

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 工程學科(一)科

探究精神獎

052314

乾冰白霧的真相—冷霧機的構思

學校名稱：國立宜蘭高級中學

| | |
|---|------------------|
| 作者： 高三 許宏澤 高三 林璟觀 高三 林亮昕 | 指導老師： 游春祥 |
|---|------------------|

關鍵詞：乾冰、蒸氣壓、揮發-凝結動平衡

摘要

水蒸氣冷卻凝結是常識，乾冰吸熱讓液態水冷卻也是常識，因此，順理成章的推測乾冰生成煙霧的原因是冷卻空氣中的水蒸氣，原是非常合理的推論。但是，將乾冰放在空氣中，僅會產生少量的煙霧，而在液態水中卻產生大量煙霧，故推測乾冰放入水中時，大部分煙霧的生成應來自液態水而非空氣。問題是乾冰放入水中後，使水溫下降時，為何能使液態水汽化為水蒸氣，水蒸氣又是如何凝結成小水滴的呢？同時，若將水換成其他溶劑時，是否能夠生成煙霧，煙霧效果差異為何呢？在不同溫度，不同溶劑量，或在水中加入不同溶質時，又會如何？因此我們設計了一系列的實驗，探討各種不同的變因，企圖由實驗結果建立正確的理論，並依理論設計出可運行冷霧機的模型。

壹、研究動機

參觀台大杜鵑花節時，大氣科學系利用乾冰浸在水中所製造出煙霧，模擬龍捲風的形成，此時有人發問，煙霧如何形成，學長姐回答煙霧是乾冰凝結水蒸氣所形成。接著有人問，為何需額外加水，學長姐回答加水後生成的煙霧較多，龍捲風較易觀測。

常見的煙霧，通常由水加熱或水蒸氣冷卻產生，一般有熱煙冷霧的說法，不論是煙還是霧，當水分子團不夠大時，肉眼無法看見，故水分子必須聚集成足以散射光線的大分子團時，才形成肉眼可見的煙霧。

為理解乾冰生成煙霧的原因，網路搜尋後發現，無論是維基百科，還是台師大物理學系教授的回答，均認為煙霧的的來源是乾冰降低空氣的溫度，使空氣中的水蒸氣凝結為小水滴，與雲霧形成的方式雷同。

這讓我十分疑惑，既然煙霧是由凝結水蒸氣所形成，那麼為何加水生成的煙霧較多呢？於是上網搜尋相關資料，發現氣泡面膜的影片，影片中以清潔劑形成的膜隔絕空氣，乾冰與熱水生成大量白煙被薄膜包覆，經過一些時間後，氣泡膜自然脹大破裂，白煙傾洩而出。由此可知乾冰的白煙來自水中。

經過我們設計的多次實驗後，這些「霧」所隱含的謎團也逐一浮上檯面。

貳、 研究目的

- 一、 研究水量不同時，加入等量乾冰後，乾冰煙霧對水的重量帶來的影響
- 二、 探討水量相等時，加入不同重量乾冰後，對乾冰煙霧對水的重量帶來的影響
- 三、 起始溫度不同時，比較乾冰煙霧生成後，對水的重量帶來的影響
- 四、 使用水浴恆溫槽，比較起始條件相同下，乾冰煙霧對溶劑重量改變有何影響
- 五、 探究不同形狀容器對於乾冰煙霧的影響
- 六、 乾冰顆粒大小對於乾冰煙霧的影響
- 七、 霧的成分探究－比較不同溶劑(水、乙二醇、丙三醇、沙拉油、10%食鹽水)的實驗結果
- 八、 以灰石與酸反應製備 CO_2 ，利用排水集氣法，探討 CO_2 氣體對水重量的影響。
- 九、 總結實驗結果，推導出煙霧生成原理，以及冷霧機模型的設計。

參、 研究設備及器材

- 一、 研究設備及器材
燒杯、錐形瓶、電子秤、量筒、鐵鎚、杜耳瓶、恆溫槽
- 二、 化學藥品
乾冰、水、乙二醇、丙三醇、第三丁醇、沙拉油、乙醇、洗碗精 CaCO_3 、 HCl

肆、 研究過程或方法

一、實驗模組(變溫)：

(一)步驟：

- 1、將燒杯置於電子秤上，燒杯內加入適量溶劑，並記錄電子秤讀數 A1 (燒杯+溶劑的總重量)
- 2、取出儲存在杜耳瓶內的乾冰，用鐵鎚將乾冰敲成適當大小後，放入上述燒杯中，並記錄電子秤上讀數 A2 (燒杯+溶劑+乾冰的總重量)
- 3、待其反應完成後，拭去附著於燒杯外壁凝結的水珠，記錄整個裝置的總質量 A3 (燒杯+杯內剩餘的溶劑的重量)
- 4、重複步驟(1)~(3)至少三次，並將記錄到的數據匯整成 EXCEL 檔，觀察與比較得到的數據

(二)數據匯整:

- 1、將 A2 減去 A1，即可得到 乾冰的質量 B1
- 2、將 A3 減去 A1，即可得到 水減少的質量 B2
- 3、將 B2 除以 B1，即可得到 每單位乾冰的質量所減少的水重

(三)操縱變因:

1、討論對象：

- (1)溶劑量 (100g、200g、400g)
- (2)溫度 (27°C、40°C)
- (3)更換溶劑:水、乙二醇、丙三醇、沙拉油、10%食鹽水
- (4)容器 (燒杯、錐形瓶)
- (5)變溫與恆溫
- (6)乾冰重量
- (7) 乾冰顆粒大小

2、實驗目的

希望藉由實驗組及對照組的比對，探討不同變因對於白煙生成量的影響，由觀察到的現象，分析其背後的原因。

二、實驗模組(恆溫)：

控制水域溫度，使乾冰在外在溫度相同的情況下，測量並記錄實驗後的結果。

(一)步驟：

- 1、先將燒杯至於電子秤上，看著電子秤的讀數，於燒杯內加入 100 克的溶劑，並記錄下當時電子秤上的讀數 A1 (燒杯+溶劑的重量)
- 2、取出儲存在杜耳瓶內的乾冰，用鐵鎚將乾冰敲成適當大小，隨即丟入燒杯中，並記錄下當時電子秤上的讀數 A2 (燒杯+溶劑+乾冰的重量)
- 3、將上述燒杯至於恆溫槽中，待其反應完後，將燒杯從恆溫槽中取出，拭去附於燒杯外壁的水珠後，置於電子秤上，記錄整個裝置的總質量 A3 (燒杯+杯內剩餘的溶劑的重量)
- 4、重複步驟(1)~(3)至少三次，並將記錄到的數據匯整成 EXCEL 檔，觀察與比較得到的數據

(二)數據匯整:

- 1、將 A2 減去 A1，即可得到 乾冰的質量 B1
- 2、將 A3 減去 A1，即可得到 水減少的質量 B2
- 3、將 B2 除以 B1，即可得到 每單位乾冰的質量所減少的水重

(三)控制變因與操縱變因:

1、討論對象

- (1)溶劑量 (100g、200g、400g)
- (2)溫度 (27°C、40°C)
- (3)更換溶劑:水、乙二醇、丙三醇、沙拉油、10%食鹽水
- (4)容器 (燒杯、錐形瓶)
- (5)變溫與恆溫
- (6)乾冰重量
- (7) 乾冰顆粒大小

2、實驗目的

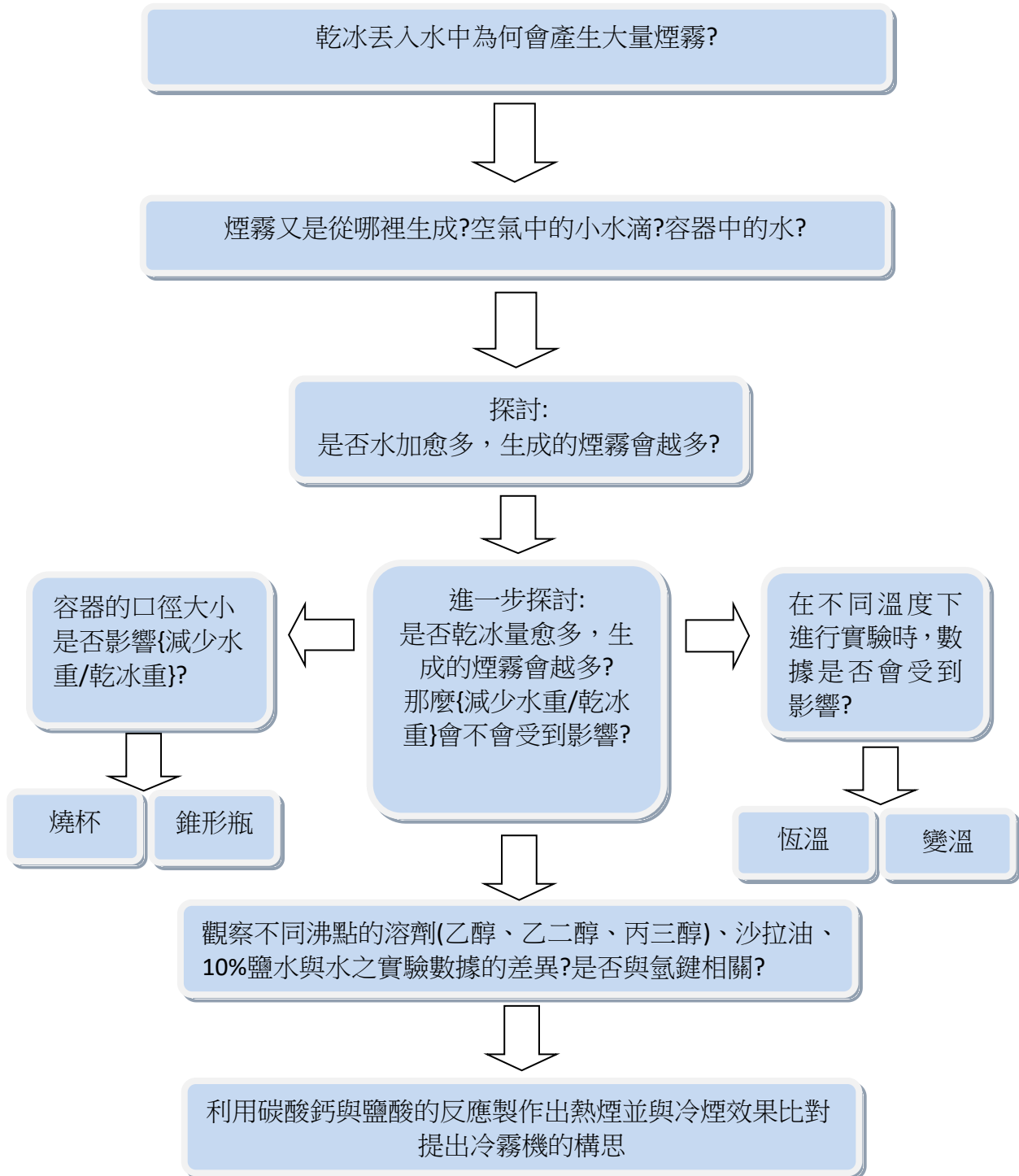
我們希望藉由比對變溫與恆溫下，對不同溶劑量、溫度、溶劑、容器、並藉由觀察到的現象，分析其背後的原因。

三、實驗模組：二氧化碳氣泡對水重量的影響

(一)步驟：

取大理石若干克，加入 HCl 後，將生成的 CO₂ 氣體排入定量水中，連續測量水的重量變化。(如實驗照片圖)

研究流程



伍、研究結果

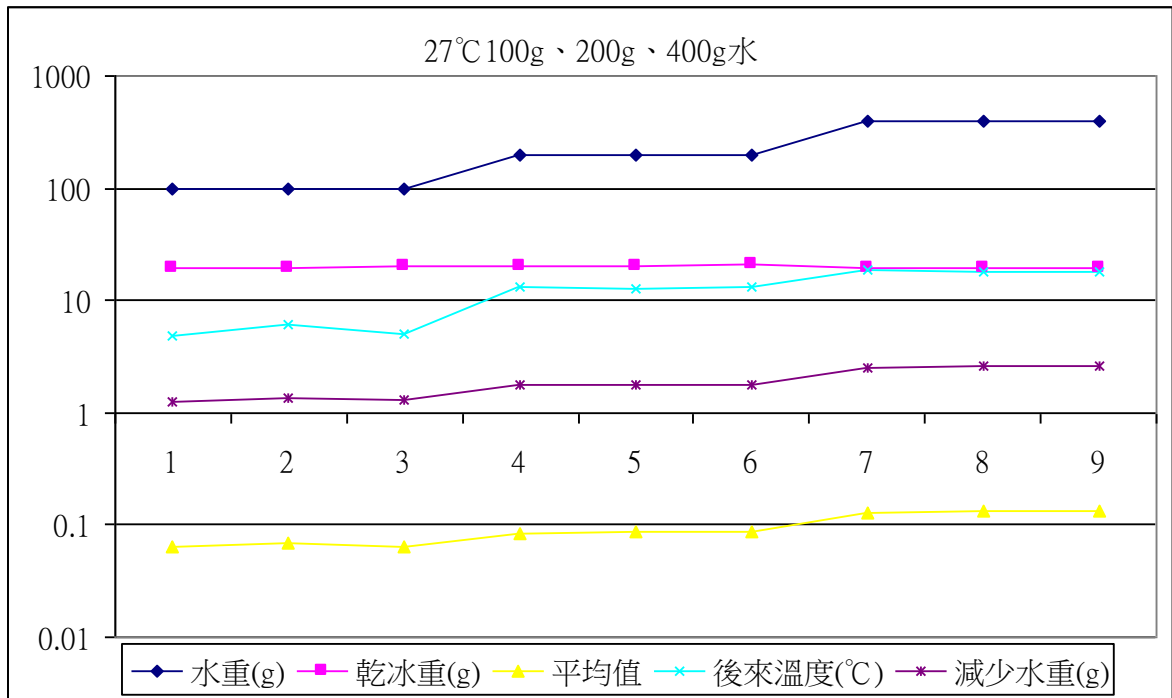
一、實驗數據

(一)比較水量對實驗之影響

1、27°C 100g、200g、400g 水

平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

| 水重(g) | 杯+水(g) | 總重(g) | 乾冰重(g) | 末溫度(°C) | 反應後重量(g)(去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 | 溫度差(°C) |
|-------|---------|---------|--------|---------|---------------|---------|-------|---------|
| 100 | 204.281 | 224.05 | 19.769 | 4.8 | 203.019 | 1.262 | 0.063 | 22.2 |
| 100 | 191.611 | 211.16 | 19.549 | 6 | 190.278 | 1.333 | 0.068 | 21 |
| 100 | 198.475 | 218.701 | 20.226 | 5 | 197.186 | 1.289 | 0.063 | 22 |
| 200 | 327.093 | 347.823 | 20.730 | 13 | 325.294 | 1.799 | 0.086 | 14 |
| 200 | 320.671 | 341.228 | 20.557 | 13 | 318.928 | 1.743 | 0.084 | 14 |
| 200 | 324.772 | 345.203 | 20.431 | 12.8 | 323.011 | 1.761 | 0.086 | 14.2 |
| 400 | 537.962 | 557.723 | 19.761 | 19 | 535.461 | 2.501 | 0.126 | 8 |
| 400 | 545.769 | 565.398 | 19.629 | 18 | 543.179 | 2.59 | 0.131 | 9 |
| 400 | 539.495 | 559.175 | 19.68 | 18.3 | 536.855 | 2.64 | 0.134 | 8.7 |



