

石炭燃焼ボイラ用送風機

Fans for Coal Fired Boilers

フライアッシュを含んだ高温燃焼ガスを誘引する誘引通風機には、従来から構造が簡単な遠心ファンが採用されてきた。しかし、プラントの大容量化に伴い省エネルギー化、コンパクト化などの観点から、動翼可変式軸流誘引通風機へのニーズが高まっている。これにこたえて軸流誘引通風機を製品化するに当たり、種々の信頼性確認試験を実施したので、その内容について紹介する。

軸流誘引通風機の開発技術課題はフライアッシュを含む高温ガスにまつわるものであり、その解決のために要素テスト及び縮小モデル(プロトタイプ)による高温条件下での機能、耐久性の確認を行った。また実プラントでのフィールドテストによりフライアッシュにまつわる技術課題を検討し、実機適用に当たっての問題点を解決した。

すなわち、オイルパック式動翼軸受は実使用条件下で十分な耐久性を持っていることを確認し、またプロトタイプで高温条件下での可変翼制御性、冷却特性、軸系の安定性、耐久性などについて良好な結果が得られた。またフィールドテストにより、動翼の最適耐摩耗処理法の確立、内部機構の強制冷却・ダストシール法の確立を実現した。更に、ダスト付着による流体性能の低下量を把握し、動翼、静翼に水蒸気を間欠噴射するダスト除去法の実機適用を可能にした。

これにより、軸流誘引通風機の技術課題に対して所期の成果を達成することができ、製品化に対して十分な準備が整った。

佐藤 順* *Sunao Satō*
山後直義** *Naoyoshi Yamago*
横山英二** *Eiji Yokoyama*
茨木善朗*** *Yoshirō Ibaraki*

1 緒 言

石炭燃焼ボイラ用の送風機としては、その役割によって押込通風機、誘引通風機、一次空気通風機などがある。ボイラプラントの大容量化に伴い、これらの通風機も従来の遠心ファンから大容量及び部分負荷運転に適した動翼可変式軸流ファンに移行してきている。

空気を圧送する押込通風機では、動翼可変式軸流ファンが採用されてから久しく、既に1,000MWボイラプラント用として製品化されている。また部分負荷で更に高効率運転を目的とした二段動翼押込通風機も製品化されている。

一方、フライアッシュを含んだ高温燃焼ガスを誘引する誘引通風機には、従来から構造が簡単な遠心ファンが採用されてきた。しかし、プラントの大容量化に伴い省エネルギー化、設備配置のコンパクト化などの観点から、動翼可変式軸流誘引通風機へのニーズが高まっている。軸流誘引通風機はフライアッシュに対する耐摩耗寿命の向上の観点から、動翼の周速を低く抑える必要があり、必然的に二段機となる。二段機の構造は既に押込通風機で確立済みであり、今回この技術を

ベースとして、動翼可変式軸流誘引通風機を開発した。本稿では、その開発内容について述べる。

2 軸流誘引通風機の開発技術課題

押込通風機は常温の空気を吸い込むのに対して、誘引通風機は100～200mg/Nm³のフライアッシュを含んだ150℃程度の高温燃焼ガスを吸い込むので、これから派生する技術課題が生じる。その主なものは次のようなものである。

- (1) フライアッシュに対する動翼、静翼の耐摩耗性
- (2) 高温条件下での機能
- (3) 機構内部へのダスト侵入の防止
- (4) 機構の冷却
- (5) 付着ダストの除去

以上の技術課題解決のために、目的に合った手段により機能、信頼性の確認試験を実施した(表1参照)。

* 電源開発株式会社 ** 日立製作所土浦工場 *** 日立製作所機械研究所

表1 動翼可変軸流誘引通風機の機能, 信頼性確認試験 機能, 信頼性の確認のため, 目的に応じた手段によって確認試験を実施した。

テ ー マ		内 容
要素 モデル機	動翼軸受	高温中で負荷された状態で, 揺動する動翼軸受の耐久性の確認。
	アッシュエロージョンテスト	フライアッシュに対する耐摩耗翼の選定。
	フィールドテスト	ダストの付着, 翼の摩耗による流体性能低下量の把握。ダストシール効果の確認。ダスト除去法の確立。
	プロトタイプテスト	高温条件下での各部の機能, 耐久性の確認。

3 機能, 信頼性の確認試験

3.1 動翼軸受の耐久性試験

動翼可変式軸流ファンで, 動翼軸受は最重要部品のひとつであり, これに不具合を生じると最悪の場合には動翼の可変操作が不能になる。動翼軸受のタイプにはグリース給油方式, オイルレス方式などがあるが, それぞれ一長一短がある。日立製作所のものは, これらのタイプの持つ欠点を解消したオイルパック方式であり, 昭和57年以降, 実機に採用している。従来のものは常温で使用されていたが, 誘引通風機では高温雰囲気中使用されるため, この条件下での耐久性の確認が必要である。オイルパック方式動翼軸受の構造は軸受本体をケースの中に収納し, 潤滑油を充満してシールパッキンでシールする構造になっている(図1参照)。

