

## 小規模木質バイオマス発電の実現による 地球温暖化防止と持続的森林保全への試み

Climate change, Forestry and  
Low Temperature Difference Indirect Heating Stirling Engine

竹内 誠  
Makoto TAKEUCHI

**要 旨** : 世界有数の森林資源をもつにもかかわらずわが国の林業は停滞しており、放置された森林は荒廃している。一方、地球温暖化防止のための再生可能エネルギーの開発においてわが国は欧州などに比べ立ち遅れている。これら二つの社会的課題に対し、双方に有効な技術として木質バイオマスによる小規模発電を考える。使用する燃料は林業における余剰木材、製材業における製材屑を原料としたペレット、チップあるいは薪などである。これらの販売収益は森林に還元され、林業および関連産業の再生に資する。そして小規模木質バイオマス発電は温暖化ガス排出ゼロとみなされ、森林国であるわが国の再生可能エネルギーとして最適である。著者は低温度差に適した $\alpha^+$ 型機構の考案により 300°Cの熱媒を介して間接的に作動ガスを加熱する間接加熱式低温度差型スターリングエンジン (LISE) を開発した。試作機は最大 10.4 kW の出力を得た。また、木質バイオマスポイラーと実際に組み合わせた実証試験を実施している。これらにより、従来困難であった木質バイオマスによる小規模発電が成立することを実証した。

**Abstract** : Japanese Forestry is declining and the forest is ruined. On the other hand, development of sustainable energy field is on behind of Europe and other countries. These two social subjects will be solved by pay back using wood biomass from lumber dusts of forestry. Low Temperature Difference Indirect Heating Stirling Engine was developed as a key technology.

**キーワード** : スターリングエンジン、木質バイオマス 林業 再生可能エネルギー、温暖化

**Keywords** : Stirling Engine, Wood biomass, Forestry, Sustainable energy, Climate change

## 1. はじめに

わが国は現在でも国土の 60%は森林であり、その比率は世界でもフィンランドに次ぐ第 2 位である。その豊かな森林が危機的状況にある。森林のうち 40%を占める人工林は間伐や植林等の保全活動が適切に行われることで持続的な状態が維持される。

ところが林業や製材産業の衰退のため十分な保全がなされず、荒廃の一途をたどっている。この再生は国家の重要な課題である。一方、温暖化防止対策において京都議定書における約束期間にある今、その達成が危ぶまれている。対策の基本となる炭酸ガス吸収源としての森林の保全と炭酸ガスを発生しない再生可能型エネルギーの開発においてわが国は欧州などに比べ大変立ち遅れている。森林という世界有数の豊かな再生可能資源をもちながらそれを温暖化防止対策に生かしていないのがわが国の現状である。この二つの課題、森林保全と温暖化防止をつなぐことができればわが国のもてる資源を最大限生かし温暖化防止に貢献することができる。木質バイオマス発電はこの目的にかなう技術である<sup>1)</sup>。しかしながらニーズの高い 100 kW以下の小規模なものは実現していなかった。本報は間接加熱式低温度差型スターリングエンジン Low temperature difference Indirect heating Stirling Engine (LISE) の開発により、森林保全や製材によって生じる残材を用いた木質ペレット、チップ、薪を燃料とする小規模コジェネ発電システムが実現し、前記二つの社会的課題の改善に資する可能性を検証する。

## 2. 社会的背景としてのわが国林業と温暖化防止対策の現状

わが国の林業の現状は、2007 年度の森林・林業白書に次のような記述がある。

「長期的に国産材需要や木材価格が低迷してきた中、森林所有者の施業意欲の低下により適切な間伐が実行されない等の状況が一部にみられるほか、林業就業者の減少・高齢化が進むなど林業を

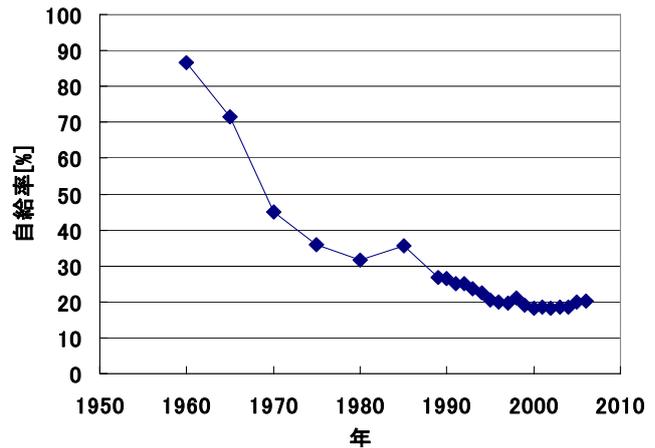


図 1 わが国の木材自給率

取り巻く状況には厳しいものがある。」

図 1 は林野庁の木材需給表（平成 18 年度）における木材自給率のデータである。ここ数年わずかながら上昇に転じているものの国産材の利用が長期的に低迷していることを示している。

