巻頭言

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

低炭素社会とガスタービン

壹岐　典彦*1
IKI Norihiko

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，燃料，低炭素社会，温室効果ガス
Gas Turbine，Jet Engine，Fuel，Low Carbon Society, Greenhouse Gas

資源エネルギーの有効利用，低炭素社会への取り組みは国民の多くが関心を持っているものと思われ，地球温暖化や大気汚染，海洋汚染などの環境問題，原発再起動，水素自動車や再生可能エネルギー導入など資源やエネルギーが，マスコミの報道でも話題に取り上げられることが多くなっています。

再生可能エネルギーの大量導入が期待されていますが，太陽光や風力のエネルギーは人間のエネルギー需要とは関係なく供給されてしまいます。再生可能エネルギーの大量導入時代を目前として，空間的，時間的に偏在するエネルギーを有効に利用することは，重要な課題です。またエネルギー供給側の改善だけでは温室効果ガス排出抑制は不十分であり，エネルギー需要側での省エネルギーに大きな役割が期待されています。

温室効果ガスの削減について考えてみると，

① 温室効果ガスであるCO_2の排出削減のために，化石燃料を利用する熱機関の効率を高めること。
② CO_2排出のより少ない燃料に燃料転換すること。
③ CO_2排出が無視される再生可能エネルギーなどの導入を促進すること。
④ CO_2を回収・貯留すること。
⑤ さらにメタンなどの温室効果ガスが放出されないように処理すること。

などが考えられます。この様々な場面でガスタービンその他のターボ機械は活躍する機会があります。

①としては，天然ガスを高効率で利用できるコンバインドサイクルの効率向上などがあります。またIGCCによる石炭火力の効率向上が期待され，更に④であるCCSとの組み合わせが求められています。

②については，これまでも一次エネルギーの天然ガスへの転換が果たされてきましたが，将来は③にあたる再生可能エネルギー由来の燃料の利用が期待され，特にガスタービンは様々な燃料に対応できることから，いろいろな場所で活躍が期待できます。昨年度スタートした内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）でも革新的構造材料，エネルギーキャリアでガスタービン技術が取り上げられています。

⑤については，メタンの地球温暖化係数はCO_2の約20倍もあり，メタンの大気中への放出を抑えるための燃焼などによる処理は重要です。さらにその処理をより省エネルギーに行うこと，できればガスタービンを利用した処理によってエネルギーを得ることができればより効果的です。

本特集は燃料・燃焼の観点から，資源エネルギー有効利用および低炭素社会の実現に関わるガスタービンを取り上げました。関連する特集としては2011年11月号で「新しい燃料製造技術と燃料多様化に対応した利用技術」を特集させて頂き，燃料製造を取り上げましたが，今回は燃料多様化にガスタービンがどのように対応しているかについて様々な事例を解説してもらう機会を得ました。燃料として水素，消化ガス，低濃度メタンガス，高炉副生ガス，アンモニアなど様々なガスを燃料としてもしくは燃料の一部として利用するガスタービン技術が紹介されています。

エネルギーキャリアの導入は再生可能エネルギー大量導入を促進する効果があり，低濃度メタンの処理をガスタービンで行うことは，処理に要するエネルギーの削減，さらにエネルギーを取り出すことに関わってきます。同じガスタービンが用いられていても設置される場所で運用条件は異なり，最適なシステム構成，運用方法は異なってきます。今回の特集記事はガスタービンの様々な運用について実例を示す貴重な資料になるものと存じます。

最後に，数年前にはシェール革命により天然ガスの価格が下落し，更に昨年は原油価格が下落しています。このように激変するエネルギー分野における燃料の最適解を見いだすことは困難です。しかし，燃料の多様化に対してガスタービンは柔軟性を持っています。本特集がガスタービンの将来の可能性を示すものとして参考になれば幸いです。

原稿受付　2015年1月9日
＊1　独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門
〒305-8564　つくば市並木1－2－1

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

水素燃焼技術の開発

堀川　敦史[*1]　HORIKAWA Atsushi
小田　剛生[*2]　ODA Takeo

キーワード：水素社会，副生水素，水素ガスタービン，水素燃焼，
Hydrogen energy society, By-product hydrogen, Hydrogen gas turbine, Hydrogen combustion

1．はじめに

2014年４月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では，コージェネレーションによる熱利用の促進や，将来の二次エネルギーとして初めて水素が明記された。水素社会の実現に向けた戦略的な技術開発の促進，ロードマップの策定等が盛り込まれた。2014年６月に経済産業省がとりまとめた「水素・燃料電池戦略ロードマップ」においても水素の利用拡大，水素発電の導入，CO_2フリー水素供給システムの確立等が記されている。

当社は，将来の低炭素・水素社会を睨み，水素の製造，液化，輸送・貯蔵，利用を一体とした「CO_2フリー水素チェーン（図１）」を提唱している。資源国の未利用資源や余剰・安価な再生可能エネルギーから低コストに水素ガスを製造，資源国の港湾にて水素ガスを液化，液体水素運搬船にて海上輸送し，利用国にて二次エネルギーとして利用するコンセプトである。現在，製造から輸送，利用に至る各要素技術の開発および製品化に取り組んでいる。

ガスタービン等の発電用燃料として水素を多量に利用する場合，水素製造からのインフラ整備が必要となる。本稿では，その一つとして，当社の水素関連技術の開発状況を紹介し，次に水素ガスタービン発電のうち，最も重要な開発課題である水素燃焼技術の開発の状況について紹介する。

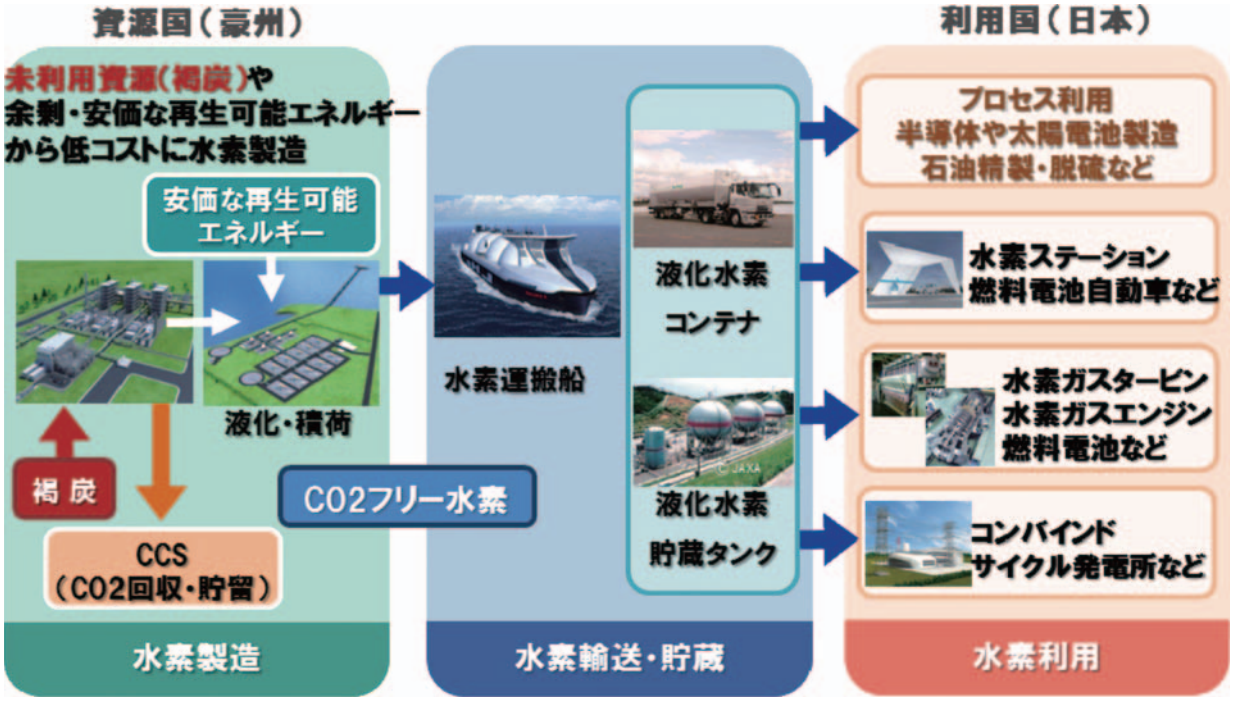


Fig. 1　Concept of CO_2 free hydrogen supply chain in Kawasaki

原稿受付　2015年１月21日
＊１　川崎重工業㈱　技術開発本部　技術研究所　熱システム研究部
〒673-8666　明石市川崎町１－１
＊２　川崎重工業㈱　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

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

2．川崎重工業における水素社会に向けた取り組み

2.1　水素チェーンモデルの概要

豪連邦政府・ビクトリア州政府と連携し，豪州の豊富に存在する褐炭をもとに水素を製造するパイロットプロジェクトの検討を進めている。褐炭は，含水分量が多く輸送効率や発電効率が低い。また，乾燥すると再吸湿性や自然発火性を有する等の短所があるため，炭鉱近傍の発電所で利用されるのみに留まっているのが現状である。このような未利用で安価な褐炭を原料とした水素製造を行い，製造過程で分離・回収されたCO_2はビクトリア州が推進しているCarbonNetに移送・貯蔵するモデルである[(1)]。製造された水素ガスは，パイプラインで港湾設備に輸送される。港湾設備は，水素液化プラントおよび水素集積基地で構成され，水素を液化・貯蔵した後に水素輸送船にて日本へ輸送し，水素ガスタービン等で利用する。

2.2　水素生成

褐炭ガス化による水素生成技術の開発のため，豪州より褐炭を取り寄せ，その性状を調査した。水分が多く，その取扱いが難しかったが，これまでの瀝青（れきせい）炭利用技術を応用し，褐炭スラリーの製造および移送等の前処理技術を構築した。図２に褐炭ガス化，ガス精製試験設備を示す。褐炭スラリー用バーナの開発を行い，加圧ガス化炉での褐炭ガス化に成功した。ガス化炉出口で水素・一酸化炭素・二酸化炭素を主成分にするガスをシフト反応器により水素と二酸化炭素に変換，当社独自のCO_2吸着技術：KCC（Kawasaki CO_2 Capture）により水素の純度を高める。

Fig. 2　Brown coal gasification and purification test plant

2.3　水素ガスの液化

図３に水素液化システムを示す。液化天然ガス等の極低温物質のハンドリング技術やガスタービン，高速回転機械のタービン技術を活用し，産業用では初となる純国産独自技術の水素ガス液化システムを開発した。本システムは，１日あたり約５トンの水素を液化する能力を有している。2014年９月に初の水素ガス液化に成功し，生産性向上等の調整運転を実施している。

Fig. 3　Liquid hydrogen production test plant

2.4　水素運搬

図４に水素輸送船（技術実証船2500m^3）の外観と内部に格納される液体水素タンクを示す。この世界初となる液体水素運搬船に搭載する液体水素タンクについて，貨物格納設備の基本承認：AiP（Approval in Principle）を日本海事協会から取得している。

－253℃の液体水素は，液化天然ガスに比べ10倍蒸発しやすいため，真空二重タンクを採用している。また，航海中の海上特有の揺動に耐え，かつ高断熱性を兼ね備えるようにガラス繊維強化プラスチック：GFRPをサドル支持構造材料に採用している。

Fig. 4　Image of liquid hydrogen carrier and tank

図５に陸上輸送用圧縮水素ガストレーラを示す。水素積載量の増加と軽量化のためAl合金とCFRPの複合容器を用いている。（平成24年度NEDO共同研究事業，協力：HySUT，JX日鉱日石エネルギー株式会社）日本初，世界最高圧の45MPaで充填し，従来の鋼製容器搭載水素トレーラ（充填圧19.6MPa）の水素積載量約200kgの２倍，400kgを輸送可能である。

Fig. 5　Hydrogen gas carrier with 45MPa gas bottles

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

3．ガスタービンでの水素利用時の課題

水素社会の導入期において，発電用途による水素の大量利用は，水素供給単価の低下をもたらし，燃料電池自動車：FCV等の民生品での水素利用の普及，更なる水素社会の発展に貢献する可能性が高い。

ガスタービンは，燃料多様性に優れることから水素を燃料ガスとすることは十分可能である。しかしながら，水素に特有の燃焼特性に適合する燃焼技術が必要であり，水素の安定燃焼と低NOx（窒素酸化物）性を兼ね備えた燃焼器の開発が鍵となる。

3.1　焼損と逆火

水素は天然ガスに比べ，最大燃焼速度が速く，消炎距離も小さいことから燃焼器部品に水素火炎が近づき，酸化や焼損を起こす可能性が高い。図6に天然ガス焚き燃料ノズルで水素を燃焼試験した際に見られた燃料ノズル部品の赤熱と試験後の燃料ノズルを示す。

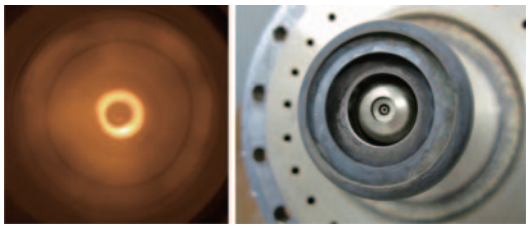


Fig. 6 Red-hot heat with hydrogen flame and fuel injector after hydrogen combustion test

また，水素では可燃範囲も広くなることから，予混合燃焼は難しい。図7に試験用の予混合バーナで，天然ガスの予混合燃焼状態から，天然ガス50vol%：水素50vol%の混合気を投入した際に発生した逆火の様子を示す。火炎が予混合通路を遡り，燃料噴射部を赤熱させている。

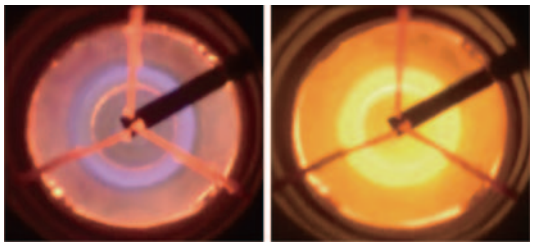


Fig. 7 Stable natural gas premix flame and flash back with natural gas and hydrogen mixture

これらのことから水素および水素リッチガスに対しては，拡散燃焼もしくは水素と空気の急速混合による吹き上がり火炎を用いて，焼損や逆火を防止することが多い[(2),(3)]。

3.2　NOxの増加

図8に拡散燃焼器内での天然ガス・水素混合気の火炎の様子を示す。天然ガス燃焼時は，火炎が一次空気孔付近から時間的・空間的に非定常に発生するのに対し，水素割合の増加に伴い，火炎の発生が燃料ノズル下流で安定するようになる。このような反応域の変化および局所的な火炎温度の上昇により，水素火炎ではNOxの発生量が天然ガスに比べて，1.5から2倍近くになる。図9に燃焼器出口温度を一定に保ち，水素割合を変化させた場合のNOx排出特性を示す。

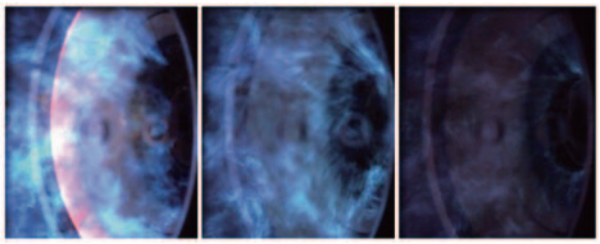


Fig. 8 Flame behavior of natural gas and hydrogen mixture, inside the diffusion flame combustor

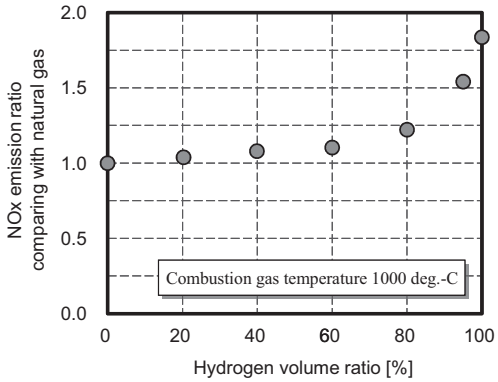


Fig. 9 NOx emission characteristic of natural gas and hydrogen mixture with constant gas temperature

天然ガス・水素混焼および水素専焼時のNOx排出の圧力依存性についても調査を進めている。図10にアーヘン工科大（RWTH Aachen University, IKDG, Germany）で実施している水素燃焼試験の様子を示す。低圧からエンジン条件まで幅広くデータを取得し，燃焼器設計に役立てている。

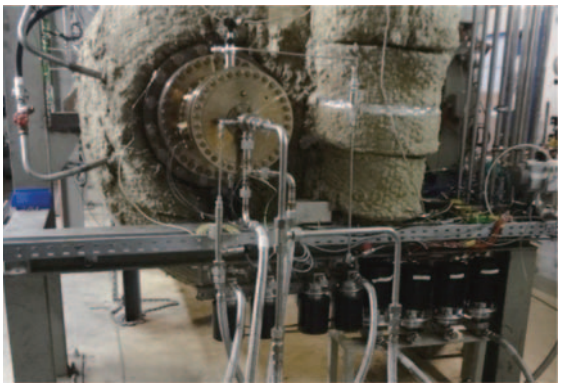


Fig.10 Hydrogen combustion test and investigations of NOx characteristics in high pressure conditions at RWTH Aachen University, Germany

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

4．水素燃焼方式

表１に現在開発を進めている水素燃焼技術の一覧を示す。一つ目は，副生水素等の水素利用ニーズを対象に，現行の天然ガス焚きドライ低NOx燃焼器（DLE燃焼器：Dry Low Emission）の追焚きバーナに水素を投入し，天然ガスと水素を混焼させる方式。二つ目は，拡散燃焼で水素もしくは高濃度の水素を安定に燃やし，水や水蒸気を用いて低NOx化を図る方式。最後は，水素専焼でも水や水蒸気を用いずに低NOx燃焼が可能な新たな水素ドライ低NOx燃焼方式である。

Table 1　Hydrogen combustion technology developments

	天然ガス･水素混焼	水素専焼 水/水蒸気噴射	水素専焼 水素ドライ低NOx （水素DLE）
低NOx化手法	ドライ方式	ウェット方式 水/水蒸気噴射	ドライ方式
最大水素濃度	60vol%	100vol%	100vol%
必要技術	DLE燃焼器 追焚き噴射弁の改良	拡散燃焼器 燃料噴射弁の改良	新たな水素DLE燃焼器
市場投入／実証	2015年頃	2015年頃	（2018年頃）

4.1　天然ガス・水素混焼

石油化学，石油精製工場等では，その製品製造プロセスの過程で水素を含むガス，副生水素が発生している。副生水素の一部は余剰となることがあり，この余剰分をガスタービンの燃料として利用できれば，天然ガス燃料費の削減，およびそれに伴うCO_2排出量の削減に繋がることが期待できる。

図11に当社ガスタービンのDLE燃焼器構造を示す。拡散燃焼方式のパイロットバーナ，予混合燃焼方式のメインバーナおよび追焚きバーナの三つのバーナで構成する。エンジン起動時には安定性に優れるパイロットバーナ，高負荷時にはメインバーナおよび追焚きバーナンにて低NOx運転を行う。

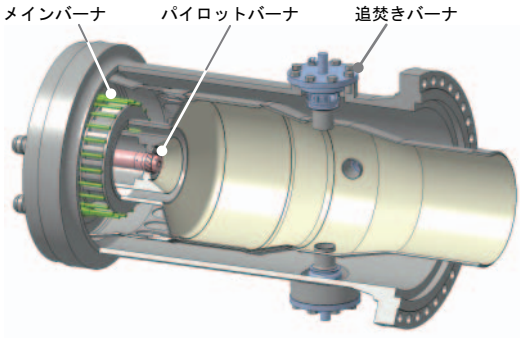


Fig.11　DLE Combustor geometry of Kawasaki gas turbine

燃焼器上流側のメインバーナで天然ガスを燃焼させているため，追焚きバーナの予混合燃料は，高温・低酸素な燃焼ガス中に投入される。このため，追焚き燃料ガスの燃焼反応が緩やかとなり，広い運転範囲で低NOx燃焼が可能である。水素投入時も同様に燃焼反応が緩やかになると考えられ，天然ガス同様に低NOx燃焼が可能である。水素投入量が燃料ガス全体の60vol%（熱量ベースで約30%）となるように追焚きバーナの開発を行った。図12に天然ガス，水素用の追焚きバーナ例を示す。

Fig.12　Supplemental burner for natural gas and hydrogen dual gas fuel

図13に燃焼器リグ試験（燃焼器のみの要素試験）結果，燃焼器出口ガス温度とNOx排出量の関係を示す。破線は定格条件相当を示す。追焚き燃料ガス出し始めは，天然ガス，水素ともNOx排出量に変わりは無い。高負荷側でのNOx排出の立ち上がりが水素の方が早く生じるものの，定格条件相当でのNOx排出量の差は僅かであり，天然ガスと変わらず実機でNOx 25ppm保証（残存酸素15%換算）が可能なレベルである[4]。

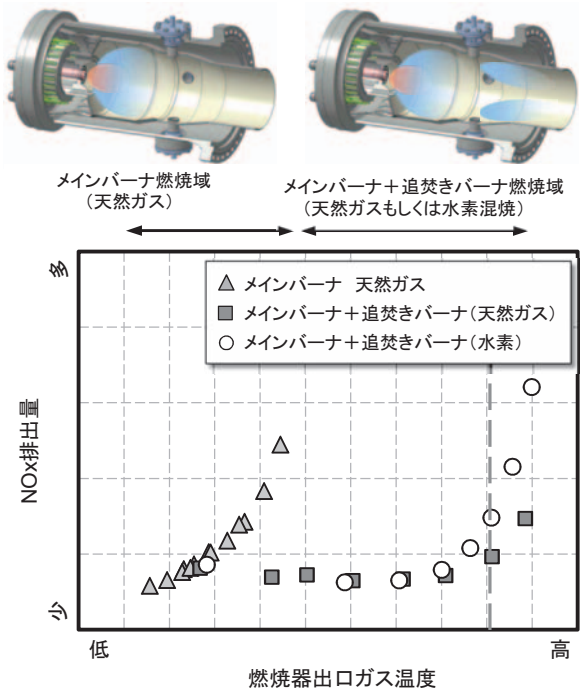


Fig.13　NOx emission characteristics of DLE combustor and hydrogen combustion result with supplemental burner

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

4.2 水素専焼 −水・水蒸気噴射による低NOx化−

拡散燃焼器では，燃焼器内に水や水蒸気を噴射し，局所的な火炎温度を低下させることによりNOx排出を低減させる（ウェット方式）。

図８および図９に示したように，燃料ガス中の水素割合により火炎発生位置，火炎形状，高温発生域が変化し，NOx排出量が増加する。天然ガスと同じ水噴射量（もしくは，天然ガスの質量流量ベースで同じ水燃比：水・蒸気噴射の質量流量÷燃料ガス質量流量）で，NOx排出を抑制するのは難しくなる。水素の火炎発生位置，高温発生域に合わせ，水素と水や水蒸気の分布を一致させる，もしくは水素と燃焼用空気の混合域に水や水蒸気を供給する必要がある。

一つのヒントとなったのが，気流微粒化方式である。図14に航空用ガスタービンの燃料噴射弁の一例と噴射弁内での液体の微粒化現象を示す。燃料噴射弁内を通過する高速空気流れにより燃料の液膜を微粒化し，空気と予混合した後に燃焼器内に投入する[5]。

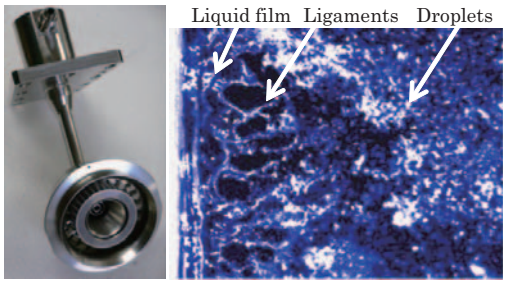


Fig.14 Fuel injector for aero gas turbine engine and air blast atomization phenomena

図15に水素用試作燃料噴射弁の一例を示す。水素の分布と水の分散を一致させるため，燃料噴射弁内の水素の高速流れに水を噴射し，微粒化，混合した後に燃焼器内に投入する。

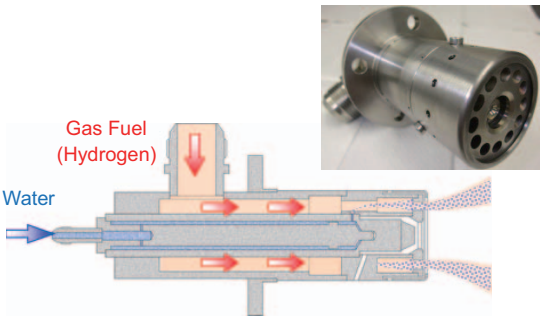


Fig.15 Concept and geometry of hydrogen gas fuel injector with water injection

図16に燃焼器リグ試験結果，水噴射量とNOx排出量の関係を示す。水素と水を別々に噴射した場合，NOxの低減が緩やかで，規制値レベルに届かない。噴射弁内で水素と水を混合してから燃焼器に投入する場合，水燃比1程度で現行の天然ガス＋水噴射と同程度までNOxの低減を図ることができている。

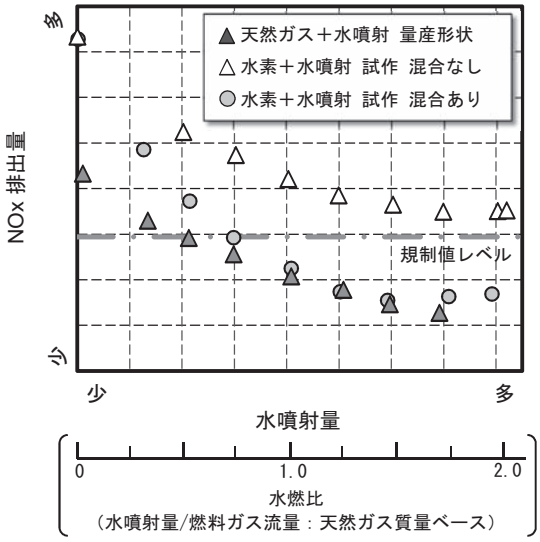


Fig.16 NOx reduction with water injection test results for natural gas and hydrogen flame

4.3 水素専焼 −ドライ低NOx−

FHアーヘン大学（Aachen University Applied Science, Germany）にて研究されているmicro-mix水素ドライ低NOx燃焼の様な微小水素火炎による低NOx燃焼原理の産業用ガスタービン燃焼器への適用検討を進めている[6],[7],[8]。図17にmicro-mixバーナの拡大図を示す。微小な水素噴射孔（直径0.3mm程度）から水素を噴射し，直行する空気噴流と急速混合し，水素火炎を形成する。微小な水素火炎を形成することで，局所的な高温域の発生を無くし，反応時間を短くしてNOxの発生を抑制する。図18に試験用のmicro-mixバーナにより形成される水素火炎を示す。

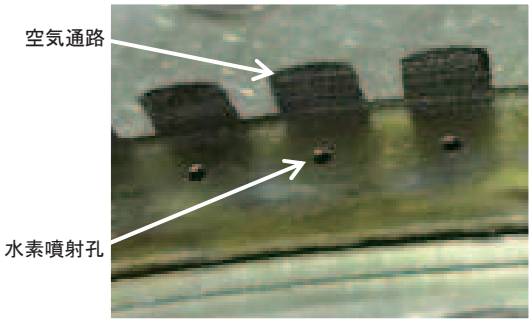


Fig.17 micro-mix burner geometry

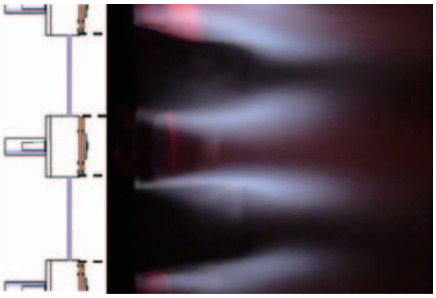


Fig.18 Hydrogen flames behind micro-mix burner

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

水素噴射孔直径が0.3mm程度では，一つの燃焼器あたりの水素噴射孔が数千個になり，実機への適用は難しい。そのため，水素噴射孔直径を拡大し，一噴射孔あたりのエネルギー密度を増加させた際のNOx排出特性の変化について調査を進めている。図19に水素噴射孔直径0.45mm，0.55mmでの試験結果を示す。エネルギー密度を増加させても低NOx燃焼原理は保たれ，NOx排出特性に大きな変化はない。バーナの設計点においてNOx５ppm以下（残存酸素15%換算）を得ている。

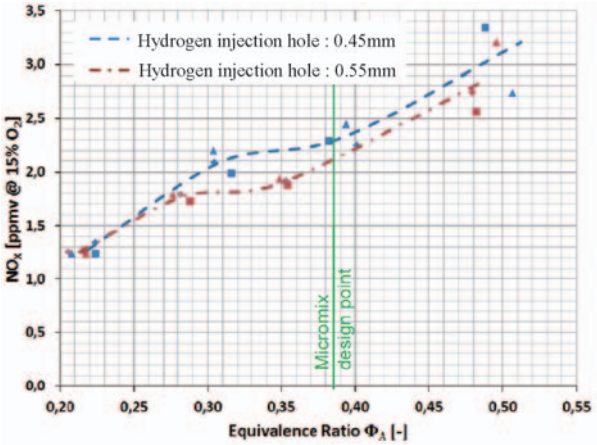


Fig.19 NOx emission characteristics with different hydrogen injection hole diameter [7]

水素噴射孔直径をミリオーダーまで拡大したバーナでの水素燃焼試験およびCFD燃焼解析による調査を継続しており，NOx排出は５ppm以下を維持している（結果の詳細はASME Turbo Expo 2015，IGTC2015で報告予定）。

水素噴射孔直径の拡大により，噴射孔閉塞のリスク低減，バーナ部品点数や加工コストの削減が可能となることから，産業用ガスタービン燃焼器への適用が可能であると判断し，微小水素火炎を用いた逆流式缶型の水素ドライ低NOx燃焼器の設計を進めている。

５．おわりに

当社の水素関連技術の開発状況の概略と水素燃焼技術の開発の状況について報告した。

すでに需要のある副生水素利用および将来の低炭素・水素社会の早期実現に貢献できるように今後も技術開発を進めていく。

参考・引用文献

(1) 山下 誠二，吉野 泰，吉村 健二，新道 憲二郎，原田 英一，“低炭素社会に向けた水素チェーンの実現性検討”，エネルギー資源学会誌，Vol.35, No. 2（2014年３月号），pp. 33-38

(2) 浅井 智広，百々 聡，小泉 浩美，高橋 宏和，吉田 正平，井上 洋，“水素リッチ燃焼焚き多孔同軸噴流バーナの大気圧燃焼特性（第２報）”，第38回日本ガスタービン学会定期講演会（徳島）講演論文集（2010），pp. 171-176

(3) 浅井 智広，百々 聡，小泉 浩美，吉田 正平，井上 洋，“水素リッチ燃焼焚き多孔同軸噴流バーナの火炎構造の検討”，第39回日本ガスタービン学会定期講演会（松本）講演論文集（2011），pp. 247-252

(4) 小田 剛生，櫻澤 俊明，木下 康裕，“水素混焼技術の開発”，第42回日本ガスタービン学会定期講演会（熊本）講演論文集（2014），pp. 11-14

(5) 小林　正佳，緒方 秀樹，小田 剛生，堀川　敦史，木下 康裕，松尾 亜紀子，“KHI における低公害航空エンジン燃焼器用燃料噴射弁の開発”，微粒化 第18巻61号（2009年３月），pp. 4-11

