

# 以真空結冰達到海水之淡化

## Desalination of Seawater by Vacuum Freezing Process

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-045

執行期限：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

主持人：周賢福 國立台灣大學機械工程學系

### 一、中文摘要

以真空結冰淡化海水技術，是利用海水在真空中閃化蒸發帶走潛熱的特性，使經由傾斜面流下之鹽水的上表層蒸發而使下層液體結出乾淨冰，達到淡化目的。真空系統閃化結冰實驗結果，發現在具有最佳進料鹽水預冷溫度值時，針對固定進料流入溫度，存在有一最佳鹽水溶液進料流量，可得最佳鹽水淡化效果。本研究並進一步探討且找出鹽水在流動表面最佳流動時間與最佳 DOP 值之間的關連性。

關鍵詞：真空閃化結冰、海水淡化

### Abstract

Vacuum-flash freezing technique is used to desalinate the sea water. When upper liquid layer film of the falling down seawater solution evaporates in vacuum, it takes away a great amount of thermal energy of the remaining solution and thus freeze the remaining lower liquid layer of the brine. The technique has the features of fast freezing and energy-saving.

The relationship between the precooling temperature and the seawater flow rate has been found. There exists a corresponding optimal flow rate when precooling degree is optimal for desalination. Desalination degree increases as the inclined angle of the flowing channel increases. Flow rate of the brine also has effects on the DOP of freezing process. The results obtained for the optimal flowing-time and the DOP provides useful data for future operations in industry.

**Keywords:** vacuum-flash freezing,  
desalination.

### 二、計畫緣由與目的

目前海水淡化主要採用蒸餾法及逆滲透法。蒸餾法純化效果雖佳，但能源消耗

量甚大，逆滲透膜法則因 RO 膜價格偏高，運作方式需要龐大而昂貴的處理系統，因此更經濟的海水淡化方法有待開發。結冰純化法僅需蒸餾法耗費能量的 1/7，若能尋出結冰迅速且使用低溫能源的操作，該技術必能取代現有方法。

本研究擬探討之真空閃化結冰技術，乃是利用液體在真空中閃化蒸發會帶走大量潛熱的特性，使表層溶液蒸發而造成下層溶液結冰。由於熱量傳遞不需透過冰層，故傳熱阻抗小，傳熱速度大幅提升，可因此解決傳統冷凍法純化技術之障礙。

至於廉價冷能的獲得則可以採用鄭建炎(1993) 設計研發的「立即熱質提升吸收式」(Immediate Heat Upgrading Absorption Chiller System, IHUA) 冰水系統(圖 1)。「熱質提升」是將低溫處的熱排放至高溫處，如此可達到制冷的效果。傳統的吸收式冷水機是利用冷水迴路和被冷物作熱交換，以達冷卻效果，屬間接式熱質提升。IHUA 將冷水迴路拿掉，蒸發側直接和被冷物作熱交換，吸收側直接將熱傳放給冷卻水，所以 IHUA 的熱質提升是立即式的。目前該系統的操作關鍵在於蒸發/吸收操作的效率不佳。

傳統蒸發/吸收單元之蒸發/吸收操作，水及吸收液是藉由高流量使傳熱水平圓管表面潤濕。即使如此，常因噴頭噴灑不均勻或液膜流動不連續，在表面張力與黏滯力作用下，水平圓管表面沒有完全被潤濕，熱傳與質傳因潤濕效果不佳而不盡理想。此外液膜太厚也影響熱質傳效果。

高流量將使吸收液噴灑過程的濃度變化小，且需大量地回流噴灑，因此造成了幾個問題：一是液體的回流需要幫浦的輸送，增加了裝置及操作費用的支出；二是

吸收液回流後，造成吸收液的進口濃度降低，減少了熱、質傳的驅動力，因此使得蒸發/吸收操作的效率不佳；三是由於液體的用量多，因此需要耗用較多的水資源與吸收液之再生資源；四是必須有較大的儲存槽與配管來儲存與輸送液體。

下落液膜會增加傳遞面積及增強熱傳係數，提升了蒸發與吸收過程的熱、質傳遞速率，因此大幅減小蒸發器與吸收器的尺寸及所需的溫差。增強下落液膜之熱、質傳速率的方法是設法在最小潤濕流量下操作，即是使最薄的液膜能完全潤濕分佈在有效熱傳面積上。本研究的後續工作將利用實驗方法來探討垂直雙圓管(蒸發/吸收單元)下落液膜的蒸發與吸收之熱、質傳現象，並由結果來分析吸收器之各項變數在波狀層流吸收過程的熱、質傳影響，希望能求得吸收器熱質傳效應的最佳值。

