

5-5. スターリングエンジンと乾留ガス化炉を組合わせた
低コスト型マイクロバイオマス発電技術の開発

株式会社レノバ

(申請時社名：株式会社リサイクルワン)

事業名： スターリングエンジンと乾留ガス化炉を組み合わせた低コスト型マイクロバイオマス発電技術の開発

事業者名： 株式会社レノバ（旧商号：株式会社リサイクルワン）
（共同実施者：株式会社プロマテリアル）

1. 事業概要

1-1. 事業の実施目的

(1) 本事業の実施目的

再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）が開始され、未利用となっている森林資源である間伐材、林地残材等を対象としたバイオマス発電事業に対する全国の林業関係者や製材関係者等の関心が高まっている。

株式会社レノバでは、平成 24 年度に 1～2MW 規模のバイオマス発電事業立上げを想定した FS 調査を 2 件実施した。この調査の中で明らかになったことは、1～2MW 規模の小型バイオマス発電事業でも日量 25～50t 前後の木材が必要となり、小規模の森林組合や製材事業者等は、木質バイオマス発電事業に参入意欲があっても燃料の供給を安定的に続けることが難しく、FIT を活用した事業化は難しいということであった。燃料供給の視点からすれば、1～2MW 規模で必要な燃料バイオマスの 10 分の 1 程度の規模であれば木材の安定供給は可能であるが、一方でこの規模で採算に合うバイオマス発電プラントは実用化されていない。したがって、数十 kW 規模の低コストなバイオマス発電プラントを開発することができれば、これらの林業関係者のニーズに合致することができ、全国で木材利用が加速度的に進むと考えられる。また、売電事業でなくとも、この規模であれば、工場等の自家発電に最適な規模であることから、自家発電でも木質燃料の利用ニーズに合致することが予想される。

このような中、株式会社プロマテリアルでは、外燃機関である「スターリングエンジン」のバイオマス発電での利用を検討してきた。現在では、1kW～40kW 規模のスターリングエンジンのラインナップを保有しており、直接燃焼型の小型バイオマス発電装置を実用化している。ただし、直接燃焼型では、熱量の安定性等で課題を抱えており、より安定した発電を行うことができる乾留ガス化発電施設の開発を目指している。これまで、スターリングエンジンとバイオマスの乾留ガス化炉の技術は確立しているものの、それを結びつける技術の検証をこれから行う必要がある。本実証事業を通じてこの検証を行い、来年度以降の商用化に結びつける。

レノバは本技術の開発研究をプロマテリアルと協力して実施し、商用化の際には、本マイクロバイオマス発電装置の普及をプロマテリアルとともに行う方針である。本技術を全国の山村地域で用いれば、従来型のバイオマス発電施設と比べて小規模・低コストで導入できるため、バイオマス発電の導入ポテンシャルが広がり、森林整備と山村地域の新たな成長産業に結びつくと考えられる。

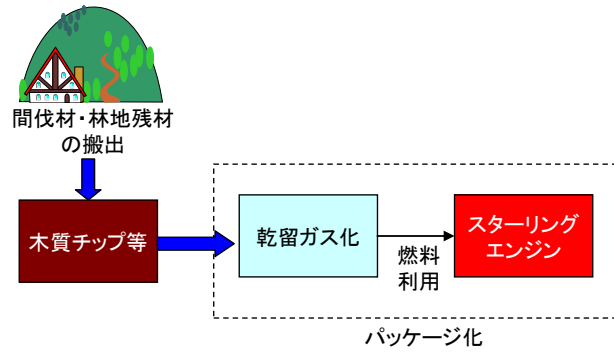


図 1 スターリングエンジンを用いたマイクロバイオマス発電のスキーム

(2) 本技術の特徴

ア) スターリングエンジンの原理

スターリングエンジンは、密閉したシリンダの外側から熱（高温・低温）を加え、空気の膨張・収縮（圧力変化）を利用してピストンを動かすエンジンである。外側から熱を加えて動くため「外燃機関」と呼ばれる。一般的なエンジンは、ガソリン・軽油をエンジン内部で爆発させて動く「内燃機関」だが、それと比べ外燃機関では燃料を爆発させる必要がなく外部からの加熱で作動する。様々なものを燃やして、また今まで利用されていなかった排熱のうちエンジニアリングの限界により用いられなかった排熱も、設計に柔軟性を持っているスターリングエンジンなら電力や運動エネルギーに変換することが可能である。

