

温度別蓄熱槽に関する一試案

(第2報 温水取出し時の特性の吟味)

A PROPOSAL ON TEMPERATURE UNBLENDED-TYPE
THERMAL STORAGE TANK

(2nd Report : Examination of the Extracting Process)

竹内 正紀*

Masanori TAKEUCHI

木村 照夫**

Teruo KIMURA

安川 敬一***

Keiichi YASUKAWA

Abstract

Though many types of the unblended-type thermal storage tank for the different temperature storages have been developed in recent years, there still remain not a few disadvantages, especially the temperature drop of the water in the tank in dependence of the variation of the heat source temperature. In our preceding report, a simple thermal storage tank in which the tank was composed of vertical double cylinder without the partition on the bottom side of the inner cylinder was presented and the availability of the storage tank was proved by the experiments of the process of the thermal storage.

In this report, the characteristics of the system in the extracting process of the thermal energy from the system is examined. A large amount of heat without the appreciable temperature blending is extracted by the present tank.

Key Words Thermal storage tank, Extracting process, Unblended-type, Vertical double cylinder, Experimental analysis

1. 緒言

水を蓄熱材とする蓄熱槽においては、効果的に蓄熱するために槽内の高温水と低温水とをできるだけ分離し、それらが混合しないように蓄熱する試みがなされている〔例えば文献(1)〕。著者らも前報²⁾において二重円筒形の蓄熱槽を考案試作し、蓄熱実験を行うことにより極めて簡単な構造で熱源の温度に応じて温度別に有効に蓄熱しうることを示した。しかし、蓄熱槽が有効に作用するには、蓄熱過程において温度別に有効に蓄熱できるのみでなく、蓄熱した温水を取出す場合にも槽内の高温水と低温水が混合することなく、高温水から順次取出せること、および蓄熱と取出しが同時に起こる場合にも槽内の高温水と低温水が混合することなく槽内の高温水から順次取出され、かつ熱源の温度に応じて温度別に蓄熱できることが望ましい。このことに関しては、前報では明らかになっていない。そこで本報では前報で吟味した蓄熱槽に対して蓄熱した温水の取出し実験を行い、本研究で考案した温度別蓄熱槽の有効性を示す。

記号

 P : ヒータの加熱量 Q : 循環流量 Q_1 : 温水取出し流量 T : 蓄熱槽内任意位置の温度、あるいは取出し温水の温度 T_0 : 加熱開始前の槽内の平均温度(初期温度) T_1 : 温水取出し時に給水口に圧送される水の温度 T_e : 蓄熱過程終了時の槽内の混合平均温度 T_{in} : 循環流の流入温度 T_{out} : 循環流の流出温度 t : 加熱経過時間 t_1 : 温水取出し直後からの経過時間

* 福井大学工学部 教授
Faculty of Engineering, Fukui University
Professor

** 福井大学工学部 助手
Faculty of Engineering, Fukui University
Research Associate

*** 株式会社エナール技研 取締役社長
Enerl Giken Co., Ltd., President

t^* : 換水時間 ($=V/Q$) t_1^* : 溫水取出し実験における換水時間
($=V/Q_1$) V : 蓄熱槽の体積 θ : 蓄熱過程における無次元温度 ($=(T-T_0)/(T_{in}-T_{out})$) θ_1 : 溫水取出し時における無次元温度 ($=(T-T_1)/(T_{in}-T_{out})$) $\bar{\theta}_1$: 溫水理想取出し時における無次元温度 ($=(T-T_1)/(\bar{T}_e-T_1)$) τ_1 : 無次元時間 ($=t_1/t_1^*$) τ_e : 蓄熱終了無次元時間あるいは温水取出し開始無次元時間

2. 実験装置と方法

実験装置は前報²⁾と同様で、温水取出し用の管が蓄熱槽天井部に設けてある。その詳細は前報に示す通りである。本実験では蓄熱槽の形式として図1に示す様に前報と同様、本研究で考案試作した形式A, B, およびそれらとの比較のための従来形の形式C, Dを対象に、一定時間蓄熱した後に温水を取出した。蓄熱した温水の取出しは蓄熱槽の底面付近に押出し用の冷水を圧送することによって行なった。この場合、集熱回路の循環ポンプとヒータをともに停止して温水を取出す実験、および循環ポンプとヒータをともにそれまでの蓄熱過程の状態に保持して温水を取出す実験の両者を対象とした。すなわち蓄熱過程と温水利用時が分離されている場合と、蓄熱しながら温水を利用する場合を模倣した。水槽内の温度は0.2 mm径のクロメル—アルメル熱電対で測定した。その温接点は前報²⁾と同じく水平断面内にA～E点の5ヶ所、高さ方向に10ヶ

所（ただしE点のみ5ヶ所）の合計45ヶ所の位置に設置した。それらの温接点には前報と同じくA, B, C, D, Eのそれぞれの位置で下方より上方へ1～10, 11～20, 21～30, 31～40および41～45の番号をつけた。さらに集熱回路を循環する温水の流入温度と流出温度、蓄熱した温水の取出し温度と押出し用の給水温度および流量計出入口を通過する温水の温度も測定し

