

# 富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL



2000 VOL.73

## 火力・地熱発電設備特集



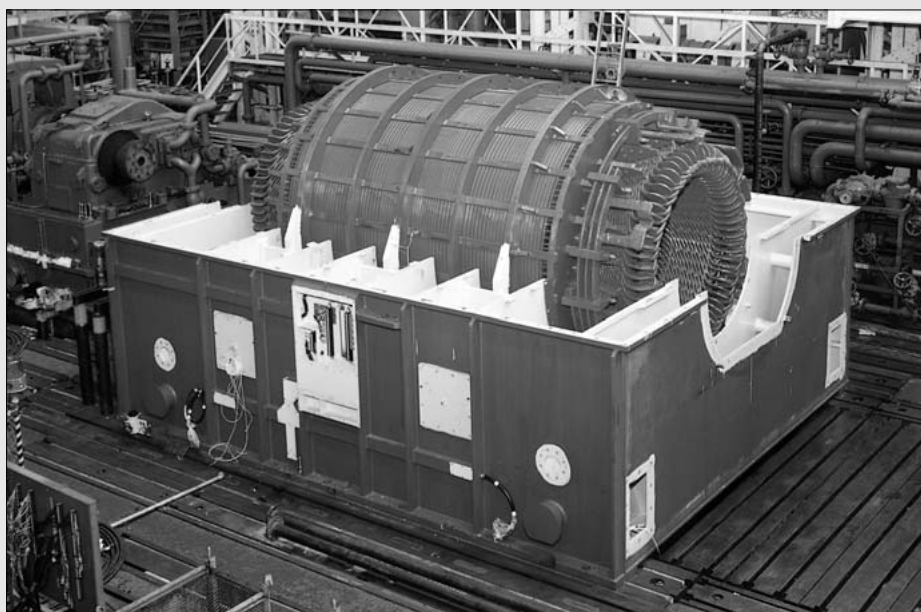
富士電機は小容量から大容量までのタービン発電機を数多く納入し、社会に貢献しています。

**FUJII**  
ELECTRIC



周波数 50 Hzでは国内最大容量 670 MVAの水素冷却タービン発電機

豊富な実績と高度な技術に基づいた空気冷却タービン発電機、水素冷却タービン発電機は、優れた性能と信頼性で、多くのお客さまから高い評価をいただいております。



自家用発電設備向け 157 MVA空気冷却タービン発電機の全含浸済み固定子

# 富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

12  
2000 VOL.73

## 火力・地熱発電設備特集

### 目次

電気はいつでも手に入れることができるのか 森安 正司	636 (2)
火力・地熱発電設備の現状と展望 赤尾 武彦 ・ 西崎 泰博	637 (3)
IPP 向けコンバインドサイクル発電設備 山形 通史 ・ 武田淳一郎 ・ 山本 隆夫	639 (5)
富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービン 酒井 吉弘 ・ 中村 憲司 ・ 和泉 栄	644 (10)
中容量再熱蒸気タービン 浅野 誠一 ・ 高橋 陽一 ・ 森山 高志	650 (16)
地熱タービン 加藤 佳史	655 (21)
電源開発(株)磯子火力発電所新 1 号発電機 鈴木 忠雄 ・ 長谷 徹 ・ 新倉 仁之	660 (26)
大容量全含浸 2 極空気冷却タービン発電機 木村 誠 ・ 日和佐寛道 ・ 阿久津信雄	665 (31)
コンバインドサイクル発電所用昇圧変圧器 安部 正彰 ・ 松瀬 圭介 ・ 大野 佳雄	669 (35)
タービン・発電機用統合制御装置 小島 広司 ・ 高村 隆太	673 (39)
火力発電所向け総合運転支援・設備保全管理システム 横瀬 主税 ・ 奈良 悟	677 (43)
発電機の余寿命診断と更新技術 日下 肇 ・ 中山 昭伸 ・ 白石 明	681 (47)
蒸気タービンの予防保全技術 加藤 雅喜 ・ 中村 憲司 ・ 住廣 敦夫	685 (51)
最近登録になった富士出願	643 (9), 664 (30), 692 (58)
技術論文社外公表一覧	693 (59)
富士時報 VOL.73 2000 (平成 12 年) 総目次	(巻末 4 ページ)

表紙写真



社会が利便性を追求し続ける限り電気の利用は増大し、地球規模では年々巨大な電力需要が生み出されている。その需要にこたえると同時に、環境負荷を低減することが発電技術に課せられた使命である。このなかで火力発電分野では、エネルギー効率の向上と地熱発電システムの発展が重要な使命である。

富士電機は日本初の超臨界圧発電所を完成させるなど、高効率プラントを開発してきた。また、地熱発電の分野でも大容量タービンを開発し、経済性の向上に貢献してきた。

表紙写真は高温・高圧大型火力発電所を遠景に、高効率化・大容量化の要(かなめ)であるタービンロータを示している。



# 電気はいつでも手に入れることができるのか

森安 正司 (もりやす しょうじ)  
関東学院大学工学部教授 工学博士



本号は20世紀最後の『富士時報』で、しかも電力分野の特集号であることは大変興味深い。現在日本の電力システムの安定度は世界一のレベルで、停電して困ったという経験がない。これは電力会社および機器を納入するメーカーのたゆみない努力の積み重ねによって得られたものである。

電力機器は20世紀に芽を出し花を咲かせ成熟した技術であるが、豊かな市民生活をする上で最も重要な電力を供給する機器として21世紀においてもさらに発展し、重要な役割を果たし続けるであろう。

さて、水、蒸気およびガスのエネルギーを利用する水車および熱機関は18世紀後半以降の産業革命の担い手として発展し利用されてきたが、これと発電機を結びつけて得られる電力の利用は1880年代以降である。

当初は直流発電機が主流で、交流発電機では単相または二相発電機が最初に検討された。現在の三相交流発電機が現れる画期的な出来事は、1891年に行われたフランクフルト万国博覧会である。このときにネッカー川沿いのラウフェン水力発電所から175 km離れたフランクフルト万国博覧会会場に三相交流電力が送電された。

この水車発電機は横軸、210 kW、95 V、40 Hz、150 min<sup>-1</sup>、32極機の横軸回転界磁形で、鉄心内径1,752 mm、鉄心長380 mmであった。これを現在の技術で製作すると約1,300 kWの出力が可能であるので、100年間で出力密度が約6倍に増大したことになる。

一方、2極タービン発電機は初期には突極界磁・回転電機子形が製作されたが、現在のような2極円筒回転界磁形のタービン発電機(250 kW、3,900 min<sup>-1</sup>、65 Hz)が最初に製作されたのは1901年である。

発電所で作る電力は当初は限られた地域の用途に用いられたので、25 Hzから65 Hzまでの種々の周波数の発電機が作られた。これは既設計品の回転速度を変更して必要な出力を得ていたことも一因である。電力の供給範囲が拡大し系統連係するに伴って、周波数は順次統合され、現在の50 Hzと60 Hzになったのである。

電力機器は20世紀、特に戦後において著しい技術進歩を遂げ、現在ではスイッチをひねれば何時でも間違いなく電気を得られるようになった。そのため、電力は現在では空気と同じ存在で、最も重要なものであるが国民の関心が薄れているように思われる。しかし、原発に対する国民の抵抗感、石油資源の枯渇、炭酸ガス排出量の抑制、水力発電所立地点の限界などのため、21世紀には空気と同じようにいつでも簡単に電気を手に入れることが困難な時代が遠からず来るであろう。これを和らげるためには、原子力エネルギーの積極的な活用、火力発電所における炭酸ガス排出量の低減と吸収処理技術、昼夜負荷平準化技術および需要機器の省エネ技術などに対して技術者のたゆみない努力が続けられるであろう。中近東などの砂漠地帯の豊富な太陽光および太陽熱発電や南米の豊富な水資源を利用した水力発電から電気分解によって得られる水素エネルギーが石油に代わって輸入され、これを火力発電所のエネルギー源として活用する時代が来るのではなからうか。また、現在は産学あげての情報志向であるが、電力分野でのテクノロジーシュリンケージがおこらないように、技術者の育成と温存が国として必要だと思う。

最後に技術者についての私の考えを述べる。いつの世でも新入社員はその時代で脚光を浴びている部門に配属されることを望むものであるが、どの部門であれ配属された職場は自分に与えられた天職と考えるべきではなからうか。

そこで努力し、技術を磨いて担当する仕事を発展させれば、いつの日にか人生の勝利者になれるだろう。成功は自ら掴み取るものであるが、努力した者には向こうからささやきかけてくるものである。ただし、努力の結果として、その技術分野では学会・業界または少なくとも会社内で第一人者であると自他ともに認められるような技術レベルでなければならない。その証として資格を取るのには励みになるであろう。また、技術に自信があれば十分な検討のもとで、失敗を恐れず新しいことに挑戦するバイタリティも必要である。

# 火力・地熱発電設備の現状と展望

赤尾 武彦(あかお たけひこ)

西崎 泰博(にしざき やすひろ)

## 1 まえがき

富士電機の火力発電設備は、1955年に事業を開始して以来、機械駆動用の蒸気タービンから事業用の大容量蒸気タービン発電設備まで、439ユニット(約2,100万kW)の実績を有している(図1参照)。この間、従来米国系で占められていた日本の火力発電技術に対して、つぼ形タービン、タービンバイパスシステムによる所内単独運転およびDSS(Daily Start & Stop)運転技術、また今ではごく一般的に採用されるようになった変圧運転方式など、欧州系技術を導入する役割も果たしてきた。これらの技術は全6台の600,000kW超臨界圧蒸気条件の高効率大型石炭火力発電設備の実績につながっている。

もともと、ドイツ・シーメンス社との技術提携によってスタートした富士電機の火力発電事業ではあるが、地熱および中容量蒸気タービンの分野で独自の技術を開発し、得意機種として成果をあげてきた。地熱発電で、最近の10年間では全世界の約42%の受注シェア(図2参照)を獲得しており、また中容量蒸気タービンは独立系発電事業者(IPP)用・自家用発電設備として実績を重ねている。

環境および経済性の面から今後ますます重要性が増してくるガスタービン・コンバインドサイクル発電設備については、シーメンス社との協力関係を一層強化するなかで、1993年に(株)富士電機ガスタービン研究所向けの69,000kWの発電設備を完成させ、建設・運転・メンテナンス技術確立すると同時に、シーメンス社と共同で国内およびアジア地区での積極的な受注活動を行っている。

## 2 富士電機の発電設備の現状

### 2.1 大型石炭火力発電設備

1982年に、東北電力(株)から能代火力発電所1号機600,000kWを受注した。これには24.5MPa、538/566の超臨界圧蒸気条件と、つぼ形タービン、1,050mm(41.5インチ)の長大低圧翼を持つ4流の低圧タービンなどで構成されるHMNタービンを採用している。

海外でも1994年に、台湾の台塑石化股份有限公司から、台湾で初めてのIPP用として600,000kWの蒸気タービン発電設備4台を受注した。4台のうち3台はすでに営業運転に入っている。

さらに1997年に、電源開発(株)から磯子火力発電所新1号発電設備(600,000kW)を受注した。これはシーメンス社と協力して受注したもので、両社の工場で作成した機器

図1 蒸気タービンの受注実績

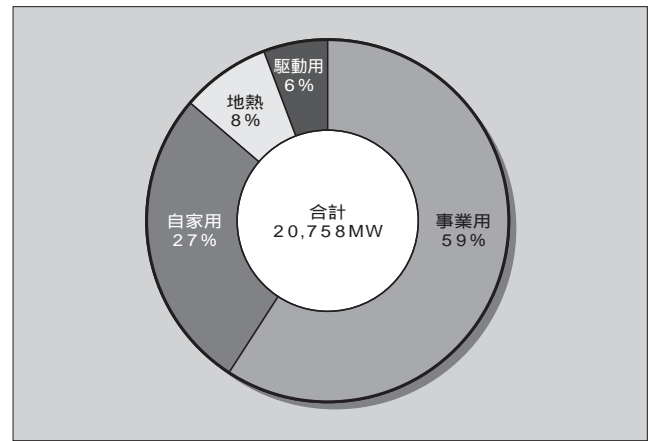
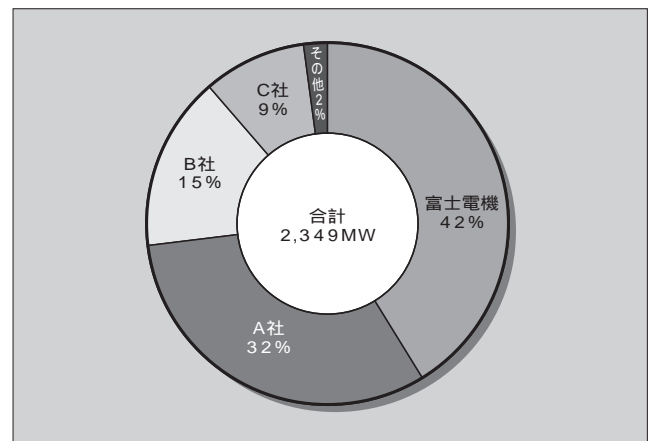


図2 最近10年間の地熱タービンの受注実績 (2000年6月現在、出典: McCoy Report)



赤尾 武彦

火力発電プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー火力事業部長。



西崎 泰博

火力発電プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー富士・シーメンスエネルギーシステム推進本部総括部長。

は現地に到着し、現在据付け工事中である。この発電設備は、25 MPa、600/610 と世界でも最高水準の蒸気条件と、1,150 mm (45.3 インチ) という能代火力発電所 1 号機よりさらに長大な低圧翼を利用し、低圧タービンを 2 流にするという最新技術を採用している。

## 2.2 地熱発電設備

豊富な地熱資源を有する環太平洋地域を中心に地熱の開発が行われてきた。富士電機も、反動タービンの、比較的遅い蒸気流速で高出力を得られ、不純物を含んだ地熱蒸気に適しているという特徴を武器に、米国西海岸地区や、フィリピン、インドネシアを中心とする東南アジアに、数多くの地熱発電設備を納入してきた。

住友商事(株)経由で1997年にマグマヌサンタラ社から、フルターンキー契約で受注したワヤンウインド地熱発電設備は、単機容量が 110,000 kW と世界最大で、2000年の8月末に引渡しを完了し、現在順調に運転を継続中である。

国内では、1997年に東京電力(株)から八丈島地熱発電所向けに同社初の地熱発電設備を受注し、1999年に引渡しを完了した。この設備は、容量は小さい(3,300 kW)ものの、離島での再生可能エネルギーを利用した発電設備として、環境保護に一役買っている。

## 2.3 IPP・自家用発電設備

IPP や自家用発電の多様なニーズに対しては、1 ケーシング非再熱蒸気タービン (FET)、再熱蒸気タービン (KN/HMN) と広範囲をカバーできる機種を有している。

国内では IPP 用発電設備として、(株)神戸製鋼所加古川製鉄所向け (58,000 kW)、住友重機械工業(株)経由の太平洋セメント(株)糸魚川工場向け (149,000 kW)、(株)ユービーイーパワーセンター向け (216,000 kW) など、FET/KN シリーズの機種を中心に着実に受注を重ねている。

海外でも IPP・自家用発電設備の受注実績を積み重ねているが、特に台湾では前述の台塑石化股份有限公司向けの 4 × 600,000 kW の発電設備以外にも、数多くの自家用発電設備を納入しており、台湾全土で35ユニット、433 万 kW の富士電機の発電設備が稼働している。

## 2.4 ガスタービン・コンバインドサイクル発電設備

1993年12月に運転開始した(株)富士電機ガスタービン研究所のガスタービン発電設備は、運転開始以来 1,000 回以上の起動を行い、累積等価運転時間も 33,000 時間に達した。その間何度か定期点検もを行い、当初の目的の、ガスタービンに関する運転、メンテナンス技術の確立に大きく寄与している。

シーメンス社と共同で1995年に富士・シーメンスエネルギーシステム推進本部を設立し、受注活動を継続してきたが、2000年になって某社から 200,000 kW の発電設備の内定を得るに至った。それ以外にも、海外のコンバインドサイクル発電設備用蒸気タービン発電機の受注実績も着実に増えつつある。

## ③ 今後の展望

火力発電は今後とも重要な電源であり、温室効果ガス削減などの課題はあるものの、電源構成の主軸であると予想されている。火力発電による環境インパクトを小さくするため、今後の発電設備技術は、蒸気条件の高温・高圧化、コンバインドサイクル化などによって発電効率の一層の向上が必要である。地熱発電設備も、すでに確立された再生可能エネルギー利用技術として、特に地熱資源の豊富な環太平洋地域では有望な電源である。日本においても、貴重な国産の再生可能エネルギーとして注目されている。

近年では建設費の低減と同時に、設備の経済的運用や保全費の抑制などによるコスト低減の強化が求められており、発電設備の予防保全も重要な課題の一つになっている。

富士電機では、プラント仕様の標準化、モジュラー化や主要構成機器である蒸気タービン、発電機の要素技術の開発のみならず、ライフサイクルコストを最小にするため、既納発電設備の履歴管理データベースの充実、最適な予防保全技術、寿命評価技術の開発などにより、予防保全への取組みを強化している。海外の顧客に対しても、専門の組織を作り、予防保全の強化に力を入れている。ここでは、予防保全のみではなく、IT 利用による運転支援、設備監視、設備診断なども行っていく。

また、製造設備面においても、最新鋭工作機械の導入や物流の改善などによる品質向上、納期短縮、コスト削減を狙って、エネルギー製作所(川崎市)内に建設中であったタービン、発電機の専用工場が完成した。最近の発電設備需要の急増に対して大きく貢献できるものと確信している。

## ④ あとがき

電力の自由化などによって多様化が進むと思われるニーズに対応するためには、幅広い機種・分野での技術開発が不可欠である。大型石炭火力発電分野やガスタービンコンバインドサイクル分野でのシーメンス社の技術の有効利用と、独自技術としての地熱発電用蒸気タービン、IPP・自家用発電設備、コンバインドサイクル用の中容量蒸気タービンおよび空気冷却式発電機の開発など、技術資源を有効に活用し、今後ともお客様に満足していただける製品とサービスを提供していく所存である。

## 参考文献

- (1) 山田茂登：最近の地熱発電設備の納入実績について，地熱，Vol.37，No.3，p.117（2000）
- (2) 真島俊昭：八丈島地熱発電所の建設計画について，地熱，Vol.35，No.4，p.32（1998）
- (3) 能勢正見ほか：富士電機ガスタービン研究所 69 MW 発電設備の概要と運転実績，火力原子力発電，Vol.46，No.470，p.66-72（1995）



# IPP 向けコンバインドサイクル発電設備

山形 通史 (やまがた なおふみ)

武田 淳一郎 (たけだ じゅんいちろう)

山本 隆夫 (やまもと たかお)

## ① まえがき

1995年電気事業法の改正で電力卸供給入札制度が導入され、それまで電力会社が専有していた市場の開放が始まった。翌1996年から電力卸供給入札が実施され、4年間で経過している。国内で実施されたこれまでの入札実績は、表1に示すとおりである。

また、2000年7月の電気事業法の改正で電力の小売り事業が自由化された。適用範囲は特別高圧電源に限られているが、商社や燃料会社などが電力小売り事業に参入を開始した。

このように、IPP (Independent Power Producer: 独立系発電事業者) と電力会社間で売電をめぐる競争が始まった。

以下、IPPのニーズに対応する富士電機とドイツ・シーメンス社 (富士・シーメンス) のコンバインドサイクル発電設備について紹介する。

## ② IPP 向けコンバインドサイクル発電設備の需要

IPP電源に求められているのは、発電単価が安いことおよび環境規制を確実にクリアできることである。発電単価の低減には、設備費の低減 (初期投資額の低減)、熱効率の向上 (燃料費の低減) および発電設備の信頼性・保守性の確保 (保守費の低減) が特に重要となる。

これまでの国内のIPPのベース電源には、安い石炭や重油と既設のインフラストラクチャーを利用した在来型の

火力発電設備が大半を占めてきた。

一方、国内の一日の電力需要変化は昼間と夜間の格差が大きく、DSS (Daily Start & Stop: 毎深夜停止起動) 運用のできる設備が求められている。急速起動が可能なガスタービンと小型の蒸気タービンの組合せで構成されているコンバインドサイクル発電設備は、短時間での起動が可能であり、この需要に対応が容易である。

また、従来型火力発電設備に比べて次の特長を持っているコンバインドサイクル発電設備の需要は、今後とも一層増加するものと予想される。

- (1) 建設コストが安く、建設期間が短い。
- (2) 定格負荷および部分負荷での熱効率が高い。
- (3) 環境特性がよい (NOx および CO<sub>2</sub> 排出量が少ない)。

## ③ 富士・シーメンスのコンバインドサイクル発電設備

### 3.1 コンバインドサイクル発電設備のラインアップ

富士・シーメンスのコンバインドサイクル発電設備の性能諸元例を表2に示す。

ガスタービン1台につき100~400MWクラスのラインアップであり、多軸についても系列化されている。送電端効率はいずれの場合も50% (LHV基準) 以上であり、3A形ガスタービン (VX4.3A) を採用した設備の送電端

表2 富士・シーメンスのコンバインドサイクル発電設備の性能諸元

モデル	形式	周波数	送電端出力	送電端効率
GUD 1S. V64. 3A <sup>*1</sup>	一軸	50/60 Hz	100 MW	52.4%
GUD 1. V84. 2 <sup>*1</sup>	別軸	60 Hz	160 MW	51.0%
GUD 1S. V84. 3A <sup>*2</sup>	一軸	60 Hz	267 MW	57.0%
GUD 1. V94. 2 <sup>*1</sup>	別軸	50 Hz	233 MW	51.5%
GUD 1S. V94. 2A <sup>*2</sup>	一軸	50 Hz	294 MW	55.2%
GUD 1S. V94. 3A <sup>*2</sup>	一軸	50 Hz	390 MW	57.3%

燃料はガスとし、低位発熱量 (LHV) 基準にて効率を算出。

\*1: 複圧非再熱式コンバインドサイクル

\*2: 三重圧再熱式コンバインドサイクル

表1 電力卸供給入札の実績

項目	年			
	1996	1997	1998	1999
募集容量	2,650 MW	2,855 MW	150 MW	1,000 MW
入札件数	100件	92件	5件	11件
入札容量	10,831 MW	14,254 MW	764 MW	2,510 MW
落札件数	20件	16件	2件	5件
落札容量	3,047 MW	3,118 MW	215 MW	1,000 MW

注 国内の全電力卸供給入札実績。落札辞退案件は反映せず。



山形 通史

火力発電設備のプラントエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー富士・シーメンスエネルギーシステム推進本部総括部技術部。



武田 淳一郎

火力発電設備のプラントエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー富士・シーメンスエネルギーシステム推進本部総括部技術部参与。



山本 隆夫

蒸気タービンの設計、ガスタービン発電設備のプラントエンジニアリングに従事。現在、電機システムカンパニー富士・シーメンスエネルギーシステム推進本部総括部技術部長。

効率は 57 % ( LHV 基準 ) を超える世界最高水準である。

主要機器であるガスタービンは、1994年に開発された 1,400 級の最新型 3A 形機 ( VX4. 3A ) と、1970 ~ 1980 年代に開発され運転実績豊富な 1,100 級の 2 形機 ( VX4. 2 ) が採用されている。シーメンス社の重負荷形ガスタービンのマーケットシェアは、最近では 30 ~ 40 % に達しており、世界各国の IPP 向けコンバインドサイクルにも数多くの納入実績がある。

3.2 標準プラント設計

富士・シーメンスのコンバインドサイクル発電設備は、基本仕様、現地要求仕様、顧客要求仕様に分けて、あらかじめ標準設計されている。

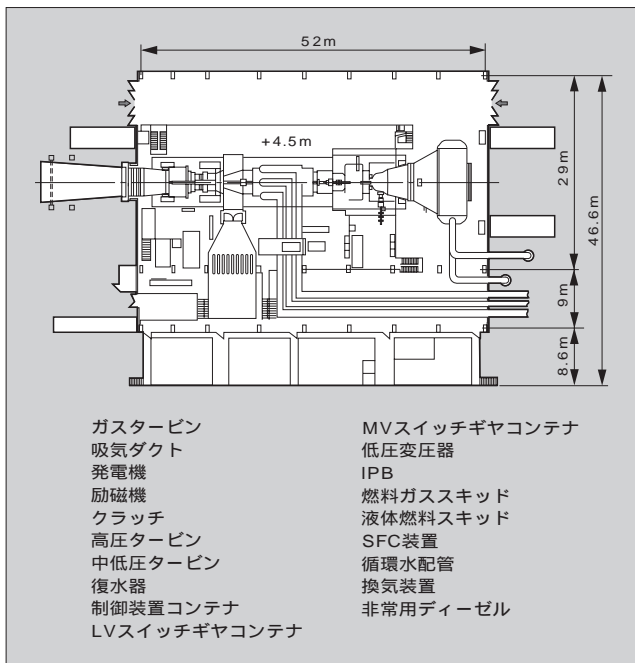
基本仕様はターンキーベースの供給範囲をカバーし、性能、経済性を最適化した標準として完成している。現地仕様および顧客要求仕様で変更が必要となる冷却水設備や二次燃料設備などは、オプションモジュールとして設備が標準設計されている。

このように最適化、標準設計を完了した基本仕様により、オプションモジュールを組み合わせることで、市場の要求に応じた幅広いプラント計画ができるようになっている。各モジュールの組合せを決めれば、三次元 CAD によって全体配置計画や、P&I ( Piping & Instrument )、機器リストなどの各種エンジニアリングが容易に遂行できる。

こうした取組みにより、実プラントのエンジニアリング時間や設備費が低減でき、顧客にもコストダウンの成果を享受してもらうことができる。

標準プラント設計された配置図を図 1 に示す。これを適用して全体計画された一軸形コンバインドサイクル発電設備の例として、図 2 に三次元 CAD 設計されたプラント ( GUD 1S. V94. 3A ) の外観、図 3 に実際のプラントの外

図 1 一軸形コンバインドサイクル発電設備の配置図



観を示す。

4 コンバインドサイクル発電設備の各機器の特長

4.1 パワートレイン

富士・シーメンスの一軸形コンバインドサイクル発電設備のパワートレインは、図 4 に示すようにガスタービン、発電機、蒸気タービンの順で配置され、次の特長を有している。<sup>(1)(2)</sup>

(1) パワートレインは床置き配置を採用

蒸気タービンに排気損失の少ない軸流排気方式を採用し、パワートレインを床置き配置としている。タービン架台が不要となるとともに、タービン建屋は 1 階構造とすることができ、従来の 3 階構造の建屋に比べて土木建築費用の大幅な低減が可能となった。

(2) クラッチの採用

発電機と蒸気タービンの間には、伸び差を吸収し自動着

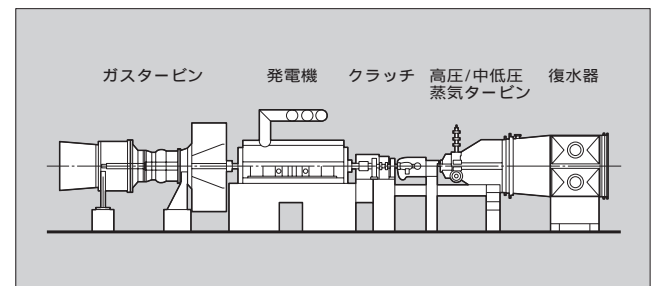
図 2 三次元 CAD 設計のプラントの外観



図 3 実際のプラントの外観



図 4 一軸形コンバインドサイクル発電設備の構成





脱のできるクラッチを設置している。これにより、ガスタービンおよび蒸気タービンは、伸び差やスラスト荷重に対して独立した設計が可能となり、標準タービンが適用できる。また、蒸気タービンとは無関係にガスタービンの起動・停止ができ、起動・停止ロスが低減できる。

(3) 静止形周波数変換装置 (SFC) の採用

ガスタービンの起動は、発電機を電動機として使用する静止形周波数変換起動方式である。起動用電動機などが不要で軸長が短くなり、全体配置を小さくしている。また、起動装置が電気設備だけで構成されるので保守が容易となる。

4.2 ガスタービン設備

シーメンス社のすべてのガスタービンに共通の特長は、実証済み技術に裏付けられた信頼性の高さと保守の容易さである。

(1) 軽量・高剛性のディスクタイプロータ

半径方向に切られたのこ歯状継手(ハースセレーション)を介して各ディスクを1本のボルト(センタータイボルト)で結合したロータは、各ディスクが個々に熱膨張した際にも拘束熱応力を生じることがなく相互の芯(しん)を保持する自己調芯機能を有している。熱時定数が小さく振動特性も優れているので、単体では最短12分での起動が可能である。

また、すべての動静翼は、ロータをつり出さずに交換、点検ができる。

(2) 大型燃焼室内でのマルチバーナ燃焼方式

均一な燃焼温度分布が得られ、低NOx、高燃焼効率に有利な大型燃焼室内でのマルチバーナ燃焼方式を採用している。ハイブリッドバーナは気液両燃料での予混合燃焼が可能である。天然ガス燃焼時の出口NOx濃度は21~30ppm(16% O<sub>2</sub> dry)で、アンモニアを使った有触媒脱硝装置により煙突出口では3ppm以下が達成できる。

また、保守・点検時には、マンホールから燃焼室内に入りバーナやタービン初段翼などの高温部品を直接目視点検できるので、短時間で確実な点検ができる。

これらに加えて、二軸受支持方式、水平二分割構造ケーシング、圧縮機端駆動、タービンは軸流排気、などの構造的特徴は、数十年の実証済み技術である。

最新型の3A形ガスタービン(図5)では、圧縮機翼列に三次元設計の拡散制御翼列、燃焼器にアニュラー形構造、タービン動翼に単結晶翼、タービン翼冷却には最新のフィルム冷却構造を採用し、高温度化、高効率化を達成している。

4.3 蒸気タービン設備

蒸気タービン設備は、軸流排気式蒸気タービンと軸流復水器の採用で排気損失を低減させ、高効率かつ経済的に優れた設備としている。各プラント形式と排気圧力に応じて低圧翼の選定とモデルの標準化が行われている。

三圧再熱形に採用される蒸気タービン(高圧はつぼ形、

中低圧は軸流排気式)の断面図を図6に示す。

4.4 発電機設備

発電機は、発電機容量に応じて空気冷却式と水素冷却式によって標準化している。一軸式のGUD 1S. V84. 3AおよびGUD 1S. V94. 3A用の大型発電機は効率重視で水素冷却式を採用し、それ以外の発電機は設備費と保守性に優れた空気冷却式を採用している。

4.5 計装制御システムおよび電気設備

計装制御システムは、シーメンス社製の発電プラント用プロセス制御システム「テレパームXP」を採用している。テレパームXPを採用した場合の特長としては、

- (1) ソフトウェア、ハードウェアの高度なモジュール化と柔軟な拡張性を持つ。
- (2) 国際水準の基本ソフトウェア(Windows<sup>注1</sup>やUNIX<sup>注2</sup>な

注1 Windows : 米国 Microsoft Corp. の登録商標

注2 UNIX : X/Open Company Ltd. がライセンスしている米国ならびに他の国における登録商標

図5 3A形ガスタービン

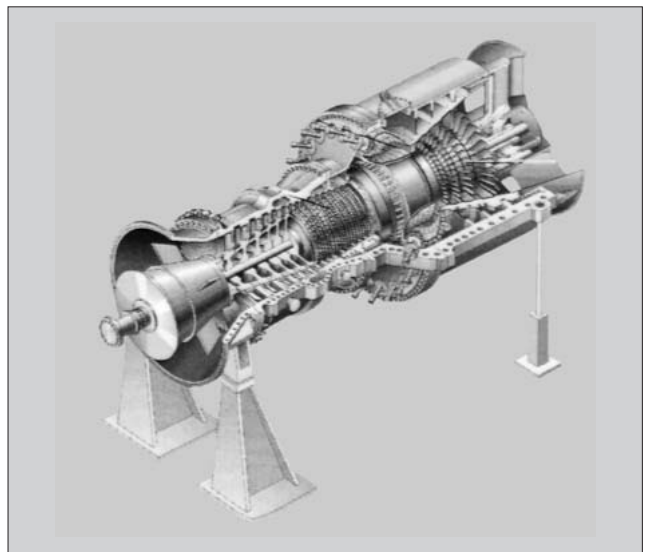


図6 三圧再熱形軸流排気蒸気タービン

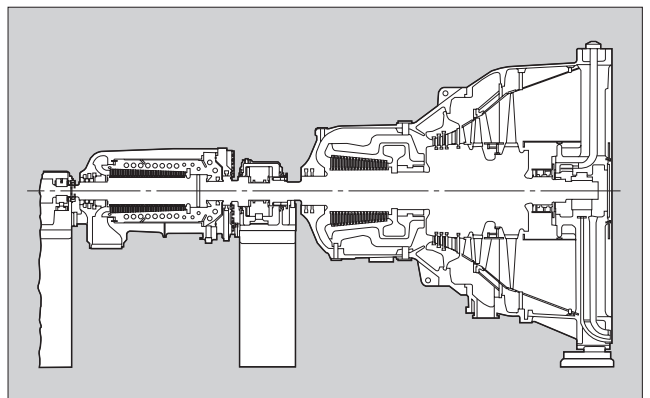


図7 テレパーム XP の階層構成の制御システム概念図

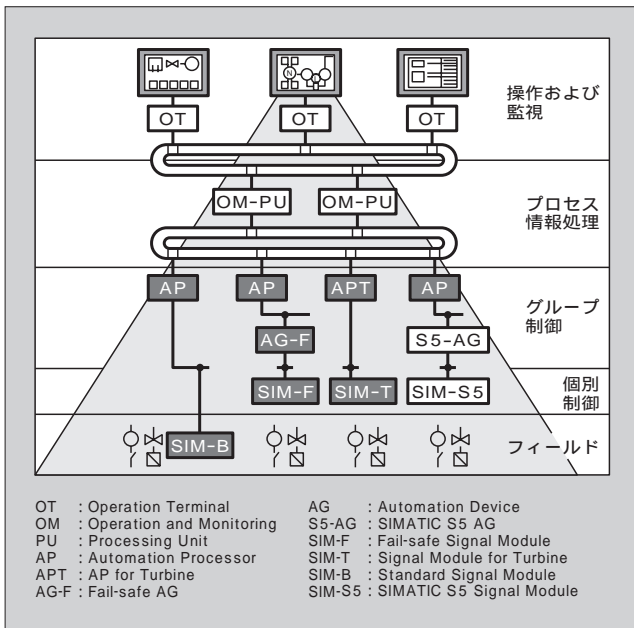
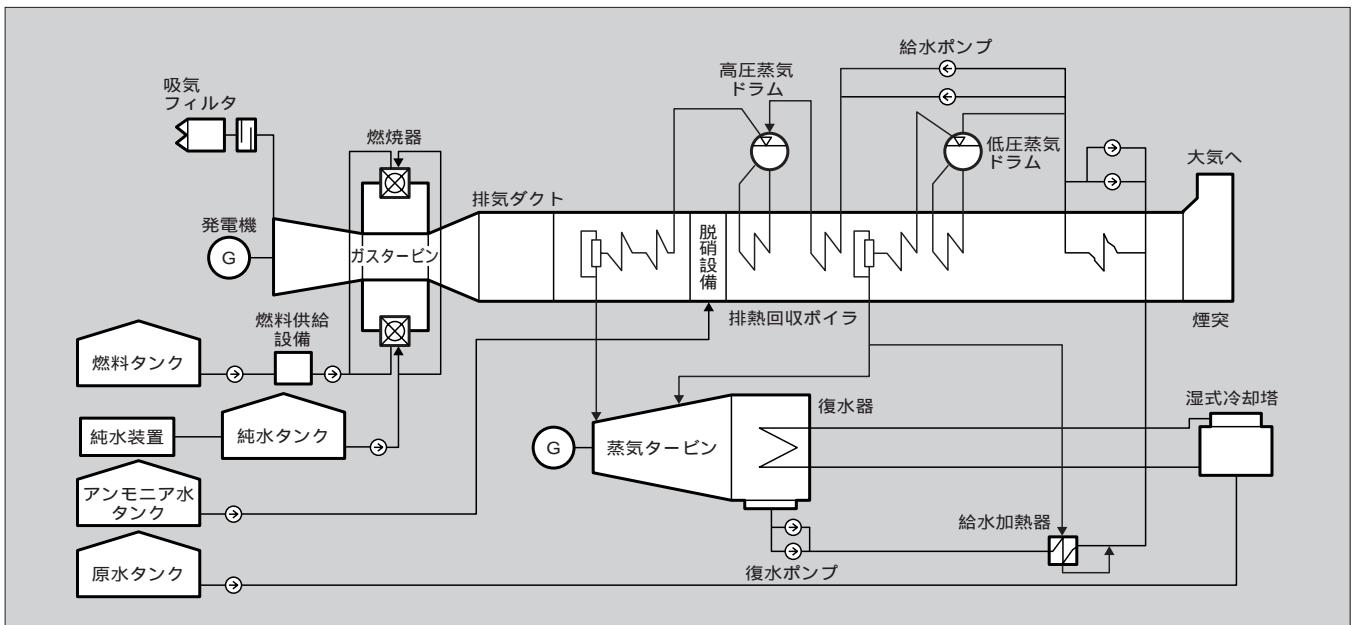


図8 電気制御装置収納コンテナ



図9 某IPPコンバインドサイクル発電設備の概略系統図



ど)とオープンコミュニケーションを採用している。  
 (3) 統一された MMI (Man Machine Interface) による操作, 監視, 管理ができる。  
 などがあげられる。

図7にテレパーム XP の階層構成の制御システム概念図を示す。

電気制御装置は, 図8に示すようなコンテナ収納式を採用しており, 建屋を必要としない。これにより土木建築費を低減している。また, 工場での配線, 組立および試験を行い完成度を高めることで, 現地での据付け, 試運転工程を短縮するとともにトータルコストダウンを図っている。

5 某社向けコンバインドサイクル発電設備

富士電機は, 1999年度の IPP 入札で落札された某社コンバインドサイクル発電設備の内定を得ている。表3に示すこの設備は, 富士・シーメンスが日本国内に納入する初

表3 IPP 発電設備の概要

項目	諸元
出力	約200 MW
プラント	別軸形コンバインドサイクル
ガスタービン	開放サイクル一軸形 (V94.2形ガスタービン)
蒸気タービン	混圧復水式
発電機	空気冷却同期発電機
冷却方式	湿式冷却塔
使用燃料	灯油
運転パターン	利用率 : ミドル30% 年間運転日数 : 223日 運転パターン : DSS 運用 運転時間 : 12時間/日
納期	2006年5月完工

のコンバインドサイクル発電設備となる。

この発電設備の特長は次のとおりである。

- (1) ガスタービンは信頼性を重視し、納入・運転実績の豊富な V94.2 形ガスタービンを採用している。
- (2) DSS 運用のため、起動・停止の損失、および停止中の所内動力の最小化を図った設備計画としている。
- (3) 蒸気タービンは、全周噴射絞り制御方式および軸流排気方式によって高効率を確保している。
- (4) 排熱回収ボイラは、ボイラ循環ポンプの不要な横形復圧式自然循環形ボイラを採用している。
- (5) 冬季の白煙防止のために、乾湿併用形冷却塔設備を採用している。
- (6) シーメンス社製制御装置を採用している。

このコンバインドサイクル発電設備の概略系統図を図 9 に示す。

⑥ あとがき

電力需要は今後も確実に増加することから、コンバイン

ドサイクル発電設備の建設は増加するものと思われる。また、在来火力発電設備が老朽化し更新する時期を迎えているが、新設するよりも少ない投資で高効率化ができるリパワリング案件も今後増加していくものと予想される。

一方、設備費の低減や効率向上、さらに環境問題の解決などの要求は、競争によりさらに厳しい課題となっていく。

今後ともコンバインドサイクル発電設備を顧客に満足していただける形で提供できるよう、富士・シーメンスが一体となって努力する所存である。

参考文献

- (1) Balling, L. et al. : The New Generation of Advanced GUD Combined-Cycle Blocks, Power Gen. Europe 95 (1995)
- (2) 明畷市郎：シーメンスの最新型コンバインドサイクルプラント，日本ガスタービン学会誌，Vol.27，No.3，p.146-152 (1999)
- (3) 吉川修平・山本隆夫：富士・シーメンスガスタービン，火力原子力発電，Vol.46，No.10，p.1181-1187 (1995)

