

氏 名	ひろ 瀬	せ 瀬	こう 宏	いち 一
授 与 学 位	工	学	博	士
学位授与年月日	昭和 59 年 3 月 27 日			
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項			
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻			
学 位 論 文 題 目	潜熱蓄熱に関する基礎的研究ならびにソーラーシ テムへの応用			
指 導 教 官	東北大学教授 相原 利雄			
論 文 審 査 委 員	東北大学教授	相原 利雄	東北大学教授	大塚 芳郎
	東北大学教授	武山 斌郎	東北大学助教授	斎藤 武雄

## 論 文 内 容 要 旨

1 次エネルギーの 99.7% を輸入に頼る我が国にとってエネルギー供給の信頼性を確保するための諸対策, すなわち, (1) エネルギー源の多角化, (2) 新エネルギー技術の開発促進, (3) エネルギー供給源の分散化, (4) エネルギー貯蔵技術の推進は真に必要であり, 特に, 即応性のある熱エネルギー貯蔵技術の開発が重要となっている。また, エネルギー源の多角化の観点から, 各種自然エネルギー, とくに身近に無尽蔵に存在する太陽エネルギーやゴミ焼却熱など間欠性を有する低密度エネルギーが見直されている。これらの低密度エネルギーの実際的な利用にあたっては蓄熱技術の開発は不可欠であり急務である。

この蓄熱技術の中で, 相変化時の潜熱を利用する潜熱蓄熱は相変化物質 (Phase Change Material: 以後 PCM と略記。) の融点で熱の出入りがあること, 潜熱の大きさにより蓄熱空間を大幅に縮小できるなど, 我が国において, 特に有望な蓄熱方式である。

本論文においては, この潜熱蓄熱について基礎的, ならびに応用的研究を行った。基礎的研究としては潜熱蓄熱における代表的な方式の熱的特性について, 数値的ならびに実験的に詳細に研究を行った。数値解析においては, 実用的な寸法および規模の解析を行うために, 高 Rayleigh 数において発生する動的な計算不安定を克服するための手法を提示した。

潜熱蓄熱の各方式を比較することにより明らかとなった問題点を克服するため, 球カプセル型潜熱蓄熱方式を採用した。この球カプセル型潜熱蓄熱槽について性能シミュレーション, および蓄熱

・放熱実験を行い、基礎的な熱的特性を調べるとともに、プロトタイプの前熱蓄熱槽を製作し、実験を行った。

これらの実験およびシミュレーション解析結果を基にして、今日まで、前熱蓄熱の実用化を阻んできたPCMの過冷却を克服するシステムとしてヒートポンプを併用する、球カプセル前熱蓄熱／ヒートポンプシステムを新たに提案した。加えて前熱蓄熱のソーラーシステムへの応用の有効性、および、ヒートポンプとの併用の適合性を示すことにより前熱蓄熱の有用性を明らかにした。

論文は、全編6章により構成されている。以下に各章の内容を概説する。

## 第1章 緒 論

本章は緒論であり、前熱蓄熱の意義、および問題点を述べるとともに、PCMの模索に始まる研究の経緯、近年の研究の動向などを記した。

## 第2章 多次元相変化問題の数値解法

本章では高 $R_a$ 数の場合に現われる動的不安定の克服に対する数値解析手法を展開した。

前熱蓄熱はPCMの相変化時の潜熱を利用するものであり、現象としては、日常生活に見られる水の凍結や融解に代表される多次元相変化問題となる。この問題は液相側の熱伝達と固相側の熱伝導とが複合することに加え、液相の自然対流を記述するNavier-Stokes式の強い非線形性のため、実際的な大きさへの適用は、現われる $R_a$ 数が著しく大きくなり計算不安定が生ずるため非常に困難であった。

本章では、それを克服する数値解析手法として、(1)多次元相変化界面を固定化し、1次元界面として扱う境界固定法、(2) $R_a$ 数の大きさに応じて計算領域を拡張する領域変換法、(3)分割数を大幅に低減できる高精度多点差分法、(4)勾配の大きい場所での分解能を高める変格子間隔法、(5)動的安定性を鎮静化するために、6次の最小自乗法を導入した。これらの手法を複合して適用することにより計算時間が大幅に低減され、実用上重要な高 $R_a$ 数の領域まで計算が可能となることを示し、後の章での解析を可能とした。

