

## 特集：GT 燃料多様化技術

## 「GT 燃料多様化技術」特集号によせて

佐藤 幹夫<sup>\*1</sup>

SATO Mikio

原油価格の国際指標であるニューヨーク商業取引所の米国産標準原油（WTI）先物価格は、2003年末には約30ドル／バレルであったが、2004年末には50ドルを超え、2005年8月末には取引所開設以来始めて、時間外取引とはいえ70ドル台／バレルと史上最高値を更新した。8月末の原油急騰の直接的な原因としては、メキシコ湾岸を襲ったハリケーン“カトリーナ”にあるが、原油価格高騰の基本的な要因としては米国の堅調な経済状況や、中国などの経済成長に伴うエネルギー需要の増大がある。2006年に入っても原油価格の高騰は続き、4月21日には75ドルを超えた。現在の石油の年間消費量は約300億バレルであるが、資源探査技術の進歩にもかかわらず、近年の石油発見量は年間数十億バレルにとどまっていることから、石油生産ピークの到来が現実味を帯びてきている。また、石油の確認埋蔵量は中東湾岸諸国が65%を占め、イランの核開発問題や、アフリカ最大の産油国（世界第10位）であるナイジェリアの反政府運動などによる地政学的リスクも増大している。また、クリーンで環境負荷の少ない天然ガスの需要も増大しており、国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LNGの輸入を開始した。これらのことからLNGについては05年の世界需要1億5千万トンが、2020年には約4億トンに達すると予想されている。現在、わが国は年間5,800万トンのLNGを輸入する世界最大のLNG輸入国であるが、将来的には日本が優位を保ってきたLNG市場でも資源争奪戦が激しくなるものと予想される。石炭についても可採年数は約160年（BP統計2005）とされるが、1993年に石油純輸入国に、1996年には原油純輸入国に転じた中国は、遠からず石炭についても純輸入国になるとの見方もあり、長期的には石炭の需給もタイトになるものと予想される。

このようなエネルギー資源を取り巻く状況の中、一次エネルギー供給の約96%を海外に依存するわが国のエネルギー安全保障の確保は、国の命運をかけたともいえる重要な課題である。

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。

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、長期的にみるとLNGの需給がタイトになる可能性もあり、ガスタービン用燃料の多様化は重要である。

ガスタービン燃料の多様化という観点から、これまでに実施された国家プロジェクトを振り返ると、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したものであり、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1,000kW級実証試験プラントにより行われた。

メタノールは分子式 $\text{CH}_3\text{OH}$ 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、特異な香気をもち、水および多くの有機溶剤に良く混和する。メタノールはLNGと同様、燃焼ガス中に $\text{SO}_x$ およびばいじんを含まないクリーンな燃料であるが、分子中に酸素を含んでいるため、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、メタノールは約0.8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、 $\text{NO}_x$ 発生量は低下する傾向にある。

メタノールが一酸化炭素と水素に分解する反応や、水と反応して二酸化炭素と水素に分解する改質反応は吸熱反応であるため、メタノール利用ガスタービンでは、メタノールの吸熱反応を利用して可能な限り熱回収を行うことにより、熱効率向上を図るシステム構成が考えられる。例えば、「メタノール分解型複合発電」では、メタノールの吸熱反応を利用した熱回収に加え、蒸気タービンとの複合発電サイクルを組み合わせることにより熱効率向上を図るシステムであり、タービン入口温度が1,300℃級の場合で、49.2%の効率（発電端、HHV基準）が期待できるとされる。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、発電単価はメタノール生焚き、メタノールガス焚き複合発電等、他のメタノール発電システムに比べて高くなるとされる。

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ために、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

原稿受付 2006年6月27日

\*1 財電力中央研究所 エネルギー技術研究所  
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

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)」プロジェクトを平成5年度から平成10年度にかけて実施した。本プロジェクトは、水力、太陽光、地熱および風力等の再生可能エネルギーを利用して水素を製造し、輸送に適した形に変換した後に、輸送・貯蔵し、発電、輸送用燃料、都市ガス等の広範な分野で利用する水素利用国際クリーンエネルギーネットワークの世界的導入を可能とする技術の確立を最終目標とするものであった。今からみると世界で最も先進的な水素関連プロジェクトであったといえる。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1,700℃級とし、発電効率60%以上(発電端, HHV 基準)を目標とした研究開発が実施された。

ガスタービンの歴史をひもといてみると、世界最初のガスタービンで用いられた燃料は石炭であったことがわかる。世界で最初にガスタービンの製作に成功したのは、ドイツのシュトルツェで、1872年のことであった(多管式、外燃式ガスタービン)。空気圧縮機もタービンも軸流多段の堂々たるものであり、現用のターボ・ジェットエンジンに酷似しているが、中央の加熱部だけが独特であり、この点は現用のものとは異なる。これは、燃料が石炭であり(当時は石油の使用は考慮外であった)、それはタービン装置に内包させられないので、外に出し、熱は管壁を通して圧縮空気に伝わるようにした。この点を除けば、現用のものと全く変わらない。本質は開放サイクルであり、空気は大気から吸い入れて、用済みのものは大気へ放出された。しかしながら、最初のガスタービンは回転圧縮機の性能が劣弱で、外に取り出せる動力がほとんど得られず、実用化に至らなかった。

その後、石油の時代を迎えるとともに、1930年にはイギリスのホイットル卿によるジェットエンジンの特許申請がなされ、第2次大戦中の1939年に人類最初のジェット推進による飛行が成功した。ジェット燃料を用いる航空用ガスタービンとともに発電用ガスタービンも重油等の液体燃料が用いられたが、天然ガスの利用拡大が図られるとともに、発電用ガスタービンの燃料は天然ガスが主流となった。わが国では東北電力(株)東新潟火力に1984年、東京電力(株)富津火力に1985年にLNG 焚き1,100℃級ガスタービンを用いる複合発電が導入され、本格的なLNGの時代を迎えることになった。その後のガスタービン技術の進歩は著しく、現在、事業用大型ガスタービンではタービン入口温度が1,500℃級に達し、蒸気タービンを組み合わせる排熱回収型複合発電としての熱効率は53%(発電端, HHV 基準)が得られる時代を迎えている。

ガスタービンは液体燃料や気体燃料を用いることはできるが、石炭やバイオマス、超重質油などを直接ガスタービン燃料として用いることはできない。しかしなが

ら、石炭やバイオマスなどをガス化することにより高効率なガスタービンシステムで使用することが可能となる。世界最初のガスタービンが石炭を燃料としていたこと(外燃式)はさておき、埋蔵量が豊富で価格の安い石炭の効率的利用は重要である。前述したように、わが国では年間発電電力量の約24%を石炭火力が賄っている。現在商用機として運転されている石炭利用発電には、微粉炭火力、大気圧の流動床燃焼発電(AFBC)、加圧型流動床燃焼複合発電(PFBC)などがあるが、そのほとんどがボイラ／蒸気タービンを用いる微粉炭火力である。微粉炭火力の蒸気条件は高温化・高圧化が進み、わが国では蒸気条件として25MPa, 600℃／610℃の超々臨界圧(USC)を用いるプラントが運転されており、発電端効率として44%(HHV 基準)に達している。

資源エネルギー庁石炭課は、2004年6月にクリーン・コール・サイクル(C3)研究会報告として、「2030年を見据えた新しい石炭政策のあり方―クリーン・コール・サイクルの確立に向けたC3イニシアティブ―」を発表した。本報告では、2030年以降のゼロエミッション社会の実現に向けて、ガス化技術を中核とする石炭利用技術の開発と、CO<sub>2</sub>分離・回収・固定化技術の開発を進めるとしている。

石炭利用発電の高効率化という観点から、国および電気事業は現在、空気吹き石炭ガス化炉を用いる250MW級石炭ガス化複合発電(IGCC)実証機建設を進めており、2007年度から運転が開始される予定である。ガス化剤に空気を用いる噴流床石炭ガス化燃料は、CO、H<sub>2</sub>および少量のメタン(CH<sub>4</sub>)を可燃性成分とし、燃料組成の約70%をN<sub>2</sub>やCO<sub>2</sub>などの不燃生成成分が占める。このため、燃料発熱量は約1,000kcal/m<sup>3</sup>Nと低く、天然ガスの約1/10である。空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料は、天然ガス(CH<sub>4</sub>)等の高カロリー燃料と異なり、不燃性成分を多く含むため、火災温度が低い。すなわち、天然ガス(CH<sub>4</sub>)の理論断熱最高火災温度は約2,200℃であるのに対し、石炭ガス化低カロリー燃料の場合は約1,700℃と500℃程度低い。これらのことから石炭ガス化燃料を用いるガスタービンでは、燃焼安定性の確保が重要である。

さらに、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NH<sub>3</sub>は除去されずに燃焼器に供給され、ガスタービンの燃焼過程でフェュエルNO<sub>x</sub>となるため、NH<sub>3</sub>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、フェュエルNO<sub>x</sub>低減燃焼技術の確立が重要となる。

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)根岸精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)に買電している。

また、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%、水素を約3%含み、発熱量が700～800kcal/m<sup>3</sup>N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の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環境問題を背景に、バイオマス由来の液体燃料製造が盛んである。ガソリン

代替としてのバイオエタノールや、軽油代替としてのバイオディーゼル燃料など製造、利用が世界的に進んでいる。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。バイオ燃料は主として自動車用燃料としての利用が想定されているが、低コストで大量に製造することが可能になれば、ガスタービン燃料としての利用も当然考えられる。

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発電の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進展に期待したい。

特集：GT 燃料多様化技術

## 汚泥消化ガス焚き Dual-Fuel GT 発電装置の開発

樽井 真一<sup>\*1</sup>  
TARUI Shinichi小山 正道<sup>\*1</sup>  
KOYAMA Masamichi

キーワード：Dual-Fuel, Digester gas, Combustor, Gas Turbine (Niigata Gas Turbine NGT2BC)

## 1. はじめに

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したガスは、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 削減や余剰エネルギーを有効利用できるバイオマスとして、近年ガスエンジンやガスタービンの燃料に利用されている。

全国で1,000箇所強ある下水処理場のうち、下水汚泥の嫌気性消化工程にて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箇所ある。しかしながら、そのほとんどは数百kWクラスのスラッジエンジンであり、国内では1000kW級のガスタービンによる消化ガス発電は無い<sup>1)</sup>。下水処理場の消費電量は国内総電力使用量の約0.6%あり、汚泥消化ガス発電によりエネルギー自給率を高めることが期待されている<sup>2)</sup>。

また、このような未利用燃料の有効利用は、エネルギー消費量削減、CO<sub>2</sub>排出量削減のほか、複数電源確保による処理場運営の信頼性向上などにも利点がある。

本稿では、低位発熱量21MJ/Nm<sup>3</sup>以下の汚泥消化ガスおよび灯油を燃料として利用できるガスタービン燃焼器の開発とそれを利用したガスタービン発電装置について

述べる。ガスタービンの場合は、連続燃焼であることから多種燃料への対応が比較的容易であり、消化ガスと灯油 (液体燃料) のデュアルフューエル化を図ることで、防災兼用常用発電装置としての利用等、用途の拡大が可能となる。

## 2. 消化ガス発電装置の概要

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1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、脱硫し、一旦ガスタンクに貯留された後、シロキサンを除去し、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。発電装置で得られた電力は下水処理場に返される。

## 3. 汚泥消化ガスの性質

汚泥消化ガス組成を表1に示す。主にメタンガス (CH<sub>4</sub>) と二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) からなり、低位発熱量はおおよそ21MJ/Nm<sup>3</sup>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ている。シロキサンは、燃焼により二酸化珪素 (SiO<sub>2</sub>) を生成し、タービン高温部品の冷却

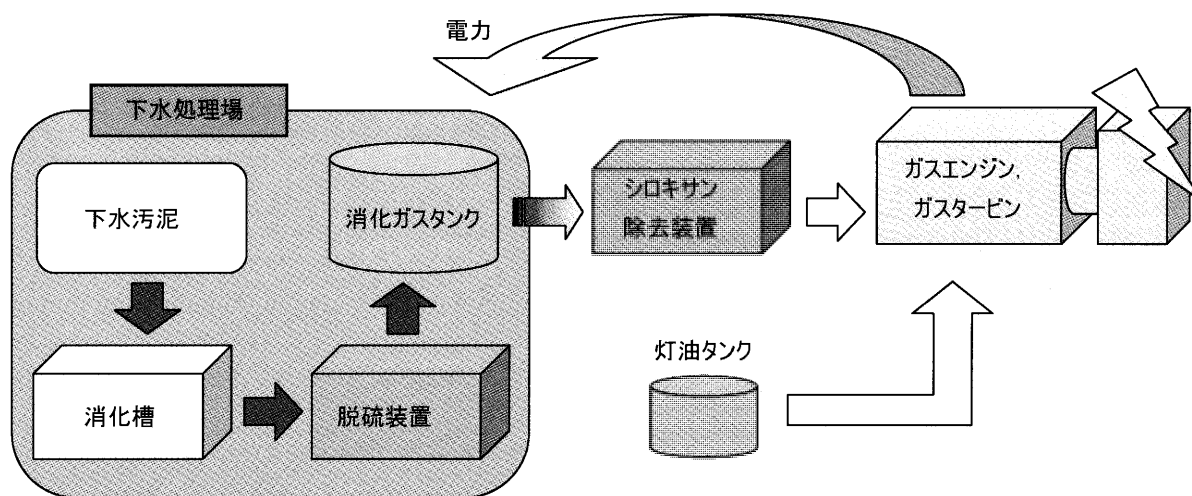


図1 汚泥消化ガス発電プロセスフロー

原稿受付 2006年7月19日

\*1 新潟原動機株式会社

〒957-0101 新潟県北蒲原郡聖籠町東港5-2756-3

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ことから、シロキサン除去装置が必要となる。なお、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無いと考えられる。

表1 汚泥消化ガス組成

単位: vol%

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

また、汚泥消化ガスは、以下の4項目に代表される燃焼に悪影響を及ぼす特徴を持つ。第一に、発熱量が都市ガスの約半分である。ガス燃料増加によりガス燃料供給装置の大幅な変更が必要になる。第二に、比重が約1.0と重い。ガス運動量の上昇によりガス噴出方法の変更が必要である。第三に、燃焼速度が都市ガスの約半分であることから、保炎性の悪化が予想される。最後に、多量に含まれるCO<sub>2</sub>などの不活性ガスは、燃焼領域の火炎温度を低下させる。化学反応解析による灯油と消化ガスの燃焼領域の平衡断熱火炎温度を図2に示す。燃焼領域の当量比において、灯油に比べ約200℃の断熱火炎温度の低下が予想された。従って、消化ガス燃焼の場合には、燃焼領域に流入する空気を少なくして、燃焼領域の当量比を上げる必要がある。

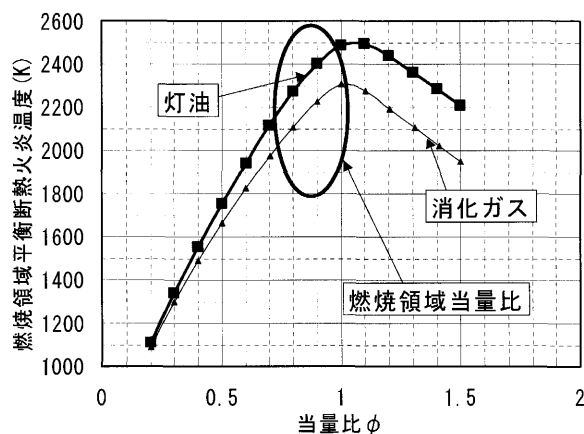


図2 消化ガスの平衡断熱火炎温度

#### 4. ガスタービン機関

ガスタービン機関は1500kW級常用ガスタービンとして実績のあるNGT2BCをベースに、消化ガスおよび灯油による運転が可能なものとした。

ベースのNGT2BCは、都市ガスと灯油の両方の燃焼に対応できる機関であり、遠心2段圧縮機、軸流3段タービンおよび単筒缶形燃焼器からなる。ガスタービン機関本体を図3に、燃焼器構造を図4に示す。

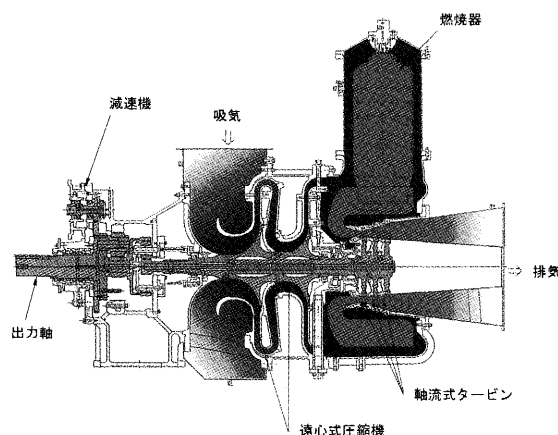


図3 ガスタービン本体断面図

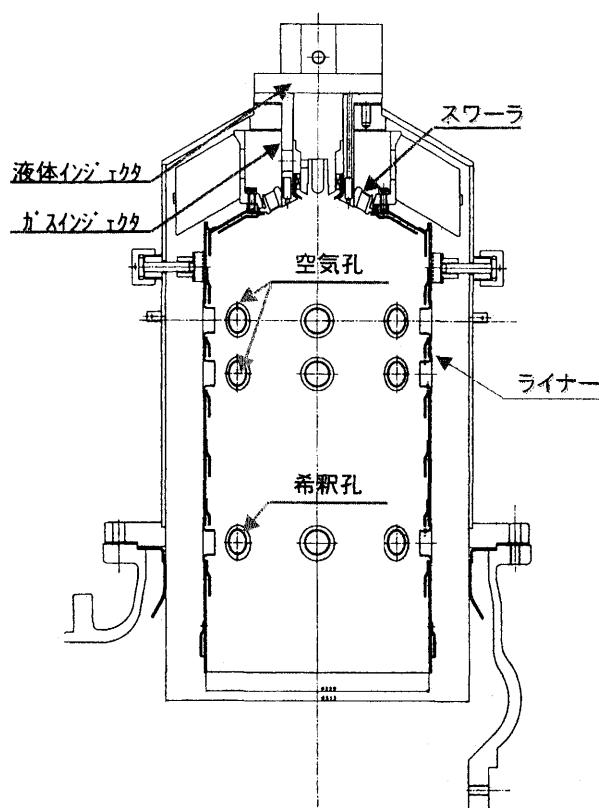


図4 燃焼器構造

#### 5. 消化ガス燃焼器の開発

開発はCFD (Computational Fluid Dynamics) による事前検討、大気圧燃焼試験および実機搭載試験によって行われた。試験に使用する燃料ガスは、都市ガス13AとCO<sub>2</sub>を混合して消化ガスを模擬し、低位発熱量18MJ/Nm<sup>3</sup>程度とした。前述のように、消化ガス燃焼器開発における重要なポイントは次の二点である。

- ①燃料ガス噴出方法と空気スワラのマッチング
- ②燃焼器内滞留時間の増加

そこで、CFD解析により燃料と空気の混合がより促進される適切なガス噴出方法を検討し、燃焼試験によりそのガス噴出方法と空気スワラのマッチングを試験し、

高燃焼効率および高い保炎性となるマッチングを見出した。

また、消化ガスの燃焼速度が低いため、燃焼器直径を増加することにより、燃焼器代表流速を減少させ、燃焼器内の滞留時間を従来よりも長くした。

### 5.1 ガス噴出方法

三種類のガス噴出方向を検討し、燃焼試験に供試した。一つは旋回成分を持たないもの（直進方向）、そして空気スワール旋回方向に対して順方向および逆方向の旋回を与えた場合である。三種類のガス噴出方向における燃料ガス濃度のCFD結果および燃焼試験時の火炎の様子を図5に示す。

直進の場合のCFD結果によると、ライナー中心部に非常に燃料の濃い領域が存在している。また、燃焼試験時の火炎も暗く不安定なものとなった。順旋回の場合は、ライナー外側に燃料が偏っており、火炎もまた外側で明るくなった。一方逆旋回の場合は、ライナー全体に均一に燃料が広がっており、火炎も明るく安定したものとなった。以上のことから、逆旋回のガス噴出方法は燃料と空気の混合を促進させる事が分かる。

燃焼試験における消化ガス燃焼時の燃焼効率を図6に示す。三種類のガス噴出方法における燃焼効率は、明らかな違いを示した。直進の場合、低負荷域での保炎性が悪く、全体当量比 $\phi = 0.17$ 付近から急激に燃焼効率の低

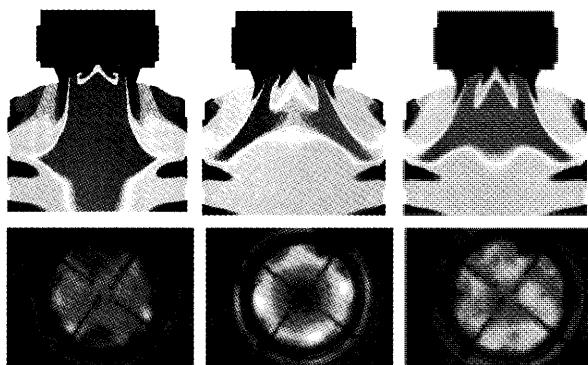


図5 燃料濃度分布CFD結果および火炎写真

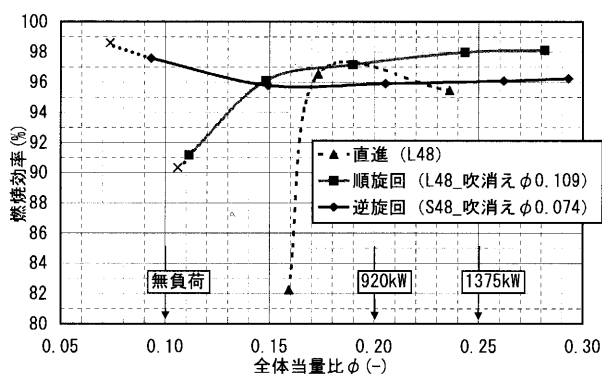


図6 消化ガス燃焼時の燃焼効率

下が見られた。順旋回と逆旋回を比較すると、低負荷域では逆旋回の方が効率も高く、吹消え限界（×印）も低負荷側へ移動している。以上のことから、直進のガス噴出方法は消化ガスには適さないと判断した。

### 5.2 ガス噴出方法とスワールのマッチング

次に、ガス噴出方法が順旋回と逆旋回の場合に、より高い燃焼効率を得るスワールの組合せについて、スロット面積とスワール数の違う数種類のスワールを燃焼試験に供試し、燃焼効率や希薄側の保炎性を確認した。

図7にスロット面積を同等にして、スワール数を変えた場合の試験結果を示す。供試スワールの仕様を表2に示す。順旋回の場合にはスワール数の大きい方が高効率であり、逆旋回ではスワール数の小さい方が高効率となった。逆旋回の場合の吹消え限界（×印）が順旋回より低当量比側にあることから、逆旋回の場合の保炎性は希薄側で良好であることを示した。

これらの結果より、ガス噴出方法とスワールの組合せは、燃焼効率や希薄側の保炎性に影響を及ぼすことが分かった。

表2 供試スワール仕様

スワールID	スワール数	旋回角度	スロット面積
S48	1.15	48度	10.8 cm <sup>2</sup>
L58	1.59	58度	11.7 cm <sup>2</sup>

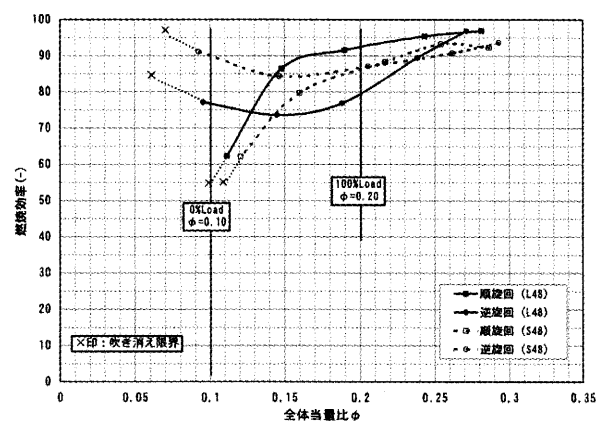


図7 スワール数の影響

### 5.3 燃焼器内滞留時間の増加

燃焼器直径を大きくすることによる滞留時間増加の効果をCFD解析により確認した。軸方向速度分布の解析結果を図8に示す。燃料噴出方法は、低負荷側での保炎性の良い逆旋回とした。図8にて、再循環流を示す色の濃い領域はライナー径を増大した場合（太胴径）に広がっており、太胴径燃焼器は標準径よりも長い時間かけて燃焼することができると考えられる。また空気孔より下流の速度が標準径より減少していることも、燃焼器内の滞留時間の増加となり、消化ガス燃焼にとって有利で

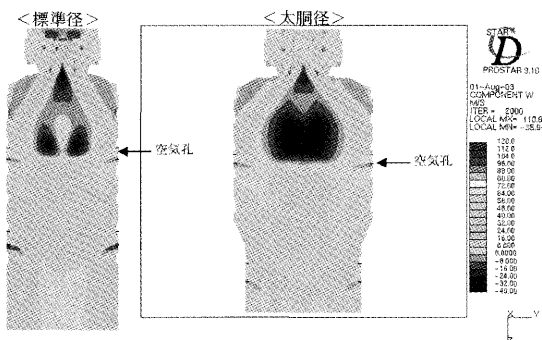


図8 軸方向速度分布

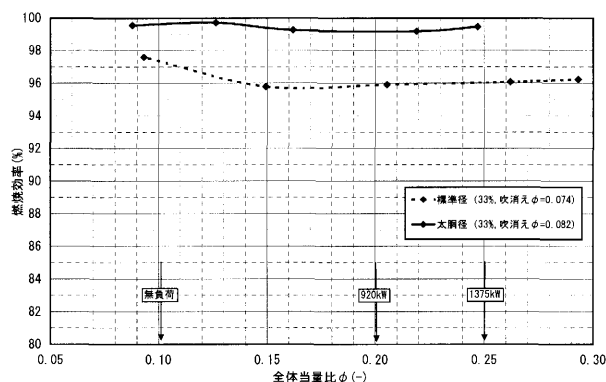


図9 ライナー径の影響

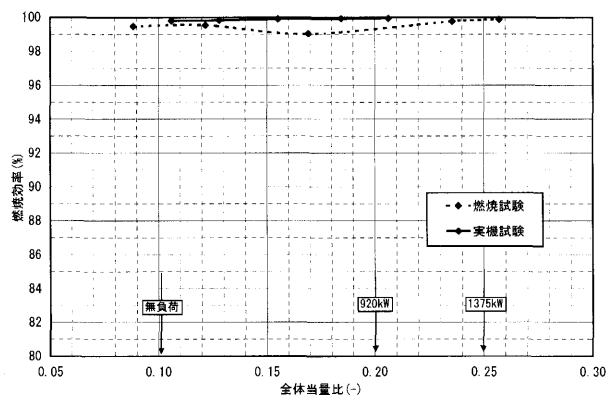


図10 太胴径ライナー実機試験結果

ある。

ライナー内径の増大に伴う燃焼器性能への影響を燃焼試験にて確認した結果を図9に示す。燃焼領域空気配分を一定としてライナー径増大だけで、燃焼効率はおよそ3%上昇した。

#### 5.4 太胴径ライナー実機試験

試験結果を図10に示す。燃焼試験の結果も点線にて併記した。初回実機試験結果と同様に実機試験の燃焼効率は燃焼試験よりも高くなった。また、太胴径燃焼器については、全範囲の負荷において99.8%以上の高い燃焼効率を得た。

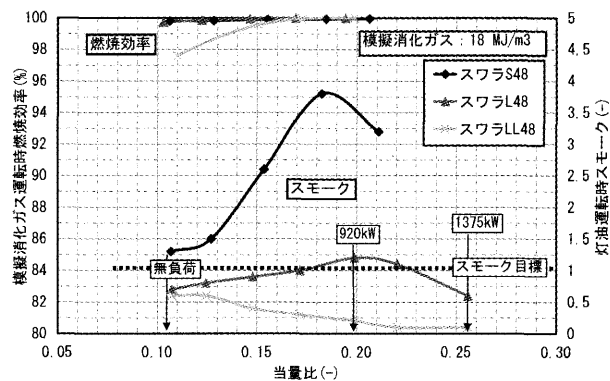


図11 太胴径ライナー実機試験結果

#### 5.5 デュアルフューエル仕様の検討

前項までにおいて、消化ガス良好的な燃焼が実現出来た。しかしこの燃焼器で灯油運転した時、スモーク排出量が過大となった。これは、消化ガスを良好に燃焼するため、燃焼領域の当量比を上げたことによるものである。スモーク排出を抑えるため、消化ガス燃焼性能の極端な悪化の無い範囲で、スワラの微調整により燃焼領域の空気配分を調整した結果を図11に示す。逆旋回ガス噴出で最も燃焼効率の良かったスワラ (S48) の場合、灯油運転時のスモーク排出量は非常に多かった。スモーク低減の為にスワラのスロート面積を1.4倍まで大きくすると (L48)、スモーク排出量は大幅に低減したが、中負荷域でスモークは上昇傾向を示した。そこで、さらにスワラのスロート面積大きいスワラ (2.0倍 LL48) にて実機運転を試みた。その結果、スモーク排出量は目標レベル以下となった。また、このスワラ (LL48) における消化ガス燃焼効率は低負荷側でも約98%以上の高い値を維持した。

#### 6. 下水処理場での運用

今回開発した燃焼器を搭載したガスタービン発電装置は既に下水処理場に納入され、そこで発生する汚泥消化ガスを燃料とする運転および灯油での運転において良好な運転性能を達成している。

この下水処理場の発電システムは、常用ガスエンジン発電装置と今回開発したデュアルフューエル・ガスタービン発電装置が併設されており、ガスタービンは二機一軸化したツイン機で発電出力は消化ガス燃料使用時1840kW、灯油使用時2750kWである。

発電装置断面図を図12に示す。

また、この発電システムには、ガスエンジン／ガスタービン共用のシロキサン除去装置が設置されている。この装置は活性炭を用いてシロキサンを吸着させるものであり、発電装置入口においてシロキサンをほぼ100%除去している。

現地で計測した燃焼効率、灯油運転時のスモークおよびNO<sub>x</sub>性能を図13、14に示す。消化ガスの場合の燃焼

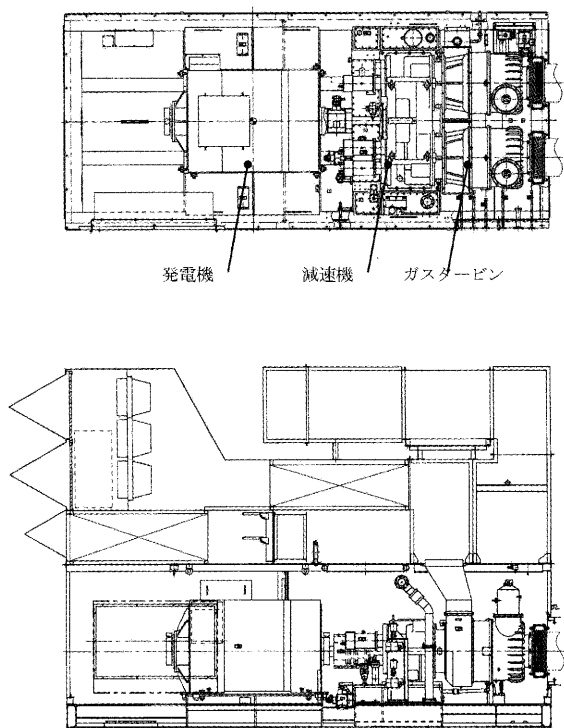


図12 ガスタービン発電装置断面図

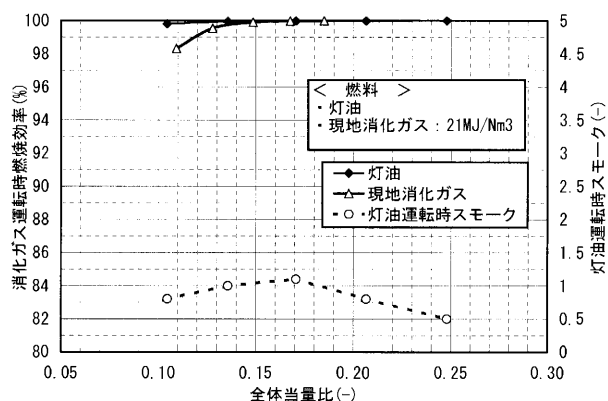


図13 燃焼効率, スモーク (実用運転)

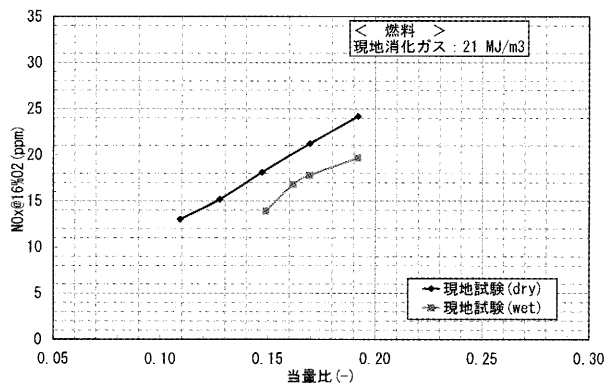


図14 NOx 性能 (実用運転)

効率は98%以上となっており, また灯油運転は全運転範囲において高燃焼効率および可視出来る範囲以下のスモーク排出を達成している。NOx 性能については, 実測で24ppm@16%O<sub>2</sub>であった。

## 7. まとめ

燃焼特性の大きく異なる汚泥消化ガスと灯油の両方を良好に燃焼できるガスタービン燃焼器を開発した。開発におけるポイントは, 下記の二点であった。

- ①燃料ガスに空気スワラの旋回方向と逆向き方向の旋回を与えることにより燃料と空気の混合を促進した。
- ②燃焼器径を増大することにより, 燃焼器内の滞留時間を長くし, 消化ガス燃焼時の燃焼効率を向上した。

開発した燃焼器を搭載したガスタービン発電装置は, 下水処理場にて既に2年以上運用しているが, 現在までシロキサン等の消化ガスに含まれる有害物質による損傷等の問題は無く, 安定して運用を継続している。

## 謝 辞

本開発を進めるにあたり, 貴重なご助言を頂いた石川島播磨重工業株式会社 技術開発本部 基盤技術研究所様に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) 小林英夫: 低 NOx 燃焼技術を用いたバイオガス燃焼について, ガスタービン学会誌, Vol.29, No.6 (2001) pp.453-458.
- (2) 宇美史郎: 汚泥消化ガスを利用したエネルギーシステムの開発と市場展望, 汚泥消化ガスを利用したエネルギーシステムの開発事例講習会テキスト, (株)技術情報センター, pp.1-8
- (3) 吉田邦夫: 油燃焼の理論と実際, (財)省エネルギーセンター, pp.75.
- (4) 佐々木正史: 排気規制の動向 付録 規制値単位換算法, GTSJ, 23-89 (1995) pp.28-29.
- (5) A.H.Lefebvre: ガスタービンの燃焼工学, 日刊工業新聞社, pp.569.
- (6) 小山正道, 藤原弘: 低カロリーガス焼き Dual-Fuel 型燃焼器の開発, ガスタービン学会誌, Vol.34, No.1 (2006) pp.41-46.



特集：GT 燃料多様化技術

# 木質系バイオマスによる小規模分散型高効率ガス化発電システムの開発

山田 健一\*<sup>1</sup>  
YAMADA Kenichi

渡辺 達也\*<sup>1</sup>  
WATANABE Tatsuya

キーワード：ガスタービン、バイオマス、ガス化、低カロリーガス、タール  
Gas turbine, Biomass, Gasification, Low calorific value gas, Tar

## 1. はじめに

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、建築廃材などがある。その中で特に発生量が多い製材所木屑や林地放置材は、山間部に存在し、集積度が低いいため有効な利用が図られていない。

現状の木質系バイオマス利用は、小規模の場合、燃料ペレット製造や木炭化などによって利用されており、大規模な利用は、木屑焚きボイラを使用し蒸気発生による電力、熱利用を行っている。このボイラ蒸気タービンシステムでは、大規模設備でないと発電効率が低く、設備単価が高いため、相当量のバイオマス燃料確保が必要となる。しかしながら、山間部に広く遍く分布し嵩高い木質系バイオマスを経済的に収集する手段が無く、また、収集できたとしてもそのエネルギーを利用する需要が少ないため、それらを利用した大規模設備の設置が難しいのが現状である。

このような未利用の木質系バイオマスの有効利用を図るためには、その集積量・エネルギー需要量に見合った小規模で高効率な設備の普及が不可欠である。特に、木質系バイオマスエネルギーを利便性の高い電気エネルギーに変換する発電設備が必須となるが、従来技術ではこのような小規模設備において経済的に適合する発電効率を達成することは難しく、現実に発電システムとして設置されている例は限られている。

本研究開発は、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、従来に比べ効率的かつ経済的に有用エネルギーに転換可能な小規模分散型発電システムの開発を目的とし、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）殿によるバイオマスエネルギー高効率転換技術開発の一テーマとして2002年に採択された。

本稿では、開発システムの概要と研究開発内容を紹介する。

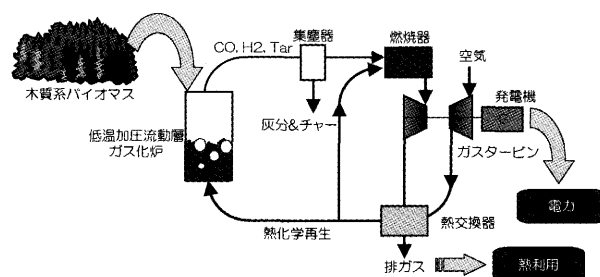


図1 加圧流動層ガス化発電システムの概略

## 2. 開発システムの概略

図1に開発システムの概略を示す。

開発システムは、木質系バイオマスを加圧流動層ガス化炉により650℃程度の比較的低い温度でガス化し、可燃性ガスおよびタール分を含む生成ガスをそのままの温度・圧力でガスタービン燃焼器に導き燃焼させ、その燃焼ガスをガスタービンで膨張させ発電を行う。さらに、ガスタービン圧縮空気の一部は、熱交換後、流動層ガス化炉に導入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。

具体的なシステムの特長を以下に説明する。

### 2.1 熱化学再生の利用

図2に各種燃料の水蒸気改質による発熱量増加割合と改質温度との関係を示す。

アルコールやバイオマス、石油などの有機化合物は、改質が行われる温度が比較的低く、改質温度が上昇するに従い発熱量の増加割合が大きくなる。ここで発熱量の増加量とは、熱エネルギーを吸収して化学エネルギーに変換される改質反応の吸熱量であり、改質温度とは改質反応が開始する温度を示しており、低い改質温度であるほど低い温度の熱エネルギーを利用することができることを意味している。<sup>(1)</sup>

バイオマスは、石炭などの固体燃料に比べてガス化反応温度が低く、600Kを越えるとガス化反応が進行することがわかる。これに対して、石炭のガス化には高温熱エネルギーが必要で、本来そのまま仕事に変換できる割合が高い、エクセルギー率の高い熱源を必要とする。

原稿受付 2006年7月7日

\*1 カワサキプラントシステムズ(株)  
プロジェクト開発総括部新規プロジェクト推進グループ  
〒650-8670 神戸市中央区東川崎町3-1-1

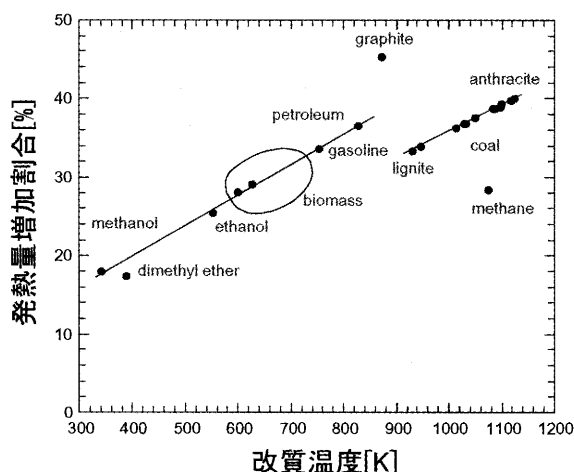


図2 各種燃料の発熱増加割合と改質温度の関係

つまり、バイオマスのガス化にはエクセルギー率の低い、仕事をした後の排熱でガス化ができるという利点がある。

これはバイオマスが石炭に比べエクセルギー的に優れた燃料であることを意味しており、仕事をした後のエクセルギー率の低いエンタルピーで、水素や一酸化炭素といったエクセルギー率が高い燃料を生成することが出来る性質をもっており、その熱化学再生による発熱増加割合は、25～30%も保有しているといえる。

具体的に本システムの例によりその効果を説明する。

一般にガス化反応では、ガス化剤の一部を燃焼し反応温度を維持する必要がある。

本システムでは、システム規模と流動層温度の設定にもよるが、約35%のバイオマスを燃焼させる必要がある。この時、系の放熱損失を、供給バイオマス熱量の約6%とし、熱化学再生がないとすると

$$\begin{aligned}\text{冷ガス効率} &= 100\% - \text{部分燃焼割合} 35\% - \text{放熱損失} 6\% \\ &= 59\%\end{aligned}$$

となりシステムで得られる最大の冷ガス効率は、59%しか達成できない。

本システムでは、ガスタービンの排熱によりガス化空気を予熱しこの熱により熱化学再生による発熱量増加割合25%を利用するため

$$\begin{aligned}\text{冷ガス効率} &= (100\% - \text{部分燃焼割合} 35\%) \times \text{熱化学再生} \\ &\quad 125\% - \text{放熱損失} 6\% \\ &= 75\%\end{aligned}$$

となり冷ガス効率は最大で75%が達成できる。

このように本システムは、バイオマスのエネルギー変換システムをケミカルヒートポンプとしてとらえ、ガスタービンによる排熱を利用し熱化学再生を行い、ガス化に必要な650℃程度の低い温度で高効率の冷ガス効率を達成することを特徴としている。

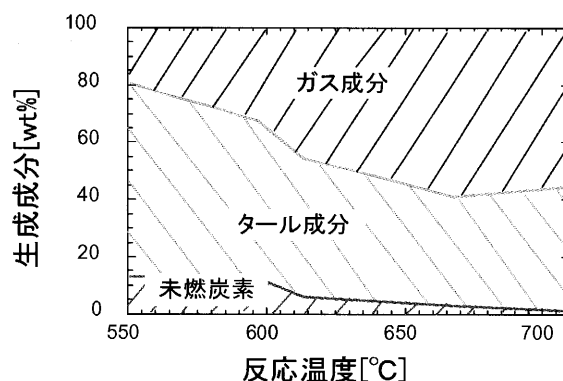


図3 バイオマス水蒸気改質による反応温度と生成成分

## 2.2 タール成分のエネルギー有効利用

しかしながら、バイオマスを低温でガス化すると、バイオマスの炭化水素成分が高分子状態でガス化し、これがタール成分となる。

図3にバイオマスの水蒸気改質により生成したガスとタール成分、炭素の重量割合と反応温度との関係を示す。<sup>(2),(3)</sup>

図3では、反応温度が高いほどタール成分、未燃炭素(char)は減少しガス成分が多くなる。未燃炭素は600℃程度までの反応温度では10%を越えるが、600℃以上になると急激に減少し、650℃では3%以下となり、発熱量の3%程度になる。タール成分は、650℃においても約40%程存在している。

タールは、ガス化した場合に生成する可燃性の高分子炭化水素であり、冷却に伴いガス化ガス中の高沸点成分が凝縮・液化し、粘性が強いいため付着や閉塞によるハンドリングトラブルを起こす。

このため、従来のガス化システムでは、このタール成分の生成を出来るだけ少なくするため、高温でガス化を行っている。高温でガス化すると、ガス化ガスの持つ顕熱が大きくなり、冷ガス効率はそれだけ低くなる。また、生成したガス化ガスをガスエンジン等で冷却して用いる場合はタールを除去する必要がある、顕熱及びタール成分の持つ化学エネルギーの損失となる。

タルの除去方法としては、水洗除去、フィルターでの分離、触媒での分解等が行われている。しかしながら水処理、フィルターの洗浄、触媒の再生といった操作が必要となり、運転を複雑にし、設備費を増加させる。

本システムは、ガスタービン燃焼器と同じ圧力の加圧流動層ガス化炉によりバイオマスをガス化し、冷却することなくガスタービン燃料に利用することにより、生成ガス中のタール成分除去が不要で、ガスの保有している熱エネルギーおよび化学エネルギーを全て熱機関に利用することができ、バイオマスのエンタルピーをより多く利用することができる。<sup>(4)</sup>

上記の熱化学再生の利用とタール成分のエネルギー有効利用により、小規模分散型発電においても冷ガス効率

75%以上を達成し、発電端効率を20%以上にまで高め、従来技術であるボイラ・蒸気タービン発電方式による10%程度の発電端効率より遙かに高いエネルギー転換効率を達成できる。

冷ガス効率=発生ガス発熱量÷投入バイオマスの発熱量

発電端効率=発電量÷全入熱量

### 3. 研究開発の内容と目標

本システムの研究開発の内容は、次の項目である。

#### (1) 流動層ガス化反応特性等試験研究

加圧流動層においてバイオマスを流動化しガス化を行うため、流動化特性、ガス化反応、飛散ダスト性状等をラボスケール試験炉、ベンチスケール試験設備にて研究する。

#### (2) 生成ガス利用に関する要素技術の開発

流動層ガス化炉で発生するバイオマス中の灰分、未燃炭素などの飛散ダストを連続除去するフィルターと、比較的低温の生成ガスを安定的に燃焼させるガスタービン燃焼器を開発する。

#### (3) 実用化研究

ベンチスケール試験設備のガス化炉やガスタービン燃焼器などから実用規模へのスケールアップ方法やシステム連系、制御方法を確立し実用化を図る。

#### (4) システムの普及・波及効果の研究

バイオマスエネルギーの分布量を把握、製材所、木工加工所などでのエネルギー需要量を把握し小規模分散型システムの適正規模、開発システムの導入可能性、実機要求等を調査把握し実用化を図る。

本システムの研究開発は、小規模で、冷ガス効率75%以上、発電端効率20%以上を目標とする。

この時、発電量は、たとえば処理量890kg/h (Wet Base, バイオマス水分30%) にて発電量約650kW 程度となる。

### 4. 研究開発体制とスケジュール

本研究開発を効果的に推進するために、川崎重工業株式会社と財団法人エネルギー総合工学研究所が共同して研究開発を行った。川崎重工業株式会社は主としてシステム構成要素機器の技術開発およびベンチシステムの運転研究を行い、財団法人エネルギー総合工学研究所は主としてシステムの技術的および経済的評価並びに市場導入普及およびその波及効果に関する調査研究を行った。

また、流動層ガス化にかかわる基礎反応研究のために東京農工大学 堀尾正勲教授、東京大学 堤敦司助教授、システムの普及・波及効果の研究のために高知県森林局 殿、島根大学 小池浩一郎助教授のご協力を仰ぎ研究開発を効率的に推進した。

本研究開発の全体スケジュールを表1に示す。

2003年度からベンチスケール試験設備(図4参照)により試験研究を実施した。ベンチスケール試験はPhase1からPhase3までの3段階で進めた。

表1 全体研究開発スケジュール

開発項目	2001年度 (H13年度)	2002年度 (H14年度)	2003年度 (H15年度)	2004年度 (H16年度)
1. 流動層ガス化反応特性等試験研究		ラボ試験	ベンチ試験	
2. 生成ガス利用に関する要素技術の開発		ラボ試験	ベンチ試験	
3. 実用化試験および研究				
4. システムの普及・波及効果の研究				

