

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

Research on Heat and Electricity Combined Utilization of Woody Biomass Energies

星 朗^{*1}

Akira HOSHI

赤澤拓也^{*4}

Takuya AKAZAWA

小野孝文^{*2}

Takafumi ONO

藤本 勲^{*5}

Isao FUJIMOTO

阿部大樹^{*3}

Daiki ABE

菊岡泰平^{*5}

Yasuhira KIKUOKA

Abstract

A time has come to reflect on civilization blessed with convenient fossil fuels for the past 100 years. Bad effects caused by excessive carbon dioxide (CO₂) have now begun destroying our global environment seriously. In addition, fossil fuels have become limited resources. Therefore renewable energy such as solar, wind, and biomass will be needed as substitute fuels. In such background, we manufactured the practical Stirling engine using biomass fuels in 2005. And we proposed a unique co-generation system by the engine that uses woody biomass fuels. The co-generation system provided about 3kW of electricity and the heat from the system can be recovered and used in a number of ways for space and domestic water heating. The co-generation system utilizes up to 45% of the system input energy in the form of electricity or heat. In this study, we tried to recover the waste heat of 43% by using a thermoelectric conversion module.

キーワード: 木質バイオマス, 実用スターリングエンジン, コージェネレーション, 熱電変換モジュール

Key Words: Woody Biomass Fuels, Practical Stirling Engine, Co-generation System, Thermoelectric conversion module

1. 緒言

2008年7月に我が国が議長国となって開催された「洞爺湖サミット」では、地球環境問題、その中でも「地球温暖化対策」が重要なテーマの一つとして掲げられている。我が国における地球温暖化対策の一つとして、政府は2002年にバイオマス資源を最大限有効に活用していくために「バイオマス・ニッポン総合戦略」を閣議決定し、バイオマスの利用促進に向けて、国家プロジェクトとして取り組んできた。地球温暖化防止、循環型社会の形成のみならず、競争力を持った新たな産業の育成、農林水産業や農山漁村の活性化のために、エネルギーや製品としてバイオマスを総合的に最大限利用することを目的としている。

植物を燃焼したときに大気中に放出される二酸化炭素(CO₂)は、植物の成長過程で吸収したCO₂を放出しているだけなので、地球全体で見ればCO₂ニュートラルとなる。

そこで、自然界のサイクル中に存在する木質バイオマスを燃料として有効活用することにより、地球温暖化の要因となるCO₂の排出量を軽減し、代替燃料として活用することで化石燃料消費の低減も期待される。

本研究室では、2005年に木質バイオマス燃料の新しい活用方法の一つとして、産学連携の取り組みによって実用スターリングエンジンを完成¹⁾²⁾させ、このエンジンを用いて木質バイオマス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いる。また、関西電力(株)らのグループも、このシステムを御坊市日高港に建設された「新エネルギーパーク」に導入(図1)して、様々な実験を行っている。

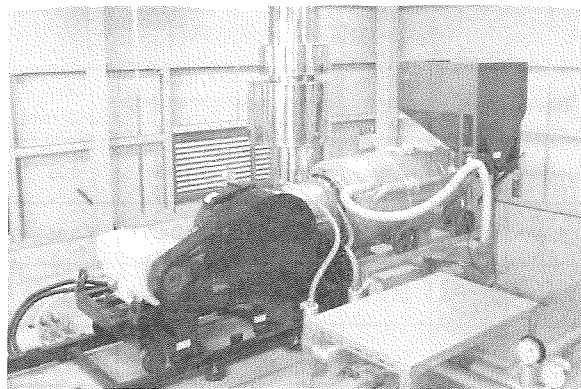


Fig.1 Practical Stirling engine

図1 新エネルギーパークの実用スターリングエンジン

*1 一関工業高等専門学校機械工学科 教授
(〒021-8511 一関市萩荘字高梨)

e-mail:hoshi@ichinoseki.ac.jp

*2 一関工業高等専門学校機械工学科 講師

*3 アイシン精機(株)