最近登録になった富士出願

〔特 許〕

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
3097375	三相電流検出回路	松本 吉弘	3099542	交流入力振巾のデジタル推定演算方法	上部 誠二 新井 健司
3097394	回路遮断器の内装付属品表示装置	三浦 正夫 内田 直司 小嶋明比古	3099557	ダイオード	桜井 敬二
			3099577	有機薄膜発光素子	菅田 好信 黒田 昌美
3097610	誘導機可変速駆動装置	松本 康 大澤 千春 水上 哲也	3099582	自動販売機における情報収集方法	川崎 一哉
			3099584	表面加圧形半導体圧力センサの製造方法	山崎 高弘 石川 建司
3097628	光記録媒体	山崎 幹夫 菅野 敏之	3099585	報知装置	乾 大輔
3099407	リン酸型燃料電池の水処理システム	山本 修 小澤 芳明	3099586	空き缶回収機	清藤 真次 宮尾 哲也 永田 和重 垣内 弘行 岩本 昌三 橋口 勝敏
3099429	IPL 処理におけるファイルデータの保存方法	寄田 浩司			
3099487	伝送端末の非回線・光交信装置	沼上 毅			
3099529	有機薄膜発光素子	菅田 好信 白石洋太郎 黒田 昌美 古庄 昇	3099603	測距装置	森 賢一
			3099604	可撓性光電変換モジュール，その接続方法およびその製造装置	吉田 隆



# 富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービン

酒井 吉弘(さかい よしひろ)

中村 憲司(なかむら けんじ)

和泉 栄(いずみ さかえ)

## ① まえがき

蒸気タービンが「成熟機械」と言われるようになって久しいが、近年、蒸気タービンの技術開発のスピードはむしろ加速している感があり、技術的なブレークスルーが行われつつある。無論、蒸気タービンの開発は、一朝一夕にしてなるものではなく、長期にわたる地道な努力の積み重ねが今日、成果となって実を結んでいるものであることは言うまでもない。

富士電機とドイツ・シーメンス社(富士・シーメンス)は緊密な協力関係のもとに、大容量蒸気タービンの技術開発を絶え間なく着実にやってきた。その成果の一端を紹介する。

## ② 技術開発の重点

富士・シーメンスの大容量蒸気タービンの技術開発は、大容量タンデムコンパウンド機(単軸くし形タービン)の開発、蒸気条件の高温・高圧化、およびタービン内部効率の向上を重点課題として推進されてきた。以下に富士・シーメンスの大容量蒸気タービンの技術開発動向について概要を述べる。

### (1) 大容量タンデムコンパウンド機の開発

富士・シーメンスの蒸気タービンは一貫してタンデムコンパウンド機として大容量化を進めてきたことが特徴の一つである。タンデムコンパウンド機はクロスコンパウンド機(二軸並列形タービン)に比べて質量が軽く、設置スペースが少なく済むので、建屋を含む設備費を大幅に低減できるメリットがある。性能の面でも、最終段翼の長大化により、クロスコンパウンド機と同等である。

図1はシーメンス社の3,000 r/min用最大容量機の変遷を、わが国の記録機と比較して示したものである。1970年代にはすでに800 MW タンデムコンパウンド機が実用化され、またPWR(加圧水型原子炉)用としては3,000 r/min 1,100 MW タンデムコンパウンド機が1987年に運転を開始した。火力発電用としては現在、ドイツ・ニーダー

アウセム発電所 K ユニット 1,000 MW タンデムコンパウンド機が製作中である(2002年運転開始予定)。このタービンは最終段に鋼製の1,150 mm(45.3インチ)翼を採用しており、設計排気圧力が低い<sup>(1)</sup>ため6流排気として性能向上を図っている。

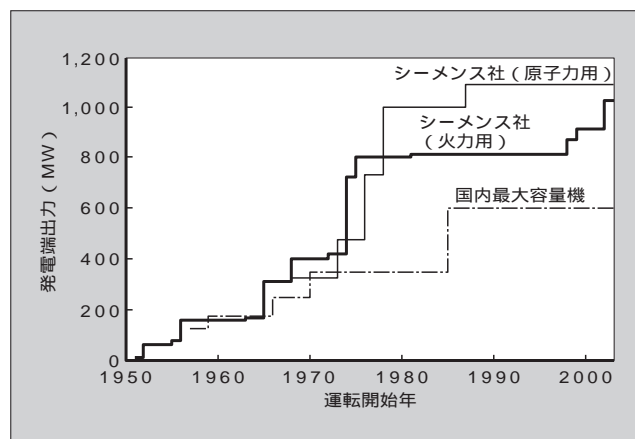
### (2) 高温・高圧蒸気条件の採用

シーメンス社は1950年代から、蒸気温度600~650の超高温タービンを14台製作・納入してきた実績がある。主に化学プラントのトップタービンとして用いられ、出力は最大でも125 MWと比較的小容量のタービンではあったが、超高温タービンの貴重な運転経験は現在の高温・高圧タービンの設計に反映されている<sup>(2)</sup>。

その後、経済性の観点からドイツ国内では高温化が進まず、蒸気温度は540以下が標準となった。しかし、エネルギー価格の長期的な上昇に加えて、環境問題、特にCO<sub>2</sub>排出規制がプラント熱効率の一層の向上を促しており、ドイツの新設機には再び超高温・高圧蒸気条件が採用される傾向にある。現在製作中のニーダーアウセム発電所 K ユニット 1,000 MW タンデムコンパウンド機には主蒸気圧力25.0 MPa、主蒸気温度580、再熱蒸気温度600の蒸気条件が採用されている。

高温化を進めるに際しては、タービンの基本的な構造は

図1 3,000 r/min用タンデムコンパウンド機の出力の変遷



酒井 吉弘

蒸気タービンの設計、開発に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部技師長。日本機械学会会員。



中村 憲司

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部担当課長。日本機械学会会員。



和泉 栄

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担当課長。ターボ機械協会会員。

従来と変わらず、材料のグレードアップによって対応することにより、高い信頼性を確保している。

(3) タービン内部効率の向上

蒸気条件の高温・高圧化と併せて、蒸気タービンの内部効率を向上させることも、発電プラントの熱効率向上のために重要である。富士・シーメンスの蒸気タービンは反動段の長所を生かした高効率タービンであるが、後述する三次元反動翼や新世代低圧翼の採用などにより、タービン効率の飛躍的な向上が実現された。

富士・シーメンスが電源開発(株)から受注し現在鋭意据付け中の磯子火力発電所新1号600MW蒸気タービン

(主蒸気圧力 25.1 MPa, 主蒸気温度 600 , 再熱蒸気温度 610 )には、上述した技術開発の成果が生かされている。

③ 高温タービン用材料の開発

シーメンス社における高温タービン用材料の開発は、EC諸国の共同研究である COST501 プロジェクトの一環として行われてきた。

COST501 プロジェクトは 600 ~ 620 級の蒸気発電プラントの実用化を目的として、1983 ~ 1997年に EC 諸国のタービンメーカー、ボイラメーカー、鉄鋼メーカー、電力

表1 改良12%Cr鋼試作ロータの化学成分

化学成分 鋼種	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	V	W	Nb	B	N
B	0.17	0.07	0.06	0.007	0.001	0.012	9.34	1.58	0.12	0.27	-	0.059	0.0080	0.015
E	0.12	0.10	0.45	0.008	0.002	0.008	10.39	1.06	0.74	0.18	0.81	0.045	0.0002	0.052
F	0.11	0.03	0.52	0.010	0.005	0.006	10.22	1.42	0.58	0.18	-	0.05	0.0012	0.056

図2 改良12%Cr鋼(E鋼)試作ロータの機械試験結果

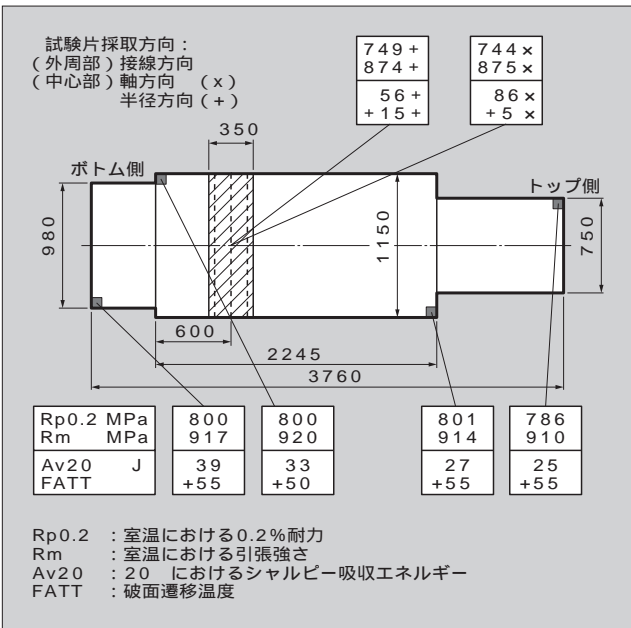


図4 製作中の改良12%Cr鋼(F鋼)試作ロータ

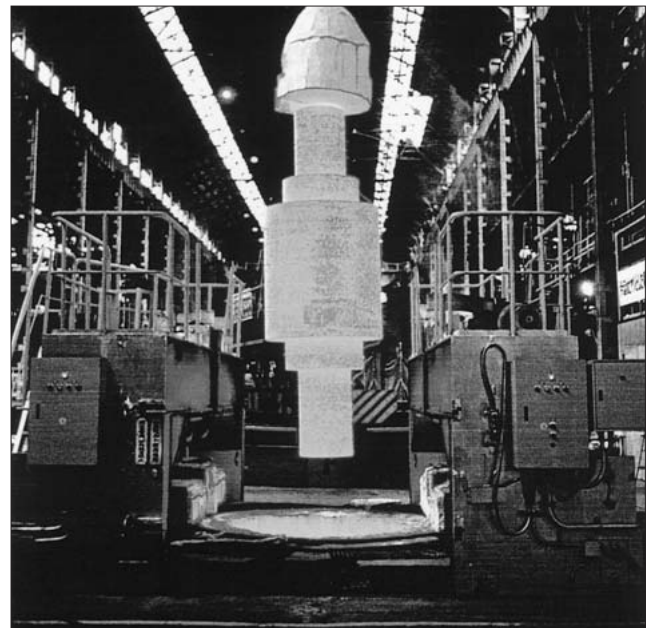


図3 改良12%Cr鋼試作ロータの長時間クリープ試験結果

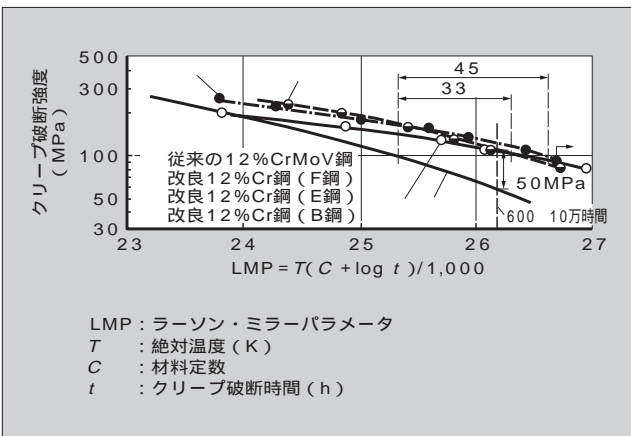
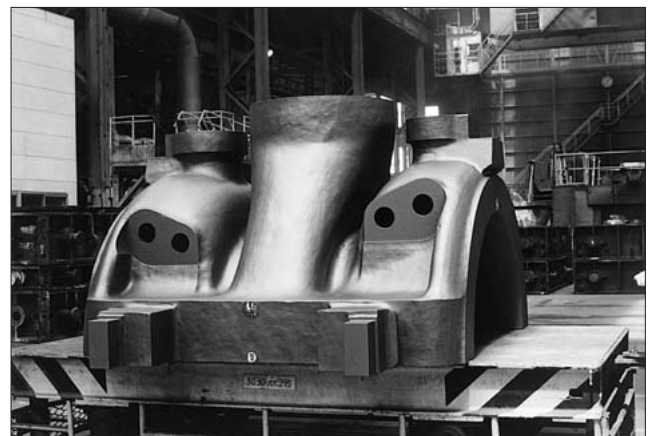


図5 改良12%Cr鋼製内部ケーシング



会社，研究機関の参加のもとに推進され，大きな成果を上げた。試験片によるスクリーニングを実施した後，表 1 に示す 3 種の実機サイズの試作ロータ（図 2）が製作され，長時間クリープ試験を含む検証試験が行われた。その結果，3 鋼種とも大容量高温タービン用ロータ材として必要な特性を満足することが確認され，まず E，F 鋼を用いたロータが実用化された。E，F 鋼よりさらにクリープ強度が優れている B 鋼については，製造技術上の難しさから実用化が遅れたが，大型試作ロータの製作に成功し，実機への適用が可能になった。図 3 に 3 鋼種の試作ロータの長時間クリープ試験の結果を示す。

富士電機は国内の鉄鋼メーカーと共同で改良 12 % Cr 鋼（F 鋼）を用いた実機サイズのロータを試作し，長時間クリープ試験，高温低サイクル疲労試験などの材料試験を独自に行った。図 4 は製作中の試作ロータの写真である。富士電機が行った材料試験でも，COST501 プロジェクトとほぼ同じ結果が得られ，改良 12 % Cr 鋼の優れた高温特性が確認された。

COST501 プロジェクトでは，600 ~ 620 級の改良 12 % Cr 鋳鋼ケーシング材についても，開発，検証試験を実施し，実用化した。図 5 は富士電機が台塑石化股份有限公司に納入した 600 MW 蒸気タービンの改良 12 % Cr 鋳鋼製中圧内部ケーシングである。このタービンは再熱蒸気温度が 566 であるが，経年的なクリープ変形を小さくする目的で，高温クリープ強度の優れた改良 12 % Cr 鋳鋼を採用した。

なお，EC 諸国は現在，650 級および 700 級蒸気発電プラントの実用化をめざした共同開発プロジェクトを推進している。

4 信頼性向上技術

大容量化，高温・高圧化，高効率化の進む火力プラントにおいて，富士・シーメンスが開発し，実機にて検証してきた事業用タービンの信頼性向上技術について以下に詳説する（図 6）。

(1) つぼ形ケーシング

高圧タービンの外部ケーシングは，厚肉の水平フランジを持たない軸対称円筒形状のつぼ形としている。起動時の加熱が均一となるため，熱応力，熱変形が小さく抑えられる。

(2) 調速段のない全周噴射方式

高圧タービンに調速段のない全周噴射変圧運転を採用することにより，翼根元径を小さく抑え，ロータに作用する応力の軽減，流入部構造のシンプル化，高効率化，軸振動に対する安定性向上を果たしている。また，部分負荷運転時でも各部の温度はほとんど変化しないため，負荷変化に伴う寿命消費がきわめて小さい。

(3) 貫通中心孔のないロータ

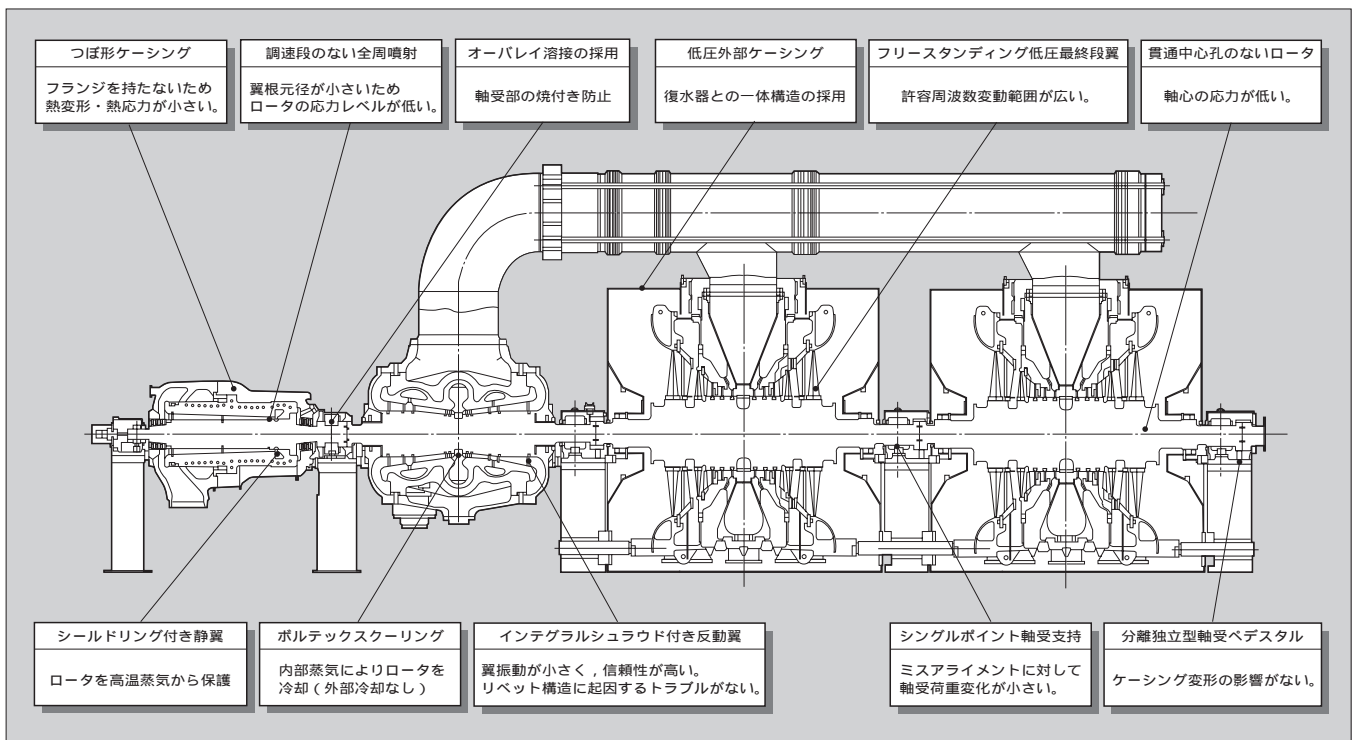
高圧・中圧・低圧ロータは貫通中心孔のない設計とすることにより，軸心応力を低減し，脆性破壊に対する安全性を向上させている。

(4) オーバレイ溶接

高温強度の要求される高圧・中圧ロータに適用される熱伝導率の小さい 12 % Cr ロータの軸受部の焼付き防止対策として，ジャーナル部，スラストカラー部，軸受台貫通部のロータ表面に低 Cr 鋼をオーバレイ溶接している。

(5) シングルポイント軸受支持

図 6 富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービンの特徴





高圧・中圧・低圧タービン間に軸受を各1個配置するシングルポイント軸受支持を採用することにより、アライメント変化に対する軸受荷重変化、曲げ応力変化が小さく抑えられる。そのためダブルポイント軸受支持と比較して、大きなアライメント変化を許容できる。

(6) 分離独立型軸受ペダスタル

軸受台はケーシングに載せず、タービン基礎に直接埋め込む分離独立型としている。これにより配管力、真空力などによりケーシングが変形しても軸アライメントは変化せず、また軸支持剛性が高いため、軸振動特性が向上する。

(7) シールドリング付き静翼

高圧タービン初段には、シールドリング付き静翼を採用し、初段静翼通過後の低温蒸気をロータ表面に流している。これにより、ロータ表面には高温の主蒸気が直接接触しないため、ロータのクリープ寿命消費を低く抑えることができる。

(8) ボルテックススクーリング (図7)

ダブルフロータイプの中圧タービン初段には、シールドリング付き静翼の採用に加え、シールドリングにあけた接線方向の穴から再熱蒸気の一部を高速の旋回流として噴出しロータ表面を冷却するボルテックススクーリングを採用している。これにより、ロータのクリープ寿命消費を低減している。

(9) インテグラルシュラウド付き反動翼

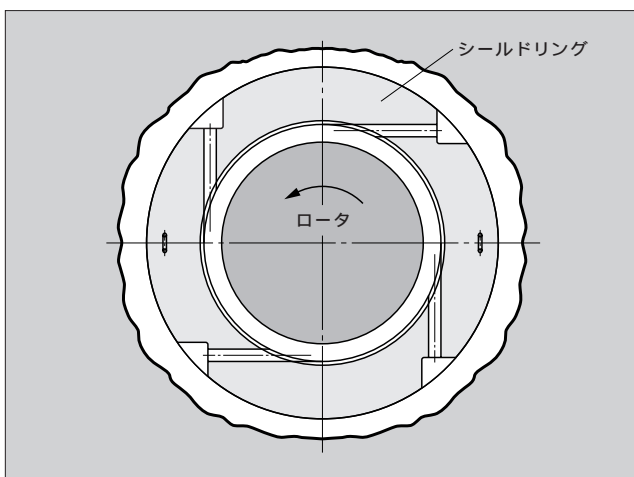
低圧長翼を除く高圧・中圧・低圧タービンの動翼のシュラウドは、翼と一体に削り出したインテグラルシュラウド構造を採用している。テノンをリベット止めする必要がなく、運転中にはシュラウド相互間の摩擦により高い制振効果が得られる。

(10) フリースタANDING低圧最終段動翼

低圧最終段動翼はシュラウドやレーシングワイヤなどの付属物がないフリースタANDING翼を採用している。個々の翼の固有振動数を正確に調律できるため、-5%から+3%までの広範囲の周波数変化に対して連続運転を許容できる。

(11) 復水器一体型低圧外部ケーシング (図8)

図7 中圧タービン流入部のボルテックススクーリング



低圧外部ケーシングと復水器は溶接で一体の真空容器とし、荷重はすべて復水器の台板で支持する構造としている。良好な気密が得られるとともに、真空力がタービン基礎に作用しないため、タービン基礎を軽量化できる。また、低圧内部ケーシングの自重は、外部ケーシングで支持するのではなく、タービン基礎上に設置したタービン前後の軸受台で支持する構造としている。真空力により外部ケーシングが変形しても、内部ケーシングが変位しないため、ラビングに対する安全性が向上している。

(12) 伸び差軽減対策 (図8)

タンデムコンパウンド機では、特に低圧タービンにおける伸び差が問題となるが、中圧外部ケーシングと低圧内部ケーシングを連結ロッドにより軸方向に結合する構造を採用し、低圧タービンの伸び差を小さくしている。

5 性能向上技術

タービン内部効率向上のため、富士・シーメンスは、その大きな特徴となっている反動タービンのメリットを十分に生かした新技術の開発を推進し、逐次実機に適用していくことによって、図9に示す大きな成果を収めてきた。

ここでは、翼を中心に、主な性能向上技術について紹介する。

5.1 反動翼の性能向上

富士・シーメンスにおける蒸気タービンの翼列は、通常、全段、効率の高い反動段で構成されている。反動翼の性能をさらに向上させるため、下記の開発を行った。

(1) 反動翼の完全三次元設計

蒸気タービンの高中圧部に使われる反動段翼列のうち、比較的翼長の短い翼は、発生する損失のうち、壁面付近の境界層に発生する渦流(二次流れ)に起因する損失の占め

図8 復水器一体型低圧外部ケーシング

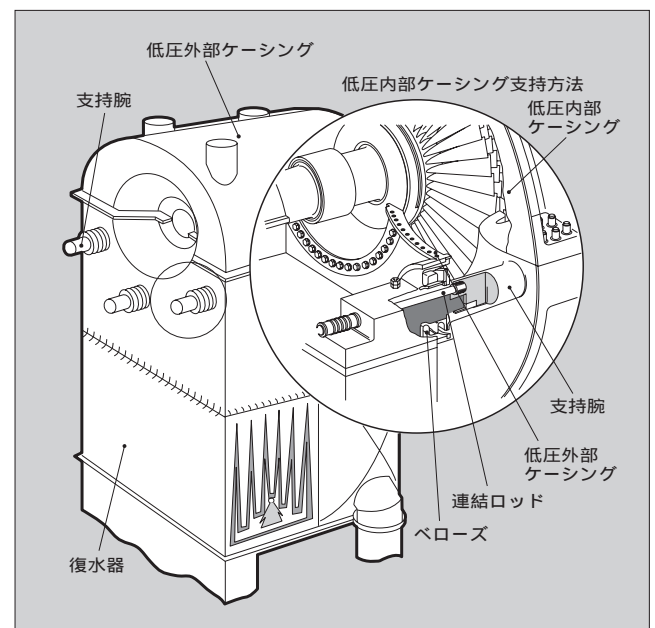


図9 性能向上技術と効率改善量

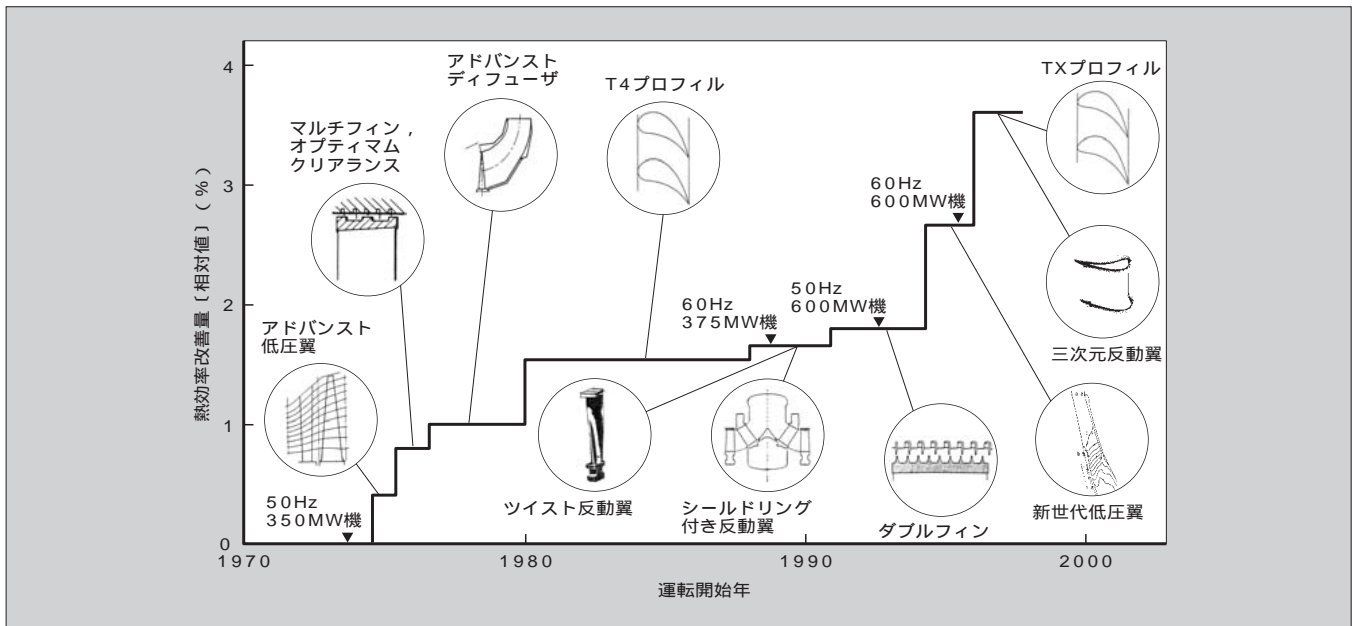
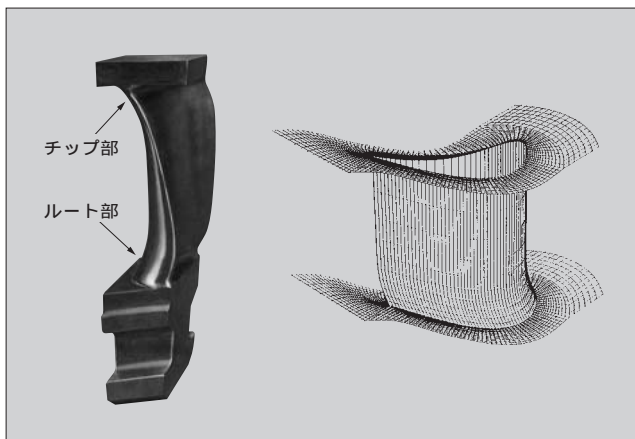


図10 完全三次元設計翼と計算メッシュ



る割合が大きい。この部分の翼列には、従来、翼の長さ方向に同一の翼形断面を持った翼（円筒翼）が使用されていた。しかし最近では数値流体解析技術の進歩に伴い、翼間の粘性流れの解析を精度よく行うことが可能となり、複雑な流れに対する、翼面の傾き、湾曲度などを最適化した三次元反動翼が実現可能となった（図10）。

(2) 高効率反動翼形の開発

従来の反動翼形（T4 プロフィール）より大幅にプロフィール損失を低減させた、新しい反動翼形（TX プロフィール）を開発した（図11）。

新反動翼形は、従来プロフィールより広い流入角に対して、損失が小さいという特性を持っており、円筒翼の翼列効率の改善に大きく貢献している（図12）。

5.2 低圧翼の性能向上

40年以上にわたるフリースタンディング低圧翼の信頼性を維持しながら、性能を飛躍的に高めた新世代低圧翼を開発し、実機に適用している。50 Hz 用としては、1,150 mm

図11 高効率反動翼形

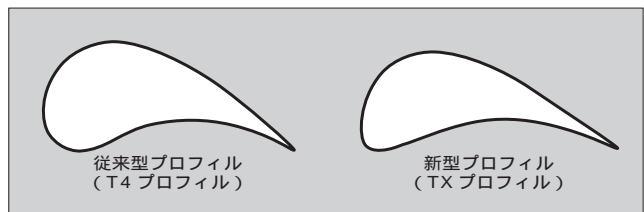
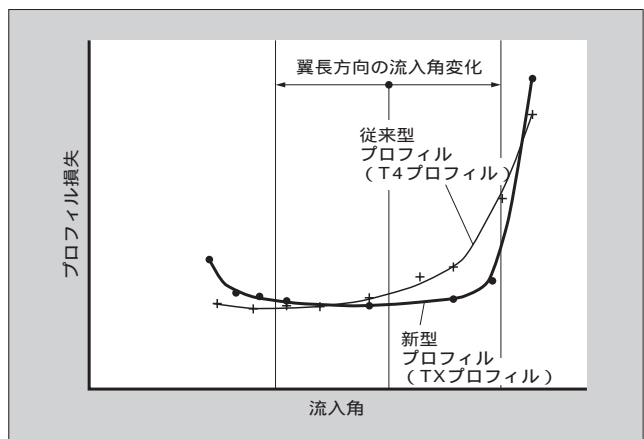


図12 流入角とプロフィール損失の関係



（45.3 インチ）翼の開発を完了し、実機における良好な運転を継続中である。現在、さらに大きい 1,400 mm（55.1 インチ）翼の開発を進めているところである。以下に、新世代低圧翼の効率面での特徴を説明する。

(1) 遷音速プロフィール

近年の数値流体解析技術の進歩により、翼列内の流れを精度よくシミュレートすることができるようになったため、翼列内の速度分布を最適化して、損失の少ないプロフィールを実現することが可能になった（図13）。新プロフィールは遷音速流れに適したコンバージェント・ダイバージェント

図13 新世代低圧翼の解析例と蒸気風洞試験結果

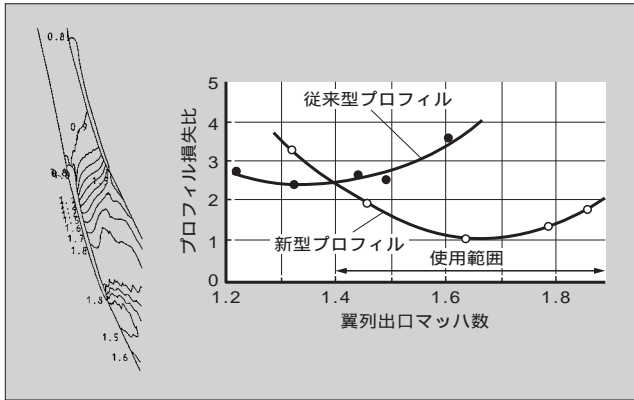
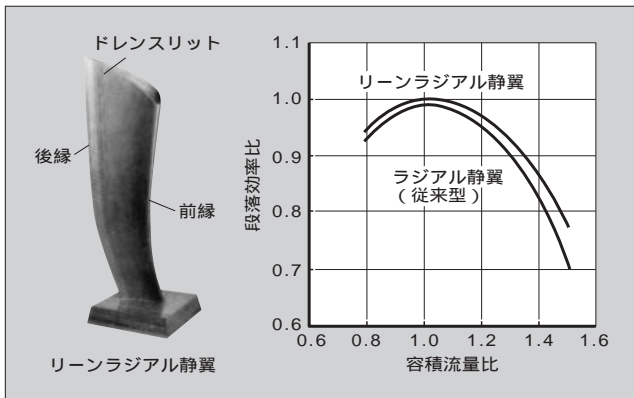


図14 リーンラジアル静翼のモデルタービン効率測定結果



翼形（翼間流路が末広がりになるように設計された翼形）としているのが特徴である。蒸気風洞試験の結果、出口マッハ数が大きい場合には、新翼形を採用することによりプロフィール損失が従来の2分の1以下に低減されることが確認できた。

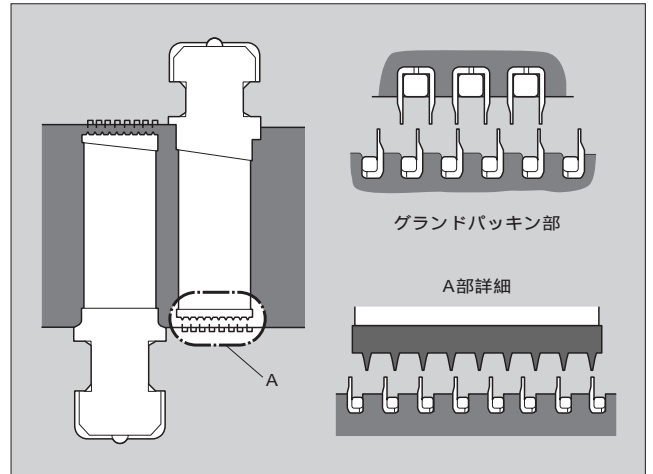
(2) リーンラジアル静翼

三次元タイムマーキング法を用いて種々の翼形状についてフローパターンの変化を比較検討した結果、図14のように、ルート側で周方向の傾斜を持ちチップ側でラジアル方向になるような「バナナ形」の静翼が最適であることが分かった。このようなリーンラジアル静翼を用いることにより、はく離を生じやすいルート付近の流れが大幅に改善される。モデルタービン試験の結果、従来形の静翼に比べ段階効率が2%以上改善されることが確認できた。

5.3 リークージ損失の低減

翼端およびグラウンドのシール方法としては、従来、高・中圧タービンに対してはラビリンズ形、また伸び差が大きい低圧タービンに対してはストレート形のシールフィンが用いられてきた。モデル実験によって種々の形状のシールフィンを比較検討した結果、伸び差の関係でフィンのピッチが大きくなる場合には新しく開発されたダブルフィン形

図15 ダブルフィンの構造



を採用することによって、リークージ損失を減少させることが分かったので、低圧タービンには、このダブルフィンを適用している。図15にダブルフィンの適用例を示す。

⑥ あとがき

富士・シーメンスの大容量高温・高圧タービンは、これまで長年にわたって積み重ねられてきた良好な運転実績をベースに、最新の材料・流力・制御技術を取り入れて、一層の性能・信頼性・運転・保守性の向上を図ったものであり、最近運転開始した実機でも良好な結果が得られている。

今後ともユーザー各位のご指導を得て、高性能で使いやすい蒸気タービンを供給すべく、着実な開発を推進していく所存である。

参考文献

- (1) Zörner, W. : Steam Turbines for Power Plants Employing Advanced Steam Conditions, 10th CEPSI (1994)
- (2) Engelke, W. et al. : Turbines for High Steam Parameters, Int. Joint Power Generation Conference (1994)
- (3) Berger, C. et al. : Steam Turbine Materials : High Temperature Forgings, 5th Int. Conf. Materials for Advanced Power Engineering (1994)
- (4) 山下満男ほか：600 級高温タービン用ロータの開発，火力原子力発電大会（1995）
- (5) Oeynhausien, H. et al. : Steam Turbines for the New Generation of Power Plants, VGB Kraftwerkstechnik, Vol.76, No.12, p.890-895 (1996)
- (6) Drosdziock, A. ; Feldmüller, A. : High-Efficiency Steam Turbines for Coal-Fired Power Plants, Power Gen Asia 95 (1995)
- (7) 中村憲司・加藤秀雄：蒸気タービン設計への流れ解析技術の適用，富士時報，Vol.69，No.9，p.457-460（1996）



# 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

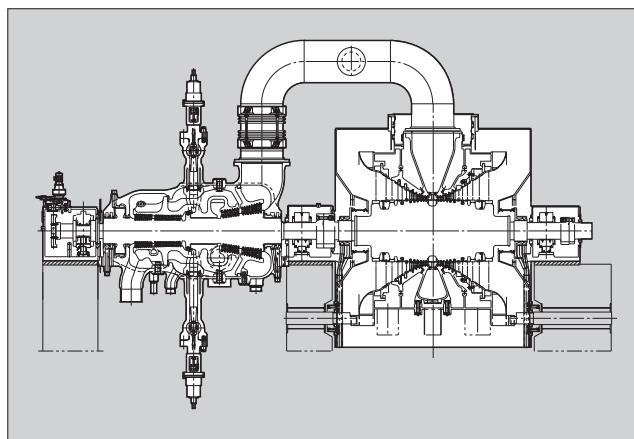
工場にて出荷準備中の高中圧タービンを図2に示す。

#### (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

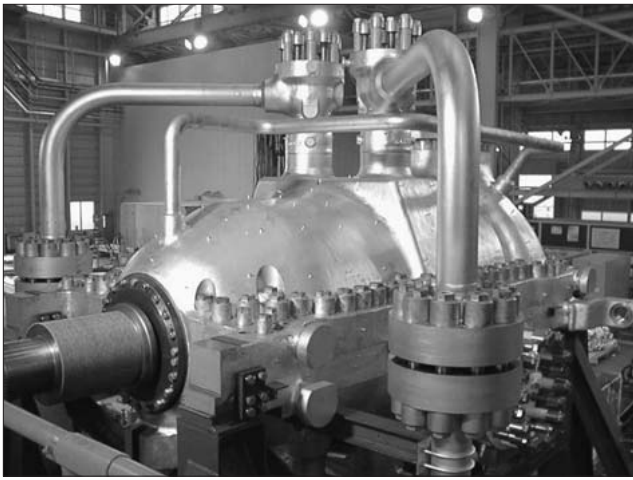
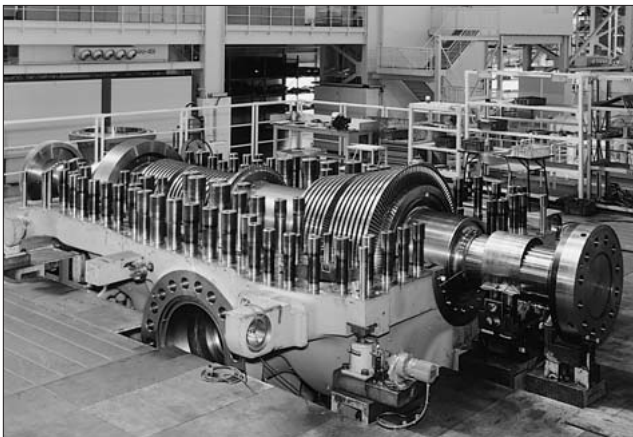


図3 組立中の高中圧タービン



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

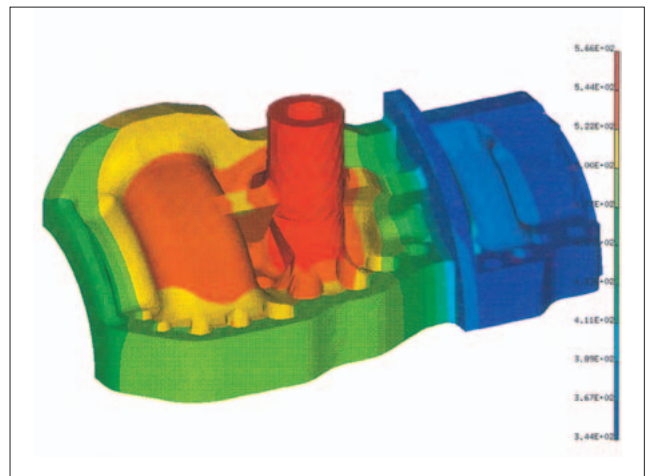
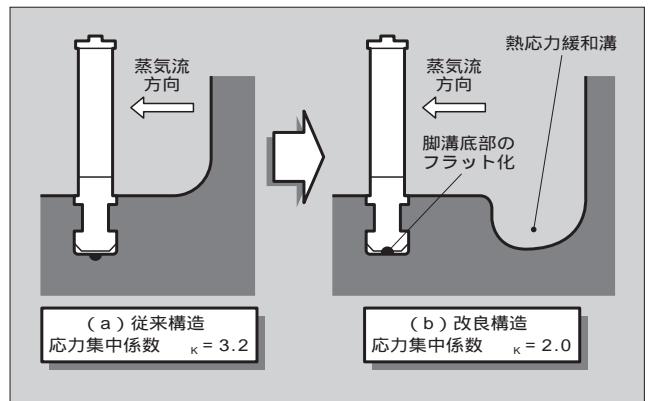


