

中容量再熱蒸気タービン

浅野 誠一(あさの せいいち)

高橋 陽一(たかはし よういち)

森山 高志(もりやま たかし)

1 まえがき

1997年の「気候変動に関する国際連合枠組み条約第3回締約国会議」(地球温暖化防止京都会議)以降、二酸化炭素の総量規制に代表される環境問題が地球規模での大きな社会問題となりつつあり、火力発電分野においても化石燃料の枯渇問題と相まって、より発電効率が高い再熱発電プラントが大きな位置を占めつつある。また一方、国内外の電力自由化の波は、より安価で高効率の電力供給設備の建設を促進しており、新設のIPP(独立系発電事業者)向け火力発電プラントの多くは、発電効率が高い再熱プラントで占められている。こうした背景のなか、再熱蒸気発電プラントの適用範囲は、高温大型化の方向にあるガスタービンコンバインドサイクルと、低公害型で燃料選択の自由度が高い流動床ボイラに代表される石炭火力へと展開してきており、従来の電力会社向け超臨界大容量プラントとは一線を画した新たなニーズとなっている。

こうした市場状況のなか、新たな顧客ニーズにこたえるべく開発したのが、低コスト高効率型の中容量再熱蒸気タービンであり、近年の解析技術の進歩によってもたらされたシミュレーションやビジュアル技術を取り入れて開発された高性能機である。

本稿では、新たに開発した低コスト高効率型の中容量再熱蒸気タービン(図1)の概要について、その特徴を中心に紹介する。

2 開発機の仕様

2.1 設計条件

開発機の設計条件としては、コンベンショナル向けタービンをターゲットとし、以下のように設定した。

- (1) 蒸気条件：17 MPa/566 /566
- (2) 排気圧力：5.07 kPa (722 mmHg)
- (3) 出力：150 MW
- (4) 抽気段数：7段

なお、コンバインドサイクル向けについては、12 MPa

程度の主蒸気圧力と変圧運用などの特異性を考慮し、高圧弁構造と弁配置を一部改善したうえ、全周噴射絞りタービン構造を採用している。

2.2 要求運用機能

- (1) 運用帯：40～100%負荷帯での高効率確保
- (2) 運用特性：昼夜2シフト運用およびDSS(Daily Start & Stop)対応

3 開発機の特徴

3.1 高中圧タービン

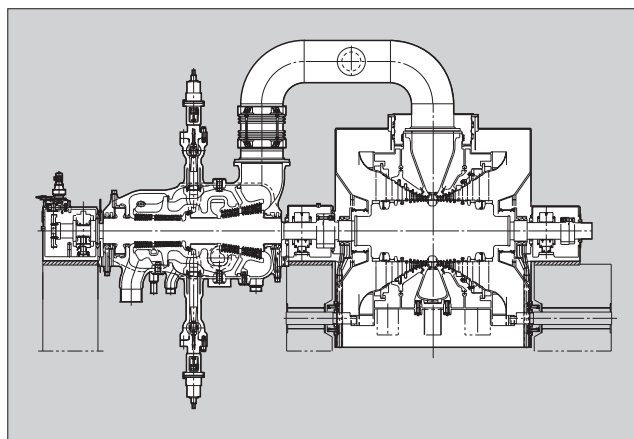
工場にて出荷準備中の高中圧タービンを図2に示す。

(1) 二重ケーシング構造

17 MPa/566 の高圧高温蒸気にさらされる高中圧タービンには、内部ケーシング(1% CrMoV 鋳鋼)と外部ケーシング(1% CrMo 鋳鋼)からなる水平二つ割り二重ケーシング構造(図3)を採用した。

この二重ケーシング構造は、タービン内部に作用する圧力および温度を両ケーシングで分担させ、フランジ部を中心にした肉厚低減とフランジボルトの小サイズ化によるコンパクト化を可能にした。また、ケーシング薄肉化および

図1 中容量再熱蒸気タービンの断面図



浅野 誠一

蒸気タービンの設計に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部長。



高橋 陽一

蒸気タービンの設計に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部。



森山 高志

蒸気タービンの設計に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部。

フランジ厚さ低減は、ケーシングのコンパクトばかりでなく、起動および負荷変動における発生熱応力を低減し、昼夜2シフト運用やDSS運用における疲労寿命消費を大幅に減少させた。