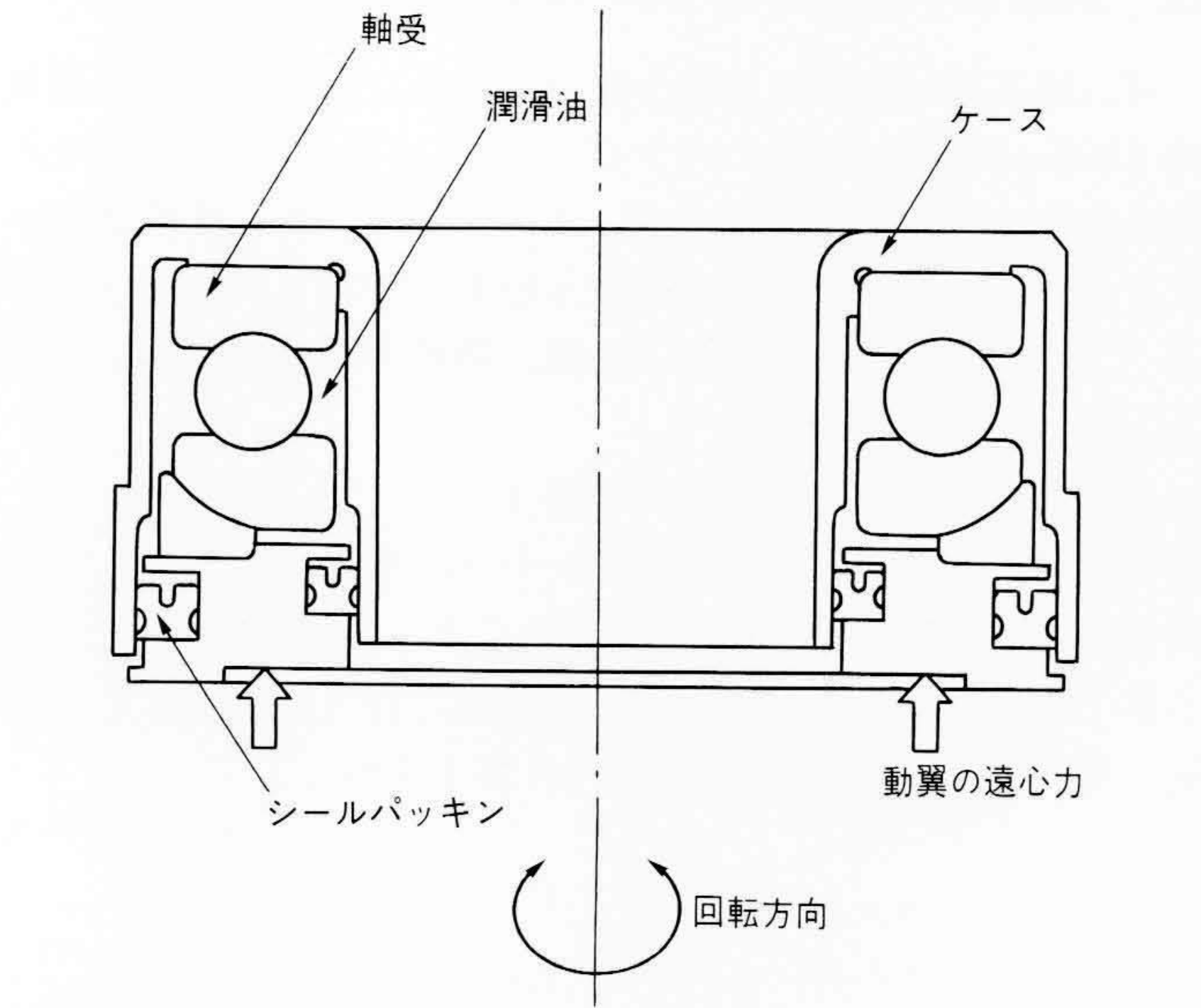


図1 オイルパック式動翼軸受 ケースの中に軸受, 潤滑油を封入したパック方式としている。

耐久試験では実機サイズの供試軸受に高温雰囲気中で負荷し, 5年相当分の微揺動運動を与えて耐久性を確認した。微揺動運動を与える目的は, 実機では一定負荷でも制御系との関連で, 動翼は1分間に3回程度(0.05Hz)の微揺動を繰り返しており, これを模擬したものである。耐久試験の試験条件を表2に示す。負荷した荷重は基本静定格荷重の1.1倍とした。潤滑油は粘度の異なる2種類の作動油(#150, #320)を選定し, 潤滑油温度はシールエアの冷却効果を考慮して120℃とした。揺動振幅は実機の条件に合わせ, 揺動振動数は実機の100倍の加速条件とした。試験結果の要約は次のとおりである。

- (1) 摩擦係数は玉軸受で0.004, ころ軸受で0.027程度であり, 経時的な増加は微少である。
- (2) 軸受の摩耗こん(痕)深さは軽微であり, 10~30μm程度である。
- (3) 潤滑油の劣化は極めて軽微である。また粘度による機能の有意差は認められない。
- (4) シールパッキン(フッ素ゴム)の損傷, 劣化は認められず, 油漏れも生じない。

実機に適用する場合の負荷荷重は基本静定格荷重の70~80%程度とするので, 耐久試験の条件は実機に比べて過酷な条件となっている。したがって, 実機使用では十分な耐久性を持っていることが確認された。

3.2 アッシュエロージョンテスト

動翼はフライアッシュを含むガスの中を高速で回転するために摩耗が問題になる。動翼の摩耗パターンとしては,

- (1) 前縁での衝撃摩耗
- (2) 腹面(凹面)でのひっかき摩耗

に大別できる。これに対応するためには,

- (1) 前縁部に硬質肉盛
- (2) 翼面に耐摩耗処理層

を形成することが有効である。

耐摩耗処理翼の比較検討を行うために, アッシュエロージョン試験装置の中にモデルファンを組み込んで摩耗試験を実施した。図2にフローシートを示す。この装置は実物のフラ

表2 動翼軸受の耐久試験条件 実機サイズの供試軸受に高温雰囲気中で負荷するとともに, 揺動運動を与えて耐久性を確認した。

テ ス ト No.		1	2	3
軸 受 種 類 (内径)	—	スラスト玉軸受 (160mm)		自動調心 ころ軸受 (150mm)
潤 滑 油	—	# 320	# 150	# 150
油 温 度	℃	120	120	120
荷 重	t	205	205	230
基本静定格荷重	t	186	186	210
振 動 数	Hz	5	5	5
振 幅	度	±0.1	±0.1	±0.1
繰 返 し 数	回	7.8×10 ⁶	7.8×10 ⁶	7.8×10 ⁶

