

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

燃料の研究開発と利用技術の研究開発

平田 悟史*¹
HIRATA Satoshi

1. 化石燃料を取り巻く現状

現在、国内で燃料として使われているものの大部分は石炭、石油、天然ガスなどのいわゆる化石燃料である。2008年のBP統計によると石炭の可採年数は122年、石油は42年、天然ガスは60年と言われている（いずれも非在来型の燃料は除く）⁽¹⁾。この数値についてはさまざまな議論があるが、化石燃料が有限であることは間違いなく、新興国の経済発展に伴ってその需給は今後も逼迫していくであろう。また産出国のナショナリズムの高まりもあり、その価格は上がることがあっても下がることはないと考えられている。さらに日本はこれらの燃料の大半を海外からの輸入に頼っており、石炭、石油、天然ガスの自給率は、それぞれ0%、0.4%、4.2%である⁽²⁾。今後、化石燃料を安定して確保することが難しくなる可能性がある。

ところで産業革命以降の化石燃料の大量消費によって280ppmであった大気中の二酸化炭素濃度は急激に増加して2009年には387ppmとなっており、このまま何も対策をしないと、今世紀末には世界の平均気温が1.8～4.0℃、平均海面水位が18～59cmそれぞれ上昇すると予測されている⁽³⁾。二酸化炭素を含む温室効果ガスの排出削減については、1997年に採択された京都議定書において、日本は2008～2012年間の平均排出量を1990年レベルから6%減らすことを約束しており、2009年は森林吸収と京都メカニズムを除いて4.1%減となっている⁽⁴⁾。温室効果ガスの排出量を減らす手段としては、化石燃料使用量の削減、化石燃料の中で温室効果ガス排出量の少ない燃料への転換、エネルギー変換・輸送・利用効率の向上、省エネルギーによる使用量の削減、森林吸収量の増大などいろいろあるが、いずれにしても化石燃料の利用形態を見直すことは不可欠である。

2. 何を燃料にするのか

これまで日本の経済成長は石炭、石油、天然ガスに支えられてきた。まとまった量の良質の化石燃料が比較的安価で入手できたので、これらを利用して効率の高い大規模集中型のエネルギー供給体制を構築し、これを基盤として輸出型の製造業を発展させることができた。しかし供給量の制約、価格の高騰、温室効果ガス削減の必要

性から、在来型の化石燃料の消費そのものを減らさざるを得ない状況にある。それではこれから何を燃料にするのか。ここでは2つの燃料の可能性について考えたい。

2.1 低品位の化石燃料

ここで低品位の化石燃料とは、褐炭と非在来型石油、非在来型天然ガスを指すことにする。

褐炭は石炭埋蔵量の約半分を占めているが、水分や不純物が多く重量あたりの発熱量が小さい。しかも空気中の酸素と反応して自然発火する恐れがあるため、保管・輸送にも適さない。したがって主に採取地で発電用燃料として使われている。これを有効利用するために、保管・輸送に適したブリケット加工が実用化されており、脱水等によって改質するための研究も行われている。

非在来型石油には、オイルサンド、オイルシェールがある。オイルサンドは重質油成分を含む砂岩層（サンド）であり、アスファルト状の液体を回収することができる。オイルシェールとは油母と呼ばれる物質を多く含む頁岩層（シェール）であり、油母とは石油になる過程の有機物である。オイルシェールはそのまま燃焼して利用されるほか、加熱によって重質油やガスを回収して使う場合もある。非在来型石油の採取・精製には特殊な技術が必要で、また廃棄物が大量に発生するが、原油価格の高騰に伴って急速に実用化が進んでいる。

非在来型天然ガスには、タイトサンドガス、シェールガス、コールベットメタン、メタンハイドレートなどがある。タイトサンドガスとは硬質（タイト）な砂岩層（サンド）の中に存在するガス、シェールガスは有機物を多く含む頁岩層（シェール）に存在するガス、コールベットメタンは石炭に吸着あるいは石炭の隙間を満たす状態で石炭層に存在するガスで、いずれも米国で生産実績がある⁽⁵⁾。メタンハイドレートはメタンを水が囲んだシャーベット状の包接水和物で、海底下、数100mの堆積物中や永久凍土中に広く分布していることがわかっており、日本近海でも存在が確認されている。これらの非在来型天然ガスは埋蔵量が多いが採取のために特殊な技術が必要で、また採取にあたって廃棄物が発生するなど、環境に影響を与える場合もある。

低品位燃料についてはすでに多くの研究が行われており、この特集においてもこれらの燃料をガスタービンで用いるための研究開発事例がいくつか紹介されている。しかしメタンハイドレートを除いて国内に資源がなく輸

原稿受付 2010年10月11日

* 1 独立行政法人産業技術総合研究所 バイオマス研究センター
〒739-0046 東広島市鏡山3-11-32

送効率が悪いために、日本ではほとんど実用化されていない。これらの低品位燃料の利用にあたっては、低品位の化石燃料をそのまま利用する技術と、低品位の化石燃料を改質して品質の高い燃料に変換する技術の2つが考えられる。前者は燃料の生産地におけるエネルギー利用に、後者はこれに加えて日本への燃料の輸送のためにも使える技術である。

低品位化石燃料は、在来型化石燃料の供給減への対策として有効である。エネルギーセキュリティの観点から、これらの資源の採掘権を確保し、安定供給ができる体制を早急に整えておくべきであろう。ただ低品位化石燃料の利用にあたっては、採取・改質・輸送・利用のすべての工程において、在来型化石燃料に比べて温室効果ガスの排出量が増える可能性があり、しかも日本のエネルギー自給率の向上には寄与しないことに留意が必要である。

一方、メタンハイドレートは日本の近海に、日本の天然ガス消費量の約百年分の埋蔵が推定されており⁽⁶⁾、日本はこの採取・利用技術の開発に注力すべきである。

2.2 バイオマス

バイオマスは、もともと二酸化炭素と水から太陽光エネルギーによって合成されたものであるため、利用にあたって温室効果ガスの排出量はゼロとみなされる。まずは日本国内にある資源を徹底的に利用することを考えるべきである。国内には日本のエネルギー需要に見合った量のバイオマスはないが、2つの方法で資源の確保が可能である。一つ目は開発輸入と言って、日本が開発した技術によって海外でバイオマスから燃料を生産しこれを輸入するという方法で、例えば海外の製紙用チップの生産拠点で、残渣からバイオエタノールを製造して輸入するというプランが考えられる。二つ目は国内でバイオマス資源を増産する方法で、例えば国産材の利用を促進して発生した製材残材を燃料として利用する、あるいは遊休地で成長速度の速いエネルギー作物や微細藻類を生産し、これを原料にして燃料を生産するといったことが考えられる。

バイオマスも低品位の化石燃料と同様に、熱量が低く、採取・輸送にコストがかかるため、採取地で利用するか、輸送に適した形態に変換するか、のいずれかが必要である。さらにバイオマスは種類が多く、1か所あたりの発生量が少ないため、利用にはさらに困難を伴う。しかし温室効果ガスの排出量を削減するためには、バイオマスの利用を積極的に進めていかななくてはならない。

3. 今後の見通し

化石燃料を潤沢に使えた時代は終わりに近づいており、

これからは在来型のエネルギーをできるだけ確保しながら、多品種、低質の燃料と太陽光、風力、地熱などの再生可能エネルギーを積極的に利用していかなければならない。日本はエネルギー自給率が4%と極めて低いので、まずは海外の低品位化石燃料とバイオマス資源の権益をしっかりと確保し、長期間にわたって安定供給できる体制を構築する必要がある。そしてその採取・変換・輸送・利用のための技術開発は、どの国の何を対象とすることを決めた上で、官民共同で集中的に取り組むべきである。すでに説明したように、低品位化石燃料やバイオマスは、その種類、性状が多岐にわたっている。これら全てを研究開発の対象としたのでは、研究成果が発散してしまう。特に海外の資源を対象に研究開発を行い、その成果を海外に技術移転する場合には、技術移転した結果が一企業だけでなく日本という国家にとってメリットがあるかどうか十分に検討する必要がある。また国内で企業同士が競争していても、海外の企業との競争に負けては意味がない。エネルギーの確保は国家の問題であるので、国が主導して整理をすべきである。

エネルギー問題は環境問題と表裏一体である。環境への影響を無視して、エネルギー問題の解決はあり得ず、この2つの問題を同時に解決していかなければならない。そのために長期的には、在来型、非在来型を含め、化石燃料の使用は減らしていかなざるを得ない。

一方でメタンハイドレートは日本国内に存在する数少ないエネルギー資源であり、その採取・利用技術を他国に先駆けて早急に確立する必要がある。日本が資源とその採取・利用技術を保有していることは、安全保障上、重要な意味を持つ。

今後、新しい燃料と利用技術の研究開発において、日本ガスタービン学会が果たす役割に期待して、巻頭言とする。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁ホームページ, (<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-in-japan/energy2010html/world/index.htm>)
- (2) 総合エネルギー統計, エネルギーバランス表, 2009年度, 資源エネルギー庁
- (3) 地球温暖化の影響・適応情報資料集, 環境省地球環境局, 2009
- (4) 2009年度の温室効果ガス排出(確定値) <概要>, 環境省, 2011年4月26日
- (5) 新エネルギーの展望, 非在来型天然ガス, エネルギー総合工学研究所(1993)
- (6) 奥田義久, メタンハイドレート～次世代の巨大な天然ガス資源～, AIST TODAY Vol.1, No.6, (2001) p19

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

バイオマス燃料の特性と研究開発状況

平田 悟史*¹
HIRATA Satoshi

キーワード：バイオマス，バイオマス燃料，バイオ燃料，再生可能エネルギー

1. はじめに

日本におけるバイオマスのエネルギー利用は、地球温暖化対策を主たる目的として進められてきた。また最近では化石燃料枯渇への対応、原子力に代わる新たな再生可能エネルギーの導入、大規模集中型に偏ったエネルギー供給体制の見直しの観点からも、バイオマスのエネルギー利用が注目されはじめている。

バイオマスを原料として作られる燃料をバイオマス燃料と定義するならば、それは気体、液体、固体の3種類に大別されるが、同じ気体燃料でも原料と変換方法によって製造される燃料の性状が大きく異なる。そこですでに実用化されているものを含めて、主要なバイオマス燃料の製造方法、性状を紹介し、今後バイオマス燃料の利用を考える際の参考になるようにしたい。また現在研究開発が進められている新しいバイオマス燃料についても、その状況と実用化の見通しについて簡単に紹介する。

2. バイオマスの特徴

2.1 バイオマスの定義

バイオマスとは、生物由来の物質を表す“Bio”とまとまった量を表す“Mass”が合わさってできた言葉で、太陽光をエネルギー源として二酸化炭素と水から生産された有機物の総称を表す。したがって、エネルギーだけでなく食料や素材として用いられているものも広義のバイオマスに含まれる。一方バイオマスをエネルギー資源として捉える場合は、新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法施行令で使われている定義¹⁾、すなわち、「動植物に由来する有機物であってエネルギー源として利用することができるもの（原油、石油ガス、可燃性天然ガス及び石炭並びにこれらから製造される製品を除く。）」が一般的に用いられる。

2.2 エネルギー源としての特徴

バイオマスをエネルギー源として捉える場合、次のような特徴がある。

1) カーボン・ニュートラル 利用にあたって大気中の

二酸化炭素濃度に影響を与えないという意味で、バイオマスのエネルギー利用が温室効果ガス排出削減に効果があるとされる根拠である。

2) 再生可能 バイオマスは太陽光、二酸化炭素、水から生産されるため、これらの物質がある限り、再生される。

3) 貯蔵可能 太陽光、風力、地熱などの他の再生可能エネルギーは貯蔵が難しいが、バイオマスは貯蔵が可能で、必要ときに電気や可燃性ガスなどの二次エネルギーに変換することができる。

4) エネルギー密度が低い 化石燃料に対しエネルギー密度が低いため、そのままの形では輸送効率が悪く、長距離輸送に向いていない。

5) 広く薄く分布 広い範囲に低い密度で存在するため、大規模に利用する場合は広範囲からの収集が必要となる。

6) 食料生産との競合 エネルギー源として用いるためにバイオマスを生産する場合、土地が必要となるが、食料生産と競合する。

7) 種類が多く変換・利用技術が複雑 例えば木質チップ、畜産糞尿、廃食用油はいずれもエネルギー源として実際に用いられるバイオマスであるが、その性状が全く異なるため、変換・利用の方法が異なる。バイオマスはその種類ごとに、変換・利用技術を分ける必要がある。

この7つの特徴のうち、1) から3) は他のエネルギー源との比較で利点といえるが、4) から7) は欠点となる。特にバイオマス資源を従来型の大規模集中型エネルギー変換・供給体系の中で利用することを考えると、4) と5) については、大きなハンディキャップとなる。

2.3 エネルギー源としてのポテンシャル

国内にあるバイオマス資源で、日本の一次エネルギー供給のどの程度を賄えるかは、どのような想定のもとで試算するかによってその値が大きく変わる。平成13年に資源エネルギー庁が実施した調査²⁾では、その時点での賦存量にその時点で実用化されている技術に基づいて収集・運搬・利用することを前提とした利用可能率をかけるという方法で積算した結果、利用可能量は年間1.1

原稿受付 2010年10月11日

* 1 独立行政法人産業技術総合研究所 バイオマス研究センター
〒739-0046 東広島市鏡山3-11-32

×10¹⁸Jで、一次エネルギー供給⁽³⁾ (2.18×10¹⁹J/年) の約5%は賄えるとの結論を得ている。この値にはエネルギー利用を目的としたバイオマスの生産(エネルギープランテーション)は含まれていないため、究極的な利用可能量はこれより大きくなると考えられる。

一方、世界については国際エネルギー機関の報告書⁽⁴⁾によると、2050年において持続可能な状態で供給できるバイオマスエネルギーの量は年間2～5×10²⁰Jで、技術的には15×10²⁰Jまで供給可能とされている。2008年における世界のエネルギー需要が5×10²⁰J/年、2050年における世界のエネルギー需要が6～10×10²⁰J/年なので、計算上はバイオマス資源だけで世界のエネルギー需要が賄えることになっている。

このように世界全体で見た場合バイオマス資源は十分な量があるが、日本国内だけでは国内のエネルギー需要を満たせないことがわかる。わが国では国内のバイオマス資源を有効利用するとともに、日本で開発した技術を海外へ移転し、海外のバイオマス資源からバイオマス燃料を製造しこれを輸入するという「開発輸入」という考え方が重要である。産総研におけるバイオマス燃料の研究開発においても、国内実用化モデルと海外実用化モデルの両方を視野に入れて研究開発を進めている。

2.4 国内のバイオマスエネルギー導入目標

バイオマスエネルギーの導入目標は表1のとおりである。合計値には太陽熱利用も含まれているため、厳密にはバイオマスエネルギーだけではないが、2020年度には原油換算で1,555万kL、2030年度には1,644万kLの導入を目指している。廃棄物発電+バイオマス発電は、バイオマス資源をそのまま燃焼して蒸気を作り、蒸気タービンで発電するプロセスが大半を占めると考えられるが、バイオマス資源を気体、液体、固体のバイオマス燃料に変換してから燃焼するプロセスもある。バイオマス熱利用には、輸送用バイオ燃料が内数として明記されているが、これにはバイオエタノール、バイオディーゼル燃料、BTL (Biomass to Liquid) が含まれている。また輸送

用バイオ燃料以外の熱利用、及び廃棄物熱利用にも、発電と同様、バイオマス資源を気体、液体、固体のバイオマス燃料に変換してから熱利用するケースが含まれている。このように輸送用バイオ燃料以外のバイオマス燃料については、明確に数値目標が設定されているわけではない。

一方、新エネルギー・産業技術総合開発機構が作成した再生可能エネルギー技術白書⁽⁷⁾には、輸送用バイオ燃料を初めとするバイオマス燃料の導入に向けたロードマップが示されている。図1にこれを示すが、2015年には木質系バイオマス、農業残渣を原料とするバイオエタノールの価格を、国内生産では100円/L、海外での資源作物由来の場合は40円/Lにすること、2020年には輸送用バイオ燃料の国産と開発輸入をあわせた比率を50%以上に、そしてBTLで製造される液体燃料の価格をエタノール換算で40円/Lにするという数値目標が明記されている。

3. 気体燃料への変換技術

バイオマス資源を気体燃料に変換する技術は、熱化学プロセスと生物プロセスの2つがあり、いずれも対象とするバイオマス資源の種類・性状と変換プロセス、プロダクトの性状が全く異なる。ところがいずれもバイオマスから作られた気体(ガス)であるため、その変換プロセスをガス化、生成物をバイオガス、と同じように呼んでいる場合があるがこれは誤りである。この点も含めて、本章で説明する。

3.1 合成ガス

バイオマス資源を熱分解して気体(ガス)を得るプロセスをガス化といい、ガス化で得られた可燃性ガスを合成ガス(Synthesis gas, Syngas)またはガス化ガス(Producer gas)と呼ぶ。ガス化で得られたガスは、通常バイオガスとは呼ばない。

バイオマスのガス化は、一般的に酸素の供給が制限された環境で600℃以上の高温で行われる。このときガス

表1 日本のバイオマスエネルギーの導入目標⁽⁵⁾

(単位:原油換算 万kL)

	2005年度 実績	2020年度 最大導入ケース	2030年度 最大導入ケース
廃棄物発電 +バイオマス発電	252	408	494
バイオマス熱利用 (うち輸送用バイオ燃料) ⁽⁶⁾	142	335 (60)	423
太陽熱利用、廃棄物熱利用、 黒液・廃材等利用	687	812	727
合計 (対一次エネルギー供給比)	1,081 (1.8%)	1,555 (2.8%)	1,644 (2.9%)

注:2020年度、2030年度の対一次エネルギー供給比は、2009年度の一次エネルギー供給をもとに計算

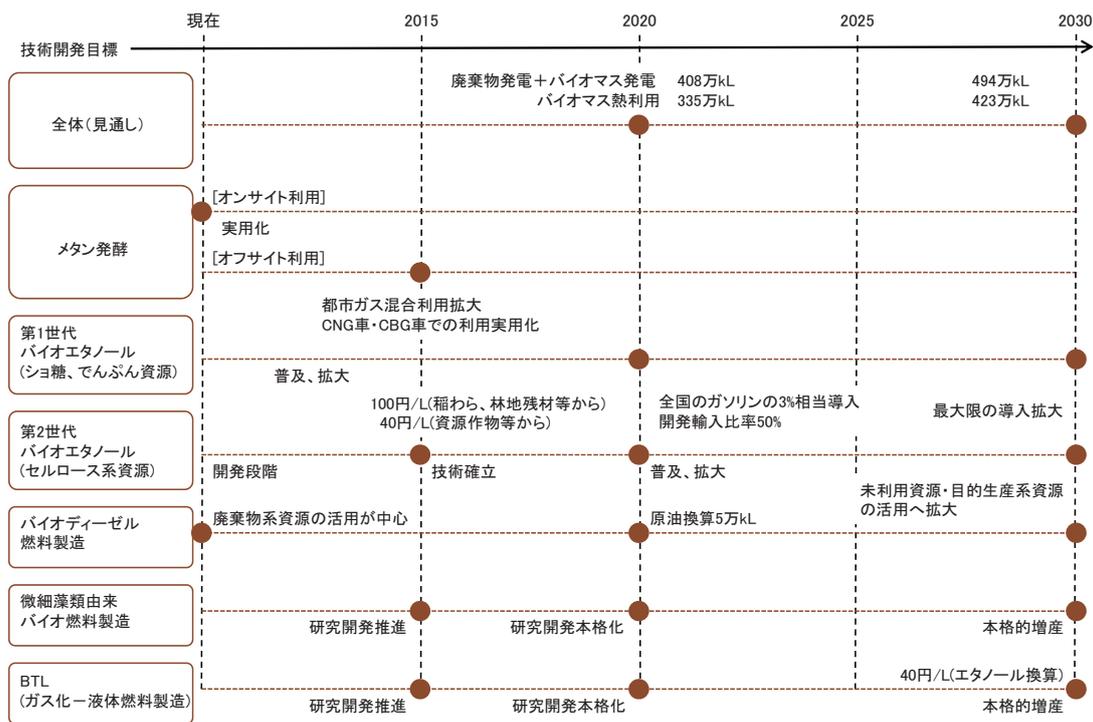


図1 バイオマスエネルギーロードマップ

化剤と呼ばれる気体を添加する。また反応を促進するために触媒を添加することもある。ガス化は数多くの化学反応が起きることによって進行するが、吸熱反応の方が支配である。原料の組成はもとより、温度、圧力、触媒の有無などによって、生成物の組成が異なる。

ガス化反応を行うための装置をガス化炉という。バイオマスのガス化に使われるガス化炉は、大きく分けて5種類あり、その特徴を表2にまとめて示す。これ以外にもさまざまなタイプのガス化炉が開発されており、ガス化の温度、圧力、触媒の有無などと組み合わせると、ガス化の方式は200種類程度あると言われている。

水分を多く含む原料はその水分を蒸発させるためにエネルギーが必要となるので、ガス化には向いていない。合成ガスの製造を目的とするガス化炉では、原料の水分量は30%以下にすることが望ましい。(原料の処理又は

減量化が目的の場合は、この限りではない。) またガス化炉へ投入する前に、脱水、乾燥、炭化の工程を設けることで、水分を多く含む原料に対応できるようにしたプロセスもある。

合成ガスの組成は、原料、ガス化条件（ガス化炉形式、温度、圧力、ガス化剤の種類）によって異なるが、部分酸化ガス化炉で空気をガス化剤として木質バイオマスをガス化した場合、一酸化炭素が20%、水素が15%、二酸化炭素が10%、メタンが5%、窒素が50%のガスができる。ガス化剤として空気を使っているため、バイオマスの燃焼排ガスと空気中の窒素が合成ガスに混ざってしまう。このため低位発熱量は6MJ/Nm³程度と低い。そこでガス化剤の種類を変えたり、加熱方式を外熱式にしたりすることで、ガスの発熱量を高くする工夫をしている。

木質バイオマスをガス化したとき、全ての成分が気体

表2 バイオマスのガス化で用いられるガス化炉

ガス化炉の形式	燃料滞留時間	合成ガス熱量	合成ガス中のタール濃度	副生物	ガス化炉の運転制御	適正規模 (発電出力換算)
固定床アップドラフト型	長	低	10~30g/Nm ³	多	簡単	<2,000kW
固定床ダウンドラフト型	長	低	1~3g/Nm ³	多	簡単	<500kW
流動床	中	中	数g/Nm ³	中	中	200~2,000kW
噴流床	短	中	<0.1g/Nm ³	少	複雑	>2,000kW
ロータリーキルン(外熱式)	長	高	数g/Nm ³	中	簡単	<500kW

になるわけではなく、一部は液体と固体になる。液体成分がいわゆるタール分で、固体成分は木炭である。前者は冷えると固体になり、配管閉塞やバルブ、ブロワ、内燃機関の故障の原因となるため、できるだけ除去する必要がある。また木炭についても、微粉化してダストとなり、合成ガスとともに流出すると、そこに含まれる無機質のために金属部品が磨耗する可能性があるため、同様に除去する必要がある。

3.2 バイオガス

バイオマス資源を微生物によって分解してメタンを主成分とする気体（ガス）を得るプロセスをメタン発酵といい、得られるガスをバイオガス（Biogas）という。

メタン発酵は多種類の微生物集団（細菌叢）によって行われる複合反応であり、図2に示すように大きく3つの過程に分けられる。原料となるバイオマスとしては家畜排せつ物、食品廃棄物、下水汚泥、厨芥などで、得られるバイオガスはメタンが60%、二酸化炭素が40%で、低位発熱量は21MJ/Nm³程度である。

メタン発酵を行うタンクを発酵槽という。発酵槽に投入する原料の固形物濃度によって、湿式メタン発酵と乾式メタン発酵に分けられる。湿式メタン発酵とは、発酵槽内の固形物濃度が7～12%程度である。湿式メタン発酵は発酵温度によって、さらに35℃で発酵を行う中温発酵と、55℃で発酵を行う高温発酵に分けられる。メタン発酵はさまざまな微生物によって反応が進むが、発酵槽内で意図しない微生物（いわゆる雑菌）が増殖することで、反応がうまく進まないことがある。そのために発酵槽の上流側に殺菌槽を設置して、原料に付着している雑菌の増殖を抑えたり、発酵槽内の滞留時間を長くしたりするなどの対策を取る。一方高温発酵では、雑菌の増殖を抑えられるので衛生的であるが、加温のためのエネルギーが必要となる。乾式メタン発酵は、発酵槽内の固形物濃度が15～35%で発酵を行うが、湿式メタン発酵で使われるのとは異なる種類の微生物を使っている。

メタン発酵で得られたバイオガスは、気体燃料として使われるが、ここにはタンパク質に含まれる硫黄に由来する硫化水素（H₂S）と、シャンプー、リンスに由来す

るシロキサンが含まれている。シロキサンの分子式を図3に示す。家畜排せつ物やタンパク質を含む食品廃棄物、厨芥を原料にしたバイオガスには、硫化水素が1～3%程度含まれるが、これは配管、バルブ、ガスタンク、燃焼機器などの腐食の原因となるため、発酵槽とガスタンクの間で脱硫装置を設けて除去する。脱硫の方法としては、酸化鉄（Fe₂O₃）を利用し硫化水素を硫化鉄（Fe₂S₃）に変換して除去する乾式脱硫、硫黄酸化細菌という微生物によってH₂SをSおよびSO₄²⁻に酸化して除去する生物脱硫が主として用いられている。一方下水汚泥由来のバイオガスには、シロキサンが1～20ppm含まれているが、シロキサンに含まれているシリカ（Si）がガスエンジン内で固着するため、バイオガスを内燃機関で燃焼させる場合には、取り除く必要がある。バイオガスを活性炭に通すことで、シロキサンを吸着させて除去する。

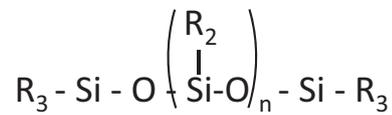


図3 シロキサンの構造式

4. 液体燃料への変換技術

バイオマスを原料とする液体燃料としては、輸送用燃料としてガソリンに混ぜて用いられるバイオエタノール、輸送用燃料として軽油に混ぜて用いられるバイオディーゼル燃料とBTL、重油代替として用いられる熱分解油の4つがある。これらは原料、製造プロセスが全く異なるものであるため、それぞれ説明する。

4.1 バイオエタノール

エタノール（C₂H₅OH）は糖（グルコース、C₆H₁₂O₆）を原料にして、微生物の一種である酵母を使ったアルコール発酵で生産され、飲料用、食品用、化学原料用に広く使われている。ブラジルではサトウキビから、米国ではトウモロコシから、燃料用エタノールの製造が行われており、ガソリンに混ぜてあるいはガソリンの代替燃料として広く流通している。日本でもバイオエタノール

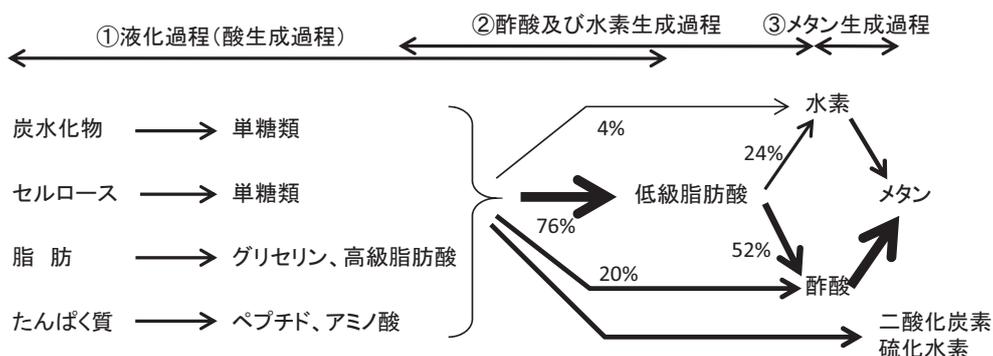


図2 メタン発酵のメカニズム

をガソリンに混ぜることで、輸送分野での温室効果ガスの削減につなげようという動きがあり、海外からのバイオエタノールの輸入による普及促進、国内の糖・でんぷん系バイオマス資源（サトウキビ、ビート（砂糖大根）、余剰米）を原料とするバイオエタノールの製造、さらに非食用のバイオマス資源（稲わら、麦わら、木質）を原料とするバイオエタノール製造技術の開発・実証が進められている。

非食用バイオマス資源は、成分としてセルロース、ヘミセルロース、リグニンが強固に絡まりあった構造をしている。これを硫酸による化学分解、物理的な粉碎、高温水を使った水熱処理、酵素を使った分解などを組み合わせることで、アルコール発酵の原料となるグルコースを得る。ただヘミセルロースを分解して得られるキシロースは、通常アルコール発酵で用いられる微生物ではエタノールに変換することができない。そこで遺伝子を組み換えることでキシロースもエタノールに変換できる微生物を開発し、これを用いてエタノールを生産する。アルコール発酵で得られるエタノール濃度は5～10%なので、蒸留と膜脱水によって99.5%まで濃縮し、これが燃料として用いられる。

4.2 バイオディーゼル燃料

バイオディーゼル燃料（Bio Diesel Fuel）とは、植物由来の油脂から作られる軽油代替燃料の総称である。BDFとも言われるが、これは登録商標である。バイオディーゼル燃料の原料として、国内では主に調理に使用した廃食用油が使われている。油脂（トリグリセリド）はそのままでは粘度が高く、燃料ポンプなどのトラブルの原因になるので、これにメタノールと触媒を混ぜてエステル交換反応を起こし、脂肪酸メチルエステルにしたものが使われる。この反応を図4に示すが、副生物としてグリセリンが生成するのでその有効利用方法も考えなければならない。

海外ではバイオマス燃料の本命として開発に力を入れている国も多く、アブラヤシやジャトロファの実から得られる油脂を原料にして、バイオディーゼル燃料の製造を進めている。また微細藻類の中には細胞内に油脂を蓄積するものがあり、これを人工的に大量培養する試みもなされている。



図4 エステル交換反応によるバイオディーゼル燃料の製造

4.3 BTL

BTLとはBiomass to Liquidの略で、バイオマスから液体燃料を製造するプロセス及びその生成物を指す。原料となるバイオマスをガス化して、水素と一酸化炭素を得たのち、これを高温、高圧条件下で触媒反応させて液体炭化水素を作る。ガソリン、灯油、軽油などと分子量に近い液体炭化水素が得られるほか、高分子量のワックスも生成する。また触媒や反応条件を変えることで、ジメチルエーテルやアルコールを製造することも可能である。BTLで作られる軽油は、バイオエタノール、バイオディーゼル燃料とともに、液体バイオマス燃料の有力候補の一つとされており、BTLプロセスについても現在研究開発が進められている。

BTLプロセスは、水素、一酸化炭素に変換できるのであれば原料は何でもよく、バイオマス以外では、石炭、天然ガスから液体炭化水素を製造するプロセスがすでに実用化している。なお石炭を原料とするプロセスはCTL（Coal to Liquid）、天然ガスを原料とするプロセスはGTL（Gas to Liquid）と呼ばれている。

4.4 熱分解油

微粉化した木質バイオマスを無酸素条件で500℃まで急速に加熱し、さらに生成物を急冷すると、重油状の液体燃料が得られる。これは熱分解油（Pyrolysis oil）あるいはバイオオイル（Bio Oil）と呼ばれる。高位発熱量は16～18MJ/kgで重油より低いものの、粘度はほとんど変わらない。カナダの民間企業であるDynamotive Energy System Corporationでは原料処理量が日量200tの設備を運転中である⁽⁸⁾。

1～2mmに微粉化した木質バイオマスを無酸素状態で450～500℃のバブリング流動床リアクターに入れると、瞬間的に分解・蒸発し、ガスとなってリアクターの外へ出る。ガス中のチャー（炭素）はサイクロンで除去し、急冷装置へ送られたガスはバイオオイルとガスに分離される。ガスはリアクターの加熱のための燃料として使われるほか、バブリングのための動力源としても用いられる。投入した原料のうち、重量比で65～75%がバイオオイル、15～20%がチャー、10～20%がガスとなるが、この比は投入原料の組成による。得られたバイオオイルの一部はアップグレーディングして、燃料として販売している。

5. 固体燃料への変換技術

バイオマスから得られる固体燃料としては、炭、木質ペレット燃料、木質ブリケット燃料、木質チップ、バイオコークスなどがある。このうち木質チップは機械的に破碎しただけなので、ここではそれ以外の4つについて概要を紹介する。

5.1 炭

炭とはバイオマスを蒸し焼きにして得られる、炭素を主成分とする物質であり、木を原料として作られる木炭は古くから固体燃料として広く用いられてきた。木炭は、その原料、製造方法によって分類することができる。

- 1) 白炭 カシ類を原料として800℃以上の高温で炭化され、窯から出した後に消し粉をかけて消火することで作られる。炭質が硬く火力が強い。ウバメガシを原料にした白炭を備長炭という。
- 2) 黒炭 カシ、クヌギ、ナラ等を原料として400～700℃で炭化され、炭窯の中で空気を遮断して消火して製造される。炭質が柔らかく着火が容易。マングローブを原料とする黒炭が東南アジアから輸入されている。
- 3) オガ炭 おが屑を高温高压で圧縮成型したオガライトを炭化したもの。価格は安いですが火力は強い。

このほか建築廃材のチップを炭化した粉炭や、食品廃棄物などの水分の多いバイオマスを炭化したものも市場に出回っているが、燃料として大量に使用されている状況ではない。

5.2 木質ペレット・木質ブリケット

かさ高く不定形で扱いにくい木質バイオマスを、同じ形に揃えて扱いやすくするとともに、かさ比重を上げて貯蔵性・輸送性を改善したのが木質ペレット燃料と木質ブリケット燃料である。いずれもヨーロッパと北米で固形燃料として普及しており、小型燃焼機器の燃料として用いられている。木質ペレット燃料と木質ブリケット燃料の写真を図5に示す。

木質ペレット燃料は、木質バイオマスを粉碎したのち加熱圧縮成型して作られる固体燃料で、長さ10～30mm、直径は6～8mmである。およそ200℃で加熱するため、原料に含まれるリグニンが熱で溶けてバイン



木質ペレット

木質ブリケット

図5 木質ペレットと木質ブリケットの写真

ダーの役割を果たし、硬い固形物となる。木質ペレット燃料の含水率は8～12%と低い。

木質ペレットは原料によって3種類に分けられる。

- 1) 全木ペレット 丸太の全て部分を原料として利用したもので、樹皮が含まれるため外見は茶色で、灰分は0.2～1.3%である。
- 2) ホワイトペレット 丸太の幹の部分だけを原料として利用したもので、樹皮が含まれていないので白っぽい色をしている。灰分は0.2～0.6%と少ないため燃焼したときの灰の発生量が最も少ない。
- 3) パークペレット 樹皮を原料としたもので、外見はこげ茶色をしている。灰分は針葉樹の樹皮を原料としたものでは2.5～4.5%、広葉樹の樹皮を原料としたものでは4.7～7.6%と、他のペレットと比べて多いため燃焼したときの灰の発生量が多い。

木質ペレットには国が定めた規格はないが、日本木質ペレット協会が平成23年3月31日に木質ペレット品質規格を制定している⁹⁾。これによると、灰分の重量比率によって、A、B、Cの3種類に分けており、低位発熱量はAとBが16.5MJ/kg以上、Cが16.0MJ/kg以上、かさ密度はいずれも650kg/m³以上、750kg/m³以下となっている。

木質ブリケットは、木質バイオマスを粉碎したのち、圧縮成型することで作られる。木質ペレット燃料とは異なり加熱されていないため、長期間保存すると空気中の水分を吸収して崩れてしまう。成型機によっていろいろなサイズのものを作ることができるが、図5の写真のものは直径が50mm、長さが60mmである。

木質ブリケットは薪ストーブ用燃料として市販されているが、流通量は非常に少ない。北海道では木質ブリケットをボイラで燃焼して、マンションの集中暖房・給湯に使用している例もある。

5.3 バイオコークス

バイオコークスは、バイオマスを高温・高压で圧縮して作る新しい固形燃料で、石炭コークスの代替燃料として利用できる。ほぼ全てのバイオマスを原料とすることが可能で、まず水分量が10～15%まで原料を乾燥した後、円筒形の反応器に原料を入れ、温度180～230℃、圧力20MPaで40分間圧縮すると、長さ1m、直径10cm、重さ約10kgの円筒形のバイオコークスが得られる。得られたバイオコークスは真比重が1.4、圧縮強度が40～200MPaと硬いため、石炭コークスの代替燃料として使用できる。一方熱量はもとの原料とほぼ同じである。これは近畿大学が開発を行っているもので、バイオコークスをキュボラ炉、ボイラ、廃棄物高温ガス化直接溶融炉で使用し、その有用性が確認されている。

6. 今後の見通し

バイオマスの燃料変換技術を開発するにあたって、そ

の技術はどこで、何を原料として、どのくらいの規模で実用化するのかをあらかじめ想定しておくことが重要である。すでに述べたように国内にはバイオマス資源はあるものの量的な制約があり、従来型の化石資源と同じ規模の変換設備を作ることは難しい。海外では大規模な設備を作ることが可能だが、日本へ輸送する手段、コストや、国内での利用方法の検討が必要である。バイオマス燃料として市場が形成されているのは、固形燃料では木質チップと木質ペレット、液体燃料ではバイオエタノールとバイオディーゼル燃料くらいで、他のバイオマス燃料については、これからの実証研究を通じて市場を創出するか、あるいは自家利用を中心に考えることになる。そのときにバイオマスの利用方法として、その燃料が本当に適切なのか考える必要がある。

本稿ではバイオマスの燃料変換について説明してきたが、バイオマスは燃料以外にも、ケミカル、マテリアルの原料として使うことができる。一般的にケミカル、マテリアルの方が付加価値が高いため、変換プロセスの経済性はよくなる。今後はバイオマスを原料にして、エネルギー、ケミカル、マテリアルを複合的に製造するシステムの構築が求められるものと考えられる。

7. おわりに

バイオマス資源をエネルギー利用する場合は、発想の転換が必要である。わが国のエネルギー供給体制は海外から大量輸送される原油、石炭、天然ガスや原子力発電に合わせて構築されたものなので、バイオマスをこの中に組み込んで利用しようとしても、価格競争力がない。今回の震災では、効率とコストを重視した大規模集中型のエネルギー供給体制には、エネルギーセキュリティの面で不安があることも明らかになった。国内のバイオマス資源をエネルギー利用する場合は、広く薄く分布しているという性質を利用して、小規模分散型エネルギー源としての利用が望ましい。再生可能、国産資源であると

いう特徴も活かしながら、少々価格が高くても利用されるエネルギー源を目指すべきだろう。

一方で海外のバイオマス資源を利用する場合は、海外でエネルギー変換し、それを大量輸送して国内で利用することになる。したがってすでに構築されている化石燃料用のインフラを活かした実用化が望ましい。

今後、新興国でエネルギー需要の更なる伸びが予想されているため、化石燃料の価格が下がることはないだろう。国内にあるバイオマス資源をどのように利用すれば最も効率的か、あるいは海外のバイオマス資源を日本で利用するためには、どのような変換技術、運搬方法が適切かについて、合意形成が必要と考える。

参考文献

- (1) 新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法施行令（平成九年六月二十日政令第二百八号）
- (2) 平成13年度新エネルギー等導入促進基礎調査（バイオマスエネルギーの利用・普及政策に関する調査）報告書、2002年5月、日本エネルギー学会
- (3) 総合エネルギー統計、エネルギーバランス表、2009年度、資源エネルギー庁
- (4) IEA Bioenergy Annual Report 2009, 2010年、国際エネルギー機関
- (5) 長期エネルギー需給見通し（再計算）、平成21年8月、資源エネルギー庁
- (6) 長期エネルギー需給見通し（再計算）最大導入ケースにおける主要施策のCO₂削減効果等について（試算）。平成21年8月、資源エネルギー庁
- (7) NEDO再生可能エネルギー技術白書～新たなエネルギー社会の実現に向けて～、平成22年7月、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (8) Dymamotive Energy System Corporationホームページ、<http://www.dynamotive.com>
- (9) 木質ペレット品質規格、一般社団法人日本木質ペレット協会
http://www.mokushin.com/jpa/news/news_04.pdf

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

エネルギー会社から見たバイオ燃料技術開発 (JX日鉱日石エネルギー株式会社の取り組み)

上田 巖^{*1}
UEDA Iwao

キーワード：バイオ燃料, BH Fining, 水素化処理, 異性化処理, バイオジェット燃料, 微細藻類

1. はじめに

地球温暖化の原因となる二酸化炭素 (CO₂) の排出量削減やエネルギー源の多様化に貢献するエネルギーとして「新エネルギー」の開発・実用化と導入・普及が国の施策として進められている。

こうした中、弊社では「エネルギー・資源・素材における創造と革新を通じて持続可能な経済・社会の発展に貢献します」のグループ理念の下、新エネルギーに関しても水素エネルギー、太陽光発電やバイオ燃料の研究開発に取り組んでいる。

本稿ではこの中からバイオ燃料、特に油脂からバイオ燃料を製造する研究開発の取組みとして、水素化バイオディーゼル燃料の開発とバイオジェット燃料の開発について紹介する。

2. エネルギー会社から見たバイオ燃料

生活や経済活動の基盤であるエネルギーに対しては、環境適合性 (Environmental Harmony)、経済性 (Economic Efficiency) および供給安定性 (Energy Security) の3つ、いわゆる「3つのE」(図1)を同時に実現することが不可欠である。地球温暖化対策の推進が世界的な動きとなる中、日本のエネルギー政策の基本的な方向性が、国の方針として法や計画等によって示されている。2030年をターゲットとするエネルギー基本計



図1 エネルギーの求められる3つの視点

原稿受付 2011年9月20日

*1 JX日鉱日石エネルギー(株)

〒100-8162 千代田区大手町2-6-3

画の流れと2050年をターゲットとするCool Earth-エネルギー革新技術計画の流れとがあるが、いずれも、「3つのE」の実現というエネルギー政策の基本方針に則っている。

エネルギー会社である我々は、バイオ燃料の供給に際しても、この「3つのE」を常に念頭に取組みなくてはならない。新技術の研究開発・事業化においても持続可能性基準への適合や適正コストのもとに、安定した品質の製品を国内において普遍的にかつ安定的に供給することが必要である。その意味で、技術開発では、用いる原料に関係なく、一定の品質のバイオ燃料が確保できるようにするための燃料化の技術やバイオマス原料を大量に安価で生産する技術に取り組む必要がある。また、事業化する際には、相当規模の数量を確保する絵姿が描けなければならない。

これらの考えの下、我々は、燃料化の技術開発として油脂の水素化・異性化処理技術を開発した。さらに、バイオマス原料として微細藻類を用いたバイオジェット燃料の開発に取り組んでいる。

3. 水素化バイオ軽油 (BHD) の開発

(1) 開発の背景

バイオディーゼル燃料の導入は、主に海外を中心に進んでおり、特にディーゼル車が普及している欧州では規制や環境意識の高まりから、早くから導入が進んでいた。

バイオディーゼル燃料の製造方法について図2に示す。利用形態としては、一部地域で油脂を直接混合して使用されている以外は、植物性油脂や動物性油脂あるいは廃食油などを原料として、これをメタノールでエステル化したFAME (Fatty Acid Methyl Ester: 脂肪酸メチルエステル) が現時点では主流である。

しかしFAMEは、原料とする油脂によって性状が異なる、精製の条件によってはグリセリン、メタオールやアルカリ触媒などの不純物が残留し車両へ悪影響を与える、既存の軽油と比較すると酸化安定性等が劣る、などの問題点がある。

そこで国内では品確法 (揮発油等の品質の確保等に関する法律) により、FAMEを5%以内で添加すること

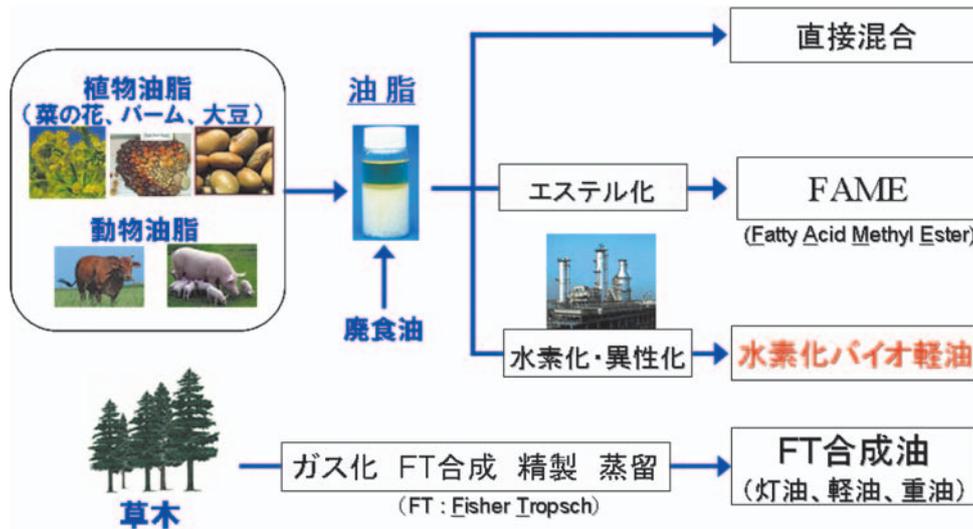


図2 バイオディーゼル燃料の製造方法¹⁾

表1 品格法におけるFAME混合時の強制規格

項目	満たすべき基準
メタノール	0.01 質量%以下
酸価	0.13 mgKOH/g以下
ぎ酸、酢酸及びプロピオン酸の合計	0.003 質量%以下
酸価の増加	0.12 mgKOH/g以下

が認められているが、その場合、表1の強制規格を満たすことが要求される。

そこで当社は、2005年、トヨタ自動車殿と共同で、動植物油脂を原料として既存燃料と同等の品質の燃料油(Drop-in Fuel)を製造することを目的としたバイオ燃料の開発に着手した。

当社は石油精製プロセスの保有技術を活かして、動植

物油脂の水素化・異性化処理技術としてBH-Fining*プロセスを開発した。また、BH-Finingにより得られた水素化バイオ軽油(BHD: Bio Hydro-fined Diesel)の品質設計を行い、更に製品評価をトヨタ自動車株式会社殿と共同で実施し、BHD技術を完成した。