*4 一関工業高等専門学校 専攻科生

*5 関西電力(株)

(原稿受付: 2008年9月4日)

本報告では、木質バイオマス燃料とする実用スターリングエンジンを用いたコージェネレーションシステムの概要を紹介し、実証試験によりシステム全体のエネルギーフローを明らかにする。さらに研究では、ヒートポンプおよび熱電変換モジュールの複合によって熱・電力の利用効率を増大させ、総合エネルギー効率の向上を目指した。

2. 実証試験に用いた木質バイオマス燃料

化石燃料の代替燃料として注目されている再生可能エネルギーの中で、貯蔵が可能で、人間によってエネルギー源をコントロールすることが可能な燃料はバイオマスエネルギーだけである。バイオマスエネルギーの中でも、特に木質バイオマス燃料はエネルギー資源の乏しい我国においても採取できる量が多く、再生可能 (renewable) かつ持続可能 (sustainable) なエネルギー源として利用が期待されている。

本研究では、開発した実用スターリングエンジンの燃料として木質バイオマスエネルギーである、おが屑、チップ、ペレット、廃木材として出る薪などを用いて実証試験を行った。表 1 に本研究の対象燃料として、これまでの性能試験^{3) 4) 5)}において使用してきた代表的なバイオマス燃料の発熱量、含水率⁶⁾を示した。

ここでチップとは、伐採された木材をチップパーで薄く板状に砕いたもので、環境負荷は小さく安価となる。ペレットは、樹皮やおが屑を乾燥させ、熱を加えて粒状に固めて成形したもので、おが屑やチップに比べて発熱量が大きい。燃料として扱いやすいが、ペレットを生成する際の環境負荷が大きく、生産コストも大きい。ペレットには、全木、木部、樹皮の種類がある。全木ペレットは木の皮と木質部を混合したもの（幹や枝のままなど）を、樹皮ペレットは木の皮を、木部ペレットは木の皮を剥いで木の皮を含まないようにして作ったペレットである。おが粉は、おが屑よりも粒度が荒く、チップをさらに細かくした形状になる。表に示したおが粉の発熱量、灰分率の値は、本研究において測定した値である。

Table 1 Woody biomass fuels

表 1 木質バイオマス燃料

Biomass fuels	Calorific power [kJ/kg]	Water content rate [%]	Ash content rate [%]	Costs [US\$/kWh]
Sawdust	7,500	45~60	1~3	0.05
Chip	8,800	30~50	1	0.04
Pellet	16,000	10~15	1~5	0.07
Firewood	12,000	25~50	1~5	0.04
Shredded wood	18,000	13~14	1	0.1

木質バイオマス燃料は、近年では、チップボイラー、ペレットストーブ・ボイラーなどにも利用されるようになってきたが、今後、木質バイオマス燃料の普及に際しては、従来の化石燃料に対するコスト⁷⁾の差が大きな課題となる。現状ではペレットを生産する工場は少なく、ペレットの単位エネルギー量当たりのコストは灯油 (US\$0.045/kWh) と比べて高くなるが、今後の大量生産および流通の整備により、樹皮ペレットは灯油と同等の単価となることが予想される。また、チップについては重油 (US\$0.04/kWh) とともに十分に競争可能であると考えられる。

3. 実証試験システム

1816 年に Robert Stirling によって発明されたスターリングエンジンは、理論熱効率がよく、多種燃料の利用が可能で、静粛かつ低公害 (低 NO_x 等) であるといった点から、近年、再び注目されてきている¹⁾。スターリングエンジンの用途としては競争相手となる内燃機関の使用が困難な領域こそ最適であると考えられる。木質バイオマス燃料そのままでは内燃機関は絶対に運転することができないため、特に木質バイオマス燃料の有効活用においてスターリングエンジンは最適な熱機関の一つと考えられる。2005 年には、米国スターリングテクノロジー社の設計による実用スターリングエンジンの国産 1 号機を、本学と (株) スターリングエンジン (神奈川県) および (株) 東洋工機 (岩手県) との産学連携の取り組みで完成させた^{1) 2)}。表 2 に本研究で採用した実用スターリングエンジンの仕様を示した。

