凝縮熱を利用した形状安定化ポリエチレン粒子群の非定常蓄熱特性*

稲葉英男^{*1}, 米田 彰^{*2}
堀部明彦^{*1}, 尾崎公一^{*1}

The Transient Latent Heat Storage Characteristics of the Shape-Stabilized Polyethylene Pellets by Condensed Heat

Hideo INABA, Akira YONEDA,
Akihiko HORIBE and Koichi OZAKI

This paper deals with the transient heat storage characteristics of high-density polyethylene pellets used as a latent heat storage material by the condensed heat from the ethylene glycol vapor. The polyethylene pellets are fabricated by the shape-stabilization treatment in which the molten pellets maintain the same shape as the solidified ones. The polyethylene pellets packed in the cylindrical heat storage vessel are melted by the condensed heat from the flowing vapor. The effects of vapor temperature, flow rate and the amount of the pellets on the latent heat storage characteristics are investigated experimentally. Moreover, the vapor movement among the packed pellets is enhanced by using the partition plate in the pellets layer. The nondimensional correlation equations of the completion time of heat storage are defined in terms of various nondimensional parameters.

Key Words: Heat Storage, Phase Change Material, Polyethylene Pellet, Ethylene-glycol Vapor, Condensed Heat

1. 緒言

近年, 特に昼夜間の電力需要格差の増大は, 電力エネルギー有効利用の立場から大きな問題となっている. 特に, 夜間電力の有効利用による電力利用平準化を図る手段として, 電力エネルギーの熱エネルギーへの変換そして貯蔵技術に関する関心が増大している. 現状の民生用熱エネルギー貯蔵法において, 一般家庭のレベルまで普及しているものは, 水の顕熱を利用した温水蓄熱のみであり, 今後一般家庭においても利用可能な蓄熱システムの開発が望まれるところである. 物質の融解・凝固に伴う潜熱を利用した蓄熱方法は, 水などの温度差を利用した従来の顕熱蓄熱方法と比較して, 単位体積当たりの蓄熱量が大きく, また融点近傍のはば一定温度の熱出力を得られる特徴を有することなどから, 有望な蓄熱技術である.

この種の潜熱蓄熱に関する従来の研究では, 円筒状あるいは球状カプセル容器内に, 蓄熱材である有機系の固・液相変化物質を封入し, その周囲に熱媒体を流して熱交換を行うカプセル型潜熱蓄熱が多く見られる^{(1)~(3)}. しかしながら, この種のカプセル型潜熱蓄熱は, カプセル内に蓄熱材を封入させる煩雑さがあり, またカプセル自体が蓄熱材の熱交換の際に大きな熱抵抗となる問題点がある. このような問題点を克服する蓄熱材として, 表面架橋処理された形状安定化ポリエチレン潜熱蓄熱材が注目されている. 形状安定化ポリエチレンは, それ自身が表面熱抵抗の非常に小さなもので, 蓄熱体は固相形状を維持した状態で, 熱媒体と直接接触熱交換により融解蓄熱させることが可能となる. 神

本ら^{(4)~(5)}は, 蓄熱体である形状安定化ポリエチレンと熱媒体を直接接触させて熱交換を行う方法として, 細長い円柱状蓄熱体群とエチレングリコール熱媒体との間の潜熱蓄熱に関する報告を行っている. このような蓄熱方法では, 蓄熱完了までに長時間を要することや熱媒体の流動エネルギー消費が大きいなどの課題が残されており, この種の蓄熱材に対しては積極的な伝熱促進法の開発が必要不可欠である.

本研究は, 中温度(150℃程度)における容積当りの蓄熱密度の高い急速潜熱蓄熱システムの開発を目的としたもので, 潜熱蓄熱材として表面架橋処理を施した粒状の形状安定化ポリエチレンを選定し⁽⁶⁾, さらに蓄熱(融解)速度を増加させる方法として, ボイラーにて発生したエチレングリコール水溶液からのエチレングリコール蒸気を粒状蓄熱体充填層に流入そして凝縮させ, その凝縮熱で同ポリエチレンの融解による潜熱蓄熱システムを提案するものである. 本潜熱蓄熱システムは, 大気圧レベルで中温度の潜熱および顕熱蓄熱が可能であり, 蓄熱槽の大幅な小型化と蓄熱時間の短縮を図ることができる.

本報告では, 非定常蓄熱特性に影響を及ぼす蓄熱槽の構造, 熱媒体蒸気温度および蒸気流速等の効果^{(7)~(9)}を実験的に検討し, その性能を評価したものである.

