

# 最新の高効率ガスタービン

## New Advanced Heavy-Duty Gas Turbine

ガスタービン発電設備は、排熱を回収し蒸気タービンとの組み合わせによるコンバインドサイクル発電プラント、および熱併給システムと組み合わせたコージェネレーション発電プラントの適用拡大に向けて、高温・高効率化の開発が進められている。日立-GE形ガスタービンでは、燃焼温度1,260℃の大容量MS7001F形ガスタービンが開発され、現在、現地試運転中である。また、日立製作所自主開発のH25形ガスタービンについては、コージェネ・コンバインド発電プラント向けとして、すでに2台が営業運転中である。このガスタービンも高温・高効率を誇る中・小容量ガスタービンであり、さらに新機種として、H25形をスケールダウン設計したH15形ガスタービンも開発した。

瀧花清作\* Seisaku Takihana  
 高橋浩二\* Kôji Takahashi  
 広瀬文之\* Fumiyuki Hirose

### 1 緒言

日立-GE形MS7001F形ガスタービンは、米国General Electric Company(以下、GE社と言う。)で1982年から6年の歳月をかけて開発され、1988年11月に工場から1号機が出荷された。この1号機は、現在、米国バージニア電力会社チェスターフィールド発電所で現地試運転を行っている。このガスタービンは、最先端技術を誇るジェットエンジンの設計法を取り入れた高温・高効率の大容量機であり、随所に新技術を導入している。

また、MS7001F形が発電用60 Hz機であるのに対し、50 Hz機としてMS7001F形のスケールアップ設計によって開発中のMS9001F形がある。さらに、日立製作所が自力で開発したコージェネ・コンバインド発電用に適した小容量ガスタービンH25形、H15形がある。まず、最初にH25形ガスタービンを開発し、すでに2台を営業運転に入れている。H15形は、H25形の実績を基に、スケールダウン設計によって開発した。同一手法によって、石炭ガス化燃料仕様のH14形ガスタービンを開発済みであり、すでに工場での無負荷および負荷試験を終了している。以下、ガスタービンの新技術としてMS7001F形、MS9001F形ガスタービンおよびH25形、H15形ガスタービンの概要、特徴などについて述べる。

### 2 コンバインドプラント用大容量ガスタービン

#### 2.1 MS7001形ガスタービンの変遷

日立-GE形MS7001形ガスタービンのモデルの変遷を図1に示す。MS7001形ガスタービンは、現在、E形およびEA形が主

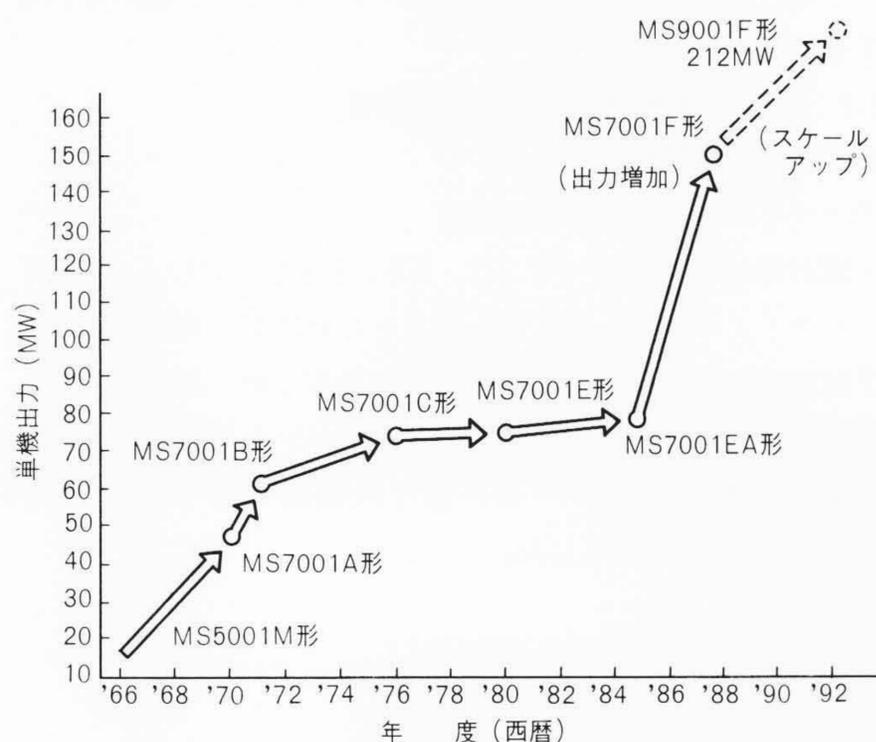


図1 MS7001形ガスタービンのモデルの変遷 形式MS7001の後に記載の英字がモデルを示す。Aが初号機を示し、以下B、Cの順に新機種となることを表している。

流であり、九州電力株式会社新大分発電所納め、および中国電力株式会社柳井発電所納めコンバインドプラント用として、おのおの6機で構成し、据付け中である。いずれも平成2年春に試運転が開始された。F形は、E形、EA形を基に大幅な出力増加を図ったもので、高温・高効率の大容量ガスタービンである。MS7001F形およびMS9001F形の仕様を表1に示す。

\* 日立製作所 日立工場

表1 MS7001F形およびMS9001F形ガスタービンの仕様 両者とも、燃焼温度1,260℃であり、高温、高効率を誇る大容量ガスタービンである。回転数の違いにより、MS7001F形は60 Hz地域向け、MS9001F形は50 Hz地域向けとして、適用される。

項目	仕様	
	MS7001F形	MS9001F形
定格出力	150,00 kW (単純サイクル, 発電機端)	212,200 kW (単純サイクル, 発電機端)
定格回転数	3,600 r/min	3,000 r/min
効率 (LHV)	34.5%	34.1%(計画)
燃焼温度/圧力比	1,260℃/13.5	1,260℃/13.5
排気温度	583℃	583℃
タービン段数	3段	3段
圧縮機段数	18段	18段
燃焼器	14個	18個

(大気条件: 15℃/0.10 MPa)

なお、MS9001F形は、このMS7001F形を基に、スケールアップ設計によって現在開発を進めており、その仕様も合わせて示した。

## 2.2 MS7001F形ガスタービンの概要<sup>1)</sup>

### 2.2.1 概念設計

#### (1) サイクルパラメータの選定

MS7001F形ガスタービンは、E形、EA形に対し、コンバインドサイクルのニーズにマッチするため高温・高効率化および出力増加を図り大形化することを基本方針に開発された。

