

ソーラーランキンサイクルシステムの 基本性能に関する研究

A Research on Performance of Solar Rankine Cycle System

星 朗 *¹
Akira HOSHI

齋 藤 武 雄 *²
Takeo S. SAITOH

Abstract

An advanced solar Rankine cycle system with CPC (Compound Parabolic Concentrator) solar collector and high-temperature LHTES (Latent Heat Thermal Energy Storage) steam accumulator was newly proposed.

First, the present paper describes improvement of the thermal efficiency of the CPC collector. A lot of improvements were done including double glazing filled with Kr gas, insulations, and selective coating.

Second, the phase-change steam accumulator with high temperature phase change material (PCM) was designed and evaluated both experimentally and theoretically. The present steam accumulator has twice as better performance as the conventional sensible heat steam accumulator.

Third, the new steam turbine (expander) was invented and designed under the "Concept of Superposition". The proposed turbine consists of numerous thin disks of the same diameter with blade elements. The steam is introduced from a nozzle to this turbine with pulsating flow. So, this turbine is named "Pulse turbine". This unique turbine is cost effective and can be easily extended to incorporate "Cascading".

The present paper reports experimental results of the proposed system under actual solar radiation and under heat stored accumulator conditions.

キーワード： 太陽熱，ソーラーランキンサイクル，サーマルエレクトリック，低温度差機関，
CPC型ソーラーコレクタ

Key Words： Solar Thermal Energy, Solar Rankine Cycle, Thermal Electric,
Low-temperature Difference Engine, CPC-type Solar Collector

1. 緒 言

人類は、この100年間に化石燃料をふんだんに使い、驚異的な技術の革新と経済発展を成し遂げた。その証左に人口は、この100年間に4倍にふえたが、全体の化石エネルギー消費は約50倍に増えた。21世紀の人口増加による化石エネルギー需要の増大は、現在の化石燃料の枯渇のスピードを早める。したがって、21世紀末遅くとも22世紀末には、“化石燃料はなくなる”とみてよい⁽¹⁾。これに伴ない、ガソリンなど化石燃料の燃焼によって得られる1500℃以上の高温はもはや使えなくなる。“燃焼による爆発”といった高ポテンシャル差の技術に替わり、相変化を包含する新しい技術の開発が重要となってくる。しかし、ここで大切なことは、燃焼の重要性がなくなることはなく、化石燃料から水素やメタンなどへと燃料転換が行われることである。

また、太陽エネルギーなどの再生可能エネルギー利用の視点から見ると、1000℃などの高温はピンポイント(pin point)でしか得られない。また、構造上の問題から熱損失も大きく、効率が極めて低い。さらに、装置が高価で、高度な材料技術も必要となってくる。したがって、100～300℃の中温度範囲で働くソーラーランキンサイクルシステムが有望となってくるが、これまでは、この温度範囲で稼働するソーラーランキンサイクルシステムは知見されず、開発の必要があった。

このように、近年のエネルギー事情、環境問題を背景に、その資源量から言って太陽エネルギーなどの再生可能エネルギーのより積極的な利用に大きな期待がかかっている。本研究では、これら太陽エネルギーの利用方法のうち、とくに太陽エネルギーの動力化という点に焦点を絞り、化石燃料を消費しない時代に向けて、これまで全く使われなかった中

*1 一関工業高等専門学校 (〒021-8511 一関市萩荘字高梨)

*2 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：2002年6月10日)

温度範囲の利用をターゲットとしたソーラーランキンサイクルシステム(Solar Rankine Cycle System; SRCS)を提案する。

提案するソーラーランキンサイクルシステムは、潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータをはじめとして、新たに中温集熱用に設計・開発した定置型CPCソーラーコレクタ、および粘性・衝動複合型蒸気タービンより構成される。従来の太陽光発電(太陽電池)と比較し、発電のみならず30を超える多機能・多用途化が図れ、導入による効果大きい。

ここで、太陽エネルギーのうち光利用の代表例として太陽電池について、夏季にほとんど未利用となるソーラーコレクタを活用した熱利用のSRCSと比較して表1に示す。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、提案するソーラーランキンサイクルシステム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ングサイクルとしての利用、燃料電池(Fuel cell; FC)など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、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汎な応用範囲が考えられる。

Table 1 Comparison of solar Rankine cycle system with PV cell

System	SRCS	PV cell
Operation	Dynamic	Static
Electricity generation system	○	○
Hot water supply	○	—
Cooling	○	○
Steam supply	○	—
Sterilization /disinfections	○	—
Drying /process heat	○	—
Desalination /distillation	○	—
Fuel production	○	○
Characteristics in the summer	High efficiency (16~20%)	Low efficiency (6~8%)
Applicability	- Geothermal - Ocean thermal - Energy recovery - Energy storage - Middle and bottoming cycles - Combination with the fuel cell	—