本研究希望一方面在冷凍技術上，提出突破性的發展方向，另一方面在下落液膜式蒸發/吸收操作上，尋求“低流量且無回流”的可能性，以期對革新的海水淡化處理有所貢獻。

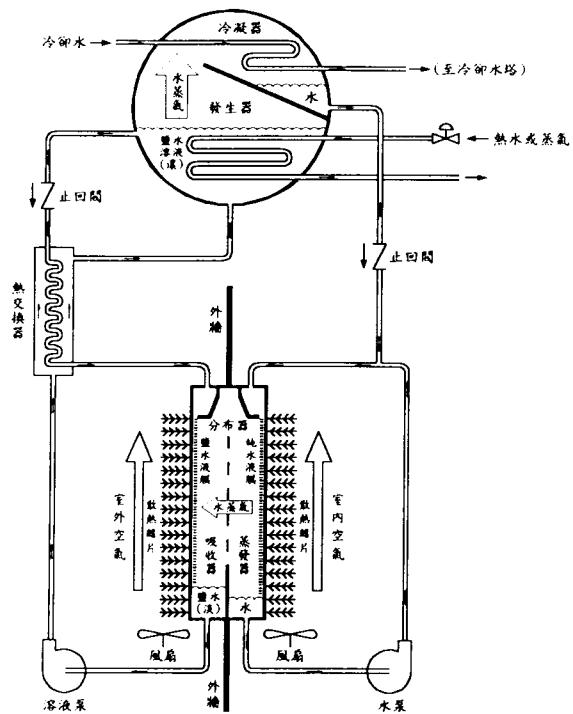


圖 1 立即熱質提升吸收式冷凍系統

### 三、研究方法：實驗系統及設備

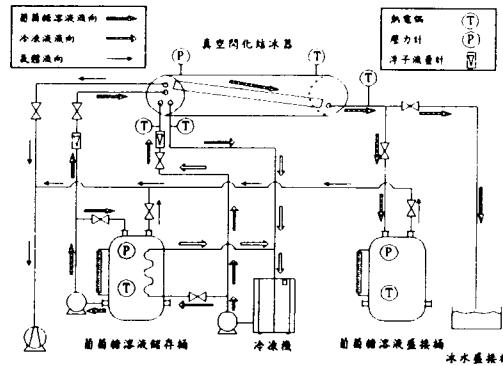


圖 2 真空閃化結冰實驗系統圖

真空閃化結冰之系統如圖 2 所示，包含：

(1) 鹽水迴路：將預冷後之鹽水(以葡萄糖水溶液模擬)自儲存桶經泵浦打出，進入真空閃化結冰器中之傾斜流道流下，經由真空泵浦的抽氣與下方冷凝管的吸附蒸氣效果使得表層溶液蒸發，帶走下層溶液的熱量而使其結冰於流動表面，未凝結的溶液則流出結冰器，進入溶液盛接桶。

(2) 冷凍液迴路：乙二醇冷凍液自恆溫槽輸出，進入結冰器中的下方冷凝管，吸附上方溶液蒸發之蒸氣，使其在冷凝管表面形成固態結晶，溫度升高後之冷凍液則經由管路流回冷凍恆溫槽內。

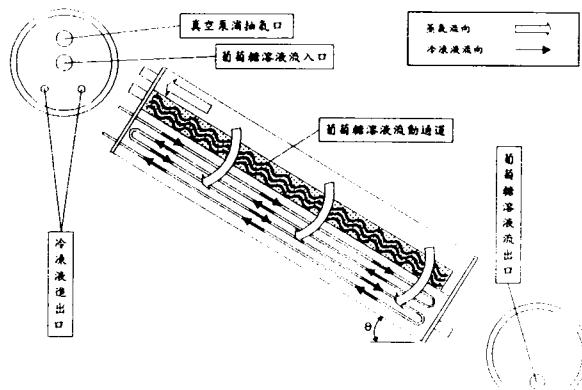


圖 3. 真空閃化結冰器

圖 3 為壓克力真空閃化結冰器主體，長 1100mm、外徑 150mm、厚 10mm，圓柱兩端以直徑 200mm 不鏽鋼法蘭密封，蓋板內挖溝槽並封入橡皮墊圈以對外隔絕，內部設有供鹽水結冰用之流道。法蘭上之真空泵浦抽氣口、葡萄糖溶液流入口、冷凝管進出口與葡萄糖溶液流出口皆

