

発電用高効率ガスタービンとその運転実績

High-efficiency Gas Turbine Development Applying 1600°C Class “J” Technology



羽田 哲^{*1}
Satoshi Hada

高田 和正^{*2}
Kazumasa Takata

岩崎 好史^{*2}
Yoshifumi Iwasaki

由里 雅則^{*3}
Masanori Yuri

正田 淳一郎^{*4}
Junichiro Masada

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に基づいたガスタービン開発により、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 形を開発し、2011年 MHPS 高砂工場内実証設備にて実証運転を開始、その後世界で販売、運転実績を重ねている。さらに、M501J 形(60Hz 機)に採用した中核技術を基に、J形の 50Hz 機となる M701J 形を開発、工場試験を実施後、出荷を完了した。本稿では、これら最新鋭の高効率ガスタービンの運用状況と開発状況、及び発電用大型ガスタービンの開発動向について紹介する。

1. はじめに

化石燃料を利用する発電設備の中でも最も高効率かつクリーンな発電設備であるガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)発電は、その優れた負荷追従能力から再生可能エネルギーとの親和性も高い。また、世界的な電力需要の拡大と、シェールガス田開発などによる天然ガス供給源の拡大を背景に、ますますその存在感を増してきている。

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いるが、MHPSは、1980年代に 1150°C級大容量ガスタービン M701D 形を開発、その後 1989年にタービン入口温度 1350°Cの M501F 形、1997年に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、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(図1)。その後 MHPS では、ガスタービンの更なる高効率化を目指し、2004年から国家プロジェクト“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・高効率化に必要となる最新技術の開発に取り組み、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の高効率機 M501J 形を開発、実証した。さらに、M501J 形(60Hz 機)に採用した中核技術を基に、J形の 50Hz 機となる M701J 形を開発した。また、J形の技術に加えて空冷燃焼器を採用し、J形ガスタービンと同レベルの性能を保ちながら運用性を改善した M501JAC 形の開発も並行して進めている。

表1にガスタービン性能と主要目を示す。本稿では、これら最新鋭の高効率ガスタービンの開発状況と運用状況について紹介する。

*1. 三菱日立パワーシステムズ(株) ガスタービン技術本部高砂ガスタービン技術部 グループ長

*2. 三菱日立パワーシステムズ(株) ガスタービン技術本部高砂ガスタービン技術部 主席チーム統括

*3. 三菱日立パワーシステムズ(株) ガスタービン技術本部高砂ガスタービン技術部 次長

*4. 三菱日立パワーシステムズ(株) ガスタービン技術本部 副本部長

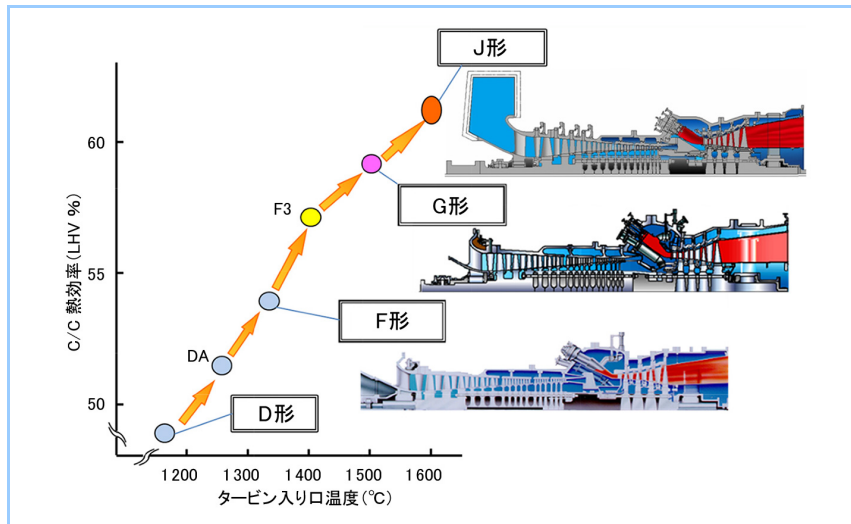


図1 大型ガスタービン機種開発の変遷

表1 ガスタービン性能(ISO, 標準条件)と主要目

	60Hz 機		50Hz 機
型式	M501J 形	M501JAC 形	M701J 形
回転数	3600rpm	3600rpm	3000rpm
GTCC 出力(発電端)	470MW	450MW	680MW
GT 効率 (低位発熱量基準)	41%以上	41%以上	41%以上
圧縮機/圧力比	15 段/23		
燃焼器	蒸気冷却式 16 缶	空気冷却式 16 缶	蒸気冷却式 22 缶
タービン	1～4段動翼 空気冷却 1～3段静翼 空気冷却 4段静翼 無冷却		

