

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

佳作

030102

漂流吧，反泡泡－探討 antibubble 在流體中的
穩定性及其應用

學校名稱：桃園市立大成國民中學

作者： 國二 李叡 國二 洪安岱 國二 黃奕言	指導老師： 顏思恬 王思琪
--	-----------------------------

關鍵詞：反泡泡、鹽類、流體

作品名稱：漂流吧，反泡泡－探討 antibubble 在流體中的穩定性及其應用

摘要

本次研究探討反泡泡在流體中的穩定性及其應用，我們發現：

- 一、成功次數最高的基礎變因為：水與洗碗精重量比 150：1，吸管外口徑寬度 0.6cm，入水角度垂直水面 90 度，吸取水量高度離管口 2.5cm，吸管距承接液面高度 0.5cm，流量 1.59 L/min（流速 1.74 cm/s）。
- 二、在基礎流量下，0.15M 的 KCl 溶液有最高的平均存活時間。
- 三、0.1M 的 CaCl₂ 在高流速（1.78 L/min）時有極佳的一致性及存活時間。
- 四、0.2M 的 MgCl₂ 溶液在低流速（1.44 L/min）時有最高的平均存活時間。
- 五、在三種流速下，KCl 反泡泡的存活時間與濃度有顯著負相關。
- 六、在流體中反泡泡的存活時間與正離子價數與的離子半徑有關。
- 七、利用 CaCl₂ 溶液形成的反泡泡取代以靜脈導管注射高濃度 CaCl₂ 溶液治療心律不整的可行性。

壹、前言

一、研究動機

之前看過學長姐關於反泡泡的科展實驗，覺得很有趣，因此我們想再深入的研究，想討論不同鹽類的反泡泡在類似血液濃度及流速的食鹽水中的存活時間，並藉著改變流速來了解反泡泡在流體中的穩定性，於是我們設計了這個實驗。

由初步實驗的結果發現 CaCl_2 溶液的反泡泡有極佳的一致性及其存活時間，且由相關醫學文獻中了解 CaCl_2 溶液有拮抗高血鉀造成心律不整的療效，想更進一步研究其可行性。

二、研究目的

- (一)、 找出反泡泡成功次數最高的基礎變因。
- (二)、 探討不同鹽類在相同流體速率下對反泡泡存活時間的影響。
 - 1、 正一價鹽類： NaCl 、 KCl 。
 - 2、 正二價鹽類： MgCl_2 、 CaCl_2 。
- (三)、 探討相同濃度、不同鹽類在不同流速下對反泡泡存活時間的影響。
 - 1、 高流速（1.78 L/min）。
 - 2、 基礎流速（1.59 L/min）。
 - 3、 低流速（1.44 L/min）。
- (四)、 探討相同鹽類、不同濃度在不同流速下對反泡泡存活時間的影響。
 - 1、 高流速（1.78 L/min）。
 - 2、 基礎流速（1.59 L/min）。
 - 3、 低流速（1.44 L/min）。
- (五)、 探討不同濃度的 CaCl_2 溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響。
 - 1、 CaCl_2 溶液濃度：0.10M、0.15M、0.20M、0.25M。
 - 2、 基礎溶液流量：2.16L/min、3.02L/min、3.89L/min、4.75L/min、5.62L/min、6.48L/min、7.35L/min。

三、文獻探討

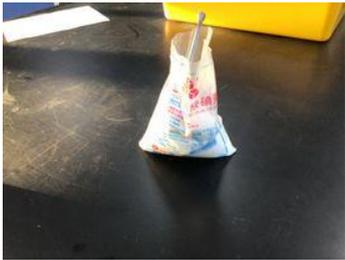
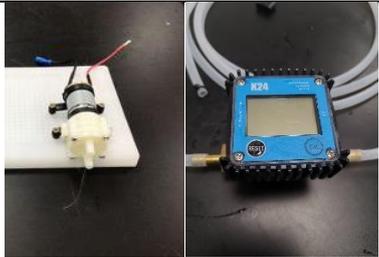
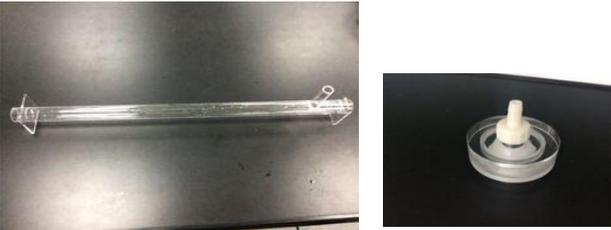
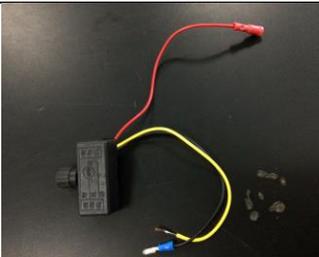
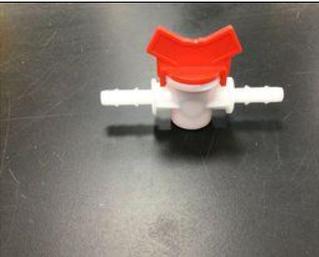
- (一)、反泡泡是一種特殊的球形結構，在液體中產生，並被一層薄薄的空氣膜包圍。其獨特的雙層氣液介面結構使其對靶向藥物運輸、主動洩漏檢測、和臨床診斷成像具有重要價值。
- (二)、「第 46 屆—泡泡造反了」^{〔二〕}文獻中提到：反泡泡存活時間大多在 70 秒之內，僅有少數超過 100 秒；且洗碗精濃度越稀薄，反泡泡的成功越低。
- (三)、「第 63 屆科展—探討速率及添加鹽類對 Antibubble 的影響」^{〔三〕}：此文獻各項變因的最佳條件如下
 1. 水與洗碗精重量比：100：1
 2. 不同吸管口徑：吸管口徑 0.6cm，製作反泡泡效果最好
 3. 入水角度：為了方便操作實驗，基礎變因使用 90 度入水。
 4. 吸取水量高度：吸管上刻度線 2.5cm 製作反泡泡效果最好
 5. 吸管距承接液體表面高度：吸管距離水面 0.5cm 製作反泡泡效果最好。
- (四)、2022 年 Rabia Zia 等學者在 *Advances in antibubble formation and potential applications*^{〔五〕} 文中，從物理的角度解釋反泡泡的形成。
- (五)、2010 年，Dorbolo 等學者研究了反泡泡中的氣流，並提出了一個薄膜動力學模型，該模型考慮了表面剪切力來預測反泡泡壽命^{〔六〕}。2015 年，Sob'yanin 提出了一個反泡泡破裂過程的模型。氣膜的收縮導致在爆裂邊緣出現環形空間（rim），其速度隨時間逐漸減小可以通過平衡表面張力和流體流動阻力來確定^{〔九〕}。
- (六)、2019 年，Stride 和 Coussios 在 *Nucleation, mapping and control of cavitation for drug delivery* 文中提到：治療癌症和中風等疾病的一個主要挑戰是在整個目標區域達到足夠濃度的藥物，而不會在身體其他部位產生毒副作用。而被驅動的微小反泡泡可產生一系列力學、熱和化學效應，可用於實現局部遞送和改善藥物在組織中的分佈^{〔十一〕}。
- (七)、國內文獻都未針對反泡泡在流動液體中存活時間的及一致性的研究。
- (八)、設計【實驗二】~【實驗六】來討論添加鹽類及流體流速對反泡泡存活時間的影響。
- (九)、緊急治療高血鉀的策略包括：減少吸收、增加排除、重新分佈（讓血液中的鉀離子回到細胞中）。緊急處置時，可以鈣鹽（穩定細胞膜電位）救命^{〔十二〕}。
- (十)、設計【實驗七】來討論不同濃度的 CaCl₂ 溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響。

貳、研究設備及器材

研究器材和藥品

一、藥品：氯化鈉、氯化鉀、氯化鎂、氯化鈣。

二、器材：白熊洗碗精、水、0.6cm 的吸管、10mL 的針筒、電子秤、滴管、燒杯、量筒、刮勺、玻棒、12V 馬達、100cm 壓克力管、8mm 矽膠管、電流控制開關、控水閥門、接口、流量計、微量滴定管、數位直流電源供應器、筆電、平板，如下圖（一）。

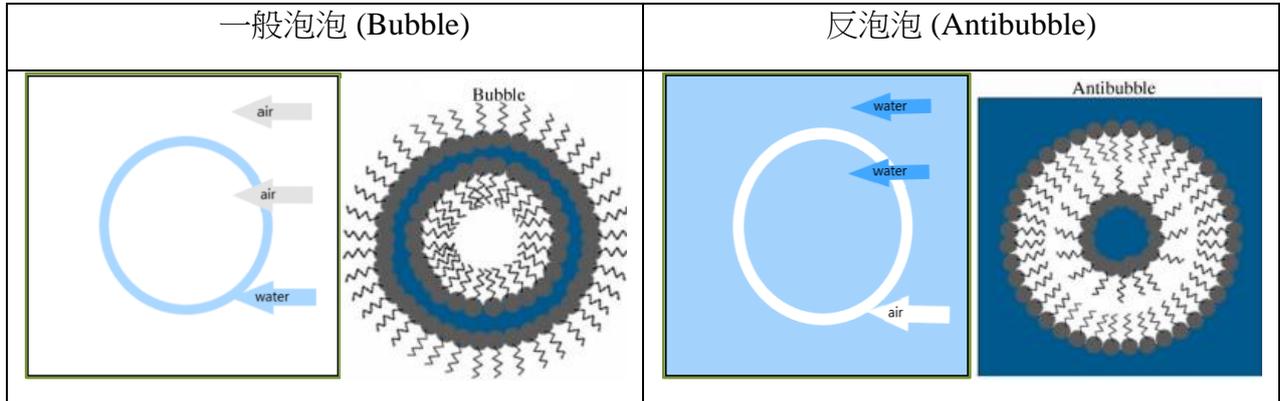
			
各種鹽類			
			
12V 馬達、流量計		壓克力管長 100cm、內徑 4.4cm 及接口	
			
洗碗精	電流控制開關	控水閥門	8mm 矽膠管
			
數位直流電源供應器		微量滴定管 (100µL – 1000µL)	

圖（一）各種器材與藥品（作者拍攝）

貳、研究過程或方法

一、何謂反泡泡

- (一)、反泡泡結構為內部是水，接著包裹一層薄空氣殼，而外部則同為水，與一般泡泡結構相反，如圖（二）。（引用來源：探討速率及添加鹽類對 Antibubble 的影響。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會作品說明書）

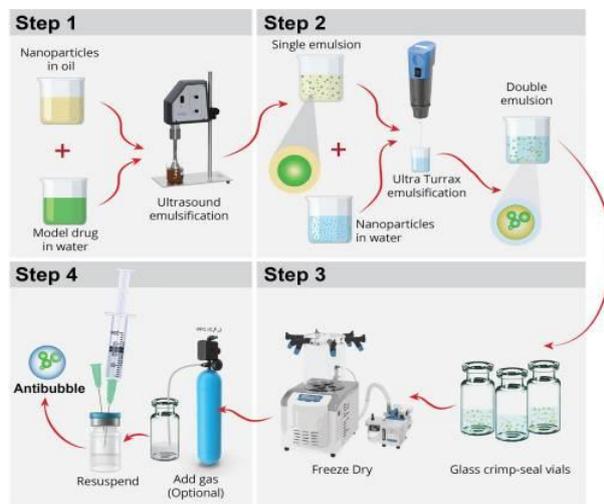


圖（二）一般泡泡（Bubble，左）與反泡泡（Anti-Bubble，右）示意圖

(二)、反泡泡的應用

1. 反泡泡的潛在用途，可用作潤滑劑，它的空氣薄膜也可用來過濾空氣或其他氣體；而在化學相關工業，則可從煙囪中去除污染物。
2. 反泡泡也可用於藥物運輸，例如包裹益生菌以保護它們免受外部環境的影響，或利用紫外線固化聚合物可將產生藥物填充在膠囊中，如圖（三）。

（引用來源：Formulation and characterisation of drug-loaded antibubbles for image-guided and ultrasound-triggered drug delivery. [Ultrasonics Sonochemistry | ScienceDirect.com by Elsevier](#)）



（圖三）

二、【實驗一】確認製作反泡泡的各項基礎變因

為了確保實驗的再現性，並找出適合我們實驗操作的方式，所以設計了【實驗一】來設定後面實驗的基礎變因，實驗裝置如下圖(四)。(作者拍攝製作)



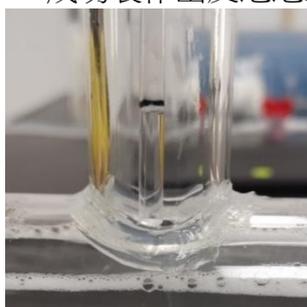
(圖四)

【實驗步驟】

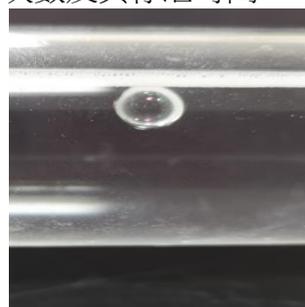
1. 血液的標準濃度（即生理鹽水的濃度）為 0.9%，大約為 0.15M，而實驗裝置容量約為 1400mL。所以我們取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl (0.15M)，再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
2. 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.59 L/min，持續流動 1 分鐘，如圖（五）（作者拍攝）。
3. 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
4. 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。如圖（六）（作者拍攝）
5. 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。



圖（五）



圖（六）



成功製作出反泡泡

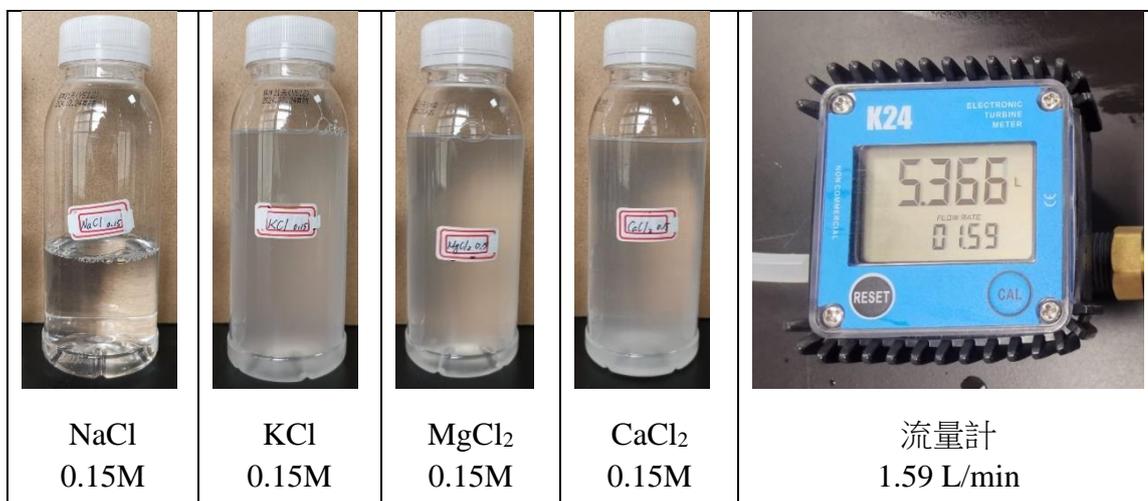
三、探討不同鹽類溶液對反泡泡的影響

【實驗二】探討不同鹽類溶液對反泡泡的影響

在操作實驗一之後，我們思考，在同樣的條件下以不同鹽類來製作反泡泡，會不會影響反泡泡的成功率及存活時間？所以設計了下列實驗。

【實驗步驟】

1. 取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl (0.15M)，再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
2. 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。
3. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.59 L/min，持續流動 1 分鐘。
4. 配置 0.15M 的 KCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
5. 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
6. 將吸管插入 KCl 溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將 KCl 溶液滴入基礎溶液。
7. 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。
8. 配置 0.15M 的 CaCl₂ 及 MgCl₂ 溶液並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
9. 重複步驟 5~7。



