

物理科

科別：物理科

組別：國中組

作品名稱：過冷不結冰的水

關鍵詞：過冷、結晶核

編號：030103

學校名稱：

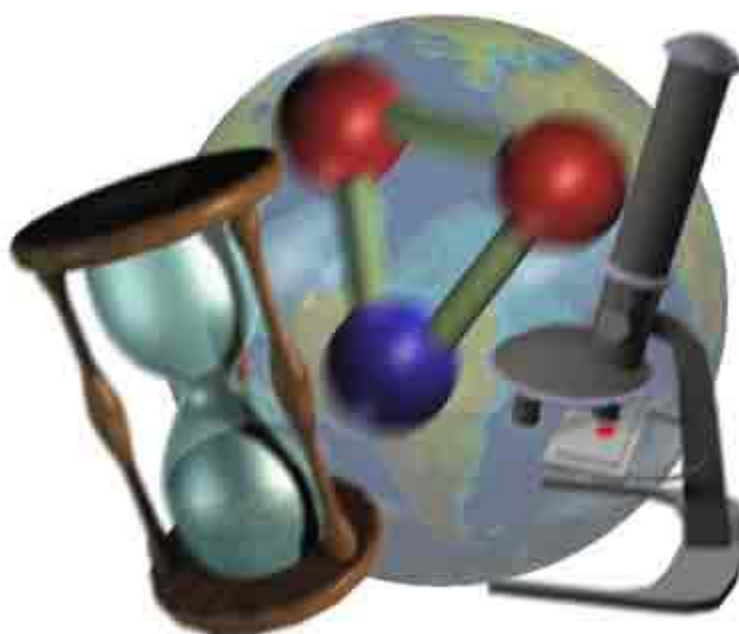
台北縣立中平國民中學

作者姓名：

吳丰、謝志宏、謝玟伶

指導老師：

林劍池、黃淑美



## 摘要

本實驗在家裡的冰箱冷凍庫進行，以電子式溫度計紀錄水過冷的現象及結冰瞬間放熱使溫度竄升的現象。研究的第一階段在尋找影響過冷效果的變因。第二階段挑戰最低溫。第三階段在尋找觸發結冰的方法，希望能提供人造雨更環保有效的方法，同時也希望研究結果能作為國中理化的參考資料。

過冷現象並不穩定，我們在各種因素中摸索，以很多的數據來作為統計上的比較，在掌握到接觸面性質、水質、水量及形狀等重要因素之後，我們測得過冷水的溫度一次一次地創新低，曾經測到-20.3 的水，成功率也提升到 90%以上。探討觸發結冰的方法中，原本期望能「喊水結凍」但是失敗了，但在電火花及化學藥品的觸發方面我們卻有非常重大發現。

## 壹、研究動機

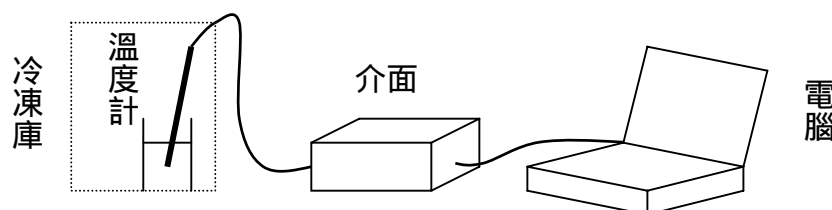
一次偶然的發現，放在冰箱冷凍庫中許久的杯水居然未結冰，用手指輕彈後卻迅速的結冰。結冰過程就像蜘蛛網般蔓延開來，馬上整杯杯水就變成了冰。這種現象和我們國中理化課本第一章水的冰點、第五章溫度的變化所教的不太一樣。因而引發了我們研究的興趣：想知道為何水已超過冰點還不會結冰、最低溫又能到幾度，還有哪些因素會影響水的結冰 等。我們便著手開始實驗。

## 貳、研究目的

- 一、探討影響水過冷而不結冰的因素
- 二、挑戰過冷水最低溫的極限
- 三、研究使過冷水觸發結冰的方法，並分析可能的原理
- 四、尋找人造雨的有效環保做法
- 五、了解水在放熱過程中溫度與狀態的真實變化

## 參、研究設備及器材

- 一、測溫度的裝置：電子式溫度計、介面、數據處理軟體、電腦。



圖(一) 測量溫度基本裝置

- 二、各種容器：5mL 滴瓶、20mL 滴瓶、玻璃燒杯、優酪乳杯、酷樂杯、240mL 塑膠杯等。
- 三、各種水：活性炭過濾水、自來水、礦泉水、蒸餾水、熱水瓶煮過的水、杯水等
- 四、觸發裝置：小號、長笛、擴音器、電腦聲音處理軟體、滅蚊拍、行動電話
- 五、粉末及藥品：粉筆灰、碳粉、細鹽、熟石灰、硫粉、大理石粉、KCl、KBr、KI、

CuSO<sub>4</sub>、NaOH、KOH、MnO<sub>2</sub>、Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、BaCl<sub>2</sub>

六、其他：PTFE 水電防漏膠帶、保鮮膜、冰箱、天平、酒精溫度計、燒杯、塑膠滴管、蠟燭、試管架、顯微鏡

## 肆、研究過程及結果

### 一、測量水過冷的成功率

- (一) 想法：試試看是不是每一次水都會過冷不結冰。
- (二) 步驟：將 10 杯 240mL 未開封的杯水編號後放入冰箱冷凍庫，紀錄位置。每隔 20 分鐘打開冰箱門觀察結冰情形。退冰之後重複操作。

(三) 結果：

1. 杯水在冷凍庫中的位置如圖(二)

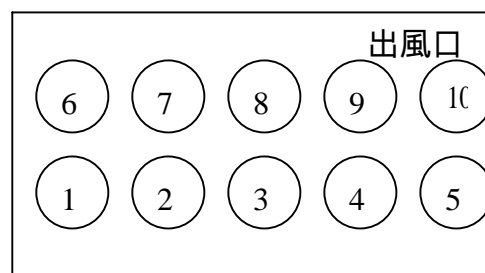


圖 (二)

