

ダイナミック氷蓄熱システムの開発

Development of Dynamic Ice Storage System

技術本部 渡部 正治^{*1} 川田 章廣^{*2}
株 根 浩 男^{*3}
高砂製作所 小川 康正^{*4} 中沢 邦泰^{*4}

水の過冷却現象を利用したダイナミック氷蓄熱システムは、従来のスタティック型氷蓄熱システムと比較して、製氷コイルが不要となり、冷凍機の成績係数が高くなる等の特徴を有する。本研究では過冷却現象に対する伝熱管材料と流動による安定性を理論的に検討した。また、要素試験により過冷却水生成に対する Re 数の影響を確認するとともに、30 Rt 規模のベンチプラント装置により製氷及び解氷運転時の特性把握を行った。

The Dynamic Ice Storage System which makes use of supercooling characteristics of water is superior to the Static Ice Storage System in that it has no coils in freezing water, thereby enhancing the coefficient of performance of the refrigerator. We have theoretically examined the physical characteristics of heat transfer tubes and the stability of supercooling water flowing inside the tubes, and then experimentally clarified the effect of the Reynolds number on producing supercooling water using a small-scale test device. Further, we clarified the characteristics of operability in the water freezing and thawing modes by using a large-scale ice production test device with a capacity of 30 Rt.

1. はじめに

電力需要は年々増加の一途をたどっているが、同時に昼間と夜間との電力負荷の格差も大きくなってきており、電力負荷平準化に対する要求が高まってきている。これらの原因としては昼間の冷房需要によるものが大きい。近年では夏期のみならず OA 機器の増加に伴い、年間を通じ冷房負荷が増加する傾向にある。

そこで、負荷平準化の一つの方法として夜間電力利用により冷熱を貯蔵し、昼間、これを取出して冷房用の冷水を作る氷蓄熱システムが注目され、多方面での研究開発の結果、各種のシステム⁽¹⁾が開発され、現在加速度的に普及しつつある。

当社においても、既に蓄熱槽内の製氷コイルで製氷を行うスタティック型氷蓄熱システムを実用化しているが、さらに今回、水の過冷却現象を利用したダイナミック氷蓄熱システムを開発し、実機適用第1号として、平成6年7月にオープンした当社伊豆高原クラブに導入した。本ダイナミック氷蓄熱システムは、従来のスタティック型と比較し、高い冷凍機成績係数が期待できること、大容量システムに適していること及び水以外の媒体を必要としないので環境を汚さない等の優れた特徴を有し、さらに1mm程度の微細な氷粒が生成されるため流動性を持ち氷スラリーとしての取扱いが可能であることから今後、幅広い利用が期待されるシステムである。

2. 過冷却水生成原理及び理論的考察

過冷却現象は比較的容易に実現できるものであるが、通常取られる平衡状態と異なり、例えば水の状態から氷を生成させるような初期の相変化過程に生じる熱力学的に準安定な状態である。この過冷却状態は、系内に水と氷とが共存するような平衡な部分があると、過冷却状態を維持できないため不安定であるが、初期に過冷却水から氷が発生するには外乱等が必要であり、これを制御することにより工学的な利用範囲において、連続的な過冷却生成が可能である。

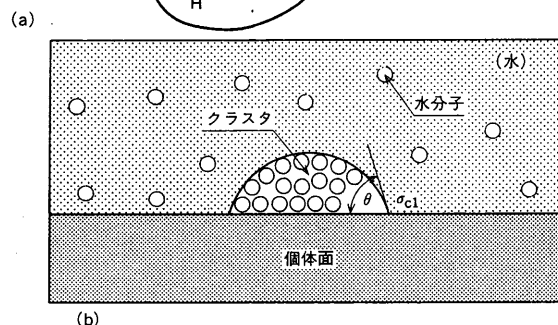
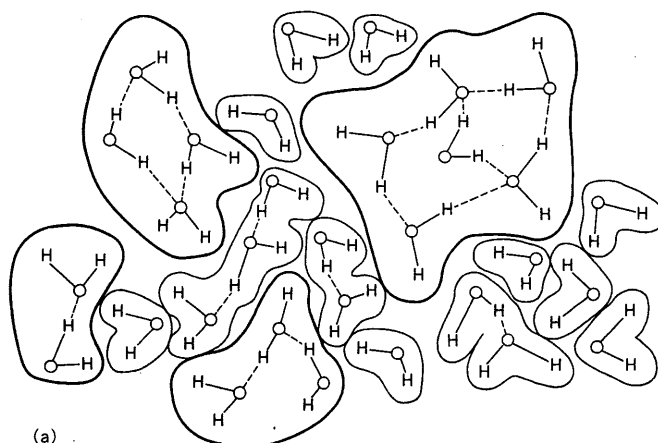


