

「常陽」炉運転自動化の検討

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)



昭和 63 年 11 月

技術資料コード	
開示区分	レポート No.
T	J9164 88-007

この資料は 図書室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です

動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室

株式会社 東芝

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ください。

〒311-13 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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

1988年11月

「常陽」炉運転自動化の検討

佐藤 増雄^{*1}, 府川 直弘^{*2}
玉置 哲男^{*3}, 岩下 強^{*4}
伊藤 篤^{*2}, 関口 峰生^{*1}
山中 俊勝^{*5}, 吉田 恵^{*1}
丸山 富美^{*1}, 山本 博樹^{*3}

要 旨

本報告書は、「常陽」の制御棒操作を自動化することによって、運転員の負担を軽減すると共に、マンマシンインタフェイスの充実と運転操作性の向上を図り、さらに、運転操作面での信頼性、安全性の改善を図ることを目的とし、以下の項目について検討した結果をまとめたものである。

尚、本検討は、現状プラント構成に基づくもの（制御棒操作自動化システム）と、蒸気発生器を設置した場合のプラント構成に基づくもの（プラント運転自動化システム）とに分け、検討を実施した。

本報告書は、株式会社東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号 : 63C2431

事業団担当者 : 寺門 銃夫（大洗工学センター実験炉部 原子炉第一課）

*1: 株式会社 東芝 原子力事業部 動力炉開発部

*2: 株式会社 東芝 府中工場 発電計算機システム部

*3: 日本原子力事業株式会社 システム解析部

*4: 日本原子力事業株式会社 核工学部

*5: 株式会社 東芝 京浜事業所 原子炉機器製造部

- ① 制御棒操作自動化システム、及びプラント運転自動化システム構成の検討
- ② 知識工学等新技術適用による制御手法の検討
- ③ マンマシンインタフェイス手法、及び異常時処置方法の検討
- ④ 既設制御棒駆動機構、及び中央制御盤の改造範囲の検討

また、自動化システムを実現するにあたっての課題について検討した。

以上の検討により、制御棒操作自動化システムとプラン運転自動化システムの基本構成を設定するとともに、既設制御棒駆動機構の改造を行わなくとも、制御棒操作自動化実現に必要な制御棒位置制御が可能である見通しを得た。

PNC TJ9164 88-007
November, 1988

Evaluation of the Automatic Reactor Operation System for JOYO

Masuo Sato^{*1}, Naohiro Fukawa^{*2}
Tetsuo Tamaoki^{*3}, Tsuyoshi Iwashita^{*3}
Atsushi Ito^{*2}, Mineo Sekiguchi^{*1}
Toshikatsu Yamanaka^{*4}, Megumu Yoshida^{*1}
Fumi Maruyama^{*1}, Hiroki Yamamoto^{*3}

Abstract

The automatic reactor operation system for JOYO is evaluated. In JOYO, by realizing the automatic operation of control rod, the reduction of the operator's load will be performed, and by improving the man-machine interface, the operability will be also improved. Still, in order to improve the reliability and safety of operator, following items are evaluated. In these evaluations, two kinds of automatic reactor operation systems are considered, one is limited to a control rod operation and the other is to an overall plant operation with steam generators.

- 1) Configuration of the automatic control rod operation system and the automatic plant operation system.
- 2) Control algorithm by using the knowledge engineering.
- 3) Methods of the man-machine interface and the operation against emergency conditions.
- 4) Scope of modification of the present control rod drive system and central control panels.

And, the problems which are necessary to be solved to implement this system, are evaluated.

Basic configuration of the automatic control rods operation system and the automatic plant operation system are established, and it is ascertained that the present control rod drive system will be useful to the control rod position control to realize the automatic control rod operation without any modification of the control rod drive mechanism.

Work performed by TOSHIBA Corporation under contract Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison: Tsuguo Terakado (Fast Reactor Division)

*1: Advanced reactor Engineering Dept. TOSHIBA Corporation

*2: Fuchu Works TOSHIBA Corporation

*3: Nippon Atomic Industry Group Co., Ltd.

*4: Keihin Product Operations TOSHIBA Corporation

目 次

1. 概 要	1
2. 炉運転自動化システムの基本構成の検討	3
2.1 現状プラント構成に基づく制御棒操作自動化システムの検討	3
2.1.1 全体システム構成の検討	3
2.1.2 計算機システム構成の検討	8
2.1.3 制御棒操作自動化の制御系構成の検討	13
2.1.4 マンマシンコミュニケーション手法の検討	24
2.1.5 異常時処置方法の検討	29
2.2 蒸気発生器を設置した場合のプラント運転自動化システム構成の検討	33
2.2.1 全体システム構成の検討	33
2.2.2 計算機システム構成の検討	39
2.2.3 プラント運転自動化の制御系構成の検討	46
2.2.4 マンマシンコミュニケーション手法の検討	51
2.2.5 異常時処置方法の検討	58
3. ハードウェアの改造検討	62
3.1 制御棒駆動機構の改造検討	62
3.1.1 現状の制御棒駆動モータの利用について	62
3.1.2 制御棒駆動モータの改造について	71

3.2 中央制御盤の改造範囲の検討	7 6
3.2.1 現状プラント構成に基づく改造内容	7 6
3.2.2 蒸気発生器設置の場合の改造内容	8 0
4. 先行プラントの動向と今後の課題	8 3
4.1 先行プラントの動向	8 3
4.2 今後の課題	9 0
5. まとめ	9 3
< 謝辞 >	9 6

1. 概 要

プラントの運転自動化は、プラントの起動・運転・停止時の運転員の負担を軽減し、マンマシンインタフェイスの充実と共に運転操作性の向上を図るものであり、さらに、運転操作面での信頼性、安全性の改善に大きく貢献するものである。

火力プラントの分野では、プロセス計算機に大幅な自動化機能を持たせた総合的な運転自動化を実現している、また、軽水炉型原子力プラントの分野においても、女川原子力発電所第1号機等において実用化レベルで運転自動化システムの開発が進められている。原子力プラントでは安全性が厳しく要求されているため、運転自動化によりプラントの機能を向上させていくためには、各原子力プラント特有の特性に応じた具体的検討を行っていく必要がある。

高速炉プラントの分野では、高速原型炉「もんじゅ」発電所において、高速炉では初めての比較的広範囲な運転自動化が行われている。これは、水・蒸気系、タービン・発電機設備の通常運転を対象としたものである。

高速炉プラントとしての運転自動化の機能をさらに総合的なものに向上させていくためには、高速炉プラント特有の特性を考慮した運転監視制御方法、異常時対応方法等、プラントの運転自動化に係わるシステム全体の信頼性、保全性を確保するための技術を確立する必要がある。

ここでは、「常陽」の出力調整用として最も重要な制御棒操作を主体として、「常陽」の全運転モードに亘っての自動化を達成するために必要な制御棒操作自動化システムについて、その基本構成を検討すると共に、蒸気発生器を設置した場合のプラント全体の運転自動化システムの基本構成についても検討するものとする。

さらに、制御棒操作自動化システム、及びプラント運転自動化システムの双方について、自動化を達成するために必要となる計算機システムの構成、制御系の構成、運転員とのマンマシンコミュニケーション手法、及び異常時処置方法について検討する。

制御棒操作自動化システムにおける計算機システムは、制御棒操作自動化に必要となる機能を持つものとし、そのハードウェア構成を設定した。

蒸気発生器を設置した場合の計算機システムは、現状の計算機システムを全面的に見

直すものとし、プラント運転自動化の機能を含めた全体機能とそのハードウェア構成を設定した。

制御棒操作自動化システムにおける制御系には、自動化動作に柔軟性をもたせ、かつ制御の信頼性及び運転特性の向上を目的として、知識工学等新技術を適用するものとし、その構成、及び制御方式を設定した。

蒸気発生器を設置した場合のプラント運転自動化システムにおける制御系では、上記の他に各サブシステム間の協調制御能力の向上、及び万一制御装置に故障が起こった場合の異常の局所化を図ることを目的として、それぞれのサブシステムは自律分散構成とし、その全体構成、及び各制御装置の制御方式を設定した。

マンマシンコミュニケーション手法、及び異常時処置方法については、新型マンマシンインターフェイスディバイス、及び知識工学の手法を大幅に適用することにより、人間（運転員）と機械系（プラント）の意思疎通を積極的に図るよう、それぞれの基本機能の検討を実施した。

また、制御棒操作自動化システム、及びプラント運転自動化システムのそれぞれに対し、制御棒駆動機構、中央制御盤の既設備の改造、改良点のまとめ、及び追加設備の検討を実施した。制御棒駆動制御装置については、駆動モータを現状のままとした場合の制御能力の解析評価を実施した。

さらに、発電プラントにおける自動化の動向を調査すると共に、制御棒操作自動化システム、及びプラント運転自動化システムを実現するにあたっての今後の課題について検討した。

2. 炉運転自動化システムの基本構成の検討

制御棒操作自動化による「常陽」の全運転モードの自動化を達成するためのシステム基本構成を、①現状プラント構成に基づくもの（制御棒操作自動化システム）と、②蒸気発生器を設置したプラント構成に基づくもの（プラント運転自動化システム）とに分けて示すものとする。尚、蒸気発生器を設置した場合については、制御棒操作の自動化機能のみならず、安定な炉出力制御の自動化を実現するために必要となるプラント全般に亘る運転自動化機能を含め、そのシステムの基本構成について検討する。

2.1 現状プラント構成に基づく制御棒操作自動化システム基本構成の検討

2.1.1 全体システム構成の検討

(1) 制御棒操作自動化システムの検討範囲

制御棒操作自動化に伴なうプラントの自動化運転の対象範囲は、表2.1.1-1に示す通り主機操作とする。従って、炉運転制御を主体とした自動化を検討すれば主要な部分はカバーされるため、本検討ではこの部分について検討するものとする。

(2) 制御棒操作自動化システム基本構成

「常陽」における主たる操作は臨界近接、系統昇温、出力上昇から定格出力運転を経て出力下降に至る一連の通常起動・運転・停止において連続的に行われる操作は、制御棒の操作のみである。その制御棒操作と協調をとつて行う主冷却系統における操作は、主冷却器出口N a 温度制御装置の制御モード変更と主冷却器送風器の運転・停止のみであり、その操作タイミングは、原子炉出力あるいは原子炉出口温度によって決定され、出力運転時の主冷却器出口N a 温度制御装置の温度設定値もまた原子炉出口温度により決定される。また、原子炉出口温度は制御棒操作により制御されるため、「常陽」の運転状態は制御棒の操作に依存するものとなっている。

つまり、運転員からの臨界近接、系統昇温、出力上昇、出力下降、出力調整等の運転指令に基づき、制御棒操作を行うとともに、その操作と協調をとつて行うべき主冷却系統における操作のタイミングを決定するシステムにより制御棒操作

自動化運転が達成される。制御棒操作自動化システムの基本構成を図2.1.1-1に示す。図2.1.1-1において制御棒操作自動化管理計算機は、運転員の指令と、プラント全般に亘るプロセス信号から判断した運転状態に基づき、制御棒操作自動化運転の進行を監視すると共に主冷却器出口N_a温度制御装置の制御モード変更と主冷却器送風器の運転・停止タイミングを判断するものである。

ディジタル制御装置で構成される原子炉出力制御装置は、運転員からの運転指令を中央制御盤から受け、原子炉回りのプロセス状態から次に成すべき操作を決定し、これに基づき必要な制御棒の自動操作を行うものであり、自律化した機能を持つ。

表2.1.1-1 制御棒操作自動化システム自動化運転範囲（起動）（1／2）

運転状態	自動化運転対象範囲
臨界操作	制御棒引抜き操作 臨界 5×10^4 cps 確認
1MWまでの出力上昇	制御棒引抜き操作 熱出力1MW確認
核加熱（系統昇温）	制御棒引抜き操作 オーバフロータンクとR/V出口Na温度の温度差80°C以内確認 2次C/T出口と主冷却器出口Na温度差80°C以内確認 原子炉出口Na温度 370°C確認 系統温度上昇率20°C/hour以内確認
出力上昇（自然通風）	主冷却器出口Na温度制御装置「AUTO」切替え操作 制御棒引抜き操作 主冷却器出口Na温度制御装置温度設定値変更操作 熱出力12MW確認 出力上昇率5MW/20min以内確認
主送風器起動準備・起動	主冷却器出口Na温度制御装置「MAN」切替え操作 主冷却器入口ダンパ「全開」、出口ベーン「全閉」操作 主送風機起動条件成立確認 主送風機起動操作 主冷却器出口Na温度制御装置「CAS」切替え操作
出力上昇	制御棒引抜き操作 出力上昇率5MW/20min以内確認 目標出力到達確認
定格出力	出力調整

表2.1.1-1 制御棒操作自動化システム自動化運転範囲（停止）（2／2）

運転状態	自動化運転対象範囲
出力下降	制御棒挿入操作 出力下降率 - 10MW / 20min 以内確認 熱出力 30MW 確認
停止操作 (制御棒一斉挿入)	主冷却器出口 N a 温度制御装置「A U T O」切替え操作 主冷却器出口 N a 温度制御装置温度設定値変更操作 主送風機停止操作 (主冷却器入口 N a 温度 380°C 確認後)
系統降温	主冷却器出口 N a 温度制御装置「M A N」切替え操作 主冷却器入口ダンパ、出口ダンパ、出口ベーン開度調整操作 系統温度上昇率 20°C / hour 以内確認
低温停止	主冷却器出口 N a 温度 250°C 確認 主冷却器入口ダンパ、出口ダンパ、出口ベーン全閉操作

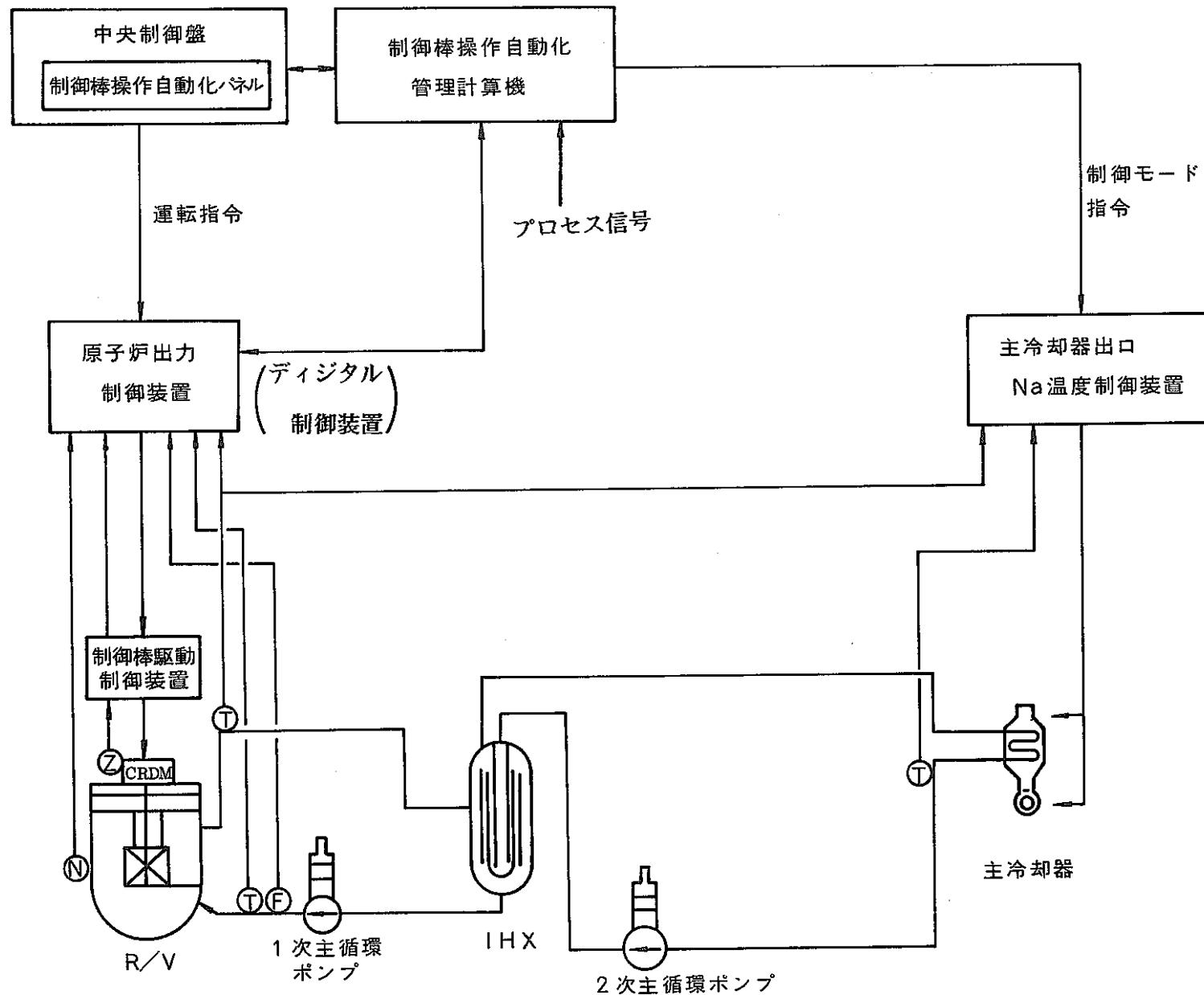


図 2.1.1-1 制御棒操作自動化システムの基本構成（現状プラントへの適用）

2.1.2 計算機システム構成の検討

(1) 基本的なシステム構成の考え方

現状プラント構成に基づく制御棒操作自動化システムにおける制御棒操作自動化管理計算機の役割とそのために必要なハードウェア構成を整理すると以下の通りとなる。

(a) 役割、機能

- ① 制御棒操作自動化運転（通常起動・運転・停止）の管理上必要なプロセス値の監視
- ② 運転指令及びプラント状態から、主冷却器出口Na 温度制御装置の制御モード切換及び主冷却器の運転・停止のタイミングを判断し、キック指令を与える。
- ③ 自動化の進行状態（プラントの運転進行状況あるいは渋滞状況）の表示
- ④ 異常診断（異常反応度監視）
- ⑤ 異常時における自動制御の停止指令

(b) ハードウェアの選択及び構成

- ① 信頼性確保のため、C P Uは2重化とする。
- ② 自動化進行、異常診断等の状況、結果を表示するためにC R Tを設ける。
- ③ 既存の計算機システムと情報交換ができるよう伝送装置を設ける。
- ④ 下位の制御装置との情報交換用の伝送装置を設ける。
- ⑤ ハードウェアは信頼性と実績のあるものを用いる。
- ⑥ 運転操作性の向上を図るため、タッチスクリーン（C R T画面選択操作用）付高密度C R Tを設ける。

(2) 計算機システムの機能構成

本制御棒操作自動化管理計算機システムは、運転指令に基づく、原子炉出力制御装置の制御棒操作とそれに関連するプロセス量の監視と、プラント状態の推移に伴なう、主冷却器出口Na 温度制御装置のモード切換を行う自動化管理機能を有している。さらに制御棒操作が、自動化されているため、常に反応度を計算し、

異常であるか否かを診断する機能も併せ持たせる。

以上の内容を列挙すると、以下の通りとなる。

(a) 機能構成

① 監視機能

自動制御されている制御棒の位置及び位置変化に伴なうプラント出力を監視するためのプロセス量を監視し、C R Tへ表示を行う。また、タイプライターの記録も行う。

② 自動化管理機能

運転指令、及びプラントの各種プロセス値から判断して主冷却器出口Na温度制御装置のモード切換えと主冷却器送風器の運転・停止の指令を行う。

③ 診断機能

反応度バランス法により常に反応度に異常が認められるか否かを診断し、異常の原因を判定すると共に原子炉出力制御系へ、自動制御の解除指令を出す。

(b) 入力するプロセス信号

上記a)の機能を実行するためのインプット信号としては以下のプロセス信号を入力するものとする。

① 中性子束レベル（起動系、中間系、出力系）

② ペリオド（起動系、中間系、出力系）

③ 制御棒位置（# 1～# 6）

④ 原子炉出口温度（A、B ループ）

⑤ 原子炉入口温度（A、B ループ）

⑥ 主冷却器入口Na 温度（A、B ループ）

⑦ 主冷却器出口Na 温度（A ループ（1A、2A）、B ループ（1B、2A））

⑧ 一次冷却材流量（A、B ループ）

⑨ 二次冷却材流量（A、B ループ）

⑩ オーバフロータンク Na 温度

(3) 計算機ハードウェア構成

(a) 基本構成

制御棒操作自動化管理計算機は自動化管理ということで信頼性を確保するため、中央演算処理装置（C P U）は二重化とする。

また、各種情報の提供、操作ガイダンスの出力のためにC R Tを設置し、プラント状態を履歴として残すため、タイプライターとC R Tの表示内容をそのままコピーするハードコピーを備えるものとする。

一方、情報の入力のためにプロセス入出力装置と既設の計算機システムとの情報伝達が行えるよう、伝送インターフェイスを設けておくものとする。以上、計算機のハードウェア構成を図2.1.2-1に示す。

(b) ハードウェア概要

以下に本システムを構成するハードウェア項目と概略用途を示す。

- | | | |
|-----------------------|----------------|---|
| ① 中央演算処理装置
(C P U) | 2式 | 自動化管理、ディスプレイ表示制御、プラント監視、異常診断等の処理を行う。 |
| ② 主メモリ | | プログラムデータの記憶 |
| ③ 磁気ディスク
(M D) | 2式 | O S、アプリケーションプログラムのセーブ用及び、データダンプ用として設ける。 |
| ④ C R T | 高密度カラーC R T 2式 | 警報表示、状態表示、運転操作ガイドメッセージ表示、系統図表示等の表示を行う。またタッチスクリーンを設けてタッチオペレーション（対話、画面切替等）を可能とする。 |
| ⑤ ハードコピー
(H C) | 1式 | C R T表示画面のコピーを行う。 |

- ⑥ タイプライター 漢字シリアルプリンタ 1式
(T W) 定時ログ日報等のログ出力、状変メッセージ、自動化メッセージ（操作ガイドメッセージ等）の出力を行う。
- ⑦ プロセス入出力装置 P I / O 1式
(P I / O) アナログ信号、ディジタル信号の入出力を行う。
- ⑧ 伝送インタフェイス 一式
(IF-1、IF-2) 既設の計算機システムとのデータ伝送を行うための装置
- ⑨ コンソール C R T 各 C P U に一式
- ⑩ フロッピーディスク 保守用として各 C P U に 1 式設けるものとする。
(F D D)

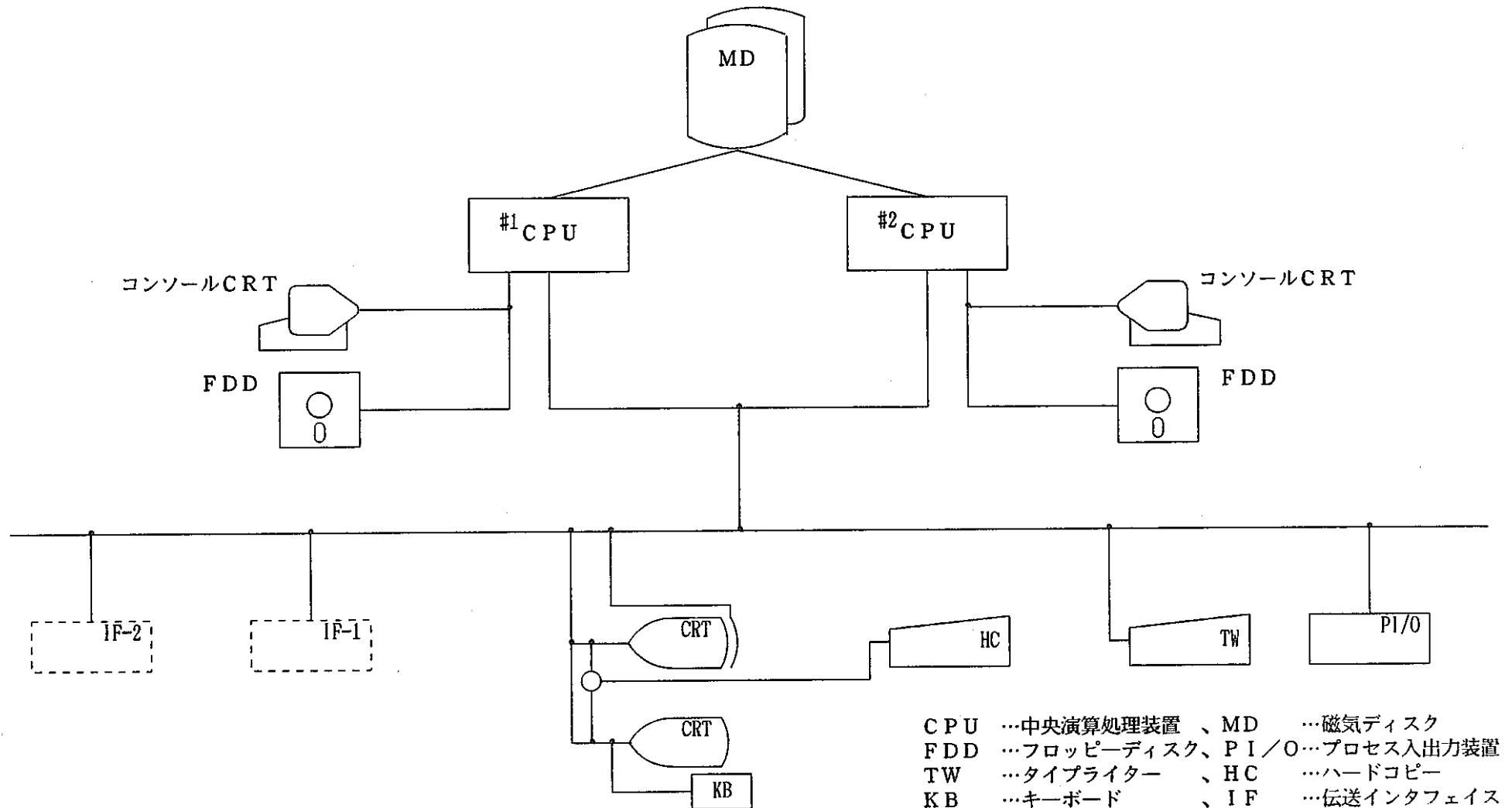


図2.1.2-1 計算機ハードウェア構成図（現状プラント構成）

2.1.3 制御棒操作自動化の制御系構成の検討

(1) 基本構成の検討

「常陽」の全運転モードにおいて制御棒操作自動化運転を実現するために、「常陽」へ追加する制御系は、マイクロプロセッサを用いたディジタル制御装置により構成するものとする。ディジタル制御装置は以下の利点を有しており、保守性、制御性、及びシステムの拡張性を向上させることができるために、計測制御システム全体としての総合的な機能向上が達成される。

- (a) 部品の経年変化による制御特性の変化がない。
- (b) 同一機種で目的に応じた様々な制御方式が可能。
- (c) 他の計算機との有機的な結合が可能。
- (d) 高度な制御機能への対応が容易。

ディジタル制御装置は、小さな電気信号で大きなパワーを制御するものであり、ちょっとした信号の乱れがそのまま大パワーの乱れとなって現れる恐れがある。また、ディジタル制御装置を構成するマイクロプロセッサに万一故障が発生した場合、その出力信号が高側に働く確率と低側に働く確率はほぼ同じオーダーにあるため、マイクロプロセッサ単体ではフェイルセーフティの設計が困難となる。ディジタル制御装置に存在するこのような問題点を考慮したうえで、制御棒操作自動化の制御系は以下に示す基本思想に基づき設計するものとする。

本制御系は、各プロセスの制御機能単位でモジュール化し、万一故障が発生してもその影響が最少限度に限定することが可能となるようにする。各モジュール化されたプラント制御系は、3重化されたマイクロプロセッサにより構成するものとし、制御機能としては单一故障に耐え得るものとする。また、同時故障の影響を少なくするため、3重化されたマイクロプロセッサは、非同期式とする。3重化された出力信号を非冗長なアクチュエータに送出する場合、フェイルセーフティな設計であるアナログ回路により構成された中間値選択器により出力信号を決定するものとする。

制御棒操作自動化の制御系の基本構成を図2.1.3-1 に示す。

(2) 制御系構成の検討

制御棒操作自動化システムの構成要素であり、新設すべき制御系となる原子炉出力制御装置の基本構成について検討する。

原子炉出力制御装置は、運転員からの起動・停止指令に基づき、以下の自動化項目のうち行うべきものを判定し、それに対応する自動化処理を行う。

- (a) 臨界近接操作
- (b) 系統昇温制御
- (c) 出力上昇・下降（主送風機起動・停止の自動化を含む）
- (d) 出力調整

上記 (a)～(d) の全運転モードにわたり制御する場合にはプロセス特性の非線形性が問題となり、一般的な目標値追従の制御だけでは、制御が困難となる。そこで、運転員の行っている運転操作をそのまま制御方式に反映することのできるファジー制御を採用する。

