

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 化學科

第一名

030201

『冰清欲結』-探討不同條件溶液結冰時溶質匯聚現象的差異

學校名稱：高雄市立福山國民中學

作者： 國二 洪翌洋 國二 劉宣妤 國二 劉奐均	指導老師： 鄭士鴻
---	------------------

關鍵詞：結冰、溶質、匯聚

得獎感言

冰清欲結-探討不同條件溶液結冰時溶質匯聚現象的差異

做了這一年的科展之後，收穫真的很多。從一開始的選擇題目，針對主題的文獻搜尋，實驗的計畫、操作與改進，到著手寫研究報告，瘋狂的檢查與修改，以及最後海報製作和練習口頭報告，每一步都有許多的辛酸血淚，但每一步都值得珍惜。雖然路很難走，但還是得含淚努力克服萬難，完成艱苦的路程。

當然，其中還是有不少的樂趣，像是做實驗時美麗的錯誤、奇怪但令我們回味再三的玩笑、寫報告時昏天黑地之中享受「完成」的成就感等，這樣的過程也能讓科展之路並不只有「辛苦」二字，而是值得細細品味與享受的。經過了一年的淬鍊，除了學習到許多的理化知識，還培養了正向的科學態度與精神，增進撰寫報告與解決問題的能力，訓練了我們的口條，也讓自己的思路更加活化、邏輯化。

處理「煩人」的數據和圖表，總是令我們感到頭痛不已。我們有好幾次把分析出來的數據弄丟了，或是將修改前後的圖表混淆在一起，也常在製作圖表後卻忘記存檔，努力皆付諸東流。所以我們利用表格管理的方式，讓自己是否完成的項目一目了然，不僅確認自己努力的方向，也較容易掌控時間。

還有，在即將交件的那段時間，也是一大難題。每天早上一睜開眼，第一件事情就是打開電腦修報告，即使出門也不忘帶著紙本報告和筆，走到哪修到哪。那段時間特別常和家人發生爭執，因為父母希望我們多專注於即將到來的段考，而我們則堅持盡我們所能投入於科展報告。經過不斷的討論和妥協，雙方都各退一步，制定了一些時間管理和電腦使用的規定，漸漸解決相關的問題。

最後，要好好感謝認真指導我們、不惜犧牲時間和精力的老師，他帶給我們許多不同於其他學生的知識、技能和態度；也感謝組員們的盡力投入和付出，以及師長、同學們的鼓勵，讓這條路走得更堅定。



高雄市賽



實驗過程



上台領獎

摘要

我們發現有些水溶液結冰後會推擠溶質到中央匯聚成顏色較深的區域，但有些溶液卻不會，到底是什麼原因造成此現象的差異？於是我們操縱各種變因來觀察它們對溶液結冰時溶質匯聚表現的影響。

實驗發現並非所有的濃度都會匯聚；不同溶質的匯聚情形也不同；溶劑所含雜質越多匯聚效果越差，且結冰後氣泡分布也各有特色；上下等寬的容器呈角錐狀匯聚，下窄上寬的容器則為柱狀匯聚；先結冰的地方會推擠溶質到後結冰的地方且結冰速率越慢匯聚程度越好；最後我們利用保麗龍包覆+重力方向來控制結冰順序使冰晶推擠力達到加倍的效果，再透過自製離子濃度檢測器發現冰塊中溶質匯聚區的濃度並非均勻一致，而是依結冰的順序而有低、中、高的「濃度梯度」現象。

壹、研究動機

在烈日當空的夏天，我們不時地想要來一杯冰涼止渴的飲料，有次因為想快速的把飲料冷卻，便把它們冰入冷凍庫中，後來忘了這件事，取出來時竟已全凝固了！我們發現有些飲料結冰時中間會形成一塊顏色較深的溶質濃縮區塊，有些卻不會，且不同狀況下各種飲料結冰後的溶質濃縮區塊形狀、顏色也不太相同，其中關鍵差異到底在哪裡？為了瞭解是何原因才有以上情況，經詢問師長以及搜尋一些相關的資訊，發現對這種現象的解釋眾說紛紜。因此，我們希望能藉由科學方法，找出不同變因對溶質匯聚有何影響。

貳、研究目的

- 一、觀察溶液結冰後溶質匯聚的狀況，找出成功匯聚的方法。
- 二、探討溶液中溶質匯聚的影響因素：
 - (一)不同溶液濃度、溶質與水質。
 - (二)不同形狀容器所匯聚的差異。
 - (三)不同結冰順序及速率所造成的影響。
- 三、以自製離子濃度檢測器測量不同狀況下匯聚濃度的變化。

參、研究設備及器材

- 一、實驗器材：冰箱、六種不同形狀的容器(容量 250ml 以上)、圓柱狀容器(容量 550ml)、方格板、ImageJ 軟體、珍奶吸管、軟木塞、線鋸、塑膠比色槽(容量 4.5ml)、黑色瓦楞紙、黑色壁報紙、深色塑膠盒(8 cm*8 cm*9.8 cm)、光敏電阻、LED 燈泡、三用電錶、AC 轉 DC 可調變壓器、鱷魚夾電線
- 二、實驗藥品：過錳酸鉀(KMnO_4)、氯化錳($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、硫酸錳($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、氯化鎳($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、硫酸鎳($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、氯化銅($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、硫酸銅($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、氯化亞鈷($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、鐵氰化鉀($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$)、RO 水、礦泉水、自來水、氣泡水

肆、文獻探討

我們查詢相關資料時，發現大多數關於結冰的論文都是針對如何做出透明冰，或是裡面氣泡多寡探討，鮮少有研究溶液結冰時何種溶質會匯聚、如何匯聚以及相關影響因素的探討。

在第 45 屆科展論文『挫冰大不同-探討影響冰晶的因素』探討在水中加入不同種類溶質後對冰塊的外觀及結構的影響，論文注重於加入各種溶質對整體冰塊結構與透明度的影響，但偏觀察沒有量化以及沒有提及同溶質不同濃度的影響，故我們想知道如果可以固定溶質種類、配置不同濃度的溶液結冰後對其溶質匯聚的差異。^(參考資料 2)

而在第 26 屆科展論文『透明中的朦朧-冰中不透明的探討』指出不同來源的水結冰後的氣泡數或分布也不同，這令我們想到：如果以相同溶質不同來源的水配成濃度相同的溶液結冰後，產生的氣泡是否會對溶質匯聚有影響？^(參考資料 1)

另外在第 51 屆科展論文『冰漩渦』中各實驗都以食用色素 0.5 ml 加水 900 ml 觀察其結冰後匯聚狀況與原因探討，但經查詢後我們發現食用色素為各商家以不同配方混出的混合物，我們無法得知是誰有匯聚？誰沒有匯聚？濃度要多少才開始匯聚？濃度過高或過低會如何？故我們將溶質改成用純物質來調配溶液，並設計一套可以明確量化匯聚情況的方法。^(參考資料 3)

伍、研究過程、結果與討論

一、【實驗一】探討不同濃度對相同溶質結冰後的匯聚有什麼影響

(一)研究目的：由事前的試做實驗發現在相同溶質的情況下不是所有的濃度都會有匯聚的現象，我們想知道什麼濃度會開始匯聚？以及高濃度匯聚的比較好還是低濃度匯聚的比較好？

(二)變因

控制變因		操縱變因	應變變因
1.溶質：過錳酸鉀	4.溶液體積：450ml	溶液濃度	不同濃度的溶液是否匯聚以及匯聚程度的差異
2.容器：550ml 的圓柱狀容器	5.冰箱溫度：-15.7°C		
3.溶劑：RO 水	6.結凍時間：15hrs		

1.控制變因

(1)溶質：我們選實驗室易取得且結冰有匯聚現象的有色鹽類過錳酸鉀來做溶質。

(2)容器：為了使結冰過程中溶質能較為一致的被推擠到正中央，我們取上下截面積相同的圓柱狀容器(容量550ml)來做為實驗的標準容器以便觀察。

(3)溶劑：我們取水質狀況穩定且易取得的 RO 水來做溶劑

(4)冰箱溫度：我們把冰箱內的溫度調節器固定到第三段(維持在-15.7°C)(如圖 1)。

(5)結冰時間：為了使溶液能確實的結冰完全，我們固定在下午五點將溶液放入實驗室的冰箱，靜置一晚到隔天早上八點取出(共 15hrs)。



▲圖 1：冰箱內的溫度調節器

2.操縱變因

濃度：我們設定過錳酸鉀的莫耳濃度 0.05M 為最高濃度開始做實驗，並依次對半稀釋，總共取八個層級的濃度去觀察它們結冰時溶質匯聚的差異(依次為莫耳濃度 0.05、0.025、0.0125、0.00625、0.00313、0.00156、0.00078、0.00039M)。

(三)實驗步驟

<p>1.秤量 7.11g 的過錳酸鉀，加水至 900ml 配成 0.05M 的過錳酸鉀水溶液。</p> 	<p>2.取步驟一配成的溶液依次加水稀釋成不同濃度的過錳酸鉀水溶液。</p> 	<p>3.將不同濃度的溶液分別裝入 550ml 的圓柱狀容器中並蓋上蓋子，貼標籤。</p> 
<p>4.將所有濃度的過錳酸鉀水溶液放入冰箱中，靜置一晚等待其完全結冰。</p> 	<p>5.隔天將冰塊從容器中取出，放置於方格板前固定位置、固定距離後拍照並觀察不同濃度對相同溶質結冰後的匯聚有什麼影響。</p> 	

(四)實驗結果

1.不同濃度結冰後的匯聚差異：

匯聚狀況				
濃度	0.05M	0.025M	0.0125M	0.00625M
匯聚狀況				
濃度	0.00313M	0.00156M	0.00078M	0.00039M

2.由實驗結果發現**並非所有的濃度結冰時都有溶質匯聚的現象**：

當過錳酸鉀溶液的濃度高於 0.00313M 時，我們觀察到各溶液結冰後溶質仍然佈滿整個冰塊，沒有看到溶質匯聚的現象，從濃度 0.00313M 時開始出現匯聚、有透明冰的現象，且溶液濃度越低，其溶質匯聚現象越明顯。

3.我們發現溶液濃度越低，結冰後溶質匯聚體積越小，且各濃度水溶液雖在液態時顏色深淺不同，但溶質匯聚後所呈現的顏色似乎差不多深，我們猜想**是否不同濃度溶液結冰後溶質往內匯聚的程度與溶質往內壓縮、使濃度提高到某種程度有關**，故我們以**軟體 ImageJ** 輔以**數學計算法**去**估算**不同濃度的溶液冰塊中溶質匯聚後的體積，再與溶質 mole 數相除，得到最終「**匯聚濃度**」的估計值來幫助判斷，研究過程如下：

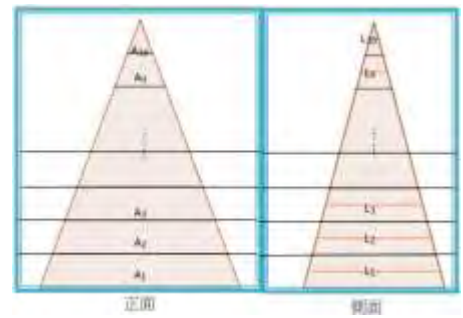
(1)將冰塊從容器中取出，放置於方格板前固定位置、固定距離後將各冰塊正、側面各拍一張。

(2)將正面照片由下往上分割成固定高度(1cm)的十個長方形區域(如圖 2)。

(3)利用 ImageJ 的色塊分析功能選取有顏色的區域後，算出各區域**有溶質匯聚的正面面積 A_x** 。

(4)側面則以軟體對應正面 10 個長方形區域，選取各區中間高度的匯聚區長度即為**各區域的平均寬度 L_x** (如圖 3)。

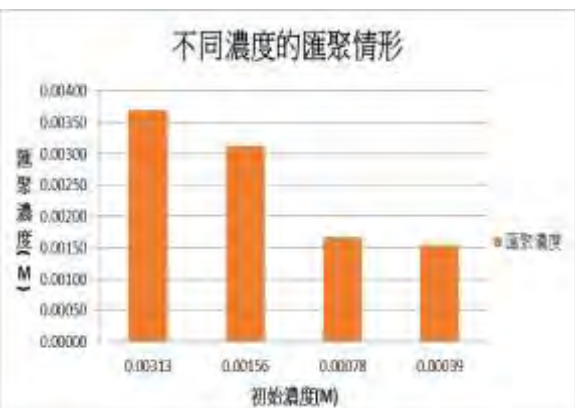
(5)最後以**正面面積(A_x) \times 側面長度(L_x) \div 該區域體積(V_x)**，算出十區域各自體積再加總
 $\rightarrow A_1*L_1+A_2*L_2+\dots+A_9*L_9+A_{10}*L_{10} \div$ 匯聚區塊的總體積。



▲圖 2：正面切割示意图 ▲圖 3：側面切割示意图

4.實驗數據與圖表

初始濃度	0.00313	0.00156	0.00078	0.00039	
各區域體積 (mm ³)	1	63340.6	56194.9	50689.7	25006.6
	2	56908.9	31451.2	25566.2	14722.4
	3	53063.1	28742.4	24862.0	10826.6
	4	49914.2	26078.8	22239.5	11215.2
	5	45636.5	21732.4	20091.2	11575.5
	6	41749.1	19304.8	29843.8	10882.8
	7	30517.0	15414.2	16726.1	10102.8
	8	21670.1	11393.4	11113.5	9813.2
	9	16224.4	8531.1	5764.7	5345.6
	10	1463.3	6761.7	4312.4	4900.5
總體積(L)	0.380487	0.225605	0.211209	0.114391	
匯聚濃度(M)	0.003696	0.003117	0.001665	0.001537	



