

# インバリエント分析技術とビッグデータを活用したプラント監視装置の開発

Development of the Plant Monitor System utilized Invariant Analysis Technology and Big Data

中国電力株式会社	林 司	Tsukasa HAYASHI	会員
中国電力株式会社	生田 睦男	Takeo IKUTA	会員
中国電力株式会社	藤岡 隆	Takashi FUJIOKA	会員
日本電気株式会社	山本 敬之	Takayuki YAMAMOTO	会員
株式会社IIU	高瀬 健太郎	Kentaro TAKASE	会員

Our Company, aims at tracking huge plant parameters (Big Data), managed by Nuclear Power Plants. By application of this Big Data, along with NEC Corporation we developed a system to detect any equipment abnormalities accurately and as much as possible at an early stage.

After the implementation of the system, checks of the actual working of the system can be conducted and performance gains enhanced drastically.

**Keywords:** Big Data, invariant, Real-time monitoring

## 1. はじめに

近年、ビッグデータを活用した機器等の故障診断技術について注目されるようになり、技術雑誌等で広く紹介されるようになった。

原子力発電所は多くの機器で構成されており、機器の故障内容によってはプラント停止に至るケースもあり、故障を予兆の段階で早期に発見し、適切に対応することが求められる。

こうしたニーズに対応するため、従来から発電所に設置している運転監視用計算機に蓄えられているビッグデータを活用した「機器故障予兆監視システム」を平成 23 年から日本電気株式会社（以下、NEC という）と共同開発し、平成 26 年 7 月に島根 2 号機に、平成 27 年 3 月には島根 3 号機にシステムを導入し、今日まで試験運用を行っている。

今回は、島根 2 号機に導入したシステムの開発～今日に至るまでの試験状況等について以下紹介する。

## 2. システム開発の経緯

### (1) 開発の目的

原子力発電所の安全性向上と稼働率向上は原子力事業者にとって最重要課題であるが、これらを達成するためには以下の課題を解決する必要がある。

①プラントの異常を早期に発見する手段や、状態を的確に捉え客観的に評価する手段がなく、特に長期停止後の

再稼働時の信頼性確保は課題が多い。

②経験豊富な運転員や保修員が減りつつあり、いつまでも人に多くを依存し続ける訳にはいかないため、人に頼らずリアルタイムで異常の予兆を捉えられるようにしたい。

③稼働状況は警報システムや運転員のパトロール等により監視しているが、現行の運用では、僅かな異常の兆候を検知することは困難である。

以上の諸課題を解決するアイテムの一つとして、従来から NEC が開発していたビッグデータ処理技術を生かし、本システムを共同開発することとした。

### (2) 開発の歩み

西暦	内容
2009	NEC が <sup>※</sup> SIAT 技術開発、IT 向け製品化済
2011	SIAT 技術を活用した原子力発電所での故障予兆監視システムを NEC と共同開発着手
2012	島根原子力発電所の過去運用データ（運転監視用計算機の保存データ）分析
2013	検知のスピードを焦点にモックアップ試験等実施
2014	実用化のためのソフト開発～2号機システム導入
2015	3号機システム導入
2017	試験運用中

連絡先: 藤岡 隆、〒730-8701 広島県広島市中区小町 4-33、中国電力株式会社 電源事業本部（炉心技術グループ）  
E-mail: 278570@pnet.energia.co.jp

※SIAT : System Invariant Analysis Technology  
インバリエント=不変性

### 3. 故障予兆検知の仕組み

故障予兆を検知するためには、監視対象とする機器や系統全体に設置したセンサ（温度、圧力、振動、電流等）からの情報を元にセンサ間の結びつきの強さを計算する。

計算は簡単な一次式で表わされる [例： $y = f(x)$ ]。例えばセンサAの値が1からnに変化した場合、センサBは必ずそれにつられて一定量変化する場合、センサA・B間に一定量の関係性があると判断する。一方、センサAの値が1からnに変化しても、センサCの値が不変であった場合はセンサA・C間には関係性が存在しないと判断する。

