U.D.C. 621.311.23:621.438-634.2

原油燃焼ガスタービンの運転実績

Operating Experience with Crude Burning Gas Turbines

西嶋庸正* *Tsunemasa Nishijima*

1977年の運開以来，総出力237.4MWのガスタービン発電設備がサウジアラビアで，好調に運転を続けている。

本発電所は，15.2MWのFS5形ガスタービン2台，41.4MWのFS7形ガスタービン5台を主とし，発電制御機器，トランス，スイッチギヤ，燃料貯蔵設備などを含む近代的発電設備である。

また，夏季周囲温度50°C，地勢は砂漠地帯という極めて過酷な設置条件に加えて，原油生燃焼での連続運転を要求されたため，特に燃料系統を中心に種々の新開発を適用実施し，これに対処した。

運転初期には，主として燃料に起因する幾つかの問題が発生したが，いずれも解決し1981年4月現在での総運転時間は，約12万7,000時間に達している。

この間，ガスタービン燃焼器，動静翼のタービン主要部分の定期点検が計33回にわたって実施されたが，一部部品の現地補修を実施したものの，いずれも現在満足すべき状態にある。

1 緒　言

1976年急速に増大する電力需要に応ずるため，サウジアラビア国内に総出力237.4MWのガスタービン発電設備を，1978年1月までにフルターンキーベースで完成させる契約がまとまった。

契約上の主な要求点は，下記のとおりである。

(1) 原油を主燃料として使用すること。

(2) 周囲温度50°C，砂漠地帯での長期連続運転に耐え得る設計とすること。

(3) 急激に増大する電力需要に応ずるため，1号機の運開は1977年2月とすること。

本プロジェクトで，日立製作所は，ガスタービン発電機をはじめとする主要電気品分野を担当し，予定どおり1977年2月に1号機の運開を，1978年1月に最終機の運開を成功させた。

2 発電所概要

図1に本発電所の概要を示す。

本発電所は，大別して7台のガスタービン発電機セット，燃料油貯蔵設備及び移送設備，13.8kV，33kVスイッチギヤ並びに発電所制御設備から構成されている。

過酷な周囲条件を考慮すると，ガスタービン発電設備はすべて屋内設置が望ましいが，1号機運開が契約後約1年と非常に短納期であること，及びFS5形ガスタービンは大形の

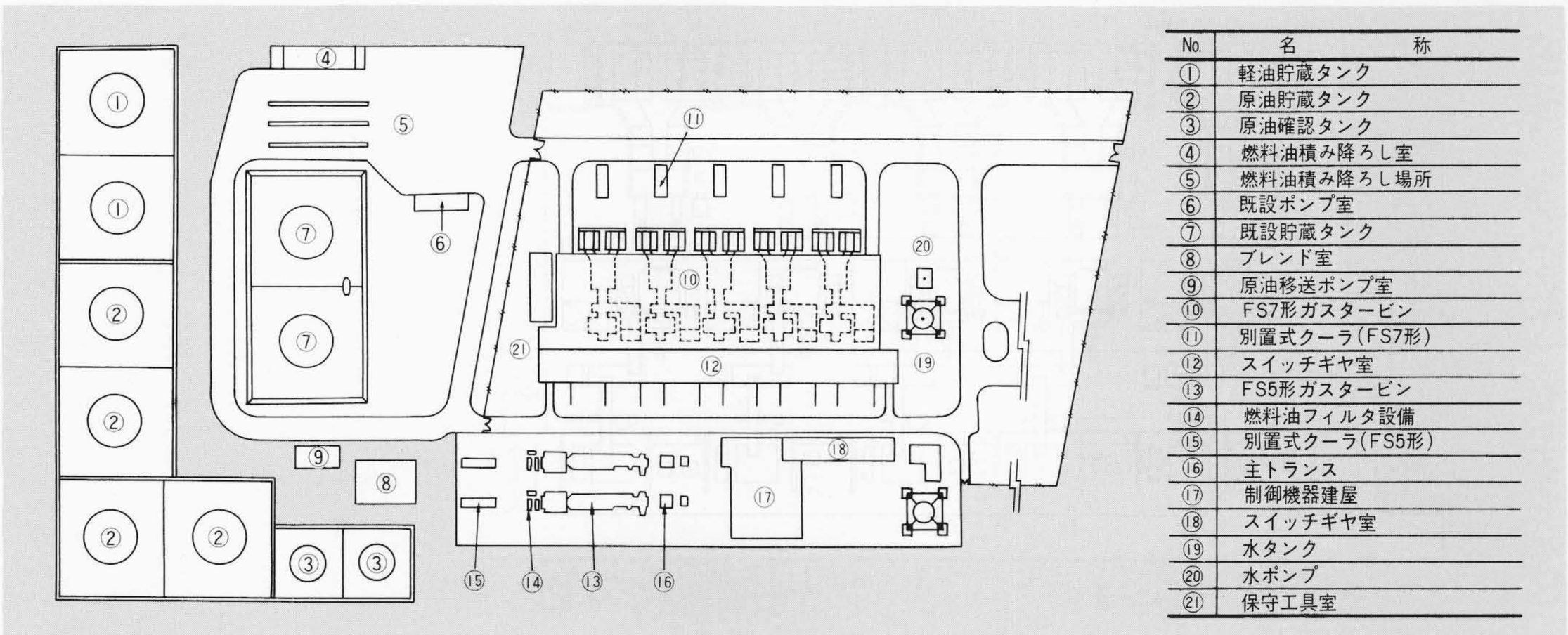


図1　原油燃焼ガスタービン発電設備　出力237.4MW発電設備は，FS5形×2台，FS7形×5台のガスタービン発電機を主とし，補助電気機器類，燃料油貯蔵設備及び移送設備から構成される。