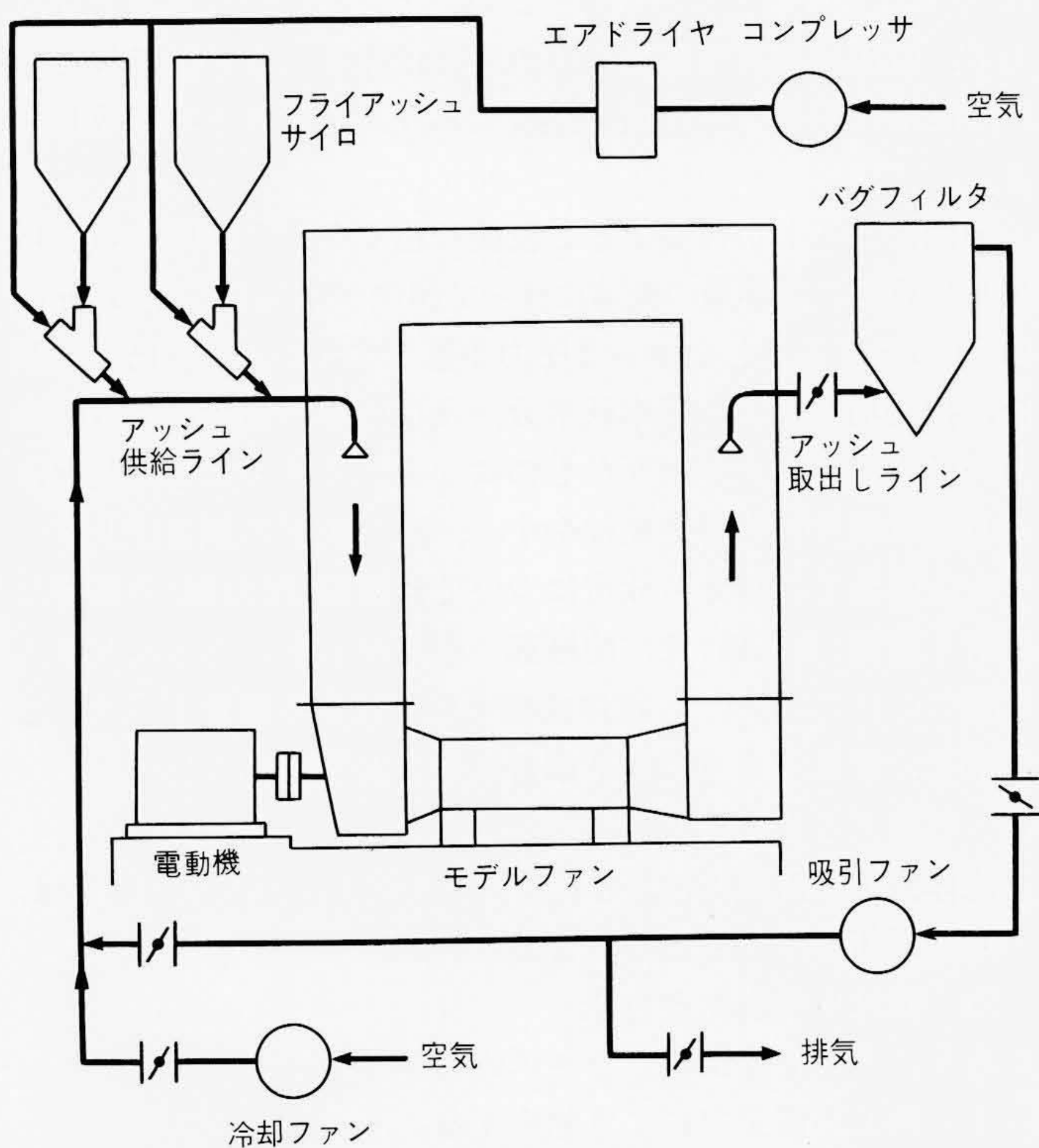


図2 アッシュエロージョン試験装置のフローシート 実物のフライアッシュを連続的に供給，回収できるクローズドループになっている。

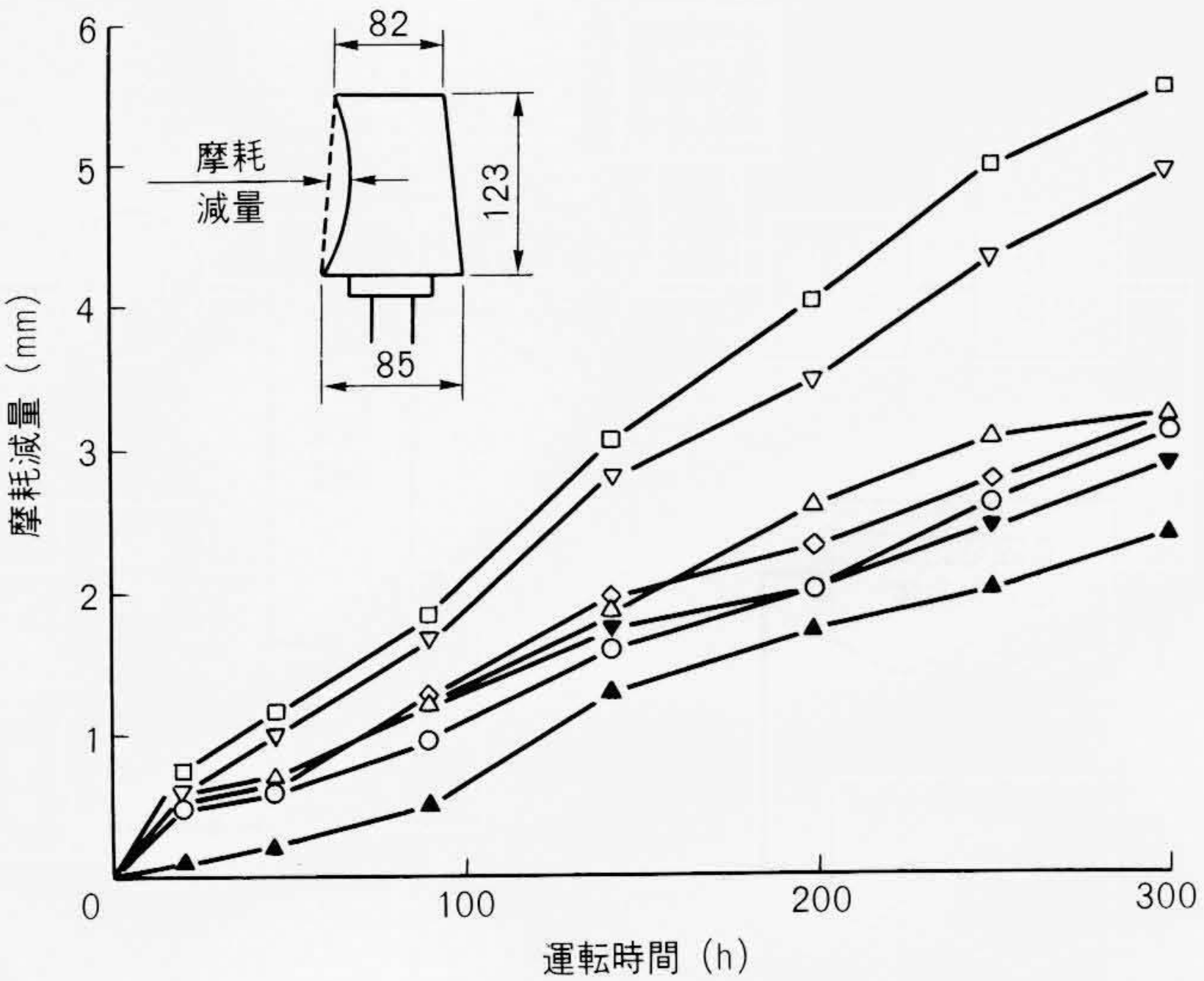
イアッシュを連続的に供給，回収できるクローズドループになっており，空気温度，アッシュ濃度を制御することができる。モデルファンの仕様を表3に示す。動翼の先端周速は実機に合わせ，摩耗条件を等価にしている。またアッシュ濃度は2 g/Nm³とし，実際のプラントの10～20倍に濃くして加速試験とし，総計300時間の運転試験を実施した。結果を図3に示すが，前縁の肉盛材にはステライトNo.6を使用し，コーティングとしては溶射，めっきなどを実施した中で，硬質クロムめっき，アルミナ溶射などが良い耐摩耗性を示した。良好な結果を示したものを選定し，更に実際のプラントでのフィールドテストを実施した。

3.3 フィールドテスト

軸流誘引通風機の製品化に当たっては，要素試験あるいは工場でのモデルテストの確認だけでは不十分である。特に，

表3 モデルファン仕様 動翼の周速を実機に合わせ，摩耗条件を実機と等価にしている。

項 目		仕 様
形 式	—	φ600mm 1段固定翼軸流式
