

「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

研究代表者 五福 明夫 国立大学法人岡山大学大学院自然科学研究科
 参画機関 国立大学法人岡山大学、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）の研究が進んでいる。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早期に検出する手法の開発を目的とする。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、その特性と正常範囲を把握する。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水・蒸気系と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プロセス信号を選定した。未観測重要状態変数の推定に対しては、蒸発器及び過熱器の各出入口温度、蒸発器給水流量、IHX（中間熱交換器）2次側 Na 温度、2次主冷却系 Na 流量など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、JAEA から提供された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、タービン駆動給水ポンプ回転数、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。把握したプロセス信号特性や変動範囲は、異常徴候診断手法の検証データの生成に用いた。

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（平成22-23年度）

「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、発生が想定される異常を、(1)モータ部異常、(2)回転羽根の損傷、(3)回転軸の摩耗による偏心、(4)異物混入、(5)流路への微量の空気混入として、図1のポンプ診断実験設備を製作した。これを用いて、駆動電圧異常や異物混入及び回転羽根のバランス変化による異常に対して、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（平成22-24年度）

「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。そして、「もんじゅ」の水・蒸気系の安定運転に重要な蒸発器や過熱器の伝熱管状態を常時把握するために、「もんじゅ」の蒸発器や過熱器の簡易物理モデルに基づいて状態推定器を構成した。

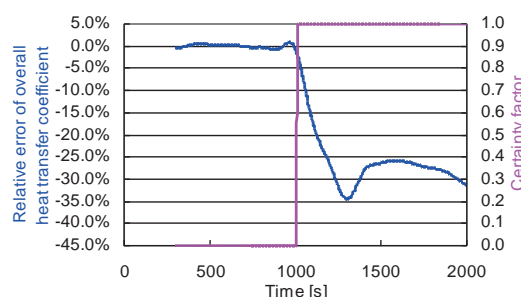


図2 熱通過率の変動率の推定結果

プロセス信号に含まれる雑音は、各信号の周波数領域特性を考慮して設計したローパスフィルタにより除去し、構成した状態推定器を用いて未観測の重要状態変数である熱通過率を、「もんじゅ」の正常運転時（40%出力時）に0.5%程度の変動以内でオンライン推定する手法を確立した。

さらに、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模擬された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、図2に例を示すように、異常検出ができることを確認した。

③SVMによる異常徴候検出手法（平成21-24年度）

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。そして、診断に適切な信号を選択する手法として、(1)因子解析と決定木解析を組み合わせた手法、(2)少数のプロセス信号によるSVM診断器の診断精度から多数のプロセス信号を用いた場合の診断精度を予測するSVMを構成して用いる方法の2種類の手法を開発した。開発したプロセス信号選択手法を用いて選択されたプロセス信号を用いて構成したSVM診断器は、

表1のように、全ての(16の)プロセス信号を用いて構成したSVM診断器の性能とほぼ同じか上回ることを確認した。また、運転員が結果を理解し易いSVM異常徴候検

表1 信号選択手法の評価結果

異常	SVM診断器		選択信号によるSVM診断器		
	MS	検知時間	MS	検知時間	選択信号数
給水温度の低下異常	0.999	40	0.999	46	4
熱交換器での伝熱異常	0.999	31	0.996	31	5
給水流量低下異常	0.976	582	0.981	50	2
1次主循環ポンプ流量異常	0.994	158	0.993	173	5

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。

④ ウェーブレット変換による異常徴候検出手法（平成 21-24 年度）

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。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[3]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。また、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振動及び音響に関する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ゆらぎ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を評価した。図 3 に異常徴候検出結果例を示す。なお、1 次系主循環ポンプ異常を、プロセス信号の一つである 2 次主循環ポンプ回転数による異常検出を試みたが、異常による信号の変化が微小であるため、異常検出は困難であった。

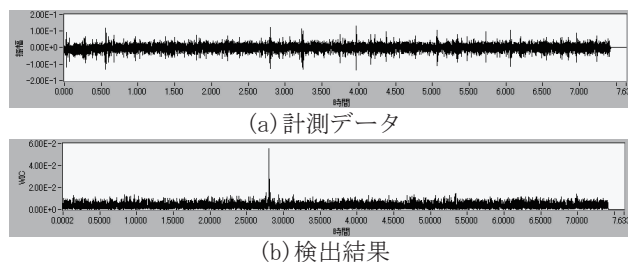


図 3 異物（球）混入時の振動信号からの検出結果

⑤ 多属性類似度に基づく事例ベース診断手法（平成 21-24 年度）

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。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。また、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生成された模擬プロセス信号データ、また、周波数異常、センサ不感帯及び信号飽和の異常を模擬したプロセス信号データに対して、図 4 に例を示すように、類似の信号挙動を高速に検索でき、異常の徴候を早期に検出できることを確認した。

