

スターリングエンジンを用いた 家庭用向け小型 CHP システムの構築

黄 樹偉, 王 振鑫*

(平成23年10月5日受理)

Development of a Micro-CHP System for Home Use by Using a Stirling Engine

Shuwei HUANG and Zhenxin WANG
(Received October 5, 2011)

A prototype of micro Combined Heat & Power system (or micro-CHP system) with an electric output of 4.8[W] and a heat supply of 268[W] has been developed for home use by using a small Stirling engine to drive a DC generator, which serves as a starter motor as well. Water supplied to the cooler of the engine is heated by the cooling fins and then heated further by the exhaust gas, resulting in warm water which is outputted as the heat supply from this system. Although the electric output of this system is much lower than the required practical level and the overall efficiency is only about 45%, considering the simplified designs of the engine and the heat exchanger used in this system, it shows some potentials to be developed as a micro-CHP system for home use after optimizing both the engine and the heat exchanger.

Keyword : Stirling Engine, Electric Output, Warm Water, Micro-CHP, Prototype, Cogeneration System

小型スターリングエンジンを用いた、電気出力4.8W、給熱量268Wの家庭用向け小型コージェネレーションシステムの構築を試みた。発電用DCモータはシステム起動時にはスターターモーターとして作動する。スターリングエンジンの冷却部に供する冷却水は冷却フィンにより加熱されたあと、燃焼室からの排ガスによりさらに加熱され、温水となって外部に給熱する。

* 榎石崎本店

現システムの電気出力は実用レベルに比べ遙かに小さく、総合効率も燃料の約45%にしか達していないが、本システムに用いたエンジンや熱交換器などが簡易設計により製作されたものであることを考慮すれば、エンジンや熱交換器の最適化により家庭用熱電併給システムとしての可能性は示されている。

1. はじめに

近年、地球環境問題に対応するために、世界各国でCO₂削減施策が本格的に動きはじめている。CO₂の削減は、これを排出しない太陽光や、地熱、カーボンニュートラルであるバイオマス燃料を積極的に利用するだけでなく、一次エネルギーの80%以上を占める^[1]化石燃料の利用効率を向上することは最も効果的であると考えられる。

エネルギーの利用効率を上げる方法として、現在世界各国で

CHPの利用が進められており、図1にIEAによる統計結果^[2]を示す。従来のガス火力プラントによる電力供給とガスボイラーによる熱供給をそれぞれ単独に行う方法に比べ、CHP (Combined Heat & Power) による熱電併給システムを用いた場合のエネルギーと炭素排出量の削減効果は、供給される電力と熱の割合により変化するが、IEAによる試算例では、エネルギーと炭素排出量がそれぞれ約21%削減できると見積もっている^[3]。

CHPの利用形態については、大型CHPプラントによる地域全体での利用のほか、地域インフラの整備が不要な、家庭用小型CHPシステムでの利用が考えられる。前者は人口密集の都市部に適し、後者は人口過疎地域や発展途上国に適すると思われる。図2に後者の一例を示す。

家庭用CHPについて、エンジンと発電機を用いる方法と、燃料電池を用いる方法がある。後者はコストが高いため、一般用に向かないと思われる。一方、エンジンを用いる場合、従来の内燃機関では騒音と振動が大きく、普通の住宅環境に適さないとされる。そこで、運転が静粛なスターリングエンジンを家庭用CHPの動力部に用いる方法が注目され、その将来性が期待されている^[4]。本研究はこのような家庭用向け小型CHPの可能性を調べるため、高度な製作技術によらず、既報^[5]で製作したスターリングエンジンをCHPの動力部に用いて、電気出力数ワット程度の簡易な小型CHPシステムの構築を行った。本文はこのシステムの詳細といくつかの問題点について報告する。

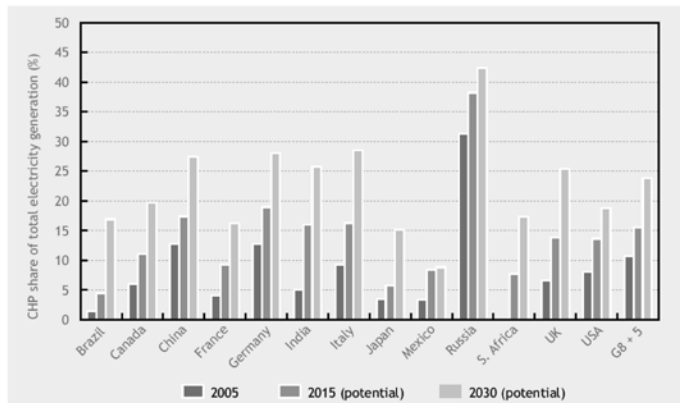


図1. 世界主要経済体でのCHPによる発電のシェア(2005年)と将来展望^[2]