- (1) 監視対象機器等に存在するセンサ群を、監視対象としてシステムに登録しておく。（手で任意のセンサ選択も可能）
- (2) 次に、過去の正常時の機器稼働データを使って、正常運転時のセンサ間の関係性の強さの範囲を学習させる。（これを教師モデルとする）
- (3) 学習させた教師モデルをリアルタイム（任意の間隔でよい）で使用し、各センサ間の関係性の強さが教師モデルの関係性の強さの範囲か否かを判定し、一定時間外れた状態が続く場合は、システムからメッセージを発する。

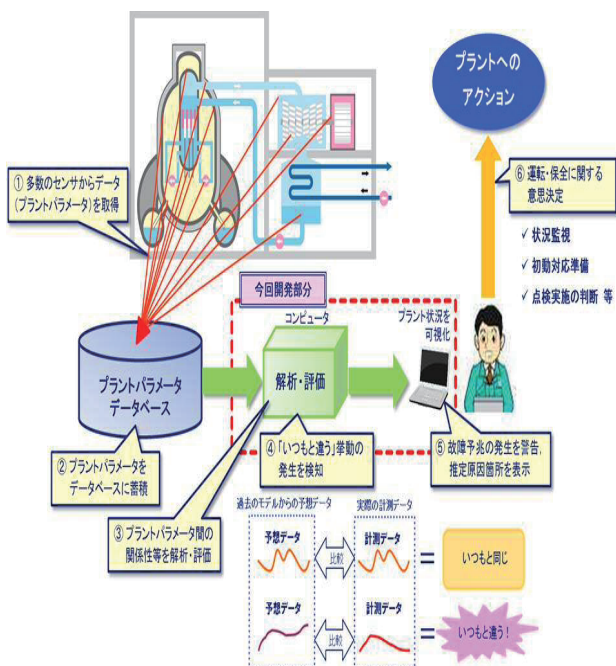


図-1 予兆監視の仕組み

### 4. システム構成

島根原子力発電所2号機のシステム構成を図-2に示す。

なお、3号機についてもシステム構成は同様であるが、プラント設計における集中化・自動化が図られたため、センサの入力点数が多いことからデータ保存用盤面が1面多い。

システムは既設の運転監視用計算機と連携し、各種のセンサ情報や計算機内のデジタルデータを使用している。

現在は既存のセンサデータ等を流用するに留まっているが、監視の目的等に応じてセンサの追加等を行えば、より精度の高い監視が可能となる。

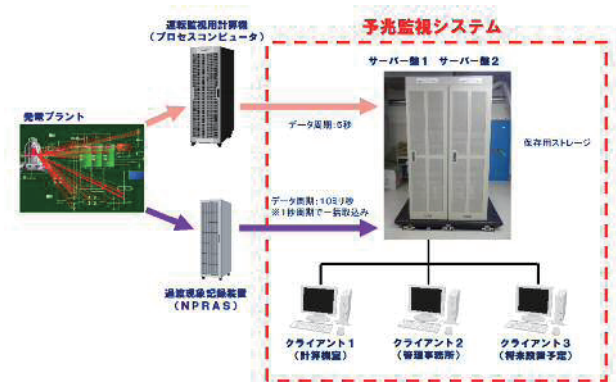


図-2 システム構成

### 5. システム仕様

項目	島根2号機	島根3号機
データ保存期間	39ヶ月	39ヶ月
記憶容量	96TB	192TB
入力データ点数	約3850点	約12000点
データ周期	1～5秒	5秒
同時監視最大モデル数	20 但しセンサ組み合わせ上限は500000点	6※ 但しセンサ組み合わせ上限は500000点
盤設置数	2面 システム動作1 データ保存1	3面 システム動作1 データ保存2
操作端末	3台	3台

