LMG

1700℃級コンバインドサイクル発電用 ガスタービン要素技術の開発と今後の展開

Development of Key Technologies for the 1700 degC class Gas Turbine
Applied to Combined Cycle Power Plants and Future Plans

執筆者プロフィール

有村 久登
Hisato ARIMURA

- ◎1984年三菱重工業（株）入社、1997年より現部署にてガスタービン開発・設計に従事。
- ◎研究・専門テーマは、ガスタービンの性能・信頼性向上
- ◎正員、三菱重工業（株） 原動機事業本部 高砂製作所 ガスタービン技術部 主幹技師
(〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町 2-1-1 / E-mail : hisato_arimura@mhi.co.jp)

正田 淳一郎
Junichiro MASADA

- ◎1985年三菱重工業（株）入社、同年より現部署にてガスタービン開発・設計に従事。
- ◎研究・専門テーマは、ガスタービンの性能・信頼性向上
- ◎三菱重工業（株） 原動機事業本部 高砂製作所 ガスタービン技術部 次長
(〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町 2-1-1 / E-mail : junichiro_masada@mhi.co.jp)

1. はじめに

ガスタービンコンバインドサイクル発電プラントは、その主機であるガスタービンの高温・高効率化により、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。三菱重工業（株）（以下、当社）も1980年代初頭から天然ガスを主燃料とする大容量・高効率ガスタービンの開発を続けており、1997年にはタービン入口温度1500℃級（M501G/M701G）ガスタービンを開発し、長期運転実

績により高効率・高信頼性を確立してきた。

このような実績を背景に、ガスタービンコンバインドサイクルのさらなる高効率化を目指して、2004年度から国家プロジェクト「1700℃級ガスタービン要素技術開発」に参加し、ガスタービンの高温・高効率化技術を確立した。

この技術を活用して、当社はタービン入口温度が世界最高温度となる1600℃級のM501Jガスタービンを開発した。J形ガスタービンを主機としたコンバインドサイクル発電効率は60%（LHV基準）以上となり、従来型火力に比べて約30%の効率改善と大幅なCO₂削減が期待されている。

2. 1700℃級ガスタービンの要素技術開発^{(1)~(3)}

熱サイクルの最高温度を上昇させれば、熱効率は上昇し、現状のG形の1500℃級からさらに高温化した1700℃級

図1 排ガス再循環方式プラントイメージ

図2 排ガス再循環燃焼器

図3 NO_x 濃度計測結果 (1700℃条件)

ガスタービンでは、コンバインド熱効率は、62～65% (LHV) となる。国家プロジェクト「1700℃級ガスタービン要素技術開発」ではコーティング、冷却翼、燃焼器、タービン、圧縮機、耐熱材料の要素技術開発を実施した。また、タービン入口温度上昇に伴うNO_x生成量の増大を抑えるため、サイクルは排ガス再循環システム（排ガスの一部を外気と混合し圧縮機の吸気に導くセミクロード方式）を前提とした。

2.1 排ガス再循環方式燃焼器

排ガス再循環システムでは排ガスの一部を圧縮機の吸気に再循環させることにより、燃焼器内では低酸素雰囲気下で燃焼が行われるため、NO_x生成量を大幅に低減することができる。低酸素環境では保炎性の低下が懸念されるため、大きな保炎器を設け、保炎性に起因する燃焼振動の低減を図っている（図2）。1700℃燃焼試験は、酸素濃度と燃焼圧力をパラメータにして実施した。酸素濃度の低下に伴いNO_xは低減し、設計条件（排ガス循環比率35%）でNO_x = 45ppm@15%O₂となり、目標（50ppm）達成の目途が得られた（図3）。

