

最近の経年火力発電ユニット再生技術

特集

加藤 雅喜(かとう まさき)

浅野 誠一(あさの せいいち)

福田 昌介(ふくだ しょうすけ)

① まえがき

富士電機は、運転開始以来 30 年経過した経年火力発電ユニットにおいて、さらに 20 年以上の継続運用を目的に設備の長寿命化対策として、再熱二車室式タービンの基礎と、ほとんどすべての補機を流用した最新鋭の再熱単車室式タービンへの置換え工事を実施した。

限られた既存発電所のスペースへの高性能再熱単車室式タービンの設置は、発電機設備の絶縁更新、高圧配電盤・制御監視装置の更新と合わせ、機械式ガバナからデジタル式ガバナ・タービン自動起動システム(ATS)制御・CRT オペレーションの採用により操作性および信頼性を飛躍的に高め、またメンテナンス性の大幅な向上を実現した。

このリフレッシュ技術は、今後、納入発電ユニットの約 7 割を占める経年火力発電ユニットに低コストで適用することが可能であることから、顧客のニーズにマッチングした新たな提案として大きな需要を期待している。

ここでは、この経年火力発電ユニットの設備を大幅に流用しながら最新技術を融合させて、経年機が抱える課題を解決し、新たな発電ユニットに再生した技術とその事例を紹介する。図 1 に再生発電ユニットの全景を示す。

図 1 再生発電ユニットの全景



② 経年火力発電ユニットの抱える課題

余寿命診断技術の発達によって設備の寿命が定量的に評価できるようになり、また、統計的寿命や事故情報が公開されるようになった。一方、設置者は経年火力発電ユニットの継続運用・定期点検インターバル延長などに対し次のような不安を抱いており、深刻な悩みとして耳にする機会が多くなった。

- 1) ユニット全体の老朽化とトラブル発生の不安
- 2) 高温高圧蒸気タービンの材料劣化による損傷の懸念
- 3) 蒸気タービン各部位に生じている摩耗・腐食・浸食
- 4) 配管摩耗・減肉・噴破事故発生の不安
- 5) 発電機・電気機器の絶縁劣化・寿命
- 6) 廃型対応遅れによるメンテナンス不備
- 7) 制御保安装置の信頼性低下
- 8) 運用操作性改善遅れによるミスオペレーション
- 9) 経年振動上昇傾向に対する不安
- 10) 経年的効率の低下による損失
- 11) 起動時間の遅延による起動損失

③ 長寿命化対策工事計画

長寿命化対策工事の基本は、経年設備が抱える弱点を補修や取替え・改造更新によって今後の長期継続運用に耐え得るようにし、顧客の不安を取り除くことであるが、さらに顧客の運用計画や欲求を満たし、広範囲にわたり最新技術を適用し近代化を図ることが重要となる。図 2 に今回実施した長寿命化対策工事の計画・展開概要を示す。

④ 最新鋭蒸気タービンの適用技術

運転開始後 20 年以上経過した蒸気タービンは、長年にわたる運用により、材料の高温クリープ損傷や疲労損傷などが認められるようになるが、その対策として、対症療法的に部品の新製取替えを行うことが一般的であった。

今回の長寿命化対策は、これまで行ってきた経年劣化対



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、富士電機システムズ株式会社発電プラント本部火力統括部プラントサービス部長。



浅野 誠一

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



福田 昌介

火力発電設備の電気・制御アフターサービスエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社発電プラント本部火力統括部電気制御サービス部。

