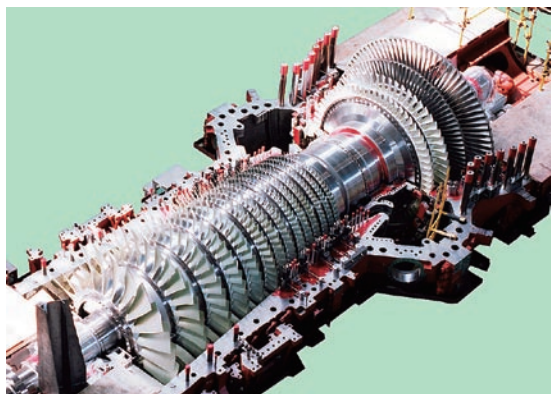


## 特 集 論 文

## 高効率ガスタービンの運転実績と今後の開発動向

## Operating Status of Uprating Gas Turbines and Trend of Gas Turbine Development in the Future



塚 越 敬 三<sup>\*1</sup>  
Keizo Tsukagoshi

六 山 亮 昌<sup>\*2</sup>  
Akimasa Muyama

正 田 淳 一 郎<sup>\*3</sup>  
Junichiro Masada

岩 崎 洋 一<sup>\*4</sup>  
Yoichi Iwasaki

伊 藤 栄 作<sup>\*5</sup>  
Eisaku Ito

これまで発電用大型ガスタービンの開発は、冷却技術や材料技術などの要素技術を中心とした高温化技術で熱効率の向上に注力してきた。当社は1980年代に1100℃級D形ガスタービンを開発し、世界初の大型コンバインドサイクル発電所を設置し、運転に成功した。以来、更に高温化させたF形/G形ガスタービンを開発し、国内外に多数納入し、順調な運転実績を示した。その後も当社は継続的にF形/G形ガスタービンの改良を実施し、その良好な運転実績を上げてきている。一方で当社は、更にタービン入口温度を上げ大幅な熱効率上昇をねらった次世代の1700℃級ガスタービンの要素技術開発を国家プロジェクトに参画して進めている。

## 1. は じ め に

天然ガスを主燃料とする大型発電用ガスタービンは、1980年代より、コンバインドサイクル発電設備の主機として活躍を開始し、以後タービン入口温度の高温化で熱効率を継続的に向上させてきた。近年では地球環境問題が深刻となる中、日本は2005年2月に発効された京都議定書のCO<sub>2</sub>削減目標を達成する必要がある、より高効率な発電設備が必要となってきている。

当社は1984年、タービン入口温度1100℃級のM701Dガスタービンを開発し、世界初の大型コンバインドプラントである東北電力(株)東新潟火力発電所3号系列に設置し成功したのを皮切りに、図1に示すように更にタービン入口温度を高めたF形/G形ガスタービンの開発に成功し、大型火力発電プラントで運転実績を順調にあげている。その結果、表1に示すようにコンバインド効率を飛躍的に向上させ、エネルギー消費の低減や排出ガスの低公害化に大きく貢献してきた。

