

バイオマス直噴燃焼式 55 kW 小型発電プラントの研究開発

Development of Small-Scale Biomass Power Plant with 55 kW Stirling Engine

佐藤克良^{*}・大岩徳雄^{*}・石川明^{*}
Sato Katsura Ooiwa Norio Ishikawa Akira

西山明雄^{**}・森滋勝^{***}・守富寛^{****}
Nishiyama Akio Mori Shigekatsu Moritomi Hiroshi

(原稿受付日 2008 年 2 月 21 日, 受理日 2008 年 8 月 1 日)

Small-Scale biomass power plant with Stirling engine (STE) was developed in this R&D. In wood powder combustion test, air ratio could be down to 1.1 without increasing CO and unburned carbon. Combustion efficiency was higher than 99.9% at air ratio of 1.1. NOx emission was 100 ppm (6%O₂) at air ratio of 1.1, and 200 ppm (6%O₂) at air ratio of 2.5. As results of start-up and shut-down tests, operating performance and safety were quite excellent. It looks easy to establish a full-automatic control and operation system. Ash fouling problem in the heater head of STE was clearly found during wood powder burning. As a result, higher dust loading, higher combustion temperature, and also higher STE inlet gas temperature result larger amount of ash deposit. That is, potassium in wood fuel evaporates in burner zone, and it is accumulated at the surfaces of STE heater tubes. Ca, Si and another ash components are accumulated with together at this moment at the tube surfaces. At the final stage, continuous operation of about 7 hours with cyclone collector was carried out reducing ash fouling. We calculated energy balance, power generation efficiency is 20% in case that preheating air temperature is 600 .

1. まえがき

バイオマスは生物資源とも言われ、太陽エネルギーにより大気中の二酸化炭素 (CO₂) が固定されたものであり、燃焼等で利用しても大気中の CO₂ が増加しないため、究極の地球温暖化対策として注目されている。バイオマスとしては、間伐材、製材所廃材など木質系のもや粕殻など農業廃棄物が考えられる。特に木質系バイオマスは性状が安定しており、有害物質もほとんど含まれないため、近年良好なエネルギー資源としてその利用技術が注目されている。

しかし、このようなバイオマスは発生地域が分散し、経済的に収集・輸送することが容易でなく、発生量も化石燃料に比べ乏しいことから、大規模発電は困難とされている。これらを有効に利用するには、小規模に収集して高効率に電力に変換する技術が不可欠である。

そこで本研究では、外燃機関であるスターリングエンジンに着目し、バイオマス直噴燃焼バーナーとスターリングエンジンを組み合わせることにより、高効率、低コストかつシンプルな発電システムの研究開発を行った。

2. スターリングエンジンとは

1816 年に考案されたスターリングエンジン (以下 STE) は、外燃機関であり、その理論熱効率の高さから夢のエンジンとされてきた。その駆動部はディーゼルエンジンなどのような往復式の内燃機関と同様にピストンとシリンダとで構成されるが、内燃機関がシリンダ内での燃焼による膨張力を利用しピストン運動するのに対し、STE は、外部からの加熱・冷却により、シリンダ内に封入された作動ガスを膨張・収縮させ、ピストン運動するものである。図 1 に動作概念図を示す。作動ガスには、ヘリウム、水素や窒素などの非凝縮性気体を用いている。

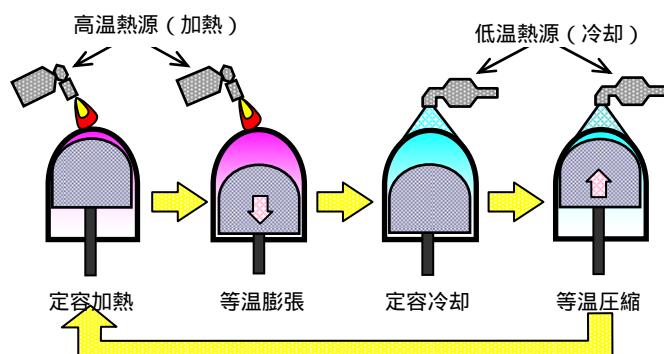


図 1 スターリングエンジン動作概念図

STE には、大きく 4 つの形式があり、図 2¹⁾ に示すように、2 つのパワーピストンで構成された形、ディスプレイ

^{*} 中部電力株式会社技術開発本部電力技術研究所
エネルギーエンジニアリンググループ エネルギーチーム
〒459-8522 愛知県名古屋市長区大高町字北関山 20 番地の 1
^{**} 中外炉工業株式会社堺事業所エンジニアリングセンター
バイオマスグループ技術課
〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町 2 丁 4 番
^{***} 先端技術連携リサーチセンター
〒463-0003 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2268-1
^{****} 岐阜大学工学研究科 環境エネルギーシステム
〒550-0003 岐阜県岐阜市柳戸 1 番 1