2. 結冰情形如表(一)：

第一次

時間(分)	20	40	60	80	100	120	140
已結冰編號	X	X	X	5 9 10	3 4 6 7	8	1 2

第二次

時間(分)	20	40	60	80	100	120	140
已結冰編號	X	X	X	3 4 5 7 9 10	2 8	6	1

第三次

時間(分)	20	40	60	80	100	120	140
已結冰編號	X	X	X	1 2 3 4 5 8 9 10	7	6	

表(一) 測試過冷的成功率

3. 在出風口附近的水比較早結冰，可見冷空氣直接吹比較容易結冰。
4. 打開冰箱後杯子外壁會起霧，擦掉才看得清楚。有些水可能是在擦的時候結冰的。
5. 水結冰過久體積膨脹把塑膠杯脹得變形，變形後的塑膠杯解凍後再作，通常都失敗。

### 二、探討影響過冷不結冰的因素

- (一) 比較容器的影響

1. 想法：試試各種容器過冷不結冰的效果如何。以電子式溫度計看出結冰過程溫度的變化。

2. 步驟：

(1) 分別以 5mL PE 點滴瓶、20mL PE 點滴瓶、50mL 玻璃燒杯、燻過蠟的 50mL 玻璃燒杯、125mL 優酪乳杯、700mL 塑膠杯、240mL 塑膠杯裝水進行以下實驗。



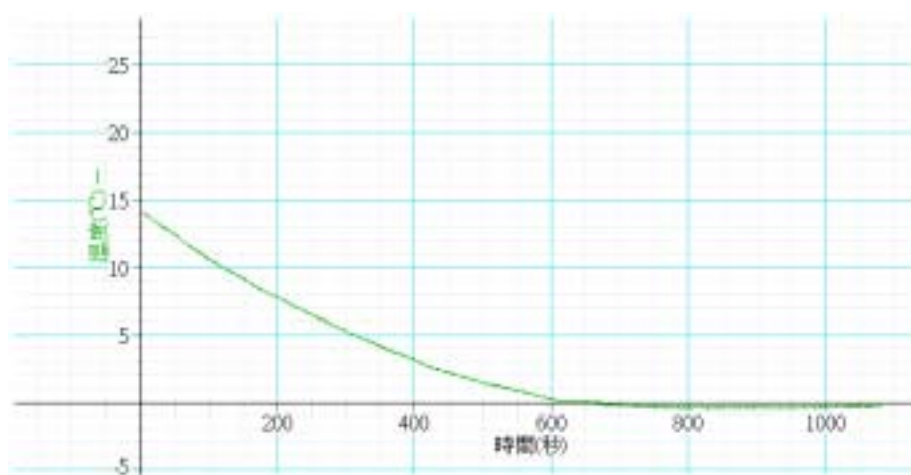
照片(一) 比較各種容器效果

(2) 將容器裝水，插入溫度計，放入冰箱冷凍庫，以電子式溫度計紀錄溫度並即時以圖形顯示於電腦螢幕上。

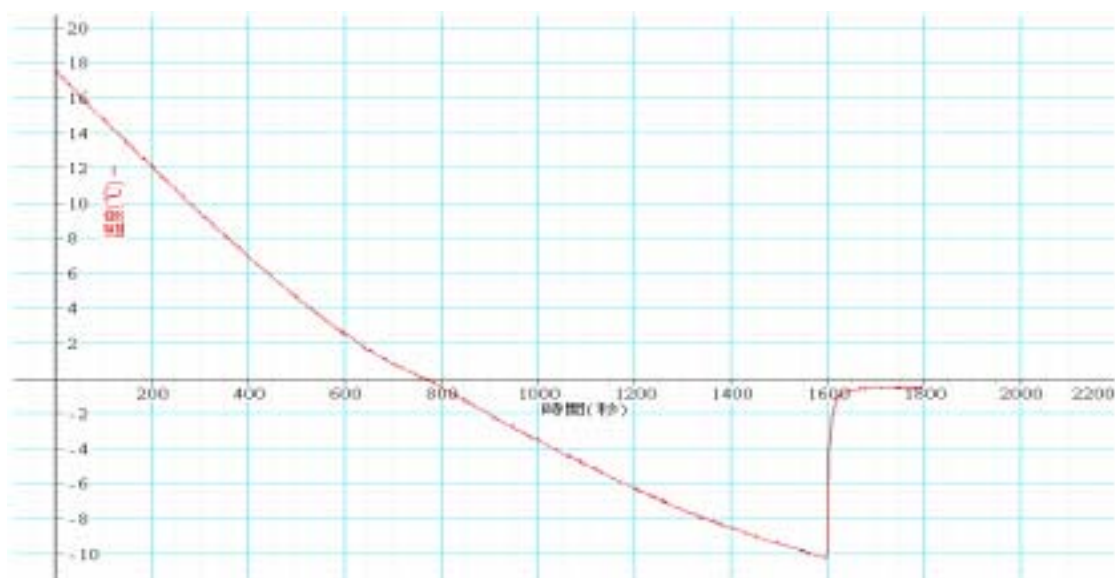
(3) 紀錄每一次結冰前的最低溫。

3. 結果：

(1) 圖形顯示，到了 0 仍然繼續下降就表示已經成了過冷水，過冷水的溫度如果突然竄升就表示瞬間結冰而且放出熱量，使整個容器內的水(和冰)溫度升高。如圖(四)



圖(三) 過冷失敗



圖(四) 過冷成功

(2) 測量結果統計如下表(二)其中 5mL 點滴瓶的過冷效果最好。

容器種類	50mL 玻璃杯 燻臘	200mL 紙杯	優酪乳 杯	5mL 點滴瓶	240mL 塑膠杯	700mL 塑膠杯 隔絕	500mL 玻璃杯 隔絕	240mL 塑膠杯 隔絕
最低溫平 均值( )	-0.5	-0.6	-0.4	-5.2	-0.7	-1.9	-1.0	-1.3

