

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 化學科

080204

又大又通透的銨明礬結晶寶石之研究

學校名稱： 高雄市三民區博愛國民小學

作者：	指導老師：
小六 郭青玉	黃丙焜
小六 劉品箴	吳官展
小六 林芯宇	

關鍵詞： 銨明礬、結晶

又大又通透的銨明礬結晶寶石之研究

摘要

想做出又大又通透的銨明礬結晶，在濃度上可以選擇 15g/100ml，因為濃度太高會凝聚在一塊，顏色不透明；濃度太低則無法形成結晶。

冷卻速度太快，結晶體積會變小；而冷卻速度太慢，會造成結晶偏白且體積也變小。所以使用保溫袋做適度保溫是不錯的選擇。

另外減緩蒸發(結晶量少、尺寸小)、使用蒸餾水(各方面與自來水差異不大)、重複養晶(體積增加、但透明度減少)以及流動(量多但細碎)等變因影響都不是很正面。

適度添加硼酸、稀硫酸及溶解溫度降低可以提升透明度；而氯化鈉與硼酸(溶解溫度 60°C)的添加則會提升結晶的尺寸。最重要的是，總量增加(濃度不變)的方式不僅可以讓結晶的尺寸、數量皆增加，而透明度也很高，是體積增加但透明度不減的關鍵！

壹、前言

一、研究動機

因為以前哥哥有拿一杯懸吊的明礬結晶回家，小時候的我覺得它很漂亮，但長大才明白是什麼原理，所以這次獨立研究想到這個主題，想要深入去了解並讓明礬結晶更大、更通透，完成屬於自己的結晶寶石！

二、研究目的與架構

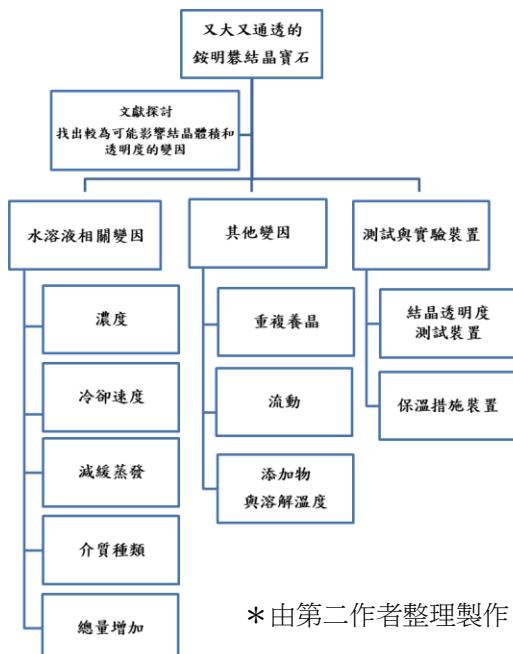
(一)認識銨明礬的結晶過程

(二)了解不同因素對銨明礬結晶的影響

- 1、濃度
- 2、冷卻速度(降溫慢的方法探討)
- 3、減緩蒸發(加保鮮膜)
- 4、介質種類(自來水、蒸餾水)
- 5、重複養晶
- 6、總量增加(濃度不變)
- 7、流動
- 8、添加物與溶解溫度

(三)建立明礬結晶的透光度比較方式

(四)確認保溫措施裝置



貳、研究設備及器材

				
銨明礬	瓦斯爐與鍋子	濾紙	保溫袋	
				
保鮮膜	電子秤	暖暖包	探針式溫度計	
				
游標卡尺	沉水馬達	照度計	小型手電筒	
			*由第一作者拍製	
Arduino Quono擴充板	Arduino溫濕度計	各項添加物		

參、研究過程或方法

一、文獻探討

(一)銨明礬

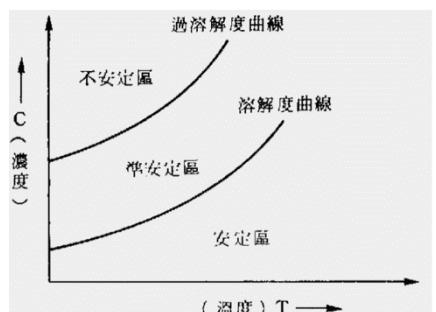
- 1、十二水合硫酸鋁銨，俗名銨明礬，化學式 $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 。在一些應用中會用到少量的硫酸鋁銨，天然的十二水合硫酸鋁銨是一種名為 tschermigite 的礦物
 - 2、硫酸鋁銨為無色、透明結晶體或白色粉末。其微溶於水、稀酸和甘油，水溶液呈酸性。不溶於醇。
- 資料來源：維基百科(2024年9月12日)，硫酸鋁銨。

(二)結晶之邁耶理論

邁耶提出在溶解度曲線以上的過飽和區，再以過溶解度曲線分為不安定區及準安定區。

- 1、準安定區：只能成長晶體不能生成晶體，故需加入少數微小晶體，作為晶種；如控制得當，可得較大之晶體。
- 2、不安定區：會有大量微小晶體析出，分享了過飽和溶質的量，使晶體無法長大，故成為微小的晶體。

→根據此段文獻，我們了解到溶液濃度不要設定太高，避免落入不安定區，導致微小的晶體產生。另外準安定區(適當的濃度與溫度)，應該適合用來做重複養晶。



取自：晶晶計較-明礬結晶的奧秘。中華民國第 56 屆科展

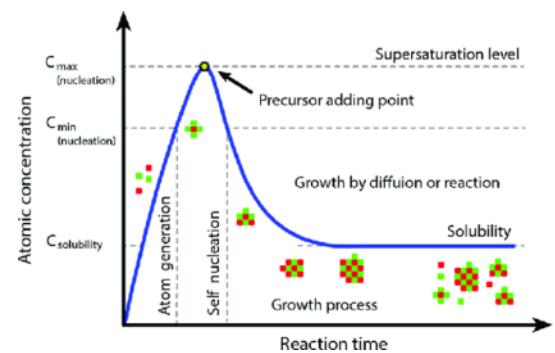
(三)晶體的生長階段

晶體從液相中的生長會經歷三個階段：

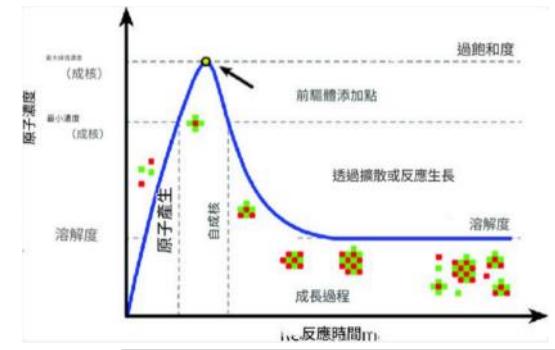
- 1、原子生成 (Atom generation)，由於溫度或濃度的局部變化，在此階段粒子仍散亂的排列。隨著反應進行，原子濃度逐漸上升，當超過 C_{min} (最低成核所需的濃度)時，有可能開始成核，達到 C_{max} (成核的最適原子濃度上限)時為成核最活躍區域。
- 2、自發成核 (Self nucleation)，形成結晶微顆粒的作用稱為成核作用。原子濃度處於過飽和區域（介於 C_{min} 與 C_{max} ），出現大量晶核生成。可再分為「均勻成核作用」與「不均勻成核作用」。「均勻成核作用」是指基質體系內的質點同時進入不穩定狀態而形成新相，此類作用過程牽涉到粒子需要移動到正確的位置與方向才能開始發生堆積，因此需克服相當大的表面能障礙才能成核，即需要相當大的過冷程度才能成核。「不均勻成核作用」是指體系中已經存在某種不均勻性，例如懸浮的雜質微粒，容器壁上凹凸不平等，它們都有效地降低了表面能成核時的表面能障礙，會優先在這些具有不均勻性的地點形成晶核。
- 3、成長過程 (Growth process)，結晶微顆粒的表面逐漸沉積更多的固體，最後生長成為大型的晶體顆粒。
- 4、回到溶解度 (Solubility)，隨時間推移，原子濃度降低至溶解度，晶體成長停止。

→根據此段文獻，我們了解到成核有最低所需濃度，而濃度越高成核越活躍。另外也了解到在加熱水後緩緩加入銨明礬粉末的那一刻，就是「前驅物加入點」(反應所必需的原料或初始化學物質)。

- 資料來源：Cryst. Growth Des. 2017, 17, 794–799
- 資料來源：晶晶計較-明礬結晶的奧秘。中華民國第 56 屆科展



取自：Cryst. Growth Des. 2017, 17, 794–799



取自：Cryst. Growth Des. 2017, 17, 794–799(google 翻譯)

(四)化學添加物的選擇

透過 ChatGPT 了解到「適度酸性（pH 3.5–5）環境有助於穩定鋁離子（ Al^{3+} ）和硫酸根離子（ SO_4^{2-} ），促進銨明礬晶體的形成」。

1、鋁離子的水解平衡

鋁離子（ Al^{3+} ）在水中會形成 $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ ，而隨著 pH 升高，會逐漸發生水解，生成氫氧化鋁（ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ）及其他水解產物。如果 pH 過高（接近中性或鹼性），這些水解產物便會以沉澱形式存在，從而降低游離鋁離子的濃度，這對明礬晶體的規則生長不利。相對地，在 pH 3.5–5 的微酸性區域，鋁離子主要以水合態存在，避免了過度水解，使其穩定留在溶液中，以便與硫酸根（ SO_4^{2-} ）和銨離子（ NH_4^+ ）形成結晶前體。

2、硫酸根離子的存在形式

硫酸（ H_2SO_4 ）是一元強酸與一元弱酸的組合，當溶液 pH 在 3.5–5 區域時，硫酸根主要以 SO_4^{2-} 存在。如果 pH 過低（例如低於 2），部分 SO_4^{2-} 會轉變為 HSO_4^- （重硫酸根），從而降低了 SO_4^{2-} 的實際濃度，影響了銨明礬中所需的離子比例，進而不利於結晶。

→根據此段文獻，我們了解到或許可以適度添加相對較弱或是稀釋的酸性物質來嘗試促進銨明礬晶體的形成。

➤ 資料來源：林文郁（主編）。(2011)。無機化學（第3版）。臺北：高立圖書。

(五)相關報告參考

查詢歷屆全國科展作品，發現有許多關於結晶的研究，主要都是探究各項變因對於結晶的生成、成長速度、數量、體積、形狀、硬度、密度、顏色的影響，對於透明度的著墨較少。而我們偶然看到結晶的實驗，覺得結晶很漂亮很像人造寶石，因此便想透過研究來製造出不只體積大、透明度還更高的結晶，這樣看起來會更像寶石中的鑽石，再把它做成首飾，應該會很棒。

根據文獻且結合我們想做出體積大、透明度又高的明礬結晶之目的，我們有以下的基礎設定：1. 調配好的明礬水溶液靜置在不受陽光直射、附近無電器且不易碰觸到的角落。2. 實驗都將會用濾紙將水溶液進行過濾。3. 不使用附著材料（結晶看起來較容易破碎且模糊）。4. 重複養晶的水溶液溫度控制在 30~60°C。

而我們的實驗主要就從濃度、冷卻速度、減緩蒸發、介質種類、重複養晶、總量增加、流動、光暗、添加物等方向來進行

我們將明礬結晶相關研究與其他結晶相關研究進行分析，如表 1 與表 2。

表 1：明礬結晶相關研究(由第一作者整理)

屆數(組別)	作品名稱	該作品探討方向
35 屆國小組 化學科	怎樣做出漂亮的結晶體	了解不同溶質的結晶(含明礬)狀況，以及探討加入酒精、濃度、附著材料、光暗、環境溫度、降溫的速度、壓力對結晶(數量、體積)的影響。

40 屆國小組 物理科	利用明礬沈底晶體 研究單晶的成長 n 再向單晶體挑戰	以顯微攝影來觀察晶體的成長，並計算出成長率。還發現沉底晶體的成長過程中，會抑制它的立體成長，使得它只能長成扁平狀。
44 屆國小組 化學科	“晶”華再現	從顯微鏡下觀察並比較不同溶質結晶(含明礬)的生成和形狀，並探討降溫的速度、附著材料、瓶口大小、水位高低、過程中搖晃等變因對結晶(生成、成長速度、形狀、數量、體積)的影響，並讓結晶以藝術的型態呈現。
56 屆國小組 化學科	晶晶計較- 明礬結晶的奧秘	確認糖度計與明礬濃度的關係，以及探討濃度、相同濃度但不同溫度放入晶種、置入不同數量的晶種、晶種多次培養對結晶(數量、體積、形狀)的影響。
59 屆國小組 化學科	精益求精「晶」	探討濃度、降溫的速度、震動、附著物相關變因對結晶(數量、體積)的影響並探究銨明礬結晶染色的方法。

表 2：其他結晶相關研究(由第二作者整理)

屆數(組別)	作品名稱	該作品探討方向
23 屆國小組 化學科	食鹽結晶的探討	探討添加物、滲透作用、離子移動、附著材料對食鹽結晶(形狀、體積)的影響。
30 屆國小組 化學科	結晶世界的奧妙	探討濃度、附著材料、容器、溫度對結晶(成長速度、體積)的影響。
43 屆國中組 化學科	晶體聯合國的高峰會議—探討結晶與各種變因的相互關係	探討溫度、雜質、破損對結晶(形狀、體積)的影響。並研究結晶染色方法與晶體晶型。
44 屆高中組 化學科	神奇暖暖包—醋酸鈉結晶之研究	主要研究以手折金屬片使溶液結晶並放熱的過程。在結晶部分則探討濃度、溫度、添加物對醋酸鈉結晶(成長速率)的影響。
57 屆國小組 化學科	藍色夢幻—硫酸銅結晶的研究	確認糖度計與硫酸銅濃度的關係，以及探討濃度、不同濃度放入晶種、晶種多次培養、電解、磁力、纏繞棉線、懸吊高度對硫酸銅結晶(重量、體積、形狀、成長速度)的影響。
58 屆國小組 化學科	藍晶閃耀~探索單結晶、雙結晶、包心結晶形成的條件	探討濃度、降溫的速度、震動、附著物相關變因對結晶(數量、體積)的影響並探究銨明礬結晶染色的方法。
62 屆國小組 化學科	水中「晶」靈-探討硫酸銅結晶大小的變因	探討單雙溶質(硫酸銅、銨明礬)、濃度、降溫的速度、低溫、加磁、加壓對單結晶(形狀、體積、硬度、密度、顏色、透光度)、包心結晶及雙結晶的影響並探究結晶後之液體再製晶體的性質與廢液環保處理的方法。

二、實驗設計

(一) 實驗順序與設計內容

在研究結果中所呈現的是關於變因的比較結果，因此在這裡呈現先前按照我們的思考脈絡所做的各個實驗(順序與設計原因)。

1. 實驗一：結晶試做實驗

(1) 200g/200ml(1 : 1)濃度高溫明礬水溶液

→ 啟發：需降低明礬的量，並建立後續實驗操作設計與步驟

2. 實驗二：降低濃度實驗(嘗試建立操作設計與步驟)

