

# 快速真空製冰程序之實驗探討

## Experimental Study on the Fast Vacuum Freezing Ice Production Process

計畫編號：NSC 90-2212-E-002-220

執行期限：90年8月1日至91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

本研究提出一種結合固-液-汽三相傳輸與潛熱互用之創新型快速真空製冰法，其特色是在低於三相點操作狀況下，使結冰過程中具有自發性溫度驅動力。先以不可逆熱力學為根基，建立此製冰法的理論模式，描述此法於真空狀態下冰層成長現象與其熱質傳現象，同時推導出結冰速度方程式與熱質傳方程式。理論分析結果發現此法的結冰速度可能比傳統常壓製冰法高出一數量級，乃進一步以實驗方式探討確定之。實驗過程量測不同操作條件下之結冰速度與熱傳係數，以驗證真空結冰理論之正確性，並因而找出最佳操作條件。  
關鍵詞：真空製冰，結冰速度，潛熱互用

### Abstract

A new vacuum freezing ice production (VFIP) process based on solid-liquid-vapor multiple phase transformation and the latent-heat coupling mechanism is introduced in the study. Coupled heat and mass flux equations of irreversible thermodynamics are applied to depict ice growing phenomenon under vacuum condition for predicting the ice growth rate. Ice growth rates of the model determined preliminarily are found to be at least one order of magnitude higher than the ones of the conventional freezing process which produces ice under the atmospheric pressure. With the feature of spontaneous temperature gradient developed inside the ice layer of VFIP, a really fast and energy-saving ice-block production method is found to overcome the energy consumptive and slow ice growth rate of the conventional methods.

**Keywords:** vacuum freezing, ice-growth rate, latent-heat coupling.

### 二、計畫緣由與目的

有關真空製冰的研究相當少，Dickey (1996)曾發表過在低於三相點的操作環境下，以真空閃化模式將海水結成小冰晶，再經洗冰過程將冰晶與海水分離達成海水淡化。但因其研究中所產生的是懸浮的冰粒，而非具體的冰塊，故於實際應用上有著很大的限制。Chen (1995)稍早也曾提出類似的理念，但並沒有實際驗證的結果。

基於快速結冰及節約能量的出發點，本研究提出了一種結合固-液-汽三相傳輸與潛熱互用之創新快速真空製冰法 (Vacuum Freezing Ice Production)，利用於低於三相點操作狀況下，使結冰過程中具有自發性溫度驅動力而達到快速與節能之目標，簡稱此法為 VFIP 法。

從水的相圖(Fig.1)可清楚的發現 VFIP 法獨特與奇妙的特點，當壓力稍低於水之三相點壓力(4.58 mmHg)時，即亞三相點，此時水結冰的溫度高於冰昇華成蒸氣的溫度，故在結冰介面與昇華介面間便產生一溫度梯度，此一特點正好提供了在結冰過程中排熱所需的熱傳溫差。亦即水結成冰所放出的熱，將可以由另一介面的冰昇華成蒸氣所排除。故此 VFIP 法可經由操作壓力低於三相點壓力而引發出一自發性的溫度驅動力，而不需藉由外界提供熱傳溫差以進行熱量傳遞的過程，故已可預見 VFIP 法將具有快速結冰與節省能源的特質。

本研究針對真空製冰法先執行一些理論分析工作，建立並探討過此 VFIP 過程之理論模式。此 VFIP 理論模式是基於不可逆熱力學(Kuiken,1994)所建立，從理論模式中可預測其結冰速率與熱傳係數。分析結果發現 VFIP 法的結冰速度遠超過傳統常壓下之結冰速度。在 Ratkje(1995)與

Flesland(1995)的研究中，當溫度驅動力為 0.2 到 1°C 時，常壓結冰速度為  $3 \times 10^{-7}$  m/s 到  $1.15 \times 10^{-6}$  m/s (Fig.4)。而在相同的溫度驅動力時，VFIP 法理論推測的結冰速度可能高達  $1.15 \times 10^{-5}$  m/s 到  $7 \times 10^{-5}$  m/s (Fig.3)，高過一個數量級的大小。故理論分析已預見 VFIP 法將具有極為快速的結冰速度，對於取代目前傳統製冰法有著極大的可行性。

在發現真空製冰法具有如此可觀的結冰速度，本研究乃進一步提出對應的實驗來驗證 VFIP 理論預測的結冰速度，量測在亞三相點下之結冰速度與熱質傳係數，建立完整的實驗資料，同時於研究過程中找尋最佳化操作條件，包括真空製冰槽、進料水入口分佈器及蒸氣冷凝盤管等的研製，而建立邁向工業化的設計法則，期能解決目前傳統製冰法緩慢且耗能的缺點。

