閉容器内における冷媒と蓄熱材の直接接触伝熱 を利用する氷蓄冷の研究*

宇高 義郎^{*1}, 斎藤 彬夫^{*1}
新美 勝^{*2}, 中田 直樹^{*3}

Ice Cold Energy Storage Using Direct Contact Phase Change Heat Transfer between Refrigerant and PCM in an Enclosure

Yoshio UTAKA, Akio SAITO,
Masaru NIIMI, and Naoki NAKATA

A cold energy storage method having excellent heat transfer characteristics was proposed, utilizing natural circulation of a refrigerant. Three layers, i. e., a refrigerant vapor (R 12 or R 114) layer, a water layer and a refrigerant liquid layer stratified in this order from the top were kept in an enclosure composed of a condenser, an evaporator and a condensate receiver-and-return tube. Direct contact heat transfers of a refrigerant with phase change were applied both for the cold energy storage and release processes. In the storage process, the refrigerant liquid vaporizes at the refrigerant liquid-water interface with the formation of ice, the vapor condenses at the condensing surface and the condensate returns to the refrigerant liquid layer simultaneously. In the release process, the refrigerant liquid vaporizes at the vaporizing surface, the vapor condenses on the ice with melting, and the condensate and melted water returns to the original layers simultaneously. It was confirmed by the measurements that rapid ice formation and melting were realized.

Key Words: Phase Change, Ice Cold Energy Storage, Direct Contact Heat Transfer, Refrigerant, Solidification, Melting, Condensation, Boiling

1. 緒 言

夜間の余剰電力によって蓄冷(製氷)し、昼間の冷房に利用する氷蓄冷技術は、電力負荷のピークカットの見地から重要である。しかしながら、従来のほとんどの蓄冷装置、すなわち、伝熱壁面上に氷を付着させる方法を利用する場合には、蓄冷時に伝熱面上で成長する氷層が熱抵抗となり、蓄冷速度を時間とともに著しく低下させる。そのため従来の蓄冷方式においては、蓄放冷時間を短縮させるには大きな温度差を必要とし、冷凍機の COP の低下をもたらすなどの問題点が指摘されてきた。このような欠点を補うためのいくつかの製氷方式が検討されてきている⁽¹⁾。

本研究は、密閉容器内において、蓄冷材としての水とともに内部に封入される作動媒体(以下冷媒と呼ぶ)の、水あるいは氷との直接接触気液相変化伝熱をとまう自然循環サイクルを利用する、新たな高性能蓄・放冷方式を提案するものである。さらに、本方式にも

とづく小形装置を試作し、その蓄・放冷過程における性能に関する検討を行う。

2. 蓄・放冷方式

本研究で提案する氷蓄・放冷方式では、後述するように、容器内部に封入される蓄冷材としての水あるいは氷と冷媒との直接接触状態を維持したまま、冷媒の気液相変化および蓄冷材の固液相変化熱交換を蓄冷および放冷の全過程において実現させておくため、冷媒のもつべき基本的条件として以下の3点を満足する必要がある。

- (1) 水との溶解性をもたない、あるいは溶解度が小さい。
- (2) 液密度が水より大きい。
- (3) 低沸点物質であり、蒸気圧が水と比較して大きい。

これらの条件を満たす冷媒として本研究では R 12 および R 114 を選定した。以下に述べる蓄・放冷原理ではこれらの組合せについて説明する。なお、ここでは生成固相を氷に限定して述べるが、本実験で用いたフロン系冷媒は水との包接化合物を形成するものがあることが知られており⁽²⁾、冷媒の種類によっては固相は氷とガス水和物との混合体となる可能性が考えられ

* 昭和62年5月27日 第24回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和62年6月8日。

^{*1} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*2} 准員、建設省関東地方建設局 (〒243 厚木市恩名66)。