(6) H. H.-W. Funke, S. Boerner, J. Keinz, K. Kusterer, D. Kronier, J. Kitajima, M. Kazari, A. Horikawa, Numerical and experimental characterization of low NOx Micromix combustion principle for industrial hydrogen gas turbine applications, ASME Turbo Expo 2012 (Copenhagen), GT2012-69421, 2012

(7) H. H.-W. Funke, S. Boerner, J. Keinz, K. Kusterer, A. Haj Ayed, N. Tekin, M. Kazari, J. Kitajima, A. Horikawa, K. Okada, Numerical and experimental characterization of lthe Dry Low NOx Micromix hydrogen combustion principle at increasing energy density for industrial hydrogen gas turbine applications, ASME Turbo Expo 2013 (San Antonio), GT2013-94771, 2013

(8) A. Haj Ayed, K. Kusterer, H. H.-W. Funke, J. Keinz, M. Kazari, J. Kitajima, A. Horikawa, K. Okada, D. Bohn, Numerical study on increasing energy density for the DLN Micromix hydrogen combustion principle, ASME Turbo Expo 2014 (Dusseldorf), GT2014-25848, 2014

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

論説◆解説

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

エネルギーキャリアとして アンモニアを用いたガスタービン

倉田　修[*1] KURATA Osamu
壹岐　典彦[*1] IKI Norihiko
松沼　孝幸[*1] MATSUNUMA Takayuki
井上　貴博[*2] INOUE Takahiro
鈴木　雅人[*2] SUZUKI Masato
辻村　拓[*3] TSUJIMURA Taku
古谷　博秀[*3] FURUTANI Hirohide

キーワード：アンモニア，水素キャリア，マイクロガスタービン，実証，選択触媒還元
Ammonia，Hydrogen career，Micro gas turbine，Demonstration test, Selective catalytic reduction

1．緒言

地球温暖化の防止は人類にとって重要な課題となっている。国際エネルギー機関（IEA）の報告では，将来のエネルギーの利用と地球温暖化についていくつかのシナリオを描いている[(1),(2)]。2050年において６℃シナリオ（6DS）に対して２℃シナリオ（2DS）に温暖化レベルを抑えるためには，再生可能エネルギーの普及が，温暖化ガス排出削減の34%の役割を果たすものと推測されている。一次エネルギーに対してこの大量の再生可能エネルギー導入を実現させる上で，エネルギーキャリア技術の進歩が期待されている。様々なエネルギーキャリアのうちで，アンモニアは水素含有量の多い水素キャリアとして期待されている。

水素キャリアは，常温常圧では気体の水素を，水素を多く含んだ化学物質に変換して，より簡便に貯蔵・輸送を行うための媒質で，有機溶媒に水素を着脱して用いる有機ハイドライト（メチルシクロヘキサンなど）や，窒素と水素から合成し直接燃焼して用いることもできるアンモニアがある。アンモニアは炭素元素を含まず水素の割合が多い水素キャリアとして特に注目されており，発電用燃料としての利用に期待が高まっている。アンモニアは燃焼しても主に水と窒素しか発生しないことから，従来の燃焼燃料に一部アンモニアを置き換えるだけでも，二酸化炭素排出量の削減効果が大きい。しかし，アンモニアは一般の燃料より着火しにくく燃焼速度も遅いなど課題が多く，これまでアンモニアを燃料とするガスタービン発電は行われていなかった。産総研は，再生可能エネルギーの大量導入を支える水素キャリアの研究開発を推進しているが，現在，東北大と連携して，アンモニアを直接燃焼しガスタービンで発電する技術の開発を進めている[(3)]。なお，本研究開発は，平成26年度からスタートした内閣府のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「エネルギーキャリア」の中で取り組まれている。

原稿受付　2015年１月５日
＊１　独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門
〒305-8564　つくば市並木１－２－１
＊２　独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門
〒305-8569　つくば市小野川16－１
＊３　独立行政法人産業技術総合研究所再生可能エネルギー研究センター
〒963-0298　郡山市待池台２－２－９

2．アンモニアの特性

2.1　アンモニアの位置づけと燃料としての歴史

アンモニアは分子式NH_3で表され，炭素フリーの燃焼性の物質で窒素と水素を含んでいる。アンモニアを合成する代表的な工業プロセスとしてハーバー－ボッシュ法が知られている。図１に示すように液化アンモニアの高

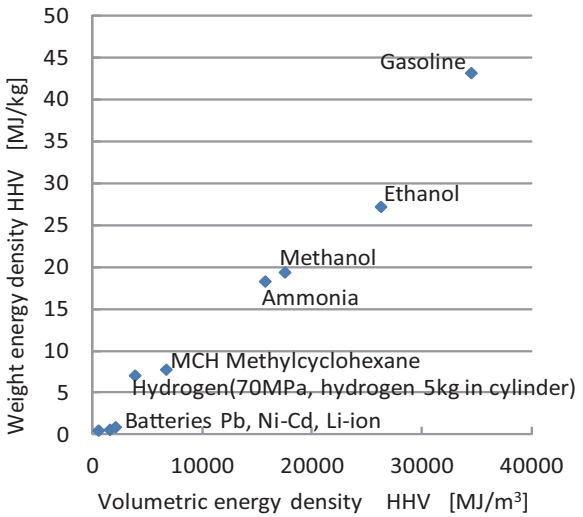


Fig. 1　Higher heat value of Ammonia and other fuels[(4),(5)]

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

位発熱量はそれほど高くはないが，メタノールの高位発熱量と同等程度である。このため，液化アンモニアのエネルギー密度は電池よりも高いことになる。アンモニアは一般的な化学物質であり，貯蔵技術や輸送技術も確立されている。

アンモニアの燃料としての利用はなにも新しいアイデアではない。1940年代には，アンモニアは他の燃料と併用して自動車用燃料として使われていた。1960年代には，アメリカでX-15ロケットプレーンがアンモニアを燃料として開発され，飛行機の最高速度と最高高度の記録を打ち立てている。アンモニアガスを燃焼させるガスタービンエンジンも開発されていた。このエンジンではSolar Model T-350ガスタービンが基本エンジンとして利用され，燃焼器はアンモニアガス燃焼器，または触媒燃焼器へと変更された[(6),(7)]。1970年代には大気汚染問題が深刻になったが，アンモニアは窒素を含有しているため，アンモニア燃焼器の排ガスには多くの窒素酸化物NOxが含まれる。当時はこのNOxを抑制する手法は難しかった。近年，アンモニアによる選択触媒還元（SCR）法が，エンジンの排ガスのNOx削減に使われている。このため，アンモニアエンジンのNOx問題は解決可能となっている。最近はアンモニアを燃料とした自動車や発電プラントはいくつかの国々で開発が開始されている[(8)]。日本でも，日本政府は平成25年にエネルギーキャリアに注目した研究開発プロジェクトを立ち上げ，アンモニア合成とアンモニア利用が取り上げられた。

2.2　アンモニアの燃料としての特徴

アンモニアは冷凍機の冷媒に使われるほど気化熱は大きい。気化熱はメタノールと同程度である（表１）。したがって，液化アンモニアを利用する場合は，気化熱をいかに供給するかがシステムとして成立する上で重要である。

表２に示すようにアンモニアの空気中における燃焼速度は７cm/sec程度であり[(9)]，炭化水素や水素に比べると非常に遅い。このため，アンモニアは燃焼し難い燃料であり，燃焼器の体積も大きくなることが予想される。

表３に示すようにアンモニアの爆発限界は16-25%と天然ガスに比べ高濃度側になっている。発火温度は651℃となっている。アンモニアは500℃以上の空気中においては水素と窒素に分解を始める[(10)]。このため，分解による水素添加などによる火炎強化が検討されている。

アンモニアの蒸気圧は図２のように-33℃，0℃，25℃

Table 1　Heat of vaporization of Ammonia

Compound	Boiling point at normal pressure ℃	Heat of vaporization kJ/kg
Ammonia	-33.34	1371
Butane	-1	320
Diethyl ether	34.6	353.1
Ethanol	78.37	841
Methanol	64.7	1104
Water	100	2260

Table 2　Burning velocity of Ammonia

	Maximum burning velocity in air at normal pressure cm/s
Ammonia	7
Methane	37
Methanol	55
Propane	43
Hydrogen	291.2

Table 3　Ignition temperature of Ammonia

	Explosive limits %	Ignition temperature ℃
Ammonia	16-25	651
Hydrogen	4-75	500
Natural gas	4.7-15	482-632

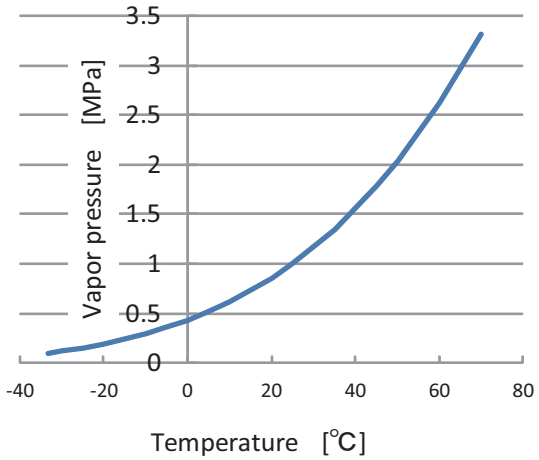


Fig. 2　Vapor pressure of Ammonia

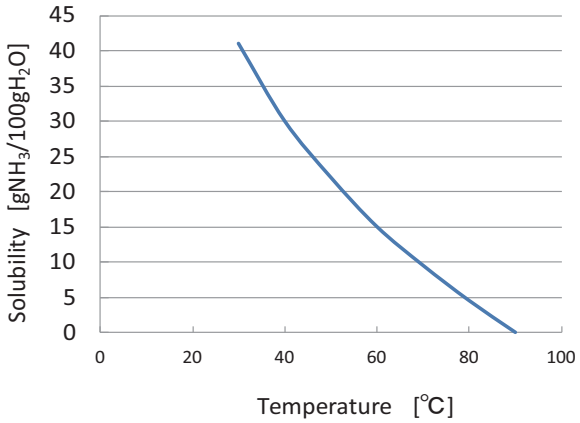


Fig. 3　Solubility of Ammonia

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

においてそれぞれ0.1MPa，0.43MPa，1.0MPaである。したがって，常温，大気圧では気体である。また,アンモニアは水に良く溶けるため[11](図３)，アンモニア排出による被害を防ぐには，水を用いた除害槽が有効である。

３．アンモニアの法規制

アンモニアは毒物劇物取扱者に劇物と定められている。毒物劇物取扱者は製造，販売，授与についての届出を定めているものの，消費についての届出は不要となっている。アンモニアガスは毒性ガス，可燃性ガスであり，高圧ガス保安法によれば，液化ガスを使用する場合，液出口の圧力が0.2MPa以上になると高圧ガス製造所になる[11](電気事業法は異なる基準)。また，アンモニアの貯蔵量が３トン以上になると高圧ガス保安法に定める特定高圧ガスの消費者となる。アンモニアは消防法の危険物ではないが，消防活動阻害物質であり，200kg以上貯蔵するには届出を必要とする。アンモニアは特定化学物質障害予防規則に定める第３類物質であり，特殊健康診断は受ける必要はない。第３類物質を100L以上取扱うものには漏洩警報機を備えなければならない。アンモニアは悪臭防止法にも規定されており，敷地境界線の地表における規制基準が地域ごとに定められている。また，アンモニア除害槽を設ける場合は，この施設が水質汚濁防止法に定める特定施設となり，自治体に届出が必要となる。

４．実証施設の概要

4.1　アンモニア供給設備

産業技術総合研究所に大規模なアンモニア供給設備を整えるのは得策ではない。アンモニア供給設備を設けるに当たり，さまざまな法令上の制約を避ける観点から，50kW級のマイクロガスタービンを基本としたシステムを選定した。50kW級ガスタービンは熱効率が25%程度と仮定すると200kWの燃料投入が必要になる。蒸発に伴う潜熱は高位発熱量のおよそ６%である。従って，50kW級ガスタービンのアンモニア供給に伴う気化熱には12kW以上を必要とする。このため，アンモニア供給設備はアンモニア１トン容器と気化器を基本とする供給系を計画し構築した。供給設備の完成に工期を要したため，完成前に，アンモニア50kg容器を用いた機能確認試験を先行して行ない（図４，図５），灯油－アンモニア混焼によるガスタービン発電を試みた。実証試験は産総研が平成26年４月に開設した福島再生可能エネルギー研究所（福島県郡山市）において実施した。

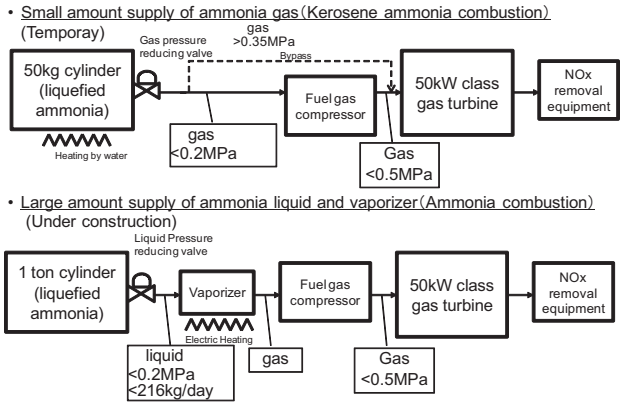


Fig. 4　Plan of Ammonia supply

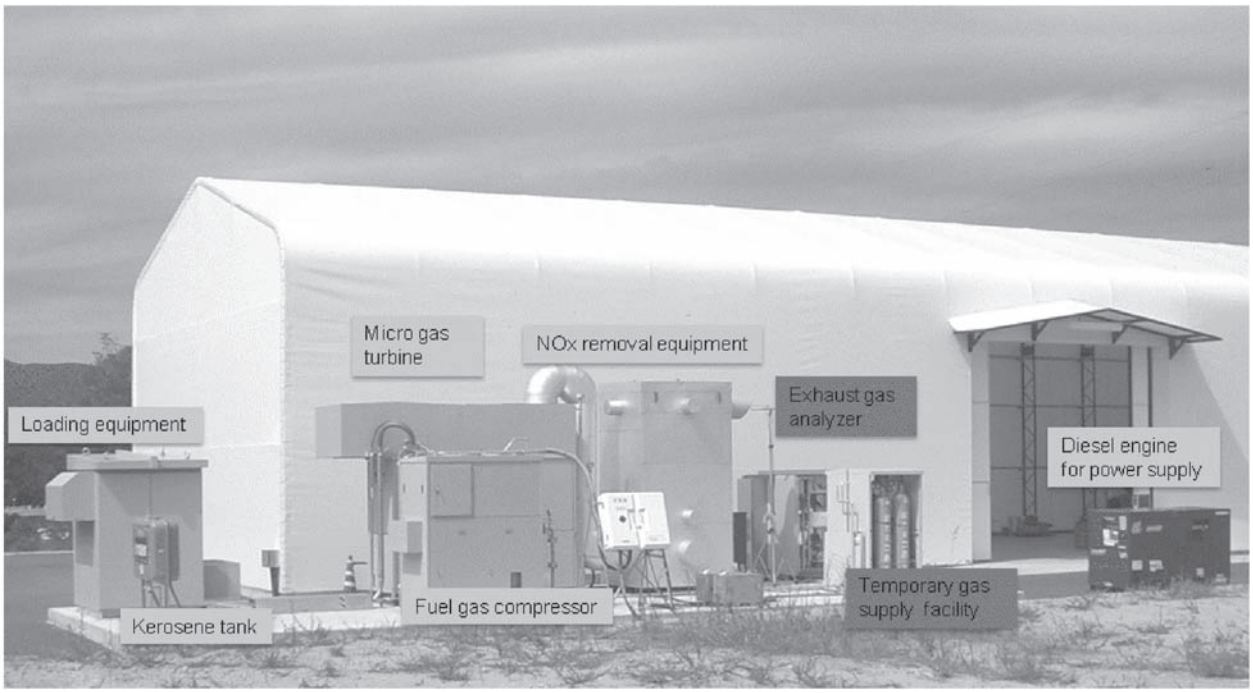


Fig. 5　Test facilities for micro gas turbine power generation with temporary gas supply facility

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

4.2 試作ガスタービン[3]

図６に今回開発したマイクロガスタービン発電装置を示す。トヨタタービンアンドシステム社製の灯油焚き50kWのシステムをベースにしている。液体と気体の二系統の燃料を供給できる燃焼器を試作して置き換えることで，灯油とアンモニアを安定して混焼可能とした。

試験は以下のように行った。灯油だけを供給してガスタービンを起動し，安定に21kWの発電を開始した後，気体燃料を供給するガス配管に窒素－アンモニア混合ガスを供給してアンモニアの燃焼を開始し，徐々にアンモニアの比率を上げ，最終的には窒素供給を止めて，灯油－アンモニア混焼を実現した。発電出力を一定に制御する運転を行ったところ，アンモニア燃焼による発熱量分だけ，灯油の供給量を削減することができ，灯油の供給量を30%削減した状態で21kWの発電出力を安定に維持した（図７）。

また排出された窒素酸化物は，通常の脱硝装置に適量のアンモニアを供給することで10ppm未満までに抑制でき，環境基準に十分適合していた。

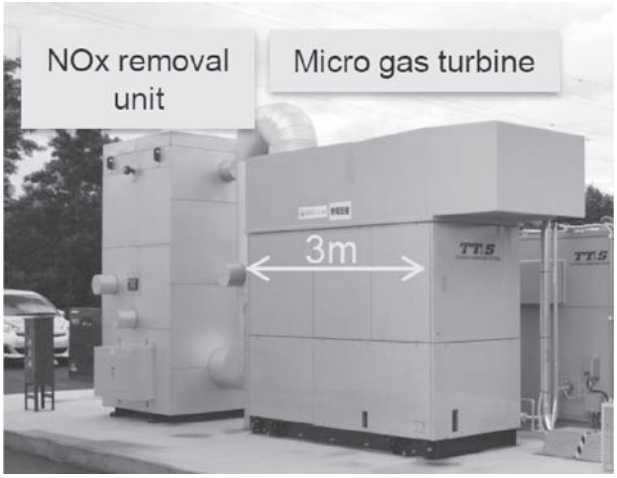


Fig. 6 Ammonia-fired micro gas turbine power generation
(3)より転載

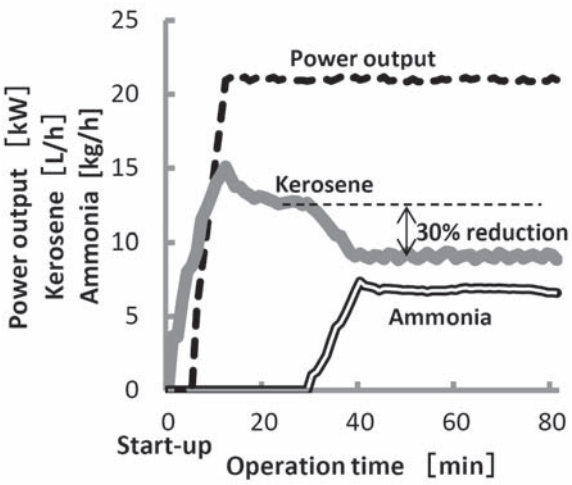


Fig. 7 Change of fuel supply and power output of gas turbine
(3)より転載

5．今後の予定

今後，引き続きアンモニア比率を増加させた灯油－アンモニア混焼，天然ガス－アンモニア混焼やアンモニア専焼（CO_2，すすフリー）での実証実験を行う予定である。

本研究開発について

本分野の研究開発の一部は，平成25年度JST戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発（ALCA）の委託研究「アンモニア内燃機関の技術開発」において行われた。

6．引用文献

(1) IEA World Energy Outlook 2013, 2013
(2) IEA Energy Technology Perspectives 2014, 2014
(3) 平成26年９月18日 産総研・JSTプレスリリース
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140918/pr20140918.html
http://www.jst.go.jp/pr/announce/20140918-2/index.html
(4) NEDO水素エネルギー白書2014, p.100
(5) http://www.chem-station.com/blog/2012/07/post-422.html
(6) Pratt, D.T., Technical Report No.9 “Performance of Ammonia-Fired Gas-Turbine Combustors”, DA-04-200-AMC- 791（x）, 1967
(7) Final Technical Report “Development of an Ammonia-Burning Gas Turbine Engine”, DA-44-009-AMC- 824（T）, 1968
(8) Evans, B., The Tenth Annual NH3 Fuel Conference, 2013
(9)後藤，早川，三本,荒川，工藤，小林,「高圧環境下におけるアンモニア空気予混合火炎の層流燃焼特性」, 第52回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.276-277, 2014.12
(10) G. Ciccarelli, D.Jackson, J.Verreault, Combustion and Flame, 144, 2006, pp.53-63
(11) アンモニア設備規程, 日本電気協会 火力専門部会, 2008

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

論説◆解説

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

低濃度メタン燃焼ガスタービン発電

黒坂　聡[*1]
KUROSAKA So

山崎　義弘[*1]
YAMASAKI Yoshihiro

キーワード：低濃度メタン，炭坑通気メタン，触媒燃焼器，電力変換装置，再生サイクル
Lean methane, Ventilation air methane, Catalytic combustor, Power converter, Regenerative cycle

1．はじめに

地球温暖化の影響原因とされている温室効果ガスには，排出量の約80%を占める二酸化炭素（CO_2）が代表的であるが，CO_2に次に多く排出されているものとしてメタンが挙げられる。メタンの地球温暖化係数はCO_2の約21倍と高く，大気中に放出されているメタンガスの総排出量の約６%が炭鉱からである（図１）。

石炭層中には，石炭の生成過程で生じたメタンガスが含有されており，石炭採掘時に湧出する。湧出したメタンガスのうち，高濃度（メタン濃度30%以上）の炭鉱メタン（CMM：Coal Mine Methane）は民生ガスや発電などに利用されているものの，低濃度（メタン濃度１～30%）のCMMとメタン濃度１%未満の希薄な炭坑通気メタン（VAM：Ventilation Air Methane）は未利用のまま大気中に放出されている。炭坑内の作業安全を確保するために通気に含まれるメタン濃度が１%未満になるように膨大な換気空気を炭坑内に送り，排出させている（図２）。坑内から排出される通気がVAMであり，採炭過程において排出されるメタンガスの60～80%を占める（図３）。

VAMの大気中への放出は資源エネルギーとして有効利用しないまま無駄にするだけでなく，地球温暖化の一因にもなっている。

当社はVAMなどの低濃度メタンガスを燃料として利用する「低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置」を世界で初めて開発した。本報では，開発した本装置のコンセプトと適用技術の概要を紹介する。

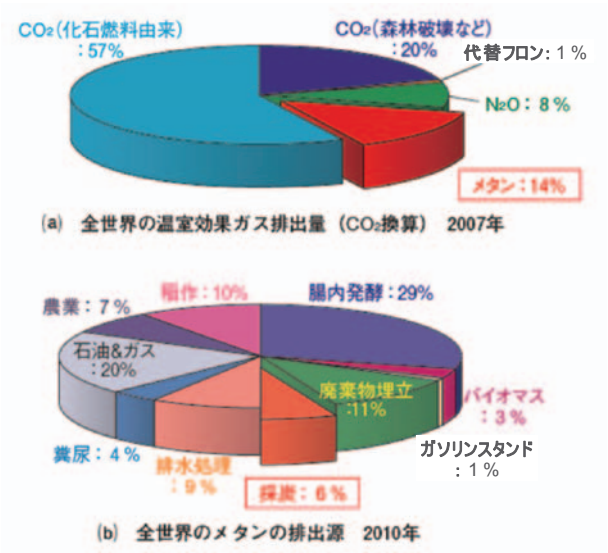


Fig. 1 Greenhouse gas emissions and sources around the world

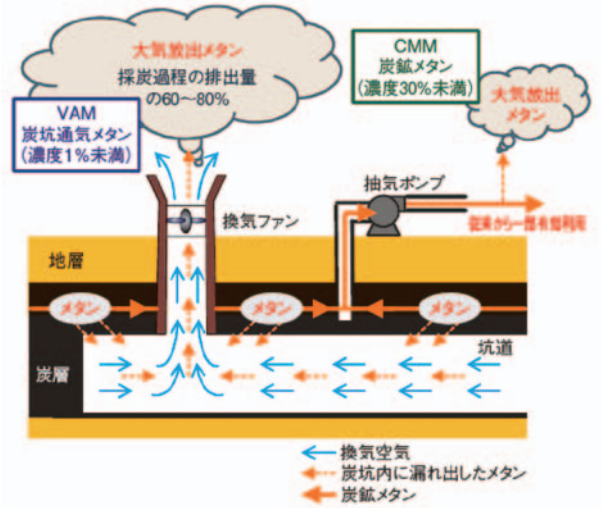
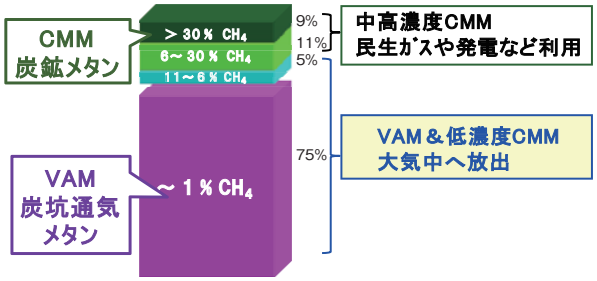


Fig. 2 Methane emitted into the atmosphere from coal mines



出典：中国煤炭信息研究院(CCII)による

Fig. 3 Methane emissions from coal mines in china, 2008

原稿受付　2014年12月24日

＊1　川崎重工業(株)　技術開発本部　システム技術開発センター
〒673-8666　明石市川崎町１-１
＊2　川崎重工業(株)　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

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

2．未利用希薄メタン処理システム

2.1　システムのコンセプト

当社が提案する未利用希薄メタン処理システムのコンセプトを図４に示す。現状では炭鉱から大気放出されている大量の希薄メタン（VAMおよび低濃度CMM）を効率的に処理でき，かつ発電することで未利用エネルギー資源を有効利用するものとなっている。

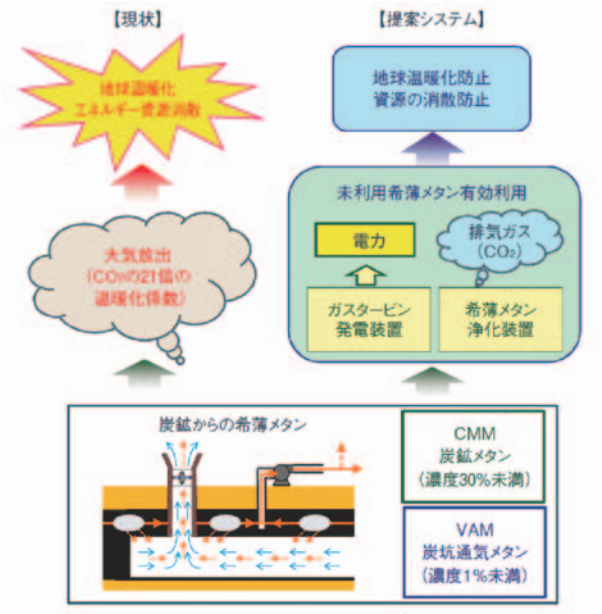


Fig. 4　Concept behind treatment system for unused lean methane

2.2　システムの機器構成

本システムの機器構成を図５に示す。

「ガスタービン発電装置」では，エンジン吸気口から未利用のまま大気放出されている大量のVAMとCMMの混合気（メタン濃度：２％）を吸い込んで圧縮し，触媒燃焼器にて燃焼させ，高温・高圧の燃焼ガスでタービンを回転させ，発電機を駆動させる。

ここで，触媒燃焼器は，通常の方式で燃焼できない超低濃度メタンガスを燃焼可能であるが，触媒反応させるために予熱が必要となる。本システムでは熱交換器をタービン排気口に設置し，排熱によって触媒反応開始温度まで加温して，触媒の予熱を図っている。始動時においては，排ガス温度が低く触媒を予熱できないため，加温のための熱源が別途必要となる。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の設置を検討したが，始動時の触媒予熱の為だけに燃料用ガスコンプレッサを設置することは大幅なコスト増となるため採用しなかった。そこで，本システムでは始動時の熱源として，タービン出口から熱交換器の間の常圧部分に，常圧のCMMを燃料とする始動用燃焼器を設置した。

本システムにより，大量の温室効果ガス（VAMおよびCMM）の放出量を削減すると同時に，現状，大気中に放出されているエネルギー資源を有効活用して発電することにより，天然ガスや軽油等の発電用良質燃料の使用量も削減できる。

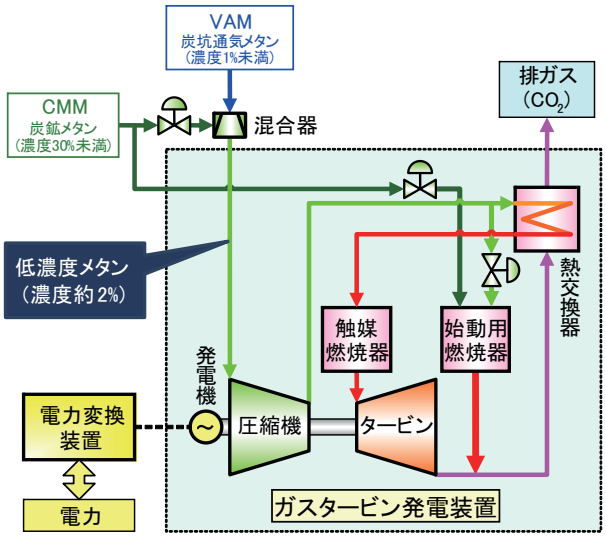


Fig. 5　Configuration of system

2.3　システムの特長及び計画性能

本システムの特長を以下に示し，計画性能を表１に示す。

(1) 従来，利用手段が無かったVAMおよび低濃度CMMで発電でき，良質な燃料（天然ガス，石油，石炭）の消費量を削減できる。
(2) 発電と同時に温室効果ガス排出量を削減できる。
(3) 窒素酸化物（NOx）が発生しない。
(4) メタンの可燃範囲（５～15％）外の低濃度メタン（約２％）を使用するため，安全性が高い。
(5) 小型で可搬式にすることが可能。
(6) 低濃度メタンガスを常圧のまま利用するため，燃料用ガスコンプレッサが不要。
(7) 低濃度CMMを常圧のまま燃料とする始動燃焼器を備えているため，始動時において良質な燃料を必要とせず，燃料用ガスコンプレッサも不要。

Table 1　Design performance of system

発電装置	発電機端出力（kW）*1)	800
	VAM+CMM処理量（Nm^3/h）	22,000
	温室効果ガス削減量（t-CO_2/年）*2) *3)	48,000
浄化装置	VAM処理量（Nm^3/h）	38,000
	温室効果ガス削減量（t-CO_2/年）*2) *3)	20,000
温室効果ガス削減総量（t-CO_2/年）*3)		68,000

*1) 15℃，１気圧，高度：0m条件における出力.
*2) メタン濃度をVAM：0.5%，CMM：30%とした場合.
*3) 稼働率97%で１年間運転した場合.