図1 水のクラスタ状態と付着モデル (a) 液体状態の水分子は幾つかの分子が集合した状態(クラスタ)で存在することを示す。(b) 固体表面上でのクラスタの状態をモデル化した図。
Cluster model of water and adhesion model of cluster

2.1 核生成理論

液体中の水分子は熱運動により、図1(a)に示すようにクラスタと呼ばれる大小の水分子集団が生成したり、消滅したりしている。このクラスタの大きさは過冷却度に関係している。氷はこのクラスタがある一定の大きさ以上に成長した場合に発生する。

^{*1}高砂研究所燃焼・伝熱研究室 工博 ^{*3}高砂研究所燃焼・伝熱研究室
^{*2}高砂研究所燃焼・伝熱研究室主査 ^{*4}機械技術部冷熱プラント設計課主務

固体と液体の平衡は両者の自由エネルギーが等しいことであり、凝固温度以下の状態では、液体としての自由エネルギーよりも固体に相変化した場合の自由エネルギーの方が小さく安定となるために系は固体に変化する。これが熱力学的観点からとらえた凝固相変化現象である。しかしながら、クラスタは曲率を持つため、ある大きさ以下では界面の自由エネルギーが過剰となりクラスタが成長せず、水の状態を維持する。これが過冷却状態である。この過冷却状態及び過冷却から固体へ相変化する際の理論的研究については例えば文献⁽²⁾に詳しいが、理論的な見地から伝熱面となる固体面及び流れの影響を定量的に扱ったものはない。

図1(b)に示すように、 i 個の水分子からなるクラスタが固体面に接触角 θ で付着した場合を考えると、クラスタに働く自由エネルギーの過剰量 ΔG_{in} は水と水との自由エネルギーの差 ΔG_v 、クラスタ・水面界での界面張力 σ_{cl} 、付着仕事 W_A から次式で表される。

$$\Delta G_{in} = V_c \Delta G_v + A_{cl} \sigma_{cl} + A_{cs} W_A \quad (1)$$

ここに、 V_c はクラスタ体積、 A_{cl} はクラスタ・水界面の表面積、 A_{cs} はクラスタ・壁面界面の表面積であり、クラスタ形状を半径 r 、接触角 θ の球冠で表すとそれぞれ次式で表される。

$$V_c = \pi r^3 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) / 3 \quad (2)$$

$$A_{cl} = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

$$A_{cs} = \pi r^2 (1 - \cos^2 \theta) \quad (4)$$

また、 ΔG_v 及び W_A はそれぞれ次式で表される。

$$-\Delta G_v = L_m \cdot \Delta T / T_m \quad (5)$$

$$-W_A = \sigma_{cl} (1 + \cos \theta) \quad (6)$$

ここに、 L_m は凝固潜熱、 ΔT は過冷却度($=T_m - T$)、 T_m は凝固温度である。

式(2)～式(6)の関係を式(1)に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta G_{in} &= \pi r^3 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \Delta G_v / 3 + 2\pi r^2 (1 - \cos \theta) \sigma_{cl} \\ &\quad - \pi r^2 (1 - \cos^2 \theta) (1 + \cos \theta) \sigma_{cl} \\ &= \pi r^3 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \Delta G_v / 3 \\ &\quad + \pi r^2 \sigma_{cl} [\cos \theta (1 - \cos^2 \theta) - (\cos \theta - 1)^2] \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)はクラスタ半径 r に対して極大値を持ち、このときのクラスタ半径を r^* とすると、次の諸式で与えられる。

$$\frac{\partial(\Delta G_{in})}{\partial r} = 0$$

$$\begin{aligned} \pi r^2 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \Delta G_v \\ - 2\pi r \sigma_{cl} [\cos \theta (1 - \cos^2 \theta) - (\cos \theta - 1)^2] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$r_{in}^* = \frac{2\sigma_{cl} [\cos \theta (1 - \cos^2 \theta) - (\cos \theta - 1)^2]}{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \Delta G_v} \quad (9)$$