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中温度差エネルギーを有効に使う技術として今回提案するソーラーランキンサイクルシステム⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾の概略を示す。本研究で提案する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⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾、潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータ⁽²⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、およびスチームエキスパンダ⁽¹³⁾の三大要素からなる。定置型CPCソーラーコレクタで高温高圧水を造り、フラッシュボイラ兼エネルギー貯蔵器である潜熱エネルギー貯蔵型スチーム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はこのようにコー・ジェネレーション(Co-generation; 熱電併給)としても使える。

このランキンサイクルでは、中温度差熱源での熱効率が他のガスサイクルなどに比べて相対的に良好である。これは、作動流体の蒸発や凝縮がゆっくりとなされるときには等温可逆変化とみなすことができるために、この場合の熱効率は流体飽和温度を高熱源とし、コンデンサでの温度を低熱源とする可逆サイクル(カルノーサイクル)の熱効率に近づけることができる点に理由がある。

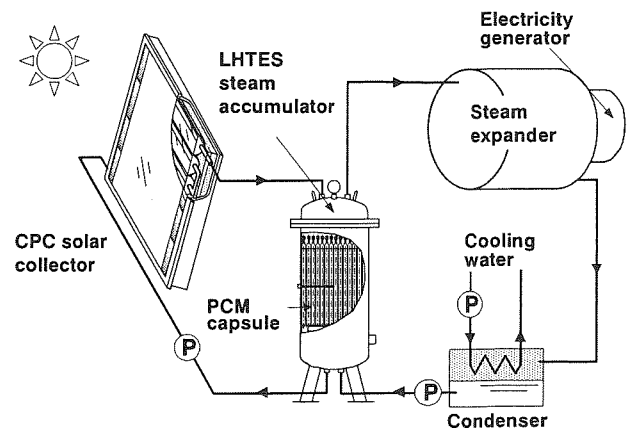


Fig.1 Solar Rankine cycle system

3. 構成機器の性能

3.1 CPC型ソーラーコレクタ

本研究では、寒冷地での使用や中温集熱の場合に効率のよい空気充填式CPC (Compound Parabolic Concentrator: 複合放物面集光)型ソーラーコレクタをベースに、さらにソーラーランキンサイクルシステムに適合するよう中温集熱領域の効率を大幅に改善したCPCコレクタを開発した。太陽エネルギーなどの自然エネルギーは、無尽蔵で広く分布するが、

エネルギー密度が小さく、間欠性を有する。そのため何よりも効率的に量を集めることが第一の要件となる。

図2に本研究のソーラーランキンサイクルシステムで利用したCPC型ソーラーコレクタの概略図を示す。シンプルかつローコスト実現のために、真空断熱などの特別な技術を用いることなく中温(100℃～250℃)を得ることができるというコンセプトの下で今回開発したコレクタで、構造は作動流体を流すための集熱管とアルミニウム製のCPC形状を持つ反射板、およびカバー、断熱材、ケーシングなどからなる。集熱管は銅管表面に選択吸収ペイント(吸収率0.92, 放射率0.3)が施されている。反射板の形状は放物線とインボリュート曲線で構成され、許容偏角32°で、0.94という高い反射率を有する増反射コーティングが施されたアルミニウム板をプレスして製作した。カバー(強化ガラス)はCPCキャビティ内における自然対流による熱損失を減少させるために、ガラスによってCPCキャビティを密閉する構造となっている。なお、ガラスについてはクリプトンガス(Krypton gas)封入複層ガラス(透過率0.86, 厚さはガラス3mm, クリプトンガス層8mm, の計14mm)を使用した。断熱材には、中温域においても温度依存性の少ない超微粒子シリカ系断熱材(熱伝導率: 0.024W/m²K (at 200℃))を採用した。