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

3．適用技術の概要

ガスタービン発電装置の主要諸元を表２に示し，外観を図６に示す。さらに，各要素の適用技術の概要を以下に示す。

Table 2 Equipment specifications of gas turbine generator set

部　位	項　目	形式・仕様
ガスタービン	形　式	再生サイクル　１軸式
	出力位置	吸 気 側
	圧 縮 機	遠心２段
	燃 焼 器	単缶　触媒燃焼器
	タービン	軸流３段（全段無冷却）
エンジン機　器	始動燃焼器	単缶　拡散燃焼器
	熱交換器	プレートフィン型
	減 速 機	遊星２段歯車式
パ ワ ー エレクトロニクス機　器	発 電 機	誘導発電機（始動装置兼用）
	電力変換装置	インバータ・コンバータ方式

3.1　再生サイクル式ガスタービン

本システムの核となるガスタービンは，当社が開発・販売している1,000kW級ガスタービン：M1A-01をベースに，排気口に熱交換器を備えた再生サイクル式に最適化したもので，希薄燃料に対応できる触媒燃焼器を備えている（図７）。

熱交換器については，高い温度効率と耐久性に加え小型であることが要求される。これらを考慮し，当社600kW級再生式ガスタービン：S7Aでも実績のあるプレートフィン型熱交換器を大型化し採用した（図８）。

Fig. 7 Gas Turbine Power Section

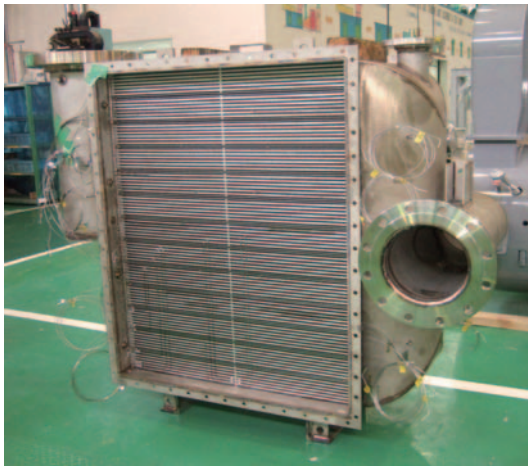


Fig. 8 Plate-fin-type recuperator

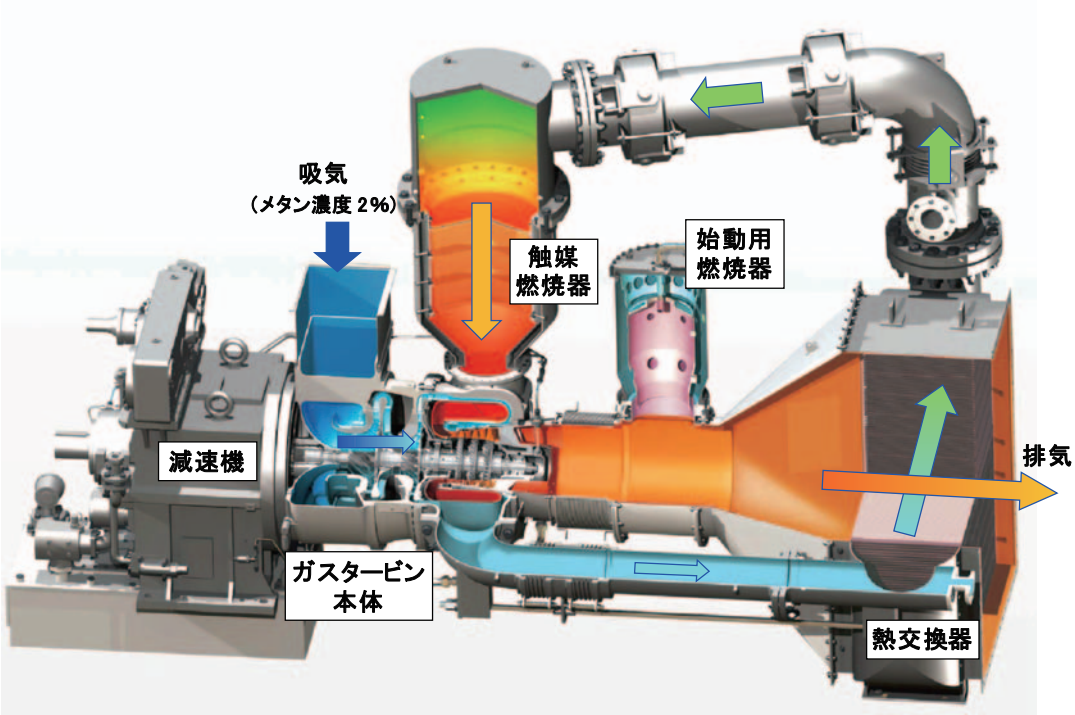


Fig. 6 Overview of lean methane-fueled gas turbine

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

3.2　触媒燃焼器

本システムに必要不可欠な「触媒燃焼技術」は，触媒表面に吸着した空気中の酸素とメタンを触媒の強い酸化作用によって燃焼反応（酸化）させるものであり，通常の火炎燃焼ができない超低濃度のメタンガスを処理することができる（図９上）。燃焼温度は低温（300～900℃）であり，大気汚染原因物質の一つである窒素酸化物（NOx）は全く発生しない。一方，通常の燃焼器における火炎燃焼反応を行うためには可燃濃度範囲（５～15％）の混合気と1000℃を超える高温を保つ必要があり，大量のNOxを発生する（図９下）。

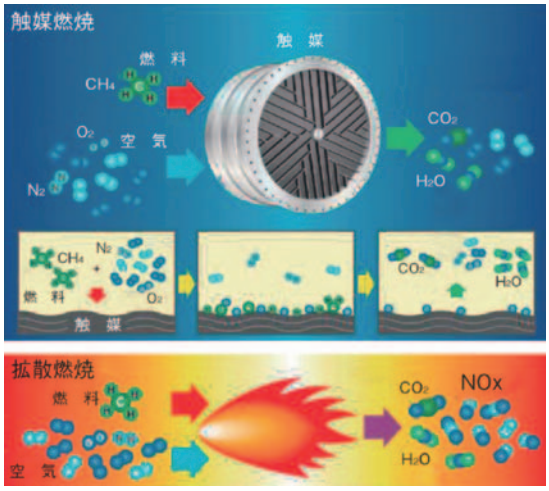


Fig. 9　Comparison between catalyst combustion and diffusion combustion

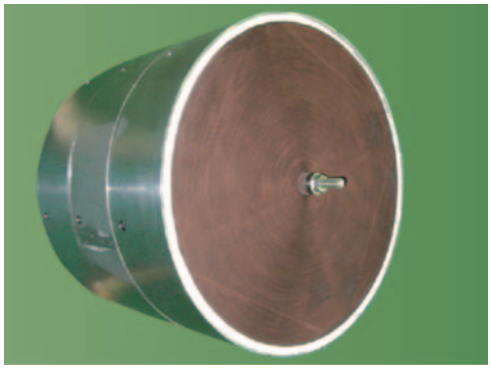


Fig.10　Catalyst combustor core

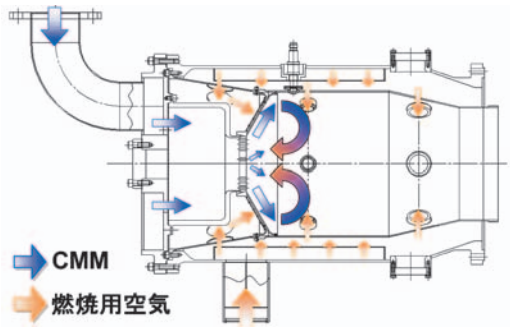


Fig.11　Schematic view of starting combustor

当社は，超低NOxガスタービンとして，触媒燃焼式ガスタービンM1A-13Xを世界で唯一実用化しており，それらの触媒燃焼技術を転用し，本システムの触媒燃焼器を開発した（図10）。

3.3　始動用燃焼器

本システムでは始動時の熱源として，タービン出口から熱交換器の間の常圧部分に，常圧のCMMを燃料とする新開発の始動用燃焼器を設置した。始動用燃焼器の空気には，ガスタービンのモータリング時に圧縮器から発生する加圧空気を一部抽気して利用している。

この機構により始動用燃焼器は本体サイズを大幅に小さくでき，システム全体の小型化に寄与している（図11）。

3.4　電力変換装置

電力変換装置（セルインバータ）の外観を図12に示し，始動および定常時の機器の作動イメージを図13に示す。

本システムの始動時では，触媒を予熱するために熱交換器を暖機してからVAMとCMMの混合気を触媒燃焼器に送り込んで着火させる必要がある。この暖機および着火工程において，ガスタービンを部分回転数で駆動させた方が軸動力（電力消費量）と未着火リスクが少なくなる点で有利となる。

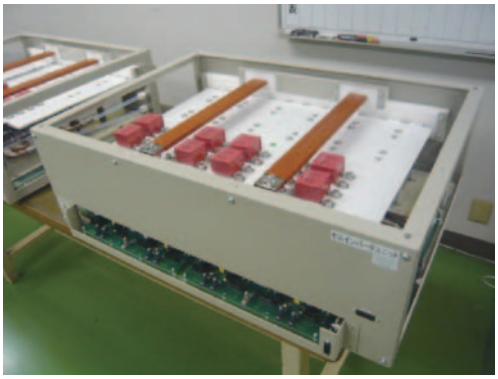


Fig.12　Power converter

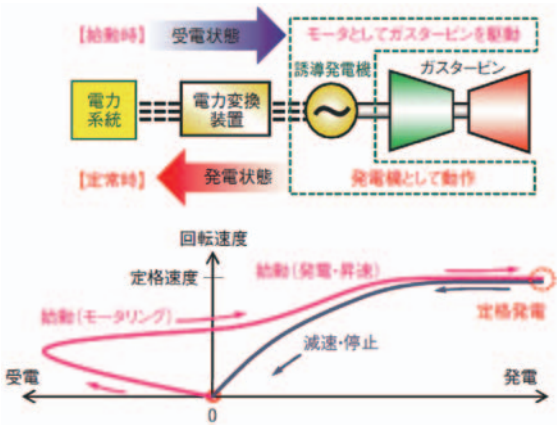


Fig.13　Image of equipment operation in starting phase and steady running phase

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

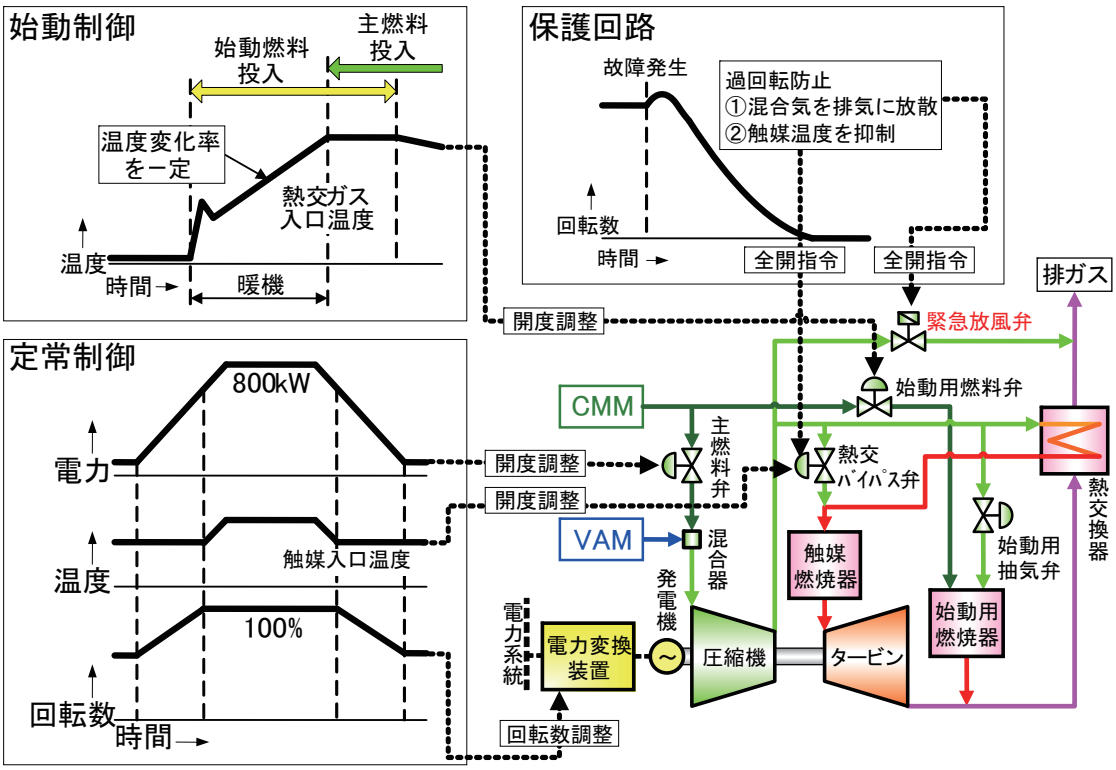


Fig.14 Schematic diagram of control system for lean methane-fueled gas turbine generator

また，熱交換器は急激な温度変化に対して破損する恐れがあるため，暖機から定格状態まで，ガスタービンを部分回転数で維持させる必要がある。

上述のことを踏まえ，本システムでは発電機に誘導発電機を採用し，自社開発の電力変換装置を用いて，始動時のモータリングから定格発電までガスタービンの可変速制御を実施している。電力変換装置は，発電機を系統連系したままでモータ・発電の双方向の電力のやり取りが，同期投入などの操作無しでシームレスに行える。

3.5 制御システム

本システムは，通常の制御・シーケンスをベースとして，始動と触媒の２つの燃焼器への燃料制御，電力変換装置による回転数制御，VAM/CMMが変動した際の圧縮器内での混合気爆発防止や触媒劣化時による失火防止といった複雑な保護回路や対応制御を新たに組み込んでいる。制御システムの概要を図14に示す。この他，触媒劣化を触媒出入口温度差と吸気燃料濃度の関係から判定し，回転数と触媒温度の設定を補正する制御なども組み込んでいる。

構築した制御システムは，始動から定格までの全運転域で，燃料の増減操作に加えて，電力変換装置による回転数操作を組み合わせることで安定した触媒燃焼と発電状態の維持を実現すると共に，触媒や熱交換器などの機器の保護と安全性に配慮したものとなっている。

4．社内実証試験

4.1 実証試験機

実証試験機（図15）および実証試験設備（図16）を用いて社内（明石工場）にて実証試験を行った。社内実証試験では，VAMのような低濃度メタンが存在しないため，空気を吸気し，混合器に都市ガスを噴霧し，低濃度メタンを模擬している。

4.2 実証試験結果

実証試験機にて，始動試験や負荷試験などを実施し，始動から負荷運転までの自動制御にて安定的な運転が可能で，かつ所定性能（温室効果ガス削減量：48,000 ton-CO_2/年，定格出力：800kW）が得られることを確認した。負荷試験結果の一例を図17に示す。

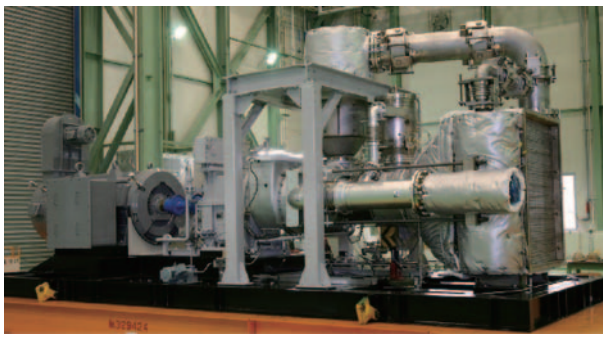


Fig.15 Demonstration test unit

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

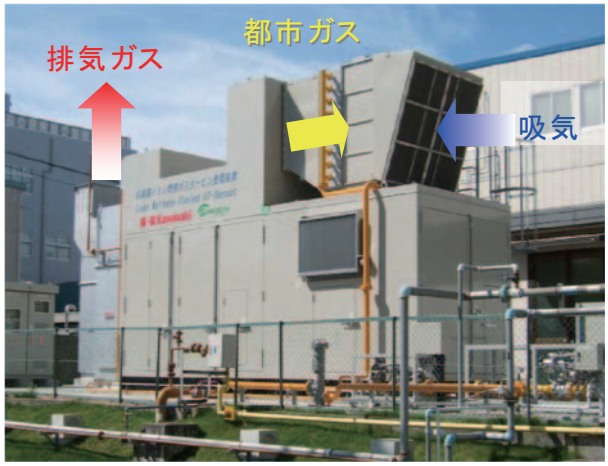


Fig.16 Demonstration test facility

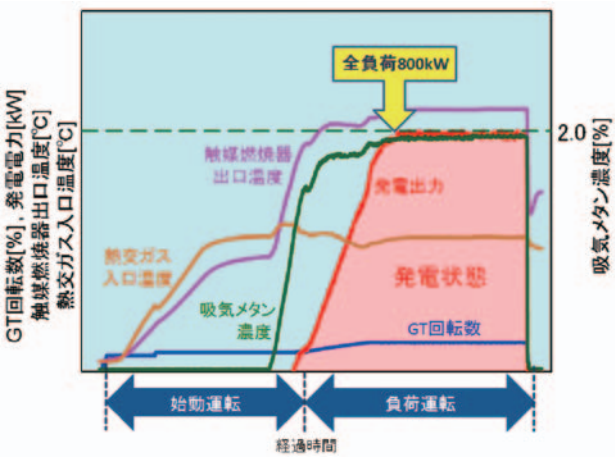


Fig.17 Example of results of demonstration tests

4.3　耐久試験

実機試験機にて，本システムの各機器要素の耐久性を確認する試験を実施して，目標性能を満足する結果を得られた。確認した耐久試験項目を下記に示す。

(1) 連続負荷試験：触媒燃焼器の触媒活性変化を確認
(2) サイクル試験：始動・停止の低サイクルに対する熱交換器など機器の耐用性を確認
(3) 吸気メタン濃度変動試験：吸気メタン濃度変動に対するシステム全体の追随性を確認

5．おわりに

今後，開発した「低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置」を用い，世界の炭鉱やごみ埋め立て地などから大気中に放出されている未利用の低濃度メタンガスの大量処理にて，温室効果ガスの削減と発電による有効活用を通じ，地球環境の未来に貢献していく。

参考文献

(1) 山崎義弘，上村大助，堂浦康司，細川恭史，田中克典，佐藤　毅，黒坂　聡，松尾和也，堀川敦史，“低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置”，川崎重工技報173号，(2013)，pp. 38-41.
(2) 上村大助，合田真琴，山崎義弘，黒坂　聡，松尾和也，堂浦康司，“炭坑通気メタン（VAM）焚きガスタービン発電装置の開発”，第40回日本ガスタービン学会定期講演会論文集，(2012)，pp. 261-264.
(3) 柏原宏行，緒方正裕，木下康裕，“川崎重工業における燃料多様化の取り組み”，日本ガスタービン学会誌，Vol.39，No. 6，(2011)，pp. 421-427.
(4) 山崎義弘，黒坂　聡，柏原宏行，“希薄燃料吸入ガスタービン”，特許 第4751950号
(5) 黒坂　聡，山崎義弘，佐野　光，堂浦康司，南　吉隆，“希薄燃料吸入ガスタービン”，特許 第5183795号
(6) 黒坂　聡，山崎義弘，堂浦康司，“希薄燃料吸入ガスタービンの制御方法および制御装置”，特許 第5592965号

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

論説◆解説

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

航空分野における地球温暖化対策への取り組み

藤原　仁志*1　FUJIWARA Hitoshi
岡井　敬一*1　OKAI Keiichi

キーワード：国際民間航空機関，航空用バイオ燃料，低炭素燃料，電動推進
International Civil Aviation Organization，Aviation bio fuel，Low carbon fuel，Electric powered propulsion

1．緒言

航空分野における地球温暖化対策の目標や行動計画の設定については，航空輸送の性質上，国際的な合意の元で進めることが望ましく，現在は，国際民間航空機関（ICAO）を中心に行われている。航空分野から排出される温室効果ガスは，全体のおよそ２％と現状では大きくないが，航空輸送は年率でおよそ５％程度の伸びが続くと予想されていることや，自動車分野で進む急速な効率化，電動化も考慮すれば，今後，航空分野の温暖化への影響度が日増しに大きくなることが懸念される[1]。本稿では，目前に迫る航空機 CO_2規制から始め，航空機の燃費を考える上で必要な基本事項や今後の動向，航空用バイオジェット燃料，将来に向けた代替燃料・電動化の可能性などについて述べる。本稿は解説記事であるが，文献情報の羅列となって読みにくくなることなく，他分野の方にも興味を持って読んでいただけるよう心がけた。

2．航空機排出CO_2関連の国際規制の動向

航空機のCO_2排出規制については，国際民間航空機関の環境保全委員会（ICAO CAEP）において作業が進められており，排出基準について 2016年２月のCAEP10総会で合意し，2020年より施行される方向で議論が進められている[2]。CO_2排出規制の元になる指標（横軸と縦軸）はほぼ決まっており，今後，規制レベル，規制対象や，各機材のCO_2排出の認証作業スケジュールの具体的な詰めが行われる。大手航空機メーカは主要機材のCO_2排出認証に積極姿勢を見せており，中小もこれに追随していくものと思われる。また，ICAOでは，関連してAFTF（代替燃料タスクフォース）やMBM（Market Based Measure）の部会も並行して行われており，代替燃料使用によるCO_2削減効果算定 LCA（Life Cycle Analysis）の標準化や，国際航空への課金等を視野に入れた市場原理によるCO_2削減の仕組み作りも進められている。これらにも，上記の ICAO CO_2排出規制の規制値が基準となっていくものと予想される。

3．航空機の燃費の基本事項と燃費改善の試み

本節では，まず，航空機の燃費効率について，基本に立ち返って見直しつつ，必要な技術や将来の方向性について考えたい。本節の内容は，ICAO CAEPのCO_2 task groupでも日本政府委員より発表され，航空機CO_2規制指標決定の課程においてもtechnology neutralityとして，一つの重要なコンセプトとされた事項である。

3.1　航空機の燃費効率

簡単のため，図１のように，一定高度を一定速度V［m/s］で巡航する航空機を考える。

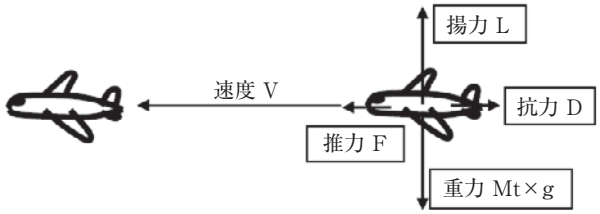


Fig. 1　An aircraft at cruise condition

航空機の役割は，要求された重量の人荷（payload）を，指定された距離だけ運ぶこと，すなわち，人荷×運ぶ距離，と考えて良いであろう。本来は時間の要素もあるが，とりあえず，亜音速機ではそれほど大きな差異はないので除いて考える。今，payloadを M_p[kg]，機体やエンジンも含めた航空機の総重量を M_t[kg］とし，図１のように１秒間でV[m］進んだとする。その時の燃料流量をm_f[kg/s]，燃料の発熱量をq_f[J/kg］とすると，その１秒間にエンジンに与えた熱は Q_f（$=m_f\times q_f$）[J］となり，航空機の燃費に関する効率 η は，

$$\eta \propto \frac{M_p \times V}{Q_f} \tag{1}$$

と考えるのが自然である。今，図１の巡航状態における機体の力のつりあい$L= M_t\times g$，$F=D$に注意して，式 (1) を変形すると

原稿受付　2015年１月12日
＊１　宇宙航空研究開発機構 航空本部
〒182-8522　調布市深大寺東町 7-44-1
＊２　東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656　文京区本郷 7-3-1

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

$$\eta \propto \frac{M_p}{M_t g} \times \frac{L}{D} \times \frac{F \times V}{Q_f} \tag{2}$$

となり，重力加速度gは一定として省略すれば

$$\eta = \underbrace{\boxed{\frac{M_p}{M_t}}}_{\text{構造材料}} \times \underbrace{\boxed{\frac{L}{D}}}_{\text{空力}} \times \underbrace{\boxed{\frac{F \times V}{Q_f}}}_{\text{エンジン}} \tag{3}$$

を得る。上式は，基本的な物理現象に基づくものであって，今後のCO_2削減に向けた，構造材料・空力・エンジンの３者の高効率化の努力の寄与度が，式に示される通りCO_2規制の指標にも均等に反映されるべきであることを示しており，この考え方がtechnology neutralityである。上記の通り，ICAOのCO_2規制の指標を決める上でも重要なコンセプトの一つとされ，CAEP9で実際に合意された指標には，このtechnology neutralityが考慮されている。ただし，これを完全には満たしていないが，その理由としては，technology neutralityを突き詰めて行けば，基本的に長距離便は搭載燃料重量の関係で不利になり，短距離便の乗継が推奨されることとなること，また，小型機やビジネスジェット機など，比較的payloadが小さな機材は，一般の中大型旅客機と同一には扱えないという課題が生じることなどがあげられる。このため，ICAOの航空機CO_2規制では，上記と合わせて，transport capability neutrality（多様な航空需要を尊重し，特定用途の機材が不利になることがないようにすること ）というコンセプトも採用している。規制式の指標決定においては，0.24という指数に象徴されるように，両者のバランスをどう取るかという技術的な議論がさかんに行われ，決定の課程では，日本からも，航空局を中心として，JAXAやメーカから積極的な貢献が行われ，特に，現三菱重工業の高見光氏のICAOのCO_2指標決定における貢献は，国際会議の場で高く評価されたことを付記しておきたい。

3.2　航空エンジンの燃費効率

上式(3)によれば，航空エンジンの主な担当分は３番目の$F \times V/Q_f$となるが，これについて，簡単のため，入口と出口の静圧は同じとし，図２のようなモデルを考える。

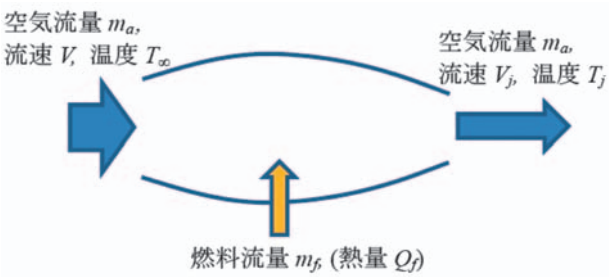


Fig. 2　An aero-engine at cruise condition

この時，エンジンの推力は

$$F = m_a \times (V_j - V) \tag{4}$$

と表せる[3]。エネルギ保存については，与えた熱は，運動エネルギ，圧力エネルギ，内部エネルギの増分の合計に相当する。

$$Q_f = \left(\frac{1}{2}m_a V_j^2 - \frac{1}{2}m_a V^2\right) + \left(m_a C_p T_j - m_a C_p T_\infty\right) \tag{5}$$

航空エンジンは流入流速Vより出口流速V_jを上げて，その運動量差で推力を得ることが目的であるから，排気の温度T_jを上げて内部エネルギ$m_a C_v T$を増加させても，産業用のように上空でコジェネ等を行うことは出来ず，捨てるだけとなる。また，入口より出口で気体が膨張するため圧力エネルギも増加し，これは正確には，ベルヌイの式が損失無で成立していることから，エンジンの熱機関としての摩擦損失とは言い難いのであるが，圧力エネルギの増加分も結局は利用不可能であるので省略する。これらより，与えた熱のうち，運動エネルギの増分に寄与した割合，すなわち

$$\eta_e = \left(\frac{1}{2}m_a V_j^2 - \frac{1}{2}m_a V^2\right) \Big/ Q_f \tag{6}$$

が，航空エンジン単体として見た熱機関としての効率と考えられる[3]。エンジンの排気温度T_jは EGT（Exhaust Gas Temperature）と呼ばれ，同じ燃料流量でも EGTが上がってきていることは，効率が下がってきていることを意味し，エアラインでは，定期的にエンジンの水洗浄を行って EGTを下げる努力が行われている。圧縮機・タービン・ファンその他の流路では，空気どうしや壁面との摩擦によって，運動エネルギが内部エネルギへと変換されるので，形状や冷却方法の工夫によって，上記の熱効率が上昇する。また，熱サイクルとして，全体圧力比やタービン入口温度を上げると，上記効率が向上するが[3]，圧縮機の段数が増えると重量も増える上，材料や冷却の問題も生じる。現状で最大50前後と考えられる圧力比は，次世代エンジンではもう一段上昇させる方向のようであるが，さらにその次の高温高圧力比の段階となると，火炎温度が上がりすぎて，究極的には投入された熱で分子のかい離が起こり，温度が上昇しない領域に入ってくることが考えられる[4]。このため，巡航時のみ圧力比を高めたり，離陸上昇時のみ再熱を行うなどの工夫が必要になる可能性が考えられる。

最後に，エンジンでの運動エネルギの増加が，航空機を運ぶ仕事に寄与する割合，すなわち

$$\eta_p = F \times V \Big/ \left(\frac{1}{2}m_a V_j^2 - \frac{1}{2}m_a V^2\right) = \frac{2}{1 + V_j / V} \tag{7}$$

を推進効率と呼ぶ[3]。まとめれば，式(3)のエンジンの担当する効率について，

$$F \times V / Q_f = \eta_e \times \eta_p \tag{8}$$

を得る。推進効率については，少し計算をすると，式

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

(7)での損失分（分母－分子）は，$1/2m_a(Vj-V)^2$となることから分かるように，排気ジェットが周囲の空気と混合し，大きな渦が形成され，それが徐々に小さな渦へ変換されて，最終的に熱になって消失する（図３参照）[5]。

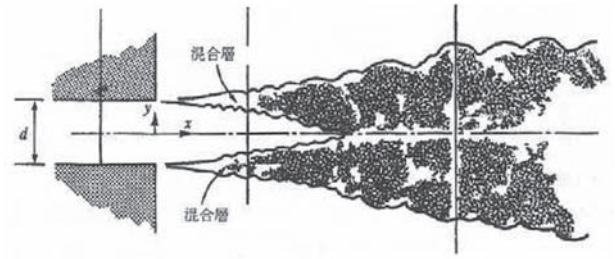


Fig. 3 Loss of kinetic energy of the exhaust jet

推力Fを得るには$V_j > V$となる必要があるが，式(7)より，排気速度V_jが機速Vに近くて少し大きい程度が望ましいということが分かる。ただし，式(4)から分かるように，一定の推力Fを保持するには，同時に空気流量m_aを大きくする，すなわち，ファン径を大きくしたり，ファンケースを取り払って重量ペナルティを軽減し，なるべく広い領域から空気を取り込む工夫などが必要になる。あまりファンが大きいと地面に接触するので，高翼化，分散ファン，究極的にはTilt rotorのような形態も予想できる。

最後に，エンジンの重量軽減については，基本的に式(3)の構造材料の一つの要素となるので，機体総重量に対する比率での効果が期待できる。回転部の段数を減らす，複合材や中空チタンのファンやファンケースなどの軽量化は，それ自体に加え，その部品を支持する部材や回転軸の軽量化にもつながる。

３．航空用代替燃料

ICAOでは2020年から国際航空排出CO_2量を増加させないことを目標に掲げており，この達成には，前節のような機材の効率化や運航の効率化だけでは対応が難しく，大幅なCO_2削減が期待される航空用バイオジェット燃料の導入が期待されている。

3.1　航空用燃料の規格

現状で民間航空輸送に主に使われているジェット燃料はASTM D1655のJetA-1という規格（国内ではJIS規格K2209：航空タービン燃料の１号）であるが，航空用の代替燃料については，ASTM D7566規格により合成パラフィンケロシンをJetA-1に50%以下の割合で混合したジェット燃料の初の承認（2011年７月）に続いて，欧米各国でのバイオ燃料も順次ASTMの認証を受けている。このASTM D7566規格を満たす燃料はJetA-1と同等とされ，従来の空港の燃料供給系統にそのまま投入することができる[1]。混合が50%までに制限されている理由の一つには，fuel serro類の潤滑性低下の問題があり，このあたりが解決されれば 100%バイオ燃料での運航も将来的に可能になっていくものと期待できる。