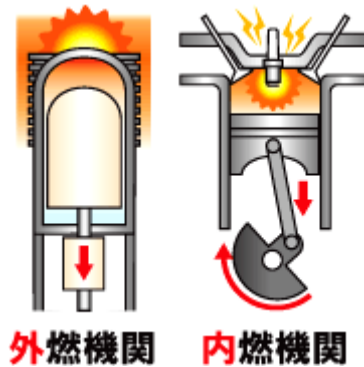


図 2 外燃機関（スターリングエンジン）と内燃機関の仕組みのイメージ

イ) 本発電技術の特徴

外燃機関であるスターリングエンジン発電システムは、バイオマスガスの直接燃焼熱をエンジン内部の気体の膨張・収縮作用によりダイレクトに電気に変換させる。その特徴は以下の通りである。

①それぞれの地域にある様々なバイオマス資源を燃料として使うことができる。バイオ

マスの直接燃焼による熱により発電するため、木質チップ、木質ペレット、薪、穀殻、剪定枝などの燃料を分散型発電用の燃料として活用でき、エネルギーの地産地消を実現しやすい。

- ②メンテナンスが容易である。外燃機関のため腐食成分がエンジン内部に接することはないため、スターリングエンジンを構成する部品はディーゼルエンジンに比べて 1/3 以下に抑えられる。作業としては定期的なエンジンメンテナンス及び受熱部の煤のクリーニングのみとなる。低コストでかつメンテナンスが行いやすいため、地域の中小企業や農家、林業事業者等でも導入ができるようになる。
- ③バイオマス発電であるのために、CO₂ の削減ができる。普及により大きな CO₂ 削減効果が期待でき、地球温暖化対策に貢献することができる。
- ④ユニットを複数台つなげることで、1kW～数十 kW まで、出力のカスタマイズが可能である。設置場所毎に供給可能なバイオマス量によって、単純に台数の増減によりシステムの出力をカスタマイズできる。1 台が故障した際、またはメンテナンスの際にも全体を停止する必要がなく、安定した運転が可能になり、バイオマス特有の不安定リスクを分散することが出来る。ユニットは同一のため、量産効果によるコスト低減が見込める。
- ⑤製材所や温水利用施設等の熱利用の施設があれば、余熱を木材の乾燥等に利用することも可能である。余熱利用（コージェネ）の場合には総合熱効率 80%程度となり、高効率である。
- ⑥可搬性が良く設置が容易なため、工事コストが低減される。パッケージ化されているので、他のプラント建設とは異なり、配管、電気工事のみで済むため工事費の低コスト化が可能である。

1-2. 事業の実施項目

(1) 検証項目

本技術の実用化に向けては、以下の事項を検証する。

① 安定したガス供給

木質バイオマスを乾留ガス化炉にてガス化し、精製されたガスをスターリングエンジンに対して安定的に供給し、燃焼させる必要がある。

② 発電効率

ガス燃焼による熱を効率的にスターリングエンジンに与え、発電効率を向上させる技術を確立させる必要がある。

③ コスト低減

最終的には量産化と製造コスト削減効果により、システムコストを 50 万円/kW としたいと考えている。このため、装置のどの部分の製造コストを削減することが可能であるかを検討する必要がある。

④ メンテナンス

本技術は、林業事業体、地域の中小企業、農家、自治体等に導入してもらうことを想定している。このため、メンテナンスが必要な部分は極力簡素化し、高度な技術知識がなくても稼働、メンテナンスが行えるようにしていく必要がある。実際に一定期間稼働することにより、必要なメンテナンスと技術がどこにあるのかを検証する必要がある。

⑤ パッケージ化

本技術では、スターリングエンジンを複数台つなげることにより、1kW～数十 kW の発電規模をオーダーメイドで簡易的に作り上げることが可能である。将来的にはシステムをコンテナに入れることで、様々な場所に導入しやすくする方針である。ガス化炉とエンジンの組み上げ方を検証することで、パッケージ化の方策を検討する必要がある。

⑥ 事業採算性

イニシャルコスト、ランニングコスト、燃料調達コストを検証した上で、本技術導入による事業採算性を検証する。

⑦ ターゲット市場分析と導入方策の検討

本技術が本実証事業により確立すれば、来年度以降からの商用化を目指す。このため、ターゲットとなる市場の分析を行った上で、導入方策を検討する必要がある。これを受けて、来年度以降の普及を具体化させる。

