U.D.C. 621.438.1

中国電力株式会社坂発電所向け

67,000kW大容量ガスタービン

67,000kW Large Capacity Gas Turbine for Saka P.S. of Chugoku Electric Power Co.

西本正次* *Nishimoto Masatsugu*
星野和貞** *Hoshino Kazusada*
小島秀夫** *Kojima Hideo*
目黒和利*** *Meguro Kazutoshi*

ガスタービンは設置の容易さ，運転操作の簡単さ，及び起動の迅速さにより，従来ピークロード発電設備として順調な発展を遂げてきたが，このたび採用した日立-GE MS 7001ガスタービンではこれらの特色に加え，大容量・高性能化を実現した。

また，本ガスタービンを設置するに当たっては，NOx低減対策として，燃焼器中への水噴射を行ない，排気ガス中のNOxを50ppm以下とし，騒音対策として，防音建屋内にガスタービン機器を収納して，地域の暗騒音を実質的に上昇させないなど，環境問題に特に留意した。

中国電力株式会社坂発電所向け67,000kWガスタービン発電設備は，このほど順調に営業運転に入った。

1 緒　言

ガスタービン発電設備は，従来より原子力発電設備あるいは火力発電設備に比べ設置が容易であること，運転操作が簡単であること，起動が迅速であることなどの特色により，ピークロード発電用として発展してきたが，このほど日立製作所では，これらの特色に加え，大容量・高性能化の特色を持つ60Hz大容量ガスタービンを完成した。本ガスタービンは，MS7001ガスタービンと呼ばれ，更に，環境対策として騒音及びNOxに対する施策も万全の70,000kW級大容量ガスタービン発電設備として，順調に営業運転を開始した。

以下にその概要を紹介する。

2 MS7001ガスタービンの概要と特徴

2.1 計画概要

このガスタービンは，これまでに2,000台以上の実績を持ち，十分信頼性が確立しているモデルシリーズMS5001ガスタービンをスケールアップし，出力の増加及び熱効率の向上を図ったものである。基本的な設計については，MS5001と同様の技術が採用されており，大容量化された新機種ではあるが，確立された技術に基づいた信頼性の高い設計であると言える。また，この大容量ガスタービンに対しても，従来機種と同じく，パッケージ型を標準として採用し，輸送コスト及び据付コストの低減を期している。

制御方式については，完全自動運転，遠隔操作が可能で，その中枢部にはスピードトロニックと称する，ソリッドステート化した電子制御を採用している。

2.2 ガスタービン主要仕様及び構造

表1に本ガスタービンの主要仕様を，**図1**にガスタービン本体の断面図を示す。

本ガスタービンは単純開放サイクル1軸型で，圧縮機とタービンを直結し3軸受で支持されており，回転速度は3,600rpmで，変速装置を用いることなく60Hz発電機を駆動することができる。

圧縮機は軸流形17段より成り，空気を約10気圧に圧縮する。

表1　MS7001ガスタービンの主要仕様　従来型ガスタービンより燃焼温度が約100°C上昇し，高性能・大容量となった。

No.	項目		仕様
1	形式		単純開放サイクル1軸ガスタービン
2	出力	水噴射なし	ピーク：62,300kW ベース：56,350kW
		水噴射あり(2%)	ピーク：67,000kW ベース：60,050kW
3	熱効率(HHV基準)	水噴射なし	ピーク：28.37% ベース：27.97%
		水噴射あり(2%)	ピーク：26.58% ベース：26.29%
4	タービン入口温度		ピーク：1,066°C ベース：1,004°C
5	タービン排気温度		ピーク：554°C ベース：514°C
6	回転数		3,600rpm
7	圧縮機	形式	軸流式
		段数	17段
		空気流量	860,000kg/h
		圧力比	ピーク：9.7　ベース：9.5
8	タービン	形式	軸流衝動式
		段数	3段
9	燃焼器	形式	多筒形（キャニュラ形）
		筒数	10本
10	制御方式		電子制御（スピードトロニック）
11	パッケージ構成		(1) コントロールパッケージ (2) 補機パッケージ (3) タービンパッケージ (4) 発電機パッケージ (5) 発電機補機パッケージ

