

1650°C級 M501JAC 形ガスタービンを有する 第二T地点実証発電設備での運転状況

Operation Status of 1650°C Class M501JAC Gas Turbine at New T-point 2 Demonstration Plant



森本 一毅* ¹ Kazuki Morimoto	松村 嘉和* ² Yoshikazu Matsumura
鈴木 健太郎* ¹ Kentaro Suzuki	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°C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°C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°C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を実施の上、2020 年7月より商業運転を開始した。本報では、試運転検証結果、及びその後の運転状況について紹介する。

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°C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°C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°C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°C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°C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 の開発に取り組み、その中核

*1 三菱パワー株式会社 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 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 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 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 ガスタービン技術総括部 総括部長

技術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。このたび、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合せた出力 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 形の実証結果と、その後約1年間の商業運転を踏まえた運転状況について紹介する。

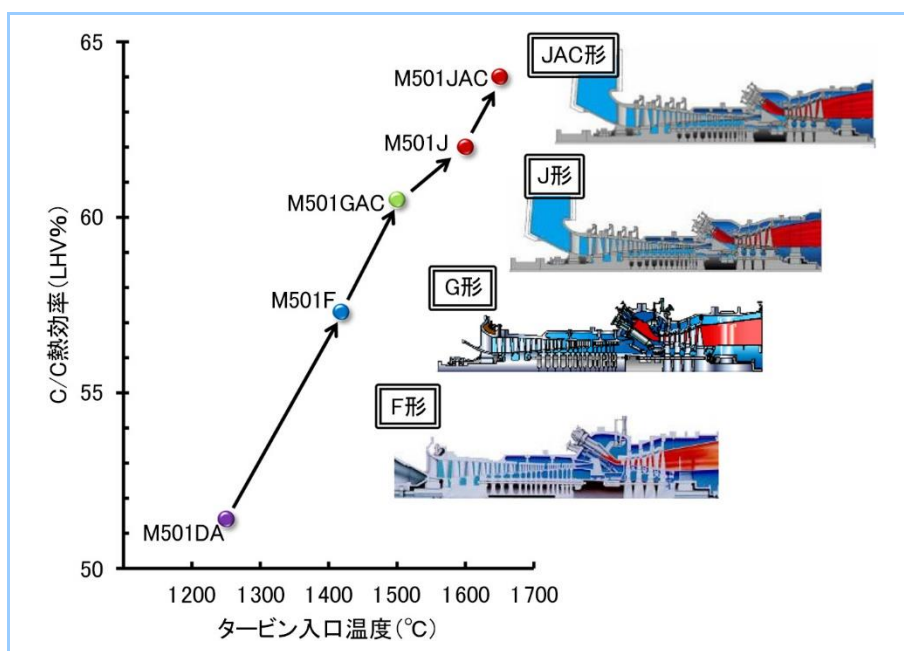


図1 大型ガスタービンの機種開発変遷

2. 1650℃級 M501JAC 形ガスタービンの開発コンセプト

当社では、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2, 3)、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)。

- 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 M501H形(1999-2000 年に検証済、以下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。