(2) 課題解決のために本事業で行う実施項目

①技術開発における課題点

ア) ガス化炉とスターリングエンジンを組み合わせた発電システムの最適化

木質バイオマス発電機は、これまでのところ数 MW 規模の大規模な施設が主流であり、汎用性のある小規模（100kW 以下）の発電プラントは実質的に商用化されていない。ガス化炉及びスターリングエンジンは、それぞれ実用化されている技術であるが、両者を組み合わせる技術の検証が必要である。システム全体の発電効率を最適化するためには、各ユニットの稼働条件や制御方法、エネルギーバランス、メンテナンス性、コストなどを踏まえた設計が必要となる。

イ) 乾留ガスの安定的抽出

発電した電力の利用又は売電をするいずれの場合においても、安定的に利用可能な電気を発電する必要がある。特に、本技術開発で目的としている小規模バイオマス発電システムの場合には、スターリングエンジンの原動力となる乾留ガスを安定的に抽出することが、発電した電力の安定化に大きく影響する。

一般的には、ロータリーキルン方式や流動床方式を採用したガスの安定抽出を行うが、小型発電システムでは設備単価が高額となり、事業性の観点から同方式の採用は困難となる。事業化コストの観点からは、固定床方式で安定的にガスを抽出することが課題となる。

ウ) 燃焼の安定化

発電の安定化には、イ)に加えてスターリングエンジンを加熱する燃焼の安定化も課題となる。本発電システムで得られる乾留ガスの成分は、可燃成分として CO が 25%程度含まれた 1,500kcal/m³程度のガスである。この乾留ガスをカーボンの発生を抑えつつ、最適な燃焼条件の設定と火炎形状の工夫により、高効率でかつ安定した燃焼を実現する必要がある。

エ) スターリングエンジンヘッド温度の均一化

フリーピストン型スターリングエンジン発電機を効率的に安定して連続稼働させるためには、ヘッド温度（受熱部温度）の均一化が重要となる。そのためには、バーナー及び炉とスターリングエンジン発電機の組付け及び調整と、エンジンが熱を吸収し易くするための流気ガイドフィンの形状の検討によるスターリングエンジンヘッド温度の均一化を実現する必要がある。

②本事業における実施項目

ア) 発電システムの設計

木質バイオマス燃料の供給から発電した電力の系統連系までの発電システム全体について、プロマテリアルは技術的視点から、レノバは汎用化と事業性の視点から、設計を検討した。システムの設計は、ガス化炉メーカーである株式会社キンセイ産業、バーナー・工業炉メーカーである株式会社正英製作所と協議を行い、現時点で対応可能な機能、制御・稼働条件、設置条件などの課題について整理・検討し、出力 30kW の発電システムの実証機を設計した。

イ) ガス化炉関連設備の技術開発

木質バイオマスを燃焼し、安定的に乾留ガスを抽出するためのガス化炉を開発した。ガス化炉の開発は、焼却装置や熱エネルギープラントのプロフェッショナルであるキンセイ産業のエンジニアリング協力を得て行った。同社は、廃棄物などの性状が不安定な燃料を対象とした燃焼炉やエネルギープラントを多数手掛けており、木質バイオマスに特化したガス化炉は、同社の既製ガス化炉が前提としている廃棄物系燃料などに比べて形状・燃焼条件が安定していることから、将来的にはスペックダウンができる可能性が高い。

「(1) 技術課題における課題点」で前述したとおり、ガス化炉はコスト削減の観点からバッチ式の乾留炉、汎用性の観点から 24 時間安定して稼働させるため 2 基の交互運転方式を採用した。技術的な検討事項としては、2 つの炉の燃焼温度、炉内温度、弁によるガス及び空気の切り替え制御、投入及び灰出しに関する一連の制御条件等である。

ウ) 発電設備の技術開発

スターリングエンジンの安定化および高効率化の観点から、スターリングエンジンの

稼働条件、制御方法などについて研究、開発する。スターリングエンジンの加熱に用いるバーナー技術については、広島大学の石塚悟教授から技術アドバイスを得て進めた。また、汎用パワーコンディショナとの接続を前提に、芝浦工業大学の高見弘教授とともにスターリングエンジン制御システムを共同開発した。スターリングエンジンの出力電圧は、通常の発電機よりも大幅に変動するため、コンバータおよび高効率・高品質の出力を得るための制御用のコントローラの研究を行った。

エ) 実証実験の実施

ア)～ウ) で検討したバイオマス発電装置を神奈川県山北町の廃校となった共和小学校の校庭に設置し、稼働実証実験を行った。実証実験では、発電システムの稼働条件、メンテナンス性、コスト低減が可能な工程及び機器などについて検証した。