(作者拍攝)

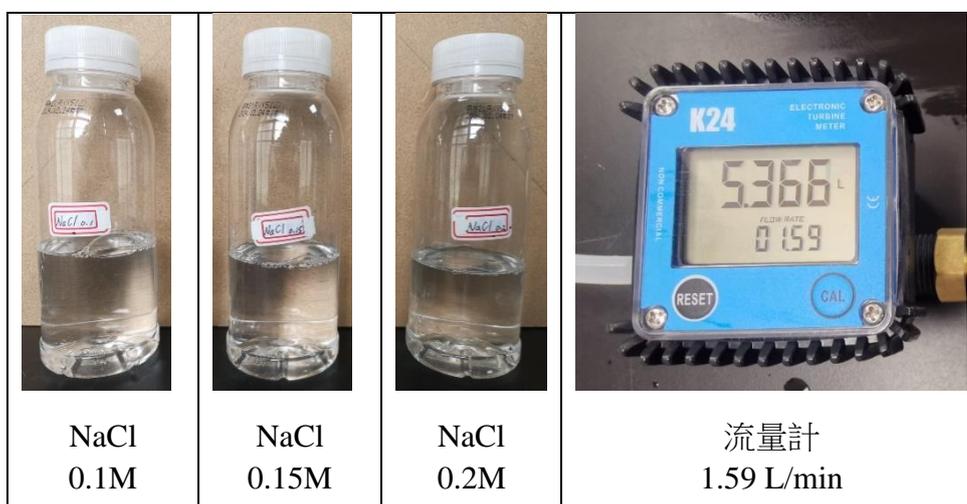
四、探討不同濃度對反泡泡的影響

【實驗三】探討 NaCl 溶液濃度對反泡泡的影響

在操作實驗三之後，我們思考，在同樣的條件下以不同濃度來製作反泡泡，會不會影響反泡泡的成功率及存活時間？所以設計了下列實驗。

【實驗步驟】

1. 取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl (0.15M)，再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
2. 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。
3. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.59 L/min，持續流動 1 分鐘。
4. 配置 0.1M 的 NaCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
5. 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
6. 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。
7. 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。
8. 配置 0.2M 的 NaCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
9. 重複步驟 5~7。



(作者拍攝)

五、探討其他鹽類溶液再不同濃度下對反泡泡的影響

【實驗四】探討不同鹽類溶液及不同濃度對反泡泡的影響

在操作實驗二及三之後，我們試圖比較不同鹽類溶液以不同濃度來製作反泡泡，會不會影響反泡泡的成功率及存活時間？所以設計了下列實驗。

【實驗步驟】

1. 取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl (0.15M)，再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
2. 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。
3. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.59 L/min，持續流動 1 分鐘。
4. 配置 0.1M 的 KCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
5. 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。

- 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。
- 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。
- 配置 0.2M 的 KCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
- 重複步驟 5~7。
- 配置 0.1M 的 CaCl₂ 溶液及 MgCl₂ 溶液各 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
- 重複步驟 5~7。



(作者拍攝)

六、探討流體流速對反泡泡的影響

【實驗五】探討 NaCl 在不同流體流速對反泡泡的影響

在實驗一的設計，我們是以小靜脈血液流速（約為 1.75 cm/s）作為基礎，以流量 1.59 L/min（1.74 cm/s）為基準的條件下討論反泡泡的成功率及存活時間？但血液的流速會因各種因素而改變，所以我們設計了下列改變流速的實驗。

【實驗步驟】

- 取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl（0.15M），再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。
- 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.44 L/min，持續流動 1 分鐘。
- 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
- 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。
- 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。
- 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.78 L/min，持續流動 1 分鐘。
- 重複步驟 5~6。

		
流量計 1.44 L/min	流量計 1.59 L/min	流量計 1.78 L/min

(作者拍攝)

七、探討其他鹽類溶液在不同濃度及不同流速下對反泡泡的影響

【實驗六】探討不同鹽類溶液及不同濃度在不同流速下對反泡泡的影響

在操作實驗五之後，我們發現流速會影響反泡泡的成功率及存活時間？所以不同的流量再次檢驗實驗二、實驗三及實驗四。

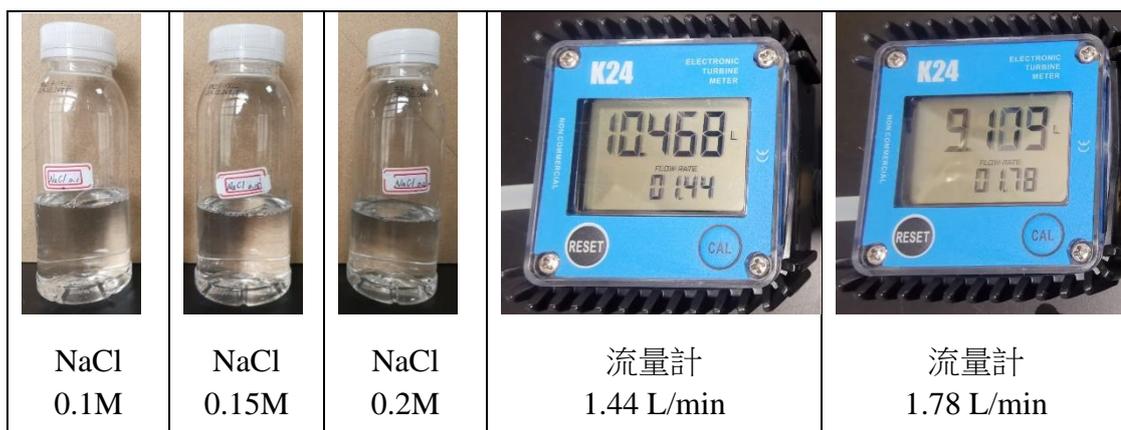
【實驗步驟六之一】相同濃度、不同鹽類、不同流量。

1. 取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl (0.15M)，再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
2. 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。
3. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.44 L/min，持續流動 1 分鐘。
4. 配置 0.15M 的 KCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
5. 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
6. 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。
7. 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。
8. 配置 0.15M 的 CaCl₂ 溶液及 MgCl₂ 溶液各 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精。
9. 重複步驟 5~7。
10. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.78 L/min，持續流動 1 分鐘。
11. 重複步驟 4~9。(下圖為作者拍攝)

				
KCl 0.15M	MgCl ₂ 0.15M	CaCl ₂ 0.15M	流量計 1.44 L/min	流量計 1.78 L/min

【實驗步驟六之二】相同鹽類、不同濃度、不同流量。

1. 取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl (0.15M)，再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
2. 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。
3. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.44 L/min，持續流動 1 分鐘。
4. 配置 0.1M 的 NaCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
5. 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
6. 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。
7. 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。
8. 配置 0.2M 的 NaCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
9. 重複步驟 5~7。
10. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.78 L/min，持續流動 1 分鐘。
11. 重複步驟 4~9。



(作者拍攝)

【實驗步驟六之三】不同鹽類、不同濃度、不同流量。

1. 取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl (0.15M)，再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
2. 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。
3. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.44 L/min，持續流動 1 分鐘。
4. 配置 0.1M 的 KCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
5. 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
6. 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。

7. 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。
8. 配置 0.2M 的 KCl 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
9. 重複步驟 5~7。
10. 配置 0.1M 的 CaCl₂ 溶液及 MgCl₂ 溶液各 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精。
11. 重複步驟 5~7。
12. 調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在 1.78 L/min，持續流動 1 分鐘。
13. 重複步驟 4~11。

八、探討不同濃度的 CaCl₂ 溶液在接近腔靜脈血流量下對反泡泡的影響

【實驗七】探討不同濃度的 CaCl₂ 溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響

1. 取 1400mL 的水加入 12.46g NaCl (0.15M)，再加入 9.3g 的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
2. 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動直流電源供應器。
3. 調整電源供應器電壓及電流控制旋鈕及控水閥門，將流量控制在 2.16 L/min，持續流動 1 分鐘。
4. 配置 0.1M 的 CaCl₂ 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
5. 在離吸管管口 2.5cm 處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
6. 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面 90 度，並距離承接液面 0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。
7. 觀察並記錄滴入 40 次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。
8. 配置 0.15M 的 CaCl₂ 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精，攪拌均勻。
9. 重複步驟 5~7。
10. 配置 0.2M 的 CaCl₂ 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精。
11. 重複步驟 5~7。
12. 配置 0.25M 的 CaCl₂ 溶液 250mL 並加入 1.66g 的洗碗精。
13. 重複步驟 5~7。
14. 調整電源供應器電壓及電流控制旋鈕及控水閥門，將流量控制在 3.02L/min，持續流動 1 分鐘。
15. 重複步驟 4~13。

16. 調整電源供應器電壓及電流控制旋鈕及控水閥門，將流量控制在 3.89L/min，持續流動 1 分鐘。
17. 重複步驟 4~13。
18. 調整電源供應器電壓及電流控制旋鈕及控水閥門，將流量控制在 4.75L/min，持續流動 1 分鐘。
19. 重複步驟 4~13。
20. 調整電源供應器電壓及電流控制旋鈕及控水閥門，將流量控制在 5.62L/min，持續流動 1 分鐘。
21. 重複步驟 4~13。
22. 調整電源供應器電壓及電流控制旋鈕及控水閥門，將流量控制在 6.48L/min，持續流動 1 分鐘。
23. 重複步驟 4~13。
24. 調整電源供應器電壓及電流控制旋鈕及控水閥門，將流量控制在 7.35L/min，持續流動 1 分鐘。
25. 重複步驟 4~13。

參、實驗結果

一、【實驗一】確認製作反泡泡的各項基礎變因

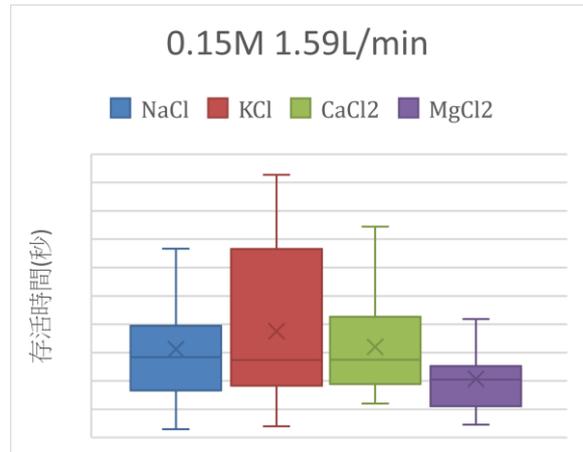
鹽類	NaCl
濃度	0.15M
流量	1.59 L/min
成功次數	36
成功率	90%
抵達次數	3
抵達率	8%



(作者製作)

二、【實驗二】探討不同鹽類溶液對反泡泡的影響

流量	1.59 L/min			
溶液	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂
莫耳濃度	0.15M			
成功次數	36	34	18	29
成功率	90%	85%	45%	73%
抵達次數	3	7	1	1
抵達率	8%	18%	3%	3%



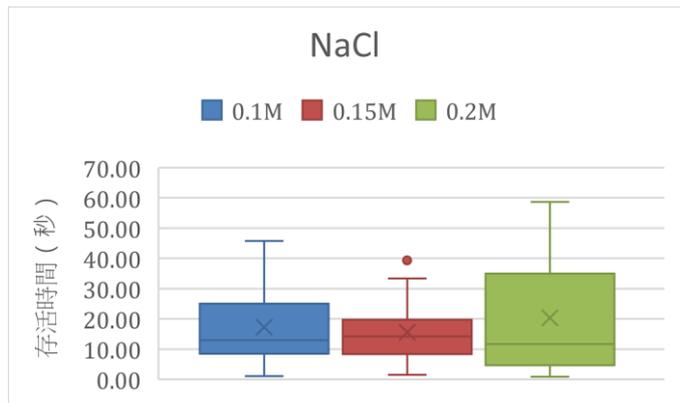
(作者製作)

NaCl 成功率最高但 KCl 的平均存活時間最長，抵達終點的次數也最多。

1. CaCl₂ 成功率最低但 MgCl₂ 存活時間最短。

三、【實驗三】探討 NaCl 溶液在不同濃度對反泡泡的影響

流量	1.59 L/min		
鹽類	NaCl		
莫耳濃度	0.1M	0.15M	0.2M
成功次數	25	36	31
成功率	62.5%	90.0%	77.5%
抵達次數	5	3	11
抵達率	12.5%	8.0%	27.5%

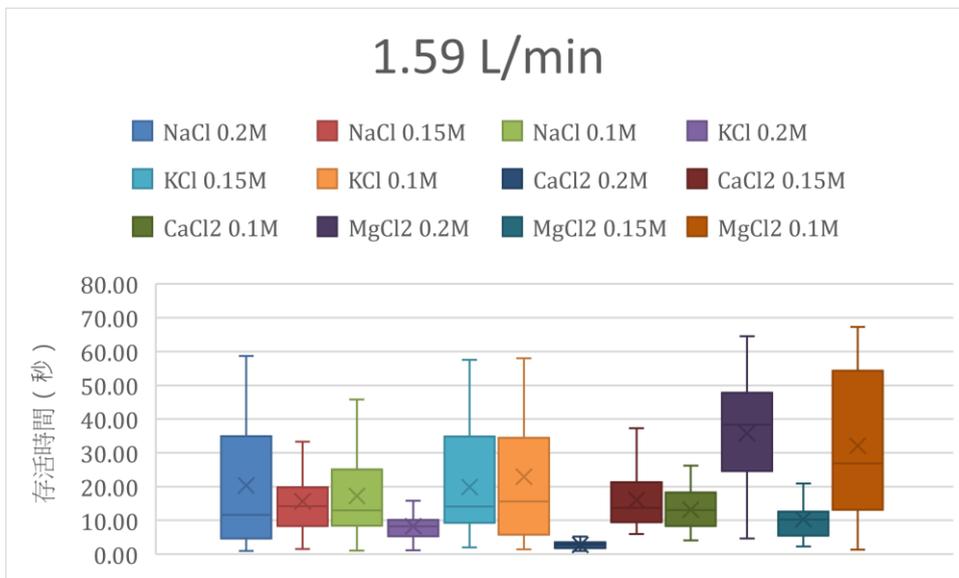


(作者製作)

◆ 0.2M 的 NaCl 雖然成功率不是最高，但有最長的存活時間及最多的抵達次數。

【實驗四】探討不同鹽類溶液及不同濃度對反泡泡的影響

流量	1.59 L/min											
鹽類	NaCl			KCl			CaCl ₂			MgCl ₂		
莫耳濃度	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2
成功次數	25	36	31	23	34	24	13	18	22	23	29	29
成功率	63%	90%	78%	58%	85%	60%	33%	45%	55%	58%	73%	73%
抵達次數	5	3	11	3	7	0	0	1	0	8	1	20
抵達率	13%	8%	28%	8%	18%	0%	0%	3%	0%	20%	3%	50%

