

1650℃級 JAC 形ガスタービンの中核とする 第二T地点実証発電設備での検証結果

Validation Result of 1650℃ Class JAC Gas Turbine on New T-point Demonstration Plant



森本 一毅^{*1}
Kazuki Morimoto

松村 嘉和^{*2}
Yoshikazu Matsumura

飯島 高善^{*1}
Takayoshi Iijima

若園 進^{*3}
Susumu Wakazono

片岡 正人^{*4}
Masahito Kataoka

由里 雅則^{*5}
Masanori Yuri

近年、再生可能エネルギー（以下、再エネ）の普及が進んでいる一方で、その電源供給能力の不安定性等から、ガスタービン・コンバインドサイクル（以下、GTCC）の重要性がより高まっている。GTCC の高効率化にはガスタービンの高温化が重要であり、三菱パワー株式会社（以下、当社）は 2004 年から参画した国家プロジェクト“1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発”の開発成果を活用して、世界初のタービン入口温度 1600℃の高効率機 M501J 形を開発、その運転実績を着実に積み重ねてきた。実績あるJ形をベースに、個々の要素としては既設T地点で検証を完了した、燃焼器強制空冷システム／超厚膜 TBC (Thermal Barrier Coating)／高圧力比圧縮機といった中核技術を適用した、次世代 1650℃級 JAC 形ガスタービンの試運転を 2020 年1月から第二T地点で開始し、機器信頼性、性能等の健全性の最終確認が完了したため、本報ではその実証結果について紹介する。

1. はじめに

昨今、CO₂ 排出量削減の重要性の高さから、風力発電や太陽光発電などの再エネによる電力供給が計画・実行されているが、自然変動の避けられない不安定電源であり、電力系統に急激な周波数変動や負荷変動が生じる等の懸念もある。その中で地球環境保全及びエネルギー安定供給の観点から、従来火力と比べ高効率かつ運用性に優れる GTCC の重要性がより高まってきている。GTCC の高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており、当社は、1980 年代に 1150℃級大容量ガスタービン M701D 形を開発後、タービン入口温度 1350℃の M501F 形、蒸気冷却式燃焼器を採用したタービン入口温度 1500℃の M501G 形を開発し（図1）、高いプラント熱効率と信頼性及び低公害性を実証してきた。高温・高効率化に欠かせない最新技術の研究開発に取り組むため、2004 年からは国家プロジェクト“1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発”に参画、その開発成果を活用して世界初のタービン入口温度 1600℃となる高効率機 M501J 形ガスタービンを開発した。当社高砂工場内のガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備（以下、既設T地点）にて 2011 年から実証運転を開始し、M501J 形 GTCC の運転実績を着実に積み重ねてきた。

J形ガスタービンは燃焼器の冷却に蒸気冷却方式を採用しているが、高いタービン入口温度を維持したまま空冷化できれば、GTCC の更なる高効率化と運用性改善が期待できる。そのため、当社では高温ガスタービンの空冷化を実現する次世代 GTCC の開発に取組み、その中核技術

*1 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部大型ガスタービン技術部

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

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

*4 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部大型ガスタービン技術部 部長

*5 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ガスタービン技術総括部 総括部長

である強制空冷システムを考案した。2015 年春にT地点にてシステム全体の検証試験を完了し、その後、10000 時間以上の長期運用を実施してきた。この中核技術はタービン入口温度 1650℃の高温化を達成した次世代高効率ガスタービン JAC 形(J-Air-Cooled)に適用されている。JAC 形ガスタービンの長期実機検証に向け、高砂工場内に複合サイクル発電所第2号発電設備(以下第二T地点)の建設を進めてきた。この度、第二T地点は 1650℃次世代高効率ガスタービン JAC 形と新開発の高効率蒸気タービンを組み合わせた出力 566MW の最新鋭 GTCC 設備として、昨年 2020 年1月から試運転を開始し、4月2日にコンバインド定格出力 566MW 到達後、発電プラント運用に必要な諸試験・調整を実施し、発電設備としての機能確認を全て完了した後、7月1日より商業運転を開始している。また、JAC 形ガスタービンの採用により GTCC としての発電効率は64%に達するが、その根幹となる技術実証のために試運転中は通常の計器による計測以外に数千点にも及ぶ大規模な特殊計測を実施しオンラインで監視、評価を実施した。本報では、最新鋭の高効率ガスタービンである JAC 形の開発コンセプトと第二T地点実証発電設備における、JAC 形の実証結果について紹介する。