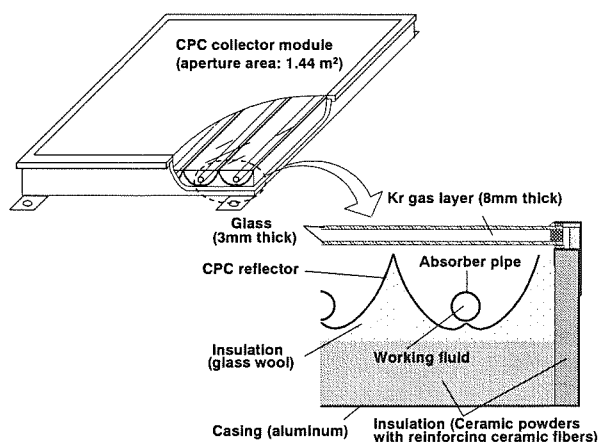


Fig.2 CPC collector module

長さ1.68mのCPC樋(トラフ)を13本並べて1つのモジュール(有効面積1.44m²)を形成し、このモジュール4枚を実験時期の太陽高度を考慮して、傾斜角45°, 方位角0°(真南)に4直列に並べて有効面積を5.75m²とした。製作したソーラーコレクタアレイの概観写真を図3に示した。中温集熱領域における集熱効率の向上のため、熱媒体の出口側である上部2枚のコレクタモジュールについては、コレクタキャビティ内部全体にクリプトンガスを封入して断熱性能を向上している。

実験は、シース型熱電対(T型)を用いてソーラーコレクタモジュールの入口・出口水温を測定し、全天日射計(英弘精機製MS-601)により測定した日射量とともに温度ロガーを介

してパソコンにデータ収集した。流量は温水メーター(金門製作所製HWD15)を用いて測定した。測定した入口出口温度差と流量および比熱から集熱量を求め、それを日射量と有効面積の積で除することによってコレクタの集熱効率を定義した。JIS規格では日射量630W/m²以上、変動が50%以内のデータを用いることとなっているが、本研究ではこれまでの経験から測定データとして日射量が800W/m²以上のもののだけを採用し、10分以上定常状態が続いたデータの平均値を採った。

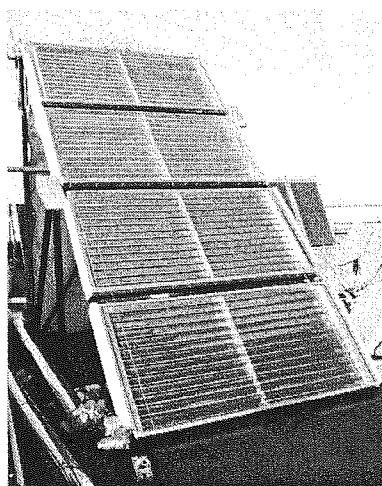


Fig.3 CPC collector array

本研究で製作したCPC型ソーラーコレクタの集熱効率曲線を図4に示した。CPC型ソーラーコレクタは真空式でないにもかかわらず、従来の平板型および真空管型⁽⁶⁾と比較して、格段に集熱効率が高いことがわかる。平板型についてはハービマンハウス(HARBEMAN House^{*3})のデータを用いた(14)(15)。

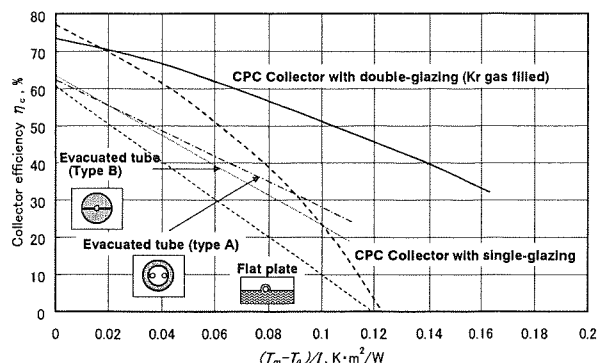


Fig.4 Comparison of present CPC collectors with other collector types

^{*3} HARBEMANとはHARmony Between Man And Natureの略であり、当研究室が開発した太陽熱・太陽光・放射冷却などを利用した実用的自然エネルギー自立住宅⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾である。

中温集熱を考慮して、クリプトンガス封入複層ガラスを採用することによって、中温域での集熱効率が格段に向上したことがわかる。CPC型ソーラーコレクタは、パラメータ $(T_m - T_a)/I$ が大きい範囲でも高い集熱効率を示すことから、ソーラーランキンサイクルシステムのような中温集熱への応用が可能と考えられる。

3.2 潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータ

ソーラーランキンサイクルシステム(SRCS)は香川県仁尾町のように広い土地にたくさんの鏡を置いて中央のタワー(塔)上のボイラに反射光線を集めて高温の蒸気を得るユニット方式(タワー方式)と、たくさんの小型コレクタで高温水もしくは気液混合蒸気を作り、それを集めてフラッシュボイラ兼気液分離器で蒸気を発生分離させる分散型方式とがある⁽⁴⁾。いずれの方式でも、太陽熱は時間的に一定せず、曇りや夜間には利用できないため、エネルギーの貯蔵が必要となる。

