

特集 「技術研究所再整備」

中温度潜熱蓄熱槽の蓄放熱特性

藤 田 尚 志 (本社建築本部)	大 澤 明 廣 (本社設計本部)
伊 藤 剛 (本社設計本部)	津 越 紀 和 (本社設計本部)

Thermal Characteristics of Water Tank with Phase Change Material Having Moderate Melting Point

Hisashi Fujita	Akihiro Osawa
Tsuyoshi Ito	Toshikazu Tsukoshi

Abstract

Experiments were carried out with an experimental water tank that contained a phase change material (PCM) with a melting point of approximately 15°C. This experimental tank was a model of the latent-heat storage tank installed on top of the new main building of the Obayashi Corporation Technical Research Institute. In each experiment, the tank was supplied with water at a constant temperature and at a constant flow-rate. The supplied water having a temperature of 12°C froze the PCM completely, whereas that having a temperature of 14°C failed to do so. In the former case, the measured outlet water temperatures were analyzed, and the latent heat of the PCM was estimated to be 80–128 J/g. This estimation was much lesser than the value of 135–152 J/g measured by differential scanning calorimetry. However, the estimated total heat of 200 J/g suggests that the difference is attributable to the sensible heat as well as a part of the latent heat.

概 要

技術研究所の新本館屋上に設置される潜熱蓄熱槽（水槽内に相変化温度約15°Cのパラフィン系潜熱蓄熱材を設置）の一部を模擬した実験槽に、一定流量で一定温度の水を供給する実験を、流量・温度の設定を変えて数通り行った。潜熱蓄熱材を凝固させる蓄冷実験では、槽に供給する水の温度（入口温度）が12°Cでは潜熱蓄熱材の凝固完了が確認されたが、14°Cではかなりの水量を供給しても凝固が完了しなかった。入口温度12°Cの蓄冷実験で得られた、槽から出る水の温度（出口温度）の測定結果から潜熱蓄熱材の重量当たり潜熱量を算出すると80～128 J/gであり、DSC（示差走査熱量測定）で測定された値135～152J/gよりも小さかった。しかしながら熱量合計（潜熱量+顕熱量）では200J/gとかなり大きく、顕熱量としてカウントした中に潜熱量が含まれていると推測された。

1. はじめに

技術研究所の新本館では潜熱・顕熱分離空調システムを採用しているため、空気を露点温度以下にまで冷やして除湿する過程が生じず、冷房用冷水の一般的な温度（5～7°C）よりも高い温度（以降「中温度」）の冷水で冷房が可能である。冷熱源機から供給される冷水の温度を中温度と高く設定することで、冷熱源機の効率が向上する。加えて、水蓄熱槽を設け、外気温度が下がって条件の良い夜間に冷熱源機を運転して昼間の空調用に冷熱を蓄えることで、さらなる効率向上を狙っている。

この水蓄熱槽は屋上設置のために槽容量が限定されるので、その中に潜熱蓄熱材を入れて（この槽を以降「潜熱蓄熱槽」と呼称）蓄熱量の増加を図った。従って、潜熱蓄熱材は中温度で相変化するものである。

本報では、潜熱蓄熱槽の効率的な使用方法（水温、流速、蓄放冷時間）を確定するために、潜熱蓄熱槽の一部

を模擬して製作した実験槽にて測定した結果を報告する。

2. 潜熱蓄熱材

用いた潜熱蓄熱材は、JX日鉱日石エネルギー製の「エコジュール®」の1種である。これはパラフィンを主材料とし、パラフィンが溶けてもゲル状にとどまるような添加物が加えられている。パラフィンは炭素数16のものだけを使ったが、添加物が加えられている分、パラフィン単体よりも本エコジュールの方が潜熱蓄熱量がやや少ない。DSC（示差走査熱量測定）¹⁾で本エコジュールの潜熱量は、凝固時135J/g（15→12°C）、融解時152J/g（12→20°C）と測定された。

エコジュールは、扱いやすいように50gずつ透明樹脂シートでパック包装（長さ274mmの筒状）され、「ゲルパック」と呼ばれる（Photo 1）。ゲルパックは312本ずつ穴明きのプラスチック箱（幅465mm×奥行345mm×高さ



