

J形ガスタービンの運転実績をふまえた 1650°C級 JAC 形ガスタービンの開発

Development of 1650°C Class Next Generation JAC Gas Turbine based on J Experience



高村 啓太*¹
Keita Takamura

飯島 高善*²
Takayoshi Iijima

若園 進*³
Susumu Wakazono

羽田 哲*⁴
Satoshi Hada

由里 雅則*⁵
Masanori Yuri

片岡 正人*⁶
Masahito Kataoka

三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)は、豊富な運転実績と先端技術研究、検証に基づく絶え間ないガスタービン開発を通じて、地球環境保全及びエネルギーの安定供給に貢献し続けている。最近では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”の成果を活用して、世界初となるタービン入口温度1600°Cの高効率機M501J形を開発し、世界各国で運転実績を積み上げてきている。本報では、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(Thermal Barrier Coating)、高圧力比圧縮機を中核技術として適用した、次世代1650°C級のJAC(J Air Cooled)形ガスタービン開発状況について紹介する。これらは個々の要素としては検証済であり、最終的な検証として、2020年MHPS高砂工場内設備にて実機検証開始を予定している。

1. はじめに

近年、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たガスタービンコンバインドサイクル発電プラント(GTCC)の重要性が高まっている。GTCCの高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており、MHPS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。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”に参画して高温・高効率化に欠かせない最新技術の研究開発に取り組み、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。MHPS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(T地点)にて2011年から実証運転を開始し、その後M501J形GTCCの運転実績を着実に積み重ねている。

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、MHPS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、その中核技術である強制空冷システムを考案した。2015年春にMHPS高砂工場内のT地点にてシステム全体

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部 技術士(機械部門)

*2 三菱日立パワーシステムズ(株)ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部

*3 三菱日立パワーシステムズ(株)ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部 首席技師

*4 三菱日立パワーシステムズ(株)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 工博 技術士(機械部門)

*5 三菱日立パワーシステムズ(株)ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部 次長

*6 三菱日立パワーシステムズ(株)ターボマシナリー本部大型ガスタービン技術部 部長

の検証試験を完了し、その後、現在まで10000時間以上の長期運用を実施している。本報では、MHPS 最新鋭の高効率ガスタービンの開発と運用状況、及び実績ある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 形ガスタービンの開発状況について紹介する。

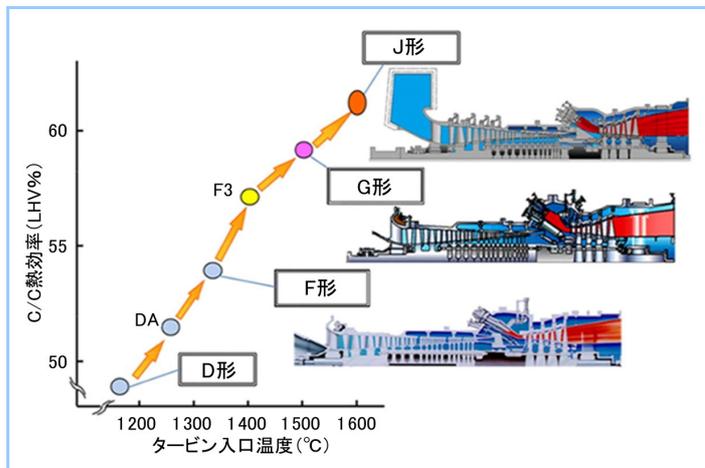


図1 大型ガスタービン機種開発の変遷

2. M501J 形ガスタービンの開発と実績

M501J 形は、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形で実証済み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℃が達成可能となった。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、従来型石炭焼き火力発電所を天然ガス焼き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。

