

太陽エネルギー利用潜熱貯蔵型 スチームアキュムレータの研究

(第2報；スチームアキュムレータの基本性能)

A Study of Solar Steam Accumulator with High Temperature
Latent Heat Thermal Energy Storage
(2nd Report ; Fundamental Characteristics of Steam Accumulator)

星 朗 *¹
Akira HOSHI

齋藤武雄 *¹
Takeo S. SAITOH

Abstract

In the present paper, we will propose high-temperature latent heat thermal energy storage (LHTES) system for the steam accumulator. Most of conventional LHTES systems employed phase change material (PCM) with relatively low melting point. The principal purpose of the past LHTES system was applications to space heating/cooling. In the companion paper (1st report), the charging and discharging characteristics of the high melting point phase change materials were revealed experimentally.

However, since fossil fuels like petroleum, coal, and natural gas will sooner or later run out in the 21st century, natural energies like solar, wind, and biomass will rise as one of alternative energy sources. One of the most promising means to produce power from these natural energies is the solar Rankine cycle system which operates under a low temperature range below 200°C. Solar heat is collected and stored as pressurized hot water in the LHTES accumulator in daytime, and the steam turbines or various type of expanders will be operated whenever energy demand exists.

As an application of the LHTES system to steam accumulator is taken up and the possible thermal performance of this accumulator will be discussed theoretically. Further, this article describes the designing of the high-temperature LHTES steam accumulator, and clarifies the charging characteristics by the experiment. The present LHTES system is applied to solar Rankine cycle system will be introduced.

キーワード： 太陽エネルギー利用, 高温, 潜熱, エネルギー貯蔵, スチームアキュムレータ, ソーラーランキンサイクル, スチームタービン, エキスパンダ

Key Words: Solar Energy Utilization, High Temperature, Latent Heat, Thermal Energy Storage, Steam Accumulator, Solar Rankine Cycle, Steam Turbine, Expander

1. 緒言

化石燃料の枯渇化が懸念される21世紀は、機器の高効率化および自然エネルギー利用などが最も重要な課題となる。太陽エネルギーなどの自然エネルギー(環境エネルギー)は、無尽蔵で広く分布するが、エネルギー密度が極めて小さく、間欠性を有する。そのため何よりも量を集めて、高密度エネルギー貯蔵することが重要である。

第1報においては、太陽エネルギー利用をコンセプトとした高温LHTES(Latent Heat Thermal Energy Storage)システムの応用例として潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータを取り上げ、それに用いる高

融点潜熱蓄熱材の熱物性値や融解・凝固特性に関する実験的研究を行って、このアキュムレータで利用可能な蓄熱物質の1つとして多価アルコールのマンニトールが熱物性的には有効であることを報告した。しかし、マンニトールに代表される多価アルコール系潜熱蓄熱材を用いた潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータを実際のエネルギー貯蔵器として設計する場合の形状やサイズ、また、フラッシュボイラとして稼働した時の蒸気発生量などに関する検討は行わなかった。

そこで、本報では、第1報で報告した多価アルコール系高融点潜熱蓄熱材の熱物性値や融解・凝固特性を考慮して、多価アルコール系高融点潜熱蓄熱材を用いた潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータの特性

*1 東北大学大学院工学研究科
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)
(原稿受付：平成13年2月19日)

について自己蒸発量などの計算を行った。さらに、計算結果を基にして実際に潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータを設計・試作して、実験的にその性能評価を行った。

2. ソーラーランキンサイクルシステム

図 1 に、太陽エネルギーなどの低温度差エネルギーを有効に使う術として提案されているソーラーランキンサイクルシステム (Solar Rankine cycle system; SRCS)⁽¹⁾⁽²⁾の概略を示す。SRCSは、定置型(非追尾式複合放物面集光型: CPC)ソーラーコレクタ⁽³⁾、本研究で報告する潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータ⁽⁴⁾、およびエキスパンダ⁽⁵⁾の三大要素からなる。定置型CPCソーラーコレクタで高温水を造り、フラッシュボイラ兼蓄熱器である潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータで蓄熱し、必要に応じて蒸気を発生させてスチームエキスパンダおよび発電機によって発電を行わせるものである。排気された蒸気はコンデンサで凝縮されたのち再びアキュムレータに戻るが、コンデンサで熱交換された高温の冷却水は給湯や冬季の暖房に利用することが可能で、SRCSではコージェネレーションも行える。