また、前述のとおり、最終段の冷却熱量は主冷却器出口 N a 温度制御装置により原子炉出力（具体的には原子炉出口温度）に追従して制御されており、原子炉回りのプロセス量で他の系統のプロセス量と協調をとって制御すべきものはない。つまり、原子炉出力制御装置では、他の系統との協調制御の観点からは、出力変更等運転状態の移行時に原子炉出口温度あるいは中性子束レベルの直接的なフィードバック制御を行う必要はない。ただし、定格運転時には、原子炉出口温度を定められた一定の値に保つことがプラント運用上必要であり、高出力運転時には原子炉出口温度を規定値に保つために原子炉出口温度あるいは中性子束レベルのフィードバック制御を行うものとする。

原子炉出力制御装置の制御機能ブロック図を図2.1.3-2 に示す。

図2.1.3-2において、ファジールールはこれまでに確立された運転操作の判断基準を記述したものである。判断基準をファジールールとして表したのは、プロセスの出力に含まれるノイズとか計測誤差を考慮して、プロセス量あいまい量に変換したほうが、これまで行ってきた運転員の制御棒の手動操作の内容を忠実に自動化運

に反映できるためである。このファジールールには、制御棒操作自動化項目の選定基準、制御棒の操作手順、制御棒の引抜き・挿入量の判定基準、原子炉出口温度フィードバック制御の実施判定基準が記述されている。

制御棒操作自動化判定処理部は、原子炉まわりのプロセス量を入力して、ファジールールに基づき制御棒操作の自動化処理を決定するものである。その結果を制御棒操作部、及びフィードバック制御部に送出する。

制御棒操作部は、制御棒操作自動化判定処理部にて決定された自動化処理に基づき、原子炉出口温度フィードバック制御を必要とする高出力運転状態以外の時に、制御棒操作を行うものである。臨界近接操作、系統昇温制御、及び出力上昇制御、出力下降制御、出力調整制御よりなる出力調整に対応するファジールールを実行することにより、制御棒の引抜き量・挿入量を決定し、制御棒駆動制御装置に各制御棒の必要駆動量を送信する。

フィードバック制御部は、原子炉出口温度フィードバック制御を必要とする高出力運転状態時に機能するものである。フィードバック制御部の制御方式は、制御棒駆動制御装置の制御方式を速度型にするか位置型にするかにより異なってくるが、フィードバック信号としての原子炉出口温度の他に速応性向上のために出力系の中性子束信号を補助信号として用いるものとする。

(3) ファジールールに基づく制御方法

原子炉出力制御装置による制御棒操作は大きく分けて、制御の観点から以下の 6 つの領域に分割される。

モード	制御領域	運転操作基準
起動	1) 臨界近接	1) 全制御棒を 350mmまで引抜く 2) 制御棒 1～4 を臨界予想位置まで引抜く 3) 制御棒 5, 6 を逆増倍から求めた予測位置まで引抜く 4) 制御棒 6 にて臨界にする
低出力	2) 1 MW出力までの上昇 (系統昇温)	1) 最も深い位置にある制御棒を順次引抜く この時、制御棒の操作法としては、臨界点位置より制御棒を 5 mm引抜き、以後出力上昇速度がこの 5 cm引抜き時の速度を維持するよう、適宜制御棒操作量を調整する
高出力	3) 系統昇温	1) 最も深い位置にある制御棒を順次引抜く この時、系統温度上昇率が20°C/hrを越えないよう制御棒引抜き速度を調整する
	4) 出力上昇	1) 最も深い位置にある制御棒を順次引抜く この時、出力上昇率が5MW/20min を越えないよう制御棒引抜き速度を調整する
	5) 出力下降	1) 最も浅い位置にある制御棒を順次挿入する この時、出力下降率が-10MW/20min を越えないよう制御棒引抜き速度を調整する
	6) 出力調整	1) 所定の制御棒を挿入、あるいは引抜く この時、ペリオドが規定値以内となるようにする

上記の表から、それぞれの運転操作において守るべき基準が異なっていることが分る。すなわち、臨界近接では、“予測位置まで引抜く”という操作であり、1 MW出力までは、“出力上昇速度を維持する”という操作である。さらに、系統昇温では、“系統温度上昇速度の維持”であり、出力上昇あるいは出力下降では、“出力上昇速度あるいは出力下降速度を維持する”という操作である。このように、操作目標が複数ある場合には、目標別の制御規則が必要となる。

複数個の IF - THEN型の規則で操作量を決定することを可能とする制御を実

現するため、ファジー制御を用いる。すなわち、臨界近接操作では、図2.1.3-3に示すように中性子束の逆増倍曲線により臨界近接を予測し、これを用いた予見ファジー制御にて行うことが考えられる。そして、この時の制御ルールに運転員の経験則あるいはシミュレーションにより得られた経験を用いることで巧妙な運転が可能となる。

1MW出力、系統昇温、出力上昇、出力下降の領域では、出力変化率、あるいは系統昇温率を規定値に保つことが必要となる。これは、一般的な目標値追従の制御であるが、出力変化率も系統昇温率も制御棒位置に対して簡単な線形な式で表わせられるものではない。また、出力変化率も広範囲にわたり制御する場合に非線形性が問題となってくる。このような対象の制御には、制御対象の非線形性をも考慮できるファジー制御が最適となる。

ファジー制御は対象の特性を言語により記述するため、対象の数学的表現が得られない場合にも有効に働く。そして重要なことは、ファジー制御にはロバスト性（部分的な特性が変化したとしても全体特性としての影響が小さい性質をロバスト性という）があることである。これは、言語でモデルを記述することと、複数のルールによる並列性があることに起因する。

図2.1.3-4にこのようなファジー制御の例を示す。非線形な対象に対する目標値追従制御も制御対象の特性にあわせ、プラントの応答変化に応じたフェイズにおいて、どのような制御が最適かをルールとして記述している。図2.1.3-4では、原子炉出力と出力変化率により制御棒挿入速度を決定するファジー制御の構造を示している。

例えば、ルール1では、“出力Pが正が小さく、かつ出力変化率 \dot{P} が零の時は、制御棒の引抜き速度を正で大きな値とする”というアルゴリズムを表している。このルールによって測定された出力Pと出力変化率 \dot{P} がどの程度マッチングするかを調べるのがファジー推論である。すなわち、正で小さい（P S）、正で大きい（P B）等は、ファジー変数であり、図2.1.3-5に示すような-1～1の間で正規化したメンバーシップ関数で表現するものである。（ここでは、三角形の関数形とする）

このメンバーシップ関数と測定された出力と出力変化率とを用いてファジー推論を行ふ。

推論の処理方法を図2.1.3-6に説明する。先ずルール1の前件部 ($P = P_S \wedge \dot{P} = Z_O$) のマッチングの度合いを調べる。図2.1.3-6では、 $P = P_S$ のマッチング度合いが 0.6であり、 $\dot{P} = Z_O$ のマッチング度合いが 0.8であり、その時ルール1の前件部にマッチングする度合いは最小値をとり 0.6とする。これにより、後件部を採用する度合いも 0.6となり、後件部のメンバーシップ関数を 0.6で削り落す。このようにして、ルール1に対するファジー推論結果が得られる。同様な処理をルール2以降についても行い、それらの結果を合成する。この合成結果は、ファジー集合（メンバーシップ関数）となる。ここでは、ファジー集合の重心を取り、出力を確定するものとする。これにより、ファジー制御の出力としての制御棒引抜き速度あるいは挿入速度が得られることになる。

以上のように、プラントの測定プロセス信号を IF - THEN型のルールを持つファジー制御に入力してファジー推論を行い、推論結果を確定値として出力する。

ファジー制御の特徴を以下にまとめて示す。

- (a) “もし……ならば……せよ”という言語で記述できるため、簡単にプログラム化が可能である。
- (b) 複数のルールで出力を決め、かつ各ルールが並列であるため、ロバスト性が高い。（すなわち、1つのルールがなくなったり、間違えていても他のルールでそれをカバーすることができる。）
- (c) 論理による制御であり、定常時の制御も例外時の制御も区別なく同じ形式で記述することができる。

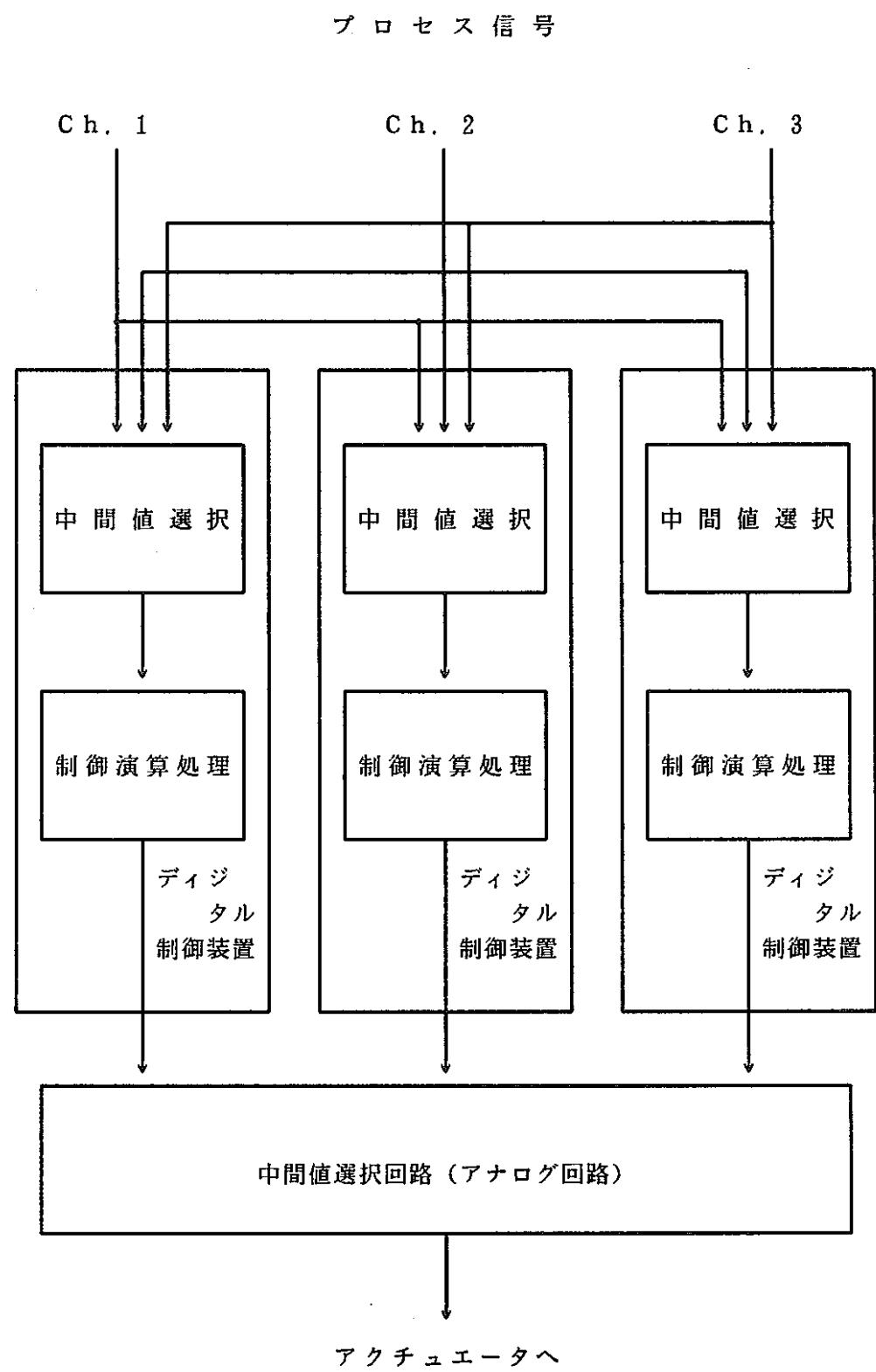


図2.1.3-1 制御棒操作自動化システムの制御系（原子炉出力制御装置）基本構成

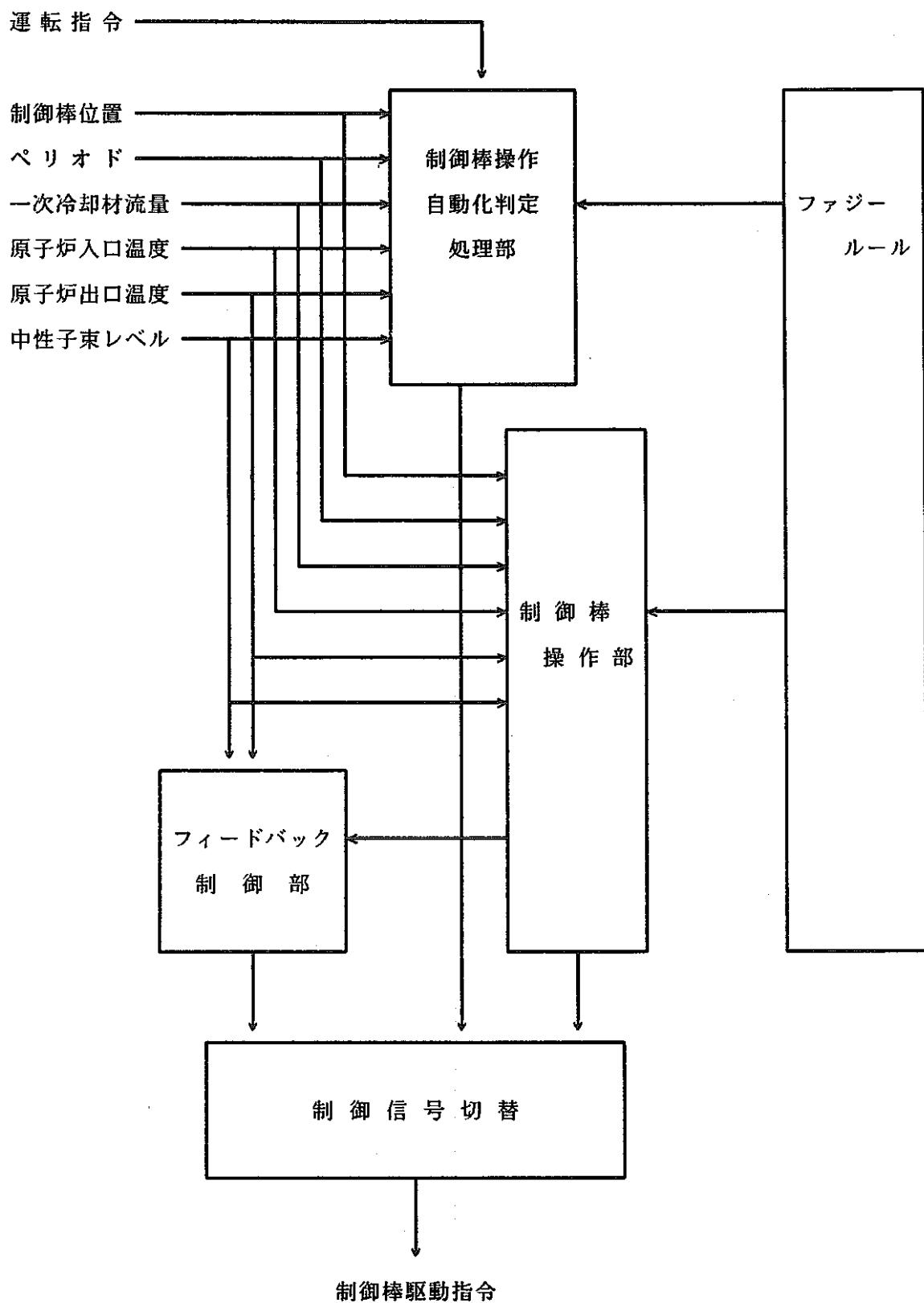


図2.1.3-2 原子炉出力制御装置制御機能ブロック図

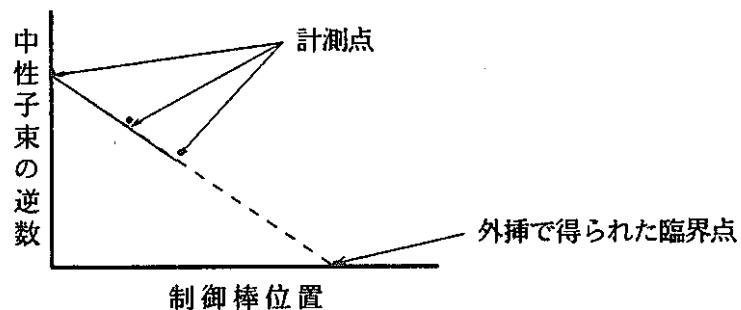
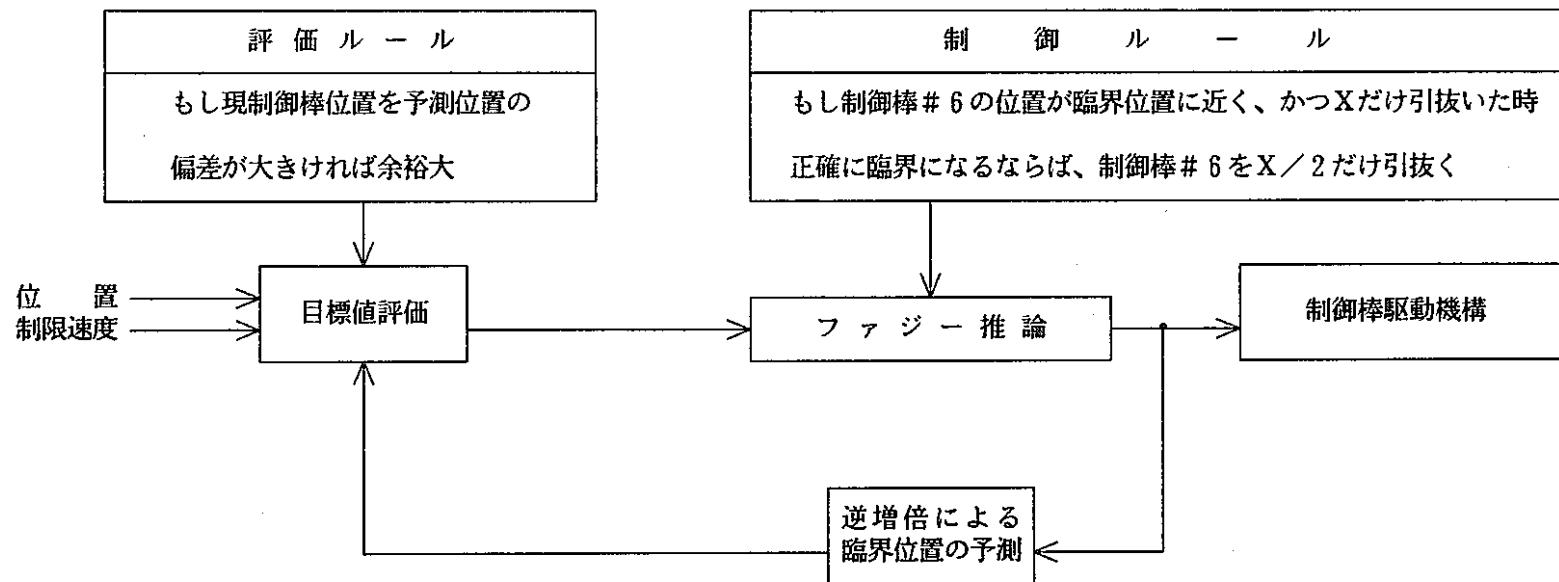
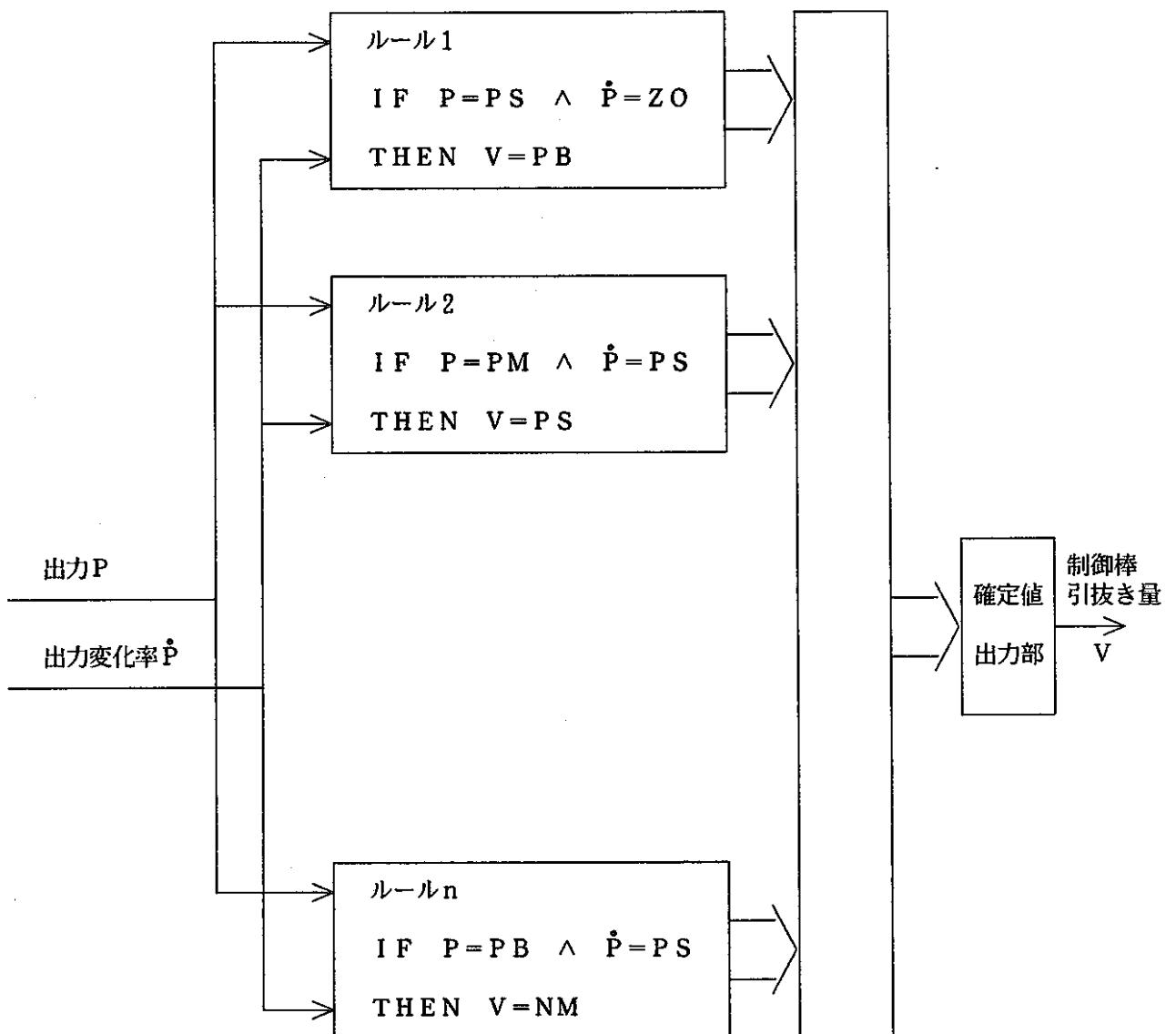


図2.1.3-3 予見ファジー制御方式の概要



PB : Positive Big

PM : Positive Medium

PS : Positive Small

ZO : Zero

NS : Negative Small

NM : Negative Medium

NB : Negative Big

図2.1.3-4 ファジー制御系の構造

PB : Positive Big
 PM : Positive Medium
 PS : Positive Small
 ZO : Zero

NS : Negative Small
 NM : Negative Medium
 NB : Negative Big

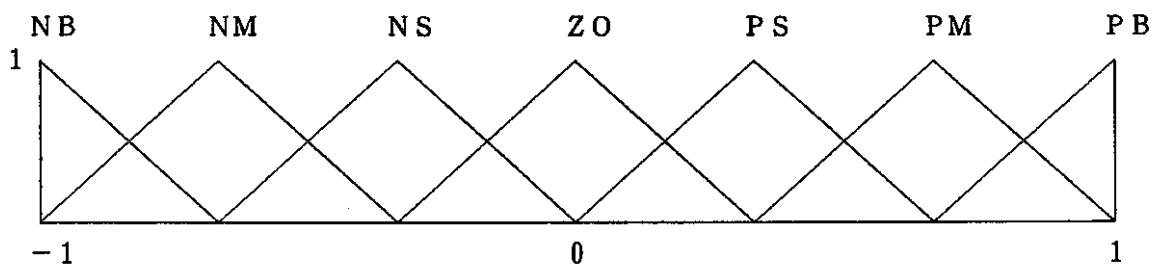
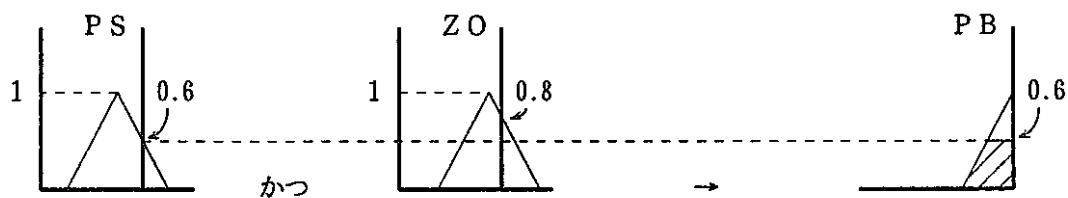
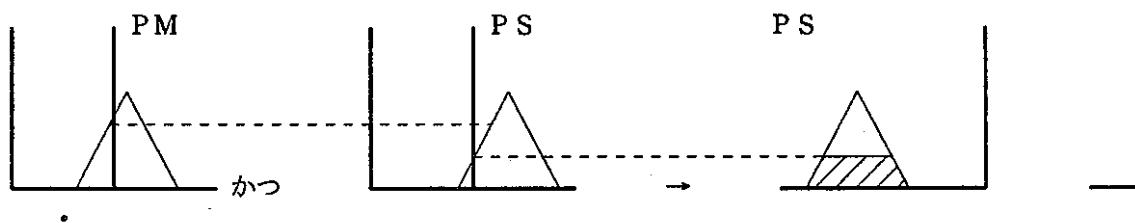


図2.1.3-5 ファジー変数（三角形メンバーシップ関数）

ルール1



ルール2



ルールn

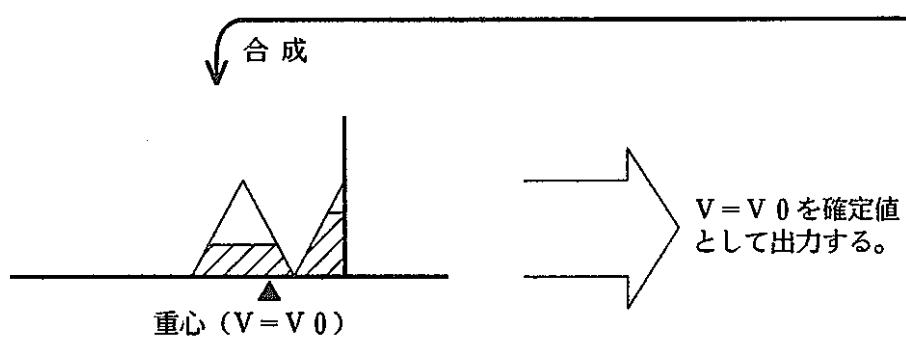


図2.1.3-6 ファジー推論の処理フロー

2.1.4 マンマシンコミュニケーション手法の検討

制御棒操作の自動化に伴なうプラント起動・運転・停止の自動化を行う上で人間と機械との情報伝達（マンマシンコミュニケーション）がいかにあれば良いかをマンマシンインターフェイスの機能面から検討を行う。

(1) マンマシン機能の分類

人間（運転員）と機械（プラント）との意思疎通を向上させ、安定かつ安全な運転を確保するために必要となる両者間のインターフェイス（マンマシンインターフェイス）を機能面から分類すると以下のようになる。

マンマシンインターフェイス機能

警報機能	事故、故障等の異常時に対応動作を促すため運転員に積極的に異変、状変を通知する機能。（ANN窓、ブザー、CRT表示）
監視機能	プラントの現在状態あるいは過去からの推移が観測でき、プラントの健全性（あるいは異常状態）を把握するための機能。（メータ、レコーダ、ランプ、CRT表示、ITV等）
操作機能	プラントの機器を動作（あるいは、停止）させる。あるいは状態を確認、変更する機能。（自動化コンソール、各種スイッチ）
記録機能	プラントの状態を履歴として残し、報告、解析に供する機能。（計算機ログ出力、レコーダ、ハードコピ一）
運転支援機能	自動化運転時の操作ガイド、あるいは異常時に於けるプラント運転操作に関し、運転員を補助・支援する機能。（CRT、音声応答装置）
通信機能	現場の状況、あるいは中制室からの指示を連絡し合うための機能。（ページング、電話）

