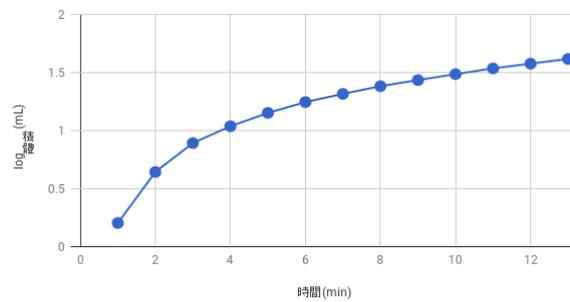
NH4Cl 1M NaNO2 2M 80°C



NH4Cl 2M NaNO2 1M 60°C



NH4Cl 2M KNO2 2M 60°C



|              |         |         |         |         |         |         |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| NH4Cl+NaNO2  |         |         |         |         |         |         |
| 2            |         |         |         |         |         |         |
| min          | 1       | 1.5     | 2       | 2.5     | 3       | 3.5     |
| 60°C(2M2M) k | 3.82369 | 0       | 3.94949 | 0       | 3.97492 | 0       |
| min          | 4       | 4.5     | 5       | 5.5     | 6       | 6.5     |
| 60°C(2M2M) k | 3.89738 | 0       | 3.71433 | 0       | 4.15454 | 0       |
| min          | 7       | 8       | 9       | 10      | 11      | 12      |
| 60°C(2M2M) k | 3.65649 | 3.67794 | 4.01871 | 3.72329 | 3.63771 | 3.87521 |
| min          | 13      |         |         |         |         |         |
| 60°C(2M2M) k | 3.68109 |         |         |         |         |         |

|              |             |             |             |             |             |             |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| min          | 1           | 1.5         | 2           | 2.5         |             |             |
| 70°C(2M2M) k | 18.75309538 | 19.03278911 | 18.67562067 | 17.7403502  |             |             |
| min          | 1           |             |             |             |             |             |
| 80°C(2M2M) k | 43.08840783 |             |             |             |             |             |
|              | 活化能(60-70)  | 149869.95   | 149KJ       |             |             |             |
|              | 活化能(60-80)  | 118318.26   | 118KJ       |             |             |             |
|              | 活化能(70-80)  | 84871.57    | 85KJ        |             |             |             |
| min          | 1           | 1.5         | 2           | 2.5         |             |             |
| 60°C(2M1M) k | 5.03        | 0           | 4.854147721 | 0           | 3           | 3.5         |
| min          | 4           | 4.5         | 5           | 5.5         | 4.269446341 | 0           |
| 60°C(2M1M) k | 5.3201146   | 0           | 4.319486    | 0           | 6           | 6.5         |
| min          | 7           | 8           | 9           | 10          | 5.799642987 | 0           |
| 60°C(2M1M) k | 4.372633933 | 4.39572398  | 4.630599715 | 4.443600355 | 11          | 12          |
| min          | 13          | 14          | 15          | 16          | 4.68119162  | 4.707409753 |
| 60°C(2M1M) k | 5.600271285 | 3.677656266 | 4.567496615 | 4.812128217 | 17          | 18          |
| min          | 19          | 20          | 21          | 22          | 4.397274825 | 4.420070544 |
| 60°C(2M1M) k | 4.889895498 | 4.693195879 | 4.493095783 | 3.836155367 |             |             |
| min          | 1           | 1.5         | 2           | 2.5         |             |             |
| 70°C(2M1M) k | 15.39226249 | 15.12049779 | 15.04459282 | 15.40007333 | 3           | 3.5         |
| min          | 7           | 8           | 9           | 10          | 15.7538118  | 15.25021019 |
| 70°C(2M1M) k | 14.7294609  | 14.86237153 | 14.54102446 | 13.99561135 | 11          | 12          |
|              |             |             |             |             | 14.56448258 | 14.45714156 |
| min          | 1           | 1.5         | 2           |             |             |             |
| 80°C(2M1M) k | 40.81042163 | 40.86300302 | 38.38587315 |             |             |             |
|              | 活化能(60-70)  | 111156.47   | 111KJ       |             |             |             |
|              | 活化能(60-80)  | 105471.70   | 105KJ       |             |             |             |
|              | 活化能(70-80)  | 99445.50    | 99KJ        |             |             |             |
| min          | 1           | 1.5         | 2           | 2.5         |             |             |
| 60°C(1M2M) k | 4.22        | 0           | 3.834359438 | 0           | 3           | 3.5         |
| min          | 4           | 4.5         | 5           | 5.5         | 4.463924499 | 0           |

