

分析論文 

－ プラント保全のヒューマンファクター シリーズ2 －

原子力発電プラント・フレキシブルメンテナンスシステムの開発 － 課題と機能 －

株式会社東芝・瀧澤 洋二
Yoji TAKIZAWA

株式会社日立製作所・大賀 幸治
Yukiharu OHGA

三菱重工業株式会社・渡辺 長深
Osami WATANABE

三菱電機株式会社・西沢 博志
Hiroshi NISHIZAWA

1. はじめに

原子力発電プラントでは、安全性・信頼性を確保するために、毎年プラントを停止して電気事業法で義務付けられた定期検査を実施している。発電プラントの信頼性を確保しながら稼働率を高めるためには、保守作業の効率化が必要である。同時に、発電プラントの高経年化に伴い、メンテナンス技術の高度化が今後重要となってくる。一方、保守要員には高度な知識・技能・技術が要求され、ベテラン技能者のノウハウの伝承を含めた教育・訓練の効率化・高度化のための技術開発も必要とされている。

これらを背景として、(株)東芝、(株)日立製作所、三菱重工業(株)および三菱電機(株)の4社では、平成12年度より5ヵ年計画で、「原子力発電プラント・フレキシブルメンテナンスシステム(以下FMS)」の開発を進めている^[1]。

本稿では、FMSで開発中の保守高度化技術と訓練高度化技術について、これらの技術が解決しようとしている課題と機能を中心に論じる。

2. 保守高度化技術

2-1) センサ校正支援システム

センサの校正作業は、定期検査ごとに実施されており、基準圧力を加えての調整などが必要なため、多くの作業量を要している。このため、センサ校正作業量低減のためのシステムを開発している。システムは図-1のように、センサ校正記録データを統計解析し、将来のセンサドリフト量分布を予測することにより適正な校正周期を決定すると共に、プラントからオンラインで取り込んだプロセス信号から、センサ特性変化

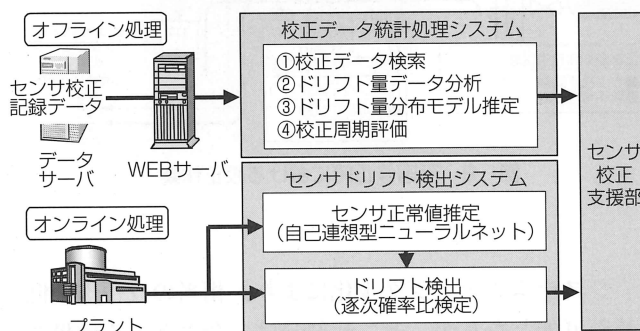


図-1 センサ校正支援システムの構成

を検出する。これによって、センサ信頼性を確保しながら、校正周期を伸長して、校正作業量を低減する。

校正データ統計処理システム^[2]は、WEBベースのシステムであり、ユーザは、電力会社本店やサイト事務室などから、場所の限定なく利用できる。本システムでは、①センサ型式などの条件を与えて、定検時の校正記録データを検索する。②対象となるセンサのドリフト量分布を、ヒストグラムや正規確率紙等で視覚的に、あるいは仮説検定により確認する。次いで、③統計モデルを作成して将来のドリフト量分布を予測し、④ドリフト量が許容精度を逸脱する確率を基に、適正な校正周期を決定する。

一方、センサドリフト検出システム^[2]は、自己連想型ニューラルネットを用いて、オンライン測定値からドリフトの含まれていない正常値を推定し、これを測定値と比較することにより、ドリフト量を検出する。検出には、データのゆらぎの影響を緩和するため、逐次確率比検定手法を使用している。

センサ校正支援部は、二つの処理システムからの結果を基に、次回定検で校正すべきセンサなどの情報を保守員に提供する。

2-2) センサの点検周期判断支援システム

原子力発電プラントにおける計測制御システムの校正作業は図-2に示すステージから構成されており、保守コストの低減及びプラントの計画停止（定期検査）期間短縮のため、校正作業低減が必要とされている。

