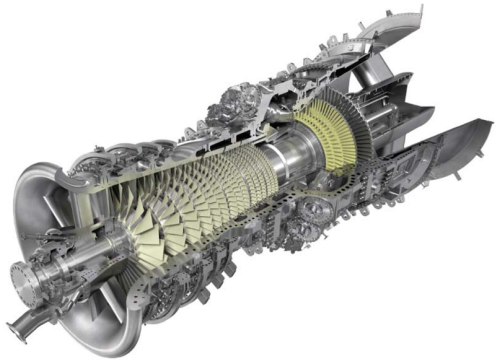
J形ガスタービンの運転実績と JAC の開発

Development of Next Generation JAC Gas Turbine based on J Experience



由里 雅則[*1] Masanori Yuri
正田 淳一郎[*2] Junichiro Masada
羽田 哲[*3] Satoshi Hada
若園 進[*4] Susumu Wakazono

三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)は，豊富なガスタービンの運転実績と先端技術研究，検証に基づく絶え間ない開発を通じて，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℃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℃の高効率機M501J形を開発し，MHPS 高砂工場内実証設備にて 2011 年から実証運転を開始した。その後世界各国へ納入，運転実績を積み上げてきている。さらに，ガスタービンコンバインドサイクル発電(GTCC)の更なる高効率化と運用性改善を狙い，燃焼器の冷却は蒸気冷却システムに換え新たに強制空冷システムを開発した。本稿では，MHPS 最新鋭の高効率ガスタービンの開発と運用状況，及び M501J 形に採用した技術を基に，強制空冷システムを中核技術として用いた次世代 1650℃級の JAC(J Air Cooled)ガスタービン開発について紹介する。

1. はじめに

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℃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。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することで，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。MHPS 高砂工場内実証設備(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きている。

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 高砂工場内のガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備にてシステム全体の検証試験を完了し，その後，現在まで長期運用されている。本稿では，MHPS 最新鋭の高効率ガスタービンの開発と運用状況，及び強制空冷システムを中核技術として用いた次世代 1650℃級 JAC(J Air Cooled)ガスタービンの開発について紹介する。

*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 次長
*2 三菱日立パワーシステムズ(株)ターボマシナリー本部 副本部長兼ガスタービン技術総括部長
*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 Gr 長 工博 技術士(機械部門)
*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 主席チーム統括

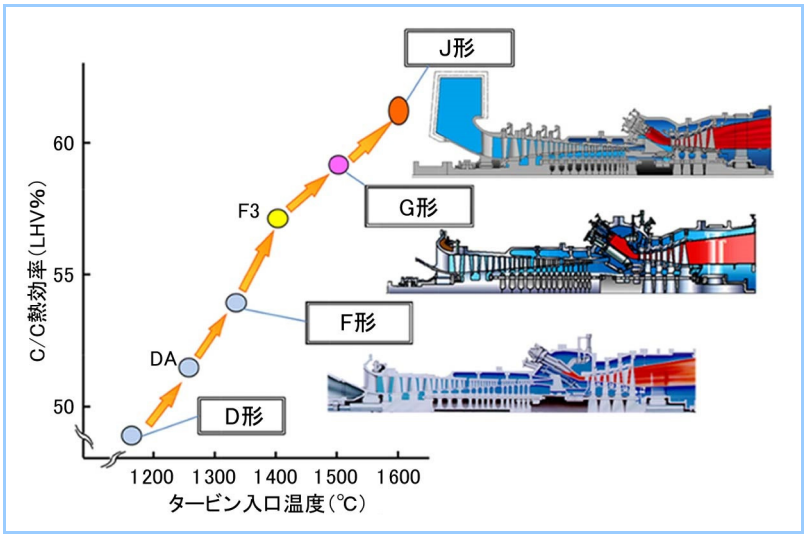


図1 大型ガスタービン機種開発の変遷

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。CO_2 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。

