

状態監視保全技術の開発と実機適用

Development and application of Monitoring and Diagnosis Techniques
for Condition Based Maintenance in Nuclear Power Plant

(株) 東芝 電力・社会システム社	日隈 幸治	Koji HIGUMA	Member
原子力タービン・ユーティリティ設計部	鵜原 義彦	Yoshihiko UHARA	Non-Member
	山本 博樹	Hiroki YAMAMOTO	Member
	清水 俊一	Shunichi SHIMIZU	Member
(株) 東芝 電力・社会システム社	渡部 幸夫	Yukio WATANABE	Non-Member
電力・社会システム技術開発センター	兼本 茂	Shigeru KANEMOTO	Non-Member

Abstract In operation of nuclear power plants (NPPs), it is required not only to preserve and improve the reliability and safety, but also to introduce more efficient and lower cost maintenance strategy simultaneously, due to the power trading deregulation in recent years. For this purpose, Condition Based maintenance (CBM), which has been extensively applied in the nuclear power plant of U.S., is introduced as a maintenance method for rotating machines in Japanese nuclear power plant. TOSHIBA develops the various monitoring and diagnosis technologies that support CBM in NPPs. This paper describes examples of monitoring and diagnosis tools developed by TOSHIBA and their application experiences in real fields of NPPs.

Keywords: Condition Based Maintenance, Diagnosis, Monitoring, Rotating machine

連絡先: 日隈幸治 〒235-8523 横浜市磯子区新杉田8番地(株)東芝 磯子エンジニアリングセンタ

1. はじめに

原子力発電所は、信頼性と安全性の維持、向上に加え、昨今の電力自由化などを背景に、運転保守にかかわる費用抑制や経済性の向上が要求されている。このような要求への対応として、従来の時間計画保全 (TBM: Time Based Maintenance) に代わって、米国の原子力発電所において実績のある状態監視保全 (CBM: Condition Based Maintenance) の導入が進んでおり、主に回転機の保全方式として、多数の電力会社において試運用の段階から定着化の段階に移行している。

当社は、プラントメーカーとして、電力会社の推進するCBMの適用を支援する各種の監視診断技術を開発、提供している。これは、CBMの運用に関わる業務を、より簡易かつ効率化して、業務遂行にかかるコストを低減することを目的とした計測技術や支援技術である。この利用により、CBMの適用対象機器を広げ、さらに高い精度で機器の状態や健全性を判断

することが可能になる。本稿では、当社の開発してきた監視診断技術の具体例と、実機への適用事例について紹介する。

2. 東芝の状態監視保全支援技術の概要

図1にCBMの実施過程と各過程に対する支援技術を示す。CBMは周知のように、日常の監視診断～異常検知～監視強化、原因究明～補修～補修後診断～のサイクルで進められる。

図1上段は、CBMで監視する劣化パラメータの推移を概念的に示しており、中段は、パラメータの推移に対応するCBMの過程を、さらに下段は、各過程に対して当社の開発した技術やサービスを示している。図に示すように東芝は、CBMを支援する技術として、1) 効率化技術: CBMの運用を省力化し、データ活用を効率化する技術、2) 高度化技術: CBM適用機器の拡大や劣化診断のための高度な診断技術、3) 運用支援技術: CBMの運用業務を支援する技術、の3つの観点で開発を進めている。