※モデル数の増加を検討中

## 6. システム適用用途

2項においてシステム開発の目的を述べたが、開発を進めていく過程で他の用途にも使用できることが分かった。

そのため、次のケースで利用することを想定している。

### (1) プラント運転中および停止中における各種システムのリアルタイム監視

プラント運転時および停止中における機器故障予兆監視画面例を図-3に示す。

監視したいシステムや機器毎に最大20までの監視モデルを同時監視可能であり、約5秒周期で監視している。



図-3 監視画面例

### (2) 注目する機器の状態監視 (状態監視保全)

機器のデータ (振動, 温度, 圧力, 流量他) を定期的に取り得し, 傾向監視することにより劣化や機器故障を予想する。

本システムにより, 注目する機器のセンサデータの相関変化を定期的に評価し, 従来から実施している手法をサポートする。

### (3) 定期試験における機器の状態判定

過去の定期試験で検出された関係性との比較により, 現時点の機器の状態の良否を判定する。

島根2号機で実施している定期試験について評価した例を図-4~7に示す。

### a. 分析対象および分析方法

ポンプの自動起動定期試験における健全性確認のため, 図-4のとおりポンプ起動時, 定格流量時, ポンプ停止時の3段階に分割して各々の段階で分析する。

分析方法は予め作成した評価モデルを使用し, モデルには過去正常に実施した5回分の定期試験時のデータを教師データとして学習させている。

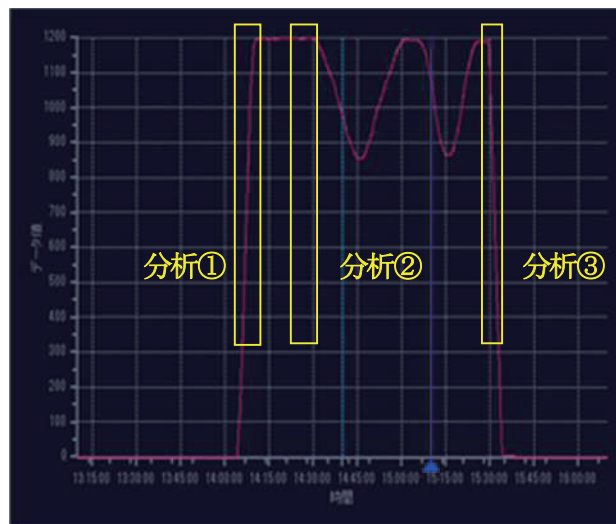


図-4 ポンプ起動定期試験の流量特性

### b. 分析方法

今回開発したコアインバリエント法と呼ぶ手法を用いて評価する。

表示画面は二次元マトリクス (総当たり表と同じで縦横は同じセンサで表す) で表示され, 視覚的に従来との違いや, どのセンサが従来と異なる動作をしているかを捉えることができる。