^{*3} 東京工業大学大学院。

る。

図1に示すように、上方に冷媒蒸気の凝縮部、下方に冷媒液の蒸発部、内部に冷媒受液部および送液管（併せて受送液部と呼ぶ）を設けた、水と冷媒が封入された密閉容器を考える。容器内部では冷媒および水は、上方から密度差により冷媒蒸気層、水あるいは水層、冷媒液層に成層化して分布する。

図1(a)に蓄冷（水の凝固）方式について示した。初め、容器内に水が蓄えられている状態から、凝縮部を水の凝固点（ 0°C ）以下の低温液により冷却を開始すると、冷媒蒸気が凝縮面上に凝縮し、凝縮液は凝縮部直下に設置された受液板に滴下し集められ、送液管を通過して冷媒液層へ戻される。容器内部の圧力が減少するため、冷媒の飽和温度が凝固点以下に達することにより、水層と低温の冷媒液層との直接接触界面にて冷媒液の沸騰を生じさせる。このとき水は凝固潜熱を奪われ固化し、生成した氷は自らの浮力および蒸気泡の上昇により水層の上方に集積されてゆく。また同時に沸騰により発生した蒸気は水層および形成された氷層を通過して冷媒蒸気層に達し、凝縮部に液化され、受送液部を経て、再び冷媒液層へ戻る。このような系では、常に冷媒と水の液・液界面に生成固相が停留することがないため非常に小さな熱抵抗状態が凝固完了まで維持され、迅速な蓄冷を可能とする。

図1 蓄・放冷原理

図1(b)に示した放冷（水の融解）過程では、冷媒液を蒸発させるために蒸発部に 0°C 以上の高温液を流す。蒸発面上で冷媒液が沸騰、容器内圧力は上昇し冷媒の飽和温度が氷の融点以上に達することにより、蓄冷過程で生成された氷表面で蒸気が凝縮し、氷を融解させる。この場合においても、冷媒凝縮液と融解水はそれぞれ冷媒液層、水層に戻るため凝縮の熱抵抗は小さく、また蒸発面が冷媒液に接している限り沸騰は持続され熱抵抗の小さい状態が維持される。

以上のように、本方式では蓄・放冷ともに、閉容器内において、動力を要さない冷媒の自然循環サイクルを利用し、非常に熱伝達率の高い冷媒の気・液相変化伝熱を水あるいは氷との直接接触状態を持続させながら行わせることにより迅速な蓄・放冷を実現させる点に特長がある。

3. 実験装置と方法

上記の方式を実現させるときの、容器内部における現象を観察するための装置本体を図2に示す。上方から順に、黄銅製の凝縮器、アクリル製の受送液器、ガラス製の封入器および封入器と一体製の蒸発器からなる。封入器にガラスを用いたのは観察のためであるとともに壁面からの冷媒液の沸騰を防止し、壁面が現象に及ぼす影響を小さくするためである。凝縮面は重力方向に対して 45° 傾斜させており、蓄冷過程では冷媒凝縮液は凝縮面下端部に流下する。円管内周に設けた受液リングに集められた冷媒凝縮液は、送液管を通

図2 観察用装置主要部

て蒸発面上部の冷媒液層に戻る。また、放冷過程においては、凝縮器を通水加熱し、ガラス製の蒸発面から冷媒液の沸騰を生じさせる構造になっている。

実験の準備にあたっては、容器内部を真空ポンプにより十分に脱気した後、冷媒、水の順に封入した。蓄冷材としての水には水道水を用いた。冷媒を先に封入したのは、液戻し管内への水の侵入を防ぐためである。また、次に述べる測定用装置についても同様の手順で行った。

