

自律分散協調機能監視システムの研究

松岡 猛^{*}、沼野 正義^{*}、染谷 実^{*}、福戸 淳司^{*}

三友 信夫^{*}、宮崎 恵子^{*}、松倉 洋史^{*}、丹羽 康之^{*}

高橋 将人^{**}

A Study on the Observation System for Autonomous, Distributed and Cooperative Function in a Future Type Nuclear Power Plant

by

Takeshi MATSUOKA, Masayoshi NUMANO, Minoru SOMEYA

Junji FUKUTO, Nobuo MITOMO, Keiko MIYAZAKI

Hiroshi MATSUKURA, Yasuyuki NIWA and Masato TAKAHASHI

Abstract

The concept of advanced future plants are discussed by five research institutes; Ship Research Institute, Electrotechnical laboratory, The Institute of physical and chemical research, Japan atomic energy research institute, and Power reactor and nuclear fuel development corporation (Cross-over group). And, an autonomous plant is identified as a future type plant. In this future type plant, there are many agents that consist plant sub-systems or plant components and have artificial intelligence. They are distributed in plant and have autonomous functions, and cooperate each other to establish total plant function. Even if the plant has autonomous function, human operators have to always watch the plant state. Therefore, the needs of the observation system for autonomous, distributed, and cooperative functions are strongly required. The present paper has presented a new idea about the observation system, and developed fundamental functions for this observation system, that is, plant function model, auto-classification of plant states, three dimensional graphical display, expression of robot group's activity. Also, autonomous plant simulator has been developed for this research activity. Finally, the effectiveness of this observation system has been evaluated by experiments of operator's reaction to this system.

原稿受付 平成12年10月25日

審査済 平成12年12月13日

目次

1. 序論
2. 自律プラントの構成
 - 2.1. エージェントの働き
 - 2.2. 自律分散協調機能監視システム
3. 要素研究
 - 3.1. 自律型原子力プラントシミュレータの開発
 - 3.1.1. シミュレータの基本構成
 - 3.1.2. シミュレータの運転制御
 - 3.1.3. シナリオ編集機能の整備
 - 3.1.4. 自律機能の編集機能
 - 3.1.5. 自律機能動作状態の表現
 - 3.2. プラント模型
 - 3.3. 三次元画像によるプラント状態表示
 - 3.3.1. 計算機環境
 - 3.3.2. 三次元画像基本構成機器
 - 3.3.3. 三次元画像表示インターフェース部
 - 3.3.4. 異常状態の注意喚起方法
 - 3.3.5. PWR プラント・シミュレータ、プラント模型との結合
 - 3.4. プラント機能モデル
 - 3.4.1. 基本構成
 - 3.4.2. プラント状態の判断機能
 - 3.4.3. プラント模型との接続
 - 3.5. プラント状態自動分類機能
 - 3.5.1. COBWEB について
 - 3.5.2. COBWEB の基本操作
 - 3.5.3. COBWEB による分類
 - 3.5.4. 連続データの分類
 - 3.5.5. プラント模型との接続
 - 3.5.6. プラント状態自動分類機能まとめ
 - 3.6. ロボット群動作状況の表示
 - 3.6.1. ロボット群行動のシミュレーション
 - 3.6.2. 個々のロボット行動
 - 3.6.3. 巡回点検のアルゴリズム
 - 3.6.4. ロボット行動の表示
4. 統合管理システム
 - 4.1. システム構成
 - 4.2. 総合評価実験
 - 4.2.1. PWR プラントシミュレータと結合しての実験
 - 4.2.2. 実験結果
 - 4.2.3. プラント模型と結合しての実験
 - 4.2.4. 実験結果
 - 4.3. 改良点

4.4. 総合評価実験まとめ

5. 結言

参考文献

1. 序論

本報告は、平成6年度～平成10年度において原子力基盤総合的研究（クロスオーバー研究）により実施した将来型の自律型プラントを対象とした自律分散協調機能監視システムの研究成果についての報告である。将来型プラントを対象とした知的マン・マシン・インターフェース技術の研究を同じくクロスオーバー研究により平成元年度～5年度にわたり実施したが、本研究はその成果を受けての第二期5年間の研究である。クロスオーバー研究には船舶技術研究所、日本原子力研究所、動力炉核燃料開発事業団（現核燃料サイクル機構）、理化学研究所、電子技術総合研究所の5機関が参加し、互いに協調して研究を進めた。各機関の分担は、船舶技術研究所はマン・マシン・インターフェース分野、日本原子力研究所は遠隔操作ロボット、動力炉核燃料開発事業団（現核燃料サイクル機構）は知的運転制御システム分野、理化学研究所は保守点検システムおよび保全用小型ロボット群、電子技術総合研究所は能動センシングシステム及びロボット技術である。さらに、電力会社、プラント製造企業、コンピュータ会社、大学等の専門家の参加した研究交流委員会でのアドバイスも適時受けてきた。

自律型プラントの実現により、ヒューマン・エラーを可能な限り排除した安全性の高い、稼働率・信頼性の高いプラントが達成できると考えられている。自律型プラントは人工知能技術の応用により自分自身で各種の判断を下しながら自律的に運転継続、非常時対策等を実施していく。このようなプラントの構成として、プラント内各所に人工知能要素（エージェント）が分散したマルチ・エージェント・システムを想定している。このエージェントには自律ロボットも含まれ、保守作業をもプラント自身の判断により実施可能な体系となっている。

この自律型プラントにおいても、プラント運転によりもたらされる結果に責任を持つのはあくまでも人間であるべきと考えられている。つまり、通常運転時における発電出力の設定には電力需要条件、経済的条件を加味する必要がある。また、非常時における対応には政治的判断が大きく関与してくる。さらに、人間の設計した工学システムがあらゆる事態をあらかじめ想定できるとは考えにくい。この様な場合に人間が臨機応変にプラント運転に介入し、対処

することが必要となる。そのためには自律型プラントといえどもマン・マシン・インターフェイスが必要となってくる。人間の役割は既存プラントにおける運転員というよりは運転管理者としての立場となる。

しかし、高度に自律化されたプラントでは、それぞれのエージェントの動作は複雑な論理に従い、エージェント間の協調動作、フィードバック効果も存在しており、プラント全体としての動作がブラックボックス化してしまう危が常に指摘されて来ている。

この様な自律型プラントにおけるマン・マシン・インターフェイスの重要な機能としてプラント状態を必要に応じて容易に観察・把握し、人工知能の援助のもとに大所・高所の判断・決定・操作が行えることが挙げられる。本研究においては、プラント運転及びロボット群の活動を含む自律分散協調機能が適正に機能しているかを監視するシステムに着目し、各所に分散した人工知能要素（エージェント）間の協調、判断過程、判断結果等を運転管理者に透過性が高く、運転管理者の望む任意のレベル（動作の概念的把握から各機器の状態まで）で提供するシステム技術の開発を行った⁽¹⁾⁽²⁾。

具体的には要素技術の研究、システム化技術、及びクロスオーバー研究に参加している他機関の研究との統合化についても検討を行い、以下に示す6項目に沿って実施した。

- ①自律機能の階層的な表現技術の研究
- ②分散協調機能の動作状態の表現技術の研究
- ③意志決定過程の表現技術の研究
- ④運転制御システムとの統合
- ⑤保全システムとの統合
- ⑥総合的評価実験

これにより、自律化されたプラントとロボットという機械系におけるブラックボックス化を防止するとともに、新しい形で人間と機械系との係わり方を明らかにしていき、将来実現するであろう自律型プラントにおける重要な要素技術として活用されることを期待している。

2. 自律型プラントの構成

自律型プラントの機能構成としては、運転制御、保全作業共それぞれの部分システムが階層的、協調的な動作を行うと想定した。複雑なシステムを相互関係の比較的少ないより単純なサブ・システムの結合とし、解析や設計を見通し良く容易に実施できることを念頭に置いた。通常運転時には各サブ・システムはある程度独立して機能している。異常時、事故時等には必要に応じて相互作用の程度を増やした協調動作、或いは機能の動的な再構成の実施等が行われる。また、分散システムであるので、危険分散、自己診

断、保守の局所化の面でも優れている。さらに、信頼性向上のため、単一機能に対して異なる方式に基づく冗長系を各所に導入することも考えられる。

このような自律型プラントにおいて事故時の対応まで含めた全ての動作を機械システムにまかせてしまうわけにはいかない。人間（運転管理者）は常にプラント状態を透明性を持って監視し、必要とあらば容易にプラント運転に介入出来るシステム構成となっている必要がある。これら各種エージェントの関連を示したのが図1であり⁽³⁾、運転操作グループ、プラント運転制御部分、自律ロボット群が互いに密接に関連して全体として自律型プラントを構成している。図中薄色の矢印は階層関係を、濃い矢印は協調関係を表している。本研究はそれらの動作状況の表現を目標としている。

2.1. エージェントの働き

これら運転操作グループ、プラント運転制御部、ロボット群をそれぞれ自律的に動作するエージェント群として捉える考えが広まってきている。

ここでエージェントについて考察してみる⁽⁴⁾。エージェントとは大規模複雑なシステム中に存在する自律的な機能を持った最小単位と設定されている。

エージェントは、自律的、反動的であり、人間（これもエージェントの一種と考えることができる）あるいは他のエージェントと情報交換ができる能力、自分の行動を環境に適合して変化させる能力を備えていると定義されている。また、人工知能研究の立場からは、信念、欲望、意図を持ち、計画立案能力、学習能力、環境適合能力を持っていると捉えられている。エージェントを機能の面から捉えて分類すると、ガイド、注意喚起、モニター、協調者、忠告者、代行者に分けられる。別の観点からの分類では、ユーザーのプログラムしたエージェント、自律的人工知能タイプのエージェント、学習していくエージェントとなる。

エージェントが備えるべき性質の一つに環境適合性（アダプティブ）が挙げられている。単なる自動制御でないより柔軟な自律システムとしてはアダプティブな機能が必要とされる。アダプティブ・システムとは他のシステム・人間との相互作用の結果、自分の状態・行動を変化・適合していく能力のあるシステムのことである。そのための基本機能として他のシステムから信号を取得し、処理する事が要求される。更により高度の能力としては、自分自身のモデルを持っており、どの部分を変更・改良すれば良いか知っている必要がある。しかも、このモデルは意図レベル、物理的性質レベル、概念的構造レベル等の異なった複数のモデルである必要がある。また、他のシステムのモデルを保持・認識しており、相互作用による取得情報量の増大に伴いそのモデルの姿は発展していく。インターフェースお

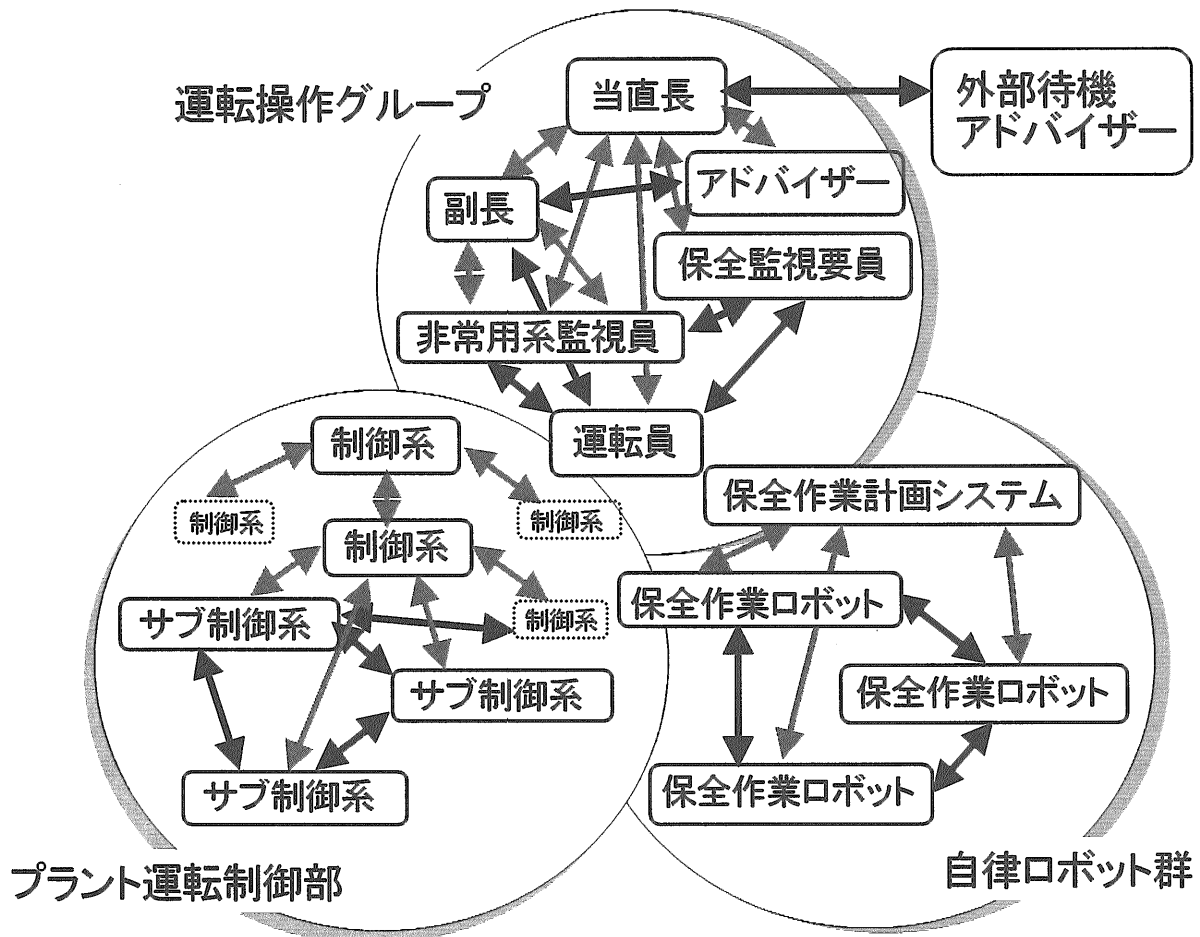


図1 自律型プラントの構成モデル図

よび適合化の過程を含んだ相互作用自体もモデルとして捉えられる。

本クロスオーバー研究では、このモデルベーストのアプローチを採用しており、マン・マシン・インターフェイス内にもプラント等についてのモデルを保持し、モデルに基づいた判断・運転支援を実施すべきものとし、学習効果により拡張・発展する例としてプラント機能モデルの開発を行った。

2.2. 自律分散協調機能監視システム

自律型プラントでは、前節で説明した高度な機能を持ったエージェントがプラント内各所に分散配置され、自律的に動作するとともに図1に示すような相互に協調あるいは統合化されたシステムとなっている。つまり、プラント要素、部分システム、ロボットに知能が搭載されており、それらが分担、協調して各々の役割を果たし、全体としてプラントの目的が達成されている。このような自律型プラントにおいて人間がプラント管理者としての役割を果たすため、階層構造的なつながり・分散協調動作の実施状況の把握が必要となってくる。

監視システム内部には、プラント各部を機能の面から捉

えてそれらのつながりとして全体プラント状態を理解するプラント機能モデルを保持しているのが適切と考えられる。このプラント機能モデルに基づき、情報提示・運転支援等のマン・マシン・インターフェースとしての基本的機能を実現していく。本研究においては、自律型プラントシミュレータ開発、プラント機能モデルの研究、プラント状態表示機能、プラント状態分類機能、ロボット行動表示機能の各項目を取り上げ、図2に示す関連を持たせて研究を進めた。

3. 要素研究

3.1. 自律型原子力プラントシミュレータの開発

自律型プラントの監視機能の研究を進めるにあたり、自律型プラントが必要となる。そこで、自律型プラントの概念⁽⁴⁾に基づいて、リアルタイム・エキスパートシステム構築用ツールである G2 (米国 Gensym 社製)を用いて加圧水型原子力プラント (PWR) を基として図3の系統図に示す自律型プラントシミュレータの開発を行った^{(6),(7)}。本シミュレータの利用目的から、シミュレーションにおける定