*BH-FiningはJX日鉱日石エネルギー株式会社の登録商標

(2) BH-Finingの概要

油脂の水素化・異性化処理について図3に示す。一般的な植物油脂であるトリグリセリドはその構造内に約8wt%の酸素分を有している。

①水素化処理

水素化処理では、動植物油脂由来の不飽和結合の飽和化、および酸素の脱離が起これるとともに、植物油脂のト

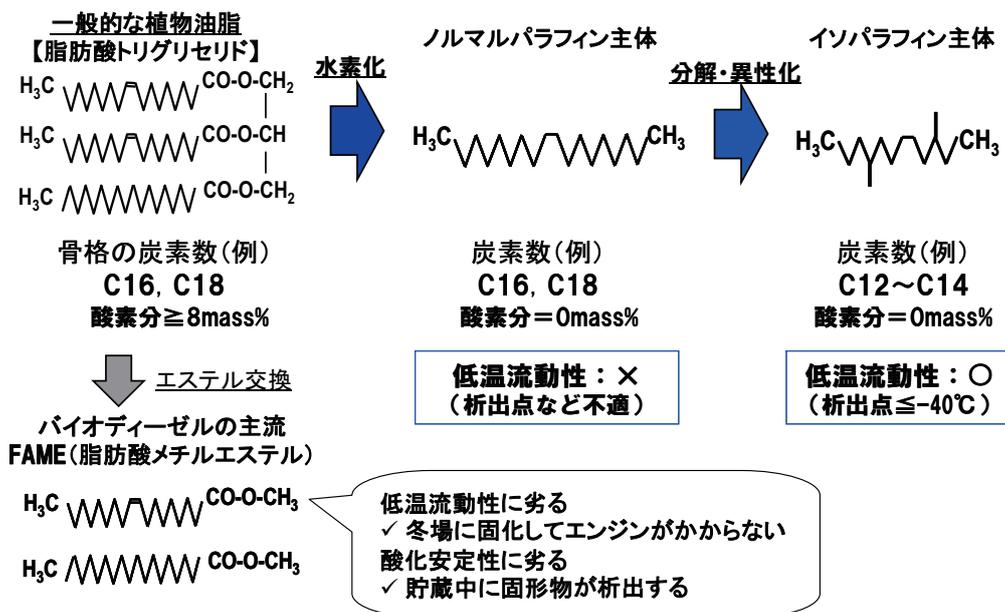


図3 油脂の水素化・異性化

リグリセリド構造の分解によって、軽油の沸点に近い炭化水素を製造する技術である。具体的には金属硫化物触媒を用いた接触水素化によって、オレフィン水素化、エステルの水素化脱酸素および脱炭酸を行いn-パラフィンを得る。一例として、BH-Finingにより得られたパーム油脂由来のBHDと原料パーム油脂、パーム油脂由来のFAMEおよび既存軽油との性状比較を表2に示す。この段階で油中の酸素分は無くなり、油としての酸化安定性が格段に改善される(図4)。

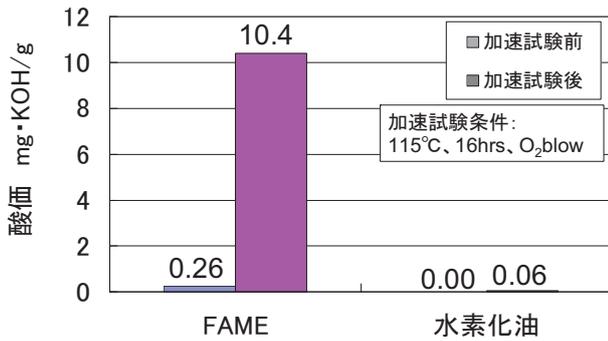


図4 水素化油の酸化安定性評価

②異性化処理

C18の脂肪酸で構成されるパーム油脂のような場合、水素化された分岐構造のないn-パラフィンは常温で固体であり、低温流動性が悪いため、使用方法によっては問題が残る。そのため貴金属担持触媒を用いて異性化することによってn-パラフィンの一部をi-パラフィンに転換し、低温性能を改善する。軽油として使用する場合、特に寒冷地で軽油基材として用いる際には必須となる。副反応である分解を抑えつつ異性化を進行させることがこの技術開発の鍵であり、低温性能向上と分解率抑制のバランスを考慮し、異性化度の目標を定めている。

③燃料油の実走行試験

BH-Finingで得られた燃料油の評価として、東京都殿

で運営している都バスを用いたBHD混合軽油の走行試験をトヨタ自動車株式会社殿、日野自動車株式会社殿とともに4者のプロジェクトとして実施した。このプロジェクトでは2007年10月から2008年3月までの半年間、BHDを10%混合した燃料を用いてデモ走行試験が行われ、特に大きなトラブルもなく、無事終了し、BHD混合軽油の自動車燃料としての適合性が検証された。

この開発により、燃料としての品質確保と1次エネルギーの多様化、CO₂排出量削減等の課題を同時に解決することが可能となったと考えている。また、この技術は植物油脂だけでなく、微細藻類由来の油脂にも適用が可能であることから、当社では次章に示すバイオジェット燃料の開発を開始した。

4. バイオジェット燃料の開発

(1) 開発の背景

地球温暖化対策として、国際的にCO₂削減策が進められていく中で、需要の増加から今後もCO₂排出量の増加が見込まれる航空分野に対して欧州連合(EU)では2012年より航空部門を排出権取引制度(EU-ETS)に含めることを決定した。

航空業界でも国際航空運送協会(IATA)が2009年6月にCO₂削減の自主目標として、2020年からの航空機からのCO₂排出上限の設定、2009年から2020年の間で、年間1.5%の燃料効率の改善、および2050年までに対2005年比で50%の排出量削減という内容を設定している。

一方、航空機用の燃料としてはエネルギー密度が高く搭載性に優れた液体燃料が必須である。また、陸上輸送の自動車では、CO₂排出削減策として電気自動車(EV)や燃料電池車(FCV)など他のエネルギーへの転換が可能であることに対して、航空機では航行中の燃料面からのCO₂削減策としてはバイオジェット燃料の利用が唯一の対策と見られている。

そのため、航空業界では持続可能な航空用燃料

表2 各種軽油の性状比較

		パーム油	パーム油 FAME	パーム油 BHD	一般軽油	
密度 (15°C)	kg/m ³	916	874	783	830	
動粘度	(30°C)	-	5.5	4.1	3.7	
	(100°C)	8.6	-	-	-	
引火点	°C	274	180	116	70	
セタン価		-	62	98	58	
流動点	°C	25	20	20	-15	
総発熱量	MJ/kg	40	40	47	46	
蒸留	10%留出温度	°C	588	333	272	220
	90%留出温度	°C	614	359	320	335
硫黄分	massppm	<1	<1	<1	6	
酸素分	mass%	12	12	<1	0	
芳香族分	vol%	<1	<1	<1	19	
全酸価	加速試験前	mgKOH/g	0.12	0.26	0.00	0.00
	加速試験*後		-	10.40	0.06	0.06

*115°C、16時間酸素吹き込み

ユーザーグループ (Sustainable Aviation Fuel Users Group : SAFUG) が設立され、バイオジェット燃料に対する国際規模での健全な持続可能性を実現する基準の策定やバイオジェット燃料の開発、商業化の促進を図っている。

こうした中、当社は、全日本空輸株式会社殿および株式会社日本航空殿からのバイオジェット燃料開発の要望を受け、培養などのプロセス技術を有する株式会社日立プラントテクノロジー殿および微細藻ユーグレナの培養技術を持つ株式会社ユーグレナ殿とともに、バイオジェット燃料の製造に関する基礎検討を進め、現在は共同で、その要素技術開発およびフィージビリティスタディ (事業化可能性調査) を実施している⁽²⁾。

(2) バイオジェット燃料開発の概要

①原料の選択

今回の開発で特徴的なのは、バイオマス原料として微細藻類のユーグレナ (別名ミドリムシ) を選択していることにある。

バイオマス原料としての微細藻類は、主要用途が食料ではなく、その生産には畑作地以外の土地も利用可能であることから、直接的、間接的に食料との競合を緩和することが可能である。また、陸性油脂植物の10倍以上の成長速度があり、単位面積当たりの生産性が高いため、他のバイオマス原料植物と比べて所要面積を抑えることができる (表3)。

ユーグレナは、その微細藻類の中でも成長速度が速く、太陽光エネルギーを光合成の理論限界近くまで固定化できる優れたポテンシャルを有している。

表3 主なバイオマスの油脂生産能力⁽²⁾

バイオマス	油脂生産能力 [Ton-Oil/ha/y]
Corn とうもろこし	0.2
Soybeans 大豆	0.5
Safflower ベニバナ	0.8
Sunflower ヒマワリ	1.0
Rapeseed アブラナ	1.2
Oil Palm アブラヤシ	6.0
Micro Algae 微細藻類	47-140

さらに表4に示すとおり、微細藻類や植物油脂に含まれる成分の炭素骨格は炭素数分布が16以上と、軽油あるいはそれよりも重質な石油留分に相当するのに対し、ユーグレナ油脂は分岐構造が炭素数14を中心とした炭素骨格で構成されている。既存ジェット燃料の炭素数分布は10～16の範囲内であることから、BH-Finingによりユーグレナ油脂から得られるバイオ燃料はこの範囲に相当する。これは、ユーグレナ油脂が、他の植物油脂に比べ簡易にジェット燃料に精製可能であることを示している。

これらの理由から、今回の開発ではバイオマス原料としてユーグレナを選択している。

一方で、微細藻類の短所もいくつかあり、それが開発・実用化に向けた課題となっている (表5)。

陸生の植物油脂栽培に比べ栽培実績に乏しく、特に異生物の混入 (コンタミネーション) については大きな課題である。また、藻体内で生成した油脂の回収・抽出に

表4 微細藻および植物油の脂肪酸炭素数分布

炭素数	微細藻			植物油	
	ユーグレナ	クロレラ	スピルリナ	パーム油	大豆油
10	0	0	0	0	0
12	5	0	0	0	0
14	44	1	0	2	0
16	13	15	46	40	8
18+	-	47	24	58	92

表5 生産における微細藻類の特徴

微細藻 (ユーグレナ、クロレラ、ホヅリオコックスなど)	vs	陸生植物 (パーム、アブラナ、大豆など)
陸生植物の10倍以上	○	生産性ポテンシャル ×
培養条件未確立が課題 ・異生物の混入防止が必要 ・品種改良などは今後の技術課題	×	栽培実績多数 (技術確立) ・病害虫に強い ・多産種、気候対応など品種改良が進んでいる
単位が極微小であり、培養液(水)からの分離・回収が困難	×	回収・収穫 ○
油脂抽出のため培養液中の微細藻の濃縮・乾燥が不可欠	×	乾燥 ○
細胞内に蓄積されているので回収・分離が困難	×	油脂抽出 ○
		果実、種子などに油脂を濃縮し、蓄積するので収穫が比較的容易
		不要
		植物油として既に確立された技術

ついても極微小の藻体に対応する技術の開発・適用が必要である。

②バイオジェット燃料製造工程と開発課題

微細藻ユーグレナは陸上の植物同様に窒素、リンおよびカリウムを始めとする必要な栄養素を含む培養液中で炭素源としてCO₂を吹き込み培養する。ユーグレナは藻体内に油脂を30～40%程度生成する(図5)。

図6に現在想定している製造工程と開発課題について示した。

持続可能性基準を満たしたバイオ燃料の開発では、生産にかかわるエネルギーを極力低減することが重要である。そのため我々は現在のところ、オープンポンドを用いた光合成による大量培養を行うことを想定している。

また、燃料用バイオマス原料としては低コストでの大量生産が必要である。現在、一部健康食品などの用途で生産されている微細藻は高付加価値少量生産のため、その生産方法を燃料に適用すると、1L当り数千円～数万円と非常に高額な製造コストになってしまう。従って燃料用として市場競争力のあるレベルまで下げるためには、設備コストおよび製造コストを大幅に削減するための技術開発が必要である。特に、以下の主要課題の解決が必須である。

- ユーグレナ生産性の向上および油脂含有率の向上
- 設備の低コスト化(特に培養設備)および低エネルギー化(特に乾燥設備)
- 副産物である抽出残渣の付加価値化

更には「3つのE」のひとつである安定供給を念頭に置くと、相当規模の数量の生産が必要となることから、これまでに無い量の大量生産を行わなければならない。そのためには現在想定できない規模での大量培養技術についての開発・実証も必要となってくる。

③燃料化工程

高度約1万mを飛行するジェット機にとって、その燃

料に求められる要件として最も重要なものは低温性能(析出点)である。バイオジェット燃料の規格はフライト・テストなどの結果を踏まえて、Bio-SPK(Synthetic Paraffinic Kerosene)を50%を上限として添加できることが本年7月に認められた(ASTM D 7566)。

その中で析出点は、基材となるBio-SPKでは-40℃、最終製品となるBio-SPK混合燃料では既存ジェット燃料と同様に-47℃と規定された。析出点以外のほぼ全ての項目について、既存ジェット燃料と同等の性能(Drop-in Fuel)が要求されている。そのため、バイオジェット燃料の製造に当たっては、前章の水素化・異性化技術、BH-Finingを適用する。

ユーグレナ油脂の水素化反応例と水素化・異性化した際の性状を図7に示す。

ユーグレナ油脂はパーム油など植物油脂や他の微細藻類の油脂でも多く見られるトリグリセリドではなくモノエステルを生成する。この油脂を水素化脱炭酸反応および水素化脱水反応により精製し炭化水素を得る。

ユーグレナ油脂は水素化された段階で、油脂中の酸素分が排除されるが、n-パラフィンが主体の成分であり常温で固体と低温性能が悪い。そのため、これを改善するための異性化を行う。これによりi-パラフィン主体の成分となることによって低温性能が改善され、析出点はBio-SPKの規格値である-40℃を満足するレベルになる。

(3) 事業化に向けた課題

ここ数年、バイオジェット燃料によるテスト飛行や一部商業路線でのテスト運用のニュースが出てきている。これらはカメリナやココナッツなど陸生植物油脂から製造された燃料が主であり、微細藻類由来のバイオ燃料については、ごく少量、試験生産のものを用いた例はあるが、まだ実用化の段階に達していないのが現状である。これは微細藻類の低コスト大量培養の技術がいまだ確立

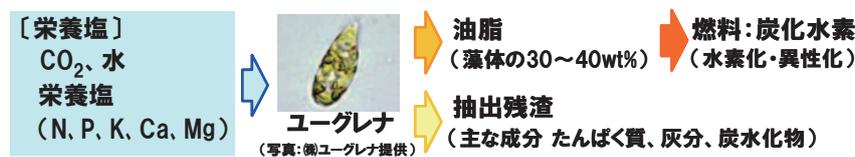


図5 ユーグレナ培養に必要な栄養素と生成物



図6 想定される製造工程と課題

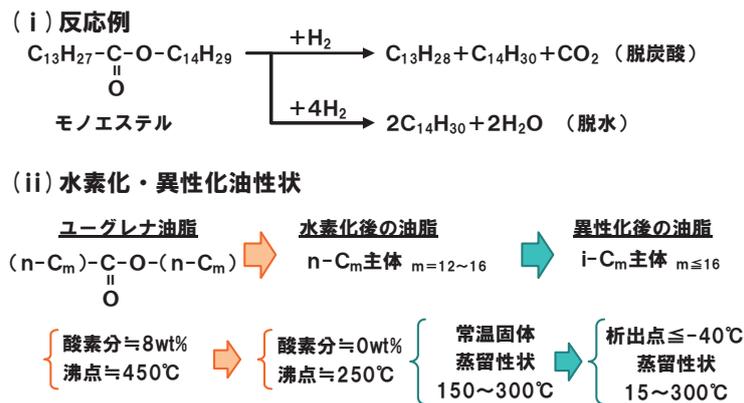


図7 ユージェレナ油脂の燃料化

されていないことによる。

一方、技術以外の課題も多い。特に大きな課題として、オープンポンドでの培養に適した立地の問題がある。栽培に適した気候条件であり、水やCO₂の供給が可能で、かつ広大な土地を確保することが必要であることから、選択肢として海外立地による開発輸入がひとつの方向性として考えられる。

このような実用化に向けた整理を経団連傘下の産業競争力懇談会(COCN)が、その活動の一環として2010年度に「農工連携研究会 微細藻燃料分科会」で検討している。この分科会には、微細藻からのバイオ燃料生産に関心の高い数多くの企業・機関が参加し、今後、我が国が「3つのE」を満たす微細藻類を利用したバイオ燃料を開発・事業化するための課題を抽出・整理すると共に、その課題を解決するために必要な取組みを取り纏めて提言している⁽⁴⁾。

5. おわりに

新エネルギーとしてのバイオ燃料の必要性は今後もますます高まっていく。我々はエネルギー会社としても持続可能性の観点から、バイオ燃料の開発・実用化・普及に貢献すべきと考えている。

しかし、「3つのE」の中でも供給安定性と経済性を念頭に置くと、相当の規模で安定的に確保できるバイオマス原料を選択せざるを得ない。その意味でも微細藻類が有力な候補として開発に着手しているところである。

ただし、微細藻類由来のバイオ燃料の開発は、国の「エネルギー基本計画 第二次改定」においても「2030年に最大限の導入拡大を目指す」技術であり、開発から導入・普及までの息の長い取り組みになる。そのため、企業単独での取り組みではなく、オールジャパンの強力な連携と国の継続的な支援が重要と考えている。

参考文献

- (1) 世界省エネルギー等ビジネス推進協議会, 国際展開技術集 2011 “P-3 水素化バイオ軽油 (JX日鉱日石エネルギー)” (2011.1)
- (2) JX日鉱日石エネルギープレスリリース (2010.5.27)
- (3) 渡邊信, 第1回 つくば3Eフォーラム報告書, p.23, p.160-167, “藻類バイオマスエネルギー技術の展望” (2007.12.15-16)
- (4) 産業競争力懇談会, 2010年度研究会最終報告 “農林水産業と工業の連携研究会～微細藻燃料分科会～” (2011.3.4)

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

新種液体燃料のガスタービンへの適用性評価

西田 啓之*¹
NISHIDA Hiroyuki橋本 望*¹
HASHIMOTO Nozomu小沢 靖*¹
OZAWA Yasushi

キーワード：Combustor, Liquid Fuel, Alternative Fuel, NOx, Smoke

1. はじめに

2011年3月11日以来、日本でのエネルギー事情は一変し、これまで想定されていたエネルギー政策の見直しは余儀のない情勢となっている。このような状況の下、国内の電力設備容量の6割を占める化石燃料（石炭、液化天然ガス（LNG）、石油など）を用いる火力発電が重要視され、さらにガスタービン（GT）をはじめとして緊急的な増設が行われている。しかし、長期的に見ると、このような化石燃料への依存は、CO₂排出量削減の観点だけでなく、エネルギーセキュリティーの問題もあり、再生可能エネルギーへの転換も模索されている。

CO₂排出量削減の1つの選択として、GTと蒸気タービンとを組み合わせたGT複合発電設備（GTCC）は、高い熱効率と、優れた負荷調整能力とあいまって、多く導入されている。その主たる燃料はLNGであるが、近年の世界的需要の伸びにより、需給の逼迫が懸念される。一方、石油系燃料は、調達や輸送の容易さ、長期保存性など、高い運用機動性といった利点を持つが、価格が高いなど問題もある。このような石油系燃料を用いるGTあるいはGTCCは、高い負荷調整能力と確実な燃料供給、柔軟な運用性を備え、太陽光、風力発電などの自然エネルギー増加に伴う発電量変動に対応するのに最も適した発電設備と考えられている。また、石油燃料に代え、植物由来の液体燃料を使えば、CO₂排出量の削減にもつながる。

本稿では、GTへ適用できる液体燃料について幅広く検討し、その適用への課題点の抽出と評価方法について検討した。また、発電用ガスタービンの他、航空用GTについても代替燃料の観点から言及する。

2. ガスタービン燃料の要求スペック

発電用GTの燃料には汎用性があるといわれるが、実用的には多くの制限がある。ガスタービン燃料に要求される一般的なスペックとその基準の概要について表1に示す⁽¹⁾。これより3つの要求に大別され、第一は防爆などの安全性、設備、使用環境に関するもの、第二は燃焼

排ガスの腐食性に関するもの、そして第三に排ガス規制に関連するものである。表に示すものは一般的なものであり、各メーカーごと、あるいは、機種ごとに個別に要求仕様を規定することを推奨している⁽²⁾。

一方で、ガスタービンに使用される燃料については、灯油や軽油あるいはA重油が一般的であり、これら燃料規格には、引火点、蒸留性状や硫黄含有量などの要求品質として、JIS K 2203軽油、JISK 2204 A重油、JIS K 2205 C重油などがあるが、それらでは腐食の原因となる微量金属の含有量について規定されてない。国際的にはASTM⁽³⁾やISO⁽⁴⁾において表2に示す推奨値が示され、重質の油種では協議によるよう推奨されている。

表1 一般的なガスタービン燃料の要求スペック⁽¹⁾より再編

	仕 様	解 説
引火点	・40℃以下	防爆対策が必要 個々に対処 防爆対策不要
	・40～60℃	
	・60℃以上	
蒸気圧	≤13.7kPa	13.7kPaを超える起動油として軽油クラスの代替燃料が必要(ペーパーロック対策)
流動点	≤環境温度-10℃	10℃以上余裕がないと燃料加熱装置が必要
粘度	≤5.8～13cSt@起動	流動性や噴霧特性の目安となる指標
	≤20.9cSt@負荷運転	
残留炭素	≤0.35%	0.35%を超えるとデブリ、ばい煙の発生に注意が必要
泥水分	≤1.0%	蒸留油では分離・設備腐食防止のため通常0.05%程度に規制。重質油では乳化状態になるため1.0%以下を基準
ナトリウム(Na) +カリウム(K)	≤0.5ppm	VやSと結合し低融点化合物を形成し、高温部材を腐食する。吸込空気などに含まれる場合、燃料に換算し制限される
バナジウム(V)	≤0.5ppm	他の物質と化合して低融点化合物を形成し、高温部材を腐食する
鉛(Pb)	≤2.0ppm	腐食の原因に加え、V腐食防止剤であるMg系添加剤の効果を阻害。Na、K、Vと結合し腐食を加速する
カルシウム(Ca)	≤10ppm	燃焼器やタービンに強固なデブリを形成、タービンの性能低下に影響
その他の 微量金属成分	≤2.0ppm	マンガニン(Mn)はNa、Sの共存で腐食を加速、リン(P)は高温部材腐食の一因となる
硫黄(S)	≤0.5%	燃料中の金属分と反応して低融点化合物を形成し、高温部材を腐食する

表2 微量金属含有量の最大値^{(3),(4)}より

微量金属含有量の最大値(mg/kg)			
バナジウム(V)	ナトリウム(Na) +カリウム(K)	カルシウム(Ca)	鉛(Pb)
0.5	0.5	0.5	0.5

3. 代替液体燃料の性状

筆者らは、表1の条件を満たし発電用GTに適用可能な燃料として、表3に示すように化石燃料であるA重油、Light Cycle Oil (LCO)、オイルサンド改質油、バイオ燃料であるパームとそのメチルエステル (PME)、ジャトロファ（南洋アブラギリ）等について燃料性状分析を行い、その性状から燃焼性を評価した⁽⁵⁾。

原稿受付 2011年9月17日

* 1 (財)電力中央研究所

〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1

LCOは石油精製プロセスにおける中間製品であり、原油の常圧蒸留残油は流動接触分解により処理されるが、その蒸留留出物のうち分解ガソリンよりも高沸点の留出物である⁽⁶⁾。特徴として、低粘度で低硫黄、C/H比が高く芳香族炭化水素を多く含み、着火点が高くセタン指数が低いこと、比較的、蒸留終点温度が低い、つまり蒸発性がよいことが挙げられる。これらから、芳香族炭化水素含有量が多いことに起因するすすの発生、それに伴う火炎からの放射の増大が懸念され、断熱火炎温度も軽油より高いためNO_xの増大が予測される。

オイルサンドは、カナダを中心に産出されるが、山元で改質されて原料油 (Crude oil) として出荷される⁽⁷⁾。表3に示すオイルサンド改質油は、これらのうち軽質のもの (OSA) である。揮発性の高い成分を含んで第1石油類に分類され、このままでは取り扱いが困難であるため、ナフサ分 (軽質分) を取り除いて (今後、OSA (NC) と言う) 用いた。OSA (NC) では、若干、粘性が上昇し、硫黄含有量が増えている。軽油に比べC/H比が高く、芳香族炭化水素が多い傾向が見られる。また、蒸留終点温度が高く、蒸発しにくい成分があることが分かる。これらから、OSA (NC) でも、芳香族炭化水素に起因するすすの発生、火炎からの放射の増大、断熱火

炎温度が高いことによるNO_xの増大が予測される。さらに、燃料の温度制御などによる粘性の調整も必要と思われる。

パームは、単位面積当たりの油分収量が高く⁽⁸⁾、プランテーションによる効率的な生産が可能なことから、食用油としてのみならず、代替燃料としても注目されている。一方、ジャトロファは、毒性を有する非食用植物であり、食料と競合しない次世代バイオ燃料とされる。パームよりも乾燥に強いことも利点の一つである。ニートとは搾油後に不純物を取り除いたものである。性状をみると、パームニートは常温では流動せず、ジャトロファも粘性が高いため、温度制御などによる粘性の調整が不可欠である。しかし、パネルコーキングと蒸留性状から分かるように、温度を上げすぎるとコーキングを起こすという問題もある。また、植物由来であるが故に、多量の施肥によるNa, Kの持ち越しに注意が必要である。

このようなニート系の油の問題を解決する方法の一つが、メチルエステル化である。これは、バイオ燃料の主成分であるトリグリセライドをアルカリ触媒によりメタノールと反応させて、グリセリンを分離して残りのメチルエステルを燃料とするものである。この場合、メチルエステル化の工程と不要物であるグリセリンの問題は

表3 燃料性状分析結果⁽⁵⁾

		軽油2号	重油1種1号 特A重油	LCO	オイルサンド改質油 OSA	オイルサンド改質油 OSA(NC)	パームニート	パームメチルエステル PME	ジャトロファニート JPO
密度	@30°C	g/cm ³	0.8252	0.8707	0.893	0.8496	0.8913(50°C ^{*)}	0.8636	0.9069
動粘度	@30°C	mm ² /s	3.292	4.246	2.034	4.242	16.77	28.36(50°C ^{*)}	5.627
高位発熱量		J/g	45,990	45,210	43,640	45,160	45,270	39,830	39,570
低位発熱量		J/g	43,100	42,700	41,650	42,450	42,660	37,090	36,920
引火点		°C	62.5	87.5	78	< 20	116.0	251	174.0
着火点		°C	228	246	> 510	255	249	450	245
セタン指数(セタン値)		-	54.8	40.6	23.8	43.9	36.8	(57.8)	43.9
流動点		°C	-22.5	-25	-50以下	-17.5	-12.5	17.5	12.5
断熱火炎温度 ^{**} (燃料温度)		°C	2168 (30°C)	2186 (30°C)	2193 (30°C)	2165 (30°C)	2187 (88°C)	2168 (50°C)	2138 (50°C)
水分		ppmw	-	95	106	64	45	0.12	86
灰分		wt%	-	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	-	0.0034
炭素分		wt%	86.4	87.8	89.4	86.9	87.6	76.7	76.4
水素分		wt%	13.5	12.2	10.6	12.9	12.3	12	12.4
窒素分		ppmw	5	< 1	69	500	630	11	< 1
C/H比			6.400	7.197	8.434	6.736	7.122	6.392	6.161
酸素分		wt%	-	< 0.5	-	-	10.8	-	10.1
硫黄分		ppmw	6	560	360	1700	2100	3	< 1
残留炭素分		wt%	0.01	0.04	0.01	0.01	0.02	0.24	0.0
微量元素など	カリウム	ppmw	-	< 0.3	< 0.3	< 0.3	-	2	< 0.3
	ナトリウム	ppmw	-	< 0.1	< 0.1	< 0.1	-	< 0.1	< 0.1
	カルシウム	ppmw	-	< 0.1	< 0.1	< 0.1	-	5	< 1
	マグネシウム	ppmw	-	< 0.1	< 0.1	< 0.1	-	1	< 0.1
	マンガン	ppmw	-	< 0.1	< 0.1	< 0.1	-	0.3	< 0.1
	鉛	ppmw	-	< 0.1	< 0.1	< 0.1	-	< 0.1	< 0.1
	バナジウム分	ppmw	-	0.2	< 0.1	< 0.1	-	< 0.1	< 0.1
	ニッケル分	ppmw	-	< 0.1	< 0.1	< 0.1	-	< 0.1	< 0.1
	リン分	ppmw	-	< 5	< 5	< 5	-	< 5	< 10
	アルミニウム	ppmw	-	< 0.5	< 0.5	< 0.5	-	0.7	< 0.5
	シリカ	ppmw	-	< 0.5	< 0.5	< 0.5	-	1	< 0.5
塩素分	ppmw	-	< 3	< 3	< 3	-	< 3	14.0	
ドライラッジ		mg/100mL	-	10	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.01	< 10
酸価		mgKOH/g	-	< 0.05	< 0.05	< 0.05	-	7.05	0.1
酸化安定性 16h×115°C		mgKOH/g	-	-	-	-	-	1.25	5.2
銅板腐食		-	-	1	1	1	-	1	1.0
パネルコーキング	パネル温度 250°C	mg	0.55	22.8	0.0	-	3.4	338.6	-
表面張力	@23°C	dyn/cm	28	29.1	29.5	27.9	26.8	33.5	30.6
ワックス分		wt%	-	< 0.1	-	< 0.1	-	-	-
アスファルテン分		wt%	-	< 0.05	< 0.05	< 0.05	-	-	-
蒸留性状	蒸留方法		常圧蒸留	常圧蒸留	常圧蒸留	ガス圧蒸留	ガス圧蒸留	減圧蒸留	減圧蒸留
	初留点	°C	186.5	201.0	191.5	36	198	359.0	327.5
	10容量%	°C	225.0	240.5	210.0	140	242	483.0	340.5
	20容量%	°C	243.0	255.5	218.0	212	274	511.5	341.5
	30容量%	°C	257.0	266.0	224.0	261	301	520.0	342.5
	40容量%	°C	268.0	275.0	230.0	299	323	522.5	343.5
	50容量%	°C	276.5	284.5	237.0	327	344	-	345.0
	60容量%	°C	284.0	295.0	244.5	352	365	-	346.5
	70容量%	°C	292.5	306.0	253.0	377	387	-	348.0
	80容量%	°C	302.5	320.5	263.0	406	412	-	350.5
	90容量%	°C	317.0	338.0	276.5	440	444	-	353.0
終点	°C	343.5	364.0	305.0	528	531	-	347.0	
蒸気圧	@37.8°C	kPa	-	2.0	-	36.5	-	1.5	-
石油分類			第2石油類	第3石油類	第3石油類	第1石油類	第3石油類	動植物油類	第3石油類

-: 計測不能/未計測 *1 蒸留性状10容量%留出後、分解。 *2 空気温度(乾燥空気)400°C *3: 30°Cで流動性なしのため

あるが、粘度が下がり、若干の燃料温度の制御だけで、コーキング等の問題はなくなる。一方で、一部のゴム類に対する膨潤性や、金属に対する浸食性が発生する。また、肥料の持ち越しに加え、触媒としてもNaやKを使用するため、分離を十分に行う必要がある。これらニート燃料やメチルエステルは含酸素燃料であり、芳香族炭化水素を含まないため、すすの発生などは低く抑えられる特徴がある。

4. 燃焼試験による燃料適用性評価

前章では燃料性状から予測される課題点を抽出したが、どの程度の問題が生じるのか、また、燃料性状からでは推定できない事象が起きる可能性はないか検討するため、筆者らは大気圧燃焼試験による適用性評価を行った^{(9),(10)}など。

4.1 試験装置及び実験方法

試験に用いたバーナの断面を図1に示す。燃料ノズルは、デラバン0.875GPH相当の圧力噴霧ノズル、噴霧角は約64°とした。燃焼実験装置の系統図を図2に示す。空気は圧縮機により供給され、流量を計測されて、流量調整弁、加熱器を経て400℃で燃焼器へ導かれる。燃焼器は耐火断熱材を内張りした縦型構造で、内径150mm、長さ910mmである。燃焼ガスは冷却器を通して排出される。

燃料供給装置は2系統の恒温槽、燃料タンク、流量計、

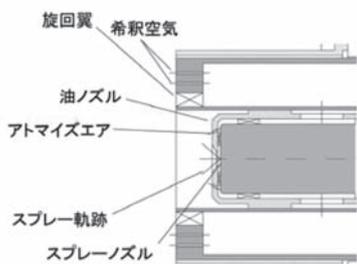


図1 バーナ断面図

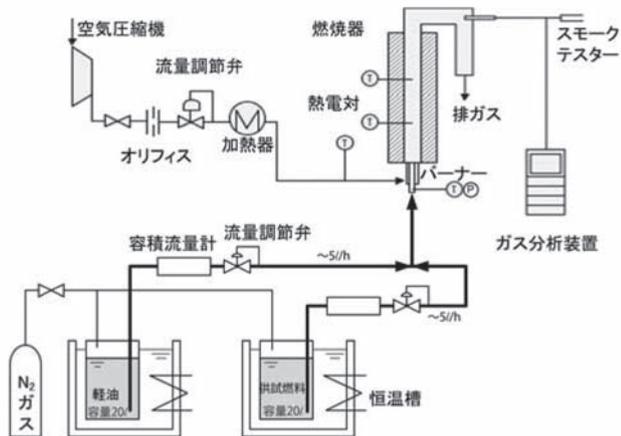


図2 燃焼試験装置系統図

圧力調整弁、ヒートホース、圧力計から構成され、流量調整弁を介して両者を混合した後、更にヒートホースを経て、燃料ノズルへと導かれる。軽油または供試燃料は、それぞれ予め所定温度に温水槽で加熱し、さらに、燃料タンクからノズルまでの流路もヒーターで加熱して燃料温度を制御した。燃料は燃料タンクを窒素で加圧し燃料ノズルに供給した。

排ガスは、連続式ガス分析装置により測定する。排ガス中のスモークはFSN (ISO)⁽¹¹⁾で評価する。また、燃焼域でのすすなどを評価するため、二色法⁽¹²⁾に基づき、すす濃度の指標であるKL値 (K:すすの吸収係数, L:火炎厚み) の計測を行っている。

試験は、まず燃焼器に所定の温度(400℃)および流量の空気を供給した後、放電式イグナイタをバーナ出口に挿入し、所定の温度および流量の燃料を供給して燃料を着火した。

それぞれの供試燃料では粘性が異なるため、粘性が一致するように可能な限り燃料温度を調整し、噴霧状況が近くなるようにした。ただし、LCOは粘度が低いため常温(25℃)での試験、ジャトロファニートは燃料温度調整の限界である110℃程度としたが、粘性を一致させることはできなかった。

4.2 燃焼試験結果と考察

図3に空気流量を110Nm³/hに固定して、燃焼器出口温度を変化させた場合の16%O₂濃度換算NO_x濃度(以後、NO_x濃度と言う)を示す。燃焼器出口温度を高く(GTの負荷上昇に相当)してもほとんどNO_x濃度は変化しない傾向を示し、NO_xが燃焼温度にほとんど依存しない典型的な非予混合燃焼の特徴が観察された。OSA (NC) 等では燃料中に窒素 (Fuel N) を含むため、その影響も懸念されたが、燃料流量とNO_x濃度との間に相関性は少なく、Fuel Nの影響は観察されなかった。最高断熱火炎温度とNO_xの関係⁽¹³⁾から推測されるように、LCOを除く各燃料では、断熱火炎温度が高ければNO_xが高くなる傾向を示した。しかし、供試燃料のうち最も高い最高断熱火炎温度を示すLCOで最も低いNO_x濃度となった。この原因として、本試験で用いたバーナでは非予混合燃焼が起っており、表3に示すようにLCOは粘性が低いため微粒化が良く、蒸発性も良いが、自己着火温度が高いことから、蒸発は速やかに行われるものの、着火し難いため燃料蒸気と空気との混合時間が十分にあり、他の燃料に比べ、燃料が均質、かつ希薄な状態で燃焼することが考えられる。それに対し、他の燃料では蒸発特性や自己着火温度が比較的近い傾向にあり、LCOのような差異が表れなかったと考えられる。ただし、LCOが高いNO_x排出特性を示す報告例⁽¹⁴⁾もあり、この結果は燃焼形態の影響が大きいと考えられる。なお、燃焼器出口温度1200℃以上ではCO、THCの顕著な発生はなかった。

図4には燃焼器出口のすす濃度であるFSN計測結果を示す。軽油ではほとんど計測限界付近であるが、A重油、LCOでは燃焼器出口温度の低下に伴って高くなり、特にLCOは1350℃以下では可視化煙の基準⁽¹⁵⁾であるFSN>0.135となり、1100℃では0.4にまで達した。A重油はLCOより低い傾向を示した。バイオ系燃料では、すすの発生は観察されなかった。

図5にバーナ近傍におけるすすの発光に起因するKL値の計測結果を示す。A重油、OSA (NC)、LCO、軽油の順ですす濃度が多い傾向を示した。PMEではKL値は

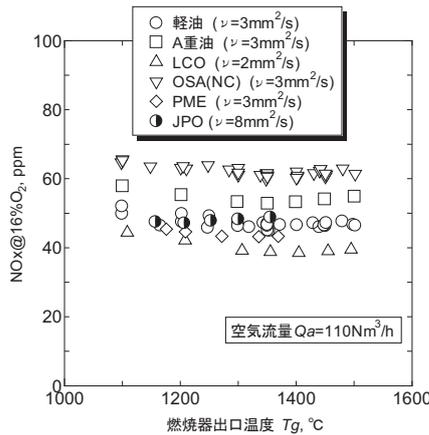


図3 NOx特性：燃焼負荷への依存性

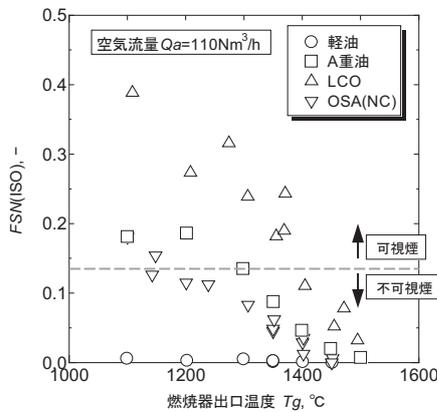


図4 FSN特性：燃焼負荷への依存性

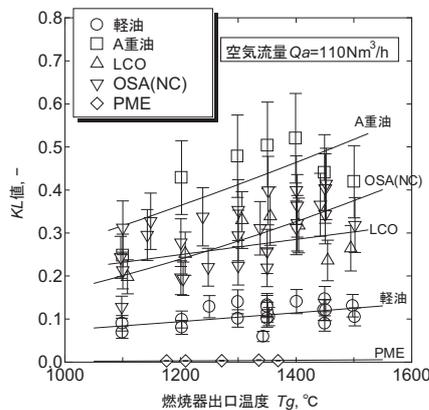


図5 KL特性：燃焼負荷への依存性

ほぼ0ですすの発生はない。すすの排出量であるFSNの傾向とは異なり、燃焼器出口温度の上昇によってKL値は高くなる傾向を示し、すすの発生と燃え切りでは特性が異なることが示された。

5. ガスタービンによる燃料適用性評価の検証

最終的にはGT実機による検証試験により燃料の適用性が評価される。ここでは、小型GTでの検証や航空機でのデモフライトについて述べる。

5.1 小型GT による検証実験

アルコール系燃料を用いた小型GTでの検証試験がいくつか報告されている⁽¹⁵⁾など。表4にVolvo Aero Turbine製GTの仕様、表5にはそれにアルコール燃料を適用した場合の排ガス特性を示す⁽¹⁶⁾。

アルコール系燃料では、火炎温度が低いため、NOxの排出は抑制されるが、低負荷時ではアルデヒド、アルキルニトライトなどの毒性物質の排出が懸念される。少し古いですが、Danjoらは45PS (33kW相当)の小型ガスタービンを用いて検証を行い、メチルニトライトおよびエチルニトライトを検出したが、その濃度は内燃機関と比べ極めて低いことを報告している⁽¹⁶⁾。なお、アルコール系燃料はガソリン代替として自動車での使用が想定され、発電用GTでの使用は限られるものと考えられる。

Orenda Aerospace社では、図6に示すOGT2500を用い、燃料系などを改造してBio Fuel、原油およびバイオエタノールでの試験を行っている⁽¹⁷⁾。表6に燃料性状を示す。このうちBio-oilは、おがくず、廃材の乾溜液のようで15～21%の水分を含み、発熱量は16 MJ/kg程度とアルコール系燃料よりもかなり低い。試験の結果を表7に示す。Bio-oil、エタノールではNOxの発生が抑制されることがわかり、特にBio-oilではDistillate (軽油に近い中間留分)に比べて1/6にまで低下している。しかし、COは約50ppmまで増加している。Bio-oilを用いた実験では、短時間でデポジットが発生したとの報告もある⁽¹⁸⁾。

この他、GT 機関車にバイオマス燃料として菜種エチルエステル、大豆メチルエステル、水素化大豆エチルエ

表4 Volvo Aero Turbine製VT100の性能表

Electrical output	110 kWe
Inlet pressure (P ₀)	4.8 bar
Inlet air temperature (T ₀)	890 K
Air mass flow	0.8 kg/s
Combustor residence time (hot)	8 ms
Combustor pressure drop	4.0 %

表5 VT100エンジン試験における排ガス性状

	Measured emissions	Target emissions
NOx (g/kWhe)	0.90	1.0
CO (g/kWhe)	0.40	1.5
UHC (g/kWhe)	0.033	0.05

ただし旧規格は 7g/kWhe(筆者注)

表7 OGT2500での燃焼試験の結果

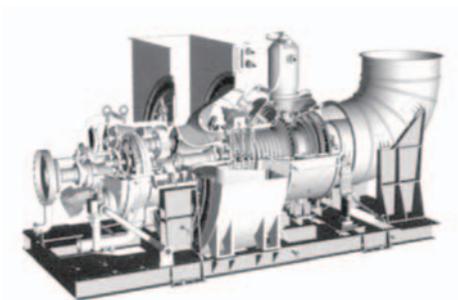


図6 Orenda Aerospace社製OGT2500

OGT 2500 gas turbine test performance
 NOx and SO₂ emissions when operating on bio oil or ethanol are significantly lower than for #2 distillate (see test data) while CO emissions are much higher – but all remain well below Ontario regulatory limits of 189 ppm for NOx, 86 ppm for SOx and 60 ppm for CO.

Test Performance	Bio-oil	Ethanol	Distillate
Fuel flow (per hour)	1883 liters	13,850 liters	1071 liters
Electric generator output	2510 kW	2510 kW	2510 kW
Inlet air temperature	-2.1°C	2.0°C	-2.8°C
Exhaust gas temperature	417°C	415°C	403°C
NOx emissions	58 ppm	101 ppm	321 ppm
SOx emissions	2 ppm	2 ppm	7 ppm
CO emissions	48.7 ppm	3.0 ppm	1.0 ppm

表6 OGT2500に使用した燃料の性状

OGT 2500 gas turbine test fuel characteristics
 Since bio oil is such a viscous fuel it requires preheating to improve its flow handling and for compressed air atomization to reduce fuel droplet size for more complete combustion.

Fuel Properties	Bio-oil	Ethanol	Distillate
LHV heat rate (per kg)	15-17 MJ	25-26 MJ	42-43 MJ
Relative density (per liter)	1.2-1.3 kg	0.80-0.82 kg	0.82-0.86 kg
Kinematic viscosity (40°C)	17-48 cST	1.4 cST	3-6 cST
Flash point	58°C	13°C	74°C
Carbon (weight)	42.0%	52.2%	84-87%
Hydrogen (weight)	7.3%	13.1%	13-16%
Nitrogen (weight)	0.06	--	≤0.05
Oxygen (weight)	44.7%	34.8%	--
Water (weight)	15-21%	≤6.2%	≤200 ppm
Sulfur (weight)	≤0.02%	--	≤0.4%
Ash (weight)	≤0.05%	--	≤0.01%
Vanadium	≤3 ppm	--	≤0.01 ppm

ステル、木質熱分解油を適用した場合のコストと排ガス特性についての報告もある¹⁹⁾。

5.2 バイオ燃料デモフライト

これまで述べた、個々の燃料について評価してある程度の改造を許容してGTに適用する方法とは異なり、航空用燃料では機体やエンジンに何の改修もせずに適用できる「Drop-in Fuel」が望まれており、規格による燃料の性能確保を目指している。その規格がASTM D7566²⁰⁾であり、ASTMD1655²¹⁾で規定される標準ジェット燃料(Jet Aなど)と混合し、従来の燃料と同様の運用を目指している。このために、燃料性状の分析、調整、Rig試験、エンジン試験などを経てデモフライトに至る一連のプロトコルが実施され²²⁾、表8に示すようにJet-Aとジャトロファ、カメラナ(アブラナ科の植物)、海藻から抽出された油との混合燃料で、その割合、機材、エンジン

表8 デモフライトに用いられたバイオ燃料

Airline	Air New Zealand	Continental Airlines	Japan Airlines
Aircraft	Boeing 747-400	Boeing 737-800	Boeing 747-300
Engine	Rolls-Royce RB211-524G	CFM International CFM56-7B	Pratt & Whitney JT9D-7R4G2
Plant Feedstock	50% jatropa	47.5% jatropa, 2.5% algae	42% camelina, 8% jatropa/algae
Fuel Provider for Test Flight	UOP	UOP	Nikki Universal/UOP
Flight date	Dec 30, 2008	Jan 7, 2009	Jan 30, 2009
Engine Tests/Ground Run Results	Comparison of fuel flow with expected heat of combustion	Engine Operability & Emissions Tests for various blend percentages	Engine Operability & Emissions on Neste Oil-provided paraffins for ground engine test only.
Flight Test Profile	Climb to FL 350, Mach 0.84 accels & decels, engine windmill restarts, starter-assisted engine relights, simulated missed approach, suction feed test	Climb to FL390, Mach 0.78, accels & decels, engine windmill restarts, starter-assisted engine relights, simulated missed approach, suction feed test	Climb to FL390, Mach 0.80, accels & decels, engine windmill restart, suction feed test. Was the only hydro-mechanical engine used for this series of flight tests.

