

1 350℃級大型ガスタービン (F シリーズ) の運用実績

Field Experience of 1 350℃ Class Gas Turbine (F-series)

原動機事業本部 塚 越 敬 三^{*1}

高砂製作所 青 木 素 直^{*2} 青 山 邦 明^{*3}

谷 村 聡^{*4}

技 術 本 部 西 田 幸 一^{*5}

タービン入口温度 1 150℃ 級の D シリーズ、そして 1 250℃ 級の MF-111 で培った冷却技術・低 NOx 燃焼技術を基に高温・高性能・低 NOx 化を実現したのが、1 350℃ 級 F シリーズガスタービンである。この F シリーズガスタービンは、平成 5 年の初号機運開以来、50 Hz/60 Hz 機合せて 40 台以上もの受注実績があり、その信頼性は国内外で高く評価されている。近年、市場のニーズにこたえるべく F シリーズの後継機として性能向上型 F シリーズ (1 350℃ 級及び 1 400℃ 級) のラインナップを充実させることとし、新材料選定、コーティング技術そして低 NOx 燃焼技術向上に力を注いでいる。今後、これら後継機による更なる省エネルギー化への貢献が期待されている。

F-series gas turbine (turbine inlet gas temperature 1 350℃ class) has high temperature, high efficient and low NOx design concepts based on the cooling and low NOx technique of D-series (1 150℃ class) and MF-111 (1 250℃ class). MHI have brought about good sales results of F-series gas turbine since 1993 (first commercial operation). Nowadays, MHI is about to develop the succeeding F-series (1 350℃ class and 1 400℃ class) for market needs. These successors are expected their contribution for saving energy.

1. ま え が き

環境問題がクローズアップされエネルギーの有効利用がより一層要求される中で、コンバインドサイクルプラントはその総合熱効率の良さからも脚光を浴びている。コンバインドサイクルプラントでは、その主機であるガスタービン自身の高温・高性能化によりプラント総合熱効率の大幅な改善が期待できる。

当社は、昭和 56 年に 1 150℃ 級ガスタービン MW-701 D を開発、その後 1 350℃ 級への中間ステップとして小型実証機の 1 250℃ 級 MF-111 ガスタービンの開発に着手し、優れた性能を発揮している。この間に培った高度な冷却技術と低 NOx 燃焼技術を基に、昭和 60 年 1 350℃ 級大容量ガスタービン 501 F/701 F の開発に着手した。60 Hz 機 501 F ガスタービンは、平成元年に工場実負荷試験を成功裏に完了し、初号機は平成 4 年末から現地試運転、そして翌年運開し現在では約 30 000 h 以上の運転実績がある⁽¹⁾⁽²⁾。

また、50 Hz 機 701 F ガスタービンは、501 F ガスタービンをベースに平成 4 年から実機検閲機として試験を開始している⁽³⁾。

近年、さらに今後の市場のニーズと競争力強化の観点から、現状の F シリーズの後継機種として性能向上型 F シリーズ (1 350℃ 級及び 1 400℃ 級) のラインナップを充実させることとした。

本報では、現状 F シリーズの特徴と実績、さらにアップグレード機種である二つのラインナップの、オリジナル F シリーズからの改良点について報告する。

2. F シリーズガスタービンの特徴⁽¹⁾

図 1 に断面を示す F シリーズガスタービンを使用したコンバインドサイクルプラントには次の特徴がある。

(1) 高温技術

冷却翼は新冷却技術を小型実証機である MF-111 (1 250℃ 級) に適用し、その実績・経験を F シリーズにフィードバック

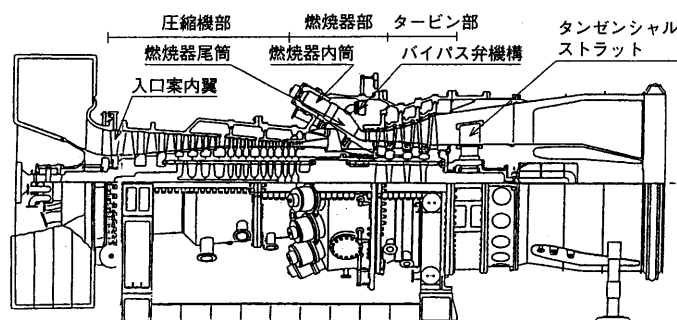


図 1 F シリーズガスタービン F シリーズガスタービンの断面構造を示す。豊富な運転実績と高い信頼性を持つ従来機種の基本構造をそのまま踏襲している。
F-series gas turbine longitudinal section