図2 長寿命化対策工事の計画・展開概要

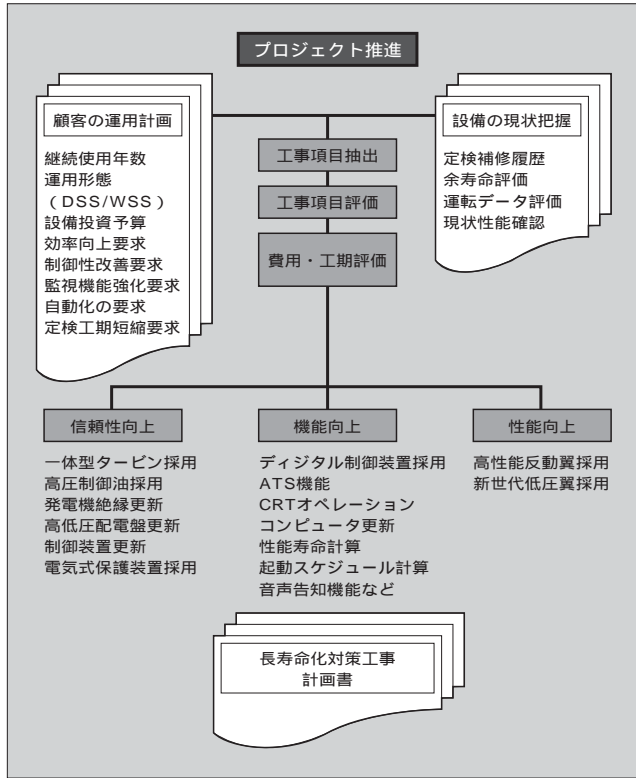
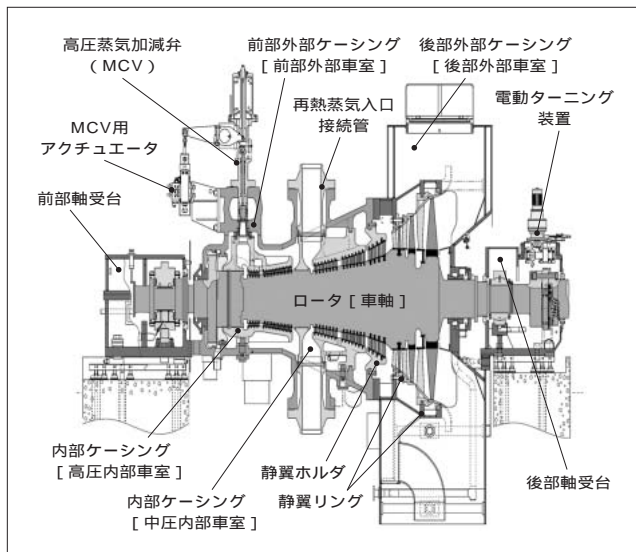


図3 蒸気タービン断面図



策ではなく、大幅に既設機器を流用しながら従来の再熱二車室式タービンを最新技術を駆使した再熱単車室式タービンへ構造変更することで、コンパクト化、効率向上、起動損失の低減、操作性の向上を図り、さらにメンテナンスコストも大幅に低減できる新たな発電ユニットに再生することであった。

4.1 蒸気タービンの仕様

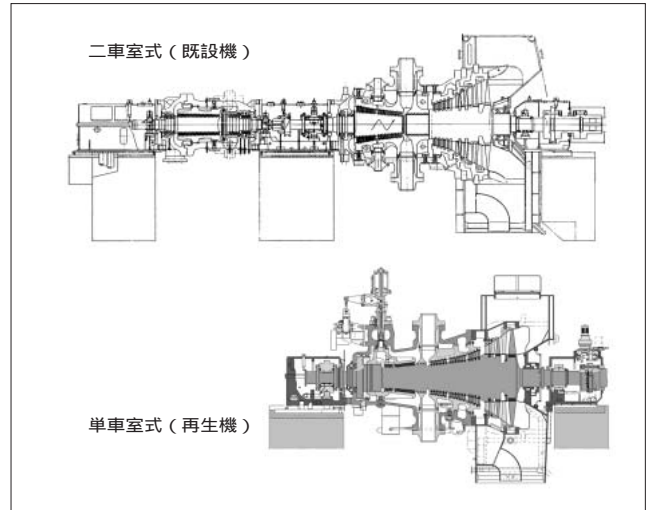
本蒸気タービンの仕様は次のとおりである。図3には断面図を示す。

型式 : 単車室再熱再生式

表1 蒸気タービンの再生機と既設機との寸法・質量比較

項目	単車室式 (再生機)	二車室式 (既設機)
軸方向長さ (mm)	8,300	12,980
本体質量 (t)	160	210

図4 蒸気タービンの既設機と再生機との比較



- 出力 : 85,000 kW
- 主蒸気圧力・温度 : 13.83 MPa/538
- 再熱蒸気圧力・温度 : 3.13 MPa/538
- 真空 : 696 mmHg
- 抽気段数 : 5 段
- 回転数 : 3,600 r/min