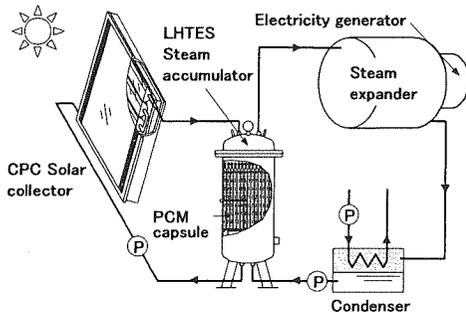


図 1 ソーラーランキンサイクルシステム

ここで、太陽エネルギーから電気を得る他のシステムの代表的なものとして太陽電池 (Photovoltaic cell; PV)が挙げられるが、夏季にほとんど未利用となるソーラーコレクタを活用することによって、システムの稼働率を向上させてトータル的にエネルギーの有効利用を図るという点において、提案する本システムは太陽電池とは全く異なったコンセプトを有する。表 1 にSRCSと太陽電池の機能を比較したものを示す。多機能性という面で、太陽電池がそれ自身でおもに発電のみしかできないのに対して、SRCSでは発電をはじめとして給湯・暖房などのコージェネレーションの機能やエネルギー貯蔵が可能であるために太陽のない夜間や曇りの日にも稼働するという大きな利点を有する。さらに、エネルギー回収装

置やボトムリングサイクルとしての利用、燃料電池(Fuel cell; FC)などとの組み合わせが可能であり、またエネルギー源の多様性等の特徴を有する。加えて、地熱、海洋温度差、ポンプ、水車、風車、吸収冷凍機およびデシカントクーリングの熱源などの広い応用範囲が考えられる。

表 1 SRCSと太陽電池の機能比較

システム	SRCS	太陽電池
特徴	動的(Dynamic)	静的(Static)
多機能性	① 発電 ② 暖・冷房、給湯 ③ 24時間稼働 ④ リパワリング ⑤ エネルギー貯蔵可能 ⑥ エネルギー回収装置 ⑦ ボトムリングサイクル ⑧ 燃料電池などとの組み合わせ可能 ⑨ エネルギー源の多様性	① 主に発電のみ ② 一部ハイブリッド化したものあり
夏期の特性	夏の効率・出力高 (正特性)	夏の発電効率低 (逆特性)
応用性 適用性	応用範囲が広汎 地熱、海洋温度差、 吸収冷凍機への応用 エネルギー回収 種々熱媒の利用可能 (ORC:Organic Rankine Cycle アンモニア)	—

3. 自己蒸発量

スチームアキュムレータでは短時間の高負荷に対する対応が可能で、また、少量の蒸気を長時間供給可能であるといった利点を有する。このようなスチームアキュムレータの特性を利用して、間欠的な太陽エネルギーを平準化して負荷に対応させたり、日射のない夜間や曇天時に連続的に蒸気を供給することができるようになる。

スチームアキュムレータからの蒸発量は、発生蒸気の熱量が常に一定ではないために初圧から終圧までの圧力変化を細分化して熱量計算する方法が適切であるが、近似計算⁽⁶⁾として初圧と終圧の蒸気を持つ熱量の平均熱量を持った蒸気が発生するものとして自己蒸発量を計算しても、発生蒸気総量を検討する初期設計の段階においては実用上さしかえない。初圧から終圧までの圧力変化を細分化してのちの式(14)により計算した場合と、初圧と終圧の蒸気を持つ熱量の平均熱量を持った蒸気が発生するものとして近似計算した場合の自己