Table 2 Specification of practical Stirling engine

表 2 実用スターリングエンジン仕様

Engine output	5 HP at 650rpm
Fuels used	Wood, sawdust, chip, pellet, carbonized dropping, etc.
Fuel consumption	38 kW (10kg/hr of wood)
Lubrication	Dry bearings; no oil used
Working fluid	Air
Working pressure	5 bar, self-pressurizing
Heater head temp.	650 °C
Dimensions	450×450×1200 mm
Weight	200 kg

本研究では、通常であれば廃棄されてしまう未利用エネルギーである木質バイオマス燃料を燃料としてコージェネレーションシステムを構築し、従来の燃焼熱のみの利用ではなく電力の併給も可能として総合エネルギー効率を増大させることを目指した。コージェネレーション利用は、需要地域に設置した場合に送電ロスが発生しないなどの利点を有し、地域単位での分散型エネルギーシステムや、複数の新エネルギー利用技術を組み合わせて安定したエネルギーを

供給できるマイクログリッドシステム⁸⁾としての技術開発が進められている。

図2に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、また、外観を図3に示した。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(FCU: Fan Coil Unit)において熱回収され、温風暖房として利用される。さらに、FCUを出た温水はヒートポンプ(HP: Heat Pump)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。

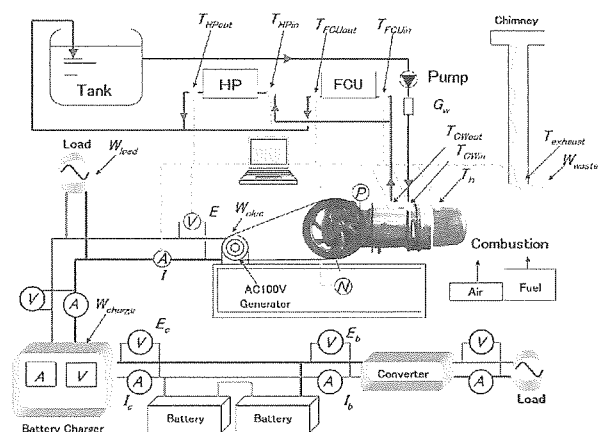


Fig.2 Co-generation system

図2 コージェネレーションシステム

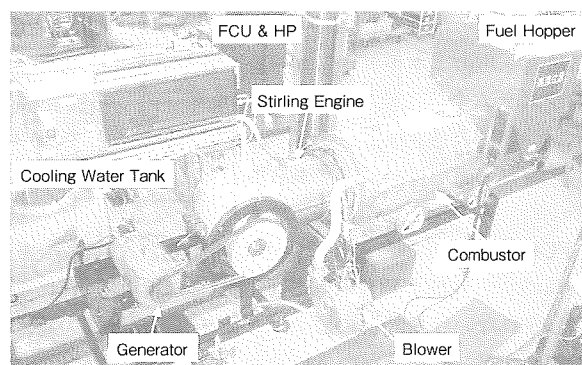


Fig.3 Experimental system

図3 実験装置外観

さらに本システムでは、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、安定した電力を供給することができるようにした。

4. 実証試験方法および結果・考察

実証試験では、エンジン加熱器表面の平均温度 T_h 、エンジン冷却水の入口・出口温度 T_{CWin} ・ T_{CWout} 、FCUの入口・

出口温度 T_{FCUin} ・ T_{FCUout} 、HPの入口・出口温度 T_{HPin} ・ T_{HPout} および冷却水量 G_w [kg/min]をパソコンにより自動計測した。さらに、エンジン始動後に発電機から出力される電圧 E ・電流 I 、およびエンジン回転数 N の計測を行った。(図2 コージェネレーションシステム概略図参照)

