木質バイオマス燃料コージェネレーションシステムにおける 排煙からの排熱回収・発電に関する研究*

星 朗^{*1}, 赤澤 拓也^{*2}, 若嶋 振一郎^{*1}, 藤本 勲^{*3}, 菊岡 泰平^{*3}

Study on Waste Heat Recovery from Exhaust Smoke in Co-Generation System Using Woody Biomass Fuels

Akira HOSHI^{*1}, Takuya AKAZAWA, Shin-ichiro WAKASHIMA,
Isao FUJIMOTO and Yasuhira KIKUOKA

^{*1} Ichinoseki National College of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
Takanashi, Hagisho, Ichinoseki-shi, Iwate, 021-8511 Japan

In recent years, fossil fuels such as petroleum, coal, and natural gas have become limited resources. In addition, bad effects caused by excessive carbon dioxide (CO₂) emissions have now begun destroying our global environment seriously. Since current living and economical standards depend strongly on the fossil fuels, it is necessary to realize a new society that utilizes biomass as one of major sources of energy. In this background, we manufactured a practical Stirling engine using woody biomass fuels for the first time in Japan in 2005. Further we proposed a unique co-generation system with the Stirling engine that uses woody biomass fuels such as sawdust, firewood, and wood pellets. In this co-generation system, 43% of the input energy is wasted as heat loss from the exhaust smoke into the atmosphere. Therefore we tried to recover the waste heat by using a thermoelectric conversion module in this study. In this report, the results of basic performance test and demonstration experiment as a co-generation system combined the waste heat recovery with a power generating system are reported.

Key Words : Stirling Engine, Cogeneration, Biomass Energy, Alternative Energy, Renewable Energy,
Waste Heat Recovery, Energy Conversion, Thermoelectric Conversion

1. 緒 言

世界規模での化石燃料の大量消費により、近年、その燃焼に伴う二酸化炭素 (CO₂) の大量放出を要因の一つとする地球温暖化問題が進行している。一方では、経済成長を持続するために安定したエネルギーの供給が求められており、化石燃料の枯渇も懸念されている。このような背景にあって、特にエネルギー自給率の低い我が国では、化石燃料に代わる代替エネルギーの国内自給が急務となっている。

本研究室では、2005 年に木質バイオマス燃料の有効活用を目的として実用スターリングエンジンを開発した⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。スターリングエンジンは理論熱効率が高く、静粛で、内燃機関での利用が難しい木質バイオマス燃料の直接燃焼によってエンジンを駆動することが可能である。

さらに本研究室では、開発された実用スターリングエンジンをベースとした木質バイオマス燃料を燃料とするコージェネレーションシステムを提案してきたが、そのエネルギーフローを調べたところ約 43% のエネルギーが排煙の熱として未利用のまま大気中に棄てられていることが明らかとなった⁽⁴⁾。よって、提案するコージェネレーションシステムの総合エネルギー効率を向上させるためには、排煙からの排熱回収が大きな課題と言える。

* 原稿受付 2010 年 9 月 27 日

^{*1} 正員、一関工業高等専門学校 (〒021-8511 岩手県一関市萩荘字高梨)

^{*2} 高砂熱学工業 (株)

^{*3} 関西電力 (株) 研究開発室 エネルギー利用技術研究所 総合エネルギー研究室

E-mail: hoshi@ichinoseki.ac.jp

そこで本研究では、熱電変換モジュール (Thermoelectric Conversion Module ; TCM) を用いた排煙からの排熱回収方法に着目し、その基本性能を明らかにした⁽⁵⁾⁽⁶⁾上で、効率良く排熱回収・発電できるプロトタイプ排煙排熱回収・発電システムを新たに提案することを目的としている。本論文では、実用スターリングエンジンをベースとするコージェネレーションシステムとプロトタイプ排煙排熱回収・発電システムを複合して利用した場合の実証試験結果を示すとともに、考察・検討を行う。