している。冷却構造の強化により、図 2 に示すように、ガス温度 1 350℃ においても翼メタル温度は従来機と同レベルを保持していることが分かる。タービン翼の中で厳しい条件下にある第一段動静翼の冷却構造を図 3 に示す。

● 第一段静翼

3 インサートによる内面インピンジメント冷却、翼面フィルム冷却、前縁部シャワーヘッド及び後縁部ピンフィン冷却構造を採用している。

● 第一段動翼

前縁部シャワーヘッド冷却、翼面フィルム冷却、リターンフロー冷却及び後縁部ピンフィン冷却構造を採用し冷却効果を高めている。

(2) 低 NOx 燃焼技術

予混合式低 NOx 燃焼器を D シリーズにて世界に先駆け実用化しており、F シリーズではこれをベースとして更に改良を加え、タービン入口温度の上昇による NOx 排出量の増加を抑制し、なおかつ、より低 NOx 化を図っている (図 4 参照)。

*1 原動機技術センタータービン技術部ガスタービン技術課長

*2 タービン技術部長 工博

*3 タービン技術部ガスタービン設計課主務

*4 タービン技術部ガスタービン設計課

*5 高砂研究所燃焼・伝熱研究室

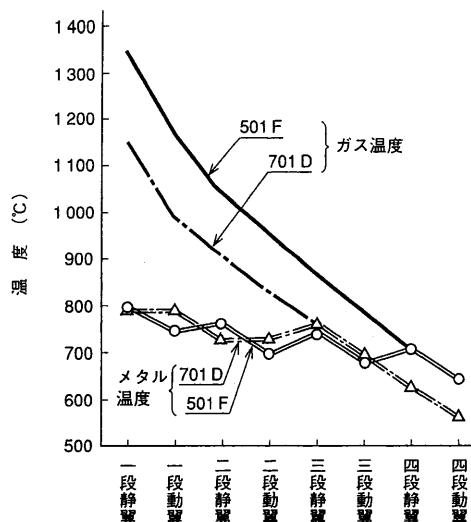


図2 タービン各段のガス温度及びメタル温度
Fシリーズガスタービンでは、Dシリーズと比べてガス温度が200℃上昇するが、メタル温度は従来機並みである。
Turbine metal and gas temperatures

改良点は以下のとおりである。

- ① 予混合ノズル採用により混合，均一性を改善
- ② パイロットノズルを火種とし，メインの火炎安定性確保
- ③ 燃焼領域での燃空比を最適にするバイパス弁
- ④ 冷却空気を低減可能とする新型冷却壁（Plate Fin/MT-Fin）

(3) 信頼性の高い構造

Fシリーズガスタービンは，図1にその断面形状を示すとおり一軸式ヘビーデューティ形であり，三菱ガスタービンの長年の実績ある構造を踏襲している。

- アライメント変化が少ないコールドエンド（圧縮機側）駆動
- 軸受のメンテナンスが簡単な二軸受式ロータ
- 排ガスボイラとの結合が容易な軸流排気方式
- 耐久性・メンテナンス性が優れた翼環構造（二重ケーシング）
- 心ずれが少ないタンゼンシャルストラット支持構造

3. 国内外での運用実績

Fシリーズガスタービンの運用実績を表1に示す。初号機は平成4年末から現地試運転，そして翌年運開して以来，約30 000 h以上の運転実績がある。そして，このFシリーズガスタービンは現在では国内，国外合せて40台以上もの受注実績があり，その運転の高い信頼性が評価された結果といえる。また，コンバインドプラントとしての軸構成に関しても，蒸気タービンと別軸の場合，同軸の場合共に対応可能としている。