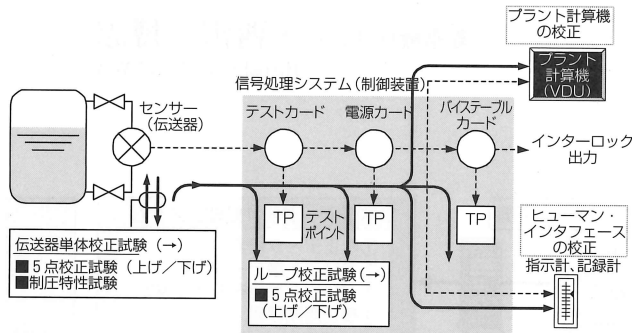


図-2 計画停止時における校正作業

システムのデジタル化により、相当の校正作業低減が可能となるが、センサ部分は、今のところ効果的な校正作業低減手法がない。このため、センサのドリフト量を評価する新しい点検周期判断支援システムを開発してきた。本システムは、校正作業が実施された定期検査直後にセンサの特性をモデル化し、プラント運転後の次回定期検査直前のドリフト量（センサの推定真値と実測値の差）を評価し、校正が不要なセンサを識別するものである。

点検周期判断支援システムの構成を図-3に示す。

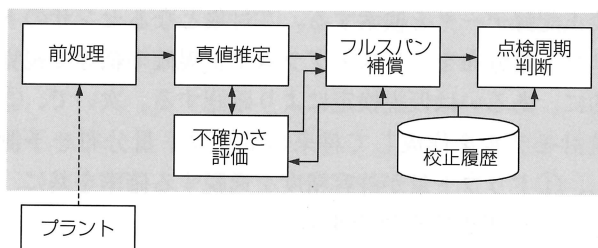


図-3 点検周期判断支援システムの構成

本システムの各ブロックの機能を以下に記す。

(1) 前処理（プラントデータ入力）

既存の計測制御システムからプラントデータを入力する部分である。

(2) 真値推定

プロセス量の真値推定手法にはいくつかの方法が

あるが、ここでは自己連想型ニューラルネットワーク（AANN - Auto Associative Neural Network）を用いた^[3]。

(3) 不確かさ評価

真値推定のために相関する複数のセンサ出力を用いることにより、各センサのドリフトが各々のセンサ推定値に影響を及ぼす不確かさを評価する。

(4) フルスパン補償

測定値は運転状態に対応した定常点にあり、フルスパンに渡るドリフト推定を過去の校正データから統計的手法により補償を行う^[4]。

(5) 点検周期判断（校正間隔支援）

センサのフルレンジに渡る補償結果に基づき、将来の健全性を予測する。

本システムは第一段階の開発を完了し、今後原子力発電所実機におけるパフォーマンス検証を行い、システムの更なる改善を試みる計画である。

2-3) 狭隘部探傷システム

近年、原子炉内構造物の検査では、応力腐食割れ等の表面開口欠陥を確実に早期検出する検査技術が求められているが、原子炉内部は狭隘かつ複雑な形状の部位が多く、目視検査や従来の超音波検査では、これらの要求を十分に満たせない場合もある。そこで、本要求に応えるため、レーザー超音波探傷法を用い、原子炉内部構造物に生じた微小な表面開口欠陥を検出するレーザー超音波探傷装置の開発を進めている^[5]。

開発システムの構成を図-4に示す。超音波送信部では、光ファイバーによって超音波発生用レーザー光を伝送して小型探傷ヘッド送信部から模擬原子炉内構造物に集光照射し、熱歪みや蒸発反力によって超音波を発生させる。他方、超音波受信部では、同様に超音波受信用レーザー光を小型探傷ヘッド受信部から照射し、その正反射光をファイバー伝送して受信する。正反射光は、その反射点に超音波が通過した場合、周波数変調を受けるため、ファブリペロー干渉計によって光学的に超音波を計測することができる。

