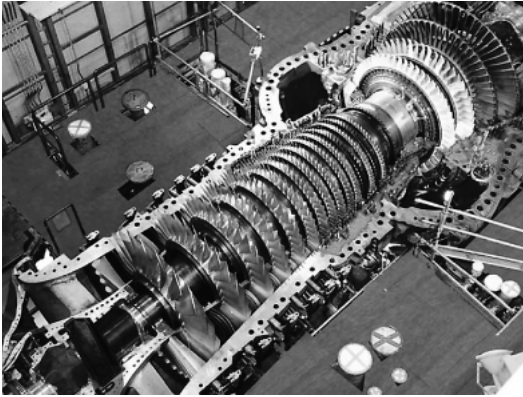


大容量ガスタービンの最新技術動向

Latest Technology Development of Large Frame Gas Turbine

福泉靖史 潮成弘 有村久登
馬越龍太郎 内田澄生



大型事業用のガスタービンの開発は、冷却技術、材料技術などの要素技術を中心とした高温化技術によって発展してきた。当社では1990年初頭よりタービン入口温度1500級ガスタービンの開発に着手し、1997年にG形ガスタービンの商業運転開始に結実した。また、タービン翼を蒸気冷却式としたH形ガスタービンは2001年に全負荷運転に成功した。ここでは、大容量高効率ガスタービンの開発を支える要素技術開発の紹介、実機での技術適用の実績を紹介し、技術開発の将来動向を展望する。

1. はじめに

LNGを燃料とする大型の事業用ガスタービンは、1980年代初期から日本の火力発電設備の主機として活躍を開始して以来、エネルギー消費の低減、排出ガスの低公害化に大きく貢献してきた。

当社では、1981年のタービン入口温度1150級D形(M701D)ガスタービン、1989年の1350級F形(M501F/M701F)ガスタービンの開発に続き、回収形蒸気冷却燃焼器を採用したタービン入口温度1500級G形(M501G/M701G)ガスタービンを開発し、60Hz市場向けM501Gは、1997年から当社高砂製作所内のガスタービン複合プラント実証設備(以下T地点)にて、50Hz市場向けM701Gは東北電力(株)

東新潟火力発電所4号系列にて1999年から順調に商業運転を行っている。また、更なる高効率化を推し進めるために、タービン翼に回収型蒸気冷却を採用したH形ガスタービンを開発し、T地点にて2001年3月にプラント全負荷試験に成功した。

これら事業用大容量ガスタービンについて、技術開発変遷と運転実績について述べるとともに、今後の技術動向に関して言及する。

2. 大型ガスタービンの要素技術開発

図1は開発技術の年代ごとの変遷を示している。大型ガスタービンの性能向上の中心は、燃焼ガス的高温化であり、その推進役となったのはNi基を中心とする耐熱材料の開発と、

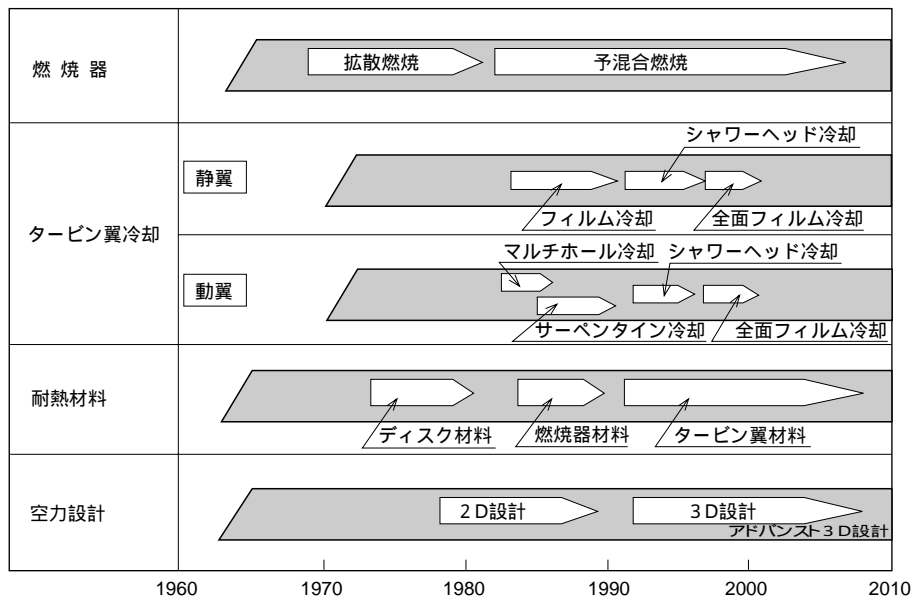


図1 要素技術開発の経緯

冷却技術の向上である。

また、低公害化も時代の重要な要求となり、高温燃焼によるNOxの発生を抑える予混合燃焼の技術が1980年代より急速な進歩を遂げた。

そのほかにも、タービン及び圧縮機の翼における空力的な損失を低減させるため、CFD (Computational Fluid Dynamics) 等の計算ソフトウェアによる三次元設計の進歩が顕著である。