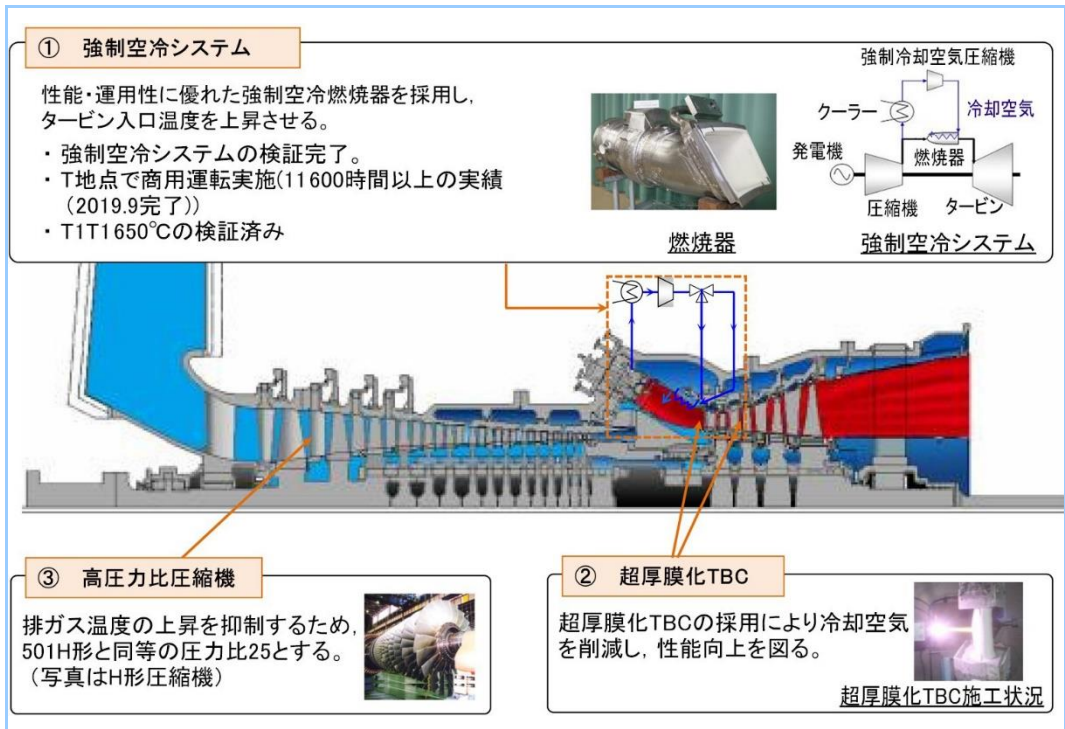


図2 1650°C級 JAC 形ガスタービンの開発コンセプト

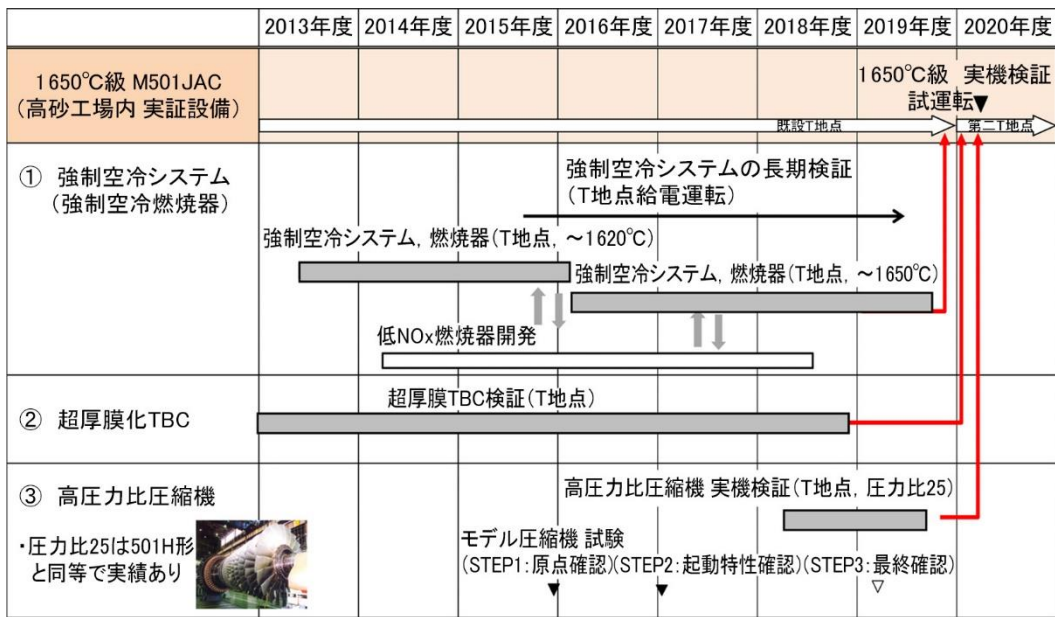


図3 要素技術の1650°C級 JAC 形ガスタービンへの適用の流れ

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

3. 1650°C級 M501JAC 形ガスタービンの第二T地点における検証結果と運転状況

第二T地点は、1650°C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合せた出力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4, 5)。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。

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6)。また、その後約1年間の商業運転、及び検証試運転を実施し2021年3月休転時に点検した状況について紹介する。