機能確認試験では、図-4に示す模擬原子炉内構造物に対する走査探傷を行った。模擬原子炉内構造物は、円柱状構造物であり、周方向にスリット欠陥を付加されている。また、円柱状構造物の周囲には、小口径の円柱状構造物を配し、原子炉内の狭隘部を模擬している。図-5は、小型探傷ヘッドを周方向に走査さ

せた場合の欠陥反射の超音波によるオンライン可視化探傷結果である。スリット欠陥を明確に認識することができ、レーザー超音波探傷法が、狭隘かつ複雑な形状の部位に対して、高い検査能力を有していることがわかる。

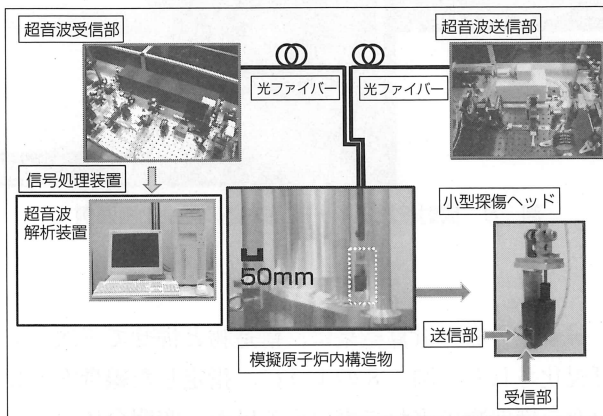


図-4 レーザ超音波探傷システムの構成

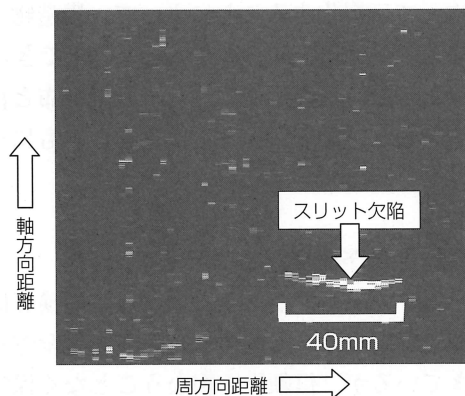


図-5 探傷試験結果の表示例

複合センシングシステムのブロック図を図-6に示す。画像処理を効果的に行うデバイスとして、撮像素子に画像前処理機能が備わった人工網膜撮像デバイス^[7]を用いた。人工網膜撮像デバイスは低消費電力で様々な前処理をデバイス上で高速に行えることが特徴であり、結果として後段の処理系の負荷が低減する。アナログメータを監視対象とした場合、カメラでメータを撮像し、その画像データを人工網膜撮像デバイスの二値化や射影演算といった前処理機能により、データ量を1/100から1/1000にまで圧縮する。圧縮されたデータは、MPU（超小型演算処理装置）による演算でメータの角度情報といった必要な情報のみを取り出し、最終的にはデータ量を数万分の一にまで低減する。この小容量監視データは、微弱無線などの低速・低消費電力の無線で十分伝送することが可能で、多くの消費電力を要する高速無線を用いる必要が無く、カメラヘッド全体で低消費電力化が実現でき、太陽電池による自己給電が可能となる。本システムは、プラントの監視および巡視点検作業のコストを大幅に削減できるだけでなく、作業員の立入りが困難な箇所の監視にも有効であり、今後は大規模ネットワーク化を含めたシステム検討を進めていく予定である。