二次元マトリクス上に, 自動抽出されたインバリエントは<白塗>で表示され, インバリエントが崩れた場合に<赤塗>で表示される。

評価モデルと今回実施した定期試験との分析結果は図-5~7のとおり。

ポンプの本体に直接関係するパラメータ

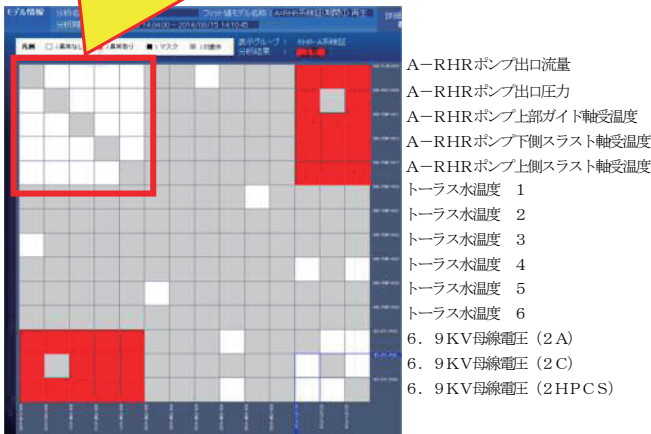


図-5 分析①での評価結果

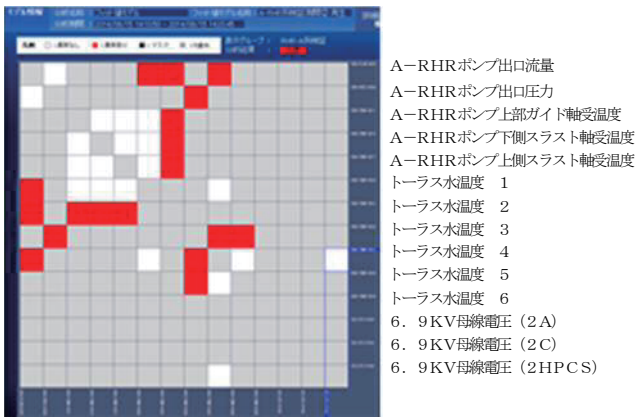


図-6 分析②での評価結果

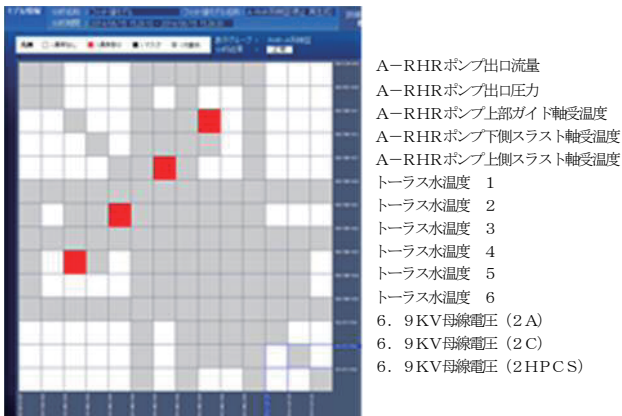


図-7 分析③での評価結果

c. 分析結果

(a) 分析①での評価

分析①で赤く表示されているところは、6.9kVの所内電源電圧であり、これは試験時に別の大型機器が起動したため、一時的に所内電圧が低下したものを捉えている。ポンプに係る部分に異常は見られない。

(b) 分析②での評価

分析②で赤く表示されているところは、トーラス水温度であり、これは試験時のポンプの戻り水ラインがいつもと違うライン構成としていたものを捉えている。ポンプに係る部分に異常は見られない。

(c) 分析③での評価

分析③で赤く表示されているところは、ポンプ軸受温度とトーラス水温度の関係であるが、分析②と同様に系統の違いを捉えている。ポンプに係る部分に異常は見られない。

(d) 総合評価

分析①～③の結果についてはポンプに異常を示す表示がないことから、正常と判定した。なお、当日の運転員による機器点検やパラメータ等に異常はなく、この事からも判定は妥当と考える。

(4) プラント起動工程および停止工程におけるプラント健全性確認

a. 起動工程確認

起動には①原子炉起動～圧力上昇、②復水器真空上昇、③タービン起動、④発電機並入、出力上昇等（大別すると8工程）のイベントがあり、イベントごとに機器の健全性を確認している。

本システムを活用し、各イベント終了時点で、モデルとの比較、評価を行うことで、これまでと異なる視点で健全性を確認する。（6.（3）で紹介したコアインバリエント法による）



図-8 プラント起動工程監視画面

起動工程の評価は各イベント（例えば原子炉圧力上昇完了時）用に作成した監視モデル※を使用し、原子炉圧力上昇が完了した時点で健全性を評価する。

評価した例を図-9に示す。

※：原子炉圧力上昇完了時監視モデル

- ①原子炉起動に関係するセンサを任意抽出し、監視モデルとして登録しておく。
- ②過去6定検分の原子炉起動時（正常に実施されたもの）のデータを使用し、監視モデルに各センサ間の関係性の強さを学習させておく。
- ③原子炉圧力上昇完了後、学習させた監視モデルと各センサ間の関係性の強さが正常範囲内か否かを比較する。
- ④比較した結果は2次元マトリクスにより表示する。

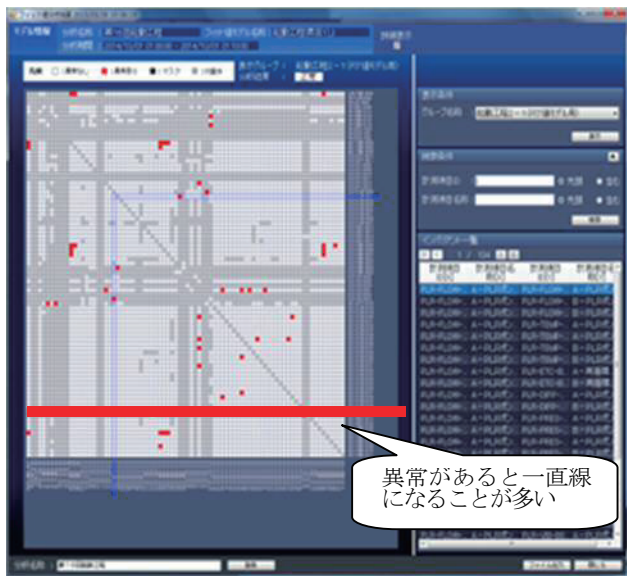


図-9 島根2号機16回定検原子炉圧力上昇の健全性評価結果

図-9では赤い表示が所どころ見られるが、散発的であり、正常の範囲内である。異常があった場合は、異常に関係するセンサの列が一直線上に表示される。

#### b. 停止工程確認

プラント停止は①定格出力～発電機解列～原子炉停止までで、過去の停止データを正常モデルとし、イベント終了時点でモデルとの比較・評価を行う。（起動時と同様に、コサインバリエーション法を使用する）

