

原子力発電所デジタル制御システム

Digital Control Systems for Nuclear Power Plants

BWR原子力発電プラントで、デジタル制御システムの適用が進んできている。これはもちろん、最近のデジタル半導体技術の急速な進歩発展に負うところが大であるが、原子力プラントの計装制御系に要求されている高信頼化をはじめとする種々の課題を実現するためには、デジタル技術の適用が極めて有力であることも一つの大きな要因である。

本論文では、プラントの運転状態を総括監視しているプラント計算機システムと、最も高信頼性を要求される重要な制御系に適用することを目的に開発した、多重分散型システム構成をもつデジタル式高信頼化制御装置“NURECS-3000”について具体的に説明する。

これらをはじめとするデジタル制御システムの適用拡大は、今後の原子力発電所の安全性、信頼性、経済性、稼働率などの向上に大いに寄与するものと期待される。

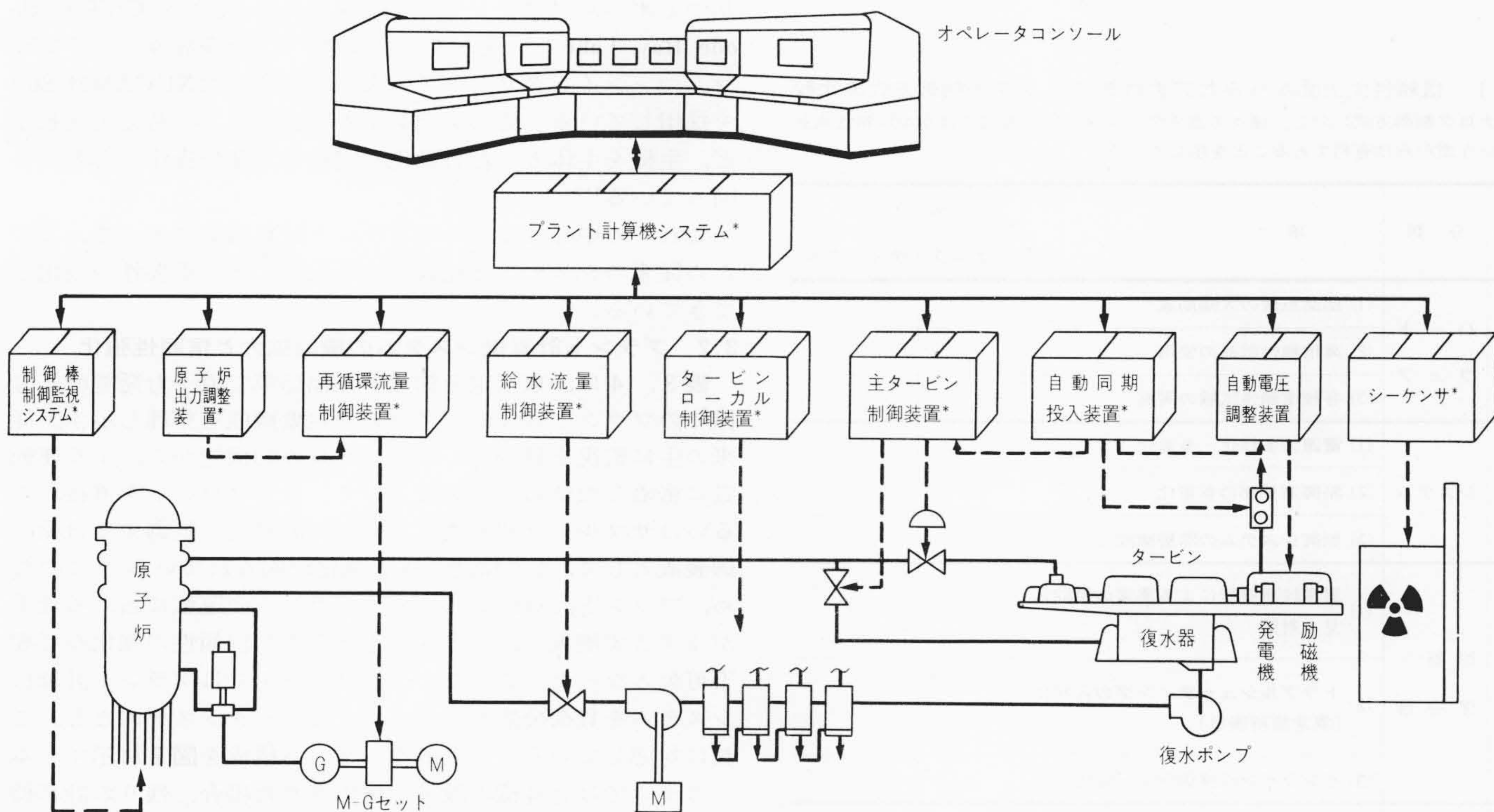
若林泰夫* Yasuo Wakabayashi
浅見一夫** Kazuo Asami
上下利男*** Toshio Jōuge
三宅雅夫** Masao Miyake
伊藤哲男**** Tetsuo Itō

1 緒 言

米国GE(General Electric)社との技術提携により始まったBWR(沸騰水型原子炉)プラントの計装制御技術も、その後の多年にわたる運転経験の蓄積と、メーカー、電力会社一体となった広範囲にわたる技術改良、研究開発などにより、長足の進歩を遂げてきている。特に、原子力発電所が、最も安全性、信頼性を要求されている巨大システムであるだけに、その面からの技術開発が目覚ましく、ハードウェア、ソフトウェア、ヒューマンウェアの三つの面からの徹底したアプローチがなされてきている¹⁾。

それら技術革新の中心的位置を占めるのが、最近の半導体技術の急速な進歩発展に裏打ちされたデジタル技術応用製品であり、信頼性向上、機能向上、性能向上、経済性向上など種々の目的に従って有機的に全体システムの中に組み入れられてきている。

以下、現在建設中の東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機に適用される最新の計装制御システムの中から、特にその中心的役割を担うデジタル制御システムについて説明する。



注：略語説明 G(発電機), M(電動機), *(デジタル化制御装置)

図1 BWR原子力発電所の主要制御系 BWR(沸騰水型原子炉)原子力発電所の主要制御装置の大部分が、既にデジタル化されていることが分かる。

* 東京電力株式会社原子力設計課 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所原子力事業部 **** 日立製作所エネルギー研究所