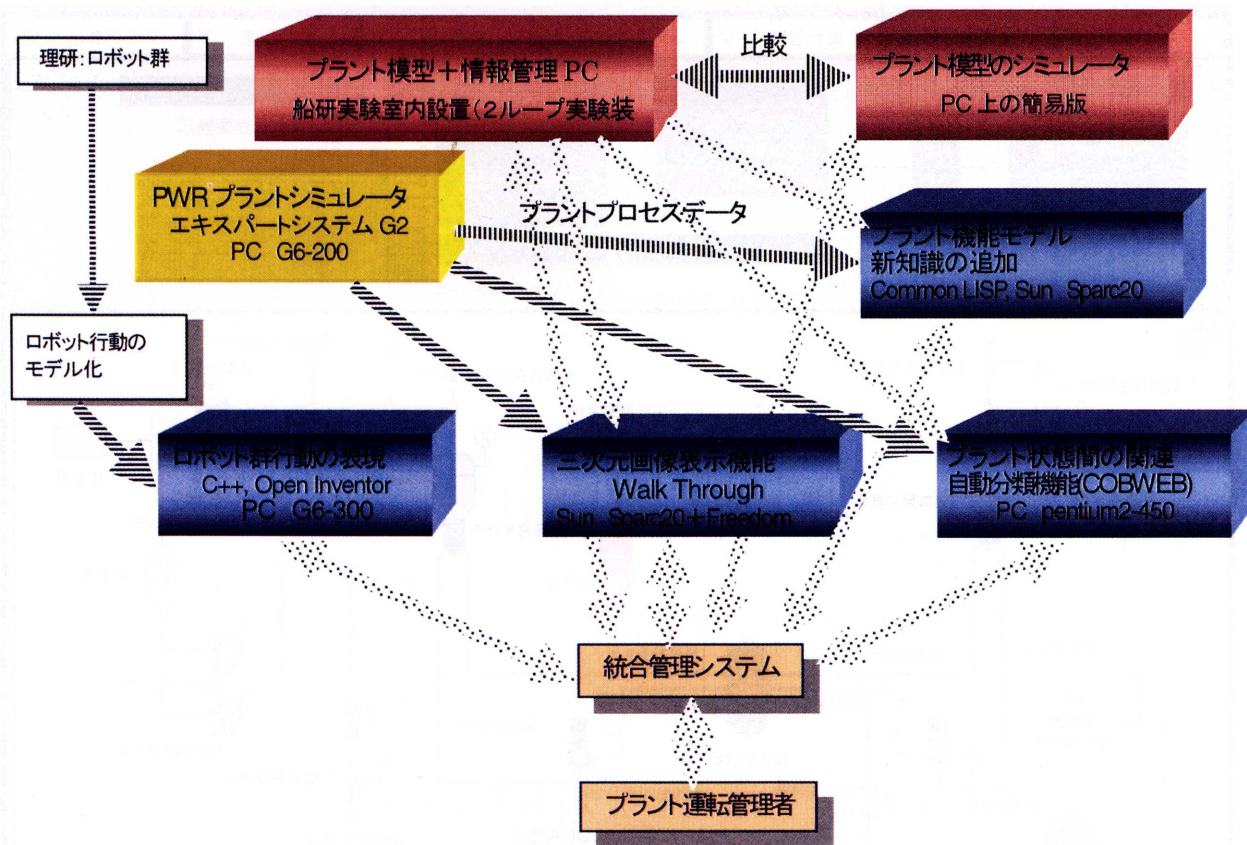


図2 研究項目関連図

量的精度はそれほど重要でなく、プラントの過渡応答が定性的に妥当な挙動を示すことを念頭に置いて開発した。

G2では、階層化されたオブジェクト指向のモデリング機能とルール・ベースおよびモデルを動かすシミュレーション機能が用意されている。プラントの構成機器など現実世界のオブジェクトを個々に定義し、それらの接続関係を図を使って表現・編集できる。各オブジェクトはアイコンと属性を持っており、アイコン上でウインドウを開き、そのオブジェクトに関する知識をフレームで表現する事ができる。オブジェクトの属性値はクラスを定義する時階層的に定義されており、クラス間での属性の継承もなされる。更に、システムの動作に関する規則、知識等を自然言語(英語)により表現する事もできる。各種制御系の動作はルールの形式で記述してあり、安全注入系等の工学的安全施設はオブジェクトとしてはモデル化していない。更に、プラント状態保存機能、シナリオイベントの起動機能、及び自律機能を整備した。このエキスパートシステムでは各種の自律機能を容易にシミュレータ中に組み込む事ができる。

3.1.1. シミュレータの基本構成

図3の系統図に示す加圧水型原子力プラント(PWR)シミュレータのモデル化にあつては最新4ループPWRを想定し、Aループに1ループ、Bループに残る3ループを

受けもたせ、表示する計測値はA、B両ループ共1ループ分の値としている。本シミュレータの利用目的から、シミュレーションにおける量的精度はそれほど重要でなく、プラントの過渡応答が定性的に妥当な挙動を示すことを念頭に置いて開発した。

構築した範囲は原子炉炉心部を中心に発電機までとした。各構成機器のモデル化の詳細については参考文献を参照⁽⁴⁾。

3.1.2. シミュレータの運転制御

本シミュレーション・システムでは運転モードとして以下の7種類を自動的に認識する事ができる。

- ・臨界零出力
- ・中間出力
- ・定格出力
- ・炉停止
- ・過渡変動
- ・仮想出力上昇
- ・仮想出力低下

上記の運転モードに対して二種類の制御モードが用意されている。第一は仮想制御モードであり、仮想出力上昇および仮想出力低下の運転モードを実現する。これは、現実より早い手順で自動的に臨界零出力～定格出力、定格出力～臨界零出力の運転が行われる。

第二は通常制御モードで臨界零出力、中間出力、定格出力、炉停止、過渡変動の運転モードに対して設定できる。

さらに出力制御、制御棒位置、加圧器水位、加圧器圧力、蒸気発生器水位については手動制御も可能とした。また、主要機器の起動/停止の切り替え、原子炉トリップ操作も

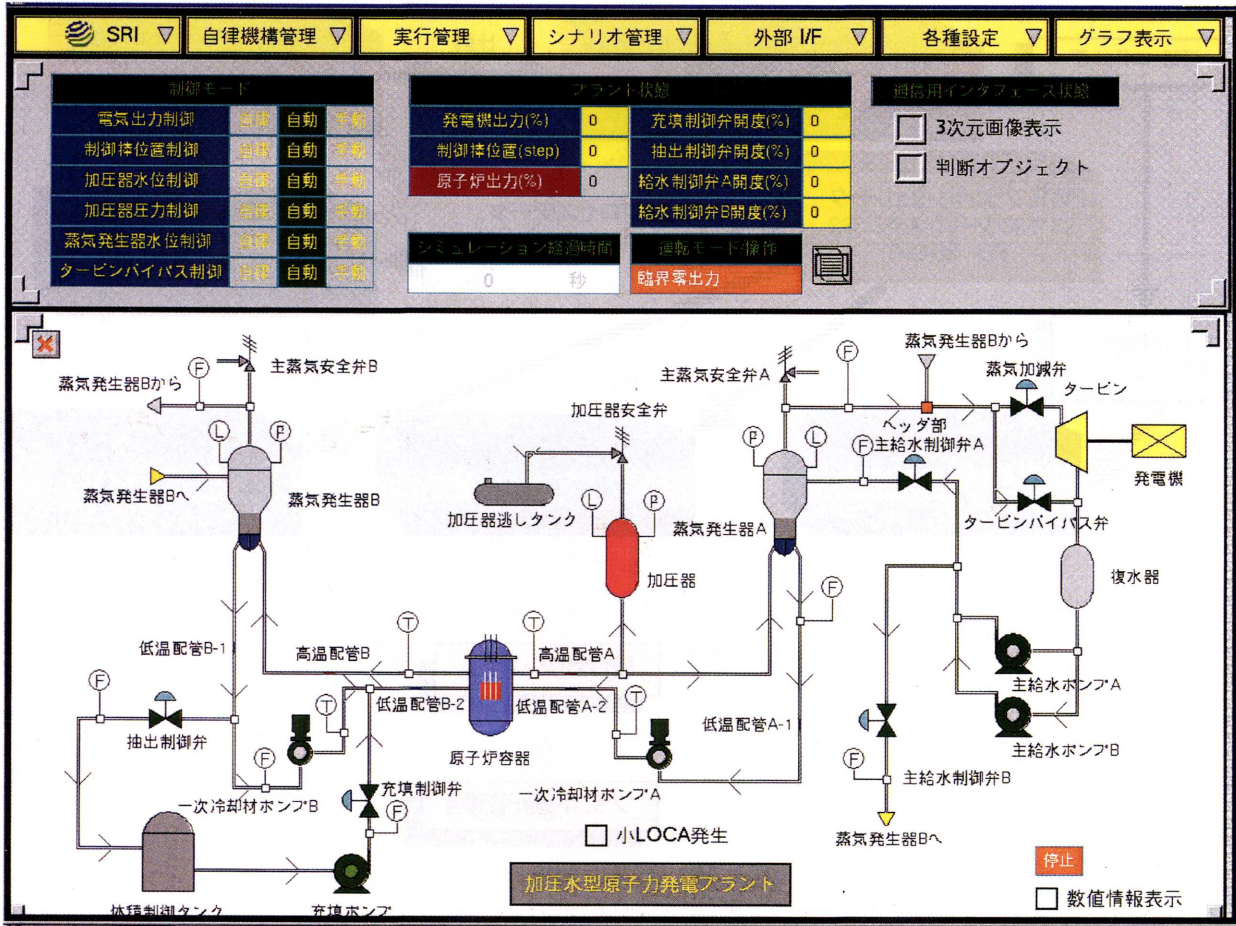


図3 自律型原子力プラントシミュレータの系統図

手動で行える。

3.1.3. シナリオ編集機能の整備

プラントの基本機能に加えて、以下の特殊機能を整備しマン・マシン・インタフェース研究において使用する事を考慮したシミュレータとした⁹⁾。

(1) プラント状態保存機能

これは、実行中のシミュレーション状態をそのまま保存する機能である。この機能によりシミュレーション中の任意の時点の情報を適宜保存し、後に参照する事が可能である。

(2) シナリオイベントの起動機能

故障等の特定のイベントをあらかじめ作成したシナリオに従って発生する機能である。これにより機器の故障等のイベントを再現性良く自動的に発生でき、運転員の対応評価や自律機能の検証に用いられる。

3.1.4. 自律機能の編集機能

自律機能の編集機能では機器動作、設定目標、判定条件等基本的な要素をグラフィカルに組み合わせる事によりシ

ミュレータに任意の自律機能を組み込む事を可能とした。従来、ルールの形で記述されていた自律機能がより明確な形で表現されている。

この自律機能編集機能を用いて、以下に示した4事象発生時に働く自律機能を実現した。

1. 一次冷却材ポンプ1台故障時の対応。

一次冷却材ポンプAが故障した場合、次の制御を自律的に実行していく。

- 発電機出力を定格の75%となるように徐々に低下。
- 制御棒は発電機出力に対応する形で徐々に挿入。
- 給水流量は蒸気発生器水位制御で制御する。
- 電気出力75%の定常運転を維持する。

2. 蒸気発生器二次側主蒸気安全弁開固着時の対応。

蒸気発生器Aの二次側主蒸気安全弁が開固着した場合、次の制御を自律的に実行していく。

- Aループ二次側の主給水制御弁を閉止し給水流量を0とする。
- 一次冷却材ポンプAを停止する。
- 発電機出力を定格の75%となるように徐々に低下。
- 制御棒も発電機出力に対応する形で徐々に挿入。

- e) 電気出力 75% の定常運転を維持する。
- 3. 蒸気発生器二次側主給水制御弁閉固着時の対応。
蒸気発生器 A の二次側主給水弁が閉固着した場合、次の制御を自律的に実行していく。
 - a) 一次冷却材ポンプ A を停止する。
 - b) 発電機出力を定格の 75% となるように徐々に低下。
 - c) 制御棒も発電機出力に対応する形で徐々に挿入。
 - d) 電気出力 75% の定常運転を維持する。
- 4. 二次側給水ポンプ 1 台の故障時の対応。
二次側給水ポンプ 2 台中の 1 台が故障した場合、次の制御を自律的に実行していく。
 - a) 発電機出力を定格の 50% となるように徐々に低下。
 - b) 制御棒も発電機出力に対応する形で徐々に挿入。
 - c) 電気出力 50% の定常運転を維持する。
 これらの自律機能を自律のための規範の観点から見ると、基本機能維持（発電機出力を可能なレベルで維持する。）と自己組織化（適時系統を分離する。）に属すると考えられる。また、これらの自律機能と前述のシナリオイベント起動機能は組み合わせて実行することが可能である。更に、当該故障が修理完了した場合は、故障機器を再起動（復帰）し、原子炉は自律的に定格運転状態まで復帰させられる。一方、出力上昇中あるいは低出力運転中で発電機出力が目標とす

る値（75% あるいは 50%）より小の場合に機器故障が発生した場合は自律機能は働かず炉停止に至る。

自律機能が作動中に、更に他の機器故障が発生した場合も自律機能を解除し自動的に炉停止するものとしている。また、自律機能はオペレータが手動で解除できる様にもなっている。

3.1.5. 自律機能動作状態の表現

プラントに不具合が発生した時に自律機能が働きプラントを特定の運転状態に保持する。この自律機能がどのように働いているかを表現するために、自律機能編集機能で用意した基本的な要素の動作状況を色彩表示した。自律機能が働いていない場合は各要素を“灰色”で表示し、自律機能が働いている場合は各要素は機能状態に対応した色彩で表示される。

図4は自律機能が働いている一例を表しており、一次冷却材ポンプが故障した状態で、故障機器台数・出力値条件が満足されている場合が表現されている。設定目標値が75%出力であり、まだ達成されていないことが黄色により表示されている。目標とする75%出力が達成されるとこれが赤色に変化する。下部の図は、機器故障・制御機構の発現状態を示している。

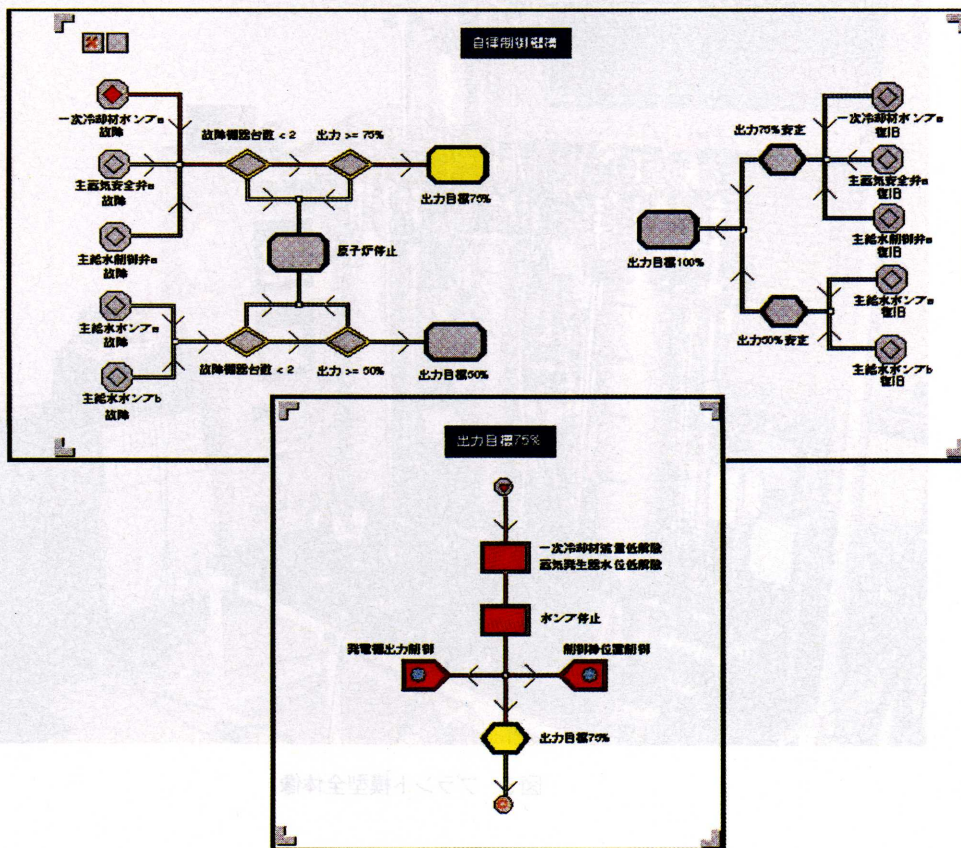


図4 自律機能動作状態の表現例

3.2. プラント模型

プラントプロセスデータの生成用として、PWR シミュレータの他にプラント模型を用意した。本模型は、2ループ加压水型 (PWR) 原子力プラントの運転を模擬するものであり、図5に示す形状を持っている。

炉心部分 (体積: 7dm^3) には加熱器 (電気ヒーター: 最大出力 4.5kW) を備えている。また左右には蒸気発生器 (2次系片側体積: 10dm^3) を備え、1次系と2次系の熱交換は対向流形式で行われている。さらに蒸気発生器で蒸気となった2次冷却水 (もしくは高温水の2次冷却水) は、クーリングタワーに流れ込み冷却され、再び蒸気発生器に流れ込む2次冷却水として再利用される循環設計となっている。

加压器については、コンプレッサーを利用し、高压ガスを送り込むことにより1次系の圧力をあげている。定格圧力を2気圧としているため、1次系温度が 120°C までは加压水型として正常の運転が行える。各所に下記のセンサーを取り付けてある。

温度計 (熱電対): 炉心、1次系蒸気発生器入口 (左右)、1次系蒸気発生器出口 (左右)、2次系蒸気発生器入口 (左右)、2次系蒸気発生器出口 (左右)

