

知的保全管理システムの開発

— 故障検知・故障診断評価システムの開発 —

1998年3月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1313 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-1313, Japan.

©動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

知的保安全管理システムの開発 -故障検知・故障診断評価システムの開発-

須田一則*、吉川信治*、谷賢*

要 旨

原子力プラントの運転・保守における経済性や安全性の向上を図るべく様々な研究が行われている。我々は既存のプラントにおいて運転員及び保守員が果たしていた役割を代替する人工知能を用いた制御システム及び自律ロボットシステムの概念構築を進めている。その要素技術として、保守員の頭脳に代わるシステムである知的保安全管理システムの開発を実施している。

知的保安全管理システムは、保守員が実施している予防保全・事後保全に関する機能、すなわち、プラント内の保安全管理に係わる状態の監視、機器の異常検知、保守・補修に係わる保全方策の策定を自律的に行うことが必要である。本報告では、予防保全における状態監視に着目して、機器の状態監視、異常診断に必要なセンサーの健全性評価システムを開発した。そのシステム構成としては近年大規模プラントにて検討されている人工知能技術の分散協調手法を採用し、エージェント毎に信号の送受信を行う通信機能及び関連する機器の特性モデルを分散配置するシステムを開発した。

FBRプラントの水・蒸気系を対象にシステムを構築し、試験を行った結果、各エージェント間の協調により、故障の程度をファジアルゴリズムにより定量的に表すことを可能とした。また、故障診断評価機能のためにエージェント間相互評価によって導かれた推定値は、故障センサーの代替評価とすることができる。

* 大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

Development of An Intellectual Maintenance Management System

- Development of trouble detection and troubleshooting evaluation system -

Kazunori SUDA*, Shinji YOSHIKAWA*, Satoshi TANI*

Abstract

Many research activities are conducted to enhance cost performance and safety of nuclear power plants operation and maintenance. Concept of autonomous operating system to equal the role of operators and of maintenance personnel with artificial intelligence and autonomous robots has been developed. An intellectual maintenance management system has been developed to be equipped with decision making functions of maintenance personnel.

The intellectual maintenance management system is in charge of maintenance function of an autonomous plant, which consists of plant-wide monitoring, evaluation of component integrity, and scheduling of maintenance activities. In other words, this system should be equipped with preventive maintenance and corrective maintenance functions those are currently loaded on personnel. In this report, we discussed condition monitoring maintenance in the preventive maintenance. We also reported a sensor validation system development for machinery condition monitoring and diagnosis. We adopted distributed and cooperative system construction technique, which is expected recently in applications to large-scale plants. This system has inter-agent communication function for signal transmission and reception among distributed physics models of machineries.

The system has been constructed for water / steam system of the LMFBR power plant. The system has been validated to be capable of cooperative sensor validation by the distributed set of agents, with quantitative indication of sensor deviation based on a newly developed fuzzy algorithm with inter-agent cooperation. The derived reference parameter value from the inter-agent evaluations also stands for the alternative measurement to the malfunctioned sensor.

*Frontier Technology Section , Advanced Technology Division , Oarai Engineering Center

目次

1. 緒言	1
2. 故障検知及び故障診断評価システム検討	2
2. 1 分散協調機構検討	3
2. 2 エージェント構成	5
2. 3 推定値算出手法検討	7
2. 4 非同期放送通信	9
3. 故障検知及び故障診断評価システム試作	9
3. 1 試作対象範囲	10
3. 2 試作モデル概要	10
3. 3 推定値算出法	12
3. 3. 1 センサーエージェント推定値算出法	12
3. 3. 2 センサー値の推定値算出計算の打ち切り精度	13
3. 3. 3 アクチュエータ特性値の推定値算出法	13
3. 4 推定値グレード算出法	13
3. 4. 1 センサー値の推定値グレード算出法	13
3. 4. 2 アクチュエータ特性値の推定値グレード算出法	15
3. 5 試作システム	15
4. 結言	18
5. 謝辞	19
6. 参考文献	19

添付資料

1. 故障検知・故障診断評価システムのモデル概要	20
2. センサー及びアクチュエータエージェントの使用モデル説明	28

図 目次

図 1	保全の分類	2
図 2	分散制御システムの構成	3
図 3	システムの構成	4
図 4	センサーエージェント動作	6
図 5	故障検知システム処理フロー	8
図 6	試作対象範囲	10
図 7	エージェント及び物理モデルの関係	11
図 8	センサーエージェントメンバーシップ関数	14
図 9	蒸発器出口蒸気温度センサー故障	16
図 10	給水調節弁開度センサー故障	16
図 11-1	システム表示画面 (故障検知前)	17
図 11-2	システム表示画面 (故障検知後)	18

1. 緒言

原子力プラントの安全性、信頼性向上を目的として、人的因子からのトラブル発生を極力低減させるべく、運転制御の高度化、知能化に関する研究開発が国内外で精力的に進められている。わが国における代表的な試みとしては、運転員に対し、プラント状況に関する適切かつ過不足ない情報を提供し、安全性、信頼性の向上を図るといった知的運転支援システムの開発がある。しかし、あくまでも運転員支援を目指すものであって、異常時における判断や操作は運転員に委ねられている。自律型プラントの開発は、プラント運転・保守において最終的な判断や操作までを人間に依存することなく実行しうるような人間機械協調型のシステム開発を目指している。その自律型プラント開発の要素技術として、人工知能を備えた自律型運転制御システムの開発¹⁾及び知的保全管理システムの開発を行っている。

知的保全管理システムは、先行して開発を実施している運転員の代わりとなる自律型運転制御システムと保守員の代わりとなる自律ロボットとを有機的に結合して、プラント内の保全管理に係わるプラント状態の監視、機器の異常診断、保守・補修に係わる保全計画の策定(図1)を自律的に行い、その結果を双方に指示・伝達するという重要な役割を担っている。まず、自律型プラントの全体構成及び知的保全管理システムの役割、FBRプラントの代表的な系統を対象にした知的保全管理システムの基本構成、知的保全管理システム内の通信方式について検討を行い、知的保全管理システム概念を構築²⁾した。本報では、FBRプラントを対象とした知的保全管理システムの基本構成のうち、機器の状態監視及び異常診断に必須であるセンサーの健全性に着目し、システム構築を行い検証することとした。

自律的なシステムを構築するためには、系統毎に分散化されたシステムが有機的に結合しあってプラント診断・制御を行い、さらには運転・保守を実施する必要がある。分散協調型のシステムの利点としては、通常時における試験等により一時的に設置されるセンサー群を容易に取り入れられることが挙げられる。そのため、診断や制御の性能向上が図れると考えられる。一方、異常時には、機器の異常及びセンサーの異常により使用できなくなったセンサーの代替センサーを周囲に取り付けることにより、最低限の運転が可能になると考えられる。また、従来の集中型システムに比べて、システムの改造のしやすさ、そのための作業時間の短縮化、プラントに異常が発生した場合の原因追求のしやすさが挙げられる。従来の原子力プラントはある程度分散化が進んではいるが、そのデザインは人間によって系の外で集中的に行われている。また、系統毎の大きな枠組みで分散が行われており、その内部のポンプや弁の制御は出力指令により集中管理されている。すなわち、システムの分散は行われているが階層の異なるサブシステム間の上意下達的な協調であり、センサーレベルの協調までは至っていない。そこで、従来システムにおける自動化の向上、過酷な状況下における作業支援を目指すためには、従来のシステムではなく、分散協調によるシステム開発が必要である。

本報では、FBRプラントの最も複雑な系統である水・蒸気系の一部を対象として取り上げる。故障検知・診断評価システムに必要なエージェントの構成、センサーの

健全性評価に必要な評価法検討、分散配置されたエージェントの協調に必要な通信形態の検討について試作システムにて検証を行う。

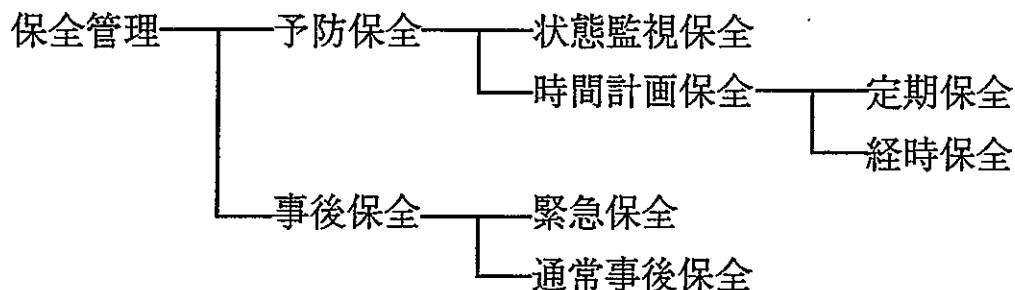


図1 保全の分類

2. 故障検知及び故障診断評価システム検討

従来の原子力プラントにおいては、安全上重要なパラメータ、物理量の計測等の信頼性の向上として、計装センサーの多重化などが実施されてきた。しかしながら、広範な計測対象についてセンサーを多重化することはコスト面及び配置上からも困難であると考えられる。そこで、本システムの実現においては、種々の計測量の物理的関係に着目し、異なる種類、箇所の計測量から他の計測量を機器の特性モデル（物理モデル）を用いてセンサー値を推定して、計測値との比較（センサーヴァリデーション）によりセンサーの健全性について評価を行う必要がある。さらに、システムの実装には人工知能分野で検討されている分散協調手法を採用してシステムの拡張性及びセンサーの物理的な多重化と同様な多重化をソフトウェア上で構築し、誤信号に対するプラント診断システムの信頼性の向上を図る。

