

1,300 °C級高性能ガスタービンの完成

Completion of 1,300 deg.C High Efficiency Gas Turbine

広瀬 文之* Fumiyuki Hirose

高橋 浩二* Kōji Takahashi

小豆畑 茂** Shigeru Azuhata

古賀 嗣明* Tsuguaki Koga



中国電力株式会社柳井発電所の全容 1, 2号系列のおの700 MWの本格的なコンバインドサイクル発電プラントである。平成2年11月に1-(1)号系列が営業運転開始となり、現在2号系列の建設を急ピッチで進めている。

最近、わが国では省エネルギー化のニーズにこたえるため、ガスタービンの排熱を回収し、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ガスタービン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・高効率ガスタービンの開発が進められている。現在、高性能のガスタービンとして、燃焼温度1,260 °Cの大容量MS7001F形(以下、F7F形と言う。)ガスタービンが国内で実用化されつ

つあるが、さらに高効率を目指して、現在もなお新技術の開発が進められている。高効率化のためには、燃焼温度の上昇が必須(す)の条件であり、達成のためにはタービン翼の新冷却技術の導入、新材料の採用、また燃焼器では環境条件に適合した低NO_x(窒素酸化物)燃焼器の開発など、新技術の開発と実機適用のための検証が必要である。このたび、F7F形ガスタービンの初号機を完成し、工場での試運転を経て現地へ発送した。

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 日立工場 工学博士

1 はじめに

最近の技術革新の成果として、燃焼温度(タービン第1段動翼入口温度)1,200℃以上の高効率ガスタービンの実用化が進められている。このたび日立製作所は、最新鋭の高性能MS7001F形(以下、F7F形と言う。)ガスタービンを完成した。このガスタービンは、大容量・高性能機としてわが国初の燃焼温度1,300℃級であり、新技術を随所に駆使している。ここでは、最新鋭かつ高性能のF7F形ガスタービンの紹介と、工場試験の概要について述べる。

2 最新鋭ガスタービンの概要

2.1 ガスタービンの変遷

ガスタービンの高効率化を図るには、燃焼温度の上昇を許容するための新技術の発展が必要不可欠である。これには、ガスタービンの高温部材である動翼、静翼および燃焼器の冷却技術の改良、ならびに新材料の開発が必要である。また、高温部材だけでなく外気を取り入れて圧縮し、高温作動流体の源となる空気圧縮機部についても、高効率化のための大容量・高圧力比化に向けた開発を進めている。タービン入口温度の変遷を図1に示す。タービン入口温度の上昇が年間で約25℃となっており、その内訳は冷却で約15℃、材料で約10℃であることがわかる。