|              |             |             |             |             |             |             |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 60°C(1M2M) k | 4.693443509 | 0           | 4.513942265 | 0           | 6           | 6.5         |
| min          | 7           | 8           | 9           | 10          | 4.331329281 | 0           |
| 60°C(1M2M) k | 4.319486    | 0           | 5.799642987 | 0           | 11          | 12          |
| min          | 13          | 14          | 15          | 16          | 4.372633933 | 4.39572398  |
| 60°C(1M2M) k | 4.145707104 | 4.37592093  | 4.399038059 | 4.422345994 | 17          | 18          |
| min          | 19          | 20          | 21          | 22          | 4.233069917 | 4.254550271 |
| 60°C(1M2M) k | 4.491152438 | 3.86723582  | 4.101922783 | 3.686139167 | 23          | 24          |
| min          | 25          | 26          | 27          | 28          | 4.578063858 | 3.942268363 |
| 60°C(1M2M) k | 3.739614213 | 4.20015441  | 4.667627521 | 3.347048833 | 29          | 30          |
| min          | 31          |             |             |             | 4.937243782 | 3.379529476 |
| 60°C(1M2M) k | 4.529722648 |             |             |             |             |             |
| min          | 1           | 1.5         | 2           | 2.5         | 3           | 3.5         |
| 70°C(1M2M) k | 17.13702809 | 15.65188533 | 17.28664387 | 17.88194209 | 17.00096252 | 15.20755867 |
| min          | 4           | 4.5         | 5           | 5.5         | 6           | 6.5         |
| 70°C(1M2M) k | 15.14329051 | 15.70832485 | 14.52225216 | 15.32454729 | 15.00087655 | 13.99434993 |
| min          | 1           | 1.5         | 2           | 2.5         | 3           |             |
| 80°C(1M2M) k | 34.13109224 | 33.54290853 | 31.75215477 | 31.48927383 | 31.5854821  |             |
|              | 活化能(60-70)  | 125803.9056 | 126KJ       |             |             |             |
|              | 活化能(60-80)  | 100015.406  | 100KJ       |             |             |             |
|              | 活化能(70-80)  | 72678.04755 | 72KJ        |             |             |             |

## 【評語】 050215

1. 可以從高中實驗中重新思考操作的問題和實作可能遇到的安全性，然後進一步進行改良和設計。十分值得鼓勵！
2. 除了改成水溶液反應較為新穎外，其他為測一個反應的反應級數、速率常數、活化能。建議能加入一些巧思和新的想法，增加其創意及應用性。

# 摘要

原理： $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaNO}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$

反應速率： $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^m[\text{NaNO}_2]^n$

活化能： $E_a = (\ln A - \ln k)RT$   $k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$

本實驗以 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 及 $\text{NaNO}_2$ 的水溶液為主要反應物製造氮氣，測量出此反應之基本數據後，再以 $\text{NH}_4\text{Br}$ 或 $\text{KNO}_2$ 取代原反應物，探討不同離子、濃度、溫度.....對產生氮氣之反應速率的影響。

實驗中，我們發現溫度及濃度為影響反應速率的主要因素，藉由實驗數據亦可得知此反應  $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^1[\text{NaNO}_2]^1$  為二級反應。再由計算出的反應速率常數，可算出反應活化能，並由此得知反應速率與溫度的關係。

均相反應中依碰撞學說所說，溫度愈高，超過低能之粒子數愈多(主因)，粒子運動速率快(次因)；反應物濃度愈高，總碰撞次數及有效碰撞的機會愈多，故速率愈快。

## 壹、研究動機

在化學實驗室製備氮氣的實驗過程中，我們使用固體 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 及 $\text{NaNO}_2$ 作為反應物，除了不易混和均勻，反應產生之水也易導致試管爆炸的可能性增加，而且反應速率過快，較容易發生危險。