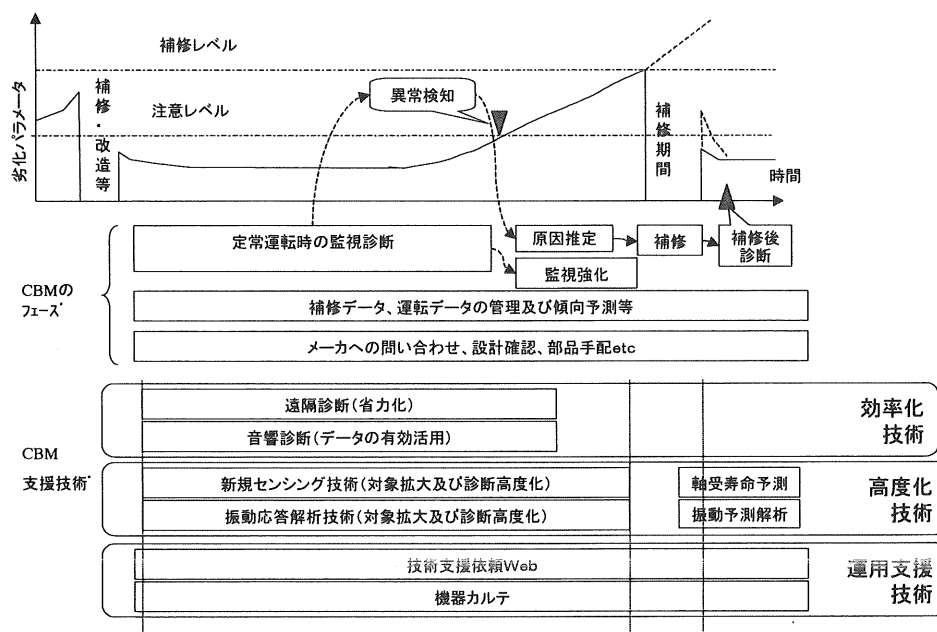


Fig1 CBM flow & Technique for CBM

3. 効率化技術

効率化技術の開発では、CBMに関わるデータ採取、管理を自動化・省力化し、CBM導入コストを抑制するとともに、効率的な運用を可能することを目的としている。このための技術として、遠隔によるデータ採取や音響診断技術等を開発し、実機への適用を進めている。

3.1 音響診断

機器状態変化の発見は、運転員のパトロールにおける異音検知がファーストヒットとなる場合が多い。すなわち、音響監視は、機器の状態変化を発見する感度の高い監視方法の一つと考えられる。しかし音は、人により感じ方が異なるため、同じ音を聞いても、その特徴を説明、伝達する場合、技量や経験などにより、異音と感じる人も、正常音とする人もいて、診断に使うことが困難であった。この問題を解決し、音響を診断に利用するためには、携帯マイクで採取した音響と予め作成した正常音のデータベース（以下、DB）を周波数解析等で可視化し、特徴周波数を比較する方法により、技量に依存しない判定方法が必要である。

当社は、回転機400台分の正常音DBを構築し、音響診断の運用を開始している。しかし、特徴周波数を比較する方法は、対象が増加した場合、作業量が膨大になるため、しきい値によ

るスクリーニング法の採用などで、一次判定を自動化する必要がある。しかし、音響は振動のように測定感度を毎回同一にすることが困難であり、音響レベルの単純な比較による判定は難しい。このため、音響レベルに依存しない判定手法を開発し、その有効性を確認した[1]。

図2は、音響診断の概要を示している。音響データの採取により、正常音DBを参照して波形比較、あるいはしきい値による異音判定を行い、異音であれば、振動測定による詳細診断や対策等のステップに進む。異音でなければ、正常音DBへ追加し、判定精度の向上に利用する。

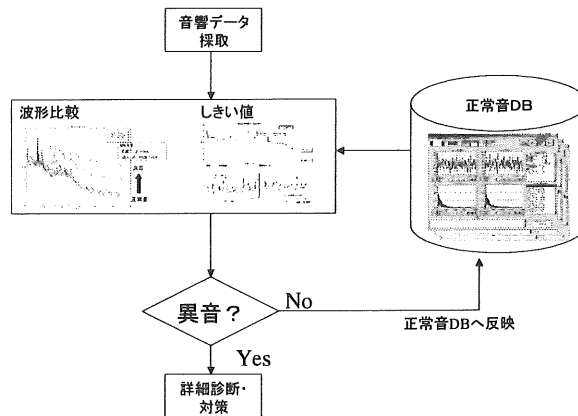


Fig.2 Rough sketch of sound diagnosis

また、この音響診断では、携帯端末を利用した音響データ収集/判定用の簡易ツールを開発している。本ツールの適用により、省力化と

簡易な診断を実現している。

音響診断は、運転員のパトロールに適用することにより、図3に示すように、CBMによる振動データ採取（通常、1～2ヶ月に1度）の間の監視を補間することが可能であり、信頼性向上につながる。

