

最近の沸騰水型原子力発電所計測制御システム

Advanced Control and Instrumentation Systems for BWR Power Plants

BWR原子力発電技術の我が国への導入以来、日立製作所ではその計測制御分野に対して多くの研究開発を進め、より信頼性の高いいわゆる日本型BWRの技術確立に努めてきた。

この結果、近年のBWR計測制御技術の発展は、急速かつ目覚ましいものがあり、大きな変革期を形成しつつある。

これは、我が国のBWRプラントの豊富な運転経験を基に、電力会社と一体となった開発研究、改良の積極的な推進と、デジタル応用技術に代表される関連基盤技術の着実な適用展開によるものである。これらの新技術、新製品の適用によって、プラント運転の信頼性を飛躍的に高め得ることが期待される。

本稿では、日立製作所での最近の代表的な計測制御システムについて、基本技術、特徴を中心にその概要を述べる。

矢内勝也* *Katsuya Yanai*

上下利男** *Toshio Jōge*

三宅雅夫* *Masao Miyake*

伊藤哲男*** *Tetsuo Itō*

1 緒言

BWR(沸騰水型原子炉)プラントの計測制御技術は、多年の運転経験をベースに原子力プラント全般に対する技術的改良開発と併行して、長足の進歩を遂げてきた。

日立製作所はこれら展開の中で、特に安全性、信頼性、稼働率の向上などを重要な主題として、技術開発、製品開発両面にわたり、積極的に改善、開発を進めてきた。

すなわち、発電ユニット容量の増大、安全強化を中心とする各種設備の強化改善、ALAP改善(放射能低減の強化)、改良標準化、運転信頼性の大幅向上など、それぞれの改良、開発のニーズに対応した計測制御システムを、信頼性、機能、性能などの高度化を志向しながら発展させてきた。

以下、BWR計測制御技術の開発状況と、最近の代表的計測制御システムの中から、実プラント適用ベースの新形中央監視制御システム、高信頼化制御装置及びマイクロコントローラを装備した新しい各種制御装置について内容を概説する。

2 BWRプラント計測制御システムの開発

我が国に商業ベースのBWR原子力発電所が建設されて以来十数年が経過した。現在、全国で12基のBWRプラントが稼働中であり、同時に豊富な運転経験が蓄積されてきた。この間のBWR計測制御技術に対するニーズ及び技術発展の変遷をみると、

- (1) 昭和40年代前半は、技術導入期であり、基本技術の開発、確立と国産化に努力が払われた。
- (2) 同後半には、大容量化、安全性強化、ALAP改善に関する技術開発を積極的に実施してきた。
- (3) 昭和50年代前半に入り、改良標準化、運転信頼性の向上(マンマシン性向上)が重要課題として取り上げられた。
- (4) 更に現在は、稼働率の向上、系統運用性能の向上、合理化が主な技術開発主題といえよう。

日立製作所は、これらのニーズに適合した計測制御システムを確立するために、常に関連基盤技術の進歩を見極め、最新かつ合理的な諸システムを順次開発、改良してきた。

ハードウェア面では、演算素子は初期のトランジスタからICそしてLSIへ順次適用を拡大し、併行して、アナログ演算方式からデジタル演算方式主体へと大きな変革を押し進めてきた。特にマイクロプロセッサや信号多重伝送技術を積極的に導入し、高信頼、高機能のフレキシブルで合理的な計測制御設備を着実に実用化してきた。

ソフトウェアの面でも、オンライン炉心性能予測技術、各種のプラント制御・自動化技術、異常診断技術、プラント運転監視にかかる各種インテリジェント機能、自動計測技術など計算機応用の高度の諸技術を開発してきた。

更にヒューマンウェア面では、人間-機械系でのマンマシンインタフェースの在り方を人間工学、心理工学の観点から最適化を追求し、特に米国TMI(スリーマイル島)原子力発電所事故後、更にこの点を強化改善してきた。

他方、システム構成としては、初期の単一構成主体から、システム化、統合化へと合理的かつ機能的なトータルシステム構築へ研究開発、改善を進めてきた。

表1には、電気出力1,100MWクラスの大型BWR原子力発電所に対する日立製作所の最近の計測制御システムの代表例を示す。計算機応用技術及びマイクロコントローラによるデジタルシステムが主体となっていることが分かる。

3 プラント運転監視の合理化

3.1 運転監視の変遷

原子力発電プラントは、システム規模の大きさに加え、放射線被曝防止の観点からも、中央集中監視方式をとる典型的なプラントである。このため多量の情報量と操作機器が中央制御室に集中し、中央制御盤は長大なものとなっている。更に、近年のユニット容量の拡大、種々の安全強化に伴う系統及び系統内機器の拡大は、中央監視制御をますます大規模化・高度化し、プラント運転監視性の改善・合理化が要求されるようになってきた。一方、計算機制御技術をはじめ、制御機器の技術的進展は目覚ましく、なかでもカラーCRT(Cathode

