

太陽熱アシストによる省エネ型ボイラシステムの開発

Development of a Solar-Assisted Boiler System

松野伸介 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主査 博士(工学)
 大塚裕之 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主査
 平田淳 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 部長

太陽集熱パネルと小型貫流ボイラを組合せ、化石燃料の消費量および二酸化炭素の排出量を抑制するボイラシステムを考案し、基礎試験を行った。貫流ボイラから生成される高圧蒸気で蒸気エゼクタを駆動し、太陽集熱パネル内部を吸引することによって、パネル内部を減圧してパネル内の水を沸騰させ、太陽熱で低圧蒸気を生成する。両者はエゼクタで混合され、蒸気利用先に中・低圧の蒸気として供給される。このシステムによって燃料消費および二酸化炭素排出量は最大で30%程度、年間平均で5~10%低減される見通しを得た。

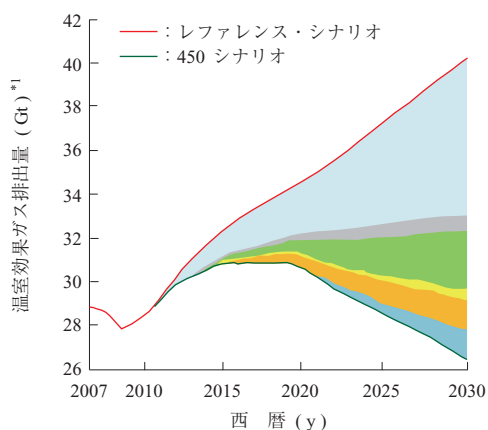
A compact industrial boiler system that is combined with solar thermal panels has been developed that has lower fuel consumption and CO₂ emissions than conventional systems, and has been subjected to basic testing. High-pressure steam generated by the compact boiler drives a steam ejector to decrease the pressure inside the solar panels, causing the generation of low-pressure steam within them using solar thermal energy. Steam from both sources is mixed in the ejector and is supplied on demand at low to medium pressure to where its use is required. During peak operation, reductions of 30% in fuel consumption and CO₂ emissions can be achieved by using this system, while annual reductions of between 5% and 10% are envisaged.

1. 緒 言

二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量増加による地球温暖化への危惧から、国際エネルギー機関(IEA)は2030年までの世界の温室効果ガスの排出量予測を発表している⁽¹⁾。第1図に450シナリオによる世界の温室効果ガス(二酸化炭素換算)排出量低減予測を示す。レファレンス・シナリオは世界各国の政府が既存の政策や対策を全く変えなかった場合のエネルギー市場予測

に基づくシナリオであり、大気中の温室効果ガス濃度がCO₂換算1000ppmを超えることで地球の気温を最大で6℃上昇させ、深刻な気候変動につながると見込まれている。これに対して大気中の温室効果ガス濃度を450ppmに安定させ、気温上昇を2℃以内に抑える450シナリオが提唱されている。これを達成するためにはエネルギー機器の高効率化に加え、再生可能エネルギー(Renewable Energy)の大幅な導入が不可欠である。

再生可能エネルギーのなかで、風力や太陽光(太陽電



項目	低減量 (Mt) ^{*1}		投資額 (十億ドル) ^{*2}	
	2020	2030	2010~2020	2021~2030
西暦(y)				
高効率化・省エネ	2 517	7 880	1 999	5 586
エンドユーザ	2 284	7 145	1 933	5 551
発電所	233	735	66	35
再生エネルギー	680	2 741	527	2 260
バイオ燃料	57	429	27	378
原子力	493	1 380	125	491
CO ₂ 回収・貯留	102	1 410	56	646

(注) *1: CO₂換算
*2: 2008年換算

第1図 450シナリオによる世界の二酸化炭素排出量低減予測
 Fig. 1 Worldwide reduction of energy-related CO₂ emissions under the 450 scenario