以下に、大容量・高温ガスタービンの各要素技術について、G形ガスタービンに採用されている技術を代表にして解説する。

2.1 燃焼器技術

NOxの発生は、燃料中の窒素化合物により発生するフューエルNOxと、高温燃焼により発生するサーマルNOxとに分類され、LNGを主力燃料とした大容量ガスタービンでは、後者のサーマルNOxの低減が重要になる。サーマルNOxの低減対策には高温領域の形成を防ぐことが有効であり、当社では燃料希薄予混合燃焼の開発を他社に先駆けて行い、ガスタービンとして世界で初めて1984年にD形 (M701D) において実用化した。

その後F形 (M501F/M701F)、G形 (M501G/M701G) と燃焼温度の上昇に伴い進化させてきているが、1500級のG形においては世界で初めて回収型蒸気冷却を採用した。図2は、F形クラスとG形クラスの燃焼器の比較である。

G形クラスで採用した世界初の回収型蒸気冷却の基本設計概念は、F形クラスとほぼ同等の火炎温度を保ちながら、燃

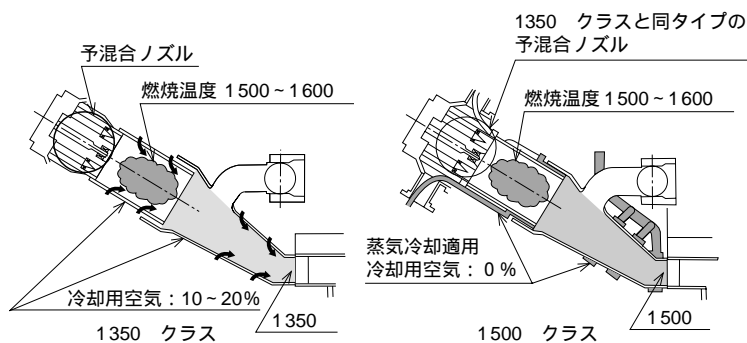


図2 予混合燃焼器

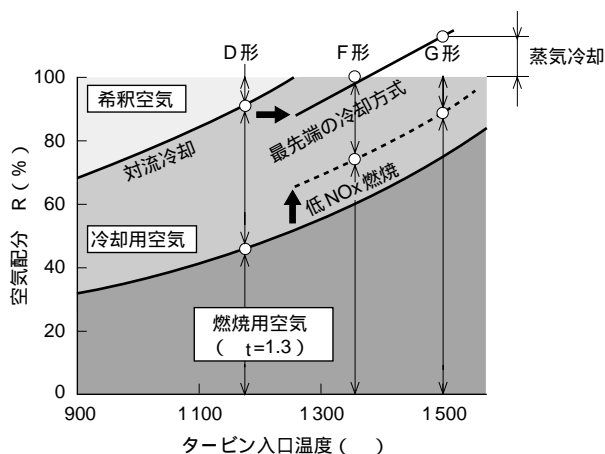


図3 タービン入口温度と燃焼器内空気配分

焼器下流での冷却空気の混入を防ぎ、より高温のガスをタービンに導入して高効率化を図ろうというものである。

図3は、空気の利用率と燃焼温度の関係を示すものであるが、回収型蒸気冷却により、F形と同等の低NOx性能を保ちながら、冷却を一部蒸気で肩代わりさせていることが分かる。

2.2 タービン翼冷却技術

D、F、G形とタービン入り口のガス温度の上昇に伴い、冷却技術も進歩してきた。3シリーズ共に、空冷翼を採用しており、特にG形ガスタービンの第1段動静翼には最新冷却技術、全面遮熱コーティング (TBC: Thermal Barrier Coating) 等を採用し、図4に示すとおり従来機並のメタル温度を維持している。

