

岡村 隆成
T. Okamura

伊藤 勝康
S. Itoh

山田 正彦
M. Yamada

当社は、コンバインドサイクルの中核機器であるガスタービンの研究開発に取り組んでいる。プラント熱効率の向上を旨として、次世代 1,500℃級ガスタービンの空冷と蒸気冷却タービン翼を開発した。蒸気冷却は従来の空冷に比べて冷却特性に優れており、熱効率も改善されてプラント性能の面からもきわめて有利で、将来のコンバインドサイクルへの適用が期待される。一方、環境保全の面から、LNG（液化天然ガス）燃料用低 NO_x（窒素酸化物）燃焼器の開発に注力し、1,300℃級低 NO_x 燃焼器はすでに製品化を完了してプラントに適用される。そして、灯油などの液体燃料用や石炭ガス化燃料など多様な燃料用の燃焼器を開発している。

Toshiba has been conducting research and development of gas turbines as the main component of a combined-cycle power plant. With the objective of attaining higher thermal efficiency, we have developed both air-cooled and steam-cooled turbine blades which have been applied to the 1,500°C-class next-generation gas turbine. The steam-cooled system is superior to the air-cooled system in terms of cooling characteristics and is also advantageous in terms of thermal efficiency. This cooling technology is expected to be applied to the next combined-cycle system.

Meanwhile, a 1,300°C-class low-NO_x combustor for natural gas fuel has been commercialized. Low-NO_x combustors for liquid fuels such as distillate oil and coal-gasification fuel are being developed corresponding to the expected use of various fuels in the future.

1 まえがき

わが国のコンバインドサイクル発電プラントは、1980年ごろから 1,100℃級ガスタービンを使用した排熱回収式のプラントが本格的に導入され始めた。この発電システムは従来の大型蒸気タービンプラントに比べて、高い熱効率と柔軟な負荷追従性そして LNG 燃料を使用したクリーンなプラントであるなどの優れた特長を備えており、着実な運転実績を積み重ねている。1990年代に入ると、1,300℃級のコンバインドサイクル発電プラントが導入され、熱効率は 48%（高位発熱量基準）台に達する高効率で、かつ大容量であり、現在も多数建設が進められている。コンバインドサイクルの進展はガスタービンの進歩に負うところが大きく、現在、1,500℃級ガスタービンの開発が進められており、さらに高効率プラントが実現される。

ガスタービンの開発は、高効率化と大容量化そして低 NO_x 化などの環境保全が課題であり、ここに、当社のガスタービンの研究開発の取組みの一端を紹介する。

2 ガスタービンの開発課題

1,500℃級次世代コンバインドサイクルは、プラント熱効率は 50%以上で、出力は 400/500 MW 級（60/50 Hz）の高効率、大容量プラントを目標としており、低 NO_x 化については、NO_x ≤ 20 ppm を目標にして、将来はさらに低 NO_x 化

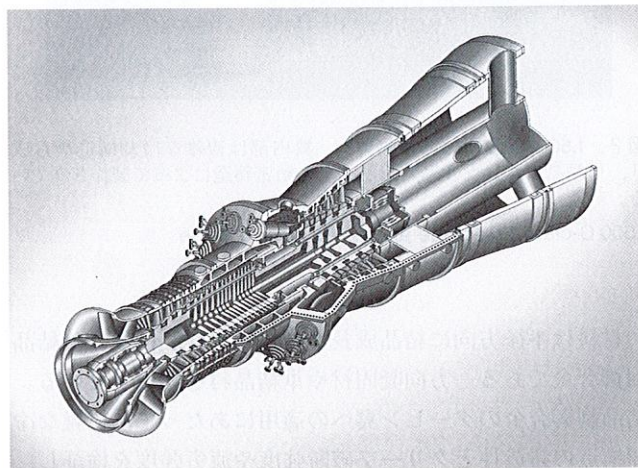


図1. 1,500℃級ガスタービンの全体構造 タービンの高温化、圧縮機の大容量化そして燃焼器の低 NO_x 化の最新技術が組み込まれる。
Structure of 1,500°C-class gas turbine