3.2　航空用バイオ燃料の普及

世界各国で航空用バイオ燃料の製造プロジェクトやASTM認証が計画・実行されている。例えば，米国ではロサンゼルス空港でユナイテッド航空にバイオジェット燃料が継続的に供給される計画となっている他，欧州では，ロンドンで都市ごみをガス化，合成して得られる燃料が英国航空に供給される予定となっている。日本では，2009年に日本航空がバイオジェット燃料を用いたテストフライトを行った実績があるものの，現状では，まだ，継続的な供給をする計画が無い[1]。そのような中，今年度より，東京大学や航空会社，空港会社等が運営委員となり，商社，エンジニアリング会社，国の省庁や関係機関も参加して「次世代航空機燃料イニシアティブ」が立ち上がり，次世代航空機燃料の導入に向けたロードマップを平成27年４月までに策定する活動が行われている[6]。

3.3　航空用バイオ燃料の製造に向けた今後の課題

バイオ燃料の製造方法は多岐に渡り，一般に公開されている資料やホームページも多数あるので，それを順次紹介することも可能であるが，本稿は少し趣向を変えて，筆者らがしばらく本分野に取り組んできて，バイオ燃料の製造課程を理解する上で重要と思われるポイントについて述べてみる。

例えば，ここに一片の木材（割りばしか何か）が，あったとする。これを直接，空気中で火に入れて燃やしてしまえば，ご存じの通り，二酸化炭素と水（水蒸気）となり，後に灰が残るのみである。その場で光や熱が発生するものの，燃料を得ることは出来ない。一方で，木材の中には炭素や水素等の原子が含まれているので，この木材に酸素を与えず熱だけ与えて分解する熱分解を行えば，燃料となり得る有用な物質を得ることが出来る。大手中学入試塾では必ず勉強する小学生の実験の一つにも，割りばしの乾留というものがあり，これはまさに，その熱分解に相当する（図４）。

図４の「かっ色の液体」は，通常は，上澄みは木酢液と呼ばれ，アルコールやカルボン酸を含み，かつてアルコールの製造に利用された時代もある。沈殿する木タールは，比較的炭素鎖の長い（C30前後等）炭化水素やカルボン酸等で，石油精製所等で行われる水素化分解（高圧で水素を加え，炭素鎖を切断し，より軽質の燃料を得ること）を行えば，有用な燃料となる。また，図４で発生している気体は木ガスと呼ばれ，熱分解する温度にもよるが，一酸化炭素や水素，メタン等の有用な燃料が得られる。大手学習塾の資料を見ると，燃焼と熱分解の違いを学ぶためにこの学習をしているようには見えないが，

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

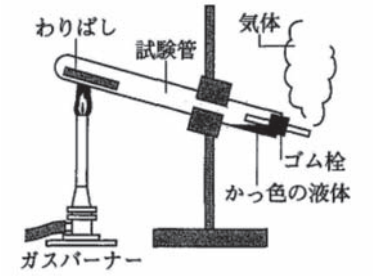


Fig. 4 Dry distillation of a wood chip

この熱分解（及び水素化分解）がバイオ燃料製造の基本と言える。専門家の先生によれば，木材，牛脂，魚など，何でも酸素を与えず 400℃程度まで加熱すれば，各種燃料等に分解するそうである。ただし，反応を加速するために触媒が必要な場合があり，これを接触触媒法と呼ぶ。

以下に，現状での主な航空用バイオ燃料の製造プロセスの分類を示す。

①微細藻類培養→油脂抽出→水素化／熱分解→Jet燃料
②木材調達・粉砕→熱分解ガス化→FT合成→Jet燃料
③都市ごみ→焼却炉/熱分解→ガス化→FT合成→Jet燃料
④廃油，植物油，牛豚脂→水素化／接触熱分解→Jet燃料

上記，FT（Fisher-Tropsch）合成は，COとH_2の混合ガスから炭化水素を合成する方法で，天然ガスの液体燃料化の一環として，Shell社やSasol社が商業ベースで先行しており，日本でもJAPAN-GTLコンソーシアムを中心とした実証研究や商業化に向けた活動が進められている。また，上記の①～④では，途中でアルコールが生成される場合がある他，さとうきび等糖類の発酵によるアルコール生成例も多々あり，LanzaTech社のATJ（アルコールのジェット燃料化）もキー技術の一つである。一方，水素化分解や熱分解については，精油所や大学等を中心として，国内の技術で対応可能と考えられる。いずれの方法でも，現状のバイオ燃料生産量はジェット燃料総消費量に対して見れば非常に少ないが，現段階で重要なことは，コスト面で石油精製の燃料と同等程度とし，継続的な生産・供給・消費が可能な，いわゆるsustainableなモデルケースを作ることであり，うまく行けば，それを日本全国，世界中に広げることが可能となる。

上記③の都市ごみに関して，非常に大雑把な計算を行うとすれば，現状で，ごみは約0.5kg/人・日発生しており，筆者の居住する東京都練馬区を例として人口を70万とすると，練馬区のごみは一日350トン，このうち半分は水分なので，これを消去し，各種データによれば，dry成分175トンの10 ～ 20%を液体燃料として回収できるので，仮に収率を15%とすると，およそ26トン（33kℓ：200ℓドラム缶で 160缶分）のバイオ燃料が毎日得られる。ボーイング777が満席で東京から札幌までの約900kmを飛行しても燃料消費は約7.9トン（約10kℓ）であるので[7]，無視できない数字と言える。問題はコストであるが，既存の焼却炉の変更や，設備の付加にはなかなか難しい面があるので，焼却炉の更新時に，バイオ燃料の製造も考慮して同時に付加設備として設ければ，100円/ℓ 程度での運転が可能な範囲に入ってきている。今後，バイオ燃料の供給まで視野に入れた，理想的なごみの処理方法を，関係機関も含めて，皆様と考えていければ幸甚である。

4．非継ぎ足し航空代替燃料

前節までに紹介された航空用バイオ燃料は，既存のジェット燃料JetA-1と性状がほぼ同等で，従来の機材・配管貯蔵系統などがそのまま使用できる。ここでは，少し対象を広げて，燃料のエネルギ密度から，燃料を分類してみる。第一は現状のジェット燃料と同等程度の燃料（エネルギ密度～ 40MJ/kg強），第二は，低級アルコールなど，含酸素割合が一定以上の燃料（エネルギ密度～30MJ/kg前後），第三が，水素・メタンといった，液体の低温管理が必要だが，高いエネルギ含有を期待できる低炭素燃料（エネルギ密度 50MJ/kg以上）である。

第一のものは，3.1節に示した通り，既に規格として成立している合成・バイオ燃料である。最近では，グリーンディーゼルがジェット燃料の性状に近いとして，航空用燃料の混合燃料として適用可能と検討されている[8]。

第二の含酸素燃料は，酸素を携行することになる点で長距離便では不利になる点があるため，最近では，上記第一グループの燃料を合成する原料として用いる試み（例えば，3.2節の ATJ（Alcohol To Jet））が始まっているが，コスト面で妥当な道筋を得ることが重要になる。

第三の選択肢が，長期的に見れば低炭素化の観点でも最も望ましい。ただし，メタン（50MJ/kg）については，燃料管理の困難さに比して，燃料のエネルギ密度の増大量が比較的小さいため，第二のカテゴリーと同様に，合成燃料の原料とする方が現実的である可能性もある。一方，水素はエネルギ密度が 130MJ/kgと高く，航空用燃料として魅力的で，この分類では，水素が最も望ましい解と考えられる（図５参照）。また，水素は C（炭素原子）を含まないため，燃料製造課程でのCO_2発生はあるものの，本質的にゼロCO_2エミッション燃料と言える。一方，課題としては，通常沸点20.3Kと極低温の液体燃料の管理や，図５に示す通り，燃料が大きな体積を占めることが挙げられる。

水素を燃料とする航空機の例としては，1988年にロシア（当時のソ連）がTu-154の改造機（Tu-155）として水素燃料ジェットエンジンの飛行試験（巡航時のみ作動）を実施している。また，同年，米国でもConrad氏がGrumman .American“Cheetah”の改造機（エンジンは Lycoming 0320-E2Dが原型）を用いて，離着陸を含む全行程で水素レシプロエンジンの飛行試験を成功させている。また，我が国を含む多くの国・機関等によって，30年以上にわたり，エネルギ危機が叫ばれ

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

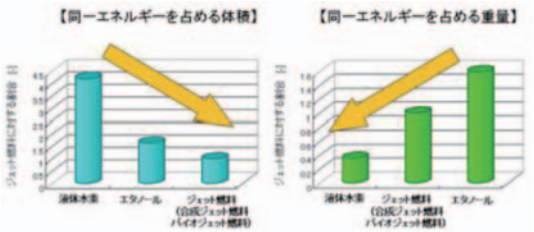


Fig. 5 Comparison of hydrogen, jet fuel and ethanol

る度に水素燃料の導入検討がなされてきた。具体的には，NASAの出資による米国での検討 Brewerや，欧州EUにおける今世紀に入ってからの概念検討プロジェクトCryoplaneなどが挙げられる。包括的なレヴューは文献[9]を参照されたい。

水素燃料航空機に向けた技術課題は，主に，A）燃料タンクの軽量化・繰返し使用と整備，B）エンジンシステム，C）燃料供給系，D）巡航時の大気に及ぼす排気の影響評価に分類できる。既存の航空機と比べて燃料のタンクや供給系統が大きくため，それに応じて，機体の形状も既存のものとは大きく異なる可能性がある。水素燃料航空機はCO_2排出ゼロであるが，一方で，水蒸気の排出は多くなる。水蒸気は，最大の温暖化ガスである上に，航空機は，高空大気に水蒸気を含む排気ガスを排出するほぼ唯一の輸送機関である。また，水蒸気は下記の通り，飛行機雲の形成にも大きな影響を与えることが考えられ，飛行機雲の及ぼす温暖化効果が未解明な現状では，水素航空機に対して，地球温暖化対策としての過大な期待を持つことは，現状では慎まねばならないと言えよう（課題D）。飛行機雲の温暖化効果については，今後の重要な検討課題であり，飛行機雲は温暖化効果が懸念される一方で，遮蔽効果など，逆に地球冷却化効果を予測する研究者もいる。こうした飛行機雲の形成過程と気候変動への影響評価の取り組みとして，NASAがDC-8巡航時に後方の随伴機（Falcon HU25）が直接排気の計測を行う研究（ACCESS-I,II）があげられる[10],[11]。ここでは，バイオ燃料と従来ジェット燃料の巡航時の排気の比較も実施されている。

また，他の輸送機関と同様，水素の経済的で安定な供給は水素の航空輸送への導入に向けた重要な課題であり，水素社会に向けたインフラ整備の是非が水素燃料航空機の導入の鍵を握ると言っても過言ではない。2014年の燃料電池自動車の発売[12]をきっかけに 2015年を普及元年として，インフラ整備を含めた活動が活発に行われてきているものの，実際の普及には，水素燃料を扱う社会をいかに分野横断的に実現していくかが重要と言える。

5．新形式航空エンジンと航空用代替燃料の関係

先に示したように，水素には燃焼時CO_2排出がなく，重量当りのエネルギ密度が大きいという利点がある一方で，安全性を考えると，機体・エンジンに留まらず，空港等の設備も一新することが必要になる可能性があり，継ぎ足し燃料導入に比べるとハードルが一段高い。

液体水素の極低温性を生かした別の活用方法として，極超音速用エンジン（特に加速機向け）がある。このエンジンでは，極超音速飛行時，空気をエンジンに取り込む際に発生する熱を液体水素で冷却できるという利点がある。こうした視点での水素ジェットエンジンの展開を図６に模式的に示す。開発中の極超音速予冷ターボジェットエンジン技術については文献[13]を参照されたい。亜音速機用エンジンでは，液体水素の燃料の冷却目的での利用は，極超音速機ほどでは無いにしても，燃焼器や高圧タービンの冷却，および，圧縮機での予冷却等が期待できる。燃料タンク容積の拡大・配置位置制約・極低温燃料貯蔵・供給要件に基づく設計制約がうまく解決できれば，現状の航空エンジンの高温・高圧化のブレイク・スルーとなる可能性もある。極超音素機を除く機体への液体水素利用に関する事例全般については文献[9]を参照されたい。ここでは，水素を，燃料，もしくは，極低温媒体として用いるエンジンの概念の一つとして研究されているコア分離電動ファンエンジンについて，燃料との関連の視点で以下に紹介する。

コア分離ファンエンジンとは，現状の直結式ターボファン（Direct-Drive Turbofan）エンジンのバイパス比向上限界を克服するために，開発中のギアドライブターボファン（Gear-Drive Turbofan）エンジンの考え方を一歩進め，動力源供給用コアと推進用ファンを別置きとするものである。動力源にはいくつかの可能性があるが。ガスタービン発電機等電力供給による検討が主流である。コアと直結した推進ファンであれば，バイパス比10超で限界があるが，適切な大きさの複数の電動ファンを設けることで，発電コア流量に対するファン流量（相当バイパス比）を30前後まで拡大することが検討されている[14]。これは，2.2節に示したファン径拡大の制約を解消することにもつながる。

このコア分離ファンエンジンにおける課題の一つが，

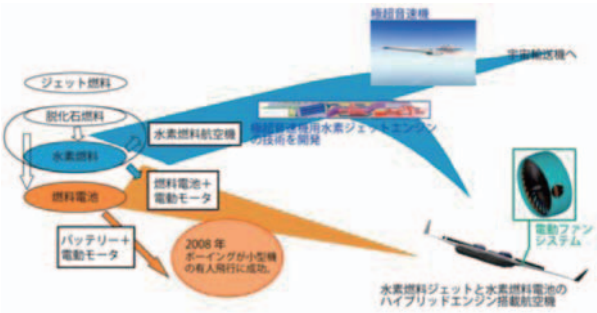


Fig. 6 Future applications of hydrogen jet engine technologies

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

ファン駆動用軽量モータの導入であるが，軽量化の一手段として，液体水素超電導モータの利用が検討されている[15],[16]。超電導リニア新幹線においては，液体ヘリウム超電導技術が適用されており，鉄道業界を中心に次世代高温超電導として，窒素超電導の線材技術の研究開発が積極的に進められている。航空機においては，液体水素を冷媒として，二ホウ化マグネシウム MgB_2などを超電導材料とする超電導モータ向けに活用することが積極的に検討されており，液体水素中に直接入れられた超電導モータの駆動試験がすでに行われている[17]。また，米国でも，解析・数値的に超電導モータ適用の検討がなされている[16]。こうした検討例では，液体水素管理の困難さから，発電用ガスタービン燃料はジェット燃料を用い，極低温の利用のために別に液体水素を用意することなどが想定されている[14]。

コア分離ファンエンジンにおいて，水素を燃料として利用するという観点では，水素を，ガスタービン，もしくは，燃料電池 /ガスタービン・ハイブリッド発電機用燃料として用いることが検討されている。燃料電池については，重量等の課題があるものの，ガスタービンと組み合わせることで高効率を追求できる固体酸化物型燃料電池の適用が有望視されており，水素を含む多様な燃料が利用可能である[13]。固体酸化物型燃料電池では多様な燃料が利用可能であるが，炭化水素燃料を用いる場合であっても，原油由来のジェット燃料より，硫黄分を含まないバイオ燃料の方が好ましいと指摘されている[18]。

NASA-Boeing Sugar（N+4）検討では，コア分離ファンエンジンではないが，ターボファンエンジンの圧縮機–燃焼器間に固体酸化物型燃料電池を設けており，ここではメタン燃料直接改質を想定している[19]。この検討は，水素より高温の液体メタンで利用可能な超電導技術が2040年頃に出来ることを期待してのものであり，燃料電池からの出力は，別置きの電動ファンを駆動するために用いられるとしている。

以上のように，2040年前後以降を目指して進められる旅客機用コア分離ファンエンジン技術（NASA N3-X, NASA-Boeing Sugar Bolt（N+4）, Airbus E-Thrust[20], JAXA Emission free aircraft）では，現状のターボファンエンジンの性能を大きく超えるエンジンを導入するために，新しい概念と低炭素燃料の組み合わせを前提とするケースが多い。この背景として，NASA Research Announcementのように，目標性能が与えられて，それを実現する技術の組み合わせの提案を公募する仕組み等があり，当該分野の概念検討を促進している。上記の通り，亜音速旅客機用のエンジンで，水素やメタンといった従来のジェット燃料と性状が異なり，極低温・低密度というハンデを持つ燃料を用いる場合には，新しいエンジン概念との親和性・超電導適用といった強い利点が求められる。また，こうしたエンジンシステム概念の実現に向けては，適切なシステム設定と，鍵となる要素技術の実現が必須である。

最後に，システムエネルギマネジメントの視点から，水素と燃料電池の活用検討事例を紹介する。現在の航空機のシステム動力は，通常，エンジン由来の油圧・高圧空気・電力により供給されている。こうした動力の発生量は，エンジンの運転状態に左右され，必ずしもシステム側の需要量の変化に最適な対応をしていない。こうした問題意識から，IHI/IAは，ボーイングの環境適合性実証機 eco-Demonstratorの初号機で，水素–酸素再生型燃料電池の搭載試験[21]を行い，発電側と需要側の需給不釣り合いを解消する手段としての燃料電池の活用実証を行った。再生型燃料電池は，燃料電池と逆反応の水電解装置も備えており，発電と，水電解による余剰電力を利用した水素・酸素発生を行うことが出来る。これも，水素利用の一形態であり，すでに始まっている航空機のシステム電動化度向上（MEA=More Electric Aircraft化）と，今後進展する電動推進系の研究開発等，航空機全機レベルでのエネルギマネジメントの高度化が今後重要性を増すと考えられる。

6．引用文献

(1) 中島陸博，“航空用バイオジェット燃料の最新動向”，日本エネルギー学会誌，Vol. 93（2014），pp. 52-55.

(2) 梅澤大輔，“ICAO CAEPの動向”，航空環境研究，No.18（2014），pp. 50-53.

(3) HIH Saravanamuttoo他 3名著，藤原仁志（訳），ガスタービンの基礎と応用，pp.59-195, 東海大学出版会.

(4) A. H. Lefebvre著，佐藤幸徳（監訳），ガスタービンの燃焼工学，pp.82-83, 日刊工業新聞社.

(5) H. Tennekes and J. L. Lumley（著），藤原仁志，荒川忠一（訳），乱流入門，p.153, 東海大学出版会.

(6) 東京大学航空イノベーション総括寄付講座，次世代航空機燃料イニシアティブ，http://inaf-japan.tumblr.com/.（参照2014年12月26日）

(7) 片桐敏雄監修，日本航空広報部編，航空実用辞典，p.320, 朝日ソノラマ.

(8) Green Diesel is Potential Pathway to Aviation's CO_2 Goal, Aviation Week & Space Technology（電子版），2014年1月20日

(9) 水素燃料航空機検討調査会，水素燃料航空機の国内外検討調査，宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-08-005（2008）.

(10) Bulzan, D., Alternative Fuels Research ARMD Fixed Wing Project Clean Power Subproject, 2013 MACCCR Fuels Summit, 2013.

(11) NASA News release, ACCESS II Confirms Jet Biofuel Burns Cleaner, 2014年 9月 3日。

(12) TOYOTA，セダンタイプの新型燃料電池自動車「MIRAI」を発売，2014年11月18日，TOYOTA Global Newsroom.

(13) 田口秀之，岡井敬一，JAXAにおける未来型航空エンジンシステムの研究，特集：航空用，発電用エンジンシステムの最近の開発動向，日本ガスタービン学会誌 Vol.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

40, No. 3 , 2012.5.
⑭ Kim, H., Brown, G. and Felder, J.: Distributed Turboelectric Propulsion for Hybrid Wing Body Aircraft, International Powered Lift Conference, 2008.
⑮ US-Patent#7555893 Aircraft Propulsion System
⑯ Luongo C.A., Masson, P. J., Nam, T., Marvis, D., Brown, G., Kim, H. D., Waters, M. and Hall, D., Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors, Applied Superconductivity Conference, 2008.
⑰ NEDO News release, 世界初，超電導ポンプシステムを用いた液体水素移送に成功, 2012年 5 月10日.
⑱ Roth, B. and Griffin III, R., Fuel Cell Hybrid Propulsion Challenges and Opportunities for Commercial Aviation, AIAA 2010 6537.
⑲ Bradley, M. K., and Droney, C. K.: Subsonic Ultra Green Aircraft Research Phase II: N+4 Advanced Concept Development, NASA/CR-2012-217556, 2012.
⑳ Airbus website, E-Thrust Brochure.
㉑ Okaya, S., Arastu, A. H. and Breit, J., Regenerative Fuel Cell（RFC）for High Power Space System Applications, AIAA 2013-3923, 11th International Energy Conversion Engineering Conference, 2013.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

論説◆解説

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

柏崎市自然環境浄化センターの消化ガス発電について

高橋　　潤[*1]
TAKAHASHI Jun

キーワード：バイオマス，消化ガス発電，コージェネレーション，排熱利用，カーボン・オフセット
Biomass，Digestion Gas Electrical Power Generation，Cogeneration，Recovery of Waste Heat，Carbon Offset

1．はじめに

柏崎市は，日本海に面した，新潟県のほぼ中央に位置し，県都，新潟市まで84km，北陸自動車道で1時間30分（JR信越本線特急で１時間15分），首都圏東京へ約300km，北陸･関越自動車道で約３時間，JR上越新幹線では最短2時間の距離にあります。

また，三階節で名高い米山をはじめ，黒姫山，八石山，西山連峰の山々の懐に抱かれ，豊かな恵みを受けつつ，福浦八景や砂丘地など変化に富んだ42kmの海岸線から佐渡島を望む風光明媚な地方都市です。

平成17年５月１日に刈羽郡高柳町及び同郡西山町と合併し，新たな取組を進めてきています。また，平成19年度を初年度とする「第四次総合計画」がスタートし，基本理念「好きです輝く柏崎」を掲げ，市民と行政との協働による，輝きに満ちた柏崎の創造をめざしていた矢先，平成19年７月16日に「新潟県中越沖地震」が発生し，市内全域が甚大な被害を受け未曾有の災害となりました。全国からの温かい支援と市民の助け合いなどにより，震災からの復旧は早いスピードで進み，一つの区切りをつけ，震災前以上の活力を備えた復興に向け歩みを続けています。

当市の公共下水道事業は，昭和46年に基本計画を策定し，昭和48年度に下水道法による事業認可を得て工事に着手，処理場完成に伴い昭和56年同年６月20日に第一期区域約214haの供用を開始しました。その後，順調に事業は進展しており，平成25年度末現在，1951.9haが整備済みとなっています。平成25年度末の汚水処理人口普及率は，公共下水道，農業集落排水，合併浄化槽の合計で，97.7％となっています。

柏崎市自然環境浄化センター（表１）は，昭和56年の水処理1系供用開始以降，平成２年に水処理２系，平成17年に水処理３系と施設の増設を行ってきました。現在は，施設の老朽化に伴い平成23年に長寿命化計画を策定し，改築更新工事を実施しています。

2．消化ガス発電導入の経緯

当市は，エネルギーと関わりの深い地域であり，古くは明治30年代の石油産出により，「石油産業発祥の地」

Table 1　Summary of the Treatment Plant（2013）

Facility Area	113,400m^2
Sewerage System	Separate Sewage System
Treatment System	Standard Activated Sludge Treatment System
Planned Target Year	2020
Planned District Area	2,914ha
Planned Treatment Population	63,500
Current Treatment Capability（Daily Maximum）	39,750m^3／day
Influent Volume（Daily Average）	23,666m^3／day
Sewage Sludge Treatment System	Concentration→Digestion→Centrifugal Dehydration
Digestion Tank dumped Sewage Sludge Organic Component（Monthly Average）	87.70%
Digestion Sludge Organic Component（Monthly Average）	74.20%
Digestibility（Monthly Average）	59%

原稿受付　2014年12月26日
＊1　柏崎市ガス水道局
〒945-0053　柏崎市鏡町１-11

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

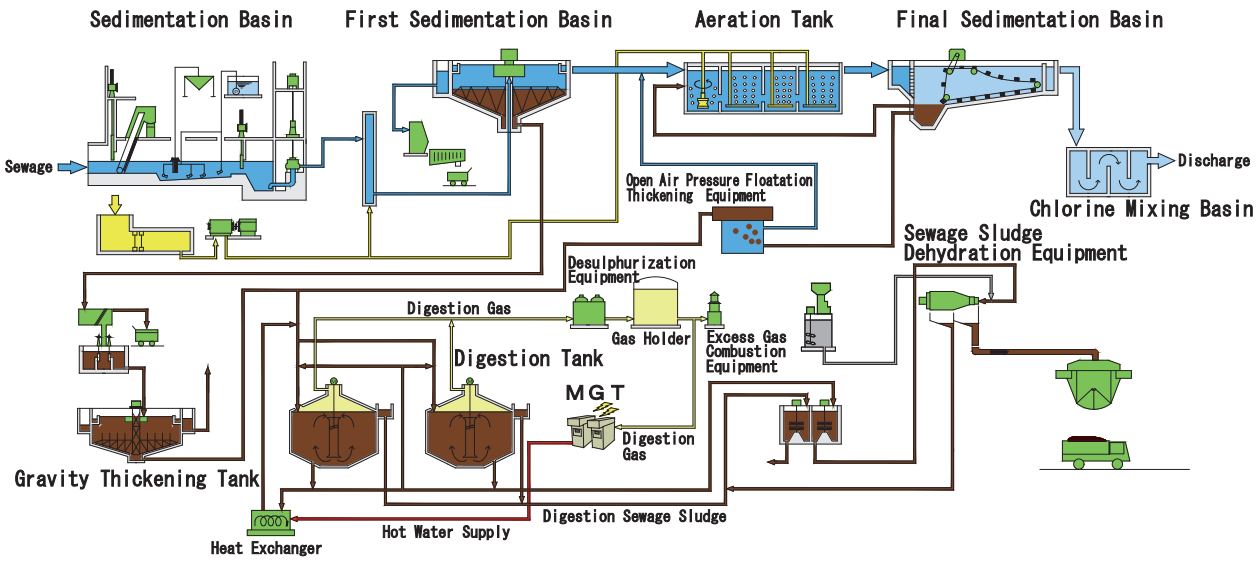


Fig. 1　Diagram of Treatment Process in the Treatment Plant

として活況を呈し，石油産業に支えられた機械金属加工業が基幹産業となって発展してきたまちです。また，柏崎刈羽原子力発電所の立地拠点としても，「エネルギーのまち」の役割を担っています。

こうした背景を踏まえ，農山漁村の活性化を中心とするアプローチに留まらず，地方の自立，温暖化対策，少子高齢化社会への対応，地産地消，新たな産業の創出と循環型の経済モデルづくりなどを目指し，「エネルギーのまち柏崎」の持つ地域シーズを活かしたバイオマスエネルギーの利用と供に，副産物についてもカスケード利用を行って資源の有効活用を産業振興に結びつけることを目標とする「柏崎市バイオマスタウン構想」を平成18年度に策定しました。この構想の柱の一つとして「下水汚泥等からの消化ガス利活用事業」を掲げました。

柏崎市自然環境浄化センターでは，下水汚泥を嫌気性消化して得られる消化ガスの一部を消化タンク加温温水ヒーターの燃料として有効活用しておりましたが，消化ガス発生量に対して燃料として使用しているガス量は約20％であり，残りは余剰ガスとして燃焼させていました。

このため，消化ガス発生量を検証し，発生量に見合った有効利用方法の選定を行いました。平成21・22年度の消化ガス発生量から費用対効果を考えた場合，「消化ガス発電事業」が消化ガスの有効利活用に最適であり，化石燃料の節減，CO_2排出量の削減と同時に当浄化センターの消費電力の一部を賄うことが可能である本事業を採用することになりました。

平成23年度に公募型プロポーザル方式によるデザインビルドでの事業発注を行い，事業者の選定は，経済性，環境性，維持管理性，信頼性，機器仕様，機器台数，その他提案，プロポーザルにおける要求水準の可否について審査を行い決定しました。

3．事業概要

3.1　施設概要

柏崎市自然環境浄化センターは，標準活性汚泥法の下水処理場で処理フローは，図１のとおりです。

3.1.1　消化タンク

消化タンク（図２）は，3,795m^3× ２槽の総容量7,590m^{3}です。嫌気性１段消化方式で，消化温度36.4℃

Fig. 2　Gas Holder and Digestion Tank

Fig. 3　Siloxane Removal System

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

Fig. 4　Gas Compressor

Fig. 5　Micro Gas Turbine

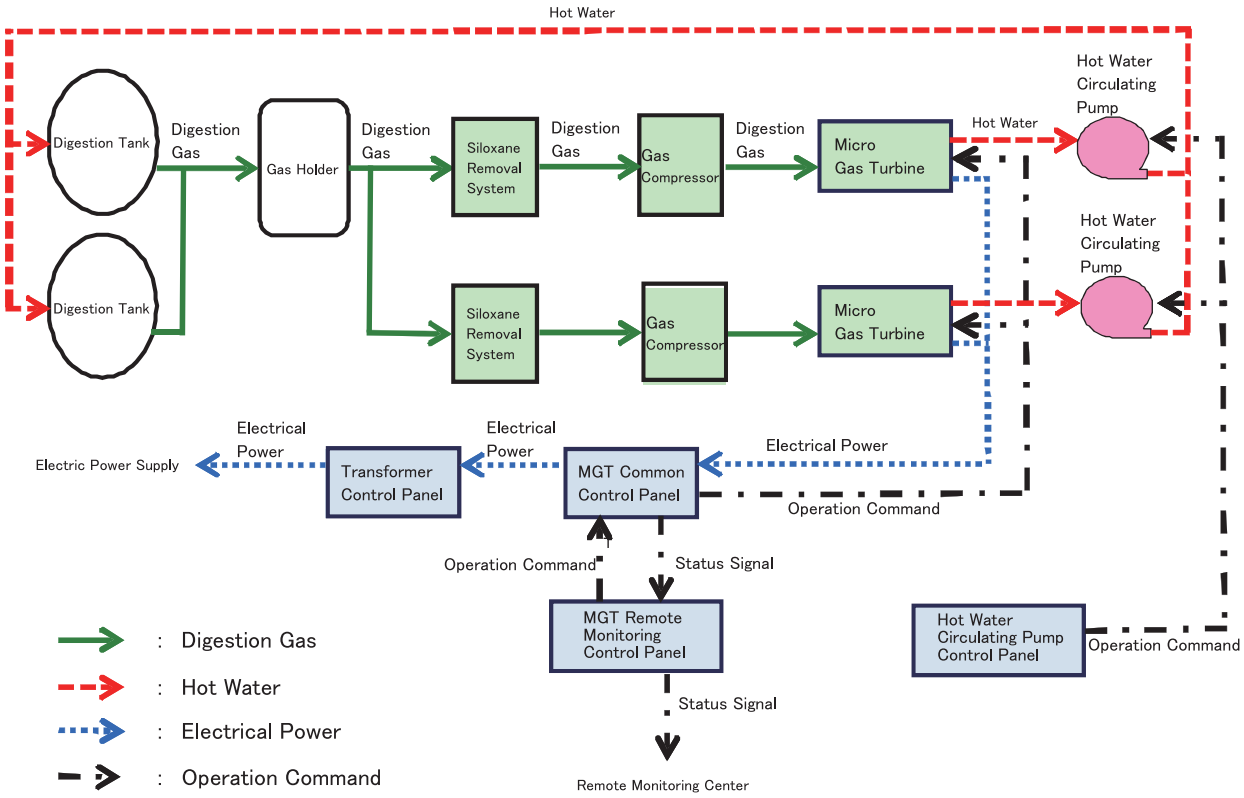


Fig. 6　Outline of Micro Gas Turbine Cogeneration System

（平均値），消化日数86日（平均値）となっています。消化ガスは，乾式脱硫塔を通過後，1,500m^{3}のガスホルダー（図２）に一時貯留し，消化ガス発電設備に供給されます。また，消化ガスの性状は，CH_4 55%，CO_2 39%，H_2S 9ppm（各平均値）となっています。

