

特集：バイオマス発電

バイオマス発電の特集に寄せて

For a Special Feature of Biomass Power Generation

平田 悟史*¹
HIRATA Satoshi

バイオマス発電とは、バイオマス（生物資源）を原料として発電することであるが、原料によって適用される技術が異なり、また国内と海外で状況が異なる。特集記事をお読みいただくにあたって、この点を整理しておきたい。

バイオマスとは再生可能な、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたものと定義されている。この中にはさまざまな種類のものが含まれており、水分量が15%以下で熱化学変換に適した木質ペレット燃料から、重量の約半分が水分である生木、水分量が60～90%で熱化学変換には適さない家畜排せつ物まで多種多様である。当然のことながら、原料の性状によって適用可能な発電技術は異なる。この特集記事では木質バイオマスを対象としたボイラ・蒸気タービン発電、オーガニックランキンサイクル発電、ガス化・ガスエンジン発電、ガス化・ガスタービン発電の4つが紹介されている。この4つの技術について、特徴を整理する。

ボイラ・蒸気タービン発電は技術的に確立しており、稼働実績も多い。燃焼器、蒸気タービンとも、燃料と設備規模、電力と熱の需要に合わせて複数の選択肢があり、ニーズに合わせて適切な設備がプラントメーカーから提供される。発電効率は設備の規模に比例するため、大型設備の方が経済的に有利だが、一方で大量の燃料を確保する必要があるため、設備の規模にはおのずと制約がある。国内では木質バイオマス専焼の場合、発電出力は50MW程度が限界だが、石炭や廃棄物との混焼によって、設備の大型化を図る例も見受けられる。バイオマス資源が豊富な海外では、さらに大型の設備が存在する。この記事で紹介されている循環流動層ボイラは、比較的大型の設備に適用され、かつ燃料の性状に制約が少ない優れた技術である。国内ではバイオマス資源に限りがあるため、発電設備の更なる立地は困難と思われるが、東南アジアを中心に海外においては、需要の拡大が期待できる技術である。

ボイラ・蒸気タービン発電設備は、発電出力が2 MW程度の場合、発電端効率が12%程度と低く、経済性は乏

しい。これを解決するための方法として、オーガニックランキンサイクル（ORC）発電、ガス化発電が提案されている。

ORC発電は従来型の燃焼器にORCを組合せた発電システムである。小森氏の解説にあるようにORC発電では発電端効率は16%とボイラ・蒸気タービン発電より高く、冷却水を必要としないというメリットがある。また熱供給と組合せることによって高い総合効率を得ることができる。ヨーロッパ中心に普及が進んでおり、今後日本でも導入が進むことが期待されている。

ガス化発電は燃焼器をガス化炉に置き換え、発生させた可燃性ガスをガスエンジン、ガスタービンなどの内燃機関で燃焼させ、発電するものである。鈴木氏の解説では固定床アップドラフト型ガス化炉、飴氏の解説では加圧流動層ガス化を採用している。ガス化炉における木質バイオマスのガス化効率は約70%、ガスエンジン発電機、ガスタービン発電機の発電効率は約30%であることから、20%程度の発電端効率が得られる。ガス化効率、内燃機関の発電効率とも、設備規模の影響が比較的小さいため、小規模発電設備に向いている。またORC発電と同様、熱供給と組合せることで、高い総合効率が期待できる。今から15年ほど前に、国内の多くの企業がガス化発電の開発を進めたが、実用化に至ったものは少なかった。技術的な課題もあったが、一番のネックは発電コストの高さにあった。2012年に再生可能エネルギー固定価格買取制度がスタートしたことで、状況は大きく変わり、ガス化発電設備の設置が進み始めている。地域で発生したバイオマス資源を地域でエネルギー源として有効利用するためには、これらの技術は有効であり、今後、技術の改良が進み、導入事例が増えると思われる。

バイオマス発電は多様な燃料に対応しつつ、発電効率を高くし、省力化を進めて、安定稼働を達成しなければならない。基礎的な技術はほぼ確立しているので、今後は実機規模で設備を運転しながら、問題点を解決していくという段階にある。世界的にみると、バイオマス発電は増加する傾向にあり、日本の企業にもビジネスチャンスは大いにあると思われる。技術の更なる進歩に期待したい。

原稿受付 2017年1月23日

*1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
〒305-8560 つくば市梅園1-1-1

特集：バイオマス発電

宿毛バイオマス発電所における取組みについて

Introduction of Sukumo Biomass Power Plant

永野 正朗^{*1}

NAGANO Masao

キーワード：木質バイオマス，FIT，枝条，樹皮

Wood Biomass, Feed In Tariff, Branches, Bark

1. 緒言

株式会社グリーン・エネルギー研究所は、2012年7月に高知工科大学研究者グループを中心に設立されたエネルギーベンチャー企業である。同社は地域の森林資源を活用した地方における持続可能な産業クラスターの構築を目指しており、冬季の施設園芸における加温用燃料となる木質ペレット製造事業と再生可能エネルギーの固定価格買取制度（以下、FITという）を活用した木質バイオマス発電事業を高知県宿毛市において2015年より開始した。本稿では、従来は利用価値の低い木質バイオマス資源とされていた枝条や樹皮といった本来の意味での未利用木質バイオマス資源を積極的に活用している宿毛バイオマス発電所（図1）の取組みについて紹介することとしたい。



Fig. 1 Sukumo Biomass Power Plant

2. 設立の経緯

株式会社グリーン・エネルギー研究所代表取締役会長および社長は、高知工科大学の現教授である。また、現在専務取締役を務めている著者も株式会社グリーン・エネルギー研究所に勤務する前は高知工科大学で研究員と

して木質バイオマスに関する研究に携わっていた。株式会社グリーン・エネルギー研究所が設立され、現在の宿毛バイオマス発電所運営に至るきっかけは、重油価格高騰に苦しんでいた施設園芸農業の加温用燃料を地域の森林資源に転換する取り組みを2005年頃から地元企業や農業関係者らと一緒に始めたことにある。それまでハウス加温用の燃料となる重油等の化石燃料は地域外から購入することが当たり前であった。しかし為替や原油の生産調整等によりこれら化石燃料価格は大きく変動することから、農業経営は常に不安定な状態であった。そこで地域のエネルギー資源を地域内で生産し地域産業のエネルギーとして利用することで、施設園芸経営において高い比率を占めるエネルギーコストの変動を安定化し、また地域内にエネルギー産業を基盤とした新たな雇用創出の機会を生み、材価低迷等により管理が困難となっている地域の山林を維持していく新たな地域経営システムを創出することができるのではないかと考えた。地元農業関係者らの協力により施設園芸用加温装置の開発は進み、さらに木質燃料利用装置に対する公的な補助事業の拡充効果等もあり、当時、高知県内においてほぼゼロであった施設園芸における木質燃料利用加温装置の導入件数は2015年度時点でおおよそ240台程度となり、また高知県内の木質ペレット燃料需要はおおよそ7千トン程度まで伸びている⁽¹⁾。

一定規模の木質燃料需要を創出できたことで供給事業計画の見通しが立ったこともあり、木質ペレット燃料製造事業計画の策定に着手することとなった。木質ペレット燃料の製造工程では、乾燥材の端材などを原料としない場合原料オガ粉の乾燥工程が必須となるが、その熱源に発電設備で発生する排熱をうまく利用することができないか検討を進めたことが発電事業に着手するきっかけであった。結果的に発電設備からの排熱のペレット製造時の乾燥熱源利用は実現しなかったが、施設園芸用加温機等小型燃焼装置用の木質ペレットの原料には向かない木質資源（枝条、樹皮など）については、発電用の燃料

原稿受付 2017年1月24日

*1 (株)グリーン・エネルギー研究所
〒780-0002 高知市重倉266-2

として使用することで、幅広く森林資源を利活用する仕組みの構築につながったといえる。

3. 宿毛バイオマス発電所について

3.1 発電設備概要

宿毛バイオマス発電所は、高知西南中核工業団地内の一角約7千坪（法面除く）の敷地に木質ペレット製造所と並んで建設された木質燃料専焼のFIT発電所としては四国で第一号となる木質バイオマス発電所である。同発電所は、発電設備に併設された原料ストックヤード、燃料製造・保管設備を有しており、燃料製造と発電を同敷地内で行うことができる設計となっている。宿毛バイオマス発電所の基本的な設備構成を表1に示す。

Table 1 General specifications of Sukumo Biomass Power Plant

boiler		natural circulation water-tube boiler
Maximum pressure	Mpa	7.00
Maximum temperature	°C	475
Maximum evaporation	t/h	30.0
Combustion		combination stoker (sliding stoker grate and traveling stoker)
Turbine		extraction condensing turbine
Generator		three-phase synchronous generator
Rated electricity production	kW	6,500
Electricity consumption	kW	500-700
Electricity supply	kW/h	5,800-6,000
Fuel		wood chips, branches, bark
Fuel consumption	t-wet/y	90,000

宿毛バイオマス発電所ではコンビネーションストーカー炉（図2）を採用している。燃料となる細かく砕かれた木材は燃料搬送設備によりチップフィーダーまで搬送され、スプレッターにより燃焼炉内に投入される。コンビネーションストーカー炉では、燃焼炉に投入された燃料は、トラベリングストーカー上に直接落下させるのではなく摺動ストーカーという階段状のストーカーに燃料を一旦預け、一定量の水分を蒸発させたのちに逆走式トラベリングストーカー上に燃料を送り燃焼させること

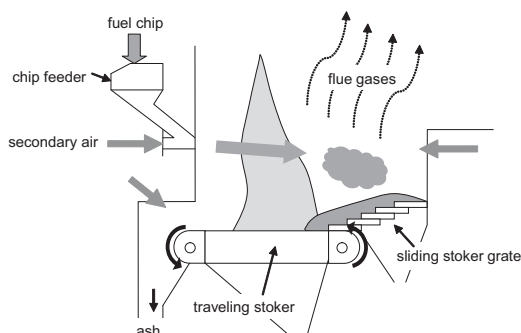


Fig. 2 Structure of combination stoker

で、比較的水分率の高い燃料にも対応していることが特徴といえる。

燃焼ガスにより加熱された水は450℃程度の過熱蒸気としてタービン入口に送り込まれ衝動減速機付き蒸気タービンを回転させる。仕事を終えた蒸気は復水器で冷却され再びボイラーに給水される。燃焼ガスは一次、二次空気、ボイラー給水用に熱回収されたのち電気集塵機で飛灰を回収し排気筒より放出される。また、燃焼に伴って発生する炉床灰は水封式のアッシュコンベアにより排出される。同設備における燃料消費量は時間当たり最大11～12トン程度であるが、燃料の水分率や嵩比重等の条件によって変わる。また燃焼灰の発生量も燃料の種類等によって変化するが概ね2%未満で推移している。

3.2 当直勤務体制

宿毛バイオマス発電所では当直員（当直長含む）10名による5直3交替制を採用している。近年では当直員8名の編成による4直3交替制や4直2交替制も一般化しているが、宿毛バイオマス発電所では地元雇用創出の観点より地元からの新規採用を行っており、運転開始時点における当直員のなかで発電施設等の運転経験を有するオペレーターは皆無であったことから5直編成とすることとした。彼らの教育訓練については、石炭火力発電所での豊富な現場勤務経験を有する当社BT主任技術者により試運転開始の約3カ月前より実施された。教育資料についてはBT主任技術者が一から作成し、この教育資料がオペレーターの発電設備に関する知識についてのすべての基礎となった。

また、建設中の現場（図3）を直接見ることで設備の機能や配置について学習を行っていった。入社3カ月目より、右も左も分からない状態で操作にあたることとなった彼らの苦労は計り知れないが、今となっては非常に貴重な経験であったのではないと思われる。



Fig. 3 Boiler under construction in 2014

3.3 燃料製造設備概要

発電用燃料として使用する丸太や短尺材については、刃物で切削加工を行う移動式切削機（Doppstadt製



Fig. 4 Mobile chipper "DH910K"

DH910K) により適正なサイズにチップ化される (図4)。

一方、枝条や樹皮については、石や金属類などの異物が混入していることがあり、刃物が欠けるなどのリスクが非常に高いことから高速でスイングハンマーを回転させ投入物を砕く (図5) 移動式の一軸高速回転破碎機 (Doppstadt製AK510K) による燃料化方式を採用している。

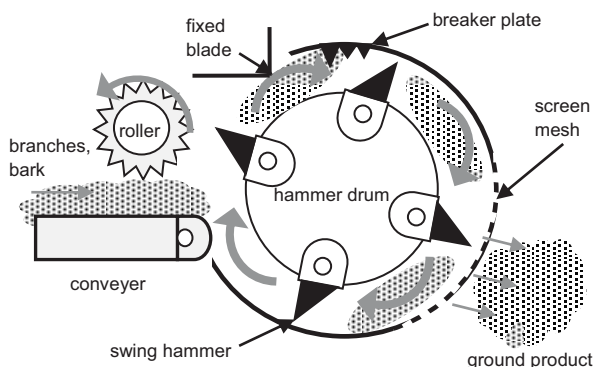


Fig. 5 Structure of high-speed mobile shredder

これら2つの燃料化機械を使って細かく砕かれた木質燃料は、水分などの状況に応じた配合比率で混合し発電用燃料として使用される。現在、宿毛バイオマス発電所では総燃料消費量のおよそ半分程度をこれらの機械を使って自社で加工している。混合された燃料はホイールローダーで燃料ピットに投入されたのち燃料供給設備により自動でボイラーに投入されていく。現在、燃料の加工・投入作業は7名の班員がシフト勤務で担当している。

4. 燃料について

4.1 燃料の価値

FIT対応の木質バイオマス発電所において実際に使用されている燃料は、国産材を原料とする木質チップ燃料から輸入木材チップ、輸入木質ペレットやアブラヤシの核であるPKS (Palm Kernel Shell) のような非木質系まで多種多様である。国産材においても丸太をチップ

機でチップ加工したものから、枝条をシュレッダーで破碎処理したものや樹皮を粉碎したもので幅広い。これら多種多様な燃料において品質として最も重要なファクターはカロリー (熱量) である。木はその体内において水分を保有しており燃焼時に活用できる熱量はその水分の量によって決まる。一般的にスギやヒノキのような針葉樹の生木はその重量の50%~60数%程度が水で構成されている。特にスギは水分が多く、製材チップのような辺材部を原料としたものでは時期によっては70%近い水分率となることもあり、この場合に得られる熱量 (低位発熱量) は1,000kcal/kg未満となる。一方でペレットのように水分率が10%程度まで乾燥処理が施された木質燃料では4,000kcal/kg程度の熱量 (低位発熱量) が得られることから、同じ重量であっても熱量の観点から燃料としての価値は4倍以上の開きがあることがわかる。このようにFIT発電所では使用する燃料の水分率管理が極めて重要であり、このことについて燃料供給事業者との間で十分な認識共有をしたうえで事業推進を図ることが事業運営上非常に重要であることは、木質バイオマス専焼発電事業者にとって共通認識であると思われる。

一方、FIT木質バイオマス発電所において使用する燃料条件としてもうひとつ重要な要素は発電した電力買取価格の区分にある。FIT発電所の発電電力の買取区分は発電の為に使用した原料の由来によって決まることになっており、すべてのFIT発電用燃料には発電利用に供する木質バイオマスの証明のためのガイドライン (林野庁、平成24年6月) (以下、ガイドラインという) に沿って使用する燃料の由来証明書が添付される必要がある。例えば間伐材由来の木質バイオマス (以下、未利用木材という) 証明書が添付されている場合、その原料によりつくられた電力は1kWh当り32円 (税抜き)、(発電規模が2,000kW未満の場合は1kWh当り40円 (税抜き)) で買い取られる。一方、製材所で発生する端材であることが証明された原料によりつくられた電力は一般木質バイオマス (以下、一般木材という) として1kWh当り24円 (税抜き) で買い取られる。いずれのケースでも発生源からの出所の証明書が添付されていることが必須であり、例え未利用木材であっても証明書が添付されていなければ建設廃材と同等の1kWh当り13円 (税抜き) での買取りとなってしまう (図6)。宿毛バイオマス発電所では未利用木材と一般木材を使用しており、今後、未利用木材の比率を上げることが経営上の課題となっている。

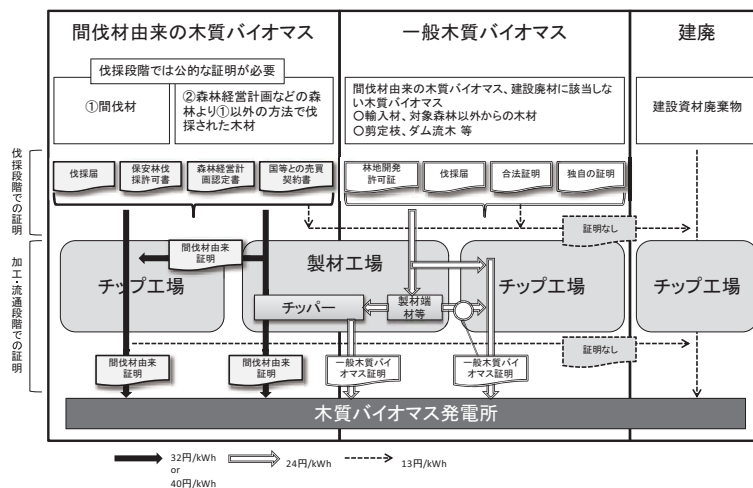


Fig. 6 Electricity price and derivation of fuel in F.I.T.

4.2 燃料調達

全項で述べたとおり宿毛バイオマス発電所では輸入燃料や建設廃材は使用しておらず、未利用木材と一般木材の2種類を使用している。これらの燃料木材の調達については大小様々な燃料供給事業者（あるいは個人）と宿毛バイオマス発電所が直接取引する形態を採用している。年間9万トン程度の燃料を大口のチップ事業者や製材所などから安定的に確保する一方で、地域に存在する小規模な林家や製材所、あるいは個人による直接持ち込み（図7）などとも受け入れることで、普段自分たちが使用している電力の一部が自分たちの持ち込まれた木質資源によって生み出されていることを実感してもらう狙いもある。



Fig. 7 carry in by mini-truck

燃料用木材の買取価格は未利用木材・一般木材区分別、丸太、枝葉等部位別で設定しており、個人により持ち込まれた材の買取りに対しては当日現金払いでの購入を行っている。個人で自らの山を間伐するいわゆる“自伐林家”の方による持ち込みや、自らの家の庭木などを剪定した際に発生した木材を持ち込まれる方、あるいは土木工事の際に発生した支障木を持ち込まれる事業者の方など開業当初はごく少数であったが、地元行政の協力に

よる周知活動や口コミなどにより現在ではコンスタントに月当たり150台（重量150トン）を超える車で持ち込みが生まれるようになった（図8）。

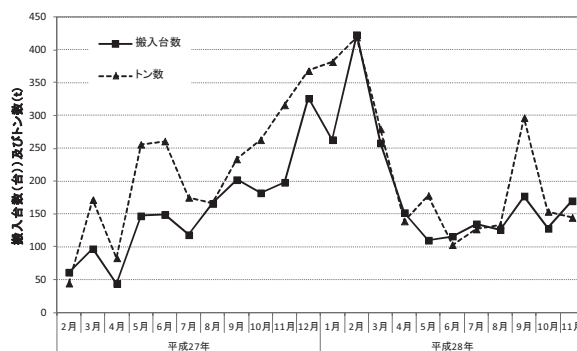


Fig. 8 Number of supply by locals

4.3 木質バイオマス燃料の代行証明制度

宿毛バイオマス発電所が地元の小規模な事業者や個人からの燃料調達を進めるにおいて障害となった事項のひとつに木材の由来証明制度があった。

木質バイオマス証明のガイドラインは、森林から搬出される木質燃料は森林組合や素材生産業組合等に加盟している事業者によるものである前提として策定されており、証明書交付時には自主行動規範を策定し事業者認定番号を交付できる団体によって割り振られた事業認定番号を書き入れることとなっている。しかし自伐林家や零細な個人経営の林業事業者などでは登録料や年会費などの問題により素材生産業組合などに加盟していないことが多く、こういった事業者あるいは個人が証明書を発行することができないことが開業してはじめて分かった。そこで、宿毛バイオマス発電所の立地する幡多地域の6市町村（宿毛市、四万十市、土佐清水市、黒潮町、大月町、三原村）と隣接する愛媛県南宇和郡愛南町の7つの市町村では、それぞれの自治体の山林において適正な手続きを経て搬出される燃料用木材については、各市町村

の担当課が木質バイオマス燃料の代行証明書を発行窓口を設け、個人などによる山林からの燃料持ち込みを支援していただけることとなった。前述の個人等による持ち込み台数がコンスタントに月150トンを超えるようになったのはこういった地元行政の支援によるところも大きい。

5. 燃焼灰について

宿毛バイオマス発電所で使用している燃料は、山林から伐採された樹木の幹部および枝条や背板、樹皮、木端、チップなどの製材端材、そして屋敷林の剪定枝や土木工事の際に出る支障木などであり、建設廃材等は一切使用していない。

株式会社グリーン・エネルギー研究所では、燃焼時に発生する燃焼灰も資源再循環のサイクルに入れるため運転開始当初より燃焼灰の成分分析を継続してきた。その結果、平成27年8月に高知県より草木灰肥料「フォレストアッシュ」(図9)としての受理番号(高知県 第特375号)を取得するに至った。



Fig. 9 Forest ash

フォレストアッシュはクリーンな木材のみを燃焼させた際に生じる草木灰であり、安全性については特殊肥料でありながら普通肥料である汚泥肥料の公定規格もクリアしている。成分としては、カリウム、ケイ酸、カルシウム、マグネシウム(苦土)、鉄分等のミネラル分が含まれており、水稲栽培などでの効果が期待される。また、加湿等の処理により顆粒状となっているため散布時にはほこりが立ちにくく取り扱いが容易である。

これまでのところ、地元のブロッコリー農家や水稲栽培農家等での施肥実績があり、ブロッコリー栽培農家からは「無施用区画と比べ収穫初期の収量が多かった」、水稲農家からも「初期の生育が早く、株数が多いように思われた」という評価を頂いている。また、2015年に高知県幡多郡大月町で開催された大月町花街道では、観賞用のコスモス畑にpH調整材としてフォレストアッシュを施用して頂き地元の観光業に貢献させていただくことも

できた。今後は農業分野だけでなく、漁業や観光業とも連携し一次産業の活性化を図っていきたいと考えている。

6. 教育・広報活動

株式会社グリーン・エネルギー研究所は、宿毛市内に木質バイオマス発電所を立地するにあたって雇用創出効果とともに環境教育の場として地元貢献を果たしていきたいと考えている。地域の将来を担う子供たちが自分たちに、日常使っている電気がどのような原理でつくられるのか、木質バイオマスを原料に発電を行うためにどのような作業が必要なのか、などを実際に現場で体験していただくことで環境、経済とエネルギーについて考えるきっかけづくりとなることを望んでいる。

これまで地元小中学校から環境教育の一環として工場見学(図10)に来ていただくことも多く、またカリキュラムの都合上、工場に來られない場合は教室に出前授業をさせていただく機会も頂いている。また、地元地域の方々を対象とした見学会を定期的に開催することで、事業内容や環境への影響などについて深く理解をしていただくことができた。



Fig. 10 Biomass plant tour by a local primary school

昨年11月、12月には高知県内の環境活動支援センター企画による見学会を開催し、その様子が地元新聞で紹介されたことにより更に広く当社の活動について知っていただくことができた。また宿毛市は早稲田大学の前身である東京専門学校を設立した小野梓の出身地であり、早稲田大学留学生のフィールドトリップ地としての受入や、高知工科大学主催の国際交流プログラムの受入(図11)なども積極的に実施している。

プラントの運転開始当初は、冷却塔の蒸気を見た近隣住民の方から、「煙が出ているが大丈夫か」とよく言われたことを思い出すが、継続的な広報活動により最近では応援のメッセージを頂くことが多くなったように思う。



Fig. 11 Visitors from Kochi University of Technology international exchange program

7. 課題と今後の展望について

運転開始より約2年が経過したが、オペレーションの観点から様々な問題に直面してきた。これまで述べたとおり、宿毛バイオマス発電所では枝条や樹皮を破碎した燃料を最大で50%程度チップ燃料に混合した燃料を使用しており、今後も積極的に活用することとしている。

樹皮は繊維質であることからチップに比べ嵩比重が低いことが多い。また繊維質同士が絡まり固まりとなって崩れにくくなる現象がみられることもある。通常、燃料ピット内に一定量貯留させた燃料は燃料ピット床に設置されたレーキフィーダーにより燃料排出スクリーンに向けて流れていくのであるが、繊維質の絡まりにより崩れにくくなった時は燃料の流量低警報が連続して発生することがある。最悪のケースではチップフィーダーレベル低によりボイラ停止に至る可能性があることから、この状態が続くことは望ましくない。また、破碎された枝条や樹皮は外的な水分の影響を受けやすく水分状態の変動幅が大きい。そのため投入される燃料の水分や嵩比重の状態は刻々と変化することからその状態に合ったエアアの調整が求められる。これらの問題をクリアするためには燃料の状態を把握することが重要であると思われる。

燃料の状態について投入作業員と発電オペレーターの間で情報を共有し、最適な調整を行って高い発電量を維持していくことが今後の課題のひとつである。

また、枝条や樹皮利用の問題として、異物混入が多いことがあげられる。枝条の場合、山で積み上げられた枝葉を運搬車に積み込む際にどうしても石を巻き込んでしまう。大きな石であれば破碎機に投入する際に重機作業員が取り除くことができるが拳大程度の石はそのまま破碎機に投入される。碎かれた石や砂は燃料供給設備の摩耗度合いを促進し、設備の修繕・交換費用増につながる。また、破碎機に投入された枝葉の多くは破碎機のスクリーンメッシュ小の大きさに碎かれるが、なかにはスクリーンメッシュに垂直方向に抜けでるものがある。この長物が供給設備内に詰まり運転を阻害することがある。これらの問題に対しては長物等の選別装置を設置するなどして対応を図ることが今後の課題となっている。

枝葉や樹皮はこれまで用途が無かったことから山に捨てられるか産業廃棄物として処理されてきた。FITのバイオマス発電は本来こういった潜在的に存在している「未利用」の木質バイオマス資源を最大限有効に活用することが目的であるはずである。売電電力は賦課金として国民負担で賄われており、異物や長物、繊維質といった解決すべき問題は多いがそれを乗り越える努力を怠らないことが事業者に求められるべきである。これまでの運転によって水分管理や設備とのマッチングが合えば枝条や樹皮といった原料も有効に使用することのできる燃料であることがわかっている。株式会社グリーン・エネルギー研究所宿毛バイオマス発電所では今後も枝条・樹皮利用を続け、地域に根付いた企業となることを目指している。

参考文献

- (1) 高知県木質バイオマスエネルギー利用促進協議会、平成27年度高知県木質バイオマスエネルギー利用促進協議会第3回運営委員会資料、(2016)、pp. 6-7.