表(二) 以各種容器裝水比較過冷效果

## (二) 比較將溫度計以各種 PTFE ( 防漏膠帶 ) 包紮的影響

- 想法：觀察到很多過冷失敗時冰的晶體像是從溫度計長出來的，如照片(二)，所以溫度計的表面可能也會影響結冰。



照片(二) 冰的晶體從溫度計表面開始長出

## 2. 步驟：

- (1) 將溫度計前端分別用不同廠牌的 PTFE 防漏膠帶包紮。
- (2) 將溫度計垂直固定在試管架上，使溫度計下端恰好插入點滴瓶。
- (3) 將整個裝置放進冷凍庫測量溫度，紀錄過冷水的最低溫。

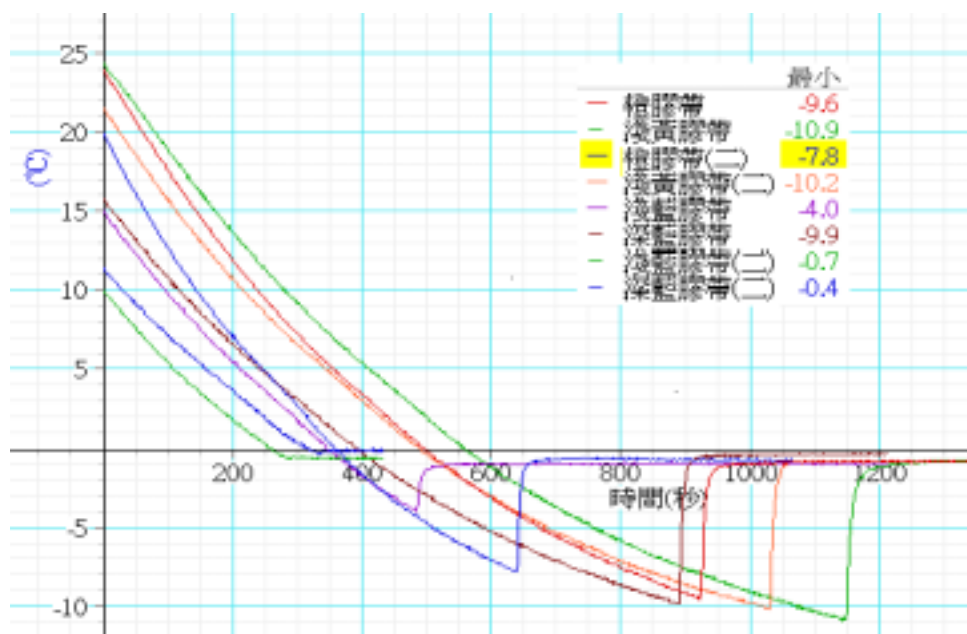


照片(三) 以防漏膠帶包紮溫度計測量裝置

- (4) 以顯微鏡觀察比較防漏膠帶表面粗糙程度

## 3. 結果：

- (1) 如圖(五)所示，過冷水的溫度果然降低了許多。其中包紮淺藍色和深藍色廠牌膠帶的溫度計失敗。
- (2) 淺藍色廠牌膠帶重複試驗很多次，失敗率很高。其他廠牌成功率都明顯較高。

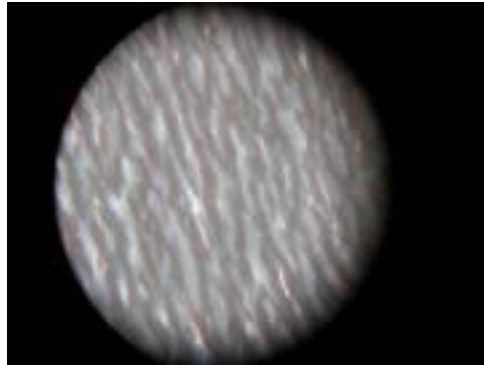


圖(五) 各種防漏膠帶的過冷效果比較

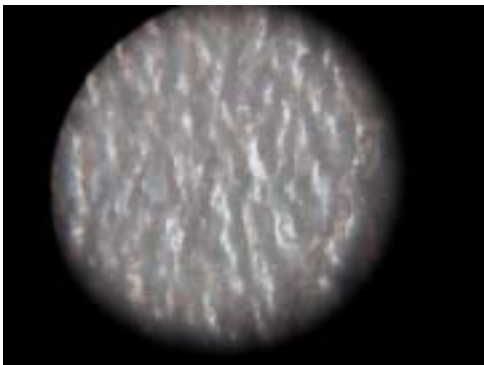
- (3) 各種防漏膠帶以顯微鏡觀察如照片(四)所示，其中淺藍色廠牌膠帶的表面有

很多不規則突出顆粒狀，像乾掉的膠水一樣的東西。其他的膠帶表面雖然也不平整但顆粒狀比較平緩。

(4) 比較過冷成功率可知表面較粗糙的防漏膠帶較容易失敗。



淺黃色



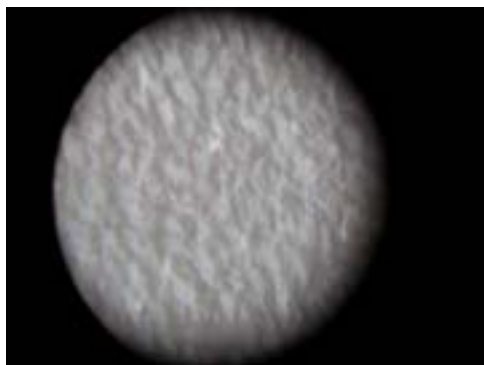
淺藍色



深藍色



黃色



橙色

照片(四) 各種防漏膠帶及其表面(放大 400 倍)

### (三) 比較水量的影響

1. 想法：一些氣象學的資料提到大氣中有許多過冷水滴，溫度可以降到零下四十℃，我們想水量的多少可能也會影響過冷水的最低溫。
2. 步驟：
  - (1) 以點滴瓶分別裝 5.00g、4.00g、3.00g、2.00g、1.00g、0.80g、0.60g、0.40g、0.20g 的蒸餾水各 6 瓶。