由實驗結果得知，27°C時，約等量的乾冰加入不等量的水中時，水的重量愈多，初溫與末溫的溫度差愈小，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，平均減少水重亦愈大。

(二)比較溫度對實驗之影響

1、100g 水 27℃、40℃之比較

平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

| 杯+水(g) | 總重(g) | 乾冰重(g) | 初溫(°C) | 末溫(°C) | 反應後重量(g)(去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 | 溫度差(°C) |
|---------|---------|--------|--------|--------|---------------|---------|-------|---------|
| 204.281 | 224.05 | 19.769 | 27 | 4.8 | 203.019 | 1.262 | 0.063 | 22.2 |
| 191.611 | 211.16 | 19.549 | 27 | 8 | 190.278 | 1.333 | 0.068 | 19 |
| 198.475 | 218.701 | 20.226 | 27 | 5 | 197.186 | 1.289 | 0.063 | 22 |
| 224.673 | 244.683 | 20.010 | 40 | 11.2 | 222.691 | 1.982 | 0.099 | 28.8 |
| 219.497 | 239.678 | 20.181 | 40 | 11 | 217.439 | 2.058 | 0.101 | 29 |
| 223.568 | 224.178 | 20.610 | 40 | 10.8 | 221.394 | 2.714 | 0.105 | 29.2 |

2、200g 水 27℃、40℃之比較

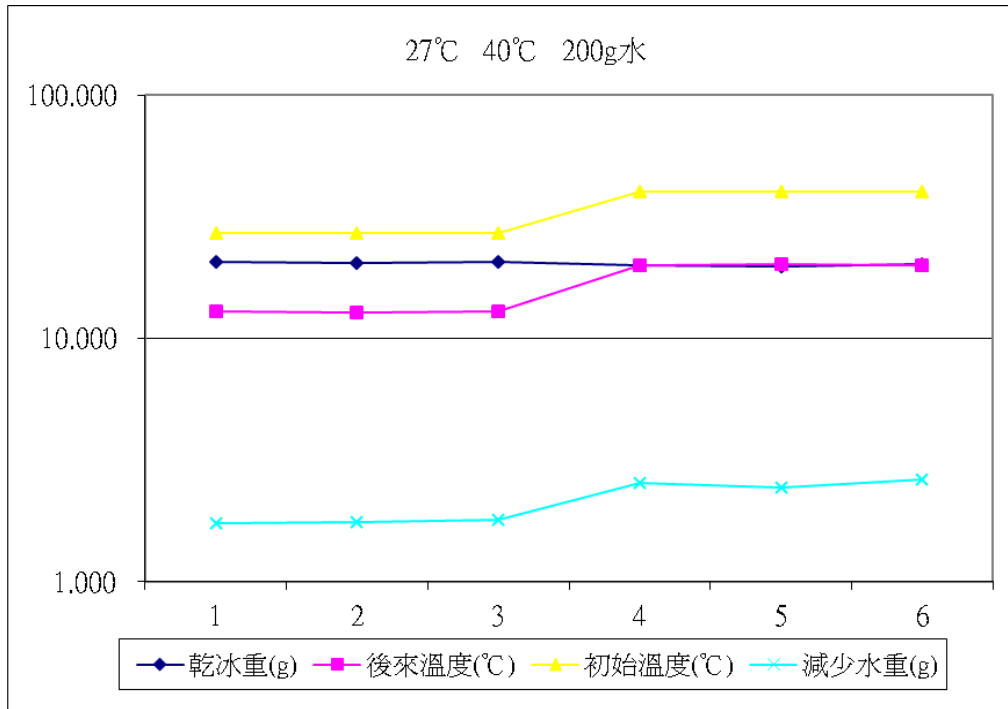
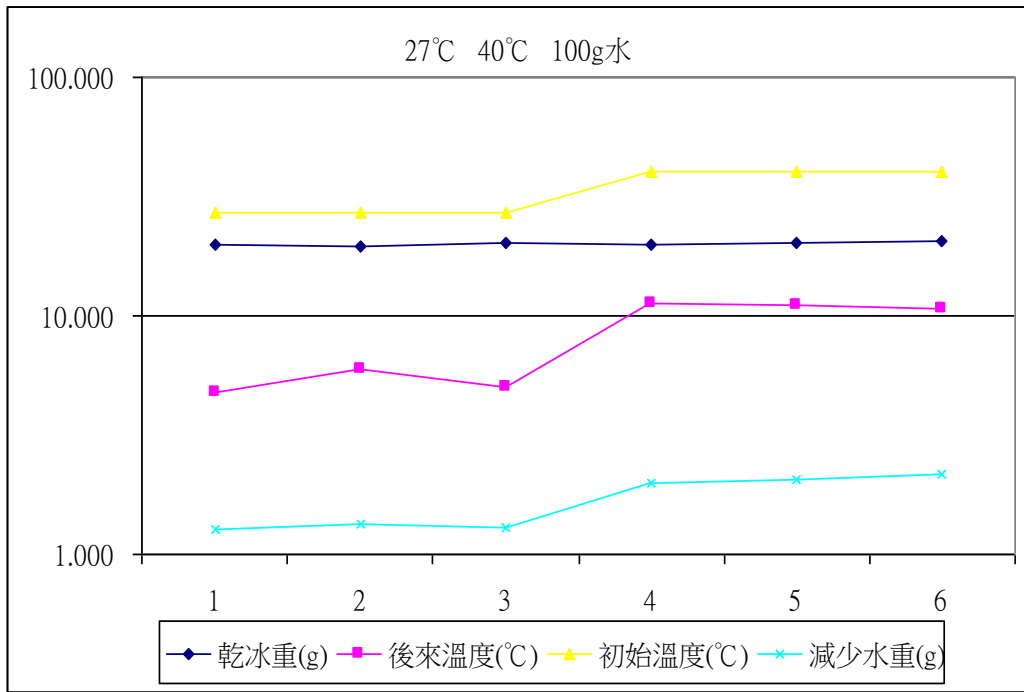
平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

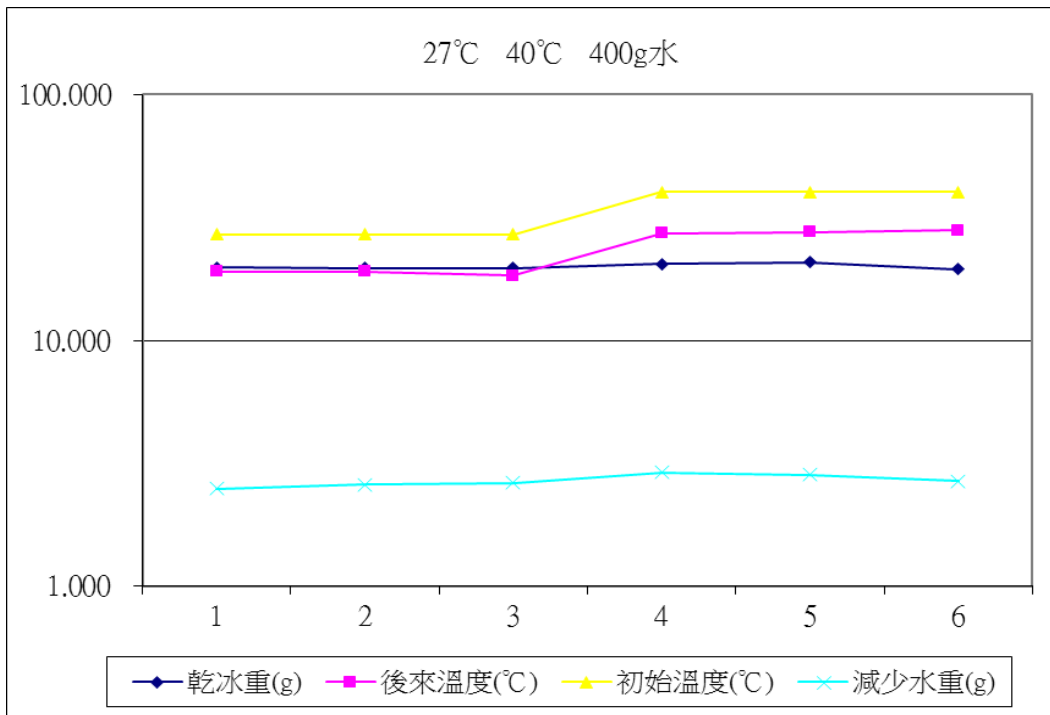
| 杯+水(g) | 總重(g) | 乾冰重(g) | 初溫(°C) | 末溫(°C) | 反應後重量(g)(去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 | 溫度差(°C) |
|---------|---------|--------|--------|--------|---------------|---------|-------|---------|
| 320.671 | 341.228 | 20.557 | 27 | 13 | 318.928 | 1.743 | 0.084 | 14 |
| 324.772 | 345.203 | 20.431 | 27 | 12.8 | 323.011 | 1.761 | 0.086 | 14.2 |
| 327.093 | 347.823 | 20.730 | 27 | 13 | 325.294 | 1.799 | 0.086 | 14 |
| 337.94 | 357.925 | 19.985 | 40 | 21.1 | 335.383 | 2.557 | 0.127 | 18.9 |
| 330.232 | 349.925 | 19.693 | 40 | 20 | 327.783 | 2.449 | 0.124 | 20 |
| 333.304 | 353.425 | 20.121 | 40 | 19.9 | 330.638 | 2.621 | 0.130 | 20.1 |

3、400g 水 27℃、40℃之比較

平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

| 杯+水(g) | 總重(g) | 乾冰重(g) | 初溫(°C) | 末溫(°C) | 反應後重量(g)(去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 | 溫度差(°C) |
|---------|---------|--------|--------|--------|---------------|---------|-------|---------|
| 537.962 | 557.723 | 19.761 | 27 | 19 | 535.461 | 2.501 | 0.126 | 8 |
| 545.769 | 565.398 | 19.629 | 27 | 19 | 543.179 | 2.59 | 0.131 | 8 |
| 539.495 | 559.175 | 19.680 | 27 | 18.3 | 536.855 | 2.64 | 0.134 | 8.7 |
| 561.364 | 581.803 | 20.439 | 40 | 27.3 | 558.464 | 2.90 | 0.141 | 12.7 |
| 555.342 | 576.103 | 20.761 | 40 | 27.6 | 552.496 | 2.84 | 0.137 | 12.4 |
| 554.807 | 574.272 | 19.465 | 40 | 28 | 552.131 | 2.676 | 0.137 | 12 |





由實驗結果得知，

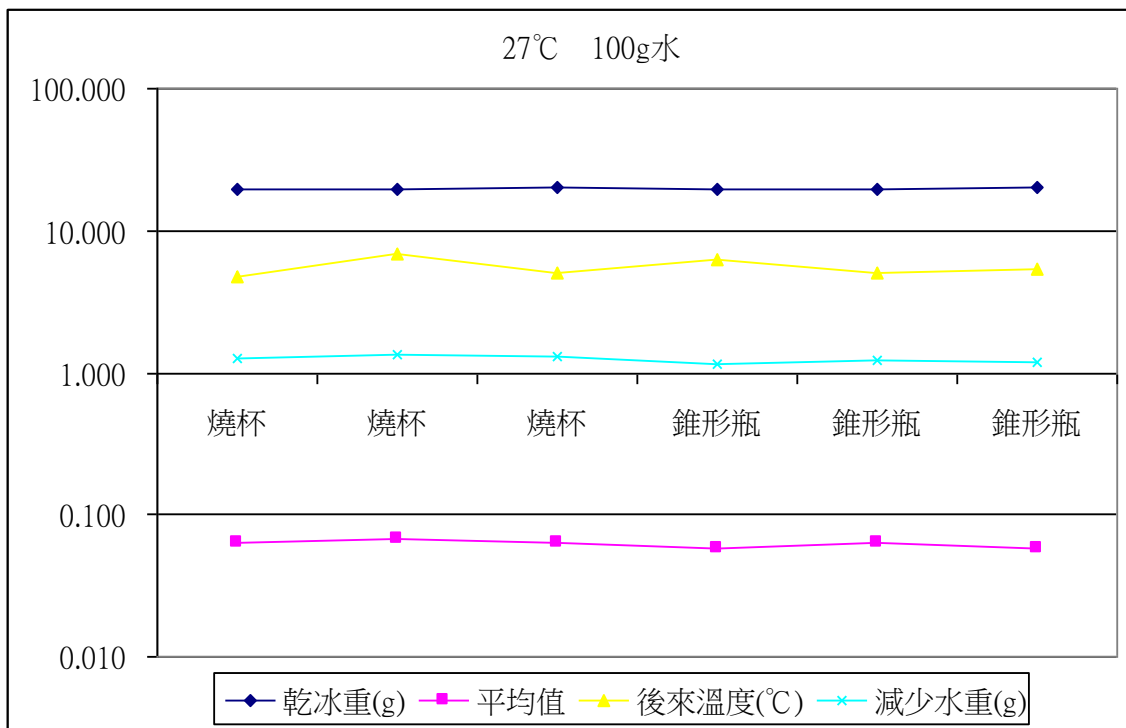
- (1)約等量的乾冰加入等量的水中時，初溫愈高，初溫與末溫的溫度差愈大，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，平均減少水重亦愈大。
- (2)水量與初溫交叉比較，得知水量愈多，初溫愈高，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，平均減少水重亦愈大，且溫度的影響大於水量的影響。