特集：バイオマス発電

やまがたグリーンパワー木質バイオマスガス化発電所の施設紹介

Introduction of Yamagata Green Power Woody Biomass Gasification Type Power Plant



鈴木 崇之^{*1}
SUZUKI Takayuki

キーワード：バイオマス発電，木質原料，ガス化，ガス精製，ガスエンジン

Biomass Power Generation, Woody Feedstock, Gasification, Gas Cleaning, Gas Engine

1. はじめに

地球規模での異常気象が普通のように報道される昨今、温室効果ガスであるCO₂削減は人類の将来にとって喫緊の課題となっている。2011年3月11日の東日本大震災以降、これまで細々と行われていた自然エネルギーを利用した発電が注目され、2012年7月1日に再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT; Feed in Tariff）が施行されると、全国で次々に各種自然エネルギーを利用する発電所が設置された。

その中でバイオマス発電は、太陽光発電や風力発電などの発電方法とは異なり、昼夜季節を問わず安定した電源として見込めることや、運転のための人員や燃料の調達が必要ではあるが、それが地元で新規雇用を生み、林業再生や地域経済へ良い影響を与えることが期待できると、徐々に設置数が増加している。

やまがたグリーンパワー株式会社では、約10年前から、木質バイオマス発電の中でも珍しい技術である「ガス化」と呼ばれる方法で、地域由来の木質バイオマスである間伐材や果樹剪定枝を利用して発電を行ってきた。本報では、ガス化技術に基づいた当社のバイオマス発電所の概要について紹介する。

2. バイオマス発電所の概要

2.1 発電所概要

やまがたグリーンパワー木質バイオマス発電所の施設概要を表1に、その外観を図1に示す。また、使用燃料である木チップを図2に示す。

燃料となる木チップは、当発電所から約6km離れた所にある当社関連会社のやまがたグリーンリサイクル株式会社にて生産し、当発電所までダンパー車で運搬している。他に地元チップ生産者や製材所からも購入しているが、ごく少量である。

Table 1 Outline of biomass power plant

施設名称	やまがたグリーンパワー 木質バイオマス発電施設
所在地	山形県村山市富並大沢4083-1
発電方式	ガス化炉+ガスエンジン発電
発電出力	2,000kW
燃料の種類	生木を原料とした木チップ (切削チップ、破砕チップの混合) 含水率：45～60%（湿量基準）
燃料使用量	60トン/日、年間約2万トン
バイオマス比率	100%
運転開始	2007年1月
敷地面積	6,200m ²
計画運転時間	1日24時間 年間320日
従業員数	10名



Fig. 1 External appearance of biomass power plant

木チップには切削チップと破砕チップの2種類があり、切削チップは県産材の低質材、製材不適合木及び間伐材などから、破砕チップは生木の廃棄物である剪定枝、抜根及び支障木などから生産している。木チップの原料について図3と図4に示す。果樹剪定枝については、地元自治体の協力を得て、発生源である農家の負担を抑える形で収集している。

当発電所では、一般的な木質バイオマスボイラで使用

原稿受付 2017年1月17日

*1 やまがたグリーンパワー(株)

〒995-0208 村山市大字富並字大沢4083-1



Fig. 2 Appearance of wood chips
(Left: Chipped one, Right: Crushed one)



Fig. 3 Wood chip feedstock (Timbers from forest thinning)



Fig. 4 Wood chip feedstock (Pruned branches of fruit trees)

するようなペレット、建築廃材や解体材を原料とする木チップは使用していない。現在は切削チップを8～9割、残りを破碎チップで運転している。

2.2 発電所特徴

当発電所は、デンマークにおいて熱電併給施設として商用実績のあるバブコック&ウィルコックスフェルント社 (Babcock & Wilcox Vølund ApS 以下、フェルント社) からの導入技術を基盤に、日本のプラントメーカーであるJFEエンジニアリング株式会社によって構築されたもので、特徴としては次の3つが挙げられる。

- (1)木チップを熱化学変換して可燃性のガスを作り、そのガスを燃料としてガスエンジン発電を行うこと。
- (2)高含水率の木質バイオマスを燃料として使用できること。
- (3)大量に発生するタールを処理する仕組みを導入し、タールの有効利用を可能とするとともに、ガスエンジンの運転に支障のないシステムを構築したこと。

ここで、(1)は「ガス化」と呼ばれる技術であり、木質バイオマスが持つエネルギーをより高効率で電気へ変えやすいとされている。これは発電効率と呼ばれ、一般に小規模な木質バイオマスボイラと蒸気タービンによる発電効率が10～15%程度であるのに対して（これは約10年前の数値であり、現在はずっと高い効率になっているものもある）、当社のガス化技術では約29%と計算されている。

発電効率が高いということは、使用する燃料が少なく済むということである。つまり木質バイオマス原料の収集範囲が狭くて済むし、狭い範囲の集材でも発電が継続して行えるというメリットを有している。

また、(2)は木チップから可燃性のガスを作り出す際に、当社のガス化炉ではある一定の水分（45～60%）を含む生木が適しているため、乾燥工程が必要なく、その分の時間とコストを省くことができる。このことは、これまで水分が多いために発電燃料には適さないと考え、「誰も使っていない燃料」である林地残材などの林業系木質バイオマスや、生木系廃棄物を燃料として使用できることを意味する。現在は10年前とは異なり、FIT法の施行により林業系木質バイオマスの需要は非常に多くなっているが、木チップの乾燥やコストに係わる問題解決には大きな進展が見られないため、(2)の特徴は当発電所の大きな強みとなっている。

更に、(3)はガス化技術において厄介物とされている可燃ガス中のタールを、プラント内で発生する余熱を利用して処理を行うものであり、詳しくは後述する。

なお、ガス化技術には複数の方法があり、全てのガス化発電がこれらの特徴を持つわけではない。使用可能な木チップの含水率や形状、タールの発生量などはガス化方法により様々であり、特に木質バイオマスの含水率については、一般的なボイラ以上に厳しい含水率制限を持つガス化炉の方が多い。「ガス化」＝「生木使用可能」とは限らないため留意が必要である。

2.3 設備フロー

当発電所の設備フローを図5に示す。主要な機器としては以下がある。

- (1)燃料受入供給設備（図示していない）
- (2)ガス化炉
- (3)精製設備
- (4)ガスエンジン発電機
- (5)タール処理装置

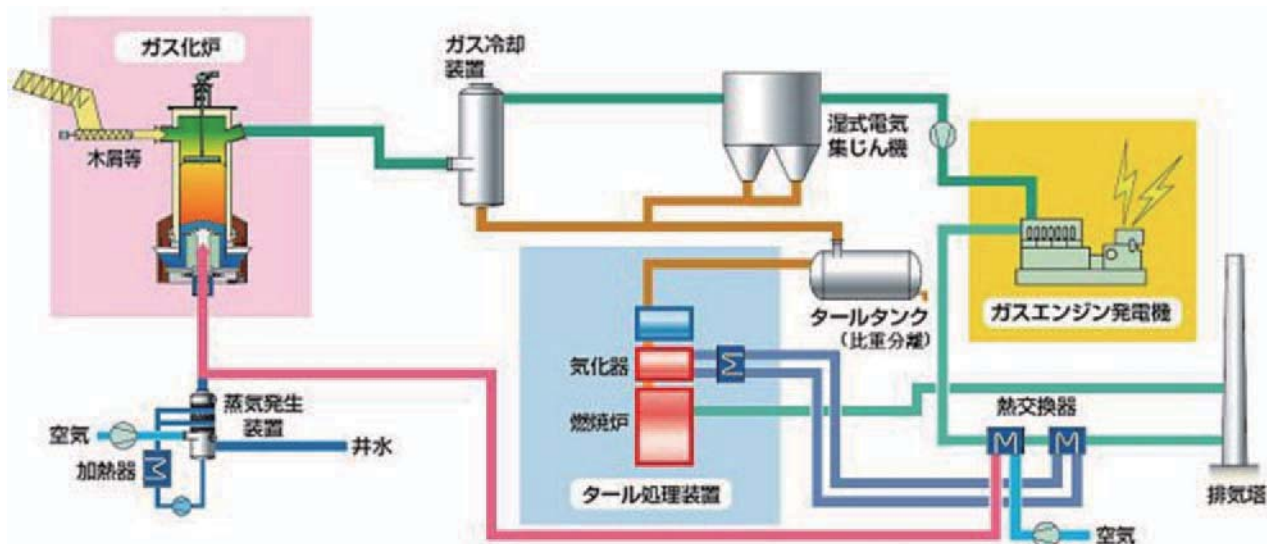


Fig. 5 Schematic flow diagram of biomass power plant facilities

2.4 燃料受入供給設備

木チップの形状を均一化し、微細な粉分を除去するため、木チップはふるいに掛けた後に当発電所へ搬入される。当発電所のガス化炉に適した木チップの大きさは10～100mm四方で厚さ10mm程度とされているが、当発電所で実際に使用している木チップは5～50mm四方で厚さ5mm程度と小振りである。これは当発電所建設時の10年前、大きい木チップを加工できるチップパーが海外製のものしかなく、入手が困難かつ国内での稼働実績が無かったことから、本来は製紙原料用の木チップを加工するチップパーを導入し、工夫して生産しているためである。この大きさの木チップであっても運転は問題なく継続できている。

当発電所へダンプカーで搬入された木チップは、発電所内の受入ピットにて受け入れる。受け入れの様子を図6に示す。この受入ピットは約50トンの容量がある。受け入れた木チップは、コンクリート壁で仕切られた貯留スペースにクレーンが自動運転で積み替えを行う。クレーンを図7に示す。貯留スペースは約100トンの容量があるが、受入ピットと貯留スペースを合計しても約2

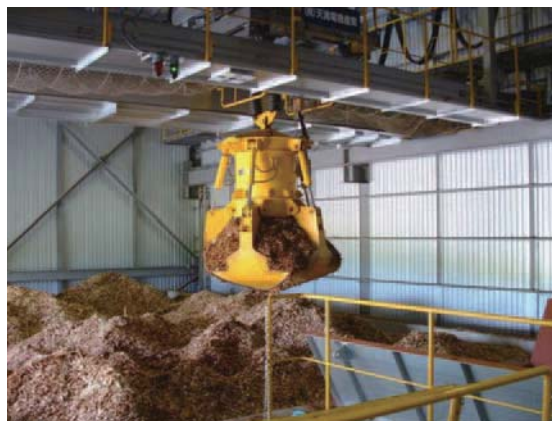


Fig. 7 Crane feeding wood chips

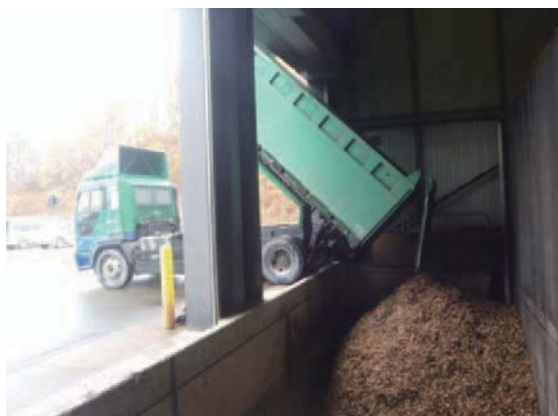


Fig. 6 Dumping of wood chips

日分の容量しか無いため、木チップはほぼ毎日搬入される。

貯留スペースからガス化炉への木チップ供給も自動運転で行われる。ガス化炉からの燃料供給指示信号がクレーンへ送られると、クレーンは木チップを投入ホッパコンベヤへ投入する。投入ホッパコンベヤに投入された木チップは、燃料コンベヤにてガス化炉へ搬送される。

投入ホッパコンベヤからガス化炉までは、ガス化炉内への空気（酸素）の流入を避けるために、ダンパ等をつけ、高い密閉性を保つようにしている。

この燃料コンベヤには水噴霧装置を設置している。これは含水率が低い木チップが搬入された際に水分を添加できるようにするためであり、水噴霧を行う判断基準とするため木チップの含水率は1日8回、3時間ごとに測定している。過去に含水率が非常に低い木チップが搬入された際は、受入ピットに水を張り、水に浸した後に積み替えを行ったこともあった。木チップを乾燥させる設備は当発電所には無く、一般的なボイラ発電とは相当異なった水分管理を行っている。

2.5 ガス化炉

ガス化炉は、使用燃料である木チップからガスエンジンの燃料となる可燃性ガスを作り出す炉で、固定床型、流動床型、噴流床型、キルン型などが実用化されている。当社では、フェルント社とJFEエンジニアリング株式会社の技術を用いた固定床アップドラフト型ガス化反応炉を採用している。この炉の概略図を図8に示す。

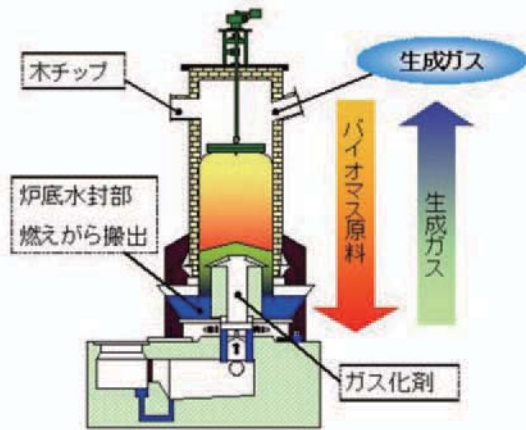


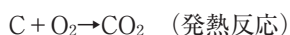
Fig. 8 Gasification furnace

炉上部よりコンベヤで投入した木チップは、炉内に均一になるよう炉内で回転する羽根を使い積層させる。投入量は定格で60トン/日である。ガス化剤は炉下部より上昇流で供給する。ガス化剤とは、木チップ（固体）を可燃性ガス（気体）に熱化学変換させるために必要なガスのことで、空気、空気+水蒸気、水蒸気のみなどが使われるが、当社では井水で加湿した高温の空気をガス化剤として用いている。

木チップは、層内を下部から上部に流れる高温のガスによって徐々に温度を上げながら下部へと移動していき、ガス化剤によってガス化反応した後に灰となる。灰は炉下部に設けられた水封部から排出する。一方、発生した可燃性ガスは木チップとは逆の流れで上昇していき、炉上部より取り出す。

炉内では、木チップのガス化反応に伴って、下部から上部へ向かって灰層、チャー層、揮発・熱分解層、生材層の各層を形成している。ここで、チャーとは木チップが揮発・熱分解を行った後にできる黒い炭（固定炭素分）のことである。チャー層下部では、ガス化剤として供給されている空気中の酸素によって燃焼反応が起こり、1,000℃前後の燃焼ガスが発生する。

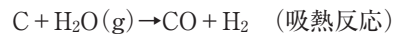
○燃焼（酸化）反応：



また、チャー層上部では、チャー層下部の燃焼反応の発熱によりチャーが高温になり、水蒸気と反応する水性ガス反応やCO₂と反応する発生炉ガス反応などの吸熱反

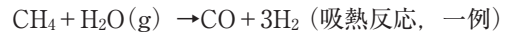
応が進行する。これらの反応により燃料として有用な気体であるCOとH₂が発生する。

○チャーのガス化反応：



更に、チャー層上部の気相部では、水蒸気がCOと反応してH₂を発生するシフト反応や、水蒸気が気相のタールや炭化水素ガスと反応してCOとH₂を発生する水蒸気改質反応が行われる。

○気相での改質反応：



チャー層上部でCOとH₂を発生させた後、800℃程度まで若干温度が下がったガスは、揮発・熱分解層へと上昇する。揮発・熱分解層では、ガスの持つ熱により木材の揮発分（H₂, CO, CO₂, H₂O, C_xH_y, C_xH_yOH, C_xH_yCOOHなど）が気化し、上昇しているガスと混合する。なお、このときに気化した揮発分の一部が高分子量の炭化水素である「タール」となる。このタールは、ガス化炉の後段に設けられたガス精製設備で冷却されて、黄土色～黒い油状の液体になる。

この後、ガスは生材層へと更に上昇する。生材層においてガスは原料中の水分と熱交換しながら上昇を続け、やがて80℃程度となって、生成ガスとして炉上部より炉外へ取り出される。

この取り出された生成ガスは、他の形式のガス化炉（固定床ダウンドラフト式など）と比較し、タールを多量に含む。

木チップは、チャー層下部で燃焼した後、灰となり、炉底部の水封部分である水槽に排出する。ここに溜まった灰は、水槽に挿入されているコンベヤにて排出され、灰ピットまで搬送される。

2.6 ガス精製設備

ガス化炉から取り出された80℃程度の生成ガスは、燃料となる気体のほかに多量のタールも含んでいるため、当発電所では2つの装置を使用して生成ガス中からタールを除去している。

まず、ガス化炉から取り出された生成ガスは、生成ガス冷却器により約40℃まで冷却する。このとき、水蒸気の凝縮により多量の水が発生するため、タールは冷却器内に付着することなく水と共に洗い流される。この段階でタールの粗除去が行われる。生成ガス冷却器の外観を図9に示す。

次に、この生成ガスを生成ガス冷却器から湿式電気集塵器へ送り、残留するタール分を更に除去する。その後、生成ガスはガスエンジンへ送られる。これらの除去により、ガスエンジン入口における生成ガス中のタール濃度は、ゼロではないもののガスエンジンの安定運転に支障のないレベルまで低減される。ガスエンジンへ供給される直前の生成ガス組成の一例を表2に示す。なお、生成



Fig. 9 Gas cleaning equipment



Fig. 10 Gas engine and generator

ガスの組成は常時測定監視している訳ではなく、通常は生成ガス中の酸素濃度のみを常時測定し監視している。

この測定時は、計画値よりCO₂がやや高く、H₂、CO、CH₄が若干低かった。これは、測定当時投入していた木チップの含水率が約45%と、当発電所からすればやや乾燥気味であり、ガス化反応よりも燃焼反応が多くなっていったことが原因と考えられる。この測定時の生成ガス発熱量は6.9MJ/m³N (1,650kcal/m³N) であり、天然ガスと比較するとかなりの低カロリーガスである。

Table 2 Gas composition of producer gas

気体名	計画値	実測値
H ₂	20%	約17%
CO	30%	約26%
CH ₄	4 %	約 2 %
N ₂	40%未満	約42%
CO ₂	6 %未満	約11%
O ₂	1 %未満	0 %
他	数%	約 2 %

2.7 ガスエンジン発電機と送電

ガス化発電は、ガス化炉とガスエンジンとを組み合わせることによって、高効率発電を行うことができる。このガスエンジン発電機の外観を図10に示す。

当発電所では、デンマークのハーボーレにある商用ガス化熱電併給プラントで長期安定稼働の実績があるGE イェンバッハ社製のガスエンジンを設置している。このガスエンジンは都市ガス用に製作されたものを特殊ガス用に調整したもので、木チップから生成した低カロリーかつ微量のタールを含むガスであっても、安定稼働が可能なものとなっている。

当発電所の発電機は、電力会社の系統に流れている電気と同じ6,600V、50Hzの電気を発電している。そのため、発電した電気をそのまま当発電所内の最寄りの電柱から数十メートル先の電力会社の系統へ繋ぎ込むことができ、大掛かりな変電・送電施設は必要ない。当発電所の送電設備を図11に示す。



Fig. 11 Electric power transmission equipment

当発電所は、2013年3月に固定価格買取制度の発電設備認定を受けており、発電した電気は、所内消費電力を差し引いて小売電気事業者へ売電している。

2.8 タール処理装置

当発電所のガス精製設備からは使用燃料60トン/日に対して、日量約30トンものタール水が発生する。これまでは、この大量のタール水の発生が固定床アップドラフト式ガス化炉の欠点と言われてきた。しかし、当社ではこのタール水を処理・有効利用するためにタール処理設備を設置し、この欠点を軽減している。この設備はガス化炉と同様にフェルント社から導入した技術である。タール処理のフローを図12に示す。

まず、ガス精製設備から回収したタール水を、発電所屋外にあるタールタンクに送る。このタールタンク内部では、タール水は比重差により、タール分が濃く黒色の液体（重質タール）と、タール分が薄く黄土色の液体（軽質タール）に分離する。

重質タールはタールタンク内に溜めておき、一定量が溜まるごとにタンクローリ等で外部へ出荷する。出荷先

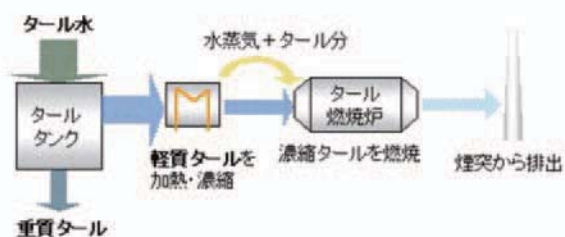


Fig. 12 Tar treatment flow

では重油の代替燃料として利用している。この重質タールは木質バイオマスを由来としていることから、カーボンニュートラルな燃料として取り扱うことが可能である。1日で発生するタール水約30トンのうち、回収できる重質タールは約1～2トン程度である。

軽質タールは発電所内に戻し、場内で発生する余熱を回収して温水を作り、これで軽質タールを加熱して水分を蒸発させ濃縮する。タール処理装置の外観を図13に示す。



Fig. 13 Tar treatment equipment

濃縮した軽質タールは発電所内にあるボイラの燃料として使用し、このボイラから温水として回収した熱を、軽質タールを濃縮する熱として再利用する。当然、このサイクルだけでは熱が不足するが、ガスエンジンの排ガスから熱を回収することにより不足分を補っている。

濃縮の際に発生した水蒸気は、微量ではあるが揮発したタール分を含むため、ボイラ内に吹き込みタール分を完全に燃焼させた後、ボイラ排ガスと一緒に煙突から排出している。

一方、この軽質タールは木酢液という名称でホームセンターなどで販売されている液体と同じ成分であるため、発電所近隣の農家が土壌改良剤や虫除け剤として引き取りに来ることがある。引き取りの量は数リットル～数百リットルと発生量からすれば非常に少量であるため、申し込みがあれば無料で提供している。

3. おわりに

ここまで当発電所の概要を紹介してきたが、運転開始当初から当発電所が上手く稼働していた訳ではない。当時から木質バイオマス「ガス化」発電はタールの問題などにより商業用プラントとして適切ではないとされていた。当社ではボイラを用いた通常の燃焼方式も検討したが、入手可能な木質バイオマス燃料は誰もが不要とする生木のみであったことから、高含水率の木質バイオマスに対応可能な固定床アップドラフト型ガス化反応炉方式を選び発電所を建設、運転を開始した。初期の数年は、やはりタールの問題や予期せぬトラブルで大変苦労したが、運転を継続する中でのノウハウの蓄積により徐々に問題は解決されていき、10年経った現在では、他所へ同様のシステムを用いた発電所建設を検討できるまでに運転は安定してきている。この10年という期間は長いようであるが、固定価格買取制度による電力買取期間からすればようやく折り返し地点である。当社では今後も地域の木質バイオマスの受け皿となるべく、運転を継続していきたい。

特集：バイオマス発電

循環流動層CFB技術による発電設備へのバイオマス燃料利用と実績

Biomass Fuels Utilization for Power Generation
by Circulating Fluidized Bed Technology藤井 大也^{*1}
FUJII Hirotada伊藤 一芳^{*1}
ITO Kazuyoshi

キーワード：バイオマス，発電，循環流動層

Biomass, Power Generation, Circulating Fluidized Bed

1. 緒言

2000年以降に環境問題が注目され、とりわけ地球温暖化への対応が世界的に求められる傾向は、更に強い要求となっている。

住友重機械工業株式会社は、循環流動層（以下、CFB）燃焼技術を用い、バイオマス燃料や廃タイヤ、廃プラスチック等の廃棄物燃料を石炭の代替燃料とした発電設備の提供を、現在の再生可能エネルギー固定価格買取制度（以下、FIT）の前身となる新エネルギー等利用に関する特別措置法（RPS法 2002年制定）より開始し、RPS法下の初号機は既に13年間の安定稼働を継続している。

バイオマス燃料等の利用には、限られた量の資源で目的の設備容量を実現するために、多種燃料の混焼技術の開発が必要であった。また、それらの燃料は、化石燃料⁽¹⁾と比較し安定調達の困難さだけでなく、性状の不安定さ、腐食性成分や異物混入など、様々な課題があった。

更に、現FIT制度では、新電力事業に対して国内バイオマスだけでは燃料が足りず、海外バイオマスの利用や、大型化、高効率化が進められている。

2016年12月現在、国内外を含めた当社納入のバイオマス等を利用したCFBボイラは39缶が稼働中であり、石炭換算でのCO₂削減量は年間420万ton超、FIT制度下での未利用木質燃料の使用量は年間130万ton超と推定される。