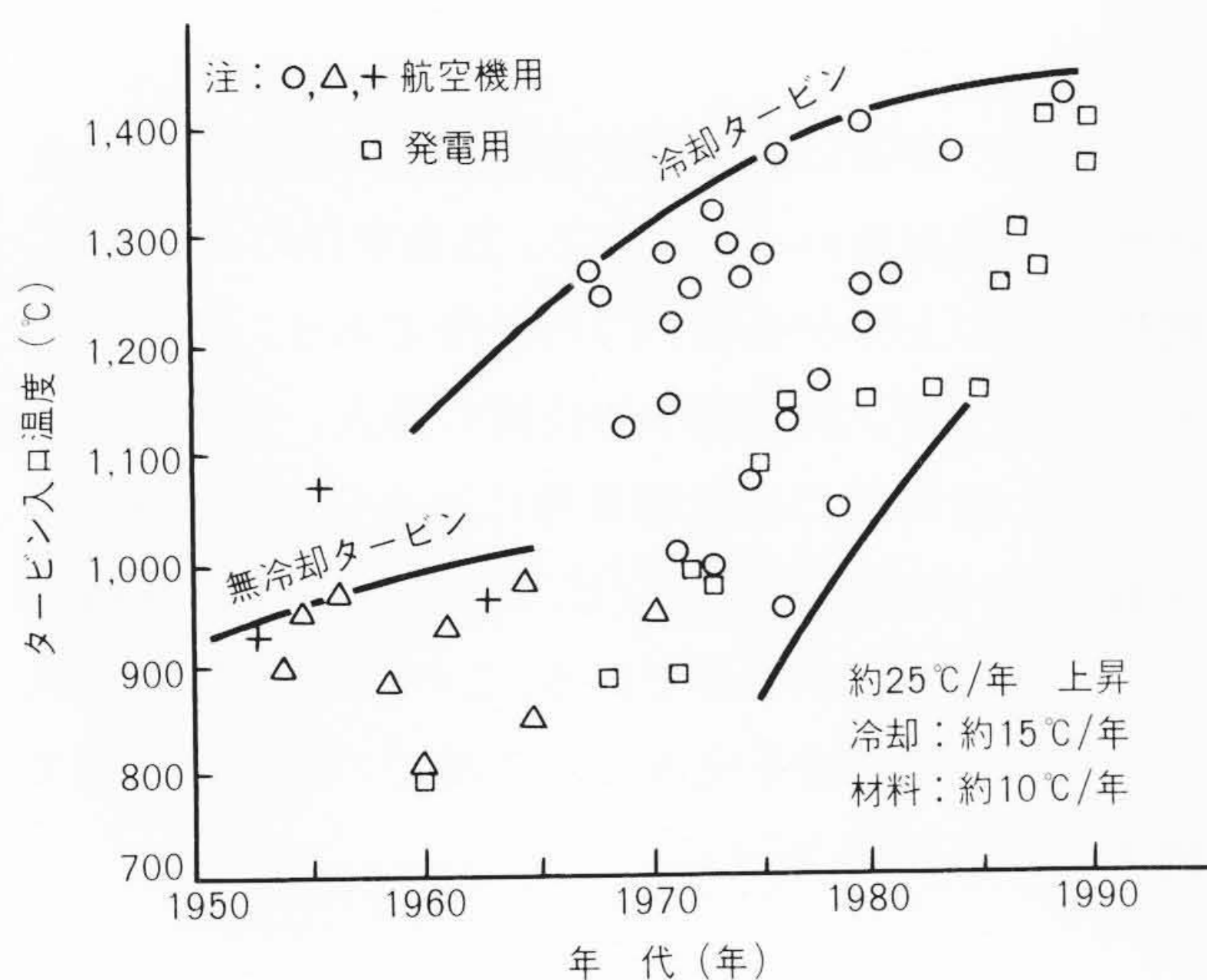


図1 タービン入口温度の変遷 ジェットエンジン、ガスタービンのタービン入口温度の変遷について年代をベースに示す。昔の無冷却タービンの時代から、現代は冷却タービンが主流となっている。

2.2 1,300℃級ガスタービンの概要

1,300℃級ガスタービンであるF7F形ガスタービンは、E形、EA形をベースに高性能圧縮機の開発や新材料、新冷却技術の採用により、1982年から約6年の歳月をかけて開発したものである。MS7001E形(以下、F7E形と言う。), EA形とF形、FA形の仕様比較を表1に示す。ガスタービンのE形、EA形は燃焼温度が1,100℃級であるのに比べて、F形、FA形は1,300℃級と大幅な上昇となっている。F形はEA形に比べて燃焼温度で156℃上昇、出力で約80%増加しており、絶対値で1.9%の効率向上を図っている。さらに、FA形は、F形に比べて燃焼温度で28℃、出力で4%、効率で1%(絶対値)上昇している。F7F形ガスタービン本体断面を図2に示す。ガスタービン本体は、空気圧縮機、燃焼器およびタービンの三つの部分から構成している。F形ガスタービンに関する新技術の内容について次に述べる。

(1) 空気圧縮機

空気圧縮機の翼列は、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て遷音速^{※)}となる。既存翼形状では、亜音速^{※)}設計のために遷音速状態で損失が大きくなることから、翼形状をやや薄肉の直線形状とした遷音速設計とし、損失を低く抑えている。

(2) タービン

タービン段数は、性能や実績面からF7形として採用した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を軸流とすることによって、損失の低減を図っている。タービン翼の枚数は、動翼が第1～3段ともすべて92枚、静翼の第1段、2段がおのおの1セグメント2枚翼で24セグメント計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て熱応力の緩和を図っている。第1段動翼は、燃焼温度の大幅な上昇に対応するため、ジェットエンジンの第1段動翼の実績をベースに設計開発したりターンフロー冷却翼を採用している。

