特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

刑部　真弘[*1]
OSAKABE Masahiro

先日，寄港した客船クイーンメリーII号は，15万トン，全長345mという巨大さゆえ，横浜ベイブリッジの下を通過できず，旅客船が通常使用する大さん橋ではなく大黒埠頭に着岸した。この超大型船には，四基のディーゼルの他に，二基のガスタービンが搭載され合計114MWの発電能力がある。船体上部煙突部分に設置されたガスタービンは，年々環境規制が厳しくなる港湾地域で積極的に用いられることが期待される。ガスタービンはディーゼルに比べて排気がきれいであるが，良質で高価な燃料を使わなければいけないのが悩みの種である。

今回の特集では，“ゴミ”を燃料として使えるようなガスタービンの登場を期待しつつ，様々な分野で使われるようになった燃料について紹介する。様々な燃料についての珠玉の解説が登場するまえに，ここでは浅学を省みず燃料の特徴および基礎について整理してみた。

燃料の種類

燃料中の可燃成分は炭素C，水素Hおよび硫黄Sである。このうち主成分は炭素と水素である。図１に各種燃料の水素と炭素原子のモル比H/Cを示す。燃焼によって，炭素からは二酸化炭素CO_2が発生するが，水素Hからは水H_2Oが発生する。二酸化酸素は，地球温暖化物質として排出量の制限を受ける物質であるため，燃料中のH/Cはできるだけ大きい方が望ましいといえる。H/Cの最も大きな燃料は水素であり，最も小さな燃料は石炭である。この意味で，水素は最もクリーンな燃料であり，地球環境保護の観点で注目されている。数百年分の埋蔵量が確認されたと報道されているメタンは，低温液化（－162℃）されLNG（Liquefied natural gas）として輸入されている。同様に輸入されている液化石油ガスLPG（Liquefied petroleum gas）は，プロパンまたはブタン燃料を液化したものである。また，燃料転換により炭酸ガス排出量を削減することが各事業所等で行われているが，これは，使用燃料をH/Cの大きな燃料に変換していくことを行っている。モル比H/Cが約２の液体燃料を，約４のガス燃料に転換することにより，同じ発熱量ベースで30％二酸化炭素の排出を抑制できる。有史以来，石炭や炭等の固体燃料を用いてきた人類が，20世紀にはいって液体燃料を手にし高性能動力源を開発することに成功した。環境との調和が益々重要になる21世紀は，H/C比の高いクリーンなガス燃料の時代となる可能性がある。ただし，メタンは二酸化炭素の21倍の地球温暖化効果を持つ物質であり，大気中への放出に気をつける必要がある。

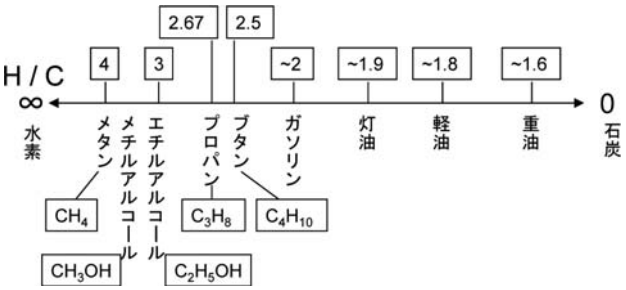


図１　各種燃料中のH/C比

現在，工業用として広く用いられている重油は，比較的低価格ではあるが，残念ながら液体燃料の中ではH/C比がかなり低い燃料である。重油は1種（A重油），２種（B重油）および３種（C重油）に分類される。重油中の灰分は微量であるが，そのなかにバナジウムなどの金属成分が含まれると，それが高温伝熱面での腐食に関与するので少ないほうがよい。また，重油中の硫黄分は燃焼して毒性のある亜硫酸ガス$S0_2$となり，さらにその一部は無水硫酸$S0_3$となる。この$S0_3$は有害物質であるとともに，低温伝熱面での腐食の原因となるためその含有量は少ないほうがよい。

脱化石燃料達成のための代替エネルギーには，その消費過程で二酸化炭素排出のない光，風力，地熱，潮流などの活用や，二酸化炭素を排出しても再び栽培することにより回収可能な木材，草などを用いたカーボン・ニュートラルなバイオ燃料がある。特にトウモロコシ等からとったバイオエタノールは，H/Cが３のエチルアルコールであり，石油の代替として取扱が容易なことから近年注目されている。しかし，バイオ燃料の生産には資源生物の生産力や量を管理し，環境破壊を増幅しないことが重要課題である。また，現状のバイオ燃料生産システムでは，トラクター等の稼動に化石燃料を大量に使うことも忘れてはならない。さらに，トウモロコシなどの食糧資源は，近い将来に世界的な人口増加による食糧不足が予測されている中で，エネルギー資源作物とするこ

原稿受付　2009年７月22日
＊１　東京海洋大学　海洋工学部　海洋電子機械工学科
〒135-8533　東京都江東区越中島２－１－６

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

とには疑問がある。東京海洋大学では地球表面積の70％を占める海，特に，わが国の広大な排他的経済水域を利用して未利用生物資源である海藻からバイオ燃料を生産する研究開発を行っている。

燃焼および発熱量

燃料は加熱されて引火点以上になると，空気中の酸素と反応して多量の熱を発生する。可燃成分の燃焼反応式（1 kmol当たり）は次のとおりである。

ここで，式(2)は不完全燃焼の反応式である。式(3)は水素の反応式であるが，生成されるH_2Oが蒸気である場合の反応熱は66.9kWhであるが，液体の水である場合には79.4kWhとなる。これは生成された水がもつ蒸発熱（潜熱）の差による。

ここで，燃料1kgあたりの発熱量に注目すると，炭素1 kgは9.42kWh，水素1 kgは33.5kWhとなり，水素の方が炭素の3.5倍程度となっている。このため，重さ当たりの出力が大きいことが要求されるロケットでは，燃料として液体水素（LH_2）が用いられる。

$$\underset{12kg}{C} + \underset{32kg}{O_2} = \underset{44kg}{CO_2} + 113\,kWh \tag{1}$$

$$\underset{12kg}{C} + \underset{16kg}{\frac{1}{2}O_2} = \underset{28kg}{CO} + 34.2\,kWh \tag{2}$$

$$\underset{2kg}{H_2} + \underset{16kg}{\frac{1}{2}O_2} = \underset{18kg}{H_2O}\begin{cases} +66.9\,kWh(steam) \\ +79.4\,kWh(water) \end{cases} \tag{3}$$

$$\underset{32kg}{S} + \underset{32kg}{O_2} = \underset{64kg}{SO_2} + 82.5\,kWh \tag{4}$$

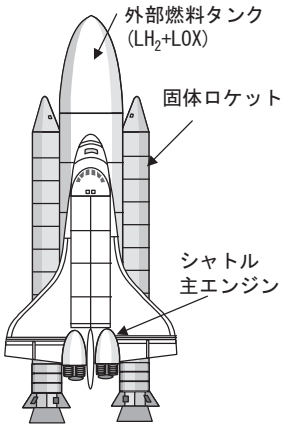


図２　スペースシャトルの燃料タンク

ただし，液体水素（LH_2）は，大気圧の条件では約－250℃の低温となるが，その密度は約70kg/m^{3}であり重油等の液体燃料の1/10程度しかない。すなわち発熱量当たりの質量は小さいが，その体積は非常に大きくなる。図２は宇宙往還機（スペースシャトル）である。巨大な外部燃料タンク（直径8.5m，高さ47.1m）は，その中に収められた液体水素（LH_2）と液体酸素（LOX）を，打ち上げ時の約９分間シャトル主エンジンに供給し使いきると切り離される。なお，液体酸素（LOX）は，大気圧の条件では約－180℃の低温となるが，その密度は約1100kg/m^{3}と比較的大きい。

燃料１kgまたは１m^3_N（大気圧０℃での容積基準）が完全燃焼する際に発生する熱量を，その燃料の発熱量（heating value）という。水素を含む燃料では，燃焼ガス中の水分が蒸気の状態にあるか，凝縮水の状態にあるかによって異なり，後者の方が蒸発熱に相当する分だけ高くなる。前者を低発熱量（LHV, lower heating value），後者を高発熱量（HHV, higher heating value）とよぶ。この二種類の発熱量は，石油燃料では約６％，都市ガス（13A）では10％程度異なる。このため，効率もLHV基準とHHV基準では同量異なることになる。一般的に船舶ではLHV基準が用いられるが，陸上の発電ではHHV基準とすることが多い。

図３に示したのは，H/Cの値と燃料１kg当たりの発熱量の関係である。H/Cの増大とともに，燃料１kg当たりの発熱量が増加するのがわかる。また，H/Cの増大とともに排ガス中の水蒸気量が増えるので，LHVとHHVの差が大きくなる。

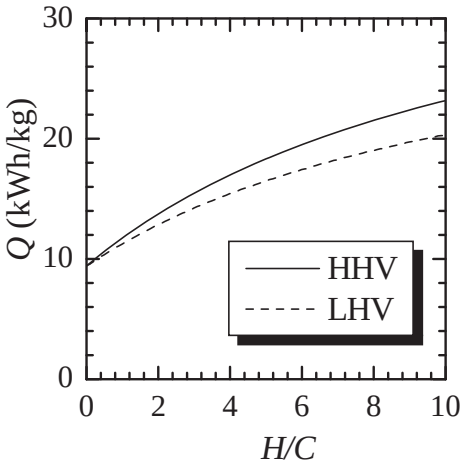


図３　H/Cと発熱量の関係

理論空気量と排ガス

一般的な燃料中の主成分は，炭素Cと水素Hである。ここで，ガソリン等のH/C=2の液体燃料１kgを燃焼させることを考えてみる。前述した反応式で，炭素12kgと水素２kgが燃え，その結果44kgの二酸化炭素が排出

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

されたと考えれば良いので，燃料１kg当たりでは

$$\frac{44}{14}=3.14\text{kg}$$

の二酸化炭素が排出されたことになる。彼女とドライブに行って，40kgのガソリンを使ったとすると，彼女の重さの数倍はある120kgもの二酸化炭素を排出したことになるのである。これらが積もり積み重なって，現在の日本人が１年間に排出する二酸化炭素は，10トン（2005年時点）にもなる。アメリカ人は，なんと20トンも排出している。

図４に示したのは，H/Cの値と燃料1kg当たりの二酸化炭素排出量の関係である。H/Cの増大とともに，燃料１kg当たりの二酸化炭素排出量が減少するのがわかる。H/Cが大きな燃料に転換することにより，二酸化炭素の排出を抑制できる。

図５に示したのは，H/Cの値と高位発熱量（HHV）当たりの二酸化炭素排出量の関係である。モル比H/Cが約２の液体燃料を，約4のガス燃料に転換することにより，同じ発熱量ベースで30％二酸化炭素の排出を抑制できる。

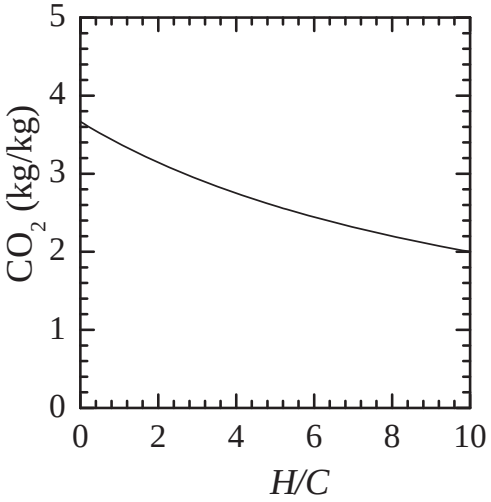


図４　H/Cの値と燃料１kg当たりの二酸化炭素排出量の関係

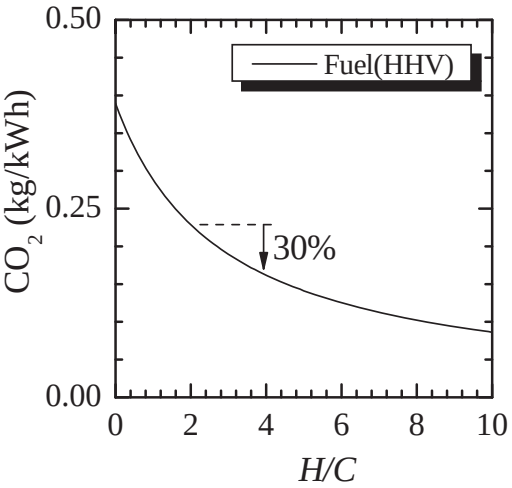


図５　H/Cの値と高位発熱量（HHV）当たりの二酸化炭素排出量の関係

ところで，燃料1kg当りに排出される水蒸気量は，図６のようにH/Cの増大とともに増加する。排ガス中に含まれる水蒸気量が多いということは，その水蒸気の気化熱である潜熱も多いということであり，H/Cの増大とともに潜熱回収の意義は大きい。また，ここで注目して欲しいのは，例えばH/Cが２程度の灯油を用いた石油ストーブでは，燃料よりも重い量の水蒸気が燃焼によって放出されているということである。H/Cが４の天然ガスを燃料としたガスストーブでは，燃料重量の２倍近い水蒸気が放出され，部屋の湿度維持に貢献する。電気式ヒートポンプを用いた暖房では，当然，この水蒸気の放出がない。このため，部屋の空気は乾く傾向にあるため，加湿を行う必要がある。

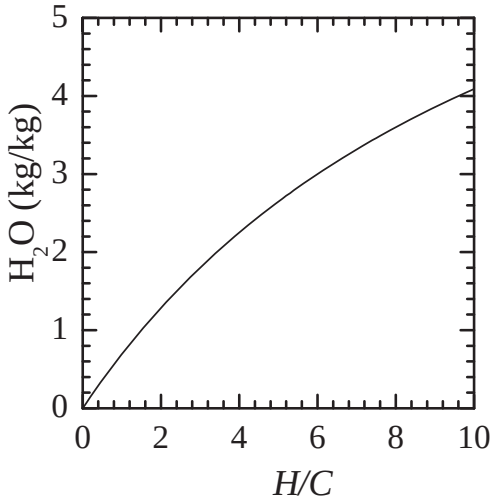


図６　H/Cの値と燃料１kg当たりの水蒸気排出量の関係

また，燃やすのに必要な酸素量は，H/C=2では前述した反応式によると，燃料１kg当たりでは

$$\frac{48}{14}=3.43\text{kg}$$

必要である。空気中の酸素質量濃度は23％であるので，必要な空気量は

$$\frac{3.43}{0.23}=14.9\text{kg}$$

であり，水素が多くなるとそれ以上（水素のみだと約35kg）必要とされる。最もこれらは燃焼に必要な最低限の理論空気量であるから実際にはもっと多くを供給しなければならない。

図７に示したのは，H/Cの値と燃料１kg当たりの理論空気量の関係である。H/Cの増大とともに，燃料１kg当たりに必要とされる理論空気量が増加するのがわかる。

燃焼に必要な大量空気中の約80%は窒素である。この

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

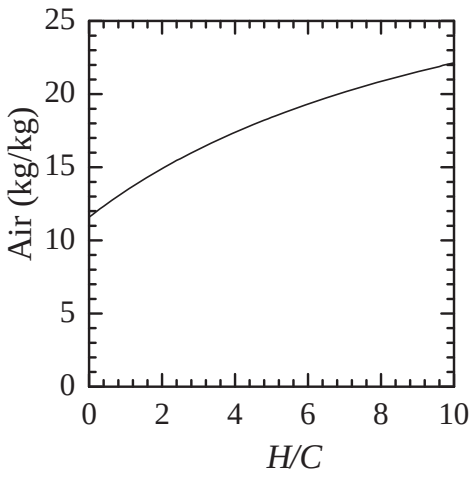


図７　H/Cの値と燃料１kg当たりの理論空気量の関係

窒素は燃焼ガス中で有害な窒素酸化物NOxを生成したり，熱を含んで排ガス熱損失の原因となったりする。人類は有史以来，空気を用いた燃焼により，ほとんどの熱および動力を得てきた。最近，ゼオライト等の窒素吸着物質やセラミックス製の酸素透過膜の研究開発が急速に行われており，比較的安価な酸素が得られる環境が整いつつある。燃焼に空気でなく酸素を用いると，例えば工場等から排出される低カロリーガスを燃やすことができたり，排ガス量を大きく減らせると共にCO_2回収が容易になる等のメリットがある。また，窒素酸化物やダイオキシン等の有害生成物を抑制することも可能となる。

さて，酸性雨の原因として排ガス中の窒素酸化物NOxが問題となっている。燃焼用空気に含まれる窒素と反応して出来たものと，燃料中に含まれる窒素分によって生成されるものとがある。一般的に，十分に酸素があり燃焼温度が高い場合に多く生成される。動力装置等から排出されるNOxのほとんどがNOであり，数%がNO_2である。NO_2は，人間の粘膜でHNO_3（硝酸）となる。このため，NO_2を含む排気ガスを吸い込むと鼻や気管が刺激されチクチクした感じがする。また，NOはこのような刺激性はないが，血液中のヘモグロビンとの結合力は酸素の５～30万倍と言われており，特に酸欠に注意しなければならない。

発電にともなう二酸化炭素放出量

各種燃料を用いた発電方法があるが，１kWhの電力を得るのに，どれだけの二酸化炭素を排出するかを，３つの研究機関が調べたものが表1である。表中の数値には，発電装置の建設，運転および廃棄等によって排出されたすべての二酸化炭素排出量が含まれる。石炭，石油，天然ガスとH/Cが増加するとともに，二酸化炭素排出量は低くなる。図５に示した燃料発熱量当たりの二酸化炭素排出量に比べると，ライフサイクル排出量は約３倍となっている。また，当然ではあるが，化石燃料を用いた発電に比べて，太陽光，風力，原子力および水力発電の二酸化炭素排出量は少ない。ただし，これらには，研究機関によって見積もりに大きな相違がある。

図８は，三つの研究機関のCO_2排出量平均を，発電方式ごとに棒グラフにしたものである。繰り返すが，石炭，石油，天然ガスの化石燃料に比べて，原子力および自然エネルギーのCO_2排出量が少ない。ところが，原子力は，安全運転をさせるために負荷変動をさせることが難しい状況にあり，自然エネルギーは出力変動が大きいという難点がある。このため，これらのエネルギーを上手に使っていく仕組みが必要とされ，ICT（情報通信技術）を用いたスマート電力供給網[1]が提案されている。

表１　ライフサイクルCO_2排出量（kg/kWh）（2007年）

	スイス	国際原子力	電力中央
発電方式	PSI研究所	機関IAEA	研究所
石　　炭	1.071	0.978	0.975
石　　油	0.855	0.811	0.742
天然ガス	0.605	0.696	0.519-0.608
太陽光	0.144-0.189	0.097	0.053
風　　力	0.036	0.036	0.029
原子力	0.016	0.021	0.022
水　　力	0.004	0.016-0.023	0.011

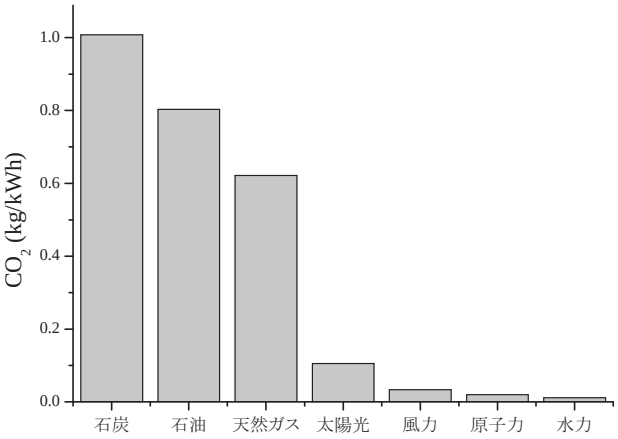


図８　ライフサイクルCO_2排出量（平均）

参考文献

(1)　SMART研究会編，地域分散エネルギー技術，海文堂出版，(2004)

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

家庭からの排水および養鶏業から排出される廃棄物のバイオマスエネルギー転換について

毛利　邦彦*1
MOURI Kunihiko

1．はじめに

日本における地球温暖化ガスの排出抑制のために，太陽光発電，風力発電などの自然変動電源の導入促進のほかに，動植物に由来する有機物であってエネルギー源として利用することが出来るバイオマス資源が地球温暖化防止の資源として脚光を浴びて来たが，本解説は多種多様性のあるバイオマスエネルギー源の中から汚泥と鶏糞の利用についての具体的な検討を行った結果を紹介し，そのエネルギー源のガスタービンへの燃料としての利用の課題について取りまとめたものである。

2．地球温暖化とエネルギー技術開発の背景

地球温暖化防止に対する事象については，気候変動に関する政府間パネル（IPCC）に報告された第４次評価報告書（2007年）により，科学的根拠（データー）が蓄積された報告が発表された。

それによると，地球温暖化が顕在化して来ている傾向を示しており，地球温暖化に起因する異常気象，および異常気象に起因する生態的変化も世界各地で報告されるようになり，地球温暖化に対する考え方が「ほぼ人為的な活動に起因することは疑いの余地がない」と一歩踏み込んだ報告となり，地球温暖化ガスの排出抑制に世界が真剣に取り組むように要請をした。

この地球温暖化に対する防止については，1997年に京都で開催された，気候変動枠組み条約第3回締約国会議（COP3）にて，地球温暖化ガスの削減目標を定め，2004年に発効した拘束力のある国際的な約束である。

この京都議定書に割り当てられた国別の地球温暖化ガスの削減目標を達成するべく，各国ではいろいろな取り組みを実施し，その達成を義務つけているが，日本は京都議定書以前よりエネルギーを輸入に頼っているためにエネルギーの安定確保のため，早期にその対応政策を実施して来ていた。それは1973年の石油ショックに端を発し，エネルギー源の多様化を推進すると共に，新エネルギーの推進を目的としたサンシャイン計画（1974年）や省エネルギー技術開発促進を目的としたムーンライト計画（1978年）が制定されエネルギー安定供給と環境配慮型技術開発が促進されて来た。

京都議定書採択以降のエネルギー政策は地球温暖化ガスの削減を図るために1997年に新エネルギー利用の促進に関する特別措置法により新エネルギーの導入促進を図る措置が取られ，また1998年に防止対策推進大綱が策定され地球温暖化防止の総合的な国の取り組みが促進されて来た。

この地球温暖化ガスの削減には再生可能エネルギーの導入促進が肝要となるが，2002年の「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」によって今まで廃棄物の一部と見なされていたバイオマスエネルギーが「新エネルギー」として認知，追加された事が，エネルギー源と地域とが，連携する結果となり，バイオマスの導入促進に対して，国の支援が可能なシステム（バイオマスタウン構想）が構築できるようになった。

その基本構想は①地球温暖化防止②循環型社会の形成③競争力のある新たな戦略的産業の育成④農林漁業，農漁村の活性化を目的としたものである。

一方，エネルギー安定供給の基幹会社としての電力会社，ガス会社が料金の低減化と安定供給の責任を果たすために，発電設備の高効率化による化石燃料の削減，公害物質排出の低減，大規模化によるスケールメリットによるコストの低減を図るための技術開発を実施して来た。特に1973年の第１次石油ショック以後の開発は環境対策技術開発を含め，大規模火力発電の開発とプラント効率の高効率化であった。

1960年頃に稼働した石炭火力発電は75MW級程度であり，1970年台には250MW級に，更に1980年台には500MW級の運転が開始され，2000年には国内最大の1050MWの石炭火力発電所が運開するなど単機容量を大規模化することで，電力単価の低減（スケールメリット）を図って来た。

また大規模化と相まって蒸気条件の高温高圧化によるプラント効率の向上技術開発が進められて来た。

蒸気条件は東京電力の柏崎発電所（600MW　石油火力）に主蒸気温度538℃，再熱温度566℃の超臨界圧の実用化を見たが，1998年には中国電力の三隅発電所（1,000MW，石炭火力）では主蒸気温度600℃，再熱温度610℃の超超臨界圧（USC）の蒸気条件の実用化が実

原稿受付　2009年８月４日
＊1　㈱eL-Power Technology　取締役 技術部長
東京海洋大　社旗連携センター　客員教授
〒238-0042　神奈川県横須賀市汐入町２-36

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

施されて来た。

余談であるが，この超超臨界圧はUSCと呼ばれウルトラ・スーパー・クリティカル（Ultra Super Critical）の英語の略であるが，この技術を主体的に開発した電源開発㈱の中林恭之氏が名付けた技術である。

ガスタービンの効率向上も入口ガス温度条件が1100℃以上になるとガスタービンによる発電と排ガスの温度を利用したボイラーで発生した蒸気を利用した蒸気タービン発電との複合発電により，総合的なプラント効率の向上を図った。単機規模も300MWの大型化を達成して，遮熱コーティング（TBC）と，タービン翼の冷却技術の開発等を図りながら，サーマルNOxの限界値近傍の1,500℃（TIT）まで高温化により，総合効率60％（LHVベース）の最高効率を達成して来た。

2000年の電気事業法の大幅な改正により，電気事業が自然寡占事業から電力自由化による競争の時代となり，商社やガス会社等が特定規模電気事業者（PPS）を設立し小売事業に参入して来た。

PPSは関連企業や自社の余剰電源を電力会社の送電線を経由して（託送）小売りを行うものである。

2000年の前後に，電気と熱を併給（コージェネレーション）した小規模（28kW程度）のマイクロタービン（MGT）が米国から導入され，改正電気事業法の自由化拡大を視野に，その経済性や技術課題の実証が盛んに実施されていた。

また，環境に優しいとされる各種燃料電池の開発も積極的に実施され，水素をエネルギー源とする開発が積極的に実施されていた。

余談ではあるが，水素の開発は日本では早くから国の取り組みとして，WE-NETと呼ばれた産学官の大型プロジェクトが推進され，水素利用推進に日本は先駆的な開発を実施していた。

このような技術の進展については，第1次石油ショックを契機に大型化，効率向上，省エネルギーなどのエネルギーセキュリティおよび環境負荷の低減を目的とした技術開発を行ってきたが，その背景には，地球温暖化防止に対する国の政策に基づき，地域，大学，企業，国民と多方面に亘る利害関係を調整する必要が新たに考慮しなければならない時代となって来た。

3．バイオマス資源のエネルギー転換への適用

バイオマスのエネルギーは図１に示すように多種多様なバイオマス資源が存在するが，林業の活性化と賦存量が比較的多いとされる木質バイオマスが，早期に開発が始められ，間伐材の処理を効果的かつ経済的に処理する目的として，能代森林組合による木質バイオマス発電（3,000kW）が平成15年に運開したが，このシステムは既存のボイラー・タービンシステムで，プラント効率も11.3％（燃料発熱量　2,700kcal/kg）と効率の良くないシステムであった。

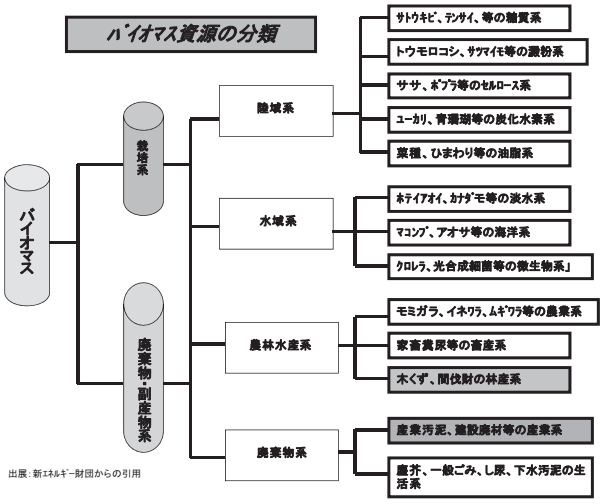


図１　バイオマスの分類

最近ではPPSの事業のグリーン電力販売促進として，サミット明星パワーエナジー社による木質系バイオマス発電（50MW）を運開して，グリーン電力の小売りを実施している。

また，北欧では2000年頃から木質バイオマスのガス化の実証試験をヨーロッパ連合（EU）にて実施していた。

写真１は，オーストリアにおける5,000kW相当の加圧型の木質バイオマス実証試験装置を示す。

またフィンランドのケースであるが，木質ボイラーによる地域暖房へのエネルギーとして，図２に示す様に，広くフィンランド国内に分布している。

この木質バイオマスの普及は化石燃料からの転換，再生可能エネルギーによる地球温暖化防止を目的以外に林業の振興による雇用の創出を国の政策として位置付けている点が，昨今の日本の雇用状況の悪化を考えると，環境の促進と雇用機会の創出をソリューションとして考えている点（図３を参照）に先駆的であると感じている。

写真１　オーストリアの電力会社によるガス化実証試験装置（5000kW相当）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

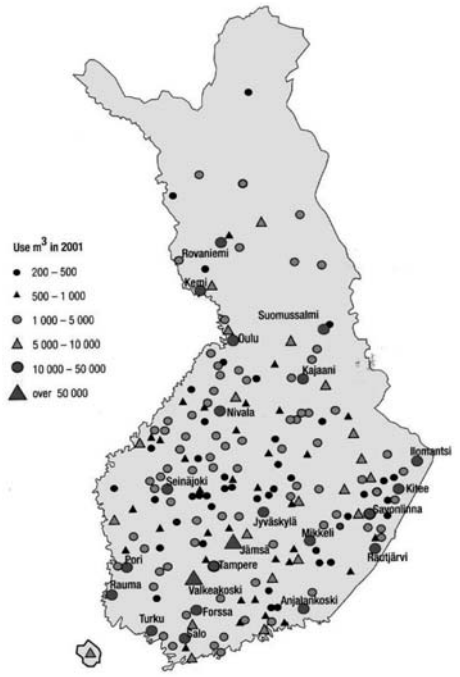


図２　チップを用いた地域暖房プラントの実績

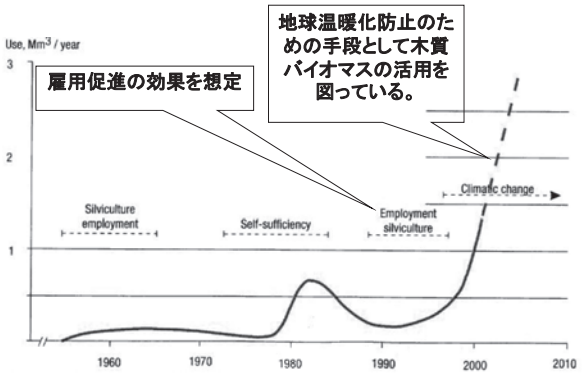


図３　雇用促進等のための木質バイオマス産業の発展経緯

４．未活用のバイオマス資源

バイオマス資源の年間発生量は表１に示すように年間約２億２千万トンとなっているがそのうち未活用分として約9,500万トン（年間）が未利用として埋め立てや焼却されているが，エネルギーへの利用はパルプ工場からの黒液が主で，全体の９％程度しか利用されていない。

循環型社会の構築に，食品残渣，汚泥，畜産残渣等の多くは肥料として有効利用されていると報告されている。

食品，畜産飼料は輸入によるものが多いが，餌が食肉に転化される割合は正確には把握していないが，牛は10％程度，豚は30％程度，鶏は50％程度と言われている。食肉にならない分は放熱と糞尿になるので，飼料の輸入は糞尿の輸入とも考えられる。糞尿は肥料として活用され，新たに作物に生育に転化すると考えられるが，毎年約１億トンを堆肥等の肥料として日本の土壌に散布していることになる。

食糧は人間を経由して下水汚泥として下水処理場に運ばれ，飼料は家畜を経由して，糞尿になり，それが堆肥に変換され循環していることになる。

特に鶏糞はリンやカリウムを多く含んでいるので良質の肥料として，畜産農場の近傍の農家が引き取りバランスしているが，大規模の養鶏業者は糞尿の発生が過多になり，遠方の肥料利用者に処理コスト以下のコストにて処理をしている現実が存在する。