なお、プラント停止時の評価も重要であり、異常があった場合は、定期検査の中で異常個所の修理を行う。

- (5) 機器点検前後およびリプレースした機器健全性評価

機器の分解点検、またはリプレースした後の試運転時に評価する。評価は、当該機器の前回点検後の試験データとの比較、点検前データとの比較により行う。

- (6) トラブル事象後の分析機能活用

万一、トラブル等により原子炉が緊急停止した場合の原因究明・対策に活用する。

- (7) シミュレータ機能

- a. 機器故障の予兆事象をパターン化し、事故の予測と事故の防止のための教育に活用する。
- b. 計器・センサのパラメータを変動させ、予兆の発生から故障までの変動を模擬する。

## 7. 開発時の検証

今回、NECとの共同開発に当たっては、以下に示す検証を行いながら開発を進めた。

- (1) 実際のプラントデータを用いた解析

2001年以降、島根原子力発電所であった不具合事例を約30項目抽出し、検知可能か否かの検証を行った。

検証にあたっては、システムの起動、定格熱出力運転中、定検中等監視したい全てのケースで検証した。

検証の結果、事象の検出は概ね良好であり、検知時間も事象発生の約数時間前から、運転員と同程度内に収まった。（但し、一部検知不可事象もあった）

これらは既存のセンサのみで実施した結果であり、目的に応じてセンサを追加すれば、検知精度、時間とも向上するのは言うまでもない。

検証結果の一例を以下に示す。

- a. 島根2号機主蒸気圧力検出器（以下、MSPSという）からの漏えい事象  
[不具合概要]

原子炉からタービンに蒸気を送る主蒸気配管4本のうち1本にMSPS3台が設置されており、通常は3台の検出圧力の平均値でタービン主塞止弁前の圧力が一定になるよう圧力制御をしている。

このうち、1台の検出器に蒸気漏えいがあり、2006年10月13日11時30分頃に運転員が発見し、不具合除去操作（検出器をバルブ隔離）を行い収束した。

### 運転員の事象把握時刻

事象を運転員が把握した時刻は平成 18 年 10 月 13 日 11 時 30 分頃と考えられる。関連するパラメータ（原子炉圧力）は 6 時頃より値の変動が現れていたが、対象パラメータを監視するしきい値を超えるほどの変動ではなかったと考えられる。



10月13日 0時～16時までの原子炉圧力の時系列グラフ

図-10 島根2号機MS P S蒸気漏えいによる原子炉圧力の変化

### (a) システムによる検証

上記事象をシステムで捉えられるかを、通常使用する監視モデルを使って検証した。

#### [検証結果]

検証の結果、実際の運転員による発見より 7 時間以上早く検知され、事象が拡大する前に処置可能であることが確認された。

このときの圧力低下率は 0.1% 程度であり、しきい値監視手法ではこの時点での検出は困難であった。

検証結果を図-11 に示す。

なお、注意したいことはこのグラフは原子炉圧力の挙動ではなく、関係性のあるセンサ間の強さがある閾値を超えた総数を表しており、モデルの中のセンサには 3 台の MS P S 圧力は含まれておらず、圧力の平均値のみが含まれている。

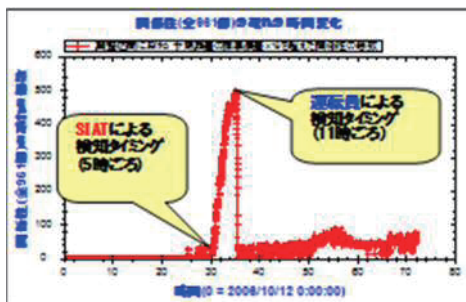


図-11 監視モデルによる検証結果

### (2) 島根原子力発電所訓練施設による試験（モックアップ試験）

島根原子力発電所の訓練用施設にある横型ポンプの循環ラインを使用し、様々な故障予兆を模擬的に発生させ、検知性能を検証した。

現実の運用に近い環境で本システムを評価するため、モックアップ試験設備（横型ポンプ、ポンプ用電動機等）の試験ループ内の各部にセンサを取り付け、各種模擬故障（キャビテーション、軸受傷）における系統のデータを取得し、解析・評価を実施。