* 日立製作所日立工場

F7形ガスタービン完成後は，ピークロード用として使われるため，連続運転に対する信頼性がFS7ほど要求されない点を考慮して，FS5形2台は短納期納入が可能な屋外式パッケージ形となった。

図2に，屋内設置のFS7形ガスタービンの配置を示す。

屋内設置により，過酷な周囲条件に煩わされることの少ない快適な保守作業，恒久設備としてのクレーン，ホイストの有効活用など，屋外形に比べてはるかに優れた利点をもつこととなった。

3 ガスタービン

3.1 ガスタービン本体

本プロジェクトで使用されているFS5形ガスタービンは，既に2,000台以上の運転実績をもつ同形機をベースに，原油燃焼用に一部設計変更を行なったもので，FS7形は基本的にはFS5形をスケールアップし，以降の技術的進歩を取り入れて，より高性能化したガスタービンである。

表1は，本プロジェクトで使用されたFS5形及びFS7形ガスタービンの基本仕様を，**図3**は，FS7形ガスタービンの全体図を示すものである。

FS7形ガスタービンは，約18m×3mのコンパクトなベース上に組み立てられ，出荷前に工場試験でその性能が確認される。

ガスタービンは単サイクル1軸方式で，圧縮機は17段，圧力比約9.5，タービンは衝動式3段，第1段動翼入口温度は1,004°Cである。このような高温ガスに耐え得るように，タービン第1段動静翼は当然のことながら空冷翼を採用しているが，燃焼器についても，原油燃焼による高輻射熱をも考慮して，従来のルーバ形に代えて新開発のスロット冷却形燃焼器を採用した。**図4**に，燃焼器システムとスロット冷却形燃焼器の構造を示す。本燃焼器の採用により，燃焼器の最高表面温度は100°C以上低下し，かつ表面温度分布もより均一化したため，燃焼器寿命を大幅に向上させる主原因となっている。

表1 FS5形及びFS7形ガスタービン仕様 本プロジェクト用FS5形，FS7形ガスタービンは共に豊富な実績をもつ同形機をベースに，原油燃焼用として設計変更されたものである。

項目		仕様	
		FS5形	FS7形
形式		単純1軸	単純1軸
燃料		軽油，原油又はブレンド油	原油，軽油又はブレンド油
運転モード		ベース	ベース
定格出力		15,150kW*	41,430kW*
ヒートレート(LHV)		3,599kcal/kWh*	3,034kcal/kWh*
タービン入口温度		899°C	1,004°C
排気温度		497°C*	537°C*
空気流量		95kg/s*	196kg/s*
回転数		5,100rpm	3,600rpm
圧縮機	形式	軸流	軸流
	段数	17	17
タービン	形式	軸流	軸流
	段数	2	3
燃焼器	形式	多缶式	多缶式
	段数	10	10
制御方式		電子制御	電子制御
起動装置		ディーゼルエンジン	同期電動機
燃料噴霧方式		低圧空気噴霧	低圧・高圧空気噴霧

注：＊大気温度50°C，大気圧力713mmHg

更に，後述する高温腐食対策として，設計的に最も厳しい第1段動翼に対して，白金-クロム-アルミ混合物の拡散コーティングを実施し，翼表面には，バナジウム化合物による腐食成分への保護膜を形成させているのも設計上の大きな特色である。本コーティングの採用により，動翼寿命が約50%増加すると予想されている。