池)と並んで期待されるのが太陽熱利用である。第2図に太陽光エネルギーの利用分野を示す。太陽光を直接電気に変換するのが太陽電池であり、日本国内では特に普及が進んでいるが、世界全体を見渡すと、温水を生成する家庭用太陽集熱パネルの普及⁽²⁾や、大規模な集熱プラントを利用した太陽熱発電プラント⁽³⁾の建設が進められている。第2図に示すように、いったん、太陽光のエネルギーを熱エネルギーに変換することによって、電力以外のエネルギー利用分野に大きな広がりをもたせることが可能である。

第3図に太陽熱利用技術マップを示す。横軸は温度、縦軸に機器・プラントの出力規模を示している。太陽熱利用の大きな特長は、ミラーやレンズなどの光学機器で集光

することによって温度を制御し、利用温度を選択できるところにある。アプリケーションごとに適切な温度が存在し、一般には高温利用ほどプラントも大規模化していく(海水淡水化が例外といえる)。

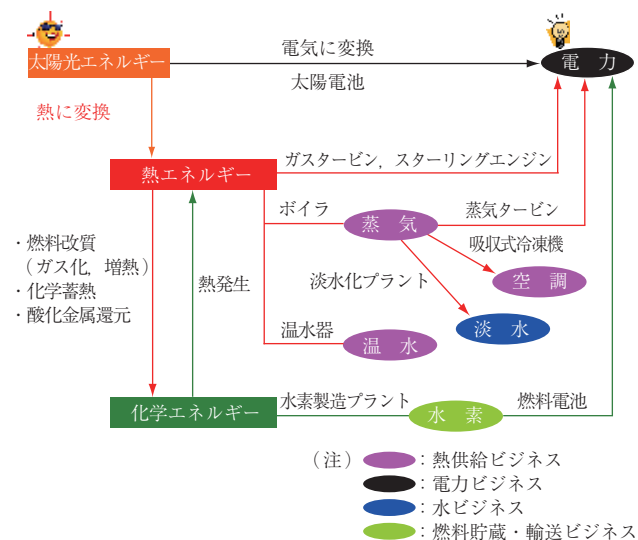
サンベルトと呼ばれる直達日射光が豊富な地域(地中海沿岸、中東、オーストラリア、アメリカ南西部など)では、集光システムを用いた大規模太陽熱発電などが有望であるが、日本のように散乱光(空中の微粒子や周囲の物体に反射散乱してから到達する日光)の割合が多い地域では、非集光型のシステムが有効である。したがって、熱利用の観点からは、太陽集熱パネルの高度利用が期待される。

太陽集熱パネルは家庭用の温水器として1970年代ごろから普及しており、太陽エネルギーの利用効率は40~60%と太陽電池を遥かにしのぐことが知られていながら、その利用先は温水(~70℃)のみに限られ、利用分野を広げる新たな開発はほとんどされてこなかった⁽²⁾。しかし、集熱や断熱構造にはさまざまな工夫が施されており、100℃前後の低圧蒸気生成に効率良く利用できる可能性がある。ここではIHIグループの製品のひとつである小型貫流ボイラと組合せ、太陽熱エネルギーによるボイラの消費燃料および二酸化炭素排出量の低減を図る新しいシステムを検討した。