山北町は、木質バイオマスを使った地域づくりに積極的に取り組んでおり、本技術開発にも高い関心を示している。現地における協力事業者として、地域で森林整備と木質バイオマスの利活用を進めている「NPO 法人足柄杣人の会」の協力を得て、地元との調整や設置の準備、実証稼働を行った。実証期間中は、発電した電気は電球を灯すことに用いた。

オ) 事業性の検証

実証実験で収集したデータを基に、実証機を商用化したことを想定して、設備導入に関わる事業性の検証を行った。

- ▶ 今回の実証機の開発にかかったコストを参考として本発電技術を量産化した場合の設備価格を基に、イニシャルコストを試算
- ▶ 実証実験中に検証したランニングコスト（人件費、補助燃料等）を基に、実用化した際のランニングコストを試算
- ▶ 燃料購入価格と売電による利益、及び熱利用による燃料削減効果の検証

カ) 普及方策の検討

具体的な市場ターゲットを見据えた上での開発を行うため、以下の観点からの市場ターゲットの分析を行い、普及方策を検討した。

- ▶ 本技術の規模（数十 kW）が適用可能な業種等の特定
- ▶ 導入条件の検証
- ▶ 他のバイオマス発電技術と比較してのメリットの検証
- ▶ 資源量からみて、特に有望な地域の検証
- ▶ 分散型電源への適用可能性検証

1-3. 実施項目の達成目標

(1) 発電効率 15%以上の小型バイオマス発電プラントの実現

木質バイオマス発電プラントは、前述したとおり数 MW 以上が主流となっており、数十 kW のものは少ない。本技術開発では、小型で発電効率 15%以上を目標とした発電システムを開発する。

(2) 24 時間連続稼動可能な発電システムの実現

木質バイオマスのガス化による内燃式発電機では、燃焼機関へのタール成分などの付着などによりメンテナンス頻度が高く実質的に連続稼動が困難な発電システムが多い。本技術開発では、スターリングエンジンの特徴の一つである、外燃式によるメンテナンス優位性を活かした連続稼動可能な発電システムを開発する。

(3) 将来的に発電システムの単価が 50 万円/kW 以下となる目処をつける

木質バイオマス発電システムが普及するためには、現在の FIT 売電単価で 50 万円/kW 程度とする必要がある。従来の方式による小型発電システムでは、内燃式エンジンを採用しているため、ガスの改質設備やエンジンのメンテナンスの必要性などから、50 万円/kW を下回る発電システムは困難であった。しかしながら、本発電システムでは、内燃式に比べプロセスの簡易化ができることなどから、システム単価 50 万円/kW も十分に可能である。技術開発及び実証実験を通じて、発電システムの単価を 50 万円/kW 以下とすることに向けたフィードバックを行い、50 万円/kW 以下で商品化する目処を立てる。

(4) 山北町の森林整備と組み合わせた継続的な実証機の利用

本実証機は実証後も一定期間にわたり、神奈川県山北町の廃校となった共和小学校の校庭において、地域で森林整備と木質バイオマスの利活用を進めている「NPO 法人足柄柚人の会」が、森林整備とともに発電事業を継続することを想定している。地元自治体である山北町役場も本事業への協力の意向を示しており、地域一体となった森林整備と木材の有効利用につなげることができる。

2. 事業の実施内容

2-1. 設置機器一覧

本発電システムの構成は、以下の通りである。

乾留ガス化炉	2基
バーナー炉	1基
燃焼炉	1基
起電炉	1基
煙突	1基
1kW級スターリングエンジン	30台
制電装置・制御盤	一式
灯油タンク	一式
水タンク及び水冷システム	一式

2-2. 設計仕様

それぞれの機器のスペックは以下の通りである。

①乾留ガス化炉

型式	GB-2W-600 特型
寸法	3.6×1.6×1.8[m]
燃料投入方式	手動 400kg/バッチ
燃焼方法	全自動 乾留ガス化炉
炉容積	2 m ³
点火方式	自動着火バーナによる (100,000kcal/h)

②バーナー炉

型式	熱酸化炉
最大燃焼量	200,000kcal/h
燃焼方式	乾留ガス拡散燃焼式
構造	鋼 構造築炉式
安全装置	炎検知方式 CDS 逆火防止 炉内圧コントロール 配管一式
コントロール方式	排ガスダンパー制御

