

特集：ガスタービンの将来展望—ガスタービンは生き残れるか？—

「ガスタービンの将来展望」特集号によせて

吉識 晴夫^{*1}

YOSHIKI Haruo

本特集号は、競合する他機関と比較して、エネルギー問題・環境問題への対応性などの面から、ガスタービンは技術的、社会的に将来どのような立場がとれるかを展望したものである。

現在、ガスタービンは小型・軽量・大出力の特性を発揮して、航空用エンジンとして主役の座を占めている。産業用では、大型高温ガスタービンの性能及び信頼性向上により、コンバインドサイクル発電がNO_xやCO₂の排出量削減を実現させ、火力発電の分野で地球環境の保全に大きく寄与している。

我国におけるこれまでのガスタービン利用拡大について簡単に振り返ると、第二次大戦中の航空用ジェットエンジンの開発が起源となる。大戦後しばらくの間、航空機の研究は占領軍により禁止されていたが、ガスタービンの特性を生かせる陸船用ガスタービンの実用化研究が行なわれた。また、NO_xの良好な排気特性から自動車用エンジンとして期待され、開発が行なわれた。1971年に東京で開催された我国最初の国際ガスタービン会議では、トヨタと日産がガスタービンバスの実車を展示し、国内外から注目を集めた。しかし、当時は優れた高温耐熱材料がないことや要素技術の未熟さ等により、ガスタービンの熱効率が低く、期待通りには車両用や船用エンジンとしての実用化には至らなかった。特に自動車用では、部分負荷性能の低さは致命的であった。ただガスタービンの立場を離れて考えると、ガスタービン乗用車の駆動システムの基本構想はハイブリッドエンジンに生かされていると言えよう。

その後、航空機用ファンジェットエンジンの研究開発(FJR70)、高効率ガスタービン(AGTJ-100)などが国家プロジェクトとして官民一体となって鋭意実施された。その結果、前者ではV2500実用エンジンの国際共同開発・生産へと発展し、後者では三菱重工が大型高温ガスタービンの高性能化に成功し、コンバインドサイクル発電で国際競争力を持つに至り、我国のガスタービン産業に貢献している。

また、消防法等の改正により、既存の防火対象物にも消防用設備等の設置並びに非常電源(自家発電、蓄電

池)の附置が義務付けられた。これを契機に、小型・軽量で冷却水不要の特長を持つ非常用ガスタービン発電設備の設置が進められた。

その他の国家的プロジェクトとしては、高温部に冷却構造を採用し難い小型ガスタービンの高性能化を目指して、セラミックガスタービン、自動車用セラミックガスタービンの研究開発が行なわれた。小型のためコンバインドサイクル用には不向きで、ガスタービン単体での高性能化が必要となり、再生サイクルを採用した。小型であるので面積律則の熱交換器の利用はそれ程制約事項とはならず、発電用では伝熱式の再生熱交換器を、自動車用では小型にできる回転蓄熱式再生熱交換器を採用した。実験的には高性能性を示せたが、セラミックスの弱点を克服することはできなかった。熱効率の高いガスエンジンと競争して、コージェネレーションなどの分散電源で普及を図るためには、最低限熱効率を40%以上(LHV規準)とする必要がある。このためにも、プロジェクト終了後、小型セラミックガスタービンの研究開発が途絶えたことは残念に思う。セラミックスの特性を考えると、小型ガスタービンですら技術的に十分成熟しないうちに大型化を考えることには、無理がある。実用化する上で、かなり困難な技術的問題を克服する必要がある場合、企業だけの努力に任せて済ますには限界がある。

船用ガスタービンでは、次世代内航船(スーパーエコシップ)の実証的研究開発が進められており、ガスタービンの有用性を示すことが期待されている。ディーゼルエンジンと競合するなかで、排気清浄性のほか運用面などで有利な点を実証することが肝要である。

航空用ガスタービンでは、超音速輸送機用推進システム研究開発(HYPR)、環境適合型次世代超音速推進システムの研究開発(ESPR)などの国家プロジェクトが実施され、騒音やNO_x排出量の低減、熱効率の改善等の技術開発を行った。超音速機の要望は現在それ程大きくないことから、これらの成果の実用化に向けて、環境適応型小型航空機用エンジン研究開発を遂行中である。今後の航空用エンジン開発は、1社単独で行なうことは経済的に困難であり、国際協力の下で行なわれることが多くなるであろう。このような場合、我国の企業が国際的に優位性のある技術を保持していることは非常に重要なことである。また、このように有用な技術を経済的に

原稿受付 2007年1月29日

^{*1} 帝京平成大学 現代ライフ学部 情報サイエンス学科
〒290-0171 千葉県市原市潤井戸2289

成立させ、航空用エンジンだけでなく、産業用ガスタービンへの適用も推進する必要がある。

発電用ガスタービンでは、環境保全と高効率を達成して石炭を有効利用するため、石炭ガス化複合発電(IGCC)の実証プラントでの研究開発が行なわれている。また、圧縮機の吸気に微細水滴噴霧を行ない、高効率化と排気特性改善を目指す AHAT (Advanced Humid Air Turbine) システムが研究されている。この他、タービン入口温度1700℃級ガスタービンの研究開発が行なわれており、発電効率の向上を目指している。この高温ガスタービンを成立させるためには、冷却技術だけでなく圧縮機の高圧縮比化が必要になる。コンバインドサイクルで利用されることを考えると、ボトムングに用いられる蒸気タービンを従来の蒸気条件でなく、更なる高温条件で使うことが図られれば、ガスタービンの圧縮比の増大が抑えられ、発電効率の一層の改善が期待できる。

ガスタービンの弟分ともいえるターボ過給機の我国における開発を見ると、第二次大戦中に行なわれた航空機エンジンの高空性能の改善研究が起源である。大戦後、韓国の李承晩ラインにより我国の漁船が不当拿捕されることを防止するため、漁船エンジンのターボ過給機による高性能化が図られた。その後、船用2ストロークサイクル大型ディーゼルエンジンにターボ過給機が用いられ、エンジンの高性能化に寄与した。さらに、1980年頃からは自動車用エンジンにターボ過給機の利用が始まり、翼車径の小さいターボ過給機の生産台数が急激に増大した。現在、ヨーロッパではガソリンエンジンより熱効率が高くCO₂排出量の削減効果の大きいディーゼルエンジンが

乗用車用エンジンとしても盛んに用いられており、この高性能化にターボ過給機が大きな役割を果たしている。我国でも地球温暖化対策として、NO_xや粒子状物質の排出が少ない小型ディーゼルエンジンを開発し、そのエンジンを搭載した乗用車や商用車の普及が促進されることを期待したい。

我国の人口は減少傾向にあるが、世界的には人口増大が進み、エネルギーの消費量は増加の一途をたどっている。このため、高効率・低公害の発電設備の普及が進まないと、地球規模での環境悪化が収まることはない。我国でも利便性から、電力の使用量が減少することはないだろう。大口需要家向け電力小売の自由化により電力卸事業が始まり、中出力発電設備へのガスタービン利用が期待される。大型発電設備では、出力が寸法の3乗に比例することは重要な特性である。その上、燃料多様性に優れるガスタービンの発電分野で果たす役割は益々期待される。ただ、小型分散型電源でガスタービンが主役を演じるには、未だ力不足と言える。一方、移動用機関では取り扱いやすさから、液体燃料の利用が当分の間、大勢を占めると思われる。しかし、ガスタービンは航空エンジンを除けば、熱効率が改善されない限り主流エンジンとなることは難しいだろう。

以上、ガスタービンの現在の技術と開発中の情報を基に、将来のガスタービンの活躍分野について私見を述べさせて頂いた。各分野の具体的な見通しについては別項に述べられている。今後、ガスタービン関係者の一層の努力により、益々利用される分野が拡大することを期待したい。

特集：ガスタービンの将来展望—ガスタービンは生き残れるか？—

航空エンジン

林 茂^{*1}
HAYASHI Shigeru

1. まえがき

「ガスタービンは生き残れるか？」という副題でガスタービンの航空エンジンとしての将来を展望せよという課題が与えられた。現時点で競合しそうなものが見えていけば面白いが、民間航空に限定すればすでに獲得された圧倒的な地位が揺るぐことはないといしか著者には思えない。ガスタービンが航空エンジンとして誕生してから半世紀以上たったことからすでに成熟産業という見方もあるが、現在の高バイパス比ファン・エンジンとWhittleのジェットエンジンを比べるとまったく違うといっているくらいの進化が見られる。今後もガスタービンは、顕在化するであろう石油の枯渇、CO₂や燃焼排出物による地球温暖化等、人類が始めて遭遇する問題に対しても新しい技術を身に付け、進化し続けられると考えるからである。そこで本稿ではいわゆるジェットエンジンの誕生から現在の大型高バイパス比ファン・エンジンに至るまでの航空ガスタービンの進化と今後を概観することにした。

2. ガスタービンの独占的地位

第2次世界大戦までは航空エンジンはピストン・エンジンであったが、その末期の44, 45年に軍用機エンジンとして実用になったガスタービンは瞬間に、この分野で絶対的な地位を確立した。52年にはターボジェットが、また53年にはターボ・プロップとして民間航空に導入され、その後いわゆるジェット・エンジンとして進歩を続け、この分野でも圧倒的な地位を築いている。また、ガスタービンはヘリコプター用のターボシャフト・エンジンにも使われており、航空の全範囲を占有しているといえる。これに対して、ピストンエンジンは、現在ではゼネラル・アビエーション向けの小型機や練習機に限定されている。

ガスタービンが圧倒的な地位を確保したのは、航空エンジンに要求される軽量で大出力であるという特性を備えていたからだということに異存はないが、これは必要条件のひとつにすぎず、民間航空での成長は、航空エンジン製造企業間で激しい技術開発競争が行なわれ、安全

性・信頼性が非常に高まり、しかも唯一の大量・高速輸送手段を提供し、また、その後の環境保全の要求にも適宜応えられてきたことなどによるものである。

ガスタービン推進の大型ジェット輸送機の出現は、人類の活動範囲を飛躍的に拡大するとともに物流の速度を加速し、時間あたりの生産性を飛躍的に高め、今日の人類の活動のグローバル化を支えている。ガスタービンは20世紀の大発明のひとつといわれるが、上記の変化をみれば尤もである。

3. 代替新エンジンの出現の可能性

高分子膜型燃料電池／モータ・システムが次世代の原動機として注目を浴び、10年以内に燃料電池乗用車を商業ベースにという声も聞かれる。しかし、ハイブリッドやディーゼルの方がバイオ燃料への適応性が高く、燃料電池自動車の民間化時期はもっと先になるのではないかと思う。燃料電池航空機についての調査研究や実験機の構想はあるが、燃料電池／モータはガスタービンに比べ出力密度が小さいこと、応答が遅いなどの難点があり、また、水素は体積あたりのエネルギーが小さいために輸送機としての燃料としては不向きである。改質器による水素生成は重量の点でさらに不利である。いま改めてファンジェットエンジンの形状や構造を眺めると、大量の空気を加速して大推力を得るという目的に極めて適したように進化しているということを改めて感じる。

著者が新エンジンの出現の可能性に関し否定的な見方をするのは、前述の技術的な理由だけでなく、下記の、技術とは別の要因も無視できないと考えるからである。仮に性能面で現在のガスタービンを凌ぐようなポテンシャルが実験室レベルで確認されている革新的エンジンがあったとしても、これまでに実証されてきた航空ガスタービンの信頼性や安全性に対抗できるまでに開発を行うに必要な莫大な投資をできる余裕は、熾烈な競争に置かれている3大エンジンメカにはないであろう。

航空エンジンの開発には巨額の開発費がかかり、その回収には20年もの期間を要するというビジネスの特殊性から、新しい技術は研究開発プログラムにおいて既存エンジンを用いた技術実証に成功し、タイミングよくその後の新規開発エンジンへの適用が決定されたとしても10年以上かかるのが一般的である。したがって20年先の技

原稿受付 2007年2月26日

*1 宇宙航空研究開発機構 環境適応エンジンチーム
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

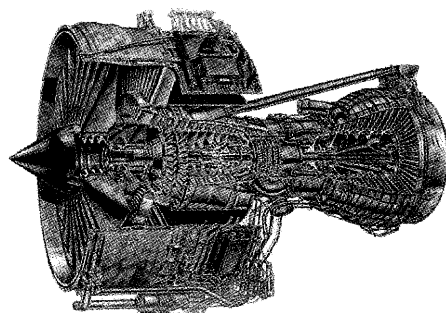
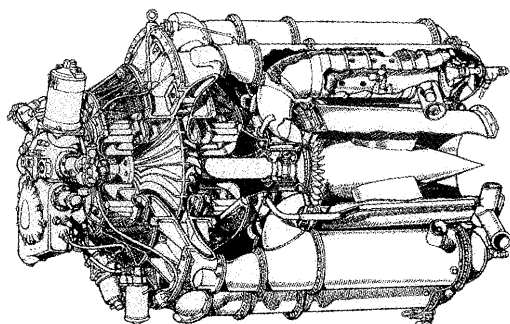


図1 最初航空用ガスタービン, Whittle W2/700 (左) と最新のガスタービン, ロールス・ロイス社製 Trent 800 (右)

術というのは、少なくとも今見えていなければならないのである。

4. これまでの航空ガスタービンの進歩

4.1 形態・性能

現在の3大航空エンジンメーカーはいずれも、ガスタービン事業に乗り出したときに Whittle の W2/700エンジン (図1 (左)) を手本にした。このジェット・エンジンの主要構成要素は、圧縮機、燃焼器、タービン、そして推進ノズルである。最新のものは、図1 (右) の例が示すように大きなファンを備え、タービンも圧縮機駆動とファン駆動の多段構成になり、圧縮機も遠心型から低中、高压の多段軸流型に、それに対応して軸も1軸から2軸、あるいは3軸に、燃焼器も多缶逆流型から環状に、外見だけでもずいぶん変化した。大量の空気を押し出すことによって大推力を発生させるのに最適な形態に進化し、燃料消費の大幅な削減と騒音の顕著な低減も可能になった。

図2, 図3, 図4はそれぞれ、今日までの推力、推力・重量比、全圧力比のトレンドを示している。全圧力比は初期のもののはほぼ10倍に増大し、推力は大型民間旅客機の双発化を可能にした離陸推力50トンを超えるものまでが実用になっている。推力重量比は7を超えている。

ファンとそれを駆動するタービンを除いたエンジンの中心部分をコア (エンジン) と呼ぶ。このコアの単位空気流量あたりの出力が大きいほどエンジンの軽量化と推進効率の向上が図られる。図5はコアの比出力とタービンロータ入口温度との関係を示している。Whittle のエンジンのタービンロータ入口温度は約1000Kであったが、最新エンジンでは約1700Kに達しており、コアの比出力は半世紀の間に5倍以上にも向上したことになる。研究開発レベルでは8~10倍が実証されており、今後の発展の余地は大きい。絶対的なタービン入口温度の限界は材料の制約がない場合、最高火炎温度により制約されるが、そこまでいかないうちに今後も強化が続く NOx 排出規制に適合するためやむなく2100K程度に抑制せざるを得なくなるかもしれない。それでも向上の余地は大きい。

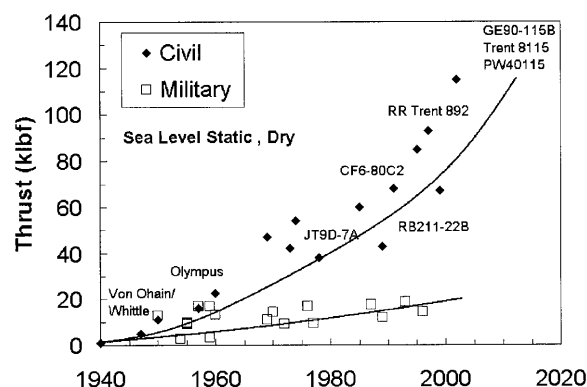


図2 推力の増大傾向

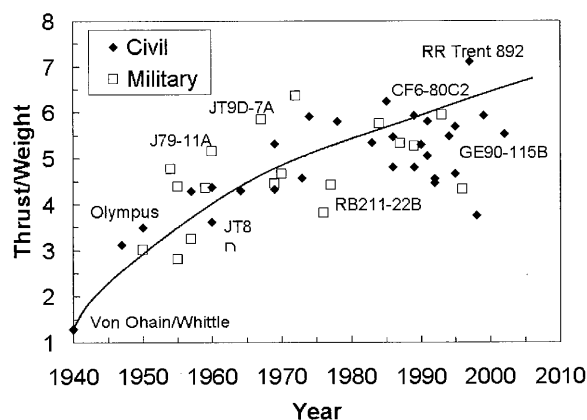


図3 推力/重量比の増大傾向

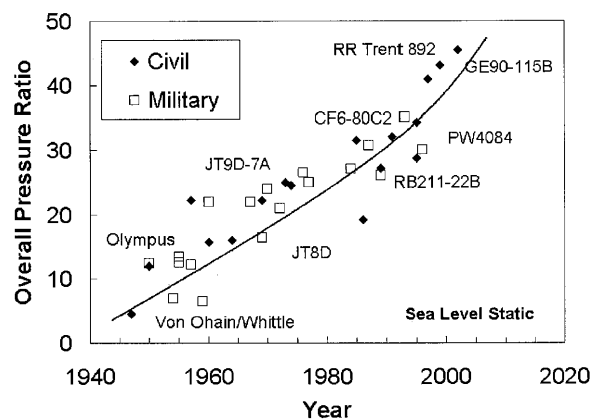


図4 全圧力比の増大傾向

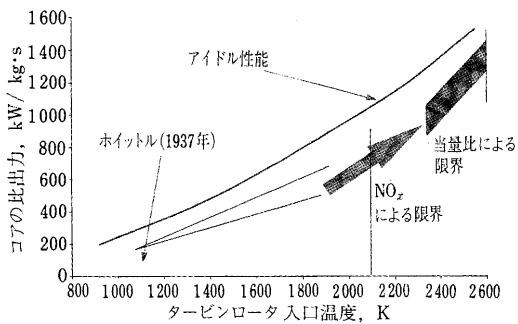


図5 コアの比推力とタービン入口温度との関係

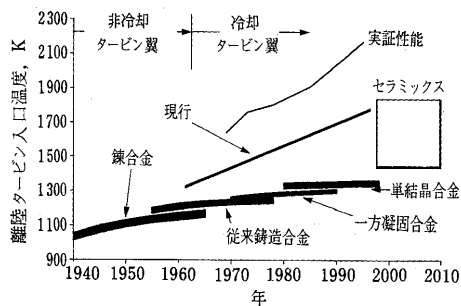


図6 離陸時のタービン入口温度とタービン材料の耐熱温度の変遷

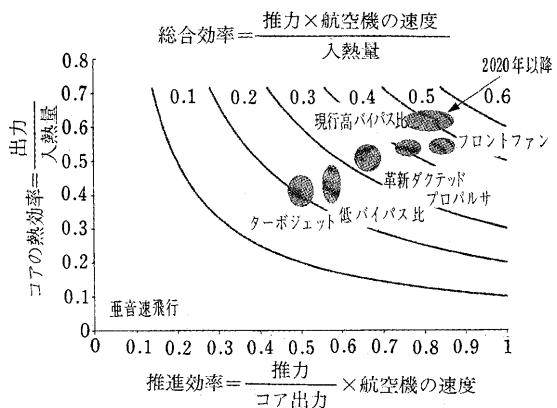


図7 航空ガスタービンの進化による総合効率の向上の実績と予想

図6はタービン入口温度の現在までの変遷を示すが、新耐熱金属材料や精密鋳造技術の実用化によって約300℃の温度上昇が実現し、60年代初頭に実用になったタービン翼の空気冷却により約400℃の温度上昇が達成されている。なお、図中にはセラミックスの適用による飛躍的な温度上昇が描かれているが、セラミックスは当面、実用になりそうにない。

図7は総合効率の向上のトレンドを推進効率と熱効率の面上に描いたもので、図8は今日までの総合効率の向上に果たした要素効率、サイクル効率、推進効率の寄与割合を示している。また、図9は主要なエンジンのバイパス比をその導入時期に対してプロットした図である。

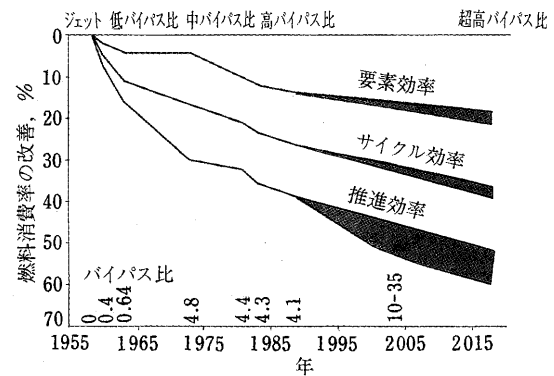


図8 要素効率、サイクル効率、推進効率の向上が民間航空ガスタービンの巡航時の燃料経済性の向上に対する寄与

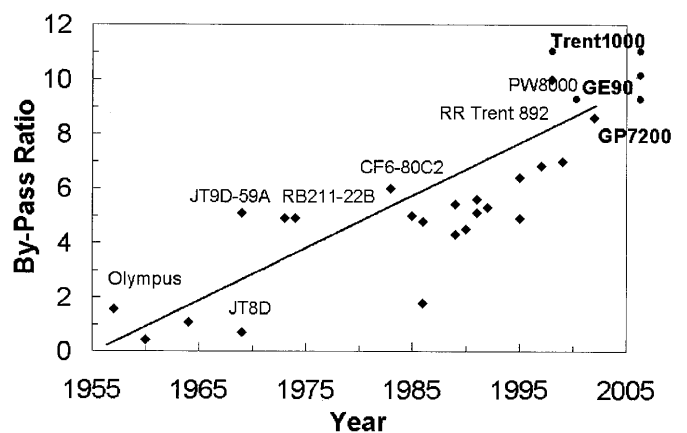


図9 バイパス比のトレンド

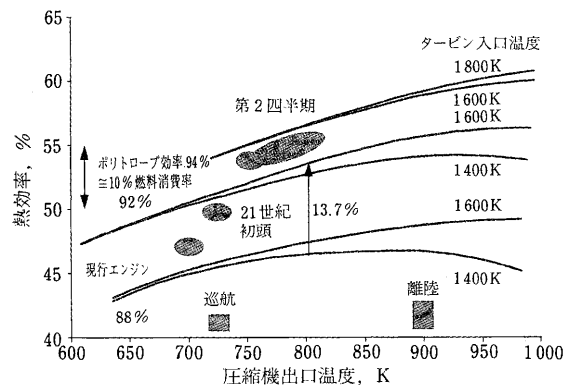


図10 要素効率向上と圧縮機出口温度の上昇によるコアの熱効率向上の予想

初期のターボジェットでは総合効率は約20%であったが、低バイパス比エンジンになると推進効率の向上により25%に、現在の高バイパス比エンジンでは高バイパス比化と熱効率向上とにより35%を超えている。

図10は熱効率と圧縮機出口温度の関係を示している。要素効率が92%になった場合、高圧力比化タービン入口温度の上昇とによって熱効率50%のエンジンが実用になりそうである。要素のポリトロープ効率が94%、タービ

ン入り口温度が1600-1800Kになれば55%の熱効率が実現されるであろう。この温度であれば原理的には、希薄予混合燃焼により NOx 排出は非常に低いレベルに抑制できる。要素効率は初期にもある程度の向上が図られたが、最近の向上は、コンピュータを用いた流れ解析と先進的計測技術を適用した実験とによって要素の空気力学が詳細に解明できるようになったことによる。実現には、製造技術の開発が必須であり、ワイドコードファンブレードの開発を例にすれば、中空チタン翼の製造技術の開発や複合材による製造技術が不可欠であった。いずれも今後の発展が期待される。

4.2 環境技術

航空機の環境問題といえば、空港近傍における騒音とエンジン排出物による局所的な大気汚染、それに温暖化や気象変動として顕在化する地球大気への影響である。航空輸送は、これまで年率5%程度の成長を続けてきており、最新の統計によるとテロによる落ち込みは一時的であったことがはっきりしてきている。今後の持続的な成長には、上記の環境問題の克服が不可欠と考えられている。

図11には高バイパス比エンジンが出現してからの航空機の騒音レベルの顕著な低減が示されているが、今後も改善が続くと予想される。図12はロンドンヒースロー空港におけるジェット機が登場してからの騒音暴露レベル

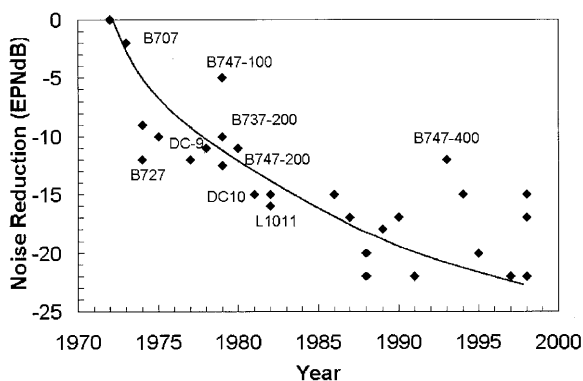


図11 航空エンジン騒音の軽減

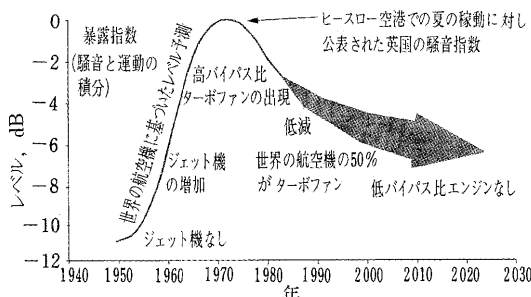


図12 高バイパス比エンジンへの代替による空港騒音暴露の著しい軽減

の変化を示している。ジェット機の増加により騒音暴露が著しく増大したが、高バイパス比エンジンの導入が始まり、急速に代替が進むにつれて騒音暴露は急速に下がったことが分かる。輸送の伸びに伴い離発着回数が増加増えるのでより静かな航空機の開発が必要であることはいうまでもない。空港騒音の問題は、離着陸時の運行方法の変更や適切な土地利用計画の実施によって解決される部分も大きい。

図13は空港での離発着に伴うエンジン排気中の窒素酸化物 (NOx)、一酸化炭素 (CO)、未燃炭化水素 (HC) の乗客ひとりあたりの排出量の遷移を示している。CO、HC については大幅な削減が達成されているが、NOx についてはそれほど減っていないことがわかる。図14は代表的なエンジンの ICAO NOx 排出パラメータ (離着陸を代表する規定のモード運転での推定総排出量を離陸推力で除した値) を全圧力比に対して示したものである。

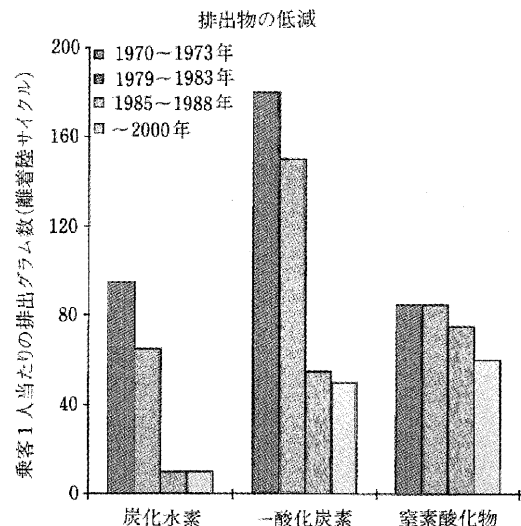


図13 離着陸サイクルにおける乗客1人あたりのエンジン排出量の遷移

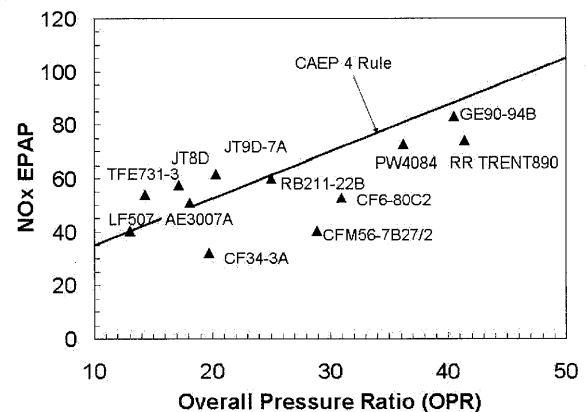


図14 NOx 排出基準の相次ぐ強化にも適合、縦軸：ICAO 離着陸サイクルでの NOx の排出パラメータ；横軸：全圧力比

圧力の高いエンジンでは余裕が少なくなっているが、超低 NOx 燃焼が可能な予混合方式燃料インジェクタの開発が進められているので、適切基準強化により近い将来には総排出量も抑えられると思う。図15はスモークの排出の遷移を示しているが、すでに非常に低いレベルにまで抑制されているエンジンがあることや今後、予混合燃焼が実用されることから、粒状物質の排出も抑制できると考えられる。

以上のようにガスタービンは、空港騒音や地球大気環境に関わる課題にも対応できると考えられる。

4.3 信頼性・安全性

民間航空においては、いうまでもなく安全性が最優先される。図16は航空エンジンの信頼性・安全性を表わす飛行中エンジン停止率 (In-Flight Shut Down) とエンジンのオーバーホール間隔 (Time Between Overhaul, Life on Wing) の実績と予測である。TBO は 1 万時間に達しているが、更に伸びる傾向にある。IFSD は、現用の成熟した設計のガスタービンでは1000飛行時間あたり0.03回程度であるのに対し、1952年のレポートによると、その当時主流であったピストン・エンジン航空機で

は0.35であるから⁽¹⁾、故障率は半世紀のあいだに10分の1以下になったということになる。この高い信頼性により ETOPS⁽²⁾ (Extended-Range Twin-Engine Operational Performance Standard) が導入されることとなり、双発の大型機が出現した。ETOPS 認可の際には IFSD は、緊急着陸が可能な空港まで180分要するときは 0.02×10^{-3} 以下、また、120分の場合は 0.05×10^{-3} 以下でなければならない。

5. 今後の航空用ガスタービン

すでに ICAO の CAEP においても航空機から排出される CO₂ 排出に対する課金や CO₂ 排出権取引が議論されている。航空輸送に伴い発生する CO₂ は現在、全体の 3 % 足らずであるが、他の分野と違って CO₂ 削減は非現実的で、そのため2050年には10%台になると予想される。世界の人口の増大と巨大な人口を抱えるロシア、中国、インド、ブラジルの経済成長に伴うエネルギー消費の増大、それによる燃料価格の高騰、航空輸送の需要増大など、地球温暖化防止のための CO₂ 排出抑制という観点から、燃料消費の少ないエンジンの開発が一層重要に成る。

引き続き高温化、高圧化、圧縮機・タービン要素の効率向上のために、地道な努力が続けられるのは疑いが無い。長距離飛行用大形機のエンジンでは、現在の高バイ

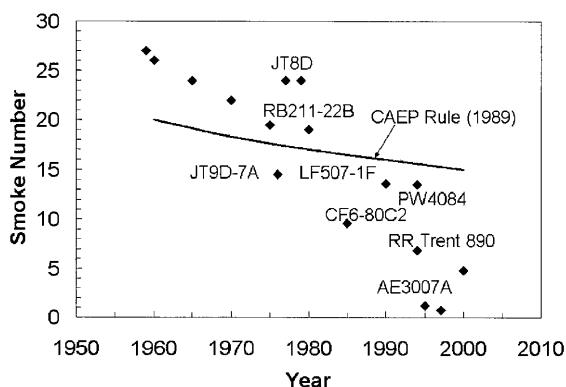


図15 スモーク排出の推移

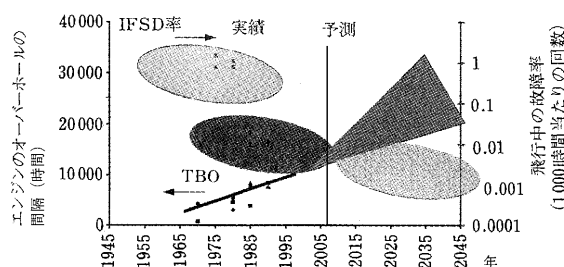


図16 エンジンオーバーホールの間隔 (TBO) と飛行中エンジン停止率 (IFSD) の推移

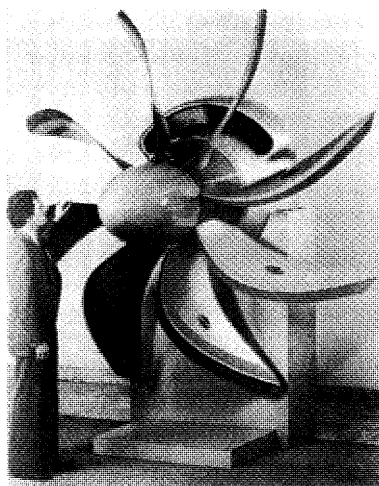
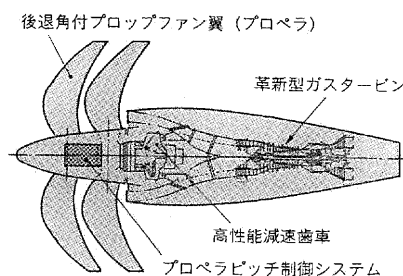


図17 P&W 社/Hamilton Standards 社のプロップ・ファン



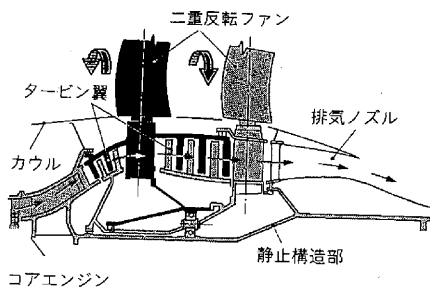


図18 GE社のUnducted・ファンの概念図

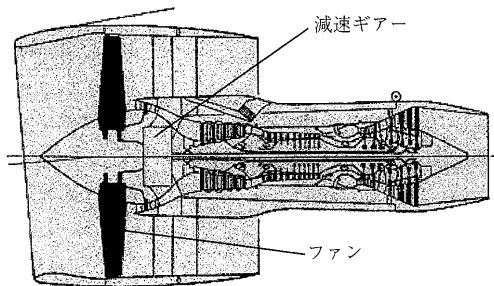


図19 V2500後継機構想P&W社のギアード・ファン

パス比ファンの形態のまま、一層の高バイパス化が進められると読む。

一方、離着陸の頻繁な短距離機に60年代に研究開発された高速ターボ・プロップ（Advanced Turboprop : ATP）が候補にはなるかもしれない。代表としてはターボプロップの発展型であるPWA社／ハミルトンスタンダード社のプロップファン（図17）、ユニークなGE社のダクトなしファン（Unducted Fan, 図18）がある。しかし、当時1990年台早期の実用化を目指していたが、その後の燃料価格が安定したことから開発は進んでいないのが実情で、実用化にはかなりの研究開発が必要とみる。騒音の点で不利である。一方、ターボファンの発展型とも言えるギアードファン（Geared Fan）の方が実現性が高いと個人的には思う。実際、V2500後継機では候補P&W社のギアード・ファン（図19）が候補に上がっているとのことであるが、ターボファンでも

高圧力比エンジンではバイパス比は10を超えてきており、どうなるか楽しみでもある。熱交換器による再生サイクルエンジンの研究開発も進められているが、熱交換器の重量増や耐久性など、解決すべき技術課題は重い。

6. あとがき

航空ガスタービンは進化しつづけており、これまでのトレンドをみても性能の限界を示唆するものはなさそうで、今後の技術発展の余地は非常に大きい。何十年後に成長が止まるのか、私には見えない。

なお、ここに述べたガスタービンに代わる航空エンジンはもちろん、ガスタービンを用いた新形式のエンジンの出現にも否定的な著者の見通しは、大学入学時と時を一にするロータリーエンジンの商品化や自動車排気規制導入時のわが国自動車メーカにおけるランキンサイクルエンジン、ガスタービンエンジンの開発、自動車用スターリングエンジン、セラミックスガスタービンエンジンなどの開発と、それらのその後を見てきたことに強く影響されているようだ。

やはり、適性のあるものは強いということである。しかし、その適性を出して進化させて人類の繁栄につなげていくのはガスタービンに関わるものの役目である。

末筆ながら本稿には文献(2), (4), (5)に掲載の図・写真を利用させていただいた著者の方々に感謝申し上げる。

参考文献

- (1) Flight Safty Foundation, Flight Safty Gigest, Feb, 2000, p. 5
- (2) 航空実用辞典, 日本航空広報部編, 改訂新版, p.323, 2004, 朝日ソノラマ
- (3) Bogga, S. Rud, K., Intercooled Recupated Aero Engine, DGLR-Paper 2004-179, 2004.
- (4) R. Singh (著), 林茂 (訳), 民間航空エンジンの50年, 機械の研究, 46巻, pp.815-822, 934-940, 1046-1051, 1997, 養賢堂
- (5) Ballal, D. R. & Zellina, J.: Progress in Aero Engine Technology (1939-2003), AIAA Paper 20043-4412, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2003.

特集：ガスタービンの将来展望 –ガスタービンは生き残れるか？–

商船用ガスタービンの現状と将来展望

井 亀 優^{*1}

IKAME Masaru

キーワード：ガスタービン，商船，海洋環境保全，排ガス規制，燃料価格

Gas Turbine, Merchant Ship, Marine Environment Protection, Emission Regulation, Fuel Price

1. はじめに

商船には旅客船，カーフェリー，貨物船，コンテナ船，油送船等，さまざまな船種，大きさ，速力のものがあり，一部に高速化を指向するものもあるが，その大部分は浮力を排水量に依存する長所を生かし，低速ではあるが効率の良い大量輸送サービスを提供している。

商船のこれまでの発展方向をたどると，貨物輸送の分野では世界経済の発展に伴う輸送需要の増大に対応するため，原料輸送船は輸送コストの削減に向けて専用化，大型化の方向に，製品輸送船は生産，流通，消費の高度化に対応するため，大型化はある程度に止め，高速化の方向に発達してきた。

他方旅客輸送の分野は，航空路線と競合しない比較的近距離の航路，カーフェリー（橋代わりあるいは陸路のバイパスの役目）に収斂している。近年それらに加えて船旅そのものを楽しむクルーズ船の需要が伸びている。

商船の大部分を占める排水量型船舶は，速力が比較的遅い領域では単位輸送仕事当りの必要エネルギーが他の輸送機関に比べて格段に少なく，その主機関として，熱効率は高いものの，重くてかさばるディーゼル機関が搭載可能で，特に長距離を航海する商船では，主機関と燃料を合わせた重さ，搭載スペースの観点から熱効率の良いディーゼル機関の優位性が発揮される。さらに価格の安い低質燃料油が使用できること，単機出力で小は百kW級から大は8万kWを超えるものまで製造可能であり，商船用主機関としてはディーゼル機関が9割を超える圧倒的なシェアを占めている。

しかし排水量型船舶は小型，高速のものほど，船体の大きさの割に大きな出力の主機関を必要とする。そのため双胴船，水中翼船やエアクッション船などの新しい形式の高速旅客船が開発されるとともに，これまでもガスタービンが小型，軽量の特長を生かしてこれらの船に搭載されている。さらに最近ではガスタービン技術の進歩に伴い，ガスタービン，ディーゼル機関と電気推進，あるいはガスタービン，蒸気タービンと電気推進を組み合わせた推進プラントが，大型のカーフェリー，クルーズ

船などに搭載されるようになった。

今日商船用ガスタービンの将来を展望する上で，ガスタービン技術だけではなく，海洋環境保護に向けた動向も重要性を増している。国際海事機関（以下IMO）は，温室効果ガス（以下GHG）の削減に向け，2003年から検討を始めるとともに，2005年5月には船舶からの大気汚染防止に向けて国際的なディーゼル機関に対するNOx排出規制，燃料油中の硫黄含有率の規制等をスタートさせ，すでに規制強化に向けた検討も始めている⁽¹⁾。今後海洋環境保護対策がさらに強化される情勢にある。このような状況は，熱効率は高いものの，低質燃料油を使用し，NOx，SOxの排出量が多いディーゼル機関の利用者に対応を求めることとなり，商船の分野におけるガスタービンとディーゼル機関の競争関係に何らかの影響を与えることも考えられる。

次章以下，ガスタービンを搭載した商船の例を紹介するとともに，船用ガスタービン及びガスタービン搭載商船の開発動向，海洋環境保護の動向を踏まえて商船の分野でのガスタービンの今後の発展の方向を展望する。

2. ガスタービンの特徴と商船への搭載例

一般的にガスタービンは，軽量で単位出力あたりの重さ，体積が小さい，単機大出力が可能，多様な燃料に対応することが可能，冷却水の必要性が低い，艤装が簡単，起動停止が容易，振動が少ない，排ガスが比較的きれい等の特長を持っている。反面現在船用機関として広く使われているディーゼル機関に比較して，熱効率が低い，

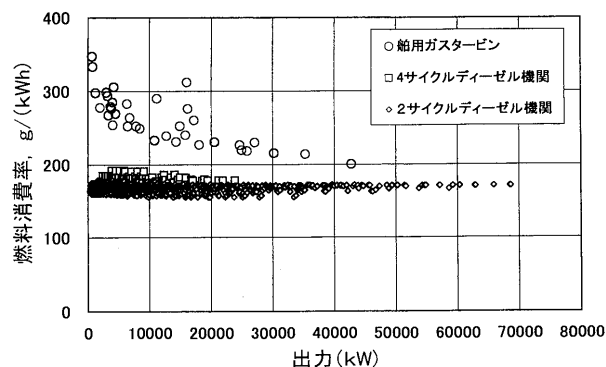


図1 出力と燃料消費率の関係

原稿受付 2007年1月9日

*1 海上技術安全研究所 エネルギー・環境評価部門

〒181-0004 三鷹市新川6-38-1

低質燃料油の使用が困難、高価格（初期価格、保守費）等の短所も有している⁽²⁾。図1に代表的な船用ガスタービンと船用ディーゼル機関の出力と燃料消費率の関係を示す^{(3), (4)}。

出力が2万kWを超えるガスタービンの燃料消費率は、ディーゼル機関のそれにかかなり近づいてはいるが、出力が2万kWより小さいものでは出力が小さいものほどガスタービンの燃料消費率の高さが際立つ。さらに、航空転用ガスタービンが主に利用する留出油であるMGO (Marine Gas Oil, 軽油相当) とディーゼル機関が利用する残渣油であるHFO (Heavy Fuel Oil, 重油) の価格差を考えると、両者の燃料費の差は依然として大きい。

このように燃料消費率の点ではディーゼル機関に劣るものの、商船用主機関の分野でも、ガスタービンはその特長を生かし、燃料費が決定的な因子にならない比較的近距離の各種高速旅客船（双胴船、水中翼船、エアクション船等）への搭載に始まり、その後のガスタービン技術の進歩に伴い、いくつかの特徴的な分野へ進出している^{(5)~(12)}。このようなガスタービンの商船への搭載例を表1に示す。

以下、これらの事例について特徴を簡単に述べる。

〈旅客船〉 比較的小型の高速旅客船は、小型、軽量、低振動、良好な起動性等の特長からガスタービンが選択されている。燃料費の関係で、そのほとんどが比較的近距離（数十～数百km）の航路に就航している。負荷の調整のため複数のガスタービンを統合したCOGAG (Combined Gas Turbine and Gas Turbine) システムを搭載した例もある。

大型クルーズ船の主機関には、振動、騒音の少なさ、排ガスがきれいなこと、操船性、機関室スペース縮小による客室の増加、信頼性、整備性が求められる。さらにホテル業務用、造水用に多量の熱を必要とすることから、

ガスタービンの排熱によって蒸気を発生し、高圧蒸気をタービンに送って軸動力を得るとともに、低圧蒸気をホテル業務用、造水用に使うことができるCOGES (Combined Gas and Steam Turbine Integrated Electric Drive System) を搭載したものがある。大型クルーズ船では主機関の排熱が有効利用できるのでガスタービン単体での熱効率の低さを補うことができる。

その他CODAG (Combined Diesel and Gas Turbine) システムを搭載したものもある。この推進システムでは、外洋航行中は熱効率の高いディーゼル機関の負荷を増して航行し、入出港、環境規制の厳しい海域を航行するときは、ディーゼル機関を一定負荷で運転して排ガスをきれいな状態に保ち、負荷変動をガスタービンで吸収しながら航行することを可能にする。

これら大型クルーズ船は、荒天下あるいは海洋環境（珊瑚礁）の保護から投錨できない海域での操船性、離着岸時間の短縮（タグポートに頼らない）等の必要から、推進装置として推力を偏向できる操船性の良い電気推進式ポッド型プロペラを搭載している例が多い。出力調整が容易なガスタービンはこの推進システムとの適合性が良好である。

〈カーフェリー〉 その多くが数十～数百kmの航路に就航している。ガスタービンとディーゼル機関を組み合わせたCODOG (Combined Diesel or Gas Turbine) システムを搭載した比較的大型のものが出現している。表1中の“Taurus”は、輸送需要の季節変動の大きな航路に就航しており、観光客の多い夏場には40ktで高速航行し、貨物輸送が主となる冬場と夜間は22ktで減速航行する必要から、CODOGシステムを搭載している。

この様に商船全体の主機関に占める割合は少ないものの、ガスタービンはいくつかの特徴的な船種の主機関として重要な役割を果たしている。

表1 ガスタービン搭載商船の例

船種	船名（型式）	載荷重量 (DWT), 総トン数(GT), 又は船長(m)	乗客定員、 ペイロード	速力(kt)	主機構成	総出力 (MW)	推進器
旅客船	Patricia Olivia II (双胴型)	45.6m	300人	40	COGAG Vericor TF40 2.98MW×4	11.9	
旅客船	ジェットfoil (全没型水中翼型)	170GT	286人	45	Allison 501KF 2.83MW×2	5.7	Water Jet ×2
旅客船 (大型クルーズ船)	Queen Mary 2	150000GT	2620人	30	CODAG GE LM2500+ 25MW×2 Wärtsilä 16V46 17MW×4	118	電気推進 ポッド型推進器×4
旅客船 (大型クルーズ船)	Millennium	90228GT	1950人		COGES GE LM2500+ 25MW×2 蒸気タービン 9MW×1	59	電気推進 ポッド型推進器×2
カーフェリー	Corsaire 13000 (単胴型)	150m	1120人 乗用車 250台と トラック 14台	42	CODOG GE LM2500+ 25MW×2 MTU 20V1163 6.5MW×2	66	Water Jet ×4
カーフェリー	Taurus (単胴型)	1200DWT	1800人 乗用車460台、又 は乗用車 100台 とトラック 30台	40	CODOG GE LM2500 22.2MW×2 MTU 20V1163 6.5MW×4	63	Water Jet ×4
カーフェリー	Explorer (双胴型)	124m	1500人 乗用車375台、又 は乗用車 80台と トラック 50台	42	COGOG GE LM2500 20.2MW×2 GE LM1600 13.07MW×2	66	Water Jet ×4
カーフェリー	Carisma (双胴型)			40	Alstom GT35 17MW×2	34	

3. 船用ガスタービン、ガスタービン搭載商船の開発動向

まず最近の代表的な船用ガスタービンの開発事例について述べる。

初めにサイクル方式を変えて性能改善を目指すものとして、艦艇用ガスタービンではあるが、先進的な中間冷却再生式のガスタービン WR21の開発がある¹³⁾。ロールスロイス社を中心に進められており、熱効率、部分負荷性能の改善の観点から、将来の商船用ガスタービンの発展の方向を示すものとして注目される。

同様の開発は日本でも行われており、再生式の船用ガスタービンの実用化を目指し、スーパーマリンガスタービン (SMGT) の研究開発が進められた¹⁴⁾。SMGT は A 重油焚きで熱効率43%を目指したもので、開発目標を達成して開発研究は終了した。現在、実船への搭載を目指した実証試験が進行中である。

次に価格の安い低質燃料油を焚くことによる燃料費の削減を目指した開発として、Siemens 社の例がある。Siemens 社が開発しているガスタービン SGT-500 (定格出力17MW) は、HFO (IFO180) を、保守性、排ガス性能に大きな影響を及ぼすことなく燃やすことができるとしている¹⁵⁾。HFO の使用による燃料費の大幅な削減を目指しており、船用ガスタービンの今後の方向として注目される。ここで IFO ナンバーは、油温50℃における mm^2s^{-1} 単位での動粘度値で燃料油を区分する方法である。

機械駆動用、船用ガスタービンとして、ロールスロイス社が開発した単純サイクル型ガスタービン、ユーロダイン (出力2500kW) がある¹⁶⁾。このガスタービンはガスゼネレータ部が遠心圧縮機、斜流タービンで構成される単純な構造ではあるが、このクラスとしては高い熱効率31.8%を特長としている。