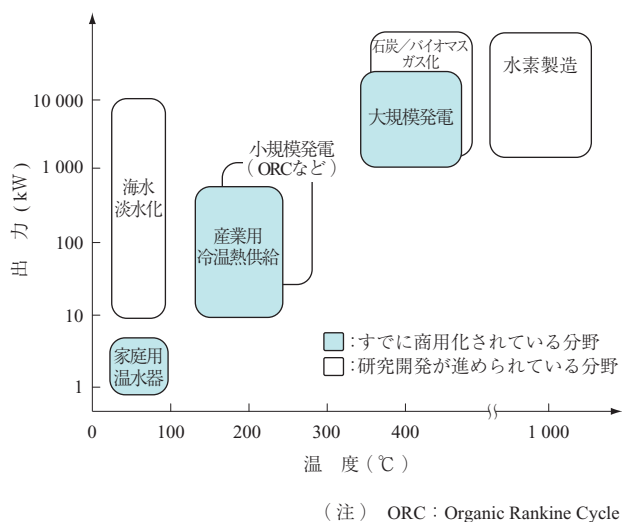
2. 太陽熱アシストボイラシステム

第4図に太陽熱アシストボイラシステムの概要を示す。第4図-(a)は試験に用いた太陽集熱パネル(平板型)であり、20 m²の面積をもっている。第4図-(b)にシステムの特長を示す。通常の小型貫流ボイラシステムでは、0.6~0.9 MPa程度の高圧でいったん蒸気を生成し、減圧弁によって所定の圧力に調整して蒸気利用プロセスへ供給している。本システムではこの減圧弁を蒸気エゼクタに置き換え、減圧時のエネルギーによって太陽集熱パネル内部を吸引し、パネル内を減圧することによって低圧蒸気を生成する。例えばパネル内を0.05 MPa(abs.)まで減圧すると、水の沸点は81.3℃となり、通常(大気圧下)であれば温水しか得られない温度で蒸気を発生させることができる。発生した低圧蒸気はエゼクタ内で高圧の駆動蒸気と混合され、中・低圧の蒸気として蒸気利用プロセスへ供給される。本システムの利点を以下に示す。

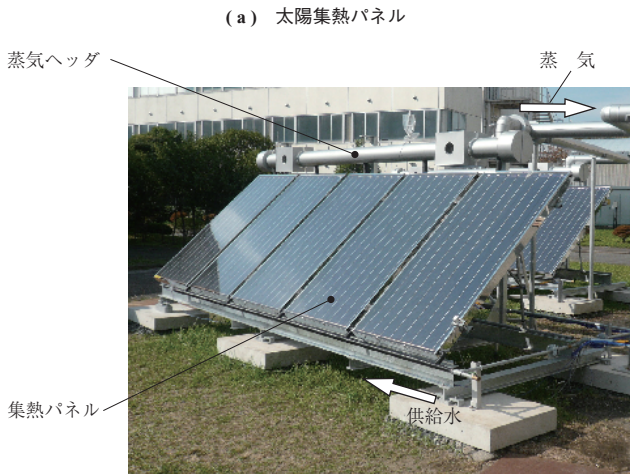
- ・天候によって日射条件が低下しても、貫流ボイラでシステム全体の出力を一定以上に保てる。



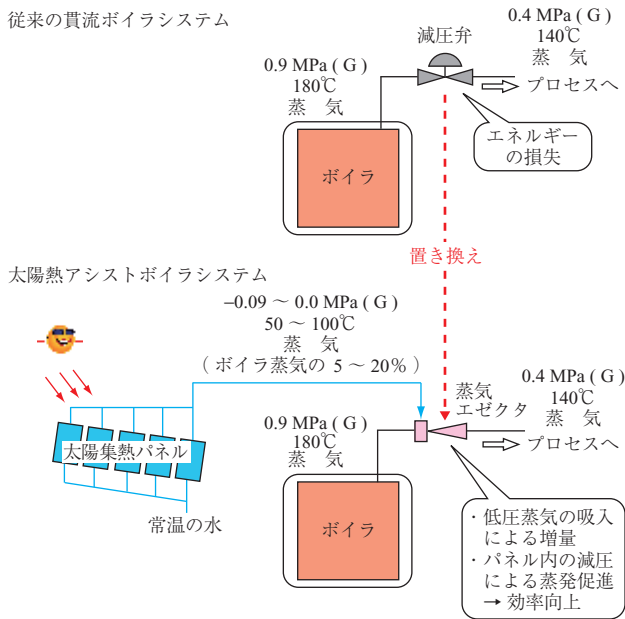
第2図 太陽光エネルギーの利用分野
Fig. 2 Solar energy applications



第3図 太陽熱利用技術マップ
Fig. 3 Technology map of solar thermal utilization



(b) システムの特長



第4図 太陽熱アシストボイラシステム
Fig. 4 Solar-assisted boiler system

- ・各要素機器（ボイラ，パネル）に新たな開発要素がない。
- ・減圧によってパネルを供給蒸気温度に比べて低温に保てるため，温水生成時と同程度の集熱効率が見込める。