(2) 機能向上のための方策

前記(1) あげた各機能を本制御棒操作自動化管理計算機で、いかに実現させる

かについて検討を行う。

(a) 警報機能

警報については、既設盤の A N N 表示があるため、自動化に係わる部分以外については重複して出力はしないものとする。

自動化に係わる部分として制御棒操作に係わる異常、あるいは、異常徵候が見られた時は、C R T へ警報出力を出すとともに操作ガイド（運転支援機能と関連）を出力する。

(b) 監視機能

監視するプロセス量としては、基本的に、2.1.2-(2)-(b) で列挙した10項目の信号について C R T に表示する。

表示方法としてはトレンド表示（アナログトレンド、またはディジタルトレンド）、系統図表示、及びメッセージ表示を考慮する。またオペレータからの要求によるポイント表示、一覧表示等のデマンド機能も考慮する。

(c) 操作機能

プラントの起動・運転・停止に係わる基本操作は制御棒操作自動化パネルより行うものとする。

自動化の進行は、上記制御棒操作自動化パネル上に設けたブレークポイント毎の照光式押ボタンスイッチ（P B）の押操作により行われる。尚 P B 押操作に当っては、前段のブレークポイントの完了条件を確認し条件を満足すれば、P B をフリッカさせ自動化の進行をオペレータに促すものとする。

(d) 記録機能

記録する項目としては、監視機能であげた項目の中で、時報、日報等として残す必要のあるものに限って計算機ログ出力を行う。

尚、C R T に表示された画面については必要に応じ、ハードコピーがとれるものとする。

(e) 運転支援機能

制御棒操作自動化運転時の操作をガイドし操作するポイント、確認するポイン

トを自動化の進行に合わせ、C R Tにメッセージとして表示を行う。

また、異常時、あるいは異常徵候が察知された時には、その時の運転員がとるべき対応動作（確認事項と操作事項）をガイドメッセージとして表示する。

尚、既設の同種の既設異常診断装置との重複はなるべく避け、矛盾はないよう考慮する。

(f) 通信機能

本機能に係わるページング、電話等の装置は、人と人とのコミュニケーションを遠隔にて行うものであるので、厳密に言うとマンマシンインタフェイスではないが、現場の状況を中制室へ、また逆に中制室より現場へプラント状況を連絡するために必要な機能であり、中制室では本機能が活用できる必要がある。

尚、本制御棒操作自動化設備においては、既設の設備があるので特に考慮はない。

以上のマンマシンインタフェイス機能を表2.1.4-1 に示す。

また、制御棒操作自動化運転の監視操作を行う自動化コンソール卓の外形図を図2.1.4-1 に示す。

表2.1.4-1 マンマシンインタフェイス機能（制御棒操作自動化管理計算機）

No.	機能	内容
1	警報機能	制御棒操作に係わる異常、あるいは、異常徵候の C R T への出力、操作ガイドの出力を行う。（既設盤 A N N との重複はできるだけさける）
2	監視機能	監視する項目は、中性子束、ペリオド、制御棒位置、原子炉入口温度等10項目とする。表示方法はトレンド表示、系統図表示、メッセージ表示を考慮する。またその他、オペレータ要求機能も考慮する。
3	操作機能	制御棒操作自動化パネルより行う。
4	記録機能	監視機能であげた項目の内必要なものの時報、日報等ログ出力、C R T 画面のハードコピー出力を行う。
5	運転支援機能	制御棒操作自動化運転時の操作ガイドメッセージ出力、異常時対応動作のガイドメッセージ出力を行う。
6	通信機能	ページング、電話（既設を流用）

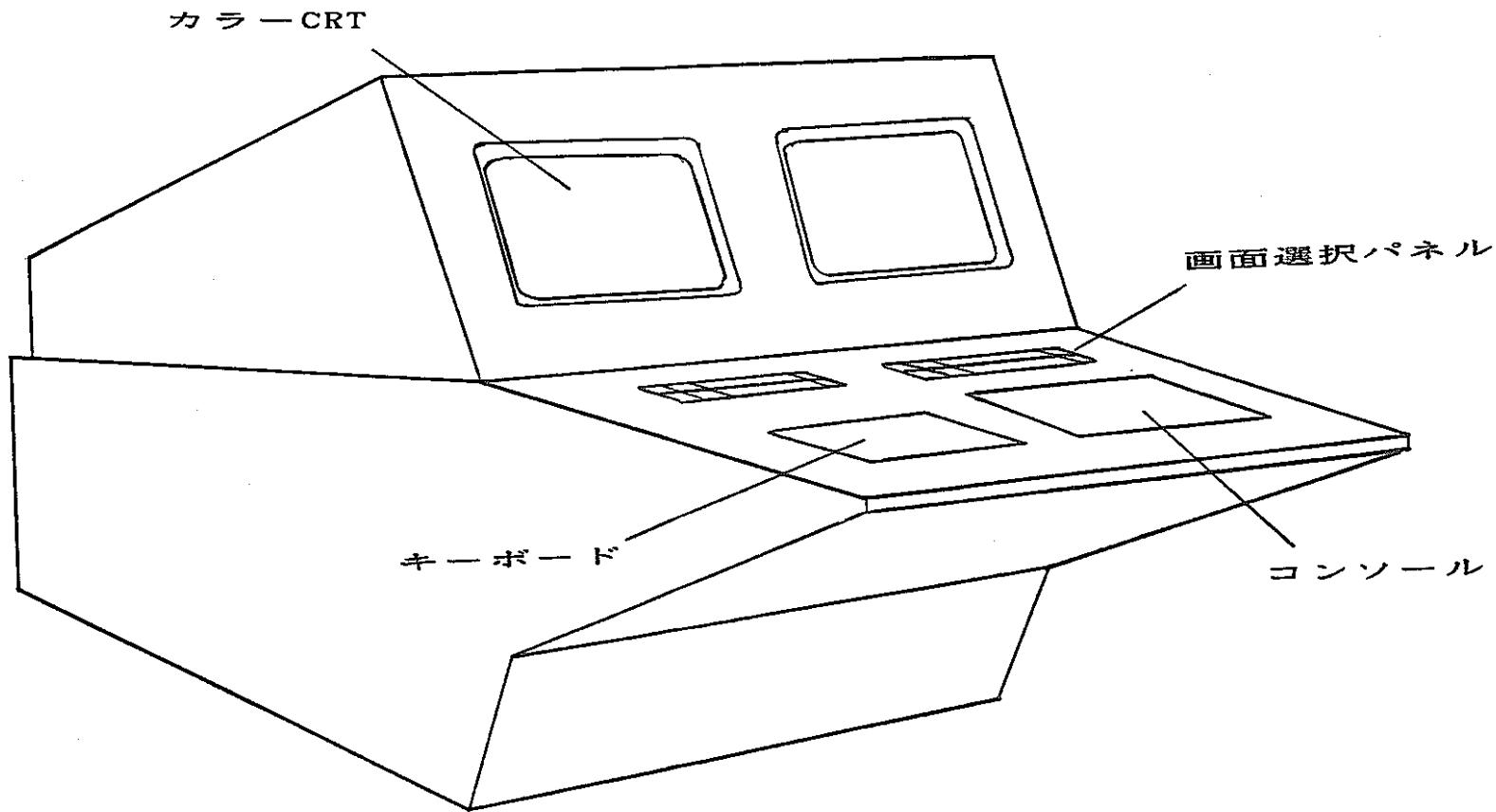


図2.1.4-1 制御棒操作自動化システム 自動化コンソール卓 外形図

2.1.5 異常時処置方法の検討

異常時処置方法を検討するにあたっては、プラントの安定性、安全性を確保するために必要となる運転機能を整理することが重要であり、プラント状態に応じて以下の運転機能が必要となる。

- ① プラントの健全性を監視して安全に運転を行う機能
- ② 異常が発生した場合に、早期に異常を検出してその進展を防止する機能
- ③ 異常が進展し急激な過渡変化をひき起こした場合でもプラントを安全に停止させる機能

従来は運転員がこれらの機能を駆使して適切な処置をとってきた。しかしながら、各種プロセス信号の挙動や機器の運転状態に関する情報量は膨大であり、これらからプラント状態を正確に判断して、なすべき操作や異常時の処置を決定することは容易ではない。このようなことから、近年知識工学手法を応用することにより、運転員が行ってきた知的経験的作業を計算機に積極的に支援させるシステムの開発が進んでおり、確証試験を通じてその有効性が確認されている。

運転自動化は、運転員が行ってきた操作等を計算機に行わせるものであり、ヒューマン・エラーの防止に大きく貢献する。運転自動化を実施する際に注意しなければならないことは、運転の自動化が行われることによって、上記①～③の運転機能が阻害されないようにすることである。

本節においては、この知識工学手法を適用した現状プラント構成での異常時処置方法について述べる。

(1) プラントの健全性を監視して安全に運転を行う機能

制御棒操作が自動化された場合には、計算機からの制御指令通りに正しく機器が動作しているか否かを監視することが必要である。これにより、自動化の健全性を確保することができる。現状プラント構成に基づく場合の自動化項目は、制御棒の操作と主冷却器出口 N a 温度制御装置の制御モード変更と主冷却器送風機の運転／停止のみであることから、以下に示した計算機からの制御指令と実際の状態を比較することにより、それらの状態を監視する。

- ① 制御棒の位置指令（原子炉出力制御装置）
- ② 主冷却器出口Na温度制御モード指令（プラント運転自動化管理計算機）
- ③ 主冷却器送風機の運転／停止指令（プラント運転自動化管理計算機）

ここで制御指令と実際の状態とに違いが認められたならば、それらについての情報をお伝えすると共に、あらかじめ知識データベースに登録してある処置マニュアルを出力する。

(2) 異常が発生した場合に、早期に異常を検出してその進展を防止する機能

制御棒操作自動化運転中において特に重要な監視項目としては、異常反応度があげられる。これは以下の(A)式に示す反応度バランス法を用いることにより、早期に異常を検出することができる。

$$\rho_{ab}(t) = \rho_{nk}(t) - (\rho_{rod}(t) + \rho_{fb}(t) + \rho_{in}(t) + \rho_{bu}(t)) + \rho_0 \quad \dots\dots\dots (A)$$

$\rho_{ab}(t)$: 異常反応度

$\rho_{nk}(t)$: 動特性反応度

$\rho_{rod}(t)$: 制御棒反応度

$\rho_{fb}(t)$: 出力変動によるフィードバック反応度

$\rho_{in}(t)$: 原子炉入口冷却材温度および流量外乱による反応度

$\rho_{bu}(t)$: 燃焼反応度

ρ_0 : 初期補正值

これは現在JOYDASにて計算、監視されているが、制御棒操作自動化に係わる項目であることとシステムの安全性を高めるといった観点から、制御棒操作自動化システムとして異常反応度の監視機能は必要となる。

(A) 式より反応度に異常が認められたならば、原子炉出力制御装置に対して自動化解除指令を与え、異常原因を判定する。これらについての情報を運転員に表示すると共に、対応する処置マニュアルを出力する。

(3) プラントを安全に停止させる機能

制御棒操作自動化運転中に急激な過渡変化が生じてプラントを安全に停止しなけ

ればならないときは、自動化に係わる制御をいつ中止するかが重要となる。これは原子炉保護系の動作の有／無を監視することにより行うことができる。原子炉保護系の動作を認めた場合は、原子炉出力制御装置に対して自動化解除指令を与えると同時に、主冷却器出口Na温度制御装置のモード変更とあらかじめ知識データベースに登録しておいた処置マニュアルを運転員に表示する。

図2.1.5-1 に上記機能を実現するための機能構成図を示す。知識データベースには、制御棒操作自動化運転や異常反応度の監視に係わるデータやプログラムと処置マニュアル等の関連マニュアルに関する情報が格納されており、監視／診断に係わる推論エンジンが設けられている。これらはプラント運転自動化管理計算機の中に組み込まれている。

以上述べたきたように知識工学手法を適用することにより、異常時においても適切な処置をとることができるばかりでなく、最適な制御棒操作自動化を行うことができる。

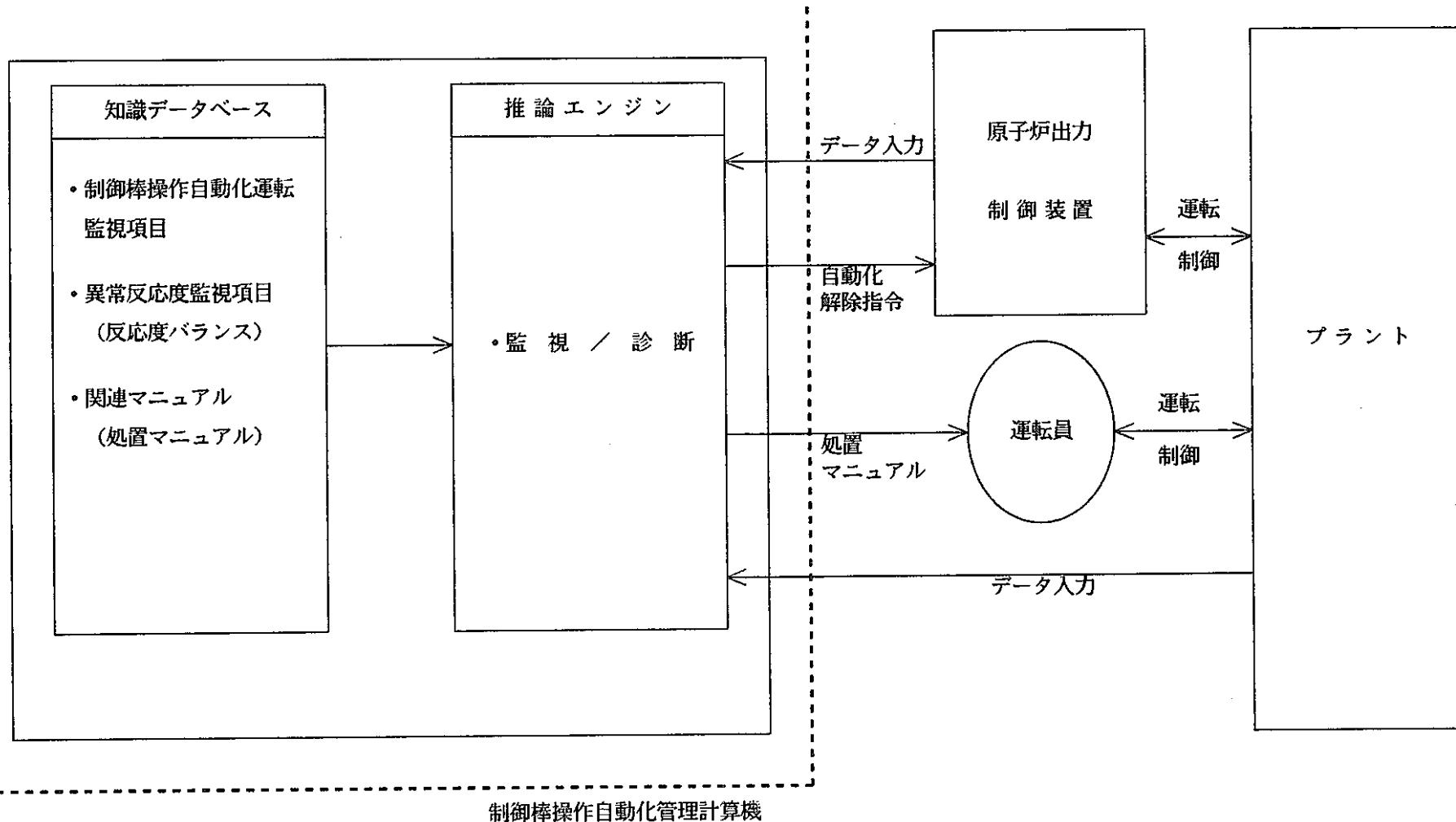


図 2.1.5-1 機能構成図（現状プラントに基づく場合）（制御棒操作自動化システム）

2.2 蒸気発生器を設置した場合のプラント運転自動化システム基本構成の検討

2.2.1 全体システム構成の検討

(1) プラント運転自動化範囲の検討

蒸気発生器を設置したプラント構成は、代表的なものを想定するものとし、その基本的な構成を図2.2.1-1に示す。

蒸気発生器を設置した場合には、制御棒操作のみならずプラント全体の運転を対象とした自動化について検討する必要がある。本検討に際しての自動化運転の対象範囲を、低温停止から出力運転を経て再び低温停止に至る通常起動運転・停止操作とする。プラント停止状態及び緊急停止状態の各運転状態については、以下の理由と先行炉の動向により範囲外とする。

- (a) プラント停止状態： プラント基本運用としての定まった運転操作がないため。
- (b) 緊急停止状態： 基本的にインタロック動作にて行われ、そのバックアップ操作についても保全性や異常時対策を考えると、運転員が行うべきものであるため。

プラント運転自動化操作対象とする機器は主機のみとする。これは、従来から現場操作にて行ってきたラインアップ操作等の補機の操作を自動化操作対象とすることは、機械的可動部の多機能化及びそれに伴う信号伝送装置の大幅な増大につながり、経済的な観点から好ましいとはいえない。また、機器、装置が増大化することは、異常時の対策が複雑化することにもなり、プラントの信頼性、安全性確保の面からも好ましいとはいえない。

(2) プラント運転自動化システム基本構の検討

蒸気発生器を設置した場合には、蒸気発生器の安定な運転を確保するために、冷却材流量を熱出力にほぼ比例するように変更する運転となる。つまり、出力運転時には少なくとも以下のプロセス量の協調をとり運転することが必要となる。

- (a) 原子炉出力
- (b) 一次冷却材流量
- (c) 二次冷却材流量

(d) 給水流量

上記 (a)～(d) のプロセス量は、従来の階層分散化方式ではない、それぞれ自律化した制御装置により制御されるものとし、信頼性、安定性、保全性の向上のため運転制御すべき状態の判定はそれぞれの制御装置にて行うものとする。プラント運転自動化システムの基本構成を図2.2.1-2 に示す。

プラント自動化管理機能用計算機は、運転員の指令と、プラント全般に亘るプロセス信号から判断した運転状態に基づき、プラント運転自動化運転の進行を監視すると共に以下の主機の操作タイミングを判断するものである。

- ① 一次主循環ポンプ、ボニーモータの起動・停止
- ② 二次主循環ポンプ、ボニーモータの起動・停止
- ③ 主給水ポンプ、ブースタポンプの起動・停止
- ④ 蒸気発生器再循環ポンプの起動・停止
- ⑤ 復水ポンプ、ブースタポンプの起動・停止
- ⑥ 循環水ポンプの起動・停止
- ⑦ 制御装置の自動・手動

プラント制御系は、原子炉出力制御装置、一次冷却材流量制御装置、二次冷却材流量制御装置、給水流量制御装置からなる。運転員からの運転指令は、原子炉出力制御装置と二次冷却材流量制御装置に与えるものとする。出力運転以外（臨界操作、系統昇温）には、運転員からの運転指令は原子炉出力制御装置に与えられ、原子炉回りのプロセス状態から次に成すべき操作の判定を行うものとする。また、出力運転時には、最も応答の遅いと考えられる二次冷却材流量制御装置に運転員からの運転指令が与えられ、二次冷却材流量制御装置はそれに基づく流量制御を行うものとする。このとき、原子炉出力制御装置、一次冷却材流量制御装置、及び給水流量制御装置は、直接的あるいは間接的に二次冷却材流量制御装置の動きにより変動したプロセス量を入力し、制御目標値を決定するものとする。これにより、プラント運転自動化システムの機能分担は、制御対象のプロセスに対応したものとなり、プラント運転自動化システムは、速応性の確保された構成となる。

本プラント運転自動化システムの機能構成を図2.2.1-3に示す。

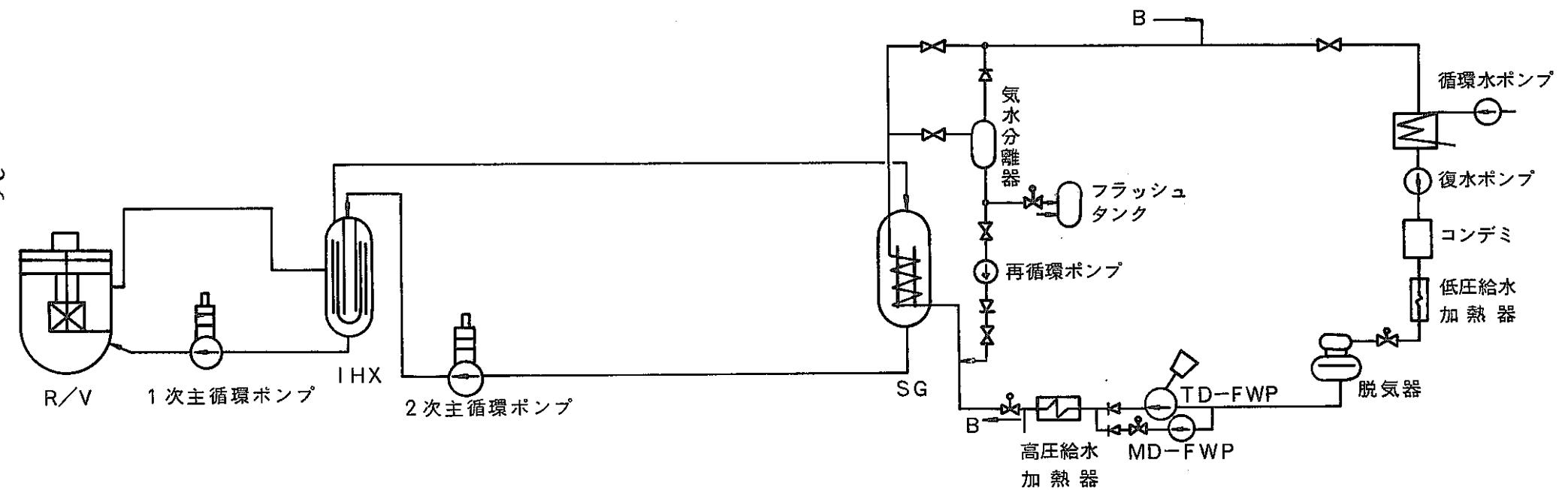


図 2.2.1-1 蒸気発生器設備の場合のプラント基本構成（例）

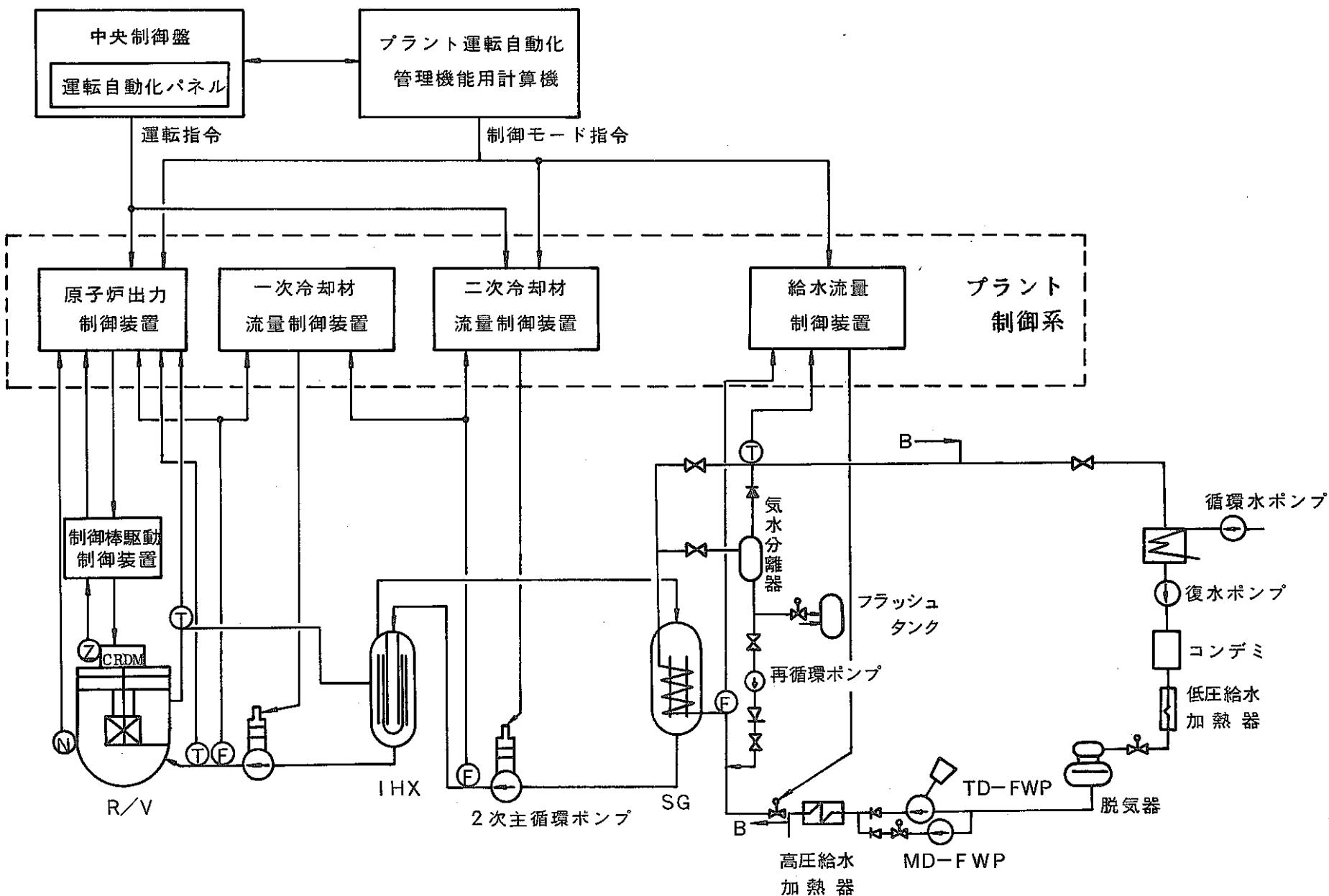


図 2.2.1-2 プラント運転自動化システムの基本構成（蒸気発生器設置の場合）

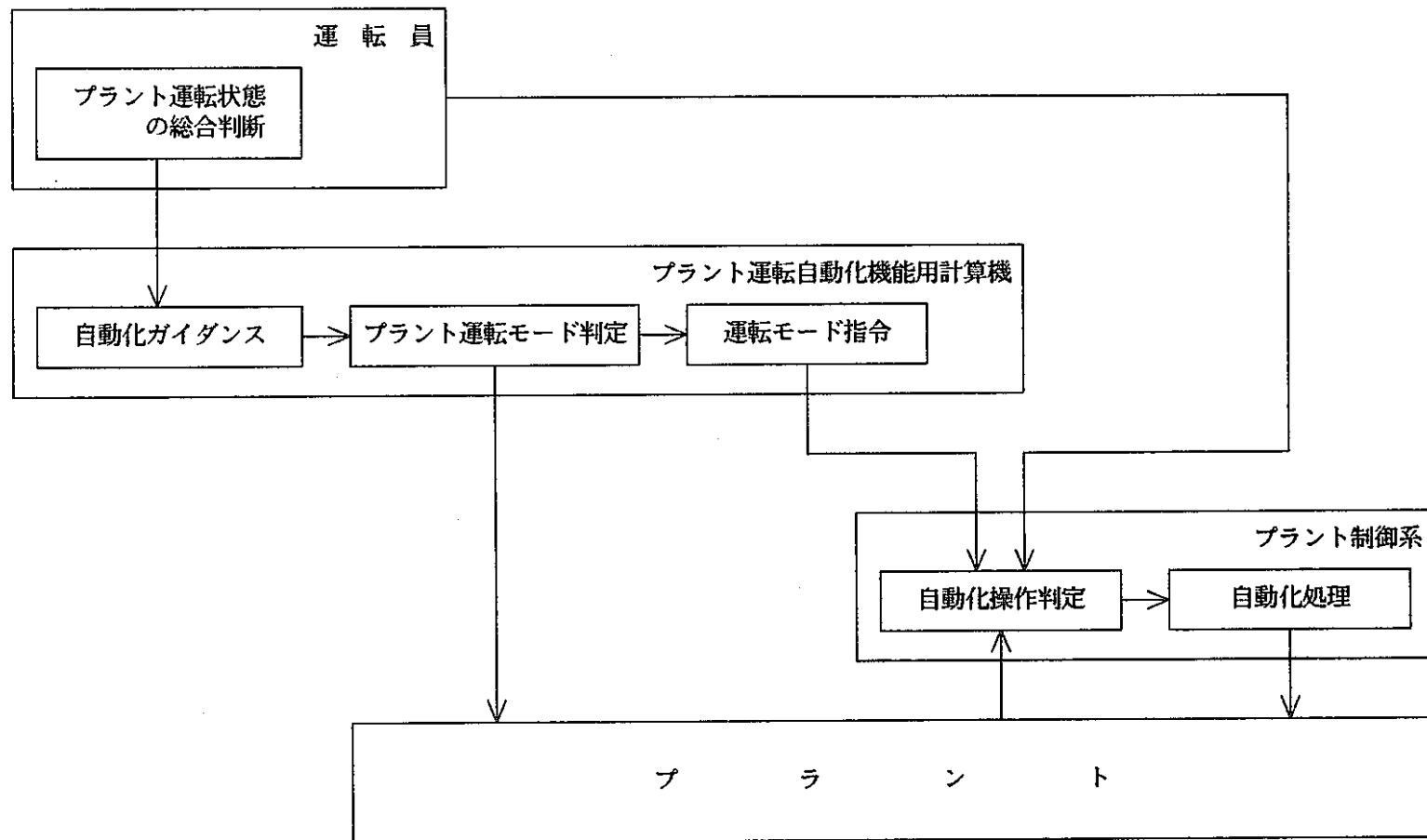


図 2.2.1-3 プラント運転自動化システムの機能構成（蒸気発生器設置の場合）

2.2.2 計算機システム構成の検討

(1) 基本的なシステム構成の考え方

蒸気発生器を設置した場合は、「常陽」の運転体系が大幅に変わるため、現在ある計算機システム (JOVDAS/JOVCAT) の体系を見直す必要がある。以下に計算機システムを見直し、再構築するための基本的な考え方を機能面及びハードウェア面から検討する。