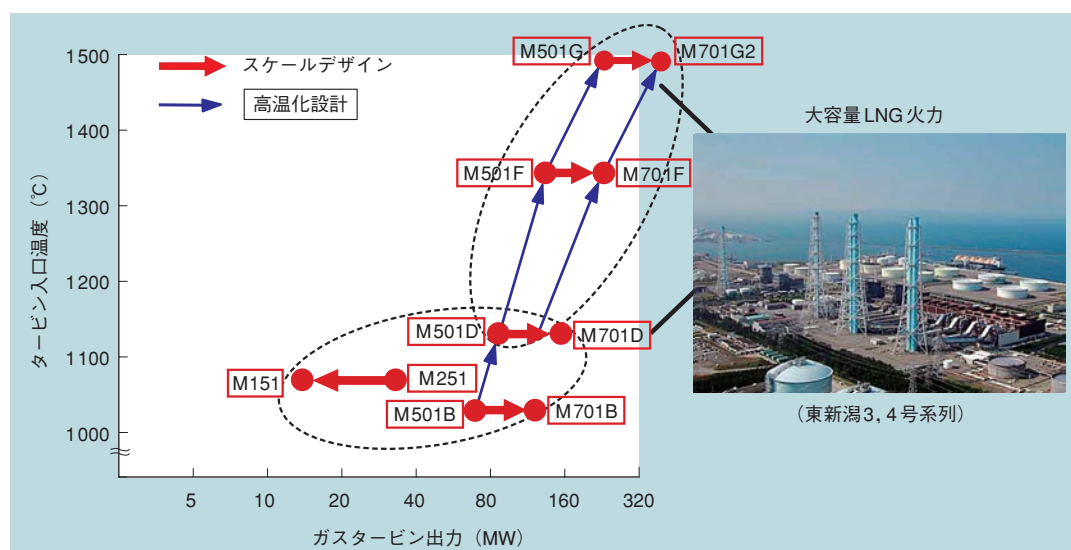


図1 当社の大型事業用ガスタービンの変遷

当社はD形→F形→G形とタービン入口温度を上げ、ガスタービンの性能を向上させてきた。

<sup>\*1</sup> 高砂製作所技監・技師長

<sup>\*2</sup> 高砂製作所ガスタービン技術部長

<sup>\*3</sup> 高砂製作所ガスタービン技術部ガスタービン統合開発グループ長

<sup>\*4</sup> 高砂製作所ガスタービン技術部ガスタービン統合開発グループ主席

<sup>\*5</sup> 技術本部高砂研究所ターボ機械研究室主席

表1 当社のガスタービンの性能変遷

| 60Hz機種名         | M501D | M501F | M501G  |
|-----------------|-------|-------|--------|
| 初号機運転時期 (年)     | 1980  | 1989  | 1997   |
| ガスタービン出力 (MW)   | 114   | 185   | 267    |
| ガスタービン効率 (%LHV) | 34.9  | 37.0  | 39.1   |
| コンバインド効率 (%LHV) | 51.4  | 57.1  | 58.4   |
| 圧力比             | 14    | 16    | 20     |
| 50Hz機種名         | M701D | M701F | M701G2 |
| 初号機運転時期 (年)     | 1981  | 1992  | 2002   |
| ガスタービン出力 (MW)   | 144   | 278   | 334    |
| ガスタービン効率 (%LHV) | 34.8  | 38.7  | 39.5   |
| コンバインド効率 (%LHV) | 51.4  | 59.0  | 59.3   |
| 圧力比             | 14    | 17    | 21     |

以降も、当社は地球環境問題に対する社会のニーズに対し、F形/G形ガスタービンの改良による性能改善を継続的に実施してきている。一方で、将来、更に高効率化したガスタービンを社会に提供すべく、それに必要な要素開発研究を国家プロジェクトの1700℃級ガスタービンの開発に参画し、並行して進めている。

本稿ではF形/G形ガスタービンに適用した改良技術の特徴と運転結果及び、1700℃級ガスタービンの要素開発研究の取組み内容、今後の予定について紹介する。

## 2. 改良F形/G形ガスタービンの技術的特徴と運転結果

現在まで、当社のF形ガスタービンは累計約380

万時間、G形ガスタービンは累計約50万時間の順調な運転実績を有している。さらに、最新の技術を適用しながら改良を継続的に行い、高性能化を図ってきている。最近適用した改良項目の技術的特徴と運転結果を以下に示す。

### 2.1 改良G形ガスタービンの技術的特徴

図2にG形ガスタービンに最近適用された改良技術項目を示す。これらの項目は、まず当社の長期実証設備M501Gに装着し、その性能・信頼性を検証後<sup>(1)</sup>、図2に示す発電プラント大型事業用ガスタービンに適用した。

#### (1) 起動時暖機翼環

G形ガスタービンでは燃焼器に蒸気冷却技術を採用している。この蒸気媒体を積極的に利用する事により、タービン部のクリアランス制御が可能となった。図3に代表例としてM701G2の場合の構造・システムを示す。燃焼器に通じるタービン翼環冷却通路に蒸気を流し、起動時タービン翼環側を暖める事により、クリアランスを広げ、負荷運転時には翼環側を蒸気で冷やす事によりクリアランスを最適化することにより、従来より運転時のクリアランスを最適化することができ、タービンの性能の向上が図れる。この起動時暖機翼環は当社の長期実証設備M501Gに2000年に装着され実機検証した。

