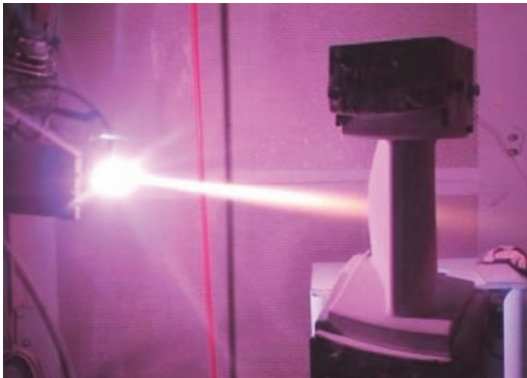


世界最高温度 1650℃級 JAC 形ガスタービン向け 先進遮熱コーティングの開発

Development of Advanced Thermal Barrier Coatings
for The World Highest Turbine Inlet Temperature 1650℃ Class JAC Gas Turbine



岡嶋 芳史^{*1}
Yoshifumi Okajima

鳥越 泰治^{*2}
Taiji Torigoe

妻鹿 雅彦^{*3}
Masahiko Mega

桑原 正光^{*4}
Masamitsu Kuwabara

若園 進^{*5}
Susumu Wakazono

三菱パワー株式会社(以下、三菱パワー)は、2020 年に世界初となる 1650℃級 JAC 形ガスタービンの定格運転を開始した。このガスタービンでは、高い信頼性を誇る1600℃級J形ガスタービンに採用された先進遮熱コーティング(Thermal Barrier Coating:以下、TBC)を、更に厚くすることで遮熱性を高め、タービン入口温度の更なる上昇を実現している。先進 TBC の高い剥離耐久性を、要素試験とJ形での十分な実機検証で確認した後、JAC 形で検証を開始し、これまで約 2000 時間の運転で良好な結果を得ている。

1. はじめに

温室効果ガス排出量をゼロとするエナジートランジションの取組みが国内外で加速している⁽¹⁾。これには、再生可能エネルギーの普及が不可欠であるが、再生可能エネルギーは天候等の影響を受け、負荷変動を発生させるという弱点がある。この弱点を補うために、速い起動性と高い熱効率を併せ持つガスタービンコンバインドサイクル発電(以下、GTCC 発電)に一層の期待がかかっている。

GTCC 発電の高効率化のため、三菱重工グループでは、2004 年から国家プロジェクト“1700℃級 超高温ガスタービン要素技術開発”に参画し、その中で開発された先進 TBC は、2011 年から 1600℃級J形ガスタービンに採用され、これまで既に累積 100 万時間以上運転されて高い信頼性を誇っている。更に三菱パワーでは、実績あるJ形をベースに、燃焼器の強制空冷システム、高圧力比圧縮機、先進 TBC の厚膜化を適用することで(図1)、世界最高のタービン入口温度 1650℃を実現した次世代高効率ガスタービン“JAC (J-series Air-Cooled) 形⁽²⁾”の試運転を 2020 年1月に開始した。本報では、JAC 形の成立に不可欠な、先進 TBC 技術について紹介する。

*1 総合研究所 製造研究部 主席研究員 工博 技術士(機械部門)

*2 総合研究所 製造研究部 主席研究員 工博 技術士(金属部門)

*3 総合研究所 製造研究部 主席研究員 技術士(金属部門)