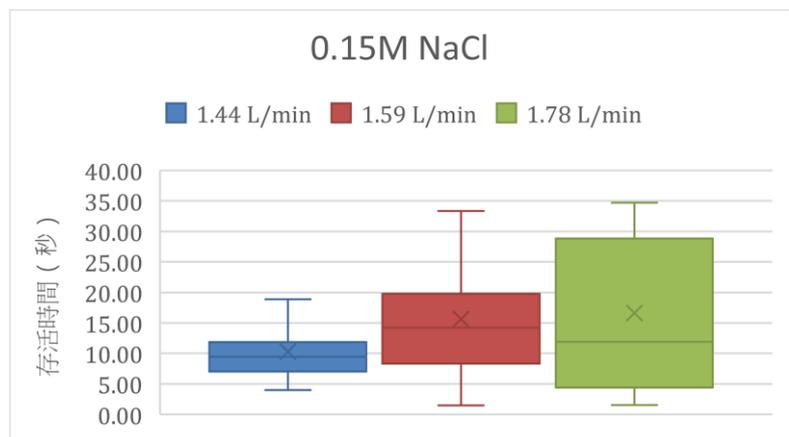


(作者製作)

1. 0.2M 的 MgCl₂ 有最高的存活時間及抵達率。
2. CaCl₂ 成功率最低，0.2M 的 CaCl₂ 存活時間最短。

【實驗五】探討流體流速對反泡泡的影響

流量 L/min	1.44	1.59	1.78
鹽類	NaCl		
莫耳濃度	0.15M		
成功次數	34	36	25
成功率	85%	90%	63%
抵達次數	3	3	10
抵達率	8%	8%	25%



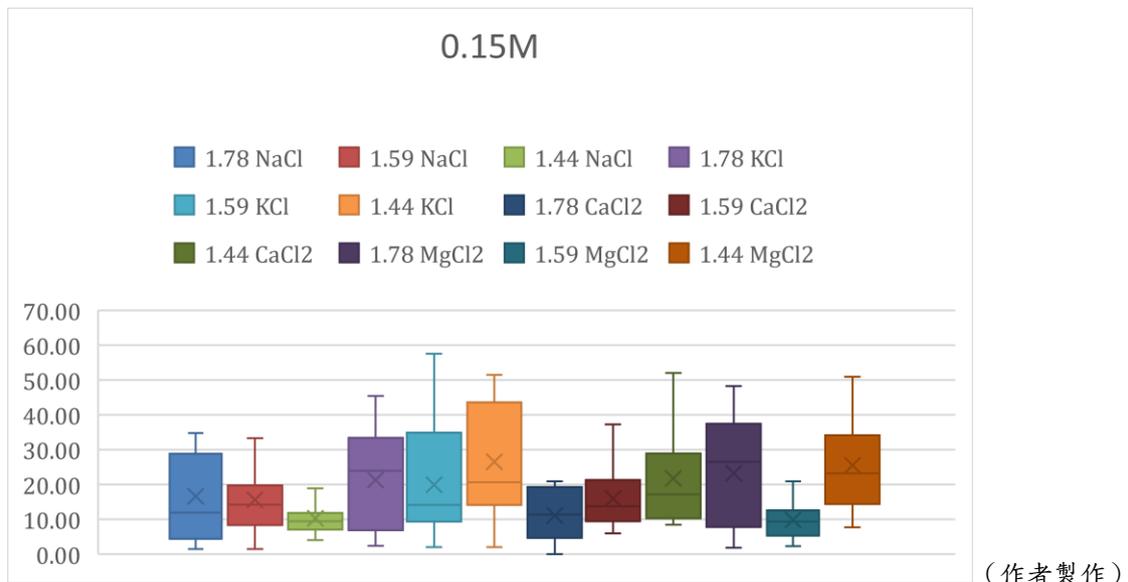
(作者製作)

◆ 在高流速時，平均存活時間及抵達率較高

【實驗六】探討不同鹽類溶液及不同濃度在不同流速下對反泡泡的影響

【實驗六之一】相同濃度、不同鹽類、不同流量

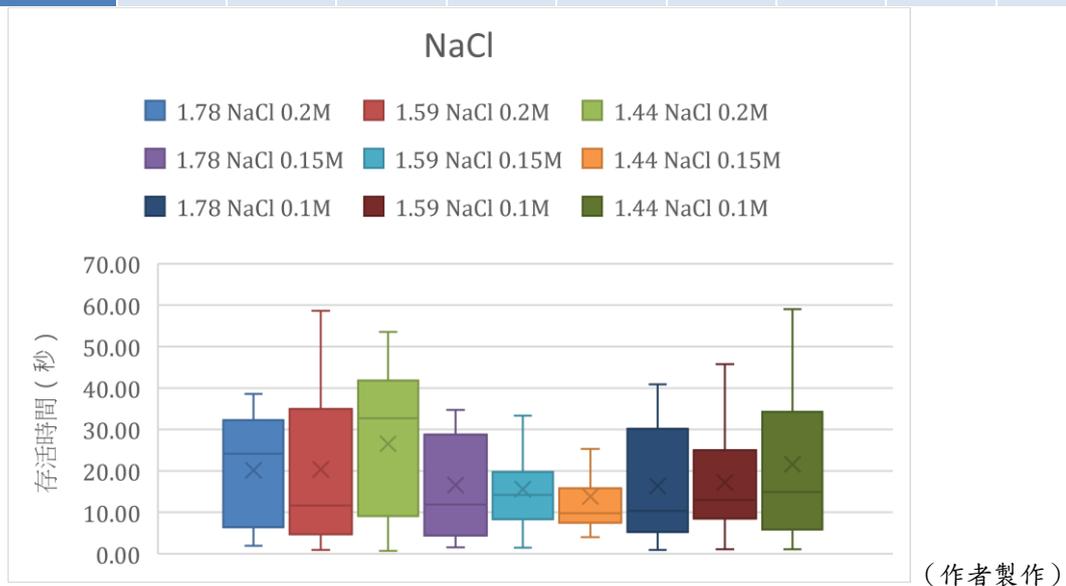
流量 L/min	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44
鹽類	NaCl			KCl			CaCl ₂			MgCl ₂		
莫耳濃度	0.15M											
成功次數	25	36	34	34	34	28	10	18	13	24	29	30
成功率	63%	90%	85%	85%	85%	70%	25%	45%	33%	60%	73%	75%
抵達次數	10	3	3	16	7	9	1	1	1	7	1	4
抵達率	25%	8%	8%	40%	18%	23%	3%	3%	3%	18%	3%	10%



1. KCl 的存活時間及抵達率較高；CaCl₂ 的存活時間及抵達率較低。
2. MgCl₂ 的存活時間及抵達率在高速及低速時的表現明顯優於中速。

【實驗六之二】相同鹽類、不同濃度、不同流量。

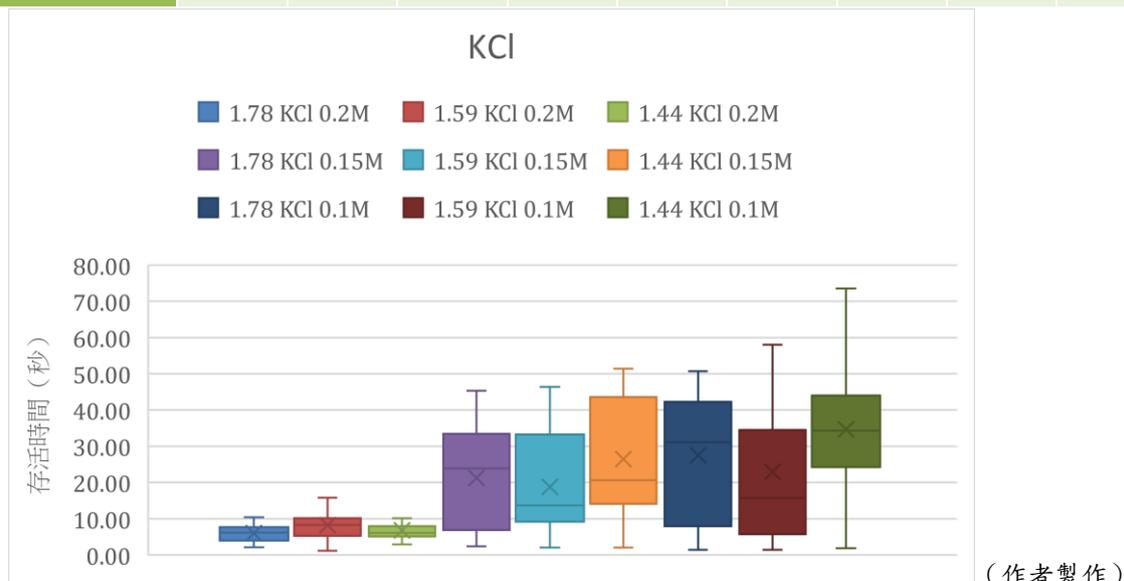
流量 L/min	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44
鹽類	NaCl								
莫耳濃度	0.2M			0.15M			0.1M		
成功次數	32	31	25	25	36	34	28	25	22
成功率	80%	78%	63%	63%	90%	85%	70%	63%	55%
抵達次數	17	11	10	10	3	3	7	5	4
抵達率	43%	28%	25%	25%	8%	8%	18%	13%	10%



◆ NaCl 的平均存活時間，以 0.2M 最高，0.15M 最低。

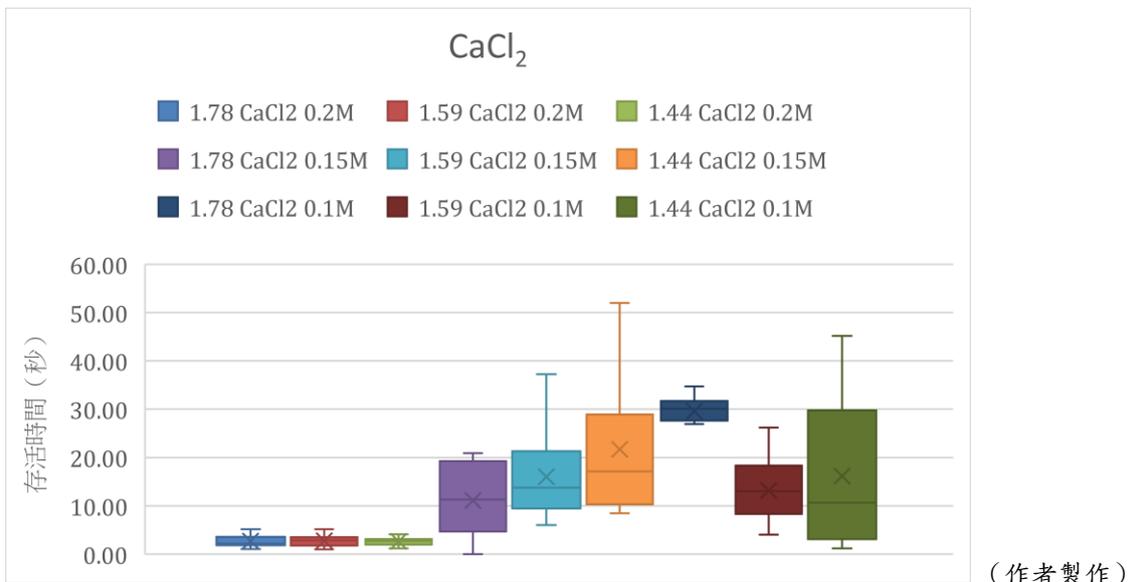
【實驗步驟六之三】不同鹽類、不同濃度、不同流量。

流量 L/min	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44
鹽類	KCl								
莫耳濃度	0.2M			0.15M			0.1M		
成功次數	31	24	29	34	34	28	24	23	18
成功率	78%	60%	73%	85%	85%	70%	60%	58%	45%
抵達次數	2	0	1	16	7	9	14	3	3
抵達率	5%	0%	3%	40%	18%	23%	35%	8%	8%



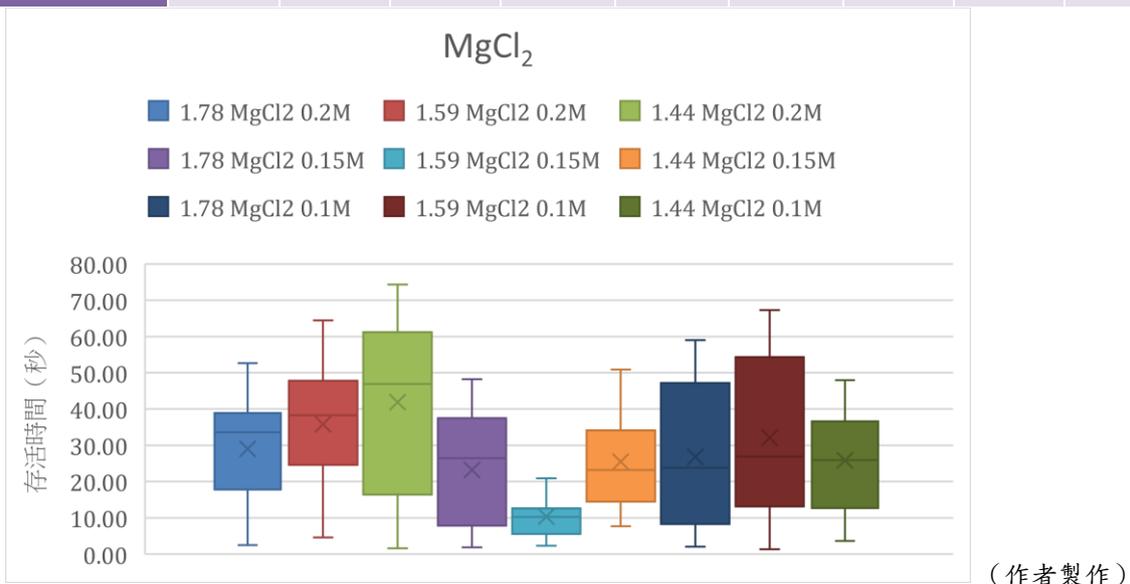
◆ KCl的平均存活時間，0.2M 顯著偏低

流量 L/min	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44
鹽類	CaCl ₂								
莫耳濃度	0.2M			0.15M			0.1M		
成功次數	13	22	22	10	18	13	14	13	13
成功率	33%	55%	55%	25%	45%	33%	35%	33%	33%
抵達次數	1	0	0	1	1	1	12	0	1
抵達率	3%	0%	0%	3%	3%	3%	30%	0%	3%