蒸発蒸気量の計算結果を比較したものを図2に示す。近似計算の場合、自己蒸発蒸気量は15%程度大きく見積もられることになる。

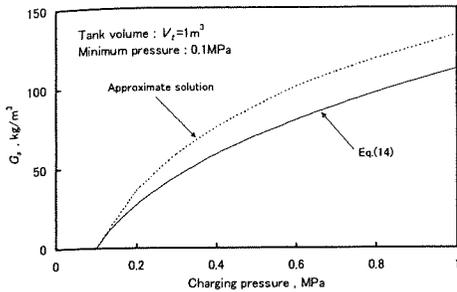


図2 自己蒸発量計算の比較

はじめに、スチームアクムレータに潜熱蓄熱技術を応用した場合の効果、発生蒸気総量について近似計算によって調べる。図3に近似計算した蓄熱線図を示した。最低(蒸気消費側)圧力が0.1MPa(大気圧開放)のときの(熱水+潜熱蓄熱材)1m³あたりの蒸気発生量を、横軸に最高(蓄熱)圧力を取って表してある。充填する潜熱蓄熱材としてエリスリトールを用いるものとした。なお、潜熱は融点に相当する飽和圧力で集中的に放熱されるものと仮定した。アクムレータの最高圧力と最低圧力の差、すなわち変圧範囲が大きくなるほどアクムレータの蒸気発生量が多くなるのがわかる。また、潜熱蓄熱材の充填率の増大に伴ってアクムレータの蒸気発生量が増加することは明らかで、潜熱蓄熱材を50%充填しただけで蒸気発生量は従来の熱水の場合と比べて2倍になる。しかし、充填率を大きくして水の占める割合が小さくなると、蓄熱分をすべて蒸気として取り出すことができなくなる。図の計算条件では、75%の充填率で高温蓄熱すると蓄熱量すべてを蒸気で取り出せないことを表している。

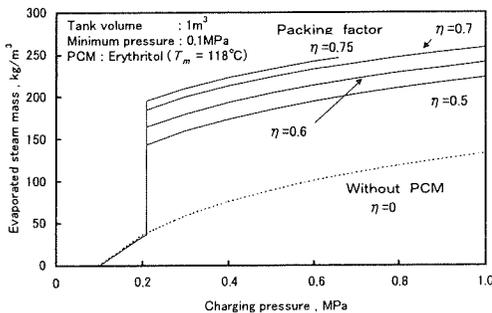


図3 蓄熱線図(蒸気消費側圧力0.1MPa)

つぎに、自己蒸発時の経時変化を明らかにするために、初圧から終圧までの圧力変化を細分化してスチームアクムレータからの自己蒸発量を詳細に計算する。図4にアクムレータの計算モデル、および主なパラメータを示した。

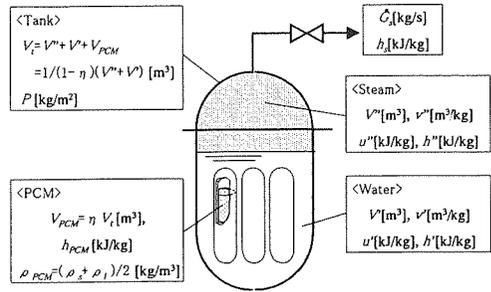


図4 スチームアクムレータの計算モデル

タンク内の(水+蒸気)重量 G および重量バランスは次式で表せる。

$$G = V'/v' + V''/v'' \quad (1)$$

$$\dot{G}_s^e = -dG/dt \quad (2)$$

また、全エネルギー E とエネルギーバランス式は次式のようになる。

$$E = u'V'/v' + u''V''/v'' \quad (3)$$

$$\dot{G}_s^e h_s = -d(E + \rho_{PCM} V_{PCM} h_{PCM})/dt \quad (4)$$

式(4)と式(6)より、

$$d(E + \rho_{PCM} V_{PCM} h_{PCM})/dt = h_s dG/dt \quad (5)$$

となる。また、式(3)と $V_t = 1/(1-\eta)(V'' + V')$ より、

$$V'/v' = Gv''/(v'' - v') - (1-\eta)V_t/(v'' - v') \quad (6)$$

$$V''/v'' = Gv'/(v'' - v') + (1-\eta)V_t/(v'' - v') \quad (7)$$

となる。よって、式(5)より次式が得られる。

$$E = (u'' - u')(1-\eta)V_t/(v'' - v') + (u'v'' - u''v')G/(v'' - v') \quad (8)$$

ここに、

$$(u'v'' - u''v')/(v'' - v') = h'' - v''r/(v'' - v') \quad (9)$$

ここで、

$$v''r/(v'' - v') = X \quad (10)$$

とおけば、

$$E = (u'' - u')(1-\eta)V_t/(v'' - v') + (h'' - X)G \quad (11)$$

となる。式(11)を式(7)に代入すると、

$$\begin{aligned} (1-\eta)V_t \frac{d}{dt} \left(\frac{u'' - u'}{v'' - v'} \right) + (h'' - X) \frac{dG}{dt} \\ + G \frac{d(h'' - X)}{dt} + \frac{d(\rho_{PCM} V_{PCM} h_{PCM})}{dt} \\ = h_s \frac{dG}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