記号

α : 温度伝導率, C_{pa} : 潜熱を含めた見掛けの定圧比熱, C_{ps} : 定圧比熱, D : 試験部容器直径, d : 粒子相当直径, Fo : フーリエ数($= \alpha \cdot \tau_f / d^2$), H : 蓄熱材充填高さ, h : 比エンタルピー, L : 潜熱, m : 質量流量, Q : 積算熱量, q : 単位時間当りの熱量, Re : レイノルズ数($= U \cdot d / \nu$), Ste : ステファン数, T : 温度, t : クオリティ, X : 液相中のエチレングリコールの質量分

* 原稿受付 1996年2月6日.

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(〒700 岡山市津島中3-1-1).^{*2} 学生員, 岡山大学大学院.

率, Y : 気相中のエチレングリコールの質量分率, C_{em} : エチレングリコール水溶液濃度, ξ : エチレングリコールの質量分率, τ : 時間, ρ : 密度, ν : 動粘性係数

添字 a : 平均, b : ボイラ, ch : 蓄熱容器, f : 蓄熱完了, st : 蓄熱, in : 試験部入口または試験部への流入, $loss$: 試験部からの損失, m : 融解, out : 試験部出口または試験部からの流出, $'$: 飽和液または凝縮液, $''$: 乾き飽和蒸気または蒸気, 1: エチレングリコール, 2: 水

2. 蓄熱材および蓄熱方法

2・1 供試蓄熱材の性質 本研究で潜熱蓄熱材として使用した表面架橋高密度ポリエチレン粒状蓄熱材の形状写真とその形状寸法を図1に示す。図1に示されるように、粒状蓄熱材平均長径 $d_0=3.00\text{mm}$, 短径 $d_1=2.07\text{mm}$, 長さ $d_2=2.96\text{mm}$ のペレット状で、粒子の平均相当直径は $d=3.09\text{mm}$ であり、そして粒子1個の平均質量は 0.014g である。尚、高密度ポリエチレンの表面は高密度かつ高融点の三次元網目状構造となっており、内部のポリエチレンが融解しても、外部へ漏れない特徴を有するものである。すなわち、表面架橋層は、数十分子層の薄いもので、熱抵抗が小さくそして内部蓄熱材が融解しても固体状態の形状を保つことになる。

図2は、使用したポリエチレン蓄熱材の融解潜熱を含めた見掛けの比熱 C_{pa} の温度依存性を示したものであり⁽⁸⁾、融解域が $107\sim 138^\circ\text{C}$ に分散する潜熱分散型(総融解潜熱 $L=155\text{kJ/kg}$)となっている。見掛けの比熱曲線から単位質量当たりの蓄熱材を初期温度 T_0 から融解完了($T_f=138^\circ\text{C}$)まで加熱する際に必要となる顕熱と潜熱を合わせた総蓄熱量は、次のようになる。

$$Q_{th} = \int_{T_0}^{T_f} C_{pa} dT \quad \dots \dots \dots (1)$$

供試材としての架橋高密度ポリエチレンに関する他の代表的物性値⁽⁴⁾(20°C)を以下に示す。

密度 $\rho=948\text{kg/m}^3$, 熱伝導率 $\lambda=0.46\text{W/(m}\cdot\text{K)}$, 温度

(a) View of pellets (b) Dimension of pellet
Fig.1 Shape-stabilized high density polyethylene pellets

Fig.2 Specific heat characteristics of polyethylene

伝導率 $\alpha=2.70 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$.

2・2 表面架橋高密度ポリエチレン蓄熱材を用いた蓄熱方法

本研究では、蓄熱速度の増大を得る目的から、円筒形容器内に充填された供試粒状蓄熱材に、その上方より直接熱媒体蒸気を蓄熱材との接触により凝縮を起こさせ、その際発生する凝縮潜熱により、供試潜熱蓄熱材を融解させて、蓄熱する方法を試みた。

図3は、粒状蓄熱材の融解過程を模式的に示したもので、主たる蓄熱材の融解熱の供給は、蒸気の凝縮潜熱によるものである。蓄熱材充填層内を重力方向に流動するエチレングリコール蒸気は、上流部にある供試潜熱蓄熱材粒子に接する部分より凝縮し、その蓄熱材を融解しながら順次下流領域の蓄熱材に向かって進むことになる。この際、エチレングリコール蒸気は比較的均一に蓄熱材粒子群に分散することより、流動抵抗の小さな状態で上流部より均一な状態で大きな融解速度を保つことが可能で、蓄熱材全体の蓄熱速度の増大が図れる。なお、50%エチレングリコール水蒸気の凝縮熱は、 $L_v=1529\text{kJ/kg}$ と大きなものである。また、凝縮エチレングリコール液は、蓄熱材粒子表面を覆いながら流下することになる。また、エチレングリコール水溶液濃度を変えることにより、任意の温度を持つ蒸気を得ることが可能である。すなわち、この種の架橋ポリエチレン融解温度に達するエチレングリコール蒸気温度は、エチレングリコール水溶液の濃度を変えるだけで、大気圧レベルで得られることになる。

