An experimental study on a granular-ice storage method

グラニューラー・アイス方式氷蓄熱に関する実験的研究

Fujio SUDA, Miyoko TOYOZAKI and Chieko MORISAWA

Department of Resources and Environment Science, School of Humanities and Culture,
Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-12 JAPAN
TEL:81-463-58-1211(EX.3417) FAX:81-463-50-2208

(Received 16, November 1995 Accepted 19, February 1996)

Ice-storage system for air-conditioning by utilizing off-peak night time power service provides a good way of energy saving. In the present study, a new type ice-storage system has been proposed, which contains granular-ice crystals of some millimeter in diameter. This system has several advantages; for example, high ice-making efficiency, high responsibility and simplicity. Fundamental experiments were carried out to seek conditions to produce granular-ice crystals successively; They were formed through injecting water droplets into a low temperature immiscible coolant with the specific gravity smaller than water. Their formation processes were observed in a small transparent ice-storage tank of 50 cm depth. As an immiscible coolant, kerosene has been utilized. Smooth granular-ices with uniform dimension were produced successively at the set-temperature lower than -20°C . Discussions have been made on the improvement of this method for practical application.

Key words; Ice-Storage System, Granular Ice, Energy Saving, Low Temperature Immiscible Coolant.

I. INTRODUCTION

日本における発電用エネルギーの全一次エネルギーに占める割合は増加の一途をたどり、1992年には遂に40%にまで達した。同時に、電力需要の季節間、平休日間、昼夜間格差も広がりつつある。特に夏期における昼夜間格差は大きく、昼間の電力需要は深夜の2倍以上にもなる。それはひとえに日中の冷房需要の増加によるものである。

電力需要の格差を平準化して、負荷率を上げることが新たな電源設備の設置と等価、もしくは自然環境に対する負荷を考慮するならば、それ以上の価値がある。平準化のためには、需要がピークとなる時間帯の電力を需要の少ない時間帯の電力で賄うように時間帯をずらせばよい。揚水発電はひとつの方法であるが、どこでも可能という訳ではない。夏期日中時のピーク負荷回避の為に、現在最も注目されているのが氷蓄熱システムである。これは格安な夜間電力を利用して製氷を行い、昼間冷房用として利用するシステムである。

氷蓄熱法は、水の凝固潜熱を利用するため、氷蓄熱法に比べ5~8倍の蓄熱密度を持ち、大きな電力シフトが期待できると共に、蓄熱槽容量を大幅に低減できるという利点がある。しかし、一方では製氷時における

冷凍機成績係数(COP)の低下、生成する氷の物理的性状(伝熱特性、体積膨張など)がやっかいな問題となり、システム構築の上で制約が多くなりがちである。¹これらの問題点を克服するために、多種多様な氷蓄熱法がこれまでに提案されてきた。

氷蓄熱システムを生成・使用する氷の性状によって分類すれば、²スタティック型とダイナミック型に分けることができる。スタティック型では、氷は基本的には伝熱面上に生成される。そのため生成される氷自体が熱抵抗体となり、製氷熱交換器の伝熱管間隔(設計氷厚み)によっては、冷凍システムの運転効率を低下させることがある。また、蓄熱槽内に熱交換器を設置する必要がある。一方、ダイナミック型では、蓄熱槽と氷生成部は分離しており、その分設計上の自由度は確保される。また、生成される氷はリキッド・アイス状やシャーベット状であり、システムの取り扱いが複雑になるものの氷厚を大きく取らずに製氷・解氷するためCOPの低下を防ぐことが期待されている。

渡辺らは最近、フラジル・アイス方式のダイナミック型氷蓄熱システムを提案している。³⁵この方式は水中に 0°C 以下に冷却した非水溶性の液体を散布して、シャーベット状の氷を生成する方法である。この方式

では、液-液直接接触熱交換による製氷をするため、製氷時の熱交換効率が良い。このとき使用される非水溶性液体の比重は1.8程度であり、ポンプで循環利用される。その成分の詳細は明らかにされていないが、実験ではフッ化炭素(パーフルオロカーボンPFC、基本分子式: C_8F_{18})を用いている。

われわれが本研究で提案する氷蓄熱法は、渡辺らの方法と同様、液-液直接接触熱交換を利用するものであるが、逆の発想により、比重が1より小さい低温の不凍液中に水を滴下することにより、粒状氷(グラニューラー・アイス)を生成しようとするものである。われわれは以下ではこれを「グラニューラー・アイス方式」の氷蓄熱法と呼ぶことにする。この新方式の利点としては(1)直接接触による熱交換であるため氷の生成効率が良い、(2)滴下する氷の大きさをコントロールすることにより、冷熱取り出しの際の応答性と持続性を最適化できる、(3)冷熱取り出しを熱交換器で間接的に行うことも、直接流して利用することも可能である、(4)装置は極めて単純であり特別な制御を必要としない、などが考えられる。

