# 富士電機の標準中容量蒸気タービン「FET シリーズ」



吉江　耕也（よしえ　こうや）　安部　道雄（あべ　みちお）　小嶋　裕之（こじま　ひろゆき）

## 1　まえがき

近年，電力の自由化や環境問題への意識の高まりなどを背景に，火力発電を取り巻く状況は大きく変わってきた。蒸気タービンに対しても，一段と高効率化が求められると同時にコンパクト化や運転操作性，保守性，信頼性の向上が不可欠になっている。

中容量蒸気タービン分野については，従来の自家発電用に加えてコンバインドサイクル用としても適用されており，単機容量の大容量化や高効率技術も積極的に取り入れられている。また，建設費の削減を目的として，軸流排気型や上向き排気型蒸気タービンも一般化している。

本稿では，このような市場状況のもと，低コストで高効率を実現した富士電機の標準中容量蒸気タービン「FET シリーズ」の特徴を紹介する。

## 2　モデルシリーズのコンセプト

### 2.1　適用範囲

中容量蒸気タービンは上述のごとく，発電専用のみならず，工場用蒸気系統への送気の機能を装備するなど，多種多様の仕様の要求がある。これらの市場ニーズに対応するために，FET 中容量蒸気タービンは幅広い蒸気条件と出力範囲をカバーした標準化モデルシリーズである。

蒸気タービンの型式，適用蒸気条件，出力範囲を**表１**に示す。

表１　富士電機の標準中容量蒸気タービン「FETシリーズ」の適用範囲

| | |
|---|---|
| 型　　式 | ○復水式<br>○背圧式<br>○1段/2段制御抽気復水式<br>○1段/2段制御抽気背圧式<br>混圧蒸気または抽気/混圧蒸気式にも適用可能 |
| 出力範囲 | 20～180 MW |
| 蒸気条件 | 主蒸気圧力：最大130 bar<br>主蒸気温度：最大540 ℃ |
| 回転速度 | 50 $s^{-1}$（3,000 r/min）または<br>60 $s^{-1}$（3,600 r/min） |

### 2.2　ブロックデザインシステム

FET 中容量蒸気タービンの設計には「ブロックデザインシステム」を採用している。蒸気タービンを構成する各ブロックは標準化された数個のコンポーネント（**図１**）が用意されており，プロジェクトごとの蒸気条件や出力などの各要求仕様に応じて組み合わせ，広範囲にわたり最適なブロックの選定を可能にしている。おのおのの標準コンポーネントは実績を重ねており，信頼性の高いタービンモデルを選択することができる。

「ブロックデザインシステム」による標準化は製作期間の短縮と製作コストの低減を可能にすることができるとともに，顧客のニーズに対応した蒸気タービンを短納期で提供することができる。

## 3　FET 蒸気タービンの大容量化

工場用蒸気の供給と発電を可能としている自家用発電蒸気タービンは従来から数多く建設されている。近年の世界的な電力自由化の流れにより，一般企業の IPP（独立系発電事業者）への参入が増加している状況下では，自家用発電の機能を維持しつつ，容量の大型化が推進されている。FET 蒸気タービンの単機容量においても，1994 年に 101 MW タービンが運転を開始して以来，市場のニーズに合わせて大容量化を図ってきた。**図２**に蒸気タービンの組立断面図，**表２**に蒸気タービンの仕様を示す。

### 3.1　絞り制御方式の採用による高効率化

FET 蒸気タービンでは，事業用火力の大容量蒸気タービンと同様に内部・外部の二重ケーシング構造の絞り制御方式の設計を踏襲している。そのため損失の大きい調速段を持たず，全段反動式（**図３**）となっているので高い効率を実現できる。また，衝動式に比べ蒸気の速度が緩やかなため，固体粒子衝突による摩耗（パーティクルエロージョン）や翼表面の劣化を小さくすることができるので，性能

**吉江　耕也**

蒸気タービンの設計開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部川崎工場技師長。ターボ機械協会会員。

