

1500℃級ガスタービンの技術的特徴と運転実績

三菱重工業株式会社

ガスタービン技術課

藤岡 昌則

1. はじめに

世界的な地球環境に対する関心が高まる中で、CO₂ 排出量の低減対応としてエネルギーの有効利用が一層強く求められており、優れた総合熱効率を持つ複合火力発電（以下、コンバインドサイクルプラントと称する。）技術が広く利用されている。

コンバインドサイクルプラントは火力発電プラントの中でも熱効率が高く、さらに予混合燃焼の技術が確立し、窒素酸化物（NO_x）等のエミッションを低く抑えることが可能となった為、脚光を浴びている。こういった状況の下、当社はタービン入口温度 1150℃級のD形ガスタービン、及び1350℃級のF形ガスタービンを開発してきた。これらのガスタービンのコンバインドサイクルプラントにおける高い性能や信頼性は、実機の運転実績により証明されている。図-1は、ガスタービンの高温化のトレンド、図-2はガスタービンの入口温度とコンバインドプラントの熱効率を示す。

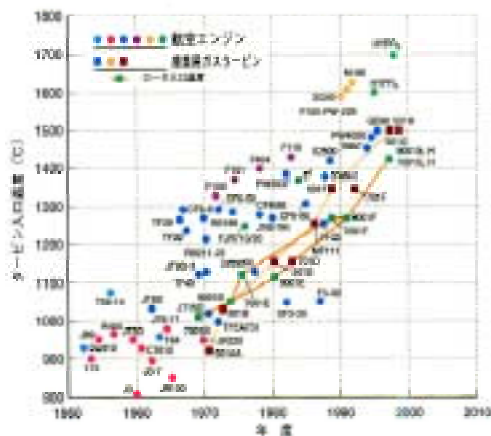


図-1 ガスタービンの高温化のトレンド

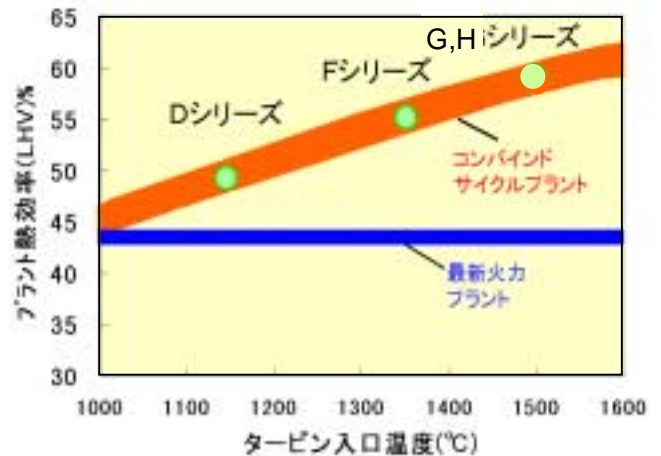


図-2 ガスタービン入口温度とプラント熱効率

図-2から、コンバインドサイクルプラントの熱効率は、ガスタービンのタービン入口温度に強く依存することが解る。

本稿では、タービン入口温度 1500℃級の発電用 M501G ガスタービンの技術的特徴と運転実績について紹介し、21世紀の発電用ガスタービンについて展望してみたい。

2. 技術的特徴

当社はサイクル温度を 1500℃にまで上昇させた M501G 形ガスタービンを開発した。M501G は 60Hz 地区用に開発された発電用ヘビーデューティ形ガスタービンである。M501G の出力は、タービン入口温度 1500℃・天然ガス燃焼で 254 MW（ISO 条件）である。G 形ガスタービンの開発は 1990 年代初期に始まったが、大きく下記のコンセプトに基づいて設計されており、これにより高性能・信頼性を達成することができた。

- 1) F 形の実績ある基本構造を踏襲したこと。

- 2) 世界初の回収式蒸気冷却予混合燃焼器を開発し、空力・伝熱・材料設計に最新の技術が投入されたこと。
- 3) 産業用ガスタービンで培ってきた設計クライテリアをそのまま適用したこと。
- 4) 燃焼ガス温度が大巾に上昇しても排出NO_x及び高温部品のメタル温度がF形と同程度となるレベルに抑えたこと。
- 5) 高い信頼性を確保するため、量産開始の前に実証試験を実施したことである。

以下に、M501G形ガスタービンに適用された最新要素技術について詳述する。



図-3M501Gガスタービンに適用された最新技術

①.最新の圧縮機

圧縮機は高効率の軸流形である。

G形の圧縮機はF形に比べ大流量・高効率が求められるため、結果として高マッハ数の圧縮機となっている。この要求に応えるため、G形では前方4段の動翼にMCA翼（多重円弧翼）を採用し、5～17段動翼と全ての静翼にCDA翼（速度制御翼）を採用した。また最新の3次元空力設計が適用されている。