因此，我們查出先將固體反應物配置成水溶液的方法比較溫和，如此一來，不僅不用考慮反應產生的水所造成的危險性，也可算出反應物濃度與反應速率間的關係。而且在高二下基礎化學我們學到的化學反應速率課程，令我們想更深入討論濃度、溫度、反應級數、反應速率常數與活化能間的關係。

## 貳、研究目的

- 一、以水溶液態的反應物實驗，減少其危險性
- 二、改善固體反應物無法均勻混和的問題
- 三、探討溫度、濃度與反應速率間的關係
- 四、使用不同的銨鹽、亞硝酸鹽反應，觀察其差異性
- 五、計算速率常數及活化能，並探討之
- 六、研究以水溶液態製造氮氣的實驗納入未來設計新的高中實驗課程

## 參、研究設備與器材

### 一、實驗器材

鐵架、滴定管、鐵夾、溫度計、攪拌子、電磁攪拌器、燒杯、容量瓶、深皿、橡皮管、塞子、電子天秤、秤量紙、刮勺、硬試管、玻璃棒、黑膠帶

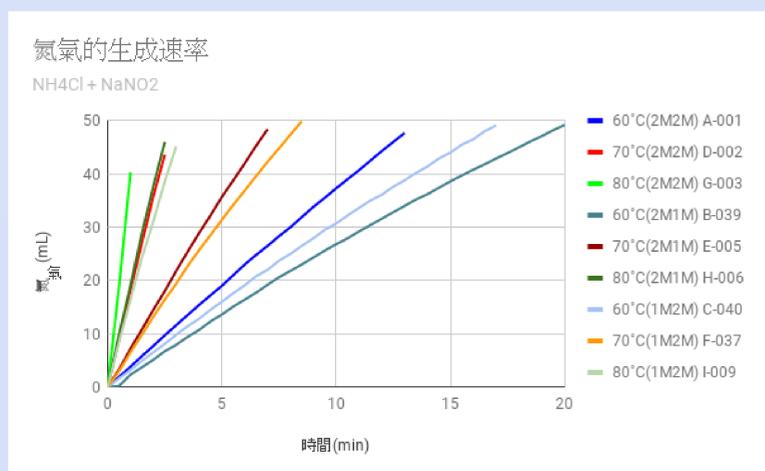
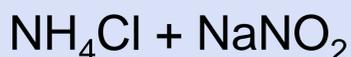
### 二、實驗藥品

氯化銨( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )、亞硝酸鈉( $\text{NaNO}_2$ )、溴化銨( $\text{NH}_4\text{Br}$ )、亞硝酸鉀( $\text{KNO}_2$ )

## 肆、研究過程與方法

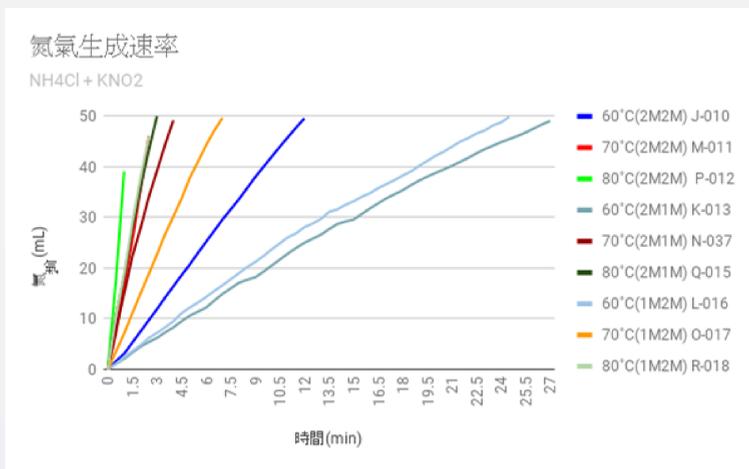
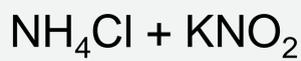
- 一、分別秤取2.675克 $\text{NH}_4\text{Cl}$  (50mmol)及3.45克 $\text{NaNO}_2$ (50mmol)，配置成2M、25mL溶液(其餘同上)
- 二、將配置好之水溶液與空的硬試管放置在磁石攪拌器上隔水預熱至實驗所需溫度(60°C、70°C、80°C)
- 三、恆溫後再將水溶液分別倒入先前預熱之硬試管中混合開始反應，立刻蓋上橡皮塞，等候氣體產生
- 四、使用滴定管收集產生之氣體，記錄氣體產生的毫升數與時間的關係，並觀察濃度與速率間的關係