2 BWR原子力発電所でのデジタル技術の適用拡大

BWR原子力発電所は、大小合わせると100以上のシステムから成るそれ自身ひとつの巨大な複合システムである。この巨大な複合システムを、安全かつ安定に運転させていくためには、一つ一つの構成要素すべてが、その与えられた使命を正しく遂行し続けていくように制御することが必要となる。そのなかでも、特にプラントの運転に密接にかかわっている主要な制御装置を図1に示す。

プラント計算機システムは、従来のデータロギングを主とする機能から、マンマシンインタフェースをつかさどる中枢頭脳として、また、プラント自動運転のコントロールタワーとして、その重要性をますます増してきている²⁾。

一方、各サブグループ制御システムでは、従来のアナログ演算方式からデジタル演算方式主体へと大きく変化してきている。特に、マイクロプロセッサや信号多重伝送技術を駆使した、高信頼・高機能・高性能のフレキシブルで合理的な計装制御設備が大幅に導入されてきている。これは、いわゆるデジタル化が単に複雑な情報処理に適しているというだけでなく、信頼性向上の面からもアナログ方式に比べて大きなメリットをもっているためである。

表1に、信頼性向上の面からみたアナログとデジタルの制御方式の比較を、表2に、代表的なデジタル制御装置について示す。

3 プロセス計算機システム

3.1 概 要

米国TMI(スリーマイル島)原子力発電所の事故以降、国外で運転監視性のなおいっそうの向上が叫ばれてきた。

最新プラントである東京電力株式会社福島第二原子力発電

表1 信頼性向上面からみたアナログ-デジタル制御方式の比較
アナログ制御方式に対し、種々の点でデジタル制御方式のほうが信頼性向上という面からは有利であることを示している。

No.	分 類	項 目	制 御 方 式	
			アナログ	デジタル
1	ハ ー ド ウ ェ ア	(1) 部品点数の大幅削減	△	○
		(2) 高信頼性部品の使用	○	○
		(3) 各種信頼性試験の実施	○	○
2	システム	(1) 電源の多様化・多重化	○	○
		(2) 制御演算部の多重化	△	○
		(3) 制御システムの階層構成	○	○
3	診 断 ・ 保 守 性	(1) 異常診断機能による異常の早期発見と対策	△	○
		(2) トラブルシューティングの容易化 (異常箇所表示)	△	○
		(3) インライン点検保守の可能化	△	○
4	制 御 性	(1) ドリフト低減	△	○
		(2) 精度向上・再現性向上	△	○
		(3) 高級演算機能による制御の高度化	△	○

注：○(実施容易), △(実施やや困難)

表2 最近の主なBWR原子力発電所デジタル制御装置 BWR原子力発電所の主要制御装置に対しては、冗長化により高信頼化されたデジタル制御システムが適用されている。

No.	システム装置名	特 長
1	プラント計算機システム	マルチシステム構成 自動化、診断強化
2	原子炉給水流量制御装置 (NURECS-3000F)	冗 長 化
3	原子炉再循環流量制御装置 (NURECS-3000R)	冗 長 化
4	主タービン制御装置 (NURECS-3000T)	冗 長 化 電気油圧方式(EHC)
5	原子炉給水ポンプ タービン制御装置	冗 長 化 電気油圧方式(EHC)
6	原子炉給水ポンプ ミニマムフロー制御装置	冗 長 化
7	起動時原子炉水位制御装置	冗 長 化
8	原子炉出力制御装置	負荷変更運転の自動化 自動日負荷調整運転
9	制御棒制御監視システム	信号多重伝送
10	走行型中性子校正装置	自 動 化
11	ダストモニタ	自 動 化
12	タービンローカル制御システム	冗 長 化
13	燃料取替機制御装置	自 動 化

所4号機ではこれを徹底させるとともに、人間工学的配慮に基づくオペレータコンソールの採用のほか、カラーCRT(Cathode Ray Tube: プロセスディスプレイ)を多数導入するなど、マンマシンインタフェースを大幅に改善したNUCamm-80³⁾を採用している。更にプラントの起動停止、負荷変更運転など、主機を主体とした自動化も実施し、運転操作の合理化を図っている^{4),5)}。

これらの中心となるのがプラント計算機システムで、このため従来のシステムと比較すると大きくその重要性が変化してきている。

3.2 プラント計算機システムの機能拡大と信頼性強化

表3、4に、東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機でのプラント計算機システムの主要機能を整理し示す。従来の主に監視を目的としたデータロギング機能から、より運転員に密着した情報伝達装置として、またプラントを直接、あるいはサブグループ制御装置を介して間接的に制御する自動制御装置として、その機能の拡大強化が図られている。このため、プラント計算機システムのプラントの運転に占める比重がますます増大し、処理性向上とともに信頼性の強化が必要不可欠となった。このため上記プラントではプラント計算機システムを負荷分散型マルチコンピュータシステムとし、これに対応している。代表的なシステム構成を図2に示す。本システムでは計算機の故障が検出された場合、残りの計算機間でシステム自動再構成が行なわれ、重要機能はできる限り喪失しないような、ねばり強いシステムを構成している。

また全系がダウンした場合でも、運転員とサブグループ制御装置により、プラントの運転継続が可能な階層構成としていることはいうまでもない。

表3 プラント計算機システム主要機能 従来のデータロギングを主とする機能から多数のプラント情報を整理し、CRTに表示したり、運転状態の監視診断予測といったよりインテリジェントな機能も実現する情報処理装置として、また、プラント運転自動化のセンターとしてその重要性を増してきている。