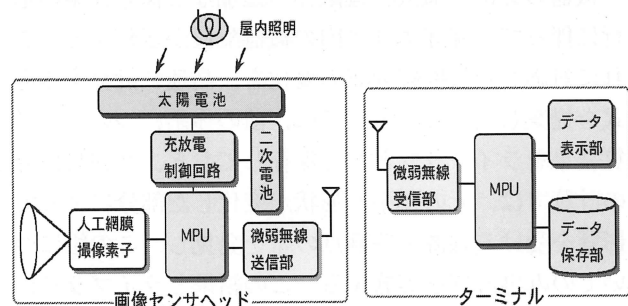


図-6 複合センシングシステムのブロック図

2-4) 複合センシングシステム

プラント情報を的確に収集して中央制御室まで伝送するシステムを、最小限のコストに抑えて設置することをねらいとして、自己給電と無線データ伝送による完全ワイヤレス型のデータ収集システムを開発した^[6]。本システムはカメラによりプラント内計器を監視するものであるが、カメラヘッドでの画像の前処理により必要な情報のみを抽出してデータ容量を低減し、その結果、無線データ伝送に要する電力を大幅に少なくした。これにより、屋内照明光を用いた太陽電池による発電で駆動電力の供給が可能となり、自己給電型のプラント監視用データ収集システムを実現できた。

2-5) 放射線管理支援システム

作業エリア内の放射線線量率分布の変化を高速に推定して放射線環境下での保守作業・放射線管理業務を支援するシステムが開発されている^[8]。

システムは図-7のように、三次元CADデータ、線量率計算結果などを格納するデータ・サーバ、三次元可視化インタフェース用計算機、及び放射線分布計算サーバで構成する。この内、三次元可視化インタフェースは、放射線分布計算用の入力データを自動生成し、線量

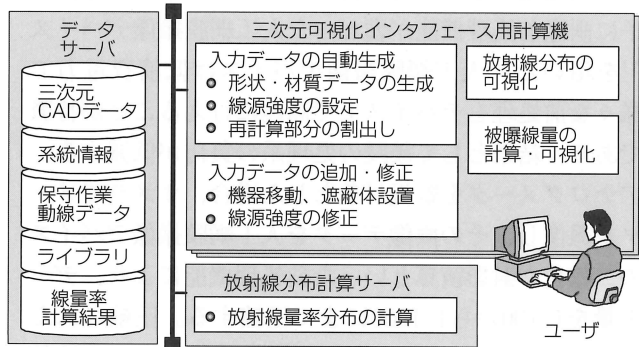


図-7 放射線管理支援システムの構成

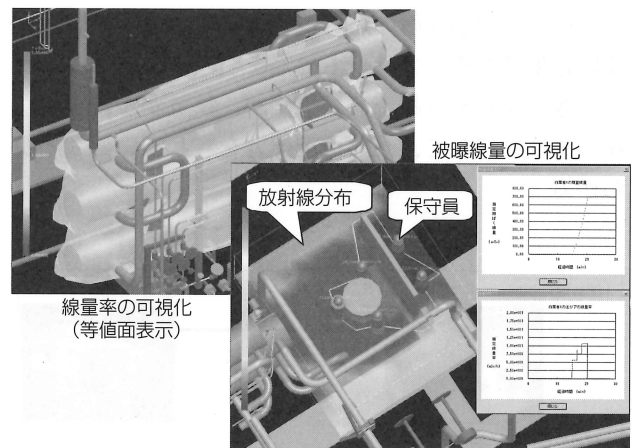


図-8 放射線線量率・被曝線量の可視化画面例

率分布・被曝線量についての計算結果を可視化すると共に、機器・配管の移動・撤去、遮蔽体の設置などの入力データの追加・修正を、形状変化を確認しながらマウス等で入力可能とする機能を持つ。本システムの特徴は、CADデータを利用して放射線分布計算用の入力データを簡便に作成できる点、放射線分布の変化を高速に計算できる点、及び放射線分布と被曝線量の推定結果を視認性良く可視化できる点にある。