を旨としている。プラントの中核機器である 1,500℃級ガスタービンの全体構造を図1に示す。

ガスタービンの主要な開発課題としては、“高効率化”、“大容量化”そして“環境保全”と“燃料の多様化”がある。高効率化のためには、タービンの高温化技術が必須（す）であり、大容量化に対しては圧縮機吸い込み空気流量の増大を図るための初段動翼の長翼開発が課題である。環境適合性の面では、厳しい環境規制に対応した低 NO_x 燃焼器の

開発が重要な課題である。ガスタービン燃料は、現在のLNG主体の燃料形態から、2000年以降には重質油などの液体燃料や石炭ガス化コンバインドサイクルの導入によってますます多様化する傾向にある。

3 高温化技術

高温化技術として、冷却技術、耐熱材料の改善そして遮熱コーティングの適用が挙げられる。1,300°C級空冷翼を基本として冷却構造の改善を図ることによって、1,500°C級冷却翼を開発した。初段空冷動翼は、図2に示すように3パスのサーペンタイン冷却通路から成り、翼面に多列フィルム冷却が採用されて冷却構造の最適化が図られている⁽¹⁾。

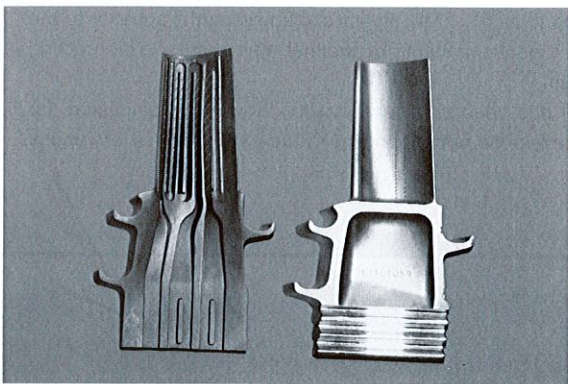


図2. 1,500°C級初段空冷動翼 翼内部は複雑な冷却構造から成り、単結晶のニッケル基超耐熱合金の精密鋳造によって製作されている。

1,500°C-class first-stage air-cooled moving blade

材料は半径方向に結晶成長させた高温強度に優れた結晶制御合金である一方向凝固材や単結晶材を使用している。結晶制御合金のタービン翼への適用にあたって、複雑な冷却構造の鋳造性とクリーブ破断強度や疲労強度を検証し、異方性材料の強度、振動設計法を確立してきた。これら動翼を所内試験発電所のガスタービンロータに組み込んで運転試験を行っており、分解検査で翼の健全性を確認している。遮熱コーティングのタービン翼への適用にあたっては、コーティングを施工したタービン翼を高温タービン試験装置に組み込んで遮熱特性の試験を実施し、コーティングのない翼に比べてガス温度を約100°C高温化できることを確認している。また、コーティングの耐久性向上のための施工プロセスの最適化や耐酸化性改善などの各種基礎試験を経て、遮熱コーティングを施工したタービン初段動静翼を上記ガスタービンに組み込んで耐久性検証運転を継続して実施している。

高温化が進むと、空冷方式は冷却と低NO_x化の両面から

限界に近づくため、蒸気を冷却媒体とした新しい冷却方式の研究開発に取り組んでいる。ガスタービンのサイクル性能面からは、基準温度である初段動翼入口のガス温度を高くすることが求められ、一方、低NO_x化の面からは、逆に燃焼器出口ガス温度を低くすることが求められる。従来の空冷方式では、冷却空気はフィルム冷却や後縁吹き出しによって主流ガスに混入するので、初段静翼の場合、静翼前後のガス温度差は150°C程度と大きい。しかし、蒸気冷却では、冷却用蒸気はガスタービンでの冷却後、主流ガスに混入せずに蒸気タービン系に戻す“回収方式”が採用される。したがって、初段静翼前後のガス温度差は50°C程度であり、初段動翼入口温度を同じとすると、蒸気冷却は空冷に比べて100°C程度燃焼器出口温度を下げるができるので、低NO_x化に有利である。また、タービン動静翼全体にわたって蒸気冷却を採用すると、コンバインドサイクルプラントの熱効率率は空冷の場合に比べて約2%の向上を図ることができ、プラント性能の面でも優れた方式である。開発した1,500°C級の初段蒸気冷却静翼を図3に示す⁽²⁾。翼の全体にわたって半径方向に冷却通路が設けられている。冷却用蒸気は外輪側から翼の背側を通過してこの部位を冷却した後、内輪側に向かい、腹側を通過して外輪側に戻る。実機と同等の運転条件で冷却媒体に蒸気を使って高温風洞試験を実施し、計画どおりの冷却性能を確認している。