実際にエンジンへ入熱するエネルギー W_{in} は、燃料としてシステムに投入された木質バイオマスのエネルギー W_{fuel} から、排煙の形で煙突より排出される排煙損失 $W_{exhaust}$ と、燃焼器表面から伝熱により放出される燃焼器損失 W_{waste} の損失エネルギーを差引いて求めた。

おが粉を燃料とした時のシステムへの入力エネルギー W_{fuel} [kW]は、燃料消費量 G_{fuel} [kg/min]に、おが粉の発熱量 q_{fuel} [kJ/kg]を乗じることで(4.1)式により求められる。

$$W_{fuel} = G_{fuel} \times q_{fuel} \times 1/60 \quad (4.1)$$

排煙損失 $W_{exhaust}$ [kW]は次式により定義する。

$$W_{exhaust} = c_{p(air)} \times G_{exhaust} \times (T_{exhaust} - T_{\infty}) \times \rho \quad (4.2)$$

ここに、
 $c_{p(air)}$: 排煙の定圧比熱[kJ/(kg・K)]
 $G_{exhaust}$: 排煙量[m³/s]
 $T_{exhaust}$: 排煙温度[K]
 T_{∞} : 周囲温度[K]
 ρ : 密度[kg/m³]

また、燃焼器損失 W_{waste} [kW]は次式によって求めた。

$$W_{waste} = (E_{waste} / K) \times S \times 1/1000 \quad (4.3)$$

ここに、
 E_{waste} : 熱流束センサー出力[mV]
 K : 熱流束センサー感度定数 [(mV・m²)/W]
 S : 表面積[m²]

(4.1) ~ (4.3) 式より、エンジンに入熱するエネルギー W_{in} [kW]は、次式により求められる。

$$W_{in} = W_{fuel} - (W_{exhaust} + W_{waste}) \quad (4.4)$$

次にエンジン冷却水の温水として出力されるエネルギー W_{heat} [kW]は次式により算出される。

$$W_{heat} = G_w \times c_p \times (T_{CWout} - T_{CWin}) \times 1/60 \quad (4.5)$$

ここに、
 c_p : 冷却水の定圧比熱 [kJ/(kg・K)]

また、発電機から出力される発電電力 W_{elec} [kW]は、電圧計出力 E [V]と電流計出力 I [A]から、次式により求めた。

$$W_{elec} = I \times E \times 1/1000 \quad (4.6)$$

なお、FCU出力 W_{FCU} [kW]およびヒートポンプ出力 W_{HP} [kW]は次式により定義した。

$$W_{FCU} = G_w \times c_p \times (T_{FCUin} - T_{FCUout}) \times 1/60 \quad (4.7)$$

$$W_{HP} = G_w \times c_p \times (T_{HPin} - T_{HPout}) \times 1/60 + W_{EP} \quad (4.8)$$

ここに、
 W_{EP} : HP消費電力[kW]

提案するコージェネレーションシステムを実用化するためには、システムの信頼性及び各要素機器の耐久性に関する評価が必要となる。そこで本研究ではコージェネレーションシステムの連続運転試験を実施し、耐久性について検討した。連続運転試験は、2006年7月から2007年2月の期間で実施した。総運転日数40日、累積運転時間は約178時間となる。また、8時間/日の長時間連続運転を実施し、問題がないことを確認した。図4に連続運転試験の結果を示す。この試験において、エンジン本体の潤滑、摩耗等によるトラブルは観察されなかったが、連続運転試験中、燃焼器内の耐熱レンガの欠損が生じており、燃焼器の信頼性、耐久性に課題が残された。今回の連続運転試験の結果より、出力される熱・電力のエネルギーは投入される木質バイオマス燃料の総量に回答し、各日ともに発電量が温水として得られるエネルギーの約14%以下であることが確認された。よって本システムを分散型エネルギーシステムとして実用化する場合、電力よりも熱の需要が大きいニーズで活用するだけでなく、発電電力を蓄電して有効活用できるシステムが必要となる。