2.2 タービン冷却

1700℃級ガスタービンではタービン翼は高温ガスにさ

計測結果

計測結果

図4 高性能フィルム冷却

らされ、耐久性維持のために十分な冷却が必要である。しかし、冷却媒体量が増大すると熱効率の低下につながるため、少ない冷却媒体量で目標冷却効率を達成できる冷却技術の開発が求められる。本プロジェクトにおいては、フィルム冷却効率の改良として、「突起付き深掘りシェイプ」を開発し、感圧塗料によりフィルム冷却効率を計測した。図4に示す計測結果から、突起付き深掘りシェイプは深掘りシェイプより冷却効率が16%向上した。

2.3 超耐熱材料の開発

1700℃級ガスタービンでは、高温クリープ破断強度・熱疲労強度および耐酸化性に優れ、かつ良好な鋳造性等を兼備する単結晶合金の開発が必要となる。当社は、物質・材料研究機構 (NIMS) 開発のNi基単結晶合金⁽⁴⁾TMS-82+、TMS-75をベースに、単結晶合金を開発した。

開発合金の高温材料強度特性評価において、図5に示すとおり、クリープ破断強度は既存単結晶合金CMSX-4より50～70℃優れており、また熱疲労寿命は、圧縮応力を重畳した試験を実施し良好な結果が得られた。開発合金は両特性共に優れており、開発目標を達成した。

2.4 遮熱コーティング技術

近年の高温ガスタービンにおいて、タービン冷却翼には

図5 クリープ強度特性と熱疲労特性

図6 開発焼結体の熱伝導率測定結果

遮熱コーティング (TBC: Thermal Barrier Coating) が適用され、ボンドコートに CoNiCrAlY を、トップコートに ZrO_2 系セラミックスを被覆し、メタル温度を低減している。1700℃級ガスタービンに対しては、さらに、遮熱性が優れ、耐熱温度の高いトップコートおよびボンドコートの開発が必要となる。

トップコートは低熱伝導率と低線膨張係数を目標に開発した。図6に示すとおり、開発焼結体 (ランタノイド添加 ZrO_2 セラミックス、複雑化合物セラミックス) の熱伝導率は、いずれも現用の YSZ (Yttria Partially Stabilized Zirconia) より低く、複雑化合物 TBC では YSZ より 20% 以上低い結果が得られた。熱サイクル試験では、複雑化合物セラミックス TBC は YSZ と同等の耐久性を示し、ランタノイド添加 ZrO_2 セラミックス TBC は優れた耐久性を示した。

また、ボンドコートは、さらなる高温下での耐酸化性、施工性、耐久性を目標に開発し、酸化特性を評価した。開発ボンドコートの TBC 界面酸化スケール生成厚さは現用

図7 高負荷翼の三次元エンドウォール効果

の CoNiCrAlY の半分であり、耐酸化性の改善が確認された。

2.5 高負荷・高性能タービン

1700℃級ガスタービンでは、高温・高圧力比のためタービン翼の空力負荷は従来比 1.3 倍と厳しくなるので、従来翼からさらなる高負荷条件での効率向上技術が必須となる。とくに高負荷翼ではエンドウォール部で生じる 2 次流れに起因する 2 次損失の増加が問題となる。従来翼のエンドウォール形状は周方向半径一定の流路面であったが、流れ場の干渉や翼前縁からの馬蹄渦の影響等を考慮し、高負荷翼ではエンドウォールで生じる 2 次流れを抑制する三次元エンドウォール形状を採用し、圧力損失を低減して空力性能改善を図った。この三次元エンドウォール翼と従来のフラット形状翼を高速回転翼列試験装置にて比較試験を実施したところ、図7に示すように、従来のフラット形状に比べて三次元エンドウォール形状では、壁面近傍での圧力損失が低減し、タービン効率が改善することを確認できた。