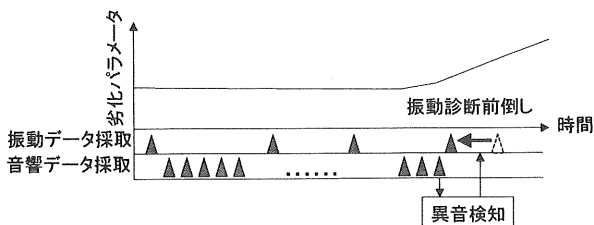


Fig.3 Applying sound diagnosis for CBM

3.2 遠隔振動診断

CBMでは、監視対象の振動値が注意レベルを超えた場合、監視強化のためデータ採取の頻度を増やす。この場合、本設の振動計が設置されていない回転機も多く、人手によるデータ採取では対応に限界が生じる。このため東芝は、発電所にて利用可能なPHS回線を用いて、振動データを自動的にリアルタイムで伝送し、遠隔地より現場機器の監視が可能なポータブル計測装置を開発している[2]。本装置により、機器の振動データを事務所で集中監視でき、迅速なデータ評価や専門家による診断が可能となる。現場に設置する装置は、測定と伝送の機能を持つコンパクト型と、表示/解析機能も備え、かつ詳細診断ツールとして使用可能なタイプの2種類がある。図4に、本装置の診断機能の概要を示す。

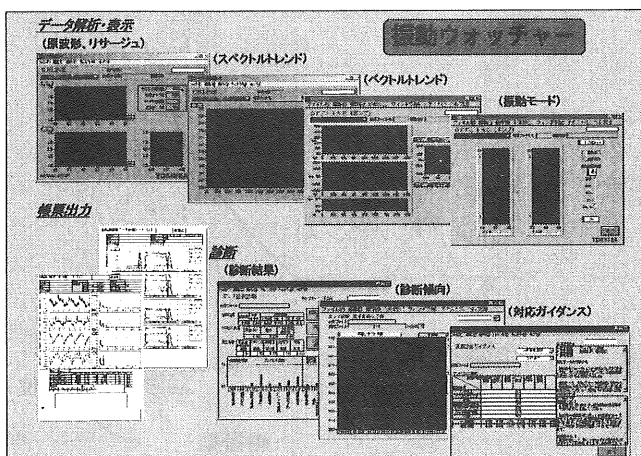


Fig.4 Examples of Remote Vibrometer displays

4. 高度化技術

高度化技術の開発は、異常の原因究明や寿命予測のような高度な診断を実現し、CBMの適用範囲を重要機器に広げ深耕化を図るとともに、センシング高度化により、これまで監視診断データの採取が困難であった機器にCBM適用を広げ拡大化を図ることを目的としている。前者の例として、振動応答解析を用いた振動予測診断や軸受劣化予測などの技術を、後者の例として、AEを利用した転がり軸受フレーキング検知技術の概要と適用例を紹介する。

4.1 振動応答解析を用いた回転機診断

振動データによる回転機の診断は一般的であり、手法もほぼ確立していると考えられる。しかし、実機でのCBMへの適用では、より高度で精度の高い診断手法が不可欠である。そこで、振動応答解析を応用した原因究明、劣化診断手法を開発しており、その概要を紹介する。

