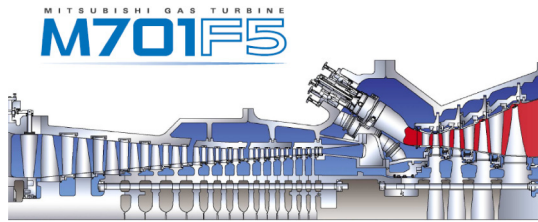


J 形ガスタービン技術を適用した 高効率/高運用性ガスタービン M701F5 形の開発

Development of the High Efficiency and Flexible Gas Turbine M701F5
by applying “J” class Turbine Technologies



安威 俊重^{*1}
Toshishige Ai

正田 淳一郎^{*2}
Junichiro Masada

伊藤 栄作^{*3}
Eisaku Ito

当社は、これまで培われた豊富な運転実績に加え、2004 年から参画している国家プロジェクト“1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発”をはじめとする先端技術研究の成果を取り入れることにより、絶え間ないガスタービン開発を進めており、地球環境保全やエネルギー安定供給の観点で社会に貢献し続けている。近年ではタービン入口温度を 1600℃級にまで上昇させ、61.5%以上のガスタービンコンバインドサイクル (GTCC) 熱効率が達成可能となる M501J 形の実証を 2011 年に成し遂げた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。M701F5 形は、既に実機にて運転実績のある J 形ガスタービン技術を用い高効率化を図るとともに、GAC 形で実績のある空気冷却燃焼器技術を採用することにより運用性を高めたガスタービンであり、2014 年に初号機が出荷される予定である。本稿では、M701F5 形ガスタービンの特徴と開発状況について説明する。

1. はじめに

ガスタービンコンバインドサイクル (GTCC) 発電は、化石燃料を利用する発電設備の中で最も高効率かつクリーンな発電設備であり、また負荷追従能力が優れていることから再生可能エネルギーとの親和性も高い。更に、シェールガス田開発などにより GTCC の主燃料となる天然ガスの供給拡大を背景に、世界的な需要がますます高まっている。

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いる。当社は、1984 年にタービン入口温度 1100℃級 M701D 形ガスタービンを開発して以来、GTCC プラントの大容量・高効率化、高信頼性化を目的とした技術開発を進め、1989 年に 1350℃級 M501F 形を、1997 年には 1500℃級 M501G 形を開発した。その後当社では、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℃級超高温ガスタービン要素技術開発”に参画して、高温・高効率化に必要な最新技術の開発に取り組み、その開発成果の一部を活用して、タービン入口温度 1600℃級で GTCC 熱効率 61.5%以上も達成可能となる M501J 形を 2011 年に開発、実証した(図1, 図2)。また、60Hz 機である M501J 形のスケール設計機である 50Hz 機 M701J 形の開発も完了し、2014 年に初号機が出荷される予定である。

また当社では新機種開発と平行して、既存機種についても新型機向けに開発された技術を適用することで継続的な改良設計を行っている。F形の 50Hz 機においては、1992 年に M701F 形の開発が完了した後、タービン入口温度 1500℃級の G 形で実証された新技術を順次 F2 形、F3 形、F4 形に取り入れ、性能及び信頼性の向上を実施してきた。現在、M701F4 形ガスタービンをベースにして、J 形ガスタービン技術等を取り入れた最新鋭機である M701F5 形ガスタービンの開発が完了し(図3)、2014 年の初号機出荷に向けて本体を製作中である。