Photo 1 ゲルパック
Gelpack



Photo 2 ゲルパック・モジュール
Gelpack Module

Table 1 実験の設定条件
Experimental Conditions

case	流量 [L/min]	平均流速 [m/s]	蓄冷時 入口温度[°C]	放冷時 入口温度[°C]
03・A	3	0.000318	12	22
03・B	3	0.000326	14	22
05・A	5	0.000517	12	22
05・B	5	0.000539	14	22
07・A	7	0.000718	12	22
07・B	7	0.000716	14	22
10・A	10	0.001016	12	22
10・B	10	0.000989	14	22
20・A	20	0.002055	12	22
20・B	20	0.002074	14	22
40・A	40	0.004073	12	22
40・B	40	0.004116	14	22
90・A	90	0.009329	12	22

280mm) に入れられ、一体で「ゲルパック・モジュール」(以降「モジュール」と略称)と呼ばれる (Photo 2)。幅4m×奥行5m×高さ3mの潜熱蓄熱槽内に、モジュールが8×14×8段に積み、その中を水が上向きまたは下向きにゆっくりと(上流側の水とほとんど混合することなく)流れる(いわゆる「押し流れ」)ように計画された。従って、8段積みモジュールを1列だけ取り出して実験槽に入れ、その蓄放熱特性を測定すれば潜熱蓄熱槽全体の蓄放熱特性が把握できると考えた (Fig. 1)。なお、潜熱蓄熱材の蓄冷(蓄熱材の凝固)時には槽最下部に比較的低い温度の水を入れてモジュール内を下から上へと流れ、放冷(蓄熱材の融解)時には槽最上部に比較的高い温度の水を入れてモジュール内を上から下へと流れる。

3. 実験概要

3.1 実験槽

8段積みモジュールが収納できる大きさとして、直径600mmの塩ビ管で実験槽を製作した (Fig. 2)。モジュール周囲の塩ビ管との隙間には断熱材(ポリスチレンフォーム)を詰めた。実験槽の最上部と最下部の水の流出入スペースでは、直径300mm塩ビ管を半割にしたものを流出入管の槽との接続口に対して、最上部では下方、最下部では上方に配して、流入水が分散して均等にモジュールに流れ込むように工夫した。

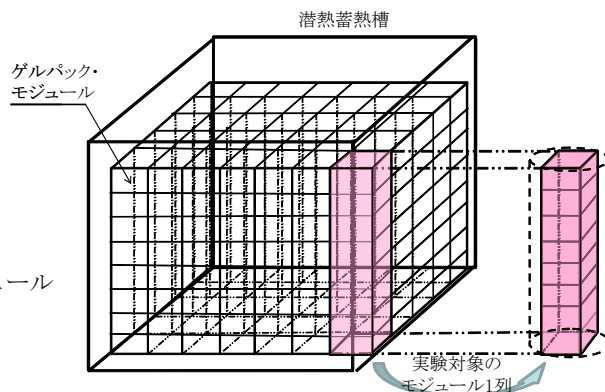


Fig. 1 潜熱蓄熱槽と実験対象のモジュール1列
Latent Heat Storage Tank
and 1 Row of Modules under Consideration

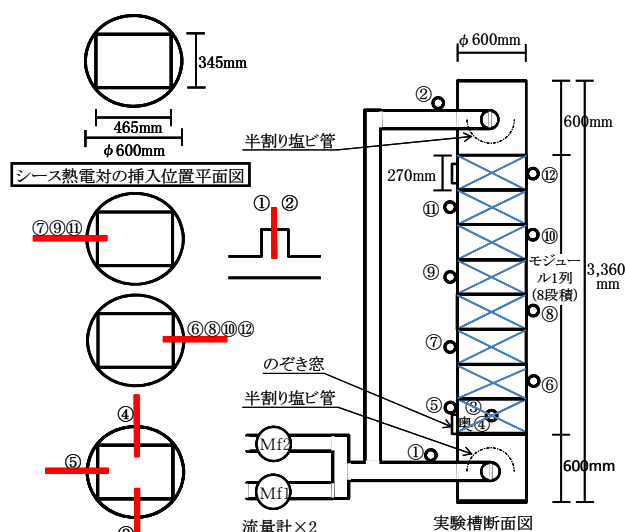


Fig. 2 実験槽と測定位置
Experimental Tank and Measuring Points

3.2 実験装置

実験槽に設定温度・流量の水を長時間定常的に供給するために、Fig. 3, Fig. 4に示す実験装置を組み立てた。2つの温度調整用水槽の1つに0°Cの水、他の1つに常温(26°C程度)の水を貯め、これらを混合することで実験槽に入れる水の温度(以降「入口温度」)を設定温度に維持した。流量は、ポンプのインバータとバルブの開度により調整した。