第1段静翼は3インサート構造とし、インピンジメント冷却による内部冷却や、シェイプトフィルム冷却吹出し孔による全面膜冷却を開発・実用化した。第1段動翼はサーペンタイン式冷却通路構造及び斜めタービュレータを採用するとともに、翼面には第1段静翼と同様にシェイプトフィルム冷却による全面膜冷却により冷却性能を高めた (図5)。

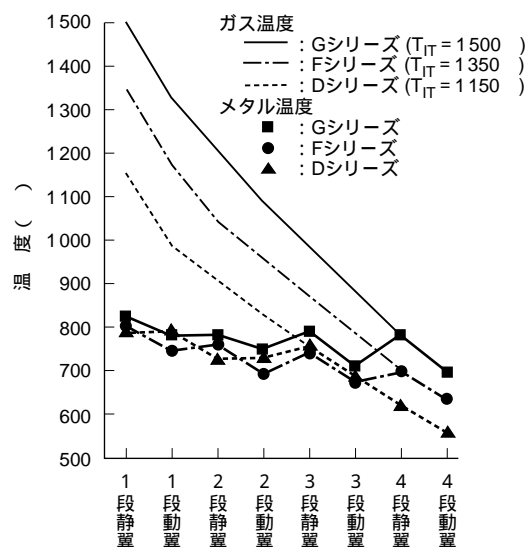


図4 ガス温度・翼メタル温度

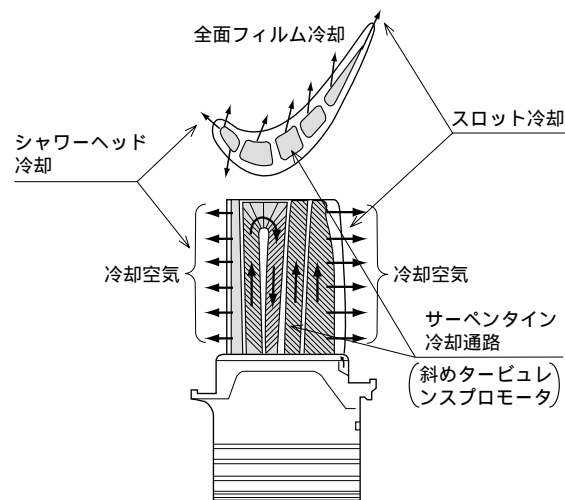


図5 G形ガスタービン第1段動翼

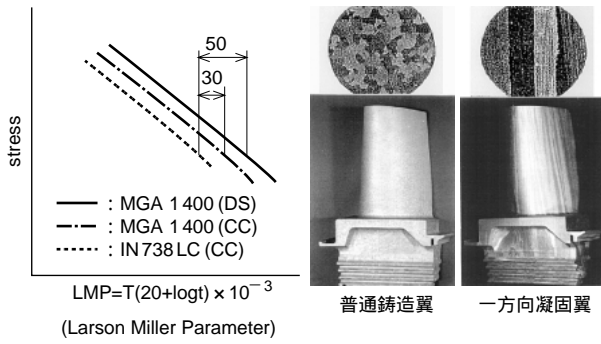


図6 タービン翼材料比較

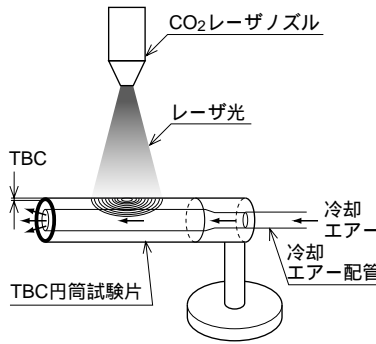


図7 CO₂レーザー熱サイクル試験

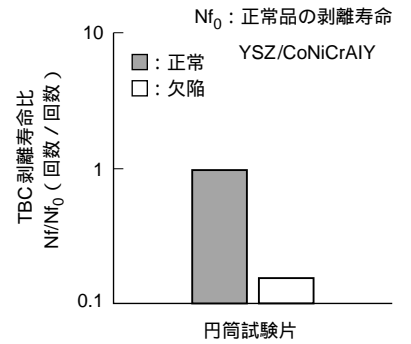


図9 熱サイクル寿命

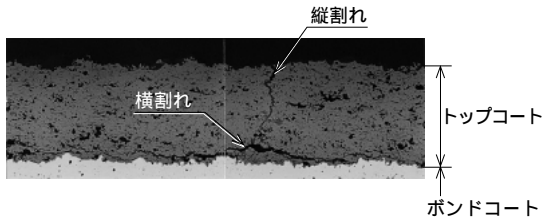


図8 試験後の断面マクロ組織

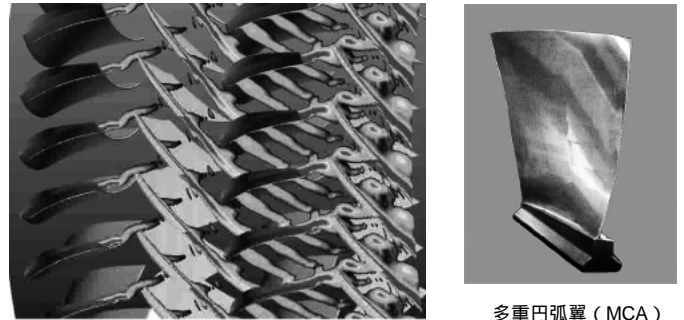


図10 非定常多段流動解析によるエントロピー分布

2.3 耐熱材料技術

冷却技術とともに重要なものが、耐熱材料の進歩である。耐熱合金にはFe基、Co基、Ni基など主成分による分類があり、製造法によっても鍛造、鑄造などの違いがある。現在は、複雑な冷却通路を形成するために精密鑄造による翼の製作が主流となっており、鑄造過程での結晶制御（一方向凝固，単結晶）により強度を高めている。当社においても、従来材料よりさらに高温強度を高めたNi基超合金を開発した。

特に静翼材料には、溶接性を改善したMGA2400を採用した。第1，2段動翼には、クリープ強度や熱疲労強度を高めるため、一方向凝固材（DS：Directionally Solidified）のMGA1400DSを適用した。これにより、従来材のIN738LC（普通鑄造翼）に比べて、クリープ破断強度はメタル温度換算で約50 向上した（図6）。

2.4 遮熱コーティング技術