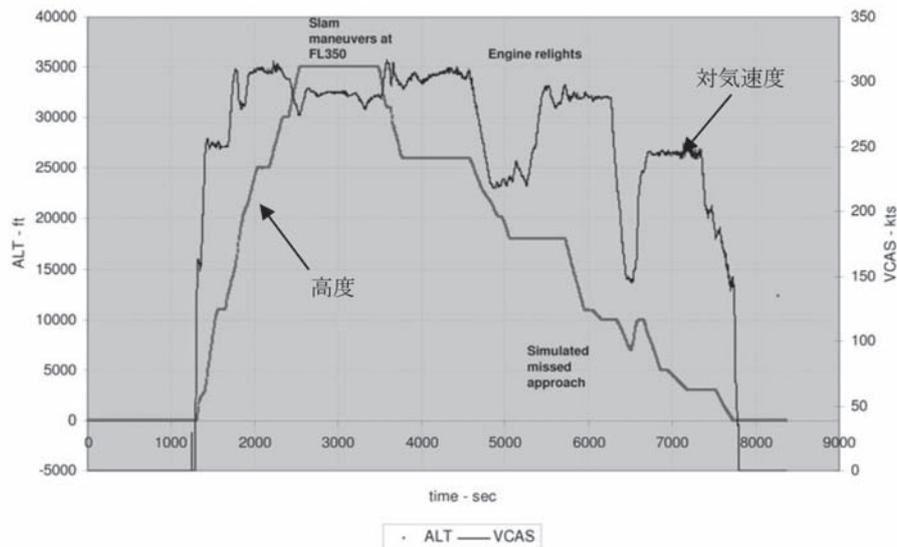


図7 ニュージーランド航空によるフライトテストプロファイル

の組み合わせを変え、いくつかのプロジェクトが組み込まれた²³。図7にはデモフライトでの高度、修正対気速度の例を示す。燃料消費率、希薄吹き消えマージン、エンジン始動、応答、再始動などの試験を行い、試験後のボアスコープ点検で、問題が生じていないことが確認された²⁴。

また、国防上の燃料入手確保の観点から、バイオ系燃料の導入を試みた米海軍の報告もある²⁵など。

6. 最後に

新種液体燃料のガスタービンへの適用性評価について、燃料の物理的な側面から述べてきた。GTに新種燃料を適用する目的は、エネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの利用等を目的とするが、産業的に成立するためには、機器の製造、保守、燃料費を含めた運用などのコストの問題を避けて通ることはできない。本稿では、実用化にとって最も重要な経済的な側面からの評価ができず、筆者らの不足を反省する。

今後、GTの利用に限らず、再生可能エネルギーとのベストミックスにより有限なエネルギー資源を少しでも長く使いながら、速やかに持続可能な社会に近づくことを期待する。

参考文献

- (1) 本田尚士, 環境圏の新しい燃焼工学, フジテクノシステム, p.719, (1999).
- (2) JIS B 8042-4:2003 ガスタービン-調達仕様-第4部: 燃料および環境.
- (3) ASTM D 2880 Standard Specifications for Gas Turbine Fuel Oils.
- (4) ISO 4261 Petroleum products — Fuels (Class F) — Specifications of gas turbine fuels for industrial and marine applications.
- (5) 西田ら, 電中研 研究報告, M07012, (2008).

- (6) 石油精製プロセス, 石油学会編, 講談社, p.1-15, (1998).
- (7) Suncor Energy inc. 2005 Annual Report, (2005).
- (8) 坂志朗, バイオディーゼルのすべて, アイピーシー, (2006).
- (9) 西田ら, 電中研 研究報告, M08014, (2009).
- (10) 西田ら, 電中研 研究報告, M10011, (2011).
- (11) ISO 10054, Internal combustion compression-ignition engines -- Measurement apparatus for smoke from engines operating under steady-state conditions -- Filter-type smokemeter.
- (12) 松井ら, 日本機械学会論文集 (B 編), vol. 45, No. 398, (1979).
- (13) Lewis, G. D., ASME Paper 81-GT-119, (1981).
- (14) Yoshida, Y., et. al., Proc. of The Int. Gas Turbine Cong. 1999 in Kobe, p.759-766, (1999).
- (15) Johansson, P., ASME paper, No.97-GT-74 (1997).
- (16) Danjo, K., et. al., proc. of 6th int. symp. of alcohol fuels tech., 1984, Vol.2, (1984).
- (17) Strenziok, R., et. al., Progress in thermochemical biomass conversion (ed. bridgewater, A.V.). Oxford: blackwell science, p.1452-1458 (2001).
- (18) Biasi, V., GAS TURBINE WORLD, Sep., (2006).
- (19) Pier, J. R., Transportation research record, paper No. 99-0207, vol. 1691, p.24-32 (1999).
- (20) ASTM D 7566 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons.
- (21) ASTM D1655 Standard Specification for Aviation Turbine Fuels.
- (22) Rumizen M., 3rd Int. Conf. on Biofuels Standards World Biofuels Markets Cong., (2010)
- (23) Boeing, http://www.boeing.com/commercial/environment/pdf/PAS_biofuel_Exec_Summary.pdf, accessed 2011.9.
- (24) Wooder, J., <http://www.rusi.org/downloads/assets/Woodger.pdf>, accessed 2011.9.
- (25) U. S. DOD News release, www.defense.gov/news/newsarticle.aspx?id=65235, accessed 2011. 9.

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

多様なガス化ガス資源とガスタービン燃焼の特徴

長谷川武治*1

HASEGAWA Takeharu

キーワード：ガス化，各種資源，ガスタービン，燃焼，CO₂回収

1. はじめに

わが国では一次エネルギーの約9割を海外からの輸入に依存しており，一般電気事業者による電力供給では約8%を賄う水力発電を除き，発電用燃料のほとんどを海外に依存している。2009年度の電力供給量は約9600億kW（受電を含む）で，LNG，石炭および石油等による火力発電は約6割の電力供給を担っている（図1）。

ガス化発電は，化石燃料だけでなく，バイオマスなどの循環型資源や廃棄物資源からCOおよびH₂を主成分とする混合ガスを生成し，ガス精製を経てクリーンなガス燃料を製造し，ガスタービンなどの高効率発電を可能にする技術として期待されている。また，鉄鋼事業ではわが国全体の約4割の石炭を使用し，鉄鉱石の還元の際に副生される高炉ガスはガスタービン発電の燃料に供されている。本稿では発電用ガスタービンの燃料多様化を念頭に，石炭等の化石燃料や重質油等の未利用資源，バイオマス等循環型資源のガス化燃料，ガス化溶融炉による廃棄物のガス化燃料等の特徴と，それに対応するガスタービン燃焼技術について概説する。

2. 各種エネルギー資源

表1に，高炉ガス（BFG），コークス炉ガス（COG），

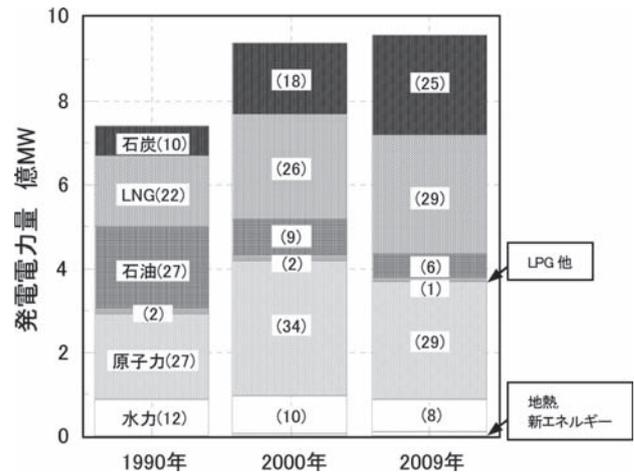


図1 一般電気事業者の電源別発電電力量の推移（出典：電気事業連合会）

およびRDF（Refuse derived fuel），一般廃棄物，石炭，バイオマス，重質油等の各種ガス化方式によるガス化ガス燃料の組成例を比較して示す。いずれの場合も発生するガス化ガスはCOとH₂を主成分とし，微量のCH₄等炭化水素分を含む低～中カロリー燃料である。一般廃棄物は含水量が多く，空気によるガス化ガスは特に低い発熱

表1 高炉ガスおよび各種ガス化ガスタービン燃料の組成例

Fuel Resource	BFG		COG		Gasified fuel									
			Waste		RDF		Coal			Biomass		Heavy residue	Orinoco tar emulsion	
			Fluidized		Fixed	Fluidized	Entrained		Wood	Black liquar	Entrained	Entrained		
					Dry	Dry	Dry	Dry	Slurry	Fluidized	Entrained	Entrained	Entrained	
Gasifier					BGL	BC	IGC	Shell	Texaco	Lurgi		Texaco	CRIEPI	
Coal supply Developer										Air	O ₂	O ₂	O ₂	
Oxydizer			Air	Air+O ₂	O ₂	Air	Air	O ₂	O ₂	Air	O ₂	O ₂	O ₂	
Composition														
CO[%]	20	6	6	30	56.4	7.9-14.7	25.9-27.6	65.2-69.5	40.9	20	46	38.1	51.7	43.5
H ₂ [%]	3	56	1.6	22	25.6	13.2-15.0	10.9-9.4	28.8-31.0	29.9	10	13	39.2	43.1	42.2
CH ₄ [%]	-	30	0.9	0.4	6.6	1.5-2.8	1.4-0.5	0.01-0.03	0.1	5	10	1.34	0.2	0.4
CO ₂ [%]	20	-	12.4	4.1	2.8	10-12	6.7-5.4	1.0-2.8	9.5	14	23	19.1	3.2	11.8
H ₂ O[%]	-	-	23.4	5.9	-(a)	11.5-18.4	-(a)	-(b)	12.3	-	-	0.18	-(b)	-(b)
NH ₃ [ppm]	-	-	-	-	-(a)	500-1000	1000	100-600	-(a)	-	-	-	-(a)	-(a)
H ₂ S+COS[%]	-	-	-	-	20ppm	-(a)	404-714ppm	0.14-1.1	-(a)	-	-	1.94	1.6	1.35
Others[%]	N ₂	C ₂ H ₂ etc.	N ₂	C ₂ H ₂ etc.	8.6	45.9-47.3	54.2-56.1	-(a)	7.3	51	8	-	0.2	0.75
CO/H ₂ モル比	7	0.1	3.8	1.4	2.2	-(a)	2.4-3.0	2.1-2.4	1.4	2	3.5	1.0	1.2	1.0
HHV[MJ/m ³]	2.9	20	1.8	6.8	13.0	3.6-4.1	4.9-5.2	12.2-12.5	9.0	5.8	11.4	10.3	12.1	11.0

BFG:Blast furnace gas, COG:Coke-oven gas, RDF:Refuse derived fuel, Waste:Municipal solid waste, (a):No description, (b):Dry base, HHV: High heating value

原稿受付 2011年8月10日

*1 (財)電力中央研究所 高効率発電領域
〒249-0001 横須賀市長坂2-6-1

量となる。燃料中のCOとH₂の比率（CO/H₂モル比率）は0.5～4程度（高炉ガスでは0.1～7）になり、燃焼速度が異なるため、それぞれに適した燃焼器を開発する必要がある。

現在、鉄鋼事業においては高炉ガス等を1300℃級ガスタービンに導入し、所内動力に利用されている。廃棄物処理事業ではRDF、RPF（Refuse paper & plastic fuel）および一般廃棄物による流動床燃焼、ガス化溶融炉の技術開発が進められており、これらの設備において低～中カロリーガス燃料を発生する。さらに電気事業では電力の安定供給の観点から発電方式として水力、火力、原子力の設備容量予備力と電力の需給バランス、エネルギー資源の埋蔵量、価格等を考慮して、それぞれの発電方式による設備建設計画の立案および発電設備についての技術開発が進められてきた（図1）。

火力発電の分野では、CO₂およびNO_x、SO_x排出量低減を目的とする環境保全を第一に据えつつ高効率発電技術の開発が必要不可欠である。特にガス化発電に関しては、各国のエネルギー政策および立地条件により様々な原料を用い、規模も異なる各種ガス化方式の開発が進められている。以下では、廃棄物事業、鉄鋼事業、未利用石油資源およびバイオマス利用におけるエネルギー資源の利用状況を概観するとともに、電気事業にて開発された各種ガス化ガス燃料を対象とする高温ガスタービン燃焼技術を紹介し、本技術適用による各事業でのエネルギーの高効率利用の可能性を示す。

2.1 廃棄物資源

廃棄物処理事業では、廃棄物等の排出を抑制し、環境への負荷低減を目的とした循環型社会の実現に向けて様々な取り組みがなされている。平成21年度のわが国における一般廃棄物の総処理量は4363万トン/年にのぼり、このうち約8割が直接焼却処理されている。焼却施設のうち約25%の施設が発電設備を有し、焼却処理量全体の約6割を処理し、発電している。発電熱効率は平均で11.29%と最新大型発電設備の約1/4～1/5と低く、総発電電力量は約69億kWh、一般電気事業者の電力供給量（約9600億kWh）の約0.7%にとどまる。現在、焼却されている全ての一般廃棄物を対象に高効率発電プラントを導入したと仮定すると約400億kWhの電力を発生し、わが国の年間発電電力量の約4%を賄うことができる。これは、水力発電量の約1/2に相当する。現在、焼却処理されている一般廃棄物のエネルギー資源化および環境負荷低減に大きく貢献できる可能性があり、発電エネルギー資源としての潜在的資質は大きい。

2.2 製鉄所高炉ガス資源

わが国の一次エネルギー供給量の22.0%（2008年）を石炭に依存しており、このうち99%を海外からの輸入に依存している。年間石炭消費量は鉄鋼事業と電気事業で

81%（2008年度）に上る。世界全体では年間約69億トン（2008年）の石炭が生産され、わが国では全体の約4%に相当する約1.86億トン（2008年）の石炭を輸入している。これは石炭輸入国全体の約24%（2006年）に相当し、わが国は世界最大の石炭輸入国である。

製鉄所では鉄鋼の生産に多量の原料炭が使用されるが、その生成過程で高炉ガス（BFG）、コークス炉ガス（COG）および転炉ガス等の副生ガスが多量に生成し、これを所内動力用のガスタービン燃料として利用している。所内動力用として導入されている高炉ガス焼きガスタービンでは、表1に示すように約3MJ/m³と発熱量の低い高炉ガスにコークス炉ガスを約1割添加して発熱量を約4MJ/m³に調整してガスタービンに供給している。現在、高炉ガスを用いた最新の発電設備では1300℃級ガスタービンによる複合発電が導入され、発電熱効率47.5%（HHV基準）、発電量300MWを発生する。

高炉ガス等の副生ガスは1980年以降ほぼ一定量生成しており、わが国の火力発電に供給される年間総燃料熱量（受電を含む）の約3%に上る。高炉ガスによる1500℃級ガスタービンの導入などの発電技術の向上は、火力発電において電源構成上重要な意味を持つ。

2.3 未利用重質油資源

オイルサンドおよびオイルシェール等の未利用重質油（以下では『超重質油と記述する』）の究極可採埋蔵量は約9200億kL（図2）と言われており、現在市場で取引される原油の可採埋蔵量（約2000億kL）の数倍に相当する。これは非在来型天然ガス資源の埋蔵量（922兆m³、重油換算で約9200億kL）に匹敵する。しかも、比較的政情の安定した中南米および北米に集中しており、発電用燃料としての有効活用はエネルギー資源の発掘、競争力確保の観点から重要であると言える。

超重質油は一般に粘性が高く、エマルジョン化して流動性を高めた場合（オリマルジョンTM）でも動粘性係数はガスタービン用燃料油の制限値の約10²倍と高い値を示す。また、H₂S、SO₂による高温硫化腐食およびCl₂、HClによる高温下におけるハロゲン腐食、さらにはNa₂SO₄、NaVO₃など溶融塩腐食が問題になり、ガス化・ガス精製処理や、超臨界水または水素を用いた脱硫・脱重金属処理による燃料処理技術が重要となる。また、環境性と高温部品の耐久性を考慮した場合、高温ガスタービンに適用するにはガス燃料の方が有利となる。

表1に超重質油のガス化ガスの組成を重油や石炭のスラリー搬送によるガス化ガスの場合と比較して示すように、主要な燃料成分や発熱量は同等となる。

2.4 バイオマス資源

デンマーク、スウェーデンの一次エネルギー供給に占めるバイオエネルギーの導入比率は10%を超えている。一方で、わが国では約1.3%（2007年）にとどまる。

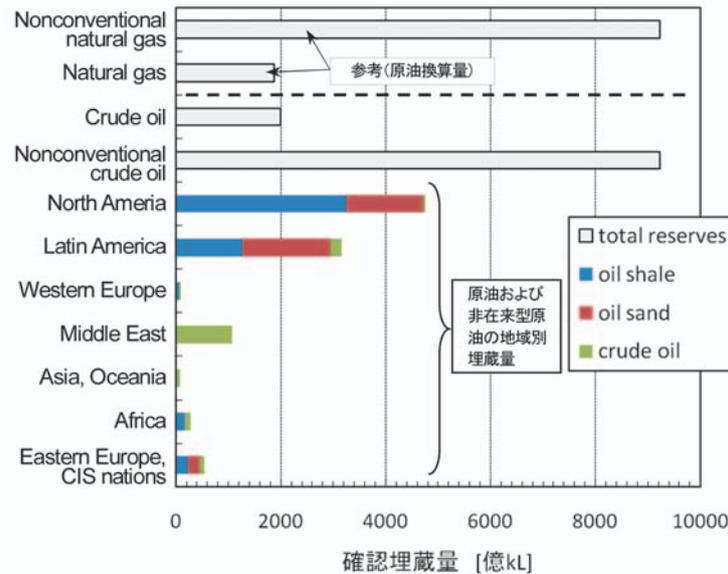


図2 原油および非在来型原油の埋蔵量

バイオマス・日本総合戦略推進会議（平成19年2月）によると、廃棄物系および未利用系バイオマスのうち、未利用部分のエネルギーのポテンシャルは原油換算で1400万kL、資源作物の場合は620万kLと試算されており、合計するとわが国の火力発電に供給される燃料の年間総熱量（2008年、受電を含む）の約14%に相当する。これらは主に林地残材、廃材、もみ殻、古紙および食品残渣等で、炭化ガス化方式またはガス化溶融炉により高効率発電での活用が期待でき、非常に大きな国産エネルギーの可能性を有している。ただし、廃棄物の場合と同様に、バイオマスは地産地消の小規模利用が有効な利用方法と考えられており、電熱併給が熱利用効率を高める上で重要となる。そのため比較的小規模なガス化炉による検討が進められている。

3. わが国のガス化発電プラントの開発例

電気事業ではLNGと同様に火力発電における石炭の利用を進めており、わが国の供給電力量の約25%（2009年）を担っている。現在、ボイラによる汽力発電で使用される発電用一般炭は主に瀝青炭等の高品位炭で、一方、石炭の埋蔵量は亜瀝青炭、褐炭等の低品位炭が約半分を占める。そのため、1980年以降の石炭の利用拡大の方針に加え、炭種拡大のための技術開発がなされてきた。現在、高品位炭に約3割の亜瀝青炭を混合した利用が進められている。

一方で、炭種拡大および石炭利用高効率発電として、石炭をガス化し、硫黄分および灰分を除去した後に高温ガスタービンに適用するガス化複合発電（IGCC：Integrated Gasified Combined Cycle）技術の研究開発が国内外で進められてきた⁽¹⁾。以下では、わが国のIGCC技術開発および今後の低炭素社会に向けたCO₂回

収型IGCC開発を例に各種資源によるガス化燃料の高効率率利用について述べる。

3.1 IGCC開発

図3にIGCC発電プラントの概要を示す。石炭等の原料をガス化炉でガス化し、その後で脱塵、脱硫等のガス精製過程を経てガスタービン燃料が生成される。

わが国では、200トン/日規模のパイロットプラントによる空気吹き噴流床石炭ガス化複合発電の研究開発が1986年から1996年までの11年間にわたり実施され、現在は250MW級IGCC実証機による検討が進められている。将来の商用プラントでは、大容量高効率1500℃級ガスタービン、ガス精製に乾式法を採用することにより、送電端熱効率48%（HHV基準）が期待される。

一方、欧米では酸素吹き石炭ガス化方式による複合発電が主流となっており、既に商用プラントによる調整運転の段階にある。また、IGCC発電技術は各種石炭だけでなく未利用エネルギーであるオイルサンド等超重質油やバイオマスなどの未利用資源を用いた高効率かつ環境

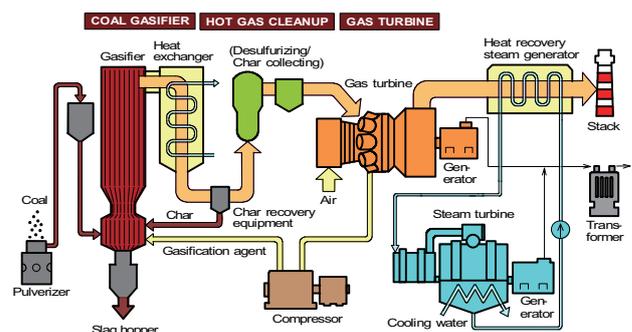


図3 空気吹きIGCCシステムの概要図

負荷を低減する発電が可能であり、各国の立地条件に応じた各種ガス化発電方式に関する研究が進められている。

3.2 CO₂回収型IGCCの開発

図4にCO₂回収機構を組み込む火力発電システムの概要例を示す。CO₂回収の方法としては、以下の3方式が提案されている。

- (1) Post-Combustion (燃焼後回収) システム
- (2) Oxy-fuel Combustion (酸素燃焼) システム
- (3) Pre-Combustion (燃焼前回収) IGCCシステム

(1)のシステムは排気ガス中のCO₂を化学吸収、物理吸収法、膜分離法またはPSA法を用いて分離回収するものであり、最も多くのエネルギーを要する。微粉炭焼き

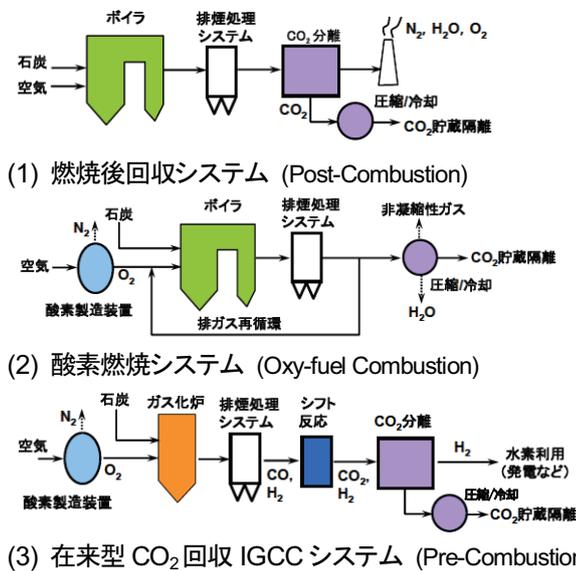


図4 CO₂回収システムの概要例³⁾

超臨界ボイラでCO₂回収率を90%とした場合で熱効率は28.2%程度になると試算されている⁽²⁾。(2)のシステムは空気の代わりに酸素を用いて燃焼させ、排気ガス中のCO₂分離動力を低減する汽力発電システムでオーストラリアのカライドで実証試験が実施されている⁽³⁾。

また、酸素吹きIGCCではCOとH₂成分で構成されるガス化ガス燃料について、水蒸気シフト反応(CO+H₂O→CO₂+H₂)を応用して燃料中のCOをCO₂に転換して回収するシステムが提案されている⁽³⁾。本システムでは、CO₂回収率を90%とした場合の熱効率は32.6%になるとの試算もある⁽²⁾。

一方で、わが国では、酸素吹きIGCCに酸素燃焼閉サイクルガスタービンを採用し、排気ガスからCO₂を分離回収するOxy-fuel Combustionシステムが提案されている⁽⁴⁾。概要例を図5に示すように、O₂-CO₂吹きガス化炉、酸素燃焼ガスタービンを採用し、排気ガスを再循環させてガスタービン燃焼温度を調整している。この場合、Pre-Combustion IGCCシステム例に見られるような水蒸気シフト反応の適用を必要とせず、CO₂分離回収のための所内動力を低減できる。本システムでは乾式ガス精製、1500℃級ガスタービン等を採用し、送電端熱効率42% (HHV基準) を目標に検討が進められている。

以下ではCOとH₂を主成分とする高炉ガスおよび各種ガス化ガス燃料を対象としたガスタービン燃焼技術について概説するとともに、CCS対応IGCC用ガスタービン燃焼技術についても言及する。

4. ガス化燃料用ガスタービン燃焼器の開発例

4.1 開発課題

各種ガス化ガス燃料を対象とするガスタービン燃焼器の開発課題を表2に示す。ガス化ガスは原料やガス化方式により組成や発熱量が異なる。ガス化剤に空気を用いる場合、燃料組成の7割をN₂、CO₂およびH₂O等の不燃

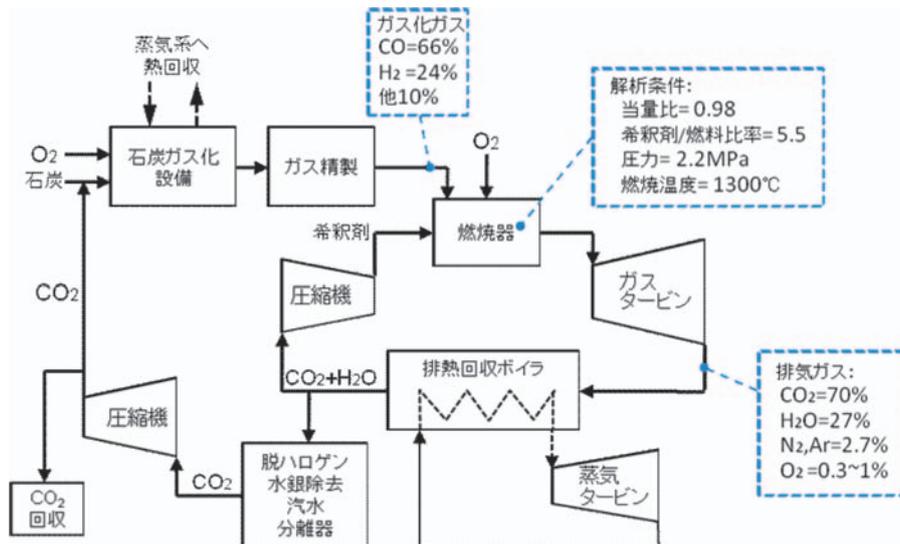


図5 CO₂回収型高効率IGCCシステムの開発例

表2 各種ガス化燃料用ガスタービン燃焼器の開発課題

		ガス精製方式	
		湿式	乾式
ガス 化 剤	空気	低カロリー燃料の安定燃焼	低カロリー燃料の安定燃焼と フェュエル NOx の抑制
	酸素	中カロリー燃料燃焼時のサ ーマル NOx の低減	サーマル NOx とフェュエル NOx の同時低減

性成分が占め、発熱量は約 2 ~ 5 MJ/m³ の低カロリー燃料となる。この場合、LNG 等の高カロリー燃料と比較して約 1/20 ~ 1/10 の発熱量になる。図 6 は各発熱量によるガス化ガス燃料の理論断熱火炎温度を LNG の主成分 CH₄ の場合に比較して示す。このように低カロリー燃料の火炎温度は低くなり、保炎の確保が重要となる。

一方、ガス化剤に酸素を用いる場合、発熱量は 9 ~ 13 MJ/m³ の中カロリー燃料となり、火炎温度は高く、空気中の N₂ に起因して発生するサーマル NOx を抑制する燃焼技術が重要となる。

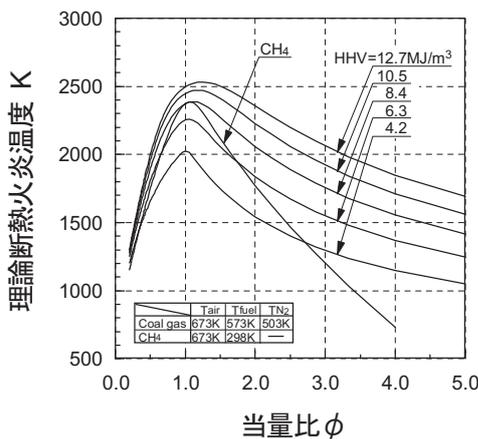


図 6 ガス化燃料および CH₄ の理論断熱火炎温度

また、ガス精製をプラント熱効率上有利な乾式法で行う場合、ガス化の過程で石炭等の原料中窒素化合物に起因して生成されるアンモニア (NH₃) は除去されずに燃焼器に供給され、ガスタービンの燃焼過程でフェュエル NOx となる。このため、それぞれ保炎の確保やサーマル NOx の低減と同時にフェュエル NOx を低減することが必要となる。

4.2 空気吹きガス化低カロリー燃料用燃焼器

(1) 1500℃ ガスタービン燃焼器の特徴

図 7 は、乾式ガス精製を採用する空気吹きガス化低カロリー燃料を対象に開発された 1500℃ 級ガスタービン燃焼器の特徴とバーナの外觀を一例として示す⁽¹⁾。本燃焼器は多缶型燃焼器の一缶に相当し、以下の特徴を持つ。

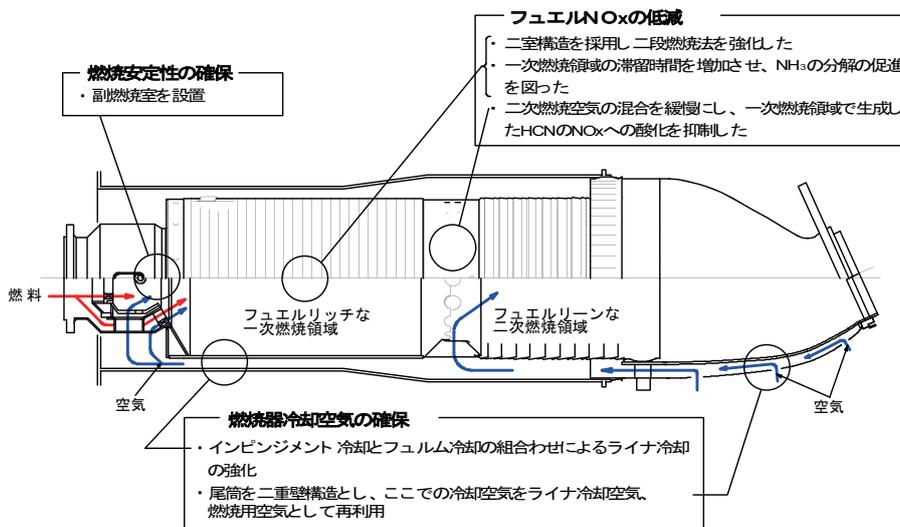
① 保炎性能の向上

図 6 に示したように、CH₄ の最高火炎温度は約 2400K を示すのに対して、低カロリー燃料 (HHV=4.2 MJ/m³) では約 2000K (当量比は 1.0) と 400K 程度も低い。部分負荷時における燃焼安定性を確保するために燃焼器入口部に副燃焼室を設け、保炎性能の向上を図っている。

② フェュエル NOx 低減

・乾式ガス精製を用いる場合、燃料中 NH₃ に起因するフェュエル NOx を生成する。フェュエル NOx を抑制する燃焼技術として二段燃焼法が知られており、燃料中 NH₃ の NOx への転換率を最小とする一次燃焼領域の当量比条件は燃料中 CH₄ 濃度に応じて変化することがわかっている (図 8)。対象となる空気吹き低カロリー燃料は CH₄ を 1% 含むことから一次当量比を 1.6 に設定している。

・燃焼器への二次空気の流入速度を低下させ、一次燃焼領域への二次空気の巻き込み等を抑えることで一次燃焼領域の燃料過濃条件を確保し、一層の低 NOx 化



1) 燃焼器の概要

2) バーナ部外觀

図 7 低カロリー燃料用 1500℃ 級ガスタービン燃焼器の開発例

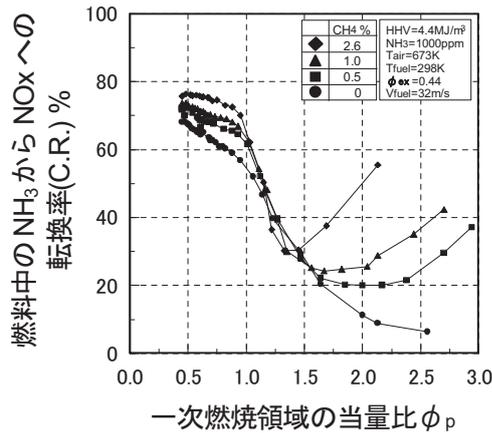


図8 一次当量比と燃料中NH₃のNO_xへの転換率の関係に及ぼす燃料中CH₄濃度の影響（小型バーナを用いた実験結果）

を図っている。

③燃焼器壁面冷却性能の向上

プラント熱効率向上を目的としてガスタービンの高温化を図る場合、空気比が低下し、冷却に用いることができる空気量比率が低下する。そのため、尾筒を二重構造にしてインピンジメント冷却とし、また、副燃焼室と一次燃焼領域のライナ壁面に、インピンジメント冷却とフィルム冷却を組み合わせた積層冷却構造を採用し、冷却性能の向上を図っている。

(2) 燃焼試験結果

図9は、燃料中にNH₃が1000ppm含まれるとした場合の、ガスタービン負荷とNH₃のNO_xへの転換率C.R.および燃焼効率ηの関係を示す。燃焼器試験では、150MW級ガスタービンの1/2サイズ縮小燃焼器を用い、IGCC運用条件を想定した燃焼試験を実施している。ガス化燃料の専焼となるガスタービン負荷約25%以上の条件では、NO_x転換率は40%（NO_x排出濃度（16% O₂換算）は60ppm）以下、燃焼効率は99.95%以上を達成した。

また、燃焼器壁面温度については、最も高温となる定格相当条件時においても概ね材料の耐熱許容温度

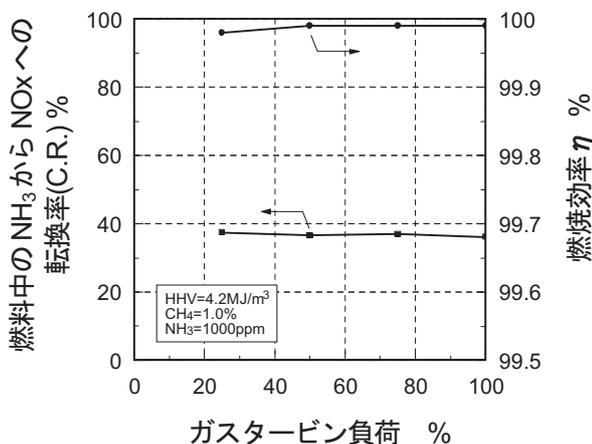


図9 燃焼器排出ガス特性

(850℃)以下に抑制した。

以上、開発したガス化低カロリー燃料用1500℃級燃焼器は、ガスタービンの全負荷帯で安定かつ低NO_x燃焼を実現し、優れた性能を示した。

4.3 酸素吹きガス化中カロリー燃料用燃焼器

表1に示したように、ガス化剤に酸素を用いるガス化中カロリー燃料は、発熱量が9～13MJ/m³と高くなる。図6に示したように、火炎温度はLNGの主成分CH₄の場合を上まわり、空気中のN₂に起因するサーマルNO_xの生成量が増大する。そのため、従来の酸素吹きIGCCでは、酸素製造設備で副生されるプラント余剰N₂を燃料に予混合してガスタービンへ供給することにより、ガスタービンの低NO_x化が図られている。しかしながら、圧力が高い燃料にN₂を注入する場合、N₂の昇圧動力が増加し、熱効率の低下を招くため、熱効率に有利な低NO_x燃焼器技術の開発が重要となる。

さらに、酸素吹きガス化発電のより一層の熱効率の向上を目的に、乾式ガス精製法を採用する場合には、サーマルNO_xの抑制と同時に、ガス化ガス中のNH₃に起因して生成するフェュエルNO_xを低減する燃焼技術の開発が重要となる。

以下では、湿式ガス精製または乾式ガス精製によるガス化燃料を対象に開発した燃焼器技術について概説する。

4.3.1 湿式ガス精製対応型燃焼器

(1) 開発課題および開発された燃焼器の特徴

酸素製造装置にて空気から分離製造されるN₂を燃焼器に供給し、火炎温度を低下させてガスタービンの低NO_x化を図るとともに、所内動力の一部を回収する。N₂の昇圧動力について試算した結果、N₂を燃焼器へ直接供給するか、または燃焼用空気に注入して供給することにより、N₂をガス化燃料に注入する従来の方式に比較してプラント熱効率は約0.3%向上することが明らかになった。また、N₂を燃焼器へ供給する低NO_x燃焼方式について、小型バーナを用いた燃焼実験により検討した結果、N₂を燃料または一次空気に混合して供給することによりサーマルNO_x排出濃度を低減できることがわかった（図10）。

以上の検討結果に基づき試作された中カロリー燃料用燃焼器の概要を図11に示す⁽¹⁾。バーナ部では、燃料ノズルと空気ノズルの外周にN₂噴射ノズルを設けて直接噴射し、バーナ部の燃焼ガスをN₂により急速に希釈し、ガス温度を低下させる構造とした。またバーナの外周部および燃焼器壁面上流部に二次空気噴射孔を設けて、バーナ近傍で燃焼ガスをN₂または燃焼空気により急速に希釈し、所定のガス温度にまで低下させる方式を採用した。さらに、部分負荷時にはN₂をバイパスし、燃焼用空気に混合して供給する機構を付加した。これにより、バーナ近傍の局所高温域を減少させ、サーマルNO_xの

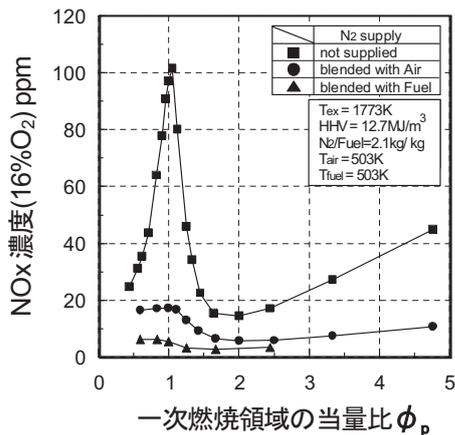


図10 二段燃焼時のサーマルNO_x排出特性に及ぼすN₂供給の影響 (小型バーナ用いた実験結果)

生成を抑制すると同時に、低負荷時にはN₂をバイパスして保炎性を確保した。

(2) 燃焼試験結果

図12は、ガスタービン負荷を想定した運用条件での排気特性を示す。NO_x排出濃度はガスタービン負荷の上昇に伴い緩やかに増加する傾向を示すものの、定格負荷相当条件においても11ppm (16%O₂換算) 以下に抑制できた。一方、燃焼効率については、ガスタービン低負荷でN₂を燃焼用空気に混合し、燃焼器へバイパスして供給することにより、低負荷条件での燃焼安定性を改善でき、ガス化燃料の専焼となるガスタービン負荷約25%相当以上で、燃焼効率99.95%を達成した。

4.3.2 乾式ガス精製対応型燃焼器

(1) 開発課題と開発した燃焼器の特徴

これまでの、1) 乾式ガス精製による空気吹きガス化低カロリー燃料用燃焼器、2) 湿式ガス精製による酸素吹きガス化中カロリー燃料用燃焼器の開発を通して、低

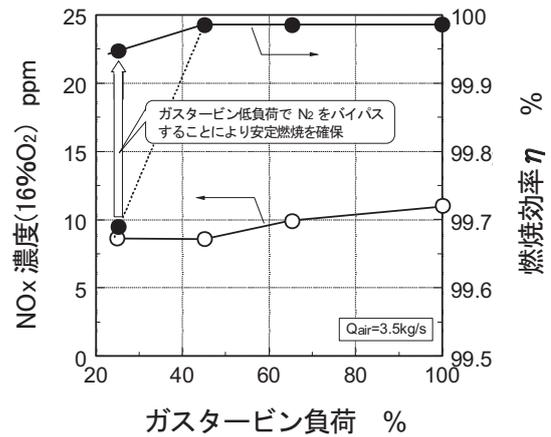


図12 湿式ガス精製対応型燃焼器の排出ガス特性

カロリー燃料のフェルNO_x低減に二段燃焼法が、中カロリー燃料におけるサーマルNO_xの抑制にプラント余剰N₂の燃焼器への直接供給が有効であることを明らかにした。これら検討結果から、中カロリー燃料のフェルNO_xおよびサーマルNO_xの同時低減燃焼方式としてN₂の直接噴射を伴う二段燃焼法を提案し、小型バーナを用いた燃焼実験によりNO_x低減効果を確認すると共に、実際に燃焼器を試作し、燃焼試験により燃焼特性について確認した⁽¹⁾。

開発した乾式ガス精製対応型燃焼器の特徴を図13に示す。本燃焼器は以下の特徴を持つ。

- ①バーナは副燃焼室構造を採用し、定格時における副燃焼室の平均当量比を2.4として、ガスタービン部分負荷を含む全負荷帯にわたる保炎性能の向上を図った。
- ②副燃焼室出口外周に主バーナを配置し、かつ主バーナの燃料と空気孔の間にN₂噴射孔を設けて、燃焼器内で燃料および空気のN₂との混合促進を図った。これにより保炎性とNH₃の還元性を犠牲にすることなく、バーナ部火炎温度を急速に低減してサーマルNO_xの生成を抑制する。

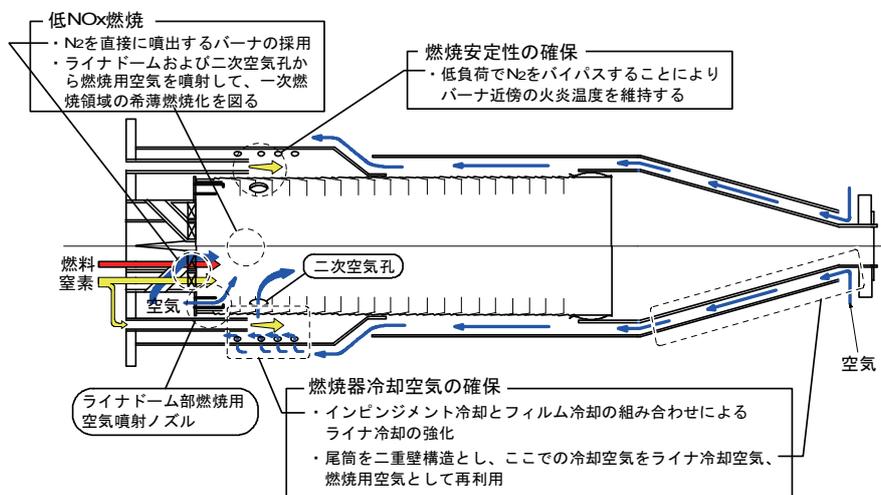


図11 湿式ガス精製対応型中カロリー燃料用ガスタービン燃焼器の概略

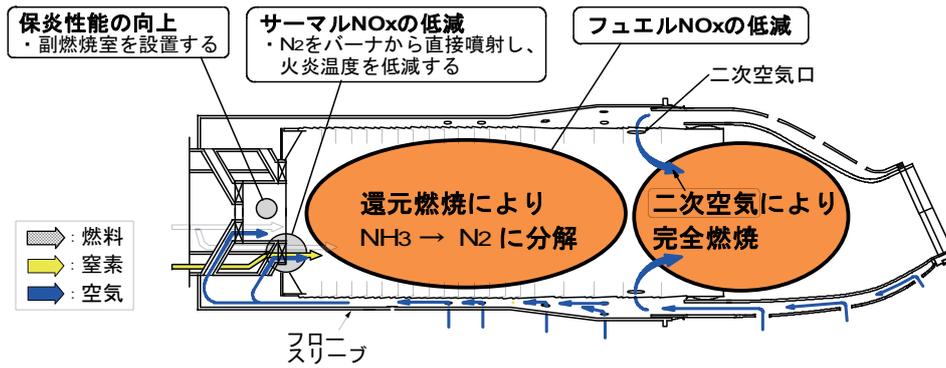


図13 乾式ガス精製対応型中カロリー燃料用1500℃級燃焼器の概略

③フュエルNO_xを抑制するために二段燃焼法を適用し、一次燃焼領域の平均当量比φ_pについては、供試燃料中のCH₄濃度が3.0%であることから1.9とした。燃焼器ライナには、二次空気孔をバーナ端から軸方向距離2×D (Dは燃焼器内径) 下流に設けた。

(2) 燃焼性能試験結果

燃焼器試験結果を図14に示す。試作した燃焼器は、本項で対象とする中カロリー燃料（燃料中CH₄濃度=0.1%、NH₃濃度=500ppm）の専焼となるガスタービン負荷約25%以上で、フュエルNO_xを含む全NO_x排出濃度は34ppm以下（16%O₂換算）、燃焼効率は99.95%以上を達成した。

4.4 CO₂回収型IGCC用ガスタービン

図5にシステムの概要を示したように、ガス化炉への石炭搬送用にガスタービン排気ガスの一部を用いることで炭素転換率を向上させるとともに、排気ガス循環によるO₂量論比燃焼閉サイクルガスタービンを採用する。この場合、燃焼排気ガスの7割をCO₂が占め、残りはH₂Oとなり、排熱回収ボイラで排気ガスの熱量を回収した後、水蒸気を凝縮させることにより高純度のCO₂が分離回収できるため、所内動力を低減できる。ただし、ガス化燃料のO₂による量論比燃焼を燃焼排気ガスで希

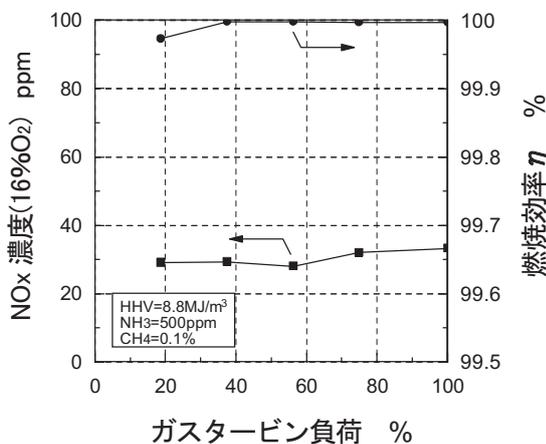


図14 乾式ガス精製対応型燃焼器の排出ガス特性

釈するため、燃料の酸化反応が阻害される懸念がある。

図15は、排気循環によるガス化燃料のO₂量論比燃焼時の燃焼排気特性について反応動力学解析により調べた結果を、LNGまたはH₂燃料の場合と比較して示す⁽⁵⁾。参考として、WE-NETプロジェクトの燃焼器試験結果と本解析手法による解析結果を併せて示している。一般に、排気循環を伴うガス化燃料のO₂量論比条件における燃焼反応は通常の空気過剰燃焼に比べて緩慢になる。特に、ガス化燃料の酸化反応はH₂やLNG燃料の場合に比べて更に緩慢になり、未燃焼成分の排出量が増加することが懸念される。すなわち、ガス化ガスによるO₂量論比燃焼閉サイクルガスタービンでは、WE-NETプロジェクトで検討されたガスタービン燃焼技術を更に高度化することが必要であり、今後の検討を要する。

5. おわりに

各種ガス化燃料を対象に開発されたガスタービン燃焼器の性能を表3にまとめて示す。サーマルNO_x濃度を8ppm以下に抑制するなど、1500℃級ガスタービン燃焼

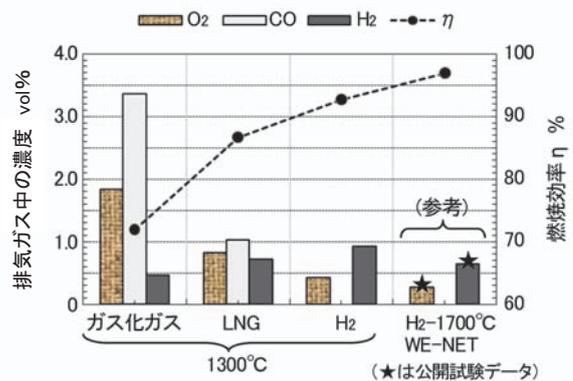


図15 各種燃料によるO₂量論比燃焼排気特性の比較（総括当量比=1での比較）

器として特異な性能を示している。本稿では、電気事業にて開発された各種ガス化燃料用低NO_x燃焼器技術を中心に紹介した。将来、高温ガスタービンの採用によるガス化ガスタービン発電の高効率化に対応する技術として実用化が期待される。今後は化石燃料資源に加え、廃

表3 各種ガス化燃料用ガスタービン燃焼器の性能

P.F.: 燃焼器出口におけるガス温度偏差

$$= (T_{\max} - T_{\text{ex}}) / (T_{\text{ex}} - T_{\text{air}}) \times 100 [\%]$$

T_{max}: 燃焼器出口での局所最高ガス温度 [K]

		ガス精製方式	
		湿式	乾式
ガス化剤	空気	<ul style="list-style-type: none"> ・1300℃級高炉ガス焼きガスタービンの開発例有り 	<ul style="list-style-type: none"> ・1500℃級燃焼器 ・NOx排出濃度:60ppm以下 ・サーマルNOx: 8ppm以下 ・P.F.(定格条件): 8%
	酸素	<ul style="list-style-type: none"> ・1300℃級燃焼器 ・サーマル NOx:11ppm 以下 ・P.F.(定格条件):10~13% 	<ul style="list-style-type: none"> ・1500℃級燃焼器 ・NOx 排出濃度:34ppm 以下 ・サーマル NOx: 8ppm 以下 ・P.F.(定格条件): 7%

棄物やバイオマスなどの循環型資源を用いたガス化発電とCCS技術に代表される環境対策技術の融合による技術展開が期待され、それぞれのシステムに適した燃焼技術もまた重要になると予想される。電気事業での開発事例が将来のガス化発電技術の発展の一助になれば幸いである。

参考文献

- (1) Hasegawa, JGPP, Vol.1, No.1, pp.9-21 (2007).
- (2) Jaeger, Gas Turbine World, Vol.40, No.4, pp.10-18 (2010).
- (3) 山田敏彦, カライドA酸素燃焼実証プロジェクトの状況, 石炭利用国際会議, L-7 (2006年9月5日).
- (4) 白井, ほか9名: (財)電中研報告書, M07003 (2007).
- (5) 長谷川, ほか2名: (財)電中研報告書, W10005 (2011).