2005年に，デンマークで循環型社会を実践している地域であるグリーンベルトを調査したが，その構造は図４に示すように豚の飼料の100％自給から糞尿は発酵プラントまたは温水ボイラー用の燃料として活用している。グリーンベルトの目標は，次に示す様に循環型社会の実践を行い，それをデンマークの「技術・制度のショーウィンドー」として自国の技術やマネージメントを海外

表１　バイオマス資源の年間発生量と利活用状況

バイオマス		年間発生量	利活用の状況
廃棄物系バイオマス	家畜排せつ物	約9,100万トン	たい肥利用　約80%
	食品廃棄物	約1,900万トン	肥飼料利用など10%未満、90%が焼却・埋立等
	製材工場等残材	約610万トン	エネルギーやたい肥への利用　約90%
	廃棄紙	約1,400万トン	大半が焼却
	下水汚泥	約7,600万トン	建設資材、たい肥利用　約60%、埋立　約40%
	パルプ黒液（乾燥重量）	約1,400万トン	直接燃焼によるエネルギー利用ほぼ全量
	建設発生木材	約480万トン	製紙原料、ボード原料、家畜敷料等へ利用約40%
未利用バイオマス	農作物非食用部（稲わら、もみがら　等）	約1,300万トン	たい肥、飼料、畜舎敷料等への利用　約30%
	林地残材	約390万トン	ほぼ未利用
資源作物			試験利用レベル

バイオマス・ニッポン総合戦略（平成14年閣議決定）より

発生源が分散しているので、収集が難しい。

工場内でまとまって発生するので、利用しやすい。

分散して賦存するバイオマスと収集・輸送コスト

バイオマスは、化石資源に比べ、薄く広く賦存し、また水分や空隙が多いので、輸送コストがかかる。
このため、地域で発生するバイオマスは、できるだけその地域で利用するのが効率的。

3

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

に輸出している。

①エネルギー自給率向上と地球環境保全
②殺菌をしない水源の確保
③化学物資に依存しない排水処理
④100%自給率の家畜飼料の確保
⑤畜産系バイオマス技術の導入

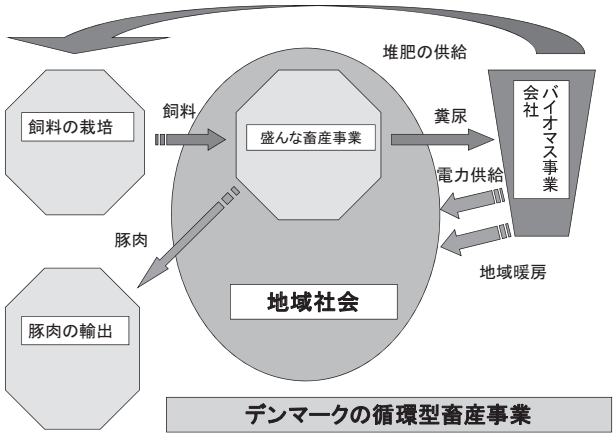


図４　デンマークのグリーンベルト地帯の循環型社会の図式

５．鶏糞のエネルギー変換事業の検討

畜産バイオマスには，牛糞，豚糞，鶏糞等があるが，発電へのエネルギー転換の一つとして，メタン発酵による発電があるが，各糞尿の単位当たりの発電能力は次のようになるが，鶏糞の低位発熱量が高く，発電に最も効果的なバイオマス資源であることが分かる。

▼牛糞尿のトン当たり約50kWh/日
▼豚糞尿のトン当たり約90kWh/日
▼レイヤー糞尿トン当たり約180kWh/日
▼ブロイラー鶏糞トン当たり約700kWh/日

また鶏糞はリンとカリウムが多く含有するので，次のような利用法が行われている。

●直接，農家への肥料として利用
●発酵して，発酵鶏糞堆肥を製造し，農家に販売
●鶏糞を焼却して，飛灰を肥料として販売
●炭化して，販売
●鶏糞を焼却して，発電および熱利用にして販売

現在は，上記の利活用により，鶏糞の発生量と利活用量はバランスしていると言われている。

６．北東北における鶏糞発電の事業化試算

青森県南，岩手県北には，図５に示すようにブロイラー養鶏業が盛んであり，その鶏糞発生量は年間23万トンを超えるものである。そのため，多くのプラントメーカーやコンサルタントがブロイラー養鶏業者や行政の未活用バイオマス調査事業の一環としてその事業化を数年前から調査や検討を実施している。

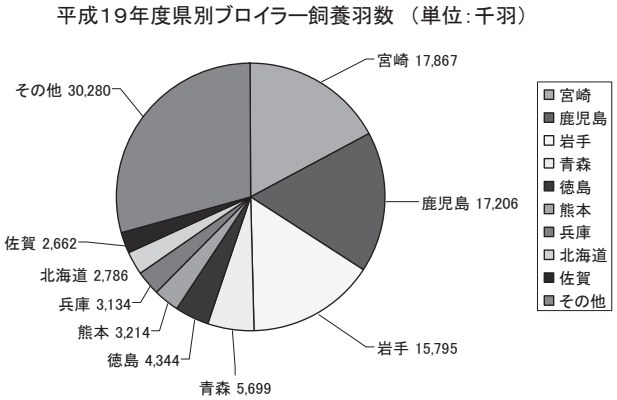


図５　ブロイラー鶏糞の飼養数（出典：畜産統計）

しかしながら，未だその事業化には至らず，今日に来ている。

既に先進事例としてプラントが稼働している宮崎，鹿児島の事例から次の事が言える。

・ブロイラー鶏糞が年間安定して多量（10万トン以上）に入手出来る場所に立地することが推奨される。
・鶏糞の処理コストが増加し，そのコスト低減を望んでいる地域
・環境問題（悪臭，排水）の問題が起こっているか，今後懸念される地域
・発電した電力を連系可能な変電所が近隣にあること。
・発電に必要な蒸気冷却用の工業用水（上水でも可）が入手できる地域。
・立地に際して立地地域の住民の了解を得やすい地域
・補助金が期待され，建設費の資金調達が容易となる行政の協力が得やすい地域

南九州の実績から北東北においても，上記の要件に合致する地点は考えられ，具体的な事業化評価の結果により，早期のプロジェクトの立ち上げが，期待されている。

７．試算の諸元と試算結果

鶏糞発電が実際どのような事業性があるかを試算した結果を紹介するが，これは石油が高騰する平成19年度に行ったものであり，また日本では電力の環境価値が低い時の検討である。

また，鶏糞の焼却灰は良好な肥料であるが，その買取り先が確実でなく，焼却灰を肥料として売却することが困難として，焼却灰は最終処分場にて廃棄処理をすることを前提にして試算を行った。試算に当たり，前提条件となる建設費や運転に用いる用役量やその単価は平成19年度以前のデーターをベースにしている。実際にプロジェクトを開始する場合は前提条件の精度を向上させることが必要となる。次には試算の前提を示す。

1）試算の前提条件

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表２　ブロイラーおよびレイヤー鶏糞の分析値

	ブロイラー鶏糞				レイヤー鶏糞			
	A	B	C	D	E	F	G	H
発熱量（低位　kcal/kg）	3500	2700	2500	2000	2500	2000	1200	400
水分(%)	14	26	28	38	12	32	47	71
灰分（%；乾きベース）	11	14	15	10	20	18	22	25

①　発電規模は年間15万トンのブロイラー鶏糞とする。
②　発熱量は岩手県南のブロイラー鶏糞の分析を実施した結果，表2に示すが，2,500kcal/kgが妥当とした。
③　鶏糞処理費用は3,000円/トンとした
④　電力は卸電力として電力会社に10円/kWhで売却し，電力の環境価値はRPS不確定なので対象外とした。
⑤　建設費は約42億円としたが，その内数として土地代，連系送電線（２km，特別高圧線），工業用水負担金，鶏糞対策費を見込んでいる。
⑥　補助金はプラントに１/２の補助金（バイオマスタウン制度の活用）
⑦　プラントの償却年は20年とし，残存価格は０とした。

内部収益率（IRR）は事業評価に用いる評価法として，広く活用している方法である。

その結果，内部収益率（IRR）は16％と試算結果が出た。これは金利を５％としても，８年目以降に赤字が一掃され，純益が出ることを意味している。

また，適正な運転と保守を行うことにより，20年以上の運転が可能であれば，償却が終わり，その利益は更に向上する。

この試算は具体的な地点を限定した上で，より精度のある試算を行い，事業の推進を図る必要がある。

最近，図６に示す様に輸入リン鉱石の国際市場が高騰し，鶏糞焼却灰がその代替品となる可能性がある。焼却灰を産業廃棄物として，最終処分するのと有価物として対価を得られるのでは，その事業収支は大きく異なり，事業成立性はより向上する。

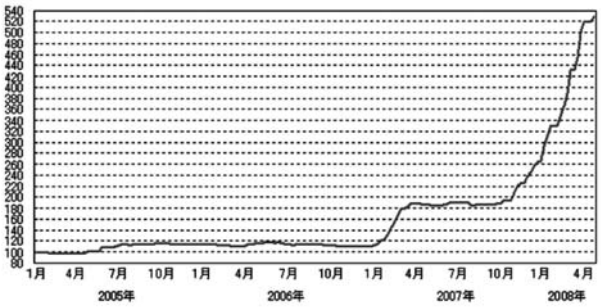


図６　りん安の国際市況（指数）（周展JA）

更に南九州の事例を考慮すると，隣接した場所に，ブロイラーのレンダーリング工場を設置し，レンダーリング工場の電力および熱エネルギーを供給する図７のビジネスモデルが考えられる。

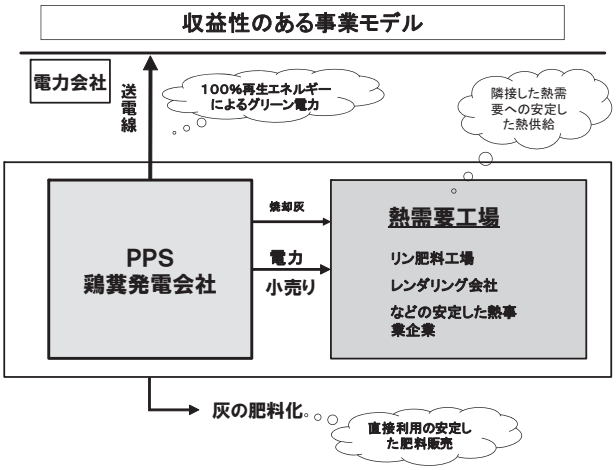


図７　推奨されるビジネスモデル

図７のビジネスモデルによる収益性の向上は，年間15万トンの鶏糞を使用する鶏糞発電から年間８万トン程度の規模の小さな鶏糞発電の事業成立性が期待される。

小規模の鶏糞発電事業が成立すると，鶏糞量が多量に賦存する区域からより広範な区域での普及が期待できることになる。

８．ガスタービン技術の導入促進について

鶏糞発電のプラント効率が11％程度として計算すると販売電力が少なく事業成立性が低くなる。鶏糞をガス化し，10,000kW程度のガスタービン発電プラントが20%以上の効率が期待できれば，その事業成立性がより期待出来る。

鶏糞のガス化技術開発は不明であるが，欧州の調査において木質バイオマスのガス化は発生するタール処理が課題とされている。

９．汚泥バイオマス発電の検討

汚泥バイオマスの発電への展開については，平成15年から平成19年度までNEDOの委託事業として青森県八戸市にて新エネルギー地域集中実証試験が実施され，そのベース負荷を受け持つ発電に汚泥から発生する消化ガスを燃料にガスエンジン発電を行った。

この実証試験は愛知県の万国博覧会にて，NEDO館と日本館へマイクログリッドと呼ばれる分散エネルギーネットワーク技術を採用した一連のプロジェクトである。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

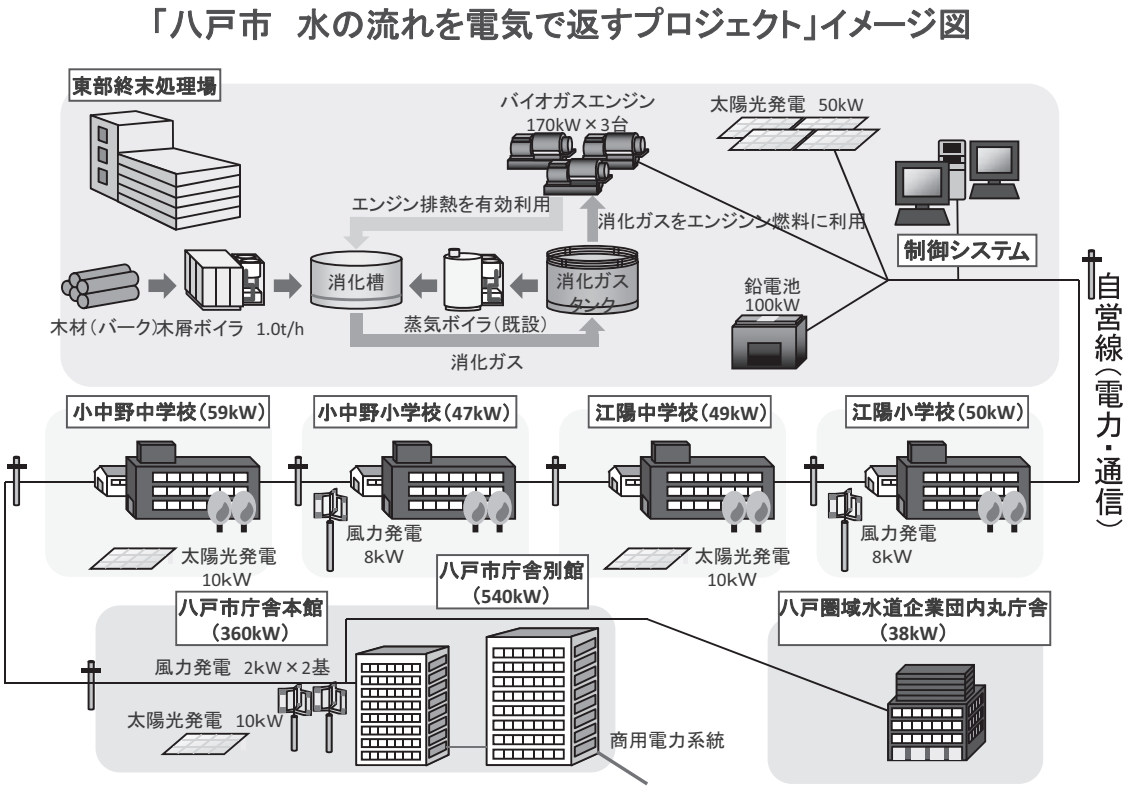


図８　八戸マイクログリッッドフロー図

９.１　システムの全体概況

本システムはマイクログリッドと呼ばれる「複数の分散電源と複数の需要家」を「自営線」にて連系され，電力を供給するシステムで，その構成は下水汚泥より発生する消化ガスにてガスエンジンによる発電を行い，八戸市の小中学校，八戸市役所に小型風力発電，太陽光発電にて構成されている。その設備の概要はガスエンジン発電510kW（170kW×３台），太陽光発電80kW（60kW，10kW，10kW×2），小型風力発電20kW（2kW×2，8kW×2）および鉛蓄電池100kWであり，特徴として，市街地に東北電力の配電系統に並行して自営線を敷設したこと，鉛蓄電池による二次電池を設置したことが挙げられる。

このプロジェクトは平成15年度から平成19年度までの５カ年に亘り，電源の供給の安定性と需要との制御を確認するもので，平成19年の秋には系統から独立した単独運転を実施し，成功をするなど，技術の実証を確認した。

９.２　目的

この実証試験の大きな目的は国の補助事業である新エネルギーの導入促進であり，この実証試験に配置された設備は図８に示すようにすべて新エネルギーと定義される太陽光発電，小型風力発電，汚泥バイオマス発電設備である。

実証試験の特徴は，次に示すように技術的課題が多く，実証試験の推進母体は八戸市役所であり，この試験の結果の事業性について，このプロジェクトでは具体的かつ組織的には検討されてはいない。

◆再生可能エネルギー 100％の電源・熱源構成
- ・個々の設備は成熟した技術
- ・地域間での隔たりない新エネルギー普及

◆熱と電力の非同一施設での利用
- ・電気の供給先は業務用の６つの需要家
- ・熱の供給先は下水処理場の汚泥消化槽

◆30分同時同量よりもさらに精度が高い需給制御技術開発
- ・誤差の過去６分移動平均が需要量に対し±３％以内
- ・自営線に併架した通信線により集中監視・制御を行う

◆自営線を利用した供給形態
- ・常時は商用系統に連系し計画量を買電
- ・自立運転試験を実施

９.３　下水処理場の概要と消化ガスの成分とガスエンジン

八戸市の下水処理場は，写真2に示すように，開放型の施設であり，汚泥を加温して消化ガスを効果的発生し，タンクに貯蔵するものである。

この汚泥の成分は全水分が79％，炭素は42％（ドライベース），水素は５％（ドライベース），灰分は22％であり，発熱量は381kcal/kg（1,592kJ/kg）であり，得られる１日の発生消化ガス量は3,000m^{3}で，メタンの濃度は60mol％である。

この消化ガスにて，510kWのガスエンジンを稼働さ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

写真２　八戸市下水処理場

せるが，消化ガスの発生を促進させる為に，木質ボイラーを新たに設置して消化槽を加温している。

９.４　汚泥のガスタービンへの適用

消化ガスのガスエンジンへの適用にはガスエンジンに影響与える成分が存在するために，定期的に点検が必要となるなど補修費用の増大などの改善すべき点がある。

そのため，保守性の良いガスタービンの適用が推奨されるが，消化ガスは汚泥を加温してその発生を増加する必要があり，加温設備が必要となるなどガスタービンの総合的な効率を低下させる。

大規模な都市の場合には規模の増加により（スケールメリット）により，加温エネルギー比率が小さくなり，効率の向上が期待できるので，検討する価値が考えられる。

一般的には、上記の理由によって、中小規模の都市での汚泥についてはガスタービン燃料としての利用は現時点での評価は低と考えている。

10.　まとめ

未活用の再生可能エネルギーとして鶏糞と汚泥について，その事例を紹介した。

どちらもバルク燃料であり，技術的ハードルの低いガスエンジンや蒸気タービン発電技術を採用している発電システムである。

木質バイオマスのガス化技術開発は大規模の開発事例が欧州にあるが，汚泥や鶏糞等の未活用バイオマスエネルギーのガス化技術について，議論も行われていない状況にあると言える。

ガス化技術は石炭，木質バイオマスなどのバルク燃料について蓄積された成果がある。

未活用バイオマス資源をガスタービンの燃料源と考えるには，技術的にも，事業化評価にも，時期が熟していないと思っているが，未活用バイオマスエネルギー資源として汚泥や鶏糞等をガスタービンへ適用への関心，検討および議論が生み出され，新たな視点が生まれることを期待している。

参照資料

本解説には次の資料を参照した。

(1)　北東北に多く賦存する鶏糞を利活用した熱･電供給事業の事業化成立性の調査事業報告書（平成21年３月，みちのくエネルギー㈱）

(2)　八戸市民エネルギー事業化可能性調査報告書（平成19年２月，八戸市）

(3)　全国マイクログリッドフォーラムin 八戸報告資料　水の流れを電気で返すプロジェクト（2007年２月，八戸市）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

論説◆解説

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

木質バイオマス流動層ガス化発電システムの開発※

松田　吉洋*1　MATSDA Yoshihiro
山田　健一*1　YAMADA Kenichi
清水　正也*1　SHIMIZU Masaya
餝　雅英*2　KAZARI Masahide
柏原　宏行*2　KASHIHARA Hiroyuki

1．はじめに

製材所木屑，林地残材，建築廃材などの木質バイオマスは，小規模の場合，燃料ペレット製造や木炭化などで利用され，大規模な場合は，木屑焚きボイラを使用し蒸気発生による電力，熱利用が行なわれている。

但し，このボイラ蒸気タービンシステムでは，大規模設備でないと発電効率が低く，発電出力当りの設備単価が高くなるため，相当な量のバイオマス燃料確保が必要となる。しかし，山間部に広く分布した嵩高い木質バイオマスを経済的に収集する手段が無く，また，収集できたとしてもそのエネルギーを利用する需要が少ないため，それらを利用した大規模設備の設置が難しい。

よって，木質バイオマスの有効利用を図るためには，その集積量・エネルギー需要量に見合った小規模で高効率な設備の普及が不可欠である。従来技術ではこのような小規模設備において経済的に適合する発電効率を達成することは難しく，現実に発電システムとして設置されている例は限られている。

流動層ガス化発電システムは，流動層ガス化炉とガスタービン発電機を組み合わせることにより，従来に比べ効率的かつ経済的に未利用バイオマスを有用エネルギーに転換することが可能な小規模分散型発電システムである。2002年度から2005年度まで新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」の一つとして開発を終了し，2006年度よりNEDOによるバイオマスエネルギーの利用促進を目的とした「地域システム化実験事業」のエネルギー転換システムとして採用され，高知県にて実証試験を行っている。

本稿では，新しく開発したガス化発電システムの構成と特長，仕様および現在高知県仁淀川町にて実施している実証試験の概要について述べる。

※2009年１月開催の第37回ガスタービンセミナーにおいて発表，本原稿執筆にあたり一部加筆。
原稿受付　2009年７月29日
＊１　カワサキプラントシステムズ㈱
〒650-8670　神戸市中央区東川崎町３－１－１
＊２　川崎重工業㈱

2．流動層ガス化発電システムの特長

流動層ガス化発電システムの概要を図１に示す。開発システムは，木質バイオマスを流動層ガス化炉により650℃程度の比較的低い温度でガス化し，可燃性ガスおよびタール分を含む生成ガスをそのままの温度・圧力でガスタービン燃焼器に導き燃焼させ，その燃焼ガスをガスタービンで膨張させて発電を行う。さらに，ガスタービン圧縮空気の一部は，熱交換後，流動層ガス化炉に導入し，ガス化剤として利用され，小規模でも高効率の発電を可能とするシステムとしている。

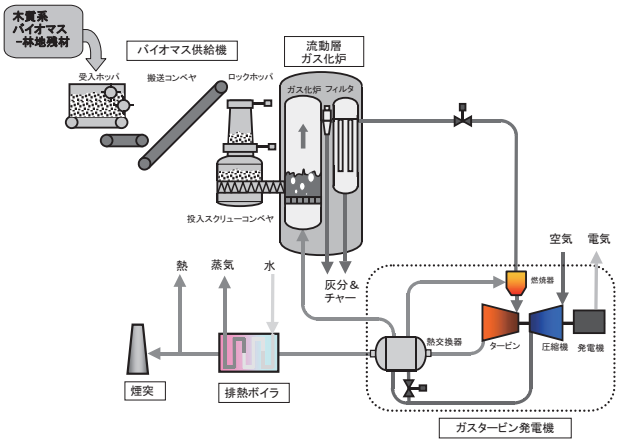


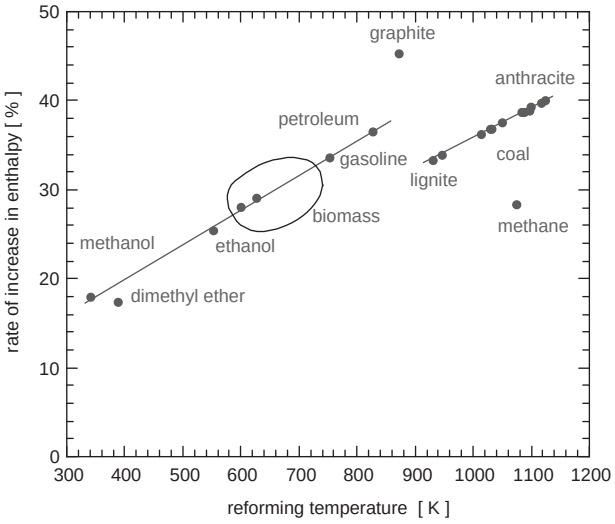
図１　流動層ガス化発電システム　概要

具体的なシステムの特長を以下に説明する。

(1)　低温でのガス化反応

図２に各種燃料の水蒸気改質による発熱量増加割合と改質温度との関係を示す。(1)　バイオマスは，石炭などの固体燃料に比べてガス化反応温度が低いことがわかる。これに対して，石炭のガス化には高温熱エネルギーが必要で，本来そのままで仕事に変換できる割合が高い，エクセルギー率の高い熱源が必要となる。本システムではバイオマスを低温でガス化することにより，高い反応温度を維持する為のエネルギーが不要になると共に，集塵等の後段設備のためにガス化した生成ガスを冷却する必要がなくなるため，生成ガスの持つ顕熱を有効

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.



Relationship between the rate of increase in enthalpy and reforming temperature

図２　各種燃料の水蒸気改質による発熱量増加割合と改質温度との関係

に利用することができ，高効率のエネルギー転換を可能としている。

⑵　タール成分の有効利用

しかしながら，バイオマスを反応温度が低い状態でガス化すると，図３に示されるとおり，タール成分，未燃炭素の発生割合が多くなる。[(2), (3)]　タール成分は，冷却されると高沸点成分が凝縮・液化して粘性が強くなるため，機器への付着や配管の閉塞によって運転上のトラブルを引き起こす。このため，従来のガス化システムでは，タール除去の装置を設置して運転を行っている。しかし，タール成分を除去することは，タール成分のもつ熱エネルギーや，化学エネルギーを損失するだけでなく，その除去方法として，水洗除去，フィルタでの分離，触媒での分解等を行うことが，運転を複雑にし，設備費，ランニングコストを増加させてしまう。

これに対し，本システムではガスタービン燃焼器と同じ圧力の加圧流動層ガス化炉によりバイオマスをガス化し，冷却することなくガスタービン燃料に利用することにより，生成ガス中のタール成分除去が不要となり，ガスの保有している熱エネルギーおよび化学エネルギーを全て熱機関に利用することができる。

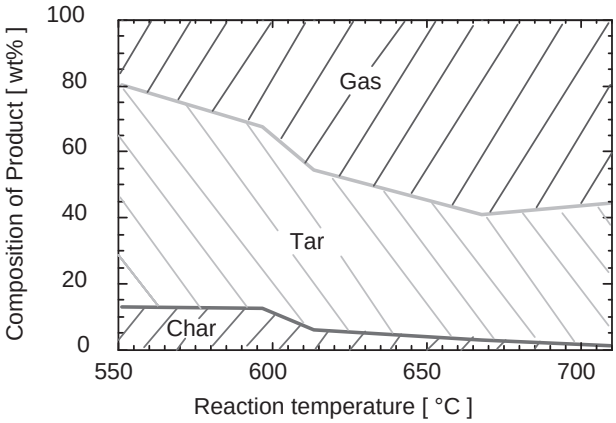


図３　バイオマス水蒸気改質による反応温度と生成成分

上記の特長により，本システムでは，バイオマスエネルギーの利用効率を高くでき，従来技術であるボイラ蒸気タービン発電方式より，同規模で約３倍高い発電効率を得ることができる。

３．研究開発

本システムの研究開発は，2002年度から開始した。弊社内に設置した24kW級のベンチスケール試験設備にて試験運転することにより，要素機器の実用性確認とシステムの実証を行った。主な開発要素を以下に示す。また，代表機器である流動層ガス化炉とガスタービンパッケージの構成図，概観を図４，５に示す。

① DSS（Daily Start and Stop）運転を可能にするガス化炉
二重殻空気断熱構造とすることにより，昇温に時間を要する熱容量の大きな耐火物を使用することなく，高い保温性能を実現した。

② 低カロリーガス（1000kcal/N㎥）でも燃焼可能な燃焼器
バーナ部の噴出し流速を低下し，保炎性能を向上させると共に，燃焼器内の滞留時間を長く取ることにより，低カロリーガスの完全燃焼を図った。

③ 幅広い燃料流量を可変できる補助燃料用燃料ノズル
システム起動時に補助燃料のみでGTを起動する場合と，ガス化発電時に補助燃料を停止する場合の場合の両方に対応可能な，ターンダウン比の大きい補助燃料/圧縮空気の二流体ノズルを開発した。

④ DSS運転でのヒートサイクルに対して耐久性のある再生熱交換器
起動時の急激な温度上昇を緩和する機構をつけると共に，発生する熱応力が低減される構造とし，高い耐久性を実現した。

⑤ 未燃チャーの燃焼に耐え，頻繁な逆洗を必要としない高温フィルタ
システムの変動要因となる運転中の逆洗を行わず，運転停止時に付着ダストを除去するフィルタ再生方法を確立した。

⑥ 圧密性の高いバイオマスを定量的に供給できる供給器
アーチングが発生しにくいホッパ形状とし，攪拌機構により絶えずバイオマスを流動させることにより，供給不良を防止した。

⑦ ガス化炉と連結しての運転を可能にするガスタービン制御
ガス化炉を燃焼状態からガス化状態へ移行する場

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

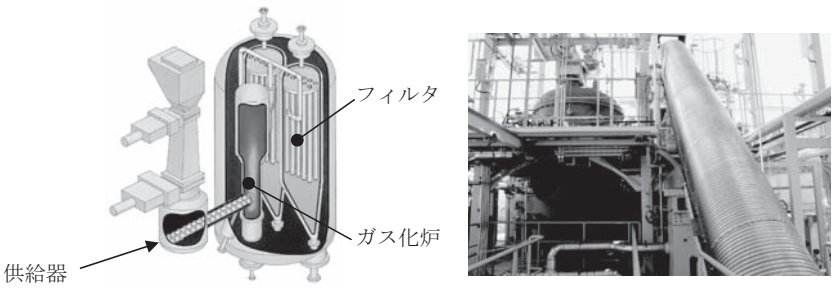


図４　流動層ガス化炉の構成図と外観

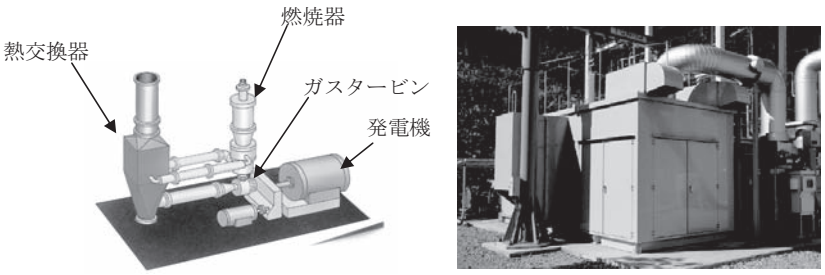


図５　ガスタービン構成図と外観

合や，ガス化発電を終了して，ガス化炉を燃焼状態に戻す場合等に，時定数の大きなガス化炉と連結しても安定的にガスタービンの運転を継続することができる制御方法を確立した。

４．高知県での実証試験

⑴　バイオマスエネルギー地域システム化実験事業について

2006年度よりNEDOにより実施されている「バイオマスエネルギー地域システム化実験事業」の目的は，地域に密着した上流工程（バイオマス収集，運搬）から下流工程（エネルギー利用）までの一貫したシステムを確立し，バイオマスエネルギーの利用を促進することにある。

流動層ガス化発電システムは，NEDO採択事業の一つとして高知県仁淀川町により実施されている「仁淀川流域エネルギー自給システムの構築」事業での，エネルギー転換・利用設備として採用され，150kWにスケー