流量計: 1次系 (左右)、2次系 (左右)、1次系漏洩部

圧力計: 1次系 (炉心)、2次系蒸気発生器出口 (左右)

水位計: 加压器、2次系蒸気発生器 (左右)

また遠隔操作が可能なアクチュエーター (ポンプ、電動弁、電磁弁、電気ヒーター) も取り付けてあるため、様々な状態模擬および測定・制御が可能となっている。

3.3. 三次元画像によるプラント状態表示

マン・マシン・インターフェイスが認識したプラント状態を運転員 (人間) が理解容易な形で提示する機能も重要な開発項目である。

その一方法としての画像による表示機能の研究を進めた^{(9),(10)}。開発環境としては、当初はグラフィックス・ワークステーション Stellar GS-1000、米国スターデント社のグラフィックソフト AVS バージョン4を用い、原子力プラントの状態を三次元カラー・グラフィックスで表現する機能を作成した。その後、表示機器の増加によりデータ量が増えたことや通信機能の追加に伴って、ワークステーションの処理スピードが追いつかなくな

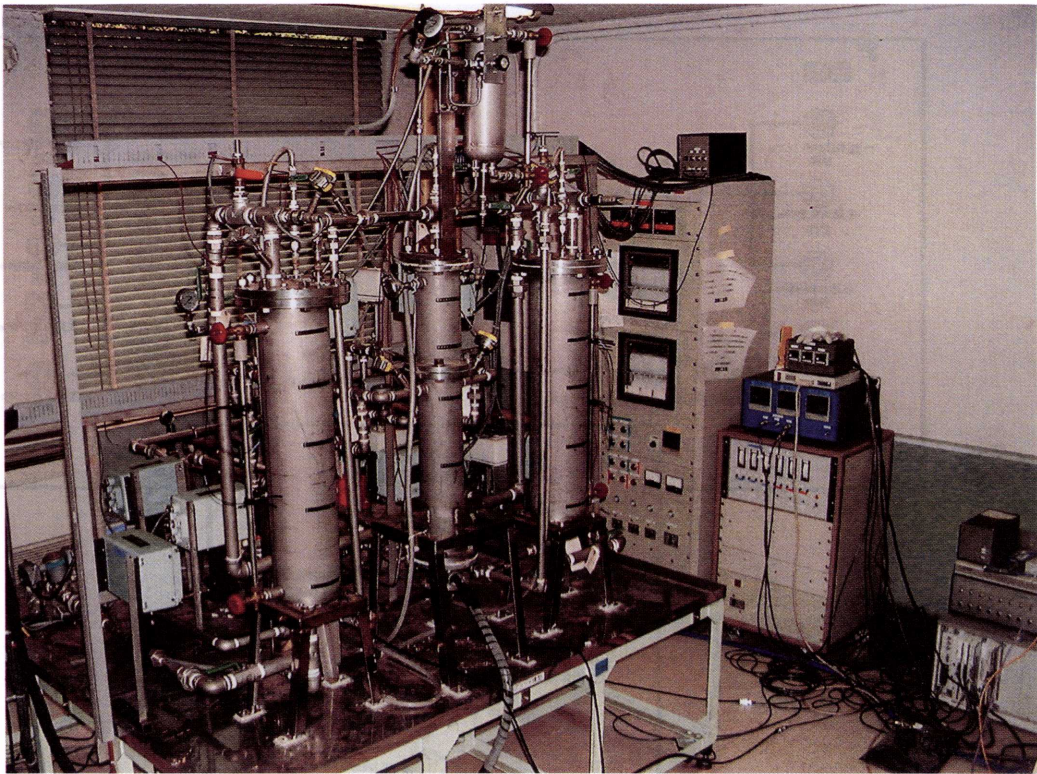


図5 プラント模型全体像

った。このため、グラフィックスアクセラレータ Freedom 1050 を接続した高速のワークステーション Sun Sparcstation 20 に、本機能を移植し、AVSバージョン5上で稼働させている。この表示機能作成および運用に当たっては、わかりやすい表示方法、適切な表示スピード、使いやすい表示操作を念頭においた。

3.3.1. 計算機環境

本三次元画像表示機能の計算機環境を以下に示す。

ハードウェア

ワークステーション： Sun Sparcstation 20 (マルチCPU, メモリー128M, Solaris2.3, FORTRAN コンパイラ, C コンパイラ)

グラフィックスアクセラレータ： Freedom 1050 (Sun Sparcstation 用高性能グラフィックス・アクセラレータ、グラフィックス性能は 500 キロトライアングル (25 ピクセル)、500 ポリゴン/秒 描画可能)

ソフトウェア

AVS (Application Visualization System)：数値データのグラフィック化をほとんどノンプログラミングで実行するシステムである。ユーザは、AVS に様々なアプリケーションから発生したデータを注入するだけでよい。後は、メニューとマウスなどの簡単な操作で望みのグラフィック化ができる。

本三次元画像表示機能では、AVS が三次元カラーグラフィックスを描画するのに、Sparcstation 20 のグラフィックスライブラリーではなく、Freedom のグラフィックライブラリーを使う。これにより、描画スピードが格段に速くなり、表示できる色もフルカラーが使えることとなった。

3.3.2. 三次元画像基本構成機器

PWR 型原子力プラントの基本構成機器を実プラント機器にできるだけ近い形状、相対的大きさで作成した。基本構成機器は 16 種類、34 個用意してある。必要データ量は機器により異なり、数十バイトから 50 キロバイ

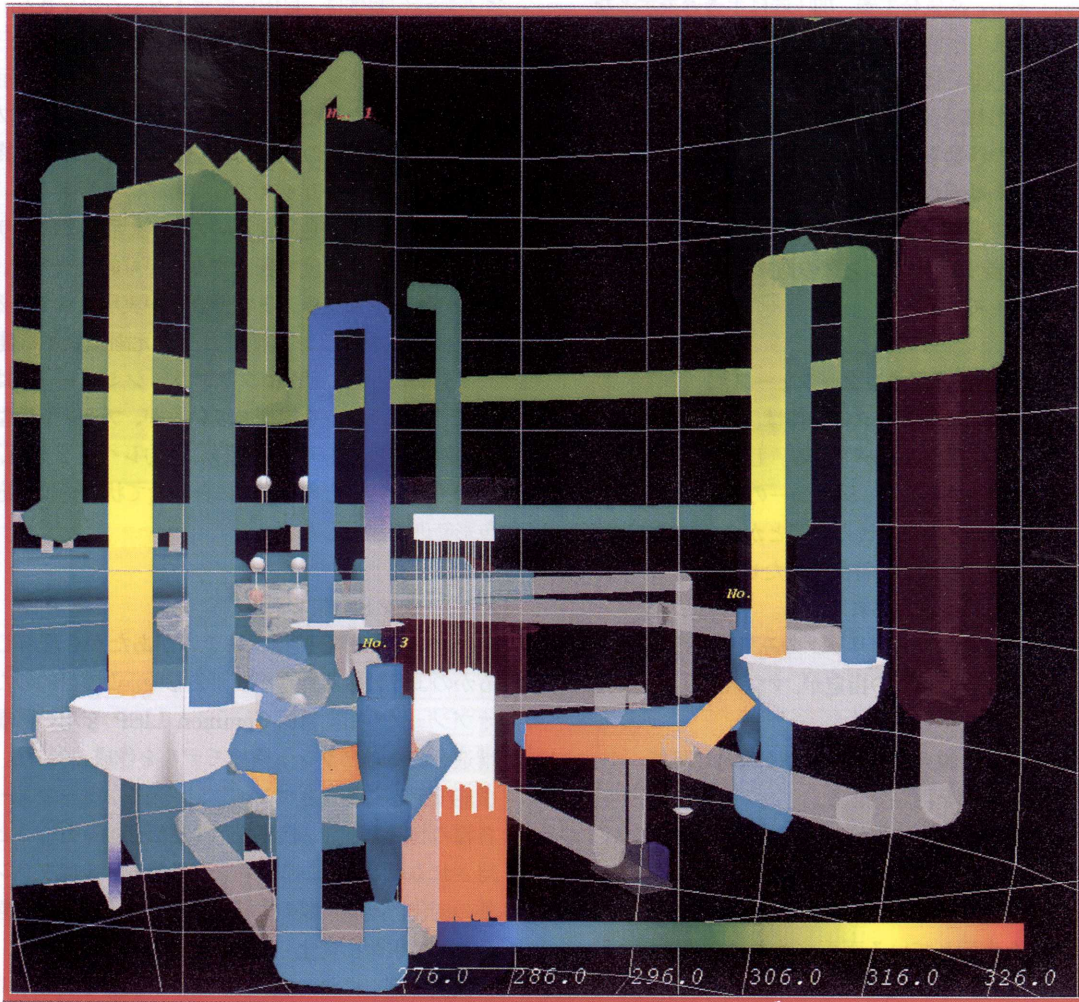


図6 三次元画像表示機能によるプラント状態表示例

トである。作成した機器の全体配置の様子は図6に見られる。

表示には、形状表示（機器の形状のみ）と状態量表示（温度・流量・圧力などの状態量）の2種類を作成した。前者は、プラントを構成する全ての機器について用意してある。後者は、状態量を表示する必要がある機器（格納容器、圧力容器、蒸気発生器、配管、ポンプ、炉心部等）について、状態量の分布が分かるように機器の表面に塗りつぶしコンター図として表示する様になっている。圧力容器、蒸気発生器には内部の状態量表示データがあり、蒸気発生器、加圧器、逃がしタンクには、内部の水位を表示するためのデータが用意されている。

全ての機器に対して、削除、拡大、縮小、三次元任意方向への移動・回転を行うことができ、面表示の他ワイヤー・フレーム表示への切り替えができる。主要機器については、形状・状態量表示の切り替え、状態量データの取り込み、内部状態量の表示、透過・半透過表示の各種機能が与えられている。図6はこれらの機能を活用した表示例である。蒸気発生器、加圧器は半透過表示となっており、内部の水位がわかる。圧力容器も半透過表示で、内部の炉心部、制御棒が見える。また、配管に沿った温度分布の様子が色彩変化で表現されている。

更に、視点の移動を任意の方向に行うことができ、プラント内のいわゆるウォーク・スルーが行える。その際、クリッピングの範囲を適切に設定しておいて、視点の移動につれて機器がクリッピングの面で切れ内部が見える様にする事もできる。

3.3.3. 三次元画像表示インターフェース部

これらの三次元画像データの操作は、AVS 自身が持っている GUI でも行うことができる。しかし、必要のないメニュー機能があること、メニューの階層が多すぎること、キーボード入力を避けたいことから、本機能専用の操作部を作成し、以下の特徴を持たせた。

- (1)常に主メニューが表示されている。
- (2)すべての操作をマウスクリックのみで行える。
- (3)ウォークスルーの移動の指定が、マウスクリックで簡単にできる。
- (4)事前に設定した視点位置への移動が瞬時に可能。
- (5)過去の視点位置を再現できる。

さらに、通常、本表示機能を使う際には、機器ごとに違う種類の状態量を監視するのではなく、温度なら温度、圧力なら圧力というように、すべての機器がひとつの種類の状態量を表示している画面が基本になると思われる。そこで、状態量ごとにグループ化を行って、そのグループを選択するメニューを作成した。このグループ化

のメニューを使用することにより、現在提示されているカラー画像が示している状態量を取り違えてしまう事を防げる。

3.3.4. 異常状態の注意喚起方法

異常状態の機器の注意を喚起するために、拡大、点滅、振動、画面中心への表示の機能を整備した。PWR プラント・シミュレータからのデータを受け取り、急激に状態量の変化する機器については上記動作が自動的に実施され運転員の注意を喚起する様になっている⁽¹¹⁾。

3.3.5. PWR プラント・シミュレータ、プラント模型との結合

PWR プラント・シミュレータとのプロセス間通信機能を作成し、三次元画像表示機能とプラント・シミュレータを結合した。この通信では、G2 からファイル転送が行われる。ファイルを3つ用意することで、表示の途中でファイルが書き換えられることを防いでいる。ファイル転送の頻度は、自由に設定することができる。この通信により、自律型原子力プラントの状態量を、三次元カラーグラフィックスで、ほぼリアルタイムに表示することが可能となった。プロセス間通信は、PWR プラント・シミュレータの画面上で、通信の開始および終了のボタンをマウスクリックすることにより行える。

プラント状態が色彩を用いた3次元画像によりリアルタイムに近い速度で表示する事が可能となり⁽¹¹⁾、直感的に理解容易なプラント状態表示が実現されている。

同様の事をプラント模型と三次元画像表示機能との間でも実現した。PWR プラント・シミュレータは現実の原子力プラントを模擬しているが、プラント模型は小型の模擬装置であり前述の様に圧力レベル2気圧、温度も120℃と低いため、それに合わせて状態量に対応する色彩範囲を調整した。

3.4. プラント機能モデル

プラント状態を監視システムがあたかも理解しているかのように振る舞う事が望ましい。この目的のためにオブジェクト指向言語 Common LISP を用い階層的な構造を持ったプラント機能モデルを作成⁽¹²⁾した。この機能モデルに基づきマン・マシン・インターフェースが各種の判断を下し、情報提示・運転支援を行うことが期待される。更に、このプラント機能モデルはプラント状態の変化、運転経験の蓄積、運転員（人間）の習熟等に合わせて柔軟に変化していくべきものである。

機能モデルにおいては、プラント状態を判断するとともに未経験プラント状態に対しては判断ルールを自動

生成する機能を作成した^{(13),(14)}。

3.4.1. 基本構成

プラント機能モデルは、オブジェクト指向言語である CLOS(Common LISP Object System) を用いて、SUN SPARC STATION 20 (メモリ 64MB) 上に構築した。CLOS は従来から人工知能研究における代表的な言語であった Common LISP を近年注目されているオブジェクト指向の考え方によりプログラミングできるように拡張したものである。現実の世界のモノ、概念をオブジェクトとして抽象化し、さらに同じ性質を持つオブジェクトをクラスとして、クラス群をより上位のクラスとして階層的にモデル化していくオブジェクト指向プログラミングは、対象プラントを人間にわかりやすい形で自然に表現することができる。また、オブジェクトがデータ(属性)とそれを操作する手続き(メソッド)をひとまとまりとして持つこと及び上位クラス概念を下位クラスが引き継ぐという継承のメカニズムによりシステムの開発とメンテナンスが容易に行える。

3.4.2. プラント状態の判断機能

判断機能は、原子力プラントのセンサー値から、ルールベース推論に基づきプラント状態を判断・認識するためのもので、オブジェクト指向言語である CLOS を用いて、原子炉プラント状態クラス、判断ルールクラスおよびデータクラスの 3 つのクラスにより実現されている。

原子炉プラント状態クラスは、原子炉プラント状態を導き出すために、段階的・階層的に原子炉の状態を表現した、抽象的なクラスであり、関連ルールの保持、判断結果の保持並びに判断結果の表示等を行う。

判断ルールクラスは、ユーザによって登録されたルールを、LISP 上に展開するためのもので、自然言語形式で入力されているルールの一つ一つの条件部・結論部は、システムが解釈可能な状態に翻訳され、そのデータは保管される。

データ・クラスとそのサブクラスであるルールデータ・クラスは、前者が推論結果のデータを、後者がルールを翻訳したデータオブジェクトをそれぞれ保存するためのものである。

本研究における判断機能は、単に現在のプラント状態を的確に判断することを支援するだけでなく、最終的には、判断者の経験、習熟度に合わせて対応でき、さらには将来型の自律分散協調プラントに相応しく運転実績を学習して自ら運転状態を判別するルールを改編し、追加するという先進的な機能を目指すものである。

以下に、プラント状態の具体的な判断の方法について、手順を追って説明する。

①データの読み込み

自律型プラントを模擬した PWR シミュレーターから、TCP/IP プロトコルを用いた通信機能を用いて、イーサネット経由でリアルタイムで運転データ(各機器類のセンサー値の集合)をプラント機能モデルに転送する。機能モデル側には 3 つのファイルが用意されており、一定時間間隔(数秒~数十秒)で順次、転送されたデータがこれらのファイルに上書きされる。プラント状態の判断の指令が出るとその時点で最新のデータが書き込まれたファイルが参照されることになる。複数のファイルを用意するのは、一つのファイルでは、プラント機能モデルがファイルを読み出し中に、PWR シミュレーター側から運転データを同じファイルに書き込まないようにするためである。

②判断値への変換

判断オブジェクトに読み込まれたセンサー値は数値情報であり、数値の微小な差異を問題にするとプラント各部の状態の組み合わせが無限に近く生成されてしまうことになる。そこで、温度、圧力、流量等の数値情報であるセンサー値を、定格運転時のプラント状態量からの隔たりに着目して定性的な基準で少数のグループ分類し、高低・大小等のラベルを各グループに与えた。以後、このラベルを判断値という。