一般的に、プラントにはシステム状態に冗長性が備わるように同一系統に複数のセンサーが設置され中央制御室等において運転員により監視されている。センサーの健全性を評価する手法の一つとして、全てのセンサーが正常であればそれぞれの計測値より推定したシステムの状態は真の状態に収束するはずであり、仮に一つのセンサーが故障した場合には、推定したシステム状態に誤差が生じ、他のセンサーの計測値から推定した状態と相互比較することにより、どのセンサーが故障したのかを推定することが可能である。また、状態推定に用いるアクチュエータの特性（弁の C_v 特性値）が変化した場合には、推定した一部の状態が計測値と誤差を生じることにより、どの特性に変化が生じたのか同定することが可能となる。そこで、センサー及びアクチュエータ毎に故障を検知・診断する機能を有するセンサーエージェント及びアクチュエータエージェント（以下、エージェントとする）を設け、エージェントがお互いに協調することにより、全体としてセンサー故障あるいは機器の特性変化が診断可能となる。しかしながら、この方法においても以下に示すような幾つかの問題点が存在する。

- ・ 計算に用いられる計測値をもたらすセンサーが故障している場合、出力される推定値が真の値から離れ、原因同定が困難になる。
- ・ プラント自体に異常が生じ、計算に用いられているモデルが対応しない場合、センサー故障と誤診する可能性がある。

- ・計測ノイズや応答時間の遅れ等により計算誤差が生じ、センサー故障と誤診する可能性がある。
- ・物理モデル自体も十分な精度でかつ計算量の小さなものを準備しなければならない。

上述した問題を解決すべく、以下では自律的に故障検知及び故障診断評価を行うための分散協調機構検討、エージェント構成、推定値の算出方法、非同期放送通信による自律動作の向上について検討を行う。

2. 1 分散協調機構検討

大規模複雑なプラントにおける保安全管理を自律的に行うシステムの機能、アーキテクチャー等の概念を確立することを主眼として、分散協調手法を用いてシステム開発を行っている。分散協調手法の特徴としては、信頼性、拡張性、操作性、応答性、経済性の向上という特徴を有しており、逆にこのことは従来型の集中制御方式の問題点として挙げられている。分散協調システムの問題点としては管理者がいない完全に平等な形態であるとの意見があるが、必要であれば階層的な組織を作り制御を集中することを妨げるものではないと考える。また、階層的な組織をエージェント群が自ら作り、自ら変えられることができることが重要な点である。すなわち、分散協調システムはもともと独立に存在するエージェント群を陽に意識し、必要に応じて組織し、統合し、調整し、協力できる機能を有するものである。

分散化には大きく分けて二通りあり、図2^①に示すように従来プラントのシステム構成である垂直型の分散、一般的には階層型分散またはハイアラキー型分散と呼ぶ。もう一つは水平型分散またはネットワーク型分散と呼ばれるものがある。

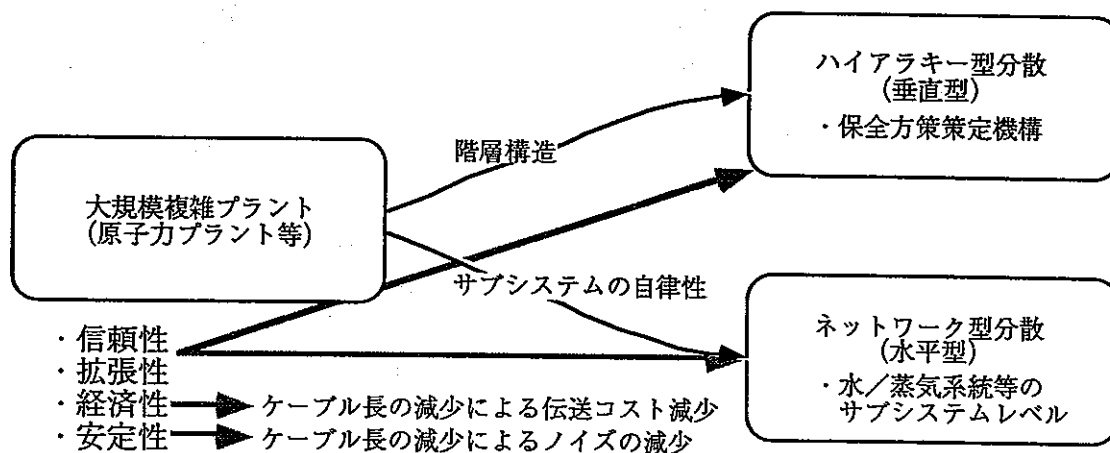


図2 分散制御システムの構成

知的保安全管理システムは故障検知・故障診断評価システム、保全方策策定システム及び過去の履歴を蓄積するデータベースにより構成する。故障検知・故障診断評価システムの役割は、プラントの機能毎に設けられたネットワーク上でセンサー、

アクチュエータ、蒸発器・過熱器等の静的機器等に割り付けられた自己判定機能（エージェント）の局所的な情報交換により、故障検知及び故障診断評価を行うことである。保全方策策定システムの役割は、故障検知・故障診断評価結果と予め規定されているプラント運用上の制約事項及び定型的な保全スケジュールデータを記述した保安全管理計画に基づき作業工程、作業手順を策定することである。知的保安全管理システムの分散化されたシステム構成については、系統毎に管理する多種多数のエージェントとそれらの協調による故障検知・故障診断評価を行うことから水平型の分散システムが最適と考えられる。一方、全体情報と必要とする保全方策策定エージェントと故障検知・故障診断評価結果との関係は垂直型の分散システムが最適と考えられる。よって、知的保安全管理システムの分散システム構成は各機能毎のサブシステムレベルにおいては水平分散型のネットワーク構成とする。保安全管理システムの全体構成については、運転制御システムと同様に複雑で大規模なシステムをより単純なシステムの結合と捉えることにより、図3に示す通りシステム全体の見通しを良くし、システム的设计・製作・保守においても容易になる特徴をもつ階層型分散との複合型の分散システム構成とした。また、サブシステムレベルではエージェントの数が增大することにより、エージェント間の通信コストの増大が考えられる。従って、ここではエージェントは個々に独立とし、従来の共有メモリによる同期を取りながらのデータ通信は行わず、放送通信により必要な時に必要な情報だけを送受信することが可能な非同期放送通信方式¹⁾の採用する。また、上位と下位の階層間の通信には、必要不可欠なデータ以外を通信しない機能を有するゲートウェイを配置し階層型分散における通信のボトルネックを解消する。

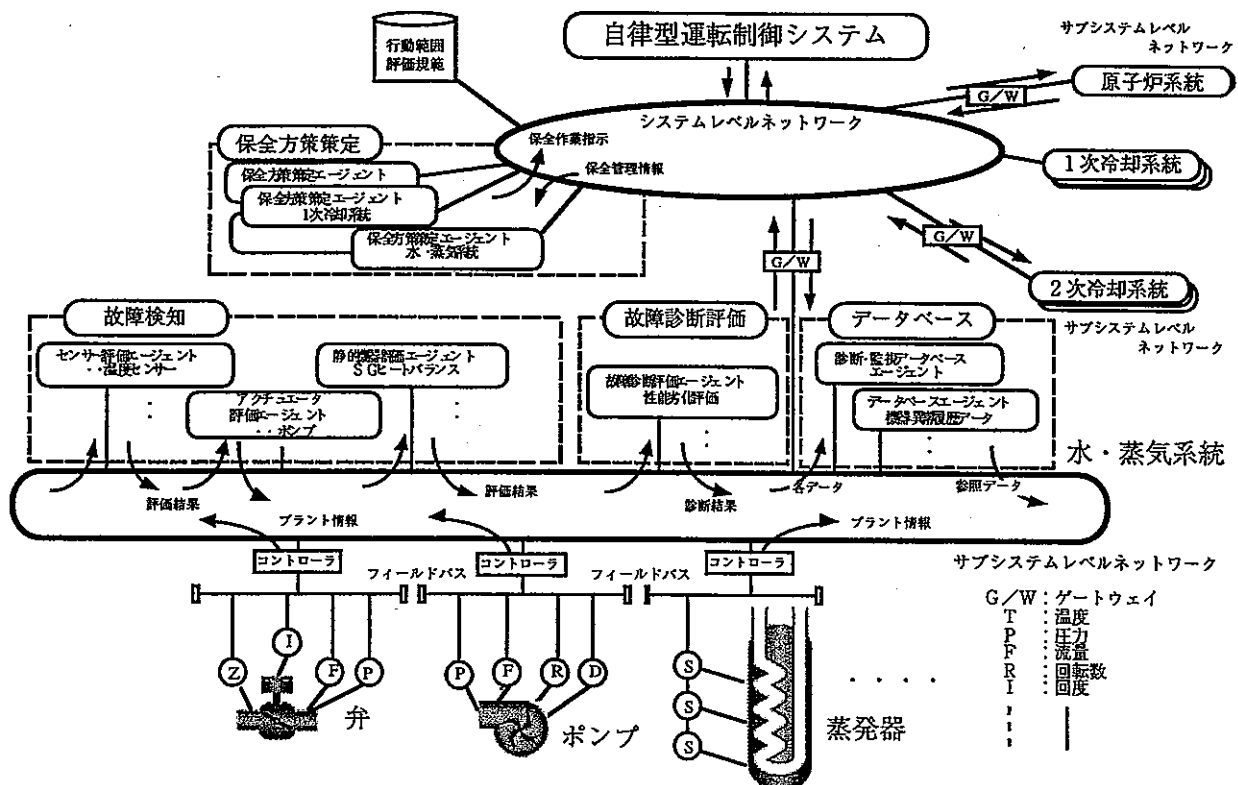


図3 システム構成

2. 2 エージェント構成

故障検知・故障診断評価システム開発のケーススタディーとして、異常診断等の情報源となるプラント情報の入力値の正確さを検査するセンサーレベルでのヴァリデーション機能を取り上げ、FBRプラントの蒸発器回りの水・蒸気系統を対象として検討する。本システムは、各種センサーから構成されるデバイス系エージェント群、データの管理を実施する情報系エージェント群より構成される。デバイス系エージェントについては、対象とする系統内にある物理デバイス、すなわち各種センサー／アクチュエータ毎にエージェントを設定した。それらの各エージェントは、自センサー信号もしくは自アクチュエータの特性に限定した範囲でプロセス特性を理解することができるように設計する。情報系エージェントは、異常診断や保全ロボット群とのインタフェース等を司る機構として設計した。本システムでは、上述したように従来のソフトウェアのように階層的なシステム構成ではない。よって、エージェントを管理するような機構は設けず、各エージェントはそれぞれが対等で、自由にデータ交換し合うことにより、各エージェント間を結合する。これらの分散協調の機能により、故障検知・故障診断評価システムは以下の5種類のエージェントを用いて開発した。