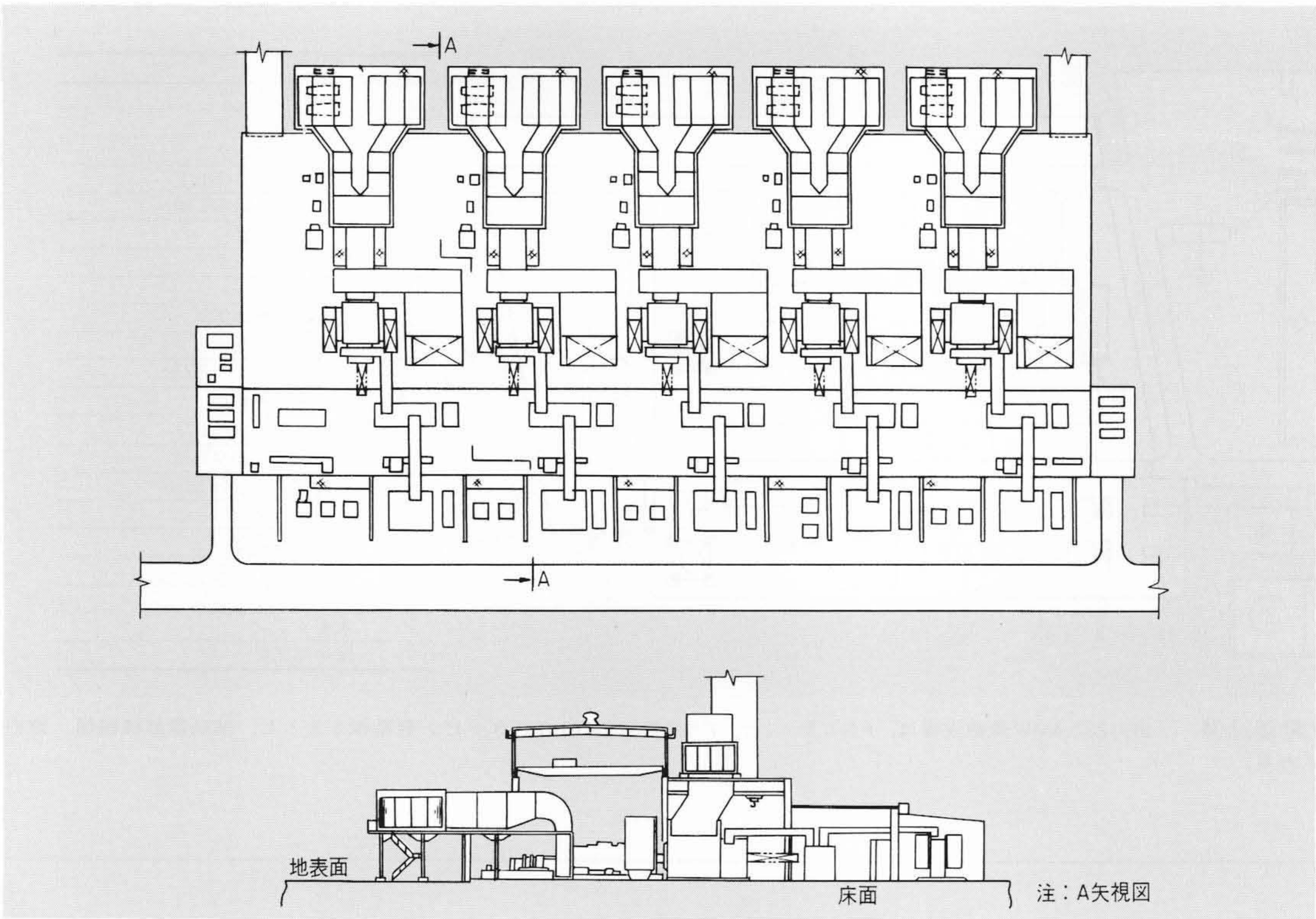


図2 FS7形ガスタービン発電設備配置 屋内形ガスタービン発電設備は，過酷な周囲条件に影響されることなく保守作業が行なえるという点で，特に中近東地域に適している。

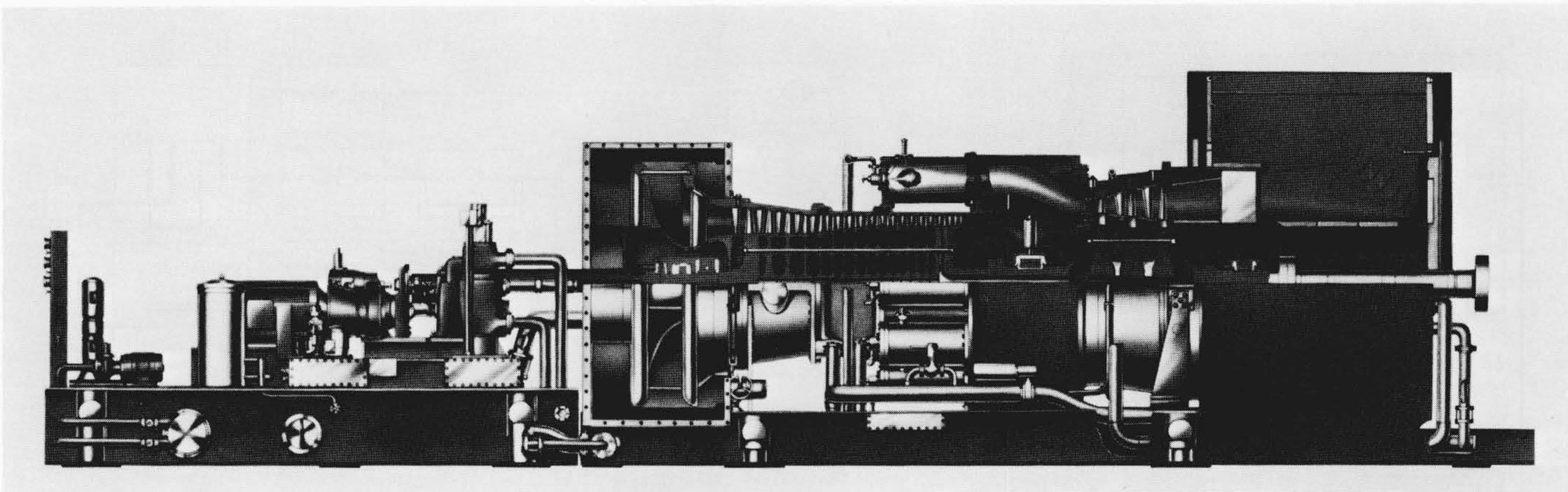


図3　FS7形ガスタービン全体図　18m×3mのタービンベース上に，ガスタービン本体，補機類がコンパクトにまとめられている。

3.2　原油性状と燃料系統設計

本プロジェクトで設計上最も厳しい点は，もちろんのことながら燃料系統である。特に，未処理の原油（アラビアンライト）をガスタービン用燃料として成功裏に使用した例はほとんどないため，入手した原油データを基に検討を行ない，設計を進めた。

表2に，原油性状，問題点及び対策を示す。

原油燃焼で最も危険な問題点は，原油中のNa（ナトリウム），K（カリウム），V（バナジウム）の燃焼生成物によって引き起こされるタービン翼の高温腐食である。

Na，Kについては，Na＋K＞1 ppmの場合に腐食速度が急激に増大するので，この場合には軽油をブレンドすることによってNa＋Kを1 ppm以下にすることとし，Vについては，原油中にMg（マグネシウム）をMg/V≧3/1の割合で添加することにより，腐食性成分の無害化を図ることにした。これらのシステムについては，次節で説明する。

