

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

最佳團隊合作獎

040201

神秘的水結晶～溫度對水結晶影響之研究

學校名稱： 國立彰化高級中學

| | |
|--------|-------|
| 作者： | 指導老師： |
| 高二 薛智奕 | 李嘉輝 |
| 高二 于洪元 | 周家全 |
| 高二 白昆庭 | |

關鍵詞：蒸餾水、冷劑、過冷現象

壹、摘要

水結晶的現象，不容易用肉眼觀察，我們利用水結晶降溫曲線的測定，分析得知開始結冰溫度、時間及結冰速率和水結冰的現象。並進一步有系統的研究不同的起始水溫的結冰現象，我們發現水的初溫在 60°C 時會最快結冰，但結冰溫度、結冰速率(g/s)則與水的初溫並無明顯的關係，而是系統的降溫速率(°C/s)越快，結冰過程時間越短(g/s)，即結冰速率越快，我們也發現過冷現象越大，則延遲結冰時間(過冷現象持續的時間)越長。至於結冰外觀的部分，對拍攝的影像進行判讀和曝光率的分析，發現初溫不同的蒸餾水所結的冰外觀稍有不同，皆含有不同量的微小氣泡。冰塊中氣泡越多，透光性越差，此乃因延遲結冰時間短，水分子排列急促所造成；反之，氣泡越少，即透光性越好，則是因延遲結冰時間較長，水分子較能夠排列整齊。特別值得一提的是，初溫 60°C 蒸餾水所結的冰透光性最差，更可證明延遲結冰時間越短，水分子調整至適當位置可用時間越短，往往造成結冰缺陷較多的現象。

貳、研究動機

有一次上課時，有同學突然提到：有關熱水比溫水先結冰的問題。使我們非常好奇，難道溫度高的水真的會比溫度低的水先結冰嗎？一百°C 的水也會比零°C 的水快結冰？於是我們就自己去找有關這個現象的解釋。對他有初步了解之後，想更完整的明白這個現象的來龍去脈，於是做了簡單的實驗。之後，在老師的建議之下，我們把目標延伸至“水的結晶”現象的深入研究。

參、研究目的

- 一、比較不同初溫的蒸餾水在相同冷卻條件下的結冰溫度及現象。
- 二、比較不同初溫的蒸餾水在相同冷卻條件下的結冰時間及結冰速率。
- 三、比較相同初溫的蒸餾水在不同冷卻條件下的結冰現象。
- 四、探討不同初溫的蒸餾水在相同冷卻條件下造成結冰的品質不同的原因。

肆、研究設備及器材

| | | | | | |
|-----------|-----|--------|----|------|----|
| NaCl(s)藥品 | 一瓶 | 試管 | 一支 | 玻棒 | 一支 |
| 純水 | 數毫升 | 保溫瓶 | 一只 | 滴管 | 一支 |
| 蒸餾水 | 數毫升 | 50m 燒杯 | 五個 | 量筒 | 一支 |
| 冰塊 | 數克 | 數據擷取系統 | 一組 | 電子天平 | 一台 |
| 保鮮膜 | 一卷 | 黑色紙 | 數張 | 相機 | 一台 |

伍、研究過程及方法

一、冷劑

(一)冷劑的製作：

- 1.以電子天平秤取 50 克 NaCl 及 60 克的蒸餾水和 90 克的冰塊。
- 2.將上述之藥品置入保溫瓶中。
- 3.將數據擷取系統的溫度探針置入保溫瓶中，應避免探針接觸杯底。用玻棒攪拌使 NaCl 充分溶解，確保冷劑發揮最大的冷卻效果。
- 4.若遇配製出效果不同之冷劑，只需靜置一段時間，達到欲操作的冷劑溫度時再進行實驗即可

(二)冷劑效果的測試：

1. 將冷劑不斷攪拌，插入溫度感測器，連至數據擷取系統中。
2. 調整 Data Studio 系統，使其擷取速度為 5HZ。
按下 Data Studio 系統介面上的“啓動”鈕，開始讀取數據。
- 3.持續 950 秒後按下 Data Studio 系統介面上的“停止”鈕停止讀取。
4. 將所得之數據與圖表建檔。

二、主要實驗：

(一)初溫不同之蒸餾水各以相同冷卻速度冷卻

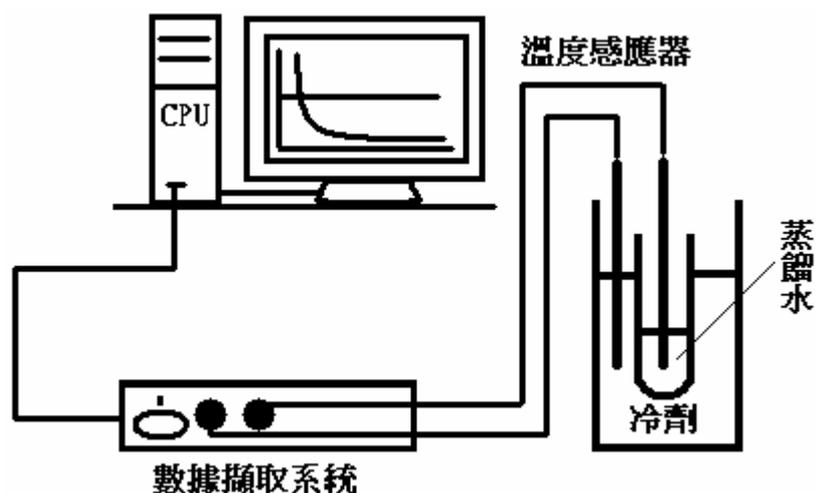
- 1.取一支小試管，加入精測 3 毫升的蒸餾水，並將其煮沸，插入溫度感測器，連至數據擷取系統中，使溫度最後被控制在 30°C。
- 2.調整 Data Studio 系統，使其每 5 秒擷取一次數據。
- 3.將試管連同管內的溫度感應器，置入已經配製完畢的冷劑，試管壁應避免碰觸到保溫瓶。
- 4.在放入冷劑的瞬間按下 Data Studio 系統介面上的“啓動”鈕，開始讀取數據。
- 5.靜置整個系統，並觀察試管中蒸餾水的冷卻情形，至一定時間後按下 Data Studio 系統介面上的“停止”鈕停止讀取。
- 6.將所得之數據與圖表建檔。
- 7.將步驟一之初溫改成控制於 30°C、40°C、60°C、70°C、80°C 等，再重複步驟二到步驟六。