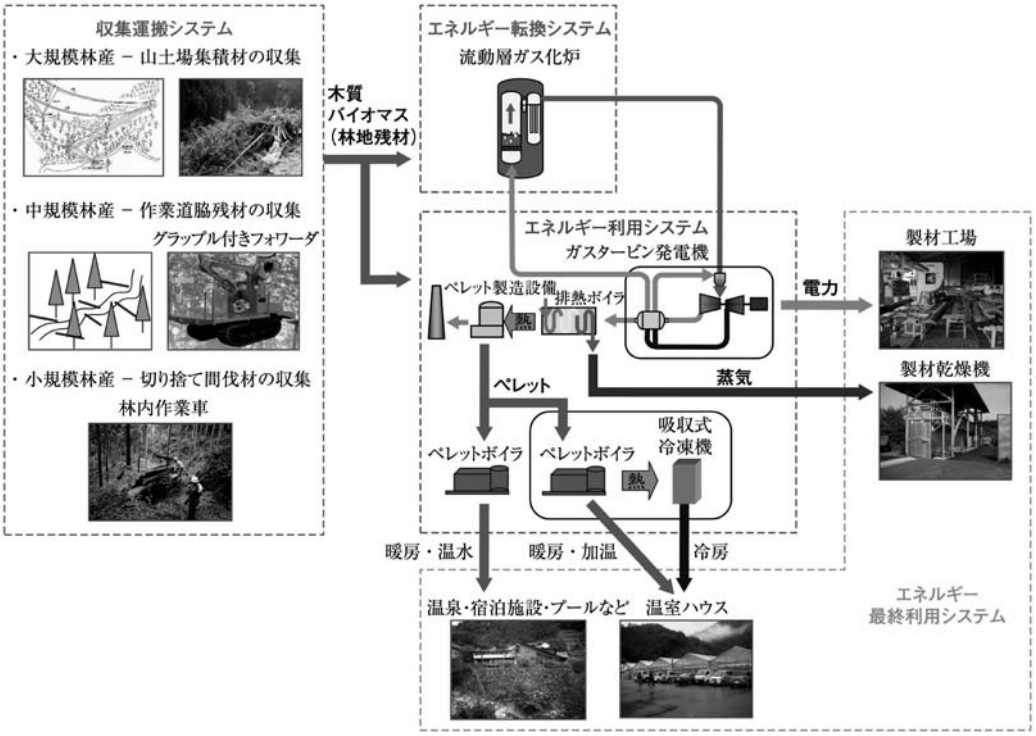


図６　高知県仁淀川町　NEDO地域システム化実験事業概要

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

図７　実証試験設備　全景

表１　実証試験設備　主仕様

項　　目		仕　　様
設置サイズ		12.5 mW x 18 mL
運転形式		8時間/日，DSS運転
構成機器		（主仕様）
	バイオマス供給器	スクリューフィーダ
	流動層ガス化炉	φ2.1mO.D.× 4 mH
		サイクロン・フィルター一体構造
	ガスタービンエンジン	KAWASAKI S1A-05エンジン
		低カロリー用燃焼器
		再生熱交換器
	排熱ボイラ	小型貫流ボイラ

表２　実証試験設備　代表性能

項　　目		仕　　様
バイオマス性状	原料性状	林地残材
		(杉，ひのき等)
	サイズ	30mmUnder 破砕物
	水　　分	45%
バイオマス供給量		364kg/h-wet
層温度		650℃
層圧力		0.7 MPaG
発電出力		150kW，系統連系運転
システム発電効率		14.30%
発生蒸気量		400 kg/h

ルアップした流動層ガス化発電システムを製材所に設置し，現在実証試験を行っている。

本事業では，森林より回収された未利用木材を30mm以下に破砕した後，発電システムに供給し，流動層ガス化炉にてガス化した後，ガスタービンで発電する。発電した電力の一部は，併設した木質ペレット製造設備の稼動用電力として供給し，残りの電力を隣接する製材所に供給している。隣接する製材所の電力需要は，通常，本発電システムより供給される電力を十分に越えるものであり，供給電力は，製材所のベースロードを担うことになる。製材所休憩時等，電力需要が低下する場合には，余剰電力は電力系統へ売電される。売電価格が低いこともあり，ガス化発電設備の稼動時間は，日中稼動の製材所の電力需要に合わせた昼間運転としている。

発電設備より排出される排ガスは，排熱ボイラに供給され，発生した蒸気は製材所に設置されている製材乾燥機用の熱源として使用される。排熱ボイラにて熱回収された後の排ガスは，併設した木質ペレット製造設備での原料乾燥熱源としてカスケード利用することにより，熱の利用効率を高めている。

実証試験設備全景を図７，主仕様を表１に示す。

⑵　設備の稼動状況

本設備は，2006年度に設計・製作・据付を終え，2007年度より３年間の予定で，実証試験を継続中である。本設備の代表性能を表２，設備稼働率の推移を図８に示す。

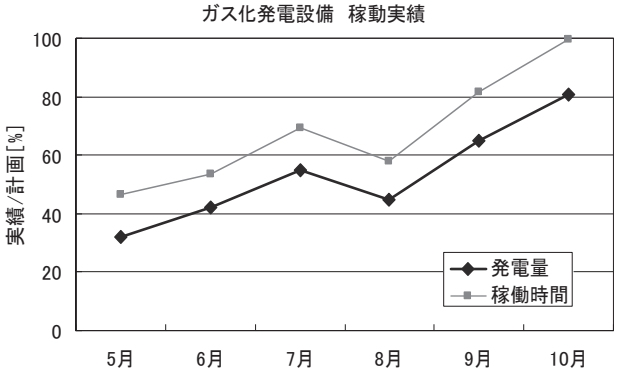


図８　実証試験設備　稼動実績（2008年度）

当初，ベンチスケール設備よりのスケールアップに伴い発生した各要素機器の初期不具合の修正，およびシステムの最適運転条件の調整を行った為，稼働率が低下していたが，順調に稼働率を上げており，現状では，システムの運転時間としては，ほぼ計画通り，発電出力では80％以上にて運転を行っている。

これまでの実証試験にて確認した事項は下記の通りである。

１）所定性能（発電出力，蒸気発生量）を満足していること。

２）燃料バイオマスは，水分50%程度（含水率100%）と，比較的高いものまで使用可能であること。

３）環境規制値を十分にクリアしていること。
（NOx=46ppm（O_2=16%換算），ばいじん濃度<0.001g/Nm^3等）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

4）起動ボタンをON/OFFすることのみで，起動からガス化運転を経て停止することができ，特殊技能，資格を持たない運転員により設備の運転が可能であること。

5）運転後に回収された未燃チャー（木炭），灰分は，ペレット化し，周辺農家の土壌改良剤として有効利用することにより，設備としてゼロエミッションが達成されること。

⑶　各要素機器の状況

ガスタービン燃焼器

本燃焼器は，システム起動時には補助燃料である灯油，ガス化発電時にはガス化炉からの低カロリーな生成ガスを燃焼させる。そのため，両燃料に対して対応できるライナの冷却を考慮する必要がある。一方，発電システムの効率向上のため，燃焼器圧損は低くなるよう設計しているため，ライナ冷却の空気が不足気味となる。試験開始当初，燃焼器ライナの冷却能力不足のため，局所的にライナ焼損が発生したが，燃焼器内の空気配分を調整し，ライナ冷却用のインピンジ数を増加させることにより，ライナ温度を低減させた。

ガスタービンエンジン

当初，燃焼排ガスの温度分布が発生し，タービン静翼に局部的な焼損が発生し，その焼損が新たな温度分布を生じさせるという悪循環が発生した。それを受け，燃焼器内の希釈空気量の増量，エンジンタイプの変更，システムの効率改善を図ることにより，図10に示されるとおり，排ガスの温度分布を低減させた。

また，バイオマス水分が規定より高い場合や，高負荷運転時に，ガスタービンコンプレッサのサージを回避するため，ガスタービンエンジンのタービンノズルの開口を拡大する改造を行い，ガス化炉とのマッチングを図った。これにより，夏場の高気温時等の厳しい環境下においても設備の安定運転を実現した。

5．あとがき

今後の実証試験を通じて，機器の耐久性・メンテナンス性向上を図り，システム全体の経済性を向上させていき，早期の製品化を通じて，バイオマスエネルギーの有効利用の促進に貢献する所存である。

おわりに，これまでの本研究開発にご支援，ご指導をいただいているNEDO，高知県仁淀川町，その他関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

⑴　山口洋介・伏見千尋・堤敦司，熱化学再生水蒸気ガス化による高効率水素製造(2)バイオマス，化学工学会第34回秋季大会　研究発表講演要旨集，B324

⑵　伏見千尋・堤　敦司，バイオマスからの水素製造；ケミカルエンジニアリング，46(9)，699-704（2001）

⑶　栗田光暁・伊藤知之・野田玲治・堀尾正靱・田中直，流動層を用いたバイオマスの接触分解ガス化；第34回化学工学会秋季大会，札幌，2001年９月

⑷　餝　雅英，第10回動力・エネルギー技術シンポジウム，講演論文集

図９　燃焼器ライナ状況（左：冷却構造改良前，右：改良後）

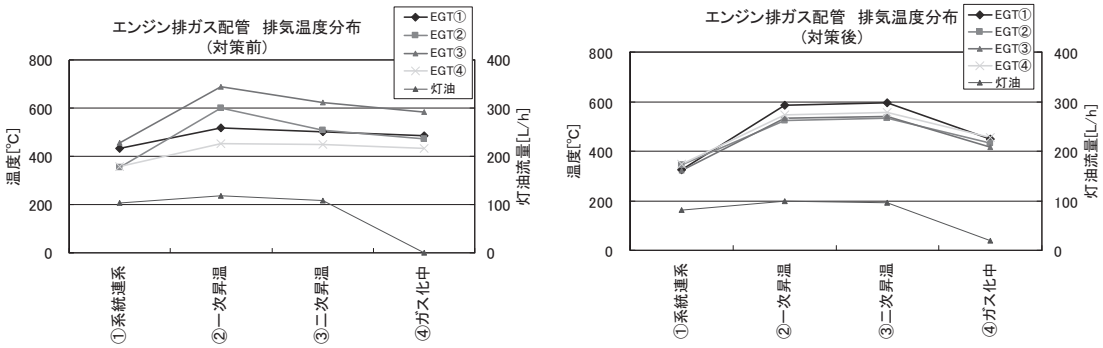


図10　燃焼排ガスの温度分布状況（左：対策前，右：対策後）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

日本航空のバイオ燃料によるデモフライト

阿部　泰典[*1]
ABE Yasunori

キーワード：Biofuel

日本航空はバイオ燃料によるデモフライトを2009年１月30日に実施いたしました。その概要についてご説明します。

１．航空会社とバイオ燃料

バイオ燃料が，航空業界にとって重要な取り組みである理由は２つあると思います。

第１の理由は，地球温暖化への対応です。空気中の二酸化炭素を吸収して育つ植物から精製されるバイオ燃料は，石油から精製される通常のジェット燃料に比べて，ライフサイクルで見たときに二酸化炭素の排出量は少なくなります。バイオ燃料はCO_2削減の重要な取組みのひとつと考えられています。

第２の理由は，石油に代わる代替燃料としての意義です。石油は限りある資源でいつかは枯渇するといわれています。航空業界が将来にわたり活動を続けるためには，石油に代わる燃料が必要です。バイオ燃料は，航空業界の持続可能性（Sustainability）という意味で大事な選択肢の１つと言えます。

このように，２つの理由からバイオ燃料の開発は，航空業界にとってとても大切な取組みだと考えます。

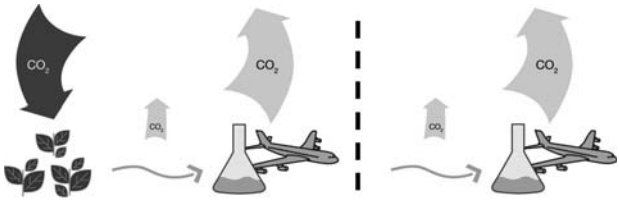


図１　バイオ燃料（左）と化石燃料の違い

２．バイオ燃料

それでは次に，今回のバイオ燃料について説明します。

最近，自動車などでバイオ燃料（バイオアルコール，バイオディーゼル等）が使われはじめましたが，これらの原料がトウモロコシやサトウキビなど人間の食べ物と競合していたため，社会的・経済的な問題となっています。このように食物と競合したり，育てるのに広大な土地を必要とするために森林破壊を起こしたりするような原料から作る燃料を第１世代のバイオ燃料といっています。このようなものでは，継続して将来にわたり使い続けることはできず，持続可能なバイオ燃料とはいえません。

それに比べて，人間の食物と競合せず森林破壊の原因とならないなどの特徴をもった植物原料から作る燃料を第２世代のバイオ燃料といいます。

今回のバイオ燃料の開発は，このような持続可能な第２世代バイオ燃料に焦点を当てて進められました。持続可能なバイオ燃料というのは，人間の食べ物と競合しない，森林破壊の原因にならないなど，将来にわたって使い続けることが可能なバイオ原料から作るジェット燃料のことです。

今回のデモフライトで使用された燃料はこの第２世代のバイオ燃料のうち，カメリナ（84%）・ジャトロファ（15%）・藻（１%）の３種類を原料としたものです。これを通常のジェット燃料と50%/50%で混合し，「混合バイオ燃料」として使用しました。

航空機やエンジンに何の改修もせずに使える燃料のことを，“Drop-in Fuel”と呼んでいますが，このことは，

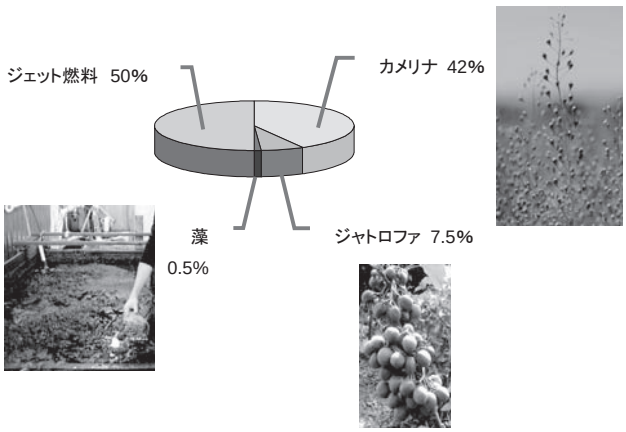


図２　バイオ原料

原稿受付　2009年５月21日
＊１　㈱日本航空インターナショナル地球環境部
〒140-8637　東京都品川区東品川２－４－11

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

航空機やエンジンにとってとても大事なことです。航空機やエンジンに改修が必要となると，航空機へのバイオ燃料の導入にはとても時間がかかってしまいます。この“Drop-in Fuel”ならば，今の航空機で速やかに使い始めることができます。

今回使用した混合バイオ燃料もDrop-in Fuelで，高高度飛行中の低温度の中でも凍らないといった性質など，ジェット燃料に必要な性質をすべて満足していました。

また，いろいろな種類のバイオ燃料を混合して使用したということも，今後のバイオ燃料の普及を考える上で重要です。航空機は世界中を飛び回るわけで，それぞれの到着地で給油をしなければなりません。いろいろな地域の多種多様な原料からできたバイオ燃料を混合して利用できるということは，バイオ燃料の可能性の幅を広げることになります。

3．バイオ燃料デモフライトプロジェクトの枠組み

それでは，今回のプロジェクトの枠組みについてご紹介します。

今回のバイオ燃料デモフライトを行った目的は，航空のためのバイオ燃料の開発を促進することです。このために，ボーイングが中心となって，エンジンメーカーのプラットアンドホイットニー社やバイオの原料の生産者，バイオ原料からジェット燃料を精製する企業と一緒にこのプロジェクトを進めました。

また，今回の日本航空の取組みは，ボーイングが世界で行っているバイオ燃料のプロジェクトの一環で，ほかに３つの航空会社によりプロジェクトが進められました。

図３　JALバイオ燃料デモフライトプロジェクトの構成

１つ目は，バージンアトランティック航空（VS）でエンジンメーカーのGEと協力して，747-400型機で2008年２月に実施しました。２つ目は，ニュージーランド航空（NZ）でロールスロイス社製のエンジンの747-400型機で，2008年12月30日に飛行しました。３つ目は，コンチネンタル航空（CO）でCFM社製のエンジンのついた737-800型機で2009年１月７日にデモフライトを行いました。これらのデモフライトは世界中でバイオ燃料の取り組みを知ってもらうために，欧州（VS），オセアニア（NZ），アメリカ（CO）と世界のいろいろな地域で実施されました。

日本航空の2009年１月30日のデモフライトは世界で４番目の実施ということで，アジア地域ではじめて行われました。

図４　４つのバイオ燃料プロジェクト

4．バイオ燃料デモフライトのプロセス

バイオ燃料プロジェクトは，バイオ原料探しから始まりました。いろいろな植物が評価されて，その中から持続可能な原料が選ばれました。次に，植物から採った油をどのようにしてジェット燃料に精製するかという手段が研究開発されました。その結果，今あるジェット燃料と組成も性質も変わらない，今の航空機やエンジンでそのまま使えるバイオジェット燃料が開発されました。

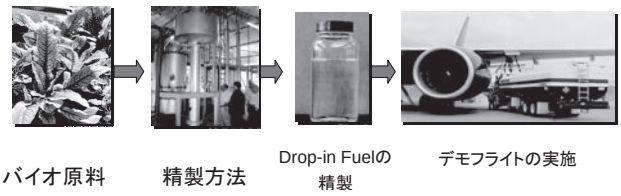


図５　バイオ燃料デモフライトのプロセス

5．デモフライトの概要

デモフライトは，2009年１月30日に，羽田空港を出発して仙台沖の空域でテストを実施し，また羽田空港に戻るというルートで実施しました。

使用機材はプラットアンドホイットニー社製のJT9D型のエンジン付の747-300型で，４つある燃料タンクのうちの３番燃料タンク（右翼の内側）に混合バイオ燃料を搭載し，３番エンジンに供給しました。

また，他の１番・２番・４番タンクとエンジンには通常

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

のジェット燃料を使用しました。

飛行中は，エンジン始動・離陸・上昇・巡航・降下・着陸などすべての飛行フェーズで３番エンジンの作動状況をモニターしました。また，エンジンの急加速・急減速やエンジンを空中で一旦停止させてから再始動するなどのテストを行いました。すべてのテストは順調に完了し１時間30分ほどの飛行で羽田空港に戻ってきました。

このフライトは，まだジェット燃料として認可されていない燃料を使うフライトということで，国土交通大臣から，特別の飛行許可をいただいて実施しました。

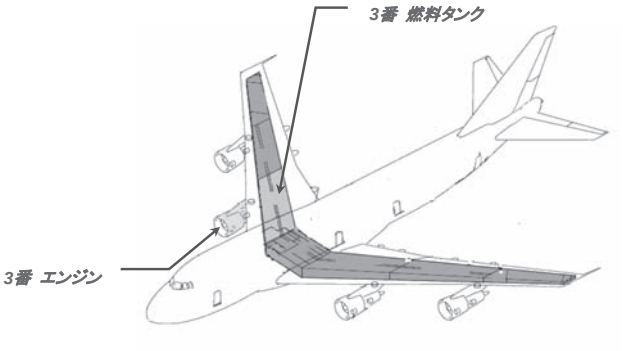


図６　デモフライトの概要

６．デモの準備と実施

フライトの３日前に混合バイオ燃料を機体搭載しました。通常運航では翼の下から給油を行いますが，３番タンクだけに混合バイオ燃料が入るように，翼の上面の給油口から燃料を搭載しました。

図７　バイオ燃料の給油

フライトの前日には，地上でエンジンの作動試験を行いました。３番エンジンはバイオ燃料で，通常の燃料となんら変わることなく作動することを確認しました。

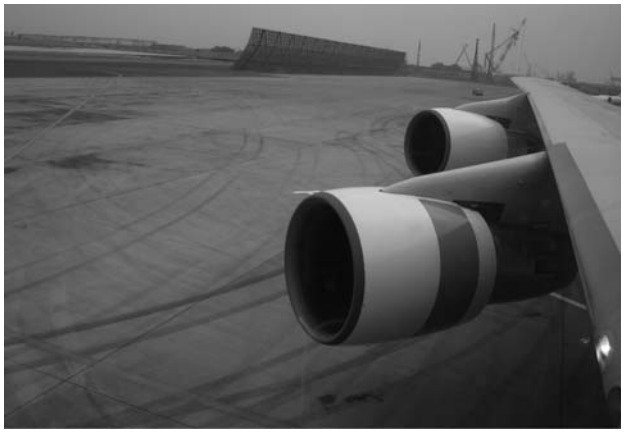


図８　バイオ燃料による地上エンジン作動試験

また，出発直前には，簡単な出発セレモニーを行い協力した各社の代表が集りました。セレモニーには，公官庁や報道メディアなどに多くお集まりいただき，バイオ燃料への関心の高さがうかがえました。

図９　出発前のセレモニー

当日は，小雨のあいにくの天候でしたが，予定通りにフライトは実施できました。当日は，運航乗務員３名と地上技術者２名が乗り組みました。

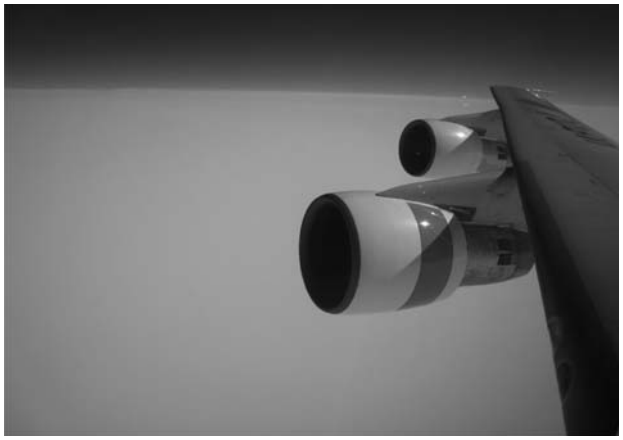


図10　飛行中の３番エンジン

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

到着後，今回のデモフライトを担当した小林啓二機長が「デモフライトは無事完了しました。フライトは順調で，バイオ燃料は従来のジェット燃料とまったく変わりませんでした。」とのコメントを述べました。

図11　羽田空港への着陸

7．これから

今回のデモフライトは無事成功しました。今は，飛行データの解析を行っていて，近いうちに解析結果がまとめられる予定です。

バイオ燃料については今後，ジェット燃料の規格にバイオ燃料を加える議論が進められることになりますが，今回の結果は他で実施されたデモフライトの結果と合わせて，この議論のなかで実証データとして使われていくものと思われます。バイオ燃料が通常のジェット燃料のひとつとして認められれば，すべての航空会社はこのバイオ燃料を使うことができるようになります。

今回のデモフライトで，技術的にはバイオ燃料で飛行機を飛ばすことができることは実証されたと思います。今後は，バイオ燃料の実用化・商品化にむけて，安定供給の確保やコスト競争力などの課題を克服していくことが必要だと思います。

今回のデモフライトで，実用化に向けてのはずみがつくことを期待しています。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

DMEを用いた廃熱の燃料再生システム

中川　二彦*1
NAKAGAWA Tsuguhiko

キーワード：ジメチルエーテル，ガスタービン，廃棄物，燃料再生，発電

1．はじめに

資源の乏しいわが国はエネルギー供給の大部分を海外に依存している。一方，CO_2排出量の削減は人類にとって喫緊の課題となっており，現在ポスト京都議定書後のCO_2排出量の削減目標をどのように設定するか，COP15に向け国際的な議論になっている。先日，日本政府はCO_2などの温室効果ガスの排出量を2005年比で2020年までに15％削減し，2050年までに70％削減するという目標を発表している。このような背景の下で，我々はエネルギーの安定供給を確保しつつ，地球温暖化防止に対応可能な，高効率かつ低環境負荷で，普及し易くかつ利便性のある新たなエネルギー供給システムを確立する必要に迫られている。

ジメチルエーテル（以下，DMEと記す）は未来の燃料として，1990年代から製造技術とその利用技術の開発が行われてきた。その分野は自動車から発電まで多岐に亘るとともに，その多くは実証試験まで行われてきた。[1] 特に，自動車分野ではエンジンの開発だけでなく，バスやトラックなどでの実走行試験も実施され，燃料としての有用性が確認されている。[2] ここでは，廃棄物の発電利用という視点から，DMEの燃料としての特性，製造方法およびDMEを用いた廃熱の燃料再生について述べる。

2．DMEの特徴

2.1　化学的性質

現在使われている燃料とDMEの物性値を表1に示す。

これより，従来の燃料と比較してDMEは次のような性質を持っていることがわかる。

①－25℃（大気圧下）または0.62MPa（常温下）で液化する。これはプロパンや天然ガスよりも液化しやすく，貯蔵・輸送の際に扱いやすい。

②ガス状態での発熱量は天然ガスとプロパンの中間であるが，単位重量あたりの発熱量は天然ガスやプロパンの約６割，軽油の約７割である。このため，重量あたりの輸送効率は他の燃料よりも劣る。

表１　各種燃料とDMEの物性比較

項目	DME	メタン	プロパン	軽油
化学式	CH_3OCH_3	CH_4	C_3H_8	－
沸点（℃）	−25.1	−161.5	−42.0	180～360
液密度（g/cm³）	0.67	－	0.49	0.84
ガス比重（対空気）	1.59	0.55	1.52	－
飽和蒸気圧（MPa）	0.62	－	0.94	－
自然発火温度（℃）	235	650	470	250
爆発限界（％）	3.4～17	5～15	2.1～9.4	0.6～7.5
セタン価	55～60	0	5	40～55
低位発熱量（MJ/kg）	28.9	50.4	46.5	42.7
低位発熱量（MJ/m³）	59.4	36.0	91.3	－

③人体に対する毒性は低く，LPGと同等である。このため，フロンに代わるスプレー噴射剤として広く利用されている。

2.2　燃料としての性質

DMEは炭素同士の結合がないため燃焼過程で粒子状物質（PM）が発生し難く，硫黄分を含まないのでSOxを発生しないクリーンな燃焼が可能である。また，酸素を化学構造の中に持つため燃焼性に優れ，セタン価が55～60と軽油よりも高いので，ディーゼルエンジンの燃料に向いていると考えられる。更に，DMEは水素に転換しやすい特性を持っている。DMEの水素転換特性を，他の燃料と比較した結果を図１に示す。

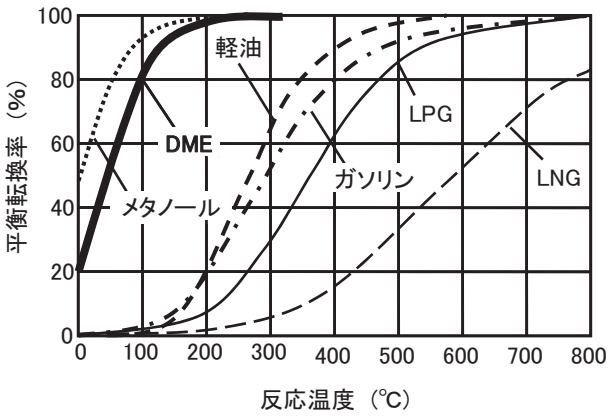


図１　各種燃料とDMEの水素転換特性

原稿受付　2009年７月10日
＊1　岡山県立大学　情報工学部　情報システム工学科
〒719-1197　岡山県総社市窪木111

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

これより，DMEはメタノールと並んで水素への転換温度が最も低い燃料のひとつであることが分かる。

3．製造技術

3.1　大量生産技術の開発

DMEの製造方法には間接法と直接法がある。何れもCOとH_2を原料にするのは同じであるが，間接法はメタノールを一度製造した後に，脱水反応によってDMEを合成するのに対し，直接法はCOとH_2から触媒反応により直接DMEを合成する。

DME合成に関する反応式を下記に示す。

$$3CO+3H_2 \rightarrow CH_3OCH_3+CO_2+246\ \mathrm{kJ/mol\text{-}DME} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$
$$2CO+4H_2 \rightarrow 2CH_3OH+182\ \mathrm{kJ/mol\text{-}DME} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$
$$2CH_3OH \rightarrow CH_3OCH_3+H_2O+23\ \mathrm{kJ/mol\text{-}DME} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$
$$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2+41\ \mathrm{kJ/mol\text{-}DME} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

(1) 式は総括反応式であり，次の３つの素反応，すなわち (2) 式のメタノール合成反応，(3) 式のメタノール脱水反応，および (4) 式のシフト反応から成り立つ。

JFEが開発した合成技術は，反応温度260℃・圧力５MPaの条件下で，(1) 式に示すCO：H_2＝１：１のモル比率の合成ガスからDMEを高い転化率で合成する。

COとH_2からの転化率は，図２に示すように，直接法の方が間接法よりも高くできるため，製造プロセスとして優位にある。

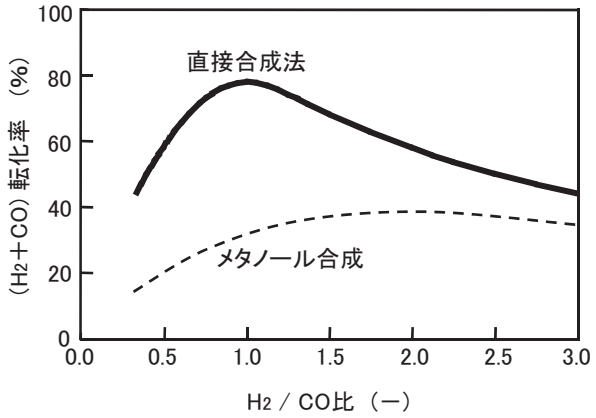


図２　DME製造におけるCOとH_2転化率

一方，間接法はメタノールが化学原料に使えるため，燃料としてのDMEだけを製造するのに比べて，事業上のリスクが低減できるというメリットがある。

直接合成法は2002～2006年にJOGMEC（石油天然ガス・金属鉱物資源機構）の補助を受け，釧路にて100t/日の実証プラントを開発・運転し，年産100万tの製造プラントへのスケールアップ技術を確立している。[3]

3.2　廃棄物からの製造

DMEは，図３に示すように，あらゆる炭化水素系の原料から製造が可能と考えられるが，その一方で，ガス化または改質によってCOとH_2の合成ガスを得る必要がある。例えば，一般廃棄物からDMEを製造するには，ガス化溶融炉などでCOとH_2の合成ガスを製造し，そのガスを原料にDMEを合成することになる。ガス化の際には廃棄物に含まれる成分だけではCO：H_2＝１：１の合成ガスを製造することが困難なうえ，合成ガスの組成も変動するため，天然ガスなどの補助燃料を加えて，これらを調整する必要がある。

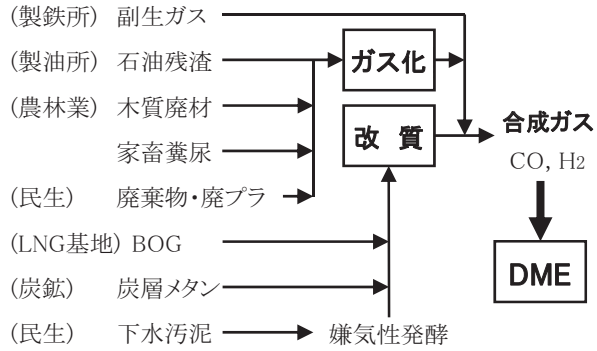


図３　DMEの製造が可能と考えられる原料

その他にも，ガス化や改質では，エネルギー損失が発生するため，これらの損失をどれだけ低減できるかが，廃棄物からDMEを製造する上での大きな課題である。

エネルギー損失を低減するためには，改質やガス化で使用する酸素の製造エネルギーの低減や廃熱の回収・有効利用技術の開発が重要になる。

4．発電燃料としての廃棄物から製造したDME

4.1　主燃料としてのDME

廃棄物をガス化後，直接合成法でDMEを製造し，ガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）の主燃料に用いて発電することを想定した場合のエネルギーフローを図４に示す。