この他、艦艇用で実績を積んだ CODOG, CODAG 等のシステムが、大型クルーズ船、高速カーフェリーあ

るいは大型 LNG 船用推進システムとして実用あるいは実用に向けた検討がされる段階に入った。

一方、ガスタービンを搭載した新しいタイプの商船の開発としては、計画段階のものも含め、次のようなものがある。

日本で進められているスーパーエコシップ実用化研究は、A 重油焚きの出力2500kW の再生式ガスタービン SMGT を、一般貨物船、カーフェリーの主機関として利用することを目指したもので、電気推進式ポッド型プロペラを利用する¹⁷⁾。2007年の実船での実証に向けて研究が進められている。排熱を利用して吸収式冷凍機を作動させ、夏場でも出力低下が少ないプラントが提案されている。

日本の高速貨物船の開発研究の結果を受けて実用化されたスーパーテクノライナー (TSL) “Ogasawara” は、空気圧支持方式表面効果船でウオータージェットにより推進され、このタイプとしては世界最大級である¹⁸⁾。この船は小笠原航路用の速力44kt の高速貨客船として建造され、全長140m、総トン数13923トンで、定格出力25MW の LM2500+2 基で駆動されるウオータージェット2基で推進される。小笠原航路に就航が予定されたが、残念ながら燃料油価格高騰の余波を受けて就航は中止された。

欧州連合 (EU) は、輸送・物流産業を支援して、貨物輸送を道路輸送から短距離海上輸送、鉄道輸送、内陸水上輸送へモーダルシフトさせることにより、道路渋滞減らし、輸送システムの環境性能を向上させるため、EU プログラム “MARCO POLO” (2003年-2006年) で提案募集を行っている¹⁹⁾。

これに関連して IZAR 社と Rolls-Royce 社は、2002年に単胴排水量型高速貨物船 (EHSCV: European High Speed Cargo Vessel) の計画を公表した²⁰⁾。この船は800海里までの比較的近距離の輸送を想定した航海速力37kt の RORO (roll-on roll-off) 船として計画された。全長212m、全幅22m、載貨重量3400トンで、定格出力

表2 蒸気タービンに替わる LNG 船用主機関の特徴

主機関	主機関の燃料種	備考
蒸気タービンプラント	HFO and/or BOG	HFOとBOGの混焼可能 信頼性、保守性良好 熱効率が低い
ガスディーゼルエンジン(複数台)+電気推進 例えば Wärtsilä 32DG	MGO and BOG	熱効率高く、排ガスが清浄 噴射のためのBOG圧縮機が大きい 高压可燃性ガスの安全対策が必要
二元燃料エンジン(複数台)+電気推進 例えば Wärtsilä L50DF	MDO or BOG+MDO(着火用)	燃料選択の自由度大 HFO対応機は開発中
ディーゼル機関 2サイクル低速型 2機2軸 4サイクル中速型 複数台+電気推進 or 可変ピッチプロペラ	HFO	熱効率高く、信頼性良好 BOGの再液化装置が必要 再液化装置の必要動力が大きい 排ガスの問題(NO_x , SO_x)
ガスタービン+蒸気タービン(COGES) 例えば Siemens SGT-500(GT35C) その他にCOGAG, CODOGシステムの提案もある。	BOG and MGO, MDO, HFO (IFO30)	大出力向き 機関部配置の自由度増による貨物搭載量の増加 排ガスが清浄 部分負荷の低効率、高温時の出力低下

32MW の Rolls-Royce MT-30 2 基で駆動されるウォータージェットで推進される。燃料には MDO (Marine Diesel Oil, A 重油に相当) を使用する。

新たなガスタービンの適用分野として大型 LNG 船が注目されている。環境対策から世界的に LNG 需要が増しており、LNG 船の船腹数の増加、大型化が検討されている。

ところで、LNG 船の主機関には、緊急時に備え停泊中もスタンバイ状態にできること、輸送中に積荷の LNG から発生する BOG (Boil-off Gas) を燃料にできること、BOG が不足したときも HFO を使って必要な出力を出せること、BOG が余剰となったとき安全に処理できることなどが要求される。このため商船の主機関のほとんどがディーゼル機関になる中で、蒸気タービンプラントが採用され続けて来た。しかし蒸気タービンプラントは、熱効率が低いこと、資格を持った機関部員の確保が必要 (運転に熟練を要す) なことから、HFO 焚き 2 サイクルディーゼル機関と再液化装置の組合せ、二元燃料ディーゼル機関 (HFO 又は BOG) あるいはガスタービンを利用する COGES システム等の検討が始まっている。この中で、ガス機関やディーゼル機関では対応が難しい大型 LNG 船の主機関としてガスタービンを利用した COGES システムが提案されている²⁰⁾。表 2 に蒸気タービンプラントに替わる LNG 船用主機関の特徴をまとめた。

以上示したように、商船用主機関としてのガスタービンの搭載は、高速旅客船、カーフェリー、大型クルーズ船の分野で領域を拡げており、大型 LNG 船、モーターシフトの流れの中で近距離貨物輸送を担う内航船の分野へ領域を拡げようとしている。

一方、競争相手であるディーゼル機関も排ガス対策技術の開発が進んでおり、燃料油価格の上昇ともあいまって、ガスタービンが商船用主機関として容易にシェアを広げられる状況にはない。現状の船舶排ガス規制レベルはディーゼル機関に対応した値にとどまっており、ガスタービンの排ガス性能をはじめとする特長が、広く船用主機関の選択を左右する状況には至っていない。

4. 今後の展望

現状では商船の主機関の分野では、熱効率が高く、しかも安価な HFO が使用でき、信頼性も確立していることからディーゼル機関が圧倒的なシェアを占めている。この状況は容易には変わらないと思われる。

主機関にどのような機関 (機関形式、出力、台数等) を採用するかは、機関室容積、機関部質量、建造費、燃料費と潤滑油費、保守点検費、修繕費、信頼性などを総合的に考慮して決めなければならない。航路の長さ、輸送需要の影響を受けるため、一般論として定量的な議論することは難しく、ここでは定性的な議論に止める。

商船用主機関としてのガスタービンの将来を展望する

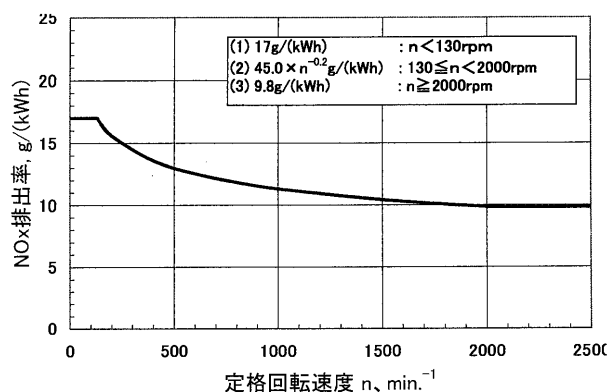


図2 NOx 規制値

上で、GHG 削減対策及び船舶排ガス規制の動向、燃料油の価格構造と今後の価格の推移が重要な鍵となる。

〈商船をめぐる温室効果ガス排出削減対策、海洋環境保護の動き²¹⁾〉 1997年12月の国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) の第3回締約国会議 (COP3) において、GHG の排出削減数値目標を含む京都議定書が採択され、UNFCCC の「科学上及び技術上の助言に関する補助機関会合 (SBSTA)」は、IMO に対して外航船からの GHG 削減対策の検討を要請した。なお内航船については各国政府の所管となっている。

これを受けて IMO は「GHG 削減のための IMO 戦略に関する文書 (IMO 総会決議)」を策定し、2003年に開催された第23回総会において採択した。

この決議では、1) 6 種の温室効果ガス (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs, PFCs, SF_6) を削減対象とすること、2) 排出指標に関するガイドラインを定め、ボランティアな削減努力を求めること、3) 排出指標を考える船種区分はタンカー、コンテナ船、散積貨物船の三種とすることとして、これらの事項について検討を始めたが、排出指標の算定方法の決定が遅れるなど、IMO としてのスケジュールは遅れている。

これとは別に、IMO は2005年に船舶からの排ガスの規制を導入した。NOx については、外航船では2000年1月1日以降に建造される船に搭載され、又は同日以降に主要な改造が行われる出力130kW 以上のディーゼル機関を規制対象として、日本の内航船では2005年5月19日以降に建造される船に搭載され、又は同日以降に主要な改造が行われる出力130kW 以上のディーゼル機関を規制対象として、図2に示す規制値を満足することが求められる。

規制値という NOx 排出率は、定められた負荷率毎に求められた NOx 排出率の値を、負荷率ごとに定められた重み係数で加重平均した値である。たとえばプロペラに直結された主機関では、負荷率100%, 75%, 50%と25%に対し、それぞれ重み係数が0.2, 0.5, 0.15, 0.15と規定されている。

次に硫黄酸化物については、船舶で使用されるいかな

る燃料も、硫黄分は4.5%（質量）を超えてはならない、また SO_x 排出規制海域（SECA：SO_x Emission Control Area）では、硫黄含有率1.5%以下の燃料油を使用するか、あるいは SO_x 排出率6.0g/(kWh) に抑えることの出来る排ガス洗浄装置を装備しなければならないと規定されている。現時点ではバルト海海域と北海海域が SECA に指定されており、それぞれ2006年5月、2007年11月からの施行が決定している。さらに IMO は、2010年及び2014年又は2015年を第2次、第3次規制開始時期とする、NO_x、SO_x 規制強化、及び粒子状物質（PM）規制の必要性についての検討にはいった。

現状の規制値のレベルにおいては、ガスタービンとディーゼル機関の初期価格、燃料費、保守費等の差を埋め合わせるものになる事例は限られる。しかし海洋環境保全対策は強化される方向にあり、2次、3次規制における削減率は流動的であるが、削減率によってはガスタービン選択に有利に働く可能性がある。

〈船用燃料油の価格〉 次に、船用燃料油の価格の影響について述べる。言うまでもなく石油製品の価格は短期的な上げ下げはあるものの、長期的に見れば上昇傾向で推移することは確実で、ガスタービンにとっては不利な条件である。ここでは燃料油種間の価格差について簡単に述べる。

アジアの主要な燃料補給港シンガポールにおける船用燃料の代表的油種 IFO380, IFO180, MDO, MGO の

平均的な価格^⑧を図3に示す。IFO380, IFO180はHFOに該当する。

2006年5月～11月の平均価格は、それぞれ312, 322, 595, 602US\$/トンとなっており、航空転用型の船用ガスタービンが使っている MGO の価格を1とすると IFO380, IFO180, MDO の価格は、それぞれ0.52, 0.53, 0.99となる。このように燃料価格は変動するものの、残渣油と留出油ではおよそ2倍の価格差がある。

表1中の双胴型高速カーフェリー“Carisma”は、HFO (IFO80) を70～75%、留出油を25～30%混合した燃料油 (IFO30) を、可視煙をほとんど出すことなく焚けるように改良された燃焼器を持つ産業用ガスタービンを搭載している。航空転用型ガスタービンや高速ディーゼル機関の多くが用いている MGO を焚く場合に比べ、燃料費がおおよそ30%削減できるとしている^⑨。ちなみに50℃における動粘度は、A重油（JIS 重油1種1号又は2号）は20mm²s⁻¹以下、B重油（JIS 重油2種）は50mm²s⁻¹以下、C重油（JIS 重油3種1号）は250mm²s⁻¹以下と規定されている。従って IFO30グレードの燃料油は、A重油とB重油の間に位置づけられる燃料油である。

ガスタービンとディーゼル機関の燃料費を考えると、熱効率の差とともに燃料価格の差が大きく響いている。商船用主機関としての領域を拓げるためには、排ガス性能、初期価格、保守費とのバランスを取りながら、価格の安い燃料油を焚けるガスタービンを開発することが一つの方向と思われる。

商船にはさまざまな船種、大きさのものがあり、主機関に対する要求も単純ではない。以下、船種毎にガスタービンの発展の方向を述べる。

〈小型旅客船の分野〉 これまでもガスタービンが進出している分野だが、引き続き数十 km から数百 km 程度の航路を走る様々なタイプの高速旅客船の主機関として、高速ディーゼル機関との競合はあるものの、小型、軽量、低振動等の特長を生かして引き続き利用されると考えられる。

〈大型クルーズ船〉 この種の船の推進プラントには、振動、騒音の少なさ、排ガスがきれいなこと、操船性、

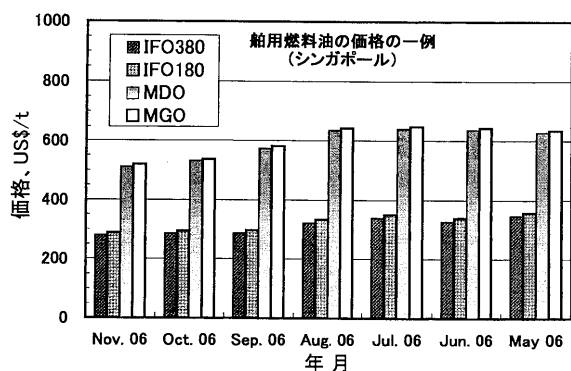


図3 船用燃料価格の例

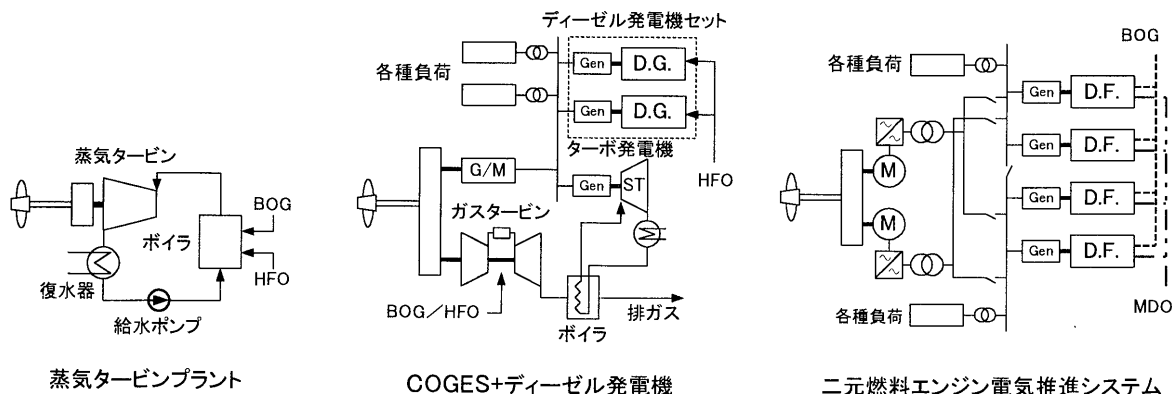


図4 蒸気タービンに変わる主機関の例

機関室スペース縮小による客室の増加, 信頼性, 整備性が求められる。クルーズ船の運用の特徴から, COGES システム, あるいは CODAG システムにくみ上げられたガスタービンの利用が拡大すると思われる。

〈カーフェリー, RORO 船〉 輸送需要の高度化, トラック輸送から海上輸送へのモーダルシフトに伴い, 比較的高速のカーフェリー, RORO 船が求められており, このようなものでは主機関の出力が増すことから, 大きさ, 速力によってはガスタービンが選択される場合があると思われる。

〈LNG 船〉 蒸気タービンプラントに変わる推進プラントとして, ガス機関, 二元燃料ディーゼル機関あるいは HFO 焚きディーゼル機関と BOG 再液化装置の組合せなどの開発が行われており, これらを搭載した LNG 船も出現している。その中で, 特に大型の LNG 船用の主機関として COGES システムが注目されている。図 4 にこのような主機関の構成例を示す。

この分野では, 安全上の見地から停泊中も主機をスタンバイしておかなければならないこと, BOG を安全に処理 (焼却又は再液化) しなければならないことなど, 安全にかかわる複数の拘束条件があり, 将来展望は容易ではないが, ガスタービンの新たな適用分野として期待される。

ガスタービンは, 石油系燃料を使う限り, 燃料費の点でディーゼル機関に対抗することは難しいものの, LNG 船の場合, 出力に比して軽量, 小型であり, 電気推進と組み合わせることにより, 配置の自由度が増し貨物搭載量を増すことができることを積極的に追求することでガスタービンの領域を拡大できる可能性がある。

5. まとめ

交通需要の多様化, 高度化が進み, 海上輸送を担う商船にも様々な輸送サービスの提供が求められる中で, GHG 削減対策, 海洋環境保護に向けた排ガス規制は, さらに厳しくなる情勢にある。

商船の主機関として圧倒的なシェアを持つディーゼル機関は, 今後の排ガス規制値の推移によっては, 燃焼技術による対応のみで NO_x を低減することが困難になり, 低硫黄分燃料を使い, SCR 装置などの後処理装置を装備せざるを得なくなることも考えられ, その優位性に負の影響がでる可能性が高い。しかしそれがガスタービンとディーゼル機関の選択に影響するところまで行くかは個々の適用事例の条件に依存する。このことに係って, 以前から言われていることではあるが排ガス性能, 初期価格, 保守費とのバランスを取りながら, 価格の安い低質燃料油を焚けるガスタービンの開発が鍵になると思われる。

ガスタービンは, これまでに比較的小型の高速旅客船, 大型カーフェリー, 大型クルーズ船の分野では一定の地歩を築いており, 技術の発展に伴いこの分野での適用範囲を拡大していくものと思われる。この点で船舶排ガス規制は有利に働く。

大型 LNG 船の主機関のような新たな領域については, 燃料消費率や初期価格などでディーゼル機関を凌駕するメリットを見出すのは今後も困難と思われ, 個々の事例ごとに様々な要求項目を総合的に評価したときガスタービンが選択される場面が出てくることを期待したい。

参考文献

- (1) <http://www.imo.org/>
- (2) 三輪光砂, ガスタービンの基礎と実際, 三訂版, 平成 8 年, p. 6, 成山堂書店
- (3) Robert Farmer, Gas Turbine World 2006 Handbook, 2006, p.96-99
- (4) 国産エンジンデータブック編集委員会, 国産エンジンデータブック '00/'01, (2001), p. 6-335, 株山海堂
- (5) Peter Mullins, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (2003-3), p.10
- (6) Jake, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (1999-9), p.50
- (7) 荒井正志, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻-第12号, (2004-12), p. 16
- (8) Mike Osenga, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (2002-3), p.59
- (9) Klaus Kunberger, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (2000-9), p.67
- (10) Klaus Kunberger, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (1999-3), p.18
- (11) Peter Mullins, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (1997-4), p.10
- (12) Peter Mullins, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (2001-9), p.58
- (13) Peter Mullins, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (1999-12), p.30
- (14) 荒井正志, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻-第12号, (2004-12), p. 17
- (15) Bo Svensson, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (2006-11), p. 32
- (16) Peter Mullins, DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, (2001-9), p. 46
- (17) 加納敏幸, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻-第12号, (2004-12), p. 9
- (18) 小林明生他 1 名, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻-第12号, (2004-12), p. 3
- (19) http://ec.europa.eu/transport/marcopolo/index_en.htm
- (20) http://www.rina.org.uk/rfiles/navalarchitect/izar_jan03.pdf
- (21) 湯浅和昭, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第40巻-第3号, (2005-5), p. 7
- (22) <http://www.bunkerworld.com/markets/prices/>

特集：ガスタービンの将来展望 - ガスタービンは生き残れるか？ -

中小型ガスタービンの現状と将来

向井 茂^{*1}
MUKAI Shigeru

キーワード：中小型ガスタービン，ガスタービンコージェネレーション，排熱有効利用，省エネルギー，CO₂排出量削減

1. はじめに

2005年2月に発効した京都議定書の第一約束期間（2008～2012年）が目前に近づき，温室効果ガス排出量の実効的な削減が求められている。京都議定書での温室効果ガス排出量を1990年比6%削減の目標に対し，2005年度の我が国の排出量は同8%増と，目標達成は非常に困難な状態にある。政府も「エネルギー使用合理化に関する法律（略して省エネ法）」の改正や，エネルギー使用合理化事業者支援事業補助金政策などで，一層の省エネルギー努力を求めている。

省エネルギー推進の必要性がますます高まる中，高効率な原動機やコージェネレーション設備の開発・改良はますます重要性を増している。また，温室効果ガス削減を目的とした天然ガスへの燃料転換需要や，コージェネレーション設備やBTG (Boiler Turbine Generator) を含むエネルギー供給設備への需要に，クリーンで高効率なガスタービンは大いに期待されている。

一方，海外市場は国内より遥かに規模が大きく有望であり，しかもガスタービンコージェネレーションは温室効果ガスの大部分を占める二酸化炭素（以下CO₂）排出量削減の有効な手段となり得ることから，「確実な即効薬」として大きく伸びていくものと考えている。

2. 中小型ガスタービンの導入トレンドとエネルギー・環境政策の変遷

2.1 当社製ガスタービンコージェネレーション設備の概要

川崎重工は1972年に初の自社開発ガスタービンの試験運転を開始し，1976年にはガスタービンを駆動源とした非常用発電設備の発売を開始した。その後自社製ガスタービンの開発と発電設備のシリーズ化を進め，非常用ガスタービン発電設備としては発電端出力150kW から4,000kW までの21種類を，コージェネレーション設備としては表1に示す発電端出力650kW から18,000kW まで9機種の標準タイプをはじめ，DLE（Dry Low Emission）燃焼型，熱電比可変型，さらに蒸気タービンと組み合わせたコンバインドサイクルシステムなど，

幅広いラインアップを展開している。

非常用ガスタービンと発電端出力4,200kW 以下の6種類の小型コージェネレーション用ガスタービンは遠心式圧縮機，単筒缶式燃焼器，軸流式タービンの構造（図1参照）を採用し，それ以上の容量のガスタービンは軸流式圧縮機，多缶式燃焼器，軸流式タービンの構造（図2参照）を採用している。

2.2 ガスタービンコージェネレーションの導入トレンドとエネルギー・環境政策の変遷

図3の上段にはガスタービンコージェネレーションの導入トレンドを累積発電容量（ストック）⁽¹⁾で示し，同図下段にはガスタービンの開発状況とエネルギー・環境政策のトレンドを示した。

1984年，東京ガス本社ビルに1,000kW ガスタービン

表1 コージェネレーション設備ラインアップ（標準システム）

機種	エンジン 型式	発電端 出力 (kW)	送気 蒸気量 (ton/h)	発電端 効率 (%)	熱回収 効率 (%)	総合 効率 (%)
PUC06	S2A-01	650	2.73	19.4	56.9	76.3
PUC12	M1A-11	1,200	3.82	22.1	49.2	71.3
PUC15	M1A-13	1,500	4.70	23.4	51.3	74.7
PUC20	M1A-23	2,135	6.75	23.5	52.1	75.6
PUC30	M1T-13	2,900	9.21	22.9	51.1	74.0
PUC40	M1T-23	4,200	13.36	23.3	51.9	75.2
PUC60	M7A-01	5,750	11.26	30.6	42.3	72.9
PUC70	M7A-02	7,050	12.80	31.1	40.0	71.1
PUC180	L20A	18,630	28.70	34.0	37.1	71.1

（主要条件）吸気温度：15℃、吸排気圧損あり、燃料：天然ガス、
NOx低減：水噴射（S,M1型）、蒸気噴射（M7,L型）、
蒸気：0.83MPaG（蒸気噴射仕様を除く）、給水：60℃

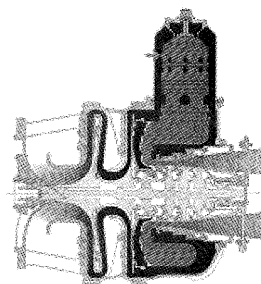


図1 M1A-13型ガスタービン断面図

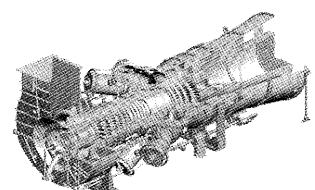


図2 M7A-03型ガスタービン断面図

原稿受付 2007年1月15日

*1 川崎重工工業(株)ガスタービン・機械カンパニー
〒105-6116 東京都港区浜松町2-4-1

コージェネレーション設備を納入したのが、当社のコージェネレーションビジネスの始まりである。図3下段に示す様に、1980年代後半からコージェネレーションに係わる様々な電気事業法の規制緩和が開始された。更に1990年代後半からは、国際的な地球温暖化問題への関心が高まり、新エネルギーの活用や省エネルギーの推進が強化されていく。これらの規制緩和やコージェネレーション推進施策の効果と、コージェネレーションの優れた省エネルギー性や環境安全性が認められたことにより、1995年から2000年頃にかけてガスタービンコージェネレーション設備の導入が加速的に進んだ。

2006年5月にまとまれた「新・国家エネルギー戦略」では、省エネルギーの長期目標として今後2030年までに更に30%の省エネルギーを行うとの数値目標が設定されており、省エネルギーが今後ますます促進されていく状況にある。

2.3 コージェネレーション設備導入に大きな影響を及ぼしたエネルギー・環境政策

1) 特定規模電気事業者 (PPS) 制度 1980年代後半からコージェネレーション設備導入に係わる電気事業制度の規制緩和が相次いで実施された。2000年には電力小売制度の部分自由化や PPS などの制度が創設され、電力自由化の範囲拡大が更に進められつつある。これらの規制緩和により、一般電気事業者以外の PPS が特定の需要家に対して電気供給を行うという新たなビジネス形態と、新たなビジネスチャンスが産み出された。

2) 新エネルギーの補助金制度 天然ガスコージェネレーションの普及に大きな影響を与えたものの一つが

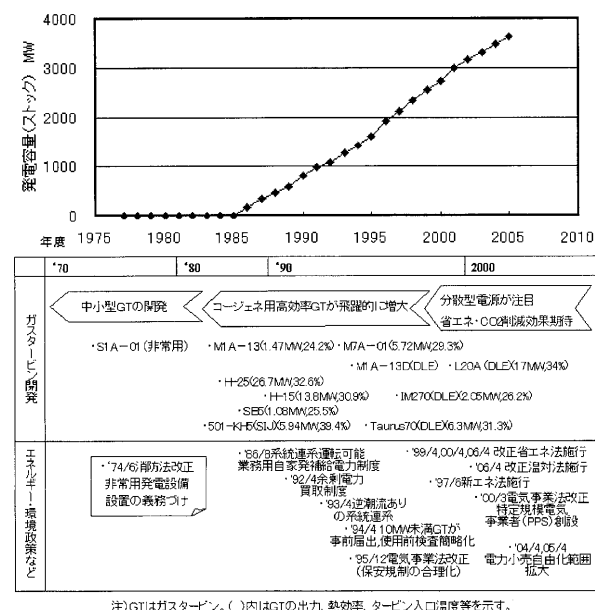


図3 ガスタービンコージェネレーションの発電容量（ストック）とエネルギー・環境政策のトレンド
出典：発電容量は日本コージェネレーションセンター調べ

「新エネルギー利用等の促進に対する特別措置法（略して新エネルギー法）」に基づく「新エネルギー事業者支援対策事業」に対する補助金制度であった。これは民間事業者が天然ガスコージェネレーション等の新エネルギー設備を導入して行う先進的で規模の大きな事業を対象として行われる補助事業である。

2000年前後に高効率天然ガスコージェネレーションの具体的設備として熱電可変型ガスタービンが示され、これが当時の6～7MW級熱電可変ガスタービンの普及に強い影響を与えたものと思われる。補助対象となる要件は年々見直されており、2000年初頭には大型（5～6MW級）ガスエンジンの普及が促進された。

2006年3月に新エネルギーの概念見直しが行われ、再生可能エネルギーに限定された。これにより新エネルギーの枠組みから天然ガスコージェネレーションや燃料電池などは除かれることになり、高性能なシステムを開発していく努力がますます必要となっている。

3) 省エネルギーの補助金制度 もう一つの重要な補助金制度が「エネルギー使用合理化事業者支援事業」である。これは省エネルギーを実施している事業者が更に省エネルギーを推進するために、先進的技術の導入、先進的な取組を実施する場合に、事業費の一部を補助するものである。

3. 中小型ガスタービンの特徴

3.1 非常用ガスタービン発電設備の特徴

表2に非常用ガスタービン発電設備の特徴とディーゼル発電設備とを比較して示す。非常用発電設備とは、火事・地震等により停電が発生した際に、非常用ポンプ、照明、換気、消火、通信設備などに電力を供給する設備であり、起動信頼性が重要な要素である。

1995年に発生した阪神・淡路大震災や2006年8月に発生した首都圏広域停電などでの実績により、非常用ガスタービン発電設備は地震・停電に強いという評価を受け、2005年度現在全国に5000台（総発電容量約3,500MW）を超える納入実績がある。

表2 非常用発電設備とディーゼルエンジン発電設備の比較

駆動源	ガスタービン	ディーゼルエンジン
	回転エネルギーを直接取り出す	往復運動を回転エネルギーに変換
起動信頼性	高い(99.97%以上) [社内データ]	やや低い
起動時間	40秒以内	10秒起動もある
周波数変動	脈動無し。瞬時変動率が小さい	脈動あり。瞬時変動が大きい
燃料	A重油・軽油・灯油(ブレンドも可)・都市ガス・天然ガス・LPG	A重油・軽油
振動	小さい	大きい
寸法・重量	小さく、軽い。耐震性が良い	大きく、重たい。耐震性に不安
冷却方式	空冷＝冷却水不要	水冷＝冷却水必要
メンテナンス	日常点検容易	日常点検は面倒
燃料消費量	多い(ディーゼルの約1.5～2倍)	少ない
排気量	大(ディーゼルの約2.5～4倍)	小

3.2 ガスタービンコージェネレーション設備の特徴

ガスタービンコージェネレーション設備の特徴も非常に表2参照)とほぼ同様である。またコージェネレーションに多く用いられるガスエンジンの特徴は、燃料が天然ガスであることを除いて同じ往復動内燃機関であるディーゼルエンジンとほぼ同様である。

以下にこれ以外のガスタービンの特長を述べる。

1) 長いメンテナンス周期 ガスタービンは回転体であるのに対し、ガスエンジン、ディーゼルエンジンなどは摺動部を有する往復動内燃機関であるために一般にメンテナンス周期は短い。点火栓を有するガスエンジンでは更に短期間で点火栓の交換や点検が必要となる。化学プラントや石油精製所では長期間の連続運転を行うことが多いため、ガスタービンが適している。

2) 多様な燃料が使用可能 表2に示した様に、多種の液体燃料やガス燃料の使用が可能である。この他にも液体燃料代替えとして利用が検討されている GTL (Gas To Liquid) や DME (ジメチルエーテル) には既存技術で対応が可能である。

3) 高効率運転が可能で CO₂排出量削減率が大 図4に6~7MW 級ガスタービンコージェネレーションとガスエンジン・ディーゼルエンジンコージェネレーションの総合効率、省エネ率(省エネルギー法に基づく原油換算一次エネルギー削減率)、CO₂排出量削減率の比較例を示す。

総合効率、省エネ率、CO₂排出量削減率共にガスタービンは最も大きい削減効果があり、ガスタービンコージェネレーションは熱(蒸気)需要が高いサイトに適している。

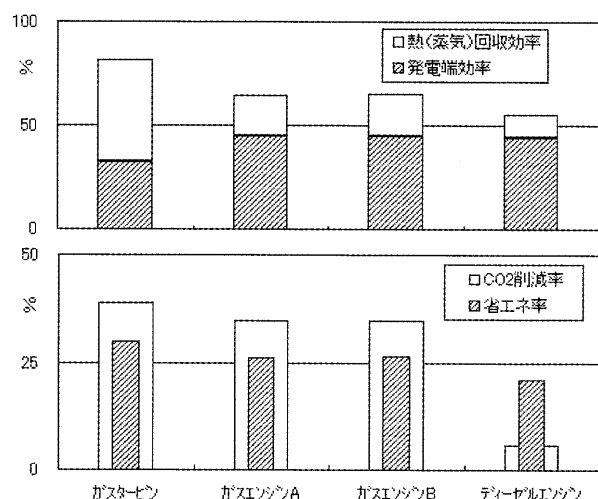


図4 6~7MW 級ガスタービンコージェネレーションと他の原動機との総合効率、省エネ率、CO₂削減率の比較例
主要条件：・各原動機の仕様はカタログ値、・従来ボイラはA 重油焚き、・都市ガスの原単位は東京ガス公表値、・その他の原単位などは省エネ法、温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルによる

4. 中小型ガスタービンの今後の展望

4.1 ガスタービンの高効率化

中小型ガスタービンの出力・効率(LHV 基準)のトレンドを図5に示す。ガスタービンの効率は発電出力が大きくなるにつれて、また年代を経るにつれて改良されて高くなる傾向にある。

ガスタービンの効率を上げるのに有効な手段は、主に圧縮機やタービンなどの要素効率を上げ損失を低減する方法と、タービン入口温度(TIT)を上げて熱サイクルの効率を上げる方法とに分類できる。

前者で最近高効率化の進展に重要な役割を果たしているのが CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析技術の発達である。空気圧縮機やタービンの設計を従来は単段毎に行っていたものが、計算機能力の向上に伴って圧縮機全体やタービン全体での解析が、比較的短時間に

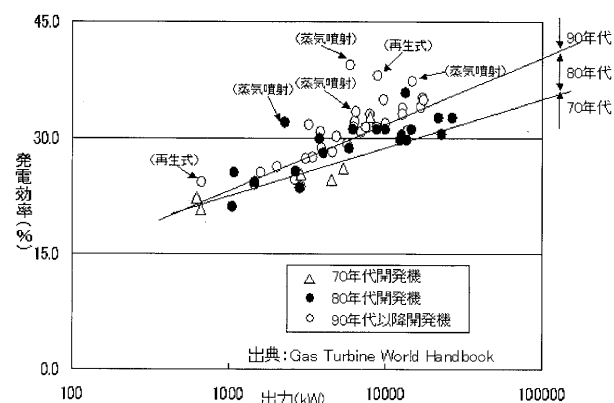


図5 中小型ガスタービンの出力・効率の遷移

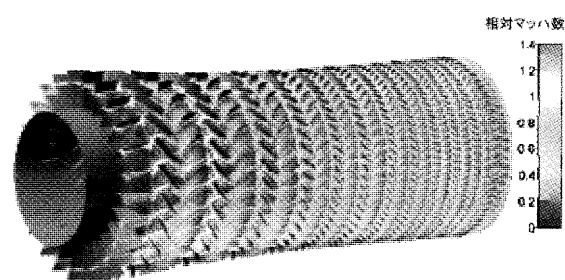


図6 軸流11段圧縮機の多段CFD 解析例(相対マッハ数分布)

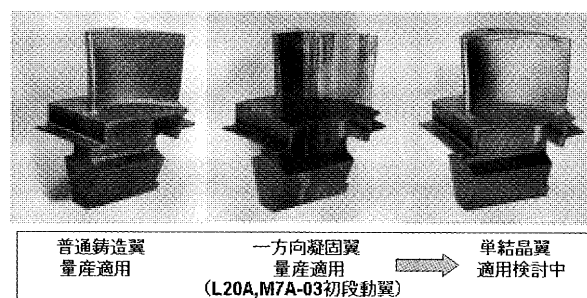
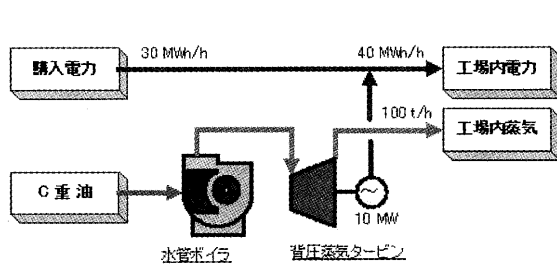
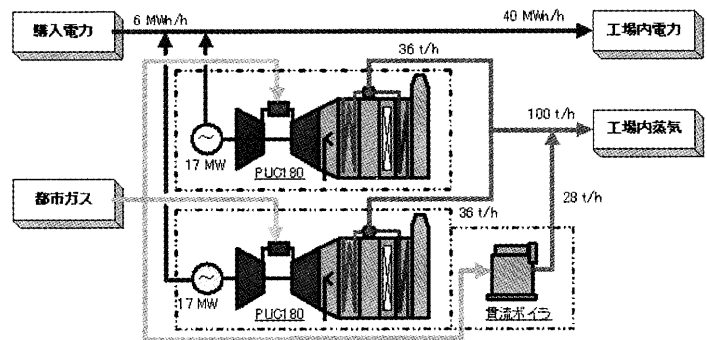


図7 普通鑄造翼・一方向凝固翼・単結晶翼の比較



(a) 現状：電力の一部と蒸気を BTG から供給



(b) 既設 BTG を撤去しガスタービンコージェネレーションに換装

図8 BTGをガスタービンコージェネレーションへ換装例

実行可能となってきた。例えば図6は当社製8MW級ガスタービンの11段軸流圧縮機の多段CFD解析例であるが、性能上重要である段間マッチングを確認しながら、圧縮機損失を低減した翼列設計が可能となっている。

後者の TIT 高温化はタービン翼の冷却技術・耐熱材料技術・遮熱技術の発展に依っている。図7にタービン一段動翼の写真例を示すが、タービンの動静翼は高温でのクリープ強度が優れたニッケル基耐熱合金を精密鋳造して製作される。従来中小型ガスタービンでは普通鋳造翼が多かったが、冷却構造の複雑化に寸法的な限界があることから、最近はクリープ強度の高い方向凝固翼を採用するケースが増えつつあり、更なる高温化に向けて単結晶翼の採用も検討されている。

以上の様に、少し前までは比較的大型のガスタービンにのみ採用されていた技術が最近では中小型ガスタービンの改良にも利用されるようになり、中小型ガスタービンの性能アップが更に加速されることが期待される。

4.2 ライフサイクルコストの低減

1) 総合効率の上昇(排熱の有効利用) ガスタービンコージェネレーションでは、(総合効率の高い運用) = (排熱の有効利用) にほかならない。3.2節で述べた様に排熱を有効に利用すれば、中小型ガスタービンコージェネレーションにより省エネルギー性とCO₂排出量低減の両面でメリットの大きな運用が可能である。

比較的大規模の大きな BTG を更新して高効率のガスタービンコージェネレーションを導入することもメリットがある。当社で蒸気タービン発電機出力10MW、蒸気発生量100t/hのBTGを蒸気発生量が同じガス焼きガスタービンコージェネレーション設備とガス焼き貫流ボイラで代替する場合のFSを行ったところ(図8参照)、省エネ率が約15%、CO₂排出量削減率が約35%という結果を得た。このようにガスタービンコージェネレーションをうまく利用すれば、省エネルギーやCO₂排出量の削減に寄与する高性能なシステムの構築が可能である。

日本コージェネレーションセンターの調べ⁽¹⁾によれば2004年度現在の内燃機を用いるコージェネレーションの

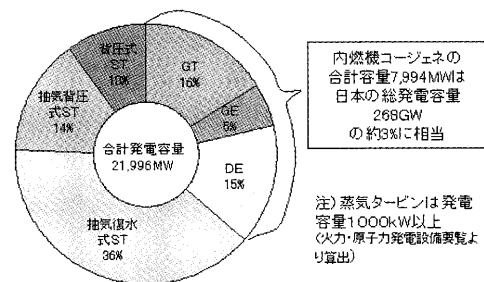


図9 蒸気タービンを含めたコージェネレーション設置実績(2004年度)

出典：日本コージェネレーションセンター調べ

総発電容量は約8,000MW(ガスタービンコージェネレーションは内数で約3,500MW)であるのに対し、蒸気タービン(背圧式あるいは抽気式)を用いるコージェネレーションの総発電容量は約14,000MWと、前者の約1.6倍の規模である(図9参照)。

蒸気タービンコージェネレーションは設置年代が古いものが多く、工場の熱電比の変化などによりエネルギー設備の見直しを行い、高性能のガスタービンコージェネレーションに換装することで省エネルギーやCO₂排出量の削減を図る必要性がでてきている。

最近は計算機能力が向上し、トッピングサイクルであるガスタービンとボトムリングサイクルの排熱ボイラや蒸気タービンを組み合わせたシステムで、年間の熱・蒸気需要に対するメリット計算やCO₂排出量の検討が比較的短時間で行えるようになってきた。これにより、蒸気システムの複雑な化学プラントなどへの導入検討を効率的に精度良く行う仕組みが整ってきた。

2) 燃料の多様化 ガスタービンの燃料としていろいろな燃料が使用可能なことはすでに述べたが、原油価格高騰や天然ガス供給のタイト感などから、中小型ガスタービンの燃料としても、今までは燃焼処理してきたような余剰燃料の利用促進や、再生可能燃料などの要求が増している。

ガスタービンではコークス炉ガス(COG)や石油精製所副生ガス(オフガス)など水素が主成分の中カロ

リーガスには比較的容易に対応可能であり、これらのガス需要は製鉄所、石油精製所や化学プラントなどを中心に今後伸びていくものと想定される。

再生可能燃料の中ではバイオガスが有望である。バイオガスは発生量が少なくしかも変動する傾向があるために、比較的小型のガスタービンの燃焼器の大型化や燃料制御装置を開発しての対応となろう。

これらのガス燃料はいずれも供給圧力が低いことが多く、燃焼器へ供給するための昇圧に必要な動力が大きくなり、採算性が悪化しやすい傾向にあるので工夫が必要となる。

4.3 更なる環境負荷の低減

エネルギーの利用に伴って生じる環境負荷の低減は、ますます重要な課題となっている。従来から窒素酸化物（以下 NOx）に関しては規制措置がとられており、ガスタービンは水・蒸気噴射や、DLE 燃焼器の採用により対応してきた。海外では更に厳しい NOx 規制を行っている国もあり、DLE の更なる低 NOx 化や運転範囲拡大などの技術開発を進めている。

4.4 中型ガスタービン発電設備の増加傾向⁽²⁾

最近運用開始した3～50MW のガスタービンのトレンド（図10参照。導入容量の単年度容量（フロー）を示す）を見ると、2002年以前は10MW 未満のガスタービンがコージェネレーションの主力として採用されていたものが、2003年以降は明らかに10MW 以上の大型ガスタービンの導入が増加する傾向にある。単機出力10MW 未満においては大型ガスエンジンが導入されるケースが増加していることも要因の一つと考えられるが、その他に下記が想定される。

1) 高い発電効率・信頼性の評価

2003年以降の導入事例を見ると、10～30MW 級では蒸気の供給を伴うコージェネレーション設備や熱電可変型コンバインドサイクルの採用が多く、4.2 1) 項で紹介した既設 BTG から高効率なガスタービンコージェネレーションへの換装需要も含まれると想定する。30MW 以上では発電のみのコンバインドサイクルの採用が多い

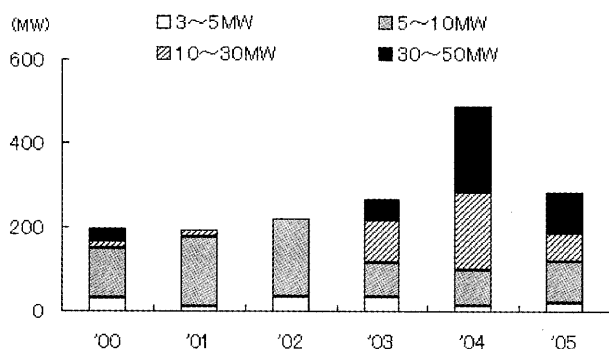


図10 最近運用開始した3～50MW ガスタービン導入容量（フロー）

傾向にある。これは高い発電効率と電気・熱需要への適応、高い信頼性が評価されたものと考ええる。

2) 電気事業制度の規制緩和

ガスタービンは発電電力が定格値に近づくにつれて効率が高くなる。2.3⁽¹⁾項で述べた電気事業制度の規制緩和によって余剰電力を販売できるようになり、熱需要がある場合にはコージェネレーションあるいは熱電可変型コンバインドサイクルで対応し、熱エネルギーはすべてサイトで消費して余剰電力を PPS に販売して高効率な運用を実現するという新たなビジネススタイルを産み出された。

以上の中型ガスタービンコージェネレーションの増加傾向は、電力自由化の範囲拡大につれてこれからも継続していくものと考えられる。

4.5 世界の中小型ガスタービンのマーケット

前項までは主に日本国内の中小型ガスタービンの納入トレンドを見てきたが、図11に世界の3～30MW 級ガスタービンの受注動向（単年度容量（フロー））を示す。本図では単年度受注容量を発電用と機械駆動用に分類しており、発電用が3,000～4,000MW、機械駆動用が約2,000MW で少しずつ増加傾向にある。ガスタービンの台数はほぼ横ばいの傾向にあるため、単機容量が増加傾向にある。一方日本国内のガスタービンコージェネレーションの単年度受注容量は約200MW⁽¹⁾であることから、発電用ガスタービンに限定しても世界のガスタービンのマーケットは日本の何十倍かの規模にある。

このように世界の中小型ガスタービンのマーケットは日本国内のマーケットより圧倒的に大きく、今後は日本国内ばかりではなく世界を視野に入れた対応が必要となると考えられる。

4.6 ガスタービンコージェネレーションが CO₂排出量削減に果たす役割

図12⁽³⁾に2003年の世界全体のエネルギー起源の CO₂排出量を示す。全体の約1/4をアメリカが占め、次いで中国やインドの排出量が大きくなっている。一方京都議定

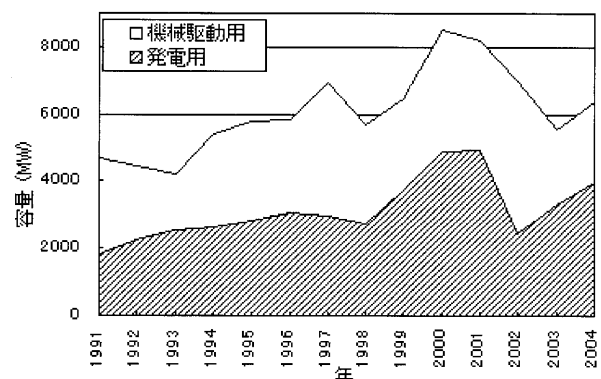


図11 世界の3～30MW 級ガスタービンの受注動向（フロー）

書に参加している国の CO₂排出量は世界全体の31%となっており、日本は5%となっている。今後は経済発展に伴う生活水準の向上、産業部門の発展が見込まれる中国・インド等の開発途上国を中心に、世界のエネルギー起源 CO₂の排出量はますます増加していくものと考えらる。国際エネルギー機関 (IEA) によると2030年の世界のエネルギー起源 CO₂排出量は現在の約1.6倍になり、中でも中国・インドの伸びは著しく、世界全体に占める割合も18%から25%に拡大すると見込まれる。一方、総合エネルギー調査部会の試算によれば日本の占める割合は約3%まで低下する。⁽³⁾

この様に CO₂排出量の削減は世界全体で取組が必要な問題である。京都議定書の第一約束期間に向けて日本は温室効果ガスの総排出量の基準年比6%削減に対して努力している訳であるが、世界全体に対する日本の貢献度はかなり低く、総合資源エネルギー調査会が策定中の「エネルギー基本計画案」にもある様に、日本がノウハウを有する省エネルギー及び CO₂排出量削減の協力を中国・インドなどへ推進していくことが重要である。その際、ガスタービンコージェネレーションは省エネルギーや CO₂排出量削減において「確実な即効薬」となり得るために、省エネルギー技術の最適事例として普及促進が期待されている。

5. 終わりに

日本国内へのコージェネレーションの普及には、国のエネルギー政策や規制緩和が影響を与えてきた。中でも大きな影響を与えたのは電気事業法の規制緩和と、地球温暖化問題対策としての新エネルギーの活用や省エネルギーの推進の強化政策であった。

現在、国内では天然ガスへの燃料転換需要や、熱電比の変化に伴う BTG のエネルギー供給設備の換装需要などに、クリーンで高効率なエネルギー供給設備が要望さ

れている。ガスタービンコージェネレーションは比較的規模が大きく、しかも電気需要に対して熱需要の大きなサイトへ、ガスエンジンコージェネレーションは比較的小規模な電気需要の大きなサイトへと、導入先の熱・電気需要に適した設備が採用される傾向にある。

最近10MW以上の中型ガスタービンの採用が増える傾向にあるが、ガスタービンが高効率で信頼性の高い原動機であるとして一般に認識されたことと、電気事業制度の規制緩和政策の効果が相まった結果と考えることができる。