3. 実験装置及び実験方法

3・1 実験装置 図4は実験装置の概略を示したものである。実験装置は、主として蒸気発生部としての電気ボイラ①、粒状潜熱蓄熱材が充填される円筒状試験蓄熱槽②、蓄熱槽流出凝縮液の計量部⑤、蓄熱槽流出蒸気の計量部⑥およびこれらを結ぶ管路系から構成されている。電気ボイラ①で発生したエチレングリコール蒸気は、蒸気流量計測部⑦を通り試験部②へ流入し、蓄熱材充填層内の粒状蓄熱材と直接接触しながら凝縮し、その凝縮熱により蓄熱材を融解して蓄熱を

Fig.3 Melting illustration of heat storage layer

行う。試験部から流出した凝縮液および蒸気は気液分離器③により分離され、凝縮液については、その質量 $m_{out,L}$ の経時変化が電子天秤⑤(分解能0.1g)にて計測される。一方、蒸気については、補助凝縮器④で完全に凝縮させた後、その質量 $m_{out,V}$ の経時変化が電子天秤⑥(分解能0.1g)にて計測される。ボイラ出口の蒸気温度は、素線径0.3mmのクロメル-アルメル熱電対(1mm径の保護管に収納：測定精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)により測定され、ボイラ内の圧力および試験部出入口圧力は、ブルドン管式連成圧力計を用いて測定される。尚、用いた圧力計の圧力測定精度は $\pm 3\text{kPa}$ である。ボイラから周囲環境へ放出される熱損失は、ボイラ外壁に張り付けられた熱流束センサ(測定精度 $\pm 2\%$)により測定される。また、周囲環境への熱損失を極力軽減するため、蓄熱槽を除くほぼ全ての管路系に設けたニクロム線ヒータで保温し、さらに装置全体を厚さ100mmのグラスウール断熱材で覆っている。

図5は、試験部の詳細を示したものである。試験部容器はステンレス鋼製であり、内直径 $D_{ch} = 100.0\text{mm}$ 、高さ $H_{ch} = 568.0\text{mm}$ 、肉厚 $t_{ch} = 0.8\text{mm}$ の円筒部分と、その上部および下部で外径 $D_0 = 19.05\text{mm}$ 、内径 $D_i = 17.05\text{mm}$ の銅管につながる円錐状部分およびこれらを接合させるフランジ部などから構成されている。円筒試験部の下部には、粒状潜熱蓄熱材保持のためのステンレス鋼製ワイヤメッシュ(≠1000、素線直径 $d = 0.2\text{mm}$)が設けられている。粒状潜熱蓄熱材は、試験部容器内に均一に充填され(蓄熱材充填層高さ H)、同図中に示す11箇所(T_{chin} 、 T_{out} および $T_1 \sim T_9$ の記号)に取付けられた素線径0.3mmのT型熱電対(測定精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)によって、蓄熱槽内温度及び試験部入口・出口蒸気温度 T_{chin} 、 T_{out} が測定される。尚、蓄熱材充填層と試験部内壁とに形成された間隙から流出する蒸気を遮断す

るため、試験部底に幅5mmのリング状テフロンシートが敷かれてある。試験部容器への入熱量 Q_{ch} (顕熱量)は、試験部外壁内に等間隔に埋め込まれた9本の素線径0.3mmの銅-コンスタンタン熱電対による温度測定値をもとに算出する。試験部から周囲へ放出される熱量は、試験部側面外壁の三箇所に取り付けられた熱流束センサ(測定精度 $\pm 2\%$)の測定値をもとに算出する。各熱電対の熱起電力及び電子天秤からの電気信号は、測定時間間隔 $\tau = 15\text{sec}$ ごとにデータ収録システム(分解能 $1\mu\text{V}$)を介してコンピュータにて自動収録され、実験終了後にデータの整理及び解析を行った。

3・2 蒸気流量の計測法 試験円筒容器部へ流入する蒸気流量は、図4の⑦、⑧に示す位置にオリフィスと電子式差圧発信器を組み合わせた微小蒸気流量計測システムを開発することにより測定した。高温蒸気に対する電子式差圧発信器のセンサ保護の為、配管内にあらかじめ油系のシール液を満たしてオリフィス前後の差圧を測定することにした。また、導圧管の配管方法を検討した結果、リザーバタンクにより液位が常に一定となるように工夫を施した。配管にはニクロム線ヒータを巻き、そのヒータ出力制御による温度調節から計測配管系内の蒸気の凝縮を防止している。本蒸気流量計測システムの測定精度は、蒸気を凝縮させてその質量測定結果と比較して $\pm 3\%$ 以内で一致していた。