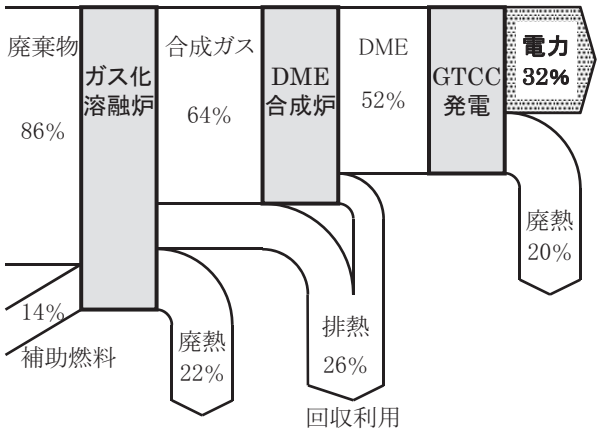


図４　廃棄物から製造したDMEを主燃料にした発電

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

図４のガス化溶融炉はシャフト炉やサーモセレクト炉などにおいて，家庭からの一般廃棄物のみを使用し，補助燃料に天然ガスを使用した場合を想定している。これより，廃棄物から合成ガスへの転換効率は補助燃料を含めて65％程度である。この合成ガスがDMEを製造する際の転換効率は80～85％程度であることから，廃棄物からのDMEへの転換効率は50～55％程度になる。得られたDMEを主燃料として発電効率60％のGTCCで発電すると，廃棄物＋補助燃料の投入エネルギーに対する総合の発電効率は約32％になる。補助燃料に天然ガスを使うことから，この補助燃料分を差し引いた廃棄物からだけの発電効率を評価すると24％程度になる。近年では補助燃料を使わずに，廃棄物焼却炉と排熱回収蒸気タービンで発電効率が20％を超える設備も多く稼動していることから，この方法は，DME合成炉とガスタービンの設備投資を考えると従来法と比較して優位性があるとは云えない。

一方，廃棄物をガス化した$CO+H_2$の合成ガスを，そのままSOFC（Solid Oxide Fuel Cell）燃料電池＋GTCC複合発電の燃料として使用することを想定すると，この複合発電の合成ガスからの発電効率は70～75％程度が期待できる。これより，廃棄物からの総合発電効率は45～48％が可能と考えられる。

したがって，現状および今後開発が期待される技術のどちらを考えても，廃棄物からDMEを合成し，それを主燃料に使って発電するというスキームは，最適な選択とは考え難い。

４.２　負荷調整への利用（廃熱の燃料化再生）

GTCCは高効率の発電設備であるが，運転負荷が低下すると，発電効率は低下する。例えば，運転負荷90％で発電効率が50％でも，運転負荷が50％に低下すると，発電効率は40％以下になり，蒸気タービンだけの発電効率との差はなくなる。このように，部分負荷運転下ではGTCCの優位性は失われる。したがって，電力需要が低下する夜間でも，ガスタービンの運転負荷を上げることができれば省エネルギーになると考えられる。これは，ガスタービン排熱を燃料として再生し，再びガスタービンで使うことができるような，排熱再生型のシステムが開発できれば可能になる。また，廃棄物発電では廃棄物の成分や発熱量が安定しないため，部分負荷での運転が避けられず，回収できる電力や発電効率に制約がある。DMEは上記のような負荷変動を調整するための補助燃料として優れた性質を持っている。

DMEは⑸式の吸熱反応によって水素へ転換する。

$$CH_3OCH_3+3H_2O+122\mathrm{kJ/mol}\rightarrow 6H_2+2CO_2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

⑸式の水素への転換反応は，図５に示すように，適切な触媒を使用すれば300℃程度の温度で進む。

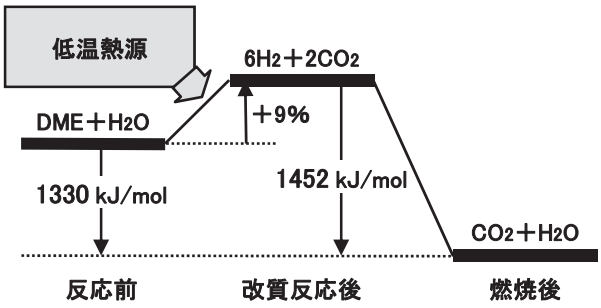


図５　DMEのH_2Oによる転換特性

図５において，反応前後を比較すると，反応後における水素の燃焼熱は，反応前のDMEの燃焼熱よりも約９％増加することから，この反応を用いれば，中低温排熱の顕熱を水素の燃焼熱として回収できることがわかる。

この反応を利用した発電技術に，DME化学再生ガスタービンシステムがあり，その構成例を図６に示す。[4]

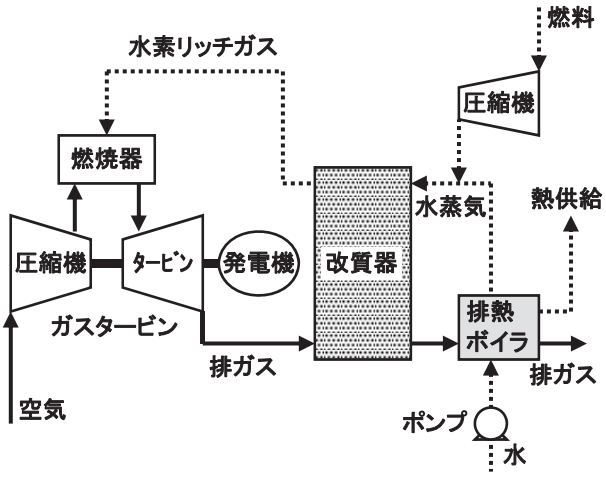


図６　DME化学再生ガスタービンシステム

このシステムでは従来のコジェネレーションと同様にガスタービンの排気ダクトに排熱ボイラーを配し，更に，排気ダクト中に改質器を配置している。排熱ボイラーで発生した蒸気は，コジェネレーションとして直接熱供給されるほか，燃料と共に改質器に供給される。改質器は触媒が充填された数多くのチューブで構成されており，改質器へ供給された燃料と蒸気は，このチューブの中の触媒層を通過する過程で水素リッチなガスに転換する。

東芝で行われた発電出力30kWでの実証試験の結果，排ガスの熱エネルギーを蒸気としてガスタービンに回収するチェンサイクルと比較して，LHVベースのプラント熱効率は相対値で7.7～8.9％向上できることが確認されている。[4]

このようなシステムは，廃棄物からの発電で適用する中小型ガスタービンで効果が期待できるとともに，水素

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

を燃料とする燃料電池と組み合わせることも考えられる。PEFC（Polymer Electrolyte Fuel Cell）などの燃料電池は，天然ガスなどを改質せずに，水素から直接発電すれば55～60％の高い効率で発電ができる。300℃以上の廃熱は，発電や工場からの燃焼排ガスなどとして排出されているため，DMEを用いれば，輸送や貯蔵が容易なうえ，廃熱を再生した水素が利用できるため，水素を使う燃料電池の普及に伴って，工場や発電の廃熱を民生・運輸などのエネルギー源として活用できるようになる。

このように，燃料電池とガスタービンの複合システムを考えるならば，原理的に高効率化が可能なSOFC向けの燃料再生が重要になる。最近，SOFCは単体で発電効率63％の達成が発表されている。[5]

DMEは次の⑹式の吸熱反応によってCO_2をCOとH_2の混合気体へ転換する。

$$CH_3OCH_3 + CO_2 + 246\text{kJ/mol} \rightarrow 3H_2 + 3CO \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

⑹式の反応は，DMEの直接合成と逆反応であり，⑸式の反応と同様に，低圧下で適切な触媒を使用すれば300℃程度で反応を進めることができ，反応前後の熱収支は図7のようになる。このCOとH_2混合気体はSOFCの燃料として利用でき，濃度100％のCO_2を用いた場合には11,700kJ/Nm^3の低位発熱量が得られ，工業用燃料としても使用することができる。

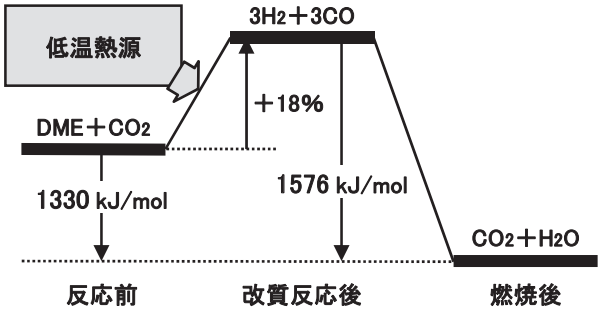


図７　DMEのCO_2による転換特性

本反応では反応後における水素とCOの混合気体の燃焼熱が，反応前のDMEの燃焼熱よりも約18％増加する。

したがって，この反応を利用すれば，燃焼排ガスなどのCO_2と廃熱を燃料として回収・再生し，工場や発電所などでの再利用が可能になる。この方法は，廃熱のエクセルギーを燃料に再生して高めることで，エネルギーの再循環を可能にする。その際に，燃焼排ガス中のCO_2も直接に再循環できるため，化石燃料を原料にしないDMEを用いれば，従来にはない画期的なエネルギーの再循環システムを構築できると考えられる。例えば，GTCCの排熱回収装置として，DME改質器と排熱ボイラーを併設することで，発電負荷が大きい時には蒸気回収発電を選択し，発電負荷が小さい時には改質器で再生した燃料をガスタービン燃料として使うことで，部分負荷運転時でも，ガスタービンは効率の高い負荷で一定運転することが可能になると考えられる。

以上のことから，発電の主燃料には廃棄物をガス化した燃料ガスや天然ガスなどを用い，DMEは負荷調整用にのみ用いる方法が良いと考えられる。必要なDMEは，図３に示した原料の一部から製造すれば良く，負荷調整や効率向上に必要なDMEだけを製造すれば，設備投資も小さくすることができる。なお，表１に示したように，DMEは 沸点－25℃・常温下0.62MPa以上で液体であることから，常温で気体又は液体として扱える。このため，地域内の燃料として融通することができ，地震などの災害でパイプラインや送電線が遮断しても，独立して必要最小限のエネルギーを確保する手段として，廃棄物焼却炉を地域の防災対策などへも活用できると考えられる。

５．廃熱の燃料再生システムの例

DMEを用いた廃熱の燃料再生システムの具体的な省エネルギー効果については，図８に示すような，LNG単独システムとLNG・DME併用システムで比較した結果が報告されている。[6]

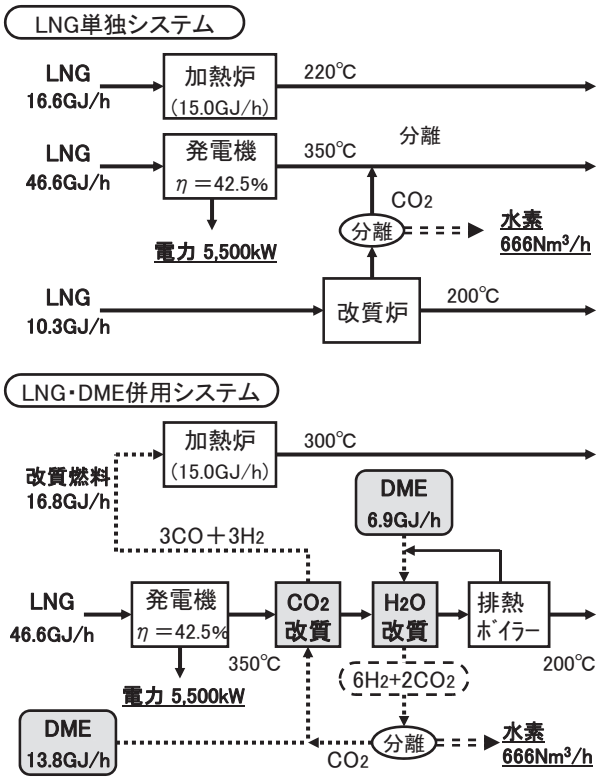


図８　DME廃熱再生システムの省エネルギー効果

図８のLNG単独システムは効果を比較する際の基準ケースであり，天然ガスを燃料とした発電設備，加熱炉及び水素発生装置がそれぞれ独立した設備として構成さ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

れている。各設備には現状で最新の省エネルギー機器が導入され，例えば，加熱炉や改質炉には，リジェネバーナが設置されていることを前提にしている。また，発電機にはガスエンジンを想定している。

一方，LNG・DME併用システムでは，発電設備の燃料のみにLNGを使用し，加熱炉と水素発生装置は，発電設備からの廃熱回収装置として，DMEを用いた廃熱再生システムを設置し，得られた燃料や水素を利用する。なお，DME改質の際のH_2O（水蒸気）やCO_2による転化率は95％である。

図８において，改質燃料の加熱炉への入熱は16.8GJ/hであり，供給DMEの燃焼熱13.8GJ/hに比べて+22％増加している。この理由は，図７に示したDME改質反応による+18％の増加（廃熱再生）に加えて，改質燃料のH_2とCO顕熱（300℃）による増加（廃熱回収）が+4％あることによる。また，図８では，廃熱再生システムによる効果のみを明確にするために，本システムの導入に伴って，加熱炉で実施が可能になる追加の省エネ対策とその効果は示していない。このため，加熱炉の排ガス温度は220℃から300℃へ上昇しており，システム導入に伴う複合効果までが最適化された結果にはなっていない。

図８のエネルギー収支に基づき，LNG単独システムとLNG・DME併用システムにおいて，それぞれの設備のエネルギー消費とCO_2の削減効果を整理した結果を表２に示す。

表２　DMEを用いた廃熱再生システムの効果

	LNG単独システム		LNG・DME併用システム	
	燃料消費（GJ/h）	CO_2排出量（kg/h）	燃料消費（GJ/h）	CO_2排出量（kg/h）
発　電	46.6	2,610	46.6	2,610
加熱炉	16.6	930	13.8	910
水素製造	10.3	580	6.9	460
「水素製造＋加熱炉」	26.9	1,510	20.7	1,370
燃料消費	基準		−23.0%	
CO_2排出		基準		− 9.1%

表２より，図８のケースでは，LNG投入熱量の28％をDMEに置き換え，DMEによる廃熱再生システムを適用することにより，LNGだけを使った場合と比較して，「加熱炉＋水素製造」の燃料消費量で23％，またCO_2排出量で９％の削減が可能である。つまり，DMEを従来燃料の単なる代替物として使うのではなく，天然ガスなどと併用した燃焼排熱の燃料再生システムとして使うことにより，燃料消費とCO_2排出量の両方で大きな削減効果が期待できることが分かる。

排熱の燃料化再生が可能な合成燃料としては，DME以外にも，メタノールやDMEと異なる分子構造を有するエタノールなどが考えられる。表３にこれらの合成燃料の特性を示す。

表３　エネルギー再循環の媒体としての特性比較

		CH_3OH（メタノール）	C_2H_6O	
			C_2H_5OH（エタノール）	CH_3OCH_3（DME）
安全性	毒性	強い	なし	なし
	爆発限界(%)	5.5〜36	4.3〜19	3.4〜17
貯蔵性	沸点(℃)	64.6	78.3	−25.1
	気化熱(MJ/kg)	1.10	0.86	0.47
	飽和蒸気圧（MPa at 298K）	−	−	0.62
汎用性	セタン価	3	8	55〜60
	低位発熱量（MJ/kg）	19.9	26.8	28.9
環境性	製造	何れもバイオマスから製造可能		
	消費（燃料）	ホルムアルデヒドを燃焼時に生成するリスク	燃焼時のNOx発生が少なく、粒子状物質も排出しない	

これより，メタノールはそれ自体が毒性を持つうえ，燃焼によって更に毒性の強いホルムアルデヒドを発生する可能性が高い。

エタノールはDMEに比べて，沸点が高く，気化熱も２倍であることに加え，単位重量あたりの低位発熱量が約10％低く，改質温度が高いため，廃熱再生という面では不利である。また，セタン価が低く，ディーゼル機関への適用が難しいことなどの制約がある。その一方で，ガス合成以外にも，アルコール発酵などの手段で簡単に製造できる利点がある。

以上の結果，廃熱の再生媒体としてはDMEが優れており，DMEの今後の課題としては，中小規模で安価に製造できる技術の確立と考えられる。

発電用途では化石燃料などから合成したDMEを主燃料として使うよりも，廃熱の再生媒体として使う方が良いと考えられ，将来において，DMEを産業副生成物，廃棄物，バイオマスなどから製造できれば，大幅なCO_2排出量の削減が可能になる。

その他の発電に係わる研究段階の技術としてDMEを用いたリバーニング脱硝がある。[7] これは微量のDMEを排ガス中に吹き込み，高温燃焼で発生したNOxを低減する技術である。発電設備ではアンモニアを用いた脱硝設備が使われているが，アンモニアは毒物のため，これを毒性のないDMEで代替することができれば，DMEの排熱再生システムと組み合わせることで，効率向上と環境対策が同時に図れることになる。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

6．まとめ

DMEの燃料としての特性，その製造方法および廃棄物などを燃料とする発電へのDME適用の可能性についてまとめた。DMEの特性から，廃熱の燃料再生システムの媒体として使えば，大きな省エネルギー効果が期待できる。

参考文献

(1) 鈴木信一，石油/天然ガスレビュー，Vol.37，No．5，1－27（2003）

(2) 若狭良治　他，石油/天然ガスレビュー，Vol.41，No．3，39－60（2007）

(3) 大野陽太郎，石油技術協会誌，Vol.70，No．2，187－195（2005）

(4) 中垣隆雄　他，日本機械学会論文集Ｂ編，Vol.72，No.718，1633－1640（2006）

(5) 中川二彦 他，エネルギー・資源，Vol.28，No.1，56－60（2007）

(6) 日本ガイシホームページなど（2009）

(7) 梶村周平ほか．化学工学会第38回秋季大会，D119，（2006）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

海藻バイオ燃料

能登谷正浩*1
NOTOYA Masahiro

キーワード：大型海藻，バイオ燃料，海洋資源，環境保全，macro-algae，bio-fuel，marine resources，preservation of environment

1．はじめに

一般に表記の課題では，大型海藻を材料にメタンガスやエタノールなど具体的な生産技術について述べるものと見なされがちだが，本稿では，むしろ技術開発の研究デザインをバイオ燃料生産の背景と地球環境問題や海藻のバイオ燃料生産に伴う水産資源や生態系保全，カスケード利用の面から述べたい。

海藻のバイオ燃料生産の構想については，これまでに報告書(1)-(4)やシンポジウム(5)，講演会などで，その内容を紹介してきた。特に2007年３月の第19回国際海藻会議における講演発表(6)以来，国内外の講演会の他，アメリカやオランダ，韓国，タイ，イスラエル，チリなどの大学やエネルギー関連集会，政府組織，石油業界等々からの講演依頼へも対応してきた。しかし，このような中では，具体的な技術開発やバイオ燃料に関する企業戦略などへの関心が目立ち，現状の地球環境を踏まえた将来的な持続可能な地球環境や資源の保全に関する視点の考え方や提案が少ないことに著者は危惧を感じている。

2．地球温暖化の予測と地球規模の災害

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第四次評価報告では，主に以下の5点，すなわち⑴過去100年間に地上気温が0.74℃上昇したこと，⑵1850年以降の温暖年の上位11年が直近の12年間に認められたこと，⑶近年の北極海の海氷面積が急激に減少していること，⑷永久凍土の融解が進行していること，さらに⑸海面水位が20世紀中に平均17cm上昇したことなどから，過去半世紀の気温上昇は人為的に温室効果ガスを増加させたことによる影響の可能性が高いとしている。また，過去200年間の大気中の二酸化炭素の濃度変化を，南極の氷床中の気泡内やハワイ，マウナロアにおける二酸化炭素濃度の観測データから描かれたグラフでは，産業革命以降と1960年以降に急上昇し，石油や石炭，天然ガスの使用量はそれと並行する増加傾向を示している。それはIPCCの結論を裏付けているようにも見える。

化石燃料は，地球誕生の数十億年後に発生した海藻や光合成生物による累積化石を基本としている。それはそれら生物が生育当時に，地球大気中に大量に存在していた二酸化炭素を体内に炭化物として蓄積，固定したものである。したがって，化石燃料の燃焼によって排出される二酸化炭素は，言わば過去の地球大気の二酸化炭素を現在のそれに付加するものである。

排出される二酸化炭素の付加量が少ない場合は，地球上空への拡散によって解消される。事実，それは上空ほど減少しているが，現状では，その拡散速度を十分に越える付加量によって，バランスが保たれずに地上から上空に至る濃度全体が増加傾向を示している。この他，主に北半球から排出される二酸化炭素は次第に南半球へも広がり，全地球上に拡散する様子も知られる(7)が，これも年々濃度上昇している。

現状の上昇傾向が進行する場合，1900年を基点とした地上気温２℃以上に達する時期は，早い場合は2026年，最も遅い予測でも2060年頃とされている。その結果は，全地球規模で地域の生態系崩壊や多様な災害が多数発生すると見なされている。水不足と共に飢餓，大洪水の頻発などが予測され，多様な環境や生態系への負のインパクトが考えられている。

3．二酸化炭素排出抑制とエネルギー資源

3.1　二酸化炭素の排出とそのストックとリサイクル

世界の二酸化炭素排出量は267億トンで，最も多量に排出している国はアメリカで，全体の約22％，次いで中国が19％，ロシアが5.8％，次いでこの狭い国土を持つ日本が4番目にランクし4.7％を排出している。また，日本国内排出量の上位は電力関係企業が最も多く，約28％，次いで鉄鋼13％と続き，大口企業180事業所の合計は51％に達する。ちなみに全家庭の総排出量は約５％と見込まれており，大口企業の排出抑制が課題となっている。

これらの二酸化炭素の処理には，大気中のガスを固定化しストックするか化石燃料の使用をやめて大気中の二酸化炭素をリサイクルするカーボンニュートラルと呼ばれるバイオマス燃料への切り替えが必要である。

原稿受付　2009年７月23日
＊1　東京海洋大学海洋科学部生物資源学科
〒108-8477　東京都港区港南４－５－７

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

今日のような差し迫った雰囲気でなかった10年以上前には，二酸化炭素の蓄積が重要視され，大規模な森林破壊を止め，砂漠などの未利用域にも木を植えてストックする方向が考えられた。その考え方では当然，海藻のように固定された炭素が１，２年で大気中に戻るような生物は使えない。しかし，過去の地球の膨大な量を固定した化石燃料から排出される二酸化炭素をストックすることは，森林などでも，その面積や量の面から難しい。また，二酸化炭素をドライアイスとして地中深く埋め込んで，蓄積しようとする発想も未だに消えていない。しかし，二酸化炭素の固化や埋設作業には多大な二酸化炭素を排出するエネルギー消費が見込まれ，さらに埋設したドライアイスが溶出したり，地殻変動に伴って再表出することなど，地中での挙動や予測のつかない危険性が推測される。そのため，直接的または総体として二酸化炭素を排出しないエネルギー資源開発へと変化してきた。著者は10年ほど以前から海藻を天然の二酸化炭素リサイクル資源と位置づけて，その機能を有効活用することを提案してきた。

3.2．二酸化炭素無排出エネルギー資源

二酸化炭素を排出しないエネルギー資源には，自然の物理エネルギー資源とバイオマスすなわちカーボンニュートラル資源の2つがある。前者には光や風力，水力，波力，潮流，地熱などが考えられ，後者には光合成生物として陸上の植物や海藻類が考えられ，それらが固定した炭素を利用するものである。

前者の場合は，エネルギーを確保する機器類の製作時に既に多くの二酸化炭素排出を伴うエネルギーを使っているが，設置後はメンテナンスその他を除けば二酸化炭素を排出しないエネルギー資源となる。後者は，エタノールなりディーゼルオイルを生産する段階と消費する段階の両過程で二酸化炭素を排出する。しかし，そのバイオマス資源が生育する過程で，空気中から二酸化炭素が吸収，固定されるため，その炭素はリサイクル利用される。木材，草，トウモロコシ，サトウキビなどからエタノールが，パーム，ヒマワリ，菜種などからはディーゼルオイルが得られる。

石油に代わる移動用エネルギー資源としては，前者では一般に電気で蓄電池を用い，後者ではアルコールやオイルをタンクに収容して用いるが，従来の石油と同等に取り扱える容易さから一般に後者が求められてきた。しかし，最近は蓄電池の性能が向上したことや清浄性や静音性などから，自動車などへは蓄電池による電気エネルギーも好まれるようである。

これらの外に，消費しても全く二酸化炭素を排出しない究極のクリーン・エネルギー資源と言われる水素がある。水素は余剰電気エネルギーを，水の電気分解によって生成し貯蔵する場合にも用いられる。

しかし，いずれのエネルギー資源でも生産する過程で，得られるエネルギー以上に二酸化炭素を排出するような資源は化石燃料資源の代替にはならない。しかし，従来からの資本主義経済的発想から，製品に対しては生産コストを添加することで事を済ませる習慣に慣らされてしまった考え方は，なかなか変えることが難しいらしく，時々その隘路に入り込んでも気付かずにそのまま開発しているものが散見される。現在日本で言われるエコ・カーやエコ減税のように，総体としては全くエコにはなっていないことに気付かないことと似ている。

4．地球温暖化と地球規模の人為的災害

化石燃料代替エネルギー資源を考える前に，先ず地球温暖化とはどのような問題かを考える必要がある。

人類は誕生以来，地球の生態系や環境をその活動によって多様に変質させる負のインパクト（絶滅種の増加，種多様性の減少，環境汚染，生体毒性物質の蔓延，適応種の極端な増大や生態的平衡の破壊等々）を与えて続けてきている。それらのインパクトの内の1側面としての二酸化炭素大量排出の問題があり，その結果として，人類の生存が危ぶまれる事態が次第に強まる中で生み出されている問題である事をしっかりと認識する必要がある。

近未来社会に起こると予測される人類の生存に係る重篤で，地球規模の危機の主要なものは３つあるとされる。⑴ 人口増加と食糧不足，⑵ 生態系を含めた環境破壊，さらに ⑶ エネルギー資源供給の不均衡による地域経済や社会発展の不均衡などとされる。人口増加や食糧不足は両者伴って進行し，今後10-40年後の2020年から2050年には地球の全人口が80-90億に達すると予測されている。その時点で必要な食糧は現在の地球の陸域では賄えないとされる。現在でも，政治的または経済的な偏りによって飢餓地域が存在するなかで，それらの課題が解決されても，なお食糧不足になるほどに人口が増加するのである。また，世界の魚介類資源は2050年頃には枯渇するとの予測もある[8]。

生態系機能を無視した産業，経済の拡大，特に産業革命以降の大量の資源浪費と廃棄物の排出は生態系破壊や環境汚染を引き起こし，種の絶滅スピード，種多様性の減少傾向を加速している。これらと相俟って，地球各地域の経済，エネルギー問題が出てくることは容易に理解できる。

このような状況を踏まえると，地球温暖化は地球的規模の公害とも言うべきエネルギー・環境問題といえる。したがって，この問題は単に石油以外のエネルギー資源を見つけ出すことではなく，可能な限り自然エネルギーを活用し，生態系の十分な環境調整力を引き出し，活用し，地球生態系を変質させることなく環境を保全しながら，また，エネルギー資源やその他の有用資源を浪費することなく，さらに，３R（Recycle, Reuse, Reduce）のように一度廃棄物を排出してから再利用するのではな

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

く，総合的かつ計画的に無駄なく使い切り，基本的に廃棄物を出さない生産システムを開発，構築することが必要である。

5．バイオマス燃料生産に係る資本主義的諸問題

バイオマス燃料資源として，アメリカではトウモロコシ，ブラジルではサトウキビなどが有名であるが，そのほか多様な作物からのエタノールやディーゼルオイルの生産が行なわれてきている。しかし，アメリカを例に取ると，従来，大豆や小麦は大規模農業下で大量の地下水を汲み上げながら生産してきたものである。そこに，バイオ燃料ブームが起こり，トウモロコシの価格が急騰すると，当然経済的な利益を見込んでトウモロコシ栽培への切り替えが進んだ。生育に大豆や小麦以上に水を必要とするトウモロコシの生産には，さらに大量の地下水が汲みあげられることとなった。結果として農地と経済破壊を同時に起こす農業へと変貌したと言われる。農地は水不足から来る砂漠化と塩害が同時進行し，将来的にも保全困難な農地を拡大する結果となった。また，同時にトウモロコシは本来食用や飼料用作物であるが，付加価値または投機的価値の高いエタノール生産用資源へと移行し，数倍の価格へ急騰した。その結果，従来から輸入にたよって畜産業を営んできた世界各地の関連業者は多大な経済的被害を被ったことは記憶に新しい。

この他，バイオエタノールの生産は，本来的に化石燃料に代わるクリーン・エネルギー資源として環境保全を目的に生産，使用されるものだが，これがガソリンのオクタン価向上剤MTBEの代替品としての用途となった。これまで地下水汚染として悪名高いMTBEを使わずにエタノールを混ぜることで，ガソリンをより容易に多量に消費する方向が加速されたことも指摘されている。また，バイオ燃料資源としての遺伝子組み換え作物を利用することも問題となっている。これまで倦厭されて来た技術や作物を無制限に生産する道を開く可能性も危惧されている。事実，巨大アメリカ石油産業はアグリバイオ企業と連携し，この時期を利益拡大の好機と捉えて方策を探っていると言う。

上記はほんの一例であるが，これらはサブプライムローンに端を発する世界恐慌を生み出し，一部の富裕層が地球経済環境を省みずに，より資本を蓄積する構造と同根である。「地球経済の発展」と共に人間の住めない地球へと環境破壊，温暖化を促進する構造であることや表面的なエコ宣伝に対しては十分に注視する必要がある。

6．バイオ燃料資源生産の場と海洋資源および環境の保全

人間の主要な生活域である陸域は地球上の約1/3程度と狭い。陸域は食糧生産の場であると共に生活域でもある。その他，自然環境を保全するための森林や良好な水資源を確保する場でもある。しかし，陸域には農地や生活域として向かない場も含まれる。極域や高地や山岳，湖沼，河川，砂漠などがある。このことを考慮すると，バイオ燃料資源の生産に充てられる面積は限られている。さらに，将来急増が予測される人口や環境悪化を考慮すると，休耕田を使ってバイオ燃料用のイネを栽培することや，発展途上国との共同開発でバイオ燃料資源の生産ために土地を海外に求めることは不可能と考えられる。将来の食糧不足では，各国で使える農地の全てを食糧生産に向けても賄えないほどに逼迫するとされる。特に，日本は食糧自給率38％以下，穀物自給率はさらに低く約28％である。したがって，先ず，自国の安心安全な食糧を確保する環境を整えることが重要な課題であるとともに，日本のような先進国が果たすべき国際的な責務とも考えられる。

他方，海域の面積は全地球の約2/3を占めその大部分は未利用海面である。当然海洋生態系やその環境保全への配慮は必要で，また，他国との協調は必要であろうが，国際的な取り決めでは概ね200海里以内は排他的経済水域として認められている。この点は，日本は他国にはない有利な立地にある。狭い国土と島国だが，国土の12倍以上の排他的経済水域と200海里基点諸島を多数保有する。太平洋上の小さな基点島1個が保有する排他的経済水域は約40万平方キロで，日本の国土（約37万平方キロ）より広い。さらに日本は世界第6位の排他的経済水域を持つ。したがって，この広大な海域を十分に活用し，多様な海洋資源の保全と同時に多様なエネルギー資源生産の技術開発を行なうべきであろう。

7．海藻の生産力と海洋環境と資源保全

海藻は基本的に陸域の植物と同様に水と二酸化炭素から，光エネルギー用いて炭水化物を作り，藻体を生長させる。海藻の成分の大部分はアルギン酸や寒天などの硫酸多糖類からなり，草木のセルロースやリグニンなどとはやや異なるが，発酵など適当な分解や化学変化によって，メタンガスやアルコール，水素などのエネルギー資源への変換が可能である。海藻の多くの種は，陸上の森林の数十年から数百年に比べると，生育時間や炭素蓄積時間は圧倒的に短い。しかし，その生産力は高く，短期間に二酸化炭素をリサイクルすることが可能で，石油代替燃料資源として有効である。