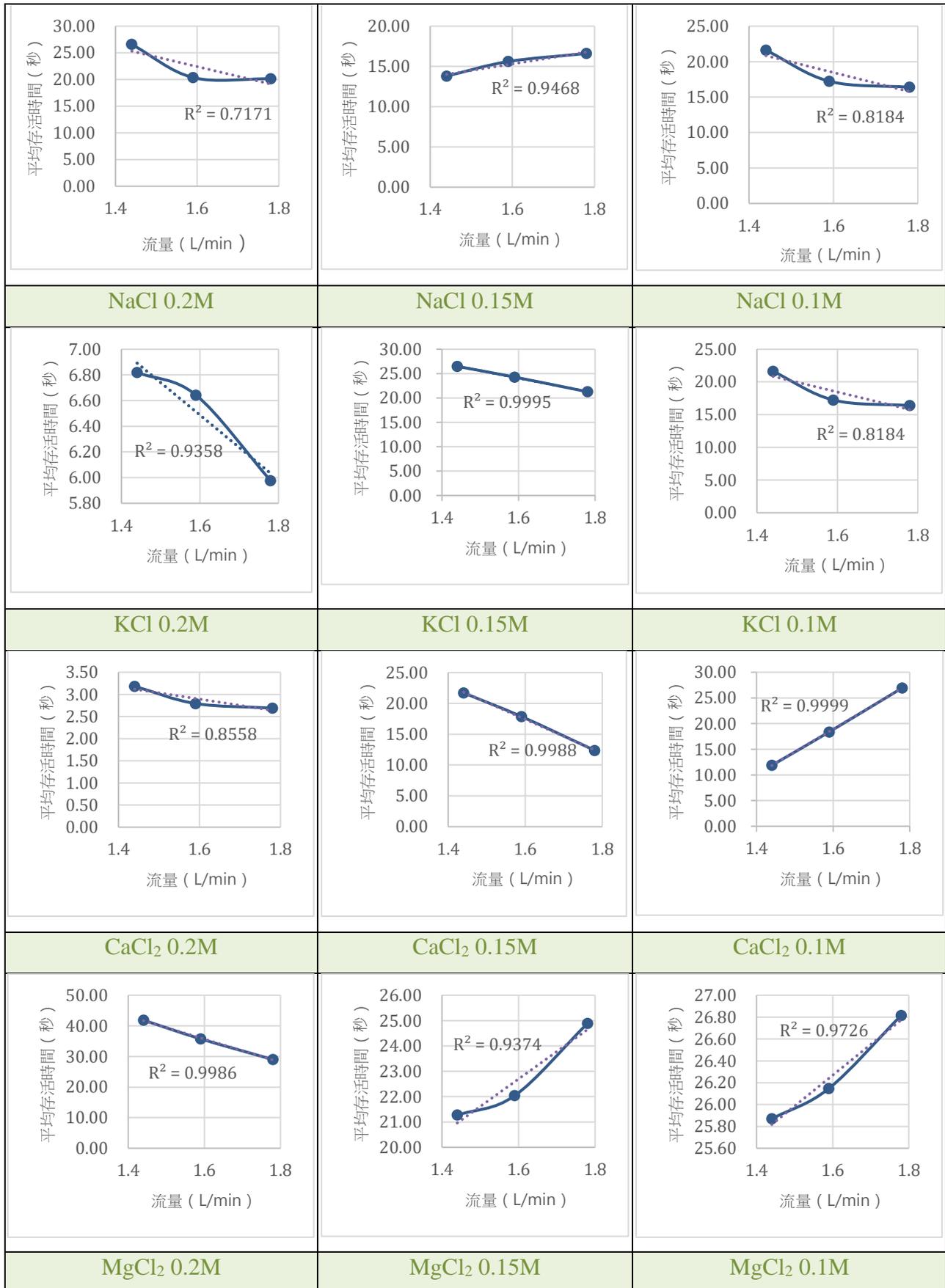
◆ CaCl₂的平均存活時間，0.1M 在高流速時明顯較高而且具有一致性。

流量 L/min	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44	1.78	1.59	1.44
鹽類	MgCl ₂								
莫耳濃度	0.2M			0.15M			0.1M		
成功次數	24	29	20	24	29	30	26	23	24
成功率	60%	73%	50%	60%	73%	75%	65%	58%	60%
抵達次數	17	20	10	7	1	4	10	8	2
抵達率	43%	50%	25%	18%	3%	10%	25%	20%	5%



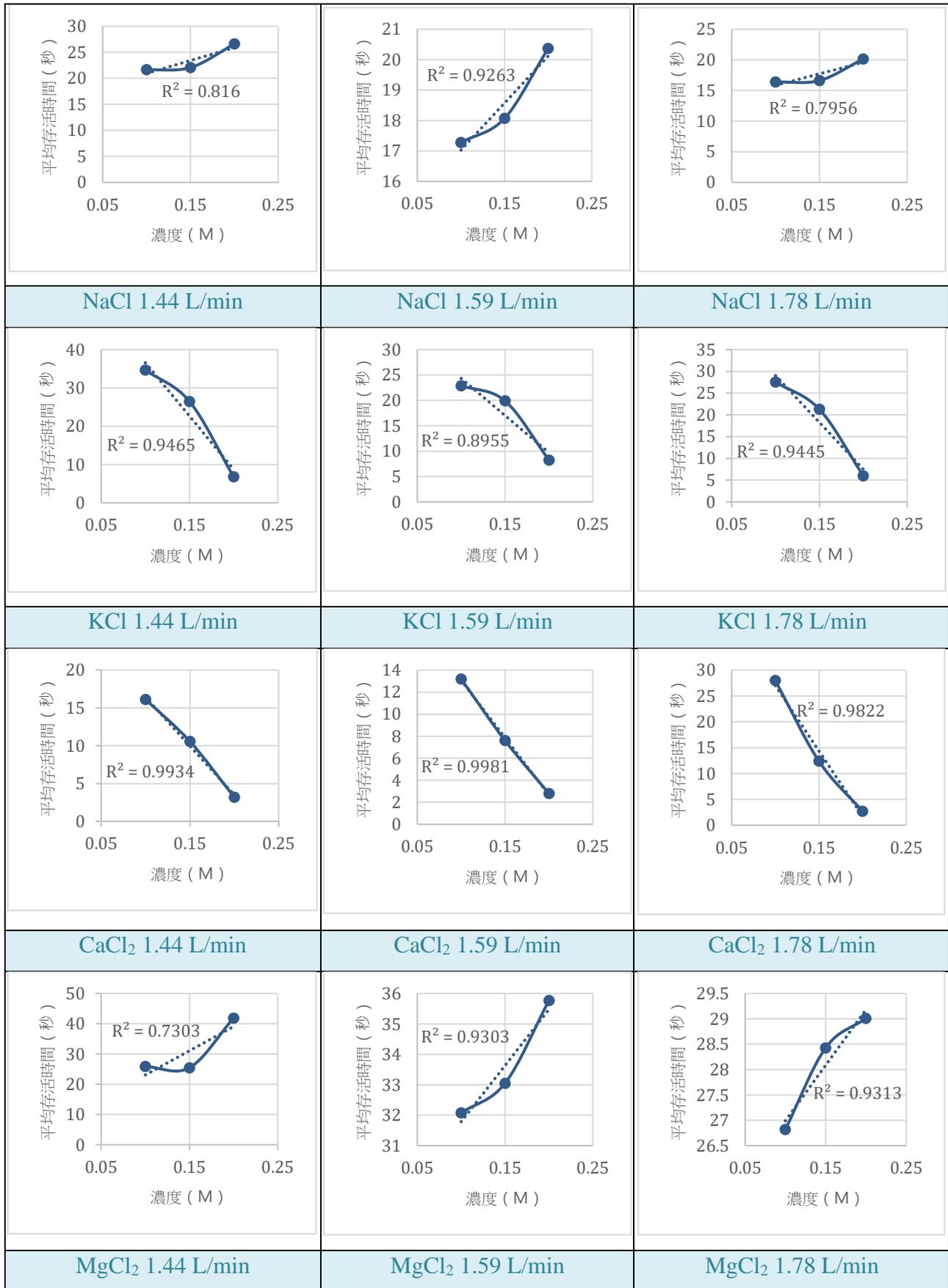
◆ MgCl₂的平均存活時間，0.2M 明顯較高

各種鹽類在不同濃度下，平均存活時間與流量關係圖（作者製作）



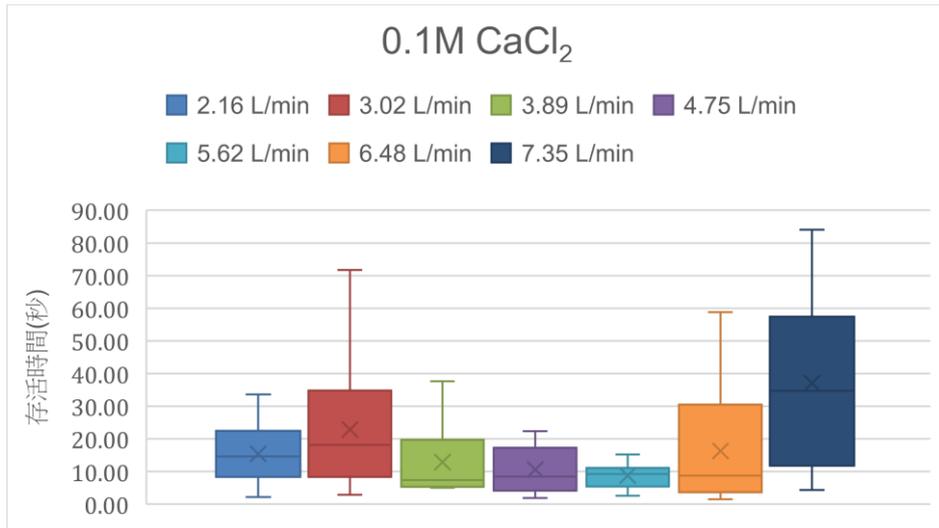
◆ 0.2M 的各種鹽類溶液平均存活時間與流體流速呈明顯負相關。

各種鹽類在不同流量下，平均存活時間與濃度關係圖（作者製作）

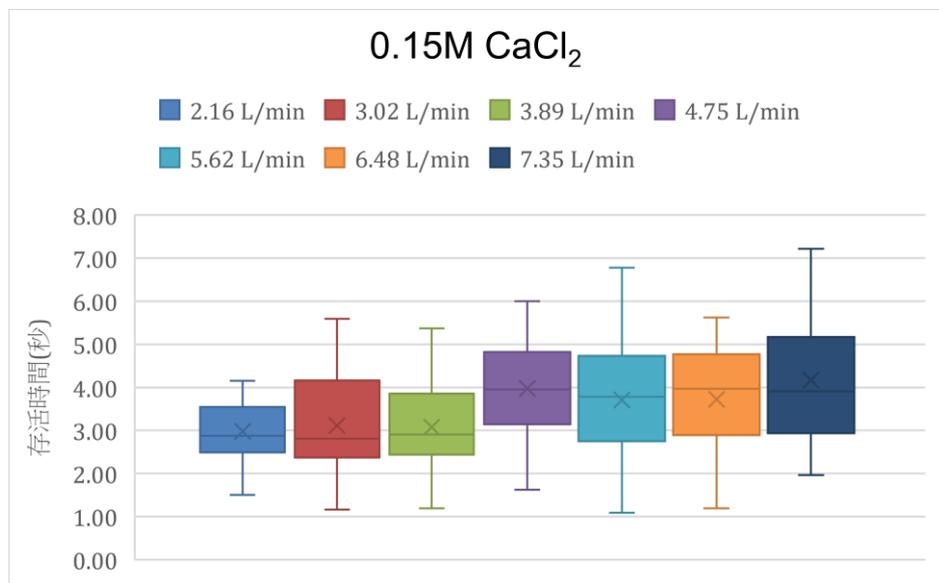


- ◆ 在各種流速下，KCl 與 CaCl₂ 的平均存活時間與濃度呈明顯負相關。
- ◆ 在各種流速下，MgCl₂ 的平均存活時間與濃度呈正相關。

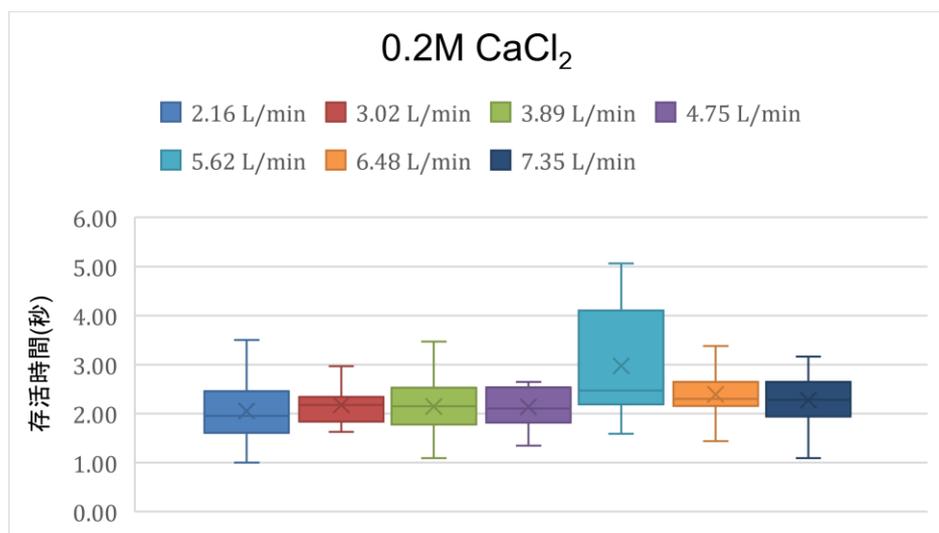
【實驗七】 探討不同濃度的 CaCl_2 溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響



(作者製作)

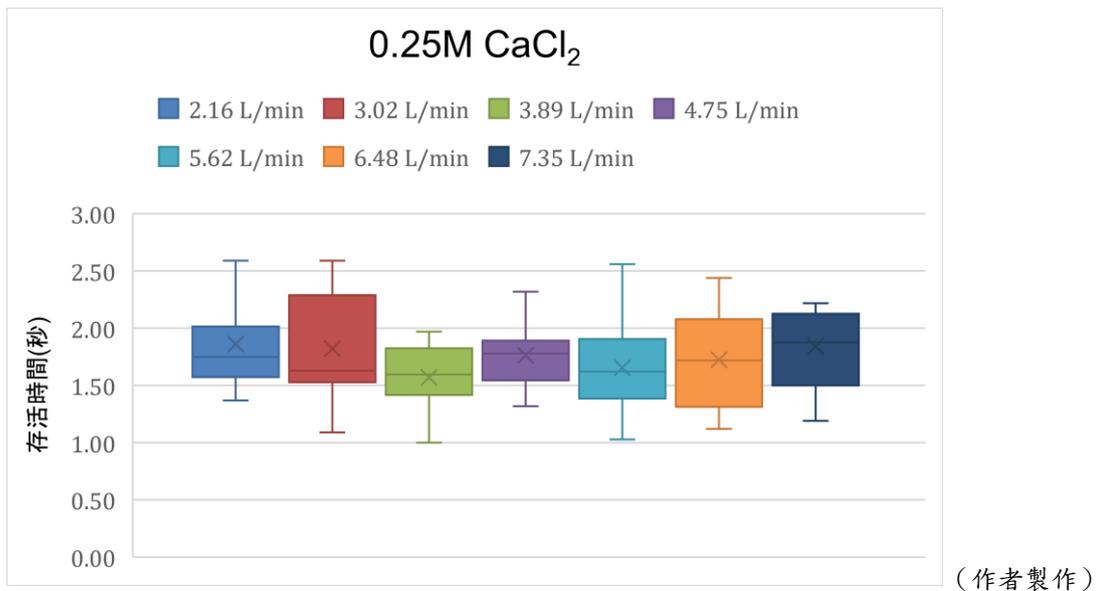


(作者製作)