図3は蓄・放冷特性を測定するための内径261 mmの円管からなるステンレス製装置の主要部である。外径15 mm、内径13 mmのステンレス製の凝縮管を容器上方に9本、蒸発管として下方に同様の管を4本ろう付けした。凝縮管直下に受液板を、また、受液板から冷媒液層までが送液管によりつながれており、これらを経て冷媒凝縮液は冷媒液層に直接送られる。観察のため側面の2箇所および下面にアクリル製の窓を取付けてある。冷却液として冷却されたエチレングリコール水溶液を、加熱液には水を使い、それぞれ所定の一定温度に保って測定を行った。装置全体を発泡スチロールにより断熱することにより外部との熱損失の低減をはかった。また、蓄・放冷熱量の経時変化を求めるためそれぞれの出入口に熱電対を取付け、それぞれの流体の出入口温度差と流量を測定した。

4. 結果および考察

4.1 観察結果 図2に示した実験装置において、R12を冷媒として使用した場合の蓄・放冷過程の観察結果を図4に示す。 T_{in} は凝縮管あるいは蒸発管入口の冷却液または加熱液温度、 h_w は水層の高さ、 h_f は冷媒液層の高さを、また t は冷却開始からの経過時間を表す。図4(a)に示した蓄冷過程においては、約60 sで水の生成が始まり、ほぼ1800 sで水が固相に変わり、蓄冷が完了した。したがって、従来の伝熱壁面上に氷を成長させてゆく方式に比べて、本方式により迅速な蓄冷が可能であることがわかる。このとき生成された固相は多孔質状になっていた。詳細な観測は難しかったが、目視によれば、液・液界面および水層中での水の生成は確認されなかったことから、氷の生成機構は次のように推測される。すなわち、冷媒液と水の界面を離脱した冷媒蒸気泡は冷媒液を一部同伴しながら水面に達し、そこで蒸発する結果、急激に水の凝固潜熱を奪い水面上において固相を生成する。固相は部分卵殻状に生成され、それらが何層にも積み重なっていくうちに、それらの間を液・液界面からの蒸気が通過するため多孔質状になるものと考えられる。また、固

体層の成長につれて液・液界面上に半透明の浮遊粒子の出現がみられた。これはR12の包接化合物が一部生成したものと考えられる(R12の包接化合物の密度は水とフロン液の間にある)。本来、液・液接触界面は凹凸のほとんどない平面であるため沸騰が起こりにくい状態となっているはずであるが、その浮遊物の存在により発泡が容易になり蒸発速度を高めていると思われる。なお、生成された固相は水と包接化合物の混在したものとも推測される。

図4(b)に示した放冷過程においては、急激な解凍が起こることが観察された。約450 sまで緩慢に融解が進行し、その後突然固相がくずれ始め固液混合状態を経て、690 sにはほとんど融解が完了した。固相の崩壊までに時間を要するのは、固相の初期温度が融点よ

図3 測定用実験装置

($T_{in} = -7.5^{\circ}\text{C}$, $h_f = 28\text{ mm}$, $h_w = 21\text{ mm}$)

(a) 蓄冷過程

($T_{in} = 34^{\circ}\text{C}$, $h_f = 30\text{ mm}$, $h_w = 36\text{ mm}$)

(b) 放冷過程

図4 R12の蓄・放冷過程の様相

り低い(約 -7°C)ため、放冷過程初期においては固相の融点までの温度上昇に要する顕熱量を必要とするうえ、固相の融解がやや進行した後に固体層の落下・崩壊が開始するためと考えられる。

次に、R 114 を用いて R 12 と同様の条件で実験を行ったが、液・液界面での発泡はかなり間欠的であったため 4 h を経た後ですら固相生成はみられなかった。R 114 は水との包接化合物を生成しないため液・液界面において発泡を促進する物質が存在しないことに起因すると考えられる。また、本観察装置は、現象の観察に主眼を置いているため、装置寸法が小さいうえ、特別な断熱を施していない。したがって、容器内の現象が遅く、熱移動速度の小さい状態では周囲からの熱の侵入により氷は生成されにくい。図 5 に液・液界面における発泡促進のため、試験的に多数の細孔をあけたアクリル小片群を浮遊させ実験を行った結果を示す。アクリルの密度は水と R 114 の中間の大きさであり、ちょうど液・液界面に滞留する。アクリル小片により液・液界面における沸騰は促進され、氷は全量固相に変化した。この場合、蒸気泡の生成および水面での蒸発の機構に関しては R 12 の場合とほぼ同様と思われるが、生成された固相は比較的大きな塊状の透明なものとなった。このときの生成固相は全量氷となっていると考えられる。