為直徑 19mm 不鏽鋼管。直徑 12.7mm 之銅冷凝管位於下半部。上半部流道頂端溶液流入口處，裝有鋁片與柵欄狀鋁條，以減緩溶液從不鏽鋼管流出的速度而能均勻流下。流道採長 960mm、寬 37mm 鋁條製成，並貼有纖維網帶以增加表面潤濕。

真空閃化結冰器前端法蘭上有 4 個接管插入，分別為真空泵浦抽氣口、葡萄糖溶液流入口、冷凝管進出口。真空閃化結冰器後端法蘭上則只有葡萄糖溶液流出口，為使葡萄糖溶液流出順利，故此接管位於法蘭的最下方。

#### 四. 研究結果與討論

##### (一) 進料溶液流量與回收率之關係探討

此實驗操作的條件，乃是將預冷溫度固定在 3°C，再觀察流量變化對回收率所造成的影响。流量的變化範圍設定在 0.1~1.0 L/min 之間，實驗所得數據經整理之後，流道傾斜角度 30° 時之曲線趨勢如圖 4 所示可分為 A、B、C 三部份：

(1) A 區屬於小流量情況，流量只有 0.1~0.22 L/min，因此當進料溶液流入真空閃化結冰器時，整個流體的溫度很快下降且迅速地閃化結冰，在進料入口附近持續累積而堵塞了整個流道。在此流量範圍的回收率，均可達到 60% 以上。

(2) B 區部份，當操作範圍在 0.22~0.68 L/min 時，進料溶液不會馬上結冰於流道表面，經過一小段的流動後，在真空泵浦與冷凝管迅速的吸熱作用下，閃化結冰會持續發生，而且冰晶也會沿著流道均勻分佈，能充分使用到流道提供結冰的空間。

(3) C 區的部份流量範圍達到 0.68~1.0 L/min，由於進料溶液流量增大，整個溶液的降溫過程需要較長的流動距離才能達結晶所需溫度，最後僅在流道末端有結冰產生，因而回收率相當低，約為 10%。

##### (二) 進料溶液流量與純化度之關係探討

純化效果與流量的關係，以流道傾斜角 30° 為例，如圖 5 所示：

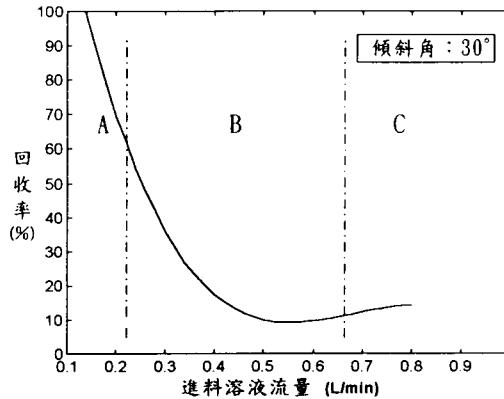


圖 4. 回收率曲線趨勢圖

(1) A 範圍表示低流量時所得冰水之純化度大約在 1 至 1.5 之間，即純化效果非常不理想，其原因是在低流量下，大部分進入真空閃化結冰器的葡萄糖溶液均形成冰晶，導致溶液中的雜質，不能藉由未結冰溶液排出，故純化效果極不理想。

(2) 當流量稍增達到 B 區範圍時，獲得的純化效果較為良好，因為在適當的流量下，僅部份溶液產生閃化結冰作用，故其餘尚未形成冰晶的溶液，可將溶液中的雜質由冰層中排出真空閃化結冰器，因而達到較高的純化度。

(3) 當流量達 0.6~1.0 之間的 C 區時，結冰僅僅分佈在流道末端，此時冰水純化度大致在 1~1.8 變動，其純化效果不佳是因為流量較大的進料溶液，會產生較厚液膜，進而導致冰層中產生較大空隙將雜質包於其中，使得純化效果不甚理想。

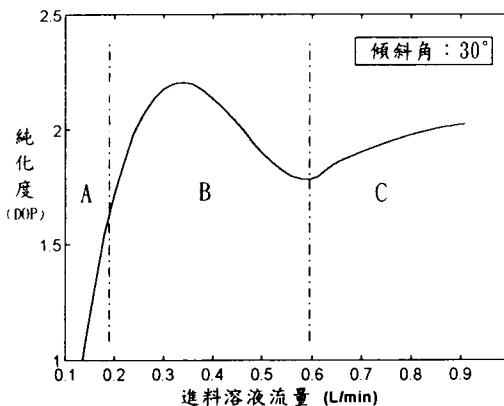


圖 5. 純化度曲線趨勢圖

### (三) 流道傾斜角度的探討

針對傾斜角度的探討方面，由研究結果可知：傾斜角度愈大時，所形成之液膜較薄，而結冰層也較均勻，故能將雜質排出至剩餘溶液進而流入儲存桶，而不會積聚於冰晶之間隙中，影響到純化效果。圖12顯示傾斜角度對 DOP 的影響，就 0.3 L/min 的流量而言，由曲線方程式可推論流道表面在傾斜角為 10°、30°、45° 情形下，所獲得純化度分別為 1.8、2.2、2.9，顯示流動面傾斜角愈大，越有利於純化。