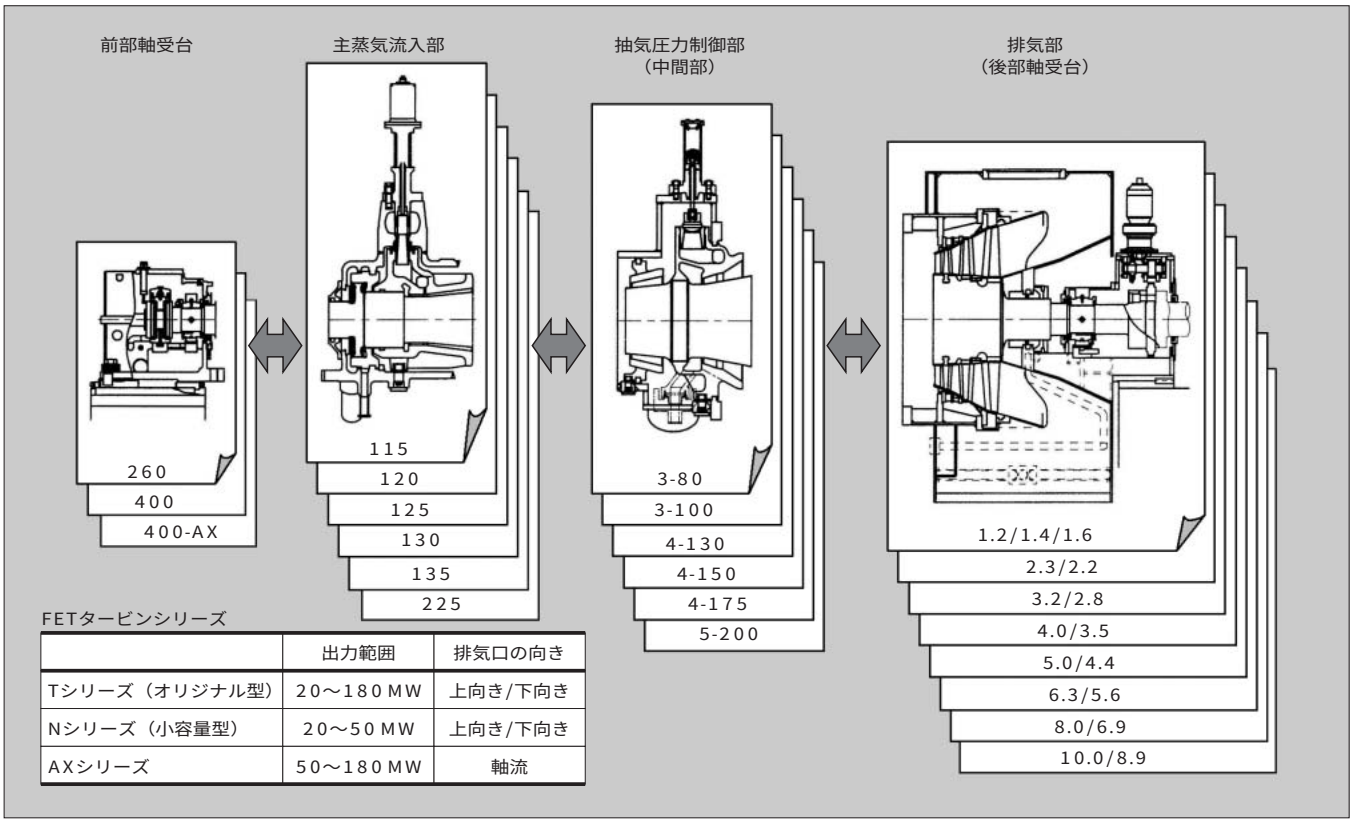
**安部　道雄**

蒸気タービンの設計開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部川崎工場火力タービン部長。

**小嶋　裕之**

蒸気タービンの設計開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部川崎工場火力タービン部担当課長。

図１　ブロックデザインシステムの概要




| | 出力範囲 | 排気口の向き |
|---|---|---|
| Tシリーズ（オリジナル型） | 20～180 MW | 上向き/下向き |
| Nシリーズ（小容量型） | 20～50 MW | 上向き/下向き |
| AXシリーズ | 50～180 MW | 軸流 |