4.2 再熱単車室機の採用

近年の蒸気タービン技術は、単機容量の拡大と蒸気条件の高温高圧化へと進んできた。従来、複数の車室で構成していた蒸気タービンは三車室から二車室へ、二車室から単車室へと大幅なコンパクト化が図られてきた。本蒸気タービンも、既設の二車室式構造を高中低一体の単車室式構造とし、既設基礎も一切改造することなく、大幅なコンパクト化を図った。

寸法および質量についての再生機と既設機との比較を表1、図4に示す。

4.3 再熱単車室機の特徴

1) 既設基礎および補機類の流用

ユニット再生ポイントの一つは、既設の低圧蒸気タービン基礎をそのまま流用することであったが、基礎コンクリートの劣化診断および再生機採用に伴う強度解析を実施し、基礎の改造に伴う費用および工程を回避できた。また、ヒータ、脱気器、復水器、タービン潤滑油設備などプラント構成補機類についても、仕様の再検討を行い既設機器の流用を図った。

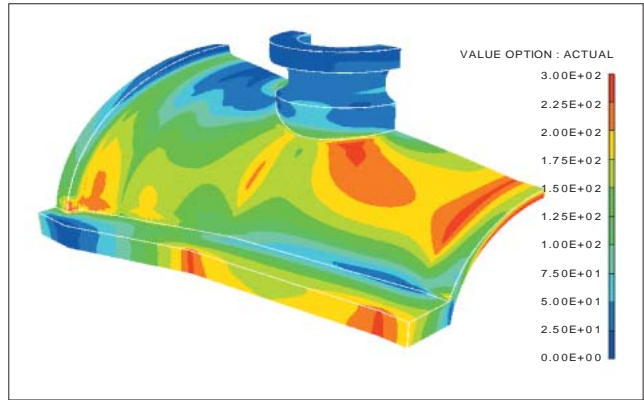
2) 絞り制御二重ケーシング構造の採用

本プラントは石油だき火力発電プラントであり、DSS

図5 蒸気タービンロータ



図6 再熱蒸気流入部の温度分布解析 (FEM 解析)



(Daily Start and Stop) 運用として計画されたため、蒸気流入部には制御段を持たない全段反動翼を採用した絞り制御方式を採用した。この絞り制御方式の採用により、タービン本体で最も強度的に厳しいタービン車室部での負荷変動による温度変化幅を小さく抑えられ、高速起動と大幅な許容負荷変化を実現した。この結果、既設プラントの懸案であった起動損失を大幅に低減することができた。

3) 軸系の振動解析と対策

単車室構造への変更に伴い、既設発電機と連結した軸系全体のコンピュータによる振動解析を行った。この結果、発電機端に設置されている励磁機の振動感度が上昇することが判明した。その対策として、励磁機のフィールドバランスを事前に検討し、計画どおりの振動値とすることができた。蒸気タービンロータを図5に示す。

4) タービン本体の温度分布および応力解析

再熱単車室式タービンへの構造変更は、高圧タービン蒸気出口部(低温再熱部)と中圧タービン蒸気流入部を一つのケーシングに合わせ持つことから、ケーシングの温度偏差が、熱応力・疲労寿命・局部変形などに大きな影響を及ぼすため、その解析が重要となる。

そのため、本蒸気タービンについては、再熱蒸気流入部を中心とした内部の温度分布・応力解析(FEM解析)を繰り返し実施し、再熱単車室式タービンの最適設計(ケーシング・フランジ形状設計、肉厚設計など)を行った。図6に再熱蒸気流入部について実施した温度分布解析結果を示す。