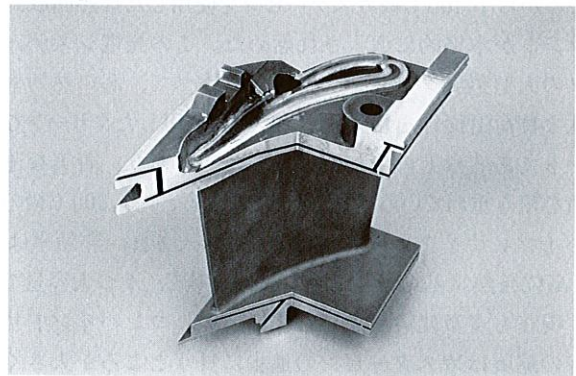


図3. 1,500°C級初段蒸気冷却静翼 冷却用蒸気は翼から主流ガスに吹き出されずに回収され、蒸気を使った冷却性能試験で優れた冷却特性が確認された。

1,500°C-class first-stage steam-cooled stator vane

4 圧縮機技術

ガスタービンの大容量化に対しては、高温化とともに吸込み空気流量の増加が課題である。ガスタービン単機出力250/300 MW (60/50 Hz) に対応した空気流量を確保するには、現有機流量の約1.3倍に増加する必要がある。その分、

初段動翼は長翼化して翼先端の流入マッハ数が高くなり、現有圧縮機では翼列内の強い衝撃波の発生で損失増加が起こり、圧縮機効率が低下する。そのため、高マッハ数でも損失が小さい新型翼の開発が必要であり、数値流体力学的手法を駆使して翼列内の衝撃波の発生を低く抑えた弱ショック翼を開発した。図4に翼列内の三次元粘性流れ解析の計算結果の例を示す。

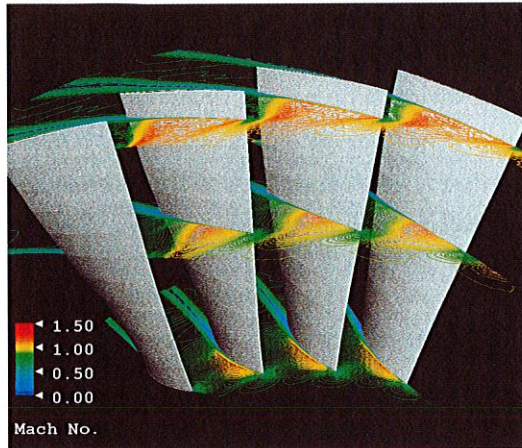


図4. 圧縮機動翼内の三次元流れ解析結果の例 翼列内の流れの状態を把握できる解析技術は、高性能圧縮機翼の開発に寄与している。
Three-dimensional flow analysis of compressor blades

5 低 NO_x化技術

LNG用低 NO_x燃焼器の開発において、現在、低 NO_x化が急速に進んでおり、1,300°C級では、NO_x ≤ 30 ppm 程度まで低減されている。今後、1,500°C級も含めて、2000年前後にはさらに低 NO_x化が進むものと予想される。当社では、環境保全の面から、特に低 NO_x燃焼器の開発に注力して取り組んでいる。NO_x低減の燃焼方式としては、燃料と空気の予混合希薄燃焼と火炎安定化のための拡散燃焼を組み合わせた方式を採用している。1,300°C級低 NO_x燃焼器は運転実績のある1,100°C級燃焼器の基本構成を継承して信頼性を確保すると同時に、予混合燃料割合を増加してNO_x低減を図り、NO_x ≤ 30 ppm (16% O₂換算)を達成している。各種信頼性検証試験を経てすでに製品化を完了しており、プラントに適用する。燃焼器の構造と外観を図5に、NO_x排出特性を図6に示す⁽³⁾。

1,500°C級低 NO_x燃焼器は、第1ステップでNO_x ≤ 20 ppmを目標に、第2ステップで一桁(けた)台を目標に開発を進めている。燃焼器の基本構造は1,300°C級を踏襲して、低 NO_x化には予混合燃料割合をさらに増加している。高温化によって予混合燃焼用の空気流量が増加するために、燃焼に寄与しない燃焼器内面のフィルム冷却用空気はほとん