この要因は違法伐採された輸入材の問題、わが国の森林は機械化困難な地形であること等多くの解決すべき課題があるが、製材くずや林地残材の処理が従来はコストとして経営を圧迫してきたことも要因のひとつである。

一方、わが国の温暖化対策の現状は、世界で再生可能エネルギーへの転換が急速に進んでいるにもかかわらず、日本は十分省エネ努力をしてきたという考え方のもとで停滞している。京都議定書約束期間が 2008 年 4 月 1 日から始まったが、基準年 1990 年の排出量 12 億 6,100 万トンに対し、2005 年に 13 億 5,900 万トンと削減目標 6%に対し、逆に 7.7%も増加しているが、有効な対策を打ち出せない現状である。

## 3. キー技術としての木質バイオマスによる小規模発電

再生可能エネルギーにおける世界の流れは風力、太陽エネルギーが技術的に完成度が高く導入ペースでは主役であるが、これらに比べより安定した発電が可能であるにもかかわらず、技術的には未完成のバイオマス系に開発への期待度が高い。近年、バイオマスエネルギーとして穀物由来の液化

およびガス化バイオ燃料による内燃エンジンや燃料電池を用いた方式が研究されて来た経緯がある。しかし、これらはプロセスが複雑で、二次的な環境問題につながる場合もあり、さらに食料とのトレードオフ関係が大きな問題として指摘されている。

一方、間伐、植林等の持続的な森林保全のもと、林業およびその周辺産業を再生、活性化し、製材屑や林地残材を木質バイオマスとしてエネルギー利用すれば前記の問題がなく、温暖化対策として次の三つの役割が期待できる。

- ①森林の成長時における炭酸ガス吸収源としての役割
- ②伐採された木は木材が使用されている間、炭酸ガスを固定化する役割。
- ③森林の保全、木材の生産の課程で発生する残材を木質バイオマス燃料として利用することで炭酸ガス増加ゼロの再生可能エネルギーを得る役割。(木質バイオマスは燃焼しても生育時に吸収したCO<sub>2</sub>が排出されるだけなので、カーボンニュートラルとされ、排出量ゼロとみなされる。)

このように森林資源に恵まれたわが国の温暖化対策として最も適していると考えられる。

木質バイオマスを利用する技術は、扱いやすい液体燃料とガス燃料を主体に様々研究されているが、いまだ多くの課題を残している。

一方、燃料としては少々扱いにくく、内燃機関の燃料として使えないため日本ではあまり注目されていないが、燃料製造法としては既に確立したシンプルな方式として木質ペレットがある。先に述べた製材くずや林地残材等を細かく砕いて圧縮し直径7ミリ長さ15ミリ程度のペレットに固めエネルギー密度の高い固形燃料としたものである。木材に含まれるリグニンが接着剤の役目を果たすため100%木材である。さらにシンプルな木材を粉碎しただけのチップや伝統的な薪もある。これらが燃料として市場価値を持つことにより、従来廃棄物としてコストとなっていたものが利益に変わり、林業と周辺産業に還元されることが期待でき

る。たとえばオーストリアやドイツなどのEU諸国では、木質ペレットを用いた暖房給湯システムの普及が進んでおり、EU全体で2020年までにCO<sub>2</sub>を京都議定書を超える20%低減を宣言しているのは、この木質ペレットを中心としたバイオマスの順調な普及がその背景にある。

木質ペレットは再生可能エネルギーであるにもかかわらず燃料としての経済性は化石燃料と遜色ない。代表的な岩手県のもので小売価格28円/kg(2007年10月現在)であり、一定規模以上のペレット生産者は採算に乗っていることは、ここ数年ペレット工場が増加していることからわかる。2008年1月現在(乱高下以前の価格とした)のA重油の価格は78.5円/liter、熱量あたりで7.22円/kWhであり、前記ペレット価格は熱量あたりでは5.96円/kWhとなり、 $5.96/7.22=0.83$ 倍ペレットの価格競争力がある<sup>2)</sup>。また、2008年の国際原油相場の乱高下に見られるような変動要因が少ない国産エネルギーであることも評価されるべきである。

