

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う行動をとっている。

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<sup>(20)</sup>。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

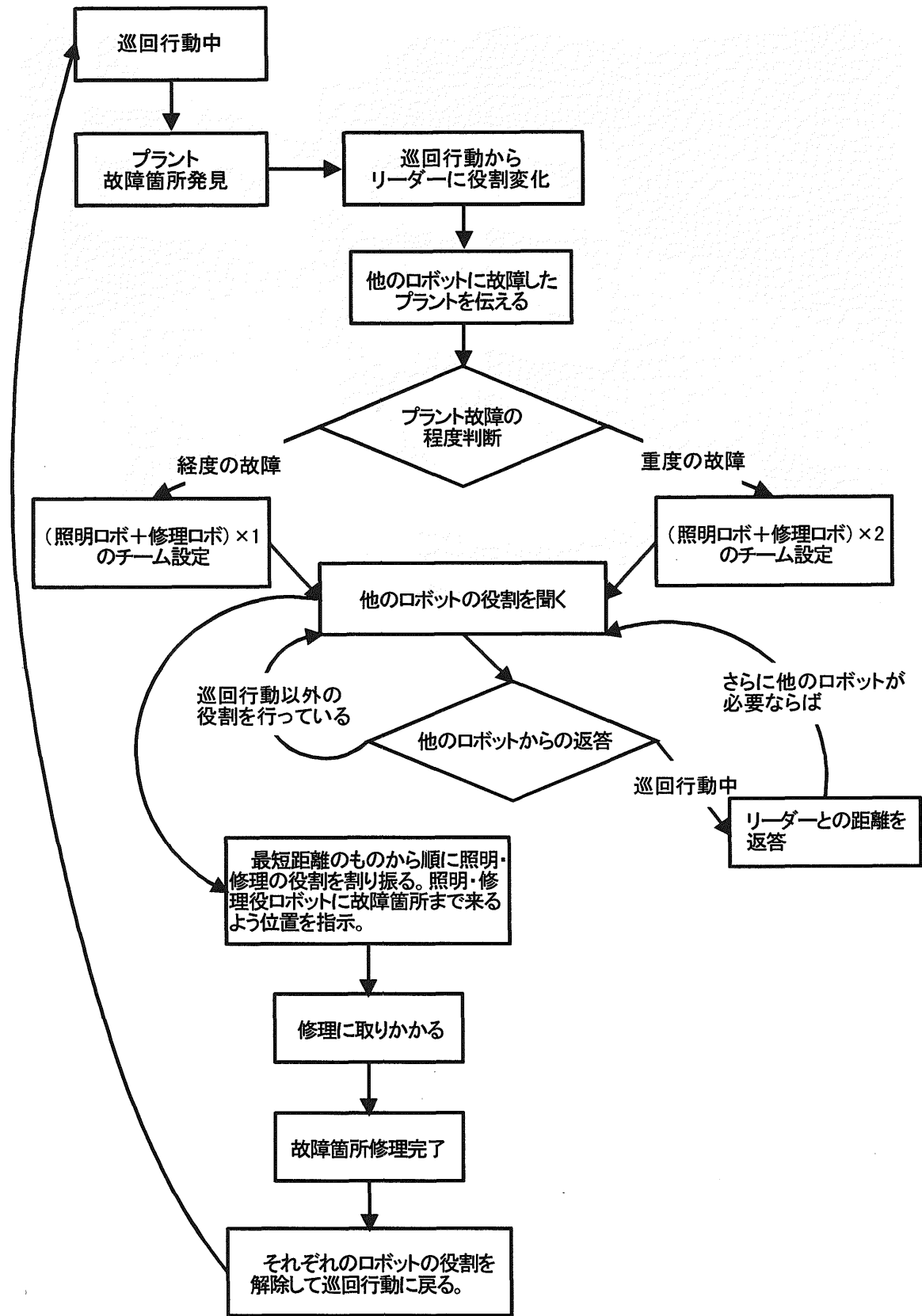


図 15 ロボット群巡回点検のアルゴリズム

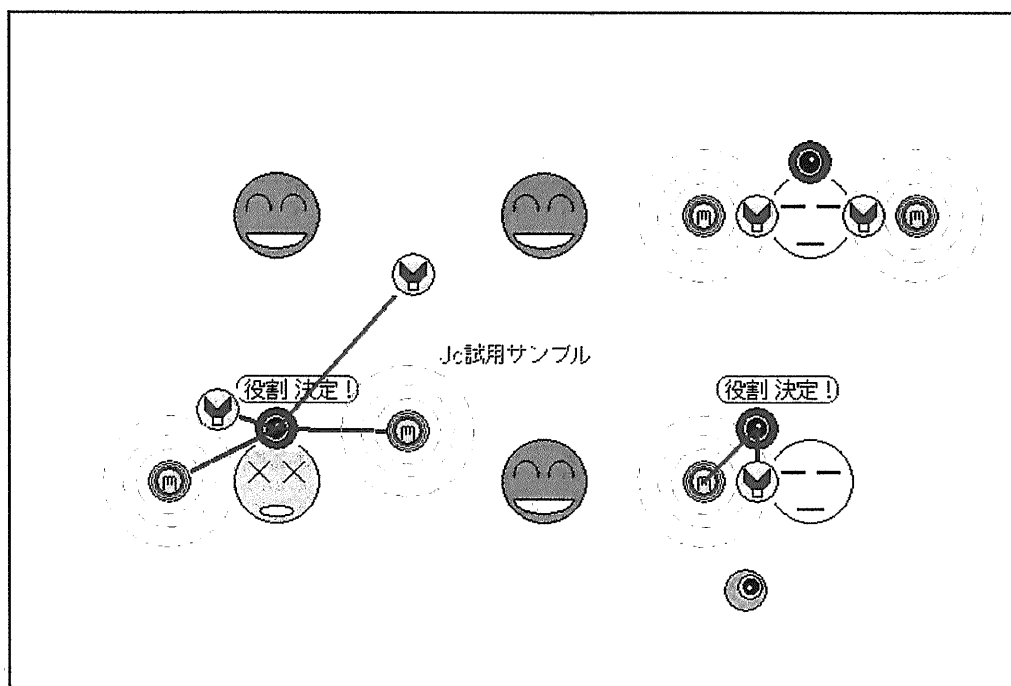


図 16 ロボット群行動のアニメーション表示