2.6 高性能圧縮機

高圧力高性能圧縮機を実現するため、前方段用遷音速翼列、および中・後方段用亜音速翼列の性能向上技術を開発した。

前方段動翼は、マッハ 1 を超える超音速流れとなり衝撃波の発生が主な損失源となるため、翼高さ方向の形状を三次元的に変化させて衝撃波を制御し、高圧力比で高効率となる翼形状を開発した。翼形状は最新 CFD (Computational Fluid Dynamics) で解析し、翼先端部の翼間衝撃波と、エンドウォールの干渉を考慮し、衝撃波の発生位置を最適化、損失を低減した形状とした。図8に示すとおり、翼形状は翼先端部分で前方に湾曲した形状となっている。本翼は 1/3 スケールの高速回転翼列試験装置にて、性能検証およ

図8 前方段遷音速翼型

び衝撃波の可視化計測を実施した。その結果、CFD解析の予測位置に衝撃波の発生が計測され、最適化設計が確認でき、従来翼より高圧力比で段効率が約1%向上する目途を得た。

中・後方段の流れは亜音速流れであり、翼形状を三次元的に変化させてエンドウォール部の2次流れを抑制しながら、主流部の摩擦損失を低減させた先進亜音速翼を開発した。開発翼は高速回転翼列試験で検証され、段効率が約1.0%向上する目途を得た。

3. 今後の展開と国プロ技術の応用

4年間の国プロ要素技術開発は2008年3月に終了し、初期の目標を達成した。今後の展開として、2008年度から実用化を目指した要素技術開発が開始され、それが完了した後に、1700℃級ガスタービンの実証機の開発設計および初号機の実証運転が計画されている。

一方、当社はこれまでのF形、G形、H形で経験および実証済みの要素技術を集大成し、かつ、この国プロ要素技術開発を通じて実用化の目処が得られた項目を採用した1600℃級M501J形ガスタービン（図9）を開発した（2011年に試運転、実機検証を予定）。1600℃級J形ガスタービンの各構成要素は、燃焼器がG形で豊富な運転実績のある低NO_x蒸気冷却燃焼器をベースとし、圧縮機にはH形で開発、実証した高効率高圧力比圧縮機をベースとしている。タービン部はG形の実績に加え、1700℃級ガスタービン技術を採用するなど、信頼性のある技術をもとに性能の向上を図っている。また、タービン入口温度が1600℃へ上昇しても、高温部品のメタル温度はこれまでの許容値以下として設計されており、高性能と高信頼性の両立を目

図9 J形ガスタービン

標として開発している⁽⁵⁾。

1600℃級J形ガスタービンはコンバインド出力460MW、コンバインド効率60%以上と世界最大容量、最高効率であり、これにより従来の石炭火力に比べ約50%（当社比）CO₂排出量を低減することが可能となる。

4. まとめ

現在推進中の国家プロジェクト「1700℃級ガスタービン要素技術開発」は、産学官の連携により世界の最先端技術を確立し、一部技術は1600℃級J形ガスタービンへ適用され、実現した。今後も継続的な要素技術開発は必要であり、これらの成果を反映した次世代高効率ガスタービンの実用化には、実機レベルでの検証が不可欠である。このガスタービンを主機としたコンバインドサイクルの実証プログラムは、大型プロジェクトとなるために、行政、電力業界、メーカーが一体となり、世界を見据えた国家プロジェクトとして取り組むことが重要である。1700℃級コンバインドサイクル発電の実現により世界最高の発電効率が達成でき、大幅なCO₂削減によって地球環境改善に大いに貢献するものと期待されている。

（原稿受付 2011年1月21日）

●文献

- (1) 塚越敬三・ほか、三菱重工技報、発電技術特集、44-4（2007）、2-7。
- (2) 塚越敬三、電気評論、（2008-7）、19-25。
- (3) Ito, E., ほか、ASME Turbo Expo, (2009) GT2009-59783。
- (4) Hino, T., Harada, H., ほか、Proc. of Intern. Gas Turbine Congress 1999 Kobe, (1999-11), 169。
- (5) 岩崎洋一・ほか、エンジンテクノロジーレビュー、発電技術特集、2-5（2010）、57-63。