③ルールベースによる判断

自律型原子力プラントはその機能に着目して、ツリー構造でモデル化されるものとする。②の判断値を基に、ツリー構造の末端のノードにおける各サブシステムの状態がルールにより判別される。さらにその判断結果を基に、より上位のサブシステムの状態を順次判別していく。これらルール群の詳細については参考文献⁽⁹⁾を参照していただきたい。

階層的な判断構造により、最終的なプラント状態だけでなく、例えば、一次ループ機能や二次側機能などのツリー構造の途中のノードにおける状態についても判断を下すことができる。

判断の対象となるプラント状態には無数の種類が想定されるが、用意されているルール群は典型的なプラント状態を判断できるように作成されている。

そこで、できるだけ判断可能な対象を拡げるため、「概ね確認」という次のような中間的な判断を導入した。すなわちセンサー値の定性的な表現である判断値を組み合わせるにより、ある機能を判定する場合、あるセンサーの判断値が条件に完全に一致していなくても、1 つだけ隣りにずれた値ならば、ある程度想定された状

態に近いとし、その組み合わせによる状態を概ね確認状態と定義する。これによって、判断結果にある程度の柔軟性を持たせることができる。ただし、2つ以上ずれた判断値を1つでも含んでいれば、その状態は未定義な状態とする。

この結果、あるセンサー値の組み合わせに対して、複数の状態が概ね確認され得ることになる。

下位機能の判断結果を幾つか組み合わせて、より上位の機能を判断する場合、下位機能に1つでも概ね確認の状態があれば、その組み合わせは全体として概ね確認されることになる。また、全てが完全に一致する組み合わせが存在せず、概ね確認された状態が複数ある場合には、それらの下位機能として、完全に一致したものを最も大きい割合で含むものを、その機能における状態の判定結果とする。また、下位機能に未定義状態を1つでも含んでいる場合は、その上位機能は未定義状態とする。

このようにして、順次、より上位の機能の状態の判定を進めていき、最終的にプラント状態が既知状態と判定、もしくは、準既知状態と判定されるか、あるいは、未定義な状態と判定される。

④判断ルールの自動生成

現在典型的な14種類のプラント状態を想定して、それらを判別するようルールを作っているが、実際にはプラント状態はもっと多様であり、実用システムではさらに詳細で精度の高い判断機能が要求されることになる。そのためには、プラントの設計・運転の経験的知識を抽出してルールの質を向上させていかなければならないが、「知識獲得のボトルネック」と言われるように、それらの作業は非常に困難であり、また、ルールが詳細になればなるほど計算機の負荷が大きくなり結果が出るまでの時間がかかるという問題がある。

そこで、過去の運転実績を利用して現在のプラント状態を推定するという事例ベース推論的なアプローチを将来、取り入れることを検討し、その基礎として判断ルールの自動生成機能およびプラント状態をデータベース化する機能を作成した。

判断ルールの自動生成機能は、プラント状態が14種類の何れかに近い状態として概ね確認されたケースあるいは未定義の状態と判断されたケースについて、最も一致の度合の高かった結果を利用して、その状態を確認するルールを自動的に生成するものである。

例えば以下のような判断が行われたとする。

条件部

- (THE 電気出力 OF 発電機 IS 中間)
- △(THE 判断状態 OF 原子炉状態 IS 発熱やや小)

- (THE 判断状態 OF 加圧器機能 IS 定格)
- (THE 判断状態 OF Aループ機能 IS 流れ定格・炉心部温度上昇やや小)
- △(THE 判断状態 OF Bループ機能 IS 流れ定格・炉心部温度上昇やや小)
- (THE 判断状態 OF 二次側機能 IS 低下・給水ポンプ1台停止)

結論部

- △(THE 判断状態 OF プラント状態 IS 二次側給水ポンプ1台停止)

ここで、○はルールが完全に一致していることを、△は概ね一致していることを示している。このとき、すでに確立しているルール群とは完全に一致しないが、すでに既知のプラント状態「二次側給水ポンプ1台停止」に近いある状態を示している。そこでこれを蓋然的な推論としてではなく確定的な一つのルールとして確立することは有益であろう。サブシステムの原子炉状態やBループ機能に関しても同様なことが言える。すると新しいルールは以下のようになる。

条件部

- (THE 電気出力 OF 発電機 IS 中間)
- (THE 判断状態 OF 原子炉状態 IS 発熱やや小-B)
- (THE 判断状態 OF 加圧器機能 IS 定格)
- (THE 判断状態 OF Aループ機能 IS 流れ定格・炉心部温度上昇やや小)
- (THE 判断状態 OF Bループ機能 IS 流れ定格・炉心部温度上昇やや小-B)
- (THE 判断状態 OF 二次側機能 IS 低下・給水ポンプ1台停止)

結論部

- (THE 判断状態 OF プラント状態 IS 二次側給水ポンプ1台停止-B)

下線部は新しい状態として仮に命名されたものである。このようにして未定義状態を含む様々なプラント状態を、それが成り立つルールの形で保存することにより、同じプラント状態が再び出現した場合、過去に生成されたルールと完全に一致することになる。

プラント状態のデータベース化機能とは、ルールベース推論に基づき判断が行われたあるプラント状態における機器オブジェクトの状態をいつでも再現可能な状態で保存することである。

以上の二つの機能はプラント機能モデル自体が自律的に、修正/拡張されるという先進的なマン・マシン・

インターフェースの基礎となるものである。今後は、運転中に出現する未経験のプラント状態について、類似したものを集約する等の組織化を行い、新たなプラント状態としてネーミングし、それを同定することのできる新ルールを自動的に生成するという機能に発展させていきたい。

図7にプラント機能モデルにおけるプラント状態判断過程、ルール・ベース付加の関連を示す。

3.4.3. プラント模型との接続

このプラント機能モデルはPWRプラント・シミュレータを対象としてルール作成を行い開発を進めてきた。この機能モデルの判断値、ルール群を変更し、プラント模型の運転状態、異常状態も判断できるようにした。前

述のように温度、圧力ともPWRシミュレータとは異なり低い値にあることと、構成ループ数、構成機器も異なっているので、大幅な手直しを必要とした。表1にプラント各部における温度、流量、圧力等の測定値とセンサー値、判断値との対応を示す。

3.5. プラント状態自動分類機能

プラント機能モデルは、ある時刻におけるプラントの状態についての判断であり、時間的な推移等は考慮されていない。原子力プラントは時間とともにその状態が変化するものと考えべきものであり、実際運転モード、異常時、事故時などに対応して種々のプラント状態が存

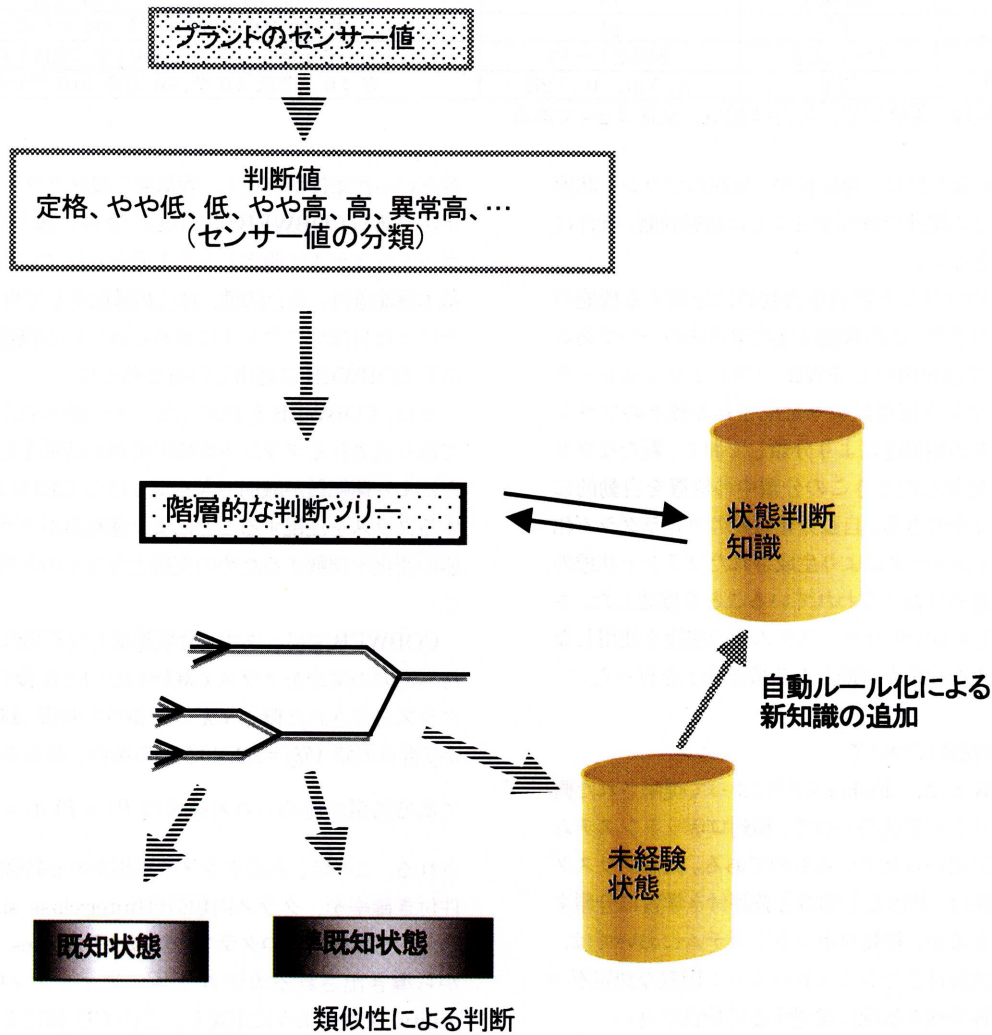


図7 プラント機能モデルによる判断過程

表1 プラント模型におけるセンサー値と判断値の対応

機器の部位	センサー値	プラント模型における測定値との対応	センサー値に基づく判断値
原子炉容器	入口温度	$(t4+t6)/2$	異常低 50 やや低 71 定格 75 高
原子炉容器	出口温度	$t5$	異常低 50 低 75 やや低 95 定格 105 高
原子炉容器	圧力	$p1$	低 200 定格 300 高
高温配管 A,B	代表温度	A: $(t5+t2)/2$ B: $(t5+t9)/2$	異常低 50 低 75 やや低 95 定格 105 高
高温配管 A,B	圧力	$p1$	低 200 定格 300 高
低温配管 A,B	代表温度	A: $(t3+t4)/2$ B: $(t8+t6)/2$	異常低 50 やや低 71(72) 定格 75(77) 高
低温配管 A,B	圧力	$p1$	低 200 定格 300 高
蒸気発生器 A,B	入口温度	A : $t2$ B : $t9$	異常低 50 低 75 やや低 95 定格 107(B105) 高
蒸気発生器 A,B	出口温度	A : $t3$ B : $t8$	異常低 50 やや低 64(60) 定格 72 高
蒸気発生器 A,B	圧力	$p1$	低 200 定格 300 高
蒸気発生器 A,B	蒸気圧力	A : $p2$ B : $p3$	零 10 低 80 やや低 100 定格 200 やや高 250 高
蒸気発生器 A,B	給水流量	A : $V2L$ B : $V2R$	零 1.0 異常低 3.0 低 6.0 定格 10.0 やや高 15.0 高
蒸気発生器 A,B	蒸気流量	A : $V2L$ B : $V2R$	零 1.0 異常低 3.0 低 6.0 定格 10.0 やや高 15.0 高
蒸気発生器 A,B	二次側保水温度	A : $t1$ B : $t7$	異常低 50 低 66 定格 81.5 高 91 異常高
一次冷却材ポンプ A,B	温度	A: $(t3+t4)/2$ B: $(t6+t8)/2$	異常低 50 やや低 71(72) 定格 75(77) 高
一次冷却材ポンプ A,B	流量	A : $V1L$ B : $V1R$	逆流 -1 ゼロ 1 自然循環 10 低 15 定格 20 高
加圧器	液相温度	$t5$	異常低 50 低 75 やや低 95 定格 105 高
加圧器	圧力	$p1$	異常低 180 低 200 定格 300 やや高 350 高
加圧器	サージ流量	0(固定データ)	-5 定格 5 (固定データ 0 : 常に定格と判断)
主給水ポンプ A,B	流量	A : $V2L$ B : $V2R$	零 1.0 異常低 3.0 低 6.0 定格 10.0 やや高 15.0 高

注) 各測定値の単位は、温度は℃、圧力はkPa、流量はg/sである。

在する。この場合には、運転員が、現在のプラント状態を他の状態との関連で理解することは状態判断、操作に貴重な支援となる。

この複数のプラント状態を自動的に分類する機能の開発を行った^{(15),(16)}。この機能は逐次学習法の一つである COBWEB 手法を用いて PWR プラントシミュレータあるいはプラント模型により生成される種々のプラント状態を相互の類似度により分類しておく。新たなプラント状態を付加したときこの分類中の位置を自動的に判定することができる。自動分類機能のプロラグラム化を行い、シミュレータにより生成されたプラント状態の分類結果が適正におこなわれていることを確認した。さらに、機能モデルでのサブシステム間の関連を使用しない、より自由な設定が可能となる機能向上を行った。

3.5.1. COBWEB について

COBWEB とは、Fisher ら⁽¹⁷⁾によって提唱された概念クラスタリング手法の一つで、移動ロボットシステムの研究などに用いられているものである。概念クラスタリングの方法は、教師なし学習と教師付き学習に分類することができるが、移動ロボットシステムにおいては、

- ・ 事前に教師付きでシミュレーション困難な想定不能な多種多様な状況に遭遇する可能性が高い
- ・ この様な状況下においても、何らかの観測値に基いた自動対応を行う必要がある

等といった条件が存在し、教師無し概念クラスタリング手法である COBWEB はこれらの条件に適合し移動ロボットシステムに適応しようと考えられている。さらに基本機能維持、自己防護、自己組織化そして自己改良等といった自律型プラントに求められている機能の条件にも COBWEB は適用し得ると考えた。

また、COBWEB を利用したツリー表示中に一定間隔で取り込まれるプラント状態の最新の状態を色分けなどにより運転員が識別できるようにしておけば、その属するクラスを注視することにより運転員がプラント状態の変化を理解するための支援となるものと考えられる。

COBWEB では、まず、分類基準となる類似の概念を持つものの集合をクラス $CK(k=1,2,\dots)$ と定義する。このクラス分けされた概念 Ck の i 番目の特徴 $A_i(i=1,2,\dots)$ が j 番目の値 $V_j(j=1,2,\dots)$ をとる場合、ある事例においてある特徴が認められる確率は $P_d = P(A_i = V_j)$ と表される。この時、あるクラスの事例がある特徴をもつ条件付き確率を、クラス内類似性(inter-class similarity)として定義し、このクラス内類似性と Bayes の法則等から導き出されるカテゴリユーティリティ(category utility) を次のように定義し、この CU 値により分類を行うものである。

$$CU = \frac{\sum_{k=1}^n P(C_k) [\sum_i \sum_j P(A_i = V_{ij} | C_k)^2 - \sum_i \sum_j P(A_i = V_{ij})^2]}{n} \dots(1)$$

3.5.2. COBWEB の基本操作

COBWEB の基本操作としては、新しい事例が入力されたときに、

- 操作1 既存のクラスへの新事例の追加
- 操作2 新事例のみの新しいクラスの生成

の2種類がある。これらの操作を示したものが、図8(a),(b)である。

まず、新事例 x を操作1によって既存のクラス A,B,C のそれぞれに暫定的に加え、各々の場合について CU 値を求める。次に操作2によって暫定的に新しいクラス D を生成し、この場合の CU 値を求める。以上の操作結果から、最大の CU 値の場合を、そのレベルでの最適な操作として採用する。階層的な樹状構造がすでに構築されている場合は、まず階層のレベル1について前述の一連の操作を行い最も適合するクラスを決定し、以降その決定されたクラスの子クラスについて同様の操作を再帰的に行っていく。この操作を、最終的に新事例のみからなるクラスを生成するまで続ける。

COBWEB の学習方法は、主として前述の操作1,2によって行われる。しかしながら、この学習される概念は遭遇する事例の順序によって変動し、特に事例が少数の場合には、遭遇する事例の順序にその結果が依存し、学

習の初期段階などでは偏ったクラスを生成する可能性が大きい。これを回避するための手法として、更に以下に示す2つの操作が用意されている。

- 操作3 既存の2つのクラスの結合
- 操作4 既存のクラスの分離

これらの操作により、一旦生成された階層構造が、部分的に再構成される。以上のような、4つの操作により COBWEB の概念クラスの構築は行われていく。

3.5.3. COBWEB による分類

COBWEB を用いたプラント状態の分類分けの有効性について検討するために、PWR プラントシミュレータから様々な状態のデータをランダムに18セット収集し、分類分けを行ってみた。まず、A から F までの6種類の状態をアルファベット順で読み込んで分類を行ってみた。その結果を図9(a)に示す。中間出力でも異なる状態の A,C,D と出力上昇と炉停止からなるグループに分かれている。出力上昇と炉停止が1グループになっているのは、判断対象のデータが、プラント停止状態から出力上昇に移る直後の状態(B)と、緊急停止による炉停止直前の状態(F)であって、相互に類似の値を示したためと思われる。今回の分類基準による分類では、適当なものと思われる。