*1 火力発電システム事業部 高砂ガスタービン技術部 主席チーム統括

*2 火力発電システム事業部 高砂ガスタービン技術部 部長

*3 火力発電システム事業部 高砂ガスタービン技術部 次長 工博

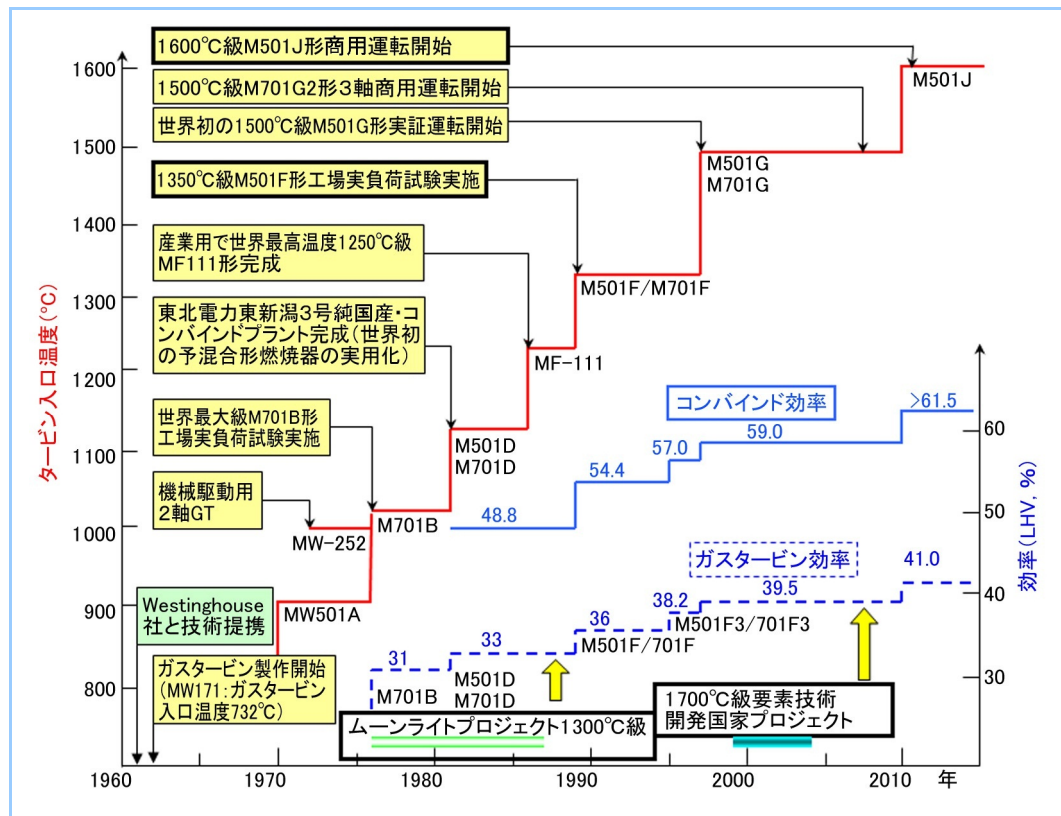


図1 三菱ガスタービンの高温化・高効率化の歴史

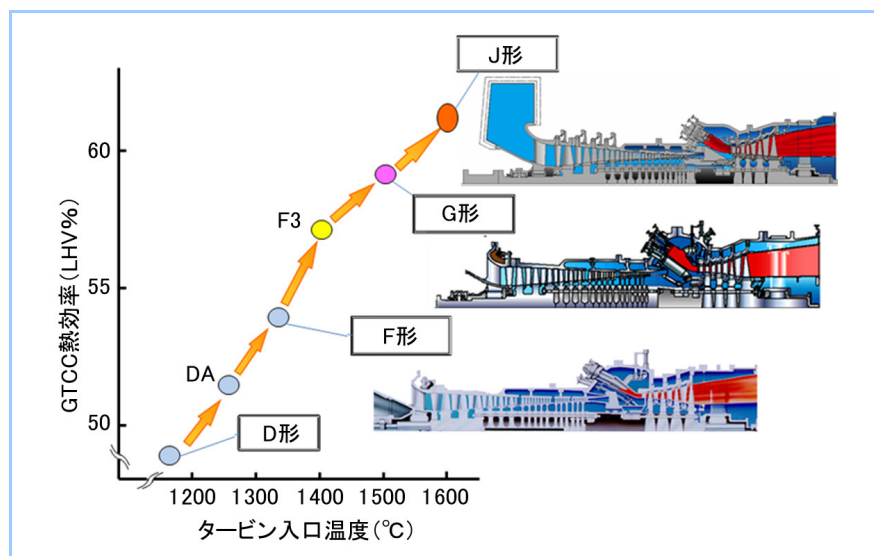


図2 ガスタービン機種開発の変遷

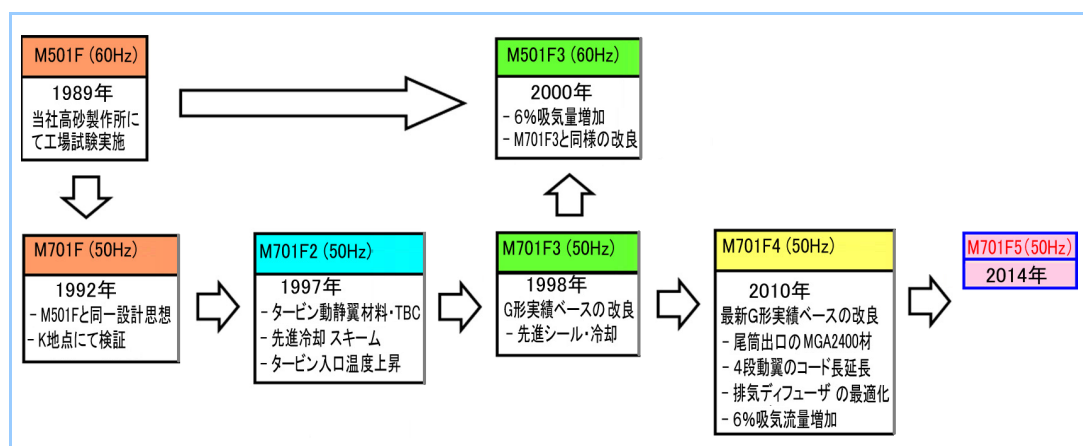


図3 F形ガスタービンの変遷

この緩まぬ新技術への追及により、ガスタービン出力はM701F形の234MWに対して、M701F5形は359MWへと、この20年間で約1.5倍に、またコンバインド効率も12%以上の向上を達成しており、燃料消費量及びCO₂排出量の削減に大きく貢献してきた。表1にM701F形、F4形及びF5形のガスタービン及びGTCC性能と主要目を示す。