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

三菱ガスタービンの燃料多様化

小森 豊明*¹
KOMORI Toyoaki

山上 展由*²
YAMAGAMI Nobuyuki

島村 裕*²
SHIMAMURA Yutaka

キーワード：ガスタービン，圧縮機，燃焼器，タービン，BFG，IGCC

1. はじめに

我が国の継続的な経済成長の実現を考える上でエネルギー対策は重要な課題である。我が国は、石炭、石油、天然ガスの化石燃料の殆どを輸入に依存しており、エネルギー自給率が低い資源最貧国である。また、地震などの自然災害発生時における持続的なエネルギー源の確保は生活維持および事業継続にとって必要不可欠である。そのため今後の経済成長にはエネルギー安全保障の早期の確立が望まれる。具体的には、自給率の向上、省エネルギー化、エネルギー源多様化、緊急時対応などが有効である。ガスタービン用燃料としても、従来の化石燃料の石油や天然ガス、LNG以外のエネルギー源として燃料多様化への取り組みは今後有望である。

弊社はガスタービン用の燃料として従来の石油、天然ガス、LNGだけではなく、燃料多様化の高効率発電設備の開発を行ってきた。例えば、製鉄所向けBFG焚GTCC、石炭IGCC、VR IGCCの低カロリー燃料を有効活用したガスタービンを開発し実機運用を行っている。また、エネルギー源の多様性の観点から次世代発電設備として燃料電池（SOFC）複合発電設備や太陽熱利用のガスタービンの開発も行っている。

本報では、弊社ガスタービンの燃料多様化技術の最新動向について紹介する。

2. 各種燃料ガスの適用実績

表1は弊社のガスタービンに使用された燃料の種類を示したものであり、2011年8月末時点で合計台数が561台に達している。

図1に各種燃料ガスの種類とその発熱量を示す。ガスタービン用燃料として天然ガス、LNG以外には、製鉄所での高炉ガス（転炉ガス、コークス炉ガスを含む）、製油所および石油化学工場での副生ガスならびに石炭・VRガス化ガスなどが使用されている。これらは、2.5MJ/m³Nから84MJ/m³Nまでの幅広い発熱量の燃料であるこ

とが特徴である。特に注目すべき点は4MJ/m³N以下の低発熱量の実績を多く有している点である。今後も多種多様な燃料に適用できるガスタービンを市場に提供する必要はある。

表1 燃料適用例

2011年8月末時点

燃料	台数
1. シングル燃料	
(1) 天然ガス 又は LNG	251
(2) 製油所ガス 又は LPG	19
(3) 製鉄所ガス	39
(4) 蒸留油	63
(4) その他	1
2. デュアル燃料	
(1) 天然ガス / 蒸留油	160
(2) 天然ガス / 重油	6
(3) 製油所ガス / 蒸留油	7
(4) LPG / 蒸留油	7
(5) 製鉄所ガス / 蒸留油	3
(6) 石炭ガス化ガス / 蒸留油	4
(7) VRガス化ガス / 蒸留油	1
合計	561

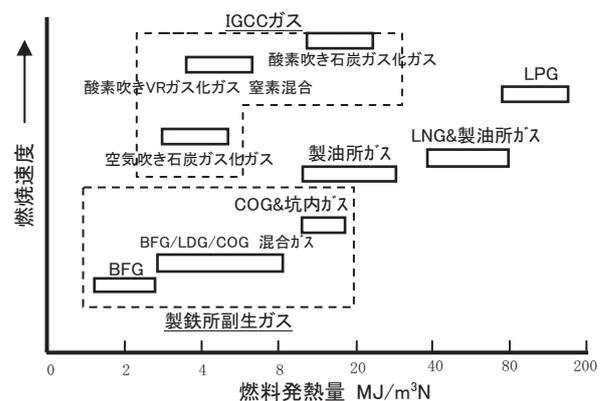


図1 燃料ガスの実績マップ

3. 三菱ガスタービンのラインナップ

三菱ガスタービンのラインナップを図2に示す。弊社ガスタービンはタービン入口温度、発電容量、運転用途の観点から大きく分けて、“①大容量LNG火力”、“②産業用コージェネレーション”、“③低カロリー燃料焚き”

原稿受付 2010年10月11日

*1 三菱重工業(株) 原動機事業本部
〒220-8401 神奈川県横浜市西区みなとみらい3-3-1

*2 三菱重工業(株) 原動機事業本部
〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1

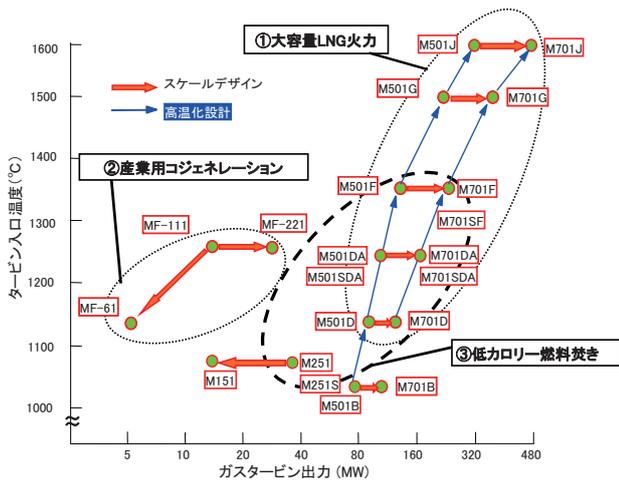


図2 三菱ガスタービンのラインナップ

の3つのグループに分類できる。“①大容量LNG火力”においては、最新鋭の1600℃級のJ形ガスタービンを開発済みであり、世界最高効率および最高出力を達成している。“③低カロリー燃料焼き”は、製鉄所向けの高炉ガス（BFG）焼きガスタービンとして、M701SF、M701SDA、M501SDA、M251Sのラインナップを揃えている。石炭およびVRのガス化ガス焼きガスタービンはD形、F形を適用し大容量化への開発を行っている。一方で、次世代の発電技術として期待される燃料電池、太陽熱を利用したガスタービンについても実用化に向け現在実証および開発中である。このように、燃料多様化については従来、主に“③低カロリー燃料焼き”のラインナップに対応している。

表2に当社実績の代表的な燃料ガス性状の特性を示す。標準燃料のLNGに比べると、他の低カロリー燃料の特徴とガスタービンでの燃焼時の配慮点は以下のとおりである。

表2 代表的な燃料ガス性状

燃料		LNG	BFG	COG増熱 BFG	空気吹き 石炭ガス化ガス	酸素吹き VRガス化ガス
組成 vol%	CH ₄	88	—	2	—	—
	C ₂ H ₆	7	—	—	—	—
	C ₃ H ₈	4	—	—	—	—
	C ₄ H ₁₀	1	—	—	—	—
	C ₅ H ₁₂	—	—	—	—	—
	N ₂	—	56	51	60	1
	CO	—	22	21	27	50
	CO ₂	—	20	20	3	3
	H ₂	—	2	6	9	45
	H ₂ O	—	—	—	—	—
	O ₂	—	—	—	—	—
Ar	—	—	—	1	1	
LHV (MJ/m ³ N)		40.8	3.0	4.2	4.4	11.3
可燃範囲 (—)		3	2	4	9	37
燃焼速度 (cm/sec)		37	3	16	36	170

1. BFG、石炭ガス化ガスはCO₂、N₂の不活性成分が60～80%と多く、LHV、燃焼速度が小さいため不安定燃焼になりやすい。
2. VRガス化ガスはCO、H₂が多く、燃焼速度が極端に高く、フラッシュバック防止の配慮が必要である。

以上の様に、各燃料に適したガスタービン仕様とする必要がある。以降に多種燃料に対応した弊社ガスタービンのそれぞれの特徴を紹介する。

4. BFG焚GTCCの紹介

BFGはLNGに比べて、発熱量が低く、窒素及び二酸化炭素の不活性成分の割合が高い。また燃焼速度が遅く可燃範囲が狭いという特徴をもっている。

そのため、LNG焚ガスタービンと比べてBFG焚ガスタービンの場合は、燃料制御システム、燃料供給システム、燃焼器などの最適化設計が必要である。

当社は、長年の技術開発と多くの運転実績を基に、BFG焚ガスタービンの設計を確立させた。図3にその概要を示す。

図3に示すように、低カロリーガスで安定した運転を維持するためには、空気圧縮機、燃焼器、タービンの最適なマッチング設計が必要である。

次にその各要素の設計内容および技術動向を紹介する。

4.1 燃料発熱量

燃料発熱量はガスタービンの設計を行う上で重要なパラメータであり、発熱量が減少する場合には設計変更が必要となる。表3に燃料発熱量と設計のコンセプトを示す。

高信頼性及び高温部品の互換性を維持するために、タービン部品は共有化するが、他の要素は発熱量の違い

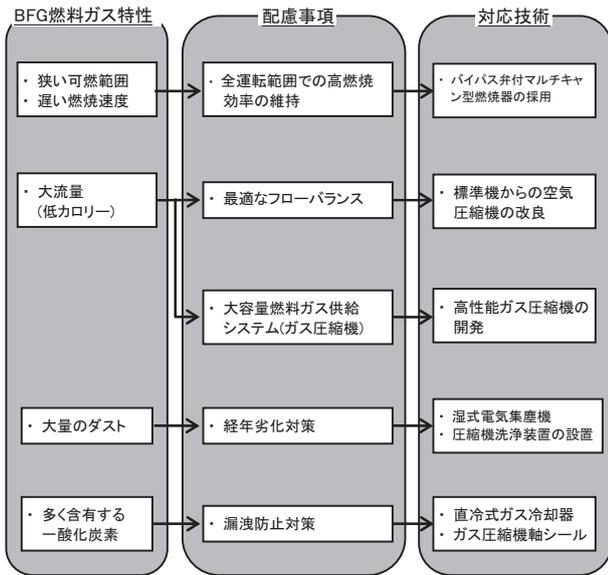


図3 BFG焚ガスタービンの設計配慮一覧

表3 燃料発熱量と設計コンセプト

発熱量	標準(LNG) 36 MJ/m ³ N	低カロリーガス 3.1 - 8.4 MJ/m ³ N
空気圧縮機	標準	設計変更もしくは運転制限
燃焼器	標準	設計変更
タービン	標準	標準
燃料供給システム	標準	設計変更
燃料	LNG	BFG

により設計変更している。

4.2 ガスタービンのフローバランス

LNG焚とBFG焚のフローバランスを図4に示す。BFGは低カロリーのためガスタービンへ供給される燃料ガス量が増加する。そのため標準のLNG 焚ガスタービンを適用すると圧力比上昇に伴う空気圧縮機のサージングやタービンのオーバーロードが懸念される。これらを防止するためにタービンへの流入ガス量を同等にするように、空気圧縮機を標準機に比べて小型化し吸気流量

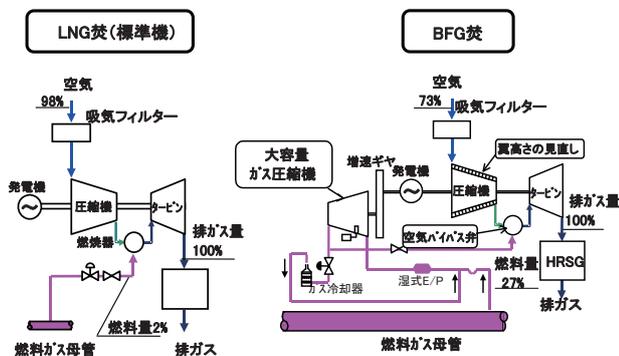


図4 LNG焚とBFG焚のフローバランス

を翼高さの調整 (チップカット) によって減少させている。

4.3 BFG 焚ガスタービンの運用性改善の実績

海外の製鉄所に納入したBFG焚きガスタービン設備に対して、顧客からBFGを増熱するCOG (コークス炉ガス) 量の削減要求が増加している。当社は、これに対してM701SDA によるCOG を削減した低カロリー運用 (図5), M251S によるCOG ゼロパイロット運用 (COGのパイロット燃料のカット) の確認運転を行った。その結果、無負荷及び定格負荷、負荷遮断とも問題なく運転ができることを確認し、顧客要求に応える運用性の改善

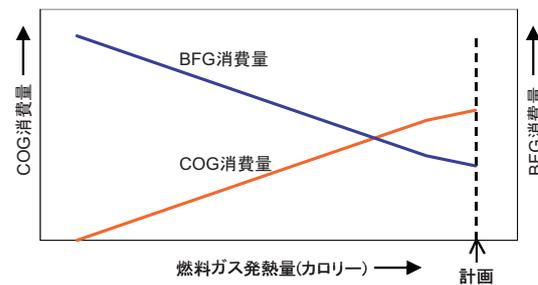


図5 M701SDAによるCOG削減運用実績

を実施した。現在、ほかの顧客に対しても運用性改善の提案を行っている。

5. 石炭ガス化ガス焚きIGCCの紹介

石炭ガス化ガス焚きコンバインドサイクル発電 (IGCC :Integrated Gasification Combined Cycle) は、石炭ガス化炉設備において、固体燃料である石炭を空気、酸素 (O₂)、水蒸気などのガス化剤により、一酸化炭素 (CO) および水素 (H₂) を主成分とする可燃性ガスに転換し、ガスタービン用燃料としたコンバインドサイクル発電である。概略系統図を図6に示す。我が国では、クリーンコールパワー研究所にてM701DAを用いた空気吹きガス化炉IGCCが2007年に稼働している (図7)。以下に空気吹きガス化ガス焚きガスタービンの各要素技術を紹介する。

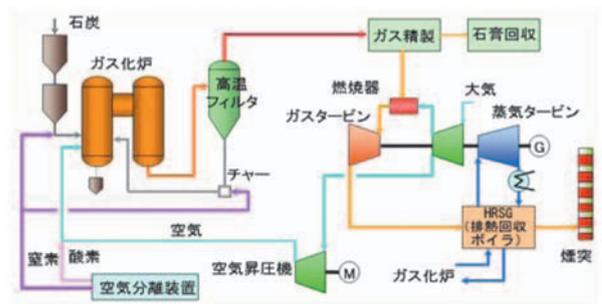


図6 石炭ガス化 (空気吹き) IGCCの概略系統図

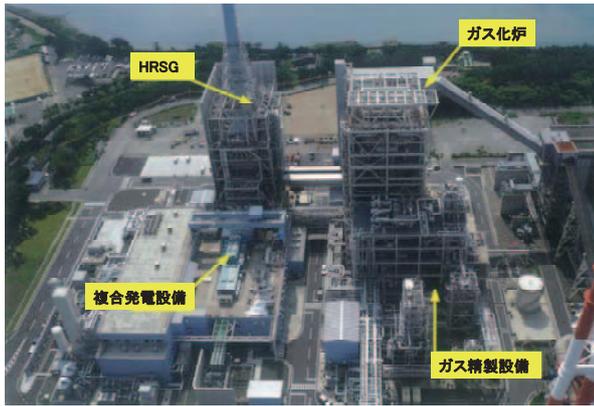


図7 IGCC実証機の全景

5.1 燃焼器

空気吹きガス化炉ではガス化剤を空気とするため、酸素吹きガス化炉で必要される酸素製造設備用動力は削減することができる。生成されたガスはLNGと比べ、1/10程度の低カロリーガスであり、またガス精製過程でアンモニア (NH₃) が除去されるために、ガスタービン燃焼器で発生するフェューエルNO_xの発生は少ない。また、低カロリーガスであるので、サーマルNO_xの発生も低レベルとなる。一方、含有水素が比較的高いことから燃焼速度が速く、可燃範囲が広い特徴を有している。

そこで、安定燃焼を確保する目的で燃焼器に拡散燃焼法を適用する。また、燃料ガスの組成の特徴から拡散燃焼器でもNO_xの排出量は低く抑えることができる。なお、次の5.2に記載のとおり、ガスタービンからの圧縮空気をガス化炉に使用するため、ガス化炉を起動する前にガスタービンを先行起動させる必要がある。LNG焚き起動も可能であるが、このIGCC用ガスタービンでは灯油焚きによる起動を採用している。このため、ガスおよび油のデュアル燃料焚きが可能な構造となっている。図8に、IGCC用拡散燃焼器を示す。

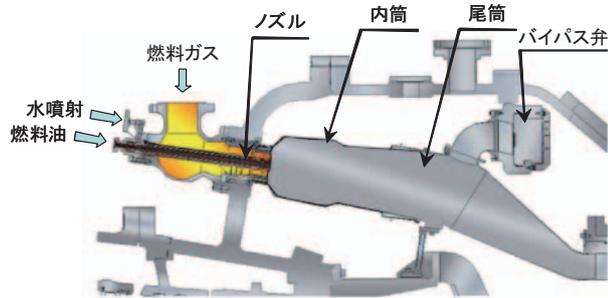


図8 IGCC用拡散燃焼器

5.2 空気圧縮機およびタービン

空気吹きIGCCでは、ガス化炉用空気をガスタービンからの圧縮空気で購入インテグレーション方式を採用している。タービンへの燃焼ガス流量はLNG焚き標準ガスタービンとほぼ同じであるため、空気圧縮機および

タービンは、LNG 焚き標準機と同一のものをそのまま使用することができる。

6. VRガス化ガス焚きIGCCの紹介

石油業界においては、主製品のひとつであるアスファルトなど重質油の需要が、国内産業・経済構造の変化により減少しつつあるため、新たな活用策として発電プラント用燃料としての用途が高まっている。とくに、減圧残さ油 (VR: Vacuum Residue) の活用方法として、都市部での厳しい環境規制にも対応可能なガス化複合発電システム (IGCC) のニーズがある。このため弊社は、VRをガス化してできたガス (以下、VRガス化ガスと呼ぶ) を使用した国内初のIGCC商用機を新日本石油精製(株)根岸製油所に建設し (図9)、2003年6月に営業運転開始した。残さ油ガス化コンバインドサイクル発電 (VR-IGCC) では、VRガス化炉設備において、空気分離設備から供給される酸素とコンバインドサイクル発電から供給される水蒸気により、残さ油を一酸化炭素 (CO) および水素 (H₂) を主成分とする可燃性ガスに転換している。図10にVR-IGCC用の概略系統図を示す。



図9 VR-IGCC複合発電設備全景

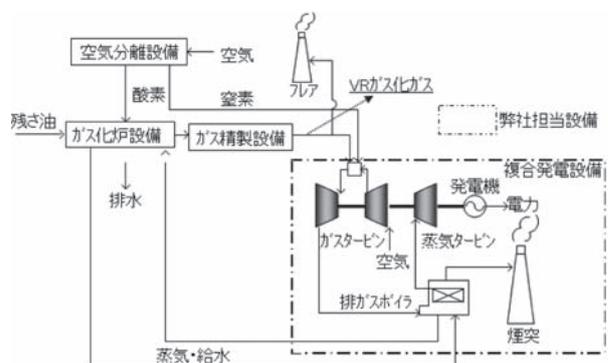


図10 VR-IGCC概略系統

6.1 燃焼器

VRガス化ガスは、空気吹き石炭ガス化ガスに比べ含有水素割合が高く、また発熱量が高く、そのまま燃焼させるとフラッシュバック発生の懸念や発生サーマルNO_xが高くなる懸念がある。そこで、空気分離設備で分離された窒素 (N₂) と混合器を介して混合し、発熱

量を下げてガスタービン用燃料ガスとしている。また、VRガス化では、空気分離設備の動力が必要なこと、コンバインドサイクル発電とガス化炉との間で蒸気、給水の授受があることから、ガス化炉の運転に先立ち、コンバインドサイクル発電を起動することが必要となる。このため、灯油焚き起動を採用しており、ガスおよび油によるデュアル燃料焚きが可能な構造となっている。

6.2 空気圧縮機およびタービン

空気吹きIGCCと異なり、ガスタービンからの空気供給の必要性がない。そのためタービン通過流量と圧力比のバランスを見ながら、最適な空気圧縮機を選定し採用している。

7. 燃料電池複合発電設備の紹介

これまで弊社では、蒸気タービンによるシンプルサイクル（1機関）の時代から、ガスタービン（GT）と蒸気タービンを組合せたコンバインドサイクル（2機関複合）の隆盛に至るまで、一貫して高温化・高压化を進めることで、常に最高効率発電への挑戦を続けて来た。今後は、更なる高効率化次世代発電設備として、高温型の燃料電池であるSOFC（固体酸化物型燃料電池：Solid Oxide Fuel Cell）を付加したトリプルコンバインドサイクルが実用化に向けて開発中である。

トリプルコンバインドサイクルは、図11に示すように従来のコンバインド設備の燃料上流側にSOFCを組合せたものである。SOFCは、ガスタービン燃焼器の上流の高压部に設置されるため、図12に示すセラミックス製の堅牢な構造体である円筒形SOFCを採用している。LNGはSOFCに投入され、未反応の排燃料がガスタービンへ送られる。1.7MJ/m³Nの低カロリー排燃料には増熱用のLNGを投入し、ガスタービンに供給する。一方、空気はガスタービン空気圧縮機からの抽気をSOFCに供給し、酸化剤として使用された後、高温排熱とともにガスタービンへ送られる。LNGの持つエネルギーを、SOFC、ガスタービン、蒸気タービンの3段階にカスケード利用することにより、送電端効率は70%-LHV以上の超高効率

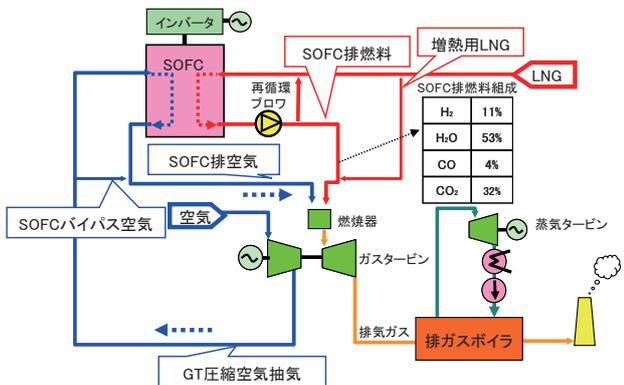


図11 トリプルコンバインドサイクル概略系統

発電が期待できる。

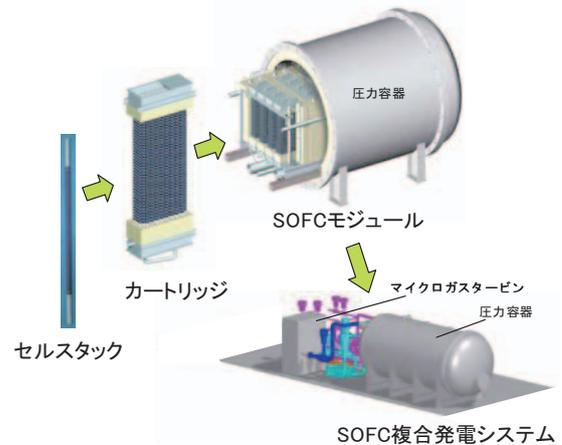


図12 SOFCモジュール

8. 太陽熱利用のガスタービンの紹介

従来のガスタービンは、燃料の燃焼による熱エネルギーから動力エネルギーへのエネルギー変換を原則としている。次世代発電設備として、太陽エネルギーから動力エネルギーへの変換を行う太陽熱利用は、直接的な燃料多様化ではないが、エネルギー源の多様化として将来有望である。太陽熱発電は、集熱した熱で蒸気をつくり蒸気タービンを回して発電する方式が主流となっているが、効率面（総合効率20%程度が限界）から大容量化には至っていなかった。

そこで弊社では、保有している高効率ガスタービン技術を活用して、集熱した熱で直接空気を暖め、高温空気により直接タービンを回して発電する、世界に実用化例のない画期的な空気ガスタービン発電方式を開発・実証し、高効率（総合効率30%）の太陽熱GT発電を実用化していく計画である。図13にシステム例、図14に概略系統を示す。

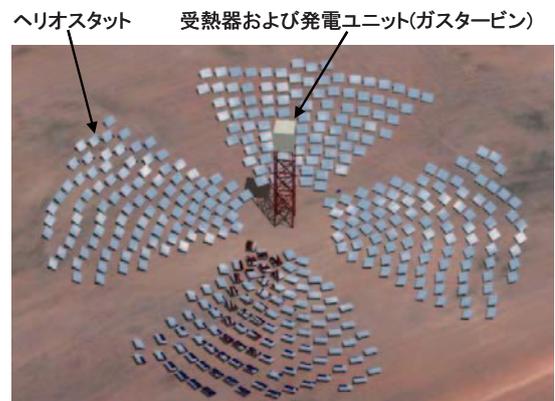


図13 太陽熱発電システム例

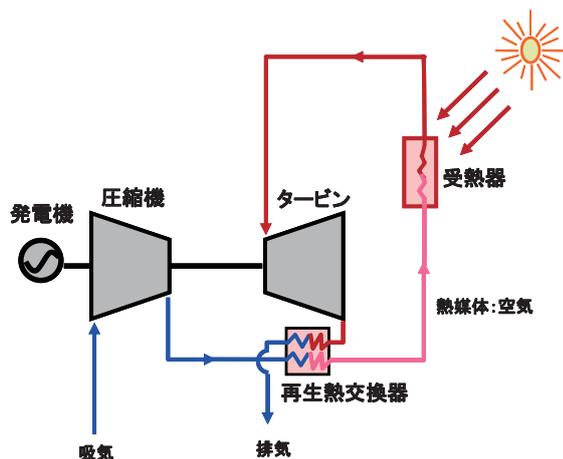


図14 太陽熱ガスタービンの概略系統

9. おわりに

今後、エネルギーの安定供給およびCO₂削減の観点から、限られた化石燃料の有効利用の社会的要求は高まり、種々の燃料による高効率ガスタービン発電の需要は高まっていくと予想される。

発電事業を取り巻く社会要求、国際的な問題は従来の化石燃料に依存したエネルギー環境の変革を迫られている。地球規模のエネルギー枯渇問題、地球温暖化問題に対し、自然エネルギー、再生可能エネルギーを含めた多様な燃料源の有効活用は今後重要となってくる。しかし、これらの技術普及は発展途上であり、主に下記の問題解決が必要と考える。

1. 停電など不測の事態発生時でも電力の安定供給が可能であること。
2. 環境に配慮した環境調和性のある設備であること。
3. 従来の電力単価並みの経済性であること。

ガスタービンの燃料多様化技術は、これらの問題点に応えられる様、継続的な技術開発を行っていく必要がある。

今後は、DME（ジメチルエーテル）等のGTL（Gas To Liquid）、シェールガス、メタンハイドレードといっ

た多種燃料に対応する当社の高効率ガスタービンの開発に期待が寄せられている。また、弊社の低カロリー燃料及び燃料電池、太陽熱といった次世代エネルギーを利用した発電設備は、現在海外で設計・建設中のものがあり、また今後建設予定の発電設備も国内外に多数ある。この技術開発によりエネルギーの有効利用や地球環境対策の要求に応え、社会に大いに貢献できると考える。今後も当社はこの分野で先駆的な役割を果たすべく、より一層の技術開発に努める所存である。

参考文献

- (1) 小森豊明, 山上展由: “BFG 焼きコンバインドサイクルプラント” 日本ガスタービン学会誌, Vol.34 (No.5), (2006.9)
- (2) T.Komori, N.Yamagami, Y.Shimamura: “Development of Leading Technology for a Low-BTU Gas-firing Gas-turbine Combined-cycle Plant at a Steelworks”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol.48, No.3 (2011)
- (3) 松元正, 潮崎成弘, 立石学: “コンバインドサイクル発電プラントの効率向上”, 平成22 度改訂版火力原子力発電, 653号, 53 頁 (2011 年)
- (4) 長井輝雄: “石炭ガス化複合発電 (IGCC) 実証プラントの開発”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.37 (No.2), 72 頁 (2009.3)
- (5) 古迫達夫, 小森豊明, 木村秀夫, 山上展由: “大容量 VR IGCC 用M701F ガスタービンの設計と運転実績”, 火力原子力発電大会論文集平成16 年度 (2005)
- (6) Y.Kobayashi, Y.Ando, T.Kabata, M.Nishiura, K.Tomida, N.Matake: “Extremely High Efficiency Power System -SOFC Triple Combined Cycle System”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol.48, No.3 (2011)
- (5) H.Nakatani, M.Tagawa, T.Osada: “DEVELOPMENT OF CONCENTRATED SOLAR BRAYTON POWER GENERATION SYSTEM”, Renewable Energy 2010 27 June-2 July, 2010 PACIFICO YOKOHAMA, Yokohama, Japan, (2010)

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

日立における燃料多様化対応燃焼技術

吉田 正平*¹
YOSHIDA Shohei

小泉 浩美*¹
KOIZUMI Hiromi

百々 聡*¹
DODO Satoshi

笹尾 俊文*²
SASAO Toshifumi

キーワード：燃料多様化，低NO_x燃焼，同軸噴流，クラスターバーナ

1. はじめに

近年，資源の有効利用及び発電コスト低減の観点より，発電用ガスタービンにおいても低価格の未利用燃料を代替燃料として用いたいとの要望が強い。また，地球環境保全の観点から，排気ガス規制が強化され，高効率に加え低エミッション燃焼技術の開発が強く望まれている。

代替燃料を代表するガス燃料には，製鉄所で発生する高炉ガス（BFG）やコークス炉ガス（COG），石油精製過程で発生する副生ガスや石炭エネルギーの有効利用を目的とした石炭ガス化ガス等の水素リッチガス，多様な炭化水素系原料から製造されるジメチルエーテル（DME）等があり，その適用が数多く検討されている。また，液体燃料としては，石油精製過程で副生される低質油や，原料の植物が生長する過程で大気中の二酸化炭素を吸収する液体バイオマス燃料等の有効利用が挙げられる。

しかし，これらの燃料の多くは，その燃料性状や燃料中の含有物の観点から低エミッション燃焼技術の適用は大変に難しい。

ガスタービンにおいては，このような燃料を適用した場合でも，信頼性の確保と排気ガスの低エミッションの両立が強く望まれており，両者を満足するには，液化天然ガス（LNG）や灯軽油と比べ特別な考慮が必要となる。本報では，弊社で検討している燃料多様化での環境保全に対応する燃焼技術の開発動向について報告する。

2. 日立H-25ガスタービンの納入実績

日立H-25ガスタービンは，軸流17段圧縮機，軸流3段タービン，10缶の逆流缶型燃焼器より構成されている。H-25ガスタービンは製品化の後も要素技術の研究をもとに改良を重ね，現在（2011/3月）では累計納入台数

140台を数え国内外で順調に稼働中である。用途別では産業用熱電併給設備向けがほぼ半数であり，次いで20%程度が発電用コンバインドサイクル向けとなっている。図1にH-25ガスタービンの概略構造を，表1にその性能諸元を示す。

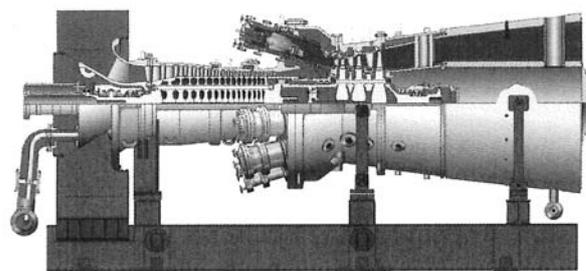


図1 H-25ガスタービン構造

表1 H-25ガスタービン性能諸元

		天然ガス	A重油
出力	(MW)	31.0	30.0
効率	(%)LHV	34.8	33.6
圧縮機入口空気流量	(kg/s)	92.4	92.4
排気温度	(°C)	564	564

大気温度:15°C/相対湿度:60%RH

3. ガスタービン適用燃料の特徴

各種の燃料をガスタービンに適用する場合，その性状，発熱量，燃焼速度，また液体燃料では蒸発温度などが安定燃焼させる場合の重要な項目となる。図2は，これまでに弊社で検討した燃料を，ガス燃料は発熱量と燃焼速度で，液体燃料は発熱量と蒸発温度でまとめたものである。ガス燃料は，発熱量の低い高炉ガスから燃焼速度の速い水素まで，液体燃料は蒸発温度の低いバイオエタノールから高い重油改質油まで，幅広い性状の燃料に対して検討している。

原稿受付 2010年10月6日

*1 (株)日立製作所 日立研究所 ガスタービン研究部
燃焼器ユニット

〒312-0034 ひたちなか市堀口832-2

*2 (株)日立製作所 電力システム社 日立事業所

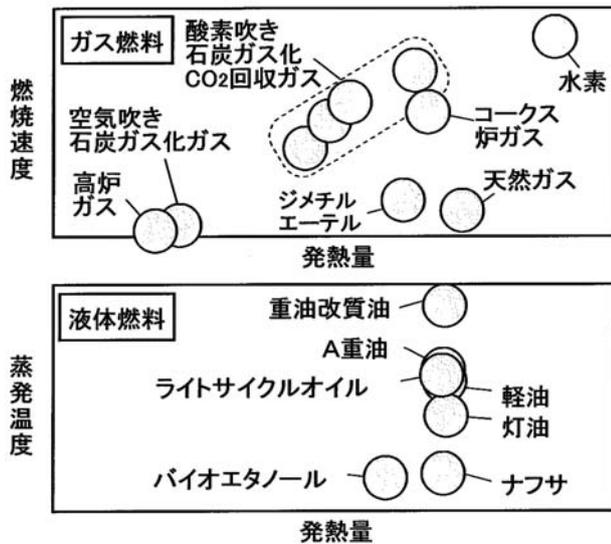


図2 ガスタービン適用燃料の特徴

4. 天然ガス焼き乾式低NOx燃焼器

シェールガスの開発により天然ガスの可採年数の伸びが予想され、環境保全には天然ガス焼きガスタービンの効率向上と低エミッション燃焼技術が一層重要となる。

図3に多数の納入実績のある天然ガス焼きH-25ガスタービン乾式低NOx燃焼器¹⁾を示す。本燃焼器は中央に拡散燃焼方式のF1バーナを有し、その周囲に予混合燃焼方式のF2バーナを配置したものである。F2バーナはバーナ内部で燃料と空気をあらかじめ混合させ、バーナ出口のリング状（ブラフボディ）保炎器により火炎を保持する。本構造のF2バーナは、燃料と空気を混合するために空間が必要となり、自発火や火炎の逆流（逆火）の問題から、適用可能な燃料は天然ガスに限られ、燃焼速度が速い水素リッチ燃料や発火温度の低いDMEには適用されていない。

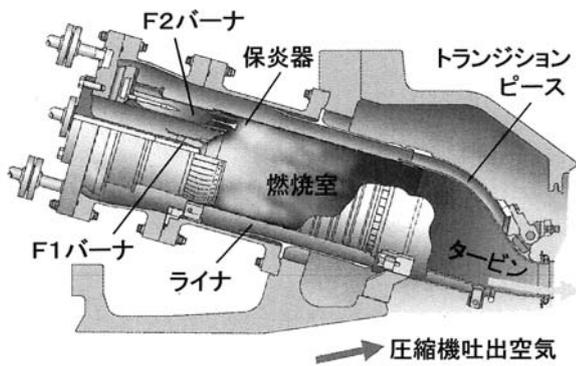


図3 天然ガス焼きH-25乾式低NOx燃焼器

5. 燃料多様化対応ガス焼き乾式低NOx燃焼技術の開発

従来の低NOx燃焼器では適用が困難であった燃料に対して、乾式で低NOx燃焼を可能とするため、弊社で

は従来の燃料と空気の混合方式とは異なる新たな技術を採用した急速混合方式を提案し開発を推進している²⁾。クラスタバーナと称したこのバーナの構造と数値流体力学（CFD）により検討した燃料と空気の混合進行状況の例を図4に示す。本バーナは従来の予混合器のような空間的な混合ではなく、空気孔上流部に燃料ノズルを設け燃料と空気が空気孔を通過する際の縮流と通過後の拡大部における乱れの増大により急速に混合させるものである。クラスタバーナではバーナ部で、燃料と空気が共存する距離が短く、主たる混合は空気孔出口から火炎に至るまでの燃焼室で進行するため、バーナ部での自発火や火炎の逆流による燃焼器損傷のリスクを回避することができる。このためクラスタバーナは高温化、高圧力比化に伴い増大する自発火や逆火のリスクを回避し、信頼性を保ちながら低NOx燃焼が可能となる。

図5に水流モデルを用いたレーザーシート法による空気孔内部の混合状況の可視化例³⁾を示す。改良型燃料ノズルでは燃料噴出方法を改善し空気孔内部で混合を促進させている。図6に実機圧力下での要素クラスタバーナの燃焼状況を示す⁴⁾。円錐状の火炎を形成することで、バーナの外周部では空気孔から火炎までの距離が延長され、燃焼室で混合が促進する。このように、レーザー計測やCFDを用い大気圧や高圧力場での要素バーナ燃焼試験⁴⁾により燃料ノズル形状や空気孔仕様の改良を重ね⁴⁾、燃焼器全体に希薄予混合火炎を形成することが可能となった。

図7に現在開発中の天然ガス焼きマルチクラスタ乾式燃焼器⁵⁾の概略を示す。本燃焼器は燃焼器中央に1個、その周囲に6個のクラスタバーナを配置した構造である。単缶中圧試験における定格負荷相当条件でのNOx排出

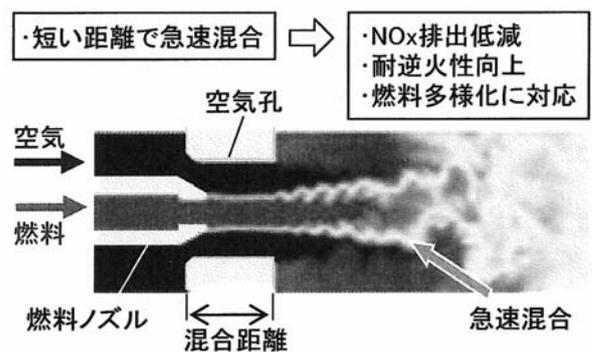


図4 クラスタバーナの構造と混合状況（CFD）

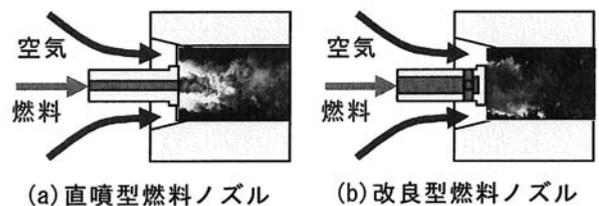


図5 クラスタバーナの混合可視化例

量は9ppm以下を確認しており、今後は運用性を含めて検討し、乾式シングル低NOx燃焼器としての実用化を目指す。

前述したクラスタバーナの低NOx化と耐逆火性を活かし、弊社では燃料多様化に対応する環境保全型燃焼技術を構築している。以下に、その内容を紹介する。

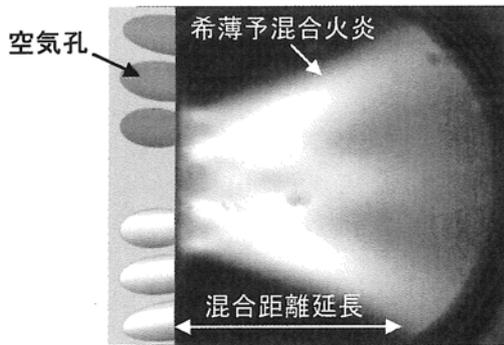


図6 クラスタバーナの燃焼状況

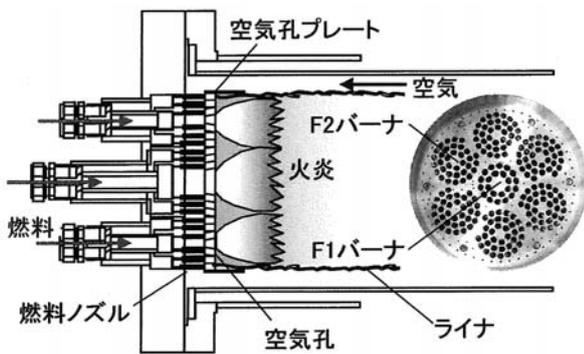


図7 天然ガス焼きマルチクラスタ乾式燃焼器

5.1 DME焼き乾式低NOx燃焼技術

DMEは多様な炭化水素原料から合成が可能であり、次世代の代替燃料として期待を集めている。しかしながらDMEの自発火温度は約350℃であり、高効率（高圧力比）ガスタービンの圧縮機吐出空気温度より低く、従来の予混合器では自発火の問題があり適用が難しい。この

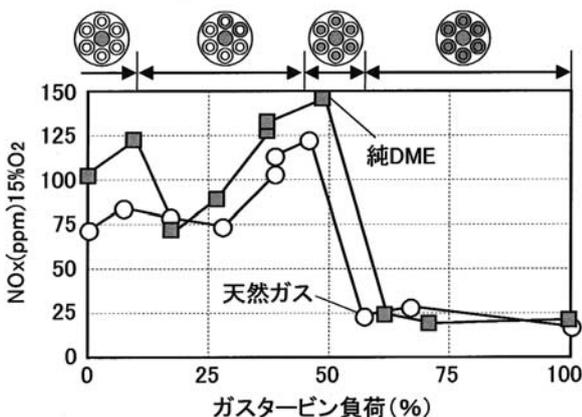


図8 DME/天然ガス焼き燃焼器のNOx排出特性

ため、クラスタバーナの耐逆火性を活かして、独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 殿から委託を受け、DME・天然ガス焼き乾式低NOx燃焼器の開発に取り組んだ。単一クラスタバーナの要素試験より知見を蓄積し⁽⁶⁾、天然ガス焼きマルチクラスタと同様なクラスタバーナ7個からなる乾式低NOx燃焼器を試作した⁽⁷⁾。図8にDME（純度100%）と天然ガスでの単缶高圧試験におけるNOx排出特性を示す。DME、天然ガス運転ともにNOx排出量25ppm以下の見込みを得ている。

5.2 水素リッチ燃料焼き乾式低NOx燃焼技術

弊社は2008年からの独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 殿によるプロジェクト「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト」に参画し、クラスタバーナの耐逆火性を活かして広い水素濃度範囲の燃料に対応する乾式低NOx燃焼器の開発を進めている。本節では二酸化炭素回収・貯留付石炭ガス化複合発電プラント (CCS-IGCC) 用燃焼器の開発状況を紹介します。

CCS-IGCCでは二酸化炭素 (CO₂) 回収率により水素濃度が回収率 CCS 0%で27vol.%からCCS 90%の84vol.%まで幅広く変化する。この水素リッチ燃料は燃焼速度が速いため、バーナを凸型形状とし、同軸噴流の流線を制御して火炎をバーナから離れた位置に安定するように浮上させ、希薄燃焼のための混合距離とバーナの信頼性を確保した。図9に開発中の水素リッチ燃料用乾式低NOx燃焼器のバーナ部構造を示す。試作した燃焼器は、中央にF1バーナを配置し、その周囲に大気圧要素試験⁽⁸⁾により検討したクラスタバーナ (F2) を6個配置したマルチクラスタ形式の燃焼器である⁽⁹⁾。図10に単缶中圧試験における定格負荷相当条件でのNOx排出特性を示す⁽⁹⁾。CCS 0%, 30%, 50%のいずれの燃料でもNOx排

