研究論文

潜熱蓄熱を利用した流体温度変動低減化

椎名 保顕^{1,*}

Reduction of Temperature Changes in Heat Transfer Fluid by the Use of Latent Heat Storage Technology

Yasuaki SHIINA^{1,*}

¹Nuclear Applied Heat Technology Division, Nuclear Science and Energy Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 4002 Narita-cho, Oarai-machi, Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki 311-1394, Japan

(Received December 15, 2005 and accepted in revised form May 9, 2006)

Application of latent heat storage technology using phase change materials (PCM) to reduce temperature changes in heat transfer fluid was studied. Temperature characteristics of heat transfer fluid flowing in a copper pipe surrounded by pure PCM or composite PCM where high porosity porous metals were saturated by the PCM were investigated by experiment and analyses. Experiment was performed by using air as a heat transfer fluid, octadecane as a PCM and copper and nickel foams as porous metals. Experimental results were compared with numerical and approximate analyses.

The results show that composite PCM with increased effective thermal conductivity augmented temperature change reduction of the heat transfer fluid. The highest reduction rate was performed by the copper foam, the second and the third were the nickel foams with fine and large pore sizes respectively. Reduction rate is increased with the increase in Reynolds number. Numerical results agreed comparatively well with the experimental results, especially agreement was well for case of the composite PCM. This implies natural convection in liquid PCM is suppressed by inserting the metal foams.

Use of latent heat storage technology at higher Reynolds number region will be effective for the reduction of temperature changes in heat transfer fluid.

KEYWORDS: latent heat storage technology, temperature change, heat transfer, PCM, metal foam, HTGR

1. はじめに

将来の社会のエネルギー源として、水素は大きな役割を果たすと考えられる。単体の水素は自然界に産出しないため、将来社会における水素供給をどのように行うかは重要な課題である。現在、日本原子力研究開発機構では、将来社会における水素供給の1つの候補として、高温ガス炉の1,000℃近い高温熱を用いた水素製造技術の研究・開発を行っている。

その場合、高温ガス炉に接続される水素製造プラント等の化学反応を行う熱利用システムは、起動時、停止時や原料供給の過剰・不足時等に流量、温度、圧力変動を生じる。これらの変動は熱的変動となって中間熱交換器を介して原子炉側に伝えられ、原子炉の運転に影響を及ぼす。そのため、原子炉系およびそれに接続された熱利用システムを安定に運転し、信頼性を向上させるには、これら熱的変動を低減することが非常に重要になる。

著者らは、このような視点から、高い固液相変化潜熱を用いた潜熱蓄熱技術の熱的変動低減化への適用について検討し、適用可能性が十分高いことを報告した¹⁾。特に、高温から低温までの熱を利用する複数の熱利用システムが高

温ガス炉に接続された場合、水の臨界温度を超えた高温の熱的変動を低減するには、比較的低い温度で温度変動低減化に有効である蒸気発生器を用いることはできず、潜熱蓄熱技術の適用の可能性は高くなると考えられる。

潜熱蓄熱を用いる場合、放熱時には熱は伝導のみで伝えられるが、一般に相変化蓄熱媒体(PCM: Phase Change Material)の熱伝導率は低いため、温度変動を効率的に低減化するためには伝熱促進が必要となる。著者らは気孔率の高い多孔体金属にPCMを含浸させ、PCMの実効熱伝導率を向上させることにより、伝熱促進効果を大幅に向上させることが可能であることを示した²⁾。

前報¹⁾において、温度変動のある伝熱流体が流れる円管外側に、多孔体金属にPCMを含浸させ、実効熱伝導率を高くした蓄熱体(複合蓄熱体)を配した場合の温度変動低減効果について解析を行った。その結果、適当な融点を持つ溶融塩をPCMとして選択することにより、熱利用システム側の除熱性能が低下して流体温度が定格より高くなった場合においても、運転員が異常現象に対処する3時間程度の間、異常な高温を正常に近い値に保持することが可能であることを示した。

本研究では、前報¹⁾を受けて、PCMとしてオクタデカンを用いた複合蓄熱体を円管外側に配した伝熱実験を行い、実験と数値解析および近似解析を比較することによ

¹ 日本原子力研究開発機構

* Corresponding author, E-mail: shiina.yasuaki@jaea.go.jp

り、数値解析、近似解析の検証を行うとともに、温度変動吸収特性への熱伝導率の影響等の考察を行った。

II. 実験装置および方法

Fig. 1 に伝熱実験装置の構成および試験部を示す。Fig. 1 左図に伝熱試験部を組み込んだ空気ループを示す。プロアを出た空気は入口冷却器、ヒータ、試験部、出口冷却器、流量計を経て再びプロアに戻る。プロアとして富士電機製リングプロアを用いた。本プロアは高圧縮比、高流量であり、出口空気温度が高くなるためプロア下段に冷却器を設置して空気温度を室温以下に下げた。試験部手前にヒータを配し、空気を周期的に加熱できるようにした。