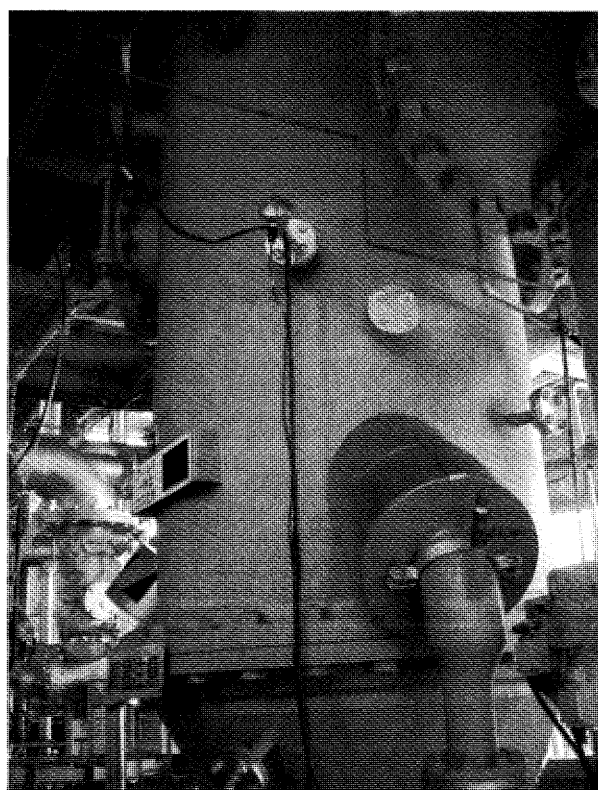


図4-1 ベンチスケール試験設備／フィルター体型ガス化炉

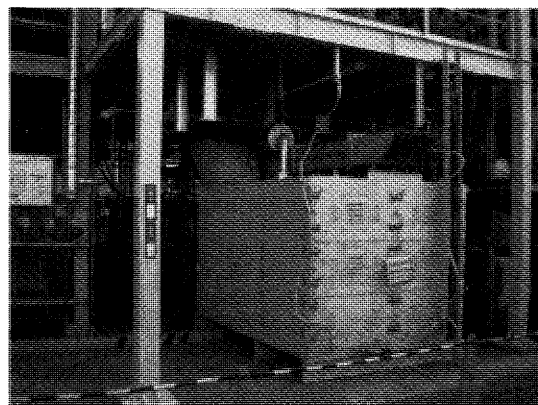


図4-2 ベンチスケール試験設備／ガスタービンパッケージ

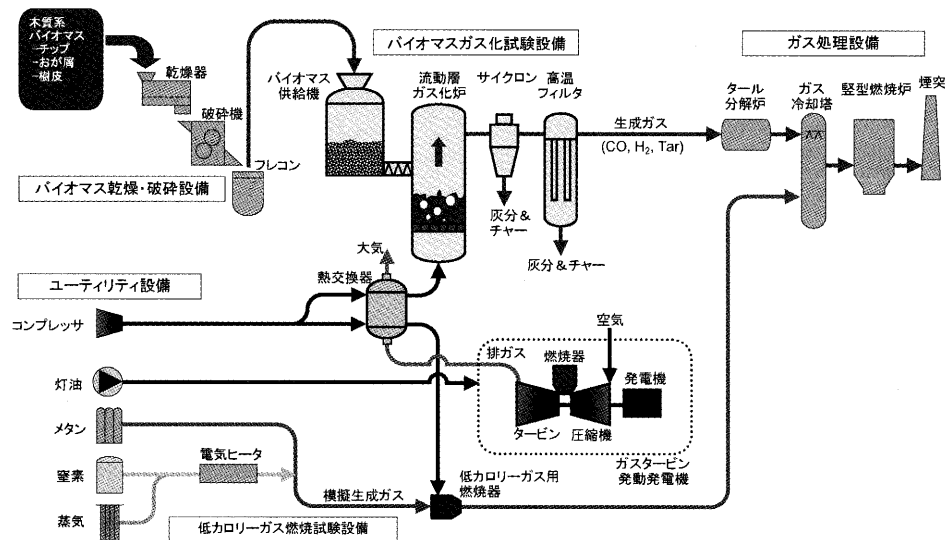


図5 ベンチ炉試験設備 Phase1フロー

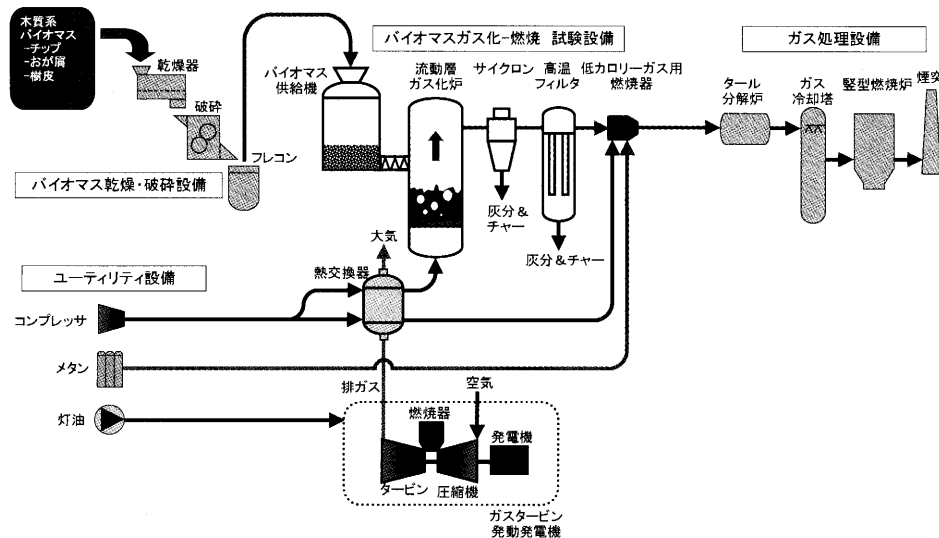


図7 ベンチ炉試験設備 Phase2フロー

## 5. 研究開発経過

### 5.1 Phase1試験

Phase1ではガス化反応特性試験を実施した(図5参照)。ガス化反応特性試験では、バイオマスの形状・水分、空気比、など様々な条件でバイオマスのガス化試験を実施し、炭素転換率98%、冷ガス効率75%を達成した。

Phase1ではガス化反応特性試験に加えて、メタンを窒素で希釈した模擬低カロリーガスの燃焼試験を実施し、開発したガスタービン燃焼器(以下、GT燃焼器)が定格当量比で高い燃焼効率を実現し、安定した保炎を維持することを確認した(図6参照)。

### 5.2 Phase2試験

Phase2では、ガス化炉と上記GT燃焼器を連結し、バイオマスをガス化して発生した生成ガスを、開発したGT燃焼器で燃焼させる試験を実施した(図7参照)。

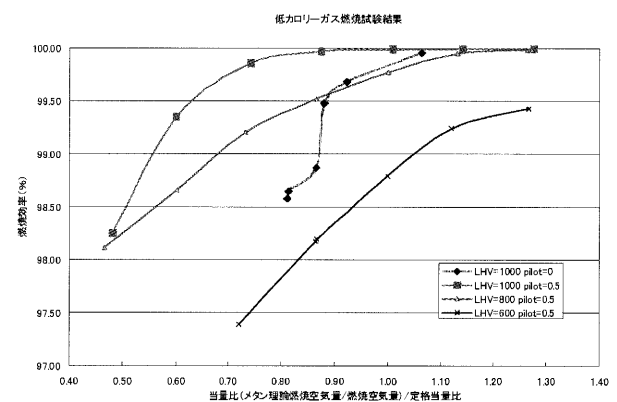


図6 GT燃焼器 燃焼試験結果

### 5.3 Phase3試験

Phase3では、ガス化炉・GT燃焼器にガスタービン発電機を連結し、バイオマスをガス化して発生した生成ガ

スをGT 燃焼器で燃焼させ、ガスタービンを駆動して発電する試験を実施した(図8, 図9 参照)。表2にPhase3試験結果の概要を示す。水分49%のバイオマス(おが屑)を58kg/h-Wet Baseで供給し、ガス化炉層温度: 660℃, 生成ガスカロリ: 4.2MJ/Nm<sup>3</sup>, 流量95Nm<sup>3</sup>/h-WB, ガスタービン出力: 16.3kW で安定した発電を実現した。ガスタービン排ガスのNO<sub>x</sub> 濃度: 40ppm (O<sub>2</sub>=16%換算), ダスト濃度: 1 mg/Nm<sup>3</sup>を達成している。

#### 5.4 低カロリー燃料燃焼器

本システムの流動層ガス化炉から発生する生成ガスは1,000kcal/Nm<sup>3</sup>程度の発熱量しか無いため、通常の高圧燃焼器燃料である天然ガスや灯油を燃焼させる燃焼器

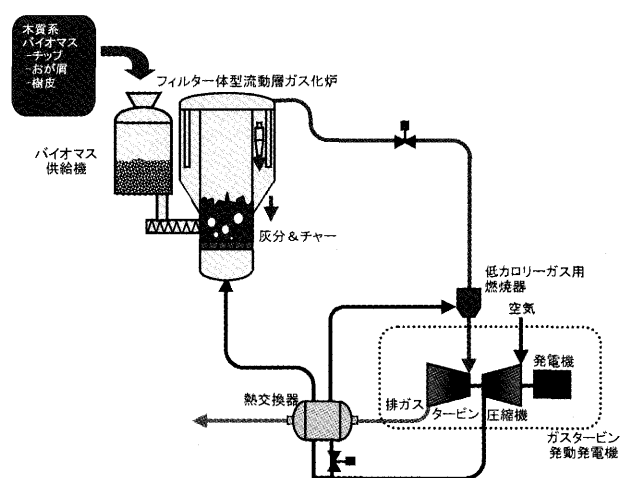


図8 ベンチ炉試験設備 Phase3フロー

では良好な燃焼特性を得ることが出来ない。

また、燃焼用空気とガス化炉を連携して運転するためにガスタービン単体時より各部(流動層, 配管等)の圧損が加わることでシステムの熱効率が低下する。そのため、システム全体の熱効率を低下させないために燃焼器の圧損は極力小さくすることが要求される。

よって以下の特徴をもつ燃焼器, 燃料ノズルを開発した<sup>(5)</sup>。図10に低カロリー用ガスガスタービン燃焼器断面図を図11に燃焼器ライナの写真を示す。

##### 1) ノズル形状

バーナ部での流速を落とし、火炎の吹き消えを抑えるとともに、システム全体の効率に影響を与える燃焼器差圧を低くしている。

燃焼器差圧がとれない状態で、低カロリー燃料と空気の

表2 Phase3試験結果

バイオマス水分	49.1	%
バイオマス供給量	58	kg/h-WB
層温度	660	℃
冷ガス効率	75	%
生成ガスカロリ	4.2	MJ/Nm <sup>3</sup>
生成ガス流量	95	Nm <sup>3</sup> /h-WB
GT 出力	16.3	kW
システム発電効率	12	%
GT 排ガス NO <sub>x</sub> 濃度	40	ppm (O <sub>2</sub> =16%換算)
GT 排ガスダスト濃度	1	mg/Nm <sup>3</sup>

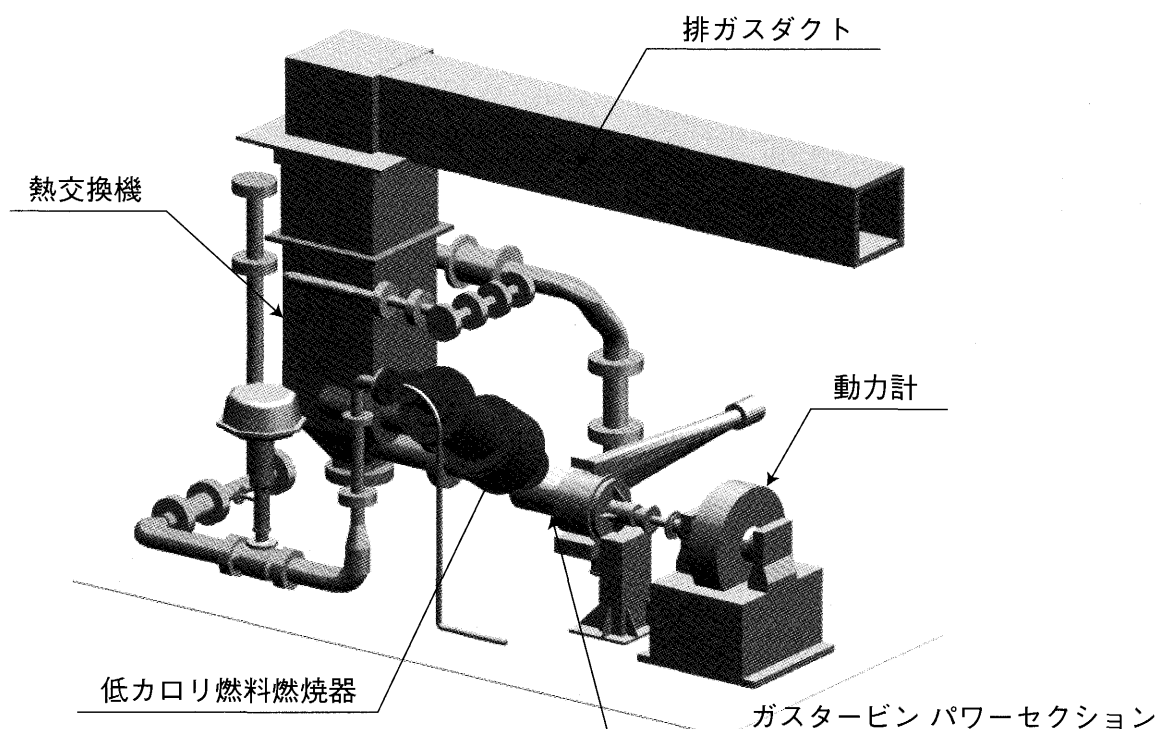


図9 ガスタービン構成図

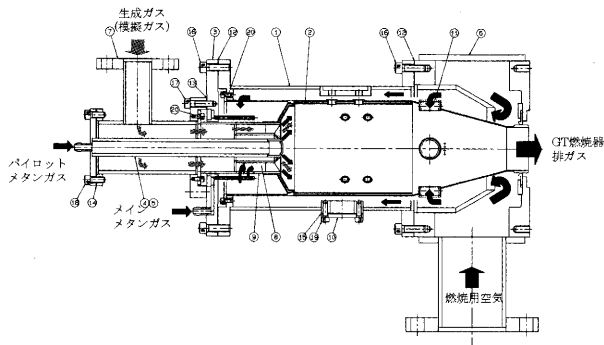


図10 GT 燃焼器断面図

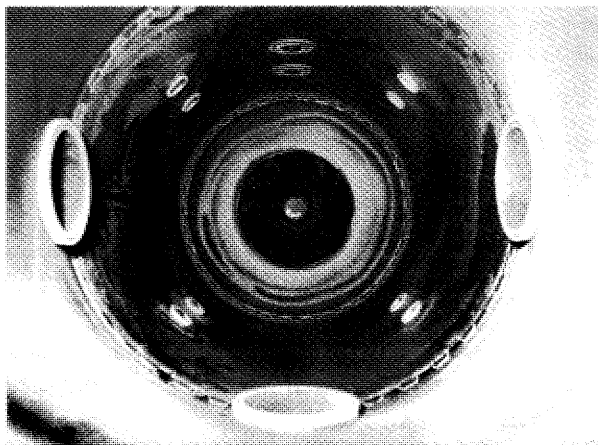


図11-1 燃焼器内部

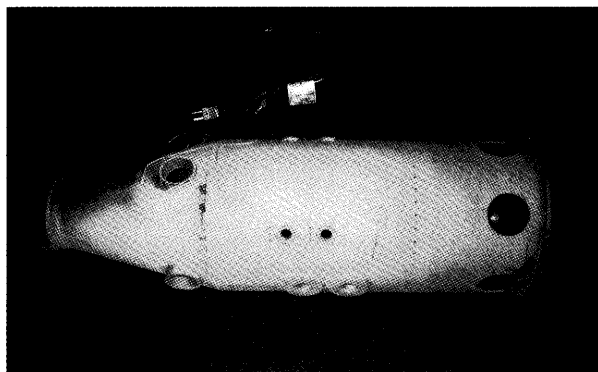


図11-2 燃焼器ライナー

混合状態を促進するため、バーナ部における燃料と空気の噴き出し方法を工夫するとともに旋回力の強いスワローを用いている。

## 2) 燃焼器

低カロリー燃料の完全燃焼を促すため、ライナー内部の断面流速を小さくし、かつ燃焼器長を長くする事により、通常の高圧タービン燃焼器より燃焼ガスの滞留時間を長くしている。

この燃焼器の開発では図12に解析結果の一例を示すようにCFDによる燃焼器内部の熱流動解析を実施し、形状の最適化を図り、燃焼器単体での燃焼試験によりその

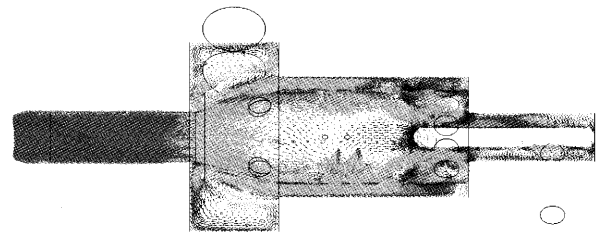


図12 熱流動解析

燃焼性能を確認した後、ガスタービンに組み込みエンジン試験を実施した。

## 5.5 まとめ

本研究開発は2005年3月で終了した。3年間の研究開発の成果をまとめると下記のとおりである。

- (1) 木質系バイオマスを用い、流動層ガス化+ガスタービン発電に成功した。この規模としては世界初のシステムである。燃料のバイオマスは、水分30%~50% (含水率43%~100%) と、比較的水分の高いものまで使用可能であることを確認した。
- (2) ガスタービン出力の制御性確認試験を実施し、バイオマス専焼で出力 $16.3 \pm 0.5 \text{ kW}$ の安定的な発電に成功した。
- (3) システムの発電効率は、ベンチ試験では約12%であったが、商用機規模ベース(650kW級)では20%を達成可能であることを確認した。

## 6. おわりに

NEDO 殿による研究委託であるバイオマスエネルギー高効率転換技術開発『木質系バイオマスによる小規模分散型高効率ガス化発電システムの開発』について、開発システムの概要と研究開発内容を紹介した。

今後は、実用規模での実証試験を実施し、システム耐久性性能の確認やメンテナンス性の向上を行い、早期に実用化を果たしバイオマスエネルギーの有効利用を促進する所存である。

## 参考文献

- (1) 山口洋介・伏見千尋・堤 敦司, 熱化学再生水蒸気ガス化による高効率水素製造(2)バイオマス, 化学工学会第34回秋季大会 研究発表講演要旨集, B324
- (2) 伏見千尋・堤敦司, バイオマスからの水素製造; ケミカルエンジニアリング, 46(9), 699-704 (2001)
- (3) 栗田光暁・伊藤知之・野田玲治・堀尾正毅・田中直, 流動層を用いたバイオマスの接触分解ガス化; 第34回化学工学会秋季大会, 札幌, 2001年9月
- (4) 堤 敦司, エネルギーと物質のコプロダクションによる革命的省エネルギー技術の理論と展開; 金属, 71(11), 1101-1106 (2001)
- (5) 飴 雅英, 第10回動力・エネルギー技術シンポジウム, 講演論文集

特集：GT 燃料多様化技術

## BFG 焚ガスタービンコンバインドサイクルプラント

小森 豊明\*<sup>1</sup>  
KOMORI Toyooki山上 展由\*<sup>1</sup>  
YAMAGAMI Nobuyukiキーワード：ガスタービン，圧縮機，燃焼器，タービン，BFG，CO<sub>2</sub>

## 1. はじめに

近年，製鉄業界において急激な製鉄需要および二酸化炭素削減の要求のため，製鉄プロセスで大量に発生するBFGを有効活用する目的で，高効率で大容量のBFG焚コンバインドサイクルの技術開発が望まれてきた。特に日本は，石炭，石油，ガスの天然資源が乏しく他の国に比べて燃料代が高い傾向にあり，BFGの有効活用が強く望まれてきた。BFGは天然ガスに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している。

当社は，低カロリー燃料の有効利用というニーズに応えるべく，従来からBFG焚ガスタービンの研究開発に取り組んでおり，タービン入口温度1,000℃級を越えるD形ガスタービンによるBFG焚コンバインドサイクルプラントの実績を多数有している。

さらに，これらの技術を結集して，世界初の1,300℃級の高効率大容量ガスタービンを採用したコンバインドサイクルプラントの開発に成功し，君津共同火力(株)君津共同発電所5号機に建設した。この発電所は2004年7月28日より営業運転を開始し現在継続運転中である。本報では，BFG焚ガスタービンコンバインドサイクルプラントに関する当社の最新鋭の技術について紹介する。

## 2. 各種燃料ガスの適用実績

表1は三菱重工のガスタービンに使用された燃料の種類を示したものであり，2006年7月時点で合計台数が475台に達している。図1にはガス燃料発熱量の範囲の実績を示した。

図1に示すように，2.5MJ/m<sup>3</sup>Nから84MJ/m<sup>3</sup>Nまでの幅広い発熱量のガス燃料の実績を有している。特に注目すべき点は4MJ/m<sup>3</sup>N以下の低発熱量の実績を多く有している点である。

## 3. 低カロリーガス用ガスタービンの開発と変遷

日本で最初のBFG焚ガスタービン（出力850kW）は

原稿受付 2006年8月4日

\*1 三菱重工業(株) 高砂製作所

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2丁目1番1号

表1 燃料適用例

2006年7月時点	
燃 料	台 数
1. シングル燃料	
(1) 天然ガス 又は LNG	187
(2) 製油所ガス 又は LPG	19
(3) 製鉄所ガス	23
(4) 蒸留油	63
(4) その他	1
2. デュアル燃料	
(1) 天然ガス / 蒸留油	157
(2) 天然ガス / 重油	6
(3) 製油所ガス / 蒸留油	7
(4) LPG / 蒸留油	7
(5) 製鉄所ガス / 蒸留油	3
(6) 石炭ガス化ガス / 蒸留油	1
(7) VRガス化ガス / 蒸留油	1
合計	475

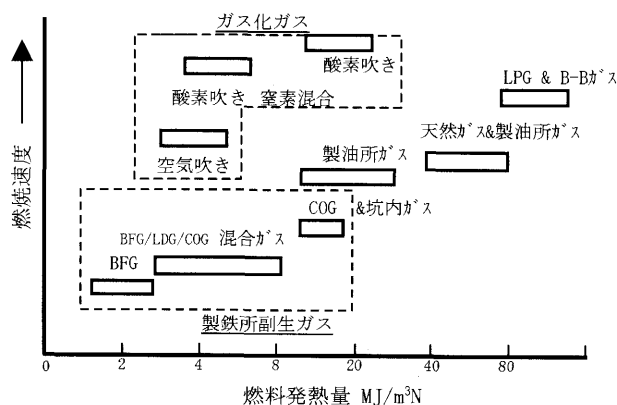


図1 燃料ガスの実績

1958年に開発を終え第一号機として八幡製鐵所（現：新日本製鐵(株)）に納入し，さらに MW171ガスタービン（出力15MW）を住友金属(株)和歌山製鐵所に納入している。ヨーロッパでは1950～1965年の間に30台前後のBFG焚ガスタービンが建設されている。これらのタービン入口温度は約750℃と低いのでこれらのプラントの多くは再生サイクルを適用してプラント熱効率を改善させている。

その後，タービン入口温度の高温化とガスタービンの

各要素効率の改善によりガスタービン自体の熱効率が向上した。また、ガスタービンの排ガス温度が上昇しているため、排熱回収ボイラのエネルギー回収効率も向上することとなった。

以上の変遷を経て、1982年に三菱重工は M151 ガスタービン（タービン入口温度1,000℃以上）を使用したコンバインドサイクルプラントを新日本製鐵(株)釜石製鐵所に納入した。M151 ガスタービンの開発後、100MW 級の D 型ガスタービン（1,150℃クラス）での低カロリーガス焚の開発に着手した。

この成果を基に1987年には JFE スチール(株)千葉製鉄所に145MW 級のガスタービンコンバインドサイクルプラ

ントを納入した。このプラントは BFG を燃料とする発電プラントでプラント効率46%（LHV ベース）の世界記録を当時達成した。

この大容量コンバインド発電プラントの運転実績を基に、1994年と1995年に D 型よりタービン入口温度が100℃高い DA 型のガスタービンを使用した同規模のプラントを瀬戸内共同火力(株)倉敷共同電所と福山共同発電所に納入している。

さらにこれらの技術を結集して、君津共同発電所5号機においては、世界初となる F 形ガスタービンによる高効率大容量の BFG 焚コンバインドサイクルプラントを納入し、BFG 焚ガスタービンでは最高のタービン入口温度1,300℃を実現している。最近では、中国及び韓国の製鉄業界の急成長に伴い BFG 焚ガスタービンの納入実績が伸びてきている。表2にその納入実績を、また図2に中国及び韓国での BFG 焚ガスタービンの納入場所を示す。

表2 低カロリーガス焚ガスタービンの運転実績

納入先	プラント	運用	型式	プラント出力	燃料		燃焼器
					主	補助	
八幡製鉄所（八幡）		1958	-	0.85 MW	BFG (3.2MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	シグマ燃焼
八幡製鉄所（八幡）		1964	-	4 MW	BFG (3.2MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	シグマ燃焼
住友金属工業（和歌山）	ロータリー・ブロー（WHB, G.M. BLOWER）	1965	MW171	15 MW	BFG (3.1MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	シグマ燃焼
四国電力（坂出）	ロータリー・ブロー	1970	MW301	225 MW	COG (18.8MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼
三菱石炭工業（新大塚）	ロータリー・ブロー	1970	MW101	9 MW	炭内ガス (20MJ/Nm <sup>3</sup> )	油	マホ燃焼
新日本製鐵（釜石）	ロータリー・ブロー 既設ST流用	1982	M151	16 MW	BFG (2.8MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	シグマ燃焼
JFE 鋼材（千葉）	ロータリー・ブロー （一軸式）	1987	M701	149 MW	BFG/COG (4.2MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
三井物産（千葉）	ロータリー・ブロー （一軸式）	1988	M711	16 MW	BFG/COG (11MJ/Nm <sup>3</sup> )	油	マホ燃焼
日新製鐵（岡山）	ロータリー・ブロー （一軸式）	1989	M251	32 MW	BFG (2.9MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
新日本製鐵（広島）	ロータリー・ブロー 既設ST流用	1989	M251	30 MW	LDG (7.6MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼
中鋼製鐵（鞍山）	ロータリー・ブロー （一軸式）	1991	M151	37 MW	BFG/LDG (4.2MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
鞍鋼製鐵（鞍山）	ロータリー・ブロー （一軸式）	1994	M501DA	149 MW	BFG/COG (4.0MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
浦項製鐵（浦項）	ロータリー・ブロー （一軸式）	1995	M501DA	149 MW	BFG/COG (4.0MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
新日本製鐵（太田）	ロータリー・ブロー （一軸式）	1997	M701	149 MW	BFG/COG (4.2MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
新日本製鐵（鹿島）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2001	M251	67 MW	BFG (2.9MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
新日本製鐵（鹿島）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2003	M701F	431 MW	Syn gas-N <sub>2</sub> (5.9MJ/Nm <sup>3</sup> )	油	マホ燃焼
君津共同火力（君津）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2004	M701F	300 MW	BFG/COG (4.4MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
沙鋼製鐵（中国）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2006	M251	30 MW×4	BFG (3.1MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
鞍鋼製鐵（中国）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2006	M701F	300 MW	BFG/COG (4.4MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
邯鄲製鐵（中国）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2006	M251	30 MW×2	BFG (3.1MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
馬鞍山製鐵（中国）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2006	M701DA	153 MW	BFG/COG (4.4MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
POSCO（韓国）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2007	M501DA	146 MW	FOG (-)	-	マホ燃焼 (BP-V)
新日本製鐵（研究開発）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2007	M701DA	250 MW	Syn gas (4.2MJ/Nm <sup>3</sup> )	油	マホ燃焼 (BP-V)
遼陽製鐵（中国）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2006	M251	30 MW	BFG (3.1MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
包頭製鐵（中国）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2006	M701DA	138 MW×2	BFG/COG (4.4MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)
IDP（タイ）	ロータリー・ブロー （一軸式）	2006	M701DA	151 MW×2	BFG/COG (4.4MJ/Nm <sup>3</sup> )	-	マホ燃焼 (BP-V)

BP-V：空気バイパス弁

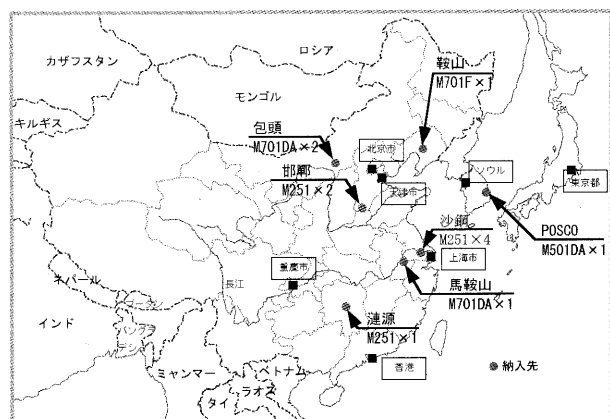


図2 中国、韓国向け BFG 焚ガスタービンの納入場所

#### 4. 低カロリーガス用ガスタービンの設計

表3に代表的な燃料ガス性状を示す。通常のガスタービンに使用される標準の天然ガスと BFG の違いは、発熱量が低く、窒素及び二酸化炭素の不活性成分の割合が高い。また燃焼速度が遅く可燃範囲が狭いという特徴をもっている。

そのため、標準の天然ガス焚ガスタービンと比べて BFG 焚ガスタービンの場合は、燃料制御システム、燃料供給システム、燃焼器などの最適化設計が必要とされる。

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

表3 代表的な燃料ガス性状

燃料	LNG	BFG	増熱 BFG	空気吹き Syngas
組成 (vol.%)				
CH <sub>4</sub>	88.0	—	2.02	2.9
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7.11	—	0.24	—
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3.58	—	—	—
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.24	—	—	—
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.05	—	—	—
N <sub>2</sub>	0.02	55.4	51.02	30.7
CO	—	22.4	20.88	11.0
CO <sub>2</sub>	—	20.4	19.78	10.9
H <sub>2</sub>	—	2.0	6.05	16.8
Ar	—	—	0.01	0.80
LHV (MJ/m <sup>3</sup> 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



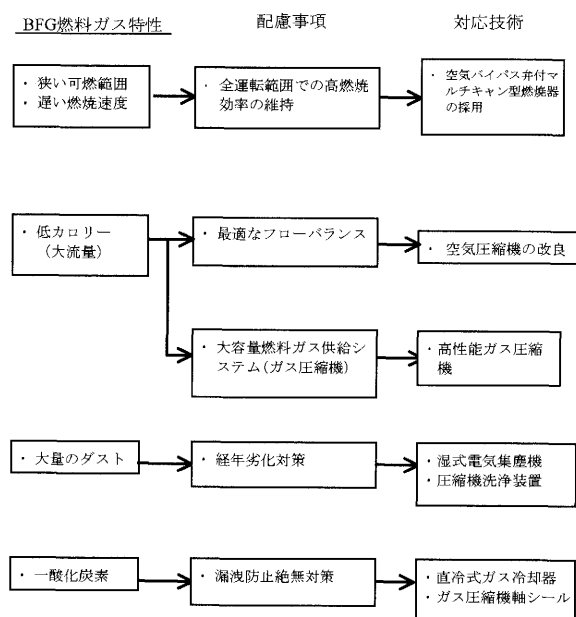


図3 BFG 焚ガスタービンの設計配慮一覧

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

次にその各要素の設計内容について説明をする。

#### 4.1 燃料発熱量

燃料発熱量はガスタービンの設計を行う上で重要なパラメータであり、発熱量が減少する場合には設計変更が必要となる。表4に燃料発熱量と設計のコンセプトを示す。

表4 燃料発熱量と設計コンセプト

発熱量	高 42 - 105 MJ/m <sup>3</sup> N	標準 (天然ガス) 36MJ/m <sup>3</sup> N	中 8.5 - 29 MJ/m <sup>3</sup> N	低 3.1-8.4 MJ/m <sup>3</sup> N
空気圧縮機	標準	標準	標準	設計変更もしくは運転制限
燃焼器	標準 (マッペンジ)	標準	標準 (マッペンジ)	設計変更
タービン	標準	標準	標準	標準
燃料供給システム	標準 (マッペンジ)	標準	標準 (マッペンジ)	設計変更
燃料	LPG, B-B	LNG	Syngas	BFG

高信頼性及び高温部品の互換性を維持するために、タービン部品は共有化するが、他の要素は発熱量の違いにより設計変更している。

参考として、BFG 焚ガスタービンの変更内容について紹介する。

#### 4.2 空気圧縮機

天然ガス焚とBFG 焚のフローバランスを図4に示す。

BFGは低カロリーのためガスタービンへ供給される燃料ガス量が増加する。そのため標準の天然ガス焚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及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

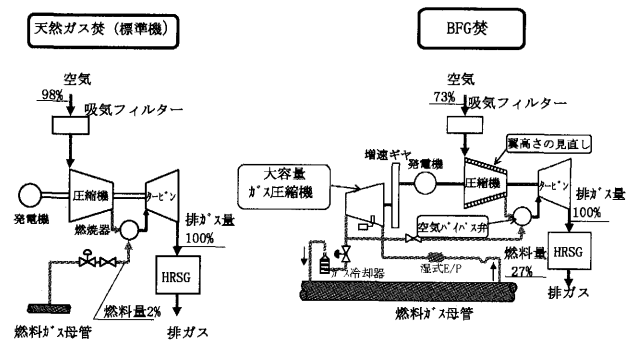


図4 天然ガス焚とBFG 焚のフローバランス

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。

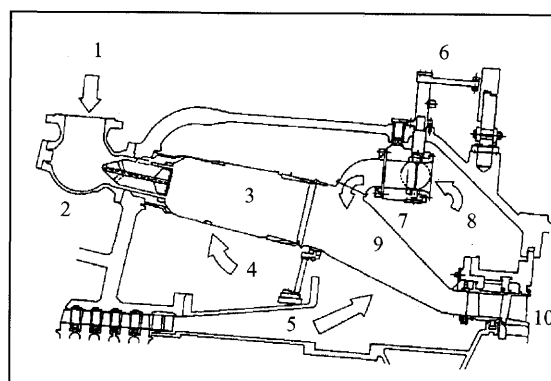
#### 4.3 燃焼器

BFG 焚の場合、燃焼の安定性という観点のみを考えるとパイロットトーチ付きの単筒型燃焼器の方が適している。しかしながら、タービン翼の信頼性なども含めてガスタービン信頼性の全体評価から、マルチチャン型燃焼器がより好ましい。以下にこの燃焼器について説明をする。

BFG 焚のガスタービンでは燃焼器内筒の冷却用空気が減少するので冷却が困難となる。この対策として、大型の単筒型燃焼器と比べ冷却面積が少ない小型のマルチチャン型燃焼器を採用している。

また、BFG 燃料は、可燃範囲が狭い特徴を有しており、部分負荷運転も含めて高燃焼効率を維持する為には常に燃空比を同程度にする必要がある。この燃空比制御の為に空気バイパス弁を設置している。

マルチチャン型BFG 焚燃焼器の断面図を図5に示す。



1. BFG+COG 燃料ガス
2. 球状燃料室
3. 内筒
4. 燃焼用空気
5. 圧縮機吐出空気
6. 空気バイパス弁可変機構
7. 空気バイパス弁
8. バイパス空気
9. 尾筒
10. タービン

図5 マルチチャン型BFG 焚燃焼器

空気バイパス弁は、燃焼器の尾筒部に取付けられており、弁開度の調整により内筒燃焼域への燃焼空気量を制御することが可能である。

この燃焼器の検証には、製鉄所内の実ガス (BFG/COG) を使用して燃焼器試験を行った。

空気バイパス弁開度の設定は、無負荷時と全負荷時で安定かつ高燃焼効率が可能な燃空比を設定し、部分負荷時も高燃焼効率が得られるように図6に示すような弁開度のスケジュールに設定している。

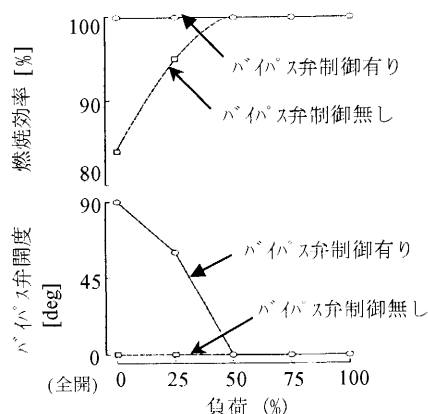


図6 空気バイパス弁開度と燃焼効率

#### 4.4 燃料供給システム

BFG 焚は天然ガス焚と比べて燃料ガス量が多くなるため、配管や弁のサイズが大きくなる。一方で、ガスタービンへの配管反力を小さくするためには、配管径を小さくする必要がある。しかし、配管径を小さくすると圧力損失を増加させることになり、プラント効率を低下させる。そのため、全体のバランスを考慮して最適な配管径を計画する必要がある。

### 5. BFG 焚ガスタービンコンバインドサイクルプラントの特徴

従来は、BFG をフレア処理で大気放散したり、ボイラ焚の燃料として使用し発生した蒸気で蒸気タービンを駆動させ発電を行うコンベンショナルプラントの活用が主流であった。低カロリーのBFGはボイラ焚燃料としては燃焼させやすい一方で、プラント効率が低く、この結果単位電気出力当りの二酸化炭素量も多く排出する面がある。

近年、地球環境問題への取り組みの一つとして、地球温暖化防止の観点から二酸化炭素排出削減に向けた技術開発が求められている。この見地からBFG 焚ガスタービンコンバインドサイクルプラントの特徴を紹介する。

#### 5.1 エネルギーバランスについて

図7にBFG 焚ガスタービンコンバインドサイクルプラント (以下: GTCC) とコンベンショナルプラント

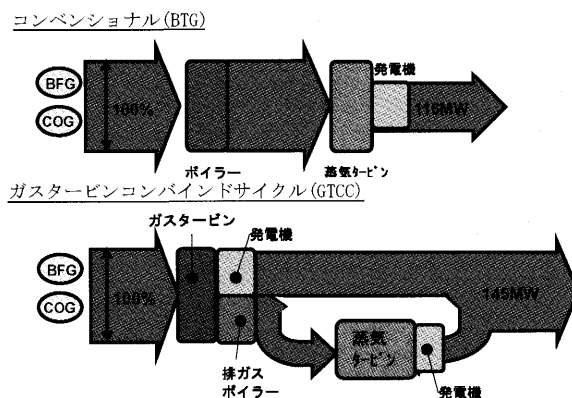


図7 エネルギーバランス図

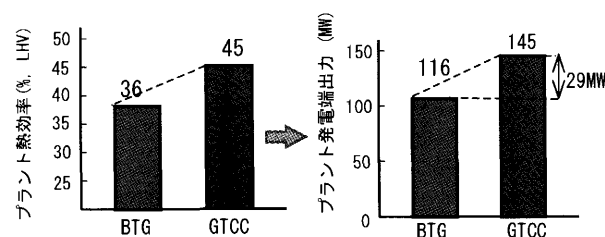


図8 BTG と GTCC の効率と出力比較

(以下: BTG) とのエネルギーバランスの例を示す。また図8にプラントの効率と出力の比較のグラフを示す。

BFG と COG の混合ガスを燃料とし、BTG と GTCC とで入熱量を同値とした場合、プラント熱効率 (低位発熱量基準) は、BTG で36%, GTCC で45%となり、プラント発電端出力において、GTCC は BTG に比べて29MW (GTCC 150MW 級にて比較) の増加が見込まれる。

#### 5.2 CO<sub>2</sub>排出削減効果について

CO<sub>2</sub>の発生量は、製鉄所副生ガスのBFG/COG量と関係がある。このBFG/COG量は粗鋼生産量により支配されるのでCO<sub>2</sub>削減はこれらの副生ガスを利用する発電設備だけでなく周囲の設備も含めて評価する必要がある。この評価案を以下に示す。

図9は極端な例であるが、BFGが現状発電設備に利

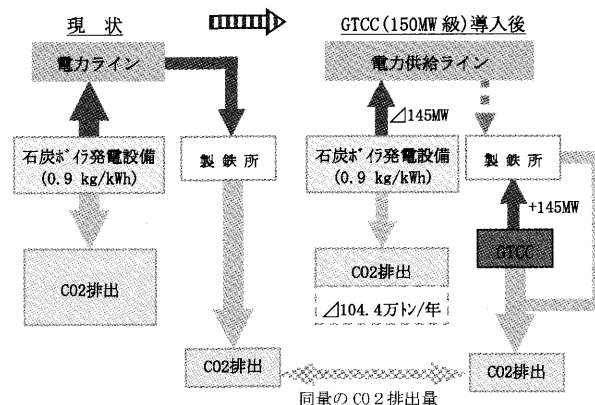
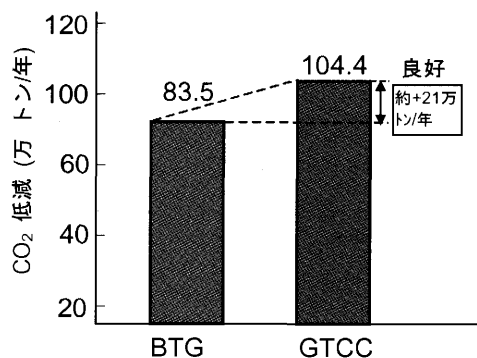


図9 CO<sub>2</sub>削減のイメージ図



年間運転時間 : 8,000hrs/年  
CO<sub>2</sub> 低減対象 : 0.9kg/kWh (石炭焚 BTG)

図10 二酸化炭素排出量の比較

用されず大気放散（途上国ではこのような例がある）されていた場合と GTCC 導入後の比較である。GTCC で 145MW 出力を発電させる替わりに、現状の石炭焚 BTG で発生させていた 145MW 分を削除することが出来る。その石炭焚 BTG の CO<sub>2</sub>削減分は年間発電時間を 8,000時間と仮定すると 104.4万トン/年の CO<sub>2</sub>削減効果となる。

BTG で比べると図10に示すように、GTCC が約21万トン/年も有利となる。

このように、BFG の有効活用としてプラント高効率化及び二酸化炭素の排出量抑制という観点から、ガスタービンコンバインドサイクルプラントの優位性をみることが出来る。

## 6. 最新鋭300MW 級 BFG 焚 F 型ガスタービンコンバインドサイクルプラントの紹介

君津共同発電所 5 号は、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 焚コンバインドサイクルプラントで、ガスタービン、蒸気タービン、ガス冷却器、復水器、制御装置といった主要機器を当社が納入してい

表 5 発電プラントの主要仕様

発電端プラント出力		300MW
ガスタービン	燃料	BFG (増熱COG)
	型式	開放単純サイクル、一軸 M701F (1300°C 級)
	出力	180.7MW (ガス圧縮機動力分を除く)
	回転数	3000 rpm
蒸気タービン	型式	単車室下向排気再熱式混気復水タービン
	出力	119.3MW
	回転数	3000 rpm
	蒸気条件	蒸気タービン入口
発電機	高圧蒸気	10.20MPaG / 535°C
	中圧蒸気	2.84MPaG / 535°C
	低圧蒸気	0.39MPaG / 277°C
	型式	AC 三相交流同期 水素冷却式
	容量	340,000kVA
	電圧	16 kV
	回転数	3000 rpm

(大気温度:15°C, 大気圧力:1.013hPa, 相対湿度:60%)

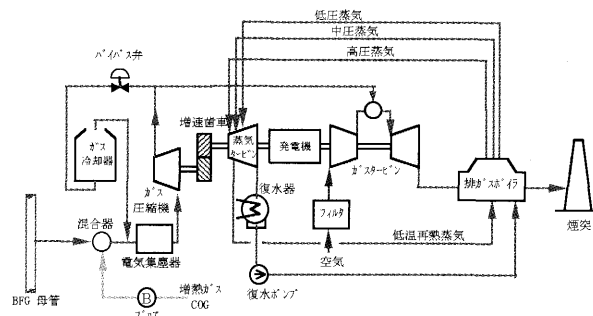


図11 プラント概略系統

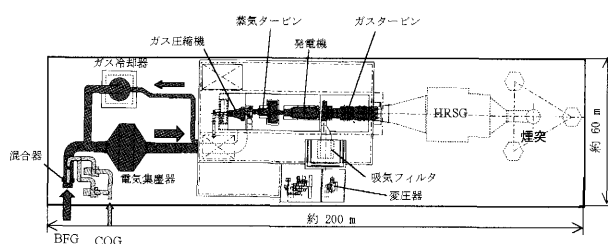


図12 発電設備の配置図

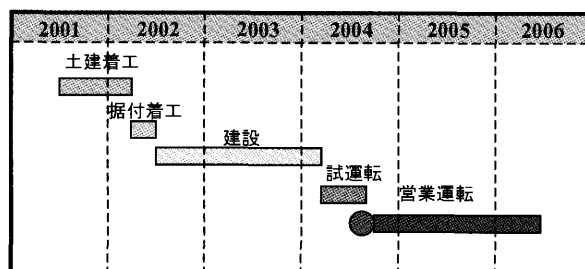
る。図11にプラント概要系統を示し、表5にプラントの主要仕様を示す。また、図12に発電設備の配置図と図13に発電設備の全景を示す。

BFG は発熱量が低いため、ガスタービンへ供給するために COG を混合し 4.4MJ/m<sup>3</sup>N-dry (LHV) 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の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、蒸気噴射及び水噴射を行うことなく低 NO<sub>x</sub> での運転を実現している。

### 6.1 運転実績

2004年5月から2004年7月の試運転中、性能と信頼性の検証を行った。その後、2004年7月28日から営業運転を開始し、現在も順調に営業運転を継続しており、2006年6月末時点で総運転時間14,560を達成している。プラントの工程を表6に示す。

表 6 プラント工程



### 6.1.1 プラント熱効率

性能試験において、プラント熱効率は計画値49.7%（発電端，低位発熱量）を達成した。

### 6.1.2 窒素酸化物排出値

性能試験において、ガスタービン出口の NO<sub>x</sub> 値が 25ppmv (O<sub>2</sub>, 16%換算値) を満足していることを確認した。

### 6.1.3 負荷遮断試験

100%負荷遮断試験の結果、速度上昇率は最大値で約 7.5%であり、ガバナの制御性は良好であった。また、負荷遮断時の燃空比急変に対しても安定燃焼を継続しており、燃焼器の吹き消え特性の優位性を確認した。

### 6.1.4 起動特性

100%負荷上昇をホット起動の場合で約80分，ウォーム起動の場合で約140分，コールド起動の場合で約185分で到達できた。

### 6.1.5 トリップ試験

BFG 母管圧力の上昇値が水封弁の設定圧力を超えないことを監視しながら低負荷から徐々に実施した。100%負荷トリップ試験においては最大上昇圧力が計画値以下であり健全性を確認した。

### 6.1.6 定期検査結果

営業運転開始から現在に至るまで合計 3 回の定期検査を行っている。3 回目の定期検査では高温部品のタービン，燃焼器とも良好な結果を得ている。

## 7. おわりに

当社の BFG 焚ガスタービンの技術を導入した発電設備は、現在、海外で設計・建設中のものがあり、また今後建設予定の発電設備も国内外に多数ある。この技術開発によりエネルギーの有効利用や地球環境対策の要求に応え、社会に大いに貢献できると考える。今後も当社はこの分野で先駆的な役割を果たすべく、より一層の技術開発に努める所存である。

## 参考文献

- (1) H. Hara, T. Komori, H. Arimura and Y. Kitauchi, 2003, "Design for F Class Blast Furnace Gas Firing 300 MW Gas Turbine Combined Cycle Plant," International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo, (November 2-7, 2003).
- (2) K. Tanaka, K. Nishida, W. Akizuki and T. Komori, 2003, "MHI combustor development for Low Calorie fuel firing," Power-Gen International 2003 Las Vegas, (December 9-11, 2003).
- (3) T. Komori, N. Yamagami and H. Hara, 2004, "Design for Blast Furnace Gas Firing Gas Turbine," The 15th Conference on Electric Power Supply Industry 2004 Shanghai, (October 18th-22nd, 2004).
- (4) 久保田昭人, 平成16年度火力原子力発電大会論文集, 2004年, 10月号, 1-1-5.
- (5) H. Matsuda, Y. Oka, 2004, "Large Capacity and High Efficiency Combined Cycle Plant F Type Gas Turbine with BFG Firing," Mitsubishi Technical Review 2004.
- (6) T. Komori, N. Yamagami, 2005, "Update on Design and Operating Experience of BTU Gas Firing Gas Turbine for Steel Works," 2005 Asian Congress on Gas Turbines (ACGT2005).