機器の分解・撤去、遮蔽体の追加など保守作業の進行に伴って、保守エリア内の機器配置が変化する。これに対応した放射線分布の変化を、高速に計算する方式を提案した。この方式では、前の体系についての計算結果をライブラリとして保存しておき、2回目以降の計算では、元の体系と形状が変化した部分によって影響を受ける線源・評価点の組を発見し、この組についてのみ再計算を実施する。この結果とライブラリに保存された計算結果から、現在の体系についての放射線線量率の分布を求める。従来、機器配置などが変更された場合には、体系全体についての再計算が必要であった。提案方式では、再計算の範囲を限定でき、計算を高速化できる。

入力データの自動生成では、CADデータを、表現方法の異なる入力用形状データに変換する必要がある。形状を忠実に再現するだけでは入力データの形状数が非常に多くなり、計算時間が増大するという問題がある。従来は遮蔽計算の専門家が計算精度とのバランスをとりながら形状の削減を行っていた。そこで、本システムではこれと同様の方法により入力データを生成するアルゴリズムを開発した。

線量率分布の計算結果は、構造物と併せて三次元で可視化される。図-8のように、指定した線量率の等値面を構造物に重ねて表示するほか、空間全体の分布や断面に沿った分布を色で表現することが可能である。三次元で可視化することによって、構造物と線量率分布の関係が容易に、視認性良く確認できる。また、被曝線量も、推定に使用した線量率分布と作業動線・作業時間・被曝線量などを構造物とともに三次元で可視化して確認できる。

2-6) 機器劣化予測支援システム

従来、原子力発電プラントの機器の定期検査は、一定の周期で分解点検を実施する時間計画保全方式で行われてきているが、信頼性を損なうことなく保守作業の合理化を実現する技術が求められている。本研究では、機器の運転・保守履歴データから経年劣化の状態を把握して適切な点検時期を判断するアルゴリズムと、これを利用した状態監視保全の適用を支援するシステムの開発を進めてきた^[9]。基本機能は次の4つである。

(1) フィールドデータの管理機能

運転保守に関わる多種多様なフィールドデータを一元管理し、要求に応じて必要な情報を検索する。

(2) 劣化徴候の検知機能

運転中のパラメータの変化が環境や運転条件に起因するものか、あるいは異常な劣化徴候かを判定する。

(3) 長期傾向の予測機能

過去の点検記録データから経年劣化の長期傾向を予測するモデルを作成し、適切な点検時期を判定する。

(4) 保守計画の立案機能

検査対象の機器に優先度を付け、次回定検の期間と予算に合った計画を提供する。

図-9はポンプの軸-ウェアリング間隔の変化を累積運転時間に対してプロットしたものであり、累積運転時間およびインペラケーシングの振動データから、軸-ウェアリング間隔を推定できることが確認できた。

分解点検の時期の判定は、次回定検時点での軸-ウェアリング間隔の推定値の確率分布を運転中に測定した振動値のばらつきから求め、しきい値を越える確率が5%を越えると分解点検を実施、5%以下では次々回の定検まで省略するものとした。図-9の例では、累積運転時間3000日に次回定期検査があると想定し、軸-ウェアリング間隔の確率分布を求めたものである。しきい値を越える確率が13.5%であり、これより、次回定期検査時に分解点検を行うことを推奨することで、コストパフォーマンスに優れた保全計画の立案を支援することが可能となる。

を伝達するため、工具・保守部品等を非接触で識別するとともにその所在を検知する。

(2) 状態確認

工具等に必要な設定値を遠隔で設定するとともに、実際の作業において実施したときの作業値を読み取ることでヒューマンエラーの発生を防止する。

(3) 非接触情報伝達

迅速な現場作業のため、データをケーブル等で接続することなく遠隔で、即座に取り出しリアルタイムで情報を伝送する。

図-10に工具管理自動化システムの構成を示す。本システムは、作業管理を行う作業管理サーバーと無線アクセスポイント (Bluetooth™ AP)、現場での作業指示を行う現場作業端末、各現場にデータ中継用の無線アクセスポイントを備えており、現場のローカル機器と通信を可能にする無線通信アダプタと作業に合わせて現場での工具管理を行う無線タグ (RFID: Radio Frequency Identification) が内蔵された工具箱で構成されている。