## 伍、研究結果

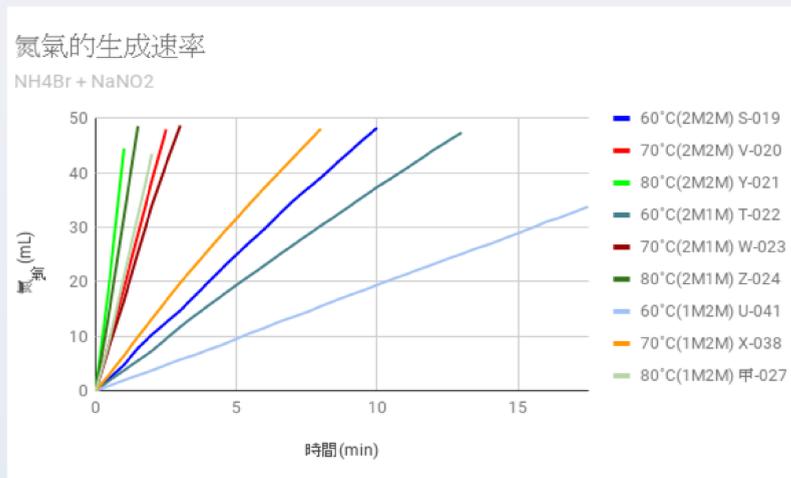
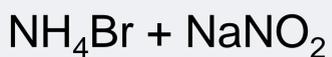


圖(一)

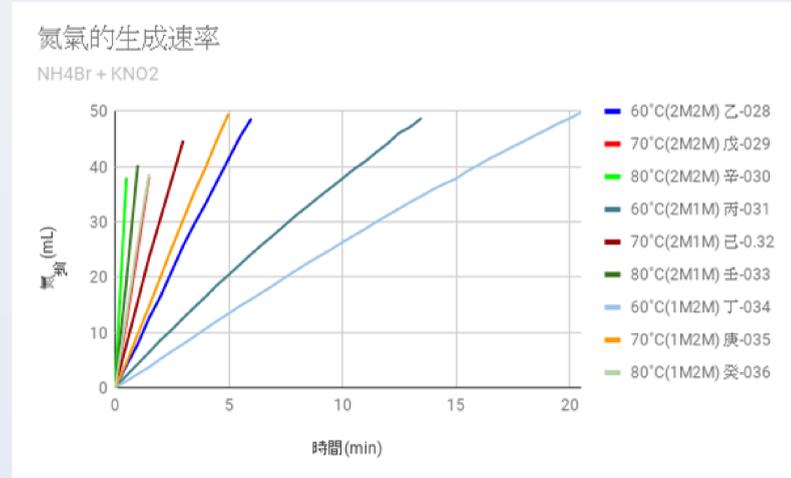
|                  |       |
|------------------|-------|
| 60°C(2M2M) A-042 | 13"44 |
| 60°C(2M1M) B-039 | 22"39 |
| 60°C(1M2M) C-040 | 25"35 |
| 70°C(2M2M) D-002 | 2"53  |
| 70°C(2M1M) E-005 | 6"45  |
| 70°C(1M2M) F-037 | 7"15  |
| 80°C(2M2M) G-003 | 1"13  |
| 80°C(2M1M) H-006 | 2"43  |
| 80°C(1M2M) I-009 | 3"22  |



圖(二)



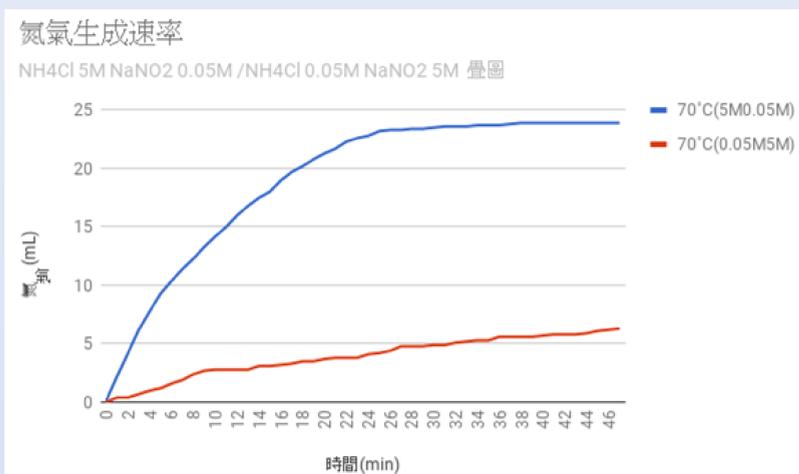
圖(三)