2. M501J 形ガスタービンの開発と検証

2.1 M501J 形ガスタービンの開発

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集大成するとともに、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の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。また、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。

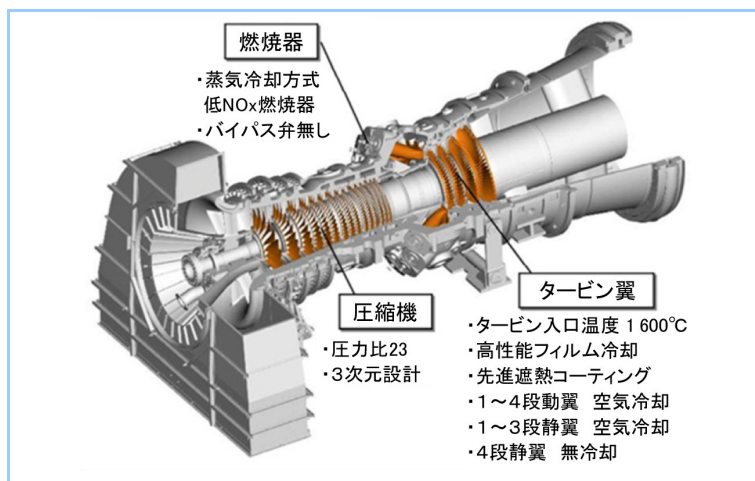


図2 M501J 形ガスタービンの特徴

2.2 T地点実証発電設備での検証

M501J 形の開発においては、基本設計段階において各要素の検証試験を実施し、その結果を詳細設計に反映し、最終的に実証発電設備にて実機検証後、商用機を製作している。

図3は MHPS 高砂製作所内にある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)の外観である。T地点は、M501G ガスタービン、蒸気タービン、排熱回収ボイラ(HRSG)を備えた実証設備複合サイクル発電所として建設され、1997 年1月から 2010 年 10 月まで 39253 時間、起動回数 2301 回の運転を行い、M501G 形の性能向上及び信頼性向上に大きく寄与した。

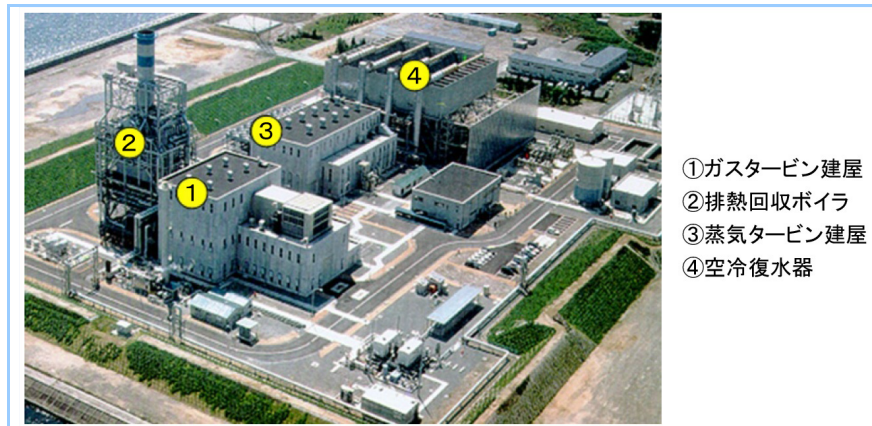


図3 MHPS 高砂製作所実証設備 複合サイクル発電所(通称T地点)

2010 年 10 月より M501G 形から M501J 形への換装工事を実施し、2011 年2月より M501J 形初号機の試運転を開始した。試運転は予定どおり進められ、2月2日の初スピン、2月7日に初着火、その後わずか7回の起動後にタービン入口温度 1600℃に到達した(図4)。