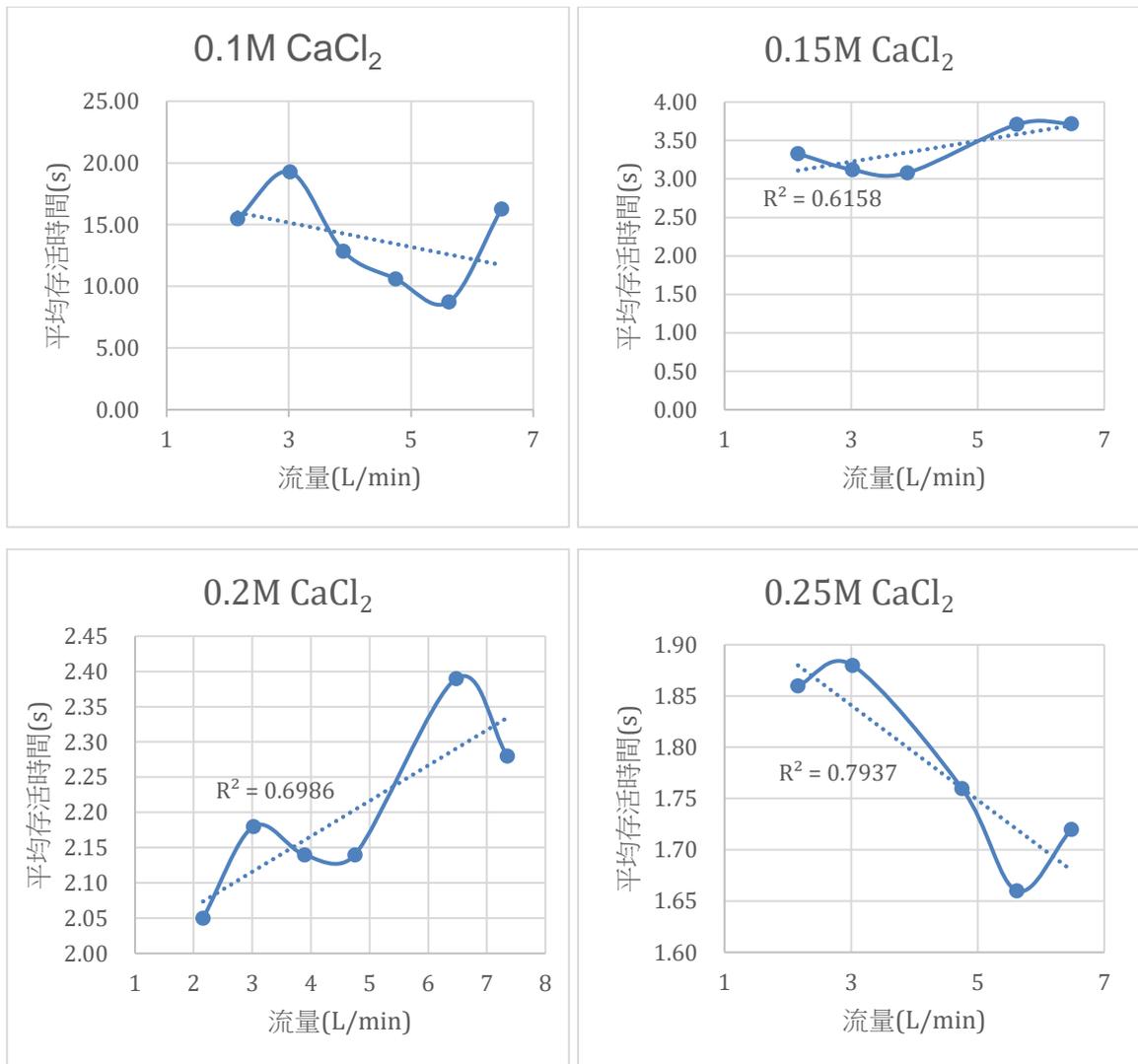


(作者製作)

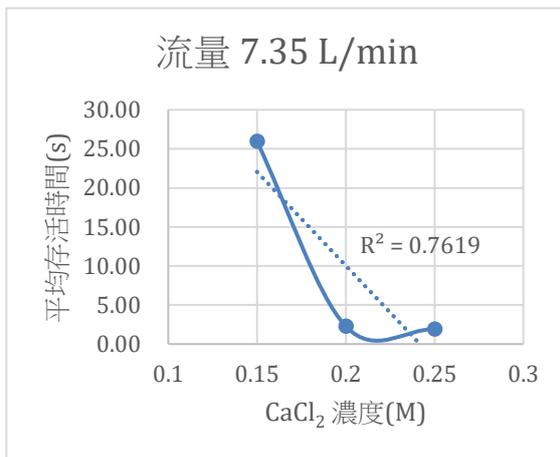
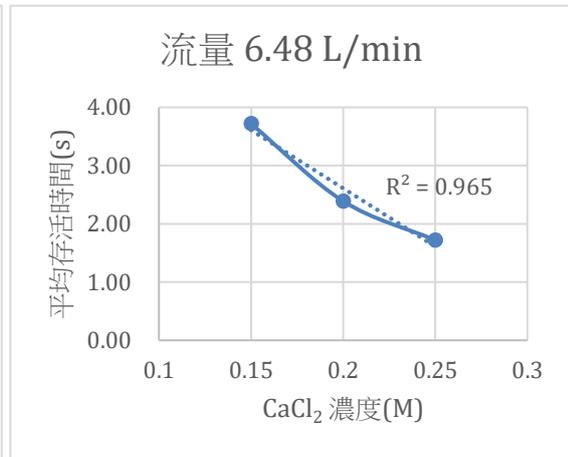
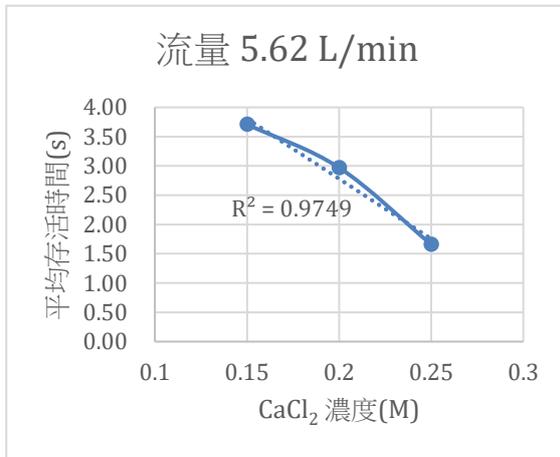
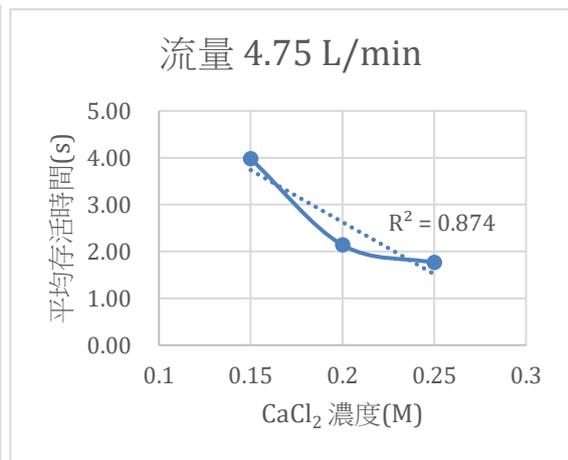
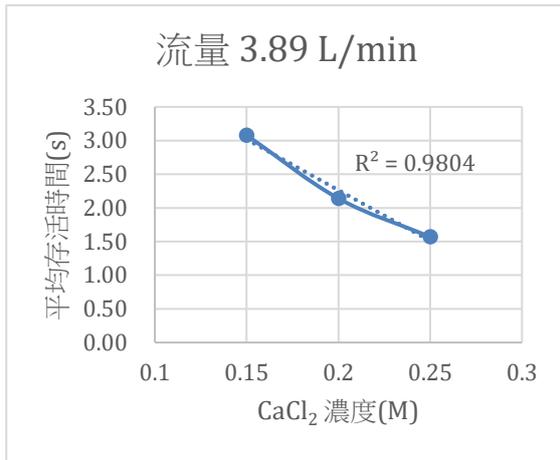
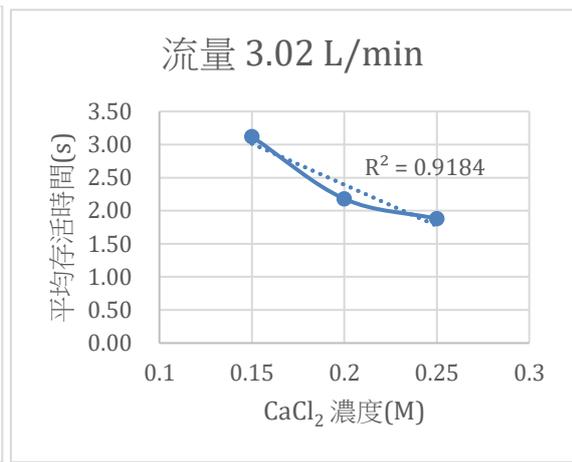
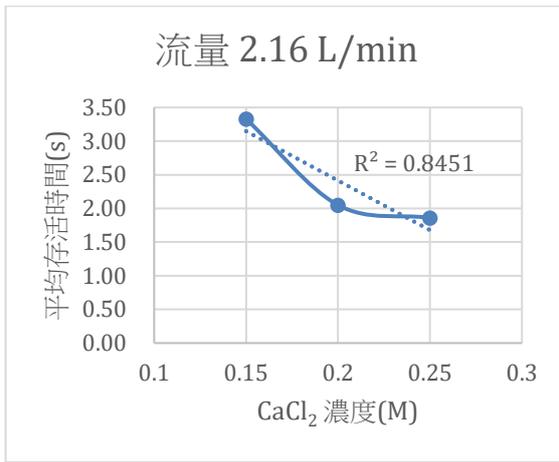
◆ 0.2M, CaCl_2 的平均存活時間, 5.62L/min 明顯較高。



◆ 0.25M, CaCl₂的平均存活時間，在各種流量下趨近一致。



(作者製作)



◆ 在各種流量下，CaCl₂ 反泡泡的平均存活時間都與濃度呈明顯負相關。

(作者製作)

肆、討論

一、【實驗一】確認製作反泡泡的各項基礎變因

(一)、根據實驗結果，我們的所測各項基礎變因的最佳條件如下

	水與洗碗精體積比	吸管外口徑寬度(cm)	入水角度(度)	吸取水量高度	吸管距承接液體表面高度(cm)
測得的最佳條件	150 : 1	0.6	90°	2.5cm	0.5cm

(二)、流量 1.59 L/min，0.15M 的 NaCl 溶液中，製造反泡泡有最高的成功率 (90%)

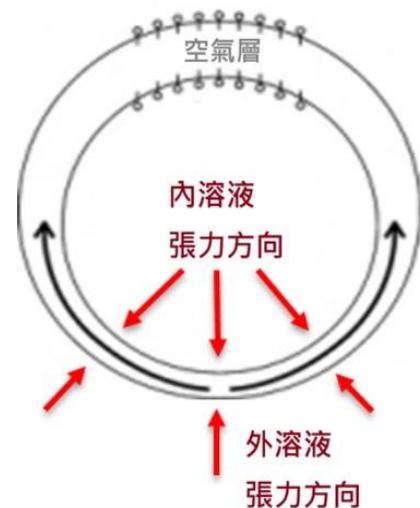
二、如下圖，在觀察實驗過程反泡泡在流體中的流動影片，我們並未發現反泡泡有翻滾的情形。



(作者拍攝)

三、【實驗二】探討不同鹽類溶液對反泡泡的影響

在與基礎溶液相同濃度的條件下，KCl 有較長的存活時間及抵達率。我們認為這可能跟正離子價數與離子半徑有關， K^+ 價數最小 (+1)，半徑最大 (138 pm)； Mg^{2+} 價數最大 (+2)，半徑最小 (72 pm)。如右圖 (作者製作)，內溶液 KCl 與外溶液 NaCl 對空氣層產生的張力差是最直接影響反泡泡的存活時間，且溶液受到擾動，反泡泡就容易破滅，所以我們推測必須要有適當的正離子價數及離子大小才能平衡內外張力差，進而增加反泡泡的存活時間。



四、【實驗三】探討 NaCl 溶液濃度對反泡泡的影響

- (一)、0.2M 的 NaCl 雖然成功率不是最高，但有最長的存活時間及最多的抵達次數。
- (二)、內、外溶液的濃度差，或許造成內、外層張力不同，使得反泡泡在流體中更容易維持穩定
- (三)、根據 *Advances in antibubble formation and potential application* ^(五) 文中所述，反泡泡的不穩定的原因通常是重力作用下的氣膜排水，因此可以透過反泡泡的運動來

延長其壽命，而運動的產生可以來自於內、外層張力不同。

五、【實驗四】探討其他鹽類溶液在不同濃度下對反泡泡的影響

- (一)、在 1.59 L/min 的流量下，0.2M 的 $MgCl_2$ 有最高的存活時間及抵達率。
- (二)、推測除了濃度差的因素外，正離子價數及大小也會有影響。

六、【實驗五】探討 NaCl 在不同流體流速對反泡泡的影響

- (一)、NaCl 在高流速時，存活時間及抵達率較高。
- (二)、反泡泡在流體中流動時，較快速的剪切流會延長其存活時間。

七、【實驗六】探討其他鹽類溶液在不同濃度及不同流速下對反泡泡的影響。

(一)、【實驗六之一】相同濃度、不同鹽類、不同流量。

- 1. 0.15M 的 KCl 整體的平均存活時間及抵達率較高。
- 2. 0.15M 的 NaCl 在低流速時有最佳的一致性。
- 3. 在應用時，比較一致的存活時間或許是更好的選擇。

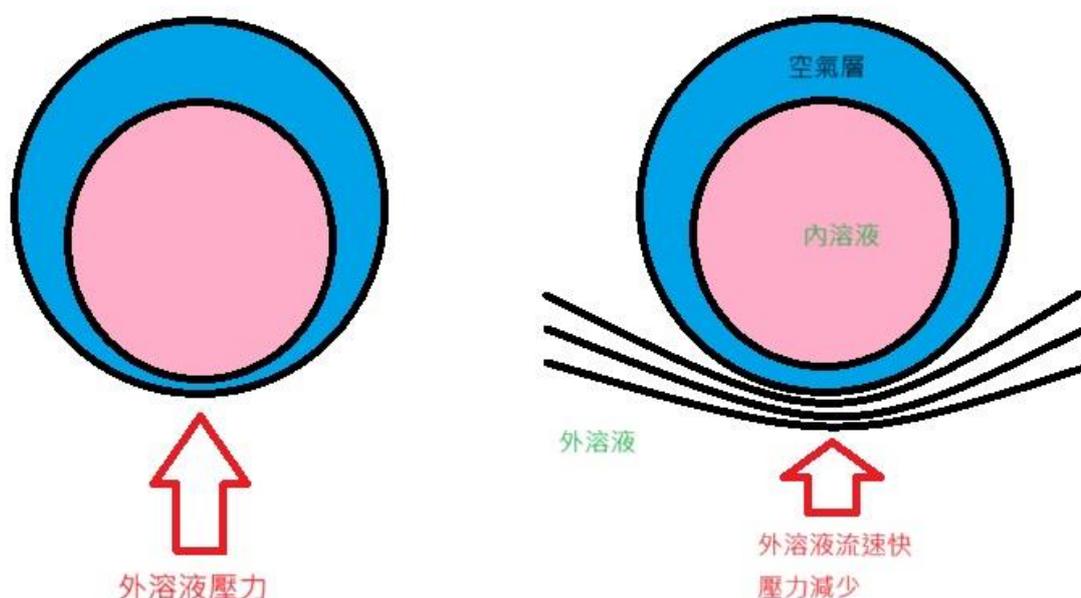
(二)、【實驗六之二】相同鹽類、不同濃度、不同流量。

- 1. NaCl 溶液反泡泡的存活時間在 0.2M 最高，0.15M 最低。
- 2. 當內、外溶液皆為 NaCl 時：內、外溶液濃度相同時，反泡泡存活時間與流速呈正相關；內、外溶液濃度不同時，反泡泡存活時間與流速呈負相關。我們推測此與內、外濃度差所造成的張力差所致。
- 3. 0.15M 的 NaCl 在流量 1.44 L/min 時有最佳的一致性。

