

2024 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

國中組 成果報告表單

題目名稱：水結「冰」清 - 水結冰探討海水淡化的可能性

一、摘要

水是 21 世紀後的戰略資源，如何取得乾淨的用水成為重要關鍵，我國四面環海，但因山高河短導致夏天常有缺水或限水議題，如何有效將海水轉化成淡水成為重要課題，本報告提出以結晶純化法代替蒸餾法取得淡水，有效節能 83%，並透過 ImageJ 軟體及食用色素藍色一號 FCF 有效判讀雜質比例，再利用控制容器位置，以緊密同心圓排列可提高結冰雜質去除率水達 97.36%，實驗中結冰水 TDS 值 51-96mg/L 符合我國飲用水水質標準，從鹽水降溫實驗中得到最有效冷凍時間，最後利用萬里地區海水進行結晶純化法，成功有效淨化成淡水。

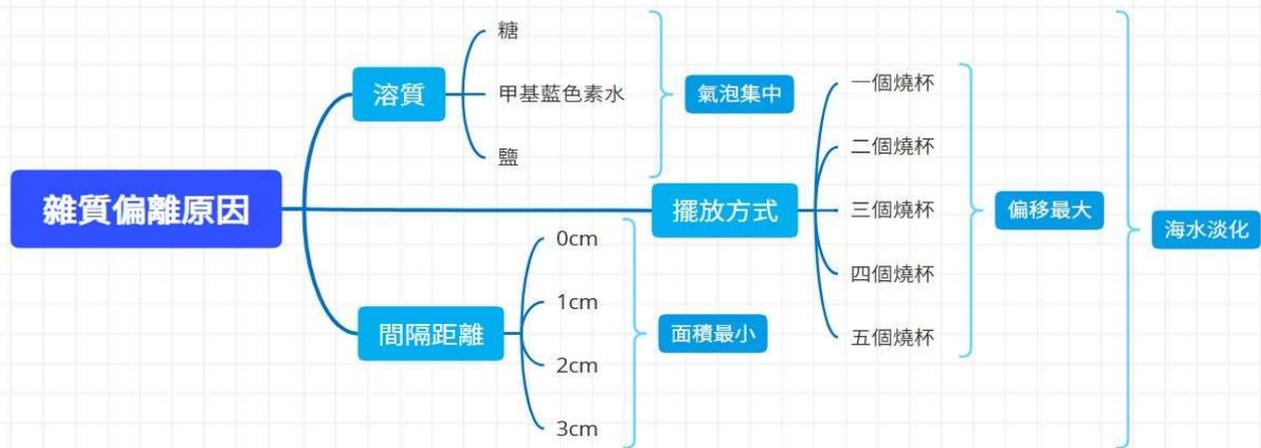
二、探究題目與動機



夏天喝飲料時，發現冰塊中間有類似小氣泡聚集的現象，並不是一個完整的透明冰塊，透過放大鏡觀察冰塊，發現雜質或氣體都集中在冰塊中心，外圍則是完整的透明冰。我們想，這種水凝固成冰的過程，是否能有效純化水溶液，進而將純水與其他雜質分離？因此著手收集資料進行研究。

三、探究目的與假設

水凝固成冰主要是在相同壓力下，溫度降低達凝固點產生的物理現象，因此容器中，水凝固的順序應為先接觸冷空氣之水分子到後接觸冷空氣之水分子，也就是從表面到溶液中心，過去研究水結晶純化法的科學報告都無法有效計算純水與雜質分布的比例，因而透過生物細胞實驗常用的影像分析軟體 ImageJ 幫忙試圖克服此問題，而水結冰的過程，水分子間會透過氫鍵互相連結，而凝固過程會將非水物質排除在外，將雜質除外的方式與常見的薄膜法或蒸發法的海水淡化方式有異曲同工之妙，因此想透過以下變因找出最有效率純化水的結晶方式，最後進行海水淡化工程。