伝熱試験部を Fig. 1 右図に示す。本試験部は外側アクリル管および内側銅管の同心二重管で構成される。外側アクリル管は内径 32 mmφ、肉厚 8 mm、内側銅管は内径 10 mmφ、肉厚 1 mm であり、長さは 440 mm である。アクリル管外側には断熱のために厚さ 5 cm のカオウールを巻き、その外側にアルミテープを巻いた。プロアからの空気は上から下に内側銅管内部を流れる。銅管とアクリル管の間の 10 mm の環状空間には蓄熱体 (PCM のみまたは PCM を多孔体金属に含浸させた複合蓄熱体) を配した。PCM としてはオクタデカンを用い、多孔体金属には発泡銅および 2 種類の発泡ニッケルを用いた。以後、この複合蓄熱体を多孔体金属の種類に応じて PCM+Cu、PCM+NiC、PCM+NiF と記す。ここで、NiC および NiF はそれぞれ気孔径の大きい発泡ニッケル (気孔径 0.96、気孔径約 2 mm) および気孔径の小さい発泡ニッケル (気孔径 0.95、気孔径約 0.5 mm) を意味する。また、発泡銅は気孔径 0.965、気孔径約 0.2 mm である。オクタデカンの物性値を Table 1 に示す。オクタデカンを多孔体金属に含浸させたときの実効熱伝導率は、多孔体金属に含浸させた液体 PCM を融点温度に保持した後、低温循環恒温槽中に設置して凝固する時間を測定する方法³⁾により求めた。この方法では、凝固過程において固相と液相の界面は融点に保持されるため、液相温度は融点付近に保たれ、自然対流の影響を無視することができる。また、発泡金属の挿入の仕方等により実効熱伝導率はばらつくが、その幅は約 ±5% 程度であったため平均値を Table 1 に示した。熱伝導率以外の物性値は以下の式から求めた。

$$\text{密度: } (\rho)_{ef} = \rho_f \varepsilon + \rho_m (1 - \varepsilon) \quad (1)$$

$$\text{比熱: } (C_p)_{ef} = \{\rho_f \varepsilon C_{p_f} + \rho_m (1 - \varepsilon) C_{p_m}\} / (\rho)_{ef} \quad (2)$$

$$\text{潜熱: } (L)_{ef} = \rho_f L \varepsilon / (\rho)_{ef} \quad (3)$$

それぞれの複合蓄熱体の実効熱伝導率を Table 2 に示す。Table 2 に示すように、発泡ニッケル NiC、NiF は気孔率がほぼ等しいにかかわらず、実効熱伝導率に違いが生じた。

Fig. 1 右図に示すように、試験部の内側銅管入口部から中心軸下方向およびそれに直角方向に x - r 座標をとる。したがって伝熱試験部は入口 $x = 0$ 、出口 $x = 440$ mm であり、蓄熱体が挿入されている領域は $6 \text{ mm} \leq r \leq 16 \text{ mm}$ である。

本空気ループの空気温度を、プロア出口、入口冷却器・出口冷却器各出口部、流量計部において 1 mmφ の K 型シース熱電対を用いて測定した。また、伝熱試験部入口部、および出口部における混合空気温度をそれぞれ 2 本の 0.5 mmφ K 型シース熱電対により測定した。蓄熱体温度は蓄熱体中心部 ($r = 11$ mm) に 1 mmφ の K 型シース熱電対を挿入して測定した。測定位置は入口部から 20 mm 下流およびそこから 80 mm 下流ごとに計 6 点である。

蓄熱体として PCM+発泡金属 (複合蓄熱体) を用いた場合の実験手順は以下のとおりである。空気ループから取り外した伝熱試験部の環状流路部に、ドーナツ状に加工した発泡金属を挿入し、融解したオクタデカンを環状空間上面まで注入する。伝熱試験部を常温中で放置して凝固させた後、空気ループに組み込む。凝固後は、固相体積は約 5% 程度収縮するため、環状部上部に約 20 mm の空間が生じる。伝熱試験部に流れる空気流量を目標値に設定し、入口冷却器出口空気温度、試験部空気温度および蓄熱体温度が

Fig. 1 Experimental apparatus and test section

Table 1 Thermal properties of octadecane

	ρ (g/cm ³)	C_p (J/g·K)	λ (W/m·K)	L (J/g)
Liquid	0.78	2.2	0.15	243
Solid	0.85	1.8	0.30	

Table 2 Thermal properties of composite PCM

	ρ (g/cm ³)	C_p (J/g·K)	λ (W/m·K)	L (J/g)
With (l) Cu (s)	1.13	1.70	4.0	176
		1.4	4.2	
With (l) NiC (s)	1.17	1.67	0.70	169
		1.39	0.81	
With (l) NiF (s)	1.25	1.58	1.0	157
		1.32	1.3	

(l): Liquid, (s): Solid

定常に達した後、ヒータに通電を開始することにより実験を始める。実験開始初期温度は約10～18℃である。実験では、入口空気温度に対して昇温、高温保持、降温、低温保持の一連の操作を加える。降温過程および低温保持過程はヒータ通電を停止した過程である。これらの操作を1回または2回繰り返して、試験部入口空気温度および出口空気温度、蓄熱体温度の測定を行う。空気温度の高温保持および低温保持時間は主にそれぞれ2時間またはそれ以上とした。以後、上述の昇温および高温保持過程を加熱過程、降温および低温保持過程を冷却過程と記述する。加熱(冷却)過程の温度および保持時間は、相変化時の特性を把握できるように、大半のPCMが融解(凝固)可能な時間および温度により定めた。そのため加熱(冷却)過程の保持時間を2時間またはそれ以上とした。入口温度は実験レイノルズ数により変えた。伝熱流体は上から下に流れるため、加熱過程ではPCMは上部から融解するが、冷却過程では高温の液体PCMが自然対流により上部に移動するため、必ずしも上部から凝固を生じるとは限らない。そのため、一度目と二度目の相変化過程は異なる特性を示すことが考えられる。そこで、実験は主として2回の加熱、冷却を繰り返した。加熱・冷却を2回繰り返す場合の周期は2時間とした。実験ではPCMのみの場合と複合蓄熱体を用いた場合の結果が比較できるように、対応する実験の試験部入口空気温度を等しく設定して実験を行った。