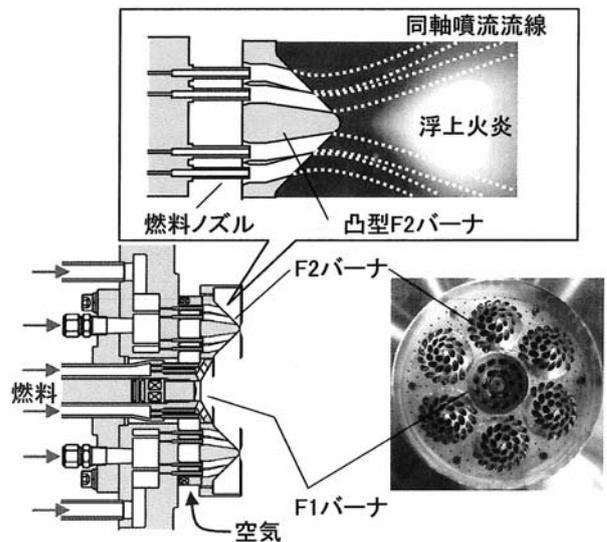


図9 CCS-IGCC用燃焼器バーナ構造

出量は10ppm以下であり、試験した範囲では逆火せず、水素リッチ燃料では世界初の乾式低NO_x燃焼を確認した。今後は運用を含め、より一層の安定範囲の拡大と低NO_x燃焼性能を図り実用化を目指す。

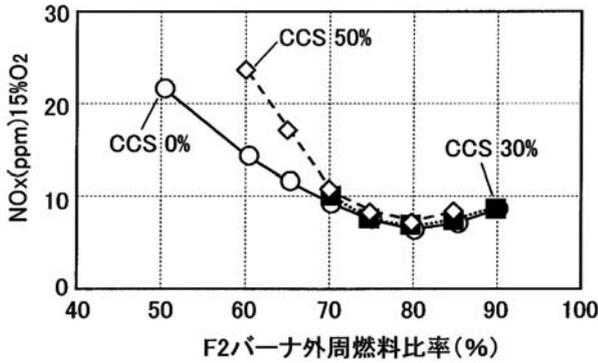


図10 CCS-IGCC用燃焼器のNO_x排出特性

5.3 低カロリーガス対応燃焼技術

ガスタービン燃料の多様化では、エネルギー有効活用の観点から低カロリーガスも重要である。本節では低カロリーガスの代表例として、空気吹き石炭ガス化ガスを取り上げる。空気吹きIGCCは、1990年代にNEDO殿の委託事業として石炭ガス化複合発電技術研究組合により、パイロットプラントの運転研究が進められ、弊社は実証プラント用燃焼器試験設備を担当し、低カロリーガス吹き燃焼器を開発した。石炭ガスの可燃成分は、水素と一

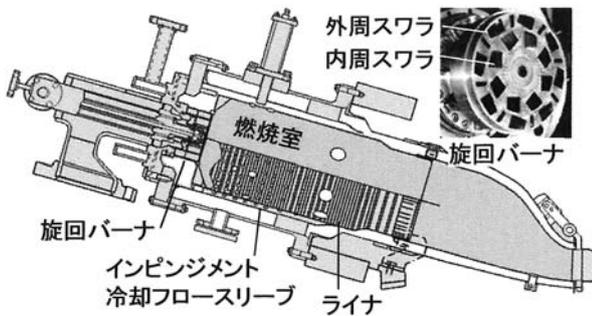


図11 空気吹きIGCC燃焼器構造

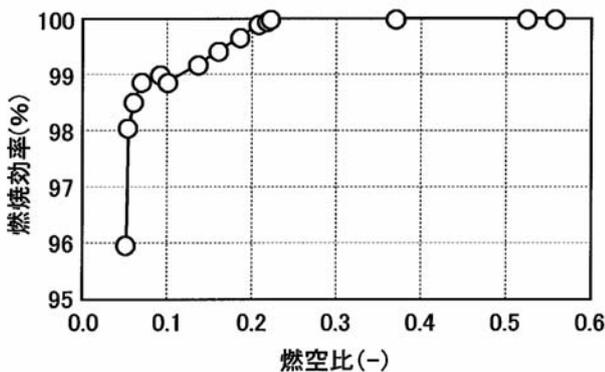


図12 空気吹きIGCC燃焼器の燃焼効率

酸化炭素を合せて約30%であり、残りは不活性ガスのため、発熱量が天然ガスの約1/10となり燃焼器では安定燃焼が課題となる。図11に開発した空気吹きIGCC用燃焼器構造を示す⁽¹⁰⁾。内、外周スワラの燃料配分を適正化し燃焼安定性を改善することにより。本燃焼器は、実証プラント用単缶燃焼試験において図12に示すように安定した燃焼性能を確認した。

現在は本燃焼器をベースとして、製鉄プロセスで発生するBFGなどの副生ガスや、将来燃料として期待されるバイオマスガスに対応した低カロリーガス吹き燃焼器開発への展開に着手している。

6. 燃料多様化対応の液体燃料の燃焼技術

6.1 低質油に対する取り組み

近年、ガスタービン燃料として石油精製過程で副生されるいわゆる低質油の使用が検討されている。低質油をガスタービンに使用できれば、資源の有効利用、高効率化による発電コストの低減とCO₂の削減が可能になると期待されている。低質油適用時の課題は、低質油に含まれる微量金属分による高温腐食に加え、燃料中の残留炭素分が多く排気ガスの煤塵濃度が高くなることである。このため弊社では、図13に示す拡散燃焼器を対象に低煤塵燃焼に関する研究開発を進めている⁽¹¹⁾。

煤塵の発生を抑制するには、燃料ノズルから噴霧する液膜の分裂促進による微粒化と、燃料噴霧内部へ空気を

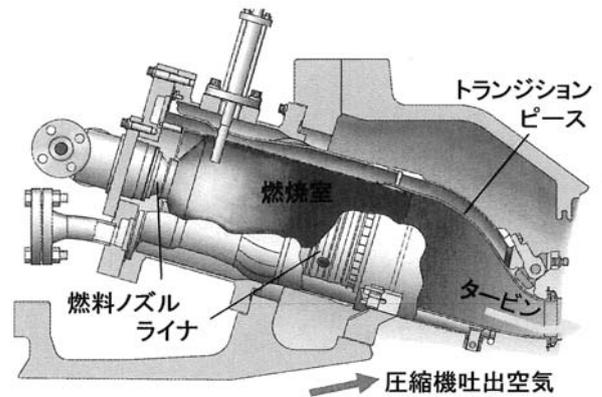


図13 H-25拡散燃焼器

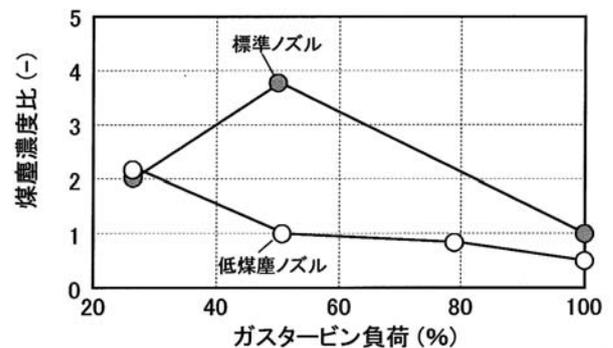


図14 低煤塵ノズルの煤塵低減効果

供給し低酸素濃度領域を低減することが必要であると考え、燃料を環状に噴霧し、環状噴霧の内外周に噴霧空気を供給する低煤塵ノズルを試作した。

図14に低質油を模擬するため軽油にC重油を混合した残留炭素分0.2wt%の試験燃料を用いた単缶高压試験結果を示す。低煤塵ノズルはガスタービン負荷の上昇に伴って煤塵濃度が低下し、定格負荷相当条件では標準ノズルに比べて約50%低減しており、単缶高压条件における煤塵低減効果を確認した。今後さらに低煤塵燃焼技術に関する研究開発を進め、低質油を高効率のガスタービンに適用することでCO₂削減に貢献したいと考える。

6.2 液体バイオマス燃料に対する取り組み

弊社では沖縄電力殿と共同で、温室効果ガスを削減可能なバイオエタノールを燃料とした発電用ガスタービンの実用化を検討している。バイオエタノールはサトウキビなどのバイオマスを発酵させ、蒸留して生産されるアルコール燃料であり、原料の植物が生長する過程で大気中の二酸化炭素を吸収しているため、バイオエタノール燃焼時の二酸化炭素は排出量としてカウントしないというカーボンニュートラルの考え方が広がっている。

バイオエタノールは灯油と比べて発熱量が低く、灯油焚きと同じ出力を得るには約1.8倍が必要となるが、95%蒸留温度が78℃と低く、引火点も16℃と低いため、蒸発しやすく燃えやすい燃料である。

図15にバイオエタノール専焼の単缶高压試験結果を示す。燃焼器には図13に示した拡散燃焼器の燃料ノズルを改良し、水分を約7%含むサトウキビが原料のバイオエタノールを用いた。定格負荷条件のNO_x排出量は沖縄県における排出基準値(70ppm,16%O₂)と同等となり、水噴射時(W/F=0.25)は1/2まで低下することを確認した。

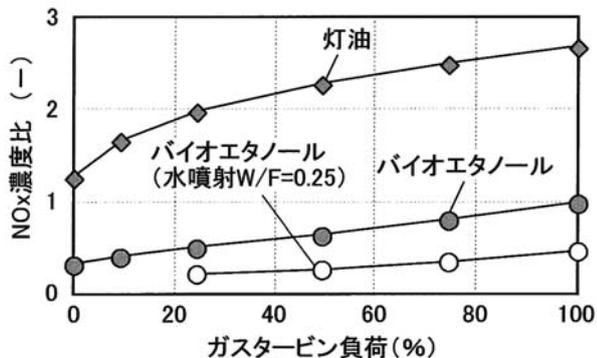


図15 バイオエタノールのNO_x排出特性

6.3 油焚き燃焼器の低NO_x化に対する取り組み

ガス焚きでは、予混合燃焼方式によって低NO_x化を図っているが、油焚きの多くは拡散燃焼方式であるため、多量のNO_xが排出される。このため、例えば燃焼場に水を噴霧して局所温度を低下させNO_x排出量を低

減しているが、水噴霧によりガスタービン効率が低下する。そこで弊社では、油焚き乾式低NO_x燃焼器の開発を進めている。

油焚き燃焼器の低NO_x化には、油を噴霧し蒸発させてから空気と混合させる予蒸発予混合燃焼方式(以下、予蒸発式)が有効である。図16に予蒸発式モデルバーナの基本構造を示す¹²⁾。モデルバーナは油と空気を混合させる混合室、油を蒸発させる蒸発室で構成される。混合室の壁面には複数の空気孔を形成し、混合室に多量の空気を導入して、油と空気の急速混合を図る。バーナ軸中心に油燃料ノズルを配置し、ガス焚きにも対応するため、空気孔の壁面にガス噴孔を形成した。

図17にA重油を用いた高圧力条件におけるモデルバーナのNO_x排出特性を示す。ガス温度1800KでNO_x排出量は25ppmまで低下しており、予蒸発式モデルバーナが油燃料の低NO_x化に有効であることを確認した。

今後さらにこの予蒸発式モデルバーナの性能を向上させ、低質油やバイオエタノール焚きにも展開してCO₂削減に貢献したいと考える。

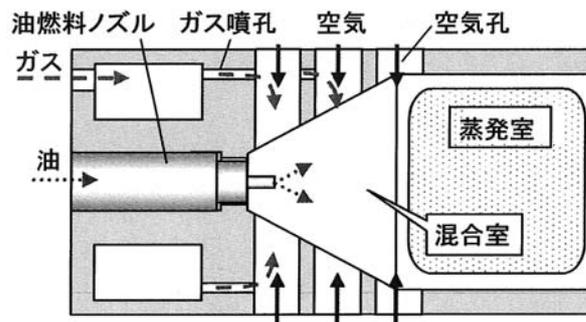


図16 予蒸発式モデルバーナ断面図

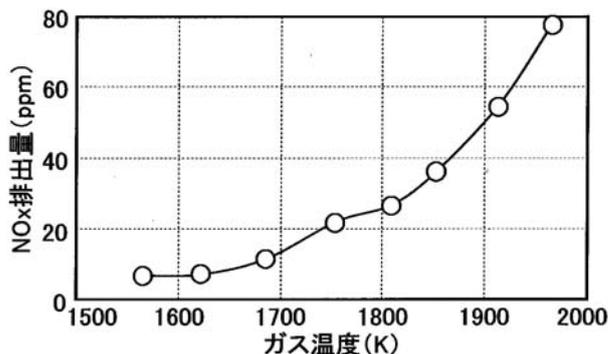


図17 モデルバーナのNO_x排出特性

7. おわりに

以上、弊社の天然ガス焚きH-25ガスタービンに適用した乾式低NO_x燃焼技術とともに、近年取り組みつつある燃料多様化に対応した環境保全型燃焼技術の開発動向について紹介した。ガスタービンは高温化・高圧力比化を通して一層の高効率を目指すとともに高い環境安全性が求められ、エネルギー安全保障の観点のみならず、地

球温暖化防止の観点からもガスタービンの燃料多様化への要望はますます高まるものと考えられる。

このような情勢に応えるべく、一層のガスタービン燃焼技術の革新が図られるものと期待される。弊社もその一端を担うべく、より一層の技術開発に努めていく所存である。

参考文献

- (1) 笹尾俊文, 他 3 名, “低NO_x燃焼器を採用したH-25ガスタービンの運転実績”, 日立評論 Vol.85, No.2 (2003), pp.19-22
- (2) 井上洋, 他 3 名, 日本燃焼学会誌, 45-131, (2003-11), 11-16
- (3) 三浦圭祐, 他 3 名, “流れの可視化による燃料/空気同軸ノズルの混合性能改善” 第34回ガスタービン定期講演会論文集, (2006), pp.239-244
- (4) 三浦圭祐, 他 3 名, “LNG焚きガスタービン燃焼器の要素技術開発” 第37回ガスタービン定期講演会論文集, (2009), pp.103-108
- (5) 三浦圭祐, 他 4 名, “LNG焚きH25ガスタービン用ドライ低NO_x燃焼器の要素技術開発” 第38回ガスタービン定期講演会論文集, (2010), 183-188
- (6) 小泉浩美, 他 3 名, “DME用ガスタービン燃焼器の開発” 第30回ガスタービン定期講演会講演論文集, (2002), pp.91-96
- (7) Takeo Saiou, et al., “PERFORMANCE DEMONSTRATION OF THE FULL SIZE MULTI CLUSTER COMBUSTOR FOR DME UNDER REAL ENGINE CONDITIONS” ASME Turbo Expo 2005, GT2005-68647
- (8) 浅井智広, 他 5 名, “水素含有燃料焚き多孔同軸噴流バーナの大気圧燃焼特性 (第 2 報)”, 第38回ガスタービン定期講演会講演論文集, (2010), pp.171-176
- (9) 百々聡, 他 5 名, “水素含有燃料焚きガスタービン用ドライ低NO_x燃焼器の燃焼特性”, 第38回ガスタービン定期講演会講演論文集, (2010), pp.177-182
- (10) 小泉浩美, 他 3 名, “石炭ガス化実証プラント用燃焼器の実圧燃焼特性”, 第24回ガスタービン定期講演会講演論文集, (1996), pp.59-64
- (11) Asai, T., Koizumi, H., Inoue, H., “An Experimental Study on Characteristics of Carbonaceous Particulate Matter Emissions from Combustion of Fuel Oil Including Carbon Residue.” IGTC 2007 Tokyo, TS-150, (2007-12)
- (12) 平田, 吉田, 関口, 井上, 渡邊, “デュアル燃料焚き低NO_x燃焼器用モデルバーナの燃焼特性”, 第35回タービン定期公演会講演論文, (2007), pp.57-62

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

川崎重工業における燃料多様化の取り組み

柏原 宏行*¹
KASHIHARA Hiroyuki

緒方 正裕*²
OGATA Masahiro

木下 康裕*²
KINOSHITA Yasuhiro

キーワード：トリプルフェューエル， 燃焼器， ハイパーコール， バイオマス， 炭鉱通気メタン

1. はじめに

産業用及び発電用ガスタービンの燃料は、天然ガスやディーゼル油、A重油などの炭化水素燃料が主流であるが、これらに代わる代替燃料として、埋蔵量が豊富で価格の安価な石炭の利用や現在未利用のバイオマス燃料、炭鉱メタンガスなどの有効利用はエネルギーセキュリティの観点から重要である。また、このようなバイオマス燃料や炭鉱メタンガスの利用は、二酸化炭素やメタンガス等の温暖化ガスの削減に寄与するため、地球環境問題対応の観点からも現在高い関心が持たれている。

そこで本報では、様々な研究がなされているガスタービン燃料多様化技術の動向の一部を簡単に解説するとともに、川崎重工業での取り組みについて紹介する。

2. トリプルフェューエル焚き

最も一般的なガスタービン燃料といえば天然ガスとディーゼル油であるが、国・地域によってはこれら燃料が入手できなかったり、できてもガスタービンの寿命に影響するような腐食成分が含まれていて使用できないケースも多い。天然ガスと比較してやや高価であるものの、比較的入手性のよいLPG（プロパン／ブタン主成分の液化石油ガス）がガスタービンの燃料として選択される場合がある。

本件は、中東の某国での事例であるが、季節によって天然ガス、ディーゼル油の入手性が悪くなる時期があり、安定した燃料確保のために第3の燃料としてLPGが焚けるトリプルフェューエル仕様の要望があり、燃焼システムを含む発電装置を開発・提供した。

燃料を切り替えてもシームレスに運転継続するためには、1つの燃料ノズルで多種の燃料を供給できる必要がある。LPGは加温・気化させてガス燃料として使用するのが一般的であるが、同じガスでも天然ガスとはウォッペインデックス（Wobbe Index：ガスの燃焼性を示す

指標の1つで、噴出熱量インプットを示す指数）が大きく異なるため燃料配管や燃料ノズルが共用できない。そこでLPGは液相のまま使用し、燃料配管や燃料ノズルをディーゼル油と共用することにした。ガス化したLPGをガスタービンに供給する場合、ガスタービンの内圧以上に昇圧する必要があり、液化防止のために加温が必要があるが、燃料制御機器の耐熱温度から加温には上限がある。LPGを液相のまま使用すればこの問題は解決する。

本システムの系統図を図1に示す。天然ガスは地域ガス供給会社からの中圧ガスを減圧して使用する。ディーゼル油はタンクに貯められたものをポンプで加圧して供給される。LPGも専用タンクに保管され、ディーゼル油と同様にポンプで加圧して供給される。安全のため、着火・始動は天然ガスまたはディーゼル油を用い、始動完了後にLPGに切り替えるシステムとしている。

液相LPGを扱う上での懸念は、配管経路の途中で予想外に気化し、燃料供給が不安定になることである。特に直接燃焼器に取り付けられる燃料ノズルの内部では燃焼器からの熱輻射や熱伝導によりこの危険性が高まる。このため、燃料ノズルは内部通路を内外に分け、少量の液相LPGを外側通路に流す構造としている。外部通路の液相LPGは、外部からの熱を受けて一部気化するが、気化熱で燃料ノズル全体を冷却する。外部通路の燃料は全体のごく一部であることから、燃料供給の安定性に大きな悪影響を与えない。燃料ノズルの外観を図2に示す。

3. 石炭利用

石炭、石油、天然ガスの単位発熱量あたりの二酸化炭素排出量の比は、石炭：石油：天然ガス＝10：8：6となる。そのため、石炭利用は石油もしくは天然ガスに比較し、環境負荷の高い燃料である。しかし石炭は埋蔵量が豊富で、産出される地域の偏りが少なく、さらには価格が安いことから、重要なエネルギー資源であることにはかわらない。そこで、環境への負荷をできるだけ低減するためにも、従来よりも発電効率を高めた石炭利用の発電設備が求められている。そのため加圧流動床複合発電（PFBC：Pressurized Fluidized Bed Combustion）や石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated coal Gasification

原稿受付 2011年10月3日

*1 川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術企画推進センター 技術研究推進部

*2 川崎重工業株式会社 ガスタービン・機械カンパニー ガスタービンビジネスセンター 技術総括部
〒673-8666 明石市川崎町1-1

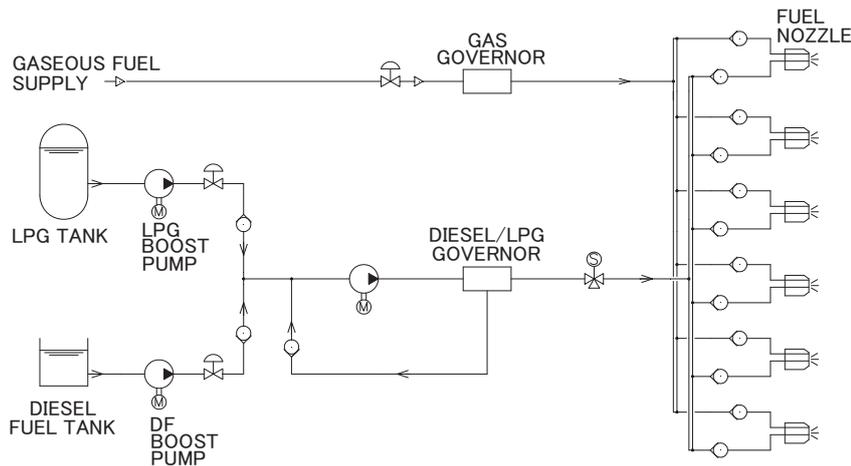


図1 トリプルフェューエル焚きシステムの燃料系統例



図2 トリプルフェューエル焚き用燃料ノズル

Combined Cycle) などをはじめ様々な取り組みがおこなわれている。それらのうちの一つのアイデアとして石炭直接燃焼タービン (DCFT: Direct Coal-Fired Turbine) がある。これはガスタービンの燃料として石炭を細かく砕いた微粉炭を用い、燃焼器において燃焼させ発生した高温ガスをタービンに導入しようとするものである。ただし石炭には、灰分が含まれるため、そのままタービンに導入した場合、タービン部での石炭灰による摩耗や、アルカリ分による腐食が大きな課題となる。そのためそれらの解決方法の一つとして、予め石炭から灰分やアルカリ分を取り除いた燃料を用いることが提案されている。これがハイパーコールと呼ばれるもので、石炭との親和性の高い溶剤で石炭を抽出し、不要な灰分を沈降除去して製造される⁽¹⁾。その特徴として、灰分は200ppm以下、アルカリ金属類 (Na, K) はイオン交換

により0.5ppmまで削減される。灰分が除去されたことにより発熱量は原炭より約10%程度高くなり、硫黄、微量金属も数分の1に減少する。また製造工程では30～40%程度の残渣が発生するが、これらは一般炭として利用可能である。表1に原炭とハイパーコールの性状の比較を示す。

ハイパーコール焚きガスタービンにおいては、ガスタービン燃焼器におけるハイパーコールの燃え切り性能がタービンの摩耗に影響をおよぼすことから、当社はハイパーコール用燃焼器開発のための基礎試験として、モデル燃焼器での燃焼試験を実施したので紹介する。

3.1 ハイパーコール用供試燃焼器および燃焼試験装置

一般に、低カロリーで燃焼速度の遅いガス燃料を燃焼させる場合は、ガスタービンでもサイロ型と呼ばれる滞留時間の長い燃焼器が採用される。ただし、燃焼ガスの均一分布において問題があることが多く、最近の高効率をねらったガスタービンでは、採用されることが少なくなっている。

そこで本研究においても、高効率化に有利な缶型燃焼器を対象とし、発電出力20MWクラスのガスタービンを想定したモデル燃焼器を用いた。通常、油や天然ガスを燃料としたガスタービン燃焼器は高負荷燃焼であり、燃焼器内の滞留時間が微粉炭焚きボイラ等と比較して短い設計がなされている。ハイパーコール焚きガスタービン燃焼器においても、なるべく短い滞留時間で、ハイパーコールの完全燃焼を図ることが課題である。そのため固体燃料であるハイパーコールを短時間で燃焼させるため

表1 ハイパーコールと原炭の組成

Sample	Moist.	Ash	VM	Fuel ratio	C	H	N	S	O	LHV	
	[wt%]	[wt%]DB	[wt%]DB		[wt%]DB						[kcal/kg]
Gregory	原炭	1.7	6.58	33.5	1.8	82.4	5.2	2.3	0.6	9.4	7460
	ハイパーコール	0.0	0.08	36.5	1.7	82.6	5.2	2.3	0.6	9.3	8200

VM: 揮発成分、Fuel ratio: 燃料比 (= 固定炭素/VM)

に、微粉碎して空気搬送により燃焼器に投入する。

本研究での燃焼試験では、保炎性、燃料供給および燃焼安定性、燃焼完結性、NOx排出量等を主とするハイパーコール燃焼に関する基礎特性把握を目的として、常圧下での燃焼試験を実施した。

図3にモデル燃焼器を示す。また燃焼試験装置系統を図4に示す。計測は、燃焼器出口部における燃焼ガス温度と燃焼排ガス中のO₂、CO、NOxのガス組成ならびに微粒子濃度および粒径分布の計測ならびに燃焼器内の火炎観察を行った。燃焼試験条件を表2に示す。なお、燃料であるハイパーコールは、燃焼完結をめざして平均粒径6 μm程度まで粉碎したものをを用いた。

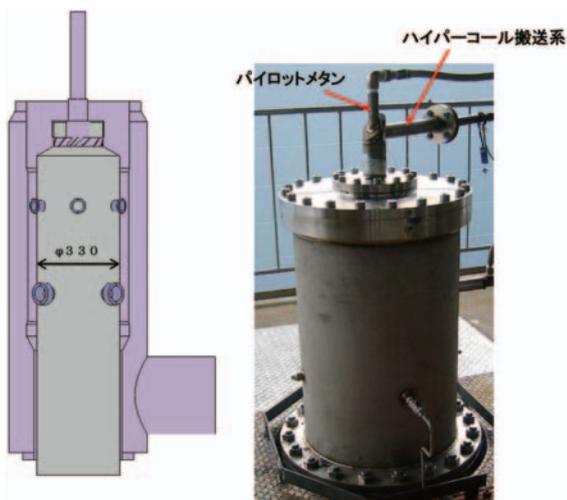


図3 モデル燃焼器の形状

3.2 燃焼試験結果

様々なバーナ形状等を試行したことにより、ハイパーコール単独でも十分な保炎性をもつ燃焼器が得られた。

表2 ハイパーコール燃焼試験条件

項目		
燃料 (ハイパーコール) 供給量		35 kg/h
燃料搬送空気	流量	200 Nm ³ /h
	温度	20°C
燃焼用予熱空気	流量	850 Nm ³ /h
	温度	400°C

そのときのバーナ形状を図5に示す。この燃焼器を用いて、1次空気孔および2次空気孔から流入する空気量を変化させ、そのときの燃焼完結性能やNOxの評価試験を実施した。図6に燃焼完結性能を、図7にNOxの特性を示す。

これらハイパーコールを用いた燃焼試験において、燃焼効率(固形分燃焼比率)は燃焼器空気配分の適正化により99%以上が可能であること、NOxは低NOx燃焼方式をとっていない微粉炭燃焼と同レベルで燃焼させること

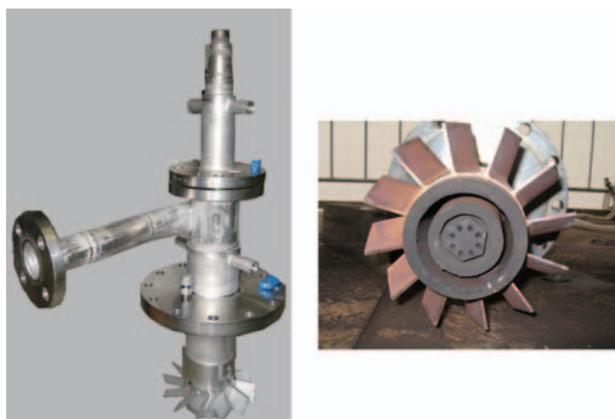


図5 ハイパーコール焚き用バーナ

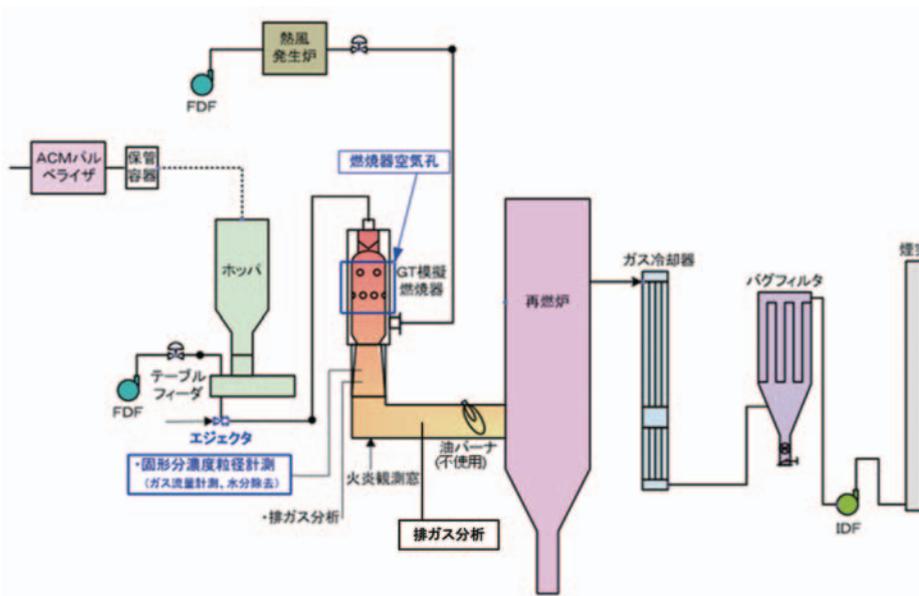


図4 燃焼試験装置系統

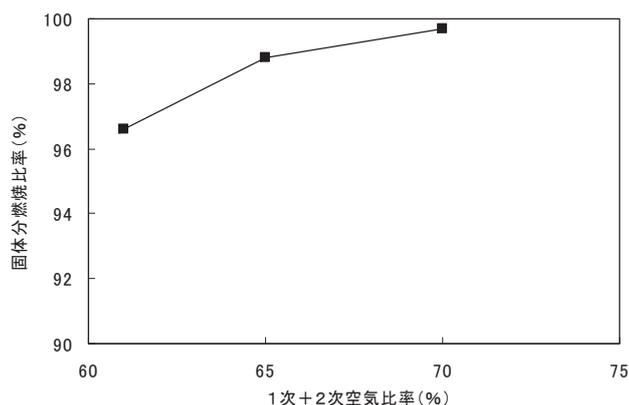


図6 空気配分と固体分燃焼比率の関係

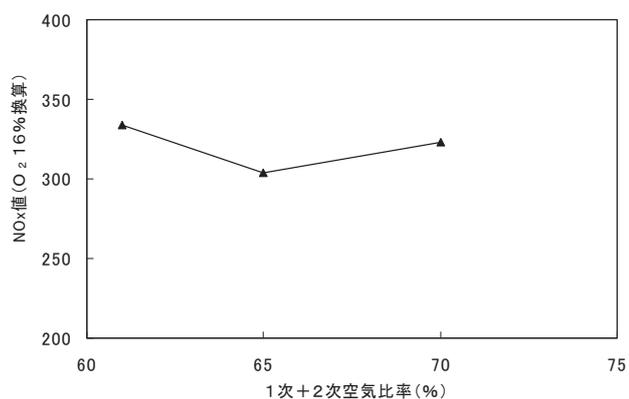


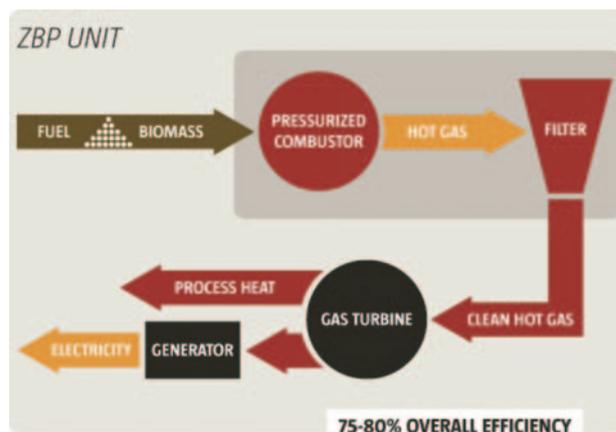
図7 空気配分とNOxの関係

が可能であることが確かめられた。ただし低NO_x化等の様々な課題もあり、実用化にむけてはさらなる開発を必要としている。

4. 木質バイオマス利用

森林資源に恵まれる地域では、製材時の残材や削りくずが多量に分散されて廃棄されており、これらの再利用についても多くの研究がなされている。これら木質バイオマスを用いた発電に関し実用化している一般的な利用方法としては、ボイラの燃料として用い、蒸気タービンにより発電する方法がある。しかし、木質バイオマスは嵩高いことから大量の遠距離輸送は向かないため、分散型発電での利用が求められる。そのためスケールメリットが生かせない関係から発電効率が一般的に低くなっている。そこで発電効率向上を目指して、木質バイオマスの燃焼ガスを直接ガスタービンに投入して利用する方法⁽²⁾ (Wood-fired Gas Turbine) について、各国で野心的な試みが続けられている。図8はその代表的なシステムフローである。⁽³⁾

Wood-fired Gas Turbine の特徴としては、気体燃料・液体燃料のような流動性の無い燃料を連続供給するための装置、木質燃料を完全燃焼させるための大型の燃焼筒、燃焼ガス中のス・ばいじんを除去する装置などが必要となる。

図8 バイオマス直接燃焼ガスタービンの一例
(出典：www.zilkha.com)

当社の聞かるところにおいては、燃料供給は木材を微粒子に加工して搬送空気に乗せて燃焼筒に供給する方式、燃焼筒内の流れを巡回させてサイクロンフィルタによりス・ばいじんを除去する方式が採用されている。また、燃焼筒は一般の化石燃料と比較すると100倍近い体積に設計されるようである。最大の課題点はやはりス・ばいじんの除去であり、木材由来の燃焼残存物が短時間でタービンノズルを閉塞させるケースが多く、実用化までには引き続き技術開発が必要となっている。そこでより実用的な木質バイオマスを利用した高効率分散型発電システムが求められている。その一つとして、加圧流動層を用いたバイオマスガス化発電がある。

4.1 木質バイオマスガス化発電

当社は高知県仁淀川町が取り組むバイオマス実験事業に参画し、木質バイオマスガス化発電システムおよびペレット製造設備を開発したので紹介する。

本実験事業では、仁淀川町が独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から「バイオマスエネルギー地域システム化実験事業」として委託をうけ、2007年4月より3カ年かけて実証試験を行ったものであり、流動層ガス化炉とガスタービンを組み合わせた木質バイオマスによる小型分散型発電システムとしては世界で初めてとなる。図9に、バイオマスガス化発電システムの概略を、表3に本実証プラントの主仕様を示す。また図10に木質バイオマスガス化発電システムおよびペレット製造設備の写真を示す。本プラントでは、流動層ガス化炉において約650℃で木質バイオマスを熱分解することによりガス化し、多量のタール成分とCO、H₂の可燃ガスを含んだ高温の低カロリーの生成ガスを発生させる。その後、サイクロン、高温フィルタによって脱塵し、ガスタービン燃焼器に導入して燃焼させ、ガスタービンによる発電を行う。このガス化によって発生したタール成分を高温蒸気の状態に保ったままガスタービンに導入することにより、通常は閉塞などの原因となるやっかい

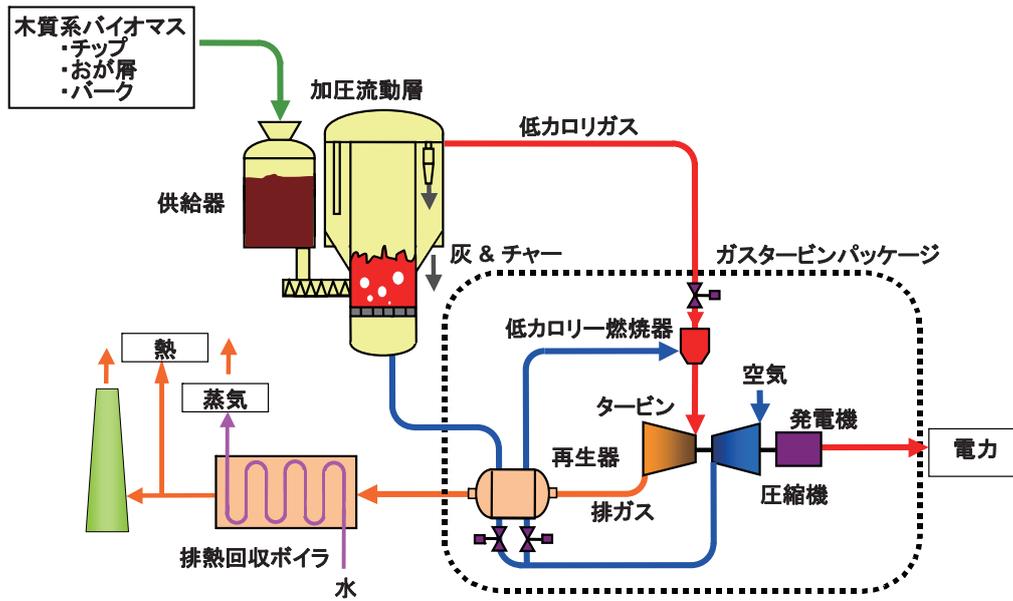


図9 バイオマスガス化発電システムの概略

表3 実験事業主仕様

収集システム		
収集量	1900	ton/年
エネルギー転換システム		
使用量	900	ton/年
	450	kg/時
エネルギー利用システム		
電気出力	150	kW
蒸気発生量	450	kg/時
ペレット生産量	600	ton/年
ペレットボイラ出力	300	Mcal/時



図10 木質バイオマスガス化発電システム（手前）およびペレット製造設備（奥）

なタール成分が、燃料として有効利用される。ガスタービンからの排熱は、熱交換器によりガスタービンのコンプレッサからの空気と熱交換され、一部空気は流動層に送られ、流動化および部分燃焼のための空気として利用される。本開発においては、高温ガスフィルタリング技

術や約1000kcal/Nm³ (4.186MJ/Nm³) の低カロリー燃料燃焼技術等の要素技術開発と、それに続いてシステム全体での制御技術等が新たに開発された。その結果、実証プラントではガス化発電設備において安定して150kWの発電操業を実現するとともに、自動化運転も達成された。発電効率についても同規模のボイラ・蒸気タービンを用いた発電方式にくらべ約3倍となった。また発電設備から出される排熱を利用したペレット製造設備では年間約600tonのペレットを製造し、重油代替燃料として地域の4施設にペレットの安定供給を行った。これらのバイオマスエネルギーの利用によりえられるCO₂削減効果は、年間約800tonに相当する事が確認されている。これらをもってNEDO委託事業としての実証試験は2010年に完了した。

5. 炭鉱から発生している未利用メタンの利用

地球温暖化の影響要因としては、人為的な温室効果ガスの放出が主原因と考えられている。とりわけ二酸化炭素はその代表的な物質であり、その次に影響があるのがメタンガスであると考えられている。メタンガスは、二酸化炭素の約21倍もの地球温暖化係数をもっており、このメタンガスを燃焼させて、地球温暖化係数1の二酸化炭素と水に変換すれば、温暖化ガスの削減になる。

メタンガスの主な発生源は、畜産や稲作関係と考えられているが、メタンガス総発生量の約6%は炭鉱から発生していると見なされており、さらに炭鉱から発生するメタンガスの約75%が炭鉱内の換気空気すなわち炭鉱通気メタン (VAM: Ventilation Air Methane) に含まれている。中国では坑内爆発や坑内火災に対する保安上の理由から、煤磁安全規定でVAMのメタンガス濃度を0.75%以下にすることが規定されており、炭鉱ではメタン濃度が可燃範囲を十分下回るように大量の空気が送り

込まれて換気されている。そのためVAMは、メタン濃度が大変希薄なことから利用することが難しく、通常は大気放散されており、地球温暖化の一因となっている。

5.1 低濃度メタン利用ガスタービン

弊社は、低濃度メタンを含む炭鉱からの換気空気をガスタービンへ吸気し燃焼させ二酸化炭素に変換すると同時に発電するシステムを開発中である。図11に炭鉱からのVAM発生と本システム概念を示す。また図12に現在開発中の低濃度メタン利用ガスタービンのシステムフローを示す。本ガスタービンでは、コンプレッサの吸気空気としてVAMを吸気させる。ただしVAMだけでは十分な燃焼ガスの温度上昇を得られないことから、炭鉱メタンガス（CMM：Coal Mine Methane）（メタン濃度約30%未満）をVAMと混合し、メタンの可燃範囲より十分低い約2%までメタン濃度を上昇させガスタービンのコンプレッサに吸入させる。CMMは炭鉱内で湧出す

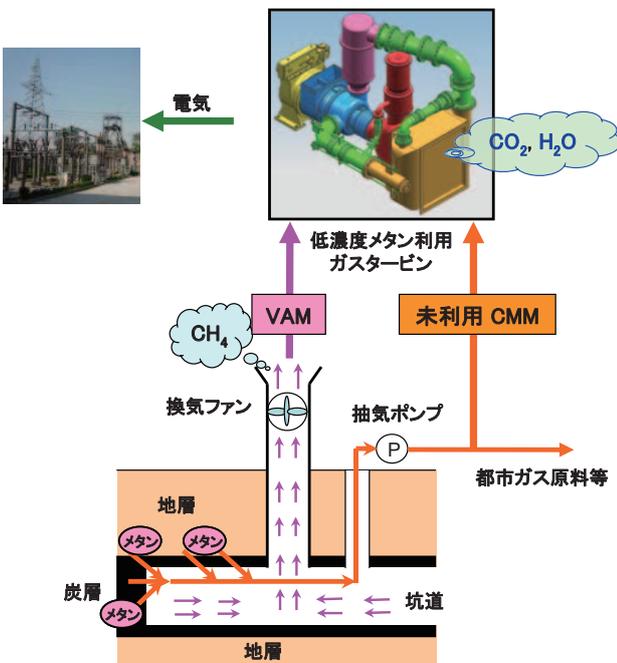


図11 VAM利用の概念図

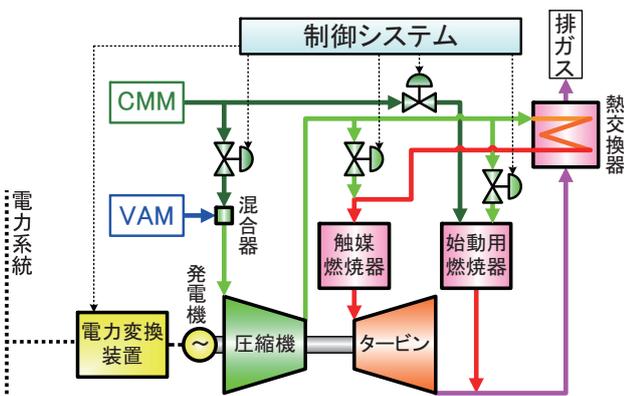


図12 低濃度メタン利用ガスタービンフロー図

るメタンを積極的に集めたもので、VAMと比較しメタン濃度は高いがやはり空気を含んでいる関係から爆発の危険があり、メタン濃度30%未満のCMMは未利用で大気放散される場合が多い。ガスタービンのコンプレッサで圧縮されたメタンを含んだ希薄混合ガスは、ガスタービンの排熱を利用した熱交換器によりさらに約400℃まで昇温させ、その後触媒燃焼器に導入させる。触媒燃焼器では、メタンの可燃範囲外の低濃度においても、適度な活性温度を触媒にあたえることにより、酸化反応を進めることが可能である。触媒燃焼器での出口ガス温度は、ガスタービンのコンプレッサに吸入させるVAMに添加するCMMの量により制御される。タービンを通過した燃焼ガスは、熱交換器によりコンプレッサからの希薄予混合ガスと熱交換される。

本ガスタービンでは、触媒燃焼方式を採用しているため、起動時には触媒が燃焼反応を開始する温度まで予熱する熱源を持つ必要がある。弊社が世界で唯一商品化している触媒燃焼器を搭載したM1A-13X型においては、触媒燃焼器の上流に加圧ガス燃料を利用したプリバーナを設置することにより触媒に導入するガス温度を触媒燃焼器の活性温度まで上昇させているが、本システムにおいては触媒予熱の為に新たな燃料用ガスコンプレッサを設置する事は製品の大幅なコスト上昇要因となるため採用していない。そこで本システムではタービン出口から熱交換器の間の常圧部分において、常圧燃焼の始動燃焼器を設置し、常圧のCMMを燃料とし触媒予熱用熱源を発生させている。始動燃焼器用の空気源は、ガスタービンのモータリングによりコンプレッサで発生した加圧空気を一部抽気し利用している。なお発電機には、誘導発電機を用いており、始動時のモータリングにも利用している。さらに電力変換システムを備えることにより、モータリングから発電までをシームレスに制御することが可能となっている。本システムの目標を表4に示す。計画では、発電量約850kWで、年間に二酸化炭素換算で約55,000tonの温暖化ガス削減効果が見込まれている。なお本発電システムは、おなじくVAM酸化技術として研究開発されているTFRR: Thermal Flow-Reversal Reactor やCFRR: Catalytic Flow-Reversal Reactor等の常圧場で作動する機器と比較し、ガスター

表4 計画性能

発電機端出力(kWe) ^(注1)	850
VAM吸入量(Nm ³ /hr) ^(注2)	20,860
CMM吸入量(Nm ³ /hr) ^(注3)	1,110
温室効果ガス削減量(tCO ₂ e/年) ^{(注4)(注5)}	55,000

(注1) 気温: 15℃、1気圧、高度: 0mの場合。

(注2) メタン濃度を0.5%とした場合。

(注3) メタン濃度を30%とした場合。

(注4) 年間稼働率を97%、メタン処理効率を99.5%とした場合。

(注5) グリッド発電減少分(6,785tCO₂e/年)を含む。

ピンの加圧下において酸化処理されるので、VAMの処理能力に対して、小規模な設備ですむ利点がある。

6. おわりに

ディーゼル機関を発明したドイツの技術者ルドルフ・ディーゼルは、当初、ディーゼル機関において微粉炭を利用する事を意図していたとされている。残念ながら現在まで微粉炭を燃料としたディーゼル機関は実用化されていないが、その目の付け所には大いに興味をそそられ、今回ご紹介したハイパーコール技術などの今後の進展によっては実用化されるかもしれないと期待している。ガスタービンにおいても、様々な燃料利用技術が今後も継続的に研究され、より地球環境に優しい燃料の利用が広まることを期待したい。

ハイパーコール用燃焼器開発や木質バイオマス流動層ガス化発電システムの開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）殿のご支援をいただき実施したもので、ここに感謝いたします。