本研究はダイナミック型氷蓄熱法のひとつとして、「グラニューラー・アイス方式」を提案し、グラニューラー・アイス生成に関する基礎的な実験を行った結果である。

II. EXPERIMENTAL APPARATUS AND METHOD

グラニューラー・アイス生成に要求されるクーラントの条件としては、(1)水に不溶で、(2)比重が1より小さく、かつ(3)利用温度範囲において不凍性であることな

FIG. 1 Schematic diagram of the experimental setup (a) and the water dropping unit (b).

どが最低限要求される。さらに、(4)安全性、(5)経済性、(6)性質の経時変化が少ないことなどもつけ加えられるであろう。これらすべての条件に必ずしも合致するものではないが、ひとつの試みとして、石油系の溶液を利用することにした。

グラニューラー・アイス生成実験に入る前に、これらのクーラントにより目的とするグラニューラー・アイスがうまく生成されるか確かめるための予備的な実験を行った。クーラントとしてエンジン・オイルを用い、これを深さ約15cmのジュワー瓶に入れて冷却し、これを攪拌して一様温度にした後、あらかじめ4~5℃に冷却した水を注射器で滴下し、生成された氷を観察した。粒径は注射針の太さにより変わり、1~5mmの範囲でコントロールできた。灯油の場合にも同様な実験を行った結果、低粘性のため底に到達するまでの時間が短い分、温度をさらに下げる必要があった。

これらの結果を踏まえて、Fig.1(a)に示すような装置を組立て、グラニューラー・アイス生成実験を行った。この装置はクーラントの入った蓄熱槽(図の中央部)、冷却ユニット、冷水タンクとポンプにつながる冷水滴下ユニット、それに温度測定用の熱電対とレコーダーからなる。

蓄熱槽は5mm厚の透明アクリル板製で、高さ50cm、横14cm、奥行き4cm(内容量2.8リットル)である。周囲を50mm厚の発泡ウレタンで断熱した。断熱壁には、内部観察のためのいくつかの蓋付きの穴が設けられている。クーラントを冷却するためのクーリング・ユニットには、直膨式投げ込みクーラー(YAMATO、NEOCOOL DIP BE200F、定格電力115W)を温度調節器と共に設置した。槽内温度測定のため、0.1mmφKタイプ熱電対5組を槽上端からそれぞれ12、21、30、39、48cmの位置に取りつけた。各温度は打点式レコーダーに記録される。

蓄熱槽上部には、水を滴下するための滴下ユニットが取り付けられている。Fig.1(b)にヘッド部分の模式図を示す。これはアクリル板製の箱に注射針を複数本取り付けただけのものである。種々のヘッドを作製したが、次節に示した結果は内径0.7mmの注射針15本のヘッドを使って得られたものである。このヘッドに冷水タンクからポンプ(YAMATO、MASTER FLEX MODEL 7018-20)で2~3℃の冷水を供給、滴下した。滴下量は一分あたり約20cm³(直径3mmの水滴にして約1500個)である。

製氷の方法、および手順は以下の通りである: 蓄熱槽に一定量のクーラント(約2.2リットル、深さ約40cm)を入れ、冷却温度を設定し、冷却開始。一定の幅で温度変動を繰り返すようになったら、底部をマグネティック・スターラーで数分間弱く攪拌する。その後、ポンプを始動、冷水を滴下する。そして、氷のできる様子を観察。また、できた氷を素早く取り出し、冷蔵庫に移し、観察、および写真撮影を行った。

III. RESULTS AND DISCUSSION

以下に示す結果はすべて、クーラントとして灯油を用いた場合である。Figure 2に、設定温度 -20°C の場合の蓄熱槽内各部の温度変動の測定結果例を示す。

FIG. 2 An example of temperature variation measured at the set-temperature of -20°C

図中の番号1~5は熱電対の位置を表している(Fig.1(a)参照)。冷却開始約50分後より、温度調節器が働き一定温度を中心とした周期的温度変動を繰り返すようになる。温度調節器のセンサーは2番の熱電対近くに設置してある。Figure 3にこの場合の深さ方向の温度分布をプロットした。各プロット点に付けた横棒は、その点の温度振動の幅を示している。(これはマグネティック・スターラーで攪拌を行う前の温度分布であるが、弱い攪拌により底部は数度 $^{\circ}\text{C}$ 上昇し、上部は逆に数度 $^{\circ}\text{C}$ 低下する。)

FIG.3 An example of temperature distribution in the storage tank measured at the set temperature of -20°C .