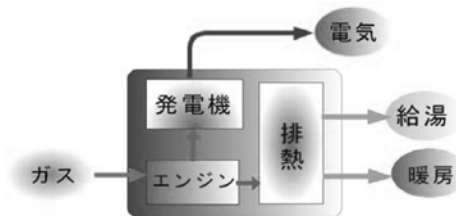


図2. 家庭用小型CHPシステムの例

2. システムの構成

構築した小型 CHP システムの構成は、図3に示すように、機能的に動力部（スターリングエンジン）、発電機及び温水装置などからなり、各部の詳細は以下に述べる。

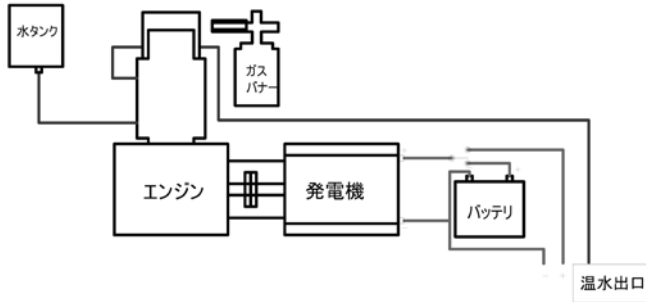


図3. 制作した小型 CHP システムの構成

2.1. 動力部

動力部は既報^[5]で製作した小型スターリングエンジンを用いた。エンジンの概要を図4に、エンジンの諸元を表1に、それぞれ示している。エンジンを CHP システムに組み込むため、以下の変更を行った。

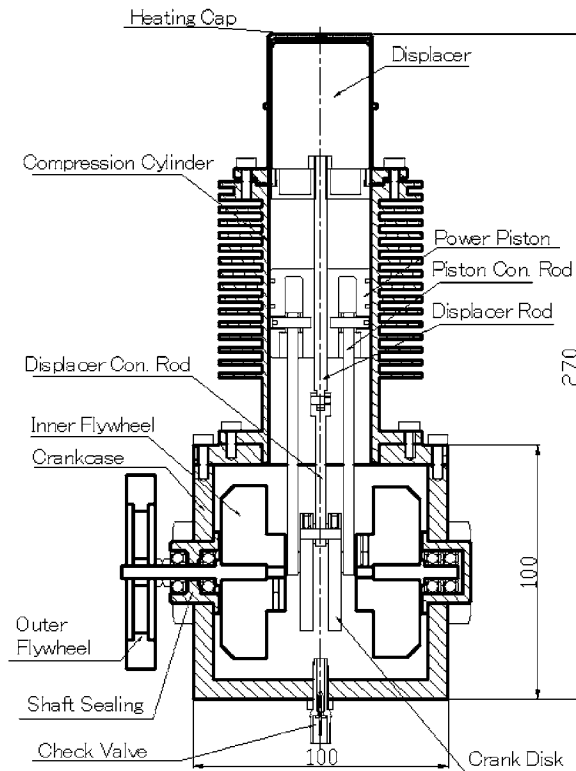


図4 用いた小型スターリングエンジンの概要

(1) 加熱方式 元のエンジンは横置きで、加熱部であるヒートキャップ部を下方からアルコールランプで加熱する。実用化に近付けるため、アルコールランプをガスバーナーへと変更し、これに伴いエンジンの設置も縦置きとした。また、燃料の利用効率を上げるため、ヒートキャップの外側にエンジンシリンダーと同軸に図5に示す円筒形の燃焼室（図中の赤い円筒）を取り付けて、ガスバーナーからの火炎を燃焼室内に制限することができる。燃焼室内からの排ガスは、側面に開けられている複数の小さな穴から出て外側に設置される熱交換器の内側に入り、そこで、らせん状に配置される伝熱管へ伝熱した後、図6に示す熱交換器シェル下方の穴から大気へ放出される。