図5 ローラ表面の応力緩和溝



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

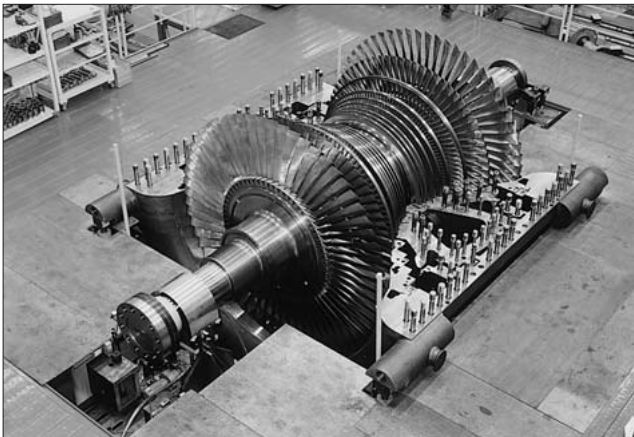
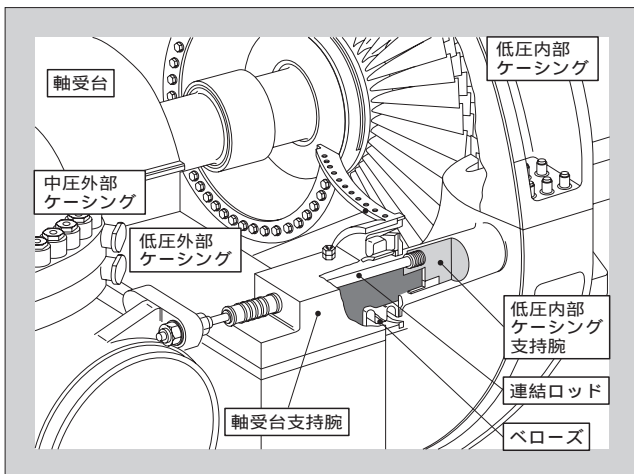


図7 低圧内部ケーシングの連結ロッド



### 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

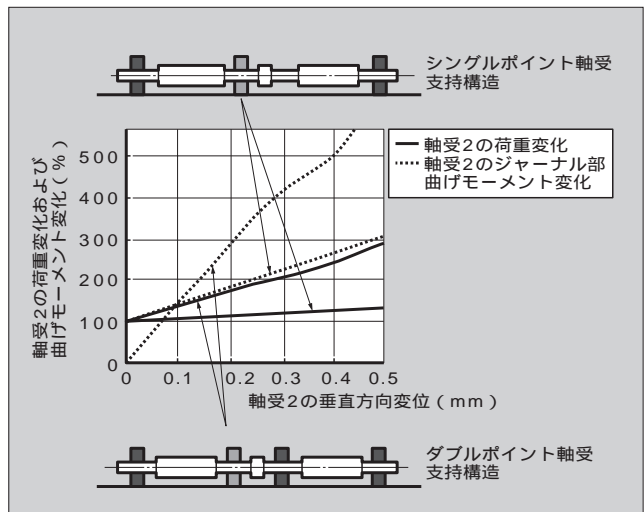
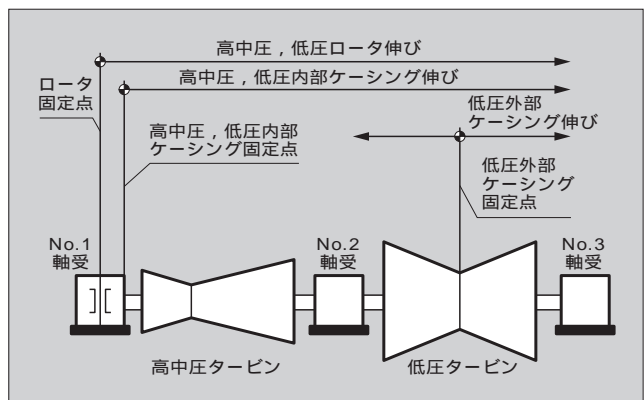


図9 固定点および伸び





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、タービンプ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

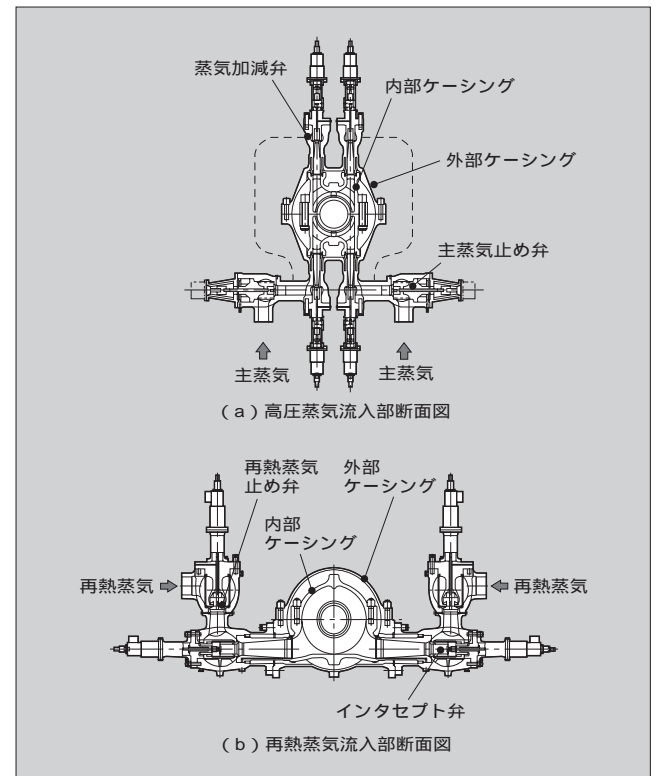


図10 ラビリンス構造(グランド部、翼部)

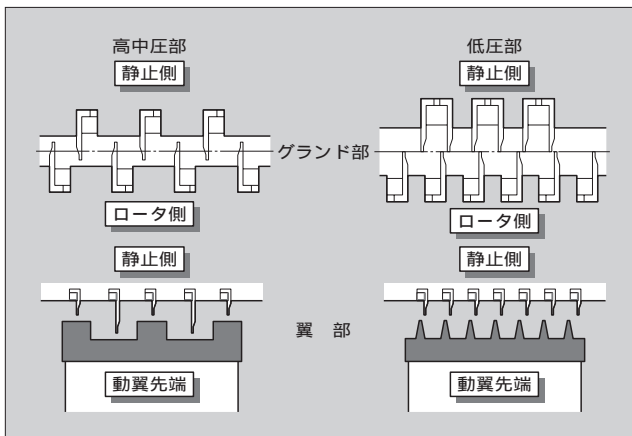


図12 ツインタイプ衝動翼

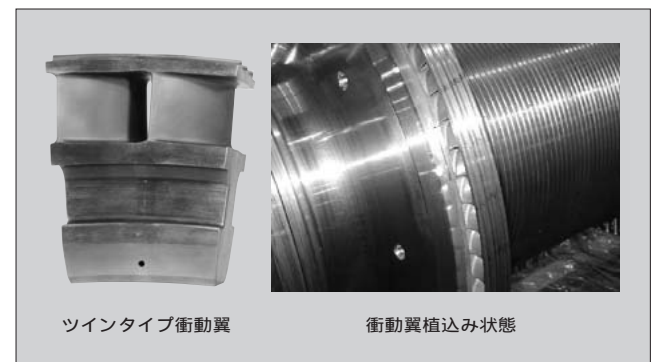
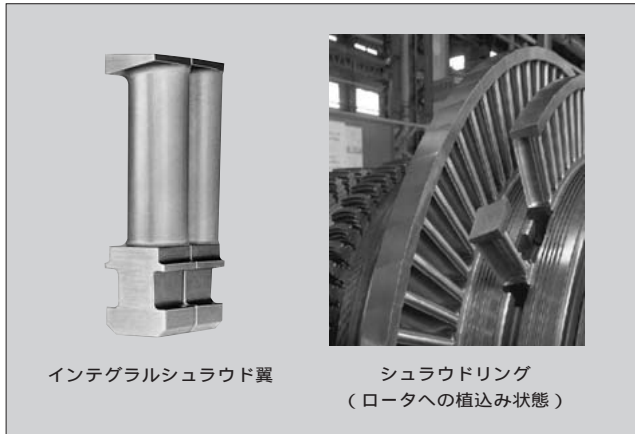




図 13 インテグラルシュラウド反動翼



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。個々の動翼は振動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可能であり、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

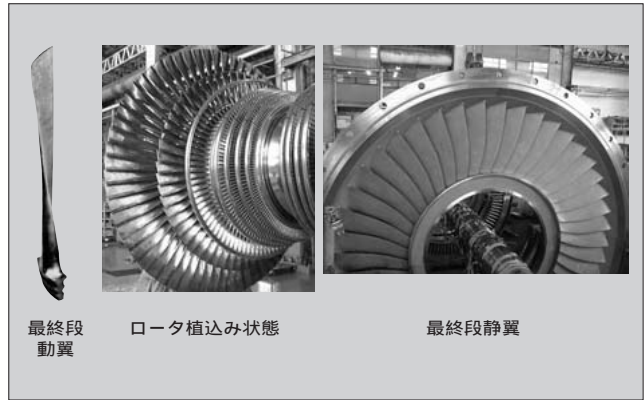
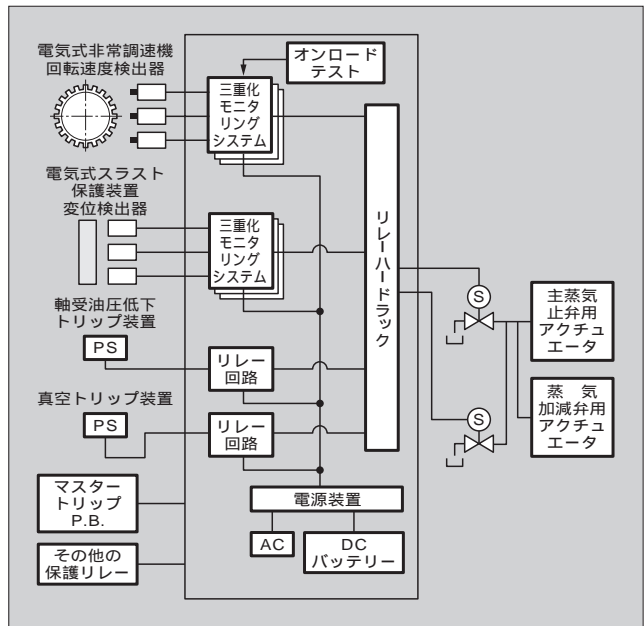


図 15 電気式保安装置の概念図



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。

# 地熱タービン

加藤 佳史(かとう よしふみ)

## 1 まえがき

1995年から5年間、世界中の地熱発電設備(バイナリーも含む)は容量ベースで16.6%増加し、総容量は7,974 MWに達した。<sup>(1)</sup>一方、富士電機が製作した地熱タービンは、1995年には総容量1,253 MWであったが、2000年9月時点で1,566 MWになったので、容量ベースで25%増加したことになる。このことは、世界的規模で環境意識が高まるなかにあつて、富士電機の地熱タービンの信頼性と運転性能の高さが広くユーザーに評価された結果であると考ええる。

<sup>(2)</sup>前報では、富士電機の地熱タービンの最新技術について紹介したが、この5年の間にも、幾つかの新技术が取り入れられてきている。そこで、本稿では、まずこの5年間で採用されてきた、地熱タービンの最新技術について述べる。次に、最近運転開始した特徴ある地熱タービンについて紹介する。最後に、地熱発電の宿命として生産井の減衰の問題があるが、この問題への対応例について紹介する。

## 2 地熱タービンの最新技術

地熱タービンは火力用蒸気タービンから発達してきたものなので、地熱タービンの技術には火力用の新技术と共通のものも、また地熱特有の技術もある。

### 2.1 高性能新反動翼

新反動翼(図1)は、高い翼列効率を維持しながら、段落あたりの熱落差を大きくして、通常火力タービンの翼段数を少なくするために開発された。これを地熱タービンに採用すると、同じ段数の場合、タービン効率が約0.7%改善する。

### 2.2 新世代低圧翼

復水タービンの最終段落に近くなると、蒸気が排気の真空まで膨張するため、蒸気通路の急激な拡大が必要となる。このため翼長の大きい低圧翼が使われる。

新世代低圧翼は、CFD(Computational Fluid Dynamics)の進歩により開発が可能となったものである。

1980年代後半に、3,000 r/min用978 mm(38.5インチ)翼を開発して以来、現在では、あらゆる出力範囲をカバーする新世代低圧翼シリーズの開発を完了している。

最終段には、ルート近傍の反動度を改善して二次損失を減少させるように、半径方向に湾曲した静翼が採用されている(図2)。また、動翼の先端近傍のプロファイルは、いわゆる、コンバージェントダイバージェント(先細末広がり)通路を形成しており、大きな損失をもたらす垂直衝撃波の発生を抑制している(図3)。

図1 新反動翼(N1)と反動翼(T4)との効率比較

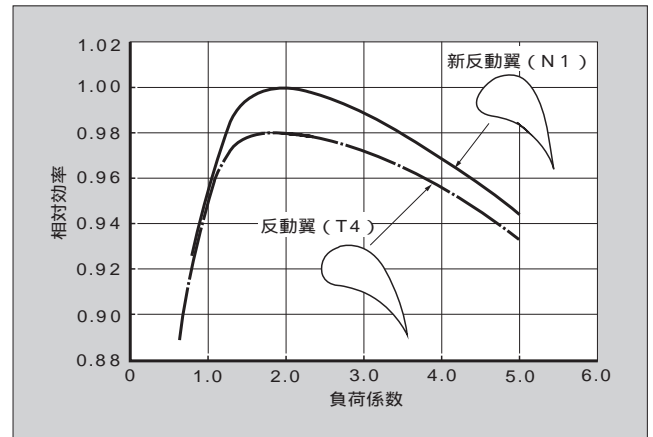
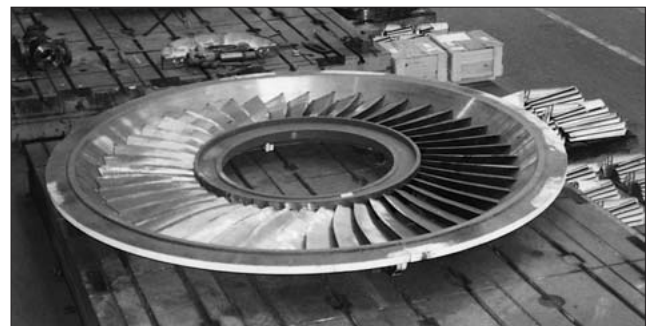


図2 最終段静翼リング



加藤 佳史

蒸気タービンの設計・開発に従事。  
現在、エネルギー製作所火力設計部担当課長。

新世代低圧翼により、地熱タービンの効率は約 1.5 % 向上する。

2.3 大口径三重偏心バタフライ形止め弁

熱水卓越型地熱発電プラントでは、発電端出力の増大を図って、セパレータで高圧蒸気を分離してタービンへ導入した後の熱水を、フラッシュに入れて低圧蒸気をつくり、これをタービンの段落へ入れる方式が採用される場合がある。これをダブルフラッシュという。これに対して、低圧蒸気を使わないシステムはシングルフラッシュと呼ばれる。ダブルフラッシュの低圧蒸気は比容積が大きいので、止め弁（非常遮断弁）と蒸気加減弁は大口径であることが要求される。

従来、低圧蒸気用の止め弁としては、二重偏心バタフライ形止め弁が使われていた。しかし、二重偏心バタフライ形止め弁は、弁が全閉した際、弁体（ディスク）とシート部のくさび効果が大きくなり過ぎて、ディスクとシートとが固く密着することがあり、弁を開くときに高いアクチュエータトルクを必要としていた。

図3 最終段動翼先端プロファイルのマッハ数分布

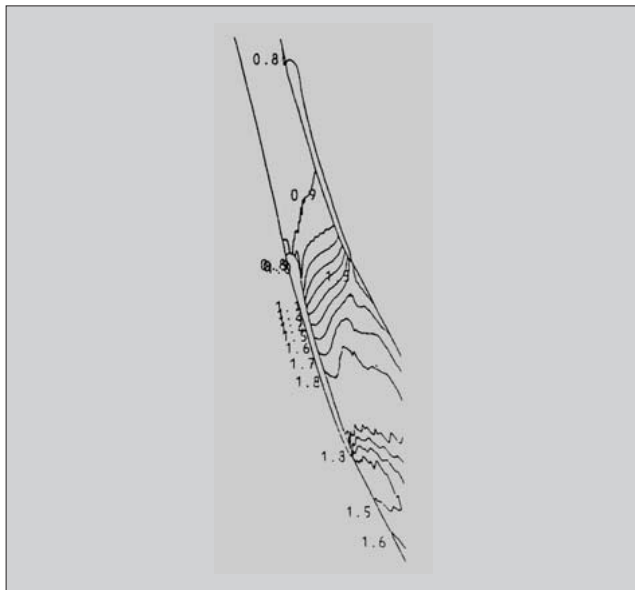
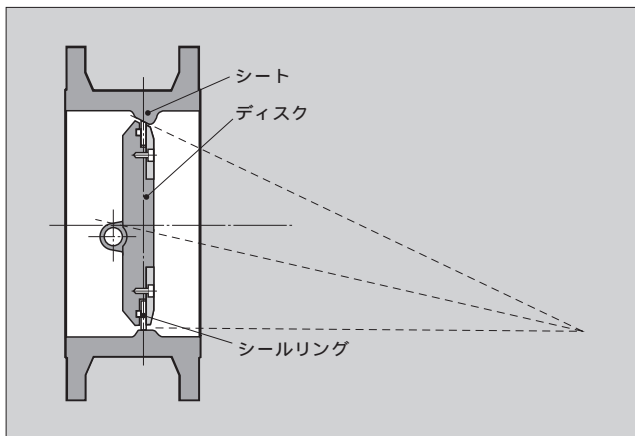


図4 三重偏心バタフライ形止め弁



三重偏心形止め弁は、シートとディスクのシール面の形状を球体ではなく、円すいを斜めに切断した形状となるようにしたところに特徴がある（図4）。弁が全閉する際、ディスクに取り付けられているシールリングは、ディスクの中に押し込まれるので、常に面接触でシールされることになる。このためくさび効果が発生しないので、比較的低いアクチュエータトルクでスムーズに開けることができる。

③ 最近の地熱タービン

最近の地熱発電市場をみると、復水タービンに限って言えば、発電容量で 20 ~ 30 MW クラスと 55 MW クラス以上のプラントが多い。出力 30 MW クラス以下の地熱タービンは、いわゆるパッケージ形（スキッドマウント形）であり、ケーシングと軸受台がスキッド（台床）上に配置され、工場で最終状態に組み立てられて、完成した状態で出荷される。パッケージ形を採用することによって、サイトでの工期が大幅に短縮される。

55 MW クラス以上は、ダブルフロー（複流）となる。通常、ロータ、ケーシング上半・下半はそれぞれ別に梱包（こんぼう）出荷されるが、パッケージ化も可能である。

ここでは、最近運転開始した、55 MW クラス以上の地熱タービンを紹介する。

3.1 ワヤンウィンド向け 110 MW 地熱タービン<sup>(4)</sup>

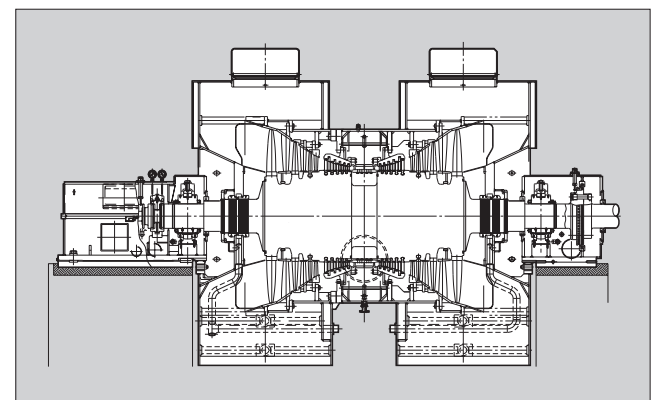
図5は、今年（2000年）の6月に運転開始した、インドネシアのワヤンウィンド地熱発電所1号タービンの断面図である。蒸気タービンは、シングルフラッシュ用、ダブルフロー、シングルケーシングタイプである。

- (1) 入口圧力：1.02 MPa
- (2) 入口温度：181
- (3) 真空：12 kPa
- (4) 回転速度：3,000 r/min
- (5) 出力：110 MW（最大 115.5 MW）

110 MW の発電端出力は、シングルケーシングの地熱タービンとしては、世界最大容量である。

シングルケーシングで 110 MW の出力を可能にさせた

図5 ワヤンウィンド（インドネシア）向け 110 MW 地熱タービンの断面図





のが、最終段翼長 697 mm (27.4 インチ) の新世代低圧翼である。最終段とその前の段の低圧動翼は、翼にレーシングワイヤのないフリースタANDINGタイプである。翼面にレーシングワイヤ用のボスや穴がないので、応力集中や蒸気中の腐食成分のたい積もない。さらに、翼面に余計なものがないので、翼の振動特性がシンプルで、その固有振動数が正確に計算できる。この特徴により、定格周波数 50 Hz の  $\pm 5\%$  の変動に対しても、時間制限なしでの運転が可能である。

段落構成は複流 8 段である。第 1 ~ 5 段には反動式のインテグラルシュラウド翼が植えられる。リベッティングがないので、残留応力が発生しない。また、インテグラルシュラウド翼は振動減衰効果に優れている。

第 1 ~ 5 段の静翼は一つの静翼ホルダに植えられる。静翼ホルダは、水平二つ割で、上半下半ともそれぞれ垂直フランジでケーシングにボルト締めで固定される。上半と下半の静翼ホルダは、互いにタイトにボルト締めされる。したがって、水平フランジ合せ面での蒸気漏れ、およびこれによるフランジ面のエロージョンは生じない。

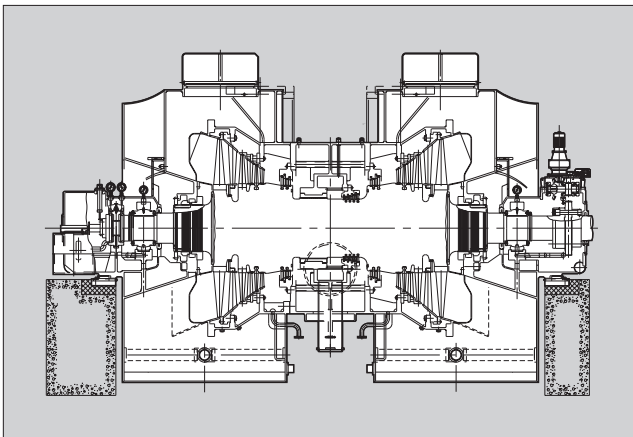
ロータは一体鍛造のドラムタイプであるため、表面に応力集中を生じさせる部分がない。材料には、通常火力に比べて Ni 含有量が少ない、CrMoNiV 鋼を使用することにより、SCC (Stress Corrosion Cracking) の発生を防止している。また、慣性重量が大きいので、運転中に何らかのアンバランスが生じてても、安定した運転を確保することができる。

ケーシングは鋼板溶接構造で、水平フランジの二つ割りタイプである。

### 3.2 ソルトンシー向け 58.32 MW 地熱タービン

図 6 に、2000年 8月に運転開始した、米国のソルトンシー 5号機用地熱タービン断面図を示す。このプラントでは、標準圧力蒸気 SP (Standard Pressure)、低圧蒸気 LP (Low Pressure) のほかに、さらに圧力の低い蒸気 VLP (Very Low Pressure) をタービンの段落に導入している。このような方式を、トリプルフラッシュ (TF) 方式とい

図 6 ソルトンシー (米国) 向け 58.32 MW 地熱タービンの断面図



うが、TF 方式を採用している地熱タービンは、世界でもほとんど例がない。

また、このプラントでは複圧式復水器が採用されており、タービンの二つ排気圧力はそれぞれ異なる。

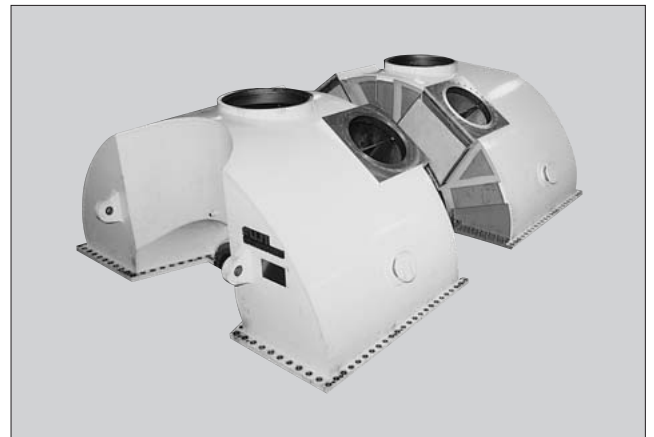
- (1) SP 圧力 : 0.86 MPa
- (2) SP 温度 : 174
- (3) LP 圧力 : 0.367 MPa
- (4) LP 温度 : 141
- (5) VLP 圧力 : 0.137 MPa
- (6) VLP 温度 : 110
- (7) 高真空 : 9.6 kPa
- (8) 低真空 : 13 kPa
- (9) 回転速度 : 3,600 r/min
- (10) 出力 : 58.32 MW (最大 64.15 MW)

SP 蒸気は一つの止め弁および加減弁を通じて、ケーシング下半のほぼ真下からタービンに入る。一方、LP 蒸気は一つの止め弁を通過後二つに分岐し、それぞれ一つの加減弁を通じて、ケーシング下半の両サイドから、タービン段落に導入される。そして、VLP 蒸気は、二つの止め弁を通過後それぞれ二つに分岐して加減弁を通過後、前後の排気ケーシング上部にそれぞれ二つずつある流入口 (図 7。なお、真上の穴は大気放出版用) を通って、タービン段落に流入する。したがって、このタービンには都合四つの止め弁と七つの加減弁が使われている。

SP 止め弁には口径 350 mm のスイングチェック弁形弁、LP および VLP 止め弁には、合計三つの口径 1,100 mm の三重偏心パタフライ形止め弁が採用されている。口径 1,100 mm のパタフライ形止め弁は、地熱タービン用としては、世界最大である。SP 加減弁は一つで口径は 350 mm、LP 加減弁は二つ、VLP 加減弁には四つの口径 750 mm のパタフライ形弁が使われている。ウッドワードガバナの信号により、SP 加減弁と VLP 加減弁は蒸気圧力を制御し、LP 加減弁は負荷制御を分担する。

段落構成は、単流 4 段と複流 5 段であり、単流 4 段と複流 2 段はインテグラルシュラウド反動翼である。最終の複流 3 段には最終段翼長 665 mm (26.2 インチ) の新世代低圧翼が使われている。

図 7 ソルトンシー向け地熱タービンのケーシング上半部





4 生産井の減衰への対応

地熱発電は地下 1,000 ~ 2,000 m にある、貯留層の高圧高温の蒸気、または熱水を蒸気源としている。通常、貯留層の周りには豊富な水源があるが、長期間にわたって一つの井戸を使用していると、蒸気源の特性が変化して圧力が低下したり、蒸気または熱水量が減少する枯渇現象が生じる。

最近の地熱発電プラントの多くは、使用後の熱水または温水を地下に還元する方法が採られている。しかし、それでも生産井の減衰が避けられないプラントもある。

そこで、この問題に対して、富士電機の地熱タービンはどのように対応できるかについて、二つの事例を紹介する。

4.1 北カリフォルニア (NCPA) 2 号機

このプラントは1983年に運転開始したが、運転開始後十数年で生産井の圧力が低下した。運転開始当初の仕様は次のとおりである。

- (1) 入口圧力：0.779 MPa
- (2) 入口温度：169
- (3) 蒸気流量：107.65 kg/s (ガス分 0.4%)
- (4) 真空：10.2 kPa
- (5) 段落構成：2 × 8 段
- (6) 回転速度：3,600 r/min
- (7) 出力：55 MW (最大 63.95 MW)

生産井の圧力低下により、発電端出力が低下したため、タービンの改造を行った。改造後の仕様は次のとおりとなった。

Phase

- (1) 入口圧力：0.572 MPa
- (2) 入口温度：157
- (3) 蒸気流量：124 kg/s (ガス分 0.4%)
- (4) 真空：10.2 kPa
- (5) 段落構成：2 × 8 段

表 1 NCPA 2号機の改造部品と改造内容

改造部品	改造内容
翼	第1~5段の動翼、静翼および静翼リングを新製
ロータ	旧品使用。第1~5段翼溝追加加工
主 弁	止め弁、蒸気加減弁のサイズアップ、新製
蒸気ストレーナ、主蒸気配管	サイズアップ
ガバナ	加減弁アクチュエータ改造

表 2 バリンピノン 地区の地熱タービン仕様

項 目 プラント	定格出力 (MW)	ユニット数 (台)	主蒸気圧力 (MPa)	主蒸気温度 ( )	排気圧力 (MPa)	段落数 (段)	主蒸気流量 (kg/s)
ナスジ	20	1	0.57	162	0.0137	8	43.89
オコイ	20	1	0.77	174	0.0127	9	40.56
ソゴンゴン	20	2	0.57	162	0.0137	8	43.89

- (6) 回転速度：3,600 r/min

- (7) 出力：55.6 MW

このプラントの場合、生産井の圧力は低下したが、発生蒸気量が増えたので、発電端出力は運転開始当初より大きくなった。

改造に際してケーシングと軸受台は旧品をそのまま使用した。また、ロータは旧品を改造して使用した。すなわち、複流 3 段の低圧翼はそのまま残して、複流 5 段の翼列を Phase の仕様に従って、新たに設計した動翼と交換した。主な改造部品と改造内容を表 1 に示す。

なお、この改造では将来さらに生産井が減衰することを想定している。将来予想される仕様は次のとおりである。

Phase

- (1) 入口圧力：0.434 MPa
- (2) 入口温度：143
- (3) 蒸気流量：124 kg/s (ガス分 0.4%)
- (4) 真空：10.2 kPa
- (5) 段落構成：2 × 7 段
- (6) 回転速度：3,600 r/min
- (7) 出力：51.4 MW

Phase では、蒸気流量が一定のまま生産井圧力が低下するので、発電端出力は Phase の 55.6 MW から 51.4 MW へと減少する。

Phase から Phase に対応するための工事は、タービンの第 1 段静翼と動翼を削除するだけなので、わずかな改造費用で出力の回復ができる。

4.2 バリンピノン

新設時から、北カリフォルニア 2 号の Phase から Phase への移行と同様な計画のもとに製作されたのが、フィリピンのバリンピノン 地区で1993年から1994年までの間に相次いで運転開始した、ナスジ 1 台、オコイ 1 台、およびソゴンゴン 2 台の合計 4 台の地熱タービンである。三つの地熱発電プラントのタービン仕様を表 2 に示す。

タービン入口圧力は、オコイが他の 2 プラントより高く、また、翼の段数構成もオコイは他のプラントのタービンより 1 段多い。これは、将来オコイの生産井圧力が低下した場合に、第一段の静翼・動翼を削除することにより、蒸気量を増大して、発電端出力を維持するための対応である。第一段の削除により、これら三つのプラントのタービンロータは共通のものとなり、オーバーホールに際しては、予備ロータを交互に入れ替えて使用することが可能となる。

図8 パリンピノン 地区の地熱タービン翼列・ロータ

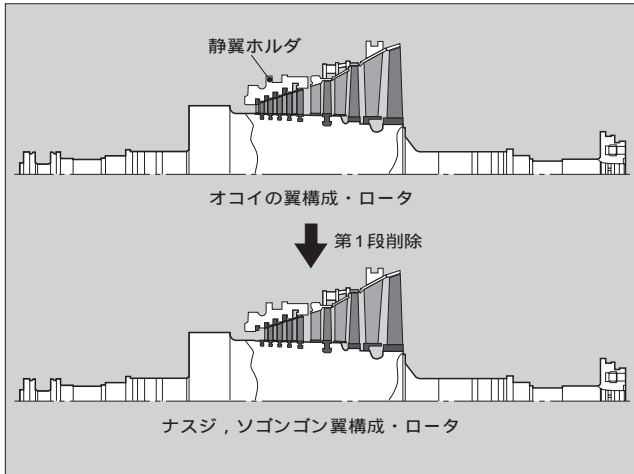
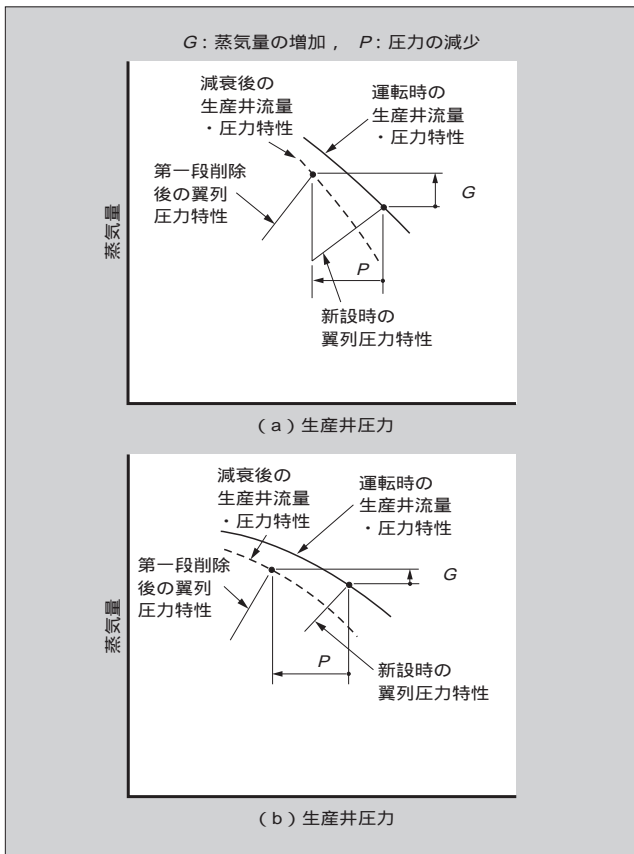


図9 生産井の減衰とタービン翼列圧力特性



4.3 生産井の減衰に対する反動タービンの利点

すでに2例を紹介したように、富士反動式地熱タービンは、生産井が減衰した場合、1段または（圧力低下がさらに進んだ場合）複数段の静翼と動翼を削除することによって対応することができる。これにより、改造にかかわる工期と費用が大幅に削減される。

生産井の減衰に静翼と動翼の削減だけで対応できるのは、反動式タービンの次の特徴によるところが大きい。

- (1) ロータがドラム形状である。
- (2) 段落あたりの熱落差が小さい（衝動式の約半分）。

4.3.1 ドラムタイプのロータ

反動式タービンのロータはドラム形状なので、動翼を根元から削除しても円盤摩擦損失やベンチレーション損失は発生しない。また、低圧翼以外のすべての静翼は、通常、一つの静翼ホルダに植えられるので、根元から削除すれば蒸気の流れを乱すことはない（図8）。

4.3.2 段落あたりの熱落差が小さい

反動タービンは段落あたりの熱落差、したがって圧力差が比較的小さいので、生産井の減衰に対応しやすい。図9に生産井の圧力特性を示す。

生産井の圧力特性が、図9(a)の場合には、圧力の低下に見合う蒸気量の増加が得られるので、段落あたりの圧力差が大きくても、1段削除によるタービン入口蒸気量の増加によって、出力はある程度維持される。

しかし、図9(b)のように圧力が低下しても蒸気量が十分増加しない場合、段落あたりの熱落差が大きいと、第一段を削除してもタービン入口蒸気量が増えてこないのので、発電端出力は低下し、改造工事の経済効果が薄れてしまう。

5 あとがき

地熱発電は化石燃料を消費せず、また二酸化炭素の発生もほとんどないクリーンなエネルギー源である。地球環境の維持がクローズアップされているなかであって、他の代替エネルギーとともに、大きな伸びが予想される。今後とも、不断の技術開発によって、地熱発電の発展に貢献していきたい。また、本稿が地熱発電関係者のご参考になれば幸いである。

参考文献

- (1) Hutterer, G. W. : The Status of World Geothermal Power Generation 1995-2000, Proc. World Geothermal Congress 2000, p.23-37 (2000)
- (2) 加藤佳史・和泉栄：地熱発電用蒸気タービンの最新技術，富士時報，Vol.68，No.10，p.576-583（1995）
- (3) 酒井吉弘ほか：蒸気タービンの新世代低圧翼の開発，富士時報，Vol.65，No.11，p.706-712（1992）
- (4) Murakami, H. et al. : Construction of the Largest Geothermal Power Plant for Wayang Windu Project, Indonesia, Proc. World Geothermal Congress 2000, p.3239-3244 (2000)
- (5) 斉藤象二郎：地熱発電の現状と課題，地熱エネルギー，Vol.25，No.3，p.16-27（2000）

# 電源開発(株)磯子火力発電所新1号発電機

鈴木 忠雄(すずき ただお)

長谷 徹(はせ とおる)

新倉 仁之(にいくら ひとし)

## ① まえがき

1997年4月にエンジニアリングを開始し、1998年に製作に着手した電源開発(株)磯子火力発電所向け新1号発電機(670 MVA)は、2000年7月に工場試験を完了した。

磯子火力発電所は、現在稼動中である既設発電所(2×265 MW)の敷地スペースの中に600 MWの発電設備を新設した後、稼動中の発電所を600 MWに更新する、スクラップアンドビルド方式が採用されているプラントである。

既設プラントの敷地内で2倍以上の発電容量アップを図るため、制約スペースにおける各機器の効果的な配置計画と最新発電設備としての省力化の要求があった。

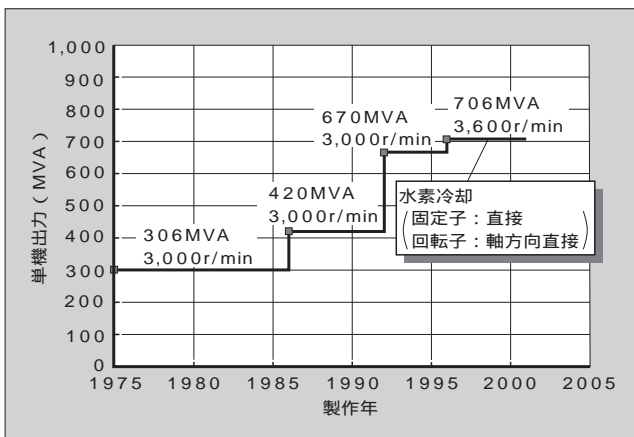
本発電プラントは大都市横浜への電力供給を担い、非常に重要な発電プラントであるため、発電機の設計・製作にあたっては、信頼性向上に注力した。

以下に本発電機の概要を紹介する。

## ② 発電機の出力範囲

図1に示すように、現状での実績最大容量機は、50 Hz機で670 MVA、60 Hz機で706 MVAである。これらは固定子、回転子の水素直接冷却方式を採用した発電機である。

図1 富士電機製タービン発電機の最大出力推移



本発電機は50 Hz機の最大容量実績機〔東北電力(株)能代火力発電所向け発電機〕と同一出力である。

本冷却方式での最大出力は、通風および冷却技術の向上により、現在では1,000 MVAまでの出力範囲を製作することができる。

## ③ 仕様および諸元

発電機の主な仕様と諸元を表1に、670 MVA発電機の断面図を図2に示す。

本発電機の基本仕様は、東北電力(株)能代火力発電所に納入した670 MVA発電機と同一であり、能代火力発電所向けとの大きな相違点は、ブラシレス励磁方式からサイリスタ励磁方式に変わった点である。また、最新火力発電機としての要求項目として次の点がある。