(三)比較容器不同對實驗之影響

1、100g 水在 27°C

平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

| 容器 | 杯+水(g) | 總重(g) | 乾冰重(g) | 末溫度(°C) | 反應後重量(g) (去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 | 溫度差(°C) |
|-----|---------|---------|--------|---------|----------------|---------|-------|---------|
| 燒杯 | 204.281 | 224.05 | 19.769 | 4.8 | 203.019 | 1.262 | 0.063 | 22.2 |
| 燒杯 | 191.611 | 211.16 | 19.549 | 8 | 190.278 | 1.333 | 0.068 | 19 |
| 燒杯 | 198.475 | 218.701 | 20.226 | 5 | 197.186 | 1.289 | 0.063 | 22 |
| 錐形瓶 | 221.113 | 240.862 | 19.749 | 6.3 | 219.959 | 1.154 | 0.058 | 20.7 |
| 錐形瓶 | 206.833 | 226.171 | 19.338 | 5 | 205.616 | 1.217 | 0.062 | 22 |
| 錐形瓶 | 213.785 | 233.832 | 20.047 | 5.4 | 212.607 | 1.178 | 0.058 | 21.6 |



由實驗結果得知，瓶口變窄後，水霧不易散逸，容易重新凝結，導致瓶口愈窄，約等量的乾冰加入加入等量水中時，減少的水重愈少，平均減少水重亦愈小。

(四)比較恆溫與變溫對實驗之影響

1、100g 水在 27°C 時之比較

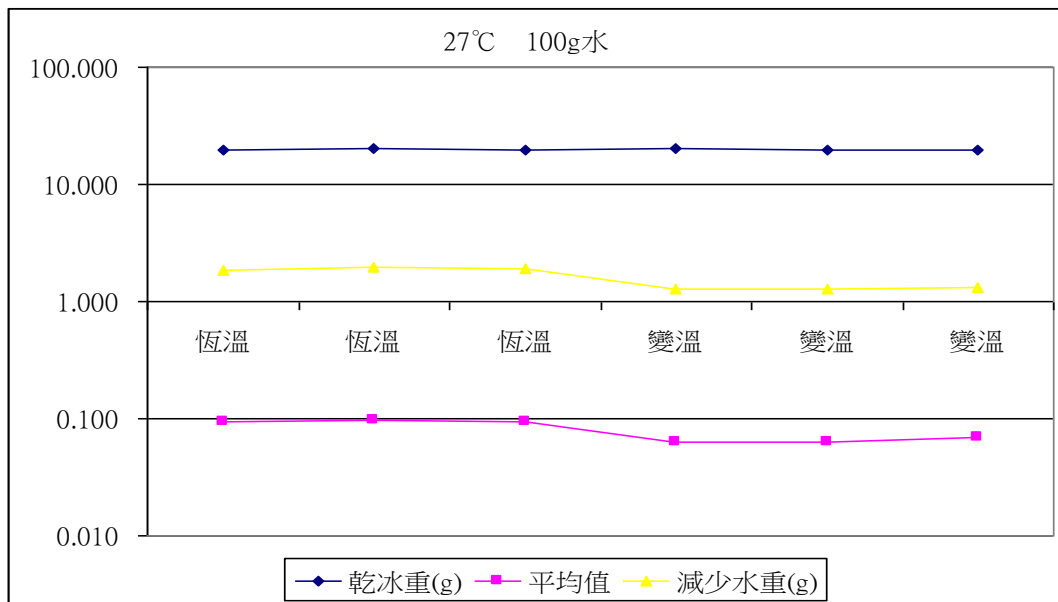
平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

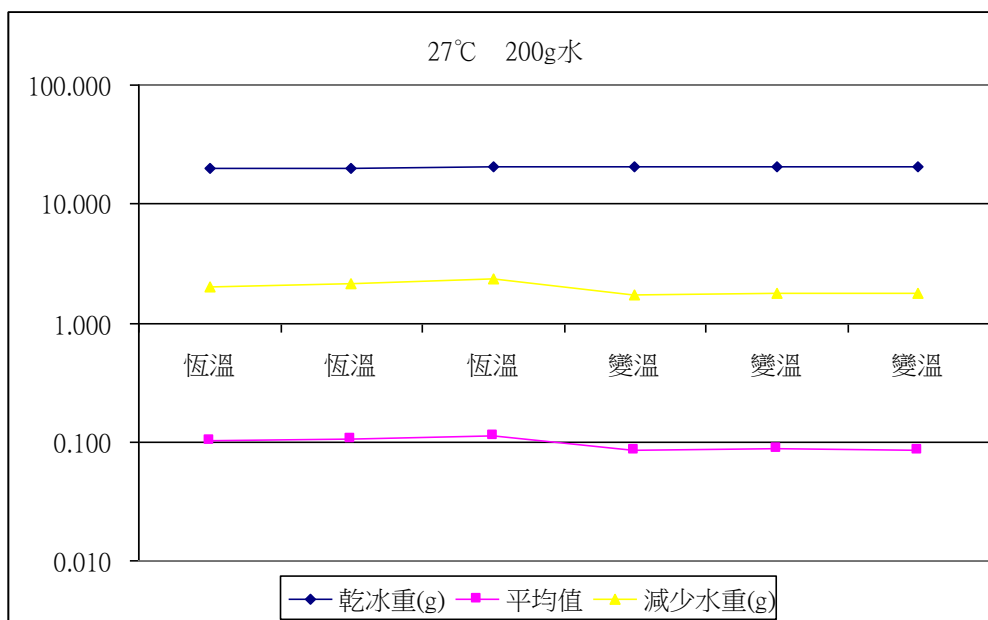
| 模式 | 乾冰重(g) | 總重(g) | 杯+水(g) | 反應後重量(g) (去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 |
|----|--------|---------|---------|----------------|---------|--------|
| 恆溫 | 19.565 | 230.762 | 211.197 | 209.376 | 1.821 | 0.093 |
| 恆溫 | 20.393 | 228.557 | 208.164 | 206.184 | 1.98 | 0.097 |
| 恆溫 | 19.806 | 235.557 | 215.751 | 213.872 | 1.879 | 0.094 |
| 變溫 | 20.226 | 218.701 | 198.475 | 197.186 | 1.289 | 0.063 |
| 變溫 | 19.769 | 224.05 | 204.281 | 203.019 | 1.262 | 0.063 |
| 變溫 | 19.549 | 211.16 | 191.611 | 190.278 | 1.333 | 0.0681 |

2、200g 水在 27°C 時之比較

平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

| 模式 | 乾冰重(g) | 總重(g) | 杯+水(g) | 反應後重量(g) (去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 |
|----|--------|---------|---------|----------------|---------|-------|
| 恆溫 | 19.906 | 329.527 | 309.621 | 307.581 | 2.04 | 0.102 |
| 恆溫 | 20.176 | 337.901 | 317.725 | 315.568 | 2.157 | 0.106 |
| 恆溫 | 20.663 | 334.901 | 314.238 | 311.91 | 2.328 | 0.112 |
| 變溫 | 20.557 | 341.228 | 320.671 | 318.928 | 1.743 | 0.084 |
| 變溫 | 20.730 | 347.823 | 327.093 | 325.294 | 1.799 | 0.086 |
| 變溫 | 20.431 | 345.203 | 324.772 | 323.011 | 1.761 | 0.086 |





由實驗結果得知，比較恆溫與變溫系統得知，當其他條件相同時，恆溫下較變溫系統，乾冰產生的煙霧較多，減少的水重較多，平均減少水重亦大。

(五)比較乾冰重量不同對實驗之影響

1、100g 水在 27°C 時之比較

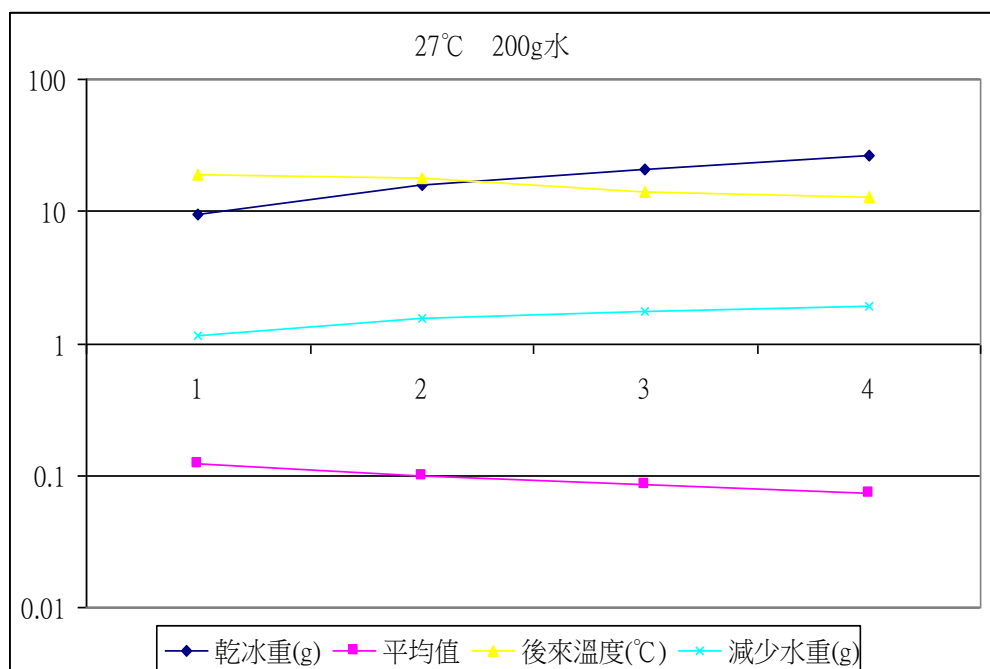
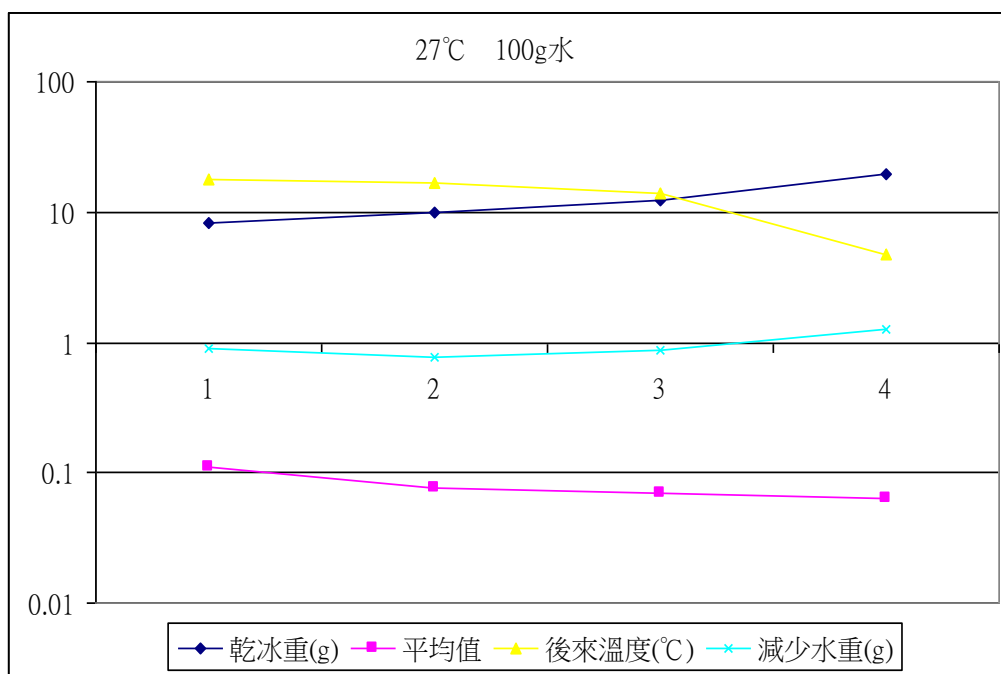
平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

| 杯+水(g) | 總重(g) | 乾冰重(g) | 初溫(°C) | 末溫(°C) | 反應後重量(g)(去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 | 溫度差(°C) |
|---------|---------|--------|--------|--------|---------------|---------|-------|---------|
| 205.815 | 214.068 | 8.253 | 27 | 18 | 204.909 | 0.906 | 0.109 | 9 |
| 204.284 | 214.149 | 9.865 | 27 | 17 | 203.523 | 0.761 | 0.077 | 10 |
| 209.355 | 221.703 | 12.348 | 27 | 14 | 208.485 | 0.870 | 0.070 | 13 |
| 204.281 | 224.05 | 19.769 | 27 | 4.8 | 203.019 | 1.262 | 0.063 | 22.2 |

2、200g 水在 27°C 時之比較

平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

| 杯+水(g) | 總重(g) | 乾冰重(g) | 初溫(°C) | 末溫(°C) | 反應後重量(g)(去水珠) | 減少水重(g) | 平均值 | 溫度差(°C) |
|---------|---------|--------|--------|--------|---------------|---------|--------|---------|
| 307.834 | 317.180 | 9.346 | 27 | 19 | 306.696 | 1.138 | 0.121 | 8 |
| 313.195 | 328.815 | 15.62 | 27 | 18 | 311.631 | 1.564 | 0.100 | 9 |
| 320.671 | 341.228 | 20.557 | 27 | 14 | 318.928 | 1.743 | 0.0846 | 13 |
| 300.009 | 326.382 | 26.373 | 27 | 13 | 298.083 | 1.926 | 0.073 | 14 |