(二)初溫相同之蒸餾水各以不同冷卻速度冷卻

- 1.取一支小試管，加入精測 3 毫升的蒸餾水，並將其煮沸，插入溫度感測器，連至數據擷取系統中，使溫度最後保持在 50°C。
- 2.調整 Data Studio 系統，使其每 5 秒擷取一次數據。
- 3.將試管連同管內的溫度計，置入已經配製完畢的冷劑，試管壁應避免碰觸到保溫瓶。
- 4.在放入冷劑的瞬間按下 Data Studio 系統介面上的“啓動”鈕，開始讀取數據。
- 5.靜置整個系統，並觀察試管中蒸餾水的冷卻情形，至一定時間後按下 Data Studio 系統介面上的“停止”鈕停止讀取。
- 6.將所得之數據與圖表建檔。

(三)初溫不同之蒸餾水各以相同冷卻速度冷卻，並觀察結冰後之現象

- 1.取一個 50ml 燒杯，加入精測 5 毫升的蒸餾水，將水煮沸後插入溫度感測器，連至數據擷取系統中，使溫度最後被控制在 30°C，迅速將燒杯口封住。
- 2.將燒杯內的溫度感應器拿出，並將燒杯置入已經配製完畢的冷劑，杯壁應避免碰觸到保溫瓶。
- 3.在放入冷劑的瞬間按下 Data Studio 系統介面上的“啓動”鈕，開始計時。
- 4.20 分鐘後拿出並置於光線暗且背景為黑色的紙上，拍攝其影像並進行透光度的分析。
- 5.將步驟一之初溫改成控制於 30°C、40°C、50°C、60°C、70°C 等，再重複步驟二到步驟 4。



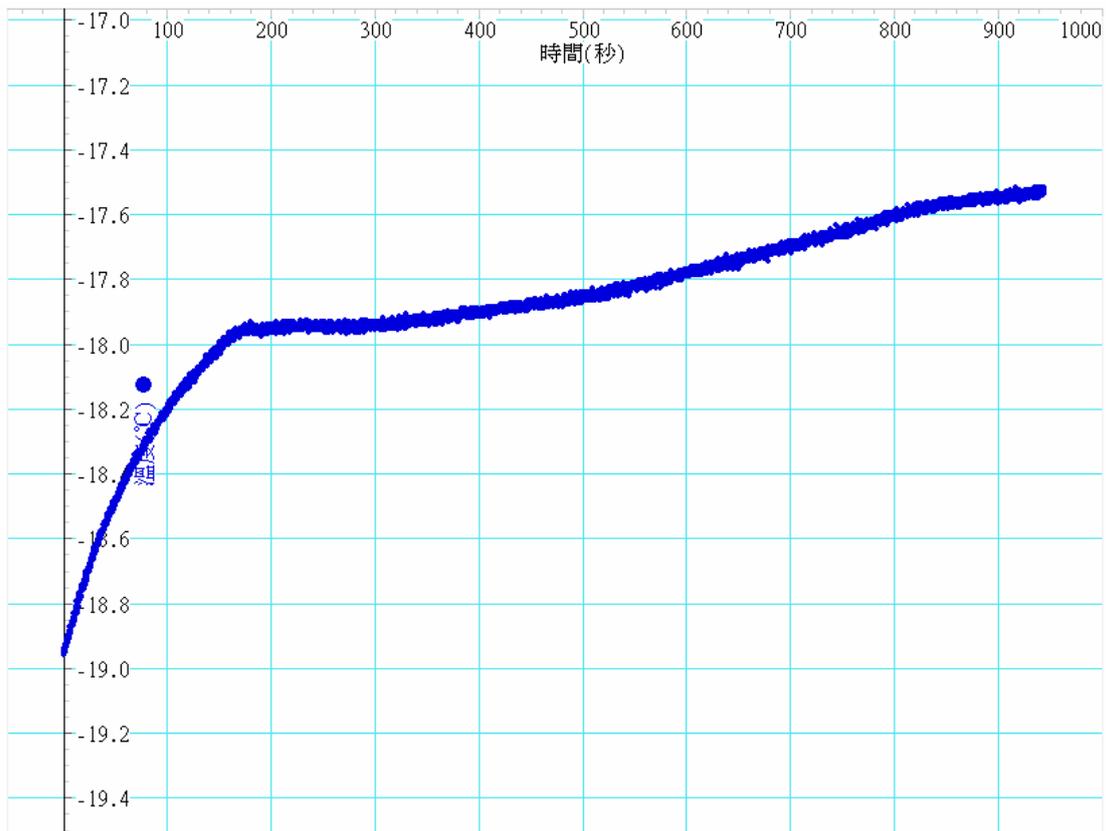
圖一：實驗裝置圖



照片一：實驗器材一覽

陸、研究結果

一、冷劑效果



圖二：冷劑在靜置且幾乎無與外界熱交換下之溫度變化情形

說明：1.前段斜率大者乃因攪拌後加速冷劑內物理變化(未穩定)，後段則穩定下來達到動態平衡。

2.圖片顯示在 200 秒之後冷劑較穩定，所以往後實驗在冷劑配好後 200 秒方可進行。

二、初溫不同之蒸餾水以相同冷卻速度下冷卻

(一)冷劑溫度在-11.0°C

表一：冷劑溫度在-11.0°C，不同初溫蒸餾水冷卻結果一覽

| 初溫°C | 開始結冰 | | 延遲結冰時間 | 系統降溫速率(°C/s) | 結冰過程所需時間(s) | 結冰速率(g/s) | 從0秒到結冰完成的時間(s) |
|------|------|-----|--------|--------------|-------------|-----------|----------------|
| | 溫度°C | 時間S | | | | | |
| 30 | -5.4 | 285 | 135 | 0.2 | 220 | 0.014 | 505 |
| 40 | -4.0 | 175 | 55 | 0.33 | 205 | 0.015 | 380 |
| 50 | -1.0 | 170 | 30 | 0.58 | 220 | 0.014 | 390 |
| 60 | -1.5 | 135 | 15 | 0.5 | 225 | 0.013 | 360 |
| 70 | -9.4 | 315 | 195 | 0.58 | 135 | 0.022 | 450 |
| 80 | -5.0 | 405 | 180 | 0.35 | 200 | 0.015 | 605 |

