A01 木質ペレットストーブを用いたスターリングエンジン発電の可能性

The Possibility of Electric Generation by Stirling Engine Using Wood Pellet Stoves

准 丹澤 篤 (エノモト) 正 濱口和洋 (明星大) 正 関谷弘志 (産総研)

Atsushi TANZAWA, ENOMOTO CO., LTD, Uenohara, Yamanashi

Kazuhiro HAMAGUCHI, Meisei University, Hino, Tokyo

Hiroshi SEKIYA, AIST, Tsukuba, Ibaraki

The forest area of Japan is almost equal to that of Sweden. However, the utilization of the wood biomass in Japan has not been advancing. By the soaring oil prices from last year, the wood pellet price has become almost equivalent to the kerosene price at the standard heat quantity. As a result, if the supply system of the wood pellet becomes systematic, the wood pellet stoves and boilers would be more widely used. In this study, effective utilization of waste heat in the pellet stove is noticed. The system generating the electric power from not only conventional space heating by the stove but also the waste heat is constructed. And, the possibility of generating the electric power has been investigated experimentally. The waste heat of the stove is utilized for driving of the Stirling engine generator and the hot water supply. The possibility of electric power generation using a wood pellet stove is verified.

Key Words : Biomass, Wood pellet, Stove, Stirling engine, Electric generation

1. 緒 言

1997年12月京都において開催されたCOP3(気候変動枠組条約第3回締約国会議)により、日本における温室効果ガス排出量が1990年を基準年として2008年から2012年の間に6%削減するよう求められている。この数値目標の達成には、化石燃料の使用抑制並びに使用機器の効率向上とともに再生可能エネルギーの積極的な活用が必要不可欠である。化石燃料を使用する機器の効率向上策には、エネルギー機器そのものの効率向上が第一であるが、コージェネレーションシステムの導入も挙げられる。昨今、一般家庭に都市ガスを燃料としたガスエンジン利用の1kW_e級コージェネレーションシステムが販売されるとともに、燃料電池(PEFC)を利用したコージェネレーションシステムの試験的な販売も開始された。一方、再生可能エネルギーの中でも木質バイオマスは、森林面積が国土の約67%とスウェーデンとほぼ同じであるにもかかわらず、その利用は十分進んでいないが、一般家庭における暖房用としてペレットストーブに利用され始めている。

本研究では、普及し始めたペレットストーブに着目し、その排熱により発電を行うペレットストーブ排熱利用発電システムいわゆる木質バイオマスを利用した小型コージェネレーションシステムを構築し、そのシステム性能を実験的に評価し、その実現の可能性を検証する。

2. 木質バイオマス

バイオマスには種々あるが、利用しやすいのは木質ペレットである。木質ペレットは、製材工場において発生した端材や森林の間伐材などを粉碎して高温圧縮成形されている。本実験において使用した木質ペレットは図1に示す製材工場で発生した檜の端材を主成分としており、その形状は直径 ϕ 6.5mm、最大長さ25mmと小さく、粒もそろい、木質バイオマスストーブやボイラにおける燃料の自動供給に適している。また、その発熱量は18.5MJ/kg、そして燃焼は安定し、煙をほとんど発生せず、灰分も0.5%と

少ない。ところで、国内における木質ペレットの利用はほとんど普及していない。これは、木質ペレットの供給体制の不備、さらには使用するストーブやボイラの高価格による。ペレットストーブの価格は、国産の普及型ペレットストーブで15万円程度、輸入品で30~40万程度であり、灯油ストーブやファンヒーターと比べると、高価である。また、木質ペレットそのものの価格が灯油に比べ割高であったことにも起因する。しかし、石油価格の高騰より、灯油価格が約2.0円/MJまで上昇している。木質ペレット価格が1.5円/MJ~3.4円/MJであることから、価格面においても競争力が出てき、灯油や都市ガスを代替する燃料として期待される。

