

「もんじゅ」プロセスデータのハイブリッド高度処理による 異常診断エージェントの研究開発

(受託者) 国立大学法人岡山大学

(研究代表者) 五福明夫 大学院自然科学研究科

(再委託先) 国立大学法人東北大学、国立大学法人神戸大学、国立大学法人福井大学

(研究開発期間) 平成21年度～24年度

1. 研究開発の背景とねらい

原子力プラントから得られるセンサデータの処理（信号処理）による、異常の早期検出や適切な対応操作の実施は、安全性確保において非常に重要である。近年、特定の時間変化と相似な時間変化成分が信号にどの程度含まれるかを分析するウェーブレット変換の新しい展開（第二世代のウェーブレット変換）や、判別分析や回帰分析に応用できるサポートベクターマシン（SVM）の研究が進展している。また、種々の診断技術の融合に関して、情報の多様性（information diversity）を重視した多様性評価基準による統合化診断の枠組み[1]が提唱されている。

本事業の目的は、高速増殖炉の保全活動に適用可能な機器やシステムの異常徴候を検出する手法の開発である。このために、まず、「もんじゅ」の正常時のプロセス信号データを解析し、その特性を把握する。また、プロセス信号を処理して「もんじゅ」の状態を監視・把握して異常の徴候を早期に検出する異常診断手法として、1) 未観測の重要状態変数の推定手法、2) SVMを用いた異常徴候の検出手法、3) ウェーブレット変換を用いた機器異常徴候の検出手法、4) 多属性類似度に基づく事例ベース診断手法を研究開発し、これらをハイブリッド型異常徴候診断手法として統合する。さらに、「もんじゅ」の分散型監視診断システム[2]のソフトウェアエージェント仕様に従って、開発手法を実行する異常徴候診断エージェントプログラムを作成する。

2. 研究開発成果

2.1 「もんじゅ」計装システムの把握と対象プロセス信号の選定（平成21-22年度）

「もんじゅ」のプラント構成、主要コンポーネントの構造及びナトリウム系の計装システムを調査して把握し、異常診断手法の目的や特徴から対象とするナトリウム系のプロセス信号を選定した。その結果、未観測重要状態変数の推定手法に対しては、中間熱交換器（IHX）2次側、蒸発器及び過熱器での各出口 Na 温度、2次主冷却系 Na 流量のプロセス信号を選定した。SVMによる異常徴候検出手法及び多属性類似度に基づく事例ベース診断手法に対しては、「もんじゅ」の全体的な異常徴候診断が目的であることから、日本原子力研究開発機構（JAEA）から提供された「もんじゅ」の正常運転時（40%出力時）の20種類の信号（合計57の信号）全てのプロセス信号を選定した。ウェーブレット変換による異常徴候検出手法では、1次主循環ポンプ及び2次主循環ポンプの回転数を選定した。

2.2 「もんじゅ」プロセス信号の特性の解析（平成21-22年度）

JAEAから提供の「もんじゅ」正常運転時（40%出力時）のプロセス信号の特性を把握した。プロセス信号に含まれる雑音成分をフーリエ変換により解析して得たパワースペクトル密度関数（PSDF）を分析することにより、周波数領域特性について信号の特徴や正常運転時での変動範囲を把握した。また、度数分布図の作成や平均、分散、歪度、尖度の統計的パラメータの計算により、時間領域特性について信号の特徴や正常運転時での変動範囲を把握した。

2.3 異常診断手法の研究開発

①ポンプ診断実験設備による異常データの生成

「もんじゅ」の水・蒸気系に用いられているポンプの構造を考慮して、図1に外観を示すポンプ診断実験設備を平成22年度に製作した。これを用いて、駆動電圧異常（平成22年度）や異物混入及び回転羽根のバランス変化による異常（平成23年度）に対して、振動と音響に関する信号データを生成した。



図1 ポンプ診断実験設備

②未観測重要状態変数の推定手法

「もんじゅ」の蒸発器と過熱器それぞれに対して、伝熱管の管壁状態を把握できる未観測の重要状態変数である、2次Na冷却系から水・蒸気系への熱通過率を、プロセス信号を用いて推定する簡易物理モデルを作成した（平成22年度）。

平成23年度には、簡易物理モデルに基づいて状態推定器を構成し、プロセスデータ計測値を用いて未観測の重要状態変数である熱通過率をオンラインで推定する手法を確立した。状態推定器にはセンサノイズを除去するためのローパスフィルタと時間平均を取り入れた。また、蒸発器や過熱器の出口では入口に対してプロセスデータに変動が表れる時間に遅れが発生することを考慮して、蒸発器や過熱器の入口に対する出口でのプロセスデータの遅れ時間を相互相関関数の計算により推定し、その遅れ時間を考慮した状態推定器を構成した。構成した状態推定器を用いて「もんじゅ」定常運転時（40%出力時）のプロセス信号から蒸発器と過熱器の伝熱管での熱通過率を推定した。図2に推定結果例を示す。定常時において、過熱器の熱通過率は $\pm 0.5\%$ 、蒸発器の圧縮水領域の熱通過率は $\pm 1.0\%$ の範囲の揺らぎで推定できることを確認した。