エネルギー貯蔵方式を大別すれば、力学的エネルギー、熱の状態のエネルギー、電磁気エネルギーおよび化学エネルギーなどの貯蔵が考えられる。このうち熱の状態のエネルギー貯蔵方式は、大別して、相変化物質の温度変化のみを利用する顕熱エネルギー貯蔵(Sensible heat thermal energy storage)と相変化物質(Phase Change Material)が相変化するときの融解・凝固に伴う大きな潜熱を利用する潜熱エネルギー貯蔵(Latent heat thermal energy storage)がある。

潜熱エネルギー貯蔵は顕熱エネルギー貯蔵に比べて大幅にエネルギー貯蔵空間を圧縮でき、一様温度で潜熱が発生する質の良いエネルギー源であるという利点を有することから、本研究では高融点相変化物質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⁽²⁾⁽¹²⁾をソーラーランキンサイクルシステムのフラッシュボイラ兼エネルギー貯蔵装置として採用した。

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5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相変化物質を封入した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。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、シース熱電対、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(10 kW)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(190 ℓ)におけるPCMカプセルの充填率(Packing factor)は0.6となる。

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ロウ付を採用した。また、高融点PCMの投入口は溶融物質を流し込んだ後にフ

レーアー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タイプの円筒カプセルを採用した。

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、できるだけ充填率を増大することができるよう、径の異なる2種類のカプセルを用意した。

なお、本研究でソーラーランキンサイクルシステムに採用した潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータは、従来の顕熱のみを利用したスチームアキュムレータと比較して2倍以上の発生蒸気量が得られることを実験およびシミュレーションにより明らかにしている⁽²⁾⁽¹²⁾。

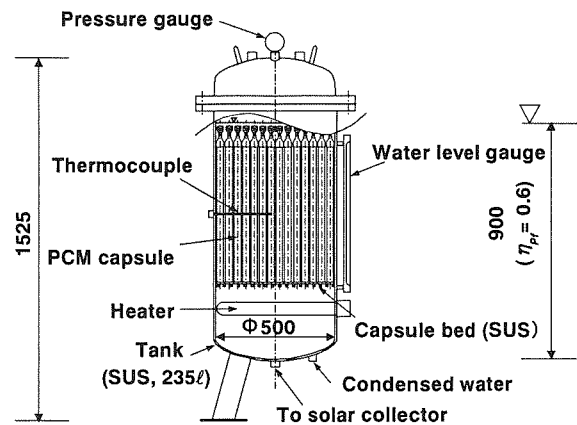


Fig.5 Latent heat thermal energy storage steam accumulator

3.3 粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービン

20世紀のタービンは、化石燃料をベースに開発されてきたため、高温・高圧・大出力の巨大タービンの方向に向かった。これはエネルギー供給や採算性までの要求から正しい方向であった。しかし、化石燃料枯渇と地球温暖化が叫ばれる21世紀は、20世紀の方向とは全く逆の方向を辿る可能性がある。ソーラータービンの具備すべき要件は、1) 蒸気温度・圧力が低い(低ポテンシャル差) 2) 小出力に対応できる 3) 低コストの3つである。以上の3つの要件を満たすタービンを構築するための重要なコンセプトは、“単純・重ね合わせ・繰返し”を利用することである。エネルギー密度が小さく、ポテンシャルの差も小さい再生可能エネルギーを利用・変換するには、その一つひとつは単純で、小出力であっても、それを100枚(個)、1000枚(個)・・・と数を増すことにより、大きな力(動力)を取り出せるということである。

本研究では、「重ね合わせ」を基本コンセプト(Concept of Superposition)とし、ソーラーランキンサイクルシステム用のエキスパンダとして新たに粘性・衝動複合型ソーラーパルス

タービンの設計・試作を行い、その性能の検証と実現可能性を探った。

新たに設計・試作した粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービンを図6に示す。粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービンは、一般の蒸気タービンで言うところのローターに相当するディスク、およびノズルが基本要素となっている。その他の要素としては、出力取り出しのための出力軸とケーシングから構成される単純な構造となっている。ディスクとケーシングで1ユニットを形成しており、ユニット単位でのカスケードイング(Cascading)を可能としている。ディスクの重ね合わせ枚数は、50~200枚である。