#### (2) 改良1段動・静翼

空力及び冷却性能を向上させたG形改良1段動・

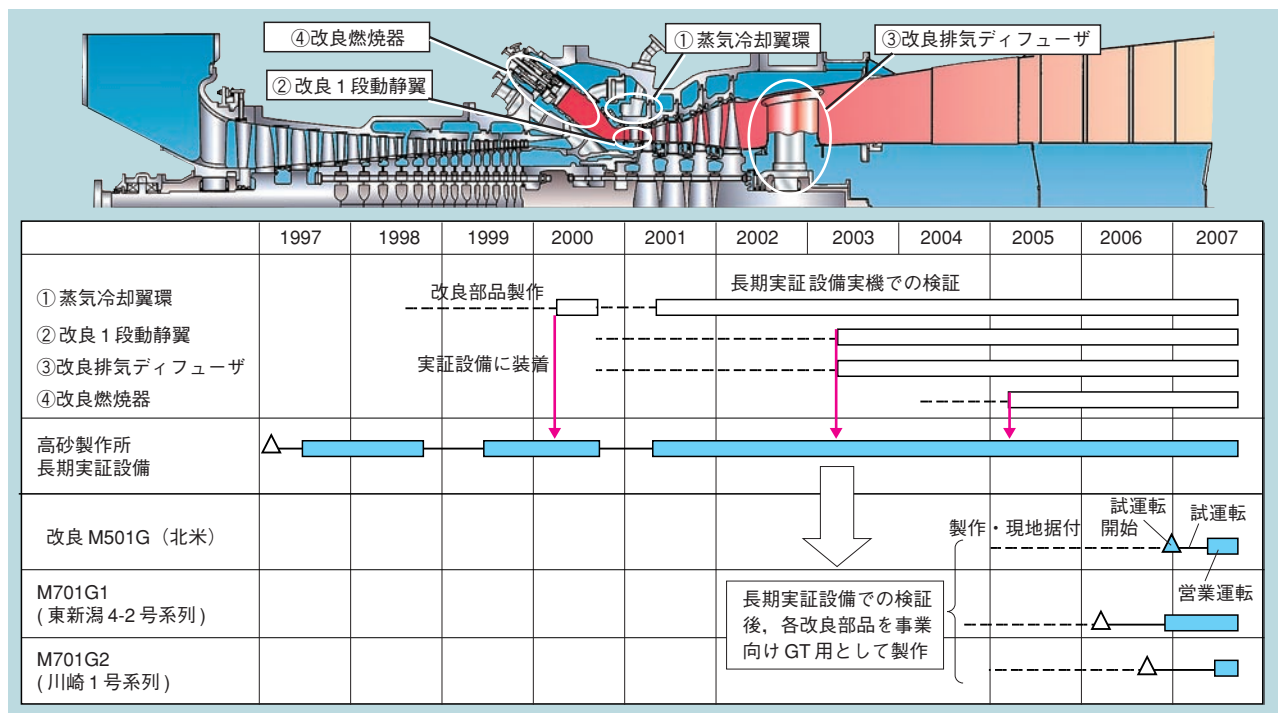


図2 改良技術項目と検証スケジュール

G形に適用した改良項目は当社の長期実証設備のM501Gに装着して検証した後、事業用ガスタービンにその適用を展開した。

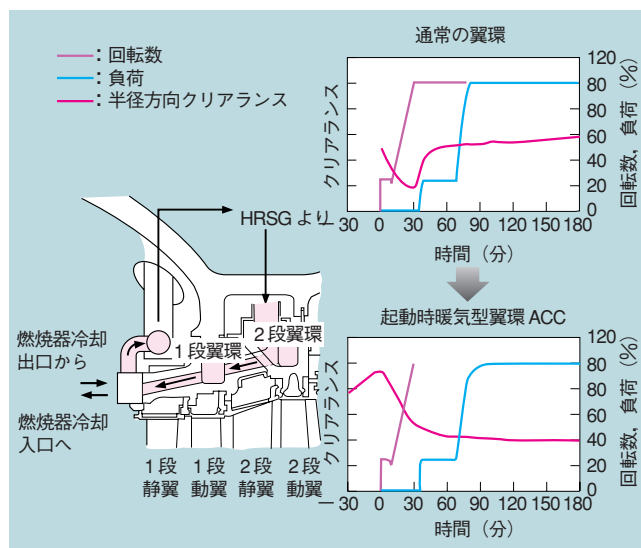


図3 起動時暖機翼環のシステムと構造

蒸気を通す事で、起動時は暖機でクリアランス拡大、負荷運転時には冷却で従来よりクリアランス縮小し、タービンの性能の向上を図る。

静翼を開発した。なお、材料は改良前と同じで1段静翼はMGA2400、1段動翼はMGA1400DSである。また、この改良1段動・静翼はこれまでの当社の設計思想と同じく、60Hz機と50Hz機でその基本寸法（翼形、翼高さ、コード長さ等）は共用化している。これらの改良翼は当社の長期実証設備M501Gに2003年に装着され実機検証した。

### (3) 改良排気ディフューザ

軸受け支持の役目の排気ストラットは、高温の排気ガスに曝され無いうようにストラットカバーで覆われているが、このカバー形状を図4に示すように翼形の形状に改良した。これにより排気ディフューザの空力損失が低減しタービンの性能が向上する。この翼形カバーは当社の長期実証設備M501Gに2003

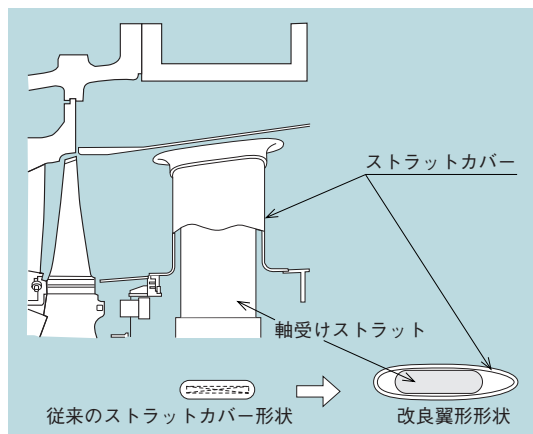


図4 改良排気ストラットカバー形状

翼形状のストラットカバーに改良する事で排気ディフューザの空力損失が低減でき、性能向上を図る。

年に装着され実機検証した。

### (4) 改良燃焼器

深刻化する地球環境の問題に対応していくために、当社は燃焼振動特性及び信頼性は維持しながら、更なる低NO<sub>x</sub>化を図った改良燃焼器を開発した。この改良燃焼器は当社の長期実証設備M501Gに2005年に装着され、その性能及び信頼性が検証された。