風 量	m ³ /min	980
風 圧	mmAq	400
ガ ス 温 度	℃	140
回 転 数	rpm	5,000
周 速	m/s	160
電 動 機	kW	132



記号	母材材質	前縁肉盛材	翼面コーティング材
□	SCW49	—	—
▽	SCW49	—	WC-Ni-Cr
△	SCW49	ステライト6	WC-Co
▲	SCW49	ステライト6	硬質クロムめっき
▼	SCW49	ステライト6	Al ₂ O ₃
○	SCW49	ステライト6	TiN
◇	SCS5	ステライト6	窒化+Cr ₂ O ₃

図3 動翼の摩耗減量 動翼の前縁にステライト6を肉盛し，翼面に硬質クロムめっきを実施したものが良い耐摩耗性を示した。

フライアッシュによる摩耗，付着，機構内部への侵入などは，工場での試験では完全に把握することはできない。そこで電源開発株式会社の協力を得て，同社竹原火力発電所でフィールドテストを実施した(昭和58年8月～同62年1月)。当初は1号機の誘引通風機下流にモデルファンを設置し，後に3号機の誘引通風機上流に移設して3年半の長期間にわたるテストを実施した。図4にモデルファンの設置系統を，表4に試験条件(プラント運転条件)を示す。モデルファンの仕様は，3.2項のアッシュエロージョンテストのモデルと同一である。

