

「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

原子力プラントにおいては、プラントから得られるセンサデータを処理（信号処理）して、正常運転状態からの逸脱の早期検出や、適切な対応操作の実施は非常に重要である。近年、新しい信号処理や機械学習に関する手法として、信号の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。

本事業では、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を目的に、「もんじゅ」プロセスデータを解析して「もんじゅ」の正常時のプロセス信号の特性を把握する。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を行う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

「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、文献、日本原子力研究開発機構 (JAEA) 提供資料及び「もんじゅ」視察によって調査して把握した。そして、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、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

①周波数領域特性の解析

JAEAから提供の「もんじゅ」正常運転時 (40%出力時) のプロセス信号に対して、微調整制御

棒位置 (FCRD) の操作による影響が小さいと見なせる6つの時間区間に対して、各プロセス信号の平均値を信号値から差し引くことにより雑音成分を求めた。そして、雑音成分に対してフーリエ変換により解析し、パワースペクトル密度関数 (PSDF) を計算した。このPSDFを分析することにより、周波数領域における特性に関して、時間区間によらずほぼ一定であること (定常性が成り立つこと)、プロセス信号によってPSDFがピークとなる周波数が異なることなど、プロセス信号による特性の特徴や、各信号の正常運転時での周波数領域特性の変動範囲を把握した。

②時間領域特性の解析

周波数領域特性の解析と同じ6つの時間区間における各プロセス信号に対して、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特性の解析を行った。その結果、ほとんどのプロセス信号では正規性が成立すること、また、時間領域特性には定常性が成り立つことや、各信号の正常運転時での時間領域特性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するとともに、想定する異常としてポンプ駆動電圧異常、回転羽根の損傷、異物混入などを選定して、図1に外観を示すポンプ診断実験設備を製作した。また、ポンプ駆動電圧が正常値の100Vからステップ状に低下しその後ステップ状に回復する異常を発生させるために、パソコン上で動作するプログラムと信号発生回路を製作してポンプ診断実験設備に組込んだ。そして、ポンプ診断実験設備を用いて、駆動電圧が90V、80Vなどに低下する異常に対して、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の外観

②未観測重要状態変数の推定手法

「もんじゅ」の蒸発器と過熱器の内部にある伝熱管の管壁の状態を把握することが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ために、以下に示す蒸発器と過熱器それぞれに対する簡易物理モデルを作成した。

$$K_{SH} = \frac{M_W (h_{WoutSH} - h_{WinSH}) (\log \Delta T_{X_{SH}} - \log \Delta T_{0SH})}{A_{allSH} (\Delta T_{X_{SH}} - \Delta T_{0SH})} \quad (1)$$

$$K_V = \frac{K_{SH} \lambda_{SH} \lambda_V}{\lambda_{SH} \lambda_V - K_{SH} \lambda_V d_{SH} + K_{SH} \lambda_{SH} d_V} \quad (2)$$

$$K_M = \frac{aK_V + bK_L}{a+b} = \frac{aK_V + bK_L}{c} \quad (3)$$

$$K_L = \frac{-K_V (aA_{all}K_V - a\alpha_1 - b\alpha_2 - c\alpha_3) + K_V \sqrt{(aA_{all}K_V - a\alpha_1 - b\alpha_2 - c\alpha_3)^2 + 4ab\alpha_2(A_{all}K_V - \alpha_1)}}{2b(A_{allSH}K_V - \alpha_1)} \quad (4)$$

ここで、 K ：熱通過率、 M ：冷却材質量流量、 T ：冷却材温度、 h ：冷却材比エンタルピ、 λ ：管壁の熱伝導率、 SH ：過熱器、 EV ：蒸発器、 N ：2次Na系側、 w ：水・蒸気系側、 in ：入口、 out ：出口、 0 ： $x=0$ の座標、 X_{SH} ： $x=X_{SH}$ の座標、 X_{EV} ： $x=X_{EV}$ の座標、 V ：蒸発器過熱領域、 M ：蒸発器飽和領域、 L ：蒸発器圧縮水領域、 a ：飽和蒸気の比体積、 b ：飽和水の比体積、 α ：蒸発器各領域の温度と伝熱量から求まる値である。

この簡易物理モデルを用いて、「もんじゅ」正常運転時（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。また、この簡易物理モデルを用いて、未観測の過熱器入口Na温度を同様に推定した。その結果、上流で計測のIHX出口Na温度に対して、流れ方向に整合した少し低い推定結果が得られたことから、この簡易物理モデルの妥当性を確認した。

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た。この手法を用いて、JAEAから提供された「もんじゅ」正常運転時（40%出力時）のプロセス信号から選定した3つの信号を用いるすべての組み合わせに対して、正常状態と異常状態を判別するSVMを構成した。それぞれのSVMに対して、「もんじゅ」の正常運転時（40%出力時）のデータを加工した異常時模擬データを用いて状態判別の精度を評価し、診断正解率が最も高かった、Aループ原子炉容器出口Na温度、Cループ原子炉容器出口Na温度及びBループIHX2次側出口Na温度の3つのプロセス信号を用いて構成したSVMを選んだ。この診断正解率の最も高いSVMの早期異常徴候検出能力を、閾値を用いた検出法（正常状態での平均値±標準偏差×2が閾値）と比較して検証した。その結果、閾値を用いた検出法では201秒要したところSVMでは85秒で検出できたことから、SVMを用いた手法の早期異常徴候検出能力を確認した。