図２　161.99 MW 蒸気タービン組立断面図

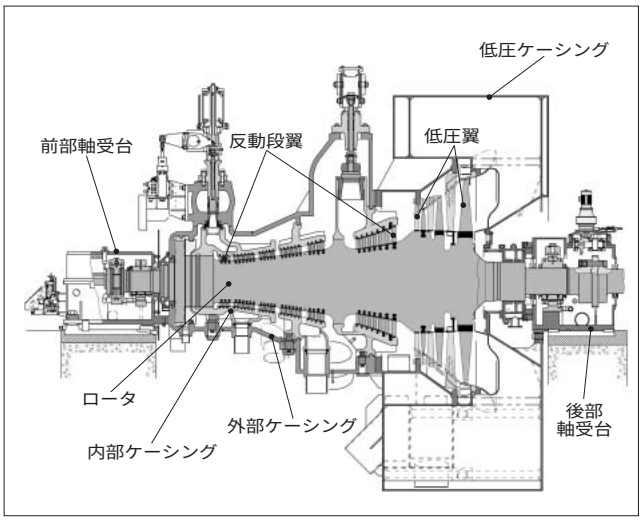
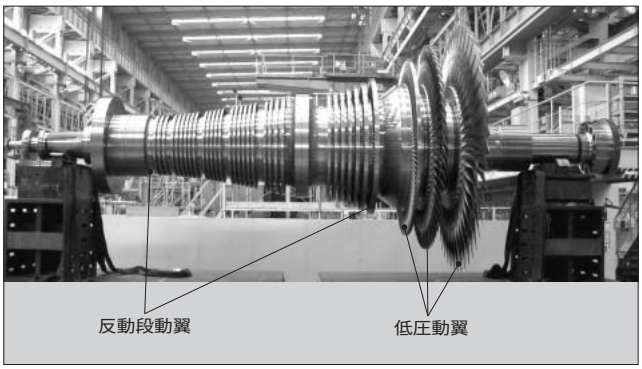



表２　蒸気タービンの仕様

| | 台湾化學繊維股份有限公司<br>SK-G4（台湾） | 台塑集團熱電<br>（寧波）有限公司<br>NB-1（中国） |
|---|---|---|
| 型　　式 | 1段抽気復水式 | 1段抽気復水式 |
| 出　　力 | 147.88 MW | 161.99 MW |
| 蒸気条件<br>抽気圧力 | 123.6 bar/538 ℃<br>/7.7 bar | 123.6 bar/538 ℃<br>/8.3 bar |
| 真　　空 | 0.088 bar | 0.088 bar |
| 回転速度 | 60 $s^{-1}$（3,600 r/min） | 50 $s^{-1}$（3,000 r/min） |
| 運転開始<br>年　　月 | 2000年5月 | 2004年7月 |

図３　反動式蒸気タービンロータ




の経年劣化が小さい。

### 3.2　新世代低圧翼の採用

低圧翼には，超音速流体解析（三次元タイムマーチング法）を用いて設計した高効率の低圧翼を採用した。

最終段（L-0）静翼には，円周方向に湾曲したリーンラジアル静翼を採用している（**図４**）。また，従来のフリースタンディング動翼の特徴である－５～＋３％の広い範囲の周波数変動を許容しながら，低圧初段（L-2）動翼には囲い輪を設置して，性能向上を図っている（**図４**）。