ーサとパワーピストンとが同一シリンダに配置された形、ディスプレイサとパワーピストンとが異なるシリンダに配置された形、さらにパワーピストンの上面と下面の空間を利用したダブルアクティング形に分類される。ここで、パワーピストンとはいわゆる出力を生むピストンであり、ディスプレイサとはシリンダ内を往復することで作動ガスを高温側と低温側へ入れ替えるピストンである。

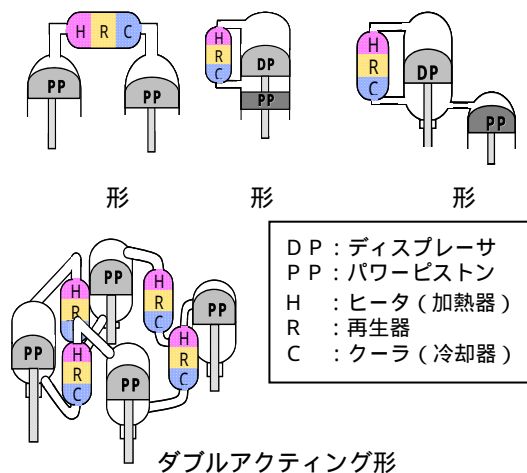


図2 スターリングエンジンの型式

これまでに日本を含め世界中で開発が進められてきたが、高効率化や高出力化といった課題が実用化(商用化)の足かせになっていた。こうした状況の中、欧米を中心に再びSTEの開発が進められてきた。

3. スターリングエンジン

本研究開発で使用したSTEは、米国STM-Power社(2007年2月にSTM-Power社は事業撤退し、現在は米国Stirling Biopower社²⁾が継承している。)の製品である。STEの構造は、図3のエンジン断面図にあるように4気筒構成ダブルアクティング型エンジンを採用している。他の型式に比べダブルアクティング型は多気筒構成であるため、高出力エンジンに最も適している。更に部品数の削減やコンパクト化が可能であり、トルク変動を抑え、ロッドシール部を小さくすることができる。STM-Power社は更に、作動ガスに高圧水素を用いることで、高効率で高出力を達成している。STM-Power社STEは基本的にバーナーによるガス焚きのものが標準であるが、今回燃焼器およびケーシングを取り外し、バイオマス燃焼炉と接続するシステムとした。

4. バイオマス直噴燃焼式STE発電システムの開発

4.1 開発内容

バイオマス直噴燃焼方式発電プラントについて紹介する。

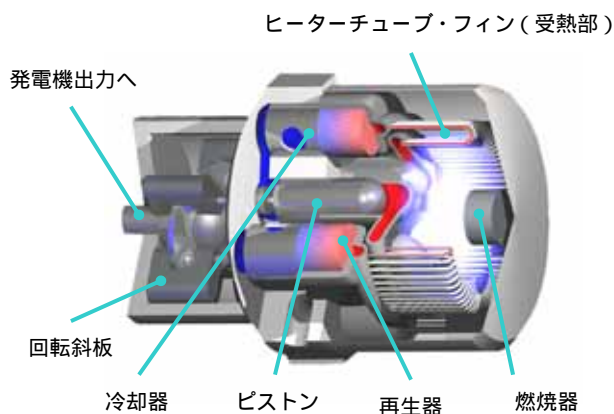


図3 スターリングエンジン断面図

本研究開発は、新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)、(株)シーテックおよび当社の共同で、平成16年度から平成18年度の3年間の研究として実施した。STEをバイオマス直噴燃焼バーナーと組み合わせることにより高性能で低コストな小規模発電システムの開発を実施した。

STEを高効率発電方式として活用するためには、STEの受熱部をバーナーによりできるだけ高温で加熱することが良い。そこで設備と運転の簡素化を目的として微粉碎したバイオマス(木粉)をバーナーで急速燃焼させ、受熱部に高温の燃焼ガスを供給することで高効率化を図ることとした。

本研究では、STEに最適な高性能・多機能バイオマス直噴バーナーを開発し、高効率STE発電システムを構築した。

開発目標としては、(1)バイオマス燃焼効率:99%以上、(2)NOx排出量:350ppm(6%O₂)以下、(3)発電端効率:20%以上(LHV,商用システムベース)、(4)設備コスト、運転コスト:既存のバイオマスガス化発電システム以下に低減、を掲げ、システムの開発研究を進めた。(1)~(4)の項目について、すべて開発目標を達成した。^{3),4)}