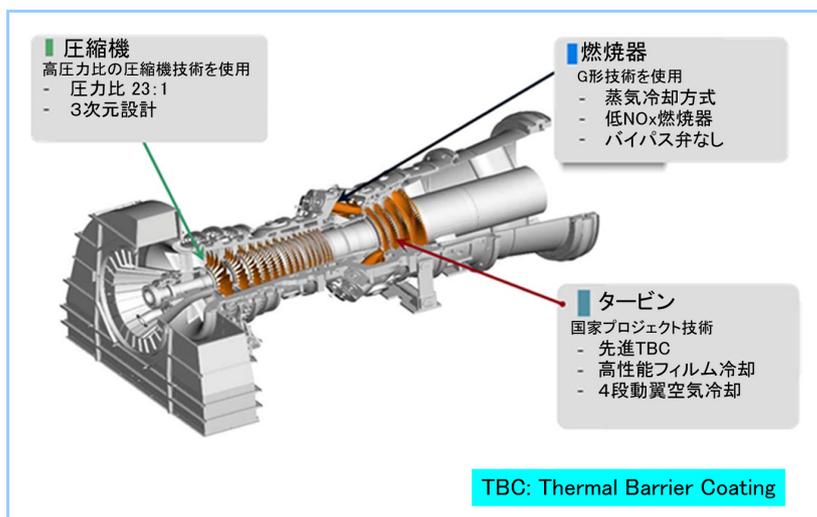
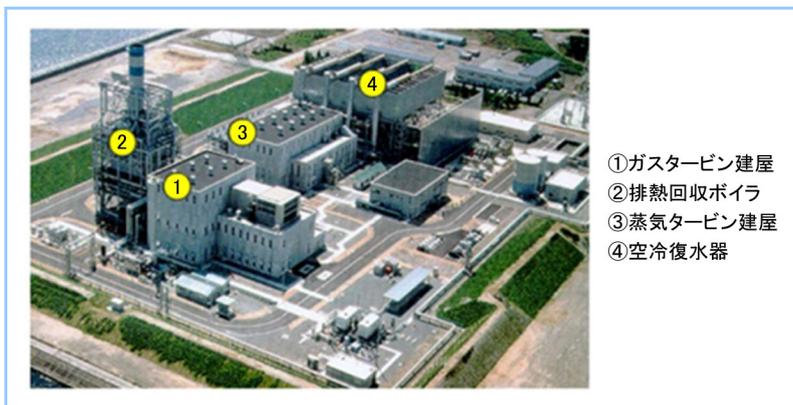


図2 M501J 形ガスタービンの技術的特徴

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実施というステップを踏んできた。図3にMHPS 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(通称T地点)の外観を示す。M501J形初号機に対して、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た上で、商用機を出荷している。J形ガスタービンは国内外合計 57 台受注、順次出荷しており、現在まで 39 台が商用運転に入っており、累計 76.8 万時間以上の運転時間を達成している(図4)。



①ガスタービン建屋
②排熱回収ボイラ
③蒸気タービン建屋
④空冷復水器

図3 MHPS 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(通称T地点)

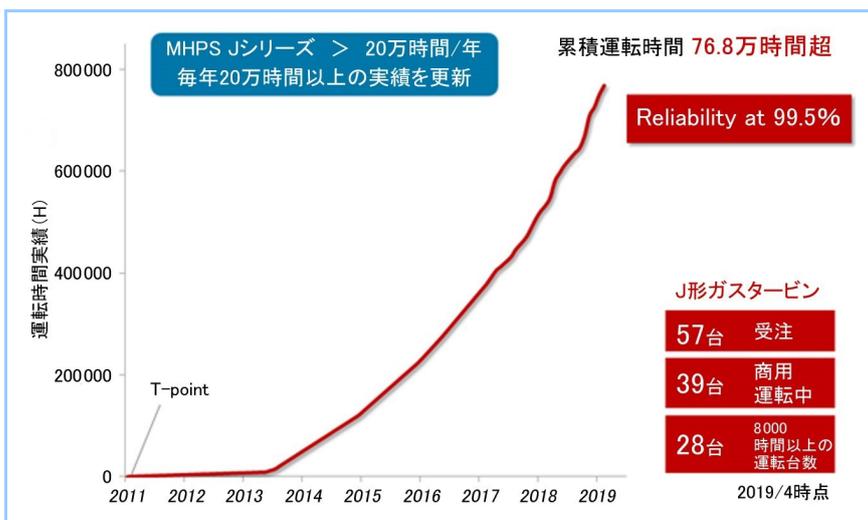


図4 M501J 形ガスタービンの実績(50Hz 機含む)

3. 次世代 1650°C級 JAC 形ガスタービンの基本コンセプト

MHPS では、実績のあるJ形に対し、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, を適用することによってJ形よりも高効率化, 運用性を改善させる1650°C級次世代 JAC 形ガスタービンの開発を進めている(図5)。