### 3.3　エロージョン対策

湿り蒸気中にある低圧翼の長大化により，水滴による動翼の浸食（エロージョン）が激しくなる。この現象を軽減するために下記の対策を行っている（**図５**）。

図４　新世代低圧翼

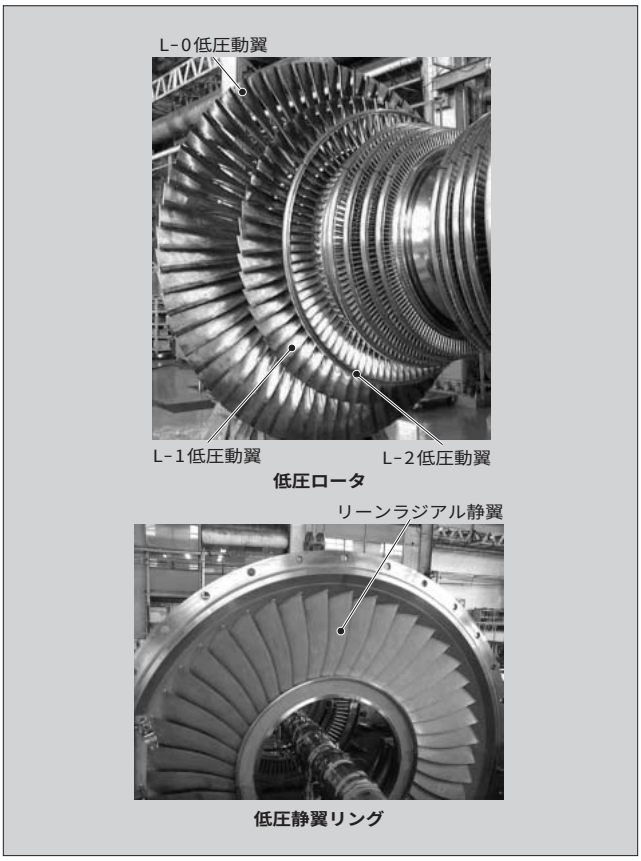
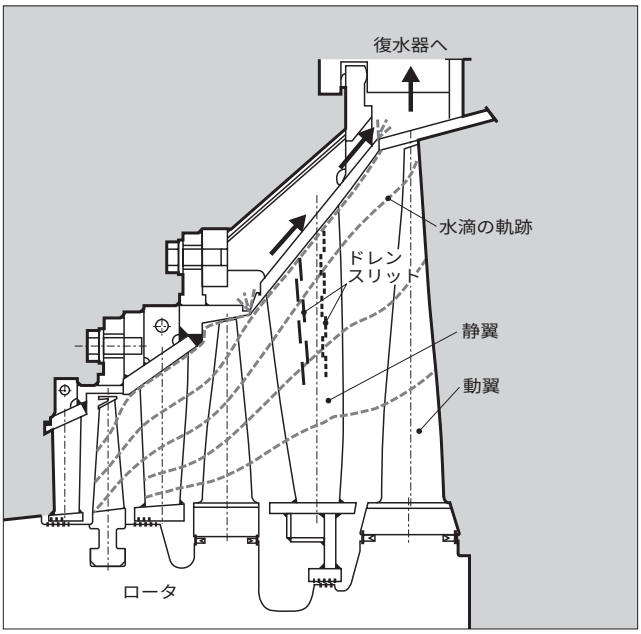



図５　エロージョン対策構造



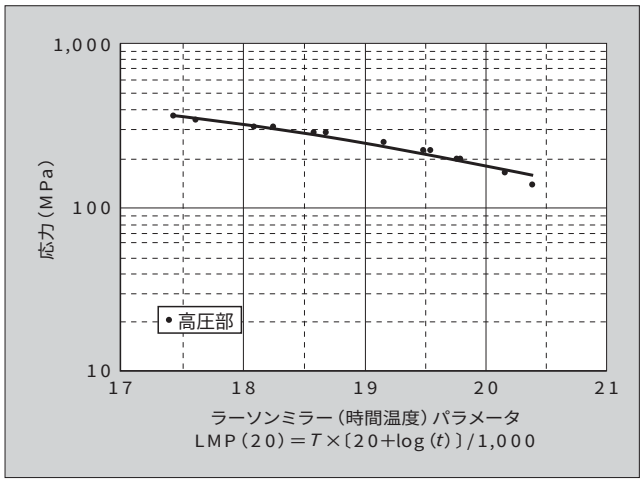

(1)　動翼の前縁部に火炎焼入れを行い，母材の表面硬度を高めている。

(2)　大型の最終段（L-0）静翼は，鋼板の中空構造として，翼表面にスリットを設けている。このスリットから水滴を排出し，後段の動翼へのドレンアタックを軽減している。

(3)　静翼後縁側の軸方向すきまを広く取り，静翼表面に付着した水滴を蒸気流れにより微細化して，ドレンアタックを軽減している。

(4)　静翼後縁を薄くして，翼表面からはがれる水滴粒子を微細化して，ドレンアタックを軽減している。

図６　クリープ破断試験結果




### 3.4　2 % Cr 鋼ロータの採用

蒸気タービンの大型化に伴いロータ直径が太くなり，動翼の長大化とともに作用する遠心力が増大する。そのため有限要素解析によりロータ軸心の正確な最大応力を算出し，材料の破壊力学の手法を用いて実運転時の強度評価を行った。特に軸心応力の高い 60 $s^{-1}$ 機については 2 % Cr 鍛鋼に傾斜熱処理を適用した。**図６**にクリープ破断試験結果を示す。