由實驗結果得知，

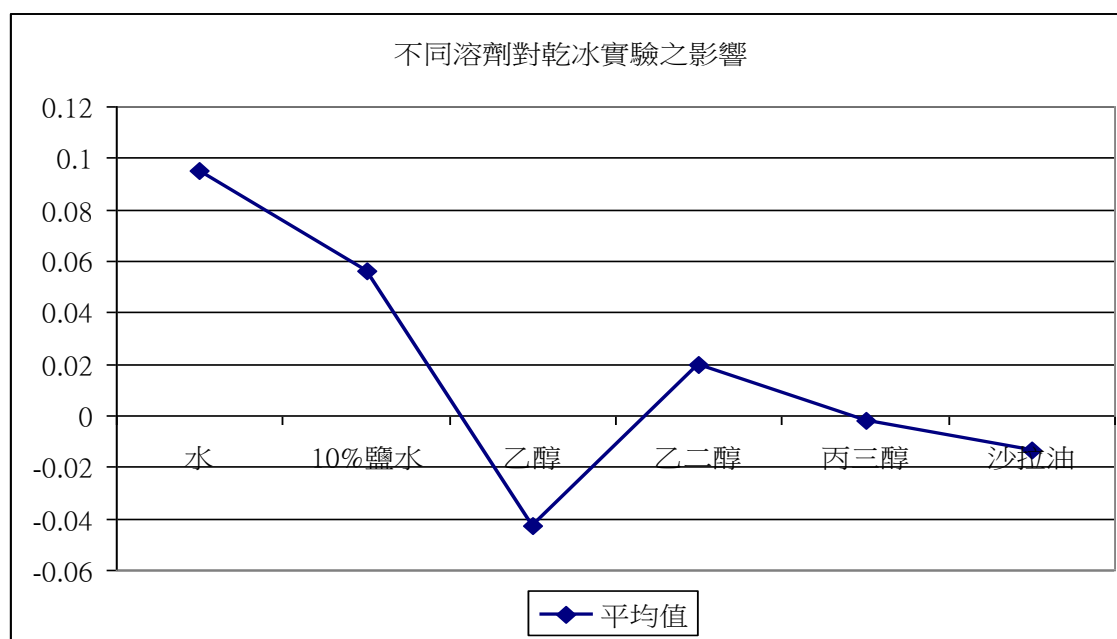
- (1) 不等量的乾冰加入等量的水中時，乾冰的重量愈大，初溫與末溫的溫度差愈大，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，但平均減少水重卻愈小。
- (2) 水量與乾冰量交叉比較得知，水量愈多，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，平均減少水重亦愈大，但乾冰量增加時，減少的水重雖亦愈大，但平均減少水重卻愈小。

(六)在恆溫系統下，比較乾冰在不同溶劑中對實驗之影響

1、100g 水在 27°C 時之比較

平均值: 減少水重(g)/乾冰重(g)

| 溶劑 | 乾冰重(g) | 平均值 | 總重(g) | 杯+劑(g) | 反應後重量 (g)(去水珠) | 減少劑重(g) |
|-------|--------|---------|---------|---------|-------------------|---------|
| 水 | 19.565 | 0.093 | 230.762 | 211.197 | 209.376 | 1.821 |
| 水 | 20.393 | 0.097 | 228.557 | 208.164 | 206.184 | 1.98 |
| 水 | 19.806 | 0.094 | 235.557 | 215.751 | 213.872 | 1.879 |
| 乙二醇 | 20.541 | 0.018 | 218.276 | 197.735 | 197.345 | 0.39 |
| 乙二醇 | 19.838 | 0.020 | 246.932 | 227.094 | 226.689 | 0.405 |
| 乙二醇 | 19.862 | 0.020 | 236.497 | 216.635 | 216.232 | 0.403 |
| 丙三醇 | 20.345 | -0.003 | 241.637 | 221.292 | 221.356 | -0.064 |
| 丙三醇 | 19.759 | -0.002 | 240.327 | 220.568 | 220.618 | -0.05 |
| 丙三醇 | 20.11 | -0.0006 | 231.794 | 211.684 | 211.697 | -0.013 |
| 乙醇 | 19.651 | -0.0492 | 236.431 | 216.78 | 217.747 | -0.967 |
| 乙醇 | 19.619 | -0.035 | 241.379 | 221.76 | 222.457 | -0.697 |
| 乙醇 | 20.057 | -0.043 | 235.291 | 215.234 | 216.112 | -0.878 |
| 沙拉油 | 20.735 | -0.016 | 218.578 | 197.843 | 198.193 | -0.35 |
| 沙拉油 | 20.196 | -0.012 | 227.362 | 207.166 | 207.416 | -0.25 |
| 沙拉油 | 19.667 | -0.010 | 223.12 | 203.453 | 203.658 | -0.205 |
| 10%鹽水 | 19.504 | 0.066 | 233.449 | 213.945 | 212.652 | 1.293 |
| 10%鹽水 | 19.664 | 0.050 | 302.418 | 282.754 | 281.758 | 0.996 |
| 10%鹽水 | 19.561 | 0.051 | 258.019 | 238.458 | 237.452 | 1.006 |

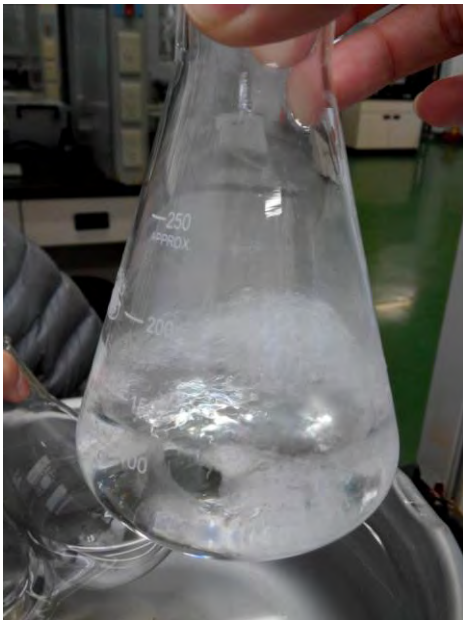




乾冰在水中白煙的生成情形



乾冰在乙二醇中白煙的生成情形



乾冰在乙醇中白煙的生成情形



乾冰在丙三醇中白煙的生成情形

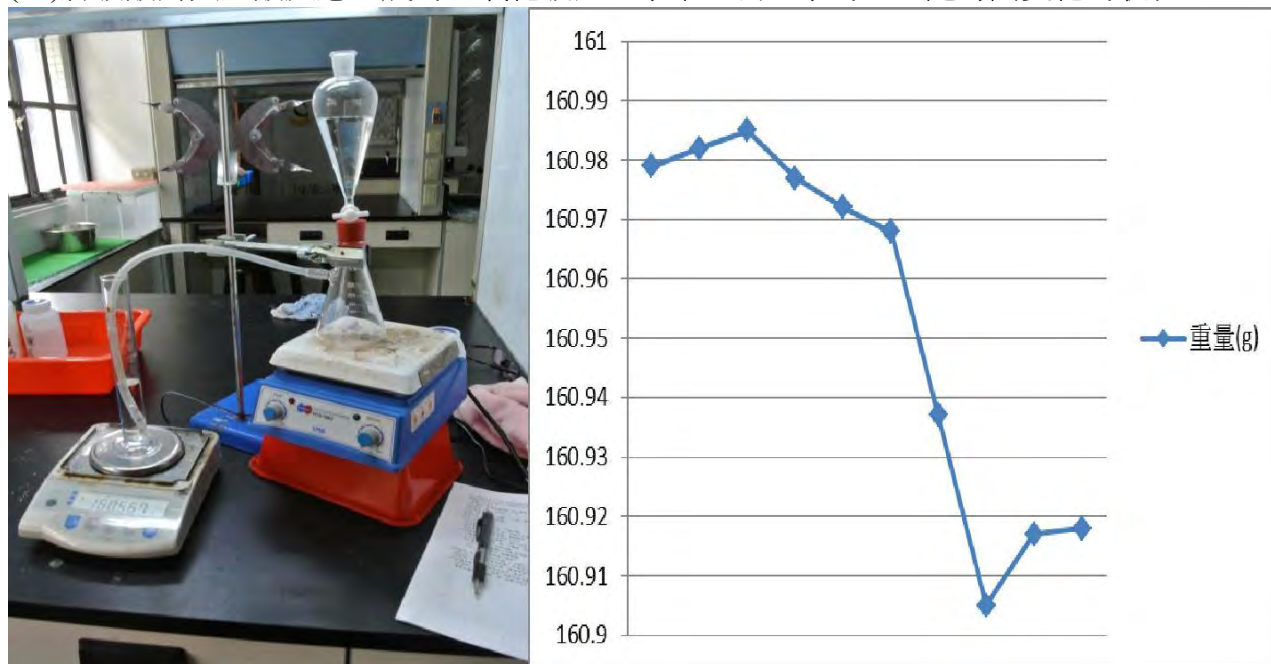
由實驗結果得知，

- (1) 並非所有溶劑均能生成霧，需與水的分子間作用力相近，可藉由氫鍵形成足以散射光線的膠體粒子(奈米粒子)，才能形成霧狀。故分子間作用力較小之乙醇，雖揮發溶液，但較難凝結成奈米粒子，成霧性較低。沙拉油與丙三醇則因分子間作用力太大(沸點較高)，不易揮發，氣態太少故亦難凝結成霧。熔點較低之溶劑甚至會直接凝固在乾冰表面，阻擋氣泡生成，最後凝固成一大塊固體。
- (2) 原本預計沸點愈低(分子間作用力愈小)，愈易隨著 CO_2 氣泡散逸至空氣中，溶劑減少量

應最大，故預計減少量應依序如下：乙醇>水>食鹽水>乙二醇>沙拉油>甘油。然而，實驗結果卻是水>食鹽水>乙二醇>甘油>沙拉油>乙醇。

因此，在恆溫條件下，除了溶劑沸點外，尚有其他關鍵影響因素，影響溶劑的重量。

(七)將碳酸鈣與鹽酸反應生成的二氧化碳通入水中，測量水的重量隨時間變化的狀況。



由實驗結果得知，水的重量隨時間的改變狀況為，先增後減。

陸、討論

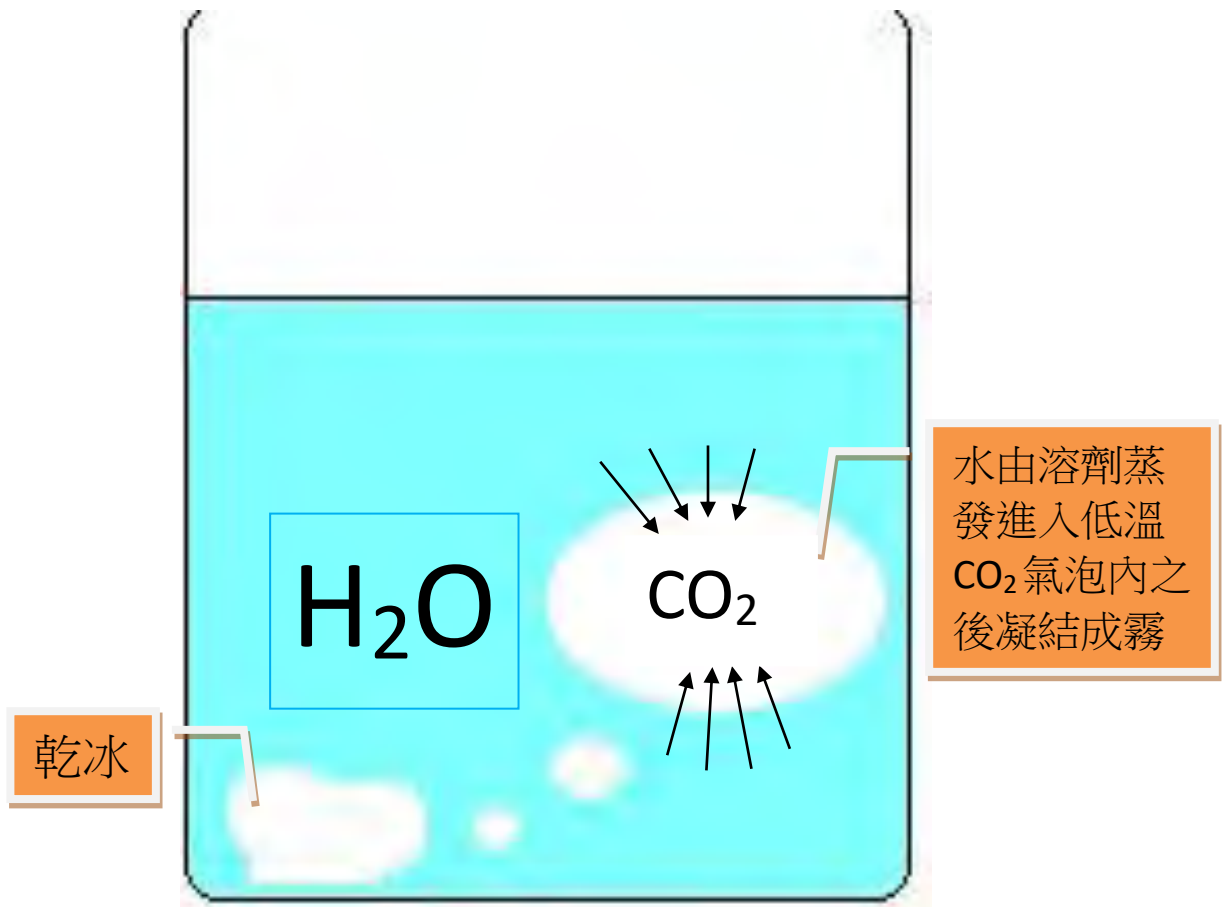
一、原理探討：

(一)、經過實驗探究，乾冰置於水中後，發生的反應種類，超乎原先預期，統計如下

1. 乾冰吸熱後昇華為二氧化碳氣體： $\text{CO}_2(\text{s}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$
2. 水吸熱後由液面蒸發到空氣中： $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ (水重減少)
3. 水由經 $\text{CO}_2(\text{g})$ 氣泡膜，揮發到低溫 $\text{CO}_2(\text{g})$ 氣泡中： $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ (水重減少)
4. 水蒸氣由空氣凝結到液面： $\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$ (水重增加)
5. 低溫 $\text{CO}_2(\text{g})$ 氣泡中的水蒸氣，遇冷凝結，生成白霧後，隨氣泡散逸至空氣中：
 $\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$ (水重減少)
6. 水被乾冰冷卻後，於乾冰表面凝固： $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{s})$
7. $\text{CO}_2(\text{g})$ 溶於水後，形成碳酸： $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ (水重增加)

※當水改為其他溶劑時，比照上述模式辦理。

- (二)、上述反應中，反應(2)、(3)、(5)三項會導致水的重量減少，反應(4)、(7)則會導致水的重量增加，故測量水(溶劑)的重量變化，即可得知反應整體的趨勢。
- (三)、水霧的生成，來自反應(3)與反應(5)。由於二氧化碳氣泡中初期僅有二氧化碳氣體，沒有水蒸氣，在水與氣泡的交界處，水的蒸發速率遠大於水的凝結速率，於是水蒸發為水蒸氣進入氣泡內，此為反應(3)，由於乾冰形成的二氧化碳氣泡溫度極低，故水蒸氣冷卻後凝結為水霧，此為反應(5)，由於氣泡上升速度極快，且生成冷霧得知，氣泡上升至液面前，氣泡內部溫度始終低於水(溶劑)的溫度，故反應(5)降低的水蒸氣量由反應(3)不斷補充，導致氣泡內飽含水霧。(如下圖)
- (四)、乾冰放在空氣中，產生的煙霧確實為凝結空氣中的水蒸氣生成，但乾冰置於水中，乾冰並未與空氣中的水蒸氣進行能量交換，且生成水霧的量遠大乾冰置於空氣中時，故推論乾冰的煙霧生成主要來自水蒸發進入二氧化碳氣泡後被二氧化碳冷卻凝結成水霧。