注：1. 外気条件　大気温度20°C，大気圧760mmHg
2. 吸排気損失として，吸気76mmH_2O，排気127mmH_2Oを含む。
3. 燃料は軽油使用

* 中国電力株式会社坂発電所　** 日立製作所日立工場　*** 日立製作所大みか工場

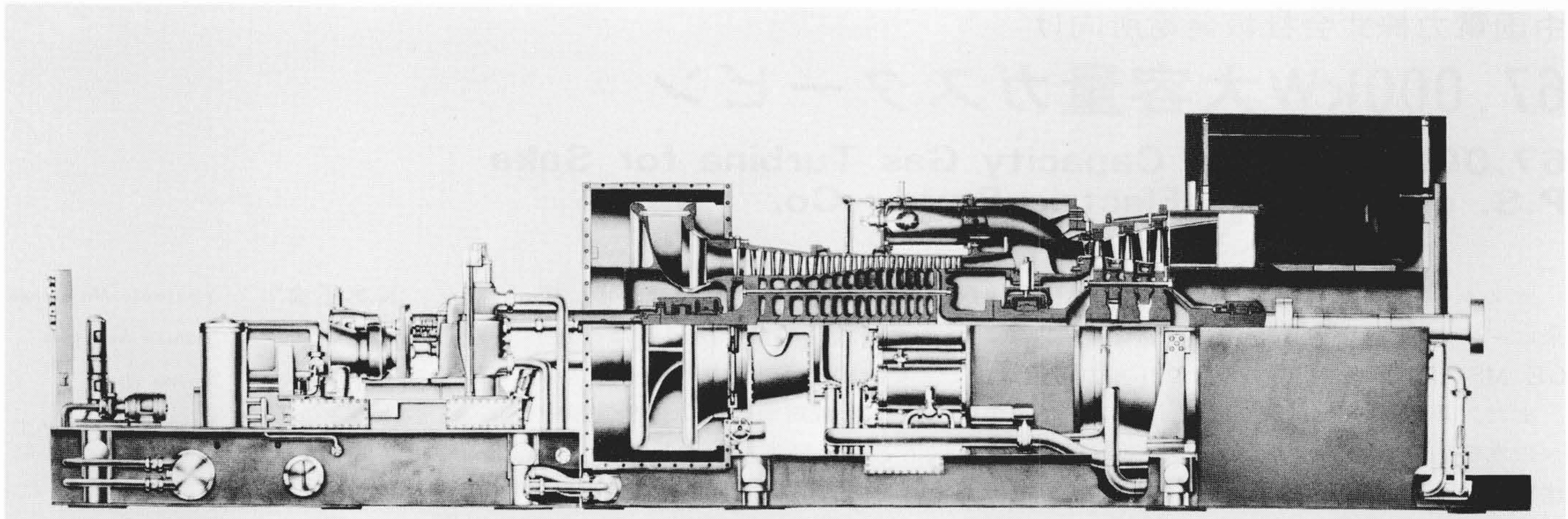

図1　MS7001ガスタービン断面図　ガスタービン本体と付属機器は，それぞれ一体のベースに設置されており，パッケージとなっている。全長は約18mである。

またタービンは軸流衝動式で3段より成り，タービン動翼は応力及び熱的に過酷な条件下におかれるために，超耐熱合金を使用している。圧縮機及びタービンのケーシングは，水平フランジで2分割され内部の点検・保守が容易である[1]。