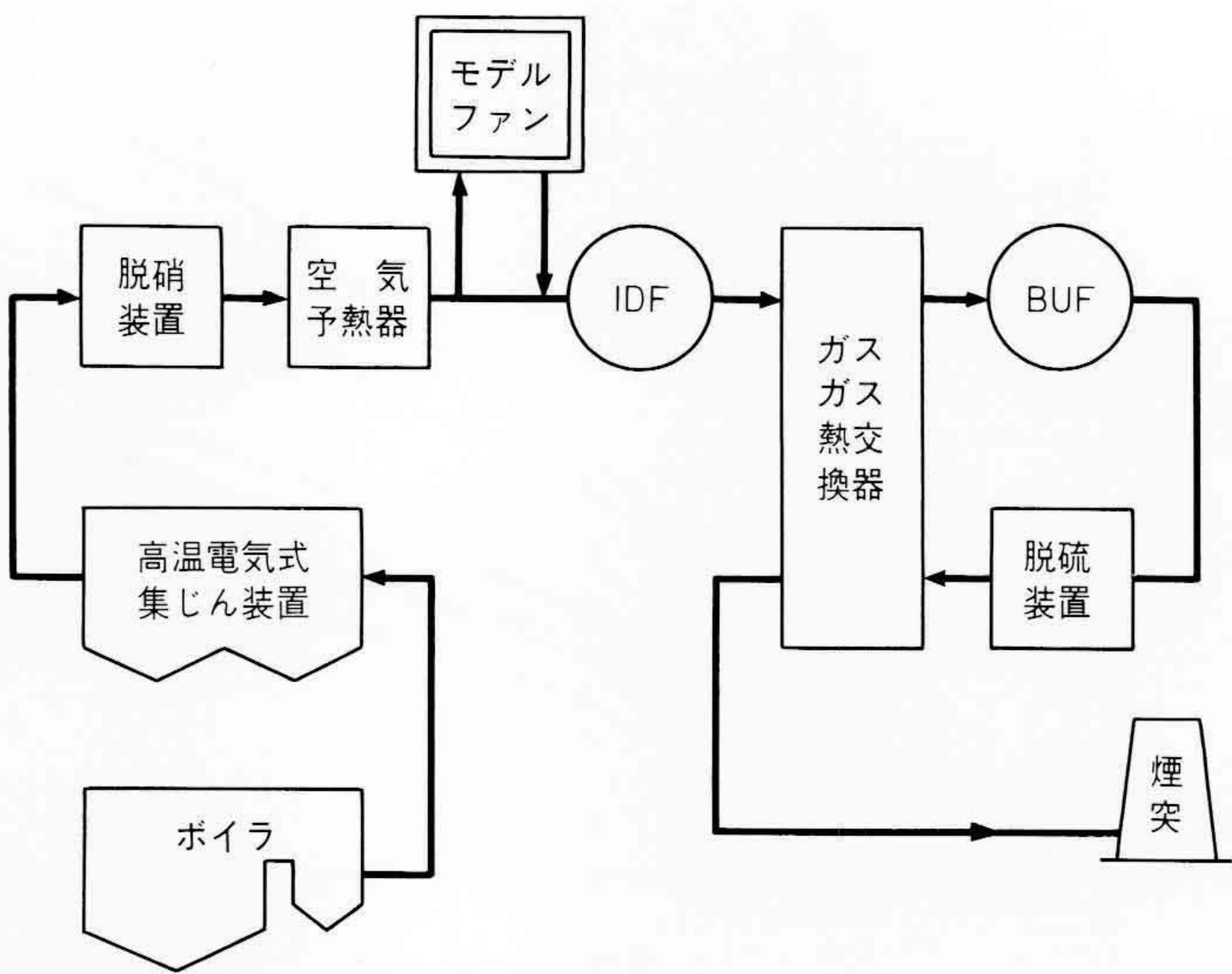
(1) 動翼，静翼の摩耗

3.2項で述べたアッシュエロージョンテストの結果により選定した供試動翼を，モデルファンに組み込んで耐摩耗性の比較検討を行った。結果を要約すると，

- (a) 摩耗の程度は前縁より腹面が顕著である。
- (b) Crめっき翼，Cr₂O₃溶射翼が良い耐摩耗性を示した。
- (c) WC，Al₂O₃，TiNなどの溶射翼は溶射層のはく離を生じた。

翼前縁の摩耗減量は，無処理翼を除いてほぼ同程度の耐摩耗性を示した。これは翼の前縁に肉盛したステライトが効果を発揮しているためである。一方，静翼については外筒側の前縁及び腹面の摩耗が顕著であるが，やはりCrめっき翼が良好な結果を示した。

(2) ダスト付着



注：略語説明
IDF (Induced Draft Fan：誘引通風機)
BUF (Boost Up Fan：昇圧通風機)

図4 モデルファン設置系統 3号機でのモデルファンの設置系統を示す。

表4 フィールドテスト試験条件 モデルファンを設置したボイラプラントの運転条件を示す。

項 目		電源開発株式会社竹原火力発電所	
		1号機	3号機
負 荷 パ タ ー ン	—	100%負荷をベースに1回/日50~60%負荷にロードダウン	100%負荷をベースに5~6回/月50%負荷にロードダウン
炭 種	—	国内炭の混焼	輸入炭の混, 専焼 (ブレアソール, 大同ほか)
ダ ス ト 濃 度	mg/Nm ³	121	81
リークNH ₃ 濃度	ppm	0.5	0.3
SO ₃ 濃 度	ppm	3	0.2
ガ ス 温 度	℃	147~158	142~170

脱硝装置からの未反応NH₃と燃焼排ガス中のSO₃からH₂Oが共存した状態で酸性硫酸NH₄HSO₄などが生成される¹⁾。主反応は次に示すとおりである。



この化合物は高温では気相、低温では固相であるが、150~210℃では粘着性のある液相であり、ダスト補集のバインダとなって付着する。ダストはガス流が物体に衝突して速度を失う点、物体の後端で渦流を生じる点に付着し、あるいはガス流と物体表面の摩擦接触によって付着する。ダスト付着を防止する目的でNH₃の添加量やガス温度などを変化させたり、翼面から空気を吹き出したり種々の方法を試みたが、付着を防止することはできなかった。動翼へのダスト付着は静翼に

比べて少なく、均等に付着するのでアンバランス重量とはならず、回転体の異常振動などの現象は発生しない。静翼については特に前縁への付着が顕著であり、時間とともに成長する。

翼面にダストが付着すると表面が粗くなり、摩擦係数の増加及び翼面の境界層の発達に伴って損失が増加し、仕事(転向角)が減少する。したがって圧力が低下するが、この低下の割合は損失増加による効率低下分、及び仕事の減少による軸動力の低下分を加え合わせたものになる。その大きい動翼ほど仕事の減少の影響を受けやすく、圧力低下の割合は大きくなる。翼面での粗さの分布については腹側(圧力面)の影響は少なく背側(負圧面)及び前縁部の影響が大きいことが実験的に調べられている^{2),3)}。流体性能の低下はある程度まで進むと飽和し、最高圧力点の低下割合は最大10%であった。