### 三、研究方法：實驗系統及設備

快速真空結冰實驗系統包含(附圖 1):

- (1) 真空結冰容器:可抽真空並足夠置放結冰水槽及冷卻盤管之不銹鋼容器。
- (2) 結冰水槽(附圖 2):為一水平方槽供水流入並於其內凝結累積成厚冰，其下置放冷卻盤管，通以乙二醇冷媒。
- (3) 儲存水槽:將預冷後之進料水儲存於內以閥門控制其流入結冰水槽之流量。
- (4) 冷卻系統及真空抽氣: 乙二醇冷凍液系統提供蒸氣冷卻盤管所需冷卻能力，真空抽氣系統則用來保持整體系統之真空度。

進料水分佈器讓進料水能形成均勻分佈之水膜靜止於真空結冰槽中，而此進料水膜厚度是否均勻將影響真空結冰品質，同時蒸氣冷凝盤管之接觸表面積必須夠大，方能很迅速的帶走因結冰放熱而使冰層昇華產生之水蒸氣。實驗操作事先俟第一層進料水膜完全結冰後，再注入第二層進料水膜結成第二層冰，如此層層相疊將形成所需厚度之大冰塊，便是所謂的多層薄膜結冰操作法。

### 四. 研究結果與討論

薄膜式真空結冰(VFIP)法的理念為在操作壓力低於水三相點壓力(4.58torr)時不

經過熱交換面，由一靜止水膜先經迅速的閃化冷卻後在其上表面形成一層極薄的冰膜，隨後液態水膜經由耦合的水結冰及冰昇華過程，使得液態靜止水膜自剛形成的極薄冰膜的下表面，逐漸往水膜底部結冰而形成第一冰層。此過程藉由在第一冰層表面注入第二層水膜繼續進行第二冰層的生成，而以此操作程序重複堆疊冰層至所需冰塊的厚度，這種操作過程就好比將紙一張一張堆積起來而成一厚紙堆。

由於在水的液-汽-固三相點時，水的液、汽及固三相化學位勢能是相等的，而於本研究所提的結冰操作過程中，操作壓力在稍低於水三相點壓力的介穩態區域，在此區域中位勢能  $\nabla \mu_{H_2O}$  對於熱質傳輸送現象的影響遠小於溫度梯度  $dT/dx$  所造成的影響，因此於 VFIP 理論模式預測及實驗操作時均可忽略化學位勢能梯度。VFIP 唯一的結冰驅動力是因操作壓力低於水三相點壓力而產生自發性溫度梯度  $dT/dx$ ，此值需為負，方能使 VFIP 過程能進行。

依當量冰層厚度理念所建立之平均冰層成長速率理論值如下式所示，其中忽略了化學位勢能梯度

$$v_{ice,ave} = \frac{l_{22}}{C_l} \left( \frac{\Delta H_{sv}}{T} \frac{\Delta T}{\delta_{eq}} \right) \left( \frac{\Delta H_{sv}}{\Delta H_{ls}} \right) \left[ 1 + \frac{1}{C_l(V_s - V_l)} \right] - \frac{l_{22} \left( \frac{\Delta H_{sv}}{T} \cdot \frac{\Delta T}{\delta_{eq}} \right)}{C_s^2(V_v - V_s)} \quad (1)$$

使用與實驗過程中之相同條件下，依式(1)所得 VFIP 理論平均冰層成長速率值亦表示於 Fig.3 中，而理論值與實驗值(Fig.5)之差異可歸因於界面上的表面動力(surface kinetics)阻力以及在式(1)中忽略了化學位勢能梯度及冰昇華介面衰減速率所致，同時在 VFIP 理論推導過程中預估的界面現象係數，以及預設低壓水蒸氣逆昇華過程為無阻力過程，均會產生理論值與實驗值之偏差，不過偏差值並不明顯。

從 Fig.3 及 4 可見即使以 VFIP 操作薄膜結冰時，結冰速率受冰層厚度的影響而衰減仍是如此嚴重，然而目前傳統常壓製

冰法的結冰過程中，其熱傳遞過程總是經過一遠厚於 VFIP 法冰層厚度  $\delta$  的冰壁進行傳熱，若將常壓結冰法與 VFIP 法的冰層成長速率進行比較，將不難發現常壓結冰法的冰層成長速率有多緩慢。Fig.4 為 Flesland (1995) 與 Ratkje (1995) 之常壓結冰研究結果，可見在溫差驅動力為  $0.2^{\circ}\text{C} \sim 1^{\circ}\text{C}$  時，常壓結冰的冰層成長速率為  $3 \times 10^{-7} \text{m/s} \sim 1.15 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 。本研究所提之 VFIP 法 (Fig. 3 and 5) 在相同溫差驅動力下所得之平均冰層結冰速率為  $10^{-6} \text{m/s} \sim 3 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，遠高於常壓結冰速率將近 30 倍，此乃因 VFIP 法的壓力差導致的自發性溫度梯度與結合潛熱互用所致。因此對於產生高速率的結冰技術而言，薄膜結冰方式絕對是必要的。