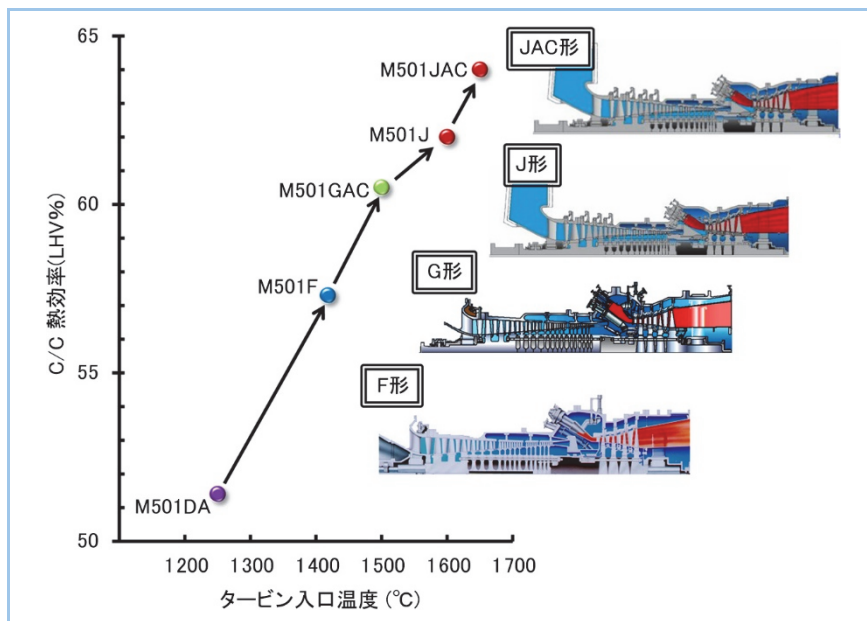


図1 大型ガスタービンの機種開発変遷

2. M501J 形ガスタービンの開発と実績

M501J 形では、豊富な運転実績のあるタービン入口温度 1400℃級F形、1500℃級G形・H形で実証済の要素技術を基盤とし、国家プロジェクトで開発された 1700℃級の最先端の技術開発成果を適用することにより、タービン入口温度 1600℃を達成した。タービン入口温度の上昇及び最新の要素技術の採用により、GTCC 発電端熱効率は従来機と比べて大きく上昇した。CO₂ 排出量は、従来型石炭焚き火力発電所を天然ガス焚きJ形コンバインドサイクル発電所に置き換えた場合、約6割の削減が可能となる。図2に M501J 形の技術的特徴について示す。

M501J 形ガスタービンの開発は、基本設計の段階で各要素の検証試験を実施し、その結果を詳細設計に反映、最終的に実証発電設備にてガスタービン全体の実機検証を実施するサイクルを踏んできた。図3に当社高砂工場内のガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備(既設T地点)の外観を示す。M501J 形初号機は、2011 年の試運転中に 2300 点に及ぶ特殊計測を実施し、性能、機械特性、燃焼特性が目標値を満足することを実証し、商用機を出荷している。J形シリーズは国内外合計 76 台受注、順次出荷しており、現在まで 45 台が商用運転に入っており、累計 116 万時間以上の運転時間を達成している(図4)。