2. プロトタイプ排煙排熱回収・発電システム

TCM そのものは小型軽量、無稼働、無排出ガス、高信頼性などの特長を有している。

これまでの研究で試作した空冷式の排熱回収・発電システム⁽⁵⁾⁽⁶⁾ (Waste Heat Recovery System ; WHRS) は、放熱部にヒートパイプと冷却フィンを使用したためにシステムのサイズが大きく、TCM のメリットである小型化を活かしきれていなかった。また、作動媒体が受熱側で蒸発し放熱側で凝縮して液体になるときの潜熱移動により、小さな温度差で大量の熱輸送を可能とするヒートパイプを使用したが、ヒートパイプの凝縮液は重力により加熱部へ還流させるサーモサイホン式を採用していたため、試作した空冷式 WHRS では水平設置姿勢の制約を受けた。さらに、空冷式 WHRS 単体では出力が小さいのでシステムを複数個接続して取り付ける必要があり、スペースの狭いスターリングエンジン・コージェネレーションシステムに設置するには場所が限られてしまうことから、小型化したシステムを開発する必要があった。

さらに、WHRS の出力向上には受熱部と放熱部の温度差を大きくすることが必要となる。しかし、TCM の熱的耐久性により、受熱部温度には限界がある。

そこで本研究では、放熱部の冷却方式を空冷に換えて伝熱量の大きい水冷を採用することで出力向上を図ることとした。空冷式 WHRS ではヒートパイプにより水平設置の姿勢の制約を受けていたが、水冷ヒートシンクを採用することにより、あらゆる設置姿勢にも対応可能で、より小型のシステムを実現できるようになる。図 1 に、水冷式のプロトタイプ排煙排熱回収・発電システムの概略図を示す。また、試作した排煙排熱回収・発電システムを既設のコージェネレーションシステムの排煙チャンバーに設置した様子を図 2 に示した。

Fig.1 Sketch of prototype WHRS
(Water cooling type)

Fig.2 Outside of prototype WHRS

水冷式のプロトタイプ排煙排熱回収・発電システム (以下、水冷式 WHRS) は、排煙チャンバーへの設置方法としてメンテナンス性を考慮して外部から取り付け可能な特殊なハンガーを使用した。また、TCM は熱電変換素子と電極の間の熱膨張率の違いによる破損が考えられるため、スプリングとナットで水冷ヒートシンクを固定し、締付力を調整できるようにした。なお冷却水は、実用段階ではスターリングエンジン冷却側で使用しているタンクの冷却水を共用することを考えているが、本研究ではスターリングエンジンと水冷式 WHRS へ供給する

冷却水流量が大きく異なることから、別系統のポンプとタンクを使用した。TCM 表面の温度は、受熱ヘッダーの上面と放熱ヘッダーである水冷ヒートシンクの下面に熱電対を取り付けて測定した。

3. TCM を用いた排煙からの排熱回収実験

3・1 TCM の選定

排煙からの排熱のような希薄なエネルギーを、効率良く回収・発電する技術の一つであるTCMによる熱電変換は、固体半導体素子により温度差から電力を直接発生させるエネルギー変換技術で、小型軽量、無稼働、無排出ガス、高信頼性などの特長を有しており、スケール効果がないために希薄で分散した排熱回収に有効⁷⁾とされている。

TCM は熱電変換素子の材料によって最適な使用温度があるため、始めにTCM 選定を目的としてコージェネレーションシステムにおける排煙温度の計測を行った。図3 には、本研究で実証試験に用いたコージェネレーションシステムの概略図を示した。高温となったエンジン冷却水は、始めにファンコイルユニット (Fun Coil Unit ; FCU) により熱回収され、温風暖房の熱源として利用される。さらに、FCUを出た温水はヒートポンプ (Heat Pump ; HP) に入り、これを熱源としてHPを稼働してFCUと同様に温風暖房を行う。さらに本コージェネレーションシステムでは、発電機から出力される電力 (最大3kW) をバッテリーチャージャーによりバッテリーへ充電するシステムを備えている。これによりエンジンが稼働していない時にも外部負荷の使用を可能とする一方、エンジンが稼働している場合にも発電機から直接出力される不安定な電力ではなく、バッテリーからの安定した電力を供給することができるようになっている。