実機では、様々な要因により振動測定箇所は限定される。また縦型ポンプは、軸受荷重が設計値と異なっているため、振動特性の個体差が大きく、原因究明や劣化予測といった高度な診断は困難であった。この解決には、図5に示すように、実機ベースの振動応答モデルによる解析が不可欠である。本手法は、振動特性を決定する要因である軸受のバネ特性と軸の加振力を決定するため、診断対象毎に個体差を測定し、解析を行う。但し実機では、これらの個体差は直接測定することが難しいため、実機で測定した振動と振動応答解析の結果が一致するように、個体差のパラメータを調節、最適化することにより、同定を可能としている。

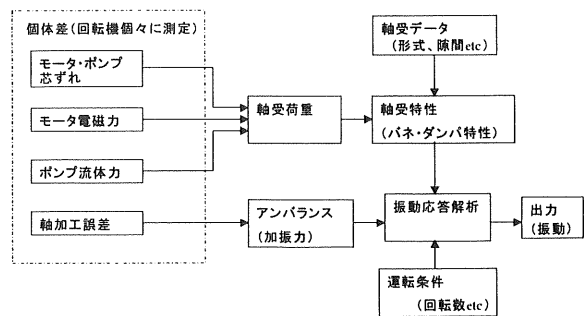


Fig.5 Outline of vibration analysis for rotating machine

4.2 回転機の振動予測解析

図1に示した補修後診断の困難な機器は、例えば、系統側の条件のために試運転時に定格状態での運転ができない回転機がある。このような回転機は、プラントが定格に達するまで補修結果の良否が判定できず、場合によっては、プラント停止し、再補修が必要となることがある。このような再補修を防止することを目的として、前節の振動応答解析モデルを用いて、定格時の振動挙動を予測する技術を開発し、実機に適用している。

振動予測技術は、補修時及び試運転時に採取可能なデータを用いて、図5に示した振動応答解析モデルのパラメータを調整し、定格状態を模擬したシミュレーションを行い、プラント起動前に定格状態での振動傾向を予測することを可能としている。図6は、本手法の適用例を示している。◆は本手法にて予測した結果、◇は実データを示しており、本手法により、プラント起動後の振動傾向が正しく予測できていることを示している。■は補修の失敗を模擬した条件によるシミュレーション例を示しており、このような場合は、再補修の必要性を示しており、プラント起動前の対策が可能となる。

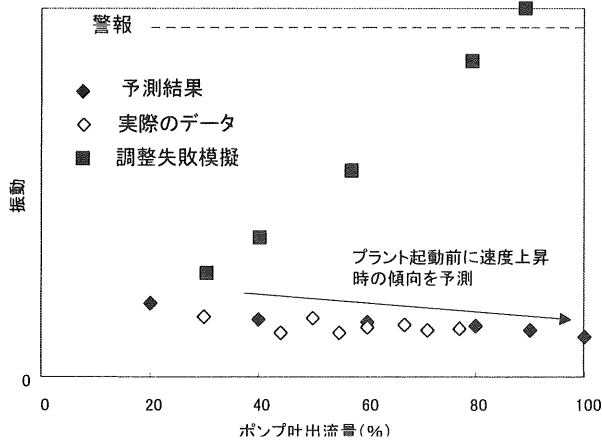


Fig. 6 Example of vibration prediction

4.3 転がり軸受の軸受荷重診断

回転機の補修後に適用する診断技術の高度化として、軸受荷重診断手法を開発した。これは、軸受の劣化因子の1つとなる組立時ミスアライメントによる軸受静荷重を振動測定により推定し、推定荷重と軸受の定格荷重の比から転がり軸受の疲労寿命を推定する技術である。

荷重が大きい、すなわち寿命が短いと判定された場合は、軸受荷重が小さくなるように再組立をすることにより、回転機の補修後の初期故障リスクを低減することができる[3]。

本手法は、図7に示すように、付加アンバランス（錘）を軸に取り付けて回転機を運転した場合の軸振動と、錘無し状態での軸振動の差を測定する。この振動の差は、図8に示すように、アライメントのずれが大きく、軸受荷重が大きいほど小さくなる。次に図9のように、求めた荷重と予め振動応答解析により求めた振動対荷重の特性曲線より、軸受の荷重を推定することができる。すなわち、組立時ミスアライメントの状況を判定することが可能となる。