そこで本研究では、発電機から出力される電力をバッテリーへ充電するシステムを新たに完成させた。このシステムでは、発電した電力を一端バッテリーへ蓄電し、発電機より供給される電力と併用することで、供給可能電力を大幅に増大させることができる。また、エンジンを稼働していない状態でも、バッテリーに蓄電した電気エネルギーから直接電力を得ることを可能としている。給湯の需要が無くなり、エンジンを停止した状態でも電力（コンバータで出力可能な最大電力 0.5kW）を利用できる。

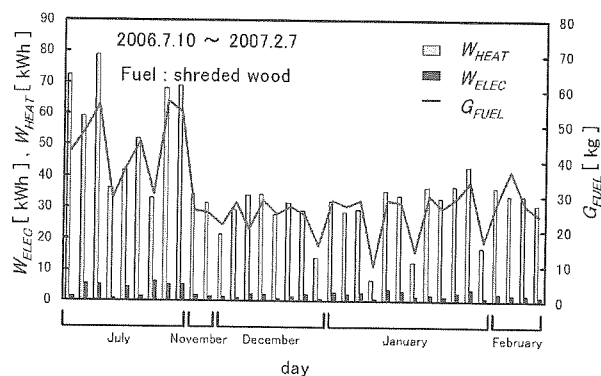


Fig.4 Long run performance test

図4 連続運転試験

本報告では、発電機より得られる電力を負荷において直接利用すると同時に、その一部をバッテリーチャージャー（デンゲン（株）ハイレート充電器 HRC-3510）によってバッテリー（古河電池（株）制御弁式サイクルサービス用鉛蓄電池 EBE-100、公称電圧 12V・容量 100Ah/5 時間率）へ充電するバッテリー運転モード（battery mode）における試験結果を図5に示した。発電機より出力された発電電力 W_{elec} [kW]、直接負荷電力消費量 W_{load} [kW]、バッテリー

チャージャー電力消費量 W_{charge} [kW]の発電電力分配バランスを示している。このモードは、低電力消費時に適しており、システムより得られる発電電力 1.1kW を充電のみ使用する場合、バッテリーチャージャーを通じて、バッテリー4個（最大発電電力 3kW 時にはバッテリー12個）へ充電可能となる。また、図中では梱包の違いにより燃料の発熱量が異なる燃料を投入する際に、発電機より得られる発電電力の変動が観察されているが、バッテリーへの充電には支障のないことが確認できる。最適なバッテリー容量・個数、蓄電方法の検討が今後の課題となる。

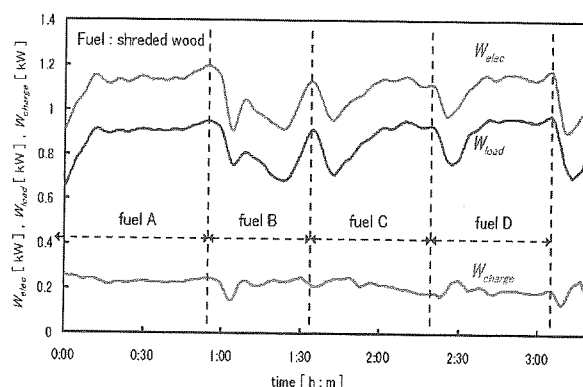


Fig.5 Battery charging run

図5 バッテリー運転モード

図6には、コージェネレーションシステムにおけるFCU単独運転時のエネルギーフローを示した。図より燃料としてシステム全体に供給されるエネルギーのうち約45%がエンジンに入熱される。また、約45%が排煙として、10%が燃焼器表面からの伝熱により損失し、燃料のもつエネルギーのうち合計55%が損失エネルギーとなる。