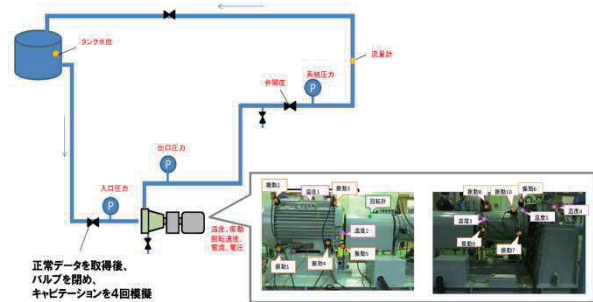


図-12 訓練施設による検証

### (3) 電力中央研究所設備による試験

本システム開発の検証結果の信憑性、データ解析の信頼性向上のため、電力中央研究所の設備を用いた検証試験を実施した。発電所の訓練施設との違いは、系統内の流体温度を最大 200℃まで変化させることが出来るため、試験では 50℃から 200℃の温度範囲内での故障検知に差が生じるのかも含めて検証した。

検証では、良好な試験結果が得られたとともに、図-13 に示すようなポンプ電流・流量・温度の関係が明らかになった。

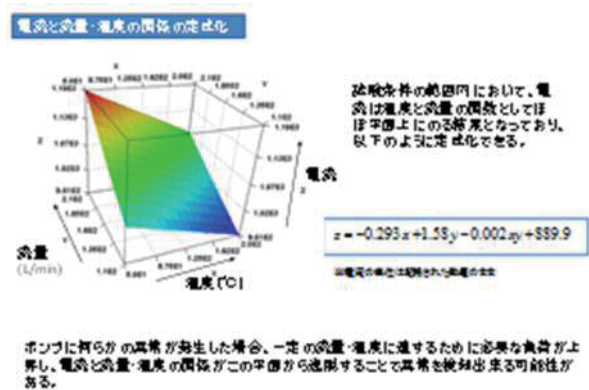


図-13 ポンプの定式化模式図

## 8. システム画面例

今回開発・設置したシステムの主な画面例を、前述したMSPSからの漏えい事象を例として説明する。

### (1) プラント全体の監視画面

- a. プラント全体を全般的に監視する画面とし、画面内の点がセンサを表す。
- b. センサの点をクリックするとセンサ情報や過去のトレンドを表示することが出来る。
- c. センサ同士は線で結ばれ、黒い場合はセンサ間の相関性に異常なし。相関性に異常が見られた場合は、赤く表示される。
- d. 原子炉やタービン廻り等センサが多く設置されているところは機器の拡大画面も表示される。

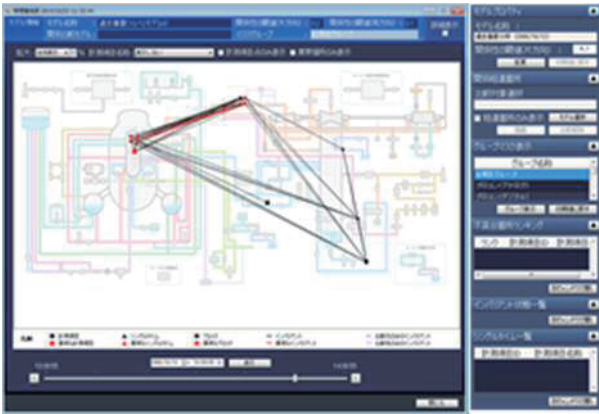


図-14 プラント全体監視画面例

### (2) アノマリスコアグラフ表示

機器の故障予兆を検知した場合、監視モデル中の関係性が崩れたセンサの総和（アノマリスコアと呼ぶ）をグラフで表示させる。



図-15 アノマリスコアグラフ画面例

### (3) システム監視画面表示

プラント全体の監視におけるシステム監視表示例を示す。

画面の左には監視しているシステム名称を表示（中央制御盤の警報をイメージ）させ、機器の故障予兆を検知した場合、赤く点滅する。確認ボタンをクリックすると、予兆継続中であれば点灯状態となり、通常状態になると確認ボタンをクリックすることで消灯する。