排煙温度の測定結果を図 4 に示す。スターリングエンジンの加熱器表面平均温度 T_H が約 650°C で稼働しているとき、排煙温度 T_{exhaust} は約 450°C で排出されており、水冷式 WHRS 設置予定の排煙チャンバー表面温度 T_{surface} は約 180°C となっている。この結果から、TCM として、連続加熱で 250°C まで使用可能で、熱源に対する熱的耐久性が確保でき、さらに形状・寸法に依存しない半導体の物理量 (熱電能、比抵抗、熱伝導率) だけの関数として与えられる熱電素子の性能指数が優れている Bi_2Te_3 系化合物を用いた TCM (ソリッドフィジクス社製、型番 TEPI-1264-1.5) を採用した。

Fig.3 Cogeneration system

Fig.4 Exhaust smoke temperature variation

3・2 TCM の基本性能試験

採用した TCM を用いて構築した水冷式 WHRS では水冷ヒートシンクを採用しており、水平設置の制約がないため、コージェネレーションシステムの排煙チャンバー上面に加えて側面にも設置することができる。そこで空冷式 WHRS では設置することが困難だった排煙チャンバー側面に高温側の受熱ヘッダーを固定して加熱し、

放熱側は TCM の放熱を、冷却水が循環している水冷ヒートシンクにより冷却するようにした。この時に得られる受熱ヘッダーと水冷ヒートシンクの温度差により、TCM において排熱が電気へ直接変換される。

一般的に熱電変換で用いる TCM にはマッチングロード出力が存在することが知られており、TCM が持つ内部抵抗と接続される負荷の関係において最も出力が大きくなる状態をロードマッチングしているという。つまり、内部抵抗が大きいと、内部抵抗による発熱などの損失として出力が小さくなってしまふ。一方で、負荷が大きい場合には出力電流が小さくなり、その結果として最適なマッチングがとられていない場合には出力される電力が小さくなってしまふ。したがって、抵抗が数オームと小さい TCM のロードマッチングには、十分な検討が必要となる。一般に内部抵抗と負荷が等しい場合に出力が最大となることが知られており、TCM を 4 個直列に接続する水冷式 WHRS について、コージェネレーションシステムにおいて実際に排熱回収・発電実験を行う前に、基本性能試験を行って特性を明らかにすることとした。

基本性能試験では、受熱側の熱源としてホットプレートを利用し、可変抵抗 ($1 \sim 20 \Omega$) で負荷を変化させながら最適なマッチングロードを検証した。これまでの基本性能試験結果⁽⁶⁾において、同じ温度差であれば実験条件に関わらず出力される電力が等しいことがわかっている。そこで、マッチングロード出力の特性を調べるための実験条件として、ホットプレートの温度を上昇させていく場合と、可変抵抗について抵抗値を増大させる場合について基本性能試験を行った。

水冷式 WHRS の基本性能試験結果を図 5 と図 6 に示す。図 5 は TCM 単体の場合について、図 6 は TCM を 4 個直列接続した場合の結果を示している。両方の実験結果より、それぞれの実験においてマッチングロード出力にあたるピーク値が存在することが明らかである。また、受熱側と放熱側の温度差 ΔT が大きくなっていくにつれて、ロードマッチングする電流の値が大きくなっていることがわかる。すなわち水冷式 WHRS では受熱側と放熱側の温度差 ΔT の増大に伴って発電電力も増加することが明らかである。また、同じ温度差 ΔT に対して TCM 単体の場合 (図 5) と TCM を 4 個直列接続した場合 (図 6) について比較すると、ロードマッチングしている状態において、ほぼ等しい電流値で 4 倍の発電電力が得られていることがわかる。

以上のことから、提案する水冷式 WHRS を用いて排煙からのエネルギー回収を行う場合でも、空冷式の場合と同様に、受熱・放熱側の温度差を大きくすること、および受熱側の面積を増大 (TCM の総面積を増大) させることが、出力増大の重要なパラメータであることが確認された。