表1 スターリングエンジンの諸元

Engine Configuration	Beta Type
Displacer Bore × Stroke	39×30mm
Displacer Swept Volume	35.8 cc
Power Piston Bore × Stroke	40×15mm
Power Piston Swept Volume	18.8 cc
Total Dead Volume	4.85 cc
Phase Angle	74 deg.
Compression Ratio	1.6
Heater Cap Temperature	500 °C
Cooler Temperature	50 °C
Working Fluid	Air
Mean Buffer Pressure	0.1MPa
Speed	1000 rpm
Indicated Power (Cal.)	18.3 W

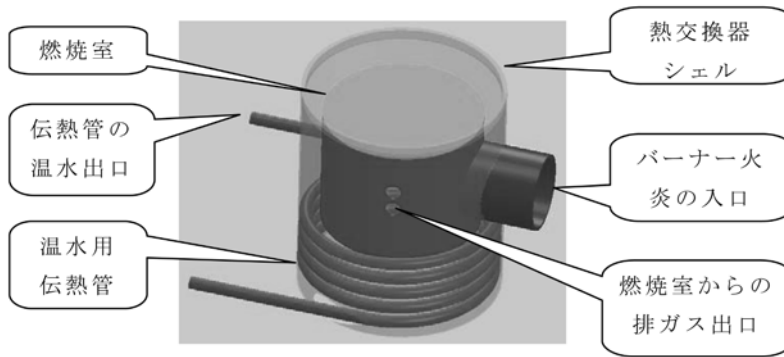


図5 燃焼室およびその外側に配置される伝熱管

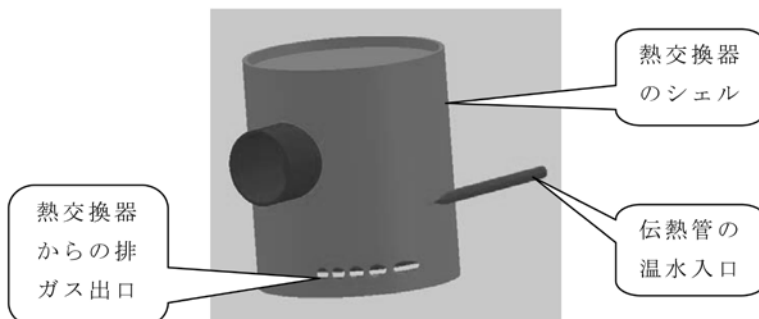


図6 エンジン排ガスを利用する温水加熱用熱交換器のシェル

- (2) 冷却方式 エンジン冷却部からの放熱を温水加熱に有効利用するため、冷却は図7に示す元の冷却フィンによる自然空冷から、図8のような水冷方式に変更した。冷却フィンの周囲を円筒で囲み、フィンには図9に示されるような流路を作って、水ジャケットとした。冷却水は下方から円周方向に沿って流れて順次上方へ流れていく。

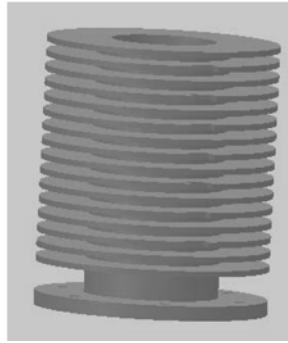


図7 元の空冷方式の冷却部

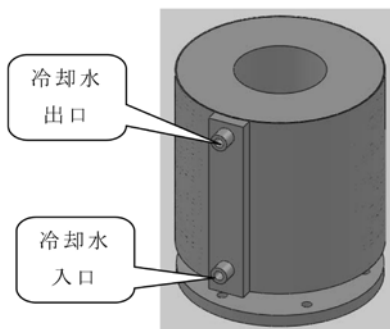


図8 改造後の水冷方式の冷却部の外観

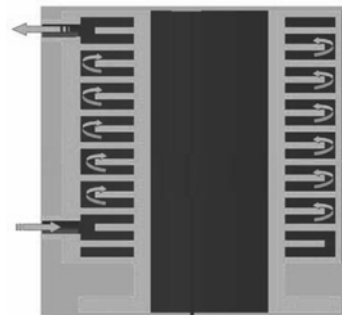


図9 冷却部内部冷却水の流れ

- (3) フライホイール 図10に示すように、エンジンの主軸と DC モータ（発電機）の回転軸を締結するために、フライホイールを取り外した。フライホイールの慣性モーメントはモータのローターにより補うこととした。また、元のエンジン出力端の軸シールは気密性が低かったため、密封はエンジンとモータ間にアルミ製のフランジ付き円筒を装着し密封構造とした。発電機の後方軸端もキャップを取り付けて密封し、エンジンとモータ全体をハーメチック形とした。これにより、エンジンのバッファー圧力を元の0.2MPa から0.4MPa 程度まで高めることができ、0.3MPa バッファー圧力での運転を可能にした。