デバイス系エージェント	：各種センサーエージェント 各種アクチュエータエージェント
情報系エージェント	：異常診断エージェント ロボット動作管理エージェント 共通データ管理エージェント

デバイス系エージェントは、自身が観測するデータ（温度、圧力値など）を周期的に取り入れて評価するとともに、自身が有する複数の物理モデルに基づく評価式を用いて評価を行う。観測データと評価式に必要なデータは、情報系エージェントである共通データ管理エージェントから周期的に取得する。共通データ管理の役割は、各種センサーやアクチュエータが自身の評価式に必要なデータを取り込む状況をエミュレートすることであり、各エージェント独自のタイミング（周期）で共通データ管理エージェントに必要な情報を送信するよう依頼する。

情報系エージェントは、デバイス系エージェントからの情報をもとにプラントの異常診断を行ったり、上記のデバイス動作状況をエミュレートしたり、保全ロボット群への保全指令をエミュレートする。従って、これら情報系エージェント機能は、完全な分散協調手法の性質からいえば、各デバイス系エージェントに分散配置されているべきものだが、人間がシステムの状態を総覧できることが望ましいので情報系エージェントを設けることとした。

以下に各エージェントの機能概要を示す。

① センサーエージェント

計測値と、他エージェントが出力した計測値／推定値を用いて算出した自センサーの推定値を比較し、一致度をファジイロジックに従って評価して、推定値グ

レードを算出するエージェントである。本エージェントは、一定時間間隔で共通データ管理エージェントに対してデータ収集要求を行い、必要データの送付を受ける。また、入手したデータを使用して推定値計算と独立/従属判定データ計算を行う。さらに、算出した推定値と計測値を比較して計測値の評価を行い、計測値整合グレードの算出を行う。最後に、エージェント内で更新したデータについて、共通データ管理エージェントに更新を要求しデータを送付する（図4）。

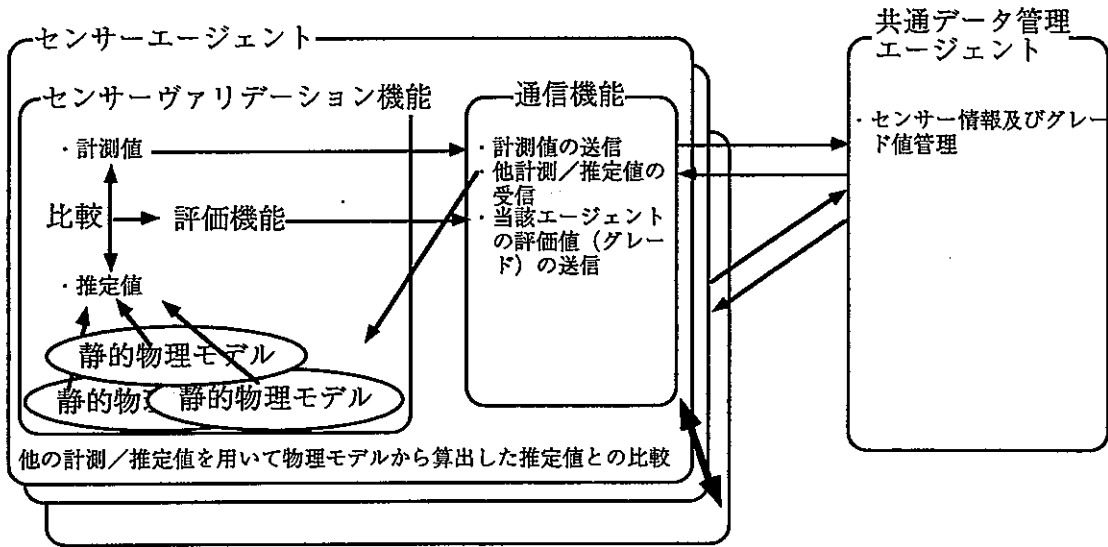


図4 センサーエージェント動作

②アクチュエータエージェント

機器特性としてのアクチュエータ（弁のCv特性値）の診断を行うエージェントである。アクチュエータ特性値を使用して計算される各センサー値の推定値とセンサー値の計測値をそれぞれ比較することで、機器特性の変化を判断し、推定値グレードを算出する。本エージェントは、一定時間間隔で共通データ管理エージェントに対してデータ収集要求を行い、必要データの送付を受ける。また、入手したデータを使用して、アクチュエータ特性値を使用して計算されるセンサー値についての推定値計算を行う。さらに、算出した推定値と当該センサーの計測値を比較して計測値の整合グレードを算出する。最後に、エージェント内で更新したデータについて、共通データ管理エージェントに更新を要求しデータを送付する。

③異常診断エージェント

センサー及びアクチュエータエージェントとは非同期/独立に動作して計測値同定グレード及びアクチュエータ特性値同定グレードを監視し、異常を検知した場合にはロボット動作管理エージェントに対して指示を与えるエージェントである。本エージェントは、共通データ管理エージェントに対して、定期的に計測値同定グレードの収集要求を出し、グレードデータを入手する。また、グレードが一定期間にわたって異常判定用の閾値を下回り続けた場合、当該センサーに異常が発生したものと判断する。さらに、異常発生を検知した場合、ロボット動作管

理エージェントに対して異常と判断したセンサー名を通知する。

④ロボット動作管理エージェント

故障が発生した時の保守員の代わりとなる自律ロボットへのインタフェースを受け持つエージェントである。本システムでは、異常診断エージェントによる異常センサー名が通知された場合、異常となったセンサー名等を他の計算機にデータを転送し、ロボットへデータを通知する。

⑤共通データ管理エージェント

各センサー信号を知的保安全管理システムに取り込むためのインタフェースエージェントである。本システムでは、センサー値の収集及び伝送を行う。本エージェントは、一定時間間隔で計測値データファイルの内容を読み込み、計測値データを更新するとともに、次章で述べるセンサー等の推定値算出数の各種変数の初期化を行う。また、各センサーエージェント、アクチュエータエージェント、異常診断エージェントからのデータ収集要求を受け、データを要求したエージェントに送付する。さらに、各センサーエージェント、アクチュエータエージェントからのデータ更新要求を受け、当該データを各エージェントから受け取って更新する役割を持つ。

2. 3 推定値算出手法検討

各センサーエージェントでは、他センサーの計測値／推定値を使用して自センサーの推定値の算定を行っている。推定値はモデルを使用して算出されたものであるが、1つのモデルが複数のエージェントで使用されている。同一のモデルに属する互いに従属な関数形を重複して用いても独立な推定値は算出できないため、推定値の独立／従属関係を判定することが必要となる。

例えば、3種類の物理モデルによって、温度：T、圧力：P、流量：G、弁開度：Zの各物理量の間以下に示す計9個の関数形が存在する場合について考える。

モデル1： $T = F_{11}(P, G)$ 、 $P = F_{12}(T, G)$ 、 $G = F_{13}(T, P)$

モデル2： $P = F_{21}(G, Z)$ 、 $G = F_{22}(P, Z)$ 、 $Z = F_{23}(P, G)$

モデル3： $T = F_{31}(G, Z)$ 、 $G = F_{32}(T, Z)$ 、 $Z = F_{33}(T, G)$

$F_{11} \sim F_{33}$ は関数形であり、 F_{1i} ($i=1 \sim 3$)、 F_{2i} ($i=1 \sim 3$)、 F_{3i} ($i=1 \sim 3$)はそれぞれ式を変形しただけなので互いに従属である。

この9個の関数形を使用して温度Tの推定値： T_j ($j=1 \sim$)を算出する。この場合は以下の5種類の推定値計算が考えられる。

$$T_1 = F_{11}(P, G)$$

$$T_2 = F_{31}(G, Z)$$

$$T_3 = F_{11}(F_{21}(G, Z), G)$$

$$T_4 = F_{11}(P, F_{32}(T, Z))$$

$$T_5 = F_{11}(F_{21}(G, Z), F_{32}(T, Z))$$

この5種類だけが独立であり、他は全てこの5種類のどれかに従属する。

例えば、 $T_6 = F_{11}(P, F_{22}(P, Z))$ というものを考えると、これは「計測

値」と「モデル1」と「モデル2」により算出した推定値であるが、この3者の組み合わせの計算は既にT3で行われている。ゆえに、T3が既に存在する場合に新たにT6の計算を行わないとする。

本システムは分散協調機構を採用するため、各エージェントは独立かつ非同期に動作する。そのため、計算順序やデータ更新順序は不定である。上記の例でいえば、T3の計算よりもT6の計算が先に行われている場合がありうるが、その場合は逆にT3の計算を行わないとする。