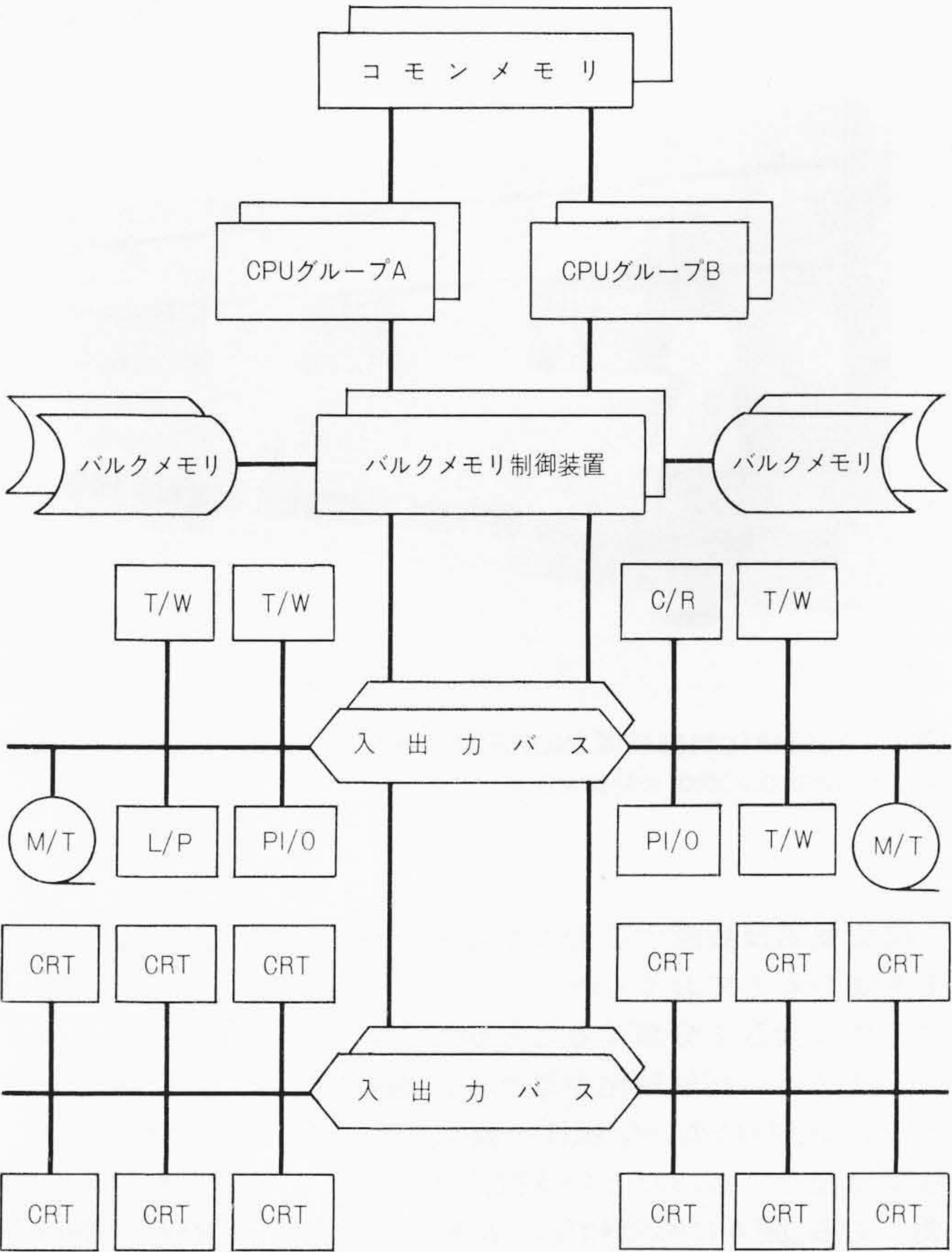
No.	分類	主な機能	最近の機能強化拡大項目
1	性能計算	(1) 炉心性能計算	—
		(2) BOP性能計算	—
		(3) 炉心性能予測(出力分布, 出力上昇経路予測)	○
2	状態監視	(1) プロセス警報, トリップシーケンス	△
		(2) 通常時状態モニタ(系統表示, サマリーステータスモニタ, 待機状態モニタ)	○
		(3) 非常時状態モニタ(トリップ時モニタ, 事故時モニタ, 工学的安全系状態表示)	○
3	CRT表示	(1) 高速グラフィック表示	○
		(2) 炉心性能表示	△
		(3) 警報メッセージ表示	△
4	操作監視及び補助	(1) RWM	—
		(2) 制御棒操作ガイド	○
		(3) オペレーションガイド	○
		(4) サーベイランステストガイド	○
		(5) 自動化	○
5	記録編集	運転日誌, 作成, 作表	—
6	計算機バックアップ	—	○

注：略語説明ほか BOP(Balance of Plant), RWM(Rod Worth Minimizer)
○(機能拡大項目), △(機能強化項目)

表4 プラント計算機システム自動化機能 プラント起動・停止及び負荷調整運転の広範囲にわたる操作を、計算機、制御装置の特徴を生かした制御方式で実現している。

系 統	No.	自 動 化 項 目	制 御 方 式
原 子 炉	1	原子炉昇圧・減圧操作	DDC/SCC
	2	出力上昇・下降(流量制御による)	SCC
	3	圧力制御切替操作	SCC
	4	出力運転中負荷設定・更新操作	KAW
タ ー ビ ン	5	タービン加減弁室ウォーミング	DDC
	6	原子炉給水ポンプ切替・追加操作	DDC/SCC
	7	タービン起動・昇速操作	SCC
	8	グラウンドシール系操作	OG
	9	真空上昇操作	OG
	10	タービン油温制御	OG
	11	タービンドレン弁操作	OG
	12	タービン油ポンプ制御	OG
発 電 機	13	発電機系統併列・初負荷操作	SCC
	14	発電機解列準備	SCC
	15	発電機励磁調整操作	KAW

注：略語説明 DDC(Direct Digital Control), SCC(計算機監視制御), KAW(Kick Action Work), OG(オペレーションガイド)



注：略語説明
T/W(タイプライタ), C/R(カードリーダ), M/T(磁気テープ),
L/P(ラインプリンタ), PI/O(プロセス入出力装置)

図2 プラント計算機システム構成図 広範かつ多様な機能に対応し、処理性の向上とともに冗長化、自動システム再構成など、高信頼化システム構成としている。

4 高信頼化制御システム“NURECS-3000”

4.1 概 要

給水流量制御系、再循環流量制御系、主タービン制御系などは原子力発電所の制御系のなかでも、特にプラントの安全性、信頼性、稼働率の確保という観点から重要な制御システムであるため、なおいっそうの高信頼化が望まれている。これらのシステムは、従来プラントでは、基本的には多数のアナログ演算器を中心としたシングル系制御システムとして構成されていた。しかし、シングル系では電子部品などの偶発故障により、プラントの安定な運転の継続に影響を与える可能性がある。