②.低NO_x蒸気冷却燃焼器

燃焼器の設計は、F形で実証されている低NO_xキャニュラー形予混合燃焼器をベースとしている。このF形の燃焼器は、タービン入口温度1400℃でNO_x排出濃度25ppm(O₂15%換算)を達成しているものである。

タービン入口温度1500℃でF形と同レベルのNO_x排出濃度とするためには、圧縮機吐出空気の一部を燃焼用空気として用い、燃焼器の冷却用に途中で希釈する形で燃焼器内部に混入する空気を削減する必要があった。このため、G形では燃焼器壁面冷却にクローズドループの蒸気を用いることとした。

③.高温タービン

タービン入口温度1500℃の条件下で、タービンのメタル温度を最小の冷却空気量で許容値以下に抑えることが、信頼性確保のために不可欠である。このために全面フィルム冷却、遮熱コーティング、新材料、一方向凝固翼等の最新技術が適用されている。

翼まわりのフィルム冷却効率の向上のため、冷却穴を扇状に加工したシェイプトフィルムや、動翼内部の乱流促進体付きサーペンタイン形状(蛇のような九十九折りの形状)の冷却空気通路の採用により伝熱特性の向上がはかられている。

これらの新技術はHTDU（高温タービン検証ユニット）を用いて、実運転条件を模擬して最終確認が行われた。HTDU設備は、M501Gの0.6倍スケールの動静翼で構成されたタービンで、G形の核を成す高温技術を検証する設備である。

④.材料

最新のガスタービンでは、最新の冷却技術とともに最新の耐熱材料が必要となる。このため動翼、静翼及び遮熱コーティング用の新材料を開発した。

動翼については、MGA1400と呼ばれる新材料を開発した。MGA1400はニッケルベースの超合金で、従来の鑄造翼と同様に一方向凝固翼としても用

いることができる。IN738LCの従来鋳造翼に比べ、MGA1400の一方方向凝固翼はクリープ強度にしてメタル温存相当で50℃高くなり、従来鋳造翼の場合でも30℃相当高くなる。現在一方方向凝固翼及び従来鋳造翼ともにG形に用いられている。

静翼については、MGA2400と称する新材料を開発した。MGA2400もニッケルベースの超合金で、高温クリープ強度と同様、熱疲労、酸化、高温腐食に対して高い耐性を持つ材料である。また溶接性も良いので補修して使うのに適している。

遮熱コーティングもまた、その遮熱効果の点で重要である。その耐久性・遮熱効果についてはMF61、MF111、MF221、M701D、M501F及びM701F等の当社の各機種で長期にわたって実機での運転実績を通じて、確認されている。

3. 長期間の運転実績

M501G形ガスタービンの実証設備として、当社高砂製作所内にM501Gを用いたコンバインドサイクル実証発電設備を建設した(図-4 参照)。M501Gの試運転は、1997年1月に開始され、試運転期間中は、1800点を超える特殊計測用プローブがガスタービン本体に取り付けられ、流れの特性、メタル温度、圧力、歪み、騒音、公害値等を全ての運転条件において計測した。又、冷却特性や部品の信頼性を含む全ての重要な特性について確認した。1997年6月末に、このコンバインドサイクル実証発電設備は、



図-4 高砂製作所コンバインドサイクル実証設備外観

通産省の認可を受け商用運転に入り、長期実証試験を開始した。この発電設備により発電された電力は、国内の電力会社の系統に送られている。2002年5月での累積運転時間/発停回数はそれぞれ13258時間/753回であり、長期に渡る信頼性が実証された。本プラントは主としてDSS(Daily Start & Stop)で運転されている。

4. 21世紀の発電用ガスタービン

エネルギー問題および地球環境の問題は、人類に課せられた重要な命題であり、省エネルギーおよび低公害に対応できる能力を持ったガスタービンエンジンは、今後も重要な役割を果たすと考えられる。

今後、プラント効率に大きく影響するタービン入口温度は、緩やかに上昇するものと予想されるが、高温化設計においては、低NO_x化燃焼器の開発が最も重要な要素になると考えられる。又、水素燃料をガスタービンに適用することが可能となれば、NO_xの増加を抑え、同時に地球温暖化の要因である炭酸ガスを排出せずにタービン入口温度を上昇させることができるため、最先端の高温化技術を駆使した1700℃級の水素燃焼ガスタービンの研究が進められており、プラント熱効率60%(HHVベース、LHVでは70%)の実現が期待されている。