図4 バイオマス直噴燃焼式STE発電システム

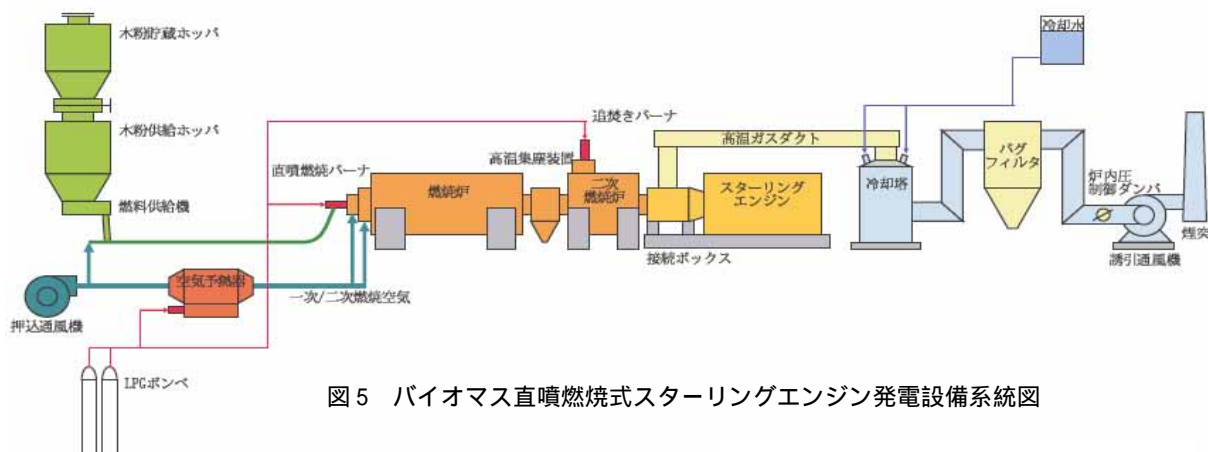


図5 バイオマス直噴燃焼式スターリングエンジン発電設備系統図

4.2 試験装置

試験装置を図4,5に示す。仕様は表1に示す通りである。木粉は、ホッパーに貯蔵する。燃焼用空気は、押込通風機（以下 FDF と呼ぶ。）により、燃焼炉に送り込む。木粉は、ホッパー下部の燃料フィーダーにより切出し、FDF の一部の空気を使って、木粉バーナーまで空気搬送する。木粉供給量は、燃料フィーダーの回転数により制御することができる。

木粉の燃焼は、今回開発した木粉バーナーを用いて燃焼炉で燃焼させる。このバーナーは微粉炭(PC)バーナーをベースにして設計開発した。燃焼空気は、図6のように3つの部分に分かれており、一次空気 (PA) は木粉を搬送する空気であり、二次空気(SA)は燃焼炉での燃焼用空気であり、三次空気(TA)は二次燃焼用空気である。SA は、スワラーを備え旋回流で燃焼炉に空気を供給する。TA は、旋回流なしで SA の外周側から送り込む。なお、PA は予熱されていない空気であり、SA, TA は空気予熱器で 300 に予熱された空気である。

本研究では、2つのタイプのバーナーを製作し、試験を実施した。タイプAは、燃焼効率を優先させた短炎バーナーである。タイプBは、低NOx用に比較的炎の長いものとした。2個のバーナーについて、燃焼特性の比較試験を実施した。

燃焼炉の内面は、耐火物ライニング構造である。炉の予備燃焼試験の結果、6.0 m の燃焼炉は 3.0 m まで短縮しても燃焼特性に影響がないことが確認された。炉長を短くすることにより放熱量が減少し、燃焼炉出口ガス温度は高められ STE 性能に有利であることから、今回試験は炉長 3.0 m で実施することとした。燃焼炉の後流側に出力 55 kW STE を接続し発電試験を実施した。

プラント起動時は、まず LPG で燃焼炉を昇温する。燃焼炉内のガス温度が徐々に上昇し、約 800 になったら、木粉専焼に切替える。炉出口ガス温度は、木粉専焼で最高

表1 プラント仕様

項目	仕様
発電機	ダブルアクティンクスターリングエンジン
燃焼炉	木粉バーナー
出力	55 kW
燃焼炉容量	400 kW
燃料流量	最大 0.03 kg/s 標準 0.02 kg/s
燃焼炉	水平炉 内径 1.0 m, 長さ 6.0 / 3.0 m
バーナータイプ	木粉/LPG 同軸式拡散混合燃焼バーナー
燃料	木粉
木粉サイズ	1.2 mm 以下 (最大) 0.5 mm 以下 (標準) (平均 0.25 mm)
起動用燃料	LPG
通風方式	平衡通風方式

1,200 まで上昇可能であることを確認した。炉で燃焼させた高温ガスを STE まで導き発電する。エンジンを通過した燃焼ガスは、実機であれば空気予熱器、排熱ボイラーで熱回収するが、本試験装置では水スプレーで 200 以下に冷却後バグフィルターで灰を除去し煙突にて排ガスを放出している。燃焼炉の圧力はゼロとなるよう誘引通風機 (IDF) 入口炉内圧制御ダンパにて常時制御している。運転のプロセサデータやオペレーションデータは、ロギングシステムで常時運転監視や制御に使用している。また、バーナー火炎は燃焼炉側面と後部の覗窓から目視確認するとともに、後部覗窓にはビデオカメラを設置し、火炎の状態を常時モニターで監視しながら運転した。