3.1.2　消化ガス発電設備

ガスホルダーから供給された消化ガスは，燃焼で生成するシリカ（SiO_2）によるマイクロガスタービン（以下「MGT」，図５）への悪影響を防止するため，シロキサン除去装置（図３）により微量不純物成分を除去します。その後，ガス圧縮機（図４）により昇圧し，MGTに供給します。本設備は，MGTの排熱を回収し，温水循環によりスパイラル式熱交換器を用いて消化タンクの加温を行うコージェネレーションシステム（図６）を採用しています。

MGTの発電効率は約29％で，排熱回収を含めた総合効率は約76％です。

なお，消化ガス発電設備導入前に使用していた消化タンク加温温水ヒーター及び余剰ガス燃焼装置は，バックアップとして運用しており，将来更新計画において能力，仕様の変更が必要となります。

3.2　運転状況

平成24年８月に試運転を開始し，変動する消化ガス発生量への追従性や発電量の確認，温水供給能力の確認，遠方監視システムの確認を行いました。そして最適な運転方法を確立し，平成25年２月から本稼働しています。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

現在の運転状況は，消化ガス発生量がMGT２台の24時間運転には不足しているため，汚泥脱水機などの運転により電力デマンドが最大となる日中の２台運転を基本とし，ガスホルダーレベルによる１台運転～２台運転への切替による台数制御を行っています。日中の２台運転を確保するために，夜間モードはガスホルダーに消化ガスを極力キープする設定とし，このほか受電電力による２台強制運転や余剰ガス燃焼装置の運転制御，コージェネレーションシステムの温水循環ポンプの運転制御などによる運用を行っています。

3.3　保守管理

施設の保守管理は，MGT製作メーカーとの委託契約により行っています。これは，公募型プロポーザル方式によるデザインビルドでの事業発注時に要求水準として，「竣工後の施設の保守管理を事業者と本市との保守管理業務契約を締結すること」とし，保守管理業務期間は，機械の耐用年数である15年間としたものです。

保守管理業務の方法は，定期点検，遠方監視，臨時点検に区分されます。

3.3.1　定期点検

15年間の定期点検計画に基づき実施し，簡易点検～主要機器のオーバーホールまでを行います。当浄化センターのデマンドに配慮し，汚泥脱水機を運転しない休日に１台ずつ停止することを基本としています。

3.3.2　遠方監視

予防保全，緊急停止時のデータ解析及び効率的に運用するためのデータ収集を目的として，24時間の遠方監視を行っています。また，緊急停止の場合は，市内メンテナンス業者との連携により即時対応が可能な体制を取っています。

3.3.3　臨時点検

保守管理業務の過程において異常を発見した場合，または，故障が発生した場合に遠方監視システムを用いた分析と原因調査を行い緊急出動による臨時点検を実施します。

Table 2 Digestion Gas Electrical Power Generation Target and Actual Results（2013）

	Target	Actual Results	Achievements
Digestion Gas Generation Volume	801,470m^3（Normal）	826,148m^3（Normal）	103%
Digestion Gas Electrical Power Generation Consumption	799,388m^3（Normal）	816,902m^3（Normal）	102%
Operating Ratio	99%	99%	100%
Annual Electric Power Generation	1,137,371kWh	1,183,218 kWh	104%
Annual Electric Power Charge	14,058,000yen	19,394,265yen	138%
CO_2 Reduction	629t	657t	104%
Electric Power Reduction Ratio	28%	31.8%	114%

Table 3 Digestion Gas Electrical Power Generation ,Actual and Reduction Ratio（2013）

Year.Month	Use of MGT（Actuals）				No Use of MGT（Estimated Charge,yen）	Reduction Electric Power Charge（yen）
	Purchased Electric Power（kWh ／ month）	MGT Generation Electric Power（kWh／month）	Total Electric Power（kWh／month）	Electric Power Charge（yen）		
2013. 4	204,860	103,217	308,077	3,008,565	4,440,911	1,432,346
2013. 5	217,390	102,787	320,177	3,178,624	4,616,016	1,437,392
2013. 6	212,980	97,497	310,477	3,269,463	4,708,994	1,439,531
2013. 7	230,960	97,206	328,166	3,727,736	5,258,077	1,530,341
2013. 8	228,410	93,972	322,382	3,743,428	5,248,951	1,505,523
2013. 9	212,810	90,523	303,333	3,992,640	5,651,488	1,658,848
2013.10	212,460	93,187	305,647	3,887,089	5,545,483	1,658,394
2013.11	208,540	90,472	299,012	3,770,007	5,359,916	1,589,909
2013.12	211,200	103,062	314,262	3,755,990	5,515,041	1,759,051
2014. 1	212,470	106,617	319,087	3,744,427	5,540,855	1,796,428
2014. 2	188,690	92,969	281,659	3,471,770	5,107,324	1,635,554
2014. 3	196,110	111,709	307,819	3,631,930	5,582,878	1,950,948
合計	2,536,880	1,183,218	3,720,098	43,181,669	62,575,934	19,394,265

1 . Electric Power Reduction Ratio　1,183,218 kWh ／ 3,720,098 kWh ＝ 31.8%
2 . Electric Power Charge Reduction Ratio　19,394,265yen ／ 62,575,934 yen ＝ 31.0%

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

4．導入効果

4.1　事業目標と実績

本稼働からまだ日が浅いですが，平成25年度の消化ガス発電の稼働状況は，稼働率99％と順調に発電を行っています。その他の実績値は，事業計画時である平成22年度の消化ガス発生量から試算した当初目標を上回っており，当浄化センターの使用電力量の31.8％，電力料金の31.0％，CO_2排出量を657t／年削減することができました。（表２，表３）

4.2　消化ガス発電見える化事業

事業効果を表示するモニター（図7）を柏崎市役所玄関ホール及び当浄化センターのロビーに設置しています。「見える化モニター」下のタッチパネルを操作することにより，消化ガス発電の仕組みやMGTの原理，発電電力量，CO_2排出削減量等を見ることができ，広く市民にPRしています。

Fig. 7　Visualization Monitor

4.3　J-クレジット制度

J-クレジット制度は，プロジェクト実施者が削減したCO_2排出量をクレジットとして認証し，活用者が低炭素社会実行計画への活用等や商品・イベントの環境負荷低減などのためにクレジットを購入するカーボン・オフセットの仕組みです。（図８）

従来は，経済産業省の国内クレジットと環境省のJ-VER制度の２制度が併存していましたが，両制度を統合し，平成25年４月以降の案件を対象として環境省，経済産業省，農林水産省が制度管理者となる新制度として開始されました。

平成24年度に本稼働した本消化ガス発電事業は，平成25年度末までなら事業登録が可能となる特例を利用し，「柏崎市ガス水道局における下水処理場へのバイオガス発電機導入プロジェクト」として，新制度では金沢市と同時に国内初となるプロジェクト登録を平成26年2月25日に行いました。（図９）

本プロジェクトにおけるCO_2排出削減計画は，平成26年3月から平成33年３月までの７年間に約4,200t（年間約600t）の削減を予定しています。

クレジットの使い道は，全量が確定した訳ではありませんが，市内の銀行ATMのカーボン・オフセットとしてクレジットの一部を譲渡する準備を進めています。平成27年度に入ってから，CO_2排出削減量の認証を受け，１回目のクレジット化を行う予定です。その後もCO_2排出量取引や市内イベントなどの市事業におけるカーボン・オフセットに活用したいと考えています。

5．今後の課題

5.1　熱量不足

MGTによる消化ガス発電は，排熱量が多くコージェネレーションシステムに適していますが，当浄化センターは寒冷地であること，また，夜間にMGT１台運転

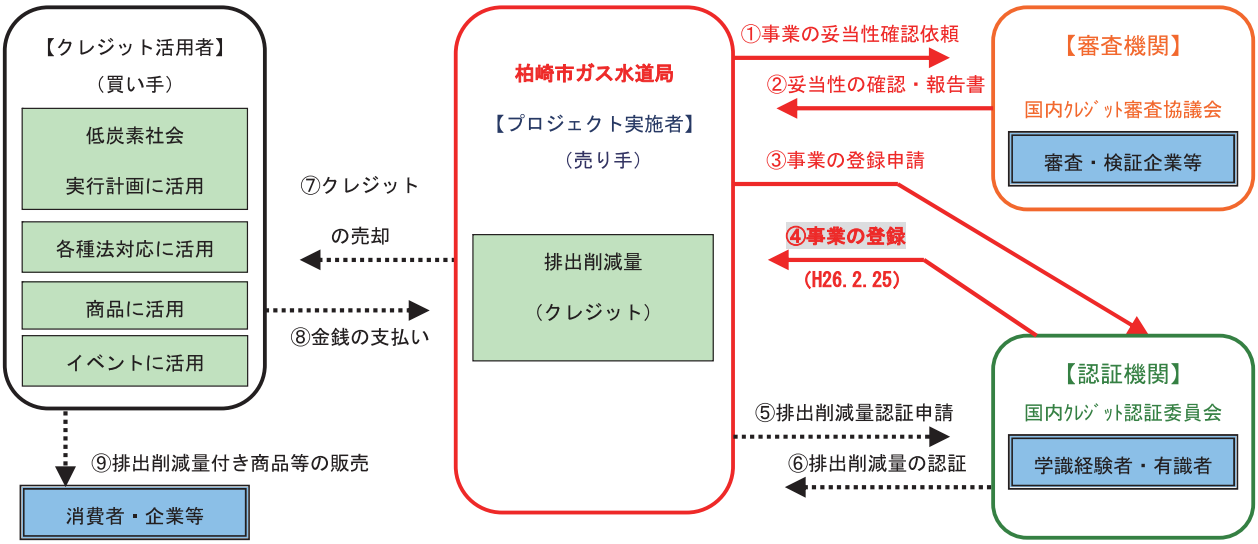
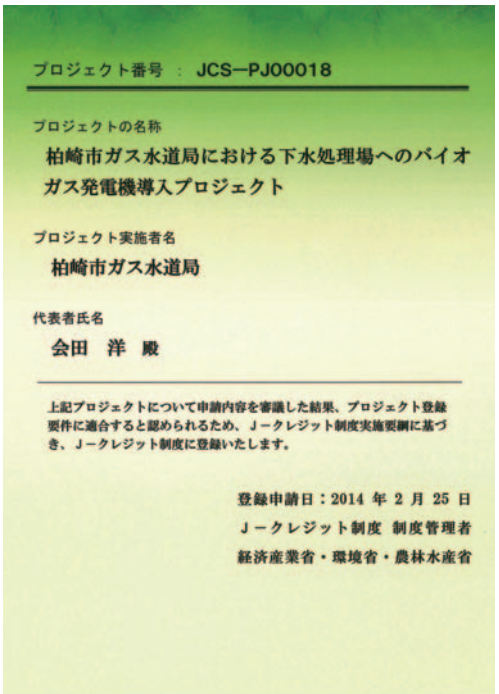


Fig. 8　Outline of J-Credit Scheme

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.


プロジェクト番号 ： JCS−PJ00018

プロジェクトの名称
柏崎市ガス水道局における下水処理場へのバイオガス発電機導入プロジェクト

プロジェクト実施者名
柏崎市ガス水道局

代表者氏名
会田　洋　殿

上記プロジェクトについて申請内容を審議した結果、プロジェクト登録要件に適合すると認められるため、Ｊ−クレジット制度実施要綱に基づき、Ｊ−クレジット制度に登録いたします。

登録申請日：2014 年 2 月 25 日
Ｊ−クレジット制度 制度管理者
経済産業省・環境省・農林水産省

Fig. 9 Registration Certificate of the J-Credit Scheme

になる時間があるため，冬期間に熱量が不足する場合があります。熱量が不足すると消化ガス発生量が減少し，さらに１台運転の時間が延びる悪循環に陥ることになるため，バックアップの消化タンク加温温水ヒーターを運転する場合があり，わずかではありますが発電量のロスとなっています。

改善策としては，次の２点が挙げられます。

①汚水処理普及率が高く，当浄化センターの汚水流入量の増加が見込めないため，現在別施設で処理しているし尿及び浄化槽汚泥を消化タンクに投入し，消化ガス発生量を増やしてMGT２台の24時間運転を行う。

②排熱回収効率を上げて熱量不足を解消する。

①は，発停を繰り返さない24時間連続運転をすることによりMGTの負担を軽減し，なお且つ起動用のプロパンガスも節減できるというメリットもあります。しかし，し尿及び浄化槽汚泥の受入や前処理，投入設備等の増設が必要であることや処理に要する使用電力が増加するため，消化ガス発電量の増加等と比較しても経済性に問題があり現実的ではありません。

②は，現行機種では対応できないため，今後の技術開発に期待するものとなります。

5.2　湿度対策

消化ガスは，消化タンクで発生した精製していない燃料であるため湿度が一定でなく，当浄化センターでは，夏場に水分の影響を受けてMGTの運転に支障をきたしています。ガス圧縮機に自動ドレンを設置して対応していますが，根本的な解決には除湿設備が必要となります。しかし，除湿設備の増設は補機電力が増加し，当浄化センターで使用する送電端電力量への影響が大きいため実用的でなく，メーカーも以前は採用していたそうですが廃止したとのことです。この件に関しましても，今後の技術開発により有効策が提案されることを期待するものです。

5.3　修繕及び更新対策

消化タンクやガスホルダーの大規模修繕や更新を実施する際の設備のバックアップについて検討する必要があります。また，それらの施工期間中の効率的な消化ガス発電設備運用方法について，メーカーからの積極的な提案やアドバイスが必要不可欠となるため，消化ガス発電におけるMGT運転制御のノウハウを蓄積し，多様な発電環境に対応できる技術力と組織づくりが必要であると考えています。

6．おわりに

本消化ガス発電事業は，国庫補助事業を活用し，公募型プロポーザル方式によるデザインビルドでの事業発注を行いました。この中で15年間の保守管理を行うことを条件としましたが，本市のような下水道専門の技術者を配置しない自治体においては，非常に有効な手法でした。

また，CO_2排出量削減効果とJ-クレジット制度の活用，購入電力料金の値上げによる電力料金削減効果の増などの導入効果が挙がっています。

今後も安定した稼働を続けていくためにMGTによる消化ガス発電がさらに普及することが必要です。コストの低減，国産部品供給の確立，発電効率の向上，燃料電池との複合化技術（ハイブリッドシステム）の開発などを推進することで，地球温暖化対策や省エネルギーに貢献し，MGT発電の普及に努めることが重要だと考えています。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

論説◆解説

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

黒部市下水道バイオマスエネルギー利活用事業における発電システムについて

村椿　謙一*1
MURATSUBAKI Kenichi

キーワード：バイオマス，メタンガス，ＰＦＩ，マイクロガスタービン，CO_2
Biomass，Methane Gas，Private Finance Initiative，Micro Gas Turbine，Carbon Dioxidee

1.1　はじめに

本市は，まちづくりの政策の柱として「共生と活力と安心」を３つの基本目標と定め，「自然環境と共生し，流域を育んだ水と緑の文化を創造する」まちづくりを推進している。平成19年度には「黒部市総合振興計画基本構想」が議決され，自然エネルギーの利活用としてバイオマス資源の利活用計画を策定し，廃棄物の減量や環境への配慮に努めたバイオマスタウンを推進することとし，平成20年３月にバイオマスタウンとして認定されている。

具体的には，廃棄物バイオマス量のうち，90％の利活用を目指しており，市内民間企業で取り組んでいる木材等リサイクル，廃食用油のバイオディーゼル燃料化について，バイオマス資源の有効利用を市民・企業に普及啓発することなどにより，バイオマスの利用率向上を図ることとしている。

本稿では，バイオマスタウン（図１）の一因を担う黒部市下水道バイオマスエネルギー利活用施設整備運営事業内容と，この事業におけるメタン発酵発電システムを事例として紹介する。

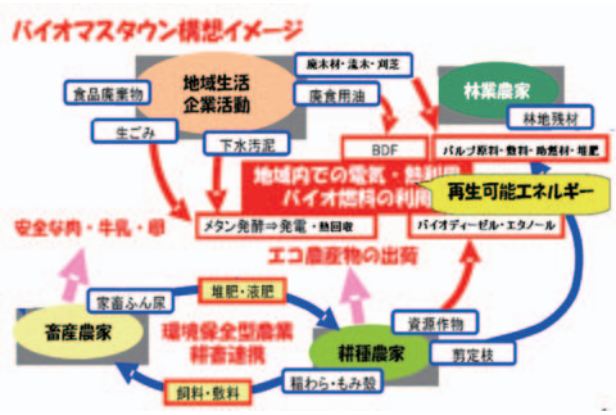


Fig. 1　Biomass town

1.2　黒部市の概要

本市は，富山県の東部にあり，日本一の清流を誇る黒部川扇状地の左岸に位置している（図２）。北西部は富山湾に面し，東は北アルプスの山々を仰ぎ，南は立山連邦をはじめとする中部山岳国立公園が広がる豊かな自然に恵まれた地域である。面積は427.96平方キロメートル，人口は約４万３千人で，平成18年３月31日に旧黒部市と旧宇奈月町が対等合併して誕生した市である。

本市における汚水処理事業は，公共下水道事業，農業集落排水処理事業，合併浄化槽設置事業により整備しており，その整備率は92.8％と概成に近づきつつあり，今後も精力的に整備を進めることとしている。

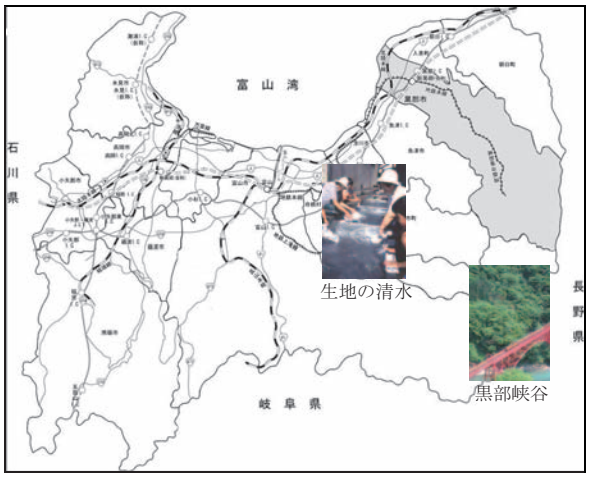


Fig. 2　City of kurobe

1.3　事業実施までの背景

黒部浄化センターから発生する下水汚泥の処理は，その全量をセメント会社，埋立処分会社などに外部委託していたが，処理委託先の休止や閉鎖・処分費の値上げなど，恒常的な市況変動へのリスクを抱えており，このリスクに対応できる新たな処理方法の確立が課題となっていた。

また，近年の地球温暖化の顕在化や，資源・エネルギー需給の逼迫が懸念される中，都市の持続的発展を維

原稿受付　2015年１月５日
＊１　黒部市　上下水道部　工務課
〒938-8555　黒部市三日市725

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

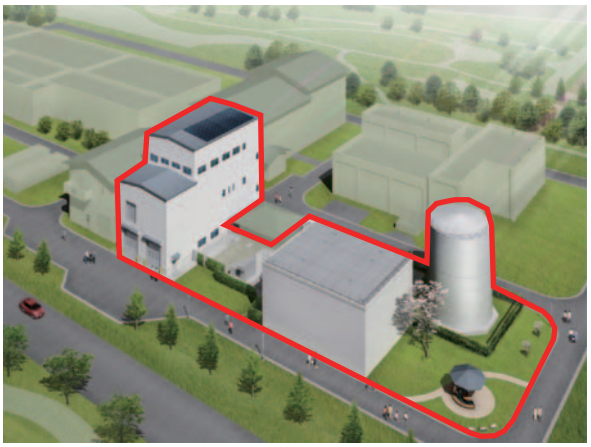


Fig. 3 Biomass recycling center

Fig. 4 Biomass recycling center

持する観点から，循環型社会に適応した廃棄物処理方法が求められている。

こうした背景を受け，下水汚泥やその他の汚泥をバイオマス資源として位置付け，温暖化防止，エネルギー利用も含めた新たなリサイクルプロセスを創出することにしたのである（図３，図４）。

1.4　PFI事業の導入

近年，メタン発酵の技術開発が進み，メタンガスを電力・熱源などに利用する技術も多様化し，燃料・肥料など乾燥汚泥のマテリアル利用方法も確立されつつある。

さらに，下水道汚泥からのリン回収技術やBTX化，水素化などの高度な新技術の開発も進められており，これら下水汚泥のリサイクル技術の進歩は目覚ましく日進月歩の感がある。

このことは，黒部市のような小さな行政体が，バイオマス利活用に関して得られるごく限られた情報により実施する従来型公共事業では，新技術に適応した事業実施が円滑に施行できない。また，これまでは黒部市で下水汚泥の最終処分先を開拓してきたが，これからは民間事業者に汚泥処理から処分までの一連の事業権を委ねた方が，新たな処分先や処分方法を，安定して確保できるのではないかと考えた。

そこで，民間事業者が持つ経営ノウハウや最新のバイオマス利用技術の活用，副生成物の流通先の確保やコスト縮減といった観点からPFIを導入し，民間事業者に下水道バイオマスエネルギー利活用施設の設計・建設・維持管理・運営の事業全般を委ねることにした。

2.1　事業の概要

黒部浄化センター全体フローを図５に示す。市内各施設から収集されてきた農業集落排水汚泥と浄化槽汚泥を，センター内の汚泥濃縮設備で受け入れ（図６），センター水処理施設からの余剰汚泥と混合・調整し，PFI事業者が建設する受入施設に処理委託する。

一方，事業系食品残渣を近隣企業から受け入れ，PFI事業者に搬入する。これは，施設運転の負荷変動低減と，一定のバイオガス量を確保するために，定量かつ安定して調達可能な事業系食品残渣（コーヒー粕）を，PFI事業者に供給するものである（図７）。

また，各家庭から排出される生ゴミについては，単体ディスポーザを使用し，分流式の下水道管渠を通じて黒部浄化センターに集約し，下水汚泥として回収することとした。これには，天候に左右されずに回収でき，収集場所や分別作業が不要になるというメリットがある。

PFI事業者は，これら黒部浄化センターに集約された下水汚泥・食品残渣などのバイオマスを，自らが設計・建設した利活用施設でメタン発酵させて，メタンガスを取り出す。得られたメタンガスは，主にメタン発酵後の消化汚泥の乾燥，及びメタン発酵槽の加温のための熱エネルギーとして利用する。また，バイオガスの一部は，PFI事業者が設置するマイクロガスタービンに発電用燃料として供給し，その発電電力は，施設内あるいはセンター内の動力源として使用する。

さらに，メタン発酵と乾燥によって減量化した乾燥汚泥は，全量を有効利用している。

PFI事業の期間は，施設建設に２年１カ月，維持管理運営期間を15年間としており，平成21年４月に総額36億円で特別目的会社（SPC）である黒部Eサービス㈱と事業契約を締結している（表１）。

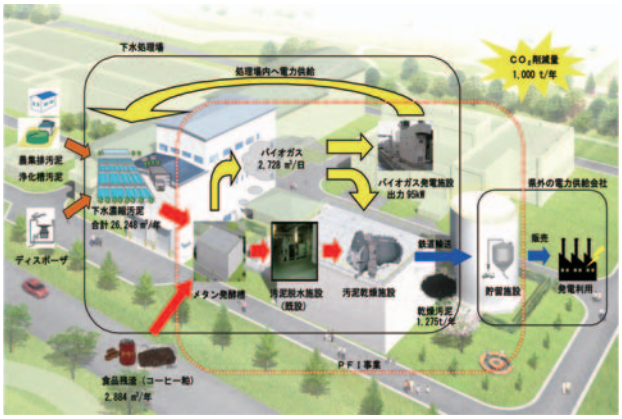


Fig. 5 Processing flow

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

Table 1　Description of business

バイオマス受入量 (H38年計画値)	①下水汚泥（濃縮汚泥）　25,034m³/年 ＊ディスポーザ由来の汚泥含む。 ②農業集落排水汚泥（濃縮汚泥）　1,080m³/年 ③浄化槽汚泥（濃縮汚泥）　134m³/年 ④事業系食品残渣（コーヒー粕）　2,884m³/年 合計　29,132m³/年
メタンガス利用法	①ボイラにより発酵槽加温熱源および汚泥乾燥機熱源として利用 ②マイクロガスタービンで発電して場内利用
汚泥有効利用方法	乾燥汚泥化し，肥料として販売及び化石燃料の代替燃料として有効利用
温暖化ガス削減量	CO_2削減量　約1,000ｔ／年 (一般家庭200戸，杉71,400本)
事業期間	①設計・建設期間 H21.4.1～H23.4.30（試運転期間を含む） ②維持管理・運営期間 H23.5.1～H38.4.30（15年間）
事業費	建設費16億円，維持管理運営費20億円 計36億円

Fig. 6　Delivery entrance of digested slude

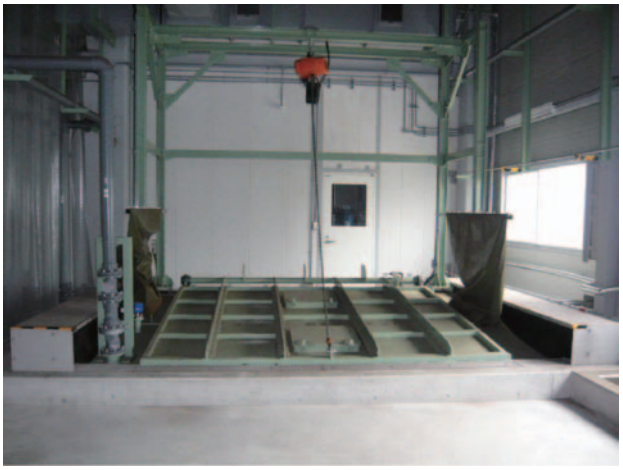


Fig. 7　Coffee grounds hopper

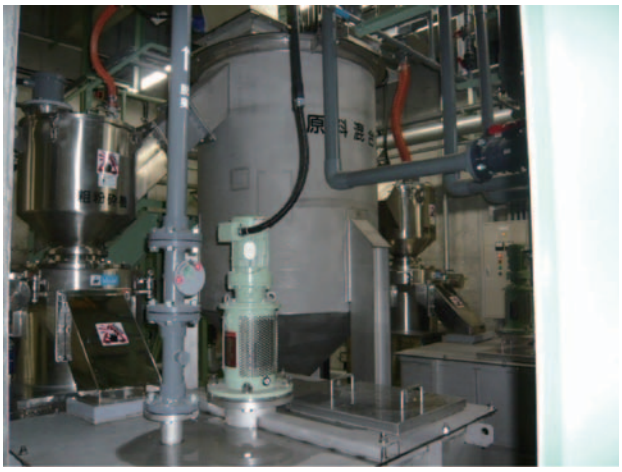


Fig. 8　Mixing tank・grinder

2.2.1　施設の特徴（メタン発酵設備）

原料である濃縮汚泥と事業系食品残渣を混合，粉砕して，生分解しやすい状態に調整したうえで，メタン発酵槽に供給する（図９）。メタン発酵槽では，あらかじめ馴致した消化汚泥を一定温度で滞留させておき，ここに原料を投入することで，消化汚泥に含まれるメタン発酵菌の作用で，原料中の有機成分がメタンガスに転換される。なお，発酵方法は高温発酵方式で行われている。

事業系食品残渣として使用するコーヒー粕は，各種汚泥と比較してメタンガスが大量に発生することから，施設のエネルギー収支を安定させるために有効である。回収したメタンガスによって，施設内で使用する熱を賄えるうえ，余剰エネルギーで発電することが可能となった。

本事例のコーヒー粕は，メタン発酵に不適であるとの見解もあったが，実証試験により一定量であれば問題がないことを確認し，原料として採用した。

平成25年度は，約87万m³／年のメタンガスが発生しており，当初計画を超える発生量となっている。

Fig. 9　Methane fermentation tank

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

2.2.2　施設の特徴（マイクロガスタービン）

メタン発酵設備で生産されたバイオガスは，脱硫装置（図10）を経てガスホルダーに貯蔵される。その後，シロキサンを除去し，バイオマスボイラーやマイクロガスタービン（図11）に供給される。各種汚泥とコーヒー粕の混合バイオマスをメタン発酵することで，シロキサンの発生は確実視されたことから，除去装置を設置した。

また，PFI事業者の提案であるマイクロガスタービンは，通常のレシプロ型発電装置と比較し，シロキサンの影響が少ない発電装置であり，安定した発電の持続，整備停止時間の低減が図れるため，本施設において採用した。マイクロガスタービンは，コンパクトで低騒音の特徴を持った環境性能に優れた発電機であり，現在は発生したメタンガスの約３割をその発電燃料として使用している。発電出力は95kwであり，廃熱から蒸気の回収も行っている。平成25年度年間発電量は約45万kwh／年で施設動力として利用している（表２，３）。回収した蒸気はメタン発酵槽の加温に利用している。

なお，マイクロガスタービンはPFI事業者により24時間遠隔監視する体制が整っているため，予防保全や早期の故障対応が可能であり，高い稼働率を維持することができる。

一方，マイクロガスタービンにより生産された電力は，本施設の各種機器が稼働している場合は，施設内にて使用している。また，夜間休日などの本施設が停止しており，利用しきれない場合は，黒部浄化センターに供給し，下水処理場内の機器にて使用している。なお，現在のところ電力会社への販売は行っていない。

Fig.10　Desulfurization equipment

Table 2　Capacity of genesis gas・electric power generation

	H23	H24	H25
メタンガス発生量（m^3／年）	573,335	869,053	874,632
MGT発電量（kwh／年）	255,460	365,181	451,476

Fig.11　Micro gas turbine

Table 3　Micro gas turbine specifications

メタンガス対応型主仕様

機　種	TA100
定格発電出力	95kw
発電効率	28%
燃料消費量 ・消化ガス低位発熱量 22MJ/Nm^3/h	55.5Nm^3／h
熱出力　温水使用	155kw 温水温度：入口60℃ /出口70℃ 吸気温度条件：15℃
熱出力　蒸気使用	98kw 温水温度：入口60℃ /出口70℃ 設計圧力吸気温度条件：15℃
総合熱効率 温水／蒸気	73%　／　56%

2.2.3　施設の特徴（その他）

本事業では，メタンガスの約6割をバイオマスボイラー（図12）の燃料として利用している。バイオマスボイラーから発生した蒸気は，メタン発酵槽の加温用として，また脱水汚泥の乾燥用として利用されている（図13）。含水率40％まで乾燥された汚泥には，余剰汚泥中に含まれていた窒素・リンなどの肥効成分が濃縮されているため，肥料として有効利用されている他，3,000kcal/kg程度のエネルギーを保有しているため，民間の小規模発電事業者で発電燃料としても有効利用されている。