## 第3章 水平円管内外の融解および凝固

本章においては前熱蓄熱の実用化における過程において、代表的な各種の前熱蓄熱方式の基礎的な熱的特性を把握した。ここでは各方式のうちシェル・アンド・チューブ型、および円筒カプセル型について研究を行った。PCMとしては水、 $n$ -オクタデカンおよび $n$ -ヘプタデカンを用いた。

まずシェル・アンド・チューブ型として、水平円管まわりの水の凍結について実験および数値解析を行い、両者の間に良い一致を得た。さらに水平円管まわりの融解について数値的に解析した。また円筒カプセル型についても、PCMとして、水、 $n$ -オクタデカンを用いて、融解・凝固過程について実験、ならびに前章で示した手法を適用し実用的な規模まで数値解析を行った。

この結果、どの方式においても凝固過程が全体的な性能の律速となること、および融解過程における自然対流の重要性を明らかにした。またシェル・アンド・チューブ型とカプセル型ではカプセ

ル型が熱的特性に優れていることが知れた。

さらに円筒カプセル型の融解の場合、円筒下部において、実験的に、軸方向の周期的なうねりが観察された。これは水中での氷円柱の融解の場合にも見られるものである。数値的に解析することにより、3次元熱不安定現象が現われること、および軸方向に周期的なうねりが生ずるメカニズムを明らかにした。

#### 第4章 球カプセル型潜熱蓄熱

潜熱蓄熱の各方式の比較検討により以下の2つの問題点が明らかとなった。(1)熱伝達率が小さいため、熱的応答が遅い。(2)円管などを用いるため任意形状の蓄熱槽を利用できない。本章ではこれらの問題点を克服するため球カプセルにPCMを封入する球カプセル潜熱蓄熱方式を採用し、基礎的な熱的特性、および各種パラメータの影響を把握するため、マイクロおよびマクロの両面から研究を行った。マイクロの面としては、蓄熱槽の単位構成要素である単一球カプセルの融解について数値解析を行うことにより、融解過程における自然対流の影響、球形状の融解、また円筒カプセルと異なり、下部側での熱不安定が起きにくいことを明らかにした。マクロな面としては、このPCMを封入した球カプセルを蓄熱槽に積み上げた球カプセル潜熱蓄熱槽の性能特性を実験的ならびに数値的に解明した。モデル実験には、 $\phi 30$  mmのプラスチック製球カプセル、PCMとしてPEG # 600を用いた。数値解析では、蓄熱槽の性能に対する(1)球カプセル直径、(2)動作流体の流量、(3)流入温度、(4)球カプセル材質、(5)PCMなどのパラメータの影響を調べ、次の知見を得た。(1)球カプセル直径を適当に定めることで蓄熱槽の熱的応答特性を選択できる。(2)流量により応答特性は反転する。(3)球カプセルの材質はプラスチックが妥当である。(4)PCMの選択は非常に重要な意味を持つ。このように潜熱蓄熱槽の性能シミュレーションにより蓄熱槽設計上の基礎的な情報が得られた。

#### 第5章 潜熱蓄熱ヒートポンプシステム

本章では、様々な利点を有しながらPCM固相の熱伝導率の低さによる応答性の低さ、およびPCMの過冷却現象などで今まで実用化を阻まれていた潜熱蓄熱について、球カプセル潜熱蓄熱方式とヒートポンプをひとつのシステムに複合することにより、これらの問題点を克服し得る、潜熱蓄熱ヒートポンプシステムを新たに提案した。

まずヒートポンプを組み込まない場合の球カプセル潜熱蓄熱槽の熱的特性を明らかにする目的で、前章において得られた各種パラメータの影響を考慮して、図1に示すようなプロトタイプの潜熱蓄熱槽を製作し、実際の利用を想定した形での実験を行い、その性能特性などを明らかにした。PCMとしてはリン酸水素2ナトリウム( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ )を用いた。実験において $10^\circ\text{C}$ 以上の過冷却が認められ、潜熱蓄熱における過冷却対策の重要性が認識された。さらにソーラーコレクタによる集熱を想定し熱入力一定のもとでの融解実験を行い、潜熱蓄熱により低温集熱が可能となるため、コレクタの集熱効率の向上が図れるなど、潜熱蓄熱をソーラーシステムへ適用することの有効性を示した。