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<sup>2)</sup>

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。

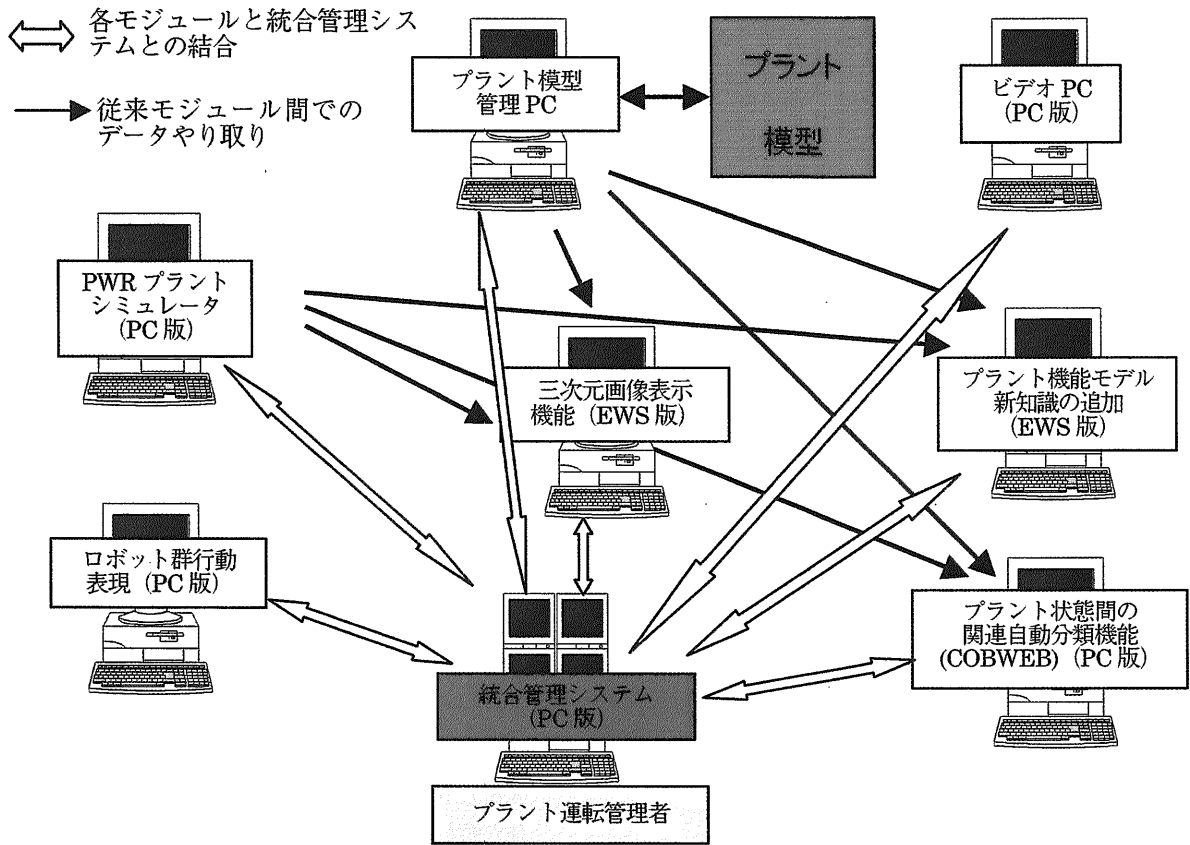


図 17 統合管理システム構成図

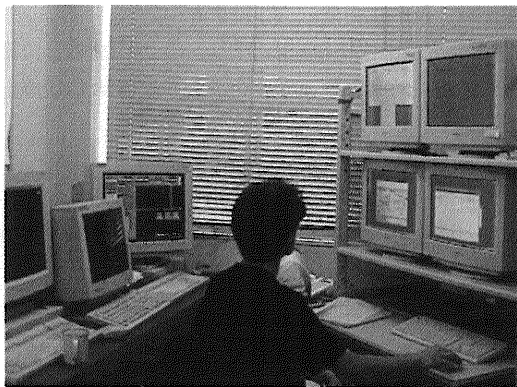


図 17 統合管理システム設置状況

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、自律機能が動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。