※) 音速以下での流れを亜音速と言う。また、音速近傍の流れで音速以上の超音速状態と亜音速状態が共存している場合を遷音速と言う。

表1 F7形ガスタービンの仕様 各形式での仕様の比較を示す。燃焼温度の上昇による出力、効率の増加がわかる。

項 目	仕 様			
	F7E	F7EA	F7F	F7FA
定格出力 (kW) (単純サイクル, 発電機端)	74,400	83,500	150,000	159,000
定格回転数(r/min)	3,600	3,600	3,600	3,600
効 率(LHV)	31.9%	32.6%	34.5%	35.9%
燃焼温度/圧力比	1,085℃/ 11.5	1,104℃/ 12.4	1,260℃/ 13.5	1,288℃/ 15.0
排 気 温 度(℃)	527℃	530℃	583℃	590℃
圧縮機段数(段)	17	17	18	18
タービン段数(段)	3	3	3	3
燃 焼 器(個)	10	10	14	14

注：大気条件(15℃/0.10MPa)

ベースとなったジェットエンジンは、TF39、CF6-6である。これらのエンジンは、1970年前半から航空機に装備しており、エンジンの製作台数としては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を強化し、燃焼温度1,260℃に対しても、翼の温度としては、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。F形の動翼、静翼の冷却方式を表2に示す。

材料については、使用温度、冷却構造および製造方法

を考慮して最適材料を選定している。タービン静翼、動翼の使用材料を表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、クリープ強度の向上を図ったものである。材料の組成は表4に示すとおりである。その他、動翼には第1段～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。