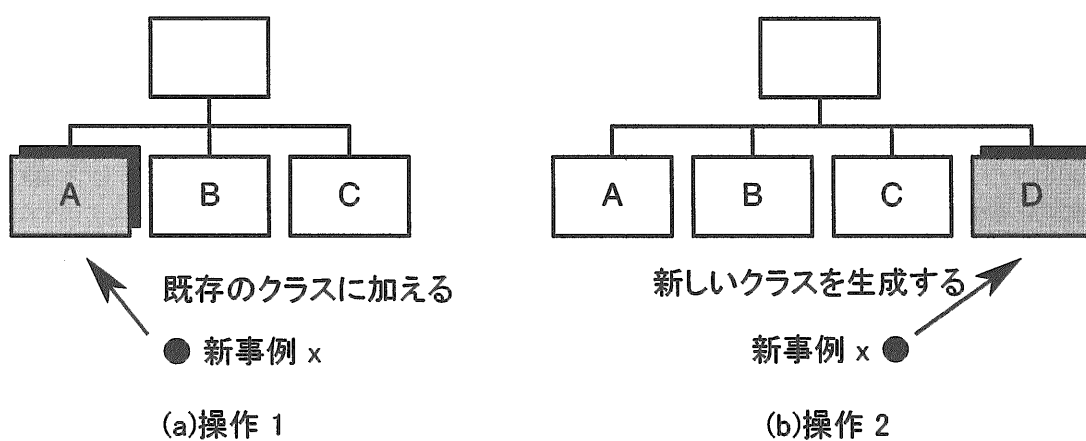


図8 COBWEB の基本操作1及び2

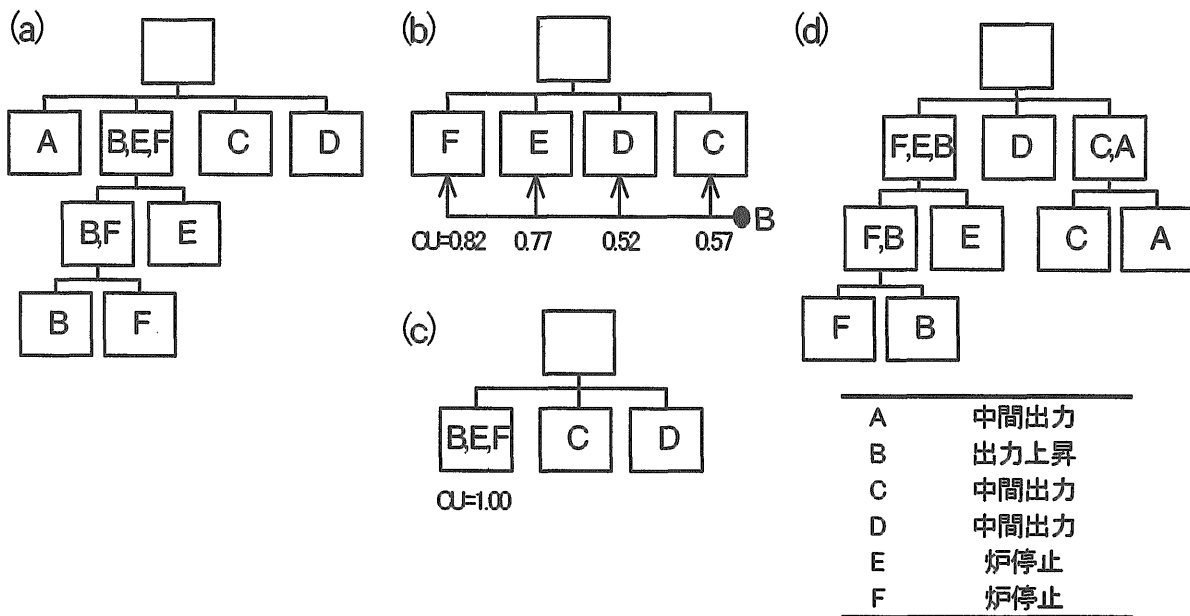


図9 COBWEBによる分類過程

次に、同じデータを前述の場合と逆の順番、Fから読み込む途中の、Bのデータが加えられる際のプロセスについて示したものが図9(b)である。COBWEBの操作では、最初の2個のデータは、それぞれが2個のクラスを作り、1個のクラスを形成することはない。したがって、「E」と「F」は別々のクラスを形成してしまう、そのため(b)に示すようにF~Cまで4つのクラスが形成される。この状態に新たにBを加えた場合には、(b)の図から明らかなように最大のCU値はFのクラスに加えた場合に得られる。ここで、操作3の「結合」を行った場合は(c)の図に示す様にさらに大きなCU値が得られる。この結果、BはFとEとともに3つの要素でクラスを形成することになり、このクラスについては(a)と同じ結果が得られ、操作3の有効性が認められる。しかしながら、この結果にさらにAを加えた場合の結果が(d)図であり、(a)図とは異なった結果が得られている。この点については、新しいデータが加えられる時点での既存の分類構造に依存し、異なった結果が得られるものと考えられる。

次に、今回収集したすべてのデータをアルファベット順で読み込み分類を行った結果を示したものが図10である。図中、説明のためにプラントの出力と時間の関係を略図で示してある。

すると、定格に移行する初期の段階、起動直後およびほぼ停止した状態、定格運転状態から停止に移行する過程そして運転停止直前の状態の各グループに分けることができ、実際に各データを詳細に調べこの結果と比較検討した結果も妥当なものであった。図中の各矢印の示

しているポイントについても、個々のデータから得られるプラントの状態とその変化等の情報と、分類された結果の構造はほぼ矛盾しないものであり、今回の基準による分類は適当であろうと思われる。

この結果に、同じプラント状態(I)を多数加え、その影響について検討した。Iを更に32加え(計33)全体で50の要素となった場合でも、後から加えられたIは、すべて同じクラスに含まれ分類上問題はなく、また全体の構造変化は起こらなかった。

3.5.4. 連続データの分類

PWRプラントシミュレータから得られるプラント状態が連続的に変化する際のデータを分類する事を検討した⁽¹⁸⁾。

基本的なプラント状態の変化として、(a)起動→定格→炉停止という状態を分類分けした。その結果得られたツリー構造を大きく6つのグループ(記号●■▲●○◇で表記)に分けて考えることにする。時間と出力変化の関係を示したグラフ上に、分類された結果を記号を用いて表したものが図11である。この図から、出力変化に対応した分類が適切に行われていることがわかる。

更に、連続的に変化していく状態を加えて分類した結果が図12である。ある状態から他の状態へとわずかでも変化が起こった場合に別のグループに分類され、プラント状態の変化を適切に判断していることがわかる。

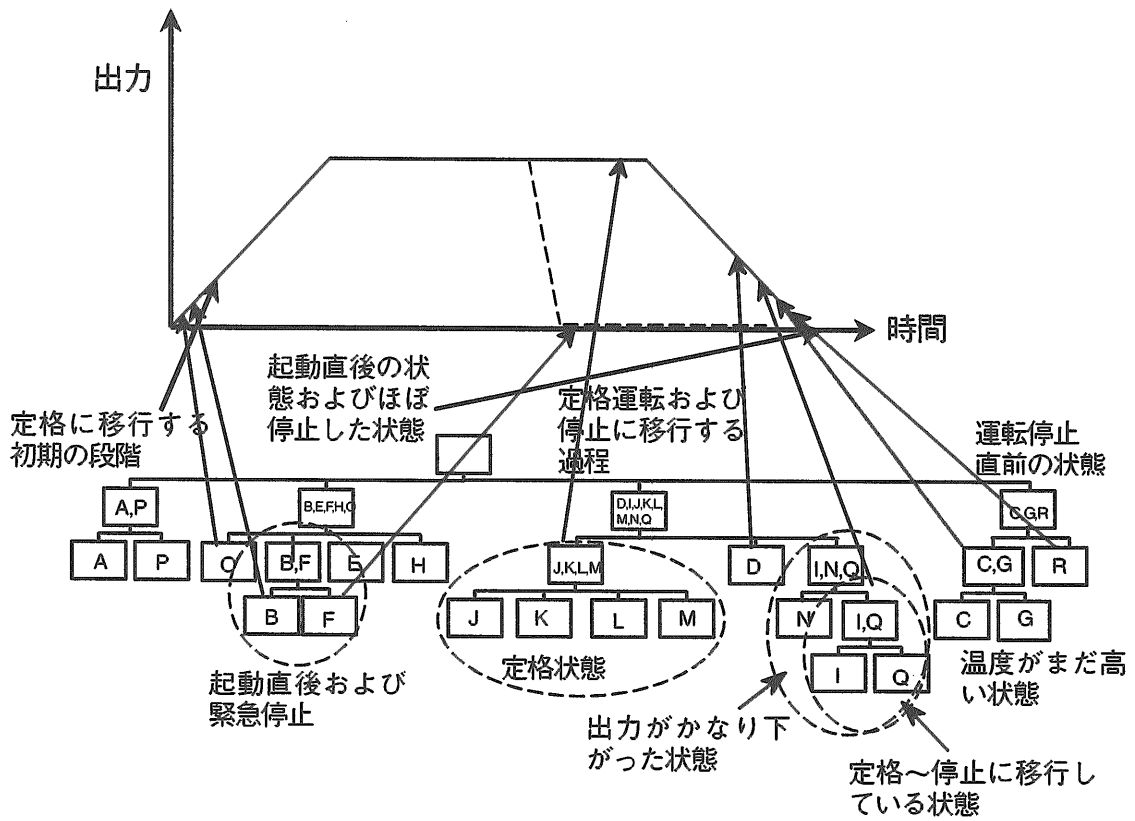


図 10 COBWEB による自動分類結果

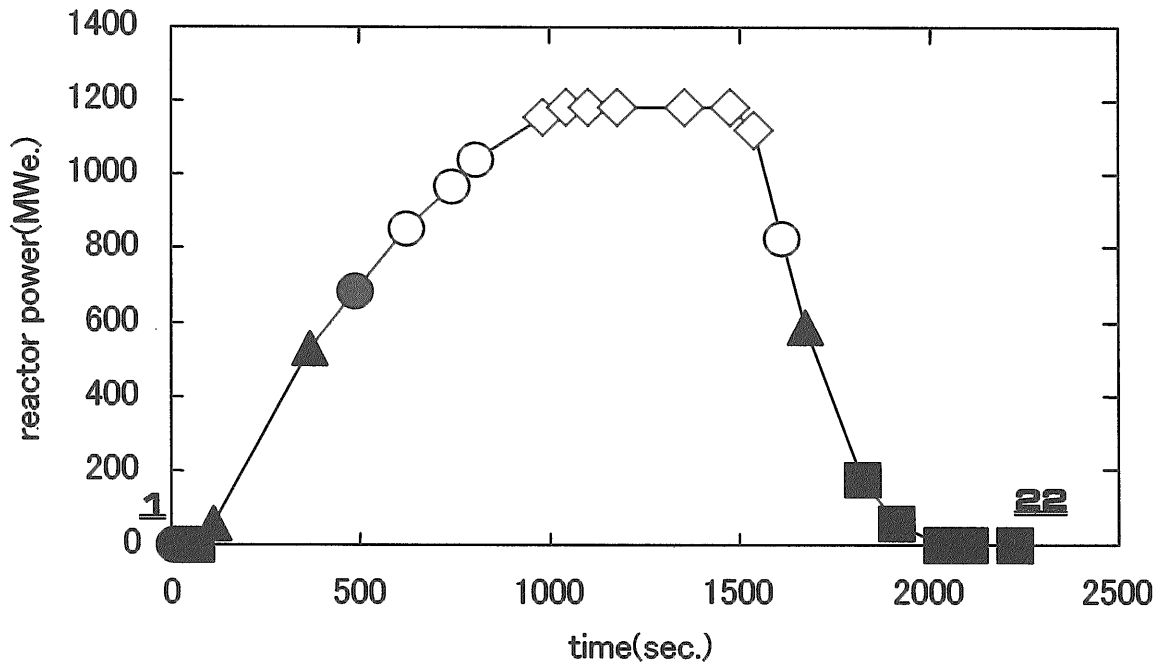


図 11 連続的に変化させたプラント状態の分類結果

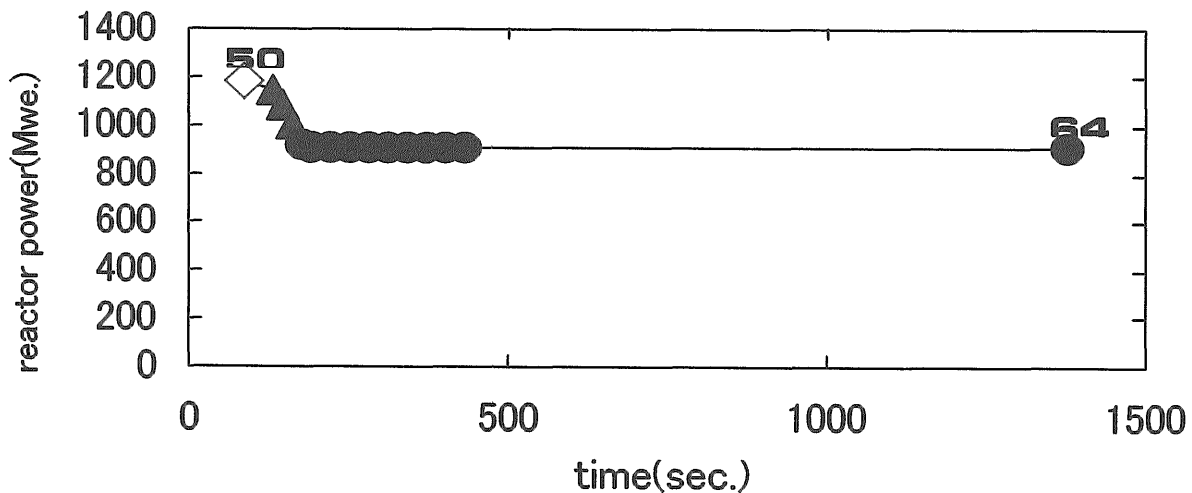


図12 プラント状態微小変化の判別例

3.5.5. プラント模型との接続

このプラント状態自動分類機能も PWR プラント・シミュレータを対象として開発を進めてきた。この自動分類機能において表 2 に示すプラント模型の各測定値を入力値データとし、プラント模型の運転状態の自動分類ができるようにした。各測定値からなる一群の値を1セットとして入力し、前述の逐次学習法によりプラント状態の分類を行った。この場合プラント模型からのデータを受け取れる様にすれば良く、プラント機能モデルで実施したルール、判断値の調整の様な作業は不要である。図 13 に分類の結果得られたツリー構造を示す。ツリー構造中の各枝の意味づけを図中に与えてある。定常運転状態が2箇所に見えてくるが、これは実際の装置が生成する物理量の微妙な条件の違いによる異同を判断している結果と思われる。図中左端部分の定常運転状態は運転開始後の定常状態に対応しており、右から 2 番目の群の定常運転状態は一度炉心温度を上昇させた後定常状態に戻した場合に対応している。

この実験で、プラント模型に対しても分類は適切に行われていることが確認できた。

3.5.6. プラント状態自動分類機能まとめ

プラントの状態の分類方法として、逐次学習法の 1 つである COBWEB を応用した分類方法を検討した結果、様々なプラント状態を適切に分類し、またシステムが経験していない未経験のプラント状態の変化に対しても適切な分類が行われ、有効な方法であることが認められた。

運転員に現在のプラント状態を過去に経験した状態

との類似度により分類・提示することはプラント運転状況把握を容易にするものと思われる。特に故障原因が明確でない突然の変化が発生した場合でもプラント状態判断、故障原因同定にとって貴重な支援情報となり得るものとする。しかしながら、本機能は分類された結果の各グループの意味やその状態の解釈を与えるものではない。この点については今後の検討課題のひとつであるが、各プラント状態の情報からそれらの属するグループ全体の意味や状態の解釈を 3.4. で説明したプラント機能モデルを利用して行うことが考えられる。

3.6. ロボット群動作状況の表示

自律型プラントでは、高度な機能を持ったエージェントの 1 つとして自律ロボット群が存在し保守作業を自律的に実施する事が想定される。

自律型プラント内におけるロボット群の動作状況を運転管理者に伝達する⁽⁹⁾ためには以下の情報を分かり易く表示する必要がある。

各ロボットのプラント内における位置情報、

プラント機器との関与状況。

ロボット相互間での情報伝達の有無、種類、協調関係。

ロボット群とそれらを統括する上位の管理機構との間の制御関係、階層関係。

これらをロボットの動的な行動に対応して表示していく必要がある。この表示についても三次元的画像表現を検討しており、ウインドウ環境、C++ Open Inventor を整備し開発中である。