* 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

表1 最近の主なBWR計測制御装置 計算機応用デジタル化など新しい基本技術を採用し、システムの高信頼化、機能・性能の向上を図っている。

No.	システム・装置名	技術ポイント	信頼性向上	被曝低減	機能・性能向上	合理化
1	新形中央監視制御システム (NUCamm-80)	情報集約, 自動化, 診断強化	○	—	○	○
2	高信頼化制御装置 (NUREGS-3000)	多重分散化, デジタル化	○	—	○	○
3	原子力用光多重伝送システム	光ファイバ, 多重化	○	—	—	○
4	中央制御室ケーブル処理システム (HICAT)	集中端子盤, プレハブケーブル	○	—	○	○
5	制御棒動作記録装置	計測自動化, 高速スクラム対応	○	—	○	—
6	起動時炉水位制御装置	流量微小調整, デジタル化	○	—	○	—
7	原子炉出力調整装置	負荷変更運転自動化, 日間負荷追従運転	○	—	○	—
8	原子炉給水ポンプタービン制御装置	電気油圧方式, デジタル化	○	—	○	—
9	制御棒監視システム (RMCS, RPIS)	信号多重伝送, デジタル化	○	—	○	○
10	安全保護系トリップシステム	アナログ化	○	○	○	—
11	走行型中性子校正装置	全自動化, デジタル化	○	—	○	○
12	ダストモニタ	計測の自動化, デジタル化	○	—	○	—
13	タービンローカル制御システム	制御性向上, デジタル化, 冗長化	○	○	○	○
14	トリチウム捕集装置	計測精度向上	—	—	○	—
15	格納容器雰囲気モニタ	直接サンプリング方式, ワイドレンジ化	○	—	○	—
16	改良型排水モニタ	非接触通水式, 計測精度向上	○	—	○	—
17	炉水試料分析装置	全自動化, 精度向上	—	○	○	○
18	大容量励磁システム (サイリスタ式)	高速応化, 冗長化	○	—	○	—

Ray Tube)表示器は、マンマシンインタフェースとしてその有効性が早くから注目され、まず、在来形制御盤に、炉心性計算表示として、更に運転監視情報表示へと順次その適用が拡大されてきた。また、CRT表示器を主体とした計算機化制御盤の開発が進められ、自動化技術、計算機制御技術の飛躍的な進歩とあいまって、実用段階に入ってきた。特に、1979年米国TMI原子力発電所の事故は、中央制御室設計のヒューマンファクタの面からの見直し・改善の必要性をその教訓として残し、新形中央監視制御システムの実機適用の気運を高めた。

3.2 新形中央監視制御システム(NUCamm-80)

日立製作所では、在来形制御盤を、特に運転監視性の面から見直し、人間工学的制御盤設計、CRT表示制御、プラント

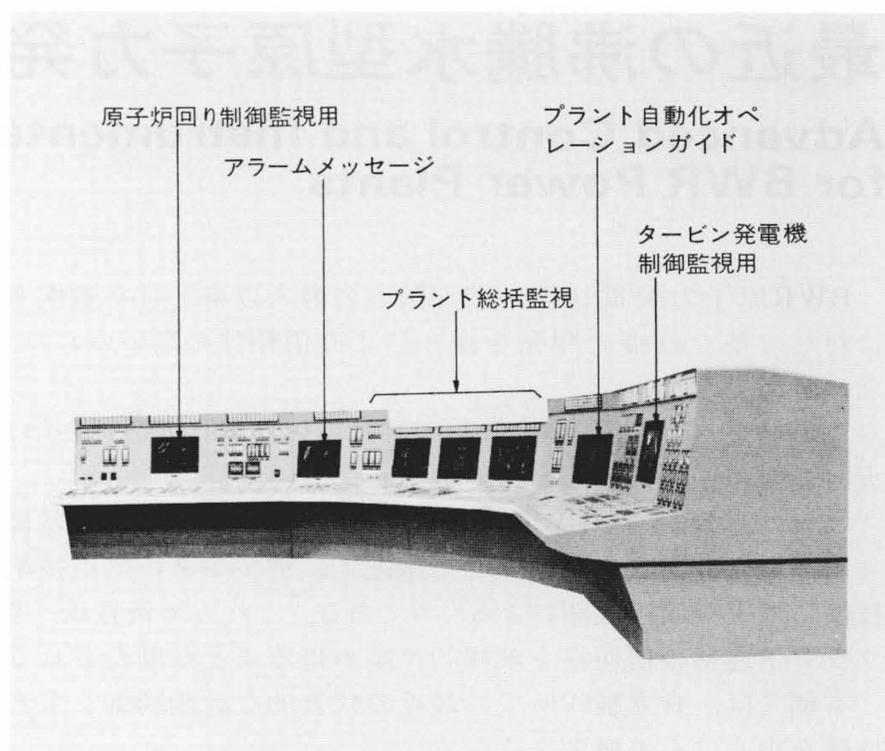


図1 新形中央監視制御システム(NUCamm-80) 総括運転監視盤には、カラーCRTを7台設置し、通常運転、緊急時対応が円滑に行なえるように、人間工学的に配慮されている。

自動化・診断などの最新技術を最大限に適用した新形中央監視制御システムを開発してきた。このシステムを、更に、TMI事故教訓からの見直し・改善を反映して、現在、実機プラント向けの設計製作を進めている。図1に、その総括監視制御盤の外観を示す。

3.2.1 制御盤設計

(1) パネルレイアウト

在来形制御盤は、系統ごとのブロック構成をとり、各系統ブロックには、その系統内の指示・記録計、制御機器がすべて配置される方式をとってきた。このため、系統及び系統内機器の拡大に伴い、盤長さが長大となり、運転操作性を低下させる要因の一つとなっていた。NUCamm-80では、主盤・副盤分離方式を採用し、通常の起動・停止、負荷運転及び運転員の迅速な対応に必要な操作は、主盤だけで行なえるようにし、更に主盤内系統構成は、プロセスの流れに沿った構成とし、運転員の作業動線の軽減、監視・操作性の向上を図った。