(a) 基本的な考え方

(i) 新たに追加する機能

- ① 高信頼度かつ集約化プラント情報の提供が行えるディスプレイ制御機能。
- ② 炉心状態の迅速かつ高精度の評価・監視・予測を行う炉心性能評価監視機能。
- ③ プラント全般に亘る性能監視、状態監視、異常診断、及びプラント自動化運転管理を行うプラント運転監視機能。

(ii) ハードウェアの選択及び構成

- ① 信頼性の確保、速応性の確保、運転監視制御の運転性能向上を図るために上記の3つの機能のC P U分散化を図る。
- ② 信頼性の確保が必要な部分は冗長化構成とする。
- ③ 運転操作性の向上を図るために、タッチスクリーン付高密度カラーC R Tを設ける。
- ④ 監視性の向上を図るために大型プロジェクタを採用する。
- ⑤ ガイダンスあるいは警報の告知を行うための音声応答装置を用いる。
- ⑥ ハードウェアは信頼性と実績のあるものを用いる（故障検出機能、自己診断機能を備えているもの）

(2) 計算機システムの機能構成の検討

本計算機システムは、運転員が必要とする情報を的確に提供し、通常運転時はもとより異常時を含むあらゆる運転状態における運転操作を支援すると共に、プラント自動化運転を管理するものであり、中央計算機として位置づけられる。具体的に、

中央計算機は、C R Tに高信頼度の集約化プラント情報の提供を行うディスプレイ制御機能、炉心状態の迅速かつ高精度の評価・監視・予測を行う炉心性能評価監視機能、及びプラント全般に亘る性能監視、状態監視、異常診断、及びプラント自動化運転進行管理を行うプラント運転監視制御機能に大別される。

① ディスプレイ制御機能

プラント運転操作監視のために必要となるプラント状態、あるいは異常診断に基づく運転ガイド情報を、高速でC R Tに表示すると共に、プラントデータの集約化表示及び記録を実行する。

C R Tへ表示するプラント状態は、プラント系統図と共に表示する。また、異常診断に基づく運転ガイド情報は、イベントツリー等その事象の推移が判断できるものと共に表示する。表示情報はその性質に応じて、数値、記号、テキスト、ヒストグラム、トレンドグラフ、色別等によりその表示体系が異なるものとすることにより、運転員にとって認識性の高いものとする。

② 炉心性能評価監視機能

炉心の熱的裕度の監視、炉心安全の監視、炉心燃料燃焼度管理等を行うもので、主な機能を以下に示す。

- ア 炉心熱出力計算
- イ 炉心出力分布計算
- ウ 炉心温度分布計算
- エ 炉心燃焼度分布計算
- オ 燃料同位元素組成計算
- カ 制御棒操作時の炉心特性計算
- キ 熱出力変更時の炉心特性計算
- ク 原子炉停止余裕予測
- ケ 異常反応度監視
- コ 燃料集合体出口温度監視

③ プラント運転監視制御機能

プラント運転操作の管理及び支援を行うものであり、運転監視機能と自動化管理機能とがある。

運転監視機能は、プラント全般に亘る各種プロセス信号を入力し、異常の徵候及び異常状態の検出を行うもので、異常発生時には、事故後記録、トリップシーケンス等の記録を行う。また、警報の発生状態、及びプロセス状態より異常原因を同定し、その結果をC R Tに表示すると共に、対応操作のマニュアルを画像情報ファイル装置からプリントアウトする。また、炉心性能計算にて必要となるプロセス量の前処理を行い、炉心性能評価監視機能を強化する。その他、主循環ポンプ、蒸気発生器等の主要機器の性能計算を行い、その結果をC R Tあるいはタイプライタ等に表示、印字する。

一方、プラント自動化管理機能は、自動化運転の進行を監視すると共に前述の主機の操作タイミングを判断するものである。また、プラント自動化運転に係わるガイダンスを運転員へ提供する。

(3) 計算機ハードウェア構成の検討

(a) 基本構成

中央計算機は、信頼性の確保、C R T表示画面の速応性確保、運転監視制御の性能向上を達成するため、ディスプレイ制御機能、炉心性能評価監視機能、プラント運転監視制御機能の機能単位で分割した3つのサブシステムより構成する。

① ディスプレイ制御システム (D C S : Display Control System)

運転情報のC R Tへの高速表示を実現するため、複数台のC P Uにより構成するものとする。また、2つの系列に分割し、万一、一方の系列の計算機が故障しても、C R T表示内容に支障をきたすことのないよう、他方の系列でバックアップ可能な構成とする。

② 炉心性能評価監視システム (R M M : Reactor Monitoring and

Management system)

本システムは、炉心の性能確認のためのものであり、運転とは直接的に関係した処理を要求されることはほとんどないため、1台のC P Uで構成する。

③ プラント運転監視制御システム (SVC:Supervisory Control
system)

計算機入力されるプラント全般に亘るプロセス信号に基づく監視診断を十分な応答性をもって処理できるよう複数のCPUにより構成する。また、万一、1台の計算機が故障しても、他の計算機にてバックアップ可能な構成とする。

以上の中央計算機のハードウェア構成を図2.2.2-1に示す。

(b) ハードウェア概要

以下に本システムを構成するハードウェア項目と概略用途を示す。

- | | |
|---------------------|---|
| ① 中央演算処理装置
(CPU) | 1式
ディスプレイ表示制御用 (DCS)
プラント運転監視制御用 (SUC)
炉心性能計算用 (RMM) として設ける |
| ② 主メモリ | プログラムデータの記憶 |
| ③ ICバルク | 各CPUと接続する。
プロセスデータ、情報の交換用 |
| ④ 磁気ディスク
(MD) | OS、コンパイラ、ソース、オブジェクトのセーブ用及びデータダンプ用として設ける。 |
| ⑤ 画像情報ファイル
装置 | TOSFILE
運転マニュアル（通常時及び異常時用）他、運転に係わる資料をファイリングしておき、必要時計算機よりの指令で目的とするファイルの情報を表示する。 |
| ⑥ CRT | 高密度カラーCRT 8台、内4台タッチスクリーン付、残4台キーボード付
主盤用に6台、当直長用に1台、エンジニアリング用に1台とする。 |

警報表示、状態表示、運転操作ガイドメッセージ表示、系統図表示、グラフ表示等をCRTに割付けて表示する。

タッチスクリーンについては、4台のCRTに取付けタッチオペレーション（対話、操作、画面切替等）が可能とする。

- | | |
|-------------------|---|
| ⑦ ビデオプロジェクタ | 背面投射型プロジェクタ
高密度カラーCRTのコントローラから駆動可能とする。 |
| ⑧ ハードコピー
(HC) | 3台
主盤の6台及び当直長用及びエンジニアリング用の各1台設けられたCRTに表示された画面のコピーをとることが可能。 |
| ⑨ タイプライタ
(TW) | 漢字シリアルプリンタ 5台
炉心性能計算の定時ログ及び日報出力用プラント性能計算の定時ログ及び日報出力用自動化等メッセージ出力用、警報出力用任意要求ログ出力用に用いる。 |
| ⑩ ラインプリンタ
(LP) | 1台
コンパイルリストの出力、システムタイプ等に主に保守用として設ける。 |
| ⑪ 磁気テープ
(MT) | 1台
ラインプリンタ同様主に保守用として設け、磁気ディスク上のメモリの吸い上げを行う。 |
| ⑫ 音声応答装置 | TOS VOICE 1式
自動化ガイダンス及び警報通知用として用い、CRT他表示器の視覚からに対し、聽覚からのオペ |

レータの支援を行う。

- ⑬ コンソールC R T 各C P Uに1式
- ⑭ フロッピーディスク 保守用として各C P Uに1式設けるものとする。

IC バルク

C P U…中央演算処理装置、MD…磁気ディスク
 F D D…フロッピーディスク、P I / O…プロセス入出力装置
 T W…タイプライター、H C…ハードコピー、S W…ハードコピー切り替えスイッチ
 K B…キーボード、M T…磁気テープ、L P…ラインプリンタ

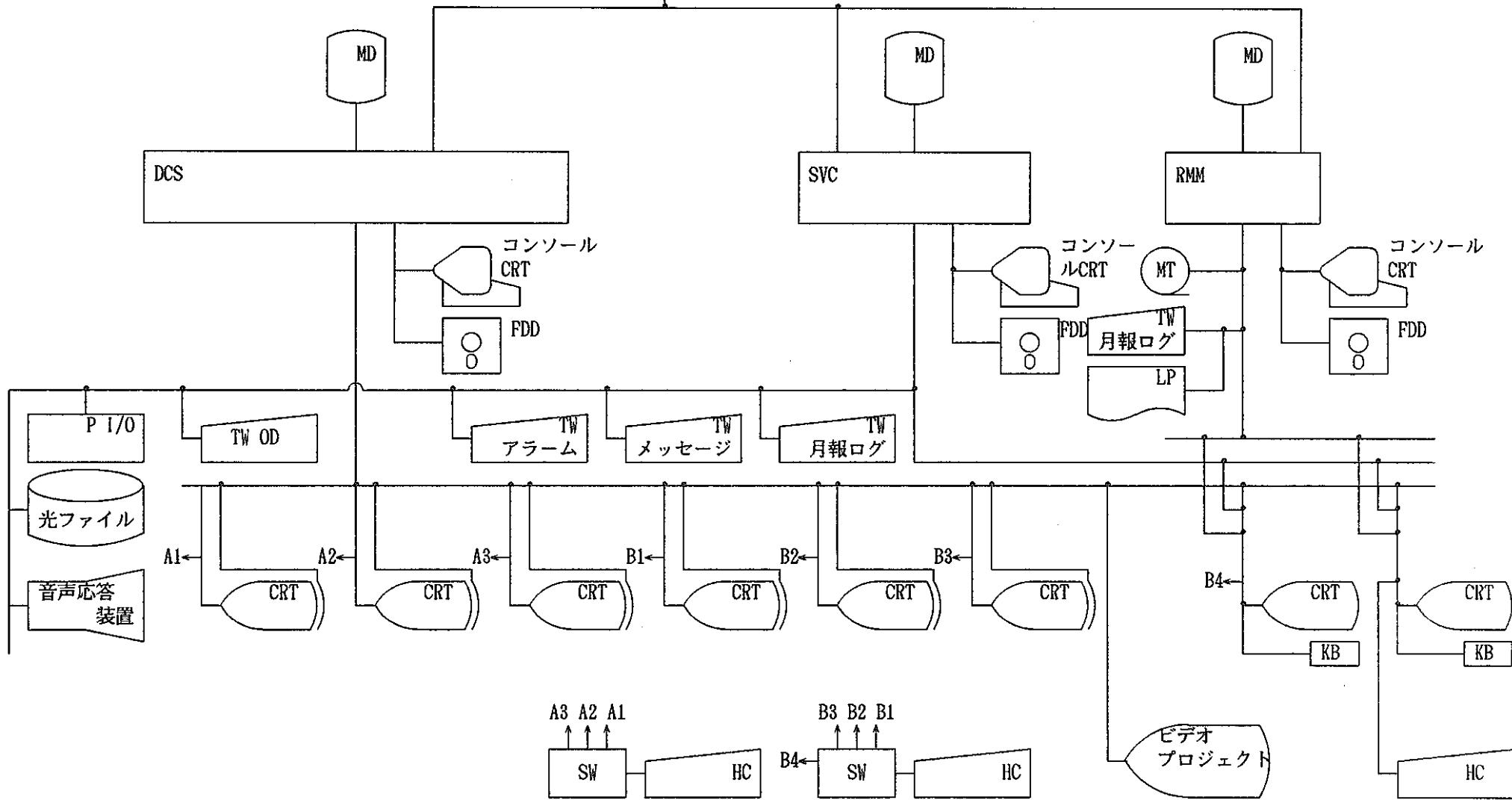


図2.2.2-1 計算機ハードウェア構成図

2.2.3 プラント運転自動化制御系構成の検討

2.1.3 に記述したとおり、制御系はマイクロプロセッサを用いたディジタル制御装置により構成するものとする。

プラント運転自動化システムの構成要素である原子炉出力制御装置、一次冷却材流量制御装置、二次冷却材流量制御装置、給水流量制御装置の基本構成について以下に示す。

蒸気発生器を設置した場合には、蒸気発生器の安定な運転を確保するために、冷却材流量を熱出力にはば比例するように運転することが必要となる。原型炉「もんじゅ」では、出力運転時にそれぞれの制御装置へ制御目標値を与える出力指令装置（マスター コントローラ）を設け、原子炉出力、一次冷却材流量、二次冷却材流量、給水流量の協調制御を実現している。ここでは、協調制御の安定性、速応性をさらに向上させることを目的として、自律分散化プラント制御系を適用するものとする。

自律分散化プラント制御系とは、各制御系を統括管理する装置を持たずに、協調制御を実現するものであり、応答の遅い制御装置に運転員の運転指令を与え、その制御装置のみが運転員の意思に基づくプラント状態の移行制御を行う。応答の速い他の制御装置は、運転員の指令を受けた制御装置により変化するプロセス量を基準として、制御目標値を決定するものとする。変化の遅いプロセス量に他のプロセス量を追従させるこの方式により、プラント制御系全体として動的にも協調性の良いものとなる。

出力運転時には、最も応答の遅いと考えられる二次冷却材流量制御装置に運転員からの運転指令を与え、二次冷却材流量制御装置はそれに基づく流量制御を行うものとする。

出力運転以外（臨界操作、系統昇温）に動作するプラント制御系は、原子炉出力制御装置のみであり、その時の機能は前記2.1.3 1)で述べた現状プラント構成に基づくものと同じであるため、出力運転時の各プラント制御系の機能について以下に示す。

(1) 二次冷却材流量制御装置

冷却材流量と原子炉出力を協調して制御する必要のある運転モードの判定はプラント運転自動化管理機能用計算機にて行うものとする。協調制御の必要性は蒸気発

生器の安定性確保にあるため、蒸気発生器出口蒸気温度等蒸気発生器回りのプロセス量により判断するものとする。二次冷却材流量制御装置は、運転員からの起動運転・停止操作指令とプラント運転自動化管理機能用計算機からの協調制御開始指令を受けて、二次冷却材流量の増大あるいは減少の制御を行う。本制御装置の制御機能ブロック図を図2.2.3-1に示す。

2) 一次冷却材流量制御装置

一次冷却材流量制御装置は、二次冷却材流量を入力し、それにより一次冷却材流量の制御目標値を決定する方式とする。本制御装置の制御機能ブロック図を図2.2.3-2に示す。

3) 原子炉出力制御装置

原子炉出力制御装置の基本機能は、前記2.2.3-1)で述べた現状プラント構成に基づくものとほぼ同じである。ただし、原子炉出口温度フィードバック制御への移行は、プラント運転自動化管理機能用計算機（SVC）からの協調制御開始指令によるものとする。原子炉出口温度フィードバック制御時の制御目標値は、一次冷却材流量（Aループ、Bループの平均値）より決定する方式とする。

4) 給水流量制御装置

給水流量制御装置は、二次冷却材流量を入力し、それにより給水流量の制御目標値を決定する方式とする。本制御装置の制御機能ブロック図を図2.2.3-3に示す。出力運転時には、蒸気発生器出口蒸気温度を一定に保つために、蒸気発生器出口蒸気温度をフィードバック信号とするカスケード制御とする。カスケード制御への移行は、蒸気発生器出口蒸気温度と二次冷却材流量により給水流量制御装置内にて判断するものとする。

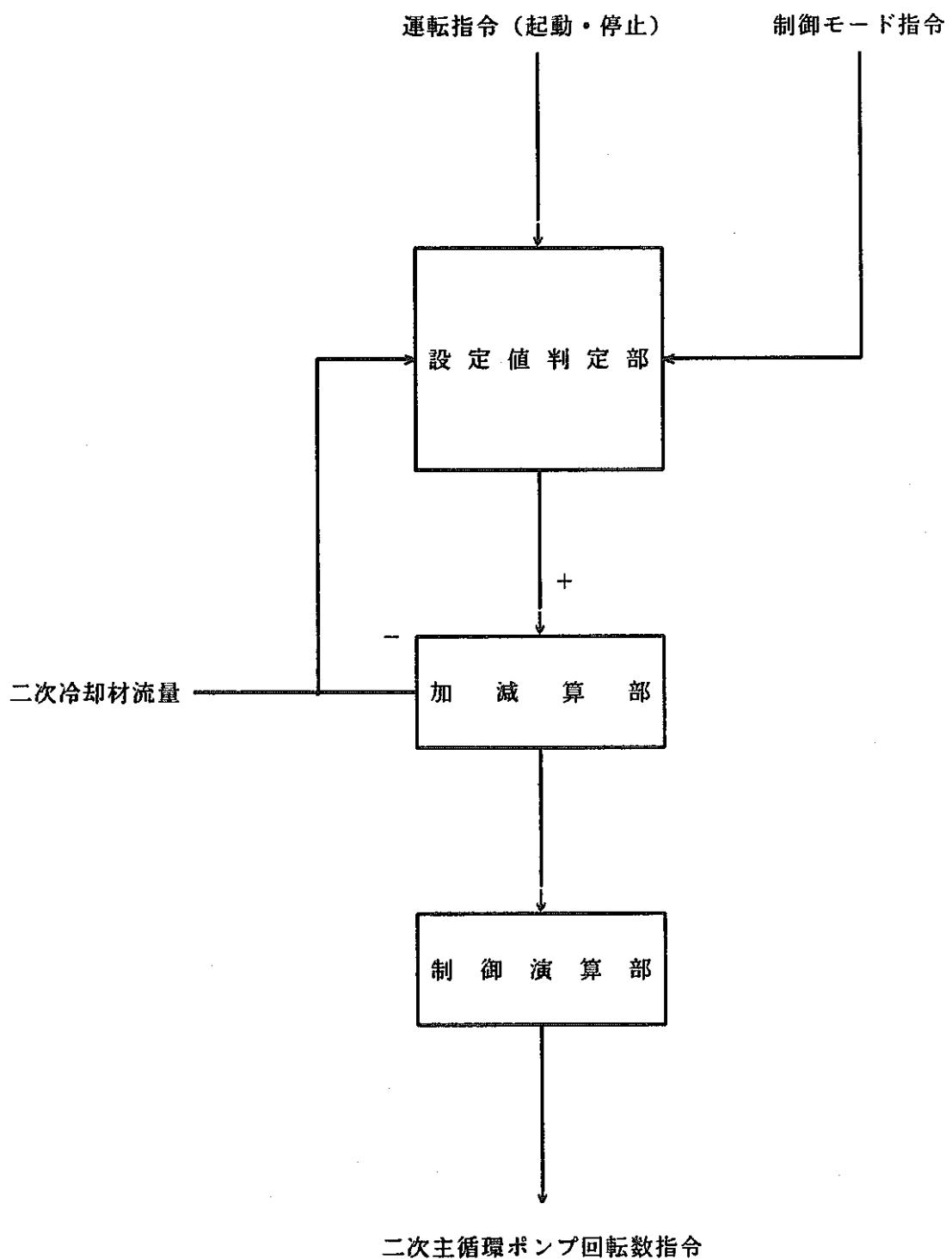


図2.2.3-1 二次冷却材流量制御装置制御機能ブロック図

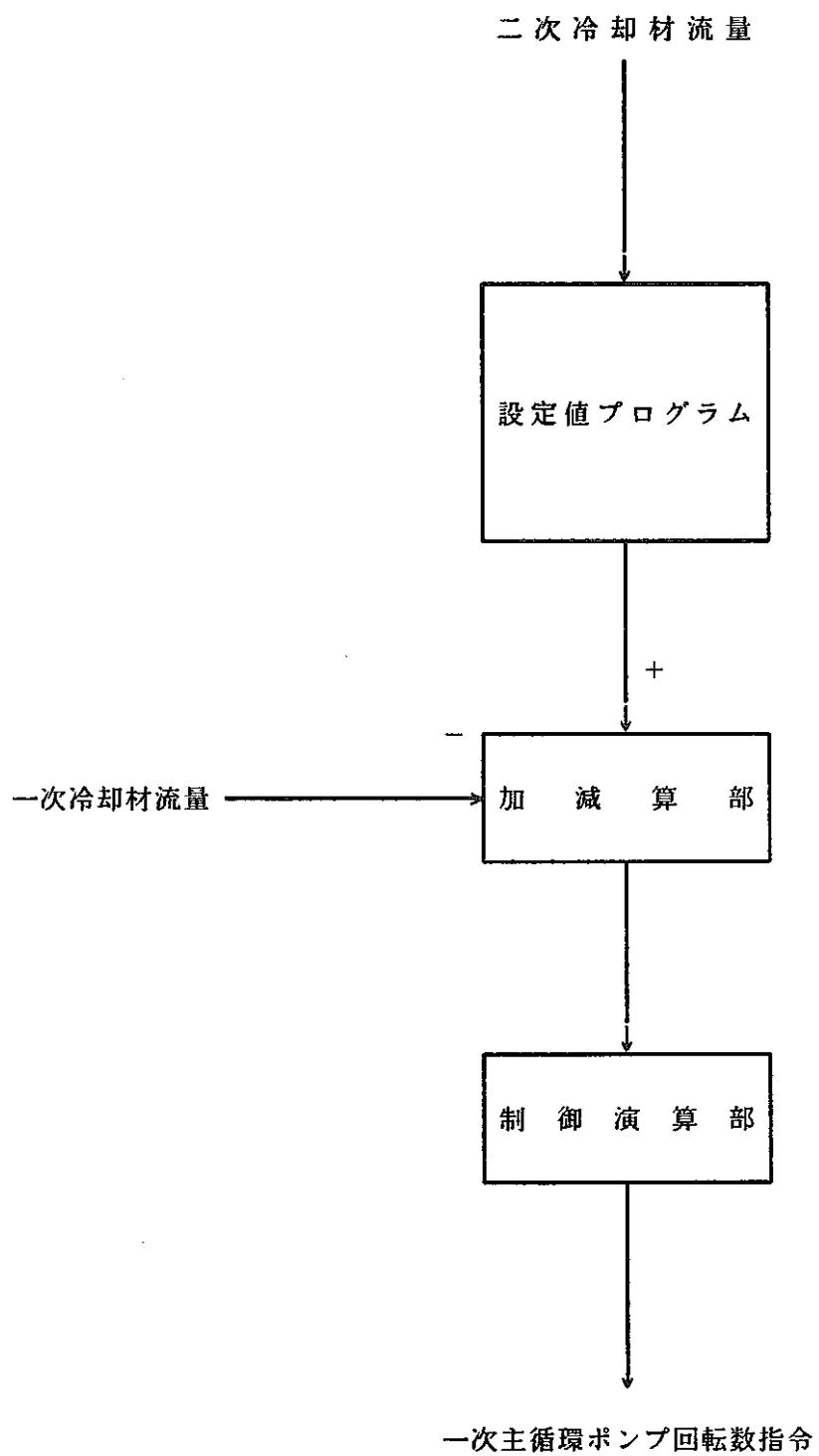


図2.2.3-2 一次冷却材流量制御装置制御機能ブロック図

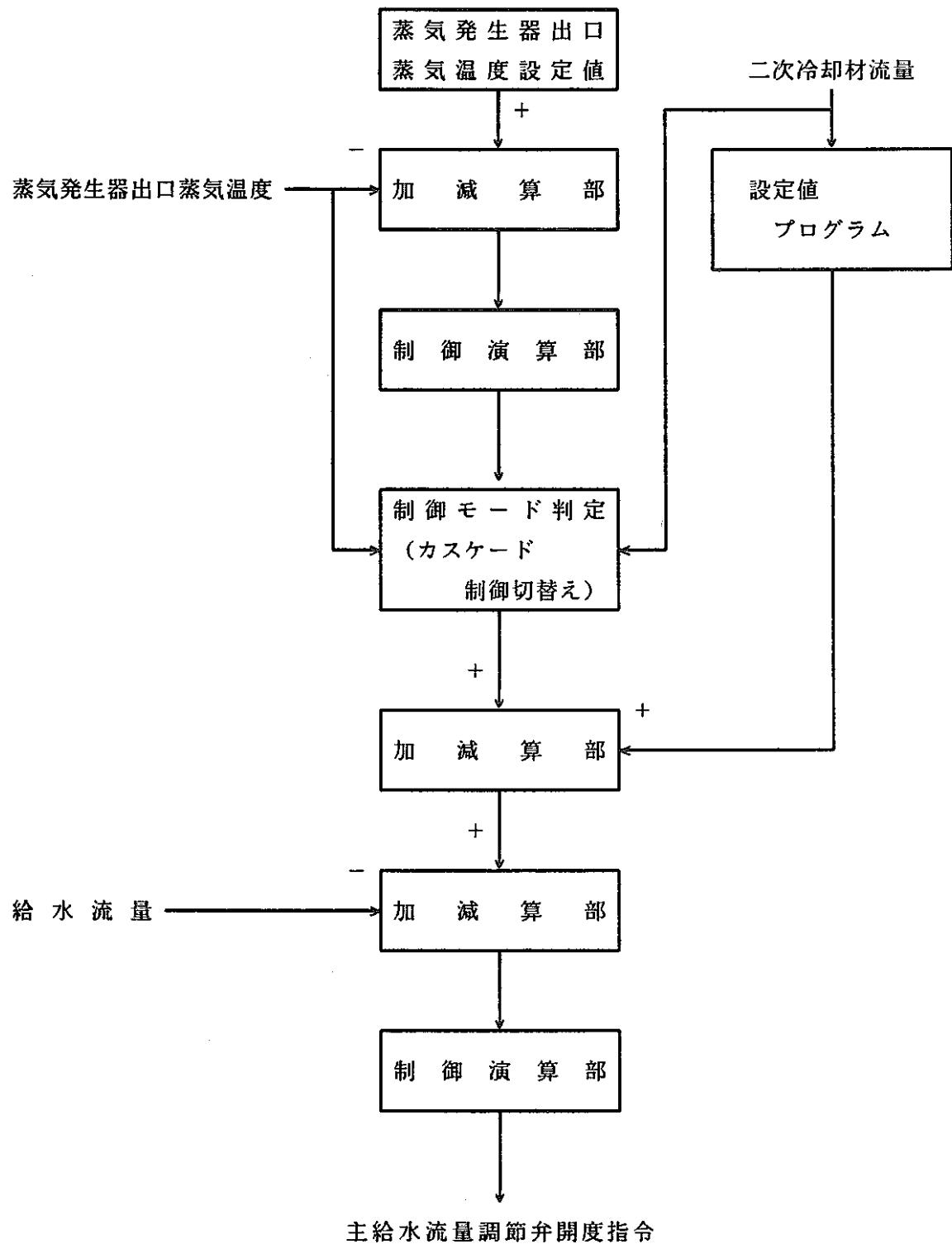


図2.2.3-3 給水流量制御装置制御機能ブロック図

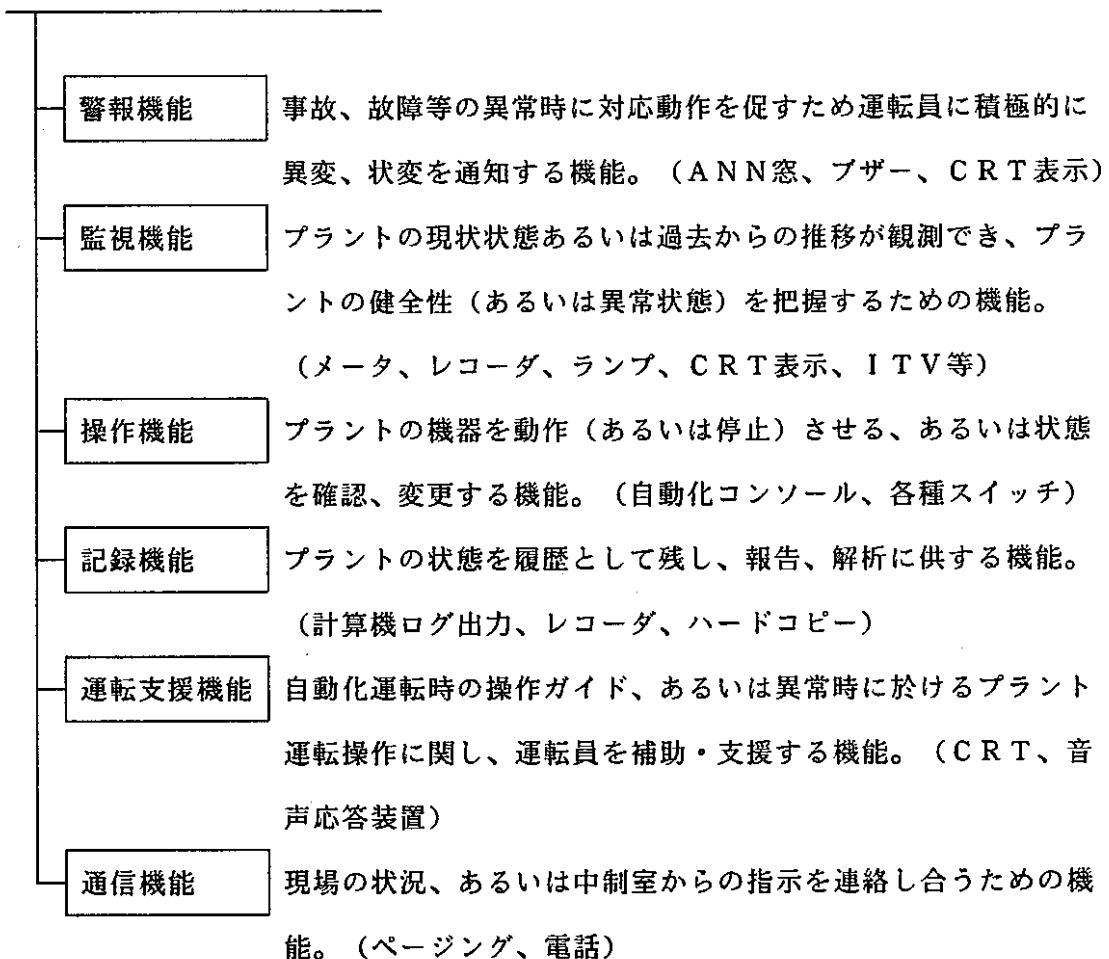
2.2.4 マンマシンコミュニケーション手法の検討

プラント運転自動化に伴なうプラント起動・運転・停止の自動化を行う上で人間と機械との情報伝達（マンマシンコミュニケーション）がいかにあれば良いかをマンマシンインターフェイスの機能面から検討を行う。