## 4　FET 小容量蒸気タービン（N シリーズ）

FET 蒸気タービンの小容量クラスをより充実させるために，N シリーズの開発を 2002 年に着手し完成した。**図７**に蒸気タービンの組立断面図と仕様を示す。

### 4.1　ノズル調速によるコンパクト化

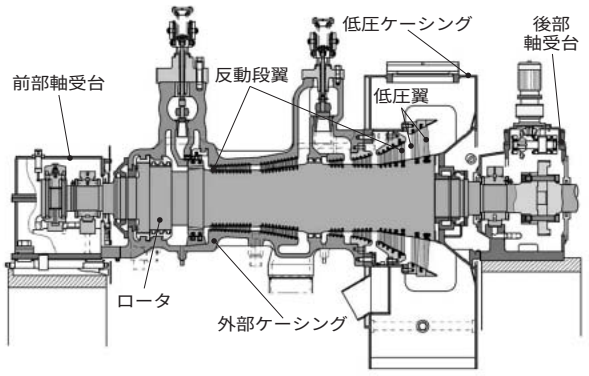
FET 蒸気タービンは，前述のとおり絞り制御方式で二重ケーシング構造である。しかし小規模の自家用発電蒸気タービンでは，昼夜の負荷変動が大きいためノズル制御方式のニーズが高い。そこで，小容量クラスに限ってノズル制御方式を採用し，ケーシングも一重化した（**図８**）。

主蒸気条件は中容量クラスと変わらぬ 538 ℃/130 bar の高温・高圧を適用するものとし，シミュレーション技術を使って実運転時のケーシングの温度分布・発生応力や変形を解析して設計した（**図９**）。

### 4.2　高性能衝動翼の採用

ノズル制御方式を採用するにあたり，効果的に車室圧力・温度を下げるために初段にカーチス段を採用した。カーチス段採用により FET 蒸気タービンの特徴である高効率を極力維持するために，二次損失の軽減を狙い円周方

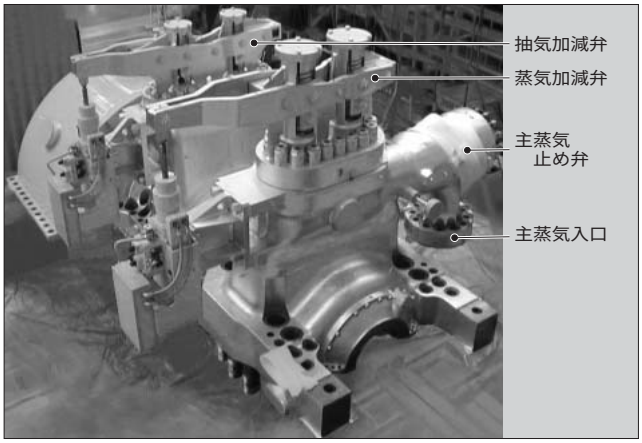
図７　N シリーズ蒸気タービン組立断面図




上海中隆紙業有限公司（中国）向け蒸気タービン

| | |
|---|---|
| 型　　式 | 1段抽気復水式 |
| 出　　力 | 26 MW |
| 蒸気条件<br>抽気圧力 | 123.6 bar/538 ℃/9.8 bar |
| 真　　空 | 0.079 bar |
| 回転速度 | 50 $s^{-1}$（3,000 r/min） |
| 運転開始年月 | 2005年3月 |

図８　ケーシングの外観




向に湾曲した三次元翼を適用した（**図10**）。これにより従来翼に対して，段落効率の 1.7 %向上を図った。

## 5　コンバインドサイクルプラントへの適用

近年の地球環境重視の観点から火力発電設備の主力は，ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた熱効率の高いコンバインドサイクルプラント（CCPP）へと移行している。この市場ニーズに合わせて 100 ～ 200 MW クラスのガスタービンとの組合せに適合できるバリエーションを追加した。