(2) CRT表示器の合理的配置

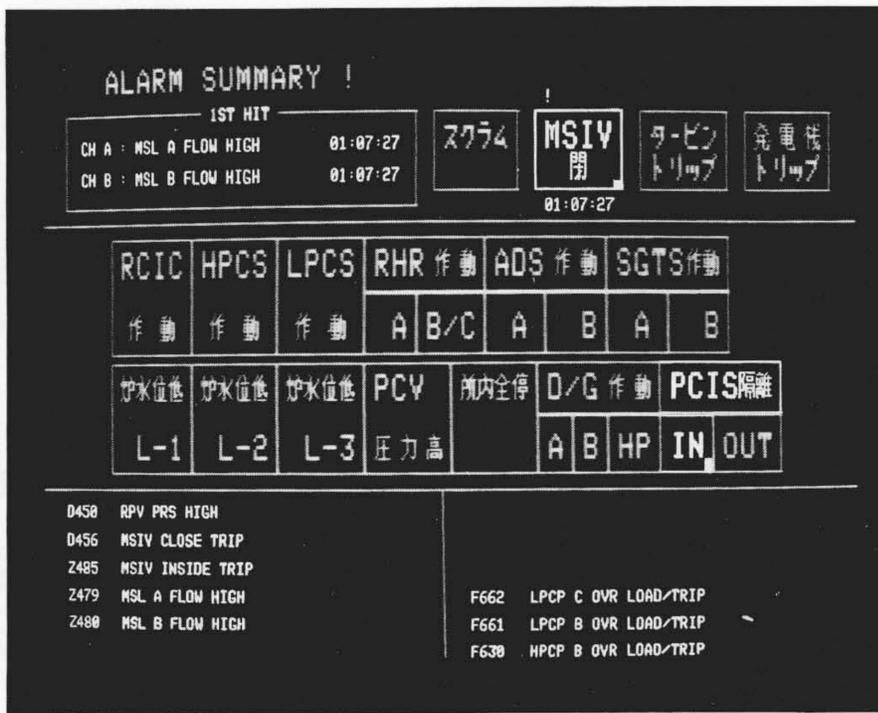
CRT表示器は、運転員とプラントの主要インタフェースとなる主盤に7台、副盤である非常用炉心冷却系盤に2台組み込み、更に計算機用コンソールに1台、当直長用机に1台、合計11台を機能分担を明確にして配置した。特に、主盤中央部に5台を集中配置し、プラント通常時及び非常時のプラント統括監視が合理的に行なえるようにした。

(3) 人間工学的設計の適用

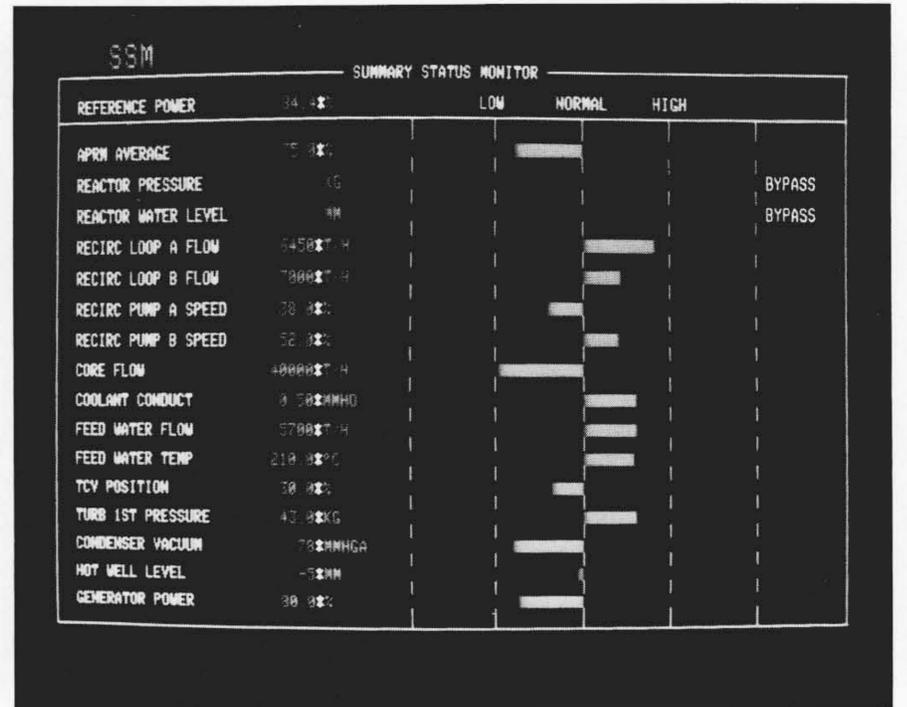
制御盤の形状、寸法、機器レイアウト、重要度分類に応じた制御機器の形式・寸法、カラーコーディングの使い分けなど全般にわたって人間工学的設計を適用し、誤判断・誤操作防止を図るとともに、運転員の肉体的・精神的負担を軽減し、プラント運転に専念できるよう配慮した。

3.2.2 CRT-計算機システムによる監視強化

NUCamm-80システムでの運転情報表示は、CRT表示器を主体に従来計装を併用する方式をとり、万一の計算機システムのダウン時も従来計装で運転が継続できる設計としている。CRT表示制御システムは、計算機でインテリジェントな



(a)



(b)

図2 CRT画面表示例 プラントトリップ時などに、第一次原因、関連重要警報を発生順に即時表示される(a図)。プラントの主要パラメータのバランス状態を常時監視し表示される(b図)。

情報処理を行なうとともに、プラント運転過程に応じて必要情報を選択し、CRT表示器に直感的把握が可能なように合理的集約表示するものである。このシステムでは、下記の機能などをもち、CRTフォーマット数は全体で約150枚が準備されている。

(1) 通常時ステータス表示

プラント起動・停止、通常負荷運転の各過程に応じて各CRT表示器に割り当てられた画面を、自動又は手動で表示する。

(2) プラントトリップ時ステータス表示

原子炉スクラム発生で自動的に統括監視用CRT表示器群に下記情報を集約表示し、プラント状態の正確かつ迅速な把握が容易となるようにしている。

(a) プラントトリップシーケンス、安全系ステータス及び重要警報集約表示(CRT画面例を図2(a)に示す。)