このため、過去の長年にわたる研究成果と経験を生かし⁶⁾、デジタル技術、多重化技術、診断技術を駆使し、従来の制御装置に比べて一桁以上信頼度を向上させた高信頼化制御装置“NURECS-3000”(Nuclear Power Plant High Reliability Control System-3000)を開発した⁷⁾。

図3 にその外観を示す。

4.2 “NURECS-3000”での高信頼化手法

- 信頼性に関する厳しい要求を満たすアプローチを大別すれば、
- (1) 故障発生防止(フォールト アボイダンス)
 - 構成要素の品質を高めて、故障が生じないようにするもの。
 - (2) 耐故障性の向上(フォールト トレランス)

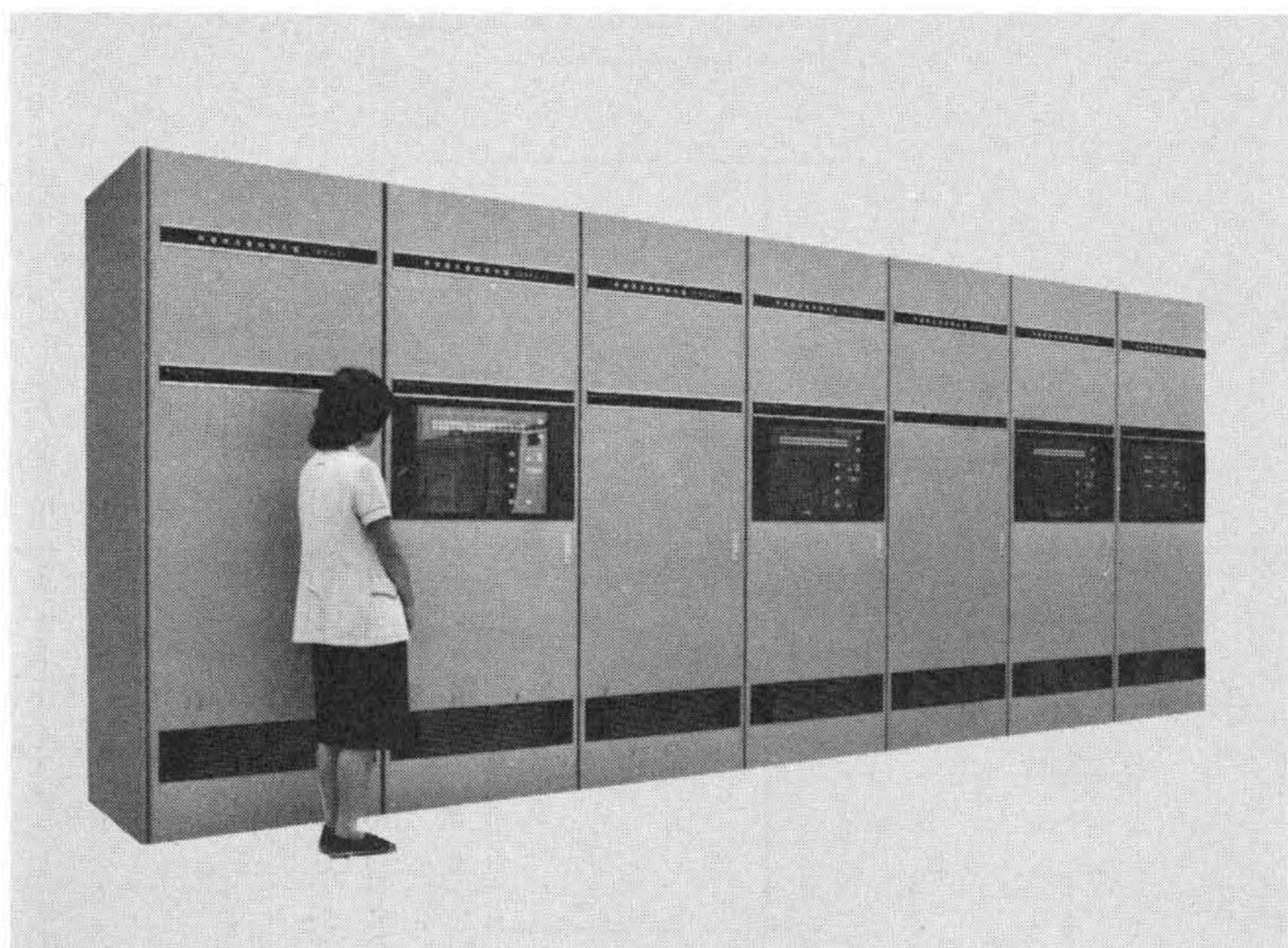


図3 高信頼化制御装置“NURECS-3000” 多重分散型システム構成をもつ“NURECS-3000”の外観を示す。

構成要素は故障するものとはじめから前提し、それに耐える方法を考えておくもの。

の二つに大きく分類することができる。

システムの高信頼化の原点が、前者にあることはいうまでもないが、特に高い信頼性を要求されるシステムに対しては、故障は起きるものだという視点からのアプローチも極めて重要である。図4に高信頼化の着眼点を示す。“NURECS-3000”の開発に当たっては、特にこの耐故障性の向上という観点からの高信頼化システム設計を行なった。

以下、本設計での基本思想を示す。

(1) 冗長化構成

構成要素は故障するという前提にたち、万一の故障発生に際しても、外部へはその影響を及ぼさないようにするために冗長化構成を基本とする。

(2) 階層構成、分散構成

冗長化とともに、万一の故障時の危険分散を目的とし、機能を縮退しながらもできる限りその使命を遂行できるようにシステムは階層化、分散化構成とする。

(3) 故障検出率の向上

冗長化構成でも、故障の検出を契機として故障箇所の除外、あるいはシステム機能の縮退などのシステムの再構成が可能となる。したがって、故障検出率のなおいっそうの向上を図る。