本ガスタービンの基本コンセプトについて以下に述べる。

- 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タービン入口温度を上昇させる。
- ②タービン入口温度が 501J 形から+50°Cとなるが、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、高性能化と信頼性を両立させる。
- ③圧縮機はH形と同等の高圧力比設計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6に示す通り、上記の個々の要素技術は検証完了しており、JAC 形へ反映、適用されている。

J形と JAC 形のガスタービン性能比較を、表1に示す。

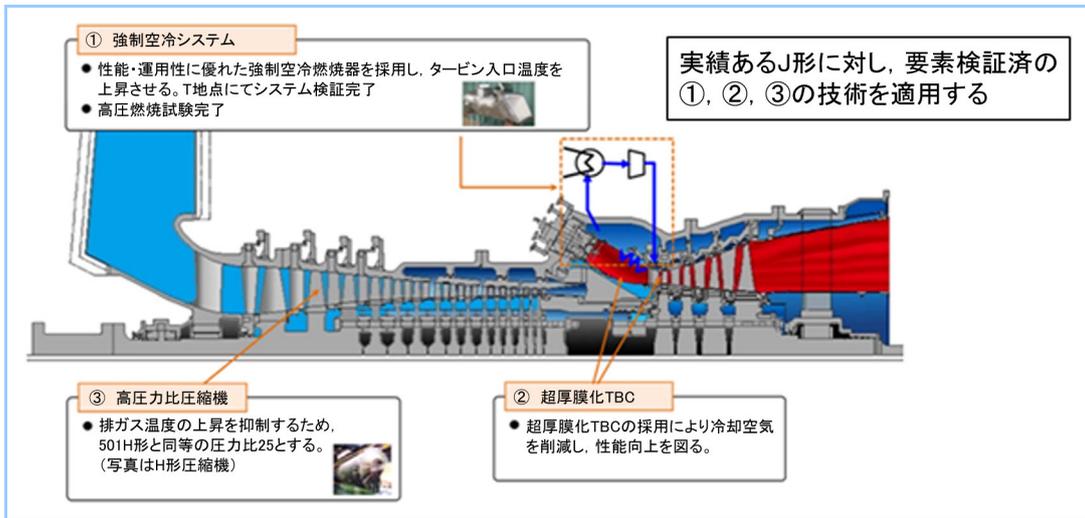


図5 1650°C級 次世代 JAC 形ガスタービンの基本コンセプト

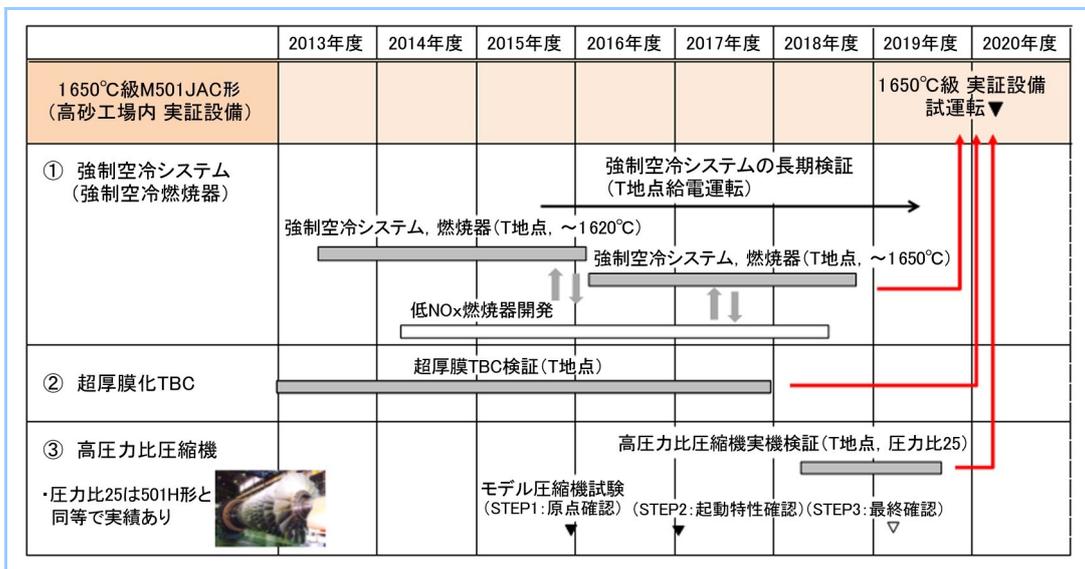


図6 要素技術の1650°C級 JAC 形ガスタービンへの適用ロードマップ

表1 ガスタービン性能 (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	425
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	614
コンバインドサイクル効率 (%-LHV)	62	64