次に、横軸に受熱側と放熱側の温度差、縦軸にマッチングロード時の発電電力をとって、TCM 単体の場合と 4 個直列接続した場合について結果を整理したものを図 7 に示した。どちらの実験結果も、受熱側と放熱側の温度差に対して発電電力は直線的に増加することが明らかである。また、同じ温度差に対して TCM を 4 個直列接続した場合の発電電力が、TCM 単体の発電電力の約 4 倍になっていることが確認できる。さらに、TCM を 2 個直列・並列接続した時の基礎実験結果⁽⁶⁾からも、直列接続時には、TCM 単体と等しい電流値において、約 2 倍の電圧が得られている。このことから、WHRS の出力増大には TCM の総面積増大が重要なパラメータであることがわかる。

Fig.5 Basic performance of water-cooled WHRS (Single TCM)

Fig.6 Basic performance of water-cooled WHRS (4 series connected TCM)

図 8 には、本研究で提案する水冷式 WHRS と初めに試作した空冷式 WHRS⁽⁶⁾について、横軸を受熱側温度として、TCM 単体の場合の受熱側と放熱側の温度差 ΔT と発電電力 P を比較して示した。水冷式 WHRS の場合、受熱側温度が大きくなるにつれて空冷式 WHRS よりも大きな温度差を得ることができ、その結果、発電電力も $T_h=150^\circ\text{C}$ で 0.5W 程度大きな値を示していることがわかる。これは冷却方式を空冷から水冷に改良したことによって、放熱側の放熱量が増大して大きな温度差を得ることができるようになったため、出力が向上したものと考えられる。

Fig.7 Output power versus temperature difference ΔT

Fig.8 Comparison between water-cooled and air-cooled WHRS

3・3 排熱回収・発電システムの実証試験

これまで実験を行ってきた木質バイオマス燃料を用いた実用スターリングエンジン・コージェネレーションシステム^{(1)~(4)}に水冷式 WHRS を取り付けた状態での実験装置外観を図 9 に、表 1 に採用した実用スターリングエンジンの仕様を示した。本研究では、提案する水冷式 WHRS を、燃焼器と煙突を接続している排煙チャンバー側面に取り付けて実証試験を行った。

実験方法は以下の通りである。まず、水冷式 WHRS の受熱ヘッダーにおいてコージェネレーションシステムにおける排煙の熱を受熱し、放熱側の水冷ヒートシンクにおいて冷却水を循環することによって冷却する。本実験では、水冷式 WHRS の性能評価のために水冷ヒートシンクの冷却システムを独立させているが、実用システムにおいては既設のエンジン冷却システムを連係させることを考えている。このときの受熱ヘッダーおよび水冷ヒートシ

シリンダの温度差により TCM で発電を行う。受熱ヘッダーの上面（温度 T_h ）と水冷ヒートシンクの下面（温度 T_c ）にそれぞれ熱電対を取り付けて、その温度差（ $\Delta T = T_h - T_c$ ）を確認しながら、負荷において出力される電圧 E V および電流 I A を自動計測した。同時にスターリングエンジン加熱器の 3 ヶ所に取り付けられた熱電対によりエンジン加熱器表面平均温度 T_H °C，ならびにエンジン冷却器における冷却水入口温度 T_{in} °C，出口温度 T_{out} °C を計測した。さらに、エンジン冷却水流量 G_w kg/min，エンジン始動後に発電機から出力される電圧 E_e V，電流 I_e A もパソコンにより自動計測した。

Fig.9 Experimental apparatus of waste heat recovery system with water-cooled WHRS

Table 1 Specifications of practical Stirling engine

Engine output	3.7 kW at 650rpm
Fuels used	Wood, sawdust, chips, pellet, carbonized dropping, etc.
Fuel consumption	38kW (10kg/hr of wood)
Lubrication	Dry bearing; no oil used
Working fluid	Air
Working pressure	0.5MPa (self-pressurizing)
Heater head temp.	650 °C
Dimensions	450 × 450 × 1200
Weight	200 kg

以上の測定データから、システム性能を評価するために必要となる発電電力，冷却水により温水として回収されたエネルギー等を以下の式により算出した。

エンジン冷却水より回収された温水のエネルギー W_{heat} W は以下の式で計算される。

$$W_{heat} = G_w \times c_p \times (T_{out} - T_{in}) \times 1/60 \quad (1)$$

ここで、
 G_w : 冷却水流量 kg/min
 c_p : 冷却水の定圧比熱 J/(kg・K)
 T_{out} : 冷却水出口温度 K
 T_{in} : 冷却水入口温度 K