このように林業および国産材の製材、利用のプロセスで発生する未利用木質バイオマス資源は経済的にも競争力のある燃料として認知され始めた。この木質バイオマスを用いて発電を行う方法は集中型と分散型がある。従来型エネルギーの基本である石炭火力発電所で木質ペレット、チップを混焼する方法は、集中型であり大規模集中配置のため廃熱利用が困難で総合効率が低い。一方、施設単位で設備し、発電を行い、同時に熱需要を満たす分散型コジェネ発電は、熱需要がある場所で発電を行うことができるため、熱利用も含めた総合効率でその優位性がある。木質バイオマスの利用においても小規模分散型コジェネ発電が求められる。

小規模コジェネ発電が可能になることで従来の暖房、給湯等の熱需要に対する化石燃料からの転換に加え、発電により従来電力の化石燃料依存分の代替として双方の温暖化ガス削減が実現する。本システムで10kWの発電を行う場合、熱効率を12%とした場合、 $10/0.12=83.3$ kWh分の燃料が従来の化石燃料から木質バイオマスに転換され、前

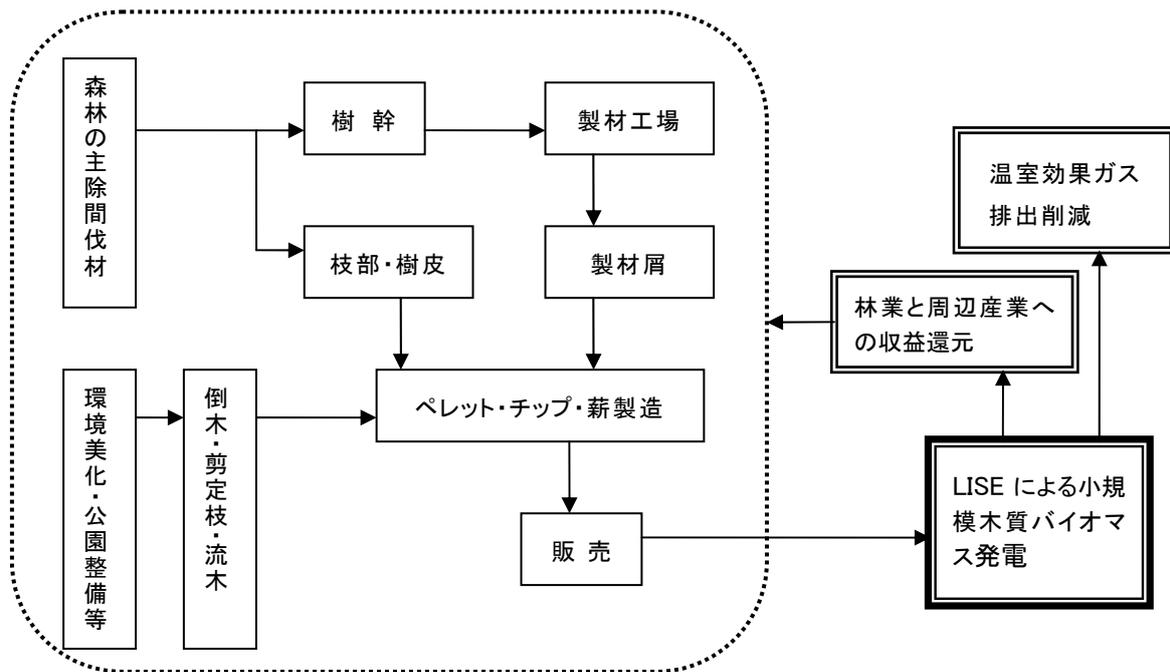


図 2 システムの位置づけ

記ペレット価格にして  $5.96 \text{ 円/kWh} \times 83.3 \text{ kWh} \times \text{年間} 4000 \text{ 時間} = 1,985,872 \text{ 円}$  の木質バイオマス需要が発生し、また、その分  $\text{CO}_2$  が削減される。たとえば A 重油の  $\text{CO}_2$  発生量は  $0.249 \text{ kg/kWh}$ （環境省基準の  $2.71 \text{ kg/litter}$  より）であるから、 $83.3 \text{ kWh} \times \text{年間} 4000 \text{ 時間} \times 0.249 \text{ kg/kWh} = 82,967 \text{ kg} = 83 \text{ トン}$  の  $\text{CO}_2$  が削減されることになる。さらに発電した  $10 \text{ kW}$  は  $\text{CO}_2$  排出ゼロの電力であるからたとえば東京電力の排出係数は  $0.425 \text{ kg/kWh}$ （2008 年経産省・環境省告示第 8 号）を用いて、 $10 \text{ kW} \times \text{年間} 4000 \text{ 時間} \times 0.425 \text{ kg/kWh} = 17 \text{ トン}$  の  $\text{CO}_2$  が削減されることになる。すなわち  $10 \text{ kW}$  級の本システム 1 台が設置されると毎年約 200 万円の木質バイオマス燃料需要が発生し、熱利用、電気利用そして損失分を合わせて 100 トンの  $\text{CO}_2$  が削減される。