照片(五) 不同的水量放在點滴瓶中

- (2) 溫度計以防漏膠帶包紮垂直固定在試管架上，使下端插入點滴瓶。
- (3) 將整個裝置放進冷凍庫測量溫度，紀錄過冷水的最低溫。
- (4) 比較過冷水的最低溫與質量的關係。

### 3. 結果：

- (1) 如表(三)，同樣溫度時過冷最低溫不大穩定，時高時低。
- (2) 2.00g 至 5.00g 之間水的最低溫平均值沒有太大的差別。
- (3) 2.00g 以下，質量愈少最低溫愈低，但是 0.40g 和 0.20g 的水卻反常。

水的質量與過冷最低溫關係 (溫度單位 )									
質量(g)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
1	-5.3	-3.5	-6.7	-12.9	-4.6	-7.2	-9.3	-2.7	-2.7
2	-1.5	-11.0	-13.1	-9.3	-11.4	-12.4	-6.4	-9.2	-10.1
3	-7.0	-3.7	-11.2	-3.9	-7.3	-9.8	-9.8	-10.3	-9.8
4	失敗	-5.9	-10.1	-7.1	-7.8	-3.0	-2.1	-3.0	-5.7
5	-6.4	-1.2	-12.0	-8.3	-10.7	-3.1	-2.9	-12.3	-7.4
6	-1.5	-4.2	失敗	-9.4	-9.3	-2.4	-12.2	-9.3	-6.3
7				-9.3	-7.8	-6.2	失敗	-2.6	-1.6
8				-10.7	-10.7	-4.0	-4.5	-5.2	-8.4
9				-7.8	-9.3	-2.9	-1.2	-2.9	-7.3
10				-12.3	-8.0		失敗		-2.3
11				-8.1	-8.9		失敗		-4.2
12				-11.7	-3.4				-5.4
平均	-4.3	-4.9	-10.6	-9.2	-8.3	-5.7	-6.1	-6.4	-5.9

表(三) 以不同質量的水測量過冷的最低溫

- (4) 觀察發現質量若小於 0.60g，水無法蓋滿瓶底，而成彎月型。
- (5) 我們推測不規則形狀會使水的表面有薄有厚，薄的部分或許會先結冰。

#### (四) 比較水質的影響

1. 想法：查資料得知水結冰需要冰核，我們想水質是否也會影響過冷的效果。
2. 步驟：
  - (1) 將溫度計用一段防漏膠帶包紮。
  - (2) 分別在點滴瓶中裝進 3mL 蒸餾水、熱水瓶煮過的水、活性炭過濾水、以濾紙過濾的自來水、未過濾的自來水，將裝置放進冷凍庫測量溫度，紀錄過冷水的最低溫。
  - (3) 比較過冷水的最低溫與水質有沒有關係。
3. 結果：
  - (1) 結果如表(四)所示，其中以濾紙過的水和活性炭過濾的水效果最好也最穩定。
  - (2) 同樣的自來水，未經過濾的效果就明顯不穩定(時好時差)，可見使過冷水結冰的冰核(可能是自來水中的懸浮顆粒)比濾紙空隙大，會被濾紙過濾掉。
  - (3) 熱水瓶裡的水效果不穩定，可能是壓出來的熱水含有一些底部的沉澱物，提供了結晶核。
  - (4) 蒸餾水的效果不大好，可能是蒸餾時有一些雜質溶解進去了。

水質種類	自來水過濾	自來水未過濾	活性炭過濾水	蒸餾水	熱水瓶的水
1	-12.9	-10.7	-9.0	-2.5	-1.0
2	-9.3	-3.1	-9.8	-2.9	失敗
3	-9.3	-9.5	-9.6	-2.8	-8.9
4	-3.4	-3.4	-10.8	-3.0	-1.0
5	-9.3	失敗	-7.8	-5.7	-7.5
平均	-8.8	-6.7	-9.4	-3.4	-4.6

表(四) 以不同種類的水測量過冷的最低溫

#### 三、挑戰過冷不結冰的最低溫極限

- (一) 想法：雖然我們沒有測得水量愈少溫度愈低的關係，但是考慮大氣中過冷水滴的形狀，於是我們決定測量一滴水的最低溫。
- (二) 步驟：
  1. 以防漏膠帶包紮溫度計，倒過來垂直固定在試管架上。