3. 基礎試験

3.1 試験装置

第4図 - (a) に示した太陽集熱パネルを IHI 横浜事業所内の試験場に設置し，システム動作原理および基本性能を確認する基礎試験を実施した。第1表に基礎試験システム諸元を示す。蒸気エゼクタは吸入比の大きさから二段式とした。

第1表 基礎試験システム諸元

Table 1 Prototype system specifications

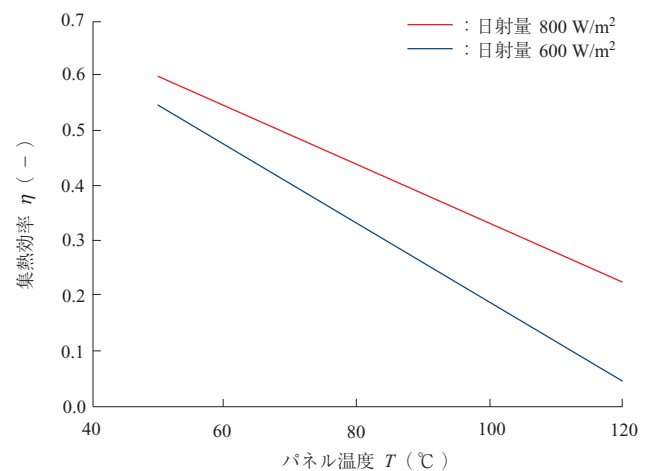
項目	単位	諸元	
小型貫流ボイラ	換算蒸発量	kg/h	200
	常用圧力	MPa (G)	0.5 ~ 0.9
	ボイラ効率	%	88
	使用燃料	-	灯油
蒸気エゼクタ	駆動流量	kg/h	100
	駆動圧力	MPa (G)	0.9
	吸込流量	kg/h	4.5
	吸込圧力	MPa (abs.)	0.01
太陽集熱パネル	吐出圧力	MPa (G)	0.1
	型式	-	平板型
	集熱面積	m ²	20
	集熱効率	%	49 ^{*1}

(注) *1: 日射量 800 W/m², パネル温度 70°C, 外気温 20°C の場合。

第5図に太陽集熱パネルの集熱特性を示す。一般的にパネル温度が上昇するとふく射による放熱ロスが増加するため，集熱効率（=集熱媒体に回収されるエネルギー/パネルに照射される太陽光エネルギー）は低下する。パネル温度をできるだけ低く抑える方が集熱効率が向上するのはこの特性のためである。

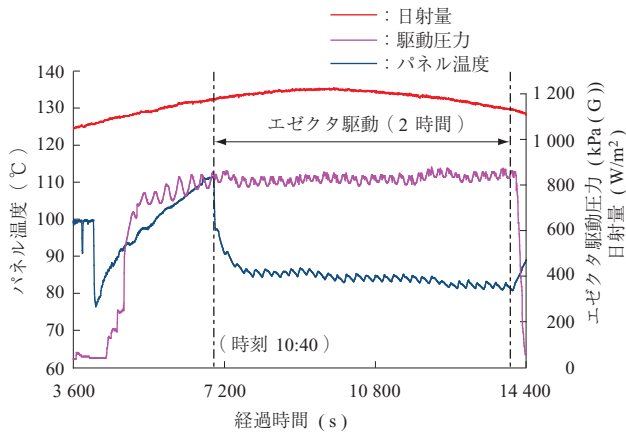
3.2 試験結果

第6図にある11月の快晴日のシステム運転状況を示す。およそ11:30ごろに太陽高度が最も高くなり，日射量が最大値を示している。その約1時間前から運転（エゼクタによる吸引）を開始した。吸引開始とともにパネル温度は速やかに低下し，パネル内部で沸騰が開始したことを示している。パネル温度はほぼ内圧（0.05 ~