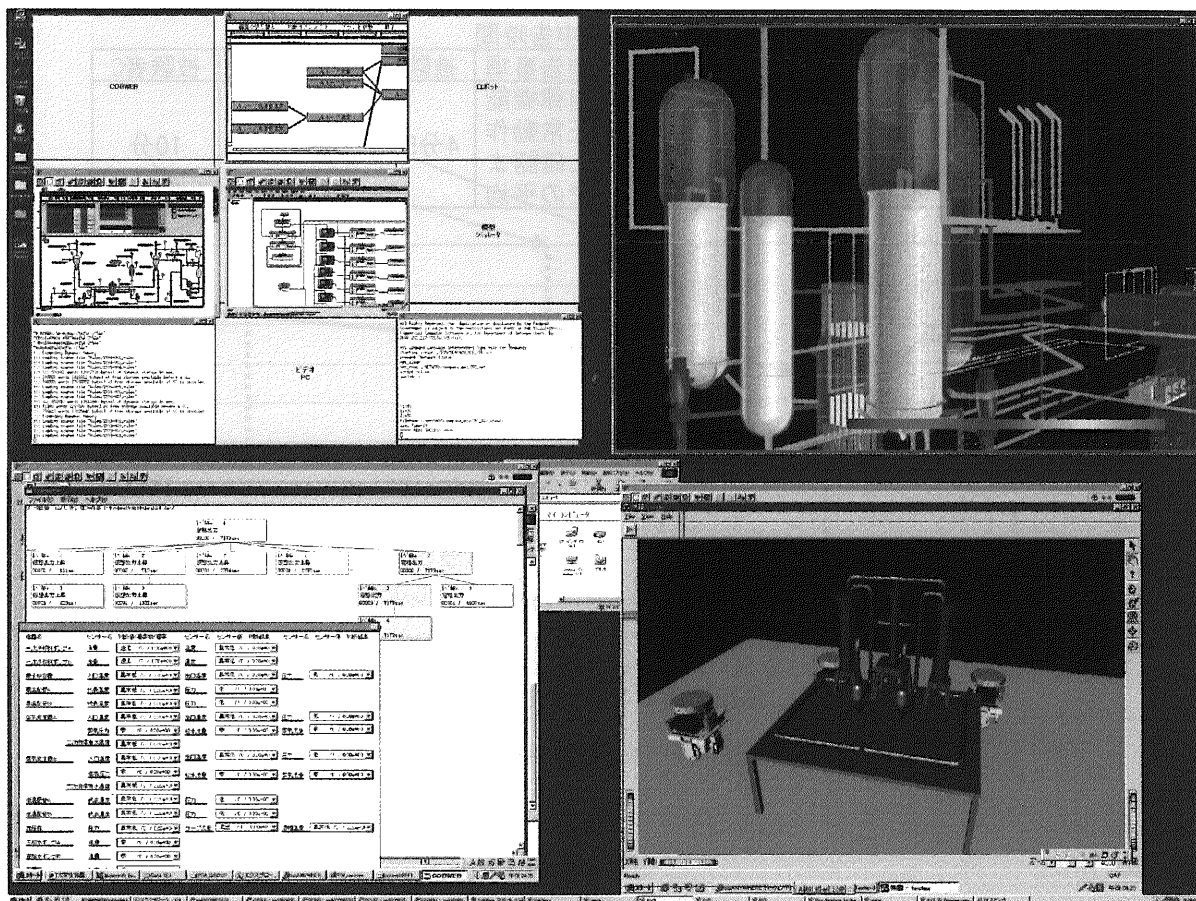


図 18 統合管理システム大画面の表示例

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<sup>(22)</sup>

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。