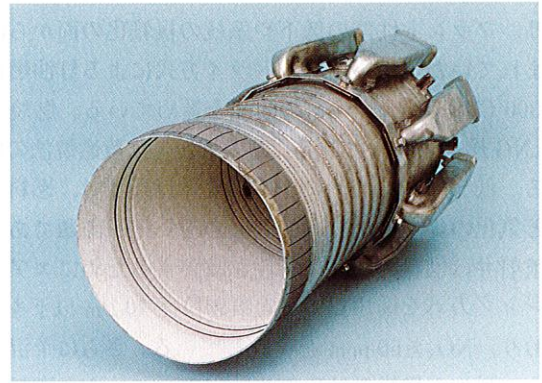
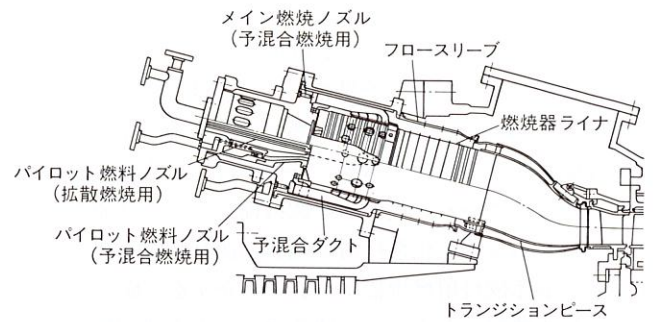


図5. 1,300°C級低 NO_x燃焼器 稼働部をもたないシンプルな構造とガスタービンの広い負荷帯で安定した燃焼によって高い運転信頼性を誇っている。

1,300°C-class low-NO_x combustor

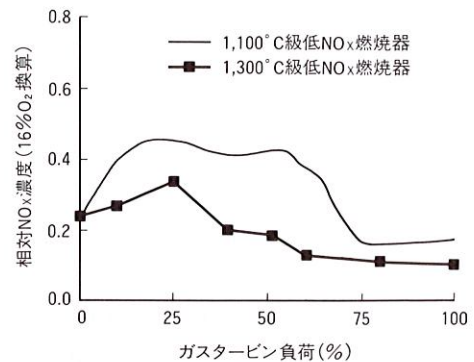


図6. NO_x排出特性 ガスタービンの低負荷から高負荷までNO_xの排出は低いレベルに維持されている。

Characteristics of NO_x emissions

ど確保できなくなる。したがって、1,500°C級燃焼器の冷却は、フィルム冷却に代わって燃焼器外面に乱流促進リブを設けて冷却強化を図っている。これによって、燃焼器のメタル温度は1,300°C級と同一レベルに維持されている。

6 各種燃料の燃焼技術

現在、LNG燃料を主体としたコンバインドサイクルが運

用されているが、今後、重質油を使用したプラントや石炭ガス化コンバインドサイクルが稼働して、ガスタービン燃料の多様化が進むものと予想される。燃料性状はそれぞれの燃料によって大きく異なるが、燃焼安定性の確保と低 NO_x 化の達成が開発の課題であり、各種燃料に対応した燃焼器の開発を進めている。代表的な燃料種として、灯油などの液体燃料と石炭ガス化燃料用燃焼器の開発状況を述べる。

まず、液体燃料用燃焼器について紹介する。従来の NO_x 低減には水噴射による、いわゆるウェット方式が採用されており、プラント性能の低下や系統の複雑化の面から改善が望まれていた。そのため、ドライ方式による灯油燃料用の 1,300°C 級低 NO_x 燃焼器の開発を進めている。燃焼方式は、LNG 燃料と同様に予混合希薄燃焼と拡散燃焼法の併用である。低 NO_x 化のための予混合希薄燃焼では、燃料の微粒化と気化の促進による燃料濃度の均一化が課題である。燃料噴射弁は燃料の微粒化特性を改善するためにエアアトマイジング方式を採用して平均噴霧粒径 20 μm 以下を実現しており、NO_x ≤ 50 ppm を達成している。さらに予混合燃料割合の増加と燃料微粒化の改善によって、ガス燃料と同レベルの NO_x ≤ 30 ppm を目標にした低 NO_x 化を進めている。これらの研究成果を他の液体燃料用低 NO_x 燃焼器の開発にも展開している。