耐熱材料とともに重要なものが、コーティング技術の進歩である。TBCを高温部品に適用することで、冷却空気量低減によるプラント高効率化とメタル基材の温度上昇を防ぐことができる。一方、TBCは品質や使用中の劣化に伴う耐久性の変化幅が大きく、TBCの耐久性、密着力評価技術が重要である。

TBC界面近傍での密着力評価試験では、TBCを施工した円筒形の試験片にCO₂レーザーを一定周期で照射する熱サイクル試験（図7）を行う。試験を通じて、TBC施工品質の悪いものは、界面近傍での横割れ（図8）発生限界ひずみが低く、かつ進展速度が速まる傾向となり、結果として熱サイクル耐久性が低下する（図9）。この検証方法は、コーティング施工法及び品質評価に適用されている。

2.5 空力設計技術

大容量化，高圧力比化，高効率化を達成するために，G形の圧縮機翼形については，前方段にはMCA（Multiple

Circular Arc）翼を採用し，中間段以降にはCDA（Controlled Diffusion Airfoil）翼を採用して損失の低減による高効率化を図った。

後述する蒸気冷却方式の採用により，タービン翼の冷却空気が従来の空気冷却式ガスタービンに比べて大幅に削減されるため，同じ圧力比ではタービン排ガス温度が高くなる。このためH形ガスタービンでは，圧力比をG形の20から25へ上昇させ，排ガス温度をボトムリングサイクルの設計に合わせて従来並みとした。圧縮機は三次元多段粘性解析コードを用いて設計された三次元スキュー翼を採用し，従来よりもワイドコード・低アスペクト比で，各段での負荷を増加することで，段数を減少させた高効率圧縮機を新規に開発した。前方段はMCA翼であり，遷音速域での衝撃波の発生を抑制する設計とし，中間及び後方段にはCDA翼を用いて境界層の流れをコントロールし，高い効率を達成した。

また，最新技術としては，これらの翼列の最適設計のために，非定常多段流動解析を通じて，上流翼の後流流れが下流翼へ伝播し干渉する損失を評価している（図10）。

タービン翼については，タービン入口温度の上昇に伴う負荷増加に対応できる高負荷・高性能の4段軸流形タービンで設計している。タービン翼形は，1150 級ガスタービンの二次元設計から進化させ，1350 級ガスタービンで三次元設計を採用しているが，G形では更に翼形を半径方向に曲線的に重ね合わせた完全三次元設計翼を採用し，翼壁面付近で発生する2次流れ損失の低減を図った。