- (一)探討不同溶質水溶液，透過結晶純化法結合圖像分析的影響。
- (二)改變盛水容器不同擺放位置，研究雜質分布最集中之方式
- (三)不同容器間隔，對雜質分布的影響。
- (四)觀測不同濃度鹽水溶液凝固時溫度的變化。
- (五)模擬海水淡化，將鹽水溶液分離雜質與冰，計算淨化率。



所需物品如下：500ml 燒杯、二號砂糖、食鹽、食用色素藍色 1 號、電子秤、鋁箔紙、玻棒、TDS 檢測儀、塑膠籃、加熱棒、隔熱手套、冷凍庫、Go Direct 溫度感測器。

四、探究方法與驗證步驟

實驗一、不同溶質水溶液透過結晶純化法，冰中雜質的分佈情形。

(一) 實驗步驟：準備亮藍 FCF 水溶液、鹽水、糖水各 500 毫升溶液，重量百分濃度分別配置 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1%，攪拌均勻直到溶質全數溶解，以兩層鋁箔紙覆蓋並貼杯壁壓齊，放入冷凍庫 48 小時至凝固，將冰塊從冷凍庫取出，從杯口上方 20 公分處拍照，並透過 ImageJ 分析雜質面積。



配置溶液



鋁箔紙覆蓋



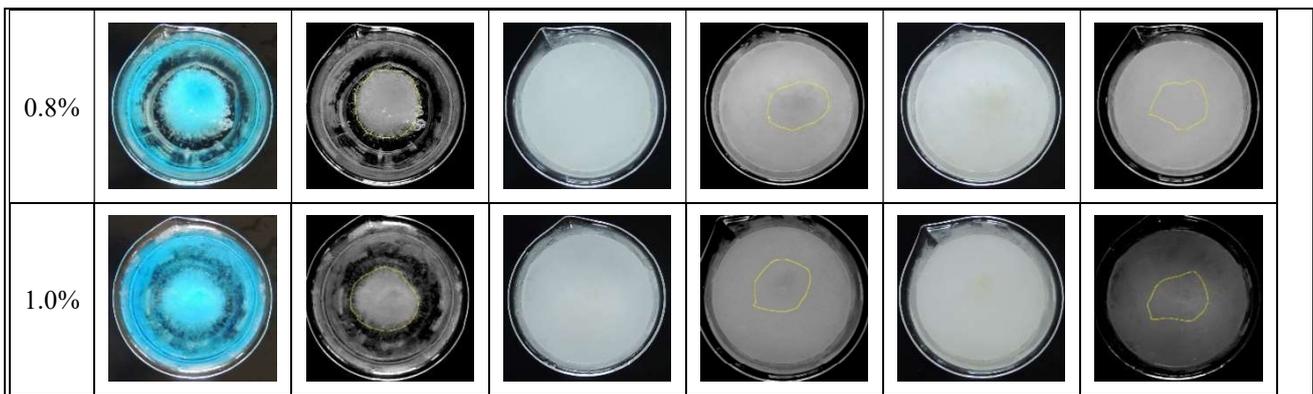
放入冷凍庫



結冰取出拍照記錄

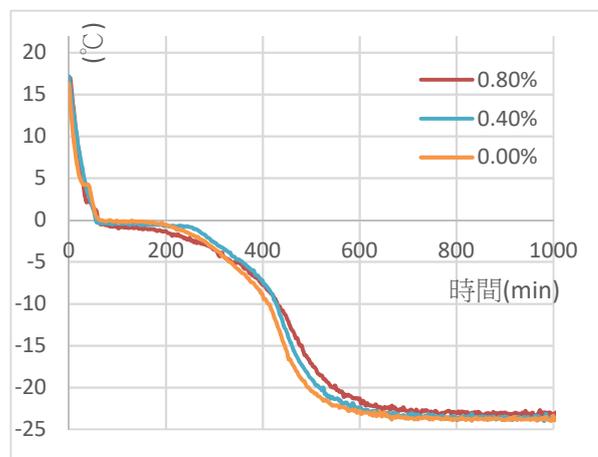
(二) 實驗結果：

	亮藍 FCF 水溶液		糖水		鹽水	
	原圖	ImageJ	原圖	ImageJ	原圖	ImageJ
0.2%						
0.4%						
0.6%						

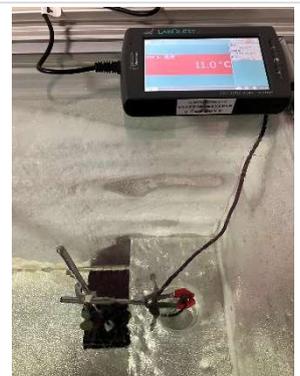