(3) 本体構成

燃焼器は、実績のあるE形、EA形と同一径とし、容量増加に伴って本数を10本から14本に増加している。ガス

表2 動・静翼冷却方式 F7F形の動・静翼の冷却方式を示す。動翼の冷却方式は、ジェットエンジンの技術である冷却効果の良いリターンフロー冷却を採用している。

段落	動 翼	静 翼
	F7F形	F7F形
	GTD-111	FSX-414
第1段		

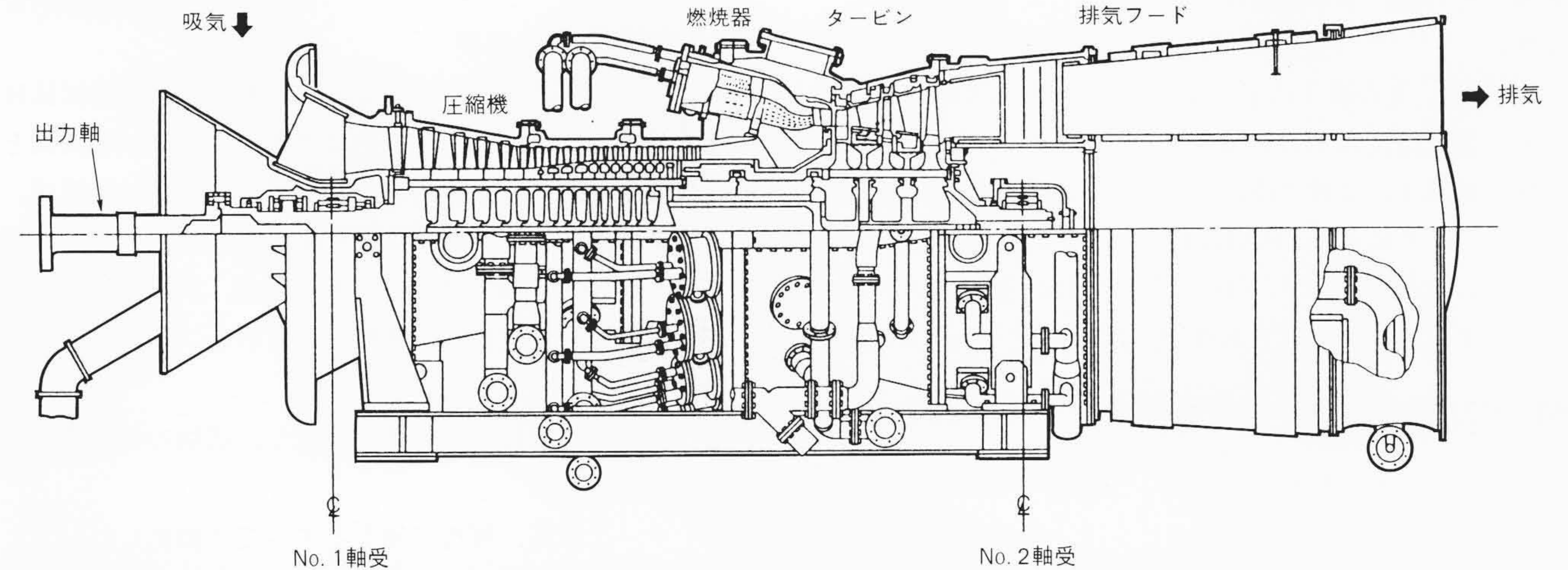


図2 F7F形ガスタービンの本体断面図 F7F形ガスタービン本体の断面図を示す。排気ガスは軸方向に排出され、出力軸は圧縮機前側端に設けている。

表3 タービン静・動翼材料比較 F7E, EA形とF, FA形とのタービン静・動翼の材質の比較を示す。F形では、タービン第2, 3段動静翼で大幅な改良を図っている。

項 目		E 形, EA 形	F 形, FA 形
タービン静翼	第1段	FSX-414 (Co基超合金)	FSX-414 (Co基超合金)
	第2段	同上	GTD-222 (Ni基超合金)
	第3段	同上	同上
タービン動翼	第1段	GTD-111 (Ni基超合金)	GTD-111 (Ni基超合金)
	第2段	IN-738 (Ni基超合金)	同上
	第3段	U-500 (Ni基超合金)	同上

表4 材料の組成 各種材料の組成を示す。超高温材料として特徴的なNi基, Co基の合金が採用されている。

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
GTD-222	ベース	22.5	19.0	—	2.0	—	2.3	1.2

タービン本体の構成として、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ている。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。また、排気ガスを後流の排熱回収ボイラなどにスムーズに導くことができる利点もある。その他、本体構成について比較したものを表5に示す。