図 2 に本システムと林業とその周辺産業そして温暖化防止の関係を示す。森林は主伐、除伐そして間伐といった方法で伐採が行われ、木材の生産が行われる。最終的に木材にならない枝部、樹皮そして製材屑などは従来廃棄物として林業におけるコストになっていたが、本システムの燃料としてこれをペレット、チップそして薪などとして販売することによって、林業およびその周辺産業へ

の収益の還元と温暖化ガス排出削減の二つの効果が期待されることを示す図である。

### 3.1 LISE（間接加熱式低温度差型スターリングエンジン）の開発

木質バイオマスで小規模コジェネ発電を考えると、既存技術である蒸気ランキンサイクルタービン発電があるが、小型化が困難で、 $1000 \text{ kW}$  以下のものは存在しない。有機ランキンサイクルを用いたものでも  $500 \text{ kW}$  以上である。そこで、小型でも効率のよい外燃機関であるスターリングエンジンを用いて、木質ペレットの燃焼熱で作動させる方式が考えられる。

スターリングエンジンは、その原型は 19 世紀の初頭に開発され、主に石炭を燃料としてその高温燃焼ガスを熱源とする外燃機関であった。当時、主流だった蒸気機関が爆発事故を頻発していたところに安全な動力源として一定の普及を見たが、その後登場した内燃機関に対抗できず市場から消えていった。近年、オランダのフィリップスが中心になり、近代の技術と材料を用いて再び開発が始まり、都市ガス等を燃料にして内燃機関より高い効率が得られることが評価され、現在まで世

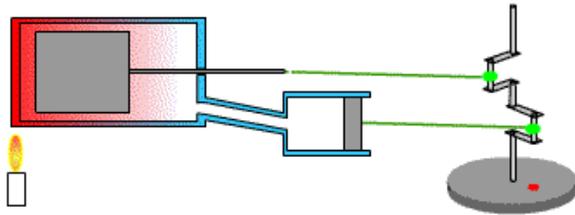


図3 スターリングエンジンの基本原理<sup>3)</sup>

界各国で開発が続けられている。これらは一貫して高温の燃焼熱を直接利用して高効率を狙う高温差型のスターリングエンジンである。

ここで、スターリングエンジンの基本的な動作を図3に示す。密閉された容器の一方を暖め、もう一方を冷やす。その容器に蓄熱効果をもった仕切りを設け、冷たい空間に向かって移動させると冷たい空間は狭くなり、冷たいガスは暖かい空間に流れ込む。冷たい空間から流入したガスは暖められ、冷たいガスよりも暖かいガスの方が多くなる。そうすると容器の中のガスは全体として圧力が上がる。そして仕切りを逆に動かすとこの逆の作用をして圧力が下がりもとの状態に戻る。この容器のどこかにピストンを設ければ圧力を受けて外部に力を取り出すことができる。その力によって軸を回転させ、さらにその軸の回転で仕切りの移動を行うことで連続的に動力を発生するエンジンとなる。

木質バイオマスによる小規模コージェネ発電にスターリングエンジンを応用する考え方は既に欧州を中心に開発されているが、現時点では高温燃焼における熱交換器の耐久性などの課題があり普及には至っていない。

さて、スターリングエンジンは外燃機関であることから燃焼熱でなくても温度差さえ存在すれば熱交換することで出力を発生させることができる特徴があり、低い温度差で運転する低温差型スターリングエンジンがある。これは1980年ごろクロアチアのザグレブ大学のコリン教授が実験的に紹介したのが最初とされ、前記の高温差型に比べ新しい技術である。したがって、19世紀から脈々と蓄積してきたスターリングエンジンの技術はそのままでは適用できず、実用的な出力が得られるものはなかった。

その理由は、高効率で熱源からの熱エネルギーを取り込むための熱交換器、圧力損失の小さな再生器、機械損失の小さなメカニズムなど、そしてそれらを構成する機構について従来の技術では不十分で、低温差型に適合した技術が必要となるためである。著者は従来からあるスターリングエンジンの基本形式である $\gamma$ 型のYA-1<sup>4)</sup>、同 $\alpha$ 型のYA-2<sup>5)</sup>の開発を経て、新規に低温差型スターリングエンジンに最適な機構として $\alpha^+$ 型機構を考案した。<sup>5)</sup> 図4にこれらの概念図を示す。

$\gamma$ 型はピストン力が働かずガス移動のみ行うディスプレイサとピストン力が働き出力を取り出すパワーピストンで構成され、 $\alpha$ 型はガス移動と出力取出しを二つのピストンの相対的な動きで機能を果たすよう構成されている。 $\alpha^+$ 型は $\alpha$ 型の圧縮側（下側）ピストンの外周部が分離して膨張側ピストン（上側）と連結してピストン力が働かないディスプレイサとして働き、内周部は外周部に形成された運動するシリンダーに内装されパワ