本稿では、CFB燃焼技術を利用する燃料特性に着眼し、一部、実設備の事例を含め、実績を報告する。

2. CFB技術の概要

2.1 CFB燃焼技術

流動（層）燃焼とは、火炉と呼ばれる燃焼室内に燃料から発生する燃料灰や外部から供給される砂、石灰石などで作られる流動媒体を持ち、その大きな熱容量を利用し、不定形の燃料や低発熱量（高水分など）の燃料を安定燃焼できる燃焼技術である。流動流速が遅く、火炉底部でのみ流動する装置をバブリング流動床ボイラと呼ぶ。低流速のため、設備の大型には不向き。設備の大型化を可能とするため、速い流動流速を用い、火炉を飛び出した流動媒体や未燃燃料をサイクロンセパレータにより回収し、再び、火炉へ戻し循環燃焼させる機構を持つ装置を循環流動層（CFB）ボイラと呼ぶ。

CFB燃焼技術の最大の利点は、循環媒体により火炉に大きな熱保有があるため、高水分燃料などの低い発熱量の燃料を有効に燃焼できることである。また、流動状態の火炉に燃料供給することから、多少の不定形の燃料や偏在があっても、攪拌・分散し安定燃焼できる。さらにセパレータにより循環流動させるため、燃えにくい燃料も、循環・長時間燃焼させることができ、高い燃焼効率での利用が可能である。

また、燃料利用は1種類とは限らず多数の燃料の同時利用（混焼）も可能であり、同一の設備で幅広い燃料利用⁽²⁾ができるエネルギーセキュリティに優れた燃焼技術⁽³⁾である。

代表的なバイオマス利用のCFBボイラの概念図を図1に示す。

2.2 環境特性

① 硫黄酸化物（SO_x）

流動層では、炉内に流動媒体を持つため、炉内に石灰石を投入することができ、火炉内での高効率炉内脱硫が可能である。そのため、外部に脱硫装置を設置する必要がない場合も多々ある。都市型の環境規制要求などは排ガス後段の脱硫装置の追設により対応可能である。

原稿受付 2017年1月20日

* 1 住友重機械工業(株) エネルギー環境事業部 ボイラ技術部
〒141-0031 品川区西五反田7-25-9

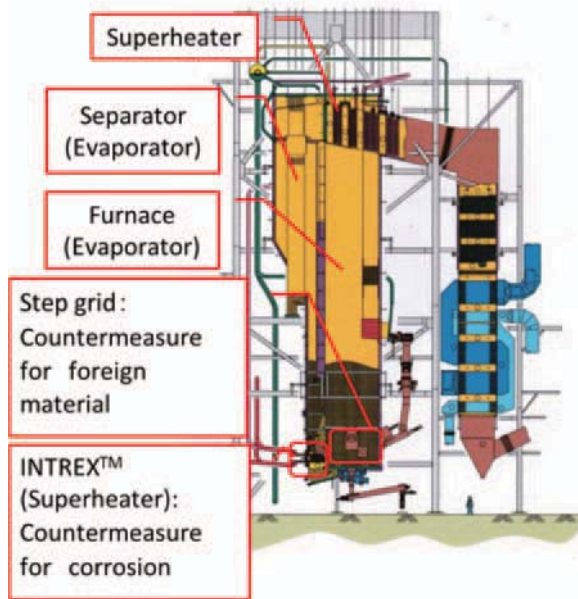


Fig. 1 Conceptual drawing of biomass boiler

② 窒素酸化物 (NO_x)

CFB燃焼技術の特徴である分散燃焼により、炉内全体での温度均一燃焼が実現可能であり、局所高温部が発生し難く、かつ、比較的低温燃焼 (900°C 前後) が可能であるため、サーマル NO_x の発生が低い特徴を持つ。更に、高速渦流のサイクロンセパレータにアンモニアや尿素を噴霧することにより、炉内での無触媒脱硝が可能である。CFB自体の NO_x 発生量が低いため、排ガス後段への触媒脱硝装置を持たない設備がほとんどである。都市型の環境規制要求などは排ガス後段に触媒脱硝装置を追設することで対応可能であり、この場合も炉内無触媒脱硝との組み合わせで、触媒量の低減を実現している。

③ 二酸化炭素 (CO_2)

Local Emission と呼ばれる SO_x 、 NO_x 、煤塵などと並び、世界的要求のGlobal Emissionとして CO_2 削減がある。バイオマス燃料はカーボンニュートラル燃料であり、概ね20-30%程度のバイオマス混焼により、超々臨界発電設備と同等以下の CO_2 発生量を実現可能であり、小規模火力設備への利用を推進している。CFBにおいては、石炭との混焼だけでなく、バイオマス専焼も可能である。

2.3 腐食摩耗対策

バイオマスや廃棄物燃料には、塩素やアルカリ金属類 (Na , K) を代表とする溶融塩腐食性物質が含有されている場合がある。そのため、ゴミ焼却炉に代表される通り、高温高压の蒸気温度の設定が困難であった。

一方で、それらの発電設備の高効率化には高温高压の蒸気条件を実現する必要があるが、腐食対策用の過熱器 (INTREXTM) を採用している。このINTREX過熱器は、高温の腐食性ガスとの接触防止により腐食低減対策を実現している。図1のようにセパレータ下部に設置し、捕集された循環材と接触して熱交換を行う構造となっており、循環材中に過熱器を設置することで腐食性ガスと隔

離している。それにより、対腐食性の強い過熱器を実現している。

また、腐食対策はINTREXのような設備対策だけでなく、実運用している客先による燃料品質の管理が重要であり、今日の安定稼働は、客先との共同での環境貢献への取り組みの成果でもある。

3. CFBで使用されるバイオマス燃料例

前項で、CFBは幅広い燃料特性を持つと紹介したが、CFBにて良く利用されている燃料について紹介する。

図2にFIT認定のバイオマス発電で良く使用されているバイオマス燃料を示す。



Fig. 2 Examples of biomass fuels

3.1 未利用材

現在のFIT用として使用されている代表例として、国内未利用材がある。間伐材のようにこれまで有効に利用されていなかったが、FITにより利用を促進されている森林系のバイオマス燃料である。伐採してから利用まで時間が短いことから高水分である。また、木の皮 (バーク)、枝葉が多いことでアルカリ金属が多く含まれることがあり、ボイラ腐食の懸念がある。また、生産地に近い事が重要となるため、5 MW程度の超小型のバイオマス燃焼設備の実績⁽⁴⁾⁽⁵⁾が多い。

また、比較的大型の設備計画の場合は、国内未利用材では調達量が足りず、後述のパームヤシ殻 (PKS) や木質チップ、ペレットなどを利用する計画が多いが、燃料価格の変動や長期契約の難しさなどが指摘されている。

3.2 建築廃材

建築廃材は、FITではリサイクル材に相当する。主に、2002年6月に公布されたRPS法によって利用が促進されはじめた。家屋の解体によってでた廃材や木材加工品等、人工加工された木材であり、釘や蝶番等の異物が多く、接着剤やプラスチックのような塩素を含むものも多く含

まれている。性状は、廃材を燃料化する過程での管理に大きく依存し、異物による流動障害や塩素による腐食懸念がある。燃料供給会社との協力による管理が重要となる。

尚、燃料に混在する異物の炉内への堆積防止のため、バイオマス利用ボイラでは、炉底を階段状にした構造を採用している。

3.3 PKS

PKSは、FITでは一般木材と同様の扱いとなる海外未利用バイオマスである。パーム椰子からパームオイルを生成する過程ででてくる残渣であり、主に東南アジアで生産されている。現在、日本への輸入は、マレーシアおよびインドネシア産が多い。産地によって多少の性状の違いは見られるが、輸入バイオマスの中では、低塩素、低アルカリで発熱量も安定しており、良質の建設廃材と同等の燃料として使いやすいものである。

世界的に、バイオマス燃料としての需要が高く生産量も増加しているが、品質は低下傾向であり、当社実績でも小砂利の含有や油分の付着量の増加などが見られている。また、欧州では臭気が問題視され始めている。

4. FITで使用されるバイオマス燃料の特徴

4.1 燃料性状の振れ

上述のようにバイオマス燃料は多種存在し、同種でも利用する時期や保管方法により水分値が大きく異なる特徴がある。発電設備の安定運転のため、伐採後一定期間、自然乾燥し利用することが望まれるところであるが、建築廃材は比較的低めの水分、間伐材は高水分の傾向が顕著に顕れている。バイオマス燃料の分析例を図3に示す。バイオマス燃料では、木の部位や種類に依らず、絶乾（水分0%）状態の熱量は概ね一定の発熱量（4,500kcal/kg程度）であり、水分の変動は直接的に発熱量の変動につながる。その結果、燃料供給量が一定でもボイラの運転に影響を及ぼし、更に水分による排ガスエネルギー損失の増加により熱効率低下などの影響もある。

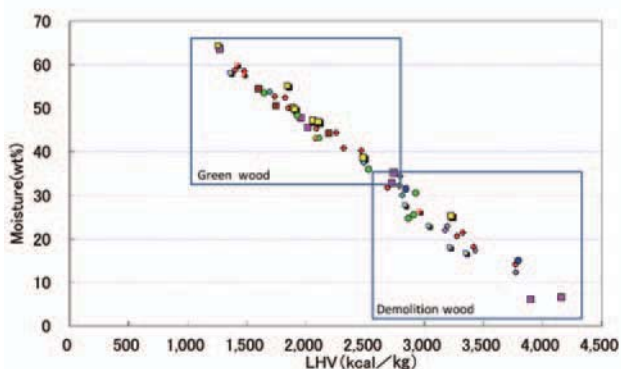


Fig. 3 Relations between biomass moisture content and its calorific heating value

4.2 腐食摩耗

流動層は、燃料から発生する燃料灰や外部から供給される砂、石灰石などを流動させているため、摩耗環境下にあるが、適正な流動流速での運転においては適正に管理できる。但し、腐食環境が強くなるにつれて、腐食摩耗⁽⁶⁾⁽⁷⁾のリスクが高くなる。燃料由来の腐食成分である塩素、アルカリ金属及び重金属類、並びに異物の持ち込みを適正に管理することも安定運転には重要な項目となる。

特にバイオマス燃料は、種類によっては塩素、アルカリ金属、異物等を多く含むことがあり、新規に燃料として選定する際には、燃料分析を実施して評価を行う必要がある。

5. 実績紹介

5.1 納入実績

当社が、これまでにバイオマス燃料を含む新エネ燃料を利用したボイラの納入実績を下記に示す。

○稼働台数 バイオマス等利用 39 台
(内 FIT対応 14 台)

○設備規模 5MW ～ 112.5MW

○バイオマス混焼率 最大 100%

○CO₂ 削減量（石炭換算） 約4,250,000 ton/year

○FIT未利用材利用 約1,300,000 ton/year

○建築廃材等利用 約1,300,000 ton/year

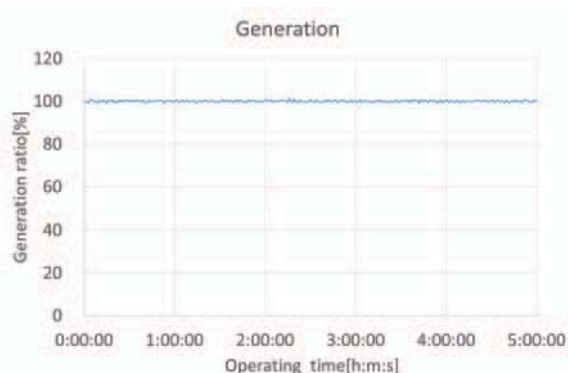
（注記）2016年度時点で、当社にて設計条件より推測
今後もFIT未利用材の利用は加速される。また、バイオマス有効利用では、CO₂削減、化石燃料節減に加えて森林未利用材の活用により、森林保護にも貢献している。

5.2 FITバイオマス利用の利点

FIT制度では、今さら言うまでもなく、太陽光発電、風力発電などの自然エネルギーを利用したものが多いが、それらは人為的な発電量制御ができない発電設備である。最大限のエネルギー利用の観点からは、得られたエネルギーの全量を利用することは重要ではあるが、需要に合わせた発電量調整ができないことは、不利な点として挙げられる。一方、CFB技術を利用した発電設備では、石炭火力同等の負荷制御性を持ち、制御電源として十分に対応が可能である。小規模火力設備が主流であるが、将来的なマイクログリッドとの組合せなどによる地域点在電源として利用できる。図4にタービン発電量制御での運転実績を示す。



(a) Trend of main steam pressure



(b) Trend of power generation

Fig. 4 Example of power control operation

6. 諸言

バイオマス発電は、現在、世界的なブームとなっているが、バイオマス資源量から火力発電設備への利用の今後の方向性は、大きく分けて2つが考えられる。1つは更なる高効率化の方向性と、もう1つは更なる使用燃料の拡大の方向性である。

前者は、耐腐食条件などをクリアし高い蒸気条件を実現化して行く方向であり、欧州で積極的に進められている。燃料管理や燃料調達 of 長期契約など契約社会として市場が成熟している点、それに伴うペレット燃料の早期

の規格化（高品質燃料）実現などの社会背景にも関連づけられそうである。これは、規格品の石炭を用い安定的な電力供給を実現している微粉炭焚き技術の方向性と合致している。また、後者は、燃料条件に比較的広い品質レンジを持たせ、市場で価格的に優位な燃料を都度採用、または組合せ利用し経済性を高める方式であり、アジア地区での小規模の石炭利用にも共通する方向性でもある。

高効率化は、当然の方向性として開発して行くとしても、特に、規格品外の安価な製品製造に長けたアジア市場では、石炭と同じように規格外であるが安価なバイオマス燃料製造が進むことが予想され、市場に合わせて最もユーザーが使い易い技術の提供が必要と考える。確立した混焼技術に、更なる高効率化、燃料種の拡大をバランスよく織り込み、これまで以上に社会に貢献できる設備の提供を目指す。

また、発電設備のエネルギー利用ではボイラ効率ほぼ上限まで達成している。今後は、タービン効率の向上に大きな期待を望む。

参考文献

- (1) 渡邊建聖, CFBボイラにおける低品位炭利用技術, 住友重機械技報, No. 188 (2015), pp. 1-4.
- (2) 渡邊建聖, 伊藤一芳, 中谷好宏, CFB燃焼技術を用いた再生可能燃料の混焼・有効利用について, 住友重機械技報, No. 177 (2011), pp. 9-12.
- (3) 山下智生, 柴田竜徳, CFBボイラ燃焼技術開発, 住友重機械技報, No. 177 (2011), pp. 5-8.
- (4) 藤井大也, 渡邊建聖, 中谷好宏, 小型CFBボイラ開発の完了, 住友重機械技報, No. 177 (2011), pp. 1-4.
- (5) 藤井大也, 小型CFBボイラのコンセプトと納入実績, 住友重機械技報, No. 188 (2015), pp. 5-8.
- (6) 柴田竜徳, CFBボイラにおけるファウリング評価, 住友重機械技報, No. 188 (2015), pp. 9-12.
- (7) 三津石大貴, 吉田和樹, 阿川隆一, 野際公宏, CFBボイラにおけるファウリング評価, 住友重機械技報, No. 188 (2015), pp. 13-16.

特集：バイオマス発電

CFBボイラと蒸気タービン発電について

Introduction of CFB Boiler and Steam Turbine Generator Technology

笹本 裕也^{*1}

SASAMOTO Yuya

キーワード：バイオマス発電，CFBボイラ，蒸気タービン，燃焼

Biomass power generation, Circulating fluidized bed boiler, Steam turbine, Combustion

1. 緒言

昨今、地球温暖化による自然環境への深刻な影響は、大きな問題となっている。地球温暖化の原因である二酸化炭素などの温室効果ガスを抑制することは、現代社会の課題の一つである。大量の化石燃料を用いて電力を発生させる発電産業においても、化石燃料に代わる燃料を使用し、二酸化炭素の排出を抑制することは重要である。

また、わが国に目を向けた場合、エネルギー自給率は、平成27年度エネルギー白書によるとわずか6%⁽¹⁾と、エネルギー資源のほとんどを海外から輸入しているのが現状である。それゆえ安定的にエネルギーを確保することもまた日本の発電産業には大きな課題である。

これらの課題の解決策として近年注目されているのが再生可能エネルギーである。再生可能エネルギーとは、自然界から持続的に利用することができるエネルギーであり、自然豊かな日本には豊富に存在している。このため、安定的なエネルギーの確保が期待できる。

この再生可能エネルギーを利用して発電を行った電力を、一定価格で電力会社が買い取る固定価格買取制度（FIT）が2012年よりスタートし、大きな注目を集めている。現在では、この制度により全国各地で再生可能エネルギー源とした発電設備（太陽光発電，風力発電，バイオマス発電など）の設置が急増している。今回は再生可能エネルギーを利用した発電設備の中のバイオマス発電に着目し、その主たる燃焼方法である循環流動層（CFB：Circulating Fluidized Bed）ボイラおよび蒸気タービン発電について紹介する。

2. CFBボイラの構成

図1に当社CFBボイラプラントの設備フロー図を示す。CFBボイラは燃焼室，サイクロン，セカンドパス

の3つの設備から構成されている。燃焼室は水冷壁で囲われた縦長の空間で、下部から燃焼空気と固体燃料が供給され、頂部の開口が次のサイクロンに繋がっている。以下に燃焼排ガス系と灰処理系のフローについて説明する。

(1)燃焼排ガス系

燃料はCFBボイラの燃焼室下部に投入され、炉底からの一次空気と燃焼室中段からの二次空気によって炉内を循環するように燃焼する。燃焼室で発生した燃焼ガスは燃焼室からサイクロンに流れ込む。サイクロンでは、燃焼ガス中に含まれる大粒の未燃物や灰を分離している。サイクロンで分離された未燃物等は再び炉内に戻り、燃焼に寄与する循環サイクルとなっている。このサイクロンを経由した固体粒子の循環が、循環流動層の名前の由来である。サイクロンから出た燃焼ガスは、過熱器、節炭器が設置された水冷壁構造（蒸発器）の対流室を流れ、ここで熱交換を行う。その後、燃焼ガスはガスエアヒータ（GAH）で燃焼空気を予熱することで熱回収し、バグフィルタを通し煤塵を取り除き、排気筒から放出される。

(2)灰処理系

燃焼することで生じる灰は燃焼室の炉底から排出されるボトムアッシュ（主灰，BA）と、バグフィルタで取り除かれるフライアッシュ（飛灰，FA）の2種類がある。BAは振動ふるいで異物大塊等を除いた後、流動媒体として再利用するため一部炉内に戻し、余剰分は排出される。バグフィルタで捕集したFAは一旦FAサイロに貯留した後、系外へ排出される。

3. 燃焼原理

燃焼室では高温の流動粒子が、燃焼空気によって噴き上げられて（流動化されて）いる。下部から供給された固体燃料は、燃焼空気によって流動粒子と混合攪拌され、高温の流動粒子によって着火温度まで加熱されて、流動化しながら燃焼が進行する。

燃料の燃焼熱によって燃焼ガスと流動粒子が加熱され、

原稿受付 2017年1月24日

*1 JFEエンジニアリング(株) 発電エンジニアリング本部
バイオマス発電事業部 設計部
〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1

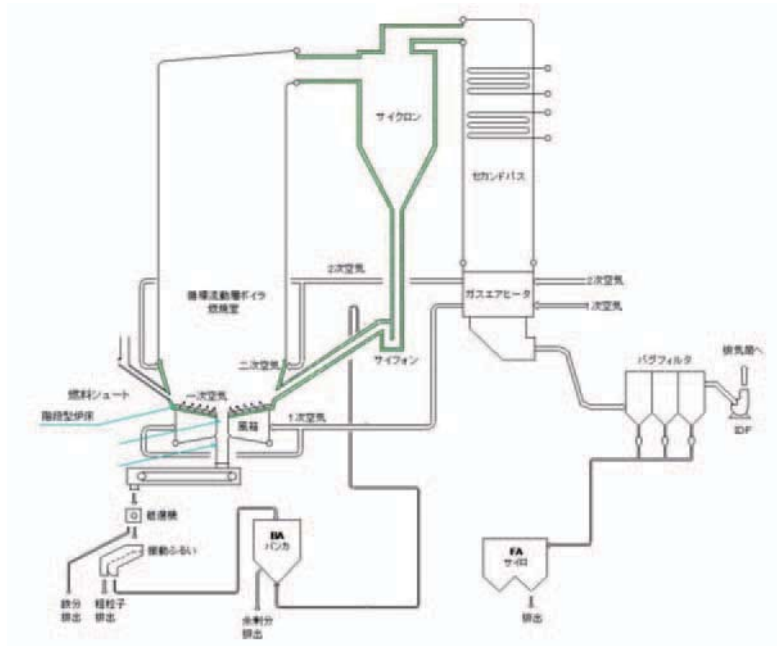


Fig. 1 Flow diagram of CFB boiler plant

同時に熱は周囲の水冷壁にも伝わって蒸気発生に使われる。また燃焼室はこの熱バランスによって、一定の温度に保たれている。

上方への流動化速度が相応に高いことから、燃焼室頂部の出口から燃焼途中の燃料粒子や不燃性の流動粒子が燃焼ガスに随伴してサイクロンへ流入する。

サイクロンで捕集された流動粒子は、再度燃焼室に戻り燃焼に寄与する。

4. CFBボイラの特長

3.に記載の燃焼原理から、循環流動層燃焼は次の特長を有している。

- (1)流動（燃焼）粒子と燃焼空気／燃焼ガスが強く攪拌、混合されるので、固気反応が良好である。
- (2)燃焼温度自体が低く、流動媒体が蓄熱体として燃焼室内を循環するので、局所的な高温場がない。
- (3)燃焼が燃焼室の高さ方向全域で進行する。
- (4)燃焼途中の燃料粒子は燃焼室が飛び出してもサイクロンによって燃焼室へ戻されるので、燃焼時間が長く取れる。

これらの特長から、循環流動層CFBボイラには以下の長所がある。

4.1 幅広い燃料適応性

CFBボイラでは、その燃焼特性から幅広燃料を用いることができる。その原理は以下の通りである。

- ①前述の特長(1)、(3)および(4)の作用より、揮発分が低く、燃焼性の悪い燃料でも使用可能である。
- ②同様に、特長(1)および(2)の作用より、燃焼室内での燃料の乾燥が可能のため、含水率の高い燃料でも使用可である。

従来の燃料（高品位炭、油およびガスなどの化石燃

料）に加え、当社CFBボイラでは、低品位炭はもとより木くず等のバイオマス燃料から廃プラスチック、廃タイヤなどの産業廃棄物まで幅広く燃料に適応することができる。実際に当社が納めたプラントで使用している燃料では、木くず木材系、廃プラスチック、畳ペレット、廃タイヤ、RPF、椰子殻（PKS）などが挙げられる。図2に、これらをまとめた燃料特性の分類図を示す。

また、当社CFBボイラでは同一燃料であっても、水分、発熱量などの燃料性状変動の許容幅が広いこともまた特長である。各々の地域で発生するバイオマスの利用を狙った地産地消型のバイオマス発電では、単一種類のバイオマス燃料だけで発電を行うことはバイオマス資源量の制約から極めて困難である。地産地消型で実用的な規模のバイオマス発電を行うためには、その地域で利用可能なあらゆる種類のバイオマス燃料を検討する必要がある、その場合当社CFBボイラが持つ燃料多様性は大きなメリットがある。

4.2 低公害性

燃料を燃焼させた際に発生する大気汚染物質は主に窒素酸化物（NOx）と硫黄酸化物（SOx）がある。当社CFBボイラは上述の特長を有していることから、それぞれの大気汚染物質を抑制できる。図3にその燃焼メカニズムを示す。

(1)低SOx性

前述の特長(1)と(4)の作用を利用し、流動媒体に石灰石を混ぜて燃焼ガス中のSOxを効率的に除去（炉内脱硫）が可能である。

(2)低NOx性

同様に特長(3)の効果により、高温の炭素粒子（赤熱チャー）が流動化しており、NOxを還元して低減が可能である。

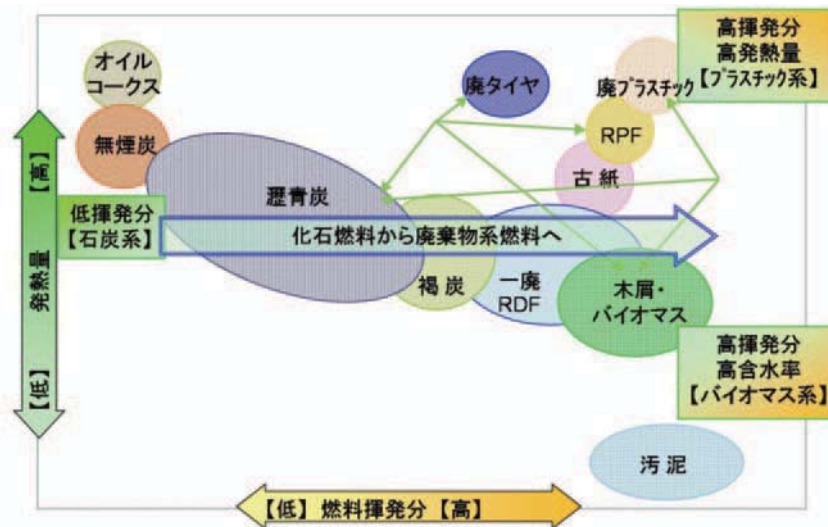


Fig. 2 Distribution of fuel for CFB boiler

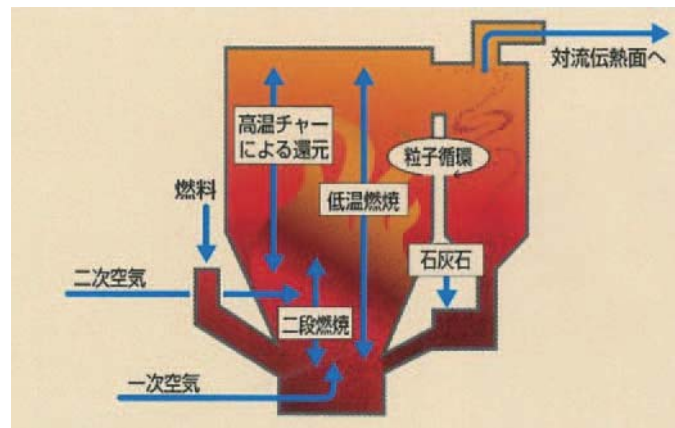


Fig. 3 Schematic drawing of combustion in CFB boiler

また、特長(2)と(3)により、二次燃焼空気を高さ方向に二段階に分けて供給することにより局所的な高温部の発生を抑制し、サーマルNO_xの生成を低減できる。

5. 蒸気タービン

発電設備のプラント効率を大きく左右する要素のひとつとして、蒸気タービン設備の効率がある。蒸気タービン発電機の出力は蒸気タービンでの熱落差から決まるので、入口蒸気条件を高く、出口真空度を低く設定すれば大きな発電出力を得ることができる。

蒸気タービンの蒸気条件は、適正蒸気条件とボイラ過熱器高温腐食対策としての蒸気温度から決定される。次に出口での真空度については真空復水器の型式、冷却水温度、気象条件によって、大きな差を生じる。中でも形式として、真空復水器には水冷式と空冷式があるが、性能面で水冷式の方が真空度を高く上げられるので、優れている。従って、発電設備を設置するに当たっては、工業用水、河川水、海水等何らかの形で水冷式復水器に必要な水源が確保できる地区を選択することが好ましい。

真空度は一年のうち夏場に下がってくることに留意し

なければならない。夏場は気温が高いため冷却水温度が上がり、水冷式真空復水器内を冷却する効果が低下するためである。この真空度が低下するということは、発電出力が低下することを意味する。夏場に発電出力が低下した場合、発電出力をリカバーするために燃料をより多くボイラに投入するのであれば、ボイラを始めとする諸設備の容量を上げておく必要がある。

6. おわりに

今回紹介したCFBボイラは、その燃料汎用性の高さから、各地域で発生する様々なバイオマスを利用を狙った地産地消型のバイオマス発電において、大きな優位性がある。また、CFBボイラは、様々な燃料を利用しても大気汚染物質を抑制できる。

今後も固定価格買取制度を追い風に、さらなる再生可能エネルギー普及にその一翼を担いたいと考える。

7. 参考文献

- (1) 経済産業省、資源エネルギー庁、平成27年度エネルギー白書、(2016)、pp. 9, 144-145.