(五)實驗討論

- 1.初始濃度 0.00313M 與 0.00156M 的溶液(後文稱為「高濃度匯聚組」): 由實驗數據發現雖然 0.00156M 的初始濃度只有 0.00313M 的一半, 但匯聚後的濃度竟然相似! 水在常溫時, 因動能較大, 氫鍵不易穩定存在, 結冰過程中, 水分子之間動能降低, 氫鍵易穩定存在, 讓水分子排列整齊, 成為冰晶。我們推論此過程冰晶會將溶質往未結冰區域推擠(後文稱為「冰晶推擠力」), 未結冰處溶液濃度逐漸提高, 分子間碰撞頻率跟著上升(後文稱為「分子間碰撞力」), 其中冰晶推擠力向內、分子間碰撞力向外, 兩者相抗衡、最終達「臨界濃度值」後溶質便無法推入而停止匯聚, 故當初始濃度高於「臨界濃度值」時, 便觀察不到溶質匯聚的發生。
- 2.初始濃度 0.00078M 與 0.00039M 的溶液(後文稱為「低濃度匯聚組」): 由數據圖我們可發現雖然低濃度組內縮體積較小, 但匯聚濃度仍低於高濃度匯聚組, 因為從 0.00078M 開始, 溶液初始濃度更低, 故結冰時其溶質理論上可以比高濃度組往內匯聚的更多, 使濃度接近『臨界濃度值』才停止, 但這個過程冰晶不但會推擠溶液中的溶質, 也會將水中的氣體一併往內推擠, 造成尚未結冰的區域分子碰撞力與氣體壓力均較大而無法真正匯聚到『臨界濃度值』的程度, 故「低濃度匯聚組」最終匯聚濃度較低且可觀察到明顯的氣泡分布現象。

二、【實驗二】探討相同濃度但不同溶質結冰後的匯聚差異

- (一)研究目的: 由於我們在觀察飲料結冰的現象時發現其所含的溶質皆為很複雜的混合物, 我們無法知道到底是誰有匯聚?誰沒有?所以我們選擇幾種實驗室較易取得的有色鹽類(純物質)來觀察不同種類的溶質在結冰過程中匯聚程度的差異。

(二)變因

控制變因		操縱變因	應變變因
1.濃度: 0.00156M。	4.溶液體積: 450ml	不同種類 的溶質	不同種類溶質在結冰過程中是否匯聚以及匯聚程度的差異
2.容器: 550ml 的圓柱狀容器	5.冰箱溫度: -15.7°C		
3.溶劑: RO 水	6.結凍時間: 15hrs		

1.控制變因

濃度：根據實驗一的結果，我們發現溶液 0.00156M 的匯聚現象較為明顯，所以用其作為研究的標準控制濃度。

2.操縱變因

溶質：我們取實驗室常見的九種有色鹽類來做溶質以觀察它們結冰後匯聚程度的差異。(如圖 4)

(三)實驗步驟










- 1.秤取各種不同的溶質，並分別加入 RO 水至 450ml 配成同為 0.00156M 但不同溶質的水溶液。
- 2.將不同溶質的水溶液分別裝入 550ml 的圓柱狀容器中並蓋上蓋子，貼標籤。
- 3.將所有不同溶質的水溶液放入冰箱中，靜置一晚等待其完全結冰。
- 4.隔天將冰塊從容器中取出，放置於方格板前固定位置、固定距離後拍照並觀察不同水質對相同溶質結冰後的匯聚有什麼影響。



▲圖 4：各種不同的藥品

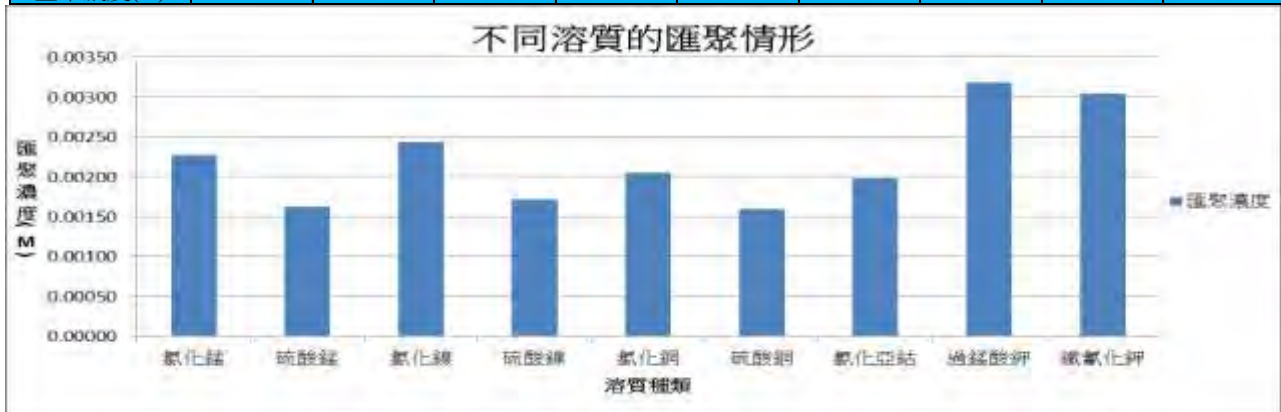
(四)實驗結果

1.不同溶質結冰後的匯聚差異：

溶質	MnCl ₂	MnSO ₄	NiCl ₂	NiSO ₄	CuCl ₂
匯聚狀況					
溶質	CuSO ₄	CoCl ₂	KMnO ₄	K ₃ Fe(CN) ₆	
匯聚狀況					

2. 實驗數據與圖表

溶質種類	氯化錳	硫酸錳	氯化鎳	硫酸鎳	氯化銅	硫酸銅	氯化亞鈷	過錳酸鉀	鐵氰化鉀	
各區域體積 (mm ³)	1	68179.9	107725.3	58324.1	74649.9	85505.2	95401.3	76136.1	49664.9	59738.2
	2	41475.4	65065.5	41540.9	52838.0	60443.7	59997.8	77735.3	41137.8	33661.8
	3	40598.7	54672.4	36528.8	41646.4	40061.4	43039.5	46433.4	36231.3	27341.1
	4	35010.5	45768.5	39122.2	45654.5	36715.4	48144.0	44048.9	30252.5	25782.1
	5	31411.6	42858.6	32812.3	44658.1	35712.7	50494.5	39304.2	20809.5	23929.6
	6	29587.5	37769.9	21328.1	37303.1	29352.5	38149.3	30559.3	15337.2	18568.1
	7	23173.8	26917.6	17091.2	47865.5	27971.6	35680.5	20782.0	13154.2	14685.7
	8	18148.4	25554.7	15125.1	35250.7	19565.5	31892.6	13160.5	7983.1	13124.3
	9	14400.7	18016.6	16566.6	18338.0	6520.2	25324.8	5264.2	4459.7	7339.7
	10	7962.4	7579.0	9953.2	10758.8	2003.2	13848.3	2788.8	2115.5	6782.8
總體積(L)	0.3099488	0.4319280	0.2883925	0.4089629	0.3438513	0.4419726	0.3562127	0.2211456	0.2309535	
匯聚濃度(M)	0.00227	0.00163	0.00244	0.00172	0.00204	0.00159	0.00197	0.00318	0.00304	



(五) 實驗討論

- 結果顯示各溶質在相同濃度下的匯聚程度皆為**原子團顯色的溶質**>**金屬陽離子顯色的溶質**，這是因為溶液放入冷凍庫結冰時，會由外層開始結冰、產生冰晶去往外推擠其他溶質，我們發現在這個過程中，在水中由**結構較大帶電原子團顯色**的過錳酸鉀與鐵氰化鉀匯聚現象較為明顯；相反的在水中解離是由**金屬離子顯色**的錳離子、鎳離子、銅離子、鈷離子受冰晶推擠、匯聚的現象較不明顯。這就是為什麼由較大的葉綠素(C₅₅H₇₂O₅N₄Mg)原子團顯色的綠茶結冰後會發現它有明顯匯聚(如圖 5)，而富含鈣、鎂、鈉、鐵等離子的運動飲料(如圖 6)較沒有溶質匯聚的現象。



▲圖 5：綠茶結冰 ▲圖 6：運動飲料結冰

- 我們發現在**金屬陽離子顯色的溶質**中(MnCl₂、MnSO₄、NiCl₂、NiSO₄、CuCl₂、CuSO₄)，即使是相同種類金屬陽離子也會有匯聚的差異。在**相同金屬陽離子**中皆為**水中解離出三個離子的溶質**>**兩個離子的溶質**(如 MnCl₂ 匯聚程度>MnSO₄)。經過資料查詢與

討論後我們發現這是因為相同濃度的不同溶質在水中會解離出不同離子數量，水中所含溶質粒子數越多，溶液的凝固點會越低，此現象稱為依數性質；由於水在結冰時，凝固點較高的純水會由杯壁開始往內結冰，但內層溶液會因依數性質使凝固點較低，故要降到較低溫度才開始結冰，溶液中所含溶質粒子數越多，溶液的凝固點會越低，整體需降溫至該凝固點時間會越久，此過程一直有純水由外層一直往內逐漸結冰而使溶質匯聚更集中，導致在**相同金屬陽離子的狀況下，在水中解離出三個離子的溶質匯聚程度皆大於兩個離子溶質的匯聚程度。**($\text{MnCl}_2 > \text{MnSO}_4$, $\text{NiCl}_2 > \text{NiSO}_4$, $\text{CuCl}_2 > \text{CuSO}_4$)。

三、【實驗三】探討不同水質的溶劑對結冰後溶質匯聚有什麼影響

(一)研究目的：我們發現用相同的飲料加入不同來源的水後結冰的匯聚情況不大相同，故本實驗探討不同水質對匯聚現象的影響。

(二)變因

控制變因		操縱變因	應變變因
1.濃度：0.00156M。	4.溶液體積：450ml	不同水質	以不同水質配相同濃度的溶液其溶質在結冰過程中是否匯聚以及匯聚程度的差異
2.溶質：過錳酸鉀	5.冰箱溫度：-15.7°C		
3.容器：550ml 圓柱狀容器	6.結凍時間：15hrs		

1.控制變因

(1)溶質：根據實驗二的結果，我們發現過錳酸鉀水溶液的匯聚較好且顏色明顯，故以其作為後續研究的標準控制溶質。

(2)濃度：根據實驗一的結果，我們發現溶液 0.00156M 的匯聚現象較為明顯，所以用其作為研究的標準控制濃度。

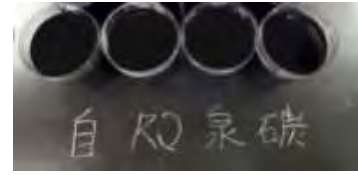
2.操縱變因—不同水質：我們分別選用(1)學校飲水機中過濾煮沸過的 RO 水、(2)市售礦泉水、(3)一般自來水及(4)自製氣泡水(註：不選用市售汽水的原因是因為其成分過於複雜，無法判定是哪個因素造成匯聚程度的差異)。



▲圖 7：各種不同溶劑

(三)實驗步驟

- 1.秤四份 0.11g 過錳酸鉀，分別加入 RO 水、礦泉水、自來水與碳酸水至 450ml 配成同為 0.00156M 但不同水質的過錳酸鉀水溶液。



▲圖 8：不同溶劑的過錳酸鉀水溶液

- 2.將不同水質的水溶液分別裝入 550ml 的圓柱狀容器中並蓋上蓋子，貼標籤。
- 3.將所有不同水質的過錳酸鉀水溶液放入冰箱中，靜置一晚等待其完全結冰。
- 4.隔天將冰塊從容器中取出，放置於方格板前固定位置、固定距離後拍照並觀察不同水質對相同溶質結冰後的匯聚有什麼影響。

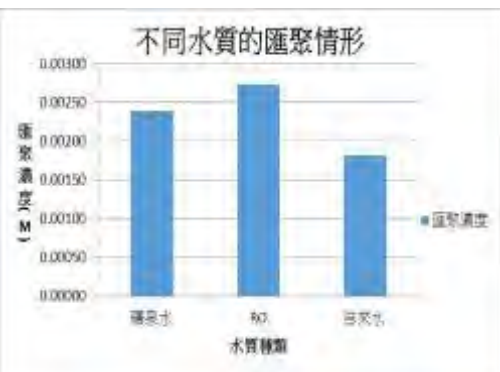
(四)實驗結果

- 1.不同水質結冰後的匯聚差異：

溶劑	RO 水	礦泉水	自來水	氣泡水
匯聚狀況				

2.實驗數據與圖表

水質種類	RO水	礦泉水	自來水	
各區域體積 (mm ³)	1	48687.6	47014.2	80985.4
	2	45860.6	35604.4	43200.7
	3	30709.0	31345.0	52391.0
	4	26877.9	31498.5	48112.3
	5	22357.0	28308.2	35514.3
	6	27785.4	34901.8	35655.6
	7	25507.1	34060.7	36893.6
	8	19077.0	29932.9	28247.6
	9	7068.6	14020.5	17203.5
	10	3307.6	6723.3	8685.3
總體積(L)	0.2572376	0.2934094	0.3868894	
匯聚濃度(M)	0.00273	0.00240	0.00182	



(五)實驗討論

- 1.由結果得知同濃度下，大部分溶液結冰時都有溶質匯聚的現象，只是在結冰後表現出來的匯聚現象略有差異：

- (1)在四種水質當中以 RO 匯聚最明顯、礦泉水次之，自來水匯聚區塊為此三種中最大，顏色也最淡，氣泡水則無明顯匯聚，內部充斥氣泡和溶質。

(2)不同水質的匯聚冰塊中，明顯出現不同的氣泡表現，分別是：RO 冰中溶質的匯聚體積雖然很小，但只有少數氣泡出現；礦泉水冰塊中竟出現大量如**耶誕樹狀的平行樹枝空氣柱**，非常特別！自來水中的溶質匯聚相對較差，也沒什麼氣泡；氣泡水**整塊遍布霧狀小氣泡**混雜溶質，匯聚狀況最差。