FCU単独使用のとき、温水として得られたエネルギー38%のうち18%がFCUで温風暖房として利用できるが、回収しきれない残り20%の温水はタンクへと戻っていた。そのため、タンク容量が小さい場合、冷却水温度がしだいに上昇し、エンジン出力の低下に繋がっていた。このときの総合エネルギー利用効率は23%となる。

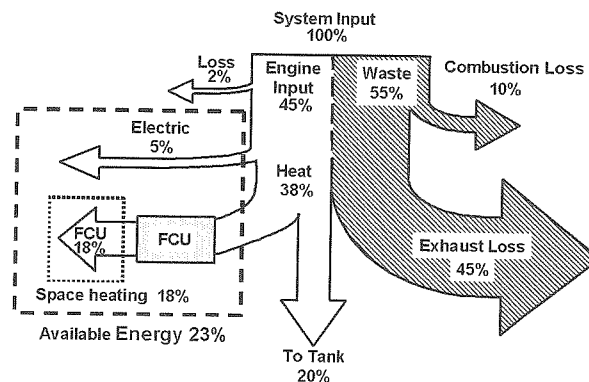


Fig.6 Energy flow of FCU only use

図6 FCU単独使用時のエネルギーフロー

本研究ではコージェネレーションシステムにおいて温水として得られるエネルギーの高効率利用を目指して、ヒートポンプを複合したシステムを新しく提案し、実証試験を行って評価した。導入したヒートポンプの成績係数は $COP=4$ ではば一定な値が得られ、本システムでHPを稼働させた場合、電力として投入したエネルギー入力約4倍の熱を回収できることになる。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フローを図7に示す。温水として利用可能なエネルギー約36%はFCUとHPを併用して全て回収可能であり、システム入力エネルギーの約5%の消費電力を入力してHPを駆動することにより約23%のエネルギーが温風暖房として利用できることがわかる。また、約5%が電力として出力され、残り約2%がエンジンの機械的な損失と考えられる。これにより総合エネルギー効率も約45%と高い値を示し、ヒートポンプ導入の有効性が確認された。しかし、問題となるのはエンジンに入熱されなかった52%のエネルギーである。9%は燃焼器表面からの伝熱により失われるが、残り43%のエネルギーは排煙として未利用のまま大気中に棄てられている。そこで、システムにおける総合エネルギー効率向上のために、排煙からのエネルギー回収技術の開発が大きな課題となる。

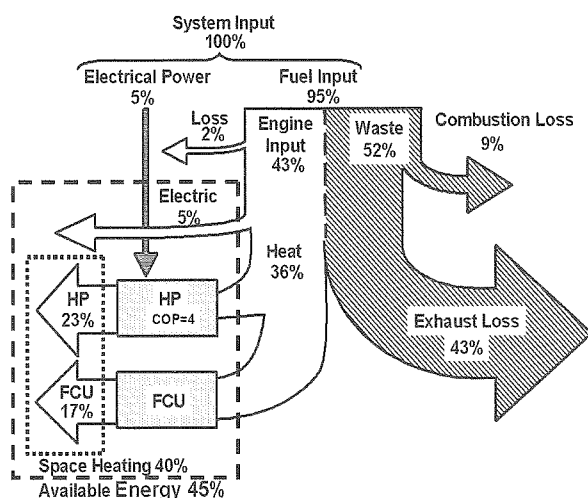


Fig.7 Energy flow of HP combined co-generation system

図7 HP複合システムにおけるエネルギーフロー

5. 熱電変換モジュールによる

排煙からのエネルギー回収試験

5.1 熱電変換システム

本章では、燃料としてシステムに供給されるエネルギーのうち排煙の熱として棄てられている43%のエネルギーを、熱電変換モジュールを用いてエネルギー回収し、発電するシステムについて考察する。

始めに、熱電素子選定のためにコージェネレーションシステム稼働時の排煙温度の計測を行った。スターリングエンジンの加熱器表面温度が約650℃で安定して運転している時、排煙は約450℃で排煙チャンバー内に排出されてお