また、発電機により得られる電力 W_{elec} W と水冷式 WHRS より得られる電力 W_{WHRS} W は、どちらも電圧計出力 E V と電流計出力 I A より、次式により求められる。

$$W_{elec} = I_e \times E_e \quad (2)$$

$$W_{WHRS} = I \times E \quad (3)$$

なお、水冷式 WHRS に接続された負荷抵抗の値は、実験で計測された受熱部 T_h と放熱部 T_c の温度条件から、基本性能試験結果をもとに整理した TCM の負荷特性のグラフを参照して決定し、ロードマッチングさせている。

図 10 には、図 9 に示した装置において、本研究で提案する水冷式 WHRS (TCM 4 個直列接続) を用いた排煙からの排熱回収・発電の実験結果を示す。実験では木質バイオマスの燃料消費量を 6.1kg/hr (約 31.3kW) とし、コージェネレーションシステムにおいてエンジン加熱器表面平均温度が約 810℃で定常運転のとき、発電機から発電電力として約 2.8kW 得られ、また、冷却水によって温水として約 16kW エネルギーが回収されている。そして、本研究のテーマである水冷式 WHRS において、この実験では約 500℃の排煙における排熱によって、TCM の受熱側が約 90℃、放熱側が約 18℃、温度差 $\Delta T = 72^\circ\text{C}$ で、最大で約 6W の発電電力が得られている。なお、初めに試作した空冷式 WHRS (TCM 単体) では、約 520℃の排煙における排熱から、受熱ヘッダー側が約 120℃、放熱ヘッダー側が約 50℃の温度差 $\Delta T = 70^\circ\text{C}$ において、約 1.1W 発電している⁹⁾。

(a) Cogeneration system

(b) Waste heat recovery system

Fig.10 Experimental results of the waste heat recovery system

実験結果から、既設の実用スターリングエンジン・コージェネレーションシステムがほぼ同じ状態で運転されている時、本研究で提案する水冷式 WHRS を用いて排煙からの排熱回収・発電をする場合には、空冷式 WHRS よりも大きな発電電力を得られることが明らかである。これは、TCM 総面積の増大はもちろんであるが、放熱側を水冷にしたために伝熱性能が向上し、放熱側温度を低くすることができるために受熱側と放熱側の温度差を大きくとることができ、その結果、大きな出力を得ることができるようになったものと考えられる。

さらに、既設のスターリングエンジン・コージェネレーションシステムの排煙チャンバーと煙突に多数の水冷式 WHRS を取り付けを考える。この時、WHRS を取り付けける面は全て同じ温度で、等しく受熱可能であると仮定する。また、空冷式 WHRS (TCM 1 個) の受熱面積は $63 \times 60 \text{ mm}$ と小さいもののヒートパイプ冷却フィンが取り付けられているために全体のサイズは $W180 \times L115 \times H100$ と大きいものに対して、水冷式 WHRS (TCM 4 個) の受熱面積は $160 \times 130 \text{ mm}$ で全体のサイズは $W160 \times L190 \times H28$ と TCM 1 個当たりの大きさは小さい。排煙チャンバーの表面積は 1.25 m^2 であるが、燃焼器と煙突に接続されている部分、および床面には WHRS を取り付けることができないことから、排煙チャンバー本体に取り付け可能な面積は 0.86 m^2 となる。煙突については、図 10 (b) の煙突部温度より排煙チャンバーとの接続部から 1 m の高さまでを水冷式 WHRS により同等の発電ができるものと考え、1 辺 0.26 m 、高さ 1 m の矩形ダクトを煙突として使用すると 1.04 m^2 の面積が利用できる。このとき、水冷式 WHRS は既設のコージェネレーションシステムに 71 個取り付けることが可能で、単純計算で得られる発電電力は 426 W となる。一方、空冷式 WHRS は設置姿勢を考慮すると、排煙チャンバー上面に 4 個しか取り付けることができず、このとき得られる発電電力は 4.4 W となる。このことから、本研究で提案する水冷式 WHRS がより実用的なシステムであると言える。