5) セパレート式油システムの採用

本蒸気タービンでは、従来の制御油・潤滑油併用低圧油システムからセパレート式油システムに変更した。この制御油システムは、弁操作力の増加と制御性の向上を図った14MPaの高圧油システムであり、プランジャ式制御油ポンプを中心とした操作油と弁操作の電油サーボ式アクチュエータによる最新式制御装置システムである。また、潤滑油システムは、タービン駆動主油ポンプから電気式主油ポンプに変更した低圧油システムであるが、既設の潤滑油系統機器を流用する工夫を行った。

6) デジタル式ガバナと全電気式保安装置の採用

自動起動や遠隔自動化などに代表される省人化対応や制御性の向上要求は、デジタル式ガバナの採用と全電気式保安装置システムの採用によって実現した。

特に、全電気式保安装置システムは、従来の機械式に対して油配管や検出用メカニカル装置が不要であり、検出センサの小型化と設置場所が比較的自由に選べる利点がある。富士電機では、こうした利点を生かして、軸流排気式タービンやシングルトレイン式コンバインドサイクルプラントを含めたあらゆる型式のタービンに対して標準的に採用しているシステムである。

5) 発電機設備の絶縁更新技術

長期に使用した発電機固定子コイルなどの絶縁は、電界ストレス、熱ストレス、機械ストレス、汚損などにより経年的に劣化し、絶縁耐力の限界(絶縁寿命)を迎える。

そのため、設備の予防保全の観点から非破壊的絶縁診断や、物理化学的絶縁診断などの手法により、その絶縁劣化度を把握し、絶縁寿命に到達し重大事故に至る前に計画的に絶縁更新を行うことが重要となる。

今回実施した発電機の長寿命化対策工事は、固定子コイルの非破壊的絶縁診断データから算出した固定子コイルの残存破壊電圧(BDV: Break Down Voltage)と、長年蓄積した非破壊データの統計的な相関関係から、絶縁耐力の限界(余寿命)を定量的に推測し、絶縁更新の時期およびその範囲を正しく評価し、今後さらに20年の継続運用に耐え得る設備に再生することであった。以下にその実施例を紹介する。

5.1 発電機の仕様

本発電機の仕様は次のとおりである。

製造年：1972年

型式：横軸円筒回転界磁全閉内冷型

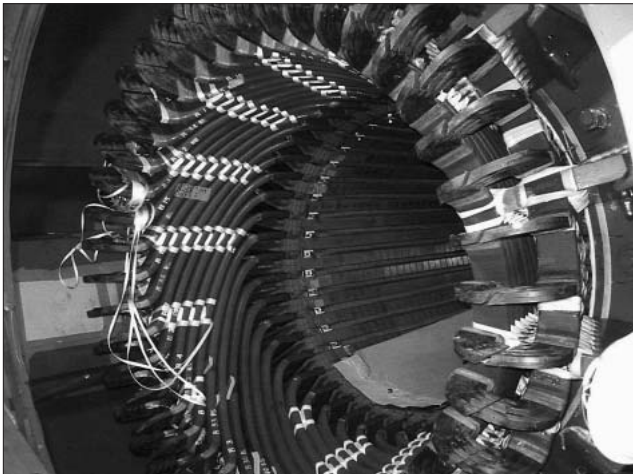
出力：100,000 kVA

電圧：13,800 V

電流：4,184 A

力率：0.85

図7 発電機固定子コイル更新工事



相数 : 3
 極数 : 2
 絶縁種別 : B

5.2 発電機固定子コイル巻替え工事

余寿命評価結果、運転に必要とされる絶縁耐力値を下回ることが判明したためコイルの巻替え更新を実施した。絶縁種別はB種からF種エポキシ樹脂・真空含浸絶縁材にし、絶縁性能の向上を図るとともに、コイル接続方法をブロック工法に改良することで現地絶縁更新工期を大幅に短縮できた。更新工事中の発電機固定子コイルを図7に示す。