(3) 付着ダストの除去

流体機械の内部に付着したダストを除去する方法としては、

- (a) 固体粒子を投入する方法
- (b) 流体を噴射する方法

があり、ダスト除去のメカニズムとしては、

- (i) 粒子の衝突力により除去する。
- (ii) 噴流の流体力で吹き飛ばす。

ことが挙げられる。(a)の例としては、穀物や木の実の殻を投入するもので、(i)の粒子の衝突により除去するものである。(b)の方法では流体として空気、水、水蒸気などがある。空気の場合は密度、速度を大きくすることによって(ii)の流体力の効果を利用するものである。水の場合は密度が大きいことによる流体力の効果が考えられるが、実際には水滴粒子の衝突によるものであり、(i)に近いと言える。水蒸気の場合は両者が混在していると考えられる。今回の場合は除去効果、後流機器への影響などを総合的に考慮して水蒸気を採用した。

動翼については、動翼の上流直前のステーに末広ノズルを半径方向に複数個設置し、ガス流方向に噴射した。静翼については、静翼上流直前のケース壁面にノズルを設置し、ガス流と直角方向に水蒸気を噴射した。図5にノズルの配置を示す。動翼は回転しているために、動翼前のステーの1枚に半径方向に数個のノズルを設置すればよい。また動翼の取付角度は閉じたほうが除去範囲が広がるので、負荷を下げたときに噴射すると効果的である。静翼は固定しているので、1枚ごとの静翼にノズルを設置する必要があるが、前縁に衝突する流れの上流位置にノズルを設置すると効果的に除去できる。静翼の場合はガス流に直角方向に水蒸気を噴射するため、両者の速度の相関関係により水蒸気の到達範囲、すなわち除去範囲が決まる⁴⁾。

本実験により除去範囲を決める各種パラメータの相関関係を把握した。

ダストは運転時間の経過とともに固着傾向が強くなるため、噴射間隔は短いほうがよく1日に1回程度がよい。水蒸気の圧力は5 kgf/cm²以上で効果が見られた。蒸気圧力5 kgf/cm²、噴射間隔1回/日、1回につき1分間の噴射を実施した結果、ダストによるファンの性能低下を最小限にとどめる除去効果が見いだせ、実機への採用が可能となった。

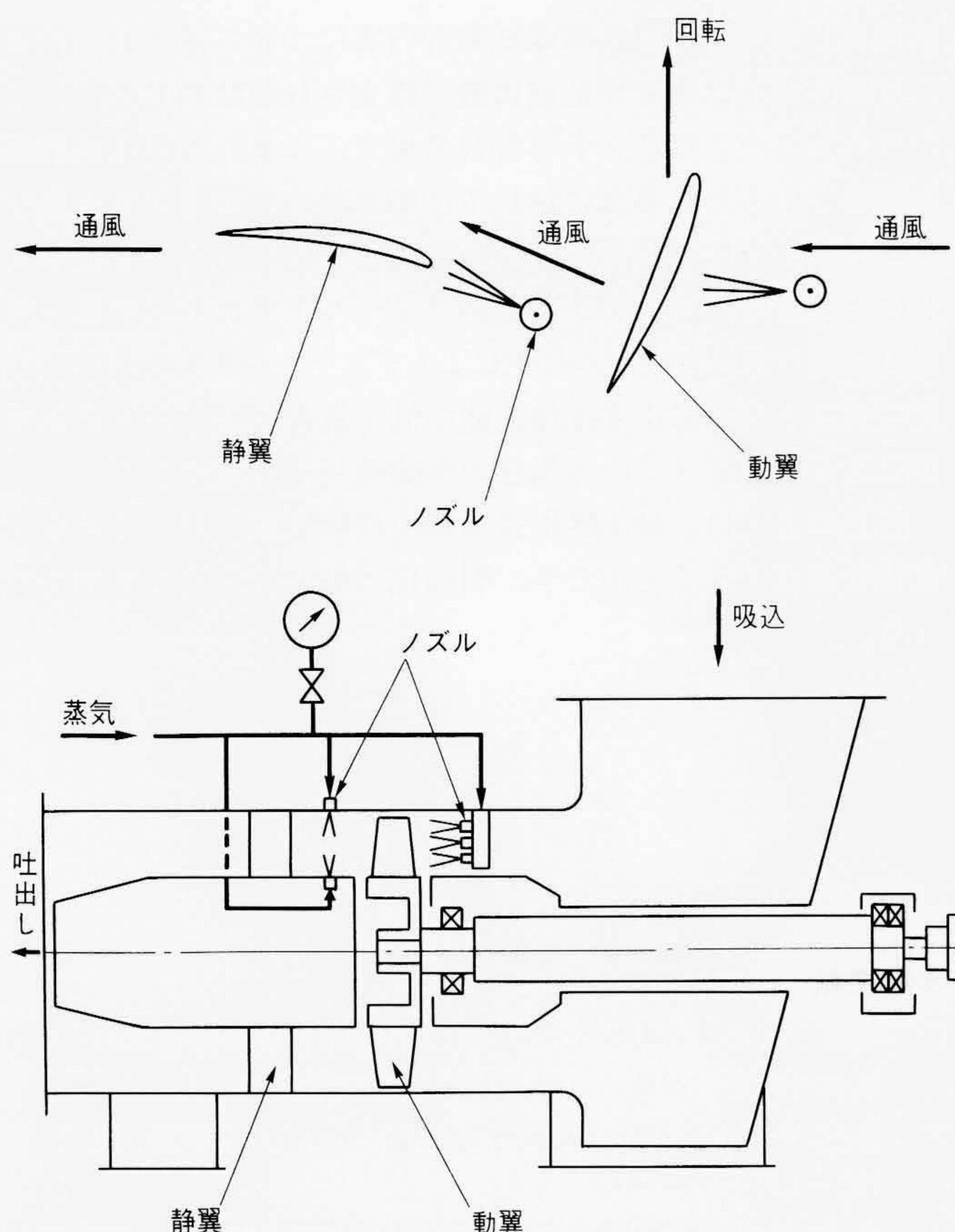


図5 ダスト除去用蒸気噴射ノズルの配置 動翼については上流のステーに、静翼については上流のケース壁面にノズルを配置した。

(4) ダストシール

燃焼ガス中のダストがファンの内筒内部に侵入すると、回転体にたい(堆)積して異常振動を発生させたり、内部機構に詰まってスティックなどの不具合を生じる。これを防止するために、別設置のファンから内筒内部に圧力空気を導入し、流体通路へ吹き出させる構造を採用している。このシールエアは、同時に内部機構の冷却効果も持っている。空気の吹出速度 5 m/s でケース内部へのダスト侵入を防止できた。