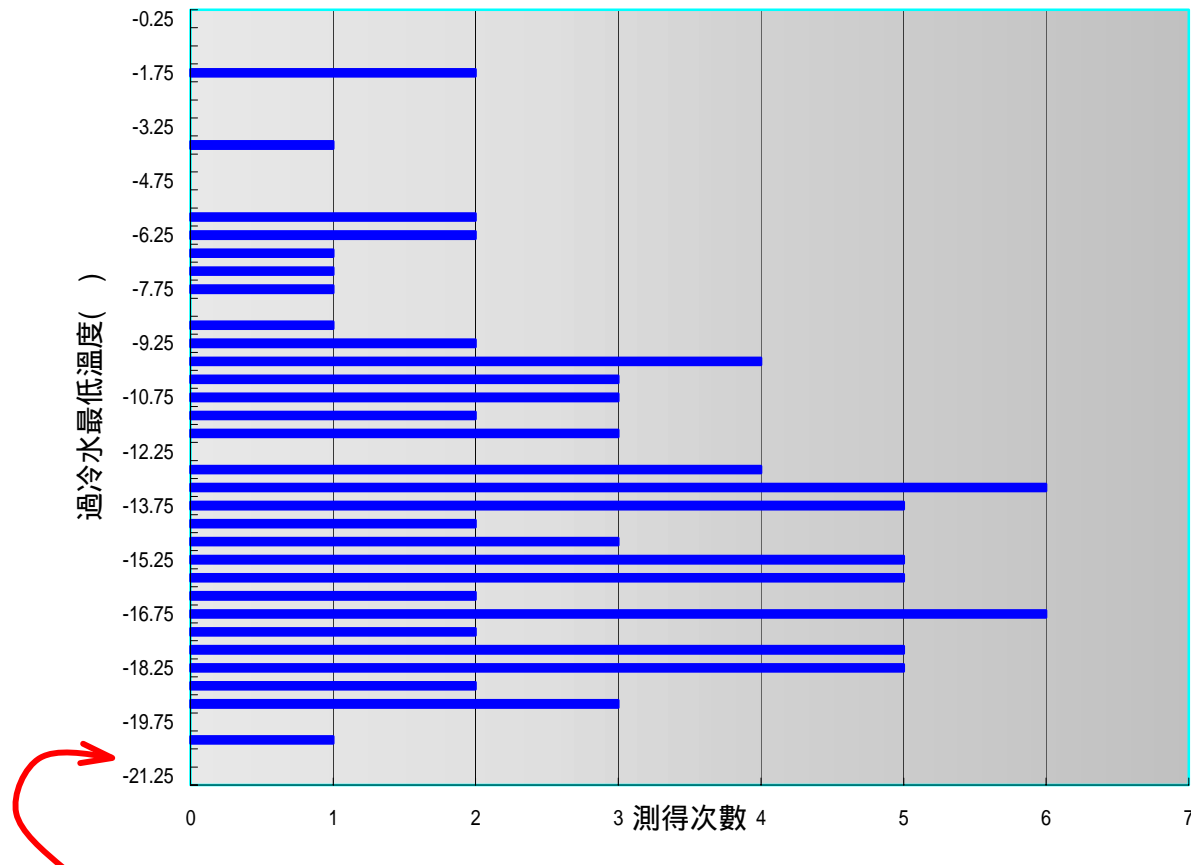
以 PTFE 防漏膠帶包紮的溫度計



照片(六) 一滴水滴在包了防漏膠帶的溫度計上

2. 吸取凝結在熱水瓶內蓋上的一滴水，滴在溫度計上端。如照片(六)

3. 將整個裝置放進冷凍庫(擋住出風口)測量溫度，紀錄過冷水的最低溫。
  4. 重複操作測量最低溫。
- (三) 結果：實驗結果如表(五)，共測量 84 次，最低溫零下 20.3℃，一半以上低於零下 13.75℃。沒有失敗。



最低溫 -20.3

表(五) 挑戰過冷水的最低溫度統計表

#### 四、研究如何觸發結冰

##### (一) 研究能否「喊水結凍」

1. 想法：用手指輕彈可以讓水震動而結冰，我們想假如能夠「喊水結凍」也就是用聲波震動，那真是太神氣了。
2. 步驟：
  - (1) 將點滴瓶裝水放入冷凍庫中，當溫度降到約零下 4℃ 進行以下時驗。
  - (2) 在冰箱外大聲喊叫
  - (3) 打開冷凍庫的門大聲喊叫。
  - (4) 在冰箱外吹小喇叭，並且嘗試各種音調。
  - (5) 在冰箱外吹長笛，並且嘗試各種音調。
  - (6) 長笛吹 La 的音，錄音後在電腦裡用錄音程式改變音調，從很低的音到非常高的音總共約 10 個八度音。
  - (7) 將耳機放進冷凍庫，從電腦控制發音，並嘗試各種音調。
  - (8) 將擴音器放進冷凍庫，從電腦控制發音，並嘗試各種音調。照片(七)

3. 結果：以上方法都沒辦法讓過冷水結冰，真是太不給面子了。



照片(七) 擴音器放進冷凍庫中

## (二) 研究「閃電打雷」的影響

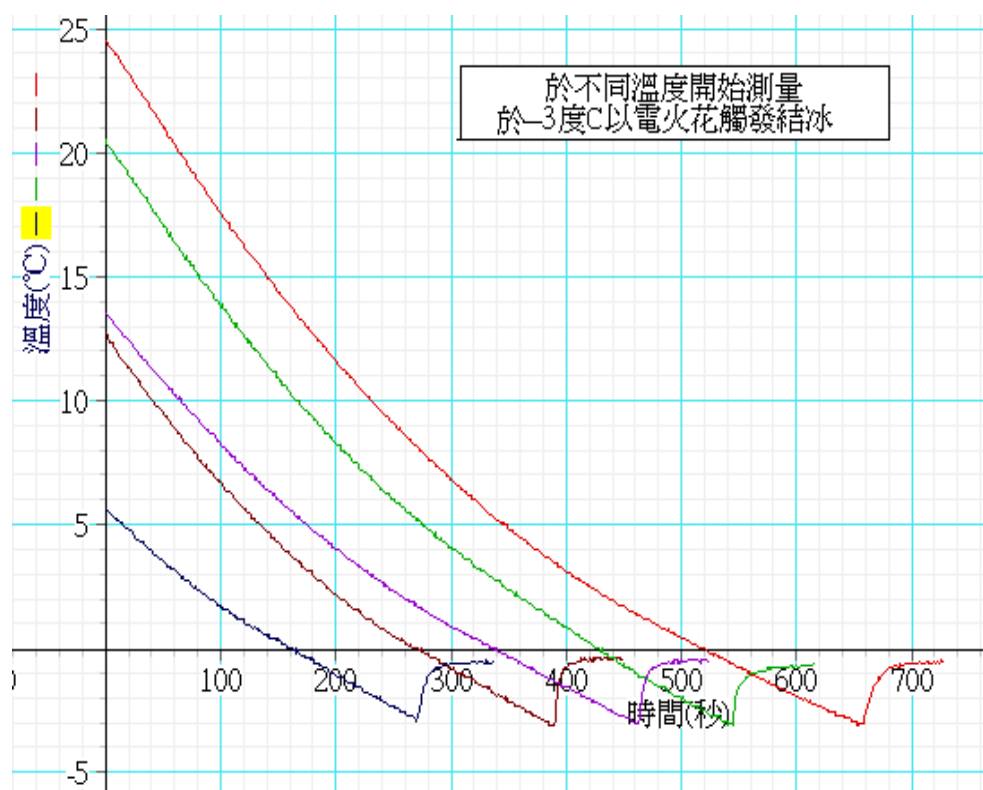
1. 想法：有一次看卡通影片，有一幕是閃電打雷時，閃電將烏雲拉開一條拉鍊，於是烏雲裡的水就倒出來-下雨了。所以我們就想在瓶子裡製造一個小型的雷電看會不會讓過冷水結冰。
2. 步驟：
  - (1) 把滅蚊拍的內、外層金屬網各接一條電線出來。
  - (2) 將兩條電線另一端的絕緣皮剝掉約半公分，只留一條細銅絲，其他的銅絲都剪掉。小心地插進點滴瓶裡面，讓兩條細銅絲的尖端相距約 3mm。
  - (3) 小心的在點滴瓶裡加水，不要弄濕細銅絲，插上溫度計，放進冷凍庫測量溫度。
  - (4) 當溫度降到零下 3 時按下滅蚊拍的按鈕，使銅絲間產生火花和啪的聲音，看能不能使水結冰。照片(八)