耐熱合金材料の開発とジェットエンジンの最先端設計法を活用し、燃焼温度(タービン第1段動翼入口ガス温度)を1,260℃(2,300°F)とした。

これらのサイクル条件をベースに、ガスタービンの比出力と熱効率の関係を燃焼温度と圧力比をパラメータとして整理すると、図2<sup>2)</sup>に示すようになる。同図(a)から、燃焼温度1,260℃で比出力(入口空気量に対する出力)が最大となる圧力比13.5を設計点として選定した。すなわち、ガスタービンとしては、出力に対してコンパクトであること(比出力が大であること)が、経済性の面で優位となるからである。さらに同図(b)から、コンバインドサイクル効率としては、燃焼温度1,260℃の場合、圧力比13.5で最大値となる。すなわち、ガスタービンの圧力比としては、ガスタービン単体の比出力を大きくでき、かつコンバインドサイクル効率が最大となる値を選定している。

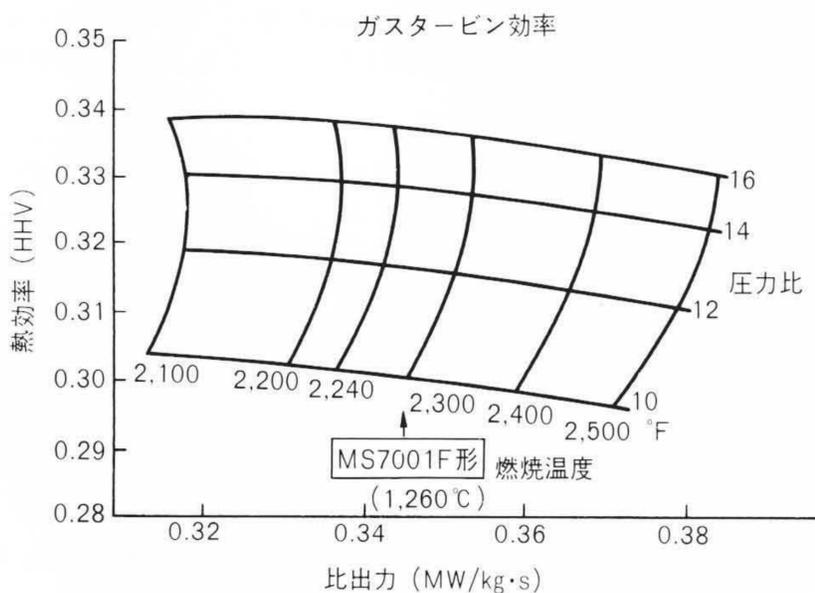
#### (2) 圧縮機の設計

圧縮機の翼列は、実績のあるE形圧縮機のスケールアップで設計している。さらに、空気流量増加に伴う圧縮機入口流路部の拡大により、従来の圧縮機段数17段にさらに初段翼を追加して18段としている。この追加の初段翼は、翼外径の増大によって周速が大となり、翼面上での空気流のマッハ数が増大し遷音速となる。既存翼形状は、亜音速設計のため遷音速状態では図3に示すように損失が大きくなる。このため、翼形状をやや薄肉の直線形状とした遷音速設計とすることによって、損失を低く抑える設計としている。

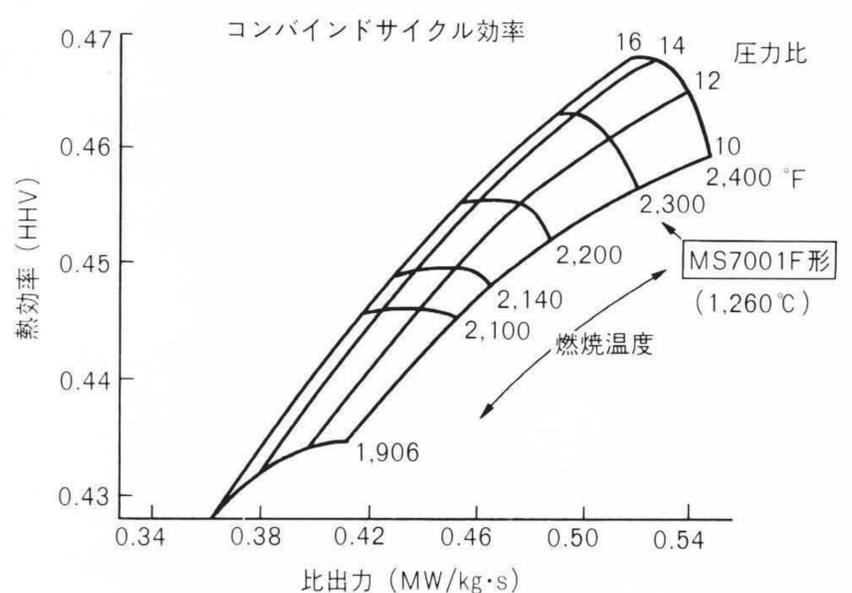
#### (3) タービンの設計

タービン段数としては、性能および実績面からMS7001形として採用している3段としている。翼の設計にあたっては、三次元設計としており、3段動翼の出口ガス流れ方向は軸流とすることによって、損失の低減に配慮している。

タービン翼の枚数は、動翼が第1～3段ともすべて92枚、静翼が第1, 2段がおのおの1セグメント2枚翼で24セグメ



(a) ガスタービン比出力と効率の関係



(b) ガスタービン比出力とコンバインドサイクル効率の関係

図2 ガスタービンの比出力と効率の関係 (a) ガスタービンの比出力と熱効率の関係を示す。燃焼温度1,260℃のとき、圧力比13.5で比出力は最大となる。(b) コンバインドサイクルでの比出力と熱効率の関係を示す。燃焼温度1,260℃のとき、圧力比13.5で熱効率は最大となる。