また，冷却空気の漏れ込みを考慮し，動翼・静翼を連ねた複数段のモデルによる，多段粘性流動解析によりガス流路の最適化を行い，全体性能を向上している（図11）。

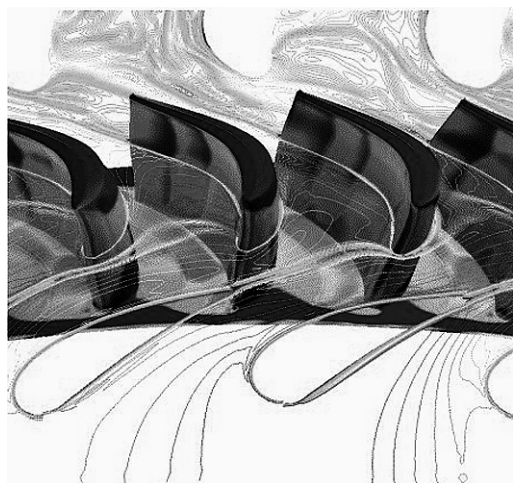


図11 多段流動解析による流路最適化（ガス温度分布）

また、これらの多段翼解析による圧縮機列、タービン翼列の設計では、翼ごとのFEMによる複雑な振動モードを含む高度な振動解析技術を通じて強度解析を行っている。

2.6 蒸気冷却に関する技術特徴

H形ガスタービンでは、タービン1段及び2段の動翼・静翼に蒸気冷却方式を採用している。排熱回収蒸気発生器で発生した高圧蒸気は高圧蒸気タービンで仕事をした後、ガスタービンの蒸気冷却翼に送気して冷却に使用する。冷却後の蒸気は中圧蒸気タービン入口に回収される。主要な特徴を下記に示す。

- (1) 1500 級G形ガスタービンで既に採用している蒸気冷却式低NO_x燃焼器をH形でも採用した。
- (2) 4段軸流式タービン翼は、前方2段は蒸気冷却式、第3段は空気冷却式、第4段は無冷却である。動翼の冷却蒸気はタービン側の軸端から回転体内部へ供給され、同じく軸端より回収される。静翼の冷却蒸気は、静翼を支持するタービン翼環内部に設けられたマニホールドを介して各静翼へ均等に分配される。
- (3) 高温高圧の蒸気をシールする技術は、主要な蒸気冷却技術の一つである。シール部分の熱変形や摩耗によってシール性能が劣化するため、開発当初より多くの要素試験や実機検証試験を実施し最適なシール構造を採用した。

2.7 構造設計技術

各段ごとの動翼先端（チップ）と壁面との隙間（クリアランス）を、接触をしない範囲で詰め、動翼で仕事せずにリークする作動流体量を低減すれば、ガスタービンの高効率化につながる。しかし、起動時、停止時の車室側とロータ・動翼の回転系との非定常の熱延び差による変化量を把握しなければ、安全にクリアランスを詰めることができない。