(b) 主要パラメータの経過値トレンド表示

(c) 炉心ステータス表示

(d) プラントサマリ表示(CRT画面例を図2(b)に示す。)

(e) スクラム後確認操作項目表示

(3) プラント事故時ステータス表示

プラント事故時、監視すべきキーパラメータのトレンド表示、系統集約表示、サマリ表示などで、特に(a)反応度制御、(b)炉心冷却、(c)原子炉圧力バウンダリの健全性、(d)一次格納容器の健全性、(e)放出放射能の各安全監視機能ごとにグループ分けして合理的表示を行なっている。

(4) サーベイランステストガイドシステム

工学的安全施設は、その健全性を確認するため定期的に電動弁開閉試験、ポンプ起動試験などの試験が実施される。このシステムは、試験手順のガイド、試験結果の判定及び記録を自動的に行ない、CRT表示するものである。

(5) 異常の早期検出機能

プラント通常運転時、プラント異常を早期に検出し、運転員を支援し、プラント稼働率、運転の安全性向上を図るシステムとして、主要パラメータ間のバランス監視を行なうサマリステータスマニタ、プラント動作性モデルと観測値との偏差を監視するモデル比較方式プラント診断システム及び工学的安全施設などの待機状態を監視する待機系モニタを適用

した。

3.2.3 プラント自動化

プラント自動化システムは、プラント起動・停止操作を主体に、その運転進行管理及び運転操作を自動化するもので、運転員の誤判断、誤操作確率の低減、省力化及びプラント機器へのストレスの軽減を図るものである。

(1) 自動化の範囲

計算機によるプラント統括管理は、下記の運転を対象に補機を含めた広い範囲にわたって行なっている。

(a) ユニット起動前準備以降、定格負荷までの起動操作

(b) 通常運転時の制御棒パターン交換及び調整運転

(c) 日間負荷調整、負荷一定運転

(d) 定格負荷から復水器真空破壊までの停止操作

計算機は上記プラント統括管理に基づき運転ガイドを行な

表2 主な自動化項目と制御方式 主機主体に操作の自動化を行ない、計算機、制御装置の特徴を生かした制御方式を適用している。

主な自動化項目	制御方式	
	計算機	制御装置
プラント出力制御(炉心流量調整)	SCC	APC
原子炉昇圧時圧力設定値制御	SCC	EHC
原子炉減圧制御	SCC/DDC	EHC
給水小流量時炉水位制御	—	FWC
原子炉給水ポンプ切替操作	DDC	FWC
タービン加減弁ウォーミング操作	DDC	EHC
タービン起動昇速操作	SCC	EHC
発電機励磁調整操作	KIC	AVR
発電機並列・初負荷操作	SCC/KIC	EHC/ASS
圧力制御切替操作	SCC	EHC

注：略語説明 APC(原子炉出力調整装置)、EHC(タービン制御装置)、FWC(給水流量制御装置)、AVR(自動電圧調整装置)、ASS(自動同期併入装置)、SCC(計算機監視制御)、DDC(計算機直接制御)、KIC(シーケンシャル制御)

い、主機操作を主体に運転操作の自動化を行なう。表2に主要な自動化項目を示す。

(2) 制御方式と制御内容

計算機は、プラント運転を「起動」、「停止」、「通常」などの運転フェーズと各運転フェーズを構成する複数のブレイクポイントを管理し、個々の操作のタイミングの決定、操作前条件のチェック、操作指示及び操作完了条件のチェックなどを行なう。操作の自動化は、計算機による直接制御及び専用制御装置で行なう。計算機制御方式は次の3種とし、各操作に対しては、それぞれの特長を生かした最も適切な制御方式を適用した。

(a) DDC (Direct Digital Control : 計算機直接制御)

計算機内で操作量を計算し、直接操作端を駆動する方式

(b) SCC (Supervisory Computer Control : 計算機監視制御)

計算機は設定値の設定や装置の使用、除外を指令し、連続的な制御は専用の制御装置が実行する方式

(c) KIC (Kick Action : シーケンシャル制御)

シーケンス制御装置などに計算機が起動信号を与える方式
プラント自動化システムは、計算機システム、サブグループ制御装置、シーケンス制御装置などから成る階層化構成とし、サブグループ制御装置は、デジタル制御方式を大幅に採用し、高信頼度及び自動運転機能の適切な分担を図った。

3.2.4 計算機システム

計算機システムは、プラント運転監視上の役割が大幅に拡大した。その重要性を考慮し、応答性、処理性、信頼性の向上を図るため、中央演算処理装置を複数台使用し、特にマルチ構成に優れた日立制御用計算機HIDICシリーズによる負荷

分散形マルチコンピュータシステムを構成している。

また、万一計算機のうち1台が停止した場合でも、残りの計算機で計算機間相互バックアップ機能と負荷分担の自動再構成によって、自動的に即時バックアップをさせる。更に、記憶装置の二重化、カラーCRT、タイプライタなど周辺機器の相互バックアップ方式とし、十分なシステム信頼性を確保するように考慮した。図3に、本計算機システムの構成を示す。

4 プラント主要制御システムの高信頼化

原子力発電所の制御系のなかでもプラントの安全性、信頼性、稼働率の向上の点で特に重要な制御装置に対しては、いっそうの高信頼化が望まれていた。しかし、従来の単一系では電子部品などの偶発故障による制御系への障害に対して抜本的な予防策がとれず、システム的な信頼性強化が望まれていた。日立製作所は、これに対し、早くからその必要性を認識し、昭和49年から本格的なシステム開発を着手し、合理的な高信頼化制御システム“NURECS” (“Nuclear Power Plant High Reliability Control Systems”)を開発した。