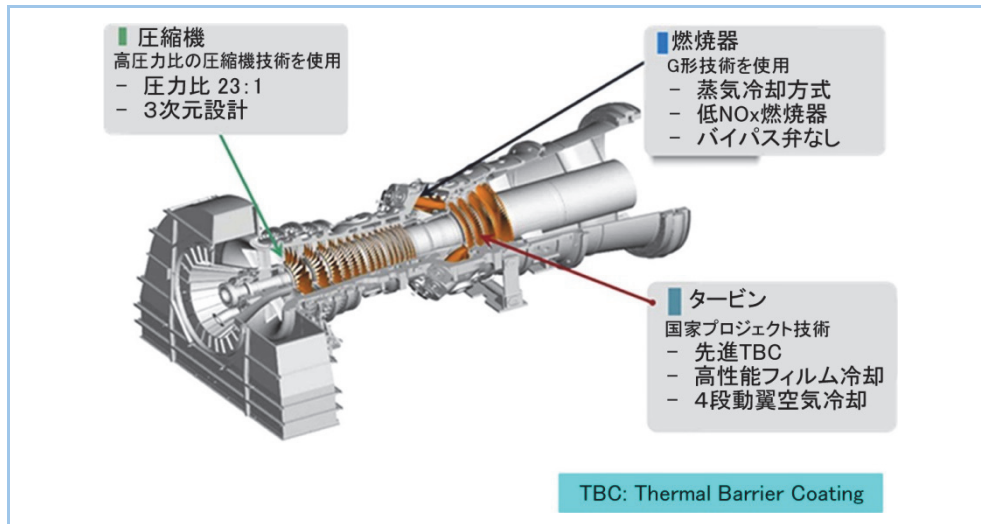


図2 M501J 形ガスタービンの各構成要素の技術的特徴

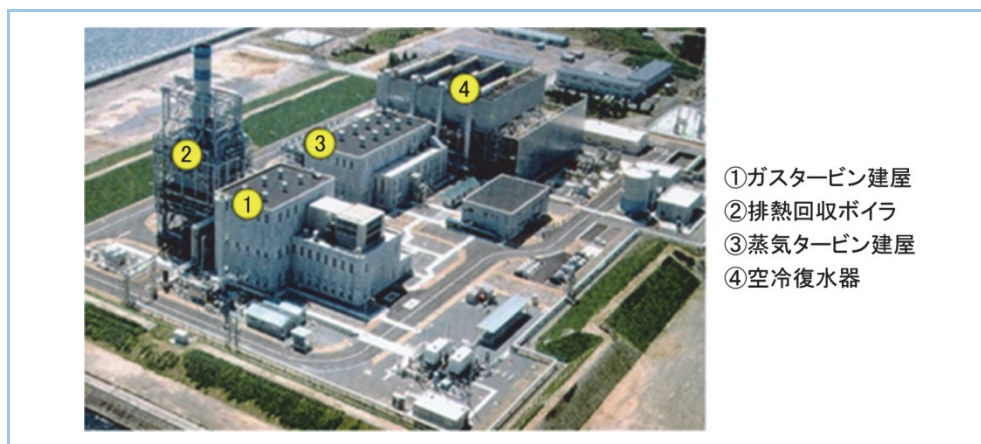


図3 三菱パワー高砂工場 ガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備（既設T地点）

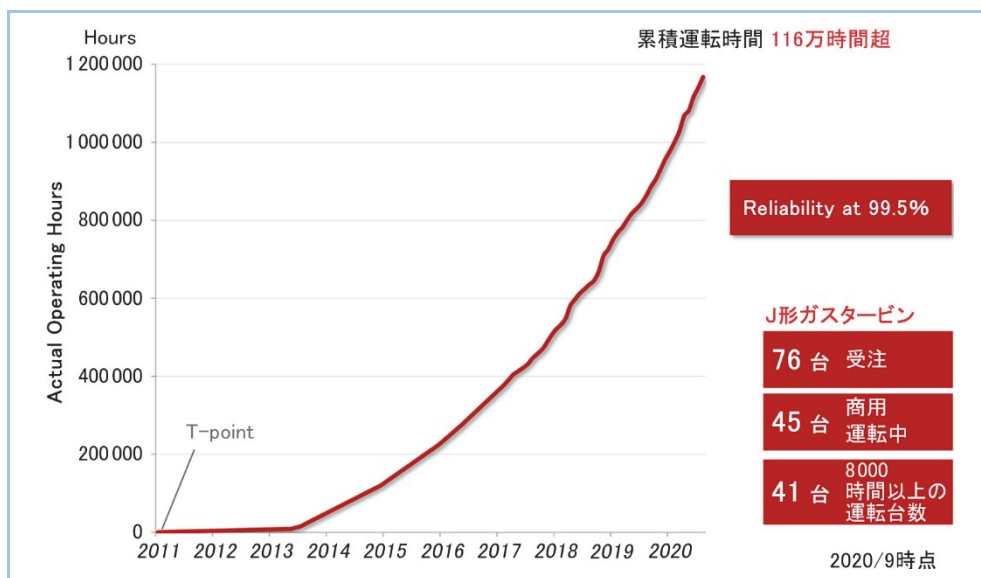


図4 M501J 形ガスタービンの運転実績（50Hz 機含む）

3. 1650℃級 M501JAC 形ガスタービンの開発コンセプト

当社は、実績のある M501J 形をベースとして、検証済の要素技術：①燃焼器強制空冷システム、②超厚膜化 TBC、③高圧力比圧縮機を適用することで、更なる高効率化、運用性改善を狙い 1650℃級次世代 JAC 形ガスタービンの開発を進めてきた。