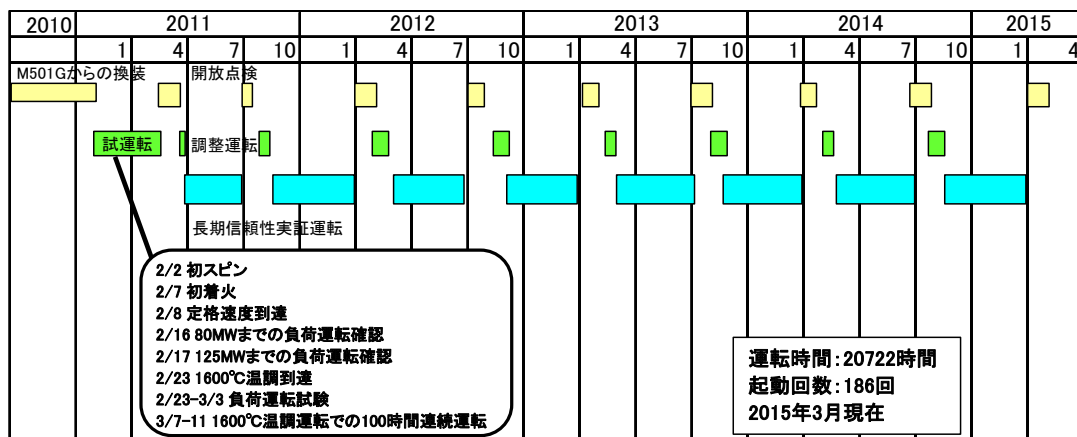


図4 T地点実証設備検証状況

その後4月末まで各種の試験を行い、開放点検を実施、各部品の健全性が確認された。この初号機に対しては、2300 点にわたる特殊計測を実施し、性能、機械特性、燃焼特性が目標値を満足することを確認した。T地点では2011 年7月より M501J 形の長期信頼性実証運転を行っており、2015 年3月末時点で起動回数 186 回、運転時間 20722 時間に達し、順調に実証運転を継続している。図5は、2014 年 10 月の本格点検結果を示しており、各部品の健全性を確認した。

なお、近年のガスタービンの開発設計では、要素試験や実機検証試験に加えて、CFD をはじめとした大規模解析を適用した最適化設計を行っている。M501J 形の開発設計及び検証結果の分析にも、これらの設計ツールが有効に活用されており、その結果は、本稿で紹介する高効率ガスタービンの開発にも反映され、性能及び信頼性の改善に大きく貢献している。図6及び図7は圧縮機の全段 CFD 解析結果の一例であり、CFD 解析結果が実機の状態を精度良くとらえていることが分かる。

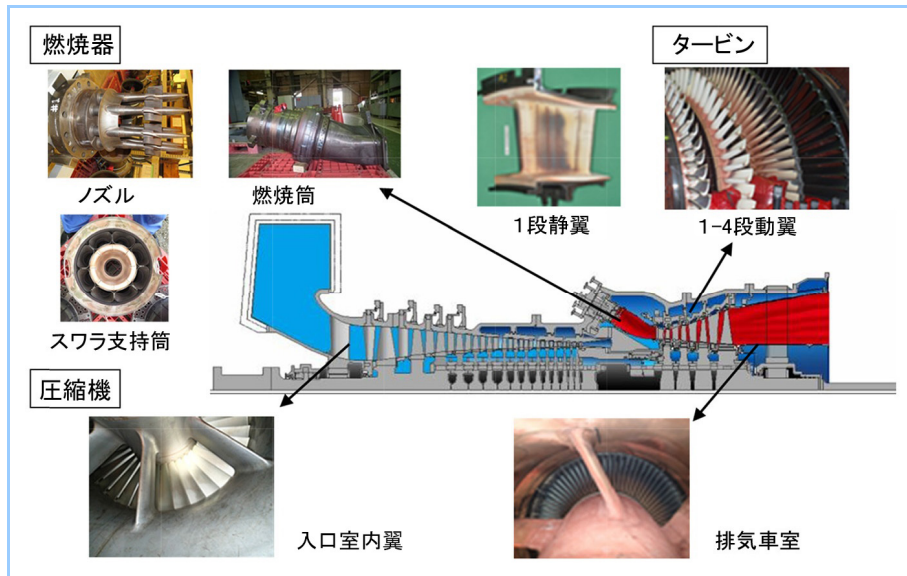


図5 T地点実証設備検証状況(運転時間 18466 時間, 起動 175 回後)