## 五. 參考文獻

1. Cheng, C. Y., 1995, "High performance in-situ freezing-melting process", *United States Patent*, No. 5388414.
2. Dickey, L. C., 1996, "Evaporation of water from agitated freezing slurries at low pressure", *Desalination*, V. 104, pp. 155-163.
3. Flesland, O., 1995, "Freeze concentration by layer crystallization", *Drying Technology*, Vol. 13, pp. 1713-1739.
4. Forland, K. S., Forland, T., and Ratkje, S. K., 1988, *Irreversible Thermodynamics Theory and Applications*, John Wiley, N.Y.
5. Fukusako, S., Yamada, M., 1993, "Recent advances in research on water-freezing and ice-melting problems", *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 99-105.
6. Huige, N. J. J., 1972, "Nucleation and growth of ice crystals from water and sugar solutions in continuous stirred tank crystallizers", Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
7. Kuiken, G. D. C., 1994, *Thermodynamics of Irreversible Process*, John Wiley, N.Y.
8. Ratkje, S. K., Flesland, O., 1995, "Modeling the freeze concentration process by irreversible thermodynamics", *J. Food Eng.*, Vol. 25, pp. 553-567.
9. Tester, J. W., Modell, M., 1997, *Thermodynamics and its applications*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, N.J.

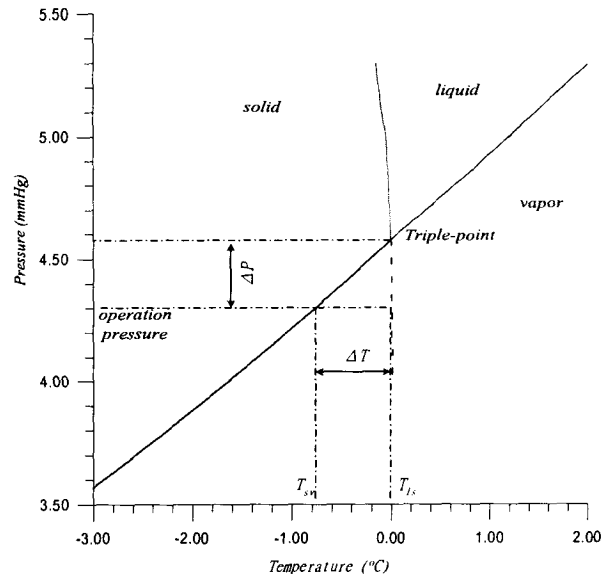


Fig. 1 Phase diagram of pure water near the triple point

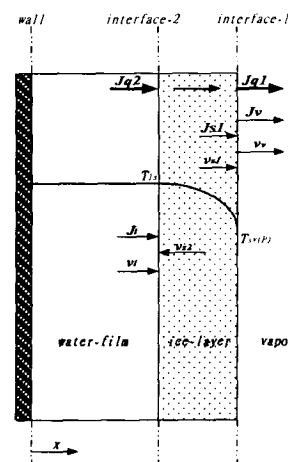


Fig. 2 Theoretical VFIP model

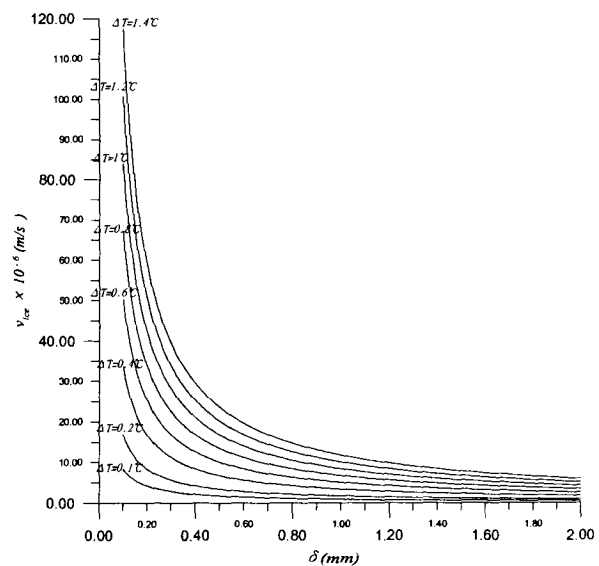


Fig. 3 Ice growth rate of the VFIP model with different ice-layer thickness and temperature difference