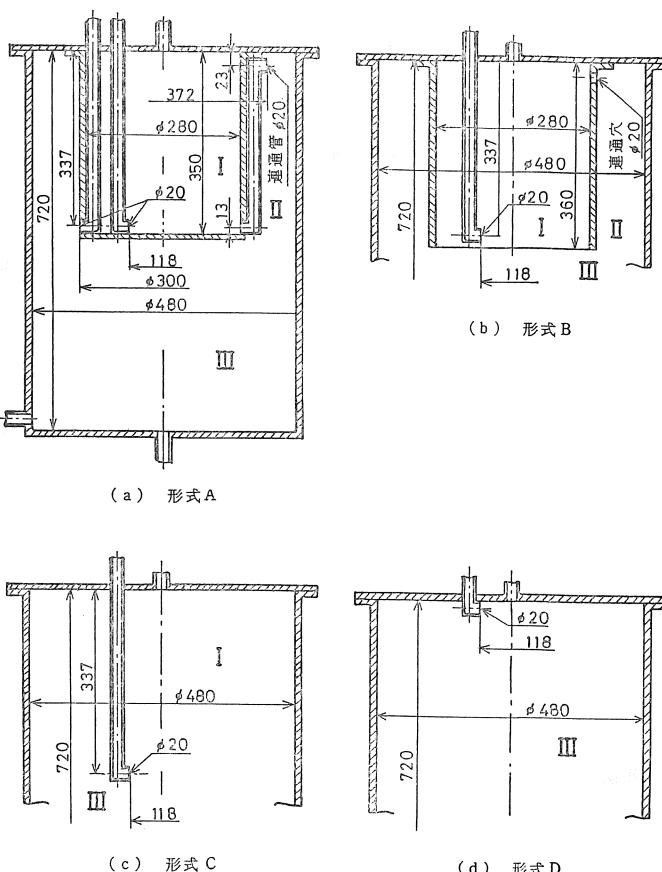


図1 蓄熱槽の形式

表1 実験条件(1)

| 実験No. | 蓄熱過程 | | | | | | 取出し過程 | | |
|-------|----------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| | 加熱量 P kW | 循環流量 Q l/min | 換水時間 t^* min | 初期温度 T_0 °C | 温度上昇 $T_{in}-T_{out}$ °C | 蓄熱終了 無次元時間 τ_e | 取出し流量 Q_1 l/min | 取出し換水時間 t_1^* min | 給水温度 T_1 °C |
| A-1 1 | 1. 0 85 | 1. 8 4 | 6 8. 2 | 1 8. 0 | 8. 4 3 | 1. 3 2 | 0. 8 7 | 1 4 4. 3 | 1 7. 3 |
| A-1 2 | 1. 0 97 | 1. 7 8 | 7 0. 7 | 1 7. 2 | 8. 8 4 | 1. 2 7 | 1. 8 2 | 6 9. 0 | 1 7. 2 |
| A-1 3 | 1. 1 19 | 1. 8 0 | 7 0. 1 | 1 7. 7 | 8. 9 4 | 1. 2 8 | 2. 6 7 | 4 7. 3 | 1 7. 2 |
| B-1 1 | 1. 1 06 | 1. 7 4 | 7 2. 5 | 1 7. 4 | 9. 1 2 | 1. 2 4 | 0. 8 7 | 1 4 4. 5 | 1 7. 9 |
| B-1 2 | 1. 1 01 | 1. 7 3 | 7 2. 7 | 1 7. 4 | 9. 1 1 | 1. 2 4 | 1. 8 3 | 6 9. 0 | 1 7. 7 |
| B-1 3 | 1. 1 34 | 1. 7 4 | 7 2. 6 | 1 7. 6 | 9. 3 6 | 1. 2 4 | 2. 6 7 | 4 7. 2 | 1 7. 3 |
| C-1 1 | 1. 1 12 | 1. 7 7 | 7 3. 4 | 1 8. 8 | 9. 0 0 | 1. 4 7 | 0. 8 8 | 1 4 8. 6 | 1 8. 4 |
| C-1 2 | 1. 1 17 | 1. 7 5 | 7 4. 3 | 1 8. 5 | 9. 1 4 | 1. 4 5 | 1. 8 3 | 7 1. 0 | 1 8. 2 |
| C-1 3 | 1. 0 99 | 1. 7 6 | 7 3. 9 | 1 8. 3 | 8. 9 5 | 1. 4 6 | 2. 6 9 | 4 8. 4 | 1 8. 1 |
| D-1 1 | 1. 0 69 | 1. 7 2 | 7 5. 8 | 1 9. 5 | 8. 9 3 | 1. 4 3 | 0. 9 0 | 1 4 4. 4 | 1 9. 5 |
| D-1 2 | 1. 1 18 | 1. 7 4 | 7 4. 7 | 1 9. 4 | 9. 2 1 | 1. 4 5 | 1. 8 3 | 7 1. 0 | 1 9. 4 |
| D-1 3 | 1. 1 01 | 1. 7 3 | 7 5. 2 | 1 9. 3 | 9. 1 3 | 1. 4 4 | 2. 7 4 | 4 7. 5 | 1 9. 2 |

た。それらの測定位置の詳細は前報に示されている。前報と同じく今後便宜的に図1に示すように形式A, Bでは内槽の内側の領域を領域I, 内槽外側と外槽とでつくられる環状の領域を領域II, 内槽の底面より下の領域を領域IIIと呼ぶ。形式C, Dでは内槽と外槽の区別はなく、形式Cでは循環水流入口より上方が形式A, Bの領域I, 下方が領域IIIに、形式Dではすべての領域が領域IIIに対応する。