照片(八) 利用電蚊拍製造出小型雷電

### 3. 結果：

(1) 測量 5 次都成功，按下開關很快溫度就竄高，結冰了。圖(六)



圖(六) 電火花觸發結冰

(2) 火花放電可能使空氣瞬間膨脹，使水震動，也可能使空氣中的氮和氧形成化合物。

### (三) 研究「來電的感覺」的影響

1. 想法：一篇研究中提到，天空中的過冷水滴結成冰晶可能和帶電有關，那麼上一個研究只按下開關而不要使火花放電能不能也觸發結冰呢？

#### 2. 步驟：

(1) 同上階段改裝滅蚊拍的裝置，但是把點滴瓶內兩條細銅絲的距離加大，使得按下開關也不會放電。

(2) 等溫度降到零下 3 時按下開關，觀察能否觸發結冰。

(3) 把其中一條電線拉離開點滴瓶，只留一條細銅絲在裡面，重複(2)的操作。

(4) 換成另一條電線的細銅絲在點滴瓶裡面，重複(2)的操作。

#### 3. 結果：

(1) 兩電極都在瓶子內但是不放電：測量 6 次，每次都成功。

(2) 只留紅色電線的電極在瓶子內：測量 11 次，10 次成功。

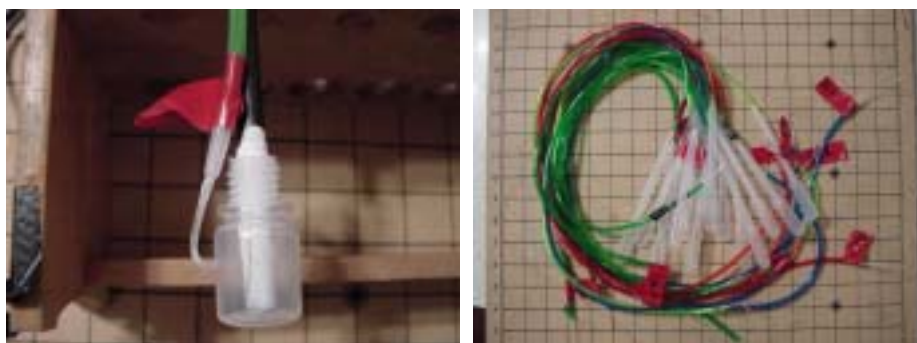
(3) 只留灰色電線的電極在瓶子內：測量 4 次，4 次都成功。

(4) 可見只要讓過冷水有「來電的感覺」不用閃電打雷也能觸發結冰。

(5) 可能是細銅絲帶電時，產生靜電作用，使水分子做規則的排列，導致結冰。

#### (四) 研究「噴灑種子」的影響

- 想法：人造雨是在雲層上灑乾冰和碘化銀，使溫度降低並且提供冰核，或許在大氣中和在液態水中的情形有些相似的地方。假如能夠研究出一些環保、經濟又有效的方法豈不就更棒。所以我們在過冷水裡灑下不同的粉末，看能不能觸發結冰。
- 步驟：
  - (1) 觀察以下粉末及藥品的特性：粉筆灰、碳粉、細鹽、熟石灰、硫粉、大理石粉、 $\text{KCl}$ 、 $\text{KBr}$ 、 $\text{KI}$ 、 $\text{CuSO}_4$ 、 $\text{NaOH}$ 、 $\text{KOH}$ 、 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{BaCl}_2$ 。
  - (2) 為了不震動到過冷水，將 3mL 的塑膠滴管改裝成噴管。如照片(九)



照片(九) 3mL 的塑膠滴管改裝成噴管

- (3) 將極少量的粉末放進噴管前端轉彎的細管中，連同溫度計插進裝有 3mL 水的點滴瓶中。(不可讓藥品沾到水)
- (4) 放進冷凍庫，噴管的擠壓端留在冰箱外。
- (5) 當溫度降到零下 3℃ 時按下噴管的擠壓端將粉末噴進過冷水中，看能否觸發結冰。
- (6) 每一種粉末使用一條噴管，重複以上操作。
- 結果：
  - (1) 如表(六)。能觸發結冰的粉末，擠壓噴管不到 2 秒鐘就看到溫度迅速飆高迅速結冰。否則溫度繼續下降。(詳見討論二)

粉末種類	粒狀	投入水中的情形			噴入過冷水的變化
		溶解性	熱量變化	酸鹼性	
粉筆灰	粉狀	不溶	X	中	迅速結冰
碳粉	粉狀	不溶	X	中	迅速結冰
硫粉	粉狀	不溶	X	中	溫度不變
大理石粉	粉狀	不溶	X	中	迅速結冰
$\text{MnO}_2$	粉狀	不溶	X	中	迅速結冰
熟石灰	粉狀	難溶	放熱	鹼	迅速結冰
$\text{NaOH}$	小圓粒	可溶	放熱	鹼	溫度不變
$\text{KOH}$	碎屑	可溶	放熱	鹼	溫度不變
細鹽	晶體	可溶	吸熱	中	迅速結冰

KCl	晶體	可溶	吸熱	中	迅速結冰
KBr	晶體	可溶	吸熱	中	溫度不變
KI	晶體	可溶	吸熱	中	迅速結冰
BaCl <sub>2</sub>	晶體	可溶	放熱	中	迅速結冰
CuSO <sub>4</sub>	晶體	可溶	吸熱	酸	迅速結冰
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	晶體	可溶	吸熱	中	迅速結冰
空白實驗	噴管內不放粉末，只擠入空氣				溫度不變