- (1) 効率 : 99%以上
- (2) 水素純度 : 98.5%
- (3) 起動停止回数 : 3,000回

表1 発電機の主な仕様と諸元

仕様	出力	670 MVA
	電圧	19,000 V
	力率	0.9
	周波数	50 Hz
	冷却方式	固定子・回転子水素直接冷却
	水素ガス圧力	0.4 MPa (ゲージ圧)
	回転速度	3,000 r/min
	短絡比	0.58
	励磁方式	サイリスタ直接励磁
	励磁電圧	500 V (DC)
諸元	励磁電流	5,030 A (DC)
	全長	15.6 m
	全質量	524 t
	固定子つり上げ質量	345 t
	回転子質量	68 t



鈴木 忠雄

タービン発電機の構造設計に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部副参与。



長谷 徹

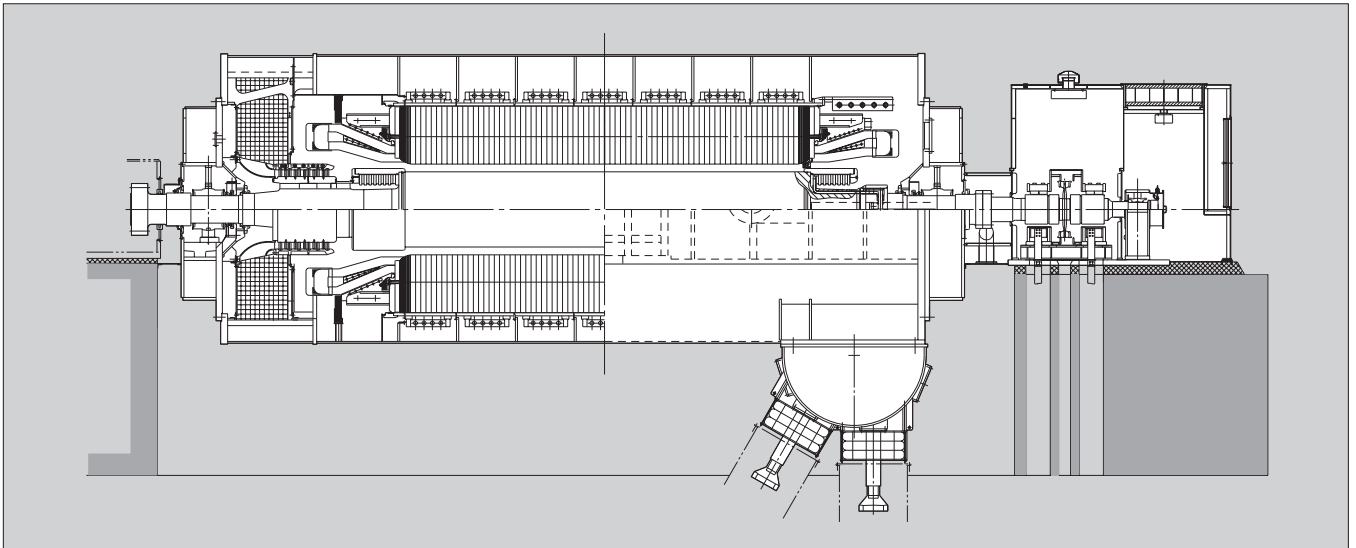
タービン発電機の構造設計に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部。



新倉 仁之

大型回転機の電気設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部。電気学会会員。

図2 670 MVA 発電機の断面図



4 発電機の特長

4.1 冷却方式

固定子・回転子巻線の冷却方式は水素ガス直接冷却方式である。この方式は、2種類の冷媒を必要とする固定子水冷却方式に比べ、巻線冷却水に関する運転監視の項目や補機がないことから、明らかに保守が簡便になる利点がある。

図3に水素直接冷却タービン発電機の冷却通風回路図を示す。冷媒である水素ガスは回転子に取り付けられたコンプレッサによって発電機内を循環する。各部からの発生熱量は機内に挿入された水素ガスクーラによって熱交換される。

通風回路には、それぞれの部位の発生損失に対応して必要風量（ガス流量）の配分を設定し、工場試験で風量が設定値になるように各部の絞り調整が行われている。

発電機の効果的な冷却には、通風用コンプレッサの動力を最小にするため全体の風量・圧力損失をできるだけ抑え、各部に適正な冷却風量（ガス流量）を分配することが重要である。解析技術の進歩に伴い、発電機内発生損失を従来より細分化した部位に分けて評価できるようになり、その各部の損失に対して必要ガス流量を計算し、風量配分を設定した。図4に従来機と比較した風量配分比を示す。これにより従来設計に比べ総風量を約10%低減することができ、発電機効率の向上に大きく寄与している。

4.2 固定子コイル

図5に固定子コイルの断面を示す。コイルの素線にはレベル転位を行うほか、上バーと下バーの素線構成を変えた異断面コイルを採用し、発生損失低減を図っている。すなわち、上コイルでは表皮効果損失がコイル厚みによって増大する傾向を持つことから、コイルの全損失（表皮効果損+ジュール損）が最少になるように素線構成を選定している。

図3 発電機の冷却通風回路図

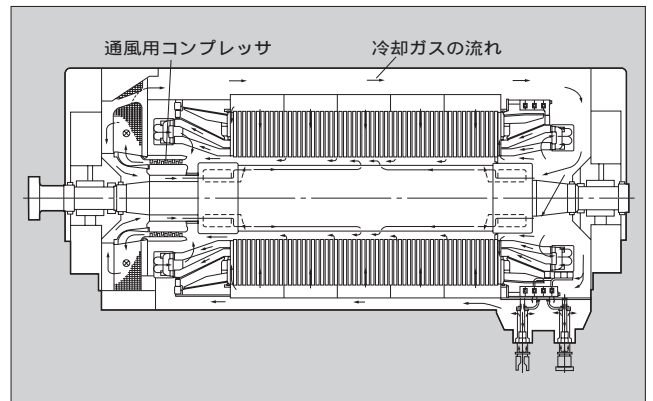
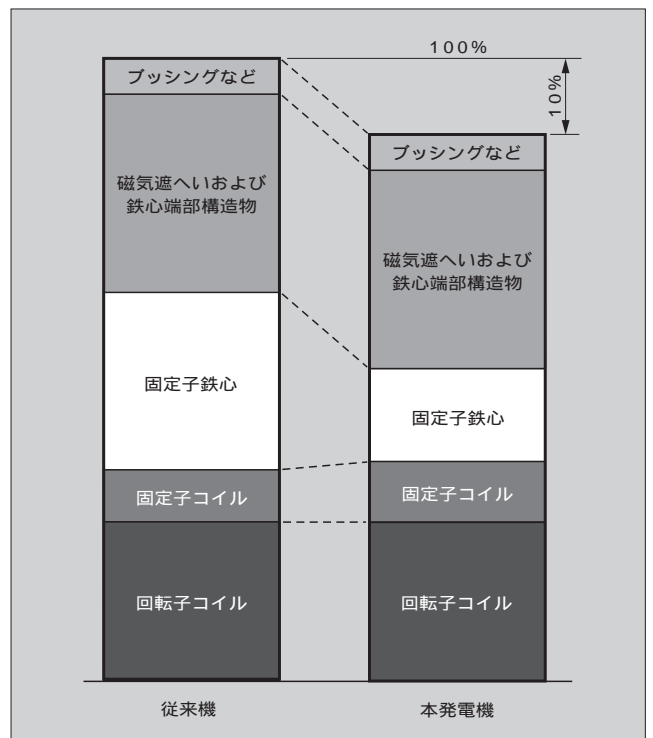


図4 冷却風量の配分比較





コイルの絶縁は経年的に枯れを生ずるので、枯れによるコイルの緩みを防止するために、従来からきめ細かな保守が要求されている。コイルの緩みがあると、コイルがスロット内で振動するために、機械的あるいはバイブレーションスパークなどの電氣的損傷を生ずる。図5に示したスプリングライナはコイルの緩み防止対策であって、トップスプリングライナはコイルをその電磁力の数倍のばね力によってスロット内に固定して振動を防止し、サイドスプリングライナはコイルをスロット壁に密着させることにより振動を制御するとともにコイル表面を確実に接地させている。

4.3 回転子の冷却

図5の回転子コイルの断面図に示すように、回転子コイルの冷却はコイルに中空導体を採用しており、図6に示すように軸方向直接冷却方式である。スロット内のコイル冷却風はコイルエンド側から流入し、コイルと熱交換を行った後、鉄心中央部から排出される。

4.4 振動

発電機出力の増大とともに回転子が長大化すると、いろいろな振動発生要因に対して敏感になってくる。その振動発生要因の一つに、サーマルアンバランス問題がある。

回転子の長大の度合いを軸胴部の長さ(L)と直径(D)の比L/Dで表すとき、富士電機ではL/Dについて、アンバランス感度の増大、危険速度が低くなることによる軸

図5 固定子コイルおよび回転子コイルの断面図

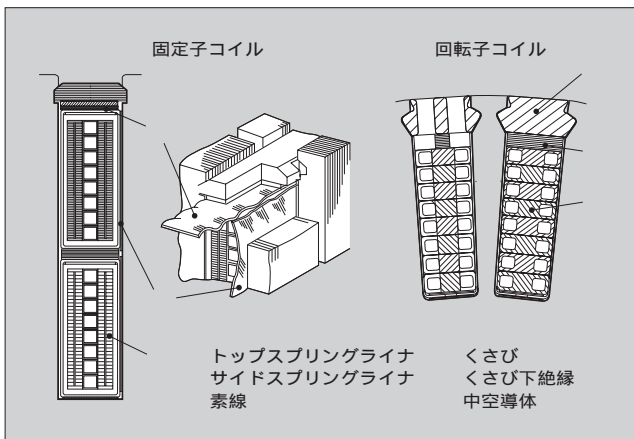
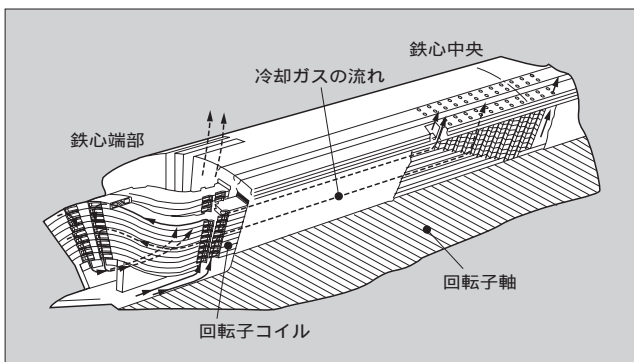


図6 回転子コイルの冷却



受安定度の低下などの制約から7程度が上限と考えている。この発電機の回転子のL/Dは5.1であって、まだ限界には至らないが、富士電機製として最大級のものである。図7に、L/Dの制約要因のなかでも重要と考えられるサーマルアンバランスの傾向を示す。例えば、回転子の周上の対向位置に1程度の温度不均一があっても、無視できないアンバランスを生ずることが分かる。

サーマルアンバランスを低減するための対策は、参考文献1を参照いただきたい。

4.5 スリップリング、ブラシ装置

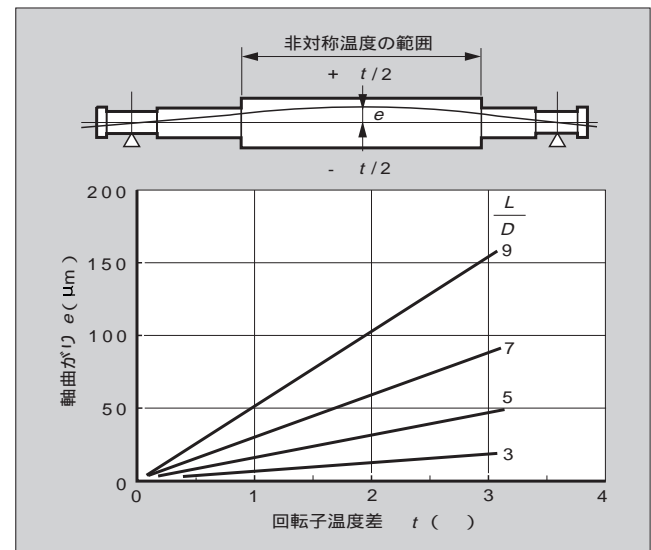
この発電機では、スリップリングとブラシ装置による界磁電流供給構造を採っている。今回の界磁電流5,030Aはスリップリングとブラシ装置構造としては、富士電機のこれまでの実績を超える。したがって、品質検証については、実運転状態を再現した最大定格電流による試験を実施して万全を期した。この結果、温度、電流密度など磯子火力発電所向けとしての検証にとどまらず、今後のスリップリングとブラシ装置に関するデータ蓄積のためにさまざまな試験、実験を実行し、多くの重要なデータを採取することができた。

4.6 密封油供給装置

軸貫通部における水素気密保持のための、密封油供給は複流式密封油供給装置によって行われている。油供給系統は図8に示すように、空気側および水素側の2系統に分かれて密封油を供給する。

本発電機においては、水素純度98.5%以上を連続して確保するために、空気側系統に油中に含まれる水分、空気などを真空脱気処理する機能を特別に追加する方法によって機内の高純度を維持する。この真空処理を併用した複流式密封油供給装置は、簡便かつ安価な方法で高純度が得られる方法である。すでに海外向けプラントの数台にて10年を超える運転実績がある。

図7 回転子非対称温度差と軸曲がりの関係



5 検証および試験結果

5.1 回転子静止通風試験

回転子コイルは軸方向直接冷却方式であるので、コイル温度は鉄心中央部で最高に達する。回転子コイルの温度は通常、発電機能力の上限を規定する重要な要素であり、温度解析の検証を実施することは、信頼性向上に大きく貢献する。したがって、計算精度の検証のために、静止通風試験を実施した。この検証試験は、コイルの温度を直接測定するために、温度素子を多数埋め込んだ実験用コイル群を製作工程において組み込み、実施した。

この試験状態を図9に示す。また、図10に計算値と測定値の比較を示す。図10に示すように、計算値と測定値は良

好な一致が認められ、精度の高い計算であることが検証できた。

また、今後の同一冷却方式の回転子に対する信頼性向上にも大きく貢献できる。

図10 回転子コイル温度実測値と計算値の比較

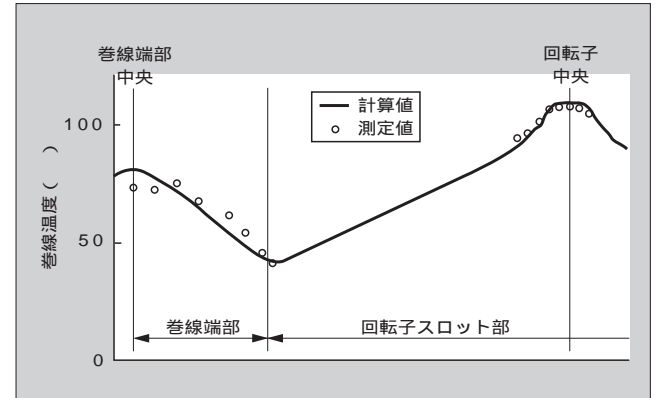


図8 密封油供給系統図

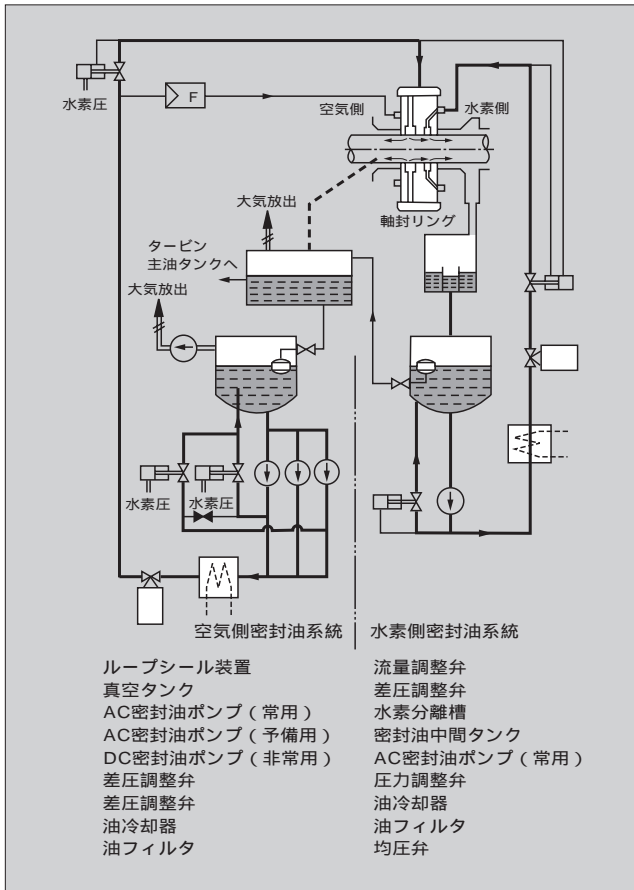


図11 発電機損失低減対策結果

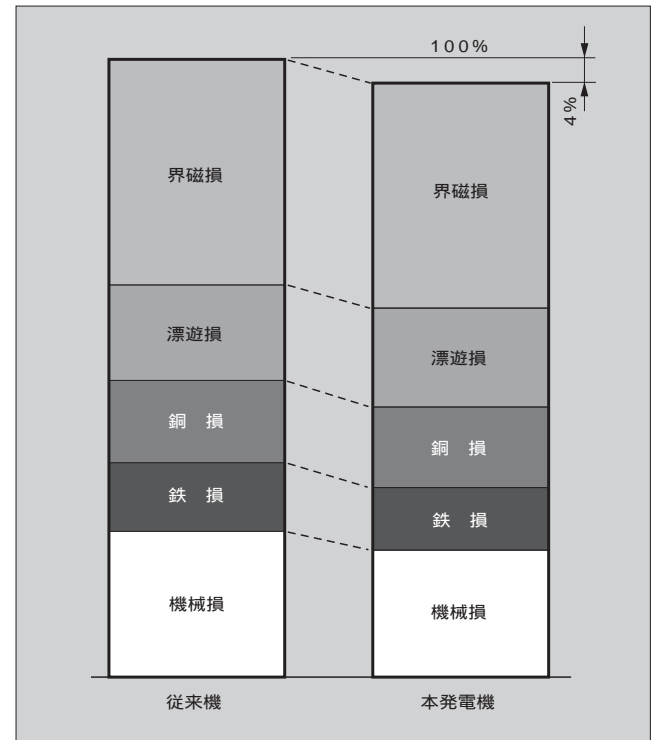


図9 回転子静止通風試験状態図

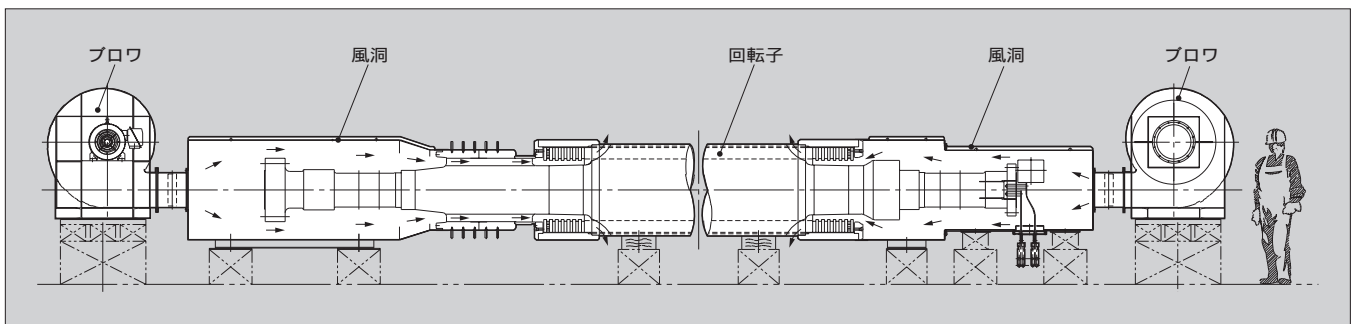


表2 工場試験時振動測定結果

部 位	方 向	X 方向	Y 方向
発電機前側軸受		35.1 μm	18.6 μm
発電機後側軸受		30.0 μm	26.4 μm
スリップリング軸受		33.1 μm	34.0 μm

5.2 工場試験結果

(1) 発電機発生損失

この発電機の発生損失測定結果を従来機と比較して図11に示す。このうち機械損と鉄損に低減が認められるが、機械損減少は冷却ガスの適正配分によって過剰な風量を節減したことによるものであり、鉄損減少は鉄心板の材質向上の効果である。この結果、発電機要求効率を満足することができた。

(2) 巻線温度上昇

定格負荷での巻線温度上昇は、

- (a) 固定子巻線：41.0 K
- b. 回転子巻線：37.2 K

であり、規格値を十分に下回っていることから、風量配分が適正であったことを検証できた。

(3) 振 動

振動の測定結果を表2に示す。全軸受部において、管理値 50 μm (p-p) に対して良好な結果である。

⑥ あとがき

本発電機は事業用火力発電機として、より高度な信頼性を得るため、設計、製作、試験の各ステップにわたる総合的な品質管理を行ってきたが、この過程で貴重な技術的成果と経験の蓄積が得られた。

本プラントは現在、現地建設の真っ最中であり、現地試運転へとステージが進んでいく。これまでの富士電機の現地品質活動を推進した経験を十分に生かし、さらなる品質向上をめざす所存である。

発電機の製作にあたり、ご指導をいただいた電源開発(株)の関係各位に厚く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 森安正司ほか：タービン発電機技術の進歩，富士時報，Vol.60，No.5，p.330-334 (1987)
- (2) 矢郷昌三ほか：東北電力(株)能代火力発電所1号機の発電機，富士時報，Vol.66，No.7，p.415-420 (1993)

最近登録になった富士出願

[特 許]

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
3099612	浮遊溶解装置	植村 浩	3101123	電流遮断装置	小林 学
3099654	冷蔵ショーケース設備	須藤 晴彦	3101124	マグネット点火装置	小林 学
3099681	交流電動機の変速制御装置	田島 宏一 海田 英俊 鉄谷 裕司	3101339	不燃性絶縁液体	仲神 芳武
			3101366	高温高圧蒸気の圧力容器	棚倉 信行
3099685	回路遮断器	浅川 浩司 内田 直司 濱 京嗣	3101998	過電流検出回路	三添 公義
			3102074	電気車の空転/滑走検出装置	岩堀 道雄 田村 浩明 依田 和之
3099690	回路遮断器	浅川 浩司 内田 直司 濱 京嗣	3102125	薄膜磁気素子	斎藤 明
3099731	自動販売機の商品取出口扉装置	佐藤 俊博	3102126	インクジェット記録装置	木佐 一之信 小糸 信之
3100580	ナトリウム冷却型高速炉の炉心支持装置	広木 篤博 尾崎 博 戸澤 克弘	3102138	光電スイッチ	菅原 聡
			3102154	畜冷・蓄熱機能付自動販売機	岩本 昌三 木村 幸雄

# 大容量全含浸 2 極空気冷却タービン発電機

木村 誠(きむら まこと)

日和佐 寛道(ひわさ ひろみち)

阿久津 信雄(あくつ のぶお)

## 1 まえがき

近年、コンバインドサイクルあるいはガスタービン発電機として、大容量全含浸 2 極空気冷却タービン発電機（空冷機）の需要が増大している。この背景には、空冷機が水素冷却タービン発電機に比べ、短期間での据付けが可能であること、初期投資額が低いこと、メンテナンスが容易であることなどの利点に加え、解析技術の進歩による信頼性の向上や効率の向上などが挙げられる。

富士電機では、このような市場ニーズにこたえるべく大容量全含浸空冷機の開発に取り組み、50 Hz 機では出力 300 MVA、60 Hz 機では出力 250 MVA の系列化を完了した。

この発電機は、富士電機が1999年に試作した 126 MVA 試作実験機での検証を基に、空冷機の大容量化に対する製品信頼性と経済性を兼ね備えた発電機である。

図 1 に大容量全含浸空冷機の断面構造を示す。

## 2 2 極タービン発電機の出力範囲と仕様

富士電機の 2 極タービン発電機の出力と冷却方式を図 2

に示す。

主な仕様は次のとおりである。

- (1) 出力 : 50 Hz 300 MVA 以下  
60 Hz 250 MVA 以下

図 2 2 極タービン発電機の出力と冷却方式

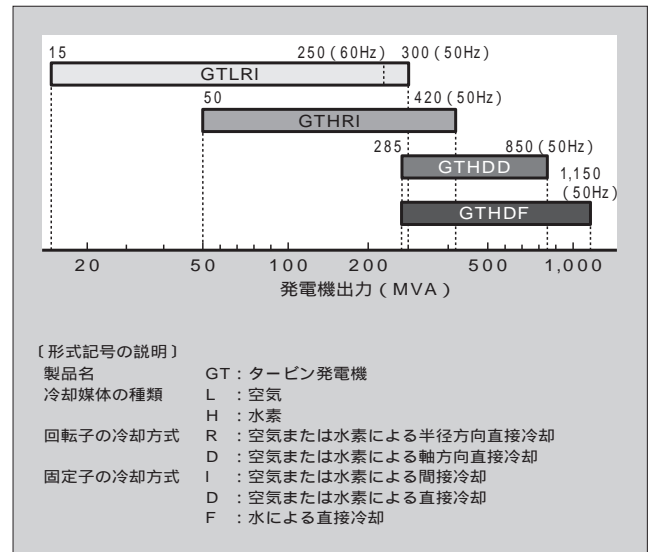
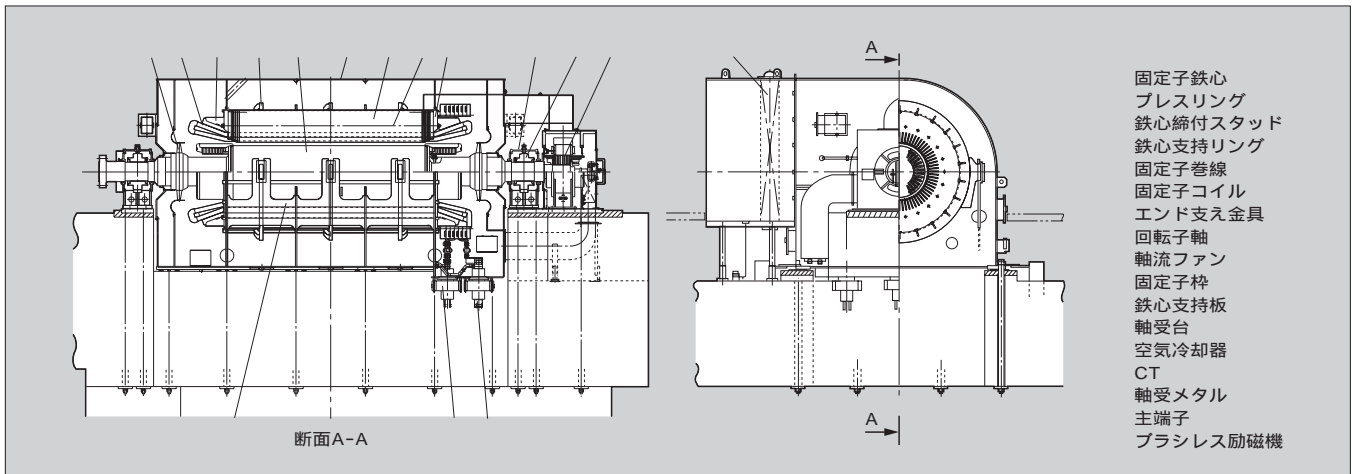


図 1 大容量全含浸空冷機の断面構造



木村 誠

大型回転機の電気設計および開発に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部。電気学会会員。



日和佐 寛道

大型回転機の電気設計および開発に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部課長補佐。電気学会会員。



阿久津 信雄

大型回転機の構造設計および開発に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部副参与。



- (2) 電 圧 : 11 kV , 13.8 kV ( 190 MVA 以下 )  
16 kV ( 200 MVA 以上 )
- (3) 力 率 : 0.85 ( 遅れ )
- (4) 絶縁階級 : F 種
- (5) 冷却方式 : 固定子.....間接冷却  
回轉子.....半径方向直接冷却
- (6) 励磁方式 : ブラシレス励磁方式  
サイリスタ励磁方式

③ 通風冷却

空冷機において通風冷却技術は大容量化を実現するための重要な要素の一つである。通風の最適化によって、発電機内の温度上昇を平準化させ利用率を高めることができ、さらに各部の風量・圧力損失を抑えることにより風損が減少し高効率化が可能となるからである。富士電機ではこれまでに、実験、解析を繰り返し、通風冷却技術の改良とともにその設計精度向上に努めてきた。近年では、流れ解析による機内通風シミュレーションが導入され、通風の最適化をより一層飛躍させている。

3.1 固定子の通風冷却

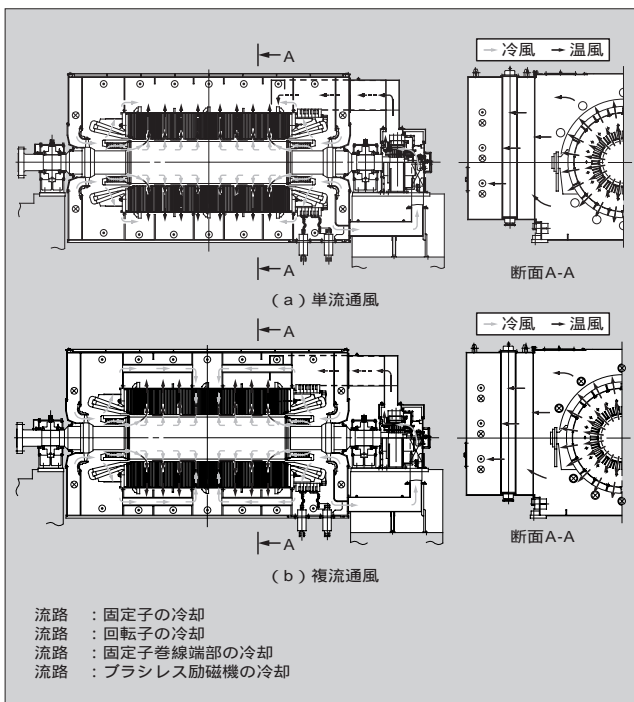
図3に固定子間接冷却発電機の通風方式を示す。

図3(a)は冷却風を軸端の軸流ファンにより固定子の両端部から送り込む方式で、単流通風と呼んでいる。この方式は主に、比較的鉄心長の短い小・中容量の発電機に採用され、固定子枠の構造が簡素化されるなどの長所を持つ。

固定子鉄心の冷却ダクト配置を最適にすることによって巻線温度の均一化を実現している。

固定子両端から送り込まれる冷却風は固定子鉄心内径部

図3 固定子間接冷却発電機の通風方式



および回轉子の熱を吸収しながら空気を流れるため、鉄心長の長い発電機では中央部の冷却風温度が上昇し、その分固定子巻線の温度も高くなる。この場合、冷却風量を増加させる対策も考えられるが、これは風量増による風損の増加およびファン部での冷却風の温度上昇をきたすことから効果が小さい。

これらの理由から、鉄心長の長い空冷機では、図3bに示す複流通風が適している。この方式は冷却風を固定子の両端部と中央部から送り込む方式で、鉄心中央部を温度の低い冷却風で冷却するので、風量を必要以上に増加させることなく巻線の温度を低減し、均一化することが可能である。

実際の設計において、個々の発電機にいずれの通風方式を適用するかは、通風回路網計算と巻線温度計算により詳細検討を行い最適となる通風方式を採用している。同様に、通風ダクト配置についても最適化を図っている。

3.2 回轉子の通風冷却

回轉子の通風冷却技術は、126 MVA 試作実験機での検証を基に開発された新技術を採用している。図4に回轉子巻線の通風構造を示す。

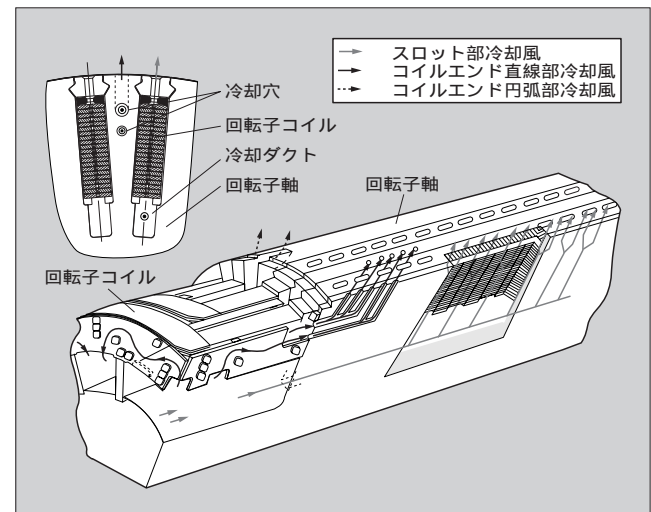
この通風構造は次の特長を持っている。

- (1) 回轉子スロット部の巻線導体冷却穴を従来の直角から図に示すような斜めにしたことにより、軸方向の風量分布が均一化され端部側の風量が増大し、軸端部および近接する保持リング部の導体温度を低減できる。
- (2) 保持リングによって保持される回轉子巻線端部の冷却は、流路をコイルごとに通風する方式を採用しており、端部巻線が一様に冷却されるよう工夫されている。

さらに巻線端部の温度上昇を低減させる対策として、周方向の巻線導体幅を軸方向の導体幅よりも大きくし、抵抗損を減らしている。

これらの通風技術の優位性は、流れ解析や126 MVA 試作実験機での検証から確認されている。

図4 回轉子巻線の通風構造

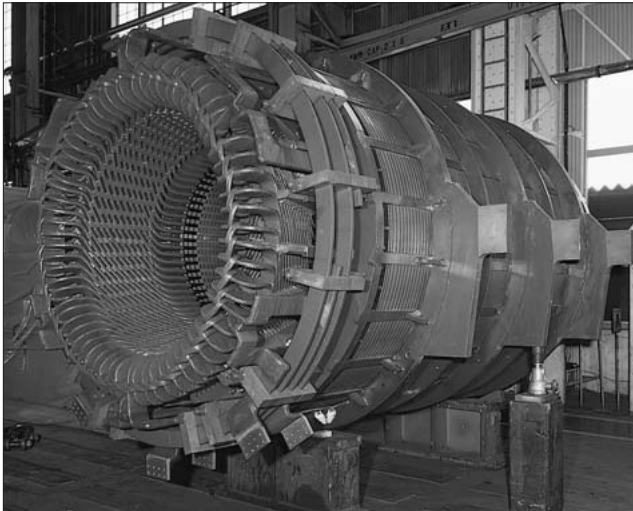


4 絶 縁

4.1 全含浸固定子絶縁

固定子巻線の絶縁には全含浸絶縁方式を採用している。主絶縁にはガラス基材の集成マイカテープを用い、内部および外部コロナ防止を施した後、固定子鉄心スロットに挿入してエポキシ樹脂を真空含浸する。図5は、含浸後の完成した固定子の外観を示す。

図5 含浸後の完成した固定子の外観



N89-6681-2

図6 全含浸固定子絶縁システム

固定子巻線絶縁システムの特長  
全含浸絶縁方式による ○メンテナンスフリー  
○冷却効果の向上

項目	技術項目	全含浸絶縁方式	通常絶縁方式
メンテナンスフリー	コイルの振動防止	特殊充てん材の保持力による振動防止	スプリングライナの挿入による振動防止
	コイルエンドの経年的なゆるみ防止	樹脂によるコイルエンドの一体化	定期的なコイルエンド点検とゆるみ補修
	固定子くさびの経年的なゆるみ防止	樹脂によるくさびの接着	定期的なくさびの点検とゆるみ補修
	固定子鉄心の経年的なゆるみ防止	樹脂による鉄心の接着	定期的な点検とゆるみ補修
冷却向上	鉄心の防錆	樹脂による鉄心のコーティング	定期的な点検と補修
	巻線温度低減	スロットとコイルの間の空けきは樹脂で充てんされ、熱抵抗が減少する。	スロットとコイルの間の空けきがコイル冷却の熱抵抗となる。

全含浸絶縁方式

特殊充てん材

電磁力

スロットすきまへの樹脂の充てん

通常絶縁方式

スプリングライナ

スロットすきま

全含浸システムは、富士電機の小容量機で利用していた技術を改良拡大したのであるが、欧州のメーカーでは空冷機にとどまらず、水素冷却タービン発電機にも適用されており、今後の主流と見られる絶縁方式である。

個々に鉄心スロットにコイルを挿入する通常の絶縁方式に比べ、図6に示すように種々の利点を持っている。

4.2 回転子絶縁

回転子巻線の絶縁にはF種絶縁を採用しており、耐熱性が高く、高強度のガラスエポキシ積層板を中心素材として使用している。

また導体と絶縁物の熱膨張差により、すべりが生じ、この部分に摩擦粉が発生するのを防止する対策も実施されている。

5 全含浸固定子の構造

固定子枠は上下二分割構造を採用している。下部枠には固定子鉄心と固定子巻線からなる固定子が支持されている。固定子は電磁力により、だ円形に変形し、その変形が回転サイクルで回転するので、これを支持する固定子枠には回転の倍サイクルの振動が発生する。富士電機ではこの振動問題を回避すべく、すべての空冷機の固定子をばね支持する構造を採用している。固定子をばね支持することにより、固定子枠の振動は固定子鉄心の振動の約 1/7 に低減することが実証試験で確認されている。

また、固定子枠は、突発短絡時の強度確保と回転周波数および2倍周波数の励振力との共振を回避する必要がある。このため、設計時に有限要素法による強度および固有振動解析を行っている。解析の対象となる主要部品は、上下固定子枠、固定子鉄心、固定子巻線であり、解析モデルの作成で特に重要なことは、固定子巻線の剛性を考慮した固定子鉄心の等価剛性と、固定子枠の基礎設置部の境界条件である。富士電機はこれまでに多数の発電機に対し、固定子鉄心の荷重試験、全含浸後の固定子の加振テスト、さらには発電機全体の加振テストを実施し、これらに関する豊富

図7 2相突発短絡時の固定子枠の応力解析結果

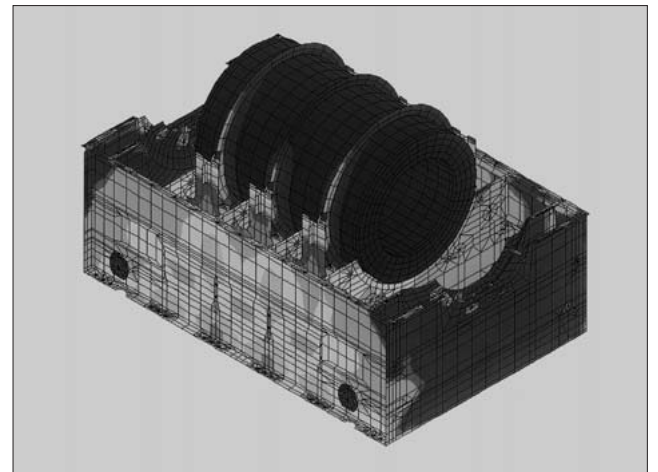
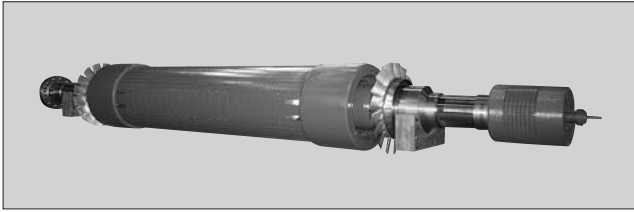


図 8 回転子の外観



N89-6681-44

な基礎データを有している。

これらの強度および固有振動解析により、固定子枠は高剛性構造で、振動上も問題となる固有振動数は存在しないことが確認されている。図 7 に 2 相突発短絡時の固定子枠の応力解析結果を示す。

⑥ 回転子の構造

回転子には、強大な遠心力が作用するので、各部品は高強度で、信頼性の高いものでなければならない。このため、回転子軸には高強度、高靱性の NiCrMoV 鋼が使用され、界磁巻線端部を保持する保持リングには、非磁性で応力腐食割れ感度が低く、高靱性、高強度の 18Mn18Cr 鋼が使用されている。また、界磁巻線にはクリープ特性に優れた銀入り銅が使用され、界磁巻線をスロット内に保持する回転子くさびには高強度と高導電率を兼ね備えた特殊合金が使用されている。

また、大容量空冷機の回転子は、細長い形状をしているため振動対策が非常に重要である。富士電機が実施している主要な振動対策は次のとおりである。

- (1) 回転子軸中央部の剛性の非対称性を極力低減する。
  - (2) サーマルアンバランスを小さくするために、界磁巻線および回転子くさびの熱膨張を拘束し過ぎぬよう、摩擦係数を低減する。
  - (3) 軸の軸受ジャーナル部の真円度を高める。
  - (4) オーバハンク形ブラシレス励磁機を小型・軽量化する。
- 図 8 に回転子の外観を示す。