以上の変更により、エンジンの動力性能を直接計測できないので、発電機の特性和出力電流、電圧などにより、間接的に算出した。

2.2. 発電機

発電機は、エンジンの動力を電力に変換するが、図3に示しているように、エンジンを起動する

ときには、始動モータとして作動し、エンジンの運転が安定になると切り替えスイッチで発電機モードへと切り替えられる。

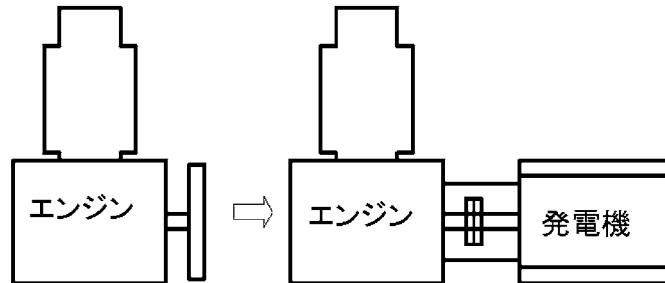


図10 エンジンとモータの締結に伴った出力端の変化

発電機の選定に際し、まず元のエンジンの出力をトルク計（小野測器株式会社SS-010）により計測した。その結果、所定加熱温度において回転速度が1000rpm程度、出力は約7～8Wであることが分かった。しかしながら、これにマッチする最適な発電機が入手できないため、定格出力70Wの直流モータを発電機とした。

エンジンと発電機がハーメチック形に組み込まれているため、エンジンの回転速度と出力は、発電機の出力とその特性曲線から算出する必要がある。このため、発電機の特性を図11に示すように

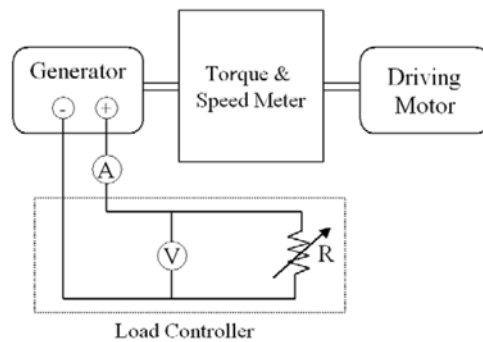


図11 発電機特性の測定方法

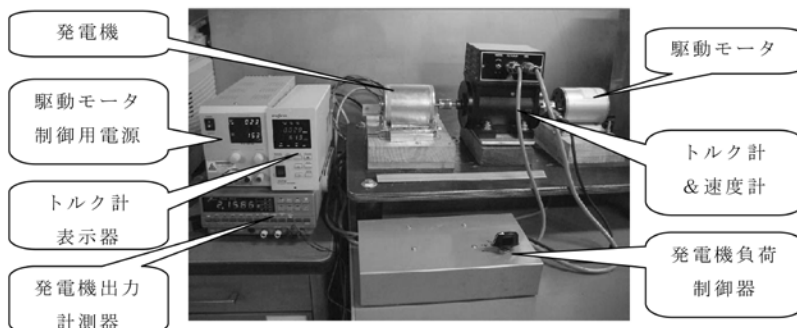


図12 発電機特性測定の実験装置

計測し、図12は実験装置を示す。計測結果を図13に示す。

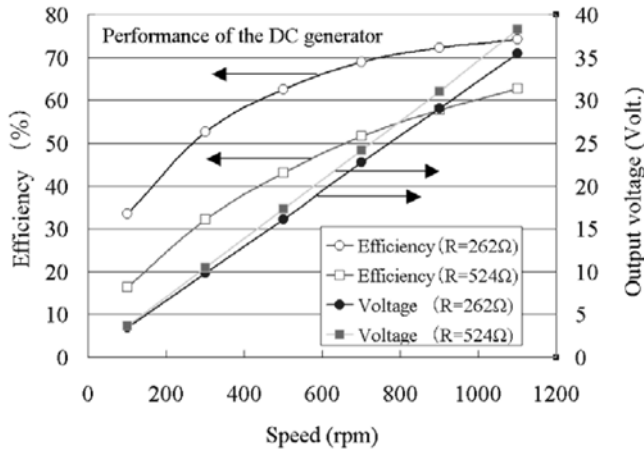


図13 発電機の特性格計測結果

図13より、負荷である外部抵抗が一定の時に、発電機の電圧は回転速度のみの関数であることがわかる。CHPに組み込まれた後に、この特性を利用してエンジンの回転数を算出する。また、発電機を駆動するスターリングエンジンの出力 P_S は発電機の電気出力 P_E と発電効率 η_E から次式で算出することができる。