図 11 には、本研究で既設のコージェネレーションシステムに多数個の水冷式 WHRS を設置した場合のエネルギーフローを新たに試算して示した。なお同図においては、熱源となる木質バイオマス燃料をベースとするエネルギーフローに着目しており、ポンプおよび FCU の補機動力は除いてある。

システムに投入されるエネルギーの約 36% が排煙の排熱として棄てられていたが、提案する水冷式 WHRS で排熱を回収することにより、約 1.3% (426 W) が電力として利用できるようになる。これにより、研究室で取り組んでいる木質バイオマス燃料コージェネレーションシステムにおいて出力される電力は、発電機から出力される 8.7% と合わせて計 10% となる。また、FCU および HP などで温風暖房として利用したエネルギーは約 38% であることから、総合エネルギー効率として約 48% が得られる。

Fig.11 Energy flow of cogeneration system combined WHRS

ここで、水冷式 WHRS (TCM 4 個直列接続) と空冷式 WHRS の製作費を比較すると、それぞれ 5.7 万円と 3 万円である。既設のスターリングエンジン・コージェネレーションシステムに取り付けて排煙の排熱から回収・発電したエネルギーは、それぞれ 6W と 1.1W であり、1W あたりのコストは水冷式 WHRS で 9,500 円/W、空冷式 WHRS では 27,000 円/W となる。これより、提案する水冷式 WHRS のコストパフォーマンスのほうが良いことが言える。なお、実証試験で用いた実用スターリングエンジンの 1W あたりのコストは 1,300 円/W であり、多種多様な燃料で発電できることを考えると、システムとしても十分に実用性が高いと考えられる。

4. エクセルギー解析

化石燃料の大量消費に起因するエネルギー資源の枯渇問題や地球温暖化に代表される地球規模の環境問題を背景に、省エネルギー・代替エネルギーに関わる新技術の開発や従来技術の改良が工学の重要な役割となってきた。ここで、ヒートポンプやコージェネレーションシステムなどのエネルギー変換システムを評価する上で、無駄に捨てられているエネルギーを定量的に明らかにするためにエクセルギー解析⁽¹⁰⁾が必要となる。本章では、人間が利用する視点に立った質としてのエネルギー、すなわちエクセルギーの概念から、本研究で提案する木質バイオマス燃料コージェネレーションシステムを評価する。

エクセルギー E_{kJ} とは、周囲と非平衡にある系が平衡状態に達するまでに発生可能な理論最大仕事のことであり、熱のエクセルギー E_Q kJ は以下の式⁽¹⁰⁾により求められる。

$$E_Q = Q_H \left(1 - \frac{T_0}{T_{HS}} \right) \quad (4)$$

ここで、木質バイオマス燃料 1 kg 当たりの発熱量 $Q_H = 18500 \text{ kJ}$ 、熱源温度 $T_{HS} = 800^\circ\text{C}$ 、周囲温度 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ であるから、燃料 1 kg のエクセルギーは $E_Q = 13500 \text{ kJ}$ ということになる。

次に、本システムで活用したエクセルギーを L kJ とすると、本システムのエクセルギー効率 ζ は次式⁽¹⁰⁾により求められる。なお、本研究では木質バイオマス燃料の有効活用という点に着目しているため、補機類の動力は分母から除いて考えている。エクセルギー効率を求めることは、コージェネレーション等のエネルギーカスケード利用の有用性を示す場合に有効となる⁽¹⁰⁾。

$$\zeta = \frac{L}{E_Q} \quad (5)$$

本システムにおいて、木質バイオマス燃料 1 kg の燃焼により発電機で得られる発電量は $L_{\text{elec}} = 1652 \text{ kJ}$ であるから、活用できたエクセルギーを 1652 kJ と考えるとエクセルギー効率 (有効エネルギー効率) ζ として約 12 % が得られることになる。

木質バイオマス燃料を従来のストーブで暖房のみに使用する場合には、熱源温度と暖房利用温度の差が大きいためエクセルギー効率は低くなることが予想される。本研究で提案するようなシステムを用いて燃焼温度に近い高温を利用してスターリングエンジンによる発電を行い、冷却水や排煙の排熱などをカスケード利用することが大切になるものと考えている。