4.1 高信頼化制御システム

NURECSは、マイクロコントローラを使用した多重分散形のいわゆるフォールトトレラントシステム(Fault Tolerant System)で、電子部品などの単一故障に対して、システム機能の停止の可能性を最小限化することを設計の基本思想としている。

したがって、BWRプラントで、原子炉の出力、水位、圧力などを直接制御している原子炉再循環流量制御装置、給水流量制御装置、EHC(主タービン制御装置)など、特に重要なプラントの中核制御システムへ適用することが望ましい。これによって、プラント運転の信頼性、安全性、制御の安定性を飛躍的に強化できる。

NURECSは、そのシステム構成を従来の一重系に対し多重化構成とし、演算制御方式をアナログ演算方式からマイクロコントローラを使用したデジタル演算方式とし、各種の診断機能を大幅に強化している。更に、非線形補正、先行制御などシステムの最適制御化を図っている。

この結果、NURECSは従来方式に比べ、そのシステム信頼性を大幅に改善でき、同時に保守性、過渡安定性を著しく向上させることが可能となった。

図4に、NURECSの全体位置づけを示す。

4.2 NURECS-3000システム構成

NURECS-3000は、多重分散形の三重化システムである。本システムは、図5のシステム構成概念図に示すように、プロセス検出部、制御演算部、多数決判定部、信号切換部、システム電源部などすべてのシステム構成部位を三重化し、2 out of 3の多数決によって最も正常な信号を常に自動的に選択させ、制御信号を出力するような構成としている。

したがって、単一トラブルによるシステム制御機能の喪失を無くすことが可能となる。

各構成部位のトラブルは、マイクロコントローラ自体の自己診断機能に加え、相互間の診断及びシステム診断機能によって検出され、短時間に保全を行なえるように考慮されている。保全作業中は二重系による待機冗長系構成をとる。また、システム電源部は、所内の直流及び交流電源から受電し、一方の電源喪失があってもシステムダウンしないような構成としている。