表1 ガスタービン性能(ISO, 標準条件)と主要目

型式	M701F 形	M701F4 形	M701F5 形
初号機出荷年	1992 年	2009 年	2014 年
回転数	3000rpm	3000rpm	3000rpm
ガスタービン出力	234MW	312MW	359MW
GTCC 出力(発電端)	334MW	465MW	525MW
GTCC 効率 (発電端, 低位発熱量基準)	54.4%	59.5%	61%以上
圧縮機	17 段		
燃焼器	空気冷却式 20 缶		
タービン	1～3段静翼/動翼 空気冷却 4段静翼/動翼 無冷却		

2. M701F5 形ガスタービンの特徴

M701F5 形ガスタービンは、先行機である M701F4 形をベースとした基本体格を保持したまま、他機種で実証された先進要素技術を取り入れることにより、信頼性を確保しつつ高効率化を図る設計コンセプトを採用している。圧縮機は M701F4 形の圧縮機をベースとして、高効率化のため CDA (Control Diffusion Airfoil) 翼を採用し、燃焼器には GAC 形で実証された低 NO_x 燃焼システムと空気冷却技術、タービン部には 1600℃ 級 J 形の空力及び冷却技術を採用している。F5 形ガスタービンへの導入技術とその特徴を図4及び図5に示す⁽⁴⁾。