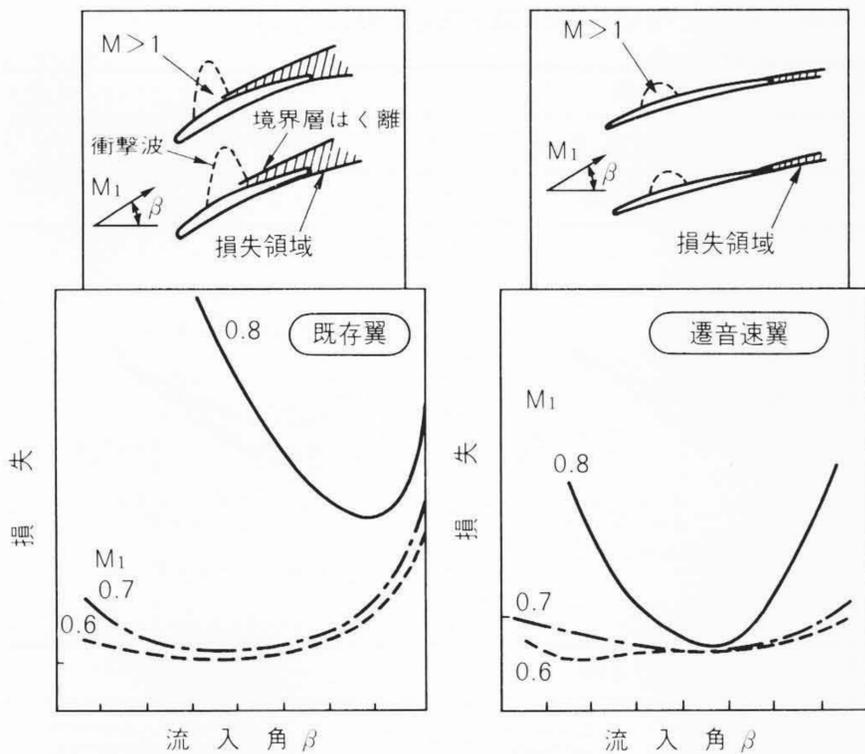


図3 圧縮機翼の比較 圧縮機での既存翼と遷音速翼の比較を示す。マッハ数の増大により、既存翼では損失が大きくなる。遷音速翼では、ある流入角 $\beta$ の範囲で、マッハ数の増大によっても損失があまり変化しない違いがある。

ント計48枚、第3段が1セグメント3枚翼で20セグメント計60枚である。静翼については、おのおの1セグメント当たりの翼枚数を少なくし、熱応力の緩和を図っている。

#### (4) 冷却設計

タービン第1段動翼は、燃焼温度の大幅上昇に対応するため、GE社のジェットエンジンTF39、CF6-6の第1段動翼の実績をベースに設計開発したリターンフロー冷却翼を採用している(図4)。これらのエンジンは、1970年前半から航空機に装備されており、エンジンの製作台数としては、約1,000台以上の実績がある。このリターンフロー冷却翼を採用することによって冷却が強化され、燃焼温度1,260℃に対しても翼のメタル温度としては、E形、EA形と同等または低く抑えている。

その他の翼については、在来技術と同一のインピンジメント(衝突噴流)、フィルム(空気膜)、コンベクション(対流)冷却を採用している。各翼の冷却方式の比較を表2に示す。

#### (5) 材料の選定

使用温度、冷却構造、製造方法を考慮して最適材料を選定しており、タービン静翼、動翼および燃焼器の材料と組成を表3に示す。GTD-222材は静翼用材料として開発したNi基合金であり、クリープ強度向上を図っており、静翼の変形防止に対し配慮している。その他、動翼には第1～3段とも耐腐食のため表面に金属コーティングを施している。

#### (6) 本体構成

MS7001F形ガスタービンの本体断面図を図5に示す。この機種で初めて排気ガスを軸方向に排出する軸流排気方式を採用した。このため、出力軸は圧縮機前側となり、発電機を低温の吸気側に配置できる利点がある。その他本体構成につい

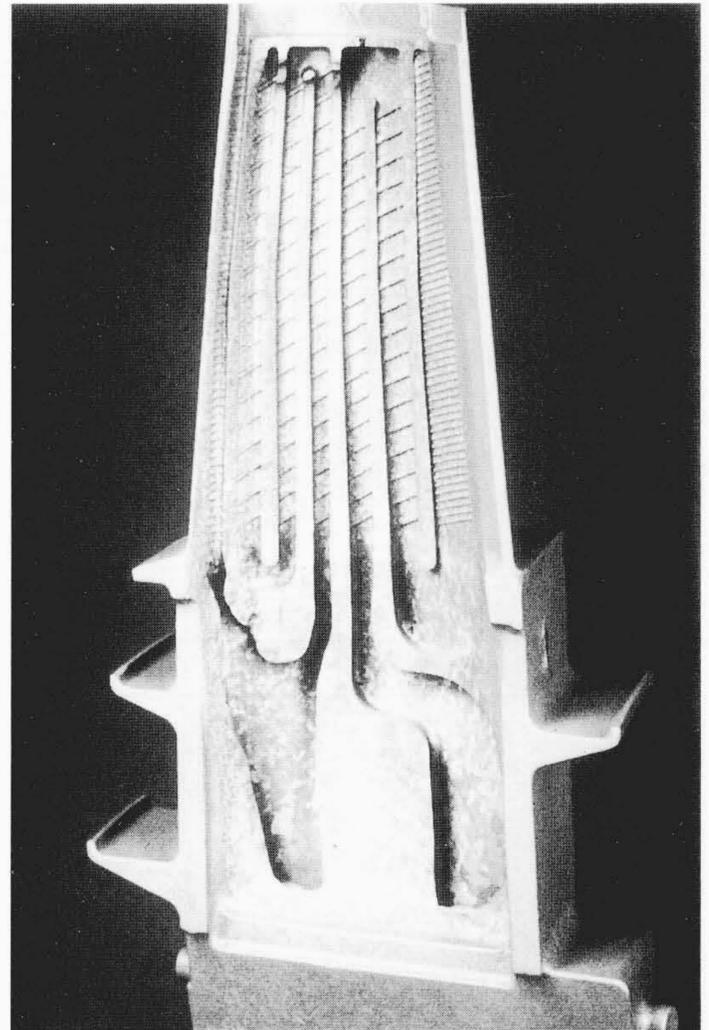


図4 タービン第1段動翼(リターンフロー冷却翼) タービン第1段動翼の内部冷却通路を示した写真である。

て比較したものを表4に示す。

#### 2.2.2 開発工程および各種試験内容と結果

MS7001F形ガスタービンは、今から8年前の1982年からGE社で設計を開始し、1987年4月末に組み立てが完了した。その後、各種確認試験を経て1988年11月にバージニア電力会社へ出荷された。このガスタービンの開発工程を図6に示す。この開発の過程は、フェーズIからIIIまで3段階に分けて進め、その各試験内容は下記のとおりである。