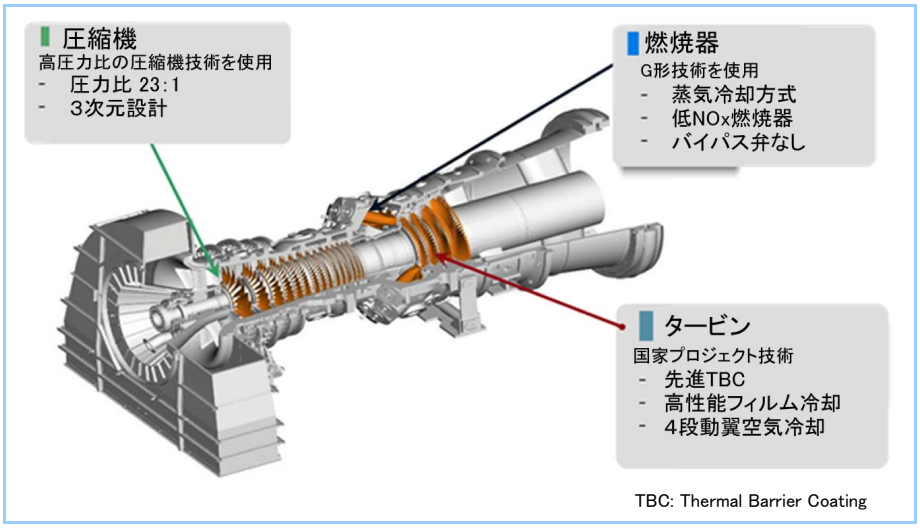


図2 M501J ガスタービンの技術的特徴

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 45 台受注，順次出荷しており，現在まで 23 台が商用運転に入っており，累計 40 万時間以上の運転時間を達成している（図4）。

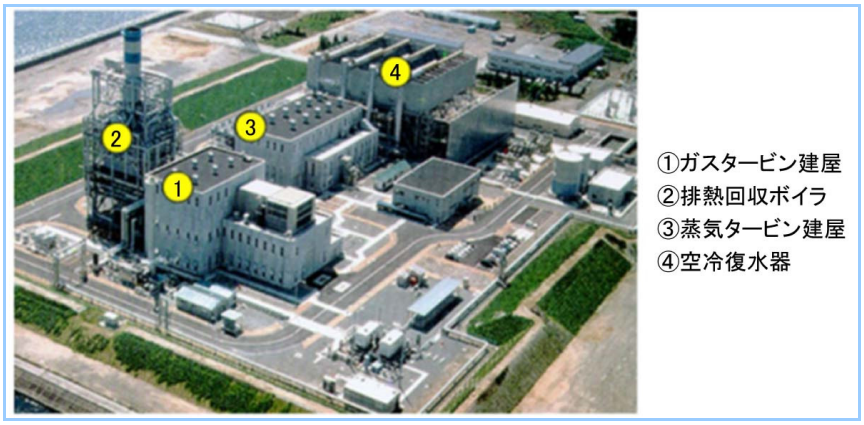


図3 MHPS 高砂工場 ガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備(通称T地点)

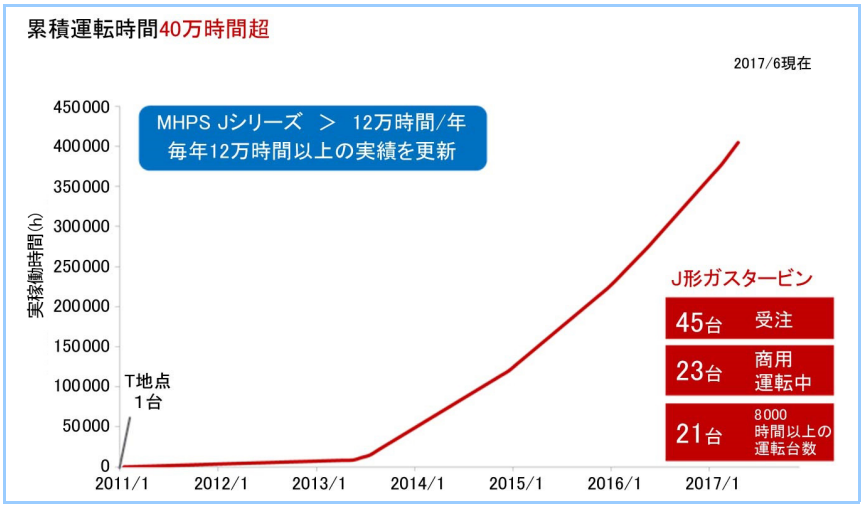


図4 M501J 形ガスタービンの実績(50Hz 機含む)