3. 実験結果と考察

3.1 蓄熱過程と温水利用時 が分離している場合

循環流量約 $1.8 \text{ l}/\text{min}$, 温度上昇約 9°C に設定し、適当な時間蓄熱した後、集熱回路の循環ポンプとヒータを停止して、直ちに水槽内に蓄熱された温水を取出す実験を行なった。取出し流量は3種類に変えた。それらの実験条件を表1に示す。表中の蓄熱終了無次元時間 τ_e は蓄熱した時間を換水時間 t^* で除したものである。また、取出し換水時間 $t_1^* = V/Q_1$ は取出し流量 Q_1 で定義した換水時間。給水温度 T_1 は蓄熱された温水を取出すため給水口に圧送される水の温度である。取出し過程の槽内の温度の過渡応答線図を各形式の蓄熱槽について取出し温水の温度と共に一例として取出し流量が約 $1.8 \text{ l}/\text{min}$ の場合について図2に示す。図2の縦軸は水槽内の温度 T 、押出し用の給水温度 T_1 および蓄熱過程の温度上昇($T_{in} - T_{out}$)を基準に、 $\theta_1 = (T - T_1) / (T_{in} - T_{out})$ で無次元化したもの、横軸は取出し直後からの経過時間 t_1 を取出し換水時間 t_1^* で無次元化した無次元時間 $\tau_1 = t_1 / t_1^*$ であり、図2中の番号は熱電対の番号を示している。いずれの形式でも蓄熱槽の下方の流体ほどより早く給水温度になり、蓄熱槽内の温水が取出し用の給水によって押し上げられていることがわかる。しかも形式A, Bではともに領域IIIに所属し、同じ水平断面

に設置された熱電対の番号1と31, 2と32, 3と33, 4と34および5と35の温度経過が一致するので、同じ高さの水平面に含まれる温水は均一に押し上げられていることがわかる。このように同じ領域に含まれる水平断面の温度は等しいので図2には形式A, Bでは内槽と外槽について温度測定位置A(番号1~10)とE(番号31~40), 形式C, Dでは温度測定位置Eの温度経過を示した。内槽をつけた形式AとBとでは内槽の底の有無によって領域I, IIの温度応答は全く異なる