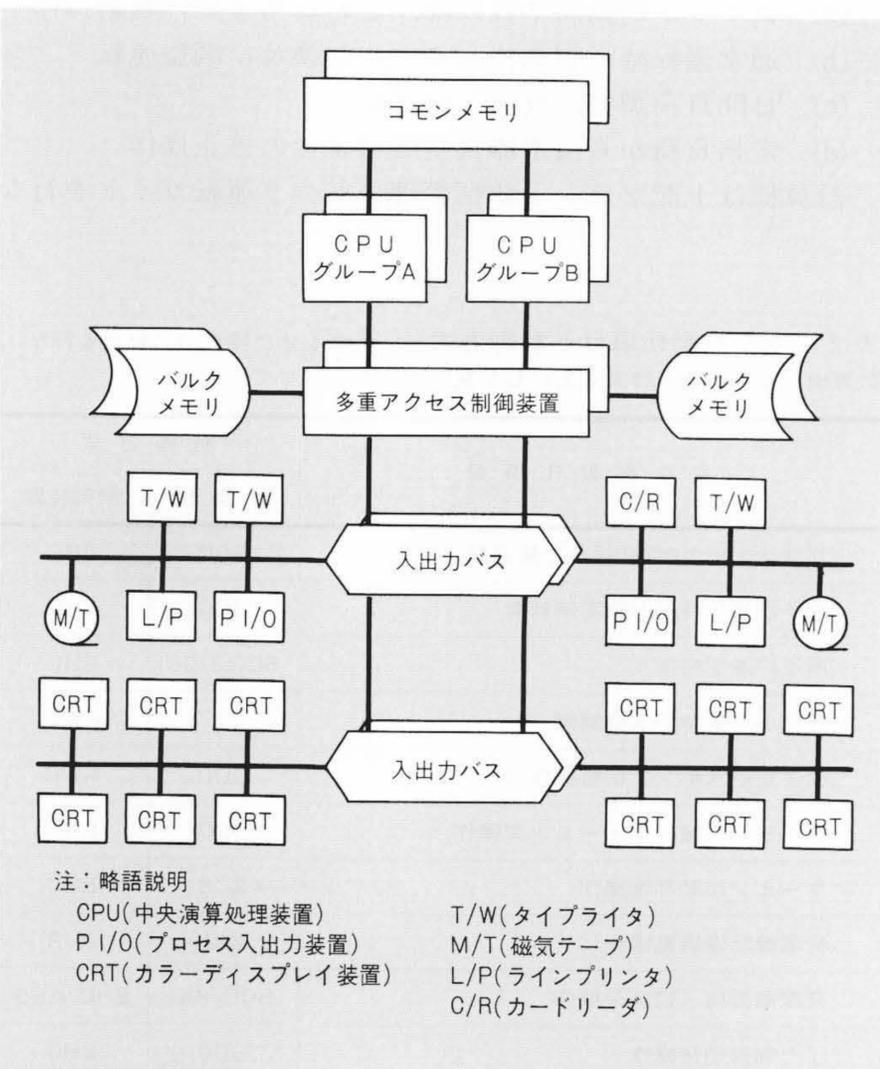


図3 NUCAMM-80計算機システム構成 中央監視制御システムの広範かつ多様な機能に対応して、冗長化、自動システム再構成など高信頼化システム構成としている。

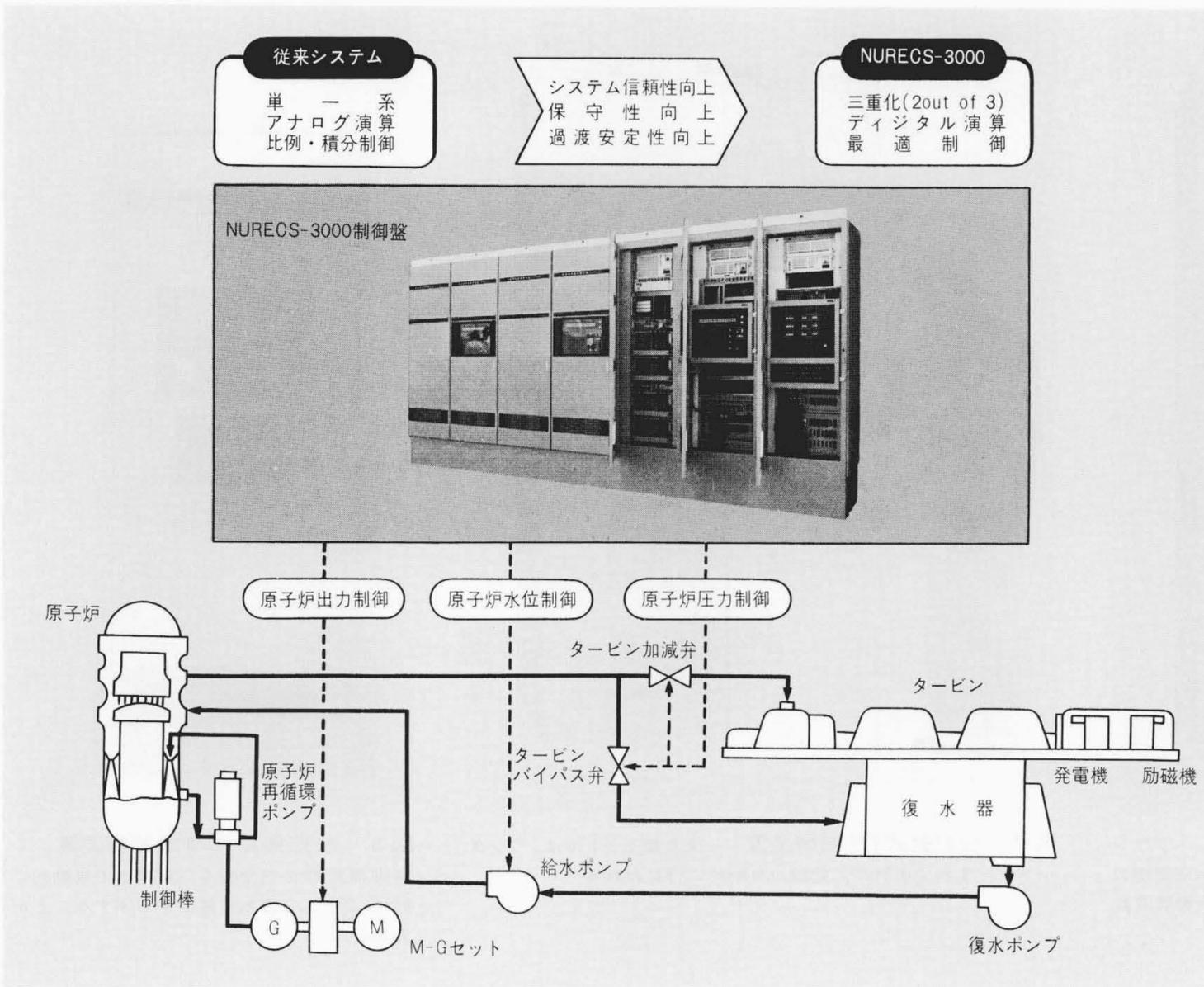


図4 NURECSシステム プラントの中枢制御装置をマイクロコントローラを使用して多重化し、単一のトラブルでは制御機能が喪失せず運転継続が可能となる。

この多重システムの有効性は、多くの人工故障による実証試験に対し、常に正常側が自動選択され、システム全体の制御機能の維持ができることを確認しており、本システムの適用によって、プラント運転信頼性の向上に大きく寄与できると考える。