▲圖 9：礦泉水成分











2.實驗數據可看到 RO 水與礦泉水的溶質匯聚狀況相當好，但礦泉水的匯聚濃度略低於 RO 水，經觀察討後我們發現這是因為：

- (1)這兩種水源皆過濾到無雜質，冰晶推擠時不會遇到其他阻礙，故最終匯聚濃度皆較高。
- (2)礦泉水中雖然含有**大量的礦物質**(如鈣、鎂、鈉、鐵離子等)，由實驗二結果知道這些離子在水中是以較小體積存在，對於冰塊結冰過程影響不大，故在此非決定性影響因素。

3.我們非常好奇為何 RO 水與礦泉水最終匯聚濃度相似，但為何氣泡表現差異如此大？且礦泉水中為何會出現大量的平行結構空氣柱？這些空氣柱對於溶質的匯聚又會有什麼影響？故我們重複這兩組的實驗，並**以外接電源的攝影機與 LED 一同冰入冰箱**來幫助我們觀察這兩者在結冰過程到底發生什麼事(如圖 10)，實驗結果如下(攝影截圖)：



▲圖 10：攝影截圖實際裝置圖

	0hr	3hrs	4.5hrs	6hrs	7.5hrs
RO 水					
礦泉水					

(1)我們發現在 4.5hrs 前，兩組表現幾乎沒有差異；從第 4.5hrs 開始，礦泉水組開始邊內縮邊以原溶質移動的軌跡留下一絲絲的空氣柱；最終到 7.5hrs 完成結冰後，此過程中礦泉水組不斷重複上述過程，在內縮匯聚的軌跡上留下一條條空氣柱(如礦泉水 4.5hrs 到 7.5hrs)。

(2)我們發現兩者表現差異如此大是因為 RO 水是我們取自於學校飲水機中經過 RO 機過濾、高溫殺菌的純水，在此過程中因氣體的溶解度隨溫度升高而降低，導致水中含氣量大減，後來雖有降溫(我們各實驗溶劑溫度皆在 30°C)，但此過程於封閉管路中，並無外來空氣可以溶進去，故 RO 水組的含氣量遠低於礦泉水組，導致兩者氣泡差異大。

(3)礦泉水組在結冰時，冰晶會往內推擠溶質與溶解在水中的氣體，導致未結冰部分的溶質與氣體密度提高，且密度越高，分子間碰撞頻率越大，而細小溶質對氣體來說是良好的凝結核，周遭的氣體會較易附著在其上產生較大氣泡，故溶質邊凝結周遭氣體邊移動(如礦泉水 6hrs)，使氣泡沿著溶質移動軌跡產生空氣柱，且由於礦泉水中含氣量較高，氣體並不會全凝結，未凝結氣體會隨著溶質被擠壓至中央，造成內部壓力大而冰晶推擠不易，故匯聚程度較 RO 水組差。

(4)另外，我們發現實驗一中雖用含氣量較低的 RO 水當溶劑，但低



▲圖 11：實驗一初始濃度 0.00078M

濃度組結冰時也有空氣柱出現(如圖 11)，這可歸因為此組溶液初始濃度較低，結冰時可比高濃度組匯聚的更小，造成原本較低的氣體密度隨之提高、溶質碰撞頻率也會增加，而出現類似情況。

4.實驗結果發現自來水組雖然有匯聚，但匯聚程度相當差，而且溶質周遭存有圓型小氣泡，這是因為：

(1)自來水未經過濾，所含**雜質與氣體皆多**，雖然仍有溶質匯聚現象，但冰晶往內推擠這些物質時所造成的內部壓力遠大於 RO 水與礦泉水，故匯聚程度明顯較差。

(2)另外雖然自來水中含氣量相對較高，但實驗結果卻無出現樹枝狀氣泡，這是因為如上述(1)所說，自來水內部雜質與氣體較多，故冰晶能推擠溶質向內匯聚、移動的程度較小，比較不會出現礦泉水組中溶質邊凝結周遭的氣體邊移動而產生樹枝狀空氣柱的狀況，取而代之的，氣體大多留在原地並以鄰近的雜質為凝結核來集中形成微小的圓形氣泡。

5.最後，氣泡水組冰塊呈現白色霧狀氣泡混雜溶質遍布，匯聚狀況最差，這是因為氣泡水中含有**大量 CO₂ 氣體**，導致結冰時冰晶擠壓溶質所遇到的內部壓力與阻礙非常大，故匯聚程度為四種溶劑中最差的；且因氣體密度原本就很大，故溶質與氣體的碰撞頻率非常高，而使整個冰塊**遍布超細微的圓形小氣泡**。

四、【實驗四】探討不同容器對結冰後的溶質匯聚有什麼影響

(一)研究目的：我們想知道使用不同形狀的容器來結冰會不會產生不同的匯聚形狀，因此在本實驗探討不同的容器對匯聚現象的影響

(二)變因

控制變因		操縱變因	應變變因
1.濃度：0.00156M	4.溶液體積：250ml	不同形狀的 容器	相同條件的溶液在 不同形狀的容器所 造成的匯聚差異
2.溶質：過錳酸鉀	5.冰箱溫度：-15.7°C		
3.溶劑：RO 水	6.結凍時間：15hrs		

操縱變因—容器：我們採買市面上常見不同形狀且容量 250ml 以上的六種容器(如圖 12)。

(三)實驗步驟

- 1.秤量六份 0.06g 的過錳酸鉀，分別加水至 250ml 配成六杯 0.00156M 的過錳酸鉀溶液。
- 2.將水溶液分別裝入不同容器中並蓋上蓋子。
- 3.將所有已裝入不同容器的過錳酸鉀水溶液放入冰箱中，靜置一晚等待其完全結冰。
- 4.隔天將冰塊從容器中取出，放置於方格板前固定位置、固定距離後拍照並觀察不同容器對相同溶液結冰後的匯聚有什麼影響。









▲圖 12：不同形狀的各種容器



▲圖 13：各容器結冰狀況

(四)實驗結果

1.不同容器結冰後的匯聚差異：

容器	市售飲料杯	半球體	正方體	圓筒(直徑 6.4cm)
匯聚狀況				
容器	圓筒(直徑 8.4cm)	長方體		
匯聚狀況				





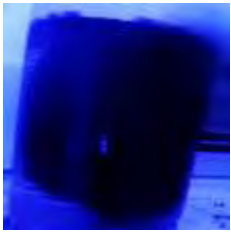







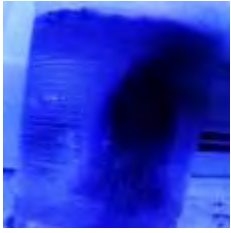
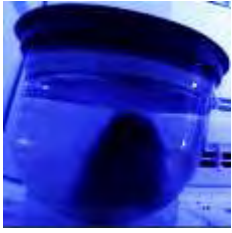


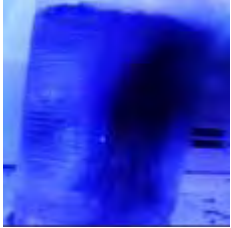



(五)實驗討論




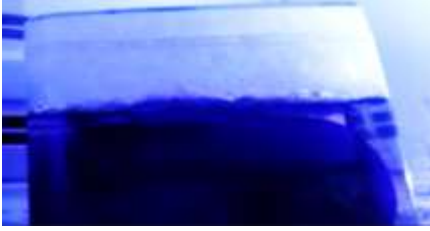






1.由實驗結果發現相同濃度下，所有不同形狀的容器結冰時都有溶質匯聚的現象，且匯聚程度相似，而不同種類的容器形狀會造成結冰後匯聚區塊的形狀有所異同：

(1)市售飲料杯、半球體容器匯聚成上下寬度相近的**圓柱狀匯聚**。

(2)直徑 8.4cm 與 6.4cm 的圓筒、正方體、長方體匯聚成下寬上窄的**角錐狀匯聚**。

2.為了觀察此現象，我們將攝影機與 LED 燈一同冰入冷凍庫來幫助我們觀察不同形狀的容器對溶質在結冰過程中的匯聚現象有什麼影響，結冰過程截圖如下：

容器	市售飲料杯	半球體	正方體	圓筒(直徑 6.4cm)
0hr				
3hrs				
4.5hrs				
6hrs				
7.5hrs				

容器	圓筒(直徑 8.4cm)	長方體
0hr		
3hrs		
4.5hrs		
6hrs		
7.5hrs		

由結果圖我們發現：

- (1)**角錐狀匯聚組**：非常意外的是，我們一直以為杯中的溶液會如同自然課本說的因為熱對流而從表面開始結冰，但由影片我們發現無論是哪種容器都是**由整個容器的最外圍(包含上下與四周)開始結冰**，進而開始往內推擠溶質，使溶質被擠壓成一個圓球狀、濃度較高的區域(如角錐狀匯聚組 4.5hrs)經過討論後我們發現這是因為水的熱傳導與對流的速度沒想像中的快，所以四周與底部的水被冰箱快速降溫後來不及獲得內部的熱量傳遞就先結冰了。

- (2)隨著時間推移，各容器內的溶質繼續以近似橢圓狀的型態被往內擠壓、濃縮，直到 3~4.5hrs 的時候，此時溶質區域被擠壓所形成的顏色相當深，造成較大的壓力使冰晶往內推擠的速率開始變慢，最終到 4.5~6hrs 我們發現**匯聚區的底部與上半部的推擠速率開始出現差異**，匯聚區上半部還是以穩定的速率被向內推擠，但底部冰晶卻無法繼續將溶質推入，最終形成為一個**下寬上窄的角錐狀匯聚區**。
- (3)經觀察與討論我們懷疑溶質被推擠到最後內壓極大呈現直立橢圓狀時(如角錐狀匯聚組 4.5hrs)，此時由於溶液**深度越大水壓越大**，以及**溶質受重力影響**導致沉降在底部的濃度應該會略高於上半部，以上兩因素造成此時的直立橢圓狀匯聚區的**下半部壓力大於上半部壓力**，導致**冰晶往內推擠時受到的阻礙不同**，而有下寬上窄的角錐狀匯聚區現象產生。
- (4)**圓柱狀匯聚組**：由影片我們發現這兩組皆為**上寬下窄的容器**，故一開始由整個容器的最外圍開始均勻向內結冰時，冰晶層是**以容器的形狀向內推擠**溶質形成一個上寬下窄的匯聚區(如圖 14)，但由於底部的濃度與壓力皆較大，使冰晶往內推擠的速率慢於上半部，故這種上快下慢的推擠速度差異反而減少了匯聚區的上下寬度差，最終形成上下寬度相近的圓柱狀匯聚。



▲圖 14：角錐狀匯聚組(左)及圓柱狀匯聚組(右)結冰方向示意圖

五、【實驗五】探討不同結冰順序對結冰後的溶質匯聚有什麼影響

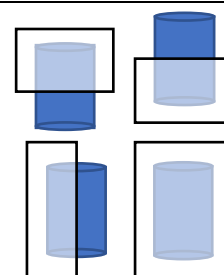
(一)研究目的：

- 1.我們在實驗過程中發現將相同狀況的溶液放在冰箱的不同位置(是否在出風口前、有無靠牆、有無其他障礙物相連等)會導致結冰速率和匯聚的情況不大相同，我們想要知道不同結冰順序及速率會對溶質的匯聚造成什麼樣的影響。
- 2.我們在自然課本第三冊第五章「溫度與熱」中學到保麗龍是熱傳導很差的一種材質，故我們使用它來包住容器的不同部位以減緩其結冰的速率以及結冰的順序。

(二)變因

控制變因		操縱變因	應變變因
1.濃度：0.00156M	4.溶液體積：450ml	用保麗龍包住不同部位的容器以控制不同結冰順序及速率	不同結冰順序或速率所造成的溶質匯聚程度差異
2.溶質：過錳酸鉀	5.溶劑：RO 水		
3.容器：550ml 的圓柱狀容器	6.冰箱溫度：-15.7°C		
	7.結凍時間：15hrs		

操縱變因—不同結冰順序及速率：我們依圓柱狀容器規格切割厚度 6cm 保麗龍並組裝成可包住容器外**上半部、下半部、左半部及全部**等部位(如圖 15)的形狀來控制各種不同狀況的結冰順序與速率。



▲圖 15：保麗龍包覆容器外不同部位示意圖

(三)實驗步驟

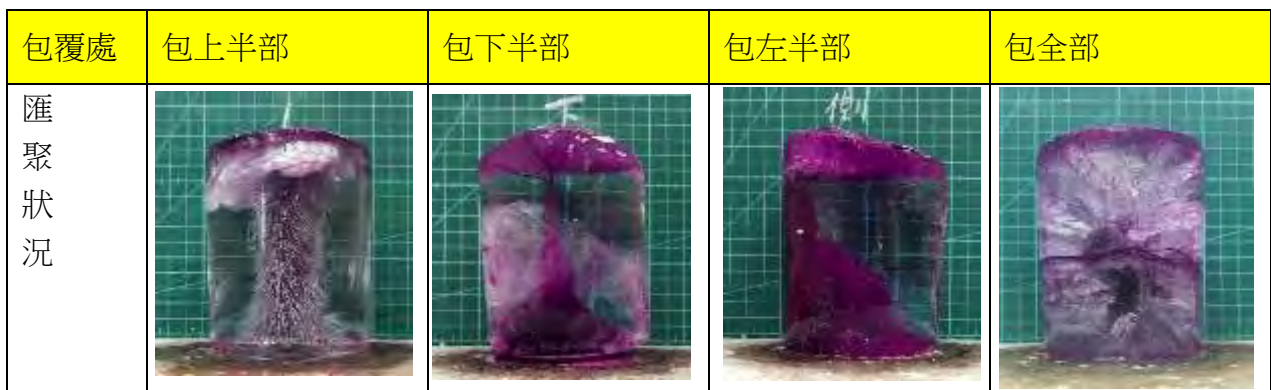
- 1.秤量四份 0.11g 的過錳酸鉀，分別加水至 450ml 配成四杯 0.00156M 的過錳酸鉀水溶液。
- 2.將過錳酸鉀水溶液分別裝入 550ml 的圓柱狀容器中並蓋上蓋子，貼標籤。
- 3.用保麗龍分別包住容器外上半部、下半部、左半部及全部等各種部位。
- 4.將已包好保麗龍的過錳酸鉀水溶液放入冰箱中，靜置一晚等待其完全結冰。
- 5.隔天將冰塊從容器中取出，放置於方格板前固定位置、固定距離後拍照並觀察不同結冰順序對結冰後的匯聚有什麼影響。