##### (1) フェーズI

この試験は要素試験が主であり、新しい解析技術が駆使されている。各要素ごとの試験概要は次に述べるとおりである。

##### (a) 圧縮機

翼の振動特性の確認を行った。実寸大の翼、ホイールを製作し、回転装置によって回転させ、翼の振動応答を確認した。

##### (b) タービン

圧縮機と同一の内容で試験を実施した。

##### (c) 冷却システム

ロータのモデルを製作し、冷却空気の流動試験を実施した。

##### (d) 排気システム

冷却システム同様、モデルを製作して流動試験を実施した。

表2 動翼, 静翼冷却方式の比較 タービン動翼, 静翼の冷却方式の違いをMS700IE形, EA形とMS700IF形を比較して示す。

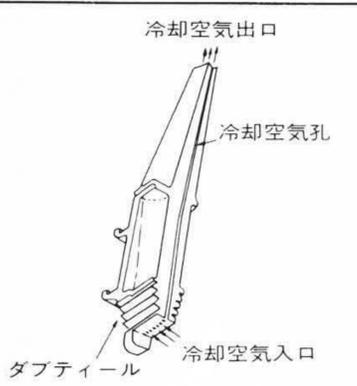
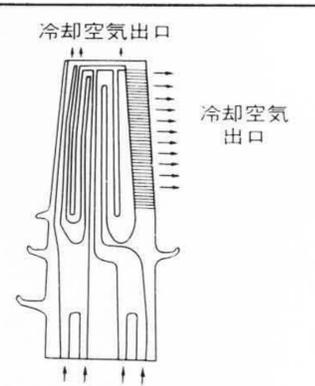
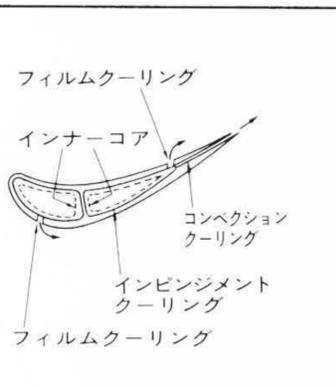
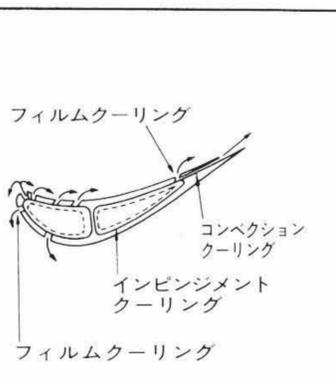
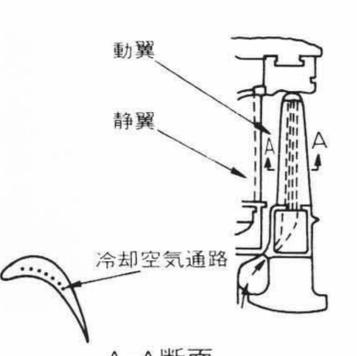
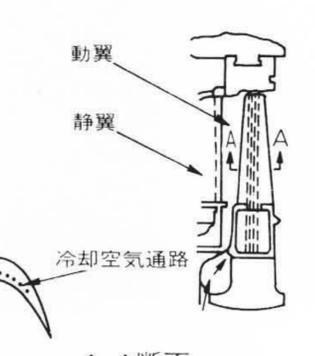
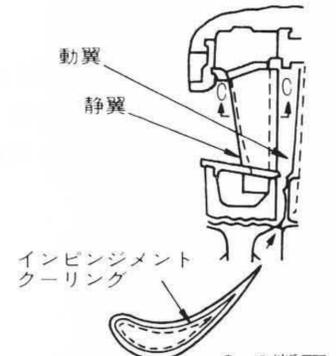
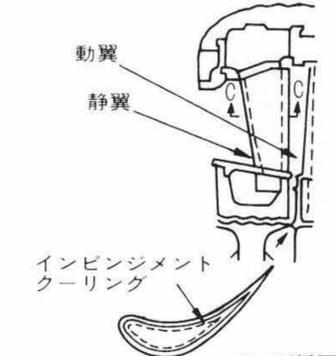
段落	動翼		静翼	
	MS700IE形, EA形	MS700IF形	MS700IE形, EA形	MS700IF形
第1段	GTD-111	GTD-111	FSX-414	FSX-414
				
第2段	IN-738	GTD-111	FSX-414	GTD-222
				
第3段	U-500	GTD-111	FSX-414	GTD-222
	無冷却	無冷却	無冷却	冷却

表3 タービン静翼, 動翼および燃焼器の材料と組成を示す。また, その材料の組成を右の(b)表に示す。

この表は, MS700IE形, EA形とF形とのタービン動翼, 静翼および燃焼器の材質の比較

(a) 材料名

項目	E形, EA形	F形	
タービン静翼	第1段	FSX-414(鋳造)	FSX-414(鋳造)
	第2段	FSX-414(鋳造)	GTD-222(鋳造)
	第3段	FSX-414(鋳造)	GTD-222(鋳造)
タービン動翼	第1段	GTD-111(鋳造)	GTD-111(鋳造)
	第2段	IN-738(鋳造)	GTD-111(鋳造)
	第3段	U-500(鋳造)	GTD-111(鋳造)
燃焼器	ライナ	HASTELLOY-X	HASTELLOY-X およびHS-188
	トランジションピース	N-263	N-263

(b) 材料の組成

材料名称	組成 (wt%)							
	Ni	Cr	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al
FSX-414	10.0	29.0	ベース	1.0	7.0	—	—	—
GTD-111	ベース	14.0	9.5	—	3.8	1.5	4.9	3.0
IN-738	ベース	16.0	8.3	0.2	2.6	1.75	3.4	3.4
U-500	ベース	18.5	18.5	—	—	4.0	3.0	3.0
HASTELLOY-X	ベース	22.0	1.5	1.9	0.7	9.0	—	—
N-263	ベース	20.0	20.0	0.4	—	6.0	2.1	0.4
HS-188	22.0	22.0	ベース	1.5	14.0	—	—	—
GTD-222	ベース	22.5	19.0	—	2.0	—	2.3	1.2

(2) フェーズII

工場実機無負荷および負荷試験を実施している。

(a) 圧縮機

性能およびサージングの特性確認を行った。

(b) タービン

翼の振動特性, 燃焼ガス温度分布およびメタル温度分布

を測定した。

工場試験の試験設備配置を図7<sup>3)</sup>に示す。ガスタービンの負荷は, 軸流の負荷圧縮機を駆動することによって吸収した。試験で, 定格の温度条件を作り出すために, ガスタービン吸気部の絞り弁による空気量の調整などができるようにしている。また, 負荷圧縮機を用いることによって, 実機圧縮機の