⑦ ブラシレス励磁機および磁石同期発電機

富士電機は、励磁方式として標準的にブラシレス励磁方式を採用している。この励磁装置の構造上の特長は、回転整流装置を交流励磁機に内蔵することで小型・軽量化を実現し、発電機全体の振動を抑制している点である。さらに、励磁機を軸端にオーバハンク取付けとすることによりメンテナンス性の向上が図られている。

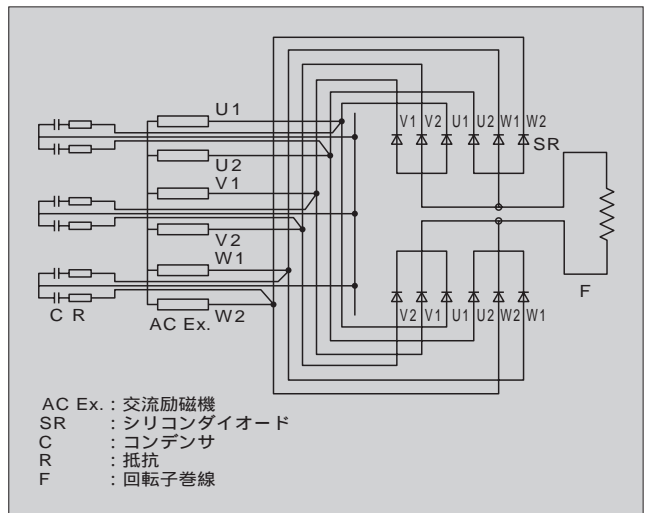
また富士電機はブラシレス励磁機の励磁電源として、系統事故による電圧降下があっても励磁機に励磁電源を安定的に供給できる磁石同期発電機 (PMG) を標準的に採用している。この PMG に対してもエネルギー積が非常に大きい希土類磁石を使用することにより、小型・軽量化を図っている。図 9 にブラシレス励磁機の外観、図 10 にブラシレ

図 9 ブラシレス励磁機の外観



N89-6681-25

図 10 ブラシレス励磁機の結線図



ス励磁機の結線図を示す。

⑧ あとがき

大容量全含浸 2 極空気冷却タービン発電機についての構造と特長について述べた。これらの技術を適用した発電機は、126 MVA 試作実験機や高度な解析手法によって詳細検証が実施されたものであり、十分な信頼性を有している。今後も市場の要求にこたえるべく空冷機の大容量化と性能向上に努める所存である。

参考文献

- (1) 日和佐寛道ほか：2 極空気冷却タービン発電機の損失，電気学会研究会資料回転機研究会，RM-00-9 (2000)
- (2) 木村誠ほか：2 極空気冷却タービン発電機の漂遊負荷損の検討，電気学会全国大会，5-009 (2000)
- (3) 三村一郎・佐藤昭二：新系列 2 極空気冷却タービン発電機の完成，富士時報，Vol.72，No.5，p.263-266 (1999)



# コンバインドサイクル発電所用昇圧変圧器

安部 正彰(あべ まさあき)

松瀬 圭介(まつせ けいすけ)

大野 佳雄(おの よしお)

## ① まえがき

近年、高い熱効率、経済的な優位性、環境への優しさなどの特長があるコンバインドサイクル発電プラントの建設が増加してきている。富士電機も表1に示すように、国内電力会社の火力発電所用昇圧変圧器を多数製作、納入してきているが、最近ではコンバインドサイクル発電所用を相次いで出荷し、着実にその設計ノウハウを積み重ねている<sup>(1)</sup>。

一方、電力自由化の流れのなかで、発電所建設コストの見直しが進み、昇圧変圧器単体をとってみても、変圧器本

体、輸送、現地工事、それに基礎も含めたトータルコストの低減が強く要請されている。

本稿では、このような要請にこたえるべく、富士電機がコンバインドサイクル発電所用昇圧変圧器に最近適用している技術の一端を紹介する。

## ② 全装輸送式変圧器<sup>(2)</sup>

一般に、変圧器は工場試験完了後、外装部品を取り外して輸送し、現地で再度組み立て直すという工程を踏んでい

表1 最近の国内電力会社向け火力発電所用昇圧変圧器の納入実績

納入年 (工場出荷年)	納入先	台数	容量 (MVA)	電圧 (kV)	Hz	冷却方式	備考
1990年	東京電力(株) 東扇島火力発電所 2号	1	1,100	19.5/280	50	送油風冷	別置形負荷時タップ 切換器付き
1990年	北陸電力(株) 敦賀火力発電所 1号	1	530	19.5/275	60	送油風冷	負荷時タップ切換器付き
1993年	東北電力(株) 能代火力発電所 2号	1	620	19.4/275	50	送油風冷	負荷時タップ切換器付き
1993年	北陸電力(株) 七尾大田火力発電所 1号	1	530	19/275	60	送油風冷	負荷時タップ切換器付き
1995~1996年	東京電力(株) 横浜火力発電所 7&8号系列	4 4	395 395	22.5/283 22.5/148	50 50	送油風冷 送油風冷	
1996年	東北電力(株) 原町火力発電所 2号	1	1,050	19.5/275	50	送油風冷	負荷時タップ切換器付き
1997年	北陸電力(株) 七尾大田火力発電所 2号	1	740	25/275	60	導油風冷	負荷時タップ切換器付き
1997年	中部電力(株) 新名古屋火力発電所 7号系列	6	265+9	17.6/281 18/6.9	60	送油水冷	主変圧器+直結変圧器 (所内変圧器),ファン タンク収納形,全装輸送式
1997~1998年	東京電力(株) 千葉火力発電所 1&2号系列	4 4	380 380	21.5/281.25 22.5/281.25	50 50	導油風冷 導油風冷	全装輸送式
1999年	北陸電力(株) 敦賀火力発電所 2号	1	740	25/275	60	導油風冷	負荷時タップ切換器付き
1999年	電源開発(株) 橘湾火力発電所 2号	1	1,100	20/510	60	導油風冷	
1999年, 2000年	東京電力(株) 富津火力発電所 3号系列	2	2×410 /820	2×22.5/525	50	導油風冷	スプリット形
2000年	東京電力(株) 品川火力発電所 1号系列	3	395	22.5/154	50	導油風冷	負荷時タップ切換器付き 全装輸送式

注 網掛け部はコンバインドサイクル発電所



安部 正彰

火力発電設備の電気機器のエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー火力事業部電気制御技術部課長。電気学会会員。



松瀬 圭介

国内電力会社向け変電設備のエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー電機・交通システム事業部変電技術部。



大野 佳雄

電力用および工業用油入変圧器の設計に従事。現在、変電システム製作所変圧器部。



る。これに対し、工場完成状態のまま輸送し、現地で据え付けることができれば、現地工程の大幅な短縮のみならず製品の信頼性向上にも大きく寄与することができる。特に火力発電所の場合、岸壁があるため海上輸送が可能で、構内の輸送制限も一般公道より緩やかであるため、最近では可能な限り全装輸送式変圧器の適用を進めている。

全装輸送式変圧器の実現にあたっての基本的な狙いをまとめると図1のようになる。

2.1 変圧器構造の見直し

(1) 防音壁の省略と冷却器の本体マウント

防音壁付変圧器の場合、現地で組み立てるうえに、冷却器は防音壁の外側に別置されるため、全装輸送は困難である。このため、ステップラップ方式接合鉄心や制振鋼板などの新しい低騒音化技術を採用して、防音壁の省略を実現した。これにより、冷却器の本体マウントも可能となった。

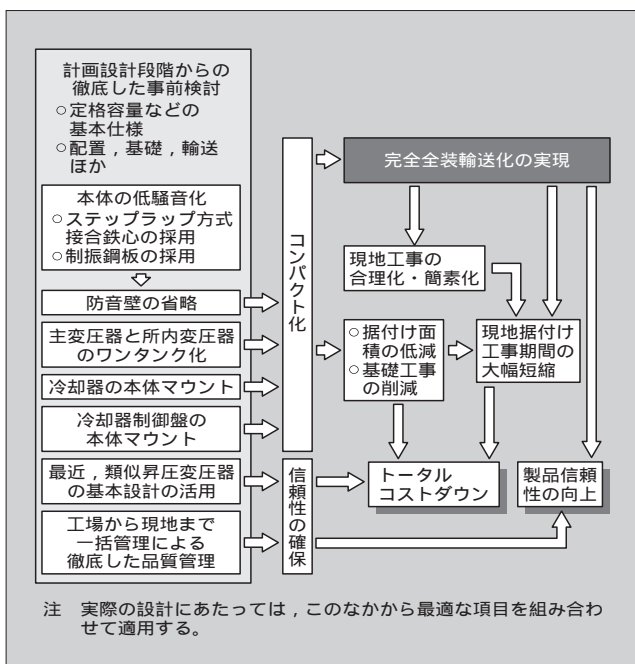
(2) 冷却器制御盤の本体マウント

冷却器制御盤は変圧器近傍に別置されることが多いが、変圧器本体にマウントして工場で試験した状態のまま輸送することにより、現地での変圧器本体とのケーブル接続工事が不要となる。ただし、変圧器から伝わってくる振動に対して、防振ゴムの適用などの対策を実施している。

(3) つり上げを考慮した外装部品のレイアウト

すべての外装部品を取り付けた状態でつり上げるためには、変圧器の重心位置がほぼ中央になるように、かつ、つりワイヤと部品との干渉がないように、部品の配置を検討する必要がある。具体的には、冷却器の左右対称配置や、一次、二次の取り合い点のバランスの良い配置などの工夫をしている。このため、設計レビューには物流部門も参画し、設計の早い段階から輸送方法や現地の条件を考慮して、変圧器構造の決定を行っている。

図1 全装輸送式変圧器設計のポイント



2.2 現地輸送と据付け工事

発電所構内の輸送にはスーパーキャリアを、基礎上でのつり降ろし、オンベッド作業にはリフトシステムを用いている。これにより、岸壁での水切りからオンベッドまで1日で安全に完了することができ、据付け工事期間も従来に比べて30～50%短縮することが可能となった。

図2、図3に現地輸送状況を示す。

③ 低減容量の採用

一般の汽力発電プラントの発電機出力は、気温に関係なく一定であるが、コンバインドサイクル発電プラントでは、ガスタービンの特性から図4に示すとおり、気温に反比例して気温が高くなるほど出力が低下する。つまり、コンバインドサイクル発電用の変圧器は、気温が高くなれば負荷が減少することになる。

一方、変圧器の寿命は、その巻線最高点温度に最も大きな影響を受ける。すなわち、巻線最高点温度が高いほど、変圧器の寿命損失が増加することになる。

図2 スーパーキャリアによる構内輸送



図3 リフトシステムによる据付け作業



図4 発電プラントの発電機出力特性

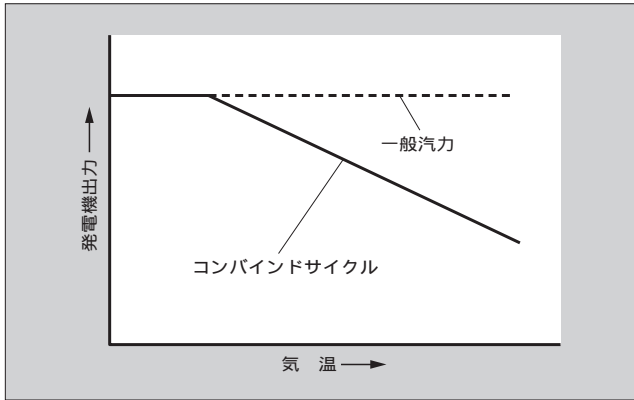
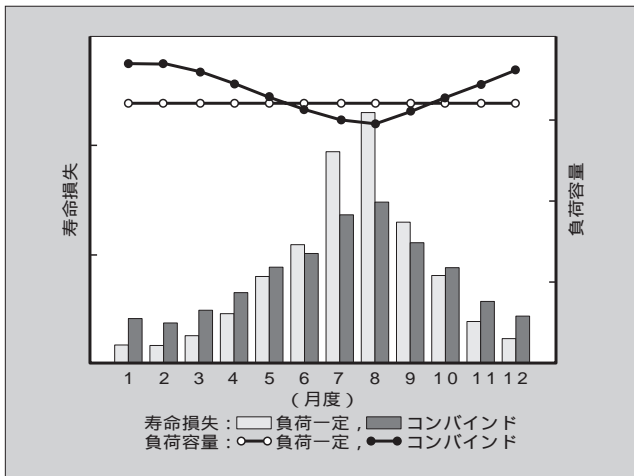


図5 変圧器の寿命損失と負荷容量



一定負荷の変圧器の場合、気温の高い夏場に巻線最高温度が高くなり、寿命損失の大半を消費することになるが、逆に、コンバインドサイクル発電用変圧器では、気温の高い夏場に変圧器負荷が減少するので、巻線最高温度が低くなり、一定負荷の変圧器に比べると年間の寿命損失は少なくなる。

そこで、図5に示すように、変圧器が設置される場所での毎月の気温の変化を考慮して、

$$〔コンバインドサイクル用変圧器の年間寿命損失〕 = 〔一定負荷の変圧器の年間寿命損失〕$$

となるような一定負荷の変圧器容量を求め、これに若干の余裕を加えて、コンバインドサイクル用変圧器の定格容量としている。こうすることで、冬場のコンバインドサイクル発電プラントの最大出力に見合った変圧器容量よりも低減された定格容量を選定することができる。

#### 4 スプリット形変圧器

##### 4.1 巻線構造

従来、発電所の昇圧変圧器は、1台の発電機に対して1台設置されるのが一般的であるが、最近のコンバインドサイクル発電所では、変圧器設置スペースの削減や変圧器と開閉装置を含めた機器全体のコストダウンを図るため、図

図6 主回路結線図

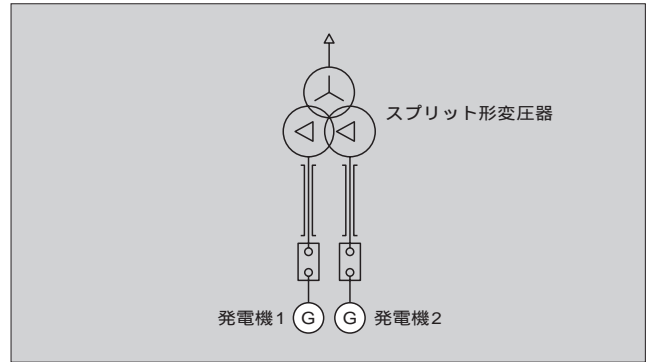


図7 スプリット形変圧器の巻線配置

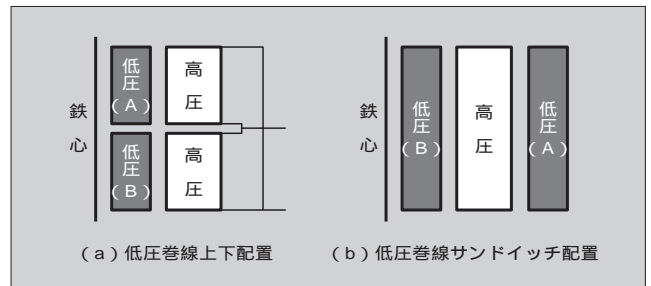


図8 低圧巻線（上下配置）



6に示すように、発電機2台に対して変圧器1台を設置するケースがある。このように同一定格の低圧巻線を二つ有する3巻線変圧器をスプリット形と呼んでいる。

スプリット形変圧器の巻線配置には、図7に示すような低圧巻線を上下に配置する方式と、低圧巻線で高圧巻線をサンドイッチのようにはさむ配置方式があるが、富士電機では、高圧巻線が外側にあるため高圧リードの引出しが容易となる低圧巻線上下配置を採用している。図8に低圧巻線の製作状況を示す。

##### 4.2 設計上の留意点

低圧巻線上下配置の変圧器の場合、簡単にいえば2台の同一定格の変圧器を上下に重ね合わせたような構造であり、高圧巻線も低圧巻線と同様に上下に分かれて、それが並列接続されている。このため、低圧巻線の一方のみが運転さ

図9 スプリット形変圧器の巻線磁界マッピング例

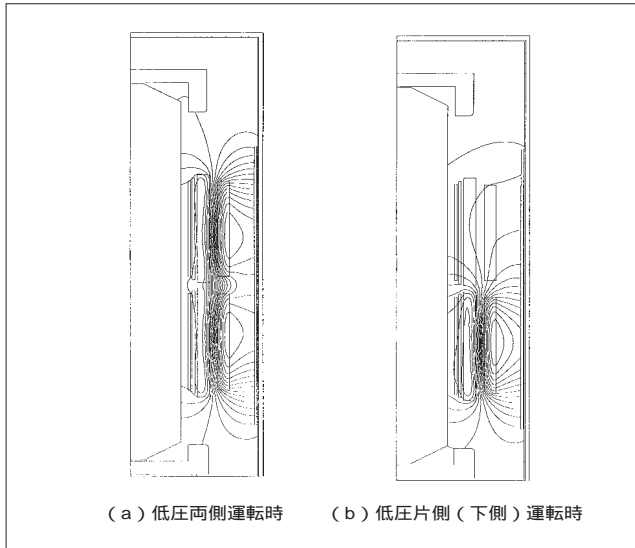
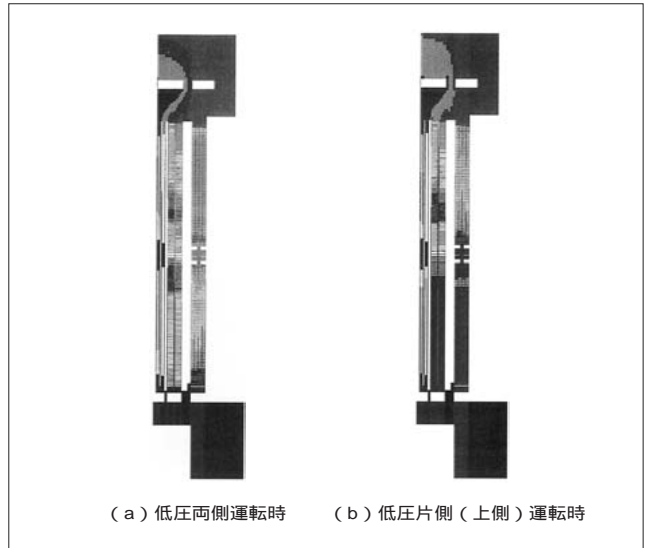


図10 スプリット形変圧器の巻線温度解析例



れる片側運転時に、設計上、留意すべき事項がでてくる。

(1) インピーダンス整合

高圧巻線が上下に並列接続されているために、片側運転時は高圧巻線の上側と下側とにある割合で電流が分流することになる。この分流割合を精度の高い解析を行って把握し、インピーダンスの整合を十分確認する必要がある。

(2) 漏れ磁束対策

前項で述べたように、片側運転時の電流分布が不均一となるため、漏れ磁束分布が両側運転時に比べて巻線端部領域において非対称となる。この漏れ磁束分布については、漏れ磁束解析を行い、各構造部分に局部加熱を発生させないように十分な対策を実施する必要がある。図9に磁界マッピングの一例を示す。片側運転時は、漏れ磁束の分布が巻線中央部で鉄心側とタンク側に還流し、分布が上下対称とならないことが分かる。

(3) 冷却設計

同容量の低圧巻線が二つあるため、例えば、変圧器の負荷率が50%といってもいろいろなケースが想定される。一例として、両方の低圧巻線の負荷が均等に半分になっている場合と、片側巻線のみ全負荷運転している場合とを考えてみても、発生する負荷損は異なってくる。すなわち、負荷率100%の変圧器で発生する負荷損に比べて、前者の場合に発生する負荷損は約25%となるのに対し、後者の

場合のそれは約50%となる。さらに実際には、漏れ磁束の影響を受けて停止側の巻線からも損失が若干発生するため、片側運転時に発生する負荷損は50%よりも大きくなる。スプリット形変圧器では、これらのことを十分考慮して冷却器の制御システムを検討する必要がある。

なお、図10に巻線の温度解析例を示す。停止側の巻線に、運転側の影響が及んでいることが分かる。

5 あとがき

昇圧変圧器は、本稿で述べたコンバインドサイクル発電所用に限らず、火力発電設備の重要な機器としての高信頼性の確保はもとより、コンパクト化やコストダウンの要請が、今後ますます高まるものと考えられる。

富士電機はこれまでの経験を生かしながら、新たな技術開発を進め、これらの要請に的確にこたえていく所存である。

参考文献

(1) 大久保堅司ほか：最近の変圧器技術，富士時報，Vol.71，No.9，p.488-493（1998）  
 (2) 齋藤義夫：全装輸送式大容量変圧器，電気評論，Vol.84，No.3，p.16-18（1999）

# タービン・発電機用統合制御装置

小島 広司(こじま ひろし)

高村 隆太(たかむら りゅうた)

## 1 まえがき

火力発電事業の分野では1997年の電気事業法の改正や2000年の電力小売りの部分自由化や規制緩和の波を受けて、ユーザーのメーカーに対する価格低減の要求は年々強くなってきている。一方、電力の供給についてはその重要性から、信頼性維持も併せて要求されている。

富士電機は火力タービン制御装置である電子油圧式调速装置(ガバナ)と発電機制御装置である自動電圧調整装置(AVR)をそれぞれ32ビット汎用プログラマブルコントローラ(PLC)によりデジタル化した。さらにPLCの高速化に伴い低価格化・省スペース化を狙い、ガバナとAVRの機能を一体化した、タービン・発電機用統合制御装置を開発した。信頼性については、多重化(二重化、三重化)を行うことにより確保している。

数万kW～十数万kWの自家用火力発電所、IPP(独立系発電事業者)設備をターゲットとして開発し、1989年の初号機から納入実績もすでに40台を超え、順調に運転を継続している。なお、輸出プラントについては、コストパフォーマンスを勘案し、600,000kWクラスの火力発電設備に三重化タービン・発電機用統合制御装置(TGR)を適用した例がある。

## 2 タービン・発電機用統合制御装置

### 2.1 高信頼性システム

ガバナとAVRの一体化によって集中度が上がったので、制御装置を二重化システムや三重化システムにすることによって高信頼性を確保している。各システムの特徴は以下のようなものになる。

#### (1) 一重化システム

1台の制御装置からなる最も安価なシステム形態である。また、万一の故障に備えて、運転の継続や安全停止が行えるよう最小限のマニュアルバックアップ装置を具備している。

#### (2) 二重化システム

主に自家用火力発電所やIPP向けに適用され、2台の制御装置による運転・待機冗長形(デュプレックス)システムである。切換時の制御を変動なく行えるよう、待機側は運転側の制御データを定期的にコピーし、運転側に故障などが発生した場合は、高速で待機側へ切り換えるようになっている。経済性と信頼性の両者を取る場合に採用される形態である。

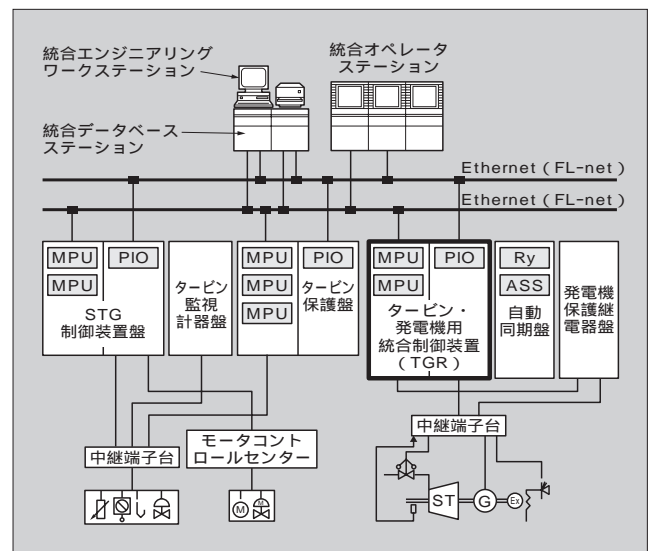
#### (3) 三重化システム

事業用・自家用大容量発電システムに採用され、3台の制御装置からなるシステムである。3台の制御装置は互いに独立して非同期で運転され、その出力信号については、デジタル出力は2 out of 3(多数決)、アナログ出力は中間値選択が行われる。また非同期で運転しているため、定期的に制御装置間のデータの補正も行っている。1台故障時においても3台の多数決出力によって制御されているので切換が発生せず信頼性が最も高い形態である。

### 2.2 TGRのシステム構成

IPP向け火力発電所のタービン・発電機の制御・保護シ

図1 IPP向け火力発電所の制御・保護システム構成



小島 広司

火力発電設備の制御・保護システムの設計に従事。現在、電機システムカンパニー火力事業部電気制御技術部。



高村 隆太

火力発電設備の制御・保護システムの設計に従事。現在、電機システムカンパニー火力事業部電気制御技術部。



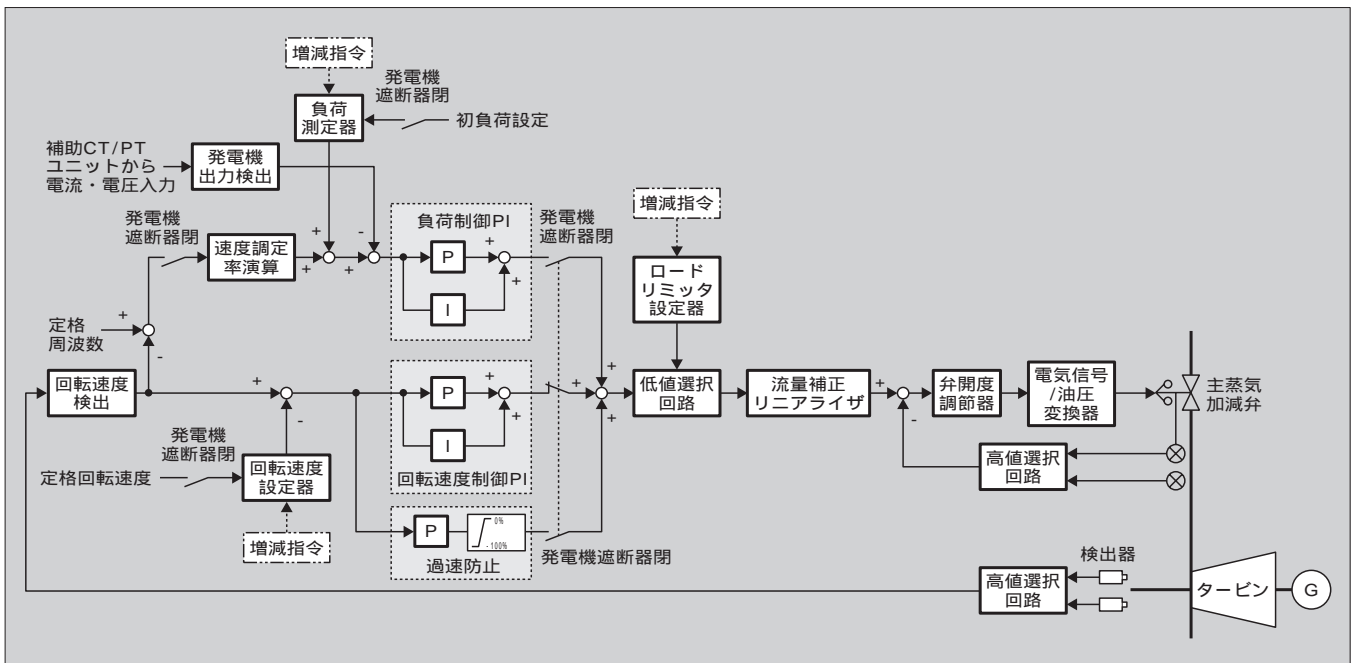
システム構成を図1に示す。図中、太枠線部が本稿で述べるTGRであり、本プラントでは二重化システムを採用している。TGRはFL-net（FAコントロールネットワーク）によってオープン統合分散監視制御システム（タービン保護盤やSTG制御装置盤、統合オペレータステーション、統合データベースステーション、統合エンジニアリングワークステーション）と連携されている。こうした伝送形態の採用により現地建設工程の大幅な短縮化が可能になるとともに、システム構成の変更に柔軟に対応することができる。

次に、二重化システムの外観を図2に示す。オプション機能であるプログラマブル操作表示器（POD）が盤面に設置され、各種警報や状態の表示、設定値の設定を行うことができる。従来の集合表示灯や操作スイッチを用いる場合に比べて、操作性や保守性、可視性を向上させている。

図2 二重化 TGR の外観



図3 ガバナ基本機能構成



### 2.3 TGRの機能

#### (1) ガバナ機能

ガバナの機能は次のとおりである。図3にガバナ基本機能構成を示す。

- 回転速度制御
- 出力制御
- ロードリミッタ制御
- 自動昇速
- 自動初負荷取り
- 速度調定率演算（ガバナフリー）
- 加減弁開度制御
- ロードシェディング（先行加速防止）
- 圧力制御〔主蒸気圧（前圧・限界圧）、抽気圧、混気圧〕

電力一定制御（APC）

周波数一定制御（AFC）

（～はオプション機能）

#### (2) AVR機能

AVRの機能は次のとおりである。図4にAVR基本機能構成を示す。

- 自動電圧調整
- 電圧調定率演算（ドループ）
- ソフトスタート
- 界磁電流制限
- 過不足励磁制限（進相・遅相無効電力制限）
- V/F補償
- 手動電圧調整
- 回転整流器故障検出
- 自動無効電力制御（AQR）

図4 AVR基本機能構成

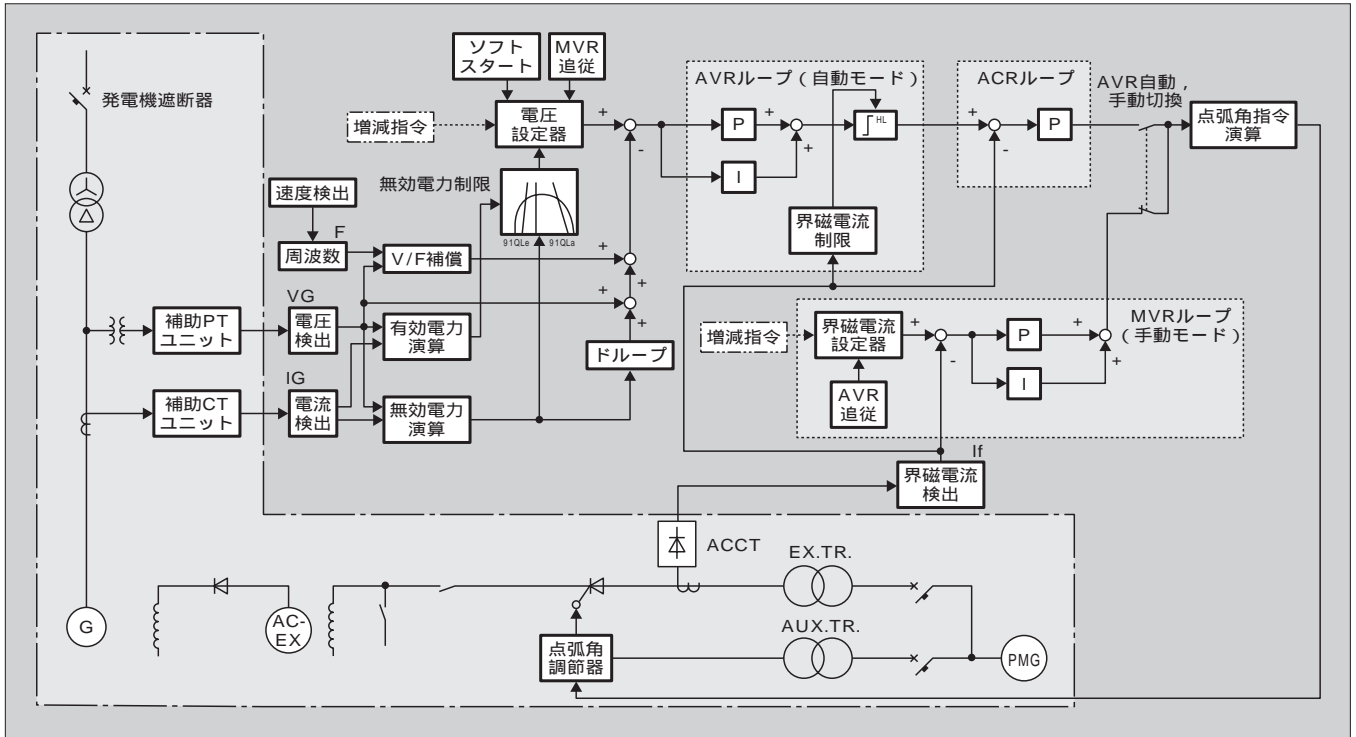


図5 AVR操作画面

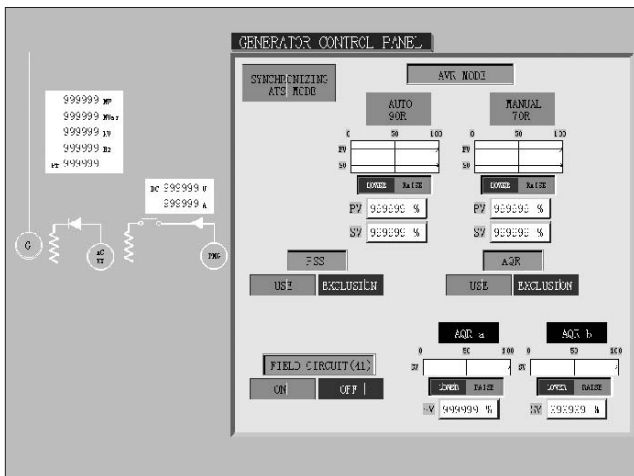
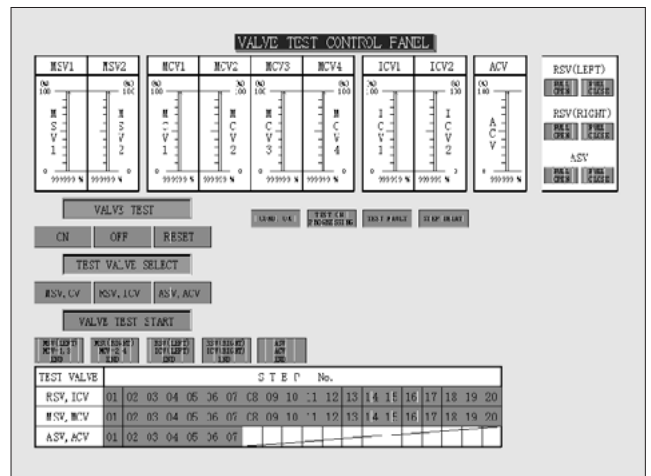


図6 AVT操作画面



自動力率調整 (APFR)

系統安定化 (PSS)

( ~ はオプション機能)

(3) タービン自動起動機能 (ATS), 自動停止機能 (ASD)

タービン起動指令を受けて、ドレン弁などの電動機や弁のリセット用電磁弁などに制御信号を出力し、リミットスイッチなどからのチェックバック信号入力により、起動ステップを一つずつ確認しながら、タービンを自動的に立ち上げていくのがATSである。同様にタービンを自動的に停止させるのがASDである。

(4) 自動弁試験機能 (AVT)

タービンの蒸気を遮断する止め弁と蒸気流量を制御する加減弁は、通常の運転で正常に動作するのはもちろんであるが、事故が起きた場合には確実に弁を閉めてタービンを

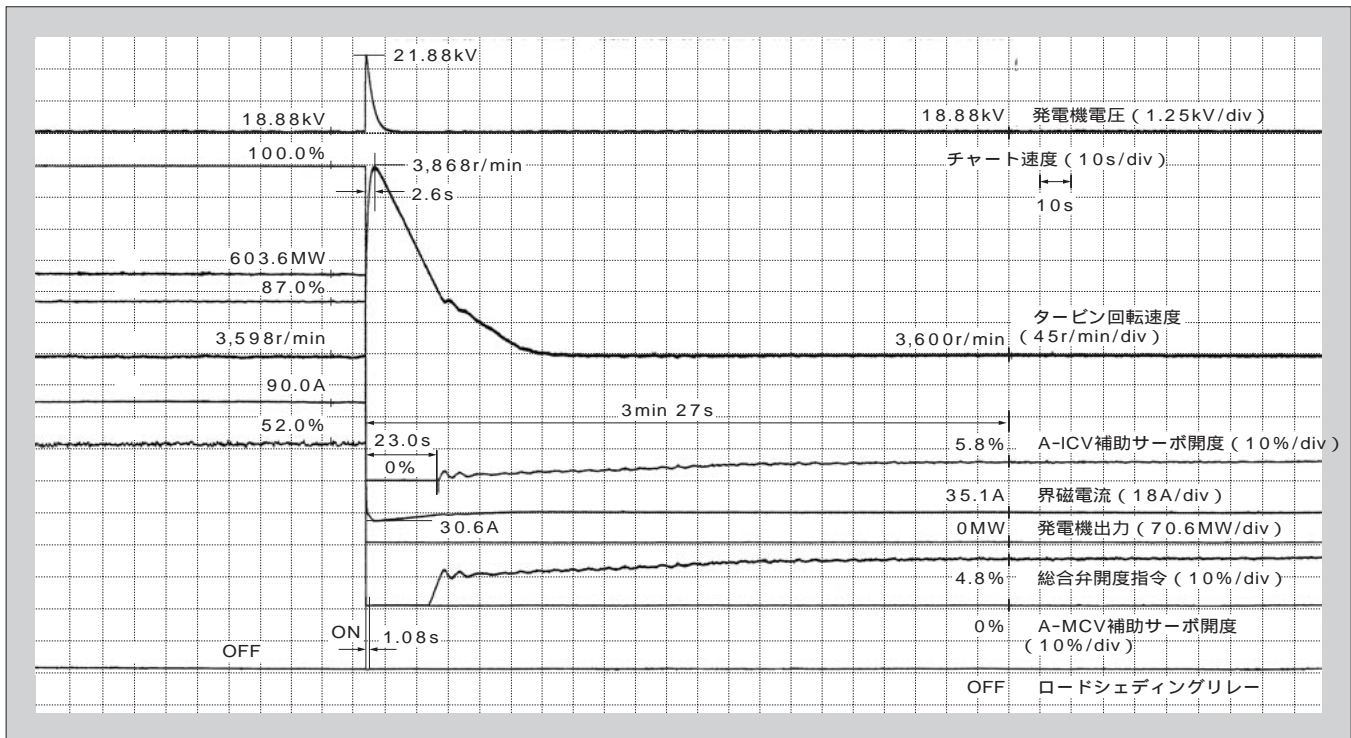
安全に停止させる責務を果たす必要がある。そのため、タービンが運転中に定期的にこれらの弁が正常に動作することを確認する必要がある。本機能により運転中自動的に弁の正常動作試験を行うことができる。

上記1)-(4)の機能の操作画面の例として図1のシステムにおける統合オペレータステーションのAVRとAVTの操作画面を図5と図6にそれぞれ示す。本ステーションでは、プラントの警報などの情報を表示するとともに、タッチスクリーン方式にてプラントの操作を行うことができる。

ステーション-統合制御装置間の通信はFL-netを使用し、ガバナ、AVR、ATS、AVTなどの制御指令・設定値および状態監視の情報交換を行っている。

また、TGRの保護制御特性の例として100%負荷遮断における現地試験結果を図7に示す。

図7 100%負荷遮断現地試験結果



③ 制御装置の特徴

3.1 富士電機製 32 ビット汎用 PLC「MICREX」の採用  
 MICREX は設定（システム定義）により動作モード（一重化，二重化，三重化）を定義できるので，タービン回転速度・交流電圧・交流電流を検出する特殊検出ボードを除くと，他分野とハードウェアを共有化することができる。これにより，信頼性向上や製作リードタイムの短縮化，アフターサービスの充実を図っている。富士電機は従来からの分散制御システム（DCS）の資産を継承しながら，信頼性と高速応答性を確保しつつオープン化に対応できる統合分散形制御システム MICREX シリーズを開発してきた。

3.2 オープン化とシステム拡張性  
 ネットワークは汎用 LAN（Ethernet<sup>注</sup>，RS-232C など），制御用 LAN（DPCS-F），フィールドネットワーク（PE/Tリンク）の三階層構造となっている。それぞれの LAN

注 Ethernet：米国 Xerox Corp. の登録商標

にはワークステーションやパソコンを接続することができ，各種運転支援システムや保守支援システム，診断システムなどの機能を付加していくことができる。また，開放形コントローラ間ネットワークである FL-net もサポートし，ユーザーにマルチベンダシステム構築の柔軟性を提供している。