特集：GT 燃料多様化技術

DME/LNG 焚き低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の開発齊藤 武雄\*<sup>1</sup>  
SAITOU Takeo三浦 圭祐\*<sup>1</sup>  
MIURA Keisuke井上 洋\*<sup>1</sup>  
INOUE Hiroshiキーワード：DME，低 NO<sub>x</sub> 燃焼，同軸噴流，クラスターノズル，マルチ燃料

## 1. はじめに

DME (ジメチルエーテル) は次世代クリーン燃料として注目されており<sup>(1),(2)</sup>，発電用燃料ではまとまった量の利用先として高効率発電が可能なガスタービンコンバインドサイクル発電が期待される。その場合，DME の燃料としての導入期において電気という商品が持つ高信頼性を確保するため，LNG や LPG などのバックアップ燃料に対応していることが求められる。しかしながら，DME のガスタービン燃焼に関する報告は少ない<sup>(3)-(5)</sup>。ここでは平成13-15年度に石油公団（現石油・天然ガス金属鉱物資源機構）の提案公募事業「DME 高効率燃焼システム」として実施した内容のうち，ガスタービン用 DME/LNG 焚き低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の研究開発成果を中心に紹介する。

## 2. DME 供給システムについて

DME は加圧すると容易に液化するプロパンに似た特徴がある。一方，ガスタービンは起動から定格負荷までの間，大気圧から 2 MPa 程度までと大きく運転圧力が変化するが，安定燃焼確保のためには，全運転領域において DME を相変化させることなく，液体，気体のいずれかの状態で安定に供給しなければならない。図 1 は DME の飽和蒸気圧線図を示すが，液相，あるいは気相のどちらかだけの領域で燃料を供給するためには，液相の場合には保冷，気相の場合には加温が必要となる。液相，気相のどちらの状態でも DME を供給するのがコスト，運用面で優れているかを比較検討した結果を表 1 に示す。LPG 供給システムの実績，環境対応，特に，予混合燃焼技術の採用による NO<sub>x</sub> 低減，起動停止時燃料パージシステムの簡便性などの点から気相での DME 供給，燃焼システムを選択し，図 2 に示すような DME ガス焚き燃料供給設備を製作した<sup>(6)</sup>。この設備では液体 DME は加圧ポンプを介して蒸発器にて 100~120℃ 程度まで過熱しテストスタンドに供給するとともに，燃料配管も同等の温度を維持するようにスチームトレースを施した。

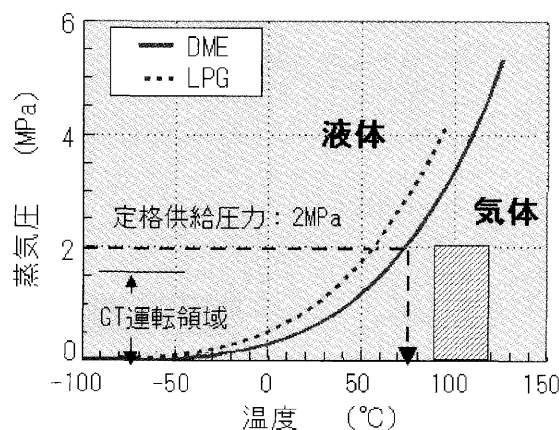


図 1 DME の飽和蒸気圧線図

表 1 ガス焚き／液焚きの比較

項目	ガス焚	液 焚
GT 性能	基準熱効率	水噴射により熱効率低下
供給系	課題	1) 保液システム 2) フローバイパダー 3) 高圧システム
	コスト	保液システムと分配システムが高価
	開発要素	気化器 (LPG 並)
排ガス特性	25 ppm 以下目標	50 ppm (空気流量の 2% 水噴射)
運用性	全負荷ガス焚	起動・停止時の気化対策要 (起動時燃料要)

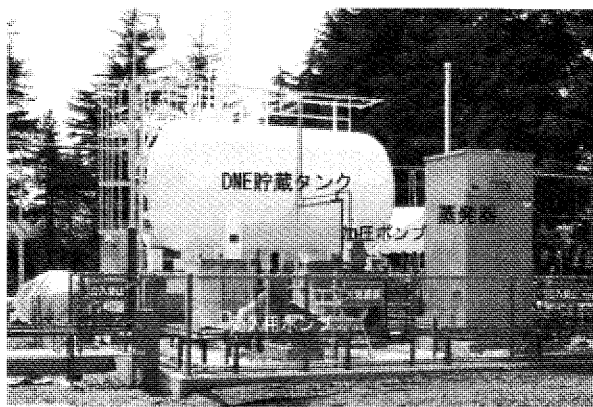


図 2 DME 供給設備

原稿受付 2006年 7月13日

\* 1 株式会社製作所 電力・電機開発研究所  
〒312-0032 茨城県ひたちなか市堀口832-2

### 3. DME の低 NO<sub>x</sub> 燃焼方式検討

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て表 2 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 150～250℃ 低い点である。NO<sub>x</sub> 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は 400℃ を超え、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発生の可能性が高くなる。

ガスタービン燃焼器における燃焼方式としては拡散燃焼と予混合燃焼の 2 つの方式があり、DME を燃焼させる場合のそれぞれの特徴と課題を図 3 に示す。拡散バーナは燃料を直接燃焼室に噴射する方式で、燃焼室以外での発火やフラッシュバックの可能性はなく信頼性の高い燃焼方式である。また、LNG、LPG などをバックアップ燃料とするマルチ燃料対応性も良い。しかしながら、当量比近くで燃焼するため火炎温度が高く、大量のサーマル NO<sub>x</sub> を発生するという問題点がある。一方、予混合バーナは予め燃料と空気を混合してから燃焼室へ噴出して燃焼するため、火炎温度が低く NO<sub>x</sub> 低減に有効である反面、前記のように予混合器内での発火・フラッシュバックの可能性があること、またマルチ燃料対応も困難と考えられる。

そこで DME の低 NO<sub>x</sub> 燃焼実現に伴う問題点を解決するために、図 4 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た。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を実現するものである<sup>(7),(8)</sup>。

図 5 には非定常乱流解析により同軸噴流の混合の様子を検討した一例を参考として示す。燃料と空気は狭い空気流路で混合が進むとともに燃焼室に噴出後、さらに急速に混合する様子が示唆されている。このように、クラスターバーナ構造では非常に短い混合距離で良好な混合状態が得られるためフラッシュバックを防止できるとともに、予混合燃焼と同等の低 NO<sub>x</sub> 燃焼が可能となる。また、燃料と空気が同軸に配置されるため、燃料の体積流量差が混合状態に与える影響が小さく、発熱量の違う燃料に対しても同等の混合性能が得られると考えられる。以上のことから、本構造は拡散バーナの高信頼性、マルチ燃料対応性と予混合燃焼の低 NO<sub>x</sub> 性を兼ね備え、DME 焚き燃焼器用低 NO<sub>x</sub> バーナとして優れた燃焼方式であると考えた。

### 4. DME/LNG 焚きマルチクラスターバーナ

開発の対象としたガスタービンは日立製 25MW 級ガスタービンの H25 であり、定格負荷における燃焼温度は

表 2 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	℃	-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	℃	350	632	504

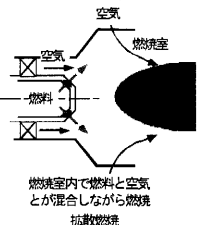
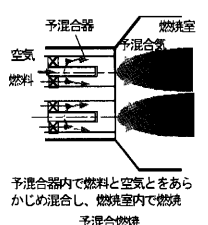
拡散バーナ		予混合バーナ	
			
NO <sub>x</sub> 排出低減	×	NO <sub>x</sub> 排出低減	○
フラッシュバック防止	○	フラッシュバック防止	△
マルチ燃料対応	○	マルチ燃料対応	×

図 3 従来燃焼方式の特徴と課題

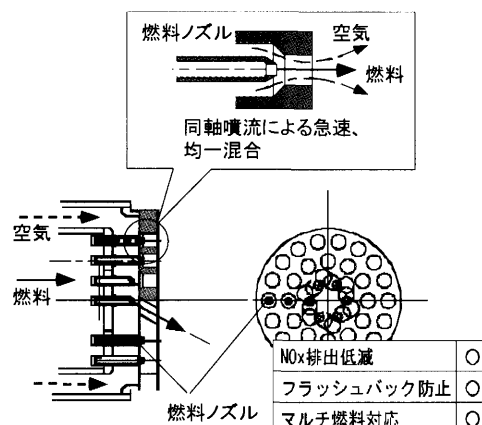


図 4 同軸噴流クラスターバーナ概念図

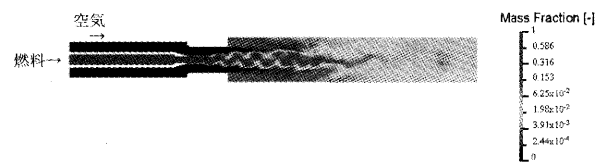


図 5 同軸噴流ノズルの混合状態解析例  
(Large Eddy Simulation による非定常乱流解析)

表 3 開発目標

- |                          |                    |
|--------------------------|--------------------|
| (1) NO <sub>x</sub> 排出濃度 | 20 ppm 以下          |
| (2) 燃焼効率                 | 99.9% 以上           |
| (3) マルチ燃料対応：             |                    |
|                          | 純DME／燃料グレードDME／LNG |

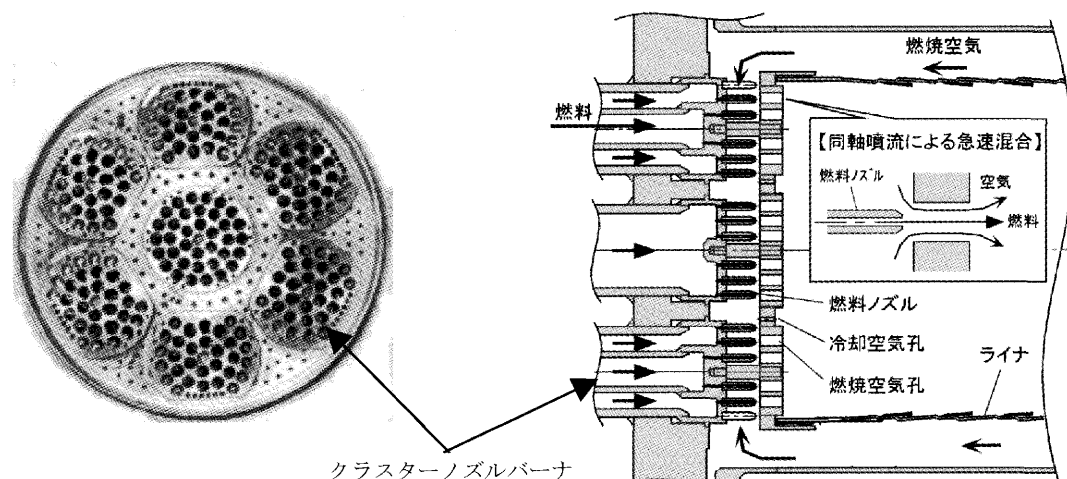


図6 マルチクラスターバーナ概略図

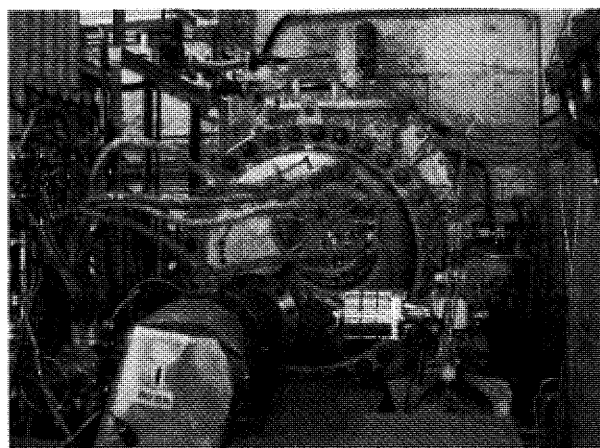


図7 実負荷燃焼試験設備

1,260℃である。開発目標を表3に示す。開発は、クラスターノズルバーナの要素モデルによる大気圧燃焼試験からスタートし、バーナ構造パラメータの基礎検討と適正化を行った<sup>9)</sup>。この結果をもとに、実寸マルチクラスターバーナを試作し、低圧燃焼実験によりマルチクラスターバーナの配置適正化を進め、開発目標達成の見通しを得た<sup>10)</sup>。

図6に開発したマルチクラスターバーナ1缶の正面写真および燃焼器概略断面構造を示す。バーナは7本のクラスターバーナで構成され、起動から定格負荷までガスタービン負荷に応じて点火するバーナ本数を制御するように構成している。このバーナを用いてH25ガスタービン実負荷条件での燃焼器単缶試験を実施し、試作したマルチクラスターバーナの性能実証を行った。実負荷単缶燃焼試験においては、燃料として純DME、LNGのほか、実際に供給される燃料を想定した不純物を含む燃料グレードDME模擬燃料についても性能を評価した<sup>11), 12)</sup>。

## 5. 実負荷単缶燃焼試験

試験に使用した実負荷単缶燃焼試験設備を図7に示す。

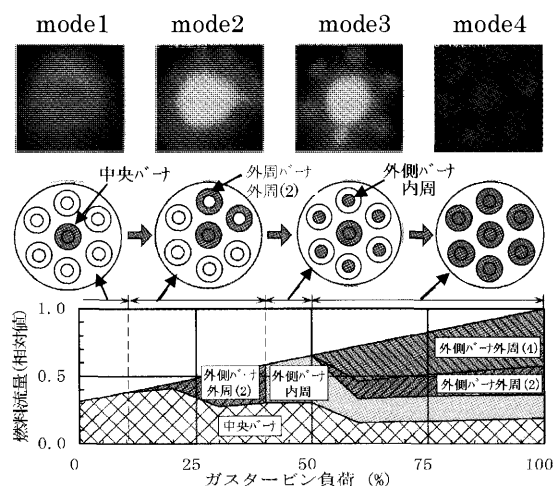


図8 燃焼モードとガスタービン負荷の関係

本設備はH25ガスタービンの点火・起動から定格負荷までの実機条件を実温・実圧で設定でき、燃焼器の実装状態で性能を確認できる設備となっている。

ガスタービンの燃焼器では起動から定格負荷までの燃焼負荷が大きく変化する。低NOx燃焼方式を採用する場合、個々のバーナが対応可能な負荷変化が限られているため、前述のように点火するバーナ本数の異なるいくつかの燃焼モードによりガスタービン負荷全体をカバーして運転することになる。開発したマルチクラスターバーナでは燃料系統数の節減を考慮し、外周バーナの燃料供給を内外2つに分け、全部で4系統による4つの燃焼モードで負荷全体をカバーすることとした。図8にはマルチクラスターバーナにおける燃焼モードとガスタービン負荷の関係を示す。

図9には開発したマルチクラスターバーナのNOx排出特性を横軸にガスタービン負荷をとって示す。ガスタービン負荷50%以下の範囲では中央バーナのみ、mode1から順次mode3まで点火バーナを増加させて運

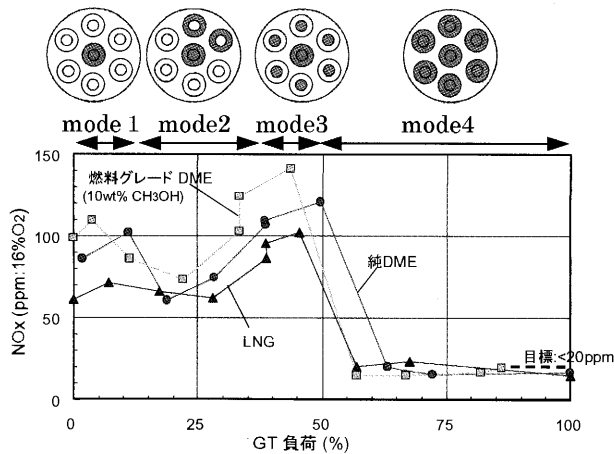


図9 ガスタービン負荷とNOx濃度

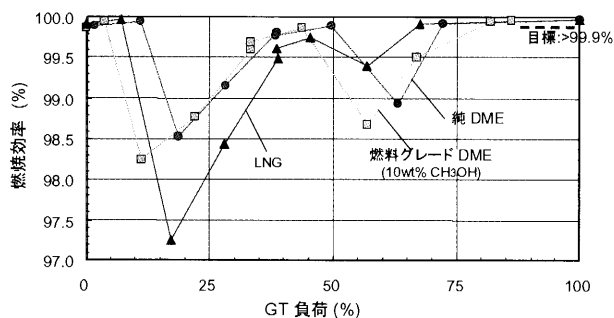


図10 ガスタービン負荷と燃焼効率

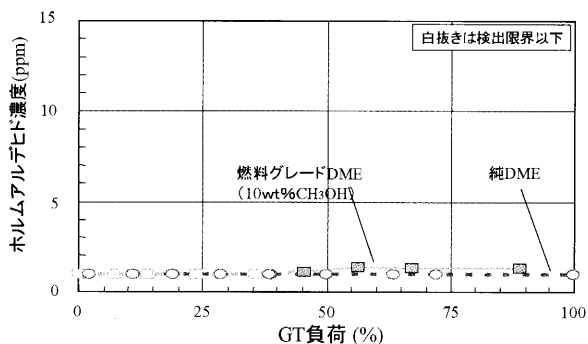


図11 ガスタービン負荷とアルデヒド濃度

転し、NOxは100ppm前後である。燃料の種別では純DME、燃料グレードDME模擬燃料（メタノール10%含有）と比べてLNGのNOxレベルがやや低い傾向を示す。50%負荷以上の条件ではすべてのバーナに点火する低NOx運転モード（mode4）となり、NOx濃度が大きく下がるとともに燃料種間の差は小さくなる。定格負荷条件では、試験で使用した純DME、燃料グレードDMEに加えてLNGのすべての燃料で開発目標であるNOx20ppm以下を達成した。

図10には燃焼効率特性をやはり横軸にガスタービン負荷をとって示す。燃焼効率は部分負荷ではやや低めであり、特に、燃焼mode切り替え領域で低くなる傾向を示

す。燃料種別ではLNGの燃焼効率がやや低い傾向を示す。しかしmode4の70%負荷以上ではいずれの燃料に対しても開発目標である燃焼効率99.9%以上を達成している。また、開発期間中の試験を通していわゆるフラッシュバック現象は全く発生しなかった。

図11にアルデヒドの排出特性を示す。メタノールなどの含酸素燃料ではアルデヒド類の排出が増える傾向があることが自動車用エンジンでのガソリン代替燃料などの例で指摘されており、同じく含酸素燃料であるDMEについても考慮しておく必要があると考えられ、計測を行った。結果はアセトアルデヒドは計測した範囲で検出されず、ホルムアルデヒドについても純DMEではすべての計測点で検出限界（1ppm）以下。メタノールを10%含む燃料グレードDME模擬燃料で最大1.4ppmであった。

## 6. まとめ

次世代クリーン燃料として注目されているDMEを高効率火力発電で利用するためのDME焼きガスタービン低NOx燃焼器としてマルチクラスターバーナという新しい燃焼器構造を提案し開発を進めた。25MW級ガスタービン燃焼器実寸試作品について、無負荷から定格負荷まで実機条件下での単弁燃焼試験を実施した結果、定格負荷条件において、純DME、LNG、燃料グレードDMEのいずれの燃料に対してもNOx<20ppm（16%O<sub>2</sub>）、燃焼効率>99.9%の性能が確認でき、DME燃料の高効率ガスタービンコンバインドサイクル発電への導入に向けた技術的な見通しは得られたと考えている。

## 参考文献

- (1) 鈴木信市, 石油/天然ガスレビュー, (2003-9), 1-27
- (2) DME1 (1st Int. DME Conf.), 2004.10
- (3) Basu, A. Gradassi, M., Sills, R., Fleisch, T., Puri, R., ASME Turbo Expo 2001, 2001-GT-0003
- (4) Narukawa, K., Koizumi, H., Inoue, H., Kobayashi, N., ASME Turbo Expo 2004, GT2004-53515, 2004.6
- (5) 日本DMEフォーラム編, DMEハンドブック (2006.4), 187-226, オーム社
- (6) 小林成嘉ほか4名, 日本ガスタービン学会誌, 31(6), 21-26 (2003)
- (7) Inoue, H. Kobayashi, N., Koganezawa, T., 23rd CIMAC World Congress, (2001-6), 876-882
- (8) 井上洋ほか3名, 日本燃焼学会誌, 45-131, (2003-11), 11-16
- (9) 小泉浩美ほか3名, 第30回ガスタービン定期講演会論文集, (2002-10), 91-96
- (10) Saitou, T., Inoue, H., Kobayashi, N., ASME Turbo Expo 2004, GT2004-53689, (2004-6)
- (11) Saitou, T., Miura, K., Inoue, H., Kobayashi, N., Suzuki, S., ASME Turbo Expo 2005, GT2005-68647, (2005-6)
- (12) 齊藤武雄ほか3名, 第33回ガスタービン定期講演会論文集, (2005-9), 25-30



特集：GT 燃料多様化技術

## 石炭ガス化複合発電

太田 一広<sup>\*1</sup>  
OTA Katsuhikoキーワード：燃料多様化，石炭，IGCC，CO<sub>2</sub>，ゼロエミッション

## 1. はじめに

京都議定書が2005年2月16日に発効し，日本は2008～2012年のCO<sub>2</sub>排出量を1990年度比で6%削減する必要がある，原子力，新エネルギー，天然ガスの更なる導入並びに省エネルギー等の対策が提言されている。一方，石炭は世界中に広く分布し，廉価なエネルギーであり，エネルギーセキュリティや経済性などの観点から，日本の一次エネルギーの約20%を担っており，発生発電量の約20%が石炭火力発電所によるものである。

石炭の発熱量当たりのCO<sub>2</sub>発生量は，天然ガスの約1.5倍であり，石炭火力のCO<sub>2</sub>排出原単位は，0.88kg-CO<sub>2</sub>/kWhと高く，CO<sub>2</sub>発生量のより少ない石炭高効率発電技術が重要となっている。

石炭火力の高効率発電技術としては，超々臨界圧ボイラ(USC：Ultra Super Critical)及び石炭ガス化複合発電(IGCC：Integrated coal Gasification Combined Cycle)がある。USCについては，既に主蒸気温度600℃，再熱蒸気温度610℃のプラントが稼動しており，送電端効率は42%程度(LHVベース)と世界のトップクラスの

熱効率を達成している。

IGCCは，石炭をガス化し，ガスタービン燃料として使用するものであり，1500℃級のガスタービンを組み合わせると送電端効率で48～50%(LHVベース)が実現できる。

本報では，IGCCの最近の動向，空気吹きIGCC及びゼロエミッションを目指したIGCCについて述べる。

## 2. IGCCの開発状況

我が国では，高効率，高信頼性の空気吹きIGCCの開発を，9電力会社，電源開発及び電力中央研究所が共同で，国からの補助を受けながら開発を進めており，1986～1996年度の間，200t/日規模(25MW相当)のパイロットプラント試験を実施し，成功裏に終了した。現在，商用化に至る開発の最終段階として，電力会社が共同で設立した株式会社クリーンコールパワー研究所が国家プロジェクトとして，250MW級実証機を建設中で，2007年秋から試験を開始する予定である。

海外では既に300MW級の酸素吹きIGCCが運転中で

表1 世界のIGCCプロジェクト

プロジェクト	Buggenum (オランダ)	Puertollano (スペイン)	Wabash River (アメリカ)	Tampa (アメリカ)
ガス化炉方式	酸素吹き ドライフィード シェル炉	酸素吹き ドライフィード プレンプロー炉	酸素吹き スラリーフィード E-GAS炉	酸素吹き スラリーフィード GE炉
発電端出力 (適用GT)	284MW (1100℃級GT)	335MW (1300℃級GT)	296MW (1300℃級GT)	322MW (1300℃級GT)
実施主体	電力会社4社で 会社設立	電力会社8社と メーカー3社	エネルギー会社 と電力会社	電力会社単独
実証試験 開始時期	1994年1月	1997年11月	1995年11月	1996年9月
送電端効率	計画 41.4% 実績 不詳	計画 41.5% 実績 不詳	計画 37.8% 実績 39.7%	計画 39.7% 実績 37.5%
使用燃料	・豪州炭他 ・バイオマス ・天然ガス	・地元炭 ・石油コークス ・天然ガス	・地元炭(高硫黄) ・石油コークス ・天然ガス	・東部炭(高硫黄) ・石油コークス ・天然ガス

原稿受付 2006年8月17日

\*1 三菱重工業(株) 原動機事業本部 火力プロジェクト部  
〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1

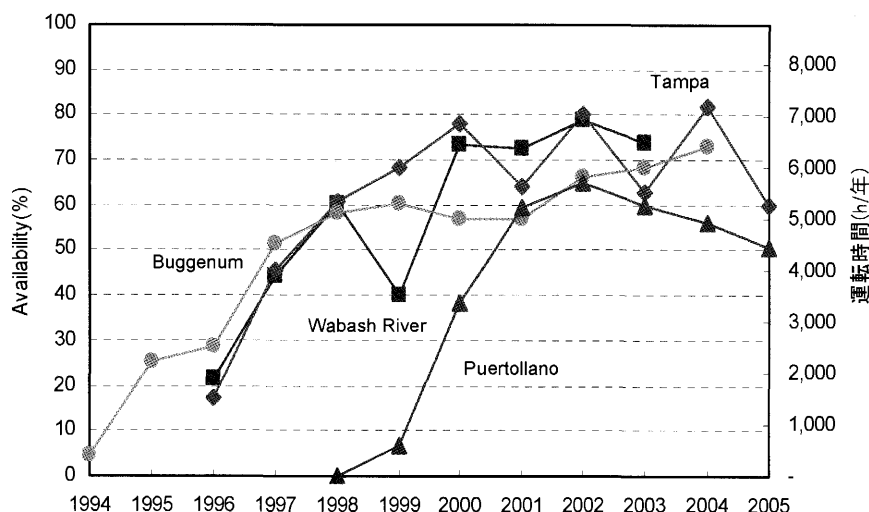


図1 海外IGCCのSyngas 焚きのAvailability

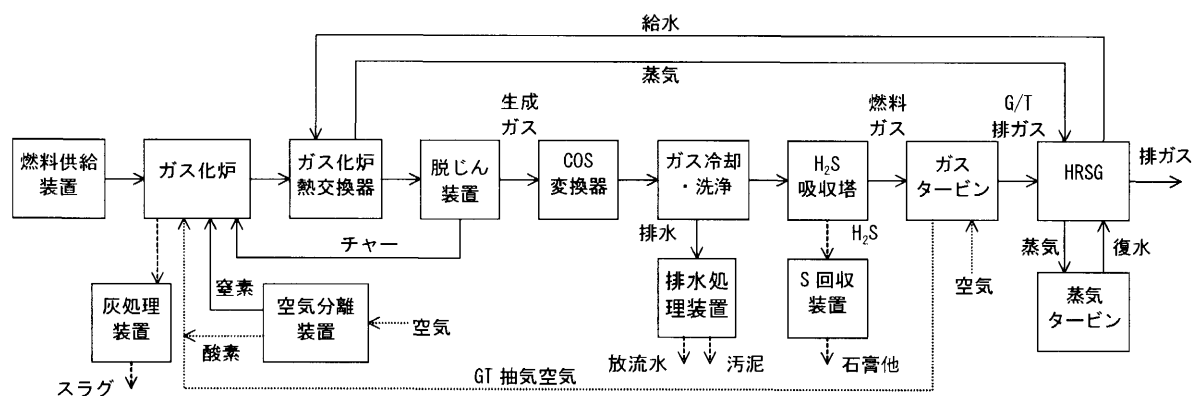


図2 IGCCのシステム構成例

ある。酸素吹きはガス化が容易であるが、酸素製造に多くの所内動力を要するため、必ずしも送電端効率は高くない。いずれの海外IGCCは天然ガスが使用可能であるためか、石炭専焼での信頼性が十分ではない。海外IGCCプロジェクトの概要を表1に示す。海外IGCCプラントの石炭使用時（Syngas 焚き）のAvailabilityは図1に示す通り、70～80%である。

最近、米国では、自国に豊富なエネルギー資源の利用及び最近の天然ガス価格の上昇により多くの石炭火力の計画が進められている。特に、環境性能の改善の観点から、IGCCが注目されている。

更に、2005年8月に施行されたエネルギー政策（Energy Policy Act 以下 EPACT）の優遇税制を前提とした2010年頃の運転開始を目標とした複数のIGCCプロジェクトが検討されている。AEP（American Electric Power）が、600MW級IGCCの検討（FEED：Front End Engineering Design プロジェクト費用見積りのための詳細設計）を進めている。同プラントの送電端効率は38.6%（HHV）である。

欧州では、オランダでNuonが、2011年運開の石炭とバイオマス混焼の1200MW級IGCCであるMagnumプ

ロジェクトを発表している。

また、GTメーカーがガス化炉技術を買収し、ガス化炉及びGTを一貫で供給する体制を整え、IGCCに取り組んでいる。GEは2004年にChevron-Texacoのガス化技術部門を買収し、また、Siemensは、2006年にスイスSustecのGSP™（Gaskombinat Schwarze Pumpe）技術を買収した。

更に、IGCC主機メーカーはエンジニアリング会社との協業を発表し、IGCCの計画及びPR活動を行っている。

### 3. IGCCの構成

IGCCは、石炭を部分酸化することにより、一酸化炭素、水素を主成分とするガス燃料に変換する石炭ガス化炉、その生成ガスからばいじん、硫黄分を除去するガス精製設備、その精製ガスを燃料としたガスタービン複合サイクル発電設備から構成される。システムの構成例を図2に示す。

#### (1) 石炭ガス化炉

石炭ガス化炉は燃料の供給方式及び石炭をガス化するガス化剤の種類により、いろいろな方式が開発・実用化

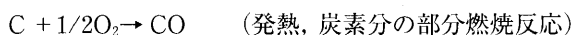
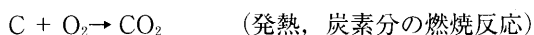
されている。

燃料をガス化するガス化剤として、空気及び酸素がある。

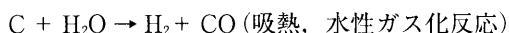
石炭性状、燃料の供給方式及びガス化剤により発生するガスの組成、発熱量は異なり、約1000～3000kcal/m<sup>3</sup>Nの発熱量を有する石灰ガス化ガスが得られる。

ガス化炉では高温で石炭を酸素、水蒸気などのガス化剤と反応させて、水素、一酸化炭素を生成する。主要反応を次に示す。

炭素と酸素との反応



炭素と水蒸気との反応



また、ガス化炉は、ガスタービン入口燃料ガス所要圧力に合わせ2.5～4.0MPa程度で運転される。

## (2) ガス精製設備

ガス化炉で発生したガス化ガスには、石炭中灰分及び硫黄分を含むため、ガス精製装置にて後流プロセスまたは環境排出基準が要求するガス性状まで精製浄化する必要がある。ガス化ガス中からばいじんを除去する脱塵設備及び有害成分を除去する脱硫設備が設置される。

### ① 脱塵設備

ガス化ガスには、石炭中灰分及び未反応炭素等のダストを含むため、脱塵設備でガスタービンの許容ダスト濃度以下迄精密脱塵を行う。

### ② 脱硫設備

脱硫方式は乾式脱硫及び湿式脱硫がある。現在、主に湿式脱硫方式で検討が進められている。

湿式脱硫設備は、COS変換器、洗浄塔、H<sub>2</sub>S吸収塔及びS回収設備から構成される。

脱硫設備では、脱塵設備を出たガスをまずH<sub>2</sub>S吸収塔で除去できないCOSをH<sub>2</sub>Sに変換し、水洗浄によりNH<sub>3</sub>、ハロゲン及び重金属等を除去する。そしてエネルギー消費原単位の小さいMDEA（メチルディエタノールアミン）法等により硫黄分を除去する。

除去された硫黄は石膏もしくは単体硫黄として回収され、有効利用が可能である。

### (3) ガスタービン

石炭ガス化ガスはLNGに比べ発熱量が約1/10の低カロリーでばいじん及びアルカリ金属を含むガス燃料である。表2にLNG、石炭ガス化ガスと低カロリーガス焼きガスタービンの代表燃料である増熱高炉ガス（BFG）の性状例を示す。

石炭ガス化ガスは、発熱量が低い、水素を多く含むため、LNG及びBFGに比べて可燃範囲が広い。また、石炭ガス化ガス性状は、BFGと類似しており、BFG焼きガスタービンを基に石炭ガス化用ガスタービンへの対応が可能である。

空気吹きガス化炉からの石炭ガスの発熱量は約

表2 ガスタービン燃料ガス性状例

燃 料 項 目	LNG	高炉ガス (BFG)	石炭ガス 化ガス
HHV (kcal/m <sup>3</sup> N)	10,810	970	1,060
LHV (kcal/m <sup>3</sup> N)	9,750	940	1,010
主成分 (vol%)			
CO	—	23.6	25.7
H <sub>2</sub>	—	5.1	9.1
CO <sub>2</sub>	—	20.8	2.9
H <sub>2</sub> O	—	3.0	3.5
N <sub>2</sub>	0.1	46.5	58.0
Ar	—	—	0.7
CH <sub>4</sub>	88.8	0.9	0.04
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.6	0.0	—
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3.7	0.1	—
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.8	—	—
理論燃空比 (kg/kg)	0.059	1.29	1.08
可燃範囲(上限/下限比)	3.18	4.45	8.66

1,000kcal/m<sup>3</sup>N (LHV) であり、サーマルNO<sub>x</sub>の発生も少ない。一方、酸素吹きガス化炉は燃料発熱量が約2,500kcal/m<sup>3</sup>N (LHV) であり、COを多く含むため理論燃焼温度が上昇しサーマルNO<sub>x</sub>の発生が多い。NO<sub>x</sub>低減対策として、空気分離装置で製造される窒素をガスタービンの燃料ガスへ混入させる方法がある。窒素の希釈により、燃料ガスの発熱量は約半分に低下し、空気吹きガス化炉のガス発熱量とほぼ同じとなり、ガスタービンでの燃焼時に発生するNO<sub>x</sub>が低減される。

図3に空気吹きIGCCシステムと酸素吹きIGCCシステムの比較を示す。

## 4. 空気吹きIGCC

前述の通り、欧米のIGCCは、化学原料製造用に開発された酸素吹きガス化炉を発電用に適用したもので、酸素製造動力が大きく送電端熱効率が低い傾向にある。これに対し、我が国ではより高効率かつ高信頼性を目指し、所内動力が少ない空気吹きガス化炉を採用した独自の空気吹きIGCC技術が推進されている。空気吹きIGCCは、図4に示す空気吹き乾式給炭二段噴流床石炭ガス化炉を用いる。空気吹き石炭IGCCは酸素吹きに比べて酸素製造動力が少なく送電端効率高い。また、乾式給炭は石炭スラリーによる湿式給炭方式に比べ水分の潜熱ロスが少ない。

二段噴流床空気吹きガス化炉は、灰の熔融安定排出が可能で高温燃焼を行うコンバスタ部（燃焼部）とその高温ガスによってガス化反応を行うリダクタ部から構成さ

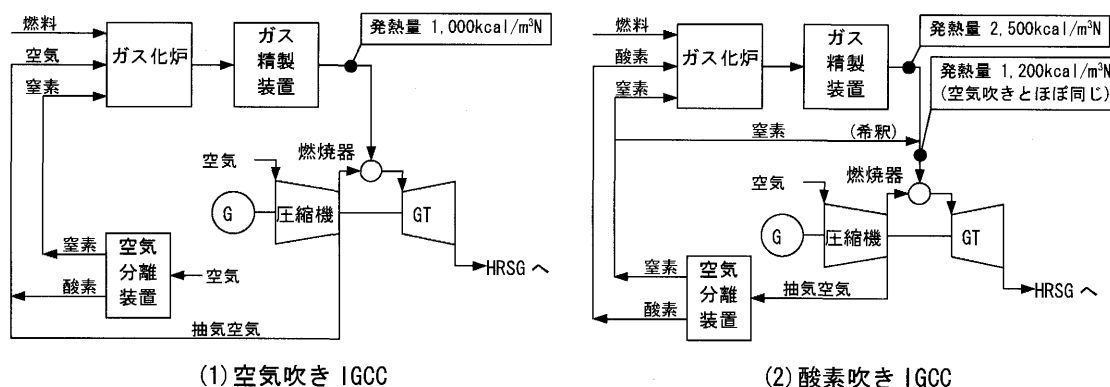


図3 空気吹きと酸素吹きのIGCCシステムの比較

表3 IGCCシステムの比較

項目	酸化剤		給炭方式		ガス精製		送電端効率 (%, 絶対値)
	空気	酸素	乾式	湿式	乾式	湿式	
空気吹き	○		○		○	○	ベース (乾式脱硫)
欧州 A		○	○			○	(ベース) -2.5
米国 B		○		○		○	(ベース) -5.5

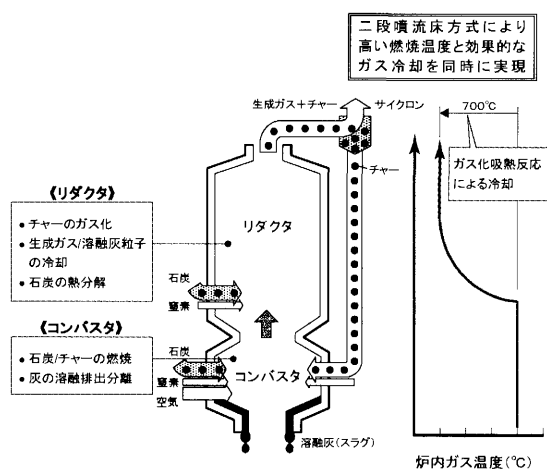


図4 空気吹き二段噴流床石炭ガス化炉の原理

れる。機能の分離により、空気で石炭灰の溶融とスラグ安定排出に必要なガス温度とガスタービンの安定燃焼が可能なガス発熱量を得ることができる。また、生成ガス中に含まれる溶融灰粒子を石炭のガス化吸熱反応により効果的に冷却できるので、大型の輻射熱交換器や低温ガスによる冷却（クエンチ）システムが不要で、ガス化炉をコンパクトにできる利点がある。

ガス化炉後流の熱交換器では、ガス化炉からの生成ガス及び未反応炭素を含むチャーを所定温度まで冷却し、生成ガス及びチャーの顕熱を高圧蒸気として回収する。

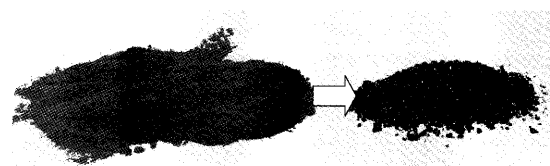
空気吹きIGCCは、表3に示す通り酸素吹きIGCCに比べて、高い送電端効率を実現できる。

#### (1) 高い発電効率

IGCC 商用機の送電端効率は48～50%（LHV ベース）で、現状の微粉炭火力に比べて約15-20%の効率向上が可能である。これによりCO<sub>2</sub>の排出原単位を石油火力並にできる。

#### (2) 広い炭種適合性

IGCCは微粉炭火力で使い難い灰融点の低い石炭が適しており、利用炭種の拡大が図れる。



微粉炭焚きフライアッシュ

IGCCスラグ

容積 100% (ベース)

ガラス質  
非溶出性  
容積 50%

灰処理費の低減

図5 IGCCスラグの特徴

#### (3) 高い環境特性

高効率化によりSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじんの排出原単位の低減が可能である。更に、複合発電のため微粉炭火力に比べ温排水量が約30%低減できる

#### (4) 優れた石炭灰処理

石炭灰は溶融スラグとして排出されるため図5の通りフライアッシュに比べて、容積がほぼ半減し、また、微量物質の溶出がほとんど無い。

図6にシステム構成図を、表4に基本要目を示す。

#### (5) プラント性能

1500°C級ガスタービンと組み合わせた空気吹き石炭IGCCの送電端効率は、湿式脱硫と組み合わせで48%、乾式脱硫で50%（LHV ベース）が得られ、単機出力は500～650MWである。

ガスタービン形式とプラント性能の関係を図7に示す。

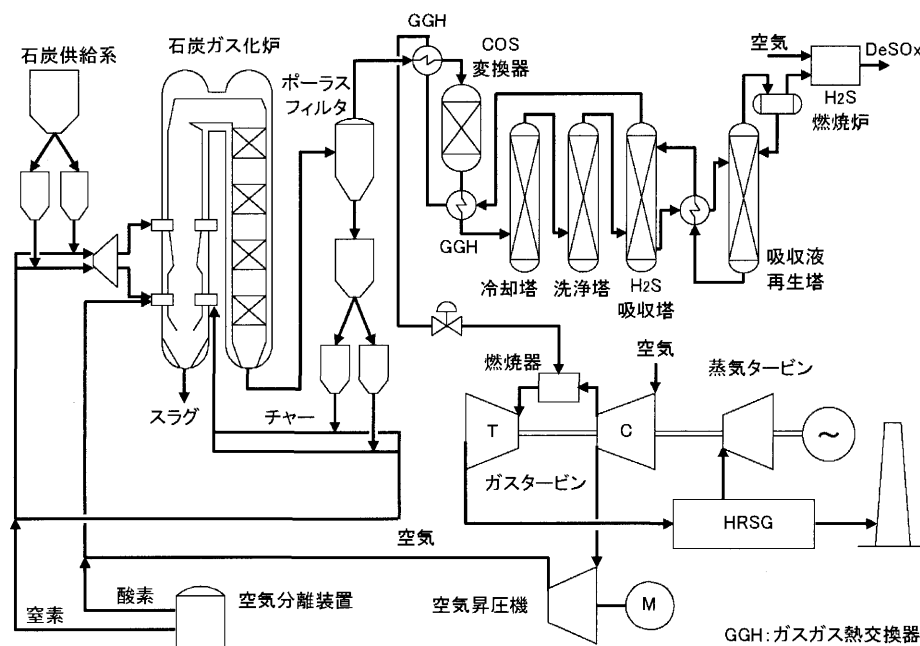


図6 空気吹き IGCC のシステム構成例 (湿式脱硫)

表4 空気吹き石炭 IGCC 基本構成

項目	要目
ガス化炉	空気吹き二段噴流床方式
石炭供給方式	乾式給炭
脱塵設備	ポーラスフィルタ
脱硫設備	湿式 MDEA 脱硫/乾式脱硫
ガスタービン	1250℃～1500℃級

表5 IGCC 実証機の概要

出力 (石炭使用量)	250MW 級(約 1700t/日)
ガス化炉	乾式給炭 空気吹き加圧二段噴流床
ガス精製	湿式ガス精製(吸収液 MDEA) + 石膏回収
ガスタービン	1250℃級
目標プラント効率	発電端 48%、送電端 42% (LHV ベース)

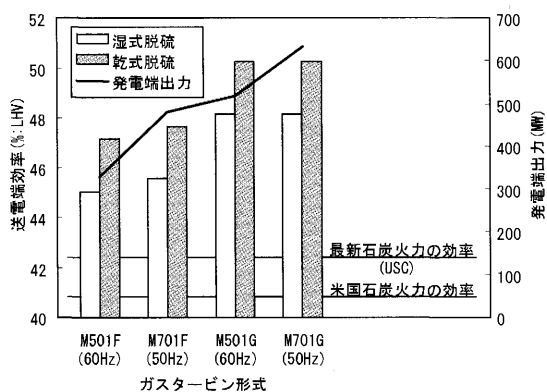


図7 空気吹き IGCC のプラント性能

## 5. 250MW 級 IGCC 実証機

現在、株式会社クリーンコールパワー研究所が常磐共同火力(株)勿来発電所構内に国の30%補助金を得て、250MW 級実証機を建設中で2007年秋から試運転の予定である。

実証機では空気吹きガス化炉と湿式脱硫の組み合わせが採用された。実証機の出力は、商用機の約1/2規模の250MW (石炭使用量約1700t/日) で、1250℃ 級ガスタービンが採用されている。

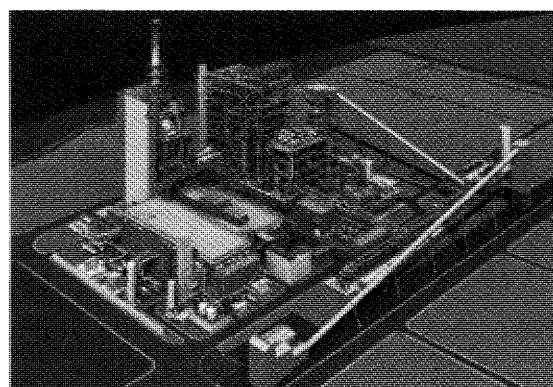


図8 250MW 級 IGCC 実証機完成予想図

目標送電端効率は、1250℃ 級ガスタービンでは高効率化に限界があるため新鋭大容量微粉炭火力と同程度の42% (LHV ベース) である。また、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん等の排出濃度は、日本の新鋭微粉炭火力と同等である。実証機の概要を表5 及び完成予想図を図8 に示す。

表6 海外の主要IGCC及びゼロエミッションを目指したIGCCプロジェクト

方式	項目	国	実施主体	燃料	状況	出力(MW)	運転予定
IGCC	AEP	米国	AEP(電力)	石炭	FEED	600 × 2~3	2010
	Cinergy	米国	Cinergy(電力)	石炭	FEED	600	2010 頃
	Magnum	オランダ	Nuon(電力)	石炭 バイオマス	FS サイト決定	1,200	2011
	Saxony	ドイツ	Siemens(メーカ)	石炭	不明	1,000	未定
ゼロエミッション を目指した IGCC	GreenGen (中国煤電公司)	中国	華能電力公司他	石炭	不明	200~400	2020 頃
	FutureGen	米国	U.S. DOE FutureGen Alliance	石炭	基本計画 サイト選定	275	2012
	ZeroGen	豪州	Stanwell(電力)他	石炭	(FS)	100	2010
	Killinghole	英国	E.ON UK(電力)	石炭	FS	450	不明
	RWE	ドイツ	RWE(電力)	石炭	FS	450	2014
CO <sub>2</sub> 回収型 微粉炭火力	Carson	米国	BP(石油)	石油 コークス	FS	500	2011
	CASTOR	デンマーク	Vattenfall(電力) RWE(電力)他	石炭	FS	420<既設> (CO <sub>2</sub> 回収 1t/h)	2008
	Tilbury	英国	Npower-RWE(電力)	石炭	FS	1,000	—

## 6. ゼロエミッションをめざしたIGCCの動向

最近、ゼロエミッションを目指し、CO<sub>2</sub>回収を組合せたIGCCの検討が進められている。

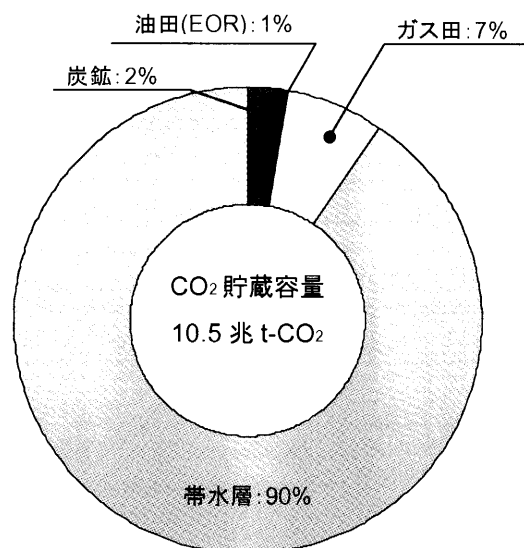
石炭火力からのCO<sub>2</sub>回収方式として、①石炭燃焼排ガスからCO<sub>2</sub>を回収する方式と②燃焼前の燃料ガスからCO<sub>2</sub>回収する方式がある。CO<sub>2</sub>の回収により送電端効率が低下し、CO<sub>2</sub>回収設備を必要とするため、発電原価が上昇する。

燃焼排ガスからのCO<sub>2</sub>回収は、国内外でパイロットプラント規模の開発が進められている。IGCCの場合は、加圧状態でCO<sub>2</sub>排ガスを除去できるため、処理ガス量が小さく、かつ、CO<sub>2</sub>濃度が高いため、燃焼排ガスからのCO<sub>2</sub>除去に比べ、プラント効率の低下が小さく、発電原価の上昇が小さいと評価されている。米国では、2002年にブッシュ大統領がCO<sub>2</sub>隔離及び水素利用を目的とした出力275MWのFUTURE-GENプロジェクトを発表した。2005年9月に電力会社及び石炭会社等が出資するFutureGen Industrial Allianceが設立され、2007年に建設場所を決定し、2012年運転開始の計画が発表されている。また、豪州では、2010年に運転開始する出力100MWのZeroGenプロジェクトが発表された。

表6に海外の主要IGCCプロジェクトとゼロエミッションを目指したIGCCプロジェクトを示す。

CO<sub>2</sub>隔離は、単にCO<sub>2</sub>分離だけでなく、回収したCO<sub>2</sub>を安全に貯留することが重要であり、全体を俯瞰した検討が必要となる。全世界のCO<sub>2</sub>貯留容量は、約10.5兆tonとの調査例があり、同量は2003年に各国から発生したCO<sub>2</sub>量の約400年分に相当する。図9に海洋投棄を除く世界のCO<sub>2</sub>貯留容量の調査例を示す。

CO<sub>2</sub>貯留容量の約90%が、帯水層による地中隔離（陸域及び海域）である。現在、欧米を中心に実用化してい

図9 世界のCO<sub>2</sub>貯蔵容量と内訳例

るCO<sub>2</sub>の隔離方法として、EOR (Enhanced Oil Recovery) がある。これはCO<sub>2</sub>を油田に圧入することで原油の粘性を低下させ、原油の回収率を向上させるもので、経済メリットがある。

また、図10に2003年の国別のCO<sub>2</sub>発生量とCO<sub>2</sub>隔離容量との関係を示す。米国及び旧ソ連は、CO<sub>2</sub>貯留能力が2兆ton以上と大きく、CO<sub>2</sub>発生量に対する貯留容量も大きい。一方、日本はCO<sub>2</sub>貯留容量が小さく、CO<sub>2</sub>隔離容量は、地域により大きく異なり、CO<sub>2</sub>隔離では地域制約を受けることを十分考慮する必要がある。

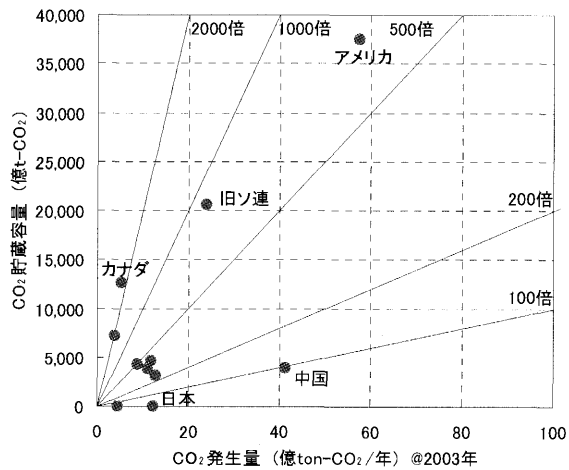


図10 国別のCO<sub>2</sub>発生量（2003年）とCO<sub>2</sub>貯蔵容量

## 7. まとめ

石炭は廉価なエネルギーで、世界中に広く分布し、引き続き、主要エネルギーの一つとして利用される見通しである。最新のGTを組合せたIGCCは、効率が高く、地域に依らず普遍的に、従来石炭火力に比べ、CO<sub>2</sub>排出原単位を約15-20%低減可能である。現在国家プロジェクトとして開発が進められているIGCC250MW級IGCC実証機で信頼性・運転性を一日も早く検証し、広く世界に普及を望む次第である。

## 船用過給機の性能計測試験と“計測の不確かさ評価”

Performance Measurement Tests of a Marine Turbocharger  
And “Uncertainty Evaluation in Measurement”小池 利康<sup>\*1</sup>  
KOIKE Toshiyasu岩城 史典<sup>\*2</sup>  
IWAKI Fuminori小口 幸成<sup>\*3</sup>  
OGUCHI Koseiキーワード：不確かさ，計測，ターボチャージャ，過給機，性能  
Uncertainty, Measurement, Turbocharger, Performance

## Abstract

In recent years, followed by the enhancing powers and low specific fuel consumptions of marine diesel engines, turbochargers are also required to provide higher efficiency and higher pressure ratio. Therefore, the performance measurement test of marine turbochargers is one of the most important processes for the improvement of the present model and for the new model development.

For the performance measurement tests of a marine turbocharger, the quantity such as efficiency, which can't be measured directly, should be calculated by measuring the quantity of states such as pressure, temperature, mass flow rate and others. The true values won't be obtained when the values of atmospheric pressure, temperature, humidity and others have dispersion. Therefore, it is necessary to consider these influences on the analyses of the measured data.

In this paper, to clarify the uncertainties of the performance measurement for a marine turbocharger, performance values were calculated from quantities of state parameters of some turbochargers, and then the calculated results were critically compared with uncertainty effects.