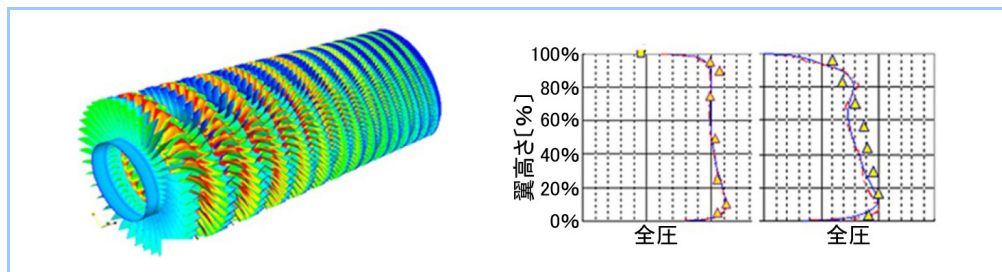


図6 実機圧縮機の全段 CFD 解析と全圧分布(左:5段静翼入口, 右:デフューザ入口)

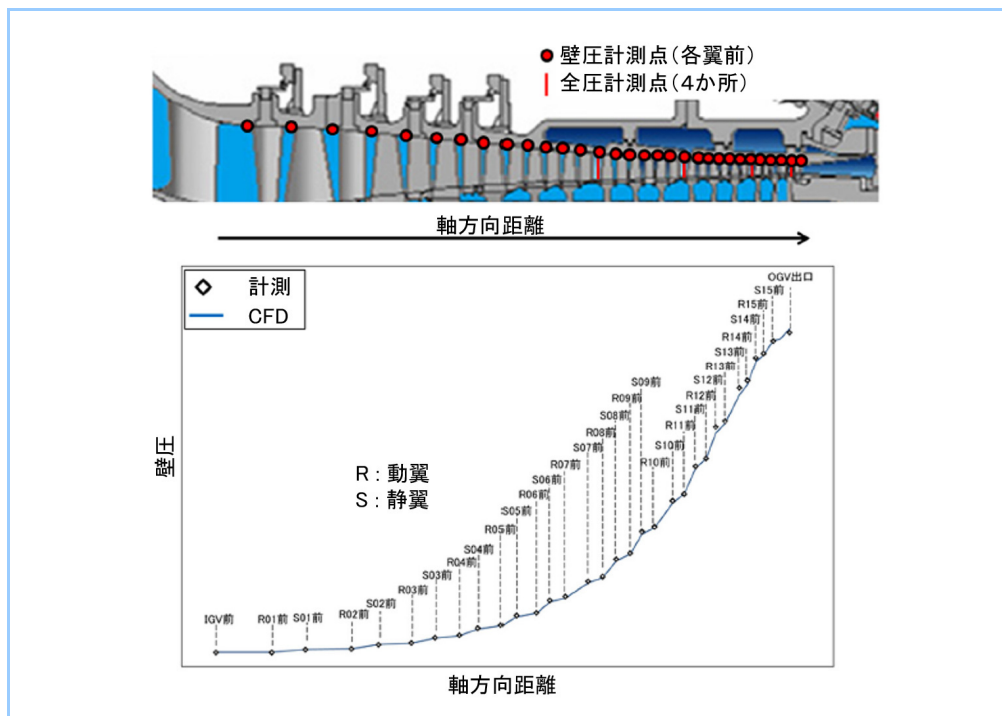


図7 実機圧縮機全段のケーシング面の圧力分布(計測 Vs. CFD)

3. M501J 形ガスタービンの運転実績

T地点で実証した M501J 形の商用機は、これまでに合計 34 台を受注して順次出荷されており、2012 年より試運転を開始した(図8)。既に関西電力(株)姫路第二発電所、韓国4発電所にて順調に運転実績を重ねて、現在まで累計 11 万時間以上の運転時間、1800 回以上の起動回数を達成した。