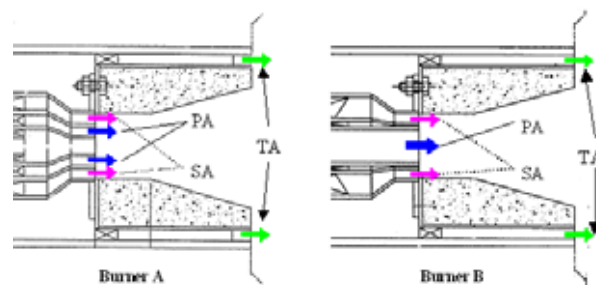


図6 木粉バーナー断面図

4.3 燃料分析

木粉の燃料分析を表2に示す。木質バイオマスは、廃棄物や石炭に比べ、灰分が低く、窒素、硫黄が少ないことから、燃焼排ガス中のばいじん、硫酸酸化物、窒素酸化物の排出が少なく抑制できる。そのため、排ガスがクリーンであり、排ガス処理が容易で、設備が簡素化できる。さらに揮発分が高いため、燃焼性にも優れている。

また、硫黄、塩素および灰が少ないため、伝熱管や構造物のエロージョンやコロージョンのリスクが少ない。しかし、カリウムが高いため、4.4.3で説明する通りファウリングやスラッシングがヒーターチューブで発生しやすい。

表2 木粉燃料分析値

Sample No.		I	II	III
HHV	MJ/kg, dry	19.12	19.04	18.94
Moisture	%, wet	9.62	10.2	12.3
Volatile matter	%, dry	81.06	81.42	81.68
Fixed carbon	%, dry	18.42	18.10	17.88
Ash	%, dry	0.52	0.48	0.44
C	%, dry	52.67	52.03	52.10
H	%, dry	6.09	6.03	6.15
O	%, dry	40.53	41.30	41.14
N	%, dry	0.18	0.14	0.16
S	mg/kg, dry	140	160	100
Cl	mg/kg, dry	< 50	< 50	< 50
SiO ₂	%, in ash	13.85	8.99	5.71
Al ₂ O ₃	%, in ash	3.04	2.19	1.29
Fe ₂ O ₃	%, in ash	5.92	5.23	4.76
CaO	%, in ash	39.57	37.71	39.06
SO ₃	%, in ash	4.14	3.49	3.10
P ₂ O ₅	%, in ash	1.99	1.99	1.69
Na ₂ O	%, in ash	3.74	2.75	1.89
K ₂ O	%, in ash	14.88	26.30	31.26

木粉サイズによる燃焼への影響について比較試験の結果を図7に示す。これは9種類の木粉サンプル(A-I)を用いて燃焼試験を実施した。9種の木粉とも完全燃焼することができ、燃焼上問題ないことが確認できた。ただし、サンプルIについては、木粉中の大粒径の粒子が燃え切る前に炉底部に堆積しながら燃焼していく様子が確認され、バーナーまたは炉形状の改良が必要であることがわかった。

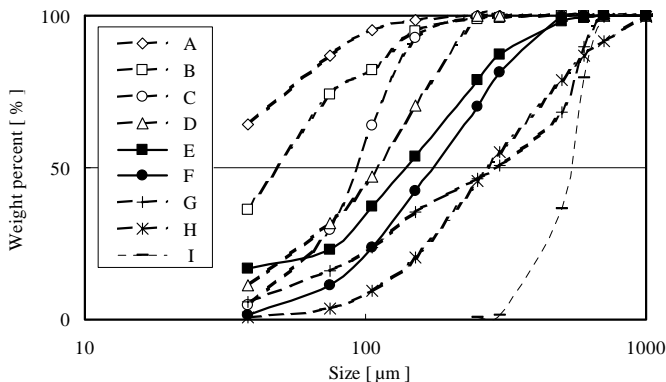


図7 木粉粒径分布

4.4 試験結果

4.4.1 燃焼炉試験結果

はじめに燃焼テストの結果を述べる。

(1) バーナー火炎長さ

図8は、バーナーBを用いた場合での火炎長さである。木粉は、図7で示したサンプルEまたはFを使用した。火炎の形状は、バーナー部の空気に大きく依存していることが目視で確認され、スワラー（旋回用）空気および搬送用空気(PA)が多い場合は火炎が長くなり、逆に空気量を絞ると火炎は短くなった。これらの結果から、燃焼炉は長さ3.0mまで短縮可能であることを確認した。

燃焼炉を短くすることにより、炉からの放出熱損失を減らすことができ、燃焼炉出口ガス温度を高められるためSTE性能も向上(4.4.2参照)し、プラント効率も向上する。そのため実機では、さらに短くすることも検討する必要があると考えられる。