(1) マンマシン機能の分類

2.1.4 の検討と同様に、人間と機械とのインターフェイス（マンマシンインターフェイス）を機能面から、分類すると以下のようになる。

マンマシンインターフェイス



(2) 機能向上のための方策

中央計算機を導入することによってマンマシンインターフェイスとしての機能向上を図るために前記(1) であげた各機能についていかなる配慮が必要かを検討する。

(a) 警報機能

重要ANNについては、主盤上部にハードANNとして残し、他はCRTメッセージ化を図る。

尚、ハードANNは緊急度に応じて色で区別を行う。また、CRTへのメッセージANNについては、従属ANNの抑制表示、ANNの集約表示を行い、必要部分を拡大細分表示し、ANNの具体的項目の確認が行えるなど、情報過多による、混乱を起こさせないよう考慮する。

(b) 監視機能

プラントの状態（主要なプロセス量、機器の動作状況、バルブの開閉状態等）運転の進行状況、異常の発生具合等は全て、主盤に設けた6台のCRT表示器、ANN表示器、計器及び主盤外に設置した大型プロジェクタにより監視できるものとする。

尚、主盤に設けた6台のCRTと大型プロジェクタへの表示内容の割付けは以下の通りで考える。ただし、以下に割付けた表示内容は各CRTに対してのメイン画面であり、互いにバックアップ表示が可能なものとする。また、プラントの起動（あるいは停止）の進行に伴い画面の変更が必要となるCRTについては、自動的に画面の切換えが行われるものとする。

(i) CRT画面の割付け（図2.2.4-1 参照）

- ① #1 CRT : 工安系の状態を系統図とともに各機器、弁の動作状況、プロセス値などが確認できる画面を表示する。
- ② #2 CRT : 警報表示を行う。表示内容としては通常アラーム、異常アラームに分けて表示するとともに表示形態としては、項目毎のポイント表示の他、集合表示等も考慮する。異常診断機能からもたらされる結果も本CRTを開いて表示する。
- ③ #3 CRT : トレンド表示を行う。主要プロセス量を複数枚の画面に分けてトレンド表示を行う。また、トレンドをかけたい

ポイントについては、要求に応じて登録、削除が行え登録されているポイントのトレンド表示が可能とする。安全パラメータの表示も本CRTにより行う。

- ④ #4 CRT : 反応度系の表示を行う。制御棒の位置、中性子束反応度、ペリオド等の値をグラフ、パターン等により表示を行う。
- ⑤ #5 CRT : 運転ガイド表示を行う。自動運転時の運転状態（モード）表示、自動化進行のポイント毎の確認あるいは操作ガイドメッセージの表示を行う。また、異常における確認、処置手順のガイドメッセージも行う。
- ⑥ #6 CRT : 水蒸気系および補助系統の系統表示を行う。
- ⑦ 大型プロジェクタ : プラントサマリ表示を行う。主系統を系統表示し、機器の駆動状況、バルブの開閉状態、主要プロセス値（デジタル値あるいは、アナログ値にて表示する）を系統図画面の中に表示する。

(c) 操作機能

プラント自動化運転に係わるコンソール操作は、主盤に設けられた自動化コンソールにより行えるものとする。尚、操作に際しては運転ガイド用の#5 CRTの表示に従い操作できるものとする。

自動化コンソールの操作は上記のCRTガイドメッセージによる他、2.1.4-2)-c) に記載と同じ方法をとるものとする。

自動化操作の他に、主盤の6台のCRTには、タッチスクリーンが設けられている事により、タッチ操作による画面の切換、手動操作可能な機器の駆動等ができるものとする。

(d) 記録機能

許認可上、計算機処理が許されないパラメータの記録（これは表示の場合も同様）は従来計器として残す他は、計算機処理により、タイプライター、ハードコピー、磁気記憶装置に記録がとれるようにするものとする。

尚、タイプライターへの記録には用途別に以下の通りに別けるものとする。

- ① 日報ログ用－1 : 炉心性能計算の結果を日報、定時ログとして打出すもの。
- ② 日報ログ用－2 : プラント性能計算の結果を日報、定時ログとして打出すもの。
- ③ メッセージ用 : 自動化に係わるガイドメッセージや状態変化メッセージの出力を行うもの。
- ④ アラーム用 : 異常時のアラームメッセージの出力を行うもの。
- ⑤ O D用 : 運転員の要求に応じてログ出力を行うもの。（オン、デマンド）

(e) 運転支援機能

通常運転時には、自動化運転時に於いても必要な操作（コンソール操作）ガイドを#5 CRTへ出力する他、異常診断機能により、プラントの異常徵候が認められた時の#2 CRTへの診断結果表示とともに、プラントの状態が異常状態に進展しないようにするためのガイドメッセージも#5 CRTへ出力できるものとする。

また、異常状態になった時の運転員の取るべき対応動作についても、ガイドメッセージを#5 CRTへ出力する。

(f) 通信機能

通信機能については、2.1.4-2)-f) 同様既設のものを流用するという事で、特に考慮はしない。

以上のマンマシンインタフェイス機能を表2.2.4-1 に示す。

また、中央制御盤主盤の外形図を図2.2.4-2 に示す。

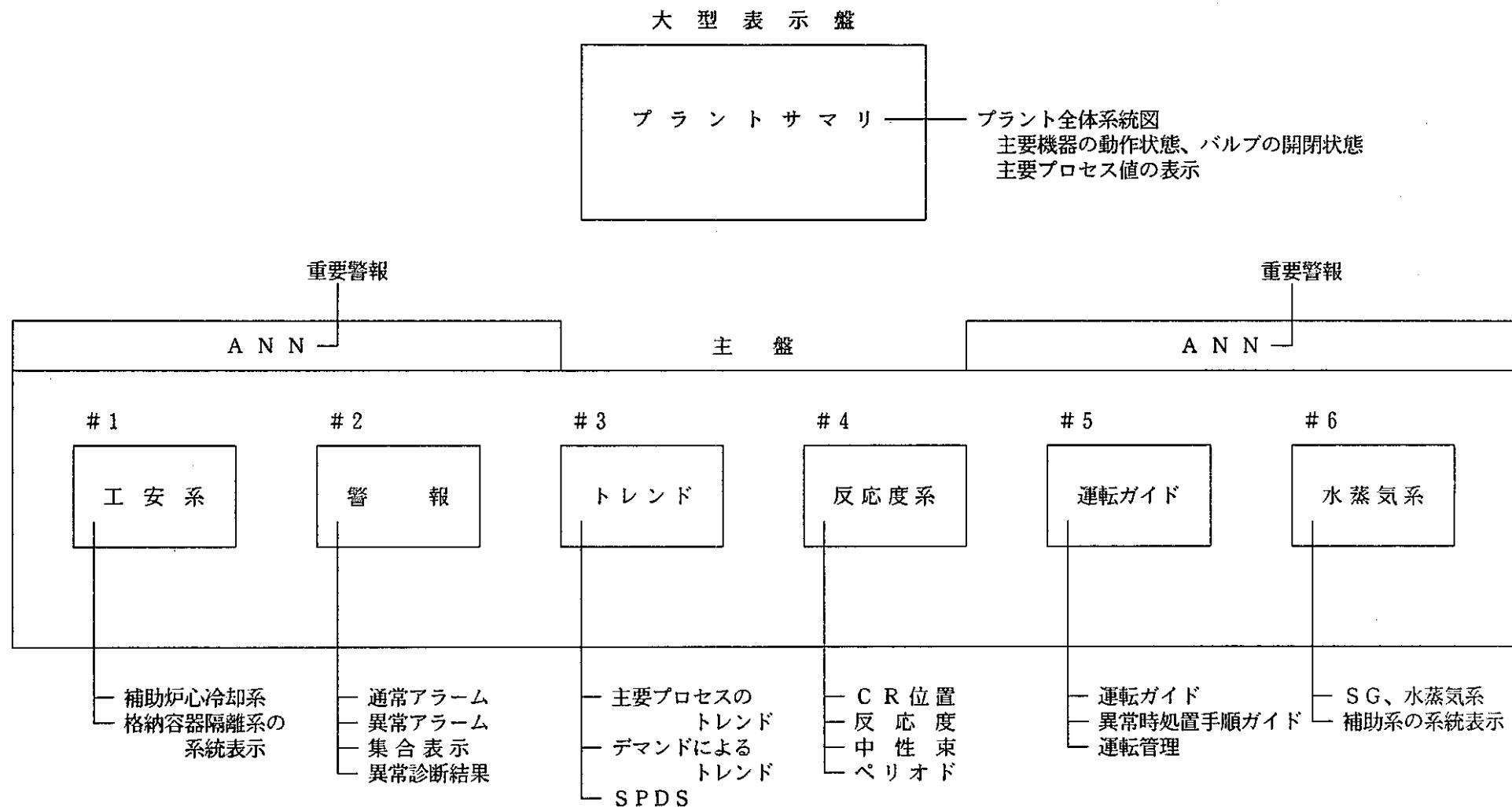


図 2.2.4-1 CRT 画面割付け

表2.2.4-1 マンマシンインタフェイス機能（中央計算機）

No.	機能	内容
1	警報機能	重要ANNは主盤上に残し、他はCRTメッセージ化 ハードANNは色別して区別 RTメッセージANNは集約表示（拡大細分化表示）
2	監視機能	主盤に設けた6台のCRT、ANN表示器、計器及び主盤外の大型プロジェクタによるプラント状態監視
3	操作機能	主盤に設けた自動化コンソールによる自動化操作 (CRTガイドメッセージに従い操作可能) タッチスクリーン付きCRTによりタッチ操作可能
4	記録機能	タイプライターへの炉心性能計算、プラント性能計算、結果の日報、定時ログ、自動化ガイドメッセージ、異常時のアラームメッセージ、オペレータ要求によるログ等の出力 ハードコピーへの画面コピーの出力
5	運転支援機能	自動化運転時の操作ガイドメッセージ出力 異常時の対応動作ガイドメッセージ出力
6	通信機能	電話、ページング（既設を流用）

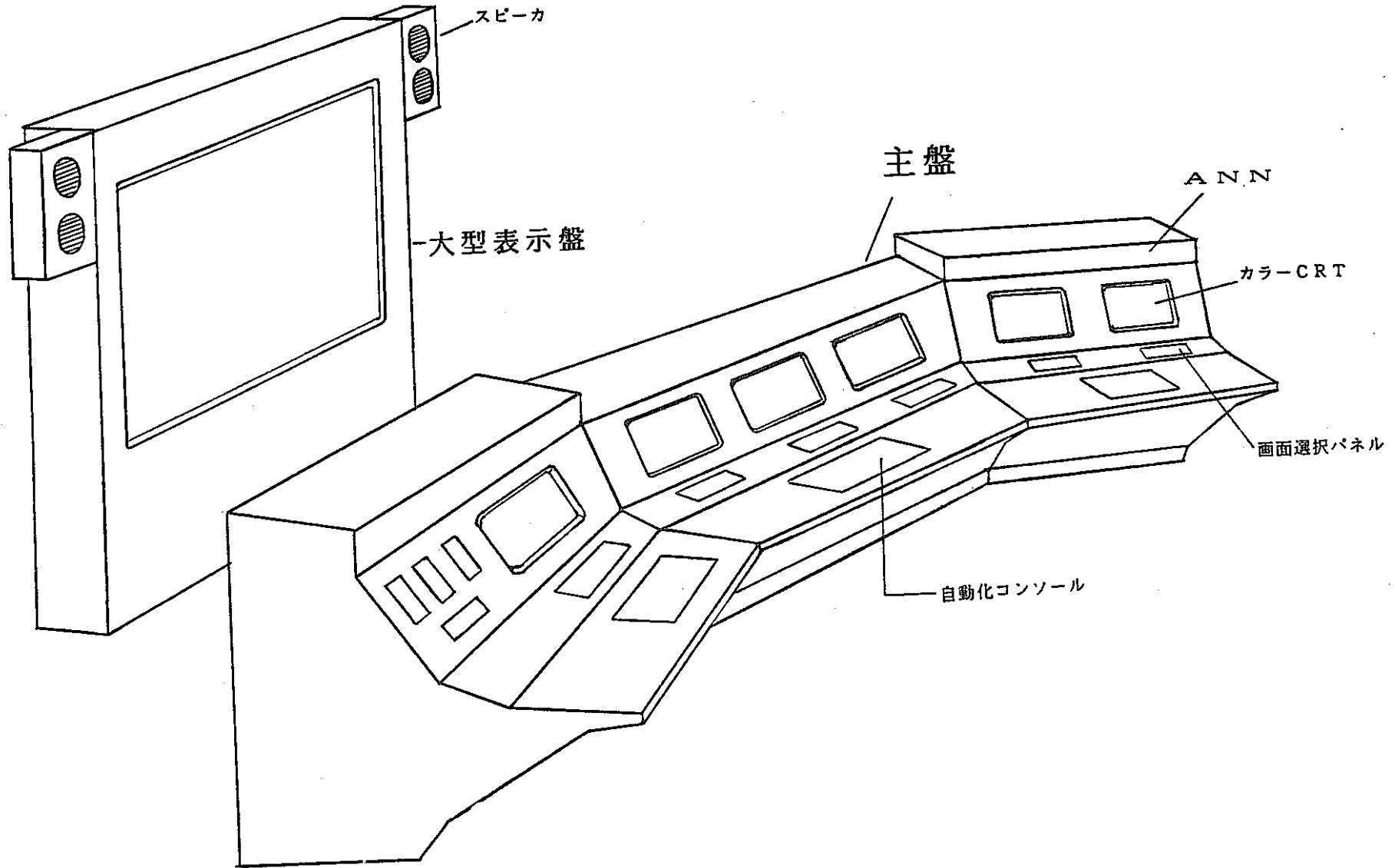


図2.2.4-2 中央制御盤主盤 外形図

2.2.5 異常時処置方法の検討

蒸気発生器を設置した場合には、安定な炉出力制御を実現するため自動化の対象範囲は、プラント全般にわたるものとなる。

また、プラントの健全性を確保するための監視項目は各系統にわたって存在している。以下に系統毎の主要監視項目について示す。

① 原子炉系

- 局所流路閉塞
- 局所冷却材沸騰
- 局所燃料ピン破損（DN法）
- 局所燃料ピン破損（CG法）
- 炉内構造物振動

② 冷却系

- ナトリウム漏洩
- 蒸気発生器 水漏洩（ナトリウム－水反応）
- 蒸気発生器 流動安定性
- 回転体 振動特性
- 各種補助系の機能健全性

③ 保護系／制御系

- 安全保護系ロジック・シーケンス
- 各種制御系特性（検出器、制御器、操作器）

したがって、プラント全般にわたるプラント運転自動化を達成し、その健全性を確保するためには、プラント全体の監視・制御を総合的かつ統合的に支援するシステムが不可欠となる。プラントの運転信頼性を確保するためには、蒸気発生器を設置した場合にも同様に、2.1.5節で述べた以下の機能が必要となる。

- ① プラントの健全性を監視して安全に運転を行う機能
- ② 異常が発生した場合に、早期に異常を検出してその進展を防止する機能
- ③ 異常が進展し急激な過渡変化をひき起こした場合でもプラントを安全に停止

させる機能

本節においても、2.1.5節と同様に、知識工学手法を適用した蒸気発生器設置時の異常時処置方法について述べる。

(1) プラントの健全性を監視して安全に運転を行う機能

蒸気発生器設置のプラントでは、多くの機能モジュールがフィードバック・ループを構成して影響し合っているため、システムの応答は複雑なものとなっている。そこで、出力変更時等の運転操作においては、動特性シミュレーション・プログラムを用いてプラントの挙動を定量的に評価し、操作パラメータ／制御パラメータ間の関係から最適な操作パラメータ、操作量さらに操作後のプラント状態までも予測し、実際の状態と比較して自動化運転が正しく行われているか否かを監視する。ここで自動化運転が正しく行われていないと認められたときには、復旧操作を決定すると共に運転員にその旨を伝える。また運転モードと主要プロセス量の挙動は、運転履歴として自動的に保存する。

(2) 異常が発生した場合に、早期に異常を検出してその進展を防止する機能

警報の発生にまで至らない場合であっても、通常の運転状態が明らかである場合に限り、その基準状態からの偏りを監視することにより早期に異常を検出することが可能である。このような早期異常検知の技術としては、静的／動的なバランス解析と炉雑音解析による監視が非常に有効である。以下にこれらの例を示す。

① 温度バランス法による炉心監視

② 炉雑音特性のパターン認識による機器異常監視

このバランス解析と炉雑音解析による監視より得られた異常のパターンと、知識データベースに登録してある各異常事象に対して与えられている基準パターンとを比較することにより、異常の原因を判定し、その規模を定量的に評価することができる。さらに異常の進展を予測すると共にその復旧操作を決定する。特に炉雑音解析による監視は、未知の状態であっても自動的にパターンを学習することができる所以、後にこれらについての情報を入力することにより既知状態の基準パターンとして扱い、診断に活用することができる。

(3) プラントを安全に停止させる機能

プラントに何等かの異常が発生した場合には、複数の信号の過渡変化として観測されることが多い、その変化が大きい場合には多数の警報が発生する。このような場合には適切な処置をとることが重要となる。したがって警報の属性／重要度、警報間の因果関係、処置についての情報をあらかじめ知識データベースに登録しておき、これらを基にして異常の原因警報を判定し、適切な処置を決定する。また同時にインターロックや安全保護系といったプラントの自動保護機能の動作のチェック（シーケンス・モニタリング）も行う。さらにバランス解析、炉雑音解析等から異常の原因警報を発生させるに至った起因事象を判定し、異常の動特性シミュレーションを行い、その進展を予測する。

図2.2.5-1 に上記機能を実現するための機能構成図を示す。知識データベースには、系統／機器／部品といったプラントの構造／構成に従って記述された設計データ、動特性シミュレーション・プログラム、監視／診断に関するデータ、各種関連マニュアル等の情報が格納されている。推論エンジンとしては、監視／診断に係わるそれが設けられている。これらはプラント運転自動化機能用計算機のプラント運転監視制御システム（SVC）の中に組み込まれている。

以上述べたように、自動化監視、バランス解析、炉雑音解析、警報処理診断等のエキスパート・システムを組み合わせることにより、プラント全体の監視／制御を統合的に支援することができる。これによって計測制御系の信頼性、プラントの運転操作性を高め、安全性がより増すばかりでなく、稼動率の向上にも寄与することができる。

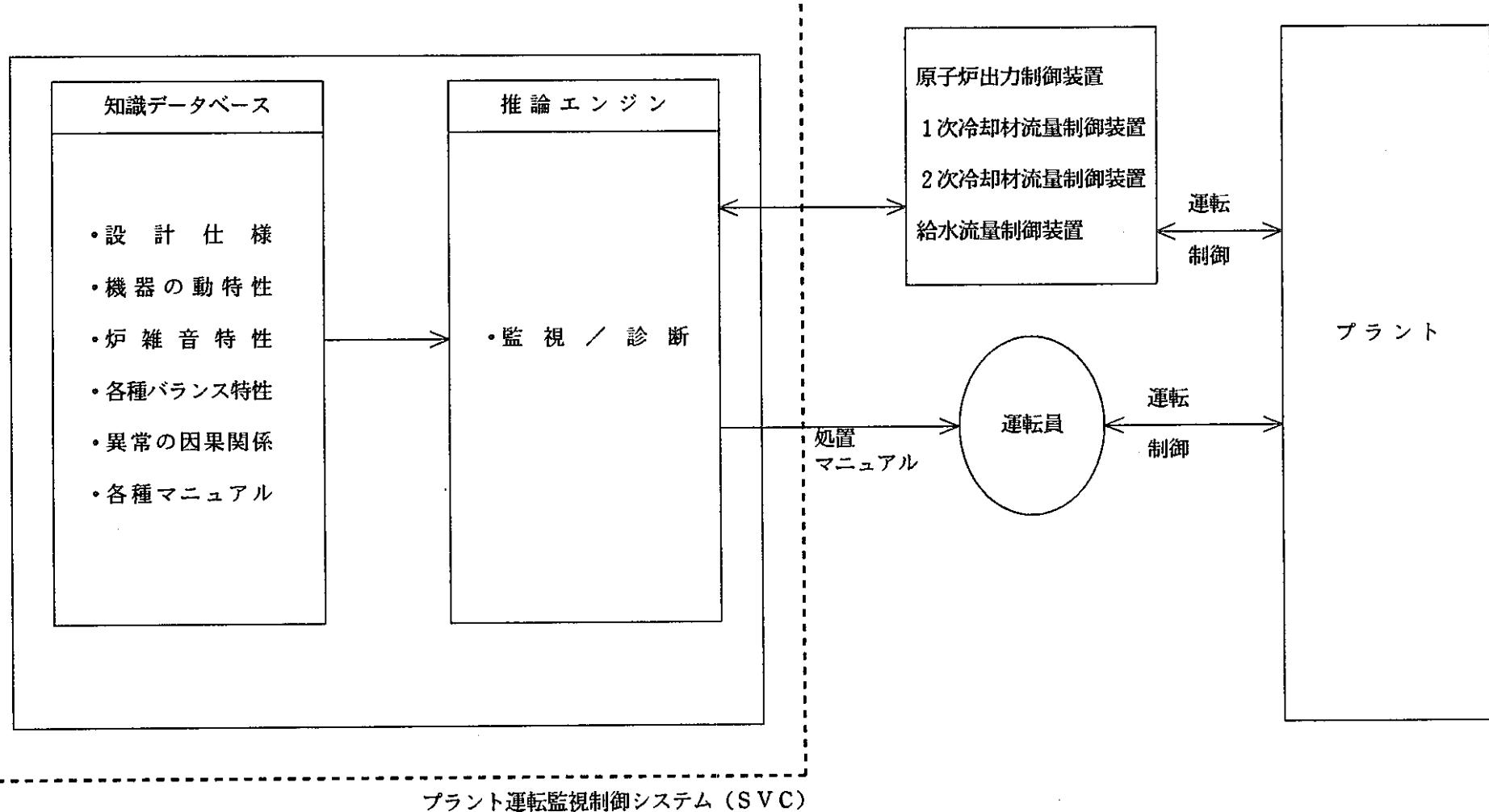


図 2.2.5-1 機能構成図（蒸気発生器を設置した場合）（プラント運転自動化システム）

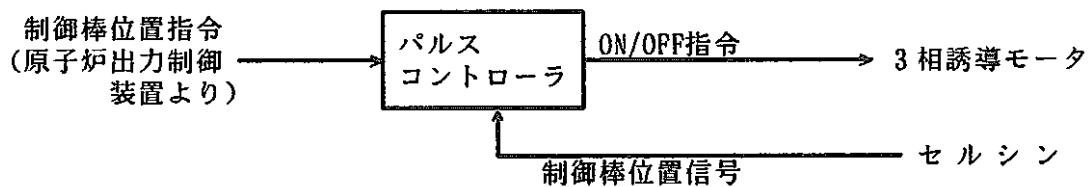
3. ハードウェアの改造検討

3.1 制御棒駆動機構の改造検討

3.1.1 現状の制御棒駆動モータの利用について

(1) 制御棒駆動制御装置の基本構成

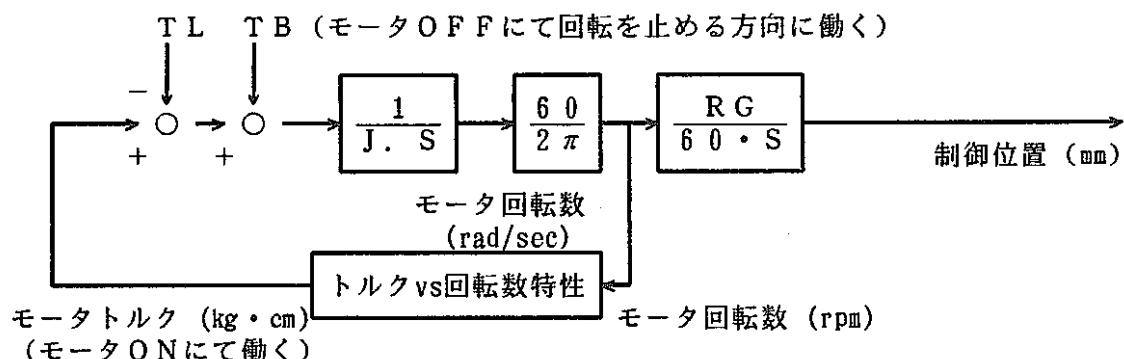
現状の制御棒駆動モータ（3相誘導モータ）を用いた場合の実現上最も現実的な制御棒駆動制御装置の構成を下図に示す。



パルスコントローラは、ある一定周期で制御棒位置指令と制御棒位置信号との偏差を比較し、その偏差に比例したパルス幅の接点出力を発信するものであり、本構成により位置制御性能が満足されるものであれば制御棒操作自動化を達成するにあたっての制御棒駆動機構に係わる改造は制御棒駆動制御装置のみとなる。

(2) 3相誘導モータの特性評価

3相誘導モータの伝達関数特性を以下に示す。



TL : 負荷トルク (kg・cm)

TB : ブレーキトルク (kg・cm)

J : イナーシャ (kg・cm/sec²)

RG : 制御棒位置／回転数換算係数 (mm/rpm)

前記の3相誘導モータの伝達関数特性により、モータをON/OFFした時のシミュレーションの結果を図3.1.1-1と図3.1.1-2に示す。図3.1.1-1は制御棒駆動モータを時間0秒にて引抜き側に操作したものであり、図3.1.1-2は0.2秒間隔で引抜き、停止、挿入の操作を繰返したものであり、十分な即応性を有していることが分る。