$$P_S = P_E / \eta_E \quad (1)$$

2.3. 温水装置

温水装置は図14に示すように、主に図中の下方にあるエンジン冷却部の水冷装置と、図中の上方にある円筒形熱交換器中に螺旋状に配置される $\phi 6$ 銅管から構成される。温水の加熱はまず、水タンクまたは水道からの水を冷却水として水冷装置の冷却水入り口から導入し、エンジンの冷却部で受熱させ、温度をある程度まで高めておく（図9参照）。冷却部から出た水は燃焼室外周にある熱交換器の伝熱管に導入し、そこでさらに排ガスから吸熱して、最終の温水となる。

温水の最終温度は、冷却水の流量により変化するが、常に最終の温度が80℃以下となるよう流量制御を行っている。図14中の各点における温度は、典型的な温度値である。

以上の動力部、発電機と温水装置から構築されたシステムを図15に示す。図中の圧力計はエンジンのバッファ圧を常時モニターし、ガス充填用バルブは、作動ガス充填時に外部の真空ポンプやガスポンペに繋ぐものである。

使用の利便さや携帯性を考慮して、システム全体を図16に示すように筐体にパッケージした。点火スイッチ、モータの切り替え、水タンクへの水補給、発電機の外部負荷制御などは、すべて筐体の外部から行えることとした。

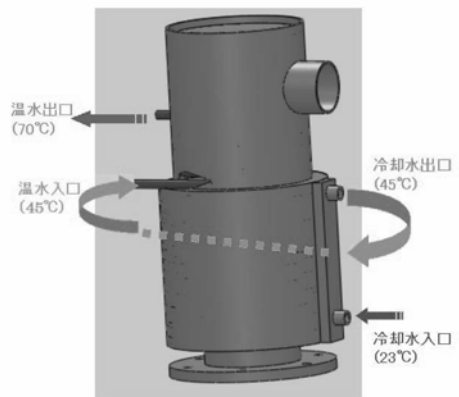


図14 冷却水から温水までの水の流れ

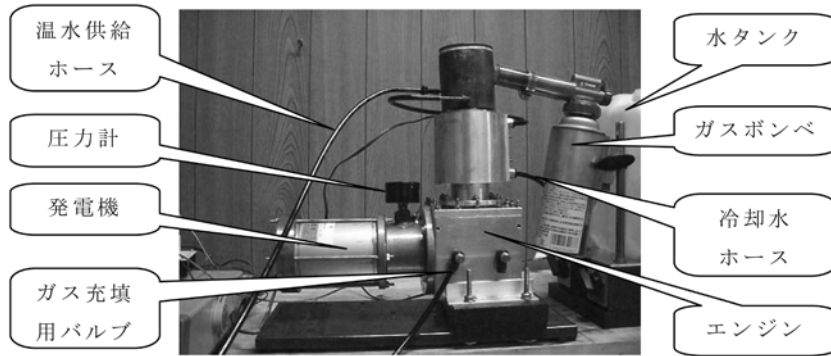


図15 構築した小型 CHP システム

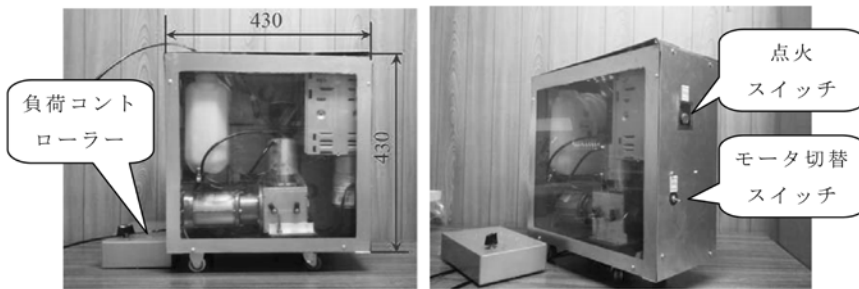


図16 筐体にパッケージした小型 CHP システム

3. システムの性能

3.1. 実験方法 試作した小型 CHP システムの性能は以下のように計測を行った。

性能測定時に、加熱用ガスバーナーの火力を微調整して、エンジンの加熱部の特定の点（ヒートキャップの中心点）温度が所定の温度（ $500 \pm 5^\circ\text{C}$ ）に安定するまで調整する。続いて、エンジン冷却部を通過した冷却水の温度が $45 \pm 1^\circ\text{C}$ になるまで冷却水流量を微調整して固定する。