*4 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部 主席技師

*5 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部 グループ長

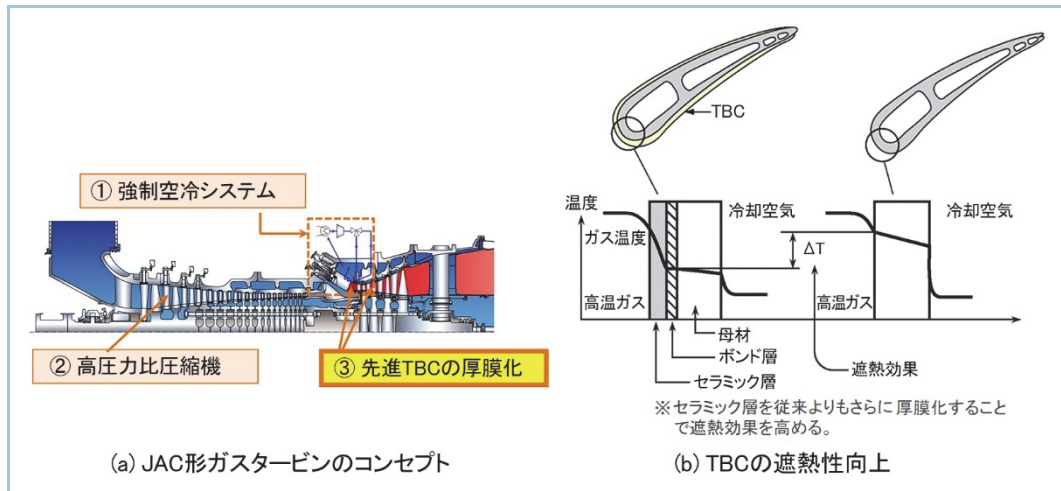


図1 JAC 形ガスタービンのコンセプトとTBC

2. 先進 TBC の開発

候補材料の選定に当たっては、当社で開発された、電子構造に基づく材料計算システム(図2(a))を用いて、低熱伝導で高温安定性に優れる材料組成を選定した。選定された材料組成で焼結体を作製し、熱伝導率等を評価した結果、従来材である YSZ (Yttria partially Stabilized Zirconia: イットリア部分安定化ジルコニア) よりも低い熱伝導率を示す候補材を見いだすことに成功した⁽³⁾(図2(b))。

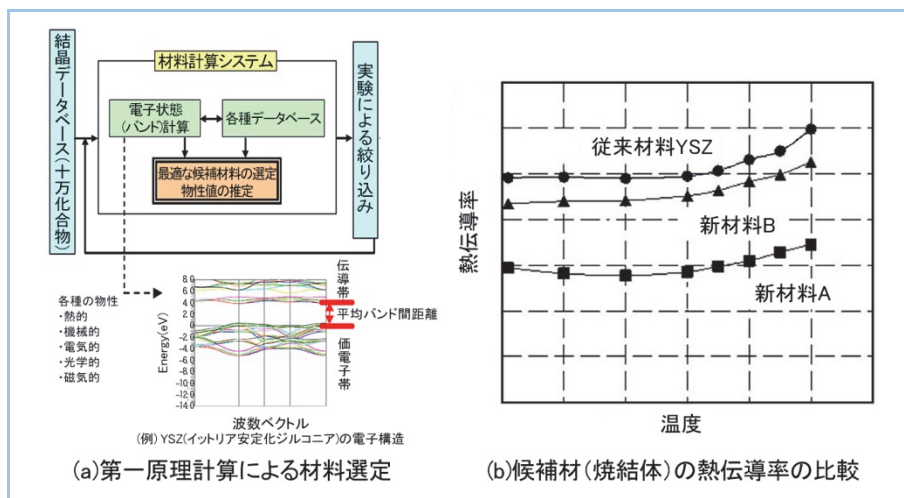


図2 セラミックス材料選定と焼結体の評価例

TBC は大気圧プラズマ溶射によって施工され、皮膜中に微細気孔を多く導入することで焼結体よりも更に熱伝導率の低いコーティングを形成する。しかし過剰な気孔の導入は、実機運転環境でのエロージョンや早期剥離を招く恐れがあるため、溶射成膜条件の適正化が重要である。そのため、飛行溶射粒子の温度、速度分布等の情報(図3)と、成膜後のマイクロ組織や皮膜特性との対応を取得し、溶射成膜条件の適正化を行った。

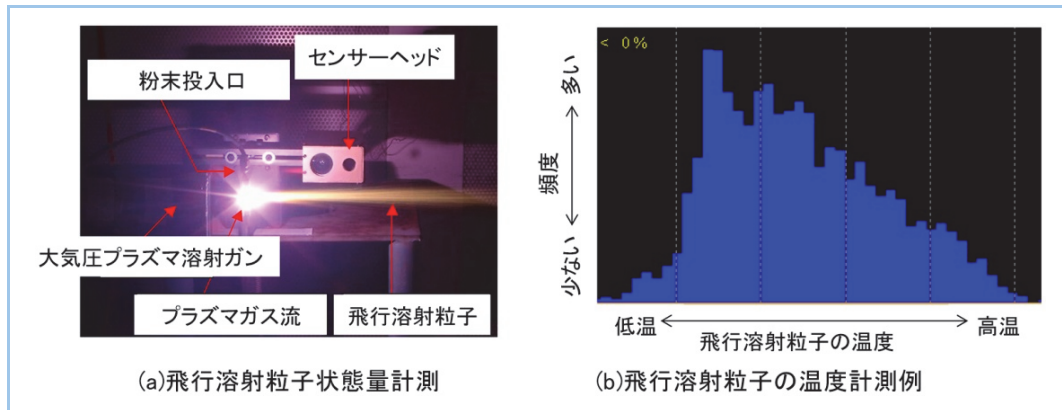


図3 溶射成膜条件適正化のための状態量計測

3. 厚膜先進 TBC の実機検証

TBC は、一般的に厚くなると剥離しやすくなることが知られている⁽⁴⁾が、先進 TBC は、従来の TBC に比べて極めて高い剥離耐久性を有するため、厚膜化による遮熱性向上が可能である。従来 TBC と先進 TBC を対象に、曲げによる密着強度試験を行ったところ、従来 TBC は標準膜厚から厚膜化すると剥離限界ひずみが大きく低下するのに対して、先進 TBC では同程度厚くしても、従来 TBC 標準膜厚と同等以上の高い密着力を示した⁽⁵⁾(図4(a))。この傾向は、別途実施した CO₂ レーザによる熱サイクル耐久性試験でも示され(図4(b))、厚膜先進 TBC の高い密着力・剥離耐久性が確認されている。