3. 次世代ガスタービンの中核技術

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。この強制空冷システムを採用すれば，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である。2015 年春に，T地点にてシステム全体の実機検証試験を完了したので，その概要を紹介する。

3.1 強制空冷システムの概要

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車室に戻す冷却系統としている。図5に強制空冷システムの概略図を示す。

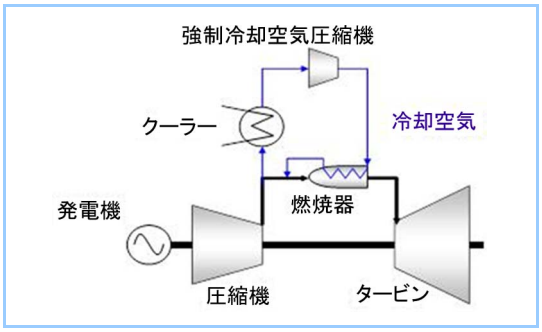


図5 強制空冷システム概略図

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廃熱をボトミング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廃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。

3.2 強制空冷燃焼器

強制空冷燃焼器の冷却構造は，J 形が採用している蒸気冷却同様に対流伝熱を利用した MT-FIN 構造を採用した。燃焼器の上流側は，燃焼器室内の空気により冷却する構造とし，下流側は，強制冷却空気圧縮機を介する強制冷却空気による冷却とした。強制冷却空気による冷却範囲は下流側のみに限定することにより，強制冷却空気圧縮機を経由する冷却空気量の最小化を図っている。また，下流側の冷却方向は，熱負荷の高い燃焼筒出口から供給することで出口部での冷却能力を確保しつつ，効率よく冷却する設計とした。上流側は，音響ライナを設置し燃焼振動の抑制を図っているが，MT-FIN を通じて燃焼筒を対流冷却した空気を音響ライナ孔からパージする構造とした。図6に燃焼筒の冷却構造の概略を示すこの強制空冷燃焼器は，後述する強制空冷システム全体の検証に先立ち，高圧燃焼試験設備にて冷却性能及び燃焼性に問題ないことを確認している。

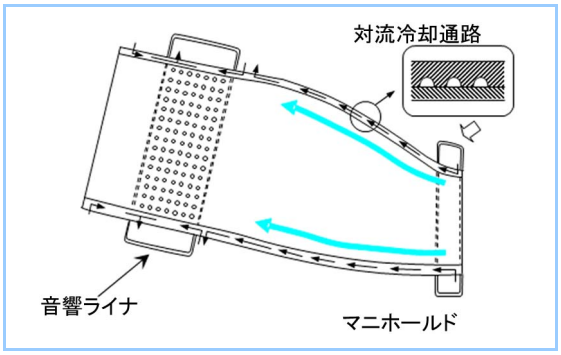


図6 強制空冷燃焼器 燃焼筒の冷却構造

3.3 強制空冷システム実機検証

図7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。強制空冷システムでは強制冷却空気冷却器の廃熱をボトミングサイクルにて回収するが，T地点検証では既存のボトミングシステムを流用するため，強制冷却空気冷却器としてラジエータ式の冷却器を追設した。

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。

また，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検証した。図8に冷却空気量変化時の燃焼器メタル温度挙動を示す。冷却空気量の低下に伴いメタル温度は上昇するが，当初計画の冷却空気量を下回っても，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。その他，燃焼振動特性，排ガスエミッションも特に問題なく，安定運用可能であることを確認できた。