ただし、式(8)の左辺第1項は常に負であるので、 ΔG_{in} が極大値を持つ条件は式(8)左辺第2項の[]内の値が負である必要がある。すなわち、次式が必要条件となる。

$$\begin{aligned} [\cos \theta (1 - \cos^2 \theta) - (\cos \theta - 1)^2] < 0 \\ \therefore \theta > 65.5^\circ \end{aligned} \quad (10)$$

クラスタ半径が r_{in}^* 以下の場合には、クラスタの成長に対する自由エネルギー変化は正となりクラスタは成長せず過冷却状態が維持される。一方、クラスタ半径が r_{in}^* 以上の場合には、クラスタの成長に対する自由エネルギー変化は負となり、クラスタは成長し過冷却水から氷に相変化する。すなわち、 r_{in}^* は過冷却状態が維持できる限界を与える臨界半径である。また、過冷却解除は過冷却度が大きく、接触角が小さいほど、臨界半径 r_{in}^* と臨界半径に対するエネルギーが小さくなり、過冷却解除を起こしやすくなることを示している。

実際の過冷却解除は、このような臨界半径を持つクラスタに1個の水分子が加わることによって進行する。したがって、クラスタの持つ自由エネルギー分布がボルツマン分布に従うとすると、過冷却解除となる核の発生頻度 J は次式で表される。

$$J = f \cdot n \cdot \exp(-\Delta G_{in}^* / kT) \quad (\text{個}/\text{m}^3\text{s}) \quad (11)$$

ここに、 f は単位時間当たりの衝突分子数、 n は過冷却水の分子数密度、 k はボルツマン定数、 ΔG_{in}^* は臨界半径 r_{in}^* における自由エネルギーである。

式(11)は、過冷却水の解除が自由エネルギーが小さく、衝突分子数が多い程、生じやすくなることを示している。

2.2 核生成に及ぼす影響

過冷却状態における式(7)及び式(11)の関係から、ダイナミック氷蓄熱システム過冷却度の安定性に及ぼす影響としては以下が挙げられる。

- (1) 過冷却温度 システム運用のための過冷却水生成温度の変動及び冷却過程における局所的な過冷却部の発生による安定性低下。
- (2) 配管材質 伝熱管材料及び過冷却水配管材料等へのクラスタ付着による安定性低下。
- (3) 配管内流動 配管内での過冷却水流動による衝突分子数の増加による核発生頻度の増加。

実際のシステムではこれらが複合した形で作用するが、ここでは各項目について、実機運用上問題となる過冷却解除が発生する確率、すなわち核発生頻度により評価する。

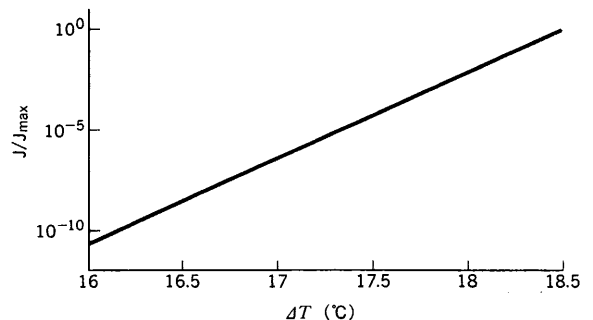


図2 過冷却温度に対する核発生頻度の影響 過冷却温度に対して核発生頻度は大きく変化し、最大過冷却度以下では比較的安定になることを示す。
Effect of nucleation by supercooling

図2に過冷却温度に対する核発生頻度の関係を示す。計算に当たっては水道水における最大過冷却度を 18.5°C ⁽³⁾(純水の場合では 39°C ⁽²⁾)、クラスタの界面張力を $\sigma_{cl}=32.1(\text{mJ}/\text{m}^2)$ ⁽²⁾とし、式(7)、(9)及び式(11)から求めた。なお、図中の ΔT_{max} 及び J_{max} はそれぞれ、水道水の最大過冷却度及び最大過冷却度における核発生頻度である。核発生頻度に対する過冷却度の影響は極めて大きく最大過冷却度以下では急激に核発生頻度は低下している。すなわち、最大過冷却度以下の状態では、過冷却水は比較的安定して維持できることを示している。次に図3(a)は J_{max} を一つの限界と考え、 J_{max} 一定の条件の下に求めた、固体材料とクラスタとの接触角 θ に対する限界過冷却度(J_{max} となる過冷却度)の関係を示す。限界過冷却度に対して、接触角の影響は比較的大きく固体材料により限界過冷却度が変化すると考えられる。なお、図中には表面物理の見地から筆者らが別途解析的に求めた金属と高分子材料との接触角の例を示している。また、図3(b)には、図3(a)と同様に J_{max} 一定条件の下に求めた、配管内 Re 数に対