また，乾燥汚泥は肥料登録しており，「くろべ緑花王」の名称で市民にも無償配布している。

一方，余剰メタンガスを利用してお湯を沸かし，施設内に整備した足湯に供給している（図14）。黒部浄化センターは「開かれた下水処理場」として，センター内の修景公園「アクアパーク」と共に一般に開放されているが，本施設もその一角にあり，市民の憩いの場として利用者の好評を得ている。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

Fig.12　Biomass boiler

Fig.13　Sludge dehydrator

Fig.14　Footbath

3．まとめ

本事業は，下水汚泥の処理コスト削減はもとより化石燃料の消費削減，CO_2の排出抑制を実施し，持続的なバイオマス循環処理システムを目指した黒部市の取り組みである。

本事業におけるメタン発酵発電システムとしては，基本的なフローを用いたものであるが，PFI手法を活用し，民間事業者の資金や技術能力を活用し，効率的な整備や維持管理を実現したものである。

メタン発酵発電事業における，中心設備である発電機の選定は，バイオマス量，性状，さらに熱利用なども考慮することが必要である。また，広義に発電システムをとらえるならば，メタン発酵槽，発酵温度，発酵期間さらに前処理設備までも含めたシステムがその範囲となる。

すなわち各種のバイオマスが，最良の状態で発酵し，メタンガスを生産するシステムを選定することが最も重要である。

今後も，市とPFI事業者が事業契約に基づくリスク分担事項を誠実に履行し，バイオマス利活用事業における発電システムの効率的な運用に努めていきたい。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

論説◆解説

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

MGTの今後の可能性「MGT」によるVOC処理とコージェネレーションシステムがもたらす価値の提言

青島　康一郎*1
AOSHIMA Koichiro

キーワード：マイクロガスタービン，VOC（揮発性有機化合物），コージェネレーション，VOC処理システム，Micro Gas Turbine，Volatile Organic Compounds，Cogeneration，VOC Removal System

1．はじめに

環境問題，エネルギーの転換・自然エネルギーの活用，原子力発電の安全性に関する問題，日本だけで無く世界規模の問題とも言えるこれらの問題に直面し，劇的な変化を要求される時代に，ガスタービン分野においても，今までと同じように化石燃料を用いたコージェネレーションだけでは，その価値が向上していく事は望めないと考えられる。本著で提唱するVOCを補助燃料として使用する新たなコージェネレーションシステムこそ，ガスタービンの新たな価値を見出す第一歩になるものと考える。

Table 1　Volatile organic compounds discharge facilities targeted for regulation and effluent standard[1]

揮発性有機化合物排出施設	規模要件	排出基準	
揮発性有機化合物を溶剤として使用する化学製品の製造の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力が3,000m³/時以上のもの	600ppmC	
塗装施設（吹付塗装に限る。）	排風機の排風能力が100,000m³/時以上のもの	自動車の製造の用に供するもの	既設700ppmC 新設400ppmC
		その他のもの	700ppmC
塗装の用に供する乾燥施設（吹付塗装及び電着塗装に係るものを除く。）	送風機の送風能力が10,000m³/時以上のもの	木材・木製品（家具を含む。）の製造の用に供するもの	1,000ppmC
		その他のもの	600ppmC
印刷回路用銅張積層板、粘着テープ・粘着シート、はく離紙又は包装材料（合成樹脂を積層するものに限る。）の製造に係る接着の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力が5,000m³/時以上のもの	1,400ppmC	
接着の用に供する乾燥施設（前項に掲げるもの及び木材・木製品（家具を含む。）の製造の用に供するものを除く。）	送風機の送風能力が15,000m³/時以上のもの	1,400ppmC	
印刷の用に供する乾燥施設（オフセット輪転印刷に係るものに限る。）	送風機の送風能力が7,000m³/時以上のもの	400ppmC	
印刷の用に供する乾燥施設（グラビア印刷に係るものに限る。）	送風機の送風能力が27,000m³/時以上のもの	700ppmC	
工業製品の洗浄施設（乾燥施設を含む。）	洗浄剤が空気に接する面の面積が5m²以上のもの	400ppmC	
ガソリン、原油、ナフサその他の温度37.8度において蒸気圧が20キロパスカルを超える揮発性有機化合物の貯蔵タンク（密閉式及び浮屋根式（内部浮屋根式を含む。）のものを除く。）	1,000kl以上のもの（ただし、既設の貯蔵タンクは、容量が2,000kl以上のものについて排出基準を適用する。）	60,000ppmC	

原稿受付　2015年1月5日
＊1　㈱アオシマシステムエンジニアリング
〒425-0071　焼津市三ケ名1800-1

2．VOCの概要

2.1　VOC排出規制について

塗装，印刷，コンバーテック関連の工場より排出される揮発性有機化合物（VOC）は，大気汚染防止法により排出量の削減，排出濃度（ppmC）の低濃度化が求められている。

表1に施設別の排出基準を示す[1]。

揮発性有機化合物とは，一般にトルエン，酢酸エチル，MEK等といった，いわゆる有機溶剤と呼ばれる物質が，大気中で気体状となった有機化合物であり，人体への影響が懸念されるともに，光化学スモッグを引き起こす原因の一因となっている。

2.2　VOC処理方式

揮発性有機化合物（VOC）処理には，大別して燃焼方式（直接燃焼方式，酸化触媒方式，蓄熱燃焼方式等）と溶剤回収方式があるが，前者は燃焼に伴うランニングコストの負担が大となり，後者では回収溶剤の分類・再利用の困難さや排水処理問題等があり，VOC処理対策を実施すべき中小企業にとってはVOC処理を行う事が非常に大きな経営負担となっている。

2.3　MGTによるVOC処理

MGT（マイクロガスタービン）によるVOC処理方式とは，コージェネレーションシステムの補助燃料としてVOCを使用する事で主燃料の消費量を削減し，VOC処理とコージェネレーションの価値向上を同時に実現する新たなトリジェネレーションとも言えるシステムである（図1）。

MGTの基本構成は，300KW級の発電パッケージと，排熱回収ボイラーの組合せとなっており，燃焼用空気として爆発下限界25%LEL（21,000ppmC）までのVOCガスを吸入し主燃料（都市ガス，LPG，灯油）と混合燃焼され，得られた動力により発電機を駆動し最大285kW

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

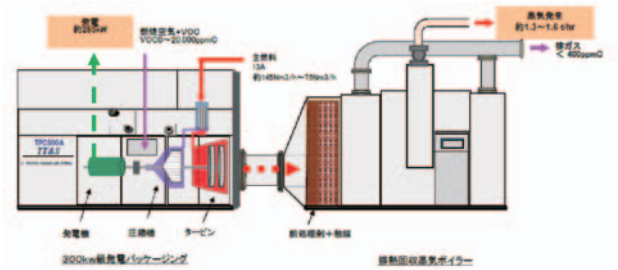


Fig. 1 Micro gas turbine & heat recovery steam generator Unit

の発電電力を得る事ができ，排熱回収ボイラーにより，最大約1.6t/Hr強の蒸気を生成する事が可能である。（図２はMGTユニット，図３は排熱回収ボイラーの実機の写真データ）

MGTに導入されたVOCガスは，燃焼過程で約85～90%酸化分解処理されるが，一部のVOCガスはMGT内部での高温処理滞留時間が不足するため，発電パッケージのみでは処理しきれず残存する。残存した未処理VOCガスは排熱回収ボイラー前段の触媒により酸化分解され，総合的に98%以上の除去効率を発揮する。

VOCガスを補助燃料として使用する事で，主燃料を最大約50%程度削減する事ができ，VOC濃度が高濃度であればある程，コージェネレーションとの組み合わせによるランニングメリット効果はより大きなものとなる。

図４はVOC濃度と燃料低減率の関係を示す。図５はVOC濃度と蒸気発生量の関係を示す。

Fig. 2 Micro gas turbine Generation package Unit

Fig. 3 Heat recovery steam generator

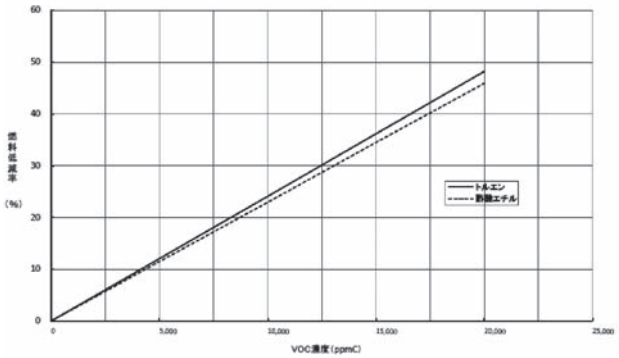


Fig. 4 VOC density and mileage reduction effect

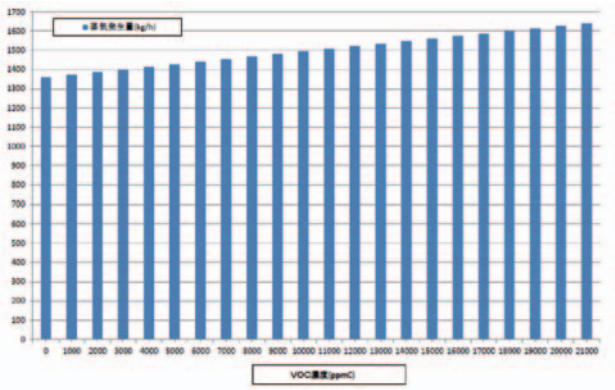


Fig. 5 Relations of VOC density and the quantity of steam outbreak

2.4　工場よりのVOCガス排出実態

VOC処理濃度の最大は前述したように21,000ppmCであるが，処理投入できるVOCガスを含む空気量は118Nm³/min（7,080Nm³/Hr）が装置スペックとなる。また，投入ガスは入口温度で乾球温度40℃以下の温度条件。

工場より排出されるVOCガスは，風量も温度も濃度も加工により異なり，１日の中でも変動が発生する。図６はあるコーティング塗工関連工場の乾燥炉排気の１ラインにおける時系列の濃度変動実測データである。

FID式VOC測定器により連続測定した結果であるが，グラフより5,000ppmC前後の濃度を変動して推移している事がわかる。（風量は実測値216.9Nm³/min）

風量としても，そのままではMGTへ投入処理する事ができず，乾燥炉よりの排気であるため，温度も100～120℃の温度域であった。また，同様なラインを複数有しており単純にMGTでの処理を行う事は，スペック的にもまたイニシャルコスト・ランニングコストの面よりも難しい状況であった。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

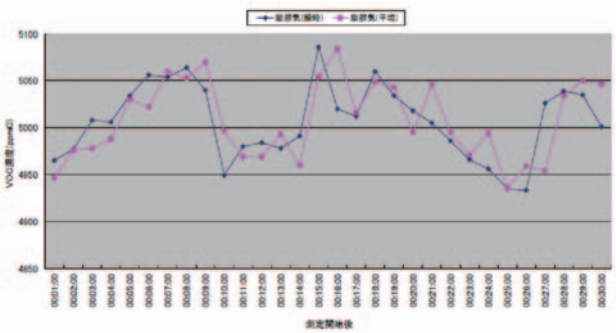


Fig. 6　Exhaust VOC density actual survey data

3．MGTによるVOC処理システムの構築（特許取得済み）

3.1　高効率VOC処理システムの設計エンジニアリング

弊社では工場実態を調査し，最適な処理を行うために設計・エンジニアリングを行い，工場より排出されるVOC原ガス複数ラインを集合チャンバー（多機能調整チャンバー）に集め，前段階にて濃縮装置を組み込み，圧力制御，高濃度化制御及び風量制御，温度制御システムを構築する事で，MGTによる高効率VOC処理システムを実現した。

濃縮装置の機構・メカニズムを図７に示す。図８は濃縮装置本体の実機写真データである。

濃縮装置は，ケーシングと耐熱シールにより「吸着ゾーン」・「再生ゾーン」・「冷却ゾーン」に区分され，

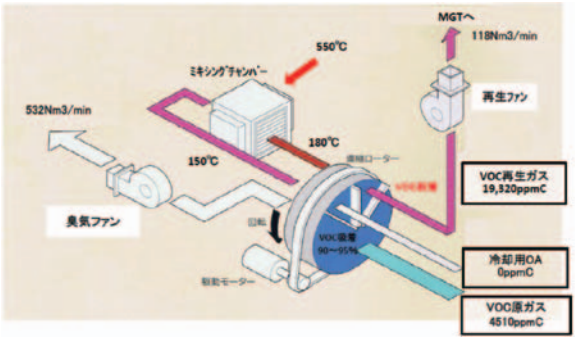


Fig. 7　Mechanism of the VOC concentrator

Fig. 8　VOC Concentrator

一定速度で連続的に回転を行う。

①VOCを含む原ガスは「吸着ゾーン」にて吸着除去され，浄化空気として大気へ排出される。（図７における臭気ファン）
原ガス風量×含有VOCの90 ～ 95%が吸着ゾーンにて吸着。

②濃縮ローターが回転し，吸着されたVOCは「再生ゾーン」へと移行する。「再生ゾーン」では180℃に制御された高温エアーにより，濃縮ローターに溜まったVOCを高温脱着させ高濃度化を行う。

再生脱着後の濃度は，原ガス濃度に依存し，原ガス濃度×約4.0 ～ 4.5倍の濃度となる。高濃度化されたガス風量は，再生ファンにより118Nm^3/minに制御される。（図７における再生ファン）

③高温脱着した後，ローターに溜まった熱を除去する為に，ローターが回転し「冷却ゾーン」へと移行する。冷却ゾーンでは，冷却用OAを吸引しローター冷却パージを行い，再度吸着ゾーンへと移行する。

濃縮の機構は①～③のサイクルを連続的に行う事により，安定的にVOCガスを高濃度化＋風量制御を実現する。高濃度化されたVOCガスは，脱着熱の移行により50℃～ 60℃の高温状態となっているため，MGT投入前に冷却処理を行い40℃以下まで冷却しMGTへと導入処理される。外気の潜熱で冷却は可能。

濃縮装置で濃縮処理すべきVOC排気は，各ラインよりの排気総量で最大532Nm^3/minであり，それらを多機能調整チャンバーに集合させ，チャンバー内圧力制御を行う。複数ラインを処理するシステムではあるが，加工条件によっては全ライン稼働する事もあれば，１ラインのみ稼働となる場合もある。また，前述したように同一ラインでも排気設定を加工によって調整する事もあるため，風量変動も発生する。

多機能調整チャンバーでは，そういった加工条件に対応するために，原ガス全風量が532Nm^3/minに満たない場合，チャンバー部に設けた避圧ダンパーにより不足風量が確保されるという役割も担う。

多機能調整チャンバーに集合したVOC原ガスは，臭気ファンによって濃縮装置に導かれる。臭気ファンは風量に適応した周波数にて定速運転を行い，吸着ゾーンにVOCガスを運ぶ。この時，安全対策の観点から濃縮装置内が負圧となるよう，吸込方式の送風機配置となっている。

図９に処理システム全体フローを示す。

原ガスの濃度は，光波干渉式VOC濃度計によって測定・監視・モニタリングを行う。（SP換算値4,510ppmC）

原ガス濃度が過濃度となった場合には，希釈制御が可

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

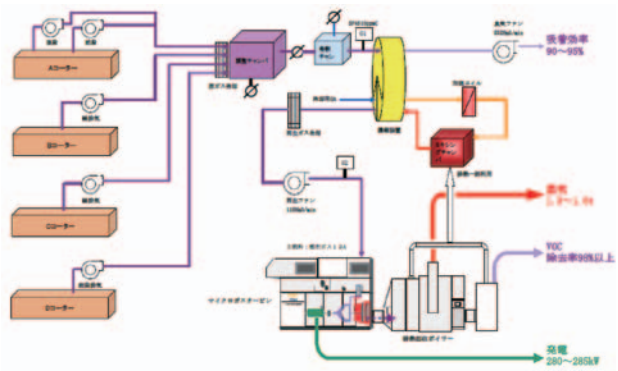


Fig. 9　VOC removal system flow

Fig.10　Real-time trendy graph of density and the heat capacity

能なシステムも組み込む事で，エマージェンシーに対する対処も可能となっている。

濃縮装置にて濃縮・高濃度化されたVOCガスは，冷却装置を経て40℃以下に制御され，再生ファンに吸引される。再生ファンに吸引された高濃度ガスはMGTの吸入口へと導かれ処理される。高濃度化されたVOCガスも，原ガス同様に濃度をモニタリングしており，濃縮装置による高温脱着不良や過濃度対策としてのエマージェンシー回路を有している。

3.2　システムの安全対策と処理運転制御方式

本システムは，VOCを連続的に処理する事を目的としたシステムであり，排ガスには溶剤であるVOCガスが含まれるため，安全な処理運転は必須条件である。

運転の中で考え得る機器類の異常や想定されるエマージェンシー回路について，軽故障～重故障まで万全な対応をとり，異常発生時には全ての異常を携帯電話に発信するシステムを組み込み，異常時には即座に異常発生を知る事ができるようになっている。また，異常発生時には状況と条件に応じシステム側で自動識別し，軽故障時等は異常発放のみにて処理運転は継続する場合や，処理継続せず安全に自動停止する場合などが自動的に行われる。

システムの処理運転制御方式については，専用のシーケンスを組み，手動にて運転をセレクトすれば，連動自動回路により処理運転が立ち上がるシステムとなっている。各機器類が順次立ち上がり処理可能となれば，処理したいラインの処理ボタンをセレクトするだけで処理が開始される。

VOC処理運転時は，処理全体のフローをタッチパネル画面にてモニタリング表示しており，各制御部・監視部の圧力・温度・原ガス濃度・再生濃度・VOC熱量等が１画面で全て確認でき，また濃度制御については，時系列でのグラフを表示切替する事も可能であり，処理操作や管理をできる限り簡単に行う事が可能な制御システムとなっている。図10は原ガス濃度，濃縮後濃度及びVOC発熱量のリアルタイムトレンドグラフの写真である。

3.3　VOC処理システム導入後の経緯

弊社がエンジニアリングし導入・実稼働しているシステムでは，2008年から運用しているユーザー様があり６年程経過している。その他にも同様な処理システムを導入したユーザー様は全国にいるが，いずれのユーザー様においても，今現在処理稼働を継続している。導入時には，それぞれ個別案件として，経済産業省が定めた新エネルギー等事業者支援対策費補助事業や，静岡県のCO_2削減に関する補助事業に採択されている。

今日に至るまでには，システム稼働開始時よりは大小少なからず諸問題に直面し解決してきた経緯があり，VOCに起因する問題点をクリアしてきた。一概にVOCと言っても，含まれる成分は非常に多く，中には触媒を被毒させる有機シリコンが微量含まれている事があり，実際に短時間で触媒が被毒してしまったケースがあった。被毒当初は，ユーザー様よりの開示情報でもシリコン含有は無いと考えられていたため，原因が把握できない状況であった。原因追求のため活性炭による捕捉試験（図11）や，ガス測定（ガスクロ，質量分析）等の調査検討を繰り返し，最終的に安全性データシートにも記載されないppbオーダーのシリコン成分が含まれている事が判明した。

この問題は非常にデリケートな問題で，技術的な側面や使用される塗料の仕入前段階のノウハウとしての観点より，塗料に含まれる一定量以下の成分は開示義務が無

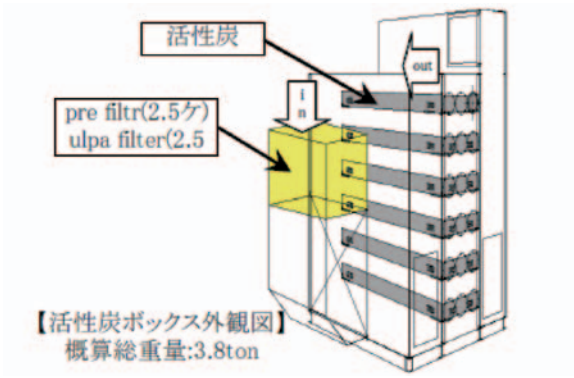


Fig.11　Sampling examination by active carbon and filter[2)]

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

く，全ての成分は開示されない・開示する事ができないという一面があるためである。

触媒が被毒すると，VOC除去効率が低下し未分解ガスが酸化分解処理されないため，臭気の発生原因となる。触媒は，洗浄・交換可能であるが，非常に高価であるため短期間における定期的な洗浄・交換は費用対効果として現実的な方法では無い。

実際に触媒被毒が発覚した際には，再生洗浄を行い洗浄した触媒と交換し復旧を行ったが，繰り返しの使用では新品の触媒と比較して当然劣化も進行するため，新品との交換も実施した。図12に触媒サンプルピースの再生前後浄化率比較を示す。

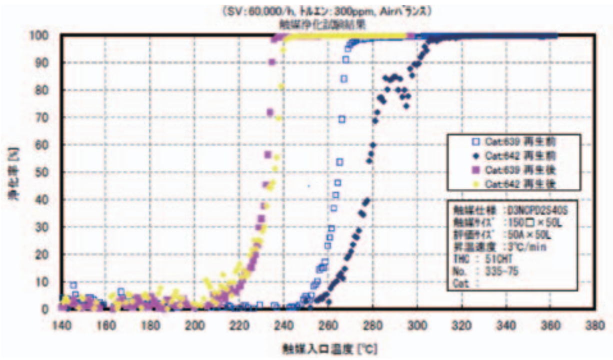


Fig.12 Purification test result of the catalyst(3)

触媒被毒が，年に数回程度の頻度で発生したケースもあり，原因追求と試験・測定の繰り返しと，抜本的な解決方法の模索には，時間とコストをかけ非常に苦労した。

この問題に対し，解決策として触媒を使用せずに別の処理方式を直列に組み合わせる方式を設計・立案し，残存VOCを処理するとともに，触媒をバイパスする事を可能としたシステムを構築した。これにより，最大のネックであった触媒被毒問題を解消し，安定的な処理を確立した。

別処理方式としては，蓄熱式脱臭装置（RTO）を採用し，MGT処理システムの最終処理排気エアーをRTOにて処理する事で，VOCの98%以上の除去効率を満足した。

また，RTOへはシリコンライン排気も同時処理が可能となるよう，処理風量スペックは約300Nm^3/minとし熱効率を良くするとともに，蓄熱体セルを50セルタイプとし，シリコンによる目詰まり対策をとった。

RTOは起動ボタンをONにすれば自動起動にて立ち上がり，蓄熱体の燃焼炉内温度が昇温完了して処理可能な状態となる。立上げ完了までは，RTO本体の送風機がINV制御にて運転し，燃焼炉内温度を昇温するために13Aを消費しバーナー加熱を行う。

運転立上げ時の結果（試運転時６月）では，運転開始から33minで立上げが完了し処理可能状態となり，消費ガス量22Nm^3，消費電力４kWの実績値であった。

RTOは，運転立上時の30min ～ 45minは燃料が必要であるが，VOC濃度実態を調査・把握し，設計した高熱効率処理を可能とした事により，VOCガスが導入されている間はほぼ自然運転を行い，燃料を消費する事無く処理運転を行う事ができる。

RTOの蓄熱体も，長期運用の中で蓄熱体セルにシリコンが付着し目詰まりを起こし，蓄熱体を閉塞させるが，グラインダーやドライアイス洗浄により洗浄再利用が可能である。また，触媒に比べ蓄熱体自体は非常に安価であり，シリコン処理においては現実的な運用が可能である。

MGTとの併用により，MGTでは処理する事ができない有機シリコンの処理が可能となり，RTOでは実現する事ができないランニングによる運転メリットを確保する事が可能となった。

3.4　実稼働データとランニングメリット

MGTによるVOC処理システムでは，高濃度VOCをコージェネレーションの補助燃料として使用する事で，ランニングにおいては非常に大きな価値を生み出す。

現行のシステムでは，発電出力一定制御にて280 ～ 285kWの発電した電力を系統連系盤より構内電力負荷に供給し，排熱回収ボイラーより得られた中圧蒸気0.78MPa，1.3 ～ 1.6tの蒸気を，蒸気ヘッダーより蒸気使用機器類に供給している。工場敷地内の全ての電力・蒸気を300kW級のガスタービンで補う事はできないため，購買電力と貫流ボイラー併用にて生産を行っているものの，VOCを補助燃料として使用しながらのコージェネレーションシステムによるランニングメリットは大きい。

表２は，ある１ヶ月の各日毎の実運転データのまとめである。１ヶ月の平均から，１時間あたりのランニング

Table 2 TPC300A MGT driving monthly report

	GT起動回数	運転時間	発電機発生電力量	VOC処理濃度(計算値)	積算燃料流量	MGT燃料流量	排ガスボイラ積算給水量	蒸気発生量	発生蒸気ガス換算	発電効率	排熱回収効率	総合効率
日	回	時間	kWh	ppmC	Nm3	Nm3/h	L	kg/h	Nm3	%	%	%
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
2	1	11	2,923	9,132	1,211	110	16,690	1,517	1,089	21.4	85.4	106.8
3	1	10	2,907	11,180	1,162	116	18,053	1,805	1,177	22.1	96.3	118.4
4	1	9	2,601	9,191	1,056	117	15,909	1,768	1,037	21.8	93.3	115.1
5	1	11	3,019	9,255	1,263	115	18,802	1,709	1,226	21.2	92.3	113.4
6	1	9	2,534	7,120	1,117	124	14,791	1,643	964	20.1	82.0	102.1
7	1	10	2,609	6,998	1,255	126	14,699	1,470	958	19.8	72.5	92.3
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
9	1	11	2,886	5,205	1,378	125	17,622	1,602	1,149	19.2	79.2	98.4
10	1	10	2,929	4,681	1,404	140	16,869	1,687	1,100	18.5	74.4	92.9
11	1	11	2,949	6,653	1,310	119	17,319	1,574	1,129	19.9	81.9	101.8
12	1	10	2,840	7,908	1,235	124	17,118	1,712	1,116	20.3	85.9	106.2
13	1	10	2,781	7,617	1,224	122	15,192	1,519	991	20.1	76.9	97.0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
16	1	10	2,824	7,181	1,264	126	16,929	1,693	1,104	19.8	83.0	102.7
17	1	9	2,737	5,805	1,259	140	15,991	1,777	1,043	19.2	78.7	97.9
18	1	11	2,972	6,900	1,288	117	17,938	1,631	1,170	20.4	86.3	106.7
19	1	10	2,733	9,044	1,136	114	17,325	1,733	1,130	21.3	94.4	115.7
20	2	10	2,916	7,181	1,314	131	16,621	1,662	1,084	19.6	78.4	98.0
21	1	9	2,649	7,119	1,183	131	16,021	1,780	1,045	19.8	83.9	103.7
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
23	1	1	173	0	102	102	160	160	10	15.0	9.7	24.7
24	1	11	2,954	9,463	1,224	111	18,550	1,686	1,210	21.4	93.9	115.2
25	1	10	2,881	10,617	1,162	116	17,896	1,790	1,167	21.9	95.4	117.4
26	1	10	2,845	12,455	1,105	111	17,621	1,762	1,149	22.8	98.8	121.5
27	1	9	2,610	12,626	1,034	115	16,084	1,787	1,049	22.3	96.4	118.7
28	2	9	2,409	9,242	997	111	13,275	1,475	866	21.3	82.5	103.8
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
合計	25	221	61,975		26,682		367,475		23,961			
平均			280.4 (kW)	8,259 (ppmC)		120.7 (Nm3/h)		1,663 (kg/h)	108.4 (Nm3/h)	20.6	85.3	105.9

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

コストを算出する。

【電力エネルギー】
①消費電力（補機電力） 43.2kWh
②発電電力 280.4kWh
③電力メリット ②－①＝237.2kWh

【燃料エネルギー】
④消費燃料（13A） 120.7Nm^3/h
⑤取得蒸気の13A換算 108.4Nm^3/h
⑥燃料デメリット ④－⑤＝12.3Nm^3/h

【1時間当たりのランニングメリット】
⑦電力メリット（14円/kWhとして算出）
＝237.2kWh×14円/kWh=3,221円
⑧燃料デメリット（94円/Nm^{3}として算出）
＝12.3Nm^3/h×94円/Nm^3=1,156円
⑨総合運転メリット ⑦－⑧＝2,065円

1時間当たりのランニングメリットは，契約電力料金や事業所全体での燃料量契約によるが，直近の実績金額として算出しても，VOCを補助燃料として使用し高効率処理を行う事で，⑨のように1時間当たり2,065円のランニングメリットを生み出す事ができる。

本システムでは実質約237kWの電力を削減する事が可能なため，デマンド契約電力についても引き下げが可能となり，トータル的なメリットとしては更に大きなものとなる。(237kWの基本料金の削減)

3.5 VOC処理＋コージェネレーションシステムの価値

3.11以降，原子力発電所の停止・太陽光発電の一定の普及・電力の自由化等々の影響から，電力料金（基本料金・従量料金共）は上昇の一途をたどっている。今後の情勢を考えれば，VOC処理機能付きマイクロガスタービンによるコージェネレーションシステムは，活躍の場が増えてくる事が期待される。

ガスタービンによるコージェネレーションシステム自体，一時は普及したものの，燃料の価格高騰を背景に装置自体を停止させている事業所も増えた。

3.4で算出した実際の運転データに基づくランニングメリット計算からもわかる通り，VOC処理＋コージェネレーションシステムにおいて，平均濃度8,259ppmCの濃度時でも，「燃料」についてはデメリット側の存在である。VOCガスを補助燃料として使用する事で，主燃料（13A）の時間当たりの使用量を削減する事が可能となる。VOCガス無し（0ppmC時）では 144.6Nm^3/hの主燃料が必要であるが，VOC濃度8,259ppmC時における実績値ベースで120.7Nm^3/hに抑えられ23.9Nm^3/hの削減効果が得られた。

VOC濃度が更に高濃度となれば，総合的なランニングメリットはより大きなものとなる。燃料だけでみても14,000ppmC時にはメリット側に転じ，時間当たり約207円のメリットが生まれ，処理可能な最高濃度21,000ppmC時に至っては，時間当たり最大の約2,933円の燃料メリットが生じる。

電力メリットまで加味した総合ランニング的にみれば，濃度6,000ppmCにおいて時間当たり約307円の運転メリットに転じ，最高濃度21,000ppmC時においては時間当たり約6,154円もの運転メリットが得られるわけである。

工場より排出されるVOCガスを補助燃料として使用し，またそのVOCを高濃度処理し安定的に供給するシステムを構築する事でコージェネレーションシステムの価値が飛躍的に高まり，コージェネレーションの新たな価値が生まれる。

大気汚染防止法を遵守し，地球環境のために処理すべきVOCガスについても，コージェネレーションと組合せる事で，中小企業としては負担が大きなものであったという課題から，処理すればする程価値を生み出すものへとシフトする。

環境破壊問題，電力問題，エネルギー問題等々，企業の運営にも直結するテーマに対し，次世代に繋げていくためには，コージェネレーションによる排熱利用やVOCガスのような排気ガスの有効活用が必要となる事は必須であると言っても過言では無い。

廃棄しているエネルギーは無いか，考え方を転換する事はできないか，有効な活用方法は無いか，見直すべき工程や方法は無いのか，製造の現場で視点をシフトチェンジし，新たな発想と新たな技術を生み出す事に挑戦していくべきであると考える。

4．ガスタービンの可能性

弊社で構築したマイクロガスタービンによるVOC処理システムの中核を担うガスタービンユニット本体は，㈱トヨタタービンアンドシステム社製である。もともとはVOC処理機能の無い，一般的なガスタービンを製造していたが，新たな開発として生まれたのが今回のVOC処理が可能なガスタービンであった。