雜質面積占比	0.2%	0.4%	0.6%	0.8%	1.0%
亮藍水溶液	28.56%	29.89%	31.17%	32.98%	33.56%
糖水	19.52%	17.83%	16.71%	16.05%	15.08%
鹽水	11.01%	10.66%	9.76%	9.07%	8.04%
清水	27.20%				

首先從實驗照片可知，透過色素作為溶質，有助於觀察水溶液凝固時雜質的分布狀況，透過 ImageJ 分析，更能協助判讀無色溶液凝固後，雜質分布的狀況。從各種水溶液雜質分布和清水所形成清冰的雜質分布比例可知，亮藍水溶液的雜質佔比 28.56% 和清水凝固後所形成的雜質佔比 27.20%，差距不大；反倒是鹽水 8.04% 與 15.08% 和清冰有顯著的差異，主要原因應為亮藍的分子量 793 較大，而鹽分子量 58.5、糖分子量 342 相對較小，在相同重量百分濃度下，分子數量鹽 > 糖 > 亮藍，且鹽為離子化合物，溶於水後會解離出鈉離子 (Na⁺) 和氯離子 (Cl⁻)，溶質溶於水後的粒子數越多，會讓凝固點越低，也就是相同降溫條件下，該水溶液凝固時間會越長，導致雜質被冰擠出來的時間越充足，能讓雜質更聚集在更小的空間內。為了證實這個推論，我們使用 Go Direct 溫度感應器記錄不同濃度鹽水在相同冷凍庫中降溫狀況。如右圖。



從圖中可發現，到達凝固點時，0.0% 的凝固點維持 117 分鐘，才有明顯下降，而 0.4% 的凝固點則維持 189 分鐘，且凝固範圍介於 -0.02°C 到 -0.92°C，為標準混合物凝固點的呈現方式。也就是鹽水濃度越高，溫度下降越慢，結凍時間越長，雜質有更多的時間移動，導致雜質中心柱越集中的現象，符合實驗一鹽水的結果。