(1) 20g/100ml(2 : 10)濃度高溫明礬水溶液

→ 啟發：將溫度控制在 60°C、保鮮膜的洞口擴大、珍珠板的保溫改為保溫袋。(調整操作設計)，且後續繼續進行濃度實驗。

3. 實驗三：確認濃度高的明礬水結晶狀況(確認操作設計與步驟)

(1) 濃度 40g/100ml(4 : 10)過飽和明礬水溶液

(2) 濃度 30g/100ml(3 : 10)過飽和明礬水溶液

(3) 濃度 20g/100ml(2 : 10)過飽和明礬水溶液

→ 啟發：濃度較低的組別，結出的晶體會變得比較透明，因此預計在實驗四嘗試再降低濃度。

4. 實驗四：再次降低濃度實驗

(1) 濃度 20g/100ml(2 : 10)高溫過飽和明礬水溶液

(2) 濃度 15g/100ml(1.5 : 10)高溫過飽和明礬水溶液

(3) 濃度 10g/100ml(1 : 10)高溫飽和明礬水溶液

(4) 濃度 10g/100ml(1 : 10)常溫飽和明礬水溶液(為過飽和，所以再做一組常溫)

→ 啟發：**15g/100ml(1.5 : 10)**這一組個別結晶的透明度與形狀都更好，因此後續實驗皆採用濃度 15g/100ml 高溫明礬水來進行結晶實驗。

5. 實驗五：確認蒸發速度與保溫效果差別實驗

(1) A 組設置：只纏保鮮膜(減緩蒸發)

(2) B 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)

(3) C 組設置：皆無措施(無減緩蒸發，無減緩溫度散失等措施)

→ 啟發：再做一次實驗(實驗六)確認結果(重複再現性)，並嘗試取得晶種來做後續的養晶實驗。

6. 實驗六：確認實驗五結果並正式取得養晶的晶種實驗

(1) A 組設置：只纏保鮮膜(減緩蒸發)

(2) B 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)

(3) C 組設置：皆無措施(無減緩蒸發，無減緩溫度散失等措施)

→啟發：只纏保鮮膜(減緩蒸發)的組別結出的結晶，尺寸都會較小，因此後續實驗不再探討減緩蒸發。目前為止，部分組別的透明度都還不錯，但為了增加結晶尺寸，因此實驗七便開始進行重複養晶的實驗。

7. 實驗七：重複養晶增大體積實驗 1(嘗試建立操作設計與步驟)

(1) A1 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)，晶種用魚線懸吊(為了增加晶種接觸面積)

(2) A2 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)，晶種直接放置於杯底

(3) B1 組設置：無措施(無減緩溫度散失措施)，晶種用魚線懸吊

(4) B2 組設置：無措施(無減緩溫度散失措施)，晶種直接放置於杯底

PS：晶種置入時間點：根據文獻，過濾後等待溫度降到 30~60 度，倒到杯中後放晶種

→啟發：魚線須綁穩，避免掉落影響實驗結果。另外可用 T 字綁法來去除掉杯蓋，並回復使用燒杯。不過晶種用完，所以下個實驗將再作一次實驗五的內容並且再加入蒸餾水之變因進行探討。



魚線懸吊

(由第三作者拍製)

8. 實驗八：取得養晶的晶種實驗(加入蒸餾水之變因進行探討)

(1) A1 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解

(2) A2 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、蒸餾水溶解

(3) B1 組設置：無措施(無減緩溫度散失措施)、自來水溶解

(4) B2 組設置：無措施(無減緩溫度散失措施)、蒸餾水溶解

→啟發：

①有保溫的組別，晶種的尺寸(3.2mm 左右)和實驗五、實驗六相比(5mm 左右)，尺寸小了 36%左右。另外，沒保溫的組別的晶種尺寸，此次和有保溫的組別的晶種尺寸很相近，一樣不可預測。

②結晶過小有可能是實驗當時環境溫度明顯降低導致(或是本就有失敗的機率)，所以後續實驗打算做個簡單的保溫箱或是保溫裝置，讓環境溫度提高，減緩溫度散失，讓溶液降溫慢一點。

③本次實驗未成功取得養晶的晶種，因此下個實驗繼續嘗試取得透明的晶種，且一樣再加入蒸餾水之變因進行探討。。

9. 實驗九：提升環境溫度暨取得養晶的晶種實驗

(1) A1 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解

(2) A2 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、蒸餾水溶解

(3) B1 組設置：放保溫夾層袋(進階減緩溫度散失)、自來水溶解

(4) B2 組設置：放保溫夾層袋(進階減緩溫度散失)、蒸餾水溶解

(5) C1 組設置：放保溫箱(高階減緩溫度散失)、自來水溶解

(6) C2 組設置：放保溫箱(高階減緩溫度散失)、蒸餾水溶解

→啟發：太多的保溫措施，反而會造成結晶偏白不透明或是其體積變小，所以上個實驗的結晶體積變小有可能是概率問題，但適度的保溫可能會減少這個狀況的發生，因此後續實驗便繼續採用包保溫袋的形式來進行。

10. 實驗十：重複養晶增大體積實驗 2(調整操作設計與步驟)

- (1) A1 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、蒸餾水溶解、晶種置底
- (2) A2 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、蒸餾水溶解、晶種置底
- (3) B1 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解、晶種置底
- (4) B2 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解、晶種置底



T字綁法
(由第三作者拍製)

PS：根據實驗七結論，原先設定 A2、B2 組皆預計使用 T 字綁法來吊起晶種（為了增加晶種接觸面積），但並不容易綁，而且綁好之後盡皆脫落，因此本實驗四組都是將晶種置底，所以需再想增加晶種接觸面積的其他方法。

→啟發：

①因綁魚線的方法失敗，因此將晶種置底的方法再進行討論：

可將吸管剪短並剪出細條，一邊黏在燒杯底部，另一邊可支撐晶種，此裝置可將晶種托起並增加晶種接觸面積。

②自來水與蒸餾水不論在透明度或是尺寸都沒有太大的差別，因此後續實驗只採用自來水(降低成本)。

11. 實驗十一：重複養晶增大體積實驗 3(調整操作設計與步驟)

- (1) A 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解、吸管支撐置中
- (2) B 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解、吸管支撐置中

PS：使用濃度 30g/200ml 高溫明礬水(濃度與先前的實驗一樣，但為了讓溶液蓋過吸管，所以增加溶液体積)



→啟發：

①吸管支撐置中的方法會讓結晶的白色混濁範圍增加，而且容易破碎。
所以後續實驗皆將晶種置底來進行(直到想到更好的方式)。

吸管支撐置中
(由第三作者拍製)

②本實驗意外發現(為了讓溶液蓋過吸管便於重複結晶)，在濃度不變的前提下，增加溶液的總量，會讓結出的晶種變大而且相當透明。體積不輸給重複養晶的組別，甚至透明度更高。

③所以我們預計在下一個實驗再測試一下，在濃度不變的前提下，增加溶液的總量，觀察是否會讓結出的晶種一樣那麼大而且透明。(確認結果的重複再現性)

12. 實驗十二：重複養晶增大體積實驗 4(含溶液總量增加但濃度不變實驗)

- (1) A 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解、晶種置底
- (2) B 組設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解、晶種置底

PS：使用濃度 30g/200ml 高溫明礬水

→啟發：增加溶液的總量，是可以讓晶種變大而且透明，甚至比部分重複養晶的結晶都大、透明度更高。後續實驗可以朝這個面向發展(總量再增加)。

13. 實驗十三：溶液總量增加(濃度不變)實驗

- (1) A 組設置：濃度 30g/200ml(1.5 : 10)過飽和明礬水(保溫袋、自來水溶解)
- (2) B 組設置：濃度 60g/400ml(1.5 : 10)過飽和明礬水(保溫袋、自來水溶解)

(3) C 組設置：濃度 90g/600ml(1.5 : 10)過飽和明礬水(保溫袋、自來水溶解)

(4) D 組設置：濃度 120g/800ml(1.5 : 10)過飽和明礬水(保溫袋、自來水溶解)

PS：使用濃度 30g/200ml 高溫明礬水

→啟發：溶液總量增加到**濃度 90g/600ml**，結晶的尺寸、數量皆增加，而透明度也超過 100 Lux，但更濃的 120g/800ml(同一濃度)，其結晶數量過多又黏在一起，並鋪滿杯底，雖然透明度也超過 100 Lux，但尺寸卻變小，不符合需求。所以下一個明礬水溶液流動實驗就採用**濃度 90g/600ml**的比例。

14. 實驗十四：明礬水溶液流動實驗

(1)濃度 90g/600ml(1.5 : 10)過飽和明礬水(保溫袋、自來水溶解)

PS：放置沉水馬達讓溶液形成流動，希望能讓晶體的成長加速

→啟發：不如預期會增加結晶的附著，反而造成結晶數量多又細碎(可能因為震動)。

而後續打算探討化學添加物對結晶透明度與尺寸的影響。



流動裝置
(由第三作者拍製)

15. 實驗十五：添加物實驗 1(水溫 60 度)

(1) A 組設置：無添加對照組(保溫袋、自來水溶解、水溫 60 度)

(2) B 組設置：添加「硼酸」6.9g(佔溶液 1%) (保溫袋、自來水溶解、水溫 60 度)

(3) C 組設置：添加「稀硫酸」1.18g(4 滴/100ml) (保溫袋、自來水溶解、水溫 60 度)

(4) D 組設置：添加 「氯化鈉」3.45g(佔溶液 0.5%) (保溫袋、自來水溶解、水溫 60 度)

PS：使用濃度 90g/600ml(1.5 : 10)過飽和明礬水

→啟發：本次實驗結晶的尺寸整體來說降低不少，仍舊存在失敗機率(重複再現性)或是尚未探討到的變因所導致。因此下個實驗打算嘗試降低溶解溫度的變因。

16. 實驗十六：添加物實驗 2(水溫 50 度)

(1) A 組設置：無添加對照組(保溫袋、自來水溶解、水溫 50 度)

(2) B 組設置：添加「硼酸」6.9g(佔溶液 1%) (保溫袋、自來水溶解、水溫 50 度)

(3) C 組設置：添加「稀硫酸」1.18g(4 滴/100ml) (保溫袋、自來水溶解、水溫 50 度)

(4) D 組設置：添加 「氯化鈉」3.45g(佔溶液 0.5%) (保溫袋、自來水溶解、水溫 50 度)

PS：使用濃度 90g/600ml(1.5 : 10)過飽和明礬水

→啟發：透明度雖然大幅提升，而結晶的尺寸雖有所提升但仍比不上先前的總量實驗。或許仍舊存在失敗機率(重複再現性)或是尚未探討到的變因所導致。我們可能可以提升成功率或是了解趨勢，但仍舊無法保證每次都能成功。

(二)結晶透明度測試裝置(由第一作者拍攝整理)

為了對結晶的透明度有一個客觀的數據，方便進行比較。所以我們想到用照度計來量測結晶的透明度，因為將結晶擺在手電筒前，比較透明的結晶所透出的光亮度會比模糊起霧的結晶來的高。

	經量測 →	
沒有結晶		量得 323Lux

	經量測 →	
模糊起霧的結晶		量得 30Lux

	經量測 →	
相對透明的結晶		量得 218Lux

*由第一作者拍攝整理

1、實驗裝置的設置

- ①拿一個 24.6 cm *24.6 cm *35.6 cm 的紙箱。
- ②在 24.6 cm *35.6 cm 的其中一面裁一個寬 10.5 cm 長 20 cm 的長方形缺口(入口)。
- ③把照度計立起來放在最裡面靠壁。
- ④把手電筒放在紙箱開口中央擺 45 度。

2、測試方法(由第一作者拍攝整理)

- ①把照度計立起來放在最裡面靠壁。
- ②先測試環境最低的數值。
- ③再把固定最高數值打開。
- ④把要測試的結晶(該實驗最透明且足夠大的前兩塊結晶)用手放在手電筒(放在紙箱開口中央擺 45 度)的前面並打開光源。
- ⑤看「固定最高數值」是多少再和「箱子內環境最高的數值」相減即為該結晶的透明度。(數值越高，代表透明度越好)(數值單位：Lux)

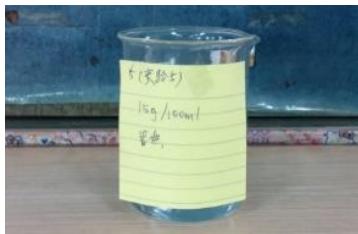
		
1.把照度計打開並立在 箱子裡面靠裡邊	2.將測試的結晶用固定 在手電筒前端	3.確認「固定最高數 值」並做後續計算

*由第一作者拍攝整理

(三)保溫措施裝置設計

1.皆無措施~設置流程(由第二作者拍攝整理)

沒有任何保溫措施



2.保溫袋~設置流程(由第二作者拍攝整理)

緊貼燒杯包裹上一層保溫袋



3.保溫箱~設置流程(由第二作者拍攝整理)

		
1.在紙箱內貼上保溫膜	2.在底部放置暖暖包	3.將包著保溫袋的明礬 水溶液放入

4.保溫夾層袋~設置流程(由第二作者拍攝整理)

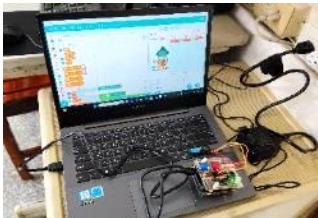
		
1.做一個更大的保溫袋 ，裡面放兩片暖暖包	2.將包好保溫袋的燒杯 放進放有暖暖包的袋中	3.將過濾好的明礬水溶 液倒入此保溫夾層袋裡

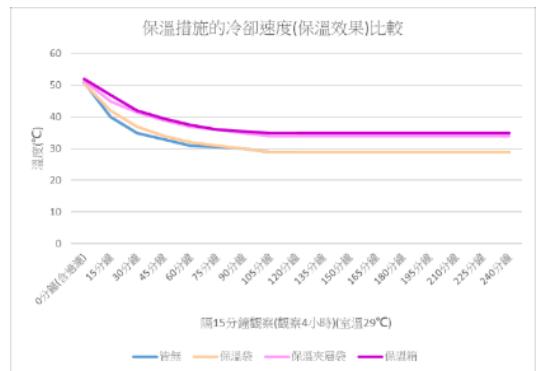
間隔 措施	0 分 鐘	15 分 鐘	30 分 鐘	45 分 鐘	60 分 鐘	75 分 鐘	90 分 鐘	105 分 鐘	120 分 鐘	135 分 鐘	150 分 鐘	165 分 鐘	180 分 鐘	195 分 鐘	210 分 鐘	225 分 鐘	240 分 鐘
皆無	51	40	35	33	31	30.5	30	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
保溫 袋	50.5	42	37	34	32	31	30	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
保溫 夾層	51.5	45	41.5	39	37	36	35	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
保溫 箱	52	47	42	39.5	37.5	36	35.5	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35