▲圖 16：實際包裹示意圖

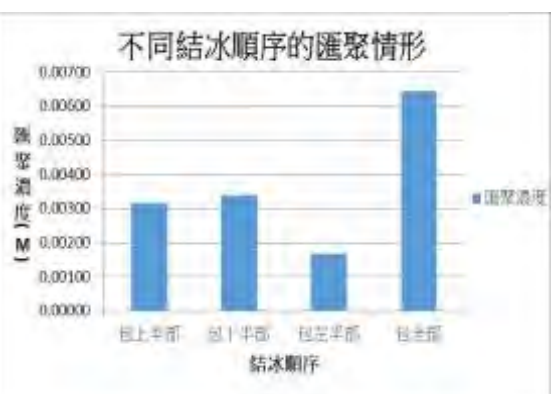
(四)實驗結果

- 1.不同結冰順序的匯聚差異：



2.實驗數據與圖表

結冰順序	包上半部	包下半部	包左半部	包全部	
各區域體積 (mm ³)	1	19470.7	50082.1	104709.6	36881.5
	2	30472.1	54892.3	63302.5	16628.0
	3	21163.2	50637.9	62730.9	11091.9
	4	15410.7	20908.7	49517.9	8526.0
	5	16843.3	11940.0	40837.1	11610.6
	6	16744.2	10259.2	38277.8	8217.7
	7	22333.9	4481.9	22423.0	10652.7
	8	20260.0	2409.4	15357.8	3838.9
	9	24746.0	817.6	12924.4	1561.5
	10	34501.3	245.4	11282.1	0.0
總體積(L)	0.2219455	0.2066746	0.4213631	0.1090089	
匯聚濃度(M)	0.00317	0.00340	0.00167	0.00645	



(五)實驗討論

1.實驗結果發現同濃度下，**無論何種結冰順序結冰時都有溶質匯聚的現象，只是在結冰後表現出來的匯聚現象有差異：**

(1)由實驗數據與結果我們發現匯聚濃度：**包全部>包下半部>包上半部>包左半部**。

(2)不同結冰順序的匯聚冰塊顯現出不同的溶質匯聚形狀，分別是：

- a.包上半部→**圓柱狀匯聚貫穿**冰塊上下端。
- b.包下半部→溶質**集中匯聚在下方**。
- c.包左半部→溶質集中在**左半邊**，沿著杯壁匯聚成**上窄下寬的巨大三角錐**。
- d.包全部→溶質壓縮到冰塊**正中央**，且四周出現許多**裂痕**。

2.我們發現容器中有包保麗龍的區塊由於熱傳導較差，整杯容器會**由無保麗龍的區域開始結冰**，再逐漸往有保麗龍的區域邊結冰邊推擠溶質，故我們實驗前預設溶質最後都應匯聚在有包覆保麗龍的區域，但經實際操作後發現包下半部的實驗結果如我們預估的完全匯聚在下方，但包上半部的結果竟成圓柱狀匯聚貫穿冰塊上下端而非全集中於上方，經觀察與討論後發現：

- (1)包下半部：因上半部溶液先結冰使冰晶將溶質逐漸往下推擠，加上重力亦吸引溶質向下沉降，**兩者效應相加**使溶質匯聚區主要集中在下半部。
- (2)包上半部：下半部溶液先結冰使冰晶將溶質往上及中央推擠，但重力吸引溶質向下沉降且底部的水壓較大，導致冰晶向內推擠溶質到某濃度便無法推入，故匯聚形狀不像其他組為窄角錐狀而是上下寬度差異不大的圓柱狀匯聚，我們猜想**是否冰晶推擠力對溶質的影響小於重力對溶質的下拉力**，故我們另外設計了實驗六來探討這兩者的比較。
- (3)包左半部：右半溶液先結冰使冰晶如一道牆往左推進，但猶如前述(2)所說尚未結冰的溶質區底部的水壓較大+重力對溶質的吸引力導致這道**冰牆受到下半部的推擠阻力遠大於上半部**，故最後**沿著杯壁匯聚成一個上窄下寬的巨大三角錐**。
- (4)包全部：這組因全部包覆保麗龍導致整體**要結冰所需時間最長**，可以讓冰晶穩定的向內推擠溶質，故其匯聚壓縮率最高，壓力也最大，最終匯聚於冰塊的正中央；但也因最後壓力過大，最內部結冰使體積膨脹時整體冰塊承受不住壓力而從匯聚處崩裂出來，故這組的冰塊裂縫最多也最集中。

六、【實驗六】探討各種狀況下不同結冰順序所造成的匯聚濃度差異

- (一)研究目的：由實驗一~五結果發現冰塊中溶質匯聚區非均勻分布，而是依結冰的順序而有不同濃度之分(如圖 16)；我們很好奇在不同結冰順序下產生濃度有何差異，原先我們想直接橫切圓柱狀冰塊來算濃度，但發現那樣算出來只是不同高度的平均濃度，而非不同結冰順序的濃度，經過討論後我們決定使用珍奶吸管配合保麗龍盒來控制其結冰順序以觀測不同結冰順序所造成的匯聚濃度差異。首先我們想知道如何用保麗龍包覆吸管能使結冰過程推擠溶質的效果最好、方便我們去切割吸管來測量不同結冰順序造成的濃度差異。故本實驗設計出不同保麗龍包覆法配合擺放角度來觀察其匯聚的差異。



▲圖 17：匯聚區域的顏色並非均勻分布

(二)變因

控制變因		操縱變因	應變變因
1.濃度：0.00156M	5.體積：18ml	不同保麗龍包	觀察不同操縱
2.溶質：過錳酸鉀	6.冰箱溫度：-15.7°C	覆法配合不同	變因造成的溶
3.容器：珍奶吸管加軟木塞	7.結凍時間：15hrs	擺放角度	質匯聚效果差
4.溶劑：RO 水			異

1.控制變因

(1)濃度與溶質：由實驗一、二結果我們取匯聚結果較明顯的 0.00156M 的過錳酸鉀水溶液來做標準濃度與溶質。

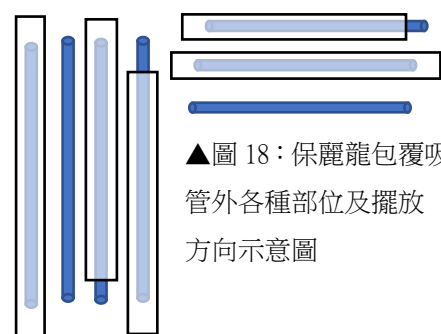
(2)容器：我們選用市面上常見的珍奶吸管，將尖端剪平後輔以合宜的橡皮塞來填充溶液。

2.操縱變因

以不同保麗龍包覆法配合擺放角度來控制結冰順序：

(1)我們依珍奶吸管規格去切割厚度 6cm 的保麗龍，固定每隔 5cm 挖一個洞(深度 18cm)，使組裝後每根吸管皆露出 1cm 的液面，冰入冷凍庫後由露出保麗龍部分開始結冰，再逐漸往保麗龍深處結冰以達到控制結冰順序的目的來觀測其對應的濃度差異。

(2)我們設計兩種擺放方向(垂直 vs 水平)、三種保麗龍包覆方法(不包、全部包、部分包)，分別為垂直不包 vs 水平不包、垂直全包 vs 水平全包、水平部份包 vs 垂直包上部 vs 垂直包下部(如圖 18)。



(三)實驗步驟

<p>1.秤量 0.05g 的過錳酸鉀，分別加水至 200ml 配成 0.00156M 的過錳酸鉀水溶液。</p> 	<p>2.以珍奶吸管當容器，將尖端切齊後分別裝入步驟一的過錳酸鉀水溶液 18ml 並以橡皮塞封緊。</p> 	<p>3.使用保麗龍分別依照垂直不包 vs 水平不包、垂直全包 vs 水平全包、水平部份包 vs 垂直包上部 vs 垂直包下部包住珍奶吸管外的各種部位並貼標籤。</p> 
<p>4.將各種不同包覆方法的過錳酸鉀水溶液吸管組放入冰箱中，靜置一晚等待其完全結冰。</p> 	<p>5.隔天將結冰的各吸管組取出，用線鋸以每段 4.5cm 平均切成四段，待融化後用自製離子濃度檢測器測量其濃度的差異。</p> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%;">  <p>(1)</p> </div> <div style="width: 50%;">  <p>(2)</p> </div> <div style="width: 50%;">  <p>(3)</p> </div> <div style="width: 50%;">  <p>(4)</p> </div> </div>	

(四)研究方法：自製離子濃度檢測器

1.裝置目的：我們想要以簡單便宜的日常用品為素材，設計一簡單而便宜的儀器來取代昂貴的光譜儀。並且以簡單的步驟，準確的測出不同濃度的過錳酸鉀水溶液。

2.裝置原理：

(1)朗伯一比爾定律：光的吸收作用受朗伯(Lamber)定律和比爾(Beer)定律所影響，合稱朗伯一比爾定律。其中，比爾定律指出，在一定的波長下，光的吸收量與吸光材料的濃度成正比。

(2)光敏電阻：利用光敏電阻**隨光照量的不同改變電阻**的原理來觀測有色溶液的離子濃度。

3.裝置圖：

(1)暗箱：為了避免其他光源影響光敏電阻照光，我們在內部貼上黑紙，吸收多餘的光線，並在測定時加蓋，避免光線進入。

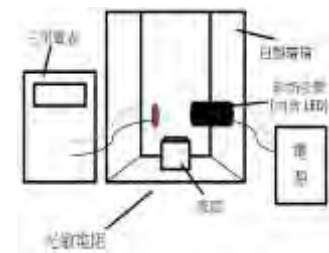
(2)底座：為了讓每次測定時的比色管都在相同位置，我們製作了底座，減少誤差。

(3)三用電表：與光敏電阻相接，測定電阻值，單位使用 $2K\Omega$ 。

(4)珍奶吸管：為了讓光源同方向入射，我們將珍奶吸管包覆黑紙，裝在 LED 外。



▲圖 19：自製離子濃度檢測器實際裝置圖



▲圖 20：自製離子濃度檢測器裝置示意圖

4.製作檢量線

(1)配置過錳酸鉀**標準溶液** 0.2、0.1、0.05、0.025、0.0125、0.00625、0.00313、0.00156、0.00078、0.00039、0.00019M。

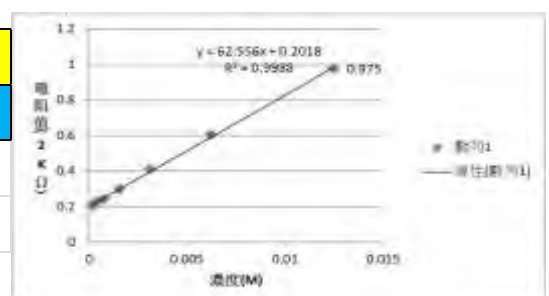
(2)將各濃度標準液裝入**比色管**並記錄**相對應的電阻值**。

(3)將資料輸入 Excel，製作分布圖：比爾定律指出，在高濃度時，檢量線會發生偏移，造成資料不準確，所以我們只取有**呈線性關係**的數據製作**檢量線**。

(4)求得**檢量線方程式**，將電阻值代入即可得濃度數值；若**濃度過高**，超出檢量線範圍，就先將該溶液**稀釋**到檢量線範圍，再回推原濃度；若濃度過低到接近純水則標示「**接近純水**」。

5.檢量線數據

濃度(M)	0.2	0.1	0.05	0.025	0.0125	0.00625
電阻值 (2K Ω)	1.401	1.376	1.329	1.225	0.975	0.604
濃度(M)	0.00313	0.00156	0.00078	0.00039	0.00020	
電阻值 (2K Ω)	0.412	0.3	0.243	0.224	0.206	



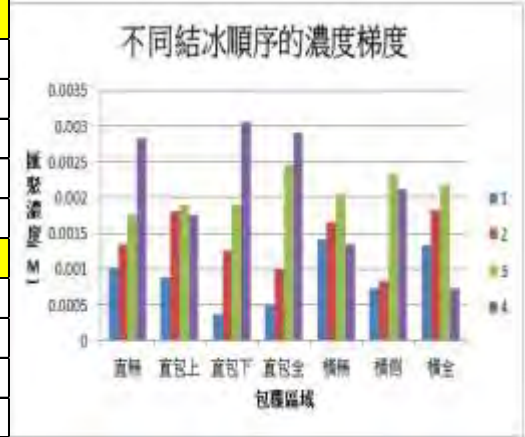
(五)實驗結果

1.不同結冰順序及擺放方式的匯聚差異：

2.實驗數據與圖表



電阻值(2KΩ)							
段數	直無	直包上	直包下	直包全	橫無	橫側	橫全
1(先結冰)	0.299	0.333	0.271	0.277	0.316	0.286	0.312
2	0.313	0.337	0.309	0.298	0.326	0.291	0.334
3	0.331	0.331	0.337	0.361	0.343	0.356	0.349
4(後結冰)	0.377	0.293	0.387	0.38	0.313	0.346	0.286
濃度(M)							
1(先結冰)	0.00102	0.00181	0.00037	0.00051	0.00142	0.00072	0.00132
2	0.00135	0.00190	0.00125	0.00100	0.00165	0.00084	0.00183
3	0.00176	0.00176	0.00190	0.00246	0.00204	0.00234	0.00218
4(後結冰)	0.00283	0.00088	0.00306	0.00290	0.00135	0.00211	0.00072