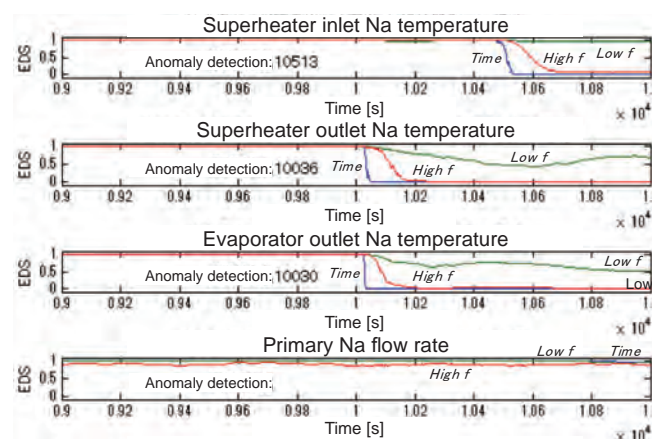


図 4 事例ベース診断手法による異常診断例

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（平成 21-24 年度）

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、解析モデルの構築を行った。そして、40%及び 100% 出力時における、給水系異常、蒸発器での熱伝達異常、1 次系主循環ポンプの流量異常、主蒸気圧力上昇及び給水加熱器の故障による給水温度異常低下の 5 種類の異常時を模擬したプロセス信

号データを生成した。

⑦ハイブリッド型診断手法（平成23-24年度）

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。この手法では、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信頼度を計算して、評価統合関数を用いて統合診断結果を得る。

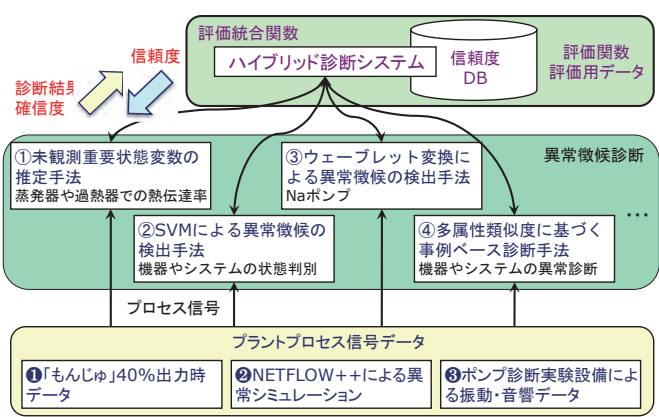


図5 ハイブリッド診断システムの構成

ハイブリッド型異常徴候診断手法の診断能力を、「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、それぞれの手法単独に比べて診断対象の状態数の増加及び異常徴候検出速度の向上が期待されることを確認した。

⑧エージェントプログラムの作成（平成24年度）

「もんじゅ」の分散型監視診断システム（dMOni）とプロセスデータサーバ（MIDAS）の関係、及びdMOniのソフトウェアエージェントの仕様を調査し、上記②～⑤の異常診断手法及び⑦のハイブリッド型診断手法のソフトウェアエージェント化における構成とソフトウェア仕様を設計した。そして、設計した構成と仕様に従って、各異常診断手法及びハイブリッド型診断手法に関するエージェントプログラムを作成した。

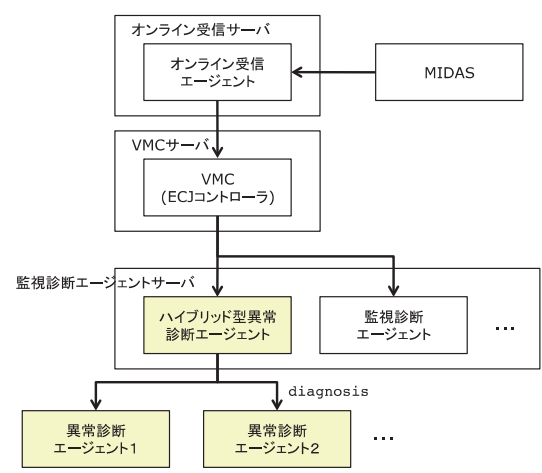


図6 ハイブリッド型診断システムの構成

2.4 異常徴候検出手法の研究開発外部評価（平成21-24年度）

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いただいた。平成21-23年度の評価結果は、次年度の研究開発の計画へ反映した。

3. 今後の展望

本研究開発の成果であるハイブリッド診断エージェントシステムを「もんじゅ」の分散型監視システムに組込んで、実システムにおける有効性の検証を行うことが必要である。

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).