が得られる。

一般に

$$h_s = h' + xr$$

において $x \approx 1$ とすると $h_s = h''$ となるので、

$$\frac{dG}{dt} = \frac{(1-\eta)V_t}{X} \frac{d}{dt} \left(\frac{u''-u'}{v''-v'} \right) + \frac{G}{X} \frac{d(h''-X)}{dt} + \frac{1}{X} \frac{d(\rho_{PCM} V_{PCM} h_{PCM})}{dt} \quad (13)$$

単位容積当りの(水+蒸気)重量を $g = G/V_t$ として独立変数を圧力 P に置き換えると、

$$\frac{dg}{dP} = \frac{(1-\eta)}{X} \frac{d}{dP} \left(\frac{u''-u'}{v''-v'} \right) + \frac{g}{X} \frac{d(h''-X)}{dP} + \frac{1}{X} \frac{d(\rho_{PCM} V_{PCM} h_{PCM})}{dP} \quad (14)$$

が得られる。

この式(14)から微小な圧力の減少に伴う自己蒸発量を計算することができる。飽和温度にある単位容積の水の圧力が0.01MPa下がるときに発生する蒸気量はそのときの圧力によって異なるわけで、図5に圧力降下0.01MPaに対して1m³の飽和水が発生する自己蒸発量を種々の圧力に対して図示した。この図より、圧力が高いほど自己蒸発量が少ないことがわかる。このことから、スチームアキュムレータでは使用側蒸気の圧力が低いほど効果がある⁽⁷⁾ことになる。

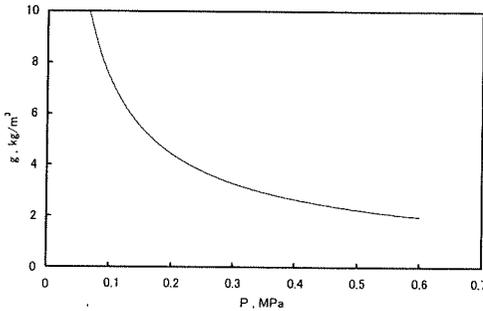


図5 圧力降下0.01MPaに対する自己蒸発量

図6には蒸気発生量 \dot{G}_s を0.005kg/s一定とした場合のタンク内圧力の変化について、潜熱蓄熱材としてエリスリトールを用いた場合と用いない場合を比較して示した。なお、潜熱は融点で集中して放熱されるものと仮定した。図より潜熱蓄熱材を用いることによって自己蒸発時間、すなわち自己蒸発量は約2倍になることがわかる。

図7は図6と同様に蒸気発生量 \dot{G}_s を0.005kg/s一定とした場合のタンク内圧力の変化について、潜熱蓄熱材としてマンニトールを用いた場合とエリスリトールを用

いた場合の効果を比較したものである。融点の高いマンニトールを用いた場合のほうが、より高温・高圧で質の高い蒸気を自己蒸発によって発生することが可能である。

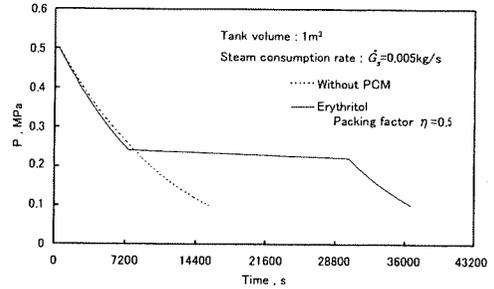


図6 蒸気圧力変化と自己蒸発時間 (潜熱蓄熱材の比較)

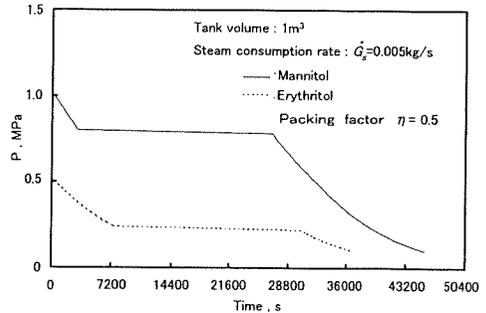


図7 蒸気圧力変化と自己蒸発時間 (マンニトールとエリスリトールの比較)