FA形は、先の表1に示すようにF形に対して圧力比を高め、燃焼温度の上昇を図ったものであり、タービン部静翼、動翼1, 2段で冷却に関する設計改善を行っている。このことにより、FA形はF形より燃焼温度が上昇しているにもかかわらず、F形と同等の静翼、動翼のメタル温度とすることが可能であり、寿命も同等となっている。

3 F7F形ガスタービンの完成

このたび、わが国初の高性能・大容量1,300℃級ガスタービンであるF7F形ガスタービンは、日立製作所で組立を完了し、工場内での無負荷定格回転試験も終了した。

表5 本体構成の比較 ガスタービン本体の各構成部について、F7E, EA形とF, FA形とを比較して示す。圧縮機段数、燃焼器個数、軸受個数が両者の大きな相違点である。

(a) 空気圧縮機		
	E形, EA形	F形, FA形
段 数	17段 (1~17段)	18段 (0~17段)
(b) 燃焼器		
	E形, EA形	F形, FA形
個 数	10本	14本
内 径 × 長 さ	φ356 mm × 980 mm	φ356 mm × 767 mm
(c) タービン		
	E形, EA形	F形, FA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

	軸 受 配 置
E 形, EA 形	
F 形, FA 形	

3.1 試験設備の概要

F7F形ガスタービンの工場内での無負荷定格回転試験を実施するにあたり、工場内にガスタービン試験設備を新設した(図3参照)。この試験設備は、1階に試験場、上階部に操作室、計測室などを配置し、屋上前方に吸気ダクト、後方に排気ダクト、燃料設備、潤滑油設備、冷却水設備などを設置した構成としている。試験設備の特徴について次に述べる。