二、初溫固定下，將定量乾冰加入不等量水中

- (一)、水量愈多，溫度變化愈小，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，平均減少水重亦愈大。
- (二)、水量增加，水位提高，氣泡上升至液面的時間延長，再加上水的末溫較高，水蒸發進入二氧化碳氣泡後凝結成水霧的量變多，故散逸至空氣中的煙霧變多，水的重量減少較多。
- (三)、水量增加，末溫較高，導致同時增加水的蒸發量、減少水蒸氣凝結量及降低二氧化碳溶解度。但以實驗數據看來，對水重的影響不大。

三、初溫不同時，將定量乾冰加入等量水中

- (一)、初溫愈高，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，平均減少水重亦愈大。
- (二)、初溫愈高，水的動能愈大，水蒸發進入二氧化碳氣泡後凝結成水霧的量愈多，故散逸至空氣中的煙霧變多，水的重量減少較多。
- (三)、初溫愈高，同時增加水的蒸發量、減少水蒸氣凝結量及降低二氧化碳溶解度，均會造成水的重量降低。但以實驗數據看來，對水重的影響不大。

四、初溫固定下，將定量乾冰加入不同容器的等量水中

- (一)、比較燒杯與錐形瓶時，容器對於水霧的影響主要在於口徑大小，錐形瓶水位較高，氣泡存在時間較長，理應生成較多煙霧，水的重量應減輕較多。然而實驗結果卻恰巧相反，因此修正推論為，瓶口愈大，生成的水霧愈易散抑制空氣中，錐形瓶的瓶口較小，生成的部分水霧無法順利排出至空氣中，於是重新凝結成水，導致水的減少量較小。
- (二)、反應條件僅容器不同，故水的蒸發量、水蒸氣凝結量及二氧化碳溶解度，差異極小，可忽略不計。

五、水浴恆溫與變溫實驗的分析比較

- (一)、水量與乾冰量相等時，水浴恆溫的反應，水蒸發較易進入二氧化碳氣泡後凝結成水霧，散逸至空氣中的煙霧較多，減少的水重較多。
- (二)、交叉比對恆溫與變溫下，溶劑量的影響得知，減少的水重由大至小依序如下：

200 克水(恆溫) > 100 克水(恆溫) > 200 克水(變溫) > 100 克水(變溫)

由此可知，水霧的生成，溫度的影響較溶劑重量大。

六、不同乾冰重量與溶劑重量的分析比較 (變溫系統)

(一)、乾冰重量愈大，水霧生成愈多，惟末溫亦愈低，導致水分子動能降低，蒸發進入二氧化碳氣泡較困難，水霧的生成效率逐漸降低，平均水霧生成量與平均減少水重，都隨之減少。

七、不同溶劑的比較 (水浴恆溫系統)

(一)、煙霧的生成與否，由分子間作用力決定，分子間作用力太大，不易蒸發，蒸氣量不足以形成大量煙霧。分子間作用力太小，容易蒸發，但未必能被冰冷的二氧化碳氣泡冷卻形成煙霧。因此，水與乙二醇為較佳起霧溶劑。

(二)、除水、10%食鹽水與乙二醇，溶劑重量下降外，乙醇，丙三醇與沙拉油的溶劑重量均增加，與之前的實驗結果差距頗大。分析原因後發現，水浴系統中，空氣中的水蒸氣含量提高，水蒸氣易凝結進入溶劑中，導致重量上升。

八、常溫二氧化碳氣體對水重量的影響

(一)、初期部分二氧化碳溶解，形成碳酸溶液，部分二氧化碳形成氣泡，水蒸氣無法進入氣泡內。並由於實驗結果得知總重上升，可知溶解的二氧化碳重量大於氣泡帶走的水重。

(二)、當碳酸溶液達飽和後，溶解的二氧化碳重量不再增加，僅剩氣泡帶走的水重，故重量極緩慢減少。

柒、結論

(一)、水霧的生成，主要為冰冷的二氧化碳氣泡，具有可讓水蒸發進入氣泡後立即凝為水霧的特質。

(二)、水溫愈高，水的動能愈大，水蒸發進入氣泡後立即凝為水霧的能力愈強，水霧愈多。

(三)、水位愈高，氣泡與水接觸的時間愈長，水蒸發進入氣泡後立即凝為水霧的量愈

趨近飽和。

(四)、水量愈多，溫度下降愈少，對水蒸發進入氣泡後立即冷凝為水霧的能力的減損愈少，形成水霧的效率愈好

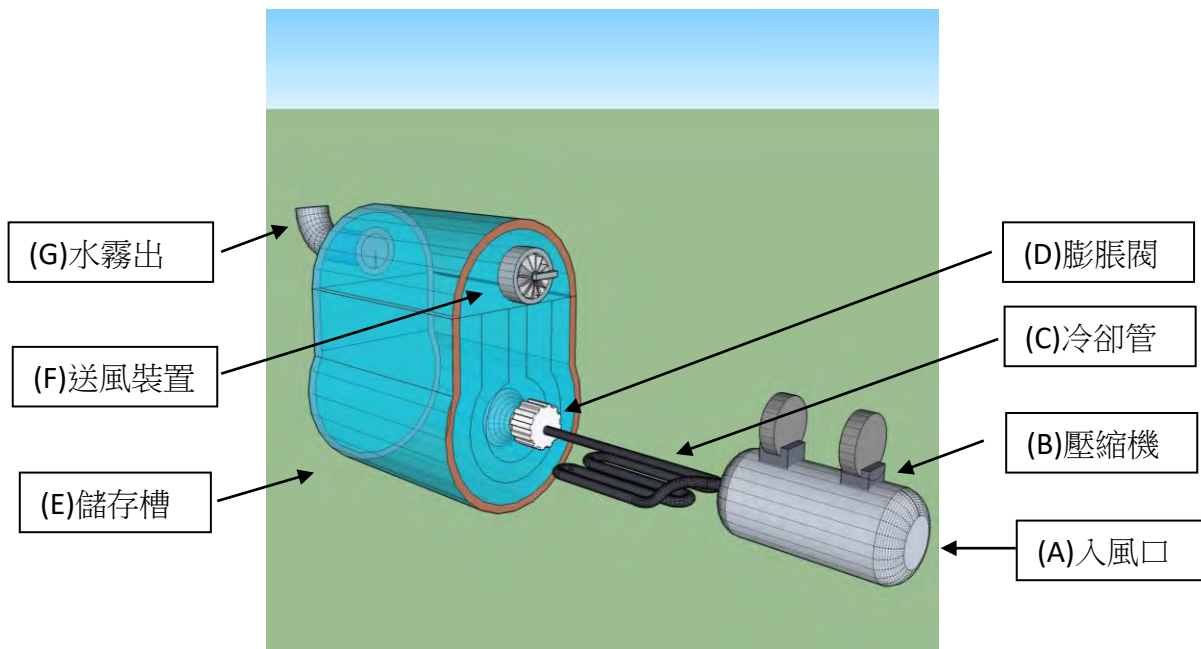
(五)、常溫二氧化碳氣泡，雖能讓水蒸發進入氣泡，惟無法冷凝成水霧，故能帶走的水分子並不多。

(六)、將液態空氣與液態氮加入水中，亦能形成大量煙霧，由此推知，水霧的生成與氣體種類關係較小，主要來自是否能形成低溫氣泡。利用上述原理，使用壓縮機，將空氣體壓縮後，經由冷卻管降溫後，至膨脹閥吸熱膨脹形成低溫的氣泡，通入較高溫的水中，即可形成水霧，再用送風裝置送出，模型如下圖所示。

(七)、水霧裝置

根據前面的實驗結果與探討可發現，氣體在液體內膨脹的過程會形成氣泡快速吸熱，使得液體形成水滴狀被氣泡帶至空中，我們可以將此原理應用在水霧裝置上，概念圖及運作原理如下：

空氣游入風口(A)進入壓縮機(B)壓縮後經冷卻管(C)冷卻，再進入膨脹閥(D)快速膨脹吸熱帶動儲存槽(E)裡的水形成冷霧透過送風裝置(F)從水霧出口(G)排出。



捌、參考資料及其他

- 一、維基百科---乾冰(<https://zh.wikipedia.org/wiki/乾冰>)
- 二、氣泡面膜實驗(<https://www.youtube.com/watch?v=K7eqWV36eoo>)
- 三、國中物理教材內容討論:關於乾冰昇華的白煙 - 國立臺灣師範大學物理學系
(<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/wwwboard/viewtopic.php?topic=18023>)
- 四、高中科展物理組---言之有霧
(http://www.tntcsh.tn.edu.tw/main.php?mod=site_doc&func=do_get_document&doc_id=291&site_id=46)

【評語】 052314

1. 本作品探究乾冰白霧的真相，並構思冷霧機之研製，以實驗數據為分析立論基礎，條理清楚。
2. 研究乾冰和液體形成白霧多寡的變因，包括液體的相對量、種類、溫度等，佐以相關原理為詳細分析、比較，並構思出效率較高的冷霧機雛形。宜進一步加以實現，俾免紙上談兵。
3. 宜加強熱力學學理的探討，考量更多的變因，以更多實驗的數據為基礎，俾確立原理與關鍵變因及設計出最佳、最具效益之冷霧機。

摘要

本研究探討乾冰生成霧氣的機制是否真的是乾冰昇華吸熱而使空氣凝結成水，又或其實背後暗藏更複雜的原理，於是我們設計了一系列的實驗探討各種不同的變因，企圖由實驗結果建立正確的理論，並依理論設計出可運行冷霧機模型。

研究動機

參觀台大杜鵑花節時，在大氣科學系的攤位知道得在盛乾冰的容器中加水生成的煙霧才會較多，使得龍捲風模型較易觀測。然而常見煙霧應該由空氣中的水蒸氣冷卻而成，乾冰僅是輔助降溫，這讓我十分疑惑，既然煙霧是由凝結水蒸氣所形成，那麼為何加水生成的煙霧較多呢？因此我們便展開了這一系列的研究。

研究目的

- 一、研究水量不同時，加入等量乾冰後，乾冰煙霧對水的重量的影響
- 二、探討水量相等時，加入不同重量乾冰後，對乾冰煙霧對水的重量的影響
- 三、起始溫度不同時，比較乾冰煙霧生成後，對水的重量帶來的影響
- 四、使用水浴恆溫槽，比較起始條件相同下，乾冰煙霧對溶劑重量改變的影響
- 五、探究不同形狀容器對於乾冰煙霧效果的影響
- 六、乾冰顆粒大小對於乾冰煙霧效果的影響
- 七、霧的成分探究—比較不同溶劑的實驗結果與影響
- 八、以灰石與酸反應製備 CO_2 ，用排水集氣法，探討 CO_2 氣體對水重量的影響。
- 九、總結實驗結果，推導出煙霧生成原理，以及冷霧機模型的設計。

實驗器材及過程方法

研究設備及器材:燒杯、錐形瓶、電子秤、量筒、鐵鎚、杜耳瓶、恆溫槽

藥品:乾冰、水、乙二醇、丙三醇、第三丁醇、沙拉油、乙醇、洗碗精、 CaCO_3 、 HCl

實驗(一):

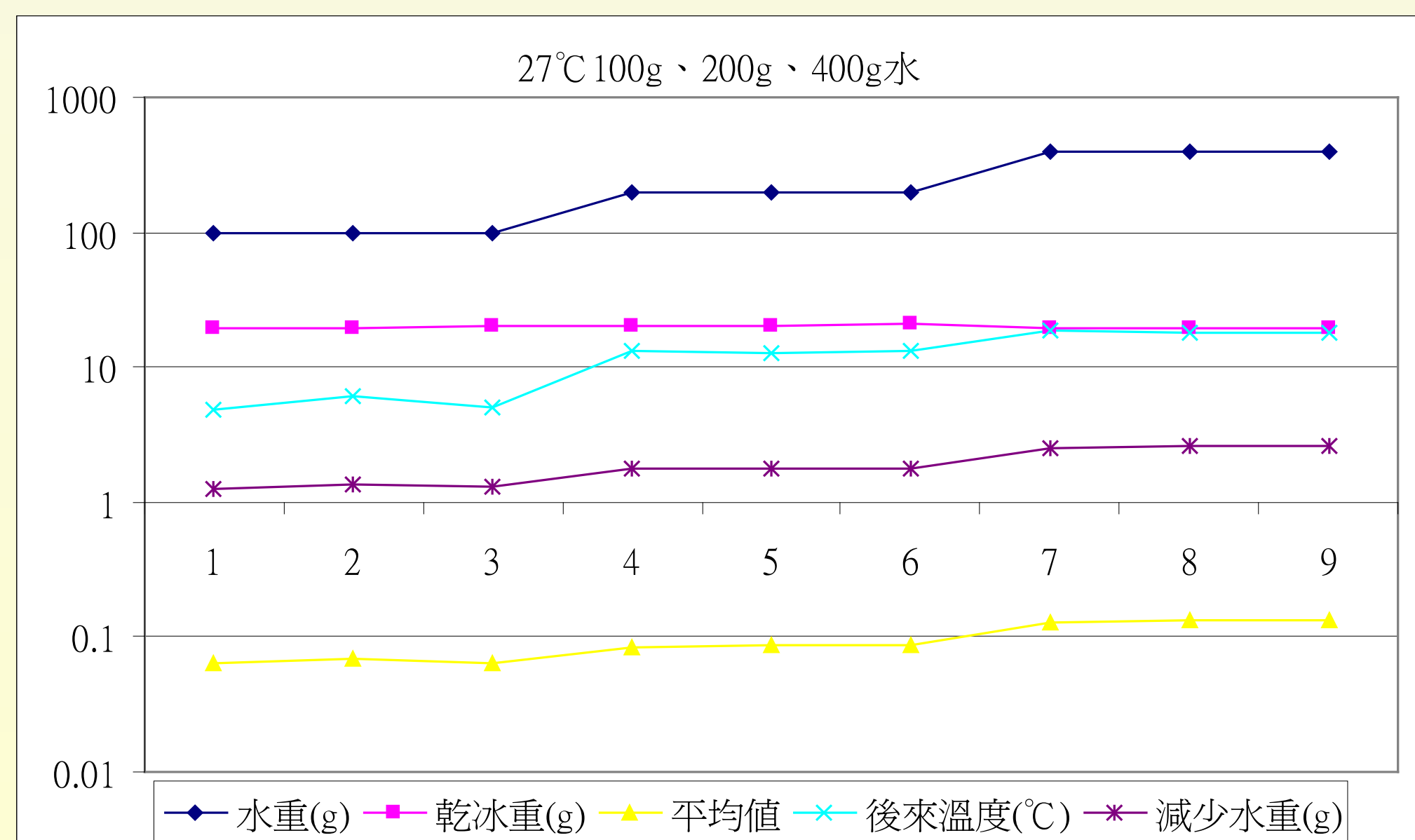
- 1、將燒杯置於電子秤上，加入適量溶劑，並記錄電子秤讀數 A_1 (燒杯+溶劑的總重量)
- 2、取出儲存在杜耳瓶內的乾冰，用鐵鎚將乾冰敲成適當大小後，放入上述燒杯中，並記錄電子秤上讀數 A_2 (燒杯+溶劑+乾冰的總重量)
- 3、待其反應完成後，拭去附著於燒杯外壁凝結的水珠，記錄整個裝置的總質量 A_3 (燒杯+杯內剩餘的溶劑的重量)
- 4、重複步驟(1)~(3)多次，並將記錄到的數據匯整成 EXCEL 檔，並分析數據
- 5、將實驗改置於恆溫槽中進行，並重複上述實驗步驟