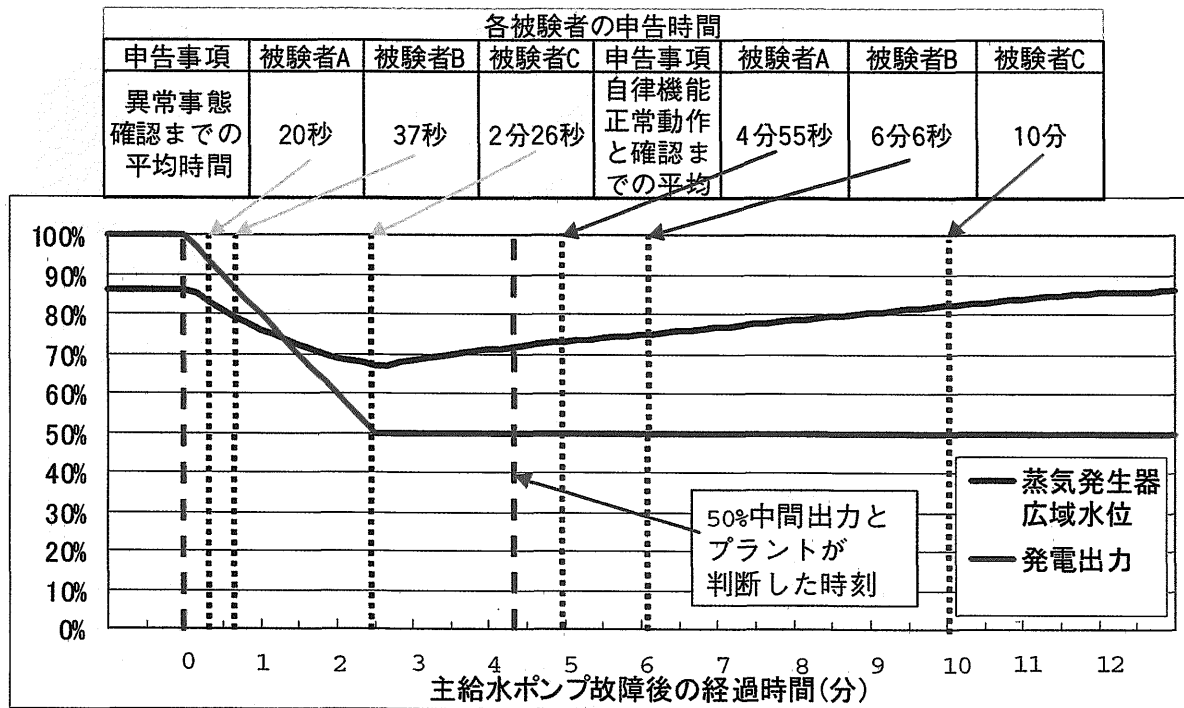


図 19 自律機能が動いた場合の各被験者の応答時刻

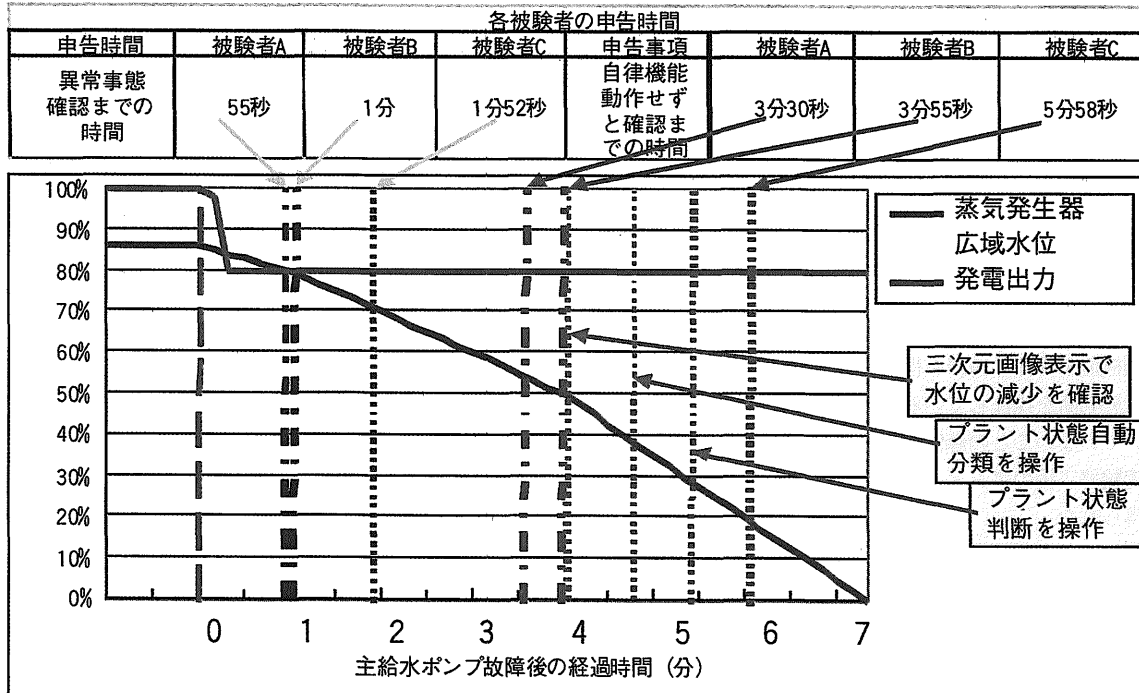


図 20 自律機能が動かない場合の各被験者の応答時刻

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