4. 潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータの試作

本研究で実際に試作した潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータの概略図を図8に示す。潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータは、压力容器であるステンレス製タンク本体と高融点潜熱蓄熱材を封入したPCMカプセルから構成される。アキュムレータの圧力変化による繰返し応力は非常に厳しいものと考えられ、タンク本体の構造設計・製作に際して十分注意した。なお、タンク容量はソーラーランキンサイクルシステムを構築した場合に、スチームアキュムレータを運転するのに必要な蒸気量を発生できる蓄熱量から決定した。タンク本体にはフラッシュボイラとしての機能を考慮して圧力計、シーす熱電対、および安全弁が取り付けられている。さらに、補助熱源として電気ヒーター(10kW)も装備している。上部鏡板には高温水入口と蒸気出口が、底部鏡板には高温水出口と還

水口が設けられている。標準的な水位(190l)におけるPCMカプセルの充填率は0.6となる。

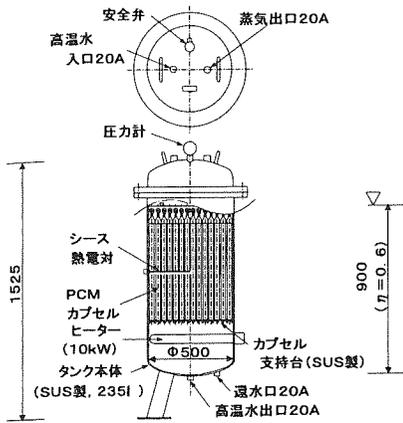


図8 潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータ概略図

図9には潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータに充填した円筒型PCMカプセルの概略図を示した。PCMカプセルは銅管および銅管用継手で製作されており、高温域の使用を考慮して接合には銀ろう付を採用した。また、高融点PCMの投入口は溶融物質を流し込んだ後にフレーアプラグを用いて密閉した。PCMカプセルはステンレス製パンチングメタルのカプセル支持台の上にスペーサを介して縦置きに並べた。本研究で使用したタンク本体が円筒縦型であるために、PCMカプセルには縦置ききの円筒カプセルを採用した。

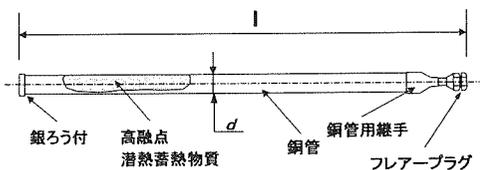


図9 PCMカプセル概略図

円筒カプセルには高融点PCMとしてマンニトール(融点166.5℃)に過冷却防止剤として硫酸カルシウムを5wt%添加したものを封入した。また、必要に応じて充填率を増大することができるように、径の異なる2種類のカプセルを用意した。2種類のカプセルのサイズおよび封入物質の重量を表2に示した。カプセルサイズは、熱伝導が支配的となる放熱(凝固)過程ばかりではなく、蓄熱(融解)過程においても小さい径の方がよく⁽¹⁾、材料

の入手、加工・製作の容易さを考慮して決定した。なお、図10には自作した2種類のPCMカプセルの写真を、また、図11にはカプセル充填の様子を載せてある。

表2 PCMカプセル仕様

		Capsule I	Capsule II
l	[mm]	670	
d	[mm]	28.58	22.22
G_{PCM}	Mannitol	438	259
	CaSO ₄	23	13
N	[本]	155	35

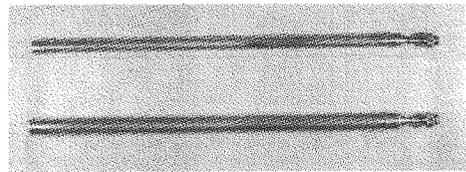


図10 PCMカプセル外観

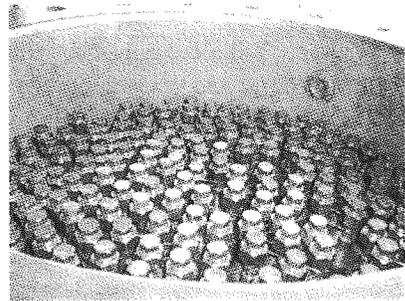


図11 PCMカプセル充填の様子

5. 潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータの性能実験

図8に示した潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータを用いて、自己蒸発による蒸気発生量の測定を行った。実験は、タンク内を180℃、1.0MPaまで加熱したのち、蒸気出口バルブを開いて大気に開放することによって蒸気を発生させ、そのときのタンク内温度、圧力、および自己蒸発蒸気流量の時間変化を測定した。蒸気流量は、管路の途中に設けられたオリフィスプレート前後の差圧をマンメータで計測して、その差圧より算出した。