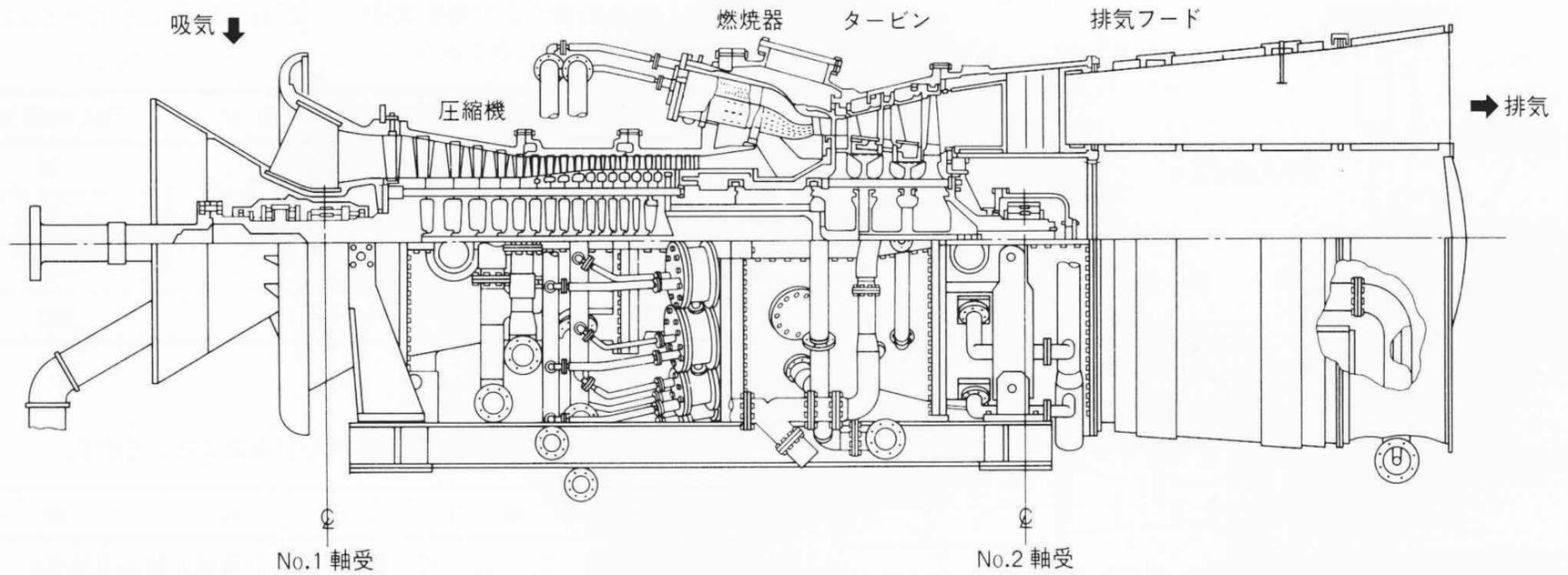


図5 MS7001F形ガスタービン本体断面図 MS7001F形ガスタービン本体の断面図である。排ガスは、軸方向に排出され、出力軸は、圧縮機前側端に設けられている特徴がある。

表4 本体構成の比較 ガスタービンの各構成部のE形、EA形とF形との比較を示す。また下図は、軸受の配置構成を示す。

(a) 空気圧縮機

	E形, EA形	F形
段数	17段 (1~17段)	18段 (0~17段)
抽気段	5段, 11段	5段, 13段

(b) 燃焼器

	E形, EA形	F形
個数	10本	14本
内径×長さ	φ356 mm×980 mm	φ356 mm×767 mm
ライナ	スロット冷却式	インピンジメント・フィルム冷却式
トランジションピース	フィルム冷却式	インピンジメント冷却式

(c) タービン

	E形, EA形	F形
段数	3段	3段
コーティング	1段動翼だけ実施	1, 2, 3段動翼に実施
静翼構成	1段	1セグメント2ペーン
	2段	1セグメント3ペーン
	3段	1セグメント4ペーン

(d) ロータ

	E形, EA形	F形
軸受個数	3個	2個
長さ	7.8 m	8.4 m
質量	28 t	50 t

(e) 軸受配置比較

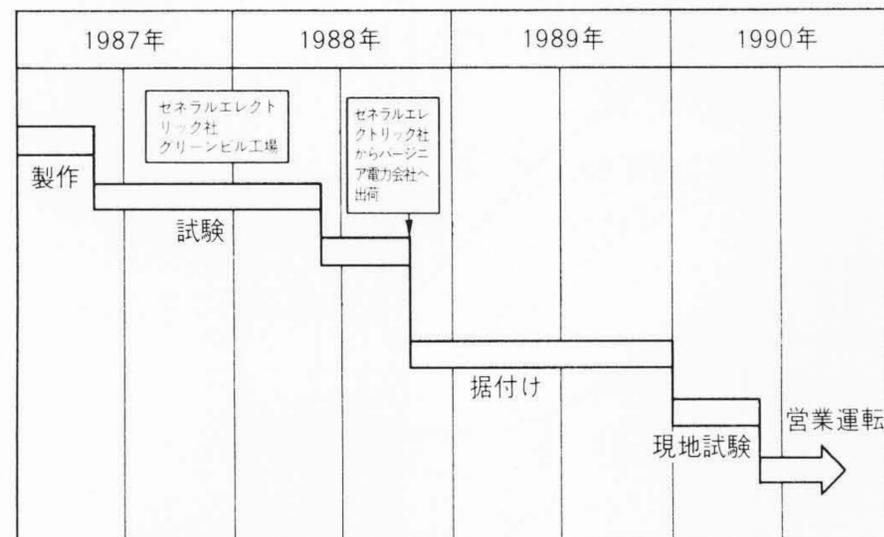
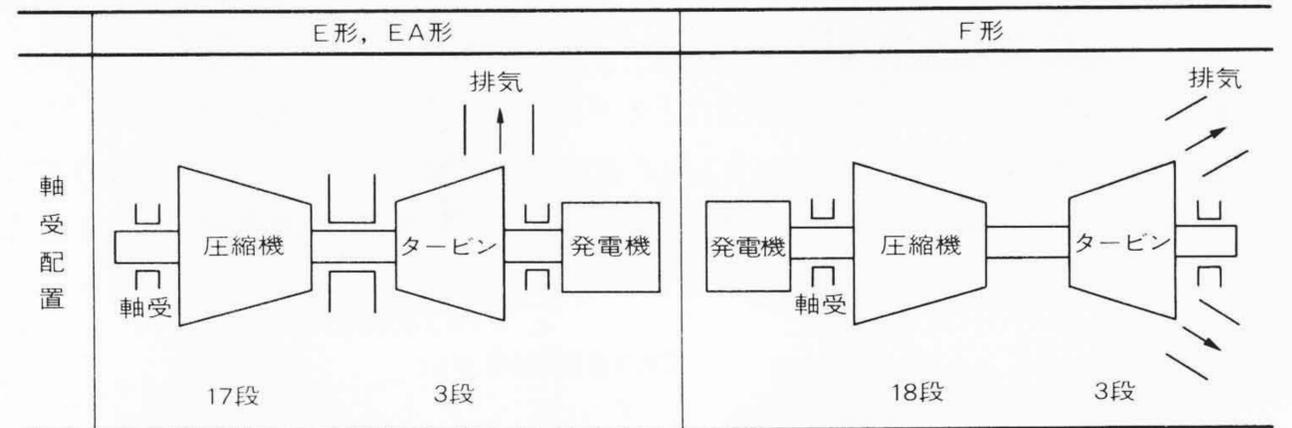