5.3 発電機回転子保持リング更新工事

保持リングの応力腐食割れ（SCC）対策として、保持リングの材質変更（18Mn18Cr）を実施した。合わせてコイルエンド間隔片の脱落防止改良および保持リング下などの絶縁も更新し信頼性の向上を図った。更新工事中の発電機回転子保持リングを図8に示す。

5.4 ブラシレス励磁機コイル巻替え工事

界磁巻線リードなどに亀裂などの劣化が確認されており、信頼性向上のため、励磁機の回転子および固定子のコイルの巻替えを実施した。

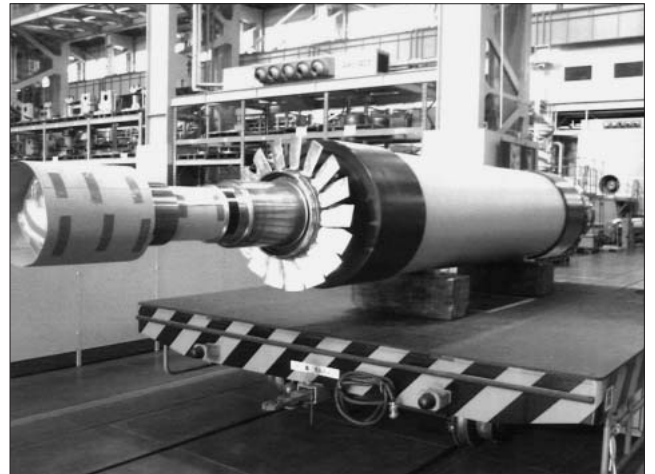
5.5 主端子ブッシングの更新工事

既設主端子ブッシングは、絶縁油を使用しており、過去に絶縁油の漏れを経験している。また、取付フランジ部の亀裂補修も行っており、今回、エポキシモールド製の主端子ブッシングに更新した。

5.6 その他

その他、軸受軸電流防止絶縁の強化改良および発電機固定子気密貫通端子などの更新を合わせて実施し、発電機設備全体の信頼性向上を図った。

図8 発電機回転子保持リング更新工事



⑥ 電気制御設備の改善技術

電力会社の経年火力発電プラントでは、ベース機から負荷調整機として、さらにDSS・WSS（Weekly Start and Stop）対応運用に変更されるケースがある。このためプラントの信頼性向上や起動時間の短縮、操作性の大幅な改善が求められる。今回の長寿命化対策工事は従来の経年劣化対策以外に、「タービンの起動時間短縮と操作性の改善」「タービン発電機監視機能の強化」の顧客ニーズを実現するための装置追加と既設流用品とのインターフェース構築が重要課題であった。これらの実現のために採用した最新鋭のデジタル制御装置と既設設備の融合について紹介する。

6.1 自動化機能および監視機能の構築

今まで手動で操作していたタービン起動にかかわる各種操作について、自動化とプラント監視機能を強化することによりオペレーターの負担の軽減と起動時間の大幅な短縮を図った。

1) タービン自動起動システム

タービン自動起動システム（ATS）の範囲は図9に示すとおりタービン主蒸気配管ウォーミング開始からタービン定格出力の約25%出力までとし、以降の負荷制御はプラント自動制御装置（APC）に切り換えるシステムである。

2) 補助蒸気制御の自動化

既設タービンの補助蒸気は、タービン軸封とエゼクタ駆動用に使用されているが、その複雑な切換え操作に時間を要していた。そのための手動操作と補助蒸気の入力許可条件をロジック化し自動制御を行わせることでタービン起動時間の大幅な短縮を図った。

3) 既設タービンドレン弁操作の自動化

既設のタービンドレン弁を電動化し、ATSからの指令により、タービンドレン弁操作の自動化を図った。

4) プラント監視機能の強化

プラントの一括総合監視と操作の軽減を目的にCRTオ

レーション装置（図10参照）を導入し、オペレーターの負担軽減を図った。また、ユニットコンピュータによる音声告知機能を追加し、マンマシンインタフェースの向上も図った。