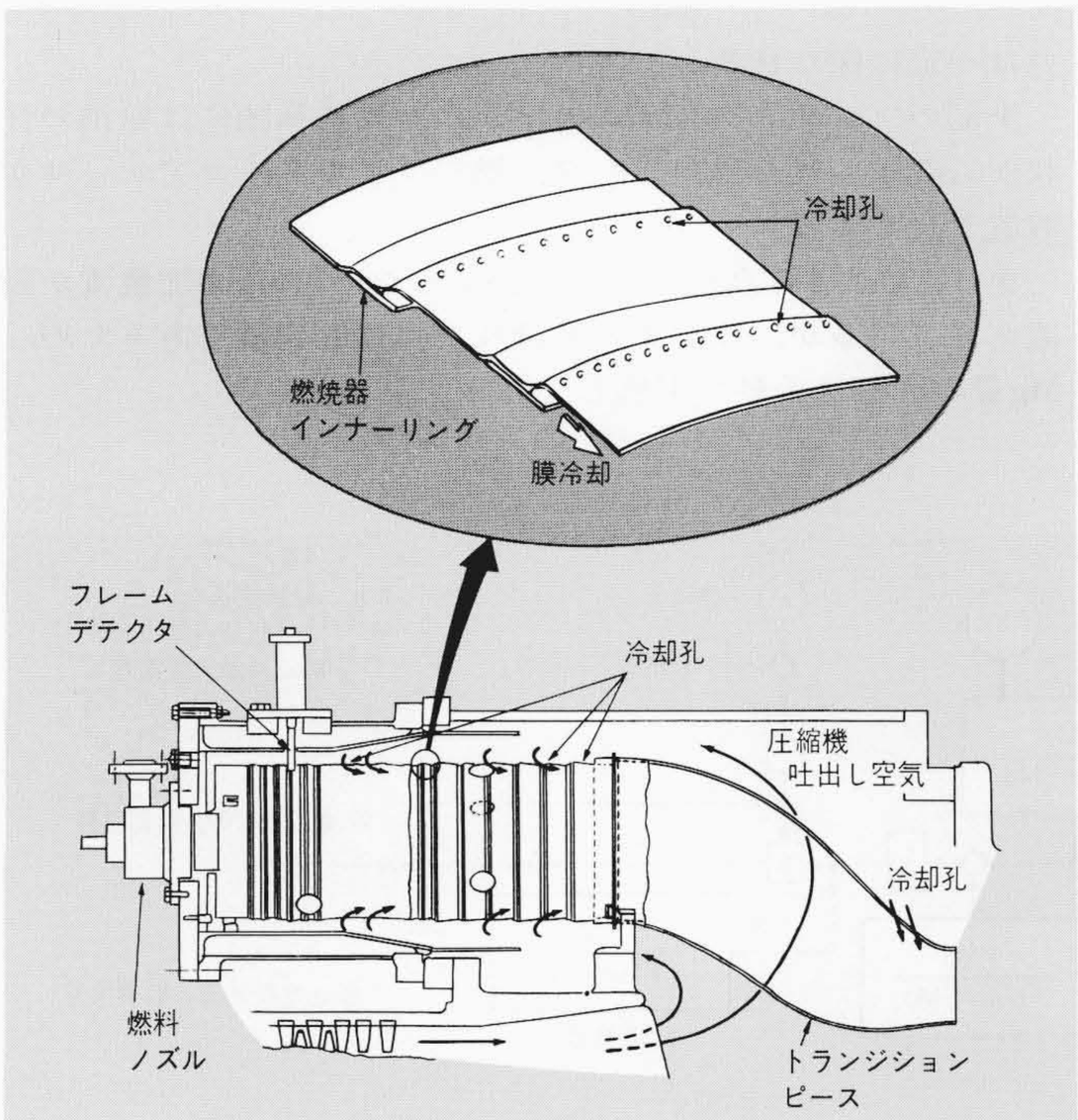


図4　FS7形ガスタービン燃焼器系統　原油燃焼に伴う高輻射熱に耐えるために，新開発のスロット冷却形燃焼器が導入されている。

表2　原油の性状と対策　原油生燃焼を成功させるため，燃料系統を中心として，種々の設備が開発された。

項　目	実測又は仕様値	問　題　点	対　策
発熱量（HHV）	平均　10,670 kcal/kg	―	―
比　重	平均　0.86	―	―
粘　度（@37.8°C）	最高　7 cst	油温低時に粘度高となり，燃料噴霧特性劣下。	燃料ヒータの採用
流動点	最高　－15°C	―	―
残　炭（コンラドソン）	最高　3.9 wt%	残炭量高 燃焼不良により煙発生	圧縮機吐出し空気抽気による高圧／低圧空気噴霧方式の採用
Na及びK	平均　0.5～3 ppm	規定値1 ppmよりも高い場合は，高温腐食。	Na＋K≦1ppmとするように，軽油とのブレンド実施。
V	平均　7～9 ppm	規定値（0.5ppm）より高い。高温腐食の原因となる。	油溶性Mg化合物をMg：V＝3：1の割合で添加。
ろう分	最高　3wt%	ろう分析出の場合は，フィルタ，燃料ノズルなど目づまり。	ロウ分溶解のため，燃料油加熱ヒータを要する。
硫黄分	平均　1.9 wt%	Na，K，Vと結合して高温腐食の原因となる。	Na，K，V対策で間接的に対策。
水　分	通常測定できず	含有している場合，燃料ポンプ，燃料分配器などの腐食の原因となる。	コアレッサ（水分離装置）の設置
泥　分	含有量変動大	多量に含まれている場合，ポンプ燃料分配器など，可動部品の損傷の原因となる。	燃料油フィルタの設置