*由第二作者整理

5.保溫效果(冷卻速度)比較(由第二作者拍攝整理)

為了對保溫措施裝置的冷卻速度(保溫效果)做個比較，我們使用 Arduino Quno 擴充板接上溫濕度計套件，搭配一般溫度計來進行確認(溫濕度計套件無法直接放入溶液中)。而由於觀察時間有限，我們只進行一次(4 個小時)的觀察比較，而當天的室溫為 29°C。PS：不同的氣溫和濃度等都可能造成影響，因此本次比較僅為相對冷卻速度參考。

		
1.將 Arduino Quno 擴充 板接上溫濕度計套件 並連結上筆電	2.再將溫濕度計套件放 進放有保溫袋中測量 溶液溫度	3.搭配一般溫度計來進 行溶液溫度確認



*由第二作者整理

→比較結果：

保溫效果從最好到最差為：1.保溫箱 2.保溫夾層袋 3.保溫袋 4.皆無(燒杯裸露)。

但也可以發現**保溫箱、保溫夾層袋**與**保溫袋、皆無**這兩組彼此間差距不會太大。不過保溫箱、保溫夾層袋能將某段溫度($34\sim35^{\circ}\text{C}$)保持相當久的時間。

肆、研究結果與討論

一、結晶試做實驗(實驗一)(嘗試超高濃度)

(一)操作步驟與說明(由第一作者拍攝整理)

- 1、調配濃度 $200\text{g}/200\text{ml}(1:1)$ 濃度高溫明礬水(隔水加熱調配出過飽和明礬水溶液)(隔水加熱可以避免煮出鍋子的雜質進入溶液中)。
- 2、靜置一週後長出許多結晶。



(二)實驗觀察：(由第一作者拍攝整理)

- 1、杯底與水面都有許多結晶。
- 2、杯底的結晶都聚合在一起並黏於杯底，無法脫落。
- 3、而原先浮於水面的結晶沉到杯底的結晶之上。
- 4、結晶的外觀大多交疊不規則且不完整，但依稀可看出結晶的固定形狀。
- 5、結晶的顏色較不透明呈現白色冰塊狀。



*由第一作者拍攝整理

(三)發現與討論：

- 1、我們發現 $200\text{g}/200\text{ml}(1:1)$ 的濃度太高，導致結晶的外觀大多交疊不規則、不完整，顏色還較不透明呈現白色冰塊狀。
- 2、因此決定之後的實驗，明礬的量要降低。
- 3、文獻探討時發現使用濾紙可以降低雜質，讓結晶變得更透，所以後續的實驗將會使用到濾紙。

二、建立實驗設計與步驟之實驗(實驗二)

(一)操作步驟與說明(由第一作者拍攝整理)

依據文獻中提到：**慢慢降溫**時，結晶速度較慢，但最後生成的結晶較大。另外**過濾**能

降低雜質，還有蒸發速度也會有所影響~~為了能做出又大又透明的明礬結晶，因此針對這些變因，我們預先做出下列操作調整。

- 1、先調配濃度 20g/100ml(2 : 10)濃度高溫明礬水溶液(溫度控制在 60°C，另外攪拌改用玻棒，因用金屬湯匙攪拌本身會有點變色)
- 2、使用濾紙過濾(過濾雜質)
- 3、杯口纏繞保鮮膜，並於上方用鉛筆戳出 6 個小洞(直徑 0.1CM)(目的為減緩蒸發)
- 4、燒杯外圍包上珍珠板保溫(使降溫減慢速度)，並靜置一週

		
1. 將 20g 明礬倒入自來水	2. 隔水加熱到完全溶解	3. 用濾紙過濾溶液
		4. 包上保鮮膜，並戳出六個小洞(直徑 0.1CM) 5. 包上珍珠板保溫

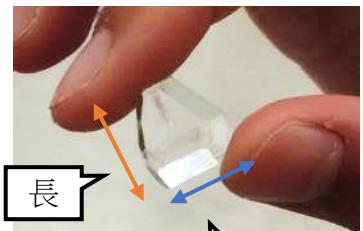
*由第一作者拍攝整理

(二) 實驗觀察：(由第一作者拍攝整理)

- 1、為了減少蒸發而纏上保鮮膜，並且用鉛筆戳下 6 個小洞，但是發現過了三、四天都尚未結晶，待撕下保鮮膜後才長出些許結晶。是因為洞過小，導致無法蒸發，等到拆了保鮮膜才長出些許結晶。

★晶種結晶情形描述(20g/100ml)

- (1) 外形：六邊形
 - (2) 顏色：半透明、微白，像冰塊
 - (3) 透明度：平均 82Lux 【A 結晶 90Lux(120-環境 30)】
【B 結晶 74Lux(100-環境 26)】
 - (4) 尺寸：平均長寬各約 10mm，最大顆長寬各有 19mm
 - (5) 重量：平均重量為 1.3g，最大顆重量有 2g
 - (6) 數量：共 6 顆
- 2、珍珠板的包裹效果較差，因為與杯子的空隙較大。



(三) 發現與討論：

1、確認操作設計與步驟：

- (1) 將保鮮膜的洞口擴大為直徑 1cm。
- (2) 珍珠板的保溫改為保溫袋(包裹更嚴密，包溫效果更好)。

2、雖然可以看出降低濃度後，結出的晶體變得比較透明，但為了確認濃度高的明礬水所結出的結晶真的會比較混濁、比較白，因此預計在實驗三提升兩組較高的濃度，看看結出來的晶種會不會比較不透明。

三、濃度實驗 (實驗三~四) (已確認操作設計與步驟)

(一)操作步驟與說明(由第一作者拍攝整理)

1、調配濃度 40g/100ml、30g/100ml、20g/100ml(實驗三)。20g/100ml、 15g/100ml、10g/100ml(高溫)和 10g/100ml(常溫飽和)(實驗四)。

2、使用濾紙過濾

3、燒杯外圍纏繞鋁箔保溫紙保溫

4、杯口纏繞保鮮膜，並於上方用鉛筆戳出 8 個洞(直徑 1 公分)，並靜置一週

◎確認操作設計與步驟，後續實驗大致上都依循這樣的步驟實施

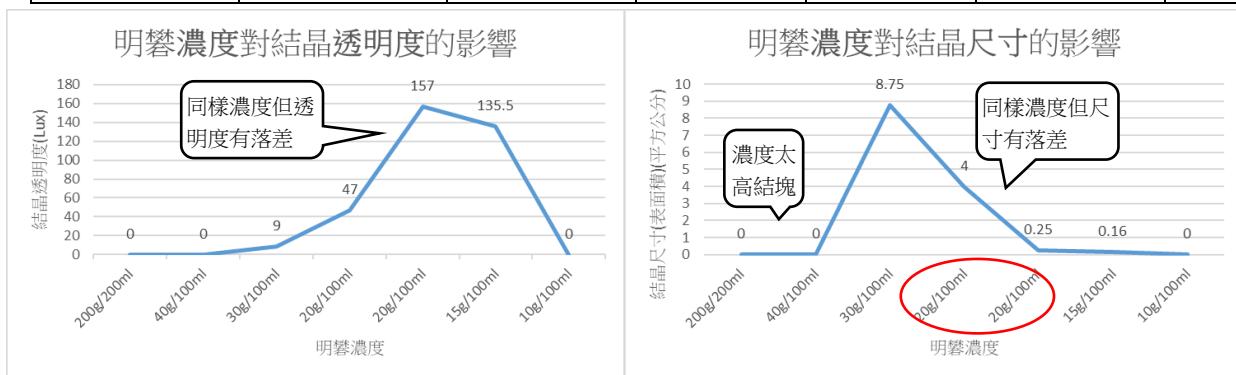
		
1.秤出所需要的明礬量	2.將明礬倒入自來水中	3.隔水加熱到完全溶解
		
4.用濾紙過濾溶液	5.包上保鮮膜，並戳出六個小洞(直徑 1CM)	6.包上保溫袋保溫

*由第一作者拍攝整理

(二)實驗觀察：(皆有減緩蒸發與保溫) (圖表由第一作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗一 200g/200ml (10 : 10)		白色	無法測量	無法測量	無法測量	無法測量
實驗三 40g/100ml (4 : 10)		微透明，微白(黏杯底 無法取出)	無法測量	無法測量	無法測量	無法測量

實驗三 30g/100ml (3 : 10)		白色如冰塊	9	1	長：35mm 寬：25mm	18.2
實驗三 20g/100ml (2 : 10)		中心較霧， 邊緣透明	47	2	長：20mm 寬：20mm	6.8
實驗四 20g/100ml (2 : 10)		不透明微白	157	25	長：5mm 寬：5mm	1.09
實驗四 15g/100ml (1.5 : 10)		透明，無白 色部分	135.5	6	長：4mm 寬：4mm	0.28
實驗四 10g/100ml (1 : 10) (高溫水溶液)	無結晶	無結晶	無法測量	無法測量	無法測量	無法測量
實驗四 10g/100ml (1 : 10) (常溫水溶液)	無結晶	無結晶	無法測量	無法測量	無法測量	無法測量



*由第一作者拍攝整理

(三)發現與討論：

- 實驗中發現濃度越高結晶就越多而且會凝聚在一塊，顏色也會呈現白色、較不透明的情況。
- 發現濃度越低，結晶較越小，但結出的晶體的確會變得比較透明。但濃度太低的組別 10g/100ml(1 : 10)都結不出結晶。
- 雖然實驗四的 20g/100ml(2 : 10)這組的透明度(平均 157 Lux)略高於 15g/100ml(1.5 : 10)這一組(平均 135.5 Lux)，但我們認為 15g/100ml(1.5 : 10)這一組 每一顆個別的透明度與形狀都更好，因此後續實驗皆採用濃度 15g/100ml 高溫明礬水來進行實驗。

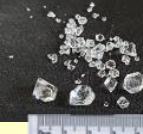
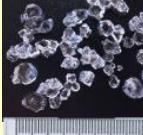
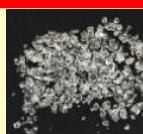
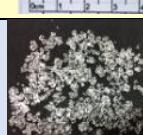
4、實驗四的 20g/100ml 的和實驗三的 20g/100ml 比較，發現實驗四的結晶較多且較小。(可能因最近氣溫降低，或者要注意結晶實驗的重複再現性問題，要再注意觀察)

四、冷卻速度實驗(實驗五~六、八~九)

(一)操作步驟與說明

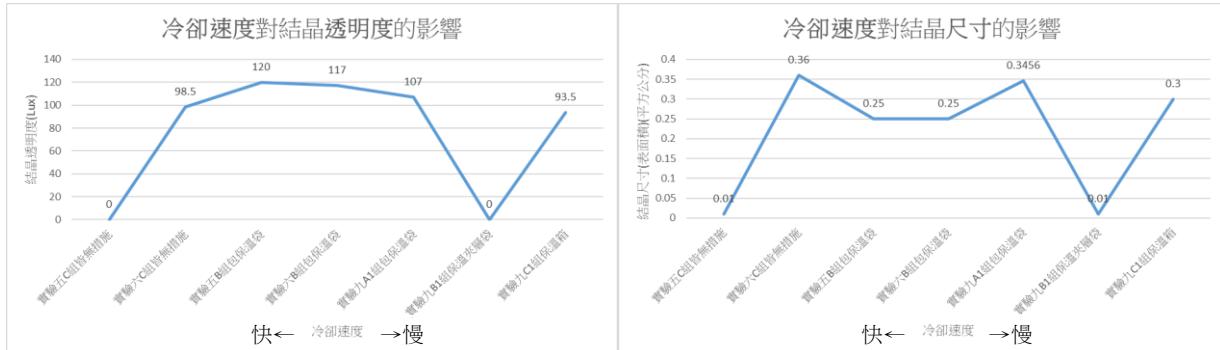
- 1、濃度皆為 15g/100ml 高溫明礬水
- 2、使用濾紙過濾
- 3、各實驗組別設置
詳情可參考實驗設計
- 4、靜置一週

(二)實驗觀察：(介質皆為自來水)(圖表由第二作者拍攝整理)

結晶描述 保溫措施	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗五 B 組 包保溫袋		透明	120	55	長：5mm 寬：5mm	0.06
實驗五 C 組 皆無措施		透明細碎	無法測量	量多 細碎	長：1mm 寬：1mm	無法測量
實驗六 B 組 包保溫袋		透明	117	65	長：5mm 寬：5mm	0.08
實驗六 C 組 皆無措施		半透明 中心霧狀 有紋路	98.5	35	長：6mm 寬：6mm	0.12
實驗八 A1 組 包保溫袋		半透明 微白	51	>300	長：3.3mm 寬：3.3mm	0.0117
實驗八 B1 組 皆無措施		半透明 微白	51	>300	長：3.8mm 寬：3.8mm	0.004
實驗九 A1 組 包保溫袋		透明	107	50	長：6.4mm 寬：5.4mm	0.1

不列入比較
但值得探討
的特殊狀況

實驗九 B1 組 保溫夾層袋		白色	無法測量	量多 細碎	長：1mm 寬：1mm	0.002
實驗九 C1 組 放保溫箱		大部分偏白，少部分透明	93.5	79	長：6mm 寬：5mm	0.23



*由第二作者拍攝整理

(三)發現與討論：

- 只包保溫袋(減緩溫度散失)的組別結出的結晶，通常尺寸都會較大(平均 5mm)，而且透明度也都還不錯(都接近 120 Lux)。
- 皆無措施(無減緩溫度散失等措施)的組別，尺寸與透明度都差異性變化較大，不是很穩定，但通常透明度相對較低且細碎、體積小、數量多。
- 在放保溫夾層袋的組別中，結晶數量過多且形狀細碎、體積小。而在放保溫箱的組別中，透明度有 93.5Lux，但整體來說都偏白不透明。
- 我們觀察到實驗八整體的結晶體積都變小，有可能是氣溫降低或是結晶實驗的失敗概率問題(重複再現性)，因此沒有放進去折線圖進行比較。
- 我們發現反而太多的保溫措施，反而會造成結晶偏白不透明或是其體積變小，但相信適度的保溫可能會減少這個狀況的發生，因此後續實驗便繼續採用包保溫袋的形式來進行。