### 2. 2 F形ガスタービンへ適用した改良技術

F形については、高温部品の冷却効率の向上、より強度の高い材料と最新シール技術の適用により、タービン入口温度を1350℃から1400℃級に上昇させ高出力・高効率化を図った改良ガスタービンを開発し、既に市場に投入している<sup>(2)</sup>。更なる高性能化を図るため、G形ガスタービンで適用済のロータ冷却供給システム（Pre-Swirl ノズル）を適用した。このノズルは、回転中のディスクに供給される冷却空気に、予めディスクと同じ周速成分を与え、静止系から回転系に導入する時の損失（ポンピングロス）を低減させ、性能を向上させるもので航空エンジンでは既に適用されている技術である。このPre-Swirlの適用に当たっては、要素試験を実施してその流量特性、圧力分布を確認の後<sup>(3)</sup>、実機に適用した。

### 2. 3 改良ガスタービンの運転実績

50 Hz機の改良M701G1 ガスタービンは東北電力（株）東新潟火力発電所4-2号系列に設置され、2006年4月に試運転を開始し、2006年12月に運開した。試運転中には起動時暖機翼環、改良燃焼器・改良タービン翼等の改良項目に対して特殊計測を実施して、許容値以下であることを確認しその信頼性を検証した。また、改良燃焼器の採用により、すべての負荷帯において安定した燃焼特性で、従来型の燃焼器が適用されていた4-1号系列に比べてNO<sub>x</sub>も低減されていることを確認した。

M701G2 ガスタービンは東京電力（株）川崎火力発電所第1号系列（1軸コンバインドプラント×3）に設置され（図5）、初号機である第3軸が、2006年10



図5 川崎火力発電所1号系列第3軸

M701G2 ガスタービン初号機は東京電力（株）川崎火力発電所1号系列第3軸に設置され、順調に試運転を完了させた後、2007年6月に運開した。

月に試運転を開始し、2007年1月に定格の500 MW 到達、保証性能を満足した事を確認後、2007年6月に運開した。試運転中には起動時暖機翼環、改良燃焼器・改良タービン翼などに対し各種確認計測を実施し、設計予想どおりの良好な結果である事を確認した。