(4) 保全系構成

常にシステムを正常状態に維持し続けるために、故障検出時にはシステム全体をダウンさせずに直ちに修理、交換ができる保全系構成とする。

(5) 修理時間をミニマムとする。

修理時間の短縮は、保全系システムの信頼度向上に極めて大きく寄与する。修理時間削減のための異常診断・異常表示機能などにより異常箇所を早期検出し、修理時間をミニマムとする。

(6) 共通部の最少化

多重システムの信頼度は、多重部分の信頼度と共通部分の信頼度により決定する。一般には前者が極めて高いため、システム全体の信頼度は後者により左右される。したがって、共通部の高信頼化のため、これをできる限り最少化する。

(7) 誤操作の防止

人間の誤操作は、共通モード故障の一種と考えることがで

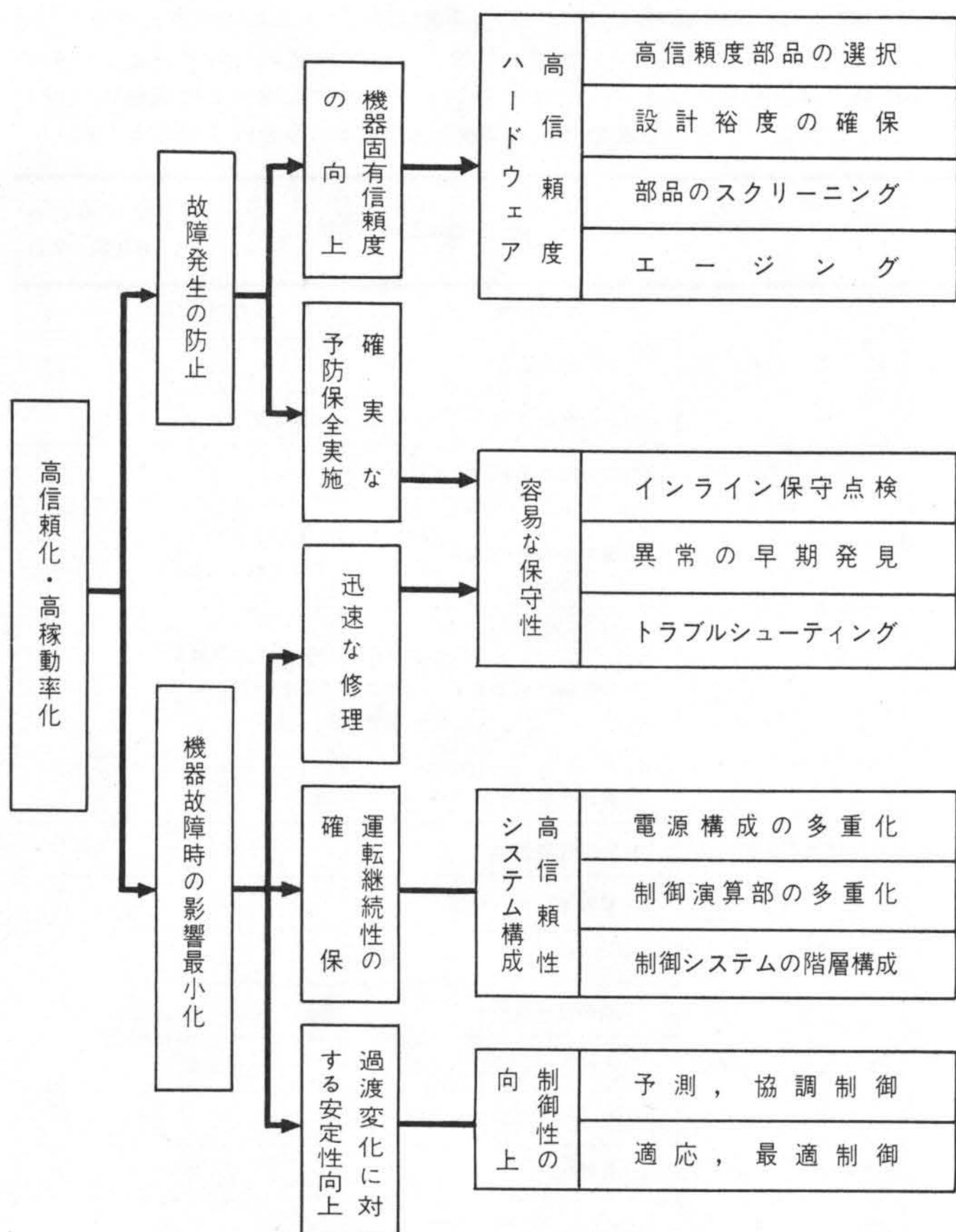


図4 システム高信頼化の着眼点 システム高信頼化のためには、故障発生そのものの防止対策と、故障が発生してしまったときの影響の最小化の二つの面から対応することが重要である。

きる。したがって、メンテナンス中のユニットの完全分離を図り、万一の誤操作に対しても、これを当該ユニット内部に封じ込めることのできるシステムとする。

4.3 “NURECS-3000”のシステム構成

以上の検討結果をベースに開発した“NURECS-3000”のシステム構成を図5に示す。共通部のミニマム化という基本方針を徹底し、全体を多重分散型構成としている。すなわち、すべての構成要素、例えば一見共通とも考えられる検出器からシステム切換えをつかさどる判定部まで明確に三つのサブシステムに分離し、共通部を可能な限り最少化した。

以下、主な具体的な手法について説明する。

(1) 電源供給システムの分散設置

共通モード故障を発生させる最大の原因に電源供給システムがある。したがって、その分離には細心の考慮を払った。各サブシステムは、分電盤のフィーダレベルから分離独立したAC電源とDC電源による二重化電源供給システムをもち、当該サブシステム内の一切の電源を供給する。各サブシステム間にかかわる共通的な機器については、信頼性解析に用いられる手法(FMEA: Failure Mode Effective Analysis)を応用し、その影響を評価し厳密に分類した。したがって、万一あるサブシステム内の電源系統に異常が発生したとしても、当該サブシステムは、制御系から直ちに除外されるが、他のサブシステムに影響を与えることはない。