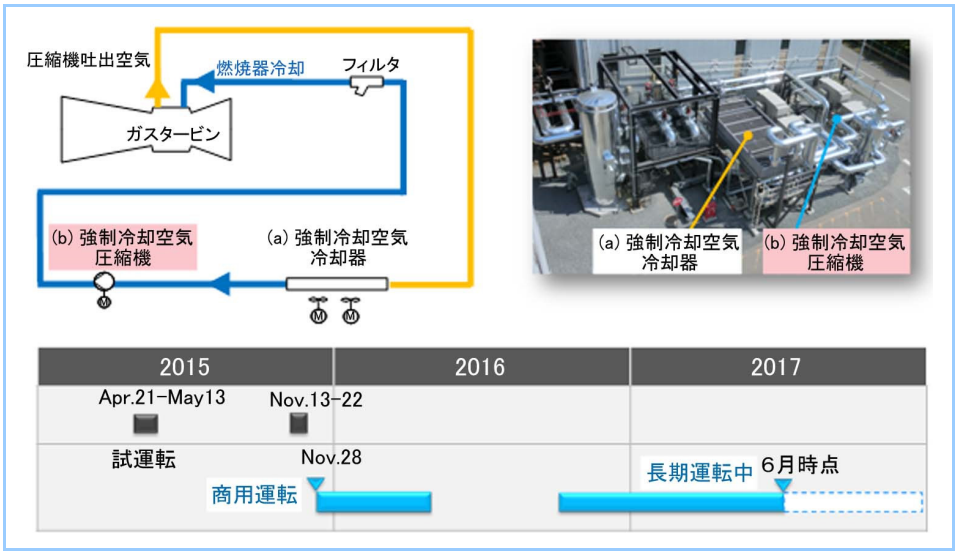


図7 T地点における強制空冷システム検証設備と系統

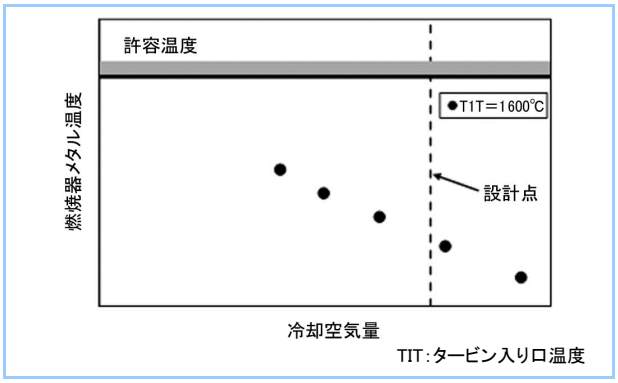


図8 強制空冷燃焼器メタル温度

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。

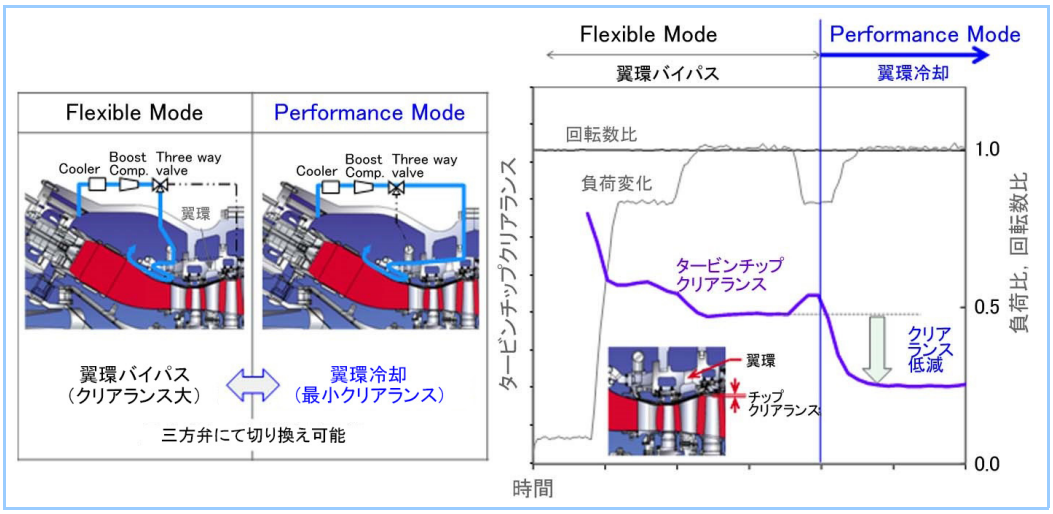


図9 強制空冷システムを利用したタービンクリアランスコントロール

4. 1650℃級次世代 JAC ガスタービンの開発

2015 年春にT地点で実機検証し，強制空冷システムは運用に問題ないことが確認できた。T地点では今なお強制空冷システムにて運転，長期検証されている。この強制空冷システムを中核技術に採用した 1650℃級次世代ガスタービンである JAC ガスタービンの開発が進められている。(図 10)タービン入口温度が 501J 形から＋50℃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(Thermal Barrier Coating)を採用し，高性能化と信頼性を両立させる。また圧縮機はH形と同等の高圧力比設計を採用することで，ガスタービン出口排気ガス温度の上昇を抑制している。

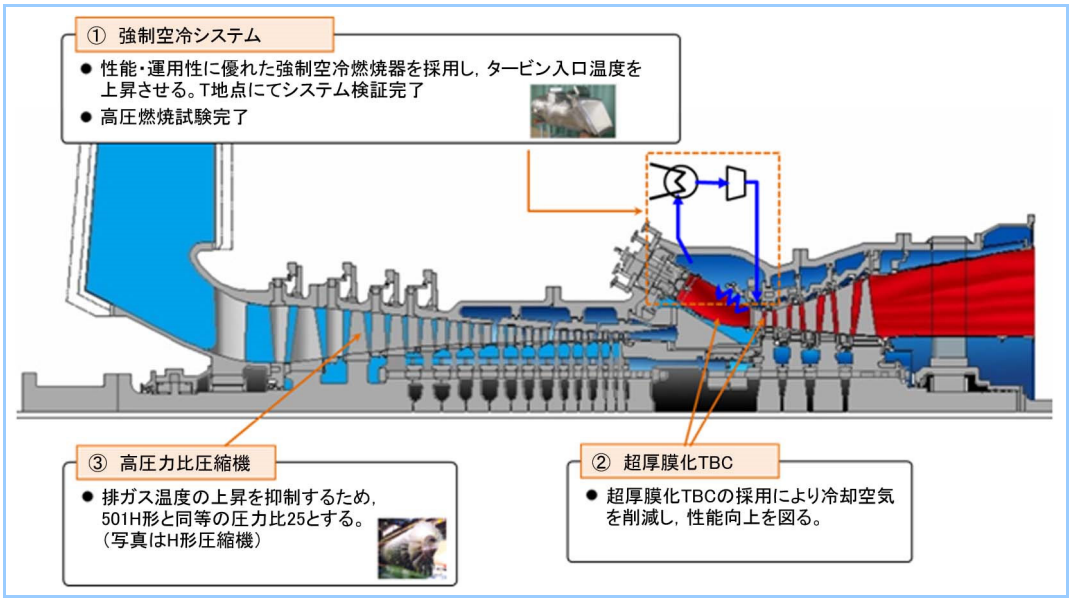


図 10 強制空冷燃焼器を用いた次世代ガスタービンの特徴

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ため，既設のT地点実証設備を廃止し，新たな実証設備として更新する予定である。図 11 に新実証設備の完成予想図を示す。現在，2020 年の実証開始を目標に開発を進めており，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。

	現状	将来
出力	38.9万Kw	51.8万Kw
燃料	都市ガス，灯油	都市ガス，灯油
運転開始	1997年6月	2020年

図 11 次世代ガスタービン実証設備とスケジュール

5. 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，三菱日立パワーシステムズ(株)(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，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，高温ガスタービンの空冷化を可能とする強制空冷システムを考案した。この強制空冷システムを 2015 年に MHPS 高砂工場内の実機検証設備にて検証し，運用に問題ないことを確認，現在まで長期運転されている。現在この強制空冷システムを中核とした 1650℃級次世代機種である JAC ガスタービンの開発を進めており，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)〕