さらに、この例ではモデル3つにを仮定したが、実際にはエージェントやモデルの追加によって、独立な推定値計算の数は変化する。本システムでは、組み合わせや個数を規定しない自由度のある設計とした。また、本報告では分散協調システムの成立性の検討を主目的とし、使用するモデルは静的なモデルとする。プラント機器の状態推定に蒸発器等、あるいは弁の静的定量モデルを扱うものとして、センサーヴァリデーション及びアクチュエータ特性診断を行った。この場合、定量的に計算されたシステム状態が正常か否か判定する際の閾値に曖昧性が入る余地がある。特に、計測値に雑音がある場合には計測値自体に曖昧性があり、計測値の関係も曖昧関係として与えられる。そこで、定量的に計算された状態の判定は、それらの曖昧性を考慮できるよう、ファジィアルゴリズムを用いて行う。詳細は後述する推定値グレード算出法にて述べる。センサー故障及びアクチュエータの特性変化の診断を目的とした静的定量モデルを用いる本診断の基本処理フローは図4に示す通りである。

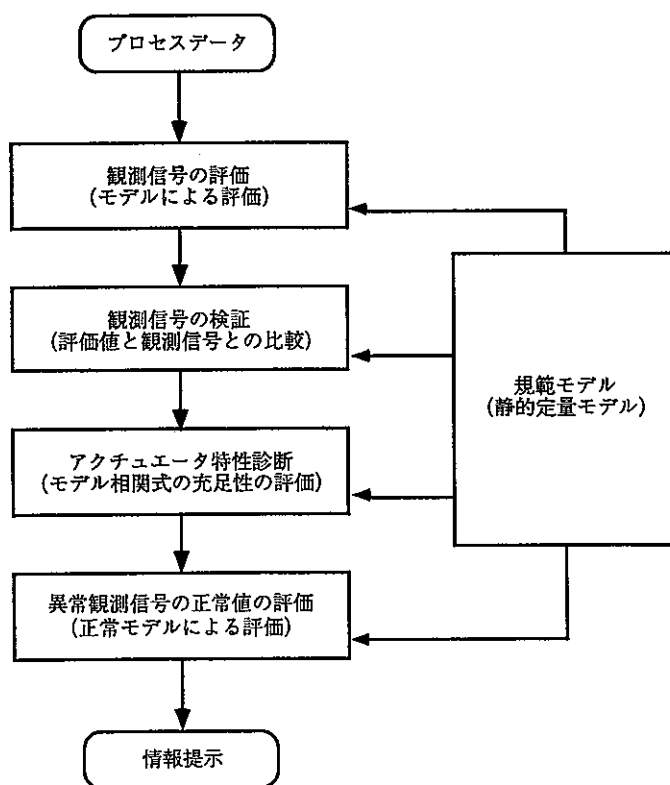


図5 故障検知システム処理フロー

2. 4 非同期放送通信

各エージェントは他エージェントからの観測データや評価結果を随時受信し、それら情報を基に所有する物理モデルなどにより自分が観測した値の検証を行う。検証のための具体的な処理機能は各エージェント毎に定義され、必要に応じて起動される。すなわち、各エージェントは他のエージェントの動作を直接意識することなく、エージェントの推定値算出に必要なデータがそろえば自律的に処理を開始する。また、センサーエージェントは複数の物理モデルを有することができ、データがそろえば該当するモデルを処理する機能が自律的に起動すると同時に、自身のモデルによる推定値を全エージェントに放送する。このように、各エージェントは他のエージェントの存在を意識することなく、自身が得た情報（計測値データや推定値）を不特定多数のエージェント群に放送すると同時に、自身の物理モデルに必要なデータがそろった時点で処理を行うことで、間接的に他エージェントと協調的に相互作用する。

本システムにおいては、分散配置された各センサー／アクチュエータエージェントは独自のタイミングで互いにデータを送信することにより協調する。すなわち、分散協調手法の特徴を最大限に活用できる非同期放送通信方式を用いた上で、システムの自律性について検討する。非同期通信におけるシステムの成立性検討に主眼を置き、本報告では静的物理モデルによる試験を行うに留める。

3. 故障検知及び故障診断評価システム試作

故障検知・故障診断評価システムの問題に対し検討を行った。センサー故障に対して検討した点は物理モデルの多重化、非同期放送通信の採用、ファジィアルゴリズムによるノイズによる誤診断の回避が挙げられる。機器の故障に対して検討した点は、機器の状態と物理モデルが乖離した場合に異常箇所の範囲をある程度特定することである。なぜなら、詳細な診断は不可能ではあるが、機器及びセンサーの正常部分の確認は可能であるからである。また、機器の故障診断においては、一つの診断システムによって結論を出すのではなく、他の診断システムとの融合、すなわち診断する対象システムの範囲や出力する診断結果の詳細度の違う診断システムから合意形成を行うことにより信頼性・安全性の向上を図ることが考えられる。ここでは、センサー故障における異常検知について試作システムを構築する。

本システム試作においては、診断情報対象とする各センサー・アクチュエータ毎にエージェントを設定し、そららの各エージェントは、自センサー信号もしくは自アクチュエータの特性に限定した範囲でプロセス特性を理解することができるようにする。全エージェントを管理するような機構は存在せず、各エージェントはそれぞれが対等で、データ交換を非同期放送通信を用いて行う。また、システムの成立性を試作システムにて検証するため、対象範囲をFBRプラントの水・蒸気系の一部を対象として実施し、プロセス特性を理解するための物理モデルとして静的モデルを採用した。

3. 1 試作対象範囲

試作システムは、代表的なFBRプラントを参照プラントとして、過熱器バイパス運転時のセンサー値の正常/異常の診断及びアクチュエータ特性値の変化判定を行えるように実施する。なお、対象とする機器は図5に示すように、「蒸発器入口/出口→気水分離器入口/出口→フラッシュタンク」という水・蒸気系の機器とそれに関連するセンサー及びアクチュエータとする。

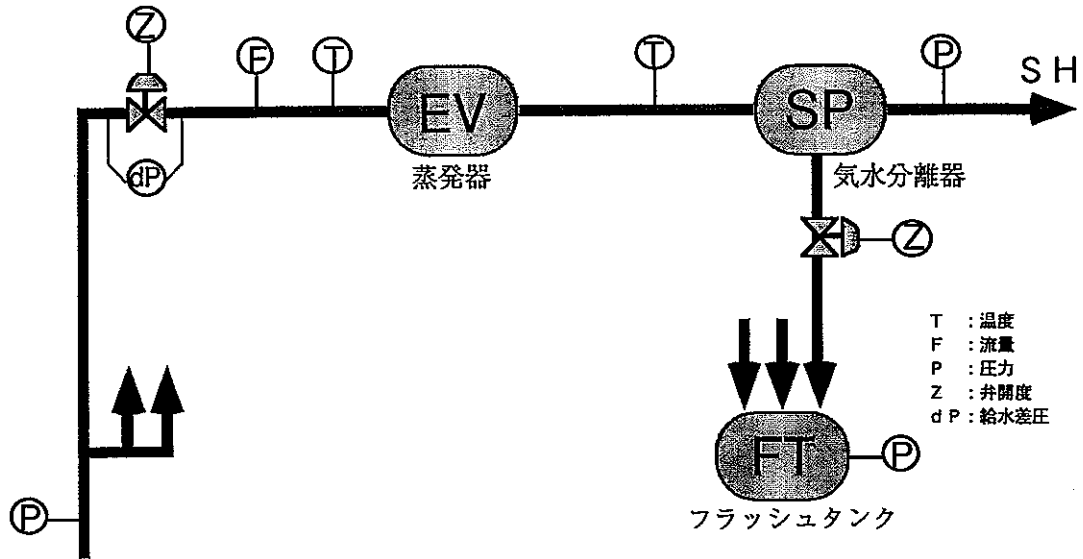


図6 試作対象範囲

3. 2 試作モデル概要

「蒸発器入口/出口→気水分離器入口/出口→フラッシュタンク」の系統におけるセンサーヴァリデーシオンに必要なセンサー及びアクチュエータは11個であり、エージェントが使用する物理モデルの関係式は5種類/計8個である。

これらのモデル及びエージェントの関係を図6に示し、例として、気水分離器ドレン弁開度センサーエージェントの故障検知及び気水分離器ドレン弁アクチュエータ（弁のCv特性値）の機器特性診断について説明する。

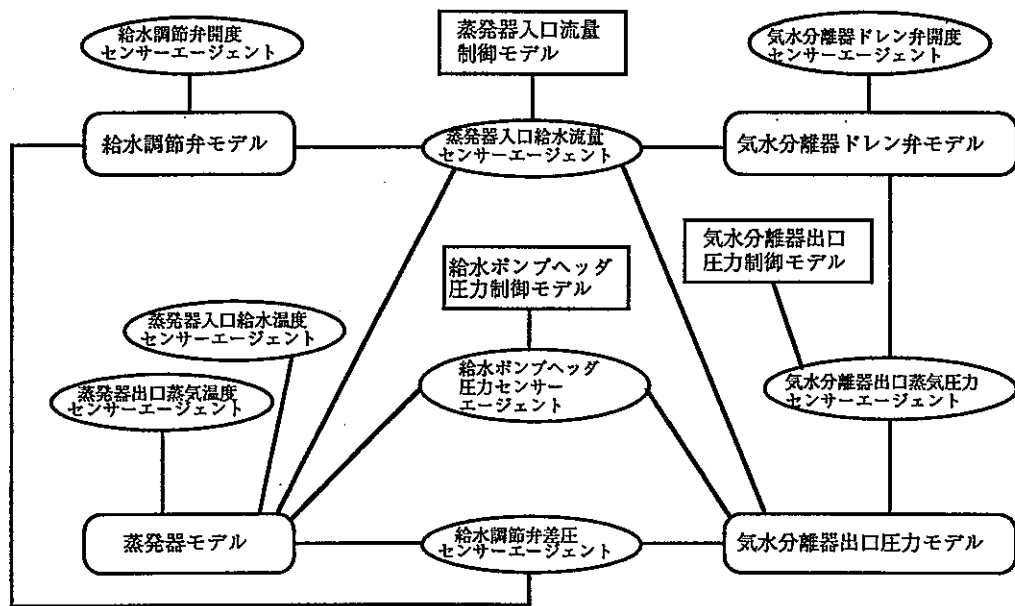


図7 エージェント及び物理モデルの関係

①気水分離器ドレン弁開度センサーエージェント

気水分離器ドレン弁モデルを使用し、自センサーの計測値と他センサーエージェント (Gfd, Psp) の計測値または推定値を用いて算出した自センサー値の推定値を比較する。