本システムの基本的な要素技術の開発は完了し、今後実際の使用に向けた課題として、工具に使用しているRFIDの通信距離の拡大や、Bluetooth™ 機器の小型・低消費電力化、工具管理への応用として工具の設定値の自動送受信や、現場作業端末のユーザーインターフェースと管理機能の向上等、実用化に向けた改良を実施する計画である。(Bluetooth™はBluetooth SIG,Incの商標)

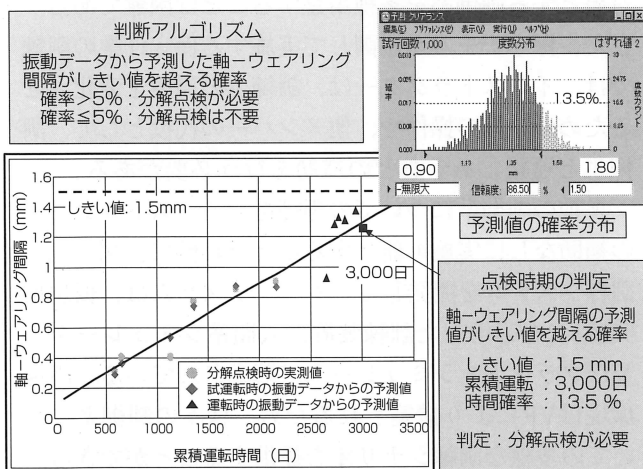


図-9 点検時期の判定方法

2-7) 工具管理自動化システム

作業員の負担を軽減し保守管理の信頼性と効率を向上させることを目的とした工具管理自動化システムは、現場作業において作業員がその都度行っていた工具・保守部品の数量確認、所在確認、作業内容伝達・設定、実施済み作業の確認を自動化するための手段を提供するものである^[10]。基本機能を以下に示す。

(1) 非接触物体検知

作業内容に適合した工具の選択、適切な使用方法

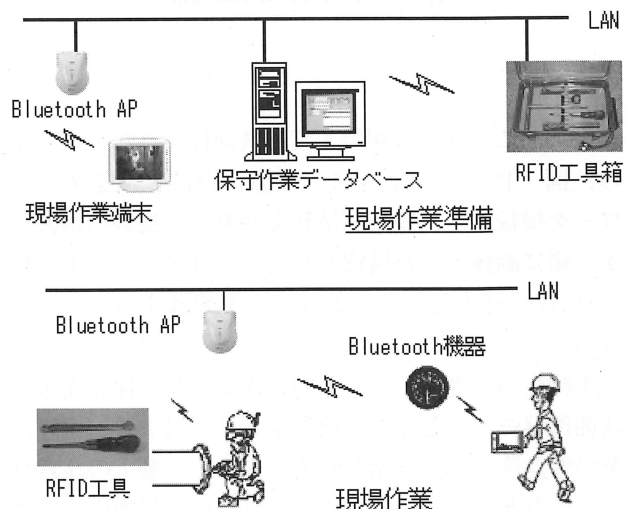


図-10 工具管理自動化システムの構成

3. 訓練高度化技術

3-1) 大型機器保守作業の体感的なオフサイト訓練システム

10年に一度程度の頻度で実施される下部炉心構造物吊上げ作業や原子炉容器上蓋開放/復旧作業など、熟練を要し、また実物大のモックアップ設備による訓練が困難な大型機器の保守作業を対象に、オフサイトで仮想体感しながら訓練するためのシステムを開発した。

作業空間と保守対象物の3Dモデルを計算機上に構築し、視覚、聴覚を中心に臨場感あふれる仮想訓練環境を実現した。大型機器特有のクレーン操作の模擬については、訓練の目的や対象者に応じてジョイスティック (図-11) あるいはマウスを選択できる。移動させる保守対象物には、空間的な挙動模擬のための動的モデルを組み込み、聴覚と同期して動きを提示することにより、臨場感をさらに増している。