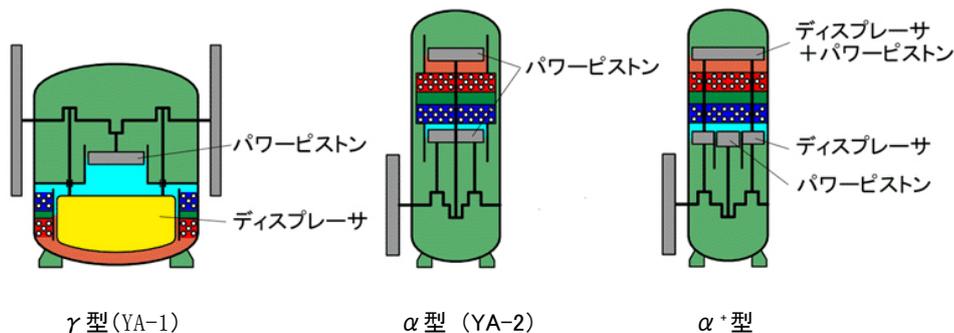


図4 低温差型スターリングエンジン基本形式の比較概念図

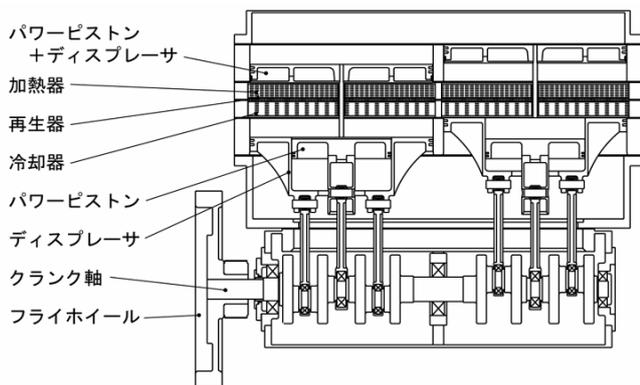


図 5 試作機の断面図



図 6 試作エンジン “AP1-10/250”

表 1 基本計画仕様

型 式	-	AP1-10/250
ディスプレーサ 径×行程	[mm]	550 × 60
パワーピストン 径×行程	[mm]	300 × 120
熱源温度	[degC]	300
冷却水温度	[degC]	20
バッファ圧力	[kPaA]	600
エンジン回転数	[min <sup>-1</sup> ]	900
エンジン出力	[kW]	10.0

ーピストンとして働くことが特徴で、再生器の作動ガス通過面積を従来のスターリングエンジンに比較して画期的に大きくすることが可能である。それにより、低圧損で大量の作動ガスを通過させ低温度差エンジンに必要な熱源との十分な交換熱量を確保できる。それは膨張側ピストンと圧縮側ピストンがロッドで連結されているためピストン力を増加させずピストンを大面積化できることによるものである。

このような低温度差型スターリングエンジンの技術を利用すると、従来のスターリングエンジンが作動ガスと燃焼ガスの直接熱交換により熱エネルギーを取り込んでいたものを最高使用温度 300℃程度の熱媒を介した間接熱交換として燃焼ガスの熱エネルギーをいったん熱媒と熱交換させ、熱媒をエンジン内で作動ガスと熱交換させる方式、間接加熱式低温度差型スターリングエンジン (LISE) とすることができる。これにより熱交換器の耐久性の問題は解決され、木質ペレットを利用した小規模分散型コジェネ発電システムを実現することが可能となる。

LISE は、木質バイオマスの燃焼ガスに触れる熱媒加熱器の伝熱管は、約 300℃の熱媒が通り、熱輸送管を経てエンジンの作動ガスに間接的にエネルギーが伝えられる。したがって伝熱管壁は常に熱媒で一定温度以下に保持されているため燃焼ガスが 1000℃を超えるような条件でも高い信頼性を持って運転可能となる。もちろん燃焼温度が低い場合も 300℃に熱媒を加熱することができれば運転が可能であり、非常に広い範囲でシステム設計が可能である。また、熱媒加熱器はスターリングエンジンの作動空間と分離されているためエンジンの設計と無関係に灰やタールによる汚れや清掃を考慮した熱交換器としての最適設計が可能であること、既設の木質ペレットボイラーに小さな改造で熱媒加熱器を組み込み、熱媒配管で LISE を中心として太陽熱集熱器や廃熱集熱器などの熱源も含む統合的な熱利用システムを接続しコジェネシステムを構成することができるなどの特徴がある。このような構想をもって実機の試作を行った。