- (1) 制御装置には最新鋭機を導入し、試験の信頼性向上を図っている。
- (2) データ収集、解析処理などすべて自動化したシステム構成として、試験の合理化を図っている。
- (3) 周囲の環境に合わせて、試験室は防音防爆構造とし

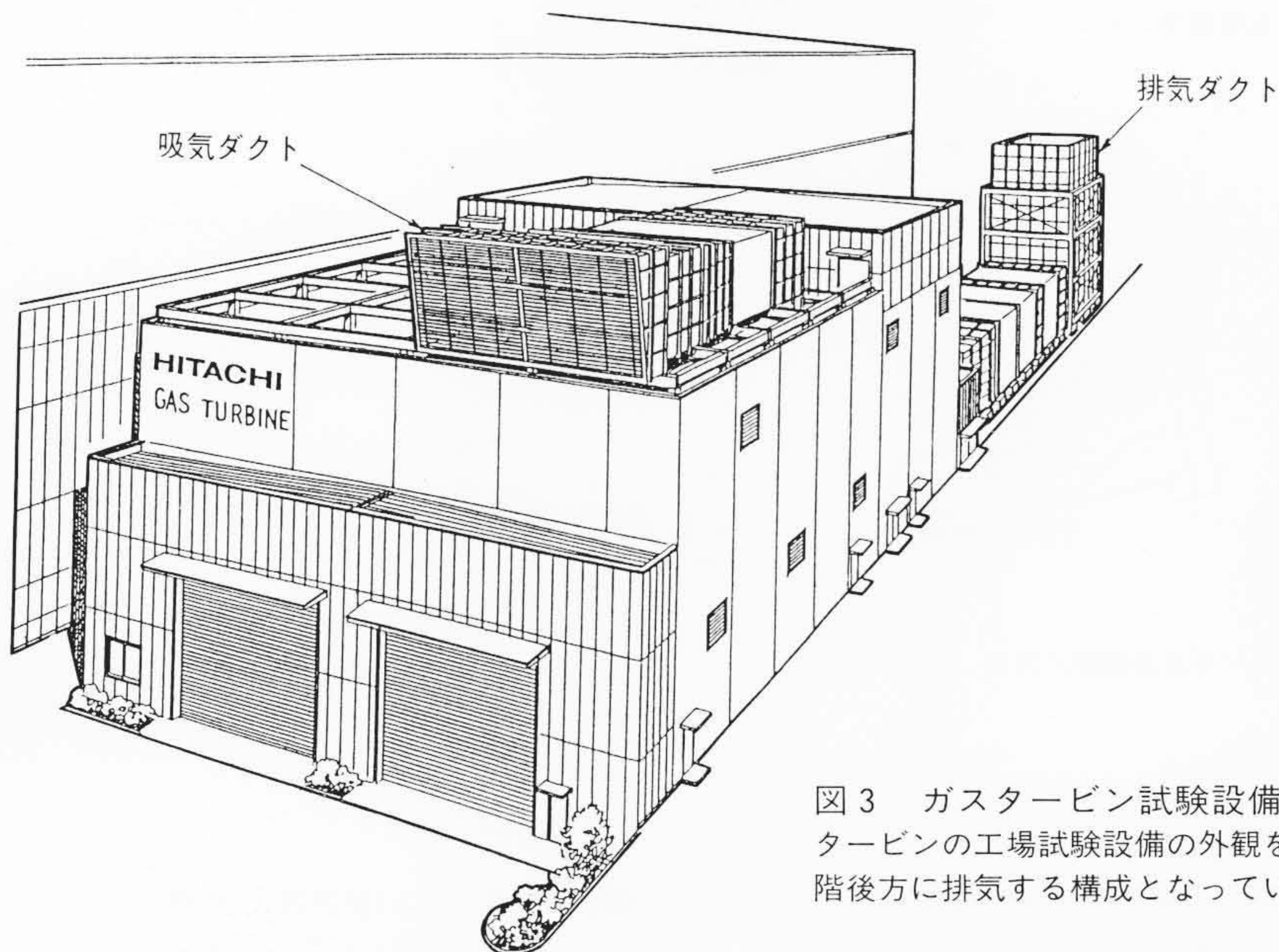


図3 ガスタービン試験設備の外観 新設したF7F形ガスタービンの工場試験設備の外観を示す。建屋屋上から吸気し、1階後方に排気する構成となっている。

ている。
3.2 工場試験の概要

F7F形ガスタービンは、工場組立完了後、試験場に搬入し、無負荷での定格回転試験を実施した。試験場内に設定したF7F形ガスタービンの状況を図4に示す。ガスタービンは、この状態で起動、点火、昇速、そして定格回転数での連続運転試験を行い、所定のデータを採取し、分析処理される。F7F形ガスタービン初号機の工場試験の結果を表6に示す。すべて良好な結果を得ることができた。