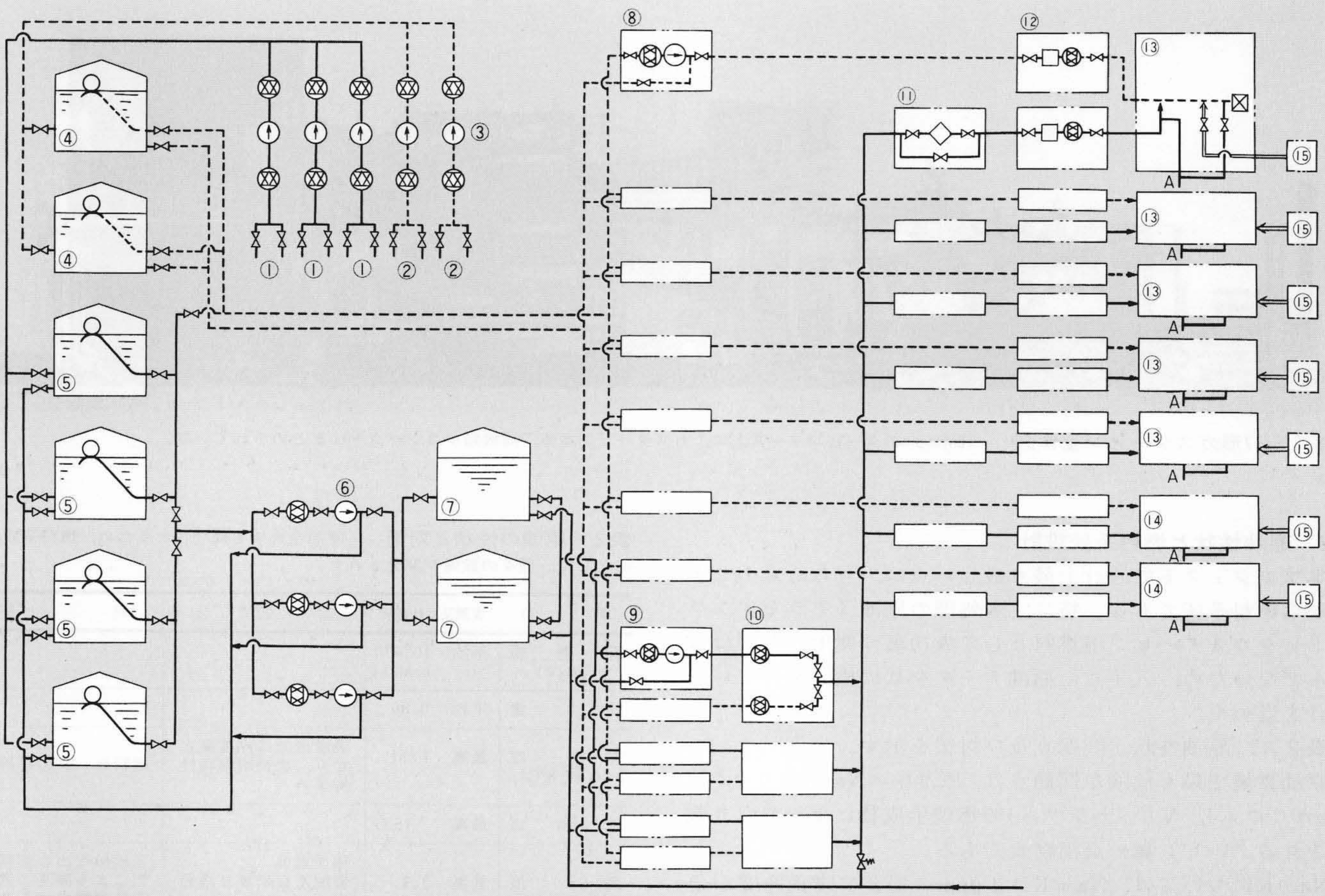
注：Na（ナトリウム），V（バナジウム），K（カリウム），Mg（マグネシウム）

3.3　燃料処理システム

燃料処理システムの系統図を**図5**に示す。

燃料貯蔵タンクは計6缶あり，うち4缶が原油用として使用される。各タンクは容量約2,800m^{3}で，順次，受入れ，沈殿，払出しとして使用されるため，受け入れた原油中の異物が十分に沈殿せずに払い出されるということはない。原油貯蔵タンク下流には2缶の確認用タンクが設置されており，燃料移送装置へ送られる原油中のNa，K，V含有量をここで測定する仕組みになっている。

万一，測定されたNa＋Kの含有量が1ppmを超える場合は，次のブレンド過程で1ppm以下となるように，軽油との自動



No.	名 称	No.	名 称	No.	名 称	No.	名 称	No.	名 称
①	原油積み降ろしステーション	④	軽油貯蔵タンク	⑦	原油確認タンク	⑩	ブレンド制御スキッド	⑬	FS7形ガスタービン
②	軽油積み降ろしステーション	⑤	原油貯蔵タンク	⑧	軽油移送ポンプ	⑪	ヒータ	⑭	FS5形ガスタービン
③	移送ポンプ	⑥	原油移送ポンプ	⑨	ブレンドポンプスキッド	⑫	フィルタ及びコアレッサスキッド	⑮	Mg添加スキッド

図5 燃料処理システム系統図 本系統は，原油又は軽油100%及びあらゆる比率の軽油，原油のブレンド運転を可能にしたところに大きな特色がある。

ブレンドが実施される。**図6**にブレンドシステムの制御概要を示す。

測定されたNa＋K濃度から必要なブレンド比が制御系統に与えられると，**図6**に示す制御系統により，燃料流量のいかんにかかわらずブレンド比一定(すなわち，Na＋K濃度一定)の制御が行なわれる。本制御系では，圧力一定制御をも実施しているので，燃料流量の変動などの外乱が入っても系統圧力は一定に保たれる。