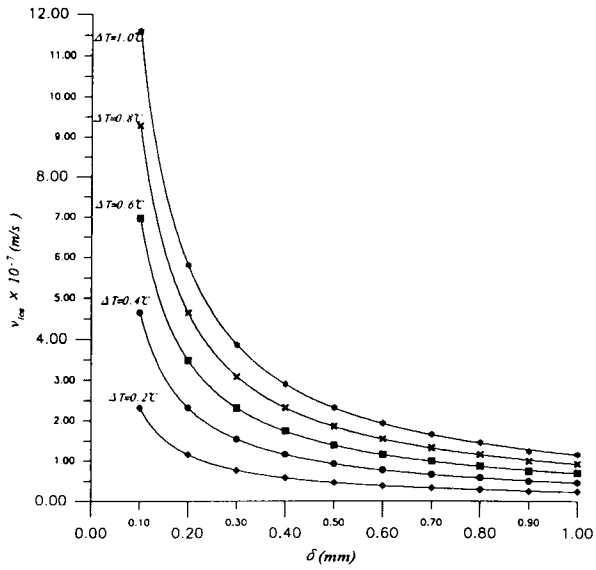
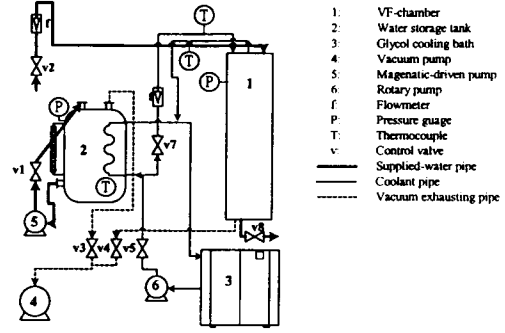
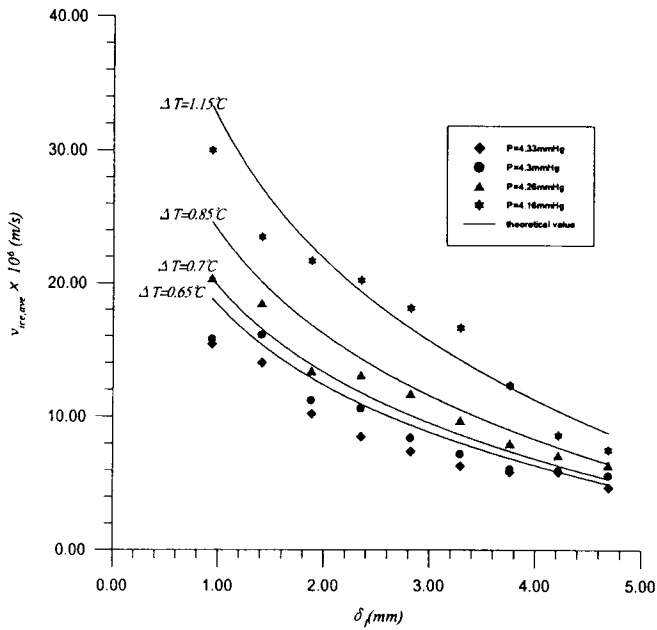


Fig. 4 Ice growth rate of the conventional ice-making model with different ice-layer thickness and temperature difference



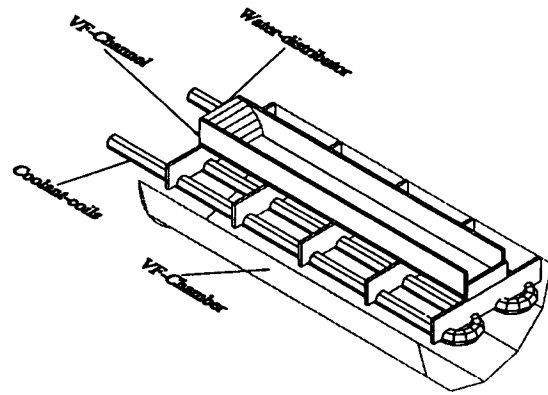
VFIP實驗系統示意圖

附圖 1 VFIP 實驗系統圖



相對於不同靜止水膜厚度下平均冰層成長速率之實驗值與由方程式(1)預測之理論值

Fig. 5 Experimental ice growth rate of VFIP



附圖 2 真空結冰槽結構圖