実験は銅管内におけるレイノルズ数が500～6,000の範囲で行った。また、加熱時の空気温度は伝熱試験部入口空気温度で約40℃(高レイノルズ数)から60℃(低レイノルズ数)の範囲で変えた。入口冷却器出口部の空気温度は約16℃である。

III. 解 析

1. 数値解析

本数値解析では、円管内流れの熱伝達相関式を与えることにより、相変化を考慮したPCM内部の熱伝導方程式を解き、実験および近似解析との比較を行った。多孔体金属にPCMを含浸させた複合蓄熱体では、多孔体金属の流動抵抗と温度の均一化により自然対流が抑制されると推測されるため、熱伝導方程式のみを解く解析を行い、自然対流を無視する効果を評価した。

蓄熱体内部の温度を求める基礎式は以下で与えられる。

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \kappa_p \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} \right) + \frac{1}{St} \frac{\partial g_s}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{T} = (T - T_f) / (T_m - T_f)$ は無次元温度、 κ_p は蓄熱体の熱拡散率、 St はステファン数、 g_s は固相率である。熱拡散率およびステファン数はPCM+多孔体金属の場合には実効値を用いる。固相率はコントロールボリューム内の空隙部における固相の体積割合を示し、空隙部が液相または固相のみの場合にはそれぞれ $g_s = 0$ または $g_s = 1$ である。固相と液相が共存している場合には $0 < g_s < 1$ であ

り、コントロールボリュームは融点温度に保持される。解析ではPCMは常に $x \geq 0$ において存在するものとし、相変化による体積変化を無視した。

境界条件として銅管内面において温度助走区間を考慮したヌッセルト数を与えた。層流の場合($Re < 2,300$)には、Poiseuille流れに対する円管長さ l の平均ヌッセルト数⁴⁾から局所ヌッセルト数 Nu_x を計算し、以下の式を与えた。

$$Nu_\infty = 3.65$$

$$Nu_x = Nu_\infty + \frac{0.0668 \frac{d_i}{x} Re Pr}{1 + 0.04 \left(\frac{d_i}{x} Re Pr \right)^{2/3}} \times \left[1 - \frac{1 + 0.0133 \left(\frac{d_i}{x} Re Pr \right)^{2/3}}{1 + 0.04 \left(\frac{d_i}{x} Re Pr \right)^{2/3}} \right] \quad (5)$$

乱流($Re > 2,300$)に対しては助走区間の効果を考慮して局所ヌッセルト数として次式を用いた⁵⁾。

$$f = 0.079 / Re^{0.25}$$

$$Nu_\infty = \frac{(f/2)(Re - 1,000)Pr}{1 + 12.7 \sqrt{f/2} (Pr^{2/3} - 1)}$$

$$Nu_x = Nu_\infty \left(1 + \left(\frac{d}{x} \right)^{2/3} \right) \quad (6)$$

ここで、 f は摩擦係数、 Nu_∞ は発達したヌッセルト数である。

伝熱試験部外管外側の境界条件として試験部断熱材外側で室内空気の流れの熱伝達率 $3 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ を与えた。実験は試験部を鉛直に配置して空気流を上から下に流したため、冷却時にはPCM内部で自然対流の影響が現れる可能性があるが、数値解析では計算の簡略化のためPCM内部に生じる自然対流は無視した。

実験との比較を行う数値解析では、寸法は実寸を用い、伝熱試験部入口空気温度の実測値を入力データとして出口空気温度およびPCM温度を求めた。また、近似解析との比較を行う数値解析では、伝熱流体としてはヘリウムを用い、内径10 mmφ、肉厚1 mm、長さ500 mmの銅管外側に厚さ20 mmの潜熱蓄熱体を配し、銅管内を流れる伝熱流体に入口でステップ状温度変動を与え、流体温度、壁温等を求めた。

2. 近似解析

潜熱蓄熱に用いるPCMの潜熱は大きいため、相変化界面の移動速度は小さい。そこで、PCM初期温度が融点に近い場合には現象を準定常を仮定して解くことが可能である。近似解析は現象を支配するパラメータを抽出するのに極めて有効であるとともに、近似解析の精度を把握することにより、現象の定量的評価を簡便に行うことを可能とする。

半無限空間に初期温度が融点 T_f の固相のPCMが存在

し、PCM 内に置かれた内外径 d_i および d_o の円管に流れる伝熱流体温度が時刻 $t=0$ に T_{in} に変化した場合、 $x=x$ における混合流体温度 T_{gm} 、円管内壁温 T_w および界面位置 s と時間 t の関係は Ste が小さい場合には以下のように求められる¹⁾。

$$\frac{T_{gm}-T_{in}}{T_f-T_{in}} = 1 - \exp(-Ax) + a \exp(-Ax) \times \ln \frac{a+1}{a+\exp(Ax)} \quad (7)$$

$$\frac{T_w-T_{in}}{T_f-T_{in}} = \frac{1}{1+a \exp(-Ax)} \quad (8)$$

$$t = \frac{\rho_p L}{2(T_f-T_{in})} \left[\frac{1}{\lambda_g} \left\{ \frac{2 \exp(Ax)}{Nu_\infty} + \frac{\lambda_g}{\lambda_w} \ln \frac{r_w}{r_i} - \frac{1}{2} \frac{\lambda_g}{\lambda_p} \right\} \times (s^2 - r_{ic}^2) + \frac{1}{\lambda_p} s^2 \ln \frac{s}{r_w} \right] \quad (9)$$

ここで、

$$A = \frac{4Nu_\infty}{RePrd_i}, \quad a = \frac{Nu_\infty \lambda_g}{2\lambda_w} \left\{ \ln \frac{r_w}{r_i} + \frac{\lambda_w}{\lambda_p} \ln \frac{s}{r_w} \right\}$$