(2) 入力信号の分離と切り離し

プラント情報は、入力信号のオンライン-オフライン切替部を介し、マイクロコントローラに入力される。万一、サブシ

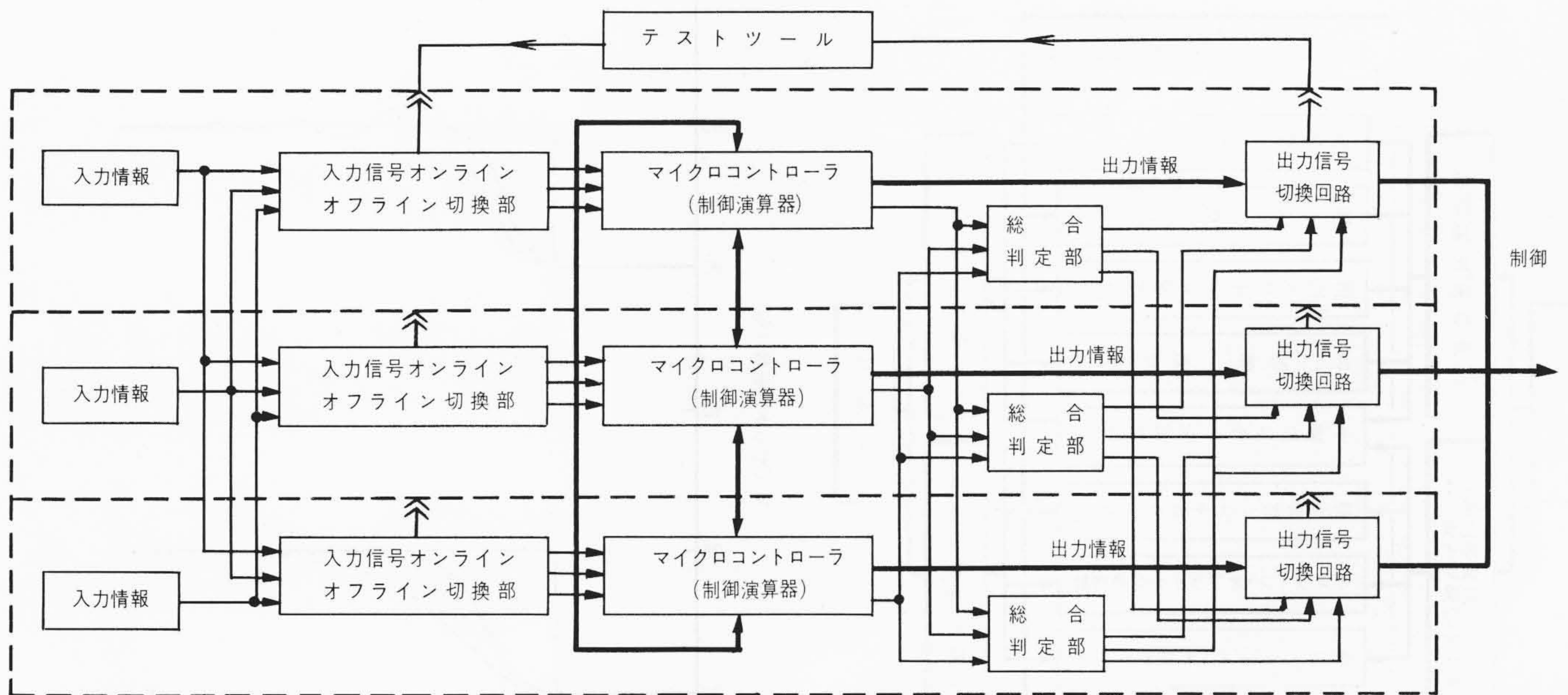


図5 “NURECS-3000” システム構成図 制御系の各構成要素を、それぞれ三重化した完全分離の多重分散型システム構成をとっており、単一のトラブルでは制御機能は喪失せず、運転継続が可能である。

システム内に異常が発生した場合、そのサブシステムは、入力信号のオンライン-オフライン切換部と、後述する出力信号の切換部によって、プラント、制御対象及び他の正常なサブシステムから完全に分離する。したがって、その異常は当該サブシステムの外へは波及しない。

(3) マイクロコントローラ

マイクロコントローラとしては、特に高信頼化を目的として開発された16ビットマイクロコンピュータを使用し、共通部最少化の基本原則に従い、3台のマイクロコントローラは特に同期装置をもたない非同期方式で動作するものとしている。

各マイクロコントローラは、オンライン-オフライン切換部を介し、入力したプラント情報から制御信号を演算する。更に、データ伝送回線を介し入力した他サブシステムの演算結果と比較照合することによって、当該サブシステムの自己診断のほかに、他サブシステムをも含めた全体的な相互診断も実施し、異常検出率の大幅向上を図っている。

(4) データ伝送及びデータコントロール

本来、共通部の最少化という観点からは、各サブシステム間同士の信号の相互授受はないほうがよい。しかし、停止、除外状態のサブシステムを待機運転状態に回復するためには、現在のシステムの運転状態に合致した状態に内部データを設定してやらなければならない。また、比例積分制御あるいはラッチデータなど、過去の履歴を必要とするデータを取り扱う場合には、制御の連続性（切換時のバンプレス性）を確保するためにもデータコピー機能が必要となる。

“NURECS-3000”では、各サブシステムを1:1のデータ伝送装置で結合し、各々のサブシステムは、自己のデータに加えて他サブシステムのデータにより各々のデータベースを作り、各々の判断でこのデータを使用するシステムとした。また、二重伝送方式の採用によって、1台のデータ伝送装置がダウンしても、データの欠落が発生していないように考慮した。このため、出力データは、各サブシステムの独自の判断により独立して決定されるため、共通モード故障を極めてひき起こしにくい方式となっている。また、突発的な異常に対しても、こ

れに左右されない強力な異常出力阻止能力をもち、かつ非同期システムでありながら内部データの一致性を保つことができた。

(5) 多重システム選択方式

一般に、多重系で問題となるのは、多重系出力の選択方法である。“NURECS-3000”の設計に当たっては、特に下記方針のもとに検討した。

- (a) 共通部の最少化の基本方針により、判定部、切換部も多重化する。
- (b) 信号ごとの選択方式ではなく、コントローラ選択方式とする。

以上の基本方針に基づき、選択判定回路を多重化したRVS (Redundant Voting System) 方式を新たに開発し、採用した。本RVS方式では、次の3段階でサブシステムの切換えを行なう。