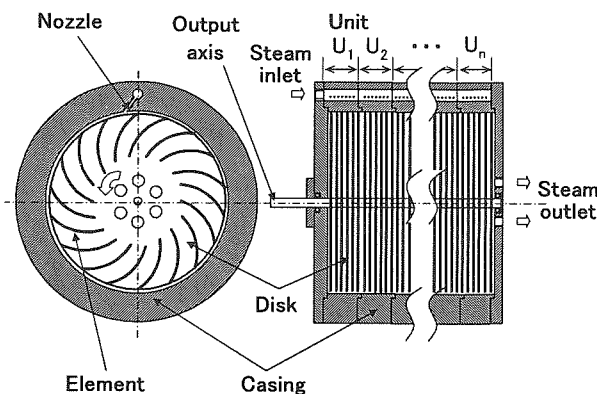


Fig.6 Solar pulse turbine

蒸気取入口より流入した蒸気は、ノズルから噴射された後、出力軸に非常に狭い間隔で稠密に取り付けられたディスクの間を外周から軸に向かって遠心力に逆らって流れ、蒸気流の粘性力と付着力によってディスクを回転させる。このタービンは、シンプルな円板を多数並べて、流入してきた蒸気とこの円板の間の粘性摩擦力と円板上の元素の衝動力を利用して動力に変換しようとしたものである。このとき、ディスクに加工が施されている衝動元素(以下、単に元素と呼ぶ)に衝突する蒸気噴流の衝動力および反動力によって、さらに出力が増大する。そして、ディスクの中心部にある開口部より蒸気排出口を通して排気される。

粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービンを効率の観点から着目した場合、蒸気消費量の低減が最も大きな課題の一つであった。蒸気をパルス噴射することによって、無駄な蒸気消費を抑え、効率向上につながり、流路遮断時に衝突圧による高圧が得られるために出力の向上が期待できる。図7にパルセーション(Pulsation)の効果を示した。同図では実験結果を出力100Wあたりの蒸気消費量、すなわち蒸気消費率に再整理して示してある。パルセーションの利用によって蒸気消費量が低減されても出力が低下しないことから、パルセーションによって約1/2の蒸気消費率となることを確認した。試作した粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービンは、

ボイラで発生させた蒸気(約140℃, 0.4MPa)を用いた性能試験において、最大300W(蒸気消費量12kg/hr)が得られた。

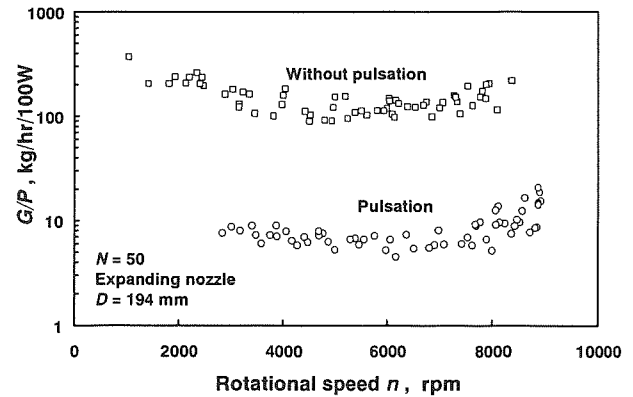


Fig.7 Pulsation effects

4. ソーラーランキンサイクルシステム運転試験

ソーラーランキンサイクルシステムの試験装置を図8に示す。ソーラーコレクタにはCPC型ソーラーコレクタを使用し、高温域での使用を考慮して、アキュムレータタンクおよびタービンは微粒子シリカ系断熱材をベースに十分な断熱を施した。

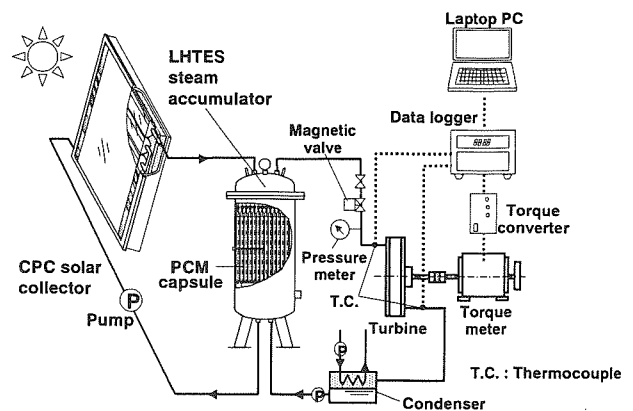


Fig.8 A schematic of the performance test equipment

図9に、本ソーラーランキンサイクルシステムの運転結果の一例を示す。この図は、潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータによるPCMによるエネルギー貯蔵を利用した、本ソーラーランキンサイクルシステムの運転結果を示している。温度スウィング $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ の運転時間はPCMの効果によって2倍以上になることがわかる。また、PCMによるエネルギー貯蔵によって出力の低下も抑えることができる。すなわち、ソーラーランキンサイクルシステムのエネルギー貯蔵運転によって、同じ温度スウィングにおいて従来のアキュムレータの2倍以上の発電が可能となることが期待できる。