3・3 実験方法 実験に先立って、実験装置全体の管系を真空ポンプにより十分真空にした後、ボイラ内の電気ヒータに入力し、蒸気の発生を開始する。ボイラ内の圧力が大気圧以上になったところで、ボイラ出口バルブを開けバイパスループに蒸気を流す。ボイラの電気ヒーター入力を制御することで蒸気流量を設定する。蒸気流量が十分安定した後、一時的に電子天秤⑤、⑥の上方のバルブを閉じ、蒸気流をバイパスループ

Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.5 Detail of test section

フから試験部蓄熱槽へバルブを切り換え、蓄熱実験を開始する。さらに、試験部出口蒸気圧力が大気圧程度に達したことを確認し、一時的に閉じておいた電子天秤上方の2つのバルブを徐々に開放する。実験中は、試験部入口蒸気温度がボイラ温度にほぼ等しくなるように、配管に巻かれたニクロム線ヒータへの電気入力を手動にて微調整する。試験部入口蒸気温度と試験部出口蒸気温度の時間的変化が等しくなった時点で実験を終了する。実験は、蓄熱特性に及ぼす因子として試験部容器空塔流速 U 、入口蒸気温度 T_{chin} 、粒状潜熱蓄熱材充填高さ H を取り挙げ、以下のような条件で行った。後述する粒子充填層内に仕切板を挿入した場合の実験もほぼ同様の条件で行った。試験部容器内空塔流速 $U=4.2 \times 10^{-2} \sim 22.5 \times 10^{-2}$ m/s、蓄熱材充填層入口蒸気温度 $T_{chin}=133.0 \sim 165.0^\circ\text{C}$ 、蓄熱材充填層高さ $H=9.50 \sim 42.0$ cm、蓄熱材充填層高さ(仕切板挿入) $H=10.7 \sim 45.7$ cm。

4 実験結果および考察

4・1 各要素における熱量の算出方法 単位時間当たりの蓄熱材の顕熱と潜熱の総蓄熱量 q_{st} (W)は、次式より算出した。

$$q_{st} = q_{in} - q_{out} - q_{ch} - q_{loss} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 q_{in} ：試験部への流入エンタルピ、 q_{out} ：試験部からの流出エンタルピ、 q_{ch} ：ステンレス鋼製容器への顕熱蓄熱量、 q_{loss} ：熱損失量である。また、各熱量の積算値は時間 τ で積分し、 $Q_{in} (= \int_0^\tau q_{in} d\tau)$ 、 $Q_{out} (= \int_0^\tau q_{out} d\tau)$ 、 $Q_{ch} (= \int_0^\tau q_{ch} d\tau)$ 、 $Q_{loss} (= \int_0^\tau q_{loss} d\tau)$ で表し、蓄熱材への総積算蓄熱量 Q_{st} (kJ)は、次のようになる。

$$Q_{st} = \int_0^\tau q_{st} d\tau = Q_{in} - Q_{out} - Q_{ch} - Q_{loss} \quad \cdots \cdots (3)$$

また、試験部の入口及び出口に関して、二成分(エチレングリコールと水)気液相平衡状態とすると、熱媒体の状態量が決定できる。すなわち、質量分率 ξ の湿り蒸気の温度が T であった場合のクオリティ t は、次のようになる。

$$t = \frac{X - \xi}{X - Y} \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 X および Y は飽和液及び飽和蒸気におけるエチレングリコールの質量分率である。一方、飽和液及び乾き飽和蒸気の比エンタルピ(基準温度を 0°C)をそれぞれ h' 、 h'' とすると、

$$h' = h'_1 X + h'_2 (1 - X) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$h'' = h''_1 Y + h''_2 (1 - Y) \quad \cdots \cdots (6)$$

であり、添字1及び添字2はそれぞれエチレングリコール及び水を、添字なしは混合物の状態を表す。尚、実験中の試験部圧力が大気圧にほぼ等しい(0.1MPa)ことから、上記の計算に必要な圧力は大気圧としてある。そして、単位時間当たりの熱量 q (W)は質量流量 m から次のようになる。

$$q = m(1-t)h' + m t h'' \quad \cdots \cdots (7)$$

上記の式(4)～(7)を試験部入口及び出口に適用することにより、 q_{in} 及び q_{out} を求める。ここで、エチレングリコールの質量分率 ξ については、ボイラー内の蒸気を乾き飽和蒸気として、温度の測定値から求めた。また、入口の質量流量 m_{in} は、入口蒸気流量計測装置から得られる測定値を用いてある。出口蒸気および液の質量流量 m_{out} は、電子天秤で測定した蒸気及び凝縮液の質量流量 $m_{out,v}$ 、 $m_{out,l}$ の和を用いてある。