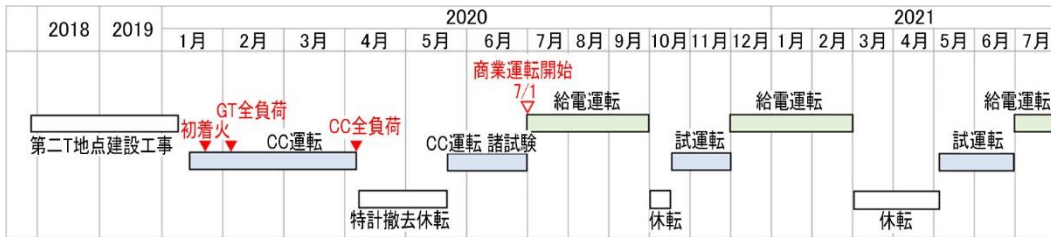


図4 第二T地点の試運転工程

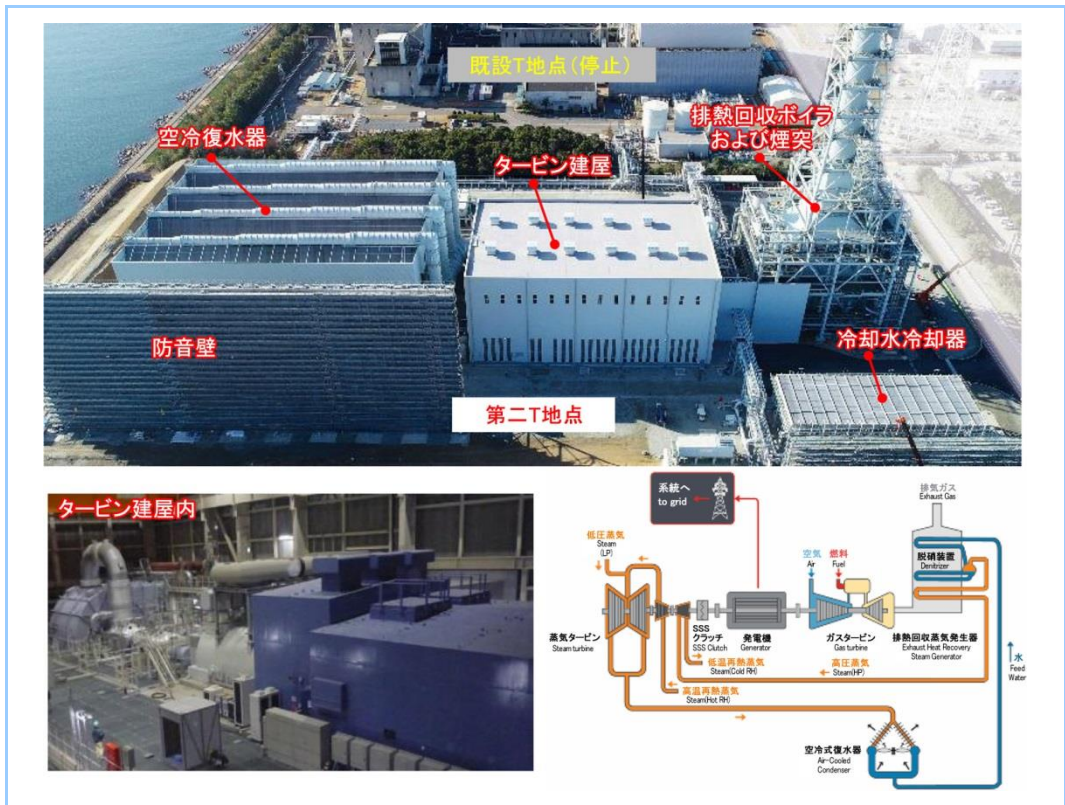


図5 第二T地点 コンバインドサイクルプラント概要

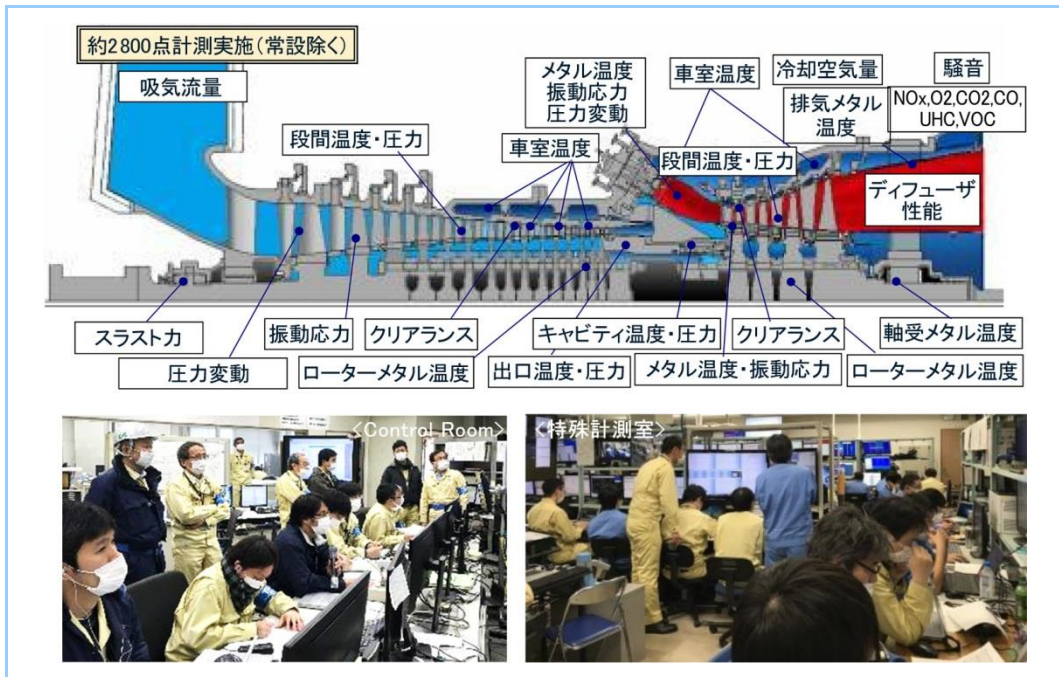


図6 試運転及び特殊計測実施状況

3.1 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7)。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。

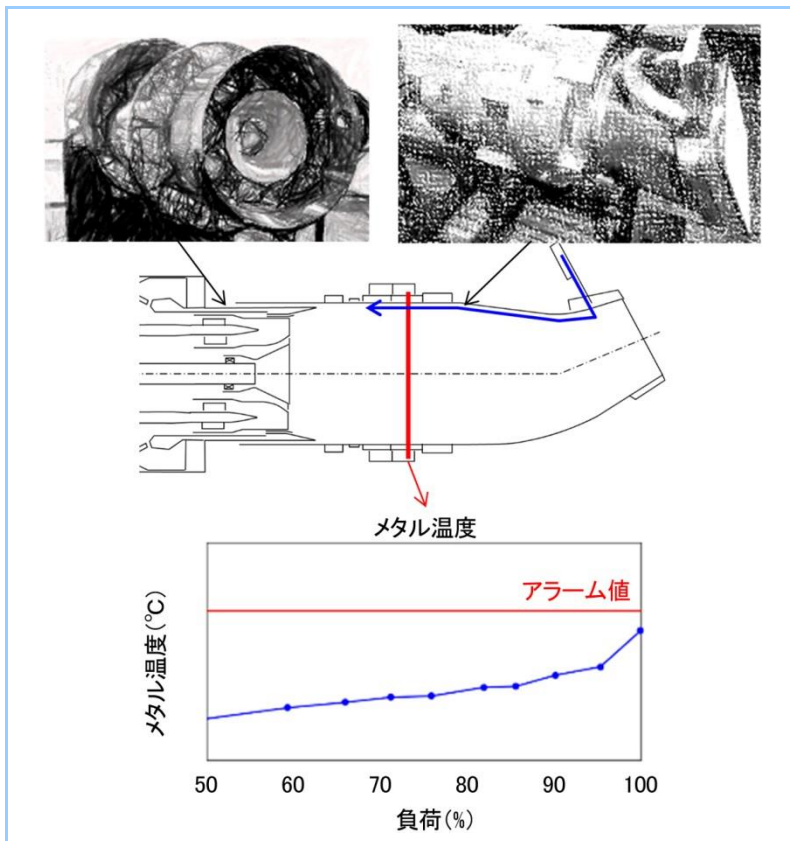


図7 強制空冷燃焼器のメタル温度計測結果