(三)、【實驗六之三】不同鹽類、不同濃度、不同流量。

- 1. 在各種流速下，KCl 的平均存活時間與濃度呈明顯負相關。認為：在內溶液濃度為 0.1M 時 K 離子的半徑最大（138 pm）、電量最小，其與水分子間的靜電力最小，所以與外溶液的張力差較大，存活時間較長。但隨著濃度增加，內、外溶液張力差縮小，存活時間也隨之縮小。
- 2. 0.2M 的 KCl 整體的平均存活時間及抵達率偏低，但有極佳的一致性。
- 3. $MgCl_2$ 在 0.2M 存活時間明顯較高。

4. **0.1M 的 CaCl_2 在高流速時有極佳的一致性**及存活時間。如下圖（作者製作），認為：當外溶液流速增加時，根據白努利原理，其液體壓力會減少，作用於反泡泡的空氣層的作用力變小，造成下方空氣層增厚，因而增加反泡泡的存活時間及一致性。

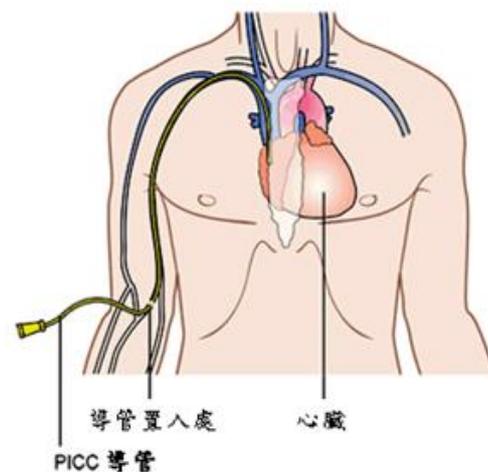


依上述實驗，可以選擇特定的鹽類作為生活或醫療應用。

八、【實驗七】探討不同濃度的 CaCl_2 溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響。

- (一)、高於基礎溶液（1.5M NaCl）濃度的 CaCl_2 溶液在濃度 0.2M 及 0.25M 時，反泡泡的平均存活時間在各種流量下皆在 2 秒左右，有非常好的一致性。
- (二)、在各種流量下， CaCl_2 的平均存活時間都與濃度呈顯著負相關。利用此特性，我們可以濃度控制反泡泡的存活時間。

- (三)、如右圖，因為高濃度的氯化鈣會損害靜脈血管，所以在治療高血鉀所導致的心律不整時，一般的醫療方式是從上臂靜脈內架設靜脈導管至腔靜脈，然後注射高濃度的氯化鈣溶液，使之直接抵達心臟以拮抗鉀離子^(十二)。但在情況緊急或過於肥胖的心律不整病患並不適合架設靜脈導管，因此，以 CaCl_2 溶液製作的反泡泡或可以取代靜脈導管來快速治療高血鉀性心律不整。



（引用來源：末期病人是否適合使用「周邊置入中心靜脈導管（PICC）」？高雄榮民總醫院醫病共享決策平台 (vghks.gov.tw)）

伍、結論

經過以上的實驗及討論，對反泡泡的實驗研究結論如下：

- 一、根據【實驗一】發現水與洗碗精重量比 150 : 1，吸管外口徑寬度 0.6cm，入水角度垂直水面 90 度，吸取水量高度離管口 2.5cm，吸管距承接液面高度 0.5cm，流量 1.59 L/min 的 NaCl 溶液有最好的反泡泡成功率。
- 二、根據【實驗二】推測必須要有適當的正離子價數及離子大小，如 KCl 有較長的存活時間在於 K⁺價數最小（+1），半徑最大（138 pm），才能平衡反泡泡內、外張力差，以增加存活時間。
- 三、根據【實驗三】推測反泡泡內、外的濃度差可能造成內、外層張力不同，進而驅使反泡泡的運動來延長其壽命，正如 0.2M 的 NaCl 反泡泡有最長的存活時間。
- 四、根據【實驗四】在 1.59 L/min 的流量下，0.2M 的 MgCl₂（價數大、離子半徑小）有最高的存活時間，推測濃度差、正離子價數及離子大小皆會影響反泡泡的存活時間。
- 五、根據【實驗五】NaCl 在高流速時，存活時間較高（16.61 秒），推測反泡泡在流體中流動時，剪切流會延長其存活時間。
- 六、根據【實驗六】發現：
 - （一）、0.1M 的 CaCl₂ 在高流速時有極佳的一致性及存活時間。
 - （二）、在應用時，較為一致的存活時間會是較好的選擇。
- 七、根據【實驗七】發現以 CaCl₂ 溶液製作的反泡泡或許可以取代靜脈導管來快速治療高血鉀性心律不整。

陸、未來展望

- 一、由於流速的大小與流量及管徑有關，未來可嘗試做不同管徑的實驗，來推測對反泡泡存活時間及一致性的影響。
- 二、本實驗受限於反泡泡的顆粒大小（0.7mL），無法真實描述反泡泡在靜脈中的流動情形，未來希望能獲得更多資源，來探討對反泡泡在醫療用途的可行性。

柒、參考文獻

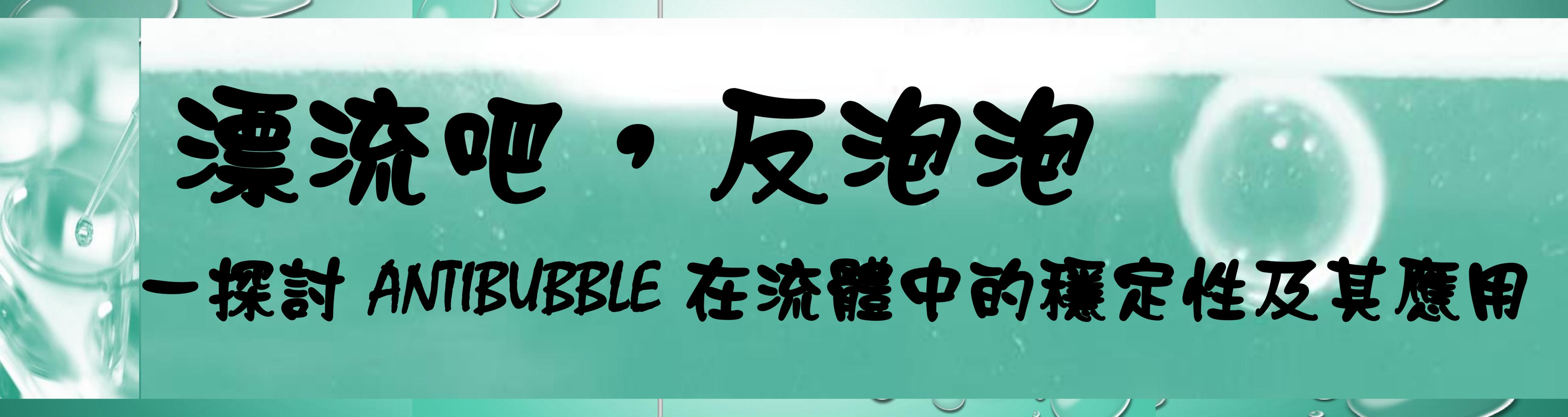
- 一、反泡泡(2024年2月19日)。維基百科。檢自：<https://reurl.cc/2L8Ze6>
- 二、水中的魔法泡泡。嘉義市第三十七屆中小學科學展覽會作品說明書。
檢自：<https://reurl.cc/GAXxyZ>
- 三、探討速率及添加鹽類對 Antibubble 的影響。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會作品說明書。檢自：[NPHSF2023-030214.pdf \(ntsec.gov.tw\)](https://www.ntsec.gov.tw/NPHSF2023-030214.pdf)
- 四、科學遊戲實驗室-反泡泡。國立台中教育大學科學教育與應用學系 NTCU。
檢自：<http://scigame.ntcu.edu.tw/water/water-012.html>
- 五、Rabia Zia et.al.(2022). Advances in antibubble formation and potential applications.
[Advances in antibubble formation and potential applications - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/S0927775222000000)
- 六、S. Dorbolo et.al.(2010) Antibubble lifetime: Influence of the bulk viscosity and of the surface modulus of the mixture. [Antibubble lifetime: Influence of the bulk viscosity and of the surface modulus of the mixture - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/S0927775210000000)
- 七、P. Geon Kim, Jerusha Vogel.(2006) Antibubbles: Factors that affect their stability.
[Antibubbles: Factors that affect their stability - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/S0927775206000000)
- 八、New Journal of Physics(2003) Fluid instabilities in the birth and death of antibubbles. [Fluid instabilities in the birth and death of antibubbles - IOPscience](https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4222/3/1/014)
- 九、D. N.Sob'yanin, "Theory of the antibubble collapse," *Phys. Rev. Lett.* 114(10), 104501 (2015).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.104501>
- 十、A-Man Zhang (张阿漫); Shi-Min Li (李世民); Pu Cui (崔璞); Shuai Li (李帅); Yun-Long Liu (刘云龙), "A unified theory for bubble dynamics," *Physics of Fluids* 35, 033323 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0145415>
- 十一、E.Stride and C. Coussios, "Nucleation, mapping and control of cavitation for drug delivery," *Nat. Rev. Phys.* 1, 495–509 (2019). <https://doi.org/10.1038/s42254-019-0074-y>
- 十二、重症醫學高血鉀的緊急治療。檢自：[重症醫學 高血鉀的緊急治療 \(Acute Management of Hyperkalemia\) - NEJS](https://www.nejs.org/doi/full/10.1056/NEJMp1900000)
- 十三、與心跳停止相關的電解質異常。台灣急診醫學通訊，第二卷第一期。檢自：[台灣急診醫學會 \(sem.org.tw\)](https://www.sem.org.tw/)

【評語】 030102

本作品探討反泡泡在流體中的穩定性及其應用，研究設計各項物理變因，進行系統化實驗，探討反泡泡的形成和穩定性，實驗設計合理，具科學探究方法。

然在實驗數據分析方法需加強，應增加實驗數據以提升分析的可靠性。數據作圖分析、物理說明及公式引用需更清楚。另對高濃度 CaCl_2 溶液以反泡泡取代靜脈導管的應用結論，可待深入探討。

作品簡報



漂流吧，反泡泡

— 探討 ANTIBUBBLE 在流體中的穩定性及其應用

摘要

本次研究探討反泡泡在流體中的穩定性及其應用，發現：

- 一.成功次數最高的基礎變因為：水與洗碗精重量比150：1，吸管外口徑寬度0.6cm，入水垂直水面90度，吸取水量高度離管口2.5cm，吸管距承接液面高度0.5cm，流量1.59 L/min（流速1.74 cm/s）。
- 二.在基礎流量下，0.15M的KCl溶液有最高的平均存活時間。
- 三.0.1M的CaCl₂在高流速（1.78 L/min）時有極佳的一致性及其存活時間。

- 四.0.2M的MgCl₂溶液在低流速（1.44 L/min）時有最高的平均存活時間。
- 五.在三種流速下，KCl反泡泡的存活時間與濃度有顯著負相關。
- 六.在流體中反泡泡的存活時間與正離子價數與的離子半徑有關。
- 七.利用CaCl₂溶液形成的反泡泡取代以靜脈導管注射高濃度CaCl₂溶液治療心律不整的可行性。

研究動機

討論不同鹽類的反泡泡在類似血液濃度及流速的食鹽水中的存活時間，並藉著改變流速來了解反泡泡在流體中的穩定性。由初步實驗的結果發現CaCl₂溶液的反泡泡有極佳的一致性及其存活時間，且由相關醫學文獻中了解CaCl₂溶液有拮抗高血鉀造成心律不整的療效，想更進一步研究其可行性。

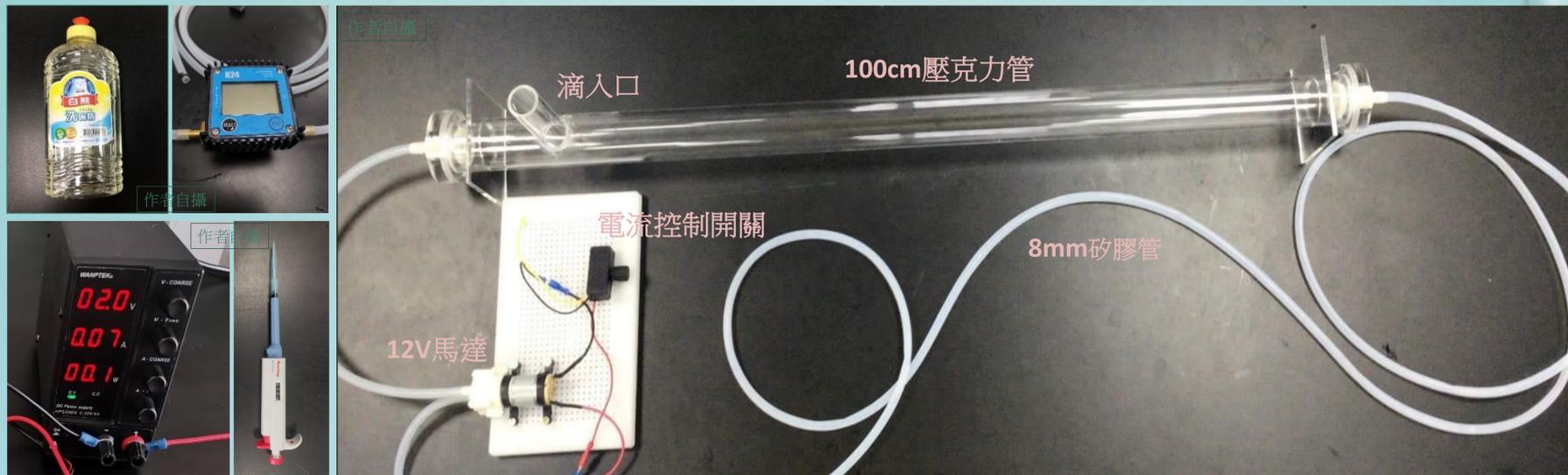
研究目的

- 一.找出反泡泡成功次數最高的基礎變因。
- 二.探討不同鹽類在相同流體速率下對反泡泡存活時間的影響。
正一價鹽類：NaCl、KCl；正二價鹽類：MgCl₂、CaCl₂。
- 三.探討相同濃度、不同鹽類在不同流速下對反泡泡生存活時間的影響。高流速（1.78 L/min）、基礎流速（1.59 L/min）、低流速（1.44 L/min）。
- 四.探討相同鹽類、不同濃度在不同流速下對反泡泡生存活時間的影響。高流速（1.78 L/min）、基礎流速（1.59 L/min）、低流速（1.44 L/min）。
- 五.探討不同濃度的CaCl₂溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響。CaCl₂溶液濃度：0.10M、0.15M、0.20M、0.25M。基礎溶液流量：2.16L/min、3.02L/min、3.89L/min、4.75L/min、5.62L/min、6.48L/min、7.35L/min。