そこで、起動、停止を含む非定常での車室、ロータの熱延び解析を通じて動翼の過渡的なチップクリアランスを把握し、最適なロータ、翼環系の設計を行う（図12）。

これにより、G形最新型のガスタービンでは、蒸気暖機によりタービン第1、2段翼環の熱伸び制御を行い、ガスタービン起動時に動翼チップ部クリアランスを制御する起動時暖

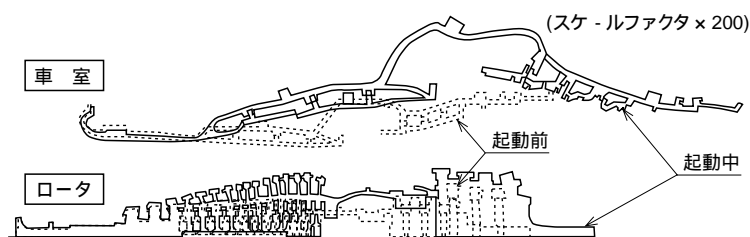


図12 非定常変形解析

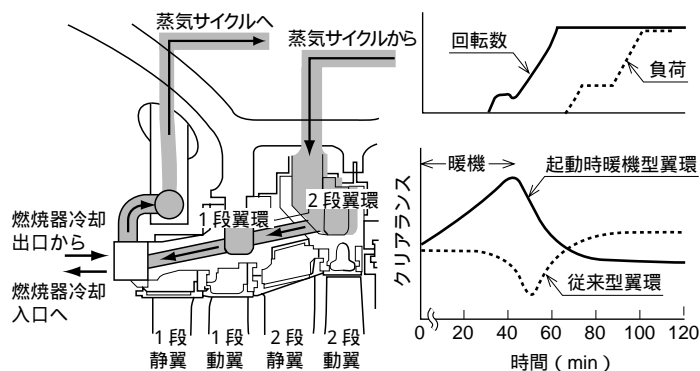


図13 起動時暖機型翼環

気型翼環構造 ACC (Active Clearance Control) を設計・採用した（図13）。

3. 運転実績

現在T地点実証設備では60 Hz機のM501G形ガスタービンが、また東北電力(株)東新潟火力発電所第4号系列では、50 Hz機のM701G形ガスタービンが営業運転中である。また、海外では、フィリピンでのM501G形ガスタービンが商業運転に入り、アメリカでのガスタービンが試運転中である。

一方、H形ガスタービンは、タービン部の部品冷却に使用している空気を削減し、タービン熱落差を理想的なサイクル線図に極力近づけることにより、熱効率のさらなる向上をねらった最新型の大容量ガスタービンで、1999年に実負荷運転に成功した。

以下にこれらガスタービンの運転実績を述べる。

3.1 G形ガスタービンの運転実績

T地点実証発電設備は、1997年1月にM501Gでの試運転を開始、同年6月に長期実証試験を開始した。

T地点は長期検証試験を行いながら、発生電力は関西電力(株)に送電している。主として夏期の電力需要ピーク時に送電され、運転は基本的にDSS運転 (Daily Start and Stop) である。運開以来5年間で運転時間13000時間以上、発停回数730回に及んでおり、頻繁な起動停止の過酷な熱負荷条件で、M501G形ガスタービンの運用を検証している。

東北電力(株)東新潟火力発電所第4号系列は、M701Gガスタービンを主機としたプラント熱効率50% (HHV) 以上の大容量コンバインドサイクル発電プラントであり、1999年7月に運開した。以来、ベースロードを基本に運用されている。これまでに2度の開放点検を行い結果は良好で、2台のM701G形ガスタービンは各々23000時間を超える運転時

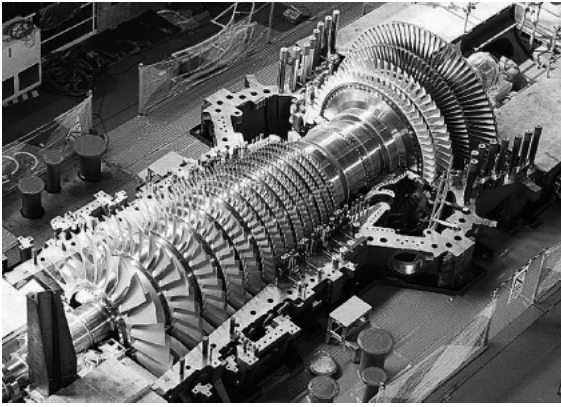


図14 M701G2形ガスタービンロータ

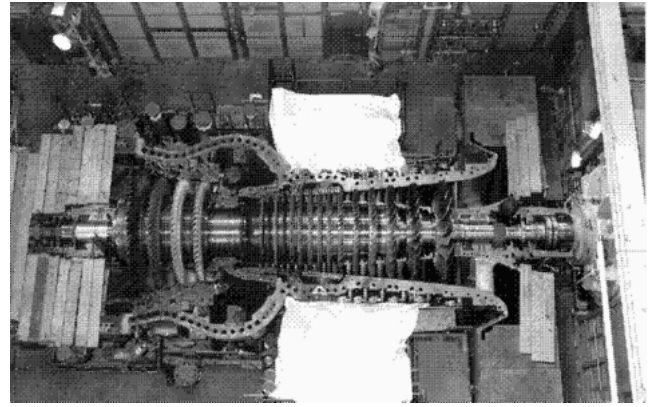


図15 M501H形ガスタービンロータ

間を記録している。

フィリピンのルソン島の KEILCO (KEPCO Ilijan Corporation) Ilijan IPP プラントは2台のM501G形ガスタービンと1台の蒸気タービンから成る2 on 1形式の別軸コンバインドサイクルプラントが2系列ある。各M501G形ガスタービンはガス、油のデュアル燃料焼き低NOx燃焼器を備え、2002年6月より商業運転に入り4台のガスタービン共に1800時間以上の運転時間を経験している。