次に、石炭ガス化燃料用燃焼器について述べる。ガス化炉形式や燃料クリーナ形式の組合せ、それに石炭種によってガス化燃料の発熱量や含有成分は異なってくる。これらの組合せはプラントによって異なり、国内では、国家プロジェクトの石炭ガス化コンバインドサイクル 200 ton/日 勿来(なこそ)パイロットプラントの運転検証が行われており、当社もこのプロジェクトに参画して燃焼試験を実施してきた。このプラントでは、空気吹きガス化炉と乾式クリーナが採用されて、ガス化燃料の発熱量は LNG の約 1/10 の低カロリー燃料で、NH₃ を含有している。そのため、サーマル NO_x の発生は少ないが、NH₃ が NO_x に転換する、いわゆるフューエル NO_x が生成する。したがって、燃焼安定性ととともに、燃料中 NH₃ の NO_x 転換率の抑制が課題である。この研究開発の一環として、リッチ/リーン の 2 段燃焼方式を採用して、模擬ガスによる燃焼試験を実施してきた⁽⁴⁾。1,300°C 級の石炭ガス化燃料用燃焼器を図 7 に示す。NO_x 転換率は 35 % 程度と低いレベルに抑制されており、また安定した燃焼状態を確認している。現在、さらに高温化を図った 1,500°C 級燃焼器の開発にも取り組んでおり、1,300°C 級燃焼器と同程度の NO_x 転換率の見通しを得ている。

7 あとがき

以上、当社の次世代ガスタービンを中心とした技術開発状況を紹介したが、今後も、プラントの高効率化のための

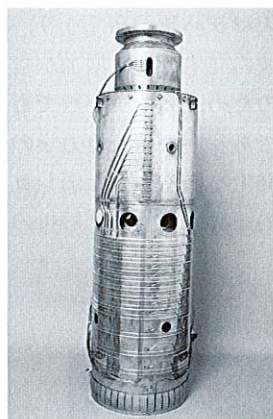


図 7. 1,300 °C 級石炭ガス化燃料用燃焼器 リッチ/リーンの 2 段燃焼方式を採用して、低カロリー燃料の低 NO_x 化と燃焼安定化を達成している。
1,300°C-class coal-gasification fuel combustor

高温化技術や大容量化技術、そして環境保全や多種燃料に対応した燃焼技術の開発を進めると同時に、高温部品の寿命診断技術の適用や補修点検の合理化技術など、コンバインドサイクルプラントとしての経済性や運用性の向上を目指した技術開発を推進する所存である。

謝 辞

ここに紹介した研究開発の一部は東北電力(株)と(財)電力中央研究所との共同研究の成果であり、ご指導いただいた関係各位に対し感謝の意を表する。

文 献

- (1) 大友文夫, 他: 高効率ガスタービン用空冷動翼の開発, 第 10 回ガスタービン 9 月講演会論文集, pp.7-12 (1995)
- (2) 伊藤勝康, 他: 高効率ガスタービン用蒸気冷却静翼の開発, 第 10 回ガスタービン 9 月講演会論文集, pp.1-6 (1995)
- (3) H. Okamoto, et al: Development of Dry Low NO_x Combustor for 1,300 °C Class Heavy-Duty Gas Turbine, 95-YOKOHAMA-IGTC-138, pp.231-236 (1995)
- (4) T. Nakata, et al: Effect of Pressure on Combustion Characteristics in LBG-Fueled 1,300 °C-Class Gas Turbine, ASME paper, 93-GT-121 (1993)



岡村 隆成 Takanari Okamura

重電技術研究所コンバインドサイクル機器技術開発部主幹。発電用ガスタービンの研究開発に従事。日本機械学会会員。Heavy Apparatus Engineering Lab.



伊藤 勝康 Shohkoh Itoh

重電技術研究所コンバインドサイクル機器技術開発部主務。ガスタービン冷却翼の研究開発に従事。日本機械学会会員。Heavy Apparatus Engineering Lab.



山田 正彦 Masahiko Yamada

重電技術研究所コンバインドサイクル機器技術開発部主務。ガスタービン燃焼器の研究開発に従事。日本機械学会会員。Heavy Apparatus Engineering Lab.