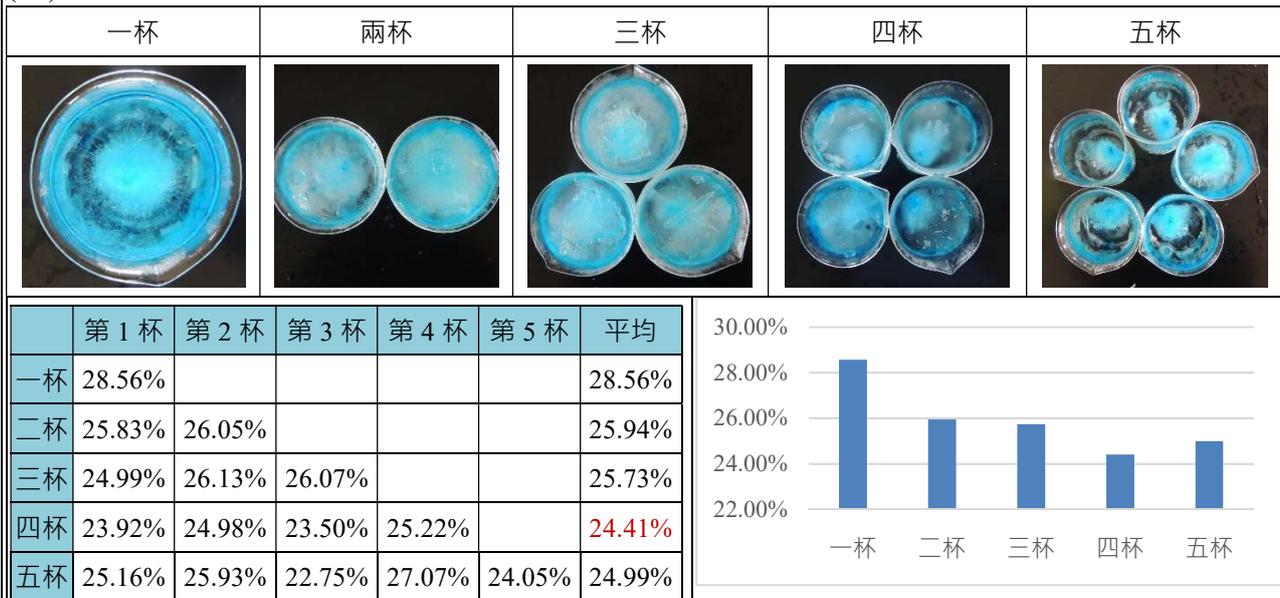
從圖中可發現，到達凝固點時，0.0% 的凝固點維持 117 分鐘，才有明顯下降，而 0.4% 的凝固點則維持 189 分鐘，且凝固範圍介於 -0.02°C 到 -0.92°C，為標準混合物凝固點的呈現方式。也就是鹽水濃度越高，溫度下降越慢，結凍時間越長，雜質有更多的時間移動，導致雜質中心柱越集中的現象，符合實驗一鹽水的結果。

實驗二、不同燒杯排列方式，對雜質分布的影響。

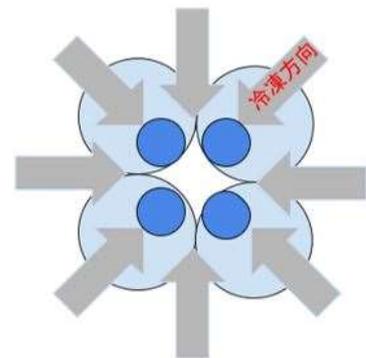
(一) 實驗步驟：

為方便觀察，準備 1% 亮藍水溶液，分別以一杯、兩杯、三杯、四杯、五杯排列成點、線、正三角形、正方形、正五邊形不同形狀，觀察分析雜質聚集效果。

(二)實驗結果：



從實驗結果可知，在四杯燒杯緊密靠攏的情況下，雜質佔燒杯圓面積僅 24.41%，比起單獨一杯 28.56% 冷凍結晶時更有效聚集雜質，從右方俯視圖可觀察出，透過燒杯靠攏的方式排列，產生雜質往燒杯上方靠近，也就是該靠近方向是朝向燒杯間所包圍的中空圓心，有此結果推測是因冷凍庫的冷房效果是由燒杯外圍往內傳遞，即最外圍先接觸到冷氣的水分子最先凝固成冰，而具有雜質的水溶液因凝固點下降，外加因外圍水已結冰，雜質被迫往溫度相對高的溶液中心靠近，導致雜質周圍溶液濃度隨時間越來越高，凝固點越降越低，冷凍時間也拉長，使雜質有偏移集中的效果，從側面照片也可看出雜質有向照片右方聚集，而非在燒杯的正中間。