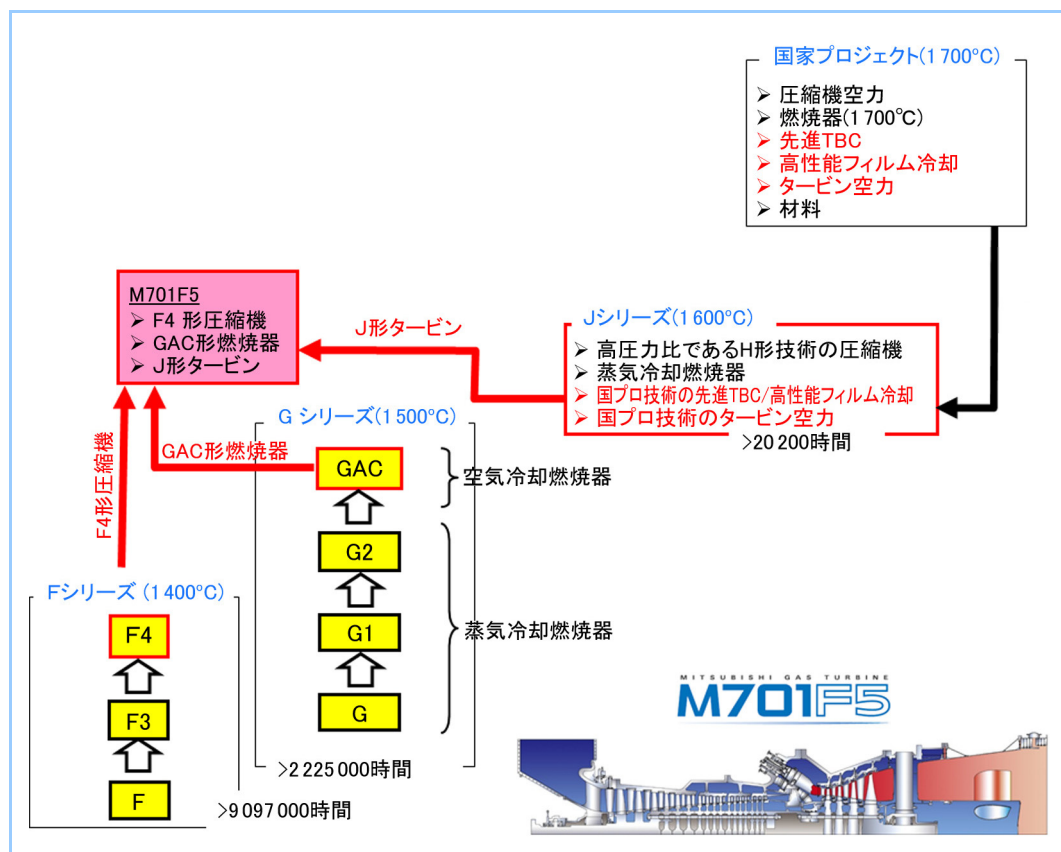


図4 他機種と M701F5 の関係

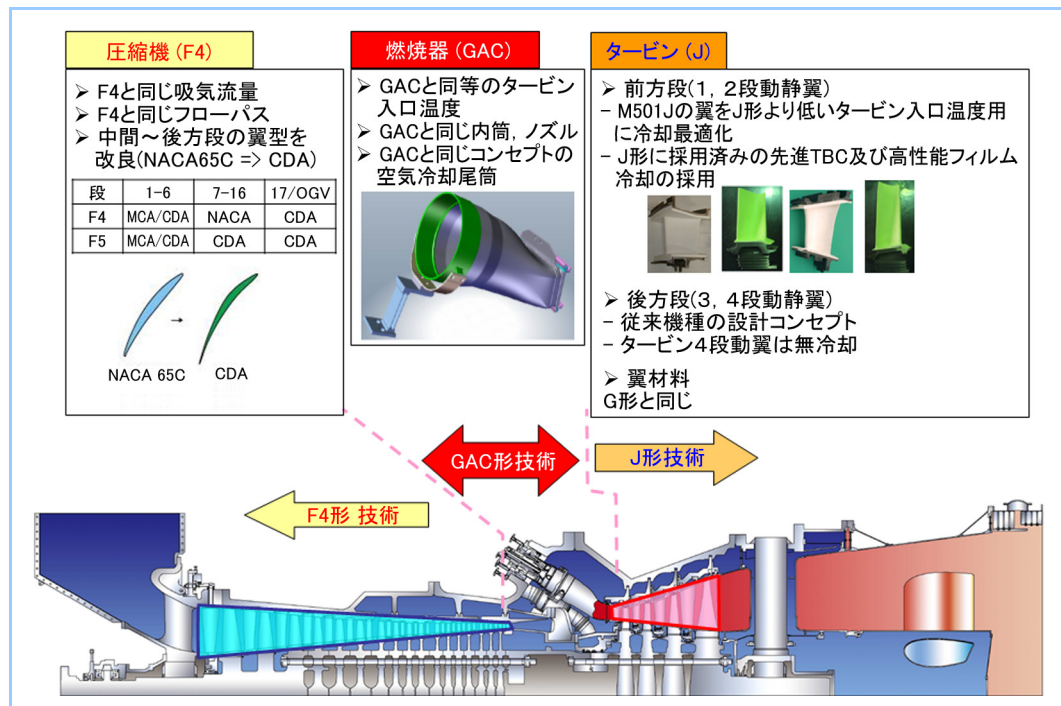


図5 M701F5 形ガスタービンの特徴

2.1 基本体格

電力の安定供給を担う大型ガスタービンにとって、信頼性及び運用性は重要な要素のひとつである。M701F5 形ガスタービンの基本体格は、軸受間距離を含めて、先行機であるF形のものを継続して採用しているが、F形は以下に示す長期の運転実績を有する信頼性の高い基本構造を踏襲して開発されたガスタービンである。

F形は、2013年9月現在で累計出荷台数 197 台、総運転時間 9097000 時間(起動回数 86800 回)と豊富な運転実績を有しており、表2にそのデータを示す。60Hz 機は西日本地域、東アジア、北中米地域などに、50Hz 機は東日本地域、東南アジア、ヨーロッパ、南米地域など全世界に納入され各地域の電力の安定供給に貢献している。

＜F形ガスタービンの基本構造＞

- 1) 高温部に軸受を持たない2軸受支持方式
- 2) 分解点検の容易な水平2分割車室構造
- 3) 出力軸は熱伸びの影響の少ない圧縮機側(コールドエンドドライブ)
- 4) コンバインドサイクル発電方式の配置に適した軸流排気
- 5) 運転時の軸受芯ずれを防止するタンジェンシャルストラット構造
- 6) トルクピンやカービックカップリングで確実にトルクを伝達するボルト結合ロータ構造
- 7) 圧縮機及びタービン動翼はロータを吊り上げることなしに翼交換可能な軸方向組立
- 8) 翼環の変形を防ぎチップクリアランスを最少に保つ遮熱環構造
- 9) メンテナンスの容易なマルチチャン型燃焼器

表2 F形ガスタービンの運転実績
(2013年9月末現在)

	M501F シリーズ (60Hz)			M701F シリーズ (50Hz)			合計
	運開後	運開前	小計	運開後	運開前	小計	
F	20	0	20	14	0	14	34
F2				2	0	2	2
F3	47	6	53	72	3	75	128
F4				16	13	29	29
F5				0	4	4	4
合計	67	6	73	104	20	124	197

F形全体:197 台(171 台運開後, 26 台運開前)

-累積運転実績 :9097000 時間/86800 回

F3 形全体:128 台(119 台運開後, 9 台運開前)

-累積運転実績 :5571000 時間/51700 回

-M501F3 最長運転時間 :99400 時間

-M501F3 最高起動回数 :2400 回

-M701F3 最長運転時間 :104000 時間

-M701F3 最高起動回数 :1300 回

F4 形全体:29 台(16 台運開後, 13 台運開前)