3.4 プロトタイプテスト

要素テスト、フィールドテストの結果を踏まえ、その集大成として実機と同一構造、同一材質の縮小モデルにより、実温度条件下で機能及び耐久性の確認を実施した。表5にモデルファンの仕様、構造を示す。口径1,700mmは1,000MW級ボイラプラント用誘引通風機の約 $\frac{1}{2.5}$ の大きさであり、動翼周速を実機と合わせ流体性能、応力で実機と等価なモデルとなっている。

(1) 高温機能試験

閉ループダクトの中にモデルファンを組み込んで断熱圧縮熱によりガス温を上昇させ、140℃に保持して各種性能、機能を確認した。動翼にはストレインゲージをはって実働応力、固有振動数を測定し、機構内部の各部にはサーモラベルをはって温度を実測した。その結果、すべての項目について計画値を満足することを確認した。試験結果の要約は次のとおりである。

表5 プロトタイプの仕様、構造 実機と同一構造、同一材質のプロトタイプにより、実温度条件下で機能、耐久性の確認を実施した。

項 目	仕 様
形 式	φ1,700 2段動翼可変式
風 量	8,000m ³ /min
風 圧	830mmAq
ガ ス 温 度	140℃
回 転 数	1,800rpm
周 速	160m/s
電 動 機	2,000kW
主 軸 受	強制給油式滑り軸受
動 翼 軸 受	オイルパック式スラストころ軸受
主 軸	中空二重軸
カ ッ プ リ ン グ	ギヤカップリング
翼 形	NACA65系統
制御油導入方式	回転継手
制御油分配方式	配圧弁
操作力発生方式	油圧ピストン

- 流体性能は予想値と良く合っている。
- 動翼の実働応力、固有振動数は計画値と良く合っている。
- オイルパック式動翼軸受の摩擦係数は、操作油圧の測定結果から計画値どおりである。
- 中空二重軸構造の主軸系は、振動値が低く位相も安定している。
- 開度信号(ドライブ開度)に対するピストン変位(動翼開度)の応答は良好で、フルストローク15秒のドライブの動きに対して、遅れなく追従する(図6参照)。
- 各部の温度は許容値以下であり、シールエアが冷却効果を発揮している。
- 騒音については原音、周囲音共に計画値と合っている。

(2) 連続耐久試験

機能試験終了後、動翼の代わりに遠心力、ピッチ低下モーメントが等価なダミー翼に付け替えて連続耐久試験を実施した。この場合には動翼による断熱圧縮熱が利用できないので、別装置の熱風発生装置によりガス温度を140℃に保持した。この状態で動翼に微揺動を行わせ1,000時間(微揺動回数で実機の2年相当分)の耐久試験を実施した。結果をまとめると以下のとおりである。

- 内筒内の雰囲気温度は、計画値80℃以下となっている。
- 軸受振動値は、運転開始当初より大差はなく安定している。
- 各しゅう(摺)動部に異常摩耗はなく、摩耗量は許容値以下である。
- 非破壊検査の結果、各部に異常はない。