Fig. 1 Wood pellet

Fig. 2 Co-generation system using wood pellet stove

3. ストープ排熱利用発電システム

図2に本研究にて構築した木質バイオマスストーブを用いたコージェネレーションシステムを示す。本システムはペレットストーブ、スターリングエンジン発電機そして排熱回収熱交換器により構成される。

本システムは、ペレットストーブにて暖房、その排熱によりスターリングエンジン発電機を用いて発電する。また、排熱回収熱交換器にて回収した排熱及びスターリングエンジンにて回収した排熱を給湯に利用することも可能である。以下に本システムの構成機器とシステム構成を示す。

3.1 ペレットストーブ 使用したペレットストーブの仕様を表1に示す。本ストーブの暖房出力(燃焼熱量)は、最大約 24kW_{th} (燃料消費量 1.33g/s)から最小約 7.9kW_{th} (燃料消費量 0.43g/s)までの調節が可能であり、木造住宅の場合、 32m^2 (室温 20°C)以上の居間の暖房が可能である。ところで、本ストーブの煙突取付口は本来燃焼室上部にあるが、熱回収が容易なように側面に変更している。

図3には、ペレットストーブの燃焼熱量とストーブ出口温度との関係を示す。同図より、最大燃焼熱量 25kW_{th} ～ 21kW_{th} 、 13kW_{th} ～ 10kW_{th} そして 8kW_{th} ～最小燃焼熱量の各燃焼範囲においては、各燃焼範囲において排ガス温度は大きな変化はない。これは、燃料に使用した木質ペレットの長さが均一でなく、各燃焼熱量において一定量の木質ペレットが供給されないためと思われる。ところで、燃焼熱量 13kW_{th} ～最小燃焼熱量の範囲では、排ガス温度が低く、供しエンジンの自立運転に必要な膨張空間の作動ガス温度 350°C 以上を得るには不十分であった。したがって、ストーブの燃焼熱量には、エンジンの自立運転が可能な概ね 24kW_{th} 、 21kW_{th} 、 15kW_{th} そして 13kW_{th} を選んだ。

Table 1 Specifications of pellet stove

Combustion method	Forced air blow
Combustion load	8 to 24kW_{th}
Fuel	Wood pellet
Hopper capacity	18 kg
Fuel consumption	1.46 to 4.25kg/h
Electric power in operation	50 to 200We

Fig. 3 Relationship between combustion load and outlet temperature of stove

3.2 スターリングエンジン発電機 使用したスターリングエンジン発電機の概要を図4、その仕様を表2に示す。本エンジンは、マイクロコージェネレーションシステム用の試験機である。本エンジンは膨張ピストン、ヒータ、

再生器、クーラ、圧縮ピストンそしてクランク軸に接続した発電機により構成される。本エンジンの最高発電出力は 0.5kWe 程度であるが、エンジン性能はストーブの排気ガス温度や排熱量に依存するので、これだけの出力は期待できない。実験に際しては、ヒータ外壁温度そして膨張空間及び圧縮空間の作動ガス温度はシースタイプのK型並びにT型熱電対にて測定する。また、膨張空間及び圧縮空間の圧力はひずみ線式エンジン指圧計により測定し、動ひずみ測定器そしてA/Dボードを介してPC上の波形収集システムにてデータ処理を行う。冷却水の流量はマスフローメータにて測定し、その出入口温度差はサーミスタセンサにて測定する。また、発電機により得られた電力は電力計に表示する。

Fig. 4 Schematic of Stirling engine generator

Table 2 Specifications of Stirling engine generator

Stroke volume in exp. and comp. space	99cm^3
Initial sealed gas	He (2 MPa)
Heater	Tubular type
Cooler	Plate fin
Regenerator	Stacked wire gauze
Engine type	α type
Cooling method	Tap water(8.0L/min)
Generator	Synchronous type
Size	$\text{W}700 \times \text{D}800 \times \text{H}900$