本ソーラーランキンサイクルに用いた粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービンはカスケードイングが可能である。1段

目のタービンから排出される蒸気を2段目、3段目、・・・n段目に取り込んで運転することによって効率の向上を図ることが可能な上、最終段で完全に凝縮された温水は、暖房・給湯にも利用が可能となる。図10に粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービンのカスケード実験結果を示した。2段のカスケードによって、タービン単体の場合の1.5倍の出力が得られることを確認した。

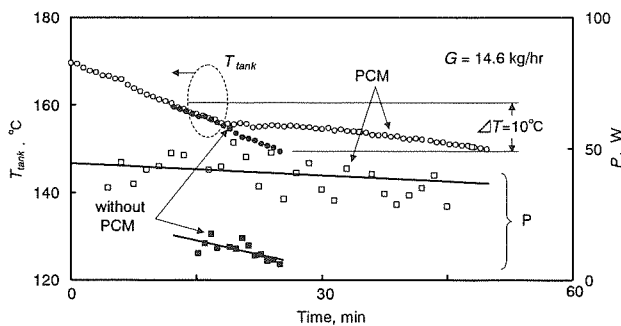


Fig.9 Energy storage operation

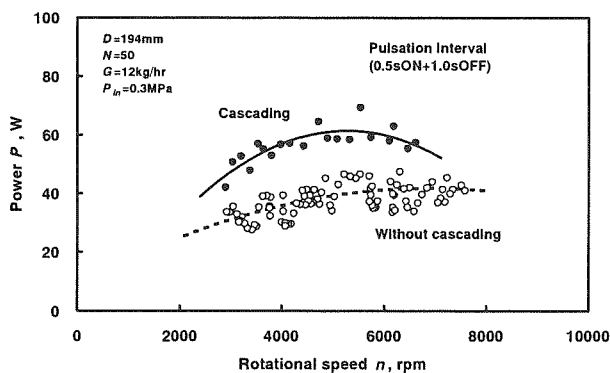


Fig.10 Cascading effects

5. 実用的プロトタイプソーラーランキンサイクルシステム

現状のシステムは、それぞれの構成要素間の最適なマッチングが取れていないため効率が低いものとなっている。現状のシステムでは、種々の効率の低下から日射量基準の効率は3%であるが、10%を目指して改良中である。図11に、現状のソーラーランキンサイクル(破線)を、目標とする理想ランキンサイクル(実線)とともにT-s線図上にあらわした。現状では破線で示すように、アキュムレータタンク内の状態からタービン入り口までに、大きな熱損失を生じている。これは、蒸気流量を調節するためのバルブや流量測定用のオリフイスリング、さらにはパルセーション用の電磁バルブを通過する際の損失と考えられる。この熱損失を改善して実線で示すような理想的なサイクルを形成すれば、2.5倍の効率向上が予測される。また、本研究で開発したCPC型ソーラーコレクタは、リフレクタの3次元化などの今後の改良によって、夏期の気象条件において集熱効率 $\eta = 0.7$ も期待できる。

図12に、潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータ

タンク内温度と出力の関係を示した。アキュムレータタンク内温度の増大に伴ってタービン出力も増加しており、先に示したカスケードの効果も考慮すると現状のシステムにおいても、タンク内温度200°Cでは蒸気消費率4.0kg/hr/100Wが得られる。さらに、図11に示した理想ランキンサイクルを形成できれば、蒸気消費率は1.6 kg/hr/100Wが期待できる。