尚、前記のパルスコントローラの処理周期は数十msecから数百msecであり、その処理周期と比較すれば、シミュレーション結果より、制御棒駆動モータのON/OFFに対する応答はほとんど瞬時と言ってよい。つまり、パルスコントローラの処理としては、制御棒の位置がある範囲（不感帯幅）に収まった時に制御棒駆動モータをOFFする機能を有していれば、制御棒位置の制御は可能である。制御棒駆動モータのON/OFFに対する応答は瞬時であるため、制御棒の目標位置に対する制御棒位置偏差に比例したパルスON/OFF制御を行う必要はない。

制御棒位置の制御精度を運転経験を踏まえ±0.1mmとして、その制御精度を確保すべき制御パラメータ（パルスコントローラの処理周期、及び不感帯幅）と制御棒位置のフィードバックの方法について検討する。

(3) パルスコントローラによる制御棒駆動制御装置の位置制御特性

制御棒駆動モータの応答は瞬時であるため、制御精度はパルスコントローラの処理周期と制御棒位置フィードバック信号の精度（分解能）により決定される。（パルスコントローラの不感帶は制御の安定性を確保するためのものであり、制御精度により決まるものである）

パルスコントローラをディジタル制御装置にて実現する場合でも、その処理周期は経験上50msec程度が最少と考えられ、制御棒の引抜き・挿入速度は2mm/secであるため、停止させるべき位置から最大0.1mmの行き過ぎ量としての制御誤差が存在する。この行き過ぎ量により制御が不安定とならないようにするために、不感帯幅は±0.05mmより大きな値とする必要がある。不感帯幅を±0.04mmとした場合の制御棒位置目標値のステップ変更シミュレーション結果を図3.1.1-3に示す。図3.1.1-3のシミュレーションは制御棒位置フィードバック信号の分解能を無視したもので

あるが、不安定になる場合があることを示している。

行き過ぎ量により生じる制御誤差が $\pm 0.05\text{mm}$ であるため、制御棒位置の制御精度を $\pm 0.1\text{mm}$ 以下とするためには、制御棒位置フィードバック信号の分解能は 0.05mm 以下とする必要がある。制御棒位置フィードバック信号の分解能を 0.06mm とした場合の制御棒位置目標値のステップ変更シミュレーション結果を図3.1.1-4に示す。この場合の不感帯幅は、行き過ぎ量に起因する不感帯幅 $\pm 0.05\text{mm}$ に制御棒位置フィードバック信号の分解能を加えたものとする必要があり、 $\pm 0.11\text{mm}$ としている。図3.1.1-4のシミュレーションにより、制御誤差が 0.1mm 以上になりうることが分る。制御棒位置フィードバック信号の分解能を 0.05mm 以下とするための制御棒位置フィードバック信号の取込み方法を以下に示す。

- ① 制御棒位置指示計の長針により駆動されるポテンショメータからの信号を入力する。短針により駆動されるポテンショメータからの信号との組合せにより位置を算出する。
- ② シンクロディジタル変換器を設け、シンクロからの位置信号を入力する。制御棒位置指示計の長針により駆動されるポテンショメータからの信号と短針により駆動されるポテンショメータからの信号との組合せにより位置を算出する。
(制御棒位置指示計の短針により駆動されるポテンショメータからの信号によってのみ制御棒位置フィードバック信号とする方法では、パルスコントローラのA/D変換器の分解能が 0.25mm となり、 0.05mm 以下とすることは不可能である。)

上記①の場合、制御棒位置フィードバック信号の分解能は、パルスコントローラのA/D変換器の分解能により定まり、 0.025mm となる。上記②の場合、シンクロディジタル変換器のB C D出力信号がシリアル伝送によりパルスコントローラに入力されることになるため、制御棒位置フィードバック信号の分解能は、シンクロディジタル変換器の分解能により定まり、 0.0005mm 以下となる。ただし、この場合、制御棒位置指示計の長針により駆動されるポテンショメータからの信号と短針により駆動されるポテンショメータからの信号との組合せにより位置を算出する必要が

あり、演算処理が複雑となるため、パルスコントローラの処理周期を確保することが困難となることが考えられる。そのため上記①の方法を採用するものとし、その制御性能を評価する。

この場合の不感帯幅は、行き過ぎ量に起因する不感帯幅 $\pm 0.05\text{mm}$ に制御棒位置フィードバック信号の分解能を加えたものに多少の余裕を見込み、 $\pm 0.08\text{mm}$ とする。

制御棒位置目標値を $+1.00\text{mm}$, $+1.02\text{mm}$, $+1.04\text{mm}$, $+1.06\text{mm}$, $+1.08\text{mm}$, $+1.10\text{mm}$ にステップ変化された場合のシミュレーション結果をそれぞれ図3.1.1-5、図3.1.1-6、図3.1.1-7、図3.1.1-8、図3.1.1-9、図3.1.1-10に示す。いずれの場合にも、制御誤差 0.08mm 以内で安定に制御されていることが分る。

以上より、パルスコントローラが 50msec 程度の処理周期を確保すれば、制御棒位置指示に対する制御誤差を 0.1mm 以内とすることができる。

時間0秒にて引抜き操作を実施

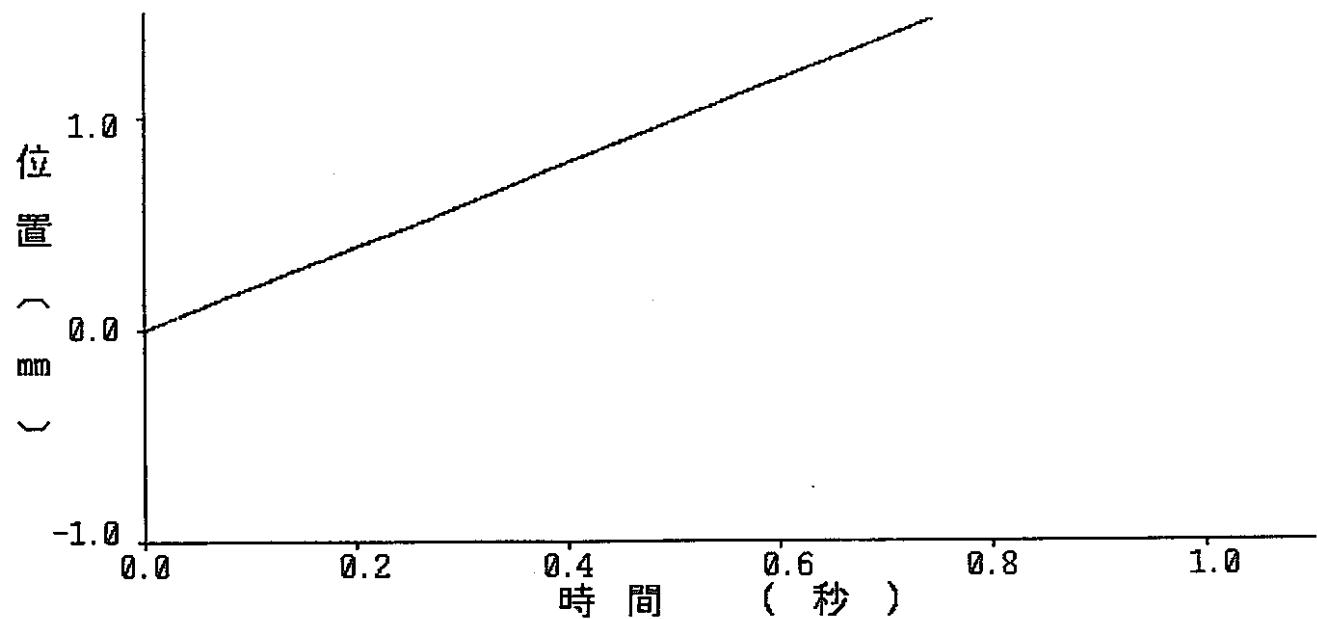


図 3.1.1-1 モータ応答性評価シミューション結果

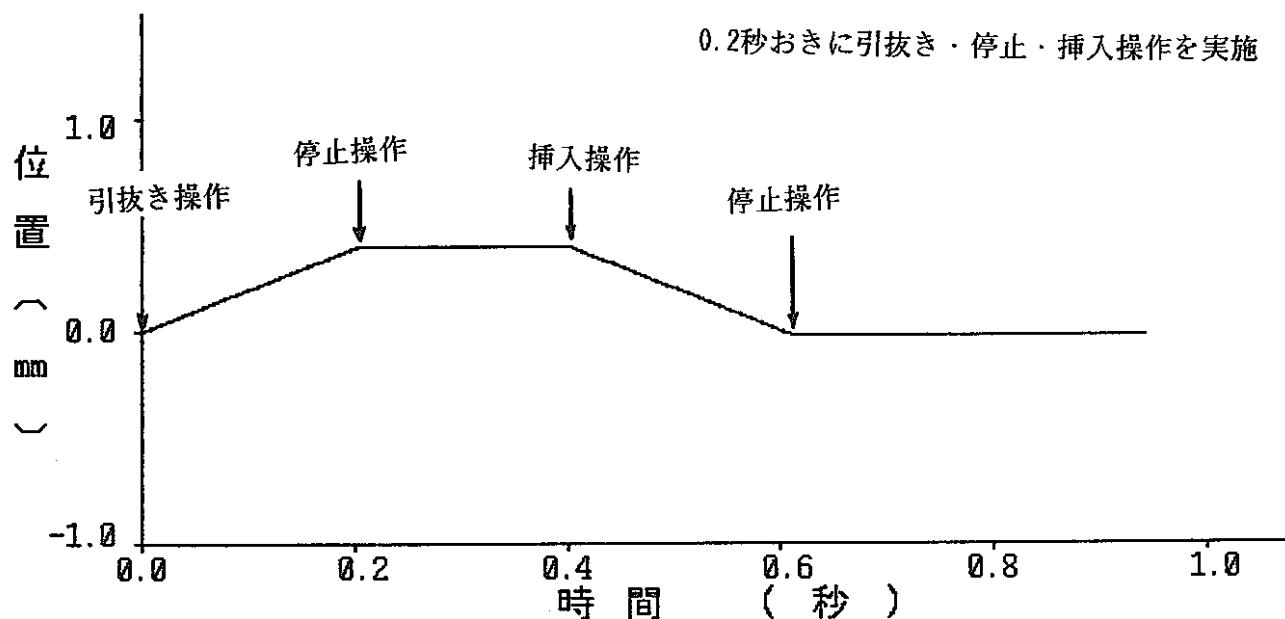


図 3.1.1-2 モータ応答性評価シミューション結果

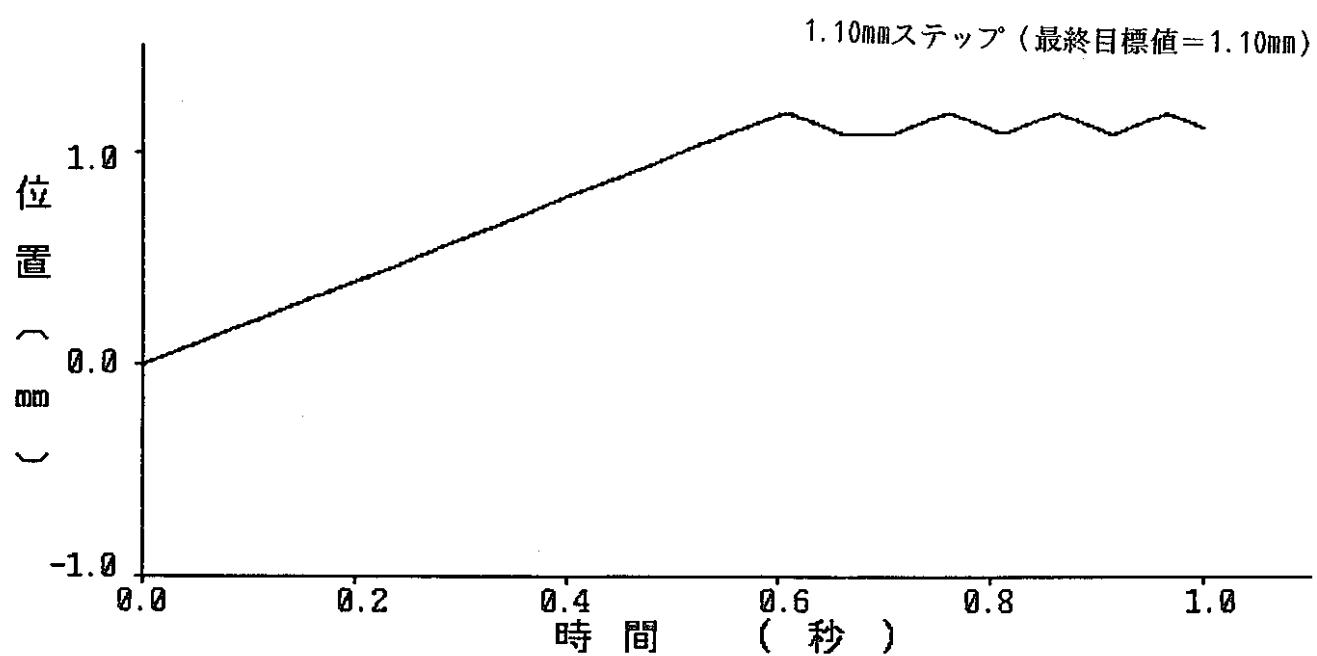


図 3.1.1-3 ステップ応答シミュレーション結果

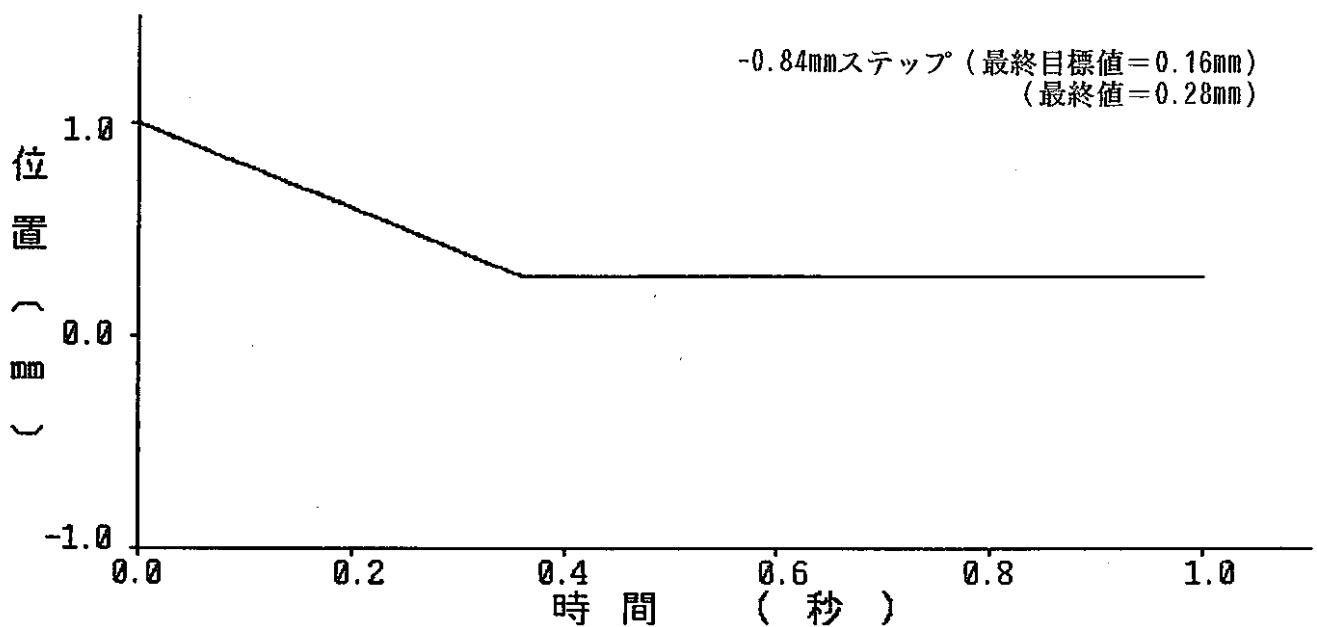


図 3.1.1-4 ステップ応答シミュレーション結果

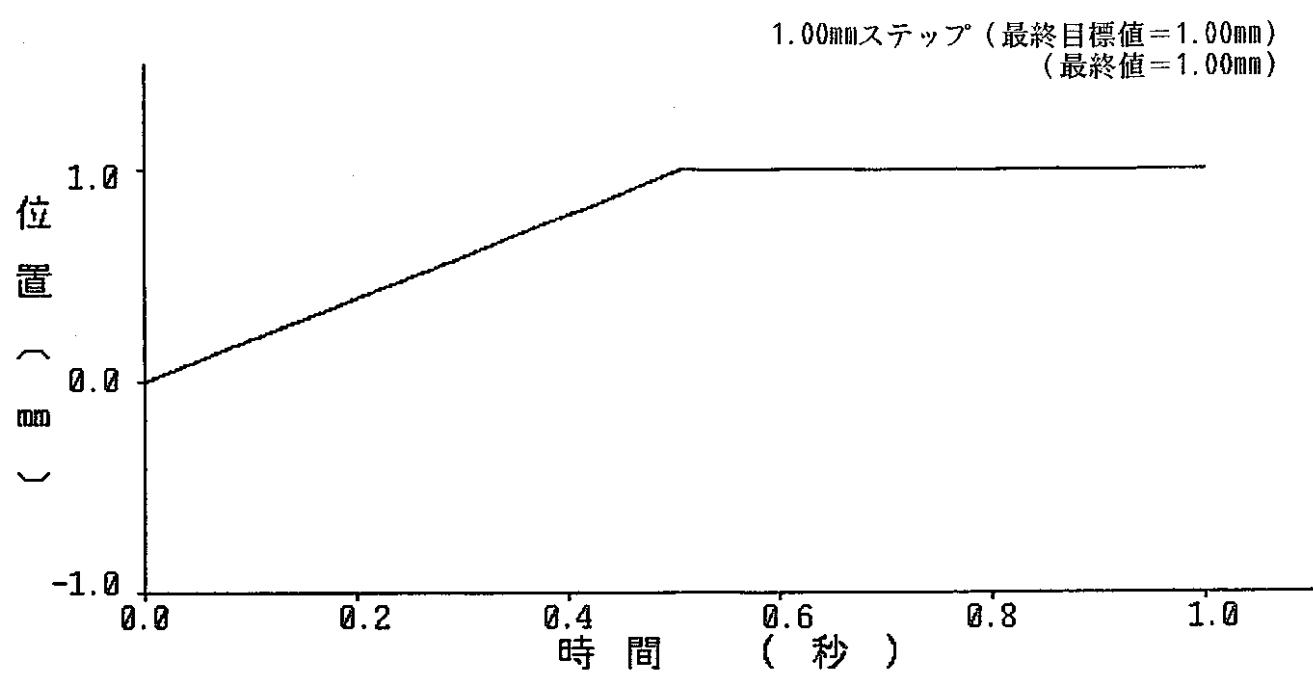


図 3.1.1-5 ステップ応答シミュレーション結果

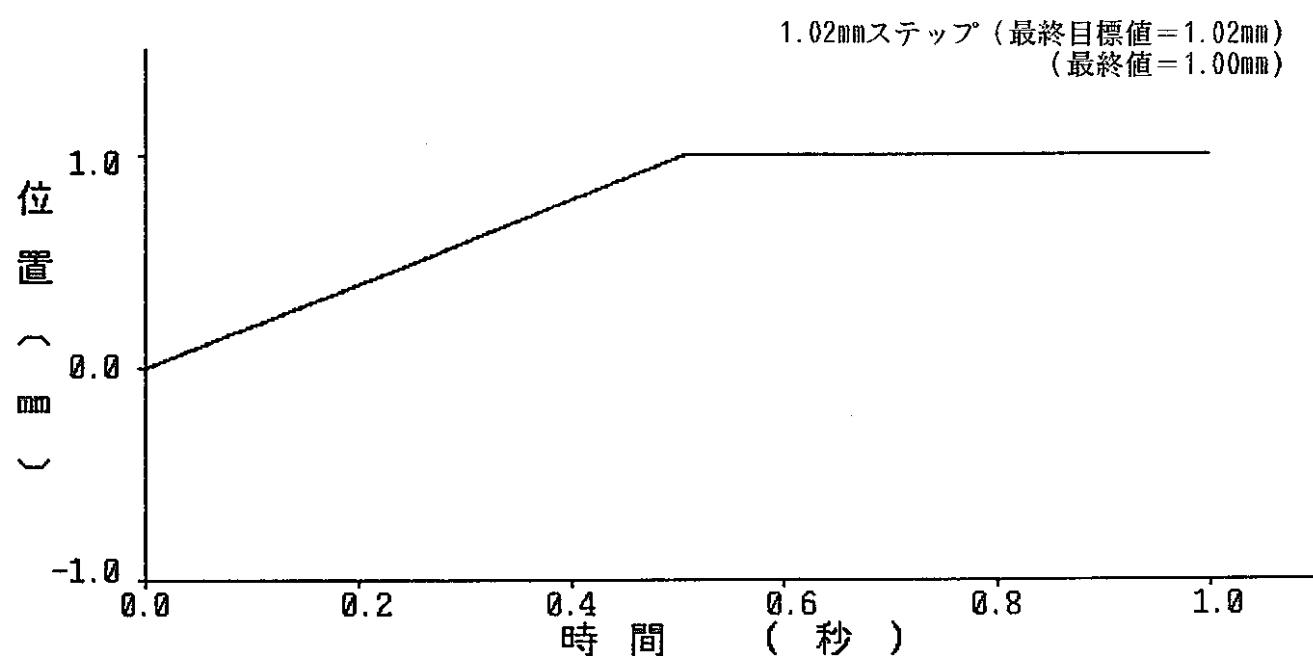


図 3.1.1-6 ステップ応答シミュレーション結果

1.04mmステップ (最終目標値=1.04mm)
(最終値=1.00mm)

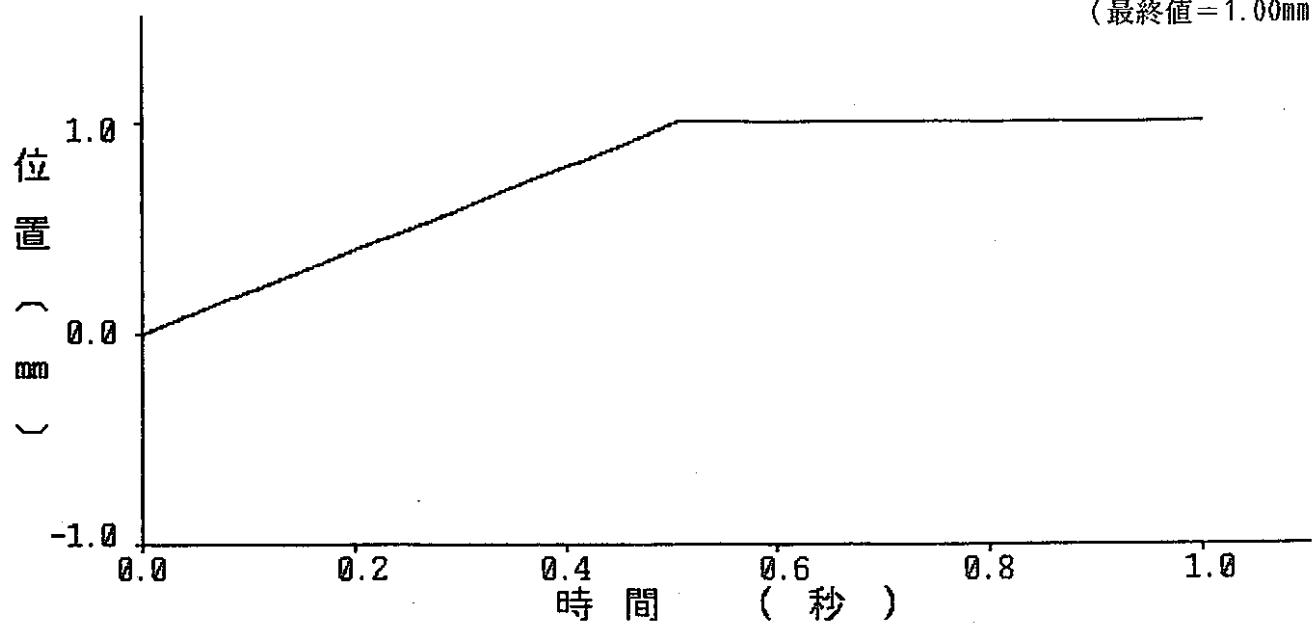


図 3.1.1-7 ステップ応答シミュレーション結果

1.06mmステップ (最終目標値=1.06mm)
(最終値=1.00mm)

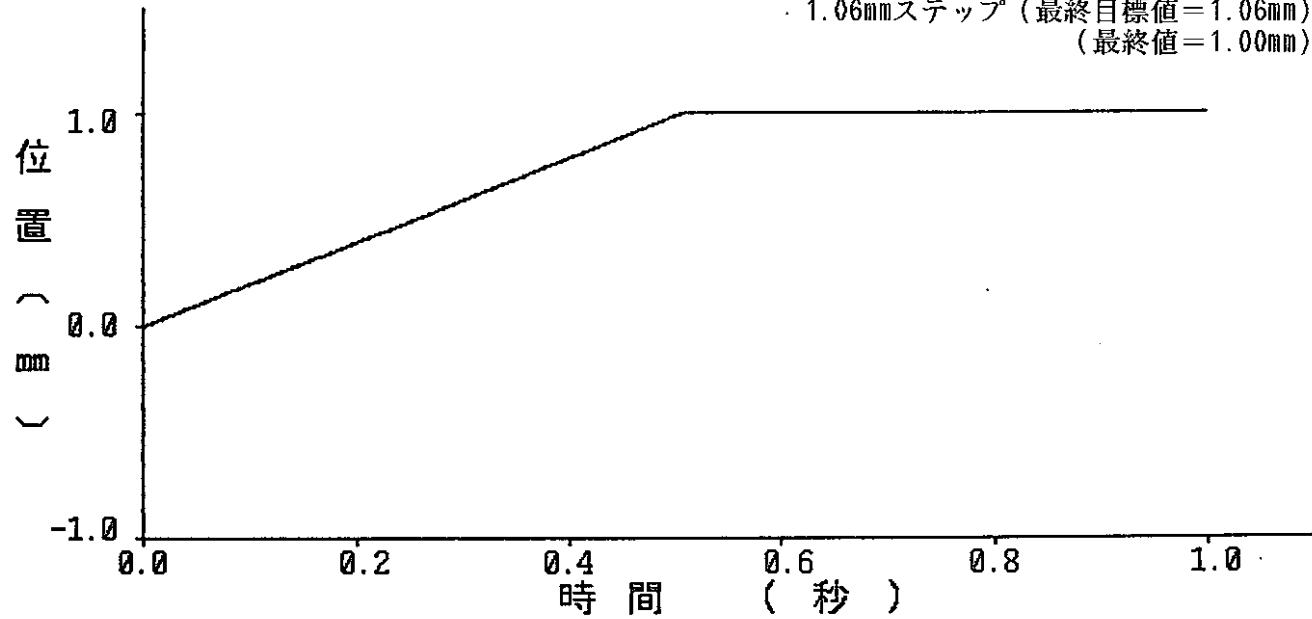


図 3.1.1-8 ステップ応答シミュレーション結果

1.08mmステップ (最終目標値=1.08mm)
(最終値=1.10mm)

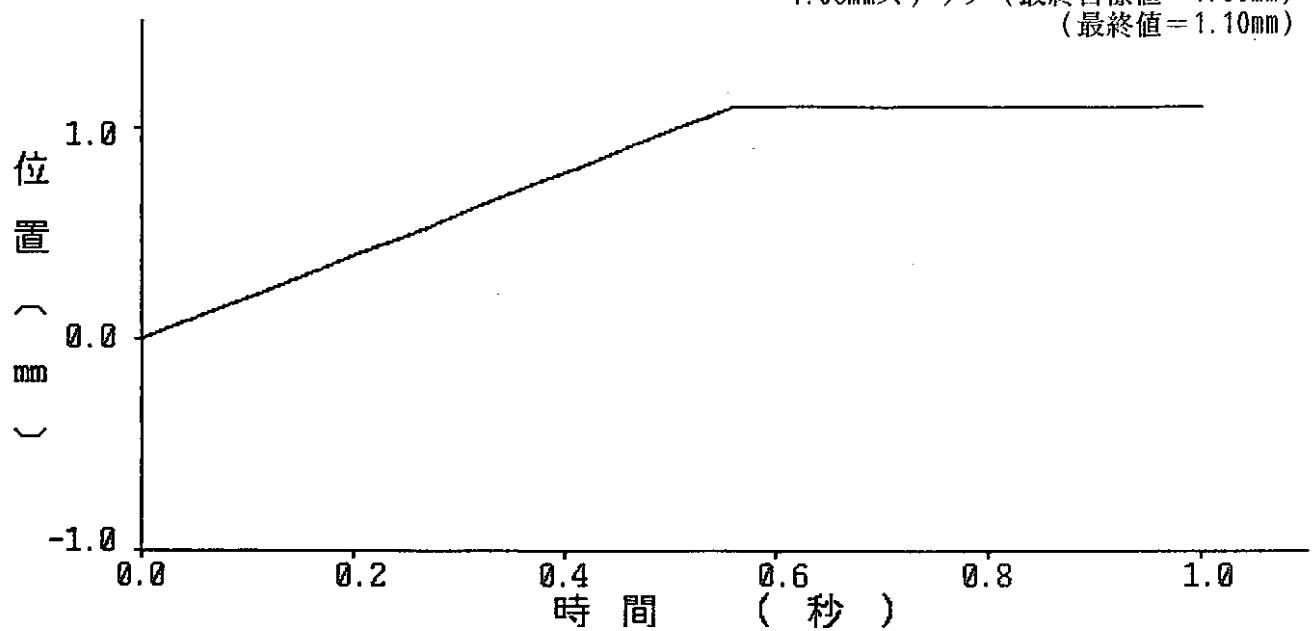


図 3.1.1-9 ステップ応答シミュレーション結果

1.10mmステップ (最終目標値=1.10mm)
(最終値=1.10mm)