特集：バイオマス発電

木質バイオマスボイラ・発電システム

Power Plant with Ligneous Biomass Boiler



森澤 伸哉*1
MORISAWA Shinya

キーワード：バイオマス，流動床，ボイラ
Biomass, Fluidized-bed, Boiler

1. はじめに

荏原環境プラント(株)は1974年に英国SDP社とより旋回流型流動床焼却炉の基本特許使用契約を締結した。

この技術は未完成であったが，ユニークで将来性が期待されるものであった。当社では実験プラントによるデータの蓄積を元に実用化をはかり，やがて産業廃棄物や都市ごみ焼却の分野で多数の焼却プラントを建設するまでに至った。

そして単なる焼却炉からさらに高効率エネルギー回収を目指して，内部循環流動床ボイラへと独自に開発・進捗させてきた。

本稿では近年，FIT（Feed in tariff, 再生可能エネルギー固定価格買取制度）の実施を受け木質バイオマス発電プラントとして利用が広がっているエバラ内部循環流動床ボイラ（Internally Circulating Fluidized-bed Boiler:以下ICFB）について，その構造・特長・今後の展望を述べる。

2. 施設概要と納入実績

ICFBは初号機納入から既に25年以上の実績があり，木質バイオマス燃料をはじめタイヤチップ，製紙スラッジなどを主体に国内で15施設，海外では6施設の実績がある。主なICFB発電ボイラ国内納入実績を表1に示す。

3. 内部循環流動床ボイラの特徴

3.1 概要

流動床技術を用いたボイラは一般に，流動化速度によりバブリング型（BFB）及び循環型（CFB）に大別される。

ICFBは，流動空気供給系と炉構造（形状）を工夫しバブリング型と同様の濃厚流動層をもち，かつ循環型の

Table 1 Domestic ICFB Power Plant (Middle Class)

No.	竣工年月	蒸発量 t/h	蒸気条件		発電出力 kW	燃料種類
			圧力 MPa	温度 ℃		
1	1990-05	70.6	6.84	470	16,000	廃プラ、塗装粕
2	2000-03	62.0	6.00	460	14,500	PS、チップダスト、廃タイヤ、石炭
3	2003-09	61.6	5.98	460	14,000	PS、廃タイヤ
4	2004-08	105.0	6.40	460	15,000	木屑、石炭
⑤	2006-09	56.0	5.90	460	12,000	木屑チップ
⑥	2006-09	53.8	5.90	460	11,500	木屑チップ
7	2007-02	65.0	6.80	460	7,600	PS、木屑、RPF量、チップダスト
⑧	2008-06	106.0	5.80	460	21,000	パーク、生オガ、乾燥オガ
9	2009-03	105.0	6.40	500	25,000	木質チップ、石炭、タイヤチップ
⑩	2010-06	64.0	5.90	465	13,600	木屑チップ
⑪	(予)2018-07	62.0	6.40	500	14,500	木質チップ

○ はバイオマス専焼

ような流動媒体循環機能を有する第三の型式であり，低腐食性，負荷追従性，不燃物対応性に優れている。

3.2 構造

ICFBの大きな特徴は，流動媒体（砂）の流動領域を，燃焼を担う中央の燃焼室と熱回収を担う熱回収室に分割することでそれぞれの室の役割を明確にし，燃焼室と熱回収室との間で流動媒体の（内部）循環流を形成することで，熱エネルギーの移動をしていることである（図1概念図参照）

熱回収室は傾斜配置されたデフレクタにより燃焼室と分割される。バイオマス等の燃料は燃焼室の上部より投入され，デフレクタは燃焼室内部の循環流（＝旋回循環流）形成を促すと同時に燃焼室の厳しい摩耗・腐食環境から層内伝熱管を保護する機能を持つ。

3.3 燃焼メカニズム

図1のように，燃焼室中央部を弱流動化域，両側部を強流動化域とすることにより，中央部で沈降し両側部で上昇する循環流（＝旋回循環流）が形成される。燃焼室

原稿受付 2017年1月5日

*1 荏原環境プラント(株) 共通基盤本部 基盤技術統括部
基盤技術開発推進室 基盤技術グループ
〒144-0042 大田区羽田旭町11-1

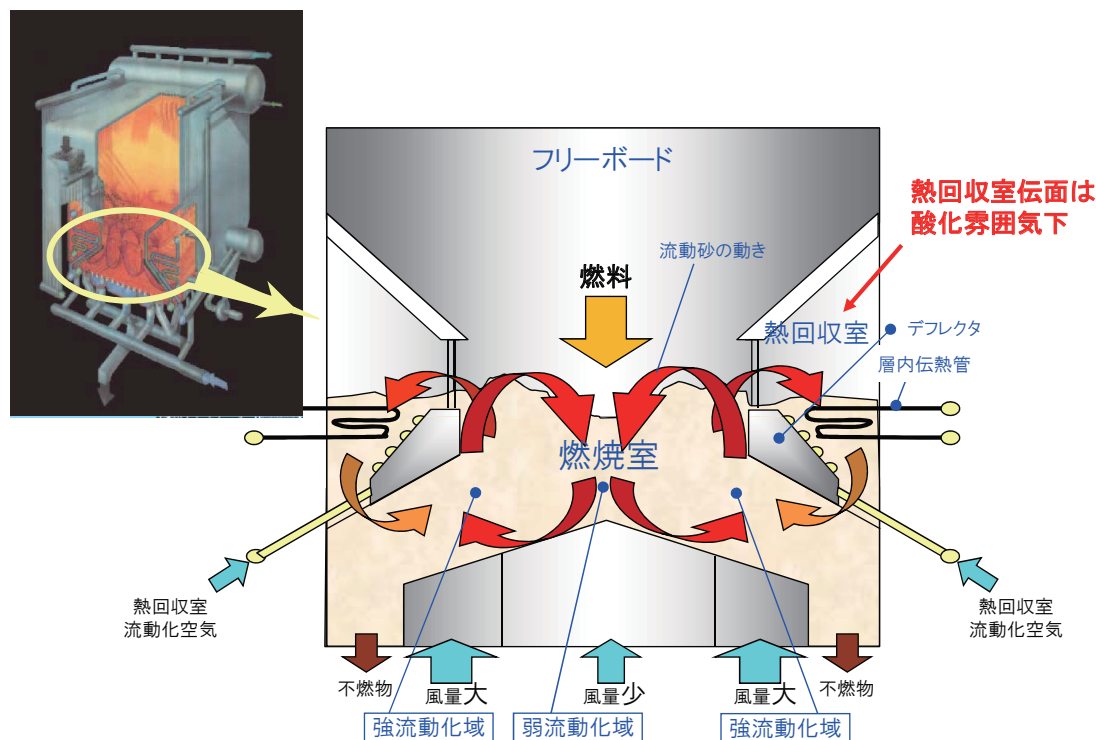


Fig. 1 Concept of Internally Circulating Fluidized-bed Boiler

上部に供給された燃料はその巡回循環流によって燃焼室流動層内部に広く拡散混合され、結果、十分な滞留時間をもって効率よく均一に燃焼することが可能となる。

3.4 熱回収メカニズム

燃焼室両側部において上昇してきた流動媒体の一部は、デフレクタ上端部を越えて熱回収室に流入する。熱回収室では下方より吹き込まれる流動化空気によって弱流動化域を形成しているため、燃焼室より飛び込んできた流動媒体は層内伝熱管に熱エネルギーを伝熱しながら緩やかに下降したのち、デフレクタ下端の連絡口から再び燃焼室へ循環する。層内伝熱管によって伝わった熱エネルギーは蒸気として最終的に蒸気タービンにて電気エネルギーへと変換され回収される。

層内伝熱管の熱伝達係数は熱回収室内の流動化速度にほぼ比例して変化する。(図2参照)

そのため、熱回収室の流動化速度を変化させることによって、熱回収量をコントロールすることが可能である。その結果、燃焼温度を一定に保ちつつ蒸気発生量を容易にコントロールできることが大きな特徴である。

3.5 低摩耗性と低腐食性

前述のように熱回収室では弱流動化域を形成しており、流動媒体の流速は $0 \sim 0.3 \text{ m/s}$ と燃焼室の循環流に比べて低く、これにより層内伝熱管周囲は低摩耗環境となる。また、燃料は燃焼室に投入され、主に燃焼室内で燃焼するため熱回収室への燃料の流入は少なく、熱回収室では酸化雰囲気が維持され低腐食環境となる。(図1参照)

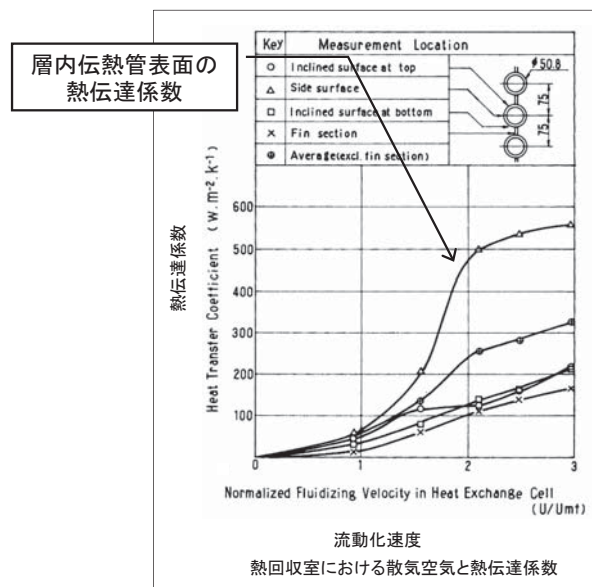


Fig. 2 Characteristics of Heat Transfer Tube in Fluidized-bed

4. ICFBによる木質バイオマス発電

木質バイオマス発電においてICFBは以下の特長を持つ。

4.1 不燃物対応性

生木系チップに残材とともに持ち込まれるがれき・土砂類、搬送時に用いられた金属製の結束材等が、また建築廃材系チップに釘・蝶番・ドアノブ等金属製建材類が混入することは不可避である。一例を図3(写真)に示す。

前述の巡回循環流により比重の大きな不燃物は傾斜した炉底を横移動し排出口へ寄せ集められ、流動媒体と共



Fig.3 Examples of Noncombustible Material in Wood Waste

に炉外へ排出される。従って、木質系バイオマスと共に持ち込まれる土砂類、建廃系バイオマスに含まれる釘・蝶番等の不燃物には問題無く対応可能である。なお、排出された不燃物は振動篩等で分級し系外排出され、流動媒体のみ炉に戻され再利用される。また、層内伝熱管をパネル型(図4)とするなど管群構成を工夫することによりワイヤ等不燃物の引っかかりを防ぐ構造としている。



Fig. 4 Plate-shaped Heat Transfer Tube in Fluidized-bed

4.2 燃料性状への対応と出力制御性

燃料収集元での貯留状況や搬送時の条件によっては水分量が大幅に変動するなど化石燃料と比べ燃料性状の変動が大きい。また、2015年1月22日に資源エネルギー庁より配信された「固定価格買取制度の運用見直し等について」により、木質バイオマス発電には出力制御性が求められている。

上記に対して、熱回収室への流動化空気量の制御により、流動媒体からボイラへの伝熱量を任意に設定できるため燃料性状の変動時、または負荷変動時の必要出熱量変動を流動媒体の蓄熱量で吸収できるためボイラ圧力が安定する。

電力デマンド制御時の負荷追従例を図5に示す。本図ではデマンドに追従し主蒸気流量が変化しているが、その間主蒸気圧力は変化しておらず、良好な負荷追従性を示している。

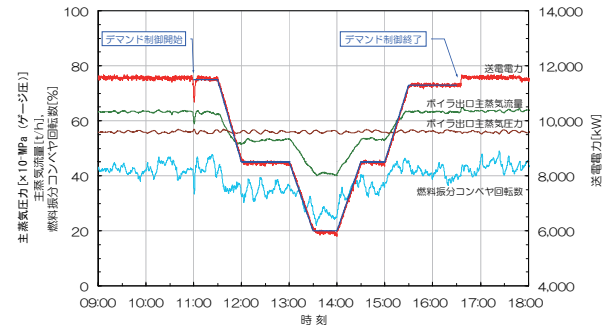


Fig. 5 Example of Power Demand Control

5. 木質バイオマス発電所運転事例

図1の納入実績表中、8項の事例についてその施設概要・運転状況を以下に述べる。

5.1 発電所概要

発電出力：21,000 kW
蒸気条件：5.8MPa（ゲージ圧）・460℃
最大蒸発量：106t/h
燃料：パーク、生オガ、乾燥オガ
タービン型式：減速式衝動抽気復水タービン（水冷）

5.2 公害防止基準

排ガスの公害防止基準及び引渡し性能試験時の測定結果を表2に示す。

Table 2 Analysis of Exhaust Gas

測定項目 items	公害防止基準 Pollution prevention standard	排ガス分析結果 analysis of exhaust gas
ばいじん Dust	30mg/m ³ N以下 (O ₂ 6%, dry)	1mg/m ³ N未満 (O ₂ 6%, dry)
窒素酸化物 NO _x	15.5m ³ N/H以下	7.08m ³ N/H (59ppm×dryガス量120,000m ³ N/H)
硫黄酸化物 SO _x	5.9m ³ N/H以下	0.816m ³ N/H (6.8ppm×dryガス量120,000m ³ N/H)
塩化水素化合物 HCl	—	2.6ppm (O ₂ 12%, dry)
一酸化炭素化合物 CO	100ppm以下（自主） (O ₂ 12%, dry)	30ppm (O ₂ 12%, dry)
ダイオキシン類 Dioxins	0.1ng-TEQ/m ³ N以下（自主） (O ₂ 12%, dry)	0 ng-TEQ/m ³ N (O ₂ 12%, dry)

5.3 受入供給系統

本発電所は木材加工会社経由で燃料を安定的に確保でき、3種類の製材・加工屑（パーク、生オガ、乾燥オガ）や建築廃材、パレット、林地残材（未利用間伐材）などを燃料として活用している。

燃料系統の受入供給設備は、燃料それぞれの形状・性状に最適な搬送機器を採用して建設費低減を図るとともに、3種類の独立した供給系統をもつことにより、搬送トラブル時には残りの系統からの供給量を増やし、バックアップ可能な設計としている。

5.4 運営・維持管理

本件では、当社が施設の運営・維持管理業務も受託しており、地元採用者や電気主任技術者を含む各種資格を有する正社員のみで運転・維持管理体制を編成することで、施設と人間が一体となって安定したパフォーマンス

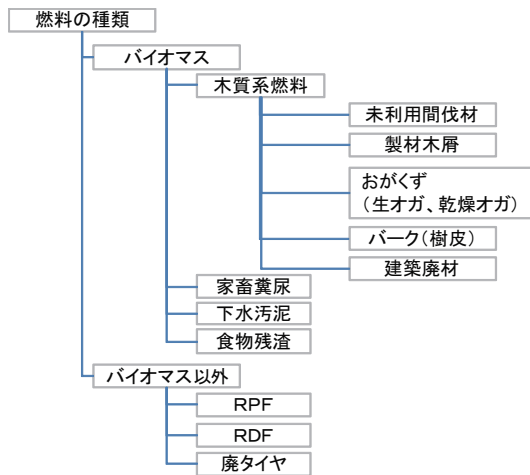


Fig. 6 Examples of Various Fuels

を發揮している。

6. おわりに ～ソリューションと今後の展望～

国内においては再生可能エネルギー固定価格買い取り制度の施行および2 MW未満での買い取り価格の引き上げにより、木質バイオマス発電プラントの引き合いが多くなっている。しかしながら利用可能な木質系バイオマス資源には限りがあり、最も売電単価が高く設定されている未利用木材資源のみでの計画では長期の燃料調達に困難が予想される。発電事業において、事業者には燃料の安定的な確保が求められる一方、メーカーには、より多様な燃料(図6)への対応力と、発電効率が高く、ランニング時のコストパフォーマンスも高い製品(システムおよびパッケージ)の提供が求められている。

当社では前述のICFBの特徴を活かし、従来よりも発

電効率を高めた2 MW規模の発電設備の設計を完了し、市場に投入予定である。あわせて全国のごみ発電施設の運営・維持管理において実績のある地域に根ざしたフィールドサポート体制により、安定した発電パフォーマンスの提供を可能としている。

特に東日本大震災以降、再生可能エネルギーを中心にした地産地消型の地域エネルギーネットワークの構築が求められてきている。地産エネルギー源としては木質バイオマスのみならず、一般廃棄物や地域特性により農業・畜産廃棄物、産業廃棄物など様々な可燃物が存在する。対応可能燃料の幅が広いICFBを地域エネルギーネットワークに取り込むことにより、地産エネルギー源を活用することが可能となる。ICFBのように高い負荷追従性を持ち、需要に応じた送電が可能な電源をネットワーク中に含めることで安定した地域エネルギーネットワークの構築が可能となると期待される。

以上のように将来、ICFBが地域のごみ発電施設とともに地域エネルギーネットワークの中核として活用されるようになれば幸甚である(図7)。

参考文献

- (1) 横山亜希子ほか, 内部循環型流動床によるバイオマス発電, 環境浄化技術, Vol.12, No.3 (2013), pp.17-21
- (2) 岡本晃靖ほか, バイオマス燃焼発電用ICFBの建設と運転・維持管理ー神之池バイオマス発電所ー, エバラ時報, No.226 (2010), pp.21-25
- (3) 横山亜希子ほか, バイオマス・廃棄物発電とエネルギー利用の有効性と課題-地産地消と地域活性-, (2013), pp.66-71, S&T出版株式会社
- (4) 森澤伸哉, 木質バイオマス発電施設, 環境浄化技術, 7・8月号 (2016), pp.6-11

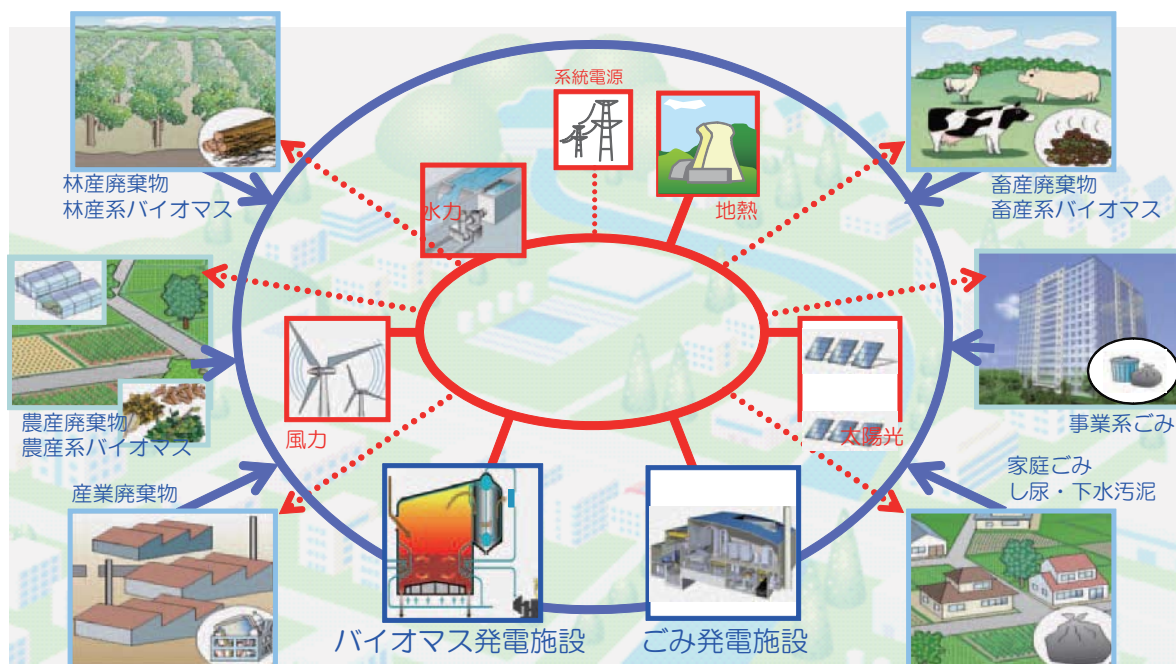


Fig. 7 Future Energy Network of "Local Consumption / Production"

特集：バイオマス発電

小・中規模バイオマス発電プラント向け ORC（オーガニックランキンサイクル）発電技術について ORC Power Generation Technology for Small & Middle Class of Biomass Plant



小森 豊明*¹
KOMORI Toyooki

キーワード：バイオマス，ORC，バイナリー，タービン
Biomass, ORC, Binary, Turbine

1. はじめに

最近の猛暑及び台風が多発から、国民の多くが地球温暖化防止に関心を持っているものと思われる。この地球温暖化防止対策及び低炭素社会への有効手段としてコージェネレーションの促進、原発再稼働や水素エネルギーの導入等が叫ばれているが、我が国の資源エネルギーの有効利用という点では、地産地消の再生可能エネルギーの導入が大いに有効である。

日本政府としても再生可能エネルギーの普及を目指し、2012年よりFIT（固定価格買取制度）を制定し、火力発電等と比べ割高となる発電コストを電力会社が一定価格で長期にわたって買い取ることで再生可能エネルギーの導入促進を進めている。このFITには立地条件等の制約が少ない太陽光や風力発電が大部分を占めているが、これらの再生可能エネルギーは天候に左右される自然エネルギーである。この為、必要なエネルギー需要とは無関係に供給されたり、逆に必要な時に供給できなかったりと電力の供給・需給調整には難がある。一方、天候にも左右されず、この電力の供給・需給調整にも対応できる再生可能エネルギーが動植物などの生物資源をエネルギーとして発電するバイオマス発電で、木質バイオマス、農業残渣、食品廃棄物など様々な資源を電気エネルギーに変換している。この資源の中でも木質バイオマスが多く利用され、発電の規模としても数十MW規模のプラントが建設・運転されている。このような大規模の発電所となると木質資源の安定供給から海外からの輸入が必要となり、且つ大量の冷却水が必要となるのでこれらの立地条件に適った沿岸部に数多く建設されている。海外からの輸入材使用により地球規模のCO₂削減には貢献できているが、日本のエネルギー自給率アップや国内産業の創出ということに関しては国内の木質資源の活用が必要

である。我が国の場合、平地が少なくこの木質資源は収集、運搬にコストがかかる険しい山間部に集中している。この為、内陸部・山間部へ従来の蒸気プラント発電所を建設する場合、機器搬入時の寸法・重量に制限があり容量的には数MWの小規模にする必要がある。この小規模の場合、蒸気条件も機器の制約から圧力・温度条件は下げる必要があり、この結果、プラント効率が低下し建設単価も割高となり山間部導入への課題となっている。小規模で効率向上を図る発電技術としてガス化発電も提唱され始めているが、木質燃料対応性への制限やメンテナンスコスト高の面から余り導入が進んでいない。