60 Hz 機の改良 M501G ガスタービンは、当社の長期実証設備で十分に検証された後、事業用として最初にアメリカ西海岸北部のポートウエストワードに納入された。2007年1月に試運転開始し、性能及び NOx 値などは保証値を十分満足する事を確認し、2007年6月に運開した。

改良 F 形ガスタービンは最初にスペイン中部のカステルノに設置され、2006年1月より試運転を開始し、2006年8月に運開した。上述の Pre-Swirl ノズルについては、現地で圧力・温度分布及び冷却空気量を特殊計測し、その性能と信頼性を確認した。

いずれの機種の改良ガスタービン共、試運転中にその性能及び信頼性は従来型に比べて向上したものである事が確認され、ユーザであるお客様から高い評価をうけ、現在も順調に運転中である。

### 3. 1700℃ガスタービン要素開発研究状況

地球温暖化問題の深刻化が叫ばれる中、CO<sub>2</sub> 排出量削減の要求は近年更に高まっている。CO<sub>2</sub> 排出量の1/3は発電によるもので、発電プラントの大幅な高効率化が CO<sub>2</sub> 排出量削減に有効で、例えば、125 万 kW の石炭火力を 1700℃ 級ガスタービンのコンバインドプラントに置き換える事で日本の CO<sub>2</sub> 総排出量の 0.4 % の削減が可能となる。これは図 6 に示すように、タービン入口温度が 1700℃ 級では熱効率 62% - 65% の達成が可能となるためである。

当社は、現行のガスタービンを更に高温・高効率化

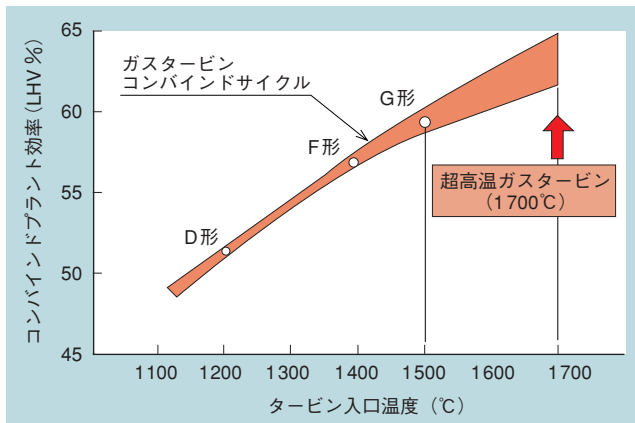


図6 タービン入口温度とコンバインド効率  
D 形→F 形→G 形とタービン入口温度上昇に伴い、コンバインド熱効率は向上していき、1700℃ 級では、熱効率 62% - 65% の達成が可能となる。

し、この地球温暖化防止に貢献すべく、国家プロジェクトである 1700℃ 級ガスタービンの開発に参画している<sup>(4)</sup>。本プロジェクトは、1700℃ 級ガスタービンで必須となる、燃焼器、コーティング、タービン翼、圧縮機、耐熱材料の要素技術開発を 4 年間で行っているもので現在までに得られた主な成果の一部を以下に簡単に述べる。

#### 3. 1 燃 焼 器

1700℃ 級ガスタービンの開発では NOx 対策面で排ガス再循環システムの導入と新コンセプトの燃焼器が必要となる。部分負荷時には予混燃焼モード、定格負荷時は拡散燃焼モード（リッチ・リーン燃焼）とする事により全負荷範囲にわたり低 NOx 燃焼が可能となる新コンセプトの燃焼器を設計・試作し、大気圧 1700℃ 燃焼試験を実施した。この試験では排ガス再循環を模擬するため、低酸素空気を使用している。図 7 に大気圧燃焼試験結果を示す。実圧に換算した NOx は目標 NOx 50 ppm 以下で、新コンセプト燃焼器と排ガス再循環の組み合わせの 1700℃ 級燃焼器の実現可能性が確認された。