定義：1.延遲結冰時間，即為水溫從 0°C 到開始結冰所經過的時間(過冷現象持續的時間)

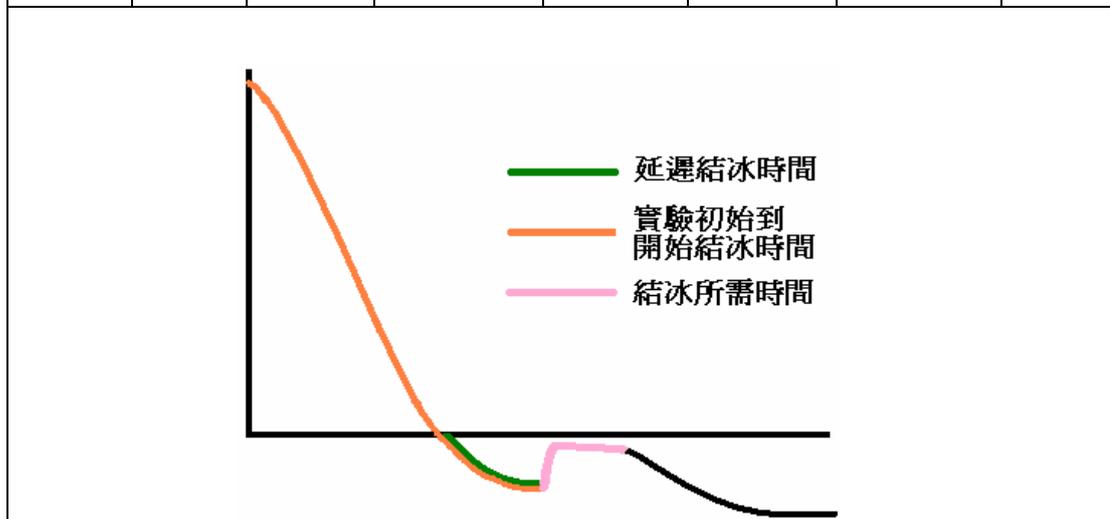
2.系統降溫速率，即為到 0°C 的時間除以初溫

3.結冰速率: 3g 水/結冰過程所需時間 (s)

(二)冷劑溫度在-17.0°C

表二：冷劑溫度在-17.0°C，不同初溫蒸餾水冷卻結果一覽

| 初溫°C | 開始結冰 | | 延遲結冰時間 | 系統降溫速率(°C/s) | 結冰過程所需時間(s) | 結冰速率(g/s) | 從0秒到結冰完成的時間(s) |
|------|-------|-----|--------|--------------|-------------|-----------|----------------|
| | 溫度°C | 時間S | | | | | |
| 30 | -1.1 | 115 | 35 | 0.26 | 215 | 0.014 | 330 |
| 40 | -0.9 | 140 | 30 | 0.36 | 115 | 0.026 | 255 |
| 50 | -3.4 | 165 | 25 | 0.36 | 260 | 0.012 | 425 |
| 60 | -2.1 | 110 | 10 | 0.6 | 90 | 0.033 | 200 |
| 70 | -1.0 | 170 | 30 | 0.58 | 220 | 0.014 | 390 |
| 80 | -10.0 | 630 | 455 | 0.48 | --- | --- | --- |



三、初溫相同之蒸餾水以不同冷卻速度下冷卻

表三：冷劑溫度不同，初溫 50°C 蒸餾水冷卻結果一覽

| 初溫°C | 冷劑溫度°C | 開始結冰 | | 延遲結冰時間(s) | 0°C 降溫速率(°C/s) | 結冰過程所需時間(s) | 結冰速率(g/s) | 從 0 秒到結冰完成的時間(s) |
|------|--------|------|------|-----------|----------------|-------------|-----------|------------------|
| | | 溫度°C | 時間 S | | | | | |
| 50 | -19.4 | -1.0 | 105 | 10 | 0.52 | 100 | 0.033 | 215 |
| | -18.7 | -1.4 | 90 | 5 | 0.59 | 60 | 0.050 | 150 |
| | -17.7 | -3.4 | 165 | 25 | 0.36 | 260 | 0.012 | 425 |
| | -7.3 | -7.0 | 260 | 145 | 0.43 | --- | --- | --- |

四、初溫不同之蒸餾水各以相同冷卻速度冷卻，並觀察結冰後之現象



照片二：初溫 30°C 蒸餾水結冰圖



照片三：初溫 40°C 蒸餾水結冰圖



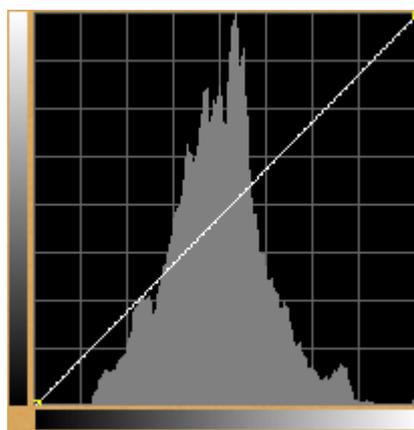
照片四：初溫 50°C 蒸餾水結冰圖



照片五：初溫 60°C 蒸餾水結冰圖

(一)上四張照片是較有代表性的照片，照片中白色的部分是微小的氣泡和空隙，黑色的部分是黑色的背景，表示透明處。

(二)從以上的各圖比較，結晶較完美透光度好，也就是它的白色霧狀越少，此乃因，延遲結冰時間較長，水分子藉由氫鍵調整至適當位置所用的時間較長，晶體堆疊較完整；反之，凝固後的結晶透光度差，則表示水分子調整位置時間短排列較不完美。