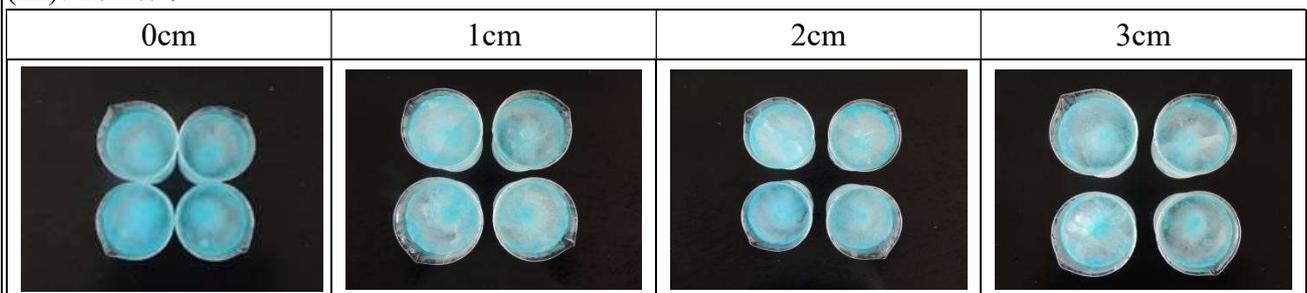


為了證實燒杯中間包圍的空間影響雜質聚集與偏移的效果，因此設計實驗三。

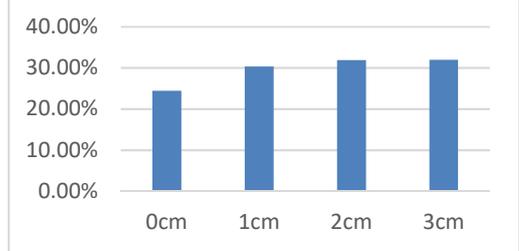
實驗三、燒杯不同間格距離對雜質分布的影響。

(一)實驗步驟：準備四組各四杯 1% 的亮藍水溶液，間隔分別為 0cm、1cm、2cm、3cm 排列。

(二)實驗結果：



	第 1 杯	第 2 杯	第 3 杯	第 4 杯	平均
0cm	23.92%	24.98%	23.50%	25.22%	24.41%
1cm	30.26%	27.98%	31.65%	31.28%	30.29%
2cm	31.04%	31.21%	32.21%	32.92%	31.85%
3cm	31.32%	28.10%	32.75%	35.71%	31.97%



從實驗結果證實推測，確實間格 0cm 能有效延緩中心處溫度下降，導致燒杯內由擺放形狀的外圍降溫至中心結凍，排列較鬆散時燒杯外圍冷空氣容易藉由燒杯間的空隙，冷氣長驅直入，導致含雜質水溶液凝固時的偏移效果大大減弱，且間隔越大，雜質分布面積佔比越高，越難有效淨化水質。

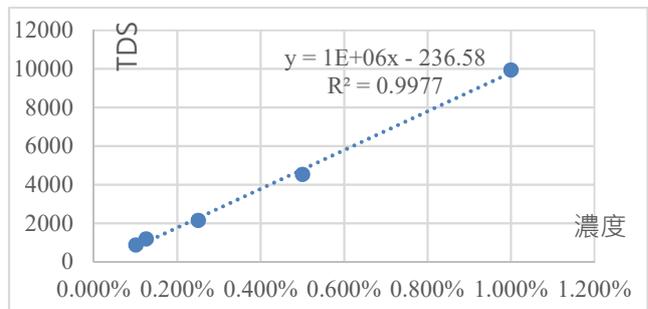
實驗四、模擬海水淡化，計算鹽水溶液冷凍結晶後淨化效率。

(一)實驗步驟：準備 0.2%的鹽水，分別測量 TDS 後，以個別凝固與緊密排列擺放進行凝固結冰 48 小時，完成後取出拍照，並利用自製加熱棒對準雜質聚集區進行加熱融化，並蒐集雜質水溶液，分離不同質量雜質水溶液及純冰，待完全融化後測量 TDS。

(二)實驗結果：

編號	鹽水濃度	原溶液 TDS(mg/L)	融化水重量(g)	融化雜質區 TDS (mg/L)	淨化後 TDS(mg/L)	淨化後濃度	雜質去除率
甲	0.2% (緊密)	1947	38.5	7430	96(-46)	0.03326%	95.07%
乙	0.2% (緊密)	1932	77	5690	51(-46)	0.02876%	97.36%
丙	0.2% (獨立)	1908	101.1	6613	76(-46)	0.03125%	96.01%
丁	0.2% (獨立)	1964	111.3	6460	97(-46)	0.03336%	95.06%