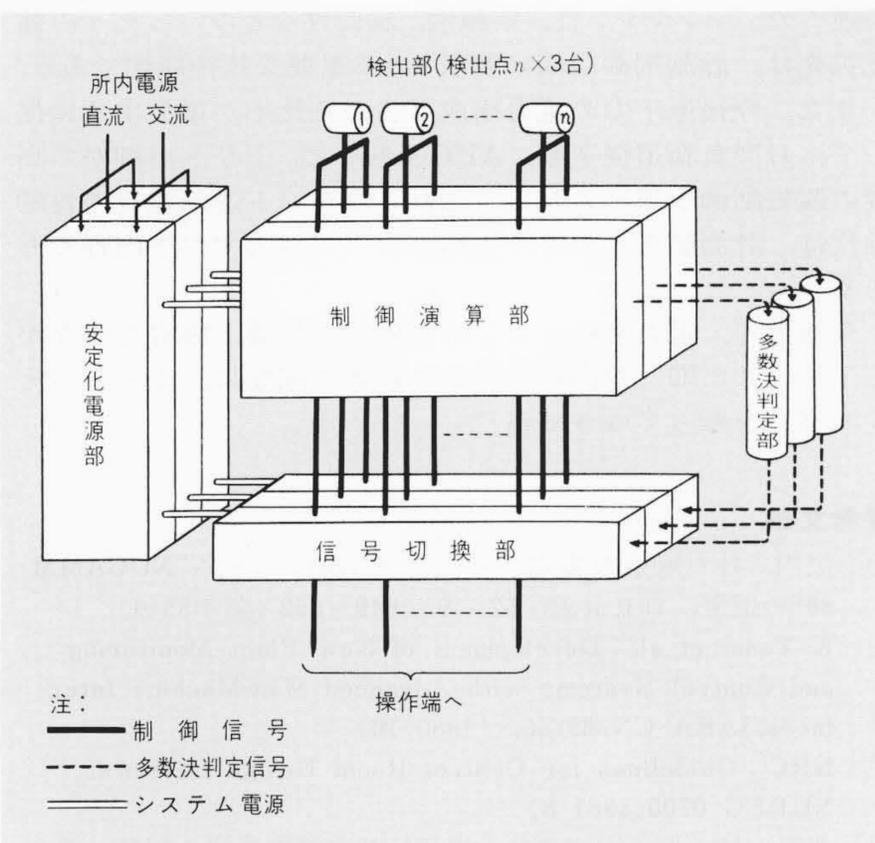


図5 NURECS-3000システム構成概念図 制御系の各構成部位をそれぞれ三重化し、多数決判定によって常に正しい制御信号でプロセスを制御している。

5 最近のデジタル応用システム

5.1 原子炉出力調整装置

原子炉出力調整装置は、原子炉再循環流量制御装置の上位制御装置として、炉心流量を変化させ発電機出力を自動的に目標値に追従させるマイクロコントローラを使用した制御装置である。

本装置は、出力一定制御のほか、あらかじめ定めたパターンに従った運転制御を行なう機能をもっており、日間負荷追従運転のほか、プラントの起動・停止時や制御棒パターン変更時のプラント出力制御、更に、AFC(自動周波数制御)運転にも適用できる。出力変化率は、0.1%/h程度から5%/min程度までの広範囲の制御が可能である(図6)。

5.2 全自動式TIP制御システム

従来のTIP(走行形中性子束校正モニタ)制御装置は、操作員による手動操作であり、電気出力1,100MWプラントでは、172個の被校正対象に対し、細心の注意と長時間を費やして計測操作を行っていた。また、この間炉心状態は一定であるということが必要であり、改善が強く望まれていた。

全自動式TIP制御システムは、計算機応用のデジタルシステムであり、ワンタッチで必要な制御、計測が行なえ、

- (1) 全自動化による省力化(従来対比約 $\frac{1}{5}$)
 - (2) 短時間計測(従来約 $\frac{1}{3}$)による計測精度向上
 - (3) X-Y記録計操作の全自動化
 - (4) 各種診断機能強化による信頼性・保守性の向上
- などの特長をもっている(図7)。