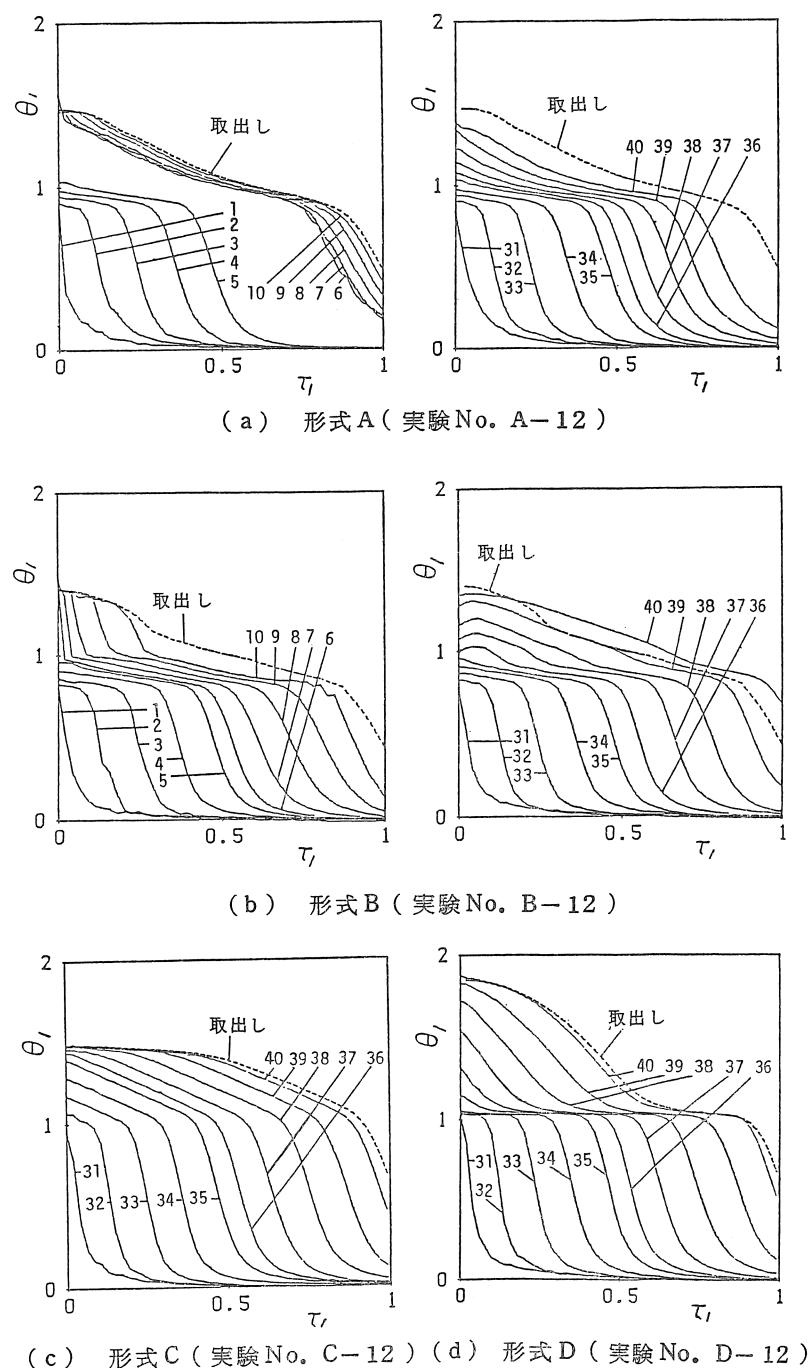


図2 槽内および取出し温度応答線図

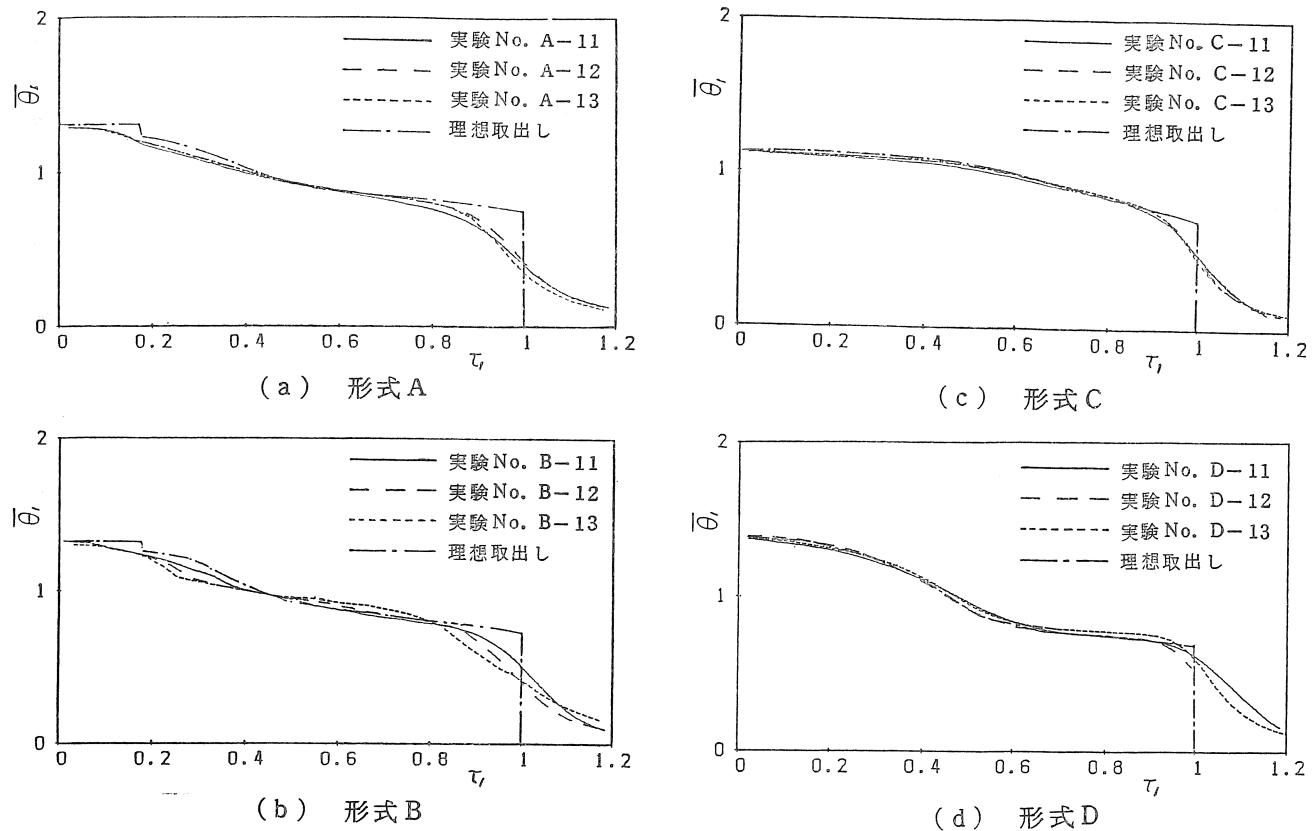


図3 取出し温度応答線図

る。すなわち内槽に底がある形式Aでは領域IIの温度応答を示す熱電対番号36~40の温度は領域IIIの上層の温度応答を示す熱電対番号5の温度と領域Iの下層の温度応答を示す熱電対番号6の温度との中間値を示す。これは温水取出し時の給水によって押し上げられた領域IIIの温水は領域IIの温水を押し上げ、領域IIの温水は連通管で領域Iの下層に導かれ領域Iの温水を押し出すためである。一方、内槽に底のない形式Bでは

取出し開始直後のわずかの間、領域IIの温度が上昇している。これは領域Iの温水の一部が取出し時に領域IIへ連通穴を通って流出していることを示している。それ以降の温度応答はいずれの時間においても、同じ高さの水平面に含まれる温水の温度は領域Iの方が領域IIより低くなる。しかも取出し開始後の早い時間に急速に領域Iの温度が下がる。このことは、取出し開始後の早い時間にまず領域IIIの低温水が領域Iの高温

