

# 最近のBWR(沸騰水型原子炉)デジタル監視制御システム

## Recent Digital Monitoring and Control System for BWR Plant

原子力プラント監視制御システムでは、いっそうの運転性、信頼性の向上を図るべく限りなく改善への努力が続けられている。

近年マイクロエレクトロニクスの進歩に伴い、コンパクトなハードウェアで多くの機能を実現できるようになり、計測制御装置でのデジタル技術の適用拡大を積極的に図ってきた。合わせてそれらを有機的結合して総合システムを構築し、より高度の効果を追求している。

本稿では、デジタル化技術を活用した盤の標準化、冗長化技術やフォルトトランス向上技術を組み合わせた高信頼度化、光多重伝送技術を利用した情報ネットワークの階層化などを重点に、そのねらい、基本構成、適用例などを紹介する。

野口跡見\* Atomi Noguchi  
 藤平一重\*\* Kazushige Tōhei  
 出海 滋\*\*\* Shigeru Izumi

### 1 緒言

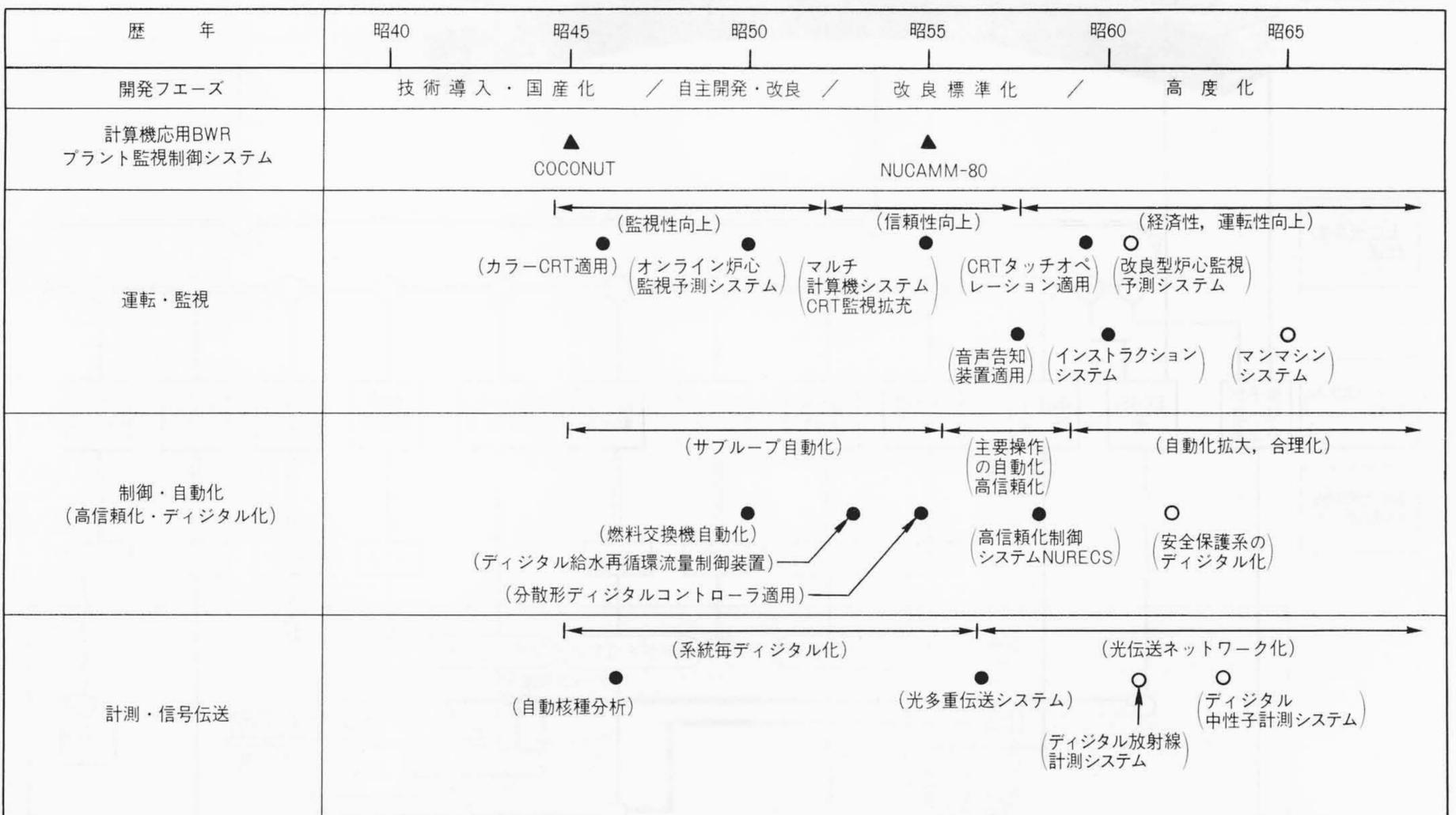
近年、BWR(沸騰水型原子炉)の監視制御システムは、稼働率、運転性の向上を追求し高度化を推進してきた<sup>1),2)</sup>。現在は、各系統ごとのデジタル化からそれを有機的に結合し、合理的な総合化デジタルシステムへと開発を進めている。