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8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。

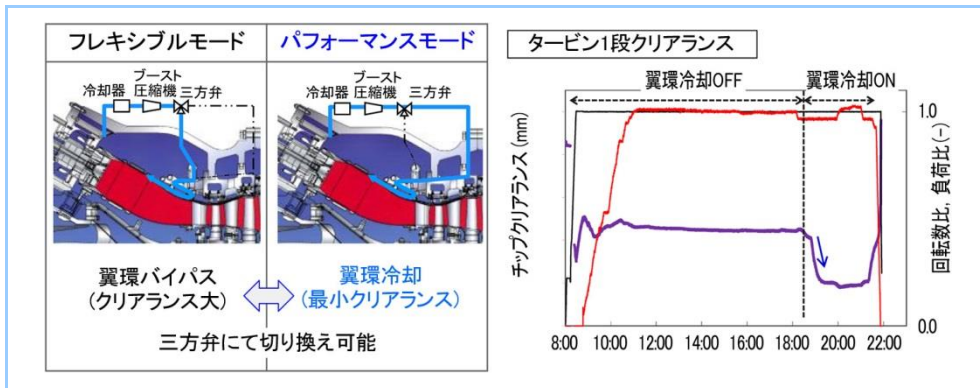


図8 強制空冷システムによるタービンクリアランス制御

3.2 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9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、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、運転後の点検でも健全であることを確認した(図10)。