(六)實驗討論

在本實驗中，我們利用**珍奶吸管+保麗龍**來控制溶液的結冰順序，再分割冰塊，待其熔化後以自製離子濃度檢測器測出每一段溶液離子的濃度。

1.由實驗數據發現，在相同濃度下，**各種結冰順序皆有匯聚**，只是各組溶質匯聚程度與濃度分布趨勢不盡相同：

(1)垂直擺放→包下、包全與無包皆是**越往下匯聚濃度越高**，且包下匯聚程度最佳，包全次之；無包與包上組則匯聚程度相對較差。

(2)水平擺放→包全與無包皆是**往中央兩段集中**，包側則越往包覆深處匯聚濃度越高。

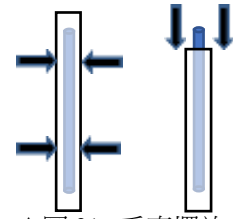
2.由實驗數據發現垂直包下與包全匯聚皆非常好，最終端還逼近初始濃度兩倍！我們好奇為何其濃度能這麼高？為何包上匯聚會與其他結冰順序差那麼多？我們發現：

(1)垂直擺放+包覆下方：

因為保麗龍包覆吸管的下方，導致整體溶液由上方開始依序往下結冰，在此過程中溶質一邊被**冰晶**往下**推擠**，一邊被**重力**往下吸引而逐漸匯聚、壓縮，**兩者效應加成**使整體依序結成**下濃上稀的「濃度梯度」**的狀況，故匯聚程度最好。

(2)垂直擺放+全部包覆：

如實驗五所述，本組被保麗龍全部包覆，導致其結冰速率最慢，所需冷卻時間最長，給予溶質充足時間被推擠到匯聚區，但其「濃度梯度」差異卻不如包下組明顯，這是因為雖然溶質粒子也受到地心引力的影響，使較多粒子沉降到溶液下半部，但這組**結冰是緩慢的由四周往中心匯聚**，而非如包下組冰晶**由上而下推擠溶質**(如圖 21)，故其各段的濃度差異相對較小。



▲圖 21：垂直擺放全部包組(左)及包下組(右)結冰方向示意圖

(3)垂直擺放+全部不包覆：

雖然溶質粒子也會受地心引力影響，使溶質沉降於下半部，但由於結冰速率最快，溶質可匯聚時間最短，加上匯聚方向由四周往中心推擠，故其「濃度梯度」差異較不明顯。

(4)垂直擺放+包覆上方：

我們**預估冰晶推擠力會把溶質往上推擠，使濃度梯度由下至上逐漸變濃**，可是結果卻顯示只有最下方溶質稍被往上推，其餘三段匯聚濃度相近，皆略高於初始濃度，匯聚效果很差，我們發現因保麗龍包覆吸管上方，導致溶液由下而上依序結冰，此過程中溶質邊被冰晶往上推擠邊受重力往下吸引，**兩力相抗衡**，導致溶質不大能被冰晶推擠上去，故我們發現**地心引力影響遠大於冰晶推擠力**。

3.由實驗結果可得知，水平擺放匯聚出的「濃度梯度」差異普遍不明顯，這是因為：

(1)水平擺放+無包/全包：

溶液水平冷凍時，溶質分布呈**水平線匯聚**(如圖 22)，因其由四周開始向內推擠溶質時受重力影響而**沉降在各段的底部**，並非往同一區集中(如圖 23)，故無「濃度梯度」現象。



▲圖 22：水平線匯聚



▲圖 23：水平擺放全包組(上)及包下組(下)結冰方向示意圖

(2)水平擺放+側包：

冰晶由未包覆處開始推擠溶質，雖最終結果呈內濃外稀現象，但重力使溶質向下沉降，導致底部壓力較大、冰晶推擠時阻力較強，故推擠效果不如垂直擺放組。

七、【實驗七】探討不同濃度溶液結冰後匯聚出的「濃度梯度」差異

(一)研究目的：由實驗六的結果發現得知**珍奶吸管垂直擺放**並用**保麗龍包覆**吸管**下方**可使溶質推擠效果最好，因此我們便利用這個方法進一步探討相同溶質在不同濃度下依序結冰後匯聚出的「濃度梯度」差異

(二)變因

控制變因		操縱變因	應變變因
1.溶質：過錳酸鉀	5.冰箱溫度：-15.7°C	溶液濃度	不同濃度的溶液匯聚出的「濃度梯度」差異
2.容器：珍奶吸管加軟木塞	6.結凍時間：15hrs		
3.溶劑：RO 水	7.保麗龍包覆吸管下方		
4.體積：18ml	並垂直擺放進冰箱		

操縱變因—濃度：如同實驗一，我們取最高濃度 0.0125M 的過錳酸鉀依次對半稀釋，總共取五個層級的濃度來做實驗(依次為 0.0125、0.00625、0.00313、0.00156、0.00078M)。

(三)實驗步驟

1.秤量 0.40g 的過錳酸鉀，加水至 200ml 配成 0.0125M 的過錳酸鉀水溶液。

2.取步驟一配成的 0.0125M 過錳酸鉀水溶液 100ml 備用，剩餘溶液依次加水稀釋成不同濃度的過錳酸鉀水溶液。



▲圖 24：已裝入珍奶吸管中的不同濃度過錳酸鉀水溶液

3.取五支珍奶吸管，將尖端切齊後分別裝入不同濃度的過錳酸鉀水溶液 18ml 並以橡皮塞封緊再貼標籤。

4.將不同濃度的過錳酸鉀水溶液吸管組以保麗龍包覆各吸管下方並垂直擺放進冰箱，靜置一晚等待其完全結冰。



▲圖 25：將結冰的各吸管組截斷後裝入塑膠比色槽中

5.隔天將結冰的各吸管組取出，用線鋸以每段 4.5cm 平均切成四段，待融化後用自製離子濃度檢測器測量其濃度的差異。

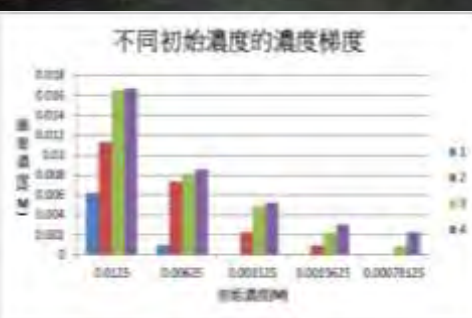
(四)實驗結果

1.不同濃度結冰後的匯聚差異：

2.實驗數據與圖表



段數	1(先結冰)	2	3	4(後結冰)	
電阻值 (2K Ω)	0.0125	0.523	0.744	0.966	0.977
	0.00625	0.297	0.571	0.605	0.626
	0.00313	0.24	0.354	0.464	0.481
	0.00156	0.254	0.295	0.352	0.386
	0.00078	0.223	0.225	0.293	0.353
匯聚濃度 (M)	0.0125	0.00621	0.01133	0.01648	0.01673
	0.00625	0.00098	0.00732	0.00811	0.00860
	0.00313	0.00093	0.00230	0.00485	0.00524
	0.00156	0.00093	0.00093	0.00225	0.00304
	0.00078	0.00088	0.00088	0.00088	0.00227

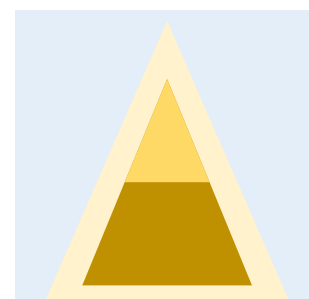


(五)實驗討論

從實驗結果得知，不論濃度的大小都存在不同程度的「濃度梯度」現象：

1.由數據發現實驗一中觀察不到匯聚的高濃度組(0.0125M、0.00625M)其實也有匯聚現象，但無法分辨其顏色差異，證明冰晶在高濃度組也可推擠溶質，只是推擠一小段就造成其餘濃度極高、壓力與阻力極大而不太能繼續往內匯聚溶質，故結冰完後面三段都呈現高濃度但差異不大、「濃度梯度」現象不明顯的狀況。

2.如同實驗一結果，這五組濃度亦由 0.00313M 往下出現明顯匯聚表現，其結冰後切割出來的四段濃度差異很大而有「濃度梯度」的現象，甚至前端有純化到接近純水的狀況。證明其實匯聚在冰塊中的溶質區域並非均勻分布，而是依結冰的順序而有低、中、高濃度之分，故才會在先前的實驗中觀察到匯聚區會有濃淡分層的現象，分別對應到最先結冰的純水層→角錐狀匯聚外圈溶質稀疏處→角錐狀匯聚內層上半部→角錐狀匯聚內層下半部(壓力+重力吸引最高濃度區)(如圖 26)。



▲圖 26：溶質匯聚區的濃度差異示意圖

陸、結論

一、【實驗一】探討不同濃度對相同溶質結冰後的匯聚有什麼影響

1.實驗結果發現過錳酸鉀水溶液在低於濃度 0.00313M 時才開始出現溶質匯聚現象，且濃度越低匯聚體積越小，但高於 0.00313M 後便無明顯匯聚，因冰塊內部冰晶推擠力不足以克服分子間碰撞力而無法將溶質壓縮。

- 2.我們發現高濃度匯聚組匯聚濃度相近，因為冰晶推擠力向內推擠、分子間碰撞力向外抵抗，兩者互相抗衡，最終到「**臨界濃度值**」後便停止匯聚。
- 3.雖然低濃度組**內縮體積較小**，但**匯聚濃度仍低於高濃度匯聚組**，因其原始濃度較低，故需匯聚至較小的體積才能到達「**臨界濃度值**」，但冰晶會將水中的氣體一併推入，造成內部壓力較大而匯聚程度較差。

二、【實驗二】探討相同濃度但不同溶質結冰後的匯聚差異

- 1.我們發現由**帶電原子團顯色**(MnO_4^- 、 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$)的溶質匯聚程度會較好，但由**金屬離子顯色**(Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+})的溶質匯聚程度相對較差。
- 2.我們發現在**相同金屬陽離子的狀況下**，由於依數性質導致在**水中解離出三個離子的溶質匯聚程度皆大於兩個離子溶質的匯聚程度**。

三、【實驗三】探討不同水質的溶劑對結冰後溶質匯聚有什麼影響

- 1.四種溶劑的匯聚程度： RO 水>礦泉水>自來水>氣泡水，溶劑內雜質與氣體越多，匯聚越差。因為冰晶推擠時會將雜質與氣體一同推入，溶劑中所含的雜質與氣體越多，匯聚區的壓力越大、匯聚程度越差。
- 2.礦泉水中出現大量的**平行結構樹枝狀氣泡柱**，這是因為冰晶往內推擠溶質與溶在水中的氣體，導致氣體密度提高，分子間的**碰撞頻率**增加，且細小的溶質為良好的**凝結核**易使周圍的氣體附著其上來產生較大的氣泡，故溶質會邊凝結周遭的氣體邊移動，使氣泡沿著溶質的移動軌跡產生空氣柱。

四、【實驗四】探討不同容器對結冰後的溶質匯聚有什麼影響

- 1.不同種類的容器會造成匯聚形狀的不同，大致分成角錐狀 vs 圓柱狀匯聚
- 2.**上下寬度一致的容器(角錐狀匯聚)**：結冰前溶質均勻分布→由外圍開始結冰向內擠壓溶質成圓球狀→冰晶隨時間向內推擠溶質成橢圓狀→由於**下方壓力較大，導致結冰速度較上方慢**，最終匯聚成角錐狀。

- 3.上寬下窄的容器(圓柱狀匯聚)：容器底下較窄會先結冰推擠溶質成上寬下窄分布，因底部濃度與壓力較大使冰晶往內推擠速率慢於上半部，這種上快下慢的**推擠速度差異**反而減少了匯聚區的上下寬度差，最終形成上下寬度相近的圓柱狀匯聚。

五、【實驗五】探討不同結冰順序對結冰後的溶質匯聚有什麼影響

- 1.匯聚濃度：包全部>包下半>包上半>包左半，不同結冰順序有不同的溶質匯聚形狀。
- 2.包下半：因**冰晶推擠力**及**重力**牽引使溶質沉降，故溶質集中匯聚在下方。
- 3.包上半：溶質受到冰晶往上推擠力與重力往下吸引力，**兩者互相抗衡**導致冰晶向上推擠不易，故最終成圓柱狀匯聚。
- 4.包全部：因**所需結冰時間長**、冰晶推擠穩定，故匯聚最好。溶質匯聚於正中央，且四周有許多裂痕。
- 5.包左半：右半部溶液先結冰使冰晶往左推擠，但底部水壓較大+重力使溶質沉降導致**下半部推擠阻力大於上半部**，故沿著杯壁匯聚成一個大三角錐。