4・2 蓄熱槽内の温度分布と蓄熱量の経時変化

図6(a)は、平均空塔流速 $U=4.03\text{cm/s}$ 、平均入口蒸気温度 $T_{chin}=144.2^\circ\text{C}$ 、蓄熱材充填層高さ $H=32.5\text{cm}$ および蓄熱槽初期温度 $T_0=35^\circ\text{C}$ の条件における蓄熱槽内の各測定点温度の経時変化を示したものである。蓄熱槽入口でのエチレングリコール蒸気の温度 T_{chin} は、実験開始直後数分で急激に上昇した後、一時的に低下しているが、これは実験開始直後に起こる真空状態にある試験部内に急激に蒸気が流入するため、装置内の蒸気の圧力降下に伴って蒸気の飽和温度が低下するためと考えられる。その後、これらの温度は実験開始から10～15分程の比較的短時間でほぼ一定の値となる。蓄熱材充填層内の各点の温度は、実験開始直後、試験部入口から蒸気の流れ方向の順に、 110°C 付近まで急激に上昇した後 $120 \sim 130^\circ\text{C}$ 付近まで緩やかに上昇し、再び急激に充填層入口温度まで上昇しており、潜熱蓄

(a) Temperature

(b) Mass flow rate

(c) Integrated energy

Fig.6 Time history of temperature, mass flow rate and integrated heat energy

熱材の融解が蓄熱槽上部より下部へと徐々に進行していく様子が伺える。このような温度上昇の変化は、図2で示されたように蓄熱材である高密度ポリエチレンの融解潜熱の温度領域が分散型をとるためと考えられる。図6(b)は、図6(a)と同一実験における蓄熱槽より流出した凝縮液および蒸気の質量流量 $m_{out,c}$ 、 $m_{out,v}$ の経時変化を示してある。図中の m_{out} は、 $m_{out,c}$ と $m_{out,v}$ を合計した総排出量である。実験開始直後から凝縮液の排出が見られ、そして約20分後から試験部より多くの蒸気が流出していることが観察される。この現象から、実験開始から約20分までは多量の蒸気が試験部内で凝縮し、その凝縮熱で蓄熱材の融解が行われ、約20分後より槽内に停留する凝縮液の熱抵抗や蓄熱材温度上昇による交換熱量の減少から、排出される蒸気量が増大するものと思われる。また、凝縮液および蒸気の流出量の変動は、槽内に停留する凝縮液が蒸气流路を狭めることによる蒸気圧の増大(ボイラ出力一定)により、凝縮液の槽外への排出が行われる現象が間欠に行われるためである。図6(c)は、各積算熱量そして流入エンタルピ q_{in} に対する蓄熱槽流出蒸気エンタルピ $q_{out,v}$ の割合 $q_{out,v}/q_{in}$ の経時変化を示したものである。積算蓄熱量 Q_{st} は時間の経過とともに増加し、ある一定の熱量に漸近していくことがわかる。また、流入エンタルピ q_{in} と流出蒸気エンタルピ $q_{out,v}$ の割合 $q_{out,v}/q_{in}$ は、実験開始直後はほぼ零であるが、その後急激に上昇した後約0.4~0.6の値で推移している。ここで、蓄熱完了時間 τ_f は、潜熱蓄熱材の融解終了温度まで蓄熱した場合の理論的に必要な熱量 Q_{th} (式(1)参照)の99%に達した時間と定義してある。

図7は、さらに大きい蒸气流速の平均空塔流速 $U = 8.74 \text{ cm/s}$ 、平均入口蒸気温度 $T_{ch,in} = 143.8^\circ\text{C}$ 、充填層高さ $H = 32.5 \text{ cm}$ の条件における蓄熱槽内温度、排出蒸気や凝縮液量そして各積算熱量の経時変化を示したものである。試験部空塔流速 U が遅い図6(a)の場合と比較して、図7(a)の U の大きい場合には、蒸気の流れ方向に対して温度上昇の時間幅が小さく、短時間で蓄熱が完了していることがわかる。これは、空塔流速が大きくなるほど流入熱量の増加とともに、蓄熱材を覆った液膜に作用する剪断力が強くなるため、液膜が薄くなり、かつ凝縮液の排出も促進され、結果として蒸気と蓄熱材の熱伝達が向上したためと考えられる。図7(b)では、図6(b)と比較して試験部流出蒸気が流出凝縮液よりも上回っていることが観察される。また、図7(c)に示すように $q_{out,v}/q_{in}$ が約0.5~0.7と大きいことから、蒸气流速の増大によって蓄熱材と蒸気の熱伝達は向上されるが、十分に凝縮潜熱を放出しないで蓄熱層を通過していくことが伺える。