②気水分離器ドレン弁アクチュエータエージェント

気水分離器ドレン弁モデルを使用し、自センサーの計測値とアクチュエータ特性値を使用して計算される他センサーエージェント (Gfd, Psp, Zsp) の推定値と比較することで機器特性の変化を判断する。

以下に試作するセンサーエージェント、アクチュエータエージェント及び物理モデルを示す。また、添付資料に各エージェント及び物理モデルの説明を記述する。

・センサー及びアクチュエータエージェント

- 給水ポンプ出口ヘッド圧力センサーエージェント : P h d
- 給水調節弁差圧センサーエージェント : D p
- 給水調節弁開度センサーエージェント : Z f d
- 給水調節弁アクチュエータエージェント : V f d
- 蒸発器給水流量センサーエージェント : G f d
- 蒸発器給水温度センサーエージェント : T f d
- 蒸発器出口蒸気温度センサーエージェント : T s t
- 気水分離器出口蒸気圧力センサーエージェント : P s p
- 気水分離器ドレン弁開度センサーエージェント : Z s p
- 気水分離器ドレン弁アクチュエータエージェント : V s p
- フラッシュタンク圧力センサーエージェント : P f t

- ・物理モデル

- 給水調節弁モデル

- 気水分離器ドレン弁モデル

- 蒸発器モデル

- 気水分離器出口圧力モデル

- 制御モデル：給水ポンプ出口ヘッダ圧力制御モデル

- 蒸発器給水流量制御モデル

- 気水分離器出口蒸気圧力制御モデル

- フラッシュタンク圧力制御モデル

3. 3 推定値算出法

3. 3. 1 センサーエージェント推定値算出法

前記した推定値算出法を踏まえ試作システムでは推定値計算の独立／従属判定を以下のようにして実施する。試作システムでは多数のセンサー、アクチュエータとそれに対応した物理モデルが存在する。各モデルに固有のID番号を割当てることによりシステム化を行う。例えば、モデル1に1、モデル2に2、モデル3には3を割当てる。

計測値と推定値を格納する変数を配列で定義する。この場合は、 $T(i)$ とする。 $i = 1$ には計測値を格納し、 $i \geq 2$ には推定値を格納する。

$T(i)$ と同時に、 $LT(i)$ 、 $KT(i)$ 、 $GT(i)$ 、という3種類の配列変数と、 MT という1種類のスカラー変数を定義する。

$LT(i)$ は、センサーの種別を格納する変数である。試作システムでは、各計測値に対してセンサーの所属する冷却ループを示すID番号を添付する。具体的には、1次冷却ループのセンサーには1、2次冷却ループのセンサーには2、そして水・蒸気ループのセンサーには3をそれぞれ設定する。 $LT(i)$ には、当該推定値計算に用いたセンサー種別を格納する。

$KT(i)$ は、モデルの種別を格納する変数である。 $KT(i)$ には、当該推定値計算に用いたモデル種別を格納する。

$GT(i)$ は、グレード値を格納する変数である。計測値 ($i=1$) は、推定値との比較を行うことによって、後述する推定値グレードの算出方法でグレード値が計算される。推定値 ($i \geq 2$) は、計算に使用した計測値のグレードのうち最も小さい値をグレード値として持つ。 $GT(i)$ には、計算に使用した計測値／推定値のグレードの中の最小値が格納される。

MT は、推定値の計算個数を格納する変数である。新たに計算した推定値が既存のものと独立であると判断された場合、 MT はカウントアップされ、上記の各配列変数の $i = MT$ 番目に新規に計算したデータが格納される。

新たに推定値計算を行う場合、センサー種別とモデル種別の計算を行い、得られた結果がこれまでに行われたどの推定値計算の結果にも従属しない場合は新規データとして登録・格納を行い、もしも既存の推定値に従属するものである場合

は結果を破棄する。この判定によって、従属する推定値計算を排除することができる。

3. 3. 2 センサー値の推定値算出計算の打ち切り精度

各センサーエージェントにおいて、推定値を算出するための使用モデル数が多い場合は、独立な計測値／推定値の組み合わせ数も多くなるので、推定値算出計算回数が膨大なものとなる可能性がある。将来的に計測値が定期的に更新されることを仮定した場合、更新間隔内で推定値算出計算が終了していることが望ましい。

また、モデルには蒸気表の参照部分や簡易近似計算部分があるため、多くのモデルを使用した場合には計算精度が悪化する可能性があるものと推測される。

以上の理由から、試作システムではモデルの使用回数に上限を設け、それを越える推定値計算は行わないこととする。このことによって、推定値算出計算回数が制限され、計測値データ更新間隔内で推定値算出計算が終了すると予想される。

3. 3. 3 アクチュエータ特性値の推定値算出法

アクチュエータ特性値の推定値は、センサー値と異なり以下のような方法で算出する。

以下のような関数形を持ったアクチュエータモデルを仮定する。

$$G = F41 (P, Z)、P = F42 (G, Z)、Z = F43 (G, P)$$

ここで、G：流量、P：圧力、Z：弁開度とする。

この時、以下のような計測値と計測値を用いて算出した推定値の比較を実施する。

$$G (1) \doteq F41 (P (1), Z (1))$$

$$P (1) \doteq F42 (G (1), Z (1))$$

$$Z (1) \doteq F43 (G (1), P (1))$$

アクチュエータ値が正常であるならば、つまり機器特性が変化していないならば、比較した両辺はほぼ等しくなるはずである。もしもアクチュエータ値が変化しているならば、比較結果はある有意な差を生じるはずである。

差と計測値の関係から各比較結果についてグレード値を算出し、そのグレード値の中の最小値をアクチュエータ特性値の推定値グレード変数に格納する。

3. 4 推定値グレード算出法

3. 4. 1 センサー値の推定値グレード算出法

センサー故障等により計測値が異常となった場合、その計測値と推定値とは偶然の一致以外、本来一致することはない。よって、推定値のいずれか一つが計測値と一致した場合、その観測信号は正常とみなすことができる。しかしながら、一般的にセンサー信号にはノイズ信号を含むため、正常か異常かを一義的に判定することは難しく、一致の程度を考慮した判定を行う必要がある。そのため、判

定のロジックにはファジロジックを用いる。具体的には、以下のように行うものとする。

① 1次推定値（1つの物理モデル式を用いて評価した値）による判定

ここでは、「1次推定値が計測値に等しい」という状態をメンバーシップ関数により定義し、メンバーシップ関数により定まるグレードで一致しているとみなす。例えば、「T1はTに等しい」という状態のメンバーシップ関数が図7のように定義され、T1とTとの偏差が+5であったとする。

この場合、推定値T1は、グレード0.5で観測信号Tに一致しているとみなす。

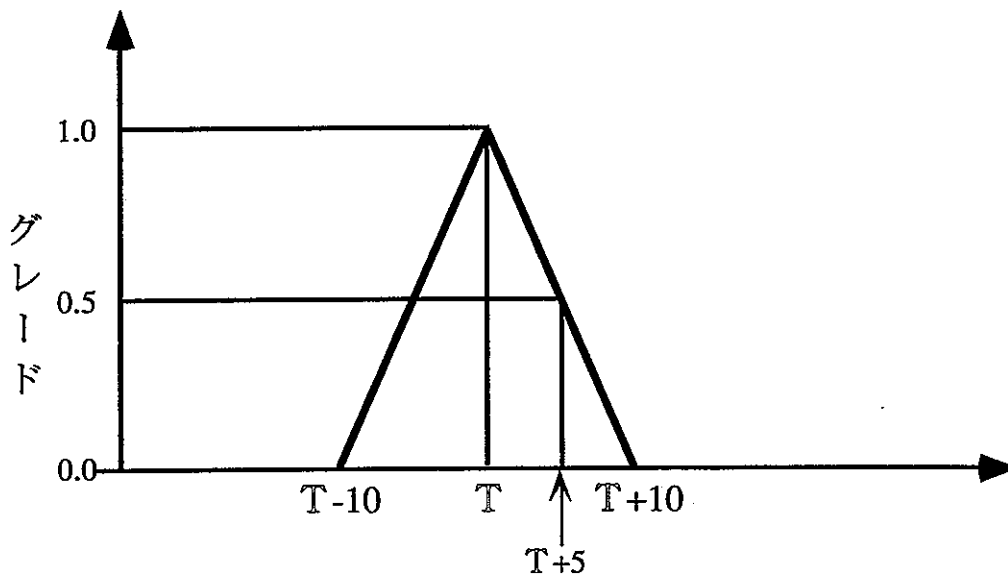


図8 センサーエージェントメンバーシップ関数

② N次推定値（N個の物理モデル式を用いて評価した値）による判定（N=2以上）

N次推定値で用いるN次未満の推定値の判定結果をも含め、ファジロジックにより以下のように判定する。

「N次推定値で用いる全てのN次未満の推定値が観測信号に等しく」かつ「N次推定値が観測信号に等しい」場合「N次推定値は観測信号に一致」

なお、「N次推定値が観測信号に等しい」という状態は、「1次推定値が観測信号に等しい」という状態を表すメンバーシップ関数と同様に定義される。例えば、2次推定値T2が0.6のグレードで観測信号Tに等しく、T2で用いている1次推定値f21(N, F) (=P2)が0.7のグレードで観測信号Pに等しい場合、それらのグレードのMIN値をとり、推定値T2は0.6のグレードで観測信号Tに一致しているとみなす。