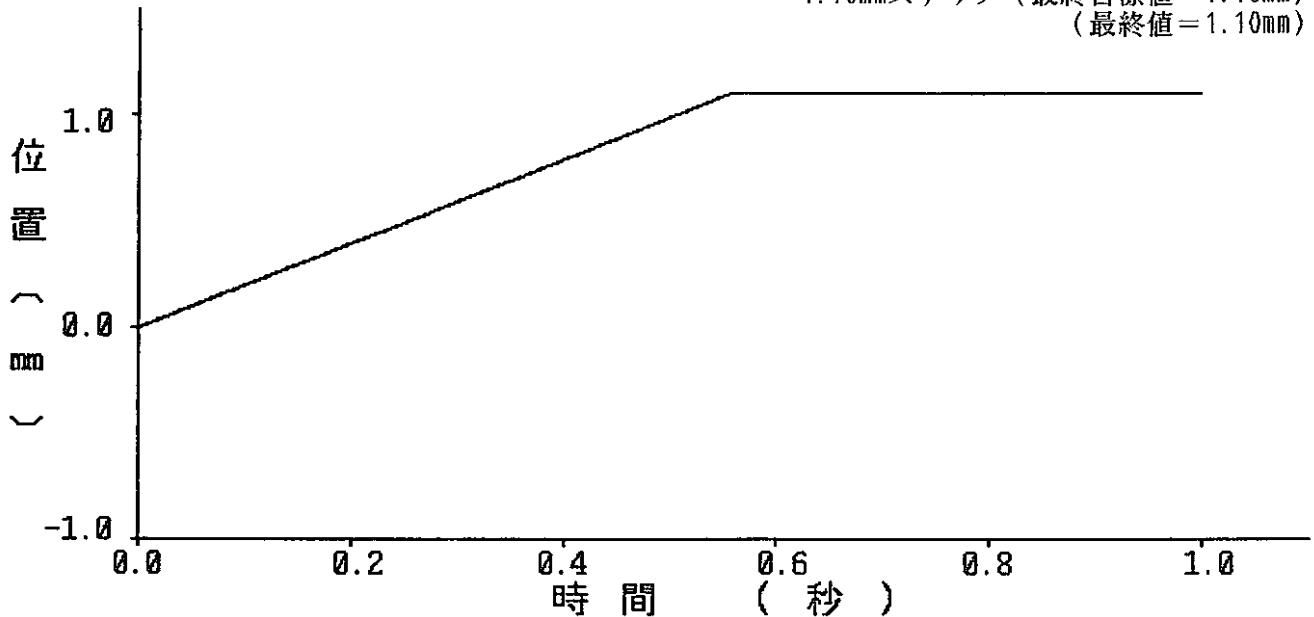


図 3.1.1-10 ステップ応答シミュレーション結果

3.1.2 制御棒駆動モータの改造について

制御棒駆動モータをステッピングモータあるいは同期型3相ACサーボモータに変えた場合、現状の制御棒駆動機構の応答性、及び制御精度をさらに向上できることが期待される。ステッピングモータ、同期型3相ACサーボモータに交換した場合の制御駆動機構の構造図をそれぞれ図3.1.2-1、図3.1.2-2に示す。また、参考として、現状の制御棒駆動機構の構造図を図3.1.2-3に示す。

制御棒駆動モータにステッピングモータ、同期型3相ACサーボモータを適用した場合のメリット、デメリット、及び特徴をシステム構成と併せ、図3.1.2-4に示す。
(現状制御棒駆動機構についても示すものとする。)

図3.1.2-4に示すように、いずれの場合もモータハウジングの改造が必要であり、特に同期型3相ACサーボモータの場合には、モータハウジングの寸法を変える必要がある。また、いずれの場合も可变速制御が可能、応答性が良い、停止精度が高い等、制御性能は優れているが、最大速度を規定するのが困難である。現状制御棒駆動モータとして使用している3相誘導モータの場合は、その回転数は電源周波数に依存しているため、電源周波数に対応する回転数以上になることはない。

制御棒駆動モータの最大回転数を規定することは許認可上必要であり、ステッピングモータ、あるいは同期型ACサーボモータに変えることにはこれらの対応が必要であり、問題が残る。

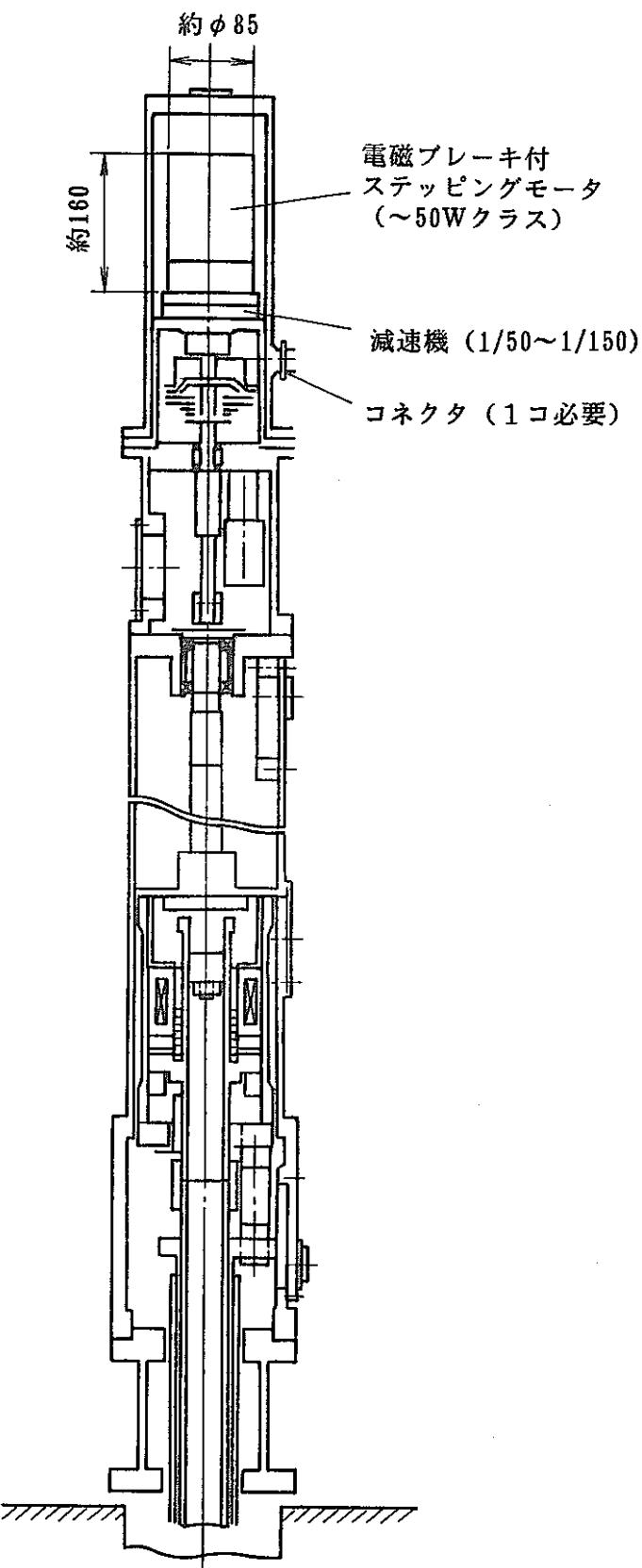


図3.1.2-1 ステッピングモータを用いた制御棒駆動機構構造図

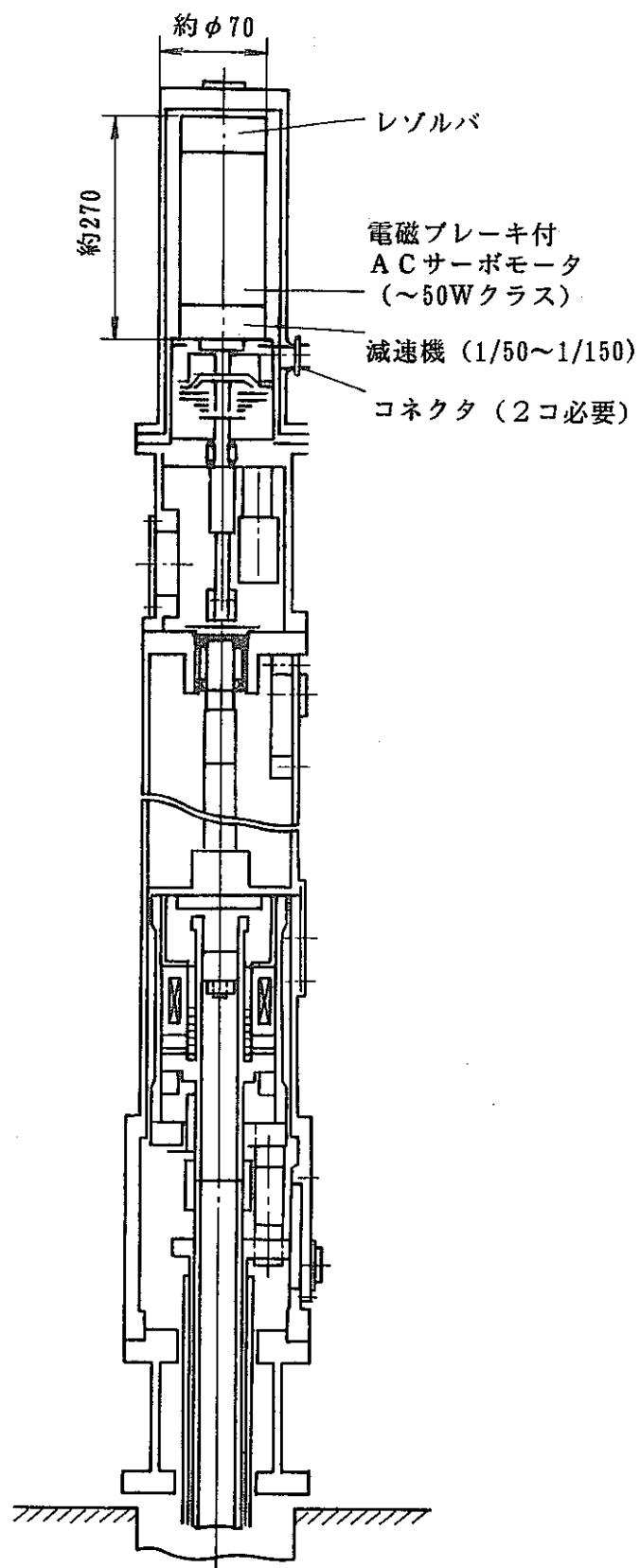


図3.1.2-2 3相ACサーボモータを用いた制御棒駆動機構構造図

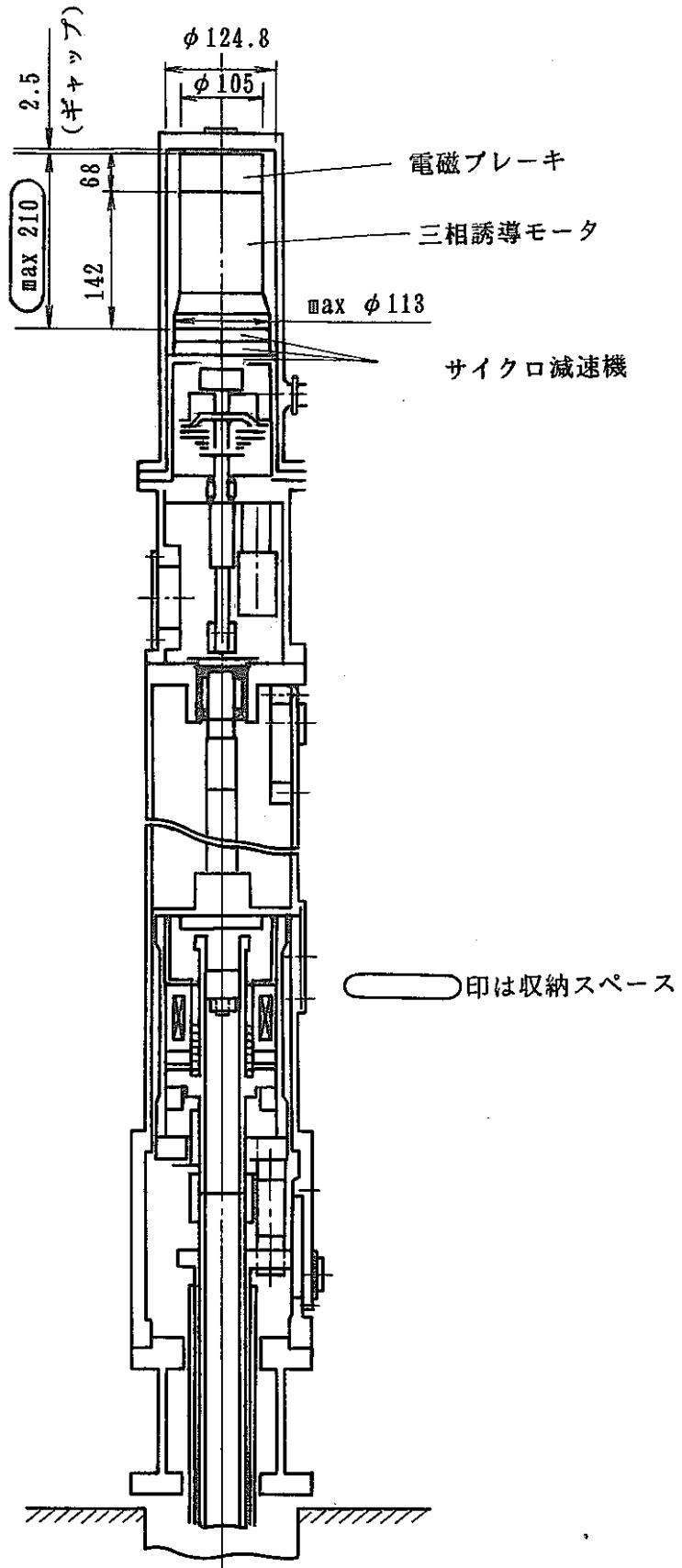


図3.1.2-3 現状の制御棒駆動機構構造図

モータ種別	システムの基本構成	メリット	デメリット	特徴
ステッピングモータ		<ul style="list-style-type: none"> 応答性、停止精度高 現モータハウジング内に収納可能 (50Wクラスのモータまで収納可能) 	<ul style="list-style-type: none"> 過大なトルク、過多パルスに対しては脱調するため、パルス数制限等の脱調防止策が必要。 モータハウジングに新規専用コネクタ必要。 誘導モータに比べ発热量大。 	<ul style="list-style-type: none"> 可变速制御に対応可能。 無励磁でも保持トルク有り。
同期型3相ACサーボモータ		<ul style="list-style-type: none"> 応答性、停止精度高 プラシレスであり、長寿命である。 回転数によらず電流-トルク特性は一定 電流-トルク特性の直線性が良い。 	<ul style="list-style-type: none"> 過大なトルクに対しては脱調するため、モータ電流制限等の脱調防止策が必要。 モータハウジングに新規専用コネクタ (2ヶ) 必要。 誘導モータ、ステッピングモータに比べ発热量大。 現モータハウジング内には収納できず、寸法を変更する必要有り。 	<ul style="list-style-type: none"> 可变速制御に対応可能。
3相誘導モータ		<ul style="list-style-type: none"> 原理的に脱調することはない。 システム構成がシンプル 	<ul style="list-style-type: none"> 制动用のブレーキが必要であり、ステッピングモータ、3相ACサーボモータに比べ、停止制度が劣る。 可变速制御は不可。 	<ul style="list-style-type: none"> 電源周波数に対応する回転数以上にすることはない。

図 3.1.2-4 各CRDモータのメリット、デメリット、及び特徴

3.2 中央制御盤の改造範囲の検討

3.2.1 現状プラント構成に基づく改造内容

2章に示した制御棒操作自動化を実現するために必要となる操作・監視項目を以下に示す。

(1) 操作項目

- (a) 原子炉出力目標値
- (b) 系統昇温時昇温率制限値
- (c) 出力変化率制限値
- (d) 自動化モード選択
 - 自動化使用
 - 自動化除外
 - 起動
 - 停止

(2) 監視項目

- (a) 自動化モード表示
 - 臨界近接操作中
 - 低出力運転中
 - 系統昇温中
 - 高出力運転中
 - 目標値到達
 - 制御棒 # 1 引抜き中
 - 制御棒 # 2 引抜き中
 - 制御棒 # 3 引抜き中
 - 制御棒 # 4 引抜き中
 - 制御棒 # 5 引抜き中
 - 制御棒 # 6 引抜き中
 - 制御棒 # 1 挿入中

- 制御棒 # 2 挿入中
- 制御棒 # 3 挿入中
- 制御棒 # 4 挿入中
- 制御棒 # 5 挿入中
- 制御棒 # 6 挿入中

上記の操作・監視機能を備えた自動化コンソールを図3.2.1-1 に示す。本コンソールを新たに設ける自動化コンソール卓に設置した場合の中央制御室の概念図を図3.2.1-2 に示す。本自動化コンソールはコンパクトなものであるため、既設原子炉制御盤に設置することも可能と考える。

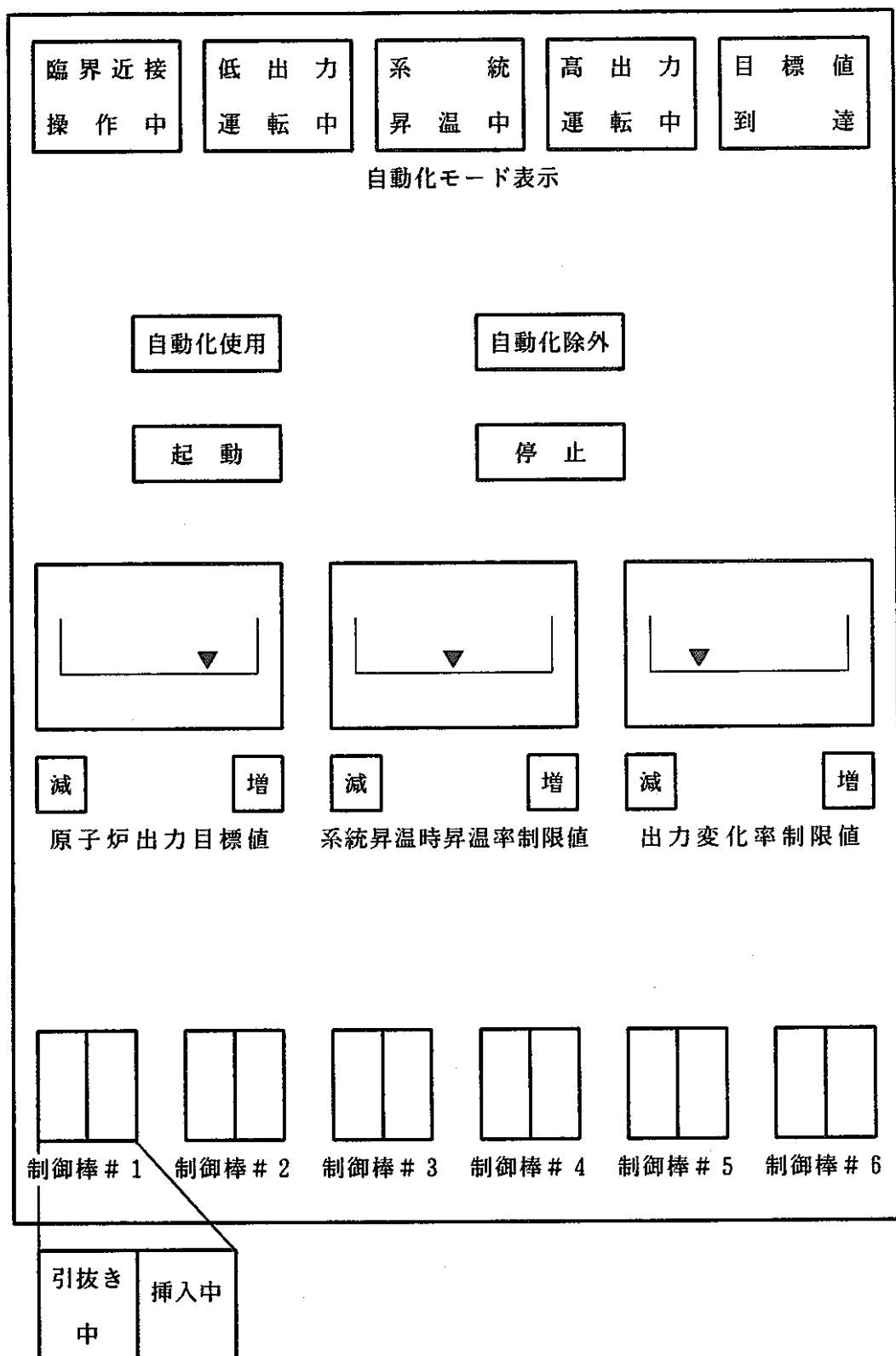


図3.2.1-1 自動化コンソール外形図

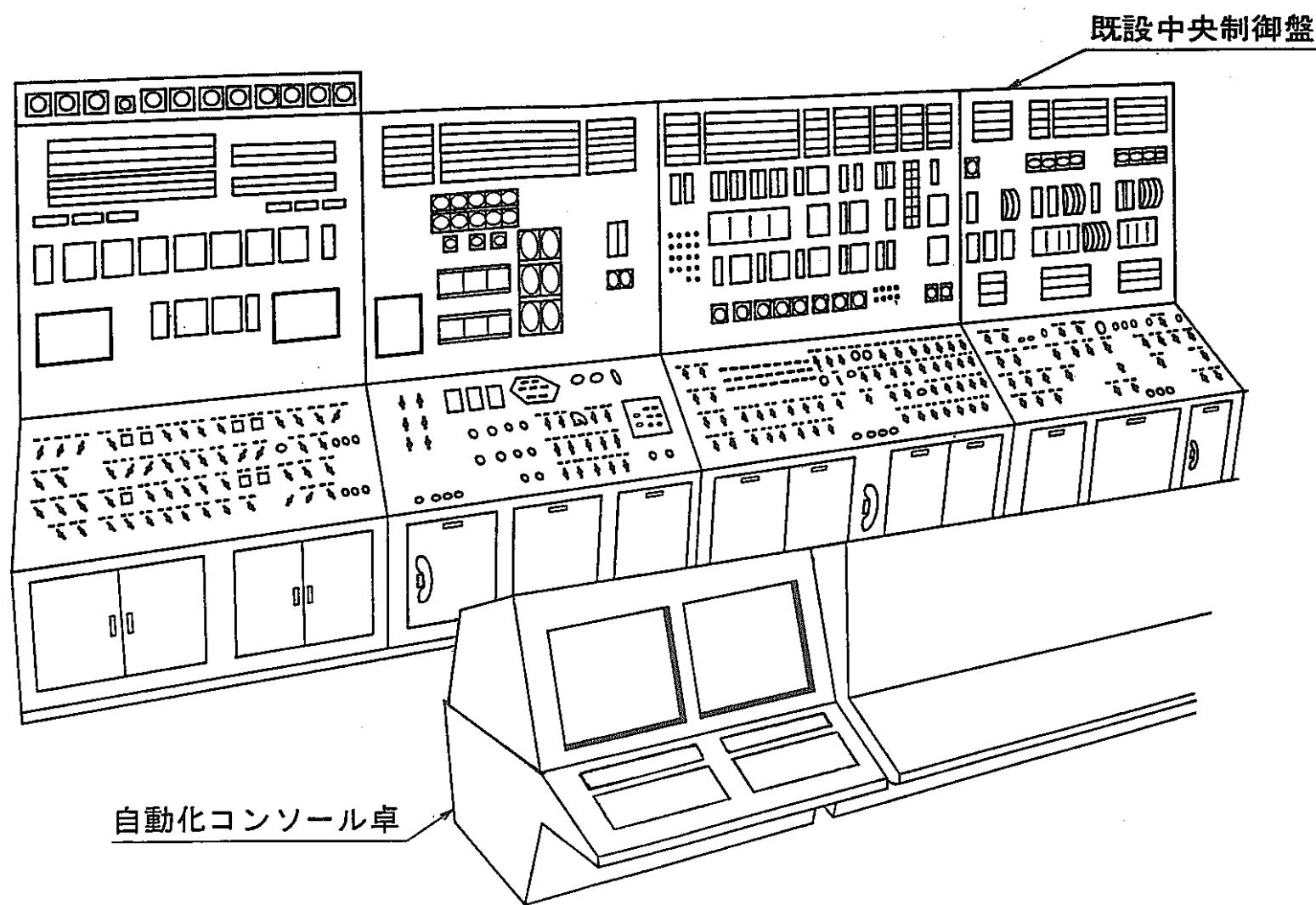


図3.2.1-2 制御棒操作自動化実施時の中央制御室の概念図

3.2.2 蒸気発生器設置の場合の改造内容

蒸気発生器設置の場合には、現在の中央制御盤を副盤と位置付け、水・蒸気系の運転制御とプラント全系に亘る監視制御を行う中央制御盤主盤を設けるものとする。その他、水・蒸気系の計装盤、継電器盤を中央制御室内に設置するものとし、それらの中央制御室内の構成案を図3.2.2-1 に示す。また、中央制御室の概念図を図3.2.2-2 に示す。