参考文献

- (1) 奥山憲幸, 古谷敦志, 小松信行, 重久卓夫, 神戸製鋼技報 Vol. 56 No. 2, (Aug. 2006) , pp.15-22.
- (2) V. Smith B. Selzer V. Sethi., 1993, "Development and demonstration of a wood-fired gas turbine system" , Report Number: DOE/MC/11076-93/C0201 CONF-9306148-7
- (3) Zilkha Biomass Energy, <http://www.zilkha.com/>

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

燃料を創る：回収，変換そして生産へ

藤森 俊郎*¹
FUJIMORI Toshiro

キーワード：ガスタービン代替燃料，ガス化，シンガス，VOC，低品位炭，褐炭，バイオジェット燃料，微細藻類

1. はじめに

非在来型の天然ガス資源の出現や，新興国の経済成長などの今後のエネルギー需要の見通しの中で，ガスタービンのニーズはさらに高まると予想される。ガスタービンは，エクセルギ効率の高い動力システムであり，他プロセスとの組み合わせによりシステム全体の効率を飛躍的に向上させることができる。コージェネレーションやコンバインドサイクルが典型的な例であるが，より効率的なシステム構築には，熱のやり取りを進展させ，原料や燃料をガスタービンとプロセスとの間でやり取りする，より強いカップリングに発展させることが必要である。そのためには，ガスタービンに適合可能な燃料種を拡大することに加えて，適用可能な燃料を創ることが重要である。

本稿では，ガスタービンの燃料を創るという観点で，未利用エネルギー源について，回収による燃料化としてVOC (Volatile Organic Compounds) 回収型ガスタービンシステム，変換による燃料化として二塔式流動層ガス化炉，そして再生可能エネルギー源によるガスタービン燃料製造ということで，藻類によるバイオジェット燃料製造技術開発の概要について紹介する。

2. VOC回収ガスタービンシステム^{(1),(2)}

VOCは，約200種類の揮発性有機化合物の総称で，光化学オキシダントや浮遊粒子状物質の原因物質とされ，大気汚染防止法，悪臭防止法，作業環境基準等で排出を規制されている。塗料や有機溶剤を使用する工場，石油類のタンクなどから年間185万トン（平成12年度調査）排出される。平成22年度までに30%の削減を目標として大気汚染防止法の一部が改正され，VOC排出事業者は，排出規制の遵守，排出濃度計測の義務が課せられた。

VOCは，主に，トルエン，キシレンやベンゼンなどの芳香族類や酢酸エチルなどであり，従来は，活性炭で吸着濃縮した後，蓄熱燃焼炉などで焼却処理されており，VOCのエネルギーは利用されないばかりか，補助燃料の使用により処理コストがかかる。

そこで，活性炭で吸着されたVOCを高温蒸気で脱着し，混合ガスをガスタービン燃料とするVOC回収処理ガスタービン発電システムを開発した。VOCは，灯油並みの発熱量があるが，芳香族成分が多くPMが増えやすい。そこで，図1に示すように蒸発混合し，予混合式ドライ低NO_x燃焼器に供給することで，スモークとNO_xの双方を抑制しつつ，高い分解率を達成する燃焼器の開発に成功した。VOC／蒸気混合ガスと天然ガスの2系統の燃料供給システムをもち，VOCは全燃料の最大50%まで噴射可能である。天然ガスはガスタービン出力を一定に保つ様に流量制御される。予混合燃焼では，燃料の性状により，逆火や燃焼振動などの不安定燃焼が発生するが，上記条件では，安定性に変化は無いことを確認している。

これまでに，2種類のガスタービンで実証運転が行われた。1つは，IHI呉工場の2500kW級IM270蒸気噴射型ガスタービンコージェネレーション設備において，隣接するIHI-MU造船所の塗装工場からVOCを含む換気空気を用いて試験をした。換気空気の一部を取り出し，濃縮後にガスタービン設備へ搬送し，濃縮空気中のVOCは，活性炭により吸着され，排熱回収ボイラの蒸気熱で取り出され，ガスタービンへ燃料として供給された。脱着ラインをガス燃料圧力と同等の高圧とすることで，VOC

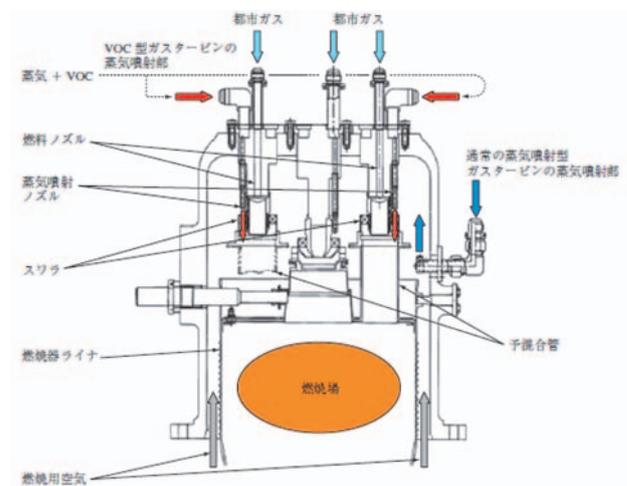


図1 VOC混焼DLE燃焼器 (IM270)

原稿受付 2010年9月30日

*1 (株)IHI 基盤技術研究所

〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1

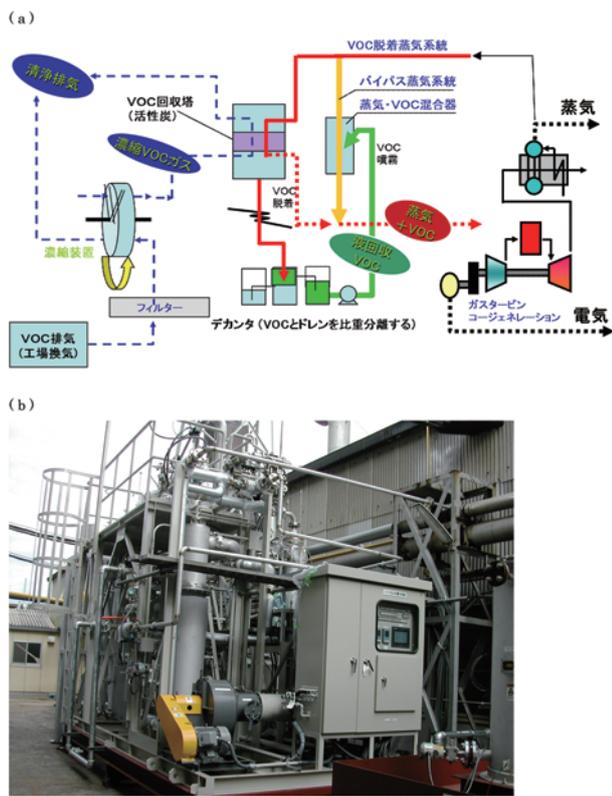


図2 VOC燃料化実証試験装置 (2500kW級コージェネレーション)
(a) 試験フロー (b) VOC回収ユニット

のために新たに圧縮機は不要となり、シンプルな装置構成となる。

図3はガスタービン運転状態を示すが、VOCの噴射によって、天然ガス燃料消費量が削減され、その間ガスタービン出力は変化せず安定に運転されている。VOCの分解率は、高出力運転時はほぼ100%であり、低出力運転時においても99.5%以上で、要求性能を十分満たす。また、NOxなどのエミッションについても大きな変化はないことを確認した。また、IHI横浜事業所のIM400蒸気噴射型コージェネレーションシステムにおいても、トルエンとキシレンによるVOC模擬ガスによる試験を行い、ガスタービンに投入された全燃料に対するVOC燃料の混焼率が20%まで問題なく運転できることを確認した。

VOCの発生源は、塗装、印刷、洗浄などの中小事業者が多く、1事業所からの排出量は、ガスタービンプラ

ントの必要量に対して十分でなく、また操業により変動する。そのため、ガスタービンによる処理事業を検討する上では、プラント規模に適した燃料の安定供給が重要となる。そこで、図4の様に複数の事業所からVOCを回収し、ガスタービン処理設備で集中的に処理し、同時にエネルギーとして回収する。VOCの回収方法は、図5に示すように活性炭に吸着し活性炭ごとトラックで輸送する方法や、液体として回収する方法があるが、それぞれ蒸気と混合ガスに変換することで、同様にガスタービンへ供給できる。個々の事業者は、回収設備を持つだけで済み、試算では、個々に焼却処理をした場合に比べ、大幅な処理コストの削減ができる。今後、VOC排出事業者と、社会実証に向け取り組みを進める。



図4 VOCエネルギーリサイクル構造図

3. 未利用褐炭用二塔式ガス化炉^{(3),(4)}

石炭やバイオマスなどの固体原料を、酸素、空気と水蒸気などのガス化剤により、CO、H₂や炭化水素などのガス成分へ変換することで、ガスタービンの燃料とすることができる。ガス化技術は、石炭ガス化複合サイクル発電 (IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle) 用として開発が進められている。一方、世界で商用運転されているガス化プロセスの用途は、化学原料用合成ガス製造が大部分である。

褐炭に代表される低品位炭は、世界の石炭埋蔵量のおよそ半分を占めるが、低発熱量で含水率が高く、一方、

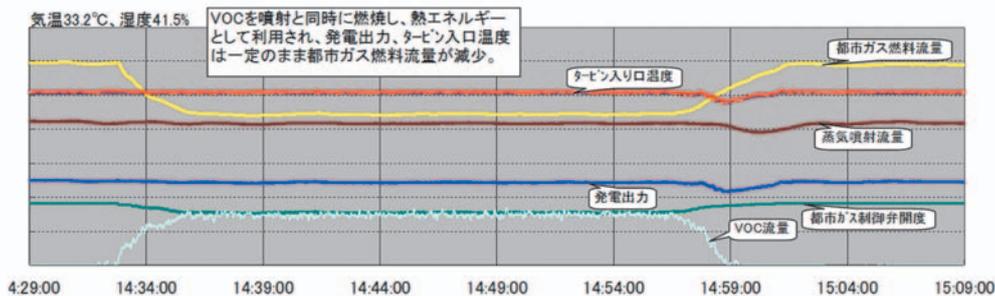


図3 ガスタービンVOC噴射試験エンジンデータ (IM400)

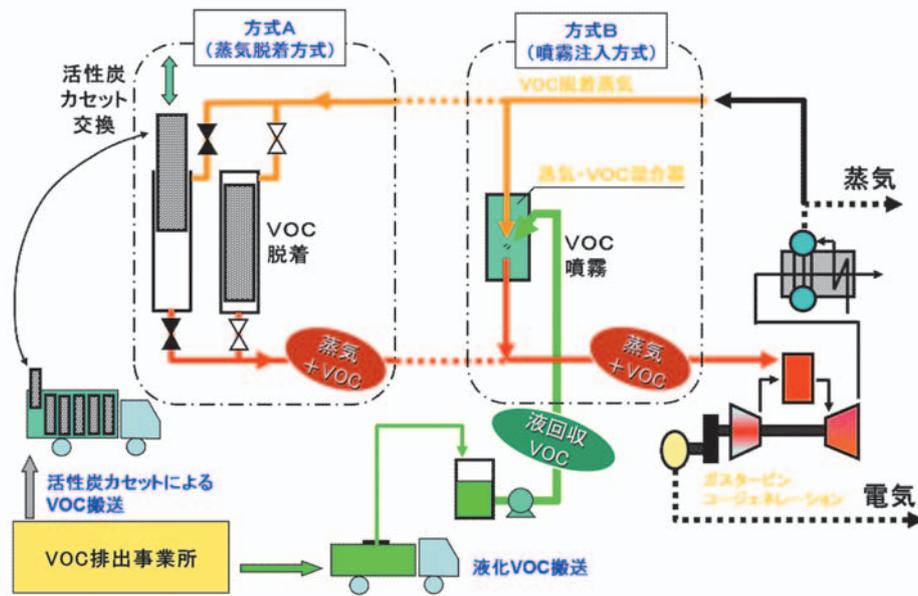


図5 回収VOC輸送、処理方式

乾燥すると自然発火しやすいため輸送に適さず、山元での利用に限られる。今後、新興国の経済成長により、エネルギー源や化学原料として褐炭利用のニーズは増大すると予想される。化学原料製造プラントでは、原料のガス化によるガス化ガスを出発点として、アンモニアやメタノールなどが合成製造されるが、所内では多くの熱や動力が必要となる。ガス化ガスの一部や、合成プロセスから排出される副生ガスを燃料として、所内でガスタービンコージェネレーションを構成することで、プラント全体のエネルギーの利用効率を大きく高めることができる。

褐炭は、表1に示すように揮発分が多く、炭化度が低く官能基を多く持ち、AAEM（アルカリ・アルカリ土類金属）の触媒作用によるチャーの反応性の高さなどから、800～900℃程度でガス化反応は十分進行する（図6）。褐炭ガス化に適したガス化炉として、循環流動層ボイラ技術を基にした二塔式循環流動層ガス化炉TIGAR®（Twin IHI Gasifier）の開発を行ってきた。二塔式循環流動層ガス化炉は、図7に示す様に、高速流動

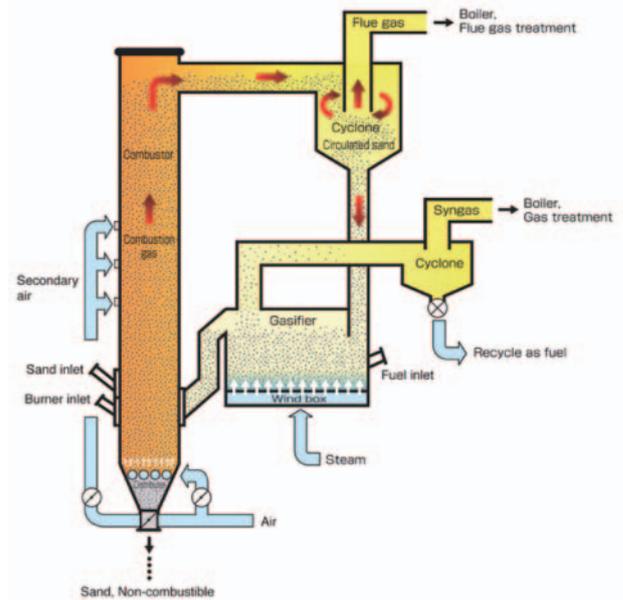


図7 二塔式流動層ガス化炉（TIGAR®）

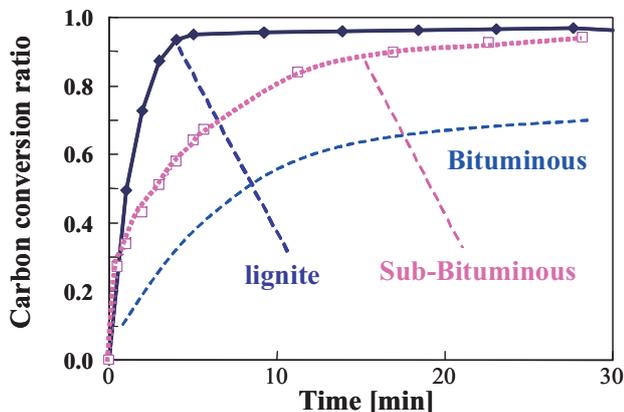


図6 低品位炭のガス化特性

層（ライザー）燃焼炉と気泡流動層ガス化炉を組み合わせたガス化炉であり、高濃度・高発熱量のガス化ガスを発生させることができる。

二塔式循環流動層ガス化炉は、ガス化炉として滞留時間を長く取れる気泡流動層型ガス化炉と、高濃度粒子循環が可能な高速流動層型燃焼炉（ライザー燃焼炉）を採用した。褐炭はガス化炉に投入され、熱分解およびガス化剤との反応により主に一酸化炭素、水素に変換される。ガス化剤としては蒸気を利用し、蒸気はガス化ガスおよび排気ガスからの熱回収によって生成する。ガス化炉で発生した未反応のチャーは循環媒体とともに燃焼炉に運ばれ、空気によって燃焼し循環媒体に熱を供給する。

循環媒体と排気ガスはサイクロンにより分離され、循環媒体はガス化炉に循環されることでガス化反応に必要な熱を供給する。

本ガス化炉では燃焼排ガスとガス化ガスが完全に分離され、水蒸気ガス化により高カロリーのガス化ガスを得ることができる。これは、大量の酸素を消費する部分酸化方式によるガス化炉プロセスに比べて、ガス化に消費されるエネルギーの削減に加えて、プラントコストの削減につながる。また、ガス化温度が低いため、灰は溶融することなく処理することが可能であり、溶融灰による炉壁の腐食、侵食や閉塞などのトラブルの発生が無く、安定な稼動が可能である。また、流動層の特徴である、燃料に対する高い適用性により、40%程度の水分の褐炭まで前処理乾燥することなく使用できる。

パイロット規模のガス化試験炉を図8に示す。ガス化容量は日量6tonである。ガス化ガス組成は、水蒸気ガス化炉の特徴である高濃度水素ガス組成で、 H_2 / CO は3に近く、化学原料合成プロセス用に適したガス組成である(図9)。今後、商用化に向けて、10倍規模のガス化

炉を褐炭生産地に建設して、長時間連続運転を行い、耐久性の確認や運転ノウハウを蓄積する。

図10に示すように、低品位炭やバイオマスなどはガス化プロセスを経由して、燃料や化学原料に合成することが可能である。図11に、アンモニア製造用ガス化プラントのイメージを示す。ガス化プラントにおいては、所内に圧縮機やファンなど多くの動力が必要であり、また各種反応炉や蒸留分離プロセスなどでは多量の熱が必要となる。ガス化ガスや合成化学プラントからのオフガスを

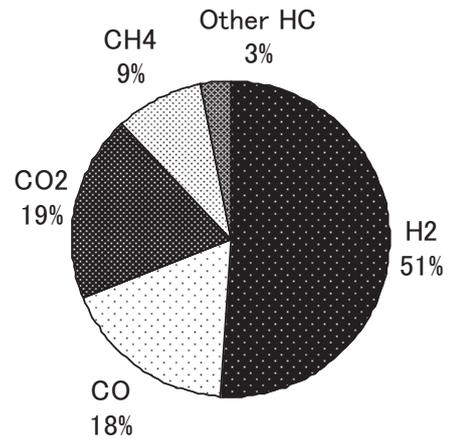


図9 ガス化ガスの組成



図8 TIGAR®パイロット炉

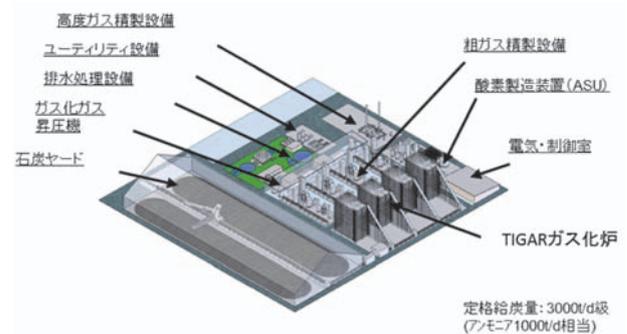


図11 アンモニア製造用ガス化プラント

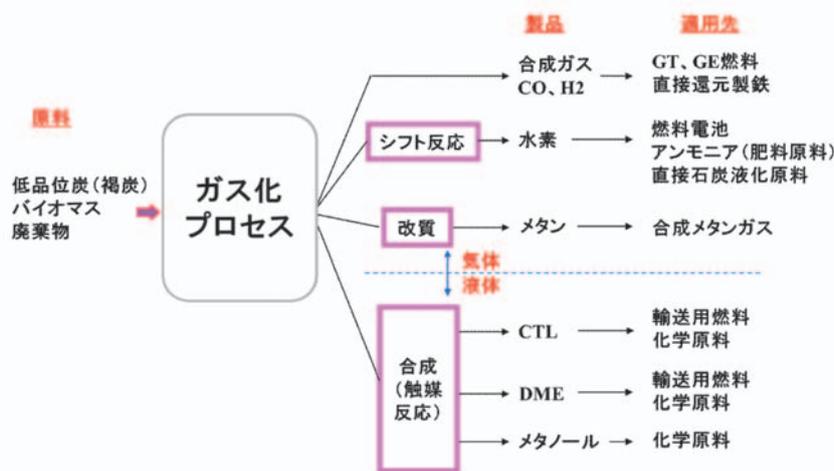


図10 ガス化ガスの用途

ガスタービン燃料として、動力、熱を同時に供給可能となり、プラント全体の効率を向上させることが可能となる。ガスタービンの排熱は高温であり、化学プラントの所内動力源として適している。

4. バイオジェット燃料⁶⁾

航空機ジェットエンジン燃料は、タンク容量の制限によりエネルギー密度が高いことが求められる。石油系燃料のエネルギー密度は、アルコール系燃料の約2倍、現在のリチウム電池の数十倍となり、ジェット燃料に適していることがわかる。バイオジェット燃料は、石油由来のジェット燃料と同等のエネルギー密度で、また再生可能なエネルギー源であることから、航空機輸送に伴うCO₂排出量を削減する切り札として、IATA（国際航空輸送協会）など多くの機関で注目されている。

バイオ燃料は、直鎖炭化水素が主体で、石油系燃料に含まれる芳香族成分が少ないなどの特徴がある。これまでに、燃焼テストからフライトテストが行われ、燃焼特

性や燃料の熱安定性や低温特性などについて評価され、その結果、2013年には、バイオ燃料を50%含むジェット燃料の規格が米国で発行され、普及が進むと予想される。

第1世代のとうもろこし等を原料とするバイオ燃料は、食物との競合が問題となり、その後、アブラヤシ等の非食物系植物に移り、現在はさらに生産性の高い微細藻類が注目されている。微細藻類の油脂生産能力（表2）は、とうもろこしの数百倍、アブラヤシの10～20倍とされている⁶⁾。当社では、神戸大学などと連携し、燃料を生産するプロセスの開発を進めている。微細藻類は、緑藻のボツリオコッカスである。図12にその一種である榎本藻⁵⁾と、抽出された燃料成分を示す。この藻は一般的なボツリオコッカスに比較して一ヶ月間で約1000倍の量に増殖し、雑菌等の他の生物が混在する環境でも培養が可能となる堅牢性を有し、更に、生産する燃料は重油に相当する高い品質であることが確認されている。今後、培養パイロットプラントの建設を進め、大規模化に向けた開発を進める。

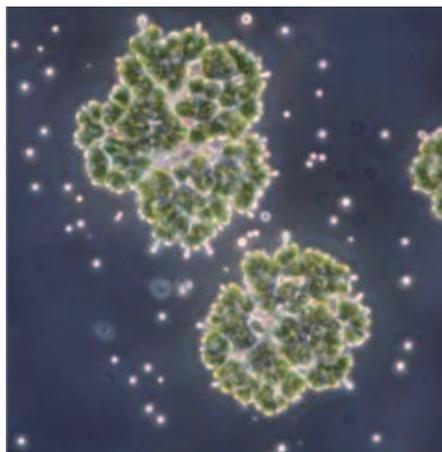
表1 低品位炭の性状（亜瀝青炭、褐炭）

石炭種	亜瀝青炭	褐炭
全水分（到着ベース）	25.0	35.0
工業分析（気乾ベース）		
水分	14.5	23.0
揮発分	42.5	38.0
固定炭素分	42.0	35.1
配分	1.0	3.9
硫黄分	0.1	0.15
燃料比	0.99	0.92
元素分析（無水ベース）		
C	74.3	73.0
H	5.6	8.4
N	1.1	1.0
S	0.1	0.2
O	18.9	17.4
高位発熱量（MJ/kg）	21.6	17.8

表2 バイオ原料による油脂生産能力の比較

バイオマス	油脂生産能力 (ton-oil/ha/y)
Corn とうもろこし	0.2
Soybeans 大豆	0.5
Safflower ベニバナ	0.8
Sunflower ヒマワリ	1.0
Rapeseed アブラナ	1.2
Oil Palm アブラヤシ	6.0
Micro Algae 微細藻類	47-140

(a)



(b)



図12 微細藻類から抽出したバイオ燃料
(a) 藻に圧力を加え油が染み出した様子（倍率×400）
(b) 微細藻類から抽出した燃料成分

5. まとめ

スマートエネルギー社会の実現には、未利用エネルギーを高効率に利用するエネルギー循環システムの構築が必要であり、ガスタービンの燃料多様化はその一翼を担う。実現には、ガスタービン燃焼技術のみならず、燃料源の回収、変換や製造技術の開発が重要であり、更には、VOCなどと燃料として回収する社会システムの構築が必要である。これには大きな投資が必要となり、政策的に推進を図る必要がある。日本が今後も世界をリードするエネルギー先進国であるためには、これらをいち早く実現することが必要であり、当社もこれに貢献すべく努力する所存である。

参考文献

- (1) 芳村幸宏, 工藤康人, 伊藤正皓, 高橋克昌, 宇治茂一, 日本ガスタービン学会誌, 第35巻, 第2号, 75-80 (2007).
- (2) 成清勉, 小林英夫, 斉藤由夫, 配管技術, 第53巻, 第10号, 23-28, (2011).
- (3) Toshiro. Fujimori, Toshihiko. Suda, Kazuo. Matsuzawa, Nobuhiko. Kubota and H. Tani, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan 20-23 May 2007
- (4) 須田俊之, 日本エネルギー学会誌, 第90巻, 第3号, 201-205, 2011
- (5) Department of Energy, National Algae Biofuels Technology Roadmap, (http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/algae_biofuels_roadmap.pdf) (2010)
- (6) 2011年7月7日付IHIプレスリリース (2011)

特集：新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

燃料用DMEの利用・普及促進への取り組み

小熊 光晴*¹
OGUMA Mitsuharu

キーワード：new fuels, alternative fuels, dimethyl ether, DME, bio DME, biomass, LCA, CO₂, standardization

1. はじめに

2008年7月11日に136ドル/バレルという史上最高値の達した原油価格の高騰は一息ついているが、我々の意識を変えるには十分なインパクトがあった。さらに2011年3月11日には東日本大震災が起り、当たり前のように使用してきた生活インフラがダメージを受け、非常時に起こり得る様々な混乱を経験した。以前より回収廃食用油からバイオディーゼル燃料を製造し公用車に使用してきた自治体では、給油所のガソリン・軽油品薄時にも自前のバイオディーゼル燃料で被災地へ支援物資を運搬できたという⁽¹⁾。電力供給のダメージを受けなかった地区では燃料供給混乱時に電気自動車活躍した。また、LPガス（オートガス）の燃料供給は震災後も比較的安定していた⁽²⁾そうだ。仮設住宅のエネルギー供給は、パイプライン不要でボンベ供給できるLPガスが威力を発揮する。度重なる余震から断水、停電、断ガスに備え、ミネラルウォーターやカセットコンロ、充電式電池用太陽光発電機などが飛ぶように売れた。オール電化住宅最盛期中、リスク分散、エネルギー供給分散の必要性を、これだけ真剣に考えさせられた経験は初めてではなかったらうか。

低炭素社会、すなわちCO₂排出量の少ない社会を実現するには、可能な限り原油の使用量を削減し、またそれよりもCO₂排出量の少ないエネルギーへと置き換えていく必要がある。また、供給量確保のため、オイルサンド等低品位オイルや石炭、天然ガス、シェールガス等非石油系エネルギーの液化利用等のパスも必要にならざるを得ない（図1参照）。エネルギーセキュリティと安全性確保を含めた『リスク分散』は、今後重要なキーワードとなる。

ここでは、燃料用ジメチルエーテル（DME）の利用・普及促進への取り組みについて最新の動向を紹介し、低炭素社会構築に対するDMEのポテンシャルを考える。

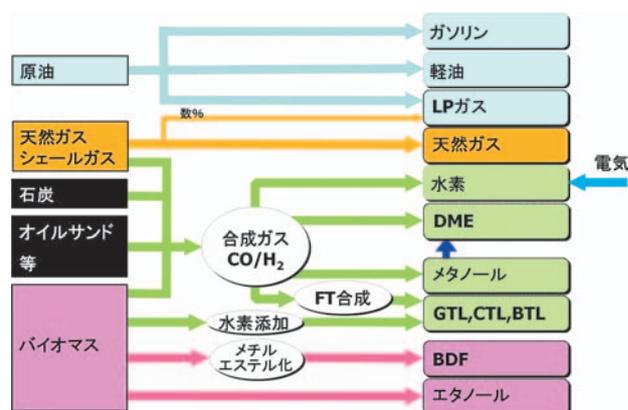


図1 資源と燃料

2. DME燃料利用に向けた国内外動向

DME（化学式：CH₃-O-CH₃）は炭素間結合がなく酸素のため燃焼時に粒子状物質（PM）をほとんど排出しないクリーンな燃料である。LPガスよりも低い約0.598MPaの加圧で液体となる液化ガスで、LPガスと混合して利用する場合、DMEの混合割合で20wt.%までは、シール材等の変更なく既存インフラやコンロ等既存の機器類が利用可能である。また、ディーゼル燃料として利用する場合、セタン価が軽油同等以上ありPM対策が不要なため、燃焼温度低減による窒素酸化物（NO_x）低減策が有効に適用可能で、高度な排気低減触媒システムを採用することなく厳しい排気規制をクリアすることが出来る。合成ガス（CO、H₂）を得ることができれば原料を特定する必要が無く、石炭・オイルサンド、天然ガス・シェールガス、バイオマスなど、あらゆる資源を原料として製造可能である。また、ディーゼル燃料のほか、LPガスや都市ガス代替としてのボイラやガスタービン、民生利用等に加え、水素キャリアとしても利用価値があり、マルチソース・マルチユースな燃料という点は、DMEの持つ最大のキャッチコピーといえる。ここでは、DMEの燃料利用に向けた最近の動向を紹介する。

2.1 日本国内における動向

燃料製造に関して、新潟市の燃料DME製造(株)による年産8万トンのDME製造能力を持つDME普及促進プラ

原稿受付 2010年10月19日

*1 独立行政法人 産業技術総合研究所
新燃料自動車技術研究センター 新燃料燃焼チーム
〒305-8564 つくば市並木1-2-1

ント（原料は天然ガス起源輸入メタノール）が2008年8月に完成し、新潟地区におけるボイラ用燃料の流通を主に現在稼働中である⁽³⁾。また、代エネ法（石油代替エネルギー促進法）の改正およびエネルギー供給構造高度化法（エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律）の成立⁽⁴⁾により、LPガスの主成分であるプロパンやブタンと蒸気圧の近いDMEをバイオマスから製造し利用することについて、LPガス業界の非化石エネルギー供給対応の対象として関心を寄せている。

新潟地区では、経済産業省資源エネルギー庁のDME燃料利用設備導入促進補助事業により、一正蒲鉾(株)と佐藤食品工業(株)がLPガスボイラおよび重油ボイラをそれぞれDMEに燃転し⁽⁵⁾、営業運転中である。一正蒲鉾(株)では2008年のDME普及促進プラントの営業運転開始とともに、将来的な燃料供給多様化を目的として、キノコ類の栽培センターへの熱源供給用既設LPガス仕様小型貫流ボイラ6基のうち、3基をDME小型貫流ボイラに代替した⁽⁶⁾。これまで50%の低燃焼条件で3,100～3,500時間、100%の高燃焼条件で1,250～1,400時間、経年変化もなくベースのLPガス仕様と同性能を維持し順調に稼働中とのことである⁽⁶⁾。佐藤食品工業(株)では、地球温暖化対策とメンテナンス性改善を目的とし、2010年に既設重油仕様小型炉筒煙管ボイラをDME仕様で代替した⁽⁶⁾。食品工場としては排出ガスの臭気も重要なファクターであり、製品への臭気付着防止にもDME燃料のメリットが生かされている。

DME自動車開発の動向としては、国土交通省「次世代低公害車開発・実用化促進事業」の一貫として交通安全環境研究所主導のもと大臣認定によるDME車両の走行試験がこれまで実施されており⁽⁷⁾、いすゞ中央研究所製の2トントラックは、総走行距離が10万キロを走破した（2009年9月）。同トラックは燃料供給系や噴射系、エンジン等各部の分解調査が実施され、DME自動車の技術基準策定に向けた有用な情報が報告された⁽⁸⁾。また、2009年規制（ポスト新長期規制）に適合し事業者登録（緑ナンバー）による実証営業走行試験を開始し

た2台の3.5トンウィングバントラック（図2参照）⁽⁹⁾は、2009年規制に適合しながら燃費はCO₂換算で2015年重量車燃費基準を達成している。同トラックはCO₂排出量換算で同クラスの軽油車と同等の燃費性能であることや、DMEに関する大きな不具合は発生していないことなどのデータを取得しつつ、順調に実証走行試験を重ねている⁽¹⁰⁾。これらの走行試験結果は、量産を可能とするDME自動車の技術基準策定のための同技術指針作成に反映される予定である。

2.2 海外の動向⁽¹⁾

図3に世界各国におけるDME製造プラントの稼働・計画状況を示す。計画段階や計画発表段階のものも多いが、種々の取り組みが実施されている様子が見えてくる。

1) 中国⁽¹¹⁾

急速な経済発展に伴い不足が見込まれる石油やLPガス需要を補填するため、資源も豊富な石炭を原料として安価なDMEを生産するということが、中国のエネルギー構造の現状に適合しているといえる。山東久泰エネルギーグループや新奥グループ等を筆頭に、2010年の中国国内DME生産能力は9,000～10,000 kトン/年と推定され、世界全生産能力の90%に匹敵する。一方、不十分な安全性確保や関連法規の整備不足などが原因と思われる事故も相次ぎ、普及促進に向けての課題も多い。

輸送分野では上海市内の路線バスにおけるDME自動車の実証試験が進められている⁽¹²⁾。

2) 韓国⁽¹³⁾

KOGAS（Korea Gas Corporation）によるプラントの海外進出が目覚ましい。300kトン/年のプラントをサウジアラビアに輸出・建設し、DMEとして輸入する計画を展開中である。DMEの用途はLPガスへの混合利用がメインであり、2013年末の国内利用開始を目指している。その他、モンゴルやベトナム、インドネシア、ミャンマー、オマーン、オーストラリア等への展開、技術協力など、計画段階のものも含めて非常に活発である。

3) サウジアラビア⁽¹⁴⁾

KOGASがAramco（サウジアラビアの国営石油会



図2 実証営業走行試験中のいすゞ中央研究所製3.5t積載ウィングバンDMEトラック



図3 世界各国におけるDME製造プラントの稼働・計画状況

社)と300kトン/年のDME製造プラントに関するMOU (Memorandum of Understanding, 覚書)を結び、2013年生産開始予定で全量を韓国へ輸出するという。

4) エジプト⁽¹⁾

国営石油化学会社EchemとカナダのMethanexとのメタノール合弁会社に中国の新奥集団が一部投資し、200kトン/年のDMEプラントを建設する。天然ガスからメタノールを製造するプラント (Mubarak Gas and Petrochemicals Complex, Damietta, 1300kトン/年、建設中)に隣接して設置予定とのこと。同国は38kトン/年のLPガスを消費し、うち20kトンは輸入に頼っている。輸入LPガスは国内天然ガスと比較し7割ほど価格が高く、家庭用LPガスにDMEを混合することでLPガスの対外依存度を下げることがDME利用の目的である。

5) 欧州⁽¹⁾

欧州バイオDMEプロジェクトでは、VOLVO (車両調達担当)、CHEMREC (DME製造・流通担当)、HALDOR TOPSOE (DME合成技術担当)、TOTAL

(燃料と潤滑性向上剤の仕様、フィールドテスト担当)、preem (流通担当)、DELPHI (燃料噴射システム担当)、ETC (実験とサンプリング担当)の7社がEUおよびスウェーデンエネルギー省による総額2,840万ユーロ(約35億円)の資金を基に、製紙工場の黒液を原料にバイオDMEを製造し、図4のような10台のDMEトラックの実証走行試験を2012年まで行う予定である。このプロジェクトの開始に際しては、VOLVOはあらゆる石油代替燃料についてライフサイクルを含めて比較評価し、次世代バイオ燃料の筆頭としてバイオDMEを位置付けている。なお、スウェーデンではバイオDMEによる運輸部門の石油依存度大幅低減を目指している。

6) インドネシア⁽¹⁾

多額の補助金が支出される民生用灯油利用からの脱却策としてLPガスへの転換が行われてきたが、このLPガスの需要を補填するエネルギーとしてDMEに着目している。石炭を原料とし800kトン/年の生産能力を確保すべく、石炭採掘やガス化技術を持つPT. Artu



図4 欧州バイオDMEプロジェクトのバイオDME製造プラントとボルボDMEトラック

MegaEnergiieや国営石油会社のPT. Pertaminaらが計画を進めているという。

7) モンゴル¹¹⁾

CBM (Coalbed methane, 石炭層中にあるメタンガス) を原料とした100～200kトン/年のDMEプラント建設 (KOGASの技術提供) が計画されている。自動車や民生用燃料としてウランバートルとその近郊に供給されるとのことである。

8) ロシア

ルシコフ前モスクワ市長のリーダーシップにより、2002年より市内の大気環境改善を目的としたDME自動車の導入政策が打ち出された。2007年時点では10台程度のレトロフィット改造DME車 (DMEと軽油の切り替え式バイフューエル車) が、学校給食の配送という形で走行試験をおこなった。その後数十台の実用走行を開始する予定¹²⁾とのことで、新型車両も導入されたようであるが、市長の退陣によりプロジェクトはストップしている様子である。

9) アイスランド¹³⁾

地熱発電による安価な電力を利用した水の電気分解による水素と、アルミ精錬工場から排出されるCO₂を原料とする、2014年完成を目指したDME製造計画がある。DMEの用途は船舶用重油燃料代替とのことである。

世界各所における、エネルギーとしてのDME利用への取り組みを見ると、その目的は逼迫する民生用エネルギー需要の補填という位置付けが最も多く、バイオDMEを含めた輸送用燃料の低炭素化、都市部の大気汚染対策と続く。プラント技術を持つ国が中東や東南アジアなど産ガス国に技術を供与し、自国のエネルギーセキュリティ確保に繋げるストーリーも見え隠れする。ただし、安価とはいえず石炭を原料としたDME製造を無作為に拡大するとCO₂排出量は増加する (次章参照)。CO₂回収・貯留 (CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage) やバイオマスの原料利用など、周辺技術と共にDME製造技術を提供していく必要性があるといえる。

3. ライフサイクルでのCO₂排出量の考察

前章では国内外のDME燃料利用・普及促進への取り組みを紹介し、各国の事情・状況、普及への筋書きがおよそ把握できた。資源を持たず、都市部の大気汚染対策はほぼ完了している我が国が、DMEを燃料として利用するストーリーがどこにあるか考えた場合、LPガス供給者のエネルギー供給構造高度化法対応、エネルギーの低炭素化による地球温暖化対策 (温室効果ガス (GHG: Green House Gas) 排出量低減)、製造・利用および安全管理技術など我が国のDME関連の高度な技術力の海外展開・技術協力、エネルギーセキュリティと安全性確保を含めたリスク分散などがキーワードに挙げられる。エネルギーの多様化に際してはライフサイクルでの

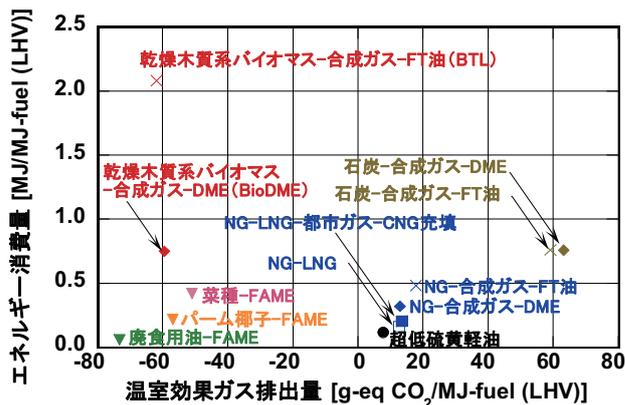


図5 各種自動車燃料のWell to Tank温室効果ガス排出量

GHG排出量の考慮は避けて通れない。

図5はみずほ情報総研とトヨタ自動車による、日本における輸送用燃料製造 (Well to Tank, すなわち、原料の採掘、採集から燃料製造、輸送を経て自動車の燃料タンクに供給される手前まで) を中心としたGHG排出量の試算結果¹⁵⁾を基に、現在考え得る主な内燃機関用燃料として、従来型燃料、代替燃料および新燃料についてグラフ化した物である。例えば、従来燃料である超低硫黄軽油では、1MJの燃料を製造するのに0.118MJのエネルギー投入 (消費) が必要で、このとき、Well to Tankで温室効果ガスを7.88g (考慮している全GHGをCO₂等価として) 排出する。この超低硫黄軽油よりも左に位置するものは発熱量等価の燃料を製造するときのGHG排出量は超低硫黄軽油と比較少なく、上に位置するものは同様に燃料を製造するときのエネルギー消費量が超低硫黄軽油と比較多く必要となることを意味する。バイオマスを原料とした場合、カーボンニュートラルの概念によりGHG排出量は削減できる。

スプレーの噴射剤等代替フロンとして利用され始めたDMEがエネルギー利用を検討され初めて十余年、当初はそのクリーンな燃焼特性のみが強調されてきた。地球温暖化対策による持続可能社会の構築が急務となっている昨今は、温室効果ガス低減に対しどれだけ寄与するかを評価せずに新エネルギーの普及は無いと言える。

図5のデータ元は輸送用燃料としての考察をベースにしているが、Well to TankでのGHG排出量について考えてみることで、他用途への利用時における燃料供給までのGHG排出量を議論してみたい。前述の図5によると、天然ガス (図中NGと標記) から合成ガスを経てDMEを製造する場合 (図中◆) は、1MJのDMEを製造するのに0.322MJのエネルギー投入 (消費) が必要で、このとき、Well to TankでGHGを12.9g排出する。同数値は、海外の天然ガス田で最も効率の良い直接合成法によりDMEに変換し、低温タンカーにより日本へ輸送してくる形態として算出されている。超低硫黄軽油 (図中●) には及ばないものの、天然ガスからLNGとして輸入し、都市ガスインフラを経由してCNGとして自動車

に充填する場合（図中■）と比較して、GHGの排出量は同等であることが示されている（エネルギー消費量はCNGの0.206MJ/MJ-fuel（LHL）に対しDMEは0.332MJ/MJ-fuel（LHL）と約1.6倍必要ではあるが。）。石炭を原料とする場合はCCS技術との組み合わせは必須といえよう。また、木質系バイオマスから合成ガスを得てDME（バイオDME）を製造する場合（図中◆）は、最終形態をフィッシャートロプシユオイル（FT油）とする（図中×）よりもエネルギー消費量を半分以下にすることができる。現状の技術から鑑みると、資源量が限定的で製造コストも高いバイオDMEを石炭や天然ガスを原料とする化石エネルギー起源DMEに微量でも混合していくのが一つの策といえる。同図のデータを基に算出すると、DMEのWell to TankでのGHG排出量を超低硫黄軽油並みにするためには、バイオDMEをおよそ10%混合する必要がある。

4. DME燃料の市場導入に向けた標準化動向

民生利用を含むDME燃料の国際間流通がいよいよ期待できる状況となり、ISO/TC28（LNGおよびLPG担当部会）のSC4、およびSC5において、2007年よりDMEも取り扱うこととなった。国際間流通時のサンプリングや計量方法を扱うSC5では日本が幹事国（幹事：日本海事検定協会）を務め、また、DMEの品質を担当するSC4では、幹事国フランス（幹事：TOTAL）のもと、工業用、発電用などの燃料としてのDMEの品質を唯一定義（TS K 0011, 2005年11月発行）していた（2007年当時）日本と共同で、DME品質基準を整備することとなった。著者はISO/TC28/SC4/WG13（Standardization of DME Fuel）、同WG14（Test methods of DME fuel characteristics）及びSC5/WG3（Procedures for measurement and calculation of refrigerated fluids）、同WG4（Sampling of refrigerated fluids）にExpertとして当初から参加中であり、2011年7月からは、退任したSC4/WG13の前コンビーナ（フランス）の後を引き継ぐ形で同コンビーナに着任した。

燃料としての国際標準化はDME燃料の国際間流通時の必要条件であり、これらの標準が整うことで、例えば安価な中国産DMEや、スウェーデン産バイオDMEを輸入することも不可能ではなくなる。その是非に言及するものではないことを念のため注記しておくが、国際市場の形成には必要な作業と言える。国内でのエネルギー利用に際しては、さらに高圧ガス保安法等関連法規の水素や圧縮天然ガス並みへの規制緩和が必要である。ここでは、ISOにおけるDME燃料関連標準化の進捗と、関連法規適用時の要検討項目を、一つの事例を用いて紹介する。

4.1 ISO/TC28/SC4（石油、石油系・非石油系液化ガス燃料等の品質と分類）

SC4ではWG13「Standardization of DME Fuel」が2007年に設置され、燃料用DME品質標準の議論が進められている。DME燃料用途の対象は、Heating fuel（工業用ボイラや家庭用コンロ等、LPガスのように使用する一般燃料）やディーゼルエンジン用燃料として使用するための、『ベースとなる燃料』の品質として議論中である。よって、ディーゼル燃料とするときに必要な添加剤や着臭剤などについては、各国の事情もあるため除外されている。2010年11月に新規案件（New Work Item）；NP16861として登録され、現在、Committee Draft（CD）に向け議論を継続中である。ベース燃料の規格が軌道に乗り次第、自動車用DME燃料の品質規格化を開始することも、同WG13のメンバーであるスウェーデン（VOLVO）と日本、中国の間で検討されている。

4.2 ISO/TC28/SC5（石油系・非石油系液化ガス燃料の計測方法）

SC5では、WG4「Sampling of refrigerated fluids」において2007年にDMEのマニュアルサンプリング方法の検討が開始され、2009年11月にISO 29945「Refrigerated non-petroleum based liquefied gaseous fuels - Dimethyl ether (DME) - Method of manual sampling onshore terminals」として発行された。また、2010年にはWG3「Procedures for measurement and calculation of refrigerated fluids」においてDME船上計量方法の検討が開始され、2011年9月現在、Committee Draftの投票中である。

4.3 DME燃料利用時の高圧ガス保安法と電気事業法の関連（可搬式DME発電システムの事例⁽⁶⁾⁽⁷⁾）

DMEを燃料とする燃料ボンベ内蔵型可搬式発電システムを作製する場合⁽⁶⁾を事例として、高圧ガス保安法ならびに電気事業法双方より適用され得る法規について整理する。

燃料としてDMEに適用される法規は、高圧ガス保安法、労働安全衛生法、消防法、建築基準法等多岐に渡るが、個々の事例では利用システムの用途が発電であるため、高圧ガス保安法と電気事業法が主たる要検討法規（表1参照）といえる。