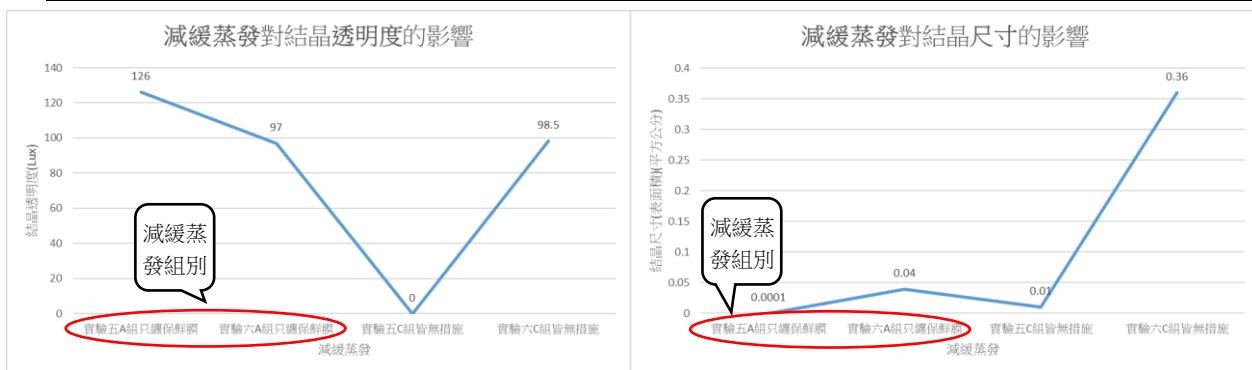
五、減緩蒸發實驗(實驗四~六、九)

(一)操作步驟與說明

- 濃度皆為 15g/100ml 高溫明礬水
- 使用濾紙過濾
- 各實驗組別設置
詳情可參考實驗設計
- 靜置一週

(二) 實驗觀察：(圖表由第二作者拍攝整理)

結晶描述 減緩蒸發	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗五 A 組 只纏保鮮膜		通透、透明	126	4	長：0.1mm 寬：0.1mm	0.2
實驗五 C 組 皆無措施		透明但因細碎看起來白	無法測量	量多細碎	長：1mm 寬：1mm	無法測量
實驗六 A 組 只纏保鮮膜		透明	97	量多	長：2mm 寬：2mm	0.015
實驗六 C 組 皆無措施		半透明，中心霧狀有紋路	98.5	35	長：6mm 寬：6mm	0.12
實驗四 包保溫袋、纏 保鮮膜		透明，無白色部分	135.5	6	長：4mm 寬：4mm	0.28
實驗五 B 組 只包保溫袋、 沒纏保鮮膜		透明、無白色	120	55	長：5mm 寬：5mm	0.06
實驗六 B 組 只包保溫袋、 沒纏保鮮膜		透明、無白色霧狀	117	55	長：5mm 寬：5mm	0.08
實驗九 A1 組 只包保溫袋、 沒纏保鮮膜		透明	107	50	長：6.4mm 寬：5.4mm	0.1



*由第二作者拍攝整理

(三)發現與討論：

- 1、只纏保鮮膜(減緩蒸發)的組別結出的結晶，通常尺寸都會較小，雖然透明度都還不錯，但結晶變大的時間會拉的太長。
- 2、從這個表格還可以額外看出有包保溫袋的組別，整體而言，透明度和尺寸都比較高。

六、介質種類實驗(實驗八~九)

(一)操作步驟與說明

- 1、濃度皆為 15g/100ml 高溫明礬水
- 2、使用濾紙過濾
- 3、各實驗組別設置
詳情可參考實驗設計
- 4、靜置一週

(二)實驗觀察：(圖表由第三作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗八 A1 組 只包保溫袋、 自來水溶解		透明、微白	51	>300	長：3.3mm 寬：3.3mm	0.04
實驗八 A2 組 只包保溫袋、 蒸餾水溶解		透明、微白	40	>300	長：3.2mm 寬：3.2mm	0.035
實驗八 B1 組 無措施、 自來水溶解		透明、微白	51	>300	長：3.8mm 寬：3.8mm	0.04
實驗八 B2 組 無措施、 蒸餾水溶解		透明、微白	51	>300	長：3.8mm 寬：3.2mm	0.03
實驗九 A1 組 只包保溫袋、 自來水溶解		透明	107	52	長：6.4mm 寬：5.4mm	0.34

實驗九 A2 組 只包保溫袋、 蒸餾水溶解		透明	109.5	43	長：4mm 寬：4mm	0.225
-----------------------------	--	----	-------	----	----------------	-------

*由第三作者拍攝整理

(三)發現與討論：

- 在實驗八中發現，蒸餾水當作介質並不會讓晶種的透明度增加。
- 在實驗九，蒸餾水與自來水的使用上依舊看不出明顯的優缺。
- 因此使用自來水或蒸餾水不論在結晶透明度或是尺寸都沒有太大的差別，因此後續實驗只採用自來水(降低成本)。

七、重複養晶實驗(實驗七，十~十二)

(一)操作步驟與說明

- 實驗七、十：15g/100ml ；實驗十一、十二：30g/200ml
- 使用濾紙過濾
- 各實驗組別設置
詳情可參考實驗設計
- 靜置一週

(二)實驗觀察：(圖表由第三作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	養晶後外觀	透明度 (Lux)	原尺寸	養晶後尺寸	初生結晶 透明度	平均尺寸
實驗七 A1 組 自來水、 晶種魚線懸吊		45	無記錄	長：14.2mm 寬：14.4mm	無	無
實驗七 A2 組 自來水、 晶種置底		43	無記錄	長：17.2mm 寬：12.9mm	無	無
實驗十 A1 組 蒸餾水、 晶種置底		27	長：8.4mm 寬：7.6mm	長：13.3mm 寬：10.6mm	無觀察	無觀察
實驗十 A2 組 蒸餾水、 晶種置底		64	長：7.4mm 寬：6.5mm	長：11mm 寬：10mm	無觀察	無觀察
實驗十 B1 組 自來水、 晶種置底		60	長：7.2mm 寬：6.1mm	長：11mm 寬：10mm	無觀察	無觀察

實驗十 B2 組 自來水、 晶種置底		71	長：7mm 寬：6.3mm 	長：10mm 寬：10mm	無觀察	無觀察
實驗十一 A 組 自來水、 吸管支撐置中		31	長：9.3mm 寬：8.4mm 	長：16.7mm 寬：12.6mm	132.5	長：9mm 寬：9mm
實驗十一 B 組 自來水、 吸管支撐置中		44	長：9.1mm 寬：8.7mm 	長：18mm 寬：14mm	129	長：13mm 寬：10mm
實驗十二 A 組 自來水、 晶種置底		28	長：6 mm 寬：4.2mm 	長：18.4mm 寬：15.7mm	103	長：8.9mm 寬：7.8mm
實驗十二 B 組 自來水、 晶種置底		34	長：6mm 寬：5mm 	長：19.6mm 寬：17.2mm	135.5	長：9.2mm 寬：8.3mm

*由第三作者拍攝整理

(三)發現與討論：

1、晶種懸吊設計的演變：

- (1)綁魚線：綁不穩，容易脫落影響實驗結果。
- (2)T字綁法：去除掉杯蓋，並回復使用燒杯，但仍舊綁不穩，容易脫落。
- (3)吸管支撐置中：結晶會包覆吸管，造成結晶碎裂與混濁不透明。
- (4)晶種置底：目前最好的選擇

- 1、在所有的重複養晶的實驗中發現，重複養晶雖然會讓晶種體積增加，但透明度卻是下降不少。(平均降低超過 50%) (養晶的晶種透明度皆在 100Lux 以上)
- 2、吸管支撐置中的方法會讓結晶的白色混濁範圍增加，而且容易破碎。所以後續實驗皆將晶種置底來進行(直到想到更好的方式)。
- 3、在實驗中意外發現(為了讓溶液蓋過吸管便於重複結晶)，在濃度不變的前提下，增加溶液的總量，會讓結出的晶種變大而且相當透明。體積不輸給重複養晶的組別，甚至透明度更高。所以後續實驗可以朝這個面向發展。

八、總量增加實驗(實驗十一~十三)

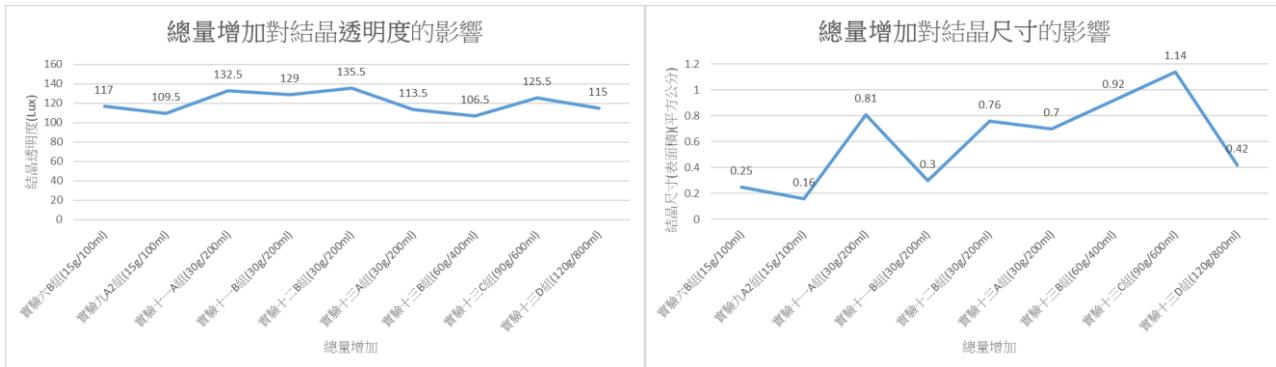
(一)操作步驟與說明

- 1、實驗十一、十二：30g/200ml ；實驗十三：30g/200ml～120g/800ml(同濃度)
- 2、使用濾紙過濾
- 3、各實驗組別設置
詳情可參考實驗設計
- 4、靜置一週

(二) 實驗觀察：(圖表由第一作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗六 B 組 初生晶種 (15g/100ml)		透明、無白色霧狀	117	55	長：5mm 寬：5mm	0.08
實驗九 A2 組 初生晶種 (15g/100ml)		透明	109.5	40	長：4mm 寬：4mm	0.225
實驗十一 A 組 初生晶種 (30g/200ml)		透明且幾乎無雜質	132.5	23	長：9mm 寬：9mm	0.24
實驗十一 B 組 初生晶種 (30g/200ml)		透明且幾乎無雜質	129	12	長：13mm 寬：10mm	0.58
實驗十二 B 組 初生晶種 (30g/200ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	135.5	15	長：9.2mm 寬：8.3mm	0.31
實驗十三 A 組 初生晶種 (30g/200ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	113.5	25	長：10mm 寬：7mm	0.375
實驗十三 B 組 初生晶種 (60g/400ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	106.5	53	長：10.4mm 寬：8.8mm	0.38
實驗十三 C 組 初生晶種 (90g/600ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	125.5	89	長：10.9mm 寬：10.5mm	0.39
實驗十三 D 組 初生晶種 (120g/800ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	115	數量過多 不可數	長：7.7mm 寬：5.4mm	0.18
實驗七 A2 組 (重複養晶)		微透明，中間較多霧狀雜質	43	1	長：17.2mm 寬：12.9mm	1.76
實驗十 B2 組 (重複養晶)		外圍透明，中間部分微白	71	1	長：10mm 寬：10mm	0.12

實驗十二 B 組 (重複養晶)		外圍部分透明，中間較白且混濁	34	1	長：19.6mm 寬：17.2mm	2.3
--------------------	--	----------------	----	---	----------------------	-----



*由第一作者拍攝整理

(三)發現與討論：

- 在實驗十一中意外發現(為了讓溶液蓋過吸管便於重複結晶)，在濃度不變的前提下，增加溶液的總量，會讓結出的晶種變大而且相當透明。體積雖然略輸給重複養晶的組別，但透明度卻相當高。而在實驗十二中也驗證了這個發現。
- 在實驗十三中再度證實溶液總量增加，結晶的尺寸、數量皆增加，而透明度也超過 **100 Lux**。
- 溶液總量增加至 **120g/800ml**(同一濃度)，其結晶數量過多又黏在一起，並鋪滿整個杯底，雖然透明度也超過 **100 Lux**，但尺寸卻變小，不符合需求。所以除了先前實驗中發現濃度過高會導致結晶鋪滿杯底，連溶液總量過高(比例不變)也會如此。
- 接下來的實驗我們決定用 **90g/600ml** 的總量(因結晶的數量和透明度比其它組還要多還要通透，且尺寸和重量要較大較重)。

九、明礬水溶液流動實驗(實驗十四)

(一)操作步驟與說明

- 濃度為 **90g/600ml** 高溫明礬水
- 使用濾紙過濾
- 燒杯外圍纏繞鋁箔保冷袋保溫
- 相關設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解，放入沉水馬達
- 靜置一週



流動裝置
(由第三作者拍製)

(二)實驗觀察：

- A 組：濃度 **90g/600ml(1.5 : 10)** 過飽和明礬水(保溫袋、自來水溶解)

★晶種結晶情形描述

- 外形：細碎、不規則狀
- 顏色：白色



由第三作者拍製

- (3)透明度：因太細碎無法測量
- (4)尺寸：平均長約 2.33mm 寬約 1.2mm
- (5)重量：平均重量為 0.01g
- (6)數量：因太細碎又過多而無法測量

(三)發現與討論：

- 1、放置沉水馬達讓溶液形成流動，不僅不如預期會增加結晶的附著，反而會造成結晶數量過多又細碎。
- 2、根據文獻推測可能是震動所造成的負面影響，造成結晶數量多又細碎。

十、添加物及溶解溫度實驗(實驗十五~十六)

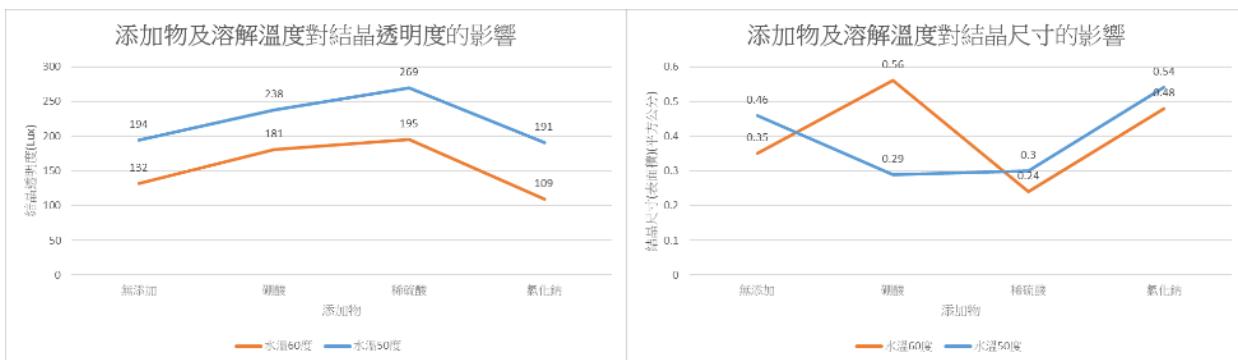
(一)操作步驟與說明

- 1、調配多杯過飽和明礬水溶液：90g/600ml 高溫明礬水
- 2、分兩組溫度 60°C、50°C(50)，每組各有三杯分別添加如下：(無添加對照組)
「硼酸」6.9g(佔溶液 1%)、「稀硫酸」1.18g(4 滴/100ml)、「氯化鈉」3.45g(佔溶液 0.5%)
- 2、使用濾紙過濾
- 3、燒杯外圍纏繞鋁箔保冷袋保溫
- 4、相關設置：只包保溫袋(減緩溫度散失)、自來水溶解
- 5、靜置一週