## 1. はじめに

近年、船用ディーゼルエンジンの高出力化・低燃費化に伴い、過給機に対しても従来以上の高効率化、高圧力比化が求められるようになった。船用過給機の新機種開発ならびに従来機種の改良および品質保証において、この熱力学的性能計測試験は最も重要な工程のひとつである<sup>(1)</sup>。

過給機の熱力学的性能計測試験は、圧力・温度・湿度などの状態量を計測し、流量・効率などの直接計測できない量を算出する。大気圧力・温度・湿度などが変動すると、その影響も考慮しなければ真の値を導くことはできない。

実測値に基づいた計算結果には、必ず誤差が含まれている。真の値が分からなければ誤差は導けないが、誤差の内容を検討して不確かさ解析を行うことによって真の値を推測し、また、誤差の要因を特定することも可能である<sup>(2)~(4)</sup>。

本報では、船用過給機の熱力学的性能計測における不確かさを明らかにするために、いくつかの過給機を用いて測定した状態量データから性能計算を行い、その結果と不確かさについて検討する。

## 2. 過給機単体性能計測試験装置

船用過給機の評価試験は、実際に船用ディーゼルエンジンに搭載して評価する方法と過給機単体専用試験装置で評価する方法の2つがある。過給機に対応したディーゼルエンジンをその都度用意することは困難であるため、通常は、過給機単体試験装置を使用して評価することが多い。

## 2.1 計測・制御機器および配管系統

図1に過給機単体性能計測試験装置の系統図を示し、表1に計測項目・記号・単位およびセンサ数を示す。

試験装置の起動用空気源①で発生させた圧縮空気は、排気ガスの代用として燃焼器②で燃焼させ、膨張による動力をタービン軸に伝えた後大気に放出する。装置起動用空気源とタービンの間には、流量計測のためのオリフィス③を設けている。一方、供試過給機のコンプレッサは、タービン軸から伝えられた回転エネルギーによ

原稿受付 2006年1月30日

再原稿受付 2006年7月19日

- \* 1 石川島汎用機械(株) 回転機事業部 船用過給機技術 Gr  
〒399-0427 長野県上伊那郡辰野町伊那富3934
- \* 2 石川島播磨重工業(株)
- \* 3 神奈川工科大学 学長



て、大気から空気を吸い込み圧縮空気として吐出する。コンプレッサと排気塔の間には、流量計測のためのオリフィス④を設けている。

起動時の過給機回転速度の制御は、おもに減圧調整バルブ PCV-1 および PCV-0 を操作する。タービン入口温度の制御は、燃料減圧調整バルブ PCV-4 を操作し、燃料流量を調整することにより行う。また、コンプレッサ吐出圧力の制御は、バルブ PCV-2 を操作する。ただし、これらの制御対象の間には、相互干渉が生じるため、一つの制御量だけを変更する場合も複数の操作を同時に行う。

過給機回転速度が上昇し、所定のコンプレッサ吐出圧力が得られると、バイパスバルブ PCV-3 を開くことによってコンプレッサから吐出した圧縮空気をタービンに供給し、装置起動用空気源からの圧縮空気を PCV-1 によって遮断すれば、自力運転をさせることができる。また、PCV-2 を全閉にすれば、コンプレッサ吐出空気的全流量がタービンに供給される。このときコンプレッサ吐出圧力は、PCV-3 によって制御する。

供試過給機のコンプレッサ・タービン・潤滑油のそれぞれ入口および出口には、圧力・温度の計測センサを設けている。また、コンプレッサ入口近傍には、大気絶対圧力センサおよび大気湿度センサを設けている。

燃焼器に供給する燃料およびアトマイザエアの流量は、それぞれ容積式およびオリフィス流量計によって計測する。また、過給機に供給する潤滑油も容積式流量計によって計測する。なお、オリフィス流量計を含めた試験装置は、ISO<sup>(5)</sup> および JIS<sup>(6)</sup> に準じている。

試験装置の制御・計測範囲は、供試過給機の大きさに合わせて選択する。これによって制御性を向上させ、計測の不確かさを許容範囲内におさめることが可能となる。

## 2.2 性能計測・制御システム

図2に性能計測・制御システムの構成図を示す。現場に設置した各計測センサからの信号は、センサラック盤

内シーケンサのプロセス計測ユニットに計測データとして収集される。センサラック盤内のシーケンサは、計測室の計測制御盤内シーケンサのメインユニットとリンクし、計測制御盤内の性能計測・制御 PC は、メインユニットから 1 秒間隔でデータを採取する。

計測制御盤内の性能計測・制御 PC および各操作機器から入出力する制御情報は、計測制御盤内シーケンサのメインユニットから、センサラック盤内シーケンサの PID フィードバック制御ユニット等を介し、現場の各操作機器に出力される。

表1 計測項目・記号・単位およびセンサ数

計測項目	記号	単位	数
過給機回転速度	$N_t$	$s^{-1}$	1
大気絶対圧力	$p_0$	kPa	1
大気温度	$t_0$	$^{\circ}C$	1
大気相対湿度	$\phi_0$	%	1
コンプレッサ入口静圧 (Gauge)	$p_{1s}$	Pa	4
コンプレッサ入口全温度	$t_{1t}$	$^{\circ}C$	8
コンプレッサ出口静圧 (Gauge)	$p_{2s}$	kPa	4
コンプレッサ出口全温度	$t_{2t}$	$^{\circ}C$	4
コンプレッサオリフィス差圧	$\Delta p_{oc}$	Pa	2
コンプレッサオリフィス前静圧 (Gauge)	$p_{oc}$	kPa	2
コンプレッサオリフィス全温度	$t_{oc}$	$^{\circ}C$	2
タービン入口静圧 (Gauge)	$p_{3s}$	kPa	6
タービン入口全温度	$t_{3t}$	$^{\circ}C$	6
タービン出口静圧 (Gauge)	$p_{4s}$	Pa	6
タービン出口全温度	$t_{4t}$	$^{\circ}C$	6
タービンオリフィス差圧	$\Delta p_{ot}$	Pa	2
タービンオリフィス前静圧 (Gauge)	$p_{ot}$	kPa	2
タービンオリフィス全温度	$t_{ot}$	$^{\circ}C$	2
アトマイザオリフィス差圧	$\Delta p_{oam}$	Pa	1
アトマイザエア静圧 (Gauge)	$p_{oam}$	kPa	1
アトマイザオリフィス全温度	$t_{oam}$	$^{\circ}C$	1
燃料流量	$V_{FO}$	L/min	1
燃料入口静圧 (Gauge)	$p_{FO}$	Pa	1
潤滑油流量	$V_{LO}$	L/min	1
潤滑油入口静圧 (Gauge)	$p_{LOi}$	kPa	2
潤滑油出口静圧 (Gauge)	$p_{LOo}$	kPa	2
潤滑油入口温度	$t_{LOi}$	$^{\circ}C$	2
潤滑油出口温度	$t_{LOo}$	$^{\circ}C$	2

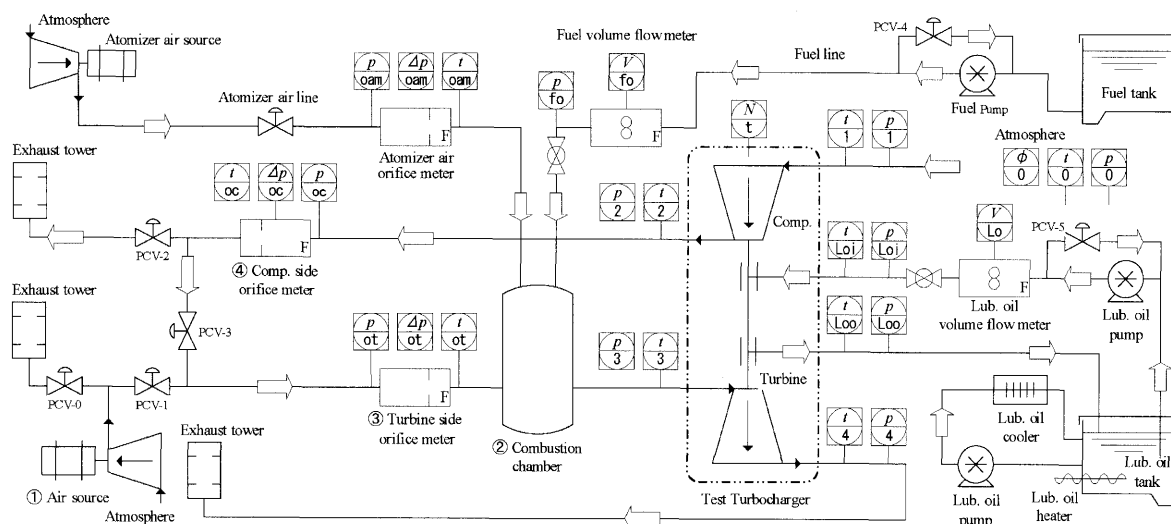


図1 過給機単体性能計測試験装置の系統図

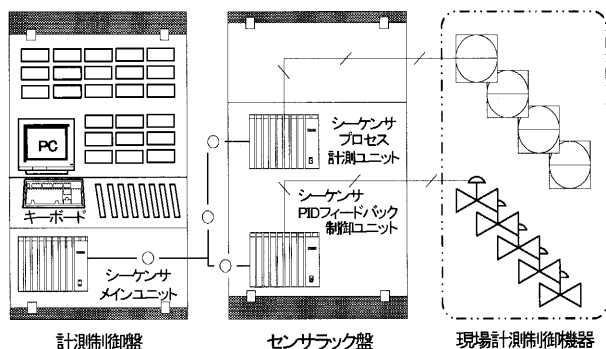


図2 性能計測・制御システム構成図

### 2.3 性能計測・制御 PC ソフト

図3に性能計測・制御 PC ソフトの構成を示す。

性能計測・制御 PC ソフトは、

- a) 仕様登録プログラム
- b) 性能計測プログラム
- c) 性能計算結果記録プログラム

の3種類から構成される。a) 仕様登録プログラムと c) 性能計算結果記録プログラムは、表計算ソフトによって作成した。なお、これらのプログラムには、表計算ソフト標準搭載の開発言語によってマクロ機能を追加している。多くの PC は、表計算ソフトがインストールされており、性能計測 PC とネットワーク接続することによって、どこからでもデータ処理が可能となる。b) 性能計測プログラムは、市販のプログラム言語によって作成した。

a) 仕様登録プログラムは、計測制御にあらかじめ必要な情報を数値処理し、b) 性能計測プログラムが利用できるデータとして保存するためのものである。計測制御にあらかじめ必要な情報とは、試験装置の仕様、供試過給機の形式・仕様により異なる固有の情報のことを示し、性能計算に必要な幾何形状の値・計画コンプレッサ性能曲線・計測のバラツキの許容値・PID 制御に必要な各係数・インターロック機能に必要な各制御量の許容値などである。したがって、過給機の仕様の数だけファイルが存在する。数値処理、ファイルの保存などは、表計算ソフトのマクロ機能によって自動処理することができる。

b) 性能計測プログラムは、試験前に、a) 仕様登録プログラムに保存された数値データを読み込み、制御に必要なデータを計測制御盤内シーケンサのメインユニットに受け渡す。計測試験中は、メインユニットの計測データを瞬時に採取して表示するとともに各種性能計算を行い、その結果もデジタルおよびグラフィック表示する。また、過給機を含めた試験装置が定常状態ではない場合および計測データのバラツキが許容値を超えている場合にはアラームメッセージを表示する。なお、計測値のトレンド記録に加え任意の計測点で、c) 性能計算結果記録プログラムに計測値を受け渡すこともできる。

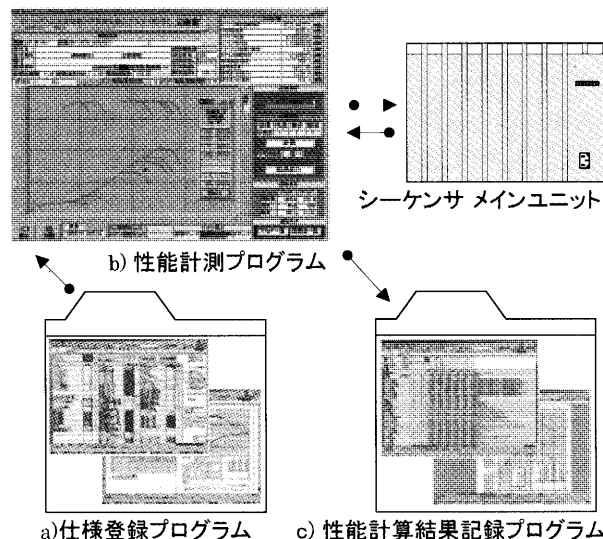


図3 性能計測・制御 PC ソフトの構成

c) 性能計算結果記録プログラムは、b) 性能計測プログラムの計測データを表計算ソフトのマクロ機能によって自動で受け取って数値計算を行い、さらにその結果のデジタルおよびグラフィック表示・出力を行う。性能計算式は、b) 性能計測プログラムと同一である。過給機を含めた試験装置が定常状態ではない場合および計測データのバラツキが許容値を超えている場合にはアラームメッセージを表示する。

なお、熱力学的性能計算式は、ISO<sup>(5)</sup>および JIS<sup>(6)</sup>に準じており、オリフィスおよびコンプレッサ側の作動流体は湿り空気、タービン側の作動流体は燃焼ガスと湿り空気の混合ガスとして、比熱・ガス定数などを算出する<sup>(7)</sup>。

## 3. 不確かさの検証方法

### 3.1 不確かさについて

本報では、計測結果の精度を評価するため、国際的に統一された“不確かさ”の表現を用いることとした<sup>(3)</sup>。

ここで使用する不確かさの用語のうち代表的なもの6つを以下に示す。

- ・“標準不確かさ”
- ・“Aタイプの評価”
- ・“Bタイプの評価”
- ・“合成標準不確かさ”
- ・“拡張不確かさ”
- ・“包含係数”

“標準不確かさ  $u$ ”とは、標準偏差であらわされる計測結果の不確かさである。計測値のバラツキの分布が正規分布をとり期待値が  $\bar{x}$  の場合、 $\bar{x} \pm u$  の区間には、その分布の約68%が含まれる。

“Aタイプの評価”および“Bタイプの評価”とは、不確かさの評価方法の呼称であり、不確かさは、評価方法によって大きくこの二つに分類できる。“Aタイプの評価”は、統計的手法によって評価し、“Bタイプの評

価”は、その他の手段によって評価するものである。その他の手段とは、校正機器の精度や蓄積された校正データなどから、確率分布を想定して評価する方法である。ここで、Aタイプの評価から求める標準不確かさを $u_a$ 、Bタイプの評価から求める標準不確かさを $u_b$ であらわす。“合成標準不確かさ $u_c$ ”とは、不確かさの伝播則に基づき、いくつかの成分の不確かさを合成したものである。例えば、Aタイプの評価から求める標準不確かさ $u_a$ とBタイプの評価から求める標準不確かさ $u_b$ を合成することもできる。

“拡張不確かさ $U$ ”は、計測値の分布の大部分を含むと期待される区間を定める量で、計測結果の“標準不確かさ $u$ ”に“包含係数 $k$ ”を乗じてあらわされる不確かさである。計測値の分布の大部分とは、信頼の水準 $p$ を示し、一般に、95%または99%をとる。したがって、計測値の分布は、 $\bar{x} \pm U$ の区間に $p$ の確率で含まれるといえる。本報では、 $\bar{x} \pm U$ の区間に、 $p$ の確率で真の値が存在すると推定した。

“包含係数 $k$ ”は、“拡張不確かさ $U$ ”を算出するための係数である。一般に、 $k=2$ のときの $\bar{x} \pm U$ は、およそ95%の信頼の水準を持つ区間となり、 $k=3$ のときは、およそ99%の信頼の水準を持つ区間となる。

### 3.2 不確かさの算出方法

以下に、本報で扱った不確かさの算出方法について説明する。

#### 3.2.1 Aタイプの評価から求める標準不確かさ

Aタイプの標準不確かさは、定常状態で繰り返し計測したときの偶然に変化する値のバラツキ度合い、すなわち式(1)に示す実験標準偏差 $s$ を元に算出した。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

ここで、 $n$ は繰り返し採取した測定値の数、 $x_i$ は $i$ 番目の測定値、 $\bar{x}$ はその平均値をあらわす。

計測値は、 $n$ 回の繰り返し計測を平均し、さらに $m$ 個の計測センサによる計測値を同一計測項目として空間的に平均化しているため、式(2)および(3)によって、その効果と空間による非一様性を評価した。

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \nu_j \cdot s_j^2}{\sum_{j=1}^m \nu_j}} \quad (2)$$

$$u = \frac{s_p}{\sqrt{m}} \quad (3)$$

ここで、 $\nu$ は自由度を示し、繰り返し計測数 $n$ の平均値 $\bar{x}$ を期待値とした場合、 $\nu=n-1$ となる。

本報では、全計測項目について、それぞれの計測センサ数 $m=1 \sim 8$ 個のデータを、1秒間隔で採取し、それぞれの繰り返し計測数 $n=30$ 回以上とした。

なお、この計測では、通常のパフォーマンス試験と同様に過給機を起動させ、試験装置の系を定常状態とした後、データを採取した。

一例として、図4にコンプレッサ出口圧力 $p_{2s}$ の度数分布図を示す。図4に示したコンプレッサ出口圧力 $p_{2s}$ は、圧縮空気が流れる円管の同一断面を空間的に4等分した位置に計測座を設け、 $m=4$ 個の計測センサによって計測した。ここで、これら4個の計測センサの計測値を $p_{2s-1}$ 、 $p_{2s-2}$ 、 $p_{2s-3}$ および $p_{2s-4}$ で示す。それぞれの平均値にはバラツキがあり、 $p_{2s-1}$ 、 $p_{2s-4}$ および $p_{2s-2}$ 、 $p_{2s-3}$ の二つの偏りがあることから、円管内の流れにも非一様性があることが想像できる。このとき、それらの標準偏差 $s$ は、0.527、0.467、0.511および0.574kPaで、4点平均の標準不確かさ $u_a$ は、0.26kPaとなる。この標準不確かさが影響を与える項目とその影響度の大きさについては、5章で述べる。

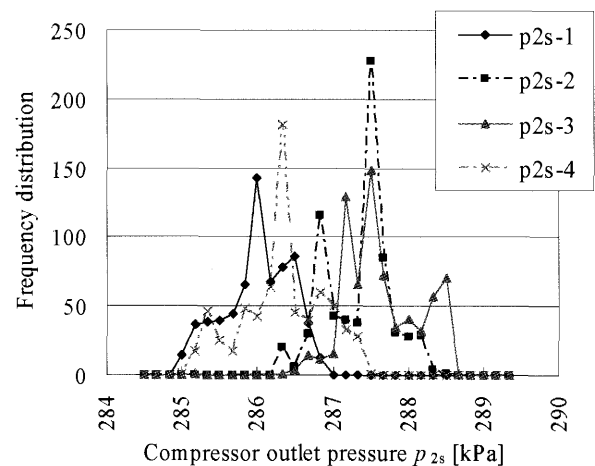


図4 度数分布図の一例

#### 3.2.2 Bタイプの評価から求める標準不確かさ

Bタイプの標準不確かさは、繰り返し計測以外の方法、すなわち計測機器の校正によっても排除しきれない不確かさおよびデータ処理の過程で付加される不確かさから算出した。これは、校正機器の精度や蓄積された校正データ・技術資料などから確率分布を想定して求めた。

圧力・温度・湿度など直接計測する項目の不確かさは、計測システムの信号処理経路の校正結果から求めた標準不確かさと校正器の標準不確かさを合成して算出した。

例えば、コンプレッサ出口静圧のBタイプの標準不確かさは、配管に設けられた静圧管に校正空気圧力を加えて求めた信号処理経路の標準不確かさと校正空気圧力の標準不確かさを合成して求めた。このとき、信号処理経路の校正結果が95%の信頼の水準を持つ拡張不確かさで与えられている場合は、この拡張不確かさを包含係数  $k=2$  で除して標準不確かさを求める。また、校正空気圧力の不確かさが99%の信頼の水準を持つ拡張不確かさで与えられている場合は、この拡張不確かさを包含係数  $k=3$  で除して標準不確かさを求める。このようにして求めたこれらの標準不確かさを合成して直接計測する項目のBタイプの標準不確かさを算出した。ここで、計測システムの信号処理経路には、計測センサ・信号変換器・信号線など複数の不確かさの要素があるが、現場のセンサから計測室の計測PCまでを系全体として校正し、信号処理経路の影響をまとめて評価した。また、 $m$  個の計測センサによる計測値を同一計測項目として空間的に平均化している場合は、Aタイプの標準不確かさと同様に、式(3)によって、その効果を評価した。

一方、流量・効率など計測センサによって直接計測できない項目の不確かさは、圧力・温度・湿度など直接計測する項目の標準不確かさと流量・効率などを求めるための理論式・経験式の標準不確かさを合成して算出した。例えば、コンプレッサ吐出空気コンプレッサ入口状態に換算した体積流量（コンプレッサ体積流量）のBタイプの標準不確かさは、コンプレッサ入口温度などの標準不確かさとオリフィス絞り機構による質量流量測定（オリフィスによる流量測定）など計算式の標準不確かさを合成して求めた。このとき、コンプレッサ入口温度など直接計測する項目の場合は、上述のように校正結果から標準不確かさを求める。また、オリフィスによる流量測定など計算式の不確かさが95%の信頼の水準を持つ拡張不確かさで与えられている場合は、この拡張不確かさを包含係数  $k=2$  で除して標準不確かさを求める。このようにして求めたこれらの標準不確かさを合成して直接計測できない項目のBタイプの標準不確かさを算出した。

### 3.2.3 合成標準不確かさ

一般に、式(4)に示した関数  $y$  の合成標準不確かさは、式(5)から求めることができる。

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (4)$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \quad (5)$$

ここで、 $u(x_i)$  は、関数  $y$  のパラメータ  $x_i$  についての標準不確かさ、 $\partial f / \partial x_i$  で示した偏導関数は、感度係

数である。

つぎに、感度係数  $\partial f / \partial x_i$  の値は、圧力・温度・湿度など直接計測する項目の計測システムの系を分割して校正しそれらをBタイプの標準不確かさとして合成する場合、または、AタイプとBタイプの標準不確かさを合成する場合は、 $\partial f / \partial x_i = 1$  になる。これらの場合には、式(5)は、式(6)のように書き換えられる。

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (6)$$

### 3.2.4 拡張不確かさ

95%の信頼の水準をもつと推定される区間をあらわす95%拡張不確かさ  $U_{95}$  は、式(7)によって求めた。包含係数  $k$  は、統計的手法により考慮する場合、信頼の水準の確率  $p=0.95$  および標準不確かさ  $u$  の持つ自由度  $\nu$  から  $t$  分布に従うとして式(8)に示す統計関数によって求めた。

$$U_{95} = k \cdot u_c(y) \quad (7)$$

$$k = t_{95}(\nu) \quad (8)$$

ここで、 $U_{95}$  を定める場合の  $t$  分布の値  $t_{95}(\nu)$  は、自由度  $\nu$  が無限大に近づくとき、1.96に漸近する。繰り返し計測数  $n$  の平均値を期待値とした場合の自由度は、 $\nu = n - 1$  となり、繰り返し計測数  $n$  を30以上にした場合には、統計関数の計算結果から  $t$  分布の値  $t_{95}(\nu)$  は2.05以下となるため、自由度  $\nu$  は十分大きいといえる。そこで、本報では、Bタイプの不確かさを校正記録・文献等の情報から求めるため、その不確かさは信憑性が高いと仮定し、この場合自由度  $\nu$  は十分大きいと考えることができ、自由度  $\nu$  には十分大きな値 ( $\nu=30$ ) を採用した。

また、合成標準不確かさ  $u_c(y)$  の有効自由度  $\nu_{\text{eff}}$  は、式(9)によって求めた。

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (9)$$

## 4. 不確かさの算出結果

表2に過給機性能計測についての不確かさの算出結果を示す。上段は直接計測する項目、下段は理論式・経験式から算出する項目である。

図5は、コンプレッサ性能計測試験結果に表1の95%拡張不確かさの幅を付加して示したものである。横軸はコンプレッサ体積流量  $V_c$ 、左縦軸は圧力比  $\pi_c$ 、右縦軸

はコンプレッサ効率 $\eta_c$ である。図中には、計測値と比較評価するための計画曲線を修正過給機回転速度をパラメータとして示した。

表2に示す不確かさの算出結果から、過給機単体性能計測試験装置における直接計測する項目および理論式・経験式から算出する項目の不確かさがわかる。

95%拡張不確かさ $U_{95}$ を定める場合の $t$ 分布の値 $t_{95}(\nu)$ は、どの項目もほぼ2である。これは、直接計測する項目のAタイプの評価で繰り返し計測数 $n$ を30以上にしていることとBタイプの不確かさを評価する場合も自由度 $\nu$ は十分大きいと考え $\nu=30$ を採用していることによる。また、理論式・経験式から算出する項目は、複数の計測値を元に多くの理論式・経験式から算出しているため、さらに自由度が大きくなっている。ASME性能試験規約<sup>(2)</sup>では、特にBタイプの評価において、自由度は30以上であるとみなされる場合が多いと想定し、 $t$ 分布の値をすべて2にしていると思われる。この方法

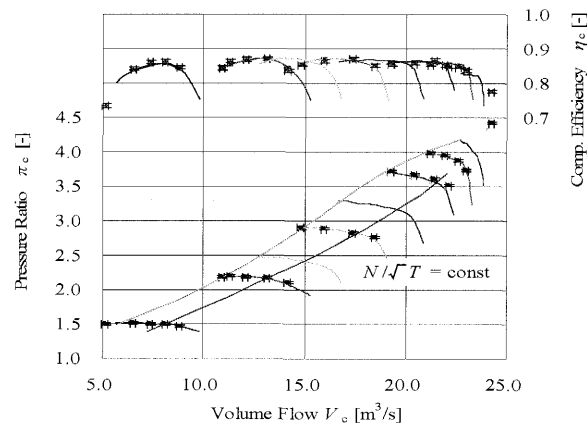


図5 性能試験結果と不確かさの例

は、流体力学および熱力学の性能計測試験などに特化した場合に、実用的な方法であるといえる。

また、図5に示す不確かさは十分小さく、計画曲線に

表2 不確かさの算出結果の例

項目	記号	単位	計測値	Aタイプ 標準 不確かさ $u_a$	Bタイプ 標準 不確かさ $u_b$	合成 標準 不確かさ $u_c$	95% 包含係数 $t_{95}(\nu_c)$	95% 拡張 不確かさ $U_{95}$
過給機回転速度	$N_t$	$s^{-1}$	285.6	0.045	0.060	0.075	1.99	0.15
大気絶対圧力	$p_0$	kPa	92.2	0.009	0.106	0.107	2.02	0.22
大気温度	$t_0$	$^{\circ}C$	18.5	0.050	0.060	0.078	1.99	0.16
大気相対湿度	$\phi_0$	%	21.1%	0.05 pts (%)	1.01 pts (%)	1.01 pts (%)	2.04	2.06 pts (%)
コンプレッサ入口全温度	$t_{1t}$	$^{\circ}C$	18.9	0.274	0.144	0.309	1.97	0.61
コンプレッサ出口静圧 (Gauge)	$p_{2s}$	kPa	302.6	0.261	0.442	0.513	1.98	1.02
コンプレッサ出口全温度	$t_{2t}$	$^{\circ}C$	216.0	0.222	0.204	0.302	1.98	0.60
コンプレッサオリフィス差圧	$\Delta p_{oc}$	Pa	14963	6.131	50.663	51.033	2.04	103.95
コンプレッサオリフィス前静圧 (Gauge)	$p_{oc}$	kPa	295.7	0.116	0.621	0.632	1.99	1.26
コンプレッサオリフィス全温度	$t_{oc}$	$^{\circ}C$	218.2	0.147	0.357	0.387	1.99	0.77
タービン入口静圧 (Gauge)	$p_{3s}$	kPa	262.5	0.286	0.510	0.585	1.98	1.16
タービン入口全温度	$t_{3t}$	$^{\circ}C$	507.1	0.817	0.612	1.021	1.98	2.02
タービン出口静圧 (Gauge)	$p_{4s}$	Pa	4920	29.630	4.246	29.933	1.97	59.05
タービン出口全温度	$t_{4t}$	$^{\circ}C$	313.8	0.557	0.474	0.731	1.97	1.44
アトマイザオリフィス差圧	$\Delta p_{oam}$	Pa	6911	19.065	50.953	54.403	2.02	109.87
アトマイザエア静圧 (Gauge)	$p_{oam}$	kPa	352.8	0.233	0.513	0.564	1.99	1.12
アトマイザオリフィス全温度	$t_{oam}$	$^{\circ}C$	20.5	0.092	0.357	0.369	2.00	0.74
燃料流量	$V_{fo}$	L/min	14.8	0.057	0.154	0.164	1.99	0.33
修正過給機回転速度	$N_{ts}$	$s^{-1}$	288.6	0.049%	0.032%	0.059%	1.98	0.12%
コンプレッサ側空気質量流量	$G_c$	kg/s	26.1	0.029%	0.239%	0.241%	1.98	0.48%
コンプレッサ平均湿り空気定圧比熱	$c_{pmc}$	J/(kg·K)	1015	0.002%	0.101%	0.101%	2.04	0.21%
コンプレッサ平均比熱比	$\kappa_{mc}$	-	1.395	0.001%	0.039%	0.039%	2.04	0.08%
コンプレッサ圧力比	$\pi_c$	-	4.43	0.063%	0.173%	0.184%	1.98	0.36%
コンプレッサ流量	$V_c$	$m^3/s$	24.2	0.057%	0.287%	0.293%	1.97	0.58%
タービン側燃焼ガス質量流量	$G_t$	kg/s	26.4	0.029%	0.237%	0.239%	1.98	0.47%
タービン平均湿り空気定圧比熱	$c_{pmt}$	J/(kg·K)	1086	0.013%	0.075%	0.076%	1.99	0.15%
タービン平均比熱比	$\kappa_{mt}$	-	1.360	0.005%	0.027%	0.027%	1.99	0.05%
タービン膨張比	$\pi_t$	-	3.77	0.082%	0.212%	0.227%	1.97	0.45%
過給機総合効率	$\eta_{T/C}$	%	61.3%	0.10 pts (%)	0.15 pts (%)	0.18 pts (%)	1.97	0.36 pts (%)
コンプレッサ断熱効率	$\eta_c$	%	77.6%	0.20 pts (%)	0.19 pts (%)	0.28 pts (%)	1.97	0.55 pts (%)
タービン断熱効率	$\eta_t$	%	83.6%	0.36 pts (%)	0.31 pts (%)	0.48 pts (%)	1.97	0.94 pts (%)

対して、計測結果を比較検証するのに満足できる量であることがわかる。

## 5. 不確かさの解析結果

表2下段の理論式・経験式から算出する合成標準不確

かさにおける要素因子ごとの影響を式(10)に示す影響度  $d_i$  であらわすこととし、その結果の一例を表3に示す。

列に理論式・経験式から算出する合成標準不確かさの項目、行にその要素因子となる合成標準不確かさの項目をあらわした。例えば、図4に示したコンプレッサ出口圧

表3 合成標準不確かさに対する各要素因子の影響度  $d_i$

合成不確かさに対する不確かさの影響	記号	単位	$N_{ts}$	$G_c$	$\pi_c$	$V_c$	$G_t$	$\pi_t$	$\eta_{TC}$	$\eta_c$	$\eta_t$
過給機回転速度	$N_t$	$s^{-1}$	19.9 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
大気絶対圧力	$p_0$	Pa	0.0 %	0.4 %	24.5 %	12.4 %	0.4 %	12.6 %	0.7 %	4.3 %	0.8 %
大気温度	$t_0$	$^{\circ}C$	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
大気相対湿度	$\phi_0$	-	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ入口全温度	$t_{1t}$	$^{\circ}C$	80.1 %	0.0 %	0.0 %	3.4 %	0.0 %	0.0 %	11.9 %	52.7 %	0.0 %
コンプレッサ出口静圧 (Gauge)	$p_{2s}$	Pa	0.0 %	0.0 %	45.2 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	11.8 %	8.0 %	0.0 %
コンプレッサ出口全温度	$t_{2t}$	$^{\circ}C$	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	18.2 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス差圧	$\Delta p_{oc}$	Pa	0.0 %	46.6 %	0.4 %	32.6 %	46.3 %	0.2 %	0.0 %	0.1 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス前静圧 (Gauge)	$p_{oc}$	Pa	0.0 %	12.2 %	0.1 %	8.5 %	12.1 %	0.1 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス全温度	$t_{oc}$	$^{\circ}C$	0.0 %	2.7 %	0.0 %	1.9 %	2.6 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
タービン入口静圧 (Gauge)	$p_{3s}$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	46.3 %	10.7 %	0.0 %	2.9 %
タービン入口全温度	$t_{3t}$	$^{\circ}C$	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	20.9 %	0.0 %	50.3 %
タービン出口静圧 (Gauge)	$p_{4s}$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	1.8 %	0.4 %	0.0 %	0.1 %
タービン出口全温度	$t_{4t}$	$^{\circ}C$	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	42.3 %
アトマイザオリフィス差圧	$\Delta p_{oam}$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザエア静圧 (Gauge)	$p_{oam}$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザオリフィス全温度	$t_{oam}$	$^{\circ}C$	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
燃料流量	$V_{fo}$	L/min	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.1 %	0.0 %	0.1 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス上流管加工内径	$D_{opc}$	m	0.0 %	0.7 %	0.0 %	0.5 %	0.7 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサオリフィスプレート絞り孔径	$d_{oc}$	m	0.0 %	2.5 %	0.0 %	1.8 %	2.5 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザオリフィス上流管加工内径	$D_{opam}$	m	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザオリフィスプレート絞り孔径	$d_{oam}$	m	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
乾き空気の水蒸気定数	$R_a$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
水蒸気の水蒸気定数	$R_w$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
飽和水蒸気臨界圧力	$p_{kw}$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
飽和水蒸気臨界温度	$T_{kw}$	K	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
燃料密度	$\rho_k$	kg/L	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
$\lambda_{2or4=4}$ の燃焼ガスの水蒸気定数	$R_{g2,4}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ出口計測部断面積	$A_2$	m <sup>2</sup>	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
タービン入口計測部断面積	$A_3$	m <sup>2</sup>	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス乾き空気比熱	$c_{paoc}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス水蒸気比熱	$c_{pwoc}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス膨張補正係数	$\epsilon_{oc}$	-	0.0 %	17.6 %	0.1 %	12.3 %	17.5 %	0.1 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス粘性係数	$\mu_{oc}$	Pa·s	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサオリフィス流出係数1	$C_{oc}$	-	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザオリフィス乾き空気定圧比熱	$c_{paam}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザオリフィス水蒸気定圧比熱	$c_{pwoam}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザオリフィス膨張補正係数	$\epsilon_{oam}$	-	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.2 %	0.0 %	0.1 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザオリフィスオリフィス粘性係数	$\mu_{oam}$	Pa·s	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
アトマイザオリフィスオリフィス流出係数1	$C_{oam}$	-	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ側空気質量流量	$G_c$	kg/s	0.0 %	17.2 %	0.1 %	12.1 %	0.0 %	0.0 %	12.7 %	0.0 %	0.0 %
消音器全圧損失	$\Delta p_f$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ入口絶対静温度	$T_{1s}$	K	0.0 %	0.0 %	0.0 %	2.9 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ入口絶対全圧力	$p_{1t}$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	11.6 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ出口乾き空気定圧比熱	$c_{pa2}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ出口水蒸気定圧比熱	$c_{pw2}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ出口絶対静温度	$T_{2s}$	K	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ出口絶対全圧力	$p_{2t}$	Pa	0.0 %	0.0 %	29.6 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	7.7 %	5.2 %	0.0 %
コンプレッサ平均絶対全温度	$T_{mt}$	K	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
コンプレッサ平均乾き空気定圧比熱	$c_{pamc}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.6 %	11.4 %	0.0 %
コンプレッサ平均水蒸気定圧比熱	$c_{pwmc}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
タービン側燃焼ガス質量流量	$G_t$	kg/s	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	17.5 %	0.1 %	12.3 %	0.0 %	0.0 %
タービン入口乾き燃焼ガス定圧比熱	$c_{pg3t}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
タービン入口乾き空気定圧比熱	$c_{pa3t}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
タービン入口水蒸気定圧比熱	$c_{pw3t}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
タービン入口絶対静温度	$T_{3ts}$	K	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
タービン入口絶対全圧力	$p_{3tt}$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	19.4 %	4.5 %	0.0 %	1.2 %
タービン出口絶対全圧力	$p_{4tt}$	Pa	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	19.4 %	4.5 %	0.0 %	1.2 %
タービン平均絶対全温度	$T_{mtt}$	K	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.1 %
タービン平均乾き燃焼ガス定圧比熱	$c_{pgmt}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.1 %	0.0 %	0.4 %
タービン平均乾き空気定圧比熱	$c_{pamt}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.1 %	0.0 %	0.6 %
タービン平均水蒸気定圧比熱	$c_{pwmt}$	J/(kg·K)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %

力 $p_{2s}$ の標準不確かさは、表3の7行目に示した。この項目がコンプレッサ圧力比 $\pi_c$ の合成標準不確かさに与える影響度は、45.2%と非常に大きい。

$$d_i = \frac{\left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2}{u_c^2(y)} \quad \text{—— (10)}$$

図6は、影響度 $d_i$ を理論式・経験式から算出する合成標準不確かさの項目を縦軸にとり、横棒グラフにあらわしたもので、左右に2つの例を示した。左右の結果は、それぞれ、別の試験装置で行った性能計測試験時のデータで、それぞれの特徴に差があるのがわかる。

表3および図6より、理論式・経験式から算出する合成標準不確かさにおける要素因子ごとの影響度を確認することができる。この結果から、影響度の大きい要素因子の不確かさを改善すれば、性能計測試験の計測精度をさらに向上させることができる。特に、性能計測試験装置の特性上、直接計測する項目に空間的な非一様性がある計測点は、非一様性の改善または空間的な計測点数を増やすことによって改善が可能である。

## 6. まとめ

船用過給機の性能計測試験と計測の不確かさを明らかにした。

合成標準不確かさにおける要素因子ごとの影響を式(10)に示す影響度 $d_i$ であらわすことを提案し、各計測因子の不確かさと性能計測結果の不確かさの因果関係を明らかにした。

計測技術の高精度化には、この不確かさ解析が不可欠であると考ええる。

## 参考文献

- (1) 小池利康, 岩城史典, 日本ガスタービン学会誌, Vol.33, No.2, (2005-3), pp8-13
- (2) ANSI, ASME PTC 19.1, Measurement Uncertainty (1985)
- (3) 日本規格協会 ISO 国際文書 計測における不確かさの表現ガイド, (1996)
- (4) 日本規格協会 JIS ハンドブック「機械計測」, “計測における不確かさの表現のガイド”について, (1996)
- (5) ISO5167, Measurement of flow by means of orifice plates, nozzles and venture tubes inserted in circular cross-section conduits running full (1980)
- (6) 日本規格協会 JIS B 8340, ターボ形プロワ・圧縮機の試験方法および検査方法, (2000)
- (7) 谷下市松, 工業熱力学 基礎編, (1970), pp.245-246, 東京裳華房.

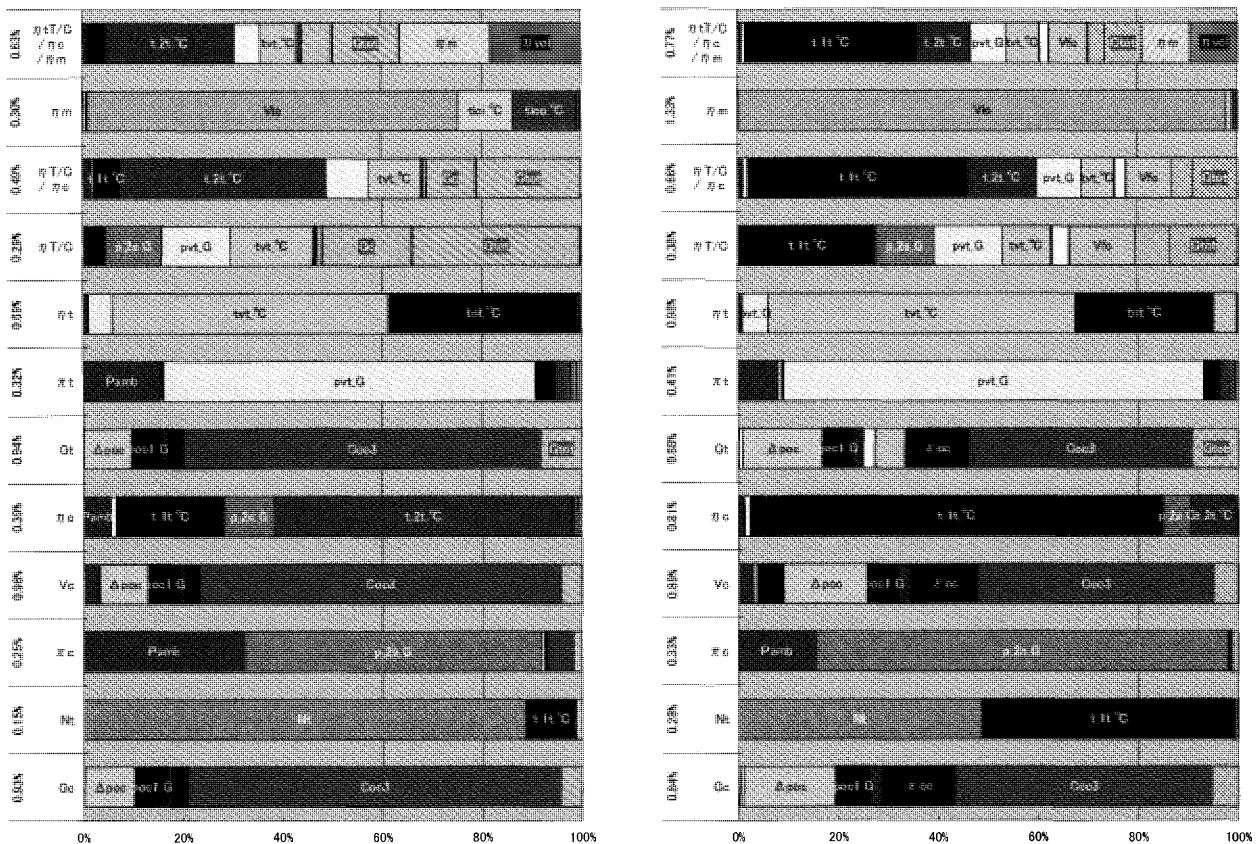


図6 合成標準不確かさに対する各要素因子の影響



# 純酸素燃焼法に基づいた CO<sub>2</sub>回収発電システムの特性と 高効率化のためのエクセルギーフロー解析

Characteristics of CO<sub>2</sub>-Capturing Systems Based on Oxy-Fuel Combustion  
and Exergetic Flow Analyses for Improving Efficiency

朴 炳植\*<sup>1</sup>  
Pyong Sik Pak

## Abstract

Two types of CO<sub>2</sub>-capturing H<sub>2</sub>O turbine power generation system based on oxy-fuel combustion method were proposed, in which steam produced in a thermal power plant is utilized. A high efficient combined cycle power generation system (CCPS) with reheat cycle was adopted as an example of existing thermal power plants into which the proposed system is incorporated. First, power generation characteristics of the CO<sub>2</sub>-capturing system, which requires no modification of the original CCPS itself, have been estimated. Second, in order to improve power generation efficiency of the proposed system and also to further increase CO<sub>2</sub> reduction capability, modification of the proposed CO<sub>2</sub>-capturing power generation system was investigated based on exergetic flow analyses, and modified systems were proposed based on the obtained results. Last, it has been shown that the modified proposed system can increase power output by 33.6%, and reduce 32.5% of CO<sub>2</sub> emission with efficiency decrease by 1.57% compared with the original CCPS.

**Key words** : CO<sub>2</sub> -capture, oxy-fuel combustion, exergy flow analysis, H<sub>2</sub>O turbine

## 1. はじめに

地球温暖化防止のため大気への二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の排出量の削減が益々重要となっている。CO<sub>2</sub>排出量の大幅な削減のためには、火力発電所から排出される CO<sub>2</sub>を回収して大気中へ放出しないことが効果的であると考えられる。CO<sub>2</sub>の回収はこれまでの大気汚染物質の除去と比較して極めて困難と考えられているが、京都議定書の発効にともない CO<sub>2</sub>排出対策の重要性はかつてなく高まっている。

このような観点から、筆者は先に既存火力発電所の例として、コンバインドサイクル発電システム (複合発電システム) を取り上げ、その排熱回収ボイラ (HRSG) で製造される中圧蒸気を利用して純酸素燃焼法を適用して CO<sub>2</sub>回収発電を行う発電システムを提案し、このシステムは元の発電システム構成自体の変更が不必要で、発電効率の低下が無いだけでなく、その経済的導入可能性も高いことを明らかにした<sup>(1)</sup>。

しかしながら、本システムでは HRSG で製造される中圧蒸気のみを利用しているので、CO<sub>2</sub>回収の対象となる発電電力の割合は全体に対し 4.5% と小さいため、

CO<sub>2</sub>削減効果は大きくない。

そこで、本論文では、同じく既存発電システム構成自体の変更が不必要でかつ大幅に CO<sub>2</sub>削減率を増加させることが可能となる CO<sub>2</sub>回収発電システムとして、まず蒸気タービンの主蒸気を利用する CO<sub>2</sub>回収発電システムを提案し、その発電特性と CO<sub>2</sub>回収効果について検討した結果について述べる。

本論文では、さらに提案 CO<sub>2</sub>回収発電システムにおいて、CO<sub>2</sub>回収による発電効率の低下を小さくすると共に CO<sub>2</sub>削減効果の大きいシステムに改良するため、そのエクセルギーフローを解析し、大きなエクセルギーロスが生じる原因を明らかにするとともに、それを低下させるためのシステム改良策について検討した結果についても述べる。

## 2. 対象既存火力発電システムの概略

CO<sub>2</sub>回収の対象となる既存火力発電システムの例として本研究では高効率な複合発電システム (以下、CCPS という) を取り上げることにした。図1は本研究で検討対象とした 3 重圧・再熱式 CCPS の概略構成を示す。新鋭の CCPS では、同図に示すように、高温ガスタービンを採用し、高温のガスタービン排ガスを利用して、発電効率向上のため HRSG で高圧蒸気、中圧蒸気および低圧蒸気の 3 種の蒸気を製造し、高圧および低圧蒸気

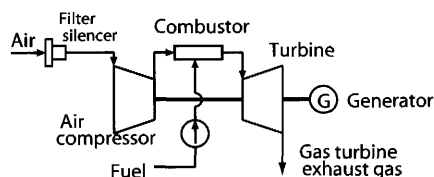
原稿受付 2005年12月12日

校閲完了 2006年8月29日

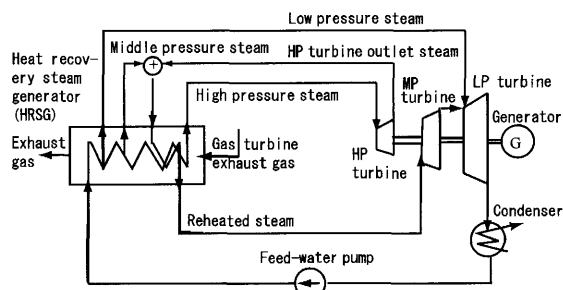
\* 1 大阪大学大学院情報科学研究科

〒565-0871 吹田市山田丘 2 - 1





(a) トッピングサイクルを構成するガスタービン発電システム

(b) ボトムリングサイクルを構成する蒸気タービン発電システム  
図1 火力発電システムの例として取り上げた3重圧・再熱式複合発電システム (CCPS) の概略構成

タービンを駆動するのみならず、高圧蒸気タービン駆動後の中圧となった高圧タービン出口排気蒸気を中圧蒸気と混合し再熱し、これを中圧蒸気タービンの駆動にも利用して発電する再熱サイクルを採用した構成となっている場合が多い<sup>(2)-(4)</sup>。

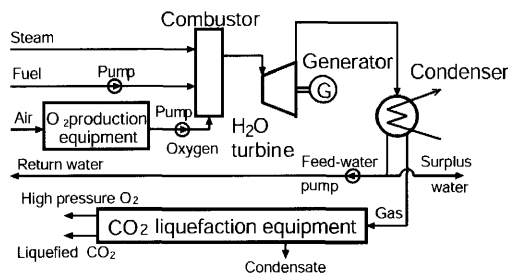
### 3. 提案 CO<sub>2</sub>回収発電システムの概略と特徴

#### 3.1 提案 CO<sub>2</sub>回収発電システムの概略構成

燃焼排ガスからCO<sub>2</sub>を回収することは、燃料の燃焼用に空気ではなく純酸素を用いれば技術的に容易であることは良く知られている<sup>(5)-(8)</sup>。ただし、純酸素の製造にはエネルギーを要し、このためCO<sub>2</sub>回収発電システムの発電効率はCO<sub>2</sub>を回収しない場合に比べて、大幅に悪化するのではと懸念されている。しかしながら、燃料ベースで見た場合の発電効率の極めて高いシステムが構成出来るならば、必要な燃料量、燃料燃焼用の純酸素量および発生CO<sub>2</sub>量が少なくなり、回収されたCO<sub>2</sub>の減容化のために必須となる回収CO<sub>2</sub>の液化動力も少なくなることは明らかである。

このような観点から、本論文で提案するCO<sub>2</sub>回収発電システムは、従来型のガスタービン発電システムや蒸気タービン発電システムと異なり、高温の過熱蒸気(H<sub>2</sub>O)をガスタービン(従来型のガスタービンと区別するため以下H<sub>2</sub>Oタービンという)の作動流体として用いて発電する発電システムを利用する。

図2に、既存の発電システムに追設してCO<sub>2</sub>を回収する提案CO<sub>2</sub>回収H<sub>2</sub>Oタービン発電システムの概略構成を示す。以下、このシステムをH<sub>2</sub>OタービンシステムあるいはHTbシステムという。HTbシステムはガスタービン発電システムを基本としているが、主要作動流体は空気ではなくHRSGで製造される中圧の蒸気を利

図2 追設するCO<sub>2</sub>回収H<sub>2</sub>Oタービン発電システム (HTbシステム) の概略構成

用することが従来型のガスタービン発電システムと異なっている。また、燃料を空気ではなく酸素を用いて燃焼させるという点でも異なっている。従って、発生CO<sub>2</sub>の分離・回収が凝縮器(復水器)での冷却作用により気液の分離という物理操作で自動的に行えるため、CO<sub>2</sub>の回収はHTbシステム固有の特性となる。復水器出口で復水より分離されたガス(回収CO<sub>2</sub>ガス)は、ガス中の水蒸気分の除去とCO<sub>2</sub>圧縮動力の低減のために冷凍機で(例えば7℃まで)冷却した後、多段(例えば4段)圧縮機によって高圧(例えば13.7MPa)に加圧した後、圧縮機出口において断熱膨張させることによって、液化される。HTbシステムの動作原理に関する詳細については、文献(5)-(7)を参照されたい。

以下、4章で述べる提案システムではHRSGで製造される再熱蒸気をCCPSの蒸気タービンではなくHTbシステムで利用し、5章で述べる改良提案システムでは再熱前の中圧の混合蒸気をHTbシステムで利用して、発電を行ない、発電後の排ガスからCO<sub>2</sub>の回収を行うものとした。

なお、HTbシステムを文献(1)で提案した小規模向けのCO<sub>2</sub>回収発電システムと比較すると、蒸気流量が最も大きい再熱蒸気あるいは再熱前の中圧の混合蒸気を利用する構成としているほか、サイズが大きく設置が困難となる再生器が提案および改良提案システムには含まれていないので規模の大きい発電に適した構成となっている点が異なっている。