図2に工場組立中のガスタービン本体を示す。

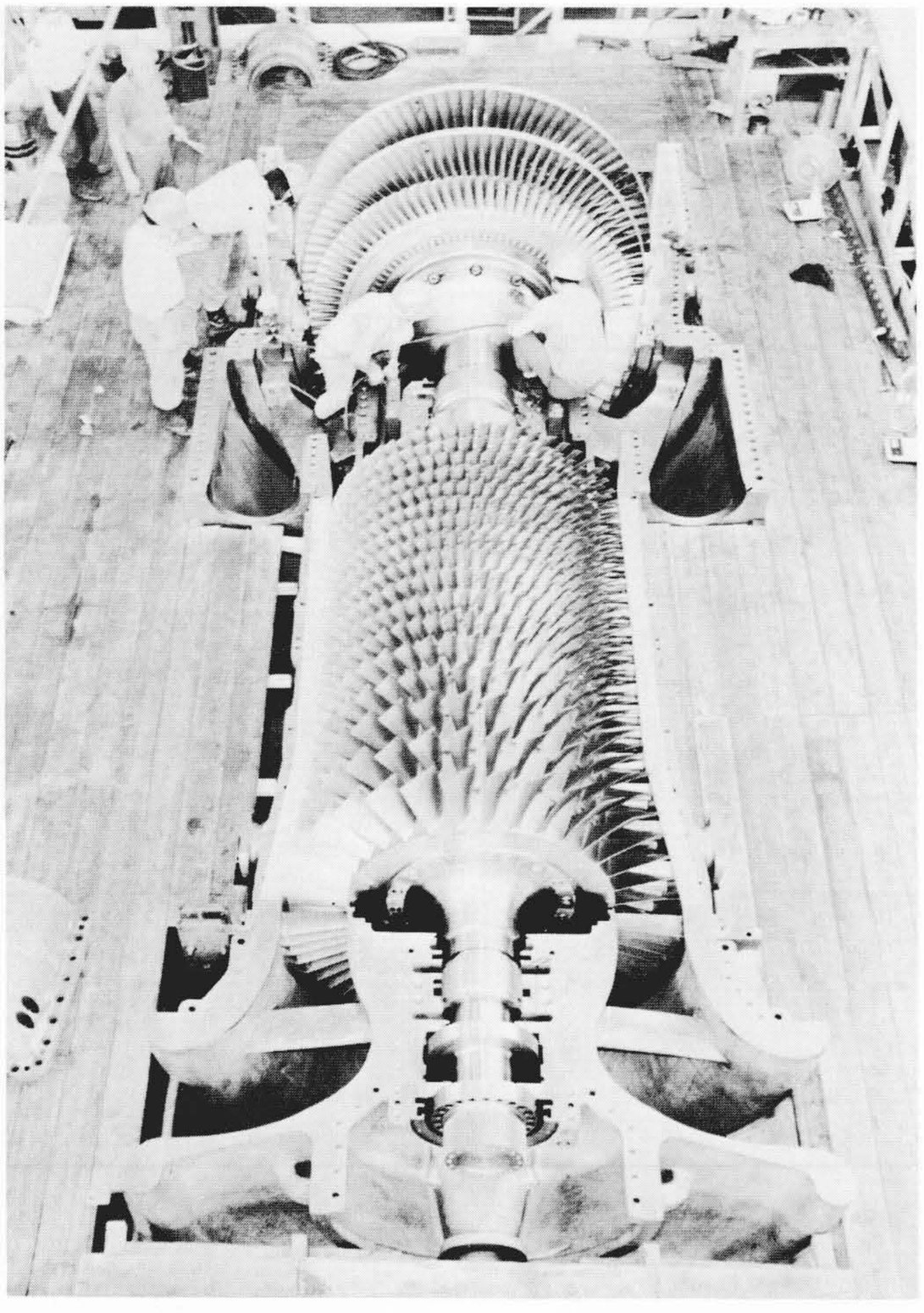

図2　工場組立中のガスタービン本体　圧縮機及びタービンのケーシングは，水平フランジで2分割され，内部の点検・保守が容易である。

2.3　タービン入口温度と冷却方式

ガスタービンサイクルにおいて，一般的にタービン入口温度の60℃の上昇は，機関出力にして約10%，熱効率にして約1%の改善に相当する。したがって，タービン入口温度を上げることはガスタービン性能向上の重要な点であり，高級耐熱合金の開発，高温部冷却方式の改良，合理的燃焼システムの採用，温度制御装置の改善などの多くの研究開発がなされて，年々タービン入口温度は上昇している。過去30年，世界でこの分野における温度上昇の割合は9.4℃/年と言われている[2]。

本67,000kW ガスタービンでは，新高級耐熱材料を使用し初めて第1段動翼の空気冷却方式を採用し，ベースロードで1,004℃，ピークロードで1,066℃というタービン入口温度の設計としている。動翼の空気冷却方式の採用及び静翼の新冷却方式の採用により，従来のMS5001ガスタービンのタービン入口温度がピークロードで985℃であるのに対し，1,000℃を超える温度が可能となった。**表2**にガスタービン主要部材

表2　MS7001ガスタービン主要部材料　高温強度，耐腐食性の面で最高級の耐熱合金が使用されている。

部品名		段落	材質
タービン	動翼	1	IN-738
		2～3	U-500
	静翼	1～2	FSX-414
		3	N-155
	翼車	1～3	Cr-Mo-V鋼
	タービン車室	—	FCD40
圧縮機	動翼	1～17	SUS403
	静翼	1～17	SUS403
	翼車	1～17	Ni-Cr-Mo-V鋼
	入口ケーシング	—	FC20
	中間ケーシング	—	FC20
	吐出ケーシング	—	FCD40
燃焼器	ライナ	—	RA333/HASTELLOY X
	トランジッションピース	—	RA333/HASTELLOY X
	外筒	—	SB42