4. 次世代1650°C級JAC形ガスタービンに適用する要素技術検証状況

本項では、JAC 形ガスタービンに適用する要素技術の検証状況について述べる。図6に示すように、これらは個々の要素としては検証済であり、最終的な検証として2020年より実機検証を予定している。

4.1 燃焼器 強制空冷システム

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°C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、T地点に

で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(クーラー)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車室に戻す冷却システムとしている。図7に強制空冷システムの概略図を示す。

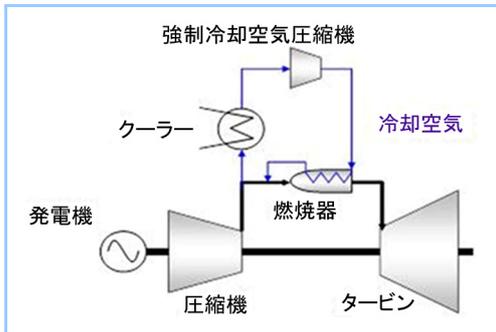


図7 強制空冷システム概略図

強制空冷システムの特徴について以下に述べる。

- (1) 強制冷却空気冷却器の排熱をボトムサイクル側で回収させ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

図8にT地点で実施した強制空冷システム検証設備全景及び系統概略を示す。

2015 年春、このT地点検証設備にて、強制空冷システムの運用性、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、すべ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を実施し、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。

T地点では今なお強制空冷システムにて運転、長期検証を実施しており、10000 時間以上の運転実績を積み上げている。

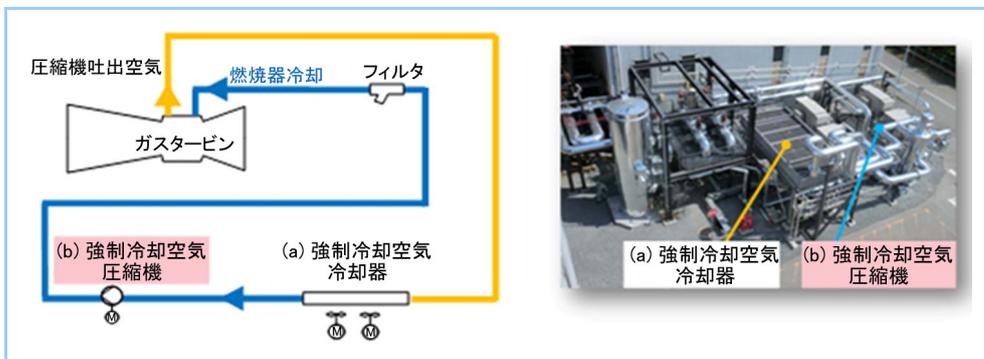


図8 T地点における強制空冷システム検証設備と系統

この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系統についても検証した。本系統では、冷却空気を、タービン翼環を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

で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)。一方後者では負荷運転中にクリアランスを詰めることができ、性能を最大化できる(Performance Mode)。図9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期待できる。

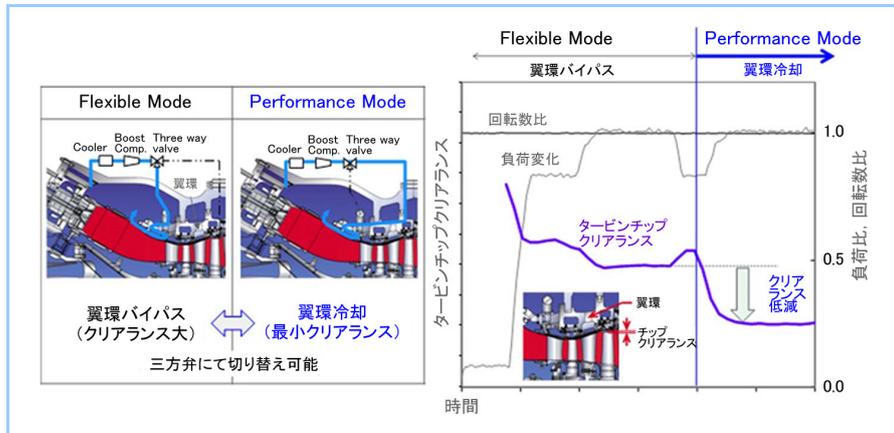


図9 強制空冷システムを利用したタービンクリアランスコントロール

4.2 超厚膜化 TBC(Thermal Barrier Coating)