海洋全体の植物プランクトンの生産量は陸域の草木の総生産量とほぼ同等とされ，コンブやホンダワラなどの大型海藻類の総生産量は海洋全体の植物プランクトンには全く及ばない。しかし，それは両者の生育面積の違いによるものである。大型海藻類のいくつかの種の年間生産量示すとは1平方メートル当たり，ミツイシコンブは500g，カナダ太平洋沿岸コンブ属は1300－1800g，日本のカジメ群落は620－4900g，*Ecklonia radiata* は1600-4900g，ノコギリモクは360－2600g，エゾノネジモクは

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

737gで，陸域で最も高い生産力を示す熱帯雨林の植物生産量と同等かやや少ない程度とされる。このことは大型海藻を未利用の広い海面で生育させることによって，効率よく二酸化炭素を吸収させ，エネルギー資源へ利用することが可能で，化石代替エネルギー資源として活用することは陸域以上に有効であることを意味する。

日本の沿岸には，南から北上する暖流が太平洋と日本海沿岸に沿って流れ，北東からの寒流は太平洋沿岸から東北沿岸，一部は茨城県沿岸にまで南下する。それぞれの沿岸には生長が速く大型となるコンブ類やホンダワラ類が豊富に生育する。また，暖寒流の境界，混合域には好漁場が形成されている。しかし，近年，海洋水の富栄養化や汚染が世界的に問題となっており，日本の沿岸海域でも，エチゼンクラゲ問題や大陸からの汚染水流出，船舶災害による海洋汚染などから，漁獲量は年々減少し続けている。

現在，日本の沿岸の自然海岸は全沿岸域の約60％といわれ，人工海岸が増加する傾向にある。その多くは海岸保全を理由に護岸や消波堤，港湾建設，埋め立てによるものでる。沿岸の人為的改変に伴って陸と海の境界域に形成されていた多様な生物をはぐくむ生態系が破壊されている。大型海藻類のコンブ類やホンダワラ類，アラメ・カジメ類のほか海草のアマモ類の群落は，水質浄化や魚介類の産卵場，幼稚仔魚の生育場，大型魚類の摂餌場などを形成し，水産資源の涵養や保全の場として有用な生態系である。また，魚類の99％の資源は，海洋面積の7.5％程度の沿岸域や「藻場」で生産されているという。そのため，従来から国や地方公共団体によって，その保全や造成事業が進められてきているが，近年，この大型の基礎生産者である海藻類を中心とした水産上重要な生態系の「藻場」は，温暖化や人為的な沿岸の改変の影響を受けて消失したり，「磯焼け」状態となっている。

また，沿岸の内海域や比較的静穏な湾内は魚介類の養殖場として利用されるが，その残餌や排出物が海域への栄養塩付加となり，赤潮やグリーン・タイド（アオサや緑藻によるブルーム）が発生し，既に全国の沿岸では珍しい現象ではなくなっている。

このように沿岸から沖合いに至る海域の人為的な生態系および環境破壊が見られる中で，大型海藻類を大規模に栽培，増殖させることは，栄養塩類や汚染物質を除去し，有用魚介類資源や生態系を回復，保全し，さらに二酸化炭素をリサイクルするバイオ燃料資源が生産され，いわば一石三鳥の資源利用となる。

著者は，これまでいろいろな場で，沖合いの洋上に，海藻を中心とした，エネルギー自立型，環境保全型の超大型総合生産システムを作る構想を提案してきた（図１）。この施設を未利用の広大な排他的経済水域に基点諸島ともに等間隔に設置し活用することによって，海洋環境の保全とともに広大な海域の資源を有効活用することが可能となる。ここに日本が持っている独自の開発技術を使って，エネルギー生産や海洋資源加工施設，廃棄物処理リサイクル施設，洋上環境監視研究施設などを設置することや，機能を特化させた小型施設の多数をシステムアップして全体を完成させることなど，構想は多様に考えられる。さらに，このような小型洋上プラントは海外への販売も可能となるだろう。このような環境保全型海洋プラント開発構想こそ，日本の国際貢献に繋がるとともに日本の経済力を上昇させるものとなるであろう。

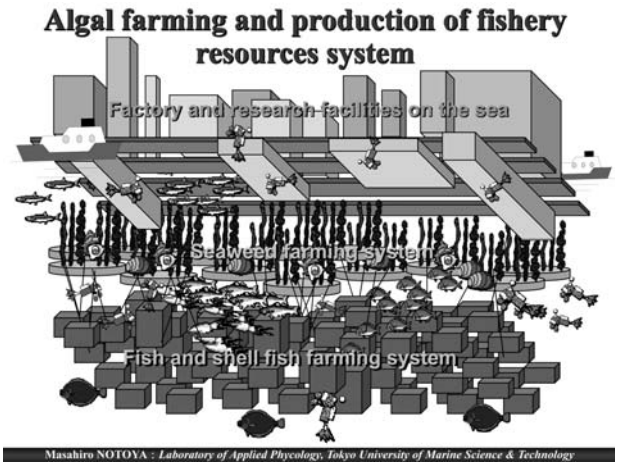


図１　養殖海藻を中心とした，沖合いの洋上自立型，環境保全型総合生産システム構想の概念図

８．海藻バイオ燃料資源としての海藻

大型で高い生産力を持つ海藻にはホンダワラやコンブ類があるが，両者を比較すると，前者は付着器から樹枝状に生長し，その枝には気胞を形成して藻体を浮かせる。そのため，光エネルギーを比較的効率よく利用する。また，藻体が浮上する特性は収穫作業上も都合がよく，付着器を基質から切り離すだけで容易に収穫が可能である。これに対して後者の藻体は海水より重く，葉状部は垂下する。従って，コンブ類を効率よく生長させるにはそれなりの栽培技術が必要である。

ホンダワラの仲間は比較的温暖な海域に生育する種が多く，大型の群落を作る。これらの群落は有用魚介類資源の涵養，保全の場，「藻場」を形成する。また，ホンダワラ類は成熟期の終わりごろから藻体の上部が切れて流出する。この流出藻体の多くは浮遊し，海流に乗って集合，生長しながら移動する「流れ藻」となる。この「流れ藻」には昔からブリ，サンマ，ウスメバルなど，多様な有用魚介類が産卵し，幼稚仔魚などの生育場として利用されることが知られている（図２）。それらの稚魚は採取され，網生簀養殖用種苗としても利用されている。したがって，ホンダワラ類の「藻場」や群落を人為的に造成，養殖することは，海産魚介類資源の保全にとって有効である。この外，海藻が生育する際には生育海域から栄養塩類吸収するため，沿岸域や富栄養化海域の浄化や環境修復にも利用できる。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

図２　浮き藻場のホンダワラ類に随伴するウスメバル稚魚

日本沿岸のコンブの仲間は東北および北海道沿岸に生育し，海域によっては大きな群落を形成する。本州，九州および四国沿岸には，暖海性のコンブの仲間であるアラメやカジメ類のほかワカメ類やアントクメなどが生育する。これらも「藻場」を形成し，水産資源の保全に役立っている。従って，ホンダワラ類より豊富に生育する海域では，これらの機能を効率よく活用することも考慮すべきであろう。

コンブやワカメ，ノリなどの養殖は，これまではごく静穏域な沿岸域で小規模に行なってきたが，バイオ燃料用の資源生産には，かなり大型の施設を外洋に設置する必要がある。そのためには，施設の耐波性や設置方法や収穫技術など解決しなければならない課題も多々考えられ，高度な技術開発が必要となる。

そこで，私は施設を用いないホンダワラ類の栽培方法を数年前に考案した（図３）。それは天然の「流れ藻」を模してホンダワラ類の藻体小片を大量に放流し，人為的に「流れ藻」を作る方法である。これは低コストで容易に，大量のバイオ燃料用の資源生産が可能である。九州北岸から放流した藻体小片は対馬暖流に乗って，生長，集合しながら日本海沿岸を北上する。九州北端から津軽海峡に到達するまでの時間は，エチゼンクラゲの移動例から，早い場合は2週間前後と考えられる。そのルートや経過時間は放流位置や時期によって異なるが，最近開発された高精度のシミュレーション・プログラムを用いると，時々刻々変化する位置と到達時間などが正確に予測可能という。「流れ藻」は途中で沿岸に打ち寄せられるものもあるが，概ね分散することはなく，日本海沿岸では津軽海峡か宗谷海峡に流れ込む。そこで藻体を採取して利用する。その間「流れ藻」では魚介類資源の保全や海水浄化に役立つ。

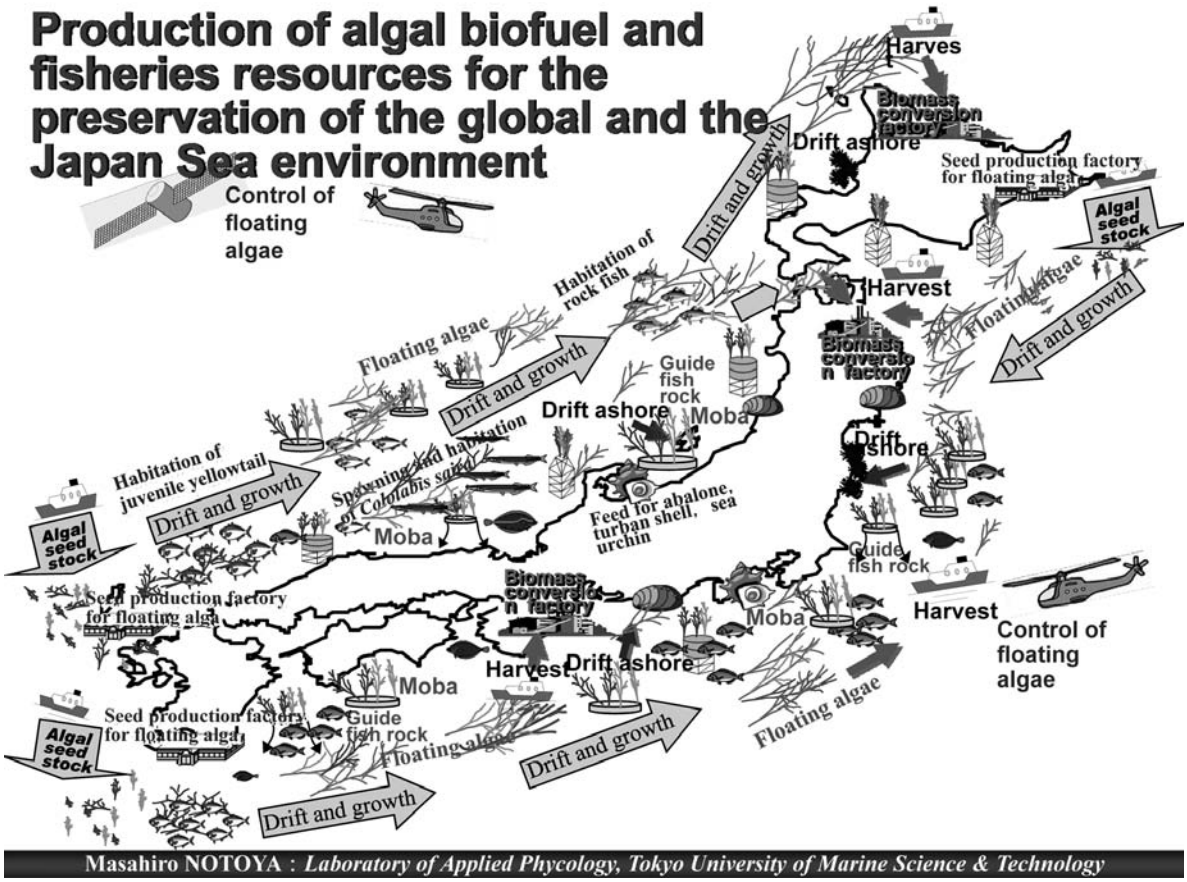


図３　海洋資源と地球環境保全のための海藻利用と海藻バイオ燃料生産の概念図

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

9．大型海藻資源とそのカスケード利用

大量生産と大量消費による経済性の向上や豊かな生活の付けが今日の地球環境問題を引き起こしている。したがって，将来的な人口増加や食糧資源の生産に対処しつつ，真に地球生態系や環境を保全しながら石油代替エネルギー資源を生産する技術を開発する必要がある。そのためには，生産するエネルギー資源量に対して，人為的に付加するエネルギー量や資源をできるだけ少なく使い，できるだけ多くの多様な有用物を生産し，廃棄物の排出をできるだけ出さない技術開発をデザインする必要がある。そのためには，海藻の生態的機能を十分に理解し，十分に活用した生産と廃棄物処理システムを構築することが必要で，自然エネルギーの最大限の利用と生産施設の単純化と総合的に計画されたカスケード方式を用いた有用物質の生産が基本となる。しかし，現在では自然環境や生態系の十分な考慮なしに膨大な廃棄物を自然環境下に押しやることや，経済発展のためと称して生態系や環境破壊を行うところから問題が生じているのである。海藻は，上述のようにその生態や環境保全（水質浄化，群落・藻場機能，漁業資源・環境保全）機能，有用物質生産（食品，コロイド，健医薬品，飼肥料，化粧品，含有金属）機能のほか，エネルギー資源に至る多様なカスケード利用が可能である。

このカスケード方式生産は，現在の資本主義的生産である石油精製過程や鉄鋼産業のスラグ処理でさえも，最大限の多種多様な有用物を製品化しているし，その結果として排出される廃棄物処理費用に関しては製品コストに加算する方法をとって，やっとその経済が成り立っている。

巷では，ある種の単細胞藻類が産生するディーゼルオイルに注目し，その大量培養によってオイル生産を行う例がある。このことは一見非常に有効で効率のよいバイオディーゼル燃料の資源生産方法で，環境にも良いように見える。しかし，この培養施設や管理，光供給技術などにかかるエネルギーと添加栄養塩類，さらに生産された微細藻類を集めてオイルを抽出するためのエネルギー等々はすべて人為的に投入しなければならず，オイル生産で得られるエネルギーを優に超えるものと考えられる。その外に膨大な面積の陸上培養施設を必要とする。これに関しては既に上述したが，食糧生産域をオイル生産へと変換するという現地球の各地域で見られる経済アンバランスを再現することに通じないだろうか。

10. まとめ

海藻からのバイオ燃料生産は，７，８年前からの構想である。当初メタン発酵や糖化発酵，部分燃焼などによる総合的な資源生産技術の確立を目指してきており，その過程で排出される残渣廃棄物なども有効に総合的なカスケードシステムを構築して，多様な有用物質を工業製品化することであった。また，海藻をバイオマス資源として大量安定供給するため，未利用の広大な排他的経済水域において，生態系を保全しながら多様な有用物質を生産するという総合生産技術の確立を目指した構想である。さらに，この構想は日本独自のものであることに加えて，技術開発の研究をデザインする新たな分野の一つとして「エネルギー・バイオロジー」が必要であることも提案された。その後，糖化発酵，部分燃焼技術はあまり進展はしていないが，共同研究者による海藻からの水素生産構想が進められている。いずれ水素生産を中心とした多様なエネルギー資源生産が可能となるものと考えられる。

国際海藻会議における講演以来，概ね海外からのまじめな反応が多かったが，残念なことに，依然として日本政府や文部科学省，その他各省庁は，この研究課題への関心は薄い。日本は地球環境の悪化を止め生態系保全や環境，資源配慮型の総合的な技術開発を確立することこそ，世界的な貢献策として検討されるよう希望する。

参考文献

(1) 能登谷正浩,月刊ケミカルエンジニアリング，53（2008-2），p.107

(2) 能登谷正浩．FOOD RESEARCH 633（2008-3），p.45

(3) 能登谷正浩．海藻のバイオ燃料用資源への利用．日本工業出版「配管工業」50（2008-6），p.25

(4) Notoya, M., Seaweeds and Their Role in Globally Changing Environment, (2009), Springer

(5) Notoya, M., Abstract Book of 9th International Phycological Congress, Tokyo, (2009)

(6) Notoya, M., Program and Abstract of 19th International Seaweed Symposium, Kobe, (2007), p. 58

(7) 田中正之，温暖化する地球，読売新聞社, (2007)

(8) Worm, B., E. B. Barbier, N. Beaumont, J. E. Duffy, Folke, C., B. S. Halpern, J. B. C. Jackson, H. K. Lotze, F. Micheli, S. R. Palumbi, E. Sala, K. A. Selkoe, J. J. Stachowicz, R. Watson, Science, 314（2006), p. 787.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

SMGT用A重油焚き低NOx燃焼器の開発

木村　武清[*1]　KIMURA Takeshi
堂浦　康司[*1]　DOURA Yasushi

キーワード：ガスタービン，低NOx燃焼器,エミッション，A重油，舶用，Gas Turbine, Dry low NOx Combustor, Emission, Heavy Fuel Oil A, Marine

1．はじめに

地球規模における大気汚染物質の排出量削減の要求はますます厳しくなってきている。海上における船舶からのNOx等の排気ガスによる大気汚染防止についても，2005年９月より規制が実施されており，2011年からは，上乗せ規制（現行規制値より15%～22%削減）も実施されようとしている。SMGT（Super Marine Gas Turbine）は，このような状況を先取りした「環境低負荷型舶用推進プラントの開発研究」というプロジェクトのもと，開発が進められた2,500kW級の舶用ガスタービンである。開発目標は，①熱効率が38～40%，②NOx排出量が１g/kWh以下，③燃料としてA重油が使用可能の３点であり，高速ディーゼルエンジンと同等の熱効率を有しながら，NOxは１/10という次世代船舶推進力源として期待を担ったものである。

燃焼器はA重油焚きかつ低NOxを実現する重要な要素であるために，本プロジェクトでは開発当初から燃焼器の要素研究が行われた。開発研究は，２つの大きな課題を定めて実施した。１つは，A重油焚きかつ再生式低NOx燃焼器を如何なるコンセプトのもとで開発を進めるか。もう１つは，A重油の燃料性状（芳香族分，10%残炭素分等）の差違が燃焼器性能（エミッション，壁温，スモーク等）に与える影響を把握することである。本報告ではSMGT用に開発されたA重油焚き低NOx燃焼器を紹介するとともに，燃焼試験及びエンジン実証試験結果を示す。また，A重油性状における燃焼器性能の影響についても述べる。

2．A重油焚き低NOx燃焼器

2.1　燃焼器仕様

SMGTは再生サイクル式ガスタービンであり，圧縮機を出た空気は再生熱交換器で排ガスからの熱を与えられた後，燃焼器に供給される（図１参照，熱交換器は省略）。SMGTの開発目標に基づいて求めたガスタービン燃焼器の基本仕様を表1に示す。定格負荷条件での燃焼器入口圧力=0.777MPa，入口温度=607℃，出口温度=1,200℃，圧力損失=４％である。SMGTは２軸式であり，部分負荷での燃焼器出口温度の低下が少ないため，低NOxの運転負荷範囲は一般的に1軸式より広く取れる。また，NOx排出量＜1g/kWhは約200ppm（O_2=０％）に換算され，燃料中にN分を含有するA重油ではかなり厳しい目標である。

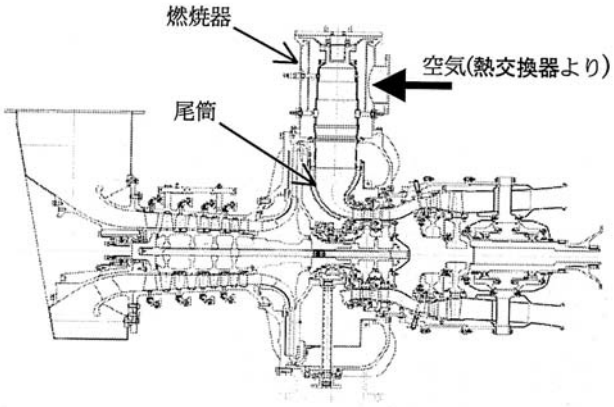


図１　エンジン断面

表１　燃焼器仕様

入口温度	607℃
入口圧力	0.777MPa
空気流量	8.6kg/s
燃焼効率	99%
NOx排出量	1g/kWh≒200ppm（O_2＝0%）
燃焼器圧力損失	4%
温度不均一率	0.20
燃料流量	0.156kg/s
出口温度	1200℃
燃料	A重油

2.2　低NOx燃焼器の設計

一般的にガスタービンで用いられる燃焼器形式は大きく分けて缶型とアニュラ型がある。缶型は重構造であるが，開発が容易で整備性が良いため産業用では広く用い

原稿受付　2009年７月10日
＊１　川崎重工業株式会社　ガスタービンビジネスセンター
〒673-8666　兵庫県明石市川崎町１－１

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

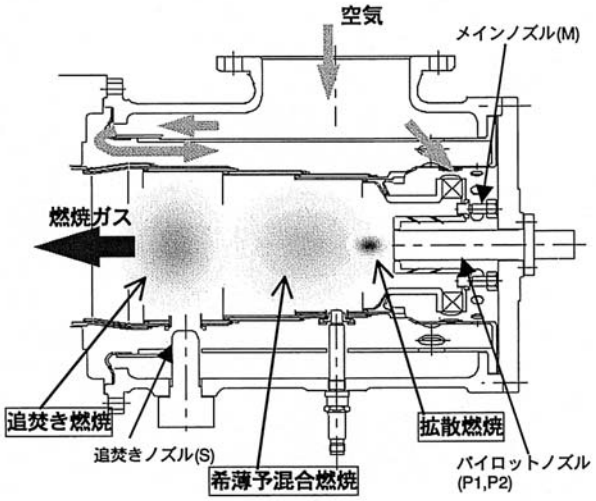


図２　低NOx燃焼器の断面

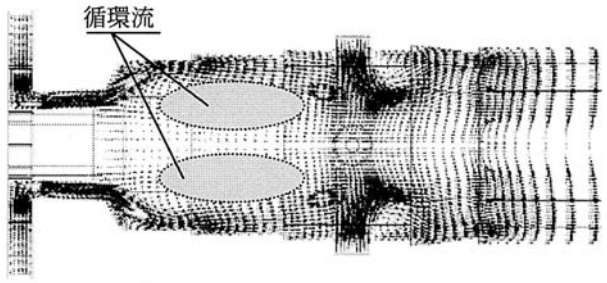


図３　ライナ内空気流れ

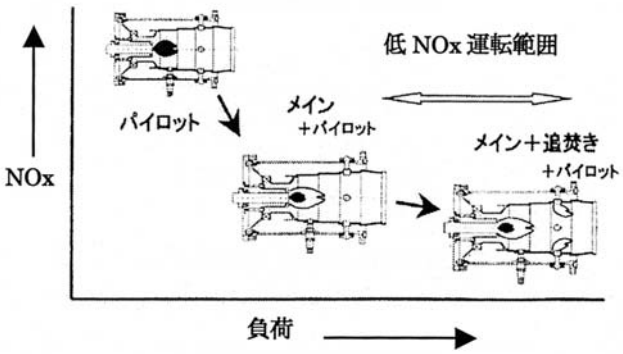


図４　負荷に対する運転制御

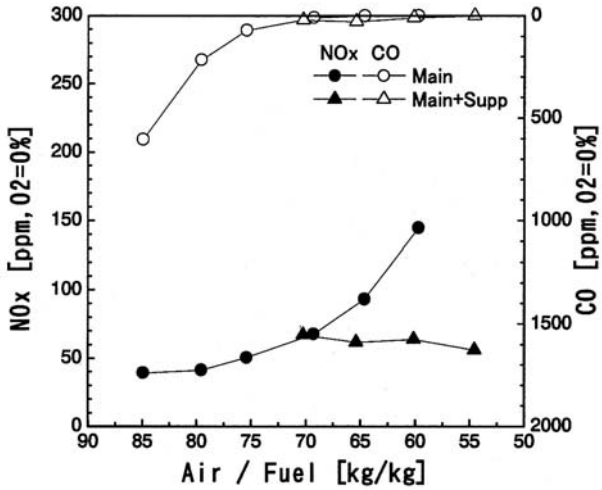


図５　燃焼器の燃焼特性

られている。そこで，SMGTでは缶型をベースに燃焼器の基本設計を実施し，燃焼器直径，長さ，配置，高温化対応等を考慮して４缶マルチキャン型＋尾筒方式を採用した。

低NOx燃焼器として希薄予混合燃焼方式を考え，低NOx燃焼の運転範囲拡大のために，追焚き燃焼を併用した。図２に低NOx燃焼器の断面図を示す。熱交換器で過熱された空気は燃焼器側面のケーシングから流入し，ケーシングとライナの間にある中間サポートにより整流された後，ライナ各部に流入する。燃料は３系統あり，着火・低負荷運転用のパイロットバーナ，希薄予混合燃焼用のメインバーナ及び追焚きバーナにそれぞれ供給される。ライナ冷却構造は冷却効率の良いインピンジフィルム方式を採用した。尾筒冷却はタービン入口温度の均一化のため，フィルム冷却を行わずに対流冷却を採用した。

燃焼器はケーシング，ライナ，燃料ノズルから構成され，燃焼用空気は主にスワーラと追焚孔（周上４個）からライナに流入する。スワーラの旋回角や開口面積，予混合管長さ，追焚孔の位置や大きさ等は，最終的には燃焼試験により決定されるが，低NOx燃焼器内の空気流れの概略を把握するために，ライナ内の空気流れ解析を行った。図３はそのCFD結果を示す。スワーラから流入した空気はライナ内に循環流を形成する。この循環流の大きさは追焚孔の位置により，その強さはスワーラ旋回強さにより決まる。スワーラの旋回強さは，エミッション，燃焼安定性，壁面温度，逆火信頼性等に影響を与えるため，その燃焼器で最適条件を選ぶ必要がある。

以上の概念検討の結果，本燃焼器は予蒸発・希薄予混合燃焼＋追焚き燃焼方式を採用した。メインバーナでは燃料の分散と微粒化を考慮して，８個の圧力噴霧ノズルから燃料を噴射している。メインノズルの噴霧角，噴射位置および旋回空気との干渉度合いが予蒸発・予混合管性能のキー技術になる。追焚きバーナは４箇所あり，圧力噴射弁を用いた。追焚きバーナ用の空気量と軸方向位置を最適化することにより，NOxの増加を抑えつつ全体燃料流量の３割程度噴射することができる。

２.３　運転制御

本低NOx燃焼器には，パイロットバーナ，メインバーナ，追焚きバーナの３種類がある。図４に負荷に対する運転制御を示す。着火から低負荷条件まではパイロット燃料による拡散燃焼運転を行う。希薄予混合燃焼が可能な空燃比に達すると，パイロット燃料からメイン燃料へ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表２　試験用燃料性状一覧

	A重油						一般軽油	灯油
	AR-1	AR-2	AR-3	CCR-2	CCR-3	JISK2205 1種1号		
芳香族分［vol%］	35.0	41.9	49.9	35.0	35.0	—	23.3	17.2
10%残炭分［mass%］	0.24	0.25	0.26	0.36	0.48	0.21～4	0.01	0
動粘度［cSt. @50℃］	2.75	2.42	2.08	2.78	2.79	～20	2.49	1.03
蒸留終点［℃］	391.0	384.5	367.5	391.0	392.0	—	366.0	256.5
窒素分［%］	0.029	0.032	0.036	0.029	0.030	—	0.004	<0.001
図中の記号	●	▲	■	◆	▼	—	▶	◀

切替えを行い，希薄予混合燃焼運転に移る。但し，パイロット燃料は，保炎及び全負荷遮断時のスムーズな切替え（希薄予混合→拡散）を行うために常時少量を噴射している。メイン燃料への切替えが終了後，追焚き燃料を噴射し，低NOx運転時は100%負荷まで全てのバーナから燃料を噴射している。

本燃焼器の空燃比に対するNOx，COの変化を図５に示す。希薄予混合燃焼においては，空燃比が小さくなるにつれてNOxが増加する。逆に空燃比が大きくなると，NOxは減少するがCO等の未燃分が増加し燃焼が不安定になる。メインバーナだけでは，低NOxかつ安定燃焼する運転範囲は狭いが，低NOxかつ低CO燃焼のメインバーナ条件から追焚き燃焼を付加することでNOx，COの増加は無く，安定燃焼を維持できる。

３．燃焼器単缶燃焼試験

３.１　試験装置

燃焼器開発は主に燃焼器単缶試験装置により行われた（図６）。供試燃焼器はプレナムチャンバーに取り付けられる。圧縮機から供給された空気はヒーター及び予燃焼器により607℃まで昇温され，プレナムチャンバーで整流された後燃焼器に供給される。燃料はパイロット，メイン，追焚きの３系統それぞれ独立に流量調整され燃焼器に供給される。燃焼ガスは燃焼器後流の計測ダクトにおいて，NOx，CO等の排ガス成分，出口温度分布，スモーク等を計測される。スモーク計測にはバッハラッハ・スモークテスターを用いた。また，熱電対による壁温計測も行った。

３.２　試験用燃料

標準的なA重油として，10%残炭分が0.24mass%，芳香族分が35vol%を用いた。燃焼器性能に影響を与える燃料性状として10%残炭分と芳香族分に着目し，これらが異なる燃料についても燃焼試験を実施した。表２に試験に用いた各燃料の性状を示す。標準燃料（AR-1）に対し，10%残炭分を0.36（CCR-2），0.48mass%（CCR-3），芳香族分を41.9（AR-2），49.9vol%（AR-3）と変化させた。

また，比較のために試験を行った灯油，軽油についても表に上げた。

３.３　燃焼試験結果

(1)　燃焼特性

燃焼器の基本設計により決められた初期形状に対してメインバーナの旋回強さ及び燃料噴射弁角度，追焚きバーナ位置及び大きさ，ライナ空気配分等を変えて燃焼試験を行い，低NOx燃焼器の最適化を図った。最終的