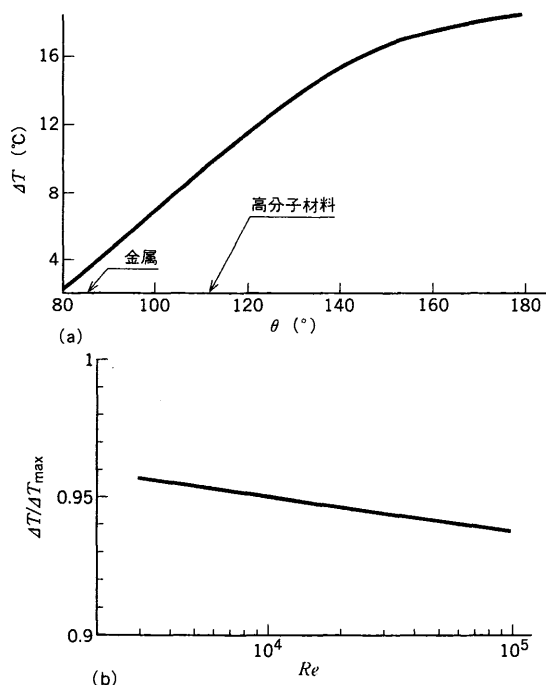


図3 限界過冷却度に対する接触角と配管内 Re 数の影響 (a) 接触角が低下することによって限界過冷却度が低下することを示す。(b) Re 数の増加により限界過冷却度は低下するが、その影響は比較的小さいことを示す。
Contact angle or Re -number vs. limit of supercooling

する過冷却度の関係を示す。限界過冷却度に対して Re 数の影響は小さく、通常の直管内での流れでは過冷却度に及ぼす影響は小さいと考えられる。なお、配管内 Re 数は、式(11)中の衝突分子数と関係付け、以下の諸式からその影響を評価した。

静止液体中の衝突分子数は分子の活性化自由エネルギーを ΔG_0 とすると次式で表される。

$$f = \frac{kT}{h} \exp(-\Delta G_0/kT) \quad (12)$$

ここに、 h はプランク定数である。

また、 ρ を密度、 m を分子の質量とすると ΔG_0 は液体粘度 μ と次の関係がある。

$$\mu = \frac{\rho h}{m} \exp(-\Delta G_0/kT) \quad (13)$$

ここで、乱流状態における配管内せん断力 τ を次式で表す。

$$\tau = \rho(\nu + \epsilon) \frac{du}{dy} \quad (14)$$

$$\epsilon/\nu = 0.0069 Re - 1 \quad (15)$$

ここで、 ν は動粘度、 ϵ は渦動粘度係数である。乱流状態では、この ϵ によるせん断力の増加分、せん断方向について活性化自由エネルギーが小さくなると考えられる。したがって、活性化自由エネルギーの減少量 ΔG_a は式(13)、(14)の関係から次式で表される。