図8は、入口蒸気温度を $T_{ch,in} = 151.5^\circ\text{C}$ に上昇した場合の蓄熱槽内温度、排出蒸気や凝縮液量および各積算熱量を示したものである。図8(a)に示すように、蓄熱

Fig.7 Time history of temperature, mass flow rate and integrated heat energy

Fig.8 Time history of temperature, mass flow rate and integrated heat energy

槽各点の温度は、蓄熱材の潜熱温度領域(107~138℃)を比較的短時間で上昇し、早期に蓄熱槽入口蒸気温度に近付く傾向となる。図8(b)に見られるように、蓄熱槽から流出する凝縮液に比べ、流出する蒸気は減少することがわかる。また、図8(c)に示すように、 $q_{out,v}/q_{in}$ は約0.2~0.4と推移し、入口蒸気温度の低い図6の場合より小さな値となっている。このことより、入口蒸気温度の上昇は蓄熱材への入熱を促進するとともに蒸気の凝縮潜熱を十分に蓄熱槽内で放出し、効率の良い蓄熱をもたらしことになる。

4・3 蓄熱材充填層形状の経時変化 実験を十数回繰り返した後、試験部容器内を観察したところ、図9で示すように、蓄熱材充填層は融解・凝固の繰返しによって円筒形状を維持したまま、その直径が容器内径より2~4mm程度収縮していることが観察された。これは、ポリエチレン粒子の融解時の体積膨張が大きく、粒子同士が圧縮され固着し、融解時の形状のまま冷却され収縮するためと考えられる。円筒形状に固まった蓄熱材充填層の形成により、蒸気はその充填層と円筒蓄熱槽の隙間を主として流れるようになり、結果として効率的な蓄熱が行えない状態となる。なお、後述の仕切板を設けない場合の実験整理式(11)は、十数回の融解・凝固を繰り返した後の蓄熱材形状の安定した状態の実験値より求めたものである。従って、種々の形状の仕切板の検討をした結果、図10に示すような簡便な構造の断面形状を持つステンレス鋼製のメッシュ(#1000、素線径0.2mm)による仕切板を充填層内に挿入し、蓄熱材充填層内に積極的に間隙をつくることにより、蒸気及び凝縮液の流路を確保する検討を行った。仕切板の配置は、分割される蓄熱粒子群の各ブロック周辺長さがほぼ同じになるようにした場合に、最短の蓄熱完了時間を得たことにより、図10(b)に示す仕切板配置とした。なお、仕切板への顕熱蓄熱量は、相対的に全蓄熱量に対し5%以内である。

4・4 蓄熱槽内の温度分布と蓄熱量の経時変化における仕切板の影響 図11は、仕切板を挿入し10回以上の蓄放熱の繰返し後の蓄熱材充填層において、図6の場合と同じ実験条件における諸値の経時変化を示したものである。図11(a)に示すように、実験初期において蓄熱材充填層全体に急激な温度上昇が観察される。これは、10回以上の蓄熱の繰返しにより、複数の仕切板に沿って蓄熱材層との間にできた間隙に蒸気を通り抜ける効果によるものと思われる。また、蓄熱

Fig.9 View of pellets taken from the test chamber

材充填層内の各温度が蒸気の流入部から順に上昇しており、蓄熱材の融解が徐々に下部に進行していく様子がわかる。ここで、蓄熱槽の蒸気出口温度 T_{out} に着目すると、充填層下部の温度よりも高くなっていることが観察される。これは、一部の蒸気が蓄熱材と十分に熱交換されないままに流出していることによる。図11(b)の蓄熱槽入口部蒸気流量 m_{in} は、実験初期において蒸気の流入が若干停滞し、蒸気流れが不安定となることが認められる。これは、蓄熱材と蒸気の大きな温度差のために、蒸気が瞬時に凝縮液となり、その凝縮液が蓄熱材粒子間又は金網メッシュに保持され、流入蒸気に対して大きな流動抵抗となっていることによる。図11(c)の $q_{out,v}/q_{in}$ は、実験開始直後は零であり、その後0.6~0.7と高い値を示すが、実験中半からは蒸気の流入が安定しており、 $q_{out,v}/q_{in}$ は、金網メッシュの無い図6の結果と比較して0.4付近で推移することより、金網メッシュの挿入は蓄熱材充填層内の蒸気の流入促進と凝縮液排出促進による効果が現れたものと考えられ、蓄熱完了時間の短縮となることがわかる。