-累積運転時間 :129000 時間/1500 回

-M701F4 最長運転時間 :22500 時間

-M701F4 最高起動回数 :180 回

2.2 圧縮機

M701F5 形の空気圧縮機は M701F4 形と同じフローパスを有し、特に前方段は F4 形と同じ翼を採用しており、吸気流量及び1段動翼のチップ周速は F4 形と同一である。また起動時の旋回失速等の空力不安定は、前方段の空力特性が大きく影響を与えるが、これも前方段が共通である F4 形の実績から容易に推測ができる。一方、従来 NACA 翼を採用していた中/後方段動静翼の翼型を高効率化のために CDA 翼に変更している(図6)。CDA 翼は翼面速度分布を最適化した翼型であり、当社ではF形以降の開発機種であるG形やH形、J形に採用実績がある。改良設計機では累積運転時間が 12 万時間を超える F4 形の前方向にも適応済みであり、十分な設計及び運転実績がある技術である。以上のとおり F5 形圧縮機は、F4 形をベースとして、これまで十分な実績のある CDA 翼を中/後方段に採用することにより、信頼性を確保しつつ、効率向上に寄与している。

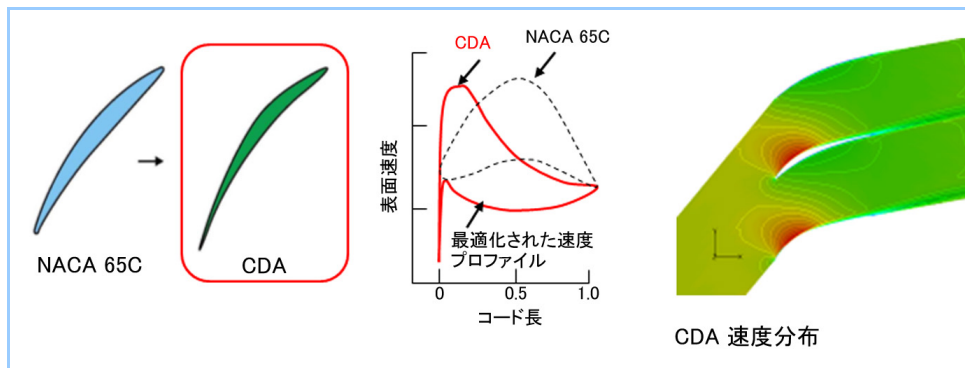


図6 圧縮機翼型の特徴

2.3 燃焼器

燃焼器には GAC 形で実績ある燃焼器技術を採用した。燃焼性に大きく影響を与えるノズル、スワラは GAC 形で実証し、その後 1600℃級のJ形でも継続的に検証を行っている低 NO_x燃焼技術をそのまま採用している(図7)。

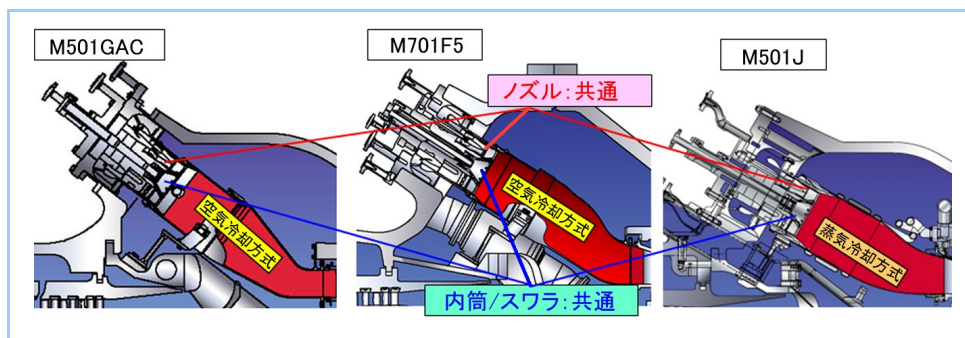


図7 燃焼器の共通部品

また内筒及び尾筒の冷却方式として、J形はガスタービン外部から供給される蒸気を用いた冷却方式を採用しているが、運用性を重視し、F5 形は GAC 形同様にこれら複雑な配管系統及び制御を必要としない空気冷却方式を採用している。空気冷却方式を燃焼器に採用する場合は、燃焼器を冷却した空気が燃焼器内の燃焼ガスに混入するため、タービン入口温度(タービン一段静翼前の平均ガス温度)に対して燃焼器内の火炎温度の上昇量が大きくなり、NO_x 及び燃焼振動に影響を与える。よって F5 形を設計するに当たり、火炎温度を 1600℃級で蒸気冷却方式を採用しているJ形と同等以下に設定することとした。結果としてタービン入口温度はJ形よりも低くなるため、それに対応してタービン冷却設計の最適化をはかった。

なお尾筒の構造簡素化による信頼性向上のために、GAC 形及びJ形でも実績のあるバイパス弁なし構造としているほか、熱応力の厳しい尾筒出口精鑄部にはタービン翼材として実績のあるMGA(Mitsubishi Gas Turbine Alloy)材を用いることで更なる信頼性を確保している。