京都議定書遵守のためには、省エネルギー及び温室効果ガス排出量削減は待ったなしの状態にある。温室効果ガスの排出量の削減には、「エネルギー基本計画案」にもある様に、日本がエネルギーの大消費地でありかつエネルギー利用効率の低いアジアの国々に対して、高い技術やノウハウを有する CO₂排出量の削減技術や省エネルギー技術協力を推進していくことが有効である。ガスタービンコージェネレーションは排熱の有効利用によって高い省エネルギー性や高い CO₂排出量の削減効果が得られ、有効かつ即効性のある省エネルギー対策となりうる。また世界の中小型ガスタービンのマーケットは、日本のマーケットに比べ遥かに大きいと、省エネルギー関連設備・機器やノウハウの普及は一つのビジネスチャンスともいえる。

中小型ガスタービンコージェネレーションは、排熱を有効利用し総合効率の高い運用を行える分散型エネルギーシステムの一つであり、世界・アジアの省エネルギーや CO₂排出量削減を図るためにも、一層の開発や普及拡大を推進していきたいと考えている。

参考文献

- (1) 日本コージェネレーションセンター, コージェネレーションシステム年間動向レポート (2004年度版及び2005年度版), (2005-7, 2006-7)
- (2) 吉野隆: 大型化するガスタービンコージェネレーション, クリーンエネルギー, 15-7 (2006-7), pp.1-3
- (3) 経済産業省, エネルギー白書2006年度版, (2006-7), (株)ぎょうせい

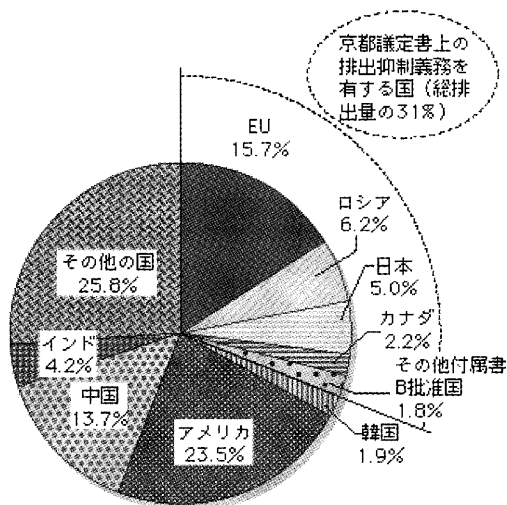


図12 国別エネルギー起源二酸化炭素排出量 (2003年)

出典: エネルギー白書2006年版

特集：ガスタービンの将来展望—ガスタービンは生き残れるか？—

発電用ガスタービンの将来展望

—再生可能エネルギー発電との比較および共存—

福泉 靖史*¹

FUKUIZUMI Yasushi

櫻田 和彦*¹

SAKURADA Kazuhiko

キーワード：Renewable Energy, Wind Turbine, Solar Cell, Gas Turbine, Combined Cycle, Micro Grid, Global Warming, CO₂ Reduction, Carbon Recycle, Future Generation,

1. まえがき

地球温暖化の傾向は、最近の異常気象や自然災害などの自然現象でより身近な問題と感じられるようになりつつあり、社会全体の関心が高まっている。このような状況下、二酸化炭素を排出する化石燃料を燃焼する発電設備は、新規計画を進めにくいのは言うまでもない。ガスタービン複合発電による高効率発電設備は、単位発電量に対するCO₂発生量が火力発電設備の中では比較的少ないが、今後さらなる排出量の削減努力の継続を求められると考える。

本稿では、躍進する再生可能エネルギー発電の利点・課題を考え、ガスタービンによる化石エネルギー発電を今後どのように位置づけ、設置・運用してゆくべきか問題提起したい。

2. 再生可能エネルギーの躍進と社会的背景

風車や太陽電池に代表される再生可能エネルギー発電は、近年、国や自治体などの補助金や優遇税制、電力買取義務化などにより普及が進んでいる。特に欧州では、いち早く普及が始まり、大陸を移動する列車や車の車窓から白く大きな風車の羽が回転する姿を見ることは少なくない。

全世界の発電量における、これら再生可能エネルギーの普及状況は、以下に述べるとおりである。

① 風車

ここ5年ほど平均年率30%の伸びを示し、2005年末現在の設備導入量は累計60GWに達した(図1)。導入の牽引者は欧州で設置容量比では8割を占める。引き続き欧州は最大の市場であるが、今後は北米・アジアでの伸びが期待されている(図2)。技術的には、風況の良い場所の単位敷地あたりの発電量を少しでも増やすため、大型化が進んでおり、現在は2MW級、ここ数年以内

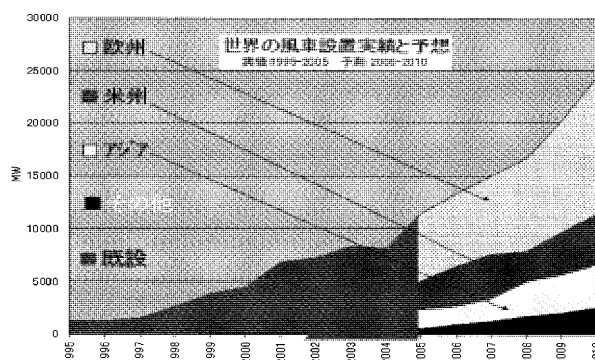


図1 年間新規導入風力発電容量の実績と予想



図2 米国テキサス州風車群(当社製)

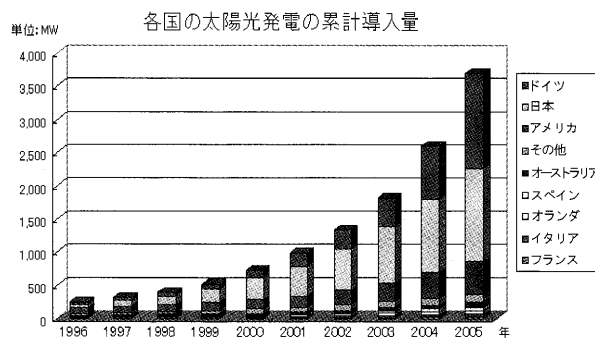


図3 太陽電池の世界累計導入量

原稿受付 2007年2月17日

*1 三菱重工業(株) 原動機事業本部

〒220-8401 横浜西区みなとみらい3-1-1

には3 MW 級が実用化され、将来は5 MW 以上にする計画も立てられている。理論的には、世界中に存在する風力エネルギーの約2割を電力として回収すると、世界中で必要とする電力需要の約7倍にもなる。実際には、設置箇所が需要地から遠いと送電系統の新設や送電ロスにより経済性が著しく低下するため、設置できる場所は限定されるものの、未開発の地域は多く、今後も大きな伸びが予想される。^{(1),(2)}

② 太陽電池

欧州を中心に、設置が進んでいる。理論的には、ゴビ砂漠全て（地球上の陸地総面積の約1%）に太陽電池を敷き詰めると、現在の地球上全体で使用している電力全てをまかなうことができると言われる。設置の伸びも著しい（図3）。これまで、日本は太陽光発電導入で世界一だったが、昨年末ドイツに抜かれた。ドイツでは再生可能エネルギー発電の電力を電力会社を買取ることが義務付けられている（図4）。EU全体では、再生可能エネルギーによる電力の比率を2020年までに20%に高める目標導入を去る2月に合意している。⁽³⁾

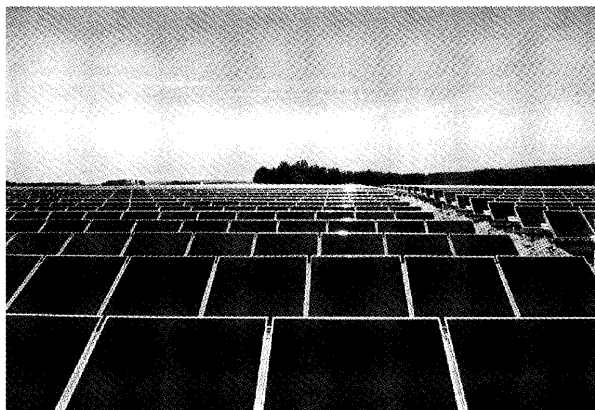


図4 太陽電池設置例
設置場所：ドイツ・ミュンヘン郊外

3. 再生可能エネルギーの利点

再生可能エネルギーによる電力の変換は、言うまでもなく燃焼を伴わない過程であり、これまで何十万年もかかって地中に固定化された二酸化炭素の大気放出を伴わない、地球環境に優しい手段である。しかし、単に燃料を必要としないだけでなく、現在の躍進の背景には、それ以外の利点もあるようである。風車と太陽電池を代表にそれらの利点を挙げるなら、下記ようになる。

(風車)

- ① 再生エネルギー利用の電源として、現状最も経済効率が低い。
- ② 大型化が技術的には比較的容易であり、更に経済効率を上げることが可能。（現在の最大のものは、一基の最大発電量が6 MW 級）

- ③ 一度設置すると、大規模なメンテナンスを必要とせず利用率が高い。従来の発電設備に比べ、設置場所を選ばない。（風のあるところなら、どこでも）洋上に置く案は典型例。
- ④ 場所さえ決まれば、発注後設置までの納期が他の発電設備に比べ非常に短く、建設も容易で工事期間も短い（図5）。

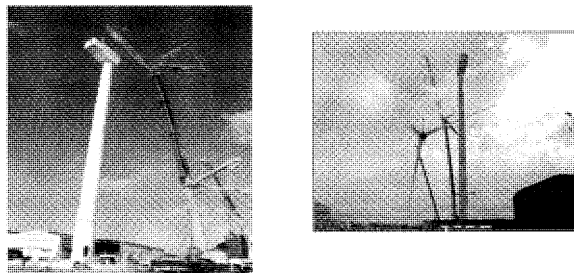


図5 風車建設状況

特に④番の発注後の発電までの時間の短さに関しては、ガスタービン及び温排水の少ないコンバインドサイクル発電所も、発電設備の中では原子力発電所などに比べ短い方とは言え、風車の圧倒的短さにはかないようがない。

(太陽電池)

- ① 発電は、太陽が出て人間が経済活動する時間に行われる。基本的に需要の増減と一致するところが大きい。
 - ② 電池パネルの材料は、地球上に無限にあるシリコンであり、特に薄膜Si系では資源枯渇・素材供給逼迫の心配がない。
 - ③ 設置場所を選ばない。都会のビルの天井、ガラスや、移動する車の天井など色々な場所における。
 - ④ 独立電源としての活用が容易で、僻地発電や移動時の電源として有効。また、農業などとの親和性が高く、灌漑や環境保全などのエネルギーとしての利用が可能。
- ④の独立性という点は、燃料を必要とする発電設備にはない太陽光発電の1番の特色と言えるだろう。
- 環境を大事にしつつ、現代生活の利便性を損ないたくない人々に、多少のコスト負担をもっても採用を決断させる理由があるように思われる。

4. 再生可能エネルギー発電の課題

このような再生可能エネルギーにも勿論課題はある。特に導入コストが高いことは、周知である。住宅用太陽光発電装置などは、kWあたり単価が未だ数十万円のレベルにあり、発電原価も通常の火力発電所のレベルの倍以上になる。風力発電についても、同じ設備容量の原子力発電所を建設する費用の3倍以上を投資が必要となる。

表1 原子力発電, GTCC, 太陽光発電, 風力発電の比較⁽⁴⁾

	原子力発電	GTCC	太陽光発電 業務用 住宅用	風力発電
1基あたり設備容量	100万kW	50万kW	300kW 3.5kW	1,000kW
利用率	80%	80%	12%	12%
1基あたり年間発電量	70億kWh	38億kWh	32万kWh 0.37万kWh	175万kWh
1基あたりの設備投資額	3,000億円	-	3億円 300万円	2.5億円
100万kW原子力発電所1基の年間発電量を生み出すのに必要な台数	1基	2基	21,875基 190万基	4,000基
(参考)必要な投資額	3,000億円	1,000億円以下	7兆円 6兆円	1兆円
必要な敷地面積 ・太陽光発電は 10m ² /kW ・風力発電は 0.082km ² /基		0.03km ² (180m × 170m)	約87km ² (山手線の内側面積(約70km ²)とほぼ同じ)	約248km ² (山手線の内側面積(約70km ²)の約3.5倍)

出典:総合エネルギー調査会第10回新エネルギー部会資料など

(注) 出展は2001年時点の情報であり, 太陽光, 風力の投資額については現状表記載値より低くなる傾向にある。

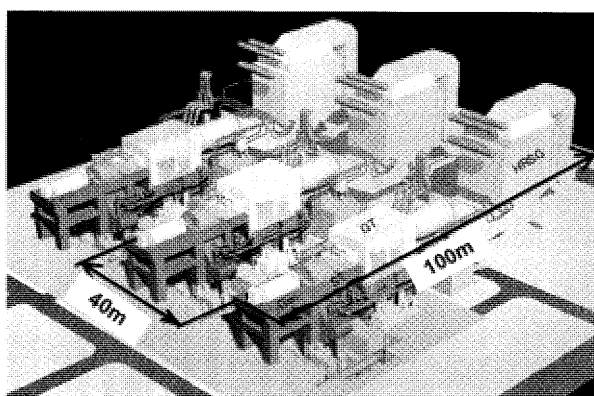


図6 M701G2ガスタービンによる一軸式コンバインドサイクル (一軸あたり出力=500MW)

一方, 必要とする面積についても非常に大きく, 平地が少なく国土の狭い日本などには現実的には厳しい。100万 kW の発電設備容量を持つには, 山手線の内側と相当の面積の太陽光パネルを設置する必要がある。風車にいたっては, 単機容量 1 MW 級の場合, 更にその3.5 倍の面積を必要とするとの算出がある (表 1)。

これに対し最新技術において1500℃まで燃焼温度を上昇させ, 化石エネルギーの持つエネルギーを変換するガスタービンは, 極めてエネルギー密度の高いエネルギー変換器であり, その設置必要面積は小さく都市近郊の需要地に設置するのに適している (図 6)。

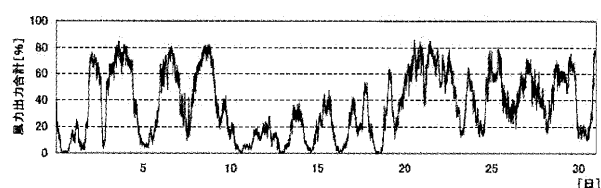
しかし, 再生可能エネルギー発電の一番の課題は, 何といても需要に応じて発生電力の制御ができないことであろう。最近では, 既に風車の追加設置には, 発生電力の平準化が必要不可欠として, 大容量の蓄電池の併設が現実的な選択肢となりつつある (図 7 および図 8)。

しかし, 発電と同規模の大容量の蓄電池の設置は更に発電原価を倍増させることになる。

需要に応じ昼間の電力が発生するように見える太陽光

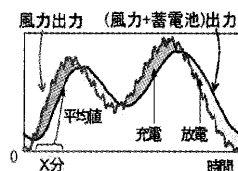
1日では定格出力合計の0%から80%まで変動

短時間 (20分程度) でも定格出力合計の30%程度が変動

図7 風力発電における出力の変動 (東北電力)⁽⁵⁾

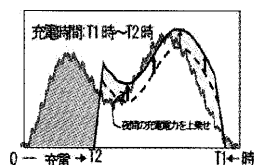
a. 短周期対応

- 過去X分の風力発電出力の平均値が蓄電池の現在出力となるように整形。
- 長時間の平均をとるほど, 変動は小さくなるが, 蓄電池容量も大きくなる。



b. 長周期+短周期対応

- 調整力が不足する時間帯は風力発電電力を完全に充電。調整力が確保できる時間帯は, 短周期対応の運転に加えて, 夜間の充電電力を上乗せする。

図8 蓄電池利用による電力平準化 (東北電力)⁽⁶⁾

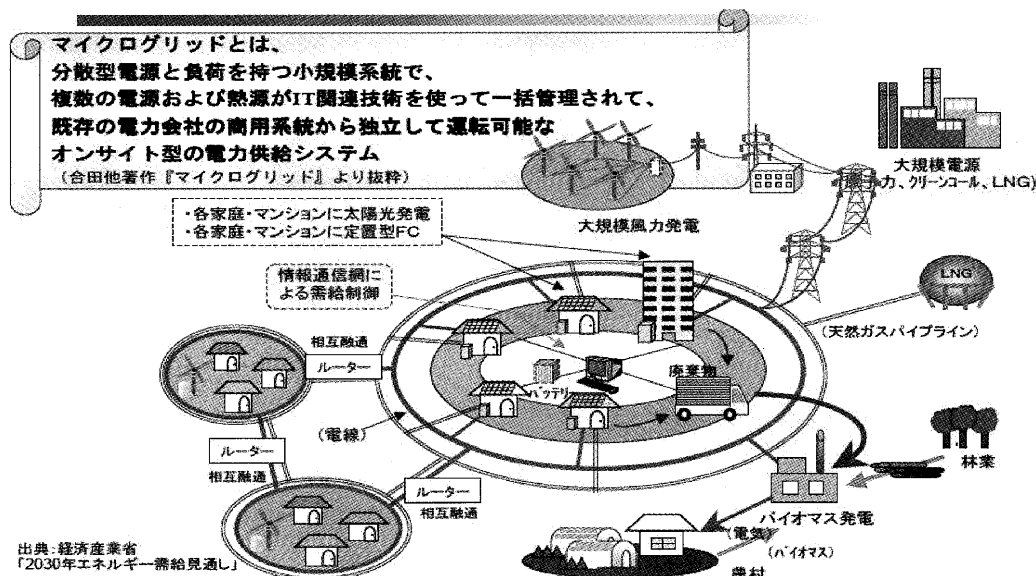
発電でも, ちょっとした雲の通過などの天候の変化で, 実際には短時間の発生電力変動がある。

この再生可能エネルギー発電による, 制御できない電力変動は, 普及の足かせになっている。これらの課題を克服する手段として, 分散電源や電池, 複数の需要地点などを一つの電力ネットワークとしてバランスさせようという「マイクログリッド」などの検討が進んでいる。この概念では小さなグリッド内で電力の発生・消費のバランスを取るためにバイオマスガスなどによるガスエンジンでの発電が検討されている。ガスタービンよりは一回り小さな容量の発電方式となろう (図 9)。

5. ガスタービン発電の利点

再生可能エネルギー代表の風車および太陽電池に対し, 現状の火力・原子力発電設備の中における, ガスタービン発電の相対的利点を纏めると下記のように集約されよう。

- ① 環境負荷が小さい。化石燃料を利用する火力発電設備の中では, 熱効率が高く, CO₂の発生量も少ない。使用する燃料も LNG などクリーンな燃料が主体。
- ② 電力需要, 系統変動に対しフレキシブルに対応する運用能力が高い。
- ③ 建設期間が, 原子力発電や他の火力発電設備に比べ短い。需要の変化に対して, 比較的短期間に計画建設が可能。
- ④ エネルギー密度が高く, 主機がコンパクトで, 必

図9 マイクログリッド概念図⁽⁷⁾

要設置面積が少なく、都市などの需要地近郊に設置することが比較的容易。

LNG 燃料は、日本のバーゲニングパワーの低下により、安定した燃料としての価値が低下したかに見えるが、一方で LNG の世界的需要の拡大に伴い、流通の需給規模及び多様性が増しているため、スポット買いなどの選択肢も増している。また LNG は一旦生産を始めると設備の投資回収効率から供給側も容易に生産を停止することができないため、先ごろ話題になったようなパイプライン輸送での供給国の一方的な遮断リスクなども少ないと言える。^{(8), (9), (10)}

6. 至近の CO₂削減目標達成に向けて

このような特徴を見ると、やはりガスタービンを主機とする高効率発電は、環境影響、エネルギーセキュリティ、建設期間などを含めた総合経済効率などの複数の必要項目のバランスから、当面発電設備の主力との位置づけは変わらないと思われる。

再生可能エネルギーの普及が進むには時間が必要であり、至近の CO₂削減目標達成には、やはり天然ガスを燃料とするガスタービンコンバインドサイクルによる高効率発電が有力な手段である。このため、弊社においても現在の燃焼温度を更に 200℃ 上昇させ、熱効率 56% (HHV 基準) 以上の効率を目指して開発に取り組んでいる (図10および図11)。

次頁表2および図12は簡単な試算であるが、国内の既存発電設備の50%を1700℃級ガスタービンコンバインドサイクルに置き換えると、年間の CO₂排出量6700万トン削減でき、原油換算で2200万トンの燃料を節約できる。6700万トンの CO₂削減量は、日本の総排出量の約4%に相当する。

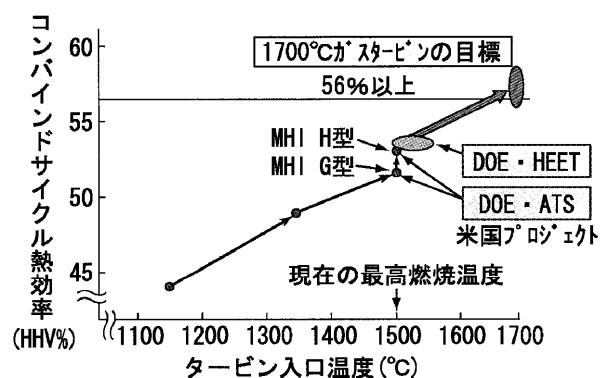


図10 1700℃ガスタービンの狙い

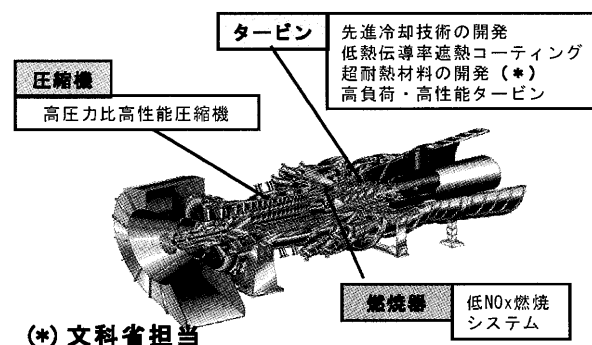


図11 1700℃ガスタービンとその開発項目

7. 再生可能エネルギーとの共存

再生可能エネルギー発電を制御できない発電の代表とするなら、ガスタービンによる高効率発電は、制御可能でフレキシブルな発電の代表である。当然のことながら両者の組み合わせは、再生可能エネルギーの普及にも手助けとなる。現状でも、昼間夜間の電力需要の増減に対応しているのは、天然ガスを燃料とするガスタービンコンバインドサイクルが主体であり、この需要変動と更に

表2 現状のLNG、石油および石炭火力の置換効果

既存発電所の 置換割合	CO ₂ 削減量	全排出量に 占める割合	省エネルギー効果 (原油換算)
30%	4000 万 ton/年	10%	1300 万トン
50%	6700 万 ton/年	17%	2200 万トン

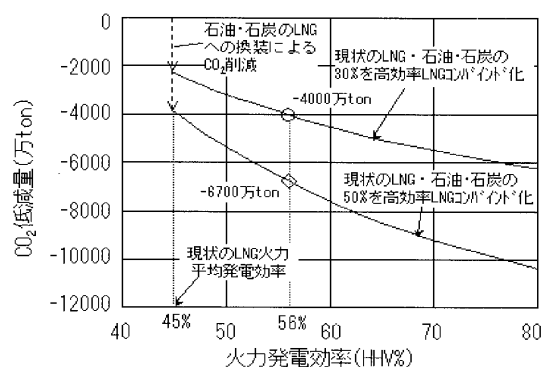
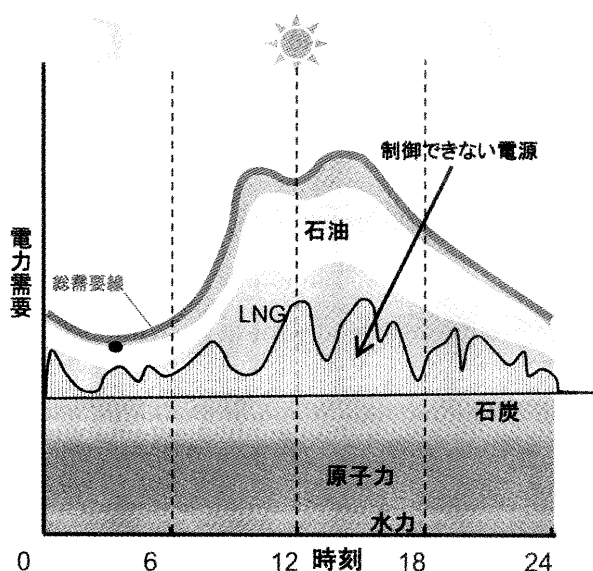
図12 火力発電効率とCO₂低減量

図13 電力需要変動イメージ図

加わる発電側の変動に対してよりフレキシブルな運用を要求される。

英国では、風力発電設備とガス火力発電設備を組み合わせた新規計画が発表された。通常は風力で発電するが、天候による発電量のばらつきをガス火力で補完する計画である。最大で200MWの発電量を持ち、そのうち約4割を風力でまかなうとの計画と。

ガスタービンは、需要に応じて急速に起動し発電を行うことが得意な機械である。風力の気まぐれな発電を補完する手段としては最適といえる。

北米など、広い大陸に需要地が軒々としている国では、電力グリッド網が十分とは言えず、風力発電所などが次々設置されると発生電力と需要のバランスをとることは更に難しい。地球温暖化による夏場の気温上昇など、今後需要の変動も激しさを増すことが予想され、これらの変動に対応する中容量のピーク発電用ガスタービンの需要も中長期的には増すものと予想している。

8. 更に未来へ

将来化石燃料が枯渇し、水素社会が到来することになっても、制御できない再生可能エネルギー発電と、燃焼等による制御可能な発電の組み合わせは、必ず必要になるであろう。再生可能エネルギー発電による水素製造は、確かに水素と言うエネルギーを貯蔵することによる発生エネルギーの平準化である。しかし、水素は活性度が高く極めて不安定な物質で、一般にはハンドリングがしづらいと言う難点があり、現状普及が進んでいない。筆者は、完全なる水素社会の到来の前段階の未来として、あえて水素による地上の炭素リサイクル循環社会を提案したい。メタンを代表とする炭化水素は天然で安定と言う特徴を有しており、我々が最も扱いやすいエネルギー源である。しかも、既存の設備やエネルギーインフラをそのまま活用できる。再生可能エネルギーで製造した水素を発電所や輸送機器や家庭などから出てくるCO₂、廃油、廃プラスチックなどと化合させ再度エネルギーレベ

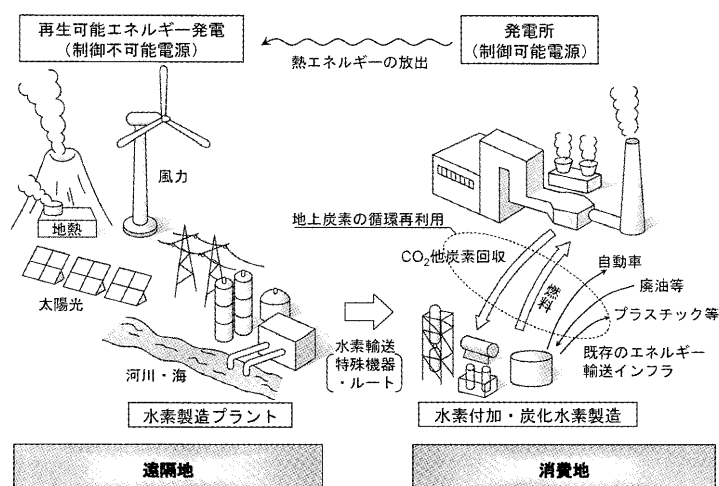


図14 再生エネルギー利用による炭素の循環利用社会

ルの高い燃料やプラスチック製品等へと転換し、そこから既存のインフラへ流して既存の設備で再利用する。そのような炭化水素の循環社会の中で、燃焼という制御可能でフレキシブルな高効率発電の主機であるガスタービンは、今後もその重要な役割を果たしてゆくに違いないと予想する。

参考文献

- (1) 上田悦紀他, 三菱重工技報 Vol.41 No.5 (2004-9). 次世代 2 MW 級大型風車の開発
- (2) 黒岩隆夫他, 三菱重工技報 Vol.41 No.3 (2004-5). 三菱重工の風力発電装置の新規種と新技術
- (3) 太陽光発電協会ホームページ

<http://www.jpea.gr.jp/4/4-2-4.htm>

- (4) 総合エネルギー調査会2001年6月, 新エネルギー部会
- (5) 東北電力株式会社 平成16年9月3日, 東北系統への風力発電の連系可能量検討結果。
- (6) 東北電力株式会社 平成17年6月6日, 蓄電池活用による風力連系可能量増加に関する試算。
- (7) 経済産業省 2003年エネルギー需給見通し
- (8) 坂口順一, ターボ機械2007年1月号, 特集号「LNGプラントの回転機械」の企画に際して
- (9) 合田忠弘他, エネルギー新書「マイクログリッドー分散型電源と電力ネットワークの共生の為にー」
- (10) 古塩正展他, 三菱電機技報, 2006年3月号, マイクログリッド需給制御システム

特集：ガスタービンの将来展望 -ガスタービンは生き残れるか？-

VOC 回収ガスタービンシステムの開発

- 熱電可変型ガスタービンコージェネレーションの蒸気噴射技術と環境負荷低減への展開 -

芳村 幸宏*¹
YOSHIMURA Yukihiko

工藤 康人*¹
KUDO Yasuhito

伊東 正皓*²
ITO Masaaki

高橋 克昌*²
TAKAHASHI Katsuyoshi

宇治 茂一*¹
UJI Shigekazu

キーワード：VOC、VOC 処理、活性炭、吸着、蒸気脱着、燃料消費低減、蒸気噴射、熱電可変型ガスタービン

1. はじめに

揮発性有機化合物(VOC: Volatile organic compounds)は光化学オキシダントや浮遊粒子状物質 (SPC: Suspended Particulate Matter) の原因物質であり、塗料や有機溶剤を使用する工場、石油類のタンク等から排出され、また自動車排出ガスにも含有されるなど多種多様な発生源から排出される。排気中に数百～数千 ppm の低濃度で存在することと、含有組成の多様性とがあいまって、回収や処理に手間がかかり大気にそのまま廃棄されている。

主な対策技術は、VOC を活性炭などで回収・再生利用する方式と、酸化分解・無害化する方式である。酸化分解にも各種方法があるが大規模処理では主に触媒燃焼や蓄熱燃焼を始めとする燃焼処理が採用されている。いずれの方式も確実な処理が期待できるが燃焼処理のための補助燃料が必要になること、VOC 自身もつ市販液体燃料並みの化学エネルギーは未利用のまま廃棄されること等の解決すべき課題がある。そこで、廃棄された VOC をガスタービンコージェネレーションの燃料として有効に利用するシステムを開発することで、前記の問題が解決できる。またその結果確実に VOC を処理するだけでなく、省エネルギー・CO₂ 排出量の削減、コストメリットが同時に達成できるため、事業者を取り巻く経済発展、エネルギー合理化、環境対策の複合した課題に対する総合的な対策手段となりえる。本稿では、弊社が独自開発した蒸気噴射型ガスタービン技術と先述の活性炭等による VOC 回収技術を組み合わせた新しいシステム開発への取り組みを紹介する。

2. 開発システムの概要

VOC 回収ガスタービンは、VOC の回収装置と蒸気噴

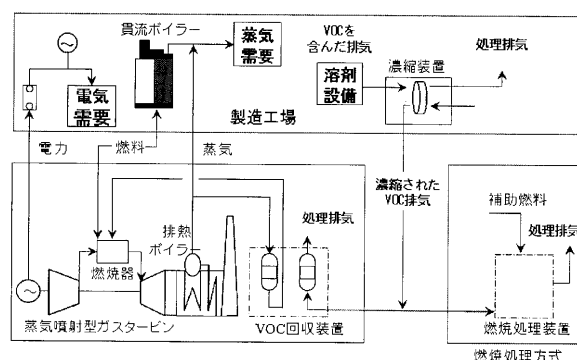


図1 VOC 回収ガスタービンシステムフロー

射型ガスタービンを組み合わせたもので、システムフローを図1に示す。蒸気噴射型ガスタービンは、蒸気需要が減った場合や電力が優先的に欲しい場合に、排熱回収ボイラーの蒸気をガスタービンの燃焼器に噴射し、発電出力を増やすことで熱電比を柔軟に変えるシステムである。

一般的なVOC回収装置は、工場排気中のVOCを容器内に充填した活性炭等により補足した後、ほぼ常圧に近い蒸気で脱着・取り出し、冷却することで液化させ回収する。液化したVOCは水との密度差を利用して分離させ、再生利用する。本システムは、脱着にガスタービンの排熱回収ボイラーから出る蒸気を使い、VOCを脱着後液化することなく蒸気と共にガスタービンの燃焼器に噴射し燃焼処理する。

工場排気中のVOCは、回収装置の活性炭部を通る間に選択的に細孔に吸着される。活性炭部で効率よく吸着するため排気VOCの濃度は2000～3000ppmにする。排気中のVOC濃度が100～200ppmの場合は、ゼオライト製のハニカムコアをもつ回転式濃縮装置等で10から15倍に濃縮する。

活性炭の吸着能力が限界近くになったら、排気を排熱ボイラーからの蒸気に切り替える。活性炭は蒸気雰囲気中で加熱され、VOCを放出する脱着が起こる。VOCは、圧力約1.5MPa (Gauge) の飽和蒸気に混ざり、ミストセパレータで液分を十分に取り除き、ガスタービンの燃焼器に噴射される。活性炭を充填した容器である活

原稿受付 2007年1月15日

*1 石川島播磨重工業(株) 原動機プラント事業部
〒135-8710 江東区豊洲3-1-1 豊洲IHIビル

*2 石川島播磨重工業(株) 技術開発本部
〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1
横浜エンジニアリングセンター2号館

活性炭塔は複数あり、一つが蒸気で脱着されている間、残りが排気から VOC を吸着する。脱着する容器を概略1時間毎に順番に切り替えることで、VOC の吸着と脱着を同時にかつ連続させている。

蒸気中の VOC は、燃焼器の中で主燃料である都市ガスとともに燃焼・分解する。本来ガスタービンに投入するエネルギーの一部が VOC の化学エネルギーで置き換えられ、燃料消費を低減する。VOC をトルエンとすると、活性炭塔 4 本程度の回収装置 1 ユニットで1時間あたり VOC 約85kg をガスタービンに取り込む。取り込み量は排熱ボイラーからの脱着用蒸気を増やし1ユニット分の最大3倍まで増やす計画である。

VOC の取り込みによるガスタービンの燃料消費低減は、経済的なメリットを生むとともに、VOC を燃焼処理するためだけに使ってきた補助燃料もなくなるので、価値を生まない公害防止対策コストに躊躇する多くの事業者が導入しやすくなる。

VOC 回収装置とガスタービンコージェネレーションはどちらも単独で稼働できる方式とした。VOC 排気ガスをガスタービンの燃焼用空気として直接吸入し燃焼させる方式も候補であったが、ガスタービンの高温部の冷却のために抽気した空気中の VOC が燃焼せず排出してしまうこと、VOC の濃度が高いと、圧縮機で断熱圧縮されて高温になった場合の安全確保が難しい等の理由で採用しなかった。

3. VOC の排出規制の動向

継続した環境負荷低減の取り組みにもよらず、環境基本法で決められた光化学オキシダントや SPC の環境基

表1 VOC 排出規制

揮発性有機化合物排出施設	規模要件	排出基準
(1) 揮発性有機化合物を溶剤として使用する化学製品の製造の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力が3,000m ³ /時以上のもの	600ppmC
(2) 塗装施設(吹付塗装に限る。)	送風機の送風能力が100,000m ³ /時以上のもの	自動車の製造の用に供するもの 既設700ppmC 新設400ppmC その他のもの 700ppmC
(3) 塗装の用に供する乾燥施設(吹付塗装及び電着塗装に係るものを除く。)	送風機の送風能力が10,000m ³ /時以上のもの	木材・木製品(家具を含む。の製造の用に供するもの 1,000ppmC その他のもの 600ppmC
(4) 印刷回路用銅箔積層板、粘着テープ、粘着シート、はく離紙又は包装材料(合成樹脂を積層するものに限る。)の製造に係る接着の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力が5,000m ³ /時以上のもの	1,400ppmC
(5) 接着の用に供する乾燥施設(前項に掲げるものと木材・木製品(家具を含む。の製造の用に供するものを除く。)	送風機の送風能力が15,000m ³ /時以上のもの	1,400ppmC
(6) 印刷の用に供する乾燥施設(オフセット輪転印刷に係るものに限る。)	送風機の送風能力が7,000m ³ /時以上のもの	400ppmC
(7) 印刷の用に供する乾燥施設(グラビア印刷に係るものに限る。)	送風機の送風能力が27,000m ³ /時以上のもの	700ppmC
(8) 工業製品の洗浄施設(乾燥施設を含む。)	洗浄剤が空気に接する面の面積が5m ² 以上のもの	400ppmC
(9) ガソリン、原油、ナフサその他の温度37.8度において蒸気圧が20kPa(13.3kPa)を超える揮発性有機化合物の貯蔵タンク(密閉式及び浮屋根式(内部浮屋根式を含む。))のものを除く。)	1,000kL以上のもの(ただし、既設の貯蔵タンクは、容量が2,000kL以上のものについて排出基準を適用する。)	60,000ppmC

NAPEC殿資料より引用

準値、ならびに光化学オキシダントの生成防止のための非メタン系炭化水素濃度の指針も、いまだ十分なレベルに達していない。VOC 規制では、浮遊粒子状物質や光化学オキシダントに係る大気汚染への対応として、工場などからの VOC の排出総量を平成12年度から平成22年度までに3割程度削減し、SPM の環境基準を達成することを目標としている。一環として工場等からの VOC の排出を包括的に抑制することを目的に、法規制と自主的取組みの双方の政策手法を適切に組み合わせる対策が始まった。平成16年大気汚染防止法の一部が改正され平成18年4月から VOC 排出事業者は、VOC 排出施設の届出義務、排出基準の遵守義務、濃度の測定義務が課せられた。

排出基準は工場等の排出口における濃度を規制する方式で、表1に示すように排出施設と規模要件毎に排出濃度の許容限度が定められた。ppm-C は炭素換算濃度で、例えばトルエン (C₆H₅-CH₃) 100ppm は、構成分子中の炭素数が7なので700ppm-C となる。

表2に、PRTR (化学物質排出移動量届出制度) で公表された大気への VOC の排出量順位を示す。VOC はトルエン、キシレン、酢酸エチルなど主なもので約200種があるが、表中に示す10物質ではほぼ90%以上を占めている。本システムは VOC 回収の効率、ガスタービンで燃焼させた後の腐食および発生物質の排出基準の制限より、塩素系 VOC と硫化物系の VOC を除く発生量上位物質を当面の対象にした。

4. IM270システム化と省エネ性・CO₂ 排出削減効果

弊社の蒸気噴射型熱電可変ガスタービンコージェネレーションには、6MW クラス IM400 IHI-FLECS と2.5MW クラス IM270 IHI-FLECS があるが、ここでは IM270 IHI-FLECS に VOC 回収装置を組み合わせシステムのヒートバランス、システム省エネルギー率、ならびにシステム CO₂削減率の計画値を示す。図2に VOC 回収量をトルエン85kg/h とした場合、図3は255kg/h とした結果を示す。ここでシステム省エネルギー率は、

表2 PRTR 排出データ

(H15年度データ)			
順位	物質番号	物質名	排出量(t ₂ /年)
1	227	トルエン	118,772
2	63	キシレン	48,043
3	145	塩化メチレン	24,637
4	40	エチルベンゼン	12,674
5	211	トリクロロエチレン	5,771
6	241	二硫化炭素	4,953
7	172	N,N-ジメチルホルムアミド	3,928
8	177	ステレン	3,802
9	96	塩化メチル	3,658
10	200	テトラクロロエチレン	1,977
上位10物質の合計			228,215
合計			250,433

処理対象VOC
排出量大、非塩素系、非硫黄系を当面の対象とする。

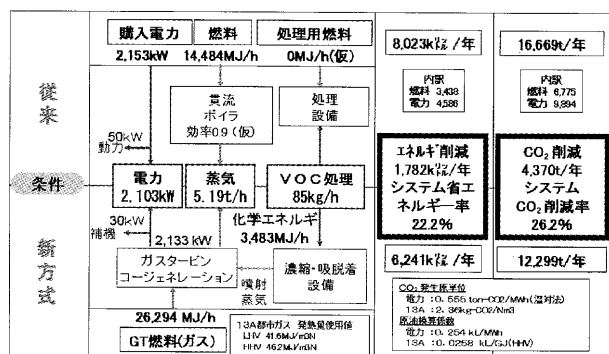


図2 VOC回収85kg/hヒートバランス (IM270)

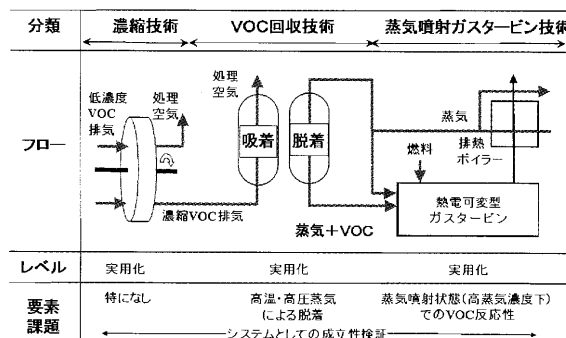


図4 技術課題

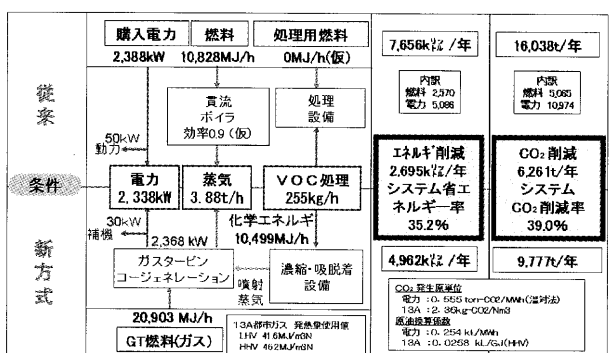


図3 VOC回収255kg/hヒートバランス (IM270)

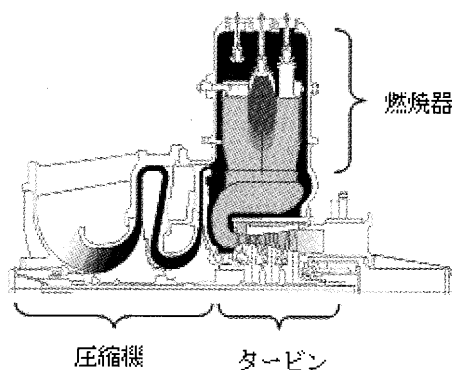


図5 IM270ガスタービン概略図

図示の電力、蒸気、VOC処理量の条件で従来方式の投入エネルギー（購入電力、ボイラーおよびVOC燃焼処理装置）と新方式の投入エネルギー（ガスタービン）の原油換算値の差を従来方式の投入エネルギー量で除したものとす。CO₂削減率も同様に定義する。原油換算係数ならびにCO₂排出係数は省エネルギー法、温暖化対策推進法による数値とした。

年間稼働時間は8,280時間、濃縮・回収装置の所要動力、必要な冷水等のユーティリティは省略している。VOCの化学エネルギー分を置き換えた残りの主燃料投入エネルギーに対する発電量と送出蒸気のエネルギーの効率を、修正発電効率 η_{ec} 、修正熱回収率 η_{tc} とすると、VOC回収85kg/hの時 $\eta_{ec}=29.2\%$ 、 $\eta_{tc}=49.6\%$ 、255kg/hの時 $\eta_{ec}=40.8\%$ 、 $\eta_{tc}=47.2\%$ となる。つまり蒸気噴射技術を利用して未利用エネルギーを適切に取り込めば、発電出力2MWクラスで発電効率30%~40%、総合効率80%~85%のガスタービンコージェネレーションが可能となる。当然、熱回収は全量を蒸気で回収できるシステムである。また公害防止のための装置でありながら導入によって省エネルギーとCO₂排出量の削減も同時に推進できる。さらにVOCの処理量に相当する化学エネルギー分とこれまで燃焼処理にかかっていた補助燃料分の費用までコストメリットになるシステムである。

5. 開発課題

本システムに必要な技術は濃縮技術、VOC回収技術、蒸気噴射ガスタービン技術である。開発の課題を図4に示す。VOC回収技術では、従来大気圧に近い蒸気でVOCを脱着した後液化して密度差で分離していたが、高温・高圧の蒸気で脱着し液化せずガスタービンへ噴射することになるので、高温・高圧蒸気での脱着技術・液化防止対策・容器の耐圧化が課題となる。ガスタービン技術では、蒸気とともにVOCを取り込むため、高い蒸気濃度の状態でのVOC分解性の確保、より安全で確実な処理ができる取り込み方法、多様なVOCが混合した場合のVOCの分解性が課題となる。また1時間程度で脱着する活性炭塔を切り替えるが、いかに円滑に蒸気をガスタービンへ噴射し出力を安定させるかの運用シーケンスの確立が課題となる。ここでは、各要素について取り組んできたものを取り上げ説明する。

5.1 IM270ガスタービンと燃焼器へのVOC噴射方式

IM270はIHIで独自開発した高効率かつ脱硝装置なしでも低NO_xを実現したクリーンなエンジンである。ベースとなるIM270ガスタービンの概略を図5に示す。遠心2段圧縮機と軸流3段タービンからなる1軸の回転系を前後2個の軸受けで支持するシンプルな構造と単缶型の燃焼器を採用しており、組立整備が非常に容易なエンジンである。また、表3に示すように2MWクラスで

は秀逸な性能を誇っており、さらに派生型として蒸気噴射による熱電可変型、デュアルフューエル（ガス/液燃料）対応型の防災常用兼用機を商品化している。

今回は熱電可変型のさらなる発展型として、工場で発生した VOC を燃焼処理しながら、そのエネルギーをタービンで回収する VOC 回収型を開発した。

VOC 回収型の燃焼器は、圧縮機から供給された燃焼用空気がスワラーを通り、予混合管内で燃料と混合され、燃焼場に投入される構造である。さらに、熱電可変型は燃焼器の側面につけた蒸気供給ポートから直接内部へ飽和蒸気を噴射する構造であり、噴射された蒸気は燃焼用の空気とともにスワラーを通り、予混合管内で加熱、混合される。これに対し今回開発した VOC 回収型では蒸気噴射系統を追加し、図 6 に示すように燃料噴射弁から通常燃料に加え、VOC を含んだ蒸気をスワラー部へ噴射する構造にした。

これは、熱電可変型と同じく燃焼器側面から VOC 混合蒸気を噴射した場合、可燃性ガスである VOC 混合ガスが燃焼器ライナー外部にも充満し、燃焼異常発生時などに被害が拡大する危険を回避するためである。また、噴射弁より噴射された VOC 混合蒸気は通常燃料と共に予

混合管で空気と混合され、VOC は冷却空気と混ざることなく全量確実に高温高压の燃焼場へと導かれる。噴射された VOC の化学エネルギー分は主燃料が減少する制御となっており、VOC 投入分の燃料が削減できる。

5.2 基礎燃焼試験

空気/蒸気と VOC が混合された混合気を処理するには①熱酸化処理：混合気を高温にすることで熱酸化させる方法、②燃焼処理：燃焼領域へ混合気を投入し燃焼させる方法が考えられる。いずれの方法でも投入した VOC がガスタービン外に排出されないようにするため、滞留時間内に処理を完了する必要がある。

そこで、VOC が分解する反応性を評価するための基礎的な装置を製作し、熱酸化試験と燃焼試験を実施した。本試験では、VOC としてトルエンおよび酢酸エチル（表 4 参照）を選択し、実機ガスタービン燃焼器と反応器の滞留時間を同一にして試験を実施した。

5.2.1 試験装置・方法

試験装置概略を図 7 に示す。試験装置は石英ガラス管による反応部/計測部と、空気/蒸気/メタンおよび VOC の供給装置・計量装置から構成される。VOC は液体で供給しディスペンサにより流量を制御し、ディスペンサ下流の配管内で高温蒸気を用いて気化させた。未燃炭化水素成分の計測には、水素炎イオン化法を用いた。

5.2.2 熱酸化試験

熱酸化試験では、空気/蒸気/VOC の流量比を、実機と同一となるように設定し、試験を実施した。計測誤差を少なくするため、反応部の滞留時間は実機の 3 倍程度

表 3 IM270 主要緒元

項目	単位	ベースエンジン IM270	熱電可変型 IM270-HI-FLECS	VOC 回収型 (計画値)
出力(大気温度 15℃)	kW	2000	2500	2368
蒸気噴射量	kg/h	—	2500	1500
回収 VOC 量	kg/h	—	—	255(トルエン)
発電効率	%	25.4	28.2	40.8
総合効率	%	78.7	57.9	88.0
排熱ボイラ総蒸気量	kg/h	6000	6210	6230
送気蒸気量	kg/h	5900	3710	3880
燃料	—	都市ガス 13A、灯油、LPG	都市ガス 13A、灯油	都市ガス 13A
回収 VOC 種類	—	—	—	トルエン、キシレン他