上式で x は円管入口から流れ方向への座標、 λ_g 、 λ_w はそれぞれ伝熱流体および円管壁の熱伝導率である。また、 Nu_∞ は (5)、(6) 式に示す発達したヌッセルト数である。この場合、管軸方向への熱の流れは半径方向への熱の流れと比較して無視している。流体は伝熱管と熱交換を行い、下流にいくに従って PCM 融点温度 T_f に近づく。円管出口部 $x=l$ における伝熱流体温度 T_{gm} と T_f との差は (7) 式を用いて次式で与えられる。

$$\frac{T_{gm}-T_f}{T_{in}-T_f} = \exp(-Al) - a \exp(-Al) \ln \frac{a+1}{a+\exp(Al)} \quad (10)$$

出口伝熱流体温度と PCM 融点の差と入口伝熱流体温度と PCM 融点との差との比を温度変動率 α として定義すると、 α は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\{T_{gm}\}_{out} - T_f}{\{T_{gm}\}_{in} - T_f} = \frac{T_{gm} - T_f}{T_{in} - T_f} = \exp(-Ax) \left\{ 1 - a \ln \frac{a+1}{a+\exp(Ax)} \right\} \quad (11)$$

温度変動率が小さい方が入口温度変動の低減効果が大きいことになる。 α は流路長さ x に依存する量であるため、同じ x で比較する必要がある。また、温度変動率 α には以下の議論が成り立つ。円管壁温度が一定の場合には、位置 x における伝熱流体温度は Ax のみに依存する。しかし、本研究の場合には流体は円管壁を介して外側の蓄熱体と熱交換を行うため、円管壁温度は流れ方向に変化し、熱交換量は円管壁温一定の場合と比べて減少する。円管壁およびその外側蓄熱体の熱伝導率が無限大の場合には、壁温は蓄熱体の相変化がすべて完了するまで融点温度に保持されるため、その間は一定となる。つまり円管壁温一定は熱伝導率が無限大の場合に相当する。蓄熱体の熱伝導率が非常に小さい場合には、円管壁温度は流体との熱交換後直ちに流

体温度に近くなり、流体温度はほとんど変化しないまま流れる。したがって、温度変動率が最も低減されるのは等温壁を仮定した場合である。

IV. 結果と考察

1. 実験と解析の比較

Figs. 2, 3 に $Re = 1,200$ および $Re = 5,000$ の場合の空気温度、蓄熱体平均温度の実験結果および数値解析結果を示す。Fig. 2 は $Re = 1,200$ の場合の結果であり、横軸は加熱開始からの時間(s)を、縦軸は温度を示す。図に点線で示す T_{in} は入口空気温度で最大値約 45°C である。Fig. 2 (a) は伝熱試験部環状部に PCM のみを封入した場合、(b) は PCM + 発泡銅を封入した場合の結果である。実験では加熱、冷却を 2 時間周期で 2 回繰り返した。(a)、(b) に示す実験の PCM の初期温度の差は約 2°C である。PCM の初期エンタルピーの差は、2 時間の加熱過程で伝熱流体から PCM への入熱量の約 3% 程度であり、無視することができる。記号は実験結果を示し、○は出口空気温度 ($(T_{gm})_{out}$)、▽は蓄熱体温度で、実測した 6 本の蓄熱体温度の平均値を示す ($(T_{PCM})_{av}$)。また、図中の実線および

(a) Without metal foams

(b) With copper foam (PCM+Cu)

Fig. 2 Time trace of inlet, exit gas and average PCM temperatures at $Re = 1,200$

(a) Without metal foam

(b) With copper foam (PCM+Cu)

Fig. 3 Time trace of inlet, exit gas and average PCM temperatures at $Re=5,000$

破線はそれぞれ出口空気温度および蓄熱体平均温度の数値解析結果を示す。

また、Fig. 3は $Re=5,000$ の場合の結果であり、(a)、(b)および記号等は Fig. 2の場合と同じである。この場合、Fig. 3(a)、(b)に示す実験のPCMの初期温度の差は約7°Cと大きい、Fig. 2の場合と同様に、初期エンタルピーの差は入熱量の約3%以下であり、無視することができる。出口空気温度は $Re=1,200$ の場合には(Fig. 2)、1回目および2回目の加熱時ともPCM+発泡銅の場合の方がPCMのみの場合より若干低くなる程度であるが、 $Re=5,000$ の場合には(Fig. 3)、1回目の加熱時にはPCM+発泡銅の方がPCMのみの場合と比べかなり低くなっていることがわかる。PCM+発泡銅で $Re=5,000$ の場合(Fig. 3(b))、出口空気温度は2回目の昇温時、約17,000 s後以降に急速に上昇し、最高温度はPCMのみの場合とほぼ同じ値に達する。実験におけるPCMの観察から、この場合にはPCMはすべて融解しており、出口空気温度の急速な上昇はPCMが完全に融解して潜熱を放出したために生じたものである。

蓄熱体平均温度は、 $Re=1,200$ の場合にはPCM+発泡

(a) Without metal foam

(b) With copper foam (PCM+Cu)