F5 形の燃焼器を用いた実圧燃焼試験は、当社高砂製作所内の試験設備にて完了し、目標値である $\text{NOx}15\text{ppm}$ ($15\%\text{O}_2$ 換算)を十分下回ることを確認し、また信頼性に影響を与える燃焼振動、内筒及び尾筒のメタル温度も制限値に対して裕度があることを確認している。

2.4 タービン

燃焼器を出た高温、高圧の燃焼ガスに晒されるタービン翼は、所定の設計寿命を満足させるため、圧縮機吐出空気又は圧縮機中間段からの抽気空気を使った冷却を行い、翼メタル温度を制限値以内に抑える必要がある。この冷却空気はタービン内でロスとなるため、信頼性を確保する範囲内で冷却空気量を低減することが性能向上の鍵となる。

タービン翼の冷却技術は、タービン入口温度の上昇とともに進歩してきており(図8)、タービン入口温度 1600°C 級のJ形では、 1500°C 級G形で培われた技術に加え、2004 年から参画している国家プロジェクト“ 1700°C 級超高温ガスタービン要素技術開発”で開発された先進遮熱コーティング(TBC: Thermal Barrier Coating)技術及び高性能フィルム冷却技術等が盛り込まれている。

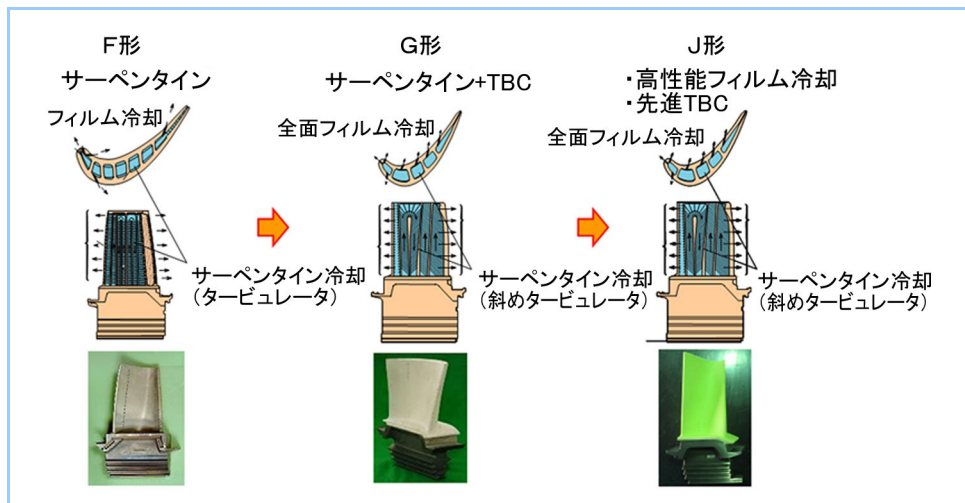


図8 各機種のタービン翼設計技術

F5 形やJ形は4段のタービンを有しており、前方段動静翼には TBC が施工されている。従来以上の遮熱効果及び耐久性を有する先進 TBC を適用することにより、高温ガスからタービン翼への入熱を低減させることが可能となり、翼メタル温度を制限値以下とするために必要となる冷却空気量を低減することができる。なお先進 TBC については、レーザー熱サイクル試験(図9)によって実翼適用前にその耐久性を確認している。



図9 先進 TBC のレーザー熱サイクル試験

またタービン翼面の冷却には、従来フィルム冷却に比べより効果的に翼を冷却することが可能な高性能フィルム冷却(図 10)を適用している。フィルム冷却には、ガスパス(Gas Path)に対して温度の低い冷却空気で翼表面を覆うことにより、翼表面のガス温度を低下させる効果がある。このフィルム冷却孔の出口形状を最適化することにより、同じ空気量でより広範囲をフィルム空気で覆うことが可能となり、冷却空気量を削減することが可能となった。

このように 1700℃級ガスタービン国家プロジェクトで開発され、1600℃級のJ形で検証済みの先進 TBC や高性能フィルム冷却技術を 1500℃級の F5 形に採用することにより、信頼性を確保しつつ、性能向上を図っている。