六、【實驗六】探討各種狀況下不同結冰順序所造成的匯聚濃度差異

- 1.垂直擺放：大部分受重力影響，所以匯聚程度大多比水平好，包下組由於上面先結冰使**冰晶向下推擠，加上重力幫助使「濃度梯度」現象最明顯**；而包上組則由下面先結冰使冰晶向上推擠，但溶質所受重力向下而使「濃度梯度」現象最差。
- 2.水平擺放：匯聚程度大多比垂直擺放差，因溶液水平冷凍時溶質受重力影響沉降在各段的底部而非如垂直擺放時往同一區集中，故「濃度梯度」現象較差。

七、【實驗七】探討不同濃度溶液結冰後匯聚出的「濃度梯度」差異

- 1.本實驗證明實驗一中觀察不到匯聚現象的高濃度組(0.0125M、0.00625M)其實也會有冰晶推擠溶質的現象，只是推擠不多就使後段濃度極高、阻力極大而無法繼續往內匯聚，故後三段都呈高濃度且差異不大。
- 2.本實驗從 0.00313M 往下開始出現明顯的匯聚表現，**溶質依照結冰的順序開始出現「濃度梯度」的現象**。證明其實在實驗一~五的**大冰塊溶質匯聚區並非濃度均勻分布**，而是**依結冰的順序而有低、中、高濃度之分**，故才會在先前的實驗中觀察到匯聚區

會有濃淡分層的現象，分別是純水層(最先結冰)、匯聚外層溶質稀疏處、匯聚內層上半部、匯聚內層下半部(壓力+重力吸引到最高濃度)。

柒、參考資料

- 1.張慈映、董曉琦、洪琬卿(1986)。透明中的朦朧-冰中不透明的探討。中華民國第 26 屆科學展覽會。
- 2.趙孝哲、張鈺菱、涂高璋、趙洵(2005)。挫冰大不同-探討影響冰晶的因素。中華民國第 45 屆科學展覽會。
- 3.劉婕宇、林子珉、林品君(2011)。冰漩渦。中華民國第 51 屆科學展覽會。
- 4.楊立盛、林建達、湯凱誠、鄧宇盛(2007)。以自製工具觀測水溶液結冰的濃度變化。中華民國第 47 屆科學展覽會。
- 5.莊博璋、葉智龍、張定閔(2018)。您喝的水多「氬」了嗎。中華民國第 58 屆科學展覽會。
- 6.曾柏睿、涂心瑜、譚采芸(2018)。被冰封的漩渦流-探討放熱式漩渦的氣體逃逸路線。中華民國第 58 屆科學展覽會。
- 7.郭重吉發行(2011)。國民中學自然與生活科技二上課本。康軒文教事業出版。
- 8.這世上到底能有幾種冰，你了解水嗎？(2015)。千趣網。取自
<http://itw01.com/2UCKQEG.html>

【評語】 030201

本研究探討不同條件下溶液結冰時溶質匯聚的現象，發想於飲料在冰箱結冰不均勻之觀察，發展出具體的探討鹽類種類、容器的形狀、含雜質程度與氣泡多寡對於溶質匯集狀況的影響，能設立適當變因提出假設，並就每一觀察現象以推擠力與重力來解釋不同形狀有色溶質聚集的成因，頗符合科學探究精神。溶質匯聚之理論解釋雖不完善，但堪稱合理，似可深入繼續以離子間化學作用力取代物理作用力來研究解釋，當更合宜。此作品觀察獨到，提出理論似可一一解釋現象，實屬難得。總體而言是一個有趣的觀察與探索課題。以下提供幾點建議最為參考：1. 數據若為多點平均，則需呈現誤差值，如” 2.實驗數據與圖表” 中數字誤差在個位數，不須寫小數點後數字。2.用氫鍵與離子作用力的化學作用力取代物理的推擠力更符實情。3.未來可擴及改變 pH，用分子溶質等研究或提出理論與實際上可能之應用。

壹、研究動機

我們發現有些飲料結冰時中間會形成一塊顏色較深的區塊，有些卻不會，且不同狀況下各種飲料結冰後的溶質區塊形狀、顏色也不太相同，其中關鍵差異到底在哪裡？我們希望能藉由科學方法，找出不同變因對溶質匯聚有何影響。

貳、研究目的

- 一、觀察溶液結冰後溶質匯聚的狀況，找出成功匯聚的方法。
- 二、探討溶液中溶質匯聚的影響因素(溶液濃度、溶質、溶劑、容器形狀、結冰順序、速率)。
- 三、以自製離子濃度檢測器測量不同狀況下匯聚濃度的變化。

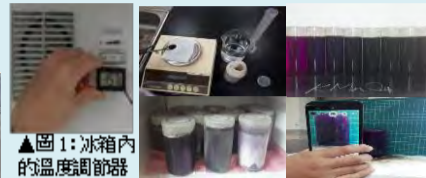
參、實驗器材

- 一、實驗器材：冰箱、六種不同形狀的容器(容量 250ml 以上)、圓柱狀容器(容量 550ml)、方格板、ImageJ 軟體、珍奶吸管、軟木塞、線鋸、塑膠比色槽(容量 4.5ml)、黑色瓦楞紙、黑色壁報紙、深色塑膠盒(8 cm*8 cm*9.8 cm)、光敏電阻、LED 燈泡、三用電錶、AC 轉 DC 可調變壓器、鱷魚夾電線
- 二、實驗藥品：過錳酸鉀(KMnO₄)、氯化錳(MnCl₂·4H₂O)、硫酸錳(MnSO₄·H₂O)、氯化鎳(NiCl₂·6H₂O)、硫酸鎳(NiSO₄·6H₂O)、氯化銅(CuCl₂·2H₂O)、硫酸銅(CuSO₄·5H₂O)、氯化亞鈷(CoCl₂·6H₂O)、鐵氰化鉀(K₃Fe(CN)₆)、RO 水、礦泉水、自來水、氣泡水

肆、研究過程、結果與討論

【實驗一】探討不同濃度對相同溶質結冰後的匯聚有什麼影響

(一)變因：	控制變因			操縱變因	應變變因
	1.溶質：過錳酸鉀	3.溶劑：RO 水	5.冰箱溫度：-15.7°C	溶液濃度	不同濃度的溶液是否匯聚以及匯聚程度的差異
	2.容器：550ml 的圓柱狀容器	4.溶液體積：450ml	6.結凍時間：15hr		



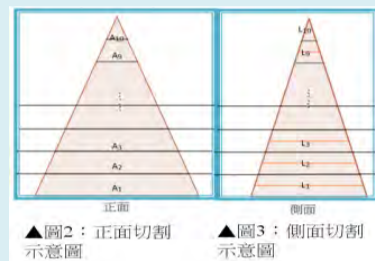
▲圖 1：冰箱內的溫度調節器

(二)實驗步驟：

我們先配出 0.05M 的過錳酸鉀水溶液，再依次加水稀釋成不同濃度的水溶液，接著將溶液分別裝入容器中並蓋上蓋子。將水溶液放入冰箱中後，靜置一晚待其完全結冰，隔天將冰塊從容器中取出，放置於方格板前固定位置、距離後拍照並觀察不同濃度對相同溶質結冰後的匯聚有什麼影響。

(三)分析方法：

冰塊取出後，放置方格板將各冰塊正、側面各拍一張，接著將正面照片分割成固定高度(1cm)的十個長方形區域(如圖 2)，接著利用 ImageJ 的色塊分析選取有色區域後，算出各區域有溶質匯聚的正面面積 A_x 。側面則對應正面 10 個區域，以軟體選取各區中間高度的匯聚區長度即為各區域的平均寬度 L_x (如圖 3) 最後將正面面積(A_x)×側面長度(L_x) = 該區域體積(V_x)，算出 10 區域體積再加總 $\rightarrow A_1 * L_1 + A_2 * L_2 + \dots + A_9 * L_9 + A_{10} * L_{10}$ = 匯聚區塊的總體積。

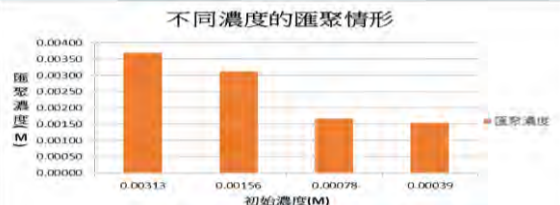


▲圖 2：正面切割示意圖

▲圖 3：側面切割示意圖

(四)實驗結果：

匯聚狀況	濃度	0.05M	0.025M	0.0125M	0.00625M	0.00313M	0.00156M	0.00078M	0.00039M



(五)實驗討論：

1. 初始濃度 0.00313M 與 0.00156M(後文稱「高濃度匯聚組」)：雖然 0.00156M 的初始濃度只有 0.00313M 的一半，但匯聚後的濃度相似！我們推論結冰過程冰晶會將溶質往未結冰區域推擠(後文稱「冰晶推擠力」)，未結冰處分子間碰撞頻率上升(後文稱「分子間碰撞力」)，其中冰晶推擠力向內、分子間碰撞力向外，最終達「臨界濃度」後溶質便停止匯聚，故當初始濃度高於「臨界濃度」時，觀察不到溶質匯聚的發生。
2. 初始濃度 0.00078M 與 0.00039M(後文稱「低濃度匯聚組」)：雖然低濃度組內縮體積較小，但匯聚濃度仍低於高濃度匯聚組，從 0.00078M 開始，初始濃度更低，故其溶質理論上可匯聚的更多，使濃度接近臨界濃度才停止，但這個過程冰晶不但會推擠溶質，也將氣體往內推擠，造成未結冰區域分子碰撞力與氣體壓力均較大而無法匯聚到臨界濃度，故低濃度匯聚組最終匯聚濃度較低且可觀察到明顯的氣泡分布現象。

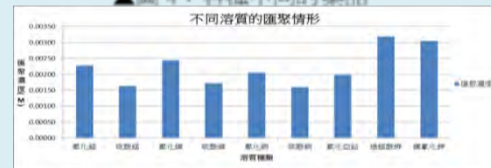
【實驗二】探討相同濃度但不同溶質結冰後的匯聚差異

(一)變因：	控制變因			操縱變因	應變變因
	1.濃度：0.00156M	3.溶劑：RO 水	5.冰箱溫度：-15.7°C	不同種類的溶質	不同種類溶質在結冰過程中是否匯聚以及匯聚程度的差異
(二)研究結果：	2.容器：550ml 的圓柱狀容器	4.溶液體積：450ml	6.結凍時間：15hrs		



▲圖 4：各種不同的藥品

匯聚狀況	溶質	MnCl ₂	MnSO ₄	NiCl ₂	NiSO ₄	CuCl ₂	CuSO ₄	CoCl ₂	KMnO ₄	K ₃ Fe(CN) ₆



(三)實驗討論：

1. 結果顯示各溶質在相同濃度下的匯聚程度皆為原子團顯色溶質 > 金屬離子顯色溶質，這是因為溶液結冰時，會由外層開始推擠溶質，我們發現此過程中，在水中由結構較大原子團顯色的過錳酸鉀與鐵氰化鉀匯聚現象較為明顯；相反的在水中解離是由金屬離子顯色的錳離子、鎳離子、銅離子、鈷離子匯聚的現象較不明顯。這就是為什麼由較大的葉綠素(C₅₅H₇₂O₅N₄Mg)原子團顯色的綠茶結冰後會發現它有明顯匯聚(如圖 5)，而富含金屬離子的運動飲料(如圖 6)較沒有溶質匯聚的現象。
2. 我們發現在金屬離子顯色的溶質中，即使是同種類的金屬離子也有匯聚的差異。同金屬離子中匯聚程度為在水中解離出三個離子的溶質 > 兩個離子的溶質。經資料查詢與討論後發現是因為不同溶質在水中會解離出不同離子數量，水中所含溶質粒子數越多，溶液的凝固點會越低，此現象稱為依數性質；由於水在結冰時，凝固點較高的純水會由杯壁開始結冰，但內層溶液會因依數性質使凝固點較低，故降到較低溫度才結冰，溶液中粒子數越多，整體降溫至凝固點時間會越久，此過程中有純水往內逐漸結冰而使匯聚更集中。



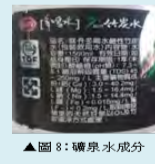
▲圖 4：綠茶結冰 ▲圖 5：運動飲料結冰

【實驗三】探討不同水質的溶劑對結冰後溶質匯聚有什麼影響

(一)變因：	控制變因			操縱變因	應變變因
	1.濃度：0.0015625M	3.容器：550ml 圓柱狀容器	5.冰箱溫度：-15.7°C	不同水質	以不同水質配相同濃度的溶液其溶質在結冰過程中是否匯聚以及匯聚程度的差異
(二)實驗結果：	2.溶質：過錳酸鉀	4.溶液體積：450ml	6.結凍時間：15hr		