④ウェーブレット変換による異常徴候検出手法

ポンプ等の回転機器を対象として、第二世代のウェーブレット変換により正常状態の周期的な振動を検出して、それが検出できなくなったことをもって、異常状態と判定する早期異常徴候検出手法を開発した。実際に計測された信号をもとにした実信号マザーウェーブレットの作成と信号検出には、章らによる寄生的離散ウェーブレット変換を応用した[3]。

ポンプ診断実験設備のポンプ駆動電圧異常時の振動データに対して開発した手法を適用した。図2に異常徴候検出結果例を示す。図の縦軸は周期的な振動の検出を示し、検出した場合に1.0となる。ウェーブレット変換における標準的なHaarやMorletのマザーウェーブレットを用いて異常徴候を検出する場合に比べて、異常の程度が小さい範囲でも正常状態と異常状態を区別できることから、開発した手法により程度が進展する異常徴候を早期に検出できることを確認した。

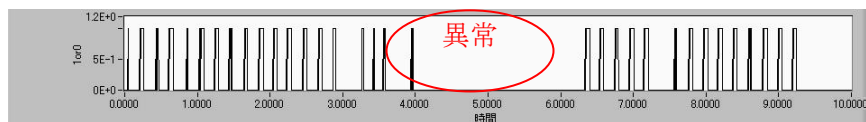


図2 異常徴候検出結果例（駆動電圧：100V→80V→100V）

⑤多属性類似度に基づく事例ベース診断手法

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た。そして、図3にその基本概念を示すように、プロセス信号の特性パラ

メータを用いて計算される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。そして、「もんじゅ」正常運転時（40%出力時）の1次主冷却系Na流量などのプロセス信号に対して、FCRDの操作による影響が小さいと見なせる6つの時間区間において、選定した特性パラメータを計算した結果に基づいて、正常運転時の事例ベースを試作した。

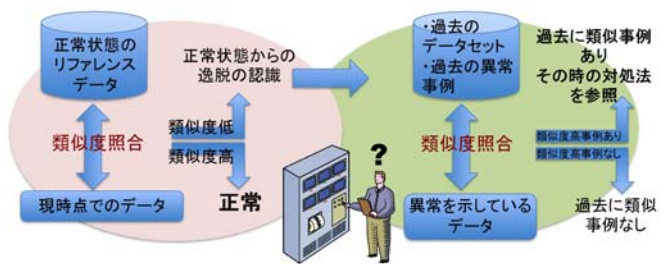


図3 多属性類似度に基づく事例ベース診断手法

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、正常運転時（40%出力時）での二種類の異常を模擬したプロセス信号の時間変化データを生成した。模擬異常は、給水流量調節弁の故障により流量が警報レベルに達しない範囲内の5%及び10%減少した場合と、蒸発器での水垢の付着を想定してこれによる伝熱管の熱抵抗が正常時の1.5倍、3倍となって熱伝達率が低下した場合である。図4には給水流量が低下した異常に対するデータ生成例を示す。今後、生成したデータは、異常診断手法の妥当性評価に用いる。

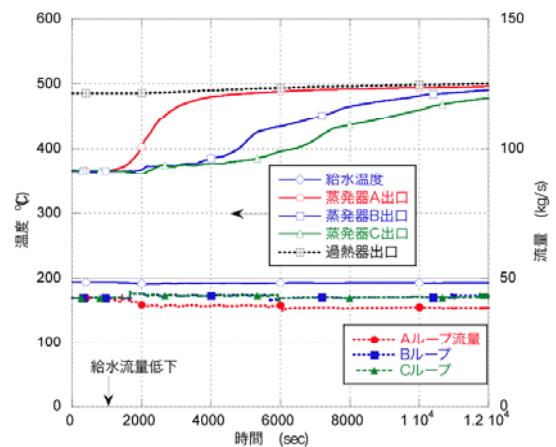


図4 異常時プロセス信号データ例

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

平成23年度以降では、ハイブリッド型異常診断手法の確立に向けて、

- (1) ポンプ診断実験設備やNETFLOW++による種々の異常状態での信号データの生成、
- (2) 第二世代のウェーブレット変換やSVMを応用した異常徴候検出手法、未観測の重要状態変数の推定手法や、多属性類似度に基づく事例ベース診断手法の開発とそれらの有効性検証、
- (3) 各異常診断手法の結果を統合して診断を行うハイブリッド型異常徴候診断手法への発展、
- (4) 研究開発手法のいくつかの異常診断エージェントとしての実装

を実施する予定である。

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).