實驗(二):

- 1、取大理石若干克，加入 HCl 後，將生成的 CO_2 氣體排入定量水中，連續測量水的重量變化。

實驗結果與討論

一、初溫固定下，將定量乾冰加入不等量水中

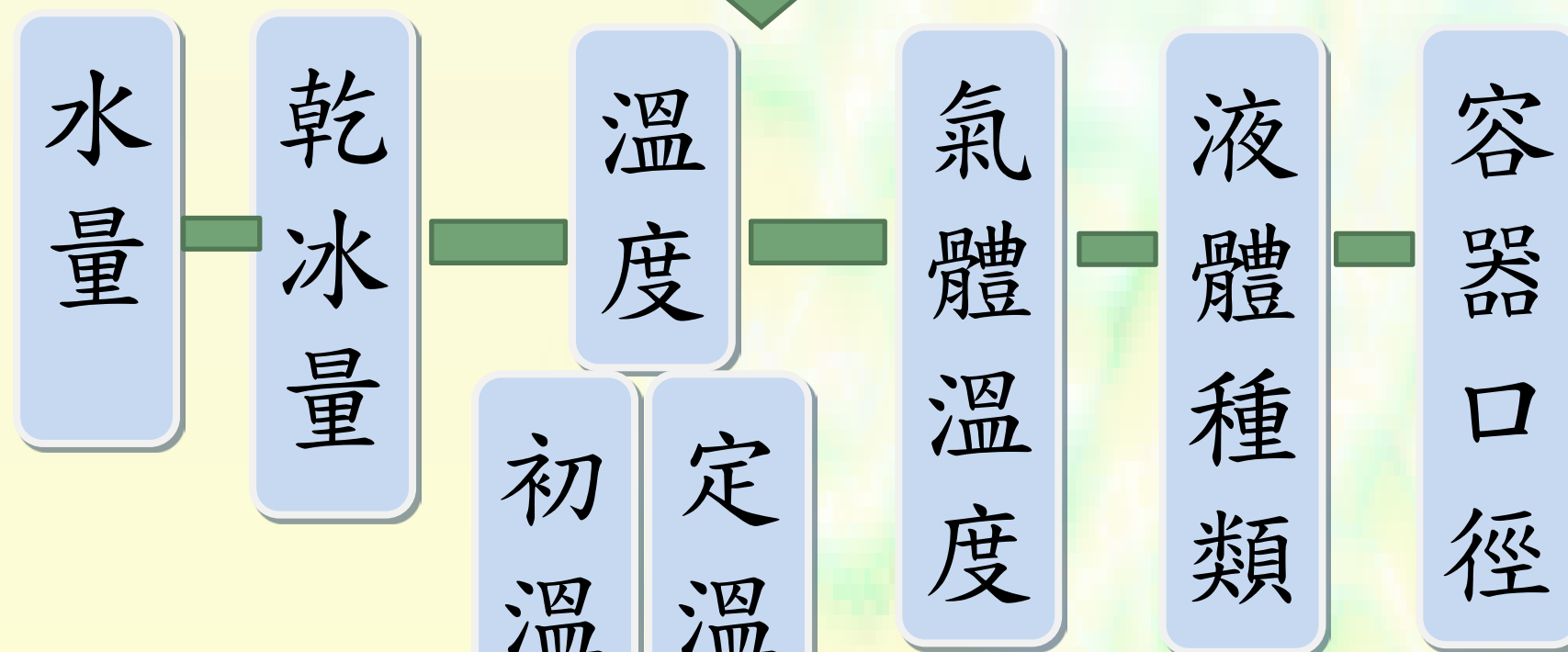


水量愈多，溫度變化愈小，乾冰產生的煙霧愈多，(平均)減少的水重愈大。

乾冰丟入水中為何會產生大量煙霧?

乾冰丟入水中煙霧來源?空氣中?水中?