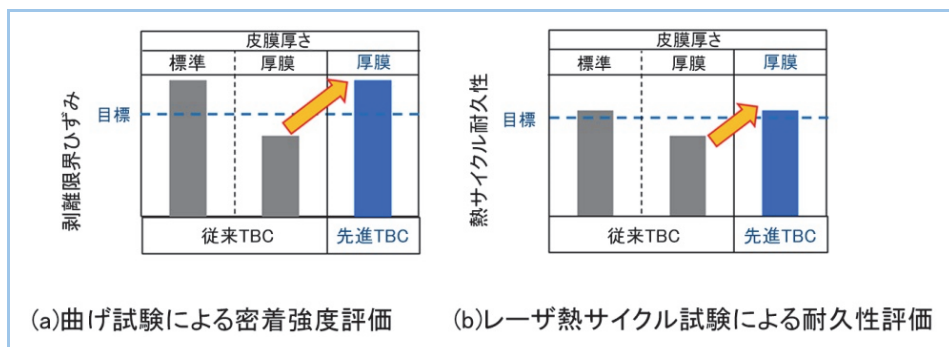


図4 厚膜化前後での密着強度及び剥離耐久性

要素試験で厚膜化した先進 TBC の信頼性を確認した後、実機部品への施工検証として、付帯試験片でのマイクロ組織観察や熱サイクル試験を行い、溶射プログラミングの作り込みを行った。この厚膜先進 TBC は、2014 年から三菱パワー高砂工場内の実証発電設備 M501J 形ガスタービン1段静翼で長期信頼性検証に供され、定期的な外観観察を繰り返しながら 2018 年まで運転され、約 18000 時間の運転後でも剥離等なく、健全であることが確認された(図5)。同様に、燃焼器・タービン動翼・分割環にも厚膜先進 TBC は施工され、長期信頼性検証を行い、健全性が確認された(図6)。