本稿では、その背景と必要性、実現の手法を述べるとともに、最近の製品化動向を適用実施例をもって示す。また合わせて、今後解決すべき課題と開発の方向について考察する。

### 2 計測制御設備開発の歩み

BWR計測制御設備では、図1に示すように著しく進歩するエレクトロニクスを積極的に取り入れ改善を図ってきている。

運転、監視の面では、監視の容易なプラントとするため、カラーCRTによる集約表示機能や随時監視可能なオンライン炉心監視予測システムの導入を図る一方、信頼性向上のため、異常が発生した場合には性能・機能の縮退による相互バックアップを行なうマルチ計算機システムを採用してきている。



注：略語説明 BWR(沸騰水型原子炉), CRT(Cathode Ray Tube)

図1 日立BWR計測制御設備開発の歩み 技術導入・国産化から改良標準化、高度化と進展する技術開発の流れのなかで、運転性の向上、高信頼化・合理化のために、デジタル化技術の進歩は大きな役割を果たしている。

\* 日立製作所大みか工場 \*\* 日立製作所日立工場 \*\*\* 日立製作所エネルギー研究所

また運転性向上のために、操作盤をコンパクト化するCRT (Cathode Ray Tube) タッチオペレーションの採用を図るとともに、適切なガイドを優先的に運転員に認知させる音声告知システムの適用や、高精度化に伴う運転余裕向上が期待できる改良型炉心監視予測システムの開発を進めてきた。

制御・自動化の面では、省力化の第一ステップとして、サブシステムの自動化に着手し、実績を積みながら、順次プラント起動・停止時の操作を中心に自動化適用範囲の拡大を図ってきた。一方、信頼性向上のため分散形制御システムの導入や、デジタル化技術、冗長化技術を基盤とする高信頼化制御装置の主要制御系への適用を図ってきた。また、安全系にもデジタル化技術を適用拡大するために、ソフトウェアを中心に高信頼度の設計を検証する手法を確立する研究を推進している。

計測・信号伝送の面では、まず系統ごとに計測信号の処理をデジタル化し盤のコンパクト化を進めてきた。更に、プラント現場に散在する各種のアナログプロセス信号を現場で集約しデジタル化し、光ケーブルを介して中央制御室へ光

多重伝送する方式を実用化するとともに、この技術をプラント全体に適用拡大して、合理的かつ高信頼度の情報伝送ネットワークを実現するための研究を進めている。

### 3 総合デジタル監視制御システム

#### 3.1 総合化のねらいと手法

高信頼化の面から各系統ごとの計測制御を可能とし、故障の影響の少ない分散構成とする。更に、統括する上位システムを設置することにより、それらを階層化して情報の流れを整理する。主要制御系統はプラント稼働率向上の観点から、重要性に応じて冗長化する。構成要素であるハードウェアはマイクロプロセッサを中核として、標準化及びモジュール化し、各システムはそれらのモジュールをブロック的に組み合わせることで構築し、固有のソフトウェア機能をもたせる。これにより機能改善の際には、ソフトウェアの追加・変更を容易に行なえるほか高度の制御や診断機能を組み込むことができる。