本ガスタービンの基本コンセプトは以下であり(図5, 6), 個々の要素技術自体は既設T地点での検証を完了し, 1650℃JAC 形への適用を進めた(表1)。

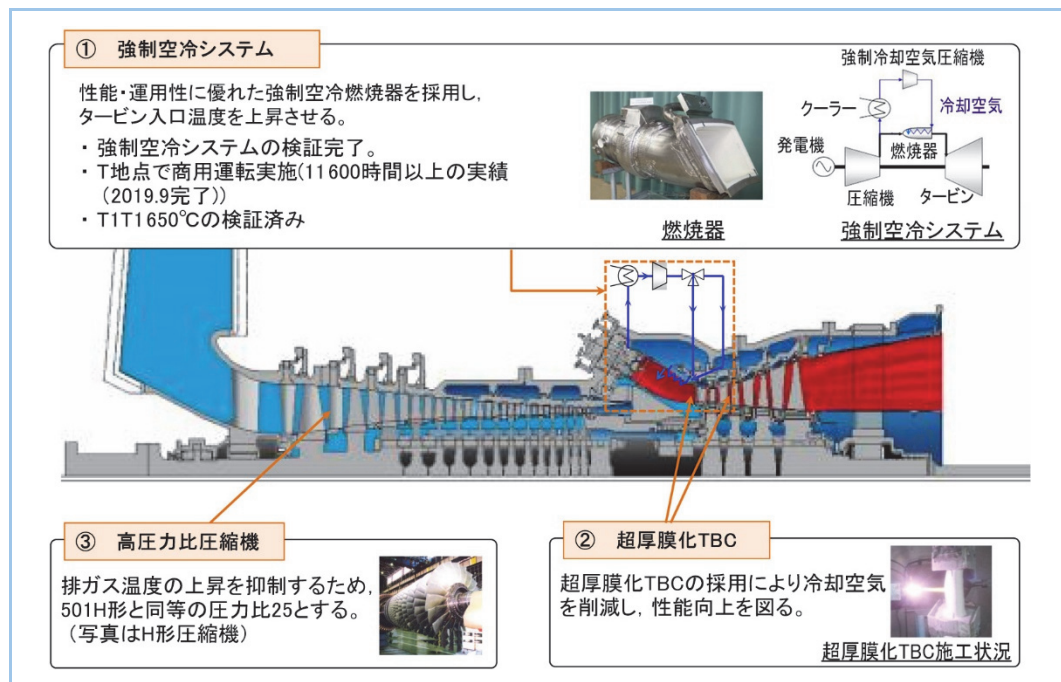


図5 1650℃級 JAC 形ガスタービンの開発コンセプト

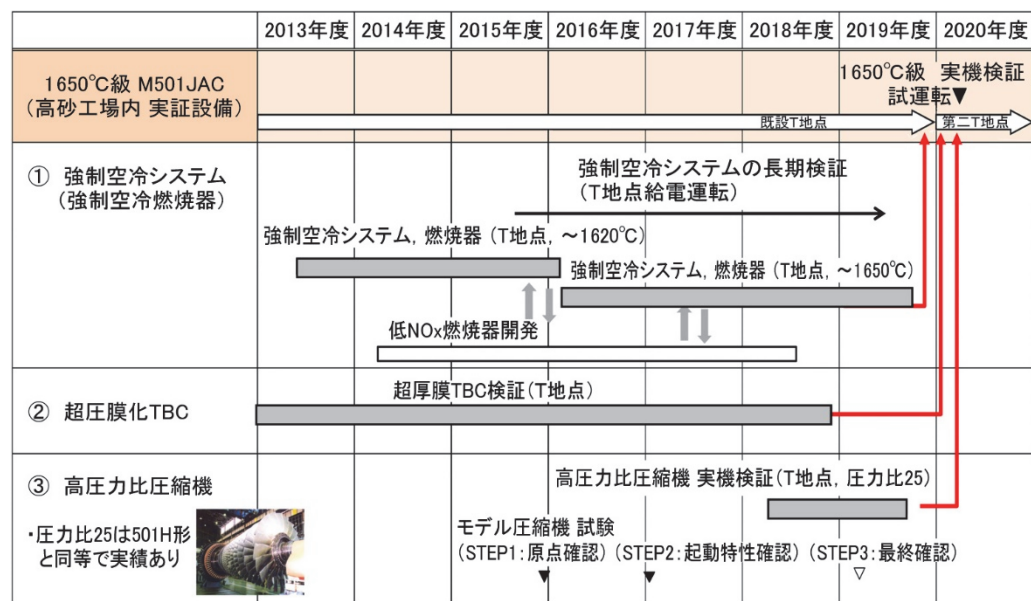


図6 要素技術の1650℃級 JAC 形ガスタービンへの適用の流れ

表1 ガスタービン性能比較(ISO, 標準条件)

	M501J 形	M501JAC 形
周波数(Hz)	60	60
圧力比(—)	23	25
ガスタービン出力(MW)	330	435
ガスタービン効率(%-LHV)	42	44
コンバインドサイクル出力(MW)	484	630
コンバインドサイクル効率(%-LHV)	62	>64

- ① 強制空冷システム採用により, 運用性を向上させるとともにJ形からタービン入口温度を上昇させる。
- ② 国家プロジェクト技術をベースに開発された超厚膜化 TBC の採用により, タービン入口

温度上昇に対し、高性能化と信頼性を両立させる。

- ③ H形と同等の高圧力比設計圧縮機を採用することにより、ガスタービン出口排気ガス温度の上昇を抑制する。

4. 1650℃級 M501JAC 形ガスタービンに適用の中核技術検証

JAC 形ガスタービンに適用した中核要素技術及び、その長期実証結果を示す。

4.1 燃焼器 強制空冷システム

システム概要

J形ガスタービンは燃焼器の冷却に蒸気冷却方式を採用しているが、高いタービン入口温度を維持したまま空冷化できれば、GTCC の更なる高効率化と運用性改善が期待できる。そのため、高温ガスタービンの空冷化を実現する技術として、強制空冷システムを考案した。強制空冷システムの採用により、タービン入口温度 1650℃級であっても空冷化を実現でき、高い複合発電効率の達成とともに、プラント全体の運用性改善が可能となる。本システムは2015年春に、既設T地点においてシステム全体の実機検証試験を完了しており、その概要を紹介する。

強制空冷システムは圧縮機出口(燃焼器車室)から抽気した空気を強制冷却空気冷却器(クーラ)にて冷却し、その後強制冷却空気圧縮機で昇圧して燃焼器の冷却に用いたのちに燃焼器内部の燃焼領域に戻す系統としている(図7)。

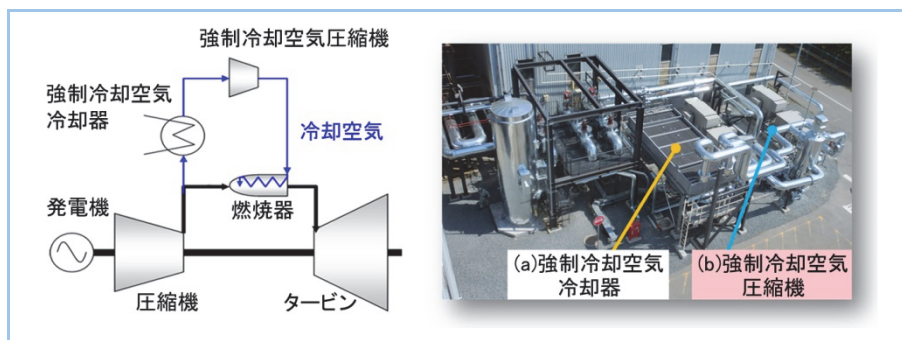


図7 強制空冷システム概略図と既設T地点検証設備

次に、強制空冷システムの特徴について以下に述べる。

- (1) 従来の蒸気冷却は排熱を全てボトム側で回収するのに対し、強制冷却空気システムでは一部の排熱をトップ側で回収させることでより効率のよいシステムとすることが可能
- (2) 燃焼器冷却構造を最適化することで既存の蒸気冷却と同等以上の冷却性能達成が可能
- (3) 蒸気冷却に比べ GTCC 全体の起動時間短縮が可能

強制空冷システムを採用した次世代 GTCC の効率向上には、少ない冷却空気量で効率的に冷却可能な燃焼器を開発し、強制冷却空気冷却器の排熱低減と回収効率向上、強制冷却空気圧縮機の動力を低減していくことが重要となる。

強制空冷システムの実機検証

2015年春、既設T地点にて強制空冷システムの実プラントにて要求される運用性、すなわち起動停止、負荷変化、負荷遮断といった過渡的な変化に対する追従性を検証し、全て問題ないことを確認した。ガスタービントリップ試験時の強制冷却空気圧縮機運転点挙動についても試験実施し、ガスタービン 100%負荷からのトリップにおいて、強制冷却空気圧縮機がサージに入ることなく、安全に停止できることを確認した。

この強制空冷システムは既設T地点にて運転、長期検証を実施し10000時間以上の運転実績を積み上げた。

4.2 超厚膜化 TBC

1650℃級 JAC 形ガスタービンは、J形タービン入口温度に対し+50℃となるが、超厚膜化

TBC の採用により、高性能化と信頼性を両立させている。一般的に TBC を厚くすると耐久性が低下するが、国家プロジェクト技術をベースに開発された TBC は従来以上の耐久性を有し、超厚膜化が可能となった。なお、超厚膜化 TBC の検証は、施工検証としてクーポン試験片を採取し、ミクロ組織、気孔率を確認したのち、熱サイクル試験を実施して耐久性に問題ないことを実翼適用前に確認した。実機検証では燃焼器、タービン1～3段動静翼、分割環に超厚膜化 TBC を施工し、長期検証によって信頼性を確認した。図8にタービン1段静翼にて実施した超厚膜化 TBC を示す。