5.3 制御棒動作時間記録装置

原子炉制御棒は、動作の健全性確認や保全計画上、種々の

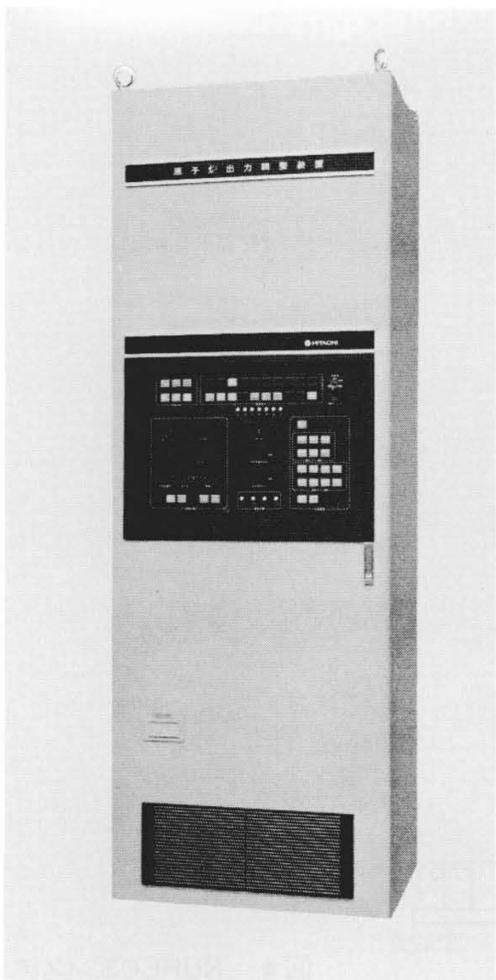


図6 原子炉出力調整装置 プラントの起動・停止時や制御棒パターン変更時のほか、日間負荷追従運転、AFC(自動周波数制御)運転にも適用できる。

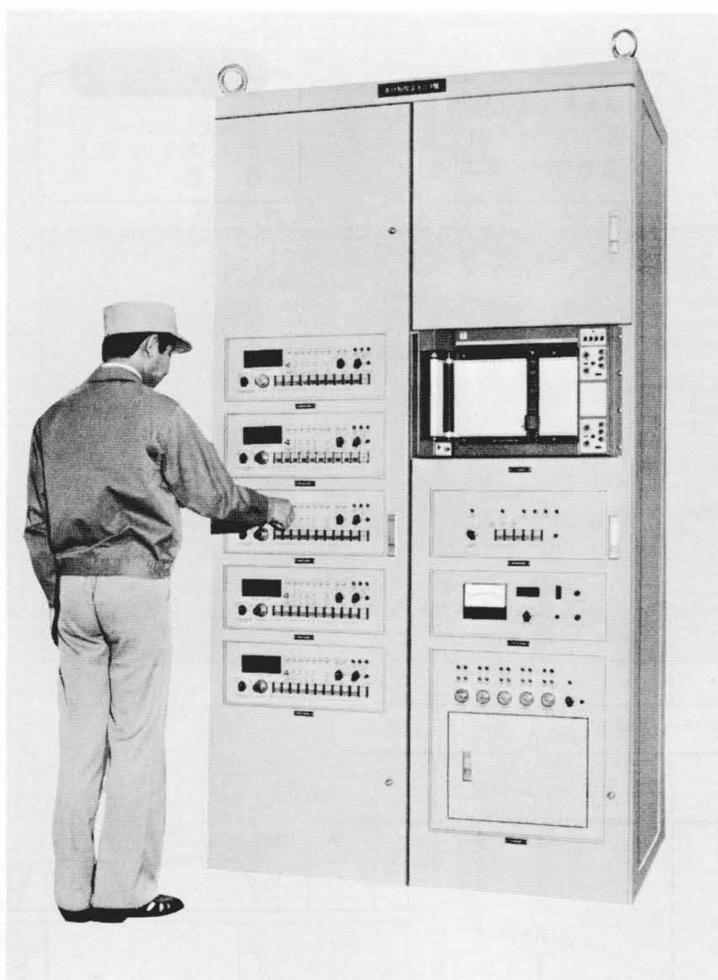


図7 全自動式TIP制御装置 全自動モードでは、ワンタッチで、すべての計測、記録が自動的にこなされる。

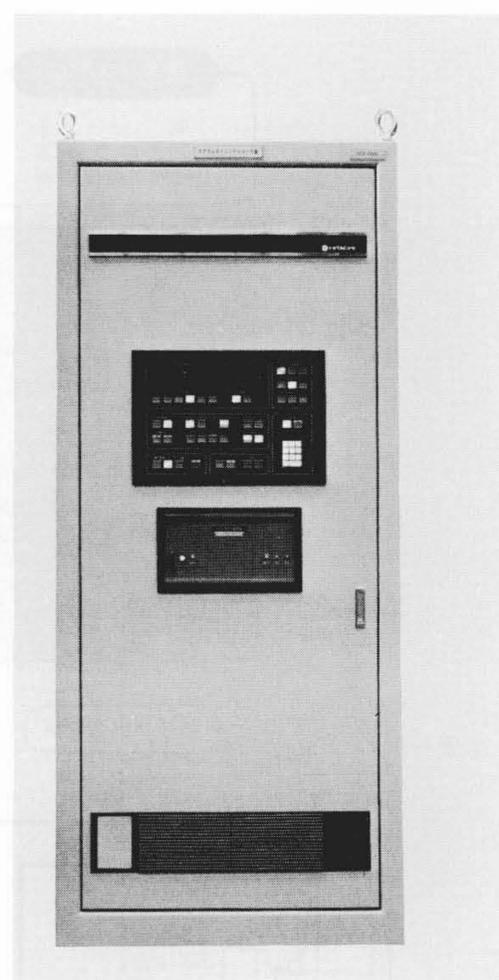


図8 制御棒動作時間記録装置 制御棒動作の健全性を、高精度で自動的に計測、評価し、直ちに結果を印字することができる。

プラント運転状態で作動評価を行なっている。

これには、例えば、各制御棒ごとの定期的作動テスト(いわゆるスクラムテスト)、原子炉緊急停止時の全制御棒作動記録、通常動作時評価などがある。

本装置は、これら各種の作動時に、全制御棒(電気出力1,100 MW出力で185本)の作動状態を自動的に計測、記録、評価を行ない、結果を直ちに印字又は表示することができ、関連システムと連動したマイクロコンピュータ応用装置である。

従来の分析、評価の手数は一切不要で、計測精度は±2ms以下で高速スクラム方式制御棒にも適用できる(図8)。

5.4 放射性核種自動分析装置

核燃料管理、水質管理上不可欠で、かつプラント定期検査工程上クリティカルパスになっている放射能分析業務は、従来は手作業、手分析であった。これに対し、放射線被曝低減、省力化、作業工程短縮、計測個人差の排除を目的として、試料採取から核種計測分析、報告書作成までを自動化した。

試料水採取装置には、マイクロコントローラによる自動制御方式を採用し、一試料を平均10分で採取できる。

データ処理装置は、放射能測定、 γ 線スペクトル解析、報告書作成などを自動処理し、分析精度(再現性)は、±5%以下である。

5.5 光多重伝送システム

原子力プラントの大容量化、運転監視制御の高度化などによって、中央制御室と現場間を中心に伝送情報量が急速に増大しており、今後更に増加が予想される。これは、ケーブル布設関連工事量を増大させ、建設工程のネックとなりつつある。

原子力用の高信頼化光多重伝送システムは、原子力としての使用環境に適合し増大する情報量の伝送に関し合理的な解決を与えるもので、以下に述べる特長をもっている。

- (1) デジタル信号処理技術によるケーブル本数の大幅削減
- (2) 光ファイバ技術採用による優れた無誘導性
- (3) 冗長化構成による高信頼化と柔軟な拡張性
- (4) 上位計算機とのリンケージによる情報の集約化

6 結 言

以上、最近のBWR計測制御設備のなかから代表例について述べた。マンマシン性、信頼性、制御性などのいっそうの強化拡充は、計測制御設備に要求される重要な技術課題である。

また、今後原子力の電力構成に占める比率が増大するに従って、日間負荷追従運転、AFC運転など、よりきめ細かい高度の運転制御が求められる。これらプラント運転監視の質的強化は、計測制御の分野が主体となって対応すべき内容でもある。

今後とも、電力会社をはじめ関係者の指導、協力を得ながら、ニーズに即した合理的なシステムの開発に、よりいっそうの努力を払ってゆきたい。

参考文献

- 1) 矢内, 外: 原子力発電所中央監視制御システム“NUCAMP-80”の開発, 日立評論, 62, 9, 649~652(昭和55-9)
- 2) K. Yanai, et al.: Development of New Plant Monitoring and Control Systems with Advanced Man-Machine Interfaces, IAEA-CN-39/66, (1980-10)
- 3) NRC: Guidelines for Control Room Design Reviews, NUREG-0700(1981-8)
- 4) 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, 629~632(昭和55-9)
- 5) 野口, 外: 原子力発電所用デジタル計装の開発, 日立評論, 64, 2, 125~128(昭和57-2)