6.2 デジタル制御システムの構築

今回追加した自動化機能ならびに監視機能と既納設備とのインタフェースを図11に示す。これら追加機能はデジタル制御装置で構成しており、デジタルコントローラはボイラ制御装置と同一機種にすることで、操作監視方式の統一と予備品の共有化を図った。また、プラント制御の重要な部位の制御装置はすべて主演算部を二重化構成とし、常用側がシステムダウンしても瞬時に待機系に切り換えてプラントがトリップすることなく運転継続が可能な冗長化

図9 ATS 起動カーブ（コールドモード）

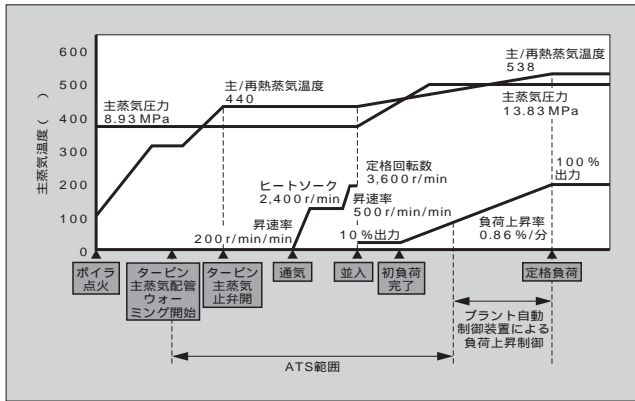
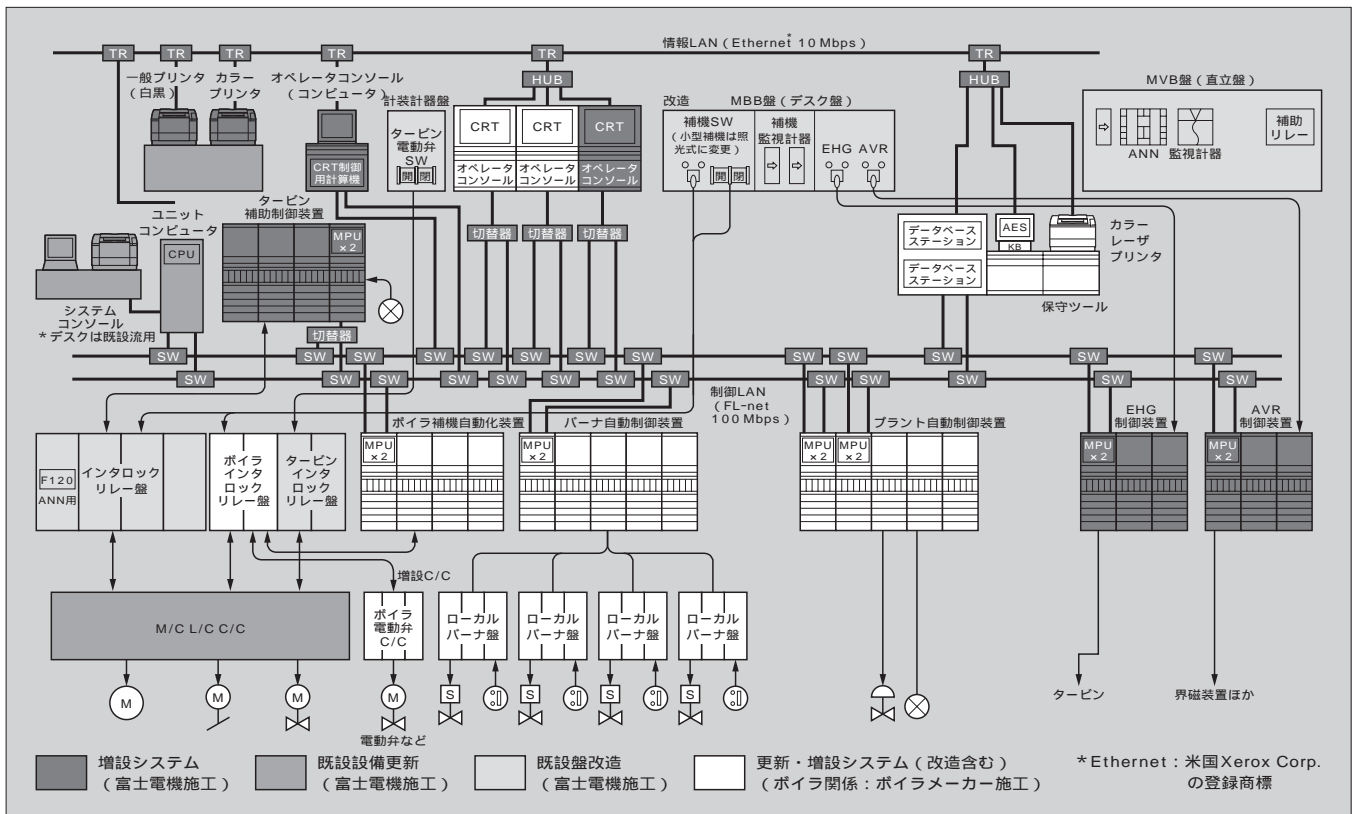