上記のブレンドシステムのほかに，燃料系統には原油の性状から要求される燃料ヒータ，燃料フィルタ，コアレッサが設置されている。

更に，Vによる高温腐食を制御するためのMg添加装置が設置されているが，原油中のV濃度が比較的少量であるため，Mg量の調整は手動で実施している。

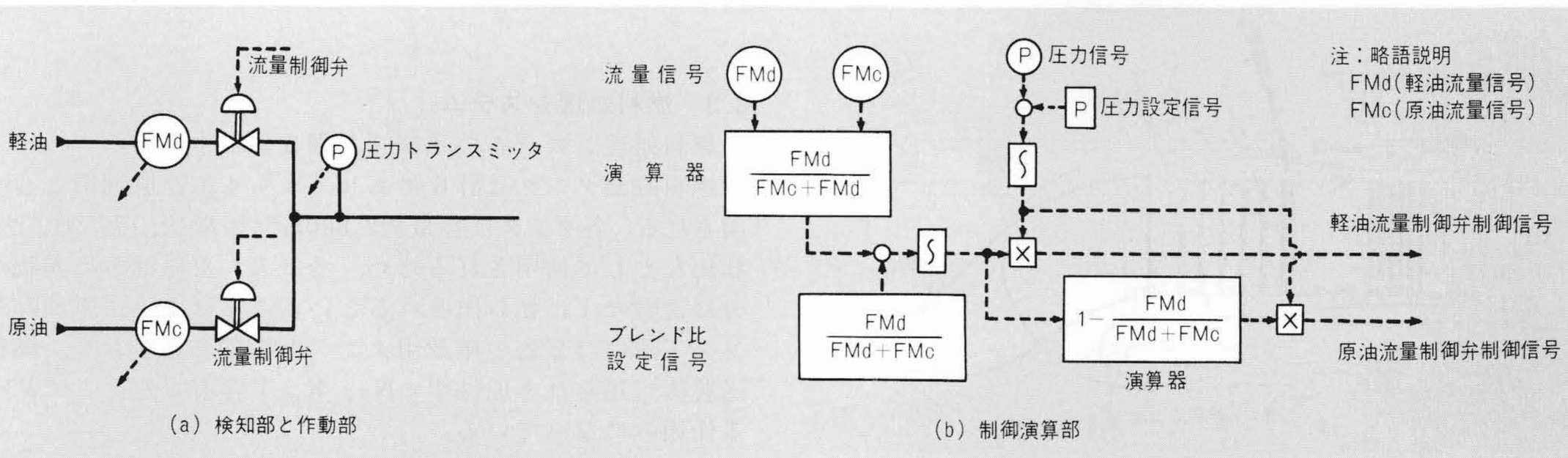


図6 燃料比ブレンド制御システム 本制御システムは，燃料ブレンド比と系統圧力を燃料流量のいかんにかかわらず一定に保つところに大きな特色をもつ。

表3　原油燃焼ガスタービンの運転実績　FS7形ガスタービンは，ほぼ連続運転用として使用されているが，FS5形ガスタービンは，1978年以降は予備機及び夏季ピーク用とし使用されている。

ユニット番号	形　式	1977年	1978年	1979年	1980年	1981年	運転時間(h)	起動回数
#1	FS5						9,976	392
#2	FS5						9,361	137
#3	FS7						23,910	152
#4	FS7						22,741	143
#5	FS7						20,813	155
#6	FS7						21,284	130
#7	FS7						18,843	120

注：●運開時期，○燃焼器点検時期，□タービン点検時期，△全体点検時期　運転時間及び起動回数は，1981年4月8日現在の値である。

本プロジェクトでは，補助燃料として軽油が使用されるが，これは原油とのブレンド用のほかに，ガスタービンの起動停止用としても用いられ，また，軽油だけによるガスタービンの運転も可能なように設計されている。

4　運転実績

4.1　運転実績概要

1977年2月，1号機が運転に入って以来，1981年4月現在，全7台が商業運転に入っており，累計運転時間は，原油又はブレンド原油で12万7,000時間にも達している。

表3は，各ユニットの運転状況をまとめて示したものである。

FS5形ガスタービンは，1977年中は切迫した電力需要をまかなうため連続運転用として使用されたが，以降は予備機又は夏季のピーク対策用として使用されてきている。

FS7形ガスタービンの運開はFS5形ガスタービンよりも遅れたものの，平均運転時間は約2万1,500時間に達しており，ほとんど連続運転用である。通常は4台運転，1台予備の運転管理を行なっているが，夏季などの電力需要増大時は全台運転，冬季の不需要期は3台運転，1台予備，1台定期点検となり，非常に余裕のある運転管理がなされていると言える。

以下に，これまでの運転で分かった技術的問題点について二，三の説明を加える。

4.2　運転信頼性

運転当初，後述するように燃料系統に一部問題点を生じたが，対策後は技術的に困難な原油燃焼にもかかわらず，非常に高い信頼性をもっており，特に最近2年ほどは，大きなトラブルは全く報告されていない。**表4**は，1979年1年間の運転信頼性をまとめて示したものであるが，運転信頼度は99.7%以上と非常に高いことが分る。

なお，**表4**中で利用率が70%台であるのは，前述したように通常1台を予備機としていることによるもので，機械自体による問題ではない。

当初，起動信頼度については信頼度50%以下に落ち込むという問題が生じたが，点火栓の点火エネルギーの大幅な増大，及び点火時燃料流量の増大により完全な解決が得られ，以降，起動失敗は経験していない。

4.3　原油中Na＋K成分とブレンド制御システム

供給される原油中のNa＋K成分は，0.5～約10ppmと時期によって大きな差異があり，その性状に応じて軽油のブレンド比も0～9程度の変動を記録している。前述の自動ブレンド制御システムは，これらの条件によく追従しており，良好な運転実績を残している。