なお、構造開発にあたっては、実運転にて予想される起動・停止、負荷変化などを含めた運転シミュレーションによって、タービン各部での温度分布(図4)、発生応力および変形量を把握して構造計画に反映した。

(2) 内部冷却構造

高中圧タービンの内部ケーシングは中圧ケーシングの抽気部までとし、その下流部である中圧排気部には内部ケーシングと分割した静翼ホルダを設置した。この内部ケーシングの分割によって、抽気蒸気を内部ケーシングと外部ケーシングによって形成される空間に導き、高圧部排気付近に設けた抽気ポートによりケーシング外に抽気する構造とした。この中圧部からの比較的低温の抽気蒸気は、高中圧ケーシングにおいて最も高温の部位となる内部ケーシングの主蒸気流入部および再熱蒸気流入部を外側から冷却し、局所的な高温対策を行わないシンプルでコンパクトな構造を可能とした。

(3) 応力緩和とロータ形状

昼夜2シフト運用などの負荷変化は、高温蒸気流入部付

図2 出荷準備中の高中圧タービン

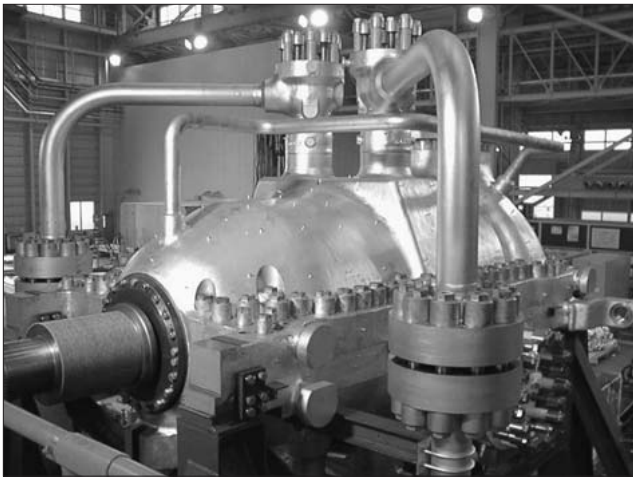
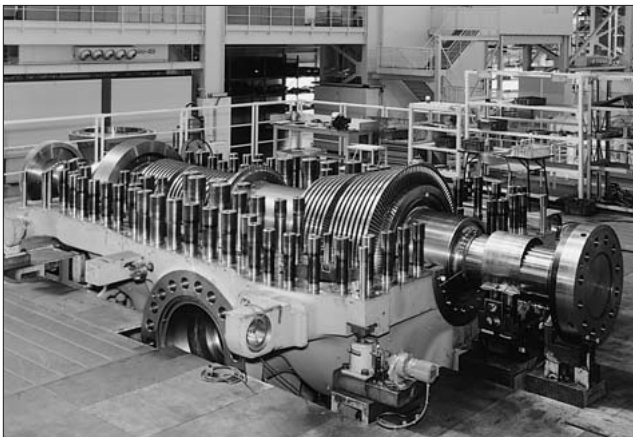


図3 組立中の高中圧タービン



近のロータ表面に熱応力を発生させる。この対策として、当該部のロータ表面に応力緩和溝(図5)を設けた。

高温蒸気が接するロータの表面部分を大きな半径で削り込み、翼脚溝底部へのクラックの発生を防止するとともに、仮にクラックが生じたとしてもロータ表面部でのスキンカットにて補修できるように配慮した。

3.2 低圧タービン

350 程度の蒸気が流入する低圧タービン(図6)では、排気部までに300 程度の温度差が発生するため、温度差による変形量が構造上の問題となってくる。この対策として、以下の構造を採用した。

(1) 三重ケーシング構造

低圧ケーシングでは温度差による熱変形を回避する目的で三重ケーシング構造を採用した。発生温度差を3個のケーシングで分担し、個々のケーシングで発生する変形量を低減させることで信頼性の向上を図った。