③燃焼炉

型式	拡散燃焼自動温度調節方式
構造	二重鋼構造築炉式
材質	SS400、SUS304／断熱材
押込ファン	型式 ターボ式 容量 1.5kW 3F 200V 50Hz 材質 SS400 防音ボックス入り

④起電炉

型式	丸型強制対流式
サイズ	φ2200×1000 H
断熱構成	キャスター、ボード 200t 他
循環ファン	型式 ラジアル型水冷インナーファン RL2.5H 0.75kW SUS310S 製[要部] インナーケーシングあり インバータ仕様
取付架台	炉架台ステップ・梯子付 振動防止材を介し取付とする
塗装	耐熱シルバー、ブルーフレーム
点検ステージ	メンテナンス チェーンブロック・ジブクレーン取付 エンジン部雨カバー取付

⑤煙突

SUS304 立ち上げ 2m コントロールダンパー付

⑥1kW 級スターリングエンジン 30 基

マイクロゲン社製 FPSE エンジン	
取付方法	垂直 下向き

⑦制御盤

操作電源	200V 3F 50Hz
1 ガス化炉・燃焼炉盤 屋外盤	1面 K
2 エンジン発停・受電盤 屋外盤	1式 S
各種インターロック関係	
完全燃焼制御装置組込	

⑧灯油タンク及び給油装置

タンク容量	200L 未満
-------	---------

⑨水タンク及び水冷システム

1	エンジン冷却用水タンク 2 ton	
	液面計 受水、給水エリアを分ける	
	機器取り付け口、排水口	
	・ P1 ポンプカイト、オーバーフロー取付 40LPS5.4A 0.4kW	1 台
	・ P2 ポンプ回路 32LPS5.25A 0.25kW	1 台
	・ クーリングタワー 型式 HT3Sob 動力 0.05kw 槽に上乗せ自然落下方式とする	1 台
2	電熱ヒーター用水タンク 1.5 ton	1 式 S
	放電抵抗用	10 台
	保護抵抗用	10*2 台
	200v 単相 1kw 仕様	
	ボールタップ及び給水口	
	オーバーフロー、ドレン抜き取付とする	

2-3. 発電機仕様

(1) 本実証機で導入したスターリングエンジン

本システムの中心となるスターリングエンジンは、プロマテリアルと提携している Mirogen Engine Cort. (MEC) のエンジンを使用した。

本実証では、MEC 製の 1kW 級スターリングエンジンを 30 台用いた装置を設計、製造した。まずは試運転段階で 10 台を設置したユニットで稼動条件等のデータを取り、30 台で稼動するユニットに規模拡大する。この台数の変更は、エンジンを設置した起電炉を取り替えることで行うことができる。出力は、スターリングエンジン受熱部に対しての熱の対流の仕方により大きく変わる。

本エンジンは、フリーピストン方式でありピストン等エンジン内部における摺動部分がなく、リニア発電機がエンジンに内蔵されているため、従来のエンジンのようなベアリングやピストンリング等交換パーツが不要であり、エンジン自体のメンテナンスは不要である。また、リニア発電によりピストン運動を回転運動に変えることなくダイレクトに発電する仕組みとなっている。そのため通常のスターリングエンジンの発電で用いられるクランク式と比べて、メカニカルロスが少なく低温時の運転がし易いのがメリットである。

表 1 本実証で用いたスターリングエンジンの使用

形式	FPSE フリーピストン型スターリングエンジン
出力	1kW 級
電圧	230V
周波数	50Hz
使用ガス	ヘリウム
充填ガス圧力	約 25at
起動温度	180～525℃
本体重量	約 50kg