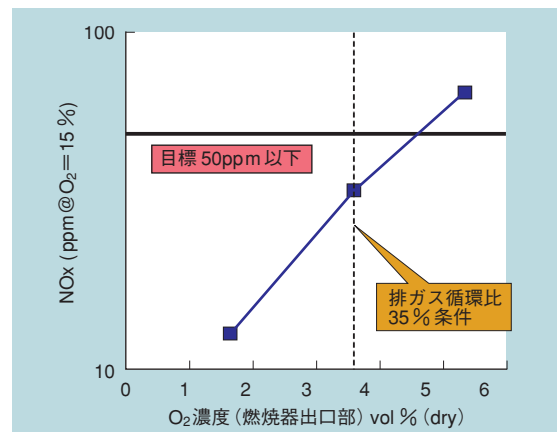


図7 新コンセプトの燃焼器の大気圧燃焼試験結果  
新コンセプト予混・拡散燃焼を試設計して製作、大気圧燃焼試験を実施し、排気再循環の条件で目標 NOx 50ppm 以下の実現性が確認できた。

#### 3. 2 タービン

1700℃ 級ガスタービン開発のためにはタービン冷却技術、遮熱コーティング技術、耐熱材料技術は不可欠である。本国家プロジェクトでは、高性能フィルム冷却の開発、低熱伝導率遮熱コーティングの開発、及び耐酸化性及び高温クリープ強度・熱疲労強度に優れ、かつ良好な鋳造性を兼備する合金の開発などを進めているが、以下に現状得られている結果の一部を示す。

図 8 に最新の遮熱コーティングの熱伝導率の計測結果を示す。新開発の遮熱コーティングは従来の YSZ に比べて約 20 % 低い事が確認されている。

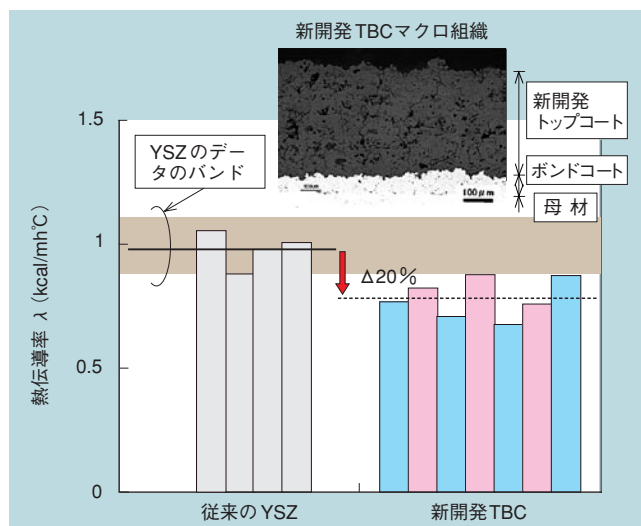


図8 新開発遮熱コーティングの熱伝導率の計測結果  
1700℃級ガスタービンの実現のため新開発中の遮熱コーティングの熱伝導率は従来に比べて20%低い事が要素試験で確認された。

1700℃級ガスタービンでは空力設計条件が極めて厳しく圧力比が従来の1.5倍以上に、空力負荷係数は従来比約1.3倍となる。従来技術では効率が低下してしまうため、新コンセプト翼を開発した。高負荷翼に適した三次元エンドウォールのコンセプトを立案し、その空力損失の低減を高速回転翼列試験で確認した(図9)。