#### 3.2 提案 CO<sub>2</sub>回収発電システムの特徴

HTbシステムは、前節で述べたように、燃料を純酸素を用いて燃焼させ、蒸気の温度を過熱し、発電利用した後に冷却して生成したCO<sub>2</sub>ガスを復水から分離・回収するシステムであり、蒸気を燃焼ガスで直接過熱している。このため、短所として、①蒸気中にはCO<sub>2</sub>ガスが含まれ、復水器出口圧力が比較対象CCPSに比べ2倍ほど高くなり<sup>(7)</sup>、単位蒸気流量当たりの発電出力が小さくなるという問題が生じる。また、②蒸気中には不凝縮ガス(CO<sub>2</sub>ガス)が含まれるので、復水器での冷却効率が悪くなり、熱交換面積が2倍ほど大きくなるという短所がある<sup>(9)</sup>。さらに、③復水器出口の復水中にはO<sub>2</sub>ガスの

ほか CO<sub>2</sub>ガスが溶け込んでいるため、脱気を十分に行う必要性もある。高効率・高信頼性を要求される事業用の発電システムとしては、これらの問題が無いに越したことはない。

しかしながら、①の短所は蒸気の圧力を増加させることにより緩和できる。ガスタービン発電の空気圧縮の場合と異なり、蒸気の圧力の増加は比較的容易である。②の復水器の熱交換面積が大きくなるという短所は、復水器のコストの比率が発電システム設備費全体の中ではかなり小さいので、問題は相対的に小さいということが出来る<sup>9)</sup>。③の短所に対しては、蒸気タービン発電の場合も給水中に O<sub>2</sub>や CO<sub>2</sub>ガスが溶存しているため、脱気を行う必要があるため、HTb システムだけの問題ではなく容易に解決できる問題である。このように、これらの短所は本質的ではないといえるので、CO<sub>2</sub>排出に対する制約が強くなれば、特別に大きな問題になるとは考えられないと思われる。

これに対して、HTb システムは長所として、① HTb システム内で生成される CO<sub>2</sub>ガスは原理上100%回収できる、②サーマル NO<sub>x</sub> を生成しないクリーンな発電システムとなる。また、③蒸気過熱用の燃焼器は HRSG に比べ極めて小型に出来る。さらに、④ガスタービンの高温化技術の発達により、タービン入口温度を高温化することが可能となるので、発電効率や CO<sub>2</sub>削減効果を将来一層向上させることも可能になる、という利点がある。

#### 4. 複合発電および提案システムの発電特性の推定

##### 4.1 前提条件

CCPS に HTb システムを組み込んだ CO<sub>2</sub>回収発電システム全体（以下、提案全体システムあるいは単に提案システムという）の特性を推定するためには、CCPS および HTb システムの両方の特性を推定する必要がある。

本研究の対象となる発電システムは、システムを構成する要素機器とそれらの機器間を流れる流体によって構成されており、発電システムの発電電力や燃料消費量などの特性は、各要素機器内で流体がどのような振る舞いをしていくかを、熱力学的特性等に基づいて推定することによって求まる。CCPS および HTb システムの特性推定に当たって用いたシミュレーションの手法については文献(8)を参照されたい。

特性の推定にあたって用いた主要な外生変数および外生パラメータを表1に示す。CCPS のガスタービンの発電端電力を200MW、タービン入口温度を1,250℃とし、タービン入口圧力は比出力を最大とする値として1.47MPaとし、蒸気タービン入口の高圧、中圧および低圧蒸気の圧力は、ここでは中部電力の川越火力発電所の3、4号系列の値<sup>12)</sup>の平均値として、それぞれ9.41, 2.26, 0.25MPaと設定した。再熱蒸気の温度は高圧蒸気の温度と同じで、再熱蒸気の圧力は中圧蒸気の圧力と同じとした。燃料は天然ガス（LNG）とし、その成分

表1 システム特性推定のための主要な外生変数と外生パラメータ

(a) 外生変数		
外生変数	複合発電システム	提案システム
ガスタービン		
発電機出力 (MW)	200	同左
タービン入口温度 (°C)	1250	同左
タービン入口圧力 (MPa)	1.47	同左
蒸気タービン		
高圧、中圧、低圧蒸気圧力 (MPa (kg/cm <sup>2</sup> ))	9.41, 2.26, 0.25 (96, 23, 2.5)	同左
再熱蒸気圧力 (MPa)	2.26	同左
復水器出口圧力 (kPa)	4.90	同左
H <sub>2</sub> O タービン		
入口温度 (°C)	—	1250
復水器出口圧力 (kPa)	—	9.81
復水器出口温度 (°C)	—	32.55
燃料ガス	CH <sub>4</sub>	同左
(b) 外生パラメータ		
外生パラメータ	複合発電システム	提案システム
空気圧縮機断熱効率 (%)	89	同左
ガスタービン断熱効率 (%)	93	同左
蒸気タービン断熱効率 (%)	90	同左
H <sub>2</sub> O タービン断熱効率 (%)	—	90
排熱回収ボイラ (HRSG)		
ターミナル温度差 (°C)	60	同左
ピンチポイント温度差 (°C)	15	同左
所内動力率 (%)	4	同左
発電機効率 (%)	99	同左
酸素過剰率	—	1.01
酸素製造動力原単位 (kWh/t)	—	237.9
CO <sub>2</sub> 液化装置		
冷凍機 COP	—	3.5
冷凍機出口温度 (°C)	—	7
圧縮機断熱効率 (%)	—	78

は簡単のためメタン (CH<sub>4</sub>) のみとした。

提案システムの特性に大きな影響を与える H<sub>2</sub>O タービン入口温度 (TIT) は、ガスタービン入口温度と同じ 1,250℃と仮定した。復水器出口圧力は、復水器入口ガス中に CO<sub>2</sub>ガス等の不凝縮ガスが容積比率でおよそ半分含まれることから<sup>17)</sup>、蒸気タービン発電システムの場合の2倍の9.81kPaと想定した。

##### 4.2 CCPS の特性推定結果

CCPS の特性を推定した結果を表2に示す。表2に示すように蒸気タービン発電端合計出力は95.3MWと推定され、その内、高圧蒸気利用分は20.9MW、再熱蒸気利用分は70.1 MW、低圧蒸気利用分は4.44MWと推定された。送電端出力は276MWとなり、送電端発電効率(低発熱量ベース、以下同じ)は川越火力発電所の3、4号系列に比べ1.6%高い55.5%と推定された。

なお、表2における再熱蒸気および低圧蒸気分の発電電力は再熱蒸気および低圧蒸気がそれぞれ復水器出口圧力まで膨張するときに発電する電力をいう。従って、CCPSにおいて再熱蒸気を利用して蒸気タービンで発電せずに、これを HTb システムで利用することになると、CCPSでの発電端電力はこの分 (70.1MW) だけ減少することになる。

表2 複合発電システムの発電特性推定結果

項目	推定値
ガスタービン	
発電端電力 (MW)	200
タービン出口ガスの温度 (°C), 流量 (t/h)	598, 1649
蒸気タービン	
高圧蒸気の温度 (°C), 流量 (t/h)	538, 195
高圧タービン排気蒸気温度 (°C)	332
中圧蒸気の温度 (°C), 流量 (t/h)	302, 32.0
再熱蒸気の温度 (°C), 流量 (t/h)	538, 227
低圧蒸気の温度 (°C), 流量 (t/h)	236, 30.2
発電端電力 (MW)	95.3
(高圧タービン分, 再熱蒸気分, 低圧蒸気分)	(20.9, 70.1, 4.44)
複合発電システム全体	
燃料消費量 (MW)	497
発電端および送電端出力 (MW)	295, 276
送電端発電効率 (%)	55.45
エクセルギー効率 (%)	55.69

### 4.3 提案システムの特性推定結果

元の複合発電システム, HTb システムおよび提案全体システムの発電特性を推定した結果を表3に示す。図3にはHTbシステムのマスフローを推定した結果の主要部分を示す。表3に示すように, HTbシステムの正味発電電力は131MW, 燃料ベース発電効率は123%になると推定されている。ここで, HTbシステムの正味発電電力とは H<sub>2</sub>O タービンの発電端の発電電力からポンプ動力など HTb システム内で消費する種々の所内消費電力のほか純酸素製造・圧縮動力および回収 CO<sub>2</sub>の液化動力を差し引いた電力をいう。また, 燃料ベース発電効率とは, HTbシステムに投入する燃料の低発熱量に対する HTbシステムで得られる正味発電電力量の比を表す。

高い燃料ベース発電効率が得られるのは, ガスタービン発電システムで効率低下の原因となっている空気圧縮機駆動用の動力が HTb システムでは不要であること<sup>(5),(6)</sup>, 再熱蒸気のエネルギー分がこの計算には含まれないからである。なお, HTb システムのエクセルギー効率を求めると表3に示すように61.8%と推定されている。

表3には, HTb システムを CCPS に組み込んだ提案全体システムの正味発電電力, 送電端発電効率および CO<sub>2</sub>削減率の推定結果も示してある。表3に示すように, HTb システムでは正味発電電力が131MW と再熱蒸気利用の蒸気タービン発電端電力の70.1MW より大きい。ため, 全体では正味発電電力が63.9MW 増加すると推定されている。即ち, HTb システムは一種のリパワリングシステムであり, その送電出力純増率は23.2%と推定されている。また, 提案システムの送電端発電効率は54.3%となり, HTb システムが CO<sub>2</sub>を回収する発電システムとしては高効率ではあるものの, CO<sub>2</sub>を回収するために必要となる純酸素の製造動力などの新たな負荷が生じるため, 組込み前の CCPS の効率に比べて1.2%減少すると推定されていることが分かる。

年間の CO<sub>2</sub>削減率の推定に当たっては, 種々の算定法が提案されているがここでは文献(1)と同じ算定法を用い

表3 提案システムおよび改良提案システムの発電特性推定結果

項目	提案システム	改良提案システム	
H <sub>2</sub> O タービン入口温度 (°C)	1250	550	1250
元の複合発電システム			
ガスタービン発電端電力 (MW)	200	同左	同左
蒸気タービン発電端電力 (MW)	25.6	28.0	同左
H <sub>2</sub> O タービンシステム			
発電端電力 (MW)	159	92.2	202
酸素製造動力 (MW)	8.80	2.69	12.7
酸素圧縮動力 (MW)	5.41	2.47	11.7
CO <sub>2</sub> 液化動力 (MW)	4.83	1.48	6.99
正味発電電力 (MW)	131	80.2	157
燃料消費量 (MW)	129	39.4	187
燃料ベース発電端効率 (%)	123	234	109
エクセルギー効率 (%)	61.8	64.0	57.9
システム全体			
合計燃料消費量 (MW)	626	536	684
合計発電端電力 (MW)	385	320	431
送電端出力 (MW)	340	291	368
送電出力純増分 (MW)	63.9	15.6	92.7
送電出力純増率 (%)	23.2	5.64	33.6
送電端発電効率 (%)	54.25	54.27	53.88
エクセルギー効率 (%)	54.48	54.50	54.11
CO <sub>2</sub> 削減量 (kt-CO <sub>2</sub> /y)	210	98.3	276
(内 CO <sub>2</sub> 回収量)	(149)	(45.5)	(215)
CO <sub>2</sub> 削減率 (%)	26.8	14.6	32.5

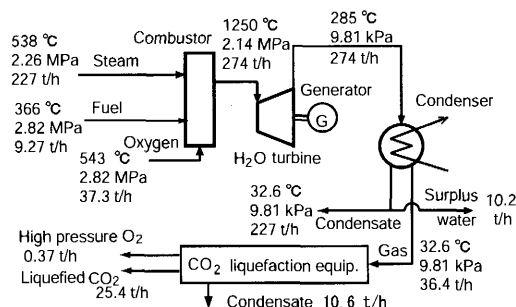


図3 HTb システムのマスフロー推定結果

ることとした。すなわち, まず提案システムから排出される年間の CO<sub>2</sub>量を推定する。次に, 提案システムと同じ年間発電電力量を発生する送電端発電効率50%の LNG 燃料発電システムから排出される CO<sub>2</sub>量を算出する。そして, 両者の CO<sub>2</sub>量を比較することにより, 算定することとした。提案システムの年間の CO<sub>2</sub>排出量を推定するに当たっては年間稼働率を66.7%と想定した。年間 CO<sub>2</sub>削減率は, 表3に示すように26.8%と推定された。

なお, 表3に示すように CO<sub>2</sub>削減量は CO<sub>2</sub>回収量より大きくなっている。これは, 発電システムの発電効率  $\eta$  が基準とした発電システムの発電効率  $\eta_b$  (今の場合 50%) より高い高効率なシステムの場合, そのシステム自体が CO<sub>2</sub>排出削減効果を持つからである。ちなみに, CO<sub>2</sub>回収の対象とした3重圧・再熱式の CCPS は高効率システムであるため, その CO<sub>2</sub>削減率は CO<sub>2</sub>削減率 =  $1 - \eta_b / \eta$  と簡単に求められるので9.8%となる。従って, 提案システムは9.8%以上の CO<sub>2</sub>削減率を持たないと意味がないことになる。

## 5. エクセルギーフロー解析結果

### 5.1 CCPS のエクセルギーフロー推定結果

表4にCCPSのエクセルギーフローを推定した結果を示す。表4に示すように、CCPSでは、タービン軸出力率（以下、率は投入燃料の化学エクセルギーを100%とする）は76.0%あるものの空気圧縮機動力として35.2%が消費されるため、ガスタービンの発電機出力率は40.4%となり、蒸気タービン発電機出力率19.3%と合わせ有効転換エクセルギー率合計は59.7%になると推定されている。主なエクセルギー損失については、ガスタービン燃焼器における非可逆損失率が26.4%と推定されているほかは特別に大きなエクセルギー損失はない。ガスタービン燃焼器非可逆損失はガスタービン入口温度（TIT）を高温にすれば低下させることが出来るものの<sup>10)</sup>、タービン材料の高温下での強度上の問題により現状では限界がある。CCPSのエクセルギー効率、仮に空気圧縮機動力が低減できれば大きく向上させることが出来るが、ガスタービン発電の原理上これは無理である。なお、復水器エクセルギー損失率は、復水器エンタルピー損失率では31.4%と大きいものの、エクセルギーで見た場合は0.78%と小さいと推定されていることが分かる。

### 5.2 提案システムのエクセルギーフロー推定結果

表4には、提案システムのエクセルギーフローを推定した結果も示してある。HTbシステムでは、ガスタービン発電システムと異なり、タービン軸発生動力をそのまま発電機の駆動に利用出来るという利点があるため、表4に示すように、提案システムの有効転換エクセルギー率の合計は61.7%となり、CCPSの59.7%より高くなると推定されている。しかし、提案システムではガスタービン燃焼器非可逆損失のほかに、HTb燃焼器非可逆損失が5.01%生じる。このほか、HTb復水器エクセルギー損失率が3.31%と3番目に大きいと推定されていることが分かる。4番目に大きいエクセルギー損失はHRSG非可逆損失率で2.61%とCCPSの3.29%よりは小さいと推定されている。

純酸素燃焼（CO<sub>2</sub>回収）に伴う直接的なエクセルギー損失は、酸素製造動力率が1.41%、酸素圧縮動力率が0.86%、CO<sub>2</sub>液化動力率が0.78%と、比較的小さいと推定されており、これが上で述べた空気圧縮機動力がHTbシステムでは存在しないこともあって、提案システムの推定エクセルギー効率54.5%は、元のCCPSの55.7%に比べ、1.2%の低下にしかないという理由となっている。

### 5.3 エクセルギー損失解析結果に基づいた高効率化改良システム

本節では、提案システムのエクセルギー損失をさらに低減させ、提案システムの効率を向上させるための対策案について検討する。

表4 エクセルギーフロー解析結果

項 目	複合発電システム	提案全体システム
燃料化学エクセルギー	100.0*	100.0*
(a) 有効転換エクセルギー		
ガスタービン発電機出力率 (タービン軸出力率)	40.4 (76.0)	32.1 (60.4)
(空気圧縮機動力率)	(-35.2)	(-28.0)
蒸気タービン発電機出力率	19.3	4.11
HTb** 発電機出力率	—	25.5
有効転換エクセルギー率合計	59.7	61.7
(b) 主なエクセルギー損失		
ガスタービン燃焼器非可逆損失率	26.4	20.9
HRSG 非可逆損失率	3.29	2.61
排ガスエクセルギー損失率	3.24	2.57
所内動力損失率	2.39	2.47
ガスタービン非可逆損失率	2.11	1.67
蒸気タービン非可逆損失率	1.94	0.27
空気圧縮機非可逆損失率	1.82	1.44
燃料ポンプ動力率	1.63	1.29
復水器エクセルギー損失率 (復水器エンタルピー損失率)	0.78 (31.4)	0.07 (3.00)
HTb 燃焼器非可逆損失率	—	5.01
HTb 復水器エクセルギー損失率	—	3.31
HTb 非可逆損失率	—	0.61
酸素製造動力率	—	1.41
酸素圧縮動力率	—	0.86
CO <sub>2</sub> 液化動力率	—	0.78
エクセルギー効率	55.69	54.48

\*: それぞれ 494.9 MW および 623.2 MW の燃料化学エクセルギーを表している。 \*\*: H<sub>2</sub>O タービン

#### 5.3.1 エクセルギー損失低下のための対策

1番目と2番目に大きいエクセルギー損失、即ちガスタービン燃焼器とHTb燃焼器における非可逆損失率は、TITを上昇させると低減することはよく知られており、このためタービンの耐熱強度の強化や冷却技術について多くの研究が行われている。本論文では、TITのさらなる上昇による効果の検討結果については、5.3.4節で簡単に述べることにし、在来技術を適用してすぐにも実行可能な手法についてまず検討する。

3番目に大きいエクセルギー損失、即ちHTb復水器のエクセルギー損失の低減を図るため、その理由を分析すれば次のようになる。

HTbシステムでは再熱蒸気をさらに過熱してHTbを駆動しているが、その圧力は中圧であり、HTbでの膨張度が少なく、HTb出口の温度即ちHTb復水器の入口温度が高くなり（図3から分かるように今の場合285℃）、エクセルギー損失が大きくなっている。

従って、HTb復水器のエクセルギー損失を小さくするための対策としては、次のことが考えられる。

- (1) HTb入口の温度を低下させる。
- (2) HTb出口の圧力を低下させ、膨張度を大きくする。
- (3) HTb入口の圧力を上昇させ、膨張度を大きくする。

(1)のHTb入口の温度を低下させる対策は、エクセルギー効率は向上するものの、HTbでの発電出力が減少し、CO<sub>2</sub>削減率が低下することになる。以下では、1,250℃を550℃に低下させた場合と、他の対策を講じて

表5 改良提案システムのエクセルギーフロー解析結果

項 目	提案 シス テム	改良提案システム	
		TTT=550	TTT=1250
燃料化学エクセルギー	100.0*	100.0*	100.0*
(a) 有効転換エクセルギー			
ガスタービン発電機出力率	32.1	37.5	29.4
(タービン有効出力率)	(60.4)	(70.5)	(55.3)
(空気圧縮機動力率)	(-28.0)	(-32.6)	(-25.6)
蒸気タービン発電機出力率	4.11	5.24	4.11
HTb** 発電機出力率	25.5	17.3	29.7
有効転換エクセルギー合計	61.7	60.0	63.3
(b) 主なエクセルギー損失			
ガスタービン燃焼器非可逆損失率	20.9	24.4	19.2
HRSG 非可逆損失率	2.61	2.14	1.68
排ガスエクセルギー損失率	2.57	2.97	2.33
所内動力損失率	2.47	2.40	2.53
ガスタービン非可逆損失率	1.67	1.95	1.53
蒸気タービン非可逆損失率	0.27	0.34	0.27
空気圧縮機非可逆損失率	1.44	1.68	1.32
燃料ポンプ動力率	1.29	1.51	1.18
復水器エクセルギー損失率	0.07	0.09	0.07
HTb 燃焼器非可逆損失率	5.01	3.39	7.37
HTb 復水器エクセルギー損失率	3.31	2.19	2.89
HTb 非可逆損失率	0.61	0.99	1.69
酸素製造動力率	1.41	0.50	1.87
酸素圧縮動力率	0.86	0.46	1.70
CO <sub>2</sub> 液化動力率	0.78	0.28	1.03
エクセルギー効率	54.48	54.50	54.11

\*: それぞれ 623.2 MW, 534.1 MW および 680.6 MW の燃料化学エクセルギーを表している。 \*\*: H<sub>2</sub>O タービン

元の1,250℃に戻した場合のほか、将来1,500℃に高温化出来た場合の3通りの場合について検討する。550℃の温度を採用したのは従来の一般的な蒸気タービンの入口温度とほぼ同じ温度にまで低下させた場合と比較するためである。

(2)のHTb 出口の圧力を低下させる対策の実施のためには、復水器冷却用海水の温度の低下あるいは復水器の熱交換面積の大幅な増加が必要で、海水温度の低下およびHTb システムの復水器の熱交換面積のさらなる増加は3.2節でも述べたように困難なので、本論文では検討案から除外する。

(3)のHTb 入口の圧力を上昇させる対策は、HRSG の改造が必要になるが、今後のCO<sub>2</sub>排出削減の重要性を考慮し、ある程度の改造は許されるものと仮定する。さて、中圧蒸気の圧力を高めると、これに対応して高圧蒸気の圧力も高める必要が生じる。ここでは、例えば中圧蒸気の圧力を2.26から5.88MPa (23から60kg/cm<sup>2</sup>) に、高圧蒸気の圧力を9.41から19.6MPa (96から200kg/cm<sup>2</sup>) に変更することにした。

さて、提案全体システムで4番目に大きいエクセルギー損失はHRSG 非可逆損失率である。これは温度がそれほど高くないガスタービン排気ガスを利用して、温度差のそれほどない蒸気に再熱するので製造蒸気量が少なくなるためであると考えられる。そこで、高圧蒸気タービン出口排気蒸気と中圧蒸気の混合蒸気のHRSG での再熱をなくし、混合蒸気をそのままHTb システム

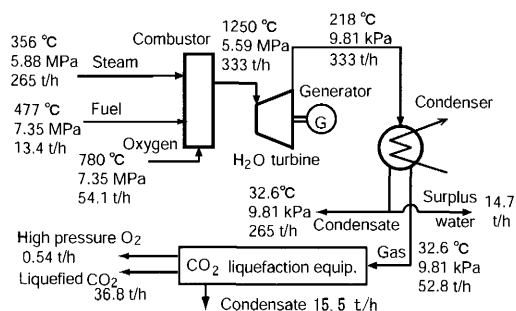


図4 改良提案システムにおける HTb システムのマスフロー推定結果 (1,250℃の場合)

で利用することにした。

### 5.3.2 HTb 入口温度を550℃にした場合

以上に述べた改良提案システムの発電特性を推定した結果も表3に示してある。表3から分かるように、蒸気タービン発電端電力は25.6から28.0MW に増加すると推定されている。これは、HRSG で高温となる再熱蒸気の製造を行わなくなったため高圧蒸気量の発生量が増加するためであり、従ってHTb システムの燃焼器入口温度は538℃から356℃に低下するものの、流量は227から265t/h に増加すると推定されている。

HTb 入口温度を550℃にした場合、H<sub>2</sub>O タービンへの流入流量は増加するもののHTb 入口の温度が1250℃から低下するため、改良提案システムの正味発電電力は131から80.2MW に減少すると推定されている。送電出力純増率は23.2%から5.64%に減少し、CO<sub>2</sub>削減率は26.8%から14.6%に減少するものの、送電端発電効率は54.25%から54.27%にわずかながら増加すると推定されている。

表5には、改良提案システムのエクセルギーフロー解析結果を改良前のシステムの特性と合わせて示してある。

表5から分かるように、HRSG 非可逆損失率が2.61%から2.14%に低下すると推定されているのは、上で述べたように、HRSG で高温な再熱蒸気の製造を行わなくなったので高圧蒸気の発生量が増加するためである。HTb 入口の温度を低下させているので、燃料消費量が626MW から536MW に減少するため、HTb 燃焼器非可逆損失率も5.01%から3.39%に少なくなると推定されている。また、HTb 復水器エクセルギー損失率も3.31%から2.19%に低下すると推定されていることが分かる。

全体では、エクセルギー効率は54.48%から54.50%に0.02%ではあるが向上すると推定されている。

エクセルギー損失が減少しているにもかかわらず効率向上がほとんど見られないのは、高効率なHTb 発電システムでの発電出力が小さく、有効出力も小さくなっているためである。

### 5.3.3 HTb 入口温度を1,250℃にした場合

改良提案システムにおいて、HTb 入口の温度を1,250℃にした場合の評価結果も表5に示してある。図

4には改良提案システムにおける HTb システムのマスフローを推定した結果の主要部分を示す。表5から分かるように、改良前の提案システムと比べると、HTb 発電機出力率は25.5%から29.7%に増加し、HRSG 非可逆損失率は2.61%から1.68%に低下し、HTb 復水器エクセルギー損失率は3.31%から2.89%に低下すると推定されている。しかし、HTb システムでの利用蒸気量が増加しているため、HTb 燃焼器での燃料消費量は増加し、HTb 燃焼器非可逆損失率は5.01%から7.37%に増加し、これに伴い酸素製造動力率、酸素圧縮動力率および CO<sub>2</sub>液化動力率もそれぞれ増加すると推定されている。

表3および表5から分かるように、HTb システムの正味発電電力は131から157MW に増加し、送電出力純増率は23.2%から33.6%に増加し、CO<sub>2</sub>削減率が26.8%から32.5%に増加するのに対して、エクセルギー効率は54.1%となり元の提案システムに比べ0.37%しか低下しないと推定されていることが分かる。

### 5.3.4 HTb 入口温度を1,500℃に高温化出来た場合

改良提案システムにおいて、HTb 入口の温度を例えば1,500℃に高温化出来た場合の特性推定結果について紙数の制約より簡単に述べると以下の通りとなる。

正味発電電力は131から198MW に増加し、送電出力純増率は23.2%から39.5%に増加し、CO<sub>2</sub>削減率が26.8%から39.5%に増加するのに対して、エクセルギー効率は54.5%となり元の提案システムと同じで効率の低下はないと推定されている。

## 6. おわりに

本論文では、CO<sub>2</sub>回収の対象となる発電システムとして、3重圧・再熱式の複合発電システムを取り上げ、そのHRSGで製造される再熱蒸気を利用してCO<sub>2</sub>回収発電するH<sub>2</sub>Oタービンシステムをまず提案し、その発電特性およびCO<sub>2</sub>削減効果について基本的な評価を行なった。

例を設定して評価した結果によれば、提案システムを組み込んだ全体システムでは送電端効率の1.2%の低下で、発電電力を23.2%増加させることが可能であり、CO<sub>2</sub>排出量を26.8%削減することが可能であると推定されることなどをまず明らかにした。

次に、提案システムの発電効率の低下を小さくすると共にCO<sub>2</sub>削減効果の増大を図るため、提案システムのエクセルギーフローを解析し、エクセルギー効率の向上とCO<sub>2</sub>削減効果の増大のための対策について検討した。

検討結果より、改良対策案を組み込んだ提案システムでは元の複合発電システムに対し、エクセルギー効率の1.58%（送電端発電効率の1.57%）の低下で、発電電力を33.6%増加させ、CO<sub>2</sub>排出量を32.5%削減することが

可能であると推定されることなどを明らかにした。

本論文で提案するCO<sub>2</sub>回収発電システムは酸素燃焼方式による発生CO<sub>2</sub>の回収方式をとるので、出力増強用のために発生するCO<sub>2</sub>を原理的に100%回収できるほか、NO<sub>x</sub>など大気汚染物質の排出もないという特徴があるため、都市・地球環境保全に適した発電システムになる。また、煙突もなく既設の発電所に追設するのが容易なため、建設期間が短くて済むという特徴もある。なお、提案CO<sub>2</sub>回収発電システムは本論文で検討対象とした複合発電システムのみならず、産業用の自家発電システムなどの汽力発電システムにも適用できることはいうまでもない。

本研究は大阪大学先端科学イノベーションセンターと(株)東芝との共同研究「新発電システムに関する研究」の一環として行われたものである。(株)東芝の加藤政一氏・高木康夫氏をはじめとする関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 朴炳植：火力発電所中圧蒸気活用CO<sub>2</sub>回収NO<sub>x</sub>フリー・リパワリングシステムの特性と経済性評価，電気学会論文誌B，123-7，(2003-9)，pp.808-813.
- (2) 中部電力カタログ：改良型コンバインドサイクル発電川越火力発電所3・4号系列，中部電力（1999-7）.
- (3) 武永和広：大容量ガスタービン排熱回収ボイラ（横型排熱回収ボイラの特徴と技術動向），ガスタービン学会誌，33-5，(2005-9)，pp.395-399.
- (4) 丸太得志，三宅功，藤田真：大容量ガスタービン向け排熱回収ボイラ（堅型自然循環HRSGの特徴），ガスタービン学会誌，33-5，(2005-9)，pp.391-394.
- (5) 朴炳植：工場廃熱を利用したCO<sub>2</sub>回収無公害高効率火力発電システムの構成と特性，電気学会論文誌D，112-3，(1992-3)，pp.221-228.
- (6) 朴炳植，上田浩史，鈴木胖：工場廃熱利用高効率H<sub>2</sub>Oタービン発電システムの構成と発電特性，電学論B，118-9，(1998-9)，pp.1006-1012.
- (7) 朴炳植：酸素燃焼方式CO<sub>2</sub>回収H<sub>2</sub>Oタービン発電システムのエクセルギー評価，エネルギー・資源，25-4，(2004-7)，pp.272-2782.
- (8) T. Kosugi and P. S. Pak: Object-oriented simulation system for evaluating characteristics of various CO<sub>2</sub>-capturing thermal power generation systems, JSST International Conference on Modeling, Control and Computation in Simulation, Tokyo, Japan, (2000-10), pp.294-299.
- (9) 小杉隆信，朴炳植，船津徹也，鈴木胖：経済性を考慮したCO<sub>2</sub>回収H<sub>2</sub>Oタービン発電システムの検討エネルギー・資源学会第18回研究発表会講演論文集，(1998-6)，pp.35-40.
- (10) 朴炳植，中村健一，鈴木胖：ガスタービンコジェネレーションシステムの各種高効率化手法のエクセルギー評価，電気学会論文誌C，109-12，(1989-12)，pp.877-884.

# 複合型インピンジ冷却構造の冷却効率分布

## Cooling Effectiveness Distribution of an Integrated Impingement and Pin Fin Cooling Configuration

仲俣千由紀<sup>\*1</sup>  
NAKAMATA Chiyuki

三村富嗣雄<sup>\*2</sup>  
MIMURA Fujio

松下 政裕<sup>\*2</sup>  
MATSUSHITA Masahiro

山根 敬<sup>\*2</sup>  
YAMANE Takashi

福山 佳孝<sup>\*2</sup>  
FUKUYAMA Yoshitaka

吉田 豊明<sup>\*3</sup>  
YOSHIDA Toyoaki

キーワード：インピンジ冷却，伝熱面積拡大，フィルム冷却，ピンフィン

Impingement cooling, Heat transfer area enhancement, Film cooling, Pin fin

### Abstract

Experimental study was conducted for the development of the integrated impingement and pin-fin cooling configuration. The temperature measurements were performed for different test pieces with various pin and hole arrangements to clarify the cooling effectiveness variation with the pin and hole arrangements. Experiments were conducted with 673K hot gas flow and room temperature cooling air. The Reynolds number of gas side flow was 380000 and cooling air Reynolds number was 2600-40000. Test plate surface temperatures were measured by an infrared camera. A cooling effectiveness distribution on each specimen was evaluated, and compared each other. There are evidences of the existence of pins on the cooling effectiveness distributions at the exact location of those. But the cooling effectiveness distributions are independent of the hole arrangement.

### 1. 序 論

航空用や発電用ガスタービンでは高効率高性能化に伴いタービン入口温度は上昇傾向にあり，このため高温部材の冷却空気流量も年々増加している。ガスタービンのさらなる性能向上をめざして冷却空気流量の削減が求められており，従来の冷却性能を大幅に上回る革新的な冷却構造が求められている。このような冷却構造として，著者らは複合型インピンジ冷却構造を考案し，研究を実施してきた。複合型インピンジ冷却構造は図1に示されるように，翼面が二重壁をなし，二重壁間に冷却側伝熱面積拡大のためピンが多数配置された構造である。この構造に関する研究は船崎ら<sup>(1)</sup>により初めて発表された。船崎ら<sup>(1)</sup>はフィルム孔とインピンジ孔を頂点とする正方形の中心にピンを1本配置した基本的な構造について感温液晶法により冷却側熱伝達率分布を計測した。彼らはインピンジ孔径に対するピン高さの比が1.5程度まではピン表面の平均熱伝達率はターゲット面の平均熱伝達率

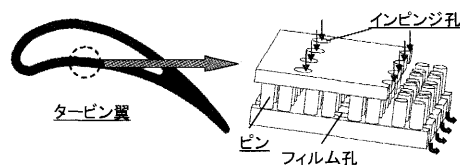


図1 複合型インピンジ冷却構造模式図

と同程度であることを示し，ピンによる表面積拡大の効果が期待できると報告した。

山脇ら<sup>(2)</sup>はピン密度の異なる2種類の試験片に対して高温ガス流中での冷却性能試験を実施した。彼らは，ピン密度が高い構造では伝熱面積増加から予測されるほどの冷却性能が得られなかったと報告している。

仲俣ら<sup>(3),(4)</sup>は，様々なピン・孔配置の構造に対して高温ガス流中での冷却性能試験を実施している。その中でピンの断面積密度が同じであるがインピンジ孔に対するピン配置が異なる2種類の試験片を用いた試験が実施されており，この2種類は冷却性能が異なるとの結果が得られている。この結果は複合型インピンジ冷却構造においてピン・孔配置が重要なパラメータであることを示している。しかし，彼らの実験で評価されたのは冷却効率のみであり，冷却効率を決定する境界条件となる冷却側

原稿受付 2006年5月22日

校閲完了 2006年8月30日

\*1 石川島播磨重工業(株)

〒190-1297 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229

\*2 宇宙航空研究開発機構

\*3 東京農工大学

表1 試験片一覧表

	従来型	従来千鳥型	基本型	千鳥型	千鳥型2
外観写真 * 左が上流側 * フィルム孔側を撮影					
ピン・孔配置 * not scale ○ フィルム孔 (φ4mm) ● インピンジ孔 (φ4mm) ● ピン					
孔数	インピンジ 34 フィルム 34	34 32	34 34	34 32	32 34
材質	ステンレス鋼			ニッケル基合金	

熱伝達率、フィルム効率などに対するピン・孔配置の影響は評価されていない。複合型インピンジ冷却構造の最適化を図る上で、ピン・孔配置が各種境界条件に及ぼす影響を把握することは必要不可欠である。

仲俣ら<sup>(3),(4)</sup>の実験では、試験片の表面温度をIRカメラで計測しており温度分布データを取得しているが、文献(3)で報告されているのは試験片表面の平均冷却効率のみである。筆者らは、異なるピン・孔配置を持つ試験片の局所的な冷却効率分布の差異を調べることで、各種境界条件の変化を間接的にではあるが類推する一助になると考え、文献(3)、(4)の実験で取得したIRカメラ計測データから局所的な冷却効率分布を評価した。本論では、複合型インピンジ冷却構造のピン・孔配置が冷却効率分布に及ぼす影響を評価し考察する。

## 2. 試験設備および方法

宇宙航空研究開発機構の高温風洞にて冷却性能試験を実施した。主流ガスは燃焼器で温度制御された燃焼ガスで、冷却空気は燃焼器上流で主流を分岐した空気である。冷却性能評価に用いる主流ガス温度は試験ダクト入口の周方向位置二箇所で、冷却空気温度は試験片入口の二箇所で熱電対により計測されている。試験片表面温度分布はIRカメラを用いて計測された。詳細は文献(3)、(4)に記載の通りである。

## 3. 試験片

表1に試験片一覧表を、図2に試験片断面模式図を示す。全ての試験片で、インピンジ孔およびフィルム孔は壁面に垂直に開口されている。内部にピンを持たない従来型および従来千鳥型は機械加工により製造され、ステンレス製である。内部にピンを持つ基本型、千鳥型および千鳥型2は、鋳造により製造され、冷却孔も鋳造時に作り込まれている。材質はタービン翼材として一般的なニッケル基合金である。試験時のメタル温度におけるニッケル基合金の熱伝導率は約10W/(mK)であり、ステンレス鋼の熱伝導率は約17W/(mK)である。試験結果の比較においては一次元熱伝導解析により熱伝導率の違いに起因する冷却効率の差を見積もり、試験結果を補

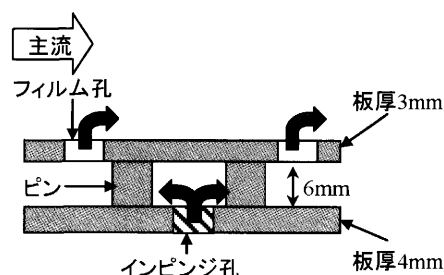


図2 試験片断面模式図

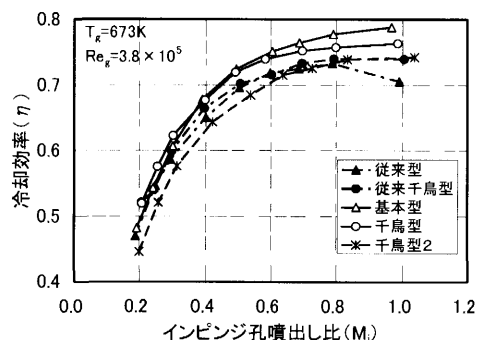


図3 単位区画平均冷却効率（文献(3)より）

正した。熱伝導率の違いに起因する冷却効率の違いは1～2%程度である。

文献(3)、(4)で報告されている表1の試験片についての平均冷却効率を図3に示す。図3の平均冷却効率はフィルム孔2列目と3列目の間の試験片中央部分の平均温度で評価した冷却効率である。この結果によると、基本型では冷却空気流量が多くなるほどピンのない従来型に対して優位性が増す結果が得られている。千鳥型もピンなしの従来千鳥型に対して優位性が確認されたが、従来千鳥型に対する優位性は流量によらずほぼ一定の割合となっており、基本型とは異なる傾向を示していた。このため、 $M_1 < 0.4$ の低流量域で千鳥型は基本型に勝る性能を示したが、それ以上の流量域では逆に基本型の性能が千鳥型を上回った。千鳥型2は、単位区画に配置されたピンの断面積密度は千鳥型と同じであるにもかかわらず、冷却効率はピンのない場合に比較して低くなっていた。



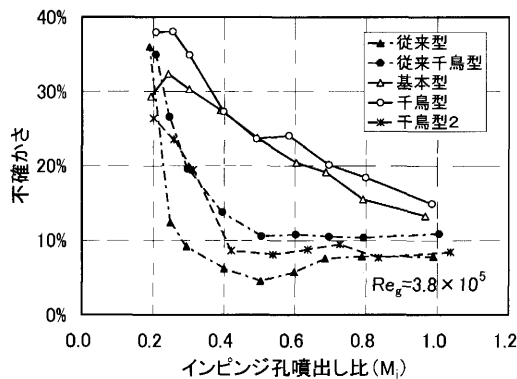


図4 不確かさ解析結果

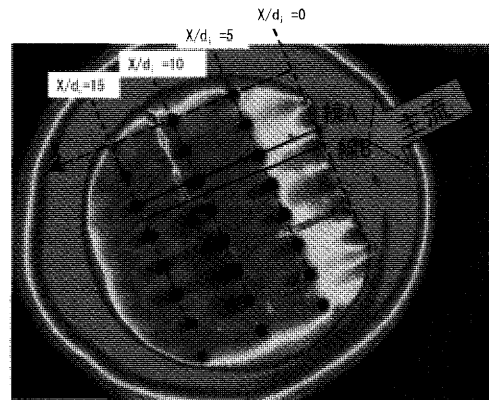


図5 冷却効率評価箇所

#### 4. 試験条件

主流側レイノルズ数（以下  $Re_g$ ）は  $3.8 \times 10^5$ ，冷却側レイノルズ数（以下  $Re_c$ ）は  $2.6 \times 10^3 \sim 4.0 \times 10^4$  である。 $Re_g$  は試験ダクト入口で計測した主流ガス温度平均値と試験片の流れ方向長さに基づき， $Re_c$  は試験片入口で計測された冷却空気温度平均値とインピンジ孔直径に基づく。フィルム冷却の重要変数である密度比を実機相当である2程度に合わせるために主流ガス温度は約673K，冷却空気供給温度は約300Kで試験を実施した。

#### 5. 誤差解析

この試験により得られる冷却効率

$$\eta = \frac{T_g - T_w}{T_g - T_c} \quad (\text{式1})$$

の不確かさを図4に示す。不確かさ解析の結果，全体の不確かさの主要因は冷却空気温度の不確かさであった。これは，主流から流入した熱により冷却空気が不均一に加熱され冷却空気温度に大きな分布が生じたことに起因している。冷却空気流量が少ない場合は主流からの入熱による温度上昇が大きく，大きな温度分布が生じるために不確かさが大きくなっている。試験片ごとに不確かさが異なる原因は，冷却性能差に起因する熱流束の違いであると考えている。本実験における冷却効率の不確かさは大きく，試験片間の冷却効率の絶対値を比較するには十分でないと考えられるが，同一条件下における温度計測の不確かさのみによる冷却効率の不確かさは1.2%と見積もられるため，試験片間での冷却効率分布形状の違いにおいては十分意味のある議論が可能である。

#### 6. 試験結果

試験により得られた熱画像から，冷却効率分布を試験片ごとに解析し，比較する。図5に示す線A（フィルム孔上），線B（フィルム孔間）に沿った冷却効率について比較を実施した。フィルム孔2列目より上流は試験片の端部に相当し，フィルム孔2列目以降とは構造の周期性が異なるため，以降の結果比較はフィルム孔2列目以降，すなわち  $X/d_1 \geq 5.0$  について行う。

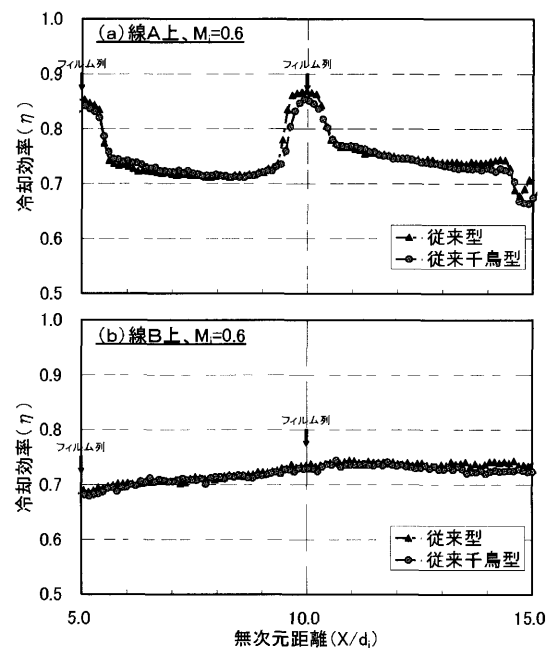


図6 孔配置の影響

##### 6.1 孔配置の影響

ピンのない従来型と従来千鳥型では平均冷却効率は  $M_1=1.0$  の場合を除いてほとんど差がなかった（図3）。局所的な相違の有無を図6に示した従来型，従来千鳥型の冷却効率分布により確認する。図6の横軸は最上流側のフィルム孔位置を0とした流れ方向の無次元距離 ( $X/d_1$ )，縦軸は式1で定義される冷却効率 ( $\eta$ ) である。以降の図7から図9についても同様である。図6によると従来型と従来千鳥型の冷却効率分布は，線A上，線B上ともにほぼ一致しており，局所的な冷却効率分布にもフィルム孔とインピンジ孔の配置の影響は見られなかった。従来型と従来千鳥型で差が見られなかったのは，今回の試験条件でのビオ数が0.2程度であったため，メタルの熱伝導により試験片内で温度が平均化されているためだと考えられる。この仮定を二次元平板での伝熱解析により検討した。冷却空気流量の多い  $M_1=1.0$  の条件にて解析を実施した結果，孔位置と孔中間位置の温度差は

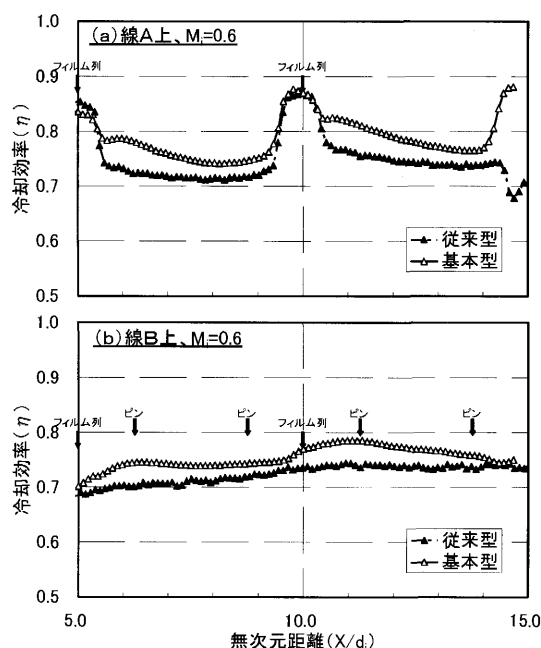


図7 ピンの影響 (基本型配置)

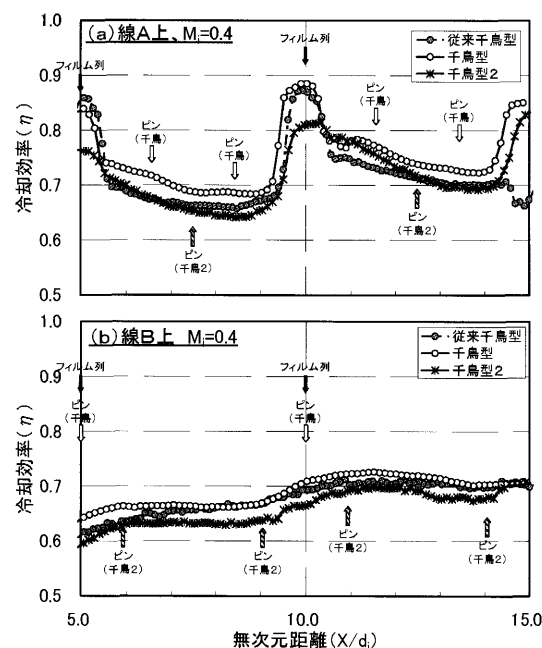


図8 ピンの影響 (千鳥型配置)

冷却側面でも $2.5^{\circ}\text{C}$ 程度、ガス側面では $0.7^{\circ}\text{C}$ 程度であり、流れに垂直方向ではガス側金属温度分布は小さいと推定された。実際にフィルム孔がなくインピンジ孔のみの試験片で表面温度分布を観測した結果からも線A上の冷却効率分布と線B上の冷却効率分布に差がないことが確認されている。

## 6.2 ピン有無の影響

図7に従来型と基本型の冷却効率分布を示す。ピンを持つ基本型は全般に従来型に対して高い冷却効率を示しており、ピンによる伝熱面積拡大の効果が現れている。ピンが配置されている線Bに沿った冷却効率分布を図7(b)に示す。フィルム孔列からフィルム孔列までの1区画の中で、基本型の上流側ピン位置 ( $X/d_f=6.25, 11.25$ ) では冷却効率が高くなっており、ピンの効果が見られた。一方、各区画の下流側のピン位置 ( $X/d_f=8.75, 13.75$ ) ではピンの効果は上流側のピンほど顕著ではない。各区画において上流側ピンと下流側ピンでピンの影響に差が出た原因のひとつには、インピンジ冷却空気の流れの対称性が崩れている可能性が考えられる。試験片のフィルム孔とインピンジ孔は各々4列ずつあり、上流側にフィルム孔が配置されている。従って、インピンジ冷却空気が上流側のフィルム孔から流出しやすくなる可能性があり、このため、各区画の上流側のピン周囲を流れる冷却空気流量は多く、一方、下流側のピン周囲を流れる冷却空気流量が少なかった可能性がある。次に線A上での冷却効率分布であるが、従来型と基本型は線A上では全く同じ構造であるにもかかわらず図7(a)によると線A上でも基本型は従来型に対して高い冷却効率を示していた。特にフィルム孔の直下流の冷却効率が高かった。船崎

ら<sup>(1)</sup>により報告されている基本型のインピンジ冷却ターゲット面の平均熱伝達率は、Florschuetzら<sup>(5)</sup>の式で予測される平均熱伝達率と同等であった。従来型の平均熱伝達率はFlorschuetzら<sup>(5)</sup>の式に従うものと仮定すると、船崎ら<sup>(1)</sup>の結果から、基本型のターゲット面平均熱伝達率は従来型とほぼ同等であると考えられる。従って、基本型のフィルム孔の直下流で冷却効率が高かった原因は、ピンのフィン効果の影響か、あるいはピンによりフィルムから噴出するフィルムの様相が変化し、フィルム冷却効率が変わったのかどちらかであると考えられる。

図8に従来千鳥型、千鳥型、千鳥型2の冷却効率分布を示す。線A上の結果を図8(a)に示す。ピン位置との対比で見ると、千鳥型ではピン位置にわずかながら冷却効率が高くなっている曲線のうねりが見られ、ピンの効果が見られる。 $X/d_f=10.8$ 付近で千鳥型の冷却効率が落ち込んでいるが、これは試験片表面の材料欠陥によるもので本質的なものではない。一方、千鳥型2ではピン位置にその存在を示す特徴は見られない。また、千鳥型2では他の2形状に比較してフィルム孔位置から下流に向かって冷却効率の低下が大きく、 $7.0 < X/d_f < 9.5$ ではピンのない従来千鳥型を下回っている。線B上の結果を図8(b)に示す。千鳥型はピン位置およびその下流で従来千鳥型に対して高い冷却効率を示し、ピンの効果が見られた。千鳥型2については分布形状は千鳥型に似ているものの、全体的に冷却効率が千鳥型よりも0.03程度低く、ピンのない従来千鳥型をも下回っていた。その中で、流れ方向にフィルム孔列からフィルム孔列までの1区画の中で上流側に位置するピン位置 ( $X/d_f=5.94, 10.94$ ) では従来千鳥型並の冷却効率を示している。しかし、下流側のピン位置については効果が明確ではなく、ピンが

存在するにもかかわらずピンのない従来千鳥型を下回る冷却効率しか得られていない。各区画の上流側のピンとの効果の違いはインピンジ冷却空気流れの非対称性によるものである可能性がある。