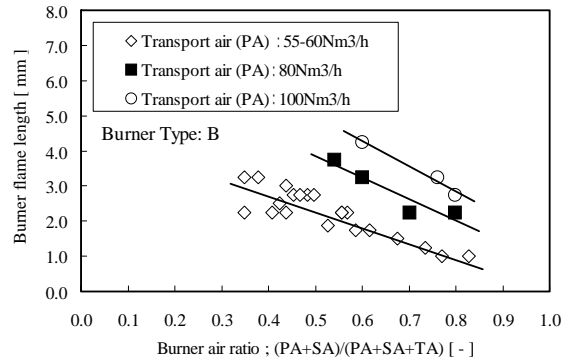


図8 バーナー部の空気分配と火炎長さの関係

(2) 燃焼温度

燃焼炉の空気比と燃焼炉出口ガス温度の関係を図9に示す。空気比が高い場合、燃焼炉の空気量が多くなり、燃焼炉出口ガス温度が低下する。後述(4.4.2および図11)の通り、燃焼ガス量が多い場合STEは、高出力を生み出すが、一方でガス温度が低いと出力は低くなってしまう。したがって、空気比および燃焼ガス温度の最適化がプラントの設計において重要であることがいえる。

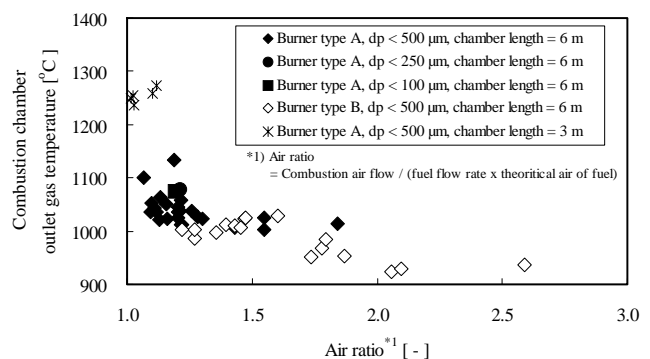


図9 バーナータイプ別の空気比と燃焼温度との関係

(3) 燃焼効率および窒素酸化物について

図 10 は木粉の燃焼効率と窒素酸化物濃度を示す。空気比 1.1~1.2 の場合では、燃焼効率は 99.9%以上、窒素酸化物濃度は 120 ppm(6 %O₂ ベース)以下であることがわかる。これらの結果は、石炭を燃焼した場合に比べ、良好な値である。

燃焼効率は、式(1)を用いて算出した。

$$\eta_c = (1 - (G_{ubc} \cdot 33.9 \cdot G_f + V_{co} \cdot 283 \cdot G_f) / (G_f \cdot LHV)) \cdot 100 \quad (1)$$

η_c : 低位発熱量に基づく燃焼効率 (%)

G_{ubc} : 単位燃料当たりの未燃炭素含有量 (kg/kg-fuel)

V_{co} : 単位燃料あたりの燃焼炉出口 CO モル(kmol/kg-fuel)

G_f : 木粉供給量 (kg/s)

LHV : 木粉の低位発熱量 (MJ/kg)

また、燃焼効率は、燃焼炉出口からサンプリングした灰を分析し、フライアッシュ中の未燃炭素量を測定した結果をもとに、式(2)を用いて算出した。

$$G_{ubc} = (UBC \cdot ASH) / 10000 \quad (2)$$

UBC : フライアッシュ中の未燃炭素の重量百分率(重量%)

ASH : 木粉中の灰の重量百分率 (重量%)