尚、新たに必要となるNaリーケ監視盤、予熱制御盤、水リーク監視盤は現場設置とするものとする。

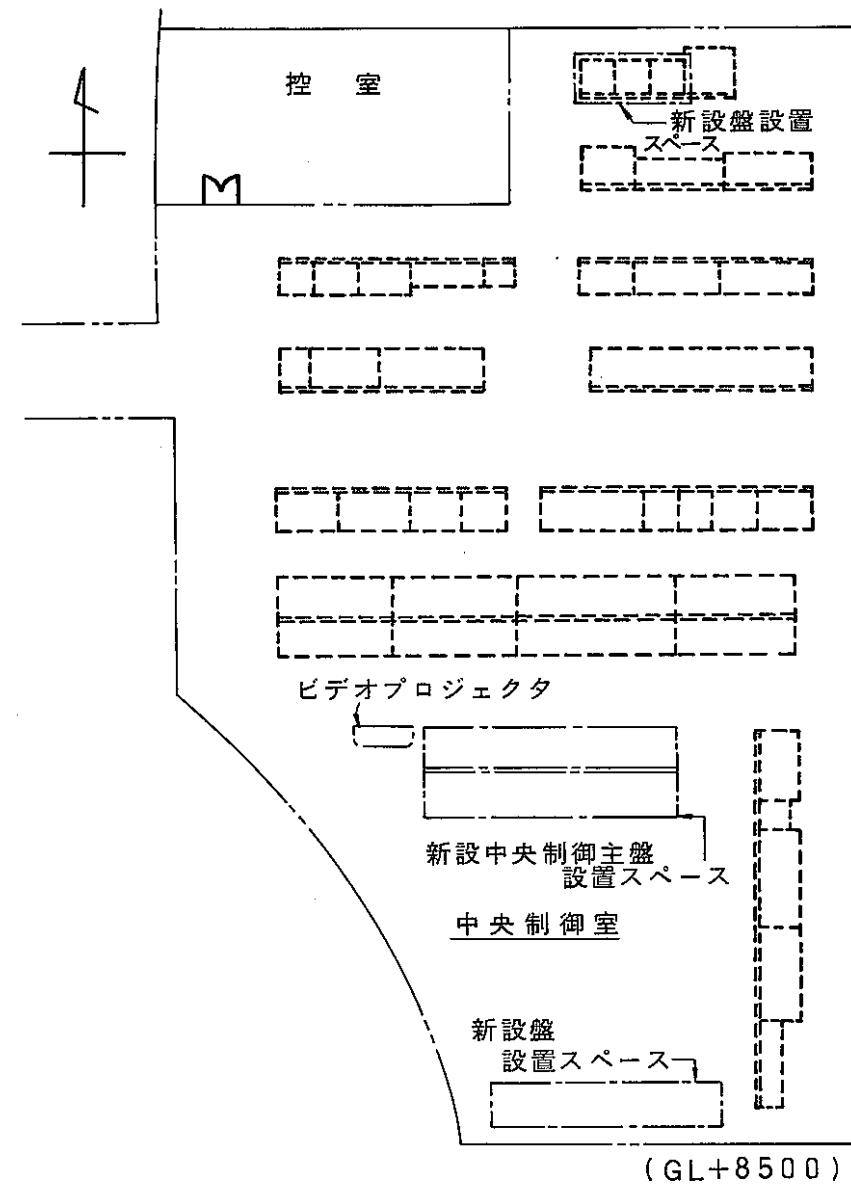


図 3.2.2-1 中央制御室全体構成

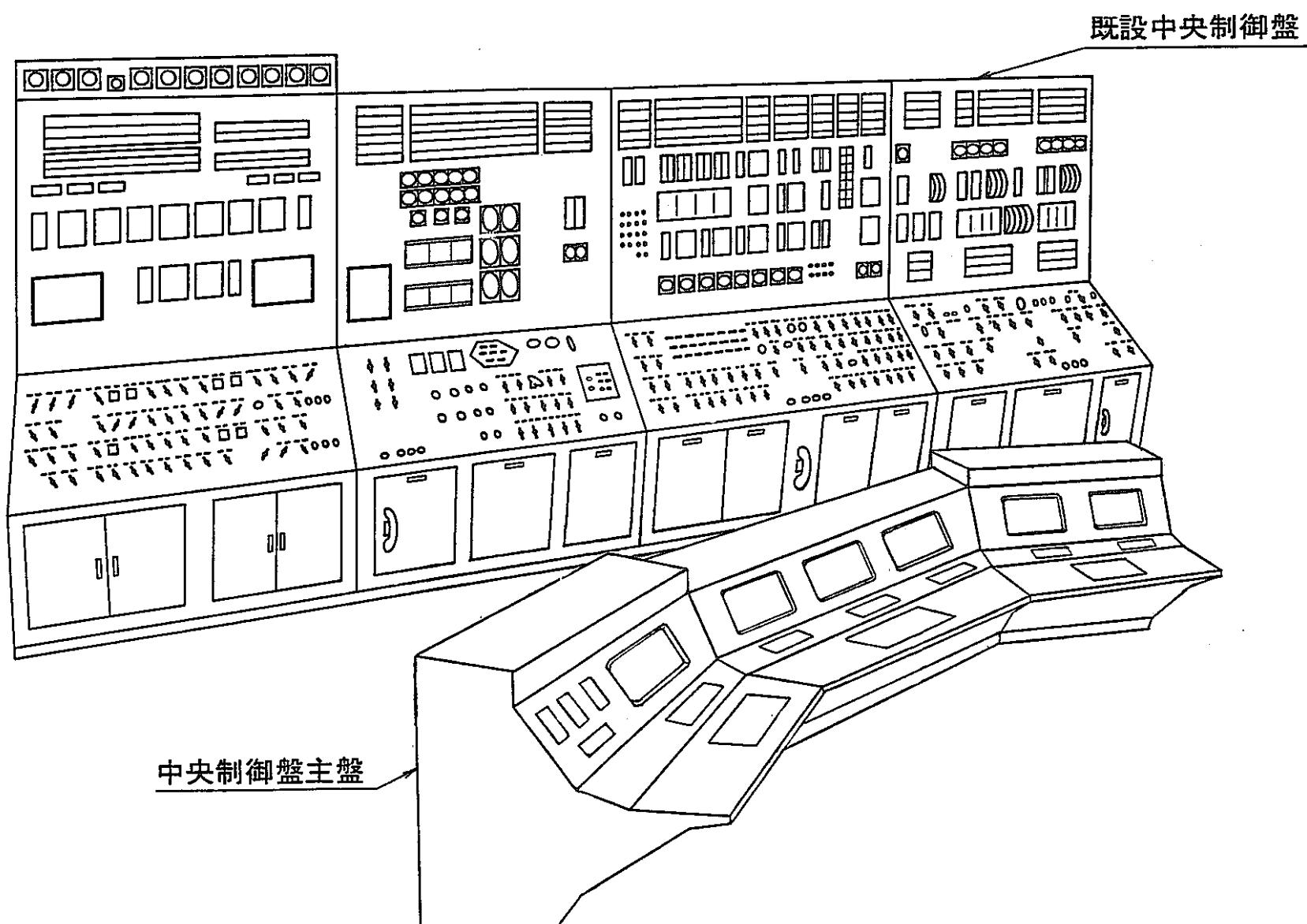


図3.2.2-2 蒸気発生器設置の場合の中央制御室の概念図

4. 先行プラントの動向と今後の課題

4.1 先行プラントの動向

(1) 水力プラントにおける自動化システム技術

水力発電は起動、停止が容易であり、負荷変動に対する追随性が良いという特徴を生かしたピーク負荷対応の役割を果たしており、発電所の制御については運転の省力化・無人化を目的として早くから自動化が進められてきている。

水力発電所の制御装置としては、初めは機械式が中心であり、運転操作の面においても各種機器を運転員が現場で直接操作する手動制御方式が中心であった。この後、電磁繼電器を用いたシーケンス制御が導入され、さらに近年はエレクトロ技術の進歩によりマイクロプロセッサを応用したデジタル制御装置が実用化され、一層の信頼性向上および保守の省略化が図られている。今後もデジタル化は加速され、保護リレーのデジタル化、情報伝送の高度化を含んだ総合デジタルシステムの実用化へ進展するものと考えられる。

運転保守業務の自動化として、従来は1ヶ所の制御所から数ヶ所の発電所を監視制御する程度であったが、最近は水系に散在する水力発電所群を集中制御化して総合運用を行う水力監視制御システムが採用されている。これは、監視、制御、記録などの運転業務の自動化を行い、設備運用の信頼性と経済性の向上を図るものである。システム構成としては、制御用計算機を中心とし、情報伝送以外の機能を計算機システムで処理する方式を用いている。

(2) 火力プラントにおける自動化システム技術

電力需要の昼夜間、季節間の格差拡大、電源構成に占める電力発電プラントの比率増加などに伴い、電力需要調整における火力プラントの役割は一段と大きくなっている。そのため火力プラントはプラント運用性の改善と、より高度なプラント運転制御技術が求められている。

火力発電所自動化システムとしては、電子計算機がデータ処理システムとして導入されたのを初めに、計算機技術の進展に伴い、運転制御の自動化システムに適用が拡大され、サブループ制御装置を介した統括監視制御と計算機直接制御の組み合

わせにより、プラントの起動、通常運転、停止の全運転領域を対象とした広範囲自動化システムが実用化された。さらに近年ではマイクロコンピュータ技術の発展、普及に対応してサブループ制御装置のディジタル化が推進され、ディジタル制御技術を対応したアドバンスト制御の適用や、設備遮断機能の充実、グラフィック CRT の活用によるマンマシン機能の充実により総合ディジタル制御システムへと進展してきた。

最新の自動化システムはマイクロコンピュータの高性能化とネットワーク技術の発展、普及を踏まえ、機能別階層構成系統単位分散方式を基本理念とし、計算機と制御装置を統合した形をとっている。このシステムでは高速ネットワークにより、各装置間のプラント情報、制御情報の交換を行っており、これにより制御装置の詳細情報に基づく運転監視の集中化、CRTオペレーションシステムによる運転操作の集約化、エンジニアリングワークステーションによるシステム保守の集中化が実現しつつある。

将来的にはさらに発電所レベルでの集中監視制御、知識工学を応用した運転支援システム、情報集約形高機能マンマシンインタフェイス、ロボットによる保安業務の自動化、新しいセンサ技術や画像処理、信号処理技術を応用した設備診断システム等を盛り込んだ自動化システムが実現されるものと思われる。

(3) 原子力プラント (BWR) における自動化システム技術

原子力プラントの自動化は局部的な自動化からプラント全体を統括する自動化へと進んできており、プラント全般にわたる起動・停止の自動化は国内でも実運用を行っている。以下に最新プラントの自動化の概要を述べる。

プラント統括自動化は、プラント起動、出力運転、および停止の各運転状態をカバーし、各々の運転操作手順に沿った自動化を図っている。自動化は計算機システムと各系統の制御装置とを結んで自動操作を行うものと、計算機システムによって操作タイミングに応じた操作ガイドの表示を行うものとの組合せによって実現している。マンマシンインタフェイスとしては、自動化コンソール、CRT表示及び音声通報等の機能を備えている。

上記、自動化の拡大として、まず通常運転においては運転操作手順に沿った自動化をすでに実現しており、現状の自動化システムの中で操作ガイドに従って運転操作を行っている部分については、比較的容易に自動操作化していくことが可能である。この中で最も重要なものが制御棒操作の自動化であり、その基本ソフトウェアの開発はすでに完了している。また、日負荷追従運転やAFC（自動周波数制御）運転についてもプラント総合自動化の中に取り込み、さらに熟練運転員の経験に基づく状況判断・意志決定ルールをも運転操作手順の中に知識ベースとして取り込んでいく計画である。

プラント異常時においては、異常状態の把握と迅速かつ確実な対応措置が必要であり、運転員の負担軽減のためには、異常発生時にその原因の診断を行うとともに、事故が発生した場合には、徵候に対応した運転手順および安全保護系の作動状態などを適切にガイドする必要がある。これらの機能はインストラクションシステムとしてすでに開発・検証している。また、プラント異常・事故時における原因の同定と高範囲なプラント状態の把握とに基づく最適な対応手順、および復旧手順を知識ベースとして構築することにより、異常・事故の程度・進展に応じた自動操作を行うことも計画されている。

海外の原子力プラントにおいては、監視診断機能に計算機技術を駆使して高度化を実施しているものがあるが、自動化運転を実施しているものは、商用炉には例がみられない。

以上、水力プラント、火力プラント、及び原子力プラント（BWR）の運転自動化の動向を表4.1-1 にまとめて示す。

(4) 計測制御システムアーキテクチャの変遷

発電プラントでの計算機の利用は、昭和30年代後半にデータロガーとして火力発電所に導入されたことに始まる。昭和40年代になるとIC化された大型制御用計算機の出現により、データロガーのみでなく計算機による制御も発展し、運転制御の自動化システムに適用が拡大された。昭和50年代にはディジタル技術が進歩し、LSI化による高速大容量計算機技術の進歩に伴い、総ての機能を計算機機能として取り込む監視・制御の集中化が計画され、プラント運転自動化機能に関しては、以下の機能を中央計算機の機能として分担させるものとした。

(a) キックアクション方式 (KIC)

プラント状態より判断し、計算機から操作端に対し、作動指令を出力する方式で、一連の操作が固定化したパターンになっている制御や、連続操作のみで操作量等の判定の必要のない制御に用いる。

(b) 計算機監視制御方式 (SCC)

計算機より設定値、目標値または装置の使用・除外指令のみ出力し、連続的なループ制御は専用の制御装置に任せられる方式で、信頼性の高い制御装置が存在する制御や、応答性の速い連続制御が必要な制御に用いる。

(c) 計算機直接制御方式 (DDC)

制御量を直接入力し、計算機から直接操作端を制御する方式で、非線形制御を必要とする制御や、プラント特性がプラント状態と共に変わり、制御方式の変更を必要とする制御に用いる。

最近では、小型ディジタル制御装置の高機能化により系統設備内で処理可能な監視制御はすべて下位の制御装置に任せられるという階層分散方式があらゆるプラントにおいて採用されている。本方式は、プラント全体の状態を監視制御する中央計算機と、その下位にあって系統レベルの状態を監視制御するディジタル制御装置、及びさらにその下位にある機器個別レベルのシーケンシャル制御装置等により構成される。中央計算機が直接的に起動をかける自動化方式はキックアクションのみとして、サブシステムレベルで処理可能な機能は下位のディジタル制御装置にて行う

のとし、中央計算機にはミニマムな情報のみ伝送する。

従って、階層分散方式により、信号伝送の高効率化が達成されると共に、処理機能が各系統設備単位のプロセス対応でモジュール化できるため、運転自動化システムの保全性向上、及び自動化管理される機器設備の保全性の向上が達成され、機能の独立と障害の局所化により、信頼性の高い最適な自動化システムを実現する。

階層分散化されたディジタル制御システムの概念図を図4.1-1 に示す。

表 4.1-1 先行プラントの運転自動化の動向

	水 力	火 力	原 子 力
1. 自動化の目的	<ul style="list-style-type: none"> ・水系の水力発電所群を一括運用することによる水資源の有効利用 ・上位給電指令と運転業務との連係強化による電力の安定供給 ・運転員の負担軽減と判断業務への専念による運用の迅速化、確実化 ・水力発電所の発電計画とダム、取水口操作との連携と協調 	<ul style="list-style-type: none"> ・火力発電所全体の総合運用への対応 ・運転員の定型的作業の負担軽減 ・プラント運転効率の向上 ・運転制御の高度化 ・業務の効率向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・プラントの安定運転 ・運転員の定型的作業の負担軽減 ・プラント運転効率の向上 ・運転制御の高度化 ・業務の効率向上 ・所員の被ばく低減
2. 自動化システム構成	<ul style="list-style-type: none"> ・制御用計算機を中心とした情報伝送以外の機能を計算機システムで処理する方式 ・制御用計算機を含む主要部は二重化 	<ul style="list-style-type: none"> ・プロセス計算機の総括監視・管理の下に各種専用制御装置を配備した階層的機能分散型 ・カラーCRTによる集約表示を中心としたプラント運転情報の提供 ・高速ネットワークによる各装置間のプラント情報、制御情報の交換 ・エンジニアリングワークステーションによるシステム保守の集中化 	<ul style="list-style-type: none"> ・プロセス計算機の総括監視・管理の下に各種専用制御装置を配備した階層的機能分散型 ・カラーCRTによる集約表示を中心としたプラント運転情報の提供 ・自動化コンソールによる運転フェーズ、ブレークポイントなどの統括監視制御 ・音声告知の導入
3. 自動化達成レベル	<ul style="list-style-type: none"> ・水系の水力発電所群を一括運用の運転自動化 	<ul style="list-style-type: none"> ・プラントユニット単位での運転自動化 	<ul style="list-style-type: none"> ・運転フェーズ、ブレークポイント単位での運転自動化
4. 将来方向	<ul style="list-style-type: none"> ・運転保全業務の自動化 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電所レベルでの集中監視制御 ・マンマシンシステムの改良、高度化 運転支援の充実 診断技術の高度化 ・運転支援の充実 診断技術の高度化 ・保安業務の自動化 	<ul style="list-style-type: none"> ・マンマシンシステムの改良、高度化 運転支援の充実 診断技術の高度化 ・自動化範囲の拡大 ・光多重伝送システムの採用 ・保守点検へのロボット技術の応用

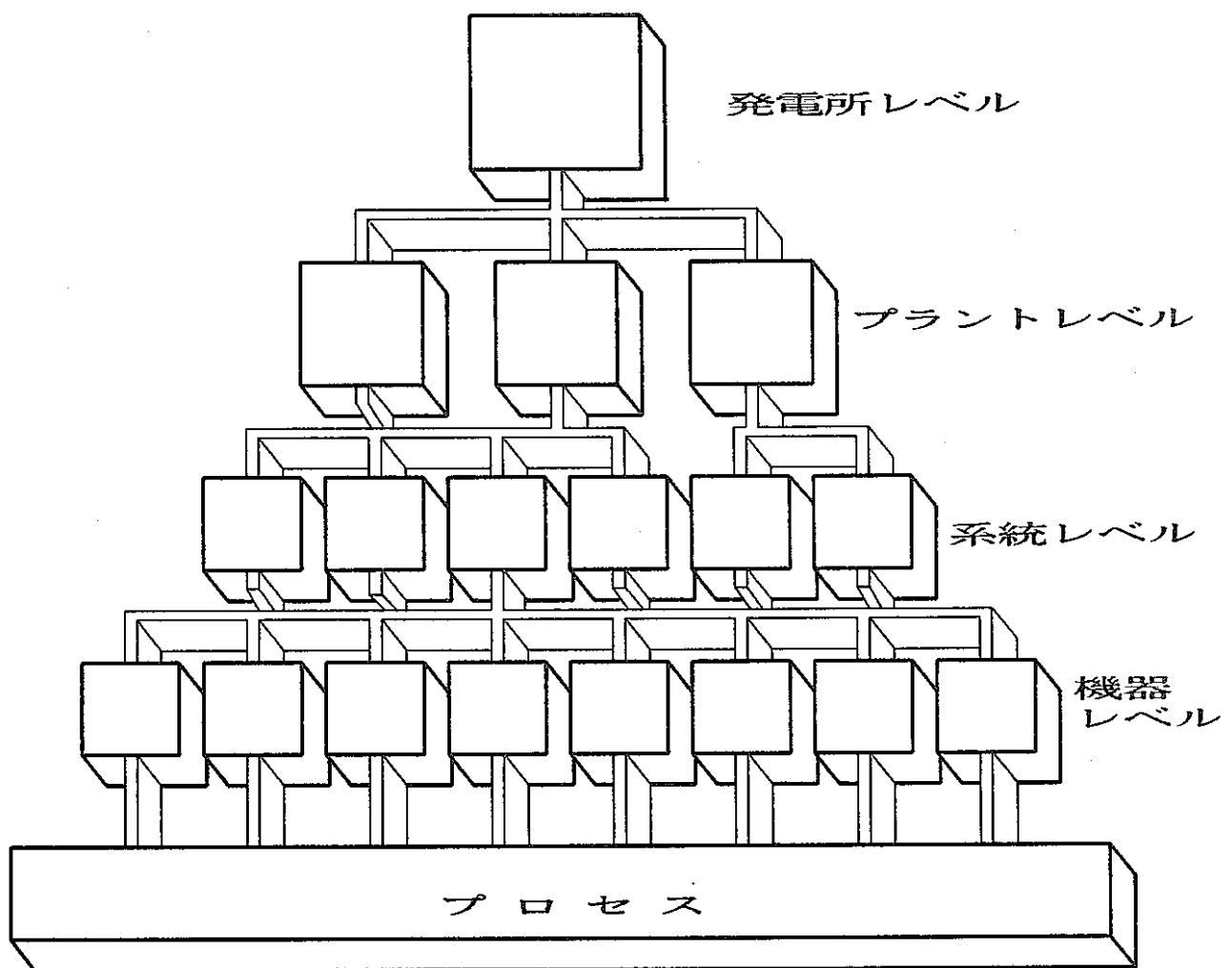


図4.1-1 階層分散化されたディジタル制御システム概念図

4.2 今後の課題

炉運転自動化を実現するうえで、考慮すべき項目を以下に示す。

1) ファジー制御の制御能力の検証

ファジー制御は、あいまいさを含む運転員の判断基準をもとに制御するものであり、運転員の運転ノウ・ハウを洩れなくファジールールとして記述することが重要となる。制御の妥当性の確認は全ての通常運転状態において評価する必要があり、シミュレータにより検証試験を行うことが不可欠である。「常陽」運転訓練シミュレータはあらゆる運転状態をシミュレーションできるものであり、これによりファジー制御の制御能力の検証が可能となる。

2) 計算機直接制御（D D C）ソフトウェアの検証

プラント制御系における計算機直接制御（D D C）ソフトウェアの設計・製作にあたっては、図4.2-1 に示すように、その各フェーズにおける検証及び最終的な確認を十分に行い、システムが正しく設計・制作されていることを確認する。

3) 原子炉出力自動制御実施による熱過渡事象の再評価

熱過渡事象の解析評価にあたっては、異常発生時に原子炉出力制御系が悪動作することも考慮して行う必要がある。当然、蒸気発生器設置の場合には熱過渡事象を全面的に見直す必要があるが、現状プラント構成に基づく制御棒操作自動化システムを実現するにあたっても、過度に出力を上昇させるような以下の異常事象の再評価が必要となる。

- a) 一次冷却材流量増大事象
- b) 二次冷却材流量増大事象
- c) 主冷却器制御異常（過冷却）

4) 制御棒駆動制御装置改造による許認可上の問題点の評価

制御棒駆動機構の改造を実施しなくとも、制御精度（送り出し指令値に対する停止精度）は運転操作上問題となることはないと考えられる。現状の制御棒駆動モータを利用するのであれば、許認可上のインパクトはない。ただし、現プラントの設置許可申請書では制御棒の最大引抜き速度が記載されており、制御精度をさらに向

るため、ステッピングモータあるいは同期型A C サーボモータを用いる場合には、
制御棒駆動モータの最大回転数を規定する手段を講じることが必要となる。

設計および製作

検証および確認試験

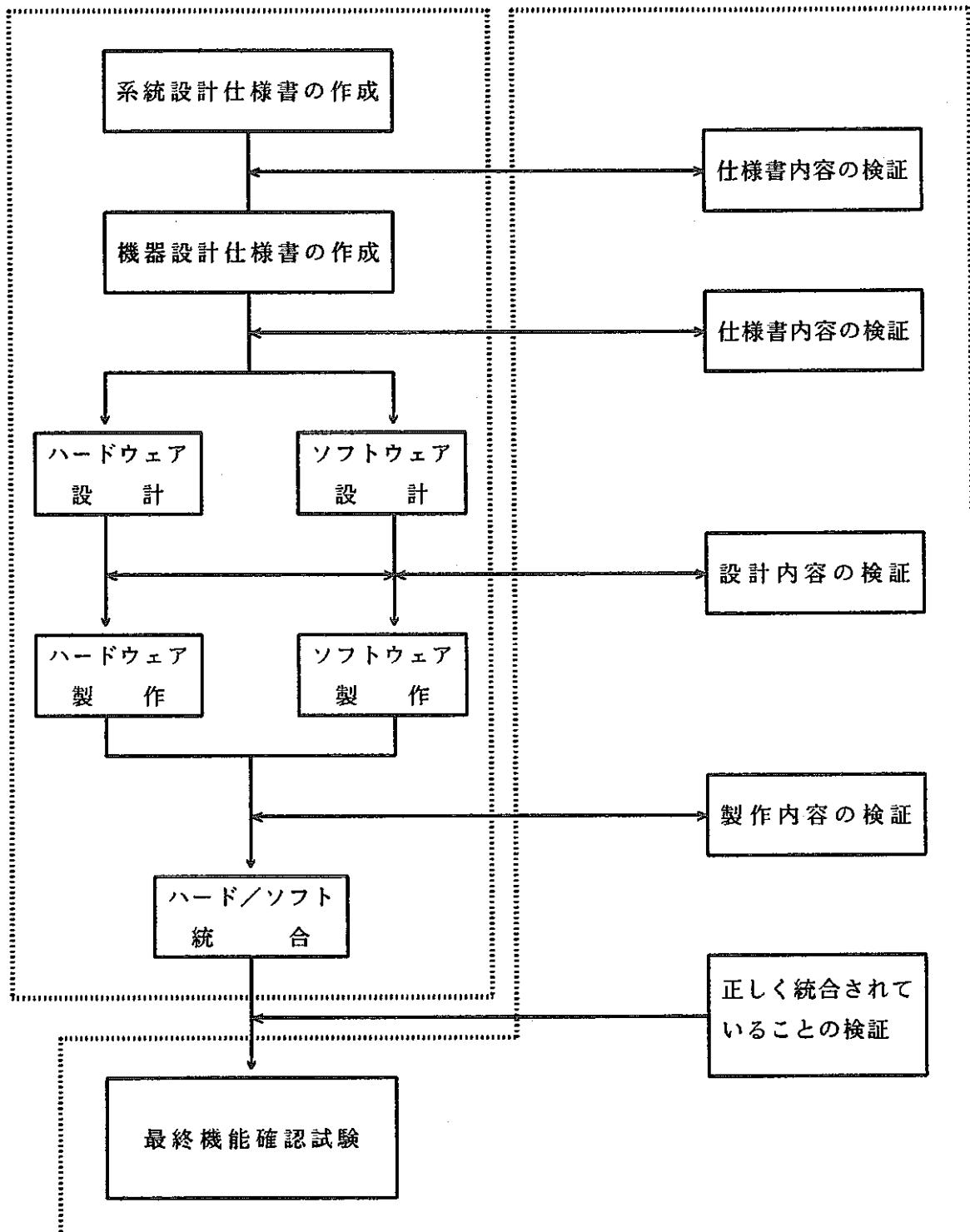


図4.2-1 計算機直接制御（D D C）ソフトウェアの検証・確認試験

5. まとめ

本検討では、現状プラント構成に基づくもの（制御棒操作自動化システム）と、蒸気発生器を設置した場合のプラント構成に基づくもの（プラント運転自動化システム）とに分け、高速実験炉「常陽」の全運転モードにおいて炉出力制御の自動化を達成するための自動化システムの基本構成について検討した。また、制御棒操作自動化を実現するにあたって実施すべき既設計測制御設備、及び制御棒駆動装置の改造点と今後の課題について整理した。以下に実施した検討内容を示す。

① 制御棒自動化システムの検討内容

臨界近接、系統昇温、出力上昇から定格出力運転を経て出力下降に至る一連の通常起動・運転・停止における炉出力制御を自動化するものとし、主冷却器出口温度制御系、主冷却器送風機の操作の自動化を含めた制御棒操作自動化システムの全体構成を設定した。制御棒操作の自動化を行う原子炉出力制御系には、通常運転時の運転状態において炉出力制御ができるよう、ファジー制御を適用するものとし、その基本機能構成を具体化した。

また、現在の制御棒駆動モータを用いた場合の制御棒位置制御特性について解析評価し、制御棒駆動制御装置を改造すれば、制御棒駆動モータを交換しなくとも、制御棒の位置制御が可能となる見通しを得た。

さらに、制御棒操作自動化システムとのマンマシンインタフェイス手法、及び異常時の対応処置方法について検討し、制御棒操作自動化に必要となる計算機システムの構成を明らかにするとともに、中央制御室における改造内容を検討した。

② プラント自動化システムの検討内容

蒸気発生器設置の代表的なプラント構成を想定し、臨界近接、系統昇温、出力上昇から定格出力運転を経て出力下降に至る一連の通常起動・運転・停止における主要系統設備の運転自動化を達成すべき、プラント全系に亘る運転自動化システムの全体構成を設定した。主冷却系統の協調制御を行うプラント制御系は、自律分散制御の思想を取り入れ、最も応答の速いと考えられる2次冷却材流量制御装置に運転員からの運転指令を与えるものとし、2次冷却材流量制御装置以外のプラント制御系の制御装置は

プラントの状態により制御すべき目標を定め、自律的に制御するものとした。これにより、即応性、保全性が十分確保された自動化制御が達成される見通しを得た。

また、最新のマンマシンインタフェイスディバイスを大幅に採用したマンマシンインターフェイス手法、及び知識工学手法適用の異常時の対応処置方法について検討し、現状の計算機システムの見直しを行い、リプレイスを前提に中央計算機システムの構成を明らかにした。さらに、中央制御室における改造内容を検討し、最新のマンマシンインターフェイスディバイスを大幅に採用することにより、現状の中央制御室内に蒸気発生器設置により必要となる中央制御盤を収納可能である見通しを得た。

今後は本検討をもとに自動化システムの設計を進めていくとともに、ファジー制御のルールの設定とシミュレータを用いての制御能力の評価と、蒸気発生器設置のプラント設計に基づく自律分散型プラント制御系の制御能力の評価を実施していく必要がある。

制御棒操作自動化システムの設計製作工程を表5-1に、プラント運転自動化システムの設計製作工程を表5-2に示す。尚、プラント運転自動化システムの設計製作工程は蒸気発生器設置のプラントの基本設計がフリーズした段階からのものを示すものであり、プラント運転自動化システムの基本設計はプラントの基本設計と並行して行っていくものとする。

表 5 - 1 制御棒操作自動化システム設計製作工程

累年	1	2	3	4
S/W 詳細設計				
H/W 詳細設計				
S/W 製作				
H/W 製作				
シミュレータ 組合せ試験				
制御棒駆動制御 実機模擬試験			-	
実機改造				-
実機試験				-

表 5 - 2 プラント運転自動化システムの設計製作工程

累年	1	2	3	4	5	6
S/W 詳細設計						
H/W 詳細設計						
S/W 製作						
H/W 製作						
シミュレータ 組合せ試験						
制御棒駆動制御 実機模擬試験				-	-	
実機改造					-	
実機試験						-

<謝辞>

昭和 63 年度動力炉・核燃料開発事業団殿との契約業務『「常陽」炉運転自動化の検討』の実施にあたり、貴重な序言、御指導を賜りました、動力炉・核燃料開発事業団実験炉部原子炉第一課課長 山下芳興殿、主任研究員 藤原昭和殿、主査 神田一郎殿、主査 時田光彦殿、大和田敏雄殿、高津戸裕司殿、寺門嗣夫殿を始めとする皆様方に対し、深く謝意を表します。