(1) 温水の給熱量

温水の給熱量は冷却水の質量流量と出入り口での水の温度差から次式で算出した。

$$Q_w = m_w \cdot c_w \cdot (t_{w,out} - t_{w,in}) \quad (2)$$

式中、 Q_w は温水給熱量 [W]、 m_w は冷却水質量流量 [kg/s]、 c_w は水の比熱 [J/kgK]、 $t_{w,out}$ と $t_{w,in}$ はそれぞれ供給温水の温度 [°C] と冷却水の初期温度。

$$P_E = I_E \cdot V_E \quad (3)$$

(2) 出力電力

出力電力は外部負荷（抵抗）における電圧と電流から次式で算出した。

式中、 P_E は出力電力 [W]、 I_E と V_E はそれぞれ外部負荷における電流 [A] と電圧 [V]。

(3) エンジンの回転速度

図13より、外部負荷（抵抗）が一定の時、発電機の出力電圧は回転速度の単調関数であることが分かる。これを元に、発電機の出力電圧からエンジンの回転速度を算出した。

(4) エンジンの出力

既述したように、スターリングエンジンの出力 P_S 、発電機の電気出力 P_E と効率 η_E から、式(1)により求める。

(5) 燃料の熱量

使用したハンディボンベの燃料は液化ブタン (C_4H_{10}) で、発熱量は低発熱量 (45.7MJ/kg) を用いた。また、装置への入力熱量は燃料の質量流量と発熱量から算出した。

3.2. 測定結果

表2に作動ガスがバッファ圧力0.1MPaの空気と、バッファ圧力0.3MPaのヘリウムの場合、それぞれの熱勘定の測定結果を示す。表2から、まず、バッファ圧力0.1MPaの空気に比べ、バッファ圧力0.3MPaのヘリウムを作動ガスとしたとき、CHPシステムの供給電力が約1.5倍となることが分かった。しかしながら、何れの場合も電気出力が実用レベルに比べ、遙かに小さいことが分かる。

表2 システムの熱勘定

	空気(0.1MPa)		ヘリウム(0.3MPa)	
	エネルギー(W)	比率	エネルギー(W)	比率
燃料の熱量	610	1.000	610	1.000
温水の熱量	271	0.444	268	0.439
電気出力	3.2	0.005	4.8	0.008
損失熱量	336	0.550	337	0.553

次に、システム全体の熱利用効率について、何れの場合も約45%に達していることがわかった。本装置の温水装置が非常に単純なものであることを考慮すれば、この熱利用効率を大幅にあげることが可能であると思われる。

4. 終わりに

CO₂排出量削減と省エネ両方の視点から注目されている CHP について、家庭用に適している、スターリングエンジンを用いた小型 CHP システムを構築し、実際に発電と温水供給ができることが確認できた。

構築したシステムの発電電力が小さく、エネルギーの総合利用効率も45%程度にしか達していなかったが、比較的簡単な設計・製作でこの性能を達成できたことを考慮すれば、高度な製作技術を用いなくても小型 CHP システムの製作が可能であることがわかった。エンジンと熱交換器両方の性能を改善すれば、このような小型 CHP システムの実用化の可能性があると考えている。場合によっては、家庭用だけでなく、携帯型 CHP に発展することも考えられる。

謝 辞

本研究の経費の一部は「平成23年度 学内特別研究費」より支弁されたものである。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, “エネルギー白書2010”,
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2010energyhtml/2-1-1.html>, 2011
- [2] IEA, “The International CHP/DHC Collaborative”,
<http://www.iea.org/g8/chp/chp.asp> (available Sep.2011)
- [3] IEA, “熱電併給”, http://www.iea.org/papers/2008/chp_report_japanese.pdf, 2009
- [4] イギリス政府貿易産業省報告, “Potential for Microgeneration Study and Analysis”,
<http://www.dti.gov.uk/files/file27558.pdf>, 2005
- [5] 黄・吉岡, “熱工学実験用小型スターリングエンジンの研究開発”, 日本機械学会第10回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, pp.23-26, 2006