CBMによって分解点検周期が延長され、組立作業の経験が少なくなるなどの作業員の技量低下が予想されるが、本手法により、組立作業が支援できるという効果も期待できる。

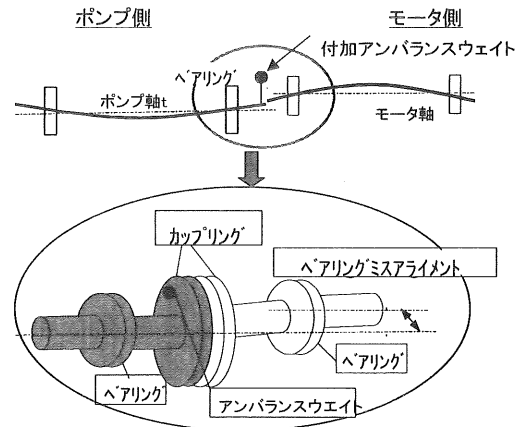


Fig. 7 Rough sketch of estimation of bearing load

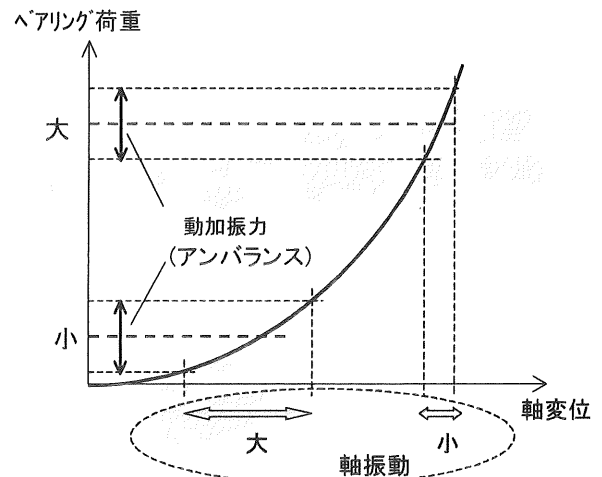


Fig. 8 Estimation Principle of bearing load

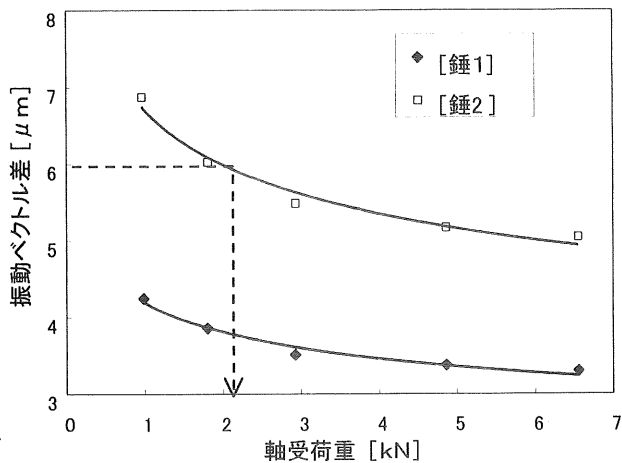


Fig.9 Estimation curve for bearing

4.4 転がり軸受フレーキング早期検知診断

日常の監視診断を高度化する技術の1つとして、転がり軸受の寿命時期を早期に診断する技術を開発している。本技術は、AEセンサと加速度センサを組合せた機能を持つ複合センサを使用し、軸受に発生する転がり疲れによるき裂発生と進展を診断する技術である[4]。ここで、複合センサとは、圧電式加速度センサの負荷質量として広帯域AEセンサ用のダンパ材を装着することにより、加速度信号とAE信号をひとつのセンサで同時に出力できるようにしたものである。本センサは、アンプなども含め1つの測定系で加速度もAEも測定でき、現場での使用に適している。