③ 観測信号の検証

全ての推定値の判定結果に基づき、以下に示すファジロジックにより観測信号が正常か異常かを判定する。

「推定値のいずれかが観測信号に等しい」場合「観測信号は正常」

つまり、T 1が0.5のグレードで観測信号Tに一致し、T 2が0.6のグレードで観測信号Tに一致し、T 3が0.4のグレードで観測信号Tに一致し、T 4が0.7のグレードで観測信号Tに一致し、T 5が0.45のグレードで観測信号Tに一致する場合、それらのグレードのMAX値をとり、観測信号Tはグレード0.7で正常であるとする。

3. 4. 2 アクチュエータ特性値の推定値グレード算出法

物理モデル式に記述されたアクチュエータの特性が変化していなければ、正常な観測信号を用いて評価した物理モデル式の関係は満足する筈である。よって、正常と判定された観測信号を用いて評価した物理モデル式が、その関係を満足していない場合、その物理モデル式に記述されたアクチュエータの特性は変化しているとみなせる。具体的には、以下のファジイロジックによりアクチュエータの特性変化を判定するものとする。

「ある物理モデル式に用いられている全ての観測信号が正常」かつ「その物理モデル式の関係が満足しない」場合「その物理モデル式に記述されたアクチュエータの特性は変化している」

なお、「物理モデル式関係を満足しない」という状態も、メンバーシップ関数にて定義されるものとする。

また、アクチュエータの特性が変化していないことは、以下のファジイロジックにより判定できる。

「ある物理モデル式に用いられている全ての観測信号が正常」かつ「その物理モデル式関係が満足している」場合「その物理モデル式に記述されたアクチュエータの特性は変化していない」

なお、「物理モデル式関係を満足している」という状態も、メンバーシップ関数にて定義されるものとする。

3. 5 試作システム

本システムは、FBRプラントの水・蒸気系統の一部を対象とし、またプラント状態としては過熱器バイパス運転時を想定して故障検知・故障診断評価が行えるシステムとして開発した。その機能検証試験として、蒸発器出口温度センサー故障と、給水調節弁開度センサー故障について実施した。

その結果、蒸発器出口温度センサー故障を模擬した場合は、他エージェント間の協調により、変更を加えた蒸発器出口温度センサーエージェントだけが正常の判定グレードが0、よって蒸発器出口温度センサーの故障を確認した(図8)。蒸発器出口温度センサーの推定値は他の健全センサー値と多重化された物理モデルにより、求めることが可能である。また、故障の度合いをファジイアルゴリズムを用いて1から0の間で正常のグレードを判定できるように開発し、故障による各エージェントの出力するデータの信憑性を確かめることを可能とした。故障判定後は、故障診断エージェントが起動し、故障を自律ロボットへの通知する。

故障診断	
OBJNAME fmht CYCLE 10	
給水調節弁差圧センサー (Dp)	0.992068
蒸発器給水流量センサー (Gfd)	1.000000
原子炉給水ポンプヘッド圧力センサー (Phd)	1.000000
気水分離器出口蒸気圧力センサー (Psp)	1.000000
フラッシュタンク器内圧力センサー (Pft)	1.000000
蒸発器入口給水温度センサー (Tfd)	0.999999
蒸発器出口蒸気温度センサー (Tst)	0.000000
給水調節弁開度センサー (Zfd)	0.992075
気水分離器ドレン弁開度センサー (Zsp)	0.998328
給水調節弁アクチュエータ (Vfd)	0.992068
気水分離器ドレン弁アクチュエータ (Vsp)	0.996657

図9 蒸発器出口蒸気温度センサー故障

給水調節弁開度センサー故障を模擬した場合は、給水流量調節弁開度センサーエージェント以外に給水流量調節弁アクチュエータエージェント及び給水調節弁差圧センサーエージェントの正常グレードが0となる結果となる（図9）。これは、給水調節弁の特性（弁のCV特性）及び給水調節弁差圧の評価にあたっては、本試作システムでは必ず給水調節弁開度を用いているためであり、センサー信号あるいは機器特性間を記述する物理モデルが冗長化されていないことに起因する。このように、適切な診断がなされていない場合があるが、これは、分散協調機能に起因するものではなく、各エージェント間の情報交換機能、分散化された評価機能については良好な結果を得ることができた。

故障診断	
給水調節弁差圧センサー (Dp)	0.000000
蒸発器給水流量センサー (Gfd)	1.000000
原子炉給水ポンプヘッド圧力センサー (Phd)	1.000000
気水分離器出口蒸気圧力センサー (Psp)	1.000000
フラッシュタンク器内圧力センサー (Pft)	1.000000
蒸発器入口給水温度センサー (Tfd)	0.999999
蒸発器出口蒸気温度センサー (Tst)	0.999988
給水調節弁開度センサー (Zfd)	0.000000
気水分離器ドレン弁開度センサー (Zsp)	0.998328
給水調節弁アクチュエータ (Vfd)	0.000000
気水分離器ドレン弁アクチュエータ (Vsp)	0.996657

図10 給水調節弁開度センサー故障

給水調節弁開度センサー故障動作の表示例として図10-1に故障直後の故障診断システムの評価中のシステム表示画面、図10-2に故障診断評価後のシステム表示画面を示す。図中では、(1)共通エリア、(2)故障診断、(3)ロボット通知、(4)MMI、(5)センサー及びアクチュエータエージェント（ここでは、給水調節弁開度センサー）のウィンドウから構成され、故障検知・故障診断評価を行うとする。上述した各表示画面について説明すると、以下のように示すことができる。

故障診断ウィンドウ(2)では共通エリアウィンドウ(1)において送受信されるデータにより、周期的に診断評価を行う。あるセンサーに故障が起きた場合には、故障診断中の正常のグレード値が低くなり、0の値を数回繰り返して出力した場合に故障と判定し、当該エージェントの故障ウィンドウを表示（図8-2、中央）し、結果をロボット通知ウィンドウ(3)に表示する。なお、故障発生、故障診断後の当該エージェントの削除及びシステムの起動・終了はMMIウィンドウ(4)にて実施する。