1650℃級 JAC 形ガスタービンは 501J 形からタービン入口温度が+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、マイクロ組織、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 10 にタービン1段静翼にて実施した超厚膜化 TBC の検証状況を示す。



図 10 タービン1段静翼 超厚膜 TBC の検証状況

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する。高圧力比の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減少し、旋回失速が相対的に悪化する懸念があるが、MHPS は 2001 年 T地点H形圧縮機(圧力比 25)にて検証済である。これに加え、2018 年5月には、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(図 11)。

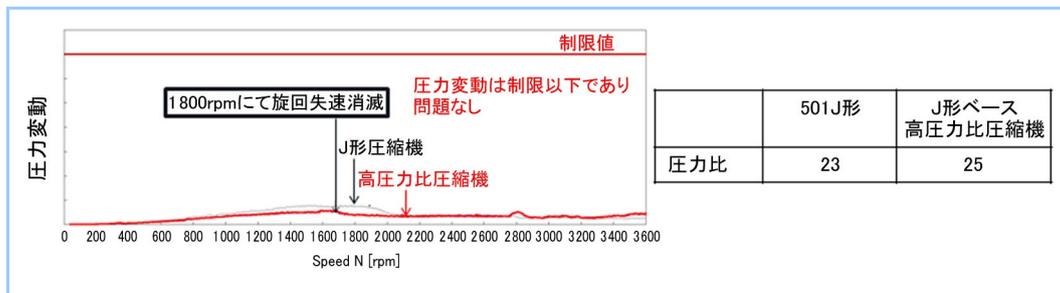


図 11 J形ベース高圧力比圧縮機の起動特性T地点検証結果

4.4 高温部材の 3D 積層技術

ガスタービン高温部品(静翼, 分割環)の冷却空気削減による性能向上を狙いとし, 現工法では製作不可能な複雑冷却構造の3D金属積層造形技術の開発を進めている。課題の一つである造形物の材料強度確保のため, 材料組成の調整と造形・熱処理プロセスの適正化に取り組み, 高温環境での3D金属積層造形物の要求強度を確保した。現在, ガスタービン高温部品(1段分割環)にて実証試験実施中である。今後は, 複雑構造の高精度造形技術の開発に取り組む計画である。



図 12 3D金属積層造形によって製作された分割環実証試験供試体

5. 次世代 1650°C級 JAC 形ガスタービンの実機検証

1650°C級 JAC 形は, 運転実績のあるJ形に対し, 検証済の要素技術を適用したガスタービンであり, 個々の要素としては検証されているが, 最終的な検証として 2020 年より初号機の実機検証を予定している。本章ではガスタービン初号機の製作状況, 及び実証のための高砂工場内設備の更新状況について述べる。

5.1 次世代 1650°C級 JAC 形ガスタービンの初号機製作状況

1650°C級 JAC 形初号機は, 3章のガスタービン設計基本コンセプト, 及び4章の要素開発検証結果に基づいて圧縮機, 燃焼器, タービン翼の開発設計を進め, 初号機の製作を完了した。回転部品については 2018 年 12 月に高速回転試験を実施し, ロータ軸, 圧縮機動翼, タービン動翼の加振試験によって離調成立性に関して問題ないことを確認しており(図 13), この結果を踏まえ, 2019 年6月に実証試験設備に向けて本体出荷を完了した。(図 14, 15)