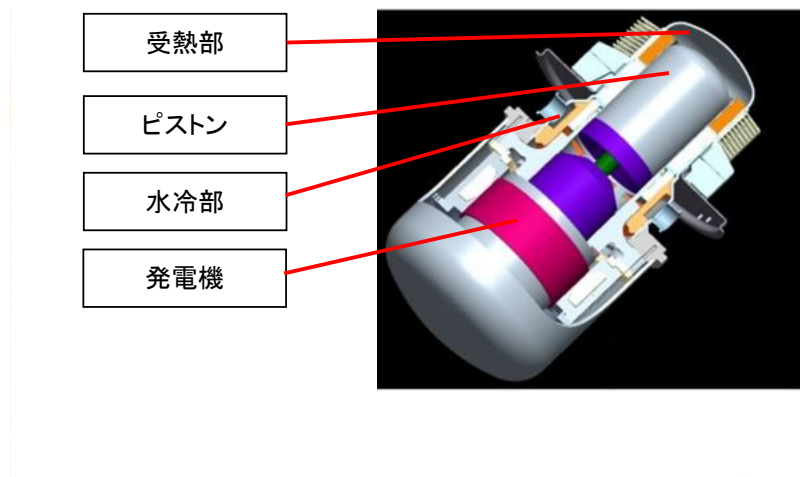


図 3 本実証で用いたスターリングエンジンのイメージ



図 4 本実証で用いたエンジンの全体写真

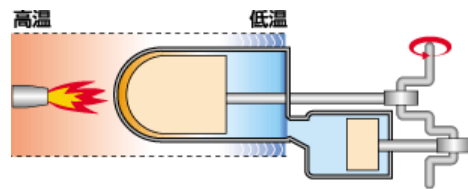
(2) スターリングエンジンの作動原理

スターリングエンジンの作動原理は、表 2 のような流れになる。

表 2 スターリングエンジンの作動原理

「熱による空気の膨張・収縮」を実現するために、密閉したシリンダーの前後に加熱部と冷却部があり、気体または熱交換機による熱のやりとりが行われている。

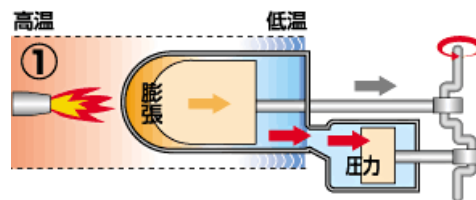
前方の大きなピストンは高温部と低温部を仕切る「ディスプレイサー」。後ろの小さなピストンが力を伝える「パワーピストン」である。



工程①

シリンダーの外部から熱を与えると、膨張した空気の圧力がパワーピストンに加わり、押し下げる。

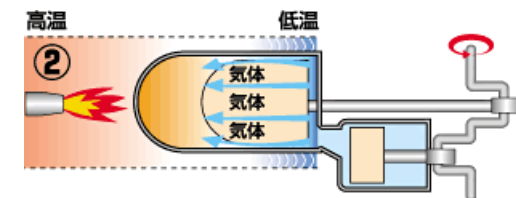
(ディスプレイサーが動き、高温側が広がっていく。パワーピストンに圧力が加わる。)



工程②

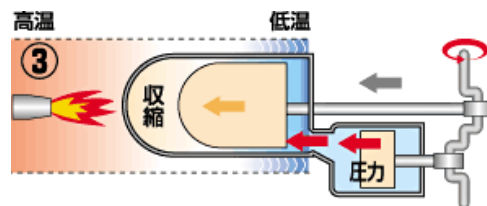
高温側が最大になると温度が低下。位相が変わり、低温側が広がっていく。

(パワーピストンが上昇する位相になると、広がった高温部に冷たい空気がディスプレイサーの隙間を流れていく)



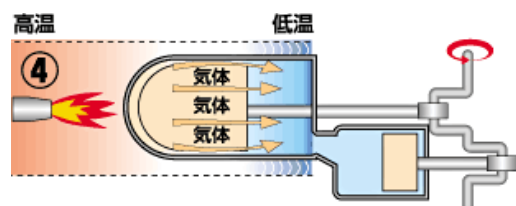
工程③

高温部が冷却されたため気体の収縮が起こり、先程と逆向きの圧力が加わる。



工程④

低温側が最大になると、再度位相が変わり、高温側が広がる膨張の段階へ。再び工程 (1) へ戻る。



2-4. 機器配置図及びシステム図

本発電装置の機器配置図及びシステム図は、以下の通りである。本実証機では、起電炉のスターリングエンジンについて、10kW（10台）と30kW（30台）で交換できる設計としている。なお今年度は、起電炉の設計、製造を10kWモデルと30kWモデルで行っているが、本年度実証期間中の稼働は10kWで行い、安定稼働のための調整を行った。今後10kWでの安定稼働が確立し次第、20kW（20台）を追加しての30kWでの稼働及び調整を行う。