(二)實驗觀察：(圖表由第二作者拍攝整理)

結晶濃度 /\ 結晶描述	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗十五 A 組 無添加 (水溫 60 度)		透明、微白	132	107	長：6.1mm 寬：5.7mm	0.146
實驗十五 B 組 添加 硼酸 (水溫 60 度)		透明	181	150	長：8.3mm 寬：6.7mm	0.168
實驗十五 C 組 添加 稀硫酸 (水溫 60 度)		透明	195	282	長：4.9mm 寬：4.9mm	0.08
實驗十五 D 組 添加 氯化鈉 (水溫 60 度)		透明	109	256	長：6.9mm 寬：6.9mm	0.183

實驗十六 A 組 無添加 (水溫 50 度)		透明	194	103	長：7mm 寬：6.5mm	0.142
實驗十六 B 組 添加 硼酸 (水溫 50 度)		透明	238	95	長：5.9mm 寬：4.9mm	0.09
實驗十六 C 組 添加 稀硫酸 (水溫 50 度)		透明	269	110	長：6.2mm 寬：4.9mm	0.084
實驗十六 D 組 添加 氯化鈉 (水溫 50 度)		透明帶部分 微白	191	140	長：7.6mm 寬：7.1mm	0.27



*由第二作者拍攝整理

(三)發現與討論：

- 1、觀察到這兩次的實驗，透明度雖然大幅提升，但結晶的尺寸(表面積)為 0.35 及 0.46 平方公分，比起之前總量實驗的表面積將近 1 平方公分來說，卻減少了超過 50%。感覺仍舊存在失敗機率(重複再現性)或是尚未探討到的變因所導致，需要再更深入研究。
- 2、溶解溫度降低(降到 50°C)會整體提升結晶的透明度，但對尺寸的影響則不是很明顯。
- 3、硼酸及稀硫酸的添加會提升結晶的透明度(2~4 成)，但氯化鈉則反而降低透明度。
- 4、氯化鈉的添加會提升結晶的尺寸(1~3 成)；稀硫酸的添加則會降低結晶的尺寸(3 成)，至於硼酸的添加則是在溶解溫度 60°C 的情況下，結晶尺寸成長(6 成)；而在溶解溫度 50°C 的情況下，結晶尺寸降低(4 成)。硼酸的添加在不同溶解的溫度影響下，結晶尺寸落差相當明顯。

伍、結論

一、濃度

- (一)濃度越高，越會導致結晶的交疊不規則、不完整而且會凝聚在一塊，顏色還不透明呈現白色冰塊狀。濃度高到一定程度(高於 **40g/100ml**)，還會讓結晶舖滿杯底，無法呈現單一顆結晶。
- (二)濃度較低的組別，結出的晶體的確會變得比較透明。就我們的實驗來看，**15g/100ml** 這一組 每一顆個別的透明度與形狀都更好。但要注意濃度太低的組別 **10g/100ml** 會結不出結晶。

二、冷卻速度(保溫效果的方法探討)

- (一)**減緩溫度散失**的組別結出的結晶，通常尺寸都會較大，而且透明度也都還不錯。
- (二)觀察到實驗八整體的結晶體積都變小，有可能是氣溫降低或是結晶實驗的失敗概率問題(重複再現性)。
- (三)然而太多或太過頭的保溫措施(保溫箱、保溫夾層袋)，反而會造成結晶偏白不透明或是其體積變小，所以結晶體積變小有可能是概率問題，但適度的保溫可能會減少這個狀況的發生，因此在我們的實驗中，最好的保溫方式是保溫袋的形式。不過仍然值得深入去探討。

三、減緩蒸發(加保鮮膜)

- (一)**減緩蒸發**的組別結出的結晶，通常尺寸都會較小而且結晶數量也會減少，雖然透明度都還不錯，但不符合我們的體積需求。
- (二)而皆無措施(**無減緩蒸發，無減緩溫度散失等措施**)的組別，尺寸與透明度都差異性變化較大，不是很穩定。

四、介質種類(自來水、蒸餾水)

- (一)蒸餾水當作介質並不會讓晶種的透明度增加。其結晶數量與透明度的差別不大，在尺寸上，大部分差異不大，不過有時反而是自來水的結晶較大(差了快 50%)。

五、重複養晶

- (一)綁魚線或是吸管支撐置中的方法，通常都會讓養晶後的結晶包覆上去，反而容易造成結晶不透明或是易於破碎。因此如果要提升透明度和尺寸的完整，將晶種置底是最合適的！
- (二)從重複養晶的實驗中發現，重複養晶雖然會讓晶種體積增加，但透明度卻是會下降相當多(平均降低超過 50%)。

六、總量增加(濃度不變)

- (一)在濃度不變的前提下，增加溶液的總量(**15g/100ml → 30g/200ml → 60g/400ml → 90g/600ml**)，其初次結晶的尺寸、數量皆增加，而透明度也超過 100 Lux。體積雖然略

輸給重複養晶的組別，但透明度卻相當高，符合我們的需求。

(二)但溶液的總量達到 120g/800ml(同一濃度)，其結晶數量過多又黏在一起，並鋪滿整個杯底，雖然透明度也超過 100 Lux，但尺寸卻變小，不符合需求。所以總量也不是越高越好，目前最好的總量增加組別為 90g/600ml。

七、流動

(一)放置沉水馬達讓溶液形成流動，不僅不如預期會增加結晶的附著，反而會造成結晶數量過多又細碎。

八、添加物及溶解溫度

(一)添加物

- 1、硼酸及稀硫酸的添加會提升結晶的透明度(2~4 成)，但氯化鈉則反而降低透明度。
- 2、氯化鈉的添加會提升結晶的尺寸(1~3 成)；稀硫酸的添加則會降低結晶的尺寸(3 成)。至於硼酸的添加則是在溶解溫度 60°C 的情況下，結晶尺寸成長(6 成)；而在溶解溫度 50°C 的情況下，結晶尺寸降低(4 成)。硼酸的添加在不同溶解的溫度影響下，結晶尺寸落差相當明顯。

(二)溶解溫度

- 1、溶解溫度降低(降到 50°C)會整體提升結晶的透明度，但對尺寸的影響則不是很明顯。

九、重複再現性及其他討論

(一)為了能準確地進行比較，我們在每次的實驗中都還是會設立一組對照組來進行比較，甚至在下一個實驗〔實驗六便是用來確認實驗五結果；實驗十二、十三部分是用來確認實驗十一的總量增加之發現〕再進行結果的重複再現性。

雖然花了許多時間，但卻能讓我們因應某些我們尚未察覺的環境變因，以便進行較為公平的比較。

(二)在實驗八中，我們發現這次結晶整體來說都偏小、細碎，可能是實驗當時環境溫度明顯降低導致(或是本就有失敗的機率--重複再現性)。

(三)在實驗十五、十六這兩次的實驗中，透明度雖然大幅提升，但結晶的尺寸(表面積)為 0.35 及 0.46 平方公分，比起之前總量實驗的表面積將近 1 平方公分來說，卻減少了超過 50%。感覺仍舊存在失敗機率(重複再現性)或是尚未探討到的變因所導致。

(四)所以要結出又大又通透的結晶的確存在重複再現性的問題(十六次實驗中有三次較出乎預料)，是會有失敗的機率。但經過重複的實驗與多次的比較，我們的確是可以按照上述結論的發現來了解趨勢或是提升成功率的！希望大家也能和我們一樣做出屬於自己的又大又通透的銨明礬結晶寶石。



*由指導老師拍攝

陸、參考文獻資料及其他

- 一、硫酸鋁銨(2024 年 9 月 12 日)。維基百科網站。取自：<https://reurl.cc/b3M8Oo>
- 二、何忻蓓、謝鎮宇、林弘偉、羅兆志 (1995)。怎樣做出漂亮的結晶體。中華民國第 35 屆科展國小組化學科。
- 三、嚴婉禎、鮑可軒、趙鴻、陳威宇 (2000)。利用明礬沈底晶體研究單晶的成長\n再向單晶體挑戰。中華民國第 40 屆科展國小組化學科。
- 四、王振羽、周俊安、呂紹瑋、黃曼舒、陳登俞 (2004)。“晶”華再現。中華民國第 44 屆科展國小組化學科。
- 五、范升維、黃亮宸、吳思穎、秦書涵、黃庭瑜、黃庭禎 (2016)。晶晶計較-明礬結晶的奧秘。中華民國第 56 屆科展國小組化學科。
- 六、彭方柔、張怡婷、李意涵、廖宣閔 (2019)。精益求精「晶」。中華民國第 59 屆科展國小組化學科。
- 七、鄭瑞春 (1983)。食鹽結晶的探討。中華民國第 23 屆科展國小組化學科。
- 八、湯詠恩、江岳勳、蔡瑞原 (1990)。結晶世界的奧妙。中華民國第 30 屆科展國小組化學科。
- 九、蔡宇軒、蕭逸凡、翁定暉 (2003)。晶體聯合國的高峰會議—探討結晶與各種變因的相互關係。中華民國第 43 屆科展國小組化學科。
- 十、賴佩婷、吳泓儀、陳涵瑜、張靜妮 (2004)。神奇暖暖包—醋酸鈉結晶之研究。中華民國第 44 屆科展高中組化學科。
- 十一、吳思穎;秦書涵;范升維;黃庭瑜;黃亮宸;黃庭禎 (2017)。藍色夢幻—硫酸銅結晶的研究。中華民國第 57 屆科展國小組化學科。
- 十二、陳郁心;林雅信;廖家好;游耘如;趙妍綾 (2018)。藍晶閃耀~探索單結晶、雙結晶、包心結晶形成的條件。中華民國第 58 屆科展國小組化學科。
- 十三、吳書昊;黃上睿;許芷睿;何雨溱 (2022)。水中「晶」靈-探討硫酸銅結晶大小的變因。中華民國第 62 屆科展國小組化學科。
- 十四、Kirakosyan, A., Kim, J., Lee, S. W., Swathi, I., Yoon, S.-G., & Choi, J. (2017). Optical properties of colloidal $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ nanocrystals by controlled growth of lateral dimension. *Crystal Growth & Design*, 17(2), 794–799. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6b01648>
- 十五、林文郁 (主編)。(2011)。無機化學 (第 3 版)。臺北：高立圖書。

【評語】080204

1. 研究主題明確聚焦於銨明礬結晶的大小與透明度優化，具有良好的可檢驗性。選題貼近教材中的結晶單元，具教育價值。然而對學術領域的創新貢獻有限，主要為既有知識的應用與驗證。
2. 實驗設計具實用性，建立透明度測量裝置展現創意。對化學教育有啟發價值，但對科學或社會的深層影響有限。
3. 實驗設計系統完整，控制變因清楚，從濃度、溫度、介質等多角度探討。數據收集詳實，重複驗證實驗結果。然而統計方法較簡單。

作品海報

又大又通透的 透明鑲嵌珠研究



摘要

想做大又通透的銨明礬結晶，在濃度上可以嘗試選擇15g/100ml，因為濃度太高會凝聚在一塊，顏色還不透明；濃度太低則無法形成結晶。冷卻速度太快，結晶體積會變小；而冷卻速度太慢，會造成結晶偏白不透明或是其體積也變小。所以使用保溫袋做適度保溫是不錯的選擇。另外減緩蒸發、使用蒸餾水、重複養晶以及流動等變因影響都不是很正面。

適度添加硼酸、稀硫酸及溶解溫度降低可以提升透明度；而氯化鈉與硼酸(溶解溫度60°C)的添加則會提升結晶的尺寸。最重要的是，總量增加(濃度不變)的方式不僅可以讓結晶的尺寸、數量皆增加，而透明度也很高，是體積增加但透明度不減的關鍵！

壹、研究動機

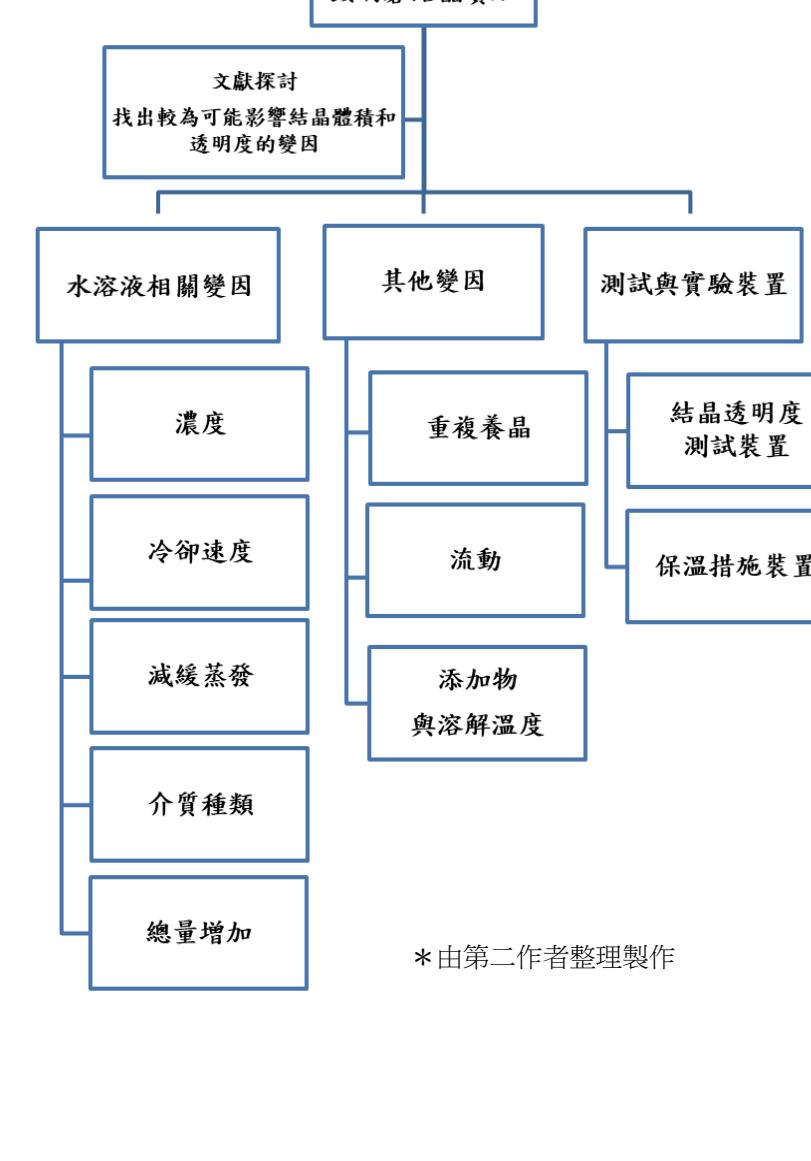
因為以前哥哥有拿一杯懸吊的銨明礬結晶回家，小時候的我覺得它很漂亮，但長大才明白是什麼原理，所以這次獨立研究想到這個主題，想要深入去了解並讓銨明礬結晶更大、更通透，完成屬於自己的結晶寶石！