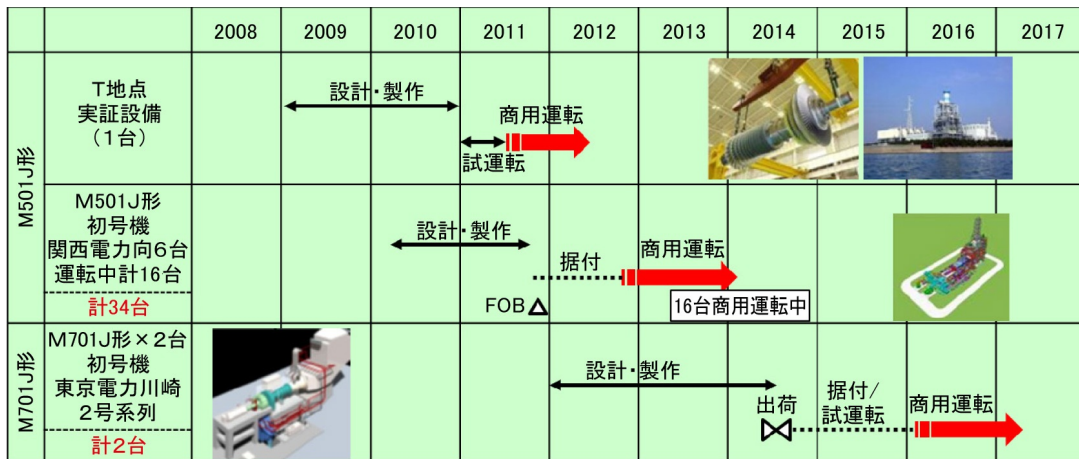


図8 運転スケジュール

関西電力(株)姫路第二発電所では 2013 年8月から 501J 形ガスタービンを用いた GTCC の1号機(501J 形ガスタービン1台と蒸気タービン1台の組合せで定格出力約 48.65 万 kW), その後連続して合計6台が商用運転に入った結果, 姫路第二発電所は総出力 291.9 万 kW(大気温度 4℃)の発電所(図9)となり, 関西電力(株)としては最大の火力発電所となった。



図9 関西電力(株)姫路第二発電所 M501J 形ガスタービンコンバインドサイクルプラント全景

韓国ではその電力需要に応じて, 既に M501J ガスタービンを 14 台受注しており, そのうち 10 台が 4 か所の発電所で運転開始している(2015 年3月現在)(図 10)。これらのプラントを除いて, M501J 形として, 国内1台, 韓国, 北米, その他を含めて合計 34 台の受注となっている。図 11 に商用運転開始した M501J ガスタービンの運転実績を示す。