実験の設定条件ごとに、実験槽最下部に比較的低い温度の水を入れる「蓄冷実験」、続いて実験槽最上部に比較的高い温度の水を入れる「放冷実験」の順に実施した。Fig. 3, Fig. 4には、蓄冷実験、放冷実験それぞれの水の流れを示す。蓄冷実験の前の初期状態は、槽内全体が放冷実験の入口温度設定値に近い。各実験の開始前には、実験槽に入れる予定の水を実験槽手前でバイパスさせ、温度と流量を設定値に安定させてからバルブを実験槽側に切り替えて実験開始とした。

3.3 測定項目・機器

温度測定にはT型シース熱電対を用いた。測定位置を

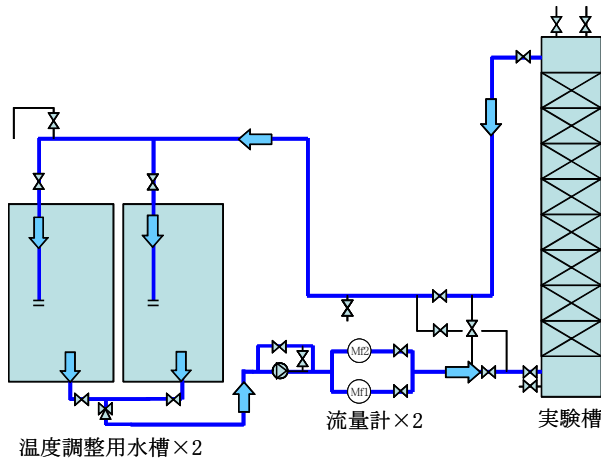


Fig. 3 蓄冷実験の水循環経路
Water Circuit for Heat Charging Case

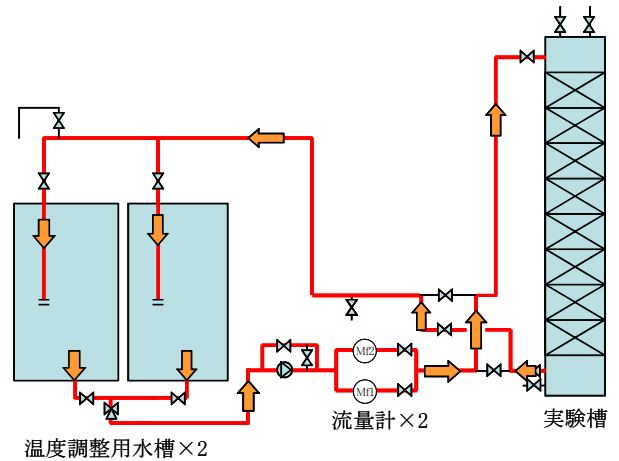


Fig. 4 放冷実験の水循環経路
Water Circuit for Heat Discharging Case

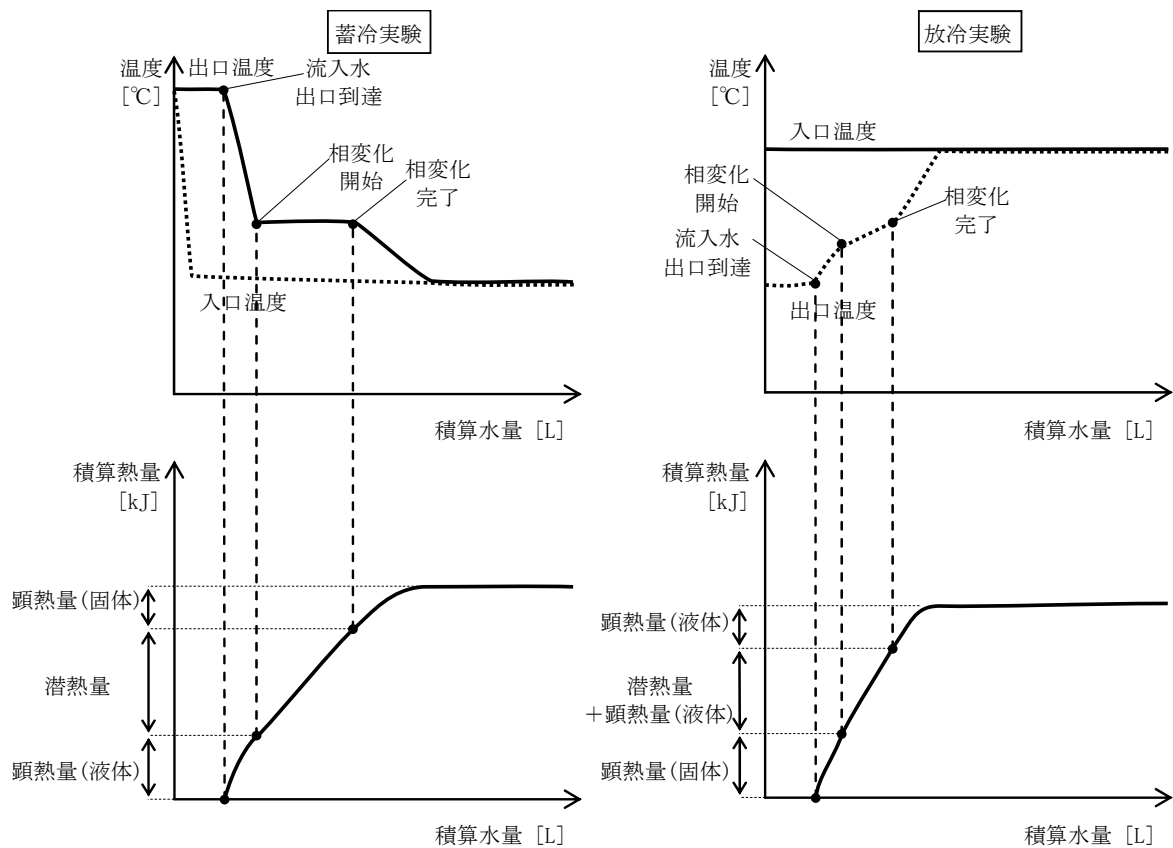


Fig. 5 蓄冷・放冷実験における出口温度変化の4過程
4 Processes of Outlet Water Temperature in Heat Charging and Discharging Cases

Fig. 2に示す。実験槽には外から挿入し、感温部はゲルパック間の隙間に置かれた。入口温度と出口温度はFig. 2の熱電対①または②で測定された。

流量測定にはパルス式流量計を使用した。流量計の測定上限が60L/minであるため流量計を並列に2個並べ、120L/minまで測定可能とした。

測定データは10秒間隔でデータロガーに収録し、1分間ごとに平均化した。

3.4 実験の設定条件

各実験で実験槽に入れる水の温度と流量をそれぞれ一

定に設定した。温度と流量の組合せをTable 1に示す。蓄冷実験の入口温度は、蓄熱材の相変化温度が約15°Cであることから、12°Cと14°Cに設定した。流量は、断面流速(モジュール寸法の平断面積当たり)1cm/s²)に相当する90L/minを上限として、40, 20, 10, 7, 5, 3L/minに設定した。放冷実験の入口温度はいずれも22°Cとした。

設定条件を表現するcase名は、流量[L/min]と蓄冷時入口温度を表す記号で構成される。蓄冷時入口温度を12°C、14°Cに設定した場合の記号をそれぞれA, Bとし、case・流量[L/min]・蓄冷時入口温度の記号の順に並べて表記した(例えば、case・03・A)。