CCPP では，タービン建屋の建設期間と建設コストを大幅に低減できる軸流排気型タービンの需要が高い。そこで従来は下向き排気型であった FET 蒸気タービンに軸流排気型の AX シリーズ（**図11**）を開発した。

図９　流入部温度分布の解析

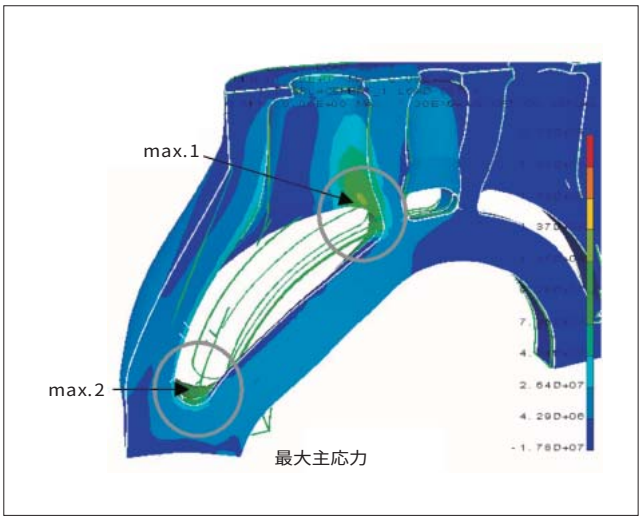
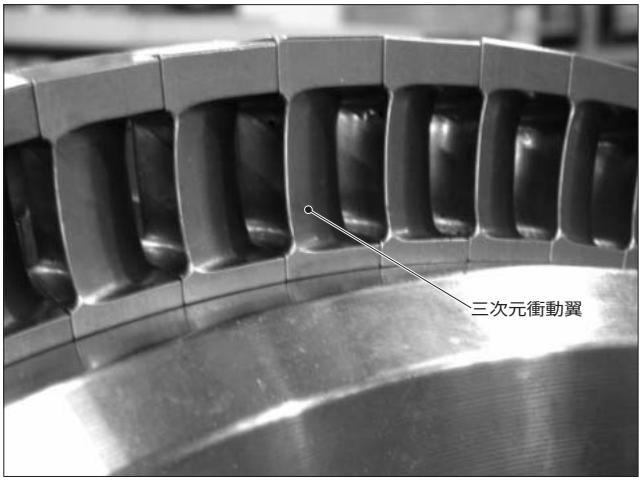



図10　三次元衝動翼の外観




また，送電ロス低減のため，CCPP は需要地に建設される。そのため大量の冷却水を必要とする水冷式復水器に代わり，発電所の設置場所を選ばない空冷式復水器が採用される。そのため蒸気タービンの排気真空が悪くなるので，低真空用シリーズを追加した。

### 5.1　軸流排気型 FET 蒸気タービン

軸流排気型の AX シリーズは，開発完了して 1999 年に初号機が運転を開始した。その後 CCPP 向けに数多く採用された。**図12** に蒸気タービンの写真と仕様を示す。

### 5.2　全電気式保安装置の採用

軸流排気型の蒸気タービンは，後部軸受台が排気室の中にあるため，前部軸受台に発電機とのカップリングやターニング装置・保安装置が設置される。そのため前部軸受台を極力簡素化しメンテナンス性を向上するため，非常調速機やスラスト保護装置などの保安装置はすべて電気式とした（**図13**）。