実際問題として，VOC処理＋コージェネレーションの歴史は決して長いものでは無く，安定的なVOC処理を行いながらコージェネレーション機能も満足するために様々な苦労をし，試行錯誤・改良を重ねつくりあげてきたというのが実際の所だ。ガスタービンで，新たな排ガス，もしくは廃液などを燃料・補助燃料に用いるという事は，技術的な課題やリスクがあるのは認識しているが，今回のVOC処理を本当の意味で可能にし，価値を生み出す事ができたように，新たな価値を生み出すガスタービンの開発に希望と期待を持つ。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

5．おわりに

5.1　これからのエネルギーと環境

地球温暖化も来るところまで来ており，COP21の指摘を待つまでも無く，地球環境も待ったなしの状況にある。

CO_2を削減せねばならないし，温暖化六ガスの対応もしなければならない。省エネ・節電も，環境改善も同時に解決していかなければならず，それらは個別テーマであると同時に，視点を変えてみれば総体としてはかなりリンクしている部分がある。

2011年３月11日の東日本大震災は，様々な価値観の転換やエネルギーの危機実態を赤裸々にしてきた。

省エネ改正法の内容も，一律のダウンでは無く，ピークカットと標準化に視点を据えている。同時に生産工場から排出されている膨大なエネルギーの再利用が改めて求められている。

それぞれに多大なエネルギーが消去され，同時にそのエネルギーの余剰分が極めて多量に破棄されている。ガス，電気，地熱，自然エネルギー等の他に，こうした廃エネルギーこそ注目されるべきだと思われる。

低温排水も，そのまま捨てられがちだが，ヒートポンプの熱源としての再利用技術が次々に出てきている。

コージェネレーションからの排熱の有効利用技術も然り，排熱回収による蒸気式ヒートポンプ然りである。VOC排気ガスも同様と言える。

VOC発生施設や製造ラインにおいて，これまで排気していた空気を再利用するという考え方から言えば，MGTでの処理だけで無く，別の再利用方法によっても新たな価値を生み出す事ができる。一般にグラビア印刷関連の工場においては，低濃度のVOCガスを含んだ極めて大風量の排ガスが放出されているが，これはMGTでの処理・有効活用はなかなか困難である。濃縮機構を用いても然りだ。しかしながら，排出される排気空気には大量の冷房及び暖房のエネルギーが含まれている。弊社ではこの空気中の溶剤を処理しつつ，冷房・暖房エネルギーの回収技術を確立し，実用化の段階に入っている。（特許申請済み）

また他にも，例えば20,000Nm^3/hの空気を13Aや重油等を用いて180℃に加熱し使用する乾燥炉などでは，その燃料を用いてタービンを稼働させ，発電した電力を得て工場に利用し，排ガス500℃を希釈・フィルター処理後に乾燥炉に利用する事も可能であり，大きなリターンを得る事ができる。

弊社は，今後とも工場の排熱・排ガス（特にVOC）の回収再利用，工場内のエネルギーの有効な組合せ，高効率コージェネレーションシステム，氷蓄熱システム，自然エネルギーや潜熱利用，そして環境改善の分野に少しでも寄与できるよう努力をしていくつもりだ。

平成26年度は，新たな排ガス処理（冷却・集塵・捕捉）としてステアリン酸亜鉛を含む排気処理システムを設計・施工・構築した。排ガスの利用という意味では，有効活用ができない性質であったが，大気への放出を防ぐ事で環境に寄与する価値は大きい。システムの概要は，冷却ワッシャーユニットによる１次冷却・捕捉と２次工程の２段スクラバー捕捉を経て，フィルターによる最終捕捉という構成になっており，大気や排水への漏洩を防ぎ低ランニングでの処理を実現している。（特許申請中）

参考文献

(1)　環境省VOCの排出規制制度概要
別表「規制対象となる揮発性有機化合物排出施設及び排出基準」
(2),(3)　㈱トヨタタービンアンドシステム提供

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

論説◆解説

特集：資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み（多様化するガスタービン燃料）

製鉄所副生ガス焚きガスタービンの最新状況

屋納　光一朗*1
YANOU Koichiro

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，高炉ガス，燃焼器，タービン，圧縮器，ガス圧縮器
Gas Turbine，Combined Cycle，BFG，Combustor，Turbine，Compressor，Gas Compressor

1．はじめに

世界的な地球環境負荷低減の動きの中で，二酸化炭素を筆頭とする温室効果ガスの排出量削減，化石燃料に代表される一次エネルギー資源の消費量削減が大きな課題となっている。

発電業界においては，火力発電設備の高効率化が二酸化炭素排出量削減と燃料消費量削減の直接的かつ有効な手段となり，中でもガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）発電設備の更なる高効率化が期待されている。

一方，製鉄業界においても生産活動に伴う二酸化炭素の排出量削減が大きな課題であり，二酸化炭素の排出量を抑制できる新たな製鉄法の開発や鉄鋼生産工程におけるエネルギー消費量削減が求められている。その中で鉄鋼製造プロセスにおいて発生する高炉ガス（BFG），コークス炉ガス（COG），転炉ガス（LDG）等の各種低カロリー副生ガスを燃料としたGTCC発電設備の導入は，その発電熱効率の高さからエネルギー資源の有効活用に大きく貢献できるが，三菱日立パワーシステムズ株式会社（MHPS）はこの分野で先駆的な役割を果たしてきた。

本稿では製鉄所副生ガス焚きガスタービンの実績と技術的特徴に加え，近年顧客から求められている様々な運用多様化ニーズに対するMHPSの最新取り組み状況に関して紹介する。

2．製鉄所副生ガス焚きガスタービンの実績

国内製鉄所におけるエネルギー設備は1960年代から1970年代を中心に臨海大規模一貫製鉄所の建設に歩調を合わせ急激な進展を見せた。それらの多くは鉄鋼各社と電力会社との共同火力の形あるいは自家発電設備として建設され，製鉄所内のエネルギー需要に対処し，かつエネルギー有効利用を図るべく，BFGを主とする副生ガス焚きの火力発電方式が採られた。多くのBFG焚きボイラが建設され，また高炉送風設備と蒸気タービン発電設備を一体化し，信頼性及び経済性の高い，いわゆるT-G-BL方式の送風発電設備も開発・実用化された。一方のガスタービン発電設備は，低カロリーな製鉄所副生ガス燃料向けには高カロリー燃料向けに開発された標準形ガスタービンをそのまま適用できないこともあって当初は余り顧みられなかったが，当社では低カロリー燃料の有効利用の観点からいち早く開発に着手し，1958年に我が国初のBFG焚き850kWガスタービンを完成させ，八幡製鐵㈱八幡製鐵所に高炉送風機駆動用原動機として納入した。更に1965年には本格的実用機となるMW171SM形ガスタービン（15000kW）を開発し，住友金属工業㈱和歌山製鉄所に納入した。

海外においては1950年から1965年にかけて，欧州で約30基のBFG焚きガスタービン発電プラントが建設されていた。これらのプラントではタービン入口温度は750℃程度であり熱効率の向上を図るため，その多くは再生サイクル（熱交換器を用いて，高温の排ガスにより圧縮機吐出空気を予熱し，排熱を回収するシステム）を採用していた。その後ガスタービンの高温化と要素効率の向上に伴い，ガスタービン単体の熱効率が向上してきた。更に排ガス温度が上昇してきたことで排ガスエネルギーの回収効率が良くなり，BFG焚きGTCC発電プラントによる総合熱効率向上の実現が期待されるようになった。

当社ではいち早くこのニーズに応えるべく，副生ガス焚き燃焼技術の豊富な経験を基盤に低発熱量BFG焚き用燃焼器の共同開発研究を1978年に新日本製鐵㈱と実施した。製鉄所構内に設置した燃焼試験設備において各種燃焼器の実BFGによる燃焼試験を行い，低発熱量BFG焚き用燃焼器の実用性を確認した。本成果を生かして1982年に新日本製鐵㈱釜石製鉄所にMW151S形BFG焚きGTCC発電プラントを納入し，既設のBFG焚き蒸気タービン自家発電設備の増強（リパワリング）を図った。MW-151S形ガスタービン（16MW）は空冷タービン翼を採用し，タービン入口温度が1000℃を超えるBFG焚きガスタービンとして開発されたが，1000℃を超える高温ガスタービンにBFG燃料が採用されたのは世界初であった。

天然ガス焚きガスタービン発電設備では1986年に当社が東北電力㈱東新潟火力発電所第３号系列向けに

原稿受付　2015年２月12日
＊１　〒676-8686　高砂市荒井町新浜２－１－１
三菱日立パワーシステムズ㈱　ガスタービン技術本部
高砂ガスタービン技術部

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

1090MWの本格的なGTCC発電プラントを納入したことを皮切りに世界中で事業用，産業用ともにGTCC発電プラントの建設が急激に増加し，各ガスタービンメーカ間の高温化・大容量ガスタービン開発競争も加速し始めることとなったが，この東新潟火力発電所第３号系列に採用されたタービン入口温度1150℃級MW701D形ガスタービンをベース機としてBFG燃料用に設計変更を加えた大容量145MWの一軸形GTCC発電プラントについてもJFEスチール㈱とともに開発を進めていた。大きな課題として低カロリー副生ガスに適用出来るマルチキャン形燃焼器の開発があったが，JFEスチール㈱東日本製鉄所（千葉地区）構内に燃焼試験設備を設置し，実寸大の燃焼器を用いた実BFGによる燃焼試験を実施することで，空気バイパス機構付きマルチキャン形燃焼器の実用化の検証が出来た。1987年には本燃焼器システムを組み込んだMW701DS形BFG焚きGTCC発電プラントを完成させ，JFEスチール㈱東日本製鉄所（千葉地区）に納入した。

この大容量GTCC発電プラントの良好な運転実績に基づき，1994年にD形よりもタービン入口温度を100℃上昇した1250℃級MW501DAS形ガスタービンを使用した同規模のGTCC発電プラントを瀬戸内共同火力㈱倉敷共同発電所に納入した。

BFG焚きガスタービンとして最高のタービン入口温度1300℃を実現したM701FS形ガスタービンは当社が培ってきたBFG焚きGTCC発電プラント技術を結集して開発した最大容量機種であり，本ガスタービンを採用する300MW大容量GTCC発電プラントを2004年に君津共同火力㈱君津共同発電所に納入した。ガスタービンの断面図を図１に，GTCC発電プラントの主要機器諸元を表１に示す。

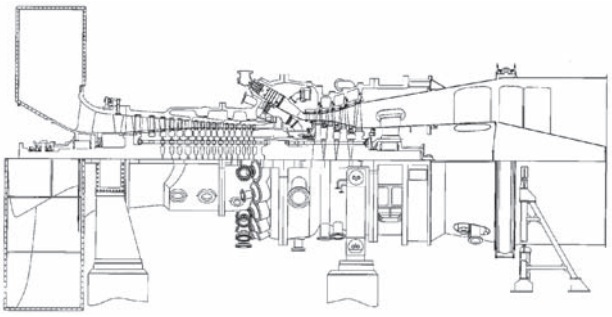


Fig. 1　Longitudinal section of M701FS gas turbine

3．製鉄所副生ガス焚きガスタービンの技術的特徴

3.1　製鉄所副生ガスの特徴

製鉄所副生ガスである高炉ガス（BFG），コークス炉ガス（COG），転炉ガス（LDG）等の主成分はCO，H_2，CH_4等で，N_2，CO_2，H_2O等の不活性ガスを多量に含むのが特徴である。表２にこれらの低カロリーガスの代表的な成分と燃焼特性を示す。

Table 1　Specification for major components

主機名	型式	仕様
発電設備	型式 出力	一軸型コンバインド発電設備 300MW
ガスタービン	型式 入口ガス温度 出力 回転数	開放サイクル一軸形 M701FS 1,300℃級 267.7MW 3,000rpm
排熱回収ボイラ	型式 蒸発量	三圧再熱自然循環型 570t/h　高圧 240t/h 中圧 284t/h 低圧 46t/h
蒸気タービン	型式 出力 蒸気圧力 蒸気温度 回転数	単車室再熱混圧復水形 SRT-40.5” 119.3MW 高圧　10.2MPa 中圧　2.84MPa 低圧　0.39MPa 高圧　535℃ 中圧　535℃ 低圧　250℃ 3,000rpm
発電機	型式 容量 冷却方式 回転数	横置円筒回転界磁同期形 340,000kVA 水素冷却 3,000rpm
主変圧器	容量 電圧	325,000kVA 一次 16,000V，２次 154,000V
ガス圧縮機	型式 回転数 容量	軸流形 5,025rpm 87MW

Table 2　Typical gas composition and characteristics of low Btu gases

		高炉ガス	転炉ガス	コークス炉ガス	石炭ガス化炉(空気注入)	メタン(参考)
成分(Vol.%)	H_2	1.9	1.9	52.8	16.8	—
	CO	19.2	61.4	5.8	11.0	—
	CH_4	—	—	27.8	2.9	100
	C_2H_4	—	—	3.8	—	—
	CO_2	22.1	15.4	1.9	10.9	—
	N_2	52.8	17.3	3.9	30.7	—
	H_2O	4.0	4.0	4.0	27.7	—
発熱量	(kcal/Nm^3)	630	1910	4450	1020	8530
層流燃焼速度	(cm/sec)	0	56	72	44	37
可燃範囲(空気比)	Rich	0.86	0.28	0.46	0.60	0.54
	Lean	1.32	2.78	3.70	5.88	1.79
	Lean/Rich	1.6	9.9	8.0	9.8	3.3

3.2　燃焼器の特徴

低カロリーガスを燃料とするガスタービンの燃焼器においては，その燃料特性に大きく影響される，以下のような点に留意が必要である。

(1)燃焼範囲が狭い

低カロリーガスは燃焼安定範囲が狭いために，天然ガスを始めとする高カロリーガスと同じ燃焼器では火炎喪失が発生し易くなり，安定したエネルギー供給が出来ない。

従って，燃焼領域での燃料と空気の割合（燃空比）を適正化することが必要となる。当社ではこれを解決する手段として，図２に示すように燃焼器の尾筒部分に空気バイパス弁機構を適用し，燃焼領域である内筒内の燃空比を適正化している。図３に示す通り，空気バイパス弁機構無しの場合では，燃料量が少なく燃焼領域の燃空比が低くなる低負荷時に燃焼効率が低下し，燃焼性が悪化

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

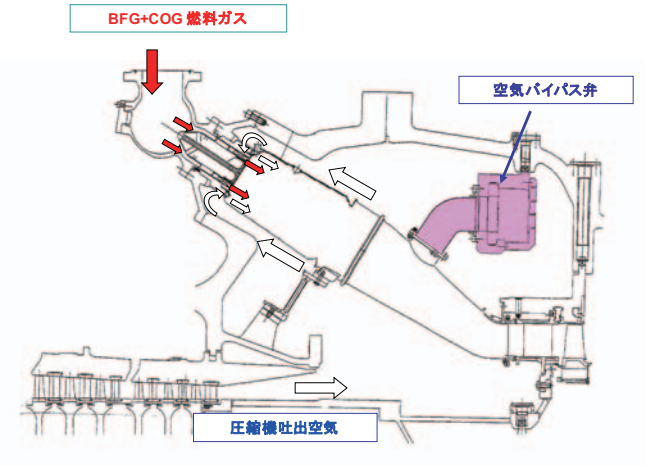


Fig. 2　Multi can type combustor for low Btu gas fuel

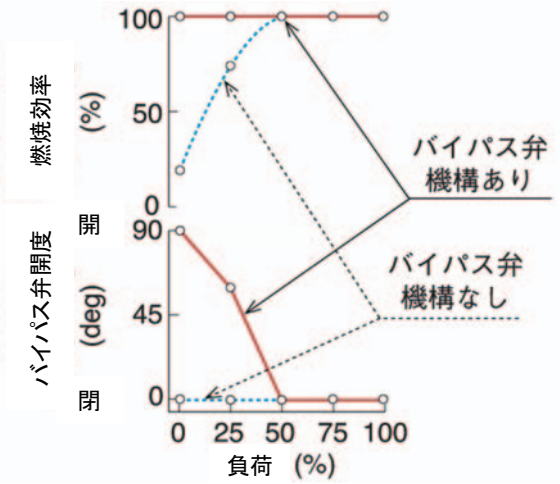


Fig. 3　Combustion efficiency improvement using bypass valve

している。これに対して空気バイパス弁機構有りの場合では，低負荷時において空気バイパス弁を開方向に設定し，燃焼領域である内筒内の燃空比を高く維持するように調整することにより，燃焼効率の改善を可能にしている。

⑵燃焼速度が遅い

低カロリーガスは燃焼速度が遅いために，天然ガスを始めとする高カロリーガスと同じ燃焼器では燃焼不安定もしくは燃焼器内での燃焼反応未完了（滞留時間の不足）の発生が懸念される。このため燃焼領域である内筒内の空気流速を低下させて火炎の安定化，滞留時間の確保を行う必要がある。低カロリーガス焚き燃焼器では内筒内の空気流速を低下させる手段として，図４に示すように内筒部の内径拡大を実施している。

⑶多量の燃焼空気が必要

低カロリーガスを燃料とする場合，天然ガスをはじめとする高カロリーガスを燃料とする場合に比べて燃料量が多くなるため，図５に示すように空気量が少なくなる。従って，燃焼器の壁面を冷却するために用いる空気量を

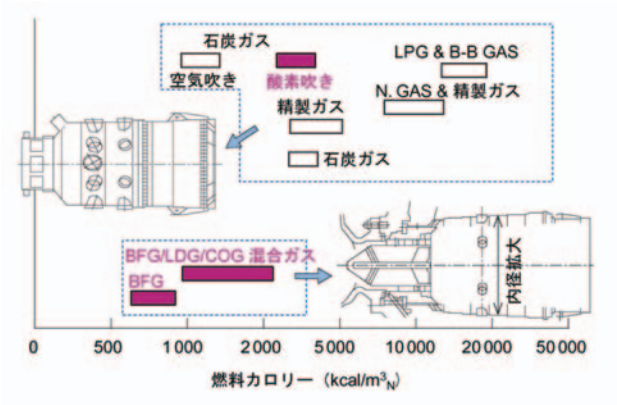


Fig. 4　Cross section of combustor basket

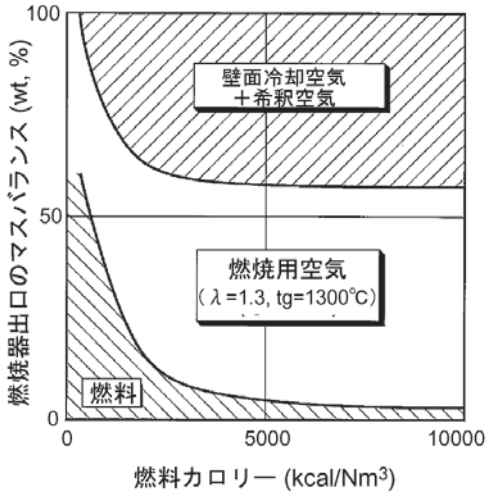


Fig. 5　Mass balance of combustor

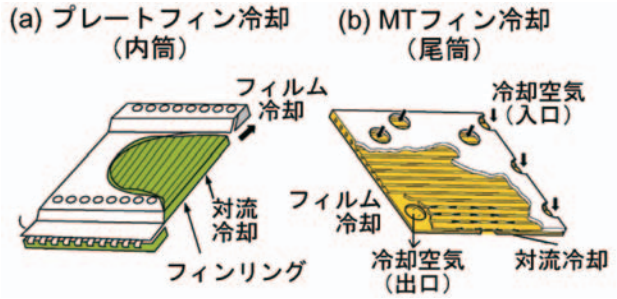


Fig. 6　Efficient cooling structure for combustor wall

最小限に抑える必要があり，燃焼器の壁面冷却構造としては図６に示すような高効率の積層冷却構造を適用している。

⑷多量の燃料流量が必要

低カロリーガスは燃料カロリーが低いことから，低カロリーガス焚きガスタービンでは通常の天然ガス焚きガスタービンに比べて約10倍もの燃料量が必要となる。このため，天然ガスのような小口径穴から燃料を噴射するタイプのノズルではノズル部で生じる圧力損失が大きくなり過ぎるため，図７に示すようなスワラー式のノズルを適用し，ノズル圧損の低減を図っている。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

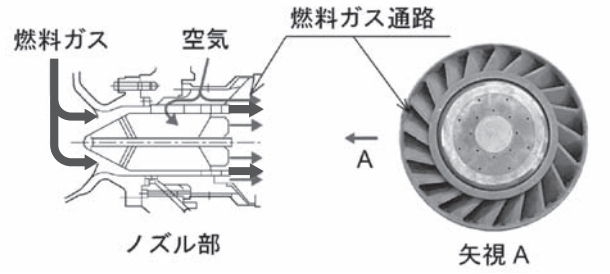


Fig. 7　Fuel nozzle for low Btu gas fuel

3.3　ガス圧縮機の特徴

ガスタービン燃料量として多量に使用される製鉄所副生ガスはほぼ大気圧相当の低圧条件で供給されてくるため，高圧の燃焼器内部へ安定的に連続噴射するためには大流量の燃料を高効率で圧縮出来るガス圧縮機が必要となる。当社ではこの要求条件に最適なものとして，図8に示すようなガスタービン空気圧縮機とほぼ構造を同一とする高効率な軸流圧縮機を採用し，これをガスタービンと増速歯車装置を介して一軸に結合し駆動用の動力をガスタービンから直接供給することで，プラント全体の高効率化を図っている。

尚，ガス圧縮機の作動流体となる製鉄所副生ガスには腐食性成分が多く含まれるため，IGV及び動静翼全ての翼面に耐腐食コーティングを施し，耐腐食性の向上を図っている。

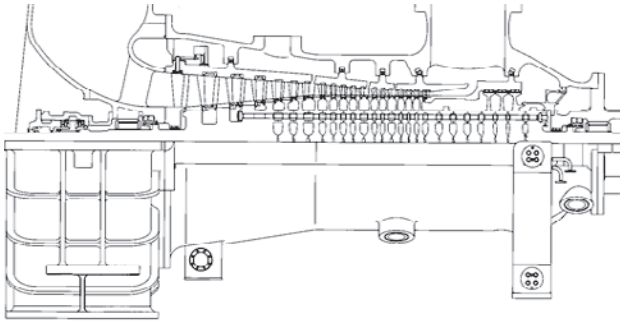


Fig. 8　Longitudinal section of gas compressor

また製鉄所副生ガスには毒性を有するCOも多く含まれることから，ガス漏洩対策には十分な配慮が必要となる。当社のガス圧縮機では軸シールにドライタイプのセグメントシールを採用し，さらにセグメントシール間にはグランド圧力より若干圧力を高めた窒素ガスを封入することでガス漏洩を完全防止する構造を採用している。

3.4　空気圧縮機の特徴

低カロリーガス焚きガスタービンにおいては多量の燃料量が必要となるが，タービンの通過ガス流量を天然ガス焚きガスタービンと同等に設定しようとすると，燃料量が多くなる分，空気量を削減してバランスを取る必要が生じる。従って，低カロリーガス焚きガスタービンでは通常の天然ガス焚きガスタービンに比べて空気圧縮機を少し小さ目に設計し直す必要がある。図9には低カロリーガス焚きガスタービンと天然ガス焚きガスタービンにおいてタービン通過ガス流量を揃えた場合の空気量と燃料量のフローバランス比較の一例を示す。本例の場合，低カロリーガス焚きガスタービンにおける空気圧縮機の空気量は天然ガス焚きガスタービンの約65%まで削減する必要があることが判る。空気圧縮機の空気量は削減するものの，空気圧縮機の作動圧力比を決定するタービンの通過ガス流量は同じであるので，作動圧力比としてはほとんど変わらない。

3.5　タービン部の特徴

高温燃焼ガスに曝されながら大きな動力を発生するタービン部の部品は通常の天然ガス焚きガスタービンにおける標準部品を出来る限り設計変更無しにそのまま流用することで，信頼性を維持することとしている。

尚，製鉄所副生ガスを燃料とする場合，燃料が多くなること，更にその燃料中にCO_2が多量に含まれることから，燃焼ガス中のCO_2濃度が高くなる特徴を有することに注意が必要である。CO_2は比熱比が小さく，タービン

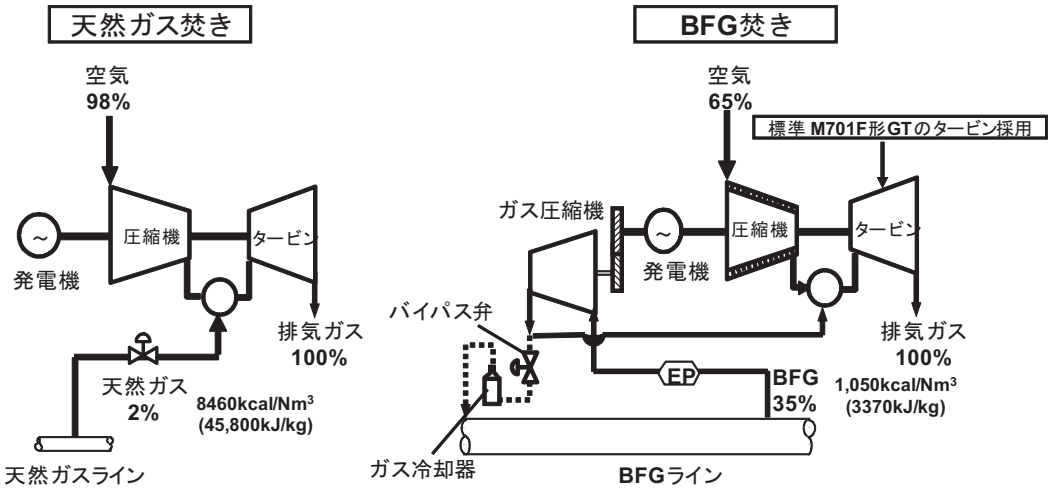


Fig. 9　Comparison of flow balance

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

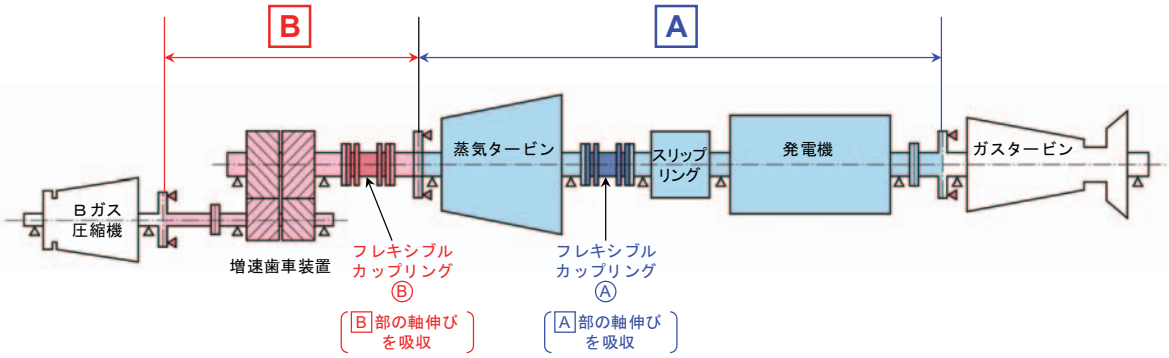


Fig.10　Shaft arrangement of low Btu gas firing GTCC

で発生できる断熱仕事が減少してしまうという特性を持っている。製鉄所のように複数の副生ガスの混合によりある程度成分をコントロールできる場合は，低カロリーガスをそのまま使用するよりは，高カロリーガスを少量混合して使用した方が全体としてメリットが出てくる場合もあるので，プラント基本計画の策定段階で十分留意すべき項目である。

3.6　軸系

ガスタービン・発電機・蒸気タービンとガス圧縮機とを増速歯車装置を介して同一軸上に配列することで，シンプルな配置を実現した。M701FS形ガスタービンを採用する300MW級GTCCにおいては軸系全長は約56mにもなるが，各機器の軸方向の熱伸びが相互に影響を及ぼさないように，図10に示すように蒸気タービンの両端にダイヤフラム式のフレキシブルカップリングを採用し，軸系の安定化を図った。

起動方式としては既設ボイラの蒸気を利用して主機である蒸気タービンで起動を行う方式を採用することで，起動のための専用設備を無くすことを可能とした。

尚，既設ボイラから適当な条件の起動用蒸気を確保出来ない場合や，ガスタービンに組み合わせる蒸気タービンを既設流用とするために別軸構成とする場合等には，起動方式に別形式，例えば天然ガス焚き一軸GTCCで一般的なサイリスタ起動方式を採用することも勿論可能であり，当社でも複数の採用例を有している。

3.7　燃料系統

ガスタービンの着火から全負荷までの燃料量は適切に制御される必要があるが，ガス圧縮機に採用した軸流式圧縮機にとっては，その流量変化幅は大きすぎる。ガス圧縮機には前方段に可変静翼機構を設け，全開～全閉までの動作で約３割の流量変化に対応可能であるが，それ以下に流量を絞る場合はガス圧縮機単体では対応できず，圧縮機出口配管部に設けた燃料ガスバイパス系統に設置した制御弁による燃料逃がし制御により対応している。

また，プラントの通常停止はもちろんのこと，緊急停止の場合でもガス圧縮機吐出の高温・高圧ガスを安全にガス母管へ戻せるよう，当社独自の直接冷却式ガス冷却システムを採用している。

尚，製鉄所副生ガスの特徴の一つとして多量のダストを含むことが挙げられる。ダスト量が多いとガス圧縮機翼への付着物堆積による効率低下やエロージョン，高温部品表面へのデポジット付着による冷却性能低下といった，性能低下や信頼性低下の原因となるため，ダスト量を適切に低減させるための湿式電気集塵機をガス圧縮機の手前に設置している。

4．多様化への最新取り組み状況

4.1　副生ガス燃料の多様化

製鉄業界における新たな製鉄法の開発や製鉄所運用形態の多様化に伴い，GTCC用燃料として従来のBFG，COG，LDG以外のガスを使用するニーズが出てきている。代表的なガスとしてFINEXガスがある。これは韓国の鉄鋼メーカであるPOSCO社が次世代製鉄技術として開発した直接還元鉄製造システムである「FINEX工法」において発生する副生ガスである。カロリーは天然ガスの1/7程度であり，BFGより高カロリーで，COGやLDGよりは低カロリーなガスであるが，同じ石炭系の副生ガスであることもあり主成分の種類は大きくは変わらない性状である。当社は2007年にPOSCO社の浦項製鉄所向けにFINEXガス焚き用に開発したM501SDA-B形ガスタービンを採用したGTCC発電設備を納入した。類似先行機であるMW501DAS形ガスタービンに比べ，設計カロリーが高くなる分，ガス圧縮機を小さめに，逆に空気圧縮機を大きめとするよう最適化した設計を行っている。

一方，主燃料としては従来通りBFGを使用するものの，BFGに混合してカロリー調整を行うための増熱燃料について，従来から用いられているCOGやLDGの代わりにLPGやLNGといった高カロリー燃料の使用も可能にしたいというニーズが出てきている。これは製鉄所内のエネルギーバランス変化次第で，GTCCで消費可能な増熱燃料が一時的に不足するケースが発生することが背景にあり，従来このような場合ではGTCCの負荷を低下させて増熱燃料の消費量を抑制するか，それでも不十

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

分な場合はプラントを停止せざるを得なかった。しかしながらユーザーには高効率なGTCCを出来るだけ停止させず運転継続したいという要望があり，これに応える手段としての補助用増熱燃料の計画が求められるケースが出てきたものである。当社ではタービン入口温度1250℃級のGTCCにおいて補助用増熱燃料にLPGやLNGを用いた実績を複数有しているが，何れも通常負荷運転には何ら支障なく，また運転中の増熱燃料切り替え操作も特に問題なく実施できることを確認した。