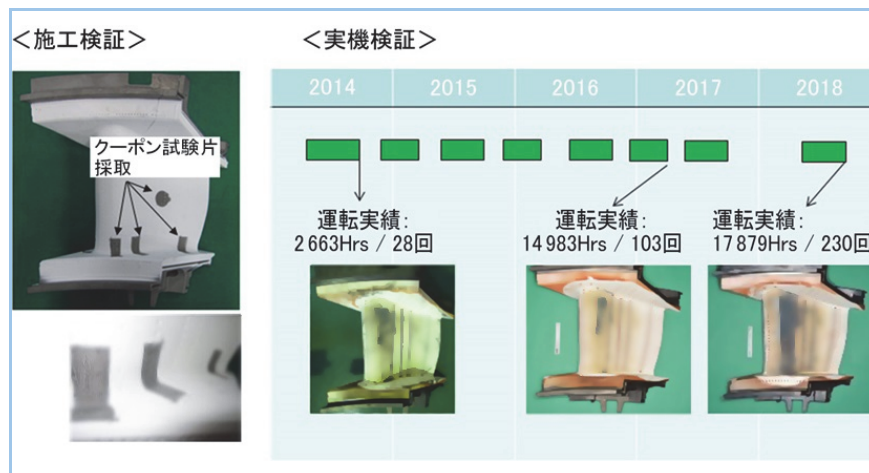


図8 タービン1段静翼 超厚膜 TBC の既設T地点での検証結果

4.3 高圧力比圧縮機

1650℃級 JAC 形ガスタービンの圧縮機は、当社運転実績のあるH形と同等の高圧力比設計を採用し、圧力比をJ形の 23 から 25 へ上昇させることにより、ガスタービン入口温度上昇に伴う排気ガス温度の上昇を抑制させる仕様とした。圧力比 25 の大風量圧縮機自体は 2001 年に既設T地点で、同じく圧力比 25 のH形圧縮機にて検証済である。これに加え 2018 年5月には、既設T地点にてJ形ベース、圧力比 25 として設計した圧縮機の実機検証を実施し、起動特性及び空力性能が良好であることを確認した。

5. 1650℃級 M501JAC 形ガスタービンの第二T地点における実証結果

第二T地点は 1650℃次世代高効率ガスタービン JAC 形と新開発の高効率蒸気タービンを組み合わせた出力 566MW の最新鋭 GTCC 設備であり、M501JAC 形ガスタービンは 2019 年春に工場出荷/オンベースし、2020 年1月から第二T地点での試運転を開始した。試運転はガスタービン単体での運転から開始し、初回着火から 10 回の起動でガスタービン定格負荷に到達、その後蒸気通気し CC (Combined Cycle) 運転で運用性確認試験を実施し7月1日より商業運転を開始している(図9, 10)。試運転ではガスタービン起動昇速から無負荷定格速度、部分負荷、定格負荷運転中の状態量を常時監視しながら、機器の信頼性、実力性能、排ガスエミッション等を最終確認し、その後商用実プラントで求められる機能試験/特殊試験を完了させた。