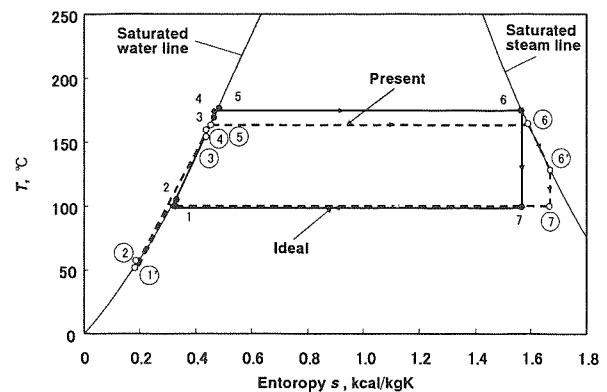


Fig.11 T-s diagram

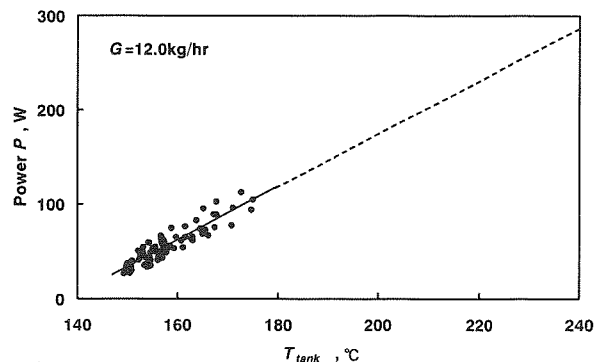


Fig.12 Effects of the temperature in accumulator tank

表2に、一般住宅における実用的プロトタイプソーラーランキンサイクルシステムについて実験結果をもとに期待できる性能を予測し、その仕様を示した。プロトタイプソーラーランキンサイクルシステムを住宅用(CPC設置面積:30m², 作動媒体:R113)に最適設計すると、夏の気象条件下で発電能力7.6kW、日射量基準の効率19.5%が期待できる。さらに、家庭用用途別エネルギー消費の内訳を考えると給湯および暖房は60%以上を占めており、本研究のソーラーランキンサイクルシステムのコー・ジェネレーション利用時の総合効率は60%以上となることが期待できる。

この実用的プロトタイプのソーラーオーガニックランキンサイクル(ORC)システムの概略図を図13に示す。ソーラーORCシステムも、CPCコレクタと潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータおよび粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービンの三要素から構成される。CPCコレクタで100~250°Cの中温水を造り、潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキ

ユムレータに蓄熱し、必要に応じてエバポレータで作動媒体と熱交換を行い、粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービンおよび発電機によって発電を行わせる。作動媒体(R113)はコンデンサで凝縮したのち、再びエバポレータに戻るが、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、ソーラーORCシステムはこのようにコー・ジェネレーション(Co-generation; 熱電併給)としても使える。

Table 2 Specifications of optimum solar Rankine cycle system

Application		General housing
Solar collector	Type	CPC solar collector
	Acceptance angle	32°
	Aperture	65mm
	Area	30m ²
	Tilt angle	30°
	Azimuth angle	0°
	Solar radiation	1.3kW/m ²
Accumulator	Type	LHTES accumulator
	Capacity	200 ℓ
	PCM	Mannitol + CaSO ₄ (5wt%)
	Packing factor	$\eta_{pf} = 0.6$
Expander	Type	Solar pulse turbine
	Disk diameter	194mm
	Disk number	50
	Cascading	3 stage × 2 parallel
	Pulsation	0.5s ON + 1.0s OFF
Working fluid	Type	R113
	Latent heat of evaporation	112.5 kJ/kg
Outlet	Power	7.6 kW ($\eta = 19.5\%$)
	Hot water supply	17 kW ($\eta = 43\%$)
	Total efficiency	$\eta = 64\%$

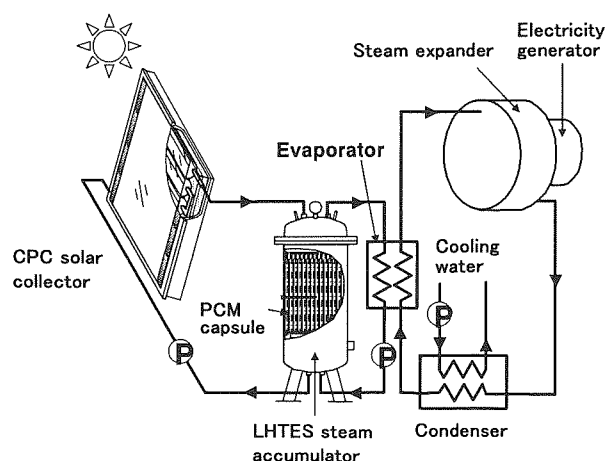


Fig.13 Solar organic Rankine cycle system

6. 結 言

本研究では太陽エネルギーからふんだんに得られる100～300℃の中温度範囲のもとで稼働するソーラーランキンサイクルシステムを提案し、プロトタイプシステムを設計・製作し、その実現可能性を実験的に検証し、以下の知見を得た。