り、熱電変換モジュールを設置予定のチャンバー表面温度は約180℃となる。そこで、熱電素子として連続加熱で250℃まで加熱可能で、熱源の変動による熱的耐久性が確保でき、さらに熱電性能指数が優れている Bi_2Te_3 系化合物を用いた熱電変換モジュール(ソリッドフィジクス社製、型式TEPI-1264-1.5)を採用した。

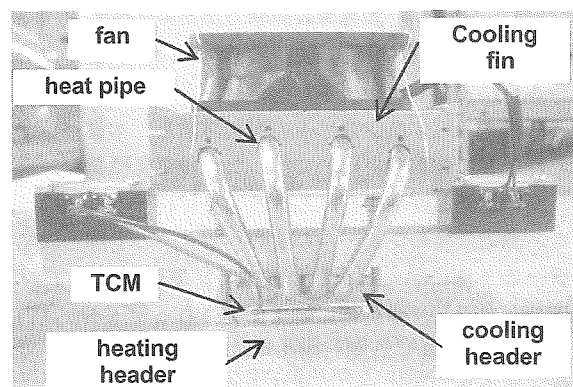


Fig.8 Thermoelectric conversion system

図8 熱電変換システム

採用した熱電変換モジュール(thermoelectric conversion module; TCM)を用いて構成した熱電変換システムの外観を図8に示した。高温側の受熱ヘッダーを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固定して加熱し、低温側は放熱ヘッダーの熱をヒートパイプで冷却フィンへ熱輸送し、ファンによって空冷されるようになっている。

5.2 マッチングロード検証試験方法および結果・考察

熱電変換モジュールには、内部抵抗と接続される外部負荷の関係において最も出力が大きくなる状態、すなわちマッチングロード出力が存在する。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いうために、実際にコージェネレーションシステムからエネルギー回収・発電実証試験を行う前に予備実験を行い、その基本性能を検討した。予備実験では高温側の熱源としてホットプレートを利用し、可変抵抗(2~12Ω)で外部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。

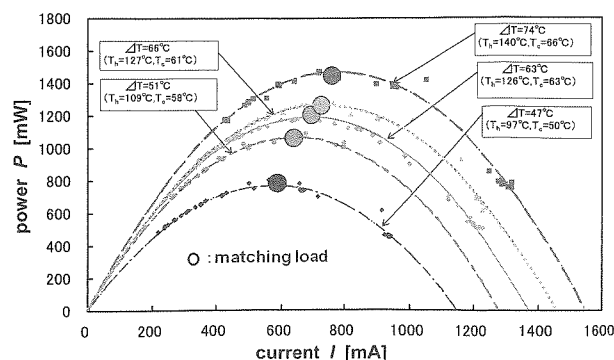


Fig.9 Matching load

図9 マッチングロード

検証試験結果の一例を図9に示した。実験結果より、それぞれの実験条件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し、高温側と低温側との温度差が大きくなるにつれてロードマッチングする電流の値、すなわち出力が大きくなることが明らかである。

5.3 エネルギー回収・発電実証試験方法および結果・考察

マッチングロード検証試験結果をもとに、熱電変換モジュールを用いてコージェネレーションシステムからエネルギー回収・発電するシステムの実証試験を、木質バイオマス燃料としておが粉を用いて行った。熱電変換モジュールは、高い排熱温度が得られる排煙チャンバーの上面に設置した。熱電変換モジュールの受熱ヘッダーの上部と放熱ヘッダーの下部に熱電対を取り付けて、温度差($T_h - T_c$) [K]を確認しながら、負荷において出力される電圧 E_{TCM} [V]と電流 I_{TCM} [A]を自動計測した。熱電変換モジュールより得られる電力 W_{TCM} [W]は、次式により求められる。

$$W_{TCM} = I_{TCM} \times E_{TCM} \quad (5.1)$$

なお、熱電変換モジュールに接続する負荷抵抗の値は、マッチングロード検証試験結果より求めた熱電変換モジュールの負荷特性を基にして決定した。

エンジン加熱器表面温度が約730℃一定で安定して稼働しているとき、発電電力として約1kW得られ、冷却水によって温水として約12kWのエネルギーが回収された。同時に熱電変換モジュールにおいて、高温側が約120℃、低温側が約50℃、温度差70℃で、約520℃の排煙による排熱から約1.1Wのエネルギーが電力として回収された。