表2は初号機の工場実負荷試験での計測値に基づいたヒートバランス解析結果と計画性能を比較したもので，ガスタービン出力，熱効率，排気流量共に計画値を上回っており，シンプルサイクルはもとよりコンバインドサイクルとしても計画性能を達成している⁽²⁾。また，現地試運転の結果においても，シンプルサイクル及びコンバインドサイクルでの出力，効率共に保証値を満足する高い性能を確保していることが確認されている。平成7年関西電力（株）向けでは，コンバインドサイクル熱効率（HHVベース）49％以上の世界記録を樹立している。

さらに，プラントの運用面での信頼性についても，その非常に

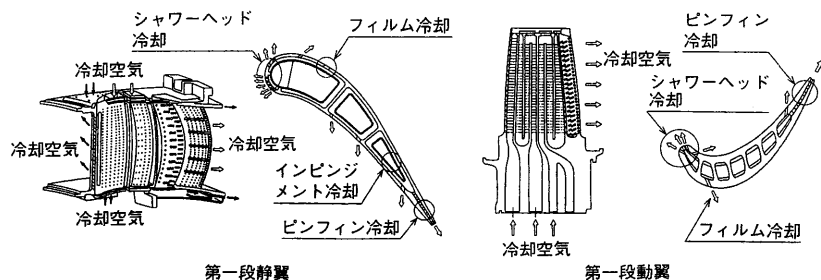


図3 Fシリーズタービン一段動静翼（空冷翼）
一段静翼はシャワーヘッド冷却等の構造を，一段動翼はリターンフロー形冷却構造を採用し，冷却効率を高めている。
Turbine first stage vane and blade cooling

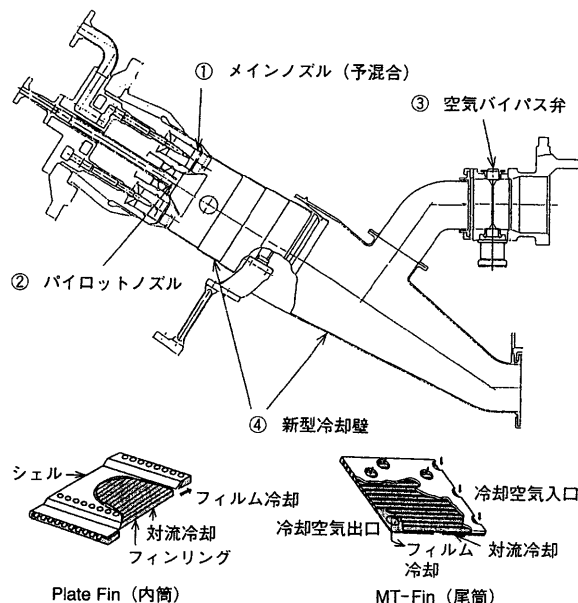


図4 予混合式低NOx燃焼器
予混合燃焼方式にバイパス弁を組合せて，水／蒸気噴射してNOx排出量を大幅に低減した。
Advanced low NOx combustor

高い稼働率を高く評価され，Florida Power & Light 社 Lauderdale 発電所向けにおいて“The 1994 Powerplant Award”を受賞している。

また，Fシリーズガスタービンでは低NOx燃焼器（ガスだき）を採用しており，そのNOx排出の実績としては平成6年に九州電力（株）向けにおいて，図5に示すように1 350℃級で25 ppm（O₂ 16％）を達成している。従来の燃焼器のように蒸気噴射や水噴射を行うことなく，NOx排出量を低く抑えることが可能であり，その技術力についても国内外共に高い評価を受けている。

以上のように，高い信頼性を確立している背景には，運転実績を通じてのガスタービン部品の信頼性の確認によるもの，そして運用中に発生した幾つかの不適合経験を通しての対策・対応による改善が重要な位置を占めている。