図11 更新後のシステム構成



システムとした。これらデジタル制御装置の導入と既納設備との融合について説明する。

6.2.1 デジタルガバナ制御装置（D-EHG）の追設

既設機は機械式ガバナ（MHG）を採用しているが、今回計画したATS、APC、その他デジタル制御システムとの連携にはD-EHGの採用が必要であることから導入した。

D-EHGの優位性は次のとおりである。

- a) リニアな連続制御
- b) 容易な速度調定率の設定
- c) タービン自動昇速ならびに負荷上昇機能

6.2.2 既設機能の見直しと再構築

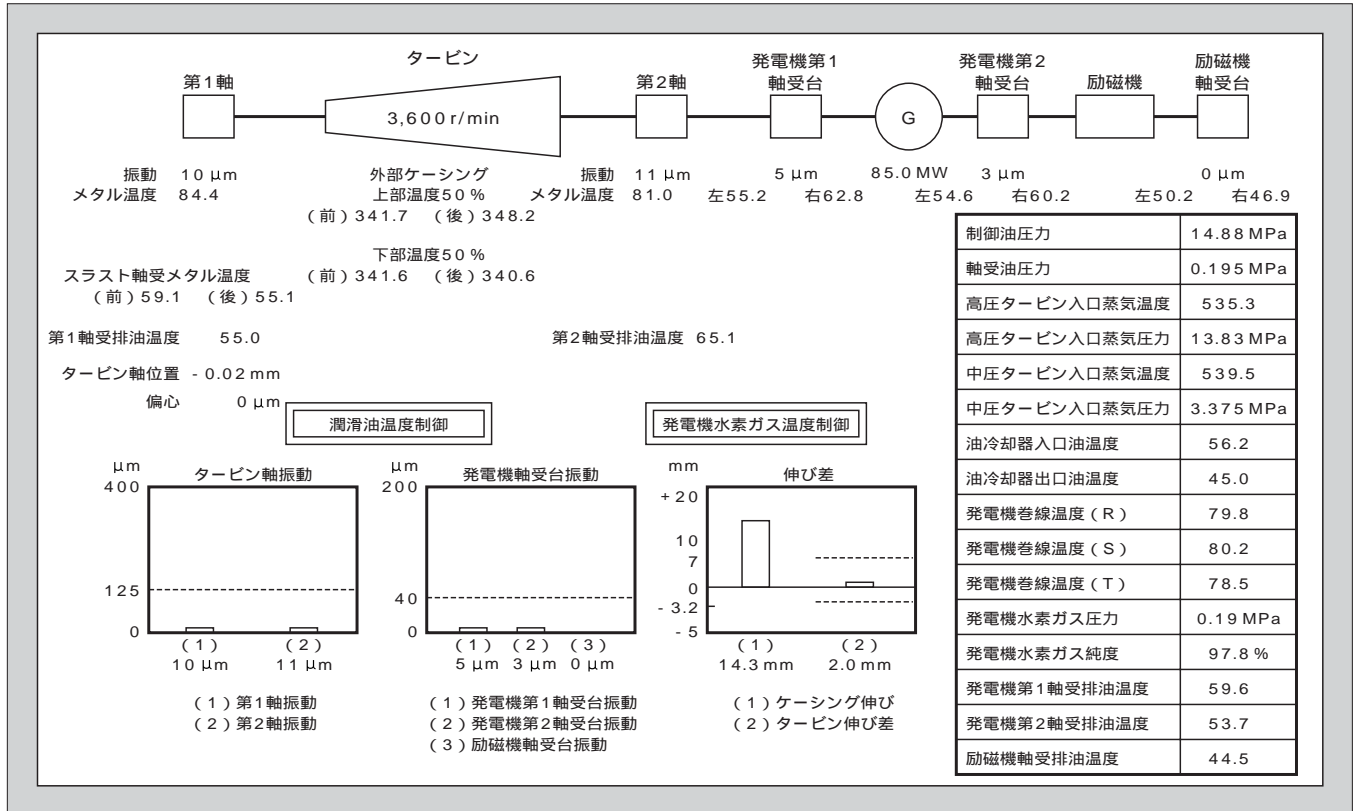
1) タービン補助制御装置の設置

今回の更新対象設備にユニットコンピュータがあり、そ

図10 更新後の中央操作室



図 12 タービン発電機状態の監視画面表示例



のシステムに数多くのローカル信号を入出力するコンピュータ入出力盤がある。ユニットコンピュータ本体は独立盤とし、従来のコンピュータ入出力盤には、タービン補機制御用のデジタルコントローラを搭載することでタービン自動化機能とコンピュータ入出力機能を共用するタービン補助制御装置として計画した。このタービン補助制御装置を既設コンピュータ入出力盤撤去跡に設置することで、コンピュータ関係の外線ケーブル全数が流用可能となった。

2) タービンローカル制御のデジタル化

既設タービンローカル制御はループごとにアナログコントローラを使用していたが、このすべての制御をタービン補助制御装置で構築した。これにより今までの個別ボードオペレーション操作をCRTオペレーション装置からの集中操作とし、オペレーターの負担軽減とアナログコントローラ掃による保守の合理化を図った。

6.2.3 CRTオペレーション装置の導入