実験に用いた熱電変換モジュールの受熱ヘッダーの面積から1m²当たりの出力を換算すると約300W/m²得られることになる。この値はシステムに投入される木質バイオマスエネルギーの約1%に相当する。本研究で採用した熱電変換モジュールを1m²の大きさになるように直列に接続してエネルギー回収するシステムを構築する場合を考えると、図10に示すエネルギーフローが得られる。

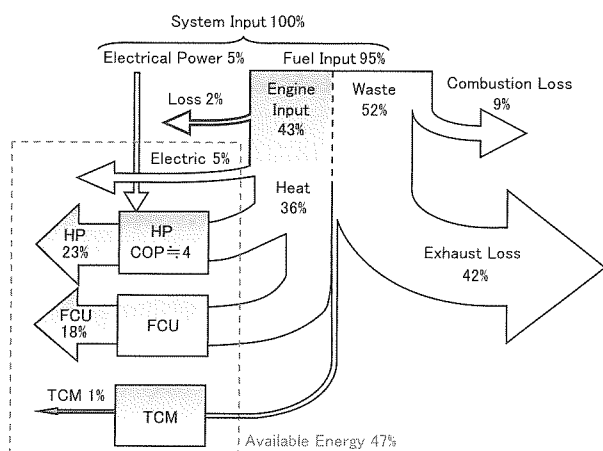


Fig.10 Energy flow using TCM combined system

図10 熱電変換モジュール複合システムの
エネルギーフロー

6. 結 言

本研究では、実用スターリングエンジンをベースとしてヒートポンプおよび熱電変換モジュールを複合させたコージェネレーションシステムを構築し、木質バイオマスエネルギーの有効利用を試みた。検証試験、実証試験を行って以下の知見を得た。

- (1) 完成した実用スターリングエンジンをベースとする複合コージェネレーションシステムを提案し、木質バイオマスエネルギーの有効利用を可能とした。
- (2) ヒートポンプを複合させることにより、エンジン冷却水の形で排出される温水の100%回収を可能とした。
- (3) バッテリー充電システムの複合により、エンジン稼働時外の電力供給を可能とし、安定電力の供給、供給可能電力の増大を実現した。
- (4) 熱電変換システムの複合によって、未利用のまま棄てられている排煙からのエネルギー回収が可能であることを明らかにした。

参考文献

- 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)，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)，41-45。
- 3) 星 朗・佐々木世治・高橋龍也・阿部大樹，スターリングエンジンを用いた木質系バイオマスの有効活用，日本機械学会第16回環境工学総合シンポジウム2006講演論文集，No.06-10(2006)，420-423。
- 4) 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 (2007), Vol.V, pp.2453-2457.
- 5) Nobutoshi Tezuka, Akira Hoshi and Seizi Sasaki, A System for the Effective Utilization of Woody Biomass Fuels by the Practical Stirling Engine, Proc. of The 13th International Stirling Engine Conference (2007), pp.235-240.
- 6) 岩手県企業局，木質燃料発電可能性調査報告，(2002)。
- 7) 岩手県林業センター，研究成果速報，No.124(2003)。
- 8) Shinya Obara, Shunsuke Kito, Akira Hoshi and Seizi Sasaki, Dynamic Characteristics of PEM-FC / Woody Biomass Engine Hybrid Micro Grid, Journal of Thermal Science and Technology, JSME, (2007), pp.111-122.