低 ← → 高

初溫 60°C 蒸餾水完全凝固曝光圖

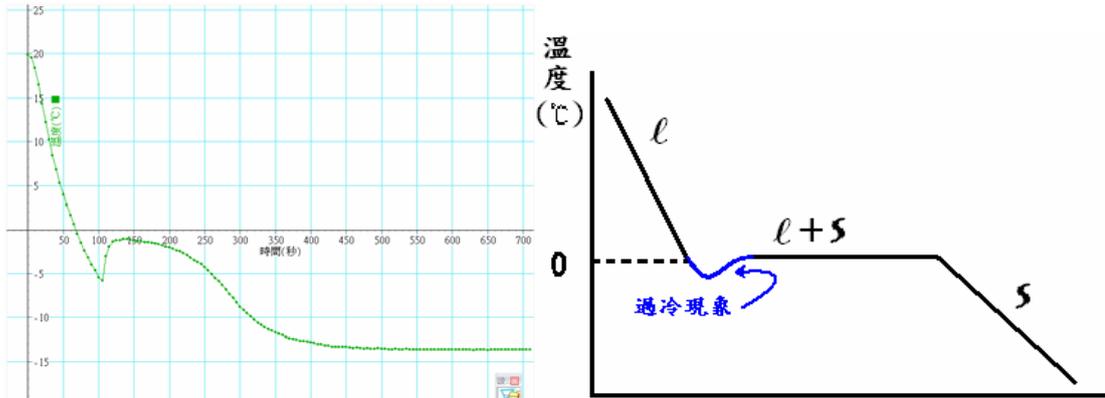
(橫座標為面積；縱座標為曝光度)

(三)上圖是一張表示水結晶照片曝光度的直方圖，而灰色的區塊代表的是該曝光度所佔的體積。因為我們的背景使用的是黑色壁報紙，且水中的微小氣泡和空隙等物質會反射光線，而成白色。又曝光度愈高代表該處愈亮，所以灰色區塊若大部分集中於右側，表示曝光多，透光度差，結晶的白色區域多；反之，若灰色區塊集中於左側，曝光少，黑色區域(背景)多，透光度佳。由此可作為水結晶透光度的判斷。

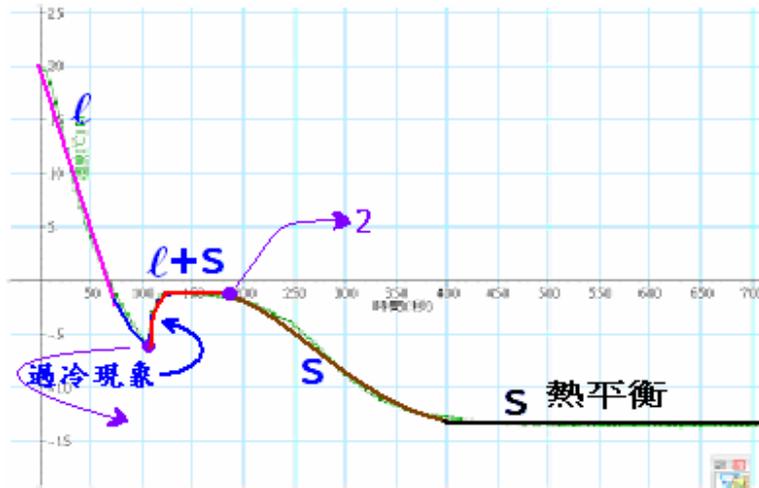
柒、討論

- 一、實驗一冷劑的部分，因為冷劑溫度低且水量少的關係，所以氯化鈉無法完全溶盡，因為氯化鈉溶於水中會吸熱，加上冰融化也吸熱所以冷劑溫度保持低溫，但低溫會造成食鹽溶解度下降，然後再度析出將冰融化。但冰一融化液態水量增多便可溶進更多食鹽，將有一定量的氯化鈉會不斷的溶解、析出(從圖二可得知)，所以在冷劑剛配製好時，冷劑溫度會不穩定。
- 二、實驗一從繪出的圖中可觀察到 200 秒後冷劑的溫度才趨於穩定，所以往後的實驗(主要實驗一)的部分，必須在冷劑配好後 200 秒方可開始(從圖二可得知)。

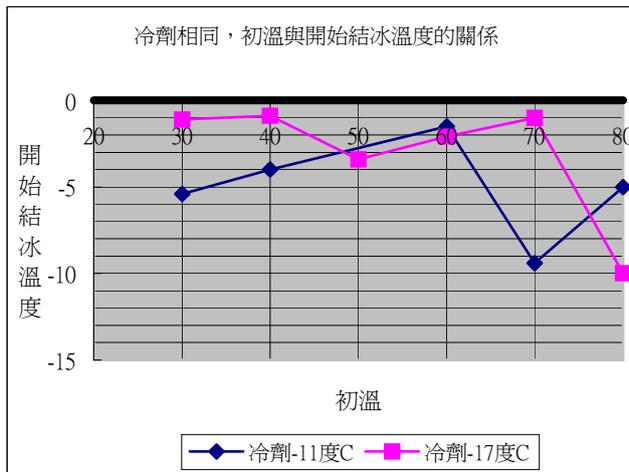
三、由於我們所討論的結冰現象，是自晶核產生到完全結冰的過程，關係到微觀的世界，並不是肉眼所能判定的，所以必須採用其他判斷的方法。我們所想到的方法是利用圖形的分析。以其中的一張圖形為例，並且將其與理想的溫度對相的變化關係圖作比較：



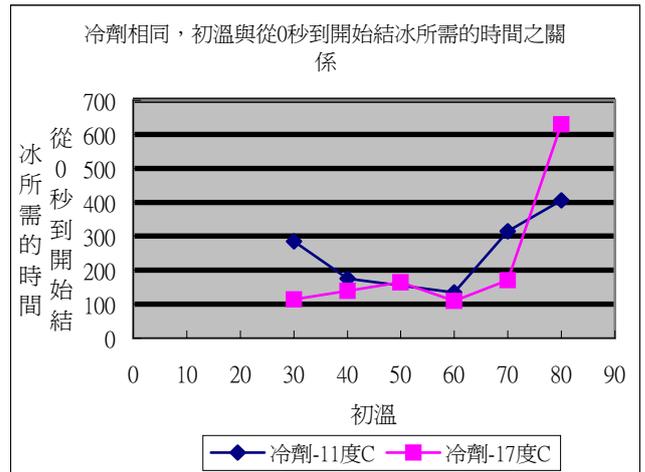
分析的結果如下：



四、



圖三：冷劑相同，初溫與開始結冰溫度的關係



圖四：冷劑相同，初溫與開始結冰之時間點的關係

(一)由圖三得知在相同冷卻條件下，冷劑溫度控制在 -11°C ，起始水溫 60°C 的開始結冰溫度最高(-1.5°C)。而冷劑溫度控制在 -17°C ，起始水溫 40°C 的開始結冰溫度最高(-0.9°C)。