CRTに表示されるプラント情報はタービン補助制御装置や他制御設備情報から伝送回路を介してCRTに入力される。CRT画面表示例を図12に示す。

CRTオペレーション導入により既設ボードオペレーションとの操作・監視区分を見直し、ボードオペレーション操作の縮小化を図った。一例としてプラント起動停止に必要な操作はCRTから行い、個別補機の操作は自動モードを追加したボードオペレーションとし、自動モードを選択することで操作の省力化を図った。

6.2.4 ユニットコンピュータによる音声告知機能の追加
自動化操作と連動し指令前に行う事前告知と操作が完了

したときの事後告知、プラント異常発生時の注意喚起告知を音声でアナウンスする機能を設けた。これら音声告知はCRTの表示と連動するものとした。

6.2.5 データ通信の信頼性向上

デジタル制御装置間の信号伝達は高速で信頼性が高く、かつ通信インターフェースが容易なオープンデータウェイで接続できるFL-net基準のLANを採用した。このLANの通信速度は最速の100Mbpsであり、デジタル自動電圧調整装置やボイラメーカー納入のデジタル制御装置とも接続され、プラント情報を容易に共有化できる構成とした。これら通信網もデジタル制御システムの信頼性向上策の一つとしてとらえ、プラント制御にかかわる重要な制御LANは冗長化し信頼性の向上を図った。

7) あとがき

富士電機が最近実施した経年火力発電ユニットの再生技術とその事例を紹介した。今後も、これらの経年火力発電ユニットをさらに継続運用していただくために、富士電機は、既設ユニットに最新技術を融合させ、信頼性・操作性に優れた近代火力発電ユニットに生まれ変わらせる再生プランを提供していく所存である。

参考文献

[1] 中山昭伸ほか、発電機固定子コイルの余寿命診断、電気学会誘電・絶縁材料研究会、DEI-00-21、2000-02。

特集