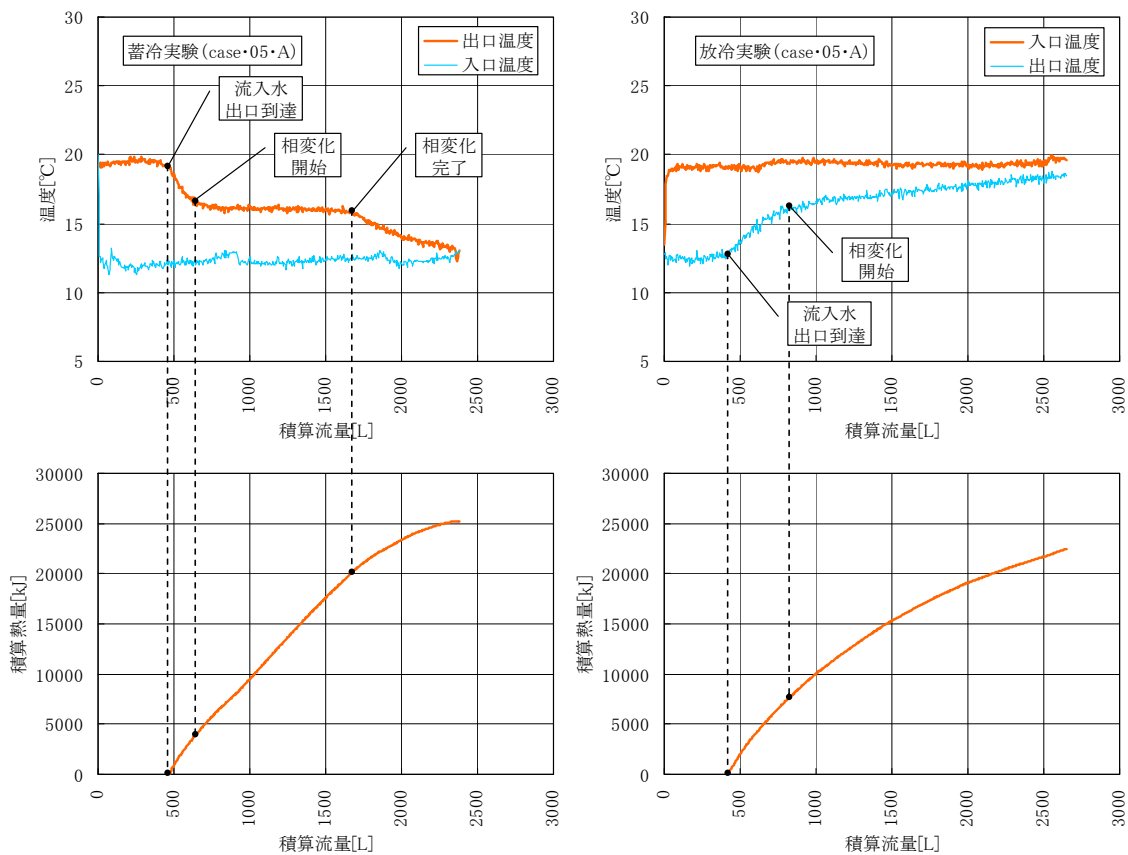


Fig. 6 測定結果 (case・05・A)
Measurement Result of case・05・A

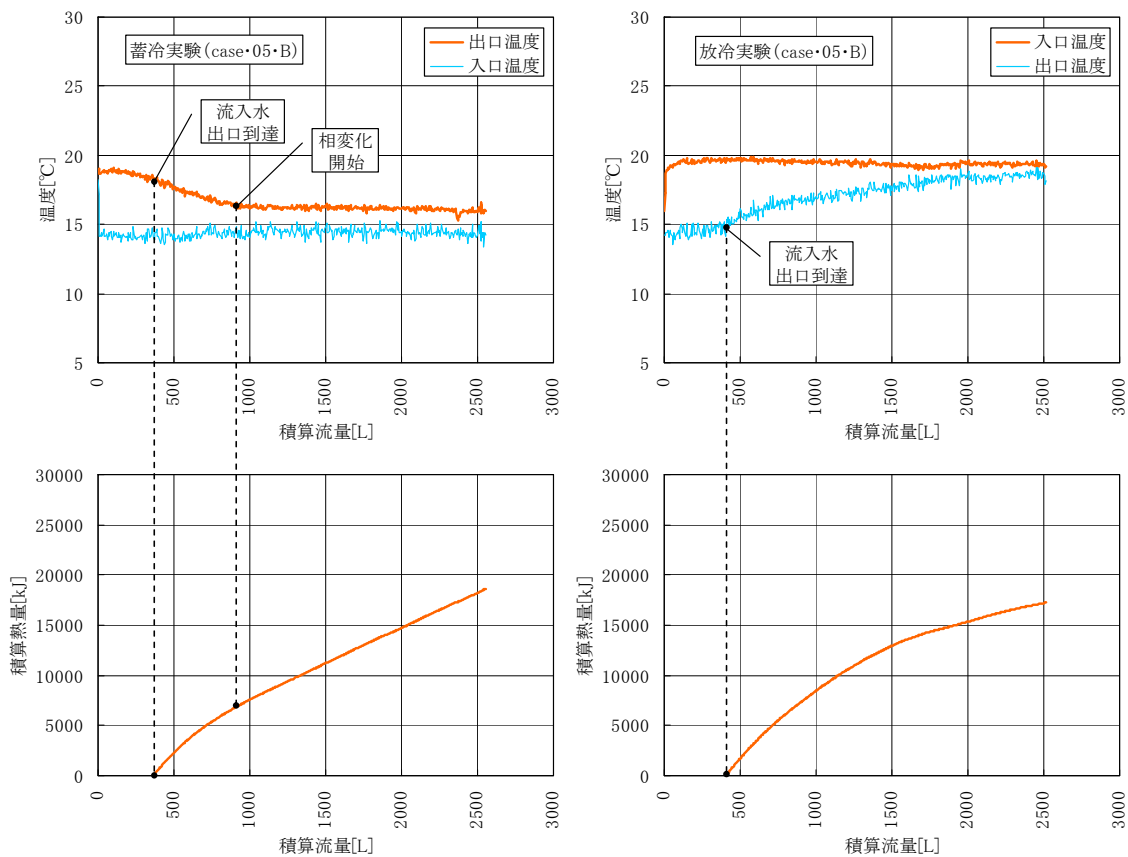


Fig. 7 測定結果 (case・05・B)
Measurement Result of case・05・B

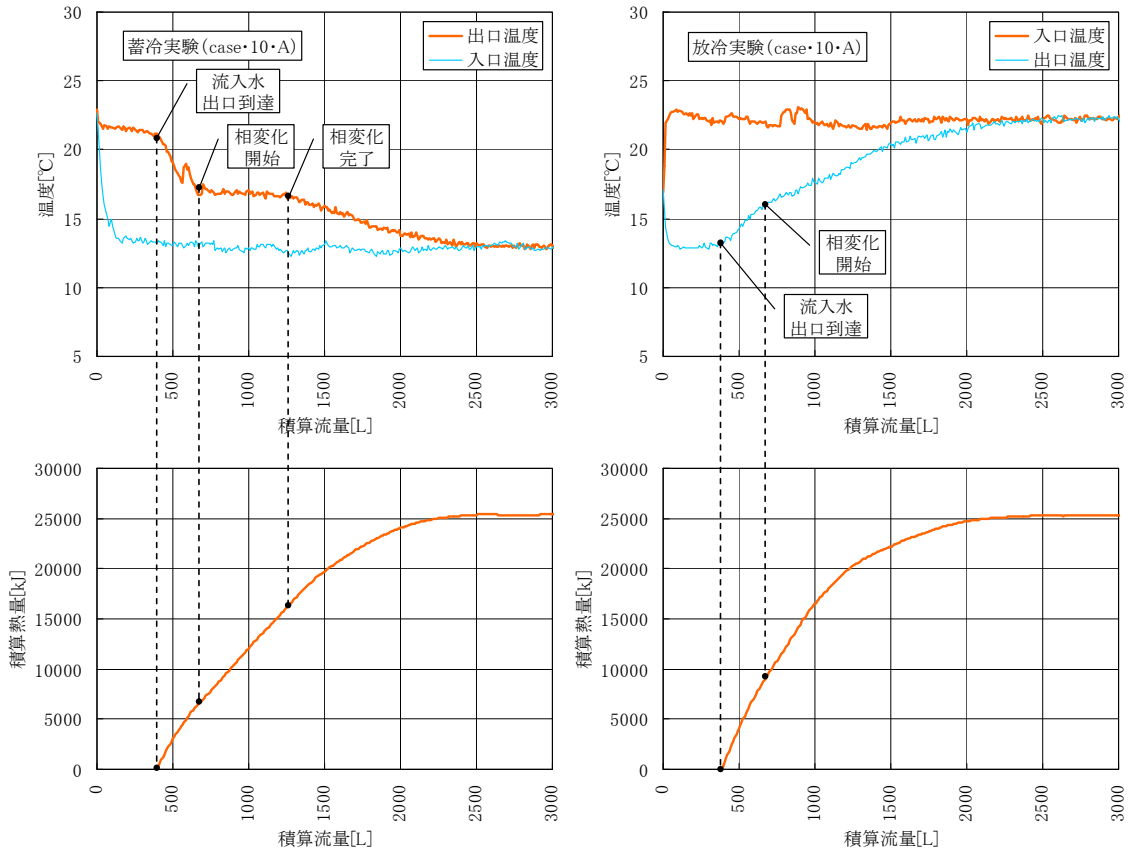


Fig. 8 測定結果 (case・10・A)
Measurement Result of case・10・A

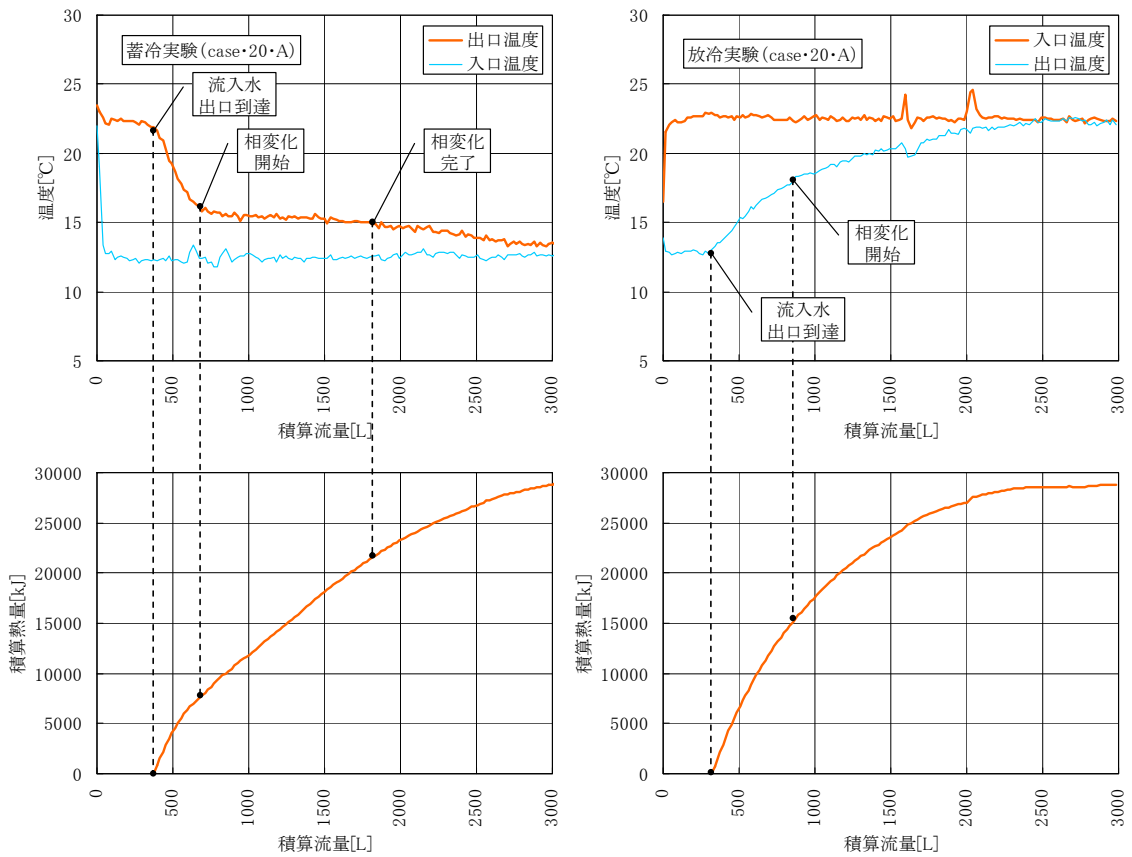