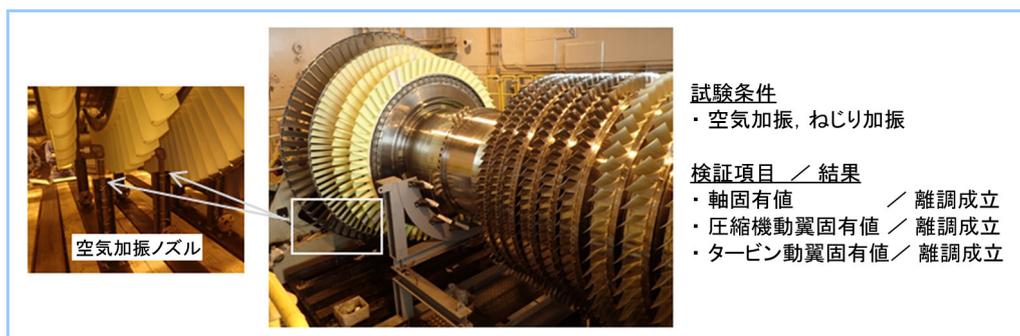


図 13 M501JAC 形ガスタービン高速回転試験



図 14 M501JAC 形ロータ本納め



図 15 M501JAC 形ガスタービン本体出荷

5.2 GTCC 実証設備の更新状況

新たに開発する GTCC の実証試験運転を行うには、ガスタービン本体だけでなく、既存の発電機、主変圧器、排熱回収ボイラなどの主要機器も次世代機の仕様に合うよう更新する必要がある。このため、既設のT地点実証設備を廃止し、新たな実証設備建設のため更新工事を実施中である。図 16 に新実証設備の建設状況を示す。

現在、2020 年の次世代 1650℃級 JAC 形の実証開始に向けて準備を進めており、これまでの G 形、J 形同様、新たな実証設備にて着実に検証を行っていき、更なる省エネルギー・低公害化の社会的ニーズに応えていく所存である。

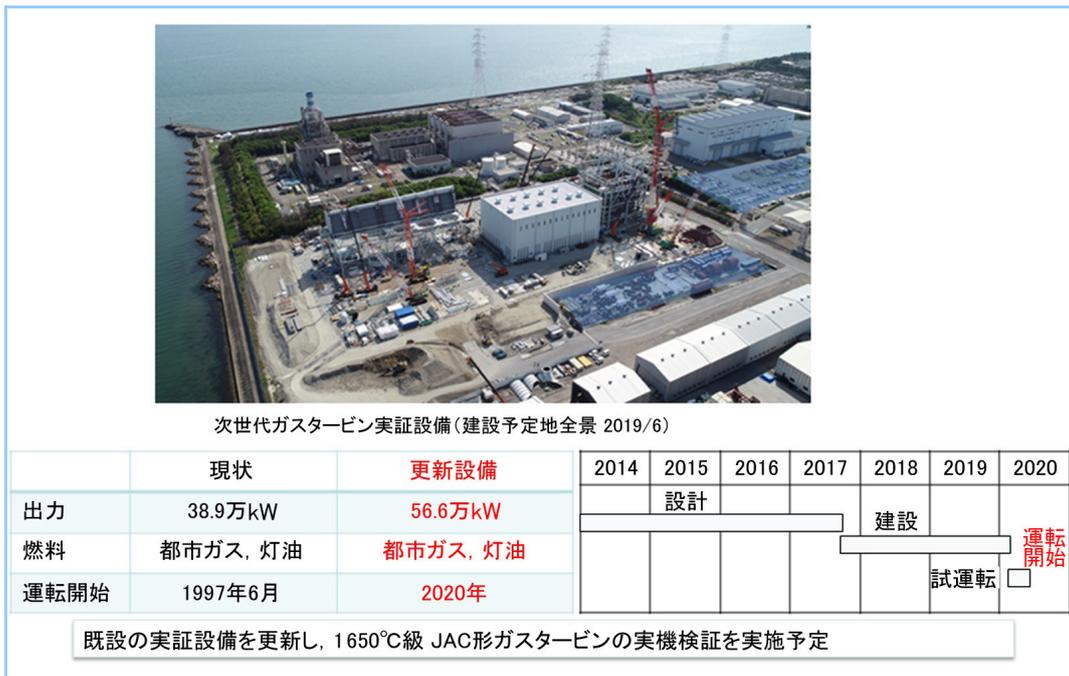


図 16 次世代 JAC 形ガスタービン実証設備

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、MHPS 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 形を開発し、その運転実績を着実に積み重ねてきている。MHPS は、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 形ガスタービンの開発を進めている。これらは個々の要素としては検証済であるが、最終的な検証として実機検証を予定しており、既設の T 地点実証設備を廃止し、新たな設備にて 2020 年実証開始予定である。

参考文献

- (1) 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
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 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)
- (5) 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)]
- (6) 若園, 由里ほか, 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)