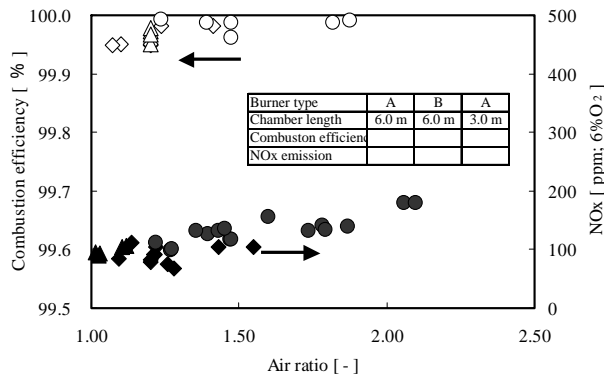


図 10 空気比に対する燃焼効率および窒素酸化物濃度の関係

4.4.2 STE 運転試験結果

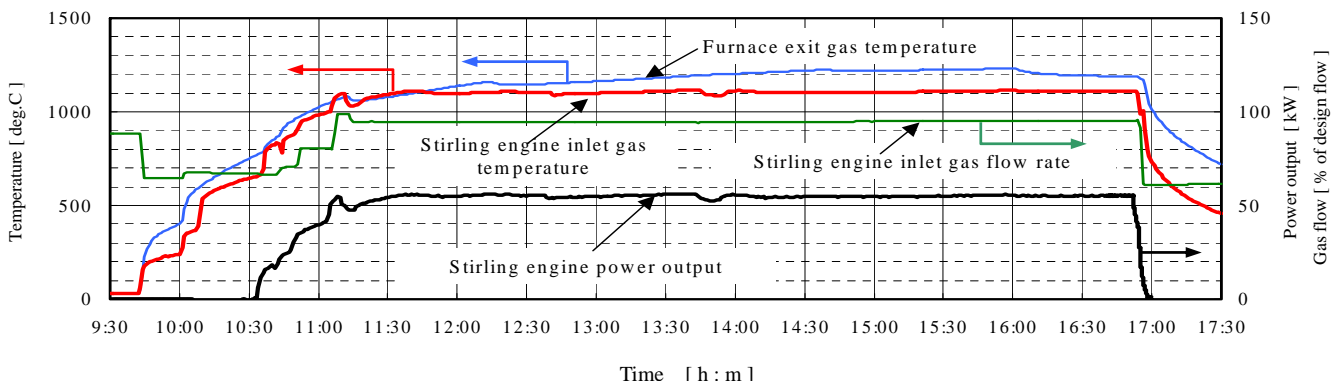


図 12 起動停止カーブ

次に、木粉燃焼ガスを使った STE 発電システムの試験結果およびデータを以下に報告する。

(1) STE 性能

STE 出力特性を把握するために、まず LPG 燃焼により、燃焼ガスのガス流量とガス温度を変化させたときの STE の発電出力変化を把握した。図 11 に示すように、STE 出力はガス流量とガス温度に大きく依存する。ガス温度が 1,000 以下の場合には、55 kW の発電出力を得るためには多くのガス流量が必要となる。通風設備や排ガス処理設備の容量が過大にならないよう、STE 入口ガス温度を高く(1,100)し、ガス量増加を抑える必要がある。ガス温度を 1,200 とした場合、図 11 に示すように空気比が下げられ空気が低減できるので設備の小型化や低コスト化が可能となる。

(2) STE 操作

55 kW 発電装置の運転特性を図 12 に示す。STE 入口ガス流量と温度の変化に STE 出力は極めて敏感に反応する。STE スタートボタンを押すと、その後は入口ガス流量増加と温度上昇に伴い、自動的に STE 出力は増加する。プラント停止時は、燃焼炉のガス温度の低下とガス流量の減少に伴って自動的に出力が低下し発電停止する。このように実用化プラントでは、制御システムの簡素化、運転制御の広範囲な自動化が実現可能であることが確認できた。

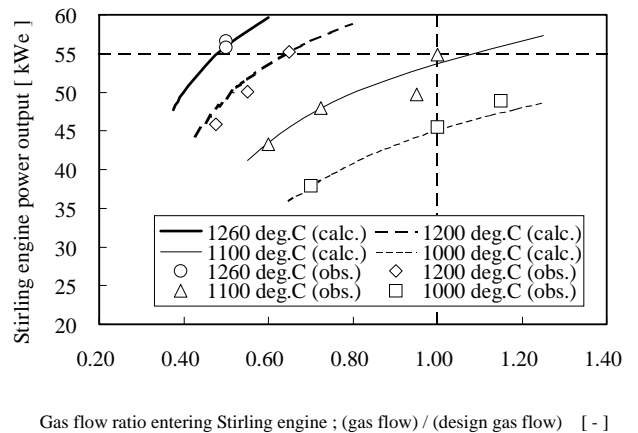


図 11 STE 入口ガスと出力の関係

4.4.3 灰付着についての考察

最後に灰付着について述べる。図 13 に示すように、燃焼灰がヒーターチューブに付着し、時間とともに STE 発電出力が低下し、同時にヒーターチューブの差圧が上昇してくる。連続運転時間は、当初 3 時間程度にとどまった。また、STE 入口ガス温度が高いほど差圧上昇は早くなる。ヒーターチューブに灰が付着している状況を図 14 に示す。

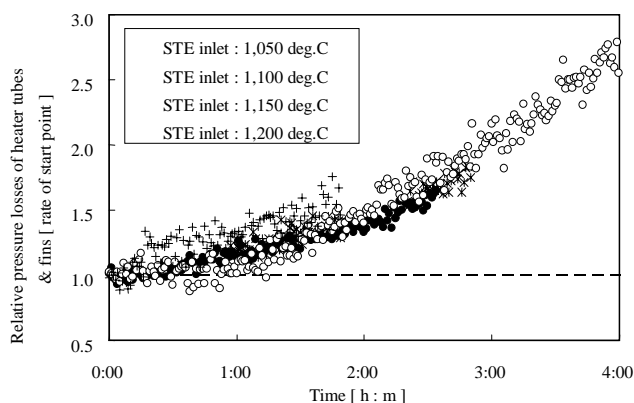


図 13 運転時間とヒーターチューブ差圧の関係



図 14 ヒーターチューブにおける灰付着状況写真

燃焼灰の顕著な付着現象が見られたため、様々な条件の木粉燃焼ガスを供給し、ヒーターチューブの灰付着量を測定した。測定結果から、STE 入口ダスト量が多い、もしくは STE 入口ガス温度が高いほど灰付着量が増加することがわかった。