貳、研究目的與架構

一、認識銨明礬的結晶過程

二、了解不同因素對銨明礬結晶的影響

- (一)濃度
- (二)冷卻速度(降溫慢的方法探討)
- (三)減緩蒸發(加保鮮膜)
- (四)介質種類(自來水、蒸餾水)
- (五)重複養晶
- (六)總量增加(濃度不變)
- (七)流動
- (八)添加物與溶解溫度



三、建立銨明礬結晶的透光度比較方式

四、確認保溫措施裝置

參、研究設備及器材



肆、研究過程與方法

一、文獻探討

(一) 結晶之邁耶理論

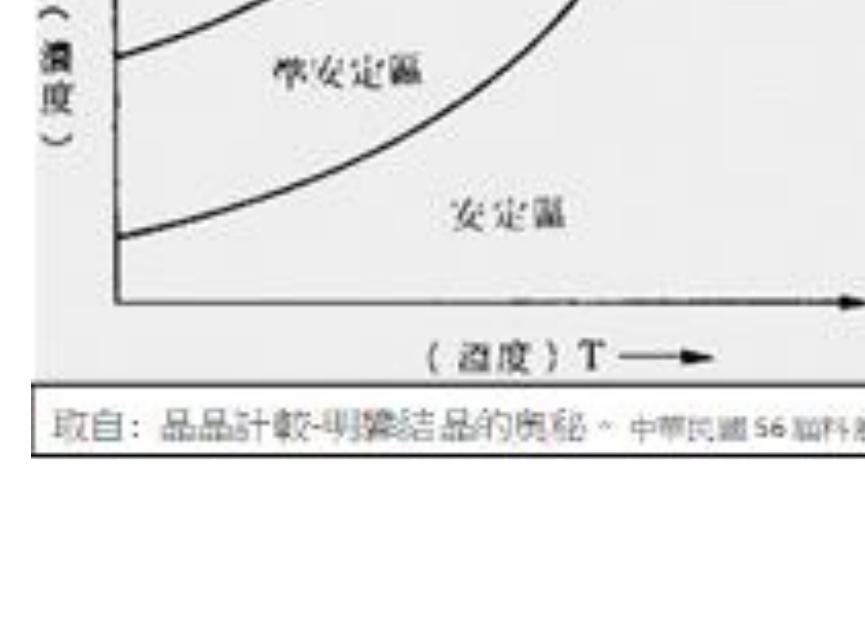
邁耶提出在溶解度曲線以上的過飽和區，再以過溶解度曲線分為不安定區及準安定區。

1. 準安定區：

只能成長晶體不能生成晶體，故需加入少數微小晶體，作為晶種；如控制得當，可得較大之晶體。

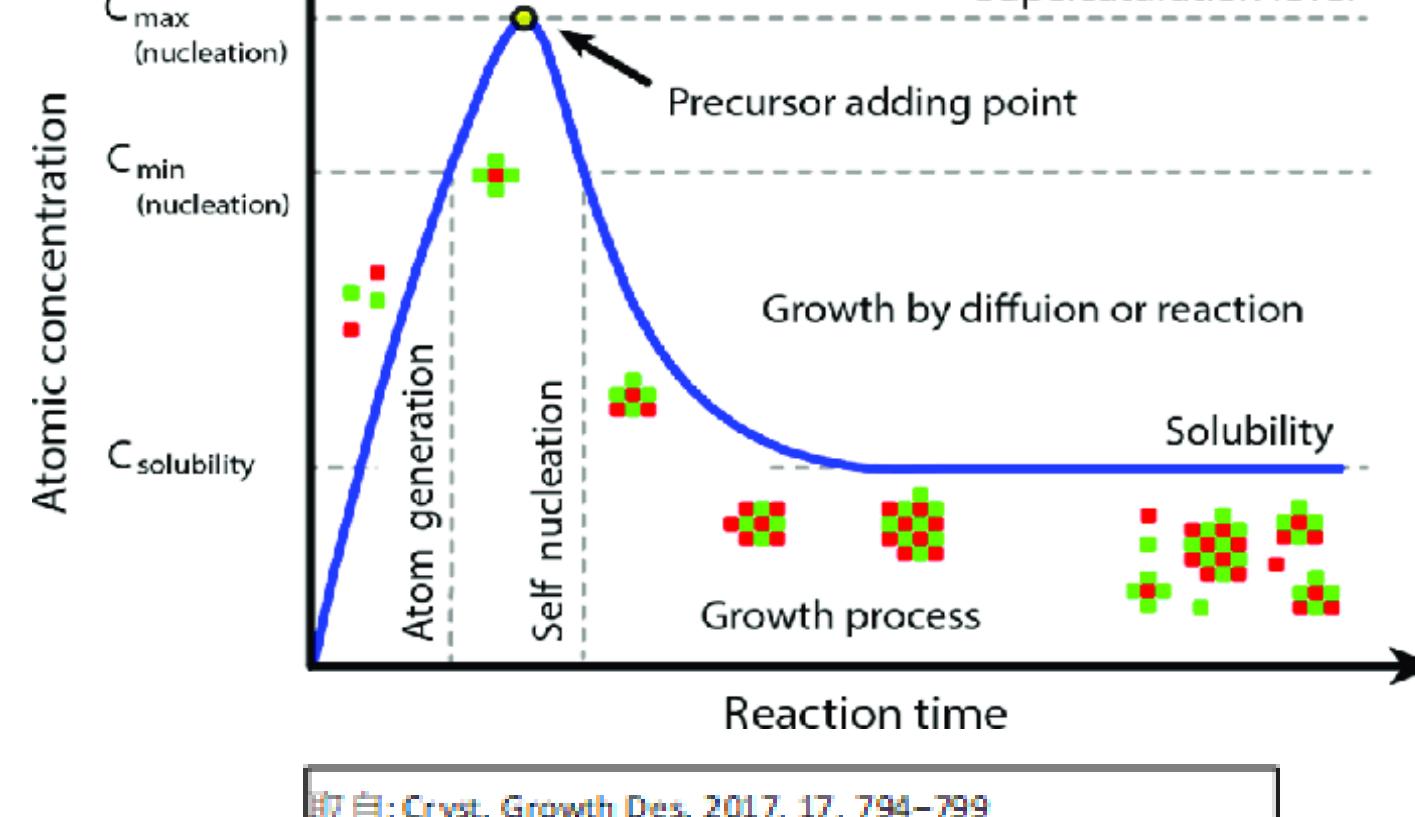
2. 不安定區：

會有大量微小晶體析出，分享了過飽和溶質的量，使晶體無法長大，故成為微小的晶體。



(二) 晶體的生長階段

1. 原子生成 (Atom generation)，由於溫度或濃度的局部變化，在此階段粒子仍散亂的排列。
2. 自發成核 (Self nucleation)，形成結晶微顆粒的作用稱為成核作用。原子濃度處於過飽和區域 (介於C_{min}與C_{max})，出現大量晶核生成。可再分為「均勻成核作用」與「不均勻成核作用」。
3. 成長過程 (Growth process)，結晶微顆粒的表面逐漸沉積更多的固體，最後生長成為大型的晶體顆粒。



(三) 相關報告參考

查詢歷屆全國科展作品，發現有許多關於結晶的研究，主要都是探究各項變因對於結晶的生成、成長速度、數量、體積、形狀、硬度、密度、顏色的影響，對於透明度的著墨較少。而我們偶然看到結晶的實驗，覺得結晶很漂亮很像人造寶石，因此便想透過研究來製造出不只體積大、透明度還更高的結晶寶石。

參考文獻後，我們有以下的基礎設定：1. 調配好的明礬水溶液靜置在不受陽光直射、附近無電器且不易碰觸到的角落。2. 實驗都將會用濾紙將水溶液進行過濾。3. 不使用附著材料(結晶看起來較容易破碎且模糊)。4. 重複養晶的水溶液溫度控制在30~60°C。

表2：其他結晶相關研究(由第二作者整理)

屆數(組別)	作品名稱	該作品探討方向
35屆國小組 化學科	怎樣做出漂亮的結晶	了解不同消費品的品項(含明礬)狀況，以及探討加入酒精、溫度、附著材料、光暗、環境溫度、降溫的速度、壓力對結晶數量、體積的影響。
40屆國小組 物理科	利用明礬沈底水體 以顯微鏡來觀察晶體的長短	並計算出成長率，發現沉底品體的成長過程中，會抑制它的立體成長，使得它只能成長扁平狀。
44屆國小組 化學科	“晶”華再現	從顯微鏡下觀察比較不同消費品(含明礬)的生成和形貌，並找出降溫的速度、附著材料、瓶口大小、水位高低、過程中是否要對結晶產生成長速度、形狀、數量、體積的影響，並連結到結晶的形態呈現。
55屆國小組 化學科	晶晶計較 明礬結晶的奧秘	確認濃度對不同溫度的關係，以及探討濃度、相向濃度與不同溫度放入品種，置入不同數目的晶種，品種多次培養對結晶數量、體積、形狀的影響。
9屆國小組 化學科	結晶說「晶」	探討濃度、降溫的速度、震動、兩者相輔相成對結晶數量、體積的影響並探究按明礬結晶顏色的方法。

二、實驗設計

(一) 結晶實驗基本設計與操作

所有結晶實驗大致上都依循這樣的步驟實施



*由第一作者拍攝整理

(二) 結晶透明度測試裝置

為了對結晶的透明度有一個客觀的數據，方便進行比較。所以我們想到用照度計來量測結晶的透明度，因為將結晶擺在手電筒前，比較透明的結晶所透出的光亮度會比模糊起霧的結晶來的高。

● 測試比較



● 測試方法

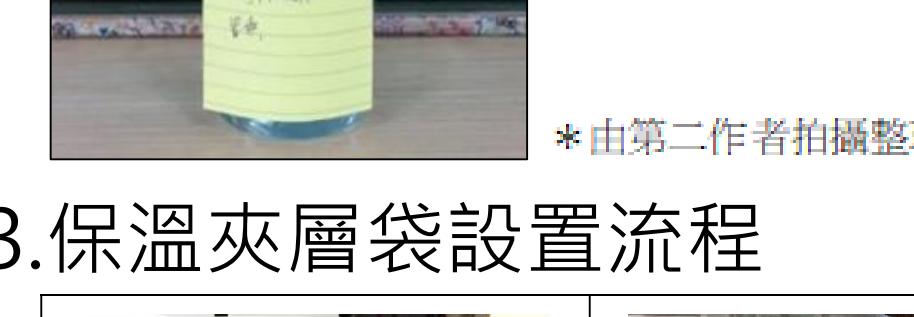


*由第一作者拍攝整理

(三) 保溫措施裝置設計

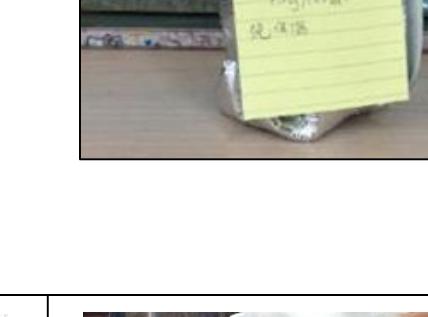
為了讓環境溫度提高，減緩溫度散失，讓溶液降溫慢一點，我們便設置了不同的保溫措施，下列就是設置流程。