表2 実験条件(2)

| 実験No. | 蓄熱過程 | | | | | | 取出し過程 | | |
|-------|----------------|--------------------|-------------------|------------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|
| | 加熱量 P kW | 循環流量 Q l/min | 換水時間 t* min | 初期温度 T ₀ °C | 温度上昇 T _{in} -T _{out} °C | 取出し開始 無次元時間 τ _e | 取出し流量 Q ₁ l/min | 取出し換水時間 t _{i*} min | |
| A-21 | 1.115 | 1.63 | 77.0 | 17.2 | 9.78 | 1.43 | 0.89 | 142.2 | |
| A-22 | 1.099 | 1.76 | 71.4 | 16.7 | 8.94 | 1.54 | 1.83 | 68.8 | |
| A-23 | 1.106 | 1.71 | 73.5 | 17.7 | 9.26 | 1.50 | 2.70 | 46.6 | |
| B-21 | 1.094 | 1.71 | 73.8 | 16.6 | 9.20 | 1.22 | 0.89 | 141.7 | |
| B-22 | 1.097 | 1.72 | 73.2 | 17.5 | 9.14 | 1.23 | 1.84 | 68.7 | |
| B-13 | 1.134 | 1.74 | 72.6 | 17.6 | 9.36 | 1.24 | 2.67 | 47.2 | |
| C-21 | 1.127 | 1.81 | 71.8 | 18.5 | 8.92 | 1.50 | 0.88 | 147.2 | |
| C-22 | 1.110 | 1.77 | 73.3 | 18.1 | 8.97 | 1.47 | 1.84 | 70.7 | |
| C-23 | 1.123 | 1.81 | 71.7 | 17.9 | 8.88 | 1.51 | 2.68 | 48.4 | |
| D-21 | 1.108 | 1.70 | 76.5 | 19.3 | 9.18 | 1.41 | 0.86 | 151.2 | |
| D-22 | 1.108 | 1.78 | 73.1 | 22.1 | 8.93 | 1.48 | 1.86 | 69.9 | |
| D-23 | 1.108 | 1.74 | 74.8 | 20.6 | 9.14 | 1.44 | 2.75 | 47.3 | |

水を押し出し、その後領域IIの中温水を徐々に連通穴を通して領域Iへ押し出すことを示している。したがって形式Bの取出し温度は取出し開始後の短い時間（この時間は内槽の体積によって決まる）を経過した後は、取出し口のある領域Iの上層の温度より高くなるが、領域IIの上層の温度より低くなる。他方、蓄熱槽内の最上層の流体が取出される形式A、C、Dでは常に槽内の最高温度の流体が取出されることになる。

蓄熱槽に蓄えられた温水を利用する際には蓄熱された温水の温度を下げることなく取出すことが重要である。形式A～Dの蓄熱槽がこの課題をどの程度満足するかを知るには取出し温水の温度が蓄熱状態よりどの程度低下したかを調べる必要がある。この比較の基準として理想取出しの場合の温度応答を求めた。その結果を実際の取出し温度応答とともに図3に示す。ここに「理想取出し」は蓄熱槽内の流体が取出し開始時から終了時まで混合することなく蓄熱終了時の温度に保たれ、かつ取出しは上層から下層へ、しかも蓄熱槽が多槽に分かれている、いずれの槽からも取出しが可能な場合には温度の高い槽の流体から先に取出されると考えた時の取出し状態で定義し、蓄熱終了時の槽内の温度分布から数値計算した。図3の縦軸は取出し温水の温度 T を給水温度 T_1 と蓄熱終了時の蓄熱槽内の温水の混合平均温度 \bar{T}_e を基準にした無次元温度 $\bar{\theta}_1 = (T - T_1) / (\bar{T}_e - T_1)$ である。理想取出しの温度応答は蓄熱過程の条件が同一で、蓄熱終了時の槽内温度分布に差異がなければ取

出し流量には左右されない性質のものである。形式A、Bでは理想取出しの温度応答の途中（ $\tau_1 = 0.18$ ）で温度が不連続的に変化するが、これは内槽内（領域I）の水がこの時点ですべて抜け出たことを意味する。実際の取出し応答においても図3より明らかなように、形式A、C、Dでは蓄熱状態が同じであれば取出し温水の温度応答は取出し流量によらず同じになる。形式Aでは領域IIの中温水が連通管を通って領域