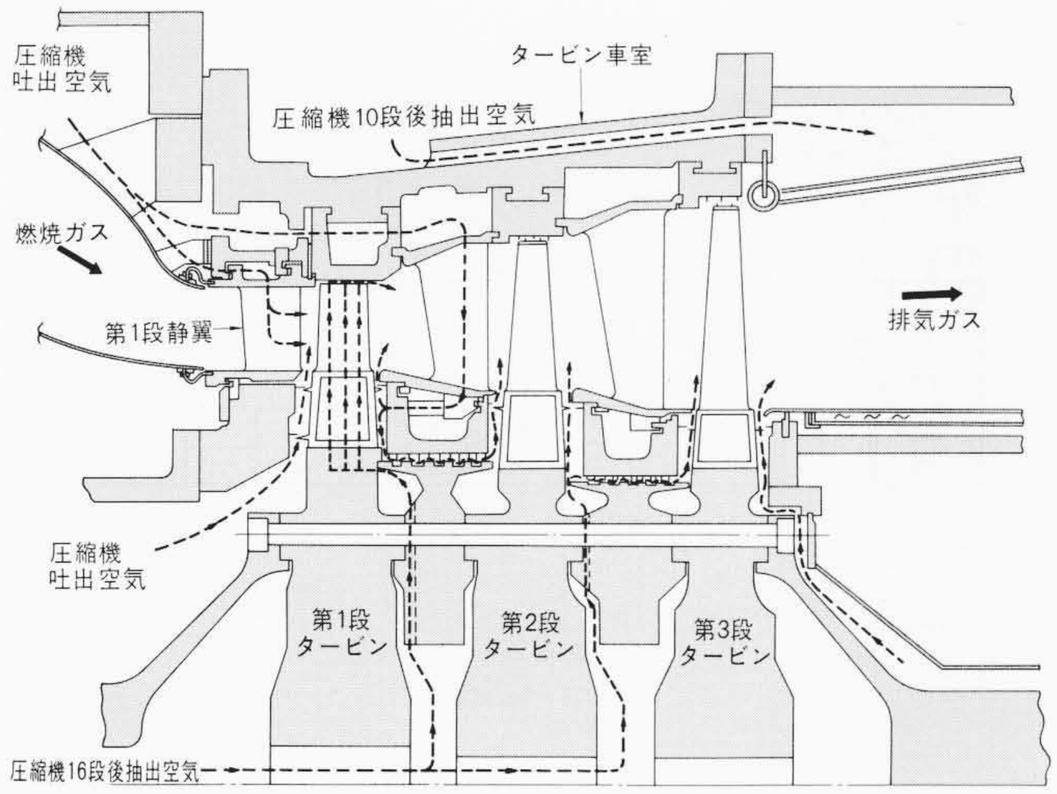

図3　ガスタービン内の冷却空気の流れ　ガスタービン高温部の冷却空気としては圧縮機吐出空気及び16段後抽出空気が用いられる。

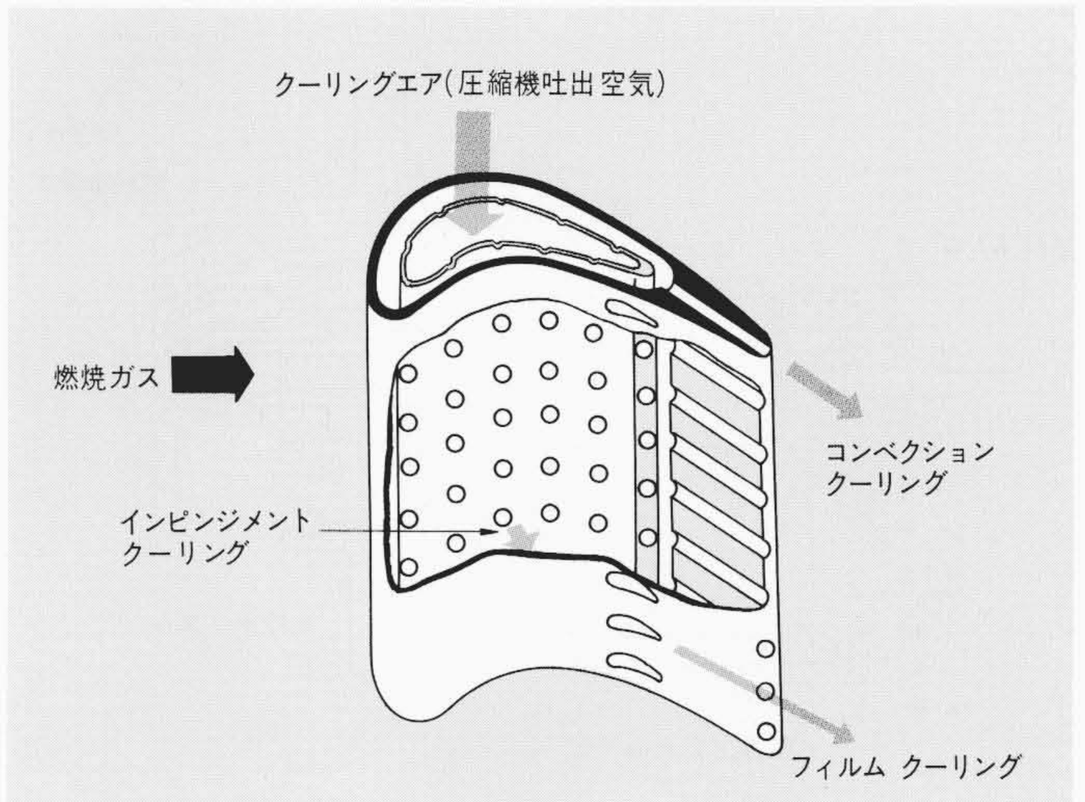

図5　第1段静翼空気冷却図　第1段静翼の冷却は，インピンジメントクーリング，コンベクションクーリング及びフィルムクーリングの三つが合成されて，効果を発揮する。

料を示す。特に高温部動静翼は，高温強度性，耐高温腐食性から見て，現在実用化されている超耐熱合金の中から最適の材料を選定している。

また，タービン第1段動翼の空冷は，動翼ダブテール部に圧縮機16段後の空気を導入し，シャンク部，翼内部を貫通する小穴群を介して翼内面を冷却することにより行なわれる。冷却後の空気は頂部に空けられた穴より排出され，1段後の高温ガス流と合流する。**図3**に冷却空気の流れを，**図4**に第1段動翼の冷却穴を示す。

次に，最も高温にさらされる第1段静翼空気冷却法について述べる。冷却空気は，圧縮機出口空気より内部シートメタルに導入され，シートメタルに空けられた小円孔を通ってノズル翼内部の壁に衝突し，ノズル翼を冷却し(インピンジメントクーリング)，その空気は翼トレーリングエッジに設けられた小穴を介して高温ガス流内に排出される際，熱伝達により熱を奪い(コンベクションクーリング)，また，その一部の空気は，翼プロフィルプレッシャ面の後半部分より放出することによって冷たい空気のフィルムを翼表面に形成し，高温ガス流から翼トレーリングエッジ付近を保護する(フィルムクーリング)。**図5**に第1段静翼の空気冷却図を示す。