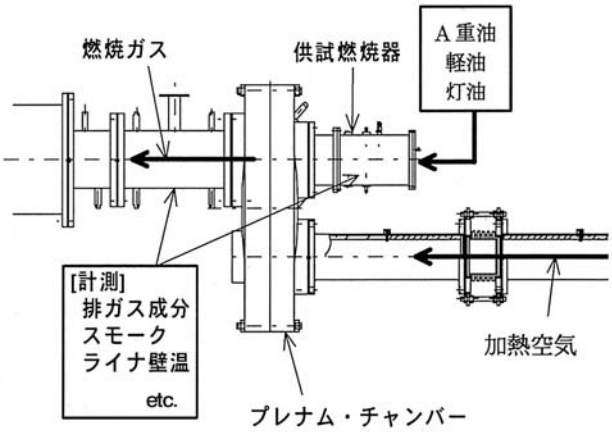


図６　燃焼試験装置概略

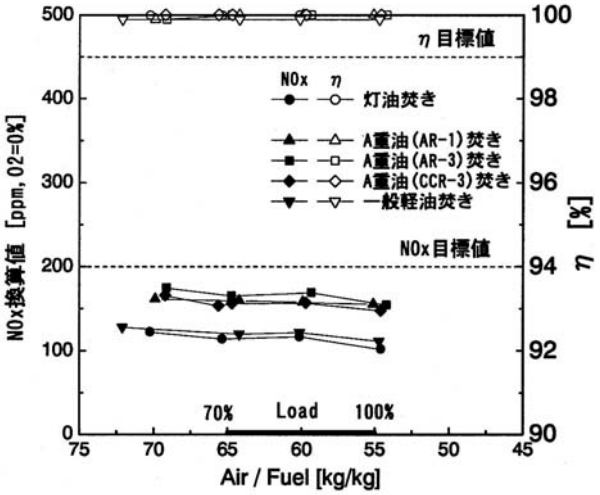


図７　各種燃料の燃焼試験結果

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

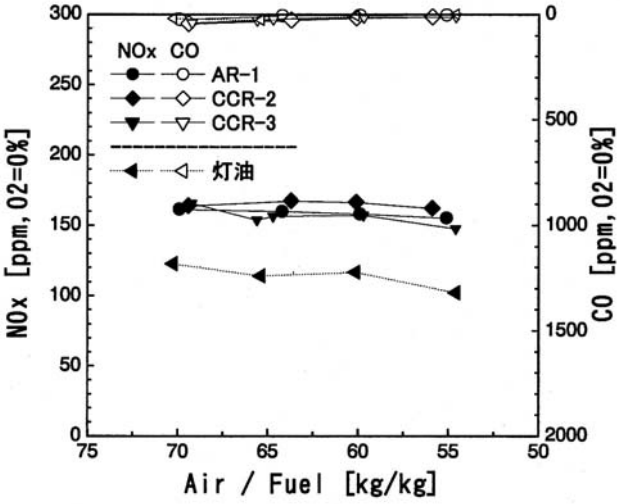


図８　燃料性状比較（10%炭素分）

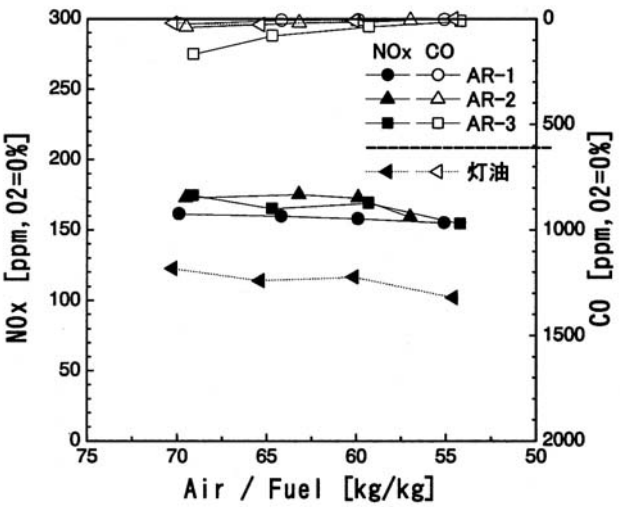


図９　燃料性状比較（芳香族分）

に調整された低NOx燃焼器の各種燃料による燃焼試験結果を図７に示す。横軸に空燃比（常用負荷範囲：70%～100%は空燃比＝65～55に相当），縦軸に実機条件に換算したNOx（ppm, O_2= 0 %）と燃焼効率η（COとTHCの未燃分から計算）を示す。NOx換算値は燃焼器入口圧力0.78MPa，入口温度607℃として，（NOx換算値）＝（0.78/P1）$^{1/2}$ exp［(607－T1）/250］×（NOx計 測値）を用いて行った。燃焼モード切替え（拡散→希薄予混合）は空燃比65までに完了しており，空燃比の変化は追焚き燃料によってなされたものである。

空燃比の変化を追焚き燃料の増減によって行っているが，追焚き燃料を増加してもNOxは増加せずに運転できることが，この燃焼器の特徴である。図中には各種A重油の他，灯軽油のデータも参考として示す。A重油と灯軽油との差違は，A重油中のN分によるFuel NOに相当している。一方，A重油性状によるNOxの差違はほとんどない。今回試験を行ったA重油に含まれるFuel N含有量は同じである。燃焼効率ηに関しては，入口空気温度が高いために，全領域でほぼη＝100%である。以上のリグ結果より，通常のFuel N分含有A重油であれば，NOx及び燃焼効率とも目標値をクリアできる見通しを得た。

⑵　燃料性状の違いによる燃焼特性

10%残炭分割合が異なるA重油（AR-1, CCR-2, CCR-3）についてNOx，COの排出特性を比較したものを図８に示す。標準10%残炭分：0.24mass%に対して1.5，２倍にしてもNOx及びCO排出量の変化はほとんど無く，燃料中の10%残炭分割合のNOx，COに与える影響は小さい。

芳香族割合が異なるA重油（AR-1, AR-2, AR-3）についてNOx，COの排出特性を比較したものを図９に示す。芳香族割合を35→50vol%まで変えると，高負荷側（低A/F）では，NOx，COとも差違はないが，低負荷側では，NOx，COとも性能が僅かであるが悪化する。

スモークについては，高負荷の低NOx予混合燃焼運転ではほとんど検出されなかった。しかし，パイロットノズルによる拡散燃焼運転時には，スモークが生じた。パイロットノズルによる拡散燃焼運転時におけるスモーク中の最大すす粒径について燃料中の10%残炭分割合及び芳香族割合による変化を図10, 11に示す。10%残炭分，芳香族ともに燃料中の割合が増加するにつれて，すす粒径が大きくなる傾向がみられる。燃焼器の下流にあるタービン翼の損傷（エロージョン）を考慮すると，すす粒径を10μm以下に抑える必要がある。実用化の場合，拡散燃焼での累積運転時間にもよるが，大きいカーボンを発生させる10%残炭分割合及び芳香族割合の高いA重油使用は慎重な検討を要す。

低NOx予混合燃焼運転におけるライナ上流部（２層目）と下流部（５層目）の壁温を図12に示す。図中のプロットは追焚き燃料によって空燃比を変化させたものである。ライナ上流部は予混合燃焼領域にあり，追焚き燃料の変化による壁温の上昇はほとんどない。ライナ下流

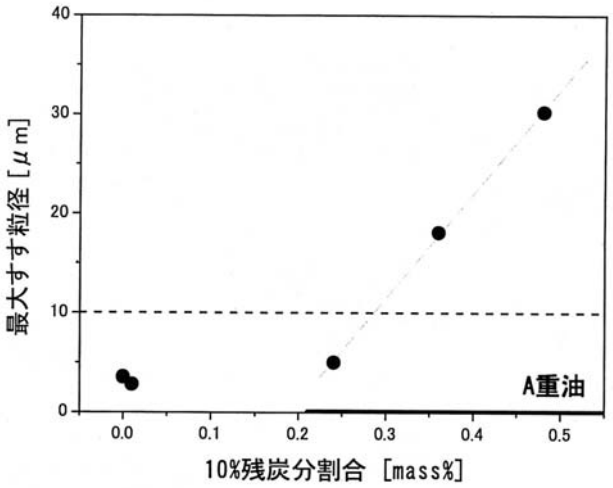


図10　最大すす粒径（10%炭素分）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

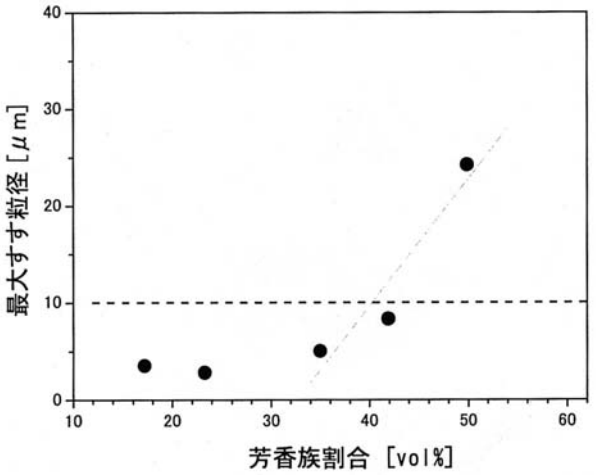


図11　最大すす粒径（芳香族分）

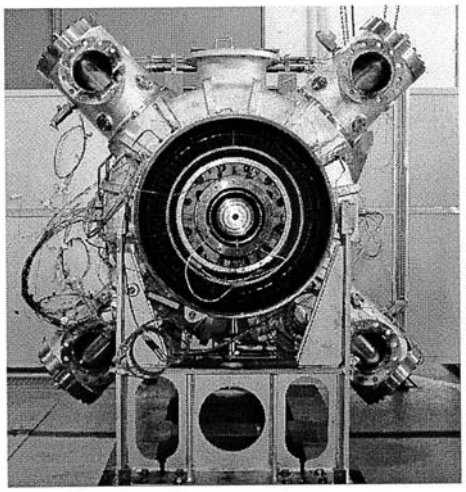


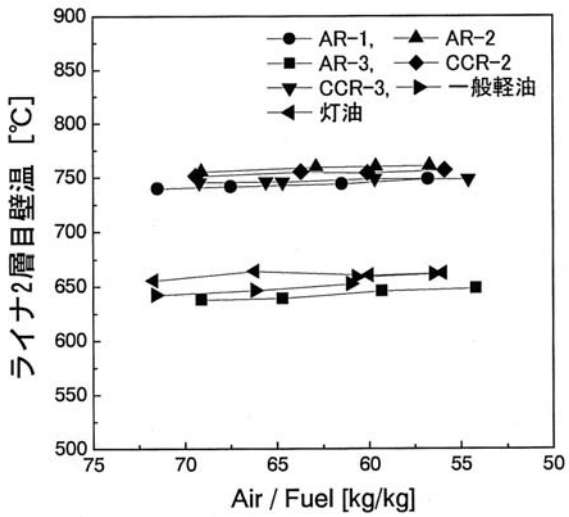
図13　搭載された燃焼器

部は追焚き燃焼領域にあり，追焚き燃料の増加につれて壁温が上昇する傾向がみられるが，追焚き燃焼が不輝炎であるために，その上昇割合は小さい。ライナ上流部の壁温は，約750℃と約650℃の２つのグループに別れている。約750℃グループの燃料（AR-３を除くA重油）では，予蒸発・予混合燃焼領域出口で輝炎が生じていた。輝炎の発生は，メイン燃料ノズルから噴射された燃料液滴が予混合部内壁に衝突し，蒸発せずに液滴のまま予混合燃焼領域出口へ流れ，燃焼するためであると思われる。この現象に大きく影響を与える燃料性状は，燃料の微粒化，蒸発に関係する粘性，蒸留終点等であると思われる。

４．エンジン実証試験

SMGT用燃焼器は４缶マルチキャン型であり，再生熱交換器で加熱された空気は４分割されて燃焼器に供給される。図13は，エンジンに搭載された燃焼器の様子を排気側から見たものである。燃料は，燃料制御装置において４つの燃料系統にそれぞれ分配された後，燃料マニホールドを経て各燃焼器に供給される。燃料系統は，メイン燃料M，追焚き燃料Sの他にパイロットノズルから噴射されるＰ１，Ｐ２があり，計４つである。実機試験ではパイロット燃料流量が多いために，パイロットバーナは小流量Ｐ１と大流量Ｐ２のデュープレックス方式になっている。Ｐ１は着火用であり，着火確認後Ｐ２による起動スケジュールにはいる。負荷に対する各系統の燃料スケジュールの概略を図14に示す。着火，起動，低負荷条件までは，パイロット燃料Ｐ１，Ｐ２のみで運転し，低NOx運転が可能となる負荷に到達するとＰ１，Ｐ２とメインMとの切替えを行う。Ｐ１は保炎のため少量残される。低NOx運転範囲での負荷変化は，主に追焚き燃料Sで対応する。

エンジン実証試験における低NOx運転では，負荷条件毎にNOx，CO等の排ガス成分を測定しながら各燃



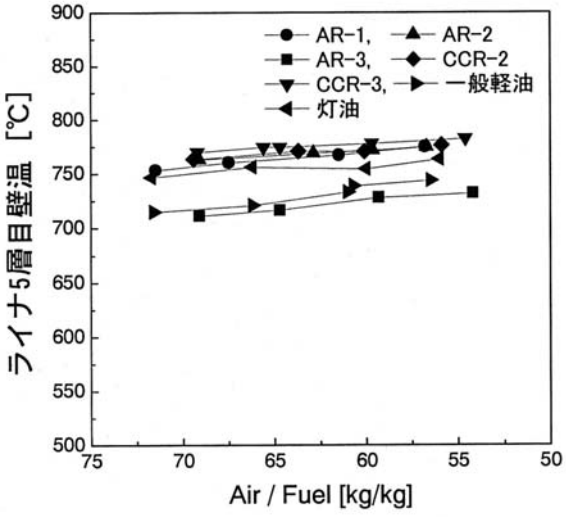


図12　ライナ壁温の変化

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

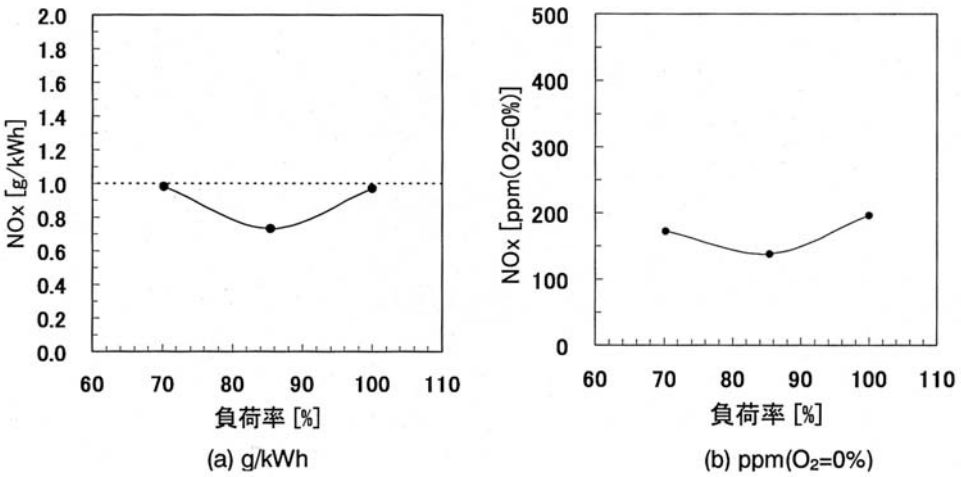


図15　NOx排出量

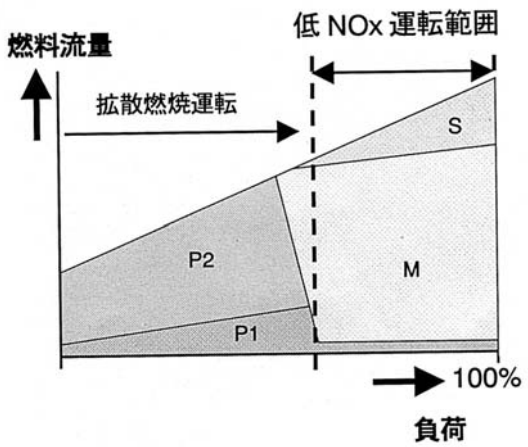


図14　燃料スケジュール概略

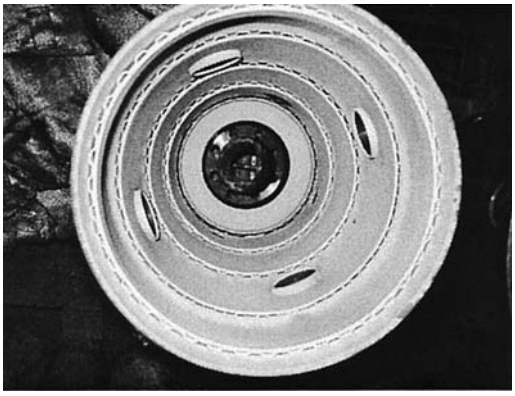


図16　運転後のライナ内面

料系統への配分を行った。A重油を用いた低NOx運転時のNOx排出量を図15に示す。負荷率70%から100%の間において，NOx目標値である1 g/kWh（200ppm（O_2= 0 %））以下で運転できることを確認した。試験中，予混合流路内及びライナ壁温の監視を行ったが，逆火や耐久性上問題となる温度になることはなかった。図16は実機試験後のライナ内面であるが，損傷やカーボンの付着等は見られなかった。この結果は，リグ試験結果と同等であり，開発計画が妥当であったことも証明できた。

5．まとめ

2,500kW級次世代舶用ガスタービンSMGT用A重油焚き低NOx燃焼器の開発状況について紹介した。

本燃焼器は予蒸発・希薄予混合燃焼と追焚き燃焼方式を組み合わせた低NOx燃焼器であり，A重油焚き小型ガスタービン（圧縮機による空気可変が取りにくい）に有望な燃焼方式であることを証明した。また，A重油の燃料性状（芳香族分，10%残炭素分等）を変えた燃焼試験を行い，希薄予混合燃焼方式を最適化することによって，燃焼器性能（エミッション，壁温，スモーク等）に及ぼす影響を極力抑えることができることが分かった。

最後に，本研究の開発は国土交通省，運輸施設整備事業団，日本財団のご指導・ご支援を得て実施したものである。ここに関係各位に深く感謝致します。

参考文献

(1)　杉本隆雄他，ガスタービン学会誌，Vol.29，No.2，p22
(2)　堂浦，木村，第16回ガスタービン秋期講演会講演論文集（2001.10），p195
(3)　堂浦，木村，第31回ガスタービン定期講演会講演論文集（2003.6），p107

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

マイクロガスタービンを用いたVOC処理システムの開発※

馬野　博光*1　UMANO Hiromitsu
新井　啓介*1　ARAI Keisuke

1．はじめに

トヨタ タービン アンド システム（以下，TTS）は1998年の会社設立以来，50kW級，300kW級のマイクロガスタービン（以下，MGT）を利用したコージェネレーションシステムの製造，販売を一貫して行ってきた。近年では，小型ガスタービンエンジンの特長を生かした多様な燃料への対応や他用途利用についても積極的に開発を進めている。今回，日本電技（株），藤森工業（株），TTS，トヨタ自動車（株）の4社が共同開発したMGT VOC処理システムの製品概要および導入事例について紹介する。

2．VOC排出規制の概要

VOC（揮発性有機化合物）は主要なもので約200種類ほどあり，トルエン，酢酸エチル，MEK等が良く知られており，このようなVOCは塗装や印刷，接着などの多様な業種で使用されている。

近年，SPM（浮遊粒子状物質）や光化学オキシダントの生成要因として，VOC排出に対する規制が強化される傾向にあり，2004年に改正された大気汚染防止法において2010年までに2000年度対比でVOC排出量マイナス30％の目標が定められ，排出基準値は表１に示すように各業種別に細かく炭素換算濃度（ppmC，※濃度［ppm］とVOC成分の分子式中に含まれる炭素数の積で表示）として規定されている。

表１　規制の対象となる施設と排出基準

VOC排出施設	規模要件	炭素換算濃度（ppmC ）
塗装施設 （吹付塗装に限る）	排風機の排風能力 100,000m³/h以上	自動車製造　既設700ppmC 新設400ppmC その他　700ppmC
塗装の用に供する乾燥施設 （吹付塗装，電着塗装を除く）	送風機の送風能力 10,000m³/h以上	木材・木製品製造　1,000ppmC その他　600ppmC
接着の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力 15,000m³/h以上	1,400ppmC
印刷回路用銅張積層板，合成樹脂，ラミネート容器包装，粘着テープにおける接着の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力 5,000m³/h以上	1,400ppmC
グラビア印刷の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力 27,000m³/h以上	700ppmC
オフセット輪転印刷の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力 7,000m³/h以上	400ppmC
揮発性有機化合物を溶剤として使用する化学製品製造の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力 3,000m³/h以上	600ppmC
工業製品の洗浄施設	洗浄剤が空気に接する面の面積が５m²以上	400ppmC
揮発性有機化合物の貯蔵タンク （ガソリン，原油，ナフサ，その他の温度37.8℃において蒸気圧20kPaを超えるもの）	新設1,000kL以上 既設2,000kL以上	60,000ppmC

※2009年１月に開催された第37回ガスタービンセミナーにて発表
原稿受付　2009年７月30日
＊1　㈱トヨタタービンアンドシステム
〒471-8573　愛知県豊田市元町１番地トヨタ自動車㈱元町工場内

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

3．既存のVOC処理技術について

従来のVOCの処理技術としては活性炭吸着などによる回収法と主に燃焼処理による分解法とがあるが，現状市販されている処理装置の多くは燃焼処理（直接燃焼方式，触媒燃焼方式，蓄熱燃焼方式）によるものである。これらの処理装置は，本来脱臭を目的に開発されてきたこともあり，優れたVOC処理能力を持つものの，基本的にはVOCの燃焼処理のみを目的としているために，運用コスト，メンテナンスコストがかかる一方で，VOC自身の持つ燃焼エネルギーはほとんど回収されていないことが課題として挙げられる。これに対してMGTを用いたVOC処理システムでは，燃焼エネルギーを電気と蒸気として回収することにより運用メリットが得られる利点を有する。

4．MGT VOC処理システムの概要

図２にMGT VOC処理システムの概要を，表２に諸元を示すが，基本的な機器構成はコージェネレーションシステムとして累計100台以上の実績のあるTTS製300kW級MGTを原動機とする発電パッケージと排熱回収蒸気ボイラーの組み合わせとなっている。

本システムでは，MGTの燃焼用空気として最大21,000ppmC（トルエンの場合）のVOCを吸気することが可能であり，吸入したVOCはMGT内部で燃料とともに燃焼し，得られた動力により発電機を駆動し，285kWの電力を発生する。この間，MGT内部の燃焼過程において，燃焼ガス温度は燃焼器出口近傍で900℃以上に達するため，吸入したVOCの90%以上はMGT内部で酸化処理され，図３に示すようにVOCの燃焼エネル

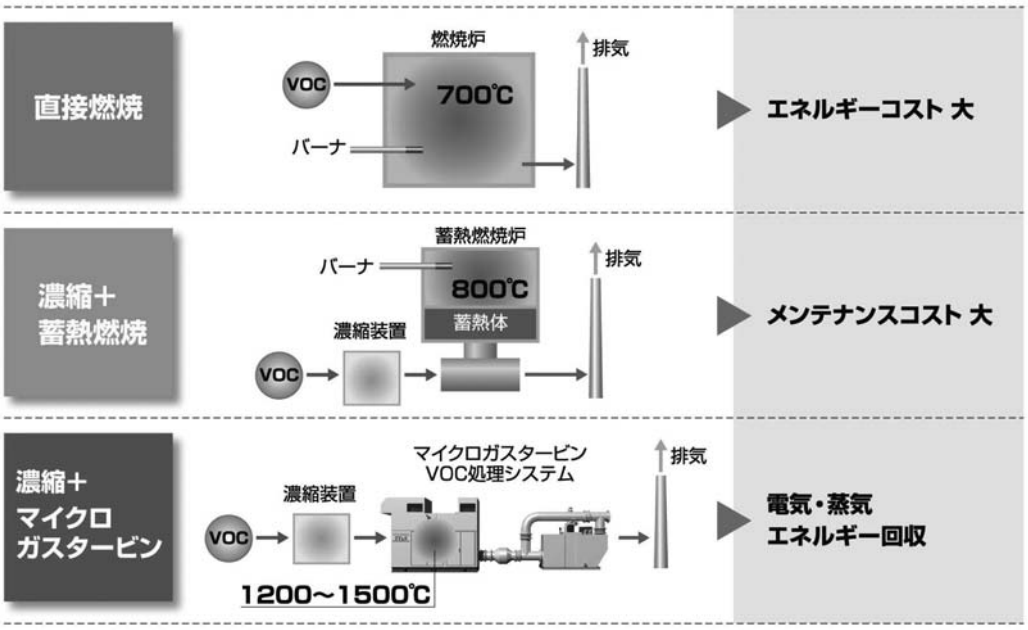


図１　主なVOC処理技術

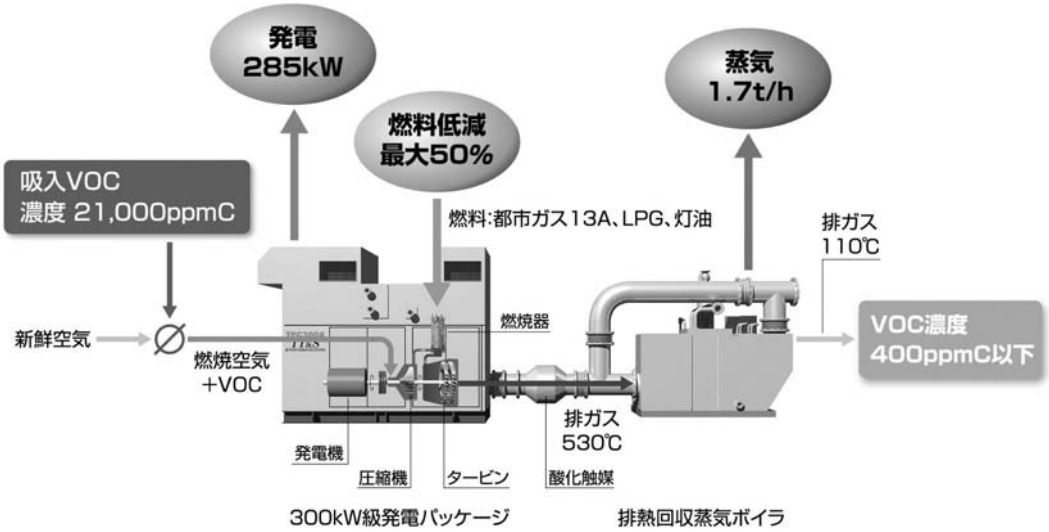


図２　MGT VOC処理システム構成

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表２　MGT VOC処理システム諸元

発電機出力		285kW
発電効率	VOCなし	17.0%
	VOC 21,000ppmC吸気時	34.4%
原動機	形式	単純開放サイクル１軸式ガスタービン
	回転数	40,000min-1
	空気流量	2.7kg/s （7,400Nm^3/h）
	使用燃料	都市ガス，ＬＰＧ，灯油
	NOx排出濃度（16%O_2換算）	19ppm　※NOx低減用蒸気噴射あり
酸化触媒	形式	メタル担体酸化触媒
排熱回収	形式	貫流ボイラ
蒸気ボイラ	蒸気発生量	1,700kg/h
	蒸気圧力	780kPa
VOC処理性能		吸気21,000ppmC→400ppmC以下

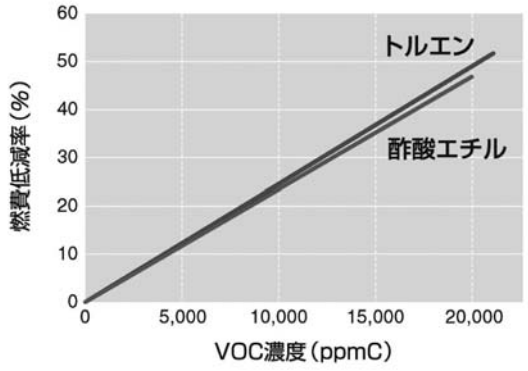


図３　VOC 吸入による燃費低減効果

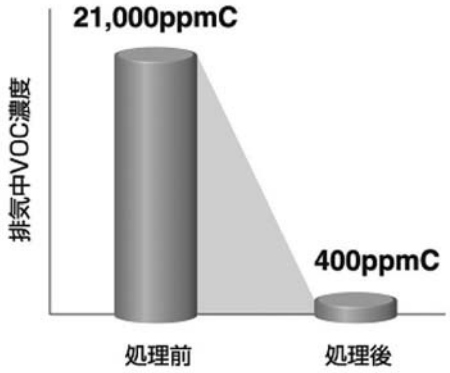


図４　MGT＋酸化触媒によるVOC処理率

ギーの貢献により最大で50%近くの燃費低減効果を得ることが出来る。ただし，冷却用や希釈用として燃焼器内部に流入する空気に含まれる一部のVOCについては，燃焼器内の高温場での滞留時間が不足することにより，未燃のままMGT下流に排出されることになる。

そこで，当社のシステムでは発電パッケージ後段に設置した酸化触媒により，MGTで処理し切れない未燃分の浄化を行っている。この酸化触媒は低負荷運転時等のMGT単体でのVOC処理性能が低下するような運転条件においても有効であり，MGT＋酸化触媒のトータルのVOC処理率は常に98%以上（＝排気VOC濃度400ppmC以下）を達成している（図４）。最終的に酸化触媒を通過した高温の排気ガスは排熱回収蒸気ボイラーにより1.7t/hの蒸気を生成する。

５．MGT VOC処理システムの開発状況

本システムの開発にあたり，当社ではまずMGT単体でのVOC処理能力を把握するため，エンジン吸気中にVOC（トルエン，酢酸エチル）を液噴射し，評価を行った。その結果，MGT内部でVOCが90%以上酸化処理可能であることが確認された。

次いで，図５に示すようなMGT発電パッケージと酸化触媒を組み合わせた試験用ユニットを製作し，実際にVOC排出設備に持ち込み検証試験を実施した（図６）。

本ユニットの諸元を表３に示すが，発電パッケージ部は当社の50kW級MGTシステムをほぼそのまま流用しており，処理風量，触媒容量を含めた全体のスペックは実際の製品システムと比較して約１/６の大きさとなっている。本ユニットでは排熱回収装置は設置せず酸化触媒出口の排気ガスはそのまま大気中に排出している。

試験結果を表４に示す。このように実際のVOC排出設備においても吸入したVOCが98％以上処理され，相応の燃費低減効果が得られることを確認した。

６．MGT VOC処理システムの製品稼動状況

MGT VOC処理システム初号機（図７）は，本システムの共同開発提案者である藤森工業㈱横浜事業所に設置されており，2007年の５月に運用を開始して以来，現在（2008年11月）までに10,000時間を越える運転実績となっている。

本システムでは図８に示すドライラミネータ（※機能

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

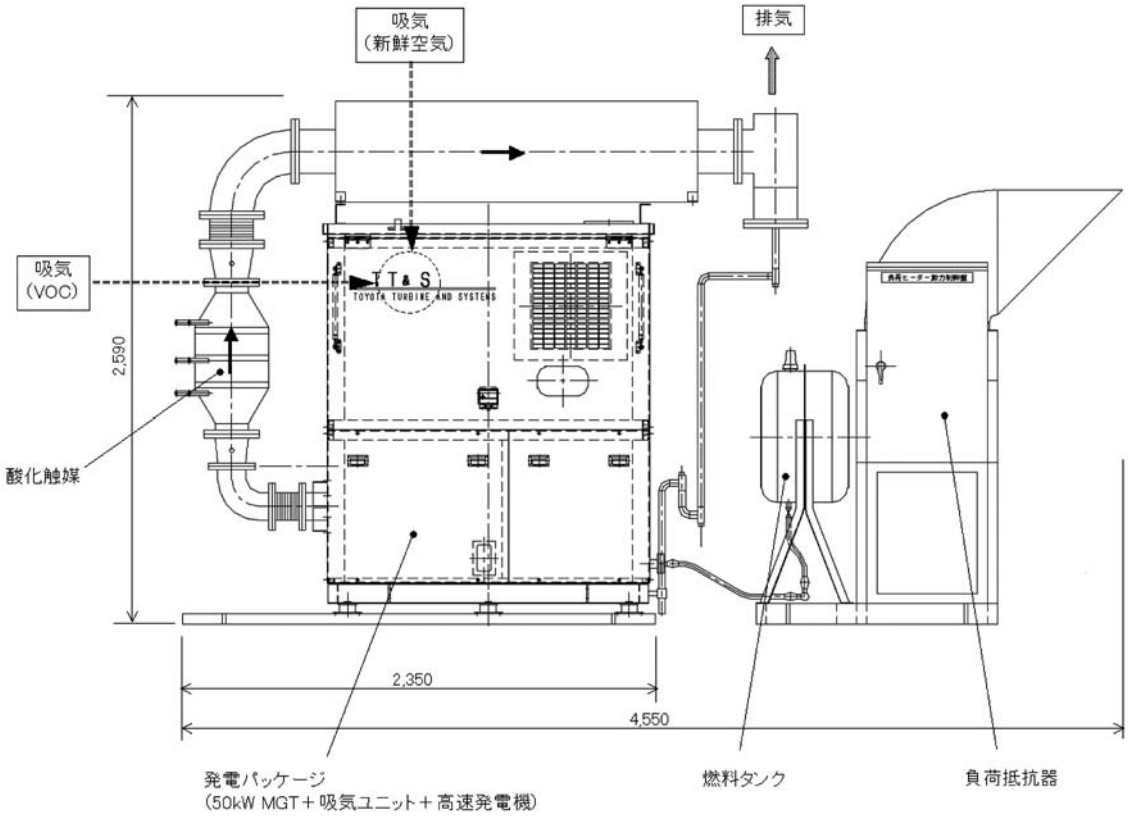


図５　50kW MGT＋触媒VOC処理試験ユニット

図６　実VOC 処理試験状況

表３　試験ユニット諸元

発電機出力		35kW
原動機	形式	単純開放サイクル
		１軸式ガスタービン
	回転数	80,000min-1
	空気流量	0.5kg/s
		(1,390Nm^3/h)
	使用燃料	灯油
酸化触媒	形式	メタル担体酸化触媒
排熱回収蒸気ボイラ		なし