図 14 は三次元的画像表現の一例であり、中央にプラント

表2 プラント模型各部測定値と対応する自動分類機能入力項目

プラント模型測定値	プラント状態自動分類機能 機能機器名	入力項目 センサー値
1次系炉心入口温度左右の平均値	原子炉容器	入口温度
1次系炉心温度	原子炉容器	出口温度
炉心圧力	原子炉容器	圧力
炉心圧力	加圧器	圧力
1次系炉心温度	加圧器	液相温度
1次系蒸気発生器入口温度	蒸気発生器 A	入口温度
1次系蒸気発生器出口温度	蒸気発生器 A	出口温度
炉心圧力	蒸気発生器 A	圧力
2次系蒸気発生器圧力	蒸気発生器 A	蒸気圧力
2次系流量	蒸気発生器 A	給水流量
2次系流量	蒸気発生器 A	蒸気流量
2次系蒸気発生器出口温度	蒸気発生器 A	二次側保有水温度
1次系蒸気発生器入口温度	蒸気発生器 B	入口温度
1次系蒸気発生器出口温度	蒸気発生器 B	出口温度
炉心圧力	蒸気発生器 B	圧力
2次系蒸気発生器圧力	蒸気発生器 B	蒸気圧力
2次系流量	蒸気発生器 B	給水流量
2次系流量	蒸気発生器 B	蒸気流量
2次系蒸気発生器出口温度	蒸気発生器 B	二次側保有水温度
2次系流量	主給水ポンプ A	流量
2次系流量	主給水ポンプ B	流量
1次系流量	一次冷却材ポンプ A	流量
左側ループ1次系炉心入口温度と 1次系蒸気発生器出口温度の平均値	一次冷却材ポンプ A	温度
1次系流量	一次冷却材ポンプ B	流量
右側ループ1次系炉心入口温度と 1次系蒸気発生器出口温度の平均値	一次冷却材ポンプ B	温度
左側ループ1次系炉心温度 =1次系蒸気発生器入口温度	高温配管 A	代表温度
炉心圧力	高温配管 A	圧力
右側ループ1次系炉心温度 =1次系蒸気発生器入口温度	高温配管 B	代表温度
炉心圧力	高温配管 B	圧力
左側ループ1次系炉心入口温度と 1次系蒸気発生器出口温度の平均値	低温配管 A	代表温度
炉心圧力	低温配管 A	圧力
右側ループ1次系炉心入口温度と 1次系蒸気発生器出口温度の平均値	低温配管 B	代表温度
炉心圧力	低温配管 B	圧力

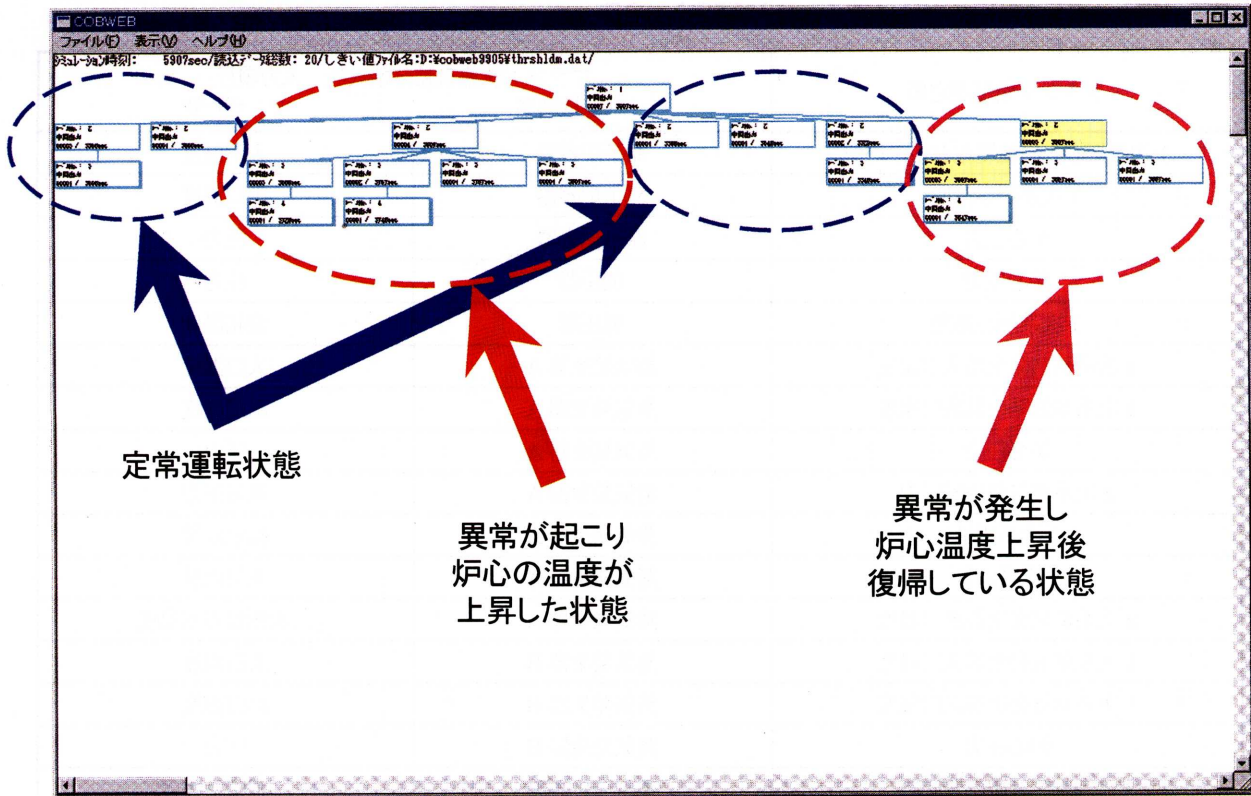


図 13 自動分類機能によるプラント模型の状態分類結果

模型があり、理研で開発したロボット3台がそれを取り囲んで観察している。実際のロボットの行動に伴って画像中のロボット位置も変化し、ロボット間の情報のやりとりも画一的に表示する事を検討中である。

3.6.1. ロボット群行動のシミュレーション

理化学研究所で開発中のロボット群行動の表示に先立ち、表示方法の要件検討のため、ロボット群行動のシミュレーションプログラム (ARSP: Autonomous Robot Simulation Program) を作成した。

6個の同等のサブシステムより構成された仮想的なプラントを対象とし、プラント内を巡回ロボット群が点検のため移動しているとした。各サブシステムは正常状態、軽故障状態、重故障状態の3状態を取り、単位時間当たりの故障率を一定として乱数を用いて故障を発生させている。

軽故障の場合は1組3台のロボットにより修復され、重故障の場合は1組5台のロボットにより修復されるとした。

3.6.2. 個々のロボット行動

プラントの内を巡回しているロボットは当初すべて

同等とし、以下の機能を与えた。

- ①プラント内のサブシステム間をあらかじめ決められた順番に従って移動していくが、他のロボットが現に検査中の場合はそこを飛ばして次へ移動する。
- ②サブシステムとの距離が60単位以内(ロボットサイズは32単位)になるとサブシステムの状態を検出して正常・軽故障・重故障の判断を行う。
- ③故障しているサブシステムを最初に発見したロボットがリーダーロボットとなる。
- ④リーダーロボットは他のロボットにサブシステムの故障情報を伝える。
- ⑤他のロボットに現在の役割を尋ねる。
- ⑥巡回行動中のロボットの中から距離の近い順に照明ロボット、修理ロボットの役割を割り付け集合させる。重故障の場合は2組の照明・修理ロボットを集合させる。照明ロボット：指定された場所に移動しサブシステムを照らす。修理ロボット：指定されたサブシステムの修理を行う。必要ロボット数が集まらない場合は⑤の役割の問い合わせを繰り返す。
- ⑦修理完了後サブシステムが正常状態に戻ったことを他のロボットに知らせる。

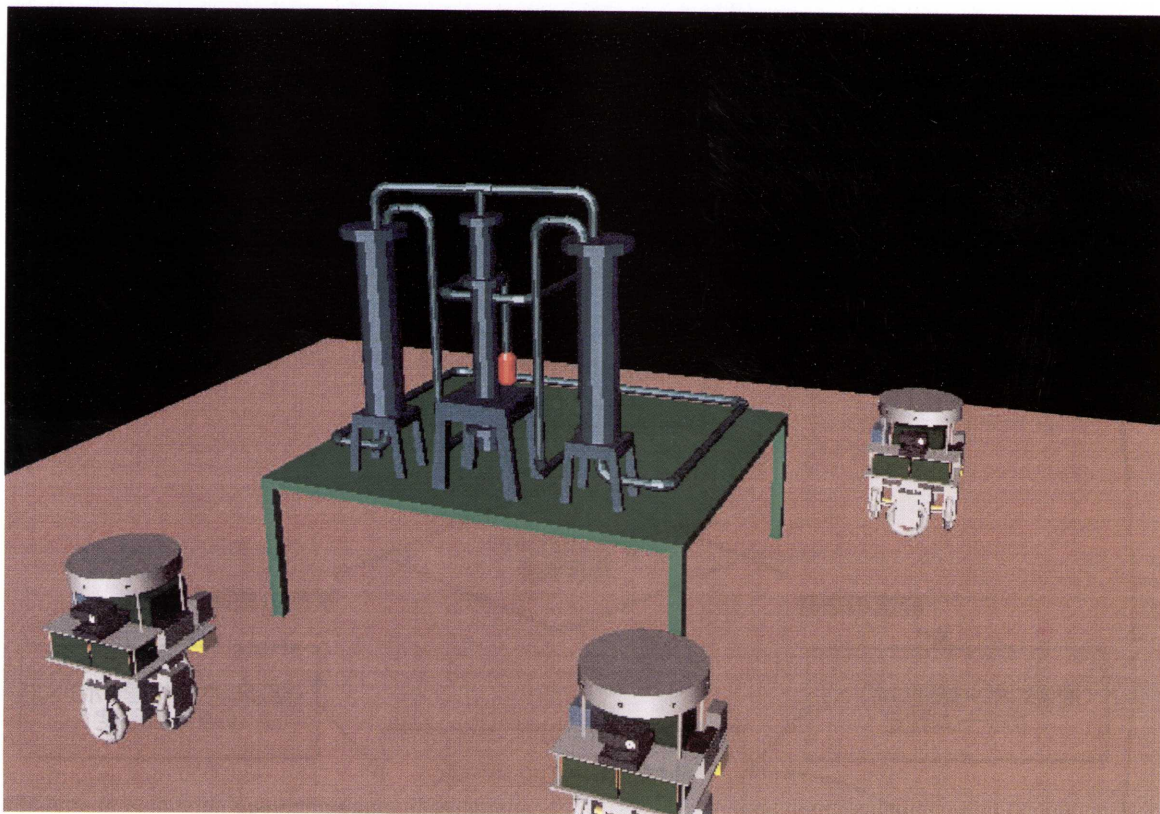


図 14 プラント模型及びロボット群の表示の1例

- ⑧照明ロボット、修理ロボットの役割を解除する。
- ⑨自身のリーダーロボットの役割を解除し巡回行動に戻る。

3.6.3. 巡回点検のアルゴリズム

巡回点検しているロボット群の行動アルゴリズムをフローチャートにあらわしたのが図 15 である。

3.6.4. ロボット行動の表示

図 16 はロボット群行動のシミュレーション中の状態をアニメーション表示した例である。図中にプラントを構成するサブシステムが6基置かれ、14 台のロボットが巡回している。サブシステムに故障が発生すると最初に発見したロボットがチーフとなり、故障発生を全てのロボットに知らせるとともに、付近に存在する2~4 台のロボットを呼び寄せる。それらにそれぞれ照明係、修理係を割り当てチームとして修理を実施する。故障が回復された後は、再び巡回に戻るといった行動をとっている。

今後、このロボット群行動のモデル及びアニメーション表示を理研ロボット群の動作表現に活用していく予定である。

4. 統合管理システム

4.1. システム構成

前章までで説明したすべての機能を統合して管理するシステムを開発した⁽²⁰⁾。図 17 にこれらの関連を示す。低コストで大画面を実現するため4 個の CRT ディスプレイを用いて一枚の大画面を表示した。この大画面中に各種の機能を並列に表示して任意の機能への自由なアクセスを可能とした。大画面中にはプラント模型および周辺に存在するロボット群のモニター画像も表示されている。

ウインドウズ NT を基本として、異なる OS 上のソフトを、X 端末を PC 上を実現することにより表示・操作可能とした。図 18 にはこの統合管理システムの設置状態の写真を示す。更に、図 19 には4 枚の CRT 画面により表示される大画面の標準的なレイアウトを示す。黄色い部分に、各機能の画面が縮小されて表示されており概略の動作状況も確認できる。縮小画面上でダブル・クリックすると所定の位置へ拡大表示され再びダブル・クリックすると元の位置へ縮小表示される。この図の場合、プラント状態三次元画像表示が右上に、ロボット群行動の三次元画像表示が右下に、プラント状態自動分類機能の画面が左下に拡大表示されている。縮小画面の中には、PWR シミュレータ、プラント機能モデル、プラント模