- (1) 潜熱エネルギー貯蔵型スチームアキュムレータ、粘性・衝動複合型ソーラーパルスタービン、およびCPC型ソーラーコレクタを用いて構築されるソーラーランキンサイクルシステムを提案した。
- (2) 空気充填式CPC型ソーラーコレクタをベースに、さらにソーラーランキンサイクルシステムに適合するよう高温集熱領域の効率を大幅に改善したCPC型コレクタを開発し、性能試験を行って $(T_m - T_a)/I$ が大きい範囲でも高い集熱効率を示すことを示した。
- (3) ソーラーランキンサイクルシステムのPCMアキュムレータによる運転試験を行い、同じ温度スウィングにおいて従来のアキュムレータの2倍以上の発電が可能であることを示した。
- (4) 実用化を考えたソーラーランキンサイクルシステムのプロトタイプモデルについて実験結果をもとに期待できる性能を予測し、一般住宅仕様で出力7.6kW、日射量基準の効率19.5%が得られることを示した。さらにコー・ジェネレーション利用においては、総合効率64%となることを示した。

謝辞

CPCコレクタ製作にあたりご支援を戴きましたイースタン技研(株)に感謝する。また、アキュムレータタンクの製作には仙都工業(株)の支援を受けたことを記し感謝する。

記号表

D	: ディスク直径
G	: 蒸気流量
I	: 日射量
N	: ディスク枚数
n	: 回転数
P	: 出力
P_{in}	: タービン入口圧力
S	: エントロピー
T	: 温度
T_a	: 気温
T_{in}	: コレクタ入口温度
T_m	: 平均集熱温度($= (T_{in} + T_{out})/2$)
T_{out}	: コレクタ出口温度
T_{tank}	: アキュムレータタンク内温度
ΔT	: 温度スウィング
θ_a	: 許容偏角
η	: システム効率
η_c	: 集熱効率
η_{pf}	: PCMカプセル充填率

参考文献

- (1) 齋藤武雄, 環境・エネルギー, 伝熱, (2002).
- (2) 星 朗・齋藤武雄, “太陽エネルギー潜熱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”, 太陽エネルギー, 27-5 (2001), pp.41-48.
- (3) Saitoh, T.S. and Hoshi, A., “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), pp.796-803.
- (4) 一色尚次・北山直方, “新蒸気動力工学”, 森北出版, (1978), p.197.
- (5) 齋藤武雄・奥平英人, “プロトタイプCPC(Compound Parabolic Concentrator)型ソーラーコレクタの実験性能に関する研究”, 太陽/風力エネルギー講演論文集, Vol.I (2000), pp.403-405.
- (6) 齋藤武雄・奥平英人, “複合放物面型(CPC)コレクタの集熱性能の研究”, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.I (2000), pp.183-184.
- (7) 奥平英人, “容積型ソーラー低温度差エンジンに関する研究”, 東北大学大学院修士学位論文 (2000).
- (8) Saitoh, T.S., Pat.Pending (2000-1).
- (9) 星 朗・齋藤武雄, “アキュムレータ用高融点潜熱蓄熱に関する研究”, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (2000), pp.275-278.
- (10) 星 朗・齋藤武雄, “潜熱エネルギー貯蔵型アキュムレータの研究”, 第38回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.I (2001), pp.57-58.
- (11) T.S.Saitoh, Pat.Pending (2000-2).
- (12) 星 朗・齋藤武雄, “太陽エネルギー潜熱アキュムレータの研究 第1報; 高融点潜熱蓄熱材の特性評価”, 太陽エネルギー, Vol.27, No.5 (2001), pp.34-40.
- (13) T.S.Saitoh, Pat.Pending (2000-3).
- (14) Saitoh, T.S. and Fujino, T., “Advanced Energy-Efficient House (HARBEMAN HOUSE) with Solar Thermal, Photovoltaic, and Sky Radiation Energies (Experimental Results)”, Solar Energy, Vol.70, No.1 (2001), pp.63-77.
- (15) Saitoh, T.S. and Fujino, T., “A Highly-Advanced Solar House with Solar Thermal and Sky Radiation Cooling”, Applied Energy, Vol.64 (1999), pp.215-228.
- (16) 齋藤武雄・藤野哲爾, “太陽熱・光および放射冷却などを複合したエネルギー自立住宅“ハービマンハウス”の研究 第1報; 稼働実績”, 太陽エネルギー, Vol.24, No.6 (1998), pp.35-42.
- (17) 齋藤武雄・藤野哲爾, “太陽熱・光および放射冷却などを複合したエネルギー自立住宅“ハービマンハウス”の研究 第2報; 理論解析とシミュレーション”, 太陽エネルギー, Vol.25, No.1 (1999), pp.49-55.