図6 MS7001F形ガスタービンの開発工程 MS7001F形ガスタービンの開発工程を示す。現在、現地試験中である。

サージ特性の把握を行えるよう配慮した。

工場試験での起動回数および運転時間の実績と試験結果を表5, 6に示す。試験結果, 確認項目すべてについて, 計画値よりも良好な結果が得られた。

(3) フェーズIII

米国バージニア電力会社での現地試験であり, 現在試運転が進められている。定格空気流量, 定格燃焼温度での負荷試験が実施され, ガスタービン全体の信頼性と性能の最終確認が行われる。

2.3 国内コンバインドサイクル発電プラントへの対応

前述したMS7001F形ガスタービンを採用したコンバインドサイクル発電プラントは, 種々計画の段階にある。発電設備の構成としては, ガスタービン, 蒸気タービンが1台の発電

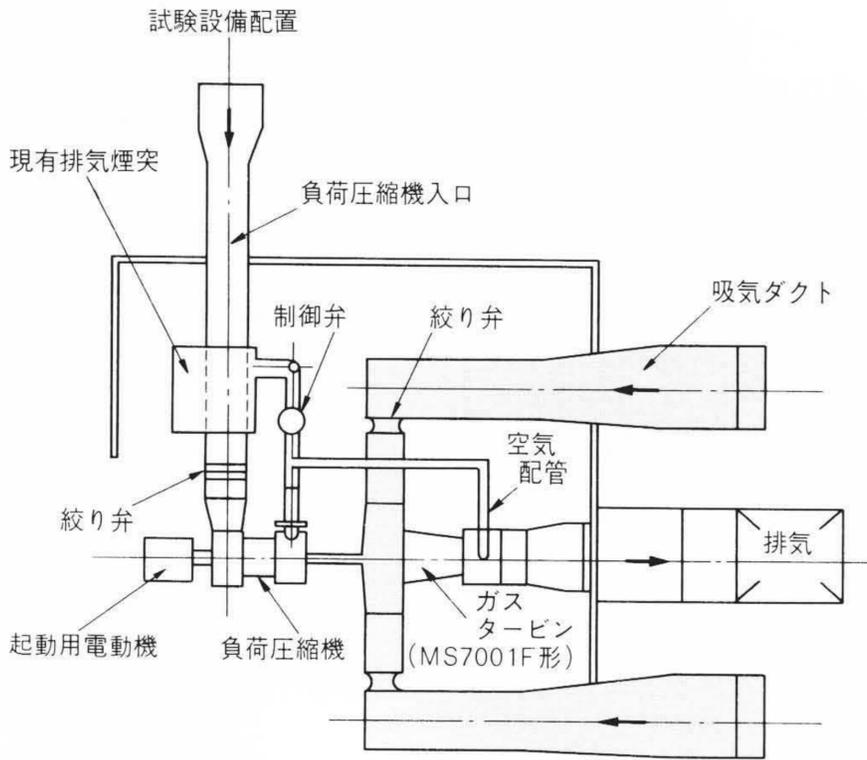


図7 試験設備配置 工場試験での試験設備の配置を示したものである。ガスタービンの負荷は、負荷圧縮機により吸収している。

表5 起動回数および運転時間 工場試験での起動回数および運転時間の実績を示した表である。

項目	起動回数(回)	運転時間(h)
無負荷試験(その1)	53	88
無負荷試験(その2)	20	40
負荷試験	61	259
累計	134	387

表6 試験結果 工場試験の結果を計画値に対して示す。

確認項目	結果
圧縮機空気流量	計画値よりも3%多い
出力	計画値よりも5%大
効率(シンプルサイクル)	計画値よりも3%良い
圧縮機効率	計画値どおり
タービン効率	計画値よりも1%良い

機を駆動する一軸の場合と、あるいはガスタービン、蒸気タービンがおのこの発電機を駆動する多軸の場合がある。ガスタービンから排出される排ガス中の窒素酸化物(以下、NO<sub>x</sub>と略記する。)濃度は、厳しい環境規制が課せられている。規制値は地域によって多少の相違があるが、一般には煙突出口で15 ppmVD以下(15%O<sub>2</sub>換算)のレベルであり、NO<sub>x</sub>生成の源である燃焼器での低NO<sub>x</sub>化が必要である。

燃焼器の低NO<sub>x</sub>化は、従来は湿式法による手段を用いてきたが、大量の水または蒸気を必要とするため設備費の増加およびプラントの効率低下を伴うことから、水または蒸気を使

用しない乾式法での低NO<sub>x</sub>燃焼器を採用しつつある。特に、MS7001F形ガスタービンは、従来に比べ燃焼温度が大幅に上昇しており、排出NO<sub>x</sub>濃度が顕著に高くなる傾向にある一方、従来と同レベルの濃度を達成するため、高度の技術導入が必要となる。日立製作所の自主開発によるF7E形、EA形ガスタービン用低NO<sub>x</sub>燃焼器の構造を図8に示す。燃焼器は、燃焼部が2段になっている。1段部は、燃空比(燃焼量/空気量)の急激な変化に対しても安定な拡散燃焼方式を採用し、2段部は、予混合燃焼方式を採用して、NO<sub>x</sub>の低減を図っている。高負荷域では、1段目と2段目がともに燃焼する2段燃焼と