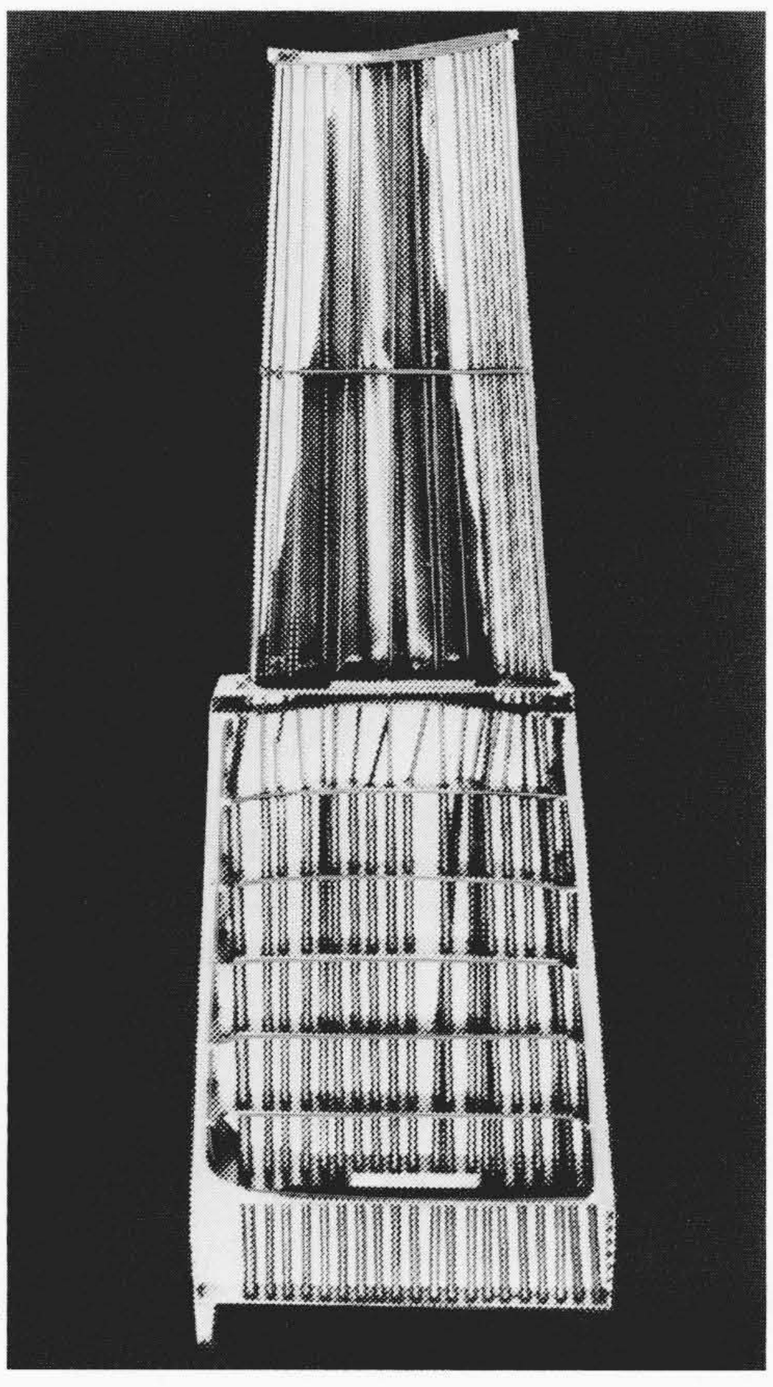

図4　第1段動翼の冷却穴　冷却空気は，動翼シャンク部より頂部まで内部を貫通する小穴群を介し，翼内面を冷却する。

3　環境対策

ガスタービンに限らず，あらゆる発電設備は高性能，高信頼性であることに加えて，環境対策が万全であることが要求される。本ガスタービンの設計，製作に当たっては，特にこのことが留意され，排出ガス中のNOx低減対策として，燃焼器中への水噴射方式が採用され，また，ガスタービンより発生する種々の騒音に対する防止策の検討がなされた。以下にその詳細について述べる。

3.1　低NOx対策

一般に燃焼温度の上昇とともに，燃焼器中で発生するNOxは増大し，本ガスタービンの場合，ピークロードで約200ppm. vol.(軽油焚きの場合)のNOxが排出ガス中に含まれることとなる。このNOxの低減策として，燃焼器中に水又は蒸気を噴射することにより，燃焼ガス温度の局部的な上昇を防止し，NOxの発生を低下させることが有効である。**図6**に水噴射を行なう場合の燃料ノズルの構造を示す。本方式で，圧縮機入口空気流量の2％の水噴射をすることにより，ピークロードで，NOxを50ppm以下とすることができる。

水噴射量は最大を2％とし，低負荷域における火炎の安定性も配慮し，全負荷範囲にわたって良好な燃焼とNOxの発生低下を意図して次式のように定める。

$$Q = a(bT_x + cP_{cd} - T_i)(d - eT_a) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで　Q：水噴射量
T_x：ガスタービン排気温度
P_{cd}：圧縮機出口圧力
T_i：水噴射を開始するガスタービン入口温度
T_a：大気温度
$a \sim e$：定数