このガスタービンは工場試験を無事終了し、中国電力株式会社柳井発電所2号系列発電設備用として現地据え付け中である(1ページの写真参照)。

4 乾式低NOx燃焼器

F7F形ガスタービン乾式低NOx(窒素酸化物)燃焼器の特徴について以下に述べる。火炎温度低減がサーマル

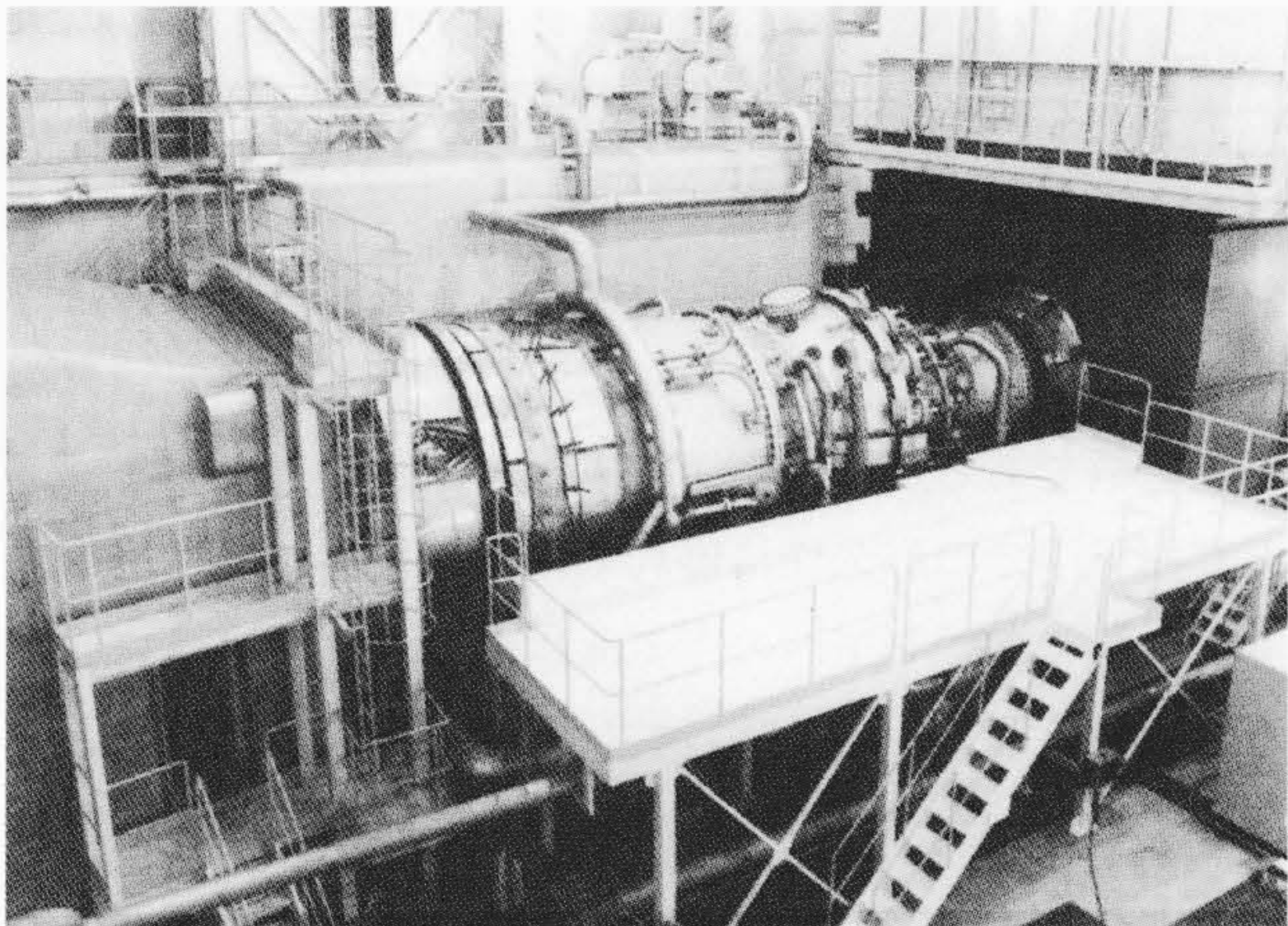


図4 工場試験状況 試験設備内に設定したF7F形ガスタービンを示す。写真右上から屋外の空気を取り入れ、左側に排気する方式である。

表6 工場試験結果 工場試験の結果をまとめて示す。無負荷試験で確認できる項目について評価している。

確 認 項 目	結 果
圧縮機入口空気流量	計画値どおり
圧 力 比	計画値よりやや良
圧 縮 機 効 率	同 上
熱 消 費 率	計画値どおり
軸 受 振 動	許容値以下

NOx抑制の基本原理なので、ガスタービン用低NOx燃焼器には、稀薄予混合燃焼法を採用した。乾式2段燃焼器の概要を図5に示す。燃焼器は、拡散燃焼を行う副室と予混合燃焼の主室とで構成している。ガスタービンの起動から低負荷帯までは、安定した火炎が得られる拡散燃焼を使用し、高負荷帯では拡散と予混合の2種類の火炎を併用している。

広い負荷帯にわたって安定した火炎を形成し、NOxを低減するためには、拡散と予混合燃焼の空気配分の最適化が重要である。特に予混合火炎は、拡散火炎よりも安定して燃焼できる混合気の噴出速度、燃空比の範囲が狭