3.1 運転実績を通じての信頼性向上例

3.1.1 高温部品の予想寿命

ガスタービンの運用の中で，実用上重要な位置を占めるものが高温部品（燃焼器内筒，尾筒，タービン動静翼等）の寿命評価であり，その評価は運転実績によるところが大きい。

材料の強度面（酸化性・熱応力強度・クリープ強度）から予想寿命を算出し，高温部品管理の指標としているが，高温部品の寿命に関しては，予想ベースに運転実績を加味しつつ見直しを図ることが必要である。ある程度運転実績が出てきた時点のガスター

表1 Fシリーズガスタービンの運用実績
Operation experience of F-series gas turbine

プラント名	ユニット数 GT+ST	出力 (MW)	運 転 状 況						運転時間 (h)	起動 回数	調査 年月
			1992	1993	1994	1995	1996	1997			
701F (50Hz)	K-地点	1+0	149						2 490	363	'96 9/25
	Wang Noi-I	4+2	1 278	#1					2 461	182	'97 1/31
				#2					2 172	151	
				#3					2 167	144	
				#4					1 998	131	
	千葉-1	4+4	1 440						営業運転 1998	—	—
	Bursa	4+2	1 400						営業運転 1998	—	—
501F (60Hz)	San Isidro	1+1	370						営業運転 1998	—	—
	Wang Noi-II	2+1	720						—	—	—
	Costanera	2+1	8 325						営業運転 1998	—	—
	Lauderdale	4+2	865	#1					27 323	112	'96 10/7
				#2					27 747	86	
				#3					27 433	71	
				#4					27 560	85	
	新大分-2	4+4	870	#2					18 196	518	'96 12/16
				#1					19 191	566	
				#3					13 533	393	
				#4					13 618	287	
	姫路 第一-5	3+1	670	#3					10 643	136	'96 10/30
				#2					10 308	140	
				#1					11 038	140	
	知多1, 2	1+1	529	#2					8 453	42	'96 9/30
		1+1	529	#1					1 921	29	
	川越-4	7+7	1 650						—	—	—
GT 計		40		— : 試運転	— : 営業運転	GT : ガスタービン ST : 蒸気タービン			計	228 252	3 576

表2 501 F ガスタービン工場実負荷試験実測性能
Full load shop test performance

			501 F	
			目 標	実 測
タービン入口温度			1 350	1 350
(一段動翼入口)			(1 260)	(1 260)
ガスタービン 単体	出 力	(MW)	148	153
	熱効率(LHV)	(%)	34.9	35.2
	排気ガス温度	(°C)	570	578
	排気ガス流量	(kg/s)	419	437
コンバインド サイクル(同軸)	出 力	(MW)	216	220 以上
	熱効率(LHV)	(%)	50 以上	51 以上

換算値 (条件: ISO, 天然ガス)

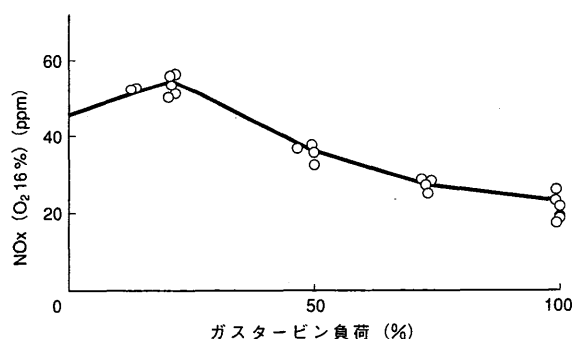


図5 低NOx燃焼器排ガス実績 Fシリーズガスタービンでは予混合式低NOx燃焼器を採用しており、1350℃級で25 ppm (O₂ 16%)の実績がある。
Emission performance of dry low NOx combustor

ビン定期点検時に、高温部品の破壊調査を実施することで継続使用の可能性を判断し、寿命見直しを行っていくこととなる。このFシリーズガスタービンは、国内でも約20 000 hの運転実績となり、ようやく見直しの時期が来たといえる。