千鳥型2の冷却効率は、線A上フィルム孔の下流近くでのみ千鳥型並みの冷却性能を示す場合があるが、その他はピンのない場合の冷却性能並み、あるいはそれ以下に留まり、ピンの効果が見られなかった。これについては、千鳥型2ではインピンジ孔がピンに取り囲まれているためインピンジ冷却空気がターゲット面上に広がることができず、インピンジ冷却の効果が下がってしまったためではないかと推定している。

### 6.3 ピン効果の比較

図9(a)から(c)は、ピンのある基本型、千鳥型、千鳥型2の線A上での冷却効率分布を  $M_i=0.6, 0.8, 1.0$  の順に示している。 $M_i$ が増すと共に次第に基本型が千鳥型を上回るようになる。特にフィルム孔の直下流で基本型の冷却効率が高くなっている。基本型では線A上にピンは配置されていないにもかかわらず、千鳥型のピンの効果を上回る冷却効率を発揮していることが明らかになった。千鳥型2については、フィルム孔直下流では千鳥型並の冷却効率であるが、下流側に向かって冷却効率の低

下が大きく、ピンが有効に働いていない。

図9(d)から(f)に線B上での冷却効率分布を示す。 $M_i=0.6$ では千鳥型と基本型の冷却効率はほぼ同じであるが、冷却空気流量が増すにつれて基本型の冷却効率が千鳥型よりも高くなっている。特に各区画の上流側の基本型のピン位置に相当する部分で基本型の冷却効率がよく、基本型のピンの効果が千鳥型に比較して高いことがわかった。千鳥型2は線B上でも全体的に基本型、千鳥型よりも冷却効率が低くピンの効果が発揮されていない。

## 7. 結 論

複合型インピンジ冷却構造についてこれまでに発表されている研究結果によると、ピン・孔配置が平均冷却効率に影響を与えることが報告されている。そこで、ピン・孔配置の違いが局所的な冷却効率分布にどのような違いとして現れているのかを調べる目的で、複合型インピンジ冷却構造の様々なピン・孔配置の構造に対して冷却効率分布を比較検討した。今回の研究で得られた主な結論を以下に列記する。

- 1) 今回試験を実施した条件においては、ピンのない構造ではフィルム孔とインピンジ孔が流れ方向に同一直線状配置の場合と、千鳥型配置の場合の冷却効率分布に相違は見られなかった。

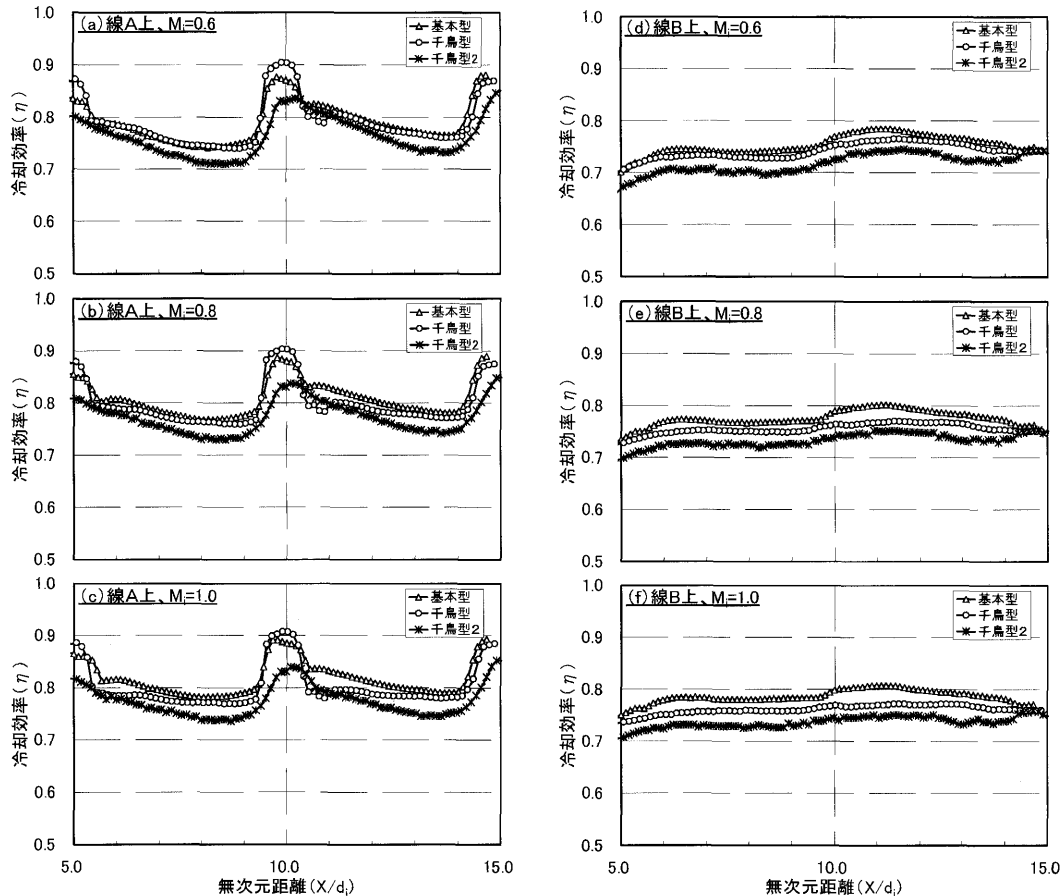


図9 ピンあり構造比較

2) ピンの影響は冷却効率分布に現れていた。基本型の場合も、千鳥型、千鳥型2の場合も、各区画で上流側のピンの効果が大きく、下流側のピンでは効果は小さくなっていた。

3) ピン有りの千鳥型と基本型を比較すると  $M_i=0.8$  以上の場合に両者に差が見られた。フィルム孔上ではフィルム孔の直下流で、孔間ではいずれにおいても各区画の上流側のピン位置において基本型の冷却効率が千鳥型に比べて特に高かった。ピンの効果は千鳥型よりも基本型で顕著であることが明らかになった。区画平均での基本型の性能が高くなっているのは、各区画上流側のピンの効果によるところが大きいことが明らかになった。

以上のように、孔配置は冷却効率分布に影響が小さいが、ピンの影響が冷却効率分布に現れていることが明らかになった。ピン・孔配置が冷却性能に影響するメカニズムの解明には、さらに冷却側熱伝達率分布、フィルム効率分布などのデータが必要であり、ピン・孔配置が冷却の境界条件のそれぞれに及ぼす影響を個別に評価することが今後の課題である。

## 8. 謝 辞

本研究は平成11年から平成15年まで実施された経済産業省の新規産業創出型産業科学技術研究開発制度による「環境適合型次世代超音速推進システムの研究開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けて実施したものです。本研究の実施に当たり、ご指導とご協力をいただいた NEDO および多くの関係各位のご厚誼に対し、深く感謝の意を表します。

## 記 号

d : 孔径 [m]

M : 噴出し比  $(V_c \rho_c) / (V_g \rho_g)$

T : 温度 [K]

$Re_c$  : 冷却側レイノルズ数

(インピンジ孔流速, インピンジ孔径に基づく)

$Re_g$  : 主流側レイノルズ数

(主流ガス流速, 流れ方向試験片長さに基づく)

V : 流速 [m/s]

X : 主流流れ方向距離 [m]

$\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\eta$  : 冷却効率 (式 1)

## 下付記号

c : 冷却空気

f : フィルム孔, フィルム冷却空気

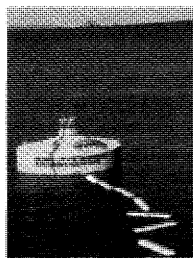
g : 主流ガス

i : インピンジ孔, インピンジ冷却空気

w : 試験片表面 (ガス側)

## 参 考 文 献

- (1) Funazaki, K., Tarukawa, Y., Kudo, T., Matsuno, S., Imai, R. and Yamawaki, S., 2001, "Heat Transfer Characteristics of an Integrated Cooling Configuration for Ultra-High Temperature Turbine Blades: Experimental and Numerical Investigations", ASME Paper 2001-GT-148
- (2) Yamawaki, S., Nakamata, C., Imai, R., Matsuno, S., Yoshida, T., Mimura, F., Kumada, M., 2003, "Cooling Performance of an Integrated Impingement and Pin Fin Cooling Configuration", ASME Paper GT2003-38215
- (3) Nakamata, C., Okita, Y., Matsuno, S., Mimura, F., Matsushita, M., Yamane, T., Fukuyama, Y., Yoshida, T., 2005, "Spatial Arrangement Dependence of Cooling Performance of an Integrated Impingement and Pin Fin Cooling Configuration", ASME Paper GT2005-68348
- (4) 仲俣, 大北, 三村, 松下, 山根, 福山, 吉田, 「複合型インピンジ冷却構造の冷却性能に対するピン配置の影響」, 日本ガスタービン学会誌, Vol.34 No.2, pp.112-117, 2006.3
- (5) Florschuetz, L. W., Truman, C. R. and Metzger, D. E., 1981, "Streamwise Flow and Heat Transfer Distributions for Jet Array Impingement with Crossflow," ASME Journal of Heat Transfer, 103, pp. 337-342.



## エネルギー問題解決へ —大きな対策と小さな対策—

神吉 博<sup>\*1</sup>  
KANKI Hiroshi

最近のエネルギーや電力の問題について考えてみる。機械学会誌7月号に“省エネルギーと新エネルギーの現状と将来”小特集号があり、電気学会誌8月号に会長演説“将来のエネルギー社会を支える電気”の記事がある。このようにエネルギー問題はこれまでもこれからも人類にとって最も重要な課題であることに異論は無いであろう。

筆者は長年、回転機械屋として、大容量の蒸気タービン、ガスタービン、ポンプ水車、ポンプと超大型のエネルギー機器の開発に携わってきた。一方家庭では10年前より新型の太陽熱温水器と太陽光発電設備を取り付け、大学では新しい波力発電システムの研究をしている。エネルギーの規模でみると100万KWから1KWと100万分の1になっている。両者についてそれぞれ意味を考えてみたい。

大容量機の効率向上の意義の大きさはガスタービン関係者が最も良く知っている通りである。50%以上の効率が実現されている熱機関は、ガスタービンコンバインドサイクルシステムと大形船用ディーゼルエンジンだけであろう。従来の蒸気タービンプラントの40%と比べるとその効果は絶大である。関係者の益々の努力による更なる効率向上が期待されている。揚水発電所やNAS電池など夜間電力の蓄エネルギーによる昼間のピークカットも同様に、火力による発電を減少させることで正味二酸化炭素排出削減に寄与できる。ただし、この時蓄えるエネルギーは原子力発電や水力発電などによる分でなければならない。

一方、自然エネルギー発電は、日本のように電力需要の絶対値が著しく大きい国では大きく寄与することは困難であるが、燃料の枯渇が問題となるこれからの重要課題である。日本はエネルギー自給率が4%と先進国最下位であり、食料自給率の低さとあわせ危機的な状況にあることを国民全体が認識しなければならない。自然エネルギー発電の中で太陽光発電は日本がリードしているが、さらに進めるためには大幅なコストダウンと国を挙げての補助が引き続き必要であろう。風力発電については台風など恵まれない環境もあるが洋上風力などさらに発展が期待される。一方海洋エネルギー発電については、日本は研究はリードしているが実用化が大幅に遅れており、コストパフォーマンスの優れたシステムの開発や規制緩和など一層の努力が必要とされる。筆者が開発中のジャイロ式波力発電システム(写真参照)は、小容量であるがこれらの問題点を解決するものとして鋭意進めている。

一方、エネルギーや電力を多く使うのが冷暖房であり、

この省エネルギーが大きな課題である。この中にはビル等大形施設の空調の問題と一般家屋の問題がある。日本の建物は一般的に空調に対する省エネの工夫が不足しており、北欧やカナダに比べ規制やコストの掛け方がかなり劣っている。これは冷暖房無しで生きていけるレベルからスタートしているところが根本問題と考えられる。北欧やカナダでは断熱性能がある値以上でないと建築許可は下りないと聞く。交流しているスウェーデンの大学の建築担当に聞くと建物の壁は600mmとのこと。大学の筆者の部屋は5mm程のアルミコルゲート板で外気と隔てられているだけである。いくら予算が足りないといってもひどすぎる設計である。大都市のビルや店舗についても、冷暖房する建物には断熱性能や入射エネルギーの規制が不可欠であろう。

地震はめったにこないが冷暖房は日々の問題であり、最近の家庭用冷蔵庫の省エネ性能の向上を参考に建築家や規制側の一層の努力が待たれる。

最近省エネ意識の高いユーザーの工場などの空調システムに関しては、ターボ冷凍機、ターボヒートポンプの著しい性能向上が達成され、インバータによる可変速運転と合わせ大幅な省エネが達成されつつある。また蓄冷、蓄熱も夜間電力を用いて盛んに実用されている。

一方、一般の家庭に眼を向けるとエアコンの性能と機能は申し分なく向上し、競争による価格の低下で、日本の消費者は非常に恵まれた状態にある。しかしそれでもエアコンはかなりの電力を使うので省エネ運用をする必要がある。もともと日本の住宅は自然とバランスして暮らせるようになっていたわけで、この知恵を十分生かす必要がある。夏はなるべく日を入れず冬は日を入れるなど、新しい建物でもブラインドひとつの操作でかなりの省エネが可能である。日々の省エネの努力が地球温暖化防止につながっている。

話はやさしいが実行は難しい、本稿が皆さんの思考が仕事と家庭の間を往復するヒントになれば幸いです。

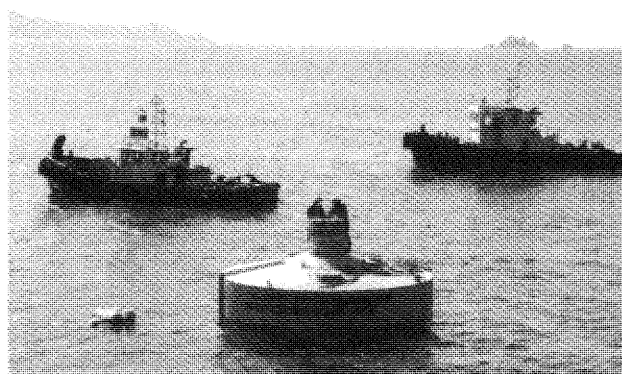


写真 実験中のジャイロ式波力発電装置

原稿受付 2006年8月11日

\*1 神戸大学 工学部 機械工学科

〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1

## 九州大学におけるガスタービン関連研究の紹介

速水 洋\*<sup>1</sup>  
HAYAMI Hiroshi

山崎 伸彦\*<sup>2</sup>  
YAMASAKI Nobuhiko

古川 雅人\*<sup>3</sup>  
FURUKAWA Masato

キーワード：Gas Turbine, Centrifugal Compressor, Internal Flow, PIV, Fan Noise, Large Eddy Simulation, Axial Compressor, Stall Inception

### 1. はじめに

九州大学におけるガスタービン関連の研究は、ターボ機械をはじめ、燃焼、潤滑、ダイナミクス等幅広く行われている。本稿では、ガスタービンに直接関連するターボ圧縮機を対象とする3研究室に絞り、概要を述べる。大学院総合理工学研究院の1研究室は、福岡市の南、春日市と大野城市にまたがる筑紫キャンパスに25年前に移転した。一方、大学院工学研究院の2研究室は昨年の夏に新キャンパスへ移転した。福岡市の西、前原市と接する、伊都キャンパスである。

### 2. 速水研究室（総合理工学研究院/筑紫キャンパス）

本研究室では、環境と共生するエネルギーシステムの構築について流体工学を駆使してシステムおよび構成機器の高性能化、省エネルギー化を図ることを目的とした研究・教育を行っており、例えば、ターボ機械の高性能化および各種要素機器の内部流動現象の研究を遂行している。そのひとつとして遷音速遠心圧縮機の開発研究を1973年以来継続している。本試験設備は25年前の移転を経て33年が経過したいま、設備の老朽化は否めないが、なお現役である。単段・高圧力比遠心圧縮機（圧力比8～6）の広流量域化が大きな目標であり、羽根車あるいはディフューザ、それらのマッチングの研究、特に小弦節比円形翼列ディフューザの適用と改良等は注目を集めた<sup>(1)</sup>。他方、性能向上のためには圧縮機内部流動の把握が不可欠であり、圧力や流れの計測も主たる継続的研究テーマである。計測手法に関しては、圧力センサー、PSP（感圧塗料）、レーザ2焦点流速計などを経て、現在PIV（粒子画像流速計測法）へ移行した。PIVの導入によって大幅な時間短縮化とともに膨大な速度ベクトル場データの取得が可能となった<sup>(2)</sup>。他方、詳細な流れ場計測とともにこれらのデータベースを活かす意味で汎

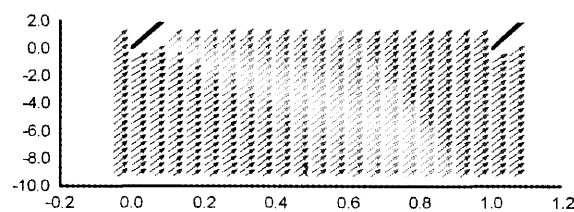
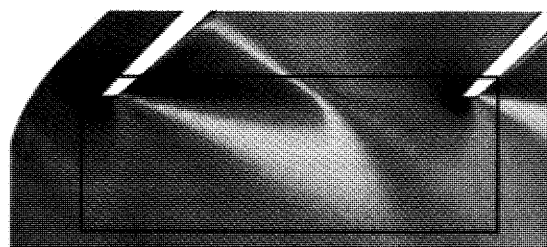


図1 遷音速遠心羽根車インデューサの自乗平均半径位置における相対マッハ数分布（上：CFD，下：PIV）

用コードではあるがCFDによる流れ解析を平行して行っている。その結果の一部とPIV計測結果との比較を図1に示す<sup>(3)</sup>。翼負圧面に発生する衝撃波の様子が捉えられている。ダイナミックPIVを用いた実験的研究も盛んである。例えば、遠心圧縮機入口部の失速に関連した非定常流れ現象の把握に挑戦中である。また、軸流ファン下流の渦構造や不安定流動状態等の計測も実行中である。遷音速遠心圧縮機試験設備利用を含め、開発研究および計測技術等、これまで蓄積したノウハウをベースに産業界との共同研究を進めるとともに、大学研究機関等との共同研究も積極的に進めている。なお、本研究室は今年の4月に先導物質化学研究所から大学院総合理工学研究院へ組織替えした。ただし、居室・実験室ともにこれまでどおりである。

### 3. 山崎研究室（工学研究院/伊都キャンパス）

研究は翼列の非定常空気力学、高速推進機関の熱流体力学を中心に行っている。振動翼列に働く非定常空気力学は本研究室が創設以来もっとも重点をおいている研究である。振動翼列に働く非定常空気力学を求める解析手法に二重線形理論があるが、この理論は計算負荷が少ないという長所がある反面、定常部分も線形化しているため、

原稿受付 2006年8月4日

- \* 1 九州大学大学院総合理工学研究院エネルギー物質科学部門  
〒816-8580 春日市春日公園6-1
- \* 2 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門  
〒819-0395 福岡市西区元岡744番地
- \* 3 九州大学大学院工学研究院機械科学部門  
〒819-0395 福岡市西区元岡744番地

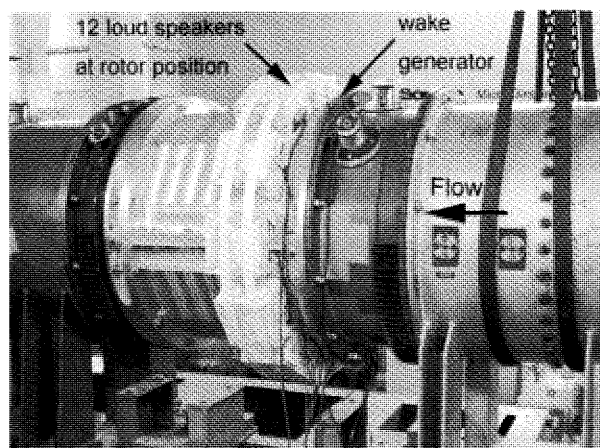


図2 ファン騒音実験設備

定常負荷について適用限界があると考えられる。それを数値流体力学的手法により定量的に評価した結果、比較的高い迎角までよい一致が見られていて、理論の有効性が示されている<sup>(4)</sup>。また、近年、燃焼計算のための複雑流れ場の数値流体力学シミュレーションを行っている。ブラフボディーと旋回を有する乱流れ場（コールド）のラージエディシミュレーションでは、スワール数に応じた大規模渦の発生・崩壊の様子や時間平均速度・速度分散などが他所で行われた検証実験とよい一致を示している。現在、これに Presumed PDF（確率密度関数）を適用して、乱流燃焼流に適用しつつある<sup>(5)</sup>。最近では、ファン騒音のアクティブコントロールの研究を行っている。ファン騒音は、動翼と静翼やストラットなどの静止コンポーネントの干渉によって生じるが、これを、ダクト壁面の周上に配置されたスピーカ（2次音源）に正確な相対位相をもったスピニングモードの制御音波を発生させて能動制御しようと試みている（図2）<sup>(6)</sup>。

#### 4. 古川研究室（工学研究院/伊都キャンパス）

本研究室では軸流および斜流ターボ圧縮機に関する研究に創設以来取り組んできた。特に、熱線流速計や高応答圧力センサーを用いた周期的多点抽出法により動翼列の内部流動を解明してきた。最近では、この従来の実験流体力学（EFD）による解析とともに、計算流体力学（CFD）による解析を併せて実施して、EFD/CFD ハイブリッド解析により動翼列周りの複雑な流動現象を解明している。CFD 解析では、有限体積法と TVD 法による空間離散化および時間方向への独自の線形化を施して開発した緩和形陰の高解像度風上スキームを用いるとともに、特異点理論に基づいた知的可視化<sup>(7)</sup>による渦構造

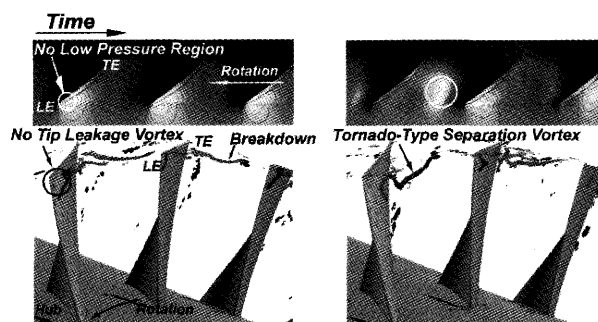


図3 軸流圧縮機動翼列の旋回失速初生時の渦流れ構造

の抽出および限界流線のトポロジー解析を行うことにより、ターボ圧縮機内の衝撃波を伴う複雑な渦流れ場の非定常3次元挙動を調べている。この知的可視化の導入によって、軸流圧縮機動翼列の翼先端漏れ渦が失速点近傍において渦崩壊を起こすこと、その渦崩壊が失速点近傍の空力性能を支配していることなど新たな知見を見出すことに成功している<sup>(8),(9)</sup>。現在、高応答圧力センサー30個を用いたケーシング面圧力の同時計測と約1,500万の計算セルを用いた大規模な非定常CFD解析とによるEFD/CFD ハイブリッド解析を実施して、軸流圧縮機動翼列における旋回失速の「初生」過程を調べている。その結果、図3に示すように、翼先端部の前縁はく離から成長した竜巻状のはく離渦が失速初生過程を支配していることが分かりつつある<sup>(10)</sup>。

#### 5. おわりに

以上がターボ圧縮機関連3研究室の概要である。福岡市の中心部からそれぞれ、南あるいは西へと若干離れてはいるが、皆様の来訪および産学連携話などを歓迎します。

#### 参考文献

- (1) Hayami, H., ASME Paper 2000-GT-465 (2000).
- (2) Hayami, H. et al., ASME Paper GT2004-53268 (2004).
- (3) 速水ほか, 日本機械学会年次大会にて発表予定 (2006-9)
- (4) 藤本ほか, 日本機械学会論文集B編, 72-713 (2006), p.17
- (5) Nagasaki ほか, IGTC2003-ABS-049, IGTC2003 (2003)
- (6) Tajima ほか, AJCPP-22112, AJCPP'2006 (2006)
- (7) 古川, 可視化情報学会誌, 23-91号 (2003), p.206
- (8) Furukawa, M. et al., Trans. ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 121 (1999), p.469
- (9) 古川ほか, 日本機械学会論文集, B編, 66-644号 (2000), p.1029
- (10) Iwakiri, K. et al., Proc. of the 3rd International Conference on Vortex Flows and Vortex Models (2005), p.211



# 2006年第51回 ASME 国際ガスタービン会議

## 1. 全 般

水木 新平<sup>\*1</sup>

MIZUKI Shimpei

ASME TURBO EXPO 2006はスペインのバルセロナ国際会議場(写真1)において5月8日(月)から11日(木)まで開催された。会議場の外には掲示がなく、建物内部でようやく目にすることができた。会場は地中海を望める海辺に面し、旧市街から少し離れた位置にあった。参加者数は2500名、発表論文数は770件を超えた。参加国数は合計55であった。展示は同じ会場で9日から11日まで開催され、展示者数は約100であった。参加登録は7日から始まったが当初予定していたより30%ほど多かったようで、CD Romが足りなくなり後に郵送されたり、バッグが不足などのトラブルはあったが、講演会場は24室と十分に用意されていた。ASMEメンバーの4日間の事前参加登録料は税込みで785ユーロと高く、展示収入が少ないためと推測した。セッションは8日から11日まで8:45から昼休みの2時間を入れて18:00まで配置されていた。講演会場の様子を写真2に示す。左右に講演室が設けられていた。初日の8日にはKeynote Sessionが15:00から17:30まで行われた。カタロニア自治政府の雇用・工業担当相のBlasco氏の挨拶と現状の説明に続いて、P&Wの技術担当副社長のAdams氏、Rolls-Royce plcのSmith氏およびSiemens Industrial Turbomachinery Ltd.のWilds氏が講演し、国際的な連携の効果と世界的なグローバルゼーションの立場からの新製品開発における製造を含む技術的課題とビジネスに関して報告がなされた。その後19:30から21:00まで地下鉄で20分ほどかかるBarcelona Royal ShipyardsでWelcome Receptionが開かれ、大勢の参加者で賑った。展示は9日の12:30から始まり、開催時間は19:00まででエントランス・ホールの奥が会場であった。スペインでは昼休みは2時間、夕食のレストランが開くのは20:30という事情に合わせて、会議と展示の時間を配置したと思われる。論文に関するCommittee数は17であった。表1に各CommitteeにおけるPaper Sessionでの論文数とこれ以外のSessionの種類と数を示す。ここで、PはPanel、TはTutorial、LはLectureと名づけられたSessionで、その後の数字は数を表す。これらの数字を見ると世界のガスタービン関係者がどの分野に力注いでいるかが読み取れる。また、Panel、TutorialおよびLecture Sessionの参加者の国籍とテーマの間にも相

関があると思え、きめの細かい計画が立てられたことが伺える。資料によると参加者の統計は、アメリカが約880名で一番多く、続いて英国が約310名、ドイツとスペインが約200名、イタリアが約140名、スイスが約90名、カナダが約80名、スウェーデンが約60名、フランスとオランダが約50名、ロシアとベルギーが約30名などでアジアからは日本が約70名、中国が60名、韓国が30名などであった。この内で日本の論文数は35件、中国は40件、韓国は7件であり、中国の躍進が目立った。

会場でDr. Wislerと話をする機会を得た。来年のモントリオールの次の会議はドレスデンを考えているとのことであった。また、中国政府がASME/IGTIが中国で国際会議をするのならば2008年にして欲しいと言っているとのことであった。今回の会議の全体の印象は参加

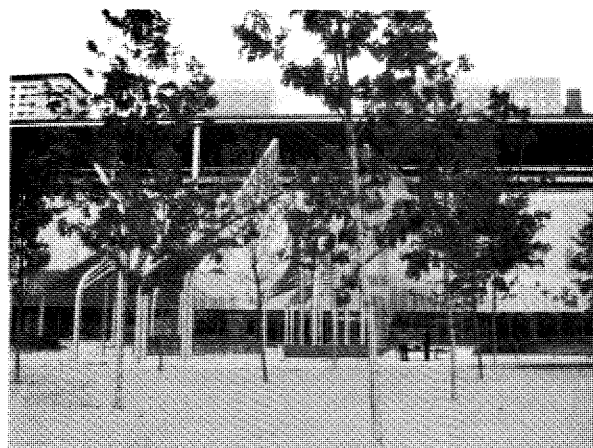


写真1 会場入口



写真2 講演会場

原稿受付 2006年7月3日

\*1 法政大学 工学部

〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2



者も多く、講演会場も人が多かったが、一方、展示会場は人が少なく、開場式の9日を除けば、やや閑散とした感じであった。

表1 Committee 名, Paper Session 論文数およびそれ以外の Session 名と Session 数

Committee 名	論文数	Session 数
Aircraft Engine	25	P3
Ceramics	10	T1
Coal, Biomass & Alternative Fuels	21	P1
Combustion & Fuels	81	P2
Controls, Diagnostics & Instrumentation	50	L1

Committee 名	論文数	Session 数
Cycle Innovations, Education	8	0
Electric Power	8	P8
Environmental & Regulatory Affairs	3	P8
Heat Transfer	146	0
Industrial & Cogeneration	30	T3
Manufacturing Materials & Metallurgy	16	P5,L1,T1
Marine	19	T1
Microturbines & Small Turbomachinery	35	P1
Oil & Gas Applications	11	P4,T2
Structures & Dynamics	35	0
Turbomachinery	184	0

## 2. 航空用ガスタービン

木村 建彦\*1  
KIMURA Takehiko

キーワード：超音速機用エンジン、バーチャルエンジン、インレットスワール

### 1. 概要

今年の航空エンジン委員会主催のセッションは10セッションで、内容は、インレットスワールや着氷に関するものとエンジンシミュレーションに関するものが中心であった。大型プロジェクト関連は、昨年までのIHPTET (Integrated High Performance Turbine Engine Technology) や VAATE (Versatile Affordable Advanced Turbine Engine) に関するものは全くなく、超音速機用エンジンのパネルセッションが1つあったのみだった。

盛況だったセッションは、超音速機用エンジンのパネルセッションとバーチャルエンジンのパネルセッションで、立ち見が出るほどの人気だったが、残念ながら、どちらも論文や資料の配布はなく、録音・撮影は固く禁止された。以下に、超音速機用エンジンのセッション、バーチャルエンジンのセッション、インレットスワールのセッションについて内容を報告する。

### 2. 超音速機用エンジン

将来のSSBJ (Supersonic Business Jet), LRSV

(Long Range Strike Air Vehicle), 宇宙往還機に適用することを想定したTBCC (Turbine Base Combined Cycle Engine) についてのセッションで、TBCCの技術課題の紹介があった。課題は、高温ガスに対応できる材料、高マッハ飛行環境におけるヒートマネジメント、ターボモードからラムモードへのモード切替の方法と制御、低マッハ飛行から高マッハ飛行までに対応できるインテークの開発、スクラムモード時のターボエンジン冷却、機体とのインテグレーション、飛行試験前の地上での試験方法/機能確認方法等が挙げられていた。今後の開発計画に関して、活発な質問が飛んでいた。

### 3. バーチャルエンジン

バーチャルエンジンのパネルセッションでは、6つの企業および大学からのパネラーがシミュレーションのデモをしながら、バーチャルエンジンの必要性和今後の課題について述べた。圧縮機内で起きる動翼後流と静翼の干渉の様子や燃焼器内部の燃焼の様子、着火の様子を動画で見せながらのプレゼンテーションには迫力があつた。エンジン全体を統合したシミュレーションモデルは未だ完成していない様子で、各要素を企業や大学で分担して開発している段階である。バーチャルエンジンの用途として、①実機を製作して行うエンジン試験の省略による

原稿受付 2006年7月7日

\*1 石川島播磨重工業(株) 航空宇宙事業本部  
防衛システム事業部 F7プロジェクト部  
〒188-8555 東京都西東京市向台町3-5-1

者も多く、講演会場も人が多かったが、一方、展示会場は人が少なく、開場式の9日を除けば、やや閑散とした感じであった。

表1 Committee 名, Paper Session 論文数およびそれ以外の Session 名と Session 数

Committee 名	論文数	Session 数
Aircraft Engine	25	P3
Ceramics	10	T1
Coal, Biomass & Alternative Fuels	21	P1
Combustion & Fuels	81	P2
Controls, Diagnostics & Instrumentation	50	L1

Committee 名	論文数	Session 数
Cycle Innovations, Education	8	0
Electric Power	8	P8
Environmental & Regulatory Affairs	3	P8
Heat Transfer	146	0
Industrial & Cogeneration	30	T3
Manufacturing Materials & Metallurgy	16	P5,L1,T1
Marine	19	T1
Microturbines & Small Turbomachinery	35	P1
Oil & Gas Applications	11	P4,T2
Structures & Dynamics	35	0
Turbomachinery	184	0

## 2. 航空用ガスタービン

木村 建彦<sup>\*1</sup>

KIMURA Takehiko

キーワード：超音速機用エンジン、バーチャルエンジン、インレットスワール

### 1. 概要

今年の航空エンジン委員会主催のセッションは10セッションで、内容は、インレットスワールや着氷に関するものとエンジンシミュレーションに関するものが中心であった。大型プロジェクト関連は、昨年までのIHPTET (Integrated High Performance Turbine Engine Technology) や VAATE (Versatile Affordable Advanced Turbine Engine) に関するものは全くなく、超音速機用エンジンのパネルセッションが1つあったのみだった。

盛況だったセッションは、超音速機用エンジンのパネルセッションとバーチャルエンジンのパネルセッションで、立ち見が出るほどの人気だったが、残念ながら、どちらも論文や資料の配布はなく、録音・撮影は固く禁止された。以下に、超音速機用エンジンのセッション、バーチャルエンジンのセッション、インレットスワールのセッションについて内容を報告する。

### 2. 超音速機用エンジン

将来のSSBJ (Supersonic Business Jet), LRSV

(Long Range Strike Air Vehicle), 宇宙往還機に適用することを想定したTBCC (Turbine Base Combined Cycle Engine) についてのセッションで、TBCCの技術課題の紹介があった。課題は、高温ガスに対応できる材料、高マッハ飛行環境におけるヒートマネジメント、ターボモードからラムモードへのモード切替の方法と制御、低マッハ飛行から高マッハ飛行までに対応できるインテークの開発、スクラムモード時のターボエンジン冷却、機体とのインテグレーション、飛行試験前の地上での試験方法/機能確認方法等が挙げられていた。今後の開発計画に関して、活発な質問が飛んでいた。

### 3. バーチャルエンジン

バーチャルエンジンのパネルセッションでは、6つの企業および大学からのパネラーがシミュレーションのデモをしながら、バーチャルエンジンの必要性和今後の課題について述べた。圧縮機内で起きる動翼後流と静翼の干渉の様子や燃焼器内部の燃焼の様子、着火の様子を動画で見せながらのプレゼンテーションには迫力があつた。エンジン全体を統合したシミュレーションモデルは未だ完成していない様子で、各要素を企業や大学で分担して開発している段階である。バーチャルエンジンの用途として、①実機を製作して行うエンジン試験の省略による

原稿受付 2006年7月7日

\*1 石川島播磨重工業(株) 航空宇宙事業本部  
防衛システム事業部 F7プロジェクト部  
〒188-8555 東京都西東京市向台町3-5-1

開発コストの削減, ②地上試験が難しく, 飛行試験ではリスクのある超音速機用エンジン TBCC のシミュレーション, ③エンジンヘルスモニタリングへの適用を挙げていた。今後の技術課題は, ①非定常空力モデルの精度向上, ②化学反応モデルの精度向上, ③伝熱モデルの精度向上, ④クーリングフローの精度向上であると言う。

#### 4. インレットスワール

継続テーマである「インレットディストーション」のうち, 一昨年の圧力分布, 昨年の温度分布に引き続き, 今年はインレットスワールをテーマとしたパネルディスカッションが行われた。インレットスワールにより, ファン動翼への空気の流入角が変化して, 推力ロスやスタビリティマージンの減少が起きる現象が問題となっているとのこと。スワールは, エンジンの空気吸込み口の近くに地面や機体の主翼・胴体が存在すること, 機体の横滑り角や迎角, 長く曲がったインテークダクトで発生するため, この問題はエンジンだけでなく機体設計とも密接に関係がある。今後開発されていく超音速機は, エンジンのマウント位置が独創的なものとなるため, スワール研究の重要性が増しているとのこと。スワールに

は, 定常スワールと非定常スワールがあり, 非定常スワールは, その正体が掴みにくく, しかも, 下流のエンジン作動状態によっても変化するため, スワールの問題は非常に複雑なものであるといった議論がなされていた。

#### 5. まとめ

以上の通り, 今年の国際会議の内容は, 超音速機用エンジンの開発に繋がっていく内容のものが多く, 超音速機用エンジンの開発が確実に進行していることが伺えた。その他, 特記すべきことは, 最近の民間航空機用エンジンのセールス形態が, Long-term maintenance agreements (客は月定額のメンテナンスフィーを払い, 製造者がメンテナンスや修理責任を負う契約) に移行していく中, エンジン出荷後のメンテナンスコスト増のリスクを精度良く予測し, 且つ, ライフサイクルコストを低減するための設計が必要となってきた。今回, 運用データをベースにしたライフサイクルコスト低減のための設計手法の研究に関して, いくつか論文が出てきており, エンジンメーカーが積極的にライフサイクルコスト低減設計に取り組み始めている様子が伺えた。

## 3. 産業用ガスタービン

田中 良造\*1  
TANAKA Ryoza

産業用ガスタービン (船用ガスタービンを含む) に関連した Committee は5つであり, 開催したセッションはペーパーセッションが30 (昨年37), パネル/チュートリアルセッションが13 (同8) の計43 (同45) であり, 論文発表は126件 (同106), 講演発表は40件 (同28) であった。昨年と比較するとセッション数は同程度であるが発表数は若干増加している (詳細右表参照)。

#### 1. 全般

前述の5つの Committee で産業ガスタービンに関してその新機種や新技術, 適用技術, 熱サイクル改良技術といった幅広い領域をカバーしており, また参加者もメーカー, ユーザー, 大学等の研究機関の研究者と様々であった。

国別にみると中国, 韓国, また東欧からの参加者が以前に比べて増えてきていると感じた。

原稿受付 2006年6月19日

\*1 川崎重工(株) ガスタービン・機械カンパニー  
ガスタービンビジネスセンター  
技術総括部 産業ガスタービン技術部 第三技術課  
〒673-8666 明石市川崎町1番1号

ASME Turbo Expo. 2006  
産業用ガスタービン関連セッション/講演発表数

Committee	Paper Session		Panel/Tutorial Session		Total	
	セッション	発表	セッション	発表	セッション	発表
Cycle Innovations	12	47	0	0	12	47
Electric Power	3	12	4	15	7	27
Industrial & Cogeneration	7	32	2	4	9	36
Oil and Gas Applications	4	18	6	20	10	38
Marine	4	17	1	1	5	18
Total	30	126	13	40	43	166
参考) 2005年	37	106	8	28	45	134

(Final Program より集計)

以下 Committee 毎に見聞記を記す。

#### 2. Cycle Innovations : サイクルイノベーション

12セッション47件の論文発表があった。

サイクル改良に関するセッションでは高温分サイクルとして Cheng Power Sys. 社から2種類の蒸気注入サイクルである Cheng Cycle と GE 社の STIG Cycle の比較についての論文発表 (GT-90382), また日立からは

開発コストの削減, ②地上試験が難しく, 飛行試験ではリスクのある超音速機用エンジン TBCC のシミュレーション, ③エンジンヘルスモニタリングへの適用を挙げていた。今後の技術課題は, ①非定常空力モデルの精度向上, ②化学反応モデルの精度向上, ③伝熱モデルの精度向上, ④クーリングフローの精度向上であると言う。

#### 4. インレットスワール

継続テーマである「インレットディストーション」のうち, 一昨年の圧力分布, 昨年の温度分布に引き続き, 今年はインレットスワールをテーマとしたパネルディスカッションが行われた。インレットスワールにより, ファン動翼への空気の流入角が変化して, 推力ロスやスタビリティマージンの減少が起きる現象が問題となっているとのこと。スワールは, エンジンの空気吸込み口の近くに地面や機体の主翼・胴体が存在すること, 機体の横滑り角や迎角, 長く曲がったインテークダクトで発生するため, この問題はエンジンだけでなく機体設計とも密接に関係がある。今後開発されていく超音速機は, エンジンのマウント位置が独創的なものとなるため, スワール研究の重要性が増しているとのこと。スワールに

は, 定常スワールと非定常スワールがあり, 非定常スワールは, その正体が掴みにくく, しかも, 下流のエンジン作動状態によっても変化するため, スワールの問題は非常に複雑なものであるといった議論がなされていた。

#### 5. まとめ

以上の通り, 今年の国際会議の内容は, 超音速機用エンジンの開発に繋がっていく内容のものが多く, 超音速機用エンジンの開発が確実に進行していることが伺えた。その他, 特記すべきことは, 最近の民間航空機用エンジンのセールス形態が, Long-term maintenance agreements (客は月定額のメンテナンスフィーを払い, 製造者がメンテナンスや修理責任を負う契約) に移行していく中, エンジン出荷後のメンテナンスコスト増のリスクを精度良く予測し, 且つ, ライフサイクルコストを低減するための設計が必要となってきた。今回, 運用データをベースにしたライフサイクルコスト低減のための設計手法の研究に関して, いくつか論文が出てきており, エンジンメーカーが積極的にライフサイクルコスト低減設計に取り組み始めている様子が伺えた。

### 3. 産業用ガスタービン

田中 良造\*1  
TANAKA Ryoza

産業用ガスタービン (船用ガスタービンを含む) に関連した Committee は5つであり, 開催したセッションはペーパーセッションが30 (昨年37), パネル/チュートリアルセッションが13 (同8) の計43 (同45) であり, 論文発表は126件 (同106), 講演発表は40件 (同28) であった。昨年と比較するとセッション数は同程度であるが発表数は若干増加している (詳細右表参照)。

#### 1. 全般

前述の5つの Committee で産業ガスタービンに関してその新機種や新技術, 適用技術, 熱サイクル改良技術といった幅広い領域をカバーしており, また参加者もメーカー, ユーザー, 大学等の研究機関の研究者と様々であった。

国別にみると中国, 韓国, また東欧からの参加者が以前に比べて増えてきていると感じた。

原稿受付 2006年6月19日

\*1 川崎重工(株) ガスタービン・機械カンパニー  
ガスタービンビジネスセンター  
技術総括部 産業ガスタービン技術部 第三技術課  
〒673-8666 明石市川崎町1番1号

ASME Turbo Expo. 2006  
産業用ガスタービン関連セッション/講演発表数

Committee	Paper Session		Panel/Tutorial Session		Total	
	セッション	発表	セッション	発表	セッション	発表
Cycle Innovations	12	47	0	0	12	47
Electric Power	3	12	4	15	7	27
Industrial & Cogeneration	7	32	2	4	9	36
Oil and Gas Applications	4	18	6	20	10	38
Marine	4	17	1	1	5	18
Total	30	126	13	40	43	166
参考) 2005年	37	106	8	28	45	134

(Final Program より集計)

以下 Committee 毎に見聞記を記す。

#### 2. Cycle Innovations : サイクルイノベーション

12セッション47件の論文発表があった。

サイクル改良に関するセッションでは高温分サイクルとして Cheng Power Sys. 社から2種類の蒸気注入サイクルである Cheng Cycle と GE 社の STIG Cycle の比較についての論文発表 (GT-90382), また日立からは

AHAT サイクルについての論文発表 (GT-90639), またケンブリッジ大学からは冷却タービンの効率計算に関する論文発表 (GT-90424) があった。

ハイブリッドシステムのセッションでは MCFC (molten carbonate fuel cell: 溶融炭酸型燃料電池) を採用したシステムに関する発表が多く見受けられた (GT-90643, GT-90644等)。

CO<sub>2</sub>削減に関するセッションでは, アルストーム社より Semi-Closed CO<sub>2</sub> CYCLE についての論文発表 (GT-90888) 等があった。

### 3. Electric Power : 電力事業用ガスタービン

論文発表が4セッションで15件あり, GE 社による大型事業用ガスタービン MS7001EA の改良設計およびフィールドテストに関する論文発表 (GT-90188), SIEMENS 社他による Syngas 用の燃焼器開発に関する論文発表 (GT-90970) 等があった。

### 4. Industrial & Cogeneration : 産業 & コージェネ用 GT

論文発表が7セッションで32件あった。

新技術に関するセッションでは, 川崎重工から L20A の Update Model に関する論文発表 (GT-90394) 及び同社と大阪府立大学で共同研究を行っている APT (Atmospheric Pressure Turbine: 常圧タービン) に関する論文発表 (GT-90938, GT-90091) があった。

また SOLAR 社から新機種 TAURUS65に関する論文発表 (GT-90099) があった。

また FOGGING や SPRAYING を適用した出力増加策に関する論文 (GT-90427, GT-90744, GT-91054, GT-90396等), 及びコージェネプラントのシステム最適化 (GT-90236, GT-90611, GT-90952, GT-91143等) に関する論文が数多く発表された。

### 5. Oil and Gas Applications :

#### オイル & ガス アプリケーション

論文発表が4セッションで18件, パネル/チュートリアルセッションが6セッションで20件, パネルセッションの比重の高い Committee である。極地での適用に関するパネルセッション (Siemens, R&R, カナダ政府), 各社の新製品を紹介するパネルセッション (川崎重工, R&R, SOLAR, Siemens, GE) 等, ユーザーを対象とした講演が多かった。

### 6. Marine : 船用ガスタービン

論文発表が4セッションで17件, うち11件が国防関連への適用に関するものであり運用や評価に関するものが多かった (GT-91301, GT-91167)。

それ以外では GE 社から電気推進船への適用に関する論文 (GT-90252), 及び LNG 船への適用に関する論文 (GT-90715) 等があり興味深かった。

## 4. 小型ガスタービンおよびセラミックス

吉田 博夫\*1  
YOSHIDA Hiro

キーワード: マイクロタービン, 熱交換器, 空気軸受, CMC, EBC, SOFC, PEM

セッション数は小型ガスタービン (以下 MGT) 11 (7), セラミックス 4 (5) であった。括弧内は昨年の数値を示す (以下同じ)。また, 論文数はそれぞれ38 (24) 件ならびに 8 (20) 件であった。プログラムによれば総論文数793 (627) 編とのことなので, 総論文数26%の増加に対し MGT 論文数は58%の増加, セラミックスのそれは60%の減少となる。セラミックスでは論文なしの発表が6件あり減少の一因だが, それらを加えても14件で昨年には及ばなかった。しかしながら, MGT とセラミックスを合わせた論文数は46 (44) となり昨年とほぼ同数となる。セラミックスと MGT との結びつき

がより鮮明になったということであろうか。

MGT 論文の内訳は要素設計関係10 (5) 件, システム設計関係8 (8) 件, 熱交換器関係13 (11) 件, そのほかにセラミックス要素関係3 (0) 件, 市場競争力・普及関係4 (0) 件であった。全体の流れとしては市場へのさらなる展開を目指し熱交換器, 軸受け, 燃焼器などの要素開発からシステム設計・運用の検討が活発化しているとの印象を受けた。プログラム上の分類を基に筆者なりに発表内容を括りなおし以下に報告する。

MGT は分散エネルギーシステムの重要な要素として期待されている。システムの検討に関しては, 30kW 級 MGT を組み込んだ吸収式冷温水システムの冷却能力に関する試験を行い, パラメータとして MGT 電力, 低温冷却水ならびに高温冷却水入り口温度に着目, これらに

原稿受付 2006年7月4日

\*1 産業技術総合研究所

〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2

AHAT サイクルについての論文発表 (GT-90639), またケンブリッジ大学からは冷却タービンの効率計算に関する論文発表 (GT-90424) があった。

ハイブリッドシステムのセッションでは MCFC (molten carbonate fuel cell: 溶融炭酸型燃料電池) を採用したシステムに関する発表が多く見受けられた (GT-90643, GT-90644等)。

CO<sub>2</sub>削減に関するセッションでは, アルストーム社より Semi-Closed CO<sub>2</sub> CYCLE についての論文発表 (GT-90888) 等があった。

### 3. Electric Power : 電力事業用ガスタービン

論文発表が4セッションで15件あり, GE 社による大型事業用ガスタービン MS7001EA の改良設計およびフィールドテストに関する論文発表 (GT-90188), SIEMENS 社他による Syngas 用の燃焼器開発に関する論文発表 (GT-90970) 等があった。

### 4. Industrial & Cogeneration : 産業 & コージェネ用 GT

論文発表が7セッションで32件あった。

新技術に関するセッションでは, 川崎重工から L20A の Update Model に関する論文発表 (GT-90394) 及び同社と大阪府立大学で共同研究を行っている APT (Atmospheric Pressure Turbine: 常圧タービン) に関する論文発表 (GT-90938, GT-90091) があった。

また SOLAR 社から新機種 TAURUS65に関する論文発表 (GT-90099) があった。

また FOGGING や SPRAYING を適用した出力増加策に関する論文 (GT-90427, GT-90744, GT-91054, GT-90396等), 及びコージェネプラントのシステム最適化 (GT-90236, GT-90611, GT-90952, GT-91143等) に関する論文が数多く発表された。

### 5. Oil and Gas Applications :

#### オイル & ガス アプリケーション

論文発表が4セッションで18件, パネル/チュートリアルセッションが6セッションで20件, パネルセッションの比重の高い Committee である。極地での適用に関するパネルセッション (Siemens, R&R, カナダ政府), 各社の新製品を紹介するパネルセッション (川崎重工, R&R, SOLAR, Siemens, GE) 等, ユーザーを対象とした講演が多かった。

### 6. Marine : 船用ガスタービン

論文発表が4セッションで17件, うち11件が国防関連への適用に関するものであり運用や評価に関するものが多かった (GT-91301, GT-91167)。

それ以外では GE 社から電気推進船への適用に関する論文 (GT-90252), 及び LNG 船への適用に関する論文 (GT-90715) 等があり興味深かった。