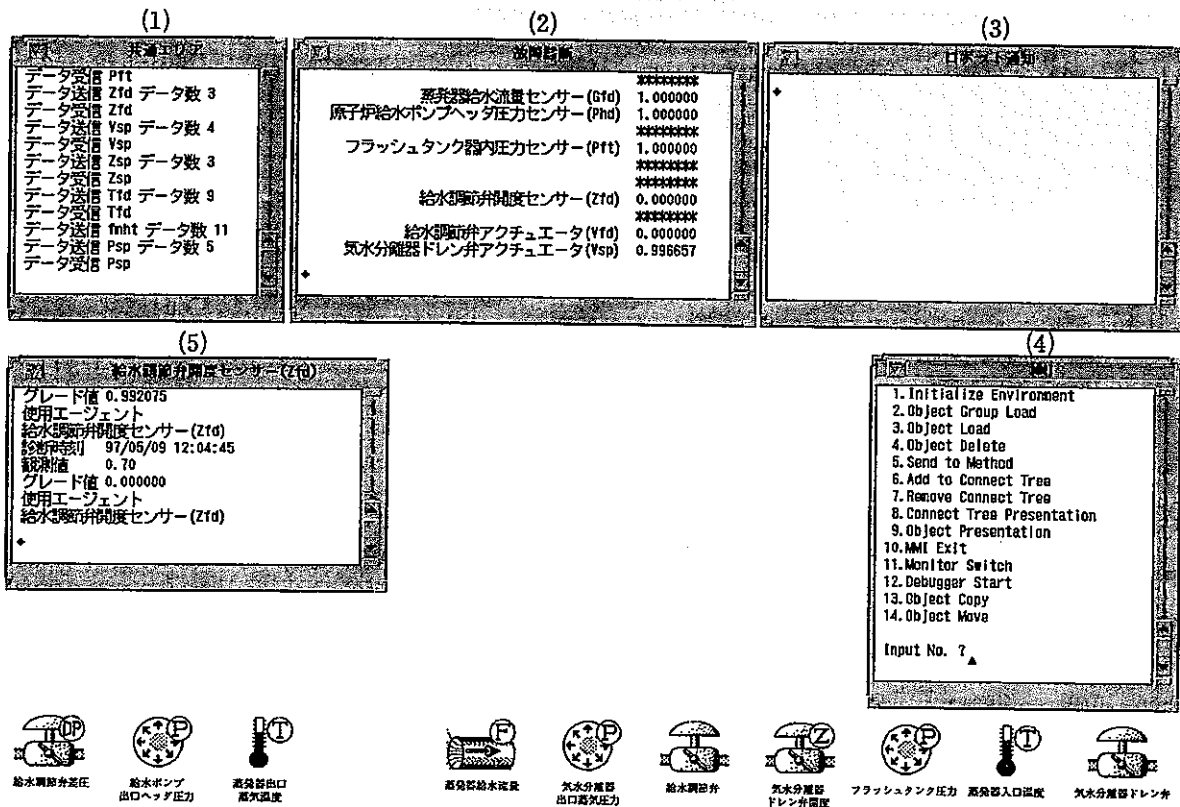


図11-1 システム表示画面（故障検知前）

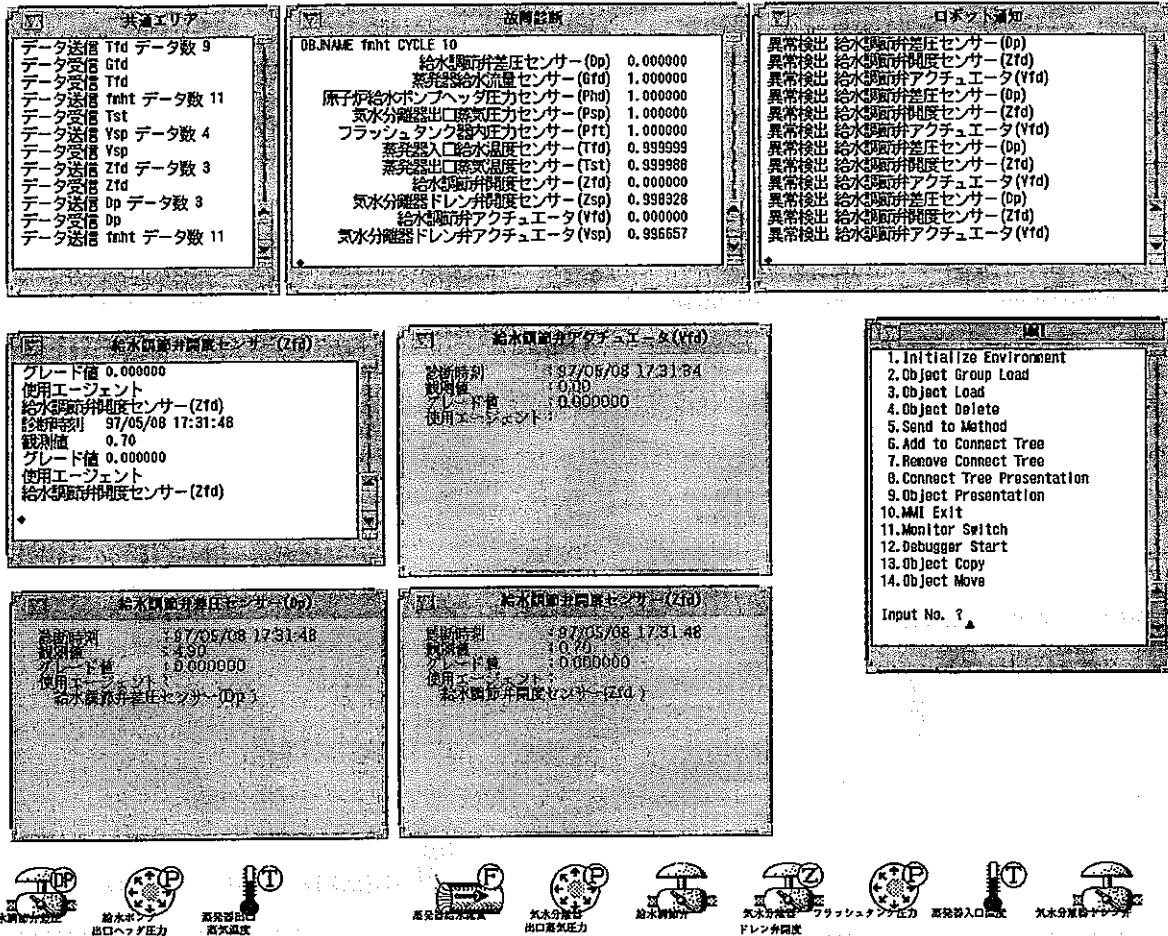


図11-2 システム表示画面 (故障検知後)

4. 結言

本報告では、知的保安全管理システムの概念検討を基に、知的保安全管理システムの分散協調手法による故障検知・故障診断評価システムの検討及び試作システムを用いて性能を評価した。

センサー故障やプラント異常における現状の問題点を2. に述べたように整理し、その解決のため、プラント機器に設置された各センサー値からソフトウェアを用いて相互評価させる手法を採用した。この手法に基づくシステムにより、従来よりも頑健な診断システムを構築できる見通しを得た。本システムでは、各センサーは自センサー値と他センサーからの信号値をもとに計算された推定値を随時比較することにより、センサー故障、弁等の動作機器の劣化状況を診断する。緊急かつ情報が不完全な状況下において、運転員に異常原因を詳細かつ信頼性高く求めることは非常に困難である。従って、情報が不完全な状況下においては、プラントの運転に重要なパラメータや物理量の値が推定値ではあるが計算機によってもたらされることは非常に有用である。さらに、センサー値、推定値の相対的な関係をファジィアルゴリズムを用いて表示し、センサー故障の状態量を示して情報の可視化を行い、運転員における異常時の支援、故障の早期検出、さらには、プラントの信頼性と制御システムの安全性を向上させる見通しを得た。

今後は、動的モデルを採用した分散協調機構を検討するとともに、プラント機器が故障した場合に行う保全方策について分散協調手法を採用し、プラントの配管、機器等に配置されたエージェント及びその上位または下位に配置されたエージェントとの情報交換により、プラントを停止せずに補修が行えるかどうかを自律的に判断する保全方策策定機構について検討する予定である。

5. 謝辞

本システムの試作に当たり、通信方式検討及び分散システム構成において協力して頂いた原子力システム株式会社瀬谷義一氏、山本裕史氏の両氏に感謝の意を表す。

6. 参考文献

- [1] 小澤健二、"知的運転制御システムの開発"、原子力工業、Vol.42-No.5(1996)
- [2] 須田一則、米川強、吉川信治、小澤健二、"知的保全管理システムの概念構築"、PNC TN9410 97-049(1997)
- [3] 成田誠之助、"分散制御システムの構成"、電子工業月報、Vol.22,No.10, pp.56-81(1980)
- [4] 関俊文他、"オブジェクト指向分散システムにおける放送待機冗長処理方式"、T.IEE Japan, Vol.114-D, No.3(1994)

添付資料

1. 故障検知・故障診断評価システムのモデル概要

本システムでは、過熱器バイパス運転時のセンサーヴァリデーションを想定して作成した。そのため、「蒸発器入口／出口→気水分離器入口／出口→フラッシュタンク」というルートの水／蒸気配管システムを診断対象とする。

試作システムで使用したモデルは以下の5種類、計8個である。

- ・ 給水調節弁モデル
- ・ 気水分離器ドレン弁モデル
- ・ 蒸発器モデル
- ・ 気水分離器出口蒸気圧力モデル
- ・ 制御モデル（給水ポンプ出口ヘッド圧力制御モデル
蒸発器給水流量制御モデル
気水分離器出口蒸気圧力制御モデル
フラッシュタンク圧力制御モデル）

次項から各モデルの仕様を述べる。

①給水調節弁モデル

給水調節弁を通過する給水は非圧縮性の強制流であるので、給水調節弁の通過流量、弁差圧及びC v特性値の間には以下に示すような関係が成立する。

$$Dp = Cvfd (Zfd) * Gfd^2$$

ここで、

Dp : 給水調節弁差圧 (弁での圧力損出)

Cvfd (Zfd) : 給水調節弁のC v特性値を算出する関数

試作システムでは弁開度とC v特性値は比例関係にあるものとし、以下の関係式を使用する。

$$Cvfd (Z) = Afd * Zfd$$

ここで、

Afd : 比例定数

Zfd : 給水調節弁開度

Gfd : 蒸発器給水流量

以上の関係式を変形することにより、各パラメータを導出する。その関数形を以下に示す。

$$\begin{aligned} Dp &= Afd * Zfd * Gfd^2 \\ &= DP101 (Gfd, Zfd) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Zfd &= Dp / Gfd^2 / Afd \\ &= ZFD101 (Gfd, Dp) \end{aligned}$$

②気水分離器ドレン弁モデル

過熱器バイパス運転時には、蒸発器出口の流体は液層単層流もしくは気液二層流となっている。この場合、気水分離器ドレン弁を通過する液流は、①で述べた非圧縮性流体の強制流ではなく、流出口を持つ容器からの流出流となる。流出口によ圧がかかっている場合の予圧、流出弁C_v特性及び流出流量の関係から以下の関係式が導ける。

$$Gfd = Cvsp (Zsp) * Psp^{0.5}$$

ここで、

Gfd : 気水分離器ドレン流量 (本システムでは蒸発器給水流量と同値)

Cvsp (Zsp) : 気水分離器ドレン弁のC_v特性値を算出する関数形

試作システムでは弁開度とC_v特性値は比例関係にあるものとし、以下の関係式を使用する。

$$Cvsp (Zsp) = Asp * Zsp$$

ここで、

Asp : 比例定数

Zsp : 気水分離器ドレン弁開度

Psp : 気水分離器出口蒸気圧力

以上の関係式ををを变形することにより、気水分離器ドレン弁開度を導出する。その関数形を以下に示す。

$$\begin{aligned} Zsp &= Gfd / Psp^{0.5} / Asp \\ &= ZSP101 (Gfd, Psp) \end{aligned}$$

③蒸発器モデル

蒸発器内の熱的状态は対向流型のモデルにて表せるものとし、蒸発器の各部の温度の関係式を導出する。

蒸発器内の熱収支は以下の式により表される。

$$C_n G_n \frac{dT_n}{dx} = AU (T_s - T_n) \quad , \quad G_s \frac{dH_s}{dx} = AU (T_s - T_n)$$

ここで、

- C : 冷却材比熱
- H : 冷却材エンタルピー
- G : 冷却材質量流量
- M : 冷却材質量
- A : 伝熱面積
- T : 冷却材温度
- U : 熱通過率
- P : 圧力