一例として燃焼器内筒について以下に述べる。

調査した内筒は、等価運転時間（実運転時間に起動回数等の影響を加味した運転時間）で約36 000 h経過したもので、外観調査、組織調査、硬さ試験、引張試験及びクリープ試験を行った。

(1) 外 観

外面の劣化は認められず、内面のコーティングのはく離も認められなかった。

(2) 機械的性質

引張強度及びクリープ強度の劣化は認められなかった。また、

引張試験の伸びでは若干基準を下回ったが、これは合金の長時間使用による硬さの変化に起因したものと考えられる。

以上の結果に基づき、このプラントでは、更に1年間の運用が可能と判断し、燃焼器内筒の予想寿命を等価運転時間で約50 000 hに延長することとしている。

3. 1. 2 長時間運転後のTBC(Thermal Barrier Coating)の評価

TBCは母材に流入する熱を低減することを目的として、高温部品（燃焼器やタービン動静翼）に対して使用している。その効果としては、メタル温度を約30℃以上低下させることができ、クリープ寿命が約5倍になると期待される。このTBCはFシリーズガ

スタービンでは、第一、二段静翼、及び燃焼器内筒、尾筒に施工されており、長時間の運転後もはく離やき裂の発生がなく健全な状態で遮熱効果を有することが必要となる。

例えば、Fシリーズガスタービンでは、約8000～13000hの運転後第一段静翼のTBCを検査した結果、ほとんどのものがはく離やき裂などがなく健全な状態にあり、コーティングはく離に対する補修推奨基準に達して再コーティングを実施したものは、全数のわずか1%程度であった。このように、TBCは長時間の運転に耐えることができ、十分な遮熱効果を発揮できるものと考えられ、更に今後実績を伸ばしていくものと予想される。

3.2 不適合経験を通しての対策・対応による改善例

3.2.1 タービン四段動翼折損 (501 F)

該当翼の破面調査の結果、粒界破面であり、一次折損翼は一枚であることが分かった。さらに翼表面及び微細き裂内部から腐食性成分が検出された。腐食雰囲気下では、翼表面から粒界き裂が進展し短時間で折損する可能性があるため、原因としては、通常は表面の酸化皮膜が粒界侵食を防止しているが、何らかの原因によって酸化皮膜が切れたことにより急速に粒界侵食が進行した可能性が考えられた。

対策としては、本動翼に耐高温腐食コーティングを施工することによって腐食成分を遮断することとした。更に信頼性を高めるために、腐食環境下でのクリープ破壊試験を実施し、初期粒界き裂の大きさの影響やコーティングの効果など多岐にわたり調査を実施し、データの蓄積を図っている。

3.2.2 タービン一段動翼損傷 (701 F)

破面調査により一段動翼のうち一枚の翼に高サイクル疲労破面が認められ、この翼が最初に折損し他翼に二次損傷を与えていることが判明した。定格負荷時の3次モードと一段動翼枚数による励振周波数40ハーモニクスの共振を回避した翼設計を行っているが、翼自身の振動数のばらつき等を考慮した場合、振動数の下限値が共振した可能性が考えられた。

対策としては動翼の振動数をチューニングし、振動数に対して1%以上離調することとし、振動数のばらつきが±2%以内であることをタッピング試験により確認後出荷することとした。チューニングの効果については、実際に実機での検証試験（テレメータテスト）を行い、改善効果を確認している。

以上のような改善対策はFシリーズガスタービンのみならず、必要と考えられる他機種に対しても反映されている。また、これらの対策を実施したプラントは現在順調に運転されている。

4. Fシリーズガスタービンの今後の展開

前述のように好調な運転実績を示しているFシリーズ（1350℃級）の後継機として性能向上型Fシリーズ（1350℃級及び1400℃級）を現在の市場のラインナップとして整備中である。これらの後継機のFシリーズは、現在そして今後の市場のニーズに柔軟に対応できるよう、オリジナルFシリーズで培った技術を踏襲しつつも性能向上のために改良設計を行っている。