木粉燃料中の灰とヒーターチューブ表面に付着した灰との比較分析データを図 15, 16 に示す。燃焼前の木粉に比べて、ヒーターチューブ表面付着灰は、カリウムを多く含んでいる。燃焼炉でガス温度が高ければ高いほど(図 15)、もしくはシリンダ内水素温度が低ければ低いほど(図 16)カリウムが多くなる傾向があった。これは、燃焼ガス温度が高ければ高いほど、もしくはシリンダ内水素温度が低ければ低いほど STE 入口ガスから凝縮するカリウムの量が多くなるためだと推察する。

STE ヒーターチューブの表面温度は、800 前後である。この温度域では、カリウムが、KOH か K_2SO_4 の状態で凝縮す

る温度域であることがわかっている。⁵⁾

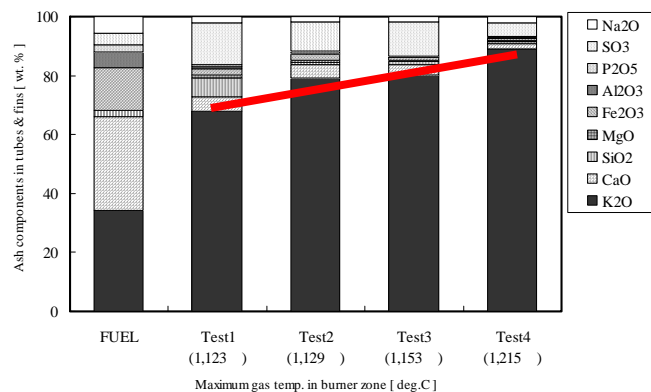


図 15 燃焼炉ガス温度とヒーターヘッド付着灰との関係

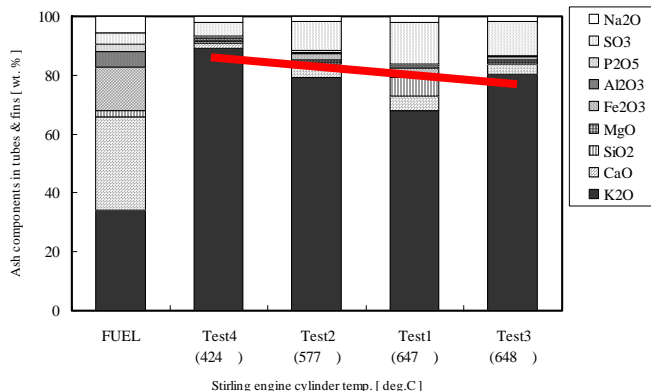


図 16 STE シリンダー内水素温度とヒーターヘッド付着灰との関係

木質バイオマスを燃焼炉で燃焼させるとカリウムは蒸発する。その燃焼ガスが STE のヒーターヘッドを通過する際、熱交換が行われてガス温度が低下し、カリウムが凝縮し、その時ガス中の固体成分(Ca, Si など)が同伴され灰の付着が起こる。これは、カリウムを多く含む木質系バイオマスを、できる限り高い温度で完全燃焼し、ガス温度を高めようとする高効率 STE システムでは避け難い現象と考える。今回の STE のように、伝熱効率の向上のためにチューブピッチを縮め、細かいメッシュのフィンを持つヒーター(受熱部)構造も灰付着を助長していると思われる。

さらに、灰付着抑制のため様々な試験を実施した。まず高温集塵器を数種類試作し試験した結果、最終的に高温サイクロンを 4 塔設置することとした。これにより灰の付着量は約 1/2 程度に低減できた。次に低空気比による低温燃焼試験を行ない、空気比 0.4 で燃焼炉出口ガス温度を 950 まで低減させ、同時に STE 入口の温度を 55 kW が維持できる範囲で 1,100 まで低減させた。これらの灰付着改善対策を実施し、約 7 時間の連続運転を達成した。その時の最終発電出力は、38 kW (31%の出力低下)であった。

次に、付着灰の清掃についてふれる。STE 本体は可動式になっており容易に取り外しができ、付着した木粉燃焼灰は冷却後に高圧水で洗浄すれば短時間で除去可能であった。

システムの高効率化には、燃焼ガス温度が高いほど有利だが、ヒーターチューブでの灰付着の問題を避けては通れない。灰付着を最小限にとどめるために、燃焼炉出口ガス温度や STE 入口ガス温度の最適化が必要であると考えられる。また、実用化プラントでは、スートブロワなど灰掃除装置が必要である。

4.5 エネルギー収支

図 11 に示した STE 性能をもとに、実機 STE コージェネレーションシステムのエネルギー収支を計算した。システムは空気予熱器を設置し、エンジン排気の顕熱を燃焼空気として回収するものとした。図 17 に基本フローを示す。