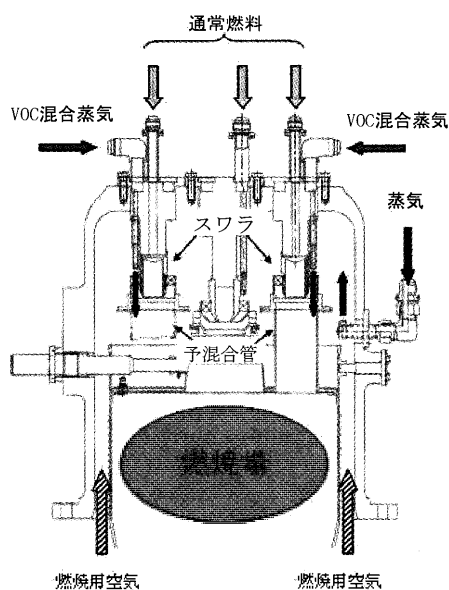


図 6 VOC 混合蒸気噴射方式

表 4 VOC 成分一覧

	Toluene	Ethyl acetate
Sample1	100	0
Sample2	0	100
Sample3	79	21

Unit:Vol%

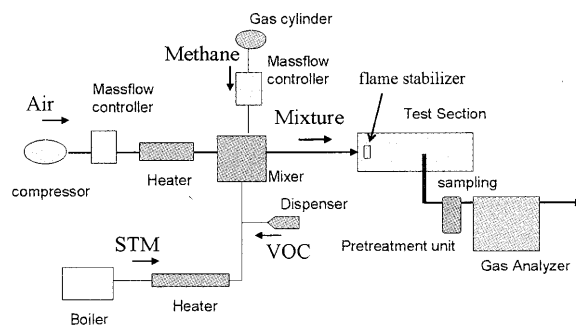


図 7 試験系統図

とした。空気/蒸気および VOC の混合気温度をパラメータに、VOC が分解する反応性について調べた。熱酸化率は以下のように定義している。

$$\text{熱酸化率} = \text{VOC 減少量} / \text{VOC 投入量}$$

図 8 に混合気ガス温度の熱酸化率への影響を評価した測定例を示す。高温になるほど、熱酸化率が大きくなっている。また、ベンゼン環を持つトルエンよりも酢酸エチルのほうが酸化しやすいことがわかった。しかし、最高試験温度における酢酸エチルの熱酸化率は低く、熱酸化のみで VOC を処理するには滞留時間を非常に長くしなければならないことがわかった。

5.2.3 燃焼試験

燃焼試験では、空気/蒸気/VOC/メタンを供給し、計測部入口の保炎器で火炎を形成した。流量比・滞留時間・供給温度は実機と同一になるように設定した。燃焼分解率を評価するために、空気/蒸気/メタンおよび VOC の予混合気を燃焼させて試験を実施した。燃焼分解率は以

下のように定義した。

$$\text{燃焼分解率} = (\text{VOC 投入量} - \text{計測量}) / \text{VOC 投入量}$$

(※計測量にはメタンの未燃分も含まれる。)

図 9 に火炎温度に対する燃焼分解率を示す。火炎温度は、平衡計算から求めた断熱火炎温度である。燃焼分解率はガスタービンの低出力運転時の温度でも 0.99 以上の高い値となることがわかった。また、トルエンと酢酸エチルを混合した場合でも、高い分解率が得られた。

VOC の処理方法として、熱酸化処理と燃焼処理の二つの方法について評価を行った。その結果、燃焼処理は蒸気を大量に含有する VOC 混合気を短時間で処理することができ、蒸気噴射型ガスタービンに適用できることがわかった。一方、熱酸化処理は長大な滞留時間が必要となりシステム適用は困難であることがわかった。

5.3 活性炭基礎試験

本システムでは VOC を活性炭に吸着した後、活性炭をガスタービンの排熱ボイラーから出る高温・高圧の飽和蒸気(180~200℃, 1.2~1.5MPa)で脱着する方式である。活性炭は粒状成型炭(約3φ×5~10mm)であり、活性炭の再生条件が高温・高圧であるため、活性炭の破碎、比表面積・細孔容積などの変化による吸着性能の低下が懸念される。そのため、高温・高圧の蒸気条件における VOC 回収装置の安定性を確認する目的で、活性炭の耐久性および吸着・脱着の繰返しによる吸着性能試験を実施した。

試験の概略を図10に示す。耐久性試験では、活性炭をオートクレープに入れて高温・高圧条件に暴露後、活性炭吸着管に充填して吸着性能を比較した。また、吸着・脱着繰返し試験は活性炭を吸着管に充填したまま、吸着と脱着を交互に行った。試験条件は次の通りである。

- 活性炭：φ 3 mm の粒状炭を長さ 2 ~ 3 mm に整粒
- VOC ガス：トルエン 600~1000ppm
- 吸着ガス流量：

耐久性試験：1.6 l/m in

繰返し試験：5.7 l/m in

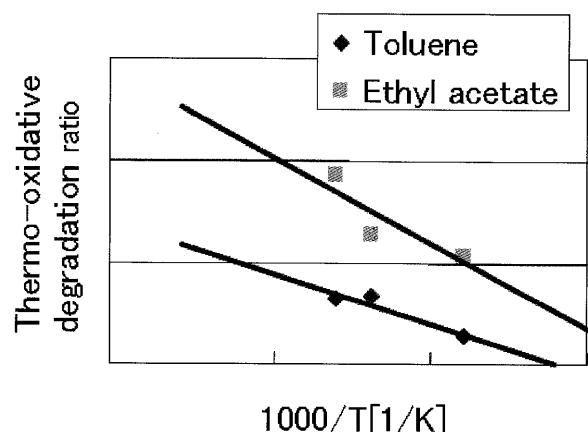


図 8 VOC 含有ガス温度の熱酸化率への影響

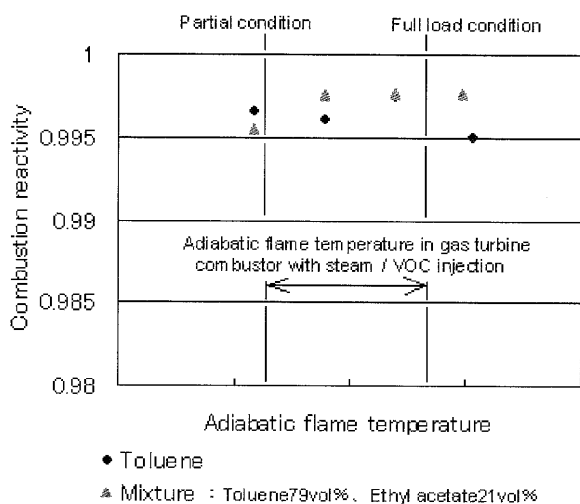


図 9 火炎温度に対する燃焼分解率

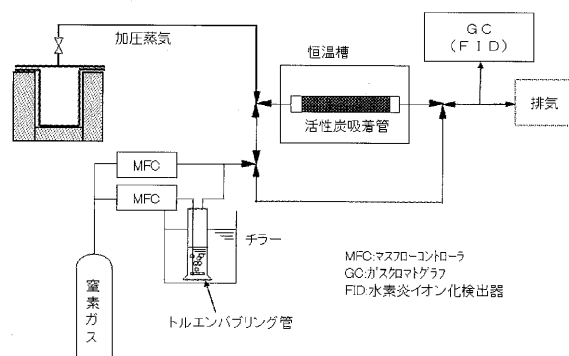


図10 高圧蒸気による活性炭の再生・吸着試験

- ・オートクレーブ：内容積 1 ℓ，外部電気加熱
加熱温度 320℃

5.3.1 耐久性試験

活性炭をオートクレーブに入れて、実機にて想定される圧力から1.7倍弱まで圧力条件を振って15時間飽和蒸気に暴露させ VOC 吸着の破過時間を未処理の活性炭と比較した。また、先の想定蒸気条件から約10℃過熱させそれぞれ24時間、49時間、66時間暴露したケース、想定蒸気条件近傍での高温水に24時間浸漬させたケースでも VOC 吸着の破過時間を未処理の活性炭と比較した。何れの条件においても破過時間に顕著な差はなく、活性炭の初期吸着性能の低下は認められなかった。また、活性炭の外観上の変化も認められなかった。

5.3.2 吸着・脱着試験

吸着・脱着の繰返し試験では VOC を混合した空気を飽和破過（吸着管出口濃度が入口濃度と同じとなる状態）まで吸着させた後、吸着管温度を200℃に加熱した状態で、オートクレーブから蒸気を供給して活性炭から VOC を脱着させた。脱着時の蒸気条件は次の通りである。

- ・圧力 : 1~1.5MPa
- ・通気量 : (水換算) 2~3cc/m in
- ・再生時間 : 1 Hr

吸着・再生を14回繰返して行った。その時の代表的なトルエン吸着破過曲線を図11に示す。1回目(新品)の破過曲線と比較すると2回目以降は破過時間が短くなっている。これは脱着を蒸気で行っていることにより、活性炭の吸着容積の一部を蒸気が占有してトルエンの吸着容量が減少したものと考えられる。そのため2回目以降のデータについて検討した。

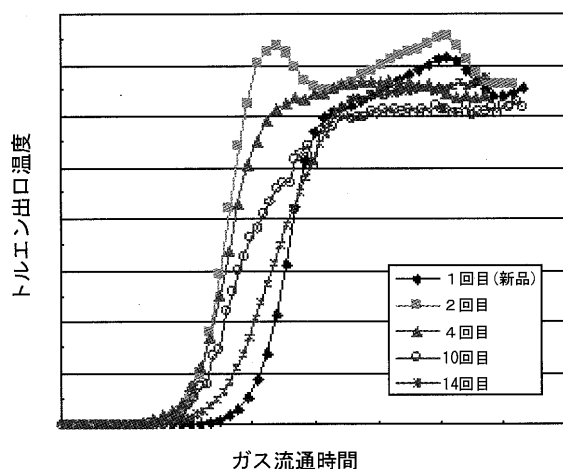


図11 トルエン吸着の活性炭破過曲線

この破過曲線からトルエンの吸着性能を評価したものを図12に示す。試験ごとにトルエン供給濃度に多少のバラツキがあるため、破過を検出した時点および破過が入口濃度の10%、15%になった時点で破過曲線から単位質量あたりの活性炭が吸着できるトルエン量を求め相対的に評価した。破過検出開始時の吸着量ではバラツキがあるものの、破過曲線の濃度が入口濃度の50%に達した時点までに供給したトルエン量、すなわち〔吸着容量〕は活性炭単位質量あたりほぼ一定になっている。したがって、吸着／脱着を繰返し行ってもトルエンの吸着量は安定しており、高温・高圧の蒸気によりトルエンの脱着、活性炭の再生が良好に行われていると判断できる。再生時の蒸気および脱着ガスをコンデンサで冷却回収すると、吸着量相当のトルエンが液として回収されていることを確認できた。また、繰返し試験後の活性炭には外観上の変化は認められなかった。

活性炭基礎試験により、本システムでの VOC 回収時に、高温・高圧（180~200℃，1.0~1.5MPa）の蒸気で活性炭の再生／脱着をしても活性炭の性能には影響しないことが確認できた。今後の実証試験では、VOC 回収装置の活性炭の吸着／再生を含めたシステム全体の検証を行う予定である。

6. まとめ

これまで省エネルギー効果を目指した蒸気噴射技術は、VOC 環境負荷の低減効果にも有効なシステム技術となる可能性を紹介した。本システムはこの後弊社呉ガスタービン発電所での実証運転を計画しており、より多くの事業者にとって経済性、エネルギー合理化、環境対策の複合した課題に対する総合的な対策手段となるもので、地球環境の悪化防止に大いに役立っていくと確信している。

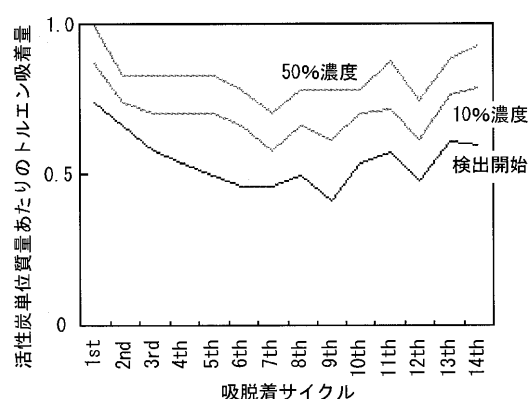


図12 活性炭の性能（吸着容量の変化）

特集：ガスタービンの将来展望 -ガスタービンは生き残れるか？-

バルチラ社製新型ガスエンジンの導入

清嶺地 誠^{*1}
SEIREIJI Makoto

キーワード：ガスエンジン、ロングストローク、高圧縮比、低ユーティリティ消費、温水回収効率

1. はじめに

当社は、2002年より6 MW級バルチラ社製18V34SG型ガスエンジンを導入し、2003年4月のヒッツパワー川崎発電所の運用開始を皮切りに主に電気需要比率の高いお客様向け中心に現在まで合計30台（受注含む）を建設し、運用いただいている。一方、バルチラ社においてはロングストローク化と圧縮比増大により高効率化、高出力化された9 MWクラスの20V34SG型ガスエンジンが開発され、姉妹機である7 MWクラスの16V34SG型と合わせてすでに世界中で受注分を含め200台を越える実績を有している。当社においても2004年より新型エンジンの導入計画を開始し、この度、特定規模電気事業者殿向けに20V34SG型ガスエンジン2台を受注したのでその計画概要と今後の展開について報告する。

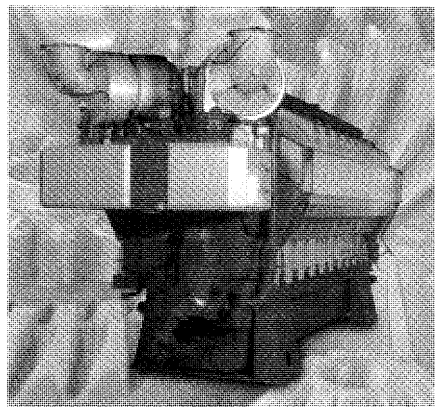


図1 20V34SG ガスエンジン

2. 16V/20V34SG ガスエンジンの主要目

20V34SG ガスエンジンの外観を図1に示す。また

16Vおよび20V34SG ガスエンジンの主要目を従来機種である18V34SG ガスエンジンと適用周波数毎に比較して表1に示す。本エンジンは、シリンダ口径はそのまま、ストロークを50mm長くすることと正味平均有効圧

表1 ガスエンジン要目比較

機種	20V34SG		16V34SG		18V34SG	
シリンダ数	20		16		18	
シリンダ径 mm	340		340		340	
ストローク mm	400		400		350	
周波数 Hz	50	60	50	60	50	60
回転速度 rpm	750	720	750	720	750	720
シリンダ当たり出力 kW/cyl	450	435	450	435	345	330
正味平均有効圧 Pe bar	19.8	20.0	19.8	20.0	17.4	17.3
平均ピストン速度 Cm m/s	10.0	9.6	10.0	9.6	8.8	8.4
エンジン端出力 kW	9,000	8,700	7,200	6,960	6,210	5,940
始動方式	圧縮空気		圧縮空気		エアーモータ	
点火方式	点火プラグによる火花着火		点火プラグによる火花着火		点火プラグによる火花着火	
潤滑油ポンプ駆動方式	エンジン軸駆動		エンジン軸駆動		エンジン軸駆動	
エンジン冷却水ポンプ駆動方式	エンジン軸駆動		エンジン軸駆動		エンジン軸駆動	
周波数 Hz	50	60	50	60	50	60
発電機端出力 kWe	8,730	8,440	6,980	6,750	6,030	5,760
発電機端効率 %	45.6	45.6	45.6	45.6	45.0	45.0
発電電圧 kV	6.6/3.3		6.6/3.3		6.6/3.3	
外形寸法 (a) 全長 mm	12,670		11,300		11,780	
(共通台床) (b) 全幅 mm	3,670		3,620		3,450	
(を含む) (c) 全高 mm	4,650		4,470		4,770	
機関単体重量 ton	76.4		70		58	
発電装置重量 ton	137.5		125.3		100	

注) ガスエンジン効率は高効率仕様(NOx値=320ppm @O₂=0%ベースを示す)であり、効率には裕度+5%を含む

原稿受付 2007年2月7日

*1 Hitz日立造船(株) エンジニアリング本部プラント計画部
発電システムグループ
〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-7-89

力を上げることでシリンダ当りの出力を約30%上げ、効率を0.6%向上させている。加えて、従来の18シリンダを20シリンダ化することで世界最大級の発電機端出力9 MWを誇っている。

また従来機種と同様に点火は副室への火花着火による方式を採用しており、着火用の液体燃料は不要となっている。さらに潤滑油ポンプおよびエンジン冷却水ポンプ（低温側、高温側共）はエンジン軸駆動により補機の消費動力を約80kW相当低減して送電端での効率低下を最小限としている。一方、始動方式を従来のエアモーター駆動方式からシリンダへの圧縮空気直接注入方式への変更、燃料噴射系の副室逆止弁を従来のパネ式からカム軸駆動による機械式への変更、副室専用の燃料圧力制御弁採用に伴うシリンダ個別燃料噴射弁の廃止によってメンテナンス性・信頼性向上を図っている。

3. 新設発電設備の概要

表2に計画中の発電設備概要を、図2に全体配置計画図を示す。本発電設備は、ガスエンジン発電機2式にて構成される特定規模電気事業者向けの発電所であり、指令される30分デマンドに対応して常に出力制御および台数制御を行う計画である。尚、付近に熱需要設備が無いため排熱回収装置は装備していない。ガスエンジン発電機は、換気設備（換気ファン5台+入出口サイレンサ）および電動ホイスドクレーンを装備したエンクロージャ内に個別設置し、騒音レベルをエンクロージャ機側1 mにて85dB^(A)以下に低減する。またガスエンジン吸気口および排気口においてもそれぞれサイレンサを装備し、出口1 mにて85dB^(A)以下としている。さらに環境対策としてガスエンジン排気は、排出NO_x値=32ppm以下（O₂=0%換算）、ホルムアルデヒド濃度=5 ppm以下を達成するために脱硝設備および酸化触媒を装備している。

表2 新設発電設備主要目

ガスエンジン発電設備	機種	バルチラ20V34SG
	使用燃料	都市ガス13A(中圧A)
	台数	2基
	周波数	Hz 50
	回転速度	rpm 750
	発電電圧	kV 6.6
	発電機端出力	kW 17,460(合計)
	発電機端効率	% 45.6
	送電端効率	% 45.1
	点火方式	点火プラグによる火花着火
排煙処理設備	潤滑油ポンプ駆動方式	エンジン軸駆動
	エンジン冷却水ポンプ駆動方式	エンジン軸駆動
	エンジン冷却方式	ラジエータ
	脱硝設備	アンモニア接触還元式 脱硝率90%
酸化触媒	接触燃焼方式	出口ホルムアルデヒド濃度 5ppm以下

注) ガスエンジン効率は高効率仕様（NO_x値=320ppm @O₂=0%ベースを示す）であり、効率には裕度+5%を含む

本発電設備の特筆すべき項目として、

- (1) 高い送電端効率
- (2) 低いユーティリティ消費量

がある。本設備の所内動力は燃料に中圧Aの都市ガスを適用することでガス圧縮動力が不要となっており、夏季最大時の2台トータルで200kW程度に押えられている。結果、送電端における効率低下は0.5%のみである。さらに台数制御を採用したエンクロージャ換気ファンおよびインバータ制御適用のラジエータにより夏季以外では更に高い送電端効率が得られる。また、主機がガスエンジンであるため夏季の吸気温度上昇による出力低下がほとんど無い。一方、ユーティリティとして、冷却水はラジエータ冷却方式のため消費がほとんど無く（補給水として1 m³/月以下）、水処理の薬品も使用しない。潤滑油の消費量も実績ベースにて0.2~0.3g/kWh程度が期待できる。これら優れたランニング性能に加えて当社発電所における豊富な運用・保守実績をベースに初号機の安定稼動に貢献したいと考えている。

4. コージェネレーションシステムへの適用

当社では特定規模電気事業者向けの発電所計画に加え従来機種においても主力であるコージェネレーションシステムの適用についても積極的にアプローチしている。単機7 MW ~ 9 MW クラスともなれば当然中型ガス

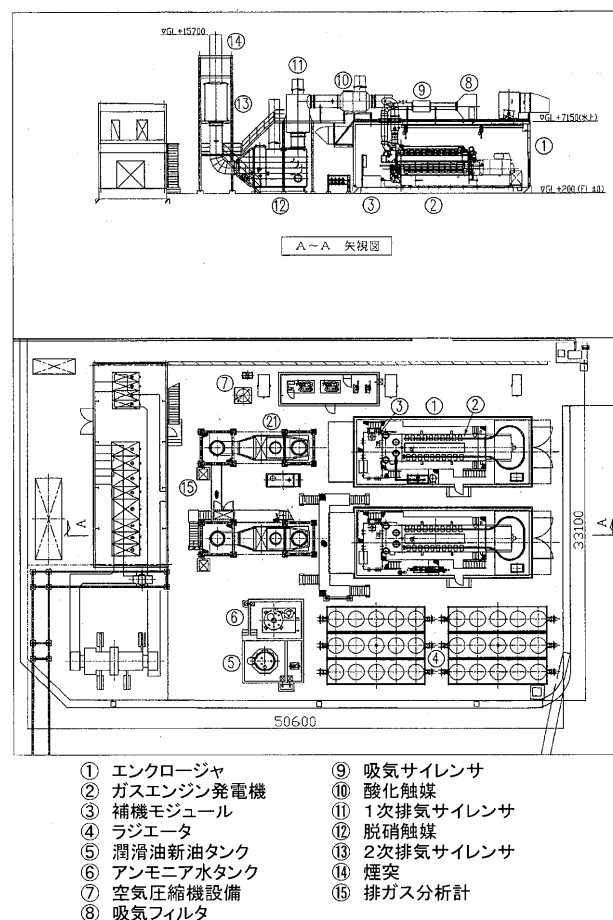


図2 新設発電所機器配置図

タービンとの競合も今後増えて行くと考えられ、総合効率においてもガスタービンと遜色ないレベルが要求されてくると思われる。ガスエンジン発電設備において、総合効率を上げるには低温域を含めた温水熱の回収をどこまでシステムとして適用できるかにかかってくる。

コージェネレーションシステムフローの例を図3に示す。本フローでは、ガスエンジン排気は排熱回収ボイラーによる蒸気回収とし、高温水は熱交換器による給水加熱用熱源および温水吸収冷凍機用熱源として回収する

システムである。また、冷却装置として冷却塔を適用しているが前述と同様にラジエータ仕様も適用として選択できる。

図4に20V34SG ガスエンジン (50Hz) 仕様の排熱回収ボイラーによる蒸気回収および高温水回収を適用したコージェネレーションシステムのヒートバランスの例を示す。高温水は従来と同様に、給水加熱用熱源、温水吸収冷凍機用熱源、液化天然ガス気化熱源、乾燥用空気加熱用熱源等に適用可能である。この場合の総合効率は、

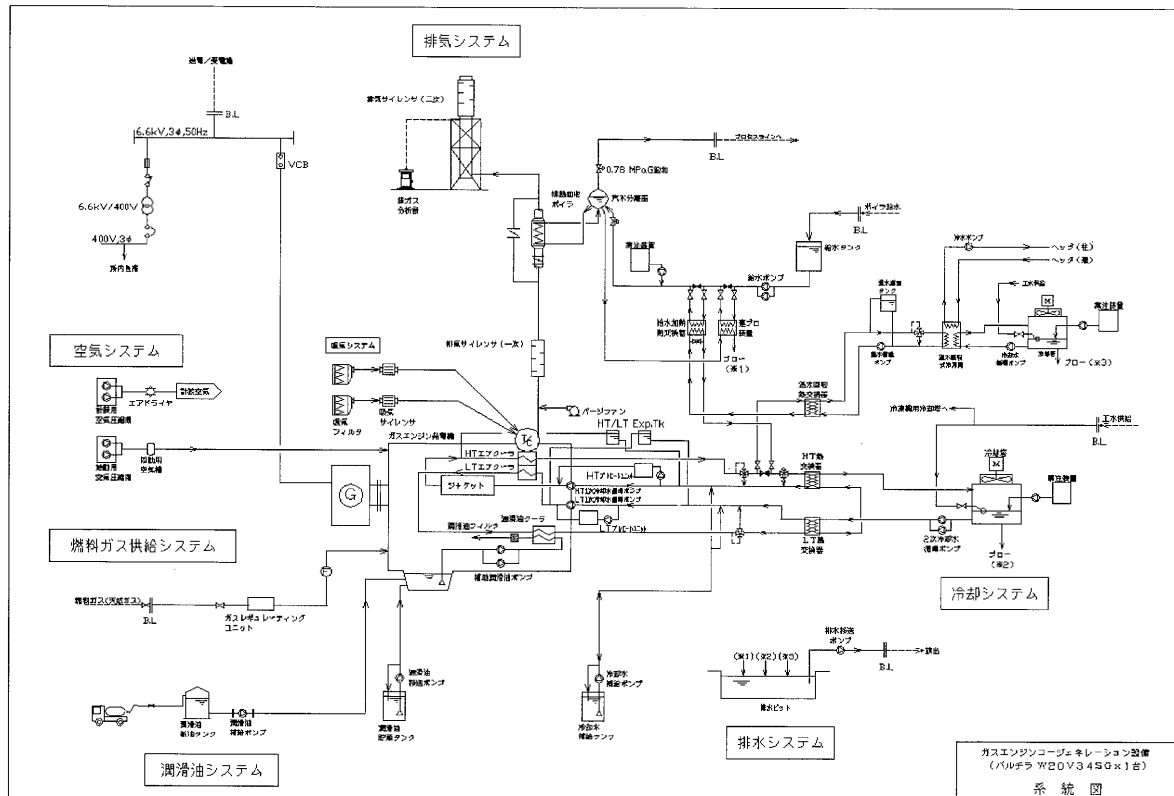


図3

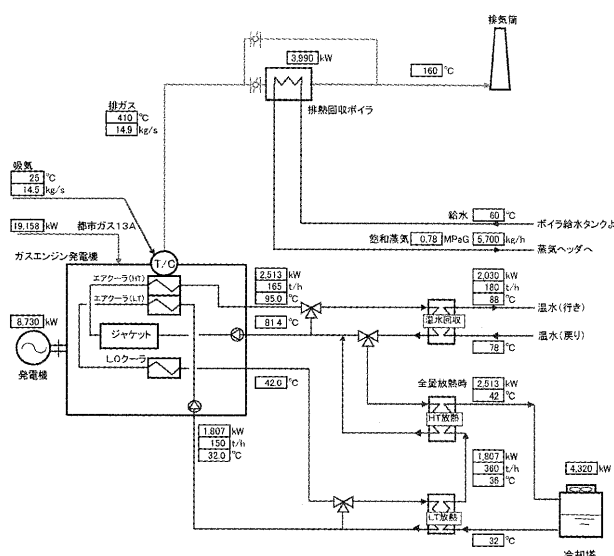


図4

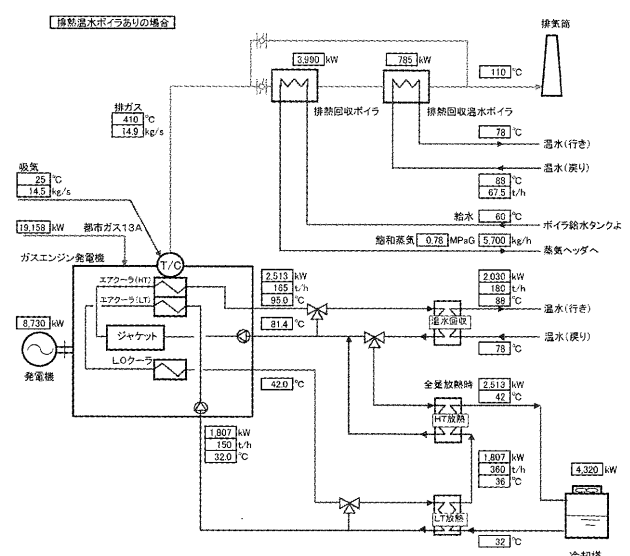


図5

20シリンダエンジン、16シリンダエンジンおよび60Hz仕様の場合も共にほぼ同様で表3に示す通り、発電効率45.6%、蒸気回収20.8%、エンジン高温水回収10.6%でトータル77%の計画である。一方、図5は、より高い総合効率を得るために排熱回収蒸気ボイラー出口に直列に温水ボイラーを適用した場合のヒートバランスを示す。この場合、同様に表3に示す通り、回収熱量が4.1%増加し、総合効率81.1%が得られる。また、本ガスエンジンは添付のフロー図およびヒートバランス図に示す様に冷却水が2系統（高温側：アフタークーラ1次冷却+ジャケット冷却と低温側：アフタークーラ2次冷却+潤滑油冷却）が標準であるが1系統にすることも可能である。よって、温水を低温域まで回収可能なシステムとすれば北欧の地域暖房向けコージェネ設備では一般的な総合効率90%超も可能である。

次に、発電機端効率の向上に着目した例として図6に示すようなガスエンジン複数台（本例は、20V34SG×3台、50Hz仕様）に蒸気タービン1台を設置したコンバインドサイクル化の適用を考えている。蒸気タービンは蒸気条件を2MPa飽和とした例で、発電機端出力

表3

No.	項目	単位	20V34SG		16V34SG	
			50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
1	発電機端出力	kWe	8,730	8,440	6,980	6,750
2	発電機端効率	%	45.6	45.6	45.6	45.6
3	燃料消費量 *1	m ³ /h	1,697	1,641	1,357	1,312
4	排ガス流量	kg/h	53,600	51,800	42,800	41,400
5	排ガス温度	°C	410	410	410	410
6	蒸気発生量	kg/h	5,700	5,500	4,550	4,400
7	同上	kW	3,990	3,850	3,190	3,080
8	エンジン温水回収量	kW	2,030	1,970	1,620	1,570
9	総合効率(温水ボイラ無し)	%	77.0	77.0	77.0	77.0
10	温水ボイラ回収熱量	kW	785	759	627	606
11	総合効率(温水ボイラ有り)	%	81.1	81.1	81.1	81.1

*1 使用燃料: 都市ガス13A、LHV=40.63 MJ/m³Nの場合

表4

	出力(kW)	効率(%)
燃料入力	57,474	—
発電出力(ガスエンジン)	26,190	45.6
発電出力(蒸気タービン)	2,120	3.7
総合発電出力	28,310	49.3

*1 使用燃料: 都市ガス13A、LHV=40.63 MJ/m³Nの場合

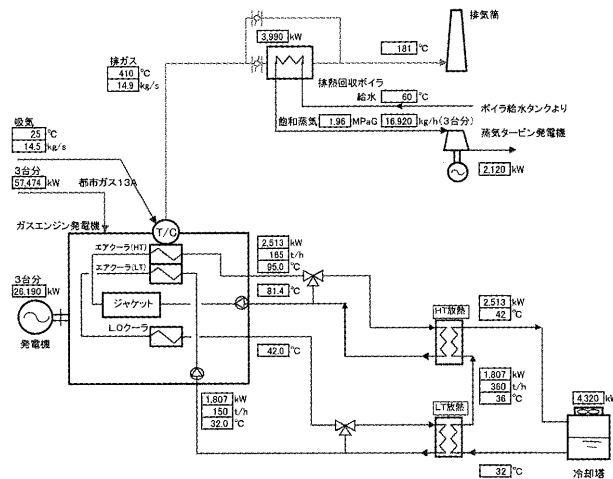


図6

2,120kWを見込んでいる。この場合、表4に示す通り総発電機端出力は約26MW、総発電機端効率は49.3%となり、3.7%の効率アップが得られる。本例のようなシステムではガスエンジンの台数制御と組み合わせて、最大運転時だけでなく部分負荷運転においても高い発電機端効率を得られる利点がある。

5. おわりに

当社ではバルチラ社製新型ガスエンジン 20V34SG×2台で構成される発電設備を受注し、現在設計製作を進めている。当社は本設備の運用およびメンテナンスを実施することになっており、従来の発電所運用実績をもとに安定稼動に努めると共に、点火プラグのさらなる長寿命化をはじめとしたメンテナンス周期の延長化と本ガスエンジンのさらなる信頼性向上に寄与したいと考えている。一方、コージェネレーションシステムへの適用についても積極的に進めており、特に高い総合効率を得られる温水回収システムの構築について計画段階から参画し、従来以上の高効率システムを提案することでより大きなCO₂排出削減、省エネ政策に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 佐竹泰文, 日本ガスタービン学会誌, Vol.32, No.6, 2004.11, P463
- (2) 熊倉祐之, クリーンエネルギー, Vol.14, No.10, 2005.10, P23
- (3) 小田拓也, 江口知孝, 第25回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集, 2006.6

特集：ガスタービンの将来展望 –ガスタービンは生き残れるか？–

SOFC 複合発電システムの開発と将来展望

久留 長生^{*1}

HISATOME Nagao

キーワード：固体酸化物形燃料電池，複合発電，モジュール，カートリッジ，ガスタービン，
トッピングシステム

Solid Oxide Fuel Cell, Combined Cycle, Module, Cartridge, Gas Turbine,
Topping System

1. はじめに

燃料電池は水素などの燃料から直接電気を取り出す1種のエネルギー変換装置であり，様々な種類の燃料電池が開発されている。（表1参照）中でも固体酸化物形燃料電池（Solid Oxide Fuel Cell：以下SOFCと略す）は作動温度が最も高くガスタービンとの複合発電により70%以上の高効率発電が可能になること，燃料として天然ガスや一酸化炭素を含む石炭ガス化ガスも利用可能なことから大規模発電用としての実用化が期待されている。

当社では1984年にSOFCの開発に着手以来，電池材料やセル構成，製造方法等について開発を進め，2004年度には独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）より「円筒形SOFC高効率コンバインドシステムの開発」を受託し，200kW級のSOFC複合発電システム（図1）を開発中である。

本報ではNEDO委託研究のこれまでの開発成果を中心に，SOFC－ガスタービン複合発電システムの開発状況と将来の展望について述べる。

表1 燃料電池の形式比較

	固体高分子形 (PEFC)	リン酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
発電部	高分子膜	リン酸	熔融炭酸塩	セラミックス
イオン	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
燃料	H ₂	H ₂	H ₂ , CO	H ₂ , CO
運転温度(°C)	60~100	150~200	600~650	700~1000
発電効率 (LHV %)	電池単体	約40	約40	約40
	システム	40~50	35~40	50~65*
用途	自動車用, 家庭用	分散電源用	中～大規模電源用	家庭用, 小～大規模電源用

PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell

PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell

MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell

SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

* : 複合発電における効率

2. SOFCの特徴

2.1 発電原理

SOFCの発電原理を図2に示す。水の電気分解と逆の反応である。酸素イオンだけを伝導し電子・ガスを通さない電解質を隔て，水素（H₂）・一酸化炭素（CO）の燃料と空気を流すと起電力が発生する。この状態で燃料側・空気側の電極間を外部回路で接続すると，電解質中を酸素イオン（O²⁻）が流れ，電子が外部回路を流れる回路が構成され，外部回路の負荷で電力を取り出すこと

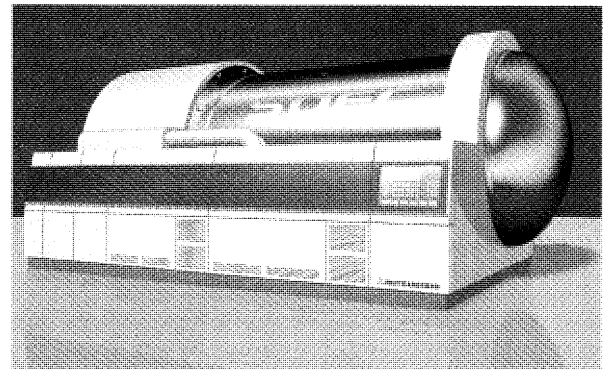


図1 SOFC マイクロガスタービン複合発電システムイメージ図

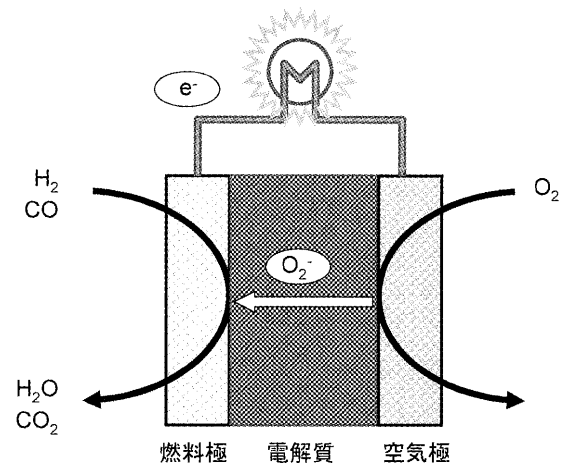


図2 SOFCの発電原理

原稿受付 2007年1月15日

*1 三菱重工業(株) 長崎造船所 燃料電池開発課
〒850-8610 長崎県長崎市飽の浦1-1

ができる。水素・一酸化炭素はそれぞれ水 (H_2O)・二酸化炭素 (CO_2) となって燃料側に排出される。反応全体は燃焼と同じであるが、燃焼では熱のみが得られるのに対して、燃料電池では燃料の化学エネルギーの一部を電力として直接取り出すことができる。

定置発電用や移動体用として実用化が進んでいるのはリン酸形燃料電池 (PAFC) と固体高分子形燃料電池 (PEFC) である。これらは水素イオン (H^+) 導電性の電解質を用いるため、直接使用できる燃料は水素のみであり、燃料に都市ガスを用いる場合は、予め改質器により水素に転換する必要がある。また、 200°C 以下の比較的低温で運転されるため反応を促進するために電極に高価な貴金属触媒が必要となる。

これに対して SOFC は、電解質にイットリア安定化ジルコニアなどの酸素イオン導電性を有するセラミックスを用いる。電解質が酸素イオン導電性であるために、水素 (H_2) だけでなく一酸化炭素 (CO) も燃料として利用できる。また、 $700\sim 1000^\circ\text{C}$ の高温作動であるため、発電反応のための貴金属触媒は不要である上に、発電反応で発生する高温の熱と水蒸気を利用して炭化水素燃料を燃料電池内部で H_2 、 CO に転換する内部改質反応が適用でき、外部改質器が不要となる。また、改質反応は下式で表されるように吸熱反応であるため、SOFC に投入した燃料は改質反応により発熱量が20%増加し発電効率向上に寄与する。



2.2 円筒形 SOFC セルチューブ

円筒形 SOFC セルチューブ (スタック) の外観を図3に、断面構造を図4に示す。基体管上に燃料極、電解質、空気極の薄膜を積層して発電素子を構成し、発電素子間をインタコネクタで直列に接続している。燃料は基体管の内側から、空気は外側から供給する。セルチューブ



図3 円筒形 SOFC セルチューブ

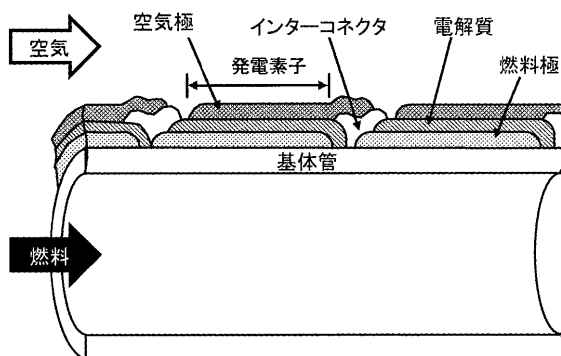


図4 円筒形 SOFC 断面構造

ブは、まず押出法で成形したセラミックス製基体管上に、燃料極、電解質、インタコネクタ原料スラリーをスクリーン印刷して薄膜を形成し、一括で焼結する。空気極は焼結温度が異なるため他の材料とは別にスクリーン印刷し、焼結して製造する。

2.3 SOFC モジュール

円筒形セルチューブは1本の出力は $100\sim 200\text{W}$ 程度と小さいため、大容量の発電装置ではセルチューブを集積して使用することになる。SOFC モジュールについては、2001年から信頼性向上のための本格的な技術開発を電源開発㈱と共同で実施した。円筒形セルチューブを100本単位で束ねて燃料・空気の供給、集電を行う最小単位のカートリッジを構成し、それを4個並べてサブモジュールを構成し、電氣的に直列に接続して電流取り出しの単位としている。更に、このサブモジュールを圧力容器の長手方向に必要個数並べることによりモジュール容量を任意に設定できる拡張性の高いモジュール構成と

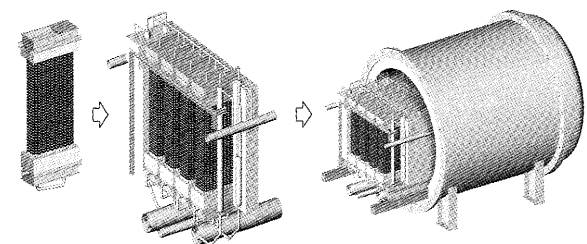


図5 SOFC モジュール構成概念図

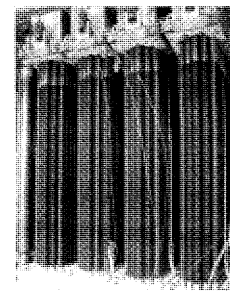


図6 カートリッジ外観

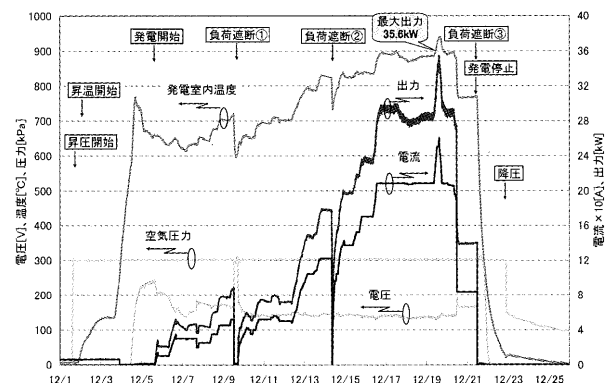


図7 SOFC40kW 級サブモジュール運転試験結果

している。モジュール構成の概念図を図5に、カートリッジ外観を図6に示す。

図7にサブモジュールの運転試験結果を示す。マイクロガスタービンとの複合発電に要求される制御特性を確認するため負荷遮断(MFT)を含む約3週間の試験を実施し、最大出力35.6kWを確認した。

3. SOFC-ガスタービン複合発電システム

3.1 システム構成

200kW級SOFC-マイクロガスタービン複合発電システムの系統図を図8に示す。SOFCはガスタービンの燃焼器の上流に挿入される。燃料の都市ガスは最初にSOFCに投入され、燃料の化学エネルギーがSOFCで直接電力に変換される。SOFCは単独では燃料の化学エネルギーのすべてを発電反応に消費することはできないが、複合発電システムではSOFCの未利用の燃料をガスタービンに送ることにより、すべての燃料を発電用として利用することができる。空気は、ガスタービン圧縮機で昇圧された後SOFCモジュール内で、発電用に酸素を供給した後、高温排熱とともにガスタービンに送られる。ガスタービンでは高温加圧空気の顕熱・圧力もエネルギー源の一部となって発電機で電力に変換され、システム全体として高い発電効率を得られる。

当社円筒形SOFCでは、SOFCモジュール内で排燃料を燃焼させず、排燃料と空気を別々に取り出す方式を採用している。モジュール内で燃焼するシステムに比べ、

SOFCモジュール出口の温度を下げることができ、SOFCとガスタービンの間の空気配管の使用温度を低く保ったままガスタービン燃焼器に送り、そこで再度燃焼してガスタービンのタービン入口温度を上げ、ガスタービンを高効率・高出力の状態で運転することができる。大容量の複合発電システムでは高温空気配管が設計上の制約となるため、高効率化のためには、排燃料と空気を別々に取り出す方式が有利である。

しかし、このシステムを構築するためには、①高温のSOFCモジュール内で燃料-空気間をガスシールする技術、②SOFC燃料-空気間の差圧制御技術、③低カロリーのSOFC排燃料をガスタービン燃焼器で燃焼する技術が必要となる。

3.2 SOFC 複合発電システム用マイクロガスタービン

SOFC複合発電システムではマイクロガスタービン(図9)をSOFCからの低カロリーガス燃料にて運転するため、産業用ガスタービンで培った高炉ガス等の低カロリーガス燃焼技術をマイクロガスタービンに適用し、燃焼器の改造を行った。SOFCからの排燃料/排空気を模擬した燃料・空気による低カロリーガス燃焼器(図10)の単体燃焼試験を実施し、計画点である燃料発熱量約3000kJ/Nm³-HHVおよび燃焼効率98%を上回る良好な安定燃焼領域を確認した。

この低カロリーガス燃焼器をマイクロガスタービンに搭載し、模擬排燃料および排空気によるマイクロガスタービンの運転試験を実施した。図11に運転トレンドを示す。

本試験において低カロリーガス燃焼器を搭載したマイクロガスタービンにおける都市ガス燃料による起動、低カロリーガスへの燃料切替および低カロリーガスによる負荷運転時の状態を確認した。また、燃料切替時においても、マイクロガスタービン制御パラメータである回転速度に変動はなく、燃料切替においてもマイクロガスタービンは十分制御可能であることを確認した。

低カロリーガス燃焼器を搭載したマイクロガスタービンでは、これまでに累積運転時間1,000時間以上、起動停止200回以上の運転履歴を経て、燃焼器、ガスタービン本体、発電機、制御機器、電力変換器などマイクロガスタービンの各構成要素の健全性を確認している。また、マイクロガスタービン単体にて複合発電システムを想定した制御試験を実施した。マイクロガスタービンを負荷遮断操作した時のトレンドを図12に示す。負荷遮断操作

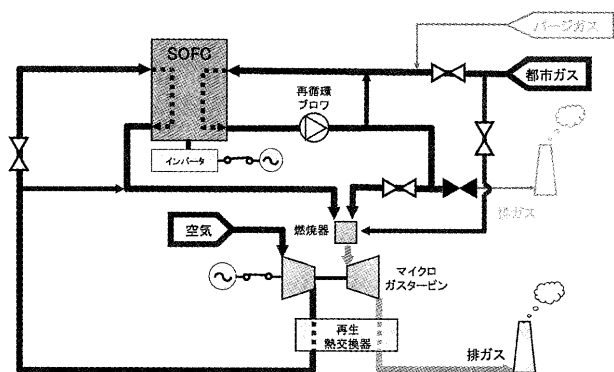


図8 SOFC マイクロガスタービン複合発電システム系統図



図9 75kW級マイクロガスタービン外観

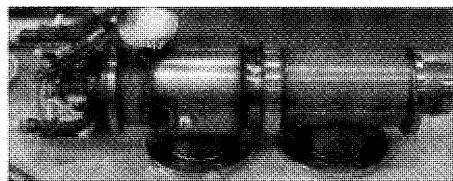


図10 低カロリーガス燃焼器外観

直後の回転速度上昇は2%以下で許容範囲内であり、また SOFC 側の空気圧力変化は差圧制御継続可能範囲内に抑えられることを確認した。

3.3 SOFC 複合発電システムの運転制御技術

SOFC の運転温度は、マイクロガスタービンからの空気流量を SOFC をバイパスするラインに設けた流量調整弁にて調節し、SOFC 発電部の空気温度を一定範囲内にする。圧力はマイクロガスタービンの回転数を一定にした状態で圧縮機の空気吐出圧力を一定に保持し、燃料-空気間の差圧を所定の範囲内とするように燃料圧力を SOFC 下流の差圧調節弁にて調節する。SOFC 出口排燃料は再循環ブロワにより燃料入口側に戻し、燃料改質に必要な水蒸気を自給する。また、マイクロガスタービン燃焼器上流に圧力調節弁を設け、SOFC 燃料側圧力と独立にマイクロガスタービン燃焼器入口燃料圧力を制御する。

また、実運用においては SOFC 複合発電システムの運転中に、SOFC またはマイクロガスタービンで異常が発生した場合、これらを安全に負荷遮断させる必要がある。負荷遮断時には電気出力は、SOFC およびマイクロガスタービンとも直ちに負荷遮断を行う。SOFC 側では燃料の供給を遮断するとともに、SOFC 出口の排燃料のマイクロガスタービンへの供給を遮断する。こ