1) 高圧ガス保安法関連

DMEは「高圧ガス」に該当する（高圧ガス保安法 第2条第三号）が、電気工作物内における高圧ガスについては適用除外を受ける（高圧ガス保安法 第3条第一項第六号）。すなわち本事例の発電システムについては、発電機の設置、運転、運搬時には高圧ガス保安法は適用されない。発電システム内部に搭載されている燃料タン

クからフィードポンプによりエンジンへDMEを圧送し、燃料噴射ポンプやサプライポンプによりインジェクタまで圧送しても、高圧ガス製造行為とは見なされず、高圧ガス製造設備としての手続きは不要となる。その一方で、耐圧構造等、電気事業法に則ったシステムとする必要がある。

但し、発電機の外部からDMEの充填作業を行なうことは高圧ガスの製造にあたり、事業所ごとに都道府県知事の許可が必要で、認可を受けた事業所以外では充填作業ができない（高圧ガス保安法 第5条第一項）。すなわち、可搬式でシステムを構築しても、必要に応じてパッケージを移動することはできるが、使用現場が高圧ガス製造所でない限り、使用現場において燃料充填をすることはできない。

表1 DMEを燃料とする発電システムに適用し得る関連法規

法 規
高圧ガス保安法 高圧ガス保安法施行令 一般高圧ガス保安規則 液化石油ガス規則 容器保安規則 コンビナート等保安規則
電気事業法 電気事業法施行令 電気事業法施行規則 電気設備に関する技術基準を定める省令 電気設備の技術基準の解釈 発電用火力設備に関する技術基準を定める省令 発電用火力設備に関する技術基準の細目を定める告示 発電用火力設備の技術基準の解釈について

2) 電気事業法関連

電気事業法ではDMEは「液化ガス」に該当する（電気事業法施行規則 第2条第一項第四号）。よって液化ガス設備に要求される法規を満足することが必要となる。ただし、同法規は発電所を対象としており、可搬式発電システムに液化ガスを燃料とした事例がないため、本事例を同法規上で解釈するのが困難な項目がいくつか発生する。法規をそのままの解釈とした場合の例と問題点を以下に示す。

事象1

法規：液化ガス設備は外面から発電所の境界線まで3m以上の距離を有するものであること（発電用火力設備に関する技術基準の解釈について 第50条第一項）。

問題点：発電所とは発電機そのものを示すが、本事例では液化ガス設備（すなわちDME燃料ボンベからエンジンまでの燃料供給設備）と発電所（すなわち発電機）が同一パッケージに内蔵されており、この法規をそのまま

適用しようとする、パッケージ内で燃料供給設備と発電機の間には3mの距離を確保しなければならない。この場合、少なくとも外形寸法は6m×6m以上となってしまう、可搬式ではなくなる。

事象2

法規：液化ガス設備の材料に属する容器及び管・・・（途中省略）・・・安全な化学的成分及び機械的強度を有し、かつ難燃性を有するもので無ければならない（発電用火力設備に関する技術基準を定める省令 第40条第一項）。問題点：「高圧ガス保安法、容器保安規則」を満足する燃料ポンベの使用を想定した場合（耐圧構造からすると、この方が一般的）、「電気事業法、発電用火力設備に関する技術基準を定める省令」に全て合致せず、例えば後者の方が高い耐圧構造を要求される。

本事例のようなDMEを燃料とする可搬式発電システムを実用化するには、適用事例のない電気事業法への対策を適切に施し、実証試験により安全性の検証を十分に行っていくことで、規制の緩和を求めていくことが必要といえる。

5. おわりに

2011年9月13日、第178臨時国会が召集され、野田首相は所信表明演説において、福島第一原子力発電所事故を踏まえてエネルギー政策を再構築するとし、来年夏を目標に「新しい戦略と計画」を打ち出す意向を表明した。原発ありきで高々と掲げた『2020年までに温室効果ガスを1990年比で25%削減する』という目標は、見直しを余儀なくされている。エネルギーセキュリティと安全性確保を含めた『リスク分散』と『地球温暖化対策』を一体化して取り組むこととなる。

今後は未利用バイオマスの高効率利用技術やライフサイクルでのGHG排出量評価など、分野を超えた技術融合・協力を進めながら、将来のエネルギーは『何から何を作りますか?』というストーリー作りを行っていきたいものである。

参考文献

- (1) 朝日新聞 “MyTown茨城” 2011年3月28日掲載記事、
<http://mytown.asahi.com/areanews/ibaraki/TKY201103270238.html>
- (2) 時事通信社2011年3月29日掲載記事
- (3) 燃料DME製造株式会社、
Web: <http://www.fueldme.com/>
- (4) 経済産業省資源エネルギー庁資料、“エネルギー供給構造高度化法について”
(Web: <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/koudoka/index.htm>), 2009年9月1日
- (5) DME普及促進センター、
Web: http://www.dmejp.com/center_subsidy.html

- (6) “DMEハンドブック追補”, 日本DMEフォーラム編, pp.99-101, 2011
- (7) 佐藤由雄ほか, “DME自動車の実用化・普及に向けた事業走行試験”, 自技会講演前刷集No.44-10, pp.5-8, 2010
- (8) 高瀬繁寿ほか, “小型DMEトラックの走行試験と実用性に関して”, 自技会講演前刷集No.44-10, pp.13-16, 2010
- (9) 国土交通省プレスリリース
http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha10_hh_000040.html
- (10) 徳丸武志ほか, “次世代低公害車としての事業用DME自動車の開発”, 自技会講演前刷集No.44-10, pp.9-12, 2010
- (11) “DMEハンドブック追補”, 日本DMEフォーラム編, pp.38-44, 2011
- (12) Zhen Huang, Wugao Zhang, Junhua Fang and Xinqi Qiao, “Shanghai DME Bus Demonstration: Recent Progress”, Presentation materials of 4th International DME Conference, held on 8 Sep. 2010 in Stockholm, Sweden
- (13) Wonjun Cho, “Introduction of KOGAS’ s Activities on DME”, Presentation materials of 4th International DME Conference, held on 8 Sep. 2010 in Stockholm, Sweden
- (14) 小熊光晴, 後藤新一, “DME (ジ・メチル・エーテル) 燃料”, 日本設計工学会東海支部シンポジウム「石油に替わるこれからの自動車燃料」資料, pp.9-29, (2007)
- (15) “輸送用燃料のWell-to-Wheel評価－日本における輸送用燃料製造 (Well-to-Tank) を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書－”, トヨタ自動車株式会社, みずほ情報総研株式会社, 2004年11月
- (16) 財にいがた産業創造機構, 「バイオ混合DME発電システムの実用化研究開発」, 平成19年度地域新生コンソーシアム研究開発事業成果報告書 (2008年3月)
- (17) “DMEハンドブック追補”, 日本DMEフォーラム編, pp.190-192, 2011

2 段復水ラジアル蒸気タービンの開発

Development of a two stage condensing radial inflow steam turbine

中野 晋^{*1}
NAKANO Susumu坪内 邦良^{*2}
TSUBOUCHI Kuniyoshi林 一堯^{*3}
HAYASHI Kazutaka白岩 弘行^{*3}
SHIRAIWA Hiroyuki山田 博行^{*3}
YAMADA Hiroyuki

ABSTRACT

A prototype machine for a 150 kW class two-stage radial inflow condensing steam turbine system has been constructed. This turbine system was proposed for use in the bottoming cycle of 2.4 MW class gas engine systems, increasing the total electrical efficiency of the system by more than 2%. The blade profiles of both high- and low-pressure turbines were designed with the consideration that the thrust force does not exceed 300 N at the rated rotational speed of 51,000 rpm. The gross power output of the prototype machine on the generator end was 150kW, and the net power output on the grid end which was extracted auxiliary power consumption was 135kW. The total electrical efficiency of the gas engine system was increased from 41.6% to 43.9%.

Key words : ラジアル蒸気タービン, 復水タービン, 排熱回収, 水潤滑軸受, スラスト力, Radial steam Turbine, Condensing turbine, Exhaust heat recovery, Water-lubricated bearing, Thrust force

1. はじめに

低炭素化社会の実現に向けて、エネルギー消費効率の向上、特に産業・民生分野における中期的エネルギー消費効率改善手法として、コージェネレーションを含む未利用排熱の利用促進が求められている⁽¹⁾。産業プラントや中小規模の廃棄物焼却施設では利用されずに排出されている蒸気が大量に存在するという調査結果も報告されており、圧力 1 MPa 以下の未利用低質蒸気の有効利用としての小型蒸気タービンの開発が期待されている⁽²⁾。また、ガスエンジン等の分散電源設備では、排熱からの温水回収と蒸気回収によって熱電併給の総合効率は 80% を上回るケースも多くなっている。しかし、全ての利用者が蒸気コージェネレーションを期待している訳では無く、電気利用のみを優先する場合も少なく無い。

本研究では、分散電源設備として 2.4 MW 級のガスエンジンを対象として、その排熱蒸気から 150 kW を発電する蒸気タービン発電システムの開発を目的とする。そ

の基本システム、プロト機の試作、及びそのプロト機による定格負荷試験結果について報告する。

2. ラジアル蒸気タービンの概要

2.1 タービンシステム

本蒸気タービンシステムのシステム系統図を図 1 に示す。タービンロータは、翼車と永久磁石式発電機ロータを一体化した構造を有する。システムは電気、蒸気、循環水、及び空気系統の 4 系統から成り立っている。

電気系統は系統電源、双方向電力変換器⁽³⁾、及び発電機を繋ぐラインから成る。起動時は系統側から電力を引き込み、電力変換器によって系統の商用周波数から発電機ロータの回転に合わせた周波数に変換して電力を発電機に供給し、発電機ロータを駆動する。タービン仕事が軸受損失、風損等のロータ損失を上回れば、発生電力を電力変換器で商用周波数に変換して系統側に送る。

蒸気系統は、0.78 MPa の飽和蒸気を高圧タービンと低圧タービンの 2 段で膨張させる。供給される蒸気に対してなるべく多くの出力を得ることを目的とするため、タービンは復水型とした。排気は復水器で常温水によって冷却され、復水後にホットウェルに一旦溜められ、復水ポンプでシステム外に排出される。

循環水系統は、双方向電力変換器、及び発電機ステー

原稿受付 2011年 2月18日

校閲完了 2011年 9月 3日

* 1 (株)日立製作所 日立研究所

〒319-1292 日立市大みか町 7-1-1

* 2 元 (株)日立製作所 電力・電機開発研究所

* 3 (株)日立エンジニアリング・アンド・サービス

タの冷却水と、水潤滑軸受⁽⁴⁾の潤滑水を供給するラインである。循環水ポンプによって送水された水は循環水冷却器によって除熱され、電力変換器、発電機、及び水潤滑軸受に供給され、再び循環水タンクに戻る。

空気系統は、発電機ロータの冷却空気とラビリンスシール部のシール空気を供給するラインである。

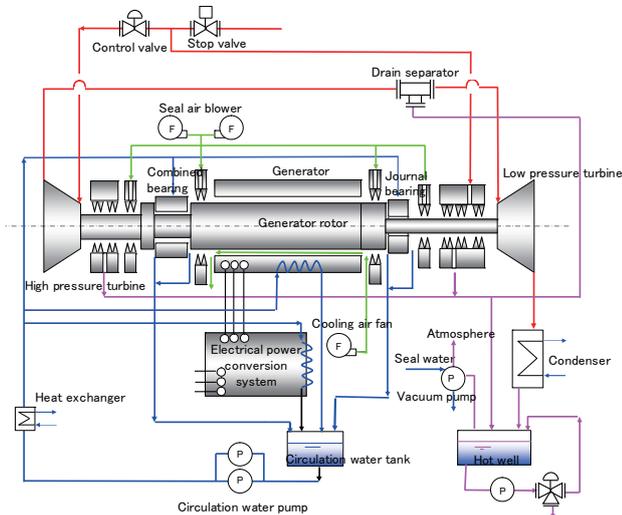


図1 タービンシステムの系統図

2.2 2 段階タービンの基本設計

タービン翼車形状の詳細設計の前段階として、高圧段と低圧段のタービン圧力比、回転数、タービン翼車外径等の基本仕様を決めなければならない。本開発のタービンロータは2段階タービンであるが、ロータ構造はできるだけ簡易な構造を目指した。つまり、両翼車に生ずる軸方向力の差を打ち消すようなバランスピストンやバランスディスクの設置を必要としない軸構造とした。このため、スラスト力評価を考慮して翼車の基本仕様を決定した。

タービンシステムの基本仕様として、高圧段と低圧段の負荷配分、各段の圧力比、及び各段のタービン断熱効率と出力を検討する。検討方法は参考文献(5)に記載されている基礎的な方法で実施した。すなわち、相似則を用いて過去の公開文献からの効率マップを参照して効率が高くなる条件を選定する。ここでは、タービンの圧力比、流量、入口蒸気温度、回転数を与え、タービン効率、出力、タービン外径を算出する⁽⁶⁾。

2.3 タービン翼車

システム基本設計結果から高圧段及び低圧段の概略仕様が決まった後に、それぞれの翼の詳細設計を実施する。

初めに1次元計算による性能予測を行う。与えられた出入口条件、回転数に対して、動翼出入口の速度三角形をチェックし、目標効率を達成する主要寸法を決定する。次に3次元翼形状の設計を行う。1次元性能解析から求

まる主要寸法を元に子午面形状、翼厚、翼角度分布により翼形状を決定する。最後に3次元粘性流れ解析を実施して静動翼一体形状でのCFDを実施して効率及び出力をチェックする。3次元粘性流れ解析結果により、流にはく離等の好ましくない状態が発生する場合は1次元性能解析に戻り好適な主要寸法の選定から再計算を実施する。流体解析によって決定された形状に対して、最後に強度解析と共振解析を実施する。これらの計算方法の詳細は参考文献(7)を参照されたい。

2.4 スラスト力

タービン回転軸に作用するスラスト力は、それぞれの翼車で、ハブ面側に作用する軸方向の力と、翼車背面に作用する軸方向の力のベクトル和で計算する。翼車のハブ面に作用する軸方向の力は、ハブ面での静圧をハブ面の軸方向投影面積で積分して得られる。ハブ面に作用する静圧分布をオイラー式に基づくと仮定して投影面半径の2次式で近似すると、ハブ面に作用する軸方向の力は、タービン入口静圧、タービン出口静圧、及び翼車出入口半径で表される⁽⁶⁾。翼車背面側に作用する軸方向の力も同様に求められるが、翼車背面の軸表面との接合部の静圧が必要になる。翼車背面の隙間流れを強制渦流れと仮定して軸表面との接合部の静圧を計算する⁽⁶⁾。

スラスト力は測定が困難な量のため、本研究では、軸受潤滑水の温度上昇からスラスト軸受の損失を測定し、その測定結果と軸受損失の計算結果との比較によってスラスト力を推測する。軸受損失の計算は、軸受水膜のレイノルズ方程式とエネルギー式から圧力及び温度分布を求め、軸受面に作用する摩擦力を計算する⁽⁴⁾。

3. 計算結果

3.1 設計条件

対象とするガスエンジンの出力を2.4MW、その100%負荷運転における排熱からの蒸気回収量を1.3MWと設定する。ボイラー給水温度を60℃とすると、蒸気圧0.78MPa、流量0.53kg/sの飽和蒸気を発生することができる。このガスエンジンの蒸気回収条件をタービンの設計条件にした。

発電機と発電機の回転数を制御する双方向電力変換器は既開発品⁽³⁾を適用する。発電機は設計許容トルク31.2Nmの永久磁石式ロータを用いおり、回転数51,000rpmで出力167kWを発電する。

3.2 高圧タービンと低圧タービンの圧力比

既存のラジアルタービンでは圧力比が4～5で比較的高効率を示している⁽⁵⁾。本開発では既開発品⁽³⁾のタービン圧力比4をベースとして設計を進めた。つまり2段階膨張の総圧力比を16とした。背圧は0.048MPaになる。

図2は、回転数51,000rpmで、2段の総圧力比を16として、高圧タービンの圧力比を変えたときのタービンの

総出力と発電機ロータに作用するスラスト力を示したものである。出力は高圧タービンの圧力比が2.5で最大となる。この時、低圧タービンの圧力比は6.4となる。スラスト力は高圧タービン側に軸が押される方向を正としているが、高圧タービン圧力比2.5ではスラスト力は-1200Nに達している。これは高圧タービンの圧力比が小さいためにタービン翼車径も小さく、翼車に作用する力が低圧タービン翼車に比べ少なくなるためである。今回開発したスラスト軸受の設計耐圧強度は1250Nであるが、実際の使用条件は、既開発品⁽³⁾の実績値を参考に300Nを使用の目安とした。

図3に高圧タービンの圧力比を4.0, 3.5, 3.0とした場合の両段のタービン断熱効率の計算結果を示す。高圧タービンの効率は、65,000rpm以上の高回転数域に最高効率点を示し、圧力比による効率の差異はほとんどない。一方、低圧タービンの最高効率点は46,000rpm以下の低回転数側に表れ、46,000rpm以上の回転数領域では、圧力比が小さいほど効率の低下が大きい。図2において、高圧タービンの圧力比2.5以上の領域では高圧タービンの圧力比が小さいほどタービン総出力は大きくなるが、これは、低圧タービンの圧力比の低下による効率低下が影響していると考えられる。タービンの総出力は、低圧タービンの圧力比の選定に依存していると言える。しかし、前述のように、スラスト力をこれまでの実績値の300N以内に抑えるために、高圧タービン圧力比は3.5を

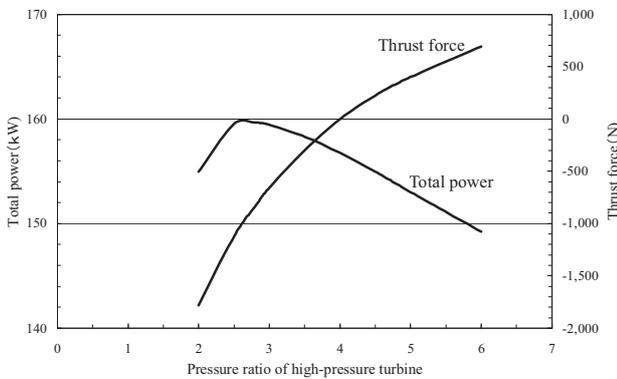


図2 タービン出力とスラスト力
(総圧力比：16, 回転数：51,000 rpm)

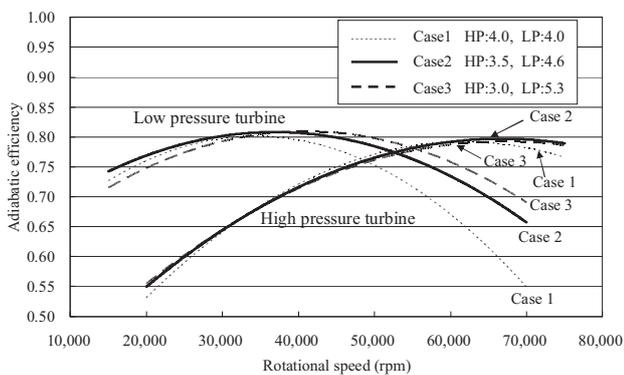


図3 タービン断熱効率

選定ポイントとした。

図4に高圧タービン圧力比3.5, 低圧タービン圧力比4.6として回転数に対するタービン総出力と総合熱効率を示す。総合熱効率の計算には、飽和水から飽和蒸気を生成するのに必要な熱量を基準値に取った。また、図には発電機出力の限界値も示す。図から、この圧力比の組合せタービンの最高効率点は回転数46,000rpmにある。しかし、この回転数ではタービン出力が発電機出力限界値を越えている。一方、発電機定格回転数から選んだ回転数51,000rpmでは、効率と出力はそれぞれの最高点から若干低下するものの、発電機限界出力に対しては裕度を持ったものになっている。

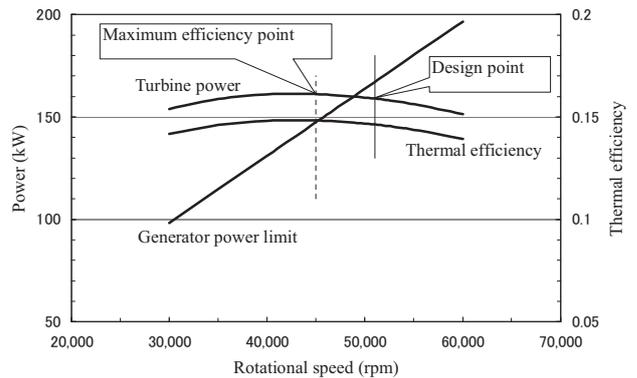


図4 タービン総出力と総合熱効率

3.3 タービン設計仕様と翼車形状

表1に本設計で決定した基本仕様を示す。高圧タービン出口で湿り度が6%になるため、この湿分を除去し、低圧タービンに飽和蒸気を供給する。低圧タービンへの蒸気流量は、除去された湿分だけ減少する。

本設計により製作したタービン翼車の写真を図5及び図6に示す。

表1 タービンの基本仕様

Items	Unit	High-pressure turbine	Low-pressure turbine
Inlet pressure	MPa	0.78	0.2
Inlet temperature	K	442.6	393.4
Mass flow rate	kg/s	0.53	0.5
Pressure ratio	-	3.5	4.6
Rated rotational speed	rpm	51,000	51,000
Diameter	m	0.154	0.184
Adiabatic efficiency	%	76.9	77.9
Wetness	%	6.0	6.5

3.4 スラスト軸受損失

図7に40,000rpmと定格回転数51,000rpmにおけるスラスト力に対するスラスト軸受損失の計算結果を示す。定格回転数では、スラスト力300Nで約1.76kWの損失を



図5 高圧タービン翼車の概観



図6 低圧タービン翼車の概観

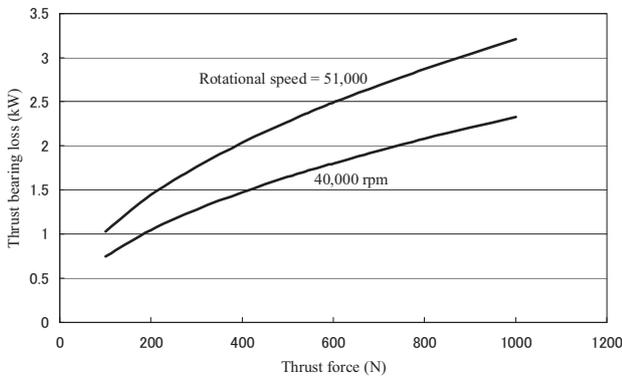


図7 スラスト軸受損失

発生する。もし、2.5 kWに達する軸受損失を発生する場合には、スラスト力は600Nに達しており設計基準の2倍になるため警戒の領域に達したものと判断できる。

4. 試験方法

4.1 運転方法

図8にプロト機の概観を示す。システムは双方向電力変換器を除き、図1に示した蒸気止弁から真空排気側のホットウェルまでをパッケージ化している。パッケージは2階で構成され、1階部分に循環水系の機器と、ホットウェルや真空ポンプ等の排気系機器を設置し、2階部分にタービン本体と復水器が設置されている。なお、双

方向電力変換器は別置きにされている⁽⁶⁾。

運転方法は、発電機ロータ回転前に循環水及び空気系統の補機類を起動し、続いて真空排気系の補機類を起動する。循環水及び冷却空気の流量及び供給圧力、排気圧力が規定値に達していることを確認してから発電機ロータを回転させる。モータリング駆動で定格回転数の12%回転数まで昇速してその回転数を保持する。ここで、蒸気流量制御弁を微開してタービン側に蒸気を供給し暖気する。暖気運転終了後は、定格回転数まで一定昇速率で昇速する。40%回転数通過後に蒸気流量制御弁の開度を増加させ、回転数の増加に伴い発電量を増加させる。定格回転数到達時に約33%負荷になるようにした。その後は、蒸気流量制御弁の開度を増加して所定の発電出力になるまで蒸気を供給する。

降速時は、冷機運転回転数を定格回転数の70%回転数として、降速開始前に、蒸気流量制御弁を絞り発電出力を10kW程度にしておく。降速率一定で回転数を低下させる。冷機運転回転数到達後は、蒸気流量制御弁を全閉にして、双方向電力変換器での回転数制御を開放してフリーラン状態で降速させる。発電機ロータの回転数が停止した後に、循環水系、及び空気系の補機類を停止する。

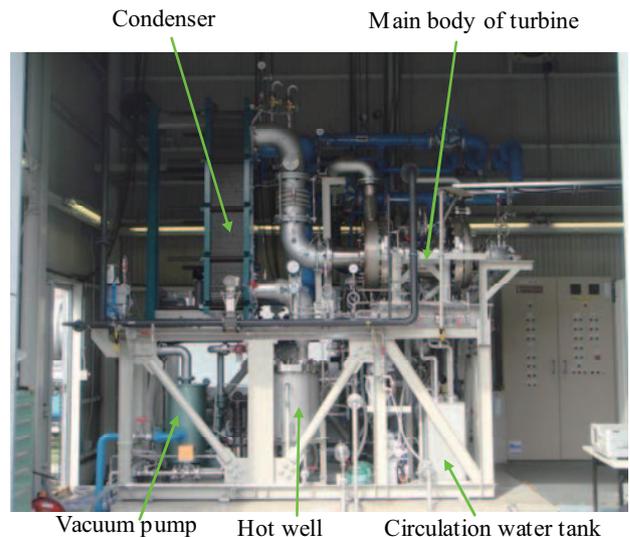


図8 プロト機の概観

4.2 計測方法

4.2.1 タービン性能

発電機出力は、発電機端での出力値（発電機端出力）と、双方向電力変換器端での出力（送電端出力）の2出力を、パワーメータ（横川電機製WT1600）で計測した。

タービン性能に関する計測項目としては、タービン出入口の圧力と温度、タービン入口での蒸気流量を計測した。圧力は半導体型圧力センサー（横川電気製FPシリーズ）を、温度はK型熱電対を用いて計測した。蒸気流量は、差圧式流量計（山武製MVC31）を用いた。

タービンの断熱効率 η_{ad} は式(1)で与えられる。式(1)で、

タービン入口の比エンタルピー h_m は全圧、全温の計測結果、及び蒸気表から求め、出口の比エンタルピー h_{ex} は式(2)から計算し、等エントロピー膨張した場合の出口での比エンタルピー $h_{ex,is}$ は出口圧と蒸気線図から求める。

$$\eta_{ad} = \frac{h_m - h_{ex}}{h_m - h_{ex,is}} \quad (1)$$

$$h_{ex} = h_{ex,sat}(1-y) + h_{ex,w}y \quad (2)$$

式(2)で y は湿度である。タービン出口側では湿度域に入るため、エンタルピーの算出には、圧力または温度の他、湿度の測定が必要になる。高圧タービン出口側での湿度は、高圧タービン通過後の凝縮水を計測して算出する。つまり、高圧タービン下流に設置されるドレンセパレータから排出されるドレン流量と低圧タービン入口での蒸気量を用いて算出する。

一方、低圧タービン出口側では装置のスペースの都合で、ドレン流量は計測できないため、湿度計⁽⁸⁾による湿度測定を実施した。計測方法はMieの散乱光原理に基づく光学計測手法で、散乱光強度分布や光の各波長の透過率分布を測定して水滴径分布と濃度分布を求める方法である。計測システムは、光源部 (Xenon lamp)、光ファイバーを内蔵するプローブ、信号処理用のパソコン、及び電源で構成される。図9にプローブ先端を示す。プローブ先端には外径18mm、長さ12mmのスロット部が設けられていて、ここを蒸気が通過する。このスロット部をはさんで反射鏡が設置されており、この間の光の透過率を測定する方式である。詳細は参考文献(8)を参照されたい。

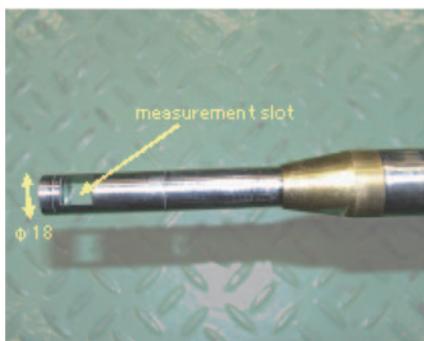


図9 湿度計のプローブ形状

4.2.2 スラスト力

発電機ロータに作用するスラスト力に関しては、直接計測することは困難なため、ここでは、軸受損失から算出する⁽⁴⁾。図10に示すように、軸受はジャーナル軸受とスラスト軸受を組み合わせたコンバインド軸受になっている。軸受に供給された潤滑水はジャーナル軸受を通過後、スラスト軸受の負荷側と反負荷側に分配される。軸受潤滑水の供給温度とスラスト軸受の負荷及び反負荷側の出口直近の排水温度を計測する。スラスト軸受の負荷

側と反負荷側の排水温度上昇の差からスラスト軸受負荷側の軸受損失を算出する。ジャーナル軸受及びスラスト軸受を通過した潤滑水は、それぞれの軸受損失の他に、軸受パッド間の空間で発生する攪拌損失、スラストカラーや軸表面を浸す潤滑水の摩擦せん断応力による損失により温度上昇する。この水温上昇値、潤滑水流量、及び水の比熱の積から損失の総量を算出する。負荷側と反負荷側に分配される流量が等しいと仮定すれば、スラスト軸受損失以外の損失は、回転数に依存するため、定格回転数での負荷側と反負荷側の軸受潤滑水排水温度上昇の差を用いて算出する損失は、スラスト軸受損失を表すことになる。得られた損失と、図7との比較からスラスト力を推定する。

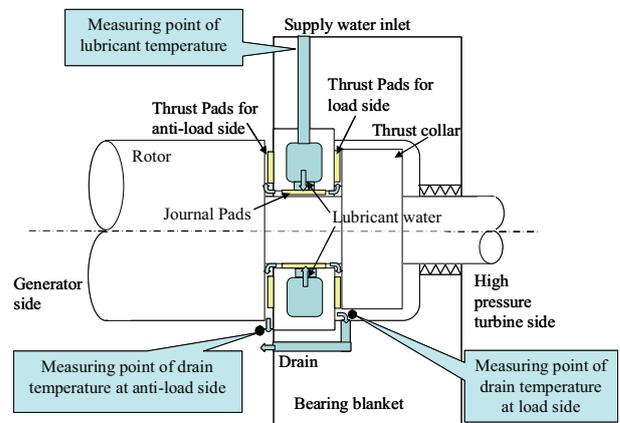


図10 コンバインド軸受の構造

5. 試験結果

5.1 タービン出力とタービン性能

図11に、回転数、発電機端と電力変換器端の発電出力、及び両出力の比から算出される電力変換器の変換効率を示す。暖気運転後、定格回転数到達時で約50kWを発電している。その後、蒸気流量を増加して、定格出力まで出力を増加させた。発電機端の出力が150kWに達した後、長時間に渡り、安定な出力を維持している。電力変換器の変換効率は、96%以上を達成している。

図12に高圧タービンの入口圧力と温度、及び蒸気流量を示す。また、図13に低圧タービンの入口圧力と温度、低圧タービン出口圧力、及び蒸気流量を示す。高圧タービン入口側の蒸気温度は、ほぼ設計温度に達しているが、圧力は0.7MPaと、設計圧力0.78MPaよりも0.08MPa低い。蒸気流量は設計流量を若干超過している。一方、低圧タービン側に関しては、蒸気温度、流量はほぼ設計条件に達しているが、入口圧力は0.18MPaと0.02MPa設計値よりも低い。

湿度の計測結果を表2に示す。高圧タービン出口の湿度は、ドレン水の測定値と低圧タービン入口蒸気流量から2.3%となり、また、低圧タービン下流の湿度は、湿度計による測定から5.4%となった。図14にエンタル

ピー・エントロピー線図上での高圧タービンと低圧タービンの熱落差の設計値と計測結果を示す。低圧タービン側に関しては設計値を上回る断熱効率80%を達成しているものの、高圧タービン側の断熱効率は約58%で、設計値76.9%の約75%程度に留まっている。図11に示したように高圧タービン側は、蒸気流量に関しては設計流量を若干超過しているものの入口圧力は設計圧力まで到達していない。今回の試験機はプロト機ということもあり、製作性を考慮してタービンケーシングは製缶品としたが、高圧タービンのノズル部のケーシング剛性が必ずしも十分でなく、0.5MPa以上の供給圧でケーシングの変形が発生することが分かった。このため、ノズル部で蒸気流量の漏れが生じたものと考えられる。この漏れによる入口圧力の低下と蒸気流量の増加が、高圧タービン側の性能低下をもたらしたものと考えられる。今後、タービンケーシングは鋳物化を行う等の高剛性化を図る。

今回の試験結果において、高圧タービン側の性能不足があったものの、発電機端において150kWを発電し、系統側では約143kWを得ている。補機電力は約8kWあり、補機電力を差し引いたタービンシステムの発電量は約135kWになる。これは、2.4MWのガスエンジンの発電効率41.6%を43.9%に向上させる出力である。高圧タービン側のケーシングの改良によりタービン入口圧力を増加させることで、発電機端出力を図4に示した160kWまで増加させることは可能と思われる。このとき補機電

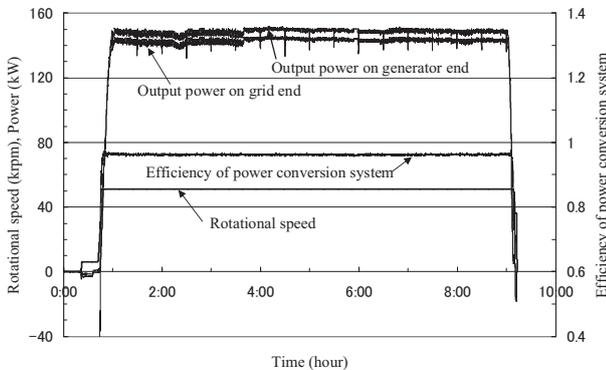


図11 タービンシステムの発電量

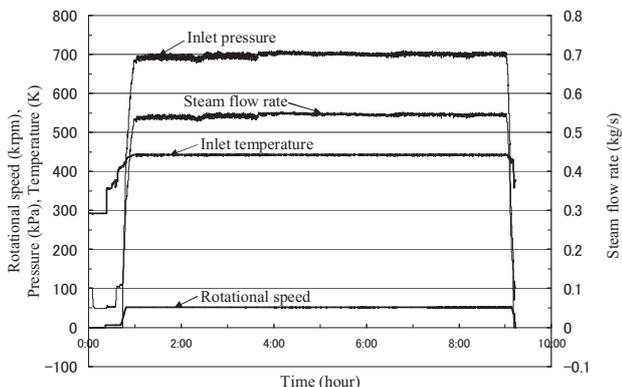


図12 高圧タービンの測定結果

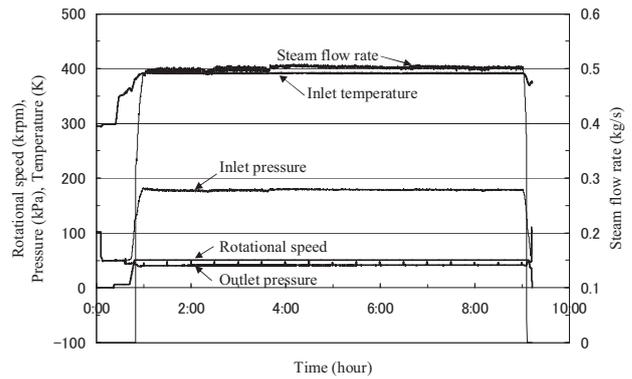


図13 低圧タービンの測定結果

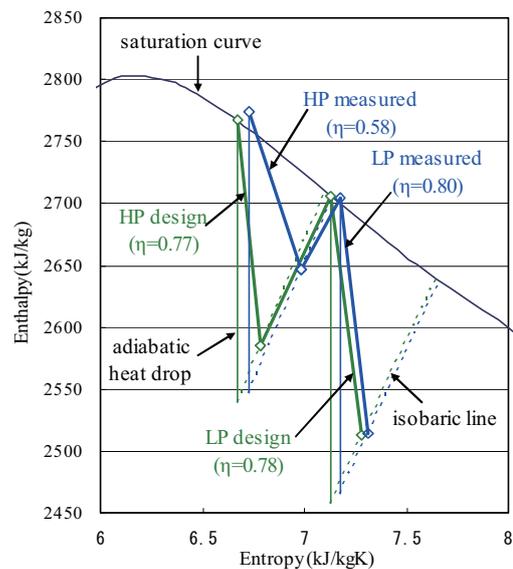


図14 タービンの膨張線図

表2 湿り度の計測結果

	Measurements (%)
High-pressure turbine	2.3
Low-pressure turbine	5.4

力を差し引いたタービンシステムの発電量は145kWとなり、ガスエンジンの発電量を44.1%まで引き上げることができる。

5.2 スラスト力

図15に発電機出力に対する軸受排水温度上昇の変化を示す。図15にはスラスト軸受が設置されるコンパインド軸受だけでなく、低圧タービン側に設置されるジャーナル軸受の排水温度上昇も示した。ジャーナル軸受の損失は回転数にのみ依存し、発電機負荷には依存しないため、定格回転数到達後は軸受排水温度上昇の変化はほとんど見られない。スラスト軸受の反負荷側の排水温度上昇も、発電機出力に対してほぼ一定である。しかし、負荷側排

水温度上昇値は約100kWまでは一定であるが、100kW以上の負荷に対して上昇を示す。スラスト軸受損失以外の損失が回転数依存であるため、この排水温度の上昇はスラスト力の増加を示すものと考えられる。

図16はスラスト軸受負荷側と反負荷側の潤滑水排水温度の差と、この排水温度差から算出したスラスト軸受損失を示したものである。潤滑水排水温度上昇値からスラスト軸受損失を算出する場合、軸受に供給された潤滑水の負荷側と反負荷側への流量分配率 α を知る必要がある⁽⁴⁾。コンバインド軸受の構造は負荷側と反負荷側で対象な構造であることと、また、類似構造の過去の実験からスラスト力が小さい場合、例えば150N以下の場合、潤滑水はほぼ等分に分配された⁽⁴⁾。ここでは、分配率 α を0.5と仮定してスラスト軸受損失を算出した。100kW以降、スラスト損失は増加し、定格出力150kW直前で、1.8kWを越える。その後、定格出力で0.8kWまで低下している。図7から軸受損失0.8～1.8kWはスラスト力100N以下～315Nに対応する。

次に分配率 α の差異による影響を調べる。類似構造の過去の実験から、スラスト力の増加により分配率 α は約0.45まで低下する⁽⁴⁾。負荷側の潤滑水排水温度上昇は100kW以上の負荷において顕著な増加が見られた。100kW負荷時点での排水温度上昇値を基準として、この温度上昇値との差と、分配率 $\alpha=0.45$ と仮定して算出した軸受損失を発電出力100kW以上の領域に▲で示し

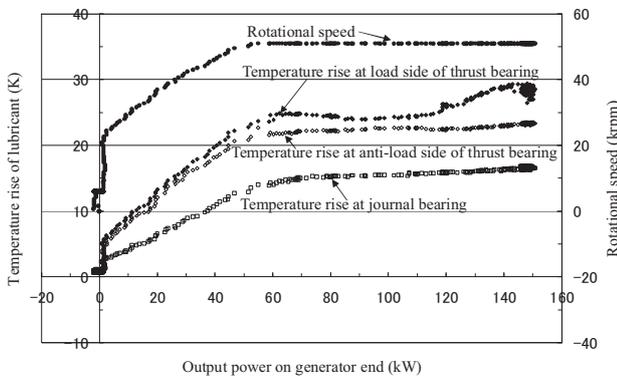


図15 発電機出力と軸受排水温度上昇

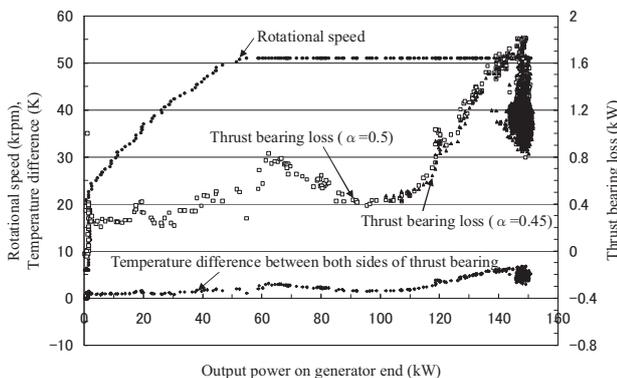


図16 スラスト軸受損失

た。結果は、分配率0.5を仮定して算出した軸受損失よりも若干小さい値を示す所もあるが、分配率0.5の結果とほぼ同等の値を示す。

図17は分配率0.5を仮定した軸受損失と高圧及び低圧タービンの入口圧力を時間に対して示した図である。図から軸受損失が1.8kWまで増加するのは、高圧タービン入口圧力が0.684MPaに到達した直後で、その後、入口圧力が0.700MPaまで増加すると軸受損失は0.8～1.2kW域まで低下している。定格出力150kWを発電している長時間の間、軸受損失は0.8～1.2kW域に留まる。この軸受損失は図7から100N以下～140Nの範囲で、定格出力域では、スラスト力は設計条件の300N以下を満足している。なお、今回の試験で、スラスト軸受の負荷面は高圧タービン翼車側であった。つまり、低圧タービン側に作用する軸方向力が高圧タービン側に作用する軸方向力よりも大きいことを意味する。高圧タービン側の圧力条件は、設計条件に達していないため、この圧力が増加することで、高圧タービン側に作用する軸方向力が増加し、スラスト力の更なる低減が図れるものと思われる。

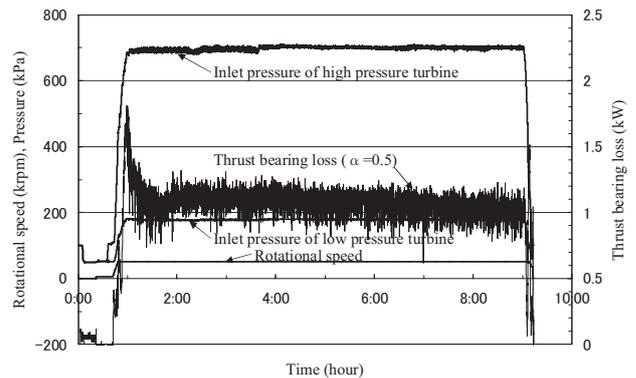


図17 スラスト軸受損失の時間変化

6. まとめ

2.4MW級のガスエンジン排熱蒸気を利用して発電する150kW級のラジアル蒸気タービンの基本設計を行い、そのプロト機を試作した。また負荷試験を行いその性能を確認した。

- (1) 定格出力時におけるスラスト力を300N以内に抑え、かつタービンの発電効率を高めるための圧力比として、高圧タービンの圧力比3.5、低圧タービンの圧力比4.6の2段復水タービンを試作した。
- (2) 負荷試験において、51,000rpmの定格回転数で、発電機端出力150kWの安定な出力を得た。
- (3) 発電機端で150kW発電時に、軸に作用するスラスト力が300N以下であることを確認した。

参考文献

- (1) 省エネルギー技術戦略2008について,資源エネルギー庁(2008-4).

- (2) 蓮池, フレキシブルタービンシステムの研究開発, 季報エネルギー総合工学, vol. 27, No. 3 (2004), 76.
- (3) Nakano, S. et al., Development of a 150 kW microturbine system which applies the humid air turbine cycle, GT-2007-28192, ASME Turbo Expo, (2007).
- (4) Nakano, S. et al., An advanced microturbine system with water-lubricated bearings, Int. J. Rotating Machinery, Vol. 2009, Article ID 718107, (2009).
- (5) Balje, O. E., Turbomachines - A guide to design, Selection, and Theory, John Wiley & Sons, Inc., Yew York, (1981).
- (6) Nakano, S. et al., A 150 kW radial inflow steam turbine system for the bottoming cycle of reciprocating engines, GT-2010-23231, ASME Turbo Expo, (2010).
- (7) Yagi, M., et al., Design and testing of the radial inflow turbine for a 150 kW microturbine system, IGTC2007-ABS-114, (2007).
- (8) Hesler, S., and Segawa, K., Benchmark testing of a low pressure steam wetness measurement probe in a model test turbine, 7th ERPI Steam Turbine/Generator Workshop and Vendor Exposition, Baltimore, 20-23, (2001).