特に内部ケーシングは、支持部を含めた応力および変形量について、各部の剛性・変形量を解析して構造計画に反映した。

(2) ケーシング支持構造

一般的な低圧タービンでは、外部ケーシングは基礎に固定されており、内部ケーシングはこの外部ケーシングにセ

図4 高中圧タービン内部ケーシングの温度分布

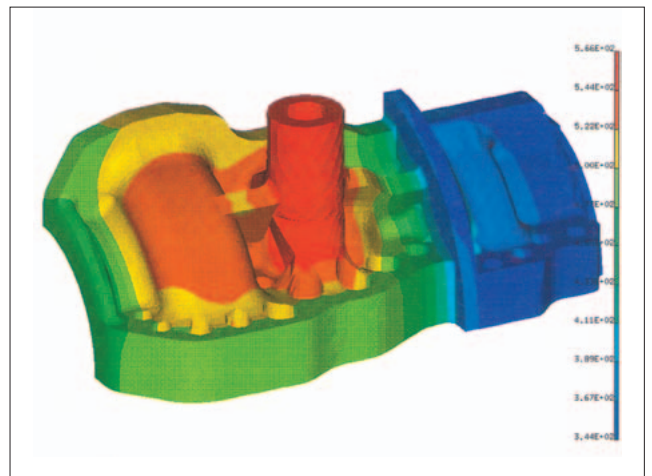
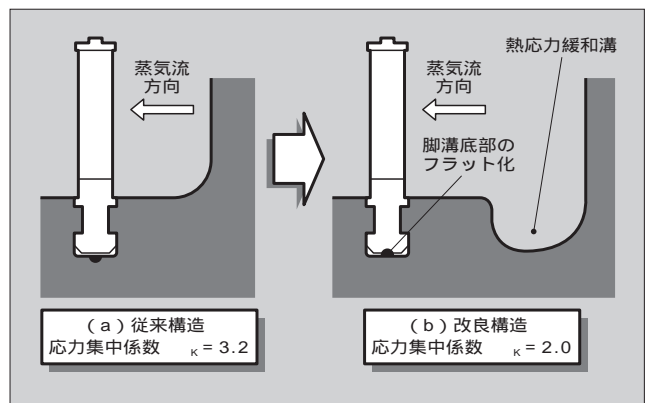


図5 ローラ表面の応力緩和溝



ンターサポートされる構造をとっている。この構造での外部ケーシングには、真空力に耐える剛性のほかに、内部ケーシングの支持という機能も要求されているため、大型鋼板構造としての高い剛性が不可欠である。

本タービンでは、真空容器機能と内部ケーシング支持機能を分離し、次のような構造とした。まず、内部の二重内部ケーシングは外部ケーシング部を貫通して軸方向に支持腕を出し、前後の軸受台にてセンターサポートされる構造とした。一方、外部ケーシングは内部ケーシングと一切接触することなく、単独で復水器上に溶接接合され、復水器と一体で真空容器を形成する構造とした。この結果、外部ケーシングには真空力以外の一切の外力が作用しないため、非常に軽量で単独な構造が可能となり、また内部ケーシングは外部ケーシングの変形の影響を一切受けない高い信頼性を有する構造となった。一方、高中圧タービン側の支持腕は、連結ロッド（図7）で高中圧タービン外部ケーシングとの間に軸方向に連結される構造とした。この連結ロッドによってケーシングの伸びが伝達され、高中圧部ケーシングの伸びがそのまま低圧内部ケーシングに伝えられることになり、低圧ケーシングで発生するロータとケーシングとの伸び差は、大幅に低減された。