図 5 に断面図、図 6 に写真、表 1 に基本計画仕様を示す。クランク軸、クランクケースはφ550 という大径のピストンにもかかわらず、α<sup>+</sup> 型機構の特性によってピストン荷重が直接クランク軸には作用しないためコンパクトなものとなった。加熱器、冷却器は、ともにプレートフィンチューブ型熱交換器を使用し、十分な通過面積を確保している。また、熱交換器と再生器の作動ガス流路は完全に一致しているため、流路の拡大、縮小によ

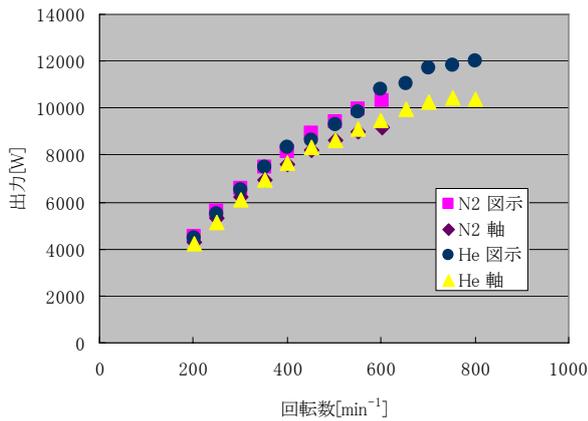


図7 図示および軸出力

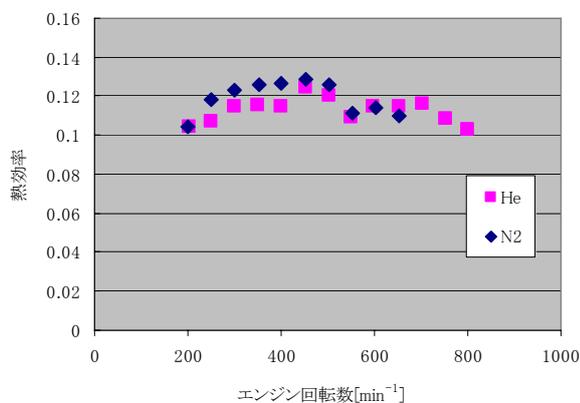


図8 熱効率

る再生器無効容積はない。

上記エンジンを作動ガスに窒素とヘリウムを用いて試運転を実施したところ 図7 のとおりヘリウムにおいて軸出力 10.4 kW の出力を得た。なお、軸出力は電気動力計を使用し、軸トルクと回転数から測定したものである。図8 は回転数に対する熱効率であり、熱媒の入口と出口の温度と流量を測定、エンジンに入った入熱量を計算し、それと前記の軸出力との比をとったものである。熱効率は約 12%であった。<sup>7)</sup>

### 5. 木質バイオマスボイラーとの組み合わせによる実証試験

2008年11月より大阪万博記念公園内におけるNPO法人里山倶楽部殿が実施中のNEDO木質バイオマス実証試験事業<sup>8,9)</sup>において $\alpha^+$ 型機構を用いた1kW級LISE実証試験を開始した。本実証試験は、公園内間伐材の薪を燃料とした温水出力14 kWの

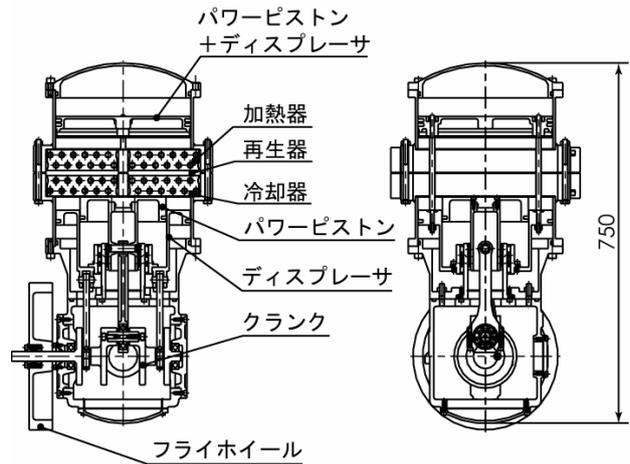


図9 AP1-1/250 エンジン

表2 基本仕様

型番	AP1-1/250
加熱方式	熱媒油による間接加熱式
冷却方式	水冷
回転数	約 600 min <sup>-1</sup>
バッファ圧力	0.5 MPaG
熱源温度	300 °C
冷却水温度	20 °C
定格出力	0.7 kW