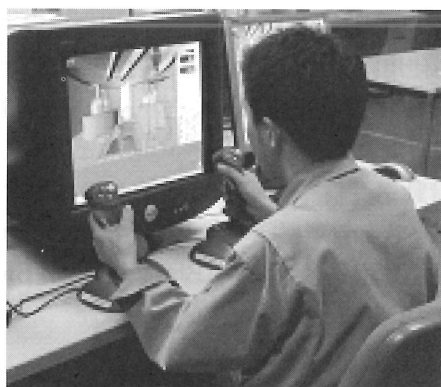


図-11 保守作業の訓練風景

また、この作業は複数人での共同作業となることから、図-12に示すように、複数台の計算機をネットワーク接続して仮想空間情報を共有し、複数の訓練生と一緒に訓練可能な構成とした。これにより作業の指示・伝達、連携等のチームワークを訓練することができる。

訓練生の行為はシステム内に構築された保守作業の状態遷移モデルと比較、照合することにより、保守作業の習熟度として評価される。また、作業上の注意点やコツなど、熟練者の有するノウハウも訓練生に提供することができる。

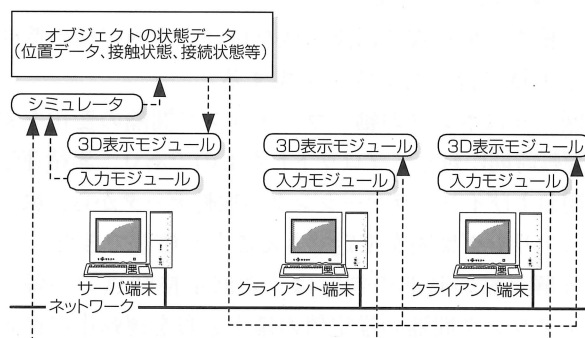


図-12 訓練システム構成図

3-2) 計測制御設備の保守訓練システム

原子力プラントの保守要員の技能・知識を維持・向上することは重要な課題である。そのため、現在、計測制御装置の保守作業については、プラントで使用される実機と同じ装置、あるいは実機相当の訓練装置を用いて訓練が実施されている。現状の方法では、訓練対象とする制御系を多種用意することは困難である。また、保守チームが協調して実施する保守作業の訓練では、インストラクターは、訓練生の環境を変化させるための設備の操作や、他メンバーの代役として、訓練生と連絡しあうなどの補助を行う必要がある。

多種の制御系についての訓練を、インストラクターの補助なしに実施可能とすることを目標に、図-13の訓練システムを開発している^[11]。システムは、仮想現実感VRを応用した訓練装置、人間系シミュレータ、及びプラント・シミュレータで構成されている。訓練環境はVRにより構築されるため、様々の制御系についての多様な訓練シナリオを提供することができる。訓練環境では、制御盤、中央制御室 (図-14)、及び現場が模擬され、各々の場所を対象とした保守訓練が可能である。訓練生の共同作業者の行動は、人間系シミュレータにより模擬され、訓練生はインストラクターの助けなしに、協調作業の訓練を一人で実施することができる。人間系シミュレータは保守員の動作を、機器の操作だけではなく、状態確認結果の報告や操作開始の連絡など、他の保守員との連携のための発話も含めて模擬する。これに必要な行動データは、保守の手順書から自動的に生成される。プラント・シミュレータは、保守員の操作に従ったプラント機器・制御装置の動的な変化を模擬する。