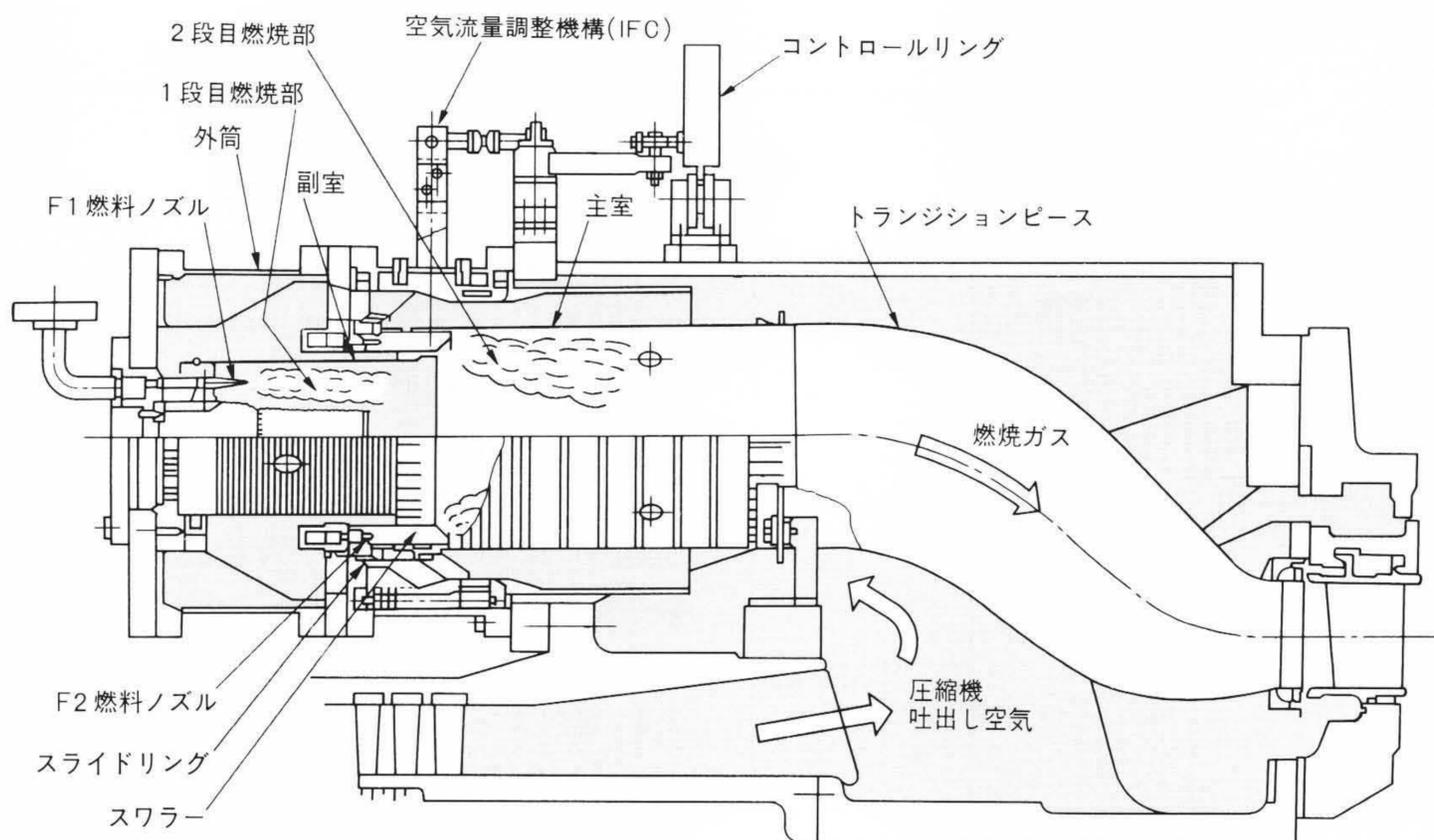


図8 低NO<sub>x</sub>燃焼器の構造 乾式低NO<sub>x</sub>燃焼器の構造断面を示す。

なる。

MS7001F形ガスタービンの低NO<sub>x</sub>燃焼器も、現在、上記実績をベースとして開発を進めている。

### 2.4 MS9001F形ガスタービンの状況

現地試運転中のMS7001F形ガスタービンと併行して、50 Hz 機地域向け大容量ガスタービンMS9001F形の開発が進められている。このガスタービンは、MS7001F形のスケールアップ設計によるものである。

MS9001F形ガスタービンは、1991年の工場試験実施を目標に、現在開発を進めている。

## 3 コージェネ・コンバインド発電プラント用中・小容量ガスタービン

日立-GE形ガスタービンについて述べてきたが、次に日立製作所が自主開発したH15形、H25形ガスタービンについて述べる。

### 3.1 H25形ガスタービン

H25形ガスタービンは、在来の25 MWクラス日立-GE形MS5001形ガスタービンに対し、大幅な高效率化を図るため、1984年から開発を開始した。開発工程を図9に示す。開発1号機は、種々要素開発や確認試験を経た後、1988年工場での無負荷および負荷試験を実施し、性能確認後、現地据付け、試運転を経て1988年12月に営業運転を開始した。H25形ガスタービンの仕様を表7に、また本体構造を図10に示す。翼、ロータ、燃焼器の冷却などに新技術が取り入れられている。燃焼器出口温度1,260℃と高温であり、圧力比は14.7に高め熱効率(LHV)32.6%を達成した。

開発1号機に引き続き、2号機目も営業運転中であり、3号機目を現在製作中である。いずれのユニットも、高温の排

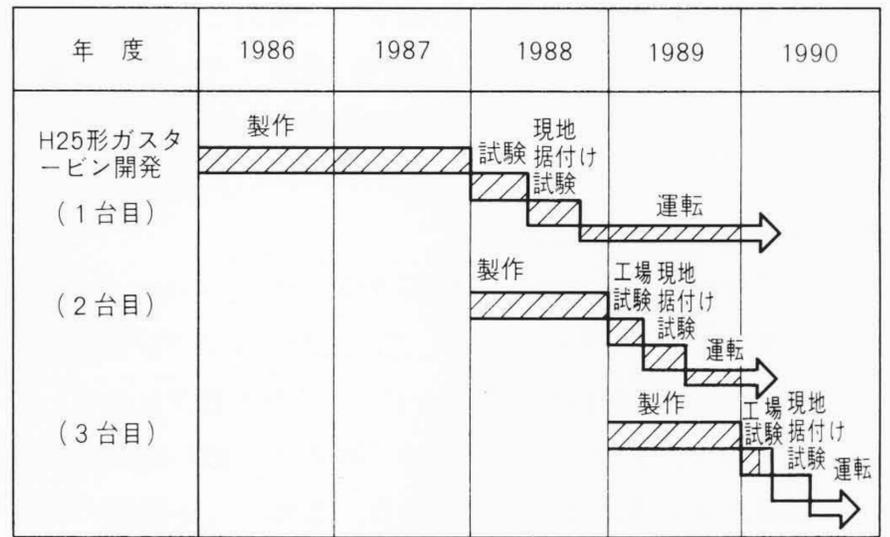


図9 H25形ガスタービン開発工程 日立製作所自主開発のH25形ガスタービンの開発工程を示す。

表7 H25形、H15形ガスタービンの仕様 この表は、H25形、H15形ガスタービンの仕様比較および回転機の相似則を説明したものである。

機 種	H25形	H15形	(回転機設計の相似則)
出 力	26,770 kW	15,000 kW	機器寸法：N倍
熱効率(LHV)	32.6%	30.9%	回 転 数： $\frac{1}{N}$ 倍
燃 焼 器 出口温度	1,260℃	1,260℃	↓
圧 力 比	14.7	14.7	
回 転 数	7,280 r/min	9,710 r/min	構造強度 同じ
圧 縮 機	軸流式17段	軸流式17段	固有振動数比 同じ
燃 焼 器	多缶式10缶	多缶式6缶	流体・性能 同じ
タービン	軸流式3段	軸流式3段	流量・出力 $N^2$ 倍