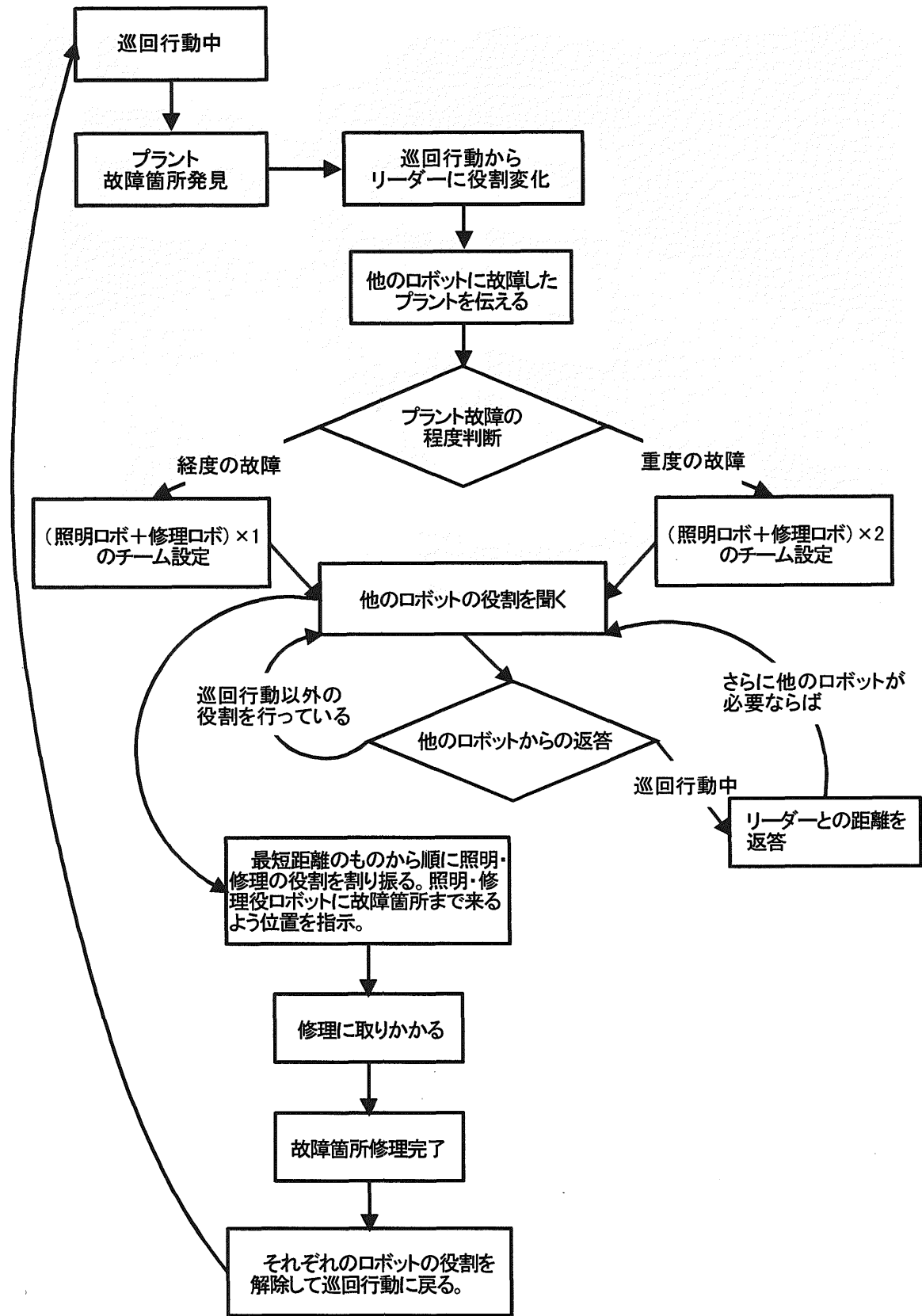


図 15 ロボット群巡回点検のアルゴリズム

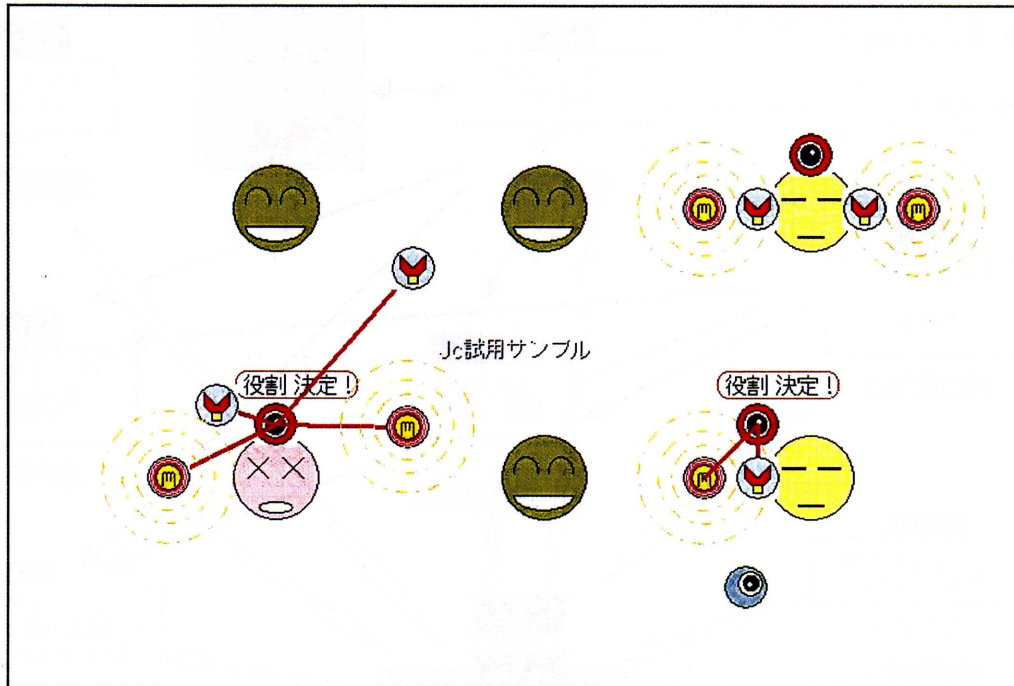


図 16 ロボット群行動のアニメーション表示

型管理 PC の画面等が見られる。

4.2. 総合評価実験

前節で説明した統合管理システムを用いて、自律型原子力プラントにおける監視のための支援機能及び統合画面インターフェイスの有効性を評価する実験を実施した。

4.2.1. PWR プラントシミュレータと結合しての実験²⁾

評価対象とした機能はプラント状態判断(プラント機能モデル)、プラント状態自動分類機能、三次元画像表示で、従来型のインジケータ、トレンドグラフは用いず、自律機能が働いているか否かの表示もなしとした。

プラント状態を判断する対象として PWR シミュレータとした場合の評価を行った結果をここでは述べる。被験者は工学系大学教育を受けた 20 代後半から 30 代前半の人間 3 人を選定した。実験に先立ち、被験者にレクチャーを受けさせ本システム及び各種機能を習熟させた。具体的には以下に示す 4 種類のプラント運転状態を経験させ、事象を理解させた。

- ①出力 100%の定格運転、
- ②出力 100%の定格運転中主給水ポンプが故障し自律機能が働き 50%出力運転へ移行する、
- ③出力 100%の定格運転中主給水ポンプが故障し自律機能が働かず出力 0%となり炉停止、

④出力 100%の定格運転中主給水ポンプが故障し自律機能が働かず 100%出力運転を継続し異常事態へと向かう。

これに対して、実験対象とし被験者に判断してもらったシナリオは次の 2 種類であった。

- A. 出力 100%の定格運転中主給水ポンプが故障し自律機能が働き 50%出力運転へ移行する。
- B. 出力 100%の定格運転中主給水ポンプが故障し自律機能が働かず 80%出力運転へ向かうが、いずれは炉停止に至る。

評価ポイントは

- ・ 「自律機能が働き危険な状態でないか判断可能か」
- ・ 「自律機能が働かず危険な状態になるか判断可能か」

においた。被験者からの申告事項としては

- ①異常事態発生
- ②自律機能の稼働の有無
- ③故障箇所

の三種とした。取得したデータはこれらの申告時刻、実験後のアンケートによる各機能・統合画面についての意見。また、実験中の被験者の挙動はビデオ撮影により記録しておいた。

実験は 1 人 3 回実施し、所要時間は 1 回平均 20 分間であった。事前には何がいつ発生するかは被験者には知らされていないが、結果的に自律機能動作シナリオを 2 回、正常に動作しないシナリオを 1 回実施した。

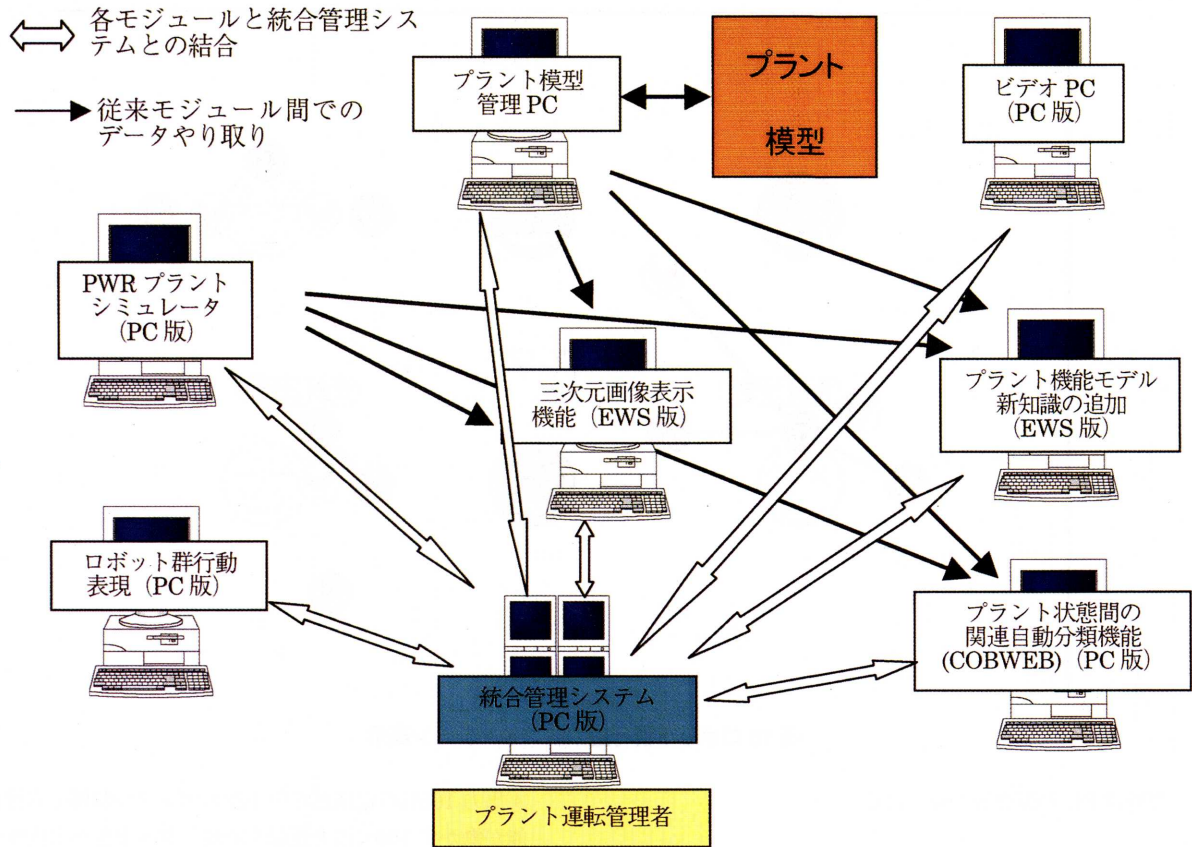


図 17 統合管理システム構成図

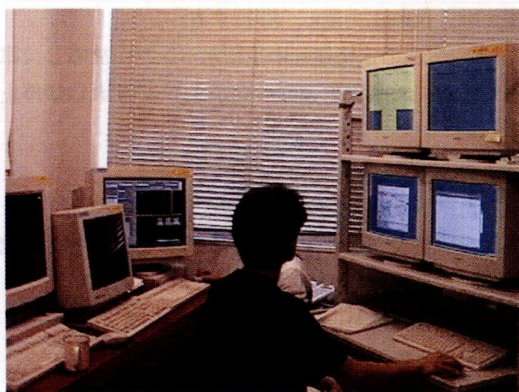


図 17 統合管理システム設置状況

4.2.2. 実験結果

自律機能が動作しているか否かの判断はいずれの被験者も正しく行えた。

自律機能が正常に機能しているとの判断は以下の情報に基づいていた。

- ①三次元画像表示において蒸気発生器水位が回復傾向

或いは安定状態にあることの確認。

- ②三次元画像表示において温度分布が自律運転 50%出力のパターン（経験済みパターン）と同一であることの確認。

- ③プラント機能モデルの判断結果が「中間出力」に落ち着いたことの確認。

逆に、自律機能が働いていないとの判断は以下の情報に基づいていた。

- ①プラント状態自動分類において過渡変化と判断され続けたことの確認。

- ②三次元画像表示において蒸気発生器水位の低下が著しいことの確認。

- ③三次元画像表示において温度分布が自律運転 50%出力のパターン（経験済みパターン）と異なることの確認。

図 19、20 には主要事象と各被験者の判断が下された時刻との関係をグラフで示した。

図 19 からは、被験者Cがやや遅れたタイミングで異常状態発生、自律機能作用を判断していることがわかるが、いずれも正しい判断を下している。

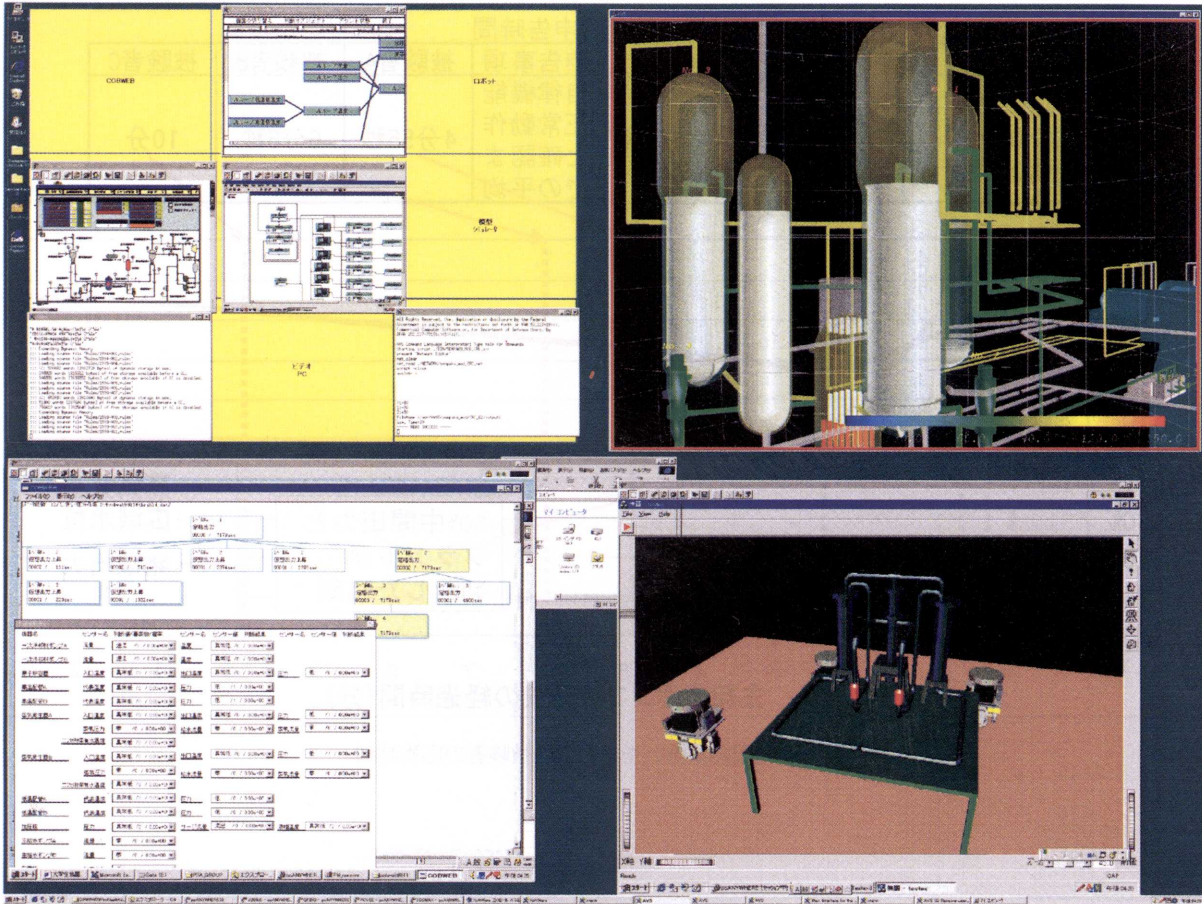


図 18 統合管理システム大画面の表示例

図 20 での自律機能が働かなかった場合の被験者の応答をみると、異常確認は 3 者とも問題なくできたと考えられるが、自律機能の不動作確認については被験者 C が手間取り、蒸気発生器水位が 20% まで下がってしまった危険な状態まで進んでから確認している。

被験者 C は、4 分後には三次元画像表示で水位の減少を確認しているものの、4 分 40 秒後にプラント状態自動分類機能进行操作し情報を得、更に 5 分 20 秒後にプラント状態判断进行操作している。その後になって自律機能が働いていないことの確信が得られた。

実験終了後のアンケートを集約した結果、以下の意見が得られた。

プラント状態判断機能(プラント機能モデル)については、故障原因を推定できる点が有効であり数値情報を併記して表示するとより有効である。

プラント状態自動分類機能(COBWEB)については、状態に変化が起きた事を知るのに有効であるが、信頼度がやや低く感じられる事と表記方法をより工夫して欲しい。

三次元画像表示については、全体の状況変化が見え、

全体的な変化が緊迫感を伴って表示されている。しかし、標準状態や故障時の色分布のパターンを憶えておく必要があるので慣れを要する。

4.2.3. プラント模型と結合しての実験⁽²²⁾

3 章で述べた様に、プラント模型に対して各種プラント状態判断機能が動作するように調整した。そこで、プラント状態を判断する対象をプラント模型とした場合についても実験を実施した。

評価対象とした機能はプラント状態判断(プラント機能モデル)、プラント状態自動分類機能、三次元画像表示で、従来型のインジケータ、トレンドグラフは用いていない。また、プラント模型には自律機能は備えられていないため、自律機能の有無は評価対象外となっている。

被験者は工学系大学修士 1 年の学生 1 名(A)及び工学系大学院を卒業した研究業務従事者 2 名(B、C)を選定した。実験に先立ち、被験者にレクチャーを受けさせプラント模型自体の運転、各機能及び本統合システムを十分習熟させた。