図12から図14に、潜熱エネルギー貯蔵型スキームアキュムレータと従来の高温水蓄熱によるアキュムレータにおける蒸気発生時のタンク内温度、圧力、および蒸気流量の時間変化を比較して示した。どちらの場合も実

験開始時の蒸気流量が40kg/hとなるように蒸気出口バルブを設定し、その後はバルブ開度を一定として蒸気を発生させた。

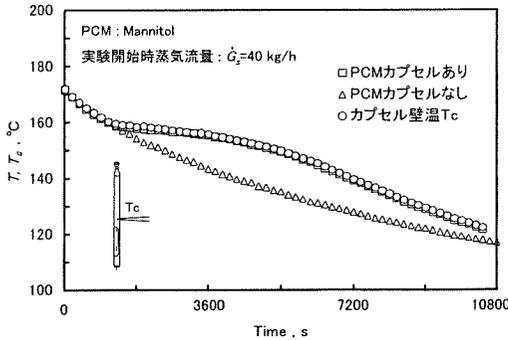


図 12 タンク内温度の時間変化(PCMカプセルの効果)

図 12からわかるように、PCMカプセルを用いることによって、マンニトールの融点(166.5°C)よりも5°C程度低い温度で一定となる領域が一定時間続くことが観察された。また、この温度における飽和圧力(約0.63MPa)で、圧力一定となることが図 13よりわかる。このことは、より高温で高圧の質の高い蒸気を一定温度、一定圧力で供給できる点において、非常に効果的である。図 13の温度変化のグラフには、タンク中央部のカプセル壁温の時間変化も参考のために載せてある。本研究のカプセルサイズにおいては長さ方向の温度分布は観察されなかった。これは、PCMの凝固過程が主に熱伝導に支配されて同心円方向に進行するためと考えられる。

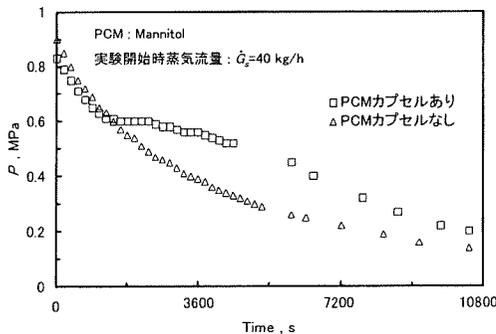


図 13 タンク内圧力の時間変化(PCMカプセルの効果)

また、図 14からもPCMカプセルを用いることによる良い効果として、一定流量の蒸気発生が一定時間続くことが観察される。その後、PCMカプセル内のマンニトール

の完全融解にともなって、3600秒付近から蒸気流量も急激に減少するようになる。なお、同図において5kg/h以下の蒸気流量については差圧マンノメータの精度の関係から測定不可能なために載せていないが、この後もタンク内圧力が大気圧と等しくなるまで微小流量の蒸気が発生しつづけている。図 14から、PCMカプセルを用いることによって蒸気発生時間を2倍以上長くすることが可能となることがわかる。

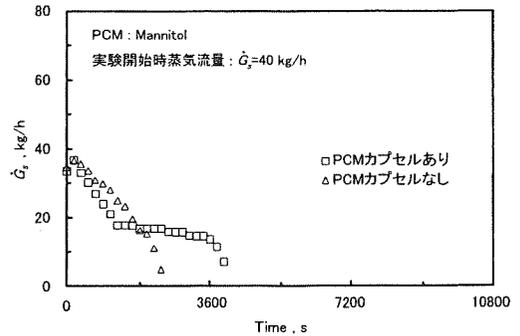


図 14 蒸気流量の時間変化(PCMカプセルの効果)