この蒸気プラントとガス化プラントに代わってこの小規模のバイオマス発電に適した技術が図1に示すORC（Organic Rankine Cycle）と呼ばれる水蒸気の代わりに高分子有機媒体を作動媒体とする発電システムである。日本ではORC発電システムはバイナリー発電や低沸点媒体タービンと呼ばれ、熱源温度レベルが100℃前後と比較的低い領域に採用されてきた。一方、作動媒体の適用温度の制約から、バイオマス燃焼ガスのように1000℃近い高温には採用された実績が無い。この市場ニーズにこたえるのが北イタリアのプレーシア市を本拠とするORC専業メーカーであるターボデン（Turboden）社であり、2013年より三菱重工のグループ会社となっている。1980年の創業よりこのターボデン社は欧州を中心に280



Fig. 1 Various biomass plant for capacity

原稿受付 2017年1月4日

* 1 三菱重工(株) エネルギー・環境ドメイン 分散電源グループ
〒108-8215 港区港南2-16-5

台以上のバイオマスプラントの実績があり、我が国でも導入が予定されている。本稿ではこのターボデン社のバイオマスプラント向けORC発電設備の技術的特徴や導入事例について紹介する。

2. ORC発電技術の原理と特徴

ORC発電は、サイクル的には作動媒体が蒸発と凝縮を繰り返して発電する通常の燃焼ボイラー/蒸気タービンと同じランキンサイクルであり、主要機器構成も同じである。ここでは、今回の様な比較的小規模の発電プラントで蒸気サイクルに比べてどのような理由から高性能となるか等について述べる。

2.1 ORC発電システムの仕組み

図2にシステム構成図を示す。サイクルを構成する機器は蒸発器、タービン発電機、再生器、凝縮器そして媒体給液ポンプである。本構成図で通常の廃熱回収蒸気サイクルに無いのは再生器である。この機器の目的は、タービン出口の熱回収であるが、この効用等については後述する。

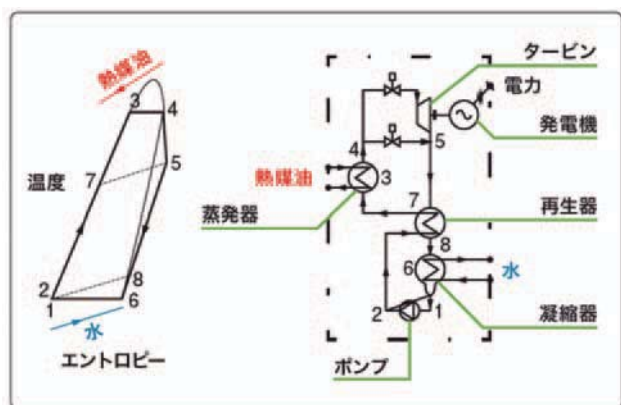


Fig. 2 ORC cycle diagram

作動内容を下記に紹介する。

- 1) 蒸発 (7→3→4)
加熱源で、蒸発器内の有機媒体を加熱・蒸発させる。
- 2) 膨張 (4→5)
この媒体蒸気はタービン内で膨張仕事をし、タービン発電機を駆動する。
- 3) 凝縮 (5→8→1)
タービンから出た蒸気は再生器に通され液体の作動流体を加熱 (2→7) した後、凝縮器内にて冷却水で冷却され凝縮液化する。
- 4) 加圧 (1→2)
作動媒体はポンプで加圧され再生器/蒸発器に供給され、再び同じサイクルを繰り返す。

2.2 サイクル効率と作動媒体

2.2.1 サイクル効率について

高温熱源すなわち、蒸発器側の加熱源の温度を T_1 (K)、低温熱源すなわち凝縮器の冷却源温度を T_0 (K)

とし、高・低温源の温度が一定とすれば、この両熱源の間で作動する理想的熱機関はカルノーサイクルであり、このサイクル効率は次の式で示される。

$$\eta_{\text{cni}} = (T_1 - T_0) / T_1 \quad (1)$$

このカルノーサイクル効率は理想値を示すもので、効率の限界値を知る目安として利用される。しかしながら、熱源が実際は有限であり、何らかの媒体との間に熱交換をしつつ温度を下げていくという熱回収システムにおいては適用し難く、カルノーサイクル効率をもって評価を行うことは妥当ではない。したがって、熱回収システムにおいては、熱交換の過程における無限に分けた微小カルノーサイクルの連続体であると考えらるべきである。このように熱源が蒸発器で温度を下げていきこの出口温度を T_2 (K) とすれば、この高温源と低温源との間で作動するサイクル効率は次式のように表され、これはエクセルギー効率と呼ばれている。

$$\eta_{\text{ex}} = 1 - \{T_0 / (T_1 - T_2)\} \cdot \ln (T_1 / T_2) \quad (2)$$

これら両式の効率を廃熱源の温度に対して示すと図3のようになる。しかしながら、このエクセルギー効率も理想値であり実際には、作動媒体の蒸発特性、供給温度、熱交換器内のターミナル温度差、冷却源の温度上昇、タービン発電機の損失などの影響により、現実に到達できるサイクル効率は低いものとなっている。過去の実績

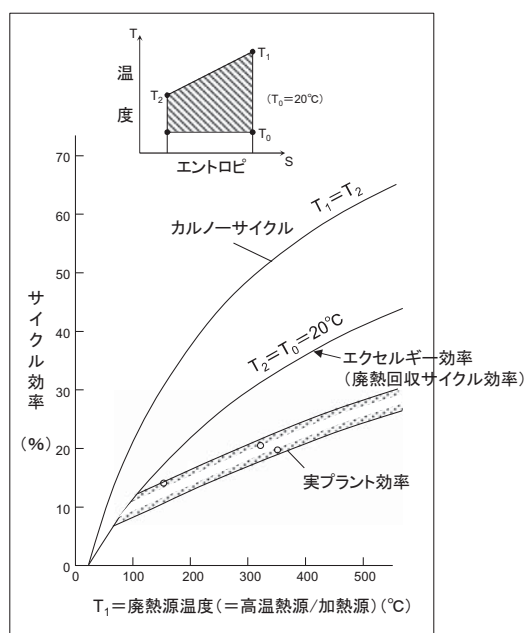


Fig. 3 Cycle efficiency vs temperature level of waste heat

の蒸気サイクルでの実例を同じく図3に示す。

2.2.2 作動媒体の効率への影響について

前項で理想のエクセルギー効率と現実の効率について大きな差があることと、その差の要因について述べた。この要因の中で作動媒体の蒸発特性差が、蒸気と今回の有機媒体の大きな違いでプラント効率に影響を与えている。

実プラントの効率を向上させるには図3に示した加熱源の降温特性（ $T1 \Rightarrow T2$ ）に媒体の予熱・蒸発温度特性を近づける必要がある。加熱源の形態が液体や気体の場合、図3のように顕熱性の特性を有するので、作動媒体も蒸発過程が顕熱性であるのが理想である。しかし、媒体は蒸発部の潜熱を有するので、この潜熱部が小さい、即ち予熱部の顕熱に対する潜熱比が小さい媒体が理想のエクセルギー効率に近づくことになる。水蒸気と有機媒体のこの蒸発特性の違いを図4に示す。この図からわかるように潜熱と顕熱比が小さい有機媒体がより加熱源の降温特性に類似するのでサイクル効率が向上することとなる。

作動媒体はこのサイクル効率だけでなく、取扱い性や経済性等も考慮して総合的に最適な媒体を選定する必要がある。図5にこの選定条件と最終目的を示す。

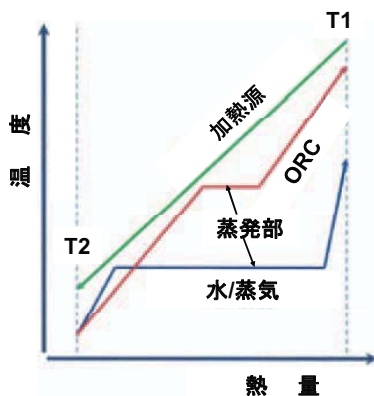


Fig. 4 Heat recovery cycle characteristics

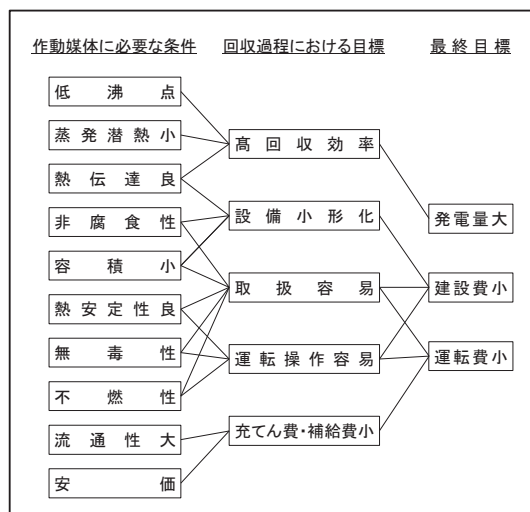


Fig. 5 Required properties for working fluid

2.2.3 ターボデンの作動媒体について

前項のように潜熱と顕熱比が小さい特性に加え、日本では採用実績が無い比較的高温の加熱源でも熱安定性に富み、且つ、タービンで膨張したタービン出口媒体蒸気が蒸気タービンのように湿り域に入らない様な特性を有

するシリコンオイルと称する媒体をターボデン社は使用する。図6のT-S線図に蒸気とシリコンオイルのタービン特性を示す。

蒸気の場合、飽和線が右に大きく張り出しており、膨張後、特にタービン入口側を飽和蒸気とした場合、湿り域に入っていく。この為、湿り損失増によるタービン効率低下や液滴によるエロージョン弊害がタービン翼に発生する。一方、シリコンオイルは乾き領域に入るので湿りによる効率低下が無いので、蒸気サイクルよりもタービン効率は向上する。但し、タービン出口が乾きで過熱度が高い場合、凝縮器へ捨てる熱量が大きくなるのでサイクル効率を低下させることになる。この対策としてターボデン社は2.1項に記載の再生器をタービン出口に追設して過熱分の熱量をサイクル内に回収し、効率低下を防止している。

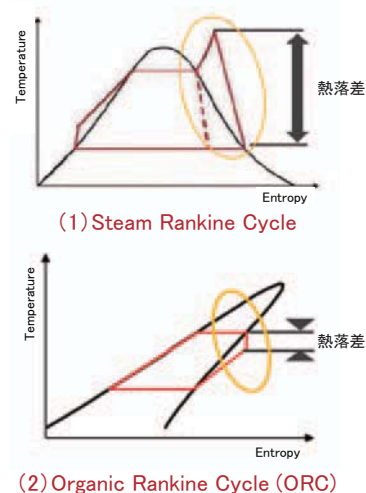


Fig. 6 T-S characteristic curve for working fluid

2.3 蒸気サイクルとの違いについて

前述に加え、タービンノズル流出速度の差による違いがある。図6に示すようにタービンの熱落差がタービン膨張比を水蒸気と同じとしても媒体物性値の特性上、シリコンオイルは小さくなる。この熱落差の大小がタービンノズルの流出速度に概略比例するので、シリコンオイルの方が水蒸気と比べタービン翼への衝突速度が小さくなる。この事は、タービン翼でのプロファイル損失を低減することとなり、水蒸気よりも効率が向上する要因となる。又、ノズル流速が小さいということは、タービン翼の周速も小さくすることが可能なので、タービン回転数を減速機が不要な発電機と同じ回転数にすることが可能である。一方、小容量の蒸気タービンは高速回転数となっており減速機が必要である。この結果、減速機による機械損失が蒸気タービンには加わることになる。

これらの事により、数MWクラスにおいて、蒸気タービンとターボデン社のORCタービンでは20%程の効率差がつくことになる。この性能差が大きいので、欧州ではORCタービンが多く導入されている。図7にこれらの

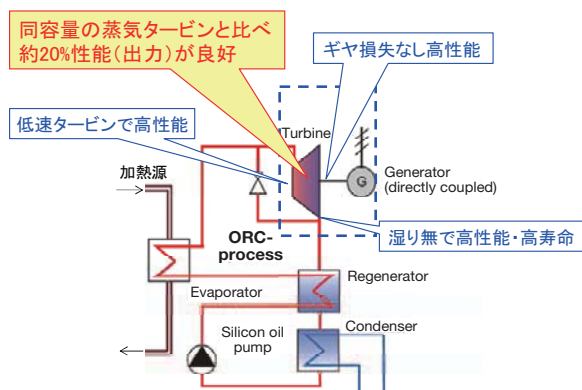


Fig. 7 Features of ORC turbine for performance

蒸気タービンとの効率差要因をまとめて示す。

更にシリコンオイルの場合は、水/水蒸気と比べ水処理や水質管理が不要で保守・取扱いが簡単で、初心者でも運転が容易ということもあり欧州では導入が進んでいる。又、蒸気サイクルでは必要なサイクル補給水が全く必要ないので、近隣に水源がなくても立地可能であるので、国内の内陸部や山間部での導入に期待が出来る。

3. ターボデン社のバイオマス向けORC発電システムについて

欧州等で多数納入されているターボデン社のORC発電システムと構成機器の特徴等につき述べる。

3.1 システム構成及び特徴

プラント全体のシステム構成を図8に示す。この図8中、中心部がターボデン社の標準的な供給範囲であり、図9にこの供給機器の外観を示す。

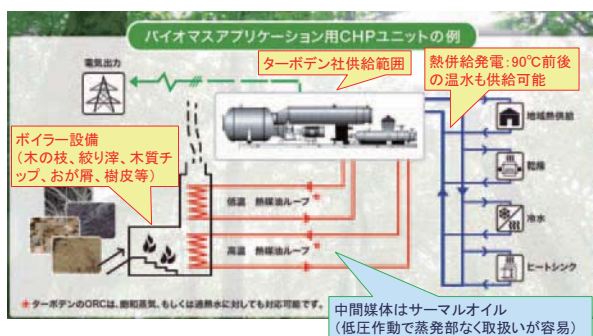


Fig. 8 Outline of ORC biomass plant system



Fig. 9 ORC unit for biomass plant

燃焼ボイラーは、一般的に多種多様な燃料に対応可能なタイプが採用されている。このボイラーの特徴としては、被加熱側に水・蒸気ではなくサーマルオイル（熱媒油）という媒体を使用することである。冒頭の第1章に、1000℃の高温に対応できるORCシステムと紹介しているが、このサーマルオイルを中間媒体としてタービンの作動媒体（シリコンオイル）の加熱源に使用することにより、この1000℃という高温域の熱回収に適用できている。この中間媒体を使用することにより、タービンの作動媒体が1000℃の高温に直接曝されることがなく、作動媒体の安定性が長期にわたって保たれる。ボイラーの熱交換部におけるサーマルオイルは液体のままで水のように蒸発する過程がないので、ボイラーチューブ内の気相成分によるエロージョンの心配はない。このサーマルオイルの圧力レベルは、数Kと蒸気で回収する場合と比べ低圧であるので強度的により裕度がある機器となる。又、容量によっては小口径配管が適用できるので国内の場合、溶接関連の申請対象が削減可能である。このサーマルオイル、必要に応じプロセス側の加熱源としても直接利用可能で、海外では合板の加熱圧着用熱源として利用されている例がある。

もう一つのシステム上の特徴はORC発電ユニットに発電用と熱電併給用の2種類を標準化していることである。この熱電併給用の熱は、図8に示すようにタービン作動媒体が凝縮器にて放熱する熱を温水として取り出すものである。タービン側からすると冷却水系統にあたるものであり、100℃以下のお湯を取り出すことが可能である。蒸気タービンの場合、蒸気を抽気して更に温水熱交換器が必要と複雑なシステムとなるが、ORCの場合は非常に簡単なシステム構成となる。欧州の場合は、このお湯の利用先として建屋暖房等の為にお湯の供給パイプラインが整備されているので、お湯の繋ぎ込みが容易である。この為、ターボデン社のバイオマスプラント向け納入ユニットの90%以上がこの熱電併給用である。図10に発電用と熱電併給用のORC周りの熱バランスを示すが、熱電併給用は凝縮器側から取り出す温度を発電専用時の30℃前後と比べ100℃近くに上げるので熱出力は増えるがその分電気出力は低下することになる。図11には欧州で使用されているお湯供給用配管の埋設状況を示す。この配管は放熱損失を最小限とする為、保温材が巻かれている。



Fig. 10 Heat balance of ORC unit



Fig. 11 Hot water piping distribution

3.2 プラント概要及び主要機器について

図12に主要機器の代表的な2 MWクラスの鳥瞰図を示す。この配置では、媒体給液ポンプは地下ピットに、それ以外の機器は地上に設置されている。配置上の特徴としては、主要機器が台板上に配管・弁類と共にモジュール化されている事であり、現地工事の期間短縮及び工事費低減を図っている。

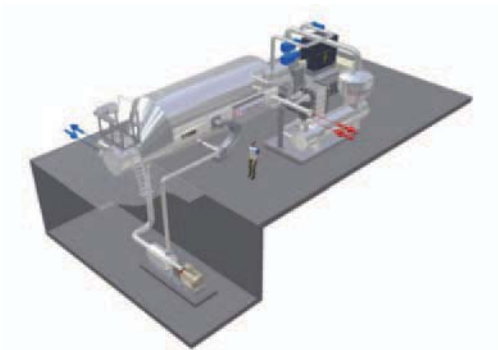


Fig. 12 Bird's eye view of ORC unit

図13の左に予熱器・蒸発器のモジュールを、右に再生器・凝縮器のモジュールを示す。熱交換器類の形式はシンプルな保守性に優れたシェル&チューブ式を採用している。再生器・凝縮器は内部では分割されているが外見上は一体型となっており、コンパクトな配置となっている。



Fig. 13 Outline of Heat exchangers

図14にタービンを示す。タービン型式は実績豊富な軸流多段式を採用している。蒸発器からの媒体蒸気は車室上部の配管よりタービンに供給され、タービンで膨張仕事し、タービン出口蒸気は軸流方向に排気し、排気損失の低減を図っている。発電機は、タービン軸と減速機を基本的に介さないで中間軸にて結合されている。作動媒体が可燃性であるので漏洩対策には万全の構造を期している。車室は、壺型構造として水平フランジ部を無くし、



Fig. 14 Outline of Turbine

ロータ軸の車室貫通部にはメカニカルオイルシールを採用している。

図15に給液ポンプのモジュールを示す。ポンプ形式は遠心多段式を採用している。特徴としては、作動媒体の流量制御をこのポンプの回転数制御にて行っている事である。この為、ポンプ駆動用の電動機はインバータ制御方式を採用している。作動媒体量は、廃熱量に応じてポンプ回転数制御にて予熱器・蒸発器へ供給され、その後、蒸発してタービンに供給される。この様に、タービン出力はポンプ流量により制御しているので、一般的なタービン入口の制御弁による絞り制御に比べ、絞り損失がなく部分負荷でも高性能である。又、タービン同様、ロータ軸の車室貫通部にはメカニカルオイルシールを採用している。



Fig. 15 Outline of pump

主要機器の構造とは異なるが、配管フランジ部の漏洩対策について図16に紹介する。配管フランジ部は基本的に溶接構造を採用しているが、メンテナンス等の為に一部には、ボルトフランジを採用している。このボルトフランジ部漏洩対策としてフランジ部を覆うカバーを付けて、このカバーの中を大気圧より常時若干低くなるように排気ファンにて吸引している。この為、万が一フランジ部で漏れが発生しても、フランジ部からは外部に漏洩しない構造となっている。万が一漏洩したガスは、排気ファンを経由して地上より十分高く拡散性に優れた安全な場所に放出される。この漏洩ガスは、この放散配管中にガス検知器を設置し常時監視されている。万が一漏洩ガスが検知された場合は、自動的にORCユニットを緊急停止させるインターロック機能を設けている。このような漏洩対策の評価から、作動媒体は可燃性であるがOTCユニットは非防爆エリアとして認定されている。

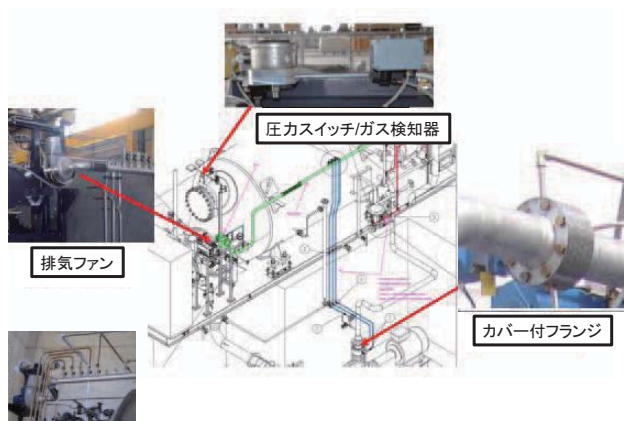


Fig. 16 Leakage gas protection system for piping

3.3 経済試算例について

第1章で述べているように、わが国で山間部への木質バイオマス材の発電プラント導入がすまないのは、地形的な要因によるバイオマス材のコスト高となる点が大い。図17に示すようにORC発電の経済性を論ずるには木材コストが大きな割合を占めるので重要であるが、本稿では本図の破線内のORC発電設備につき紹介する。

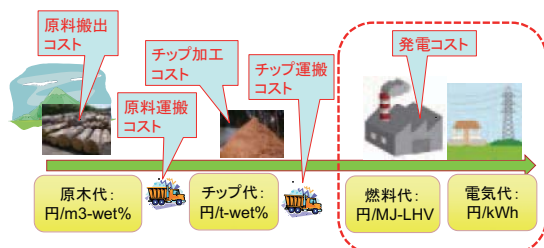


Fig. 17 Total economical stream of Biomass plant

ここでは2MW級の熱電併給プラントの年間メリットについての試算例を述べる。図18にその基準となる物質・熱収支バランスを示す。

発電出力2MWに必要な木質燃料量は、燃料の低位発熱量を10.5MJ/kgと仮定した場合、4,160kg/h必要となる。プラント全体の補機動力は概略400kWであるので有効な送電端出力は1,600kWとなる。又、お湯の出入口温度を80℃/60℃と仮定するとお湯は352m³/hが供給可能である。次に経済試算条件として電気代はFIT未利用材の40円/kWhとする。一方、お湯についてはこのお湯を油焚き温水ボイラーで供給していたとして、その油燃料分

を削減できるものとする。この場合、温水ボイラーの油消費量は概略980L/hとなり、油代は70円/Lとする。これらの条件にて一年間で8,000時間運転したとすると一年間の収入は下記となる。

- 1) 電気代；1,600kW×40円/kWh×8,000時間/年≒5.1億円/年
- 2) お湯代；980L/h×70円/L×8,000時間/年≒5.5億円/年
- 3) 合計；5.1億円/年+5.5億円/年=10.6億円/年

実際の年間メリットについては、上記より経費として燃料代、固定費償却費用、運転・保守費用等を差し引いて評価する必要がある。収入だけで評価するとお湯代の評価条件にもよるが、お湯の占める割合が比較的大きことが判る。このような背景から、欧州では90%以上のユニットが熱電併給プラントを採用している模様である。日本国内でも、このお湯の利用先が見込めるのであれば、このプラントの導入が更に進むことが期待できる。

4. 適用事例

欧州で多数導入されている熱電併給発電プラントの事例につき2例紹介する。

4.1 ペレット工場向け0.8MWプラント

本プラントはドイツ国内のペレット工場向けに導入された0.8MWと小容量のプラントである。お湯は90℃の温度レベルでペレット用原料等の乾燥に利用されているので、年間通してお湯が有効活用されている。表1にこのプラントの主要目を記載する。ペレットの年間生産量は35,000tで年間稼働率は91%と高い。このプラントはペレット原料乾燥用のお湯の供給が主目的であり、発電された電気はFIT契約にてほぼ全量、売電されている。図19にこのプラントの全景を示す。

Table 1 Plant outline of 0.8MW CHP plant

納入先	Wun Bioenergie社/ドイツ
運開時期	2011年4月
燃料	木片チップ、パーク
電気出力	800kW
熱出力	お湯：90℃×3.2MWth
熱の用途	ペレット乾燥

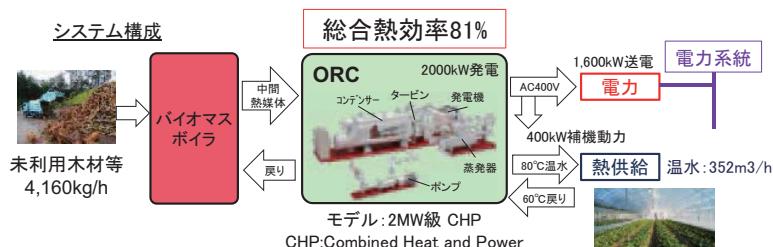


Fig. 18 Heat mass balance of 2MW class Biomass firing ORC plant



Fig. 19 Plant view of 0.8MW CHP

4.2 温室栽培向け1.7MWプラント

このプラントはドイツのトマトの温室栽培所向けに導入された1.7MWの熱電併給プラントである。この位置は北緯50度と緯度が高く内陸であるので冬場はかなり気温が下がるが、年間通してトマトを栽培する為に設置されたプラントである。トマトの年間生産量は約4,800tで、栽培用の温室のサイズは100,000m²である。この温室栽培の燃料を従来の化石燃料からバイオマスに替えることにより年間のCO₂削減量は14,000tと大きな効果を得ている。表2にプラント主要目を図20にプラント全景を示す。

Table 2 Plant outline of 1.7MW CHP plant

納入先	AGO AG-TOMSTAR社/ドイツ
運開時期	2006年12月
燃料	木片チップ
電気出力	1,690kW
熱出力	お湯：90℃×8.1MWth
熱の用途	温室暖房