5. 結 言

本研究では、TCM を用いた水冷式 WHRS の基本性能試験結果を示し、さらに水冷式 WHRS を用いて木質バイオマス燃料コージェネレーションシステムにおいて排熱回収・発電するシステムの実証試験を行って、その結果を報告した。

本研究により、以下の知見が得られた。

- (1) 受熱側と放熱側の温度差 ΔT が同じ場合、水冷式 WHRS において、TCM を 4 個直列に接続した時には、単体の場合と等しい電流値において約 4 倍の電圧が得られ、その結果、約 4 倍の発電電力が得られる。
- (2) 実際に製作した水冷式 WHRS を用いて、通常であれば廃棄されてしまう排煙の熱を回収して約 6W の電力が利用できることを示した。
- (3) 既設のコージェネレーションシステムに空冷式 WHRS と水冷式 WHRS をそれぞれ取り付けた場合の発電電力を比較することで、実用可能性の面から水冷式 WHRS が優れていることを示した。
- (4) 既設の木質バイオマス燃料コージェネレーションシステムには、提案する水冷式 WHRS を 71 個取り付けることが可能で、426W の発電電力が得られる。
- (5) 木質バイオマス燃料 1 kg のもつエクセルギー $E_Q = 13500\text{kJ}$ に対して、提案するコージェネレーションシステムでは約 12 % のエクセルギー効率が得られることを示した。

文 献

- (1) 鶴野 省三, 濱口 和洋, 星 朗, 香川 澄, 佐藤 克良, 大岩 徳雄, “スターリングエンジンで新産業創出を！ —エネルギー安全保障・環境対策に向けて—”, (株) 日本経済新聞社「月刊エネルギー」, Vol.39, No.7 (2006), pp.51-66.
- (2) 星 朗, “木質バイオマス燃料を使ったスターリングエンジン発電”, (株) 潤滑通信社「潤滑経済」8 月号, No.515 (2008), pp.41-45.
- (3) Akira Hoshi, Nobutoshi Tezuka, Seizi Sasaki, Isao Fujimoto and Noboru Yamada, “DEVELOPMENT OF PRACTICAL STIRLING ENGINE FOR CO-GENERATION SYSTEM USING WOODY BIOMASS FUELS”, Proc. of ISES Solar World Congress 2007, Vol. V, (2007), pp. 2453-2457.
- (4) 星 朗, 阿部 大樹, 高橋 隼人, 佐々木 世治, 高橋 龍也, “木質バイオマス燃料によるスターリングエンジン/ヒートポンプ複合コージェネレーションシステムのエネルギーバランス”, 日本機械学会東北支部第 43 期秋季講演会講演論文集, (2007), pp.99-100.
- (5) 星 朗, 小野 孝文, 赤澤 拓也, 藤本 勲, 菊岡 泰平, “木質バイオマス燃料スターリングエンジンにおける排煙の排熱回収”, 第 11 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集 (2008), pp.49-50.
- (6) 星 朗, 小野 孝文, 赤澤 拓也, 藤本 勲, 菊岡 泰平, “木質バイオマスエネルギーによる熱・電力複合利用に関する研究”, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.35, No.1 (2009), pp.51-56.
- (7) 大瀧 倫卓, “酸化物熱電変換材料の開発”, http://ohtaki.cube.kyushu-u.ac.jp/Ohtaki_Lab/pages/research/TE/oxide.html. (参照日 2009 年 8 月 31 日) .
- (8) 赤澤 拓也, “排煙からの熱回収・発電システムの研究”, 一関工業高等専門学校卒業研究論文 (2008)
- (9) 星 朗, 若嶋 振一郎, 前澤 一男, 伊藤 和己, “木質バイオマスエネルギーを活用した冷・温熱/電気の供給システム”, 第 19 回環境工学総合シンポジウム講演論文集 (2009), pp.378-381.
- (10) 熱力学, 日本機械学会編, JSME テキストシリーズ熱力学, 初版第 6 刷 (2007), pp. 69-77, 日本機械学会.