R 114 を用いた場合の放冷過程では、実験開始直後から解凍が始まり、連続的に融解が進行するとともに、比較的短時間のうちに氷の融解は完了した。

4・2 測定結果 蓄・放冷過程における主に熱的特性について検討を行うため図 3 に示した装置を用いて行った、4・1 節の観察実験と同様の R 12 と水および R 114 と水の組合せに関する測定結果を以下に示す。

4・2・1 R 12 の結果 図 6 (a) は R 12 を用いた場合の蓄冷過程における相変化のようすを示している。ここで T_i は初期温度を表す。観察用実験装置で見られたものと同様な多孔質状の水となっていることがわかる。水層高さ h_w が 30 mm の場合には 1500 s、50 mm のとき 2400 s 以内で水から氷への相変化は完了

した。図 6 (b) は水の初期温度 T_i 、冷却液温 T_{in} と冷媒液層高さ h_f が一定のまま水層高さ h_w だけを変化させたときの蓄冷量の経時変化を示している。 Q_i は蓄冷量、 t は時刻を表している。 h_w が増加するにつれ Q_i も増加していることがわかる。ただし、本装置は蓄冷材である水の蓄冷容量に比較して容器などの熱容量が比較的大きいため、蓄冷量が h_w に比例する関係とはなっていない。

図 6 (c) は T_i 、 h_f と h_w を固定し、 T_{in} だけを変化させたときの Q_i の経時変化を示している。 T_{in} が低くなるにしたがって Q_i が増加していることがわかる。

($T_i=20^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=-5^{\circ}\text{C}$, $h_f=30\text{ mm}$, $h_w=30\text{ mm}$)

(a) 蓄冷過程の様相

(b) 蓄冷量の経時変化 (水層高さ h_w の影響)

(c) 蓄冷量の経時変化 (冷却液温度 T_{in} の影響)

図 6 R 12 の蓄冷過程

($T_{in}=-7.5^{\circ}\text{C}$, $h_f=34\text{ mm}$, $h_w=31\text{ mm}$)

図 5 R 114 の蓄冷過程の様相

特に T_{in} が -2°C であっても速やかな蓄冷が行われており、蓄冷過程では冷却液温の比較的高い温度での運転が可能であることがわかる。

図 7 に、 T_i , T_{in} , h_w を一定に保ち、 h_f だけを変えた場合の蓄冷量の変化を示した。全結果ともほぼ一つの曲線に重なり、 h_f は蓄冷速度に影響を与えなかった。したがって、蓄冷過程においては冷媒の量は水に冷媒液が接している条件を与えるだけで十分なものと考えられ、比較的小量で満足される。

また、 T_i , h_f を固定し、冷却液温 T_{in} を変化させた

図 7 蓄冷量の経時変化 (冷媒高さ h_f の影響) (R 12)

($T_i = 0^{\circ}\text{C}$, $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$, $h_f = 30$ mm, $h_w = 30$ mm)

(a) 放冷過程の様相

(b) 放冷量の経時変化 (冷媒高さ h_f の影響)

図 8 R 12 の放冷過程

場合の結果から、蓄冷完了時の固層高さは凝固速度にほとんど依存せず、 h_w の約 3~5 倍であった。

R 12 を用いた場合の放冷過程においても観察用実験装置と同様の現象が確認された。図 8 (a) は放冷のようすの経時変化を示している。2784 s まで変化は見られないが、その後急激に解凍が始まっているのがわかる。