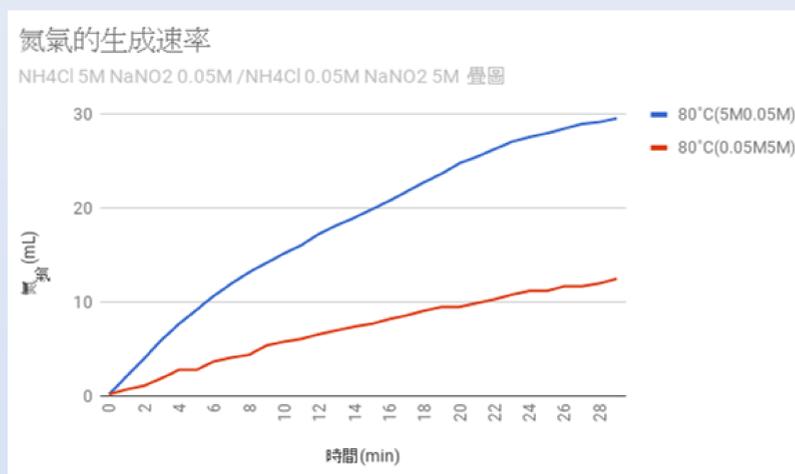
圖(四)

反應物濃度100:1 ( $\text{NH}_4\text{Cl}:5\text{M}$   $\text{NaNO}_2:0.05\text{M}$ )(70°C)  
 反應物濃度1:100 ( $\text{NH}_4\text{Cl}:0.05\text{M}$   $\text{NaNO}_2:5\text{M}$ )(70°C)

反應物濃度100:1 ( $\text{NH}_4\text{Cl}:5\text{M}$   $\text{NaNO}_2:0.05\text{M}$ )(80°C)  
 反應物濃度1:100 ( $\text{NH}_4\text{Cl}:0.05\text{M}$   $\text{NaNO}_2:5\text{M}$ )(80°C)



圖(五)



圖(六)

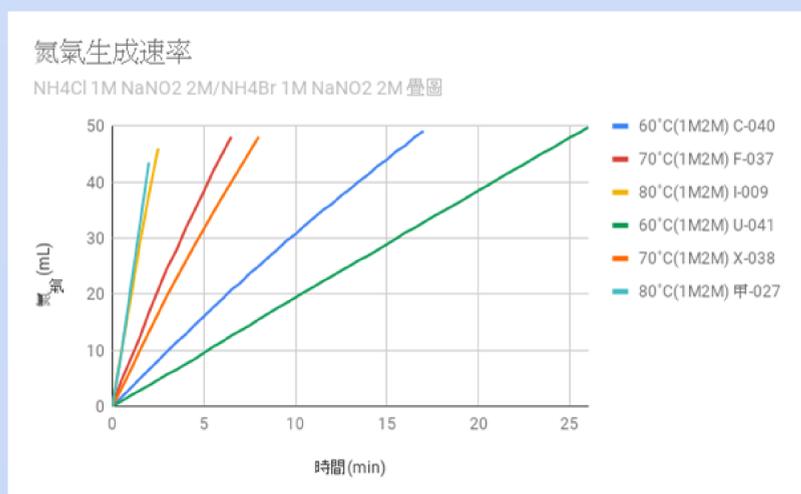
## 陸、討論

一、實際使用固體實驗，發現在安裝實驗器材時，確實較困難，且實驗過程中須以酒精燈來回加熱，增加實驗之危險性，此外，也須在過程中避免小水滴回流，否則試管因突然的降溫爆裂。