(a) View of partition

(b) Dimension of partition

Fig.10 Form of partition meshes

(a) Temperature

(b) Mass flow rate

(c) Integrated energy

Fig.11 Time history of temperature, mass flow rate and integrated heat energy

4・5 蓄熱完了時間の無次元整理 本実験では、同一断面積を有する円筒蓄熱槽内に充填される粒状蓄熱材の質量の大小によって充填層高さ H を決定しているため、 H の高さにより総蓄熱容量が異なる。このため形状安定化ポリエチレン潜熱蓄熱槽の蓄熱完了までの時間 τ_f を次元解析より無次元時間であるフーリエ数 Fo で表し、蓄熱完了時間に及ぼす因子として、レイノルズ数 Re 、顕熱と潜熱の比であるステファン数 Ste と無次元充填層高さ H/d に分割して、それぞれの影響について整理を行った。ただし、仕切板を挿入した蓄熱槽と仕切板を設けない蓄熱槽による実験結果とは別々に整理を行った。ここで、各無次元数の定義はそれぞれ次式とした。

$$\text{フーリエ数: } Fo = \frac{a \cdot \tau_f}{d^2} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$\text{レイノルズ数: } Re = \frac{U \cdot d}{\nu} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{ステファン数: } Ste = \frac{\int_{T_0}^{T_f} C_{ps} dT}{L} \quad \dots \dots \dots (10)$$

図12は、仕切板を設けない場合において無次元充填層高さ H/d およびステファン数 Ste を一定とし、フーリエ数 Fo とレイノルズ数 Re の関係を示したものである。図12により、同一の無次元充填層高さ H/d およびステファン数 Ste のもとでは、 Re 数の増加は Fo 数の減少すなわち融解促進となることが理解でき、これらの間には $Fo \propto Re^{-1.2}$ の関係がある。図13は、レイノルズ数 Re および無次元充填層高さ H/d を一定とし、フーリエ数 Fo とステファン数 Ste の関係を示したものである。図13より、同一のレイノルズ数 Re および無次元充填層高さ H/d のもとでは、ステファン数 Ste の増加はフーリエ数 Fo が著しく減少する結果となる。すなわち流入蒸気温度の増大は融解促進となることが理解でき、これらの間には $Fo \propto Ste^{-6.7}$ の関係がある。図14は、レイノルズ数 Re およびステファン数 Ste を一定としたときのフーリエ数 Fo と無次元充填層高さ H/d の関係を示したものである。図14より、同一のレイノルズ数 Re およびステファン数 Ste のもとでは、無次元蓄熱槽高さ H/d の増大はフーリエ数 Fo の増加となり、 $Fo \propto (H/d)^{1.2}$ の関係がある。以上に述べた各無次元パラメータのフーリエ数 Fo への影響をもとに最小二乗法を用いて、仕切板無しの本実験データを標準偏差 $\pm 12\%$ にて近似する次の実験整理式を得た。

$$Fo = 1.8 \times 10^3 \cdot Re^{-1.2} Ste^{-6.7} (H/d)^{1.2} \quad \dots \dots \dots (11)$$

ただし、上式の適用範囲は、 $Re = 7.9 \sim 22.6$ 、 $Ste = 1.86 \sim 2.23$ 、 $H/d = 31.7 \sim 140.0$ である。

次に、蓄熱槽に前述の仕切板を挿入することにより充填層内部への熱移動の促進を図り、前述の場合と同様に、得られた実験結果をもとに仕切板を挿入した場合の無次元整理を行った。図15は、無次元充填層高さ H/d およびステファン数 Ste を一定とし、フーリエ数

Fo とレイノルズ数 Re の関係を示したものである。図15より、フーリエ数 Fo とレイノルズ数 Re との間には $Fo \propto Re^{-0.98}$ の関係となり、仕切板を挿入しない蓄熱槽の図12の場合よりもフーリエ数 Fo に対するレイノルズ数 Re の寄与割合は減少している。これは、仕切板の挿入により充填層内における凝縮液の排出が促進され、凝縮液による流動抵抗を軽減し、低レイノルズ数においてフーリエ数 Fo の低減が目立ったためと考えられる。図16は、レイノルズ数 Re および無次元充填層高さ H/d を一定とし、フーリエ数 Fo とステファン数 Ste の関係を示したものである。図16より、フーリエ数 Fo とステファン数 Ste との間には $Fo \propto Ste^{-3.8}$ の関係となり、図13の仕切板無しの場合よりもフーリエ数 Fo に対するステファン数 Ste の寄与割合は減少する結果となった。また、フーリエ数 Fo の低減はステファン数 Ste が小さいときほど良く現れており、凝縮液の排出促進による蓄熱材充填層内の熱抵抗の軽減効果があるものと考えられる。図17は、レイノルズ数 Re およびステファン数 Ste を一定としたときのフーリエ数 Fo と無次元充填層