図9 第二T地点の試運転工程

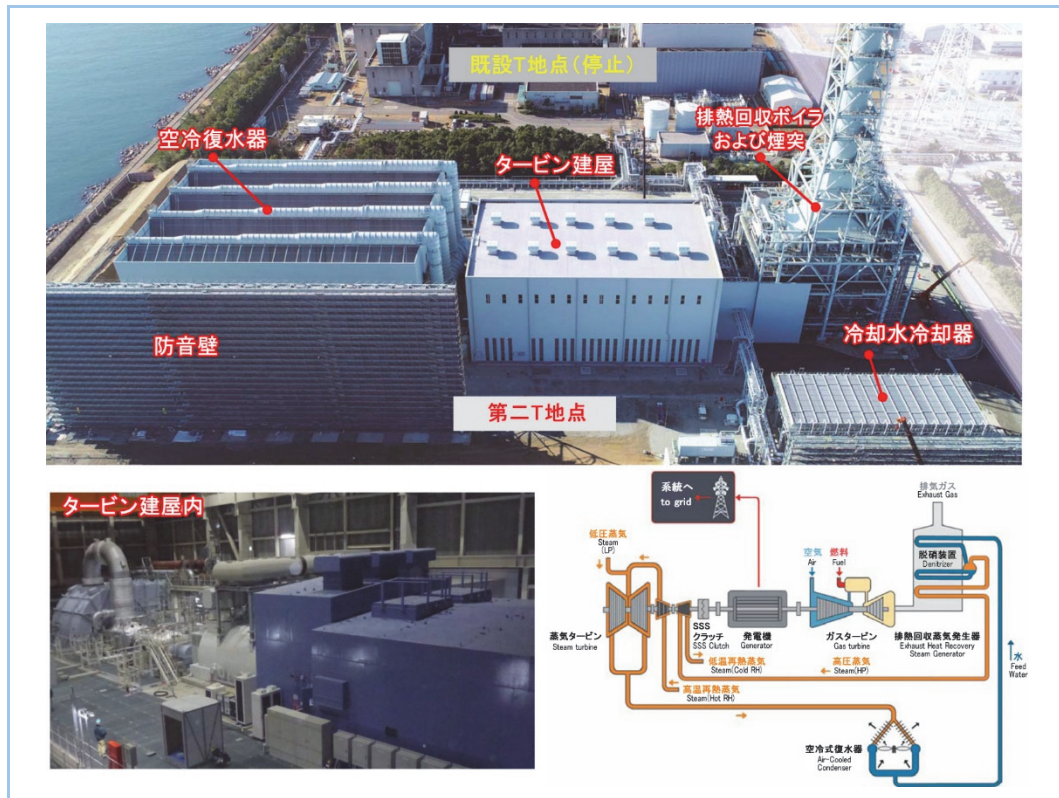


図 10 第二T地点 コンバインドサイクルプラント概要

JAC 形ガスタービンの根幹となる技術実証のために試運転中には約 2800 点を超える大規模の特殊計測を実施し、健全性評価を行った。回転部については、約 100 点に及ぶ大規模テレメータ計測も実施し、圧縮機ロータ、タービン翼のメタル温度や振動応力健全性を確認した。本章では各要素の健全性について最終確認した結果を紹介する(図11)。

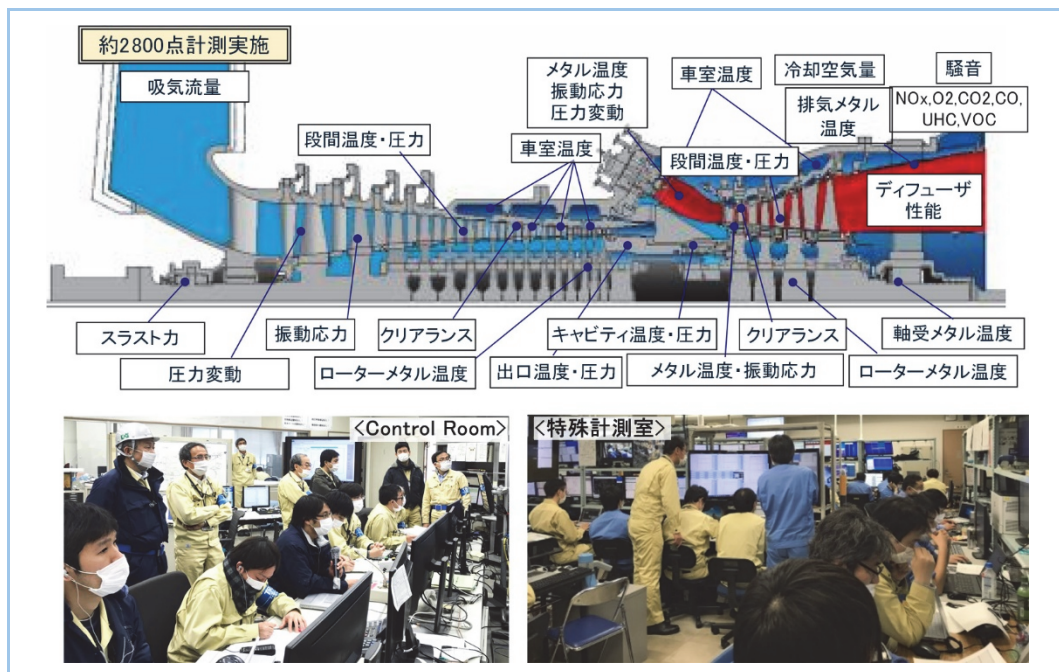


図 11 試運転及び特殊計測実施状況

5.1 強制空冷燃焼器及び強制空冷システム

強制空冷システムについては既設T地点にて過渡的な変化に対する追従性含め検証済であるが、本試運転にて強制空冷燃焼器のメタル温度を計測し、実機における冷却性能について最終検証し、燃焼筒メタル温度分布は設計許容値より低く、冷却性能に問題ないことを確認した。