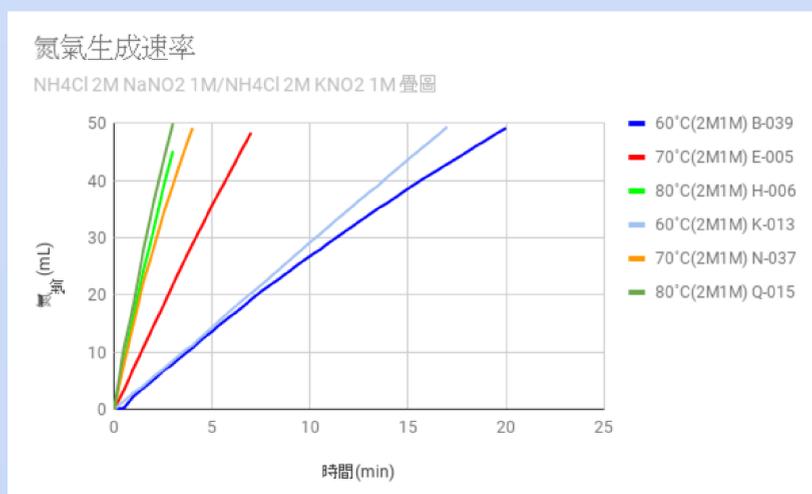
二、實驗中，銨鹽的濃度為主要控制氣體產生量者，因比較同溫(80°C)下，反應物濃度100:1之實驗，即使最高可反應之濃度皆為0.05M，在同時間時，銨鹽濃度為5M的實驗產生之氮氣體積為銨鹽濃度為0.05時多。(圖五)(圖六)

三、在反應物濃度(銨鹽皆1M，亞硝酸鈉2M)及溫度相同的條件下，由實驗可發現不同銨鹽對反應速率影響不大。圖(七)

四、由相同銨鹽的反應疊圖中，我們發現使用不同種類的亞硝酸鹽，並不會對反應速率造成太顯著的影響。圖(八)



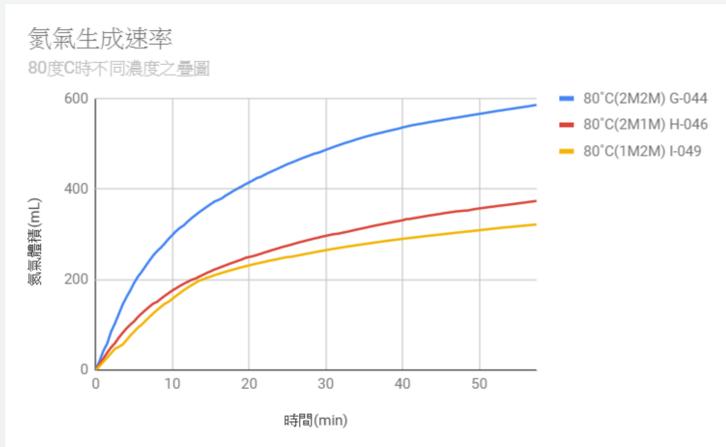
圖(七)



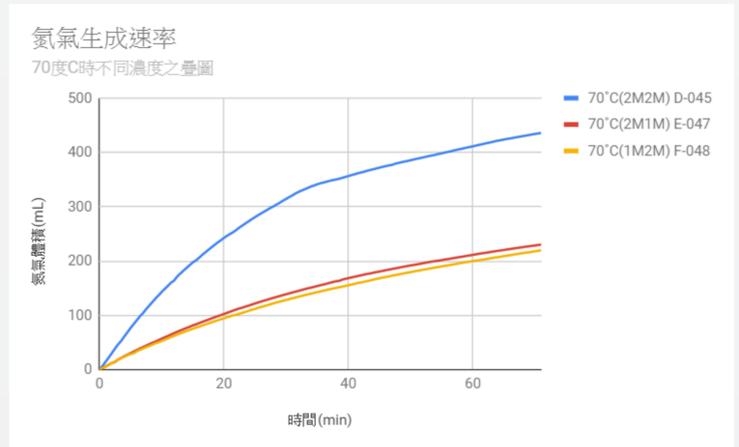
圖(八)

五、反應速率是由反應機構中最慢的反應式所決定，由於 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_2^-$ 皆為一級反應，故我們推測其反應速率的主要因素為 $\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NO}_2^-$ 相互碰撞所造成。