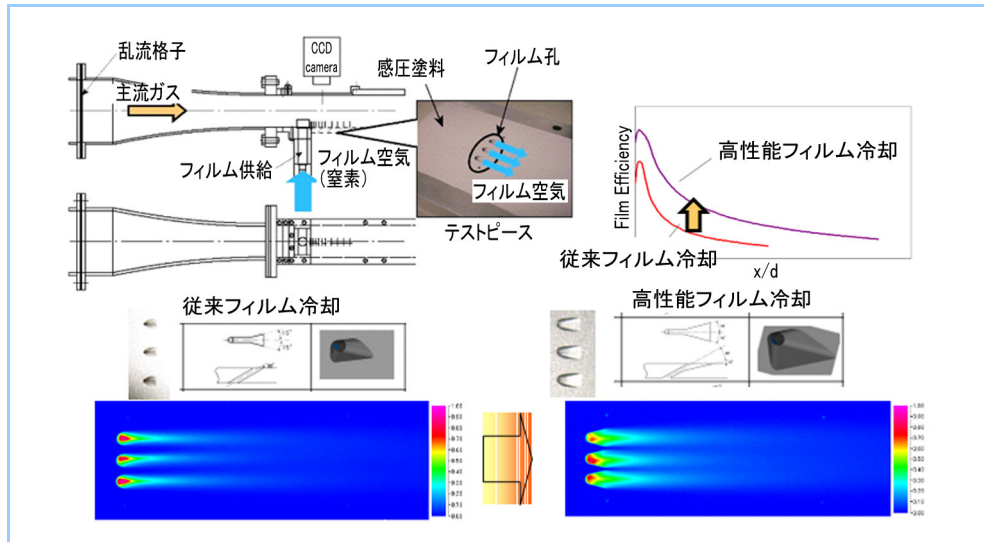


図 10 高性能フィルム冷却

3. T地点で検証された技術の F5 形への適用

当社のガスタービン開発は、まず研究所で各要素技術の検証を行い、その後詳細設計/本体製作を経て、最終的には実証発電設備(T地点)での実機検証を行うことで、新技術の検証を完了させるプロセスを取っている。検証の最終段階を担う実証発電設備は、当社高砂製作所内にあり、ガスタービン、蒸気タービン、排熱回収ボイラ(HRSG)を備えたコンバインドサイクル発電所として建設、運用されている(図 11)。

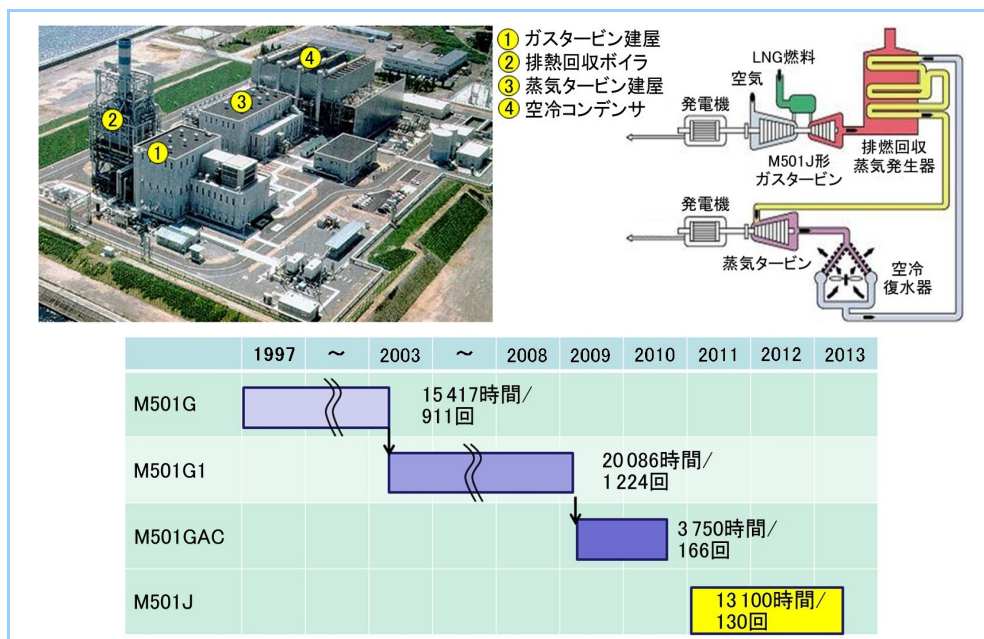


図 11 実証発電設備(T地点)

1997 年1月に M501G 形の運転がT地点で開始されたのち、M501G1 形、M501GAC 形の改良部品を適応することにより、G形の性能及び信頼性の検証を行ってきた。その後 2010 年 10 月より M501J 形への換装工事を実施し、2011 年2月に 1600℃での試運転を開始した。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。

例として図 12 にタービン1段静翼の翼面メタル温度分布を示す。各部のメタル温度は制限値に対して裕度があり、信頼性に問題がないことを確認した。また、タービン1段動翼のプラットフォーム及び翼面については、パイロメータを使用して表面メタル温度分布計測を実施し、良好な結果を得た。1段動翼プラットフォームのメタル温度計測結果を図 13 に示す。