文獻探討

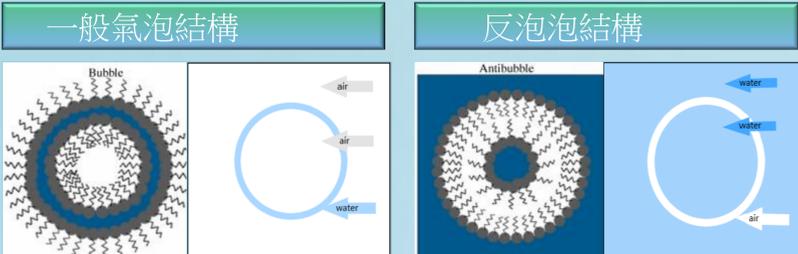
- 一.反泡泡是一種特殊的球形結構，在液體中產生，並被一層薄薄的空氣膜包圍。其獨特的雙層氣液介面結構使其對靶向藥物運輸、主動洩漏檢測、和臨床診斷成像具有重要價值。
- 二.「第63屆科展—探討速率及添加鹽類對Antibubble的影響」
- 三.2022年 Rabia Zia等學者在Advances in antibubble formation and potential applications文中，從物理的角度解釋反泡泡的形成。
- 四.2010年，Dorbolo等學者提出了一個薄膜動力學模型，該模型考慮了表面剪切力來預測反泡泡壽命。2015年，Sob'yanin 提出了一個反泡泡破裂過程的模型。
- 五.2019年，Stride 和 Coussios 在Nucleation, mapping and control of cavitation for drug delivery 文中提到：被驅動的微小反泡泡可產生一系列力學、熱和化學效應，可用於實現局部遞送和改善藥物在組織中的分佈。
- 六.國內文獻都未針對反泡泡在流動液體中存活時間的及一致性的研究。
- 七.設計（實驗二~六），來討論添加鹽類及流體流速對反泡泡存活時間的影響。
- 八.緊急治療高血鉀的策略包括：減少吸收、增加排除、重新分佈。緊急處置時，可以鈣鹽救命。
- 九.設計（實驗七）來討論不同濃度的CaCl₂溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響。

研究設備及器材

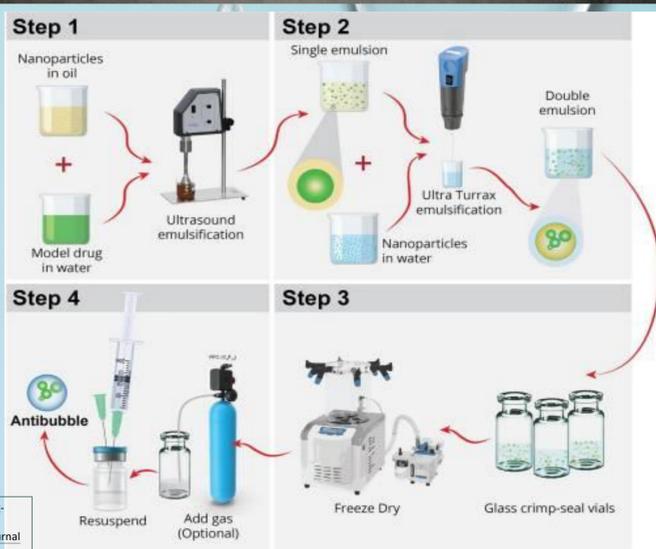


研究過程及方法

一.何謂反泡泡



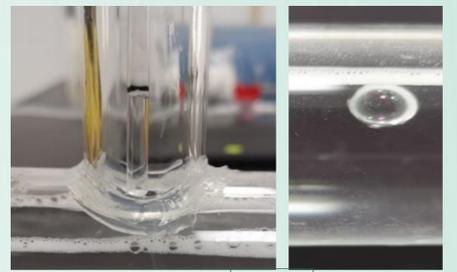
二.反泡泡的應用
反泡泡也可用於藥物運輸，例如包裹益生菌以保護它們免受外部環境的影響，或利用紫外線固化聚合物將產生藥物填充在膠囊中，如右圖。



(引用來源：Formulation and characterisation of drug-loaded antibubbles for image-guided and ultrasound-triggered drug delivery. Ultrasonics Sonochemistry | Journal | ScienceDirect.com by Elsevier)

【實驗一】確認製作反泡泡的各項基礎變因

- 血液的標準濃度（即生理鹽水的濃度）為0.9%，大約為0.15M，而實驗裝置容量約為1400mL。所以我們取1400mL的水加入12.46g NaCl（0.15M），再加入9.3g的洗碗精後，均勻攪拌作為基礎溶液。
- 將基礎溶液倒入壓克力管中，啟動電源。調整電流控制開關及控水閥門，將流量控制在1.59 L/min，持續流動1分鐘。
- 在離吸管管口2.5cm處畫上一條線，固定吸取基礎溶液的高度。
- 將吸管插入基礎溶液中至指定刻度，保持吸管垂直液面90度，並距離承接液面0.5cm，按住吸管上方開口，提起後再將基礎溶液滴入。
- 觀察並記錄滴入40次中，成功製作出反泡泡的次數及其存活時間。



作者自攝

【實驗二】探討不同鹽類溶液對反泡泡的影響



作者自攝

【實驗五】探討NaCl在不同流體流速對反泡泡的影響



作者自攝

【實驗三】探討NaCl溶液濃度對反泡泡的影響



作者自攝

【實驗六】探討不同鹽類溶液及不同濃度在不同流速下對反泡泡的影響

【實驗六之一】相同濃度、不同鹽類、不同流量



作者自攝

【實驗六之二】相同鹽類、不同濃度、不同流量。



作者自攝

【實驗六之三】不同鹽類、不同濃度、不同流量。

【實驗四】探討不同鹽類溶液及不同濃度對反泡泡的影響

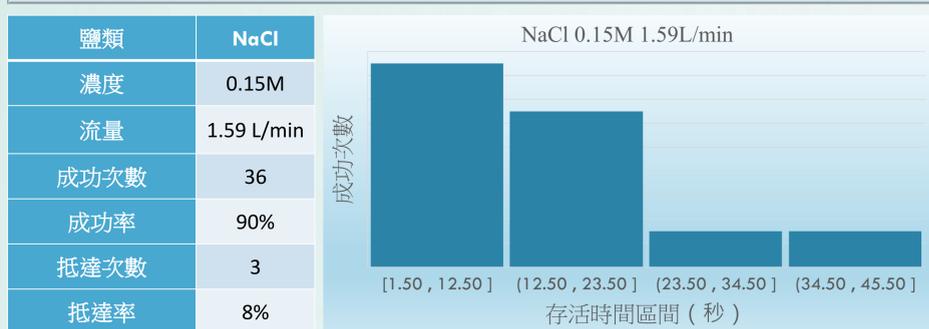


作者自攝

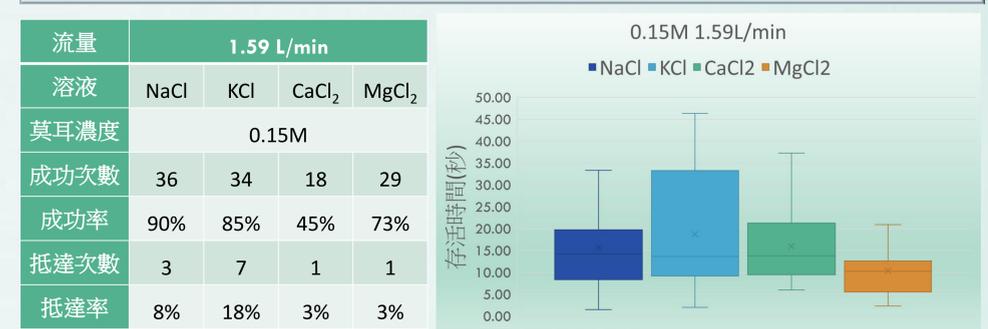
【實驗七】探討不同濃度的CaCl2溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響

實驗結果

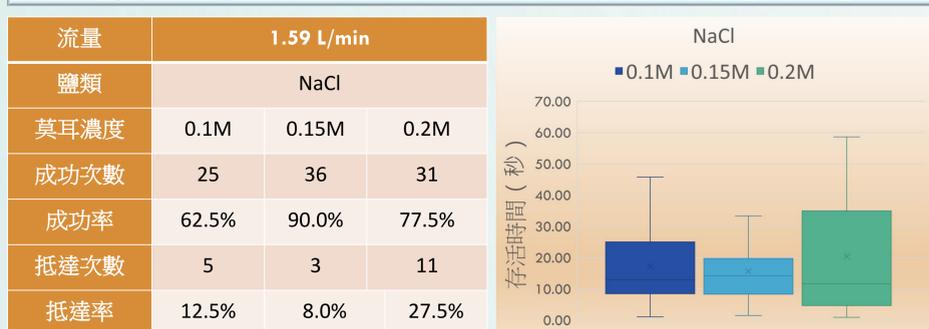
【實驗一】確認製作反泡泡的各項基礎變因



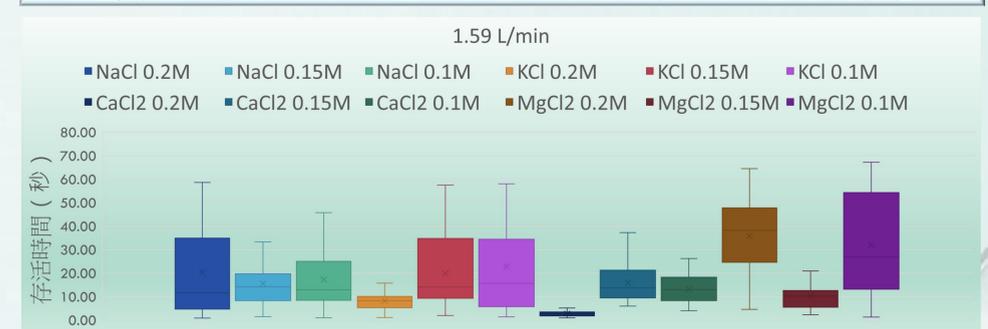
【實驗二】探討不同鹽類溶液對反泡泡的影響



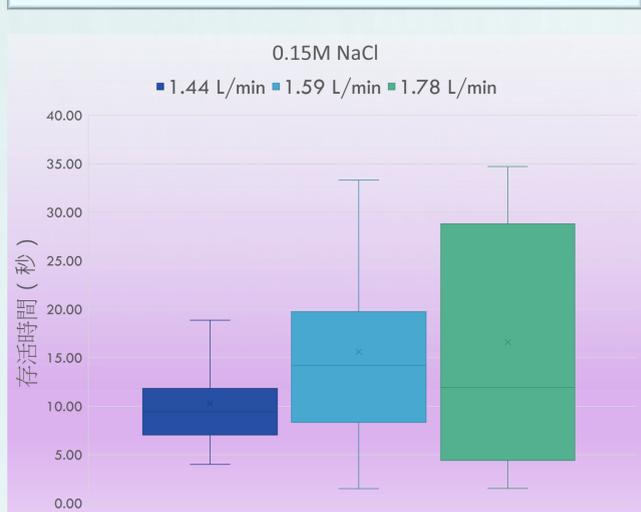
【實驗三】探討NaCl溶液在不同濃度對反泡泡的影響



【實驗四】探討不同鹽類溶液及不同濃度對反泡泡的影響

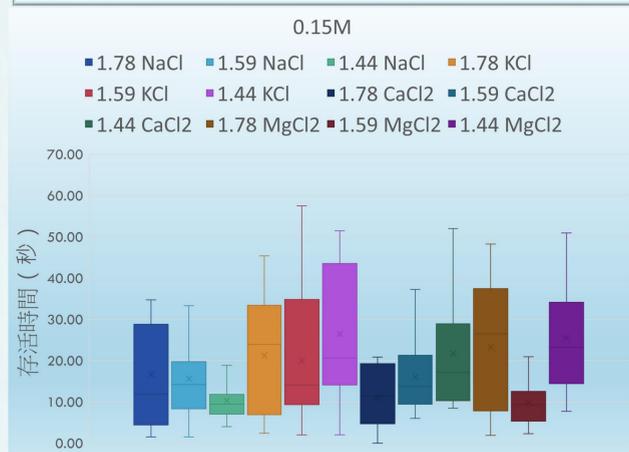


【實驗五】探討流體流速對反泡泡的影響

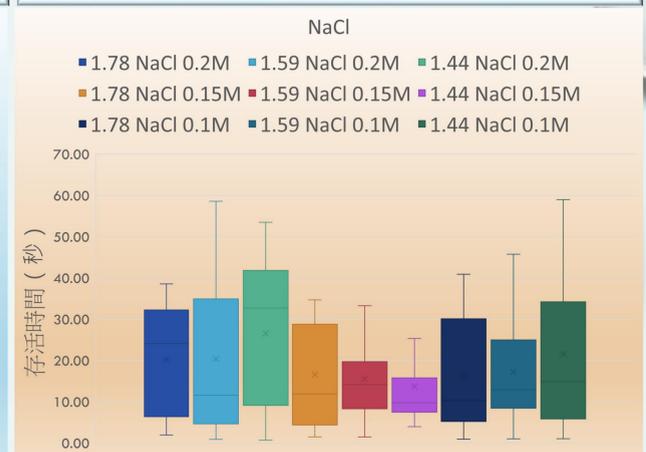


【實驗六】探討不同鹽類溶液及不同濃度在不同流速下對反泡泡的影響

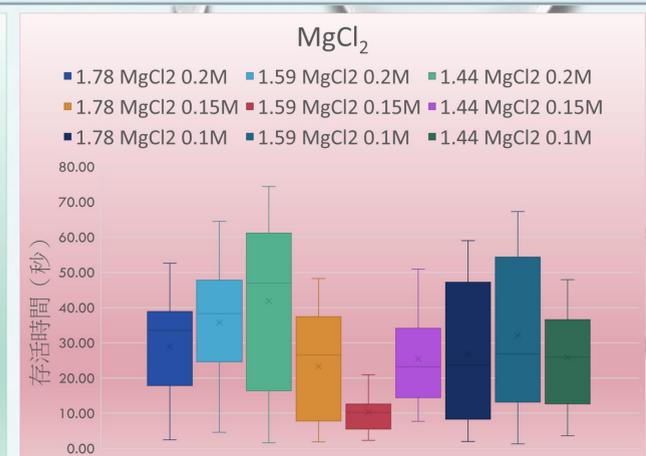
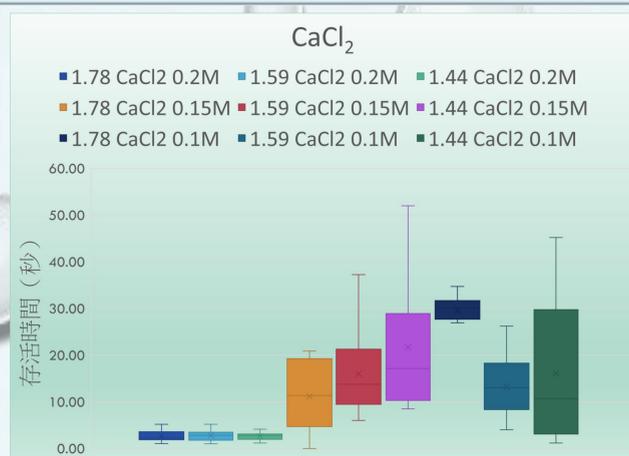
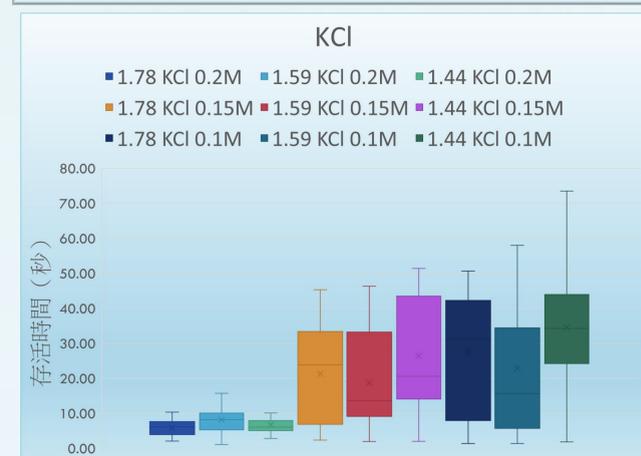
【實驗六之一】相同濃度、不同鹽類、不同流量