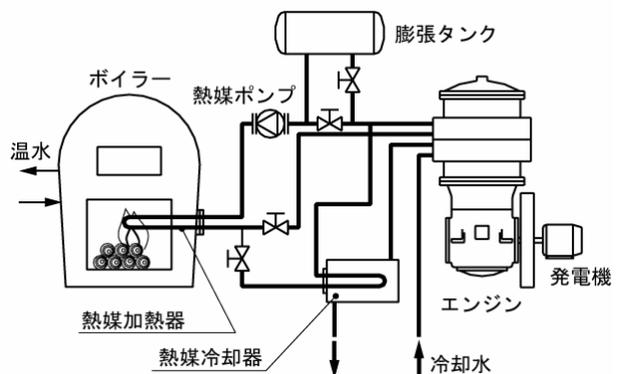


図10 間接加熱システム実証試験装置フロー

木質バイオマスボイラーに熱媒加熱器を装着し、薪の燃焼熱で熱媒を 300°Cに加熱し、間接加熱方式でエンジンを駆動し発電を行うものである。なお、温水は公園内に設置された足湯に供給される。実証試験は $\alpha^+$ 型機構を用いた 1 kW 級 LISE が採用された。図9 に基本構造、表2 に基本仕様を示す。

実証試験装置のフロー図を図10に示す。熱媒加

熱器、熱媒ポンプ、エンジンそして熱媒冷却器などで構成され、熱媒加熱器で熱媒は約 300℃まで加熱されエンジンに送られる。エンジンから熱媒をポンプで再び熱媒加熱器に戻すフローが基本である。熱媒温度はバイパスラインの熱媒冷却器とエンジンに流れる熱媒の比率で制御可能である。熱媒冷却器は全体システムとしては温水加熱器として働く。エンジンはトルク検出器を介してインバータモーターと結合され、軸出力を計測するとともに発電出力を取り出すことができる。図 11 にこれらを現場に据付完了した写真を示す。

図 12 にデータの一例を示す。朝ボイラーに薪を投入し、昼前後に薪を追加投入、夕方燃焼終了ま



図 11 木質バイオマスボイラーと LISE

での熱媒温度  $Th_{in}$  を右縦軸に、エンジン出力  $Ls$  を左縦軸示す。横軸は時刻である。

自動化されたペレットボイラー等と異なり、人手で薪を投入するバッチ式のボイラーであるため、薪の投入のタイミングと量によって発電出力に大きな変化が見られる。このデータの例では朝投入した薪の量に対し薪を追加投入するタイミングが遅れたため午前中に大きく発電出力が低下しているが、今後、チップやペレットを用いた自動化システムとすることでより安定した運転が可能となる。

## 6. 今後の展望

森林保全や温暖化防止対策も健全なビジネスとして自立できなければ長期的に見た対策とはなり得ない。そこで、市場環境と本提案のビジネスとしての可能性について展望してみる。本提案を含め再生可能エネルギーをビジネスとして考えるにあたり、化石エネルギーとの競合関係を国が政策としてどう制御するかが大きく影響する。太古の世界からの蓄積を吐き出す化石エネルギーと現在の時間軸の範囲で再生可能とするエネルギーと同一の競合条件でのビジネスはありえないはずである。EU 諸国中でも積極的なドイツの場合、再生可能エネルギーに対しては通常電力料金の 3 倍程度で買い取る固定価格買い取り制度などがあり、こ