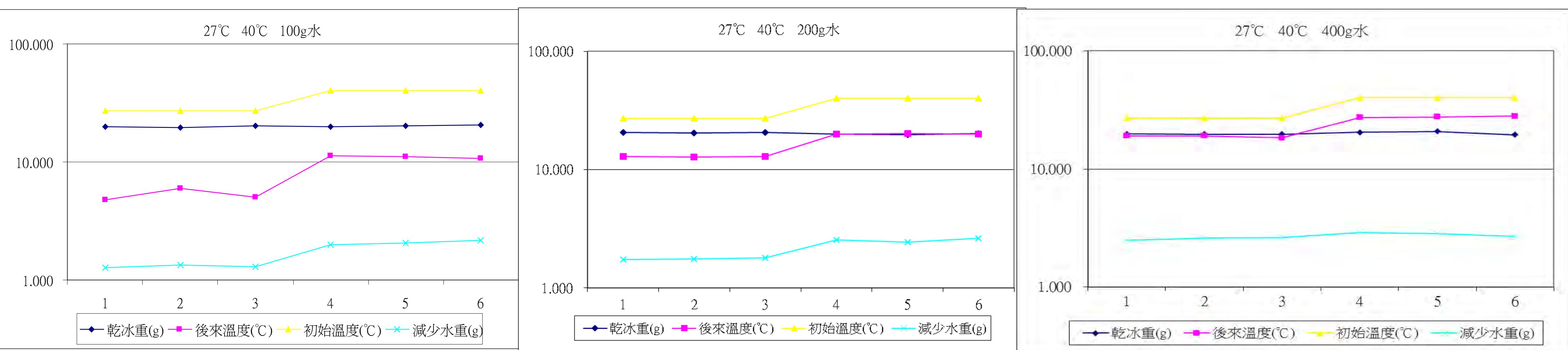
實驗探究與變因控制



實驗原理統整與探究

冷霧機構思

二、初溫不同時，將定量乾冰加入等量水中

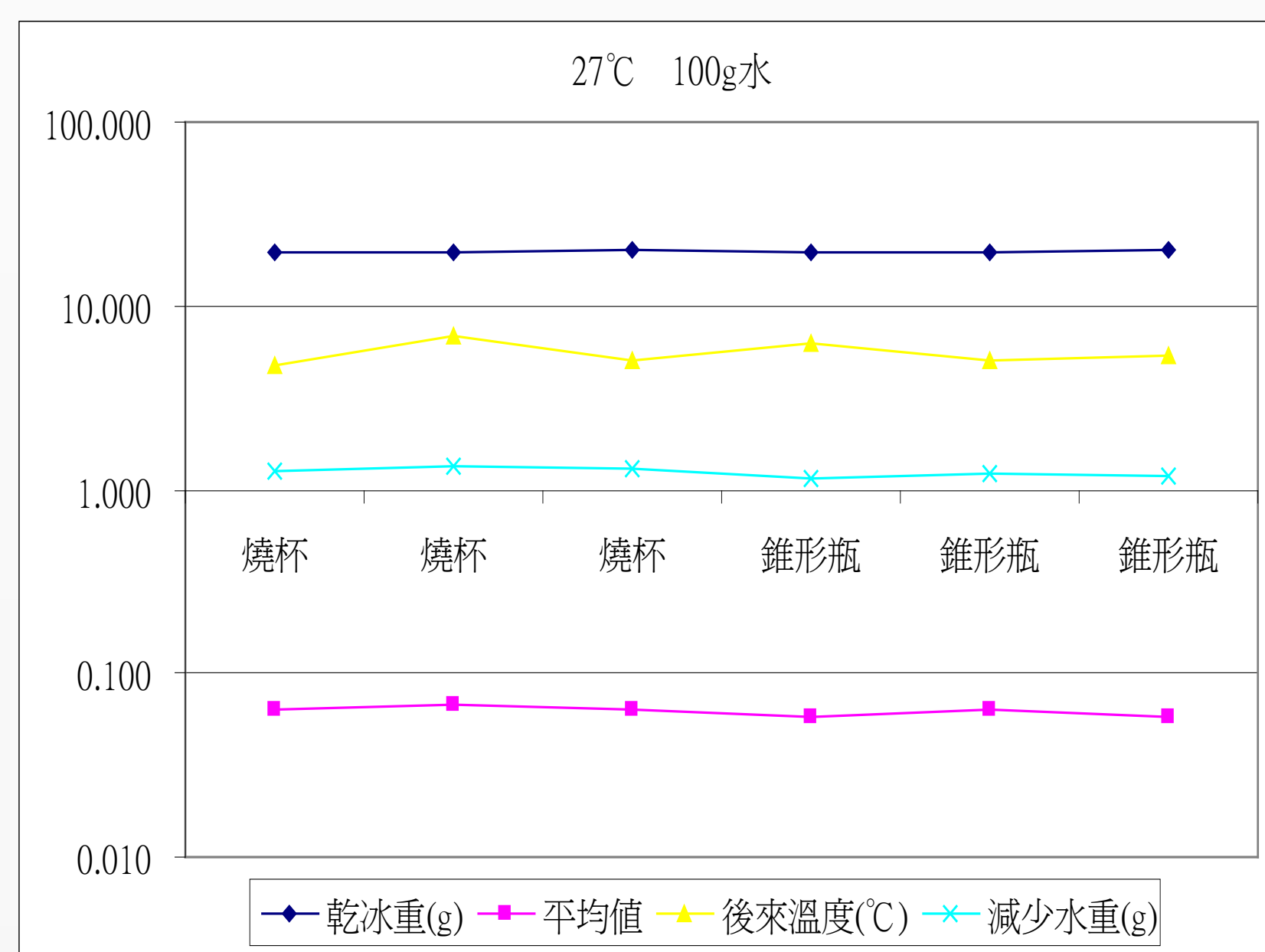


初溫愈高，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，平均減少水重亦愈大。

水量愈多，初溫愈高，乾冰產生的煙霧愈多，減少的水重愈大，平均減少水重亦愈大，且溫度的影響大於水量的影響。

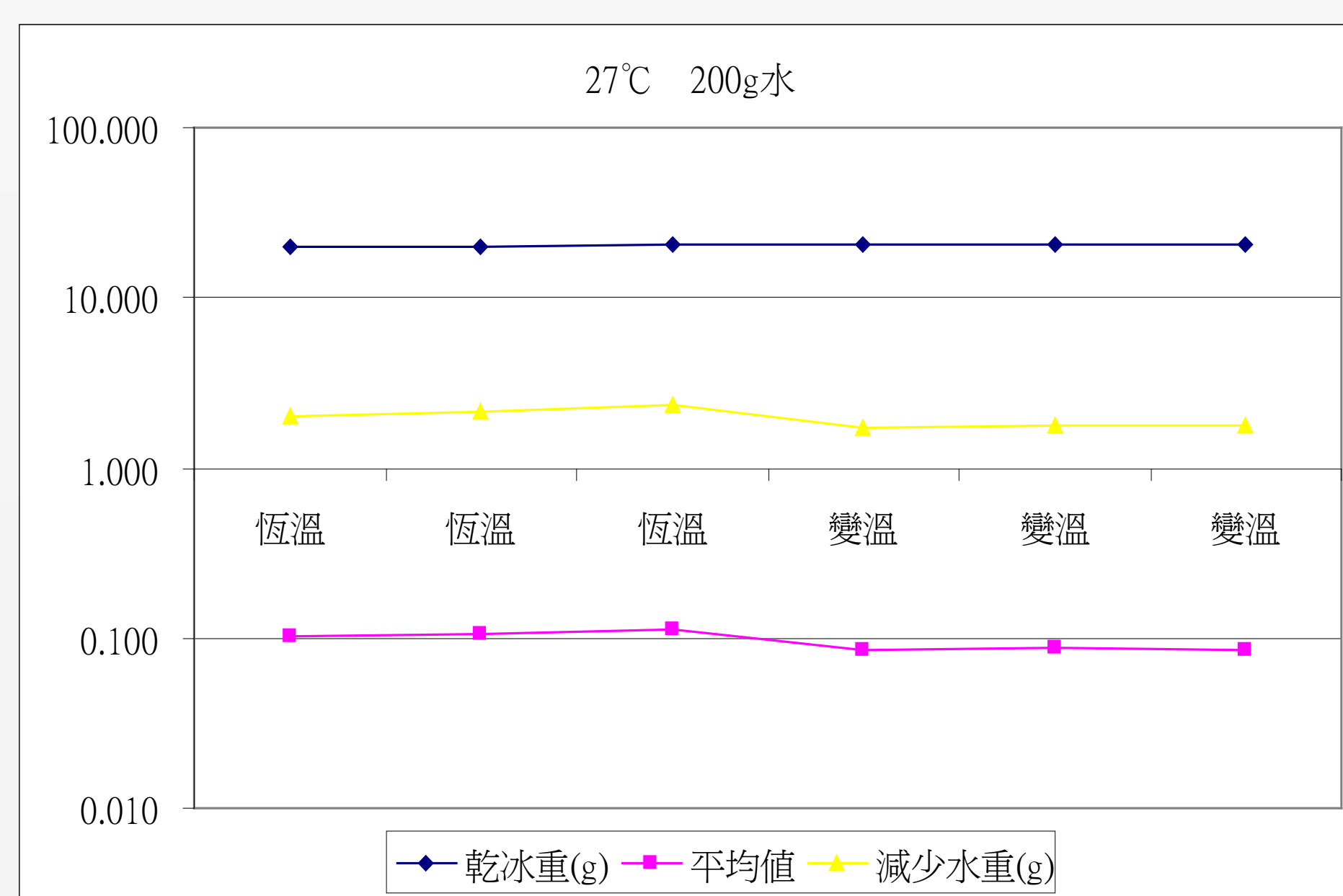
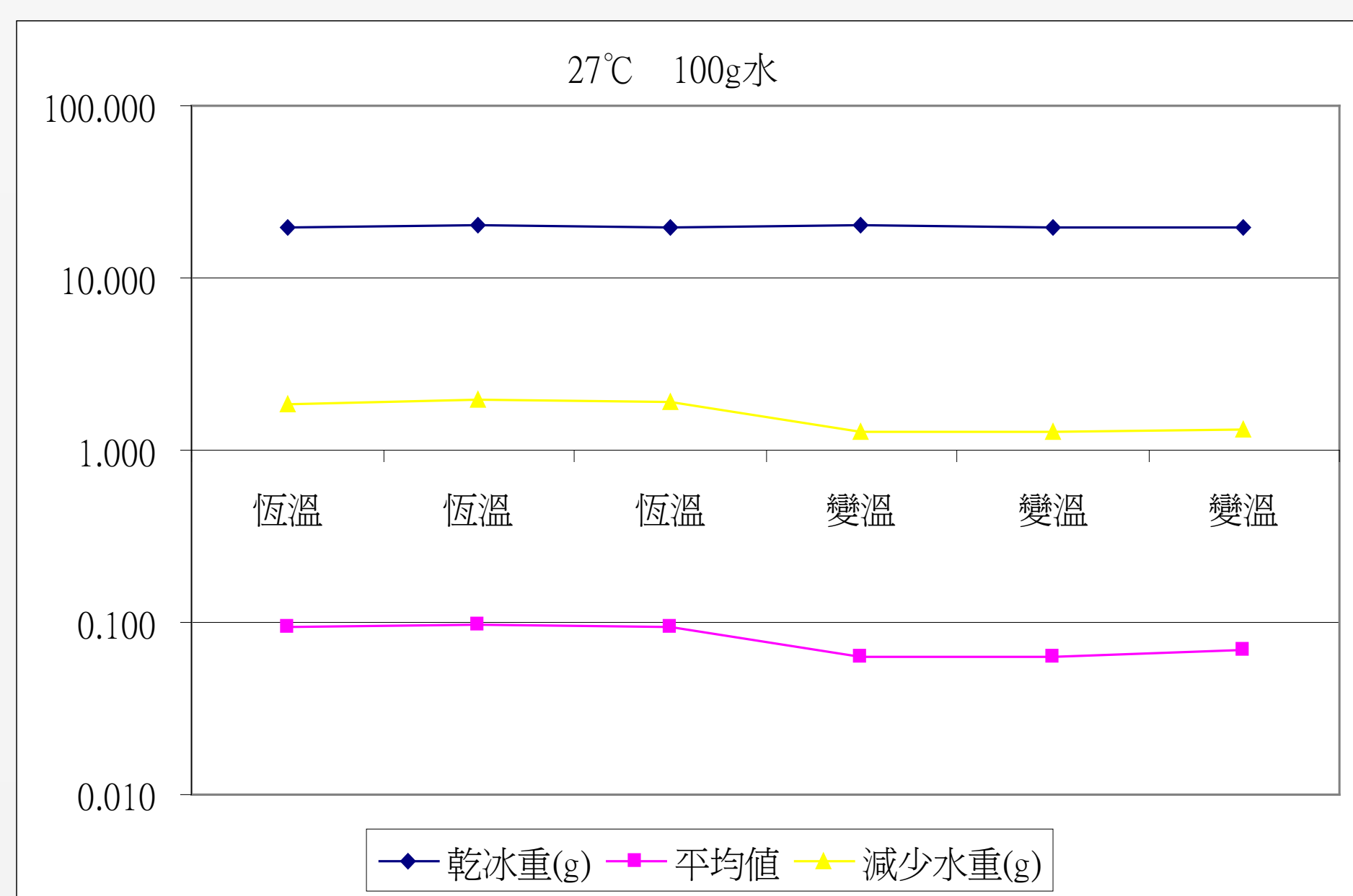
大，且溫度的影響大於水量的影響。

三、初溫固定下，將定量乾冰加入不同容器的等量水中



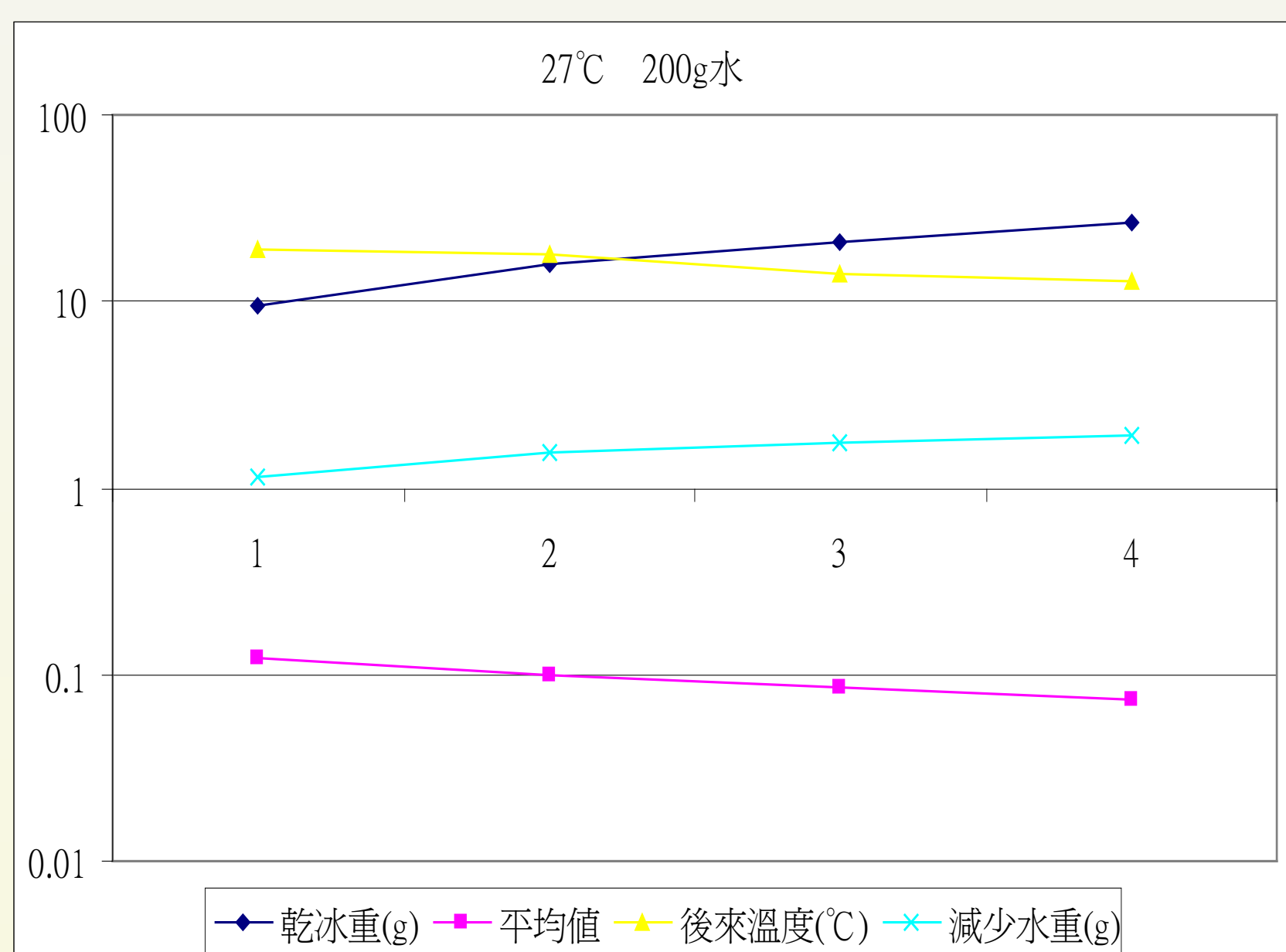
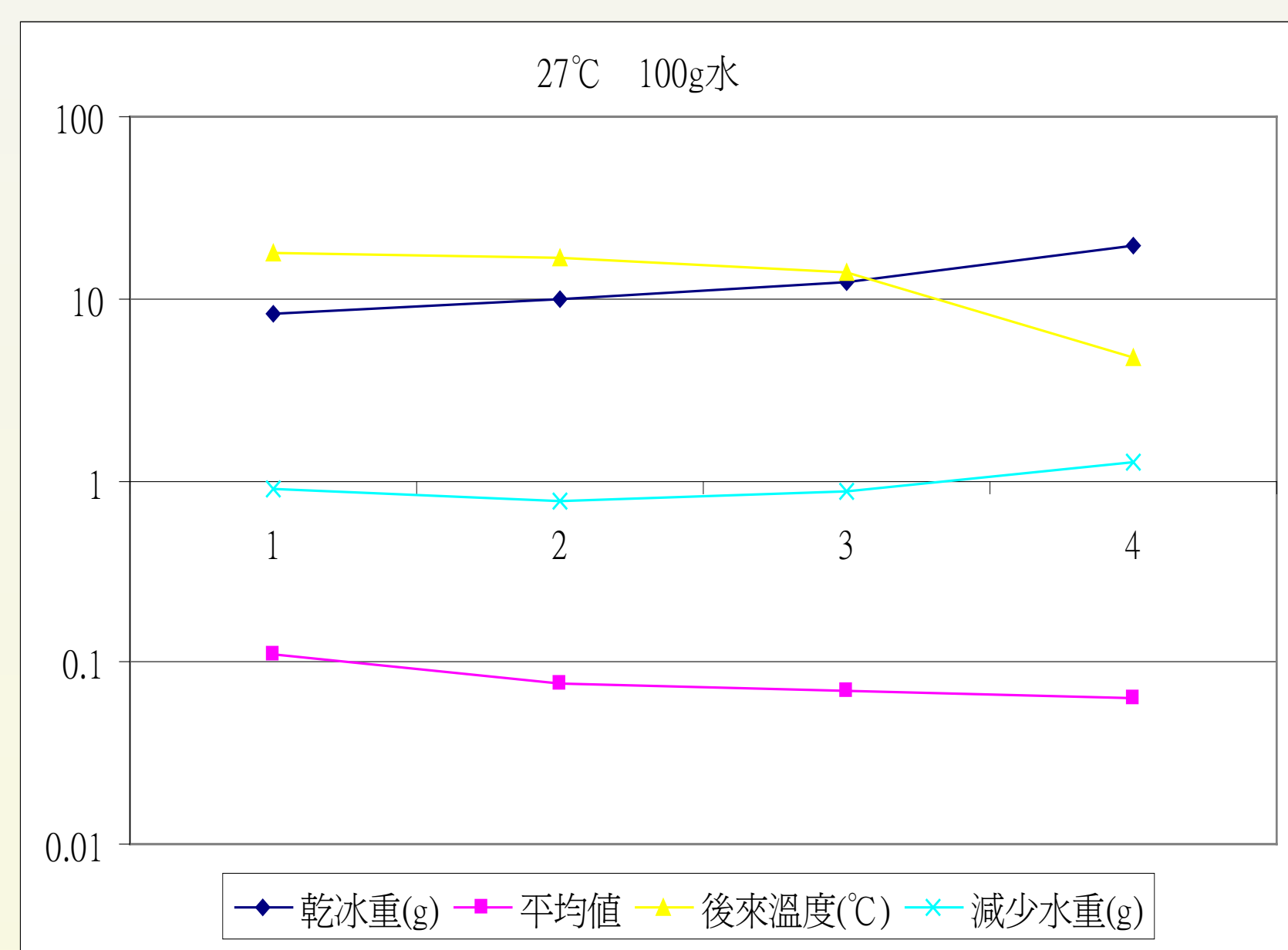
由實驗結果得知，瓶口變窄後，水霧不易散逸，容易重新凝結，導致瓶口愈窄，約等量的乾冰加入加入等量水中時，減少的水重愈少，平均減少水重亦愈小。

四、水浴恆變溫實驗的分析比較



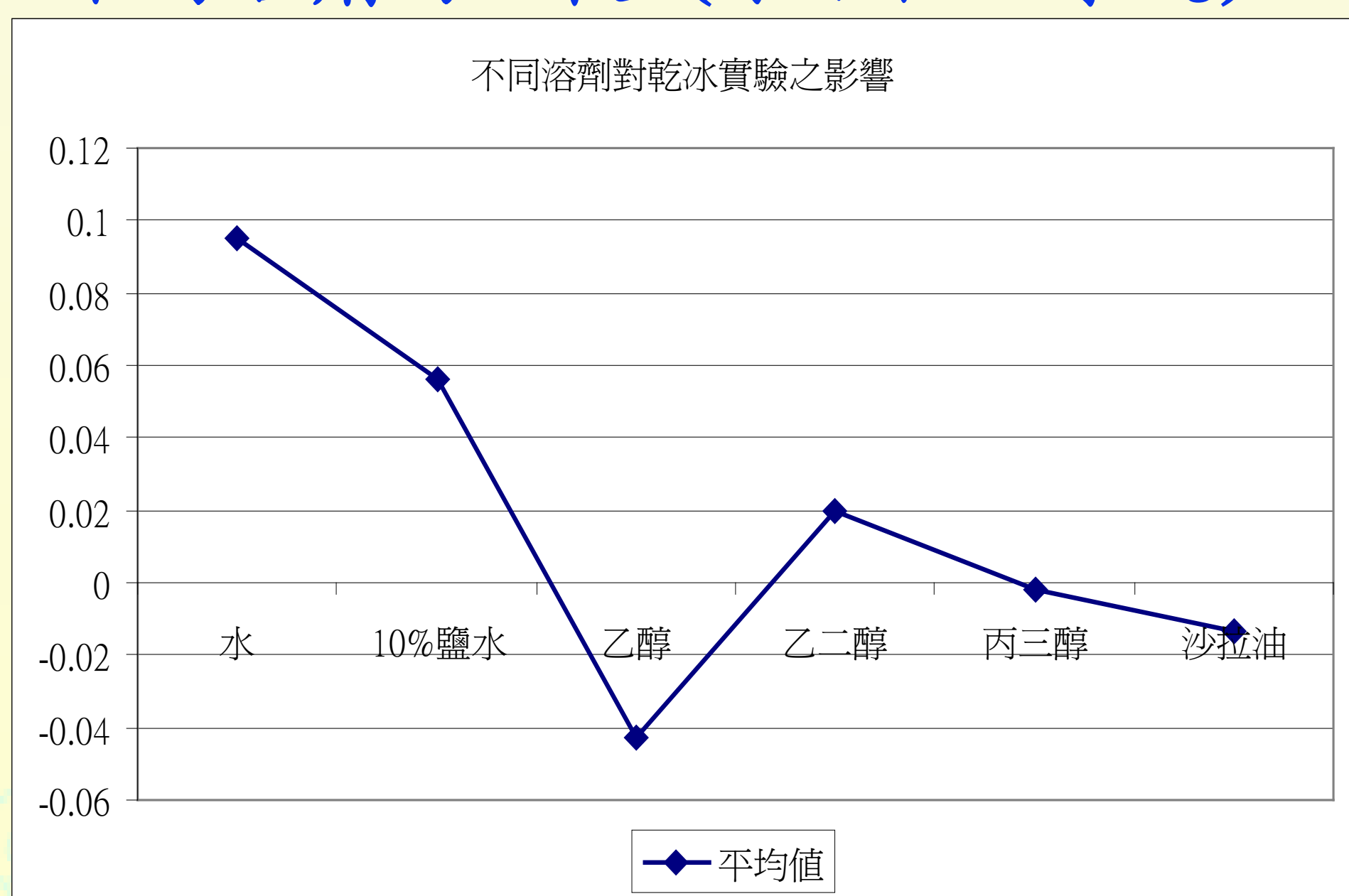
等量乾冰，在恆溫的反應下，水蒸發較易進入 CO_2 氣泡後凝結成水霧，散逸至空氣中的煙霧較多，減少的水重較多，大小依序如下：200 克水(恆溫) $>$ 100 克水(恆溫) $>$ 200 克水(變溫) $>$ 100 克水(變溫)，可推知溫度影響水霧的生成較溶劑重量大。