## 4. 小型ガスタービンおよびセラミックス

吉田 博夫\*1  
YOSHIDA Hiro

キーワード: マイクロタービン, 熱交換器, 空気軸受, CMC, EBC, SOFC, PEM

セッション数は小型ガスタービン (以下 MGT) 11 (7), セラミックス 4 (5) であった。括弧内は昨年の数値を示す (以下同じ)。また, 論文数はそれぞれ38 (24) 件ならびに 8 (20) 件であった。プログラムによれば総論文数793 (627) 編とのことなので, 総論文数26%の増加に対し MGT 論文数は58%の増加, セラミックスのそれは60%の減少となる。セラミックスでは論文なしの発表が6件あり減少の一因だが, それらを加えても14件で昨年には及ばなかった。しかしながら, MGT とセラミックスを合わせた論文数は46 (44) となり昨年とほぼ同数となる。セラミックスと MGT との結びつき

がより鮮明になったということであろうか。

MGT 論文の内訳は要素設計関係10 (5) 件, システム設計関係8 (8) 件, 熱交換器関係13 (11) 件, そのほかにセラミックス要素関係3 (0) 件, 市場競争力・普及関係4 (0) 件であった。全体の流れとしては市場へのさらなる展開を目指し熱交換器, 軸受け, 燃焼器などの要素開発からシステム設計・運用の検討が活発化しているとの印象を受けた。プログラム上の分類を基に筆者なりに発表内容を括りなおし以下に報告する。

MGT は分散エネルギーシステムの重要な要素として期待されている。システムの検討に関しては, 30kW 級 MGT を組み込んだ吸収式冷温水システムの冷却能力に関する試験を行い, パラメータとして MGT 電力, 低温冷却水ならびに高温冷却水入り口温度に着目, これらに

原稿受付 2006年7月4日

\*1 産業技術総合研究所

〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2

よって冷却機の COP ならびにシステム全体の特性把握がなされた (GT-91264)。また, MGT の過渡特性 (GT-91088), オフデザインでの運転特性 (GT-90335), インター/アフタークーラーを加えた場合の MGT サイクル (GT-90237), システム性能低下診断法 (GT-90304) など報告された。

ガスタービンの優れた多種燃料対応性を生かす研究として, 30kW 級 MGT に対してバイオディーゼル燃料を使用した場合の報告があった (GT-91259)。この時点で特段の問題は生じていないようである。(2 MPa とかなり高圧だが) 小型の燃焼器に関し低 NO<sub>x</sub> を可能とする FLOX 燃焼に関する数値解析結果 (GT-91041) ならびに小型燃焼器の最適設計法に関し 0-D コードや最新ゲーム理論などを適用した解析 (GT-90542) が報告された。また, 遠心圧縮機, 燃焼器, タービンが同一のディスク上に配置された斬新な構造の MGT に関する可能性が検討され, 大変興味深かった (GT-90020)。

軸受けに関しては, PEM 型燃料電池用オイルフリーのターボチャージャへの使用, 回転数 25 万 rpm 以上を想定した空気軸受け (GT-90796), MGT 用 800℃ 以上の使用に耐える空気軸受け (GT-90791) の開発に関する報告があった。また, 従来型とは異なり周方向にスプリングを複数埋め込んだ新しい構造の (一種の) 空気軸受けが提案された (GT-90964)。構造が単純で製作しやすいなどの長所があり期待を抱かせるが, 本格的検討はこれからである。

SOFC 用高圧ターボチャージャ (GT-90222), ターボチャージャホイールの熱に起因する機械的負荷の解析 (GT-90526), MGT システムの適用範囲を広げるためにスーパーチャージャを取り付けた場合の性能試験 (GT-90555) などについて検討された。

MGT 関連テーマのパネルセッションでは, 例年通りメーカ (Elliot, Capstone, Ingersoll Rand), ユーザ・公的機関 (CANNET, United Technologies) から新製品開発, ホテル, ショッピングセンターなど現場運転状況の報告があった。Capstone では今年 3 月バイオ燃料対応の 65kW 級 MGT 約 20 セットがフランスへ出荷されたとのことである。さらなる詳細はそれぞれのホームページ等を参照されたい。会場はほぼ満員で, 関心の高

さが感じられた。

熱交換器関係では, 再生器熱交換用フィン材料の水蒸気に起因する腐食に対する耐久性向上が重要な課題であり, 従来のステンレス (SUS347) に換わり新たな市販耐熱合金 (HR-120, AL20-25+Nb, など) を使用し, 実機による (GT-90068) あるいは水蒸気を含む 650-750℃ の環境下での高い耐酸化性, クリープ特性が確認されつつある (GT-90194, 90195, 90680)。また, 熱交換要素は伝熱面を含む多くのパラメータが存在し, それらの最適な組み合わせを無駄なく速やかに探し出すことが鍵である。CFD (GT-90256, 90529), 遺伝的アルゴリズム (GT-90366), 田口メソッド (GT-90144) などによりプライマリーサーフェス型再生器の最適化が検討された。さらに, フィン付コンパクト熱交換器 (GT-90260) の最適化, 基礎的検討として半球状ディンプル群のある平板 (GT-90121) やポーラスカーボンフォーム (PCF) (GT-90598) の伝熱特性も報告された。かつて日本でも手がけられたハニカム状セラミックの回転ドラム式熱交換器の設計と仕様が検討された (GT-90095)。作動温度 1000℃ 以上, 圧損 2% 以下, 温度効率 98% 以上, MGT の発電効率 50% を目指すとしているが検証はこれからである。また, 従来とは異なる構造のスイスロール型再生器の検討結果の報告があった (GT-91120)。これら一連の報告は, 再生器の性能向上が MGT の性能向上の喫緊の課題であることを示している。圧縮機からタービンロータまでの MGT 全体に関する熱伝達の数値解析も行われた (GT-90161)。

セラミックス関係では, 昨年同様 CMC, EBC に関する発表が多かった。燃焼器ライナの特性改善 (GT-90341, 90568), ベーン試験片に対するバースト試験による設計ならびに強度の検証 (GT-90833), 高速回転による遠心力のロータブレード強度に対する影響の解析 (GT-91312), ブレードの FOD 破損挙動の解析 (GT-90167), セラミックス・金属ハイブリッド MGT の運転結果 (GT-90328) などが報告された。ガスタービンに対するこれまでのセラミックス要素開発に関するレビュー (GT-90330, 90151) ならびに CMC に対する非破壊検査法のレビューと各手法の比較がなされ (GT-91349), 大変参考になった。

## 5. ターボ機械の性能と流れ

### 5.1 軸流関係

山田 和豊\*<sup>1</sup>

YAMADA Kazutoyo

#### 1. 全般

軸流ファン・圧縮機は10セッションで42件の講演、軸流タービンは11セッションで45件の講演があった。軸流関係の総論文数は87編であった。国別内訳としては、英国、米国がともに14編と最も多く、次いでドイツが12編、イタリアが10編、日本と中国が8編と続いている。ここでは、軸流ファン・圧縮機および軸流タービンで発表されたものから、その研究動向について紹介する。

#### 2. 軸流ファン・圧縮機

軸流ファン・圧縮機10セッションの内訳は、設計関係が4、失速関係とクリアランス関係がそれぞれ2、残りは性能改善と損失メカニズムとなっている。

設計関係では、逆解法を用いて翼の再設計を行ったもの (GT-91173)、スweep翼やリーン翼が性能に及ぼす効果について調べたもの (GT-90218, GT-90547) があった。また、低レイノルズ数条件下での翼プロファイルの設計指針が示された (GT-90882)。損失メカニズムで、stall indicator と diffusion parameter を用いたハブコーナーストールに関する新しい基準が提案された (GT-91332)。100例以上の計算によって検証されており、非常に役立つ基準であると推察される。遷音速ファンの空力性能に及ぼす部分スパンシュラウドの効果がCFDで評価され、シュラウド付きの場合にわずかに効率が改善されることが示された (GT-90992)。失速・サージ関係では、実用的な研究として、tip injection の効果を調べたもの (GT-90007)、圧力プローブを用いた失速検知方法を提案したもの (GT-90324) などがあった。一方、旋回失速初生のメカニズムを調べたものとしては、スタック角と失速初生の擾乱の関係を調べたもの (GT-90589)、高速軸流圧縮機におけるスパイク型失速初生のメカニズムを実験的・数値的に調査したもの (GT-90209, GT-90045) などの報告があった。その他に、性能改善として、翼端渦抑制の end plate (GT-90592, GT-90845) やコーナー剝離抑制の vortex generator (GT-90415) の効果が調べられていた。

#### 3. 軸流タービン

軸流タービンのセッションは、非定常流れ (翼列干渉を含む)、漏れ流れ (シュラウドおよびハブ)、低圧タービンに関するものが大半を占める。

低圧タービン関係では、主に空力特性に関して、レイノルズ数、マッハ数、インシデンスの効果 (GT-91121) や後流の非定常効果 (GT-90507) などが環状翼列、直線翼列を用いて実験的に調べられていた。また、二次流れ抑制に関する新しいエンドウォールプロファイルを紹介したもの (GT-91002)、スweepを考慮した負荷パラメータを導入して形状損失について調べたもの (GT-91070) などがあり、精力的に研究が行われていた。非定常流れ関係では、低レイノルズ数非定常流れの詳細な LDV 計測 (GT-90013) や負荷条件を変えた試験 (GT-90753) の結果が報告された。他にも、後流と二次流れの干渉 (GT-90783) や空力性能に及ぼす動静翼間距離の効果 (GT-90553, GT-90556) などを調べた研究があった。漏れ流れに関しては、実験による新しい試みが多くみられる。シュラウド漏れ流れによる損失の抑制に、turning vane を取り付けけた効果 (GT-90946) や動翼先端のウィングレットの効果 (GT-90456, GT-90459) などが調査されていた。ハブ漏れ流れに関して、ハブ径の違いによるステップの効果 (GT-90767)、コード方向ハブスロットの効果 (GT-90839) に関する研究報告があった。その他として、非設計点における高圧タービン (GT-90849) や超高負荷タービン (GT-90939) の性能、粗さの効果 (GT-90018, GT-90828)、クロッキング効果 (GT-90264) などを調べた報告があった。

原稿受付 2006年7月10日

\*1 岩手大学工学部機械工学科

〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5



## 5.2 遠心関係

坂口 大作<sup>\*1</sup>

SAKAGUCHI Daisaku

遠心関係では4セッション合計13編の発表が行われ、それらの内容は、1. 翼端漏れ渦および流量範囲拡大(2編)、2. ディフューザ失速(4編)、3. 流れ解析(3編)、4. サイズ縮小および寸法効果(4編)、に分類される。

### 1. 翼端漏れ渦および流量範囲拡大

サージ初生における流動現象の解明および運転範囲を拡大するための方法について報告がなされた。翼端隙間が大きな開放型遠心羽根車において、30個のピエゾ圧力センサをシュラウド壁面に装着し、位相固定平均を用いて壁面静圧分布を羽根入口から出口まで実験的に調べ、翼端漏れ渦の挙動と羽根なしディフューザにおける旋回失速の初生との因果関係の解明が試みられた(GT-90084)。また、運転流量範囲拡大に関して、羽根車入口翼端喉部と吸込管を連結する環状通路に形成される循環流により入射角を低減し、さらに環状通路内にガイドベーンを挿入して適切な入射角を与えることにより運転範囲の顕著な拡大がなされた。同時に、3次元粘性数値解析による予測および実験によりその効果が解明された(GT-90400)。

### 2. ディフューザ失速

遷音速遠心圧縮機の羽根つきディフューザ内部流れについて、PIVにより詳細な計測を行い、定常3次元粘性数値解析と比較した報告(GT-90268<sup>\*</sup>)では、羽根車出口でスパン方向に流れ角が大きく変化し、特にハブ側で過大な負の入射角となり前縁剝離を生じていることが示された。ハブ側の子午面速度が大きく、前縁剝離の影響はディフューザ性能に大きく影響することが明らかにされた。GT-90084と同じ実験装置について、羽根車出口流れを3D LDVにより詳細に計測した報告(GT-90083)では、翼端隙間が大きな開放型遠心羽根車の部分負荷流量では、翼先端漏れ流れの影響が大きく、ジェット・ウェーク流れとは異なるフローパターンになることが示された。多段圧縮機の最終段における羽根なしディフューザの旋回失速と関連して、圧縮機性能や運転範囲に及ぼすディフューザ通路幅、ディフューザ出口半径比および羽根車出口高さの影響が実験的に明らかにされた。実機によるこれら一連のパラメータ試験結果は、

設計および試作におけるニューラルネットワークのデータベースとして活用されている(GT-90693, 90694)。

### 3. 流れ解析

遷音速圧縮機においてLDVにより詳細に計測された実験結果について、羽根先端隙間モデルおよび乱流モデルの妥当性を検討し、特にシュラウド側の流れについては、乱流モデルによって解析結果が異なり注意が必要であるとしたもの(GT-90098<sup>\*</sup>)、羽根なしディフューザを有する遠心圧縮機の羽根車出口角を2通り変化させ、さらに羽根出口高さを3通り変化させた場合と組み合わせで3次元粘性数値解析により評価し、羽根車形状を最適設計することで運転範囲および性能改善が可能であるとした報告(GT-90622<sup>\*</sup>)があった。

### 4. サイズ縮小および寸法効果

シュラウドを有する遠心羽根車の加工切削における表面粗さが羽根車性能に及ぼす影響を調べるため、平板および円管における摩擦係数(ムーディー線図)を組合せ、羽根車内部流れの摩擦損失を数値計算により評価可能としたもの(GT-90499)、基準となる圧縮機から寸法効果を考慮して、新しい羽根車の設計が可能であるとしたもの(GT-91227)、100Wクラスのマイクロガスタービン開発に伴い、現実的な先端隙間(50  $\mu\text{m}$ )のために必要な羽根車直径および羽根高さを求めた報告(GT-90637)がなされた。なお、運転中の先端隙間の把握の重要性についても見解が示された。低比速度の遠心圧縮機において、スパン高さを変化させたトリミングが性能に及ぼす影響について実験的に調べた報告(GT-90998)に関して、コスト削減に有効な羽根車のトリミングを行う際、下流の羽根なしディフューザや戻り通路に関しても一様にトリミングすることは、摩擦損失の増加のみならず流れ角も大きく変化させてしまう影響が大きく、羽根車とは別にトリミング量を与えるべきだという見解が示された。

<sup>\*</sup>は ASME Transactions へ掲載予定論文であることを示す。

原稿受付 2006年7月18日

<sup>\*</sup>1 長崎大学大学院生産科学研究科

〒852-8521 長崎市文教町1-14

## 5.3 非定常流れと数値流体力学

伊藤 栄作\*<sup>1</sup>

ITO Eisaku

キーワード：ASME, Turbomachines, Unsteady Flow and Computer Fluid Dynamics

非定常流れ関係では、6つのセッションが設けられた。圧縮機の非定常流れに関して、ウエイクに誘起された境界層構造 (GT-90892)、圧縮機の安定限界条件や旋回失速中の空力的な励振力 (GT-90214)、旋回失速のメカニズムに関する解析研究 (GT-90223)、圧縮機翼前縁における非定常遷移の詳細検討 (GT-90641) などのほかに、軸流ファンのリセスケージングトリートメントの非定常流れ (GT-90388) も紹介された。さらに、サージ誘起や圧縮機性能に関する研究 (GT-90163)、減速通路内のコーナー剝離に関する基礎的な研究 (GT-90781) など、広範囲の研究テーマが印象に残った。超音速翼の非定常流れ解析に関しては、数件であった。

タービンの非定常流れに関して、例年のごとく、低圧タービン翼の境界層の発達、剝離、再付着に及ぼす乱れ度の影響に関するもの (GT-91293) の他に、下流の変動圧力による高揚力翼の境界層遷移 (GT-91038) 等が紹介された。また、翼車冷却空気とタービン主流の干渉 (GT-90877) や、表面の粗さと上流ウエイクの低圧タービンの性能に及ぼす影響をシミュレーションしたもの (GT-90221) など、より実機条件に近い条件での検討も増えつつある。さらに、遷音速翼列の非定常流体力学に関するセッションでは、遷音速翼列の上下流に通り抜ける非定常性を取り扱ったもの (GT-90462)、高圧段と低

圧段の干渉とそれらのインターステージの流れ制御に関する研究 (GT-90636) などが紹介された。

ターボ機械の設計手法と数値流体力学に関して、最適化手法と組み合わせた研究が多い。タービン翼のパラメトリックな表現方法と応答曲面による空力最適化 (GT-90104)、プロファイルドエンドウォール設計手法 (GT-90650)、遷音速圧縮機翼列の CFD と遺伝的アルゴリズムによる最適化 (GT-90155)、スweep、リーン、スキューなどの圧縮機翼の最適化 (GT-90384) など広範囲にわたる最適化手法の適用が試みられている。多目的、多分野を考慮した最適化検討 (GT-90420, 90926) も増えつつある。また、いわゆるインバースデザインに関する研究も3件発表された。(GT-90897, 91135, 90266) 一方で、オンライン洗浄時の水滴と気流の軌跡を翼列干渉とともに解析した例 (GT-90745)、タービン翼面上の水滴の動きの解析 (GT-90792) も実用的な研究であった。高温化に伴い、空力と伝熱や熱負荷を同時に扱うシミュレーションが増えつつあることも注目に値する。(GT-90016, 91074) 乱流モデルに関しては、ディフューザ流れの安定性に関する研究 (GT-90524)、壁付近で LES と RANS 乱流モデルをカップリングする試み (GT-91234)、境界層遷移領域におけるエントロピー生成 (GT-91027) など内容は多彩であった。

騒音低減に関するセッションでは、サイレントエアクラフト設計に関する検討結果 (GT-90559, 90564) が発表された。

原稿受付 2006年7月27日

\*1 三菱重工業㈱ 高砂研究所

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1

## 6. 伝熱関係

羽田 哲\*<sup>1</sup>

HADA Satoshi

伝熱関係の発表は、General Interest として98件、Transition として15件、Internal & Seal Systems として、34件であった。特に、フィルム冷却関係が38件、内部流 (衝突噴流冷却、リップなどによる伝熱促進) に関す

るものが32件で、相変わらず活発な研究が行われている。その中でも、タービン静翼シュラウド、動翼プラットフォーム、動翼上のケーシングなど、エンドウォールに関連する伝熱問題を扱うものが多く見られた。まず Heat Transfer Committee で発表された昨2005年度の Best Paper を紹介する。Virginia Tech のグループが発表した静翼シュラウド部に着目したもので、隣接静翼

原稿受付 2006年7月6日

\*1 三菱重工業㈱ 高砂製作所 ガスタービン技術部

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2丁目1番1号

## 5.3 非定常流れと数値流体力学

伊藤 栄作\*<sup>1</sup>

ITO Eisaku

キーワード：ASME, Turbomachines, Unsteady Flow and Computer Fluid Dynamics

非定常流れ関係では、6つのセッションが設けられた。圧縮機の非定常流れに関して、ウエイクに誘起された境界層構造 (GT-90892)、圧縮機の安定限界条件や旋回失速中の空力的な励振力 (GT-90214)、旋回失速のメカニズムに関する解析研究 (GT-90223)、圧縮機翼前縁における非定常遷移の詳細検討 (GT-90641) などのほかに、軸流ファンのリセスケージングトリートメントの非定常流れ (GT-90388) も紹介された。さらに、サージ誘起や圧縮機性能に関する研究 (GT-90163)、減速通路内のコーナー剝離に関する基礎的な研究 (GT-90781) など、広範囲の研究テーマが印象に残った。超音速翼の非定常流れ解析に関しては、数件であった。

タービンの非定常流れに関して、例年のごとく、低圧タービン翼の境界層の発達、剝離、再付着に及ぼす乱れ度の影響に関するもの (GT-91293) の他に、下流の変動圧力による高揚力翼の境界層遷移 (GT-91038) 等が紹介された。また、翼車冷却空気とタービン主流の干渉 (GT-90877) や、表面の粗さと上流ウエイクの低圧タービンの性能に及ぼす影響をシミュレーションしたもの (GT-90221) など、より実機条件に近い条件での検討も増えつつある。さらに、遷音速翼列の非定常流体力学に関するセッションでは、遷音速翼列の上下流に通り抜ける非定常性を取り扱ったもの (GT-90462)、高圧段と低

圧段の干渉とそれらのインターステージの流れ制御に関する研究 (GT-90636) などが紹介された。

ターボ機械の設計手法と数値流体力学に関して、最適化手法と組み合わせた研究が多い。タービン翼のパラメトリックな表現方法と応答曲面による空力最適化 (GT-90104)、プロファイルドエンドウォール設計手法 (GT-90650)、遷音速圧縮機翼列の CFD と遺伝的アルゴリズムによる最適化 (GT-90155)、スweep、リーン、スキューなどの圧縮機翼の最適化 (GT-90384) など広範囲にわたる最適化手法の適用が試みられている。多目的、多分野を考慮した最適化検討 (GT-90420, 90926) も増えつつある。また、いわゆるインバースデザインに関する研究も3件発表された。(GT-90897, 91135, 90266) 一方で、オンライン洗浄時の水滴と気流の軌跡を翼列干渉とともに解析した例 (GT-90745)、タービン翼面上の水滴の動きの解析 (GT-90792) も実用的な研究であった。高温化に伴い、空力と伝熱や熱負荷を同時に扱うシミュレーションが増えつつあることも注目に値する。(GT-90016, 91074) 乱流モデルに関しては、ディフューザ流れの安定性に関する研究 (GT-90524)、壁付近で LES と RANS 乱流モデルをカップリングする試み (GT-91234)、境界層遷移領域におけるエントロピー生成 (GT-91027) など内容は多彩であった。

騒音低減に関するセッションでは、サイレントエアクラフト設計に関する検討結果 (GT-90559, 90564) が発表された。

原稿受付 2006年7月27日

\*1 三菱重工業㈱ 高砂研究所

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1

## 6. 伝熱関係

羽田 哲\*<sup>1</sup>

HADA Satoshi

伝熱関係の発表は、General Interest として98件、Transition として15件、Internal & Seal Systems として、34件であった。特に、フィルム冷却関係が38件、内部流 (衝突噴流冷却、リップなどによる伝熱促進) に関す

るものが32件で、相変わらず活発な研究が行われている。その中でも、タービン静翼シュラウド、動翼プラットフォーム、動翼上のケーシングなど、エンドウォールに関連する伝熱問題を扱うものが多く見られた。まず Heat Transfer Committee で発表された昨2005年度の Best Paper を紹介する。Virginia Tech のグループが発表した静翼シュラウド部に着目したもので、隣接静翼

原稿受付 2006年7月6日

\*1 三菱重工業㈱ 高砂製作所 ガスタービン技術部

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2丁目1番1号

間の漏れ、粗さ、およびミスアライメントがある場合の、フィルム効率について実験的に検討したもの (GT2005-68900), Loughborough 大学のグループが実施した、ケーシングの熱伝達率を非定常で実験的に計測した論文 (GT2005-68437), Pratt & Whitney のグループが発表した、円柱へ近づく境界層流れが発生させる馬蹄渦に対して、その熱伝達率および流れ場について、非定常で実験的に計測した論文 (GT-69088/69091), 以上4件であった。そのうち3件が、非定常計測に主眼を置いて、その伝熱現象を明らかにしたものであることは注目してよいだろう。

次に各テーマからいくつか論文をピックアップする。  
**フィルム冷却** まずエンドウォール関係の論文の代表例として、シェイプト孔および丸孔についてそのフィルム効率を実験的に明らかにした論文 GT-90021 を挙げる。静翼端壁面に配置されたシェイプトフィルム孔は、単純円孔と比較して、同じ冷却空気量で、75%高い平均フィルム効率を得ている。また、GT-90034, 90322, 90375 では、静翼動翼間の漏れ空気が、動翼プラットフォームのフィルム効率に与える影響を回転リグ試験により実験的に計測、その結果が数値計算と比較された。またさらに高いフィルム効率を得られるフィルム形状の追求も引き続き行われている。例えば、GT-90226 では、Trench フィルムと称し、フィルム孔出口にスリット (溝) を設置し、一度フィルム冷却空気をピッチ方向に拡散させ、出来るだけピッチ方向に連続的なフィルム冷却空気を作り出そうとする形状が、実際の翼面上で実験的にフィルム効率を向上させることを示していて、シェイプトフィルム孔を凌駕するフィルム効率を得ている。また、GT-91161 では、流れに平行な壁 (Blocker) を置いて、Kidney Vortex によるフィルム空気と主流の混合を抑えようとするフィルム形状が提案されたが、実機に採用するのは困難と考えられる。GT-90854 では、DJFC (Double-Jet Film Cooling) と称して、流れ方向の2列のフィルム冷却孔を、それぞれ主流に対して異なる角度で並べ、一つ目のフィルム孔で形成された渦構造を、2つ目のフィルム孔からのフィルム空気破壊し、フィルム効率を良くするというアイデアがCFDにより示された。またフィルム孔構造ではないが、脈動流中のフィルム効率に対する論文が目立った。例えば、GT-90166 で、フィルム空気の Blowing Ratio が時間的に変動する場合、渦構造がどう変化するか、CFD解析と実験にて調べている。CFD解析では、GT-91073にて境界埋め込み法

を応用して、フィルムの渦構造をモデリングし、それを主流にはめ込むことにより、CFDを用いて、効率的にフィルム効率を予測する手法が発表された。同じ著者らによる研究は昨年度もあったが、いよいよ、その手法を用いて、実際のタービンのフィルム場を模擬しており、今後の展開が期待される。

**外部流** 非対称コンタリング、もしくは前縁のフィレットRにより、馬蹄渦、流路渦を制御し、静翼シュラウド面の熱伝達率を下げる事が出来るという報告 (GT-90390, 90318) は、良く整理されており、参考になる。また、回転場で、翼面、プラットフォーム面、チップにて熱流束計を設置し、熱伝達率を計測した発表 (GT-90966, 90968) では、BFM (ガスパス面圧と冷却空気内圧の比) をも計測しており、入口全圧7%の変動成分を考慮する必要性を示している。チップ伝熱にかかわる論文では、回転ベルトを利用して、拡大モデルによりチップの熱伝達率を詳細に計測した報告 (GT-90425), ケーシングの熱伝達率を非定常で計測した報告 (GT-90534) が注目される。

**内部流 (伝熱促進体)** まず燃焼器の尾筒冷却をその適用先として、V型リブを利用した報告 (GT-90006) は、実験と解析が丁寧に比較されており、参考になるだろう。GT-90391では、4:1の矩形断面モデルを回転させて、その内部熱伝達率を計測している。GT-91122では、フィルム孔を模擬した孔空き流路を回転させて、内部熱伝達率をナフタレン昇華法にて計測しており、空気をフィルム孔から抜くことにより、その熱伝達、流れ場の様相が異なることが、示唆された。

**セカンダリーフロー** セカンダリーフロー関連では、プリスワールシステム、回転キャビティ、リムシール及びラビリンスシールに関するものが比較的多い。GT-90494では、回転キャビティ内における渦構造の非定常的な挙動に関して、スモークによる可視化実験で確認した結果をCFD解析でよくシミュレートされており、非常に興味深い。

**遷移** 筆者は遷移関連のセッションには出席できず、割愛します。

**その他** GT-90002では、今後数10年にわたり、伝熱設計者がトライすべき伝熱技術について、分類していた。一読されたい。また、GT-91013も一般的なレビュー記事であり、現状の冷却“設計”について簡単に整理されているため、参考になる。

## 7. 燃焼および燃料関係

牧田 光正<sup>\*1</sup>

MAKIDA Mitsumasa

### 1. 全 般

燃焼及び燃料関係 (Combustion & Fuels) のコミッティーでは、19件のテクニカルセッション、2件のパネルセッションの合計21セッションが開催され、発表件数としては技術論文が109編、パネル講演が8編の合計117編と例年に比べ20件ほど増加している。セッションの主題を分野別に見ると主なものは、エミッションに関するものが2件、燃焼不安定性に関するものが3件、燃焼器開発に関するものが3件、新規の燃焼方式に関するものが2件、計算モデルに関するものが2件となっている。一方で、燃焼器としてはエミッション性能・燃焼不安定性を抜きにした議論を行うことは少ないため、大半がこの2つに関わるトピックスを扱っている。他にも、レーザーを中心とした燃焼流中の計測を扱ったセッション1件と、スワール流れや燃料ノズル周辺の挙動に的を絞ったセッション2件も設けられている。

### 2. 数値解析 (CFD) の活用

燃焼の分野でも数値解析 (CFD) の活用の機会が増え、本コミッティーでも109編の論文中36編で何らかの形でCFDが活用されている。CFD手法自体の報告も有るが、燃焼反応などの特定のモデルに焦点を絞って既存 (市販) のコードに組み込んだ結果の報告や、既存コードによるCFDをツールとして用い、実験的な計測手法と同様に燃焼現象の解明や燃焼器の開発に用いた報告が多くなってきている。一般に、燃焼の分野においては乱流・反応などが複雑に絡んだ現象を扱わなければならないため、特に実機に近い複雑な対象を扱う場合には、CFDによる詳細な予測はまだまだ困難ではあると言わざるを得ないものの、使用する計算手法 (ソフト) の得手不得手を認識した上で対象を適切に選んで用いれば、実験計測・理論解析と組み合わせで現象を多角的に検討する事が可能となり、現象解明ひいては実機開発の効率を高める事が出来ると考えられる。この分野でのCFDの活用が進んだ背景としては、既存 (市販) のCFDソフトの性能・利便性が向上したことも当然挙げられるが、上記36編のうち13編で同じソフトが使われるなどソフトの共通化が進んだ結果、前述のようにCFDをツールとして用いるためのノウハウがユーザー側にも蓄積されてきたことも大きな要因と感じられた。

CFDに関する報告を細かくみると、LESの活用など計算自体の報告 (GT-91310, 90063, 90441)、スワール等の流れ場の解析に重点をおいた報告 (GT-90764, 91300)、基礎的燃焼現象を対象とした報告 (GT-90521, 90536, 90567, 90945, 90096)、実機用燃焼器全体の解析を目的とした報告 (GT-90943, 90944, 90635, 91061, 90510, 90055, 90059)、設計ツールとしての適用手法の報告 (GT-90530, 91004, 90430, 91325) に分類される。また、CFDではないが多変数の最適化手法による燃焼器の設計法を提案したユニークな報告 (GT-90950) も見られた。燃焼の化学反応についての報告では、モデル自体に絞った報告 (GT-90326, 90478, 90571) に加え、CFDコードに組み込んで流れ場も含めた議論を行った報告 (GT-90573, 90916, 90257, 90565, 90956, 90958, 90282) が見受けられた。

### 3. 代替燃料 (燃料多様化) / 新規の燃焼方式に関する報告

LCV (Low Calorific Value) ガスなどの代替燃料を用いたシステムについては、本コミッティーにおいても2件のパネルセッションと1件のテクニカルセッションが設けられ、論文4編が取り上げられており、LNGへのCO<sub>2</sub>添加の影響 (GT-90510) や Syngas 火炎への空気湿度の影響 (GT-90338) など、燃焼に関する基礎的検討の報告が行われている。他にも、実用に近いものは "Coal, Biomass & Alternative Fuels" として独立したコミッティーの中で24編扱われており、この分野の広がりが感じられる。

また、フレイムレス燃焼を含め比較的新しい燃焼方式に関する報告としては10編が報告されており、フレイムレス燃焼の基礎的研究 (GT-91061, 91051)、Air Force Research Lab.によるタービン翼間燃焼器のリグ及び実機試験 (GT-90119, 90179) 等が報告された中、淀み点・逆流による燃焼器の基礎的研究の報告 (GT-91338, 91217) など斬新で印象深い報告も見られた。

原稿受付 2006年8月7日

\*1 ㈱宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ

〒182-8522 東京都調布市深大寺7-44-1

## 8. 制御と診断

谷口 智紀\*<sup>1</sup>

TANIGUCHI Tomoki

制御と診断の分野では12のテクニカルセッションが開かれたが、発表の総数は51件と過去最多であった。その内訳は、制御が2セッションで11件、診断が7セッションで30件、計装が3セッションで10件となっており、例年に比べて診断に関するものが大幅に増加している。本会議では主として診断および計装のセッションを聴講したので、その内容を中心に報告する。

### 1. 制御

「エンジンモデリングと制御」のセッションで6件、「エンジン制御」のセッションで5件の発表があった。制御の対象は産業用ガスタービン (GT-90496, 90590), 船用ガスタービン (GT-90439), ターボファンエンジン (GT-90656など) やその燃料システム (GT-90235) など多岐に渡っている。

### 2. 診断

「診断と人工知能法」では3件の発表があり、遠心圧縮機やガスタービンの故障分類に確率的ニューラルネットワークを適用したもの (GT-90362), 小型ガスタービンの診断に統計的手法を用いたもの (GT-91085), 線形カルマンフィルタとニューラルネットワークを組み合わせることにより、計測データからタービン入口温度やスラストなどを推定するもの (GT-90603) が報告された。

「エンジン診断」は2つのセッションで計9件の発表が行われた。特定部位の診断に関するものとしては、温度計測データからの各部位の形状劣化診断 (GT-90263) や統計モデルを用いて特定の周波数の動圧変化から DLE 燃焼器の吹き消えを検出する方法 (GT-90231), ガスタービン始動装置の故障診断 (GT-91210), 触媒センサによる燃料漏れの検出 (GT-90290) などが紹介された。

「機上エンジン診断法」では4件の発表があり、状態空間モデルとニューラルネットワークを組み合わせることによりメタル温度を推定するもの (GT-90317), カルマンフィルタの改良により過渡状態の診断精度を向上させたもの (GT-90412), 非線形機上エンジンモデルと区分線形モデルを組み合わせたハイブリッドカルマンフィルタを用いることによりエンジン劣化の影響を考慮して

診断を行うもの (GT-90870), ターボファンのスラスト推定にカルマンフィルタとロバストカルマンフィルタを適用したもの (GT-91241) が報告された。

その他には、「ガスパス解析を用いた診断」で4件、「診断のためのデータプロセッシング」で4件、「エンジン健全性管理」で6件の報告があった。

### 3. 計装

「計装」のセッションは3つに別れており、計10件の発表があった。大学などの研究機関からのものがほとんどであったが、セッションではメーカーからの聴講者も多く、活発な質疑応答が行われていた。内容は計測装置などのハードの開発に関するものが多いが、コンピュータの高速化によりデータ処理速度が大幅に向上したことも開発に大きく寄与しているようである。各発表の概要を計測対象部位ごとにまとめる。

圧縮機に関するものは、小型・高周波数応答の全圧プローブおよび静圧プローブの開発についての1件のみであった (GT-91209)。流れの向きが大きく変わるような非定常流れにおいても正しく計測できるようにデータ処理方法も工夫している。

燃焼器に関するものは最も多く、6件の発表があった。燃焼の安定性に関するものとして、レーザー振動計を用いた燃焼安定性や流れパターンの計測 (GT-90413), 火炎イオン化信号を計測することにより吹き消えを検知するセンサの開発 (GT-90879) が紹介された。また、エンジンに搭載されている排気ガス温度計測用の熱電対を利用して吹き消えを検知するシステムの開発 (GT-91080) について報告された。使用するのは汎用熱電対であるが、データ処理方法の改良により、光学式に比べて応答性はやや劣るものの高い精度での検出が可能となっている。燃焼ガス分析に関するものとしては、レーザー吸収による排ガス中の NO および NO<sub>2</sub> の同時計測 (GT-90246), 放射温度計を用いた燃焼ガス中の濃度分布計測 (GT-90899) があった。その他には、噴霧燃料のレーザー計測による燃料ノズルの性能評価 (GT-91083) が紹介された。

タービンに関するものは3件で、パイロメータを用いた実機タービン翼のメタル温度計測 (GT-90246), 衝撃風洞実験で熱線風速計を用いる場合のデータ処理に関するもの (GT-90457), オンサイトで TBC の健全性を評価するための光学システム (PLPS) の開発 (GT-90551) が報告された。

原稿受付 2006年7月7日

\* 1 川崎重工業(株) ガスタービンビジネスセンター  
技術総括部 要素技術部  
〒673-8666 明石市川崎町1番1号

## 9. 材料・構造および製造技術

吉岡 洋明<sup>\*1</sup>

YOSHOKA Yomei

本分野は、11のセッションからなる。内訳は、技術セッションが4、論文なしのパネルセッションが5、レクチャーが1、チュートリアルが1、発表数は、各々17件、21件、4件、4件の合計46件であった。なお、パネルセッション数は一昨年3、昨年4、今年は5と年々その件数・比率共増しており、時事性、話題性を重視した企画が組まれていた。

内容に関しては、まず技術セッションでは、新材料・製造技術、コーティング、クリアランス制御技術、材料評価・劣化・寿命診断の4つのセッションで組まれていた。新材料では、現用材 Nimonic 263の製造性を損なうことなくクリープ強度を Waspalloy, René 41並みに高強度化させた鍛造合金 HAYNESS 282と一方向凝固材料並みの製造性を有し強度は単結晶合金 René N5と同等とした単結晶材 CMSX-486の発表が、製造技術関連では航空機エンジンの圧縮機翼に圧縮の残留応力を付与し高サイクル疲労特性と耐 FOD 性を改善させた LPB (Low Plasticity Burnishing) プロセス、リコーティングで塞いだフィルム冷却孔を Nd-YAG レーザで明け直す技術、単結晶合金 CMSX-4の真空ロウ付け補修技術に関する発表があった。コーティング関連では、発電用ガスタービン動翼の表面損傷に関する発表があり、コーティングの酸化損傷のモデリング、同じくコーティングのき裂発生・進展抵抗の評価、基材の酸化挙動に関するもので、いずれも GE の発電用ガスタービン動翼材料を対象としたものであった。また、性能向上のためのクリアランス制御技術では、アブレーダブルコーティングに関するものが2件、いずれも  $ZrO_2$  に安定化材として  $Dy_2O_3$  あるいは  $Yb_2O_3$  を使ったものあるいは従来の  $Y_2O_3$  を用いその組織を緻密にしミクロクラックを導入させたものの評価と、17-4PH 鋼製ディスクラビリンスシールナイフエッジ部の損傷のレーザークラディングを用いた補修技術に関するものであった。なお、最後の材料評価・劣化・寿命診断は、組織変化を利用したメタル温度推定手法を普通鋳造翼に適用し FEM 解析結果と比較評価した発表と、その推定手法を単結晶材 CMSX-4の応力時効材に展開した発表、動翼材の引張り-ねじり2軸熱疲労寿命の予測法およびその保持時間・コーティング有無の影響に関する発表であり、実機の事象評価・予測

法に関する発表であった。

パネルセッションでは、話題性を重視し、リバースエンジニアリング、補修技術、ディスクの寿命に加えて、今回は遮熱コーティング (TBC) に関する企画が追加された。リバースエンジニアリングでは、今回は、Wood Group, P&W, Power Systems Mfg. に Sulzer Elbar が加わり、彼らの技術力と製品の運転実績・性能に比重をおいた発表が行われた。補修技術では、これまで補修会社中心に企画されていたが、今回は OEM である Siemens, GE, Alstom がパネリストとなり、各社の機種開発とリンクした補修技術開発への取り組みと新技術の紹介が行なわれた。TBC では、遮熱性改善への取り組みと新しい TBC システムの紹介が、特にヨーロッパ連合内で行われた EC/FP5 プロジェクトの "TBCPLUS" の成果を中心に行なわれた。

なお、今回は、レクチャーとチュートリアルにも参加したが、前者は Siemens の設計者によるガスタービン動翼の設計技術、後者は、補修技術の基本である熱処理、FIC (Fluoride Ion Cleaning)、ノズルのロウ付け補修、リコーティング・溶接補修に関する講義であった。最新の技術を交えた講義で教えられるところも多く、さながら材料技術者と設計技術者の情報交換会のようなセッションに仕立てられていた。会場は座れない者も出たほどで、非常に盛況であった。

原稿受付 2006年8月16日

\*1 (株)東芝 電力システム社

電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部

〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2丁目4番地

## 10. 展 示

小山 正道<sup>\*1</sup>

KOYAMA Masamichi

展示は会議会場である Barcelona International Convention Center で行われた。Entrance Hall に参加登録の受付、及び ASME の出版物や販売コーナーが設置されていた。73ブースによる展示が開催2日目から最終日まで行われた。120ブースの去年と比較し、展示数の縮小化がさらに進んでいる。また、例年通り展示企業のスポンサーによるレセプションが行われたが、会議期間中一回の実施に縮小されていた。

分野別に見ると、流体構造解析のコンサルティングサービス関連が14社あり最も多かった。要素や制御装置分野がそれに次いだ。ガスタービンメーカーは少なかったが、Pratt & Whitney や Rolls-Royce が例年通り大きなスペースで展示をしていた。しかしエンジン模型の展示はなくパネルやタービンプレードなどの部品の展示のみであり、このことから展示の縮小傾向が伺える。一方、CD Adapco や ANSYS といった CFD 分野のスペースも大きく、中でも ANSYS は会場の中央に位置しており、多くの人で賑わっていた。日本に関係した展示としては、Advanced Design Technology, OLYMPUS 及びアイコクアルファが去年に引き続き出展していた。OLYMPUS ではファイバースコープの実演を行っており、著者が訪れたときには盛況だった。また、展示会場内に設けられたステージにて CFD 関係のプレゼンテーションが実施されていたが、聴衆は多くは無かった。

全体としては、縮小傾向が進んでいるものの流体構造解析関係の展示は去年と同様充実していると感じた。数値解析は空力、伝熱及び燃焼といった幅広い分野での研

究・開発に適用されており、テクニカルセッションにおいても数値解析を活用している例は多い。近年、メッシュ作成から計算そしてポスト処理まで一貫して汎用ソフトを用いて行うことができる環境のもと、設計・開発ツールとして数値解析の利用者の底辺は拡大してきている。このような背景から、今後も数値解析の精度向上や更なる効率化が期待されると共にこの分野の展示もまた充実していくものと思われる。一方で、数値計算結果の裏付けとなる計測に関する展示の充実にも期待したい。

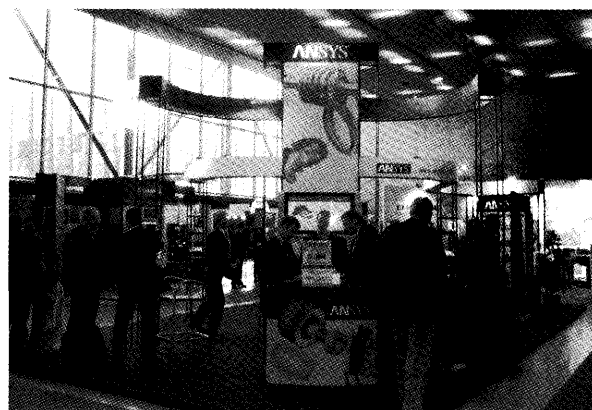


図2 ANSYS のブース



図1 展示会場全景



図3 CDAJ のブース

原稿受付 2006年7月14日

\*1 新潟原動機株

〒957-0101 新潟県北蒲原郡聖籠町東港5-2756-3



## ファンボローエアショー2006に出展・参加して

藤岡 順三\*<sup>1</sup>

FUJIOKA Junzo

横川 忠晴\*<sup>1</sup>

YOKOKAWA Tadaharu

原田 広史\*<sup>1</sup>

HARADA Hiroshi

ファンボローエアショー (Farnborough International Airshow) はパリエアショーと隔年交互に催されるもので、2006年も7月17日(月)～23日(日)に例年通り英国ロンドンより列車で45分の郊外にある Farnborough Aerodrome で開催された。17日(月)～21日(金)が招待客を対象とした Media Day/Private Trade Day/Industry Day, 22日(土)～23日(日)は一般客が参加する Public Day で、来場者は延べ25万人、この間フライトショー、航空機野外展示、屋内各社展示、プレス発表が行われた。また、大手の航空機メーカー、エンジンメーカーなどは別

途 Business Chalet を設け、会期中に大きな商談が成立することもある。

### 1. フライトショー

エアショーの大きな楽しみはフライトショー、民間航空機の目玉は前年のパリエアショーと同様本年度就航予定の Airbus 社の2階建 A380-800で、これと A340-600 が連日飛行していた。そして戦闘機、練習機、輸送機、ヘリコプターを加え Media Day/Private Trade Day/Industry day には20機3時間、Public Day には34機5時間フライトショーが毎日行なわれた。A380の大きくゆっくりとした飛行(図1)と、軍用機のマッハを越える高速飛行・曲芸飛行(図2)の対照が印象的であった。

### 2. 屋内展示

本会場となる5つの建屋にエアーライン、航空機メーカー、エンジンメーカー、航空機・エンジンの素材・部品製造会社、大学・研究機関、コンサルタント会社、出版社など1400社の出展があった。



図1 Airbus 社の2階建て A380-800

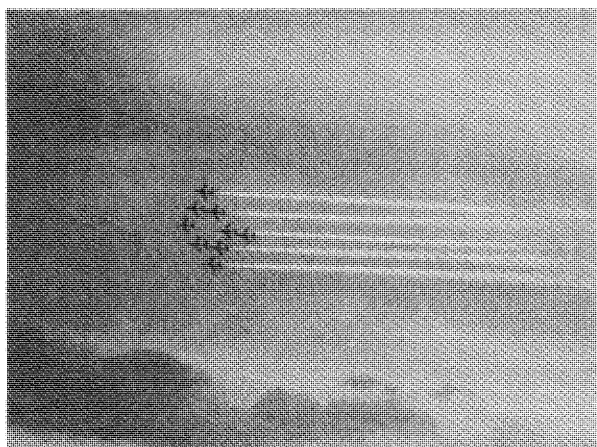


図2 Royal Air Force の Red Arrows



図3 会場入口。正面左は屋内展示会場

#### 2.1 日本企業・機関の展示

物質・材料研究機構 (NIMS) は第4, 第5世代 Ni 基単結晶ブレード, NEDO 先導研究で製作した Ni-Co 基タービンディスク合金トリプルメルト材などについて実物と説明パネルを展示した(図4)。日本航空宇宙工業会が取りまとめた6社のブースには、代表的な展示として、三菱重工業が開発検討中の国産リージョナル

原稿受付 2006年8月14日

\*1 独立行政法人 物質・材料研究機構

〒305-0047 つくば市千現1-2-1



図4 Public Day の物質・材料研究機構ブース

ジェット (MJ-70/90), 川崎重工業 (KHI) が PX, CX の民間転用 (YPX, YCX), 富士重工業が Subaru Jet, IHI 社が CF34, 新明和工業が消防・救難飛行艇, 三菱マテリアルがリング鍛造品を展示していた。宇宙航空研究開発機構は超音速機のモデルを展示していた。宇部興産は Resin Transfer Mold 法による耐熱 CFRP などを展示していた。その他森精機, 三菱カーボン, 牧野フライスの展示もあった。

## 2.2 海外各社の展示

航空機メーカーでは, Boeing 社が独自の建屋に各種民間航空機模型を展示し, A380 に対抗して開発中の B747-8 の模型・説明展示も行われていた。Airbus 社ブースでは A380 の客室実物大模型の展示があった。小型リージョナルジェット旅客機 (RJ) メーカーでは, カナダの Bombardier 社, ブラジルの Embraer 社の展示, そしてロシアの SUCHOI 社の RJ である Superjet 100 (2008 年就航, 78/98 座席, 三菱 RJ に相当) とそのエンジン SaM146 (仏・SNECMA 社と露・NPO Saturn 社とのジョイント会社 Power Jet 社製, 14,000-17,000 lb) の展示があった。

中型以上のエンジンでは世界のほとんどの主要メーカーがエンジンの実物を展示していた。代表的なものとしては, Rolls-Royce 社が Trent1000 および F-35 Joint Strike Fighter 用エンジン F135, Pratt&Whitney 社が同じ F135 と Geared Turbofan Engine, GE 社 GE90-115B とブース内 GENx Theatre での上映, Safran 社・SNECMA が SaM145, CFM International 社が CFM56, Engine Alliance 社が GP7200 とその高温部品, そして日本が参画している International Aero Engine 社が V2500 であった。今後需要が期待される 150 人乗り航空機用エンジン (現在は V2500 と CFM56) と

して Pratt&Whitney 社の Geared Turbofan Engine の開発が伝えられていたが今回の展示はその実現の可能性を感じさせた。また F-35 用エンジン F135 は RR 社, P&W 社いずれのブースにも目玉品として展示され, Lockheed Martin 社の Business Chalet の前にも F35 機体と一緒に展示されていたのは興味深かった。

部品メーカー, 材料メーカーなどの展示を観て, 主要な航空機メーカー・エンジンメーカーの部品・材料調達先が広くグローバル化していることを強く感じた。展示企業は英国, フランス, イタリア, オランダ, ロシア, 米国など世界中から集まり, 例えばロシアの軽合金メーカー VSMPO-AVISMA 社は A380 の Landing Gear と B787 の各種部品を Ti 合金で供給する予定である。ガスタービン高温高压部品材料のメーカー・開発機関では, タービンブレード用単結晶合金は我々 NIMS と Doncaster 社(英)が, ディスク用鍛造合金は Aubert&Duval 社(仏)と Leistriz 社(独)の展示があった。

## 3. プレスコンファレンス, 報道

会期中 Media Day/Private Trade Day/Industry Day に主要航空機メーカーなどのプレスコンファレンスが開催され, そのうち Boeing 社と Embraer 社のものを聴講した。

会場では門を入ると連日主要航空関連雑誌が配られ, 日本の記事として, 物質・材料研究機構の「Rolls-Royce 社との共同研究」, 川崎重工業の「PX の民間転用」, 三菱重工業の「MJ でリージョナルジェットビジネス参入」, 次世代金属・複合材料研究開発協会の「エアバス社と CFRP 損傷検出技術実用化の共同研究」, および日本企業の「B787 部品の製作状況」の記事が掲載された。Airbus 社が Boeing 社の B787 に対抗して A350-900 の開発を決定し, RR 社はそのエンジンを開発することを契約した。また, Boeing 社が Airbus 社の A380 に対抗して 500 人まで乗れる B747-8 を開発することを決定し, そのエンジンとして GE 社の GENx が採用された。

会期中ヨーロッパは熱波と呼ばれる猛暑で, ファンボローでも最高 40℃ まで気温が上昇し, 会場はエアショーの熱気と呼応するように一時停電にも見舞われたが, フライトショーや航空機展示, 航空機・エンジン産業を広くカバーする展示, プレスコンファレンスや報道からの情報収集, これらの見聞を通して航空宇宙産業全体の中でのジェットエンジンの現状・動向と将来展望を把握する機会を得ることができた。本見聞記がガスタービン・ジェットエンジンに係る方々にとってエアショーに参加される時の参考になれば幸いである。