次に本研究で蒸気流量の測定に使用しているマンノメータの差圧を一定、すなわち蒸気流量をほぼ一定なようにして同様の実験を行った。図 15に蒸気流量の時間変化を示した。図からわかるように蒸気の比重量が圧力によって変化することから蒸気流量は完全に一定とはならないが、急激な蒸気流量の変化がないようにして蒸気流量による影響を比較した。

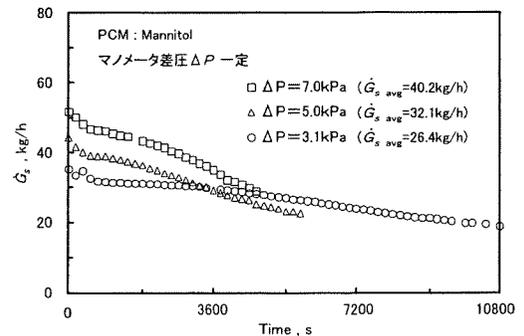


図 15 蒸気流量の時間変化(蒸気流量の比較)

このときのタンク内圧力と温度の実験結果を図 16と図 17示した。蒸気流量が大きくなるほど蒸気発生時間が短くなり、蒸気流量がある程度以上大きくなると蒸気発生

時間は約半分まで減少してしまうことが図より読み取れる。また、蒸気の流量が20~30kg/hのときに、PCMとして使用したマンニトールの融点近傍における一定温度、あるいはその温度における飽和圧力に等しい一定圧力が一定時間続くことが観察されている。シミュレーションにおいては潜熱が融点で集中して放熱されるものと仮定しているためにPCMの融解過程がはっきり現れるが、実際の現象においてはPCMカプセルからの熱伝達が複雑に影響するために明らかなPCMの完全融解時点は確認されない。本研究で試作したアキュムレータは蒸気流量20~30kg/hにおいて最適なアキュムレータであると考えられる。

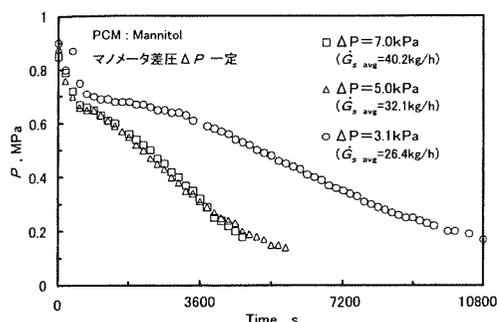


図 16 タンク内圧力の時間変化(蒸気流量の比較)

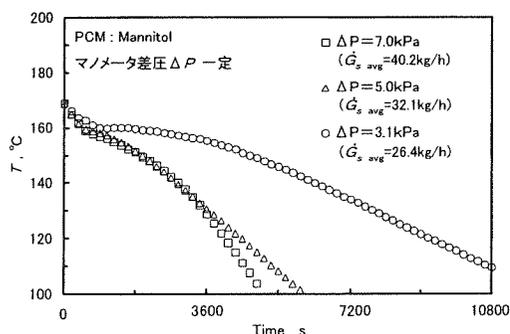


図 17 タンク内温度の時間変化(蒸気流量の比較)

図 18 に、発生蒸気量について実際の実験結果と計算結果を比較して示した。実験において蒸気流量は厳密には一定に保たれていないが、計算では平均蒸気流量を用いて式(14)により求めた。自己蒸発によって蒸気は、計算結果よりも実際には10~20%多く発生する。これは、計算モデルにおいて、ステンレス製の蓄熱タンクやカプセル支持台、および銅製のカプセル容器やスパーサーなどの蓄熱量を考慮していないためと考えられ

る。潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータの設計にあたり、PCMの種類や総量を選定する上で、本研究で示した計算式は十分に利用可能である。また、本研究ではタンク本体が円筒縦型であるために図 9 に示したような円筒縦置きカプセルを使用しているが、タンク形状によっては円筒横置き型、球型、回転楕円型、平板型などの種々の形状のカプセルが考えらる。発生蒸気量の推定に関しては本計算式はカプセル形状に関係なく利用できるものとする。