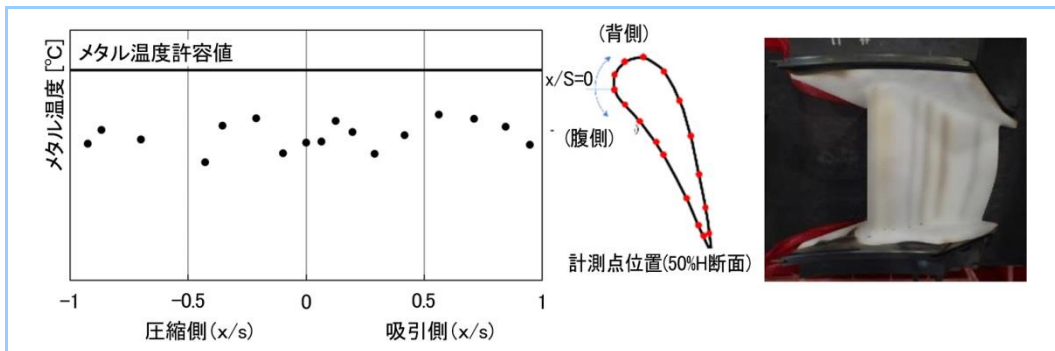


図9 タービン1段静翼メタル温度分布計測結果と運転後点検結果

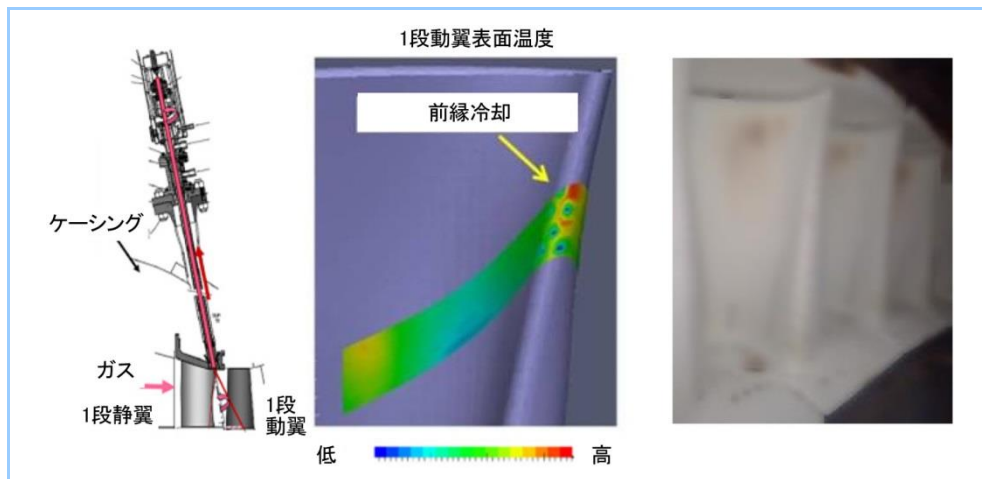


図 10 タービン1段動翼表面温度分布計測結果と運転後点検結果

3.3 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 11)。

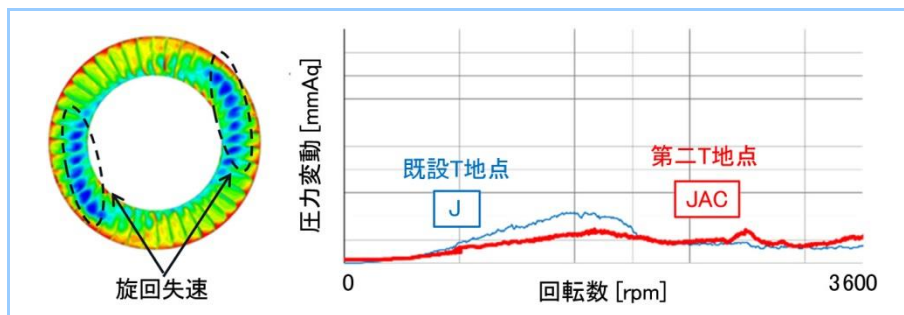


図 11 JAC 形ガスタービン高圧力比圧縮機実証結果

3.4 1年間運転後のガスタービンの状況

2020 年 1 月より試運転を開始し、同年 7 月 1 日に商業運転を開始してから、約 1 年間の給電運転及び検証試運転を実施し、2021 年 3 月にガスタービン各部の点検を実施し、圧縮機、燃焼器、タービン、吸排気構造など機器として健全であり長期信頼性に問題ないことを確認した(図 12)。