Fig. 4 Distribution of the PCM temperatures in the flow direction at $Re=5,000$

銅の方がPCMのみの場合と比べて若干高い程度であるが、 $Re=5,000$ の場合にはPCM+Cuの場合の方がかなり高くなることが示されている。また、 $Re=5,000$ の場合には蓄熱体平均温度がPCM融点(約27.5°C)を大きく超えることからPCMに融解が生じていることがわかる。さらに、Fig. 3(b)の場合には、出口空気温度が $t=17,000$ s以降急速に上昇することから、目視による観察だけでなく温度計測からもPCMが完全に融解したことが示されている。実験結果と数値解析結果を比較すると、Fig. 3(a)の加熱時の蓄熱体平均温度に差が生じている以外は比較的良く一致している。これは、 $Re=5,000$ でPCMのみの場合には、液相PCM内部に自然対流が生じ、それにより実験と解析の差が大きくなっているものと考えられる。一方、PCM+Cuの場合は蓄熱体内部の自然対流は抑制されていることが示唆されている。

Fig. 4に、 $Re=5,000$ における2回目の加熱・冷却過程の蓄熱体内温度分布を時間をパラメータとして示す。図で横軸は流れ方向(x-方向)距離を、縦軸は温度を示す。図には $t=18,000$ s から $t=25,200$ s まで(加熱14,400~21,600 s, 冷却21,600~28,800 s)3,600 sごとの温度分布を示す。

Fig. 4(a)はPCM のみの場合、(b)はPCM+Cu の場合である。図で記号+線は実験結果を、線のみは数値解析結果を示す。PCM のみの場合はFig. 4(a)から、加熱終了時($t=21,600$ s)に最も下流位置($x=400$ mm 付近)において固相が存在していることがわかる。一方、PCM+発泡銅の場合には $t=21,600$ sにおいてすべてのPCM は融解している。冷却時にはPCM のみの場合には $t=25,200$ sにおいて低温空気が流入しているにもかかわらず、 $x=100$ mm においてPCM 温度は若干上昇しているのが見られる(Fig. 4(a))が、これは液相PCM 内部の自然対流の影響であると考えられる。一方、PCM+発泡銅の場合には $t=25,200$ sにおいては入口部から下流に向かって温度が高くなっているのが観察され、自然対流の影響は観察されない(Fig. 4(b))。数値解析と実験との一致はPCM+発泡銅の場合に非常によいが、PCM のみの場合にはPCM 内部に液相が生じている場合に一致が悪くなっている。

$Re=5,000$ の場合の数値解析結果から得られた、1 回目の加熱過程における蓄熱体内部の相変化界面をFig. 5に示す。左図はPCM のみの場合、右図はPCM+発泡銅の場合の結果である。伝熱流体は図の左側を上から下に流れており、界面左側が液相、右側が固相を示す。明らかにPCM+発泡銅の場合の方が融解が早く進んでいることがわかる。

$Re=5,000$ におけるPCM のみの場合およびPCM+発泡銅の場合の試験部出口における温度変動率 α の時間変化をFig. 6に示す。図は3,500 sから7,000 sまでの結果を示す。図には実験結果、近似解析および数値解析結果を示した。近似解析結果は $t=0$ でステップ状に温度 T_m が与えられた場合の結果である。Fig. 6 から、近似解析の結果は実験結果よりやや高い(PCM のみの場合)かほぼ一致す

る(PCM+Cu の場合)のに対し、数値解析結果は実験結果よりやや低いという傾向を示す。実験と解析の差を生じる原因として以下の項目が考えられる。またその原因による効果を()内に示す。

- (1) 実験の場合、凝固時にPCM は収縮し、解析の加熱長より約20 mm 短くなる(実験の温度変動率を高くする)。
- (2) 近似解析では初期温度 $\approx$ 融点を仮定しているの、実験の場合より高い(近似解析の温度変動率を高くする)。
- (3) 解析のヌッセルト数を与える(6)式は厳密には発達乱流($Re > 10^4$)に適用されるため、これから求めた $Re=5,000$ の Nu_{∞} , Nu_x は実験より大きいと思われる(解析の温度変動率を低くする)。

Fig. 6 Comparison of the temperature change ratio among experiment, approximate and numerical analyses at $Re=5,000$

Fig. 5 Contour of the solid-liquid interfaces obtained by numerical analysis with and without copper foam at $Re=5,000$

(4) 近似解析では熱的助走区間を無視し Nu_{∞} のみを用いている(近似解析の温度変動率を高くする)。

近似解析の場合は, (3), (4)の効果により, ヌッセルト数の違いは小さくなることが考えられるため, PCM のみの場合に近似解析の温度変動率が比較的高めになる理由は主に(2)によると考えられる。PCM+Cu の場合には, 初期温度の違いの影響が増大した実効熱伝導率により比較的短時間で回復されるため, 実験との差が小さくなると考えられる。また, 数値解析は(1), (3)の理由で実験に比べて低い温度変動率を示すと考えられる。

Fig. 7 に $Re = 4,800$ の場合の PCM を含浸させた発泡金属の違いによる出口空気温度および蓄熱体平均温度の時間変化を示す。Fig. 7(a) は出口空気温度の結果, Fig. 7(b) は蓄熱体平均温度の結果である。点線は試験部入口空気温度を示す。Fig. 7(a) に示すように, 出口空気温度は PCM のみの場合が最も高く, 高い順に PCM + NiC, PCM + NiF で, PCM + Cu が最も低い。図で発泡銅を挿入した場合に 2 回目の加熱時 $t = 17,000$ s 後に出口空気温度が急速に上昇しているのは, Fig. 3 において記述したよ

(a) Mixed gas temperature at the exit

(b) Average PCM temperature

Fig. 7 Comparison of time trace of the gas and average PCM temperatures dependent on the metal foams at $Re = 4,800$

うに, PCM がすべて融解したために生じた温度上昇である。PCM+発泡ニッケルの場合には同様の現象は観察されなかった。また, Fig. 7(b) に示す蓄熱体平均温度は PCM のみの場合が最も低く PCM+Cu の場合が最も高い。