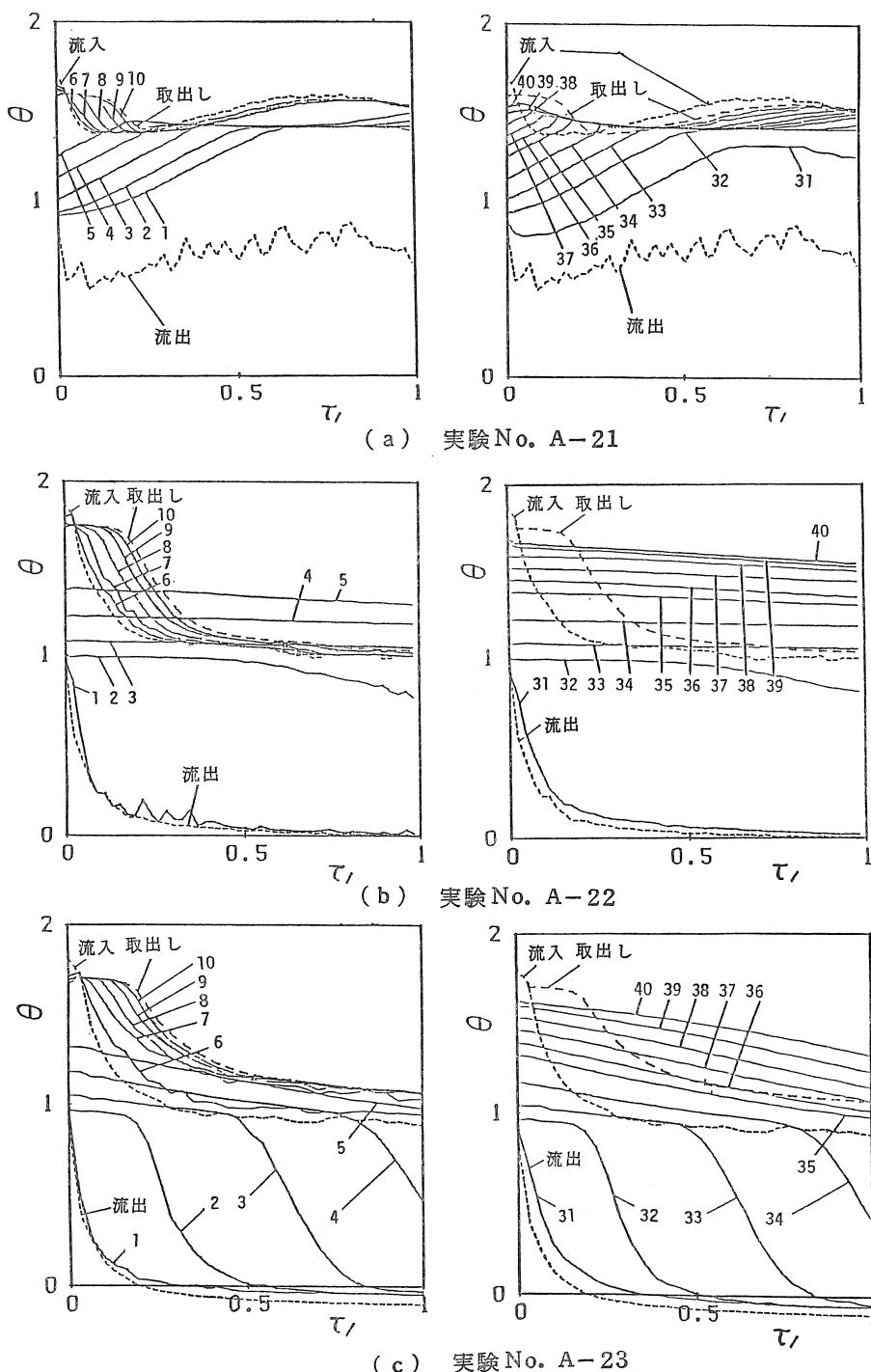


図4 槽内および取出し温度応答線図（形式A）

Iへ入る際にいくらか混合するために実際の取出し温度は理想取出し温度に比べて領域Iの高温水が取出されつくす際に若干低くなるが、全体として形式A、C、Dの温度応答は取出し終了時近傍($\tau_1=1.0$)の短時間を除いて理想取出し温度の応答と同様である。しかし形式Bでは領域Iの高温水が取出され、つづいて領域IIの中温水が取出される際に実際の取出し温水の温度は理想取出しの場合より低くなり、しかもその低くなる度合は取出し流量が多くなるほど大きくなる($\tau_1=0.18\sim0.45$)。これは次の理由によるものと考えられる。すなわち前述のようにこの時間に取出される温水は連通穴を通って領域IIの中温水と領域Iにすでに入っている領域IIIの低温水が混合したものになるからであり、しかも領域IIの中温水が連通穴を通って領域Iへ流れ出るための駆動力は前報²⁾でも述べたようにそれぞれの領域の温水の密度差によって定まるので、この流量は取出し流量が増加しても、それに比例して増加することができず、したがって取出し流量が多くなるほど取出される。

温水中に占める領域IIIの低温水（すでに領域Iに入っている）の量が多くなり、取出し温度が低くなることになる。また、理想取出しの場合には領域IIIの低温水が取出される時間でも、実際の取出しの場合には領域IIの中温水が混合して取出されるので、取出し温水の温度は理想取出しの温水温度よりも高くなる（ $\tau_1=0.45\sim0.81$ ）。すなわち取出し流量が多いほど領域IIの中温水と領域IIIの低温水が混合し、両流体の平均さ