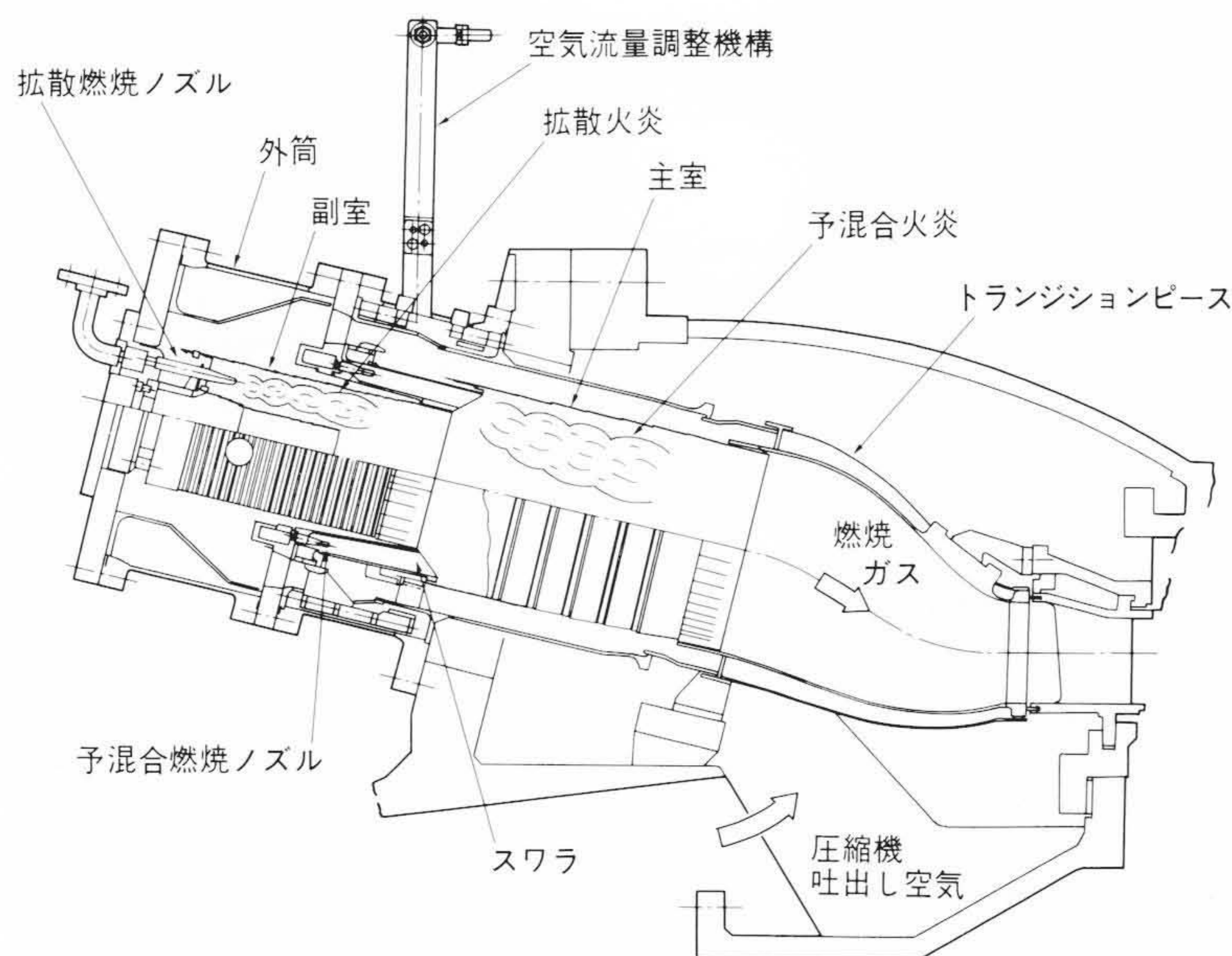


図5 乾式2段燃焼器の構造 乾式2段燃焼方式の低NOx(窒素酸化物)燃焼器構造断面を示す。この燃焼器はF7F形用を示しており、軸中心に対し斜めに設置する構造となっている。

いので、燃料流量に応じて空気流量を調整し、予混合燃焼でのガスタービンの負荷範囲を広げた。主室、副室への空気流量を調整する制御機構を設置し、負荷に応じて空気流量配分を最適化できるのが図5に示す燃焼器の一つの特徴である。この制御機構は、擦動部をなくして高温雰囲気下での耐久性に優れている。拡散燃焼を使用する低負荷帯では副室への空気流量を増加し、予混合燃焼も使用する高負荷帯では、燃料流量に応じた空気流量の設定によって安定した予混合火炎を形成できた。広い負荷範囲でNOxを低減できるようにしている。また、副室からの燃焼ガスで予混合気を点火する際、混合気の噴出速度を調整できるため、低いガスタービン負荷でも安定した予混合火炎を形成することができる。

この形式の燃焼器は、現在稼働中の中国電力株式会社

柳井発電所と九州電力株式会社新大分発電所のコンバインドプラントに採用されている。それぞれ1992年7月までに運用時間1万～1万5,000時間、起動・停止200～300回を経験し、良好な結果を得ている。

F7F形用低NOx燃焼器では、上記実績をベースに開発を行って、所期の目的を達成している。

5 おわりに

以上、最新鋭の高性能F7F形ガスタービン、および初号機の工場試験の概要について述べた。日立製作所は、これらの新技術を駆使した発電プラントの完成と、さらにより高効率のガスタービンの開発、発電プラントの実現に向けて、ユーザーのニーズにこたえるため全力を尽くす考えである。

参考文献

- 1) 高橋：ガスタービン高性能化(高温化)技術，日本ガスタービンセミナー第20回資料集(1992-1)
- 2) 瀧花，外：最新の高性能ガスタービン，日立評論，72，6，527～534(平2-6)
- 3) D. E. Brandt：Reliability and Maintainability Considerations of Advanced MS7001F Gas Turbine，1987年東京ガスタービン学会論文集87-TOKYO-IGTC-100
- 4) 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
- 5) D. E. Brandt：The Design and Development of an Advanced Heavy-Duty Gas Turbine，ASME Paper 87-GT-14
- 6) Gas Turbine Futures，May 1988，International Power Generation