(二)由圖四得知不論冷劑溫度是 -17°C 或 -11°C 皆為起始溫 60°C 時最快開始結冰，也就是最早形成晶核。

五、從實驗一和實驗二得知 60°C 的水最快結冰，繪出的圖形呈現山谷般的凹陷，推測其原因如下：溫度越大分子運動速率就越大，有助於水分子較大的機會移動到最適當的結晶位置，但卻不利於水分子穩定在結晶格子。上述兩者成拮抗作用，互相制衡，而在起始水溫 60°C 者取得最佳的平衡，為最適當的溫度。

六、由於之前的數次實驗，我們發現所有的實驗結果所做出的溫度對時間的曲線，大致可分為兩類：第一類有明顯的過冷現象，第二類則無過冷現象。造成這種差異的原因，是開始結冰的早晚，也就是晶核產生的時間點不同所造成。

七、整支試管穩定降低溫度，直到零下數度才形成晶核，又在幾秒內瞬間凝固，就造成有過冷現象的實驗。反之，在未達零度之前，晶核就先形成時，水分子可隨著溫度下降而緩緩結冰，就不會有過冷現象了。故此報告數據均採有過冷現象者。

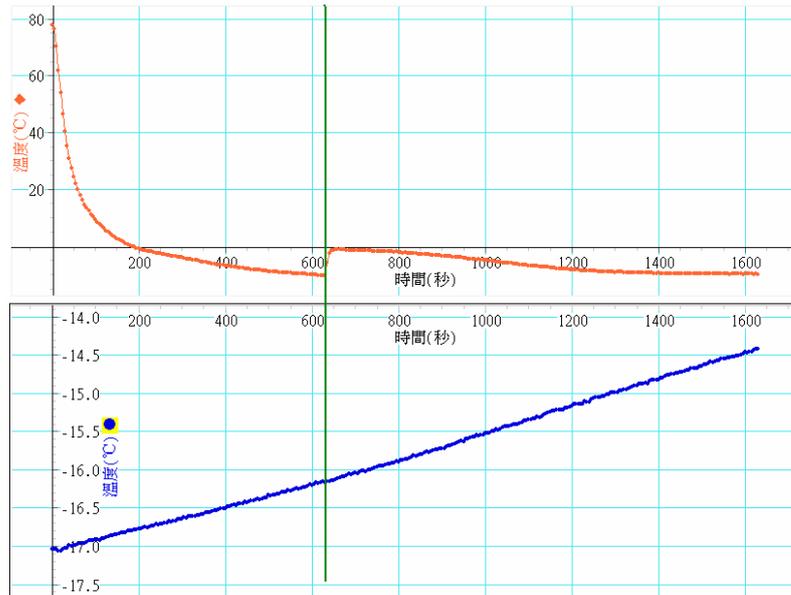
八、在無過冷現象的實驗的數據中，有一個不太明顯的現象-在接近 0°C 時，溫度下降的速率，在某一點會忽然減緩，這就是晶核產生的時間，並有一些水分子已經凝固。有一次實驗，溫度下降速率減緩後數十秒，看試管內的水，竟然在高於 0°C 就已經結冰了。由此可知，在溫度下降速率減緩後，就有少數的冰形成，只是看不出來罷了。

九、由表一得知，初溫越低並非最快結冰，結冰速率也不是最大，但系統降溫速率($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)越快結冰速率較快。然而過冷現象越大則越慢結冰，但與結冰速率毫無關聯

十、由表三得知，相同起始水溫控制在不同冷卻溫度下的實驗，我們發現過冷現象越大者越慢結冰，降溫速率越大者，結冰所需時間較短即結冰速率最高。

十一、從表一和表二得知在起始溫度 80°C 時，結冰現象較為極端，相較於起始溫度 70°C 以下，部分現象如結冰過程的相關數據都難以判別，故實驗只做到起始溫 80°C 為止。

十二、下圖是表示初溫 80°C 實驗中冷劑溫度和蒸餾水降溫的情形：

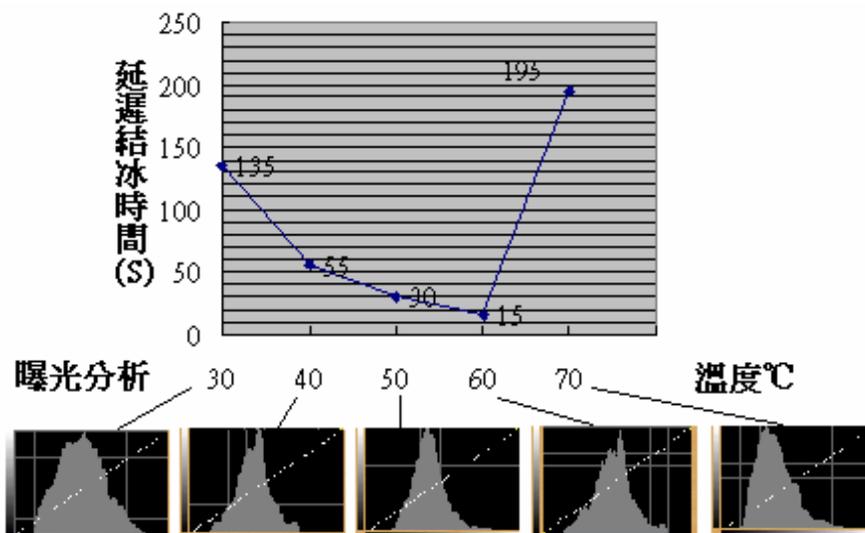


圖中綠色線段表示在該次開始結冰的時間，冷劑的部分，在綠線的左右兩端斜率有些微的不同，左端因為與試管內的蒸餾水進行熱交換，溫度平穩上升；而右端因為試管內蒸餾水開始結冰放熱，以致溫度上升加快。故此實驗不宜做太久。