この電気式保安装置は FET 蒸気タービンのほか，富士電機の大容量蒸気タービンにも適時採用されている。

図 11　軸流排気型 AX シリーズ蒸気タービン

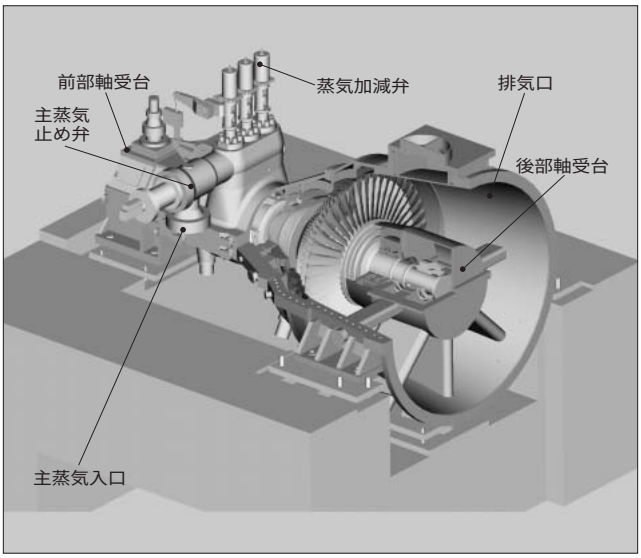
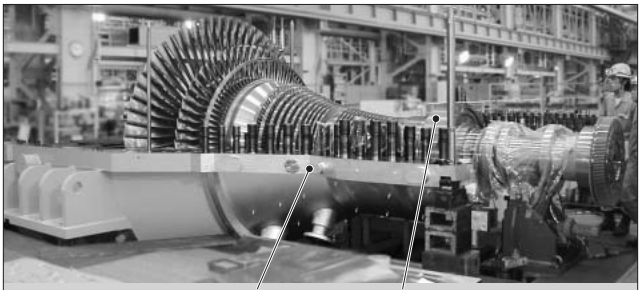



図 12　組立中の AX シリーズ蒸気タービン




Fortaleza S.A.（ブラジル）向け蒸気タービン

| | |
|---|---|
| 型　　式 | 混圧復水式 |
| 出　　力 | 117.8 MW |
| 蒸 気 条 件 | 73.3 bar/517 ℃ |
| 真　　空 | 0.065 bar |
| 回 転 速 度 | 60 $s^{-1}$（3,600 r/min） |
| 運転開始年月 | 2004年2月 |

### 5.3　空冷式復水器への対応

空冷式復水器は，水冷式復水器より低真空となるので，蒸気タービン排気部にある低圧翼の強度が厳しくなる。そこで低真空用の強化低圧翼を開発した（**図14**）。

図 13　電気式保安装置の概念図

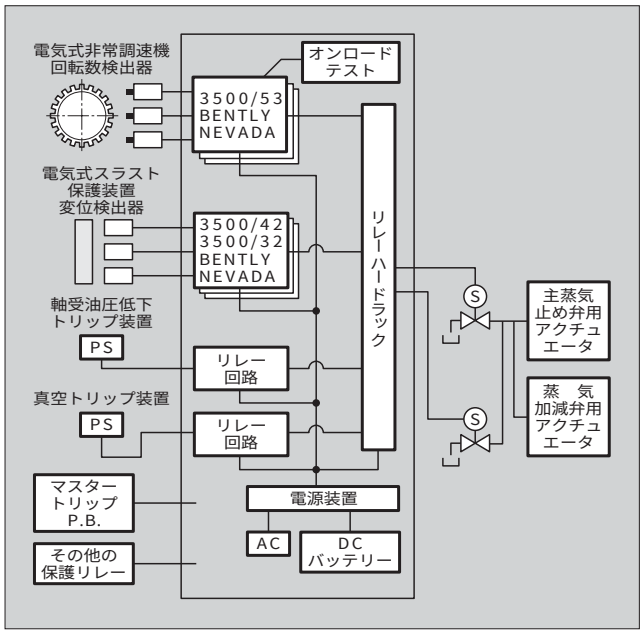
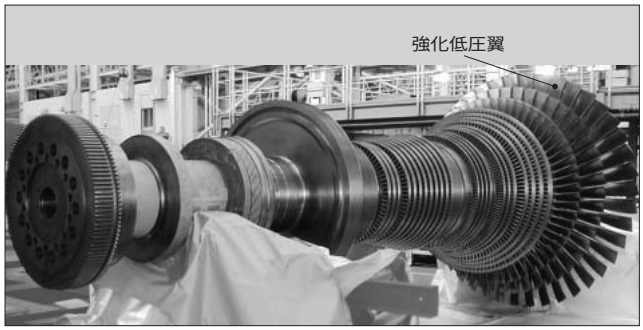



図 14　強化低圧翼の外観




## 6　あとがき

FET 中容量蒸気タービンのシリーズ充実化により広範囲な市場ニーズに適用することが可能となった。今後予想される環境問題と電力自由化の進展は，ますます高効率化と低コスト化が強まるものと考える。これらのニーズをいち早く取り入れるべく，技術開発を推進していく所存である。

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。