の際モジュール保護のため、燃料-空気間の差圧制御を行い過大差圧発生を防ぐ必要がある。

これらの過渡状態の挙動を予測し、系統制御パラメータを選定するために、SOFC について動特性シミュレーションモデルを作成し、検討を行った。負荷遮断時の SOFC 燃料-空気間差圧の経時変化シミュレーション結果を図13に示す。

各制御弁のパラメータを適切に設定することにより SOFC 燃料-空気間差圧の変動を抑えられることが示された。この結果に基づき、コンバインドサイクルシステム運転制御試験にて、負荷遮断状態の挙動を実験的に確認し、制御パラメータの調整を実施した。

サブモジュール試験での負荷遮断 (MFT) 試験結果を図14に示す。負荷遮断操作直後の燃料-空気間差圧は排空気圧力変化に排燃料圧力を追従させることで、許容値である $\pm 10\text{kPa}$ 以内に抑えられており、シミュレーションの結果と整合していることを確認した。

また、負荷遮断時にセルチューブやサブモジュールへのダメージはなく、また、局所的・一時的な異常温度上昇もなく、負荷遮断操作ができることを確認した。

3.4 200kW 級 SOFC-マイクロガスタービン複合発電システム

以上に述べた要素開発・制御技術開発の成果に基づき、2007年に運転予定の200kW 級複合発電システムの設

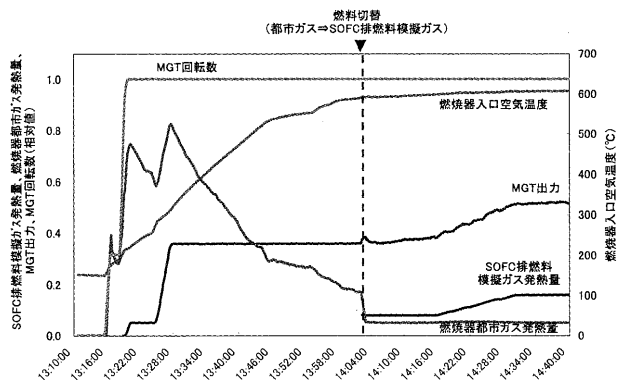


図11 低カロリーガス燃焼器搭載マイクロガスタービン運転試験

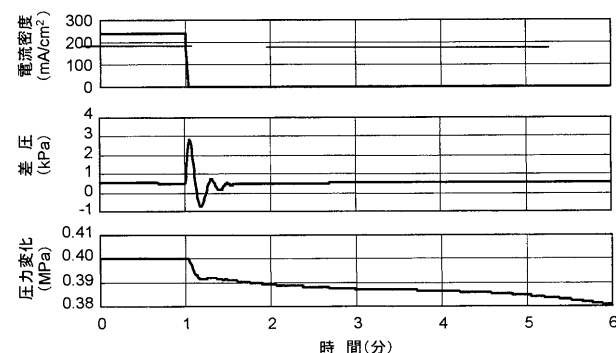


図13 SOFC 燃料 / 空気間差圧制御シミュレーション結果

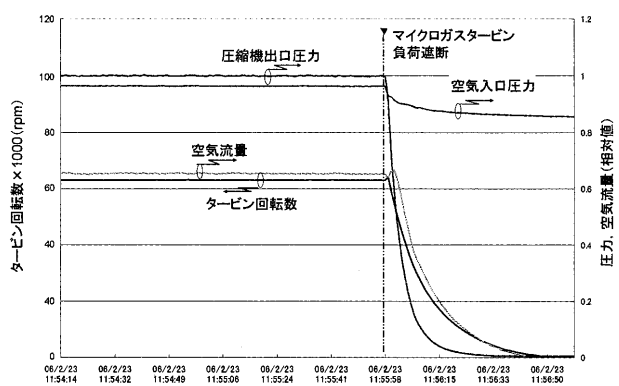


図12 マイクロガスタービン負荷遮断試験結果

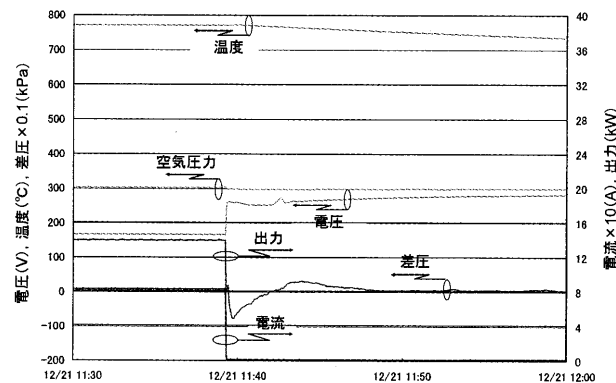


図14 サブモジュール負荷遮断試験結果

計・製作を実施中である。

200kW 級複合発電システムでは、発電効率50%以上（都市ガス燃料 LHV 基準、送電端：以下同じ）を性能目標としている。なお、同じ容量のマイクロガスタービンを用いて350kW 級複合発電システムを構成すると発電効率は55%以上となる。

4. SOFC 複合発電システムの将来展望

4.1 事業用 SOFC 複合発電システム

図15に各種プラント出力と発電効率の関係を示す。SOFC は単体でも比較的小容量でも高効率発電が可能であるが、さらにガスタービンとの複合発電化により発電

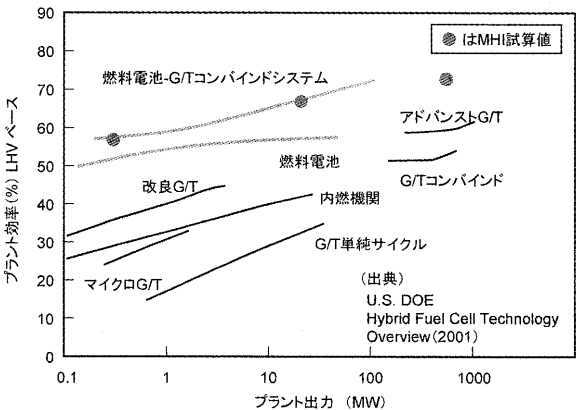


図15 各種発電方式の効率比較

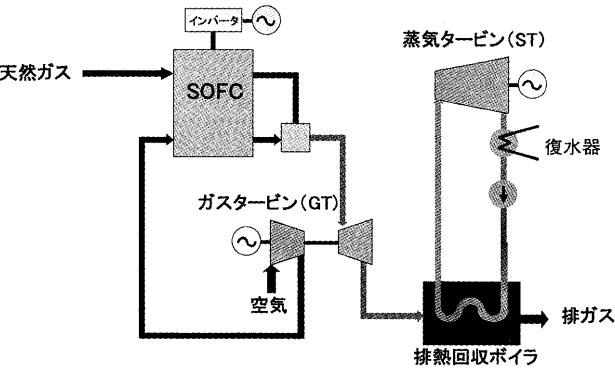


図16 SOFC ガスタービン-蒸気タービン複合発電システム（天然ガス燃料）

表 2 700MW級天然ガス焼き SOFC 複合発電システム計算例

	項目	単位	計算値
条件	燃料利用率	%	60
	セル電圧	V	0.7
	運転圧力	MPa	1.5
プラント性能	SOFC出力	MW	557
	ガスタービン出力	MW	145
	蒸気タービン出力	MW	57
	送電端出力	MW	736
	送電端効率(LHV)	%	71.2

効率は他の発電方式を大きく上回ることがわかる。

3.3節で述べたように、SOFC とマイクロガスタービンの数百 kW 級複合発電システムにおいても50%以上の高効率発電が可能となるが、SOFC のメリットを最大限に引き出せるのは大型事業用火力のガスタービン-蒸気タービン複合発電システムに SOFC を付加した SOFC-ガスタービン-蒸気タービン複合発電システムである。SOFC 複合発電システムのプラント出力はガスタービンから供給される圧縮空気量により決定される。これはガスタービンからの圧縮空気が SOFC の反応用空気として使用されるためである。図16にシステム構成図を表 2 に700MW 級の天然ガス焼き SOFC 複合発電システム計算例を示す。SOFC 出力が全体の約70%，ガ

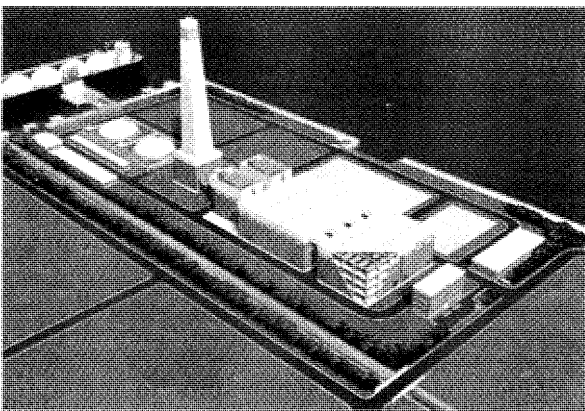


図17 200MW級天然ガス焼き SOFC 複合発電プラント鳥瞰図

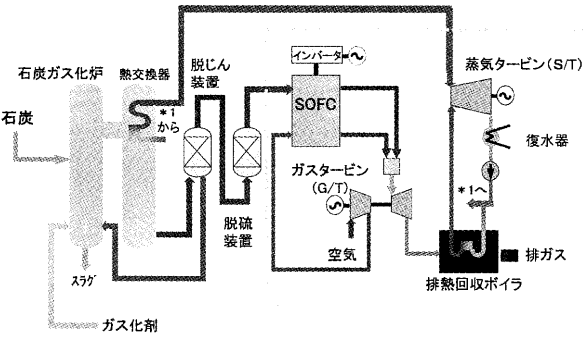


図18 SOFC ガスタービン-蒸気タービン複合発電システム（石炭燃料）

表 3 700MW級石炭ガス化 SOFC 複合発電システム計算例

	項目	単位	計算値
条件	燃料利用率	%	60
	セル電圧	V	0.7
	運転圧力	MPa	1.5
プラント性能	SOFC出力	MW	260
	ガスタービン出力	MW	236
	蒸気タービン出力	MW	206
	送電端出力	MW	653
	送電端効率(LHV)	%	59.8

スタービン出力が約20%、蒸気タービン出力が約10%程度となる。発電効率の向上にはSOFCへの供給燃料量を極力減らすことが有利であるが、実際にはSOFCの発電性能への影響やSOFCからの排燃料をガスタービン燃焼器で安定して燃焼させるため3000KJ/Nm³以上となるよう設定している。天然ガス焚き事業用SOFC複合発電システムの鳥瞰図を図17に示す。

また、石炭を燃料とする場合はガス化炉で石炭をガス化し、ばいじんや硫黄分などの被毒成分を除去したのちSOFCへ供給する。図18にシステム構成例を示す。石炭ガス化ガスの主成分は水素と一酸化炭素であり、内部改質反応が起きないため、発電に伴うモジュール内部の発熱を除去する空気量を天然ガス（メタン）燃料に比べ多く必要とし、排熱回収ボイラでの蒸気発生量が増えるため蒸気タービンの出力割合が高くなる。700MW級のシ

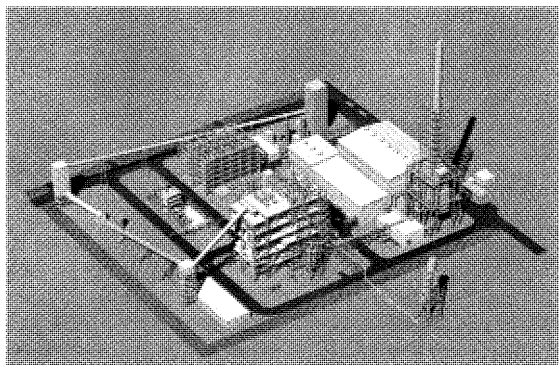


図19 700MW石炭ガス化SOFC複合発電鳥瞰図

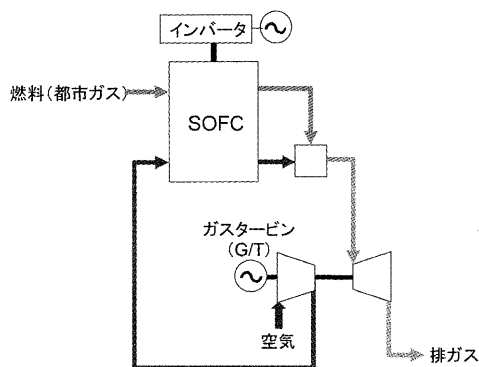


図20 SOFC ガスタービン複合発電システム

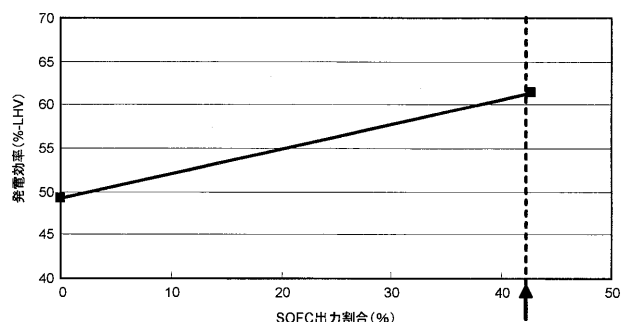


図21 SOFC トッピングシステム効率試算結果

ステム計算例を表3に、石炭ガス化SOFC複合発電システムの鳥瞰図を図19に示す。

4.2 SOFC 早期実用化への取組み

SOFCの大規模発電システムの実用化を進める上で、開発初期段階では比較的少規模のプラントでSOFCの運転実績を積み重ねることが求められる。

図20は6MW級のガスタービンとSOFCからなる複合発電システムの構成例である。本システムではプラントの総出力は約20MWと小規模ながら、発電効率は65%程度と見込まれ、同クラスの他の発電設備に比べ相対比で20%以上高効率となる。また、ガスタービンの入口ガス温度は1000℃以下であり、ガスタービン側の改良も比較的容易であると考えられる。

また、SOFCを既存のガスタービンプラントの部分トッピングサイクルとして設置し、プラント出力の増加や発電効率を向上させることも考えられる。この場合は適用するガスタービンとSOFCの出力割合によりプラント効率は変化する。一例として当社D形ガスタービンにSOFCをトッピングに設置した場合の効率の試算結果を図21に示す。7MW級SOFCの部分トッピングサイクルの設置により、発電効率は設置しない場合に比べ相対比で約2%向上するものと見込まれる。

5. まとめ

当社では1984年の開発着手以来、SOFCを火力発電における究極の高効率発電技術と位置づけており、その実現にはガスタービンとの複合発電技術の確立が不可欠である。

現在開発中のマイクロガスタービンとの複合発電システムを足掛けとして、各種ガスタービンとのコンバインド化を図っていきたいと考えている。

最後に、本技術は200kW級複合発電システム開発の委託元である(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)や共同研究を実施してきた電源開発(株)(J-POWER)を始めとする関係先の協力を得て培われたものであり、この場を借りて心から謝意を表す。

特集：ガスタービンの将来展望 -ガスタービンは生き残れるか？-

燃料多様化

佐藤 幹夫^{*1}

SATO Mikio

キーワード：ガスタービン，燃料多様化，メタノール，水素，石炭，DME，BFG，バイオマス，汚泥消化ガス

1. はじめに

クリーンで環境負荷の少ない天然ガスの需要が拡大しており，域内における天然ガス生産量が需要増に追いつかない米国は急速に液化天然ガス（LNG）の輸入を拡大している。中国も本年5月から豪州からのLNGの輸入を開始した。中国はイランやインドネシアからの輸入も予定しており，2020年には年4500～6000万トンを入力する見通しである。中国は，現在世界で取引されるLNGの4割，約5800万トンを入力する日本や需要を急増させる米国と並び，世界最大級のLNG輸入国となる。LNG利用は原油高などを背景に各国で拡大しており，2004年にインド，2005年に英国が輸入を開始した。このようなことから，世界のLNG需要は2005年の1億3900万トンから2030年には4億9500万トンへ3.6倍まで拡大すると予想されている。現在，事業化が検討されているLNGプロジェクトが順調に進展すれば，世界のLNG供給能力は2030年の需要とほぼ均衡するとされるが，当該プロジェクトの進展が停滞する場合には，世界のLNG需給は2010年以降タイトになる可能性もある。

1973年，79年と続いた石油危機を契機に石油代替が進んだわが国の電気事業では，2004年度の年間発電電力量に占める石油火力の割合は9.7%まで低下しており，天然ガス（LNG）火力が25.7%，石炭火力が24.2%となっている。このようにLNGは石炭と並びわが国の発電用燃料として重要な役割を果たしている。わが国における事業用大型ガスタービン用燃料はLNGが主であるが，前述したように，長期的に見るとLNGの需給がタイトになる可能性もあり，ガスタービン燃料の多様化は重要である。

ガスタービンは液体燃料や気体燃料を直接使用することができるが，石炭や固体バイオマス，超重質油などを直接用いることはできない。しかしながら，石炭や固体バイオマスなどをガス化することにより，これらの燃料もガスタービンで使用することが可能となる。また，水素は水素燃焼タービンにより，大規模発電システムで利用することも可能である。このような観点からみれば，ガスタービンは燃料多様化にも適用可能な熱機関であると言える。

ガスタービン燃料の多様化という観点からこれまで実

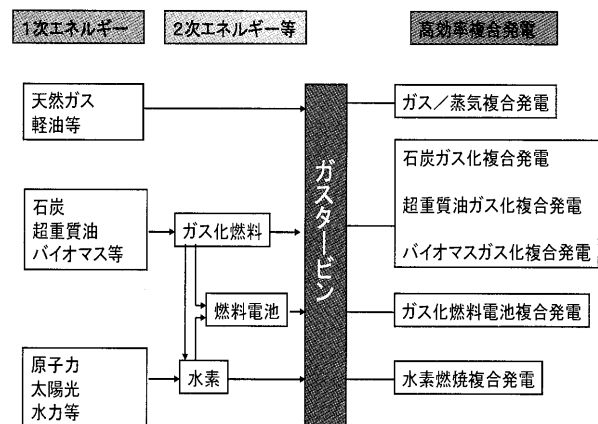


図1 ガスタービンの燃料多様化

施された国家プロジェクトを振り返ると，メタノール利用ガスタービン技術開発や WE-NET プロジェクトにおける水素燃焼タービンの開発がある。メタノール利用に関しては，昭和63年から実施された「メタノール改質型発電トータルシステム実証研究」がある。本研究は旧通商産業省資源エネルギー庁が，メタノールを燃料とする発電方式の技術的可能性を検討するために実施されたものであり，民間企業など5社が新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を通じて委託を受け，中国電力（株）大崎発電所構内で1000kW級実証試験プラントにより行われた。

一方，将来のエネルギー需要の増大に対する供給力の確保と，地球環境問題を解決することを目的に，旧通商産業省工業技術院では，ニューサンシャイン計画の主要課題のひとつとして，「水素利用国際クリーンエネルギーシステム（WE-NET）」プロジェクト（第Ⅰ期）を平成5年度から平成10年度にかけて実施した。第Ⅰ期 WE-NET プロジェクトでは，水素を大規模発電システムで利用する技術として，「水素燃焼タービンの開発」が開発課題として挙げられ，タービン入口温度を1700℃級とし，発電端効率60%以上（HHV基準）を目標とした研究開発が実施された。

石炭をガスタービン燃料とするシステムとしては，石炭ガス化複合発電（IGCC）がある。わが国では空気吹き噴流床ガス化炉を用いる250MW級実証機開発が現在進められ，2007年度からの運転開始が予定されている。また，石炭を溶剤で処理することにより，石炭中の灰分を200ppm以下とした「ハイパーコール」のガスタービ

原稿受付 2006年12月21日

*1 財電力中央研究所エネルギー技術研究所

〒240-0190 横須賀市長坂2-6-1

ン直接燃焼技術に関する研究も行われている。

また、既に実用化されている技術として、石油精製の過程で副生される残さ油を用いる重質油ガス化複合発電については、平成15年6月に新日本石油精製(株)根岸製油所において営業運転が開始された。残さ油をガス化設備でガス化させて製造した合成ガスをガスタービン用燃料として利用し、最大342MWを東京電力(株)に売電している。

製鉄所では製鉄に伴い発生する高炉ガス (BFG)、コークス製造に伴うコークス炉ガス (COG) および製鋼に伴って発生する転炉ガス (LDG) などが副生される。コークス炉ガス中には55%程度の水素が含まれるため、水素の製造や高炉ガスと混合して製鉄所構内のエネルギー源として用いられる。一方、高炉ガスはCOを約20%、水素3%含み、発熱量が3 MJ/m³程度の低カロリーガスであるが、製鉄所構内に設置されるガスタービン用燃料として有効利用されている。

以上みてきたように、ガスタービン燃料の多様化は既に進んでいるが、最近の原油高と地球問題への対応からバイオマスの利用拡大が図られている。木質系バイオマスをガス化して得られる気体燃料はガスタービンやガスエンジンでの利用が可能である。また、化石燃料を改質したガスからつくられるジメチルエーテル (DME) などの液体燃料 (ガス・ツー・リキッド: GTL) 製造なども商用化の段階に達している。

2. メタノール利用ガスタービン技術

2.1 メタノール燃料の特性

メタノールは分子式CH₃OHで示される最も簡単なアルコールで、化合物命名法ではメチルアルコールと称する。常温で無色透明な液体であり、特異な香気を持ち、水および多くの有機溶剤によく混和する。

メタノールは液化天然ガス (LNG) と同様、燃焼時の排ガス中にSO_xおよびばいじんを含まない燃料であるが、LNGに比べて発熱量が1/2以下と小さく、天然ガスと同じ熱量を得るのに2倍以上の重量流量が必要である。しかし、LNGの場合は液比重が0.3~0.4程度であり、メタノールは0.8程度であるため、輸送、貯蔵面における設備容量はほぼ同程度となる。また、燃焼温度も低いため、NO_x発生量は低下する傾向にある。また、LNGが全てメタンで構成されているとすれば、完全燃焼に必要な理論燃焼空気量はLNGの方が9%多く、燃焼後の理論排ガス量はメタノールの方が1%多くなる。排ガス性状としては、CO₂および水分ともメタノールの方が多い。

2.2 メタノールの分解・改質反応

燃料としてのメタノールの化学反応を利用する熱回収法としては、COとH₂に分解する (分解反応) 際の吸熱反応を利用する方法、水と反応させてCO₂とH₂に分解する (改質反応) 際の吸熱反応を利用する方法がある。

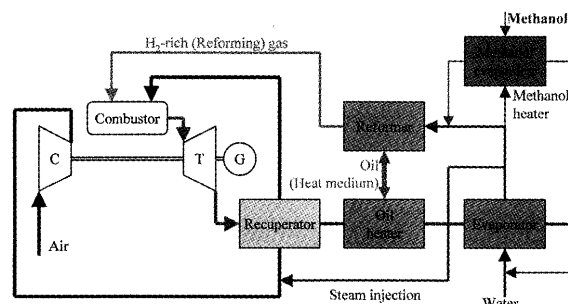
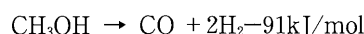


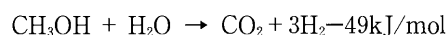
図2 メタノール改質型ガスタービンスステム

(1) 分解反応



メタノールの分解反応も改質反応同様に吸熱反応であるが、改質反応と異なるのは水を必要としないことである。このため、メタノール利用発電所の立地に関しては、水の確保による制約がない。また、反応圧力が高いほど反応が起こりにくい。

(2) 改質反応



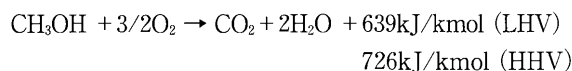
メタノールの水蒸気改質反応はメタノール特有の吸熱反応であり、メタノール改質型ガスタービンは、この吸熱反応による熱回収を行うことにより、熱効率向上を図るものである。吸熱量は反応温度が高いほど大きく、熱回収量が多くなる。

図2はメタノール改質型ガスタービンスステムを示す。本サイクルは昭和63年から6年半にわたり日立造船を中心とするグループが、NEDO受託業務として実施した「メタノール改質型発電トータルシステム実証試験」⁽¹⁾⁽²⁾で適用したシステムである。本システムは、①注水再生サイクルを採用している。②空気再生器をガスタービン排気直後に組み入れている。③熱媒体を用いた間接式の改質器を用いている、などの特徴を有している。

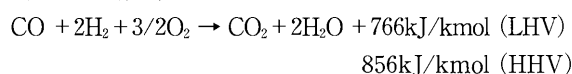
(3) 分解・改質ガスの発熱量

メタノールの分解ガスと改質ガスの発熱量については、分解ガス (CO, H₂)、改質ガス (H₂) とともにメタノールよりアップする。しかしながら、分解ガスと改質ガスの発熱量を比較すると、LHV基準では分解ガスが大きいものの、HHV基準ではほぼ同じである。

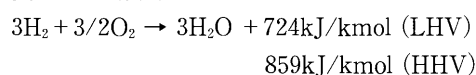
(メタノールの場合)



(分解ガスの場合)



(改質ガスの場合)



2.3 ガスタービン燃料としてのメタノール燃料の適性と特徴

メタノール燃料をガスタービンに使用した場合の特徴、問題点とその対策を考えると以下ようになる。

- ① 火炎温度が軽油、LNGと比較して約100℃低いため、低NO_x燃焼であるとともに火炎が不輝炎であることから火炎から燃焼室壁への熱輻射が低く、また燃焼時にカーボンが生成されにくいので、燃焼器についても天然ガスと同様の寿命が期待できる。また、燃料中の硫黄分はゼロのため、SO_xの発生がない。
- ② メタノールは水溶性であることからメタノールにこれらの不純物を含まないこと、および水溶性不純物を含んだ水との混合が起きないようにするための管理が必要である。
- ③ メタノール燃料は低潤滑性であり、燃料ポンプの選定に留意する必要がある。
- ④ メタノールは自身に約50%（重量比）の酸素を含んでいるため、発熱量は軽油の約1/2、天然ガスの1/2.5である。従って天然ガスと同等のエネルギーをメタノールで得ようとする、天然ガスの約2.5倍のメタノール投入が必要であるが、理論空気量はメタノールが4.99m³_N/kgに対して天然ガスが（メタン）が13.3m³_N/kgであるため、燃焼用空気量増加の必要はなく、コンプレッサ動力は増加しない。
- ⑤ 毒性および引火性（引火点16℃）に対する取り扱い上の注意が必要である。

以上のことから、メタノールはガスタービン燃料として十分適用性があるといえる。

2.4 メタノール利用ガスタービン発電システム

タービン入口温度が1300℃級の高圧タービンを用いるメタノール利用発電システムの検討がなされている。検討されたシステムは、「メタノール生焚きガスタービンシステム」、「メタノール焚き複合発電システム」、「メタノール分解型ガスタービンシステム」、「メタノール分解型複合発電システム」、「メタノール改質型ガスタービンシステム」および「メタノール改質型複合発電システム」などである。本稿では紙面の都合上、「メタノール分解型複合発電システム」と「メタノール改質型複合発電システム」の検討結果を紹介する。

(1) メタノール分解型複合発電システム

メタノールの吸熱反応を利用した熱回収に加え、蒸気タービンを組み合わせることにより熱効率を図るシステムであり、49.2%（発電端、HHV基準）の効率が期待できる。LNG複合発電と比較しても高い熱効率であり、効率の面からは高効率発電として十分魅力があるものと考えられる。しかしながら、分解反応器等の熱回収設備の設置により建設費が高くなるため、発電単価は他のメタノール発電システムと比較して高くなる。このため、導入の可能性は他のメタノール発電より低いものの、

CO₂排出削減を考慮すれば発電効率が高いことによりミドル・ベース電源としての導入の可能性はある。

(2) メタノール改質型複合発電システム

メタノールの吸熱反応を利用した熱回収に加え、蒸気タービンを組み合わせた複合発電とすることにより熱効率の向上が図られ、48.2%の熱効率（発電端、HHV基準）が期待されるものの、LNG複合発電と比較すると熱効率は低い。また、排熱回収ボイラおよび改質反応器等の熱回収設備の追加により建設費が高くなる。改質反応に大量の水を必要とする点も不利であり、導入ケースはメタノール生焚き、ガス焚き複合発電よりも限定される。

3. 水素燃焼タービン

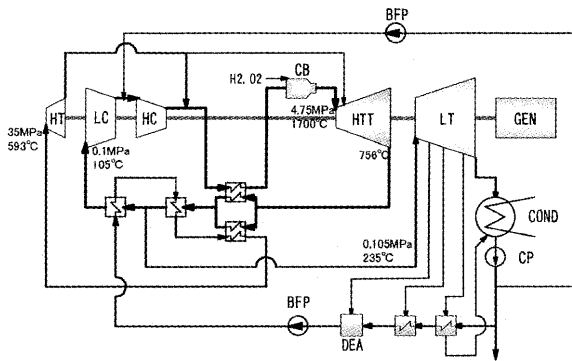
水素を大規模発電システムに利用する技術として水素燃焼タービンがある。水素燃焼タービン発電システムでは純酸素を酸化剤として用いることにより、CO₂、NO_x、SO_xを全く発生しないクリーンな発電が可能となる。しかしながら、水素はそれ自体では自然界に存在しない二次エネルギーであり、コストの高い燃料であることから、その利用に当たっては他の発電方式では得られない高い効率が求められる。

WE-NETプロジェクトにおける水素燃焼タービンの開発では、高効率化が可能なサイクルとして、「トッピング再生サイクル」、「新ランキンサイクル」および「再熱再生サイクル」の検討が行われた。本稿では「トッピング再生サイクル」の概要を紹介する。

トッピング再生サイクルの基本システム構成を図3に示す。

本システムはGRAZ工科大学（オーストリア）が考案したサイクルをベースに高温化し実現性のあるシステムに改善したサイクルであり、高圧タービン（HT）、中高圧タービン（HHT）、および低圧タービン（LT）の3つのタービンと燃焼器、4つの再生熱交換機、低圧圧縮機（LC）、高圧圧縮機（HC）および中間冷却器から構成される。水素と酸素はガス状で燃焼器（CB）に供給され燃焼される。燃焼によって発生する高温の蒸気で中高圧タービン（HHT）を駆動する。その後、水蒸気は4つの再生熱交換器で減温されて低圧圧縮機（LC）の入口に戻り、中間冷却器、高圧圧縮機（HC）を経て、再生熱交換器にて高温に再生され燃焼器へと戻る。ボトムリングの蒸気タービンサイクル側では、トッピングサイクルから抽気された蒸気が低圧タービン（LT）で仕事をし、復水器（COND）で復水され、一部の水はポンプで加圧された後、再生熱交換器で蒸発・昇温されて高圧タービン（HT）に供給される。

本サイクルは水蒸気を作動流体とするガスタービン複合発電サイクルであり、ボトムリングサイクルの中圧蒸気をトッピングサイクルの高圧タービンに通すこと、および高圧タービンの排ガスの熱を燃焼器入口で再生することを特徴としている。

図3 トッピング再生サイクル⁽³⁾

4. 石炭ガス化燃料用ガスタービン⁽⁴⁾

固体である石炭を直接ガスタービン用燃料として利用することは困難であるが、石炭をガス化して得られるCOとH₂を主要可燃成分とする石炭ガス化燃料を用いる発電プラントの開発が国内外で進められている。わが国では空気吹き石炭ガス化炉を用いる出力250MWの石炭ガス化複合発電（IGCC）実証機開発が進められており、2007年度からの運転が予定されている⁽⁵⁾。図4は石炭ガス化複合発電システム構成例を示す。

ガス化剤に空気を用いる噴流床石炭ガス化燃料は、CO、H₂および少量のCH₄を可燃性成分とし、燃料組成の約70%をN₂とCO₂などの不燃性成分が占める。このため、燃料の発熱量は約4 MJ/m³_Nと低く、天然ガスの約1/10である。しかも、上記方式から生成されるガス化

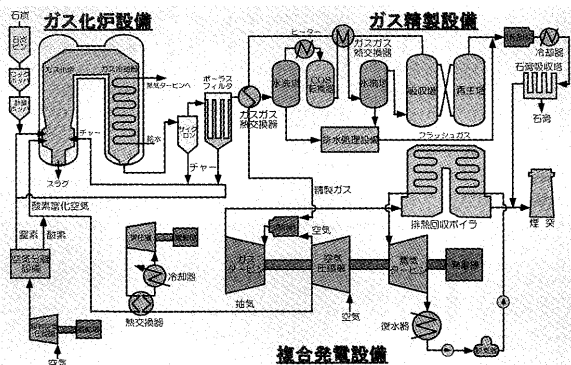


図4 石炭ガス化燃料の性状

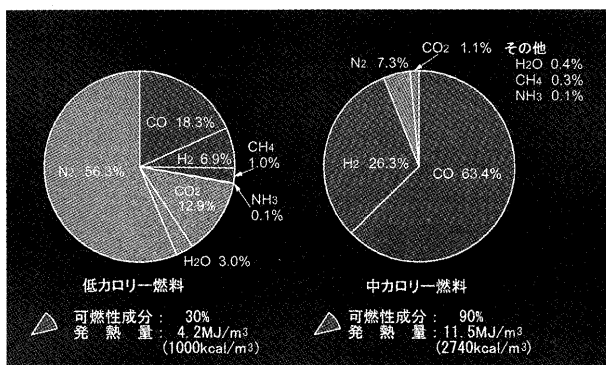


図5 石炭ガス化燃料の性状

燃料は、流動床方式と比較してH₂よりも燃焼速度の遅いCOの割合が高く、燃焼安定性の確保が重要である。図5に空気吹き石炭ガス化燃料と酸素吹き石炭ガス化燃料の組成例を示す。

また、空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料の火炎温度は低い。すなわち、天然ガス（CH₄）の理論断熱最高火炎温度は約2200℃であるのに対し、空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料の場合は約1700℃と500℃程度低い。

さらに将来的に、脱じんおよび脱硫のガス精製をプラント熱効率上有利な乾式（約450℃）で行う場合、ガス化の過程で石炭中の窒素化合物から生成されるアンモニア（NH₃）は除去されずに燃焼器に供給され、ガスタービンの燃焼過程でフュエルNO_xとなる。そのため、NH₃を含む石炭ガス化燃料を用いるガスタービン燃焼器では、燃料中のNH₃に起因するフュエルNO_x低減燃焼技術が重要となる。

5. 汚泥消化ガス焚きデュアルフュエルガスタービン⁽⁶⁾

食品会社や下水処理場から発生するメタンガスを主成分とするガスは、CO₂削減や未利用エネルギーの有効利用の観点から近年ガスエンジンやガスタービン用燃料として利用されている。

全国で1000カ所以上ある下水処理場のうち、下水汚泥の嫌気性消化工程で得られる消化ガスを燃料として利用し発電を行っている処理場は、大都市の大規模処理場で約20カ所ある。下水処理場の消費電力量は国内総電力使用量の約0.6%であり、汚泥消化ガス発電はエネルギー自給率向上からも期待されている。

下水処理場での汚泥消化ガスを用いた消化ガス発電装置のプロセスフローを図6に示す。消化槽にて下水汚泥の嫌気性発酵から発生した消化ガスは脱硫され、ガスタンクに貯留された後、シロキサンが除去され、ガスエンジンあるいはガスタービン発電装置の燃料として供給される。得られた電力は下水処理場にて使用される。

汚泥消化ガスの組成を表1に示す。主にメタンとCO₂からなり、低位発熱量は約20MJ/m³_Nである。また不純物としてシロキサンや硫化水素が含まれる。シロキサンは燃焼の過程で二酸化珪素（SiO₂）を生成し、ガスタービン高温部品の冷却孔の閉塞や、タービン翼へ付着する等、損傷や劣化の原因となる恐れがあるため、シロキサン除去装置が必要となる。硫化水素濃度は数ppmであり、ガスタービンに対する影響はほとんどないと考えられる。

汚泥消化ガスをガスタービン燃料として利用する際、燃焼の観点から次の4項目に留意する必要がある。①発熱量が都市ガス（13A）の約半分であることから、ガス量増加によりガス燃料供給装置の大幅な変更が必要となる。②比重が約1.0と重いため、ガス運動量の増加によりガス噴出方法の変更が必要である。③燃焼速度が都市ガスの約半分であることから保炎性の悪化が懸念される。④CO₂を多量に含むため、灯油と比較して理論断熱温度

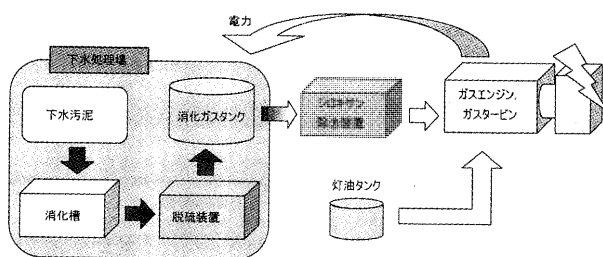


図6 汚泥消化ガス発電プロセス

表1 汚泥消化ガス組織

単位: vol%

H ₂	CO	CH ₄	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
<0.05	<0.1	60.1	1.2	0.3	37.8	2.8

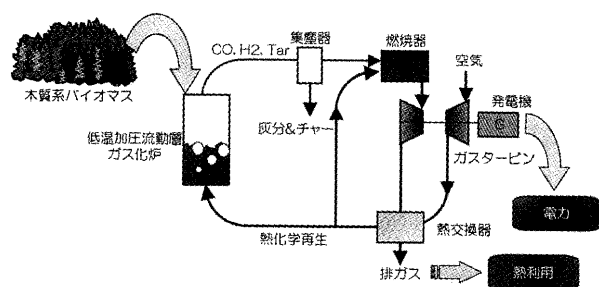


図7 木質系バイオマスを用いる加圧流動ガス化発電システム

の最大値が約200℃低い場合、消化ガス燃焼の場合、燃焼領域の当量比を高くする必要がある。

6. 木質バイオマスガス化燃料利用ガスタービン⁽⁷⁾

現在、未利用の木質系バイオマスには、製材所木屑、林地放置材、剪定街路樹および建築廃材などがある。中でも特に発生量の多い、製材所木屑や林地放置材は、山間部に存在し、集積度が低い場合有効利用が図られていない。木質系バイオマスを用いる小規模なボイラ・蒸気タービン発電では大規模発電と比較して効率が低いため、小規模であっても発電効率の高いシステムの採用が望まれる。

そのため、未利用の木質系バイオマスを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、ボイラ・蒸気タービンに比べ高効率な小規模分散型発電システムの開発を目的としたプロジェクトが、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）によるバイオマスエネルギー高効率転換技術開発のテーマとして2002年から進められている。

図7は開発システムの概要を示す。本システムでは、木質系バイオマスを加圧流動層ガス化炉により650℃程度の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に導入し、燃焼・発電する。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され、熱化学再生を行い、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。

本システムの流動層ガス化炉から発生する生成ガスは、4 MJ/m³_N程度の発熱量しかないため、通常の高圧タービン燃料である天然ガスや灯油を燃焼させる燃焼器では良好な燃焼特性が得られない。そのため、燃焼器バーナ部での流速を落とし、火炎の吹き消えを抑えるとともに、低カロリー燃料と燃焼用空気の混合状態を促進するため旋回力の強いバーナを用いるなどの工夫がなされている。また、低カロリー燃料の完全燃焼を図るため、燃焼器ライナ内部の平均断面流速を小さくし、かつ燃焼器を長くするなどして、通常の高圧タービンよりも燃焼ガスの滞留時間を長くしている。

7. BFG 焚きガスタービン⁽⁸⁾

製鉄業界においては、急激な製鉄需要およびCO₂削減の要求から、製鉄プロセスで大量に発生する高炉ガス（BFG）を有効利用する目的で、高効率で大容量のBFG 焚きコンバインドサイクルの技術開発が望まれてきた。BFGは天然ガスと比較して低カロリーであり、燃料供給ガス圧力が低いこと、また燃料中に不純物が多いことから、BFGを利用する場合には解決すべき技術的な課題が多く存在する。

表2に代表的なBFG、液化天然ガス（LNG）および空気吹き石炭ガス化燃料の代表的な性状を示す。通常の高圧タービンに使用されるLNGとBFGの違いは、BFGは発熱量が約3 MJ/m³_N程度と低く、N₂およびCO₂などの不活性成分の割合が高いことにある。また、COの含有率が高く燃焼速度が遅く、可燃範囲が狭いという特徴を有する。

図8は天然ガスとBFG 焚きガスタービンシステムのフローバランスを示す。BFGは低カロリーのためガスタービンへ供給される燃料ガス量が増加する。そのため標準のLNG 焚きガスタービンを適用すると圧力比が上昇し、空気圧縮機のサージングおよびタービンのオーバーロードが懸念される。これらを防止するためにタービンへの流入ガス量を同等にするように、空気圧縮機を標準機に比べて小型化し、吸気流量を翼高さの調整（チップカット）によって減少させている。

君津共同発電所5号機は、世界初となるF型ガスタービンによる高効率、大容量のBFG 焚き複合発電プラントで、ガスタービン、蒸気タービン、ガス冷却器、復水器などの主要機器を三菱重工業が納入している。BFGは発熱量が低いため、ガスタービンへ供給するために水素濃度の高いコークス炉ガス（COG）を混合し、4 MJ/m³_N dry (LHV) 程度まで発熱量を上げている。ガスタービン、増速ギア、発電機、蒸気タービン、ガス圧縮機は一軸で構成されており、ガス圧縮機でCOGを混合したBFGを圧縮しガスタービン燃料として供給している。ガスタービンの起動は、既設のボイラからの蒸気を使用し、蒸気タービンで駆動させている。燃焼器は

空気バイパス弁付きのマルチチャン型燃焼器を採用し、蒸気噴射および水噴射を行うことなく低 NO_x での運転を実現している。

8. DME 焚きガスタービン⁽⁹⁾

ジメチルエーテル (DME) は将来的には未利用の低品位炭、炭層メタン、油田の随伴ガス、LNG 開発に適さない中小ガス田の天然ガスおよびバイオマス燃料などから生産することが可能であり、性質が液化石油ガス (LPG) に類似し、既存の LPG の物流インフラが利用可能なことからその補完・代替的な新燃料として注目されている。現状では粒子状物質を排出せず、硫黄分を含まない環境にやさしいディーゼル燃料への適用が考えられているが、ガス

表2 代表的な燃料性状

燃料	LNG	BFG	増熱 BFG	空気吹き Syngas
組成 (vol.%)				
CH ₄	88.0	—	2.02	2.9
C ₂ H ₆	7.11	—	0.24	—
C ₃ H ₈	3.58	—	—	—
C ₄ H ₁₀	1.24	—	—	—
C ₅ H ₁₂	0.05	—	—	—
N ₂	0.02	55.4	51.02	30.7
CO	—	22.4	20.88	11.0
CO ₂	—	20.4	19.78	10.9
H ₂	—	2.0	6.05	16.8
Ar	—	—	0.01	0.80
LHV (MJ/m ³ (N))	40.9	3.0	4.2	4.3
可燃範囲 (—)	3.2	2.1	4.2	9.8
燃焼速度 (cm/sec)	37	3	16	44

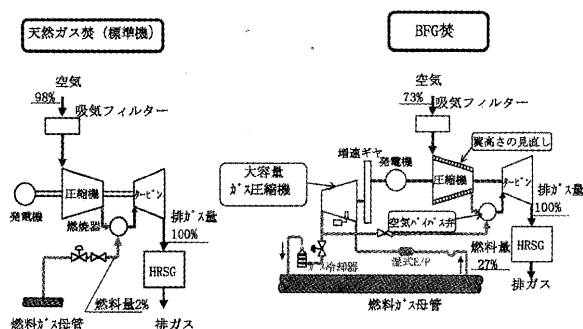


図8 天然ガス焚きとBFG焚きのフローバランス

表3 DME の燃焼特性

項目	単位	DME	メタン	プロパン
低位発熱量	MJ/kg	28.9	50.2	46.5
沸点	°C	-25	-162	-42
可燃範囲	vol %	3.4 - 17	5.0-15	2.1-9.5
燃焼速度	cm/s	50	37	43
自発火温度	°C	350	632	504

タービンへの適用に向けた研究開発も行われている。

日立製作所では25MW 級ガスタービンの H25 を対象に、気相での DME 供給、燃焼システムを採用した開発を進めている。

DME の燃焼特性を LNG の主成分であるメタン、LPG の主成分であるプロパンと比較したものを表 3 に示す。DME の燃焼特性で特筆すべき点は自発火温度が 350℃とメタン、プロパンの発火温度よりも 150～250℃低い点である。NO_x 低減のために予混合燃焼を採用した場合、夏季の運転では圧縮機からの燃焼用空気温度は 400℃を越えるため、燃料と空気の予混合気は自発火温度になる可能性があり、予混合器内で発火するいわゆるフラッシュバック現象が発生する可能性が高くなる。

日立製作所では DME の低 NO_x 燃焼実現に伴う問題点を解決するために、図 9 に示すような同軸噴流クラスターノズルバーナを提案している。本構造は燃料と空気を多数の小径同軸噴流としてバーナ端面から噴出させる構造であり、燃料と燃焼用空気を適度に燃焼室内に分散させるとともに、空気流路の急縮流、急拡大に伴う乱れにより、個々の同軸噴流における燃料と空気の急速混合の実現を図っている。

10. おわりに

エネルギーセキュリティの確保と地球環境問題への対応からも燃料多様化および高効率化は重要であり、ガスタービンはその中核となる技術である。今後ともガスタービン用燃料の多様化に向けた一層の進展に期待したい。

参考文献

- (1) エネルギー総合工学研究所, 昭和58年度 石油火力発電所メタノール転換等実証試験海外資源供給可能調査 (メタノール利用可能性調査) NEDO 委託研究成果報告書, メタノール改質型ガスタービンの概念設計, 1984

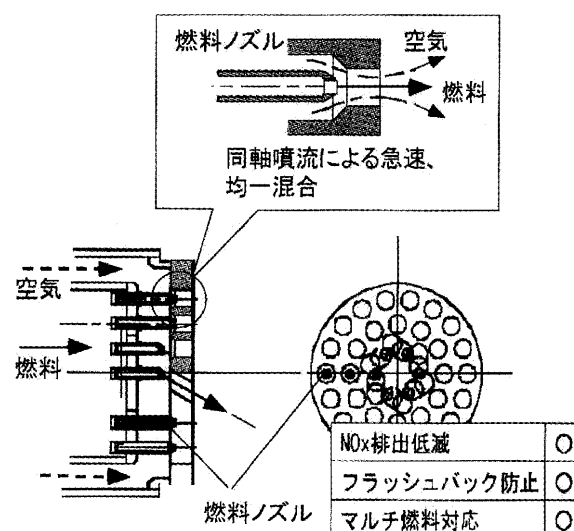


図9 同軸噴流クラスターバーナーの概念

- (2) NEDO, 平成 6 年度 石油火力発電所メタノール転換等実証試験 委託業務報告書, メタノール改質型発電トータルシステム実証試験, 1994
- (3) 幸田, 水素燃焼タービンの最適システム検討, WE-NET 水素エネルギーシンポジウム講演予稿集, (1999.2) (東京), 223-228
- (4) 例えば, 佐藤・他, ガス化燃料用ガスタービン燃焼器の開発, 電力中央研究所報告, 総合報告: W17, (2003.4)
- (5) 太田, 日本ガスタービン学会誌 Vol.34 No.5 (2006) 25-31
- (6) 樽井・他, 日本ガスタービン学会誌 Vol.34 No.5 (2006) 4-8
- (7) 山田・他, 日本ガスタービン学会誌 Vol.34 No.5 (2006) 9-14
- (8) 小森・他, 日本ガスタービン学会誌 Vol.34 No.5 (2006) 15-20
- (9) 斉藤・他, 日本ガスタービン学会誌 Vol.34 No.5 (2006) 21-24

特集：ガスタービンの将来展望—ガスタービンは生き残れるか？—

ガスタービンの将来をめざす技術伝承と人材育成

渡辺 紀徳^{*1}

WATANABE Toshinori

キーワード：ガスタービン，人材育成，技術伝承，教育

1. はじめに

日本のガスタービン，ジェットエンジン技術は，第2次世界大戦後の黎明期から，技術導入時代を経て，高効率ガスタービン研究開発や高バイパス比ターボファンエンジンFJR開発などの国家プロジェクトを通じ一段の飛躍を成し遂げた後，継続的に発展して来ている⁽¹⁾。しかしながら，2007年度以降に定年退職者が急増する人口構成の問題や，若年者の工学離れ・理系離れ，分野によっては技術開発プログラムの停滞，などの状況から，ガスタービン関連分野においてもこれまで培われた技術や技能が，次世代に十分継承されないのではないかという危機感が，特に数年前から強まっている。