## 2006年度 特別講演会 報告

久松 暢

HISAMATSU Noboru

2006年8月4日(金)、午後3時～4時50分に東京大学薬学部薬学系研究科総合研究棟の2階講堂において、2006年度の「特別講演会」が開催された。テーマは「第三期科学技術基本計画の目指す日本と推進戦略～価値創造型もの創り立国への道」と題し、当学会の第27期会長で、現在、内閣府総合科学技術会議議員の柘植綾夫氏にご講演いただいた。当日は気温が30℃を超える夏本番の暑さの中、68名が聴講に訪れた。

講演の第1部では、総合科学技術会議の役割と科学技術政策の課題についてご説明の後、第三期科学技術基本計画では政策目標をより明確にし、5ヵ年間の政府研究開発投資の総額規模を約25兆円としたことなど、第三期基本計画の概要をご紹介いただいた。また、多様な知と革新をもたらす基礎研究は一定の資源を確保して着実に推進すること、重点推進4分野（ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料）に対して、選択と集中の上、優先的に資源配分する一方、国の存立にとって基盤的であり、国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して推進する分野（推進4分野：エネルギー、ものづくり技術、社会基盤、フロンティア）に対しても、選択と集中を徹底し、適切に資源配分することなど、戦略重点化の概要についてご説明いただいた。

第2部では、第三期基本計画の分野別推進戦略の概要として、各分野毎の戦略理念により62の戦略重点科学技術を選定したことなどについてご説明いただいた。また、当学会が関連するエネルギー分野とものづくり技術分野に触れ、特に、ものづくり技術分野については、“ものづくり技術”を“ハードウェアの製造技術だけではなく、ソフトウェア等も含む高付加価値生産を支える技術”とし、科学技術に裏打ちされた価値創造型ものづくり力強化に取り組むことが述べられた。

第3部では、“イノベーション”を“科学的価値・技術的価値を社会的価値・経済的価値に具現化すること”

とし、イノベーションの実現に向けて、国の事業計画と科学技術経営との両輪の一体化経営が経済成長戦略大綱の柱になったこと、また、科学技術行政と科学技術コミュニティはイノベーション創出に向けて科学技術経営力を再構築すべきであり、“イノベーション・パイプライン網”（基礎研究と応用研究および製品開発研究とを縦と横に結合する、知と価値創造のパイプライン網）の構築が必要であることなどを唱えられた。さらに、イノベーション創出総合戦略として、基礎研究、応用・実用化研究開発、製品開発・市場投入のそれぞれの段階および全体における強化ポイントや、府省連携の研究開発活動において各分野毎に基礎から応用までを一気通貫で指揮する機能強化の必要性について述べられた。

第4部では、最近の科学技術政策に係わる重要な出来事についてご説明があり、これからの10年での科学技術イノベーションが重要であり、この5～10年でイノベーション創出ができない場合、少子高齢化等から国はその体力を失うとの危機感を訴えられた。

最後の第5部では、当学会に対して、知の結合の場（イノベーション創出の場）として政策目標に貢献する真の産・学・研究独法の三位一体連携構造を実現してもらいたいとの期待を述べられた。

講演終了後、予定時間を超過して活発な質疑応答がなされ、その中で、柘植議員より「戦略的な技術については一人が一気通貫で指揮できる“目利き”をつくる必要があると、また、“目利き”を評価する社会が必要であり、それが学協会の大きな課題であろう。」とのご意見があった。我が国の科学技術が向かうべき所とその道筋、更には、学会のあり方を考える上で、大変貴重な機会となった。

ご講演いただきました柘植議員、ならびに、講演開催にご協力いただきました関係者の方々に厚く御礼申し上げます。  
(企画委員 電力中央研究所)



## 第12回ガスタービン教育シンポジウム報告

橋本 良作

HASHIMOTO Ryosaku

2006年7月6日、7日の2日間にわたり、「第12回ガスタービン教育シンポジウム」が東京都調布市の独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）航空宇宙技術研究センターにて開催された。本シンポジウムの開催は関東と関西で隔年ごとに実施されていたが、この5年間は関東のみであった。開催場所についても JAXA 航空宇宙技術研究センターが4年連続で定着しつつある。その一方、関西での開催要望も有り、今年度より関東の開催とは別に関西でも2年に1回（今年は9月14日、15日）の開催が計画されている。今年は年2回の開催を企画しているので参加者の減少が心配されたが、社会人27名、学生33名、計60名の参加者があり、昨年と比較して社会人の参加者が若干減少したのみであった。会場及び見学のことを考えると60名は最適な人数であった。例年女性受講者が数名いたが今年は一人もいなかったのは寂しい気がした。

本シンポジウムは、ガスタービンの初心者を対象に、ガスタービンの基礎知識を学んで頂く目的で、実際のガスタービンとその関連の製造及び研究開発施設等の見学と、第一線で活躍されている各専門家による講義を併せた企画であり、1日目に講義2テーマと特別講義（JAXA のガスタービン研究）及び航空宇宙技術研究設備の見学会、2日目に講義4テーマを実施した。

1日目は、企画委員会の壹岐典彦理事による開会の挨拶に引き続き、(1)ガスタービン概論（渡辺紀徳先生）の講義が行われ、昼食後、(2)ガスタービンと流体工学（山本誠先生）、JAXA における航空用エンジン研究（柳良二先生）について講義が行われた。その後、4班に分れて見学を行った。ガスタービン関連の研究設備としては小型超音速エンジンを高空状態で運転試験が出来る超音速エンジン運転施設（写真）とジェットエンジン関係の展示の見学を行った。ガスタービン以外の研究施設としては極超音速風洞とフラッタ風洞の2ヶ所の見学を行った。研究施設見学後、展示室において JAXA の研究全

般について見学した。

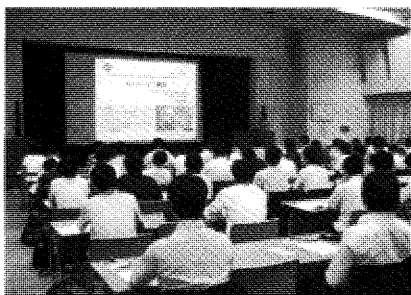
見学終了後、JAXA 航空宇宙技術研究センター厚生棟で懇親会が開催され、企画委員会の壹岐典彦理事の挨拶、JAXA 事業推進部長の鈴木和雄氏の歓迎の挨拶及び乾杯と進行した。懇親会の出席者はシンポジウム参加の6割の方々であったが、各所で議論の輪が出来、真剣な議論や相互交流がなされていた。当初の予定を30分以上超過し午後8時過ぎまで行われて有意義な交流が行われたようであった。

2日目は、前日に引き続きガスタービン関連の4テーマの講義、(3)ガスタービンと伝熱工学（福山佳孝氏）、(4)ガスタービンと燃焼工学（山中矢氏）、(5)ガスタービンと材料工学（土井裕之氏）、(6)ガスタービンと制御工学（松永易氏）が行われた。講義はガスタービンの基礎及び最新の技術動向も専門家の立場からの説明が有り、受講者にとっては、内容の濃い講義であったが皆熱心に聴講していた。

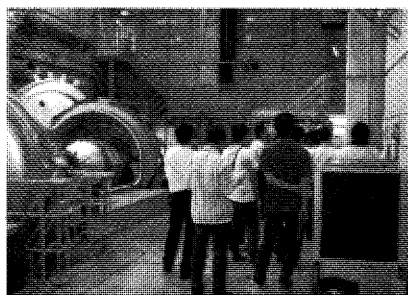
教材及び講師の方々については、一昨年度より「ガスタービン技術継続教育教材作成委員会」で編集された教材とその執筆者の方をお願いしている。教材は基礎編と応用編が含まれているが時間の関係もあり講義は基礎編のみであったが、練習問題や応用編があるので参加された皆様は有効に活用し、今後のガスタービンの知識を得るのに役立てて頂きたい。また、昨年度より2日間受講された方には受講修了証が発行された。今後の当シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートに参加された皆様に協力頂いた。アンケート集計結果は次回以降の企画及び教材の改訂に反映する予定である。

最後に、講義、資料等の準備に貴重な時間をさいて頂いた講師の方々に感謝すると共に、会場の提供、見学会及び懇親会についてご協力を頂いた独立行政法人宇宙航空研究開発機構の関係者各位に深く感謝します。

（企画委員 JAXA）



講義風景



施設見学の様子



懇親会風景

## GTSJ 第31期委員名簿 (順不同)

## 《総務委員会》

石井博之 (IHI) 塩原元哲 (東京電力) 杉浦裕之 (川崎重工) 塚原章友 (三菱重工) 平野孝典 (拓殖大)

## 《企画委員会》

小見淳介 (IHI) 川上忠重 (法政大) 木村武清 (川崎重工) 倉田修 (産総研) 高橋俊彦 (電中研)  
鳥飼高行 (東芝) 藤井健太郎 (三菱重工) 武田淳一郎 (富士電機システムズ) 橋本良作 (JAXA)  
平野篤 (防衛庁) 三嶋英裕 (日立) 山口論 (IHI) 若原剛人 (新潟原動機)

## 《編集委員会》

有村久登 (三菱重工) 市川薫 (東邦ガス) 伊東正雄 (東芝) 刑部真弘 (東京海洋大) 加藤千幸 (東大)  
柏原宏行 (川崎重工) 木下茂樹 (ダイハツ) 佐々木直人 (アイ・エイチ・アイ・エアロスペース) 塩原元哲 (東京電力)  
辻田星歩 (法政大) 中村修三 (荏原) 幡宮重雄 (日立) 服部学明 (三井造船) 平田豊 (IHI)  
山本政彦 (IHI)

## 《学術講演会委員会》

○渡辺紀徳 (東大) 井亀優 (海技研) 加藤大 (IHI) 児玉秀和 (IHI) 佐伯祐志 (東芝)  
須田祐志 (荏原) 平野孝典 (拓殖大) 古谷博秀 (産総研) 室田知也 (日立) 山本武 (JAXA)

## 《組織検討委員会》

○川口修 (慶大) 太田有 (早大) 土屋利明 (東京電力) 本間友博 水木新平 (法政大)  
吉識晴夫 (帝京平成大)

## 《英文論文集発刊準備委員会》

○渡辺紀徳 (東大) 有村久登 (三菱重工) 石田克彦 (川崎重工) 大北洋治 (IHI) 太田有 (早大)  
加藤大 (IHI) 柴田貴範 (日立) 田頭剛 (JAXA) 武石賢一郎 (阪大) 土屋利明 (東京電力)  
船崎健一 (岩手大) 山根敬 (JAXA) 山本武 (JAXA) 山本誠 (東京理科大) 吉岡洋明 (東芝)

## 《地方委員会》

○武石賢一郎 (阪大) 井上梅夫 (タクマ) 上田和夫 (関西電力) 岡芳彦 (三井造船) 川田裕 (大阪工業大)  
木下茂樹 (ダイハツ) 合田泰規 (大阪ガス) 清嶺地誠 (日立造船) 辻川吉春 (大阪府立大) 辻本良信 (阪大)  
中西章夫 (九州電力) 橋本啓介 (川崎重工) 橋本正孝 (神戸大) 速水洋 (九大) 三宅裕 (福井工業大)  
六山亮昌 (三菱重工) 吉田英生 (京大)

## 《ガスタービン統計作成委員会》

○園田豊隆 (本田技術研究所) 今井則和 (ヤンマー) 上田邦彦 (IHI) 大迫雄志 (三菱重工)  
酒井義明 (東芝) 浜野信彦 (荏原) 原田純 (川崎重工) 馬場康弘 (ターボシステムズユニテッド)  
山上展由 (三菱重工) 渡辺豊 (日立)

## 《国際委員会》

○藤網義行 (ESPR) 石田克彦 (川崎重工) 大北洋治 (IHI) 太田有 (早大) 川口修 (慶大)  
木下康裕 (川崎重工) 武石賢一郎 (阪大) 中村良也 (アイ・エヌ・シー・エンジニアリング) 幡宮重雄 (日立)  
福田雅文 (東芝) 藤岡昌則 (三菱重工) 二村尚夫 (JAXA) 船崎健一 (岩手大) 松尾亜紀子 (慶大)  
山根敬 (JAXA) 渡辺紀徳 (東大)

## 《選挙管理委員会》

○岡本洋三 杉浦裕之 (川崎重工) 鈴木伸寿 (東芝) 田口勲 (三菱重工) 北條正弘 (JAXA)  
室伏宏樹 (日立) 山方章弘 (IHI)

## 《広報委員会》

○山本誠 (東京理科大) 荒井修 (日立) 因幡和晃 (東京理科大) 岩崎英和 (川崎重工) 太田有 (早大)  
北山和弘 (東芝) 辻田星歩 (法政大) 姫野武洋 (東大) 藤岡昌則 (三菱重工) 牧田光正 (JAXA)

## 《IGTC'07実行委員会》

○大田英輔 (早大) 水木新平 (法政大) 渡辺紀徳 (東大) 西澤敏雄 (JAXA)

## 《IGTC'07実行委員会 (総務委員会)》

○土屋利明 (東京電力) 山根敬 (JAXA) 吉田博夫 (産総研) 山本誠 (東京理科大) 辻田星歩 (法政大)  
太田有 (早大) 石井博之 (IHI) 福田雅文 (東芝) 幡宮重雄 (日立) 塚原章友 (三菱重工)

## 《IGTC'07実行委員会 (論文委員会)》

○武石賢一郎 (阪大) 寺本進 (東大) 藤網義行 (ESPR) 木下康裕 (川崎重工) 吉岡洋明 (東芝)  
濱崎浩志 (IHI) 壹岐典彦 (産総研)

## 《IGTC'07実行委員会 (財務委員会)》

○長谷川聰 (川崎重工) 遠崎良樹 (川崎重工) 小松秀明 (日立) 杉浦裕之 (川崎重工)

## 《IGTC'07実行委員会 (展示委員会)》

○後藤伸穂 (日立) 乾泰二 (日立) 早東昇 (日立) 西村真琴 (日立) 天本幹夫 (日立)  
下村純志 (日立) 西出重人 (IHI) 池田慈朗 (IHI) 酒井義明 (東芝) 鳥飼高行 (東芝)  
小森豊明 (三菱重工) 乃村春雄 (川崎重工) 井上俊彦 (川崎重工) 坂本明子 (三井造船) 須田祐志 (荏原エリオット)  
江藤浩一 (荏原エリオット) 藤沢良昭 (JAXA) 原田正志 (JAXA)

## 《IGTC'07実行委員会 (行事委員会)》

○水木新平 (法政大) 御法川学 (法政大) 谷山雅俊 (東芝) 本阿弥眞治 (東京理科大) 松尾亜紀子 (慶大)  
山本勝弘 (早大)

## 第34回ガスタービン定期講演会（弘前）・見学会のお知らせ

第34回ガスタービン定期講演会・見学会を以下のように開催します。会員の皆様多数ご参加下さい

- 主 催：(社)日本ガスタービン学会 共 催：(社)日本機械学会  
 後 援：(社)弘前観光コンベンション協会、青森県コンベンション誘致協議会  
 開 催 日： 講演会 2006年10月25日(水)、26日(木) 開催場所：弘前文化センター  
 見学会 2006年10月27日(金) 住所：青森県弘前市下白銀19-4 電話：0172-33-6571  
 (HP: <http://www.hi-it.net/~bunka/>)

### 講演会：

- ・空力、燃焼・燃焼器、伝熱、材料、開発、性能、保守等 49件を予定
- ・特別講演：縄文文化の扉を開く
- ・オーガナイズドセッション：ガスタービン技術の歴史とその継承

### 参加登録費：

- ・正会員\* 13,000円
- ・学生会員\* 4,000円（ただし論文集無しで1,000円）（\*共催学会会員も同様です）
- ・会員外 18,000円（ただし学生は論文集有りで7,000円、論文集無しで4,000円）

### 懇親会：

- ・日 時：10月25日(水)（講演会終了後）
- ・場 所：弘前パークホテル（弘前市土手町126 TEL0172-31-0089）
- ・参加費：3,000円

### 見学会：

- ・日 時：10月27日(金)
- ・見学先：並木精密宝石、弘前大学、弘前航空電子 他の見学を予定  
（解散予定時刻 JR 浪岡駅16:00頃、青森空港16:20頃）
- ・定員45名程度、先着順、講演会登録者に限ります。
- ・参加費6,000円（見学先へ名簿提出の都合上、希望者は10月10日までに登録をお願いいたします。）

### 参加申込方法：

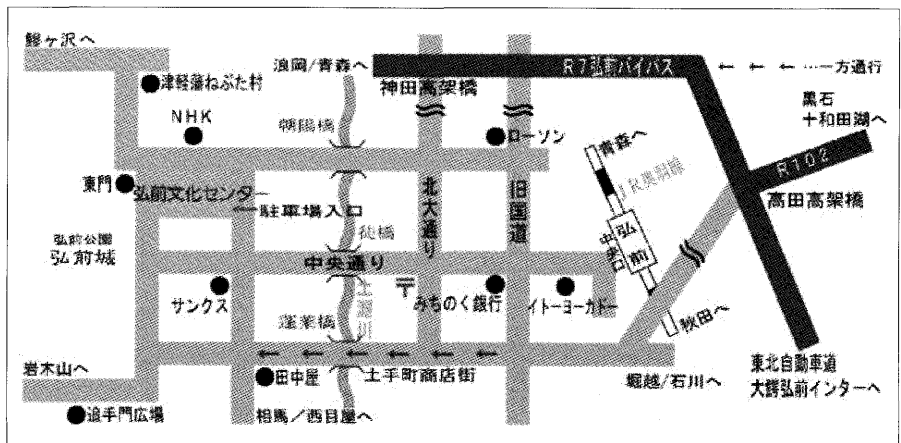
- ・講演会、見学会に参加をご希望の方は、学会 HP（<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/>）から登録されるか、参加申込書に必要事項をご記入の上、学会事務局宛にお申し込み下さい。参加登録は、受付の混乱を避けるため、事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

### 講演会場への交通等：

- ・青森空港から JR 弘前駅前までバスで約60分
- ・JR 弘前駅中央口から土手町循環100円バス 浜の町方面行き（7番のりば）で「文化センター前」下車。所要時間20分程度  
バスは10分おきに出ています。タクシーご利用の場合は弘前駅より10分から15分程度です。
- ・日本ガスタービン学会ホームページにて宿泊ホテルをご紹介します。

### 日本ガスタービン学会／弘前大学合同セミナー：

- ・10月24日(火)に弘前大学にて大学生及び一般の方々を対象とするガスタービン・ジェットエンジンの入門講座を開催します。詳しくは学会 HP を参照下さい。





## 第34回ガスタービン定期講演会(弘前) プログラム

## — 第1日 —

(一般講演 講演時間15分 討論5分 \*印 講演者、連名者の所属が省略されている場合は後者と同じです)

第1室		第2室	
10:20	<p>《一般講演》伝熱 I 座長：佐伯祐志(東芝)</p> <p>A-1 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 *宇多村元昭、加藤恭義、玉浦裕(東工大)</p> <p>A-2 複合冷却方式タービン翼の冷却空気流れ可視化に関する研究 *池田憲司(農工大)、松村和幸、吉田豊明(農工大)</p> <p>A-3 流体・熱伝導連成による2次元翼列の熱伝達解析における乱流モデルの影響 *馬場隆弘、山根敬、福山佳孝(JAXA)</p> <p>A-4 冷却翼開発におけるCFD解析(Conjugate Heat Transfer and flow analysis: 熱・流体連成解析)の適用と実機での温度計測事例 杉本隆雄、笠正憲、*田中良造、辻幸一郎(川崎重工)</p>	10:20	<p>《一般講演》材料・損傷 I 座長：原田広史(物材機構)</p> <p>B-1 単結晶耐熱合金の実機適用のための熱応力印加ラフト組織形成試験 *松下政裕、福山佳孝、藤沢良昭(JAXA)、青木祥宏(IHI)</p> <p>B-2 1100℃級ガスタービン初段動翼コーティング材の劣化・損傷解析(第2報) *伊藤勝彦、吉岡洋明、斉藤大蔵(東芝)</p> <p>B-3 先進Ni基超合金に適した新TBCシステムの開発 *松本一秀、川岸京子、原田広史(物材機構)</p> <p>B-4 パーチャルジェットエンジン要素としてのフェーズフィールドシミュレーション *北嶋具教(物材機構)、J. Wang(NPU:China)、原田広史、坂本正雄、横川忠晴(物材機構)</p>
11:40	<p>座長：室田知也(日立)</p> <p>A-5 多段傾斜インピンジメント冷却構造の冷却性能に関する実験的研究 *藤本秀、大北洋治(IHI)、福山佳孝、山根敬、三村富嗣雄、松下政裕、吉田豊明(農工大)</p> <p>A-6 複合型インピンジメント冷却構造に関する研究(内外部伝熱特性の同時計測) *バド'ン'ガレ(岩手大院)、船崎健一(岩手大)、仲俣千由紀、大北洋治(IHI)</p> <p>A-7 フィールド冷却孔周りの流れの数値解析 寺本進、*水上聡(東大院)</p>	11:40	<p>《一般講演》燃焼・燃焼器 I 座長：井亀優(海技研)</p> <p>B-8 高温高圧燃焼試験設備の拡充整備 *下平一雄、牧野敦、山田秀志、山本武、林茂(JAXA)</p> <p>B-9 航空エンジン環境技術開発プロジェクトにおける燃焼器開発 〜マルセクタ燃焼器による実温実圧試験〜 *牧田光正、山田秀志、山本武、下平一雄(JAXA)</p> <p>B-10 MGC 部材適用1700℃級ガスタービン燃焼器の開発 *松本匡史、木下康裕(川崎重工)</p> <p>B-11 360 回連続DSS運転を達成した油焚き予混合燃焼器の開発 山崎尚之、戸塚祐治(東日本旅客鉄道)、前川憲、*田中克則、西田幸一(三菱重工)</p>
13:00	<p>《一般講演》伝熱 II 座長：加藤大(IHI)</p> <p>A-8 高圧軸流圧縮機設計におけるCFDの適用 *後藤信也、加藤崇也、加藤大(IHI)</p> <p>A-9 翼列内を伝播する音波の数値解析 *賀澤順一(JAXA)、堀口泰生(JAST)、才木一寿、山本一臣、野崎理大石宛(IHI)</p> <p>A-10 ラジアル排気タービンの脈動流特性に関する研究(流入脈動流の波形的影響) *濱大樹、小西奎二、田代伸一(首都大)</p> <p>A-11 超音速エンジン内部流における非一様流れと衝撃波の制御に関する研究 *渡辺紀徳(東大)、遼英智、儘田あゆみ(東大院)、鶴沢聖治(東大)</p>	13:00	<p>《一般講演》燃焼・燃焼器 II 座長：山本武(JAXA)</p> <p>B-12 Flameless 燃焼を採用した低カロリーガス対応小型燃焼器の開発 (化学反応を考慮した熱流体解析による検討) *中島良文、山崎由大(東大院)、林茂(JAXA)、金子成彦(東大院)</p> <p>B-13 UMG 用超小型燃焼器における燃焼負荷率が火災安定性および熱損失に与える影響 *櫻井毅司(首都大)、WONG SOON FONG(都科技大院)、湯淺三郎(都科技大・首都大)</p> <p>B-14 200W 級ガスタービン用希薄予混合プロパン燃焼器の燃焼特性に及ぼす予混合気2次噴射の影響 *栗野領介(都科技大院)、湯淺三郎(都科技大・首都大)、櫻井毅司(首都大)</p> <p>B-15 超小型ガスタービン用アニュラー型燃焼器の基礎燃焼特性 *皆川和夫(IHI)、湯淺三郎、櫻井毅司(首都大)、村山元英、磯村浩介(IHI)</p>
14:00	<p>《一般講演》空力 I 座長：内田博(豊田中研)</p> <p>A-8 高圧軸流圧縮機設計におけるCFDの適用 *後藤信也、加藤崇也、加藤大(IHI)</p> <p>A-9 翼列内を伝播する音波の数値解析 *賀澤順一(JAXA)、堀口泰生(JAST)、才木一寿、山本一臣、野崎理大石宛(IHI)</p> <p>A-10 ラジアル排気タービンの脈動流特性に関する研究(流入脈動流の波形的影響) *濱大樹、小西奎二、田代伸一(首都大)</p> <p>A-11 超音速エンジン内部流における非一様流れと衝撃波の制御に関する研究 *渡辺紀徳(東大)、遼英智、儘田あゆみ(東大院)、鶴沢聖治(東大)</p>	14:00	
14:10	<p>《一般講演》空力 II 座長：加藤大(IHI)</p> <p>A-12 逆圧力勾配の影響を受ける周期的後流通過による平板境界層の遷移に関する研究 *小敷栄太郎(上智大)、船崎健一(岩手大)、築地徹浩(上智大)</p> <p>A-13 円錐に正対するポテンシャル流れについて *二村尚夫(JAXA)</p> <p>A-14 渦法による風車翼周りの流れの数値シミュレーション *平野孝典(拓大)、石井進、平本政明(日大)、田中英穂(東大名誉教授)、藤本一郎(拓大)</p> <p>A-15 低圧タービンにおける剥離泡の数値シミュレーション *山田和豊、船崎健一(岩手大)、千葉康弘(岩手大院)</p>	14:10	
15:30	<p>《特別講演》 講師：岡田康博氏(青森県文化財保護課、三内丸山遺跡対策室長)</p> <p>座長：渡辺紀徳(東大)</p>	15:30	

## — 第2日 —

(一般講演 講演時間15分 討論5分、\*印 講演者、連名者の所属が省略されている場合は後者と同じです)

第1室		第2室	
9:30	<p>《一般講演》空力III 座長：児玉秀和 (IH1)</p> <p>A-16 ジェット VTOL 輸送機用リフトファン内流の空力検討 *白鳥敏正 (首都大)、中嶋正浩 (前 都科技大院)、齋藤喜夫 (前 JAXA)</p> <p>A-17 超小型多段圧縮機の要素試作と実験 平野利幸、*石川大、萩原嵩暁 (法大院)、顧昔耆、御法川学、辻田星歩、水木新平 (法大)</p> <p>A-18 前方スライプ圧縮機動翼の亜音速流れ構造に及ぼす運転速度の影響 *吉田榮志、三岩孝太郎 (早大院)、加藤大 (IH1)、大田英輔 (早大)</p>	9:10	<p>《一般講演》燃焼・燃焼器III 座長：平野孝典 (拓大)</p> <p>B-16 5孔ビト一管を用いたガスタービン燃焼器用スワロー後方の流れ場計測 *西本圭祐 (早大院)、山本孝正 (早大)、林茂 (JAXA)、大田英輔 (早大)</p> <p>B-17 非混和性二流体中の加振噴流不安定性に伴う液滴生成過程の数値解析 *井上智博 (東大院)、渡辺紀徳、姫野武洋 (東大)</p> <p>B-18 流れの可視化による燃料/空気同軸ノズルの混合性能改善 *三浦圭祐、斉藤武雄、小山西一仁、井上洋 (日立)</p> <p>B-19 燃焼ガスへの空気添加による再燃焼に関する数値解析 *榎本朋仁 (慶大院)、松尾重紀子 (慶大)</p>
10:30	<p>《一般講演》空力IV 座長：渡辺紀徳 (東大)</p> <p>A-19 ラビリンスシール形状に関する数値的研究 (ケージングキャビティ位置の最適化) 大野貴雄 (東理大院)、戸田和之 (千葉科学大)、*山本誠 (東理大)</p> <p>A-20 矩形-円形遷移S字ダクトにおける流れの数値解析 *津島誠、寺本進 (東大院)</p> <p>A-21 高圧空冷タービン翼の軽量化に関する研究 *船崎健一 (岩手大)、岡部英展 (仙台ニコン)、藤原晴樹 (岩手大院)、仲俣千由紀、大北洋治 (IH1)</p>	10:30	<p>《一般講演》燃焼・燃焼器III 座長：古谷博秀 (産総研)</p> <p>B-20 水潤滑軸受を用いたマイクロガスタービンの軸振動 *山口和幸、井上知昭、高木亨之、岸部忠晴、八木学、中野晋、早坂靖、佐々木学 (日立)、白岩弘行 (日立エジゴアジ・アド・サビス)</p> <p>B-21 セラミック部材を組み込んだ小型ガスタービンの試験運転 *喜岐典彦、井上貴博、吉田博夫、袖岡賢、松沼孝幸、鈴木雅人 (産総研)、江原拓未、李允煥 (元 産総研)</p> <p>B-22 クラスタワーファンVTOL技術の研究 (VTOLシミュレーション用模型VTOL機格載エンジン) *松田幸雄、岩橋謙、原田正志、田頭剛 (JAXA)</p>
11:40	<p>《一般講演》空力IV 座長：渡辺紀徳 (東大)</p> <p>A-19 ラビリンスシール形状に関する数値的研究 (ケージングキャビティ位置の最適化) 大野貴雄 (東理大院)、戸田和之 (千葉科学大)、*山本誠 (東理大)</p> <p>A-20 矩形-円形遷移S字ダクトにおける流れの数値解析 *津島誠、寺本進 (東大院)</p> <p>A-21 高圧空冷タービン翼の軽量化に関する研究 *船崎健一 (岩手大)、岡部英展 (仙台ニコン)、藤原晴樹 (岩手大院)、仲俣千由紀、大北洋治 (IH1)</p>	11:40	<p>《一般講演》燃焼・燃焼器III 座長：古谷博秀 (産総研)</p> <p>B-20 水潤滑軸受を用いたマイクロガスタービンの軸振動 *山口和幸、井上知昭、高木亨之、岸部忠晴、八木学、中野晋、早坂靖、佐々木学 (日立)、白岩弘行 (日立エジゴアジ・アド・サビス)</p> <p>B-21 セラミック部材を組み込んだ小型ガスタービンの試験運転 *喜岐典彦、井上貴博、吉田博夫、袖岡賢、松沼孝幸、鈴木雅人 (産総研)、江原拓未、李允煥 (元 産総研)</p> <p>B-22 クラスタワーファンVTOL技術の研究 (VTOLシミュレーション用模型VTOL機格載エンジン) *松田幸雄、岩橋謙、原田正志、田頭剛 (JAXA)</p>
13:00	<p>昼休み (11:40~13:00)</p> <p>《オーガナイズドセッション》「ガスタービン技術の歴史とその継承」</p>		
14:30	<p>「ガスタービンから教わったこと、伝えたいこと」 「若き研究者と情熱」</p> <p>岡村隆成 氏 (ハ工大) 池口 隆 氏 (日立製作所)</p> <p>座長：船崎健一 (岩手大)</p>		
14:40	<p>《一般講演》サイクル・新燃料 座長：豊岐典彦 (産総研)</p> <p>A-22 アドバンスト高温分ガスタービンシステム検証プラントの開発 *秋山隆、四島信也、幡宮重雄、荒木秀文、小金沢知己、柴田貴範、片桐幸徳 (日立)</p> <p>A-23 セルロースの高温高圧水下の液状化に対する昇温速度の影響 *岡村隆成、佐藤久佳、福原長寿、高橋晋 (ハ工大)</p> <p>A-24 化学再生を利用したガスタービンサイクル (水蒸気による改質率が効率が与える影響について) *古谷博秀 (産総研)</p>	14:40	<p>《一般講演》燃焼・燃焼器III 座長：須田祐志 (荏原)</p> <p>B-23 パーチャルジェットエンジンの開発 - 運転時性能評価の試み 福山佳孝、松下政裕 (JAXA)、*伊藤允男、平木秀龍、吉田豊明 (農工大)、横川忠晴、原田広史 (物産機構)</p> <p>B-24 コンバインドサイクル発電プラントの起動スケジュールの多目的最適化 *白川昌和、河井研介 (東芝)、荒川雅生 (香川大)、中山弘隆 (甲南大)</p> <p>B-25 航空エンジンの高空動特性取得試験 *田頭剛、高將治、杉山七契、水野拓哉、二村尚夫、立花繁、柳良二 (JAXA)</p>
15:40		15:40	



## 第 34 回ガスタービン定期講演会 (2006 年 10 月 25, 26 日)

## 参加申込書

(社) 日本ガスタービン学会 行

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

会社／大学等名称	
所在地	〒
TEL	
FAX	

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

フリガナ 氏 名	所 属	TEL FAX	所属学協会 (GTSJは会員番号)	会員 資格	見学会 (6千円)	懇親会 (3千円)
					参加 不参加	出席 欠席
					参加 不参加	出席 欠席
					参加 不参加	出席 欠席
					参加 不参加	出席 欠席
					参加 不参加	出席 欠席

## 【事務局への連絡事項】

払込方法(○印をつけてください) 参加費等入金予定日 月 日

- 銀行 (みずほ銀行 新宿西口支店 普通 1703707)
- 郵便振替 (00170-9-179578)
- 現金書留

送金金額 円(内訳: )

当日支払いは原則として受け付けません。(当日不参加の場合でも参加費はお支払いいただきます。)

\*請求書の発行について

- 要 宛名( )
- 不要

\*領収書の発行について

- 要 宛名( )
- 不要

## 電子版英文論文集の発刊について（予告）

### 英文論文集発刊準備委員会

日本ガスタービン学会では数年にわたり、英文論文集発行の検討を進めて参りましたが、その結果、この度電子版の論文集として、学会の英文論文集を発刊する運びとなりました。誌名は International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (略称 JGPP) です。名称からも分かるように、主たる対象分野はガスタービンですが、関連する幅広い分野をカバーし、原著論文だけでなく研究開発動向や製品情報、市場動向などの review 記事も掲載する計画です。電子ジャーナルであることから、カラーの図も掲載でき、また迅速な査読を行って、内容豊富であるだけでなく、利便性の高い特色ある論文集として行きたいと思えます。現在当委員会で詳細について詰めており、近いうちに学会ホームページで論文募集を開始します。創刊は今のところ来年の早い時期を予定しております。会員の皆様には学会ホームページにご注目の上、是非積極的にご投稿いただきますよう、宜しくお願い致します。



## 第35回ガスタービンセミナー開催のお知らせ

第35回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたします。

今回は、「ガスタービンの最新技術動向と保守管理技術」をテーマとしています。

最前線で活躍されている方々の講演を通して、最新のガスタービン技術動向および保守管理技術を学ぶと共に、最新のプラント事例について知見を高める内容としました。

（詳細につきましては、11月号学会誌、ホームページ等で後日お知らせします）

1. 日 時：2007年1月23日(火) 9:30~17:00  
24日(水) 9:30~17:00
2. 場 所：東京ガス(株) 本社2階大会議室
3. テー マ：「ガスタービンの最新技術動向と保守管理技術」
4. 参加要領：11月号学会誌、当学会ホームページに掲載いたします。  
(<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/>)

## ◇2006年度会費納入のお願い◇

2006年度会費未納の方は下記金額を所定の口座または事務局宛お送りください。

賛助会員	1口	70,000円
正会員		5,000円
学生会員		2,500円

郵便振替 00170-9-179578  
 銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店  
 普通預金口座 1703707  
 いずれも口座名は(社)日本ガスタービン学会です

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが、未だ手続きをなさっていない方は、巻末の振替依頼書にご記入の上、事務局迄お送り下さい。自動振替をご利用されますと振込手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願いいたします。

## [日本ガスタービン学会誌広告掲載のご案内]

日本ガスタービン学会誌の発行部数は約2,500部、年6回、奇数月20日に発行され、会員（個人会員、賛助会員）と定期購入先に配布されます。学会誌の広告は、会誌本文と同様に重要な情報として、会員と学会誌読者に活用されています。

企業、製品、技術、書籍等のPR、求人や行事案内などにもご利用下さい。

## 掲載料；

後付け、白黒印刷、版下支給の場合

1p 60,000円

1/2p 35,000円

カラー、表紙および表紙対向ページの場合についてはお問い合わせ下さい。

## 広告掲載の受付；

下記の学会誌編集委員会事務局(委託)にお申し込み下さい。学会誌事務局でも結構です。申し込み期限は掲載号発行日の2ヵ月前です。版下がある場合は、発行日の1ヵ月前でも間に合いますので、ご相談下さい。

申込先 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
 ニッセイエブロ(株) 制作部 佐藤 孝憲 気付  
 日本ガスタービン学会誌編集委員会事務局  
 TEL：03-5733-5157 FAX：03-5733-5168

1930年の発見以来76年間、第9惑星であった冥王星が惑星から除外され、太陽系の惑星は一つ減って8個になりました。観測技術の進歩により新天体の発見が相次いだため、国際天文学連合（IAU）で「惑星の定義」が見直されたのです。

観測技術が進歩して多くの天体が見つかりましたが、生命体のいる天体は地球以外に見つかっていません。生命体のいる唯一の地球では、太陽の恵みを受けてエネルギーを獲得し、生命体は生き延びています。地球上の生命体でも特に人類は、より快適な生活のため、エネルギー獲得に躍起になっています。天文学的なことはさておいても、高騰を続けるガソリン価格、冬の需要期に向けて懸念される灯油価格の動向など、私たちは日常生活への直接の影響を実感しています。エネルギーの確保が難しくなると、戦争が懸念されます。世界大戦が勃発し、地球滅亡の日が来ないことを願わざるを得ません。

さて、どこまで進むのか先の見えない原油高騰に直面するガスタービンは、人類の平和に寄与できるのでしょうか。生き残りをかけてガスタービン燃料多様化技術の特集しました。木質系バイオマスガス化ガス、汚泥消化ガス、DME（ジメチルエーテル）、BFG（高炉ガス）、石炭ガス化ガス等、代替燃料はあるようなので希望がわいてきました。植物廃材や下水汚泥が活用できるようです。

喫茶室では、神戸大学の神吉博先生に「エネルギー問題解決へ 一大きな対策と小さな対策」という題で、仕事面での努力のみならず、忘れがちな家庭での省エネルギーについても御提言いただきました。

また、研究だよりとして、九州大学の速水洋、山崎伸

彦、古川雅人の各先生方に、ターボ圧縮機を対象とする3研究室の研究概要について紹介いただきました。

さらに、見聞記として、スペインのバルセロナ国際会議場において開催された「ASME 国際ガスタービン会議」、イギリスのロンドン郊外で開催された「ファンボローエアショー」を記載することができました。

最後になりますが、本号刊行にあたり、執筆者の方々にはお忙しい中、急な原稿依頼に対して快くお引き受けいただきありがとうございました。編集委員一同、こころよりお礼申し上げます。なお、本号の企画編集は、有村委員（三菱重工業）、柏原委員（川崎重工業）、山本委員（石川島播磨重工業）、そして、青山（三菱重工業）が担当しました。（文責：青山邦明）

#### 〈表紙写真〉

#### DME/LNG 焚き低 NOx 燃焼器

説明；この写真は、DME（ジメチルエーテル）／LNG 焚き低 NOx 燃焼器のバーナ部分を示します。多数見えている穴が燃焼用空気孔で、その奥に一つずつ燃料ノズルが設置されており、自発火温度の低い DME と燃焼用空気を急速に混合し、安定した低 NOx 燃焼を実現します。（小さな穴はバーナ端面の冷却空気孔）下段は着火から定格負荷までの火炎状況の変化を示すものです。

（提供：㈱日立製作所 電力電機開発研究所）

## だより ✠事務局 ✠

事務局のあるここ新宿では今夏、7月末に遅い梅雨明けをしてからも温度の低い日が続き8月に台風が通りすぎて行ってからやっと夏らしい夏になりました。が、時既に遅し（？）子供たちの夏休みも残り少なくなっていて、海や山での楽しみも充分味わえなかったようです。

事務局では、皆様が夏休みに入る前に年会費未納の方に納入お願いの葉書をお出しました。お手元に葉書が届いた方で、まだお送りいただいていない方は速やかにお送りくださいますようお願いいたします。会費納入の手間を訴えられる方もありましたが、送金の手間を省くため銀行口座引き落としをしておりますので、巻末の依頼書を事務局あてお送り下さい。

事務局としては、銀行自動引落により一層ご協力いた

だき、1人でも多くの会員の方に会費を収めていただくようにすることを目標にいろいろ努力しておりますので、ぜひ皆様のご協力をお願いいたします。

今年度は7月に関東地区、9月に関西地区で「教育シンポジウム」を開催致しました。

今後も関西地区においては定期的開催していく予定で、今まで距離的に参加しにくかった方々もこれによって少しでも不便さが解消できれば幸いです。

来年12月の東京での国際会議の準備も着々と進められています。今後も準備状況やご案内は学会HP（<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/>）に掲載されますので、お見逃しなきよう時々覗いてみてください。

[A]

1930年の発見以来76年間、第9惑星であった冥王星が惑星から除外され、太陽系の惑星は一つ減って8個になりました。観測技術の進歩により新天体の発見が相次いだため、国際天文学連合（IAU）で「惑星の定義」が見直されたのです。

観測技術が進歩して多くの天体が見つかりましたが、生命体のいる天体は地球以外に見つかっていません。生命体のいる唯一の地球では、太陽の恵みを受けてエネルギーを獲得し、生命体は生き延びています。地球上の生命体でも特に人類は、より快適な生活のため、エネルギー獲得に躍起になっています。天文学的なことはさておいても、高騰を続けるガソリン価格、冬の需要期に向けて懸念される灯油価格の動向など、私たちは日常生活への直接の影響を実感しています。エネルギーの確保が難しくなると、戦争が懸念されます。世界大戦が勃発し、地球滅亡の日が来ないことを願わざるを得ません。

さて、どこまで進むのか先の見えない原油高騰に直面するガスタービンは、人類の平和に寄与できるのでしょうか。生き残りをかけてガスタービン燃料多様化技術の特集しました。木質系バイオマスガス化ガス、汚泥消化ガス、DME（ジメチルエーテル）、BFG（高炉ガス）、石炭ガス化ガス等、代替燃料はあるようなので希望がわいてきました。植物廃材や下水汚泥が活用できるようです。

喫茶室では、神戸大学の神吉博先生に「エネルギー問題解決へ 一大きな対策と小さな対策」という題で、仕事面での努力のみならず、忘れがちな家庭での省エネルギーについても御提言いただきました。

また、研究だよりとして、九州大学の速水洋、山崎伸

彦、古川雅人の各先生方に、ターボ圧縮機を対象とする3研究室の研究概要について紹介いただきました。

さらに、見聞記として、スペインのパルセロナ国際会議場において開催された「ASME 国際ガスタービン会議」、イギリスのロンドン郊外で開催された「ファンボローエアショー」を記載することができました。

最後になりますが、本号刊行にあたり、執筆者の方々にはお忙しい中、急な原稿依頼に対して快くお引き受けいただきありがとうございました。編集委員一同、こころよりお礼申し上げます。なお、本号の企画編集は、有村委員（三菱重工業）、柏原委員（川崎重工業）、山本委員（石川島播磨重工業）、そして、青山（三菱重工業）が担当しました。（文責：青山邦明）

#### 〈表紙写真〉

#### DME/LNG 焚き低 NOx 燃焼器

説明；この写真は、DME（ジメチルエーテル）／LNG 焚き低 NOx 燃焼器のバーナ部分を示します。多数見えている穴が燃焼用空気孔で、その奥に一つずつ燃料ノズルが設置されており、自発火温度の低い DME と燃焼用空気を急速に混合し、安定した低 NOx 燃焼を実現します。（小さな穴はバーナ端面の冷却空気孔）下段は着火から定格負荷までの火炎状況の変化を示すものです。

（提供：㈱日立製作所 電力電機開発研究所）

## だより ✠事務局 ✠

事務局のあるここ新宿では今夏、7月末に遅い梅雨明けをしてからも温度の低い日が続き8月に台風が通りすぎて行ってからやっと夏らしい夏になりました。が、時既に遅し（？）子供たちの夏休みも残り少なくなっていて、海や山での楽しみも充分味わえなかったようです。

事務局では、皆様が夏休みに入る前に年会費未納の方に納入お願いの葉書をお出しました。お手元に葉書が届いた方で、まだお送りいただいていない方は速やかにお送りくださいますようお願いいたします。会費納入の手間を訴えられる方もありましたが、送金の手間を省くため銀行口座引き落としをしておりますので、巻末の依頼書を事務局あてお送り下さい。

事務局としては、銀行自動引落により一層ご協力いた

だき、1人でも多くの会員の方に会費を収めていただくようにすることを目標にいろいろ努力しておりますので、ぜひ皆様のご協力をお願いいたします。

今年度は7月に関東地区、9月に関西地区で「教育シンポジウム」を開催致しました。

今後も関西地区においては定期的開催していく予定で、今まで距離的に参加しにくかった方々もこれによって少しでも不便さが解消できれば幸いです。

来年12月の東京での国際会議の準備も着々と進められています。今後も準備状況やご案内は学会HP（<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/>）に掲載されますので、お見逃しなきよう時々覗いてみてください。

[A]

1930年の発見以来76年間、第9惑星であった冥王星が惑星から除外され、太陽系の惑星は一つ減って8個になりました。観測技術の進歩により新天体の発見が相次いだため、国際天文学連合（IAU）で「惑星の定義」が見直されたのです。

観測技術が進歩して多くの天体が見つかりましたが、生命体のいる天体は地球以外に見つかっていません。生命体のいる唯一の地球では、太陽の恵みを受けてエネルギーを獲得し、生命体は生き延びています。地球上の生命体でも特に人類は、より快適な生活のため、エネルギー獲得に躍起になっています。天文学的なことはさておいても、高騰を続けるガソリン価格、冬の需要期に向けて懸念される灯油価格の動向など、私たちは日常生活への直接の影響を実感しています。エネルギーの確保が難しくなると、戦争が懸念されます。世界大戦が勃発し、地球滅亡の日が来ないことを願わざるを得ません。

さて、どこまで進むのか先の見えない原油高騰に直面するガスタービンは、人類の平和に寄与できるのでしょうか。生き残りをかけてガスタービン燃料多様化技術の特集しました。木質系バイオマスガス化ガス、汚泥消化ガス、DME（ジメチルエーテル）、BFG（高炉ガス）、石炭ガス化ガス等、代替燃料はあるようなので希望がわいてきました。植物廃材や下水汚泥が活用できるようです。

喫茶室では、神戸大学の神吉博先生に「エネルギー問題解決へ 一大きな対策と小さな対策」という題で、仕事面での努力のみならず、忘れがちな家庭での省エネルギーについても御提言いただきました。

また、研究だよりとして、九州大学の速水洋、山崎伸

彦、古川雅人の各先生方に、ターボ圧縮機を対象とする3研究室の研究概要について紹介いただきました。

さらに、見聞記として、スペインのパルセロナ国際会議場において開催された「ASME 国際ガスタービン会議」、イギリスのロンドン郊外で開催された「ファンボローエアショー」を記載することができました。

最後になりますが、本号刊行にあたり、執筆者の方々にはお忙しい中、急な原稿依頼に対して快くお引き受けいただきありがとうございました。編集委員一同、こころよりお礼申し上げます。なお、本号の企画編集は、有村委員（三菱重工業）、柏原委員（川崎重工業）、山本委員（石川島播磨重工業）、そして、青山（三菱重工業）が担当しました。（文責：青山邦明）

#### 〈表紙写真〉

#### DME/LNG 焚き低 NOx 燃焼器

説明；この写真は、DME（ジメチルエーテル）／LNG 焚き低 NOx 燃焼器のバーナ部分を示します。多数見えている穴が燃焼用空気孔で、その奥に一つずつ燃料ノズルが設置されており、自発火温度の低い DME と燃焼用空気を急速に混合し、安定した低 NOx 燃焼を実現します。（小さな穴はバーナ端面の冷却空気孔）下段は着火から定格負荷までの火炎状況の変化を示すものです。

（提供：㈱日立製作所 電力電機開発研究所）

## だより ✠事務局 ✠

事務局のあるここ新宿では今夏、7月末に遅い梅雨明けをしてからも温度の低い日が続き8月に台風が通りすぎて行ってからやっと夏らしい夏になりました。が、時既に遅し（？）子供たちの夏休みも残り少なくなっていて、海や山での楽しみも充分味わえなかったようです。

事務局では、皆様が夏休みに入る前に年会費未納の方に納入お願いの葉書をお出しました。お手元に葉書が届いた方で、まだお送りいただいていない方は速やかにお送りくださいますようお願いいたします。会費納入の手間を訴えられる方もありましたが、送金の手間を省くため銀行口座引き落としをしておりますので、巻末の依頼書を事務局あてお送り下さい。

事務局としては、銀行自動引落により一層ご協力いた

だき、1人でも多くの会員の方に会費を収めていただくようにすることを目標にいろいろ努力しておりますので、ぜひ皆様のご協力をお願いいたします。

今年度は7月に関東地区、9月に関西地区で「教育シンポジウム」を開催致しました。

今後も関西地区においては定期的開催していく予定で、今まで距離的に参加しにくかった方々もこれによって少しでも不便さが解消できれば幸いです。

来年12月の東京での国際会議の準備も着々と進められています。今後も準備状況やご案内は学会HP（<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/>）に掲載されますので、お見逃しなきよう時々覗いてみてください。

[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  
ニッセイエブプロ(株)第二制作部デジタル編集課  
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.34 No.5 2006.9

発行日 2006年9月20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 ニッセイエブプロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2006, (株)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル  
(中法) 学術著作権協会  
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619  
E-mail: jaacc@mtd.biglobe.ne.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

## 学会誌編集規定

2003.8.29改訂

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

論説・解説、講義	6ページ
技術論文	6ページ
速報	4ページ
寄書、随筆	2ページ
書評	1ページ
情報欄記事	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  
ニッセイエブプロ(株)第二制作部デジタル編集課  
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.34 No.5 2006.9

発行日 2006年9月20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 ニッセイエブプロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2006, (株)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル  
(中法) 学術著作権協会  
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619  
E-mail: jaacc@mttd.biglobe.ne.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。



## 学会誌編集規定

2003.8.29改訂

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

論説・解説、講義	6ページ
技術論文	6ページ
速報	4ページ
寄書、随筆	2ページ
書評	1ページ
情報欄記事	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  
ニッセイエブプロ(株)第二制作部デジタル編集課  
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.34 No.5 2006.9

発行日 2006年9月20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 ニッセイエブプロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2006, (株)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル  
(中法) 学術著作権協会  
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619  
E-mail: jaacc@mttd.biglobe.ne.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

## 学会誌編集規定

2003.8.29改訂

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

論説・解説、講義	6ページ
技術論文	6ページ
速報	4ページ
寄書、随筆	2ページ
書評	1ページ
情報欄記事	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  
ニッセイエブプロ(株)第二制作部デジタル編集課  
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.34 No.5 2006.9

発行日 2006年9月20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 ニッセイエブプロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2006, (株)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル  
(中法) 学術著作権協会  
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619  
E-mail: jaacc@mtd.biglobe.ne.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。