表４　実VOC 処理試験結果

物件名		A社	B社	C社	D社	E社	
設備名称		ドライラミネーター	コーター	コーター	印刷機	カラーグラビア印刷機	ドライラミネーター
主要VOC成分		酢酸エチル	トルエン，MEK	トルエン，MEK	トルエン，酢酸エチル，MEK	トルエン，酢酸エチル，MEK	酢酸エチル
吸気VOC濃度（実測値）	ppmC	7420	3765	4300	3658	3360	3960
排気VOC濃度（実測値）	ppmC	138	25	69	47	35	35
VOC処理率（＝1－排気VOC濃度／吸気VOC濃度）	%	98.1%	99.3%	98.4%	98.7%	99.0%	99.1%
燃費低減効果（＝1-VOC吸気時燃費/VOC吸気なし燃費）※吸気温度変化の影響含む	%	Δ18.4%	Δ17.0%	Δ6.6%	Δ8.7%	Δ10.6%	Δ10.4%

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

図７　MGT VOC処理システム製品概観

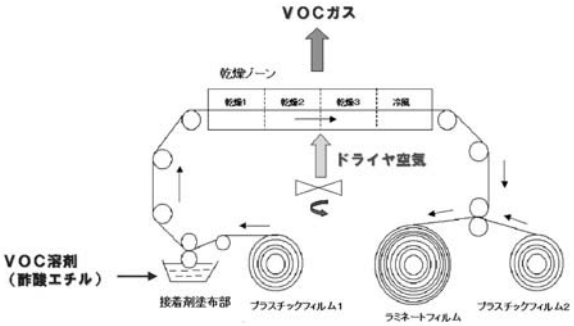


図８　VOC排出源（ドライラミネータ）

性を持ったプラスチックフィルム同士を貼り合わせ，より多機能性を持ったラミネートフィルムを製造する装置。製造されたラミネートフィルムはレトルト食品や医薬品の包装等に用いられる）の乾燥工程において排出される酢酸エチルを主成分とする比較的高濃度のVOCガスをMGT吸気中に導入し，処理を行っている。

本システムの性能データを示す。システム入／出口でのVOC濃度を同時に実測した結果に基づくVOC処理効率は図９に示すように常に98%以上を達成している。またMGTの燃費については図10に示すように，吸入するVOC濃度が高ければ高いほど大きな燃費低減効果が得られる結果となっている。その結果，図11の総合熱効率（＝発電効率＋排熱回収効率）はVOC吸気を行わない通常のコージェネレーションとしての運用では85%程度であるのに対して，吸気VOC濃度の高い条件では見かけの燃料消費量が減少するために100%を大きく越える結果が得られている。

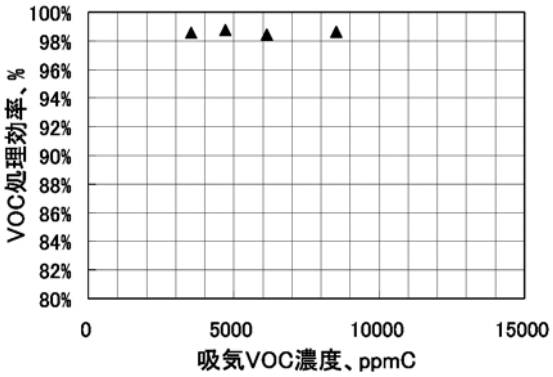


図９　VOC処理効率

なお，運用当初はVOC吸気に伴う各要素の寿命短縮が懸念されていたが，これまでにエンジン部品（コンプレッサ，燃焼器，タービン）の損傷，オイルの劣化，エンジン吸気フィルタの汚損等もなく，システム全体としても安定した運用を継続している（図12）。

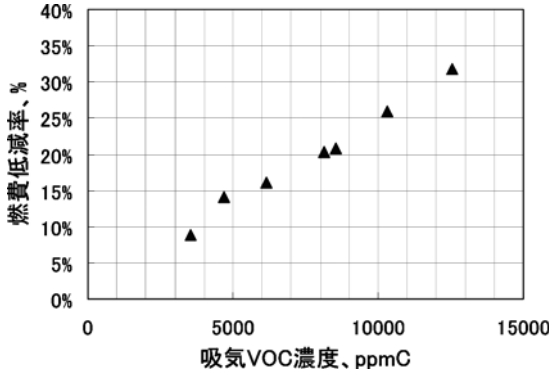


図10　燃費低減率

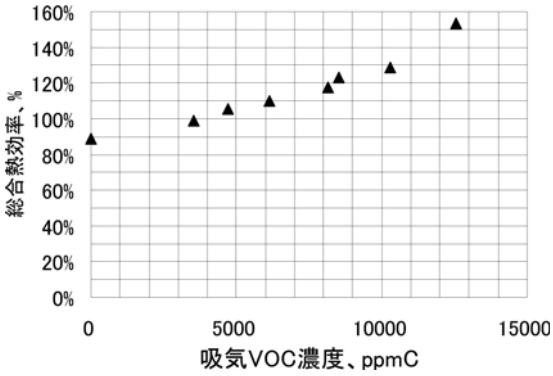


図11　総合熱効率

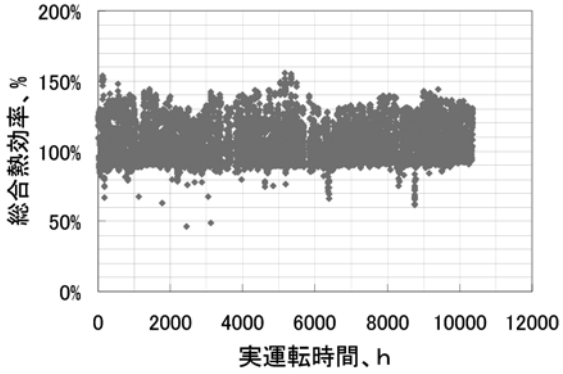


図12　運用状況（総合熱効率推移）

７．今後の展開

現状のMGT VOC処理システムでは気化したVOCのみを処理対象としているが，実際のVOC排出設備では廃液として回収されるVOCの量も無視できないレベルであり，今後これらの廃溶剤をエンジン（燃焼器）内に

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

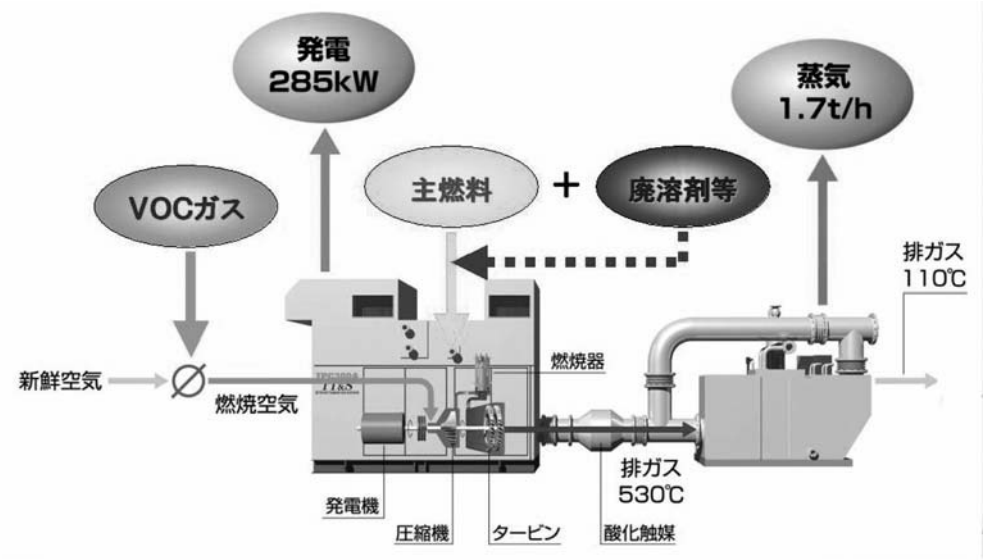


図13　VOCガス+液同時処理システム

直接噴射することにより，主燃料のさらなる低減を図るVOCガス+液同時処理システム（図13）についても開発を進めていく予定である。

また，蒸気発生による排熱回収以外にもVOC濃縮装置の脱着熱源にシステム排熱を利用する等のシステム全体のエネルギーを有効に活用し，ユーザーの経済負荷軽減につながる提案をしていきたいと考えている。

8．おわりに

MGT VOC処理システムの特長を以下にまとめる。

① コージェネレーションで実績のある機器の組合わせによる高い信頼性。

② MGT＋触媒の組み合わせにより，既存のVOC処理装置と同等の高いVOC処理性能を達成。

③ VOCの燃焼エネルギー回収による既存のコージェネレーションを上回る省エネルギー効果を実現。

参考文献

1）新井啓介，“マイクロガスタービンVOC処理システム”，クリーンエネルギー 7月号，2007年

2）新井，真殿，松井，斉藤，“マイクロガスタービンによるドライラミネータ排気VOCの処理”，コージェネレーションシンポジウム2007（第23回），2007年

3）橋本吉充，“マイクロガスタービンVOC処理システム”，コンバーテック5月号，2008年

4）新井啓介，“マイクロガスタービンVOC処理システムの導入事例”，プラントエンジニア5月号，2008年

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

論説◆解説

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

CO_2回収型火力発電の最新動向と高効率システムの開発

犬丸　淳*1
INUMARU Jun

1．はじめに

地球環境問題への対応から，石炭火力発電におけるCO_2の排出抑制が極めて重要な課題となっている。この課題に対して，電気事業はUSCやIGCCをはじめとする高効率化技術の開発，バイオマス燃料の導入など様々な対策を進めている。一方，近年欧米を中心に，中長期的な温暖化防止対策オプションの一つとして炭酸ガスの分離回収・貯留（CCS；CO_2 Capture and Storage）の導入に向けた動きが活発化している。2005年の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）で，CCSに関する特別報告書[1]が採択されて以来，CCSは有力な温暖化対策のひとつとして注目され，欧米を中心に多くの導入計画が発表されている。現在検討されているCO_2回収型発電システムは，燃焼後回収システム（Post Combustion），酸素燃焼システム（Oxy-fuel Combustion），燃焼前回収システム（Pre Combustion）の３種類に大別される。しかしながら，いずれのシステムでも，発電効率の大幅な低下やコスト上昇が大きな課題となっており，それらを解決する革新的な発電システムの開発が望まれている。

本報では，CCSに関わる最近の動向，ならびに現在考えられているCO_2回収型火力発電の概要と技術開発動向を述べるとともに，新たな将来オプションとして電力中央研究所が提案した「CO_2回収型高効率IGCCシステム」について紹介する。

2．CCSに関わる最近の動向

海外で，CO_2貯留を商業的に行っているサイトは３箇所のみ（Sleipner, Weyburn, In Salah）である。発電とCCSを組み合わせたプロジェクトは，現時点ではまだ実施に至っていない。

EUでは，2008年12月に欧州議会がEU指令案を承認した。この中で，2015年以降に300MW以上の火力発電所にCCS設置を義務付けることは回避されたが，現在各国でCCSに関する法律の検討が進められている。現在，多くのCCS 実証プロジェクトがEUで計画されているが，CCS建設を最終決定したものはない。また，英国では，300MW以上の燃焼後回収方式に補助を行うことを決定しており，2009年末までにプロジェクトを選定する予定である。これは，中国・インドの市場を視野に早期に展開が可能な燃焼後回収を選択したものと見られる。米国では，2008年１月にプロジェクト予算の増加などの理由からFutureGen計画が大幅に変更されたが，2009年７月に再び計画の推進が発表された。イリノイ州MattoonでのCO_2回収型発電プラントの建設が予定されている。

一方，我が国でもCCSに関わる情勢が大きく変化している。2008年３月に，Cool Earth－エネルギー革新技術計画（経産省）が策定され，その中でCCSは重点的に取り組むべき「21の革新技術」のひとつとして選定された。また，2008年５月に，日本CCS調査株式会社が設立された。現在，電力11社を含む29社により運営されており，当面，資源エネルギー庁 石炭課/NEDO「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト」，および経済産業省 環境政策課「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」に関する受託研究を推進することになっている。前者のプロジェクトでは，具体的な地点を対象としたCO_2回収型発電に関するFSが実施される予定である。さらに，2008年７月には「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定された。この中でCCSに関しては，2009年度以降早期に大規模実証に着手し，2020年までに実用化を目指し，現状4200円/t-CO_2の分離・回収コストを2015年に2000円台/t-CO_2，2020年代に1000円台/t-CO_2とするための技術開発を進めると位置づけられている。

3．CO_2回収型火力発電の概要と開発動向[2]

(1)　燃焼後回収システム

本システムは，微粉炭火力発電などの排煙処理装置の後流にCO_2回収装置を設置し，排ガスからの分離・回収を行うものである（図１(1)）。CO_2回収技術としては，吸収法，吸着法，膜分離法などがあるが，現時点では化学吸収法が実用化されている。化学吸収法の最大の課題は，吸収液からCO_2を放出させるための熱エネルギー消費量が大きいため，プラント熱効率が低下することである。燃焼後回収システムによる実証プロジェクトは，英国，ノルウェー，米国などで計画されている。

(2)　酸素燃焼システム

図１(2)に示すように，本システムは空気のかわりに排ガスをリサイクルしたCO_2で酸素濃度を調整したガスをボイラに供給して微粉炭を燃焼するシステムである。空気中の窒素が混入しないので燃焼排ガスはCO_2が主成

※2009年１月に開催された第37回ガスタービンセミナーにて発表
原稿受付　2009年７月29日
＊１　㈶電力中央研究所　エネルギー技術研究所
〒240-0196　神奈川県横須賀市長坂２－６－１

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

分となり，これを直接圧縮してを液化することでCO_2を回収することができる。このため，燃焼後回収システムと比べ，CO_2回収装置が不要となるメリットがある。本技術による主な実証プロジェクトを表１に示す。このうち，ドイツVattenfall社によるプロジェクトは現在稼働中である。本技術の開発課題としては，スケールアップ技術，大型ボイラでの収熱特性の検証，酸素製造動力の低減などが挙げられている。

⑶　燃焼前回収システム

本システムは，石炭ガス化複合発電（IGCC）をベースとし，ガスタービンで燃焼する前にCO_2を分離・回収するものである。石炭ガス化炉で発生した石炭ガスを改質器で水性シフト反応（$CO+H_2O \rightarrow H_2+CO_2$）により，$CO_2$と水素に改質し，$CO_2$を分離・回収する（図１⑶）。

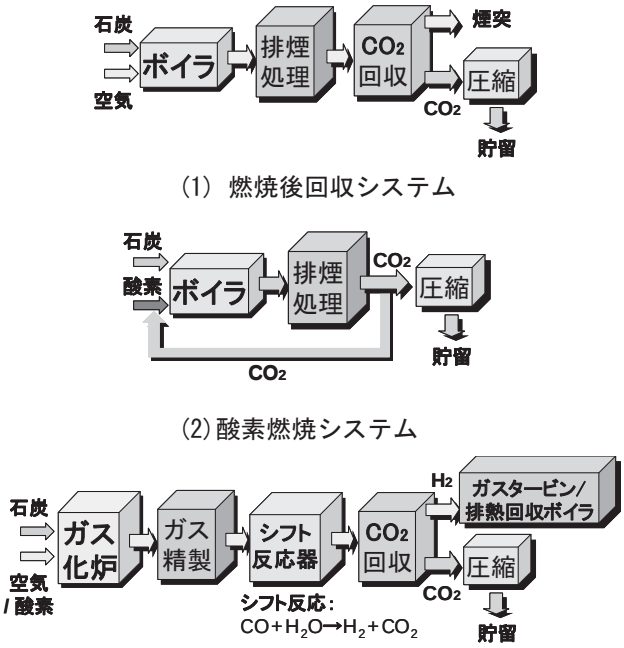


図１　各種CO_2回収型発電システムの構成

CO_2回収後の水素主体のガスはガスタービンに送られ，発電に利用される。CO_2の分離・回収には，吸収法，吸着法および膜分離法のいずれの方法も適用できる。現在，表２に示すように様々なIGCC＋CCSの実証・商用プロジェクトが計画されている。本技術においては，熱効率の低下，CO_2分離・回収装置のスケールアップ，改質器の性能向上，水素ガスタービンの開発などが課題と考えられる。

⑷　CO_2回収型火力発電の発電効率とコスト

1000MWの微粉炭火力発電に燃焼後回収システム（化学吸収）を適用し，90%のCO_2を回収したとすると，年間500万トン程度のCO_2を削減することができる（回収前送電端効率41.8%，稼働率80%の場合）。しかしながら，CO_2回収することにより所要動力が増え，発電効率が低下するとともに，CO_2回収設備などの設備費の増大により発電コストは大幅に増加する。CO_2回収により送電端熱効率は約２～３割低下し，発電コストは約1.5倍になるとの報告もある[1]。さらに，CO_2の輸送・貯留も含めた場合，発電コストは回収なしに比べて２倍程度になるものと想定されている。

表１　主な酸素燃焼発電プロジェクト

プロジェクト	開発国	出力	運転開始年(予定)
Callide	日・豪	30MW	2010
Vattenfall 社	ドイツ	30MW th	2008(実績)
CCS2 (ENEL 社)	イタリア	50MW th	2012

表２　主なCO_2回収型IGCCプロジェクト

プロジェクト	開発国	出力	運転開始年(予定)
FutureGen	米国	300MW 以上	2015
RWE 社	ドイツ	450MW	2014
Magnum (NUON 社)	オランダ	600MW (＋天然ガス=1200MW)	2013
ZeroGen	豪州	530MW	2015
GreenGen	中国	400MW	2015

４．CO_2回収型高効率IGCCシステムの概要

⑴　システムの概要

以上のように，既存の技術ではいずれのシステムでも，発電効率の大幅な低下やコスト上昇が大きな課題となるため，これらの課題を解決する新たな発電システムの開発が望まれる。（財）電力中央研究所では，CO_2を回収しながら高い効率を維持し，プラントの簡素化などによるコスト低減も期待できる，新しいCO_2回収型高効率IGCCシステムを提案している[2], [3], [4]。本システムの概念図を図２に示す。本システムは，回収したCO_2を効果的に利用する新たな酸素－CO_2吹き石炭ガス化炉と，リサイクルした排ガスに酸素を混合して燃焼させるクローズドガスタービンを組み合わせたもので，酸素燃焼と燃焼前回収を融合したシステムといえる。

ガス化炉では，従来窒素を用いていた微粉炭搬送等にリサイクルしたCO_2を用いている。脱塵，乾式脱硫を経た生成ガスは，ガスタービン燃焼器に供給され，リサイ

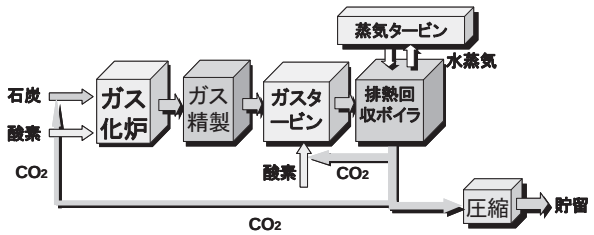


図２　CO_2回収型高効率IGCC発電システムの概念

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

クル排ガスと酸素の混合ガスにより燃焼する。ガスタービン排ガスは主成分がCO_2および水蒸気となり，排熱回収ボイラで蒸気系に熱回収された後，水洗塔で冷却されると同時にハロゲンなどの除去が行われる。水分が除かれた高CO_2濃度排ガスは，ガス化炉に必要なガス量を抽気後に圧縮・回収工程へと導かれる。また，排熱回収ボイラおよび石炭ガス化設備で熱回収した蒸気で蒸気タービンを駆動する。

図３にシステム構成を示す。本システムでは，所要エネルギーの大きいCO_2分離回収装置が不要になることに加え，以下の効果により大幅な熱効率向上が期待できる。

・酸素-CO_2で石炭をガス化することにより，従来の酸素-N_2吹きガス化に比べて，ガス化性能が向上する（後述）。
・ガスタービン燃焼器に入るまでのガス精製設備が金属フィルタと乾式脱硫のみで，ガス精製設備が簡素化できるとともに熱交換に伴う有効エネルギーのロスが小さい（図３①）。
・排熱回収ボイラで十分に熱回収した後の排ガスを水洗塔にて脱ハロゲンするため，ここでも有効エネルギーのロスが小さい（図３②）。
・ガスタービンの作動ガス中のCO_2分圧が高く，比熱比が小さいことから，タービン側，圧縮機側ともに出入口温度差が小さく，再生熱交換器を設置できる（図３③）。

⑵　ガス化炉性能の検討結果

酸素-CO_2ガス化，および比較のため酸素-窒素ガス化，空気吹きガス化について，１次元石炭ガス化炉解析プログラムによるガス化性能の試算を行った。本プログラムは軸方向１次元の反応計算を行うプログラムで，石炭のガス化反応には熱分解，チャーガス化反応，および気相反応を考慮している。チャーガス化反応には，当研究所の超高温・加圧型燃料反応実験設備（PDTF）の実験データから構築したチャーガス化反応速度式を採用した。各計算格子のガス性状（温度，濃度等）は，揮発ガス，ガス化ガス，およびガス化剤の混合ガスに対して平衡計算を行うことで決定する。生成チャー量は，ある初期値を与え，生成チャー量と投入チャー量がバランスするまで繰り返し計算を行った。表３に示すように，酸素-CO_2で石炭をガス化すると，CO_2のガス化促進効果（$C+CO_2 \rightarrow 2CO$）によって，従来の空気吹きおよび酸素-N_2吹きガス化に比べて，炉内炭素転換率および冷ガス効率が大幅に向上することが推算された。生成チャー量およびチャー中炭素を大幅に低減できれば，チャーリサイクル系がコンパクト化でき，設備コストを低減できる可能性がある。

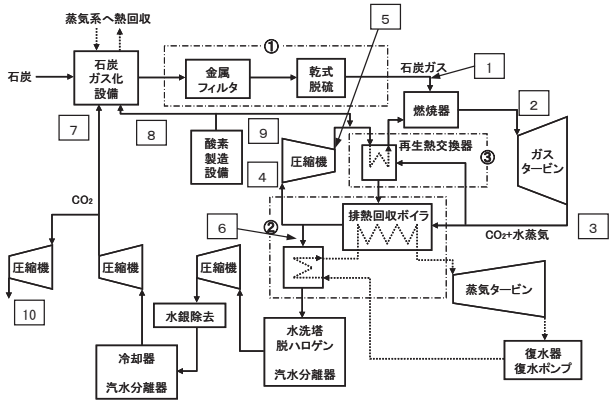


図３　CO_2回収型高効率IGCCシステムの構成

表３　石炭ガス化性能の比較

ガス化方式			酸素-CO_2	酸素-N_2	空気
炉内炭素転換率		%	100	69.9	69.5
生成チャー量		t/h	13.9	51.8	58.1
チャー中 C		wt%	＜0.1	72.9	66.3
チャー中 Ash		wt%	100	27.1	33.7
生成ガス流量		t/h	274.6	274.6	536.3
生成ガス発熱量		MJ/m^3N	11.1	10.3	5.7
生成ガス組成	H_2	vol%	21.3	24.4	12.9
	CO	vol%	66.5	56.9	31.8
	CO_2	vol%	5.4	＜0.1	2.0
	H_2O	vol%	5.3	＜0.1	2.2
	N_2	vol%	1.5	18.7	51.1
冷ガス効率		%	80.8	78.8	76.5

※いずれのケースでも生成ガス中 CH4＜0.1%

⑶　プラント熱効率解析結果

当所で開発した「発電システム熱効率解析汎用プログラム」を用いて，実用規模プラントの熱効率解析を行った。解析に当たっては，プラント出力400～450MWを想定し，石炭入熱992MW（石炭投入量118.5t/h），供給酸素濃度97.5%とし，1300℃級ガスタービンについて解析を行った。また，回収CO_2は10MPaまで圧縮・液化するものとして，その圧縮動力も考慮した。

表４に主要な位置（図３における□内の数字と対応）における作動ガスの組成，温度，圧力，および，流量を示した。ガスタービン燃焼器においては，一酸化炭素の生成を避けるため，酸素供給量を理論等量比の1.05倍とした。本システムでは，リサイクル排ガス中に未反応の酸素が存在するので，必要酸素量の0.6%増程度の酸素を補給すればよいことが分かった。また，1,300℃級ガスタービンを採用した場合には，排熱回収ボイラにおける高温側の熱が再生熱交換器（RX）で消費され，高温側の熱量が不足気味となるため，本検討では中圧蒸気圧力を下げ，再熱蒸気温度を450℃とした。さらに，同様の理由から高圧給水流量が少なく，石炭ガス化炉設備における収熱を高圧蒸発器（HP-EVA）のみでは消費しきれないので，中圧蒸発器（IP-EVA）および過熱器（IP-SH）の一部（400℃以下）と，高圧の節炭器（HP-ECO）および蒸発器（HP-EVA）の熱源として利用することとした。今後更なる高効率化を目指すには，検討システム

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表４　主要位置における作動ガスの組成，温度，圧力，流量

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		燃料ガス	燃焼器出口	タービン出口	圧縮機入口	圧縮機出口	排ガス冷却器入口	ガス化炉 CO_2	ガス化酸素	GT酸素	回収CO_2
温度	℃	400.0	1220.5	680.2	75.0	454.6	58.1	108.0	124.0	124.0	40.0
圧力	MPa	3.00	2.80	0.12	0.10	3.06	0.10	4.00	4.00	3.50	10.00
流量	kg/s	70.1	861.1	861.1	743.6	743.6	117.5	10.7	30.8	47.3	91.0
組成（mol%）	CO	66.2%									
	CO_2	4.9%	70.8%	70.8%	70.8%	70.8%	70.8%	97.1%			97.5%
	H_2	23.8%									
	H_2O	3.2%	27.3%	27.3%	27.3%	27.3%	27.3%	0.4%			
	CH_4	0.3%									
	N_2	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	2.1%	2.5%	2.5%	2.1%
	O_2		0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.4%	97.5%	97.5%	0.4%

の最適化が必須と考えられる。

表５にプラント熱効率の試算結果を示す。ここで，従来型システム（酸素-N_2）の値は，「酸素吹きガス化+湿式ガス精製+CO_2化学吸収システム」試算値[5]を入熱992MWベースで換算したものである。従来型の酸素-N_2方式では，1300℃級ガスタービン（GT）の場合，CO_2回収により送電端熱効率（HHV）が42.5%から34.9%と大幅に低下するのに対して，CO_2回収型次世代IGCCシステム（酸素-CO_2）では40%を維持しており高い値となった。これは，前節で述べたガス化性能の向上と，クローズドGTの採用，GT圧縮機後流への再生熱交換器の導入などによる高効率化と，CO_2濃縮・分離の所要エネルギーが不要であることなどによるものと考えられる。

表５　発電効率試算結果

ガス化方式		酸素-N_2	酸素-N_2	酸素-CO_2	酸素-CO_2
ガスタービンクラス		1300℃級	1300℃級	1300℃級	1500℃級
CO_2回収率	%	0	90	99 以上	99 以上
発電出力	MW	473	424	564	595
送電端出力	MW	422	346	417	447
発電端効率（HHV/LHV）	%	47.7/49.8	42.7/44.7	56.9/59.6	60.0/62.8
送電端効率（HHV/LHV）	%	42.5/44.5	34.9/36.5	42.1/44.1	45.1/47.2

５．おわりに

CCSについては，中長期的な温暖化対策オプションとなる可能性があるため，CCS導入に伴う効果と課題を明確にした上で，将来に備えて技術開発は着実に進めておくことが肝要と考える。

特にCO_2回収型高効率IGCCシステムについては，事前性能試算の結果，CO_2を回収しながら従来にない高い熱効率を達成でき，システムの簡素化も期待できることが明らかになった。ただし，実現に向けては，①システムの最適化，②ガス化炉や再生熱交換器など要素機器のコンパクト化，システムの簡素化（チャーリサイクルシステムの削減），②脱硫工程における高CO濃度ガス雰囲気下での脱硫剤中への炭素析出対策，③クローズドGTの最適設計と適切な制御方法などの課題がある。本システムの実現性について，これらの課題を踏まえた上で，今後，詳細な検討評価を進める予定である。

参考文献

(1) IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, Cambridge, Univ. Pr. (2005.12)

(2) 白井裕三ら：CO_2回収型高効率石炭ガス化複合発電システムの提案とその課題,電力中央研究所報告, M07003, (2007.10)

(3) 中尾吉伸, 幸田栄一：CO_2回収対応次世代型IGCCシステムの提案, 日本機械学会 第13回動力・エネルギー技術シンポジウム講論文集，p337-340，(2008.6)

(4) 犬丸淳：CO_2回収型発電システムの技術開発と展望,第36回ガスタービン定期講演会講演論文集，P.9-13,（2008）

(5) NEDO成果報告書：平成16年度クリーン・コール推進事業石炭ガス化を核とするコプロダクションシステムに関する調査, 04002145-0 (2005.3)

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

技術論文

1500℃級高効率ガスタービン開発のための高温部品検証試験の実施について

Execution of the High Temperature Demonstration Unit for the development of 1500℃ class Advanced Gas Turbine

松崎　裕之*1
MATSUZAKI Hiroyuki

ABSTRACT

The "Development of Advanced Gas Turbine" was performed for 6 years from 1989 by Tohoku Electric Power Co., Inc. In this project, the element technologies regarding Advanced Gas Turbine which achieves 1500℃ class firing temperature, and 50%(HHV) or more thermal efficiency as a combined cycle plant, were developed. And the element technologies of Full Coverage Film Cooling system (FCFC), which had been used in jet engines, were developed for the large size turbine 1st stage vanes and blades. The fundamental data, such as the aerodynamic efficiency and the cooling efficiency etc. of the 1st vanes and blades were obtained by accumulated with wind tunnel testing, and the applicability of FCFC cooling system to the actual machine was verified. As a result, the FCFC 1st stage vanes and blades were successfully applied to the up-to-date 1500℃ class large-sized gas turbines.