十三、根據實驗三的結果我們可以發現，結出來的冰皆有白色霧狀的感覺，其實那是由一堆微小的氣泡所組成，其形成的原因有二：

- (一)原本蒸餾水中就溶有一些氣體，而在降溫過程中，因為溶解度下降導致氣泡產生。
- (二)在結冰的過程中因為先從外側(杯緣)膨脹，而造成各部分膨脹不均勻，裡面再結冰時由於體積會改變，所以會產生空隙。
- (三)因為延遲結冰時間短，水分子藉由氫鍵調整位置時間不一，而間接影響其堆疊所致。

因為蒸餾水已經煮沸過，所以沒有第一項的疑慮，而第二項也在我們的控制變因內所以也幾乎沒有影響；而第三項決定的因素最大。



上圖是將曝光分析和結晶速率(g/s)對溫度折線圖的對照。可看出在 60°C 曝光圖中的灰色區塊大部分集中於右側，表示曝光多，結晶的白色區域多，透光性差。而高於和低於 60°C 的結晶則越集中於左側，曝光少。這也同時證明了實驗一的結果：60°C 初溫蒸餾水凝固速度較快。

捌、結論

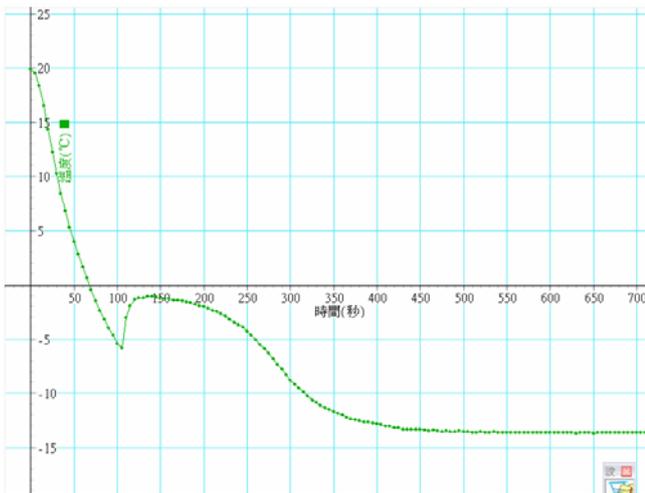
- 一、從實驗一和實驗二得知 60°C 的水最快結冰，繪出的圖形呈現山谷般的凹陷，乃因溫度越高分子運動速率越快有助於水分子較大的機會移動到結晶位置，但不利於水分子穩定在結晶格子。兩者互相制衡，而在起始水溫 60°C 為最適當的溫度。
- 二、在起始水溫 60°C 者最快結冰，但結冰速率(g/s)卻越低，過冷現象越小。另外過冷現象越大者則越慢結冰，但結冰速率卻是最大的。
- 三、冷劑溫度不同會使相同起始水溫的水結冰現象不一樣。其中過冷現象越大，同樣是越慢結冰。降溫速率越大者，結冰速率越大。
- 四、研究相同初溫的蒸餾水在不同的冷卻條件下，冷劑溫度負十七°C 到負十九°C 間有最好的冷卻效果，一旦低於負十九度就反而過猶不及。
- 五、影響結冰品質的好壞的主要因素，是延遲結冰時間的長短，而不是結冰所需的時間。初溫不同的蒸餾水所結的冰外觀稍有不同，從拍攝的影像曝光率分析，得知水結晶的品質和延遲結冰時間的長短有關聯。即延遲結冰時間愈長，水分子較能夠排列整齊，反之若延遲結冰時間較短，則因水分子排列急促，造成水結晶缺陷較多，且結冰品質相對的也最差。

玖、參考資料及其他

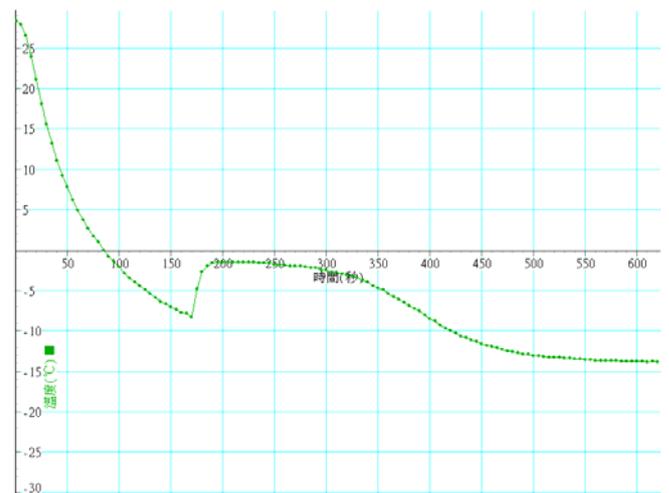
一、參考資料

1. <http://wcc.as.ntu.edu.tw/cloud/ex9.html> 過冷水
2. <http://www.ntsec.gov.tw/activity/race1/43/pdf/d/030103.pdf#search='%E9%81%8E%E5%86%B7%E6%B0%B4'>
3. DataStudio 說明書、操作手冊
4. 化學(BASIC CONCEPTS OF CHEMISTRY)作者/MALONE 出版社/高立圖書有限公司
P.296~298 10-7 水的加熱曲線