表(六) 各種粉末的特性與噴入過冷水中的反應

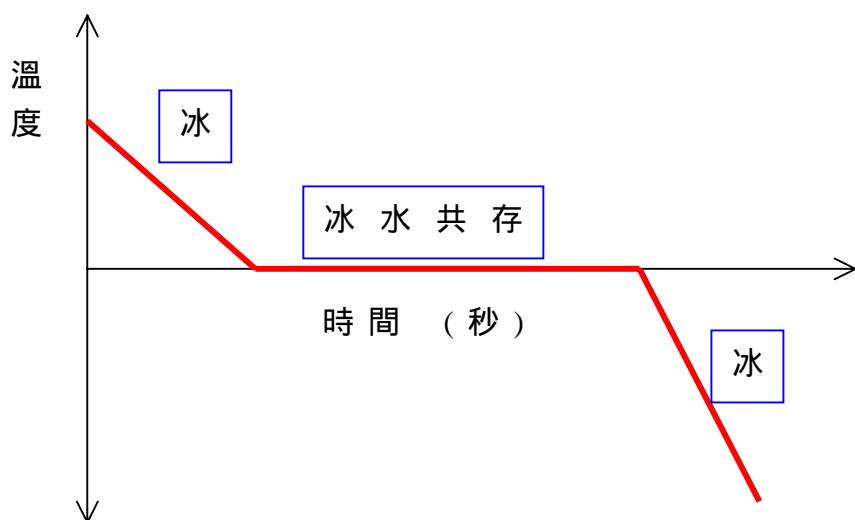
### (五) 研究電磁波的影響

1. 想法：既然靜電可以觸發結冰，試試看電磁波能不能產生作用。
2. 步驟：
  - (1) 當溫度降到約零下 3 時，很快將手機放進冷凍庫，由外面打電話進去。
  - (2) 當溫度降到約零下 3 時，將按好號碼的手機很快的放進冷凍庫，同時按啟動，讓手機由冷凍庫中打電話出來。
  - (3) 重複以上操作 6 次，換不同廠牌的手機試試，觀察能否觸發結冰。
3. 結果：只有一次成功，其他都失敗，可見手機的電磁波不會使過冷水觸發結冰，成功的那一次有可能是巧合，或是不小心碰撞造成的。

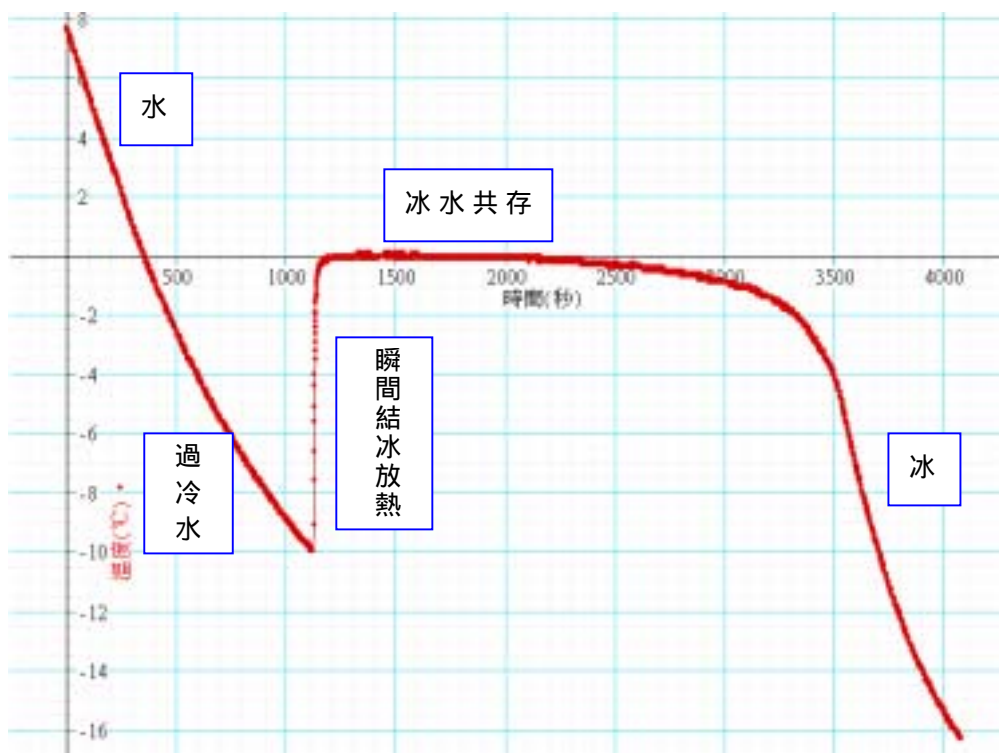
## 伍、討論

### 一、水的理想放熱過程與真實放熱過程的比較。

- (一) 課堂上提到水的三態變化都只提到水放熱過程溫度降到 0 就開始結冰，以一條折線表示。如圖(七)。但是我們研究的結果卻發現實際的情形並非那麼單純。如圖(八)。水不但會過冷不結冰，甚至還可以降到零下 20 度以下。