Fig. 20 Plant view of 1.7MW CHP

5. おわりに

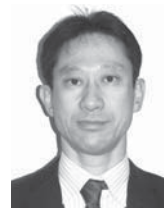
欧州で多くの実績を有する小・中容量規模向けORC発電プラントの状況について報告した。日本ではバイオマス発電が安定電源として注目を浴びているが、この技術は発電設備がコンパクトで冷却水も不要ということから国内の内陸山間部への設置が期待できる。これより、山里の荒廃材、間伐材の有効利用が更に拡大し、電源としての役割に加え山里の環境保全や地域の町創りも貢献できる多機能な発電プラントである。

国内のバイオマス資源にて発電し、地域内に収入源が生まれ、山里が再生していくというFIT本来の姿をこのORC発電プラントは実現できるものである。今後、更なる効率向上等に努め、日本のバイオマス導入拡大及び山里の活性化に貢献していく所存である。

特集：バイオマス発電

バイオマスガス化発電用ガスタービンの開発

Development of Recuperated Gas Turbine for Biomass Gasification System



飜 雅英^{*1} 柏原 宏行^{*2} 松田 吉洋^{*3}

KAZARI Masahide KASHIHARA Hiroaki MATSUDA Yoshihiro

キーワード：バイオマス，ガス化発電，ガスタービン，低カロリー燃料，流動層

Biomass, Gasification, Gas Turbine, Low-calorie fuel, Fluidized Bed

1. 緒言

木質バイオマスは、地球温暖化防止へ寄与する再生可能なエネルギー資源の一つとして、その利用拡大が求められている。

しかし木質バイオマスは大量に収集輸送することが困難なため、小規模で高効率なエネルギー転換技術の開発、普及が必要とされている。

そのため川崎重工では日量数トン～数十トン程度の比較的小規模な木質バイオマスが発生する製材所などへの導入を目指し流動層ガス化炉とガスタービンによる低カロリーガス・燃焼技術を組み合わせた独自システムの開発および実証試験を実施した。

図1に示すように本システム⁽¹⁾では、ガスタービンの圧縮機で加圧した空気を流動層ガス化炉に供給し、流動層内で約650℃で木質バイオマスを熱分解によりガス化し、多量のタール成分を含む生成ガス（CO、H₂等）が配管内部で凝縮しないよう高温を保ったままガスタービン燃焼器に導入してガスタービンによる発電を行う事を特徴としている。

そのため、従来、処理が困難なことから除去または分解されていたタール成分を高温のままガスタービンに導入し、燃料として有効利用することができるので、同規模の直接燃焼・蒸気タービン発電方式に比べ約3倍（約20%）の高効率発電が可能であり、小規模な発電設備でバイオマスを有効に利用することが可能である。

さらに、ガスタービンからの排熱は再生熱交換器により圧縮機出口の空気を加熱し燃焼器に供給することによりガスタービンの熱効率を向上させるだけではなく、流動層ガス化炉で用いるガス化用空気の熱源に再生利用す

るほか、必要に応じて排熱回収ボイラなどを設置することにより蒸気や温水として利用することも可能であり、トータルシステムとして効率向上を図ることが出来るシステムとなっている。

本稿ではこのガス化発電システムの成立性を確認するために実施したベンチスケール試験で運用した20kW級再生型ガスタービンの開発、および、高知県で実施した実証試験で運用した150kW級再生型ガスタービンの開発について報告する。

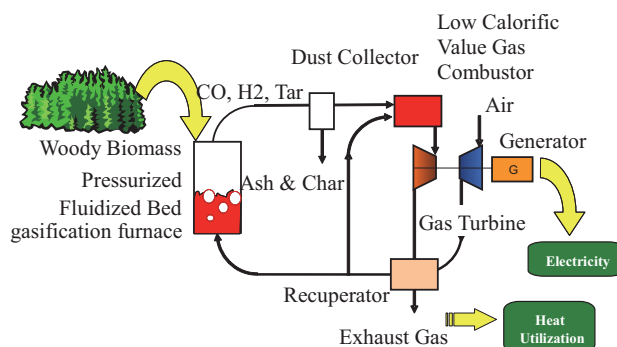


Fig. 1 Outline of generation system using gasification of woody biomass

2. 開発実施スケジュール

本システムは20kW級のベンチスケール試験、および150kW級の実証試験により開発を実施した。ベンチスケール試験の実施期間は2003年度から2005年度であり、本システムを構成する加圧流動層バイオマスガス化炉、ガス化ガス用高温フィルター、バイオマス供給機、および再生型ガスタービン等、それぞれの装置の開発、および、これらの装置を組み合わせた全体システムとしての性能確認をPhase 1～Phase 3の3段階の開発ステップで実施した。

ベンチ試験によりシステム全体の成立性、および、各装置の基本性能を確認した後に、開発の次のステップとしてベンチ試験設備をスケールアップした150kW級の

原稿受付 2017年1月10日

- * 1 川崎重工(株) 技術研究所 熱システム研究部
〒673-8666 明石市川崎町1-1
- * 2 川崎重工(株) 技術企画推進センター 研究企画部
- * 3 川崎重工(株) プラント・環境カンパニー
新規プロジェクト部

実証試験設備を用い2006年度から2009年度まで実証試験を実施し、システムの性能、制御性、および耐久性を確認した。

3. 20kW級ベンチスケール試験システム

3.1 加圧流動層ガス化炉

20kW級ベンチスケールシステムは図2に示すように加圧流動層ガス化炉と再生型ガスタービンにより構成されており、加圧流動層ガス化炉は図3に示す構造となっている。

ガス化炉は流動層下部に充填した珪砂をガスタービンの圧縮機で加圧した後、再生熱交換器により昇温された空気により流動化された流動層に木質バイオマスを投入し、約650℃の温度でガス化反応を発生させる構造となっており、種々の性状（形状、サイズ、含水率等）の木質バイオマスに対応可能である。なお、発生したガス化ガスにはダストが含まれているためガス化炉内部に設置したサイクロンおよびセラミックフィルターによりダストを取り除いた後、温度および圧力を保持したままガスタービン燃焼器へ供給される。

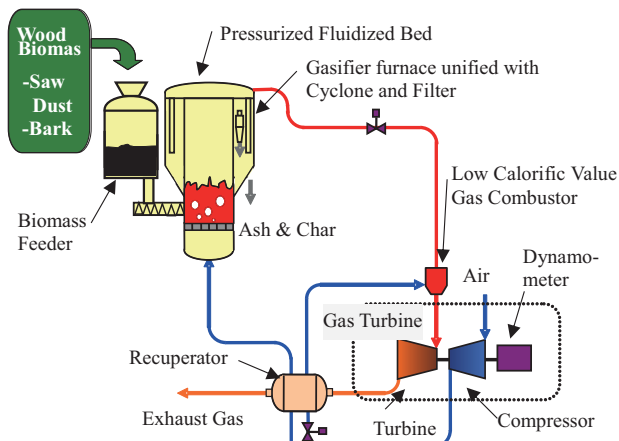


Fig. 2 20 kW class bench-scale system

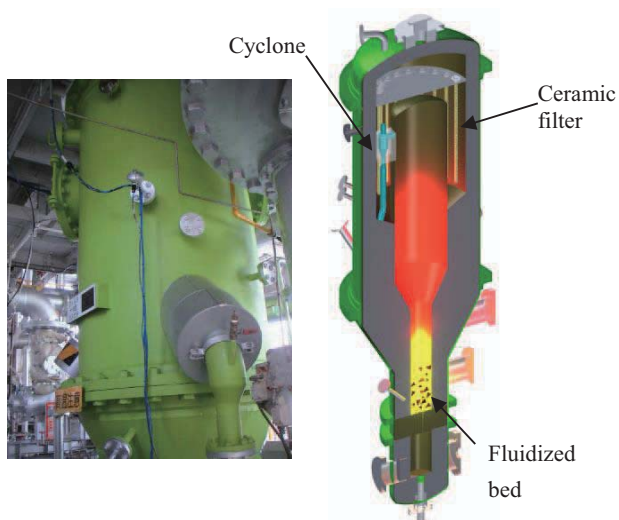


Fig. 3 Pressurized fluidized bed gasification furnace

3.2 再生ガスタービン

図4に再生型ガスタービン⁽²⁾の機器構成図を、図5にはガスタービンパッケージの内部の状況を示す。ガスタービン本体は当社製の出力20kW級S5型ガスタービンをベースエンジンとして新たに開発した低カロリー燃料用燃焼器とプレートフィン型熱交換器を組み合わせる再生型ガスタービンを開発した。

本システムではガスタービン圧縮機出口空気を熱交換器で加熱し、燃焼器への燃焼用空気とガス化炉の流動化兼バイオマス反応用空気として使用するため複雑な空気配管となっているが、熱変形による各部への応力が緩和でき、かつ、放熱損失および圧力損失が極力低下する事が可能な構造を採用している。

なお、ベンチスケール試験設備では試験条件の設定の容易さからガスタービンによる発電は行わず動力計により発生動力を回収し試験を実施した。

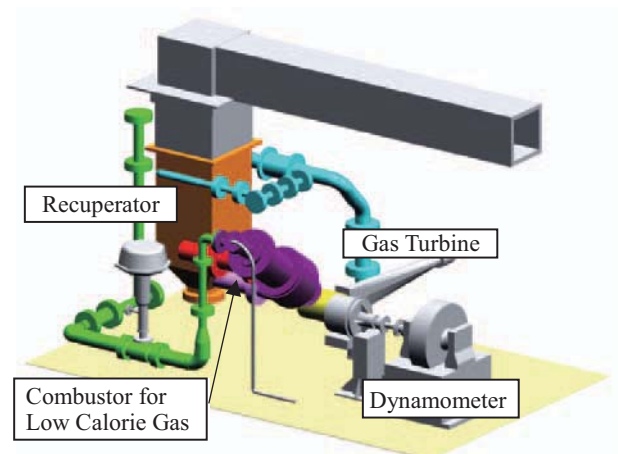


Fig. 4 Overall configuration of the gas turbine.

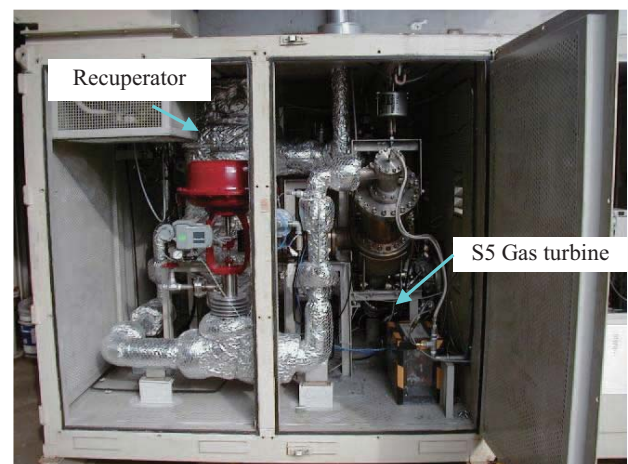


Fig. 5 Internal view of gas turbine package

3.3 低カロリー燃料用燃焼器

本システムで発生させるバイオマスガス化ガスは $4.2\text{MJ}/\text{Nm}^3$ 程度の発熱量しか無いため、通常ガスタービン燃料である天然ガスや灯油等の高カロリー燃料用の燃焼器では良好な燃焼特性を得ることが出来ない。

また、通常ガスタービンでは圧縮機出口からタービン入口までの流路には燃焼器しか無いが本システムではこの部分に燃焼器とガス化炉が設置されるため、燃焼器の圧損だけでは無くガス化炉各部（流動層、配管等）の圧損が加わることによるシステムの熱効率が低下する可能性がある。

そのため低カロリーのバイオマスガス化ガスでも十分な燃焼効率が得られ、かつ、圧損を極力低下させた燃焼器⁽³⁾、燃料ノズルの開発を実施した。以下のその特徴を示し、図6に低カロリー用ガスガスタービン燃焼器断面図を、図7に燃焼器ライナの写真を示す。

(1) ノズル形状

- ・バーナ部での流速を落とし、火炎の吹き消えを抑えるとともに、システム全体の効率に影響を与える燃焼器差圧を低くしている。
- ・燃焼器差圧がとれない状態で、低カロリー燃料と空気の混合状態を促進するため、バーナ部における燃料と空気の噴き出し方法を工夫するとともに旋回力の強いスワラーを用いている。

(2) 燃焼器

- ・低カロリー燃料の完全燃焼を促すため、ライナ内部の断面平均流速を低下させ、かつ、燃焼器長を長くする事により、通常ガスタービン燃焼器より燃焼ガスの滞留時間を長くしている。

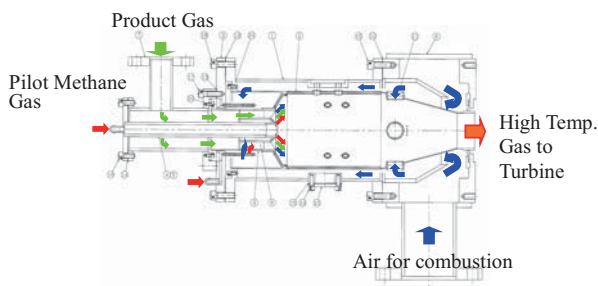


Fig. 6 Cross-sectional view of the gas turbine combustor

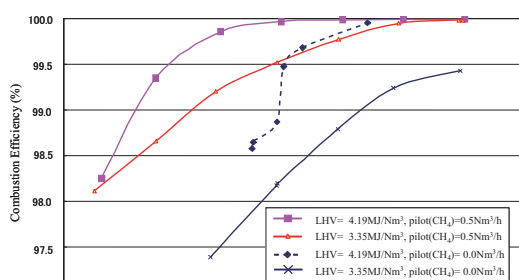


Fig. 7 Combustor liner for low calorie gas

この燃焼器の開発ではCFDによる燃焼器内部の熱流動解析による燃焼器形状の最適化を図り、次章に示すように燃焼器単体での燃焼試験により、その燃焼性能を確認した後、再生型ガスタービンに組み込みエンジン試験を実施した。

3.4 Phase 1 ベンチスケール試験

Phase 1 試験では流動層ガス化炉の試験としては主にバイオマスの形状、含水率、かさ密度等の性状の違いによるガス化性能の確認を実施し、ガス化反応条件を適正にすることにより炭素転換率75%を達成出来ることを確認した。

また、低カロリー燃料用燃焼器の試験としては基本性能を確認するためメタンを窒素で希釈し、発熱量をバイオマスガス化ガスと同程度にした模擬燃料ガスを使用した燃焼器要素試験を実施し、図8に示すように低カロリー模擬燃料ガスによる安定燃焼と十分な燃焼効率が得られることを確認した。

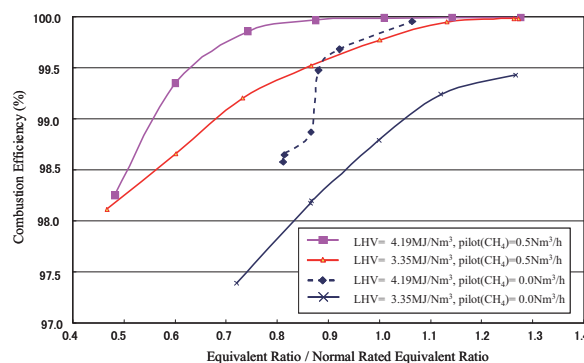


Fig. 8 Combustion test used simulated low-calorie gas

3.5 Phase 2 ベンチスケール試験

Phase 2 試験ではPhase 1 試験で性能を確認した低カロリー燃料用燃焼器に流動層ガス化炉から発生するバイオマスガス化ガス供給し燃焼試験を実施した。

その結果、CO、H₂、タールを主成分とする低カロリーのバイオマスガス化ガスでも模擬燃料ガスと同様、安定した燃焼を維持し十分な燃焼効率が得られ、今回は開発した低カロリー燃料用燃焼器がガスタービンと組み合わせても十分使用可能なが確認できた。

3.6 Phase 3 ベンチスケール試験

Phase 3 試験は図2に示すように加圧流動層ガス化炉と再生ガスタービンを接続したシステムの最終形態での試験であり、バイオマスガス化ガスを燃料としたシステム全体の成立性の確認および性能試験を実施した。

表1に代表的な試験結果、表2には、その時に使用したバイオマスガス化ガスの成分分析結果を示す。

表1に示すようにベンチ試験設備に含水率49%の木質バイオマス58 kg/h (wet base) を供給することにより発熱量 $4.2\text{MJ}/\text{Nm}^3$ の生成ガスを発生させ、この生成ガスだけでガスタービンを安定に運転し出力 16.3kWを

Table 1 Phase 3 bench scale test result

Biomass moisture level	49.1 %
Biomass supply rate	58 kg/h-WB
Gasification furnace bed temperature	660 °C
Cold gas efficiency	75 %
Biomass gasifier gas calorific value	4.2 MJ/Nm ³
Biomass gasifier gas flow	95 Nm ³ /h-WB
Gas turbine output	16.3 kW
System power generation efficiency	12 %
Gas turbine exhaust NOx concentration	40 ppm(O ₂ =16%)
Gas turbine exhaust dust concentration	1 mg/Nm ³

Table 2 Composition of representative biomass gasification gas

Gas composition	Vol(%)
H ₂	2.0
CO	6.7
HC	2.8
CO ₂	10.0
H ₂ O	40.0
N ₂	38.0
Other than those compositions, the tar is included.	

発生させることが確認できた。

3.7 ベンチスケール試験結果

ベンチスケール試験から得られた結果を以下に示す。

- 1) 流動層ガス化炉と再生型ガスタービンを組み合わせたシステムを含水率30～50%の木質バイオマス専焼により運転を可能な事を実証した。これは、小型

システムとしては世界初の成果である。

- 2) 木質バイオマス専焼時のガスタービン出力の変動はバイオマス供給量を制御することにより 16.3 ± 0.5 kWで制御可能であることを確認した。
- 3) 本試験結果から得られた熱効率は約12%であり、この試験結果をもとに計算した実機規模（650 kW クラス）の発電システムの発電効率は約20%である。

4. 実証試験用システム

実証試験⁽⁴⁾は高知県仁淀川町バイオマスエネルギー実験事業の一環として高知県佐川町にある株式会社ソニア佐川工場（高知県佐川町）にガス化発電実証システムを設置し、周囲から集められた林地残材等を利用して150kWの発電を行うとともに、排熱ボイラにより工場内の木材乾燥機に蒸気を供給することを目的に実施された。図9に実証試験システムのシステム図を示す。

また、この排熱ボイラの排熱を利用して600トン/年の木質ペレットを生産し、地元の温泉・宿泊施設や養護施設など4ヶ所に設置されたボイラの重油代替燃料として使用された。図10に株式会社ソニア佐川工場に設置されたガス化発電実証システムと隣接して設置されたペレット工場の外観を示す。

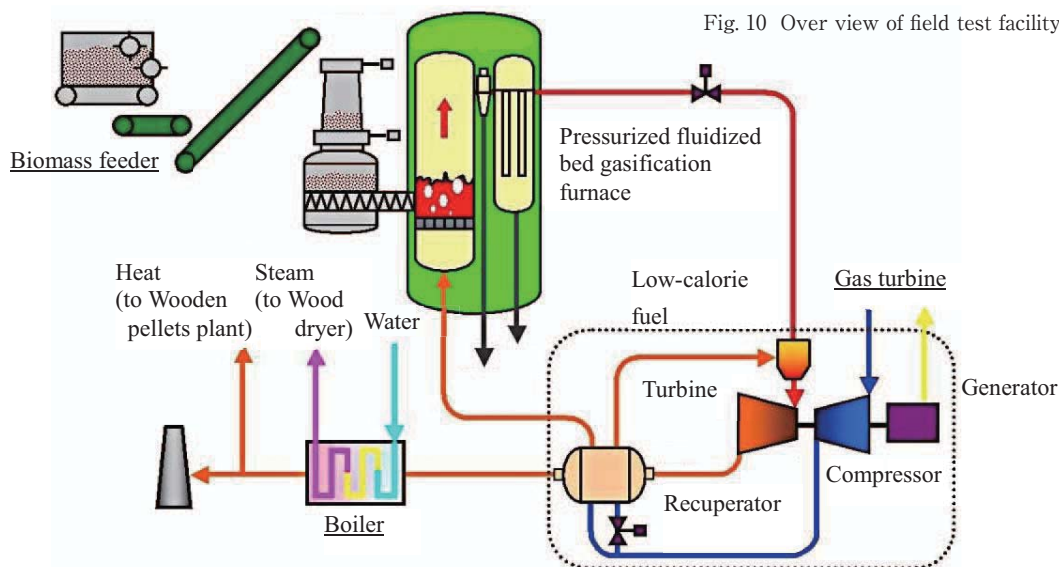


Fig. 9 The system flow of Field test facility

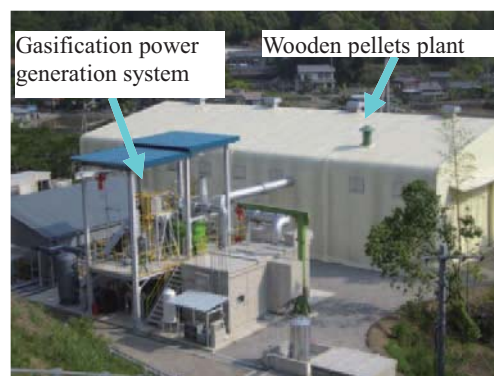


Fig. 10 Over view of field test facility

4.1 加圧流動層ガス化炉

実証試験用の流動層ガス化炉の基本的なコンセプトはベンチスケール試験装置のものと同様ではあるが150kW級システムへのスケールアップを図る際に、流動層、サイクロンおよびセラミックフィルター形状の最適化を実施している。図11に流動層ガス化炉の構造図を示す。

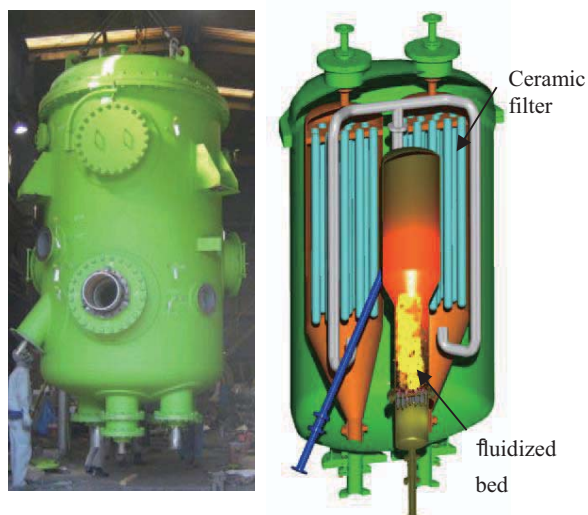


Fig. 11 Pressurized fluidized bed gasification furnace

4.2 再生ガスタービン

図12に再生型ガスタービンの機器構成図を示す。ガスタービン本体は当社製の出力150kW級のS1型ガスタービンをベースエンジンとし、ベンチスケール試験システムと同様に新たに開発した低カロリー燃料用燃焼器とプレートフィン型熱交換器を組み合わせ再生型ガスタービンを開発した。図13にはガスタービンパッケージの外観を示す。

ガスタービン圧縮機出口の空気はベンチ試験用の20kW級再生型ガスタービンと同様に再生熱交換器を通り燃焼器およびガス化炉へ供給されるが、圧縮機出口の空気をガスタービン外部に取り出す部分の構造が150kW級ガスタービンと20kW級ガスタービンでは異なるため新たな配管構造を採用した。

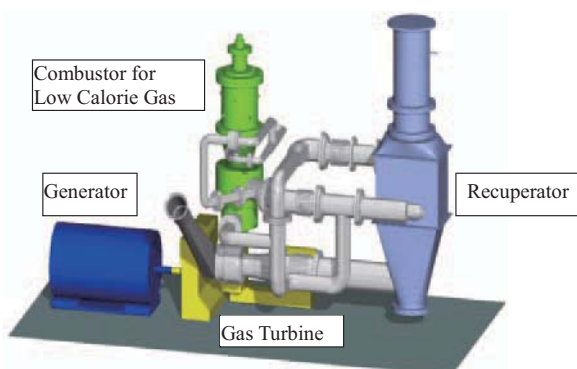


Fig. 12 The overall configuration of the gas turbine



Fig. 13 External view of gas-turbine package

この配管構造についても熱変形による各部への応力が緩和でき、かつ、放熱損失および圧力損失が極力低下する事が可能な構造としている。

4.3 低カロリー燃料用燃焼器

低カロリー燃料用燃焼器はベンチスケール試験システム用ガスタービン燃焼器と同様のコンセプトで設計し燃料の滞留時間を十分確保でき、かつ、圧損を低減できる構造としてスケールアップした。

燃焼器の形状を決定する際には図14に解析結果の一例を示すようにCFD解析を実施したが、本システムでは燃焼器入口空気配管の設置上の制約により、配管内部での偏流発生が懸念されたため燃焼用空気配管を含めた燃焼器内部の熱流動解析を実施した。

解析による構造検討の結果から燃焼器下部の燃焼空気入口部にスワラーを設置することにより圧損の上昇を抑え燃焼器内部へ流入する空気の偏りを防止出来ることがわかったため、解析によるスワラー形状の最適化を図った。図15に燃焼器の外観を示す。