(注) 外気温: 20°C

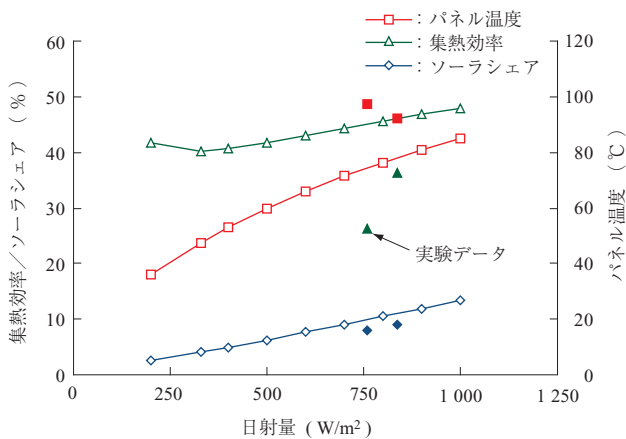
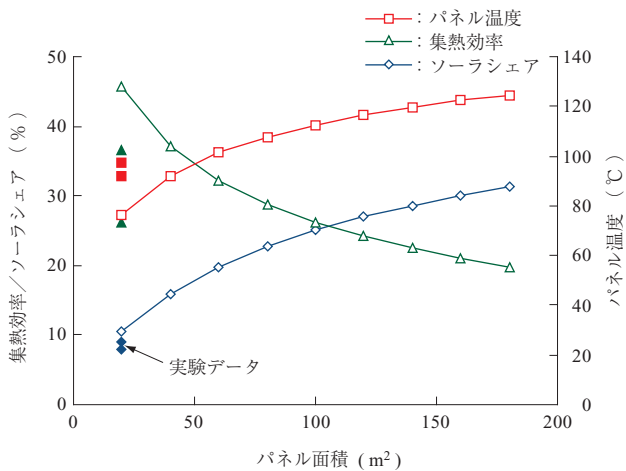
第5図 太陽集熱パネルの集熱特性
Fig. 5 Solar thermal panel performance



第 6 図 快晴日のシステム運転状況
Fig. 6 System operation data during clear weather

0.06 MPa (abs.) に対する沸点に一致し、安定して推移した。駆動圧力は貫流ボイラからエゼクタに流入する駆動蒸気の圧力を示し、ボイラの給水タイミングによって若干の変動があるものの、安定して運転されている。

第 7 図にシステムの理論性能の計算結果と実測値の比



第 7 図 システム理論性能と実測値の比較

Fig. 7 Comparison between theoretical and measured system performance

較を示す。パネル面積を横軸に表した場合、面積の増加に応じて回収できる太陽エネルギーの量が増加するため、ソーラシェア（太陽エネルギーから得た蒸気量/システムが供給する蒸気量）は増加していく。燃料消費および二酸化炭素排出量の抑制量もソーラシェアに一致する。しかし、ボイラの駆動蒸気量およびエゼクタの設計が同じであれば、吸引能力が変わらないため、パネル面積が増加していくにつれ減圧性能は低下していく。このため、パネル温度を低く保つことが困難になり、集熱効率が低下するためソーラシェアの増加は面積の増加に対して直線的にはならない。今回の実験データではパネルの集熱効率が理論値より低かったため、ソーラシェアは約 9%程度になり理論値より 2 ポイント程度低い結果となった。

また、日射量を横軸に表した場合、日射量の低下は集熱量の低下につながるが、330 W/m² まではエゼクタの設計範囲内にパネル内の圧力が収まるため、現行のシステム設計で低圧蒸気が生成できる計算となった。したがって、曇天や朝夕の浅い太陽入射角条件下でもシステムの運転は可能といえる。

4. 経済性検討

第 2 表に今回の基礎試験結果を基にしたシステムコスト概算を示す。IHI 横浜事業所内のフードセンター（工場給食の調理場）で使用されている小型貫流ボイラ（換算蒸発量 750 kg/h、食器乾燥用）への適用を想定し、試験用の計測器等を省いたコストを計算した。集熱パネルが全体コストの 33.5%を占めており、最も比率が大きいことが分かる。