表4　FS7形ガスタービンの運転信頼性　運転信頼度に比べ利用率が低いのは，原則的に常時1台以上を予備機とする顧客の運転方針による。

ユニット番号	設置時間 (h)	運転時間 (h)	事故停止時間 (h)	利用率* (%)	運転信頼度** (%)
#3	8,760	6,449	12	73.6	99.8
#4	8,760	6,309	6	72.0	99.9
#5	8,760	6,784	12	77.4	99.8
#6	8,760	6,406	16	73.1	99.7
#7	8,760	6,559	14	74.9	99.8

注：* 利用率＝$\frac{\text{運転時間}}{\text{設置時間}}$

** 運転信頼度＝$1-\frac{\text{事故停止時間}}{\text{運転時間＋事故停止時間}}$

表5　FS5形，FS7形ガスタービンの定期点検実績　各ユニット共，ほぼ日立製作所の推奨どおりの間隔で定期点検が実施されている。

ユニット番号	形　式	定期点検の回数		
		燃焼器点検	タービン点検	全体点検
#1	FS5	2	1	0
#2	FS5	2	1	0
#3	FS7	3	2	1
#4	FS7	3	2	1
#5	FS7	2	2	1
#6	FS7	2	2	1
#7	FS7	2	2	1

注：1981年4月末現在

4.4　タービンの水洗浄と出力の回復

本プロジェクトでの運転実績によると，ガスタービン出力に，1,000運転時間当たり4～8%の出力低下が見いだされている。この出力低下は，Vによる高温腐食を抑制するためのMgが，燃焼過程で$MgSO_4$(硫酸マグネシウム)を主とする灰分を形成し，これがタービン動静翼表面に付着して出力低下の原因となっている。幸い$MgSO_4$は水溶性のため，タービン部に水を噴射洗浄することにより，出力を97～99%まで回得することが可能である。本プロジェクトでは，約4,000時間ごとに水洗浄を実施し，良好な回復効果を得ることができた。

4.5　定期点検

本プロジェクトでは原油燃焼ということもあって，約4,000時間運転で燃焼器点検，約8,000時間運転でタービン点検，約1万6,000時間運転で全体点検を推奨しているが，顧客の理解もあり，ほぼ推奨どおりの点検をこれまで実施してきている。