Fig. 8 に $Re = 4,800$, $t = 7,200$ s における蓄熱体内流れ方向温度分布と PCM 内に挿入する発泡金属の関係を示す。図に示すように, PCM のみの場合には全領域で融解していないのに対し, PCM+NiC, PCM+NiF, PCM+発泡銅の場合には入口部または入口からある程度下流まで融解を生じており, 融解した領域の体積は PCM+発泡銅の場合が最も大きい。

Fig. 9 に本実験の場合の試験部出口における温度変動率とレイノルズ数の関係を示す。図中の線は(11)式から求めた実験に対応する近似解析結果を結んだもので, 実線は PCM のみの場合, 点線は PCM+発泡銅の場合の温度変動率を示す。 $Re = 2,000$ 付近の変曲点は層流と乱流のヌッセルト数の違いによるものである。白抜き記号は実験値, 黒い記号は数値解析結果を示す。図から近似解析は実験結果および数値解析結果より高い温度変動率を示すが, その理由については Fig. 6 の考察で記述した。図で $Re \approx$

Fig. 8 Comparison of the temperature distribution in the PCM dependent on the metal foams at $Re = 4,800$ and $t = 7,200$

Fig. 9 Plot of temperature change ratio against Reynolds number with and without metal foams

6,200 において PCM+Cu の場合に、実験および数値解析が近似解析より高くなっている理由は、PCM がすべて融解したことにより相変化潜熱を失い、温度変動低減能力を失ったためである。温度変動率は PCM のみの場合より PCM+発泡金属を用いる方が小さくなり、その差はレイノルズ数の増加とともに大きくなる。PCM+発泡銅の場合には $Re=5,000$ においては温度変動率は PCM のみの場合の約 0.65 から約 0.45 に減少する。実験および解析から、温度変動低減効果は発泡銅を用いる場合が最も大きく、順に気孔径の小さい発泡ニッケル、気孔径の大きい発泡ニッケルとなり、PCM のみの場合が最も小さくなることが示された。また、PCM+Cu と PCM+NiF の温度変動低減効果は大きく違わないことが示された。

2. 考 察

(1) PCM+発泡金属の有効性

オクタデカンを PCM として用いた場合、発泡金属に含浸させた複合蓄熱体の実効熱伝導率は、Table 2 に示したように、発泡銅を用いた場合には、PCM のみの場合の約 10 倍、NiF の場合は約 3 倍、NiC の場合は約 2 倍である。これは熱の流れを 1 次元とした場合の解析から求められた実効熱伝導率⁶⁾と比べると約 30~50% と小さい。本実験では円筒中に発泡金属を挿入したため円筒壁と発泡金属は接触が不十分であり、実効熱伝導率が小さい原因は主として接触熱抵抗にあると考えられる。この場合でも Fig. 6 に示したように、長さ 50 cm という短い伝熱管を用いても複合蓄熱体を用いることで、 $Re=5,000$ において温度変動率を 30% 以上低減させることが可能であることが示された。これから、複合蓄熱体を用いることは温度低減に有効であることが示された。

また、本実験で用いた 2 種類の発泡ニッケルは気孔率はほぼ同じであるが気孔径が異なり、気孔径の小さいニッケル(NiF)の方が実効熱伝導率が高くなっている。この理由は熱の流れの 3 次元性等によるものと考えられる。

これから、さらに実効熱伝導率の高い複合蓄熱体を作ることは可能であり、それを用いれば温度変動低減効果の増大が期待できる。

(2) PCM 内自然対流の影響と数値解析の精度

PCM が融解すると液相中に浮力による自然対流が生じる。本実験においても Figs. 3, 4 において記述したように自然対流の影響が見られた。 $Re=4,800$ の場合の $t=23,750$ s における蓄熱体の流れ方向温度分布と発泡金属種類の関係を Fig. 10 に示す。加熱終了は $t=21,600$ s であり、それ以降は冷却過程である。この場合、PCM のみの場合には $x=0$ から 420 mm まで流れ方向に温度が低下している。下流側の PCM 温度は融点温度よりわずかに低い値を示すが、観察および数値計算から伝熱管ごく近傍では液相になっていると考えられ、液相内の自然対流により流れ方向に温度が下降しているものと考えられる。一方、

Fig. 10 Comparison of the temperature distribution in the PCM dependent on the metal foams at $Re=4,800$ and $t=23,750$

PCM+発泡ニッケルの場合は NiC, NiF の場合とも入口から 100 mm までは流れ方向に温度が上昇し、その後流れ方向に温度が低下している。また、発泡銅の場合には、入口から $x=260$ mm まで流れ方向に温度が上昇しておりその後低下している。これらから、発泡金属が挿入されると、液相内の自然対流は抑制され、特に発泡銅の場合には、Fig. 4(b) からわかるように、全面が液相の場合でも自然対流はほとんど生じないと考えられる。これは、発泡金属を挿入すると蓄熱体の実効熱伝導率の増加により、蓄熱体内部の温度差が小さくなるとともに流動抵抗が増加するためであると考えられる。

上から下に伝熱流体が流れる系では、自然対流が存在すると冷却時に入口部に高温液体 PCM が浮力により供給されて伝熱上有利である。しかし、実験から明らかとなり、発泡金属を挿入することによる実効熱伝導率の増加の方が自然対流による伝熱促進効果より高い伝熱促進効果を示すことがわかる。