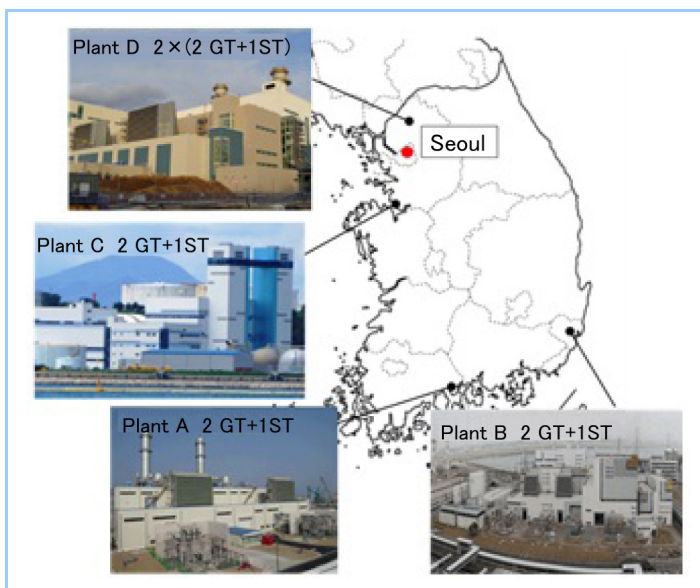


図 10 韓国 501J の運転状況

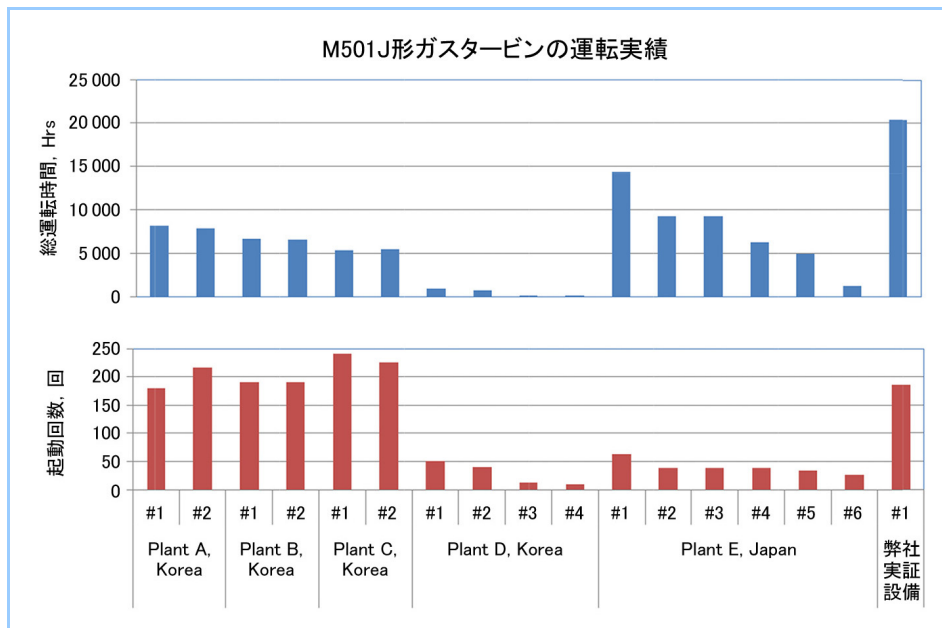


図 11 商用運転開始後の M501J 形運転実績 (2015 年2月現在)

4. J形の技術を適用したガスタービン開発

MHPSでは、このように優れた性能と高い信頼性が実証された M501J 形で採用した中核技術を基に、継続して高効率ガスタービンの開発を行っている。その一つが 1600℃級 J 形の 50Hz 機となる M701J 形であり、現在初号機の製作が進んでいる。また、空冷燃焼器を採用し運用性を改善させた M501JAC 形の開発も進めている。以下ではこれらの高効率ガスタービンの特徴について紹介する。

4.1 M701J 形ガスタービン

M501J 形(回転数 3600rpm, 60Hz)のスケール機である M701J 形(回転数 3000rpm, 50Hz)は、回転数比の逆数である 1.2 倍をスケール比とした完全スケール設計コンセプトを適用し開発した。すなわち、M701J 形の寸法を M501J 形の 1.2 倍スケールとすることで相似設計則が成立し、M701J 形の各部の応力、温度等の特性を M501J 形と同等に保っている。一方、風量及び出力はスケール比の二乗に比例するので、M701J 形の GTCC 出力は M501J 形の約 1.44 倍の 680MW となる(表1)。初号機の出荷は 2014 年に既に完了しており、2016 年の商用運転開始(図 12)を予定している。



図 12 東京電力川崎発電所 701J ガスタービン

4.2 M501JAC 形ガスタービン

M501JAC 形は、燃焼器に蒸気冷却を採用している M501J 形をベースに、M501GAC 形で実績のある空気冷却燃焼器を採用し、M501J 形と同レベルの性能を保ちながら、起動時間を短縮するなど運用性の改善を図ったガスタービンである。図 13 に M501JAC 形の特徴を示す。圧縮機は M501J 形と同一である。タービン部のフローパス形状も同じであるが、空冷燃焼器に合わせてタ

ービン動静翼の冷却構造を最適化している。燃焼器は M501GAC 形で実績のある空気冷却方式とし、J形で検証した低 NO_x 技術を適用した。M501JAC 形は 2015 年の初号機出荷を目指して開発中であり、2014 年にT地点実証設備で空冷燃焼器の検証を行った。