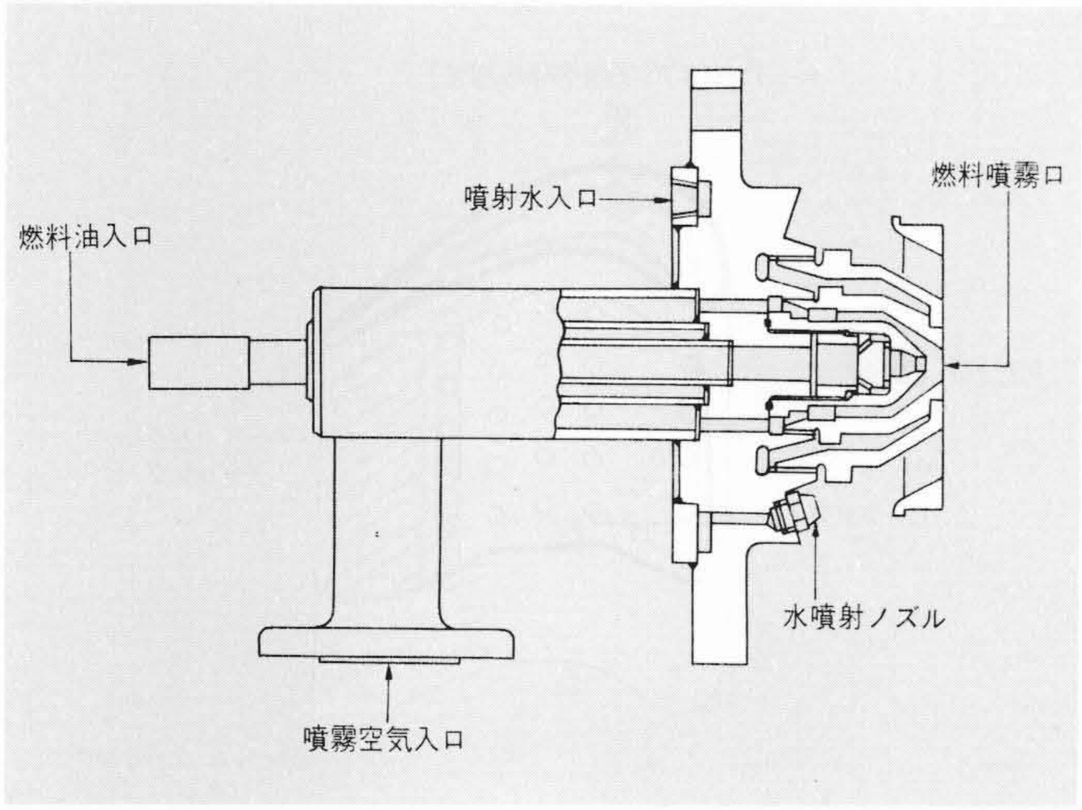

図6　水噴射付燃料ノズル　燃料噴霧口を囲んで，8個の水噴射ノズルが円周上に取り付けてある。

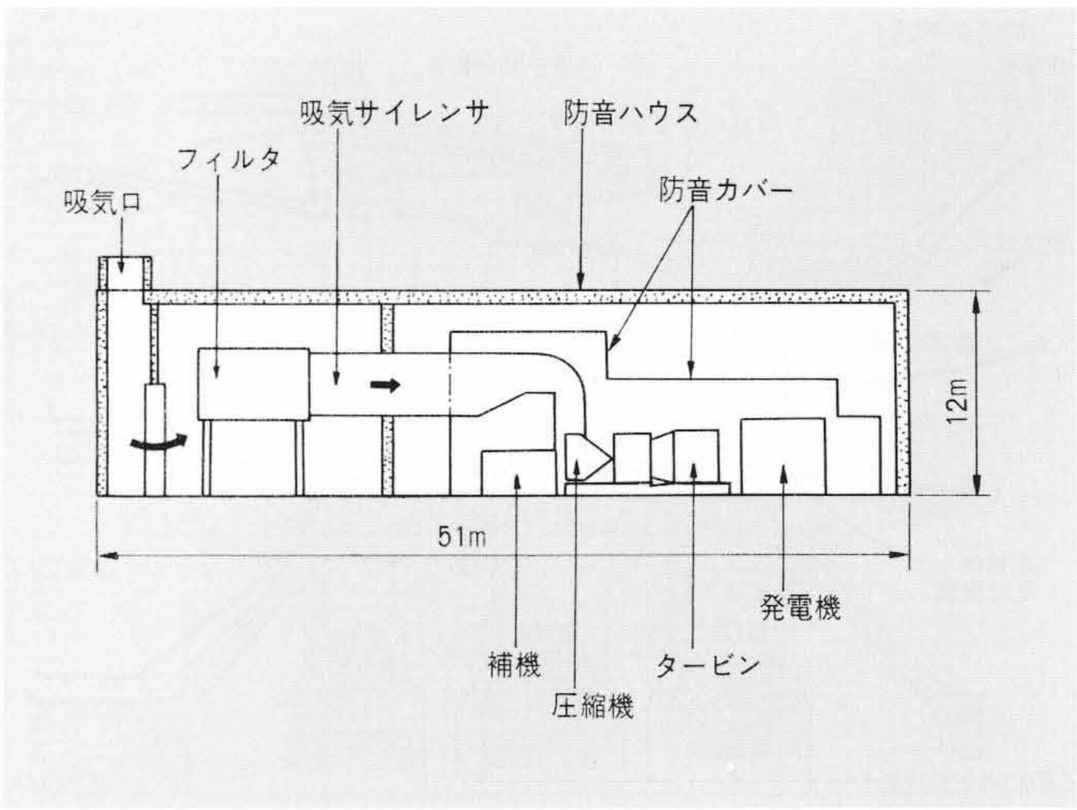

図7　ガスタービン防音建屋構造　ガスタービン本体音の防音対策として，防音カバー，防音ハウスの二重構造を採用している。

bT_x+cP_{cd}：タービン入口温度の演算式

であり，水噴射の制御は完全自動で行なわれる。

また，水噴射及び蒸気噴射によって出力増加も副次的に期待でき，圧縮機入口空気量の1％噴射により3.3％の出力増加となる。熱消費率は同じく1％噴射により後者では1.5％良くなるが，前者では3.2％悪くなる。

3.2　騒音対策

ガスタービンは，大量の空気を扱う空気機械であること及び高速の回転機械であることより，特に騒音に対する配慮が必要となる。MS7001ガスタービンを騒音源として評価した場合，工場試運転などで実測したパワーレベルの値は**表3**に示すとおりである。

実際の騒音対策の一例として，本ガスタービン2台を備えた坂発電所の防音建屋構造を**図7**に示す。本プラントでは，設備より100m離れた発電所境界線上の暗騒音レベル53dB(A)が，ガスタービンの運転によって実質的に上昇しなかった。また，機器周辺の騒音レベルは，防音ハウス外1mにて56～67dB(A)(暗騒音の影響あり)，防音ハウスと防音カバーとの間で74～83dB(A)，防音カバー内で105～110dB(A)である。

4　運転実績

MS7001ガスタービンは，米国GE社で1966年に設計が開始され，最初の2台が1971年に営業運転を開始した。以来，1972年には51台，1973年には30台，1974年には57台，1975年には35台と運転に入り[3]，1976年末には合計約200台が運転に入り，累計運転時間も50万時間を超えている。

日立製作所では，1972年に1号機を出荷以来，既に10台を受注し，そのうち6台は出荷済みである。国内では，現在2台が好調に営業運転中である。

表3　ガスタービンの騒音パワーレベル　工場試運転などにおける実測値よりパワーレベルを求めたものである。

騒音発生の区分とパワーレベル		