表3に50Hz機701Fシリーズの予想性能を示すが、出力で3～10%、効率でおよそ2%の性能向上を目指している。

性能向上型1350℃級Fシリーズでは、タービン入口温度は1350℃を維持したまま、冷却空気削減により性能向上を図ることとした。圧縮機、燃焼器は基本的にオリジナルFシリーズと共通としている。

さらに性能向上型1400℃級Fシリーズでは、タービン翼の冷却

表3 Fシリーズ後継機の予想性能

F-advanced-series expected performance

機 種	701 F	性能向上型	
		タイプ-I	タイプ-II
タービン入口温度 (°C)	1 350	1 350	1 400
G/T 出力 (MW)	234.2	242.3	256.3
G/T 熱効率 (LHV) (%)	36.6	37.2	37.3
排気温度 (°C)	550	554	579
排気流量 (kg/s)	666	666	667
C/C プラント出力 (MW)	345.5	354.7	377.9
C/C プラント熱効率 (LHV) (%)	54.1	54.6	55.2

シンプルサイクル : ISO, 天然ガス, ドライ

コンバインドサイクル(C/C): 吸/排気ロス 100/600 mmH₂O

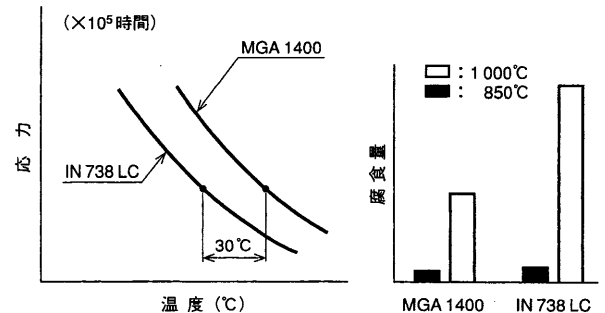


図6 従来の材料と最新材料の比較 Fシリーズの後継機ではより高温になるため、クリープ強度、耐食性に優れた新材料を採用する。

Comparison of materials

方式、材料、コーティング技術の改良を行い、タービン入口温度を1400℃まで上昇することにより、性能向上を図ることとした。特に材料に関しては図6に示すように、動翼では従来の材料（IN 738 LC）よりも高温クリープ強度、耐食性に優れた材料（MGA 1400）を採用する。圧縮機は基本的にオリジナルFシリーズと共通だが、燃焼器についてはタービン入口温度が上昇してもNOxはオリジナルFシリーズと同一レベルとなるよう、燃焼器の冷却空気の更なる削減やより一層の予混合気均一化を目指し改良を行っている。

5. あ と が き

エネルギーの有効利用として、火力発電用コンバインドプラントが運用されており、ガスタービンの高温・高効率化により総合熱効率の大幅な改善が可能となる。当社は、自主開発した1250℃級MF-111ガスタービン（15MW級）に引続き、1350℃級Fシリーズガスタービンを開発し、現在30000h以上の運転実績により信頼性が確立されている。このFシリーズガスタービンは工場実負荷試験において性能、冷却及び機械的特性を検証し、その実測性能は世界最高レベルを示している。また、後継機型のFシリーズにおいても、今後、高効率コンバインドプラントの主機となり、より一層の省エネルギー化に貢献することが期待されている。

参 考 文 献

- (1) 三賢憲治, 塚越敬三ほか, 150 MW 級大容量高温ガスタービン 501 F の開発, 三菱重工技報 Vol.27 No.1 (1990-1) p.29
- (2) 高橋進, 塚越敬三ほか, 150 MW 級高温ガスタービンの工場全負荷試験, 三菱重工技報 Vol.28 No.1 (1991-1) p.31
- (3) 高橋進, 福江一郎ほか, 220 MW 級大容量高温ガスタービン 701 F の開発, 三菱重工技報 Vol.30 No.1 (1993-1) p.1