図6 組立中の低圧タービン

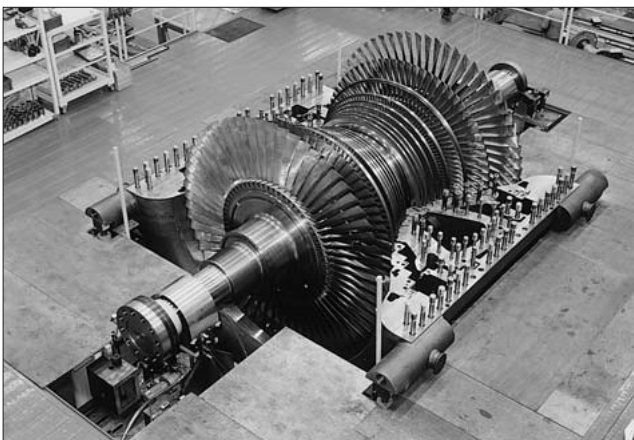
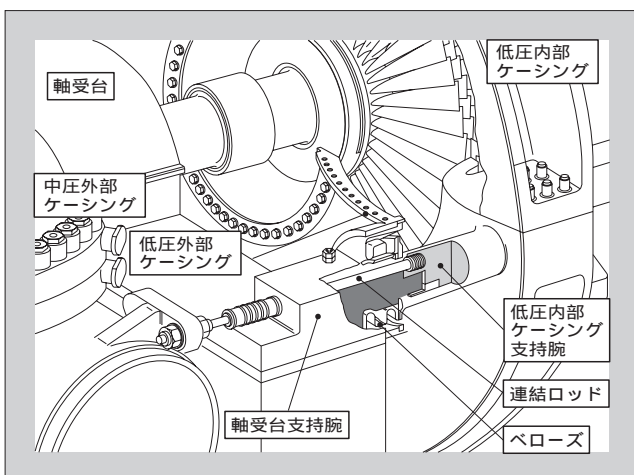


図7 低圧内部ケーシングの連結ロッド



3.3 シングルポイント軸受支持

ロータを支持する軸受は、高中圧タービン前後と低圧タービン後の3か所に設置された、いわゆるシングルポイント軸受支持構造を採用した（図8）。このシングルポイント軸受支持は、富士電機の複数ケーシングタービンにおいて従来から採用されているもので、経年的な基礎沈下などに起因したミスアライメントの発生に対しても、各軸受荷重および軸受部に作用する曲げモーメントへの影響を抑制する信頼性の高い支持構造である。

また、シングルシャフト構成のコンバインドサイクル機への適用を考慮し、高中圧タービンの前部軸受には、ロータでの発生トルクを前方の発電機に伝えることが可能な複合軸受を採用した。この軸受はスラスト軸受部の車軸径が大きく、スラスト軸受とジャーナル軸受の機能を併せ持つ軸受である。

3.4 固定点、伸びおよび伸び差

本タービンの各軸受台には、直接基礎にアンカーボルトで固定する固定式軸受台を採用した。

高中圧ケーシングは前部軸受台で軸方向に固定されており、低圧外部ケーシングは復水器上部に溶接接合され固定

図8 シングルポイント軸受支持構造

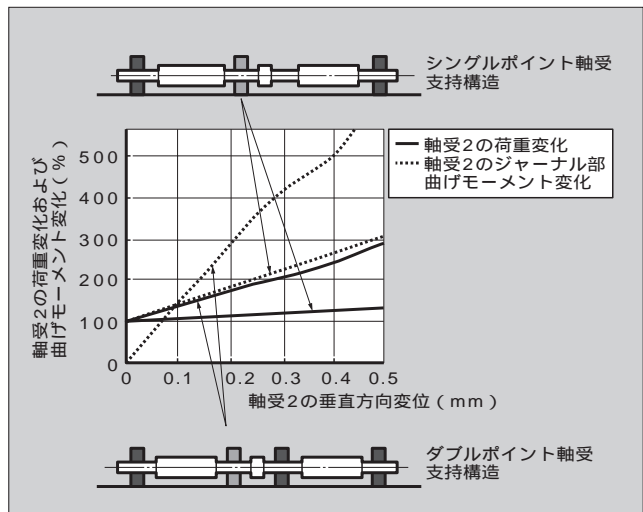
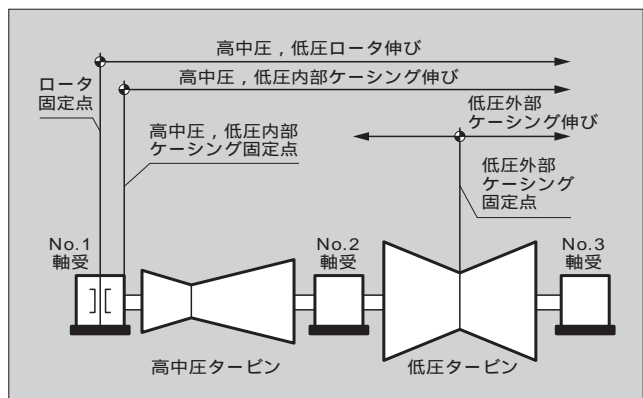