T_i , T_{in} , h_w を一定に保ち、冷媒高さ h_f だけを変化させたときの放冷量 Q_o の経時変化を図 8 (b) に示す。蓄冷時と異なり、 h_f の小さな領域で h_f の影響が顕著になっていることがわかる。特に $h_f = 20$ mm の場合、解凍がほとんど進行しなかったため放冷量が時間によらずほぼ一定となっている。図 8 (a) に示した写真の場合に相当する $h_f = 30$ mm のときには、 Q_o が約 2800 s 付近で急激に上昇しているが、この箇所はそれまで静止していた水が降下して蒸発管に接触し、急速に解凍の進行が開始した点に相当する。これらの場合には、蒸発した冷媒蒸気が多孔性水層内で凝縮したまま滞留することにより、冷媒液層が減少してゆき蒸発部において液切れを起こすためである。本実験に

($T_i = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{in} = -10^{\circ}\text{C}$, $h_f = 30$ mm, $h_w = 50$ mm)

(a) 蓄冷過程の様相

($T_i = 0^{\circ}\text{C}$, $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$, $h_f = 30$ mm, $h_w = 50$ mm)

(b) 放冷過程の様相

図 9 R 114 の結果

用いた装置ではこのように速やかな放冷を行わせるには比較的多量の冷媒を必要とした。このように、R 12 と水の組合せにおいては、今後、固相が加熱面に自重により押し付けられながら溶融する、いわゆる接触融解現象⁽³⁾を併用するなどの工夫をすることにより、この点に関する改良を進める必要がある。

4・2・2 R 114 の結果 図 9 は、 $h_f=30\text{ mm}$ 、 $h_w=50\text{ mm}$ のときの R 114 を冷媒として用いた結果である。なお、液・液界面の発泡促進材は特に使用しなかった。図 9 (a)、(b) は、それぞれ蓄冷過程 ($T_i=20^\circ\text{C}$ 、 $T_{in}=-10^\circ\text{C}$) および放冷過程 ($T_i=0^\circ\text{C}$ 、 $T_{in}=20^\circ\text{C}$) のようすを示している。蓄冷および放冷完了時間は同一条件の R 12 を冷媒として用いたときとほぼ同様であったが、図 9 (a) の $t=0\text{ s}$ の写真と凝固の完了した $t=1800\text{ s}$ の写真との比較からわかるように、凝固完了時の固相高さは水の初期高さに比べて大きな変化を示しておらず、この組合せの場合には、固相充てん率の高い蓄冷装置を可能とするものと考えられる。また、図 9 (b) から、放冷過程においても R 12 の場合とほぼ同様に迅速な融解が進行している。R 114 の場合には、凝固完了時の固相の見掛け高さが小さいため、R 12 においては冷媒を水とほぼ同量程度以上必要としたのに比べて、冷媒量が少ないにもかかわらず急速な解凍が行われていることがわかる。なお、4・1 節で述

べたように、R 114 の観察結果においては、液・液界面での沸騰が起こりにくかったにもかかわらず、本結果では良好な蓄冷が行われた。これは、容器壁などの存在により沸騰が起こりやすくなったためと考えられる。

5. 結 言

密閉容器内において、蓄冷材としての水とともに内部に封入される作動媒体の、水あるいは氷との直接接触気液相変化伝熱をともなう自然循環サイクルを利用する、新たな高性能蓄・放冷方式を提案した。さらに、本方式を利用することにより、迅速な蓄・放冷を行うことが可能であることを示した。なお、冷媒の種類により蓄冷過程で生成される固相の見掛けの膨張率が異なるため、固相充てん率が大きく異なることになる。これは、水とフロン系冷媒による包接化合物の形成の有無に関係が深いものと思われる。

本研究の一部に日本冷凍協会の補助金を使用したことを付記し、謝意を表する。

文 献

- (1) 例えば、平野、冷凍、62-714 (昭 62)、369。
- (2) 川崎・秋谷、化学工学、46-7 (昭 57)、339。
- (3) 斎藤・ほか 3 名、機論、52-473, B (昭 61)、110。