注：天然ガス燃焼ISO条件

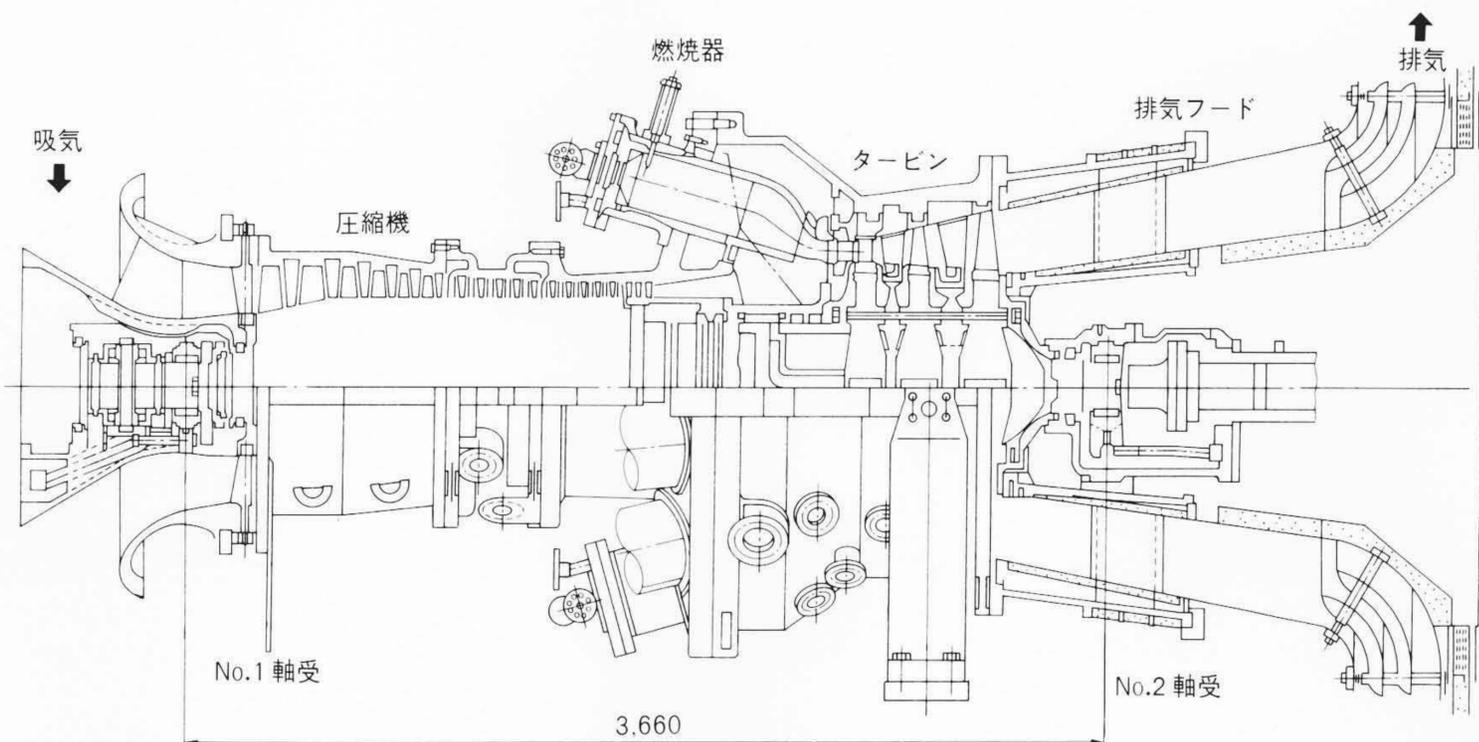


図10 H25形ガスタービン本体断面図 H25形ガスタービンの本体断面を示す。

ガスを排熱回収ボイラへ導き、発生した蒸気を各種設備へ利用するコージェネレーション(熱併給)発電プラントである。燃料はガス、液体燃料など多様化に対応できるようになっている。

### 3.2 H15形ガスタービン

H15形ガスタービンは、15 MWクラスガスタービンとして、H25形ガスタービンをベースとして、スケールダウン設計によって開発された。H15形ガスタービンの仕様を表7に示す。スケールアップ、ダウンの設計法は、同表に記載の回転機設計の相似則の考え方によるものであり、基本となる機種種の代表寸法を比例縮小することによって設計するものである。

### 3.3 今後の動向

省資源、省エネルギーが叫ばれるなか、国内の電力需要が伸びる傾向にある。こうした背景の下に、多種の燃料を使用した自家用コージェネレーション発電プラント用としての高効率・高効率、中・小容量ガスタービンとして、今後さらに台数が増加するものと予想される。

## 4 結 言

高温・高効率ガスタービンの新技術として、下記があげられる。

(1) MS7001E形、EA形ガスタービンをベースに大容量のMS7001F形ガスタービンが開発された。このガスタービンの特徴は、

(a) 燃焼温度1,260℃、単体効率(LHV)34.5%と高効率で

あり、ジェットエンジンの最先端技術を取り入れている。

(b) コンバインドサイクル発電プラント向けである。

(c) 環境対策として、乾式低NO<sub>x</sub>燃焼器が装備可能である。

(2) H15形、H25形ガスタービンが開発された。このガスタービンの特徴は、

(a) 日立製作所自主開発の高温・高効率、中・小容量ガスタービンである。

(b) コージェネレーション発電プラント向けおよびコンバインドサイクル発電プラント向けである。

最後に、これら新技術をベースに実績を踏まえながら、さらに顧客のニーズにこたえるべく高効率を目指したガスタービンの開発を推進する考えである。

### 参考文献

- 1) D. E. Brandt : 1987年東京ガスタービン学会論文集 87-TOKYO-IGTC-100 "Reliability and Maintainability Considerations of the Advanced MS7001F Gas Turbine"
- 2) D. E. Brandt : "The Design and Development of an Advanced Heavy-Duty Gas Turbine" Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol.110, p.243~250 April 1988
- 3) D. E. Brandt : "MS7001F Prototype Test Results" ASME Paper 89-GT-102