Photo 1 に2、3の設定温度における蓄熱槽底部での製氷過程の様子を示す。(a)、(b)、(c)の設定温度はそれぞれ -5°C 、 -10°C 、 -20°C である。(a)の場合には、グラニューラー・アイスにはなっておらず氷粒は互いに融合し、上方に向かってややもやした形を作りながら成長している。(b)の場合には、よく見ると一個一個は粒状を呈しているが、それらは部分的に融合しあい、やはり上

方に向かってややもやした雲形を形成しつつ伸びている。一個一個の氷が独立した球状になるのは、設定温度が -20°C 以下になってからである。それが(c)の場合であり、氷の粒は積み重なりつつ山を形成する。

Photo1 Photographs of growing ice crystals on the base of the storage tank. (a) -5°C (b) -10°C and (c) -20°C .

蓄熱槽から取り出した直後のグラニューラー・アイスの写真をPhoto 2に示す。(a)、(b)、(c)の設定温度はそれぞれ -15°C 、 -20°C 、 -25°C である。(c)のグラニューラー・アイスが青っぽく光って見えるのは、観察し易くするため滴下する前の水にブルーのインクを混入したためである。インクを混入していない場合についても実験したが、混入による影響はほとんど見られなかった。(a)の場合には、写真左側に見られるように、柱状に成長した氷も観察される。しかし、 -20°C 、 -25°C では、ほとんどが直径3mm程度のグラニューラー・アイスになっている。低温ほどサラサラした感じになる。

このように、クーラントとして灯油を用いた場合、設定温度を -20°C 以下にしないとグラニューラー・アイスは得られていない。それより上の温度では、グラニューラー・アイスは互いに融合してしまったり、雲のようにモヤモヤした形になる。

設定温度 -20°C は実用上低過ぎる温度である(設定温度の低下は製氷時のCOPの低下を招く)。本実験装置の

Photo 2 Photographs of granular-ice crystals produced at the set-temperature of -15(a), -20(b) and -25°C(c).

場合、水滴がクーラント中を落下し、液槽の底に達するまでの落下距離はせいぜい40cmである。野間らはフラジル・アイス方式の場合について、比重1.8の水滴が液-液直接接熱交換しつつ水中を落下して行く際の計算から、周囲冷媒温度と水滴の初期温度差が5~10°Cのとき、水滴が完全に熱交換を終えるに要する落下距離は1~1.5mであるとしている。⁶このことから、われわれの40cmという落下距離は短過ぎ、その分設定温度を低くする必要があったものと推定される。さらに、本実験の場合滴下ユニットからの水滴の個数は1

分間に約1500個であり、クーラント中の液滴の通路近傍は液滴との熱交換のため、温度が上がり凝固しにくくなっていることも考えられる。

これらの問題点を打開してより高い設定温度でもグラニューラー・アイスが連続的に生成されるようにするための方策として、次のようなことが考えられる: (1) 装置を大型化して落下距離を稼ぐ、(2) 粘性のより高いクーラントを使うか、またはクーラントをポンプで循環させて上昇流を起こし、落下時間を稼ぐ、さらには (3) 凝固の核形成を促進する適当な物質を水中に混入し、過冷却解消温度を高める、などが考えられる。現在、これらのことを考慮に入れた循環型の試験装置を作製し、実験中である。

IV. SUMMARY

グラニューラー・アイス方式の水蓄熱システムの可能性を探るため、グラニューラー・アイス連続生成実験を行った。比重が1より小さく、かつ非水溶性の低温不凍液中に水を滴下することにより、粒状の水を連続的に生成することができた。現状では、溶液温度が低過ぎるため、製氷時のCOPの低下を招く恐れがある。そのため、0°Cにより近い温度におけるグラニューラー・アイス生成を可能とするような工夫が必要であるとの結論に達した。

REFERENCES

- ¹Itoh and Suzuki: *Energy Storage System* (Japan Society of Energy and Resources, 1992) p. 196.
- ²Shabamoto: *Kuuki-chouwa Eiseikougaku*, **64** [10] (1986).
- ³Watanabe, Noma and Hachimomji: *Proc. of the 69th Meeting of Nippon Kikai Gakkai*, **B** 485 (1992).
- ⁴Watanabe, Yamasita, Noma and Hachimomji: *Proc. of the 30th National Heat Transfer Symposium of Japan*, **1** 415 (1993).
- ⁵Watanabe: *Journal of the Heat Transfer of Japan*, **34** [135] 73 (1995).
- ⁶Noma, Watanabe and Hachimomji: *Proc. of the 69th Meeting of Nippon Kikai Gakkai*, **B** 488 (1992).

'95 SAS Intelligent Symposium