ガスタービン学会では，2002年の設立30周年記念事業で，それまでの日本におけるガスタービンの歩みを写真集にまとめた⁽¹⁾。また，記念講演会ではこのテーマのオーガナイズドセッションを企画した⁽²⁾⁽³⁾。これを契機にその後，調査研究委員会「ガスタービン技術の歴史とその継承」を立ち上げ，日本で開発された技術の内容を資料として収集すると同時に，これを継承する手段や技術者教育についても調べ，更に定期講演会などの機会に有識者にお話を伺う調査活動を行った^{(4)~(6)}。この中で技術伝承に関する調査では，過去の開発と失敗の経験が，必ずしも若い技術者に有効に伝わっていないこと，これを改善するために，経験に基づく暗黙知を形式化して整理する努力が各所で行われていることが分かった。しかし，形式知の継承だけで技術を伝えて行くのは不可能で，OJT（On the Job Training）による教育と，最終的には経験者と若年者が一緒に開発作業に参加して技術を伝える過程が必須ということが，経験を積んだ技術者の共通認識のようである。

欧米では若年者の技術離れが日本よりかなり前から問題となっていたが，近年は産学連携による研究活動だけでなく，大学教育にも産業界や官界との緊密な連携が進展しており，インターンシップのような学生のOJTに加え，より組織的な共同教育プログラムが増加している。また，国際共同事業が進む航空エンジン産業などでは，各国の技術者の知識背景を標準化する必要があるといっ

た認識が生まれ，そのための教育プログラムなども考えられている。更に日本における技術者認定制度の拡充と国際化を求める動きもあり，技術者の育成に向けた活動は多岐にわたって活発化していると言えよう。

ここではこれら技術の伝承と人材育成に関する現状，産業界および大学における教育に関する認識，活動などを概観し，次代を築く人材育成に関して若干の考察を行いたい。

2. 世代をつなぐ産業界の技術伝承と若手教育

2.1 人材育成の現状

日本のガスタービン関連各社では，これまでの技術の発展により，多くの経験知識が蓄積されて来ている。しかしながら，これらの知識が必ずしも体系的に整理されておらず，若年技術者に有効に伝達されていない現状があるようである。各社の技術進展により，個々の技術者が当座に掌握する技術分野の範囲が狭まっていることも，円滑な伝達を阻害する要因となっており，システム全体に関する知識不足などの事例が聞かれる。更に人口構成による定年退職者の増加で，現場でのノウハウなど，無形の知識が失われるという状況が加わって，技術伝承に関する危機意識が最近特に高まっていると言える。一方，後でも触れるが，大学工学部の教育カリキュラムは，従前の工学部機械系学科のそれから大きく変化しており，経験を積んだ技術者が暗黙のうちに想定している知識背景を，若手技術者が有していない例も見受けられる。このため筆者らはしばしば，最近の大学教育はなっていない，とお叱りを受けることとなる。また，構造解析や流体解析を代表とする数値解析技術の進歩により，実物の感覚を持たない学生，若年技術者が増加しているということも，よく耳にする現象である。

調査研究委員会の調査結果等から，技術者は採用時に流体力学，材料構造力学，熱力学，機械力学などの基本的な知識を習得していることを，各社とも現在でも前提としていることが窺える。新入社員には一定期間の座学教育が施され，一般教養のほか，設計基礎や規則などの知識が講じられる。会社によっては先輩社員が教育担当として各新入社員に割り当てられ，1年間にわたり基礎教育が行われ，技術論文をまとめることが義務付けられている例もある。一般的には若年技術者の教育の中心と

原稿受付 2007年2月2日

*1 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

なる活動はOJTと考えられており、これによって基本的技術の伝承が、個人間のつながりを通して行われるという方法が有効のようである。OJTによる教育期間には3年程度から10年程度と、幅が見られる。一方、テーマを設定して社内での研究会、勉強会を開催し、相互に知識を深め合う活動も行われている。また、Design Reviewを社内でもオープンにすることなども、技術伝承の重要かつ有効な手段である。

開発に携わる技術者には、ジェネラリストとスペシャリストがいる。ジェネラリストはプロジェクトをとりまとめるプロジェクト・マネージャーの機能を果たすため、特定の技術分野だけでなく、広範な分野の知識と設計経験を必要とする。一方、スペシャリストは特定の技術分野の深化を担い、専門技術の発展に貢献する。近年は社内での両者のキャリアパスを区別して設定し、意識的に育成策を施している例もある。プロジェクトを先導するプロジェクト・リーダーには、卓越したプロジェクト・マネージャーが就くことが想定されるが、リーダーの資質には様々な高い要求があり、その候補者は稀有に思われる。欧米諸国では、大学でもマネジメント関連の学科が人気を博し、若年期からプロジェクト・マネージャー、リーダーを目指した教育プログラムなども存在するが、日本での調査結果からは、いまのところ、まず特定技術分野のスペシャリストとして出発し、豊富な経験を積んでジェネラリストとなり、更に卓越した者がプロジェクト・マネージャー、リーダーとして活躍して行くというキャリアパスが一般的に妥当と考えられている。社会一般的には日本にジェネラリストが育ち難い環境があるため、将来はジェネラリスト教育にも力を入れるべきとの要望が見られ、大学にもそのような要請が寄せられるが、ガスタービン関連産業に関しては、従来のスペシャリスト志向教育が今のところ求められるようである。

2.2 形式知と暗黙知

開発経験によって得られた知識は設計計算書、設計基準、マニュアルなど各種技術情報として整理され、その後の製品開発に参照可能なドキュメントとして蓄積されることが望まれる。この際、不具合事例も同様にドキュメント化の上、整理蓄積される。最近ではこれらの情報をデータベース化して、社内でもアクセスしやすい形に整備する活動が活発に行われている。

従来は個人ベースでのみ伝承されていたノウハウのような暗黙知を、できる限り形式知に変換してドキュメント化し、蓄積して伝達に供するという作業は、非常に重要な作業である。特に最近では暗黙知を積極的に収集することが不得手の技術者が増えており、今後は形式知化が益々重要になるとの指摘もある⁽⁸⁾。

経験知識の整理、形式知化、データベースの作成といった作業は、大変手間のかかる仕事である。この多大な労力に対し、適切な評価システムを作っておくことは、

是非必要であろう。

2.3 形式知化の限界

しかしながら、ドキュメント化された形式知のデータベースだけでは、最終的な技術の伝承はできない、という意識は広く持たれている。更にOJTでも不十分であり、実際の開発過程に若手技術者が参画し、作業の中で先達から伝承される形しか、総合的な技術伝承はない、という認識である。

これを実現するには、開発プログラムを継続的に立ち上げ、実施して行くしかない。したがって、技術伝承方策の議論は、最終的には如何にして開発プロジェクトを継続して行くか、という課題に帰結せざるを得ない。

3. ガスタービンの将来を担う人材の育成

3.1 企業における若手技術者教育の課題

文献⁽¹²⁾では、現状の教育における問題点が、以下のような言葉で表現されている。

「ガスタービンの研究、開発、設計、製作、運転、等あらゆる現場で自分でものを考え、興味を持って、新たな課題に挑戦し、目を輝かせて、仕事に取り組んで行けるエンジニアを育てることが教育だとすれば、現代は課題も大きく、問題が多い。

- まず仕事の環境として効率化を要求される経営のもとで、狭い範囲の仕事をルーティンとし、失敗が許されないエンジニアが要求され、
 - 結果的に「問うことを知らない」、「疑問を持たない（その余裕がない）」エンジニアを育ててしまい、
 - エンジニア自身も生き甲斐と誇りを忘れ、
- ついには技術離れ、もの作り離れが叫ばれ、技術の社会的評価の低さをもたらしてしまう悪循環」

これを打開するのに重要な事項として、ガスタービンビジネスが収益性の高い、夢のあるものでなければならぬこと、失敗をチャンスと捕らえて有効に生かすこと、失敗を克服したときの達成感が何ものにも替えがたいこと、このような経験を通したエンジニアの成長が企業の信用、更なる事業展開につながって行くのであること、が強調されている。

失敗を通した技術者の成長は、多くの企業の方々が指摘される点であり、企業の許容度の大きさが問われるのであろう。一方、ガスタービン技術の魅力とは何か、若年技術者はどう感じているか、については、様々な機会に考えて行く必要がある。筆者に近い学会の仲間の間では、将来の人間社会、人間生活の基盤を支え、幸福に資するという視点が、学生へのリクルートに有効との意見がある。また、地球環境保全の観点も重要であろう。

3.2 大学教育への要望と大学側の事情

文献⁽⁸⁾では、技術者教育の観点から大学教育に望むことのの一つとして、基礎教育の徹底が挙げられている。こ

れについては各社とも同じ考えであろう。力学の基礎知識と考え方の徹底が求められている。重要な点として、複雑な物理現象を単純化し、支配的なパラメータを抽出するという、基礎力学の思考過程の獲得が指摘されており、例えばコンピュータを使わずに機械を設計させる演習の実施が提案されている。

この他、近年の問題として、国語力や英語力を含む、コミュニケーション能力の不足が指摘され、十分な教育を求める声が多く聞かれる。

批判的な指摘として、大学での研究課題が基礎的な領域に偏り過ぎており、必要な技術の研究が少ないという声や、大学関係者は卒業生が企業に入ってから大学の知識がどう生かされているか、人材がどのように活用されているかについて、興味がなく、十分な知識がない、従って有効な教育ができていない、という大変厳しい声もある。他方、更にそれを通り越して、大学で受けた教育や行った研究に何ら期待していない、という声もある。

私見では、企業内でエンジニアを育成する視点と、大学教育の視点とで、意見交換をする機会が少なく、相互の理解が欠如している点が重要ではなかろうか。こういったテーマで討論することは、米国などではかなり行われており、例えば ASME/IGTI でも Education の委員会が存在し、毎年の Turbo Expo でもセッションが開かれている。大学側としても、意見交換をして、カリキュラムの妥当性の検討に生かしたいと考える。

一つだけ我田引水のことを恐縮ながら述べると、筆者が所属する航空宇宙工学科では、4 年次に卒業研究を11 月末で終了し、12 月から2 月まで3 ヶ月にわたり、卒業設計を課している。かつては機械系学科で当たり前だった卒業設計も、現在ではほとんど実施されなくなっているが、当学科の推進系コースでは10 名ほどの学生がジェットエンジンを選択し、基本計画の立案、サイクル計算、流路・翼列設計を行った後、原寸断面図を手で描いて、単位を取得する。指導には企業の技術者に参加していただき、演習ではあるがオリジナリティも要求した設計を行わせている。これはずっと以前から行われて来た教育課程を継続しているわけで、昨今のカリキュラム改革が求められる状況に合致していないが、外部評価でも高く評価されている。

大学教育の意義を見直す観点から、近年カリキュラムの再考と改変が、全国の大学で精力的に行われて来た。その結果、四大力学など従来の工学基礎教育における重点分野に振り向ける時間が減少していることは否めない。このため、大学卒業生の知識背景が、企業で経験を積んだ技術者の想定とかけ離れている場合も多かろうと想像される。教育システムは時間と共にかなりの幅で変化するので、今後また現状から振れていくであろうが、大学工学部においては、良き改革は積極的に行いつつ、技術の核となる根幹的な知識の伝達や、更にそれ以上に、考え方の基礎といった必須の項目について、常に神経を研

ぎ澄ましておく必要がある。

3.3 学会や大学による若手技術者教育

米国では夏休みに大学で各種セミナーが実施されたり、コンサルティング企業で教育講座が開かれたりしており、利用も活発であるが、日本ではあまり普及していない。しかし近年では学協会がそのような機会を提供する例が出て来ている。日本ガスタービン学会では毎年学生および企業の若手を主な対象とするガスタービン教育シンポジウムを開催しており、参加者の半数は企業の若手となっている。上述のような工学基礎知識を補うことや、もともと専門を異にしていた技術者が基礎を学ぶ機会として、一定の意義が認められている。また、ガスタービン技術者であっても、普段の仕事で担当している以外の分野について、不足している知識を取得する機会として意義があるとの意見も聞かれる。今後は大学でもニーズがあれば、このようなセミナーを開催することが考えられるであろう。そこでは例えばマーケティング教育など、必ずしも最先端技術に関する知識でない分野も、取り扱われることが望まれるであろう。

3.4 Global Engineer Education の必要性

近年、ガスタービン、航空機エンジン等の分野では、国際共同開発などの多国籍活動が普遍化している。このような状況の中で、世界の様々な地域から一つのプロジェクトに参加する技術者の間に、技術に対する理解の仕方、仕事の作法などの相違が存在することから、スムーズな共同作業の立ち上げに困難が感じられる場面が急速に増加しつつある。将来の更なる国際協力事業の発展のため、技術者教育の標準化というような活動が必要ではないかと強く感じている GE 社などの欧米大企業では、今後の方策について検討を進めつつある。

3.5 技術者認定制度の動向

国際的な技術者認定制度が、徐々に広まる気配を見せられている。米国の PE (Professional Engineer) は以前から良く知られているが、欧州の Euro Engineer 制度との相互承認が行われ、より国際性を持つ資格認定制度が確立されている。日本にも従来から技術士資格が存在しているが、より一般性、国際性を持たせようと、現在は JABEE (Japan Accreditation Board for Engineering Education 日本技術者認定機構) が技術者認定制度を司り、海外との相互認証を目指している。国内の大学では特に機械系学科を中心に、この JABEE に機関資格を認定してもらう動きが広まりつつある。機関認定されると、その大学 (学科) の卒業生は自動的に技術者資格を認定される。

3.6 大学以前の理科教育

昨今、工学離れ、理系離れが叫ばれるが、大学以前の

理科教育の改善も重要な課題であろう。文献(8)には技術者教育の中で、直感力（センス）の育成ということが、第一に挙げられている。技術の継承には構想力、経験に基づいた技術的直感力に優れた人材が必要だが、この能力を有する若い技術者が減っているとのことである。技術的直感力の涵養には、機械に対する興味や、幼児期からのものづくりに積極的に関わった経験などが土台になるので、ものづくりや実験を実際に経験させるような教育システムの整備が重要である。かつては中学校等において、技術科の授業で木工、金属加工等の体験ができたが、現在のカリキュラムではそこまで手が回らないのが実情である。更にそれより以前に、実現象に触れる、原因を考える、分かったことに喜びを感じる、といったことが体験でき、知的感動を実感できる資質を育むような教育が、幼年期から必要であろう。

4. 人材育成における産官学の協力

既に見たように、ガスタービンのような工学分野では、産業界から大学に求められる技術教育の姿があり、人材育成の観点から、大学教育にも産業界や官との連携を強めることが、教育に有効である場面も少なくない。ここでは技術教育における産官学連携に関連して、外国の事例や日本の現状を調査に基づいて述べる。また、将来の望ましい連携についても考えてみる。

4.1 欧米の事例

4.1.1 共同研究

教育が主目的ではないが、欧米の企業には自国内の大学や、世界各国の大学と共同研究体制をとっているところが少なくない。IGTC2003で Dr. Wisler が拠点大学方式の研究協力体制を紹介した GE 社では、研究のアウトソーシング戦略も絡み、10校程度の大学と緊密な共同研究体制を整備して、研究資金を投入している。アジアでは中国の清華大学が共同研究機関になっている。これらの大学とは毎年研究発表のシンポジウムを開催し、学生を含めて情報交流を行っており、会社へのメリットだけでなく、大学院生の教育にも大変役立っているようである。最近では Rolls-Royce 社が英国の多くの大学と連携し、連携講座を開設したり、共同研究契約を結んだりしており、更に世界各国にそのような拠点を展開しつつある。日本では物質・材料研究機構に昨年共同研究センターが設置されたところである。

4.1.2 EU コミッションの第6次フレームワークにおける研究施設開放プログラム¹⁵⁾

European Commission は、域内の大学や研究機関が所有する研究設備を開放するための予算措置を講じている。第6次 Framework Program では、14のプロジェクト中、SUSPOWER と ENGAS という2つがガスタービン関連のプロジェクトを実施している。

SUSPOWER はスウェーデン王立工科大学が担当しており、持続可能な熱源のための大規模実験設備を提供するものである。主要なテーマとして、高温空気燃焼、触媒燃焼、ガス化、タービンと圧縮機翼の空力弾性、フィルム冷却の空力、動静翼列間干渉が挙げられている。ENGAS はノルウェー トロンハイムのノルウェー工科大学が担当しており、環境問題に関連するガスマネージメントをテーマとして専門の多くの研究室が参画している。主要トピックスは、水素燃焼、バイオマスガス化、二酸化炭素吸収、水素二酸化炭素分離膜、岩窟内気体貯蔵、水素製造貯蔵などである。

4.1.2 Rolls-Royce 社の大学教育への参画¹⁶⁾

Rolls-Royce Bristol は、英国 Bath 大学機械工学科と、学部エンジン関連設計演習を実施している。毎年6名の学生が、会社の指導のもとに、6ヶ月間の設計プロジェクトを行う。会社と大学双方で正規の活動として定義され、大学では4年間の単位全体の20%以上を充てている。学生は Rolls-Royce での設計とともに、大学にレポートを提出し、セミナーを行う。設計の演習は主として技術面の教育であるが、ビジネスに関する内容も必ず含まれる。学生は会社の従業員として、6ヶ月間に対し7,200ポンドの給与を得る。2005年には以下の3つのプロジェクトを実施した。

- Aero-Engine Rotor-Dynamics : ローターダイナミクスのリグを用いた実験と計算。目的は Rolls-Royce で使われている手法の精度評価とモデルの質の向上。
- Implementing Design for Environment on Gas turbine engines using a Design Tool : エンジン要素のライフサイクルにおける環境面の評価を設計者が行えるような手立てを創出する。
- Aero-thermodynamics of aero-engines : 航空エンジンに関する数値解析とビジネス面を含む様々な設計手法のスタディ。(詳細は非公表。)

4.1.3 欧州の産学共同設計教育プログラム¹⁷⁾

現代の大学における工学教育で重要なミッションの一つは、産業界のニーズに応え得る学生を卒業させる事である。高度化する産業界のニーズに従い、教育は readjust して行く必要が生じる場合もある。しかし現状では、設計プロセスにおける現実的なシナリオが、そのまま学生教育のプロセスに反映されることはなかなか難しい。International Gas Turbine Project では、この乖離を解消しようと試みている。このプロジェクトではこれまで学部学生が、推力30,000ポンドの2軸ターボファンエンジンの HPT 翼冷却システムを設計した。プログラムはベルリン工科大学ジェット推進研究室、リヨン大学ターボ機械グループ、チューリヒ工科大学ターボ機械研究室が協力して実施しており、Rolls-Royce Deutschland, MTU, SNECMA および Alstom

Power から専門家を招聘している。設計アイテムとしては、特に圧縮機設計と、HP タービンの二次空気設計に重点を置いている。学生は実社会との密接な関係性を理解してトレーニングを受け、実際の航空機エンジンの設計に対する OJT に類似した教育の利益を受けている。

4.1.4 米国エネルギー省 (DOE) による Gas Turbine Industrial Fellowship Program⁽¹⁸⁾

このプログラムでは、ガスタービン関連技術を学ぶ学部、修士、および博士の学生が、ガスタービンメーカーまたはユーザーで、10週間から12週間就業する事業を実施している。予算は DOE が負担する。

4.1.5 米国のガスタービンラボラトリー⁽¹⁹⁾

大学におけるガスタービンコースで重要な教育の一つは、学生にガスタービンの実地応用の経験をさせる事である。このラボは航空推進用ガスタービンエンジンを実際に操作し、エンジンの作動状況をモデル化させる場を学生に提供している。Pratt and Whitney の PT6A-20 ターボプロップエンジンを地方空港で実際に運転し、コックピット情報を学生に取得させる。このデータから PARA および PERF というソフトウェアを用いてエンジンシステムのモデル化を経験させ、メーカーのスペックを確認させる。最終レポートでは、実際に取得した性能データをメーカーのスペックと比較検討する。また、同様のプログラムをコージェネガスタービンでも行っており、121以上の大学・専門学校でキャンパスにコージェネ設備を設置している。Baylor 大学では Alstom の 5MW 機である TB5000 を運用している。

以上のように、欧米では実践的な技術教育に対し、企業や政府機関が積極的に協力し、大きな規模で産学連携教育活動が行われている。欧米では日本より以前から、若年層の技術離れ、理系離れが大きな問題となってきた。このことも産業界が技術教育に積極的に協力する要因と考えられる。もともと欧州の伝統ある工科大学では、卒業要件に数ヶ月間の外部機関でのインターンシップなどの研修が義務づけられており（これは技術伝承の徒弟的な伝統感覚に基づいている）、技術教育における産学連携は、従来から基礎が築かれている。日本でどのようなシステムが適切かは検討しなければならないが、技術教育をより効果的に行うため、また、若年者にとって魅力的なものにするために、連携した教育プログラムの導入と発展は重要と思われる。

4.2 中国、韓国の大学における技術教育戦略

中国および韓国では、大学の技術系分野の発展、活動の活発化が著しいが、外部との連携については、基本的に欧米の大学や企業との協力関係構築を積極的に模索している状況である。

例えば中国では、清華大学、西安交通大学、西北工業大学、上海交通大学等にはほぼ共通している協力関係の構築手法が見られる。それは、まず資金を援助して学生を欧米の大学に派遣し、人脈を作る。学生の帰国後、教員の相互交流や欧米企業人の招聘により、人的交流を深める。その後、共同研究を立ち上げ、研究とともに学生の参加による実践的な教育を行う方法である。

韓国のソウル国立大学機械航空工学科では、GE 社に修士学生を派遣し、数ヶ月のインターンシップにより、現場を経験させている。並行して GE 社の技術課題に関する共同研究の実現を目指している。

これらの手法は、技術の catch up フェーズでは効果的であると思われる。実際、清華大学は欧米の代表的大企業から、アジア地域における拠点大学と指定され、共同研究パートナーとして一定の活動を行っている。もちろん外国企業から見て、中国の大市場としての魅力の要素は切り離せないが、中国の大学における技術教育にとっては、重要な機会を得ていると言えよう。

4.3 日本の大学の状況

日本でも近年、工学研究教育における産官学連携の重要性が叫ばれ、大学や研究所における知材の活用にも、活発化が強く求められている状況にある。この路線で例えば大学でのベンチャー起業や、産業界からの人材流入などが、以前に比べると急激に増加している。文部科学省の21世紀 COE プログラムでも、産学の協力、学外からの人材登用が積極的に実施されている。

学生教育の面では、学生の企業へのインターンシップ活動が増えている。大学によっては学生の卒業のために義務づける動きもある。ただ、現状では2週間程度の短期のインターンシップが多く、現場の雰囲気を経験させる実習という意味合いである。欧米では博士課程の学生が企業の研究開発チームに入って、実質的な開発活動を行い、その中の研究要素をまとめて学位を取得するような例も見られるので、インターンシップ、あるいは産学連携の形態も、大きく異なる面がある。最近の日本の大学では、一部の学生は海外の企業にも研修に行く例が出てきているが、その機会は限られており、基本的には教員個人ベースの活動となっている。

国内の研究所とは、連携大学院制度により、研究所の人材を招聘し、教育に協力して頂く活動が従前から行われてきた。ただ、従来の連携大学院制度はあまり有効に機能しておらず、労ばかり多いという意見も聞かれる。研究独法と大学との新たな協力の枠組みを考えるべきである。

4.4 今後の教育における産官学協力

産業界から求められる人材を育成するのに適した教育体系が、必ずしも実現されていないとすれば、実現に向けて産官学の協力が検討され、実行されることが望まれ

る。現状ではそのような議論をする場もなく、技術者教育の視点での情報交換はほとんど行われていないのではなかろうか。まずは技術者の育成について、学会等の場で産官学の意見交換を行い、有効な方策を検討して行くことが必要であろう。

欧米の各種プログラムに見られるような、産官学の連携による実践的教育プログラムも取り入れる必要があるのではないかと。これにより、実効性のある若年技術者教育が行われるとともに、ガスタービン関連産業の魅力が若年者により強く感じられるような環境を醸成できると、将来に向けての有効な育成策となり得る。

企業におけるインターンシップ制度の拡充も有効である。外国の大学からは、日本に来たいという学生の希望もしばしば寄せられる。日本企業の受け入れ態勢の制度化ができないものであろうか。また、日本から外国の企業に研修に出かける活動も、現在は主として教員個人の人脈を基礎にした細々としたものであるが、将来拡充ができないだろうかと。

日本の科学技術発展の観点からは、博士課程学生の研究活動の活性が極めて重要である。大学院研究の更なる活性化には、教員の努力がまず重要であるが、一つには企業や研究所との連携を深め、意義と魅力が豊富に感じられる研究テーマを相互協力のもとに設定していくプログラムを更に拡大して行くのが望ましい。

技術の伝承が、最後にはどうしても実際の開発活動への参加を通じてしかできないことは明らかなので、開発プロジェクトが継続的に走るような戦略を常に立てて行かなければならない。今後の戦略立案には、やはり産官学の協力連携が不可欠である。

5. おわりに

内閣府では昨年10月末から12月末まで、イノベーション25と題し、2025年に望まれる国家施策や国民生活について、広く国民の意見を集める活動を行った。現時点ではまだ分析が終わっていないが、全体で380件の意見が寄せられた。その中で、資源・エネルギー・環境分野、医療・福祉・交通分野、および教育等の人材育成分野に多くの関心が寄せられているとのことである。本稿で対象とした分野が、関心の高い分野に符合している。

将来の国民生活、および地球上の人間生活を支える、持続可能なエネルギー政策を実現して行く上で、ガスタービン技術を含むエネルギー変換技術は、一層進展して行かなければならない。技術の発展は、最終的には人によるのであり、有効な人材育成策を広く議論し、策定して行くことが必須である。

学会は産官学の連携を強める上で、非常に大切な位置にある。相互の情報交換の場を提供し、人材育成策や開発プロジェクトの立案に向けた検討が進められるような場を提供することは、ガスタービン学会にとって極めて重要な活動である。学会活動の益々の活発化が求められ

る所以である。

参考文献

- (1) 高田浩之監修、「日本のガスタービンの歩み」、日本ガスタービン学会、2002。
- (2) 松本正勝、「FJRの開発に関連して考える」、創立30周年記念ガスタービン講演会講演論文集、pp.17-18、2002。
- (3) 石澤和彦、「ネ20等、歴史的エンジンの開発から学ぶ事項」、創立30周年記念ガスタービン講演会講演論文集、pp.19-24、2002。
- (4) ガスタービン技術に関する調査研究委員会編、「産業技術歴史調査、我が国のガスタービン技術の独創性と創造性に関する調査編」、平成14年度調査報告書02004479-0-1、新エネルギー・産業技術総合開発機構・(社)研究産業協会、2003。
- (5) 今井兼一郎、「技術伝承—ジェットエンジンを中心として」、第30回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.11-16、2002。
- (6) 葉山眞治、「ガスタービンと大学教育」、第30回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.17-22、2002。
- (7) 塚越敬三、「大容量ガスタービンの高温・高効率化の開発の歴史」、第31回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.1-6、2003。
- (8) 杉本隆雄、「純国産の産業用・船用ガスタービン開発を通して思うこと」、第31回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.7-12、2003。
- (9) 筒井康賢、「機械試験所から産総研でのガスタービン研究」、第32回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.1-6、2004。
- (10) 渡辺康之、「IHIにおける航空エンジンの技術開発について」、第32回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.7-12、2004。
- (11) 大槻幸雄、「オートバイとガスタービンの開発物語」、第33回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.1-6、2005。
- (12) 杉村章二郎、「産業用ガスタービンの開発の歴史に見る技術の伝承」、第33回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.7-12、2005。
- (13) 岡村隆成、「ガスタービンから教わったこと、伝えたいこと」、第34回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.1-6、2006。
- (14) 池口隆、「若き研究者と情熱」、第34回ガスタービン定期講演会講演論文集、pp.7-12、2006。
- (15) Andrew Martin, Torsten Fransson, Morten Gronli, and Arne M. Bredeesen, "SUSPOWER AND ENGAS: TWO MAJOR EUROPEAN RESEARCH INFRASTRUCTURES IN THE GAS TURBINE AND ENERGY CONVERSION FIELDS", ASME Paper GT2006-91180, 2006。
- (16) G.D. Lock, M. Child, V. Cheng, R. Johnson, W. Mezzullo, C. Pattinson, S. Peet, and C. Wright, "An Undergraduate Industrial Design Exercise at Rolls-Royce plc", ASME Paper GT2006-90130, 2006。
- (17) Friederike C. Mund, Anestis I. Kalfas, Reza S. Abhari, Yasemin Turcan, Jean Hourmouziadis, Isabelle Trébinjac, André Vouillarmet, "A MULTI-COMPONENT AND MULTI-DISCIPLINARY STUDENT DESIGN PROJECT WITHIN AN INTERNATIONAL ACADEMIC AND INDUSTRIAL COLLABORATION", ASME Paper GT2003-38163, 2003。
- (18) William H. Day, "Gas Turbine Industrial Fellowship Program", ASME Paper GT2004-54323, 2004。
- (19) Kenneth W. Van Treuren, "AN APPLICATION ORIENTED GAS TURBINE LABORATORY EXPERIENCE", ASME Paper GT2004-53761, 2004。
- (20) 内閣府ホームページ
<http://www.cao.go.jp/innovationn/index.html>

DME の基礎燃焼特性に関する研究

Study on basic combustion characteristics of DME

小泉 浩美^{*1}

KOIZUMI Hiromi

井上 洋^{*1}

INOUE Hiroshi

小林 成嘉^{*2}

KOBAYASHI Nariyoshi

成川 公史^{*3}

NARUKAWA Kimihito

ABSTRACT

In order to investigate the effect of impurities contained in fuel grade dimethyl-ether on combustion characteristics, laminar burning velocity testes and diffusion flame combustor tests were carried out with various contents of impurities in model fuel grade dimethyl-ether (with about 0-9 wt% methanol and 0-10wt% moisture). From the laminar burning velocity tests, it was found that the burning velocity of fuel grade dimethyl-ether was slightly slower than that of high purity dimethyl-ether and it was faster than that of methane. This indicates that fuel grade dimethyl-ether has a high potential of flash back, like high purity dimethyl-ether. Moreover, the diffusion flame combustor tests showed that NO_x emission decreased when the impurities contained in fuel grade dimethyl-ether were increased, however CO emission were almost constant, irrespective of the content of impurities. Further, by comparing NO_x emission with various contents of impurities in fuel grade dimethyl-ether, it was clear that NO_x emission could be estimated from the adiabatic flame temperature.

キーワード：ジメチルエーテル，メタノール，燃焼速度，拡散火炎，NO_x排出特性，ガスタービン，燃焼器
Dimethyl-ether, Methanol, Burning velocity, Diffusion Flame, NO_x emission, Gas turbine, Combustor

1. 緒言

最近，次世代のクリーンエネルギーとしてジメチルエーテル（以下 DME と呼ぶ）が注目されており，DME を用いた燃焼の研究が盛んに進められている⁽¹⁾。DME は多様な炭化水素系原料からの製造が可能であるとともに，燃焼の際に硫黄酸化物や煤などの生成が少ない環境負荷の低いクリーンな燃料である。また，毒性が低く，加圧すると容易に液化する燃料でハンドリング性にも優れ，物性がプロパンに類似していることから DME の流通に関しプロパンのインフラを利用できるなどの利点もある。現在，DME は化粧品や塗料，噴射剤に利用されているが，今後は，民生用燃料（LPG 代替燃料），輸送用燃料（ディーゼル自動車など），発電用燃料（火力プラント，燃料電池）など幅広い利用が期待されている。DME の製造に関しては，従来，炭化水素系

の燃料からメタノールを製造し，合成反応により製造する間接法が主流であったが，近年，炭化水素系燃料から直接製造する直接法も検討され，燃料製造法の開発も加速されている。DME が燃料として市場に普及するには製造コストの低減が不可欠と考えられ，最近では，製造プロセスの簡素化に伴い，製造された DME にメタノールや水分などの不純物を含む燃料グレード DME⁽²⁾も高純度 DME と同様に燃料として利用可能か検討する必要がある。DME の発電用燃料への適用にあたっては，燃料のシール材や供給システムなどの検討が必要と思われるが，ガスタービン燃焼器の開発では DME の物性および燃焼性を考慮した開発が重要となる。DME の燃焼性に関する研究は，これまでバーナー構造をパラメータとした燃焼特性に関するもの⁽³⁾や，単缶による実寸燃焼器の燃焼特性に関するもの⁽⁴⁾が報告されているが，不純物の影響による DME の基礎的な燃焼特性に関する報告が少ないのが実情である。そこで本研究では，DME の基礎的な燃焼特性や燃料グレード DME の不純物が燃焼特性に及ぼす影響を調べることを目的に，大気圧による層流燃焼速度測定試験と，多種燃料の燃焼に対応可能な拡

原稿受付 2006年 6月22日

校閲完了 2007年 2月21日

- * 1 日立製作所 電力・電機開発研究所
〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口832番地の2
- * 2 日立製作所 日立研究所
- * 3 中部電力株式会社

散バーナーをベースとした実機ガスタービン燃焼器の1/2スケールに縮小したモデル燃焼器による大気圧拡散燃焼試験を行ない、メタンやプロパンと比較するとともにDMEに含まれるメタノールや水分の及ぼす影響を実験的に検討した。本報ではそれらの結果について報告する。

2. DME の物性および特徴

DME は加圧すると容易に液化する燃料で、常温・常圧において無色透明の気体となる。また液体状態における粘性が軽油の10分の1以下に相当する低粘性な燃料であることも大きな特徴といえる⁽⁵⁾。表1に気体状態におけるDMEおよびメタノールなどの物性を示す。DMEの発熱量は59.5MJ/Nm³、メタノールは28.7MJ/Nm³で、DMEの発熱量はメタノールの約2倍に相当する。これらをメタンやプロパンと比較すると、DMEの発熱量はメタンの1.6倍、プロパンの約0.7倍に相当する。空気温度350℃、燃料温度20℃条件における理論最高火炎温度は、DMEが2130℃で比較燃料の中で最も高く、メタノールは最も低い2070℃となる。したがって、拡散燃焼では、DMEが最もNO_x濃度が高くなり、メタノールの混合によってNO_x濃度が低くなることが予想される。発火温度はDMEが350℃、メタノールが470℃であり、メタンやプロパンよりも低く、自発火しやすい燃料で、自発火に対する十分な検討が必要と考えられる。次に燃料グレードDMEの組成例⁽²⁾を表2に示す。想定される燃料にはメタノールが7～8wt%、水分が3～4wt%含まれる。本研究では、DMEに含まれるメタノールや水分の影響も検討するため、高純度DME、及び10%メタノールと90%DMEの混合燃料（質量比）をベース燃料とし、水蒸気の混合割合を変化させて試験を行なった。燃料の供給方法については、気体または液体が考えられ、特に、ガスタービンでは、燃料の供給圧力が大気圧から

約2MPaまで変化するため、常温の場合、圧力条件によって気体や液体の状態が存在することになる。環境面を考慮した予混合燃焼では液体よりもむしろ気体での供給が扱いやすいと考えられ、そこで本研究では燃料蒸発器を用い、燃料を気化して供給した。

3. 層流燃焼速度測定試験

3.1 燃焼速度測定装置

図1に、層流燃焼速度測定装置の系統概略図を示す。DME（純度99.9%以上）および10%メタノールと90%DMEの混合燃料は、それぞれ液取り式のポンプより供給され、蒸発器（能力50kg/h）によって気化した後、所定の流量に調整後ミキサーに供給される。蒸発器からミキサーまでの燃料配管にはボイラーより供給される水蒸気（100℃～110℃）によってトレースが可能となっており、配管内での燃料の再液化を防止している。また、燃料混合用の水蒸気は所定の流量に調整後、ミキサーに供給される。本装置では、比較燃料であるメタンやプロパンも同様に供給可能となっている。一方、燃焼に必要な空気は圧縮機より供給され、ミキサーにおいて燃料と空気の予混合気を形成後、#200メッシュの金網によって整流し、バーナーに供給する。ミキサーからバーナーまでの配管にはバンドヒーターが設けられ、バーナー上流側に設けた予混合気温度制御用熱電対の出力をもとにフィードバック制御することで、予混合気の温度を任意に調整することができる。使用したバーナーは絞り比が3：1の矩形ノズルであり⁽⁶⁾、火炎を2次的に観察できる。燃焼速度の測定には直接写真による角度法⁽⁷⁾を用い、図中に示す火炎の頂角と予混合気の流れにより算出した。直接写真の撮影にはズームレンズとベローズを用い、拡大して撮影した。

表1 DMEとメタノールの物性

	unit	Methane	Propane	DME	Methanol
Density	kg/Nm ³	0.72	1.96	2.06	1.43
Lower heating value	MJ/Nm ³ (MJ/kg)	36.1 (50.5)	91.3 (46.5)	59.5 (28.9)	28.7 (20.1)
Adiabatic flame temperature	℃	2089	2122	2130	2070
Auto ignition temperature	℃	632	504	350	470

表2 燃料グレードDMEの組成例

	unit	Base Fuel	DME	Methanol	Steam
Fuel Grade DME	wt%	—	88～90	7～8	3～4
Test Fuel	wt%	Pure-DME	75～100	0	0～25
	wt%	90%DME	65～90	7～10	0～25
	wt%	10%Methanol			

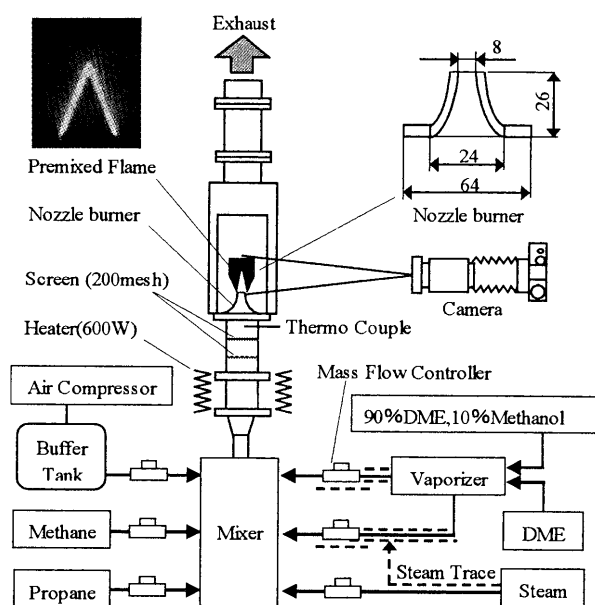


図1 燃焼速度測定装置

3.2 試験条件

表3に試験条件を示す。実機空気温度は350℃から400℃となるが、試験ではバンドヒーターの劣化を避けるため、予混合気温度を200℃に設定し、各燃料とも空気流量2.7kg/h一定条件のもと燃料流量を変化させ当量比を設定した。試験ではA、Cの基準組成以外に、それらに10%の水蒸気を混合したB、Dの燃料の合計4種類について燃焼速度を測定した。また、これらの燃料と比較するため、メタンとプロパンの燃焼速度も測定した。

表3 試験条件（大気圧層流燃焼速度試験）

	Fuel Composition (wt%)			Fuel flow rate (kg/h)	Air flow rate (kg/h)	Equivalence ratio (—)	Pressure (MPa)
	DME	Methanol	Steam				
Composition A	100	0	0	0.24~0.39	2.7	0.8~1.3	0.1
Composition B	90	0	10	0.27~0.44	2.7	0.8~1.3	0.1
Composition C	90	10	0	0.25~0.40	2.7	0.8~1.3	0.1
Composition D	81	9	10	0.28~0.45	2.7	0.8~1.3	0.1

3.3 層流燃焼速度の測定結果

図2に、組成Aおよび組成Cの当量比に対する層流燃焼速度を示す。図中には比較燃料としてメタンやプロパンの燃焼速度も併せて示してある。いずれの燃料も当量比の増加と共に燃焼速度は速くなり、量論混合比近傍において最大となり、燃料過濃側で低下する傾向を示す。燃料種による燃焼速度を比較すると、組成Aの最大燃焼速度は111cm/sで、メタノールを10%含む組成Cは104cm/sとなり、DMEにメタノールを混合した方が僅かではあるが燃焼速度は低下する傾向を示している。しかしながら、組成Cの最大燃焼速度はメタンの80cm/sよりも1.3倍速くプロパンの92cm/sよりも1.1倍速い。さらには、燃料希薄領域や過濃領域でも燃焼速度が速いため、DMEやメタノールを10%含むDME混合燃料は、メタンやプロパンよりも燃え易い燃料であることがわかる。

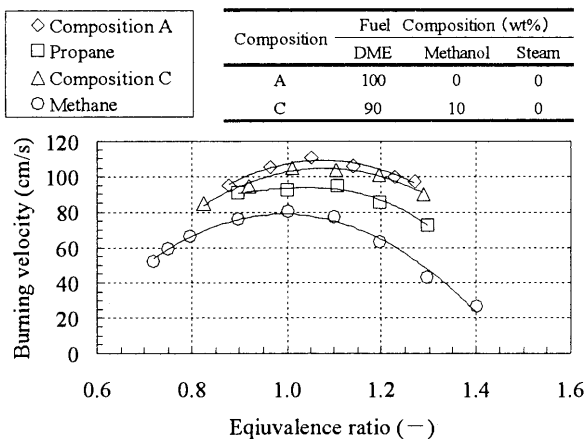


図2 メタノール添加時の層流燃焼速度

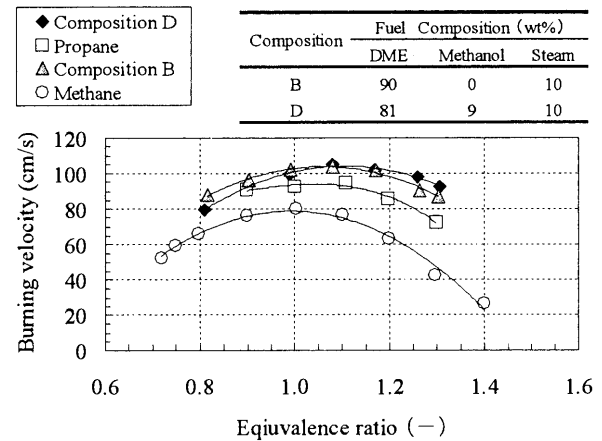


図3 水蒸気添加時の層流燃焼速度

次に、図3に組成Bおよび組成Dの当量比に対する燃焼速度を示す。組成AおよびCに水蒸気を10%添加した場合も、当量比の増加と共に燃焼速度は速くなり、量論混合比近傍で最大となり、燃料過濃側で低下する傾向を示している。当量比0.9では、組成B、Dおよびプロパンの燃焼速度は同等であるが当量比1.0以上の領域では組成Bと組成Dの方が、燃焼速度は速くなっている。それぞれの最大燃焼速度を比較すると、組成Bおよび組成Dは105cm/sでありメタンやプロパンよりも最大燃焼速度は速く、組成Bや組成Dの方が燃え易い燃料である。以上のことから、各種燃料の層流燃焼速度を予混合気温度200℃条件で比較した結果、DMEの燃焼速度が最も速く、メタンの燃焼速度が最も遅くなることがわかった。DMEにメタノールを10wt%混合した場合、最大燃焼速度は僅かながら低下し、水蒸気を10wt%添加したときの最大燃焼速度は、水蒸気添加の無い時と同等であった。

4. 拡散燃焼試験

4.1 拡散燃焼試験装置

図4に試験装置の系統概略を示す。本試験装置は、DME、メタンおよびプロパンなどの多種燃料による燃焼試験が可能である。DME、及び10%メタノールと90% DMEの混合燃料は、それぞれ液取り式のボンベより供給され、蒸発器によって気化し、所定の条件に流量を調整後、燃料ノズルに供給される。蒸発器から燃料ノズルまでの燃料配管は水蒸気によるトレースが可能となっており、燃料の再液化を防止している。一方、燃焼用の空気は圧縮機より供給され、ヒーターによって所定の温度に調整後、A1およびA2の系統に分岐され燃焼器に供給される。燃焼器に供給された空気は、衝突噴流によってライナーを冷却後、各燃焼空気孔、冷却孔及び空気旋回器より燃焼室内に流入する。燃焼器出口では、固定位置で常時サンプリングしてガス濃度(CO, THC, O₂, NO_x, CO₂)を分析した。また、今回の試験では、燃料による火炎温度分布の違いとNO_x濃度の関係を比較検討するため、燃焼器後部に設けた2次元トラバース

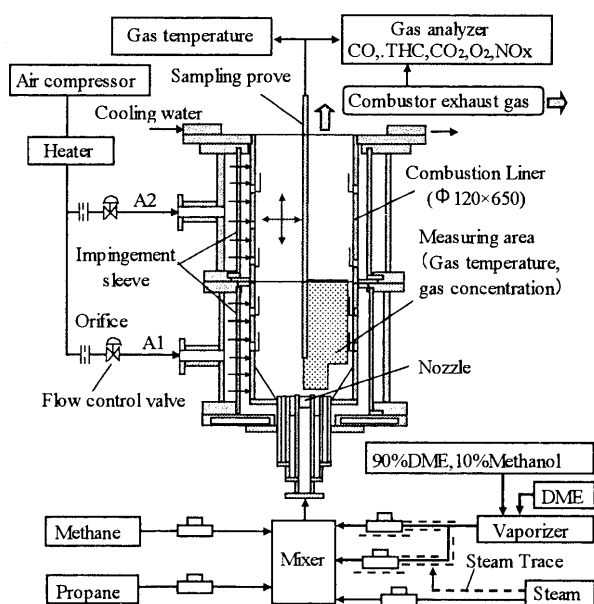


図4 拡散燃焼試験装置

装置により燃焼室内部の分布計測を行なった。計測では図中に示すように、燃焼器中心から半径方向40mm、軸方向は燃料ノズル端面から250mmの範囲で、合計40点の温度及びガスのサンプリングを実施した。

4.2 モデル燃焼器の構造

図5に、拡散バーナーをベースとした実機ガスタービン燃焼器の1/2スケールのモデル燃焼器構造を示す。試験に用いたライナーは、内径が120mm、長さが650mmで、ライナーには3列の燃焼空気孔と5列のフィルム冷却孔を設けており、さらに冷却孔の内面には冷却空気を

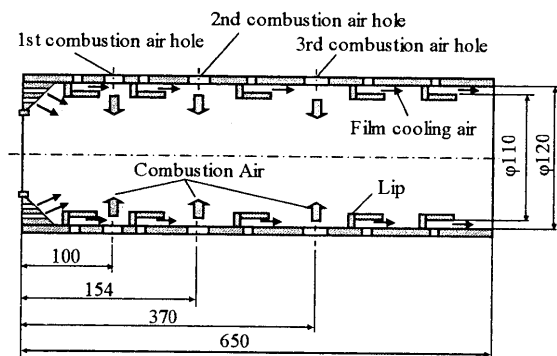


図5 燃焼器ライナーの構造

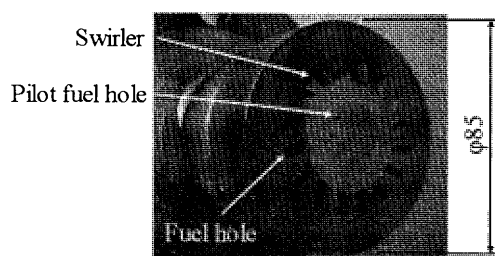


図6 燃焼ノズルの構造

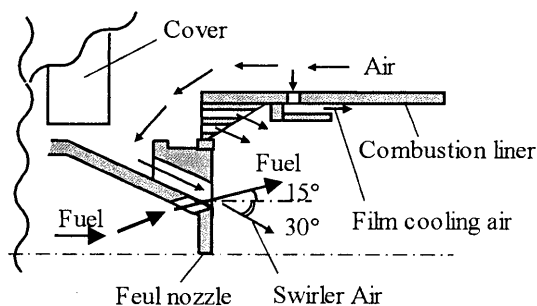


図7 燃焼器頭部部分拡大図

ライナー内壁面に沿ってフィルム状の空気を供給するためのリップを取り付けている。燃焼空気孔は、ライナー先端より100mm, 154mm, 370mmの位置にそれぞれ設け、ライナー先端から100mmまでの累積空気配分を全体の40%以下に抑え低負荷安定性を重視した空気配分としている。図6に燃料ノズル構造を、図7に燃焼器頭部の部分拡大図を示す。燃料ノズルは16枚の空気旋回ペーンで空気流路が構成され、30°の旋回角と燃焼器軸心に対し30°の内角を持つ構造となっている⁽⁸⁾。燃料噴孔はペーン内に配置され、30°の旋回角と15°の外角を有する。また、今回の試験では使用しなかったが、ノズルの中心付近には他種燃料との燃料切替が可能なパイロット噴孔が備えてある。