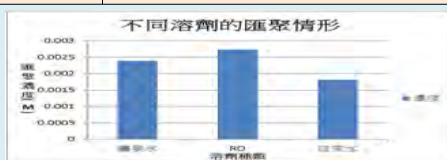


▲圖 6：各種不同溶劑



▲圖 8：礦泉水成分

匯聚狀況	溶劑	RO 水	礦泉水	自來水	氣泡水



▲圖 7：不同溶劑的過錳酸鉀水溶液

1. 由結果得知同濃度下，大部分溶液結冰時都有溶質匯聚的現象，只是在結冰後表現出來的匯聚現象略有差異：

- (1) 在四種水質當中 RO 匯聚最明顯、礦泉水次之，自來水匯聚區塊為此三種中最大，顏色也最淡，氣泡水則無明顯匯聚，內部充斥氣泡和溶質。
- (2) 不同水質的匯聚冰塊中，明顯出現不同的氣泡表現，分別是：RO 冰匯聚體積雖然很小，但只有少數氣泡；礦泉水冰塊中竟出現大量平行結構空氣柱，非常特別！自來水中匯聚較差，也沒什麼氣泡；氣泡水整塊遍布霧狀小氣泡混雜溶質，匯聚狀況最差。
2. 實驗數據可看到 RO 水與礦泉水的溶質匯聚狀況相當好，但礦泉水的匯聚濃度略低於 RO 水，經觀察後我們發現這是因為：
 - (1) 這兩種水源皆過濾到無雜質，冰晶推擠時不會遇到其他阻礙，故最終匯聚濃度皆較高。
 - (2) 礦泉水雖然含有大量礦物質(如鈣、鎂、鈉、鐵離子等)，由實驗二知道這些離子在水中是以較小體積存在，對於冰塊結冰過程影響不大，故在此非決定性影響因素。
3. 我們非常好奇為何 RO 水與礦泉水最終匯聚濃度相似，但氣泡表現差異如此大？且礦泉水中為何出現大量平行結構空氣柱？這些空氣柱對溶質匯聚又有什麼影響？故我們重複這兩組的實驗，並以外接電源的攝影機與 LED 一同冰入冰箱來幫助我們觀察這兩者在結冰過程到底發生什麼事(如圖 9)，實驗結果如下(攝影截圖)：



▲圖 9：攝影截圖實際裝置圖

(1)我們發現在 4.5hr 前，兩組表現幾乎沒有差異；從第 4.5hr 開始，礦泉水組開始邊內縮邊以原溶質移動的軌跡留下一絲絲的空氣柱；最終到 7.5hr 完成結冰後，此過程中礦泉水組不斷重複上述過程，在內縮匯聚的軌跡上留下一條條空氣柱(如礦泉水 4.5hr 到 7.5hr)。

(2)我們發現兩者差異大是因為 RO 水是取自學校飲水機中經過 RO 機過濾、高溫殺菌的純水，在此過程中氣體溶解度因溫度升高而降低，導致水中含氣量大減，後來雖有降溫(各實驗溶劑溫度皆在 30°C)，但此過程於封閉管路中，並無空氣可溶進去，故 RO 水組的含氣量遠低於礦泉水組，故兩者氣泡差異大，而礦泉水組結冰時，冰晶推擠溶質與氣體，導致未結冰部分溶質與氣體密度提高、分子間碰撞頻率變大，而溶質對氣體來說是良好的凝結核，故溶質邊凝結周遭氣體邊移動(如礦泉水 6hr)，使氣泡沿溶質移動產生空氣柱，且礦泉水含氣量較高，氣體並不會全凝結，未凝結氣體被擠壓至中央，造成冰晶不易推擠，故匯聚程度較 RO 水組差。

4.實驗結果發現自來水組雖然有匯聚，但匯聚程度相當差，而且溶質周遭存有圓型小氣泡，這是因為自來水未過濾，所含雜質與氣體皆多，雖仍有匯聚現象，但冰晶往內推擠時所造成的壓力遠大於 RO 水與礦泉水，故匯聚明顯較差；自來水中含氣量雖高，但結果卻無出現樹枝狀氣泡，是因為自來水內部雜質與氣體較多，故溶質能被推擠的程度較小，較不會出現礦泉水組中溶質邊凝結周遭氣體邊移動而產生樹枝狀空氣柱的狀況，而是多數氣體留在原地以鄰近雜質為凝結核形成小圓形氣泡。

5.氣泡水組冰塊呈現白色霧狀氣泡混雜溶質遍布，匯聚狀況最差，這是因為氣泡水中含有大量 CO₂ 氣體，導致結冰時冰晶擠壓溶質所遇到的內部壓力與阻礙非常大，故匯聚程度為四種溶劑中最差的；且因氣體密度原本就很大，故溶質與氣體的碰撞頻率非常高，而使整個冰塊遍布超細微的圓形小氣泡。

【實驗四】探討不同容器對結冰後的溶質匯聚有什麼影響

控制變因		操縱變因	應變變因
1.濃度：0.00156M	4.溶液體積：250ml	不同形狀的容器	相同條件的溶液在不同形狀的容器所造成的匯聚差異
2.溶質：過錳酸鉀	5.冰箱溫度：-15.7°C		
3.溶劑：RO 水	6.結凍時間：15hrs		



▲圖 11：不同形狀的各種容器



▲圖 12：各容器結冰狀況

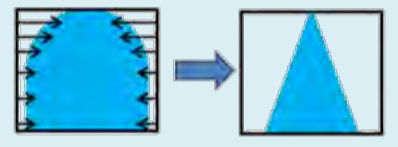
(二)實驗結果：

容器	市售飲料杯	半球體	正方體	圓筒(直徑 6.4cm)
匯聚狀況				
0hr				
3hr				
4.5hr				
6hr				
7.5hr				

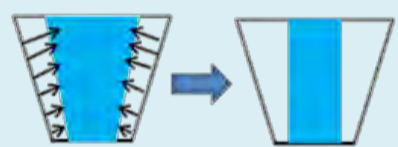
容器	圓筒(直徑 8.4cm)	長方體
匯聚狀況		
0hr		
3hr		
4.5hr		
6hr		
7.5hr		

(三)實驗討論：

1.角錐狀匯聚組：非常意外的是，我們以為杯中溶液會如課本所說因熱對流而從表面開始結冰，但由影片發現無論是哪種容器都是由容器最外圍(包含上下與四周)開始結冰，進而往內推擠溶質，使溶質被擠壓成球狀、濃度較高的區域(如角錐狀匯聚組 4.5hr)，這是因為水的熱傳導與對流速度沒想像中的快，所以四周與底部的水被冰箱降溫後未獲得內部熱量就先結冰了；各容器內溶質繼續以近似橢圓狀的型態被往內擠壓，直到 3~4.5hr 時，此時溶質區域顏色相當深，造成較大壓力使冰晶推擠變慢，最終到 4.5~6hr 我們發現匯聚區底部與上半部推擠速率開始出現差異，匯聚區上半部依舊穩定被向內推擠，但底部卻無法繼續推入溶質，最終成了一個下寬上窄的角錐狀匯聚區；我們懷疑溶質因內壓極大而呈現直立橢圓狀時(如角錐狀匯聚組 4.5hr)，由於溶液深度越大水壓越大，以及溶質受重力影響導致沉降在底部的濃度會略高於上半部，以上兩因素造成此時匯聚區的下半部壓力大於上半部壓力，故冰晶推擠時受到的阻礙不同，而有下寬上窄的角錐狀匯聚區產生。

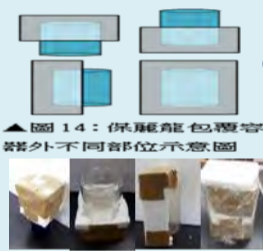


2.圓柱狀匯聚組：由影片我們發現這兩組皆為上寬下窄的容器，故一開始由容器最外圍開始均勻向內結冰，冰晶層是以容器形狀向內推擠溶質而形成上寬下窄的匯聚區(如圖 13)，但底部濃度與壓力較大，使冰晶推擠速率慢於上半部，故這種上快下慢的速度差異反而減少了匯聚區的寬度差，形成上下寬度相近的圓柱狀匯聚。



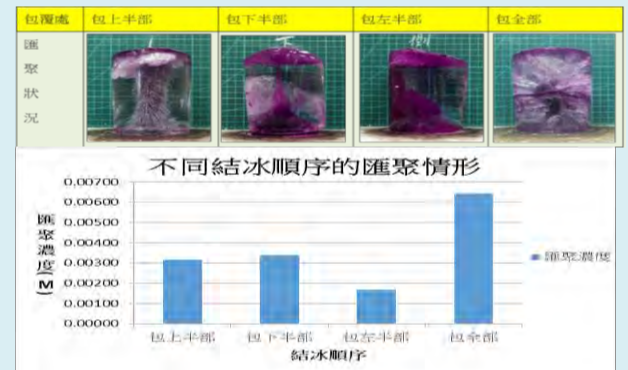
【實驗五】探討不同結冰順序對結冰後的溶質匯聚有什麼影響

控制變因		操縱變因	應變變因
1.濃度：0.00156M	4.溶液體積：450ml	用保麗龍包住不同部位的容器以控制不同結冰順序及速率	不同結冰順序或速率所造成的溶質匯聚程度差異
2.溶質：過錳酸鉀	5.溶劑：RO 水		
3.容器：550ml 的圓柱狀容器	6.冰箱溫度：-15.7°C		
7.結凍時間：15hrs			



▲圖 14：保麗龍包覆容器外不同部位示意圖

(二)實驗結果：



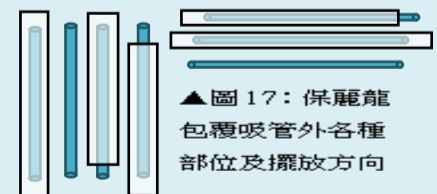
(三)實驗討論：

1.實驗結果發現同濃度下，無論何種結冰順序結冰時都有溶質匯聚的現象，只是在結冰後表現出來的匯聚現象有差異：
 (1)由實驗數據與結果我們發現匯聚濃度：包全部>包下半部>包上半部>包左半部。
 (2)不同結冰順序的匯聚冰塊顯現出不同的溶質匯聚形狀，分別是：包上半部→圓柱狀匯聚貫穿冰塊上下端；包下半部→溶質集中匯聚在下方；包左半部→溶質集中在左半邊，沿著杯壁匯聚成上窄下寬的巨大三角錐；包全部→溶質壓縮到冰塊正中央，且四周出現許多裂痕。
 2.包下半部因上半溶液先結冰使冰晶將溶質逐漸往下推擠，加上重力亦吸引溶質向下降沉，兩者效應相加使溶質匯聚區主要集中在下半部；包上半部因下半溶液先結冰溶質被往上及中央推擠，但重力吸引溶質向下降沉且底部的水壓較大，導致冰晶向內推擠到某濃度便無法推入，故匯聚形狀不像其他組為窄角錐狀而是上下寬度差異不大的圓柱狀匯聚。包左半部因右半溶液先結冰使冰晶如一道牆往左推進，但未結冰的溶質區底部的水壓較大+重力對溶質的吸引力導致這道冰牆受到下半部的推擠阻力遠大於上半部，故最後沿著杯壁匯聚成一個上窄下寬的巨大三角錐。包全部因全部包覆保麗龍導致整體要結冰所需時間最長，可以讓冰晶穩定的向內推擠溶質，故其匯聚壓縮率最高壓力最大，最終匯聚於冰塊的正中央，但裂縫最多也最集中。

【實驗六】探討各種狀況下不同結冰順序所造成的匯聚濃度差異

(一)研究目的：由實驗一~五結果發現冰塊中溶質匯聚區非均勻分布，而是依結冰的順序而有不同濃度之分(如圖 16)；我們很好奇在不同結冰順序下產生濃度有何差異，我們決定使用珍奶吸管配合保麗龍盒來控制結冰順序以觀測不同結冰順序所造成的匯聚濃度差異。首先我們想知道如何用保麗龍包覆吸管能使結冰過程推擠溶質的效果最好。故本實驗設計出不同保麗龍包覆法配合擺放角度來觀察其匯聚的差異。

控制變因		操縱變因	應變變因
1.濃度：0.0015625M	3.容器：珍奶吸管加軟木塞	不同保麗龍包覆法配合不同擺放角度	觀察不同操縱變因造成的溶質匯聚效果差異
2.溶質：過錳酸鉀	4.溶劑：RO 水		
3.容器：珍奶吸管加軟木塞	5.體積：18ml		
6.冰箱溫度：-15.7°C			
7.結凍時間：15hr			



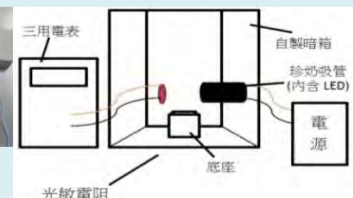
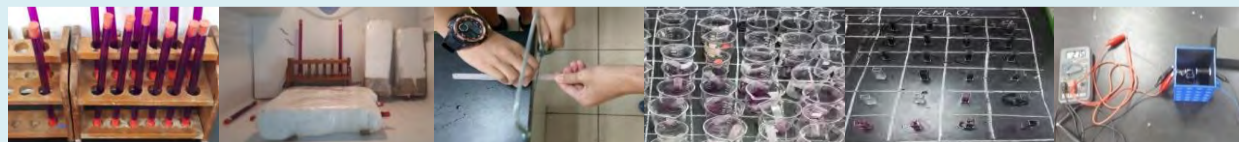
▲圖 17：保麗龍包覆吸管外各種部位及擺放方向



▲圖 16：匯聚區域的顏色並非均勻分布

先配成 0.00156M 的過錳酸鉀水溶液，裝入珍奶吸管中並以橡皮塞封緊。再使用保麗龍分別包住相對應的各種部位。將各種不同包覆方法的過錳酸鉀水溶液吸管組放入冰箱中，靜置一晚等待其完全結冰。隔天將結冰的各吸管組取出，用線鋸以每段 4.5cm 平均切成四段，待熔化後用自製離子濃度檢測器測量其濃度的差異。

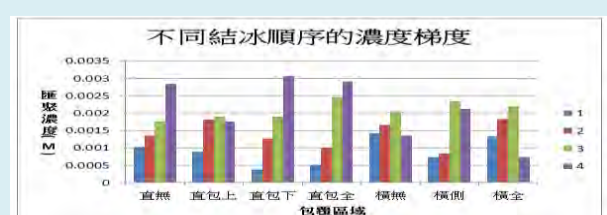
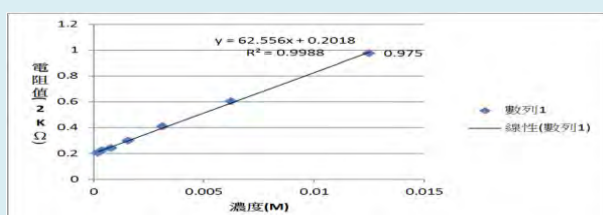
(四)研究方法：自製離子濃度檢測器