図9 固定点および伸び



されている。また、高中圧外部ケーシングは、前述のように低圧内部ケーシングと連結されており、高中圧ケーシングの伸びをそのまま低圧内部ケーシングへ伝える構造としている。一方、ロータは前部軸受台内のスラスト軸受にて軸方向に固定されている（図9）。

ロータと各内部ケーシングは、共に高中圧前部軸受台を基点として低圧方向に伸びるため、ケーシングとロータの発生伸び差は合理的に抑えられており、特に低圧タービンでの伸び差抑制に効果的である。この結果、本構造での発生伸び差は、低圧内部ケーシングが復水器中心に固定された構造での伸び差と比較して大幅に減少した。この伸び差の減少は、起動をはじめとした運用上の制限を緩和するとともに、性能の面からも有利である。

3.5 ラビリンス構造

回転部と静止部の蒸気シールには、アクシャルタイプのラビリンス構造を採用した。ラビリンス部の隣接するシールフィン間の軸方向すきまは、発生する伸び差の量によって制限される。そこで、固定点に近い高圧部のように伸び差が小さい部位と、伸び差が比較的大きな低圧部とで2種類のラビリンス構造（図10）を使い分け、蒸気シール性能を保持しながら、伸びの制限に対応させた。

3.6 主要弁配置

再熱タービンでは、主蒸気と再熱の二つの蒸気流入部を持つことから、主要弁のタービン本体回りへの配置はスペース的に困難な場合が多く、タービフロア階下に別置きされ、タービンへは連絡配管でつなぐのが一般的な方法である。

本タービンでは、信頼性とメンテナンス性を考慮したうえで、主蒸気弁のケーシング直載化と再熱蒸気弁のケーシング直結化を図り、タービン全体のコンパクト化と配管スペースの確保を図った（図11）。

3.7 衝動翼および反動翼

(1) 衝動翼

コンベンショナル用のタービンには、高圧部初段に衝動

段を採用した。この衝動翼には大きな熱落差が負荷され、さらに高圧高温蒸気が部分挿入されるため、大きな蒸気衝撃力が作用する。

衝動翼（11% CrMoVNbN）には、2枚の衝動翼を脚部とシュラウド部（囲い輪部）で溶接し、脚部の周方向蒸気力に対して十分な強度を確保したツインタイプ衝動翼（図12）を採用し、蒸気励振力に対する信頼性を確保した。また、制御段ノズルは、周上360°にわたって内部ケーシングに植え込まれたフルアークノズル構造を採用し、部分負荷から定格負荷までの広範囲にわたって高効率化を実現した。

(2) 反動翼

反動翼には、従来翼に比べて約1%の効率向上を図ったインテグラルシュラウド式高効率反動翼（図13）を採用した。一体の削り出し構造であるインテグラルシュラウド翼は、シュラウドをリベット止めする必要がないため、リ