本技術の有効性は、図10に示す試験装置を用い、確認している。ここでは、転がり軸受に定格荷重の1.2倍の荷重による加速試験を実施している。図11及び図12に加速試験の結果を示す。

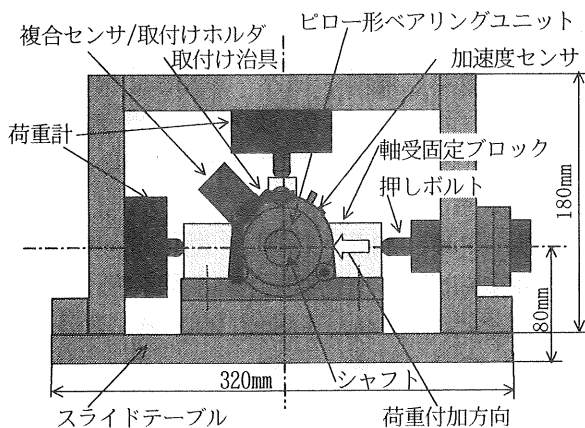


Fig.10 Acceleration Test Equipment

図11のAE事象率とは、予め定めたしきい値をAE信号が1分間に何回超えるかをカウントしたものであり、試験開始後約45分後に大きく立ち上がっている。検証用に測定した他指標も同時点で変化が認められ、この時点で剥離の発生を検知していることを示しており、AE事象率はフレーキングを早期に検知するために有効であることが確認できた。

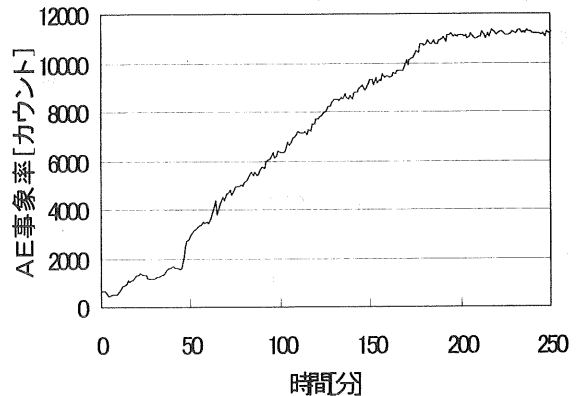


Fig.11 The Experiment result of AE

また、図12に示す加速度実効値も、ほぼAEと同時に増加しており、両者を組合せることで、より精度の高い診断が可能と考えられる。さらに、この加速度実効値は、剥離発生までの間線形に近い特性で増加しているため、フレーキング発生時期の予測にも適用可能である。

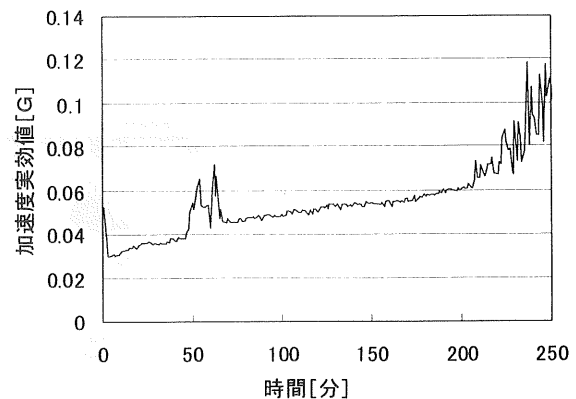


Fig.12 The Experiment result of Acceleration OA value

5. 運用支援技術

機器のCBMに関わる多様なデータを一元管理し、このデータを用いて傾向予測などを可能とする機器カルテ管理技術を開発し、実機適用中である。本システムにより、CBM運用の

効率化と高度化の支援を実現している。また、電力会社からの技術的問合せに対し、迅速かつタイムリーに回答するための技術支援Webサービスも運用している。本サービスもCBMの運用支援に寄与できると考えられる。