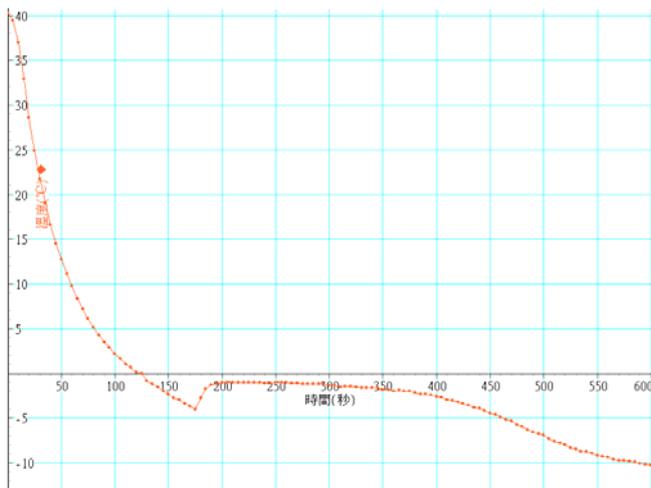
二、附圖



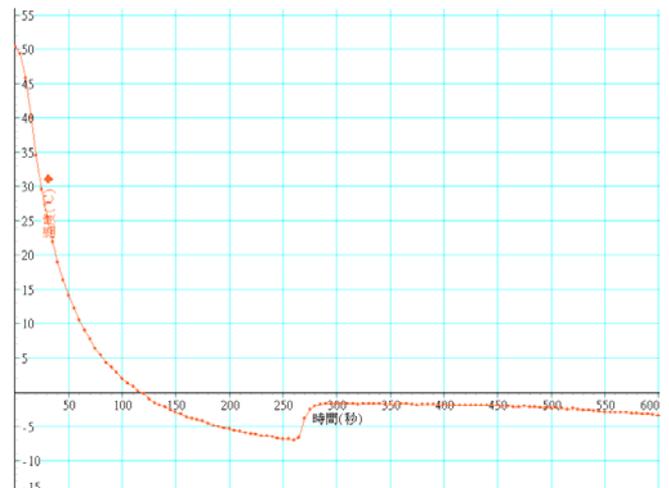
圖五：初溫 20°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



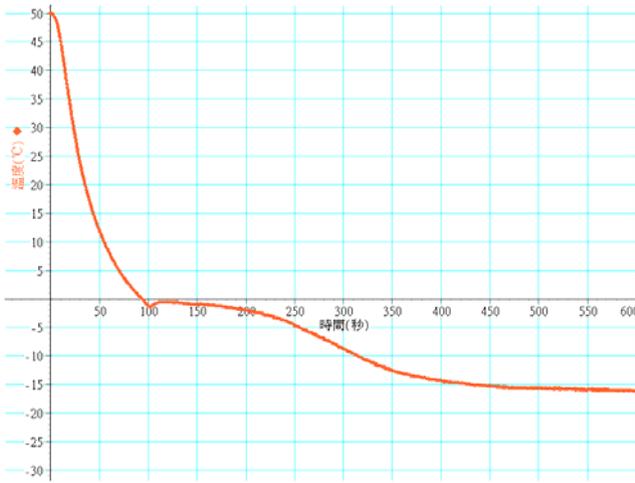
圖六：初溫 30°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



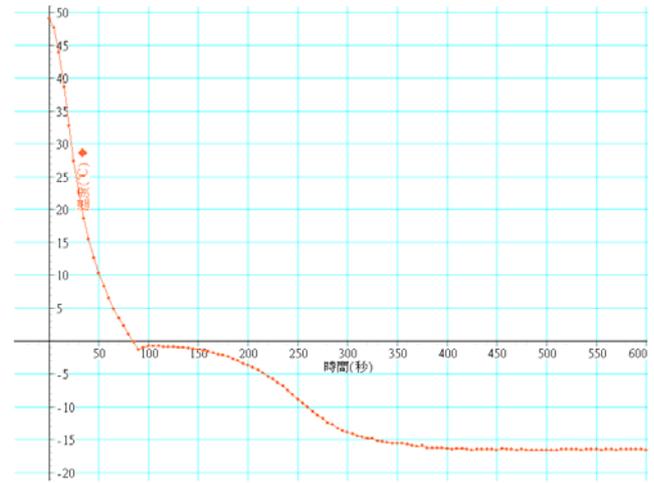
圖七：初溫 40°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



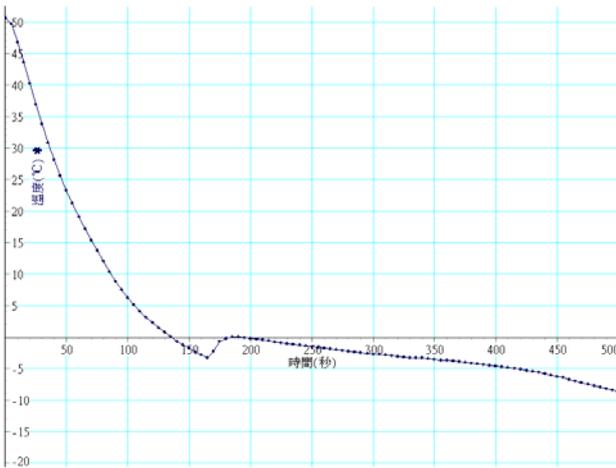
圖八：初溫 50°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



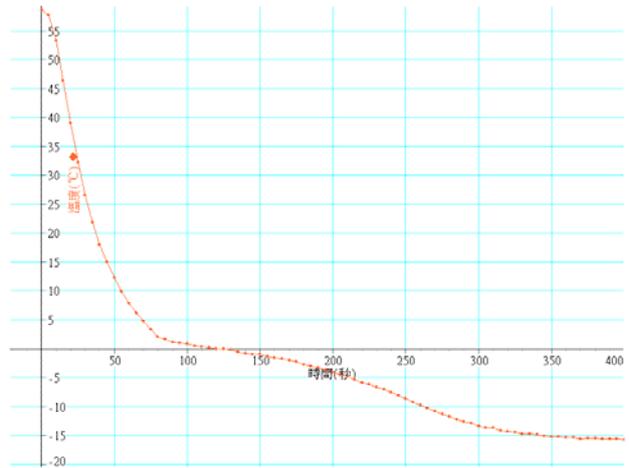
圖九：初溫 50°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水中的冷卻情形



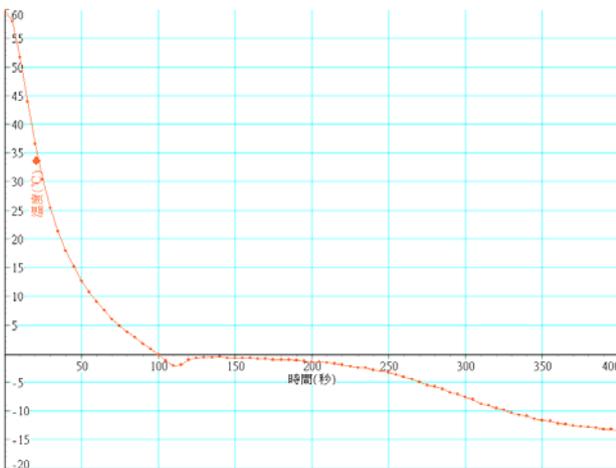
圖十：初溫 50°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