図11 弁配置図

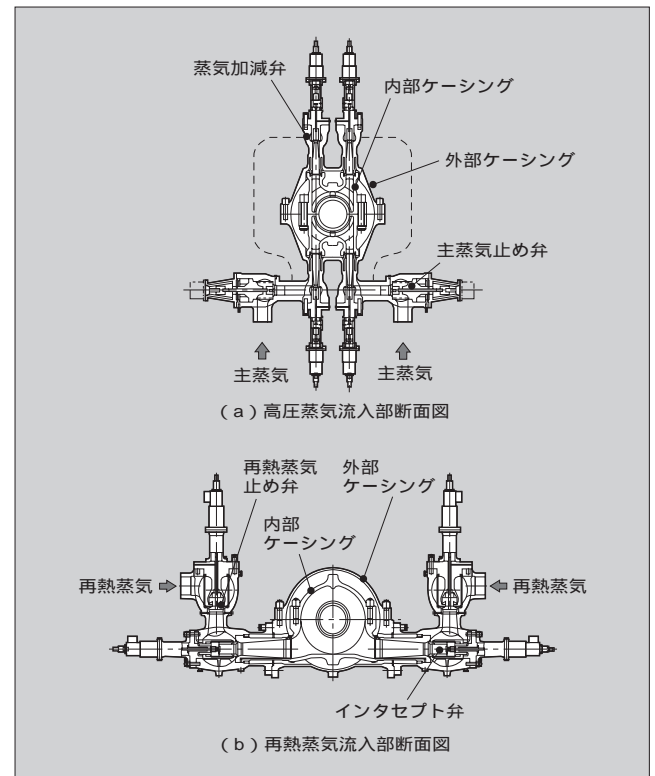


図10 ラビリンス構造（グラウンド部、翼部）

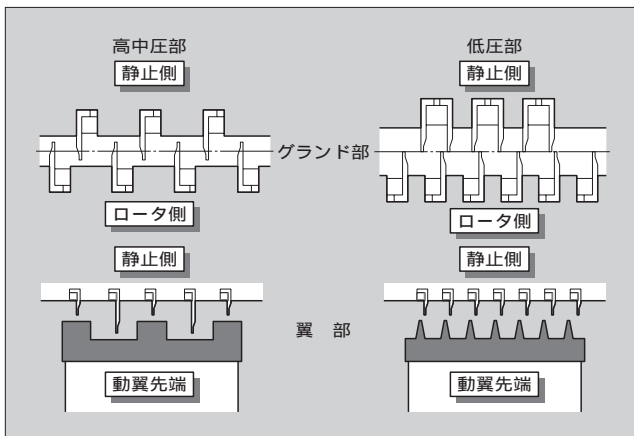


図12 ツインタイプ衝動翼

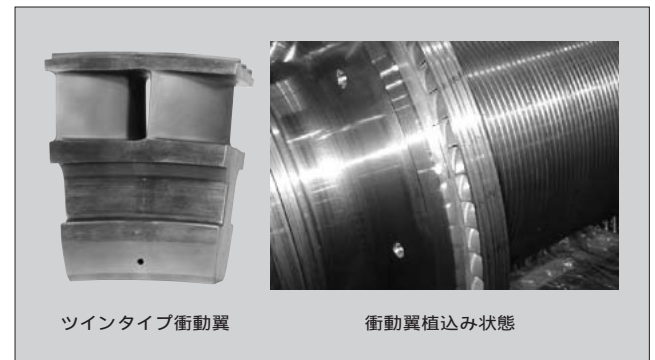
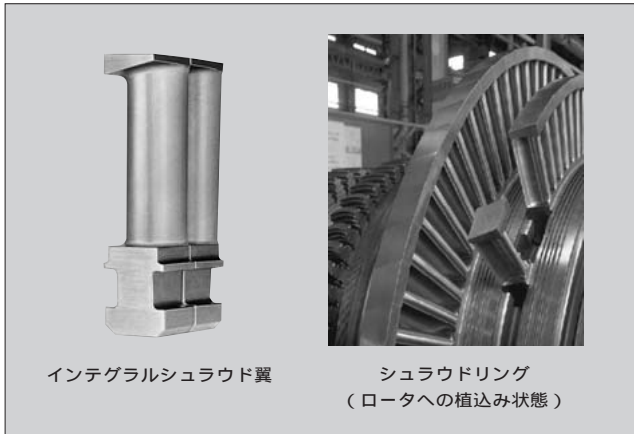


図 13 インテグラルシュラウド反動翼



ベット頭部加工に伴う残留応力の発生がなく、運転中のテノン部破損の危険性を排除している。また、ロータに植え込まれた状態でのシュラウドは、リング状に密着したシュラウドリングを形成する。このシュラウドリングはシュラウド同士の間摩擦によるダンピング効果を発揮し、蒸気励振力に対して高い信頼性を確保している。

3.8 低圧翼

低圧翼には三次元タイムマーキング法を用いて開発した高効率新型低圧翼を採用した。

最終段静翼には周方向に曲率を持ったリーンラジアル静翼を採用し、最終2段動翼はシュラウドやレーシングワイヤなどを一切使用しないフリースタンディング翼(図14)を採用した。フリースタンディング翼はリベッティングに伴う残留応力やレーシング・ワイヤ貫通部の応力集中を排除している。個々の動翼は共振モードが単純で調律することができるため、運転中の翼の共振を確実に防止することができる。さらに隣接翼との接触がないため、グループ連成振動などの危険性は皆無である。この結果、低圧翼の高い信頼性を確保すると同時に、定格回転速度の -5 ~ +3 %の広い範囲での連続運転を可能としている。