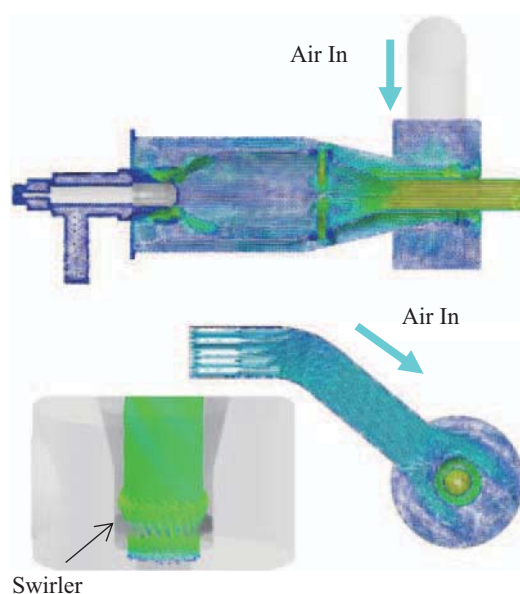


Fig. 14 CFD simulations to analyze the air flow inside the combustor



Fig. 15 Over view of the gas turbine combustor

また、本システムではシステム起動時の補助燃料としてはベンチスケール試験で使用したメタンではなく、燃料の入手性、コストを考慮し灯油を用いている。そのため、新たに灯油とバイオマスガス化ガスを使用可能なデュアルフューエル燃料ノズルを開発した。

この燃料ノズルのバイオマスガス化ガス供給部はベンチスケール試験用ガスタービンの燃料ノズルと同様のコンセプトで設計したものであるが、灯油供給部はガスタービン起動時の最も多くの燃料を供給する条件から、バイオマスガス化ガスへの切り替え直前のごく少量の燃料を供給する条件まで幅広い燃料流量で灯油を微粒化し供給する必要があるためエアブラストタイプの燃料ノズルを採用した。

4.4 実証試験結果

150kW級の実証試験システムは2008年4月末に試運転を終了後2008年5月から2009年3月まで実証試験を実施した。以下に試験結果を示す。

- 1) 補助燃料として灯油を用いたバイオマスガス化発電実証試験としてバイオマスガス化ガス専焼で150kWを発電し、その発電した電力を系統電力に供給した。図16にシステム起動時の灯油からバイオマスガス化ガスへの燃料切替時の運転データの一例を示す。
- 2) 本実証試験システムは専門の運転員だけでなく、一般の方々にも容易に運転できるようにシステムの起動から停止までの運転を全て自動化し、これによりDSS (Daily Start and Stop) 運転が可能なることを実証した。
- 3) 実証試験後にガスタービン内部の点検を実施しガスタービン内部が健全な状態を保っていることを確認した。

5. まとめ

20kW級ベンチスケール試験および150kW級実証試験用の再生型ガスタービンをそれぞれ灯油等の通常燃料を使用する発電用ガスタービンをベースとし、低カロリーのバイオマスガス化ガスを燃料として使用できるように燃焼器、燃料ノズルおよび再生用熱交換器を新たに開発し、それぞれの試験設備で加圧流動層ガス化炉と組み合わせ、木質バイオマス専焼による高効率発電が可能であることを実証した。

本プロジェクトで得られた成果は分散して存在するため有効利用が困難である木質バイオマスを利用した小規模な高効率発電システムの実現に貢献することが出来ると考えられる。

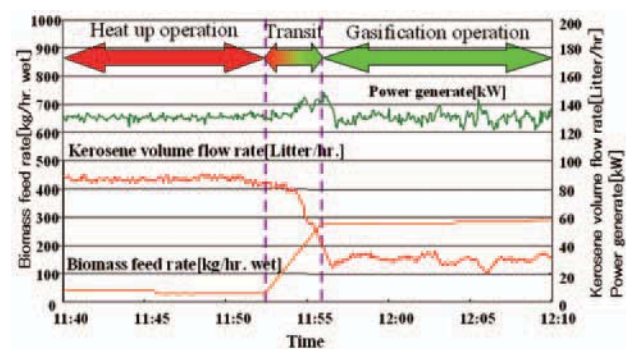


Fig. 16 The typical result of system start up operation

謝辞

本研究開発は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の支援を受け実施したものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 山田健一, 渡辺達也, 木質系バイオマスによる小規模分散型高効率ガス化発電システムの開発, コージェネレーション, Vol.19, No. 2 (2004)
- (2) 飴雅英, 柏原宏行, 堀川敦史, 渡辺達也, バイオマス加圧流動層ガス化システム用再生型ガスタービンの開発, 日本機械学会 第10回 動力・エネルギー技術シンポジウム論文集, (2005), pp.227-230
- (3) Kashiara, H., Kazari, M., YAMADA K., Watanabe, T., Development of an Efficient Small-scale Distributed Power Generation System Using Gasification of Woody Biomass, Proceedings, IGTC2007-ABS-173, (2007)
- (4) Kazari, M., Kashiara, H., Horikawa, A., Watanabe, T, et al. ,Development of an Efficient Small-Scale Distributed Power Generation System using Gasification of Woody Biomass, ICOPE-09, (2009)



根こそぎ集めて消滅させるマジカルなクラゲ処理のお話

Story of the Jellyfish Processing such as the Magic



石川 真也*¹
ISHIKAWA Shinya

昨年の夏は暑かったですね。また、海水温度も高かったんですよ。ところで、夏頃の発電所において脅威になるのがクラゲの大群です。クラゲが発電所の取水口に一気に押寄せると、数分のうちに蒸気タービンの冷却水量不足に陥り、プラントの出力制限や停止する事態にまで発展してしまうのです。海面が真っ白になり、その異様な光景を見ればゾッとすること間違いなしです。そして、何よりこのクラゲの大群は昼夜問わず突然発生するのがとても厄介なのです。

今回の喫茶室では、夏の電力事情を脅かすクラゲを根こそぎ集めてから消滅させるというマジカルなクラゲ処理についてお話したいと思います。

まずは、クラゲについて色々お話ししますが、発電所に押寄せるクラゲは主にミズクラゲという種類であり、全世界に生息しています。このクラゲは大食漢で海中の動物性プランクトンをひっきりなしに消費します。成体は直径約10～30cmの傘をもっており、95%程度が水分です。残りは、お肌に良いことでも知られるコラーゲンというたんぱく質ですが、酵素にとっても分解しやすい性質があります。表面を触るとヌルヌルしますが、これはムチンを含む粘液であり、擦ると身を守るために体内から放出されるものです。また、発電所周辺には、カワハギなどの小魚が生息しており、クラゲの内側にある生殖器付近を好んで食べます。クラゲは、陸揚げすると直ぐに死んでしまい、強烈な腐敗臭を発生しながらドロドロに液状化しますが、海水に混ざると白濁して泡立ち、水質を汚濁します。このため、発電所にクラゲが大量に押寄せると、ひっきりなしにバキュームカーによる廃棄物処理が行われることになり、量にもよりますがその費用は年間数千万円オーダーになることもあります。

さて、このような事情から発電所では、クラゲに関する様々な研究開発を行ってきておりますが、ある偶然を契機にマジカルなクラゲ処理の糸口が見つかりました。それはクラゲ監視装置の開発を行っていた時でした。試験前日にクラゲを魚籠に大量に捕まえて海中に入れておいたのにいざ使おうとしたらいらないのです。誰かが逃がしたのかと思い、再度、捕まえたのですが、翌日もまたいらないのです。「まさか、大量に入れると短時間で消えちゃうのか!？」そんな嘘のような発見から、クラゲ

の消滅メカニズムを研究し、『クラゲ洋上処理システム』という画期的な装置を開発しました。従来は、クラゲの流入を防止する網を張るというコンセプトが主流でしたが、負荷がかかりすぎると強度上の観点から強制的に網の一部を開くため、クラゲが一気に流入するという不安があったことから、新装置では逆にクラゲを極力受入れて適宜処理するというコンセプトにしています。数値流体解析により海水の流れに沿うように網を配置した回収機構を設けており、クラゲを根こそぎ集めます。そして、クラゲ専用開発したポンプで洋上に設置した貯留槽に活かしたまま形状を保ちながら移送します。実はここが重要なのですが、死んだクラゲを海中に戻すと水質を汚濁するほか、漁師以外は廃棄物投棄になるのです。

図1に貯留槽のイメージを示しますが、上層はシート、下層は網地構造となっており、ポンプ吐出流によって上層に緩やかな環流が発生するようにしています。こうして上層にクラゲを活かしながら、密集させて収容することにより、クラゲは餌をとりにくい状況下で互いに接触して擦れるため、粘液を放出しながら徐々に減量します。そして、弱ったクラゲから順々に海水の流れにより下層の下流の網地に内側に晒しながら張付くため、小魚から簡単に捕食され更に減量が促進します。その過程で死んだクラゲは自己の消化酵素や海中の微生物により分解されながら消滅するため水質汚濁や腐敗臭を発生させず、自然の摂理や食物連鎖を利用しながら環境とコストにやさしいシステムに仕上がりました。現在は、様々なタイプの取水口形状に対応できる回収機構の開発が行われています。

最後に、近年の再生可能エネルギーの大量導入に伴い、高効率で機動性能の高いGTCC発電への期待が益々高まっています。ただし、折角の高性能プラントも運転できなければ意味がありません。対策を万全にし、クラゲの大群が突然きても焦らないようにしたいですね。

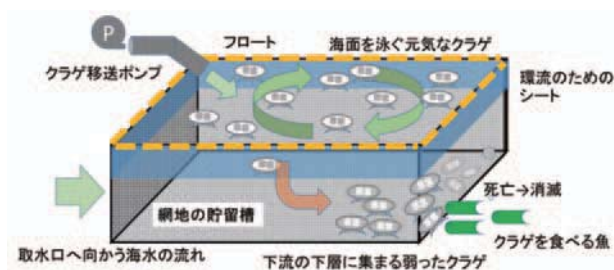


図1 貯留槽のイメージ

原稿受付 2017年1月30日

* 1 東北電力㈱ 新潟火力発電所
〒950-8744 新潟市東区桃山町2-200



学校で習わない英語 (10)

English Which Is Not Taught in School (10)

吉中 司*1
YOSHINAKA Tsukasa

－F－章 (続き)

{英語} : a fudge factor

{意味} : 「工学上の数式で、答えのリスクを低くする為の、経験に基づいた係数」

{説明} : “fudge” は18世紀の中頃、「馬鹿な!」とか「ナンセンス!」と言う意味でした。その後、印刷工達の間での通り詞として、「手元にあるものを使っての、出来るだけの仕事」とか「理想的ではないにしても、まあまあの仕事」という意味で使われていた様です (参考資料4)。

上の歴史的な話からは少し飛躍するのですが、今日この言葉は、エンジニア達が、或る機械の設計や機械の性能の解析をする際に使う数式に、その答えの技術的リスクを低くするためとか、実験結果に合わせるために使う係数のことです。技術者同士のミーティングで、よく出くわす言葉です。

例を挙げましょう。ここに、二人のエンジニアが、或る機械の性能を解析するのに使う数式について話し合っているとしましょう。「でも、こんな簡単な式で、本当にこの複雑な機械の性能を解析出来るのか?」「そうなんだよ。それが難しいところさ。そこで、この式のこの項に、経験から得られた係数を掛けてあるんだ」「つまり、実際の現象に合う様に工作してあるわけか」この最後の文を英語で、“So, you are using a fudge factor.”と表現できます。

－G－章

{英語} : I am good!

{意味} : (1) 「元気です」、(2) 「(いいえ,) 結構です」

{説明} : この表現、私の経験では、アメリカでしか聞いた事がありません。これには二つの意味があり、その一つは、英語で「お元気ですか」と聞かれた時の答えです。イギリスやカナダでなら “I am very well, thank you!” となるところですが、それがアメリカでは “I am good!” で通るのです。

それともう一つ別の意味が、ごく最近アメリカで聞かれるようになりました。例えば、或る人が何かで夢中になっている時や何かを食べている時に、友達が「何か他の事をしようか」とか「これ、別のものだけど食べる」と聞いたとしましょう。それに対して「いや、今いいよ」と答える場合に、“No. I am good!” という言葉が返って来るのです。

{英語} : a smoking gun

{意味} : 「反論の余地の無い証拠」、「確固たる証拠」

{説明} : その昔の西部劇の一場面を思い浮かべて下さい。アメリカの南部、砂漠のような荒地に作られた小さい街の中にある一軒の安サルーン。ここに来る連中は、カウボーイか東部からの流れ者。それでなくとも荒っぽい気性のこの連中の中の二人が、猛暑とアルコールにあおられてか、決まったような喧嘩を始め、結局はピストルの撃ち合いとなって、一人が死んでしまいます。

撃ち合いの音を聞いた街のシェリフは、即刻サルーンに駆け込んで来、床に倒れている一人を見つけます。「お前、お前だろう。これを撃ち殺したのは」シェリフは、連中の内の一人で、死体から丸テーブルを隔てたところにつっ立っている男のところへ、早足で詰め寄り、話せば飛んだツバが相手の顔面につく程の距離まで顔を近づけて、詰問します。問われた男は無口のままです。「お前、ノー、とは言わせんぞ。お前のピストルを見ろ。反論の余地の無い証拠だ」画面は、その男の無表情な顔から、下げた腕に沿ってゆっくり下がり、手の中に持つピストルを映し出します。その銃口からは、いまだ煙がゆらぎ出ているのです。

ここで使用例を一つ。或る実験結果を見て、予測していた事が確かに起こっていたと確認できる場合に “Look at this data. This is really a smoking gun for our prediction.” と言えます。

{英語} : Go figure!

{意味} : 「考えられん」

{説明} : この表現は、日常会話でよく出くわします。理屈では考えられない様な事が起こって、ビックリした場合に、日本語なら「考えられんよ」というところで、この言葉が使われるのです。主に北アメリカで使われるようです。

一例を挙げましょう。クラス平均程度の高校生が、先生の助言を聞かず、競争率の高い或る一流大学の入試を受け、見事合格したとししましょう。先生はあっけに取られて「エエッ、あの大学の入試に合格したって。そんな事、とても考えられんよ」と言われました。これは、英語で、“Did he pass the entrance exam of that university? Go figure!” となります。

参考資料 (参考資料は本連載を通した番号で示しています)

4. “Oxford Dictionary of English Idioms, Third Edition”
Edited by John Ayto, Oxford University Press, 2009.

原稿受付 2016年12月22日

*1 独立コンサルタント

Asian Congress on Gas Turbines 2016報告

三好 市朗
MIYOSHI Ichiro

1. はじめに

Asian Congress on Gas Turbines (アジアガスタービン会議) はガスタービンに関する情報交換をアジア地域において推進することを主目的として2005年に始まった。前回のACGT2014において、従来の日中韓3か国に加えてインドを迎えることが正式に決定され、第5回会議であるACGT2016は2016年11月14日から11月16日まで、インド・ムンバイのインド工科大学ボンベイ校で開催された。ACGTは隔年で8月に開催されるのが近年の定例となっていたが、今回は雨季と暑さを考慮して11月の開催となった。

2. 会議概要

ACGT2016推薦の宿泊ホテルから講演会場のVictor Menezes Convention Center (VMCC, 図1) までは、学会側で送迎バスをチャーター頂いた。インド工科大学ボンベイ校のメインゲートは大通りに面しており、朝は通勤ラッシュで大渋滞である。会場に向かう道すがらインドの日常に接することができた。

参加費は一般\$250, 学生\$100と過去4回と同じ水準でありProceedings (USB), 会期期間中の昼食, Tea Time, Banquetを含んでいた。講演はKeynote speech 4件, Forum 2件, そして一般講演は4つの部屋に分かれて117件の発表が行われた。今回は117の講演論文が22のセッションに分かれて講演された。158の参加登録があり, 59人は日本, 韓国, 中国, タイ, 99人がインドからの出席であった。一般講演数は前回と同程度であった。各会場での議論が活発に行われ, 発表時間を超過しても議論が続くセッションが多く見られた。国別の発表件数を過去の数値と合わせて表1に示す。今回はインドからの発表が多く, 特に学生の積極的な参加, 質疑応答が見られた。

2.1 Keynote Speech

14日はスイス連邦工科大Prof. Reza Abhariにより “Gas turbine Technologies enabling Global Transformation” という題目で都市化 (Urbanization), 低炭素化 (Decarbonization), 電化 (Electrification) を主要項目として講演があった。14日の二つ目の講演はGE Aviation上海の Dr. Xiaoyue Liuによる講演でLEAPエンジンの開発を中心に空力, 材料 (カーボンファイバー, CMC), 3Dプリンティング, 翼冷却技術の紹介があった。最近注目されている3Dプリンターを使った生産性向上, また, エンジンの検査にカメラを使った自動認識技術を適



Fig. 1 Victor Menezes Convention Center (VMCC)



Fig. 2 Lunch hall (VMCC 1st floor Foyer)

Table 1 Technical session papers by country

	2009年	2012年	2014年	2016年
韓国	17	7	38	6
日本	34	23	30	18
中国	10	55	31	12
スイス	2			
米国			2	1
インド			10	78
インドネシア	1			
イラン		6		
英国		1		
ギリシャ		1		
マレーシア		1		
タイ				2
合計	64	94	111	117

用し不具合チェックを加速するなど興味深い内容が講演された。15日は始めにシーメンスのMr. Vinod Philipから“Bringing Power to the people through evolving technology reliability and sustainability”という題目で講演があった。シーメンス社のポートフォリオ、強みに関する紹介があり、国・地域毎の大型ベース電源、小型分散電源の指向に合わせた戦略紹介がなされた。15日の二件目はバージニア工科大のProf. Srinath Ekkadから最新の冷却技術に関して紹介があった。ACGT2016のKeynote Speechは会期の午前に開催されたということもあり学生、発表者等、多くの参加者が見られた。

2.2 Forum

ACGTではテーマを決めて各国の代表者による講演と議論を行うフォーラムを企画することが恒例となっている。本会ではフォーラムが2件行われた。以下、概要を示す。

15日の午後、“Energy Strategies of China, India, Japan and Korea”と題して中、印、日、韓のエネルギー戦略が紹介された。図3に講演の様子を示す。司会はインド工科大 ボンベイ校のProf. Shantanu Bandyopadhyayで韓国からは韓国大学のProf. Jin Taek Chung、日本からは三菱重工業の佃嘉章特別顧問、中国からは中国科学院上海高等研究院のDr. Weiguang Huang、インドからはLM Turbines - CanadaのMr. Jitendra Bijlaniが登壇した。韓国からはIEA (International Energy Agency)の統計データにより、韓国国内事情の説明があった。発送電の課題、再エネ導入時の問題、原子力・石炭火力プラント追設の課題が示された。日本からは日本特有の電力事情を考慮し、急速起動を可能とするガスタービンの必要性が取り上げられた。中国はシェールガス産出国でもあり、天然ガス焚き発電設備が増加すると予測されている。2015年から2020年に向けて再生エネルギーが9%から15%に増加し系統安定化、スマートエネルギー等の課題が紹介された。

インドからは国内のエネルギー資源として石炭の割合が今後も高いことが示された。水、ガス、再生エネルギーと電力源はあるが石炭利用の伸び分が50%を占める。再生エネルギーが電力系統に導入される際の課題が紹介された。

16日の午後、“Aero-engine developments of China, India, Japan and Korea”と題して中、印、日、韓のエネルギー戦略が紹介された。図4に講演の様子を示す。司会はQuest Global USAのDr. Mani Subramanianで韓国からはHanwha TechwinのDr. Chan Sun Lim、日本からはJAXAの二村尚夫氏、中国からは中国科学院のProf. Lin Feng、インドからはGas Turbine Research Establishment (GTRE)のMr. M Z Siddiqueが登壇した。

各国、自国のエンジン開発の歴史、産業界のシェア状況、今後のテクノロジー開発に関して独自の視点で報告があり質疑応答があった。日本からは多種燃料対応、電



Fig. 3 Panelists of the first forum session (from left, Prof. Bandyopadhyay, Prof. Chung, Mr. Tsukuda, Dr. Huang, and Mr. Bijlani)



Fig. 4 Panelists of the second forum session (from left, Prof. Lim, Mr. Futamura, Prof. Feng, and Mr. M Z Siddique)

動化、新技術としてOpen-Rotor, Distributed Fanの紹介があった。インドからはAero Engine Developmentと題する講演があった。インド国内として民生用エンジンは輸入、軍事用、産業の船舶用に関しては国内向けに技術開発を推進している。設計技術は国内でIn-houseで進めており解析技術の強化を進めている。リグ試験装置は6種あり実証試験を進めている。最後にAsian Collaboration in Gas Turbine Technology (ACGT) ということで雇用創出 (Workshare), 人材交流 (Human Resource Share), インフラの共同利用 (Infrastructure), 設備投資 (Investment) を活用して開発共同体を作るという構想が述べられた。これは航空エンジン開発で良く行われている共同体でありアジアでも作るというのは面白いアイデアである。質疑応答でソウル国立大学のProf. Seung Jin Songからも好ましいコンソーシアムとのコメントがあった。

中国からはProf. Fengが翼端間隙から旋回失速に至るメカニズムを詳細に講演され、ケーシングトリートメント等の物理現象に特化した技術紹介がなされた。

2.3 講演論文

ACGT2016では117の講演論文を22のセッションに分

けて講演が行われた。セッションによっては講演時間を超過しても質疑が絶えないセッションもあり活発な議論がなされた。特に、インドの学生からの質問が多く、学生にとっても理解が深まる良い機会と考えられる。

2.4 Banquet

2日目の夜に、会場からバスでHotel Beatleに移動しBanquetが開催された。最初にインド工科大ボンベイ校のProf. Bhaskar Royから挨拶がありBanquetがスタートした。その後は各テーブルで和やかに歓談、交流が行われた。今回は2018年に日本で開催される予定であることがProf. Royから伝えられ、渡辺GTSJ国際委員長、日本側のACGT2016実行委員 山根委員長により、今後の会場選定などについて説明がなされた(図5、図6)。

3. おわりに

Keynote Lectureの講演でもあった通り、アジア地域でも電力供給ニーズが異なる。クリーンエネルギーの供給源としてガスタービンは期待されており、日本ガスタービン学会としてもガスタービンの将来像を考えるうえアジア地域での連携はますます重要になる。最後にACGT2016はインド工科大 Prof. Bhaskar Roy, Prof. A.M.Pradeepの研究室を始めインドのLocal Organizing Committeeメンバー、学生スタッフの方々の多大なご協力によってなされたものであった。関係各位に感謝したい。(国際委員会/ACGT2016実行委員会)



Fig. 5 Announcement of ACGT2018 in Banquet
(from left, Prof. Roy, Prof. Watanabe, and Dr. Yamane)



Fig. 6 Hotel Beatle Banquet hall

「Asian Congress on Gas Turbines 2016」参加助成について 表彰委員会

2016年11月14日～16日にムンバイ(インド) IIT BombayにてAsian Congress on Gas Turbines (ACGT) 2016が開催されました。日中韓で始まったACGTにおいて初のインド開催であり、当学会ではこの国際会議に参加して講演を行った若手研究者に対して、本人からの申請に基づき、交通費の一部を助成しましたので、その結果についてご報告致します。

本助成制度はガスタービンおよび関連分野の若手人材の育成や技術の発展を奨励することを目的に、ACGT 2016に参加して講演を行う満30歳未満の若手研究者に対して、往復交通費の半額相当を助成するもので、所属機関から参加費や旅費が支給されない方を対象としています。2016年7月31日を期限として応募者の募集を行ったところ、瀧澤隼人君(岩手大学大学院)および斎藤寛人君(東京大学大学院)から募集がありました。表彰委員会内で慎重審議の結果、この2名に対して日本-インド

間のエコノミークラス(直通)格安航空運賃や滞在地における宿泊費などを勘案して、一人当たり6万円の参加補助を行うことを決定致しました。

助成対象者の2名からは、ACGT2016への参加報告をご提出いただきましたので、学会誌に掲載させて頂きました。2人とも初めての国際会議への参加ということで、参加報告からも充実した3日間を過ごし、本人にとって貴重な体験になったことがお分かり頂けると思います。

本助成制度が学生諸君をはじめとする若手研究者を奨励する契機となると共に、ガスタービンおよび関連分野の将来を支える若手人材の育成に寄与することを期待しております。なお、表彰委員会では2017年度に開催される日本ガスタービン学会定期講演会(松山市)においても若手を対象とした参加助成を検討しております。学生諸君の積極的な参加をお待ちしております。

Asian Congress on Gas Turbines 2016に参加して

瀧澤 隼人^{*1}

TAKISAWA Hayato

1. はじめに

今回筆者は、初のインド開催となる Asian Congress on Gas Turbine (ACGT2016) に参加した。本学会は2016年11月14日から16日までの3日間に渡って開催され、通例とは異なる11月開催となった。本稿では筆者がACGT参加の感想をインド滞在の体験も交えながら述べる。

2. 学会への準備

今回のACGT参加は、私にとっては人生初の国際学会であり、前刷り執筆段階で非常に苦労したのを今でも覚えている。また、インドはパスポートに加えてVisaの取得も必要だったため、インド渡航前から不安にかられ、だいぶ精神的ダメージがあった。結果的にはインドの空港で取得できる Visa on Arrival を使用したが、手続きに時間が相当かかり、空港を出るまでに1時間以上は時間を要した。

3. 学会参加について

学会中は圧縮機や燃焼器をはじめ、多種多様な研究内容が発表されていたが、筆者自身はフィルム冷却に関する研究をしている関係上伝熱分野に興味があったため、Heat Transferのセッションを主に聴講した。発表内容の中には内部流路を回転させ遠心力を考慮した伝熱計測結果や、主流乱れがフィルム冷却性能に与える影響調査など非常に興味深い報告がされており、発表内容を完全に理解できたとは言いが今後の研究方針を考える良い契機となった。

筆者の発表自体は“Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices Under High Density Ratio”という題目で、高圧タービンにおけるフィルム冷却に関する発表をおこなった。フィルム冷却性能向上を目的とした流れ制御デバイスの形状最適化をタグチメソッドによって実施し、導出された形状に関する性能評価を数値解析・実験の両面からおこなったものである。発表練習は十分やってきたつもりだったが、やはり本番というのは緊張するもので、自分の話す英語が聴衆にしっかりと伝わっているのか不安であったし、今回の学会参加を通して、コミュニケーションツールとしての英語の重要性を改めて実感した。