4.2　運用カロリー範囲の拡大

増熱燃料が不足した場合に補助用増熱燃料に切り替える他に，増熱燃料を減少させ，燃料ガスカロリーを低下させて運転継続したいとの要望もあり，当社ではやはりタービン入口温度1250℃級のGTCCにおいて計画燃料ガスカロリーからCOGを減少させた低カロリー運用の実機確認を行った。運転確認点を図11に示すが，何れの運転点においても燃焼不安定に陥ることは無く，運転継続に支障ないことが確認出来た。ただし，低カロリー運用時にはますます燃料ガス量を増加させる必要があるが，ガス圧縮機容量によりその上限は決まってしまうため，図12のようにカロリー低下とともにプラント出力は低下してしまう特性となる。

しかしながら，従来はCOG系統が不調でCOGが供給されない場合はプラントを緊急停止させることとしていたが，運用面での設定変更により，COGの供給が遮断された場合でも運転継続が可能となった。更に，COG削減によるカロリー設定変更が通常負荷運転中に自由に選択出来ることとなり，GTCC発電設備としての運用性改善につながった。

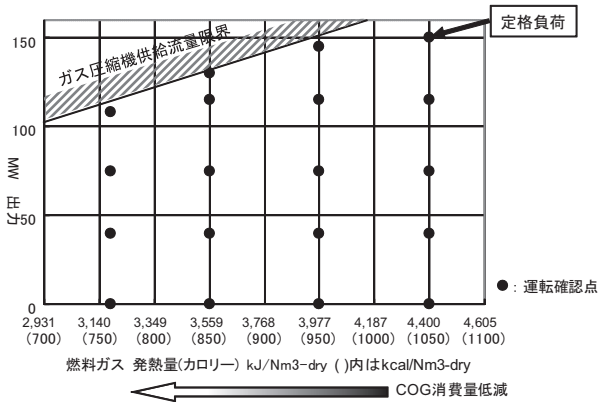


Fig.11　Low calorie operation test

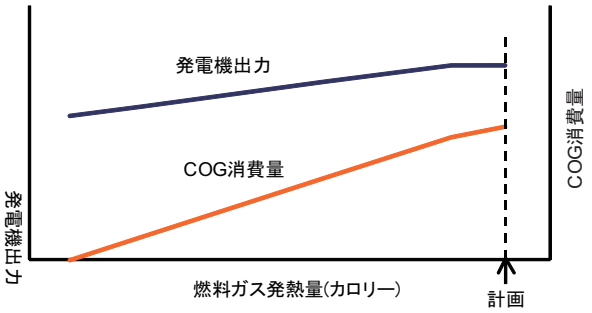


Fig.12　Generator power output characteristics in low calorie operation

5．製鉄所副生ガス焚きガスタービンの運転性能

BFG焚きガスタービンとして最高のタービン入口温度1300℃を実現したM701FS形ガスタービンを採用する300MW大容量GTCC発電プラントでは，実測のプラント総合熱効率は51%（LHV基準）超を達成している。

また，低カロリーガスは不活性成分を多く含み，断熱火炎温度が低いため，NOx発生量は低く抑えられることになる。タービン入口温度1300℃級のM701FS形ガスタービンでもガスタービン出口でのNOx排出値はあらゆる負荷範囲において10ppm未満（16%O_2換算値）を実測し，環境性能面でも非常に優れた設備であることを確認した。

次にCO_2発生量についても評価を行う。途上国の製鉄所ではBFGが発電設備の燃料として利用されずに大気放散されており，発電は石炭焚き汽力（BTG）発電プラント等で行っている。この放散されているBFGをGTCC発電プラントの燃料として活用し，300MWの発電を行うことで，既設BTGで発生させていた300MW分を削減することが出来る。これに伴うBTGのCO_2排出量削減効果は，BTGのCO_2排出量を0.9kg/kWh，年間発電時間を8000時間と仮定すると，216万トン／年に達する。一方，BFG焚きの新設BTGを導入する場合と比較すると，BTGに比べGTCCの熱効率が約25%相対値優れる分，54万トン／年もCO_2排出量削減効果が有利となる。

6．おわりに

製鉄所副生ガス焚きガスタービンはその高効率と環境性能の高さにより地球環境負荷低減に大きく貢献できる技術である。途上国の副生ガスのエネルギー有効活用が十分に進んでいない製鉄所に導入することで，一次燃料消費量削減と二酸化炭素排出量削減に大きな効果が期待できる。また，早くからエネルギー有効活用に取り組んできている我が国の製鉄所においても，1960年代から1970年代にかけて建設された副生ガス焚き火力発電設備は老朽化が進んできており，これらの設備更新時に最新の副生ガス焚きGTCC発電設備を導入することで得られる改善効果も大きなものである。ただし，製鉄所の副生ガス利用形態自身も時代の流れとともに変化しつつあり，ガスタービンメーカとしても，今後ますます多様化してくる製鉄所副生ガスの利用形態にも的確に応え，最適な発電設備を提供できるよう，技術開発に努めていく必要がある。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

報　告

第43回ガスタービンセミナー報告

藤井　　達
FUJII　Toru

「ガスタービンの最新技術と各種タービン技術の動向」と題して，第43回ガスタービンセミナーが，2015年１月22日㈭，23日㈮の両日，三菱重工横浜ビル33F大会議室にて開催された。 110名の方々に参加いただき，盛況の下，無事終了した。講師には，ガスタービン・航空エンジンのメーカーを中心に第一線でご活躍されている方々を迎え，11件のご講演をいただいた。 以下に概要を報告する。

第１日目は，主に航空エンジンの最新技術動向として，講演５件が行われた。

１日目の午前には，JAXAにおける航空エンジン環境適合性向上技術の研究開発として，効率向上と軽量化技術及びNOx，騒音レベルの低減を目指した研究開発について紹介いただいた（JAXA，西澤氏）。同じく，PW1100G－JMのエンジン開発として，日本独自の先進複合材技術の採用や燃料消費率，NOx，騒音レベルの改善を目指した最新技術について紹介された（日本航空機エンジン協会，佐藤氏）。

１日目の午後には，小型ビジネスジェット用HF120ターボファンエンジンの開発として，小型ターボファンエンジンでトップクラスとなる軽量，低燃費，低エミッションであるHF120エンジンについて紹介いただいた（本田技術研究所，野田氏）。ロケットエンジン用ターボポンプのタービン技術では，ロケットエンジンの開発過程におけるトラブル事例や解決方法の他，最新の技術動向について紹介された（JAXA，内海氏）。また，車両過給機用タービンの空力性能開発については，ダウンサイジングエンジン向けに低速域から高速域までの全域にわたる車両過給機タービンの技術課題と空力性能開発事例について紹介いただいた（ＩＨＩ，山方氏）。

第２日目は，発電システムの最新の技術動向として，講演６件が行われた。

２日目の午前には，次世代大型燃料電池SOFCとGTコンバインド発電の可能性として，固体酸化物形燃料電池とマイクロガスタービンを組み合わせた複合発電システムSOFC－MGTハイブリットシステムの技術開発の状況と今後の展望について紹介いただいた（MHPS，小林氏）。6F Gas Turbine Flange to Flange Upgrade at Hitachi Zosen Ibaraki Power Station，to Improve Plant Performance and Meet Market Needsの紹介では，長期運用された発電所の出力，効率等の向上策としてガスタービンの交換事例について紹介された（GE Power & Water，Rebeille 氏）。

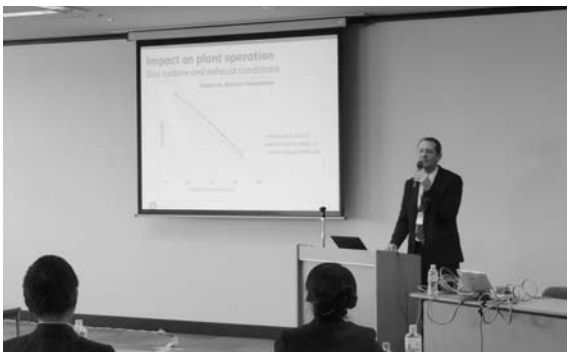
２日目の午後には，水素燃料焚き燃焼器の開発として，新たなエネルギー源として期待されている水素ガスを燃料として利用するためのガスタービン燃焼器の開発状況について紹介いただいた（川崎重工，小田氏）。石炭ガス化複合発電向けドライ低NOx燃焼器の開発では，CO_2排出量の大幅な削減が期待され，高効率発電と環境低負荷を両立するマルチクラスタ燃焼器の開発状況について紹介された（MHPS，浅井氏）。また，中低温熱回収Variable Phase Cycle 発電システムでは，地熱，工場排熱などの中低温熱源を利用したバイナリ発電システムについて，船用低速ディーゼルエンジンの排熱回収に適用した陸上試験の事例を元に紹介された（三井造船，難波氏）。最後に蒸気タービンの現状と将来の動向では，蒸気タービンのラインアップと特長及び高効率化技術と今後の動向について紹介いただいた（東芝，富永氏）。

GE殿の講演では英語による質疑応答が実施されるなど，例年と同様，今年度も各講義毎に活発な質疑が行われ，御参加頂いた方々に非常に有意義な時間を提供できたものと考えます。

講義，資料等の準備に貴重な時間をさいて頂いた講師の先生方に感謝すると共に，会場を提供して頂いた三菱日立パワーシステムズ㈱の関係者各位に深く感謝いたします。

（集会行事委員会委員）

会場の様子



講演風景

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

「国産ガスタービン・過給機資料集　ー統計，生産実績，仕様諸元ー［2014年版］」発行のお知らせ

日本ガスタービン学会では，日本国内のガスタービンおよび過給機関係各社のご協力を得て，毎年国内で生産されるガスタービン（陸舶用および航空用）および過給機の資料を収集し，統計を作成して会誌に掲載してきております。これまで，これらの資料を集大成し，広く会員の皆様の便に供するため「国産ガスタービン・過給機資料集」を1979年，1984年，1989年，1994年，1999年，2004年，2009年に発行し，好評を得ました。それから5年が経過し，今回も豊富で有益な生産統計データを再び集大成し，「国産ガスタービン・過給機資料集［2014年版］」を発行することに致しました。

この資料は約200頁（A４版）で，内容は次の3章で構成されています。

第１章　統計

毎年日本国内で生産された陸舶用および航空用ガスタービンの動向ならびに出力，台数（全体，地域別，用途別，被駆動機械別，燃料別）などの統計資料を豊富に掲載。特に最近５年間の分を中心に過去５年間の経過もわかるように図表にし，説明をつけて掲載。過給機については，この５年間の動向，生産台数，機種数の統計資料を掲載。

第２章　生産実績

最近５年間に日本国内で生産された陸舶用および航空機用ガスタービンの納入先，用途，仕様などを表にして掲載。

第３章　仕様諸元

各社で生産されるガスタービンおよび過給機の標準仕様諸元を表にして掲載。

ガスタービンおよび過給機関係者にとって，日本国内で生産されたガスタービンおよび過給機の生産統計や，納入先・現地定格出力・使用燃料等の生産実績や，仕様諸元等が網羅されているこの資料集は，製造者・使用者・研究者等を含め広くご利用いただけるものと確信しており，会員各位のお申込をお願い致します。

記

１．発 行 日：2014年12月25日

２．定　　価：１冊 20,000円（税，送料別）
会員価格：１冊 12,000円（税，送料別）

３．申込方法：下記申込書を学会事務局にお送りいただくか，学会webページ「刊行物申込フォーム」にてお申し込みください。

国産ガスタービン・過給機資料集［2014年版］購入申込書

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			
連絡先住所	〒		
所　属			
Tel.		Fax.	
E-mail			
会員種別	会員（No.　　）・　非会員	希望部数	冊

＊送料手数料は，400円（税込）／１冊です。
　２冊以上は，１冊あたり200円（税込）の追加料金をいただきます。
＊お支払の際は，刊行物代金（税込）＋送料手数料の合計金額をお振込ください。

【事務局への連絡事項】

１．送金方法（○印をつけて下さい）　　送金予定日：　　月　　日

a. 銀行振込　みずほ銀行　新宿西口支店　普通　1812298

b. 郵便振替　00170-9-179578

*口座名は「シャ）ニホンガスタービンガッカイ」です。振込手数料は貴方にてご負担願います。

２．請求書の発行について：（１）要　　宛名（　　）　（２）不要

３．領収書の発行について：（１）要　　宛名（　　）　（２）不要

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

会　告

「公益社団法人日本ガスタービン学会 2014年度通常総会」招集通知発送のお知らせ

正会員各位には当学会2014年度通常総会招集通知を３月中に発送いたします。

招集通知がお手元に届きましたら，内容をご確認のうえ，ご出席くださいますようお願い申し上げます。なお，当日ご出席願えない場合は，書面またはインターネットによって議決権を行使することができますので，2015年４月17日㈮午後５時30分までに議決権を行使くださいますようお願い申し上げます。

（総会等の概要）

日　時：　2015年４月21日㈫　14：00 ～ 16：00

場　所：　三菱重工横浜ビル33階会議室　（神奈川県横浜市西区みなとみらい３－３－１）

次　第：　公益社団法人日本ガスタービン学会　2014年度通常総会
名誉会員推薦状授与式

終了後，特別講演会（16：00 ～ 17：00），懇親会を開催いたします。

おわびと訂正

ガスタービン学会誌１月号（Vol. 43 No.１）「ガスタービン・ジェットエンジンに関する主要な国内学術会議等の俯瞰と整理」の図１に誤りがありました。訂正し，ここに正しい図を掲載のうえ，お詫びいたします。

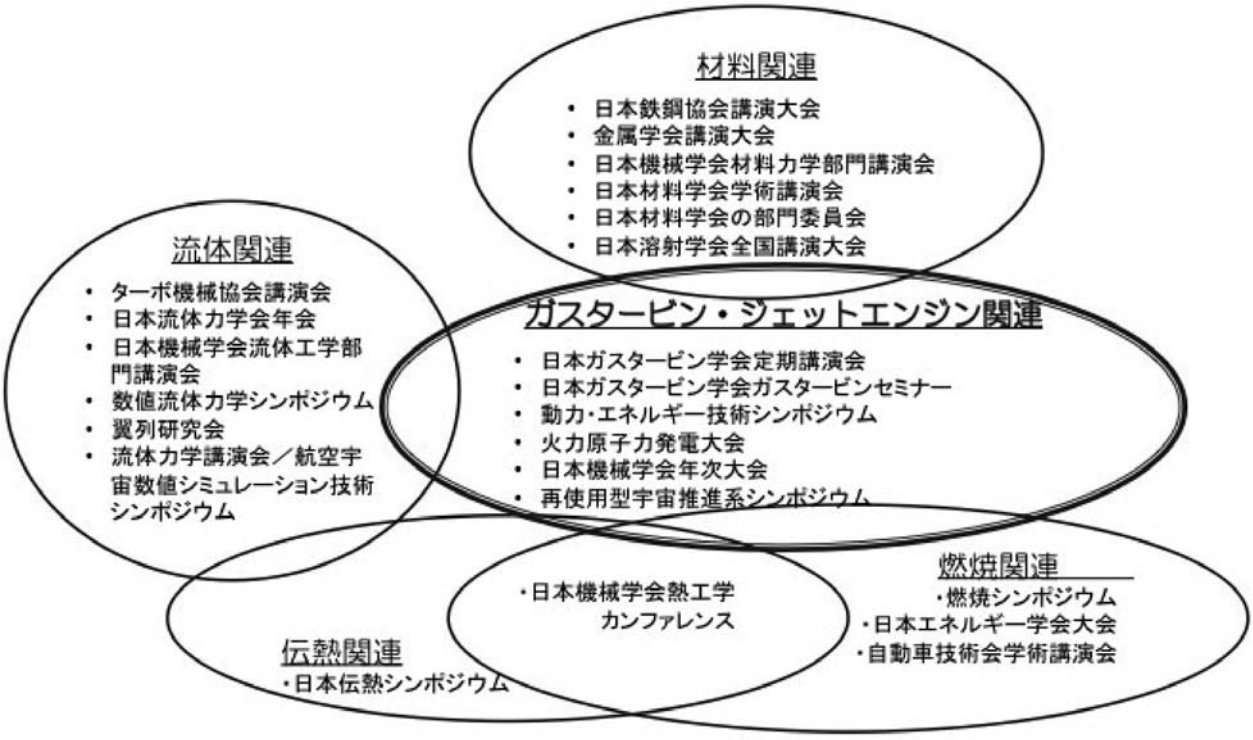


Fig. 1　Academic conferences in Japan related to the gas turbine and jet engine

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

会　告

第26回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ（予告）

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

1．日　時：　2015年７月９日㈭，７月10日㈮
2．場　所：　本田技研工業㈱　和光本社ビル（計画中）
　　（埼玉県和光市）
3．内　容：
　講義　ガスタービン概論
　　ガスタービンと流体工学
　　ガスタービンと伝熱工学
　　ガスタービンと燃焼工学
　　ガスタービンと材料工学
　　ガスタービンと制御工学
　見学会　㈱本田技術研究所　航空機エンジンR&Dセンター（計画中）
4．参加概要：
　⑴ 定　員：　60名程度
　⑵ 対象者：　大学，高等専門学校，大学院在籍者ならびにガスタービン初心者の社会人

教育シンポジウムの詳細及び申し込み方法等は本誌５月号及びホームページをご覧下さい。（http://gtsj.org/）
２日間の講義を受講された方には，「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行いたします。

★　今年度は関西地区における教育シンポジウムは開催いたしません。

次号予告　**日本ガスタービン学会誌2015年５月号（Vol.43 No.３）**

特集「航空機用ガスタービンの最新動向（仮題）」
巻頭言　渡辺　紀徳（東京大学）
次期固定翼哨戒機（XP-1）用エンジンの試験について（仮題）　平野　篤（防衛省）
ヘリコプター用ガスタービン（XTS2）の試作について（仮題）　鴨志田　徹也（三菱日立パワーシステムズ）
ヘリコプター用ガスタービン（XTS2）の試験について（仮題）　大川　啓（防衛省）
将来の戦闘機用エンジンについて（仮題）　井上　寛之（防衛省）
Hondaでの航空用ガスタービン研究とHF120ターボファンエンジンの開発　野田　悦生（本田技術研究所）
MRJの開発状況について（仮題）　貴志　公博（三菱日立パワーシステムズ）
将来の民間機用ジェットエンジンに関する研究について（仮題）　西澤　敏雄（JAXA）
環境負荷低減に向けた将来の民間機用エンジンの世界的動向について　坂井　栄治（ＩＨＩ）
航空エンジン電動化の最新研究開発動向（仮題）　岡井　敬一（東京大学）
航空機エンジンの“Geared”化動向（仮題）　五井　龍彦（川崎重工業）
極超音速エンジンの研究開発動向　小林　弘明，田口　秀之，小島　孝之（JAXA）他
※タイトル，執筆者は変更する可能性があります。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

会　告

第43回日本ガスタービン学会定期講演会・講演募集

下記の日程で，第43回日本ガスタービン学会定期講演会を，鳥取県米子市で開催いたします。講演をご希望の方は，期日までに所定の手続により講演の申込みをお願いします。

主　　催　公益社団法人　日本ガスタービン学会
協　　賛　協賛団体はガスタービン学会ウェブページ（http://www.gtsj.org/）をご覧ください。
開 催 日　2015年９月９日㈬，10日㈭
講演会場　米子コンベンションセンター BiG SHiP
鳥取県米子市末広町294
http:// www.bigship.or.jp
Tel：0859-35-8111
見 学 会　９月11日㈮

講演関連日程

講演申込締切　2015年５月11日㈪
講演採否連絡　2015年６月19日㈮
論文原稿締切　2015年７月21日㈫

募集講演

「研究報告」及び「技術紹介」に関する講演を募集いたします。「研究報告」の対象は，ガスタービン及びターボ機械等に関する最近の研究で，未発表のものとします。一部既発表部分を含む場合には未発表部分が主体となるものに限ります。「技術紹介」は，既発表の研究のレビューや関連情報（例えば，試験設備，設備運転実績等）の紹介等とします。講演論文集では「研究報告」と「技術紹介」の別を明示いたします。

ガスタービン本体及びその構成要素のみならず，補機・付属品，ガスタービンを含むシステム，ユーザーの実績等に関する論文，さらに共通する理論や技術を基盤とする技術分野（ターボチャージャー，蒸気タービンなど）の講演も歓迎します。

講演時間

論文１件につき，講演15分，討論５分，合計20分です。

登壇者の資格

原則として，本会会員もしくは協賛団体会員に限ります。（１人１題目の制限はありません。）

講演申込方法と採否の決定

日本ガスタービン学会ウェブページ（http://www.gtsj.org/）で講演申込みを受付けます。FAXで申込む場合は，申込書に必要事項を記入して，日本ガスタービン学会事務局宛にFAXしてください。申込書はガスタービン学会ウェブページからダウンロードするか，ガスタービン学会事務局にご請求ください。FAXで申込みを行った場合は，ガスタービン学会事務局に電話またはEメールにてその旨をお知らせください。

締切後の申込みは受付けません。

講演の採否は日本ガスタービン学会において決定し，６月19日㈮までにEメールにて連絡する予定です。

公益社団法人　日本ガスタービン学会事務局
電話番号：03-3365-0095
FAX番号：03-3365-0387
Eメールアドレス：gtsj-office@gtsj.org

講演論文原稿の提出

講演会に先立ち，講演論文原稿をご提出いただきます。講演論文を講演論文集原稿執筆要領（日本ガスタービン学会ウェブページに掲載）に従って，Ａ４用紙２～６ページ（技術論文に同時投稿または30日以内に投稿予定の場合は８ページまで可）で作成し，所定の講演論文原稿表紙と共に期限までに提出して下さい。加えて，講演論文集付属のCD-ROMに収録するための講演論文の電子データ（PDF形式）を同期限までに提出してください。原稿執筆要領および原稿表紙用紙は，講演採否の連絡時にEメールに添付してお送りします。

技術論文としての学会誌への投稿

原稿執筆要領に記載の要件を満たす「研究報告」の講演原稿は，著者の希望により，講演会終了後に通常の技術論文として投稿されたものとして受理されます。技術論文としての投稿を希望される場合は，講演論文原稿提出時に原稿表紙の所定欄に希望ありと記入し，さらに技術論文原稿表紙，論文コピー２部，英文アブストラクトを添付していただきます。詳細は原稿執筆要領をご覧ください。

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞

学生による「研究報告」の内，特に優秀な発表に対して表彰を行います。表彰された発表に対しては表彰状及び副賞が授与されます。エントリー希望者は申込時に所定の欄に○印をつけてください。

学生講演会参加旅費支援について

学生が登壇者として講演会に参加する際の旅費の一部を補助する予定です。審査方法等については学会ウェブページ等でお知らせします。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

会　告

○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
日本機械学会関西支部	第337回講習会「構造・強度設計における数値シミュレーションの基礎と応用」	協賛	2015/5/26-27	大阪科学技術センター8階中ホール	日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073,FAX:06-6443-6049 E-MAIL:info@kansai.jsme.or.jp
日本航空宇宙学会・宇宙航空研究開発機構	第47回流体力学講演会/第33回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム	協賛	2015/7/2-3	東京大学駒場リサーチキャンパスAn棟	日本航空宇宙学会 http://www.jsass.or.jp/web/index.php
可視化情報学会	可視化情報学会全国講演会(京都2015)	協賛	2015/10/10-11	京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス	可視化情報学会 http://www.visualization.jp

▷入　会　者　名　簿◁

〔正会員〕

山口友里江(I　H　I)　栗山　卓(川崎重工業)　古賀　和樹(川崎重工業)
福本賢一郎(川崎重工業)　浅見　真由(サ サ ク ラ)　長田　俊郎(物質・材料研究機構)
加藤　慎(三菱日立パワーシステムズ)　徳山剣太郎(三菱日立パワーシステムズ)　山本　博和(山本電気製作所)

〔学生会員〕

信太　大節(秋 田 大 学)　世古口直也(東 京 大 学)

◇2015年度会費納入のお願い◇

2015年度会費（2015年３月１日～2016年２月末日）の納入をお願い申し上げます。つきましては，2015年４月30日までに以下の通り納入くださいますようお願い致します。

なお，すでに口座自動振替をご利用の方は，2015年３月23日にご指定の口座よりお引き落としさせていただきます。

＜2015年度会費（不課税）＞

正会員	8,000円
正会員（65歳以上*）	5,000円
学生会員	2,500円
賛助会員　１口	70,000円

（*2015年３月１日現在）

【納入方法】

郵便振替：　00170-9-179578
銀行振込：　みずほ銀行　新宿西口支店
　　普通預金口座　1703707
いずれも口座名は，
シャ）ニホンガスタービンガッカイ です。
振込手数料は貴方にてご負担願います。

※会費の納入には，簡単・便利な口座自動振替をお勧め致します。自動振替をご利用されますと，振込手数料は学会負担となります。ご希望の方は巻末の「預金口座振替依頼書」にご記入の上，学会事務局までお送りください。

◇学会誌の送付先について◇

お引越しやご所属の変更に伴い，学会誌の送付先に変更が生じる場合には，学会事務局（gtsj-office@gtsj.org）にご連絡いただくか，学会HPの会員専用ページにて「登録情報変更申請」を行ってください。「あて所不明」で学会誌が返送されてくることがございますので，ご協力のほどよろしくお願いいたします。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

編集後記

寒さ厳しかった冬もようやく先が見え，桜の開花が気になる時期になりました。この冬，大寒波が何度も日本に押し寄せ，各地で豪雪被害に見舞われたり，都心部でも数度に亘り降雪による交通障害が発生するなど社会生活が大混乱しました。また，大寒波は欧州や北米など世界各地も襲い，ナイアガラの滝が凍結したニュースも伝えられました。これらの異常気象は，近年の地球温暖化の影響で北極の気温上昇が高くなったため，北極圏を取り巻くように流れているジェット気流が弱まって北極圏から寒気が流れ出したり，気流の蛇行により高気圧の動きが制限されることにより発生するとの説もあります。

地球温暖化の緩和を目的として二酸化炭素を始めとした温室効果ガスの排出が少ない低炭素社会を実現するため，巻頭言に解説されているような様々な取り組みが行われています。ガスタービンでは高効率化とは別に燃料多様化にも対応した燃焼技術の開発や実用化が行われ，着実に成果をあげてきています。

そこで，今月号の特集企画は，「資源エネルギーの有効利用と低炭素社会へのガスタービンの取り組み」について多様化するガスタービン燃料の副題と共に巻頭言を含め９本の論説・解説を取り上げました。研究機関からは，水素キャリアーとしてアンモニアを用いたガスタービンの開発状況と今後の課題，他の１件は航空機のCO_2規制化の現況やバイオジェット燃料から将来の極超音速機エンジンまでの最新情報を分かり易く解説して頂きました。また，二つの自治体からは，下水汚泥や食品残渣などからの消化ガスを利用して行うMGT発電の実績や今後の課題などを実績値を多用しながら細かく紹介して頂きました。両自治体ともに民間事業者を活用して処理施設の設計・建設から運用，維持管理まで行っており，この手法も含めて他の自治体で消化ガス発電を導入する際の参考資料として活用して頂けたら幸いです。メーカーからは，将来の水素社会の実現に向けた水素燃焼技術の開発状況や炭鉱・ゴミ埋立地などから大気中に放出されている低濃度メタンガス，塗装・印刷工場などから排出される揮発性有機化合物（VOC）ガス，鉄鋼製造工程で発生する低カロリー副生ガスなどを燃焼させるガスタービン発電の現況と課題などの最新情報を解説して頂きました。

最後になりましたが，本企画にあたり年末のご多忙な時期に関連組織と調整されながら原稿をご執筆して頂きましたこと，編集担当者一同，心より御礼申し上げます。

尚，前号で予告した特集記事の一部を諸事情により変更させて頂きました。　（櫻井　一郎）

●３月号アソシエイトエディター
櫻井　一郎（元 日本航空）
●３月号担当編集委員
加藤　千幸（東京大学）
寺澤　秀彰（東京ガス）
中野　健　（ＩＨＩ）
中野　剛　（JALエンジニアリング）

（表紙写真）
今回の表紙については，【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。
詳細については，下記記事をご参照ください。

・**「柏崎市自然環境浄化センターの消化ガス発電について」**……（P.103 ～ 108）
・**「黒部市下水道バイオマスエネルギー利活用事業における発電システムについて」**……（P.109 ～ 113）

☘事務局だより✉☘

今月からJR北陸新幹線が開通しました。まだ北陸新幹線には乗っていないのですが，実家のある富山まで２時間台で行けますので，そのスピードや乗り心地，車窓からの風景など早く確かめてみたいと思っております。思い起こすと，学生時代には，信越本線経由の特急「白山」で６時間かけて富山―東京間を行き来しており，その後，上越新幹線と特急 北越（長岡乗換え），先月までは上越新幹線と特急はくたか（越後湯沢乗換え），というルートを利用しておりました。これからはそのルートを利用することもないかと思うと，それもまたちょっと寂しい気分です。はくたかが通っていたほくほく線沿線は，遠く越後の山々を背に十日町盆地の田園風景がのどかに広がり，このあたりを昔，上杉謙信が馬に乗って駆け巡っていたのかしら，と歴史に疎い私は勝手な想像をして，車窓を楽しんでおりました。いつかゆっくりと散策をしてみたい場所です。

さて，日本ガスタービン学会は３月から新年度となりました。４月の総会に向け，３月下旬にはE-mailあるいは郵送により通常総会招集通知がお手元に届くかと思いますので，正会員の皆様には議決権を行使していただきたくよろしくお願いいたします。また，毎年10月に開催している定期講演会は，１カ月早く，９月の開催（米子市）となります。申込締切などスケジュールをお間違えのないよう，お気をつけください。　（中村　優美）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2014年６月25日制定

1．本会誌の原稿はつぎの３区分とする。

A．依頼原稿：学会誌編集委員会（以下，編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下，会員）外でもよい。

B．投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。

C．学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告，会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。

2．依頼原稿および投稿原稿は，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，情報欄記事の掲載欄に掲載することとし，刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説，講義	6ページ以内
技術論文	技術論文投稿規定による
速報	4ページ以内
寄書，随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内

3．依頼原稿の執筆者は，本会誌の原稿執筆要領に従って原稿を執筆し，編集委員会事務局（以下，編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記１に示す。

4．依頼原稿は，編集委員会の担当委員が，原稿の構成，理解の容易さ等の観点および図表や引用文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて，執筆者への照会，修正依頼を行う。

5．投稿原稿のうち技術論文以外のものは，編集委員会が審査し，本会誌への掲載可否を決定する。

6．投稿原稿のうち技術論文の審査，掲載については，技術論文投稿規定に従う。

7．依頼原稿の執筆者には，本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。

8．依頼原稿および投稿原稿の執筆者には，抜刷を10部贈呈する。

9．本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める著作権規程による。

10．他者論文から引用を行う場合，本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

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

技術論文投稿要領（抜粋）

2015年３月10日制定

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

日本ガスタービン学会誌
Vol.43　No.2　2015.3

発行日　2015年３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　壹岐　典彦
発行者　藤谷　康男
〒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
㊔ 1703707
印刷所　ニッセイエブロ㈱
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158　Fax. 03-5733-5167

©2015，公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ
本学会は，本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。
本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は，一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し，企業等法人による社内利用目的の複写については，当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的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，㈳学術著作権協会に委託致しておりません。直接，本学会へお問い合わせください。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.129, 2025/07/16.