2021 年春の検証試運転完了後は、再び給電運転を継続し、運転時間/起動回数を重ねるとともに、長期信頼性の継続確認を実施していく。

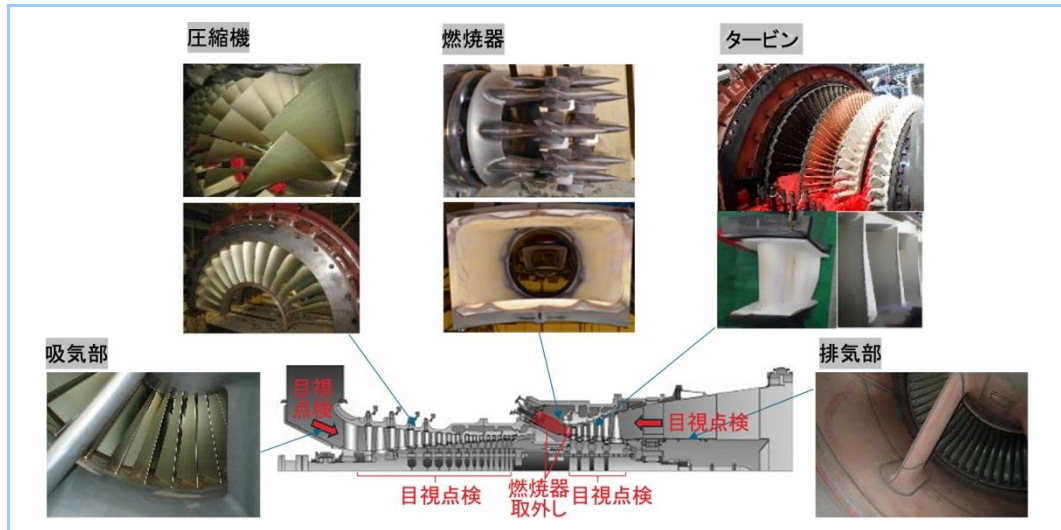


図 12 JAC 形ガスタービン 2021 年3月点検結果概要

3.5 JAC 形ガスタービンの今後の展開

以上のように、第二T地点実証発電設備にて実証され、長期信頼性を有することを確認された JAC 形ガスタービンは、以下に示す通り、顧客向け商用機の建設及び運転が開始されており、世界の更なる安定エネルギー供給に向け着実に邁進している。60Hz M501JAC 形ガスタービンについては北米などの商用機向けに 2020 年9月から順次出荷を開始しており、各地で現地据付工事を進めているところである(図 13)。また、タイ向けに受注した 50Hz M701JAC 形ガスタービン8基のうちの初号機が、コロナ禍の中であったもののスケジュール通り2021年3月31日に運転開始を迎えている。引き続き、2024 年の全号機運転開始に向けて、残りの号機の建設工事を進めているところである(図 14)。



図 13 M501JAC 形ガスタービン商用機の出荷の様子(60Hz)



図 14 M701JAC 形ガスタービン商用機 運転開始(50Hz)

4. まとめ

GTCCの効率化には、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°C 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°C 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二号発電設備(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°C 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、その後、需給要求に従い運用して運転時間/起動回数を積み重ねている。約一年間の運転後の各構成要素は健全であり、長期高信頼性を有することを確認している。

また、実証済の M501JAC 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、50Hz の M701JAC 形ガスタービンについても、コロナ禍の中スケジュール通り 2021 年 3 月にタイにて運転開始している。今後、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°C 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°C 級 JAC ガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.3 (2019)
- (3) 森本, 若園, 由里ほか, 1650°C 級 JAC 形ガスタービンを中核とする第二 T 地点実証発電設備での検証結果, 三菱重工技報 Vol.58 No.1 (2021)
- (4) 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)
- (5) 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
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) 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回(米子)講演論文集 (2015-9)
- (9) 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)]
- (10) 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)