五、不同乾冰重量的分析比較(變溫系統)



乾冰愈重，水霧愈多，惟末溫亦愈低，導致水分子動能降低，蒸發進入二氧化碳氣泡較困難，水霧的生效率逐漸降低，平均水霧生成量與平均減少水重，都隨之減少。

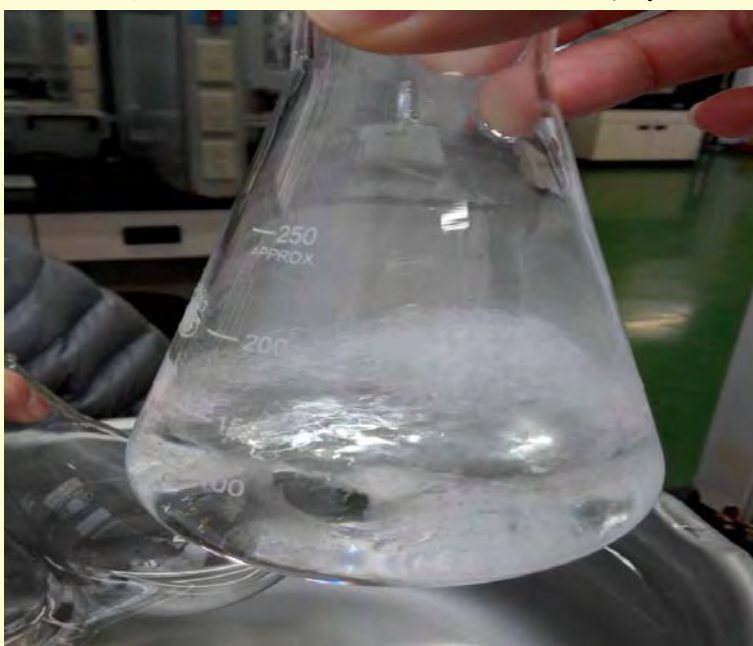
六、不同溶劑的比較 (水浴恆溫系統)



乾冰在水中的煙霧效果



乾冰在乙二醇中的煙霧效果



乾冰在乙醇中的煙霧效果

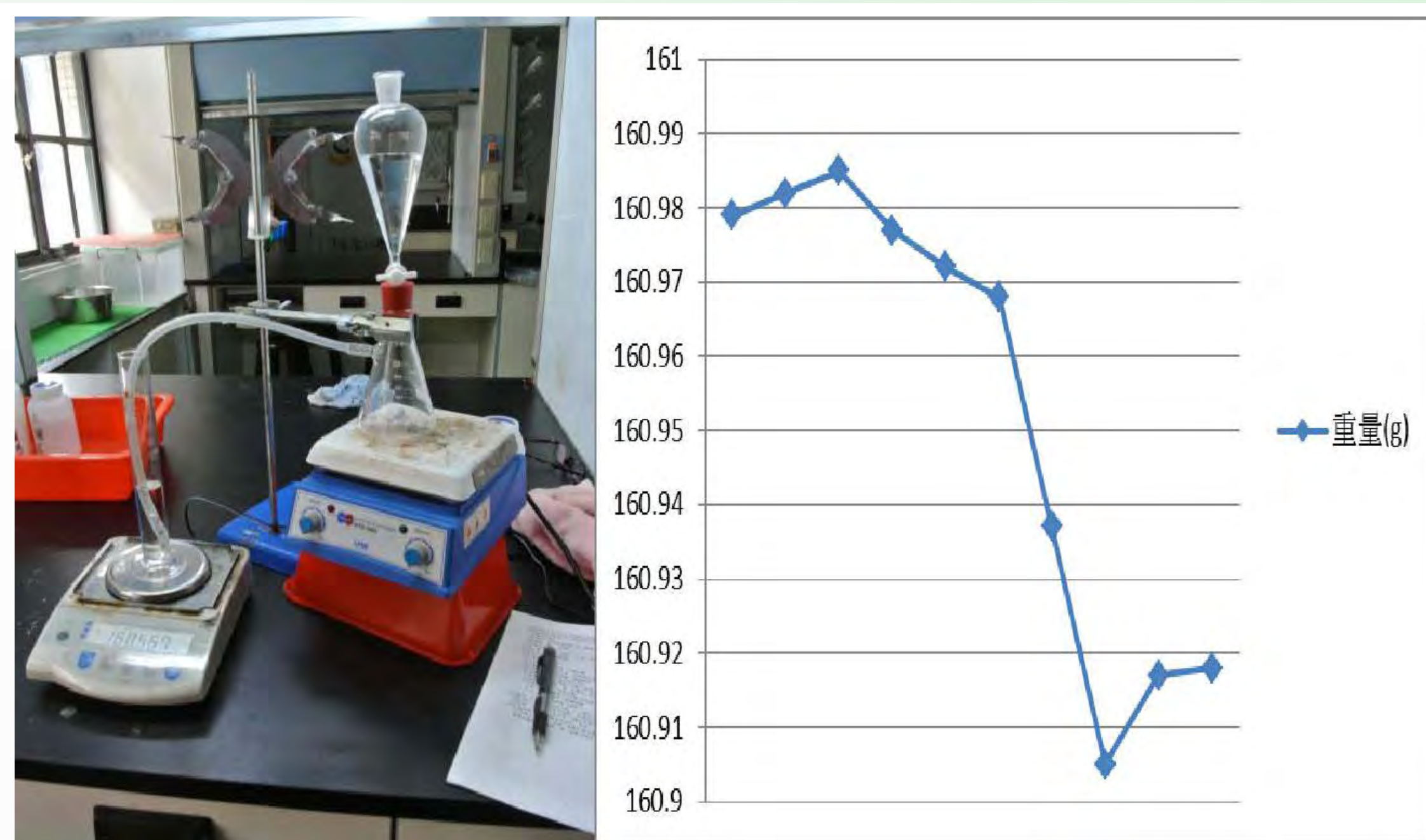


乾冰在丙三醇中的煙霧效果

實驗結果得知，並非所有溶劑均能生成霧，需與水的分子間作用力相近，才能形成霧狀。

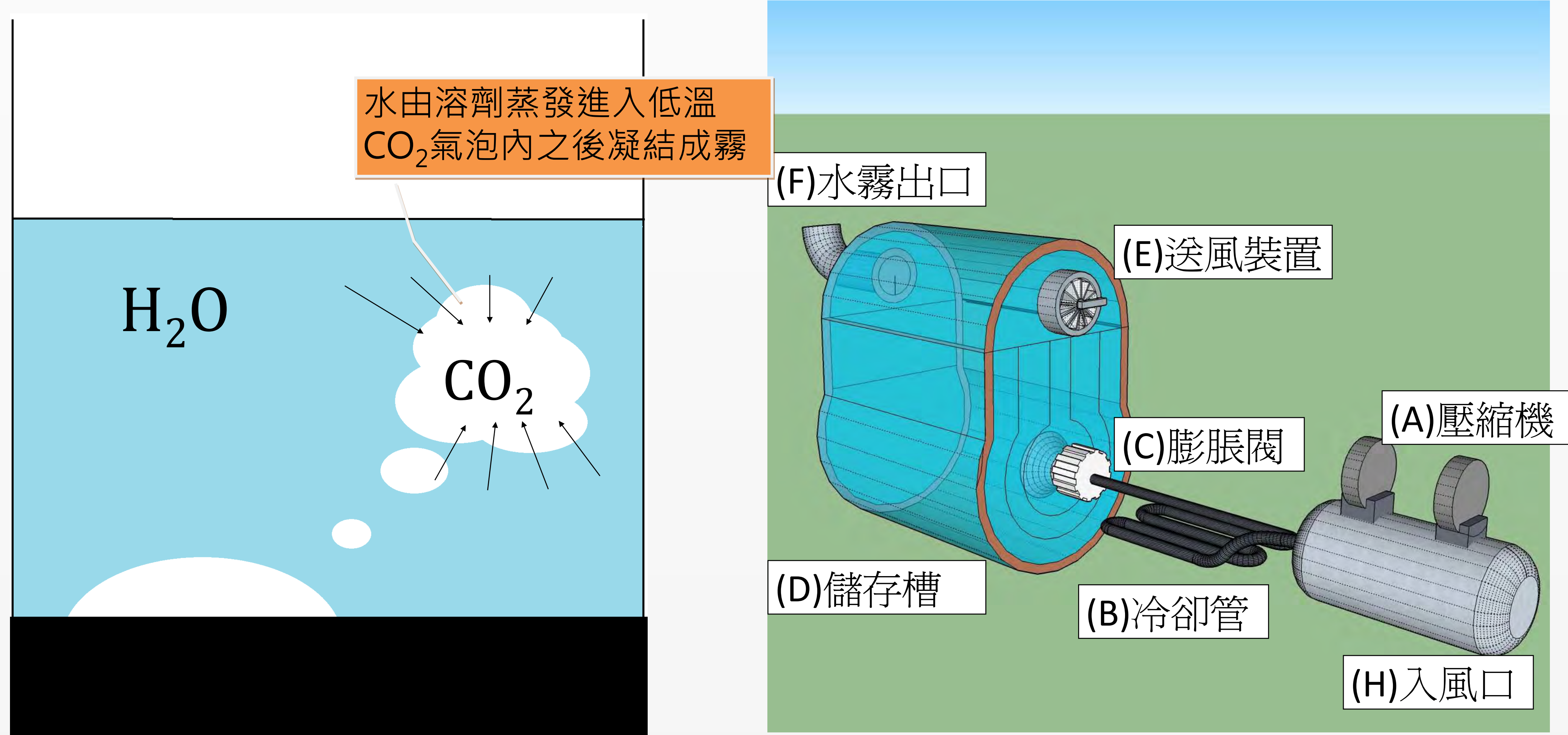
六、常溫二氧化碳對水重的影響

- (一)、初期部分 CO_2 溶解，形成碳酸溶液，部分 CO_2 形成氣泡，水蒸氣無法進入氣泡內。並由於實驗結果得知總重上升，可知溶解的 CO_2 重量大於氣泡帶走的水重。
- (二)、當碳酸溶液達飽和後，溶解的二氧化碳重量不再增加，僅剩氣泡帶走的水重，故重量極緩慢減少。



七、原理探討

水由經 $\text{CO}_{2(g)}$ 氣泡膜，揮發到低溫 $\text{CO}_{2(g)}$ 氣泡中： $\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(g)}$ (水重減少)
低溫 $\text{CO}_{2(g)}$ 氣泡中的水蒸氣，遇冷凝結生成白霧： $\text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(l)}$ (水重減少)



八、結論及冷霧機的構思

- (一)、水霧的生成，主要為冰冷的二氧化碳氣泡，具有可讓水蒸發進入氣泡後立即冷凝為霧的特質。
- (二)、水溫愈高，水的動能愈大，水蒸發進入氣泡後立即冷凝為水霧的能力愈強，水霧愈多
- (三)、水位愈高，氣泡與水接觸的時間愈長，水蒸發進入氣泡後立即冷凝為水霧的量愈趨飽和。
- (四)、水量愈多，溫度下降愈少，對水蒸發進入氣泡後立即冷凝為水霧的能力的減損愈少形成水霧的效率愈好
- (五)、並非所有溶劑均能生成霧，需與水的分子間作用力相近，可藉由氫鍵形成足以散射線的膠體粒子(奈米粒子)，才能形成霧狀。故分子間作用力較小之乙醇，雖揮發溶液但較難凝結成奈米粒子，成霧性較低。沙拉油與丙三醇則因分子間作用力太大(沸點較高)，不易揮發，氣態太少故亦難凝結成霧。熔點較低之溶劑甚至會直接凝固在冰表面，阻擋氣泡生成，最後凝固成一大塊固體。
- (六)、常溫二氧化碳氣泡，雖能讓水蒸發進入氣泡，惟無法冷凝成水霧，故能帶走的水分並不多。
- (七)、將液態空氣與液態氮加入水中，亦能形成大量煙霧，由此推知，水霧的生成與氣體種類關係較小，主要來自是否能形成低溫氣泡。利用上述原理，使用壓縮機，將空氣體壓縮後，經由冷卻管降溫後，至膨脹閥吸熱膨脹形成低溫的氣泡，通入較高溫的水中，即可形成水霧，再用送風裝置送出，模型如上圖所示。
- (八)、水霧裝置:根據前面的實驗結果與探討可發現，氣體在液體內膨脹的過程會形成氣泡快速吸熱，使得液體形成水滴狀被氣泡帶至空中，我們可以將此原理應用在水霧裝置上，概念圖及運作原理入如下：
空氣進入壓縮機(A)壓縮後經冷卻管冷卻(B)，再進入膨脹閥快速膨脹吸熱(C)帶動儲存槽(D)裡的水形成冷霧過送風裝置(E)從水霧出口(F)排出。