(図 12)。また、燃焼振動特性や排ガスエミッションについても特に問題なく、部分負荷から全負荷まで安定運用可能であることを確認した。

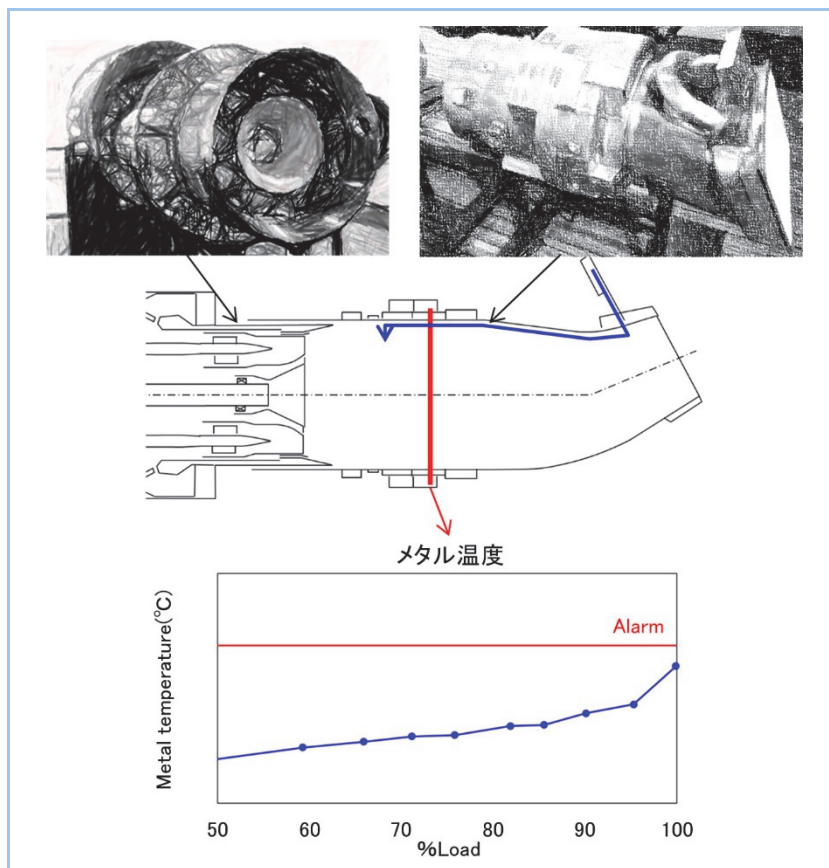


図 12 強制空冷燃焼器のメタル温度計測結果

JAC 形ガスタービンでは強制空冷システムをベースとし、負荷運転時のクリアランスコントロールを可能とするシステムを採用している。本システムでは、冷却空気をタービン翼環バイパスさせて直接燃焼器へ導入する供給方法と、負荷運転中のタービンクリアランスを低減することで性能を最大化するため、タービン翼環に通気した後に供給する方法の2系統があり、負荷運転中でも切換弁(三方弁)にて切り換え可能である。前者では、クリアランスを開けておくことで大きな負荷変化運転に対応可能である(Flexible Mode)。一方後者では負荷ホールド運転中にクリアランスを詰めることができ、定常運転時の性能を最大化できる(Performance Mode)。図 13 に負荷運転時の三方弁切り換えによるクリアランス挙動を示す。本システムにより性能を最大化したまま従来以上の運用性向上が可能であることを最終確認した。

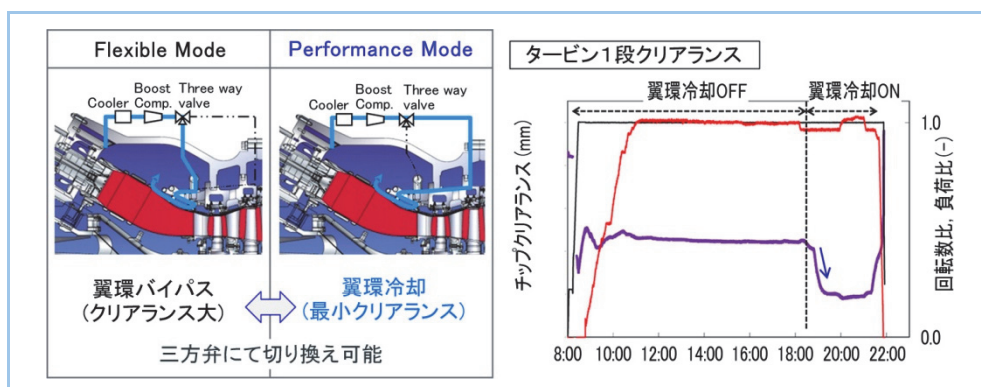


図 13 強制空冷システムによるタービンクリアランス制御

5.2 タービン翼メタル温度

1650℃級 JAC 形ガスタービンは、J形タービン入口温度に対し+50℃となるが、高性能化と信頼性を両立させるために超厚膜化 TBC を採用している。前述の通り、超厚膜化 TBC はT地点で長期検証し健全性を実施確認済であるが、その TBC を適用し冷却設計を最適化した JAC 形タービン1段静翼の特殊計測メタル温度分布を図 14 に示す。1段静翼は最も熱負荷の厳しい翼となり冷却構造も複雑となるが、局所的な高温部もなく、いずれの部位も設計許容温度以下であり、入口ガス温度 1650℃条件での健全性を確認し、約 2000 時間運転後の点検でも健全であることを確認した。

タービン1段動翼についてはテレメータ計測による翼面メタル温度/振動応力の確認に加え、T地点で導入実績のあるパイロメータ計測を実施した。燃焼器車室及びタービン1段静翼に挿入孔を設け、計測時にパイロメータを待機ポジションからガスパス内に挿入することで特に熱負荷の高くなる翼面前縁周囲の翼表面温度分布の健全性を確認し、約 2000 時間運転後の点検でも健全であることを確認した(図 15)。