3.9 全電気式保安装置

タービン前部に発電機が置かれるシングルシャフト構成のコンバインド向けへの適用を考慮し、従来機ではタービン前部軸受台内に設置していた非常调速機やスラスト保護装置などの機械式保護装置を電気式とし、同様に前部軸受台内に設置していた車軸駆動式主油ポンプも別置電動式とした。この結果、前部軸受台回りの油配管は最小限となり、メンテナンス性も大幅に向上した。

電気式保護装置の概念図を図15に示す。

3.10 電油式アクチュエータ

ガバナには富士電機製のプログラブルコントローラ(MICREX)を使用したデジタルガバナを採用し、弁操作機には高圧制御油対応の個別制御式アクチュエータを新規に開発し採用した。

図 14 フリースタンディング低圧翼

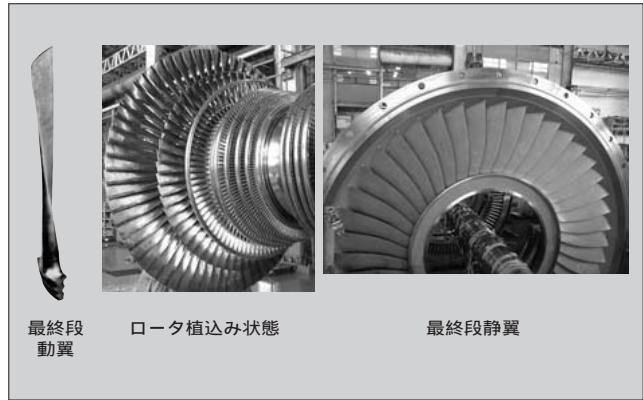
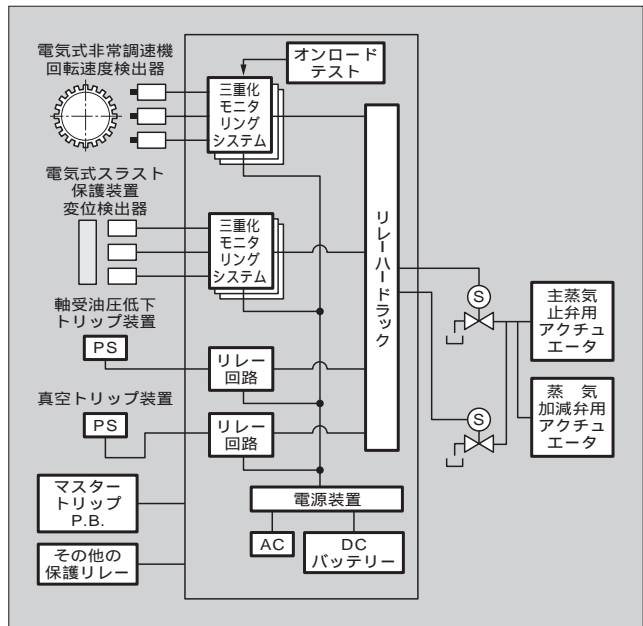


図 15 電気式保安装置の概念図



このデジタルガバナと個別制御式アクチュエータとの組合せにより、制御系の自由度がさらに増し、通常運転時のきめ細かな制御と自動弁作動試験や全周挿入起動などの複雑な制御操作を可能にした。

なお、油供給システムとしては、各要求機能に合致した高圧制御油システムと低圧潤滑油システムからなるセパレート油システムを採用した。制御油システムは2 x 100 %のピストン式電動ポンプによる16 MPa高圧油システムであり、潤滑油システムは2 x 100 %の遠心式電動ポンプによる550 kPaの低圧油システムである。

4 あとがき

以上、新規に開発した中容量型再熱蒸気タービンについて、その特徴を中心に紹介した。

環境問題と電力の自由化により、高効率化と低コストの市場ニーズがさらに強くなっていくと予想される現在、信頼性向上と低コスト高効率化、短納期化に向けて、さらに技術開発を推進する所存である。



*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。