さらに、ヒートポンプを併用し、運転することにより、居住空間の冷房および暖房実験を行い、

蓄熱槽の性能特性およびヒートポンプの運転特性を明らかにした。図2に示したのは提案した潜熱蓄熱ヒートポンプシステムのご概念図である。図に示すように、暖房、給湯、冷房の3つのモードを有する。

ヒートポンプを運転させることにより、暖房を行いながら、球カプセル内のPCMの過冷却を経て、核発生、凝固を起こすことができ、PCMの過冷却を克服できることが示された。また潜熱の発生により、ヒートポンプへの流入水温が一様化し、ヒートポンプの成績係数(COP)は4.1~4.2と高い水準に維持された(図3)。さらに蓄熱槽に熱を蓄える形で、居住空間の冷房が可能となることを示した。これにより熱的に閉じた系をつくることなど、都市の高温化現象に対する対策ともなる。

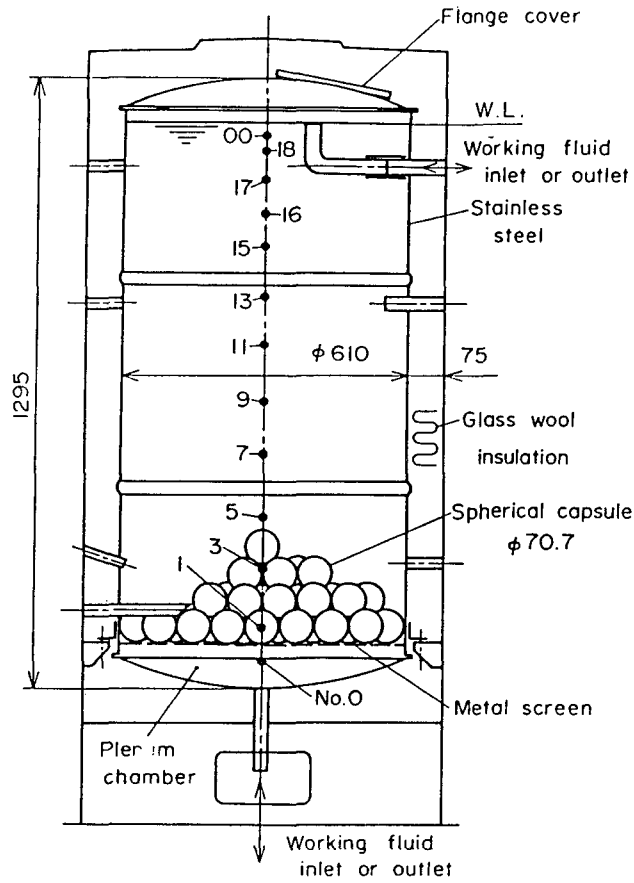


図1 球カプセル潜熱蓄熱槽詳細

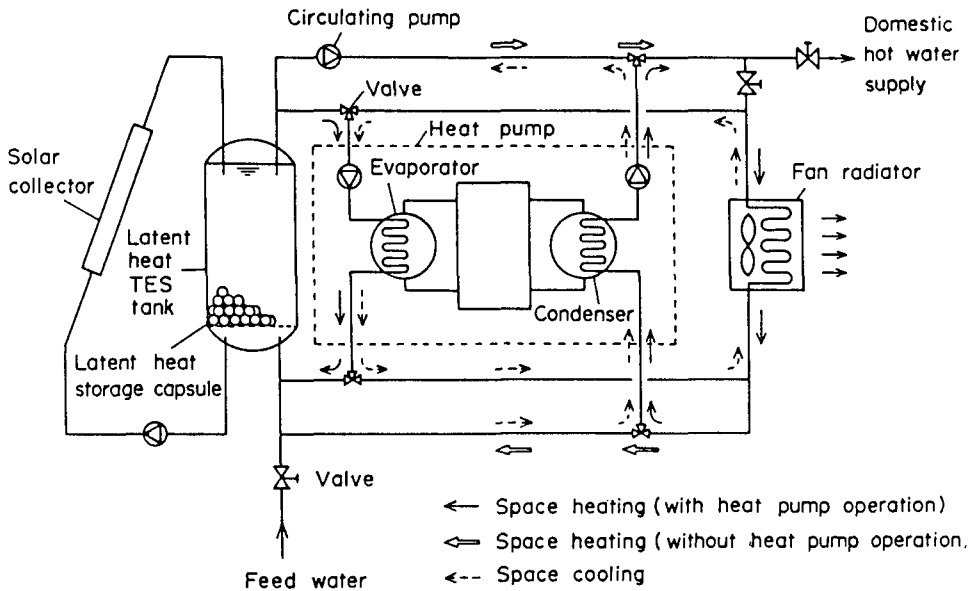


図2 球カプセル潜熱蓄熱/ヒートポンプシステムの概略

このように潜熱蓄熱ヒートポンプシステムはPCMの過冷却の克服により、PCM選択の余地の拡大など潜熱蓄熱の将来の展望を開いた。

## 第6章 結 論

本章は結論であり、第2章から第5章までの主要な結果を要約したものである。

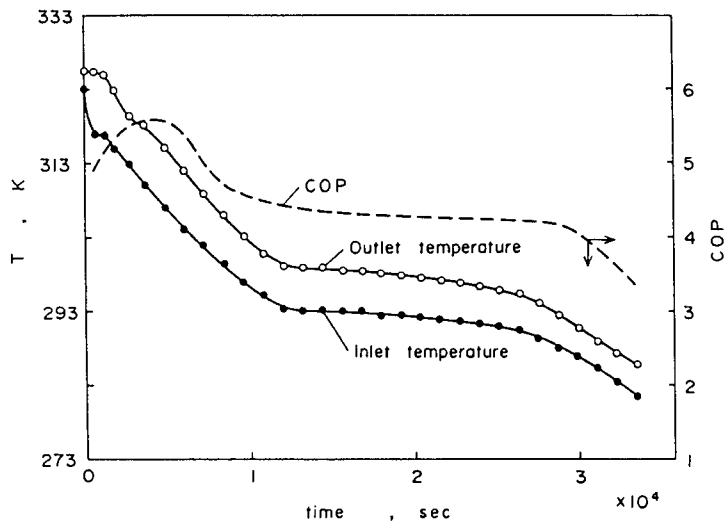


図3 ヒートポンプの成績係数および蓄熱槽出入口温度の時間変化（暖房モード）

## 審査結果の要旨

近時、新エネルギー源の開発およびエネルギーの有効利用と共に、エネルギー貯蔵技術の開発が重要課題として考えられている。