画面中央部分には警報発生中のセンサ情報を表示でき、相関崩れの大きいものからランキング形式で表示する。

更に表示画面をクリックすることで、詳細なセンサ情報が得られる仕組みとしている。



図-16 システム監視画面例

### (4) センサ実測値と予測値表示

各センサの実測値と関係するセンサの実測値および計算上の予測値を表示、更にその差分を表示させることで相関性の崩れ具合を知ることが出来る。

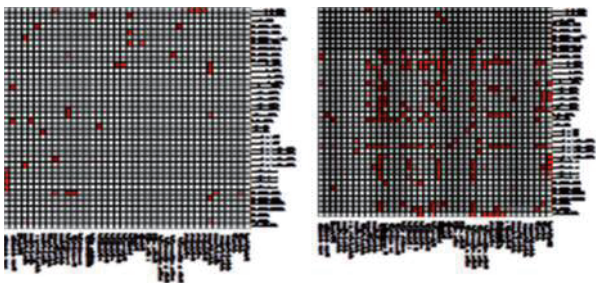


図-17 センサ実測値と予測値表示例

### (5) 2次元マトリクスによる異常表示

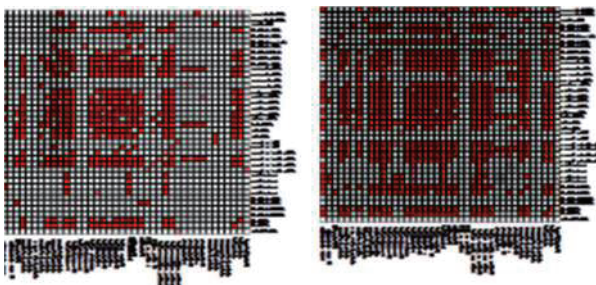
機器故障の予兆を捉えた場合、事象の進展状況を2次元マトリクスで表示し、確認することが出来る。

- a. 図-18①は正常時の状態。所どころ赤く表示されるが、正常の範囲内。
- b. ②はセンサ間の関係性が崩れ始めた段階で、警報発生に3%程度の閾値を設定（運用によって任意変更可能）しているので、警報は発報しない。  
この段階では機器の異常とまでは言えない。
- c. ③は警報閾値の3%を超えた状態で、何らかの機器異常が進展していると推測される。
- d. ④はシステム使用しなかった場合の運転員による気づきや、何らかのシステム警報が発報する時の状態。



① 通常状態

② 関係性崩れ始め



③ 進展し、警報発生 ④運転員異常気づき時

図-18 2次元マトリクスによる異常進展表示例

## 9. 現在までの改良事項

開発当初から現在まで確認できた問題点における改良事項について、以下のとおり、いくつか紹介する。

### (1) システム機能

本システムでは様々な機能を有しており、その一つ一つが使いやすいものでなくてはならない。そのため、使用する側に立った操作性を実現させている。

例えば、故障予兆を捉えた画面から、リンクしてセンサのトレンドや情報が表示される、また、センサの取り付け位置の見える化や詳細位置情報表示等。

### (2) データ抽出機能の強化

時系列データの周期取込を見直し、現在の5秒間隔に加え、30秒間隔も処理可能とした。（至近に実施した島根2号機運転監視用計算機リプレースの前後でデータ処理周期に相違があることによる。）

### (3) 監視モデル機能の強化

現状の監視モデル6画面では故障予兆の監視、分析を適切に行うことができないため、監視設定できるモデル数を現在の最大6個から最大20個に拡大した。

### (4) センサ信号のノイズ対策

センサ信号の過渡的变化による誤検知を無くするため、使用するセンサ情報には移動平均処理やフィルタ機能を持たせている。

### (5) 季節変動等によるセンサ値正常変動対策

プラントの状態は正常時でも海水温度の変化や定期補機切替等によりセンサ値が変化する。このため、正常時の監視モデルを一定間隔で学習し直す必要があり、モデル更新頻度の最適化や自動更新機能を持たせている。

## 10. おわりに

島根2号機再稼働に向けて、未実施のシステム検証試験や運用体制の整備等の課題が残っており、そのためのシステム開発を今後とも継続させ、より一層の原子力発電所安全・安定運転に寄与させたい。