5.1 機器カルテ管理技術

設計情報と運転・保守に関わるフィールド情報を融合し、CBM運用を支援する「機器カルテ管理システム」を開発している[2]。ここでは、運転パラメータや、状態監視のための振動、温度などのデータ、さらに、点検保守情報を統合的に管理している。これらデータに回帰分析や因子分析などの統計解析を活用し、劣化傾向を評価するとともに、FMEAなどの設計技術情報と組合せて、保守点検間隔の合理的判断に利用することができる。最終的には、意思決定モデルと組合せた手法により、保全計画の立案支援を行う。図13に、組立の差異が振動応答にあまり変化を与えない横型ポンプのウェアリング/シャフト間隔に対する評価例を示す。この例では、過去6回の点検結果と状態監視データの統計分析から経年劣化傾向予測モデルを作成し、次回定検時の信頼性をリスク確率として評価した例を示している。

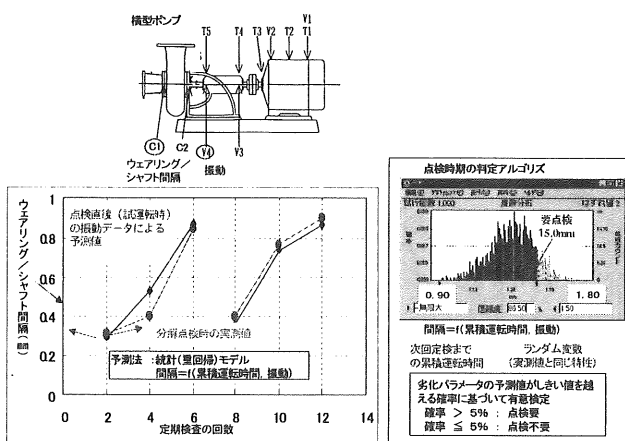


Fig.14 Example of prediction of deterioration

機器カルテ管理システムは、実機におけるCBM支援サービスに適用しており、CBM運用に必要な点検データの整備、振動データの採取、診断の支援、及びCBM全般の運用方法の検討など、一連の業務支援に活用している。

5.2 技術支援Webサービス

当社は、電力殿の技術的質問に対して、技術支援サービスを提供してきている。しかし、CBM運用では今後、状態が変化したデータの評価や原因究明などに対して、メーカーの支援は重要になるものと考えられる。また、CBMでは、補修時期が不定期となるため、補修物品の手配や技派はよりタイムリーに実施する必要があると考えられる。このため当社は、Webを活用した「技術支援Webシステム」を構築し運用を開始している。本システムは、公衆回線網を利用し、電力担当者のパソコンから直接、入力された依頼事項を電力内の審査を経て、東芝の担当部門にて受入れ、依頼内容に応じて、設計やサービス部門にて回答を作成し、依頼元の担当者に返信することができる。ここで、問合せに併せて、振動、音響、点検画像データなどを添付することで、前述に紹介した各診断技術による解析結果を返送する遠隔診断サービスも可能としている。

5. おわりに

本報では、CBM導入を効率化、高度化、及び運用支援を目的に開発した監視診断技術について紹介した。今後も、プラントメーカーとして、電力会社殿のCBM導入を御支援するための監視診断技術を開発、御提供していく所存であり、御協力と御支援をお願いする。

参考文献

- [1]玉置、榎本、兼本、日隈、永森、「主成分分析と確率ネットワークによる音響診断」、機械学会第2回評価・診断に関するシンポジウム予稿集(2003年12月)
- [2]渡部、兼本、尾崎、清水、「状態監視保全の原子カプラントへの適用」、機械学会 Dynamics and Design Conference 2003 予稿集(2003年9月)
- [3]渡部、尾崎、加藤、日隈、「回転機への能動診断技術の適用」、機械学会第1回評価・診断に関するシンポジウム予稿集(2002年12月)
- [4]渡部、尾崎、加藤、日隈、「ラジアル玉軸受の転がり疲れ寿命」、メンテナンス No240 2004年春