1. 皆無措施設置



*由第二作者拍攝整理

2. 保溫袋~設置流程



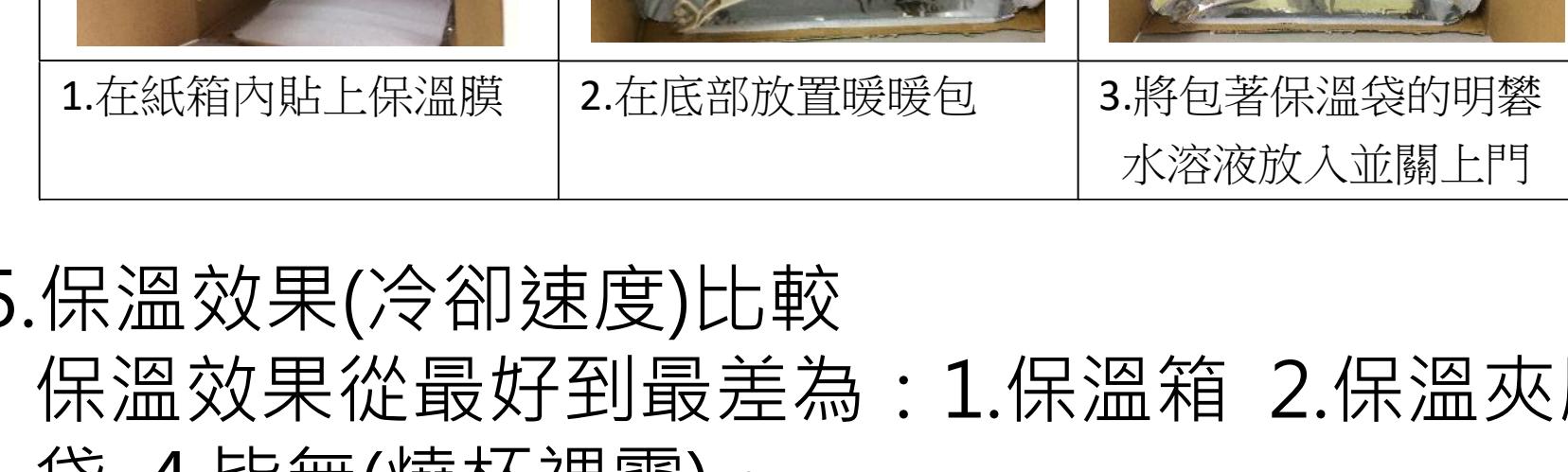
*由第二作者拍攝整理

3. 保溫夾層袋設置流程



*由第二作者拍攝整理

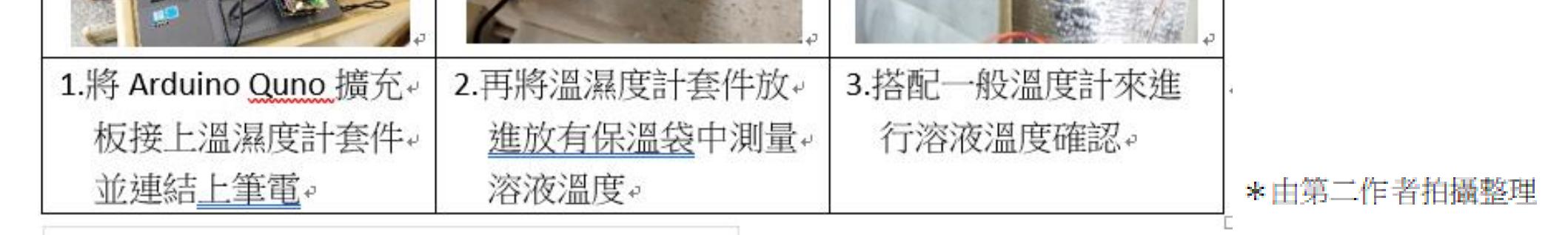
4. 保溫箱設置流程



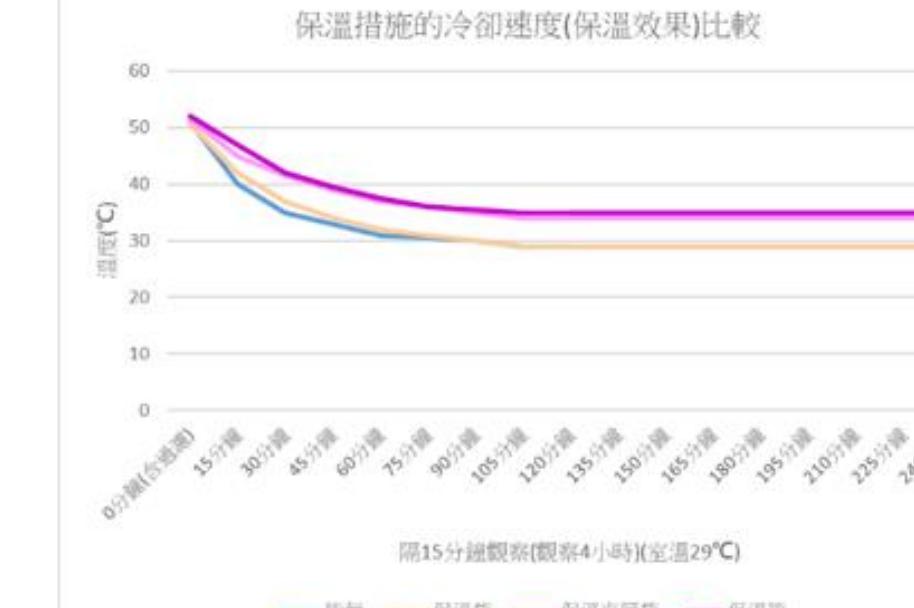
*由第二作者拍攝整理

5. 保溫效果(冷卻速度)比較

保溫效果從最好到最差為：1. 保溫箱 2. 保溫夾層袋 3. 保溫袋 4. 皆無(燒杯裸露)。



*由第二作者拍攝整理

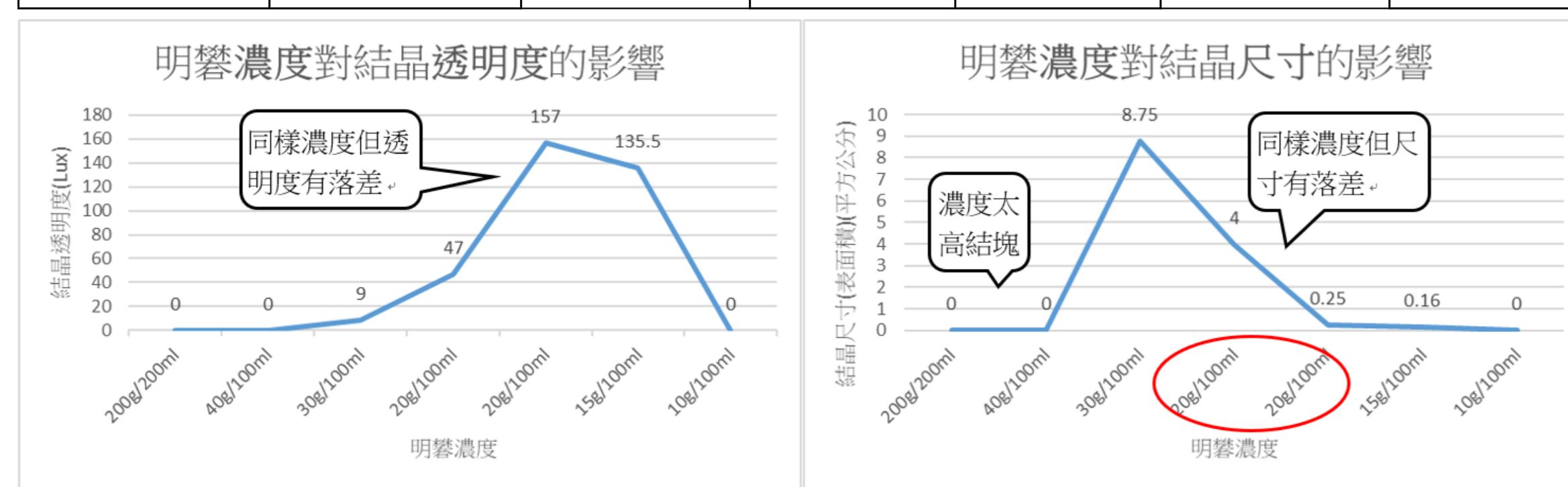


*由第二作者拍攝整理

伍、研究結果與討論

一、濃度實驗 (皆有減緩蒸發與保溫) (圖表由第一作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗一 200g/200ml (10 : 10)		白色	無法測量	無法測量	無法測量	無法測量
實驗三 40g/100ml (4 : 10)		微透明，微白(黏杯底無法取出)	無法測量	無法測量	無法測量	無法測量
實驗三 30g/100ml (3 : 10)		白色如冰塊	9	1	長：35mm 寬：25mm	18.2
實驗三 20g/100ml (2 : 10)		中心較霧，邊緣透明	47	2	長：20mm 寬：20mm	6.8
實驗四 20g/100ml (2 : 10)		不透明微白	157	25	長：5mm 寬：5mm	1.09
實驗四 15g/100ml (1.5 : 10)		透明，無白色部分	135.5	6	長：4mm 寬：4mm	0.28
實驗四 10g/100ml (1 : 10) (高溫水溶液)	無結晶	無結晶	無法測量	無法測量	無法測量	無法測量
實驗四 10g/100ml (1 : 10) (常溫水溶液)	無結晶	無結晶	無法測量	無法測量	無法測量	無法測量

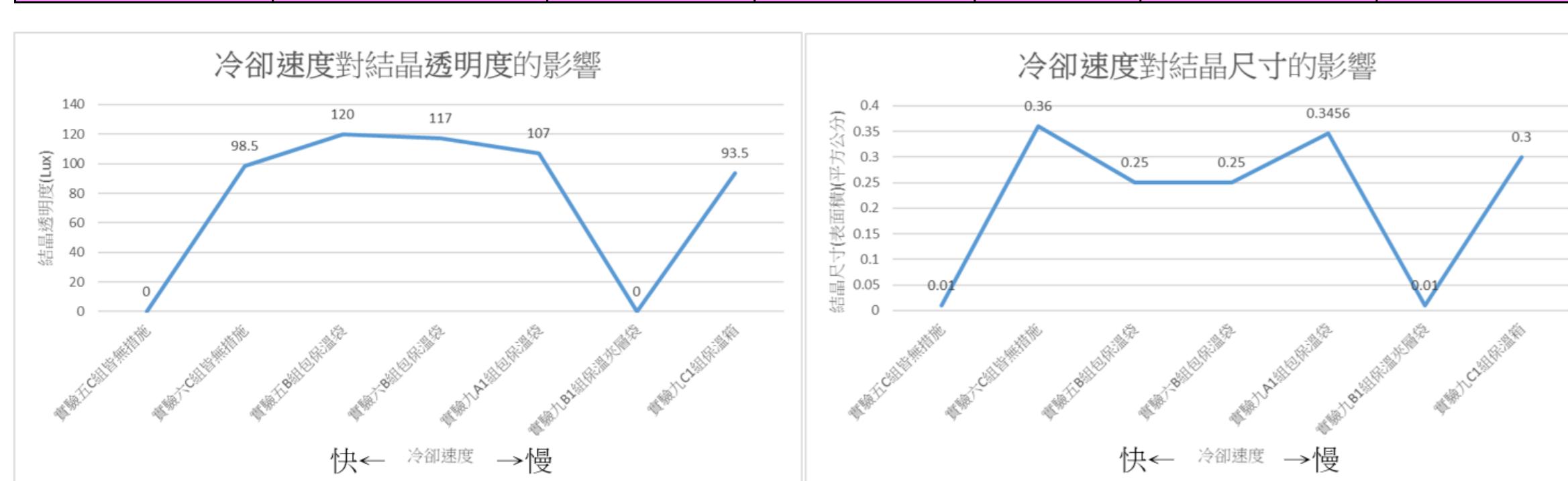


發現與討論：

- 實驗中發現濃度越高結晶就越多而且會凝聚在一塊，顏色也會呈現白色、較不透明的情況。
- 我們發現濃度較低以及結晶較小的組別，結出的晶體的確會變得比較透明。但濃度太低的組別10g/100ml(1 : 10)都結不出結晶。
- 另外雖然20g/100ml(2 : 10)這組的透明度(平均157 Lux)略高於15g/100ml(1.5 : 10)這一組(平均135.5 Lux)，但我們認為15g/100ml(1.5 : 10)這一組每一顆個別的透明度與形狀都更好，因此後續實驗皆採用濃度15g/100ml高溫明礬水來進行結晶實驗。
- 實驗四的20g/100ml的和實驗三的20g/100ml比較，發現實驗四的結晶較多且較小。(可能因最近氣溫降低，或者要注意結晶實驗的重複再現性問題，要再注意觀察)

二、冷卻速度實驗 (介質皆為自來水) (圖表由第二作者拍攝整理)

結晶描述 保溫措施	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗五 B 組 包保溫袋		透明	120	55	長：5mm 寬：5mm	0.06
實驗五 C 組 皆無措施		透明細碎	無法測量	量多細碎	長：1mm 寬：1mm	無法測量
實驗六 B 組 包保溫袋		透明	117	65	長：5mm 寬：5mm	0.08
實驗六 C 組 皆無措施		半透明 中心霧狀 有紋路	98.5	35	長：6mm 寬：6mm	0.12
實驗八 A1 組 包保溫袋		半透明 微白	51	>300	長：3.3mm 寬：3.3mm	0.0117
實驗八 B1 組 皆無措施		半透明 微白	51	>300	長：3.8mm 寬：3.8mm	0.004
實驗九 A1 組 包保溫袋		透明	107	50	長：6.4mm 寬：5.4mm	0.1
實驗九 B1 組 保溫夾層袋		白色	無法測量	量多細碎	長：1mm 寬：1mm	0.002
實驗九 C1 組 放保溫箱		大部分偏白，少部分透明	93.5	79	長：6mm 寬：5mm	0.23

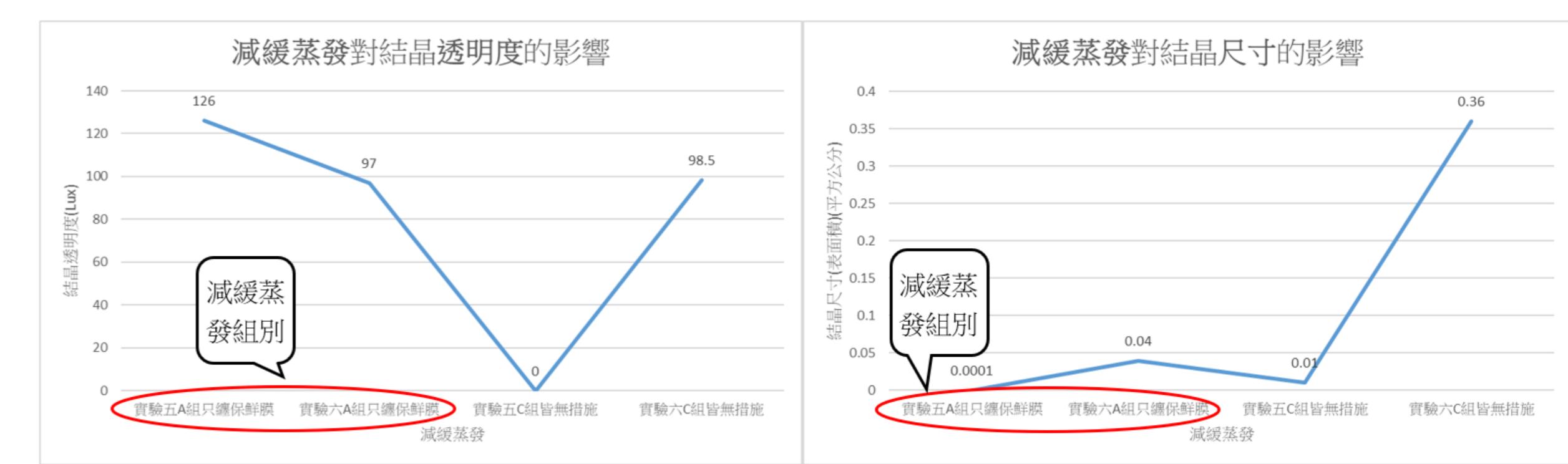


發現與討論：

- 只包保溫袋(減緩溫度散失)的組別結出的結晶，通常尺寸都會較大(平均5mm)，而且透明度也都還不錯(都接近120 Lux)。
- 皆無措施(無減緩溫度散失)的組別，尺寸與透明度都差異性變化較大，不是很穩定，但通常透明度相對較低且細碎、體積小、數量多。
- 在放保溫夾層袋的組別中，結晶數量過多且形狀細碎、體積小。而在放保溫箱的組別中，透明度有93.5Lux，但整體來說都偏白不透明。
- 觀察到實驗八整體的結晶體積都變小，有可能是氣溫降低或是結晶實驗的失敗概率問題(重複再現性)，因此沒有放進去折線圖進行比較。
- 發現反而太多的保溫措施，反而會造成結晶偏白不透明或是其體積變小，但相信適度的保溫可能會減少這個狀況的發生，因此後續實驗便繼續採用包保溫袋的形式來進行。

三、減緩蒸發實驗 (圖表由第二作者拍攝整理)