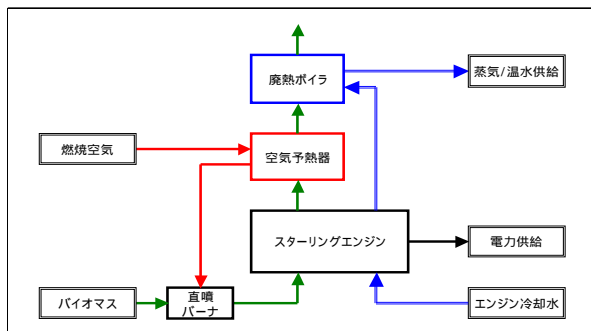


図 17 STE コージェネレーションシステム基本フロー

エネルギー収支計算結果の一例を図 18 に示す。これは予熱空気の温度に対するシステムの熱効率を示したものである。約 600℃ まで空気を予熱することで、開発目標の発電端効率 20% (図 18 の A 点) が達成できる。このとき、蒸気ボイラーと組合わせたシステムでは総合熱効率 30% にとどまるが、温水ボイラーと組み合わせれば総合熱効率約 70% に向上できる。これに対し、予熱空気の温度を 300℃ とすると発電端効率は約 15% に低下するものの、総合熱効率は向上し、蒸気ボイラーおよび温水ボイラーと組合わせたシステムで、それぞれ約 50% (図 18 の B 点) 及び約 73% (図 18 の C 点) となる。

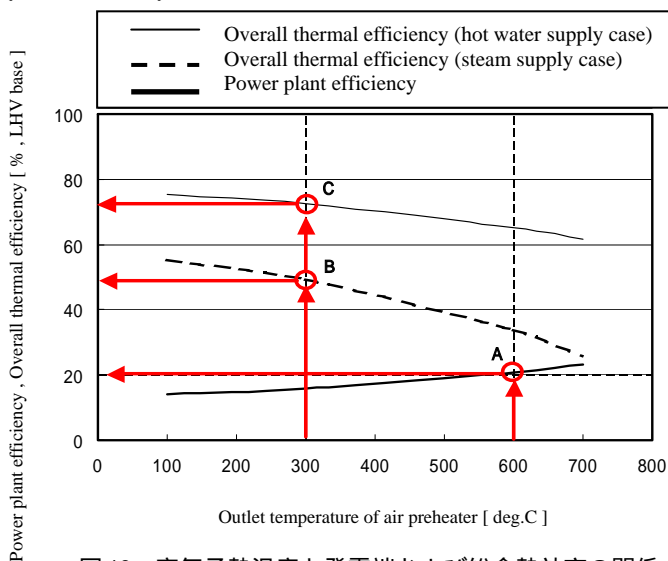


図 18 空気予熱温度と発電端および総合熱効率の関係

5. 結論

試験結果の結論は、以下の通りである。

- (1) 空気比を 1.1 まで下げても、燃焼効率 99.9% 以上であった。この空気比で、窒素酸化物は 120 ppm (6%O₂ ベース) 以下であった。
- (2) STE 出力は STE 入口ガス流量とガス温度により精度良く推算できた。プラント設備の低コストを達成しつつ 55 kW の出力を維持するためには、STE 入口ガス温度 1,100℃ 以上が必要である。
- (3) バイオマス STE 発電プラントは、従来のバイオマスガス化発電プラントに比べ、運転操作の簡素化やメンテナンスコストの低減が可能であり、最終的にはプラントの起動から停止までの全自動化の見通しを得た。
- (4) STE の受熱部に灰が付着し、受熱部の差圧上昇および伝熱性能低下による STE 出力低下した。現状設備における最大連続運転実績としては、約 7 時間であった。
- (5) 実用化にあたっては、ヒーターチューブでの灰付着対策が課題である。そのためには木粉燃焼温度および STE 入口ガス温度の最適化や灰除去装置の開発が必要である。
- (6) 今回の試験結果データに基づき、エネルギー収支計算を実施した。空気予熱を約 600℃ まで加熱することで、目標の発電端効率 20% を達成できる見通しを得た。

謝辞 本研究開発は、NEDO「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」による研究助成のもと行われたものであり、ご助成に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Stirling Engine Dictionary, National Maritime Research Institute (NMRI), Japan, Website: http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/index_j.html
- 2) Stirling Biopower, Inc. <http://www.stirlingbiopower.com/>
- 3) 佐藤克良, 大岩徳雄; バイオマス直噴燃焼式小型発電システムの開発, (2007.10), 電気評論
- 4) Katsura Sato, Norio Ohiwa, Akira Ishikawa, Hidetoshi Shimojima, Akio Nishiyama, Yoichi Moriya; Development of small-scale CHP plant with wood powder fueled Stirling engine, Proceedings of The 13th International Stirling Engine Conference (2007.9.23-26), 252-257.
- 5) Riedl R. Dahl J. Obernberger I. Narodoslowsky M. Corrosion in fire tube boilers of biomass combustion plants. Proceedings of the China International Corrosion Control Conference'99. Paper No. 90129. (1999.10)