- (a) 第1ステップ……各サブシステムでの自己診断、相互診断による各サブシステムの正常性評価
- (b) 第2ステップ……各サブシステムの正常性評価結果を総合判定し、最適サブシステムを決定
- (c) 第3ステップ……多重化された総合判定部の出力結果の2 out of 3 logicによる出力信号切換え

本方式の開発により、判定・切換部の多重分散化も達成できた。

(6) 出力切換回路

各サブシステムの出力信号はこの2 out of 3 logicをもつ出力切換回路を介して、そのうちの一つのサブシステムの出力だけが制御対象に伝えられる。また、入力回路のオンライン-オフライン切換部と同様、異常サブシステムの切り離し機能なども兼ね備えている。

図6に“NURECS-3000”多重分散型システム構築での基本コンセプトと、それを実現するために今回新たに開発し採用した主な新技術、新方式を整理して示す。

4.3 ソフトウェアの高信頼化

ソフトウェアは一種の共通部と考えることができる。したがって、ソフトウェアの高信頼化には特に留意した。具体的

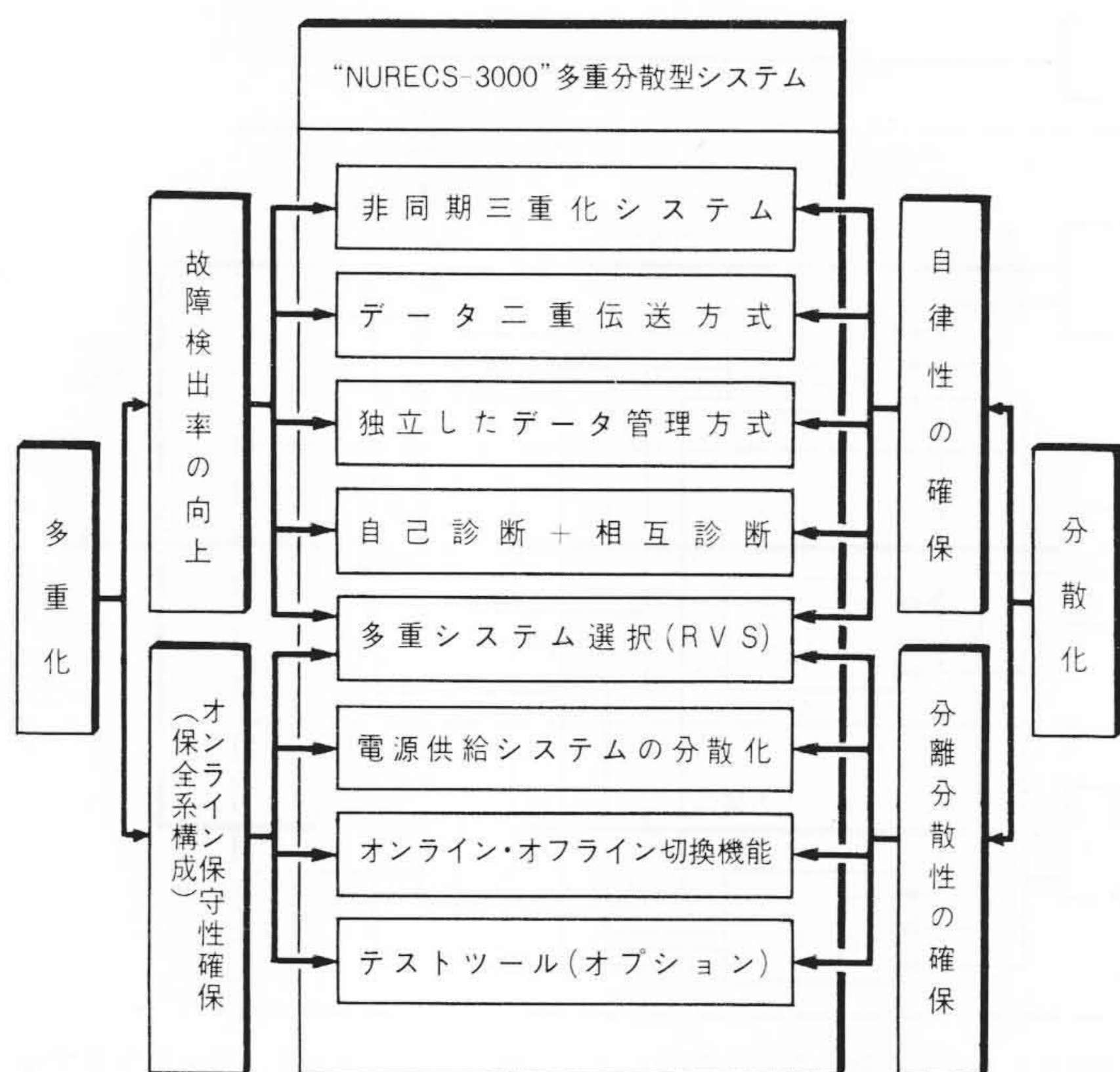


図6 “NURECS-3000”の基本コンセプトと新技術 “NURECS-3000”では、多重化と分散化の長所を融合した多重分散型システムを新たに開発適用した。本図は、多重分散型システムの基本概念と、それを実現するために新たに開発した主な新技術、新方式を示す。

手法は下記のとおりである。

- (1) プログラム構成のシンプル化
- (2) プログラムのブロック化
- (3) 制御用高級言語の使用
- (4) NURECS用プラントシミュレータを使用した徹底的なデバッグ

異常模擬機能を含む詳細なNURECSダイナミックプラントシミュレータを用い、装置の故障だけでなく、プラント側の異常事態も模擬するなど、徹底的な確認試験を実施し、ソフトウェアの信頼性を確保している。