3.3 システム構成 図5にバイオマスストーブ排熱利用スターリングエンジン発電システムの概要を示す。ペレットストーブの排気出口に設けた煙突にはスターリングエンジンのヒータ部分そしてその後ろには排熱回収熱交換器が設置されている。排ガス温度の測定には、シースタイプK型熱電対を用いる。排ガス温度は、ストーブと煙突の接続部分であるストーブ出口を 0mm として、ヒータ入口 265.5mm 、ヒータ左右 317mm 、ヒータ出口 368.5mm 、排熱回収熱交換器入口 577mm 、排熱回収熱交換器出口 1367mm そして煙突出口 2233mm の各部にて測定する。排熱回収熱交換器の熱回収媒体には水道水を用いる。熱媒体の出入口温度は、サーミスタセンサにより測定する。

システム評価は、図5中の排熱回収熱交換器の有無の影響についても実施する。実験に際して、充填圧力 2.0MPa のヘリウムを本エンジンに封入後、所要の燃焼負荷になるようストーブの燃焼目盛を調節する。その後、排気ガス温度、熱媒体流量そしてエンジン内の作動空間温度の安定性を確認後、各部の温度、クーラにおける冷却水流量そして

Fig. 5 Schematic of co-generation system using a pellet stove

作動ガス圧力を測定する。

4. システム性能評価

図 6 に排熱利用が発電のみの排熱回収熱交換器を有しない場合について、最大燃焼負荷時のエンジン性能を示す。同図によると、エンジン熱回収量は回転数の増加に伴い増加し、回転数 800rpm において 1.3kW_{th} として回転数 1100rpm において 1.6kW_{th} 得られる。図示出力は回転数 900rpm において最大 494W、その際の発電出力 174W が得られた。

Fig. 6 Engine performance in system without waste heat exchanger at large combustion load

Fig. 7 Characteristics in system without waste heat exchanger

図 7 には、排熱利用が発電のみの場合について、エンジン回転数 800rpm におけるシステム性能を示す。同図によると、エンジンの冷却水による熱回収量は 1.1kW_{th} から 1.3kW_{th} である。図示出力は 102 W から 425 W 得られ、電力は最大燃焼熱負荷時において 169 W が得られる。しかし、電力は最大燃焼熱負荷時においてのみ得られた。これは、図 8 に示す燃焼熱量に対するヒータ温度及び膨張室温度から分かる。ヒータ温度は、燃焼熱量 13kW_{th} から 15kW_{th} において 440°C から 526°C 、燃焼熱量 21kW_{th} 及び 24kW_{th} において 690°C である。膨張室温度は、燃焼熱量 13kW_{th} から 15kW_{th} において 233°C から 289°C 、燃焼熱量 21kW_{th} 及び 24kW_{th} において 430°C である。本エンジンは、膨張室温度が 350°C 程度以上に達しないと電力が得られないことから、本システムに合ったエンジン開発も必要になる。

Fig. 8 Temperature of heater tube and expansion space

Fig. 9 Energy flow in system without waste heat exchanger

図9には、排熱利用が発電のみの場合について最大の電力が得られた最大燃焼負荷時におけるエネルギーフローを示す。同図より、木質ペレットの燃焼熱量 $24.4\text{kW}_{\text{th}}$ に対して、暖房出力 22.7W_{th} (大気への放熱量も含む)、エンジンクーラ部にて回収した熱量 $1.29\text{kW}_{\text{th}}$ として電力 169W_e を得られたことが分かる。

図10には、排熱利用が発電と排熱回収の場合におけるシステム性能を示す。同図によると、排熱回収量は 1.9kW_{th} から 3.0kW_{th} 得られる。エンジン熱回収量は 1.1kW_{th} から 1.4kW_{th} である。本システムから回収できる熱量は排熱回収量とエンジン熱回収量を合わせて 3.0kW_{th} から 4.4kW_{th} 得られる。図示出力は 65W から 404W 、そして電力は最大燃焼負荷時において 158W_e 得られている。