④ あとがき

以上，TGR について述べた。

TGR ではガバナと AVR の一体化を実現したが，これは今後タービン発電機の多変数制御適用へつながるものと考えられる。

富士電機は今後もユーザーの多様なニーズにこたえられるよう，品質・信頼性を損なわない安価な制御システムの開発・提供に努力していく所存である。

最後に，当社システムにご理解・ご指導をいただいたお客様に心から感謝の意を表する次第である。

# 火力発電所向け総合運転支援・設備保全管理システム

横瀬 主税(よこせ ちから)

奈良 悟(なら さとる)

## ① まえがき

電力分野では規制緩和により、卸電力市場がオープン化された結果、IPP(独立系発電事業者)の発電事業への参加が可能となった。一方、電力会社の課題は、電力の安定供給、発電コストの低減、地球的環境問題への対処であり、発電設備の運用・保守・管理業務の省力化や運転・設備管理データの収集・管理・分析による稼働効率向上が求められている。

火力発電所の安定的な運用および運転コスト低減のために、各種構内設備において、通常運用時や定期点検時に効率的な設備監視業務を実施する必要がある。設備監視業務のなかでも、各現場機器の定期的な状態監視、および異常発生時の迅速な検知については大きなウエートを占める作業である。

これらの課題に対し、本稿では多くのプラント設備監視装置の納入実績を持つ富士電機の火力発電所向け総合運転支援・設備保全管理システムについて紹介する。

## ② 総合運転支援・設備保全管理システム

### 2.1 背景

従来から、運転業務支援、総合設備保全業務において以下のような問題点が指摘されている。

- (1) 現場での設備点検業務の作業員負荷が大きい。
- (2) 監視周期の低減、異常の早期発見が要求される。
- (3) 点検データ管理が紙を媒体としているため、各担当部署に散在し、全体での管理が十分ではない。
- (4) 協力会社などへのデータ展開作業が煩雑となっている。

### 2.2 目的

上記問題点を解決するうえで、以下の点に注目したシステム構築を行う。

- (1) 電子データにより一元管理することで、協力会社などへの展開もシステムチックに実施する。
- (2) 携帯端末利用による設備点検業務の省力化およびデー

タの電子化による情報共有化を図る。

### 2.3 システム詳細機能

総合運転支援・設備保全管理システムを機能ごとに細分化すると、図1のようになる。今回は、そのなかで下記の機能について記載する。

- (1) ITV(Industrial Television)装置
- (2) 防災監視機能
- (3) 画像処理機能
- (4) 設備情報管理機能
- (5) 巡視点検機能

## ③ 総合運転支援・設備保全管理システム内の各機能

### 3.1 ITV装置

#### 3.1.1 導入メリット

監視業務の効率化、高密度化により異常時の迅速な対応を可能とする。また、画像を定期的に保存することで異常発生前後の現場画像を用いた事故解析が容易に行える。

#### 3.1.2 機能項目

##### (1) 点検パトロールの代替

プラント巡視は、高性能なITVカメラを用いて排煙監視・構内監視、本館ほか主要機器監視などを行い、プラント起動停止時の現場確認業務の効率化、パトロールの代替などを行い機器監視の運用性向上を目的とする。

発電所構内の監視対象にITV監視カメラを設置し、モニタに映像表示することで、従来運転員が現場に出向き実施していたパトロール業務を省力化し、より効率的に業務を進めることを可能としている。

##### (2) 拡張性

将来、監視対象が増えた場合にも、カメラおよび関連のハードウェア増設とソフトウェア設定を実施することにより、容易に拡張することが可能である。表示されるモニタは、発電所構内に構築されたイントラネットにより、パソコン上に映像表示することで、必要とされる部署での適時



横瀬 主税

火力発電所向け各種コンピュータシステムのエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー火力事業部電気制御技術部。

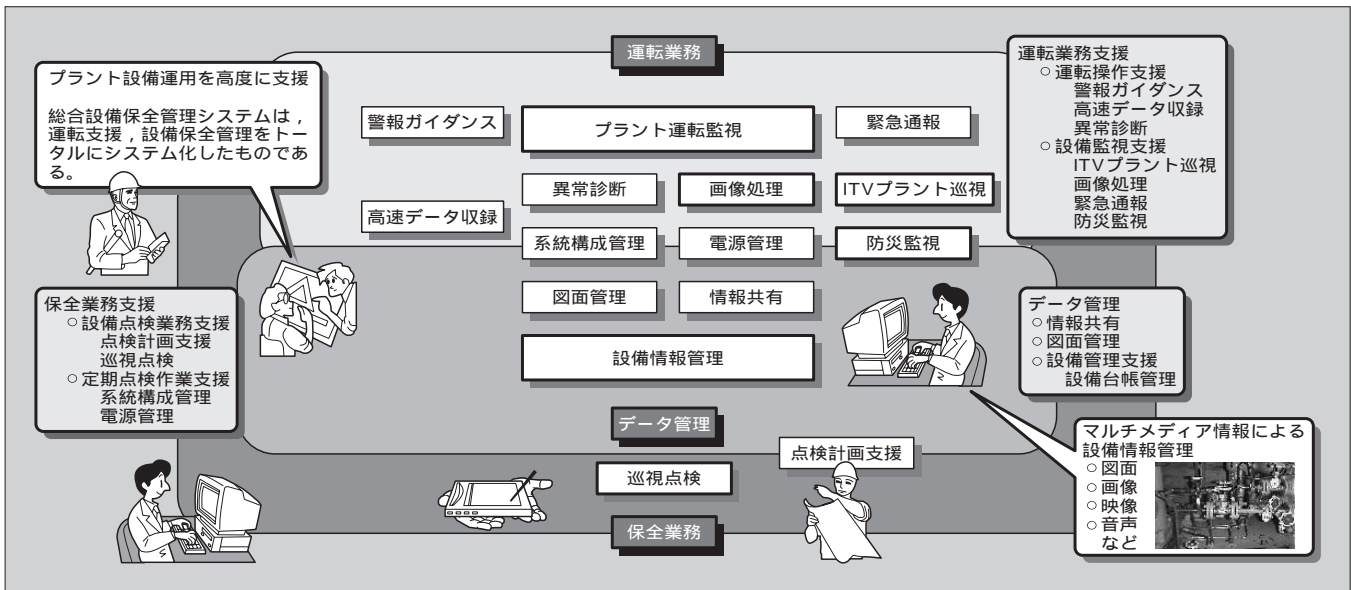


奈良 悟

火力・原子力分野の施設管理システムの設計・エンジニアリング業務に従事。現在、(株)FFC電力システム統括部第一電力システム部主任。



図1 総合運転支援・設備保全管理システムの機能



利用を可能としている。

(3) イベント連携

また、各種イベント信号に連動して映像切換表示を行うことで、発電所運転オペレーションにおける利便性を高めることも可能である。

3.2 防災監視機能

3.2.1 導入メリット

災害発生時の早期発見、関連部署への情報通知および遠隔操作による消火作業を可能とする。また、危険エリア監視とともに、防災設備情報などの管理を行える。

3.2.2 機能項目

(1) ネットワーク化

防災監視システムでは、従来システムごとにスタンドアロンな形で構成していた防災関連情報の一元管理を行い、ネットワークで有機的に結合した総合システムとしている。

ネットワークにより、運転センター、事務所のデスク、所長室など発電所構内で、防災情報の一括入手および同一の情報認識を実現している。

(2) 災害検知・データ監視

発電所構内において、火災報知器などの各種センサから災害発生信号が入力された際に、発生場所の早期確認を可能とし、かつ迅速な対応がとれることを目的としている。

また、災害を未然に防ぐために、アンモニアヤード、脱硫装置といった危険エリアの漏えいガス濃度、温度などのデータを常時監視することも併せて行う。

(3) 防災情報管理

警報発生時には、防災用パソコンに発生箇所のフロア図を表示し、一次対処方法などをガイダンスメッセージとして通知する。また、関連する防災設備情報、緊急連絡体制表も管理に含めているのでスムーズな対応を実施可能としている。サーバ内に登録した防災設備データなどの関連する管理情報の表示も併せて各種監視処理を行う。

(4) イベント連携

3.1 節に記載したプラント巡視機能との連携機能として警報発生情報を、防災監視機能側から通知することにより、警報発生箇所に関するITVカメラを自動制御し現場状況を映像として表示させる。

(5) 遠隔操作

防災用パソコンに操作パネルを表示させ、遠隔での消火作業も実現している。

(6) 緊急通報

災害発生時の迅速な対応を図るため、管理者宅、または出張先などへの自動電話、ファクシミリ通報を行う。事前に登録された音声での電話通報とし、不在時も考慮してリトライ通報も行う。

また、最新の緊急通報内容、緊急通報履歴を管理者宅へファクシミリ送付することを可能としている。さらに、緊急通報に限らず、最新の計測データをファクシミリ送付することも可能である。

3.3 画像処理機能

ITVカメラからの映像をパソコンに取り込み、以下の四つの異常検知機能を実現している。異常検知の基本的な考え方としては、取り込んだ画像の差分処理を行い、その変化分を抽出して解析処理を行う(図2)。

3.3.1 導入メリット

従来、点検員が巡回により実施していた現場機器点検業務を、ITVカメラからの映像を画像処理により監視することで、以下の利点が得られる。

- (1) 点検員の負荷低減
- (2) 異常の早期発見
- (3) 24時間監視
- (4) 常に一定した監視レベル

3.3.2 異常検知機能

- (1) 油漏れ検知

燃料装置周辺部の重油，潤滑油などの漏れを検知する。無色透明な油や，軽微な漏れいでも検知できるように，オイルパン上に吸収板を設置して監視する。

(2) 火花検知

発電機のスリップリング部などの火花発生を検知する。火花は高輝度で微小な変化が常に移動しているため，監視する対象画像を複数フレーム（画像）最大値処理し，高輝度部分を積算して，基準画像との差分をとることにより検知する。

(3) 蒸気漏れ検知

バーナ設備，配管などからの蒸気漏れを検知する。蒸気は，短い時間で漏れ状態が変化するため，複数フレームの画像を用い，前フレームの画像を基準画像として，差分画像処理した画像の累積変化から蒸気漏れを検知する。

(4) 微粉炭漏れ検知

石炭火力発電所構内での微粉炭供給配管などにピンホールが発生した場合，そこからの漏れを検知する。異常判定の際には，広範囲に微粉炭が噴出される特徴をとらえ，差分画像から一定面積以上の面積変化を検知する。

3.3.3 誤認識防止機能

通常運用するうえで問題となる以下の誤検知を防止する。

(1) 映像内への点検員侵入による誤報防止

点検員の映像は，通常画像周辺部から侵入してくることが想定されるため，画像周囲に検知領域を設け，これを通過した侵入者（点検員）を追跡し，それによる映像の変化を検知対象から除外することで，誤報防止している。

(2) 照明状態の変化に伴う誤報防止

例えば，監視映像近傍のシャッター開閉または照明点灯などにより監視映像の照度が急激に変化した場合には，画像領域内の照度のヒストグラムの変化をとらえることにより，誤報防止している。

3.4 設備情報管理機能

3.4.1 導入メリット

管理情報を電子データで管理することにより，利用効率の向上を図る。

3.4.2 詳細項目

(1) 設備台帳管理

各設備の仕様，点検記録，保修履歴などを文字データ，画像もしくは映像データ，音声データとしてデータベース化し保管管理する。

(2) 技術図書管理

設備にかかわる設計図面，設計図書，技術連絡書，操作説明書などの技術図書の保管管理を行う。保管されている情報は，設備台帳管理機能と連係し，設備をキーとした検索を可能とする。

3.5 巡視点検機能

3.5.1 導入メリット

現場での設備点検業務に携帯端末を用い，事務所に設置された点検データ管理サーバと連携することで，点検業務の効率化を図る。

(1) 導入前の作業形態

- (a) 紙（チェックシート，メモ）の現場記入による巡回，点検作業
- b) 電卓などによる校正値などの計算
- (c) 紙ファイルに伴う記録保管場所および労務の増加

図2 監視画面表示機能（例）

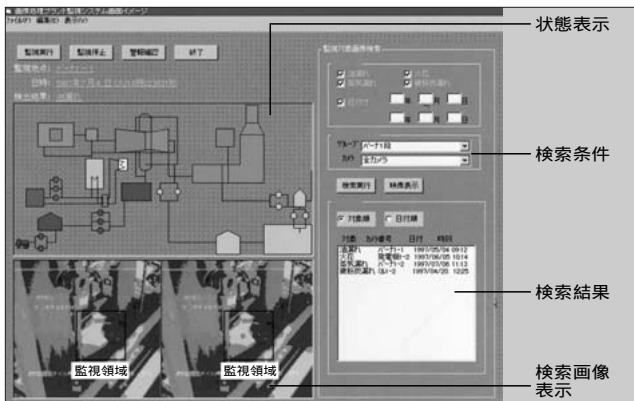


図3 点検端末画面

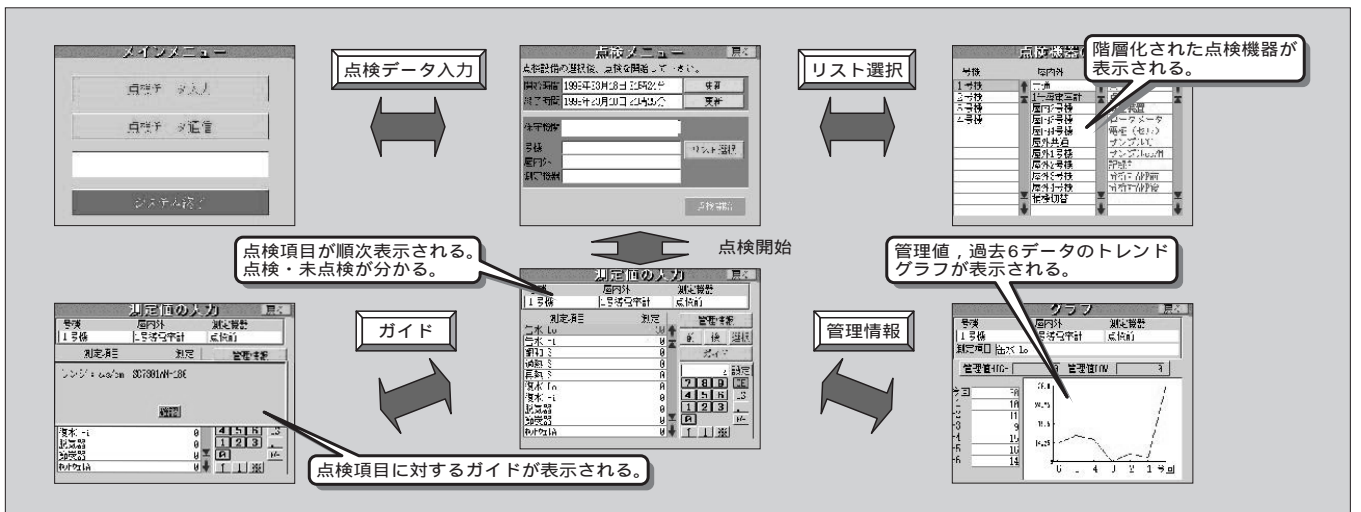
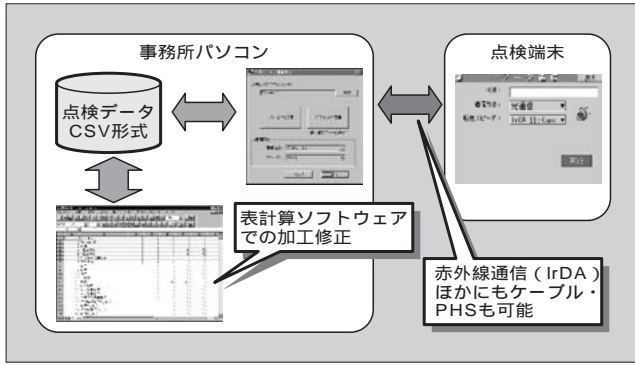


図4 点検データの流れ



能,管理値チェック機能(データベースで設定した管理値), 過去データ・トレンドグラフ表示機能を有し, 作業者を支援する(図3)。

(2) 点検データ管理サーバ機能

点検結果データを点検データ管理サーバにアップロードした後は, 汎用データベースソフトウェア上でデータ整理, 管理を行い, 汎用表計算ソフトウェアなどでの点検結果の集計, およびそれを用いた点検報告書の作成出力などに利用する(図4)。

4 あとがき

以上, 火力発電所における総合運転支援・設備保全管理システムの概略を紹介した。富士電機では, さらにニーズの取り入れを行って発電所ごとに構築された監視システムを実現していく。さらに今後, コンピュータ技術の発展を織り込み, これら発電所ごとに構築された監視システムとの連系を図ったトータルシステムを構築していく。最終的には複数の発電所をネットワークで融合した管制管理センター, 保守管理センターといった施設で一括統括管理するシステムの実現をめざす所存である。

参考文献

- (1) 奈良悟: 火力発電所総合設備保全管理システムの開発, 火力原子力発電技術協会研究発表会(2000)
- (2) 横瀬主税: 画像処理によるプラント監視システム, 火力原子力発電技術協会研究発表会(1998)

(2) 導入後の作業形態

(a) 巡回・点検作業の電子化

作業の均一化による負荷低減, 点検者による作業レベルのばらつきをなくす。

校正値などは自動計算処理することで現場確認を迅速に実施する。

b. 点検情報の電子ファイル化

点検情報の共有化および活用

ペーパーレス化, 保管場所の大幅な削減による省スペース

3.5.2 機能項目

(1) 点検端末機能

点検端末では, 点検入力機能のほかに, 点検データ管理サーバからの点検表のダウンロード, および入力ガイド機



# 発電機の余寿命診断と更新技術

日下 肇(くさか はじめ)

中山 昭伸(なかやま あきのぶ)

白石 明(しらいし あきら)

## 1 まえがき

現在、富士電機が納めた火力発電設備は20年以上経過した経年火力が6割以上を占めている。その既存設備に対する安定運用、信頼性確保、メンテナンスコスト低減などを図ることが、ユーザー側の大きな課題であり、プラントの寿命をあらかじめ予想し、長期保守計画を立てて設備の信頼性向上を図ることが求められている。

主機の一部である発電機においても、定期検査時の非破壊絶縁診断により絶縁寿命を把握し、適正な予防保全計画を図る必要がある。このような観点から、いかに既存設備の現状を把握し、効果的な対策を施して信頼性を向上させ、かつ電力の安定供給につなげていくかが最も大きな課題である。

その課題を克服する手法として、以下に余寿命診断技術と更新技術について紹介する。

## 2 絶縁診断技術

### 2.1 精密絶縁診断

富士電機は1958年からエポキシレジン絶縁を実用化してきている。およそ20~30年が経過し、老朽化したエポキシレジン絶縁方式の発電機において、事故の未然防止、機器の効率的かつ経済的な運用などの観点から発電機の絶縁診断技術の高度化が要求されている。

このような背景から、発電機を停止した状態で行う非破壊の精密絶縁診断やオンラインの部分放電測定が行われている。この精密絶縁診断は数年おきに行われる発電設備の定期検査時などに継続的に実施され、その測定値およびその経時変化の推移から、現状の絶縁状態の把握と更新時期を予測するものである。

この精密絶縁診断が効率的かつ経済的にできるように、専用の回転機絶縁診断車が使用されている。富士電機は1979年に巡回用回転機診断車を製作し、約20年間で4,700ケースを超える発電機および電動機の診断実績を上げている。現在の富士電機の回転機絶縁診断車の外観を図1に示

す。この診断車は精密な測定、評価および診断時間の短縮を目的として自動計測、自動記録、自動特性値計算、さらには多数の蓄積データを基に自動評価が行えるシステムで構成されている。また現地で測定された絶縁診断データは回転機履歴管理システムを用いてホストコンピュータのデータベースシステムに登録し、一元的に管理運用している。

### 2.2 絶縁余寿命予測

富士電機は絶縁診断測定値を用いて、直接的に発電機固定子コイルの残存破壊電圧(BDV)が推定できる方法を完成させた<sup>(1)(2)</sup>。これは実際に運転していた発電機から多数の劣化コイルを抜き取り絶縁特性を調査し、統計処理することによって求めたものである。

具体的には絶縁診断測定値( $\tan \delta$ ,  $q_{max}$ ,  $I_{12}$ )と重回帰式、補正式などを用いて、平均レベルのBDVと3のばらつきを考慮した下限レベルのBDVを算出する。そしてこれらBDVの経時変化から今後の残存BDVを予測するものであり、より具体的な巻線の更新時期を決定できる利点がある。この予測方法を用いて、現在まで数多くの発電機の余寿命予測を行ってきている。この予測方法による計算例を図2と図3に示す。図2はBDVと運転年数の関係であり、運転年数の経過とともにBDVが低下して

図1 回転機診断車の外観



N89-6542-7



日下 肇

火力発電設備のプラントサービスエンジニアリングに従事。現在、電機システムカンパニー火力事業部プラントサービス部課長。



中山 昭伸

回転機絶縁技術の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所電機技術研究所。電気学会会員。



白石 明

タービン発電機の構造設計に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部課長補佐。



図2 予測BDVと運転年数の関係

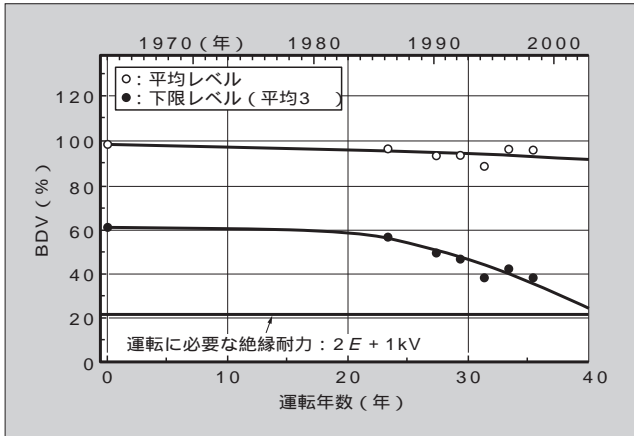
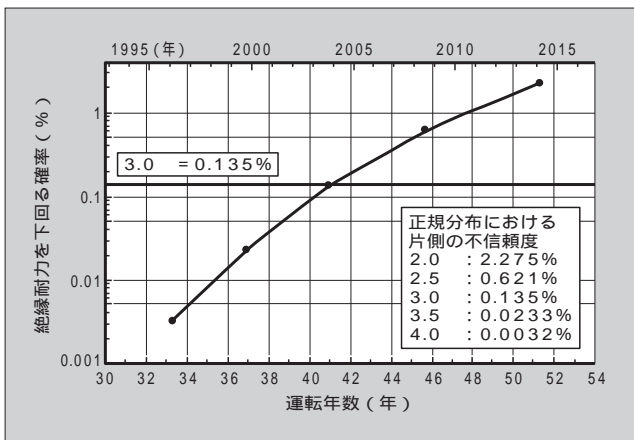


図3 運転に必要な絶縁耐力を下回る確率と運転年数の関係



いるのが把握できる。図3は運転に必要な絶縁耐力(2E+1kV)を下回る確率と運転年数の関係を示すものであり、運転年数の経過と絶縁が不良をきたす確率が明確に把握できる。

2.3 物理化学診断

現在一般的に行われている電氣的絶縁試験は、鉄心スロット部の主絶縁層の診断が主であり、コイルエンドの間隔片や縛りひもといった補強部材や回転子絶縁の構造部材の機械的強度の低下や摩耗、加熱による変質などは評価できない。したがって、発電機全体として絶縁診断するのに電氣的、機械的、熱的劣化について総合的に評価する必要がある。

このような背景から、富士電機は電気絶縁診断に加え、熱重量分析(TG分析)と赤外線分光分析(IR分析)を利用した物理化学的劣化診断手法を1988年に確立し、現在まで多数実施してきている。この物理化学的劣化分析の主な特長としては以下のものがある。

- (1) 使用されている個々の材料の熱劣化度が直接判定できる。
- (2) 数百mgのサンプル量で診断できる。
- (3) 電気診断と合わせることで、巻線全体としての劣化度が判定できる。

図4 サンプル採取箇所(タービン発電機の例)

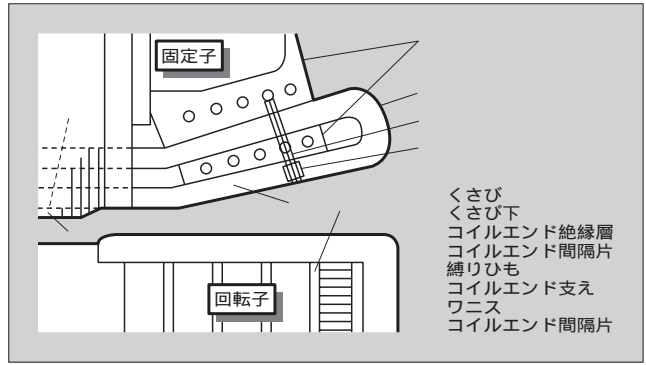
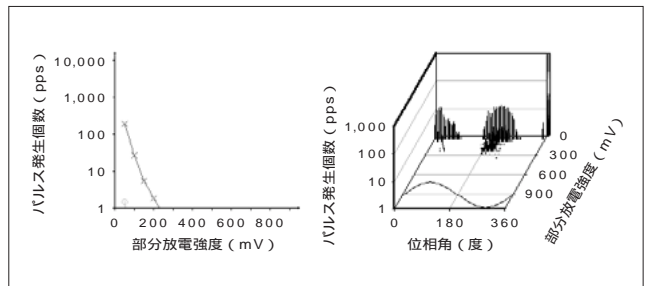


図5 オンライン部分放電測定器での出力例



(4) 界磁巻線, 直流機巻線にも適用できる。

一般に絶縁材料に使用されるエポキシ樹脂をはじめとする高分子材料の熱劣化を示す酸化、分解の進行具合は、一次減量開始温度のシフトや二次減量/一次減量比率の上昇として、IR分析ではカルボニル基による吸収強度の増大として定量的にとらえることができる。そしてこれらの劣化パラメータから相関性のある残存機械強度や加熱減量を求め、材料の熱劣化判定を行うものである。図4にタービン発電機のサンプリング箇所の一例を示す。

2.4 オンライン部分放電試験

絶縁診断の高度化と省力化が可能となるのがオンラインでの部分放電測定である。この主な特長として以下の項目があげられる。

- (1) 運転中に発生する実際の部分放電が把握できる。
- (2) くさびのゆるみや振動によるスロット放電が検出できる。
- (3) 放電検出器とその配線が完了していれば測定はいつでも可能である。
- (4) 運転停止に伴うコストや絶縁診断測定のコストが抑えられる。
- (5) 測定を継続することにより、絶縁劣化の経年変化が把握できる。

これらの特長を有したオンライン部分放電測定は有効的な絶縁監視手段として注目されている。ただしノイズの分別、検出感度、部分放電パターンの識別などの技術的に困難な課題もある。

現在、富士電機ではSSC(Stator Slot Coupler)法による部分放電測定を実発電機で継続的に実施している。測定

結果の一例を図5に示す。この測定結果から部分放電の正極側と負極側の比較，位相パターンなどの情報が把握できる。

③ 発電機更新技術

3.1 サイリスタ励磁方式からブラシレス励磁方式への更新  
最近の標準ブラシレス励磁機は発電機軸と一体構造で，オーバハング部に回転整流装置，交流励磁機回転子および磁石同期発電機（PMG）の回転子が搭載され，コンパクトなものとなっている。このため既設の基礎を流用してサイリスタ励磁方式からブラシレス励磁方式に更新することが可能となった。更新前後の構造を図6に示す。

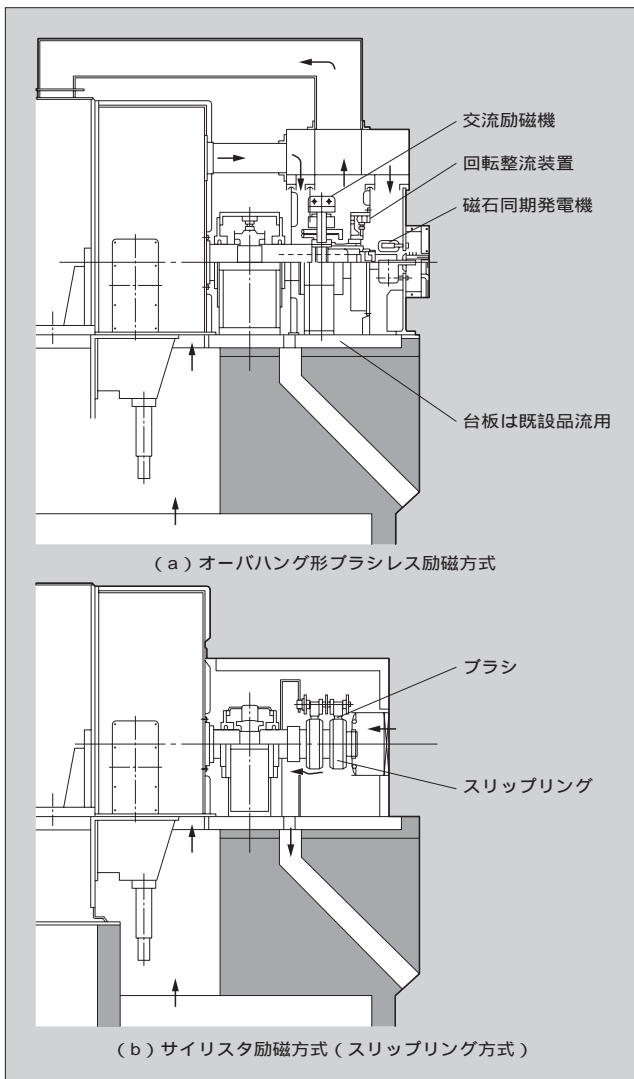
サイリスタ励磁方式からブラシレス励磁方式に更新することにより，

- (1) 日常の保守が不要となる。
- (2) 励磁盤が小さい。
- (3) 信頼性が高い。

がメリットとしてあげられる。

表1に標準オーバハング形ブラシレス励磁方式とサイリ

図6 更新前後の励磁装置の構造



スタ励磁方式の比較を示す。

また，交流励磁機回転子には全含浸絶縁を採用し，信頼性の向上を図っている。

サイリスタ励磁方式をブラシレス励磁方式に更新するタイミングとして，長期間使用のサイリスタ励磁方式発電機において絶縁劣化が進行し，その対策のため回転子一式または発電機一式更新時に，ブラシレス励磁方式への更新を行うことで更新経費は削減できる。

3.2 水素冷却発電機から空気冷却発電機への更新

3.2.1 空気冷却発電機のメリット

空気冷却発電機が水素冷却発電機に比べて有利な点は次のとおりである。

- (1) 発電機の構造が単純となり，保守点検費用が削減できる。
- (2) 水素ガスの供給，水素ガス密封油装置が不要となる。
- (3) 運転操作が簡単である。
- (4) 水素ガスの安全管理および監視が不要となる。
- (5) 水素ガスおよび炭酸ガスの購入が不要となる。

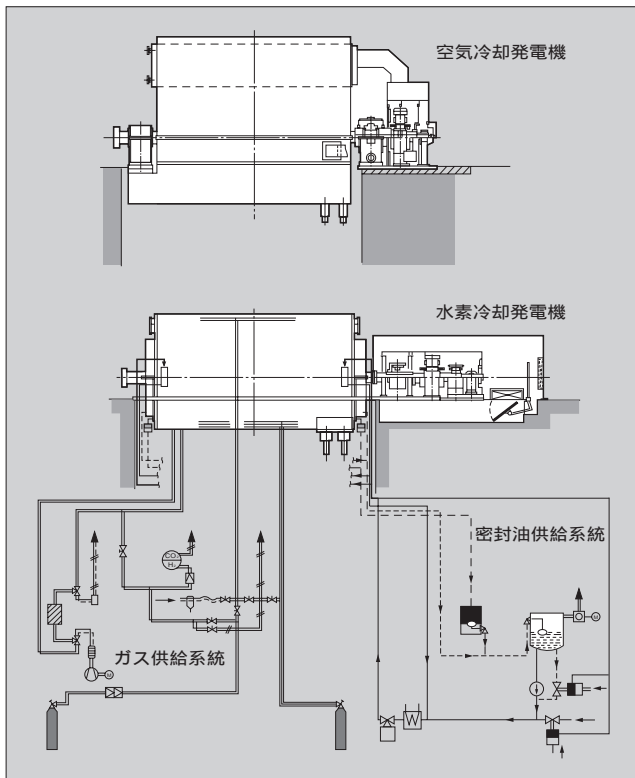
3.2.2 空気冷却発電機の出力範囲の拡大と小型化

過去においては，出力が50 MVA以上の発電機は絶縁材料および冷却技術の点から水素冷却方式が採用されていた。また，たとえ同出力の空気冷却発電機が製作できた

表1 励磁方式の比較

励磁方式		ブラシレス励磁方式	サイリスタ励磁方式
主励磁機	電源機器	同期発電機（回転電機子）	変圧器
	整流器	シリコン整流ダイオード	サイリスタ
励磁電源		磁石同期発電機	所内電源
制御装置		AVR	AVR
結線図			
EX	主交流励磁機		
GRBS	回転整流装置		
PEX	磁石同期発電機		
R	スリップリング		
PPT	励磁電源用変圧器		
保 守	スリップリングやブラシがないので日常の保守が不要である。	スリップリングの修正加工やブラシの日常の保守が必要である。また，ブラシや予備品も必要となり，ランニングコストが高くなる。	
励磁盤寸法	励磁機の励磁容量が小さいので励磁盤は小さい。	励磁電源用変圧器，大電流用サイリスタのため寸法が大きい。	
電源の信頼性	信頼性がサイリスタ方式より高い。外部の電源から完全に独立した磁石同期発電機により給電されるので，系統故障時にも確実な励磁の供給が行える。	信頼性がブラシレス方式より低い。系統故障中は所定の励磁電源が得られない。バックアップ装置が必要となる。	
発電機寸法	励磁機が主発電機にオーバハングされるので軸長が若干長い。	励磁機が直結されないため軸長は短い。	

図7 空気冷却発電設備と水素冷却発電設備の構成



しても水素冷却発電機より大型となるため、既設の水素冷却発電機の基礎を流用して空気冷却発電機に置き換えることができなかった。しかし近年では冷却技術と絶縁技術の向上により空気冷却発電機の出力範囲は 300 MVA まで可能となり、小型軽量化が図られたことにより、水素冷却発電

機を空気冷却発電機へ置き換えることが可能となった。

既設の水素冷却発電機を空気冷却発電機に更新するときには考慮すべきは、既設基礎の流用を可能とすることである。

この条件を満たすには、既設の水素冷却発電機の質量・寸法と更新する空気冷却発電機のそれとをほぼ同一にすることが必要である。

3.2.3 水素冷却発電機から空気冷却発電機への置換え

図7に置換の具体例を示す。

既設基礎の流用が可能となるとともに、潤滑油設備も既存設備が流用でき、配管は発電機との接続部分を一部変更することで流用可能である。一方、オーバハング形ブラシレス励磁機は軸受がないため潤滑油配管は不要となる。

4 あとがき

経年設備に対する安定運用・信頼性確保を図るためには長期保守計画を立て、設備の劣化度を把握し、修繕・更新などを見極めることが今後ますます重要な課題であると考ええる。今回紹介した余寿命診断と更新技術が、ライフプランを立てるうえでの一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 中山昭伸ほか：回転機固定子コイルの余寿命診断，富士時報，Vol.72，No.5，p.292-295（1999）
- (2) 中山昭伸ほか：発電機固定子コイル余寿命診断，電気学会誘電・絶縁材料研究会，DEI-00-21，p.1-6（2000）
- (3) 飯島九十九ほか：回転機絶縁の熱劣化診断技術，富士時報，Vol.69，No.2，p.118-121（1996）

# 蒸気タービンの予防保全技術

加藤 雅喜(かとう まさき)

中村 憲司(なかむら けんじ)

住廣 敦夫(すみひろ あつお)

## 1 まえがき

現在稼動している事業用・自家用火力発電設備は、その約7割が運転開始後15年以上経過したいわゆる経年機になっているが、最近では運用の過酷化〔ピークカット運用・DSS(Daily Start & Stop)/WSS(Weekly Start & Stop)運用・中間負荷調整運用〕などにより、従来にも増してその劣化が加速され、早急に適切な耐力強化対策が必要な状態になっている。

一方、電気事業法の改正により設置者責任がより明確になり、保守管理と予防保全への取組みの重要性がさらに高まっており、設備診断技術の提供と顧客ニーズにマッチした経済的かつ効果的な設備改善提案推進が期待されている。

このような背景から、富士電機では十数年前から余寿命診断技術を開発し、数多くのプラント実績から信頼度の高い劣化度評価を実現しており、さらに経年火力タービン設備における耐力強化補修や改造、同機種対策や新技術適用などの予防保全メニューを中長期設備改善プランとして提供している。

ここでは、経年蒸気タービンで経験している代表的な不具合事例を紹介するとともに、最近富士電機が実施している余寿命診断評価技術の概要や予防保全・耐力向上対策例を紹介する。

## 2 蒸気タービンの経年損傷形態とその事例

表1に蒸気タービンの主要部位に起こる代表的な経年損傷形態と富士電機が実施している余寿命診断・精密点検の手法を示す。

このように、蒸気タービン構成機器は、運転開始以降、摩耗や浸食、変形など使用環境や運転状況によりさまざまな状態変化や不具合が起こるが、一方、総運転時間が10万時間を境にして、クリープや疲労損傷、脆化などの材料的劣化も顕在化し、使用機器の強度的問題も併せて生じてくる。

いずれの経年劣化形態も蒸気タービンの各構成部材で複

合的に起こり、経年的に徐々に進行したり、あるいは急に使用限界になるほどの大きな損傷となって現れたりする。

経年機は、これらの不安を抱えながら運用されているわけであり、予想される損傷をより早い時期に余寿命診断や精密点検で見つければ、適切な処置・対策を講じることが重要となる。

以下に富士電機がこれまで経験した蒸気タービンにおける経年損傷形態の代表的な事例を紹介する。

### (1) 高圧ケーシング外面のクリープ損傷

高圧外部ケーシング外面抽気取出しR部に発生したクリープ損傷の例を図1に示す。

金属組織観察結果では、金属粒界にクリープポイドとその結合によるマイクロクラックが観察され、また、エッチングの結果、亀裂近傍に製作時の溶接補修跡が認められることから、運転中の熱応力と残留応力が重畳してクリープ亀裂に至ったものと判断されている。

### (2) 主要弁ケーシング内面のクリープ損傷

高圧複合弁ケーシング弁座外周R部に発生したクリープ損傷の例を図2に示す。

当該部は有限要素法(FEM)による解析結果からも応力が非常に高いことが確認され、金属粒界にもクリープポイドが観察されることから、典型的なクリープ損傷であることが分かる。

### (3) 高圧ノズルのエロージョン損傷

図3に高圧ノズル翼後縁部に発生したエロージョン損傷の例を示す。これは、ボイラ・主蒸気管内ではく離れた酸化スケールが高速でノズル翼に衝突するために起こる浸食現象であり、ソリッドパーティクルエロージョンと一般的に呼ばれている。

### (4) 低圧動翼のエロージョン損傷

図4に低圧動翼前縁部に発生したエロージョン損傷の例を示す。これは、低圧タービンの湿り域段落以降の動翼においてドレン水により特に蒸気流入側の翼先端がピッチング状あるいは林状に浸食する現象であり、進行すると、亀裂損傷に至ることがある。

### (5) 高温ボルトの亀裂損傷(脆化)



加藤 雅喜

火力発電設備のプラントサービスエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー火力事業部プラントサービス部長。