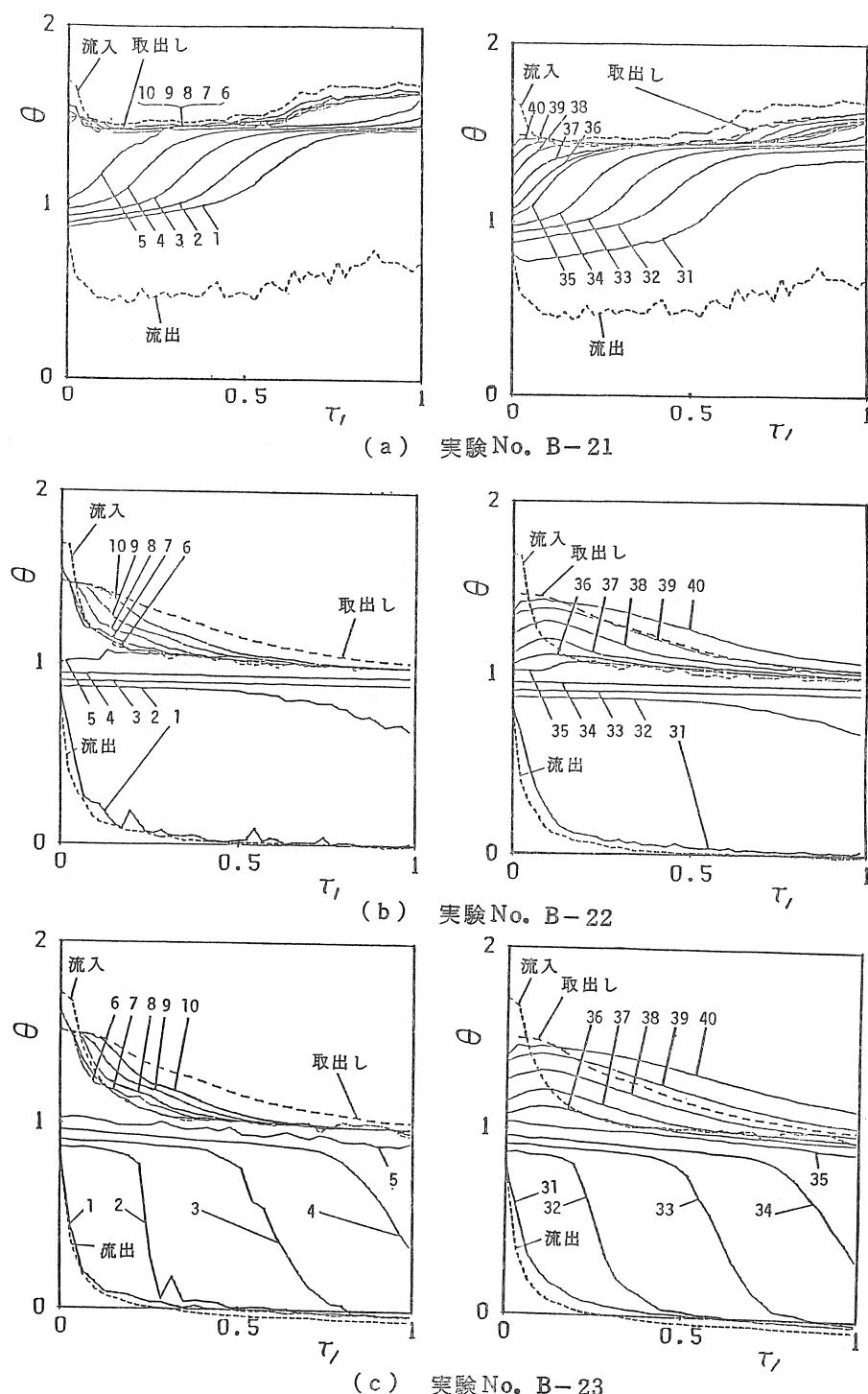


図5 槽内および取出し温度応答線図（形式B）

れた温度の温水が取出されることになる。

3.2 蓄熱しながら温水を利用する場合

循環流量約1.8l/min、温度上昇約9°Cに設定し、適当な時間蓄熱した後、集熱回路の循環ポンプとヒータを蓄熱過程のままに保ち、蓄熱槽内の温水を取出す実験を行なった。それぞれの形式で蓄熱過程の時間と同じにして、取出し流量を循環流量よりも多くした

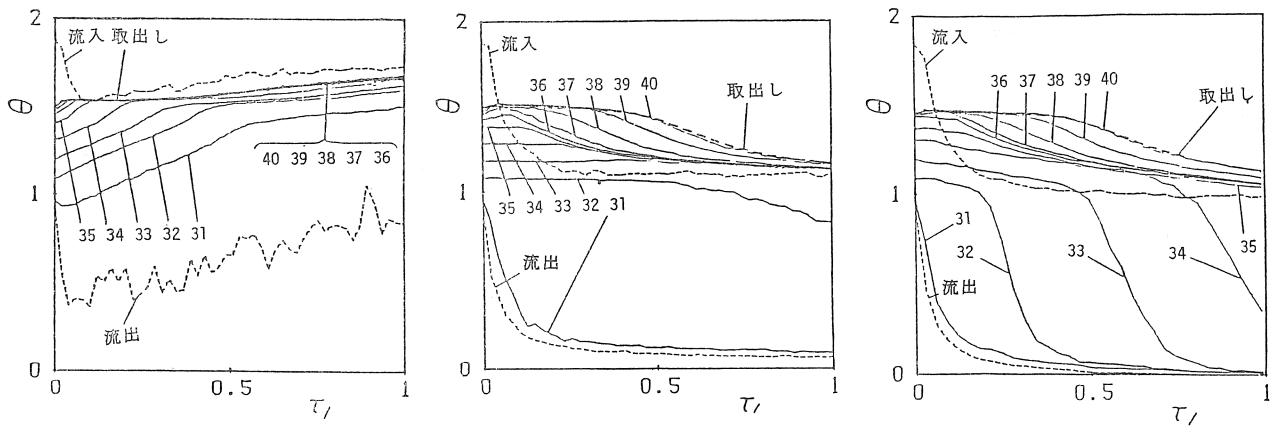


図6 槽内および取出し温度応答線図(形式C)