第 3 表に経済性評価を示す。太陽集熱パネルの設置角度は南西向け仰角 45°とした。天候は横浜市の天気出現率⁽⁴⁾から計算し、年間の太陽軌道による入射角の変化を考慮し

第 2 表 システムコスト概算
Table 2 Broad estimate of system costs

項目	単価 (千円/m ²)	合計 (千円)	比率 (%)
集熱パネル	30	1 800	33.5
蒸気エゼクタ	-	1 000	18.6
架台	9	540	10.0
機器費合計		3 340	62.1
パネル設置工事	14	840	15.6
配管工事	20	1 200	22.3
工事費合計		2 040	37.9
総合計		5 380	100.0

(注) パネル面積 60 m²、配管工事は試験機の 40%として計算。

第3表 経済性評価
Table 3 Economic evaluation

項目	単位	標準条件	稼働長	稼働長 灯油高
稼働時間	h/d	4	6	6
消費燃料量	l/y	30 240	45 360	45 360
燃料単価	円/l	76 ^{*1}	76	137 ^{*2}
燃料費	千円/y	2 290	3 435	6 219
節約燃料量	l/y	2 777	4 166	4 166
節約燃料費	千円/y	210	315	571
節約率	%	9.2	9.2	9.2
CO ₂ 削減量	t/y	7.0	10.5	10.5
回収年	y	25.6	17.1	9.4

(注) *1:総務省統計局 HP から入手, 2009年11月.
*2:総務省統計局 HP から入手, 2008年8月.

た. 標準条件としてフードセンターのボイラ稼働時間である4 h/dを想定した場合, 回収年は20年以上となり, 補助金を考慮しない太陽電池と同じく現実的な数字は得られない. 再生エネルギーシステムは稼働時間をできるだけ長くとることが経済性成立の重要なポイントであり, 本システムの場合6 h/d程度が少なくとも必要と考えられる.

燃料価格は社会情勢によって大きな変化があるが, リーマンショック前の最高値で計算すると9年程度となり, 産業用途で求められる回収年(3~5年)に対して低コスト化でマッチさせられる可能性がでてくる. 中でも第2表からは, パネルの低コスト化が必須と考えられるが, 近年の中国での太陽集熱パネルの爆発的な普及⁽²⁾から, 海外ではパネルの低コスト化が進んでいるとみられ, 輸入パネルの利用も選択肢の一つといえる.

二酸化炭素削減量は本条件で約10 t/yと計算され, 最も低炭素化の要求が高いユーザ層が使用する換算蒸発量2 t/hボイラに換算すると, 約30~40 t/yと試算される.

5. 結 言

太陽集熱パネルを利用した太陽熱アシストボイラシステムを考案し, 基礎試験によるシステム動作原理および基本性能の確認と経済性の検討を行った.

試験システムは想定どおりに稼働し, システムが供給する蒸気の9%程度を太陽エネルギーから生成することができた. システム性能は理論値よりやや低い値を示し, 改良の余地がある.

経済性はシステム稼働時間が長く, 燃料価格が上昇した場合に成立する可能性があるが, パネルの低価格化などいっそうのコストダウンが必要である. ただし, 燃料価格の上昇が電気代に転嫁されにくいこと, 世界的に見ると太陽集熱パネルの普及と低価格化が進んでいる今日の状況を考えると, 太陽電池よりメリットが大きく, 補助金がなくとも経済性が成立しやすい可能性がある.

二酸化炭素削減量は換算蒸発量2 t/hのボイラシステムで約30~40 t/yと試算され, 太陽電池では不可能な熱需要に対する低炭素化に貢献できると期待される.

参 考 文 献

- (1) IEA: World Energy Outlook 2009 (2009)
- (2) 木村 宰: 太陽熱温水器の普及はなぜ停滞しているのか 電力中央研究所報告 Rep. No. Y08002 2008年
- (3) R. Pitz-Paal et al.: ECOSTAR, European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping SES6-CT-2003-502578 (2005)
- (4) 東京管区気象台 HP: オンライン(入手先) < <http://www.jma-net.go.jp/yokohama/yoko44.htm> > (参照 2009-12-23)