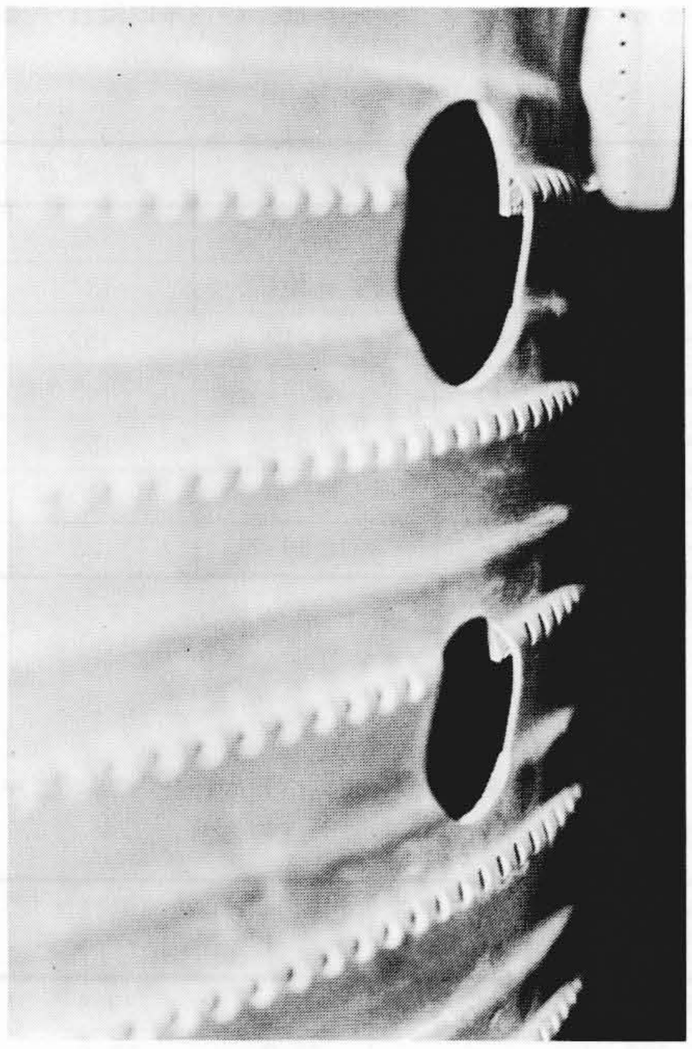


図7 使用後の燃焼器ライナ 長期間の運転後も，依然として冷却孔，インナーリングなど，主要部に損傷のないことが分かる。

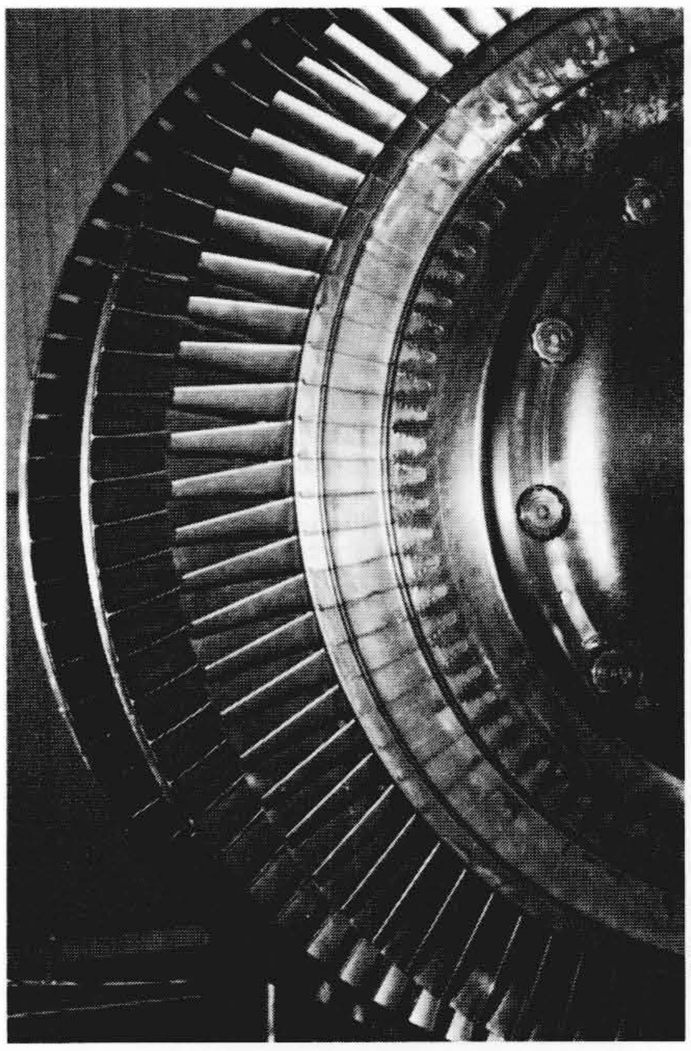


図8 2万1,000時間運転後のタービン動翼 2万1,000時間にも及ぶ原油燃焼運転にもかかわらず，動翼には腐食，クラックの兆候は見られていない。

表5に各ユニットごとのこれまでの点検回数を示す。点検結果は予想以上に良好であり，一部の部品でわずかな手直し，補修溶接を行なっているだけである。以下に，主要部品について点検時の概要を簡単に説明する。

(1) 燃焼器

最も重要な冷却孔部にクラック，目づまりは見られなかった。燃焼器内部に1～数ミリメートルの厚さで$MgSO_4$が付着するが，腐食は見られなかった。また，スプリングシール部に摩耗が見られるものがあるが，現地でシール交換を実施した。

(2) タービン静翼

付着物の厚さは2～10mmに達するが，冷却空気孔に目づまりは見られなかった。約2万時間の運転後，一部の翼端に微小なクラック発生の兆候があり，安全のため補修溶接を実施したものがある。

(3) タービン動翼

高温腐食の兆候は見られなかった。付着物の厚さは数ミリメートルに堆積したが，冷却空気孔は健全であった。

図7，8に，それぞれ約2万時間運転後の燃焼器ライナ及びタービン動翼を示す。

4.6 運転当初の主な問題点と対策

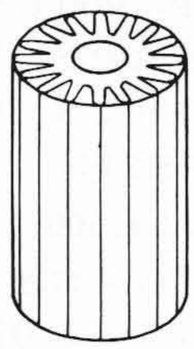
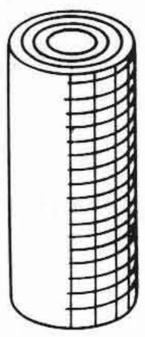
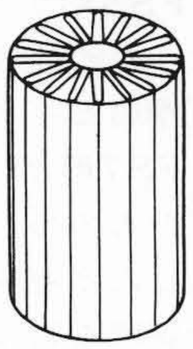
(1) 燃料分配器

燃料分配器は10筒の燃焼器に均等に燃料を分配する10連のギヤモータであるが，このギヤが固着し，ガスタービンが運転停止するという問題が当初発生した。対策としては，可変部のギヤとケーシング間の間隙を大きくするのが最も容易であるが，間隙を大きくとると，分配性能が損われるおそれがあるため，数種類の間隙をもつものを製作し，分配性能との兼ね合いで最も良いものを実験的に選択した。最終設計品の間隙は，当初の約3.3倍となっている。

(2) 燃料油フィルタ目づまり

運転当初，燃料油フィルタが短いときで，30時間程度で目づまりを生ずるという問題を生じた。目づまりしたフィルタの分析など，詳細な検討の結果，燃料制御系統機器の安全性を重視する余り，フィルタの沪過精度を小さくとりすぎたこと，油中のろう分を完全に溶融するには，油の加熱温度が不足であったことが判明し，**表6**に示すように対策し，良好な改善を見ている。

表6 燃料油フィルタの寿命改善 沪過サイズの変更及び燃料油入口温度の上昇により，ガスタービン系統機器に問題を生ずることなく，フィルタエレメントの寿命を改善した。

名称		低圧燃料油フィルタ	コアレッサ	高圧燃料油フィルタ
形式		 表面沪過方式	 層沪過方式	 表面沪過方式
沪過サイズの相対比	当初	1	1.5	1
	改善後	2.2	2.5	3
燃料油入口温度	当初	42～46℃		
	改善後	55～65℃		
寿命の相対比	当初	1	3	2
	改善後	5～6	15～20	6～8

5 結言

終わりに，以上をまとめて次に述べる。

(1) 出力237.4MWの原油燃焼ガスタービン発電設備が，1977年以来好調に運転を続け，累計運転時間にして約12万7,000時間にも達している。

(2) 最近の平均年間事故停止時間は約12時間／台であり，運転信頼性は非常に高い。

(3) 定期点検の結果，2万時間以上の運転にもかかわらず，高温腐食の兆候は見られなかった。

(4) 原油燃焼による出力低下は，1,000時間当たり4～8％であるが，水洗浄によりほぼ完全に回復できる。

(5) 燃料ブレンド制御システムは，当初の設計方針どおりに，成功裏に作動している。

(6) 運転当初の主要問題点はほぼ解決し，原油燃焼に関する貴重なノウハウを蓄積することができた。