Fig. 9 測定結果 (case・20・A)
Measurement Result of case・20・A

4. 測定結果

4.1 測定結果のまとめ方

実験槽内が等温の初期状態で、異なる温度の水を実験槽に入れると、実験槽から出る水の温度（以降「出口温度」）は、流入水が槽出口に到達するまでは初期温度を示す。このように流入水の流量や流入時間よりも積算水量（＝流量×時間）がパラメータとして適当と考えられるので、測定結果は横軸が積算水量のグラフで表す。蓄冷・放冷実験のそれぞれで、水の流入開始（実験開始）時点を積算水量＝0とする。なお、実験槽内の水の流れ方が押し出し流れと仮定すると、流入水が槽出口に到達するまでの積算水量は約460L（ 0.46m^3 ＝槽の最上部及び最下部の内容積＋モジュールの内容積－ゲルバックの内容積＝ $2 \times 0.3^2 \times \pi \times 0.6 + 8 \times 0.312$ （内法平均） $\times 0.416$ （内法平均） $\times 0.27 - 8 \times 312 \times 0.05 \times 0.001 / 0.8$ ）と計算できる。

グラフの横軸を積算水量、縦軸を温度として測定結果の入口温度と出口温度をプロットすると、Fig. 5の上図に示すような出口温度変化が予想できる。蓄冷実験では、出口温度変化は次の4過程を経ることが想定される。