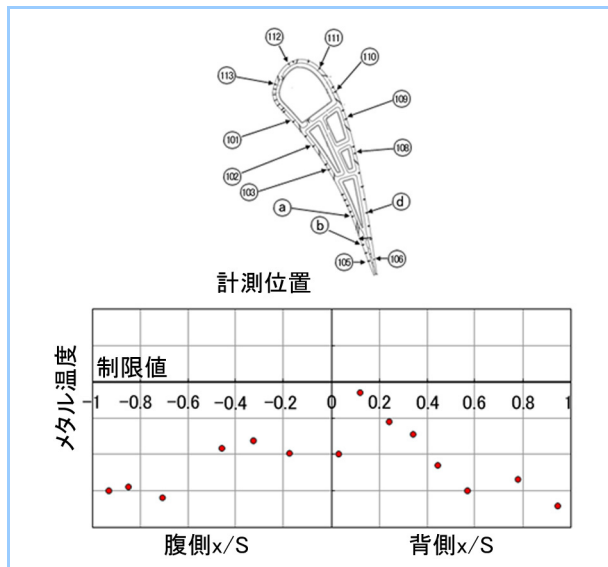


図 12 M501J 形タービン1段静翼メタル温度計測結果

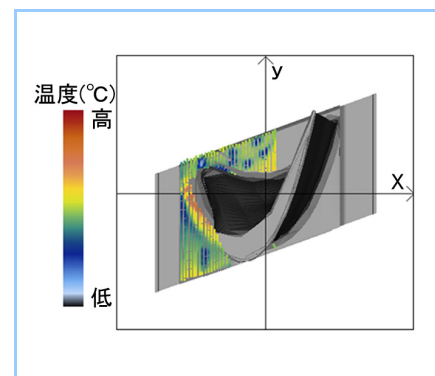


図 13 M501J 形タービン1段動翼メタル温度計測結果

試運転が完了した 2011 年7月より M501J 形の長期信頼性実証運転を行っており、2013 年9月末時点で運転時間 13100 時間、起動回数 130 回に達し、順調に実証運転を継続している。図 14 は、2013 年3月の本格点検結果を示しており、各部品とも運転後の状態が健全であることを確認した。

これまでの実証発電設備で得られた試験及び点検結果は、GAC 形の空気冷却燃焼器技術及びJ形ガスタービン技術を採用する M701F5 形にも反映され、F5 形ガスタービンの高い性能と信頼性の確保に貢献している。

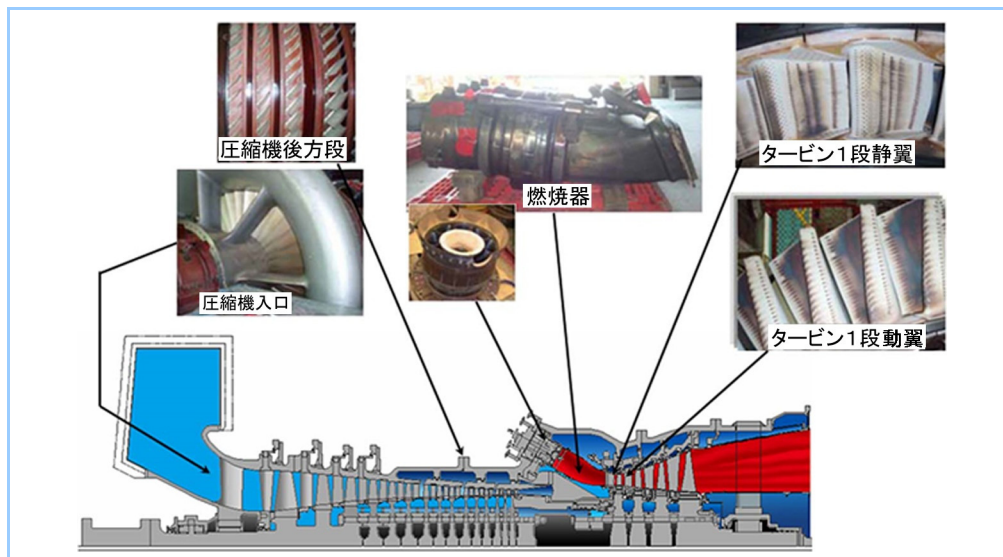


図 14 T地点 M501J 形点検結果(2013 年3月, 運転時間 10548 時間, 起動回数 120 回)

4. まとめ

当社は、豊富な運転実績と国家プロジェクト“1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発”をはじめとする先端技術研究に基づいたガスタービン開発を継続的に行っている。現在、最新の1600℃級 M501J 形で、実機検証されたタービン技術を適用した M701F5 形の開発を完了し、ガスタービン本体を製作中である。初号機は2014年に出荷し、2015年度に試運転を開始する予定である。

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中で最もクリーンかつ高効率な発電設備として、環境面及び経済面に優れており、社会からの期待も大きい。その中で、M701F5 形は運用性を兼ね備えた高効率 GTCC の主機として、今後電源の多様化、分散化が進む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), p19-24
- (3) 由里ほか, 1600℃級J形技術を適応した発電用高効率ガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol.50 No.3 (2013), p2-10
- (4) 安威ほか, M701F5 形ガスタービンの開発, 火力原子力発電大会論文集(2012) p131-138