本論文は、エネルギー貯蔵の高密度化を目的として、蓄熱容積をコンパクトにできる潜熱蓄熱に関する理論的、実験的研究を行い、要素的な系について融解および凝固過程を細密に解明し、さらに応用として球カプセルを用いた潜熱蓄熱ユニットの非正常熱応答性を解明することを目的としたものであって、全編6章よりなっている。

第1章は緒論である。

第2章は、要素的な系について潜熱蓄熱と放熱の両過程の理論的解明に必要な一般の多次元相変化問題の理論と数値解法について述べたものであって、とくに動的数値不安定が発生し、計算が極めて困難となる高レイリ数域での融解現象の数値解法を明らかにしたものである。

第3章では、前章の解析手法を用いて水平円管内外の融解および凝固過程について数値解析と実験を行い、相変化物質(PCM)の種類、管径、温度差などの影響を明らかにしたものである。また円筒カプセル内の下部領域に現われる三次元熱不安定現象に着目して不安定性の解析を行い、この領域における三次元不安定流れおよび熱伝達のメカニズムを明確にとらえている。

第4章は、球カプセル型潜熱蓄熱システムの蓄熱・放熱性能について、理論的ならびに実験的研究を行ったもので、他の諸方式との性能比較を行うことにより球カプセル方式の利点を示し、本方式が実用的に優れた特長を有することを明らかにしている。

第5章は、無機水和塩PCMの過冷却対策も加味した潜熱蓄熱ヒートポンプシステムを提案し、その非正常応答について実験および理論解析を行い、ソーラーシステムへ応用した場合の諸特性を明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、球カプセルを含む種々の蓄熱器を用いる潜熱蓄熱について、理論的および実験的研究を行い、その蓄熱・放熱特性に関して新たな知見を加えたものであって、伝熱工学および機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。