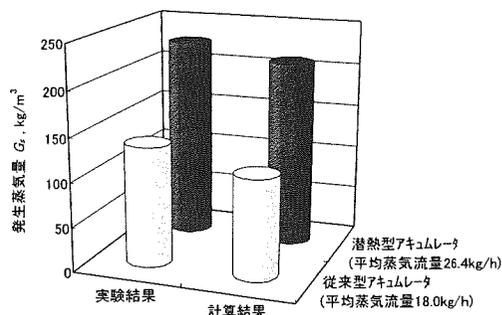


図 18 発生蒸気量の実験結果と計算結果の比較

最後に、従来型と潜熱型における発生蒸気量と蒸気発生率(= $(V_{w1} - V_{w2})/V_{w1}$)の実験結果を比較して表 3 に示した。PCMカプセルがない従来型アキュムレータの場合と本研究で提案する潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータの比較においては、タンク内圧力が0.1MPaになるまでの発生蒸気量について示した。PCMカプセルをタンク内に入れた潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータにおいては従来の高温水蓄熱によるアキュムレータに比べて発生蒸気量と蒸気発生率ともに2倍以上となる事がわかる。

表 3 従来型と潜熱型の発生蒸気量および蒸気発生率の比較

アキュムレータ	条件	発生蒸気量 [kg/m³]	蒸気発生率 [%]
従来型	実験開始時蒸気流量 40kg/h	135.5	14.1
潜熱型	実験開始時蒸気流量 40kg/h	272.7	28.5

また、潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータにおいて蒸気流量一定で流量の違いによる発生蒸気量と蒸気発生率を比較して表 4 に示した。蒸気流量一定の場合に

ついでには、マノメータの設定差圧を保持できるまでの発生蒸気量を比較した。蒸気流量の違いは蒸気発生時間に影響があらわれるが、発生蒸気量の総量や蒸気発生率には影響がみられない。

表 4 蒸気流量の違いによる発生蒸気量
および蒸気発生率の比較

アキュム レータ	条 件	発生 蒸気量 [kg/m ³]		蒸気 発生率 [%]
		40. 2	256. 4	
潜熱型	平均蒸気流量 kg/h	32. 1	207. 7	21. 7
		26. 4	226. 6	23. 6

6. 結 言

本論文では、太陽エネルギーの中温度範囲の利用をターゲットとした高温LHTESシステムに着目し、潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータを試作して性能試験を行い、以下の知見を得た。

- 1) スチームアキュムレータにおける自己蒸発量の計算を行い、潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータでは従来の熱水によるアキュムレータの2倍の蒸気を発生できることを示した。
- 2) 潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータにおける自己蒸発量の計算式および計算結果を提示して、より高融点の潜熱蓄熱材を用いることによって、より高温・高圧で質の高い蒸気が得られることを示した。
- 3) 潜熱蓄熱材などの実験および計算結果に基づいて、実際の潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータを試作、提案した。
- 4) 提案した潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータについて性能試験を行い、従来のアキュムレータと比較して2倍以上の発生蒸気量および蒸気発生率が得られることを示した。
- 5) 潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータの発生蒸気量について実験結果と計算結果の比較を行い、本計算式がアキュムレータの設計において十分に利用可能であることを確認した。

記号表

E : 全エネルギー	ギリシャ文字
G : 重量	η : 充填率
G_s : 自己蒸発蒸気量	ρ : 密度
ϕ_s : 蒸気流量	
g : 単位容積当り重量	添字
h : エンタルピ	' : 飽和水
P : 圧力	" : 飽和蒸気
r : 蒸発熱	s : 蒸気
T : 温度	t : タンク
t : 時間	w : 水
u : 内部エネルギー	PCM : 相変化物質
V : 容積	1 : 始
v : 比容積	2 : 終
x : 乾き度	

参考文献

- (1) T.S.Saitoh and A.Hoshi, High Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage System for Solar Rankine Engine, Proc. of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century (SEE2000), Hong Kong, Vol.II(2000-1), 796-803.
- (2) 一色尚次・北山直方, 新蒸気動力工学, (1978), 197, 森北出版.
- (3) T.S.Saitoh, Pat.Pending (2000-1).
- (4) T.S.Saitoh, Pat.Pending (2000-2).
- (5) T.S.Saitoh, Pat.Pending (2000-3).
- (6) 小林義則・花見昭, スチームアキュムレータの活用と省エネ事例, 化学装置(1981.6), 82-86.
- (7) 前田利春, 省エネルギーのためのアキュムレータ, (1980), ビジネス・オーム.