また、アメリカでもM501Gによるコンバインドプラントが数プラント建設、試運転中で、既に全負荷到達して運転中のものもある。

3.2 G形ガスタービンの性能向上

G形の実績に基づき、M701G形の改良となるM701G2形ガスタービンを開発し、工場実負荷試験に成功した。図14に組立て中の実機を示す。

M701G2形ガスタービンは、実績のあるM701G形を基本とし、H形で開発した技術による高効率圧縮機及び起動時暖気型翼環構造ACCを採用した。これらの改良設計により、シンプルサイクルで効率39.5% (LHV)、出力334 MWが見込まれる。

M701G2形ガスタービンは、2002年5月に工場実負荷試験に成功した。1800点以上の特殊計測を行い、軸振動、油温度、スラスト力、圧縮機特性、チップクリアランス、高温部品メタル温度、全体性能などが予測値を満足することを確認した。

3.3 H形ガスタービン試運転結果

M501H形の第1次試運転は1999年2月に開始し、各種作動確認を順次実施後、同年5月6日に220 MW (GT160 MW, ST60 MW)の出力を達成し、高圧圧縮機特性及び蒸気システム(蒸気冷却翼冷却特性)の検証を目的とした第1ステップの運転を成功裏に完了した。

図15にタービンロータを示す。計測結果から、冷却蒸気のタービンロータ、動静翼への供給と冷却性能を確認でき、試運転では、約1500点の特殊計測を実施した。例えば、蒸気冷却翼では400点以上の特殊計測を行った。図16にその結果を示す。波線はタービン入口温度に対するメタル温度の予測で、計測結果はこれに一致した。

第2次試運転では2000点を超える特殊計測を行い、ガス

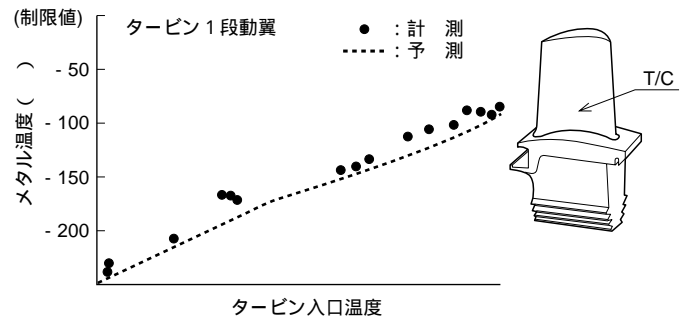


図16 タービン第1段動翼メタル温度

タービンの性能・信頼性を検証した。運転は2000年12月から2001年3月にかけて実施し、蒸気冷却部暖機試験、起動昇速試験、無負荷定格速度運転、冷却蒸気切替え試験、併入・負荷変化試験等を行い、T地点プラント全負荷出力330 MW (GT225 MW, ST105 MW)での負荷試験に世界で初めて成功した。また負荷試験終了後に負荷遮断テストを実施し、プラントの動特性のデータ採取を行い、システムの健全性も確認した。

4. ガスタービンの将来技術展望

地球環境の保全のために、化石燃料の利用は最小限にしなければならない。今後も高効率発電の社会的要求は強くなる一方で、熱効率の高いガスタービン発電技術への期待は大きい。

一方、地球環境のために、エネルギーを有効利用する燃料多様化も一つの開発分野である。また、先進国では昼間・夜間の電力需要差の拡大が顕著であり、運用がフレキシブルでしかも高効率・経済的な発電所が待望されている。

これらのニーズにこたえるべく、ガスタービンの将来技術も大きくは3つの開発分野に分類できると見ている。

1つ目は、更なる高温化・高効率化であり、1500℃を实用化したガスタービンの技術を更に進化させるためには、新たな材料、コーティング及び冷却技術の開発、低NOx化など解決しなければならない課題がある。