Key words：gas turbine, 1500℃ class, combined cycle, FCFC

1．はじめに

火力発電設備の熱効率向上は燃料使用量の減少による発電コストの低減や，地球温暖化原因物質の一つである二酸化炭素（以下，CO_2とする。）の排出低減につながり，経済的にも社会的にも重要な開発課題の一つとなっている。こうした取り組みの一つとして，化石燃料の中でもCO_2排出量が少ない天然ガスを燃料とし，より高い熱効率が期待できるガスタービン（以下，GTとする。）と蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクルプラント（以下，C/Cとする。）がガス焚火力発電設備の主流となっている。

C/Cの熱効率向上は，プラントを構成するGTの燃焼温度（以下，T１Tとする。）を上昇させることにより達成され，1984年にわが国初の大容量C/Cとして営業運転を開始した東北電力㈱の東新潟火力発電所３号系列（以下，３号系列とする。）のT１Tは1154℃であったのに対し，最新鋭C/Cに採用されているGTのT１Tは1500℃に達している。

原稿受付　2008年11月７日
校閲完了　2009年８月３日
＊1　東北電力㈱東新潟火力発電所
〒957-0101　新潟県北蒲原郡聖籠町東港１－１－55

東北電力㈱は３号系列の計画・建設・運転・保守を通じてGTとC/Cに関する知見を蓄積したが，これらの知見を次世代高効率GTとC/Cに関する知見へとリフレッシュするとともに，従来の電力会社の研究開発にはない，メーカーの分野にまで入り込んだ技術開発を実施することにより自社の独自技術を確立し，電源形成に関する将来構想と戦略への提言を行うことを目的として，平成元年度から６年度まで国内GTメーカー３社と共同で「高効率ガスタービンの開発研究」に取り組んだ。

本共研の開発目標は，T１T=1500℃，C/Cとしての熱効率50%（HHV: Higher Heating Value基準，以下同様）以上を達成する次世代高温・高効率GTを実現するために必要となる要素技術開発を目指すことであり，①高性能冷却翼の開発，②耐熱材料の開発そして③高温・低NOx燃焼器の開発の３項目を具体的な開発項目として設定した。[(1),(2)]

1500℃ GT用高性能第１段動静翼には高い冷却性能と同時に熱効率向上のため，高い空力性能も求められる。

したがって，本研究では翼の空力性能に対する全面膜冷却（Full Coverage Film Cooling。以下，FCFCとする。）冷却空気吹き出しの影響把握，翼外表面全域におけるFCFC冷却方式の冷却効率分布[(3)]，さらにはタービ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

ン部分負荷時に主流の流入条件が変化した場合の翼面熱伝達率ならびに冷却効率の変化などについてデータ蓄積を行い，FCFC冷却方式の大型GT用第１段動静翼への適用可否について検証を行った。

２．FCFC翼の概念設計と開発手順

FCFCを大型GTに適用するに当たって，以下のような基本設計方針を設定した。

１）冷却空気量を出来るだけ低減するため翼枚数を少なくし，高温ガスにさらされる表面積を少なくする。
２）必要動力を確保するために翼１枚当たりの出力を高める。
３）燃焼ガスあるいは，冷却空気中に含まれるダストなどによりフィルム冷却孔などが目詰まりを起こさない大きさとする。
４）FCFC翼は冷却空気の流量と圧力コントロールがもっとも重要であるが，冷却空気の供給部から放出部までを１つの通路となるよう設計し，主流の逆流を防止する。
５）高温雰囲気での翼面高温酸化を最小限とするため，翼表面メタル温度を材料が要求する温度以下に設定する。
６）また，冷却性能の確保と同時に熱応力の緩和を図るよう，冷却構造の最適化を図る。

以上の概念設計を実現するためにFCFCに関する基礎データの蓄積を図ったが，FCFCを実用化する上で一番大きな問題点は吹出し空気による空力性能の低下である。[4]このため，高性能冷却翼の開発は図１に示すフローにより検討がなされた。[5]

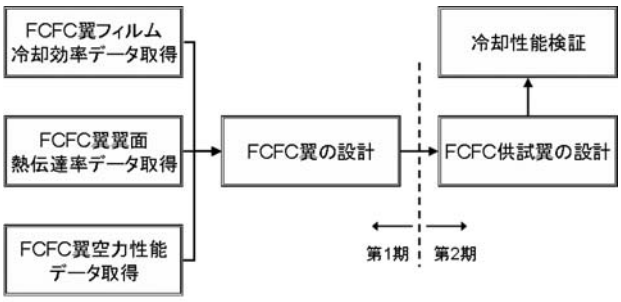


図１　高性能冷却翼開発フロー

なお，本稿では開発フローのうち，第1段静翼に関わる「FCFC翼フィルム冷却効率データ取得」と「FCFC翼翼面熱伝達率データ取得」を中心に報告する。

３．設計条件と試験装置および方法

３.１　設計条件

第１段静翼へのFCFC適用に関するデータ取得に当たって，実機での冷却設計条件を以下のように決定した。

３.１.１　ガス側条件

Ｔ１Ｔ(T_g)=1500℃，燃焼器パターンファクター（PF）=10%，最高ガス温度（Tg_{MAX}）=1606.7℃（PFの定義(1)式から算出）とした。なお，Taは冷却空気温度を表す。

$$PF = \frac{T_{gMAX} - \overline{T}_g}{\overline{T}_g - T_a} \times 100(\%) \qquad (1)$$

図２に第１段静翼設計のガス温度分布を示す。しかし，実機では燃焼器入口圧縮空気の偏流などの影響を受け，最高温度発生ポイントが変化する可能性があることから，翼部の冷却設計に当たっては，燃焼ガスの最高温度が翼のどの位置（高さ0%～100%）にあっても翼が耐えられるように設計する。

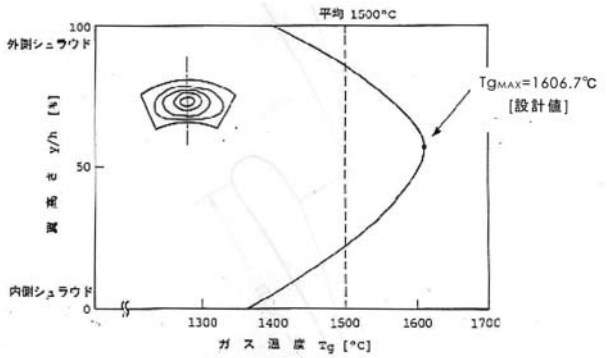


図２　第１段静翼設計ガス温度分布

３.１.２　冷却空気条件

冷却空気温度（Ta）は静翼入口で433.3℃，同圧力（Pa）は静翼入口で1.85Mpaとした。

３.１.３　翼の形状，寸法

図３に第１段静翼のPCD（Pitch Circle Diameter）における翼断面形状を示す。翼高さ（H）は121.81mm，翼コード（C）は174.0mmそして翼枚数は（Z）50枚である。

図３　第１段静翼PCD断面翼型

３.２　FCFC翼フィルム冷却効率データの取得

図３に示す実機第１段静翼として設計した翼型の断面形状の２次元試験翼を製作し，複数翼により翼列を形成して低速風洞中においてフィルム冷却効率と翼面上の圧力分布を計測した。なお，低速風洞試験に用いた試験翼は風洞の物理的制約から実機翼の75%モデル翼を用いた。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

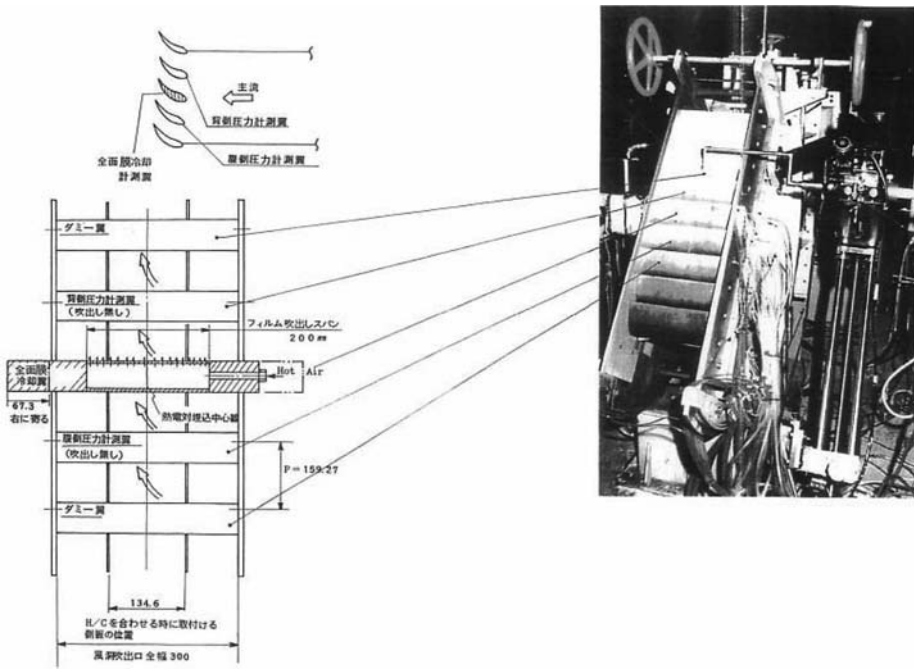


図４　翼列の構成

3.2.1　翼列の構成

図４に冷却効率計測翼，翼面圧力計測翼そして翼列の両端に配置されたダミー翼（中実翼２枚）で構成された翼列を示す。

3.2.2　冷却効率計測翼

実際のGTでは燃焼ガス主流が高温でフィルム孔からの吹出し空気は低温になっているが，本低速風洞試験では主流は常温とし，フィルム孔から加温空気を吹出して冷却効率を計測することとした。これは冷却空気流量に対し主流の流量は圧倒的に多いことから，実験を行う際に加熱対象の流量を可能な限り少なくして実験設備や実験に関わるコストを抑制するためである。冷却効率計測翼の断面図を図５に示す。図中単位なしの数値は長さで単位はmm，d：フィルム孔径，p：翼高さ方向のフィルム孔ピッチ，L：翼コード方向のフィルム孔ピッチ，α：フィルム孔の吹き出し角度をそれぞれ表している。

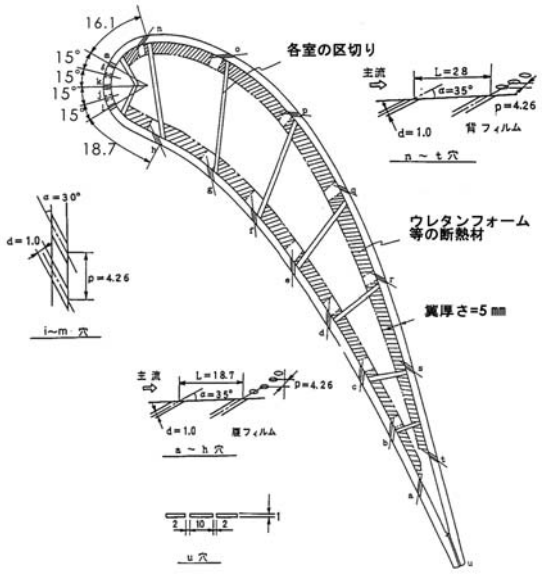


図５　冷却効率計測翼断面図

3.2.3　翼面圧力計測翼

背側，腹側圧力はそれぞれFCFC翼をはさむ別々の翼で計測する。

3.2.4　計測装置

図６に計測系統図を示す。計測にはPCを用い，圧力計測用のスキャニバルブの制御，データロガーの制御，計測データの処理（オンライン処理），試験条件の判断などを行った。なお，計測データはプリントアウトされると同時に外部記憶装置に記録した。

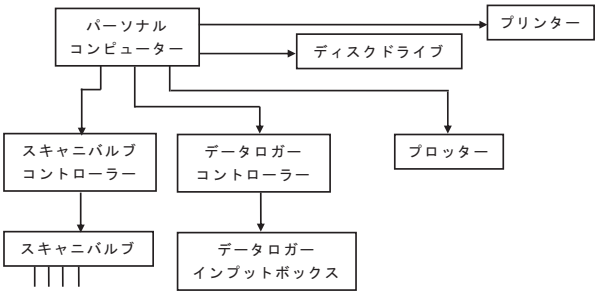


図６　計測系統図

3.2.5　計測項目

計測項目とその計測手法を表１に示す。

3.2.6　翼面速度分布

翼面静圧分布の計測結果から速度分布を求め，(2)式により翼面速度を求めた。[6]

$$V_{sx} = \sqrt{\frac{2\times(P_{tl} - P_{SX})}{\rho_{sx}}} \qquad (2)$$

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表１　計測項目と計測手法

項　　目			計　測　手　法
① 主流流速	V_{in}	m/s	ピトー管または熱線
② 主流入口全圧	P_0	Mpa	ピトー管
③ 主流入口温度	T_0	℃	熱電対
④ 主流入口乱れ			熱線風速計
⑤ フィルム冷却空気量	G_{ai}	kg/s	オリフィス
⑥ フィルム冷却空気温度	Ta	℃	熱電対
⑦ 断熱壁温	T_{aw}	℃	熱電対

ただし，Vsx：任意点における速度（m/s），ρsx：任意点における流体の密度（kg/m^3），P_{tf}:全圧（N/m^2），P_{SX}：任意点における翼面静圧（N/m^2）

3.3　FCFC翼翼面熱伝達率データの取得

実機第１段動静翼として設計した翼型のPCD断面形状の２次元モデル試験翼を製作し，複数翼により翼列を形成して低速風洞中において当該翼型の熱伝達率分布を計測した。

翼型は図３に示す通りであり，供試翼は実機翼に対し75%のモデル翼となっている。

3.3.1　熱伝達率計測翼（１枚）

図７に熱伝達率計測翼の構造を示す。ベークライト基盤にヒーターとしてニッケル箔を貼り付け，さらにニッケル箔の温度を熱電対（白金ロジュウム）により計測できるようにした。

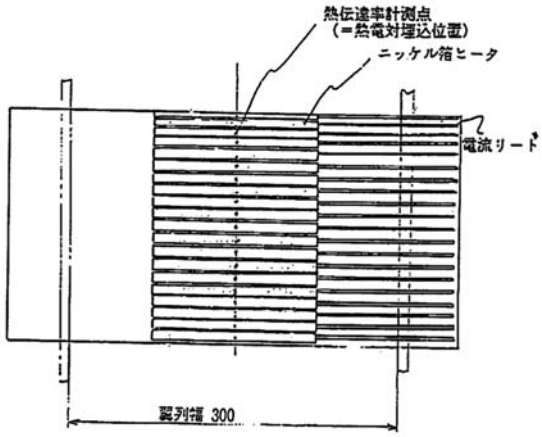


図７　熱伝達率計測翼の構造

3.3.2　翼面圧力計測翼（２枚）

背側，腹側圧力は各々熱伝達率計測翼をはさむ別々の翼で計測した。また，３.２に示す冷却効率計測と同様，翼列の両端にダミー翼として中実翼２枚を翼列の両端に配置した。

3.3.3　翼面熱伝達率の計算方法

供試体翼表面の局所熱伝達率は次のように計測した。

翼表面に貼ったニッケル箔ヒーターを通電加熱する。主流に持ち去られる熱量と加熱量のバランスから次式が成り立つ。計測の概念を図８に示す。

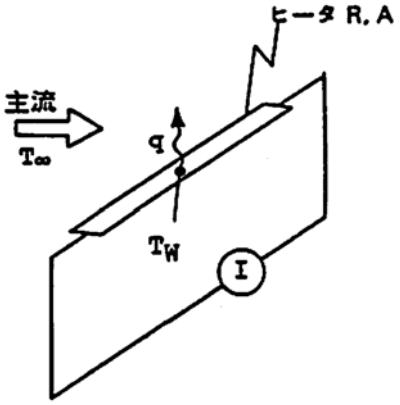


図８　熱伝達率計測概念

$$q = I^2 R = Ah(T_W - T_\infty)(\mathrm{W}) \tag{3}$$

ここで，I：電流，R：ヒーターの抵抗，A：ヒーターの面積，h：熱伝達率，Tw：ヒーター温度，T∞：主流温度

実際は，電気加熱量は全て主流に持ち去られるのではなくて，伝導，輻射の誤差が入る。したがって，

$$\text{熱伝達率}h = \frac{I^2 \times R - q_{LOSS}}{A \times (T_W - T_\infty)}\left(\mathrm{W/m^2℃}\right) \tag{4}$$

本試験ではヒーターを非常に薄くし，かつ表面を等温に制御して表面と平行な方向の熱伝導を低減した。また，ニッケル箔ヒーター裏面への放熱を小さくするために，翼材としては熱伝導率が極めて低いベークライトを用いるとともに，翼内面に断熱材（ウレタンフォーム）を張り付けた。さらにヒーター表面からの輻射を小さくするために表面を鏡面とすることでq_{LOSS}＝０と見なした。

実際の計測データから熱伝達率を求めた例を以下に示す。

（第１段静翼前縁部）

ヒーターの抵抗　R=0.284（Ω）
ヒーターの面積　A=5×10^{-4}（m^2）
〔計測データ〕
電流値　I=2.203（A）
ヒーター温度　TW=38.3（℃）
主流温度　T∞=16.1（℃）

(3)式より
⇒熱伝達率
h=124.2（W/m^2℃）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

3.3.4　計測項目

主流流速，入口全圧・温度・乱れ，ヒーター温度・電流・抵抗を計測した。

3.3.5　計測装置

計測用にパソコンを用い，スキャニバルブの制御，データロガーの制御，計測データの処理（オンライン処理），試験条件の判断を行った。なお，計測データはプリントアウトされるとともに，外部記憶装置に記録される。

温度およびヒーター電流の計測はデータロガーにより行い，圧力の計測はスキャニバルブシステムにより行った。

4．試験結果および考察

4.1　FCFC翼背側のフィルム冷却効率

吹出すフィルム冷却空気の主流との質量流量比M（$=\rho_f V_f/\rho_{gx} V_{gx}$）をパラメータ（M=0.1～1.0）にして，フィルム冷却効率を各フィルム孔について計測した。なお，ρ：密度，V：流速，添え字 f：主流，gx：冷却空気を表す。

吹き出す前縁シャワーヘッド（5列）がM=1.0一定で背側各フィルム孔がM=0.5と1.0で全面吹出しした場合のフィルム冷却効率分布を測定した。M=0.5より1.0の方が全般的に冷却効率は高くなっており，冷却空気量増加により冷却効率の向上を図ることができる。一方，冷却空気流量増加は圧縮機駆動力の増加につながり，GT全体としては性能低下に結び付いてしまうことから，冷却空気流量増加を極力抑制しつつ冷却性能確保を図る必要がある。また，Mの値に依らずフィルム空気吹き出し後，後流に行くに従い冷却効率は徐々に低下するが，次のフィルム空気吹き出しによって冷却効率はほぼ回復し，翼面全域にわたってほぼ一定の冷却効率を得られることが判明した。この結果について図9に示す。

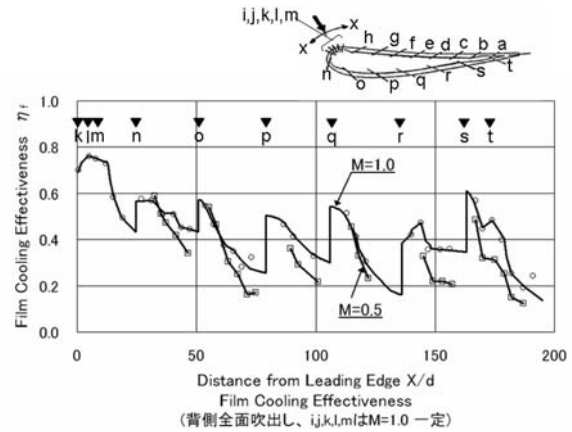


図9　全面吹出し時のフィルム冷却効率

4.2　FCFC翼翼面熱伝達率データ

表2に熱伝達率を計測した際の主流側条件を示す。また，以下の各項目についてデータ採取を行った。

4.2.1　翼面圧力分布

表2　熱伝達率計測時主流条件

TEST No.	入射角(deg) (設計値に対して)	翼入口主流乱れ $\tau\infty$(%)
C-1001	0	4
C-1002	0	7
C-1003	0	10
C-1004	0	0.5
C-1005	+5	0.5
C-1006	-5	0.5

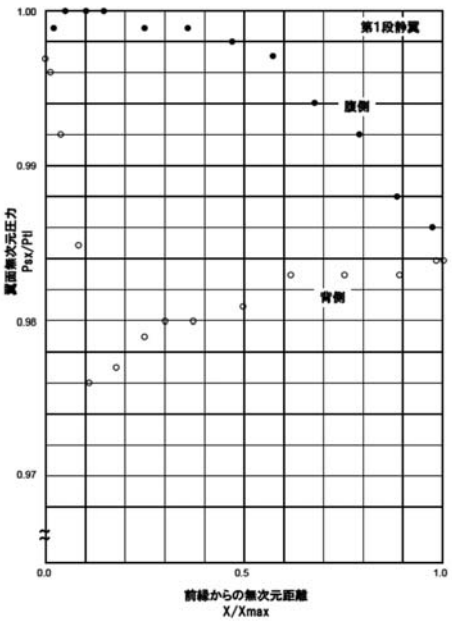


図10　入射角+5°の場合の翼面圧力分布

入射角を変化させた場合の1段静翼の翼面圧力分布を計測し，この圧力分布から翼表面の速度分布を(1)により求めた。一例として入射角が+5°の場合の翼面圧力分布を図10に示す。なお，入射角+は腹側より，入射角－は背側よりに入射角を変化させた場合を示す。

4.2.2　翼面熱伝達率分布

一例として図11に入射角を変化させた場合の熱伝達率分布を示す。

この結果，入射角を変化させた場合，腹側はほとんど変化なく，背側の前縁近傍の小さな変化と，背側中間部

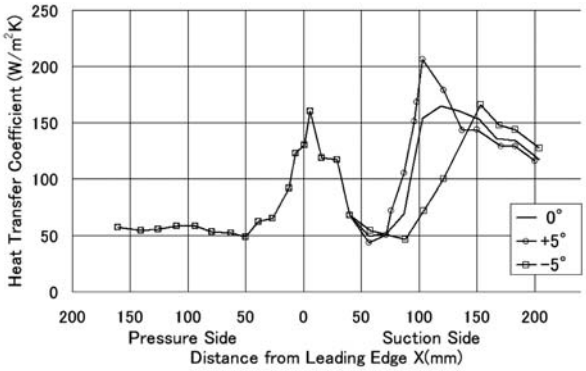


図11　入射角を変化させた場合の翼面熱伝達率分布

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

の乱流遷移区間と考えられる部分の前後の移動に差がみられる。これは，入射角変化によって翼面中間部付近に発生する流れの乱れが変化するためと考えられる。

4.3　第１段静翼へのFCFC方式適用に関する考察

以上，1500℃級GT用タービン第１段静翼にFCFC方式を適用するに当たって必要となる基礎的なフィルム冷却効率ならびに翼面熱伝達率分布を計測した。

1）静翼背側にFCFCを適用した場合，翼面後半での冷却効率低下はほとんどなく，翼面全域にわたってほぼ同程度の冷却効率を確保することができ，熱応力の緩和も可能である。

2）GT組み立て時の組み付け精度や経年変化により静翼の角度が変化した場合，さらには燃焼器内部流動変化などを想定し，入射角を変化させた場合の翼面熱伝達率分布を測定したが，その変化はほんのわずかであり，実機設計上大きな問題にはならない。

3）以上，本実験から得られたFCFCの翼面熱伝達率，冷却効率等のデータは今後のＴ１T=1500℃級GT用第１段静翼開発の基礎データとして活用可能であることを確認した。

実機FCFC翼設計に当たってはフィルム穴径，フィルムピッチそして冷却空気の吹き出し速度を変化させて翼メタル温度が設計目標値以下，かつ可能な限り均一になるよう，また，空力性能低下も最小となるよう最適化する必要がある。

この最適化設計に当たっては本実験で取得したFCFCの冷却効率ならびに翼面熱伝達率分布データなどを活用して設計を進めた。また，本稿では取り扱わなかったが，４.２.１で計測したFCFC吹き出し無の場合の翼面圧力分布とFCFC吹き出し有の場合の翼面圧力分布を比較することにより，FCFCによる空力性能への影響を把握し，最適化設計に活用した。最終的には図12と図13に示す1500℃級大型GT用第１段動静翼の冷却構造を決定した。[8], [9], [10]

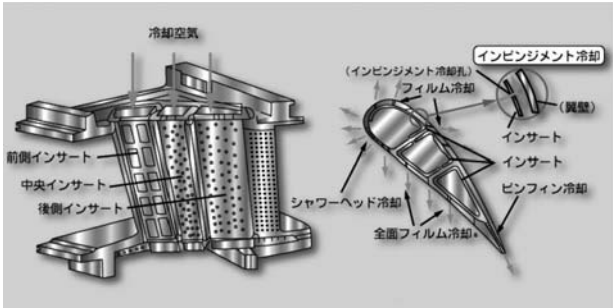


図12　第１段静翼冷却構造

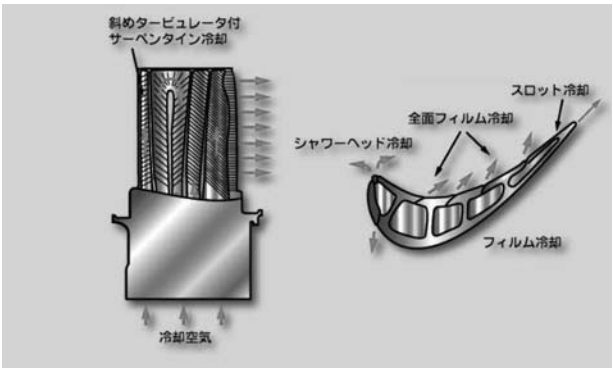


図13　第１段動翼冷却構造

5．まとめ

ジェットエンジン用小型動静翼では実用化されていたFCFCを大型ガスタービン第１段動静翼への適用へ向けて開発を行った。研究当初，FCFCは翼冷却効率の向上には有効である一方，翼空力性能への悪影響が懸念されたが，冷却孔の配置や吹き出し空気流量などを最適化することにより空力性能への影響を最小限に抑えることができた。

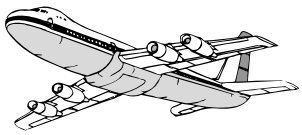
本研究の成果は最新鋭1500℃級大型GTに適用され，高性能，高信頼性を確保しつつ世界各地で有効な地球温暖化対策のひとつとして運転を継続している。[11], [12]

最後に本稿とりまとめにあたって新潟大学大学院自然科学研究科の藤澤延行教授より多大なるご指導をいただいたことに関し感謝申し上げます。

参考文献

(1)　松崎裕之，他４名：次世代LNG複合発電設備の計画，第10回ガスタービン秋季講演会講演論文集，(1995.8新潟)，pp. 25-30
(2)　H. Matsuzaki, 他５名：Development of Advanced Gas Turbine, ASME Paper No. 96-GT-294
(3)　J. L. Kerrebrock 著/梶昭次郎訳：ジェットエンジン概論，東京大学出版会，pp. 287-297
(4)　三輪光砂：ガスタービンの基礎と実際，成山堂書店，pp. 113-127
(5)　浜島　操：ガスタービン－理論と設計－，コロナ社，pp. 178-221
(6)　亀本喬司，他１名：流体力学，実教出版株式会社，pp. 159-163
(7)　A. H. Lefebvre著/佐藤幸徳監訳：ガスタービンの燃焼工学，日刊工業新聞社，pp. 163-170
(8)　K.Kano, 他５名：Development Study of 1500℃ Class High Temperature Gas Turbine, ASME Paper No. 91-GT-297
(9)　M. Sato, 他６名：High Temperature Demonstration Unit for a 1500℃ Class Gas Turbine, ASME Paper, No. 94-GT-412
(10)　M. Sato, 他５名：Final Report of the Key Technology Development Program for a Next Generation High Temperature gas Turbine, ASME Paper No. 95-GT-407
(11)　佃嘉章，他３名：東新潟４号系列1,450℃級ガスタービン複合発電設備の運転実績，火力原子力発電Vol. 51 No. 6,2000. 6, pp. 27-34
(12)　福泉靖史，他4名：大容量ガスタービンの最新技術動向，三菱重工技報 Vol. 40 2000. 7, pp. 2-4

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.



ガスタービンと出合った頃

高田　浩之*1
TAKATA　Hiroyuki

昭和26年，大学の３年になって卒業実験に八田桂三先生と岡崎卓郎先生指導の排気ターボチャージャーの動的過給に関する題目を選び，両先生の研究室に入った。

当時，機械工学科の標準カリキュラムではエンジンの講義はすべてレシプロエンジンを対象として行われており，３年で任意で聴く講義に一科目だけ，八田・岡崎先生の「ガスタービン」というのがあった。

研究室に入って暫らくした頃，お目にかかったのが1945年と1948年，1950年の３冊のInst.Mech.EのProceedingsであった。全編がガスタービンとジェットエンジンの論文で，あらゆる分野をカバーし，正しくガスタービンのバイブルであった。そのうちに研究室で輪講を始めることになり，私は最初に割り当てられたのは燃焼器の論文だったが，何しろ初めて読む英語の技術論文であり，非常に苦労しながら読んだ記憶がある。

いま，当時のノートを見ると，Proceedings中のかなり多くの論文を細かくメモを取りながら丁寧に読んでいる。その中でもA.R.Howellの圧縮機と翼列の設計に関する論文がとくに評判であった。因みにそのHowell氏には，私が1970年Cambridge滞在中の7月下旬，NGTEを訪れたときに図らずもお会いした。

昭和26年夏，東日本重工（現三菱重工）の横浜造船所では２軸中間冷却・再熱・再生式の2500HP舶用ガスタービンの試作研究が始まった。秋頃だったと思うが，研究室の学生一同・大学院の先輩たちも一緒に機械科の会議室に呼び集められ，圧縮機の翼列の計算を手伝わされた。岡崎先生が黒板に式を書き，我々はそれに従ってタイガー計算機を回す。造船所の課長さんたちも来て居られた。八田先生はお茶を入れて下さった。

大学3年の終りには，12月頃から卒業直前の３月にかけて，卒業設計をやることになっていた。私たちは卒業実験を一緒にやった３人共同で大型の舶用ガスタービンを書くことにした。３人とも圧縮機を書きたがったので，ジャンケンで分担を決め，一番負けた私は燃焼器と減速歯車を書かされる羽目になった。燃料噴射弁にはduplex型のswirl nozzleを使うことにして，棚沢泰先生の論文を懸命に読んで，計算したことを憶えている。

私たちが卒業した直後，昭和27年春に平和条約が発効し，航空の工業や研究・教育が解禁された。そして昭和29年４月，東大工学部に航空学科が再開され，駒場の理工学研究所（もとの航空研究所）にはターボジェット部門の講座が新設されることになり，私は会社から呼び戻されて，29年9月理工学研究室で八田先生の講座の助手になった。そして，八田先生が中西不二夫先生や岡崎先生と相談して決められた方針に従い，翼列の非定常性能の研究を始めることにした。これが私のその後の方向を決めたわけである。昭和30年6月には田中英穂先生が助教授として着任され，二人はその後ずっと一緒にこの非定常内部流の仕事をすることになった。

昭和30年の６月，MITのE.S.Taylor教授が航空工業会の招きで来日され，10日間にわたって東大で，全国の研究者・技術者を前にガスタービン及びジェットエンジンに関する連続講義を行われた。機械工学科の西脇仁一先生と岡崎先生が世話をされた関係で，わたしはその講義録の翻訳・出版の手伝いをするように言われ，当時西脇研究室の大学院学生だった平田賢先生たちと一緒に講義室の中央最前列にテープレコーダーと共に陣取って正しく一言一句も聞き漏らすまいと頑張ったものであった。英語を聞き取ることが殆んど出来ないので非常に苦労したが，多くの人に助けて貰って，分担して原稿を書き上げていった。岡崎先生が全体の仕上げをされたものと思っているが，講義録は立派に出来上がって11月に出版された。この本はご存知の方も多いことと思う。私は今でもその時の原稿や配られた図の一部を持っているが，懐かしい記念品である。原稿を書く際に苦労しただけあって，今でも本の中身は細かい所までよく憶えており，これが私のガスタービンの原知識となっている。その後も学部や大学院の講義などの際にずっと利用させて貰った。

旋回失速というものを初めて知ったのもこの時であった。Taylor先生が黒板に滅茶苦茶な線を書いて，“これがRotating Stallだ。私には分からないが専門家はこれを解釈できるという。”という風に話された。でもこの時にはまだ，自分がのちに旋回失速で学位論文を書くことになるとは全く思っていなかった。

このあと，昭和31年頃から，私は翼列風洞でたまたま失速の伝播を見付けたり，翼列性能を実験中の単段軸流圧縮機で旋回失速の発生に直面したりしながら，次第に旋回失速の研究に入り込んでいくことになった。

以上，私のガスタービンとの出合い，旋回失速との出合いを振り返ってみた。随分昔の話で少しうろ覚えな所もあるが，すべてが懐かしい思い出である。

原稿受付　2009年７月６日
＊1　東京大学名誉教授　日本ガスタービン学会 名誉会員

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.