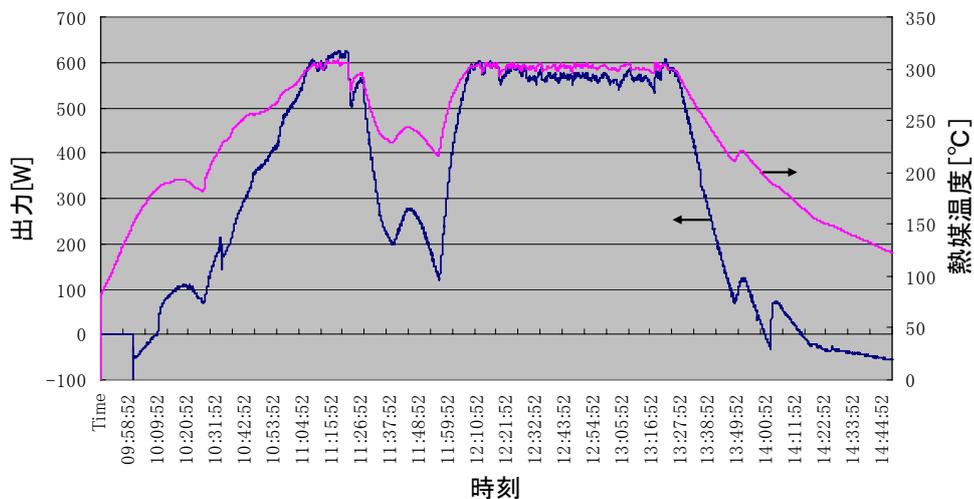


図 12 1日の熱媒温度と出力

のことを政策として明確にしている。このため再生可能エネルギーのビジネスは急速に拡大している。しかし、わが国における再生可能エネルギーの位置づけは必ずしもこの点明確ではない。むしろ既存の電力系統の安定を損ねるものとして様々な規制が存在する。したがって、現状ではいかなる再生可能エネルギーもビジネスとして成立する状況ではない。ただ、太陽光発電に限定して先のドイツの制度と似た固定価格買い取り制度が法制化されることに決定されるなど改善の動きがある。これはわが国の太陽光発電の導入量がドイツやスペインに抜かれ3位になったことをきっかけとして導入が決まった外圧主導のものである。今後さらにアメリカのグリーンニューディール政策等の影響を受けわが国の政策も変化することは十分予想されるが、このような外圧依存の状況を一刻も早く改善し、日本が主導的な役割を果たしてもらいたいものである。

これらの基本的な環境が整った上での課題は、再生可能エネルギーの中でのコスト競争がある。木質バイオマスは燃料にコストがかかるが、前記のとおり現状でも化石燃料並みであり、将来、林業および周辺産業が活性化し、十分な量の木質燃料が供給される段階ではさらにコストが低減されるため、負担は小さい。機器コストについては太陽電池等の半導体系の技術は微細化と量産化によってコストが低減されるが、機械系の技術は最適規模化と量産化によって単位あたりのコストが低減される特徴がある。スターリングエンジンはタービンや内燃機関等を含む機械系技術の中では比較的小規模でコストメリットが発揮され、数10kWクラスが有利な領域であり、小規模コジェネ発電の需要領域と合致している。さらに、低温度差型の場合は特別な高温材料や精密な構造が不要であることを生かし低コスト化を図ることができる。また、間接加熱式の場合、多様な熱源や熱利用形態を統合的にシステム化することで、構成要素個々のコストは吸収され、このクラスの再生可能エネルギーとしては最も競争力の高いものになると考えられる。

## 7. おわりに

このように 300°Cの熱媒で運転する間接加熱式低温度差型スターリングエンジンの性能を実証した。また、現場において木質バイオマスバイオマスボイラーと組み合わせた実証試験が開始され、順調に稼働中である。

結論として、 $\alpha^+$ 型機構というひとつの要素技術の開発が間接加熱式低温度差型スターリングエンジンを実現し、木質バイオマスの燃焼で小規模分散発電を行うことを実現、それにより木質バイオマスペレット、チップそして薪がエネルギーとして利用され、その原料である間伐材の製材屑、林地残材などが従来のコスト要素から収益源として林業および製材産業に還元され、ひいては森林の持続的保全と温暖化防止というわが国における重要な二つの社会的課題に資することが明らかになった。

## 引用文献

- 1) 熊崎実; 木質バイオマス発電への期待, 全国林業改良普及協会, pp.20-21 (2000)
- 2) 岩手県; 木質資源利用ボイラー導入指針 (2008)
- 3) 小林善行 WEB 科学工作館より  
<http://members.jcom.home.ne.jp/kobaysh/stirling/stirlingIntro.html>
- 4) 岩本昭一, 戸田富士夫, 鈴木伸治, 山本格, 竹内誠; 300W 級低温度差スターリングエンジンの開発, 第6回環境工学総合シンポジウム, pp.350-353 (1996)
- 5) 岩本昭一, 戸田富士夫, 平田宏一, 竹内誠; 1kW 級低温度差スターリングエンジンの性能特性, 第1回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, pp.47-50 (1997)
- 6) 竹内誠, 鈴木伸治; 新しい機構を用いた低温度差スターリングエンジン, 第8回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, pp.51-52 (2004)
- 7) Makoto Takeuchi, Yutaka Abe, Shinji Suzuki, Zenjiro Nakaya and Atsuo Kitahara; Development of 10 kW Class Low Temperature Difference Indirect Heating Stirling Engine using  $\alpha^+$ -type Mechanism, Proceedings of the 10th International Stirling Engine Conference, pp.42-45 (2007)
- 8) 神崎康一, 大塚憲昭, 楠本英世; スターリングエンジ

ン木質バイオマスコージェネシステム実機導入への  
NPO の取組, 第 9 回スターリングサイクルシンポジ  
ウム講演論文集, pp.103-104 (2005)

9) 神崎康一, 大塚憲昭, 楠本英世; 大規模公園における

スターリングエンジン・木質バイオマスボイラ・コ  
ージェネシステムの運用, 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.53-54 (2006)