六、 $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaNO}_2$  的反應圖中，將  $80^\circ\text{C}$  與  $70^\circ\text{C}$  (2M2M) 比較 (2M1M) 及 (1M2M) 的反應時間，可發現其速率相差一倍，因此推測出其為一級反應。(圖九)(圖十)

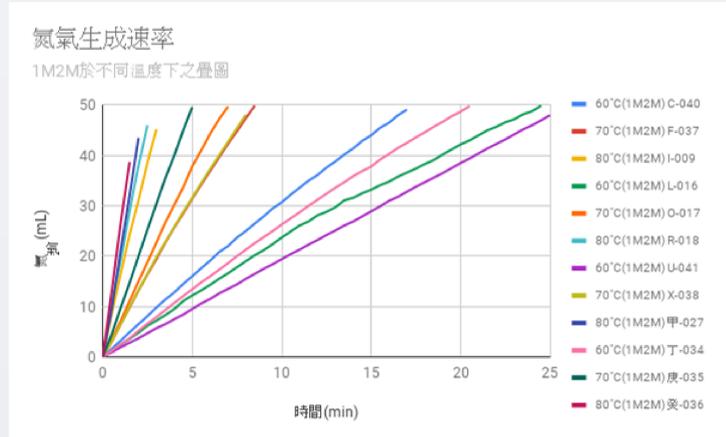


圖(九)

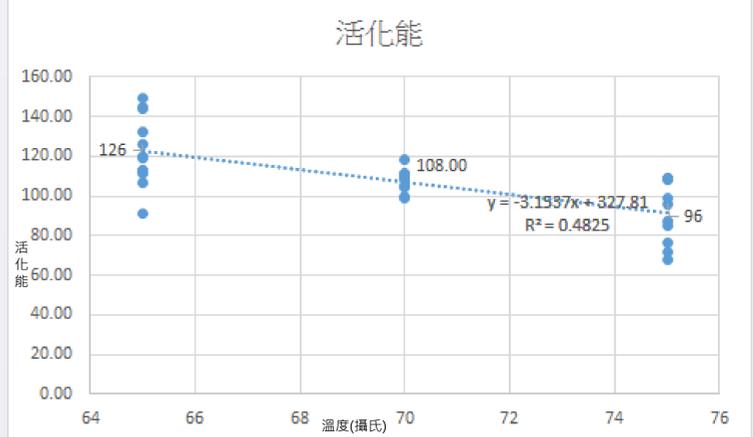


圖(十)

七、由此圖可發現溫度影響此實驗的反應速率，溫度越高，反應速率愈大，反之，則愈小。(圖十一)



圖(十一)



圖(十二)

八、藉由實驗數據，我們觀察到溫度越高，活化能有些微下降的趨勢，雖位能並不會因溫度而改變，但動能可因溫度改變而震盪，因而造成活化能的變化。(圖十二及以下三個表)

### 60°C-70°C

| Ea    | 2M2M    | 2M1M   | 1M2M   |
|-------|---------|--------|--------|
| Cl+Na | 153KJ   | 99.1KJ | 95.2KJ |
| Cl+K  | 143KJ   | 110KJ  | 122KJ  |
| Br+Na | 133KJ   | 144KJ  | 132KJ  |
| Br+K  | 111KJ   | 153KJ  | 119KJ  |
| 平均    | 126.2KJ |        |        |
| 標準差   | 20      |        |        |