【實驗六之二】相同鹽類、不同濃度、不同流量

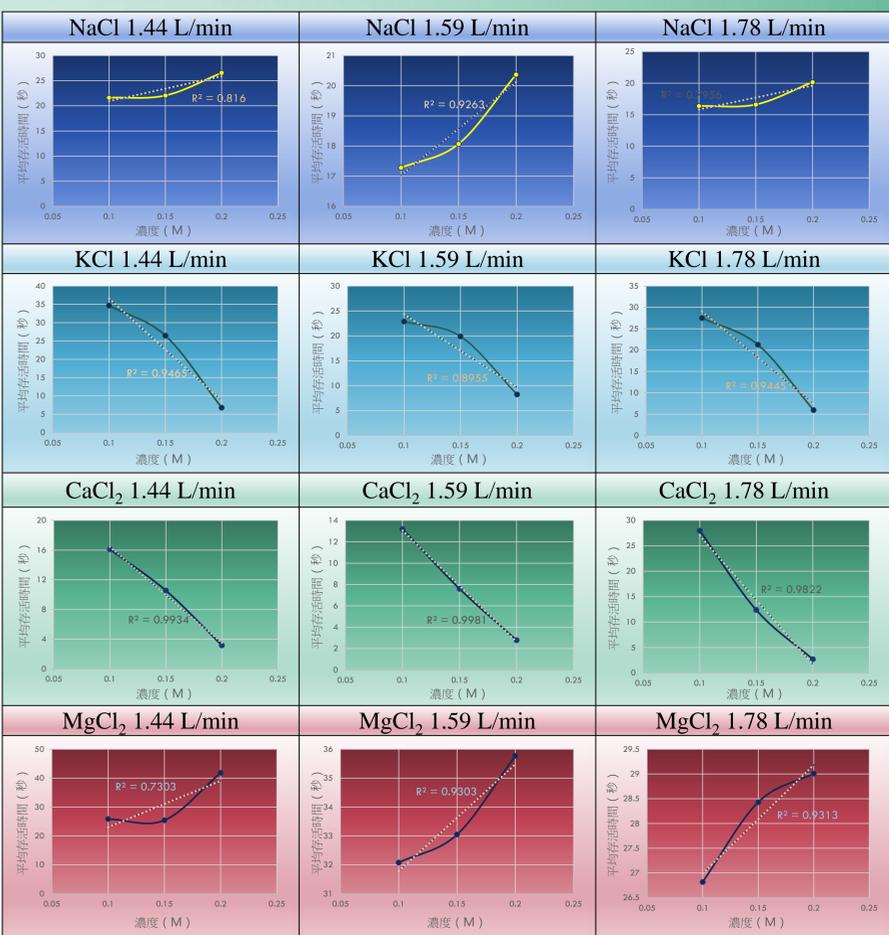
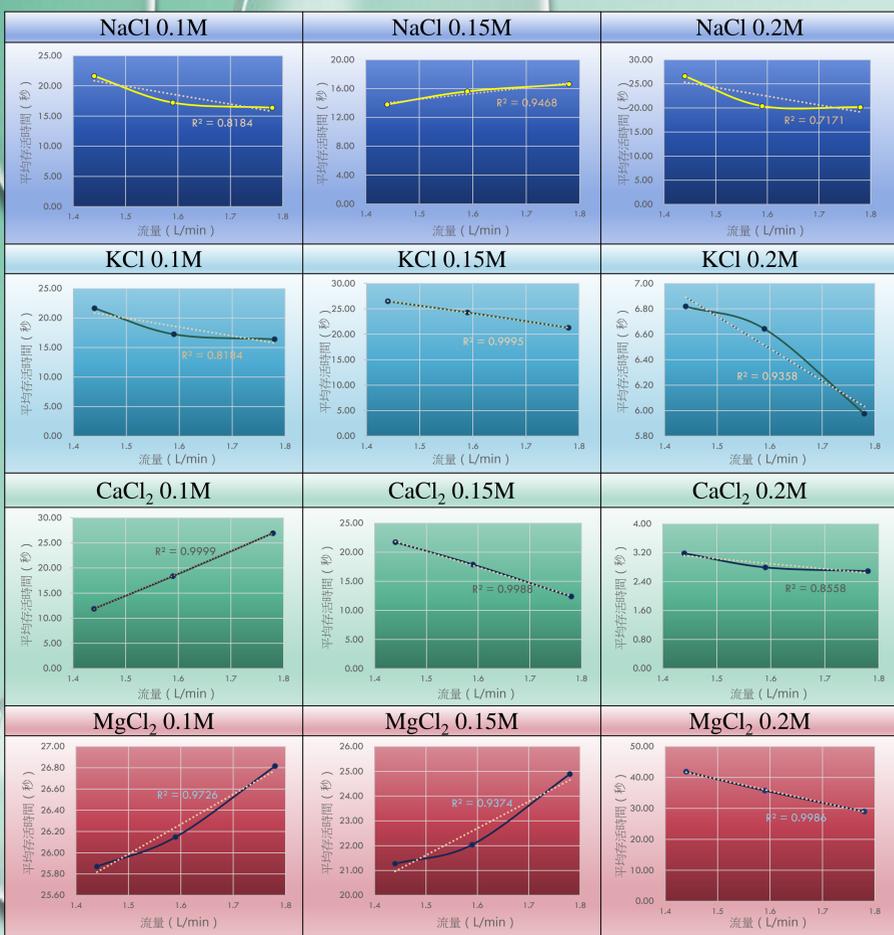
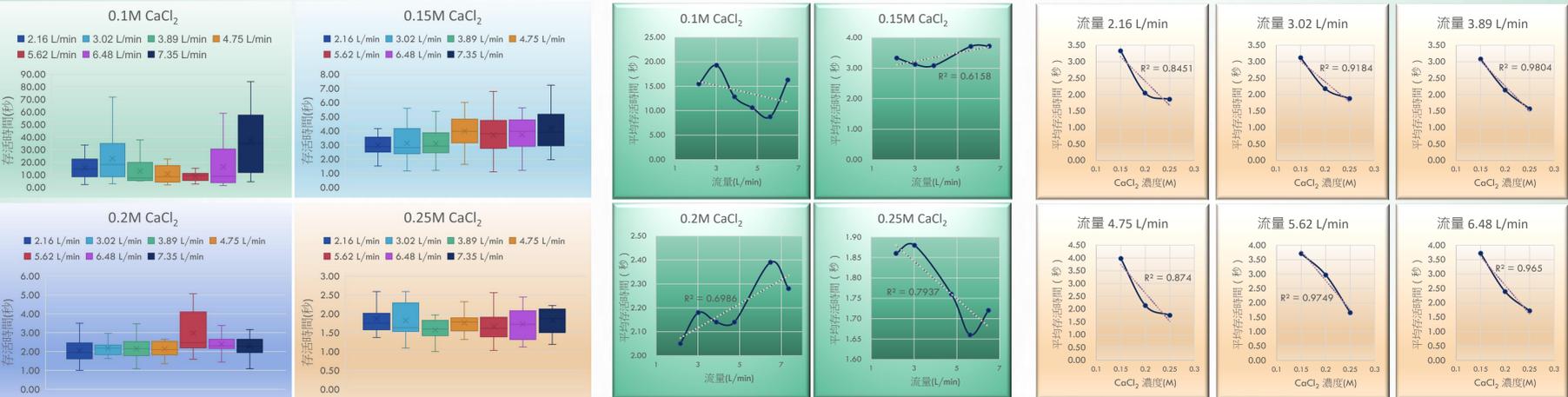


【實驗六之三】不同鹽類、不同濃度、不同流量



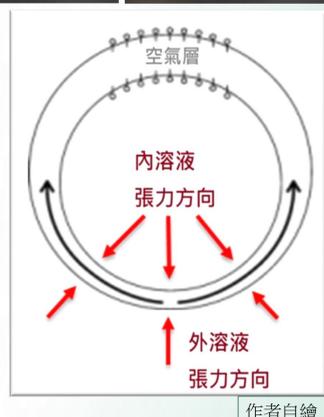
各種鹽類在不同濃度下，平均存活時間與流量關係圖

各種鹽類在不同流量下，平均存活時間與濃度關係圖

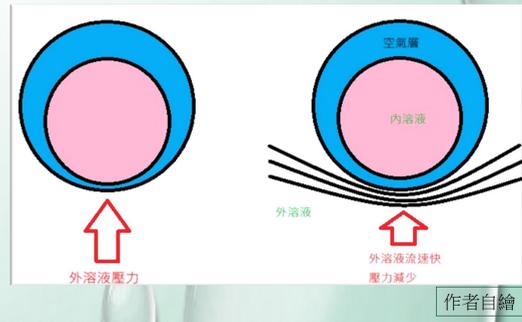
【實驗七】探討不同濃度的CaCl₂溶液反泡泡在接近腔靜脈血流量下對存活時間的影響

討論

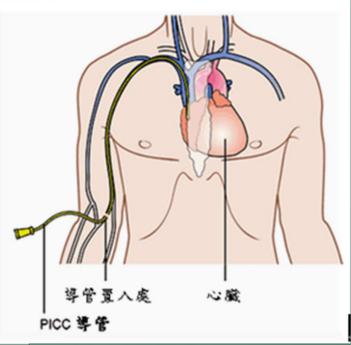
- 一、流量1.59 L/min，0.15M的NaCl溶液中，製造反泡泡有最高的成功率（90%）
- 二、在觀察實驗過程反泡泡在流體中的流動影片（如右上截圖），並未發現反泡泡有翻滾的情形。
- 三、在與基礎溶液相同濃度的條件下，KCl有較長的存活時間及抵達率。我們認為這可能跟正離子價數與離子半徑有關，K⁺價數最小（+1），半徑最大（138 pm）；Mg²⁺價數最大（+2），半徑最小（72 pm）。如右圖，內溶液KCl與外溶液NaCl對空氣層產生的張力差是最直接影響反泡泡的存活時間，且溶液受到擾動，反泡泡就容易破滅，所以我們推測必須要有適當的正離子價數及離子大小才能平衡內外張力差，增加反泡泡的存活時間。
- 四、0.2M的NaCl雖然成功率不是最高，但有最長的存活時間。我們認為：內、外溶液的濃度差，或許造成內、外層張力不同，使得反泡泡在流體中更容易維持穩定。
- 五、在1.59 L/min的流量下，0.2M的MgCl₂有最高的存活時間及抵達率。推測除了濃度差的因素外，正離子價數及大小也會有影響。
- 六、NaCl在高流速時，存活時間及抵達率較高。反泡泡在流體中流動時，較快速的剪切流會延長其存活時間。
- 七、0.15M的KCl整體的平均存活時間及抵達率較高；0.15M的NaCl在低流速時有最佳的一致性。認為在應用時，較為一致的存活時間或許是更好的選擇。
- 八、當內、外溶液皆為NaCl時：內、外溶液濃度相同時，反泡泡存活時間與流速呈正相關；內、外溶液濃度不同時，反泡泡存活時間與流速呈負相關。我們推測此與內、外濃度差所造成的張力差所致。



- 九、在各種流速下，KCl的平均存活時間與濃度呈明顯負相關。認為：在內溶液濃度為0.1M時K⁺離子的半徑最大（138 pm）、電量最小，其與水分子間的靜電力最小，所以與外溶液的張力差較大，存活時間較長。但隨著濃度增加，內、外溶液張力差縮小，存活時間也隨之縮小。
- 十、0.1M的CaCl₂在高流速時有極佳的一致性及存活時間。如右圖，認為：當外溶液流速增加時，根據白努利原理，其液體壓力會減少，作用於反泡泡的空氣層的作用力變小，造成下方空氣層增厚，因而增加反泡泡的存活時間及一致性。



- 十一、在各種流量下，CaCl₂的平均存活時間都與濃度呈顯著負相關。利用此特性，我們可以濃度控制反泡泡的存活時間。
- 十二、如右圖，因為高濃度的氯化鈣會損害靜脈血管，所以在治療高血鉀所導致的心律不整時，一般的醫療方式是從上臂靜脈內架設靜脈導管至腔靜脈，然後注射高濃度的氯化鈣溶液，使之直接抵達心臟以拮抗鉀離子。但在情況緊急或過於肥胖的心律不整病患並不適合架設靜脈導管，因此，以CaCl₂溶液製作的反泡泡或許可以取代靜脈導管來快速治療高血鉀性心律不整。



未來展望

本實驗受限於反泡泡的顆粒大小（0.7mL），無法真實描述反泡泡在靜脈中的流動情形，希望能獲得更多資源，來探討對反泡泡在醫療用途的可行性。

參考文獻

- 一、反泡泡(2024年2月19日)。維基百科。檢自：<https://reurl.cc/2L8Ze6>
- 二、探討速率及添加鹽類對Antibubble的影響。中華民國第63屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 三、重症醫學高血鉀的緊急治療。檢自：重症醫學 高血鉀的緊急治療 (Acute Management of Hyperkalemia) - NEJS
- 四、Rabia Zia et.al.(2022). Advances in antibubble formation and potential applications.
- 五、S. Dorbolo et.al.(2010) Antibubble lifetime: Influence of the bulk viscosity and of the surface modulus of the mixture.
- 六、P. Geon Kim, Jerusha Vogel.(2006) Antibubbles: Factors that affect their stability.
- 七、New Journal of Physics(2003) Fluid instabilities in the birth and death of antibubbles.
- 八、D. N.Sob'yanin, "Theory of the antibubble collapse," *Phys. Rev. Lett.* 114(10), 104501 (2015).
- 九、E.Stride and C. Coussios, "Nucleation, mapping and control of cavitation for drug delivery," *Nat. Rev. Phys.* 1, 495–509 (2019).

(引用來源：末期病人是否適合使用「周邊置入中心靜脈導管 (PICC)」？高雄榮民總醫院醫務共享決策平台 (vgths.gov.tw))