4.3 試験条件

表5に試験条件を示す。いずれの燃料も空気流量一定条件のもと、燃料流量を変化させ燃焼器出口ガス温度をパラメータとして試験を行なった。燃焼器圧力は大気圧、空気温度は350℃一定条件に設定し、燃焼器出口ガス温度は無負荷相当の650℃から定格負荷相当の1260℃の範囲において段階的に変化させ、そのときの燃焼器出口の排ガス濃度を測定した。また、水蒸気濃度の影響を検討する水蒸気添加試験では、組成A、および組成Cのベース燃料に水蒸気添加量を変化させた。さらに、燃焼器出口ガス温度650℃の条件においては、燃焼器内部の火炎温度とNO_x濃度の分布計測を行ない、火炎温度とNO_x濃度の関係について検討した。

表5 試験条件 (拡散燃焼試験)

	Air		Fuel composition (wt%)			Combustor exit gas Temperature (°C)
	Flow rate (kg/h)	Temperature (°C)	DME	Methanol	Steam	
Composition A	388	350	100	0	0	650~1260
Composition C	388	350	90	10	0	650~1260

4.4 拡散燃焼試験結果および検討

4.4.1 NO_x および CO 排出特性

組成Aおよび組成Cの燃料を燃焼したときのNO_xお

よび CO 排出特性を図 8 に示す。まず、NO_x 排出特性について述べる。いずれの燃料も燃焼器出口ガス温度が増加するにつれて NO_x 濃度は一旦減少し、さらにガス温度が高くなるにつれて増加する傾向を示す。これは、燃焼器の空気配分により NO_x の生成領域が異なるためと考えられ、低負荷条件の割には燃焼器頭部での高温領域が大きくなり、NO_x の生成量が増加するものと考えられる。メタノール濃度の影響について比較すると、燃焼器出口ガス温度が 800℃ 以下の条件では、いずれの燃料もほぼ同等の NO_x 濃度となっているが、800℃ 以上の条件になると、その温度が高いほど DME にメタノールを混合した方が NO_x 濃度は低くなる傾向を示している。これは、理論最高火炎温度が影響しているものと考えている。次に CO 排出特性について述べる。いずれの燃料も、燃焼器出口ガス温度が低下するにつれて CO 濃度は増加する傾向を示す。これは燃焼器出口ガス温度の低下に伴い、燃焼空気孔から流入する空気によって火炎が冷却されるためと考えられる。しかしながら、燃焼器出口ガス温度 650℃ 条件における CO 濃度は 110ppm 程度であり、問題となる排出レベルではない。一方、メタノール濃度の影響について比較すると、実施した試験範囲内において同等の排出レベルでありメタノール混合による CO 排出特性への影響は小さい。

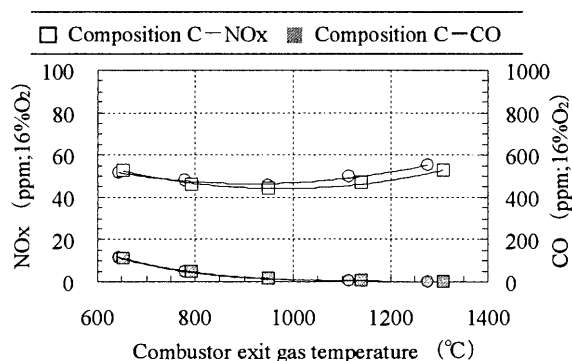


図 8 NO_x および CO 排出特性

4.4.2 NO_x 濃度に及ぼす水蒸気添加量の影響

図 9 に、燃料中の水蒸気量を変化させたときの NO_x 排出特性を示す。図中の横軸は、組成 A および組成 C の燃料に混合した水蒸気の質量比率を示している。図中には、燃焼器出口ガス温度 1260℃ と 650℃ の結果を示している。いずれの燃焼器出口ガス温度条件においても、水蒸気添加量の増加に伴い NO_x 濃度は減少する傾向を示している。これは、水蒸気添加によって局所的な火炎温度が低下するためと考えられる。燃焼器出口ガス温度 1260℃ と 650℃ の水蒸気混合による NO_x 低減効果を比較すると、1260℃ の高負荷条件の場合、水蒸気を 10% 混合することで NO_x 濃度は約 10ppm 低下するが、650℃ の低負荷条件の場合、水蒸気を 10% 混合しても 5 ppm 程度しか低下せず、水蒸気混合による NO_x の低下が緩

慢となっている。これは燃焼器の空気配分が影響していると考えられるが、詳細については別途検討が必要である。次に、水蒸気添加による燃料組成の影響について述べる。燃焼器出口ガス温度が 1260℃ の高負荷条件の場合、組成 C に比べ組成 A の NO_x 濃度が 5 ppm 程度高くなっているが、650℃ の低負荷条件では、組成による影響が小さくなっている。組成による NO_x 濃度の差は、DME とメタノールの理論火炎温度の違いが影響していると考えられ、特に、燃焼器内部に高温領域が大きく存在する高負荷条件において、その差が顕著に現れている。次に、図 10 に量論比の断熱火炎温度と NO_x 濃度の関係を示す。予混合燃焼の場合は、燃料と空気の均一な混合気を燃焼するために局所的な高温領域は存在しないが、拡散燃焼では、燃料と空気の濃度が量論比となる領域が多数存在するため、局所的な高温領域が存在し NO_x 濃度が高くなる。そこで、図 9 の水蒸気量と NO_x 濃度の関係を量論比の断熱火炎温度で再整理した。いずれの燃焼器出口ガス温度条件も、量論比の断熱火炎温度が低下するにつれて NO_x 濃度は減少する傾向を示している。図 9 では、特に高負荷条件で燃料組成による NO_x 濃度に差が生じていたが、それを量論比の断熱火炎温度で再整理することで、燃料組成によらず一本の線で整理可能となることがわかる。従って、本研究で実施した試験範囲内において、メタノールや水蒸気添加などの組成変化時の NO_x 濃度の変化は、負荷によって違いはあるもの

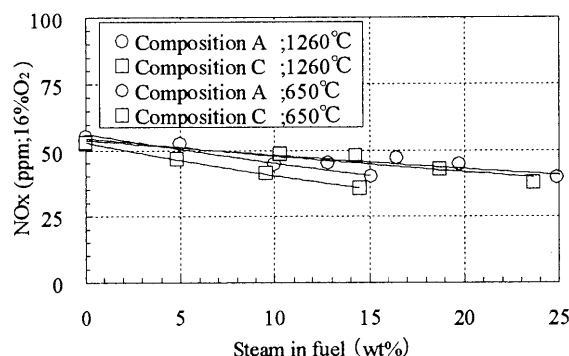


図 9 水蒸気添加量と NO_x 濃度の関係

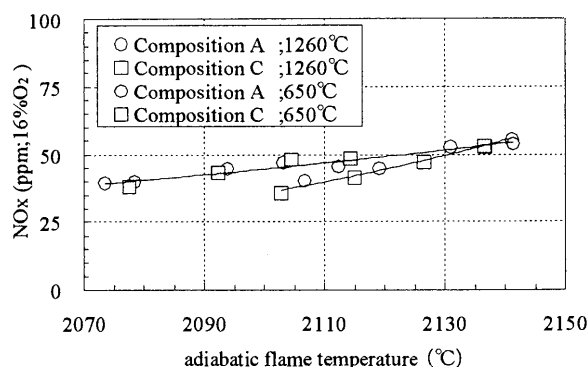


図 10 量論比の断熱火炎温度と NO_x 濃度の関係

の量論比の断熱火炎温度で評価可能であることが明らかとなった。

4.4.3 燃焼器内部の火炎温度、NO_x 濃度分布

組成 A、及び組成 A に水蒸気を 25% 添加したときの燃焼器内部の火炎温度と NO_x 濃度の分布測定結果を図 11 に示す。計測は燃焼器出口ガス温度 650℃ の条件で実施した。図中の横軸は燃焼器の半径方向距離を示し、縦軸はバーナー端面からの軸方向距離を示している。まず、水蒸気添加がないときの分布測定結果を述べる。図 11(a) は火炎温度分布を示している。燃料ノズルから噴出された燃料は空気旋回器より供給された空気と混合・燃焼し、燃料の噴流に沿った形で高温領域が形成され、さらに軸方向距離 100mm 近傍に高温領域を形成する。測定結果では、軸方向距離 100mm ～ 150mm の範囲に 1450℃ 以上の高温領域が存在している。燃焼器出口ガス温度 650℃ の条件では、154mm の位置から供給する燃焼空気によって、その下流側の温度が徐々に低下するのが確認できる。このときの NO_x は、図 11(b) に示すように、高温領域に対応して生成されるのが確認でき、高濃度領域は燃焼器の径方向中心部で且つ軸方向距離 100mm ～ 150mm の位置に存在している。燃焼器出口での実測 NO_x 濃度は 20ppm 程度であるが、燃焼器頭部では 210ppm の高濃度領域が存在し、燃焼器頭部が NO_x の生成領域であるのが確認できる。次に、水蒸気添加の影響について述べる。図 11(c) に示すように、水蒸気を添加

した場合も軸方向距離 100mm ～ 150mm の範囲に 1400℃ 程度的高温領域が存在するのが確認できる。水蒸気添加のないときに比べ、軸方向距離 100mm ～ 125mm でのピークの温度が低く、高温領域も小さくなっているのが特徴である。NO_x は火炎温度の高い領域に対応して生成されるものの、最高でも 120ppm 程度であり、水蒸気添加のないときに比べ燃焼器内部での NO_x 濃度も低くなっている。すなわち、水蒸気添加による NO_x 濃度の低下は、燃焼器頭部での火炎温度の低下とともに高温領域の減少が影響していることが示された。

4. 結言

DME の基礎的な燃焼特性や燃料グレード DME の不純物が燃焼特性に及ぼす影響についての知見を得るため、層流燃焼速度の測定試験やガスタービン燃焼器を縮小したモデル燃焼器による大気圧拡散燃焼試験を行ない、実験的に検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) DME の層流燃焼速度はメタンよりも速く、予混合気温度 200℃ 条件における最大燃焼速度は 111cm/s である。DME にメタノールを 9 wt% 混合したときの最大燃焼速度は 104cm/s となり、僅かながら低下する傾向にある。
- 2) 組成 B や組成 D のように燃料に水蒸気を混合した場合の燃焼速度も、メタンやプロパンより速く燃えやすい燃料である。
- 3) 拡散燃焼において、DME の NO_x 濃度はメタノール混合燃料よりも高負荷条件において高くなる。一方、CO の排出特性は同等であり、燃料組成による影響は小さい。
- 4) DME にメタノールや水蒸気を添加したときの NO_x 濃度は、量論比の断熱火炎温度で評価可能である。
- 5) 水蒸気添加による NO_x 濃度が低下する要因は、燃焼器頭部における火炎温度の低下と高温領域の減少が影響している。

5. 参考文献

- (1) 陳 之立ほか 2 名, 日本機械学会講演論文集, No.97-1524
- (2) Basu, A., et al., ASME 2001-GT-0003
- (3) 小泉 浩美ほか 3 名, 第 30 回ガスタービン定期講演会講演論文集 (2002-10), P.91-96
- (4) Takeo Saitou, et al., ASME GT2004-53689
- (5) 小泉 浩美ほか 3 名, 第 31 回ガスタービン定期講演会講演論文集 (2003-6), P.129-134
- (6) Tsuji, H., Hirano, T., Combustion and Flame, 15, 47 (1970)
- (7) 平野 敏右: 燃焼学, (1986), p.49, 海文堂
- (8) 小泉 浩美ほか 5 名, 第 28 回ガスタービン定期講演会講演論文集 (2000-6), P.105-110

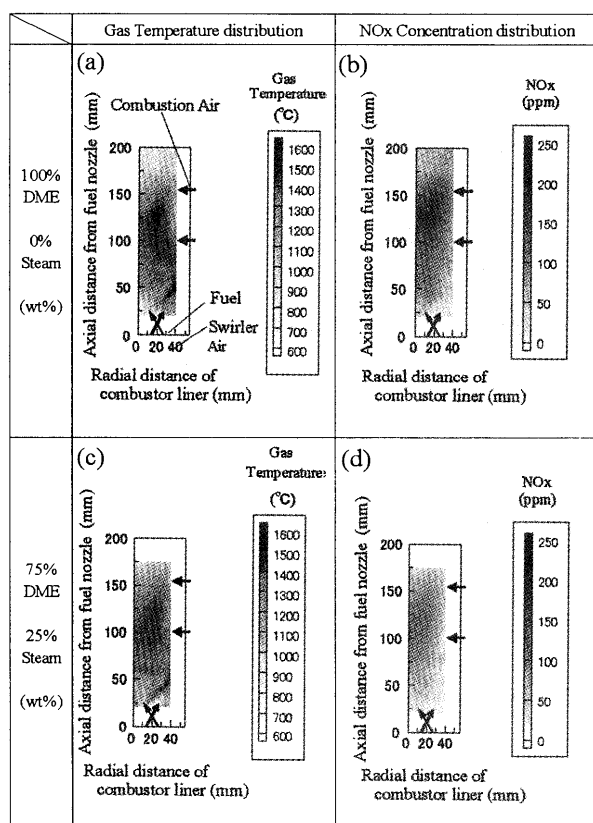


図 11 燃焼器内部の火炎温度、NO_x 濃度分布測定結果

ソーラーガスタービン用マイクロチャンネル熱交換器の伝熱流動特性

Thermal-hydraulic characteristics of a microchannel heat exchanger for solar gas turbines

宇多村元昭*¹

Motoaki UTAMURA

玉浦 裕*¹

Yutaka TAMAURA

ABSTRACT

Highly compact heat exchangers are desired for regenerative gas turbine cycle with super critical carbon dioxide as a working fluid. A set of empirical correlations of local heat transfer coefficient and pressure loss coefficient are newly derived based on experiments using micro channel heat exchanger (MCHE) with supercritical carbon dioxide as a working fluid. They are $Nu = C_1 Re^{0.8} Pr^{0.6}$, $C_1 = 0.0473$, $f = C_2 Re^{-0.25}$, $C_2 = 2.29$. The same correlation of Nusselt number is found applicable to both fluids and its value is almost two times larger than Dittus Boelter correlation. It was also shown that the above form is applicable to a wide range of geometry with the values of constants C_1 and C_2 changed. For example, the correlations with $C_1 = 0.010$ and $C_2 = 0.155$ are applicable to an existing tubular heat exchanger. Accuracy of both correlations is confirmed within 5% errors for MCHE with S-shaped fins in the range of pressures 9 ~ 12.5MPa and temperatures 280 ~ 390K. Based on the correlations, design method of heat exchanger is also developed.

Key words : Solar gas turbine, Nusselt number, micro channel, heat exchanger

1. はじめに

集光型太陽熱発電は、太陽熱エネルギーを溶融塩に蓄えることにより天候の変化に拘わらず出力を平準化できるので近年注目されている。実績ある溶融塩の最高使用温度は850K程度であるので、これまでの発電方式の主流はランキンサイクルであった（蒸気タービン効率39%）。他方、加圧空気を蓄熱せずに直接、集光外熱方式で加熱する、開放型ブレイトンサイクルも検討されているが、熱交換器の製作が難しくタービン入り口温度、圧力の実績値は、1300K、1 MPa程度に留まっており、現段階でのサイクル熱効率は前記ランキンサイクルの値を下回っている。前報⁽¹⁾では、太陽熱発電向けに、超臨界二酸化炭素を作動媒体とする新しいガスタービンサイクルを提唱した。このサイクルは、800K程度の中温度で動作するクローズド再生サイクルで、高いサイクル効率を実現するには、高性能の熱交換器が必要であることを明らかにした。本報告では、コンパクト熱交換器の一種であるマイクロチャンネル熱交換器を取り上げてその伝熱性能を実験的に評価した。

2. ソーラーガスタービン

2.1 タワー集光太陽熱発電システム

100MW級の大規模なソーラー発電では、太陽エネルギーを集光し熱エネルギーに変換して発電する熱発電が有望視されている。なかでも、蓄熱剤を介して24時間一定出力を供給する方式が主流になるとみられる。図1は、この方式の概要を示す。フィールドに照射される直接光を、地面に配置した可動鏡で反射し、中央反射鏡で光線の向きを変えたのち、地上近傍に設置されたレシーバに

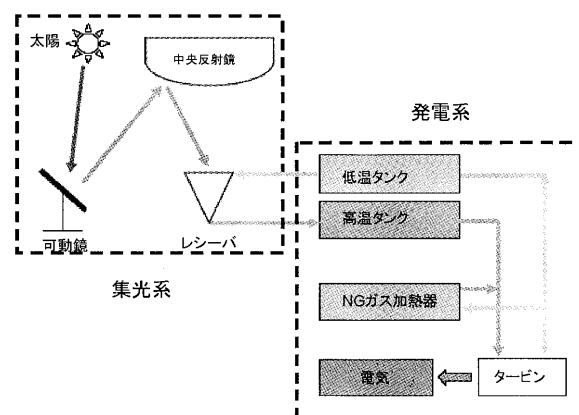


図1 蓄熱型ビームダウン集光太陽熱発電の概要

原稿受付 2006年8月31日

校閲完了 2007年2月27日

*1 東京工業大学 炭素循環エネルギー研究センター

〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1

集光する（ビームダウン方式）。レシーバには低温タンクから溶融塩が供給され、レシーバで熱交換後に高温タンクに回収される。その一部は、中間熱交換器を介して、タービン系の作動流体に伝達され、発電する。必要に応じて、過渡的に天然ガスで熱量を補う。⁽²⁾

2.2 中温度作動のガスタービンサイクル

前報⁽¹⁾で、臨界点近傍の超臨界二酸化炭素の特性を利用した、前置冷却（PC）と中間冷却（IC）を備えた再生サイクルを検討し、圧縮機入り口温度（CIT）308K、タービン入口条件 TIT800K、TIP20MPa 下で、サイクル熱効率47%を得た。ただし、熱交換器の特性に、再生熱交換器（RHX）の温度効率（高温側）98%，中間熱交換器（IHX）の圧力損失1.2%（240kPa）を仮定した。図2は、太陽熱の供給量が50MW の場合のエネルギー線図を示す。この熱交換特性を、従来の熱交換器で実現すると、大きさが巨大になり実際的ではない。そこで、マイクロチャンネル熱交換器の適用可能性を検討するため、基礎実験を行った。

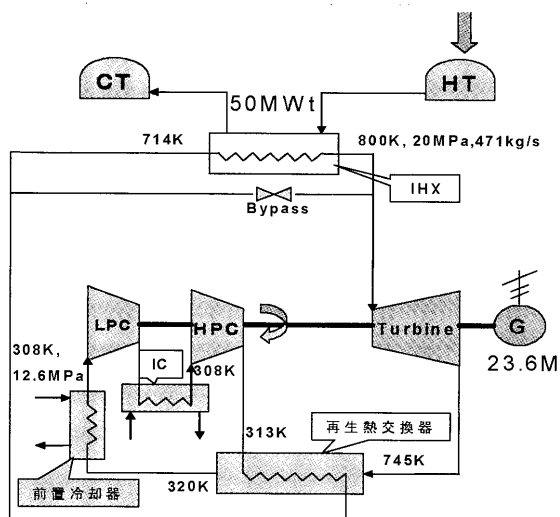


図2 超臨界二酸化炭素を用いたガスタービンサイクル構成図の一例

3. 熱交換器性能評価

3.1 試験体

伝熱性能の向上および排熱回収システムのコンパクト化を図るために、試験体として新規にコンパクト化した熱交換器を設計・製作した。実際の熱交換器形状の模式図を図3、図4に示す。このマイクロチャンネル熱交換器は無酸素銅にて製作されており、これを PCHE-M 型試験体と称す。この PCHE-M 型の製作には、光エッチングおよび拡散接合の両技術が用いられている。流路形状はエッチングにより化学的に銅版上に作成され、流体の挙動は流路内の S 字型フィンの形状により制御されている。その流路が掘り込まれた銅板を拡散接合により高

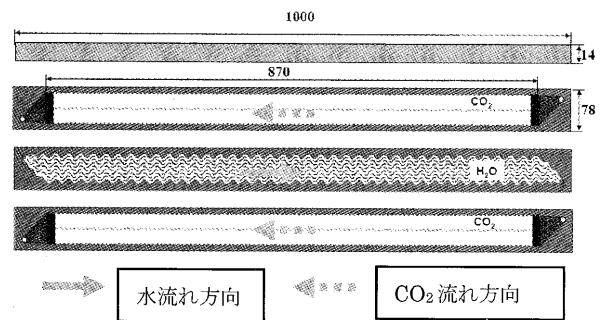


図3 PCHE-M 型の CO₂側および水側プレート形状図

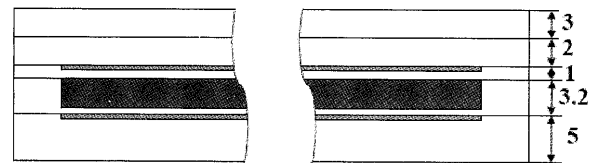


図4 PCHE-M 型の断面図

圧・高温条件で一体化した。水力等価直径の最適化によって、CO₂流路用銅板の厚さは0.91mm、流路の深さは0.47mmと算出された。図3の下3枚の銅板の各々にエッチングにより mm オーダー寸法の流路を構成し、図4に示すように、水側のプレートを2枚のCO₂側のプレートで挟み、拡散接合により接合する。組み上げた供試体は長さ、幅、厚さがそれぞれ1000mm、78mm、14mmの直方体である。図4は重ね合わせの状況を示す。図3に示すようにCO₂と水は対向流を構成している。

応力計算によってこの熱交換器は15MPaまでの圧力に耐えられることが示された。流路形状および流路内の S 字型フィンに関しては FLUENT⁽³⁾を用いて既に最適化されたものを用いている⁽⁴⁾。フィンの角度52°は熱伝達率と圧力損失係数との比、 h/f を考慮した際に最適な角度であると考えられており、今回の熱交換器においてもCO₂側・水側の両流路に用いた。熱交換器の伝熱性能を評価する際には以下の方法を用いた。熱交換器を微小計算要素に分割し、個々の計算要素を対象にしてコンピュータシミュレーションを行い、部分ごとの総括熱伝達係数を算出する。それらを積算し平均化して熱交換器全体の総括熱伝達係数とした。

これは今回の動作条件ではCO₂が臨界点付近を通り、臨界点近傍では流体の特性は急激に変化する。そのため、物性値が器内で変化しないという仮定が成立する場合に使える対数平均温度差法を、この場合には用いることができないためである。

流路形状の模式図を図5に示す。この S 字型フィンは正弦曲線から作られたものである。角度 θ は、図6に示す様に、フィンの中央部と主流方向とがなす角度である。点AおよびBは正弦曲線の山および谷に当たる点であり、そのAからBまでの距離をフィン長さとして定義した。また、

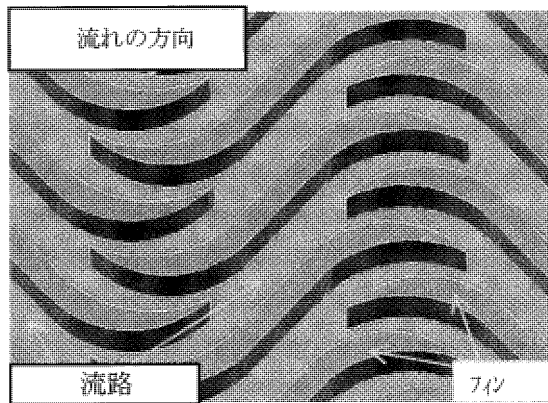


図5 流路形状の模式図

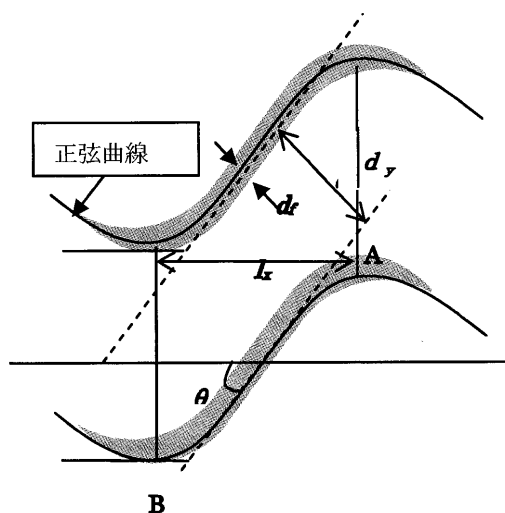


図6 S字型フィンの形状

フィンの幅を d_f 、流路幅を $(d_y - d_f)$ で定義した。このパターンを繰り返して流路を形成した。(図5参照) CO_2 側・水側ともS字型フィンを配置した流路を用いている。S字型フィンの形状パラメータを CO_2 側・水側共に表1にまとめる。両者は幾何学的に相似である。

尚、図6で $\theta = 52^\circ$ 、 $l_x = 3.7825\text{mm}$ 、 $d_f = 0.8\text{mm}$ 、 $d_y = 2.7\text{mm}$ である。

表1 流路内S字型フィンの形状パラメータ

	CO_2 側	水側
フィン角度 θ , ($^\circ$)	52	52
フィン長さ $ AB $, (mm)	4.8	14.4
フィン幅 d_f , (mm)	0.4	1.2
流路深さ, (mm)	0.47	2.5
流路幅 $d_y - d_f$, (mm)	0.87	6.17
水力直径 D_h , (mm)	0.59	3.40
流路数, (-)	54	4
伝熱面積 A , (m^2)	0.225	0.109
流路断面積 A_c , (m^2)	27.1×10^{-6}	96.5×10^{-6}

3.2 試験設備

試験ループの模式図を図7に示す。

低压タンクに蓄えられた CO_2 は圧縮機によって昇圧される。高压となった CO_2 は油分離器を通過した後ガス加熱器1(加熱容量1.9kWの電気ヒータ)によって加熱される。その後のガス冷却器1によって CO_2 を設定温度として、PCHE-M型試験体の高温側に導入する。試験体を出た CO_2 は減圧弁で減圧され制御用の流量計1を通る。その後ガス加熱器2(加熱容量2.2kWの電気ヒータ)によって圧縮機入口での温度が低くなりすぎないように加熱され、細かい温度調節を受けた後、低压タンクに戻る。また、ガス冷却器2の後に流量計2が設置されている。

高温側(CO_2 側)の入口圧力は最大圧力13MPa、精度 $\pm 0.25\%$ の圧力計で測定され、熱交換器の入口/出口間の差圧測定には、最大400kPa、精度 $\pm 0.15\%$ の差圧計を用いている。 CO_2 の流量計は測定範囲20–88kg/hr、精度 $\pm 0.5\%$ のものである。低温側(水側)の入口圧力は最大圧力1MPa、精度 $\pm 0.5\%$ の圧力計で測定され、入口・出口間の差圧測定に、最大100kPa、精度 $\pm 0.15\%$ の差圧計を用いている。水の流量計は測定範囲0.5–120kg/hr、精度 $\pm 0.5\%$ のものである。 CO_2 および水の入口部および出口部には熱電対を設置し、試験前に校正を行った。またそれらとは別に、熱交換器内部に予め、水側の流路内8本、 CO_2 側流路の直近に8本の熱電対が組み込まれている。

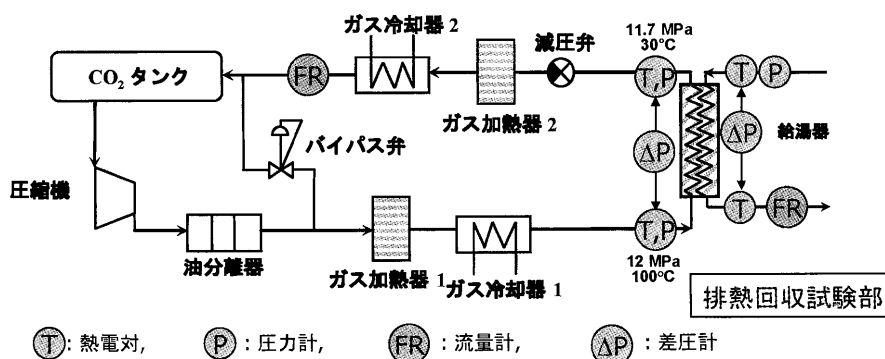


図7 試験ループの模式図

3.3 試験条件

実験はCO₂側の試験部への入口圧力、温度及び流量を変えて行なった。給湯器の運転条件は市水の温度に依存して変動するので、最低温度（冬季）と最高温度（夏季）条件にて試験を行なった。表2に試験条件を示す。

表2 給湯器試験条件

		圧力, MPa	入口温 度, °C	出口温 度, °C	流量, kg/h
試験 ①	高温 側	12	100	—	40, 45, 50, 60, 65
	低温 側	0.25	—	85	—
(給湯器 運転条件) 試験 ②	高温 側	9.5, 10.5, 11.5	118	—	40, 45, 50, 60, 65
	低温 側	0.25	(冬季) 7, (夏季) 22	90	—

3.4 試験結果

試験開始後、装置全体が定常状態になるまで約2-3時間かかる。また、設定（流量等）を変更すると安定するまでに15-20分かかる。データを測定する際には、定常に達したかどうかをみるために最低5分間数値変動が無いことを確認してからデータをを用いた。CO₂の温度や圧力・差圧は直接観測したものをを用い、流量は流量計の値をその時の温度・圧力によって補正した。それらの補正式は流量計の製造元から与えられたものである。水側は温度・圧力・差圧・流量すべて測定値をそのまま用いた。また、全ての値は5分間の平均値を用いた。PCHE-M型伝熱性能の実験値は次の式から導かれる U^{exp} で算出した。

$$U^{exp} = \frac{\bar{Q}}{A_{hot} F \Delta T_m}, \quad (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= 0.5(Q_{cold} - Q_{hot}) \\ Q_{cold} &= W_{cold} (h_{cold,out} - h_{cold,in}), \\ Q_{hot} &= W_{hot} (h_{hot,out} - h_{hot,in}), \end{aligned} \quad (2)$$

無次元の係数Fは熱交換器出入口部において完全に対向流とならないことに起因する補正值である。他方、出入口部においては流速が上がっており、そのために局所的な熱伝達率は増加する。流速の増加による熱伝達率の増加と対向流でないことによる伝熱性能の低下の効果は相殺しあうため、今回は補正係数Fは1として計算し

た。

CO₂の比熱の温度依存性を考慮に入れて、平均温度差は次の式を用いて計算した。

$$\Delta T_m = \frac{\bar{Q}}{\int_0^Q dQ / (T_{hot}(Q) - T_{cold}(Q))}, \quad (3)$$

ここで、高温側流路・低温側流路の温度は、圧力が交換熱量に対して直線的に変化するという仮定の下、各入口からのエンタルピーの変化量で計算した。式(3)は比熱が一定であると仮定されるとき対数平均温度差の算出式に相当する。CO₂の物性値はPROPATH⁽⁵⁾を用いて算出した。局所熱伝達率はヌッセルト数を用いて以下のように示される。ただし、レイノルズ数・ヌッセルト数の次数は経験的に得られたものである。

$$\begin{aligned} Nu_{hot} &= C_1 \times Re_{hot}^{0.8} Pr_{hot}^{0.6}, \\ Nu_{cold} &= C_1 \times Re_{cold}^{0.8} Pr_{cold}^{0.6} \end{aligned} \quad (4)$$

総括熱伝達係数の計算値 U^{calc} は伝熱量の関数として次のように示される。

$$U^{calc}(Q) = \frac{1}{\frac{1}{h_{hot}(Q)} + \frac{A_{hot} \Delta t_{wall}}{A_{wall} k} + \frac{A_{hot}}{A_{cold} h_{cold}(Q)}}, \quad (5)$$

ここで局所熱伝達率 h_{hot} 、 h_{cold} はヌッセルト数から得られたものである。これらの式を用いて必要伝熱面積 A^{calc} および平均総括熱伝達率 $\bar{U}^{calc}$ は次のようになる。

$$A^{calc} = \int_0^{\bar{Q}} \frac{dQ}{U^{calc}(Q) \Delta T(Q)}, \quad (6)$$

$$\bar{U}^{calc} = \frac{Q_0}{\Delta T_m A^{calc} F}.$$

C_1 は以下の項の和を最小とする値として求める。

$$\sum_{i=1}^{N_{exp}} (U_i^{calc} - U_i^{exp})^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

圧力損失は積分の形で次のように表される。

$$\Delta P = \frac{2G^2}{D_h} \int_0^L f \frac{dl}{\rho} = \frac{2G^2 L}{D_h A} \int_0^{\bar{Q}} f \frac{dQ}{U \Delta T p}. \quad (8)$$

圧力損失係数は $C_2 \times Re^{-b}$ の形で表される。

次数bの最適値はBlasius公式に類似し0.25であった。

$$f = C_2 Re^{-0.25} \quad (9)$$

定数 C_2 は以下の項の和を最小とする様に定めた。

$$\sum_{i=1}^{N_{exp}} (\Delta P_i - \Delta P_i^{exp})^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

それぞれの平均値は以下のようにして求めた（レイノルズ数の場合）

$$Re_{av} = \frac{1}{A} \int_0^A Re dA. \quad (11)$$

4. 実験結果と考察

4.1 マイクロチャンネル試験体の特性

レイノルズ数に対する交換熱量の結果を図8に示す。レイノルズ数が増えるに従って交換熱量が増加している。点が広く散乱しているのはCO₂と水の入口温度が実験ご

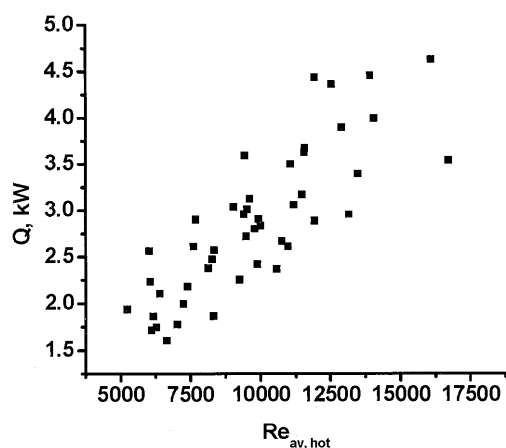


図8 レイノルズ数に対する交換熱量

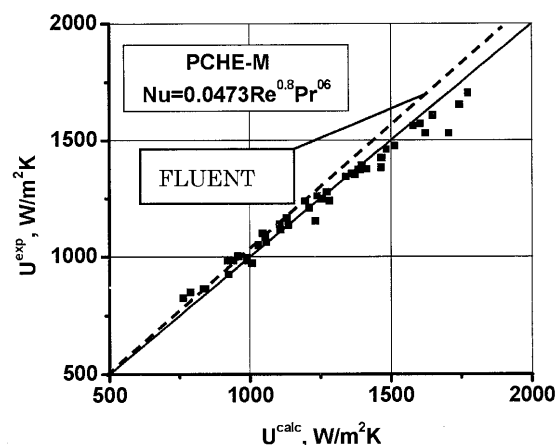


図10 総括熱伝達率の実験値と計算値の比較

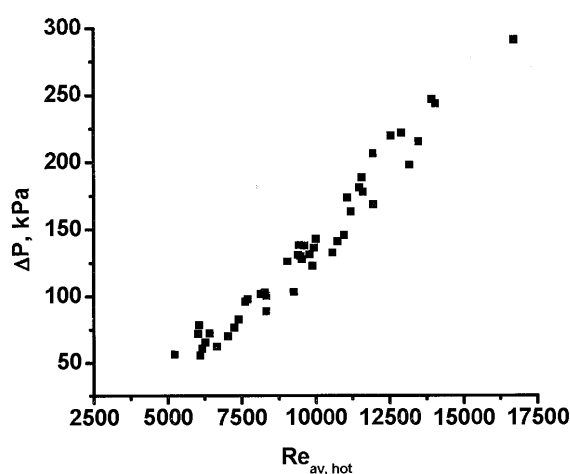
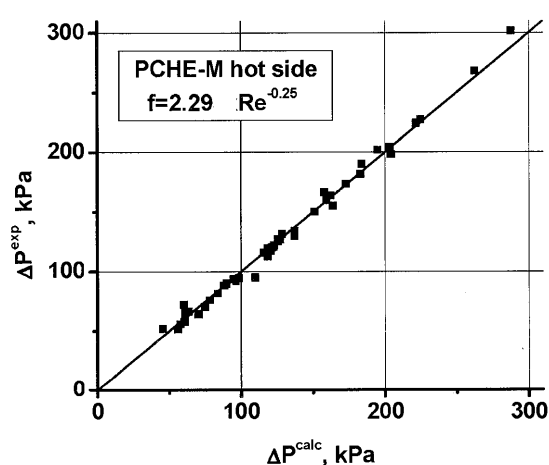
図9 高温側 (CO₂側) のレイノルズ数に対する CO₂ の圧力損失

図11 圧力損失の実験値と計算値の比較

とに異なっているためである。高温側 (CO₂側) のレイノルズ数に対する圧力損失を図9に示す。レイノルズ数の増加に伴って滑らかに増大している。圧力損失の最大値はCO₂流量83kg/hの際に得られたものである。

式(4), (9)を用い, 係数 C_1 , C_2 を実験でベストフィットした。その結果, $C_1=0.0473$, $C_2=2.29$ を得た。

図10は, 総括熱伝達係数の実験式による予測値を実験値に対して示す。図11は同様に圧力損失の実験値と予測値の比較を示す。偏差はいずれも5%であった。これより, 得られた実験式は流体によらず適用でき, かつ, 4.2節に述べるが, 異なる流路形状に対しては, 定数のみの変更で式(4), (9)を適用できることがわかった。ヌッセルト数と圧力損失係数の評価に用いた, レイノルズ数・プラントル数の範囲は以下の通りである。レイノルズ数: $2 \times 10^4 \leq Re_{hot} \leq 2 \times 10^5$; $115 \leq Re_{cold} \leq 1580$, プラントル数: $0.96 \leq Pr_{hot} \leq 5.9$; $1.9 \leq Pr_{cold} \leq 11.4$ 。

ヌッセルト数は, 同じレイノルズ数, プラントル数下で, 円管乱流強制対流熱伝達での Dittus Boelter 式の約2倍の値を持つ。また, 平均総括熱伝達率に関して, 商

用 CFD コード FLUENT による評価値よりも5%大きい値が得られた。

4.2 マイクロチャンネル試験体と

二重管型試験体による試験結果の比較

CO₂を冷媒とするコンパクト熱交換器として給湯器(商品名エコキュートとして家庭に普及)がある。代表的なものが二重管型なので, これをベンチマークにしてPCHE-Mを比較評価した。

図12は試験に供した二重管型熱交換器を示す。高圧の超臨界二酸化炭素(高温側冷媒)の流路が水流路をらせん状に周回し, 溶接されている。

本試験体とPCHE-M型に対して得られた試験結果から性能比較を行った。まず, それぞれの交換熱量に対する総括熱伝達係数の関係を求め, 続いて必要とされる熱量に応じた伝熱面積を求めた。式(4)式(9)における係数として, 二重管型熱交換器については, $C_1=0.010$, $C_2=0.155$ を得た。伝熱面積より熱交換器の長さが求まるため, 圧力損失を計算することができる。表3に

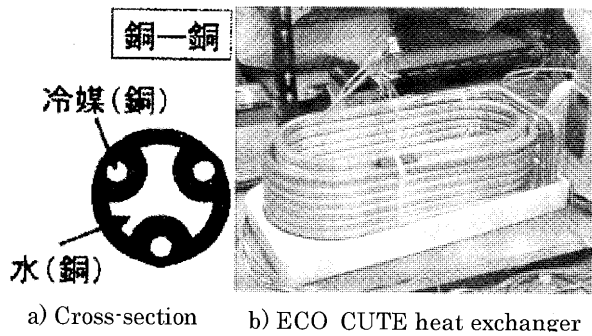


図12 二重管型試験体

表3 PCHE-M型と二重管型の比較に用いた試験条件

給湯条件	CO ₂ 側				水側				交換 熱量 kW
	T, °C		P, MPa	W, kg/h	T, °C		P, MPa	W, kg/h	
	入口	出口			入口	出口			
高温	118	16	11.5	57.8	7	90	0.25	48	4.63
中温	83	27.8	10	102	17	65	0.25	108	6.02

表4 PCHE-M型と二重管型の性能比較結果

給湯条件	必要伝熱面積, m ²		必要体積, m ³		体積比		圧力損失 ΔP _{CO₂} , kPa	
	二重管型	PCHE-M	二重管型	PCHE-M	二重管型	PCHE-M	二重管型	PCHE-M
I 高温	0.180	0.286	0.0098	0.0014	7.0	1	238	170
II 中温	0.139	0.221	0.0076	0.0011	7.0	1	474	229

PCHE-M型と二重管型の性能比較に用いた試験条件を、表4にPCHE-M型と二重管型の性能比較結果を示す。但し、中温給湯の交換熱量が6.02kWの場合は、試験結果は無く、計算で比較評価したものである。比較結果で体積比に関しては交換熱量が同じなので、体積が小さい程性能が良く、圧力損失は小さい程良い事になる。PCHE-M型は高温給湯、中温給湯条件共に二重管型より優れた熱水力特性を示すことがわかった。PCHE-Mに対する二重管型の体積比は7であり、コンパクト化が達成されている。

4.3 ソーラーガスタービン用熱交換器の設計

開発した伝熱相関式を用いて、図2に示したソーラーガスタービンサイクルに用いる熱交換器、RHXとIHXのサイズを求めた。要求性能

RHXの温度効率0.98

IHXの圧力損失0.4% (80kPa)

を表1のCO₂側流路のS-フィンを用いて実現する場合の所要寸法は、

RHX (300MW) :

$$0.85\text{m(流路長さ)} \times 2.3\text{m} \times 2.3\text{m} = 4.6\text{m}^3$$

IHX (50MW) : 0.25m(流路長さ) × 2m × 2m = 1m³となる。

これより、熱交換器のサイズはRHXで支配されることがわかる。この程度の寸法であれば、レシーバの代表寸法が約10mであるので、製作上、レイアウト上も許容できると考えられる。仮に二重管型を用いると、この7倍の寸法になり製作据付に困難が伴うと考えられる。

これより、マイクロチャンネル熱交換器の有効性が示されたと言える。

ここで、IHXの圧力損失目標値をサイクル計算(図2)では絶対圧力の1.2%としたのに対して、圧力損失を0.4%として寸法を評価した。この理由はPCHE-Mの性能が予想を越えて良好であったことで、機器据付面積は増える傾向ではあるが、サイクル効率向上に資する0.4%の方を選択して検討した。結果は、IHXの容積は、この場合においてもRHXと比較して相対的に小さくレイアウト上のインパクトは小さいことがわかる。

5. まとめ

超臨界二酸化炭素を作動媒体とするソーラーガスタービンサイクルで高いサイクル効率を実現するには、高性能の熱交換器が必要である。その有力候補であるマイクロチャンネル熱交換器を対象に試験体を製作、実験し、伝熱と流動の熱水力特性が優れていることを確認した。

- (1) 熱交換器の内部流体の物性値が変化する系で、実験データから平均総括熱伝達率を導出する方法を明らかにした。
- (2) それを用いて超臨界二酸化炭素と水を熱媒体とする実験体系で、汎用性のあるヌッセルト数と圧力損失係数の実験式を得た。
- (3) 得られた熱伝達実験式は、円管乱流熱伝達のDittus Boelter式の約2倍、二重管型試験体の約4.7倍の伝熱促進効果がある。
- (4) マイクロチャンネル熱交換器は、二重管型との体積比で1:7のコンパクト化が可能である。
- (5) 出力23MW_eのクローズドサイクルガスタービン

を構成する熱交換器を試設計し、熱負荷が最大の再生熱交換器の容積が許容できる範囲にあることを確認した。

参考文献

- (1) 宇多村元昭, 玉浦裕: 超臨界二酸化炭素を作動媒体とするソーラーガスタービンサイクル, 第33回ガスタービン定期講演会 (2005.9.10)
- (2) Utamura, M., Tamaura, Y.: A Solar Gas Turbine Cycle with Super-Critical Carbon Dioxide as a Working Fluid, GT2006-90864, Proc. ASME Turbo expo 2006, May 8-11, 2006, Barcelona, Spain
- (3) Fluent, Inc., 2003, *Fluent 6.1 User's guide*, Fluent Inc., Lebanon, NH.
- (4) Tsuzuki, N., Kato, Y. and Ishiduka, T.: High performance printed circuit heat exchanger, Heat SET 2005, April 2005
- (5) Ito, T., et al., 1990, PROPATH: A Program Package for Thermo-physical Properties of Fluids, Version 10.2, Corona Publishing Co., Tokyo, Japan.