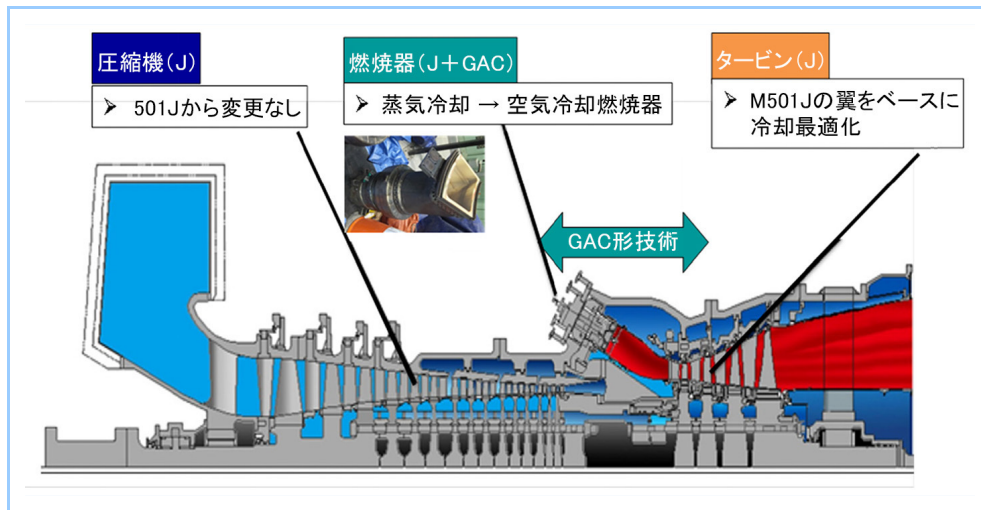


図 13 M501JAC 形ガスタービンの特徴

5. 次世代のガスタービン開発

J 形ガスタービンでは、燃焼器に蒸気冷却方式を採用しているが、タービン入口温度を高く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。以上のことから、MHPS は、次世代 GTCC の開発を行っており、タービン入口温度の高温化を指向して東北電力(株)との共同研究を行ったクローズド(次世代)空冷システムなど、空冷式 1650℃級ガスタービンの要素技術開発に着手し、複合発電効率 63%を目標に、2020 年代の実用化を目指して取り組んでいる。図 14 に次世代空冷システムの概略図を示す。このシステムは圧縮機出口(燃焼器車室)から抽気した空気を外部クーラにて冷却し、その後ブーストアップ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おり、以下の特徴を持つ。

- (1) 外部クーラからの廃熱をボトムリングサイクルに回収することに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蒸気冷却と同等以上の冷却性能にすることが可能
- (3) 蒸気冷却に比べ起動時間の短縮が可能

この次世代空冷システムは、MHPS 実証設備にて検証し、1600℃級ガスタービンに適用しつつ、空冷式 1650℃級ガスタービンの開発を進め、2020 年より実証開始を目標に空冷式 1650℃級ガスタービンコンバインド発電設備のプラント設計に取り組んでいく予定である。

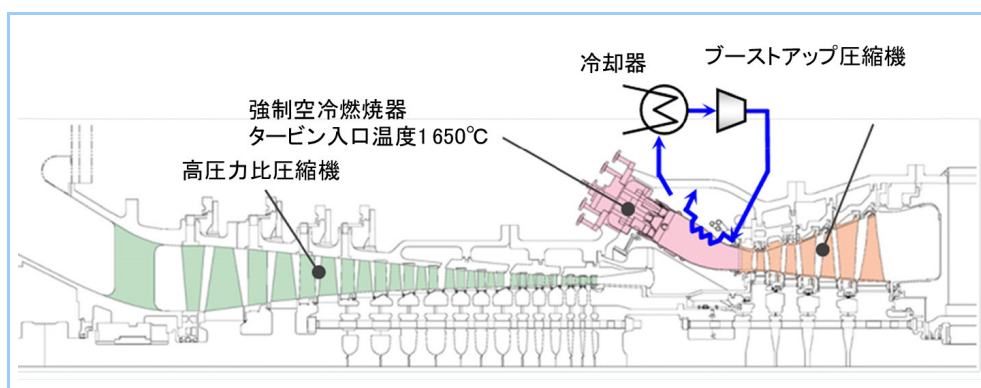


図 14 次世代空冷燃焼器を用いたガスタービンの特徴

6. まとめ

ガスタービンコンバインドサイクル発電 (GTCC) は化石燃料を使用する最もクリーンかつ高効率な発電設備として、環境、経済の両面に優れ、社会での期待が大きい。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、実証に成功した。さらに、その中核技術を基に、M701J 形及び M501JAC 形の開発・製作を進めている。また、その先の 1650℃級次世代空冷燃焼器を採用した更なる高効率機の開発をも進めている。これらのガスタービンは、高い性能と運用性を兼ね備えた高効率機として、今後電源の多様化・分散化が進む中で、世界の電力安定供給に貢献していく。

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) 羽田ほか, 世界初の 1600℃級 M501J 形ガスタービンの実証発電設備における検証試験結果, 三菱重工技報 Vol.49 No.1 (2012)
- (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) 伊藤, ガスタービンの主要コンポーネントや吸排気の CFD と最適化, GTSJ Vol.40 No.1 (2012-11)
- (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)]