中村 憲司

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部担当課長。日本機械学会会員。



住廣 敦夫

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部。日本機械学会会員。



表1 蒸気タービン主要部位の代表的損傷形態と余寿命診断・精密点検方法

機 器	部 位	経年劣化事象									余寿命診断				精密検査							
		クリープ	疲労	脆化	腐食	浸食	軟化	摩耗	変形	曲がり	理論解析	硬度測定法	金属組織法	電気分極法	VI	DI	PT	MT	HT	UT		
高・中圧 ロータ	外表面																					
	応力緩和溝部																					
	翼溝部																					
	グランド部																					
	ジャーナル部																					
	カップリング部																					
低圧 ロータ	外表面																					
	翼溝部																					
	グランド部																					
	ジャーナル部																					
	カップリング部																					
高・中圧 動静翼	シュラウド部																					
	翼根元部																					
低圧 動静翼	シュラウド部																					
	翼前縁部																					
	翼根元部																					
ノズル	ノズル室																					
	ノズル翼																					
	溶接部																					
高・中圧 ケーシング	コーナR部																					
	フランジ部																					
	接続管溶接部																					
	高温ボルト																					
低圧ケー シング	構造溶接部																					
	フランジ部																					
	ボルト																					
グランド バック	グランドバック																					
	フィン																					
	ボルト																					
主 要 弁	内表面 R 部																					
	外表面 R 部																					
	フランジ部																					
	高温ボルト																					
	弁棒・弁体																					
	シリンダ																					
	アクチュエータ																					
軸 受	軸受金																					
	シールフィン																					
	ボルト																					

図5に再熱フランジ用締付ボルトに発生した亀裂損傷の例を示す。破面観察などの結果、へき開破面が観察され脆性破壊による損傷である。

③ 富士電機における余寿命診断技術

3.1 余寿命診断技術の開発

富士電機は1987年に低合金鋼（CrMoV 鋼）の余寿命診断手法を開発した。この手法により、延べ40プラントの蒸気タービンの余寿命診断を実施し、信頼性の高い劣化度評

図1 高圧外部ケーシング外面抽気取出し R 部のクリープ損傷

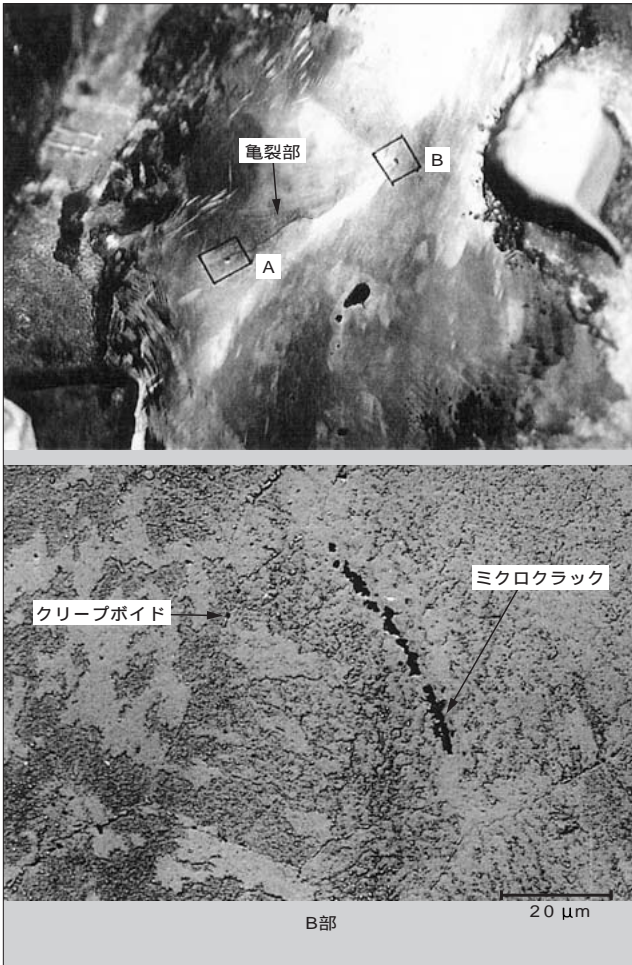
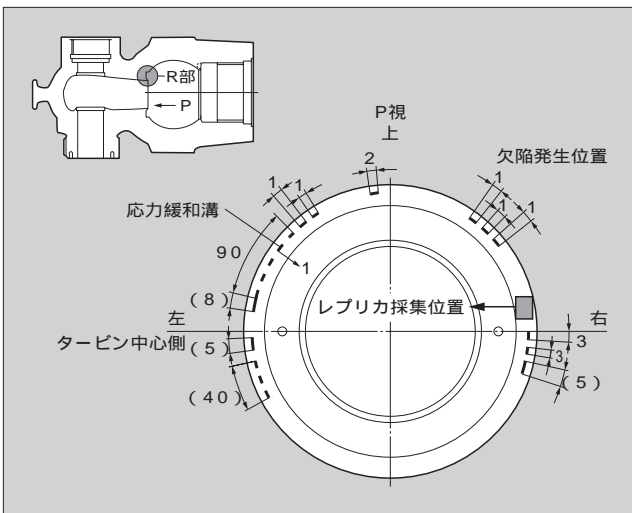


図2 高圧複合弁ケーシング弁座外周 R 部のクリープ損傷



価が可能となっている。

一方、富士電機では、早くから蒸気温度 566 の蒸気タービンに採用している高温クリープ強度などに優れた 12% Cr 鋼の余寿命診断技術の研究・開発に着手し、現在、実機での適用評価を行っている。

以下に、その 12% Cr 鋼の劣化特性を含めた、富士電機における蒸気タービン余寿命診断技術の概要を紹介する。

図3 高圧ノズルのエロージョン損傷

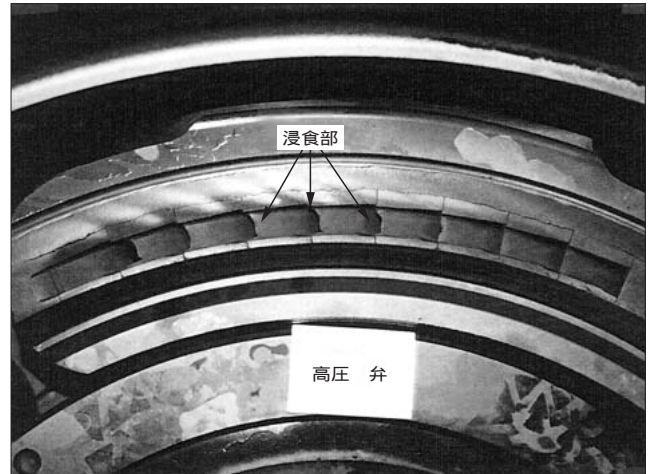


図4 低圧動翼のエロージョン損傷

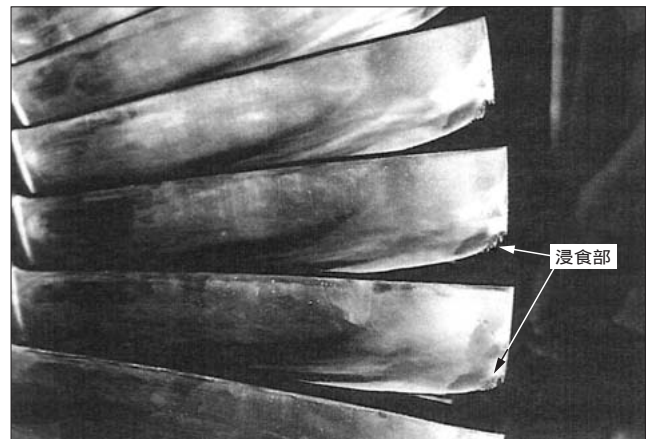
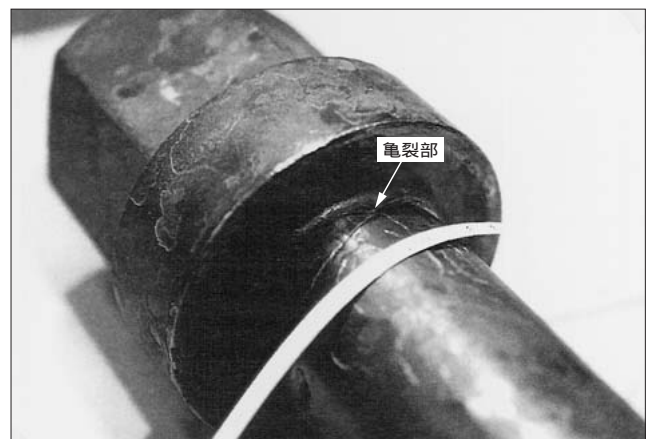


図5 高温ボルトの亀裂損傷（脆化）



### 3.2 余寿命診断手法の概要

現在、富士電機が余寿命診断に適用している手法は次のとおりであるが、表 1 で示した精密検査と併せて実施することで評価精度を高めている。

- (1) 理論解析法
- (2) 非破壊的手法
  - (a) 硬さ法

b. 金属組織法

(c) 電気化学分極法 (電気分極法)

3.2.1 理論解析法

材料特性と運転履歴,ならびに温度と応力の理論計算を基にクリープ損傷,疲労損傷を評価する。

3.2.2 非破壊的手法 (材料劣化計測)

(1) 硬さ法

クリープや疲労により,金属組織内の炭化物が析出,粗大化したり,あるいは転位密度の減少などが起こると,材料軟化となって現れるが,これを硬さ計で計測し,クリープ損傷,疲労損傷の程度を評価する方法である。

図6,図7は,CrMoV鋼,12%Cr鋼の人工劣化材から求めたクリープ劣化特性を示す。このカーブは,応力をパラメータとして,縦軸に劣化後の硬さと初期硬さの比を表し,横軸に温度・時間の使用条件要素からなるラーソン・ミラーパラメータとの関係を表している。

12%Cr鋼はCrMoV鋼同様,劣化すると硬度が低下する軟化現象がみられ,この図が示す材料特性カーブを使い,硬さの測定結果から余寿命を求める。

高温低サイクル疲労に関しても,硬さ比から,その時点における低サイクル疲労寿命消費を求めることができる。

図6 ラーソン・ミラーパラメータと硬さ比の関係によるクリープ寿命消費率の計算例 (CrMoV鋼)

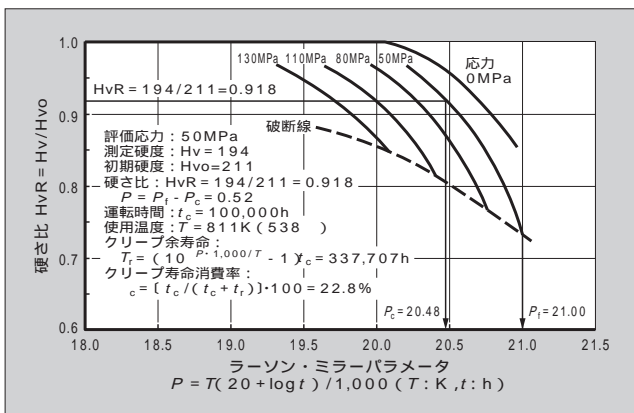
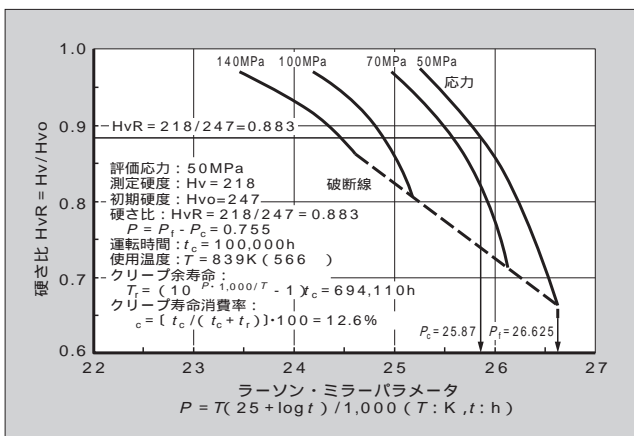


図7 ラーソン・ミラーパラメータと硬さ比の関係によるクリープ寿命消費率の計算例 (12%Cr鋼)



(2) 金属組織法

クリープによる金属組織の変化〔炭化物の析出粗大化,クリープキャビティ(クリープポイド)の生成〕をレプリカに転写して顕微鏡で観察し,クリープ損傷を評価する方法である。

(a) 炭化物による方法

図8,図9に,CrMoV鋼,12%Cr鋼について炭化物の大きさ・量の経年的な変化を示す。CrMoV鋼,12%Cr鋼ともクリープ損傷により炭化物が増加する。このことから,炭化物平均面積の初期値に対する比とラーソン・ミラーパラメータとの関係を示す線図(図10,図11)を利用して,クリープ余寿命を求めることができる。

b) Aパラメータ法

本手法は,レプリカの結晶像を横切る線上にある結晶粒界総数に対するクリープポイドが観察された粒界数の割合から,クリープ寿命消費率を求める方法である。

CrMoV鋼はクリープポイド量と損傷の関係に相関がある。一方12%Cr鋼は,図12に示すように損傷率70%以上にならないとクリープポイドは発生しない特性を有するため,損傷率の低い段階での余寿命評価手法には適していないといえる。

図8 CrMoV鋼のクリープによる炭化物の変化

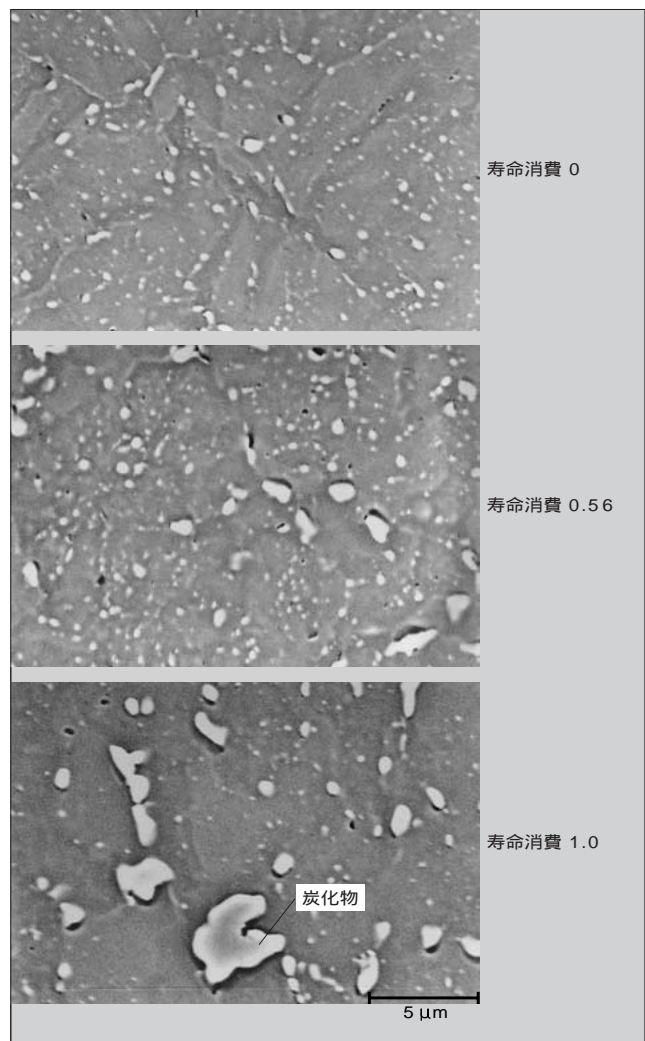
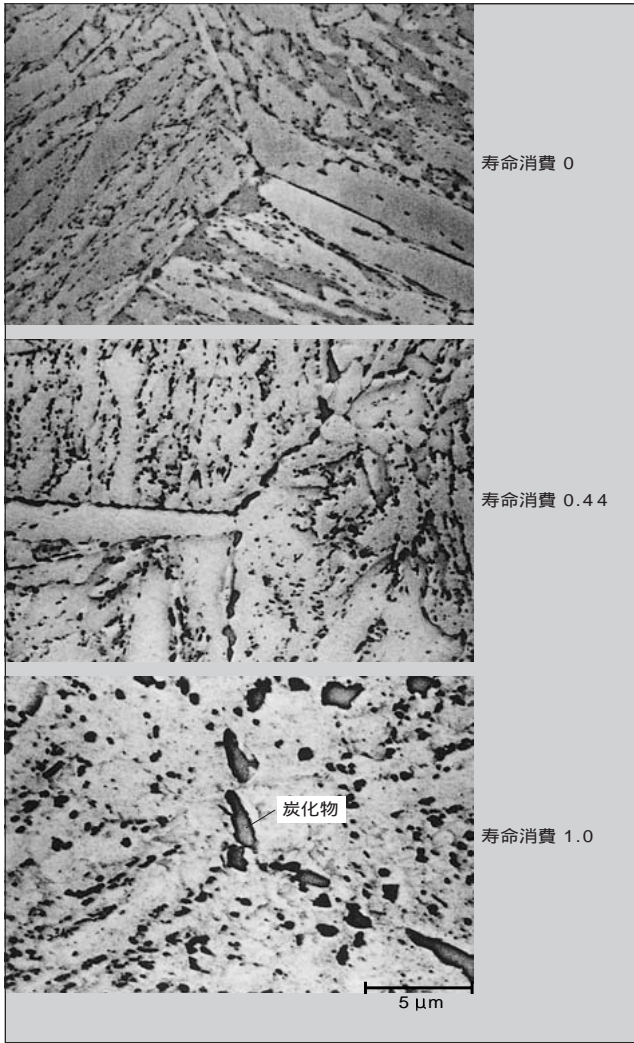




図9 12% Cr 鋼のクリープによる炭化物の変化



(3) 電気化学分極法 (電気分極法)

電気分極法は、部材の劣化を計測する部分をアノード (陽極) として、電解液中で電気分解を起こさせたときに生じる電圧と電流の関係 (分極特性) が劣化の進行に伴って変化する現象を利用して、劣化程度を評価する方法である。分極特性の変化は、高温加熱やクリープによって結晶粒界へ偏析したリン化合物や凝集粗大化した炭化物の程度を表しており、材料の脆化度を評価できる。

この方法は CrMoV 鋼の粒界脆化の検出に非常に有効であるが、12% Cr 鋼は脆化しにくい特性を有しているため脆化度が低い段階での余寿命評価手法には適していない。

なお、クリープ損傷と相関のある  $M_6C$  炭化物が電気分極法により評価できることが分かったため、富士電機では、実用化に向けて現在データを蓄積し、評価手法として確立すべく開発を行っている。

3.3 今後の余寿命診断

以上のごとく、現在富士電機では、従来から多くの実績がある CrMoV 鋼に加え、12% Cr 鋼の余寿命診断技術についても確立し、さらに精度改善を進めており、経年蒸気タービンに対し信頼性の高い余寿命・劣化度診断技術の提

図10 ランソン・ミラーパラメータと炭化物平均面積増加割合の関係によるクリープ寿命消費率の計算例 (CrMoV 鋼)

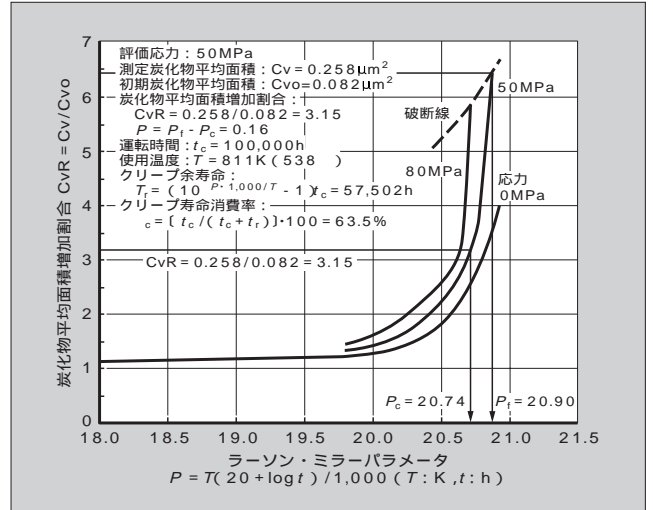


図11 ランソン・ミラーパラメータと炭化物平均面積増加割合の関係によるクリープ寿命消費率の計算例 (12% Cr 鋼)

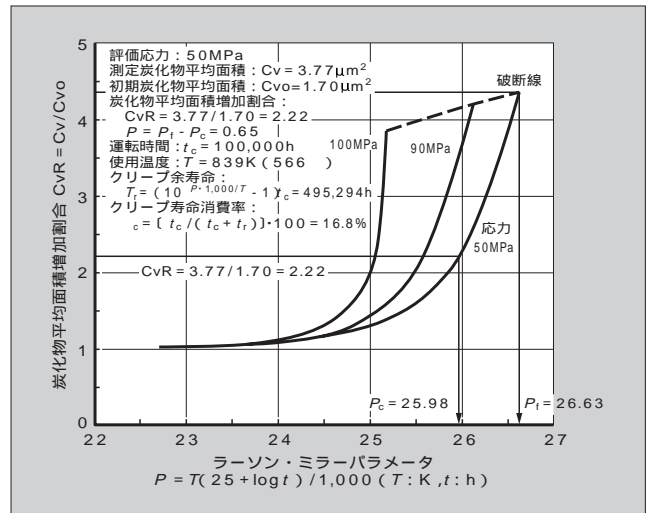
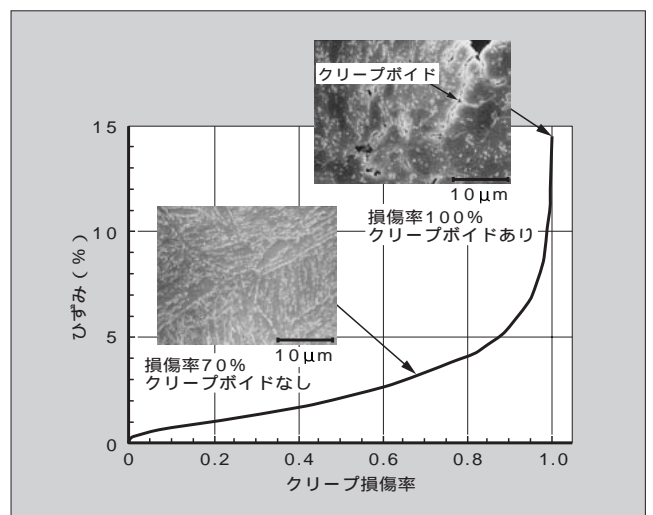


図12 クリープ曲線とクリープポイド発生状況 (12% Cr 鋼)





供が可能となっている。

今後、蒸気温度 610 クラスの蒸気タービンに採用する改良 12 % Cr 鋼についても、12 % Cr 鋼で得られた開発成果をベースに余寿命診断技術の開発・確立を行う計画である。

④ 予防保全・耐力向上適用技術

既設蒸気タービンにおいて、通常実施されている設備保全では、機器の損傷部位の補修や取替え、さらには機器の更新または改造などが、定期点検時に適宜行われているが、その際、トラブルに対する同機種対策や最新技術を適用することによって、機器の長寿命化や信頼性向上、効率向上を図ることができる。

ここでは、富士電機の行っている主な予防保全、耐力向上、性能向上技術の適用例について紹介する。

4.1 信頼性向上適用技術

(1) 応力緩和対策（長寿命化）〔本特集号の別稿「中容量再熱蒸気タービン」の図 5 参照〕

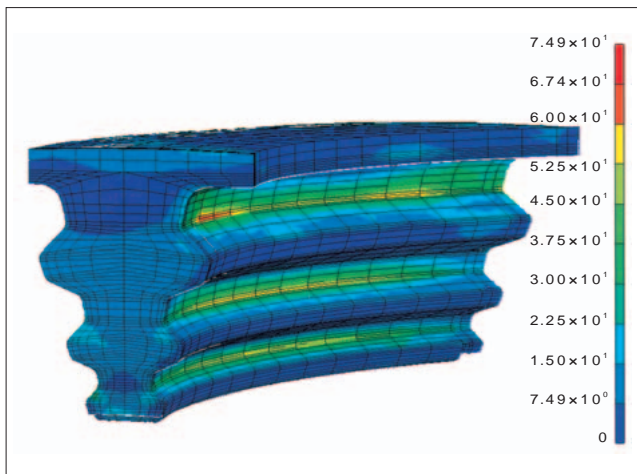
蒸気タービンのロータの高温部には、起動停止によって大きな熱応力が発生し、ロータの寿命管理上のクリティカルポイントとなっている。この熱応力の大きい部位の応力を緩和することにより、プラントの運用のフレキシビリティを改善させると同時に、ロータの延命化を図る。

具体的には、精密な FEM 計算による応力解析と運転シミュレーションをベースに、主として初段動翼の翼溝底部のフラット化、翼溝コーナ部の R 増大による応力集中の軽減、およびロータの応力緩和溝の最適化を実施する。

(2) 翼脚溝形状の最適化（信頼性向上）〔図 13 参照〕

主として、温度は低いが、応力レベルの高い低圧翼の翼脚溝に対して適用される。通常、低圧翼の翼脚溝に対しては、クリスマスツリー形の翼脚が使用されているが、この翼脚溝に対して、精密な FEM 計算によるシミュレーションを実施し、形状（特に溝の R 部）の最適化により、応力集中を軽減し、SCC（Stress Corrosion Cracking）などに対す

図 13 クリスマスツリー脚の FEM 応力解析例



る信頼性を向上させる。

さらに、必要な場合には、翼脚部や溝部にショットピーニングやローラ掛けなどにより、圧縮応力を追加することにより、翼脚溝部の損傷を防止する。

(3) 内部ケーシングの熱変形対策〔本特集号の別稿「富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービン」の図 5 参照〕

蒸気温度の高いタービンの場合、経年的に内部ケーシングにクリープによる熱変形が発生し、ロータとのギャップの確保が困難になる。この内部ケーシングを、高温クリープ特性の優れた改良 12 % Cr 鋼のものに交換することによって、熱変形が抑えられ適性なギャップの確保が可能となり信頼性向上が図れる。

(4) 低圧翼のエロージョン対策〔図 14 参照〕

湿度の高い蒸気中で運転される低圧翼は、経年的なエロージョンの進行によって、効率が低下するだけでなく、表面の損傷が極端に進行した場合、亀裂の発生や翼破損の可能性が懸念される。通常対策としては、低圧翼自体の更新により運転の継続を図ることが可能だが、さらに効果的な対策として、蒸気中の水分を直接除去する方法がある。具体的には、ケーシング側にドレンキャッチャを設けたり、静翼にドレンスリットを採用したりする方法である。

また、特に、エロージョンに対する条件の厳しいタービンに対しては、静翼中に温度の高い蒸気を通すことによって、さらに水分を除去する効果を高めた静翼ヒーティングを採用することによって、エロージョンの進行を鈍化させることができる。

図 14 静翼ヒーティングによるエロージョン防止対策

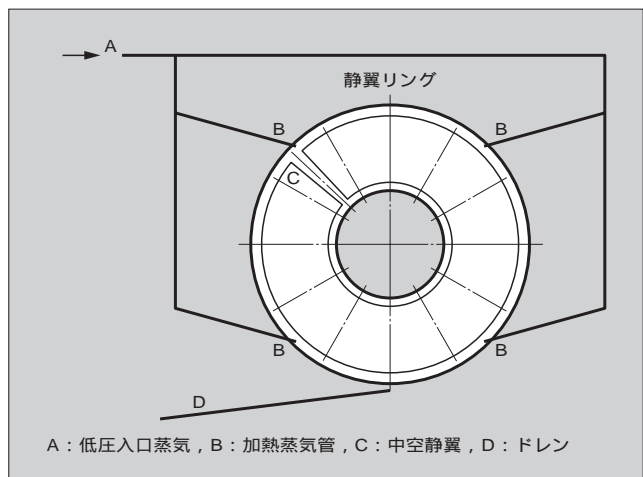
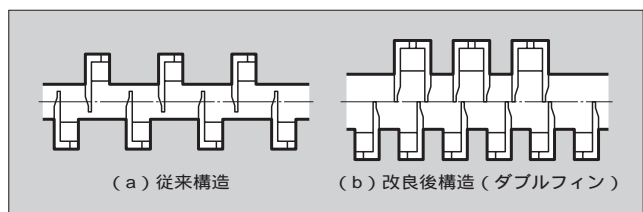


図 15 グランドシールフィンの改良



(5) グランドシールフィンの改良〔図15 参照〕

ケーシングなどの経年的な熱変形の影響によって、タービンランド部においてラッピングによる振動が発生する可能性がある。このランドのシールフィンを従来のラピンス型やシースルー型のフィンから、対向型のダブルフィンに変更することによって、ラッピングによる振動の発生を防止する。

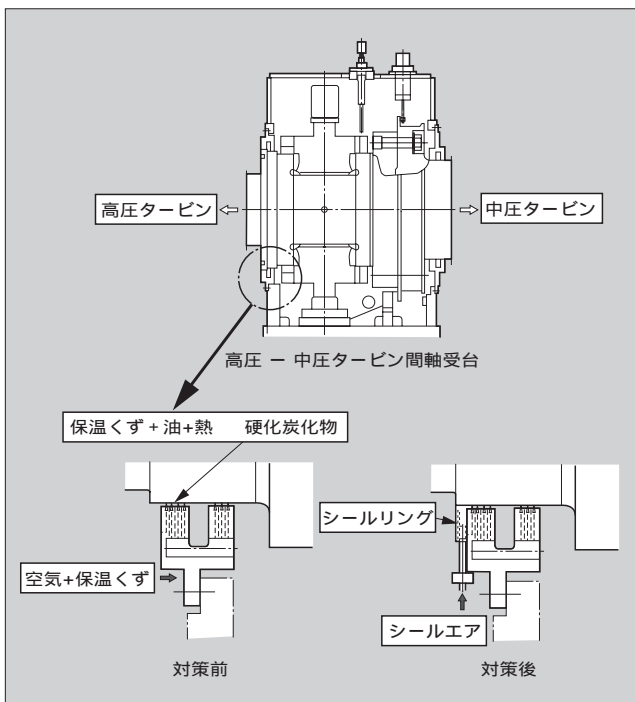
(6) 弁のしゅう動性の改善〔図16 参照〕

主要弁の弁体、弁棒に従来施工されていたステライト盛金に代えて、クロムカーバイドのジェットコート溶射を実施することによって、高温下でのしゅう動性、耐摩耗性の向上が図れる。また、同時に、酸化皮膜の生成を減少させる効果により弁すきまの減少を抑止することが期待でき、メンテナンス期間の延長も可能となる。

図 16 弁棒のジェットコーティング施工例



図 17 軸受台漏止めリングのカーボンラッピング対策例



(7) 漏止めリングのカーボンラッピング対策〔図17 参照〕

各軸受台油漏止めリングに空気中の保温くずなどのじんあいが付着し、このじんあいに吸着した潤滑油がタービンの輻射（ふくしゃ）熱で炭化（カーボナイズ）する現象があるが、この炭化物の硬化により、ロータとラッピング振動を発生させることがある。この対策として、油漏止めリングの外側にシールリングを取り付け、エア吹付けを行うことによりじんあいの吸込み・付着を防止しかつ冷却が図れる。この結果、カーボナイズ化を抑制することができる。

(8) ジャーナル軸受の形状改善〔図18 参照〕

通常、低圧部のジャーナル軸受に使われている真円軸受または二円弧軸受を、ポケット付軸受（トラークシュピーゲル軸受）に形状変更することによって、ロータの振動に対する安定性を高める。

4.2 効率向上適用技術

(1) 高効率低圧翼の採用〔本特集号の別稿「地熱タービン」の図2 参照〕

40年以上にわたるフリースタANDING低圧翼の信頼性を維持しながら、最新の数値流体解析技術（CFD）によって性能を飛躍的に高めた新世代低圧翼を開発し、モデルタービン試験による検証を経て実機に適用している。

特に、最終段の静翼には、三次元のフローパターンを最適化するためリーンラジアル静翼を採用し、従来に比べて大幅な性能改善が可能となった。

図 18 ジャーナル軸受の形状改善

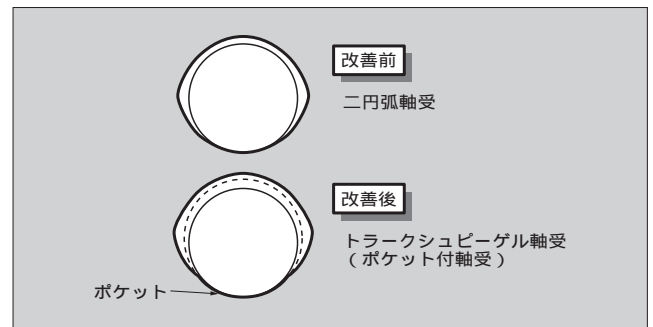


図 19 高性能新型反動翼形の流れ解析計算例

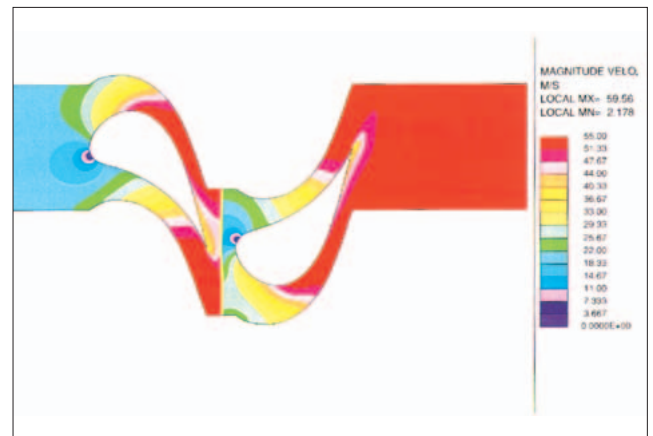
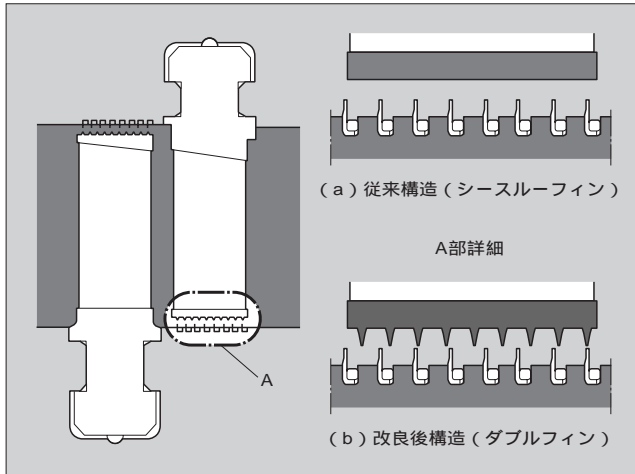


図 20 ダブルフィンの構造



用いられてきた。モデル実験によって種々の形状のシールフィンを比較検討した結果、対向形のダブルフィンを採用することによって、リークage損失を減少させ得ることが分かった。

5 あとがき

以上、富士電機の蒸気タービンに関する予防保全技術の概要について紹介した。

今後もこれら経年火力設備が主力電源設備として重要な役割を担っていかなければならない現状を踏まえ、富士電機は、顧客ニーズにマッチした適切な設備診断技術と最適な設備ライフプラン（予防保全・耐力向上対策技術）を提供していく所存である。

参考文献

- (1) 土信田徹也ほか：火力発電設備の余寿命診断技術，富士時報，Vol.60，No.5，p.348-354（1987）
- (2) 大野芳一ほか：火力発電設備における予防保全技術，富士時報，Vol.61，No.9，p.593-599（1988）
- (3) Yamashita, M. et al. : Detection of Carbides in CrMoV Steel by Electrochemical Method. PVP-Vol.276/NDE-Vol.12, ASME（1994）

(2) 高性能反動翼形の採用〔図19参照〕

従来用いられてきた反動翼形と同じ強度を保ちながら、翼列性能の改善を図った、新しい反動翼形を開発した。

新反動翼形は、従来プロファイルより幅広い負荷条件に対して、損失が小さいという特性を持っており、ストレート翼の翼列効率を大幅に高めることができる。

(3) ダブルフィンの採用〔図20参照〕

伸び差が大きい低圧タービンに対しては、従来、翼部のシールフィンとして、ストレート形のシールレスフィンが

最近登録になった富士出願

〔特 許〕

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
3102190	印字式記録計	高木 敏光	3102233	塗装設備における鋼板の加熱方法	田口 一洋
3102194	インクジェット記録ヘッドの製造方法	門脇 昭彦 相馬 伸一 武居 正彦 松田 幹彦	3102246	熱交換器	原 信
			3102254	自動販売機の制御装置	古賀 恒治 繁田 雅信
3102197	ウエハの誘電体分離方法	松崎 一夫 平林 温夫	3102316	電子写真感光体	会沢 宏一 伊藤 成通
3102201	平形半導体装置	兼田 博利	3102401	電力変換器の制御装置	海田 英俊 尾崎 一寛 江口 直也 笹川 清明
3102212	制御機器の取外し具	石川 雅英 月花 正志 柴田 勝美			3102653
3102214	半導体装置の製造方法	西澤 正人	3102828	プログラミング装置	引地 正則 丸山 吉晴 日向 一人 高橋 孝一
3102226	自動販売機用製氷機の氷吐出量制御装置	森 俊二 西脇 正剛 谷口 宏也 横山 勝治 太田 春夫			3103711
3102232	薄膜太陽電池およびその製造方法	佐藤 広喜			

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関	
スナバエネルギー再生方式2石フライバック形ソフトスイッチングDC-DCコンバータ	神 戸 工 場	小西 義弘	電気学会論文誌, 120-D, 11 (2000) 電気学会	
TiO <sub>2</sub> による NO <sub>x</sub> 除去機構の検討	富士電機総合研究所 "	西村 智明 西方 聡	第41回大気環境学会年会 (2000-9)	
高度下水処理運転支援用活性汚泥シミュレータの開発	富士電機総合研究所 " F F C	水谷 高明 佐々木康成 古屋 勇治 橋田 邦彦	第12回環境システム計測制御 (EICA) 研究発表会 (2000-10)	
オゾン処理による消毒副生成物低減と生物分解性に関する検討	富士電機総合研究所 公 共 営 業 本 部 環 境 シ ス テ ム 事 業 部	加藤 康弘 本山 信行 星川 寛	第10回日本オゾン協会年次研究講演会 (2000-10)	
無声放電型オゾナイザのオゾン生成に及ぼす誘導体材料の効果	富士電機総合研究所 "	田中 義郎 石岡 久道		
高純度酸素のオゾン発生特性	富士電機総合研究所 "	橋本 孝一 石岡 久道		
オゾン耐性膜を用いた湖沼水の浄化に関する検討	富士電機総合研究所 公 共 営 業 本 部	角川 功明 本山 信行		
ゴム材料の高濃度オゾン曝露試験	富士電機総合研究所 "	甲斐 一樹 石岡 久道		
水中気泡内放電によるオゾン生成 ( )	富士電機総合研究所	石岡 久道		
臭素酸イオンの還元により発生するラジカルの測定	富士電機総合研究所	岩本 卓治		
雨天時における A <sub>2</sub> O プロセスの運転方法のモデルによる検討	富士電機総合研究所	古屋 勇治		
ワールドワイド対応整流回路のシミュレーション解析結果と実験結果	富士電機総合研究所 "	三野 和明 黒木 一男		電気学会 半導体電力変換・産業電力電気応用合同研究会 (2000-11)
自動販売機のライフサイクルアセスメント	三 重 工 場 " " " "	木村 幸雄 清水 篤 小林 達也 冠野 恭範 長谷川陽子		第4回エコバランス国際会議 (2000-11)
定置用固体高分子型燃料電池の開発	事 業 開 発 室	青木 信	高分子学会 SST 研究会主催 第4回 SST 研究会講座 (2000-11)	
ニューラルネットワークを用いた学習機能付き自動燃焼制御の開発	環境システム事業部 事 業 開 発 室 " 富士ファコムシステム	野村 和朗 黒谷 憲一 松本 晴幸 新村 和隆	第11回廃棄物学会研究発表会 (2000-11)	
半導体スイッチ1個で構成する三相力率改善回路	富士電機総合研究所 "	小高 章弘 五十嵐征輝	電気学会 電子デバイス・半導体電力変換合同研究会 (2000-11)	
ソフトリカバリーダイオードの設計コンセプト	富士電機総合研究所 " 松 本 工 場 " "	根本 道生 西浦 彰 内藤 達也 桐澤 光明 大月 正人 関 康和		
PEFC スタックの性能評価	事 業 開 発 室 " " "	楠瀬 暢彦 加藤 茂実 青木 信 瀬谷 彰利		
Characteristics of a Monolithic DC-DC Converter utilizing a Thin-film Inductor	富士電機総合研究所 "	林 善智 菅原 聡	電気学会マイクロ磁気デバイスのシステム化調査専門委員会 (2000-11)	
Development of On-Site PAFC Power Plant at Fuji Electric	事 業 開 発 室	長谷川雅一	2000 Fuel Cell Seminar (2000-11)	
Strength Evaluation of Glass Substrate using FEM Analysis	富士電機総合研究所	富田恵津子	The third Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (2000-11)	



## カンパニー別営業品目

### 電機システムカンパニー

水処理システム, 情報・通信・制御システム, 計測システム, 電力システム, FA・物流システム, 環境装置・システム, 電動力応用システム, 産業用電源システム, 車両用電機品, クリーンルーム設備, レーザ機器, ビジョン機器, UPS, ミニ UPS, 変電システム, 火力機器, 水力機器, 原子力機器, 放射線機器, 電力量計, 省エネルギーシステム, 新エネルギーシステム