4 結 言

動翼可変式軸流誘引通風機の製品化に当たり、その開発技

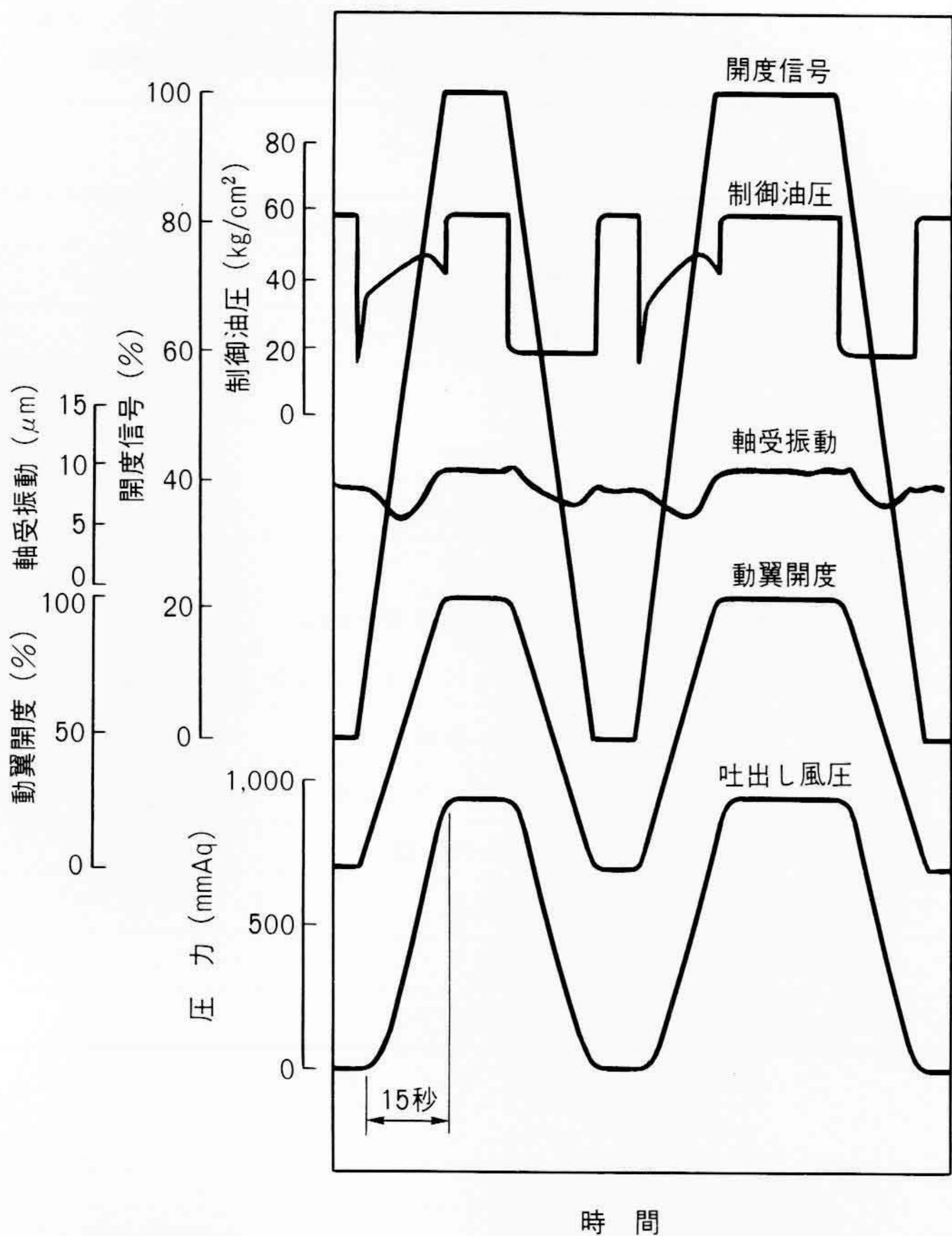


図6 動翼可変制御特性 開度信号(ドライブ開度)に対して動翼開度は、フルストローク15秒で遅れなく応答している。

術課題と機能，信頼性確認試験の内容について述べた。動翼二段機の構造は既に押込通風機で確立された技術であり，この技術をベースにダストを含む高温ガスにまつわる技術課題を解明してきた。高温に対しては動翼軸受の要素テスト及びプロトタイプにより機能，耐久性の確認を行った。またダストに対しては，実プラントでのフィールドテストで動翼，静翼の摩耗対策法，シールエアによるダストシール法を確立し，更にダスト付着による流体性能の低下量を把握し，水蒸気噴射による付着ダストの除去法の実機適用を可能にした。

以上のように，軸流誘引通風機の技術課題に対して所期の成果を達成することができ，製品化に対して十分な準備が整った。

参考文献

- 1) 毛利：石炭火力の空気予熱器における酸性硫安障害試験，火力原子力発電，28巻，9号，835～840(昭52-9)
- 2) 横山，外：ボイラ通風用高性能軸流ファン，日立評論，64，10，731～734(昭57-10)
- 3) 金子，外：軸流送風機性能に及ぼす翼面粗さの影響，機械学会第927回講演会前刷(流体力学・流体機械)(昭59-8)
- 4) 野村：噴流，森北出版(昭58-8)



差動増幅回路を一体化したISFET

日立製作所 塚田啓二・丸泉琢也・他1名
電子通信学会論文誌 J70—C，4，550～555 (昭62-4)

最近の臨床検査用生化学自動分析装置には，イオン選択性電極などの生化学センサが組み込まれるようになってきており，迅速，簡便な測定ができるようになった。また，圧力センサや温度センサなどの物理センサと同様に，イオン選択性電極でも半導体化が試みられている。半導体を用いたイオンセンサであるISFET(イオン感应性電界効果形トランジスタ)は，従来のイオン選択性電極に比べ，(1)出力インピーダンスが低いため，小形化できること，(2)多種イオンセンサを集積化できること，(3)信号処理回路やマイクロプロセッサの組込みができることなどの特徴を持っている。このため，国内外で盛んに研究が進められているが，その実用化にはいくつかの問題が残されている。なかでも，半導体の特性に由来してISFETが温度変化の影響を受けることは重要な問題となっていた。ISFETの温度係数を小さくする方法として，従来，ソース～ドレイン間に流れる電流値を調整する方法が知られていた。しかし，センサチップ間

にしきい値電圧などのばらつきがあり，個々のセンサで電流値を調整しなければならないことから，多数センサを集積化する場合にはこの方法は簡単には実現できないものと思われる。

本論文では，ISFETの温度特性を理論的に考察するとともに，著者らが新たに開発した内部補償形のISFETの温度特性について報告した。ISFETの温度特性を補償するため，ISFETと等しい電気特性を持ったMOSFETを集積化し，両者の差動をとる構成のセンサを試作した。ここでMOSFETとISFETの温度を等しくするため，MOSFETも溶液に接触できる構造が必要とされた。また同時に，両FETの製造プロセスの整合化を図る必要があった。そのため，MOSFETの構造として配線，及びゲート電極にはpoly-Siを用い，素子全面をSi₃N₄/SiO₂で覆った。この構造によって，MOSFETの耐水性を高めることができ，同時に両FETの集積化が容易となった。

試作した差動増幅形ISFETのpH応答感

度はpH1～10の範囲で49mV/pHであった。ゲート構造が同一のISFET単独の温度係数は+1.7mV/℃(20～60℃)であるが，同一条件での差動増幅形ISFETの温度係数は-0.8mV/℃であった。この温度係数は，イオン選択性電極を用いた測定でもみられる係数であり，参照電極電位の温度係数に近いものであった。この結果から，本センサの構成によってISFETの半導体特性に基づく温度特性を補償できることが明らかになった。

本論文では，ISFETと等しい電気特性を持ったMOSFETを集積化し，その差動をとることによって温度特性を改善できることを示した。

なお，本研究は通商産業省工業技術院産業活性化補助金を受けて進めたものであり，関係各位に対し深く感謝する。