震災考

船崎 健一*1

FUNAZAKI Ken-ichi

今期学会誌編集委員会委員長を拝命しております船崎健一（岩手大）です。この喫茶室では、学会の活動を支えてこられた名誉会員の方の貴重で示唆的なお話を中心に、いろいろな方々から寄せられた随想を掲載しておりますが、この号では、番外編？として、私が執筆の機会を頂戴する運びとなりました。

平成23年3月11日14時46分に宮城県沖を震源として発生した大地震は、東日本をはじめとして日本全体を物理的に激しくかつ長時間にわたり揺さぶっただけでなく、心理的にも深刻な動揺をもたらしました。地震に続いて発生した津波の大きさと被害は、当日仙台にいて、これまでに経験したことのない揺れで動き回る机の下で怯えていた私の想像をはるかに超えるものでした。とは言っても、私自身は地震直後の停電で津波の映像を見たわけではなく、ラジオでのニュースと、近くいた人のワンセグで知ったのですが、また、福島第一原発での冷却系統の停止とそれに伴う炉心のメルトダウン、水素爆発は世界をも震撼させ、現時点においても福島県を中心とした周辺地域に甚大な損失をもたらしています。最近のニュースでは、放射性物質の拡散は、関東以西まで及んでいた事実が公表されており、調査が進むと飛散地のさらなる拡大も懸念され、東日本大震災は現在も進行中の震災であるとも言えるでしょう。

前述のように私は震災当日ある学会に出席するため仙台にいました。昭和53年6月12日に発生した宮城県沖地震も今にも倒壊しそうな安アパートの中で体験しておりますが、その地震をはるかに凌ぐ、大きく長い揺れでありました。宮城県沖地震では、建物の倒壊もあり、またブロック塀の転倒などによって多くの死傷者を出しました。今回の震災でも落下物等による死傷者数はゼロではありませんでしたが、幸いにして建物や交通機関などでは揺れによる大きな人的被害がでることもなく、耐震設計基準の見直しや耐震補強工事がある程度有効に機能していたことが示されました。新幹線も無事緊急停止に成功しており、その点では科学技術は果たすべき役割を果たしたと言えるでしょう。しかし、福島第一原発だけはまったく別で、あってはならない最悪の事態を招いてしまいました。また、津波に関して、岩手県から宮城県北部にかけての津波多発地域である三陸海岸にある防潮堤を乗り越えただけでなく、津波に対する備えの手薄な宮城県の平野部にまで津波が入り込み、信じがたい数の死者を出す大惨事となりました。「想定外」という言葉では片付けられないこれらの事態は、「科学技術の敗北」とさえ言われています。

さて、この大震災をどう受け止めるべきか、どう今後に生かしていくべきか、「敗北」をどう乗り越えるべき

か、これらのことについて考えることは、地震や津波などの自然災害から逃れることの出来ない日本で生活を営む私達にとって重要な課題であり、震災で失われた多くの尊い命を無駄にしないためにも、責務でもあると言っても過言ではないでしょう。しかし、複雑かつ高度化している社会システムの実態や日本の財政状況を考えると、この課題は実に重く難しい。被災地の復興だけをとって考えても、繰り返される地震や津波にいかにも備えるべきかについての議論がようやく始まった段階であり、復興に要する予算規模に対する被災地の産業構造や人口動態予測を踏まえると、簡単に復興への答えがでると思えません。その意味では暗澹たる気持ちになるのですが、一つ確かな思いが、震災以後私の中に宿っています。それは、若い世代への期待と彼らへの適切な教育の重要性です。

仙台で被災し、避難所生活をわずか2日間だけ経験した筆者ですが、生命の安全性の確保と仙台からの脱出方法を考えるのに頭脳のはほぼ全てを使ったことによる憔悴感と事態の深刻さとあいまって、震災直後はかなり気持ちが落ち込んでおりました。しかし、大学生の屈託のない笑顔とひたむきさはそのような私に相当の元気を与えてくれるとともに、改めて若い世代が日本の希望であることを知らせてくれました。この宝をこれからの厳しい状況の中でどう育てて行くか、教育に携わるものとして身の引き締まる思いとともに責任の重さを痛感する次第です。

最後に、「震災は…」でおなじみの寺田寅彦が震災と教育のあり方について述べた言葉を、少々長いですが、引用してこの拙文を締めくくりたいと思います。

「しかし、昆虫はおそらく明日に関する知識はもっていないであろうと思われるのに、人間の科学は人間に未来の知識を授ける。この点はたしかに人間と昆虫とでちがうようである。それで日本国民のこれら災害に関する科学知識の水準をずっと高めることが出来れば、その時にはじめて天災の予防が可能になるであろうと思われる。この水準を高めるには何よりも先ず、普通教育で、もっと立入った地震津浪の知識を授ける必要がある。英独仏などの科学国の普通教育の教材にはそんなものはないと云う人があるかもしれないが、それは彼地には大地震大津浪が稀なためである。熱帯の住民が裸体で暮しているからと云って寒い国の人がその真似をする謂われはないのである。それで日本のような、世界的に有名な地震国の小学校では少なくとも毎年一回ずつ一時間や二時間くらい地震津浪に関する特別講演があっても決して不思議はないであろうと思われる。地震津浪の災害を予防するのはやはり学校で教える「愛国」の精神の具体的な発現方法の中でも最も手近で最も有効なものの一つであろうと思われるのである（津浪と人間）http://www.aozora.gr.jp/cards/000042/files/4668_13510.html」

原稿受付 2011年10月21日

*1 岩手大学工学部

〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

第39回日本ガスタービン学会定期講演会 先端技術フォーラム 「低炭素社会に向けたエネルギーシステムのデザイン」報告

中田 俊彦 東北大学

はじめに、司会の中田から、本フォーラムの概要と趣旨説明があった。「低炭素社会に向けた技術革新と変遷」と題して、温室効果ガス排出量の大幅な削減を想定した場合のエネルギーシステム設計の重要性について、具体的なデータやグラフを用いて紹介がなされた。過去100年から現在に至る一次エネルギー供給の構成変化から始まり、エネルギーフロー図およびカーボンフロー図の日米比較からわかる利用形態の違いなどを説明し、続いてエネルギー経済モデルの種類とモデル解析から得られる知見がシステム設計にてきわめて重要な役割を担うことを強調した。さらに、今後期待されるイノベーションの理解について、学習曲線Learning curveが示す過去の変遷は、未来の動向について大きな示唆を与えることを示すとともに、研究開発に伴うイノベーションの効果をモデル化する手法について、太陽電池のコスト低減の試算例を紹介した。

続いて、園山実氏（三菱総合研究所）は、「エネルギーモデルにもとづく将来需給展望」と題して、エネルギーモデルMARKALを日本に応用したシミュレーション事例を含めて発表した。いわゆるシナリオ研究として、コスト最小化など目的を設定することによって、その目的を満たすための最適なエネルギー構成が定量的に得られるのが特徴である。今後の新技術の導入可能性、温室効果ガス排出量の制約、一次エネルギー供給の選択肢など、関連する多様な要素を考慮した場合の将来動向を、解として得ることができる。従来主流だった希望的推測にもとづくエネルギービジョン策定から、汎用性のあるモデル解析に基づくエネルギー構成予測に、大きく飛躍する可能性を秘めていることが明らかにされた。

亀山寛達氏（東京ガス）からは、「低炭素社会における天然ガスの役割と水素への期待」について講演がなされた。炭素排出原単位のもっとも小さい天然ガスをエネルギーキャリアとするガスエンジンやガスタービンの燃焼機器と固体高分子型・固体電解質型燃料電池、これらに太陽光発電や太陽熱利用なども組み合わせて各要素機器の特徴を活かす、分散型エネルギーネットワークを提案した。従来の分散型電源から、ネットワーク機能へ拡張するスマート化の考え方、これに二次エネルギーである水素を加えて、燃料電池自動車など輸送分野まで展開する構想を紹介した。水素は、当初はガス等化石燃料の

水蒸気改質で賄いつつ、将来は海外も含めてグリーン電力の水電解から供給する構想など、電力ネットワークで閉じるのではなく、熱や輸送用燃料まで含む、真のエネルギーグリッドへの発想の展開を力説した。

山中康明氏（IHI）は、「石炭火力のCCSレディとCCS技術開発」について講演があった。炭素排出原単位のもっとも大きな石炭を対象として、埋蔵量の豊富な利点を活かせる新しい技術開発の紹介がなされた。欧州EU指令にて先行する、新設火力発電所に対するCaptureレディの考え方を事例に挙げて、二酸化炭素の分離・貯蔵といった付加機能を備える石炭火力発電所の設計指針を概説した。また、オーストラリアで先行するCallide酸素燃焼プロジェクトの進捗状況、700℃級超々臨界圧発電への酸素燃焼の適用など、さらに高効率化と低炭素化を両立させるプロジェクトへの意気込みを伝えた。当然ながら、プラントシステム全体としての経済性は、将来予想されるカーボンペナルティの大小によっても大きく影響されるものの、技術面でトップランナーになるべく開発プロジェクトに取り組んでいる現況を報告した。

最後に、会場からの質疑応答を含めて討論した。本先端技術フォーラムでは、最先端の技術開発に取り組む各種プロジェクトの最新情報と、それらの底流にある低炭素化と経済性の両立、さらに将来へのエネルギービジョンを客観的に設計可能なエネルギーモデル手法など、従来にない幅広い観点から議論できた。優れた要素技術のイノベーションの追求と、社会システムにそれらを具体的に実装する方策、日本発の火力技術の海外展開など、エンジニアとして立ち向かう領域の拡がりを実感させる場となった。

以上のように、優れた個別技術をエネルギーシステムの要素として捉える発想への転換。目的は、要素技術の高性能化ではなく、社会システム全体としての高性能化にあり、部分最適化から全体最適に移行する設計思想の台頭。その概念を支援するツールとして、エネルギーモデルによるシステムデザインの研究が欧米で先行している。もの作りから仕組みづくりへのパラダイム転換が、火力技術の現場を疾風している。標準化やマネジメント規格などの、目に見えない潮流を敵とせず武器とする、そんなスーパーエンジニアの出現を期待したい。

第39回日本ガスタービン学会定期講演会 先端技術フォーラム「ガスタービン燃焼関連分野における 最近の研究 ～不安定な燃焼を安定させるには？」報告

古谷 博秀 (独)産業技術総合研究所

2011年7月7日、七夕の日に長野県松本文化会館で開催された第39回日本ガスタービン学会定期講演会において、昨年に引き続き「ガスタービン燃焼関連分野における最近の研究」として先端技術フォーラムをおこなった。本年は、その副題を「不安定な燃焼を安定させるには？」とし、ガスタービン燃焼器内で起こる不安定現象とその対策について議論をおこなうこととした。

基本的には本フォーラムは、学術講演会委員会が立案したものだが、総司会として小生もその企画作りに参加し、事前にガスタービンメーカー各社にアンケート調査を実施するなど、新しい試みを盛り込みつつ準備を行った。フォーラムの進め方としては、大学や研究所からこのトピックに関わる講演をしていただき、その後、ガスタービンメーカーの燃焼器開発者を交えて、パネルディスカッションの形式で、産学両者の視点からこの問題を見つめ、議論を進める形とした。

まず、はじめに、現燃焼学会会長でもある広島大学の石塚悟先生から、循環燃焼を利用した希薄燃焼の安定化技術について講演をいただいた。通常では安定に燃焼させることが難しい希薄予混合燃焼をきれいに制御し、安定した燃焼を得る手法について解説いただいた。次に、東京工業大学の店橋護先生に、不安定性の源ともいえる乱流燃焼について、詳細反応を考慮したダイレクトシミュレーションと実験の結果を駆使して、その取り扱いについての複雑さ、問題点などについて、解説いただいた。実は私の不手際で店橋先生はパネルでの講演だけとっておられたのを、1時間でこの講演を用意いただい

たというハプニングがあったが、先生の講演はハプニングを感じさせない充実した内容であった。そして、講演の形としての発表としては、最後になるが、JAXAの立花繁氏に希薄予混合ガスタービン燃焼の圧力変動、燃焼不安定性についてということで、燃焼器の不安定性に関する研究の歴史、現在の対策のトレンドから、JAXAが手がけている最新の解決手法について発表をいただいた。豊富な内容がわかりやすく解説され、パネルディスカッションをはじめる前のプレゼンテーションとしてうまく流れを作っていた。

休憩の後には、石塚先生の司会で、パネルディスカッション形式でさらに議論を掘り下げていった。まずは、日立の井上洋氏、川崎重工の木下康裕氏、三菱重工業の斉藤圭司郎氏、IHIの藤森俊郎氏から燃焼器の不安定性の問題点とこれまで各社で取り組んでこられた対策技術について話をしてもらった。どの講演も、なかなか聞くことの出来ない、貴重な話をしていただいた。非常に議論が盛り上がったため、時間が足りなくなった感はあるが、その後、事前に実施していたアンケートを基に、各メーカーが学会や大学などに期待する項目、今後のこの分野での産学官の取り組みの可能性について議論を交わした。13時から16時までの非常に長いフォーラムではあったが、各参加者が豊富に情報を提供していただいたため、かえって時間が足りない状況であった。このフォーラムが本分野の産学官の連携に少しでも貢献できればと思いつつ、フォーラムを終了した。



写真1 フォーラムの会場の様子



写真2 各パネリスト

2011年度 第2回見学会のお知らせ

2011年度第2回見学会を、産業技術総合研究所と宇宙航空研究開発機構にて、下記の通り開催いたします。奮ってご参加下さい。

1. 日 時

2011年12月16日(金) 12:30～17:00

2. 場 所

- ・独立行政法人 産業技術総合研究所 (AIST)
つくば東事業所 (茨城県つくば市並木1-2-1)
- ・独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
筑波宇宙センター (茨城県つくば市千現2-1-1)

3. スケジュール

- 12:30 つくばエクスプレス線つくば駅に
集合、貸切バスで移動
- 12:50～14:20 産業技術総合研究所 見学
固体高分子形可逆燃料電池、エ
ジェクターを用いた燃料リサイク
ルSOFC、水素リッチ燃料の燃焼
実験、非接触吸着デバイスなど
- 14:30～16:40 宇宙航空研究開発機構 見学
展示館スペースドーム、国際宇宙
ステーション・日本実験棟「きぼ
う」の運用管制室など
- 17:00 つくばエクスプレス線つくば駅で
解散

4. 参加要領

- (1)参加資格：日本ガスタービン学会員に限る。
- (2)定 員：30名 (申し込み多数の場合、お断りする
可能性があります。)
- (3)参 加 費：(送迎用の貸切バス代を含みます。)
正会員 4,000円
学生会員 2,000円
- (4)集合場所：後日参加者にご連絡します。
- (5)そ の 他：JAXAでは、高いセキュリティ区分の施
設を見学するため、参加者の本人確認が
必要となります。当日、運転免許証やパ
スポートなどの身分証をお持ち下さい。
また、事前に名簿を提出するため、申し
込み後の参加者変更はできません。
- (6)申込方法：下記の申込書に必要事項をご記入の上、
11月30日(水)までにFAX・郵送・E-mail
にて学会事務局にお送り下さい。

見学会参加申込書

申込締切日 2011年11月30日(水)

開 催 日 2011年12月16日(金)

公益社団法人 日本ガスタービン学会 行

FAX : 03-3365-0387 TEL : 03-3365-0095 E-mail : gtsj-office@gtsj.org

氏名		G T S J 会員番号	
自宅住所 (身分証の住所)	〒		
勤務先/学校名			
勤務先/学校 住 所	〒		
T E L		<input type="checkbox"/> 自宅	<input type="checkbox"/> 携帯 <input type="checkbox"/> 勤務先
F A X			
E-mail			

GTSJガスタービンセミナー（第40回）のお知らせ

「ガスタービンの最新技術動向およびエネルギー資源の展望」をテーマに、第40回ガスタービンセミナーを下記の通り開催致します。学会の会員、非会員を問わず、皆様のご参加をお待ちしております。

1. 日 時 : 2012年1月19日(木) 10:00~17:20 (受付開始9:30)
1月20日(金) 10:00~16:40
2. 場 所 : (株) IHI 横浜事業所 横浜ゲストハウス
横浜市磯子区新中原町1 (JR根岸線 新杉田駅より徒歩10分)
*会場地図は、日本ガスタービン学会ホームページに掲載。
3. 主 催 : 公益社団法人 日本ガスタービン学会
4. 協 賛 : エネルギー・資源学会, 可視化情報学会, 火力原子力発電技術協会, 計測自動制御学会, 高温学会, 自動車技術会, ターボ機械協会, 電気学会, 天然ガス導入促進センター, 日本エネルギー学会, 日本ガス協会, 日本機械学会, 日本金属学会, 日本航空宇宙学会, 日本航空技術協会, 日本材料学会, 日本セラミックス協会, 日本鉄鋼協会, 日本伝熱学会, 日本内燃機関連合会, 日本内燃力発電設備協会, 日本燃焼学会, 日本非破壊検査協会, 日本品質管理学会, 日本マリンエンジニアリング学会, 日本流体力学会, 腐食防食協会, 溶接学会
5. セミナープログラム テーマ: 「ガスタービンの最新技術動向およびエネルギー資源の展望」

第1日目〔1月19日(木)〕

※講演時間には質疑応答の時間を含む。

「セッションⅠ：最新技術動向（1）」			
1	GT吸気冷却装置の開発と実機適用	10:00-11:00	(株) 東芝 福武 英紀 氏
2	最新の発電GT用高温材料の動向 (SC材を中心に)	11:00-12:00	(株) 日立製作所 吉成 明 氏
「セッションⅡ：最新技術動向（2）」			
3	Rolls-Royce latest product line and technology trend towards the future (弊社の最新製品と技術開発の方向性)	13:00-14:00	ロールスロイスジャパン(株) 小山 大祐 氏
4	高推重比ターボファンエンジン構成要素の試験研究	14:00-15:00	防衛省 山根 秀公 氏
5	航空機エンジン部品の修理技術開発の現状	15:20-16:20	(株) JAL エンジニアリング 中野 剛 氏
6	放電のエネルギーを利用した新コーティング技術MS Coatingの適用の現状と課題	16:20-17:20	(株) IHI 落合 宏行 氏

第2日目〔1月20日(金)〕

「セッションⅢ：最新技術動向（3）」			
7	クリーンエンジン技術と将来展望	10:00-11:00	(独) 宇宙航空研究開発機構 二村 尚夫 氏
8	世界のエネルギー資源の動向調査	11:00-12:00	(財) 電力中央研究所 小沢 靖 氏
「パネルディスカッション」			
9	旅客機関連技術の進化と液体燃料資源の将来	13:00-16:40 (途中休憩含む)	座長 吉田 英生 氏 (京都大学) パネリスト 鈴木 真二 氏 (東京大学) 松並 孝次 氏 (日本航空) 本村 真澄 氏 (JOGMEC) 椿 範立 氏 (富山大学) 松尾 雄司 氏 (日本エネルギー 経済研究所)

6. セミナーの内容

(1) 「GT吸気冷却装置の開発と実機適用」

(株) 東芝 福武 英紀 氏

夏場の電力需給逼迫対策としてガスタービンの出力向上を図れる吸気加湿冷却が期待されている。鍵となる噴霧ノズルへの要求は、圧縮機翼エロージョンリスク低減を目的とした微粒化である。当社にて超高圧下での運用においても長寿命で優れた噴霧特性を持つ噴霧ノズルを開発完了しており、更に翼エロージョン特性の評価試験を計画しているので報告する。また、当社にて今夏に実機適用した吸気加湿冷却の納入事例についても紹介する。

(2) 「最新の発電GT用高温材料の動向 (SC材を中心に)」

(株) 日立製作所 吉成 明 氏

燃焼ガス温度の高温化に伴い、最新のガスタービンでは、単結晶材が実用化されており、今後更に普及していくものと考えられる。単結晶翼は高効率化のキイ技術ではあるが、低コスト化のためレアメタルの削減、歩留まり向上が求められている。本講演では単結晶材を中心に最新の耐熱材料の開発状況、及び自社ガスタービンでの実証試験結果について紹介する

(3) 「Rolls-Royce latest product line and technology trend towards the future (弊社の最新製品と技術開発の方向性)」

(ロールスロイスジャパン(株) 小山 大祐 氏)

弊社は、長年にわたり各種の市場にガスタービン製品を投入して居ります。A380用エンジンであるTrent 900以降、技術革新が急速に進みBoeing 787 Dreamliner用エンジンであるTrent 1000は2011年秋に商業運行が日本で開始、次いでA350用エンジンであるTrent XWBへと新製品の開発と市場投入は続いています。今後も、果敢に新技術の採用に取り組む弊社の姿勢を、最新の製品群と将来への技術開発の方向性を述べることを通じてご紹介したいと思います。

(4) 「高推重比ターボファンエンジン構成要素の試験研究」

(防衛省 山根 秀公 氏)

戦闘機用エンジンクラスの高推重比ターボファンエンジンの試作に先立つ構成要素の試験研究において、要求性能の達成に重要な技術の実証や基礎データの取得を行い、エンジン本体の事業リスクの低減及び将来的な技術力の蓄積を図った。試作した構成要素は高負荷化・小型軽量化・高温化したリグ試験モデルと試験用部品である。アフターバーナ付エンジンの研究開発の経緯を振り返るとともに、研究の概要を紹介する。

(5) 「航空機エンジン部品の修理技術開発の現状」

(株) JAL エンジニアリング 中野 剛 氏

民間航空機用ジェットエンジンでは、新エンジンが開発される毎に部品価格の上昇が顕著であり、部品廃棄時のコストインパクトが大きくなってきている。加えて、近年製造メーカーマニュアルでは修理不可とされる部品が増加しつつあり、高額なエンジン部品の修理技術を如何に開発し、整備コストを削減出来るかが、航空会社の経営上、重要な要素となっている。ここでは日本航空に於ける修理技術開発の現状についてご紹介する。

(6) 「放電のエネルギーを利用した新コーティング技術MSCoatingの適用の現状と課題」

(株) III 落合 宏行 氏

めっき、溶射、溶接などに代わる耐摩耗性に優れた高品質な機能性被膜を安定的に形成する技術、MSCoatingを開発し、この技術を航空エンジン部品および一般産業部品に適用するため、適用開発を進めている。民間航空エンジンでは、高温耐摩耗特性を実現して実機に適用されている。高温耐摩耗性、アブレイシブ性、耐エロージョン、耐酸化性など、色々な機能を実現できる新技術である。適用事例とその性能を紹介する。

(7) 「クリーンエンジン技術と将来展望」

(独) 宇宙航空研究開発機構 二村 尚夫 氏

グローバル化が進む現代の社会において、旅客、物流の両面で航空輸送は日常的に我々の生活に入り込んでいる。航空輸送量の伸びは、それに対する環境規制の強化を乗り越えるための技術的解決策が模索されている。JAXAでは2003年より「クリーンエンジン技術の研究開発」として、ジェットエンジン騒音の低減、排気エミッションの低減、CO₂消費の低減を進めている。研究の現状と将来の方向性などについて講演する。

(8) 「世界のエネルギー資源の動向調査」

(財) 電力中央研究所 小沢 靖 氏

日本はエネルギー資源の多くを海外に依存しており、エネルギーセキュリティを確保していく上で、世界のエネルギー資源の動向把握は重要である。近年、米国で「シェールガス革命」とまで称される非在来型天然ガスの増産が始まり、それ以前にはカナダのオイルサンドの増産など、エネルギー価格の上昇および採掘技術の進化によって、非在来型化石燃料が増加する兆しがある。それらの状況を含め、エネルギー資源の動向の調査結果を概説する。

(9) パネルディスカッション「旅客機関連技術の進化と液体燃料資源の将来」

(座長 吉田 英生 氏 (京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻教授))

パネリスト 鈴木 真二 氏 (東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻教授)
 松並 孝次 氏 (日本航空(株)運航技術部試験飛行室調査役機長)
 本村 真澄 氏 (JOGMEC 石油開発推進本部 石油調査部主席研究員)
 椿 範立 氏 (富山大学大学院理工学研究部工学系教授)
 松尾 雄司 氏 (日本エネルギー経済研究所主任研究員)

人類がガスタービンという原動機を開発したこと、そしてこの地球上で液体化石燃料が安価に入手できてきたこと、この二つの組み合わせにより実現した航空技術は現代人に奇蹟ともいえるべき恩恵をもたらしました。とりわけ東洋の東端の島国に住む日本人には、現在世界の中心の役割を果たしている米国東海岸や欧州まで一飛び・半日程度で移動できるような交通手段は、これら二つの組み合わせ以外では考え難く、その思いを強くします。そして、ジャンボジェットが就航して早40年が経っても旅客輸送の基本的枠組は変わっていないように、これから50年あるいはさらに一世紀近い時間スパンで考えてみても、この組み合わせは国際的な移動手段としての首座を譲らないようにも思います。一方で、その燃料源となってきた石油の枯渇がよいよあと数十年先に迫っているということもよく耳にします。もしそれが本当なら石油に代わる資源からの液体燃料合成を真剣に考える必要があります。本講演会とパネルディスカッションでは、航空用ガスタービンに焦点を絞り、その関連技術の進化と液体燃料資源の将来を考えてみたいと思います。

本テーマでの話題提供として、まず、各パネリストの方から各々30分の下記講演を戴き、これらを踏まえ、40分程度のディスカッションを予定しています。

1. 福島原発事故から学ぶこと～航空機の安全性、環境性を再考する 鈴木 真二 氏
2. Cockpitから見た地球環境の変化と日本航空の環境への取り組み 松並 孝次 氏
3. 21世紀も続く炭化水素の時代 ―増加する石油・ガス埋蔵量と非在来型資源の展望― 本村 真澄 氏
4. XL (Gas/Coal/Biomass to Liquid) を中心とする液体燃料合成技術の最新動向 椿 範立 氏
5. 福島第一原子力発電所事故を踏まえた世界の長期エネルギー需給見通し 松尾 雄司 氏

7. 参加要領

- 1) 参加費 :

◆主催および協賛団体会員	2日間 25,000円	1日のみ 18,000円
◆学生会員	5,000円	
◆会員外	2日間 35,000円	1日のみ 25,000円
◆会員外(学生)	8,000円	
◆資料のみ	1冊 5,000円(残部ある場合)	
- 2) 申込方法: 申込書に所属、氏名、加入学協会名、GTSJ会員は会員番号等必要事項を明記の上、下記事務局宛 2012年1月13日(金)までにお送り下さい。
 (日本ガスタービン学会ホームページからも申込ができます)
 また、参加費につきましては2012年1月18日(水)までに以下の方法にてお支払い下さい。
 支払い期日に間に合わない場合には 事務局までご連絡ください。
 - ・郵便振替 00170-9-179578 (日本ガスタービン学会)
 - ・銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店 (普) 1812298 (日本ガスタービン学会)
 - ・現金書留
- 3) 昼食について: 昼休みはセキュリティ上(再入門手続き必要)、会場(横浜ゲストハウス)内で過ごしていただくこととなります。19日、20日の昼食用として弁当のご予約をお受けします。ご希望の方は参加申込み時にご予約ください。飲物付で一食700円です。(弁当申込締切: 1月12日)
- 4) 事務局: 公益社団法人 日本ガスタービン学会
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13-402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 URL: <http://www.gtsj.org> E-Mail: gtsj-office@gtsj.org

資料集・ネームカードは当日受付にてお渡しします。

第40回ガスタービンセミナー

(2012年1月19, 20日)

申 込 書

日本ガスタービン学会 行

FAX 03-3365-0387

TEL 03-3365-0095

会社名	
所在地	〒
TEL	
FAX	

参加者名（所在地・連絡先が所属により異なる場合には、本用紙をコピーして別シートにご記入下さい。）

フリガナ 氏 名	所 属	TEL FAX E-MAIL	所属学協会 GTSJの加は会員 No. をご記入下さい	参加日 ○印をつけて下さい	弁当予約* ○印をつけて下さい
				19・20	19・20
				19・20	19・20
				19・20	19・20
				19・20	19・20
				19・20	19・20

* 19日, 20日の昼食用として弁当のご予約をお受けします。ご希望の方は参加申込み時にご予約ください。
飲物付で一食700円です。（事前予約のみ受付（1/12締切）。代金700円は当日現金にてお支払いください。）

【事務局への連絡事項】

	2日間	人数	1日のみ	人数	合計金額
正会員	25,000円		18,000円		円
学生員	5,000円		5,000円		円
会員外	35,000円		25,000円		円
支払予定日： 月 日			支払金額		円
払込方法：（○をつけてください。） 1. 銀行振込（みずほ銀行 新宿西口支店 普通 1812298） 2. 郵便振替（00170-9-179578） 3. 現金書留 *口座名はいずれも「(社)日本ガスタービン学会」です。					
請求書の発行： 要（宛名： ） ・ 不要					
領収証の発行（当日お渡しします）： 要（宛名： ） ・ 不要					

2011年度シンポジウム開催のお知らせ

テーマ「災害への危機管理と非常用発電・電力備蓄技術の動向」

2011年3月11日の東北関東大震災は、日本人にエネルギーの重要性を再認識させました。毎日潤沢に供給されていたエネルギーが突然止まってしまった衝撃・不便さは、会員諸氏の記憶に新しいことと思います。本シンポジウムは、このような背景を踏まえ、災害時のエネルギー（特に、電力）に対する危機管理をテーマとして企画されました。本シンポジウムが災害に対する危機管理を見直す契機となっただけであれば幸いです。

1. 日時：2011年12月22日(木) 14：00-17：00
2. 場所：東京理科大学 九段校舎KS701教室
(地下鉄九段下駅下車徒歩1分、靖国神社正面、URL:<http://www.tus.ac.jp/info/campus/kagurazaka.html>)
3. 内容：
 - (1) 14：00-14：45 「災害とエネルギーの危機管理」 平塚 三好 氏 (東京理科大学)
災害に備える事業継続 (BCP, BCM) の基礎について解説し、社会インフラ、企業や工場、家庭における非常時の電力確保等に関する危機管理について、今回の東日本大震災の事例を交えながら考察する。
 - (2) 14：45-15：30 「非常用GT発電設備の役割と現状」 倉橋 浩 氏 (川崎重工業株)
以下の各テーマについて紹介する。
 - ①非常用GT発電設備とは (消防法で設置義務付け、ブラックアウト40秒スタート、始動信頼性が最重要、低コスト・小スペース対応)、②最近の動向 (インターネット・データ・センタ向けの大型複数台化)、③稼働事例 (停電、震災時の稼働事例紹介：東北大地震、首都圏大停電、阪神淡路大震災等)、④電力不足対策に向けた顧客の要望 (デュアル燃料方式による長時間運転)
 - (3) 15：30-16：15 「低炭素社会実現に向けた電池電力貯蔵技術への期待」 池谷 知彦 氏 (電力中央研究所)
東日本大震災後、電力供給の見直しが注目される中、地球温暖化問題への対応も重要である。不安定な電源である太陽光・風力発電や、ガスコジェネなど分散型電源の活用が期待される。既存の安定した火力発電、原子力発電と分散型電源と組み合わせ、需給バランスを取るのに蓄電技術が不可欠である。電池電力貯蔵技術への期待と課題を紹介する。
 - (4) 16：15-16：25 休憩
 - (5) 16：25-17：00 総合討論
4. 定員：50名
5. 参加費：会員3,000円、非会員5,000円、学生1,000円
6. 申し込み方法：E-mailまたはファックスにて、お名前、ご所属、会員区別、E-mailアドレスを明記の上、12月9日(金)までに下記日本ガスタービン学会事務局までご連絡ください。

公益社団法人日本ガスタービン学会 事務局
E-mail : gtsj-office@gtsj.org, Fax : 03-3365-0387



▷ 入会者名簿 ◁

〔正会員〕

小木曾 元一(I H I)	阿部 和人(I H I)	村岡 大輔(I H I)	田中 隆太(I H I)
周藤 由香里(I H I)	井上 薫(I H I)	百々 聡(日 立)	瀬川 武彦(産 総 研)
酒井 優和(小松製作所)	川上 龍哉(東 レ)	小野寺 真也(東北電力)	菅原 智幸(東北電力)
武石 典彦(東北電力)	青木 卓朗(東北電力)	木村 正樹(東北電力)	葛原 真勝(東北電力)
鈴木 文博(東北電力)	大野 貞彦(東北電力)	小林 克夫(東北電力)	児玉 清春(東北電力)
門脇 真(東北電力)	大竹 伸明(東北電力)		

〔学生→正会員〕

倉田 知明(I H I)	笛田 剛志(I H I)	杉立 健太(本田技研)	井出 達也(本田技研)
--------------	--------------	-------------	-------------

〔学生会員〕

岡田 理典(同志社大学)

〔賛助会員〕

中部プラントサービス

読者の皆様の声をお聞かせ下さい

学会誌編集委員会では、より良い学会誌制作のため、日本ガスタービン学会誌の読者の皆様からのご意見ご要望を受け付ける窓口（下記メールアドレス）を設置いたしました。どうぞお気軽に皆様からの声をお寄せ頂けますようお願い申し上げます。

お寄せ頂いたものについては学会誌編集委員会委員長が拝読し、必要によっては委員会に諮るなどして、ご意見を今後の学会誌の中に反映して参りたいと思います。

E-mail : hensyu@gtsj.org

- ・ご意見をお寄せいただく際は、氏名、会員/非会員の別、ご所属等をお知らせください。なお、匿名でのご意見はご遠慮下さい。
 - ・技術論文・随筆・書評などの学会誌への投稿については、従来どおり、学会誌巻末の学会誌編集規程に沿って投稿してください。
- 読者の皆様からの声をお待ちしています。

○本会共催・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
日本マリンエンジニアリング学会	技術者継続教育2011「先進コース」講習会	協賛	2011/11/24-25, 2012/1/19-20, 2/16-17	福岡県中小企業振興センター、神戸国際会館、梅田スカイビルタワーウエスト	日本マリンエンジニアリング学会 URL: http://www.jime.jp
日本機械学会	基礎教育講習会-エンジン技術の基礎と応用（その24）	協賛	2011/11/25	（株）堀場製作所東京セールスオフィス エクセレントホール	日本機械学会 URL: http://www.jsme.or.jp/
日本機械学会	噴霧燃焼の理論と実際-液滴燃焼からレシプロ・ガスタービン・ロケット機関における実例まで-	協賛	2012/1/6	東京海洋大学 越中島キャンパス	日本機械学会 URL: http://www.jsme.or.jp/
Institution of Mechanical Engineers	10th International Conference on Turbochargers and Turbocharging	協賛	2012/5/15-16	IET Savoy Place, London, UK	URL: http://www.imeche.org/events/c1340
日本機械学会	第8回内燃機関のモデリングと診断に関する国際会議 (COMODIA2012)	協賛	2012/7/23-26	福岡リーセントホテル	日本機械学会 URL: http://www.jsme.or.jp/esd/comodia/comodia2012/
ISUAAAT	The 13th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines (ISUAAAT13)	協賛	2012/9/11-14	東京大学農学部弥生講堂	ISUAAAT13（第13回翼列（回転機械）の非定常空気力学、空力音響・空力弾性学国際シンポジウム）国内委員会 実行委員長 長島利夫 E-MAIL: tnaga@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp , http://www.isuaaat.org/

訃 報

終身会員 田中 義弘 君 84才

2011年3月3日 逝去されました

ここに謹んで哀悼の意を表します

2011年度役員名簿

会長 筒井 康賢(高知工科大)
 副会長 佃 嘉章(三菱重工)
 法人管理担当執行理事 加藤 泰弘(日立製作所), 幸田 栄一(電中研), 鈴木 健(IGHI), 六山 亮昌(三菱重工), 渡辺 紀徳(東大)
 公益目的事業担当執行理事 壹岐 典彦(産総研), 佐藤 哲也(早大), 杉本 隆雄(兵庫県立大), 辻田 星歩(法政大), 二村 尚夫(JAXA), 船崎 健一(岩手大), 山根 秀公(防衛省), 山本 誠(東京理科大)
 理事 荒川 忠一(東大), 高橋 雅士(東芝), 永井 勝史(川崎重工), 坂野 貴洋(中部電力), 宮原 忠人(東京ガス)
 監事 本阿弥眞治(東京理科大), 吉田 豊明(JAXA)

2011年度委員名簿(順不同) 2011年10月6日現在

企画委員会 ○幸田 栄一(電中研), 太田 有(早大), 加藤 泰弘(日立), 鈴木 健(IGHI), 六山 亮昌(三菱重工), 渡辺 紀徳(東大)
 国際委員会 ○渡辺 紀徳(東大), 荒木 秀文(日立), 石田 克彦(川崎重工), 太田 有(早大), 岡井 敬一(JAXA), 小森 豊明(三菱重工), 中村 良也(アイ・エヌ・シー・エンジニアリング), 廣光 永兆(IGHI), 福田 雅文(物材研), 藤網 義行(ESPR組合), 船崎 健一(岩手大), 松田 寿(東芝), 山根 敬(JAXA), 山本 誠(東京理科大)
 運営委員会 ○渡辺 紀徳(東大), 伊藤 高根, 川上 龍太(東京電力), 幸田 栄一(電中研), 小森 豊明(三菱重工), 酒井 義明(東芝), 佐藤 哲也(早大), 杉本 隆雄(兵庫県立大), 鈴木 健(IGHI), 二村 尚夫(JAXA), 笠原 公輔(IGHI)
 学術講演会委員会 ○壹岐 典彦(産総研), 内田 竜朗(東芝), 齊藤 圭司郎(三菱重工), 高橋 康雄(日立製作所), 武田淳一郎(富士電機), 東部 泰昌(川崎重工), 長谷川武治(電中研), 姫野 武洋(東大), 平野 孝典(拓殖大), 山本 武(JAXA), 仲俣千由紀(IGHI)
 集行事務委員会 ○二村 尚夫(JAXA), 吉田 征二(JAXA), 岡 芳彦(三井造船), 木村 武清(川崎重工), 酒井 英司(電中研), 澤 徹(東芝), 谷光 玄行(IGHI), 仲村 晋(JALエンジニアリング), 中村 友行(防衛省), 西村 英彦(三菱重工), 松沼 孝幸(産総研), 三嶋 英裕(日立), 山形 通史(富士電機), 山根 秀公(防衛省), 山本 誠(東理大), 吉田 英生(京大)
 ガスタービン技術普及委員会 ○山根 秀公(防衛省), 秋山 陵(日立), 木村 武清(川崎重工), 齊藤 大蔵(東芝), 仲村 晋(JALエンジニアリング), 福山 佳孝(JAXA), 古川 洋之(IGHI), 宮原 忠人(東京ガス), 村田 章(農工大), 屋口 正次(電中研), 山本 誠(東理大), 渡辺 紀徳(東大)
 学会誌編集委員会 ○船崎 健一(岩手大), 壹岐 典彦(産総研), 坂野 貴洋(中部電力), 佐藤 哲也(早大), 辻田 星歩(法政大), 宮原 忠人(東京ガス), 荒木 秀文(日立), 柏原 宏行(川崎重工), 吉野 展永(IGHI), 刑部 真弘(東京海洋大), 加藤 千幸(東大), 川上 龍太(東京電力), 岸根 崇(三菱重工), 佐々木 直人(IGHIエアロスペース), 鈴木 伸寿(東芝), 檀原 伸輔(防衛省), 寺本 進(東大), 中野 健(IGHI), 早田 陽一(ダイハツ), 服部 学明(三井造船), 北條 正弘(JAXA), 三嶋 正幸(中部電力), 山下 一憲(桂原), 渡辺 和徳(電中研)
 英文論文編集委員会 ○渡辺 紀徳(東大), 山根 敬(JAXA), 壹岐 典彦(産総研), 石田 克彦(川崎重工), 太田 有(早大),

加藤 大(IGHI), 幸田 栄一(電中研), 柴田 貴範(日立), 田頭 剛(JAXA), 姫野 武洋(東大), 船崎 健一(岩手大), 山本 武(JAXA), 山本 誠(東京理科大), 吉岡 洋明(東芝)
 ガスタービン統計作成委員会 ○辻田 星歩(法政大), 山上 展由(三菱重工), 荒木 伸二(日立), 井出 琢磨(IGHI), 里見 智弘(ターボシステムズユナイテッド), 澤 徹(東芝), 白石 隆(三菱重工), 原田 純(川崎重工), 米田 幸人(ヤンマー)
 広報委員会 ○杉本 隆雄(兵庫県立大), 東部 泰昌(川崎重工), 姫野 武洋(東大), 船崎 健一(岩手大), 松沼 孝幸(産総研), 山根 敬(JAXA)
 表彰委員会 ○佃 嘉章(三菱重工), 佐藤 哲也(早大), 壹岐 典彦(産総研), 二村 尚夫(JAXA), 船崎 健一(岩手大), 六山 亮昌(三菱重工), 渡辺 紀徳(東大)
 産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳(東大), 本阿弥眞治(東理大), 赤城 正弘(防衛省), 壹岐 典彦(産総研), 石井 潤治(東芝), 岡崎 正和(長岡技術科学大), 幸田 栄一(電中研), 永留 世一(川崎重工), 西澤 敏雄(JAXA), 幡宮 重雄(日立), 福泉 靖史(三菱重工), 藤岡 順三(物質・材料研), 船崎 健一(岩手大), 古川 雅人(九大), 満岡 次郎(IGHI), 吉田 英生(京大)
 創立40周年事業準備委員会 ○筒井 康賢(高知工科大), 太田 有(早大), 幸田 栄一(電中研), 福山 佳孝(JAXA), 二村 尚夫(JAXA), 船崎 健一(岩手大), 山本 誠(東理大), 渡辺 紀徳(東大)
 調査研究委員会 ○濱 純(産総研), 壹岐 典彦(産総研), 岸部 忠晴(日立製作所), 小森 豊明(三菱重工), 辻田 星歩(法政大), 永井 勝史(川崎重工), 満岡 次郎(IGHI), 山本 悟(東北大)

2011年国際ガスタービン会議大阪大会実行委員会

委員長 武石 賢一郎(阪大)
 副委員長 佐藤 幹夫(電中研)
 幹事 岡井 敬一(JAXA)
 総務委員会 ○藤岡 照高(電中研), 高西 一光(関西電力), 小田 豊(阪大), 長谷川 武治(電中研), 水川 雅夫(関西電力), 木村 武清(川崎重工), 高田 和正(三菱重工), 野崎 理(JAXA)
 論文委員会 ○辻本 良信(阪大), 山本 誠(東理大), 山崎 伸彦(九大), 中田 俊彦(東北大), 渡辺 紀徳(東大), 牧野 敦(JAXA), 今成 邦之(IGHI), 太田 有(早大), 金子 成彦(東大), 吉岡 洋明(東芝), 古川 洋之(IGHI), 壹岐 典彦(産総研), 船崎 健一(岩手大), 赤松 史光(阪大), 田沼 唯士(帝京大), 幸田 栄一(電中研), 伊藤 栄作(三菱重工), 柴田 貴範(日立), 齋藤 英治(日立), 谷村 和彦(川崎重工)
 財務委員会 ○山脇 栄道(IGHI), 廣川 順一(IGHI), 笠原 公輔(IGHI), 杉浦 裕之(川崎重工)
 展示委員会 ○正田 淳一郎(三菱重工), 小森 豊明(三菱重工), 北山 和弘(東芝), 塚原 章友(三菱重工), 岸根 崇(三菱重工), 原 浩之(三菱重工), 山本 智彦(三菱重工), [正] 鈴木 伸寿(東芝), [副] 石川 揚介(東芝), 吉國 孝之(IGHI), 西村 真琴(日立), 井上 俊彦(川崎重工), 山形 通史(富士電機), 友田 俊之(関西電力), 柳澤 徹(大阪ガス), 山田 秀志(JAXA), 中村 昌義(GE)
 行事務委員会 ○木下 康裕(川崎重工), 堀川 敦史(川崎重工), 安田 耕二(日立), 松尾 亜紀子(慶大), 瀬川 大資(大阪府大), 岩井 裕(京大), 西村 英彦(三菱重工)
 顧問 大田 英輔(早大名誉教授), 川口 修(慶大名誉教授), 大槻 幸雄(川崎重工), 玉木 貞一(IGHI), 塚越 敬三(三菱重工)

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ーです。

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、家族的雰囲気の中で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（2011年3月現在）

会員数：2,018名（正会員 1,950名、学生会員 68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	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

※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

東日本大震災では、様々な課題が明らかとなってきました。新たに明らかになった課題もありますが、これまで取り組みを先延ばしにしてきた結果、深刻な問題となったものもあります。日本の将来のエネルギー供給は、日本の国家像をどうしたいかから取り組まなければならない大きな課題ですが、その際に考慮すべき課題の一つとして、フローとストックのバランスをどうとるべきかがあげられるように思います。松本の定期講演会の際に船崎先生が指摘されたように、今回の震災で日頃の私たちの生活がいかにフローに依存しているかを痛感させられました。正確な表現ではないかもしれませんが、電力は需要家にフロー的に供給されるものではあるものの、震災後は家電店でも蓄電池が売られるなどストックを持ちたい方が出てきています。電力以外にも鉄道や道路が使えなくなった結果、人の移動も物流も途絶えて、便利で快適な生活がいかに危ういものかを実感させられました。首都圏でもガソリン不足が起り、普段満タンにしないガソリンを満タンにする人が増えたため、供給能力の低下以上にガソリンスタンドでの給油が困難になりました。

現在の日本はエネルギーの自給自足が成り立たず、現状では地球規模のエネルギーのフローに、私たちの経済活動と生活は支えられています。将来の姿としてエネルギーの地産地消を目指す意見も聞かれますが、風力発電や太陽光発電の普及だけでは不十分で電力の系統安定のためには、フローとしての化石燃料とストックとなり得るバイオマスの利用技術の開発が必要です。

本号は燃料の研究開発に関わっている方々とガスタービンの開発者のご協力を得て、特集を組ませて頂きました。平田様は巻頭言にて、低品位の化石燃料とバイオマスを取り上げ、本学会への期待を表明されておられます。現在主流として用いられている化石燃料以外にどのような燃料が研究開発されて、どのような利用技術が開発されているのかを知る機会となれば幸いです。

本号の企画・編集にあたっては、加藤委員（東京大学）、佐々木委員（㈱IHIエアロスペース）、中野委員（㈱IHI）そして、壹岐（(独)産業技術総合研究所）が担当しました。

（壹岐典彦）

（表紙写真）

新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術

今回の表紙については論説・解説の各著者の図版より流用しております。詳細については各記事を御参照ください。

- ・エネルギー会社から見たバイオ燃料技術開発
（JX日鉱日石エネルギー株式会社の取り組み）
..... (P.389)
- ・燃料を創る：回収、変換そして生産へ..... (P.432)
- ・多様なガス化ガス資源とガスタービン燃焼の特徴
..... (P.407)

だより

♣事務局 ☒ ♣

爽やかな秋晴れが続く今日この頃、テレビで見た菊花展のニュースに深まる秋を感じます。この学会誌11月号が皆様のお手元に届く頃は、2011年国際ガスタービン会議大阪大会が成功裏に終了し、会議に参加された皆様が各職場や大学などに戻られたところだと思います。4年に1度のIGTCの開催を直前に控えた現在、事務局はIGTC関連の業務や準備に忙殺されています。長年にわたって多大なご支援をいただいた委員の皆様が報われますよう、国内外からの多くの参加者にお集まりいただき、実りある国際会議として好評を得つつ無事終了しますように願っております。

今年発行の学会誌もこの号でVOL.39は終わり、次号の

2012年1月号からはVOL.40となります。来年は学会創立40周年を迎えます。学会誌も40周年を機に内容も体裁も更に充実させ、皆様のもとにお届けしたいと考えています。

会告にもありますように、このたび学会誌の読者の皆様の声をお寄せいただく窓口（メールアドレス）を新たに設けました。

メールアドレス hensyu@gtsj.org

学会誌編集委員会では皆様からのお声を参考にさせていただき、よりよい学会誌作りに反映させていきたいと考えています。どうぞお気軽にご意見・ご要望などをお寄せ下さいませようお願いいたします。（高田）

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 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。
 - B. 依頼原稿：本学会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。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿：学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。

2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、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、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

論説・解説、講義	6ページ
技術論文	6ページ
速報	4ページ
寄書、随筆	2ページ
書評	1ページ
情報記事欄	1/2ページ

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。

4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規程を定める。

5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。

6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。

7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

但し、著作者自身または著作者が帰属する法人等が、自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載、翻訳・翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。

8. 著作者は、学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。

9. 本会発行の著作物に掲載された記事、論文などの著作物について、著作権侵害者、名誉毀損、またはその他の紛争が生じた場合、当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5164
ニッセイエブプロ(株) 制作部 編集制作課
E-mail: eblo_h3@eblo.co.jp
学会誌担当 佐藤孝憲

技術論文投稿規定

2010.8.27改訂

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) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
- 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6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。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌 Vol.39 No.6 2011.11

発行日 2011年11月20日
発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
編集者 船崎 健一
発行者 筒井 康賢
〒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. 03-5733-5164

©2011, 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、(社)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、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター(社)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いません。直接、本学会へお問い合わせください。