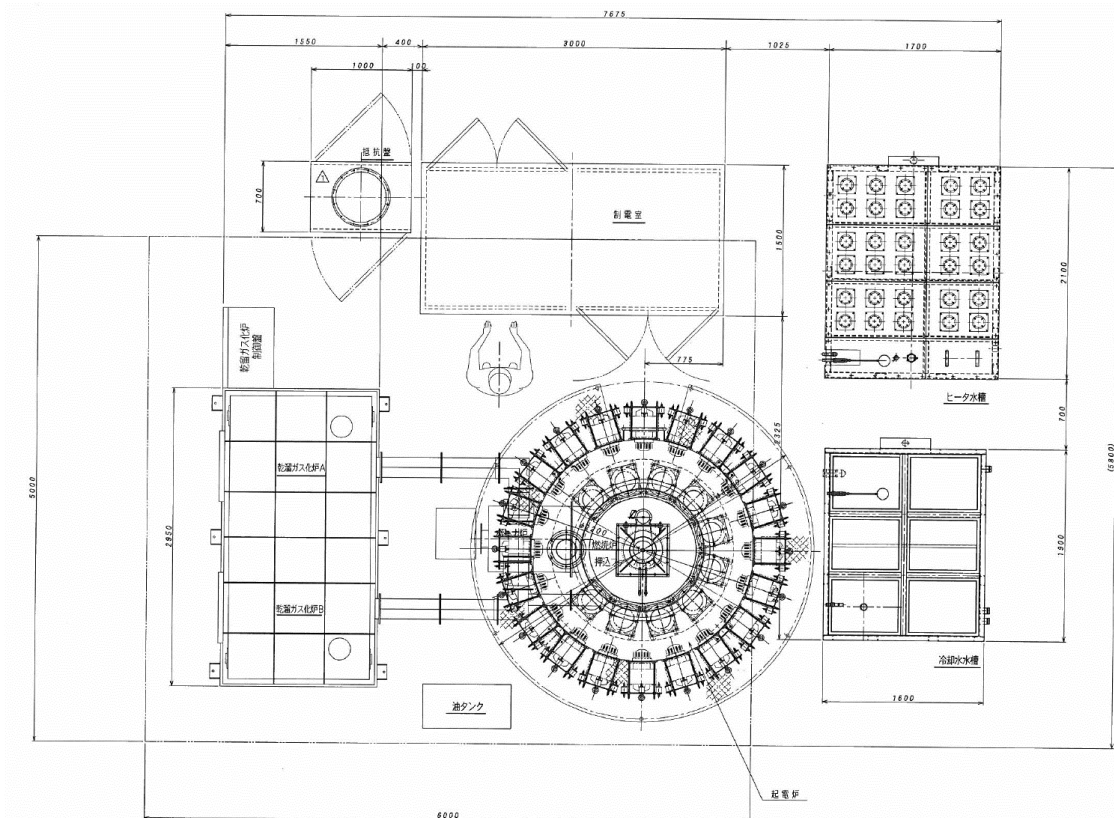


図5 機器配置図（縦図）

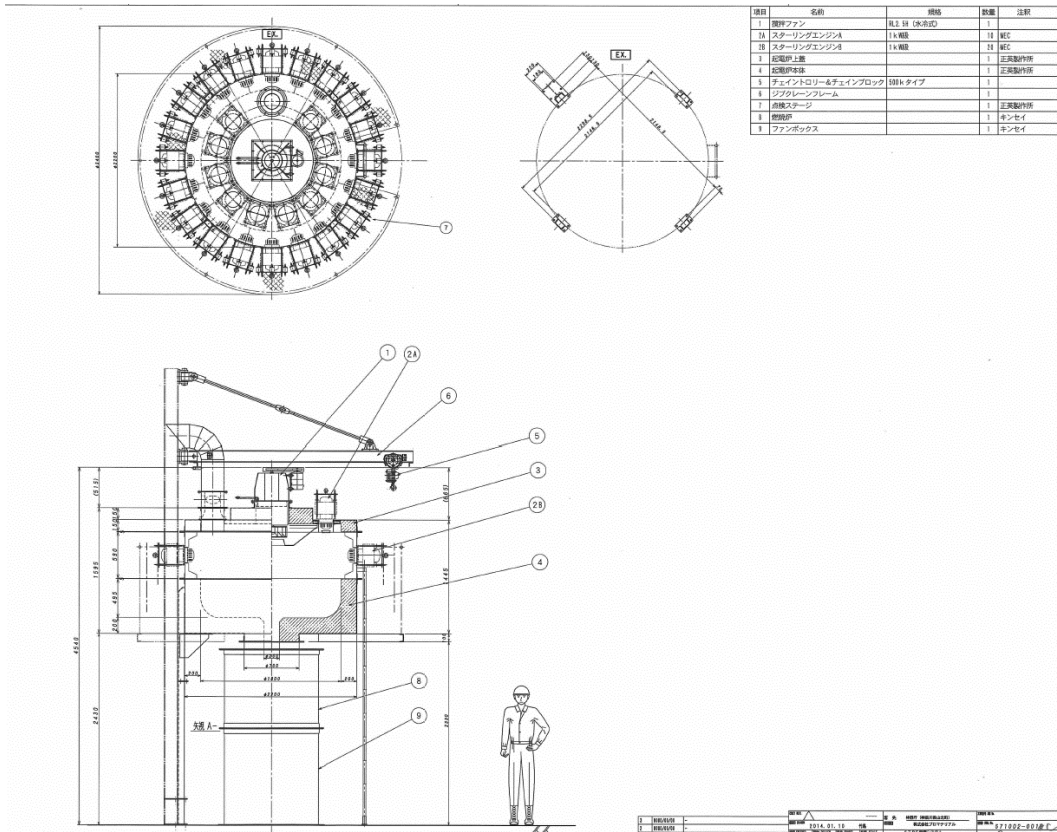


図 6 燃焼炉、起電炉の機器配置図（横図）

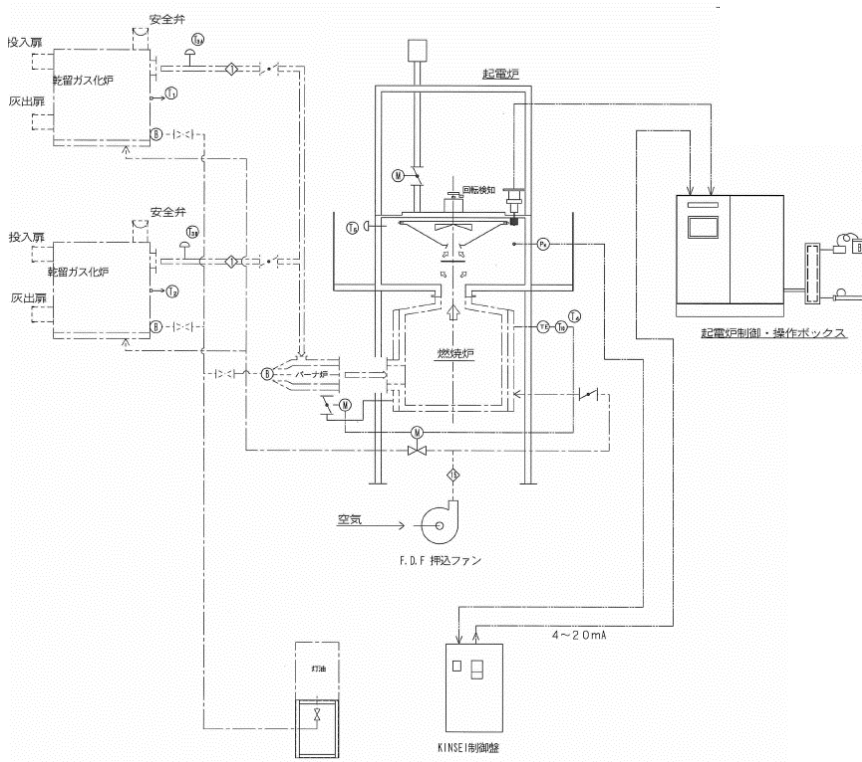


図 7 システム図



図 8 システム全体写真



図 9 起電炉上部



図 10 30kW に拡大するための 20kW 分のユニット

2-5. 設計のポイント

本実証機は、最適なガス供給を行うとともに、10台～30台の複数エンジンを自動制御して安定した発電を行うことを目的としている。この観点からの設計のポイントは、以下の通りである。

①ガスの安定的抽出

通常ガス化炉は、ガス化の細かい制御は行わないが、本実証機では、燃焼を安定化及び出口温度を一定化させるために、ガス化量を調整している。これにより、性状によりガス化量が安定しにくいバイオマス燃料とした場合でも、ガスの供給量が一定となり、安定した燃焼による発電を行うことができる。実際に一言でバイオマスとは言っても木の種類、含水率（乾燥状態）、形状、大きさ等が様々である。このような多様性を前提にして、あらゆるバイオマスを投入しても発生するガスの質を燃焼可能な状態にしておく必要がある。

具体的には、安定的な燃焼に最適なガス量を供給するため、燃焼炉の圧力を負圧としている。燃焼炉の圧力と温度を制御装置で計測し、燃焼熱温度を制御している。また、ガス化炉と燃焼炉の間についても、燃焼炉の圧力の状況に応じて、ガス化炉に送り込まれる空気量についてダンパーの自動調整を行い、ガス化の速度が最適になるように制御している。