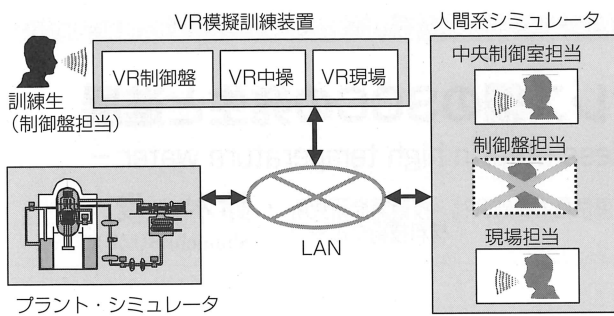


図-13 保守訓練システムの構成

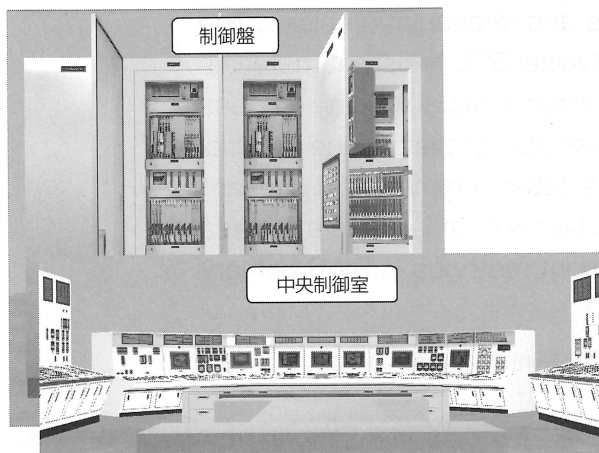


図-14 模擬訓練装置の表示画面例

4. 結び

本稿では、原子力発電所の安全性・信頼性を確保するために毎年実施されている定期検査をより効率的に行うため、著者らが開発を進めているFMSに関する開発課題とそれらに対応するためにシステムに実装される機能について論じた。

今後、実用化に向けて、ユーザーニーズをより詳細に調査し、それらを具体的な機能として実現することおよびコストパフォーマンスの検討等を実施し、開発技術の信頼性・有効性の検証評価などをより一層進めることが必要である。

参考文献

- [1] (社)日本電機工業会、“原子力発電プラント・フレキシブルメンテナンスシステムの開発状況”、電気協会報、8月号、2003、pp.52-54
- [2] 楠見尚宏他、“センサ校正支援のための基本システムの開発”、平成15年度電気学会東京支部連合研究会、NE-03-5、2003
- [3] J.W. Hines and R.E. Uhrig, “Use of Auto Associative Neural Networks for Signal Validation”, Journal of Intelligent and Robotic Systems 21, 1998, pp.143-154
- [4] D. Asada and H. Iba, “Optimization of Instrument Calibration Intervals by On-line Sensor Monitoring Techniques”, ISO/FIC2002 (International Symposium on the Future I&C NPP), 2002, pp.128-130, Seoul, Korea
- [5] 黒田英彦他、“光ファイバーを用いたレーザー超音波法の開発(2)”、日本原子力学会2003年秋の大会、D19、2003
- [6] 西沢博志、中島利郎、高嶋和夫、“プラント監視用自己給電型ワイヤレスデータ収集システムの開発”、電気学会計測研究会資料、IM-03-45、2003、pp.47-51
- [7] 近藤由和他、“人工網膜モジュール”、三菱電機技報、73、8、1999、pp.28-31
- [8] 大賀幸治、福田光子、“放射線分布計算・可視化のための基本システムの開発(1)”、日本原子力学会2003年秋の大会、D7、2003
- [9] Y.Sonoda, et al, “Inspection and Condition Monitoring Service on the Web for Nuclear Power Plants”, Human-Computer Interaction, Theory and Practice (Part II), Lawrence Erlbaum Associates, London, 2003, pp.1308-1312
- [10] 小林広幸、稲垣完治、田母神厚志、“工具管理自動化技術の開発”、電気学会全国大会”2004、pp.7-S12(5)-7-S12(8)
- [11] M. Fukuda and Y. Ohga, “A Training System for Maintenance Personnel in Nuclear Power Plants”, Human-Computer Interaction, Theory and Practice (Part II), Lawrence Erlbaum Associates, London, 2003, pp.1356-1360

(平成16年5月20日)