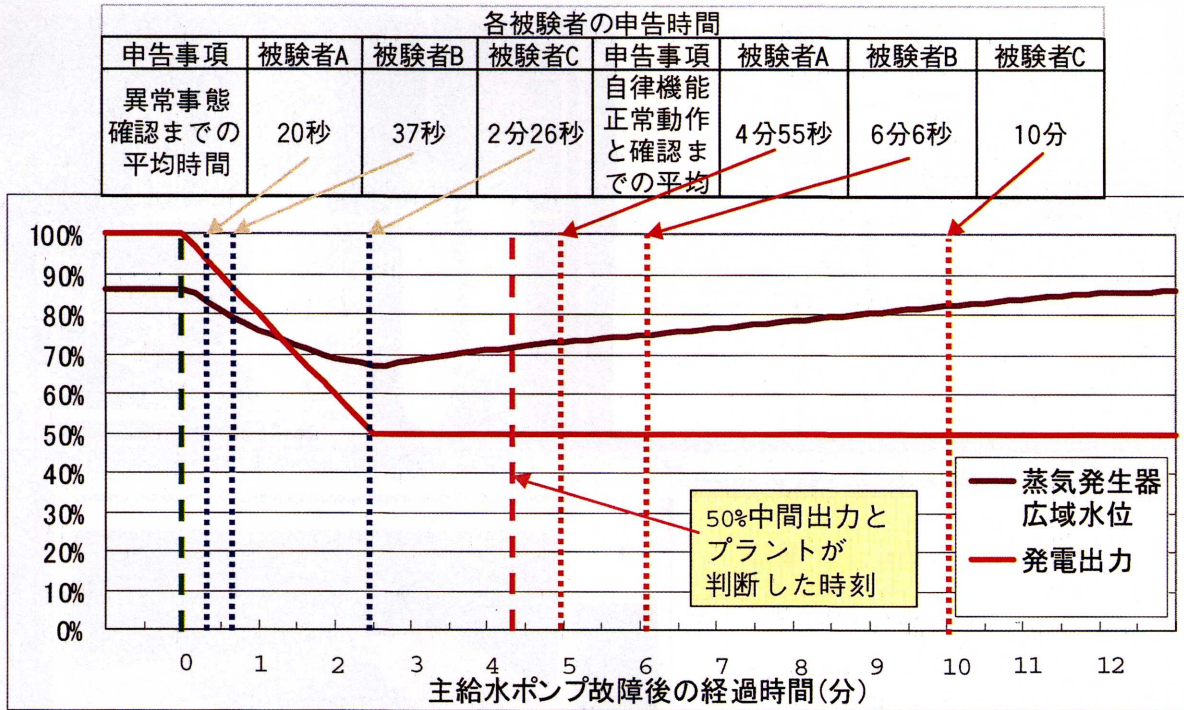


図 19 自律機能が動いた場合の各被験者の応答時刻

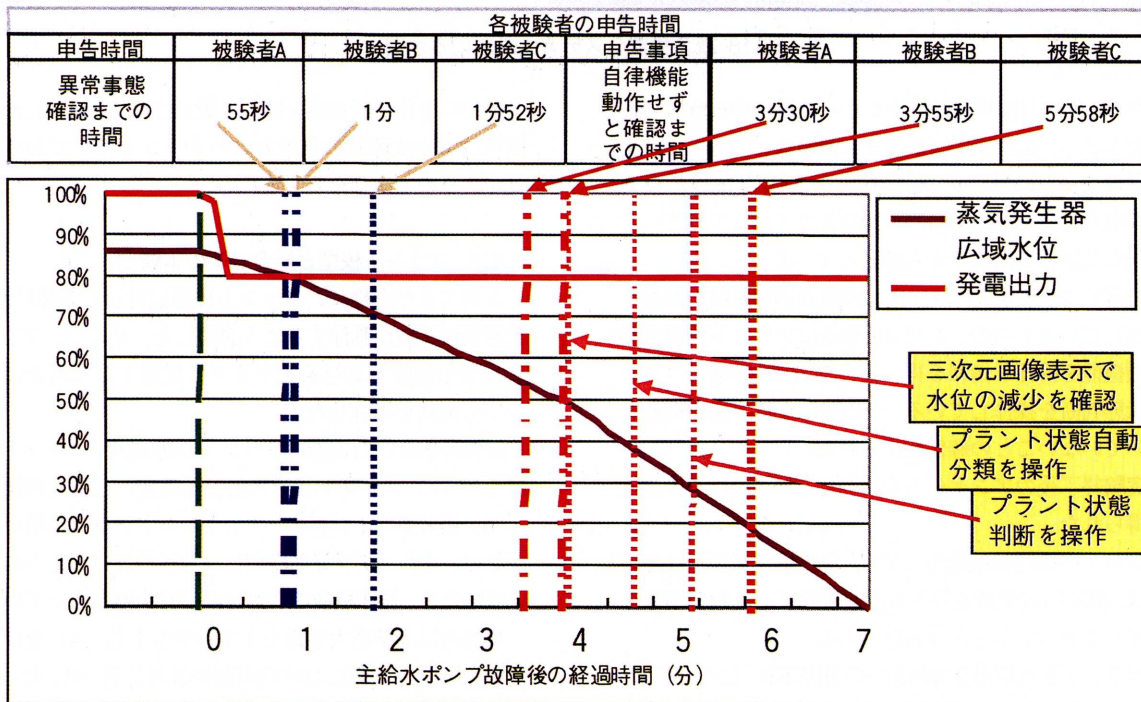


図 20 自律機能が働かない場合の各被験者の応答時刻

4.2.4. 実験結果

図 21 には事象発生と各被験者の判断が下された時刻との関係をグラフで示した。事象としては一次系左側ポンプを停止し、その 5 分後にヒーターの出力を 50% に低下し過剰な温度上昇を防いでいる。この事象を被験者がどの時点で、どの機能を活用して判断できたかを中心に評価した。

実験開始からポンプ停止の発生までの経過時間は被験者により違っているが、図では整理の都合上ポンプ停止時刻を 25 分後にあわせて表示してある。

状態変化の確認は 3 者ともほぼポンプ停止直後に確認できているが、被験者 A は、ポンプ停止と確認するまでにやや長時間を要している。

実験終了後のアンケートを集約した結果、以下の意見が得られた。

プラント状態自動分類機能 (COBWEB) については、状態に変化が起きた事を知るのに有効であるのでアラームとして役立つ。定格状態が続くと新しいクラスを横位置に追加し続けるので、新しい状態が生成されたかと勘違いしてしまう。次の判断まで待ちきれず、正常に動作しているか不安になる。プラント状態自体を判断する情報がない。表示の視認性に劣る点がある。

プラント状態判断機能 (プラント機能モデル) については、ツリーの末端まで使用すると故障原因を推定できる点が有効である。系統図画面により数値情報が得られ

る点も確認に役立った。但し、動作のためのコマンド表記がわかりにくい、更新のための時間がかかりすぎる問題点がある。従って、判断修了時を音声により知らせた方が良い。変化部分が複数箇所ある時はどこからチェックして良いか判断出来ない。また、「概ね確認」の判断は信頼度が低いと感じた。

三次元画像表示については、全体の状況変化を見るのに適しているが、微妙な変化はわかりにくい。定常状態における色の分布状態を完全に記憶しておかないとうまく使いこなせない。デジタル値表示も同時にされると良い。

統合画面では上半分の表示を下に降ろし、横一列に並べた方が見やすいのではないか。その場合良く使用する三次元画像表示と自動分類機能を中央におき、状態判断を端に置くと良い。また、音による情報も付加した方が使い勝手が良くなる。

4.3. 改良点

統合画面インターフェイスの有効性評価実験の結果、以下の項目が改良点として抽出された。①プラント状態自動分類機能：アラームとして使用しているため、音による注意喚起の付加。表示画面視認性の向上。

②プラント状態判断機能 (プラント機能モデル)：機能動作実効のためのコマンド表記の改善、判断修了時の音声による表示。

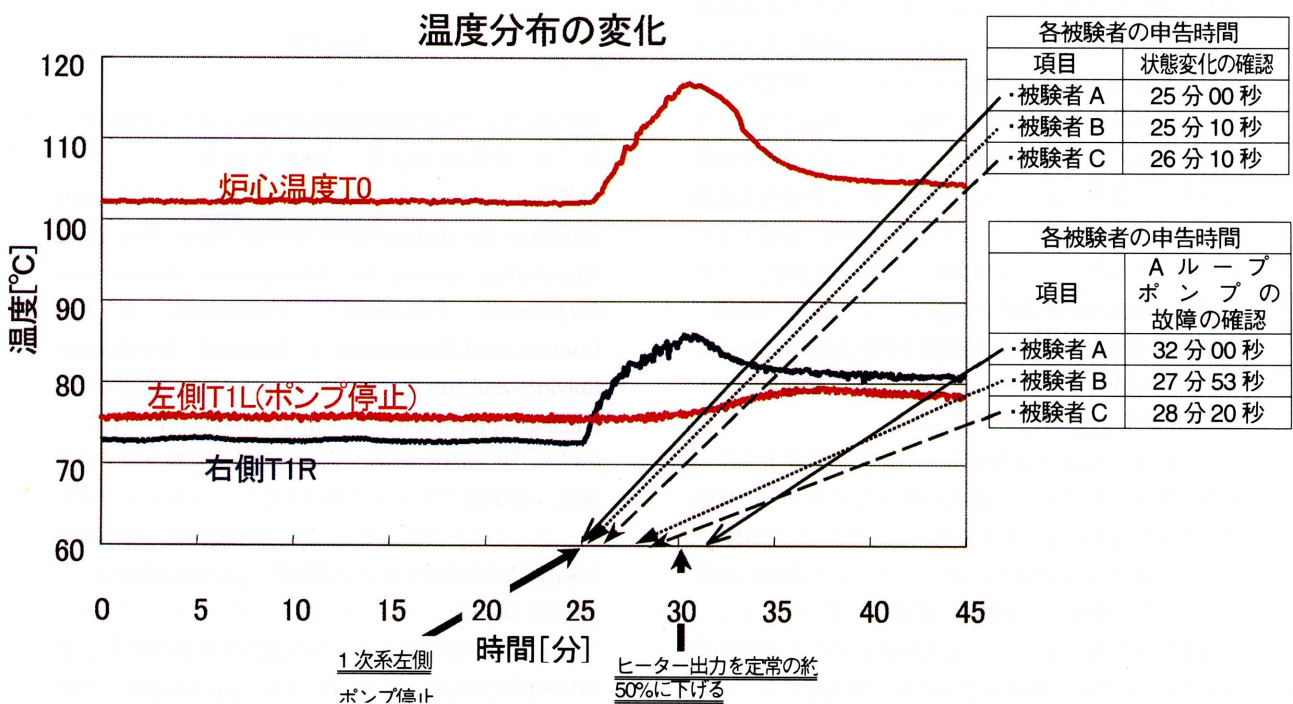


図 21 プラント模型一次系ポンプ 1 台停止時の各被験者の応答時刻

- ③三次元画像表示：状態変化が明瞭にわかるよう色変化に対応する温度幅を狭くする。デジタル値の並記。
- ④統合画面：画面のレイアウトの改善、音声機能の導入。

4.4. 総合評価実験まとめ

今回の評価実験では、従来型の数値情報、トレンドグラフ、アラーム等は併用せず3種類の機能のみを用いて実験を行った。

評価対象とした3機能の役割分担に合理性が見られた。つまり、①プラント状態自動分類で異常に気づき、次に②プラント状態判断機能で原因を推定する。最後に、③三次元画像表示で異常箇所を確認するという使い方が多く見られた。しかし、これら3種の機能間での統一された設計思想が見られない。また、自律機能が働いている場合は目指すゴールに向かっているのか、逸れているのかを判断できる情報が望まれた。

整備した統合管理システムを用いて、今後従来型の表示システム等他の機能とも組み合わせて評価実験を実施し、将来型のマンマシンインターフェースとしての要件を確認していきたい。

5. 結 言

将来型プラントである自律型プラントが安全に運転されるための重要なシステムであると考えられる自律分散協調機能監視システムの要素技術の研究・システム化技術の研究を原子力基盤クロスオーバー研究の一環として参加各機関と協調して実施した。本論では、まず各要素技術の概要を紹介した。いずれも AI 技術を活用した新しい試みであり、それぞれにおいて興味ある成果が得られている。また、各要素技術を有効に活用するためのシステム化として統合管理システムを作成し、それを用いた総合的評価実験を実施した。評価実験の結果、各機能が有機的に活用され役割分担が合理的になされている事を確認した。それとともに、より機能を向上するための指針となる知見も得られた。

ここに示した成果は自律型プラントを設計する際に活用できるだけでなく、現在の原子力プラントの信頼性・安全性向上にも活かされ得る。たとえば、米国スリーマイル島原子力発電所においてプラント各部の状態量が、ここで開発した各機能に接続されていたとすると、異常事態発生後において三次元画像表示により温度分布、流量分布等から補助給水系の弁が開状態であったこと、逃がし弁が開状態で固着していたこと、炉心内の水位が低下していること等が極めて初期に明確に把握で

きたと考えられる。また、プラント機能モデルにより事故発生時のプラント各部の機能・状態が判断され原因となる個所が容易に同定可能である。さらに、プラント状態自動分類機能により、発生した事態が小 LOCA 事故に分類される。それゆえ、スリーマイル島原子力プラントで発生した事態においてはすみやかな対処が可能となり炉心損傷事故には至ることはなかったと考えられる。このように異常事象から順次拡大していくような原子炉事故においては本研究成果の活用により確実に事故への拡大を初期段階で防止でき、現在稼働中の原子炉プラントについても、その安全性の向上に十分寄与できると考える。

さらに、一般に各種のプラント、システムにおいて自律機能を高めて設計する際のマン・マシン・インターフェースの設計にも応用できる。具体的には、船舶、航空、陸上交通システム、化学プラント、電力・ガス供給システム等への適用が考えられる。

本研究成果は、第三期研究「人間共存型プラントにおける人間の認識と理解に適合した運転・保全支援システムの研究」(平成 11 年度～15 年度)における人間の能力に適合したマンマシンインターフェースの研究において活用していき、自律型プラント実現への有用な要素・システム化技術の確立を目指した研究を継続して実施していく。

参考文献

- (1)松岡 猛、“自律分散協調機能監視システムの研究”、原子力工業第 42 巻 5 号、(1996 年 10 月)
- (2)T.Matsuoka, et al., “Toward a New Man-Machine Interface for Autonomous Power Plant Systems - Observation system for Autonomous, Diverse and Cooperative Functions-”, Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Intellectual Human Activity Support for Nuclear Applications (November 1997) pp.107-116
- (3)松岡 猛、沼野 正義、“自律分散協調監視システムの研究 自律型プラントにおける新しいマンマシンインターフェースを目指して”、平成 9 年度秋期 (第 70 回) 船舶技術研究所研究発表会講演集、pp.59-64(1997)。
- (4)松岡 猛 他、“マン・マ シン・インターフェース・システムの自律型プラントへの適応性評価の研究”、船舶技術研究所報告 第 33 巻 5 号、pp.245-281 (1997 年 1 月)
- (5)福戸 淳司 他、“原子力プラント用マン・マ シン・

インターフェイスの評価用シミュレータ”、第31回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p.685 1992年7月

(6)福戸 淳司 他、“エキスパートシステム G2 による PWR 簡易シミュレータの開発”、日本原子力学会秋の分科会講演予講集 D44 (1992年10月)

(7)福戸 淳司 他、“G2 による PWR 簡易シミュレータの開発 (2)”、日本原子力学会秋の分科会講演予講集 F12 (1993年10月)

(8)宮崎 恵子 他、“自律型プラントにおけるマン・マシン・インターフェイスの研究、原子力プラントの三次元画像表示機能の作成”、平成4年度秋季船舶技術研究所研究発表会講演集 pp.111-114 (1992年12月)

(9)宮崎 恵子 他、“マン・マシン・インターフェイスとしての原子力プラント三次元画像表示機能”、平成5年度秋季船舶技術研究所研究発表会講演集 pp.19-22 (1993年11月)

(10)宮崎 恵子、他、“マン・マシン・インターフェイスとしての原子力プラント三次元画像表示機能(第2報)”、平成6年度秋期(第64回)船舶技術研究所研究発表会講演集、pp.29-30(1994).

(11)宮崎 恵子、松岡 猛、“プラント状態3次元画像表示システムの作成”、可視化情報学会・可視化情報シンポジウム (1999年7月)

(12)菅澤 忍 他、“オブジェクト指向言語を用いた PWR プラント機能の表現”、平成5年度秋季船舶技術研究所研究発表会講演集 pp.23-26 (1993年11月)

(13)菅澤 忍、松岡 猛、“階層的なプラント機能モデルによる原子力プラント状態判断機能”、日本原子力学会秋の分科会講演予講集 C45 (1994年9月)

(14)染谷 実、他、“プラント機能モデルによるプラント状態判断機能”、平成6年度秋期(第64回)船舶技術研究所研究発表会講演集、pp.9-12(1994)

(15)三友 信夫、他、“原子力プラント状態の自動分類、COBWEB を用いた自動分類方法”、日本原子力学会秋の大会講演集、B36(1995).

(16)三友 信夫、他、“自律型プラントにおける自律分散協調機能監視システムの研究 その2 プラント状態の自動分類機能の開発”、平成8年度秋期(第68回)船舶技術研究所研究発表会講演集、pp.266-271(1996).

(17)D.H.Fisher, “Knowledge acquisition via Incremental Conceptual Clustering”, Machine learning, Vol. 2, pp. 139-172(1987)

(18)三友 信夫、松岡 猛、“原子炉プラント状態の自動分類機能の開発”、日本原子力学会誌 Vol.42, pp.56-66 (1999年)

(19)松倉 洋史 他、“自律型プラントにおける自律分散

協調機能監視システムの研究 その3 ネットワーク通信の利用”、平成8年度秋季船舶技術研究所研究発表会講演集 pp.272-275 (1996年12月)

(20)松岡 猛、他、“自律分散協調機能監視システムの研究 (1) -統合管理システムの構築-”、日本原子力学会秋の分科会講演予講集 H40 (1999年9月)

(21)三友 信夫、宮崎 恵子、他、“自律分散協調機能監視システムの研究 (2) -統合管理システムの評価-”、日本原子力学会秋の分科会講演予講集 H41 (1999年9月)

(22)松岡 猛、三友 信夫、宮崎 恵子、他、“自律分散協調機能監視システムの研究 (3) -プラント模型を用いた統合管理システムの評価-”、日本原子力学会秋の分科会講演予講集 F23 (2000年9月)