### 60°C-80°C

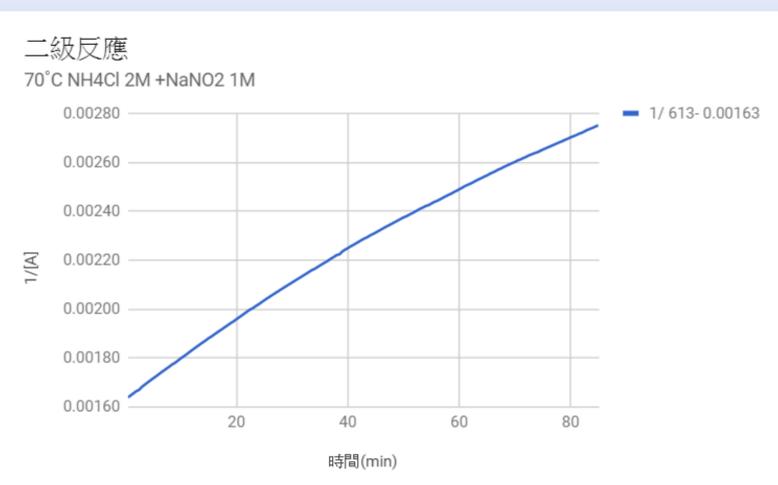
| Ea    | 2M2M    | 2M1M   | 1M2M   |
|-------|---------|--------|--------|
| Cl+Na | 120KJ   | 99.3KJ | 81.2KJ |
| Cl+K  | 110KJ   | 110KJ  | 109KJ  |
| Br+Na | 110KJ   | 109KJ  | 120KJ  |
| Br+K  | 81.7KJ  | 150KJ  | 117KJ  |
| 平均    | 109.8KJ |        |        |
| 標準差   | 18      |        |        |

### 70°C-80°C

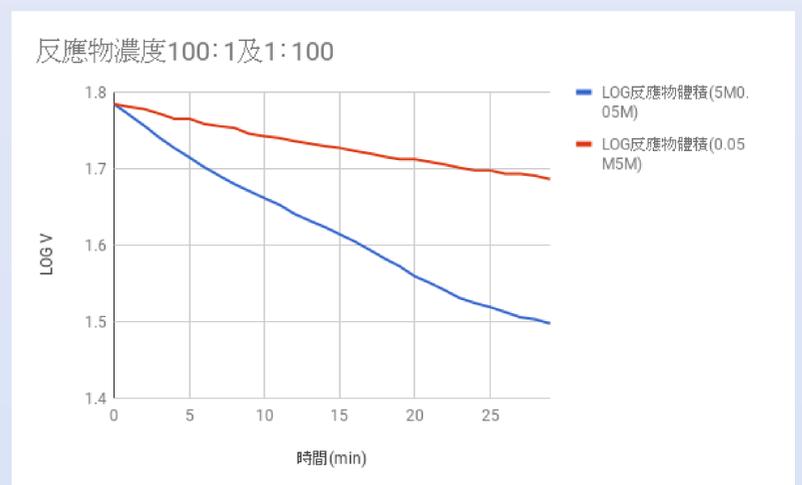
| Ea    | 2M2M   | 2M1M   | 1M2M   |
|-------|--------|--------|--------|
| Cl+Na | 84.9KJ | 99.4KJ | 95.2KJ |
| Cl+K  | 76KJ   | 108KJ  | 96KJ   |
| Br+Na | 86KJ   | 71.8KJ | 109KJ  |
| Br+K  | 50.8KJ | 103KJ  | 97KJ   |
| 平均    | 89.8KJ |        |        |
| 標準差   | 17     |        |        |

九、由反應物濃度的倒數與時間做圖，可得一正斜率直線，故可得知此反應為二級反應。(圖十三)

十、由氯化銨或亞硝酸鈉其一的濃度為絕對多數時，濃度高者的濃度變化不大，故可視為零級反應，進而造成整個反應呈現偽一級反應。(圖十四)



圖(十三)



圖(十四)

## 柒、結論

一、使用水溶液進行的反應可降低使用固體實驗時的危險性

二、由兩反應物之級數皆為1，並由其中一反應物濃度為絕對多數的實驗中，可知反應各自為一級，也可證明總反應為二級。

二級反應(second order reaction):  $R = k[\text{NH}_4\text{Cl}]^1[\text{NaNO}_2]^1$

三、由實驗證明，反應速率常數受溫度影響，因而影響反應進行的快慢。

四、低限能可能因溫度變動而發生震盪，雖低限能與活化能之能量相同，但活化能本身不隨溫度變化

五、由討論中改變濃度及溫度變因的各疊圖中，我們由其數據發現溫度、濃度皆能造成反應結果顯著的影響。

六、反應機構中，我們推測  $[\text{NH}_4^+] \leftrightarrow [\text{NO}_2^-]$  在反應中的碰撞速率，為決定實驗反應步驟的主要因素。

## 捌、未來展望

在固體實驗安全性的考量下，盼能將製造氮氣的實驗納入未來設計新的高中實驗課程。