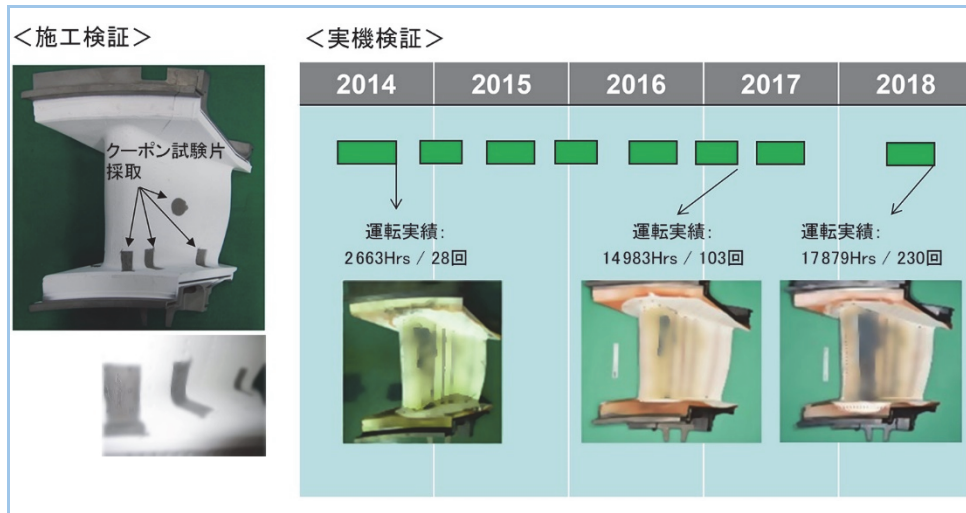


図5 タービン1段静翼 厚膜先進 TBC の検証状況

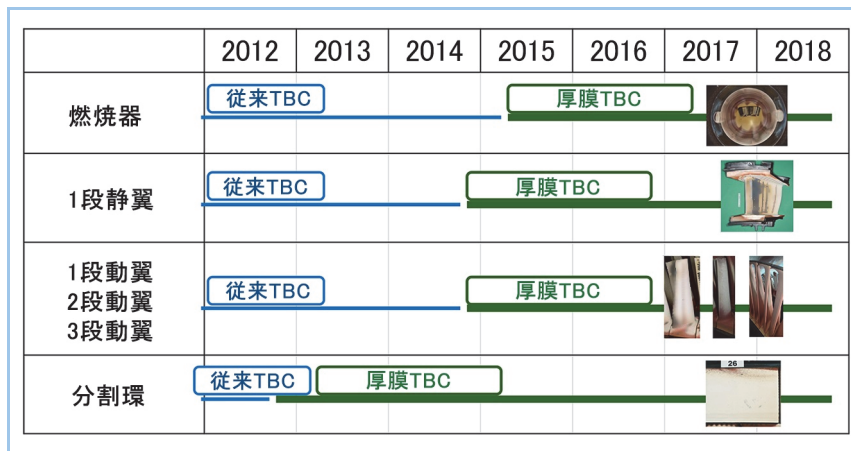


図6 M501J 形ガスタービンの各部品における厚膜先進 TBC の実機検証

要素試験及び M501J 形ガスタービンでの十分な信頼性を検証した厚膜先進 TBC は、1650℃ 級 M501JAC 形ガスタービンの各部に適用され、2020 年1月より、新設された第二実証発電設備にて試運転が開始された。2020 年 10 月までに約 2000 時間運転され、先進 TBC に剥離やエロージョン等の目立った損傷は見られず、これまでのところ良好な状態が確認されている(図7)。

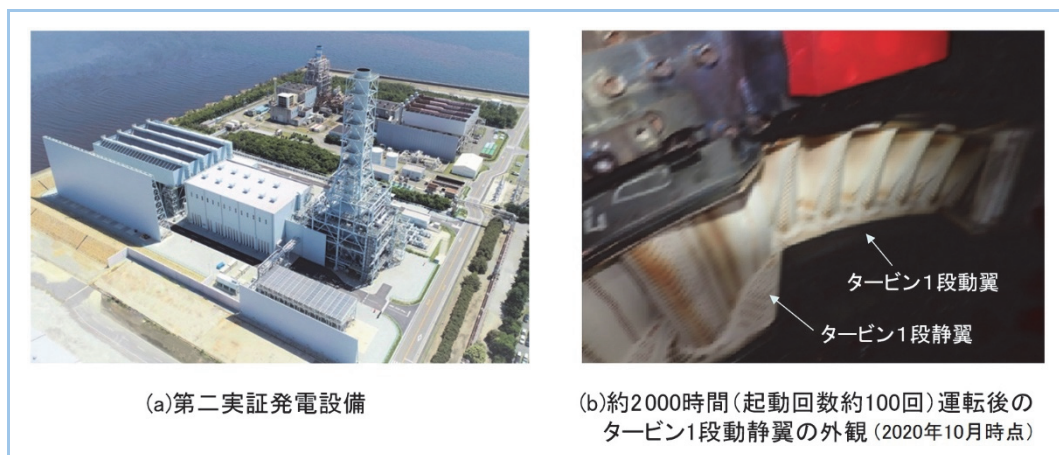


図7 第二実証発電設備での実機検証状況

4. まとめ

GTCC の高効率化には、ガスタービン入口温度の高温化が重要であり、三菱重工グループは2004 年から“1700℃級 超高温ガスタービン要素技術開発”に参画している。このプロジェクトで

開発された先進 TBC の特徴である高い密着力・耐久性を最大限に生かし、厚膜化した皮膜の信頼性を要素試験及び実機検証で十分確認した上で、世界最高のタービン入口温度である 1650℃級 JAC 形ガスタービンに適用した。JAC 形ガスタービンでは、これまで半年以上運転され皮膜の健全性が確認されている。引き続き、第二実証発電設備で厚膜先進 TBC の長期信頼性を継続監視していく。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP16002) の結果得られたものです。NEDO 及び関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 福泉, ニューノーマルで加速するエネルギートランジションとターボマシナリーに課せられた使命, 第 48 回日本ガスタービン学会定期講演会 基調講演, 2020
- (2) 高村ほか, J 形ガスタービンの運転実績を踏まえた 1650℃級 JAC 形ガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.3 (2019)
- (3) 小熊ほか, 高効率ガスタービン実現のための先進材料・製造技術開発, 三菱重工技報 Vol.52 No.4 (2015)
- (4) Bose, S. et al., Thermal Barrier Coating Experience in Gas Turbine Engines at Pratt & Whitney, Journal of Thermal Spray Technology, Vol.6(1), 1997, p.99-104
- (5) 岡嶋ほか, 次世代 1650℃級 JAC 形ガスタービン向け先進遮熱コーティングの開発, 第 48 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, A-7, 2020