圖(七) 水在放熱過程中理想的溫度變化



圖(八) 3mL 的水在-22 的冷凍庫中放熱過程的真實溫度變化

- (二) 水(冰)在冷凍庫裡溫度下降的趨勢並非直線，而是愈降愈緩和，這是因為水和冷凍庫的溫度愈來愈接近，所以放熱愈來愈慢。
  - (三) 水的比熱約為  $1\text{ cal/g}$ ，冰的比熱約為  $0.54\text{ cal/g}$ 。從圖(八)水降溫到過冷水曲線的連續性可判斷，過冷水的比熱與水的比熱一致。
  - (四) 水還沒有完全結成冰溫度就已經開始下降了，這可能是容器內的水溫度不一致，沒有達到熱平衡。
- 二、各種粉末影響過冷水結冰的因素很多，本次實驗主要著重於定性的研究，結果大致分為四項來討論：
- (一) 難溶於水者，除了硫粉以外都能觸發結冰，可能是這些粉末顆粒恰好可以擔任水結冰的冰核。而硫粉可能無法讓水分子吸附。
  - (二) 溶於水且為吸熱反應者，溶解時在局部位置產生吸熱現象，使得該地方的過冷水被吸熱而降溫，有利於結冰。KBr 例外，原因不明。
  - (三) 溶於水且為放熱反應者，溶解時放出的熱，使水溫升高不利於結冰。其中熟石灰難溶且放熱慢，其提供冰核的有利條件比放熱的不利條件強，所以也可以觸發結冰。
  - (四) 酸鹼性似乎與過冷水結冰沒有太大關聯。
- 三、因為電子溫度計本身的誤差，使溫度變化關係圖中水的冰點不一定在 0 如圖(六)，只要把這個差距用來修正測量值就可以知道真正的溫度。我們使用過一般的酒精溫度計作比對，相差不大。
- 四、塑膠杯或塑膠瓶重複使用幾次以後過冷的成功率就明顯降低，包紮在溫度計上的防漏膠帶也有相同的情形。我們推測可能是冰的晶體壓迫塑膠表面的分子使其性質改變，變得更有利於水分子附著結冰。

- 五、剛開始我們使用的容器主要是 240mL 的塑膠水杯，我們從冰晶成長的方向發現，附著在杯壁高出水平面的水可能是結冰的開始，我們認為那裡的水比較薄，比較容易降低溫度而開始結冰。所以後來我們挑戰最低溫時就使用附著力很小的防漏膠帶包紮溫度計，使滴在上面的水滴盡量縮成球形，如照片(六)。在作質量的比較、觸發原因探討等研究時也都使用附著力比較小的 PE 點滴瓶，果然成功率提高很多。
- 六、實驗中偶然發現冷藏室最上層的兩杯相同的水杯，始終維持著一杯冰，一杯水的狀態達二十幾天。測量發現這裡的溫度一直在 0 上下來回改變。溫度超過 0 時冰來不及溶化，溫度低於 0 時水過冷而不結冰，於是形成這種奇觀，真有趣。如照片(十)



照片(十) 一杯水一杯冰在冰箱裡維持了二十幾天

## 陸、結論

- 一、水過冷不結冰的現象很不穩定，很多影響的因素是看不到又很微妙的。經過幾百次實驗測量後，我們終於能掌握到一些要領，成功率提升到 90%以上，最低溫也從不到-1 突破到-20.3。在本實驗中探討出以下影響過冷現象的因素：
- (一) 接觸面的性質：和水接觸的表面附著力愈小效果愈好。試過的材料當中使用 PE 點滴瓶和表面平滑的 PTFE 防漏膠帶包紮溫度計的效果最好。
  - (二) 水量與水表面的形狀：水量愈少，水的形狀愈接近球形成功率愈高，而且能到達的溫度愈低。
  - (三) 水質的影響：水中有沉積物(如熱水瓶的鍋垢)或懸浮顆粒則過冷效果較差也較不穩定。
- 二、在觸發結冰的研究中我們設計了很多方法去試探，從成功率和觸發瞬間的立即反應可以很明確的判斷是否有效。
- (一) 火花放電、靜電感應、碰觸震動都可以有效的觸發結冰。
  - (二) 聲波震動、手機的電磁波無法觸發結冰。
  - (三) 噴灑粉末：(詳見討論(二))
    - 1. 大部分難溶於水的粉末可提供結晶核使過冷水迅速結冰。
    - 2. 溶於水吸熱的粉末可使局部溫度下降，有利於觸發過冷水結冰。
    - 3. 溶於水放熱的粉末不利於觸發結冰。
    - 4. 酸鹼性與觸發結冰無關。

- 三、在噴灑粉末觸發結冰的實驗中，我們試出了一些很環保又經濟的粉末，只要由飛機到雲層上灑下粉筆灰、食鹽、KCl、KI、碳粉(黑煙)等，就可以當做人造雨的種子。
- 四、真實水的放熱過程溫度變化曲線(圖(八))和理想的三折線(圖(七))有很大的不同：
- (一) 水溫降到 0 不一定會結冰，還需要有結晶核才會結冰。
  - (二) 溫度下降的速率和周圍的溫差有關，水溫愈接近環境溫度下降愈緩慢。
  - (三) 容器裡的水溫不一定是處處相同的，溫度計測到的溫度只能代表所在位置的局部溫度。
  - (四) 過冷水的比熱與水的比熱相似，而不與冰的比熱相似。

## 柒、參考資料

### 一、國中理化課本

- (一) 第一冊、第二冊

### 二、網站查的

- (一)<http://www.mrl.itri.org.tw/msl/newsinfo/020328.htm> 以分子動力學計算模擬水結冰過程
- (二)<http://kepu.jsinfo.gov.cn/big5/weather/thunder/tud003.html> 中國科普博覽\_大氣科學館閃電的成因
- (三)<http://www.gdjh.tcc.edu.tw/wcjswebcai/86cai/28/c7-6.htm> 光德國中 人造雨
- (四)[http://210.59.144.155:8080/cgi-bin/webpage?q=%B5%B2%A6B&u=http%3A%2F%2Fjntfs1%\(2Ecns%2Emlc%2Eedu%2Etw%2Fcontent%2F1975%2F00120072%2F0008%2Ehtm&t=tw&f=yahoo.tw](http://210.59.144.155:8080/cgi-bin/webpage?q=%B5%B2%A6B&u=http%3A%2F%2Fjntfs1%(2Ecns%2Emlc%2Eedu%2Etw%2Fcontent%2F1975%2F00120072%2F0008%2Ehtm&t=tw&f=yahoo.tw) 竹南國中 一滴水怎麼結冰

## 評語

本作品以抑制杯水中結晶核成長的方式，來達過水過冷的現象。作品能以不同成核參數如電擊、聲擊等來觀測水過冷現象。作品內容豐富過程嚴謹，並以簡易素材如防漏膠帶等隔絕溫度計與水之作用，消滅因溫度計本身所引發的成核參數，具創新，其創意性佳。