数値解析と実験結果は比較的よく一致した。特に、発泡金属を挿入した場合には一致は良好であった。一方、PCM のみの場合は発泡金属を挿入した場合と比較して一致が良くなかった。これは上述のように、PCM 内の自然対流の影響が考えられる。実験および数値解析の比較の結果、PCM+発泡金属の場合には自然対流の影響を無視した解析を行ってもよい精度で解が得られることが示された。これは、実効熱伝導率を高くした複合蓄熱体を用いた温度変動吸収装置の設計における熱計算上極めて有利である。

(3) 数値解析と近似解析結果の比較

実験と数値解析の結果から、両者は比較的よく一致することが示された。特に複合蓄熱体を用いた場合には PCM 内部の自然対流が抑制されるために、自然対流を考慮しない数値解析により、実験を良い精度で再現することが示された。蓄熱体による流体温度変動の低減効果を表す温度変動率は、熱伝導計算による数値解析で評価す

ることができるが、近似解析で得られた(11)式が高い精度で成立すれば計算時間の節約になり非常に有効である。そこで、温度変動率の数値解析および近似解析結果(=(11)式右辺)の比較を行った。III-1章に記述したように、内径 10 mm、肉厚 1 mm、長さ 50 cm の銅管外側に厚さ 20 mm の潜熱蓄熱体を配し、入口流体温度をステップ状に変えた場合の 900 s 後における温度変動率を求め、数値解析結果を近似解析と比較した。流体としてヘリウムを、PCM としてはオクタデカンを想定した。流れは $Re = 2,300$ で層流から乱流に移るものとし、ヌッセルト数としてそれぞれ $Nu = 3.65$, $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ を与えた。結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 は下流 50 cm の位置における温度変動率とレイノルズ数の関係を示したものである。図で実線は PCM のみの場合、破線は PCM+Cu の場合の結果である。PCM のみの場合でレイノルズ数が 500 以下の領域では数値解析と近似解析の誤差は 20% 程度と大きい、レイノルズ数が増加すると誤差は小さくなり、 $Re = 30,000$ では 1% 以下となる。また、複合蓄熱体の場合には誤差はさらに小さくなる。これから、入口流体温度がステップ状に変化する場合には、近似解析による(11)式により十分高い精度で温度変動率を求められることが示された。

(4) 温度変動率

(11)式は次の 2 項の積となる。

$$\exp(-Ax) \quad (12)$$

$$1 - a \ln \frac{a+1}{a + \exp(Ax)} \quad (13)$$

ここで

Fig. 11 Comparison of the temperature change ratio between approximate and numerical analyses at $x = 50$ cm

$$Ax = \frac{4Nu_{\infty} \cdot x}{RePrd_i}, \quad a = \frac{1}{2} Bi_w \ln \frac{R_w}{R_i} + \frac{1}{2} Bi_p \ln \frac{s}{R_w},$$

$$Bi_w = Nu_{\infty} \frac{\lambda_g}{\lambda_w}, \quad Bi_p = Nu_{\infty} \frac{\lambda_g}{\lambda_p}$$

である。 α は(12)、(13)式が小さい場合に小さくなるが、(12)式より、温度変動率は Ax の変化に対して指数関数的に変化する。 Ax は Re 小、 x 大の場合に大きくなる。一方、(13)式は $Ax = 0$ のとき最小値 1 をとり、 a および Ax の増加とともに増加する。通常 $\lambda_w \gg \lambda_g$, $R_w \approx R_i$ だから、

$$a \approx \frac{1}{2} Bi_p \ln \frac{s}{R_w}$$

として差し支えない。したがって、配管長 l およびレイノルズ数が定まり、 Al が一定の場合には、PCM 実効熱伝導率 λ_p が大きいほど Bi_p , a が小さくなって(13)式が小さくなり温度変動率は低下する。また、乱流域では Re が増加すると a および(13)式が増加し、また Ax の減少により(12)式も増加して温度変動率は高くなる。このように、温度変動率は Ax , Nu_{∞} や λ_p により影響を受ける。しかし、 Nu_{∞} や λ_p が(13)式に及ぼす影響に比べて、(12)式で示される Ax の影響は指数関数的であるため、結局、温度変動率は主として(12)式で規定されることになる。上記考察および Fig. 9 から、伝熱管長さが等しい場合には温度変動率はレイノルズ数が小さいほど低くなることがわかる。そのため、Fig. 9 の結果だけから考えると、低いレイノルズ数で伝熱流体を流す方が温度変動低減化には有効であるように見える。そこで、低レイノルズ数流れによる温度変動吸収に関する検討を行う。前報¹⁾で検討した HTTR の定常運転時の条件で温度変動を減少させることを考える。前報では伝熱流体(ヘリウム)が入口で定格温度 +100 K の高温で流入したとき、熔融塩として $LiF + NaCl + NaF$ を用いてヘリウム温度を定格温度 +5 K 以内にすることを検討した。前報と同じ伝熱配管条件(内径 25.6 mm/外径 31.6 mm)で、ヘリウム温度が定格温度 +5 K 以内になるときの配管長さ、配管本数、PCM 体積に対して配管が占める体積、1 本の管の体積に対する熔融 PCM が占める体積割合を求めた。そのために必要な熔融塩体積は約 15 m³ である¹⁾。結果を Table 3 に示す。Table 3 で、 n は伝熱管の長さおよび本数である。また、 $(V_{pipe})_n / (V_{PCM})_{total}$ および $(V_{PCM})_l / (V_{pipe})_{one}$ はそれぞれ、全 PCM 体積に対する全伝熱管の占める体積割合および 1 本の伝熱管により熔融した PCM の伝熱管 1 本に対する体積割合を示す。Table 3 よりヘリウムのレイノルズ数が