ー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。

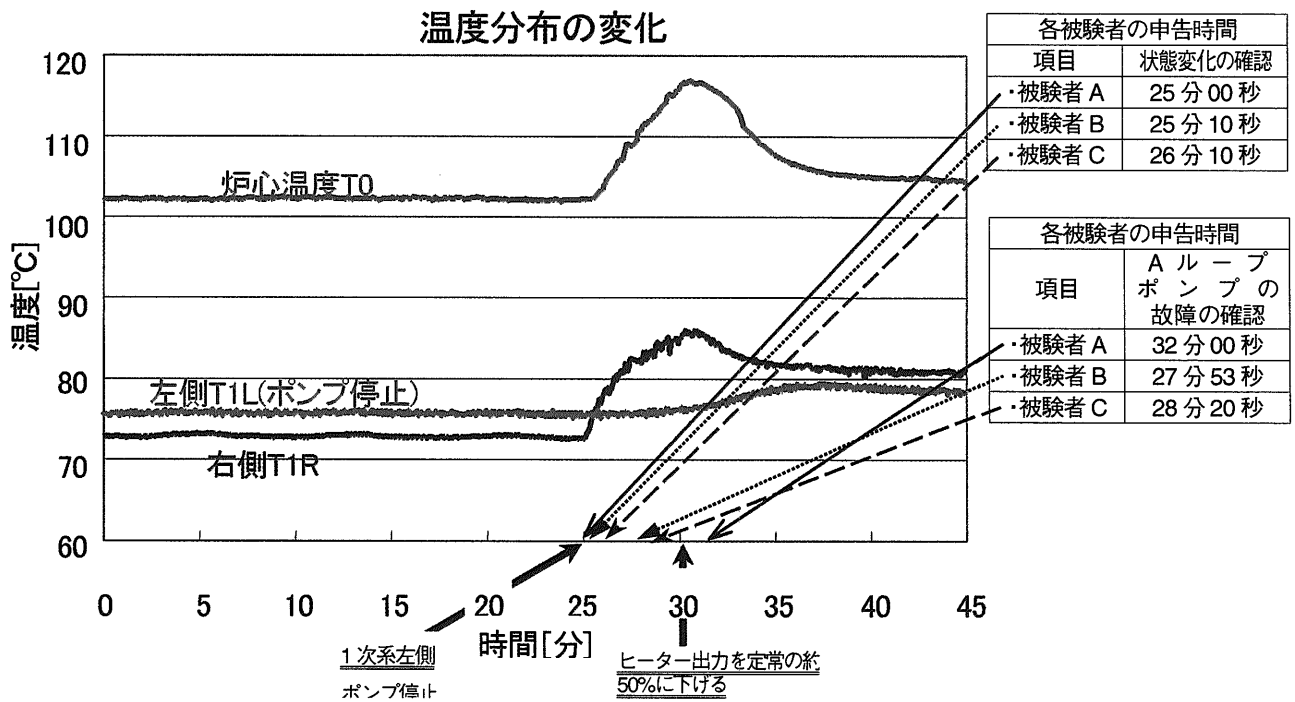


図 21 プラント模型一次系ポンプ 1 台停止時の各被験者の応答時刻

- 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)