$$\rho\epsilon = \frac{\rho h}{m} \exp(-\Delta G_a/kT) \quad (16)$$

よって、乱流状態における衝突分子数 f は次式となる。

$$f = \frac{kT}{h} \exp\{-(\Delta G_0 - \Delta G_a)/kT\} \quad (17)$$

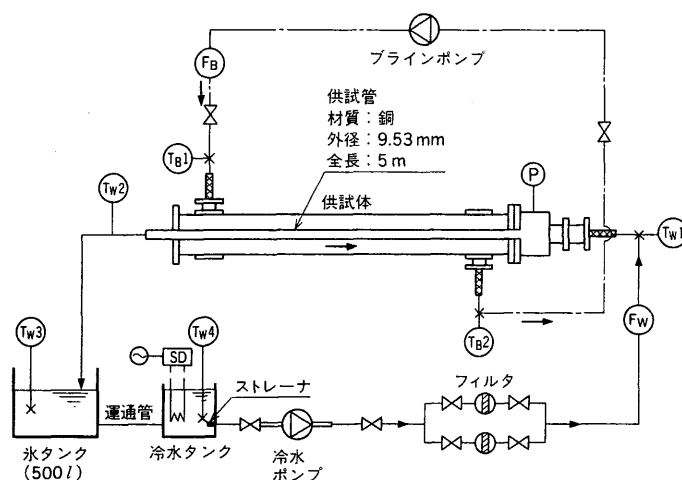


図4 単管要素試験装置系統図 単管要素試験装置の構成を示す。
Flow diagram of test apparatus

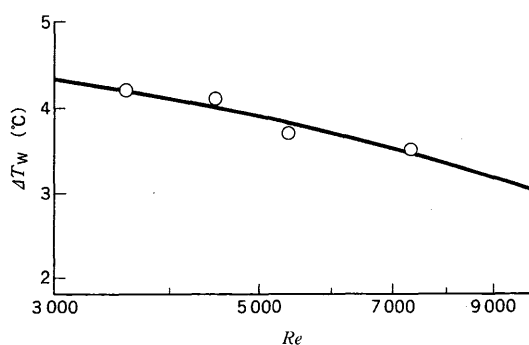


図5 要素試験結果 要素試験で得られた配管 Re 数と限界過冷却度の関係を示す。図3の解析結果と定性的に一致している。
Result of fundamental test

3. 要素試験

過冷却水の安定性に及ぼす影響としては、先に挙げた過冷却度、配管材質及び流動が考えられるが、実機へ反映させるためには過冷却水生成条件の確認及びシステムとしての運転特性を把握する必要がある。したがってここでは、単管要素試験による流動の影響評価とベンチプラント試験による製氷、解氷状況を紹介する。

3.1 単管要素試験

図4に試験装置の系統図と供試伝熱管の仕様を示す。冷水には、水道水をそのまま用いた。供試部は二重管で管外には $-5 \sim -8^\circ\text{C}$ の不凍液を、冷水と対向流で流すようになっている。冷水は、氷タンクからフィルタを介して供試伝熱管に入り、出口に取付けたビニールホースでタンクまで輸送し、そこで過冷却解除して製氷する。冷水温度（過冷却水温度）は、供試伝熱管出口直後の水流中に $\phi 0.5 \text{ mm}$ の K 型熱電対を設置し、適宜トラバースして平均温度を読むようにした。実験は、不凍液と冷水の入口温度及び流量を設定後、定常状態となった状態で数時間の連続運転確認後、計測を行った。

図5に配管内 Re 数に対して、過冷却が維持できる伝熱面での限界過冷却温度 ΔT_w との関係を示す。限界過冷却度は Re 数の増加に伴い減少する傾向にあるが、 Re 数 8000 程度で約 3.5°C の過冷却が可能である。