2つ目は、産業から付随的に発生する発熱量の低い燃料の有効利用で、これまで、製鉄所の高炉ガス焼きガスタービンなど実用化されたものはあるが、応用範囲は今後、残渣油

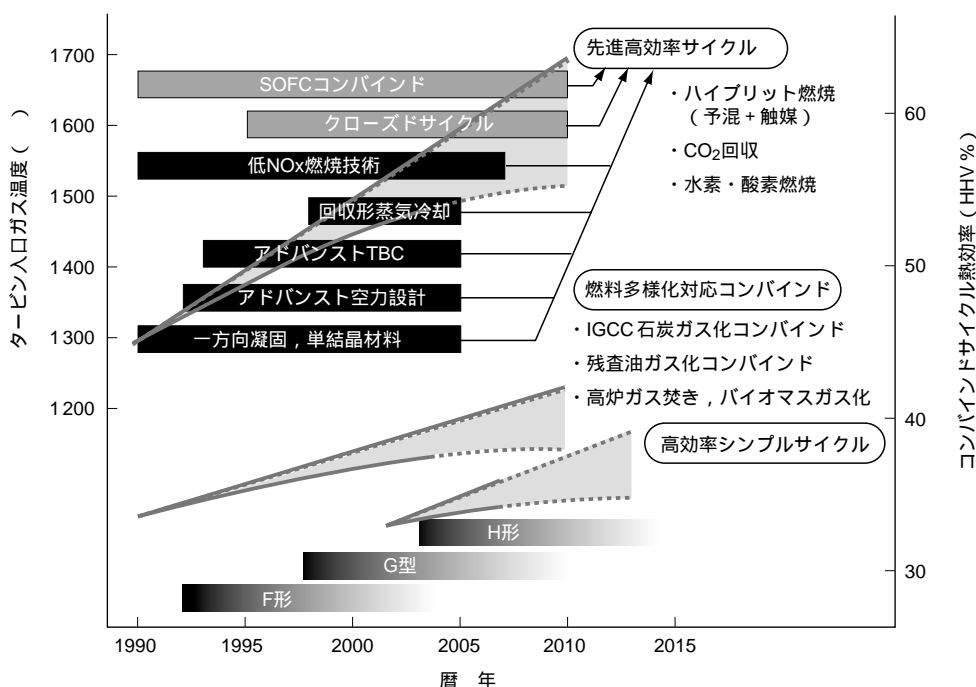


図17 ガスタービンの将来展望

ガス化ガス，廃棄物生成ガス，バイオガスなど広がっていくものと考える。

3つ目は，先行き不透明な経済状況にもマッチした短期間で建設可能な，高効率シンプルサイクルガスタービンである。建設費の比率の高いボトムサイクルを廃し，単独で短時間に出力増加の可能なシンプルサイクルは，今後老朽火力のリプレースとしても，経済的な選択肢となりうる。高圧力比で高効率，かつ信頼性が高く，扱いやすい航空エンジン技術と融合した究極のエンジンとなる。

これら3つの分野に共通して，要素効率向上，高温化，低公害化の技術は今後も発展を継続して行く予想する（図17）。

5.まとめ

ガスタービンの高温・高効率化によりコンバインドサイクル発電プラントの総合熱効率は大幅な向上が可能となる。LNG 焚きのコンバインドプラント発電設備は，その卓越した熱効率でCO₂の発生が他の化石燃料を利用した発電より少なく，例えば石炭焚きのコンベンショナルの発電設備に比べ，CO₂排出量は約半分であり，地球温暖化対策の切札として世界的に注目されている。また，低NO_x化等の燃焼技術の進歩により，その他の排気排出物も少なくクリーンな発電であり，次代を担う高効率大容量発電の鍵を握っている。

そのような観点から，さらなる高効率を実現できる，より高性能なガスタービンの開発ニーズは高い。

さらには，天然ガス焚きの分野のみならず，ガスタービンを利用したエネルギーの有効利用の社会的ニーズは大きく，今後もより高い効率を実現するため，新材料の開発，圧縮

機・タービンなど要素効率の向上など，研究開発努力を続けていく。

参考文献

- (1) A. Maekawa, E. Akita, et al., LONG TERM VERIFICATION RESULTS & RELIABILITY IMPROVEMENT OF M501G GAS TURBINE, ASME-GT-2002-30162
- (2) A. Maekawa, K. Uematsu, E. Ito et al., DEVELOPMENT AND TRIAL OPERATION RESULTS OF STEAM COOLED M501H GAS TURBINE, POWER-GEN-2001-9. A.
- (3) 梅村，1500 級501G ガスタービンの開発，三菱重工技報 Vol.34 No.4 (1997) p.226-229
- (4) 金子，鳥越，産業用ガスタービン遮熱コーティングの信頼性向上技術，GTSJ 定期講演会論文集 (2003.6)



福泉靖史
原動機事業本部
タービン技術部
ガスタービン技術課
長



潮 成弘
原動機事業本部
タービン技術部
ガスタービン技術課



有村久登
高砂製作所
タービン技術部
主席



馬越龍太郎
高砂製作所
タービン技術部
主席



内田澄生
技術本部
高砂研究所
ターボ機械推進研究
室長