(1) 流入水が槽出口に到達するまでは出口温度が初期温度（一定）を保つ。

(2) 槽内の潜熱蓄熱材が相変化を開始するまでは潜熱蓄熱材の温度が徐々に低下する（顕熱変化）ので、出口温度も徐々に低下する。

(3) 潜熱蓄熱材が相変化を開始してから完了するまでは潜熱蓄熱材が一定温度を保つ（潜熱変化）ので、出口温度も一定となる。

(4) 潜熱蓄熱材が相変化を完了した後は潜熱蓄熱材の温度が再び徐々に低下する（顕熱変化）ので、出口温度も徐々に低下し、最終的には入口温度とほぼ等しくなる。

放冷実験でも同様の過程を経ることが予想されるが、(3)の潜熱蓄熱材の相変化時には出口温度が若干上昇する可能性がある。その理由は、ゲルバック形状の中心付近に融解していない潜熱蓄熱材が残っていても、その周囲の潜熱蓄熱材が融解後さらに温度上昇（顕熱変化）すれば、出口温度にも顕熱変化の影響が表れるからである。

蓄冷・放冷実験のそれぞれで、上記の過程(1)が終了して過程(2)が開始した時点から熱量（＝水の比熱×流量×出入口温度差）を積算すると、Fig. 5の下図に示すように顕熱量と潜熱量を求めることができる。ただし放冷実験では、上述の理由で潜熱変化の過程で顕熱変化も生じている可能性がある。

4.2 測定結果と考察

得られた測定結果のうち、上述の出口温度変化の過程がよく表れている4つのcaseについて、温度変化及び積算熱量をFig. 6～Fig. 9に示す。いずれのcaseも設定流量が小さく、槽内に押し出し流れが形成されていたと推定される。これらの図から次のことが分かる。

(1) 上記(4.1節)の過程(1)の積算水量は約400Lである。

計算で求められた値460Lよりもやや小さいが、死水域、モジュールの上板・底板の容積等の影響と推察する。

(2) case・05・Bの蓄冷実験（入口温度14℃）では、積算水量2500Lでも潜熱蓄熱材の相変化が完了していない。相変化温度と入口温度との差が小さいために、水量当たりの伝熱量が比較的小さい。

(3) 入口温度12℃の3つのcase（case・*・A）の蓄冷実験の測定結果を比べると、流量の小さいcaseの方が潜熱蓄熱材の相変化完了までの積算水量が小さい。すなわち水量当たりの伝熱量が大きい。

(4) 上述の4過程の温度変化がよく表れているcase・05・Aとcase・10・Aについて潜熱蓄熱材の熱量を図から求めると、顕熱量（液体）＝4000～6000kJ、潜熱量＝10000～16000kJ、顕熱量（固体）＝5000～9000kJであり、熱量合計では両caseとも25000kJである。重量当たりに換算すると潜熱量は80～128J/gであり、DSCで測定された値135～152J/gよりも小さい。しかしながら熱量合計では両caseとも200J/gであり、顕熱量としてカウントした中に潜熱量が含まれていると推測される。

(5) 放冷実験ではいずれのcaseでも出口温度変化に顕著な区切りが無く、蓄冷実験以上に顕熱と潜熱が入り交じって放冷されていると考えられる。

5. まとめ

技術研究所の新本館屋上に設置される潜熱蓄熱槽の一部を模擬した実験槽に、一定流量で一定温度の水を供給する実験を、流量・温度の設定を変えて数通り行った。

蓄冷実験では、槽に供給する水の温度が12℃では潜熱蓄熱材の相変化完了が確認されたが、14℃ではかなりの水量を供給しても相変化が完了しなかった。

入口温度12℃の蓄冷実験で得られた出口温度の測定結果から潜熱蓄熱材の重量当たり潜熱量を算出すると80～128J/gであり、DSCで測定された値135～152J/gよりも小さかった。しかしながら熱量合計（潜熱量＋顕熱量）では200J/gとかなり大きく、顕熱量としてカウントした中に潜熱量が含まれていると推測された。

謝 辞

潜熱蓄熱材とその関連情報を提供いただきましたJX日鉱日石エネルギー株式会社の関係各位、並びに実験槽を製作し、それを用いて実験を実施していただきました中部大学の山羽教授と関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 日本熱測定学会編：熱量測定・熱分析ハンドブック（第2版），（2010.1）
- 2) 株式会社ジャパンエナジー：パラフィン系潜熱蓄熱材導入検討用ガイドブック，（2009.7）