注記: 本論文の一部は、経済産業省からの交付金を原資とし実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一つとして、NEDO 技術開発機構との受託研究契約に基づいて、東京工業大学が実施した17年度の成果である。

記号の説明

A	伝熱面積 (m^2)
A_c	流路面積 (m^2)
$/AB/$	フィン長さ (m)
C	未定数 (-)
D_h	水力等価直径 (m)

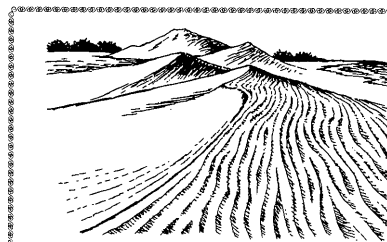
d_f	フィン間隔 (m)
F	補正係数 (-)
f	圧力損失係数 (-)
G	質量流束 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
h	熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
I_s	半周期長さ (m)
k	熱伝導率 (W/mK)
L	熱交換器長さ (m)
l	熱交換器長さ方向座標 (m)
Nu	ヌッセルト数 ($= hD_h/k$) (-)
P	圧力 (Pa)
Pr	プラントル数 (-)
ΔP	圧力損失 (Pa)
PCHE	Printed Circuit Heat Exchanger
Q	交換熱量 (W)
Re	レイノルズ数 ($= D_h G/\mu$) (-)
T	温度 (K)
ΔT	流体間温度差 (K)
Δt	壁厚さ (m)
U	総括熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
v	比体積 (m^3/kg)
W	質量流量 (kg/h)

ギリシャ語

μ	粘性率 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
ρ	流体密度 (kg/m^3)
θ	フィン角度 (deg)

添字

<i>hot</i>	高温流体側
<i>cold</i>	低温流体側
<i>m</i>	平均



霧の街

山本 誠^{*1}

YAMAMOTO Makoto

午前0時30分、漆黒の闇の中、乗機はドスンという乱暴なランディングで目指す空港に到着した。東京から7時間半、それほどの長旅ではないが、緊張感に包まれたフライトだった。機を降りた瞬間、肌を刺すような冷気が襲ってきた。気温は氷点下17度。東京では経験できない低温だが、思ったほど寒くはない。これから起こるであろう出来事に気持ちが高ぶっていたからだろうか。

空港ターミナルの廊下を黙々と歩く。ターミナルの廊下は薄暗く、暖房はほとんど効いていない。延々と続く壁には携帯電話と銀行の派手な広告ばかりが貼られ、この街での両産業の勢いを感じる。

ターンテーブルの上をゴトゴトと荷物が流れて行く。日本の空港のターンテーブルより、心なしかゆっくり回っているように見える。時間がゆっくりと流れているようにすら感じる。荷物も人も全ての動きが緩慢に見えるのは暗さのせいだろうか、寒さのせいだろうか。そんなことを考えながら荷物の出てくるのを待っていた。

預けてあった荷物を受け取り、空港ロビーに出た。真夜中にもかかわらず、ロビーには大きな名札を胸に抱えた人、人、人。どこの国でも見られる風景だが、どこか違う。ロシア系、トルコ系、アラブ系、中国系、??系と思われる人垣が行く手を阻む。まさに人種の坩堝を思わせる光景だ。アメリカでもこんなに雑多な人種を一度に見られることは少ないだろう。

雑踏をすり抜けて空港ビルを一步出る。そこは濃い霧の世界だった。視界は50mもない。オレンジ色の街灯がポツリポツリという感じでいかにも侘しげに霧の中に浮かんでいる。寒さと霧のせいかもしれないが、最果ての地、そんな印象を受ける。道路は凍りつき、道路わきには雪が張り付いている。滑らないように気をつけながら、ゆっくりゆっくりと歩く。プーンと石炭を燃やす臭いが鼻を衝く。小学生の頃使っていた石炭ストーブを思い出させる妙に懐かしい独特の臭いだ。ここでは今でも達磨ストーブが使われているのだろうか。そんなことを考えながら車に乗り込んだ。

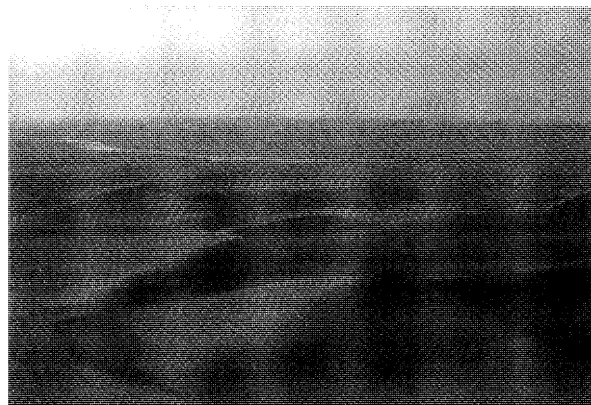
車は闇の中をホテルへ向かう。路面が凍っているにもかかわらず、かなりのスピードで霧の中を走りぬける。ヘッドライトの光だけが前方を照らす。街は濃霧に沈んで、背の高い街路樹と道路わきの建物以外はほとんど見

えない。どんな街なのだろう。キョロキョロと辺りを見回したが何も分からない。こうして、濃霧と石炭臭の強烈な印象とともに、ウルムチへの旅の初日は終わった。

ウルムチへの旅があまりに印象的であったため、そのさわりだけ書いてみたが、このままでは10ページあっても終わらないので、この辺で止めておこう。

ウルムチは新疆ウイグル自治区の首府で、北京からは2400km、飛行機で3時間半の距離にある。人口が約400万人で、42もの民族が暮らす大都市である。ただし、半分は出稼ぎ労働者であり、人口の流動が激しい。内陸性乾燥気候のため、オアシスを除いてほとんどが砂漠である。また、気温の変化が激しく、夏は40℃を超え、冬は-20℃にもなる。歴史は古く、2200年前の前漢の頃には中国(漢民族)の支配を受け、役所が置かれたそうだ。近くに(といっても200kmほど離れているが)シルクロードの天山北路/南路の分岐点トルファンや西遊記で有名な火焰山などがあり、観光地として発展している。一方、中国最大の風力発電所や石油・天然ガス掘削基地などもあり、中国のエネルギー産業の基地でもある。2000年前から変わらない日干し煉瓦の家とロバ車の生活と、近代的なビルの生活が混在したアンバランスで実に不思議な世界を形作っている。ちなみに、後から分かったことだが、ウルムチ空港で見た濃霧は霧ではなく、暖房等に燃やす石炭の煙であり、毎晩見られる現象だった。

新疆ウイグル自治区は、北京のような漢民族の中国とは全く異なり、中央アジアの文化の多様性を実感できる特異な世界である。アメリカやヨーロッパ旅行では味わえない強烈な体験ができることは間違いのないだろう。読者の皆様にも一度旅行されることをお勧めします。



ピチャン付近の砂漠

原稿受付 2007年1月22日

*1 東京理科大学工学部機械工学科

〒102-0073 千代田区九段北1-14-6

30MW 級航空転用型ガスタービン LM2500+

米澤 克夫*¹
YONEZAWA Yoshio

三輪 隆信*¹
MIWA Takanobu

水澤 実*¹
MIZUSAWA Minoru

キーワード：航空転用型ガスタービン，コージェネレーション，性能向上

1. はじめに

石川島播磨重工業（以下 IHI）では航空エンジンの開発製造で養われた技術ノウハウを生かして，航空転用型ガスタービンを用いた10MW 以下クラスの自家用発電設備向けガスタービンコージェネレーションプラントや特定発電事業者向けの50～100MW クラスのコンバインドプラントを多数納入してきた。一方，自家用発電設備向けガスタービンコージェネレーションシステムは10MW 以下クラスの普及が進み，徐々に CO₂削減や省エネを意図した10～50MW クラスのボイラタービンシステム（BTG）の燃料転換対応市場が拡大しつつある。IHI ではこのような市場向けに，全世界で多数納入実績のある航空転用型ガスタービン LM2500/LM2500+ エンジンをラインナップとして有している。

本項では LM2500 エンジン（以下 LM2500）の性能向上型である LM2500+ エンジン（以下 LM2500+）について，その概要，特徴および LM2500+ を用いた発電プラントを紹介する。

2. LM2500+ 概要

LM2500+ エンジンの原形となっている LM2500 は，1960 年代に大型航空機用ターボファンエンジンとして開発された GE 社製 CF6-6 エンジンの高圧圧縮機から高圧タービンを流用し，低圧タービンを改造してフリータービン形式の出力タービンとした陸船用ガスタービンである。⁽¹⁾ 図 1 に CF6-6 エンジンと LM2500 の断面を比較して示す。

LM2500 は高効率，小型，軽量という特徴を生かして発電設備向けとしてコージェネレーション，コンバインドサイクルに利用された。さらに，フリータービン形式という特徴を生かし機械駆動用としても利用された。1969 年の初号機納入以降900 台以上の納入／運用実績があり最高運転時間エンジンは15 万時間以上の運転実績を有する，信頼性の高いエンジンである。

LM2500+ は LM2500 の高信頼性を生かし，性能向上（約30% の高出力化，約2.5% の高効率化）を図ったエンジンである。図 2 に LM2500 と LM2500+ を比較して示す。LM2500+ は LM2500 の高圧圧縮機入口に軸流圧縮

機を1 段追加し，圧縮機の圧力比と空気流量の増加を図っている。さらに，圧力比の増加による高温部冷却空気温度上昇に対応するため，高圧タービンの冷却性能向上や材料の変更がなされた。出力タービンは作動ガス流量増加および高出力化に対応して改修されている。このように LM2500 から LM2500+ への改造はエンジンのスケールアップやタービン入口温度の上昇というような開発項目の多くなる改造をできるだけ避けて，LM2500 で実績を積んだ信頼性，耐久性をできるだけ損なわないように配慮されている。LM2500+ は1996 年に初号機が納入されこれまでに100 台のエンジンが納入されエンジンの最長運転時間は約25,000 時間に達している。

GE 社は LM2500+ をさらに改良して効率を損なうことなく10% 以上高出力化する改修計画（LM2500+ GROWTH）を進めており⁽²⁾，2006 年から納入開始した。出力向上型 LM2500+ の改修点を図 3 に示す。作動ガス流量の増加と若干のタービン入口温度の増加により出力向上を図るもので，圧縮機，タービンが改修されている。タービン入口温度は原形の CF6-6 ターボファンエンジンの実績範囲内にとどめられており，耐久性，信頼性を損なうことなく，性能向上を図っている。

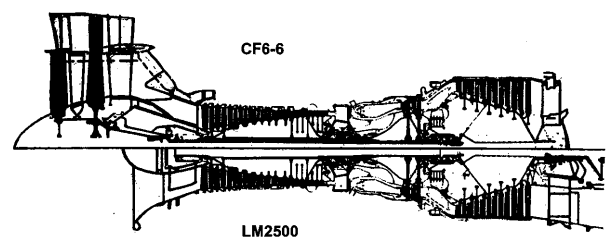


図1 LM2500とCF6の比較

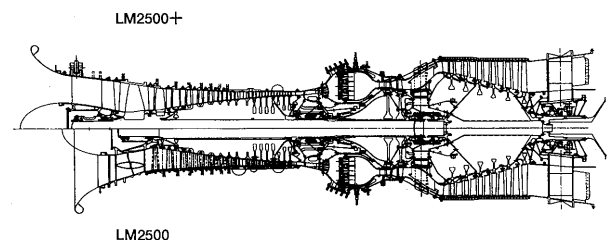


図2 LM2500とLM2500+の比較

原稿受付 2007年1月15日

* 1 石川島播磨重工業(株)原動機プラント事業部
〒135-8710 江東区豊洲3-1-1 豊洲 IHI ビル11F

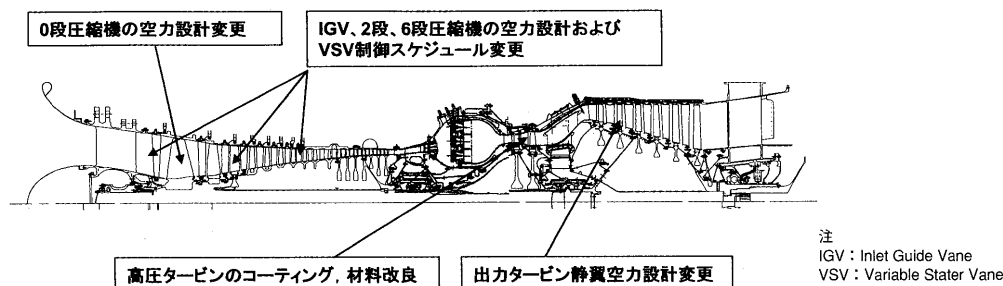
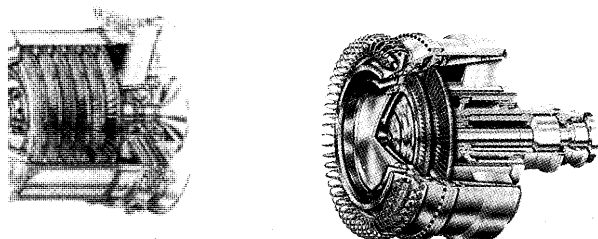


図3 LM2500 + GROWTH の改修点



1) 低速6段出力タービン 2) 高速2段出力タービン

図4 LM2500 + の出力タービン

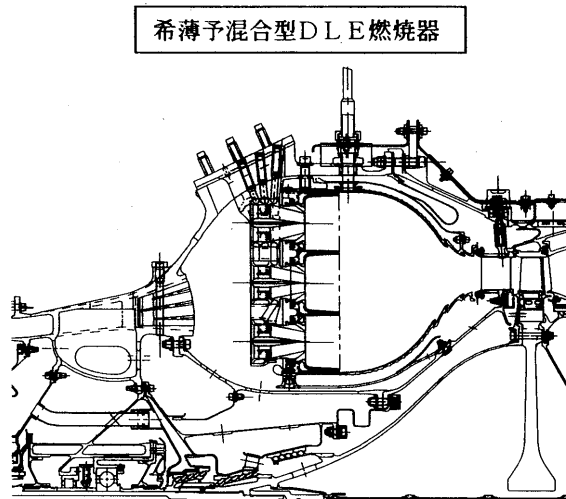
3. LM2500+の特徴

LM2500+の特徴は小型軽量、高効率である。

エンジンサイズは全長5500mm, 最大径2600mm, 重量4.2tonであり, 同出力レベルのガスタービンと比較して小型, 軽量である。

発電端効率は, 同出力レベルのガスタービンの中で最高レベルを達成している。これは主に航空転用形の特徴を生かし, 高圧力比化と各要素の高効率化により達成されている。

LM2500+には図4に示す, 2種類の出力タービンが用意されている。低速6段出力タービンは航空用エンジンの低圧タービン部と部品の共通化が図られている。また, 3000および3600min⁻¹で運転可能で, 系統周波数によらず減速機が不要なため, 主に発電用として運用されているが, 軽量であることから船用としても用いられている。高速2段出力タービンは主に機械駆動用として用いられているが, 軸端効率高く減速機ロスを考慮しても高発電端効率を達成できるため, 発電用としても用い



希薄予混合型DLE燃焼器

拡散燃焼型SAC燃焼器

図5 LM2500 + の燃焼器

表1 LM2500+ コージェネレーションプラントの性能

エンジン名称	エンジン形式			発電端出力 kW	蒸気発生量 t/H	発電端効率 %	総合効率 %	排出 NOx 濃度 ppm (16% O ₂)
	ガス発生器	燃焼器形式	出力タービン形式					
LM2500PJ (50Hz)	LM2500	DLE 燃焼器	低速6段	20,530	42.0	34.0	85.9	21
LM2500PJ (60Hz)	LM2500	DLE 燃焼器	低速6段	21,460	42.0	35.3	86.8	21
LM2500PY	LM2500+	DLE 燃焼器	低速6段	28,380	47.5	38.3	86.2	21
LM2500RB	LM2500+ GROWTH	DLE 燃焼器	高速2段	31,120	51.5	38.6	86.3	21

大気条件: 温度15℃, 相対湿度60%, 圧力101.3kPa 燃料: 都市ガス13A LHV 41.6MJ/Nm³ HRSG: 給水温度20℃, 連続ブローなし, 追い炊きなし
脱硝装置なし 送出蒸気条件: 0.8MPa 飽和蒸気

られている。

さらに、LM2500+には図5に示す、拡散燃焼型(SAC)と希薄予混合型(DLE)の2種類の燃焼器が用意されている。SACでは水または蒸気噴射をすることで、DLEでは水または蒸気噴射無くガス焚きでNO_x 21ppm (16% O₂)を保証可能である。

4. LM2500+を用いたプラント

IHIではLM2500についてはコージェネレーション、非常用電源として17台の納入実績がある。また、LM2500+についても高速フェリー用として3台の納入実績を有する。LM2500とLM2500+は外形寸法がほとんど同一であり、制御特性等も同等であるため、プラントの設計はLM2500/LM2500+で共通設計が可能である。表1にコージェネレーションシステムの性能を示す。LM2500+およびLM2500+ GROWTHでは40%近い発電端効率と約80%の総合効率を達成可能である。

5. 結言

LM2500+は多数の納入実績と長期にわたる運用実績を有するLM2500の高耐久性、高信頼性を維持した、高出力、高効率2軸ガスタービンである。また、2種類の出力タービン、燃焼器システムが選択可能で用途に合わせた最適システムが提案可能である。

IHIとしてはBTG代替市場を中心とした分散電源市場のニーズに対応して、このような特徴を有するLM2500+をその性能向上型であるLM2500+ GROWTHも含め提案し、CO₂削減、省エネルギーに貢献したいと考えている。

参考文献

- (1) G.H.Badeer, GE Aeroderivative Gas Turbines - Design and Operating Features, GER3695.
- (2) R.Farmer, LM2500 upgrade nominally rated at 46,000shp and 41% efficiency, GAS TURBINE WORLD;Nov.-Dec.2005.

第35回 ガスタービンセミナー報告

高橋 俊彦

TAKAHASHI Toshihiko

「ガスタービンの最新技術動向と保守管理技術」と題して、第35回ガスタービンセミナーが、2007年1月23日(火)、24日(水)の両日、東京ガス(株)本社ビルにて開催された。137名にご参加頂き、例年にも増して盛況であった。講師には、当該分野において第一線でご活躍の方々を迎え、16件のご講演を頂いた。第2日目には、「燃料多様化技術の将来展望」と題したパネルディスカッションが行われ、座長ならびに5名のパネリストの方々にご討論を頂いた。以下に概要を報告する。

第1日目は、午前「ガスタービンの最新技術動向⁽¹⁾」と題して、産業用ガスタービンに関連して開発が進められる最新技術について4件の講演が行われた。はじめに1700℃級ガスタービンの開発として、高効率を可能とする要素技術の開発状況とその成果が紹介された。続いて、高温分空気利用ガスタービンの要素技術の開発と検証試験の状況が紹介された。700℃級超々臨界圧汽力発電技術については、最近の研究成果および各国の開発動向が紹介され、開発意義がアピールされた。最後に8MW級のガスタービンについて、従来機からの改良点と新技術適用による高効率化が説明された。

第1日目午後には、「保守管理技術⁽¹⁾」として、航空機エンジンおよび発電用大型ガスタービンについて、それぞれメーカーおよびユーザーから講演がなされた。航空機エンジンについては、最新の健全性管理技術として、オンラインモニタリングを用いた故障予知、診断技術の紹介と、エアラインによる信頼性向上に向けた取り組みが説明された。発電用大型ガスタービンについては、高温部品の補修技術および余寿命評価手法が紹介され、ユーザーからはプラント運用の実態として、保守管理への取り組みと今後の課題、合理化事例が紹介された。

引き続き、第2日目午前に「保守管理技術⁽²⁾」と題して4件の講演が行われた。はじめにコジェネレーション用

ガスタービンについて、保守管理の事例とともに効率化と予測診断の重要性が述べられた。続いて、航空機エンジンタービン翼の損傷劣化形態と修復技術の現状が紹介された。続く2つの講演では、保守管理への適用が期待される先進技術として、X線CTを用いたデジタルエンジニアリングの概要と適用例、および従来不可能であった単結晶翼の溶接補修技術の開発について紹介された。

第2日目午後には、「最新プラント事例紹介」として、(株)東京ガス横須賀パワーステーションの概要、運転実績が紹介された後、「ガスタービンの最新技術動向⁽²⁾」と題して、環境適応型小型航空機用エンジンの研究開発概要、およびこれに関係の深いJAXAのクリーンエンジン技術の研究開発プロジェクトが紹介された。最後の講演では、石炭ガス化複合発電について、実証機の概要および建設進捗状況が説明され、これに続いて、燃料多様化技術に関するパネルディスカッションへと進んだ。

パネルディスカッションでは、LNGの需給動向についての現状報告がなされた後、各パネリストより、新種燃料について、石炭、GTL燃料、オイルサンド、バイオディーゼル燃料の状況説明、適用技術として木質バイオマスガス化ガスタービンについての話題提供がなされた。座長と会場からの質問に対する、燃料供給の視点に立った将来展望の議論は、大変興味深いものであった。

本セミナー終了後、参加者には当学会の企画運営等に関するアンケートに協力して頂いた。結果は今後の企画に反映させ、一層充実したものにしていきたい。

最後に、貴重な内容をご講演頂いた講師、パネリスト・座長、会場の提供と運営にご協力頂いた東京ガス(株)をはじめとする関係者の方々、ご参加頂いた皆様に、厚く御礼を申し上げます。

(企画委員)



企画委員長による開会挨拶

講演

パネルディスカッション

2006年度 第3回見学会報告

上松 一雄

UEMATSU Kazuo

1月26日金曜日の午後、地方委員会主催第3回見学会で福島県勿来に所在するクリーンコールパワー研究所を訪問し IGCC（石炭ガス化複合発電）実証機の建設現場を見学しました。

写真にある通り主要設備は設置済で平成19年度半ばには実証試験を開始する予定です。この IGCC 実証機は出力25MW、石炭使用量約1700t/日と大規模で、ガスタービン入口温度は1200℃と低めのため送電端効率42%（LHV 換算）ですが、ここでの実証試験結果をベースにさらなる効率向上と世界的普及（中国等への海外協力を行うと酸性雨の防止にも役立つ）を狙っています。

当日は東北の冬にも関わらず暖かい日差しの中、17人の方々（含 武石地方委員会委員長及び各委員の方々）にご参加頂き大変盛況でした。

主催側代表 藤田寛マネージャのご挨拶の後、紹介ビデオや口頭説明を頂き IGCC 実証機の環境面でのメリット（地球温暖化対策へ向けた今後の高温化など効率 UP 施策、適用炭種の拡大、出力当りの SOx・NOx・はい

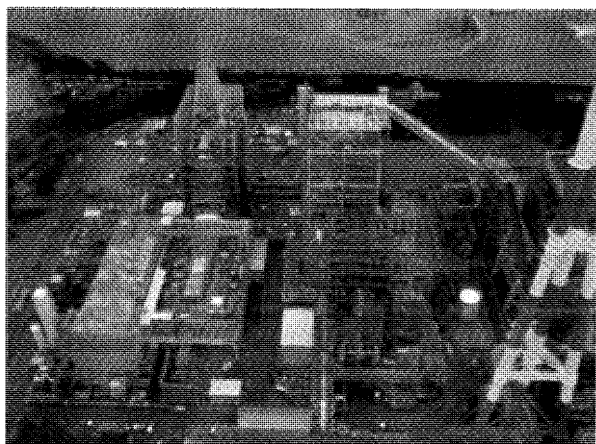
じんの排出量低減、スラグの有効利用 etc.）などが紹介されました。

特に資源の乏しいわが国においてエネルギーセキュリティ確保のために世界において埋蔵量が豊富で価格の安定した石炭を利用した火力発電を導入し、電源のベストミックスを図る重要性と共に、地球温暖化対策を両立させる事が不可欠であり、IGCC はこの中核技術になると考えられているとの事でした。

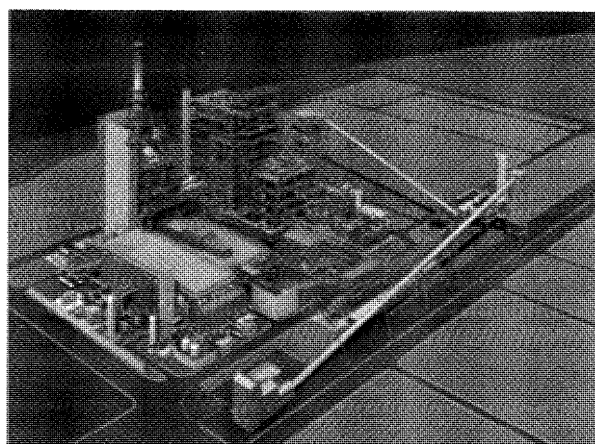
その後、実際に実証機建設現場を見学し壮大なスケールの設備である事を実感しました。本筋でない点ではありますが、近隣に民家が迫っているため巨大な防音壁で設備を囲むなど関係者の方々のご苦労が偲ばれました。

ご見学中及びその後の質疑時間を含め長時間に亘って大変熱心なご質疑がありました。

最後に、ご多忙中、クリーンコールパワー研究所の関係者の方々、一般応募者の方々、地方委員会委員の皆様には見学会を成功に導いて頂き厚く御礼申し上げます。



(IGCC 実証機工事現況写真；クリーンコールパワー研究所ご提供)



(IGCC 実証機完成予想図；クリーンコールパワー研究所ご提供)

2006年度シンポジウム報告

藤井健太郎

FUJII Kentaro

2006年度のシンポジウムは、2007年3月1日(木)午後1時より4時まで、法政大学市ヶ谷キャンパス ボアソナード・タワーの会議室にて24名の参加者を集めて開催された。

今年度は、ガスタービンとの複合サイクルを構成して、革新的な高効率運転を実現し得ることで近年関心が高まっている燃料電池について、その最新の知識を得ることを目的に、「ガスタービンと共用のある燃料電池について」という全体テーマでシンポジウムを企画した。テーマに沿って1講演あたり30分間の講演を4件お願いし、最後に50分間程度の質疑応答の時間を設けた。

1件目の講演は「マイクロガスタービンと燃料電池」と題し、東京大学の笠木伸英先生より、燃料電池の原理とシステム概論の説明から、燃料電池製作技術への数値解析の導入など幅広い提唱がなされた。マイクロガスタービン(MGT)と高温作動型燃料電池を用いたシステムでは、MGTは圧縮空気をSOFCに供給する仕事があるものの、MGTの占める発電量はシステム発電量全体の2割から1割程度が最適としており、大型GTCCとは大きく異なることが指摘された。

続いて電力中央研究所の吉葉史彦氏より「MCFC-GT

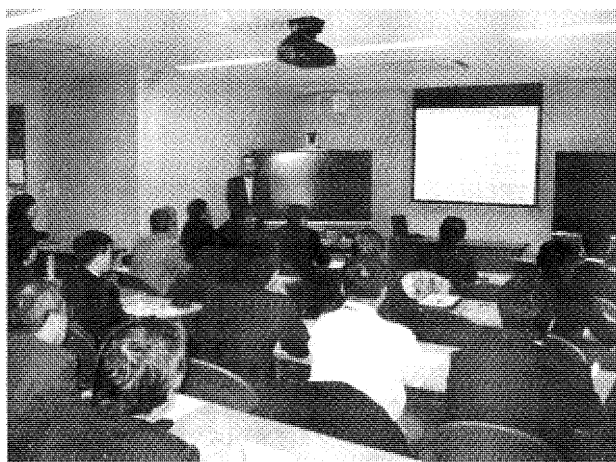
コンバインドシステムの運用実績および高効率MCFC/GTハイブリッドシステムの性能」と題し、溶融炭酸塩形燃料電池(MCFC)を用いた300kW級システムの実機運転結果の紹介や、将来300MW級システムで純酸素を用いることで77%(LHV基準)の発電効率を目論む展望が論じられた。

次に、三菱重工業の古賀重徳氏より「大容量高効率SOFC複合発電システムの開発」と題された40kW級システムの実機運転結果から、現在製作中の200kW級システムへの展開、および石炭ガス化燃料を利用した60%超の高効率大規模発電の構想に関する紹介があった。

最後の講演は「閉空間パッシブ制御式燃料電池の研究」と題し、宇宙航空研究開発機構の曾根理嗣氏より、宇宙船への搭載を目指し自己発熱で自立して継続運転ができる固体高分子形燃料電池(PEFC)開発の説明があった。

最後に、ご多忙中、大変興味深いご講演をいただいた講師の方々、極めて好意的に準備にご協力下さった法政大学関係の方々、そしてご担当いただいた企画委員会各位および事務局に、深甚なる謝意を表したい。

(企画委員)



《第35回ガスタービン定期講演会・講演論文募集》

下記の日程で、日本ガスタービン学会（主催団体）と日本機械学会の共催による第35回ガスタービン定期講演会を、岐阜市で開催いたします。期日までに所定の手続により講演の申し込みをお願いします。

開 催 日 2007年（平成19年）9月19日(木)、20日(木)
開 催 場 所 長良川国際会議場
 岐阜市長良福光2695-2
 TEL 058-296-1200
 (HP: <http://www.g-ncc.jp>)
見 学 会 講演会にあわせて、9月21日(金)に、工場見学を予定しています。

講演申込締切 2007年（平成19年）5月21日(月)

講演原稿締切 2007年（平成19年）7月30日(月)

募 集 論 文

応募論文は、ガスタービン及びターボ機械に関する最近の研究で、未発表のものとします。

一部既発表部分を含む場合には未発表部分が主体となるものに限ります。ガスタービン本体及びその構成要素のみならず、補機・付属品、ガスタービンを含むシステム、ユーザーの実績等に関する論文、さらに共通する理論や技術に基盤を持つ技術分野（ターボチャージャー、蒸気タービンなど）からの論文も歓迎します。

講演者の資格

本会会員もしくは日本機械学会会員に限ります。

（1人1題目の制限はありません）

講演申込方法と採否の決定

学会ホームページ (<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/>) 上からの講演申込受付を予定しております。また従来の方法でも申込みできます。その場合には本号掲載の申込書に必要事項を記入し、日本ガスタービン学会事務局に郵送してください。郵便未着（事故）の場合もありますので、送付されたことを電話・FAX等でご連絡ください。

（先にFAXで申し込みを行った場合も、必ず申込書を郵送してください。）

締切後の申込みは受け付けません。

申 込 先

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13

第3工新ビル 402

(社)日本ガスタービン学会

TEL: 03-3365-0095 FAX: 03-3365-0387

講演発表の採否は日本ガスタービン学会（主催団体）において決定し、6月15日(金)までに結果を連絡する予定です。

講演原稿の提出

講演者は講演原稿を講演論文集原稿執筆要領（学会ホームページに掲載）に従って、A4用紙2～6ページで作成し、所定の講演論文原稿表紙と共に期限までに提出して下さい。提出された原稿はそのままの寸法で印刷し、学術講演会講演論文集（A4版）を作成します。原稿執筆要領および原稿表紙用紙は採否連絡時に同封してお送りします。

技術論文としての学会誌への投稿

- (1) 原稿執筆要領に記載の要件を満たす講演論文は、著者の希望により、講演会終了後に技術論文投稿として受理され、校閲を経て日本ガスタービン学会誌に掲載されます。技術論文投稿を希望される場合は、講演論文原稿提出時に原稿表紙の所定欄に希望ありと記入し、さらに技術論文原稿表紙、論文コピー2部、英文アブストラクトを添付していただきます。詳細は原稿執筆要領をご覧ください。
- (2) 講演者が日本機械学会会員であり、同学会出版物（論文集およびInternational Journal）への投稿を希望される場合は、日本機械学会の所定の手続きを経て投稿することとなります。

第14回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ（予告）

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

1. 日 時：2007年7月5日(木), 6日(金)
2. 場 所：宇宙航空研究開発機構（JAXA）航空宇宙技術研究センター
（東京都調布市深大寺東町7-44-1）
3. プログラム：
第1日目 午前：講義1件（ガスタービン概論）
午後：講義1件（ガスタービンと流体工学）
JAXAの講演 JAXAにおけるガスタービン研究紹介
見学会 JAXA 総合技術研究本部 航空宇宙技術研究センター
（ガスタービン関連研究施設等）
懇親会
第2日目 午前：講義2件（ガスタービンと伝熱工学，燃烧工学）
午後：講義2件（ガスタービンと材料工学，制御工学）
4. 参加概要：
 - (1) 定 員：80名程度
 - (2) 対象者：大学，高等専門学校，大学院在籍者ならびにガスタービン初心者 of 社会人

教育シンポジウムの詳細及び申し込み方法等は本誌5月号，ポスター及びホームページをご覧ください
(<http://wwwsoc.nii.ac.jp/gtsj/index.html>)

本ガスタービン教育シンポジウムに参加された方には受講修了証を発行いたします。

★ 今年度は関西地区における教育シンポジウムは開催いたしません。

2007年度第1回見学会および技術フォーラムのお知らせ

1, 日時 2007年6月1日(金曜日) 13:00~16:00

2, 場所 九州大学大学院工学研究院
伊都キャンパス ウェスト4号館
機械科学部門 9階大会議室(914号室)
〒819-0395 福岡市西区元岡744番地

3, テーマ
「ターボ圧縮機と燃料電池」

4, 見学会およびフォーラム

4.1, 受付及び主催者ご挨拶 13:00~13:10

4.2, フォーラム 13:10~15:00

(1) 「高圧力比遠心圧縮機の開発研究 -EFDとCFDの活用-」

九州大学大学院総合理工学研究院 教授 速水 洋氏

(2) 「軸流圧縮機の失速点近傍における非定常流動現象のEFD/CFDハイブリッド解析」

九州大学大学院工学研究院 教授 古川 雅人氏

(3) 「固体酸化物形燃料電池(SOFC)の多様燃料適用性と耐久性」

九州大学大学院工学研究院 教授 佐々木 一成氏

4.3, 見学会 15:00~16:00

(1) 九州大学 大学院工学研究院 機械科学部門
水素利用プロセス研究室

(2) 九州大学 大学院工学研究院 航空宇宙工学部門
推進工学研究室

(3) 九州大学 大学院工学研究院 機械科学部門
流体科学研究室

5, 交通

詳細は以下のWebサイトをご参照ください。

<http://suisin.jimu.kyushu-u.ac.jp/>

6, 参加要領

(1) 定員 50名(申込超過の場合は抽選し、結果を応募者全員にご連絡します。)

(2) 申込方法; 下記の申込書にご記入の上, FAX, 郵送又はE-mailにて学会事務局へお送り下さい。

申込み期限; 5月15日(火)

(3) 参加費 3000円 当日お支払い下さい。

2007年度第1回見学会および技術フォーラム参加申込書

(社)日本ガスタービン学会 行

申込締切日(平成19年5月15日(火))

開催日(平成19年6月1日(金))

FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095

氏 名			
勤務先			
勤務先 住 所	〒		
TEL		FAX	
連絡先	〒		
E-mail			

2007年度 第2回見学会のお知らせ

2007年度第2回見学会を下記の通り JAL エンジンテクノロジー(株)成田国際空港内エンジン整備工場で開催致します。奮ってご参加下さい。

1. 日 時

平成19年 6 月15(金) 13:30~16:30

2. 場 所

JAL エンジンテクノロジー(株)
〒282-8610 千葉県成田市成田国際空港内
TEL 0476-32-4417

3. スケジュール

13:30~14:00

JAL エンジンテクノロジー(株)および航空用ガスタービンエンジンの整備についての概要説明

14:00~16:00

見学

航空用大型ガスタービン・エンジンについて

・分解組み立て

・部品修理

・試運転の状況

航空機の整備について

16:00~16:30

質疑応答

16:30 解散

4. 参加要領

(1)参加資格：ガスタービン学会員に限る。

(2)定 員：30名程度（申し込み多数の場合は抽選を行い、結果は全員にお知らせします。）

(3)参加費：¥3,000

(4)集合場所：後日、参加者にご連絡します。

(5)交通手段：後日、参加者にご連絡します。

(6)申込方法：下記の申込用紙にご記入のうえ 5 月15日(火)までに FAX, 郵送または E-mail にて学会事務局にお送り下さい。

詳細は学会ホームページをご覧ください。

(<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/>)

見学会参加申込書

申込締切日 2007年 5 月15日(火)

開 催 日 2007年 6 月15日(金)

(社)日本ガスタービン学会 行 FAX: 03-3365-0387

TEL: 03-3365-0095

E-mail: gtsj@pluto.dti.ne.jp

氏 名			G T S J 会員番号	
勤務先				
勤務先 住 所	〒			
T E L			F A X	
連絡先	〒			
E-mail				

○ 本会共催・協賛・行事 ○

主催学協会	会合名	開催日・会場		詳細問合せ先
日本マリンエンジニアリング学会	第76回（平成19年度春季） 学術講演会	H19/05/15-16 東京海洋大学 越中島会館	協賛	日本マリンエンジニアリング学会 http://www.jime.jp
日本機械学会 関西支部	第289回講習会 表面分析・表層構造分析の 原理・方法と適用事例 －分析実習付き－	H19/05/24-25 (株)イオン工学研究所 1階セミナー室	協賛	日本機械学会関西支部 URL： http://www.kansai.jsme.or.jp/
日本機械学会	第12回動力・エネルギー技 術シンポジウム －循環型社会における動力 エネルギー技術－	H19/06/14-15 東京海洋大学 海洋工学部	協賛	日本機械学会 事務局 URL： http://www.jsme.or.jp/
日本鉄鋼協会	第191・192回西山記念技術 講座 －21世紀を拓く高性能厚板	H19/06/22, 26 西山記念館大ホール (神戸), 東京工業大 デジタル多目的ホー ル（東京）	協賛	日本鉄鋼協会 学会・生産技術部門事務局 育成グループ 植田, 金子 TEL：03-5209-7014, FAX：03-3257-1110, E-MAIL： educact@isij.or.jp
可視化情報学 会	第35回可視化情報シンポジ ウム	H19/07/24-26 工学院大学 新宿校舎	協賛	可視化情報学会 http://www.visualization.jp



まず初めに、今月号は現在の日本の社会が直面している様々な問題の一端の影響を受けて発行が遅れたことをお詫び致します。幸い大幅な遅延に至らず会員諸氏に本号をお届けすることができ、編集委員会一同安堵しています。

さて本号は、若干大げさと言うか、大それたと言うか、問題提起を意図した企画（ガスタービンの将来展望ーガスタービンは生き残れるか？ー）にしました。京都議定書で義務づけられた温室効果ガスの1990年比6%の削減目標に対して、日本は逆に2005年度排出量が8%も増加している状況にあることに代表されるように、環境負荷低減への厳しい取り組みが動力エネルギー・熱機関の分野に要求されています。このことへの対応如何では、優れた機関特性を有するガスタービンと言えども航空機用など一部の用途を除いて、他の新しい発電システム等との競合で敗退するのではないだろうか、との危機感から、動力エネルギー・熱機関におけるガスタービンの占める位置や将来展望について客観的に見つめてみる企画を考えました。すなわち、ガスタービンが将来生き残れるかどうかを、他機関と比較した優位性やガスタービンの持つ機構的特質・排ガス等の規制基準・技術の完成度、他機関との共生の可能性などを基に把握・考察して展望しようとするものです。

提案はしたものの、余りに大きなテーマなのでどのようにまとめるか、特に巻頭言はどなたに依頼するか、副会長の吉識先生が適任ではないか、企画が企画だけに各内容の執筆者の適任者はどなたにしようか、ガスタービンが生き残るためには将来を担う若い人材の教育や技術の伝承も欠かせない、等と検討し、以下のような内容でまとめることにしました。
*交通機関エンジン[航空機/船舶]、*発電設備[中/小型、コジェネレーションシステム、燃料電池、ガスエンジン、再生可能エネルギー]、*燃料多様化、*検討課題 [熱効率、

排ガス、出力/重量比、出力の絶対値、燃料の融通性、コスト(製造・運転・保守管理・SFC/燃費など)、安全性、設置・運用性、耐久性など]、*技術伝承/大学教育。

本号の各解説では、執筆された方々に様々な観点から忌憚らない見解を述べて戴きました。本企画は非常に大きな課題だけに、本号でガスタービンの将来展望がすべて語られ、また解決策が見つかるわけではありませんが、ガスタービンと地球環境・エネルギー問題を考える一助になれば幸いです。

最後に、本号の刊行に当たり、原稿締め切りが年始の多忙な時期であったにも関わらず、ご執筆をお引き受け頂いた各著者の方々、また本企画にぴったりな表紙写真をご提供いただいた山本先生に、厚くお礼申し上げます。なお本号の企画編集は、刑部委員（東京海洋大）、木下委員（ダイハツディーゼル）、服部委員（三井造船）と湯浅（首都大）が担当しました。（文責：湯浅）

〈表紙写真〉

ビチャン付近の砂漠
Desert near Shan-Shan

説明；中国の最西端に位置する新疆ウイグル自治区ビチャン付近の砂漠。中国の砂漠地帯は、地下に眠る豊富な石油・天然ガス資源を利用したエネルギー・発電基地として積極的に開発が進められつつあり、また、太陽光発電や風力発電の有望な立地環境と考えられるため、再生可能エネルギーの供給基地としても注目されています。ガスタービンの将来は、砂漠の開発にかかっているかもしれません。」

（提供：東京理科大学 山本教授）

だより

♣事務局 ☒ ♣

今年の東京の冬は、雪で周りが白くなることもなく、暖かな晴天に恵まれた毎日でした。立春過ぎて訪れる花粉症も昨年に引き続き花粉の量が少ないとかでマスクの人が増え始めましたが（もっとも風邪かもしれません）まだ余り大騒ぎはしていません。でもこの学会誌が皆様のお手元に届くころにはどのようなになっているでしょうか。

2月末が年度末の当学会は、この「事務局だより」を書かねばならない時期になると大騒ぎ。旧年度中に新年度の事業計画・予算を文部科学省に届け出たり、事業報告・決算のまとめ、そして新旧理事の引継ぎや会計監査の準備。評議員会・通常総会の準備等しなければならないことが目白押し。それに今年は12月に控えている国際会議の準備も加わります。普段でさえ、いろいろ大騒ぎの事務局ですからこの時期になると前にも書きましたが今でも相変わらず大きな紙にやらなければならないことを壁に張り、済んだものから消していくという超原始的な方法をとっています。アレは終わった、コレがまだと確認しながらやっています。

さて、3月より新年度がはじまって会費を収めていただく時期となりました。今年度は銀行引き落としの方は3月23日に貴口座より引き落としをさせていただきますので、通帳をご確認ください。「自動引き落とし」は、振り込み手数料は

学会負担で、わざわざ振込みに出かける時間も省けます。是非ご利用下さい。この手続きをなさっていない方は、お早めに手続きをしていただくか、または、学会宛ご送金くださいますようお願いいたします。

また、会告にもございますように4月5日に通常総会が開催されます。毎年お願いしておりますが、総会成立条件として、正会員の2分の1の出席者と委任状が必要です。

3月初めにも皆様のお手元にお届けしていますが、ご欠席の場合は委任状を必ず、事務局あてご返送下さい。この学会誌にもFAX用委任状が挟み込んでありますので、是非ご返送をお願いいたします。

また新しい年度に入ると、人事異動・卒業などで所属・住所など変わられる方も多くなります。所属・住所等の変更も事務局へご一報ください。

学会誌は2ヶ月に一度となりますが、学会のホームページ(www.soc.nii.ac.jp/gtsj/)には行事の会告など最新のご案内を掲載しておりますので、是非ご覧下さい。最近HP・メールを通しての情報伝達が多くなってきました。まだメールアドレスをご連絡いただいていない方は事務局宛お送りください。お知らせなど出来るだけ早く皆様の元へご連絡いたします。
[A]

まず初めに、今月号は現在の日本の社会が直面している様々な問題の一端の影響を受けて発行が遅れたことをお詫び致します。幸い大幅な遅延に至らず会員諸氏に本号をお届けすることができ、編集委員会一同安堵しています。

さて本号は、若干大げさと言うか、大それたと言うか、問題提起を意図した企画（ガスタービンの将来展望ーガスタービンは生き残れるか？ー）にしました。京都議定書で義務づけられた温室効果ガスの1990年比6%の削減目標に対して、日本は逆に2005年度排出量が8%も増加している状況にあることに代表されるように、環境負荷低減への厳しい取り組みが動力エネルギー・熱機関の分野に要求されています。このことへの対応如何では、優れた機関特性を有するガスタービンと言えども航空機用など一部の用途を除いて、他の新しい発電システム等との競合で敗退するのではないだろうか、との危機感から、動力エネルギー・熱機関におけるガスタービンの占める位置や将来展望について客観的に見つめてみる企画を考えました。すなわち、ガスタービンが将来生き残れるかどうかを、他機関と比較した優位性やガスタービンの持つ機構的特質・排ガス等の規制基準・技術の完成度、他機関との共生の可能性などを基に把握・考察して展望しようとするものです。

提案はしたものの、余りに大きなテーマなのでどのようにまとめるか、特に巻頭言はどなたに依頼するか、副会長の吉識先生が適任ではないか、企画が企画だけに各内容の執筆者の適任者はどなたにしようか、ガスタービンが生き残るためには将来を担う若い人材の教育や技術の伝承も欠かせない、等と検討し、以下のような内容でまとめることにしました。
*交通機関エンジン[航空機/船舶]、*発電設備[中/小型、コジェネレーションシステム、燃料電池、ガスエンジン、再生可能エネルギー]、*燃料多様化、*検討課題 [熱効率、

排ガス、出力/重量比、出力の絶対値、燃料の融通性、コスト(製造・運転・保守管理・SFC/燃費など)、安全性、設置・運用性、耐久性など]、*技術伝承/大学教育。

本号の各解説では、執筆された方々に様々な観点から忌憚らない見解を述べて戴きました。本企画は非常に大きな課題だけに、本号でガスタービンの将来展望がすべて語られ、また解決策が見つかるわけではありませんが、ガスタービンと地球環境・エネルギー問題を考える一助になれば幸いです。

最後に、本号の刊行に当たり、原稿締め切りが年始の多忙な時期であったにも関わらず、ご執筆をお引き受け頂いた各著者の方々、また本企画にぴったりな表紙写真をご提供いただいた山本先生に、厚くお礼申し上げます。なお本号の企画編集は、刑部委員（東京海洋大）、木下委員（ダイハツディーゼル）、服部委員（三井造船）と湯浅（首都大）が担当しました。（文責：湯浅）

〈表紙写真〉

ビチャン付近の砂漠
Desert near Shan-Shan

説明；中国の最西端に位置する新疆ウイグル自治区ビチャン付近の砂漠。中国の砂漠地帯は、地下に眠る豊富な石油・天然ガス資源を利用したエネルギー・発電基地として積極的に開発が進められつつあり、また、太陽光発電や風力発電の有望な立地環境と考えられるため、再生可能エネルギーの供給基地としても注目されています。ガスタービンの将来は、砂漠の開発にかかっているかもしれません。」

（提供：東京理科大学 山本教授）

だより

♣事務局 ☒ ♣

今年の東京の冬は、雪で周りが白くなることもなく、暖かな晴天に恵まれた毎日でした。立春過ぎて訪れる花粉症も昨年に引き続き花粉の量が少ないとかでマスクの人が増え始めましたが（もっとも風邪かもしれません）まだ余り大騒ぎはしていません。でもこの学会誌が皆様のお手元に届くころにはどのようなになっているでしょうか。

2月末が年度末の当学会は、この「事務局だより」を書かねばならない時期になると大騒ぎ。旧年度中に新年度の事業計画・予算を文部科学省に届け出たり、事業報告・決算のまとめ、そして新旧理事の引継ぎや会計監査の準備。評議員会・通常総会の準備等しなければならないことが目白押し。それに今年は12月に控えている国際会議の準備も加わります。普段でさえ、いろいろ大騒ぎの事務局ですからこの時期になると前にも書きましたが今でも相変わらず大きな紙にやらなければならないことを壁に張り、済んだものから消していくという超原始的な方法をとっています。アレは終わった、コレがまだと確認しながらやっています。

さて、3月より新年度がはじまって会費を収めていただく時期となりました。今年度は銀行引き落としの方は3月23日に貴口座より引き落としをさせていただきますので、通帳をご確認ください。「自動引き落とし」は、振り込み手数料は

学会負担で、わざわざ振込みに出かける時間も省けます。是非ご利用下さい。この手続きをなさっていない方は、お早めに手続きをしていただくか、または、学会宛ご送金くださいますようお願いいたします。

また、会告にもございますように4月5日に通常総会が開催されます。毎年お願いしておりますが、総会成立条件として、正会員の2分の1の出席者と委任状が必要です。

3月初めにも皆様のお手元にお届けしていますが、ご欠席の場合は委任状を必ず、事務局あてご返送下さい。この学会誌にもFAX用委任状が挟み込んでありますので、是非ご返送をお願いいたします。

また新しい年度に入ると、人事異動・卒業などで所属・住所など変わられる方も多くなります。所属・住所等の変更も事務局へご一報ください。

学会誌は2ヶ月に一度となりますが、学会のホームページ(www.soc.nii.ac.jp/gtsj/)には行事の会告など最新のご案内を掲載しておりますので、是非ご覧下さい。最近HP・メールを通しての情報伝達が多くなってきました。まだメールアドレスをご連絡いただいていない方は事務局宛お送りください。お知らせなど出来るだけ早く皆様の元へご連絡いたします。
[A]

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿 会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿 本学会編集委員会がテーマを定めて特定の個人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿 学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。

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

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

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

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

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

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

7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

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

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

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

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168
ニッセイエブロ(株) 制作部 編集制作課
E-mail: eblo_h3@eblo.co.jp
学会誌担当 佐藤孝憲

技術論文投稿規定

2005.12.8改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

- 1) 主たる著者は本学会会員であること。
- 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
- 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。

2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。

3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。

4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。

5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。

6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。

7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。

8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。

9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌 Vol.35 No.2 2007.3

発行日 2007年3月30日
発行所 社団法人日本ガスタービン学会
編集者 野崎 理
発行者 吉野 隆
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
(普)1703707
印刷所 ニッセイエブロ(株)
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2007, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

本会では下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(株)日本複写権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。（社外頒布用の複写は許諾が必要です。）

権利委託先：(中法) 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
電話 (03) 3475-5618 FAX (03) 3475-5619
E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿 会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿 本学会編集委員会がテーマを定めて特定の個人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿 学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。

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

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

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

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

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

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

7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

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

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

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

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168
ニッセイエブロ(株) 制作部 編集制作課
E-mail: eblo_h3@eblo.co.jp
学会誌担当 佐藤孝憲

技術論文投稿規定

2005.12.8改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

- 1) 主たる著者は本学会会員であること。
- 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
- 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。

2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。

3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。

4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。

5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。

6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。

7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。

8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。

9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌 Vol.35 No.2 2007.3

発行日 2007年3月30日
発行所 社団法人日本ガスタービン学会
編集者 野崎 理
発行者 吉野 隆
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
(普)1703707
印刷所 ニッセイエブロ(株)
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2007, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

本会では下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(株)日本複写権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。（社外頒布用の複写は許諾が必要です。）

権利委託先：(中法) 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
電話 (03) 3475-5618 FAX (03) 3475-5619
E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿 会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿 本学会編集委員会がテーマを定めて特定の個人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿 学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

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

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

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

8. 著作者は、学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。
9. 本会発行の著作物に掲載された記事、論文などの著作物について、著作権侵害者、名誉毀損、またはその他の紛争が生じた場合、当該著作者の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168
ニッセイエブロ(株) 制作部 編集制作課
E-mail: eblo_h3@eblo.co.jp
学会誌担当 佐藤孝憲

技術論文投稿規定

2005.12.8改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
 - 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌 Vol.35 No.2 2007.3

発行日 2007年3月30日
発行所 社団法人日本ガスタービン学会
編集者 野崎 理
発行者 吉野 隆
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
(普)1703707
印刷所 ニッセイエブロ(株)
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2007, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

本会では下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(株)日本複写権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。（社外頒布用の複写は許諾が必要です。）

権利委託先：(中法) 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
電話 (03) 3475-5618 FAX (03) 3475-5619
E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿 会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿 本学会編集委員会がテーマを定めて特定の個人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿 学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。

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

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

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

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

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

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

7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

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

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

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

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168
ニッセイエプロ(株) 制作部 編集制作課
E-mail: eblo_h3@eblo.co.jp
学会誌担当 佐藤孝憲

技術論文投稿規定

2005.12.8改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

- 1) 主たる著者は本学会会員であること。
- 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
- 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。

2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。

3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。

4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。

5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。

6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。

7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。

8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。

9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌 Vol.35 No.2 2007.3

発行日 2007年3月30日
発行所 社団法人日本ガスタービン学会
編集者 野崎 理
発行者 吉野 隆
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
(普)1703707
印刷所 ニッセイエプロ(株)
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2007, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

本会では下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(株)日本複写権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。（社外頒布用の複写は許諾が必要です。）

権利委託先：(中法) 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
電話 (03) 3475-5618 FAX (03) 3475-5619
E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600