図11には、排熱利用が発電と排熱回収の場合におけるエネルギーフローを示す。同図より、木質ペレットの燃焼熱量 $24.4\text{kW}_{\text{th}}$ に対して、暖房出力 $19.6\text{kW}_{\text{th}}$ (大気への放熱量も含む)、排熱回収熱交換器にて回収した熱量 $3.05\text{kW}_{\text{th}}$ 、エンジンクーラ部にて回収した熱量 $1.29\text{kW}_{\text{th}}$ 、すなわち、本システムにて回収した総熱量 $4.34\text{kW}_{\text{th}}$ として電力 158W_e を得られたことが分かる。本システムにおける排熱回収熱交換器の有無の影響は電力の発生に現れ、熱交換器の無いシステムにおいて得られる電力の方が高い。この原因として、排熱回収熱交換器における流動抵抗が考えられる。実際、排熱回収熱交換器を有するシステムにおける実験中の煙突から黒煙の排出が確認されている。これは、排熱回収熱交換器内部に設置されたフィンが排ガスに対し流動抵抗を与えるため木質ペレットが不完全燃焼を起こしたことが考えられる。

すなわち、排熱回収熱交換器を設けたシステムの場合には、その流動抵抗により発生電力を低下させる一因になる。また、ストーブの燃焼室内に蓄積した灰による木質ペレットの不完全燃焼も考えられる。図12には、実験後の燃焼室内部に蓄積した灰を示す。図12(a)は木質ペレットの完全燃焼により生成した灰であり、燃焼室内の灰受けに存在する。図12(b)は不完全燃焼により生成した灰であり、燃焼室内の吸気口付近に存在する。これは、長時間ストーブを運転することにより蓄積した灰が吸気口を塞ぎ木質ペレットが不完全燃焼を

起こしたと考えられる。ところで、木質ペレットの灰分がスターリングエンジンのヒータ部に付着し、伝熱性能を低下させることによりエンジン性能が低下させることが考えられる。そこで、燃焼前後のヒータチューブの様子を図13に示す。同図によると、それほどの灰分の付着が見られず、エンジンが燃焼室から離れた排気管に設置されているため、灰分のエンジン性能への影響は少ないものと思われる。

(a) Complete combustion (b) Incomplete combustion
Fig. 12 Ash in combustion chamber

(a) Before experiment (b) After experiment
Fig. 13 Ash on heater tube

5. 結 言

スターリングエンジン発電機を用いた木質ペレットストーブ排熱利用発電システムを構築し、その性能評価を実験的に行った結果、次の成果が得られた。

- (1)本システムの燃焼熱が 20kW_{th} 以上の最大燃焼時においてのみ、排熱温度が 700°C を越え、供しスターリングエンジンの駆動が可能となった。
- (2)排熱利用が発電のみの場合、燃焼熱量 24kW_{th} に対して電力 194kW_e が得られた。
- (3)排熱利用が発電と排熱回収の場合、燃焼熱量 $24.4\text{kW}_{\text{th}}$ に対して電力 160W_e と熱回収量 4.4kW_{th} が得られた。

本実験により、木質ペレットストーブの排熱を利用した発電、すなわち熱需要を主としたバイオマスマイクロコージェネレーションシステムの可能性が検証できた。

文 献

- (1)有限会社東京木質資源活用センター、「木質ペレット燃料の仕様」<http://www.tokyopellet.jp/>
- (2)農林水産省、「バイオマス・ニッポン総合戦略パンフレット」<http://www.maff.go.jp/biomass/index.htm>
- (3)大場龍夫、「森林改良普及双書 No.149 森林バイオマス最前線」、(社)全国林業改良普及協会 (2005)、p30-37。
- (4)小澤祥司、「木質ペレットとペレットストーブの基礎」、ソーラーシステム、No.102、(株)ソーラーシステム研究所、p22-29。

Fig. 10 Characteristics in system with waste heat exchanger

Fig. 11 Energy flow in system with waste heat exchanger