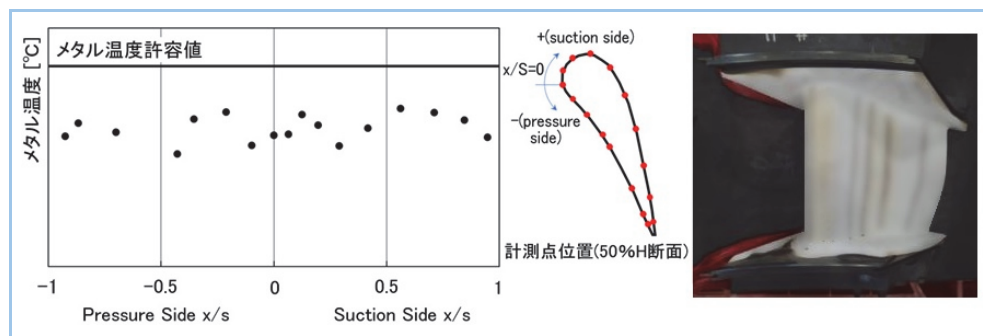


図 14 タービン1段静翼メタル温度分布計測結果と運転後点検結果

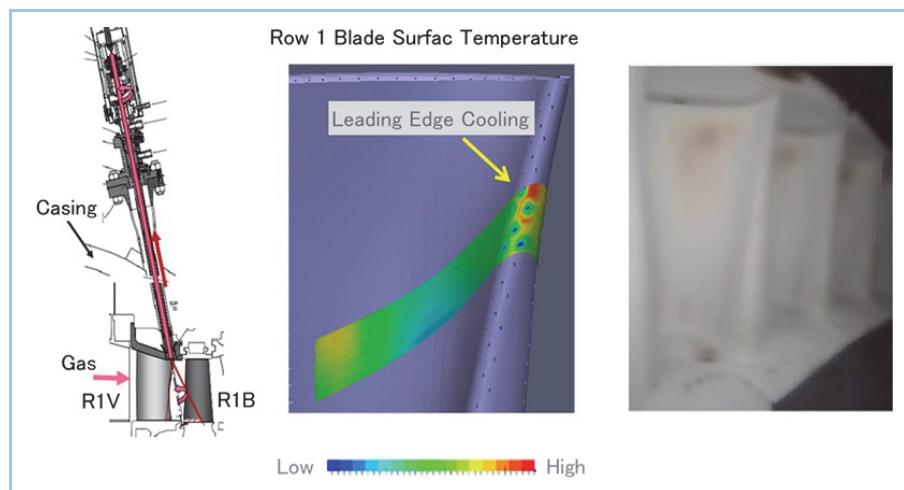


図 15 タービン1段動翼表面温度分布計測結果と運転後点検結果

5.3 高圧力比圧縮機

1650℃級 JAC 形ガスタービンの圧縮機は、圧力比をJ形 23 から 25 へ上昇させているが、高圧力比圧縮機は出口流路面積を相対的に絞った設計とすることから、圧力比の低い起動中には流量が低下し、旋回失速が相対的に悪化する懸念がある。前述の通り、同様に圧力比 25 のH形圧縮機、及び、2018 年5月には、J形ベースで圧力比 25 として設計した圧縮機をT地点にて検証したが、JAC 形でも詳細な特殊計測を実施し、起動特性、翼の振動応力や空力性能が良好であることを最終確認した。(図 16)。

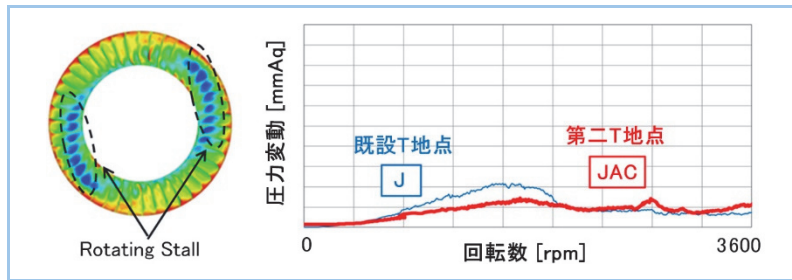


図 16 JAC 形ガスタービン高圧力比圧縮機実証結果

6. まとめ

GTCC の高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており、当社は 2004 年から参画した国家プロジェクト“1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発”の開発成果を活用して、世界初のタービン入口温度 1600℃の高効率機 M501J 形を開発、その運転実績を着実に積み重ねてきている。GTCC の更なる高効率化と運用性改善のため、実績ある J 形をベースに、燃焼器強制空冷システム、超厚膜 TBC、高圧力比圧縮機を中核技術として適用した、次世代 1650℃級 JAC 形ガスタービンを開発、個々の要素としては既設 T 地点で検証完了した。

JAC 形ガスタービン長期実証に向け、高砂工場内に複合サイクル発電所第 2 号発電設備（第二 T 地点）の建設を進めてきたが、昨年 2020 年 1 月から試運転を開始、約 2800 点にも及ぶ大規模の特殊計測を実施し、1650℃運転での JAC 形機器信頼性、性能等の健全性を最終確認した。第二 T 地点では 4 月 2 日にコンバインド定格出力 566MW 到達、発電設備としての機能確認を全て完了した後、7 月 1 日より商業運転を開始し現在も運転時間/起動回数を積み重ねている。

また、実証済の JAC 形ガスタービンは北米等の商用機向けにも順次出荷を開始している。米国ユタ州で計画されている GTCC 発電プロジェクト向けに水素混焼も計画されており、独自開発した燃焼器技術を組み込むことで、水素混焼率 30% で JAC 形ガスタービンを運転開始し、将来的には水素 100% での運転を目指している。

第二 T 地点の長期実証運転は、遠隔監視センター (RMC: Remote Monitoring Center) から行われ、ガスタービンなどの主要機器のみならず、補機を含めたプラント全体の信頼性向上、起動時間短縮や運転パラメータの自動最適化など、デジタルソリューション“TOMONI”に搭載された各種アプリケーションの検証を行い、将来的には自動自律運転の実現も目指していく予定である。

参考文献

- (1) 若園, 由里他, 最新鋭 1650℃級 JAC 形ガスタービンの実機実証, GTSJ Vol.48 No.6 (2020.11)
- (2) 高村, 若園, 由里ほか, J 形ガスタービンの運転実績踏まえた 1650℃級 JAC ガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.3 (2019)
- (3) 松見, 川村ほか, 負荷変動に対応する MHPS のガスタービン技術, GTSJ Vol.47 No.1 (2019.1)
- (4) Hada, S., Masada, J., Ito, E. and Tsukagoshi, K., Evolution and Future Trend of Large Frame Gas Turbine for Power Generation - A new 1600 degree C J class gas turbine -, ASME Turbo Expo, GT2012-68574
- (5) 羽田, 由里ほか, 発電用高効率ガスタービンとその運転実績, 三菱重工技報 Vol.52 No.2 (2015)
- (6) 塚越, 発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望, GTSJ Vol.41 No.1 (2013-1)
- (7) 高田, 次世代ガスタービンコンバインドサイクル発電設備の開発, GTSJ 第 43 回ガスタービン学会定期講演会(米子)講演論文集 (2015-9)
- (8) 山崎ほか, 次世代ガスタービンコンバインドサイクル発電設備開発への取組み, 『火力原子力発電』別冊 (CD-ROM) (2013 年 2 月 発刊)
- (9) 若園, 由里, 正田ほか, J 形ガスタービンの運転実績と JAC の開発, 三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)