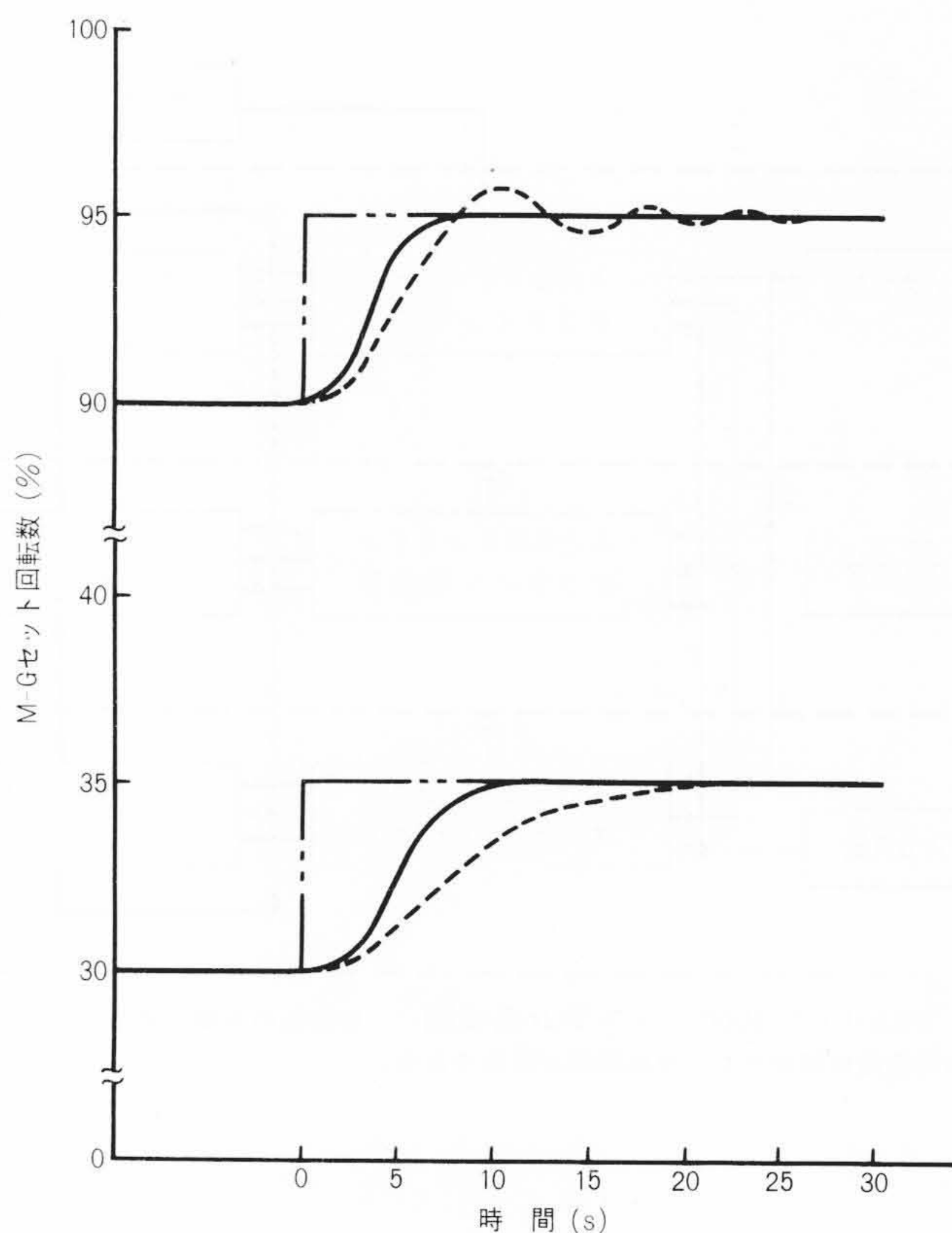
4.4 適応制御機能による制御性の向上

今回対象としたシステムの基本的な制御方式は、古典的なPI(比例積分)制御である。運転状態に応じて制御対象の特性は非線形的に変化するが、従来のアナログ制御系では、制御定数は1点しか設定できなかったため、すべての運転条件でプラントの応答性、安定性という面からは必ずしも最適とは限らなかった。そこで、運転状態に対応した非線形特性補償機能を設け、比例積分制御の長所を十分に生かすように配慮した。図7に、再循環流量制御系M-Gセットのステップ応答改善の模様を示す。低回転数域、高回転数域いずれも安定化、高速化していることが分かる。

5 結 言

BWR原子力発電所の増加と大容量化、運転経験の蓄積に伴い、計装制御設備に対するニーズも多様化し、電力・メーカー一体となった研究開発が進められてきた。特に、ここ2～3年の我が国の技術進歩は目覚ましく、デジタル制御技術を中心に世界の原子力計装制御分野でも、確実にトップグループを形成するまでに至っている。

本論文で述べたように、現在建設中の最新プラントである東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機では、重要な制御系に対してNURECSをはじめとする高信頼化を主目的に



注：—— 速度設定値
—— NURECSを使用したときの応答性(適応制御機能付)
--- 従来制御系を使用したときの応答性(適応制御機能なし)

図7 再循環流量制御系M-Gセットステップ応答試験結果 従来制御系に対し適応制御機能付のNURECSでは、M-Gセットの回転数によらず良好な制御特性を示した。

開発されたデジタル制御システムが適用されている。また近い将来には、プラント効率の向上、系統運用性能の向上、合理化などのニーズにこたえるものとして、更にデジタル制御システムの適用が拡大していくと予想される。

今後とも、関係者の指導、協力を得ながら、ニーズに即した合理的なシステム開発に、更に邁進してゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) 矢内, 外: 最近の沸騰水型原子力発電所計測制御システム, 日立評論, 64, 8, 585～590(昭57-8)
- 2) 中村, 外: 原子力発電所における計算機適用の拡大, 日立評論, 64, 6, 411～415(昭57-6)
- 3) K. Yanai, et al.: Development of New Plant Monitoring and Control Systems with Advanced Man-Machine Interfaces, IAEA-CN-39/66(1980-10)
- 4) 火力原子力発電技術協会: 計装・制御と自動化 IX, 原子力プラントの制御と自動化, 火力原子力発電, 34, 2, 199～210(昭58-2)
- 5) T. Johge, et al.: Development of Automatic Plant Start-up And Shutdown System for BWR Power Plant, IAEA-SM-265/36(1982-10)
- 6) 浅見, 外: 原子力プラント用高信頼化制御装置の開発, 日立評論, 62, 9, 629～632(昭55-9)
- 7) K. Asami, et al.: Development of Nuclear Power Plant High Reliable Control System, IAEA-SM-265/39(1982-10)