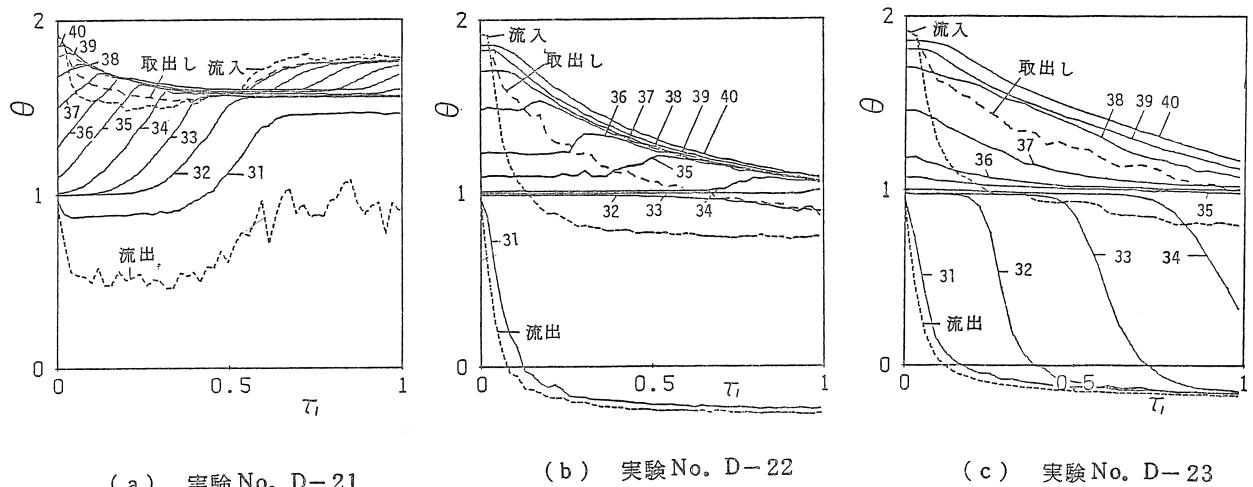


図7 槽内および取出し温度応答線図(形式D)

場合、ほぼ等しくした場合および少なくした場合の3種類に変えた。それらの実験条件を表2に示す。取出し過程の槽内の温度の過渡応答線図を取出し温水の温度、循環流の流入、流出温度と共に各形式について図4～7に示す。形式A(図4)では循環水が内槽(領域I)の底部に流入するため、取出し流量が循環流量より少ないか(図4-(a))ほぼ等しいとき(図4-(b))、取出される温水は領域Iの温水だけになる。したがって領域IIの中温水は全く利用できずに残される。取出し流量が循環流量より少ない場合には、循環流量から取出し流量を差引いた残りの流体は連通管を通して領域IIへ押し出される。循環流の流入温度が低下すると、この温度の下がった流入水が温度の高い温水を蓄えている領域IIの上部へ運ばれるので、その際には領域IIの温度が混合のため低下することになる。取出し流量が循環流量より多い場合には(図4-(c))、取出し流量が循環流量を上まわる量は領域IIの中温水で補なわれるが、この中温水は領域Iに流入する低温の水と混合するので、取出される温水は領域IIの蓄熱

した温水よりもかなり低下する。このように形式Aでは温度の下った集熱回路の循環水を内槽へ流入させると、領域IIや領域IIIの温水が利用できずにそのまま残されたり、利用される際にもその温度がかなり下げられるために、好ましい蓄熱槽としての機能を示さない。しかし循環水の流入口をその温度の高低によって内槽と外槽へ切換えれば先述の好ましくない機能は改善されることは容易に推察できるが、この場合の構造は複雑になる。形式B(図5)では領域Iと領域IIの温度差を駆動力として連通穴を通じてそれらの領域を循環する流れによって、流入する流体は領域Iあるいは領域IIへ運ばれるので、取出し流量が循環流量とほぼ等しいか(図5-(b))、多い場合(図5-(c))にも領域IIの中温水はそれほど温度低下せずに利用される。また取出し流量が循環流量よりも少ない場合(図5-(a))にも循環流量のうち取出し流量を越えた流体が低温であっても、それは領域Iあるいは領域IIの下方に運ばれると共に、領域IIの上方には連通穴を通じて領域Iの高温水が運ばれるので、すでに

蓄熱した領域Ⅱの中温水の温度を下げる事はない。このように形式Bは形式Aよりも構造が簡単で、しかも蓄熱された温水を有効に取出せる蓄熱槽であるといえる。従来形の形式C(図6)では取出し流量と循環流量との間の流量の大小に関係なく蓄熱槽の最上層の高温水が取出される。また、取出し開始前に領域Ⅲに蓄熱されていた温水で、流入温水よりも温度の高いものは当然のことながら流入温水と混合し、その温度は低下する。形式D(図7)では取出し口近傍に循環流が流入するため、取出し温水は循環流と槽内の上層にある流体が混合したものとなる。したがって流入温度が低下するとともに取出し温度も低下し、その温度は槽上層に蓄熱した温水よりも低くなる欠点があり、有効な蓄熱槽とはいえない。

4. 結 言

本報では前報で報告した蓄熱過程の特性の吟味に続き、構造が簡単で、かつ蓄熱材を温度別に蓄熱しうる蓄熱槽に対して蓄熱材を利用する場合の特性を実験により明らかとした。得られた結果を以下に要約する。

(1) 蓄熱過程と温水利用時が分離している場合には、本研究で考案試作した形式A, Bは従来の蓄熱槽形式C, Dと同様に槽内の高温水から順に取出すことができる。しかし取出し流量が多くなると形式Bでは領域Ⅱの温水を取出す際に、その温度は蓄熱時の温度に比較して若干低くなる。

(2) 蓄熱しながら温水を利用する場合には形式Bは形式Cと同様、形式A, Dに比較して温水を有効に取出せる。

参 考 文 献

- 1) 辻本誠・相原和伸・中原信生、蓄熱槽に関する研究 第1報—成層型蓄熱槽の槽内混合機構に関する実験的研究、空気調和・衛生工学会論文集 No.16 (1981), 23
- 2) 竹内正紀・木村照夫・安川敬一、温度別蓄熱槽に関する一試案 第1報 蓄熱過程の特性の吟味、太陽エネルギー、Vol. 12, No. 3(1986),

(昭和60年7月2日 原稿受理)