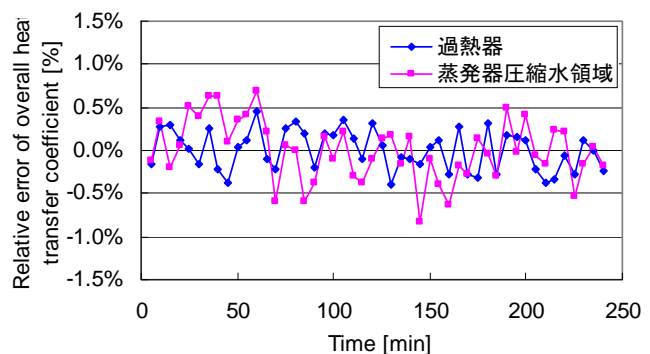


図2 熱通過率の変動率の推定結果

平成24年度は、項目⑥で実施のNETFLOW++を用いた「もんじゅ」体系の数値シミュレーションによってシミュレートされた4種類の異常事象（蒸発器熱伝達低下異常、給水流量調節弁異常による給水流量の低下、1次系主循環ポンプ異常による1次系Na流量の低下、主蒸気圧力上昇異常）における熱通過率の推定を通して、推定精度の評価を行っている。

③SVMによる異常徴候検出手法

プロセス信号を用いて機器やシステムの異常状態を早期に検出するSVMを適用した手法を開発し、JAEAから提供された「もんじゅ」正常運転時（40%出力時）のプロセス信号を用いて、SVMを用いた手法の早期異常徴候検出能力を確認した（平成21-22年度）。

平成23年度は、因子解析と決定木解析を適用して、異常徴候検出に用いるプロセス信号の選択を行う手法を開発した。また、運転員が結果を理解し易いSVM異常徴候検出手法とするために、判別境界の複雑性に注目して、単純なSVM判別境界の選択方法を構築した。これらの手法の有効性は例題により検証した。

平成 24 年度は、SVM による異常徴候検出手法の検出能力を、項目⑥で実施の NETFLOW++により生成した各種異常事象のシミュレーションデータに適用して評価している。

④ウェーブレット変換による異常徴候検出手法

マザーウェーブレットを任意に作成可能な第二世代のウェーブレット変換による異常徴候検出性の確認を行った（平成 21 年度）。そして、第二世代のウェーブレット変換である寄生的離散ウェーブレット変換によりポンプ異常徴候の早期検出手法を開発し、ポンプ診断実験設備で生成したポンプ駆動電圧異常時の信号データを用いて早期異常徴候検出能力を検証した（平成 22 年度）。

平成 23 年度は、ポンプ診断実験設備で生成した異物混入及び回転羽根のバランス変化時の信号データを用いて、これらの異常発生時に特有なプロセスデータの振動成分を抽出してマザーウェーブレットをいくつか構成し、早期の異常徴候検出能力の向上を評価した。図 3 に異常徴候検出結果例を示す。

平成 24 年度は、ポンプ診断実験設備で生成した異常時の音響データに対して異常徴候検出能力を評価している。

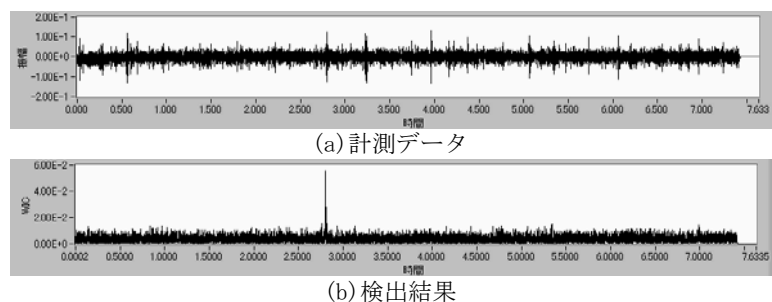


図 3 異物（球）混入時の振動信号からの検出結果

⑤多属性類似度に基づく事例ベース診断手法

図 4 にその基本概念を示すように、プロセス信号の複数の特性パラメータを用いて計算される類似度（多属性類似度）により、過去の信号挙動を格納した事例を高速に検索する手法を開発した（平成 22 年度）。ここでは、過去の類似の信号挙動との類似度を測る特性パラメータを、周波数領域特性ではプロセス信号の 10 次の AR モデルを用いた周波数スペクトル、時間領域特性ではプロセス信号の平均、分散、尖度、歪度の各統計量としている。