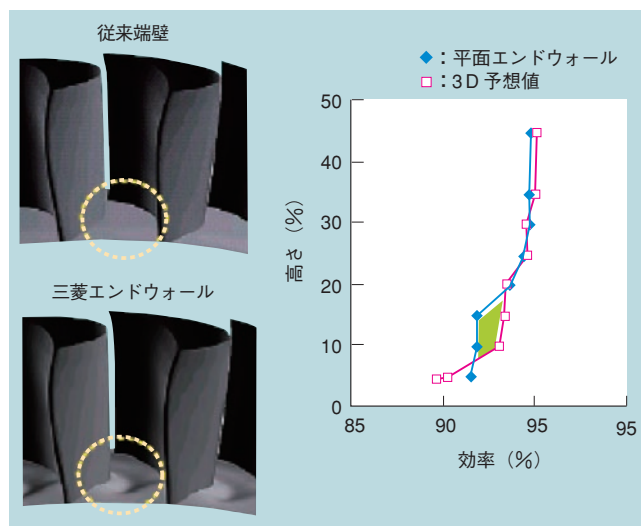


図9 三次元エンドウォールの形状とその効果  
従来より空力負荷が高い条件で2次流れ損失を低減する先進三次元エンドウォールの効果を回転翼列試験で確認した。

### 3.3 圧縮機

1700℃級ガスタービンの高圧条件化において効率で圧力比25の既存設計を上回ると共に、段数を最小限に抑えることの出来る圧縮機を開発する必要がある。新三次元形状による2次流れ制御、負荷配分制御

によるフリクションロス低減をコンセプトとした亜音速翼列を設計し、高速回転翼列試験でその効果を確認した。図10に示すように、計測された効率はCFDによる予測値より約1%高く良好な結果が得られた。

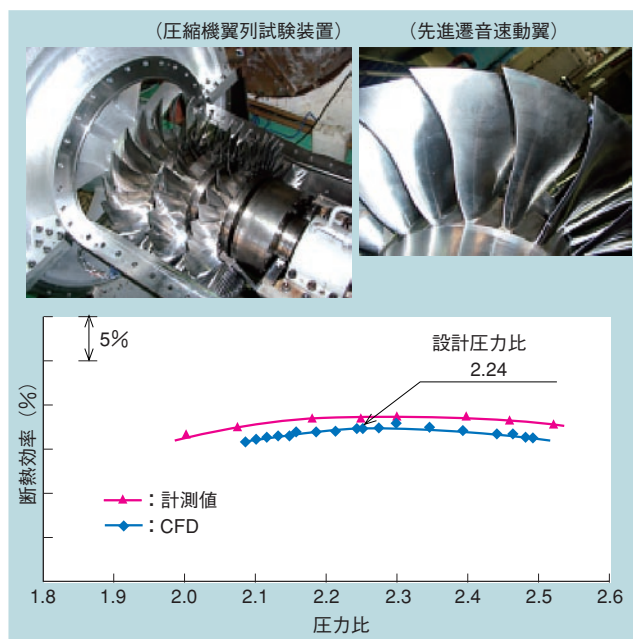


図10 新コンセプト遷音速翼列の衝撃波計測結果  
新コンセプトの遷音速翼の翼列試験を実施し、効率はCFDの予想よりも約1%高い事が確認された。

## 4. まとめと今後の展望

省エネルギー及び低公害化の観点から、ガスタービンの高温化・高性能化は今後も重要な課題となる。

当社はF形/G形ガスタービンに継続的に改良を行い、改良項目については、まず当社の長期実証設備のM501G形で実機検証した後、事業用ガスタービンに展開するという着実な検証手法で進めてきた。近年、これら改良ガスタービンを設置したコンバインドプラントが国内外で着実に運転実績を上げ、地球環境により優しいエネルギー源を社会に提供できたと考える。

また、当社は将来更に大きな効率向上を図るため、1700℃級超高温ガスタービンの国家プロジェクトに参画し、要素技術開発研究の成果を上げてきている。

これらの要素技術は既存のF形/G形にも適用できると考えられ、今後並行して検討し、既存ガスタービンの性能向上を図り、より地球に優しいエネルギー源の提供に貢献していく予定である。また、1700℃級ガスタービンの開発研究は今後も継続的に検討を進めるが、これらの実機適用に当たっては実機レベルでの検証が不可欠で、その実現のためには、今後も行政・電力業界メーカーが一体となった取組みが重要となると考える。

参 考 文 献

- (1) Arimura, H. et al. Upgraded M501G Operating Experience, ASME-GT2005-69135
- (2) Tsukagoshi, K. et al. 501F/701F Gas Turbine Uprating, ASME GT2001-0553
- (3) Laurello, V. et al. Measurement and Analysis of an Efficient Turbine Rotor Pump Work Reduction System Incorporating Pre-Swirl Nozzles and a Free Vortex Pressure Augmentation Chamber, ASME-GT2004-53090
- (4) 塚越ほか, 1700℃級ガスタービンの要素技術の開発, 三菱重工技報 VOL.44 No1 (2007) p.2



塚越敬三



六山亮昌



正田淳一郎



岩崎洋一



伊藤栄作