▲圖 18：自製離子濃度檢測器裝置示意圖

1.裝置目的：我們想設計簡單便宜的儀器來取代昂貴的光譜儀。並且以簡單的步驟，準確的測出不同濃度的過錳酸鉀水溶液
 2.裝置原理：由比爾定律指出，在一定的波長下，光的吸收量與吸光材料的濃度成正比，所以我們利用光敏電阻隨光照量的不同改變電阻的原理來觀測有色溶液的離子濃度。
 3.製作檢量線：首先取各種濃度的過錳酸鉀標準溶液裝入比色管並記錄相對應的電阻值，接著將資料輸入 Excel，製作檢量線方程式，最後將電阻值代入即可得濃度數值(若濃度過高，超出檢量線範圍，就先將該溶液稀釋到檢量線範圍，再回推原濃度；若濃度過低到接近純水則標示「接近純水」)。

(五)實驗結果：



(六)實驗討論：

在本實驗中，我們利用**珍奶吸管+保麗龍來控制溶液的結冰順序**，再分割冰塊，待其融化後以自製離子濃度檢測器測出每一段溶液離子的濃度。

1.實驗數據發現，在相同濃度下，**各種結冰順序皆有匯聚，只是各組溶質匯聚程度與濃度分布趨勢不盡相同**：

(1)垂直擺放→包下、包全與無包皆是**越往下匯聚濃度越高**，且包下匯聚程度最佳，包全次之；無包與包上組則匯聚程度相對較差。

(2)水平擺放→包全與無包皆是**往中央兩段集中**，包側則越往包覆深處匯聚濃度越高。

2.實驗數據發現垂直包下與包全最終端居然逼近初始濃度兩倍！為何其濃度能這麼高？為何包上匯聚會與其他結冰順序差那麼多？我們發現：

(1)垂直擺放+包覆下方：溶質一邊被**冰晶**往下**推擠**，一邊被**重力**往下吸引，**兩者效應加成**使整體結成**下濃上稀的「濃度梯度」**的狀況，故匯聚程度最好。

(2)垂直擺放+全部包覆：本組結冰速率最慢，給予溶質充足時間被推擠到匯聚區，但其「濃度梯度」差異卻不如包下組明顯，這是因為雖然溶質粒子也受到地心引力的影響，使較多粒子沉降到溶液下半部，但這組**結冰是緩慢的由四周往中心匯聚**，而非如包下組**冰晶由上而下推擠溶質**(如圖 19)，故其各段的濃度差異相對較小。

(3)垂直擺放+全部不包覆：雖然溶質粒子也會受地心引力影響，使溶質沉降於下半部，但由於結冰速率最快，溶質可匯聚時間最短，加上匯聚方向由四周往中心推擠，故其「濃度梯度」差異較不明顯。

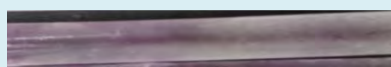
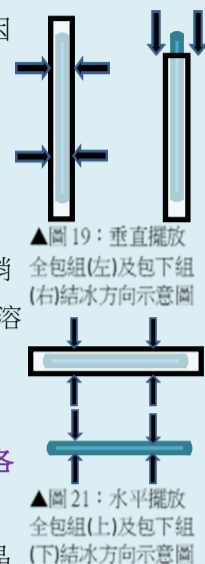
(4)垂直擺放+包覆上方：我們**預估冰晶推擠力會把溶質往上推擠，使濃度梯度由下至上逐漸變濃**，可是結果卻顯示只有最下方溶質稍被往上推，其餘三段匯聚濃度相近，匯聚效果很差，我們發現是因為溶質邊被冰晶往上推擠邊受重力往下吸引，**兩力相抗衡**，導致溶質不大能被冰晶推擠上去，故我們發現**地心引力影響遠大於冰晶推擠力**。

3.由實驗結果可得知，水平擺放匯聚出的「濃度梯度」差異普遍不明顯，這是因為：

(1)水平擺放+無包/全包：溶液水平冷凍時，溶質分布呈**水平線匯聚**(如圖 20)，因其由四周開始向內推擠溶質時受重力影響而**沉降在各段的底部**，並非往同一區集中(如圖 21)，故無「濃度梯度」現象。

(2)水平擺放+側包：冰晶由未包覆處開始推擠溶質，雖最終結果呈內濃外稀現象，但重力使溶質向下沉降，導致底部壓力較大、冰晶推擠時阻力較強，故推擠效果不如垂直擺放組。

▲圖 20：水平線匯聚



▲圖 20：水平線匯聚

【實驗七】探討不同濃度溶液結冰後匯聚出的「濃度梯度」差異

(一)研究目的：由實驗六的結果發現得知**珍奶吸管垂直擺放**並用**保麗龍包覆**吸管**下方**可使溶質推擠效果最好，因此我們便利用這個方法進一步探討相同溶質在不同濃度下依序結冰後匯聚出的「濃度梯度」差異

(二)變因

控制變因	操縱變因	應變變因
1.溶質：過錳酸鉀 2.容器：珍奶吸管加軟木塞 3.溶劑：RO水	4.體積：18ml 5.冰箱溫度：-15.7°C 6.結凍時間：15hr 7.保麗龍包覆吸管下方並垂直擺放進冰箱	不同濃度的溶液匯聚出的「濃度梯度」差異

(三)實驗結果：



(四)分析與討論：

從實驗結果得知，**不論濃度的大小都存在不同程度的「濃度梯度」現象**：

1.由數據發現實驗一中觀察不到匯聚的**高濃度組其實也有匯聚現象**，證明冰晶在高濃度組也可推擠溶質，只是推擠一小段就造成其餘濃度極高、壓力與阻力極大而不太能繼續往內匯聚溶質，故結冰完後面三段都呈現高濃度但差異不大、「濃度梯度」現象不明顯的狀況。

2.如同實驗一結果，這五組濃度亦由 0.00313M 往下出現明顯匯聚表現，其結冰後切割出來的四段濃度差異很大而有「濃度梯度」的現象，甚至前端有純化到接近純水的狀況。證明其實**匯聚在冰塊中的溶質區域並非均勻分布，而是依結冰的順序而有低、中、高濃度之分**，故才會在先前的實驗中觀察到匯聚區會有濃淡分層的現象，分別對應到最先結冰的**純水層**→角錐狀匯聚外圈**溶質稀疏處**→角錐狀匯聚**內層上半部**→角錐狀匯聚**內層下半部**(壓力+重力吸引最高濃度區)(如圖 24)。

伍、結論

【實驗一】探討不同濃度對相同溶質結冰後的匯聚有什麼影響：實驗結果發現過錳酸鉀水溶液在低於濃度 0.00313M 時開始出現溶質匯聚現象，且濃度越低匯聚體積越小，但高於 0.00313M 後便無明顯匯聚，因**冰塊內部冰晶推擠力不足以克服分子間碰撞力而無法將溶質壓縮**。高濃度匯聚組匯聚濃度相近，因為冰晶推擠力向內推擠、分子間碰撞力向外抵抗，兩者互相抗衡，最終到「**臨界濃度值**」後便停止匯聚。雖然低濃度組**內縮體積較小**，但**匯聚濃度仍低於高濃度匯聚組**，因其原始濃度較低，故需匯聚至較小的體積才能到達「臨界濃度值」，但冰晶會將水中的氣體一併推入，造成內部壓力較大而匯聚程度較差。

【實驗二】探討相同濃度但不同溶質結冰後的匯聚差異：我們發現由**帶電原子團顯色(MnO₄⁻、Fe(CN)₆³⁻)的溶質匯聚程度會較好**，但由**金屬離子顯色(Mn²⁺、Ni²⁺、Cu²⁺、Co²⁺)的溶質匯聚程度較差**。而在**相同金屬陽離子下**，由於依數性質導致在**水中解離出三個離子的溶質匯聚程度皆大於兩個離子溶質**。

【實驗三】探討不同水質的溶劑對結冰後溶質匯聚有什麼影響：四種溶劑的匯聚程度為 RO 水>礦泉水>自來水>氣泡水，溶劑內雜質與氣體越多，匯聚越差，是因為冰晶推擠時會將雜質與氣體一同推入，故溶劑中所含的雜質與氣體越多，匯聚區的壓力越大、匯聚程度越差。礦泉水中出現大量的**平行結構樹枝狀氣泡柱**，這是因為冰晶往內推擠溶質與溶在水中的氣體，導致氣體密度提高，分子間的**碰撞頻率**增加，且細小的溶質為良好的**凝結核**易使周圍的氣體附著其上來產生較大的氣泡，故溶質會邊凝結周遭的氣體邊移動，使氣泡沿著溶質的移動軌跡產生空氣柱。

【實驗四】探討不同容器對結冰後的溶質匯聚有什麼影響：不同種類的容器會造成匯聚形狀的不同，大致分成角錐狀 vs 圓柱狀匯聚。**上下寬度一致的容器(角錐狀匯聚)**：結冰前溶質均勻分布→由外圍開始結冰向內擠壓溶質成圓球狀→冰晶隨時間向內推擠溶質成橢圓狀→由於**下方壓力較大**，導致**結冰速度較上方慢**，最終匯聚成角錐狀；**上寬下窄的容器(圓柱狀匯聚)**：容器底下較窄會先結冰推擠溶質成上寬下窄分布，因底部濃度與壓力較大使冰晶往內推擠速率慢於上半部，這種上快下慢的**推擠速度差異**反而減少了匯聚區的上下寬度差，最終形成上下寬度相近的圓柱狀匯聚。

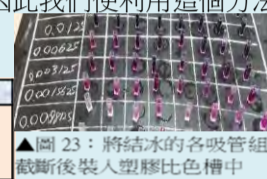
【實驗五】探討不同結冰順序對結冰後的溶質匯聚有什麼影響：匯聚濃度：包全部>包下半>包上半>包左半，不同結冰順序有不同的溶質匯聚形狀。包全部因**所需結冰時間長**、冰晶推擠穩定，故匯聚最好，且其溶質匯聚於正中央，四周有許多裂痕；包下半因**冰晶推擠力及重力**牽引使溶質沉降，故溶質集中匯聚在下方；包上半：溶質受到冰晶往上推擠力與重力往下吸引力，**兩者互相抗衡**導致冰晶向上推擠不易，故最終成圓柱狀匯聚；包左半：右半部溶液先結冰使冰晶往左推擠，但底部水壓較大+重力使溶質沉降導致**下半部推擠阻力大於上半部**，故沿著杯壁匯聚成一個大三角錐。

【實驗六】探討各種狀況下不同結冰順序所造成的匯聚濃度差異：垂直擺放組受重力影響，所以匯聚程度大多比水平好，包下組由於上面先結冰使**冰晶向下推擠及重力幫助使「濃度梯度」現象最明顯**；而包上組則由下面先結冰使冰晶向上推擠，但溶質所受重力向下而使濃度梯度現象最差。水平擺放組匯聚程度大多比垂直擺放差，因溶液水平冷凍時溶質受重力影響沉降在各段的底部而非如垂直擺放時往同一區集中，故濃度梯度現象較差。

【實驗七】探討不同濃度溶液結冰後匯聚出的「濃度梯度」差異：實驗證明實驗一觀察不到匯聚現象的高濃度組也有冰晶推擠溶質的現象，只是推擠不多就因後段濃度極高、阻力極大而無法繼續往內匯聚，故後三段都呈高濃度且差異不大。0.00313M 往下開始出現明顯的匯聚表現，**溶質依照結冰的順序出現「濃度梯度」現象**。證明實驗一~五的**大冰塊溶質匯聚區並非濃度均勻分布**，而是**依結冰的順序有低、中、高濃度之分**，故才會在先前的實驗觀察到匯聚區有濃淡分層的現象，分別是純水層(最先結冰)、匯聚外層溶質稀疏處、匯聚內層上半部、匯聚內層下半部(壓力+重力吸引到最高濃度)。

陸、參考資料與其他

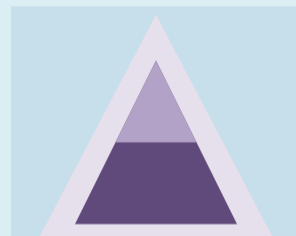
- 張慈映、董曉琦、洪琬卿(1986)。透明中的朦朧-冰中不透明的探討。中華民國第 26 屆科學展覽會。
- 趙孝哲、張鈺菱、涂高璋、趙洵(2005)。控冰大不同-探討影響冰晶的因素。中華民國第 45 屆科學展覽會。
- 劉婕宇、林子珉、林品君(2011)。冰漩渦。中華民國第 51 屆科學展覽會。
- 楊立盛、林建達、湯凱誠、鄧宇盛(2007)。以自製工具觀測水溶液結冰的濃度變化。中華民國第 47 屆科學展覽會。
- 莊博璋、葉智龍、張定閔(2018)。您喝的水多「氣」了嗎。中華民國第 58 屆科學展覽會。
- 曾柏睿、涂心瑜、譚采芸(2018)。被冰封的漩渦流-探討放熱式漩渦的氣體逃逸路線。中華民國第 58 屆科學展覽會。
- 郭重吉發行(2011)。國民中學自然與生活科技二上課本。康軒文教事業出版。
- 這世上到底能有幾種冰，你了解水嗎？(2015)。千趣網。取自 <http://itw01.com/2UCKQEG.html>



▲圖 23：將結冰的各吸管組截斷後裝入塑膠比色槽中



▲圖 22：已裝入珍奶吸管中的不同濃度過錳酸鉀水溶液



▲圖 24：溶質匯聚區的濃度差異示意圖