從數據中可發現，相同的 0.2%有接近的 TDS，以乙杯為例，結冰後可讓雜質的 TDS:1932mg/L 提升至 3 倍左右，而除去雜質的 TDS 皆僅約是雜質區 TDS 的 1%，每一杯的結果都可證實結晶純化法可有效將雜質集中，有利於小面積有效率去除後取的純水。為了推算 TDS 與溶質重量百分濃度的關係，因此另外做了檢量線如右圖，從圖中所得 R^2 達 0.99，可從趨勢線的公式反推重量百分濃度。從甲乙兩杯可證實周遭淨化水體 TDS 也會隨著融化雜質體積的上升而下降，也就是越靠近雜質中心，雜質或鹽份的濃度越高，淨化後水的 TDS 接近世界衛生組織飲用水 TDS 標準 50mg/L，淨化率達到了 85%~87%左右，可以驗證海水淡化的可行性。



五、結論與生活應用

(一)結論

1. 鹽、糖、色素等非水雜質溶於水後，透過降溫結晶純化的過程都會產生聚集的現象，而聚集現象的明顯程度，與溶於水中的雜質粒子數量有正相關，溶質越多或溶於水後解離粒子越多，雜質能越集中，進而達到更有效率的純化效果。
2. 不同排列方式也會影響雜質聚集的效果，以四個燒杯緊密排列，讓水溶液其中一側較晚凝固，可讓雜質聚集於該處，有利後續去除。
3. 除透過色素亮藍進行實驗方便觀察與判斷外，利用 ImageJ 也有助於糖水、鹽水等無色溶液的判斷。
4. 透過水結冰後，雜質聚集的特性進行淨化水質，去除率可達 97.36%，且淨化後水體的總溶解固體量最低可達 51mg/L，以符合我國該項飲用水標準。

此外水溶液的結晶純化法比起傳統的蒸發法更節能，可透過 $H=mS\Delta T$ 及凝固熱與汽化熱進行能量計算：以 1g 水溶液在常溫常壓下做計算

蒸餾法：升溫 $H=1\times 1\times(100^{\circ}\text{C}-25^{\circ}\text{C})=75$ 卡，汽化 $H=1\times 540=540$ 卡，總共 615 卡。

結晶法：降溫 $H=1\times 1\times(0^{\circ}\text{C}-25^{\circ}\text{C})=-25$ 卡，凝固 $H=1\times(-80)=-80$ 卡，總共-105 卡。

也就是透過結晶純化，在常溫狀態下耗能僅為蒸餾法的 0.17 倍。

(二)應用

根據上述結果，我們取自萬里地區的海水 500mL 進行緊密排列的結晶純化法。實驗數據如下表。

水源	原溶液 TDS(mg/L)	融化水重量(g)	融化雜質 TDS (mg/L)	未融化部分 TDS(mg/L)	去除率
萬里(甲 1)	13600	77.0	44600	1184	91.29%
萬里(乙 1)	17240	84.1	42370	1324	93.36%
萬里(乙 2)	13240	72.1	5217	56	95.77%

透過結晶純化一次後的萬里海水(甲 1)，可成功去除 91.29%的鹽分，但淨化後的海水 TDS 濃度達 1184mg/L，尚未符合我國飲用水標準。但取一樣的樣品經過兩次結晶純化(乙 1、乙 2)後，可將原本 TDS 高達 17240 mg/L 降至 56 mg/L，符合我國飲用水該項標準。

水溶液的結晶純化法不僅可以節省能源，也可以將高含鹽量的鹵水集中處理，無論從能源或是環境永續角度思考，結晶純化的海水淡化法是可行的方案。

參考資料

- (一) 邱瑞焜 (2016)。環航怎喝水?逆滲透器 可把海水變淡水。聯合報海洋教育台灣篇。
- (二) 海洋科學廳，展版號碼 0625、0603、0606、0623。地球的海若是乾了、水對地球的重要、海水的鹽度、海水所含成份。海洋科技博物館。
- (三) 柯秉承、陳宥碩 (2021)。「冰清玉潔」-「結冰法海水淡化系統」的設計。中華民國第 61 屆中小學科學展覽會。