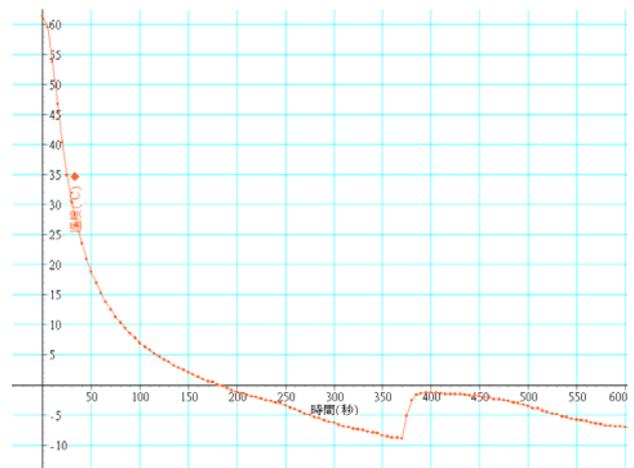
圖十一：初溫 50°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



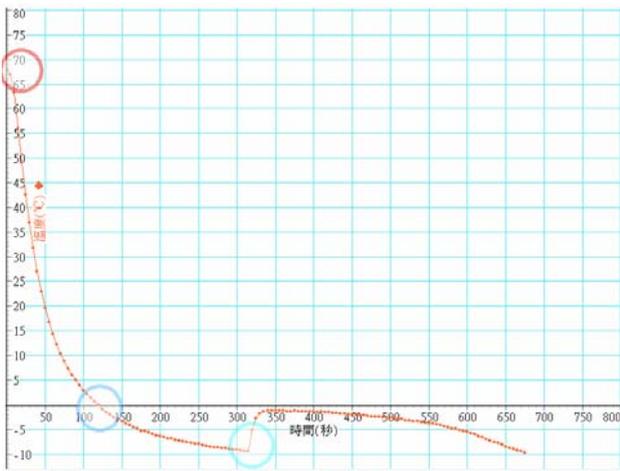
圖十二：初溫 60°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



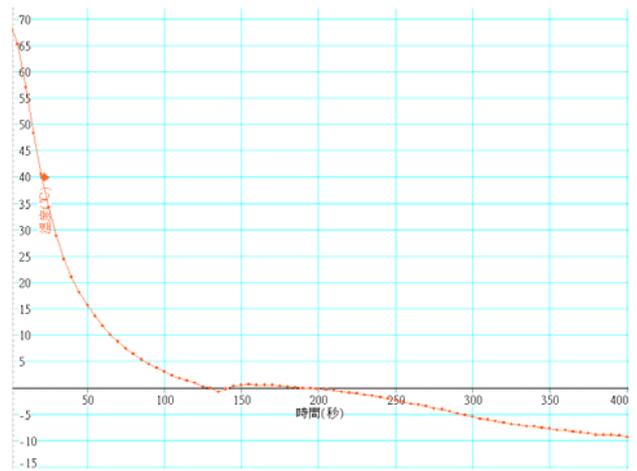
圖十三：初溫 60°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



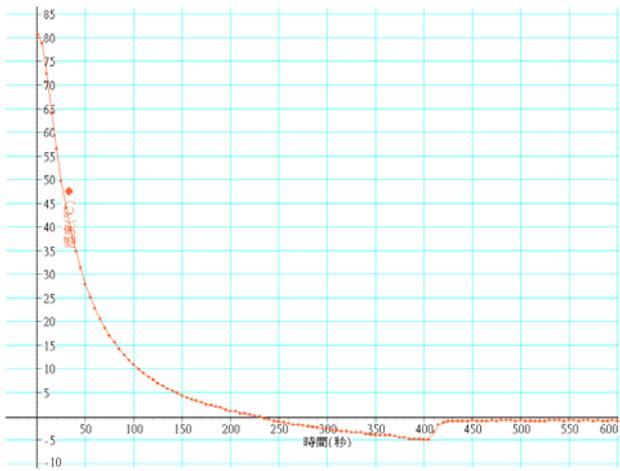
圖十四：初溫 60°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



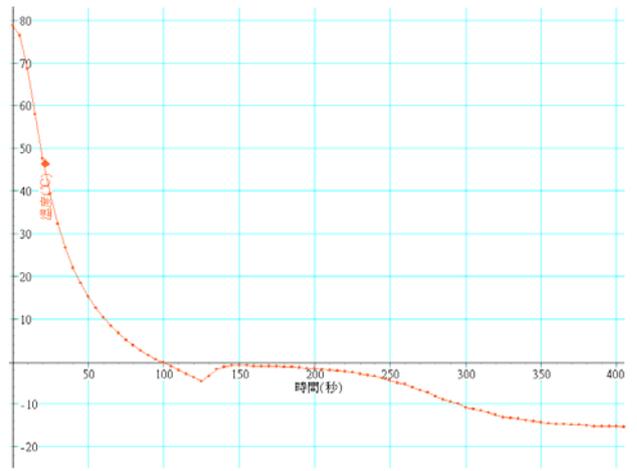
圖十五：初溫 70°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



圖十六：初溫 70°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



圖十七：初溫 70°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



圖十八：初溫 80°C 蒸餾水在不攪拌之冰-鹽-水混合液中的冷卻情形



照片六：實驗裝置實物

評語

040201 神秘的水結晶~溫度對水結晶影響之研究

利用溶液依數性的概念，在液相溫度(60°C - 30°C)與外面冷卻槽(17°C - 19°C)，探測純水液相，成為晶冰相，結晶相利用的“曝光度”來探討結晶的品質和溫差平衡的關係，雖然數據的解釋只有些定性的趨向，但團隊合作，以高中生的能力、發揮了團隊的精神，以時間換取空間的苦瓜精神，推薦為團隊獎！