圧縮機吸気音	ガスタービン本体音	タービン排気音
148dB(A)	128dB(A)	139dB(A)

5　結　　言

以上，中国電力株式会社坂発電所向け大容量ガスタービンとして，MS7001ガスタービンの概要を紹介したが，50Hz用としては，MS9001があり，本MS7001ガスタービンの1.2倍のスケールアップの相似設計を行なうことにより，100,000kW級ガスタービン発電設備として既に実用段階にある。

ガスタービンは，その特色を生かし，ピークロード発電設備として，順調な発展を遂げたが，発展に伴い

(1)　大容量・高性能化

(2)　環境対策

が不可欠となり，本稿に述べた対策を施すことにより問題の解決を図ることができた。

今後，資源節約の要望及び人間生活環境優先の考え方からすると，このような傾向は当然の帰趨であり，既にMS7001については，アップレイティングとして，タービン入口温度1,140℃(ピーク)までのものの開発が完了している。

更には，従来火力発電設備と同様，低質油，特に重油の使用，あるいはコンバインドサイクルとして，ミドルないしはベースロードとして，より経済性の高い発電設備の実用化，あるいはガスタービンの究極の目標である理論空気燃料混合比での燃焼ガスを，そのままタービン入口ガスとする超高温水冷却ガスタービンの開発など，ガスタービン技術者に課せられた要請は尽きないが，最も重要なことは，ガスタービン自体がまだ成長期にある製品といえることで，したがって，今後の発展に対する期待も大きいわけであるが，それだけに現在の実用機種の信頼性を，なおいっそう高めることに努力を傾注し，今後ともその期待にこたえたいと考える。

終わりに，本発電設備を完成するに当たって多大な御支援，御協力をいただいた中国電力株式会社の関係各位に対し，深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

1)　岩尾，川田：日立-GE70000kWパッケージ形ガスタービン，内燃機関12，135（昭48-3）

2)　C.T.Sims and W.C.Hagel：The Superalloys (1972 John Wiley & Sons Inc.)

3)　久保田：大容量発電用ガスタービンの動向，日本ガスタービン会議会報3，11，35（昭50-12）