### 機器・制御カンパニー

PLC, POD, 操作表示機器, FA センサなどの FA 制御機器, 開閉機器, 高低圧受配電機器, 電力制御機器, モールド変圧器, ガス関連機器, インバータ, サーボシステム, 回転機, 回転機応用機器, 上記構成の小システム

### 電子カンパニー

MOSFET, パワートランジスタ, スマートパワーデバイス, IGBT モジュール, 整流ダイオード, 電源用パワー IC, 高耐圧 IC, オートフォーカス用 IC, 圧力センサ, 加速度センサ, ハイブリッド IC, 磁気記録媒体, 感光体およびその周辺装置

### 流通機器システムカンパニー

自動販売機, コインメカニズム, 紙幣識別装置, 貨幣処理システム, 飲料ディスペンサ, 自動給茶機, 冷凍冷蔵ショーケース, ホテルペンダシステム, カードシステム

---

富士時報	第 73 巻	第 12 号	平成 12 年 11 月 30 日 印刷 平成 12 年 12 月 10 日 発行
			定価 525 円 (本体 500 円・送料別)

---

編集兼発行人	谷 恭 夫
--------	-------

---

発行所	富士電機株式会社 技術企画室	〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号 (ゲートシティ大崎イーストタワー)
-----	-------------------	---

---

編集室	富士電機情報サービス株式会社内 「富士時報」編集室	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 (新宿コヤマビル) 電話 (03) 5388 - 7826 FAX (03) 5388 - 7369
-----	------------------------------	---

---

印刷所	富士電機情報サービス株式会社	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 (新宿コヤマビル) 電話 (03) 5388 - 8241
-----	----------------	---

---

発売元	株式会社オーム社	〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地 電話 (03) 3233 - 0641 振替口座 東京 6 - 20018
-----	----------	---

---

# 富士時報 VOL.73 2000(平成12年)総目次

## No.1 技術成果と展望

新しい年を迎えて .....	2
ハイライト .....	4
研究・基盤技術 .....	10
電力・エネルギー .....	20
産業用システム・機器 .....	33
交通システム .....	44
公共・社会システム .....	48
情報通信・計測制御システム .....	54
システムコンポーネント .....	69
情報機器関連コンポーネント .....	78
電子デバイス・半導体 .....	81
流通機器 .....	86

## No.2 統合コントローラ「MICREX-SX」特集

制御システム技術の発展に期待する .....	関口 隆	98 (2)
適用拡大が進む統合コントローラ「MICREX-SX」 .....	井手健一郎 富沢 敬一 野口 正幸	99 (3)
操作性を向上させたローダ「D300win Ver.2」 .....	濱田 明秀 山田 正志	104 (8)
統合コントローラ「MICREX-SX」のモーションコントロールへの適用 .....	相田 忠勝 井田 貴士 富永 保隆	108 (12)
ブロックエンジニアリングによる制御ソフトウェアの開発効率向上 .....	福住 光記 島田 喜秋	114 (18)
プログラム自動生成ソフトウェアパッケージ「SC マトリクス」 .....	福住 光記 比留川賢二	118 (22)
統合コントローラ「MICREX-SX」システムにおける		
FAアプリケーションソフトウェアとの連携 .....	中村千登世 武田 義孝	122 (26)
ソフトウェア PLC のリアルタイム拡張 .....	松田 洋 森 泰二	126 (30)
拡大する SX バス接続機器 .....	川島 重雄 山田 隆雄 小高 秀之	130 (34)
IEC 準拠プログラミング教育機材 .....	永田 康則	135 (39)
統合コントローラ「MICREX-SX」の機械制御分野への適用 .....	島田 喜秋 吉崎 久之	139 (43)
統合コントローラ「MICREX-SX」の鉄鋼設備への適用 .....	横田 廣幸 乳井 直樹 渡辺 悟	144 (48)
統合コントローラ「MICREX-SX」の分散制御システム		
「パートナー」への適用 .....	町田 善信 寺田 隆夫 宮崎 栄	148 (52)

## No.3 流通機器特集

顔を持った店舗 .....	後藤 茂 井土 保	158 (2)
流通機器の現状と展望 .....	矢野 賢司 太田 篤幸 村田 信行	161 (5)
スーパーマーケット向け冷凍冷蔵オープンショーケース (MAX シリーズ) .....	山田 英司 須藤 晴彦 青山 祐次	165 (9)
コンビニエンスストア向け冷蔵オープンショーケース (MF シリーズ) .....	小林 初夫 前川 勝彦	168 (12)
コンビニエンスストア向け栄養ドリンク用ショーケース .....	山口 一幸 矢野 隆幸 安藤 豊	172 (16)
富士トータル制御システム「エコマックス V」 .....	石山 修 須藤 晴彦 中山 伸一	175 (19)
業務用急速冷凍庫「ショックフリーザー」 .....	山口 香 富松 和成 富樫 大	178 (22)
衛生除菌水供給装置「サニーボーイ」 .....	井上 正喜 垣内 弘行 武藤 健二	181 (25)
電子機器用冷却装置の開発 .....	山口 香 大嶋 正和 因 道伸	185 (29)
スキーゲートシステム .....	高橋 佳史 松本 雅弘 小峯 規弘	188 (32)
五百円硬貨の現物エスクロ機能搭載コインメック .....	大藪 博 松藤 宏 西山 高志	192 (36)
ビル&カード一体形ビルバリ .....	宮坂 和好 小寺 利治 大村 信彦	196 (40)
スーパーマーケット向け金銭処理機「セリウス-SM」 .....	新妻 信行 福島 慶之 木下 栄文	200 (44)

**No.4 新エネルギー（燃料電池・太陽光）特集**

新エネルギー特集に寄せて .....	小長井 誠	206 ( 2 )
燃料電池発電の現状と展望 .....	鴨下 友義	中島 憲之 207 ( 3 )
燃料電池発電装置のホテルへの適用 .....	中島 憲之	堀内 義実 211 ( 7 )
燃料電池発電装置の生ごみ再資源化システムへの適用 .....	東郷 芳孝	中島 憲之 黒田 健一 213 ( 9 )
りん酸形燃料電池の開発 .....	瀬谷 彰利	原田 孝 215 ( 11 )
燃料電池用コンパクト形改質器の開発 .....	工藤飛良生	横山 尚伸 219 ( 15 )
オンサイト用りん酸形燃料電池発電装置の開発 .....	大内 崇	長谷川雅一 竹田 治正 223 ( 19 )
燃料電池発電装置の燃料切替技術 .....	小松 正	千田 仁人 項 東輝 227 ( 23 )
固体高分子形燃料電池の開発 .....	青木 信	瀬谷 彰利 231 ( 27 )
オンサイト形水素発生装置の開発 .....	久保田康幹	西垣 英雄 234 ( 30 )
部分酸化改質技術の開発 .....	大賀 俊輔	清田 透 中川 功夫 237 ( 33 )
燃料電池発電装置の予防保全技術 .....	岡 嘉弘	三上 誠 三輪 英幸 241 ( 37 )
太陽光発電システムの現状と展望 .....	蟹江 範雄	藤田 満 244 ( 40 )
アモルファスシリコン太陽電池の開発 .....	市川 幸美	原嶋 孝一 249 ( 45 )
太陽光発電利用貯水池水質保全システム .....	山本総一郎	小野 正敏 253 ( 49 )
太陽光発電システム用パワーコンディショナの開発 .....	楠本 敏	加藤 正樹 藤本 久 257 ( 53 )
太陽光マイクロ水力ハイブリッドシステム実証研究 .....	大田 洋充	桜井 正博 蟹江 範雄 261 ( 57 )

**No.5 産業ソリューション特集**

新しい視点でのソリューションを .....	高橋 輝男	268 ( 2 )
産業ソリューションの現状と展望 .....	吉田 純一	中島 千尋 269 ( 3 )
製造ソリューションのコンセプト .....	田中 春樹	吉田 清 273 ( 7 )
ロジスティクスソリューションのコンセプト .....		岩田 誠也 277 ( 11 )
SCM ソリューション .....	土屋 和広	菅井 賢三 282 ( 16 )
ERP ソリューション .....	鈴木 實	岡嶋 英治 286 ( 20 )
MES ソリューション .....	及川 弘	加藤 知一 田中 優 291 ( 25 )
運送物流ソリューション .....		濱口 聖児 下津 慎治 295 ( 29 )
食品流通ソリューション .....		高橋 一仁 清水 工 299 ( 33 )
製造物流ソリューション .....	森 良一	河田 康晴 福島 康博 304 ( 38 )
マーケティングソリューション .....	高橋 美克	福島 勉 金塚 厚樹 308 ( 42 )
保全ソリューション .....	及川 弘	大池 克幸 植草 誠 313 ( 47 )

**No.6 無線ネットワーク特集 / YAG レーザ加工特集**

<b>無線ネットワーク特集</b>			
技術開発とコンセプトブレーキング .....		服部 武	322 ( 2 )
無線ネットワークの現状と展望 .....	山本 斉	小嶋明比古	323 ( 3 )
無線を利用した自動販売機システム .....		杉野 一彦	326 ( 6 )
無線ネットワークを利用したスキーゲートシステム .....		吉富喜一郎	330 ( 10 )
無線方式による自動検針システム .....	福島 興人	松本 栄治	334 ( 14 )
フレキシブル無線ネットワークによる「総合エコ監視システム」			
“ EcoEASIEST ” .....	安東 伸彦	福田 英治	山野 博之 337 ( 17 )
無線式個人線量モニタリングシステム .....	小林 裕信	河村 岳司	井上 貴之 342 ( 22 )
<b>YAG レーザ加工特集</b>			
精密加工・非接触マーキング分野におけるレーザ技術の現状と展望 .....	千葉 芳弘	折笠 親一	新妻 正行 346 ( 26 )
エコロジー・リサイクル分野へのレーザの適用			
——二つのエコロジーへのレーザの適用—— .....	植田 進	松山 修也	池田 孝文 350 ( 30 )
プラスチック分野へのレーザの適用 .....	山村 辰男	外山 公一	中下 義春 355 ( 35 )
精密加工・非接触加工分野へのレーザの適用 .....	川村 浩徳	佐々木光祐	牧絵 達弘 359 ( 39 )
刻印・捺印等マーキング分野へのレーザの適用 .....	高田 憲	岩崎 唯信	神谷 正一 363 ( 43 )
精密微細加工分野への短波長レーザの適用 .....	新妻 正行	長嶋 崇弘	藤井 政義 366 ( 46 )

**No.7 環境・省エネルギー特集**

ゼロエミッション——成熟した工業社会への道 .....	鈴木 基之	374 ( 2 )
環境・省エネルギーの現状と展望 .....	臼井 正和 岡崎 金造 赤松 和彦	375 ( 3 )
リサイクル・ゼロエミッションへの取り組み .....	早川 益壽 和田 清美 新貝 和照	379 ( 7 )
誘導加熱・熱分解技術を応用した廃棄物処理 .....	中農 勝博 林 静男 喜田 清則	384 ( 12 )
空き容器回収・再生処理システム .....	圓子 雄	388 ( 16 )
衛星通信を利用した廃棄物動態監視情報サービス .....	宗木好一郎 中村 光宏	392 ( 20 )
食産業での肥料化リサイクルプラント .....	河野 元 目崎 雅彦 竹本 克己	397 ( 25 )
自然環境保全の水処理技術とクリーンエネルギー .....	野中 規正 境 一澄	401 ( 29 )
省エネルギーへの取り組みとエンジニアリング .....	福田 英治 窪田 新一 上村 猛	406 ( 34 )
富士電機的环境保全と省エネルギー .....	山田 充	413 ( 41 )

**No.8 IC 特集**

高度情報通信技術と電源 IC .....	山沢 清人	422 ( 2 )
富士電機の IC の現状と展望 .....	古森 敏夫	423 ( 3 )
軽負荷時省電力機能付 PWM 制御 IC .....	丸山 宏志 城山 博伸	427 ( 7 )
1チャンネルCMOS DC-DC コンバータ制御 IC .....	野村 一郎	432 ( 12 )
同期整流対応6チャンネルDC-DC コンバータ制御 IC .....	遠藤 和弥	436 ( 16 )
携帯電話機用電源 IC .....	佐野 功 加茂 宏明 藪崎 純	440 ( 20 )
高周波 DC-DC コンバータ用 IC 技術 .....	林 善智 片山 靖 菅原 聡	443 ( 23 )
電源用アナログ・デジタル混載 IC 技術 .....	神谷 茂 佐野 友美 佐々木雅浩	446 ( 26 )
電源 IC 用高精度アナログ回路技術 .....	中森 昭 鈴木 健 三添 公義	449 ( 29 )
CMOS アナログ IC 設計技術 .....	藤本 英俊 藤澤 旭	452 ( 32 )
アナログ C/D MOS デバイス・プロセス技術 .....	北村 明夫 佐々木 修	456 ( 36 )
電源 IC 用パッケージ .....	河田 尚文	460 ( 40 )
広角・小型オートフォーカスモジュール .....	泉 晶雄	462 ( 42 )
EMI 対策内蔵型圧力センサ .....	加藤 和之 篠田 茂	466 ( 46 )

**No.9 解析・評価技術特集**

安全を指向した新しい解析・評価技術に期待する .....	関根 和喜	472 ( 2 )
富士電機の解析・評価技術への取り組み .....	古庄 昇 松尾信一郎	473 ( 3 )
半導体界面の評価技術 .....	河島 朋之	476 ( 6 )
磁気ディスク媒体表面の評価技術 .....	折笠 仁 熊谷 明恭	480 ( 10 )
水環境汚染の評価技術 .....	大戸時喜雄 田中 良春 本山 信行	484 ( 14 )
鉛フリーはんだ材料における評価技術 .....	山下 満男 塩川 国夫 植田 厚	488 ( 18 )
放射光 ( SPring-8 ) 利用による材料解析技術 .....	大沢 通夫 広瀬 隆之 奥田 修弘	493 ( 23 )
地熱タービンにおける解析・評価技術 .....	酒井 吉弘 山下 満男 坂田 昌良	497 ( 27 )
電磁放射ノイズの解析・評価技術 .....	外園 洋昭 大原 浩一	501 ( 31 )
貨幣搬送シミュレーション技術 .....	山本 健明 川崎 哲治	505 ( 35 )
クーラントポンプの流れ解析技術 .....	関口 功 太田 成昭	509 ( 39 )
製造プロセスにおけるシミュレーション技術 .....	坂田 昌良 古川 雅晴 安部 信一	513 ( 43 )
電磁開閉器におけるシミュレーション技術 .....	村田 進 代島 英樹 関根 香織	517 ( 47 )
超音波トランスデューサの解析技術 .....	北出雄二郎 吉村 弘幸	521 ( 51 )



**No.10 計測機器特集 / オープン PIO 特集**

計測制御技術における演繹と帰納 ..... 青島 伸治 528 ( 2 )

計測機器特集

計測機器の動向と展望 ..... 土屋 泰則 杉本 啓介 529 ( 3 )

新形差圧・圧力発信器「FCX-A シリーズ」 ..... 中村 公弘 井上 芳範 533 ( 7 )

新形超音波流量計「NEW TIME DELTA シリーズ」 ..... 山本 俊広 杉田 勉 福島 正人 537 ( 11 )

クリトスポリジウム暫定対策指針に対応した高感度濁度計 ( MK- ) ..... 佐々木明德 菊池 智文 山口 太秀 542 ( 16 )

1 回路形多機能交流電力モニタ ..... 須藤哲四郎 入間野泰夫 547 ( 21 )

オープン PIO 特集

オープン化対応 PIO の概要 ..... 橋本 親 黒江 潤一 池戸 弘泰 550 ( 24 )

バックプレーンバス「SB バス」 ..... 田ノ下 勝 加藤 富雄 555 ( 29 )

ネットワークプロトコル「EPAP」 ..... 小堀 隆哉 藤田 史彦 岩本正太郎 559 ( 33 )

オープン PIO の国際規格対応の構造技術 ..... 高橋 潔 伊藤 信吉 清水 孝也 564 ( 38 )

オープン PIO の適用方法と事例 ..... 中村 貴之 中野 正人 松平 竹央 568 ( 42 )

**No.11 産業プラント用ドライブ制御システム特集**

産業プラント用ドライブ制御システム特集に寄せて ..... 松瀬 貢規 576 ( 2 )

産業プラント用ドライブ制御システムの現状と展望 ..... 荒井 至 紙本 博史 577 ( 3 )

オープン化ドライブ制御システム ..... 西村 英二 高橋 薫 神 俊裕 579 ( 5 )

産業プラント用可変速駆動システム ..... 西郷 宏治 584 ( 10 )

汎用ベクトル制御インバータ ..... 鉄谷 裕司 金沢 直樹 市中 良和 589 ( 15 )

省エネルギー用可変速駆動システム ..... 星 昌博 河野 正志 木谷 昌史 595 ( 21 )

産業プラントにおける新しい可変速制御技術 ..... 宮下 勉 西田 英幸 伊藤 伸一 600 ( 26 )

産業プラント用エンジニアリング支援システム ..... 田中 芳紀 根本 成幸 渡辺 悟 606 ( 32 )

圧延機用ドライブ制御システム ..... 葛西 隆夫 栃木 勉 614 ( 40 )

プロセスライン用ドライブ制御システム ..... 西郷 宏治 田中 芳紀 619 ( 45 )

製紙・フィルムライン用ドライブ制御システム ..... 小田 孝一 624 ( 50 )

ドライブ用保守支援システム ..... 西村 英二 石橋 景二 岩崎 哲之 628 ( 54 )

**No.12 火力・地熱発電設備特集**

電気はいつでも手に入れることができるのか ..... 森安 正司 636 ( 2 )

火力・地熱発電設備の現状と展望 ..... 赤尾 武彦 西崎 泰博 637 ( 3 )

IPP向けコンバインドサイクル発電設備 ..... 山形 通史 武田淳一郎 山本 隆夫 639 ( 5 )

富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービン ..... 酒井 吉弘 中村 憲司 和泉 栄 644 ( 10 )

中容量再熱蒸気タービン ..... 浅野 誠一 高橋 陽一 森山 高志 650 ( 16 )

地熱タービン ..... 加藤 佳史 655 ( 21 )

電源開発(株)磯子火力発電所新1号発電機 ..... 鈴木 忠雄 長谷 徹 新倉 仁之 660 ( 26 )

大容量全含浸2極空冷タービン発電機 ..... 木村 誠 日和佐寛道 阿久津信雄 665 ( 31 )

コンバインドサイクル発電所用昇圧変圧器 ..... 安部 正彰 松瀬 圭介 大野 佳雄 669 ( 35 )

タービン・発電機用統合制御装置 ..... 小島 広司 高村 隆太 673 ( 39 )

火力発電所向け総合運転支援・設備保全管理システム ..... 横瀬 主税 奈良 悟 677 ( 43 )

発電機の余寿命診断と更新技術 ..... 日下 肇 中山 昭伸 白石 明 681 ( 47 )

蒸気タービンの予防保全技術 ..... 加藤 雅喜 中村 憲司 住廣 敦夫 685 ( 51 )

# 富士時報論文抄録

## 火力・地熱発電設備の現状と展望

赤尾 武彦 西崎 泰博  
富士時報 Vol.73 No.12 p.637-638 (2000)

富士電機は、1955年に火力事業をスタートして以来、439ユニット(20,758 MW)の蒸気タービン設備の受注実績がある。また得意分野の一つである地熱発電の分野では、世界をリードしているといえる。ドイツ・シーメンス社とは協力関係を一層強化して、超々臨界圧大型蒸気タービンのみならず、ガスタービンおよびコンバインドサイクル発電にも取り組んでいる。火力発電は今後とも重要な電源であり、富士電機は他社を差別化できる技術で、お客様に満足していただける製品とサービスを提供していく。

## IPP 向けコンバインドサイクル発電設備

山形 通史 武田 淳一郎 山本 隆夫  
富士時報 Vol.73 No.12 p.639-643 (2000)

1995年の電気事業法の改正により電力卸供給入札制度が導入され、さらに2000年7月の改正により電力小売り事業が自由化された。これにより、IPP(Independent Power Producer: 独立系発電事業者)と電力会社間で売電をめぐる競争が始まった。本稿では、IPPのニーズに対応する富士電機とドイツ・シーメンス社のコンバインドサイクル発電設備に関する技術を紹介する。

## 富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービン

酒井 吉弘 中村 憲司 和泉 栄  
富士時報 Vol.73 No.12 p.644-649 (2000)

富士電機とドイツ・シーメンス社は大容量蒸気タービンの技術開発に絶え間なく着実に取り組んできた。開発の重点課題としては、大容量タンデムコンパウンド機の開発、蒸気条件の高温・高圧化、およびタービン内部効率の向上を大きな柱として推進してきた。近年それぞれの成果を取り入れた最新鋭のマシンが運転開始されており、これまで長年にわたって積み重ねられてきた運転実績をベースとして、性能・信頼性・運転・保守性の各評価項目に対して、一段と向上が認められ、良好な結果が得られている。

## 中容量再熱蒸気タービン

浅野 誠一 高橋 陽一 森山 高志  
富士時報 Vol.73 No.12 p.650-654 (2000)

環境問題の深刻化と電力自由化の世界的な動きは、ガスタービンコンバインドサイクルの再熱プラント化と併せて、中容量再熱蒸気タービンの市場ニーズを増加させている。この市場ニーズにこたえるべく開発した新型機は、タービン基本構造、弁配置、保安装置を含む最適設計によるコンパクト化と、高効率新型プロファイルの採用による高効率化を実現し、近年のデジタル制御技術を取り入れた良好な運用性、操作性をも併せ持つ高性能機である。

## 地熱タービン

加藤 佳史  
富士時報 Vol.73 No.12 p.655-659 (2000)

2000年に運転開始したワヤンウィンド(インドネシア)向け110 MW機およびソルトンシー(米国)向け58.32 MW機には、CFDの進歩によって開発可能となった新技術や、地熱タービン特有の技術が採用されている。ワヤンウィンド機は、単気筒の地熱用としては世界最大容量であり、ソルトンシー機は、世界でもほとんど例がない、トリプルフラッシュ方式を採用している。富士反動式地熱タービンは、井戸が減衰した場合、第一段翼を削除することにより発電端出力の回復が可能である。

## 電源開発(株)礪子火力発電所新1号発電機

鈴木 忠雄 長谷 徹 新倉 仁之  
富士時報 Vol.73 No.12 p.660-664 (2000)

1998年に製作に着手した電源開発(株)礪子火力発電所新1号発電機(670 MVA)は、2000年7月に工場試験を完了させた。本発電機の重点要求項目(効率:99%以上、水素純度:98.5%)をクリアした。発電機効率向上対策として風損低減を図るため、適切な風量配分を行った。水素純度向上対策として従来技術による簡便かつ安価な方式を採用した。

## 大容量全含浸2極空気冷却タービン発電機

木村 誠 日和佐 寛道 阿久津 信雄  
富士時報 Vol.73 No.12 p.665-668 (2000)

空気冷却タービン発電機は初期コストが低い、メンテナンスが容易であるなどの利点を有し、近年のガスタービンおよびコンバインドサイクルプラントの出力増大、IPP(独立系発電事業者)の台頭などの状況変化から特に大容量機の需要が伸長している。このような背景から、さまざまな新技術を投入して開発された富士電機の大容量全含浸2極空気冷却タービン発電機について、その特徴を紹介する。

## コンバインドサイクル発電所用昇圧変圧器

安部 正彰 松瀬 圭介 大野 佳雄  
富士時報 Vol.73 No.12 p.669-672 (2000)

コンバインドサイクル発電所用昇圧変圧器に適用している最近の技術を紹介する。新しい低騒音化技術を適用して防音壁を省略し、すべての外装部品を本体にマウントして工場完成状態のまま現地に搬入する全装輸送式変圧器を実現して、トータルコストの低減に大きく寄与していること、また、コンバインドサイクル発電の出力特性と設置場所の気温変化を考慮した寿命損失を計算して変圧器容量を決定していること、さらに、発電機2台に変圧器1台で対応するスプリット巻線形変圧器の設計例などである。

# Abstracts (Fuji Electric Journal)

## Combined Cycle Power Plants for Independent Power Producers in Japan

Naofumi Yamagata Junichiro Takeda Takao Yamamoto  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.639-643 (2000)

The Electric Utility Law Act was amended in 1995 and 2000 to introduce free competition into the power market in Japan. Competition among electric power companies and independent power producers (IPPs) is becoming severer these days. This paper introduces the technology of Fuji-Siemens combined cycle power plants to meet the needs of IPPs.

## Present Status and Prospects for Thermal/Geothermal Power Generation

Takehiko Akao Yasuhiro Nishizaki  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.637-638 (2000)

Since Fuji Electric started the production of equipment for thermal power plants in 1955, it has supplied 439 steam turbine units (20,758 MW). It currently plays a leading role in geothermal generation, one of its favorite fields. In closer cooperation with Siemens, Germany, we are tackling not only ultra-super critical pressure steam turbines but also gas turbines and combined cycle power generation. Thermal power generation will remain an important power source, and Fuji Electric will supply products and services to users' satisfaction utilizing its discriminative technologies.

## Medium Capacity Reheat Steam Turbines

Seiichi Asano Yoichi Takahashi Takashi Moriyama  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.650-654 (2000)

Worldwide movements for serious environmental problems and free power marketing, in addition to increasing reheat plants for the gas turbine combined cycle, have increased market needs for medium capacity reheat steam turbines. Fuji Electric has newly developed a high-performance machine to meet the market needs. The machine realizes compactness through optimum design, including the basic turbine construction, valve arrangement and security system, as well as high efficiency by using the new type profile, and is capable of good operation and manipulation using recent digital control technology.

## Fuji-Siemens Large Capacity Steam Turbines for Advanced Steam Conditions

Yoshihiro Sakai Kenji Nakamura Sakae Izumi  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.644-649 (2000)

Fuji Electric and Siemens, Germany have steadily continued technical developments for large capacity steam turbines. Their major subjects are the development of large capacity tandem compound machines, steam conditions of higher temperature and pressure, and the improvement of turbine internal efficiency. Recently, the newest machine based on the results of development has gone into operation. Remarkable improvement on the operation record so far accumulated for many years is recognized with regard to the evaluation items of performance, reliability, operation and maintenance.

## New 670 MVA Generator for the Isogo Thermal Power Plant of Electric Power Development Co., Ltd.

Tadao Suzuki Tohru Hase Hitoshi Niikura  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.660-664 (2000)

Fuji Electric started manufacturing the new 670 MVA generator for the Isogo thermal power plant of Electric Power Development Co., Ltd. in 1998 and finished the factory test in July 2000. The generator cleared the important requirements such as efficiency higher than 99% and hydrogen purity of 98.5%. To improve generator efficiency, suitable flow distribution was applied so as to reduce head loss. To improve hydrogen purity, a simple, low-priced system based on conventional technology was applied.

## Geothermal Steam Turbines

Yoshifumi Kato  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.655-659 (2000)

The 110 MW machine for Wayang Windu, Indonesia, and the 58.32 MW machine for Salton Sea, USA, put into operation in 2000, used technologies newly developed owing to the progress of computational fluid dynamics (CFD) or peculiar to geothermal steam turbines. The former has the largest capacity in the world as a single casing machine for geothermal use, and the latter uses a triple flash system which has few example worldwide. Fuji reaction type geothermal steam turbines can recover generator output by removing the first stage stationary and moving blade rows in case of decline in the production well.

## Step-Up Transformers for Combined Cycle Power Plants

Masaaki Abe Keisuke Matsuse Yoshio Ohno  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.669-672 (2000)

This paper describes recent technologies of step-up transformers for combined cycle power plants. We manufacture transportable, totally assembled transformers that contribute to total cost reduction. They need no sound-proof enclosure by applying new noise reduction technology and can be transported to the site with the whole external equipment mounted on the main body as completed in the factory. The transformer capacity is determined by computing loss of life expectancy taking into consideration the output characteristics of combined cycle power generation and temperature changes at the installation site. Further, a split winding transformer that can be coupled with two generators is cited as an example.

## Large Capacity, Air-Cooled, Two-Pole Turbine Generators

Makoto Kimura Hiromichi Hiwasa Nobuo Akutsu  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.665-668 (2000)

Air-cooled turbine generators have the advantage of low initial cost and easy maintenance. Furthermore, demand particularly for large capacity machines has been expanding because of situation changes such as increase in the output of gas turbines and combined cycle plants and the rise of independent power producers in recent years. This paper describes an outline of Fuji Electric's large capacity, air-cooled, globally vacuum pressure impregnated (VPI), two-pole generators that were developed utilizing various new technologies to meet the situation.

### タービン・発電機用統合制御装置

小島 広司 高村 隆太  
富士時報 Vol.73 No.12 p.673-676 (2000)

最近の電力自由化の動きから、火力発電機器に対しては、価格低減と高信頼性確保の両立が求められている。蒸気タービン・発電機の主制御装置としてはタービンの回転速度を制御するガバナと発電機の電圧を制御する AVR があり、これらを一体化した統合制御装置 (TGR) を開発・製作し、十数年にわたって供給してきた。本稿では、TGR の制御機能やシステム構成、最近の開放形コントローラ間ネットワーク (FL-net) を用いたオープン統合分散監視制御システムとの連携システムについて紹介する。

### 火力発電所向け総合運転支援・設備保全管理システム

横瀬 主税 奈良 悟  
富士時報 Vol.73 No.12 p.677-680 (2000)

火力発電所の設備監視業務においては、各現場機器の定期的な状態監視および異常発生時の迅速な検知、対処は大きなウエートを占める作業である。電力業界では規制緩和の流れのなかで発電設備の運用コスト低減の必要にせまられており、設備保全管理業務についても作業効率向上による省力化が求められている。本稿では、そのような要求に対して、富士電機の提案する「総合運転支援・設備保全管理システム」について紹介する。

### 発電機の余寿命診断と更新技術

日下 肇 中山 昭伸 白石 明  
富士時報 Vol.73 No.12 p.681-684 (2000)

既設経年火力発電設備に対する安定運用・信頼性確保をいかに図っていくかが昨今の課題である。その課題を克服するうえで、設備の劣化度を十分に把握し、投資効果の高い修繕・更新を図っていくことが肝要である。

本稿では発電機の余寿命診断と更新技術を紹介する。

### 蒸気タービンの予防保全技術

加藤 雅喜 中村 憲司 住廣 敦夫  
富士時報 Vol.73 No.12 p.685-692 (2000)

経年火力発電設備は、今後も主力電源設備として重要な役割を担っていかなければならない反面、過酷な運用により従来にも増してその劣化傾向が加速されており、早急に適切な耐力強化が必要な状態になっている。

本稿では、これらの経年蒸気タービンの代表的な不具合事例を紹介するとともに、最近富士電機が実施している劣化度診断や設備補修改良・新技術適用などの予防保全技術例を紹介する。



---

### **Integrated Operation Support and Equipment Maintenance System for Thermal Power Plants**

Chikara Yokose    Satoru Nara  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.677-680 (2000)

---

In the equipment monitoring of thermal power plants, the periodic monitoring of field equipment and quick detection and measures in case of abnormality are a matter of much importance. The electric power industry is under the necessity of reducing the operation cost of generating equipment in the stream of regulation relaxation, and labor reduction in equipment maintenance by improving work efficiency is also required. This paper introduces Fuji Electric's "integrated operation support and equipment maintenance system" to meet these requirements.

---

### **Integrated Digital Control System for Steam Turbine and Generator Units**

Hiroshi Kojima    Ryuta Takamura  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.673-676 (2000)

---

Recent movement for free competition in the electric power market requires thermal power generating equipment to be low in price as well as highly reliable. The steam turbine and generator unit has two master control systems : a governor for turbine speed control and an AVR for generator voltage control. Fuji Electric developed an integrated digital control system (TGR) which integrated these two systems and has marketed the TGR over ten years. This paper describes the control functions and system configuration of the TGR as well as coordination with an advanced, open, supervisory system that uses the new open network FL-net between controllers.

---

### **Preventive Maintenance Technologies for Steam Turbines**

Masaki Kato    Kenji Nakamura    Atsuo Sumihiro  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.685-692 (2000)

---

Used thermal power plants are still required to play an important role as major power supply equipment. However, recent severe operation has accelerated their deterioration more than before, and the situation needs the quick and suitable reinforcement of durability. This paper describes the typical examples of troubles in these used steam turbines and Fuji Electric's preventive maintenance technologies such as deterioration diagnosis, equipment renovation, and new technology applications.

---

### **Diagnosis of life Expectancy and Renewal Technology for Generators**

Hajime Kusaka    Akinobu Nakayama    Akira Shiraishi  
Fuji Electric Journal Vol.73 No.12 p.681-684 (2000)

---

The stable operation and high reliability of existing used thermal power generating equipment are currently priority problems. To solve the problems, it is essential to grasp the degree of equipment deterioration enough and carry out effective investment for repair or renewal. This paper describes the trend of diagnosis technology for generator insulation and an example of renewal taking economy and maintainability into consideration.

# 富士電機株式会社

本社事務所	☎03)5435-7111	〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号(ゲートシティ大崎イーストタワー)
北海道支社	☎011)261-7231	〒060-0042 札幌市中央区大通西四丁目1番地(道銀ビル)
東北支社	☎022)225-5351	〒980-0811 仙台市青葉区一番町一丁目2番25号(仙台NSビル)
北陸支社	☎076)441-1231	〒930-0004 富山市桜橋通り3番1号(富山電気ビル)
中部支社	☎052)204-0290	〒460-0003 名古屋市中区錦一丁目19番24号(名古屋第一ビル)
関西支社	☎06)6455-3800	〒553-0002 大阪市福島区鷺洲一丁目11番19号(富士電機大阪ビル)
中国支社	☎082)247-4231	〒730-0021 広島市中区胡町4番21号(朝日生命広島胡町ビル)
四国支社	☎087)851-9101	〒760-0017 高松市番町一丁目6番8号(高松興銀ビル)
九州支社	☎092)731-7111	〒810-0001 福岡市中央区天神二丁目12番1号(天神ビル)
北関東支店	☎048)526-2200	〒360-0037 熊谷市筑波一丁目195番地(能見ビル)
首都圏北部支店	☎048)657-1231	〒330-0802 大宮市宮町一丁目38番1号(野村不動産大宮共同ビル)
首都圏東部支店	☎043)223-0701	〒260-0015 千葉市中央区富士見二丁目15番11号(日本生命千葉富士見ビル)
神奈川支店	☎045)325-5611	〒220-0004 横浜市西区北幸二丁目8番4号(横浜西口KNビル)
新潟支店	☎025)284-5314	〒950-0965 新潟市新光町16番地4(荏原新潟ビル)
長野システム支店	☎026)228-6731	〒380-0836 長野市南県町1002番地(陽光エースビル)
長野支店	☎0263)36-6740	〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号(長野県鋳物会館)
東愛知支店	☎0566)24-4031	〒448-0857 刈谷市大手町二丁目15番地(センタービルOTE21)
兵庫支店	☎078)325-8185	〒650-0033 神戸市中央区江戸町95番地(井門神戸ビル)
岡山支店	☎086)227-7500	〒700-0826 岡山市磨屋町3番10号(住友生命岡山ニューシティビル)
山口支店	☎0836)21-3177	〒755-8577 宇部市相生町8番1号(宇部興産ビル)
松山支店	☎089)933-9100	〒790-0878 松山市勝山町一丁目19番地3(青木第一ビル)
沖縄支店	☎098)862-8625	〒900-0005 那覇市天久1131番地11(ダイオキビル)
道北営業所	☎0166)68-2166	〒078-8801 旭川市緑が丘東一条四丁目1番19号(旭川リサーチパーク内)
北見営業所	☎0157)22-5225	〒090-0831 北見市西富町163番地30
釧路営業所	☎0154)22-4295	〒085-0032 釧路市新栄町8番13号
道東営業所	☎0155)24-2416	〒080-0803 帯広市東三条南十丁目15番地
道南営業所	☎0138)26-2366	〒040-0061 函館市海岸町5番18号
青森営業所	☎0177)77-7802	〒030-0861 青森市長島二丁目25番3号(ニッセイ青森センタービル)
盛岡営業所	☎019)654-1741	〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通16番21号(住友生命盛岡駅前ビル)
秋田営業所	☎018)824-3401	〒010-0962 秋田市八橋大畑一丁目5番16号
山形営業所	☎023)641-2371	〒990-0057 山形市宮町一丁目10番12号
新庄営業所	☎0233)23-1710	〒996-0001 新庄市五日町1324番地の6
福島営業所	☎024)932-0879	〒963-8033 郡山市亀田一丁目2番5号
いわき営業所	☎0246)27-9595	〒973-8402 いわき市内郷御殿町二丁目29番地
水戸営業所	☎029)231-3571	〒310-0805 水戸市中央二丁目8番8号(櫻井第2ビル)
茨城営業所	☎029)266-2945	〒311-1307 茨城県東茨城郡大洗町桜道304番地(茨交大洗駅前ビル)
金沢営業所	☎076)221-9228	〒920-0031 金沢市広岡一丁目1番18号(伊藤忠金沢ビル)
福井営業所	☎0776)21-0605	〒910-0005 福井市大手二丁目7番15号(安田生命福井ビル)
山梨営業所	☎055)222-4421	〒400-0858 甲府市相生一丁目1番21号(清田ビル)
松本営業所	☎0263)33-9141	〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号(長野県鋳物会館)
岐阜営業所	☎058)251-7110	〒500-8868 岐阜市光明町三丁目1番地(太陽ビル)
静岡営業所	☎054)251-9532	〒420-0053 静岡市弥勒二丁目5番28号(静岡荏原ビル)
浜松営業所	☎053)458-0380	〒430-0945 浜松市池町116番地13(山崎電機ビル)
和歌山営業所	☎073)432-5433	〒640-8052 和歌山市鷺ノ森堂前丁17番地
鳥取営業所	☎0857)23-4219	〒680-0862 鳥取市雲山153番地36〔鳥電商事(株)内〕
倉吉営業所	☎0858)23-5300	〒682-0802 倉吉市東蔵城町181番地(平成ビル)
山陰営業所	☎0852)21-9666	〒690-0007 松江市御手船場町549番地1号(安田火災松江ビル)
徳島営業所	☎088)655-3533	〒770-0832 徳島市寺島本町東二丁目5番地1(元木ビル)
高知営業所	☎088)824-8122	〒780-0870 高知市本町四丁目1番16号(高知電気ビル別館)
小倉営業所	☎093)521-8084	〒802-0014 北九州市小倉北区砂津二丁目1番40号(富士電機小倉ビル)
長崎営業所	☎095)827-4657	〒850-0037 長崎市金屋町7番12号
熊本営業所	☎096)387-7351	〒862-0950 熊本市水前寺六丁目27番20号(神水恵比須ビル)
大分営業所	☎097)537-3434	〒870-0036 大分市寿町5番20号
宮崎営業所	☎0985)20-8178	〒880-0805 宮崎市橋通東三丁目1番47号(宮崎プレジデントビル)
南九州営業所	☎099)224-8522	〒892-0846 鹿児島市加治屋町12番7号(日本生命鹿児島加治屋町ビル)
エネルギー製作所	☎044)333-7111	〒210-9530 川崎市川崎区田辺新田1番1号
変電システム製作所	☎0436)42-8111	〒290-8511 市原市八幡海岸通7番地
東京システム製作所	☎042)583-6111	〒191-8502 日野市富士町1番地
神戸工場	☎078)991-2111	〒651-2271 神戸市西区高塚台四丁目1番地の1
鈴鹿工場	☎0593)83-8100	〒513-8633 鈴鹿市南玉垣町5520番地
回転機工場	☎0593)83-8100	〒513-8633 鈴鹿市南玉垣町5520番地
松本工場	☎0263)25-7111	〒390-0821 松本市筑摩四丁目18番1号
山梨工場	☎055)285-6111	〒400-0222 山梨県中巨摩郡白根町飯野221番地の1
吹上工場	☎048)548-1111	〒369-0192 埼玉県北足立郡吹上町南一丁目5番45号
大田原工場	☎0287)22-7111	〒324-8510 大田原市中田原1043番地
三重工場	☎0593)30-1511	〒510-8631 四日市市富士町1番27号
(株)富士電機総合研究所	☎0468)56-1191	〒240-0194 横須賀市長坂二丁目2番1号
(株)F F C	☎03)5351-0200	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目30番3号(新宿コヤマビル)