Table 3 Effect of Reynolds number on the reduction of temperature changes

Re	300	500	1,000	2,000	5,000	30,000	50,000
Length l (cm)	120	195	380	755	430	810	980
Number of pipes: n	11,100	6,650	3,325	1,662	665	111	67
$(V_{pipe})_n / (V_{PCM})_{total}$	0.714	0.695	0.68	0.67	0.15	0.048	0.035
$(V_{PCM})_l / (V_{pipe})_{one}$	2.1	2.1	2.1	2.1	6.5	9.7	10.9

1,000の場合には伝熱管の長さは約3.8 mですむが、本数が3,000本以上必要となり、全PCM体積に対する全伝熱管の体積割合は0.68と高くなり、温度変動低減化装置全体の体積が大きくなる。また、一本の伝熱管が溶融することができるPCMの量は伝熱管1本の体積の約2.1倍にすぎない。レイノルズ数を高くすると、必要な配管長さは増加するが、 $Re=30,000$ の場合でもたかだか2倍程度になるだけである。一方、PCMに対する伝熱管体積の割合は5%以下となる。このことから実際の使用に当たっては、流れが層流条件よりも乱流条件で使用する方が経済性が高く有利であると考えられる。

V. ま と め

固液相変化潜熱を用いて伝熱流体の温度変動を低減化する場合の温度変動低減特性の把握を目的として、温度変動を伴う伝熱流体が流れる円管外側に蓄熱体を配した実験を行った。蓄熱体としてはオクタデカンのみ、またはオクタデカンを気孔率が約0.96の発泡ニッケルおよび発泡銅に含浸させた複合蓄熱体を配した伝熱実験を行い、実験、数値解析および近似解析を比較することにより潜熱蓄熱による伝熱流体の温度変動低減の評価を行った。その結果以下の結論を得た。

- (1) PCMに発泡ニッケルおよび発泡銅を含浸させた複合蓄熱体を用いると、実効熱伝導率を2倍から10倍高くすることができ、それにより、PCMのみの場合よりも伝熱流体の温度変動を大きく低減させることができることが示された。また、複合蓄熱体による温度変動率とPCMのみの場合の温度変動率の差は、レイノルズ数が高くなるとともに大きくなり、相対的に複合蓄熱体の温度変動低減効果が高くなることが示された。
- (2) 使用した発泡金属のうち、最も温度変動低減効果が大きいものは発泡銅、次が気孔径の小さいニッケル(NiF)、気孔径の大きいニッケル(NiC)の順であった。また、発泡銅と発泡ニッケル(F)の温度変動低減効果は大きく変わらないことが示された。
- (3) 相変化を考慮した熱伝導による数値解析は比較的良好に実験結果と一致した。PCMのみの場合にはPCM内の自然対流により融解時に不一致が観察された。しかし、複合蓄熱体を用いた場合には実験と数値解析はよく一致した。これは、多孔体金属により液相PCM中の自然対流が抑制されるためであると考えられる。
- (4) 実験、数値解析および近似解析の比較により、温度変動低減率は近似解析で得られた(11)式でよく近似できることが示された。
- (5) 潜熱蓄熱による温度変動低減効果を利用するには、伝熱管本数等を考慮すると乱流域で使用する方が効果的である。

〔記 号〕

a	: (9)式で定義される変数
A	: (9)式で定義される定数
Bi_p, Bi_w	: ビオー数, $Bi_w = Nu_\infty \frac{\lambda_g}{\lambda_w}$, $Bi_p = Nu_\infty \frac{\lambda_g}{\lambda_p}$
C_p	: 比熱
d_i	: 伝熱管内径
f	: 摩擦係数
g_s	: 固相率
l	: 伝熱管長さ
L	: 相変化潜熱
Nu_x	: x における局所ヌセルト数
Nu_∞	: 発達したヌセルト数
Pr	: プラントル数
r_i, r_w	: 伝熱円管内半径, 外半径
Re	: 伝熱流体のレイノルズ数
s	: 相変化界面の r 方向座標
St	: ステファン数 $= C_p(T_m - T_f)/L$
$T, \bar{T}$	: 温度, 無次元温度 $\bar{T} = (T - T_f)/(T_m - T_f)$
T_{in}, T_f	: 入口伝熱流体温度, PCM融点
T_{gm}, T_{PCM}	: 混合流体温度, PCM温度
ε	: 気孔率
κ_p	: 熱拡散率
$\lambda_g, \lambda_p, \lambda_w$	: それぞれ伝熱流体, PCM および円管壁の熱伝導率
ν	: 動粘性係数
ρ	: 密度
(添字)	
av	: 平均値
ef	: 実効値
f	: PCM
in	: 伝熱管入口における値
out	: 伝熱管出口における値

— 参考文献 —

- 1) 椎名保顕, 西原哲夫, “潜熱蓄熱を用いた核熱利用システムの熱負荷変動吸収,” 日本原子力学会和文論文誌, 2, 418-427 (2003).
- 2) Y. Shiina, T. Inagaki, “Study on the efficiency of effective thermal conductivities on melting characteristics of latent heat storage capsules,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 373 (2005).
- 3) H. Ogi, Y. Shiina, T. Inagaki, “Melting characteristics of phase change materials in cylindrical capsules with porous metals,” *11th Int. Symp. on Flow Visualization*, Notre Dame, USA, P5, (2004).
- 4) E. R. G. Eckert, R. M. Drake, *Analysis of Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, (1972).
- 5) 伝熱工学資料, 日本機械学会編, 第4版, (1988).
- 6) 竹越栄俊, 平澤良男, 松尾 純, 他, “発泡金属の有効熱伝導率に関する研究,” 日本機械学会論文集B編, 58[547], 879-884 (1992).