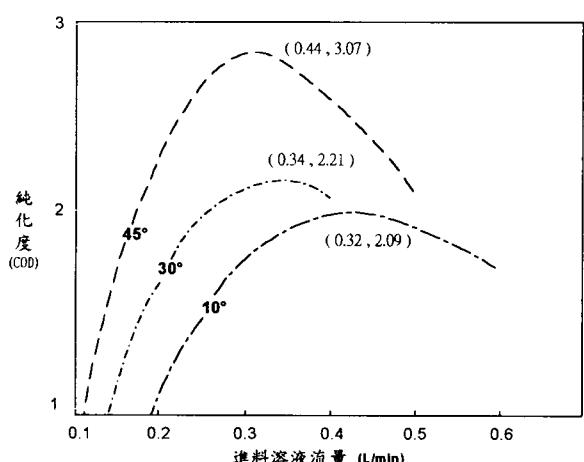


圖 6. 不同傾斜角度下，純化度與流量關係圖

### 五. 結論

本研究特別值得注意的結果是，隨著流動平面傾斜角度的增大，結冰後所得的回收率有下降的趨勢，推論其原因乃是因為較高的傾斜角度情況下，真空泵浦與冷凝管可以對流體進行吸熱作用的時間也減少了，在蒸發排熱的作用時間不足之情況下，也就導致進料溶液結冰量的減少。

傾斜程度除了對液膜的影響外，還代表流體停留在真空閃化結冰器內的時間長短，而改變流體停留在結冰器時間的最直接方法，就是加長或減短流道的長度。因此研究屬於學術研究故設備規模受限，僅以更改流道表面傾斜角度的方式來改變鹽水接受真空閃化結冰處理的時間，在工業運用設備大小不受限時，將可同時改變傾斜角度及流道表面長度，來控制鹽水停留時間，而進一步控制回收率的多寡。

### 六. 參考文獻

- [1] Brauner, N. and Maron, D. M., 1982, "Characteristics of Inclined Thin Films, Waviness and the Associated Mass Transfer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 99-110.
- [2] Grossman, G., 1983, "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Film Absorption under Laminar Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 3, pp. 357-371.
- [3] Matsuda, A., Choi, K.H., Hada, K. and Kawamura, T., 1994, "Effect of Pressure and Concentration on Performance of a Vertical Falling-Film Type of Absorber and Generator Using Lithium Bromide Aqueous Solution," *Int. J. Refrig.*, Vol. 17, pp. 538-542.
- [4] Morioka, I., Kiyota, M. and Nakao, R., 1993, "Absorption of Water Vapor into a Film of Aqueous Solution of LiBr Falling along a Vertical Pipe," *JSME International Journal, Series B*, Vol. 36, No. 2, pp. 351-356.
- [5] William, A. M. and Horacio P. B., 1994, "Vertical-Tube Aqueous LiBr Falling Film Absorption Using Advanced Surfaces," *Proc. Absorption Heat Pump Conf.*, New Orleans, pp. 185-202.
- [6] Yang, R. and Jou, D., 1995, "Heat and Mass Transfer of Absorption Process for the Falling Film Flow inside a Porous Medium," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1121-1126.
- [7] Yang, R. and Wood, B. D., 1993, "Experimental Study of Heat and Mass Transfer in Laminar Wavy Film Absorption with the Presence of Non-Absorbable Gases," *Chem. Eng. Communication*, Vol. 125, pp. 77-90.
- [8] Yüksel, M. L. and Schlünder, E. U., 1987, "Heat and Mass Transfer in Non-isothermal Absorption of Gases in Falling Liquid Films, Part I: Experimental Determination of Heat and Mass Transfer Coefficients," *Chem. Eng. Process.*, Vol. 22, pp. 193-202.
- [9] 鄭建炎, 1993, “立即熱質提升吸收式空調系統之研究”經濟部科技研究發展專案計畫報告。