結晶描述 減緩蒸發	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗五 A 組 只纏保鮮膜		通透、透明	126	4	長：0.1mm 寬：0.1mm	0.2
實驗五 C 組 皆無措施		透明但因細碎看起來白	無法測量	量多細碎	長：1mm 寬：1mm	無法測量
實驗六 A 組 只纏保鮮膜		透明	97	量多	長：2mm 寬：2mm	0.015
實驗六 C 組 皆無措施		半透明，中心霧狀有紋路	98.5	35	長：6mm 寬：6mm	0.12
實驗四 包保溫袋、纏保鮮膜		透明，無白色部分	135.5	6	長：4mm 寬：4mm	0.28
實驗五 B 組 只包保溫袋、沒纏保鮮膜		透明、無白	120	55	長：5mm 寬：5mm	0.06
實驗六 B 組 只包保溫袋、沒纏保鮮膜		透明、無白色霧狀	117	55	長：5mm 寬：5mm	0.08
實驗九 A1 組 只包保溫袋、沒纏保鮮膜		透明	107	50	長：6.4mm 寬：5.4mm	0.1



發現與討論：

- 只纏保鮮膜(減緩蒸發)的組別結出的結晶，通常尺寸都會較小，雖然透明度都還不錯，但結晶變大的時間會拉的太長。
- 從這個表格還可以額外看出有包保溫袋的組別，整體而言，透明度和尺寸都比較高。

四、介質種類實驗 (圖表由第三作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗八 A1 組 只包保溫袋、自來水溶解		透明、微白	51	>300	長：3.3mm 寬：3.3mm	0.04
實驗八 A2 組 只包保溫袋、蒸餾水溶解		透明、微白	40	>300	長：3.2mm 寬：3.2mm	0.035
實驗八 B1 組 無措施、自來水溶解		透明、微白	51	>300	長：3.8mm 寬：3.8mm	0.04
實驗八 B2 組 無措施、蒸餾水溶解		透明、微白	51	>300	長：3.8mm 寬：3.2mm	0.03
實驗九 A1 組 只包保溫袋、自來水溶解		透明	107	52	長：6.4mm 寬：5.4mm	0.34
實驗九 A2 組 只包保溫袋、蒸餾水溶解		透明	109.5	43	長：4mm 寬：4mm	0.225

發現與討論：

- 在實驗八中發現，蒸餾水當作介質並不會讓晶種的透明度增加。
- 在實驗九，蒸餾水與自來水的使用上依舊看不出明顯的優缺。
- 因此使用自來水或蒸餾水不論在結晶透明度或是尺寸都沒有太大的差別，因此後續實驗只採用自來水(降低成本)。

五、重複養晶實驗 (圖表由第三作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	養晶後外觀	透明度(Lux)	原尺寸	養晶後尺寸	初生結晶 透明度	平均尺寸
實驗七 A1 組 自來水、 晶種魚線懸吊		45	無記錄	長：14.2mm 寬：14.4mm	無	無
實驗七 A2 組 自來水、 晶種置底		43	無記錄	長：17.2mm 寬：12.9mm	無	無
實驗十 A1 組 蒸餾水、 晶種置底		27	長：8.4mm 寬：7.6mm	長：13.3mm 寬：10.6mm	無觀察	無觀察
實驗十 A2 組 蒸餾水、 晶種置底		64	長：7.4mm 寬：6.5mm	長：11mm 寬：10mm	無觀察	無觀察
實驗十 B1 組 自來水、 晶種置底		60	長：7.2mm 寬：6.1mm	長：11mm 寬：10mm	無觀察	無觀察
實驗十 B2 組 自來水、 晶種置底		71	長：7mm 寬：6.3mm	長：10mm 寬：10mm	無觀察	無觀察
實驗十一 A 組 自來水、 吸管支撐置中		31	長：9.3mm 寬：8.4mm	長：16.7mm 寬：12.6mm	132.5	長：9mm 寬：9mm
實驗十一 B 組 自來水、 吸管支撐置中		44	長：9.1mm 寬：8.7mm	長：18mm 寬：14mm	129	長：13mm 寬：10mm
實驗十二 A 組 自來水、 晶種置底		28	長：6mm 寬：4.2mm	長：18.4mm 寬：15.7mm	103	長：8.9mm 寬：7.8mm
實驗十二 B 組 自來水、 晶種置底		34	長：6mm 寬：5mm	長：19.6mm 寬：17.2mm	135.5	長：9.2mm 寬：8.3mm

發現與討論：

1. 晶種懸吊設計的演變：

(1)綁魚線：綁不穩，容易脫落影響實驗結果。(為了增加晶接觸面積)

(2)T字綁法：仍舊綁不穩，容易脫落。

(3)吸管支撐置中：結晶會包覆吸管，造成碎裂與混濁。

(4)晶種置底：目前最好的選擇

2. 在所有的重複養晶的實驗中發現，重複養晶雖然會讓晶種體積增加，但透明度卻是下降不少。(平均降低超過50%) (但晶種透明度皆在100Lux以上)

3. 在實驗中意外發現(為了讓溶液蓋過吸管便於重複結晶)，在濃度不變的前提下，增加溶液的總量，會讓結出的晶種變大而且相當透明。體積不輸給重複養晶的組別，甚至透明度更高。所以後續實驗可以朝這個面向發展。

六、總量增加實驗 (圖表由第一作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗六 B 組 初生晶種 (15g/100ml)		透明、無白色霧狀	117	55	長：5mm 寬：5mm	0.08
實驗九 A2 組 初生晶種 (15g/100ml)		透明	109.5	40	長：4mm 寬：4mm	0.225
實驗十一 A 組 初生晶種 (30g/200ml)		透明且幾乎無雜質	132.5	23	長：9mm 寬：9mm	0.24
實驗十一 B 組 初生晶種 (30g/200ml)		透明且幾乎無雜質	129	12	長：13mm 寬：10mm	0.58
實驗十二 B 組 初生晶種 (30g/200ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	135.5	15	長：9.2mm 寬：8.3mm	0.31
實驗十三 A 組 初生晶種 (30g/200ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	113.5	25	長：10mm 寬：7mm	0.375
實驗十三 B 組 初生晶種 (60g/400ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	106.5	53	長：10.4mm 寬：8.8mm	0.38
實驗十三 C 組 初生晶種 (90g/600ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	125.5	89	長：10.9mm 寬：10.5mm	0.39
實驗十三 D 組 初生晶種 (120g/800ml)		部分全透明、部分些微白色混濁	115	數量過多 不可數	長：7.7mm 寬：5.4mm	0.18
實驗七 A2 組 (重複養晶)		微透明，中間較多霧狀雜質	43	1	長：17.2mm 寬：12.9mm	1.76
實驗十 B2 組 (重複養晶)		外圍透明，中間部分微白	71	1	長：10mm 寬：10mm	0.12
實驗十二 B 組 (重複養晶)		外圍部分透明，中間較白且混濁	34	1	長：19.6mm 寬：17.2mm	2.3

發現與討論：

1. 在實驗十一中意外發現(為了讓溶液蓋過吸管便於重複結晶)，在濃度不變的前提下，增加溶液的總量，會讓結出的晶種變大而且相當透明。體積雖然略輸給重複養晶的組別，但透明度卻相當高。而在實驗十二中也驗證了這個發現。

2. 在實驗十三中再度證實溶液總量增加，結晶的尺寸、數量皆增加，而透明度也超過100 Lux。

3. 溶液總量增加至120g/800ml(同一濃度)，其結晶數量過多又黏在一起，雖然透明度也超過100 Lux，但尺寸卻變小，不符合需求。所以除了先前實驗中發現濃度過高會導致結晶鋪滿杯底，連溶液總量過高(比例不變)也會如此。

4. 接下來的實驗我們決定用90g/600ml的總量(結晶數量和透明度比其它組還要多還要通透且尺寸和重量要較大較重)。

七、流動實驗 (圖表由第三作者拍攝整理)

	外觀	透明度(Lux)	平均尺寸
實驗十四 A 組 濃度 90g/600ml		無法測量	長：2.33mm 寬：1.2mm
實驗十三 C 組 濃度 90g/600ml		125.5	長：10.9mm 寬：10.5mm

發現與討論：

1. 放置沉水馬達讓溶液形成流動，不僅不如預期會增加結晶的附著，反而會造成結晶數量過多又細碎。

2. 一周後溶液量大幅減少，可能還會增加蒸發的效果(根據文獻推測可能是震動所造成的負面影響)。



*由第三作者拍攝

八、添加物及溶解溫度實驗 (圖表由第二作者拍攝整理)

結晶描述 結晶濃度	外觀	顏色	透明度(Lux)	數量(顆)	平均尺寸	平均重量(g)
實驗十五 A 組 無添加 (水溫 60 度)		透明、微白	132	107	長：6.1mm 寬：5.7mm	0.146
實驗十五 B 組 添加硼酸 (水溫 60 度)		透明	181	150	長：8.3mm 寬：6.7mm	0.168
實驗十五 C 組 添加稀硫酸 (水溫 60 度)		透明	195	282	長：4.9mm 寬：4.9mm	0.08
實驗十五 D 組 添加氯化鈉 (水溫 60 度)		透明	109	256	長：6.9mm 寬：6.9mm	0.183
實驗十六 A 組 無添加 (水溫 50 度)		透明	194	103	長：7mm 寬：6.5mm	0.142
實驗十六 B 組 添加硼酸 (水溫 50 度)		透明	238	95	長：5.9mm 寬：4.9mm	0.09
實驗十六 C 組 添加稀硫酸 (水溫 50 度)		透明	269	110	長：6.2mm 寬：4.9mm	0.084
實驗十六 D 組 添加氯化鈉 (水溫 50 度)		透明帶部分 微白	191	140	長：7.6mm 寬：7.1mm	0.27

發現與討論：

1. 觀察到這兩次的實驗，透明度雖然大幅提升，但結晶的尺寸比起之前總量實驗的表面積來說，卻減少了超過50%。

感覺仍舊存在失敗機率(重複再現性)或是尚未探討到的變因所導致，需要再更深入研究。

2. 溶解溫度降低(降到50°C)會整體提升結晶的透明度，但對尺寸的影響則不是很明顯。

3. 硼酸及稀硫酸的添加會提升結晶的透明度(2~4成)，但氯化鈉則反而降低透明度。

4. 氯化鈉的添加會提升結晶的尺寸(1~3成)；稀硫酸的添加則會降低結晶的尺寸(3成)，至於硼酸的添加則是在溶解溫度60°C的情況下，結晶尺寸成長(6成)；而在溶解溫度50°C的情況下，結晶尺寸降低(4成)。硼酸的添加在不同溶解的溫度影響下，結晶尺寸落差相當明顯。

九、結論

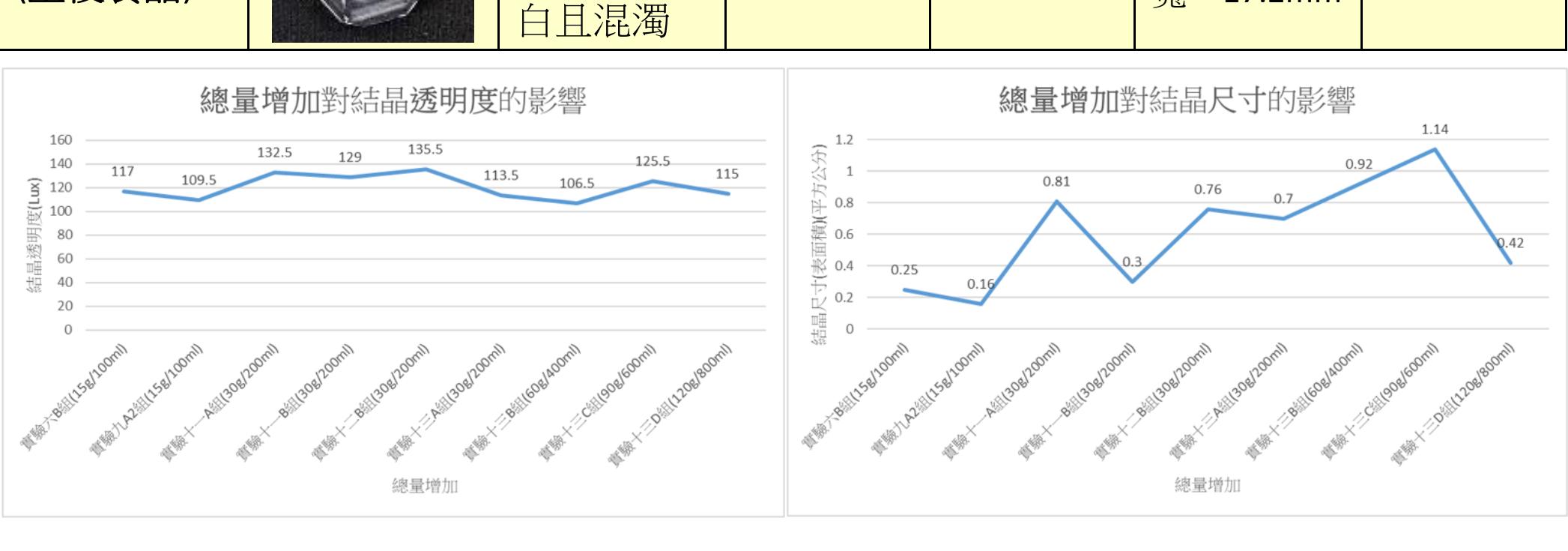
- (一) **濃度**：可以選擇15g/100ml，因為濃度太高會凝聚在一塊，顏色不透明；濃度太低則無法形成結晶。
- (二) **冷卻速度**：冷卻速度太快或太慢，結晶體積會變小。用保溫袋做適度保溫是不錯的選擇。
- (三) **減緩蒸發**：透明度高，但結晶量少、尺寸小。
- (四) **介質種類**：使用蒸餾水與自來水的各項差異不大。
- (五) **重複養晶**：體積增加、但透明度減少。
- (六) **總量增加**(濃度不變)：尺寸、數量增加，透明度也高。
- (七) **流動**：量多但細碎。
- (八) **添加物與溶解溫度**：適度添加硼酸、稀硫酸及溶解溫度降低可以提升透明度；而氯化鈉與硼酸(溶解溫度60°C)的添加則會提升結晶的尺寸。
- (九) **重複再現性及其他**：要結出又大又通透的結晶的確存在重複再現性的問題(十六次實驗中有三次出乎預料)，會有失敗的機率。但經過重複的實驗與多次的比較，的確可以按照上述的發現來了解趨勢或是提升成功率的！

十、參考文獻資料及其他

(略)



*由指導老師拍攝



發現與討論：

1. 在實驗十一中意外發現(為了讓溶液蓋過吸管便於重複結晶)，在濃度不變的前提下，增加溶液的總量，會讓結出的晶種變大而且相當透明。體積雖然略輸給重複養晶的組別，但透明度卻相當高。而在實驗十二中也驗證了這個發現。

2. 在實驗十三中再度證實溶液總量增加，結晶的尺寸、數量皆增加，而透明度也超過100 Lux。