Fig.12 Relationship between Fo and Re without partition

Fig.13 Relationship between Fo and Ste without partition

Fig.14 Relationship between Fo and H/d without partition

高さ H/d の関係を示したものである。フーリエ数 Fo と無次元充填層高さ H/d との間には $Fo \propto (H/d)^{0.92}$ の関係となり、仕切板を挿入したことによるフーリエ数 Fo の低減は、無次元充填層高さ H/d が大きい場合に顕著であり、主に蒸気の流れ方向における流動抵抗の軽減効果があるものと考えられる。蓄熱槽に仕切板を挿入した場合において、以上に述べたフーリエ数 Fo に対する各パラメータの影響を含めた実験整理式(12)を最小二乗法にて標準偏差 $\pm 14\%$ で誘導した。図18は、フーリエ数 Fo と各パラメータとの関係を示したもので、実線

Fig.15 Relationship between Fo and Re with partition

Fig.16 Relationship between Fo and Ste with partition

Fig.17 Relationship between Fo and H/d with partition

Fig.18 Variation of Fo with $Re^{-0.98} Ste^{-3.8} (H/d)^{0.92}$

は式(12)に基づくものである。

$$Fo = 1.7 \times 10^2 \cdot Re^{-0.98} Ste^{-3.8} (H/d)^{0.92} \quad \dots (12)$$

ただし、上式の適用範囲は、 $Re = 6.4 \sim 26.1$ 、 $Ste = 1.89 \sim 2.34$ 、 $H/d = 34.6 \sim 147.9$ である。

5. 結 論

表面架橋形状安定化粒状ポリエチレン潜熱蓄熱材の融解現象を利用した新しいタイプの潜熱蓄熱方法の検討を行った。熱媒体としてエチレングリコール蒸気の凝縮に伴う凝縮熱による表面架橋形状安定化粒状ポリエチレン潜熱蓄熱材の融解を、その蓄熱完了時間に及ぼす蒸气流速、入口蒸気温度、充填層高さおよび蓄熱槽の構造の影響を実験的に検討し、次のような結論を得た。

- (1) エチレングリコール蒸気の凝縮熱を利用した粒状ポリエチレン充填円筒型蓄熱槽における非定常蓄熱挙動が定量的に明らかとなった。すなわち、熱媒体蒸気の蓄熱槽流入温度および流入速度の増大に伴って、より短時間に蓄熱が進行する。しかしながら、効率的な蓄熱の点から蒸気の凝縮潜熱の放出による熱交換は、蒸気温度が高いほど良好となり、一方、蒸気流入速度が大きいほど蓄熱槽内で効率的な凝縮が得られないことが判明した。
- (2) ポリエチレン蓄熱材充填円筒型蓄熱槽で蓄熱材の融解・凝固の繰り返しによって、その蓄熱材粒子層は円筒形状を維持したまま固着し、その直径が2~4mm程度収縮することが判明した。蒸気はその充填層と円筒蓄熱槽の隙間を主として流れるようになり、結果として効率的蓄熱が行えない状態となる。
- (3) 粒状ポリエチレン充填蓄熱槽内の蒸気及び凝縮液の流路確保に設けた複数の仕切板は、仕切板を設けない蓄熱槽の場合と比較し、蓄熱完了時間の短縮となることが明らかとなった。
- (4) 潜熱蓄熱特性に及ぼす熱媒体蒸気温度および流速や蓄熱材充填量の影響について定量的に明らかにし、蓄熱完了時間に及ぼす各実験パラメータの効果が無次元整理式の形で表すことができた。

参考文献

- (1) 伊藤、機論, 50, 450, (昭59-2), 556.
- (2) 平田・植田、機論, 53, 485, (昭62-1), 204.
- (3) 菊池・ほか3名、化学, 16-5(1990), 982.
- (4) 神本・ほか7名、電子技術総合研究所研究報告, No.850(1984)
- (5) 宮武・ほか2名、空気調和衛生工学会論文集, No.48(1992-2), 49.
- (6) 稲葉・ほか2名、機講論, No.915-1(1991-3), 139.
- (7) 稲葉・ほか2名、機講論, No.945-1(1994-3), 126.
- (8) 稲葉・ほか3名、第29回伝熱シンポジウム講論, (1992), 789.
- (9) 稲葉・ほか2名、第32回伝熱シンポジウム講論, (1995-5), 461.