3.2 ベンチプラント試験

製氷能力 30 Rt 規模のベンチプラント装置を製作し、氷蓄熱シ

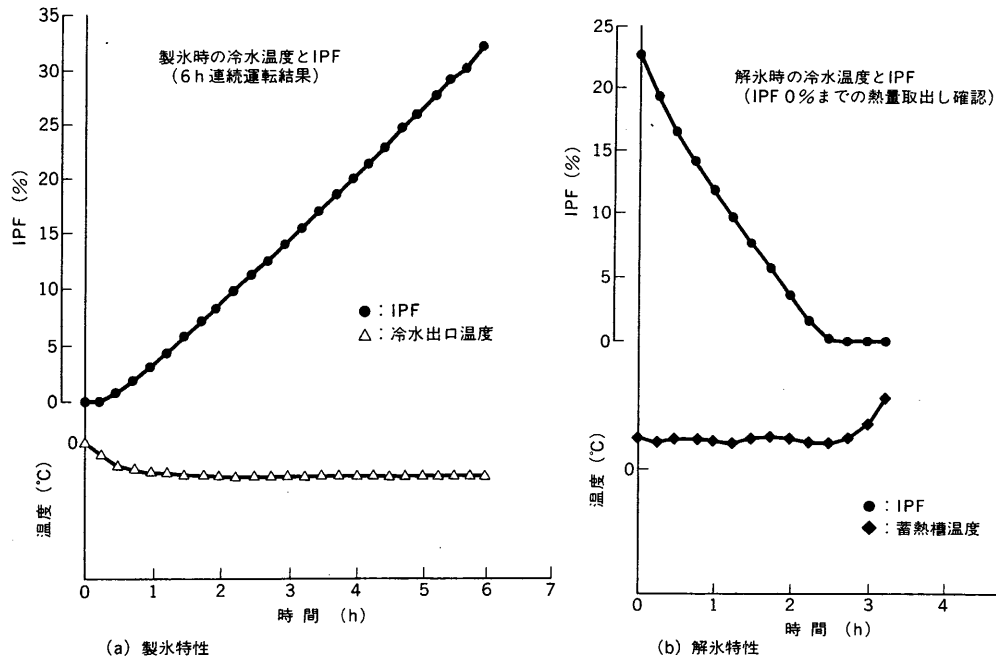


図6 ダイナミック氷蓄熱システムの製氷及び解氷特性であり、また冷熱の取出しが問題なく行えることを示す。
Freezing and thawing characteristics

表1 伊豆高原クラブ氷蓄熱システム仕様
Principal particulars of Izu-kougen Dynamic Ice Storage System

冷凍機 製氷能力	冷凍機 冷房能力	蓄熱量	冷水取出し 熱量	蓄熱槽 水張り量
90 Rt	120 Rt	1 209 Mcal	250 Mcal/h	87 m ³

システムとしての製氷及び解氷運転における妥当性を確認した。

図6(a)に本ベンチプラント設備による製氷運転結果の例を示す。次式で定義されるIPFは運転に伴いほぼ直線的に増加し、約6hで約32%まで到達している。また、冷水出口温度（過冷却水温度）もほぼ一定値を示しており、氷蓄熱システムとして過冷却水による製氷が十分可能であることを確認した。

$$IPF = (\text{氷の体積}) / (\text{初期の水張り体積}) \quad (18)$$

次に、図6(b)は解氷結果の例を示す。ここでは、IPFが約23%から約2.5hで0%まで低下しているが、この間蓄熱槽温度（冷水取出し温度）は、ほぼ一定値を維持しており、蓄熱槽内の氷の冷熱がほぼ100%有効に取出せることを確認した。

4. ダイナミック氷蓄熱システム

要素試験を踏まえ、開発したダイナミック氷蓄熱システムを平成6年7月にオープンした当社伊豆高原クラブ向け氷蓄熱システムとして納入した。

その仕様を表1に示す。また、図7は製氷状況である。

ノズルから出た過冷却水は衝突板で過冷却解除され、一部が氷となり蓄熱槽内へほぼ均一に分布し蓄えられている。また、本装置を用いて、連続運転により高IPF化の確認を行った結果、約60%の高IPF化が可能であるとのめどを得た。

5. ま と め

以上のように、水の過冷却現象を利用したダイナミック氷蓄熱

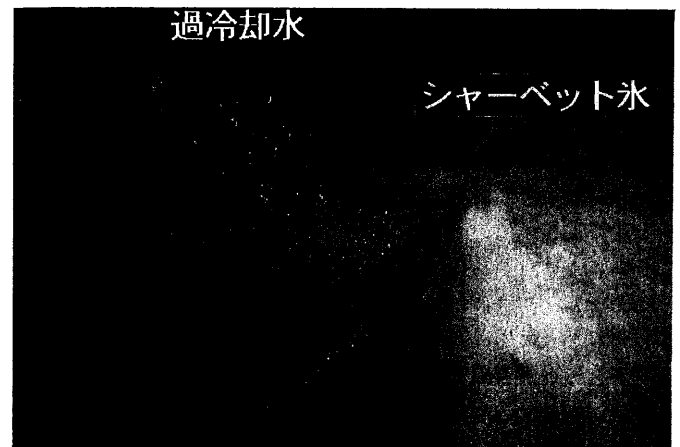


図7 実機製氷状況 伊豆高原クラブに納入したダイナミック氷蓄熱システムの製氷状況を示す。
Freezing state of Dynamic Ice Storage System

システムに関して、過冷却現象に対する理論的考察、実機製作に必要な要素試験結果の一端を述べるとともに実機適用例を紹介した。本システムは電力負荷平準化、アメニティ指向等に十分対応可能なシステムであり、今後地域冷暖房システム、ビル空調等への幅広い展開が期待できるものと考えている。

参 考 文 献

- (1) 大久保 進, 氷蓄熱利用の空調システムについて, エネルギー・資源 11 巻 4 号 (1990) p.59
- (2) 中江秀雄, 凝固工学, アグネ社 (1992) p.9~72
- (3) 木村 寛, 過冷却水を利用した氷蓄熱装置, 日本結晶学会誌 Vol.19 No.3 (1992) p.235