添字

- n : ナトリウム系側
- s : 水・蒸気系側
- in : 入口
- out : 出口

上記の方程式を凝縮水領域、飽和領域及び過熱領域に分けて解くものとする。

<凝縮水領域、過熱領域>

$$G_s \frac{dH_s}{dx} = AU((k_0 + k_1 P_s + k_3 P_s^2) + (k_2 + k_5 P_s) H_s + k_4 H_s^2 - T_n)$$

$$\text{仮定 : } T_s = k_0 + k_1 P_s + k_2 H_s + k_3 P_s^2 + k_4 H_s^2 + k_5 P_s H_s$$

<飽和領域>

$$\frac{dH_s}{dx} = \frac{AU (T_s - T_{neo})}{G_s} + \frac{H_{sew}}{C_n G_n} - \frac{AU}{C_n G_n} H_s$$

H_{sew} : 飽和水エンタルピー、T_{neo} : 飽和領域出口ナトリウム温度

蒸発器内の熱収支より、凝縮水領域、飽和領域及び過熱領域のそれぞれの軸方向の長さを求め、その和が正規化された値になるように収束演算を行うことで、各パラメータを導出することができる。その関数形を以下に示す。

$$T_{nin} = TNEI7 (T_{nout}, T_{sin}, G_n, G_s, P_w, P_s)$$

$$T_{nout} = TNEO7 (T_{nin}, T_{sin}, G_n, G_s, P_w, P_s)$$

$$T_{sin} = TSEI7 (T_{nin}, T_{nout}, G_n, G_s, P_w, P_s)$$

$$G_n = GNE7 (T_{nin}, T_{nout}, T_{si}, G_s, P_w, P_s)$$

$$G_s = GSE7 (T_{nin}, T_{nout}, T_{si}, G_n, P_w, P_s)$$

ここで、

P_w : 蒸発器入口給水圧力

本システムでは、以下の計算式を用いて算出する。

$$P_w = P_{hd} - D_p$$

ここで、

P_{hd} : 給水ポンプ出口ヘッド圧力

D_p : 給水調節弁差圧

P_s : 気水分離器出口蒸気圧力

また、蒸発器全体の熱バランスより、 T_{ni} 、 T_{no} 、 T_{fd} 、 G_{ne} 、 G_{fd} 及び蒸発器出口蒸気温度 T_{st} は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} T_{ni} &= [G_{fd} * \{ HGPT (P_{sp}, T_{st}) - HLPT (P_{fd}, T_{fd}) \} / (C_n * G_{ne})] + T_{no} \\ &= TNEI8 (T_{no}, T_{fd}, T_{st}, G_{ne}, G_{fd}, P_{fd}, P_{sp}) \end{aligned}$$

ここで、

C_n : 冷却材 (Na) 比熱

HLPT : 圧力及び温度から蒸気エンタルピを求める関数形

HGPT : 圧力及び温度から水のエンタルピを求める関数形

$$\begin{aligned} T_{no} &= T_{ni} - [G_{fd} * \{ HGPT (P_{sp}, T_{st}) - HLPT (P_{fd}, T_{fd}) \} / (C_n * G_{ne})] \\ &= TNEO8 (T_{ni}, T_{no}, T_{st}, G_{ne}, G_{fd}, P_{fd}, P_{sp}) \end{aligned}$$

$$T_{fd} = TLPH (P_{fd}, H_{fd})$$

$$= TSEI8 (T_{ni}, T_{no}, T_{st}, G_{ne}, G_{fd}, P_{fd}, P_{sp})$$

ここで、

HLPH : 圧力及びエンタルピから水の温度を求める関数形

H_{fd} : 蒸発器給水エンタルピ

$$= C_n * G_{ne} * (T_{ni} - T_{no}) / G_{fd} + HGPT (P_{sp}, T_{st})$$

$$\begin{aligned} Tst &= TGPH (Psp, Hst) \\ &= TSEO8 (Tni, Tno, Tfd, Gne, Gfd, Pfd, Psp) \end{aligned}$$

ここで、

TGPH : 圧力及びエンタルピから蒸気の温度を求める関数形

Hst : 蒸発器出口蒸気エンタルピ

$$= HLPT (Pfd, Tfd) - Cn * Gne * (Tni - Tno) / Gfd$$

$$\begin{aligned} Gne &= [Gfd * \{HGPT (Psp, Tst) - HLPT (Pfd, Tfd)\} / \{Cn * (Tni - Tno)\}] \\ &= GNE8 (Tni, Tno, Tfd, Tst, Gfd, Pfd, Psp) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Gfd &= \{Cn * Gne * (Tni - Tno)\} / \{HGPT (Psp, Tst) - HLPT (Pfd, Tfd)\} \\ &= GSE8 (Tni, Tno, Tfd, Tst, Gne, Pfd, Psp) \end{aligned}$$

④気水分離器出口蒸気圧力モデル

気水分離器出口蒸気圧力は、蒸発器入口給水圧力及び蒸発器給水流量から配管の圧力損失の式を用いて計算することができる。

$$P_{sp} = P_{hd} - D_p - A_{ev} * G_{fd}^2$$

ここで、

- P_{sp} : 気水分離器出口圧力
- P_{hd} : 給水ポンプ出口ヘッド圧力
- D_p : 給水調節弁差圧
- A_{ev} : 蒸発器圧損係数
- G_{fd} : 蒸発器給水流量

以上の関係式を変形することによって、気水分離器出口蒸気圧力を導出することができる。その関係式を以下に示す。

$$\begin{aligned} P_{sp} &= P_{hd} - D_p - A_{ev} * G_{fd}^2 \\ &= PSP101 (P_{hd} , D_p , G) \end{aligned}$$

⑤制御モデル

プラントが正常に制御されていると仮定した時、各センサーの観測値と当該センサーの制御用設定値は基本的に一致している。この仮定に基づき、以下センサー値について、制御用設定値を同定値として使用する。

1) 給水ポンプ出口ヘッダ圧力制御モデル

$$Phd = Phdset$$

ここで、

Phd : 給水ポンプ出口ヘッダ圧力

Phdset : 給水ポンプ出口ヘッダ圧力設定値

2) 蒸発器給水流量制御モデル

$$Gfd = Gfdset$$

ここで、

Gfd : 蒸発器給水流量

Gfdset : 蒸発器給水流量設定値

3) 気水分離器出口蒸気圧力制御モデル

$$Psp = Pspset$$

ここで、

Psp : 気水分離器出口蒸気圧力

Pspset : 気水分離器出口蒸気圧力設定値

4) フラッシュタンク圧力制御モデル

$$Pft = Pftset$$

ここで、

Pft : フラッシュタンク圧力

Pftset : フラッシュタンク圧力設定値

2. センサー及びアクチュエータエージェントの使用モデル説明

以下に試作システムで作成する11のセンサー/アクチュエータエージェントと各エージェントで使用しているモデルについて説明する。

①給水ポンプ出口ヘッド圧力 (Phd) センサーエージェント

- ・給水ポンプ出口ヘッド制御モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Phdset：給水ポンプ出口ヘッド圧力設定値である。

②給水調節弁差圧 (Dp) センサーエージェント

- ・給水調節弁モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Gfd：蒸発器給水流量、Zfd：給水流量調節介開度である。

③給水調節介開度 (Zfd) センサーエージェント

- ・給水調節弁モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Gfd：蒸発器給水流量、Dp：給水調節弁差圧である。

④給水調節弁ナクチュエータエージェント

- ・給水調節弁モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Gfd：蒸発器給水流量、Dp：給水調節弁差圧、Zfd：給水流量調節介開度である。

⑤蒸発器給水流量 (Gfd) センサーエージェント

- ・蒸発器モデル及び蒸発器給水流量制御モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Tni：蒸発器入口Na温度、Tno：蒸発器出口Na温度、Tfd：蒸発器入口給水温度、Gne：2次冷却材流量、Gfd：蒸発器給水流量、Phd：給水ポンプ出口ヘッド圧力、Dp：給水調節弁差圧、Psp：気水分離器出口蒸気圧力、Gfdset：蒸発器給水流量設定値である。

⑥蒸発器給水温度 (Tfd) センサーエージェント

- ・蒸発器モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Tni：蒸発器入口Na温度、Tno：蒸発器出口Na温度、Tfd：蒸発器入口給水温度、Gne：2次冷却材流量、Gfd：蒸発器給水流量、Phd：給水ポンプ出口ヘッド圧力、Dp：給水調節弁差圧、Psp：気水分離器出口蒸気圧力である。

⑦蒸発器出口蒸気温度 (Tst) センサーエージェント

- ・蒸発器モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Tni：蒸発器入口Na温度、Tno、：蒸発器出口Na温度、Tfd：蒸発器入口給水温度、Gne：2次冷却材流量、Gfd：蒸発器給水流量、Phd：給水ポンプ出口ヘッド圧力、Dp：給水調節弁差圧、Psp：気水分離器出口蒸気圧力である。

⑧気水分離器出口蒸気圧力 (Psp) センサーエージェント

- ・気水分離器出口圧力モデル及び気水分離器制御モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Gfd：蒸発器給水流量、Phd：給水ポンプ出口ベツダ圧力、Dp：給水調節弁差圧、Pspset：気水分離器出口蒸気圧力設定値である。

⑨気水分離器ドレン弁開度 (ZsP) センサーエージェント

- ・気水分離器ドレン弁モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Gfd：蒸発器給水流量、Psp：気水分離器出口蒸気圧力である。

⑩気水分離器ドレン弁アクチュエータエージェント

- ・気水分離器ドレン弁モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値は、Gfd：蒸発器給水流量、Psp：気水分離器出口蒸気圧力、Zsp：気水分離器ドレン弁開度である。

⑪フラッシュタンク圧力 (Pft) センサーエージェント

- ・フラッシュタンク制御モデルを使用する。
- ・同定値計算に使用するセンサー値はPftset：フラッシュタンク圧力設定値である。