平成 23 年度には、この類似度計算手法において重要な感度調整パラメータを、各異常状態の判別性を考慮して決定する方法を明らかにした。そして、項目⑥で実施の NETFLOW++により生成した「もんじゅ」体系の 40%出力時での異常時プロセス信号データに、雑音成分を重畳して模擬プロセス信号データを作成した。この模擬プロセス信号データに対して、周波数異常、センサ不感帯、及び、信号飽和の異常を模擬し、類似の信号挙動を高速に検索できることを確認した。

平成 24 年度は、異常の早期検出という観点から診断手法の有効性の検討を行っている。

⑥「もんじゅ」体系の数値シミュレーションによる異常時プロセス信号データの生成

熱流動数値シミュレーションコード NETFLOW++[4]により、「もんじゅ」の 1 次主冷却系、2 次主冷却系及び水・蒸気系をモデル化した体系で、40%や 100%出力時において、いくつかの異常が発生した時のプロセス信号データを生成している。解析モデルの構築を行い（平成 21 年度）、給水系異常及び蒸発器での熱伝達異常の 2 種類の異常を模擬したプロセス信号データを生成した（平成 22

年度)。

平成23年度には、1次系主循環ポンプの流量異常及び主蒸気圧力上昇異常の2種類の異常時を模擬したプロセス信号データを、40%及び100%出力時に対して生成した。図5に生成例を示す。

平成24年度は、給水加熱器の故障による給水温度異常低下事象に関して、40%及び100%出力時の解析を実施し、プロセス信号データを生成した。

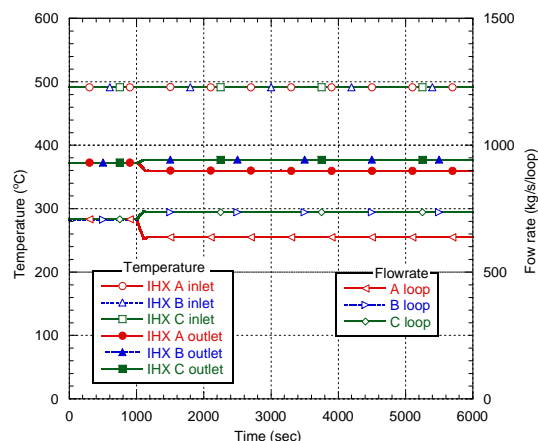


図5 40%出力時におけるポンプ性能低下時の1次系プラント挙動

⑦ハイブリッド型診断手法

上記②～⑤の診断手法を統合して多面的な異常徴候の抽出と分類を行うために、ハイブリッド型異常徴候診断手法を開発した(平成23年度)。この手法では、図6に示すように、各異常徴候診断エージェントから診断結果とともにその診断結果の確信度を受取り、各異常徴候診断エージェントの特性や過去の診断精度を考慮した診断適正評価値を計算して、評価統合関数を用いて統合診断結果を得る。

平成24年度はその診断能力を、項目⑥で実施の「もんじゅ」体系の数値シミュレーションによって生成した異常時プロセス信号データを用いて検証している。

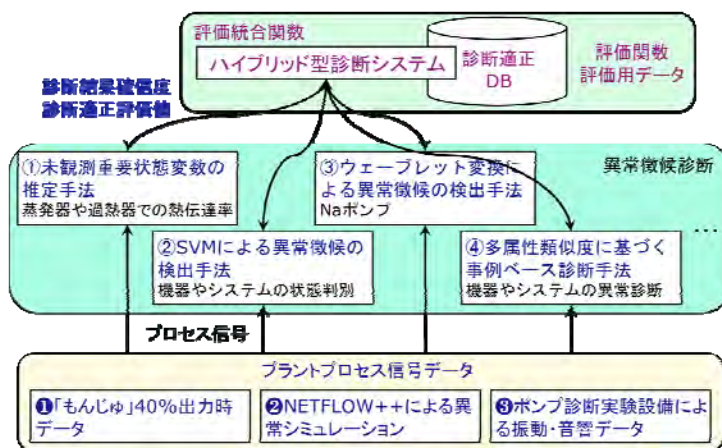


図6 ハイブリッド型診断システムの構成

2.4 異常徴候検出手法の研究開発外部評価

外部有識者による委員会を組織し、本事業全般について今後の計画及び成果をレビューした。評価結果は、研究開発の今後の計画へ反映した。

3. 今後の展望

本事業により開発した各種の異常徴候診断手法を、「もんじゅ」の分散型監視診断システムのソフトウェアエージェントの仕様に従って、エージェントプログラムとして作成する。

4. 参考文献

- [1] Catur Diantono, 高橋信, 他, 日本原子力学会誌, 42 (11), 1215-1225 (2000).
- [2] 玉山清志, 他, サイクル機構技報, No. 13, 5-12 (2001).
- [3] 章忠, 他, 日本機械学会論文集 (C編), 75-757, 2529-2536, (2009).
- [4] Hiroyasu Mochizuki, Nuclear Engineering and Design, 240, 577-587 (2010).