4. 文化の違い

筆者がインドに滞在した期間は学会日程分を含めて5日間だったが、この短期間でも日本との文化の違いを十分過ぎるほど感じる事ができた。まず食文化だが、毎食必ずと言っていいほどカレーを食べた記憶がある。しかしインドのカレーは非常にバラエティ豊かで毎日味の異なるカレーを楽しむ事ができた。

また、個人的に印象に残っているのはインドの交通事情だ。インドでは自動車運転時のクラクションに対する認識が日本と大きく異なっており、他車を追い越すときや横切るときなど、自分の存在を知らせるためにクラクションを鳴らす。そのためクラクションが絶えやむことなく朝から晩までなり続けているような様子だった。加えて横断歩道もほとんどないため、道路を渡る際には歩行者自身が車に注意して渡る必要があり、慣れるまで大変だったのを覚えている。

5. さいごに

今回の国際学会参加にあたり、参加助成を頂いたガスタービン学会をはじめ、非常に多くの方々に支援して頂いた。この場を借りて深く感謝の意を表したい。次回開催地は日本とのこと。英語で発表する機会は中々ないと思うので、是非ともより多くの学生に参加してもらいたい。



ビリヤニとチキンカレー



市街地の様子

原稿受付 2017年1月20日

*1 岩手大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 修士2年
〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

Asian Congress on Gas Turbines 2016に参加して

斎藤 寛人^{*1}
SAITO Hiroto

1. はじめに

インド西海岸に面するマハーラーシュトラ州の州都であるムンバイにて、2016年11月14日から16日までの3日間、Asian Congress on Gas Turbines (ACGT) が開催された。筆者は日本ガスタービン学会の学生向け参加助成を受け本学会に出席した。本稿では筆者がACGTで体験したことを、感想を中心に述べる。

2. インドにて

ムンバイは、インド西海岸に位置し人口1,248万人と世界有数の大都市で、Gate of India など英国風の歴史的建造物も多く見られる。6月から9月の雨季を避けるため、今回のACGTは通例と異なり11月開催となった。会場のIIT Bombay内の所々には建物を雨から守るための木材が積んであり、その激しさを物語っていた。また、会場から少し歩けばボワイ湖があり、追い込み漁、釣り、休憩などそれぞれの目的で多くの人々が集まっているのが印象的であった。

インドへの渡航にはビザが必要であり、Conference Visaの事前取得には東京か大阪のインドビザセンターに足を運ばなければならない。現地空港到着時にビザを取得することも可能だが、手続きに2時間程度かかるので、事前取得が安心である。他には電源アダプター、腹痛薬などを用意し、学会前日に到着する便に搭乗した。10時間程度のフライトであったが快適に過ごせた。

学会中は、主に伝熱分野のセッションに出席した。筆者自身の研究テーマも伝熱関係であるが、同じ分野でも研究の対象は翼型の熱交換器やピンフィン、燃焼器など様々で新鮮であった。どのセッションでも闊達な議論が行われており、発表者と数人の質問者の間で議論が行われることもしばしばであった。

筆者自身は、“Conjugate Heat Transfer Analysis on Surface Air Cooled Oil Cooler”と題した航空エンジン用の熱交換器に関する発表を行った。高速流体中の放熱フィン周囲における温度場及び流れ場を、流体・固体の温度を連成させた共役熱伝導解析手法を用いてシミュレーションし、その放熱特性について論じた。発表後には、乱流遷移に関する指摘を受けたり、現在の計算コードの問題点とその対処法について同分野に取り組む研究者からアドバイスを受けるなどした。それまでと異なる

視点から自分の研究を見直し、今後研究を進めるうえで必要となる項目について整理できた。

英語での発表は、緊張もありスマートに進めることは難しく、質問に対して的確な返答ができたとは言い難いが、初めて聞く人々にどう説明すると理解が得られるか、他の参加者の発表と比べながら考える良い機会になった。海外での学会出席は自信にもつながったので、これからはより多くの人に自分の研究に興味を持ってもらえる発表を目指したいと思う。

学会にはスタッフとして現地の大学院生が参加しており、彼らとも交流を深めることができた。日本語を勉強している学生と日常語をお互い教え合ったり、パンケットでふるまわれた食べ物について説明を受けるなど楽しい時間を過ごした。滞在中の食事については、朝昼晩とほぼすべてカレーであったのだが、味付けが多様で意外にも飽きることはなかった。学会の昼食でも多くの種類のカレーがふるまわれ、ライスやナンも数種類が用意されていたので毎日楽しみにしていた。ほかにも、ティータイムにふるまわれるチャイ、植木のヤシ、大学構内を歩く牛など随所に異国情緒を感じることができた。

3. さいごに

初めての国際学会ということで不安や苦勞もあったが、自分の研究を海外の方々に向けて発表するという貴重な体験が得られた。また、現地の院生との交流を深め、現地の文化に触れるなど楽しく過ごすことができた。自分もまた参加する機会があればぜひ行きたいが、後輩にもすすめたいと思う。参加助成をいただいた日本ガスタービン学会に心より御礼申し上げる。



学会の昼食風景（筆者左から2番目）

原稿受付 2017年1月20日

*1 東京大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 修士2年
〒113-8656 文京区本郷7-3-1

2016年度第2回見学会報告

手塚 津奈生
TEZUKA Tsunao

2016年12月2日午後、神奈川県横浜市にある扇島パワーステーションにおいて、本会主催の見学会が開催された。参加者22名は川崎駅から貸切バスに乗り、JFE扇島のセキュリティゲートや扇島専用の海底トンネルを抜け、30分ほどで3本の煙突が特徴的な発電所に到着した。

株式会社扇島パワー（以下「扇島パワー」）代表取締役社長の沖野肇氏により、発電所の概要のご説明や施設のご案内をしていただいた。

扇島パワーは東京ガス株式会社と昭和シェル株式会社の出資により2003年8月に設立され、硫黄酸化物を排出しない天然ガスを燃料としたガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電を行っている。隣接する東京ガス株式会社の扇島LNG基地から、配管を通じ天然ガスを受け入れており、扇島パワー独自の貯蔵設備を持たずに安定的に燃料を調達することが可能となっている。また、放水温度を取水温度+7℃以下に抑えたり、排出ガス中の窒素酸化物濃度を3.2ppm（16%O₂換算）以下としたりするなど環境にやさしい発電を行っている。

営業運転開始は1号機が2010年3月、2号機は同7月で、建設時期未定となっていた3号機は、2011年の東日本大震災により電力需給が逼迫したことを受けて増設が決定し、2016年2月に運転を開始した。この3号機の短工期での運転開始は、3号機が1および2号機と同じ設計であるだけでなく、当初は3基とも2010年に竣工させる計画であったため、環境アセスメントを2007年までに3号機を含めて完了させていたことが大きく寄与している。

ガスタービンと蒸気タービンの発電量は1台あたりそれぞれ約27万kWと14万kWで、3セット合計の約122万kWは一般家庭約200万軒相当の需要を賄うことができる。

「運転・監視」「給電管理」などは常勤18名で効率的に行っており、メーカーとの長期保守契約により、常に設備を良好な状態に保つことができている。ガスタービンのメンテナンスも基本的には現地で実施しているが、高温部品などはメーカーに送り返している。

屋内の見学では、「ガスタービン」「蒸気タービン」「発電機」のパッケージが1つ大空間に3セット並んでいるのを見ることができ、パッケージ越しだがガスタービンの音と振動を肌で感じることもできた。

パッケージの横を通り抜け屋外に出ると、排熱回収ボイラーの上部側面におり、見下ろした地面が遠く、施設の巨大さを実感できた。前方には高い煙突が空に伸びており、600℃の排熱が80℃となって放出されている。この85mの高さの煙突は、2005年に世間を騒がせた耐震偽装問題の直後の設計のため、非常に堅牢なつくりとなっている。

排熱回収ボイラー手前には、施設内で唯一炎が見られる場所の助燃バーナーの窓があったが、残念ながら冬場のため未使用で炎は見られなかった。

地上に降り、取水口や水処理設備、放水口なども見学した。運転を開始した年にクラゲが大量発生し、取水口から吸い込んだクラゲの除去や処分に多大な手間と労力を要したことから、気泡のカーテン発生装置を準備したが、未だ出番がなく効果の把握はできていないとのこと。

全体を通じて非常に活発な質疑があり、参加者の関心の高さがうかがえた見学会であった。

最後に、本見学会を実施するにあたり多大なご尽力・ご協力をいただいた扇島パワーの皆様、そしてご参加いただいた皆様に、心より御礼申し上げます。

（集会行事委員会委員）



発電所前での集合写真

第45回ガスタービンセミナー報告

松沼 孝幸

MATSUNUMA Takayuki

第45回ガスタービンセミナーが、「ガスタービンおよび航空エンジンの最新技術動向」をテーマとして、2017年1月26日(木)、27日(金)の2日間にわたり、本田技研工業株式会社和光本社ビル内1F会議室にて開催された。前年を上回る122名の方々にご参加いただき、活発な質疑応答が行われ、盛況の下に無事終了した。講師には、航空機エンジンと産業用ガスタービンのメーカー・大学・研究機関の第一線でご活躍されている方々を迎え、11件のご講演をいただいた。以下に概略を報告する。

1日目は、「セッションⅠ：航空エンジンの最新技術動向と材料技術」として、6件の講演が行われた。1.「航空機エンジン技術の研究開発動向」では、渡辺紀徳氏（東京大学）が、民間エンジン国際共同開発と防衛エンジン研究開発の現状、低燃費化・CO₂削減・低騒音化・NO_x削減などの研究開発動向、電動化や新燃料利用など将来技術の展望を説明した。2.「防衛装備庁における次世代エンジン研究について」では、佐久間俊一氏（防衛装備庁）が、防衛装備庁でのエンジン研究開発体制とこれまでの歩み、次世代エンジンの開発状況などを説明した。3.「航空機エンジンにおける複合材適用技術動向」では、北條正弘氏（宇宙航空研究開発機構）が、複合材の航空機エンジンへの適用事例や最新の技術動向、JAXAでの研究開発例などを説明した。4.「HF120ターボファンエンジンのCFRP製静翼開発」では、穴蔵道秀氏（Honda Aero Inc.）が、CFRP製ファンアウトレットガイドベーンのFAA材料認定の取得、量産製造プロセス課題の解決、耐空性評価などの概要を説明した。5.「航空用エンジンGeared Turbo Fanのパワーギアボックス技術」では、赤堀広文氏（川崎重工業）が、Geared Turbo Fan用パワーギアボックスの技術的特徴、歯車の設計や製造について説明し、将来のパワーギアボックス技術の課題を解説した。6.「航空機

エンジンへのCMC適用開発」では、中村武志氏（IHI）が、セラミック基複合材料（CMC）の材料・部品の開発動向をIHIでの事例を中心に説明した。

2日目は、「セッションⅡ：ガスタービンの高性能化技術と新エンジンシステム」として、5件の講演が行われた。7.「極超音速予冷ターボジェットエンジンの開発研究」では、佐藤哲也氏（早稲田大学）が、JAXAにおける予冷ターボジェットエンジンのシステム燃焼実験や要素研究などの開発内容と、飛行試験を見据えた将来構想を説明した。8.「燃焼数値シミュレーションの最新動向」では、黒瀬良一氏（京都大学）が、燃焼シミュレーション手法の基礎、燃焼振動などの基礎研究例、実機を対象とした応用研究例、今後の動向について説明した。9.「カーボンフリー燃料アンモニアとアンモニア燃焼ガスタービンの技術開発」では、壹岐典彦氏（産業技術総合研究所）が、50kW級マイクロガスタービンを灯油とガス燃料の双方で運転できるように改造して実施しているアンモニア直接燃焼ガスタービン発電の実証研究について説明した。10.「超臨界CO₂サイクル火力発電用ガスタービンの開発」では、新関良樹氏（東芝）が、米国企業3社と共同開発中の超臨界CO₂サイクル発電システムの特徴と東芝での開発状況を説明した。11.「ガスタービンコンバインド発電におけるICT（情報通信技術）による顧客付加価値向上の取組例」では、今北浩司氏（三菱日立パワーシステムズ）が、情報通信技術を活用したプラント運転データの分析診断技術による信頼性の向上・運転保守の合理化・最適化について説明した。

最後に、ご多忙中、貴重な内容をご発表いただきました講師の方々、会場の準備・運営に多大なご協力をいただきました本田技研工業および本田技術研究所の関係者の方々、そしてご参加いただきました皆様に、厚く御礼を申し上げます。（集会行事委員会委員）



講演風景



会場の様子

「公益社団法人日本ガスタービン学会 2016年度通常総会」 招集通知発送のお知らせ

正会員各位には当学会2016年度通常総会招集通知を3月末に発送いたします。

招集通知がお手元に届きましたら、内容をご確認のうえ、ご出席くださいますようお願い申し上げます。
なお、当日ご出席願えない場合は、書面またはインターネットによって議決権を行使することができますので、2017年4月17日(月)午後5時30分までに議決権を行使くださいますようお願い申し上げます。

(総会等の概要)

日 時： 2017年4月19日(水) 14:00～16:00

場 所： 川崎重工業(株)東京本社 2階 会議室 (東京都港区海岸1-14-5)

次 第： 公益社団法人日本ガスタービン学会 2016年度通常総会
名誉会員推薦状授与式

終了後、特別講演会(16:00～17:00)、懇親会を開催いたします。



第45回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会のお知らせ

第45回日本ガスタービン学会定期講演会を以下の要領で開催いたします。

講演会開催日 2017年10月18日(水)、19日(木)

講演会開催場所 松山市総合コミュニティセンター

愛媛県松山市湊町7丁目5

<http://www.cul-spo.or.jp/comcen/>

見学会 2017年10月20日(金)

講演申込要領は、学会ホームページ(<http://www.gtsj.org>) (5月掲載予定) および学会誌5月号に掲載いたします。
奮ってご応募くださいますようお願い申し上げます。

講演申込締切 2017年6月23日(金) 予定

講演採否連絡 2017年8月1日(火) 予定

論文原稿締切 2017年9月1日(金) 予定

参加申込方法は、学会誌7月号、学会ホームページに掲載予定です。

2017年度 第1回見学会のお知らせ

2017年度第1回見学会を下記の通り開催いたします。

1. 日 時： 2017年6月9日(金) 9:15～18:30 (JR仙台駅集合, 解散)
2. 場 所： 東北電力(株) 新仙台火力発電所および女川原子力発電所 (宮城県)
3. 参加要領：
 - (1)参加資格：大学生以上
 - (2)定員：40名 (申込多数の場合, お断りすることがございます)
 - (3)参加費 (税込)：当日お支払ください。(移動バス代含む)

正会員	5,400円
学生会員	4,320円
非会員	6,480円
学生非会員	4,320円

 ※別途, 昼食代1,000円 (税込) を徴収致します。
4. 申込締切： 5月18日(木)予定

*申込方法, 詳細につきましては, 学会ホームページで4月上旬頃にお知らせ致します。



第29回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

学生及び技術者 (ガスタービン初心者) を対象とした標記シンポジウムを開催しますので, 奮ってご参加ください。

1. 日 時：2017年7月6日(木), 7日(金)
2. 場 所：(国研) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 調布航空宇宙センター
(東京都調布市深大寺東町7-44-1)
3. プログラム：
 - ・ガスタービン概論
 - ・ガスタービンと流体工学／伝熱工学／燃焼工学／材料工学／制御工学
 - ・JAXA特別講演
 - ・見学会：JAXA 調布航空宇宙センター (ガスタービン関連施設等)
 - ・懇親会
4. 募集概要



©JAXA

- (1)対象者：大学, 高等専門学校, 大学院在籍者, ならびにガスタービン初心者 of 社会人
- (2)定員：60名程度

- ・教育シンポジウムの詳細および申し込み方法は本誌5月号およびホームページ (<http://www.gtsj.org/>) に掲載する予定です。
- ・本ガスタービン教育シンポジウムに2日間参加された方には, 「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。

★今年度は関西地区における教育シンポジウムは開催いたしません。

○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	共催 協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本機械学会 関西支部	第349回講習会「構造・強度設計における数値シミュレーションの基礎と応用」	協賛	2017/5/29-30	大阪科学技術センター 8階中ホール	URL: http://www.kansaijsme.or.jp/
日本機械学会	No.17-15第22回動力・エネルギー技術シンポジウム	協賛	2017/6/14-15	豊橋商工会議所	URL: http://jsme.or.jp/pes/Event/symposium.html
可視化情報学会	第45回可視化情報シンポジウム	協賛	2017/7/18-19	工学院大学 新宿キャンパス	URL: http://www.visualization.jp/symp2017/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

石井 明仁(IHI)	佐々木 克人(IHI)	谷 溪介(IHI)
林 知之(IHI)	穂坂 俊彦(IHI)	加藤 祐司(出光興産)
大山 俊郎(大山俊郎税理士事務所)	窪山 達也(千葉大学)	大江 哲之(トヨタ自動車)
杉浦 修(本田技術研究所)	藤村 宣仁(三菱重工コンプレッサ)	石井 弘実(三菱日立パワーシステムズ)
森山航太郎(三菱日立パワーシステムズ)		

次号予告 日本ガスタービン学会誌2017年5月号 (Vol.45 No.3)

特集 エミッション低減技術と計測技術

巻頭言 中垣 隆雄 (早稲田大学)

ジェットエンジンのエミッション 松山 竜佐 (川崎重工業)

高効率石炭火力発電技術「IGCC」常磐共同火力 勿来発電所10号機 石橋 喜孝 (常磐共同火力)

微粉炭燃焼火力発電における排煙対策技術 白井 裕三 (電力中央研究所)

コンバインド・サイクルプラントにおける脱硝技術の高度化への取り組み 島田 秀顕 (東芝)

ガスタービン向け脱硝装置について 宮西 英雄 (三菱日立パワーシステムズ)

脱硝, 脱硫装置のガス計測システム 田辺 亮 (島津製作所)

煙道排ガス中NO_x・O₂・NH₃の高精度測定技術とENDA-9000シリーズの紹介 石川 浩二 (堀場製作所)

※タイトル, 執筆者は変更する可能性があります。

日本ガスタービン学会入会のご案内

日本ガスタービン学会は、「エネルギー」をいかにして効率よく運用し、地球規模の環境要請に応えるかを、ガスタービンおよびエネルギー関連分野において追求する産学官民連携のコミュニティです。

会員の皆様からは、「ガスタービン学会に入会してよかったと思えること」の具体例として次の様な声が寄せられています：

- タテ（世代）とヨコ（大学，研究機関，産業界）の交流・人脈が広がった。
- 学会誌が充実しており，学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ガスタービンに熱い思いを持った人達と，家族的雰囲気ですら階層を意識せず自由な議論ができ，専門家の指導を得られた。

学会の概要（2016年3月現在）

会員数：2,005名（正会員 1,956名，学生会員 49名） 賛助会員：107社

会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300，学校 約100

会員のメリット

個人会員（正・学生会員）：

学会誌無料配布（年6回），学術講演会の論文発表・学会誌への投稿資格，本会主催の行事の参加資格と会員参加費の特典，本会刊行物の購入資格と会員価格の特典，調査研究委員会等への参加賛助会員：

学会誌の無料配布，学会誌広告・会告掲載（有料），新製品・新設備紹介欄への投稿，本会主催行事参加および出版物購入について個人会員と同等の特典

入会金と会費

会員別	入会金	会費（年額）	後期入会時 会費（初年度のみ）
正 会 員	500円	8,000円	4,000円
正 会 員（65才以上※）	500円	5,000円	2,500円
学生会員	500円	2,500円	1,250円
賛助会員	1,000円	一口 70,000円とし，一口以上	一口 35,000円

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日～翌2月末まで

入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（<http://www.gtsj.org/index.html>）。

学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。



公益社団法人

日本ガスタービン学会

Gas Turbine Society of Japan

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話番号：03-3365-0095

E-mail: gtsj-office@gtsj.org

編集 後記

ヨーロッパではイギリスがEUを離脱し、アメリカではトランプ大統領が就任し、アジア各地ではさまざまな事件が起きています。日本では3年後には東京オリンピックを控えているものの、ここ数年の経済の動向から目が離せません。大学教員としては、優秀な学生を育てるためにできるだけ大学院に進学する事を勧めたい一方で、2年後の卒業時を想像し、就職の好調さがいつまで続くのかと気を揉んでいる今日この頃です。

さて、本号では経済とも密接に関係する地球温暖化や化石資源枯渇の対策に貢献できる技術として期待されるバイオマス発電の特集を組ませていただきました。東日本大震災に起因する福島第一原子力発電所の事故により、国内の原子力発電所のほとんどが稼働を停止し、電力会社の志向するエネルギーバランスが大きく変化しました。また、政府、民間ともに自然エネルギー導入促進への気運が高まり、太陽光発電、風力発電などが最初の再生可能エネルギー発電として実用化が始まりました。バイオマス発電は、これより若干遅れて商用施設の建設が行われており、太陽光や風力という自然現象に依存しない、24時間連続して安定した良質な電力を供給できる発電所として、今後社会の注目を集めるであろうと思われます。まさに、CO₂を排出しない、時代の最先端の発電技術であり、当学会としてまとめた特集として扱うのはおそらく初めてになると思います。航空出身の私にとっては専門外の分野ですが、今回は頼もしいメンバーに恵まれて、バイオマス発電の最前線で活躍される方々にご執筆いただく事ができました。

平田様には巻頭言としてバイオマス発電技術の概要についてご説明いただきました。永野様には、手前味噌で恐縮ですが高知工科大学のベンチャー事業である宿毛バイオマス発電所についてわかりやすくご紹介いただきました。鈴木様にはガス化発電所について、伊藤様、笹

本様、森澤様には循環流動層の技術、多様な燃料等について、小森様にはエネルギー回収技術としてORCについて、そして笹様には加圧流動床ガス化炉とガスタービンを組み合わせた画期的な技術をご紹介いただきました。バイオマス発電にあまり詳しくない方でも読み進めていただければ、理解が深まるのではないかと期待しております。

最後になりましたが、ご多忙中のところ執筆をご快諾下さいました皆様に心より御礼申し上げます。この特集が会員の皆様のお役に立つ事を心より願っております。

(野崎 理)

- 3月号アソシエイトエディター
野崎 理 (高知工科大学)
- 3月号担当委員
杉本 富男 (三井造船)
野原 弘康 (ダイハツディーゼル)
山下 一憲 (荏原製作所)

(表紙写真)

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。

詳細については、下記記事をご参照ください。

- ・「宿毛バイオマス発電所における取組みについて」
..... (P.68 ~ 73)
- ・「やまがたグリーンパワー木質バイオマスガス化発電所の施設紹介」 (P.74 ~ 79)
- ・「循環流動層CFB技術による発電設備へのバイオマス燃料利用と実績」 (P.80 ~ 83)

だより

♣事務局 ☒ ♣

当学会は、2月末日が年度末ですので、ご多聞に漏れず、年度末作業に追われる中でこの原稿を書いています。2月15日に開催された理事会で2017年度の事業計画と予算は承認されましたが、次は2016年度の収支決算、事業報告、総会議案などの重要書類の作成作業が待ち構えています。また、管理事務に使用しているEXCELファイルの年度更新作業などありますが、今年は4月末をもって事務局職員を退任しますので、今後の使い勝手を考えてマクロを組み込むなど一人で勝手に忙しくしています。

事務局のマンパワーは、小生が事務局に入った2011年は職員3人、フルタイムの所定勤務時間で換算しますと2.1人(以降MPと略す)でした。その後4人(2.3MP)の体制がしばらく続き、昨年10月より5人(2.6MP)と増えています。しかし、5月より4人(2.2MP)に戻りますので、事業が増えていることを考慮するとちょっとマンパワーが不足するかなと気掛かりではあります。当面、事

務効率向上で対処しなければならないのですが、その一助としてお願いがございます。会費の自動口座振替をされていない方には是非とも自動口座振替に移行していただき、事務効率向上にご協力いただけるとありがたいです。

総会の招集通知が3月末に発送されます。総会の招集通知および議決権行使について、法人法では書面によるものを一義とし、電磁的方法は会員の承諾により可能となる二義的なものとしています。しかし、事務効率の観点からは逆転し、電磁的方法により、資料印刷費および郵送費が大幅に削減されましたし、議決権行使数が容易にしかも即時に現状把握できるようになりました。現在、およそ8割の会員の方から承諾を得ていますが、更なるご協力をお願いしたいと思います。

以上、近況報告とお願いになりましたが、長らくのご厚誼に感謝し、お礼を申し上げます。

(平岡 克英)

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2017年2月8日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
 - B. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	技術論文投稿要領による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、技術論文投稿要領に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。
8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部贈呈する。なお、非会員の第一著者には掲載号学会誌1部も贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める著作権規程による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
 ニッセイエブプロ(株) 企画制作部
 学会誌担当：高橋 邦和
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 TEL：03-5733-5158
 FAX：03-5733-5167
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2015年3月10日制定

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
 - 3) 原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの日本語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
 - 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
 - 特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
 - 他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
3. 著者がカラー1ページあたり50,000円を負担する場合には、カラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、原稿執筆要領に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを、所定の論文表紙および英文アブストラクトとともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は、論文査読に関する内規に従って査読を行い、論文委員会が掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
7. 本技術論文の著作権に関しては、学会誌編集および発行要領（抜粋）9.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
 Vol.45 No.2 2017.3

発行日 2017年3月17日
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 吉田 英生
 発行者 久山 利之
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
 第3工新ビル402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 郵便振替 00170-9-179578
 銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
 (普) 1703707
 印刷所 ニッセイエブプロ(株)
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5167

©2017, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会
 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
 FAX：03-3457-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。直接、本学会へお問い合わせください。