運転性向上のためには、自動化を拡大して運転員の負担軽

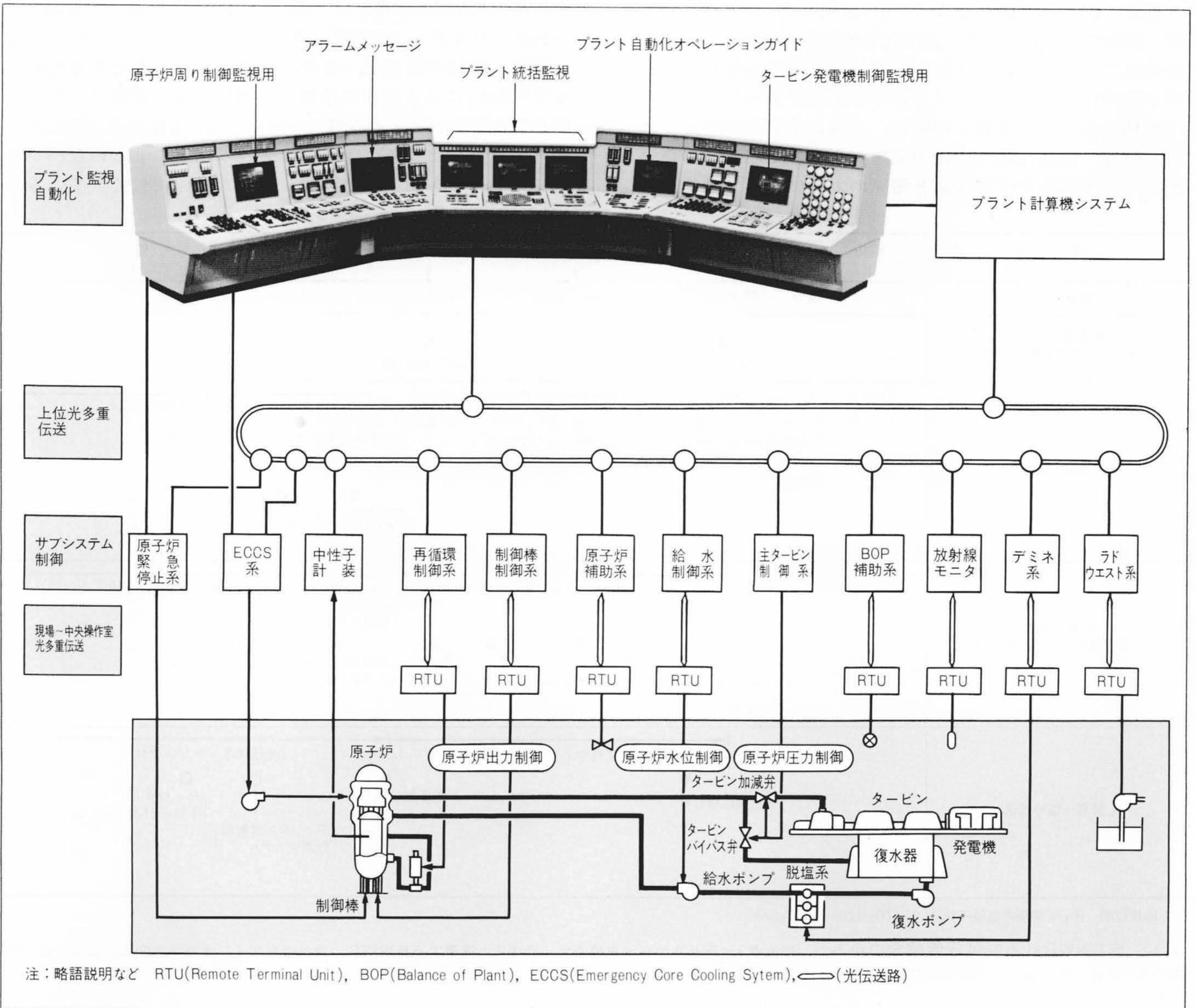


図2 総合デジタル監視制御システムの基本的な構成 下位では、サブシステムレベルの計測制御を分散して独立に行なう。各サブシステムの情報を光多重伝送を介して集約し、プラントレベル監視及び統括制御を上位で行なう。

減を図る。また、光多重伝送によりプラントの多量の情報を集約し計算機システムと結合することにより、摘出・整理した品質の高い情報を運転員に提供し、監視及び操作を容易にする。また、制御性の向上のために、運転状態に応じて制御方式を変更する適応制御などの高度制御技術をサブシステムへ適切に採用する。

3.2 システムの基本構成

以上のねらいと手法を具体的に実現する構成を図2に示す。本図に示す構成は日進月歩のハードウェアやソフトウェア技術の実用化可能レベルにより柔軟に改良されるべきものであるが、基本的な枠組みとしては変わらない。ここでは、デジタル化技術及び光多重伝送技術を常用系へ適用した場合を例にとり、具体的構成を示す。

まず、給水制御系、原子炉補助系などサブシステムレベルで制御装置を分散させ、系統単位の分離自立性を確保し、プラント全体の信頼性向上を図る。各サブシステム制御装置はデジタル化し、自動化技術、高度制御技術の適用を容易にする一方、標準化、モジュール化された構成要素で構築し、保守性、拡張性の向上を図る。給水制御系、再循環流量制御系、タービン制御系、制御棒制御系などは重要度に応じ制御装置及び信号伝送路の冗長化を図る。

常用系では、中央制御室設置のサブシステム制御装置と現場設置の計測制御機器は、RTU(Remote Terminal Unit)を介して光多重伝送で結ぶが、高速の応答を要求される系統の一部は、従来の直接配線を考慮する。非常用系も従来どおり直接配線とする。

集約監視に必要なサブシステム状態を表わす情報を、高速光多重伝送を介して上位の構成要素であるプラント計算機や統括制御盤に伝送する。運転操作性向上のため、集約されたプラント情報に基づき、プラント計算機は総合的な判断を行

表1 自動化範囲の拡大 BWR-5で主要操作の自動化適用を図り、実績を積みながら順次、補機操作、異常時対応動作とABWRに向けて適用拡大を検討している。

自動化項目		BWR-4	BWR-5	ABWR
起動前操作	起動前チェック	—	—	△
	補機系起動操作	—	—	△
起動・停止操作	制御棒操作	—	—*	○
	タービン発電機操作	—	○	○
	給復水系操作	—	△	○
	補機操作	—	△	○
定常運転操作	負荷変更操作	—	○	○
	サーベイランス	—	—*	△
	中性子計装系較正	—	—	○
異常時操作	スクラム後操作	—	—	△

注：記号説明 —(手動操作), △(一部自動化), ○(自動化拡大), \*(ガイド)

なう一方、デジタル化したサブシステム制御装置は自動化機能を分担し、プラント計算機の負担を軽減し、自動化の拡大を容易にする。自動化技術は、表1に示す項目について順次適用の拡大と、将来での少人数運転体制の確立を図る計画である。

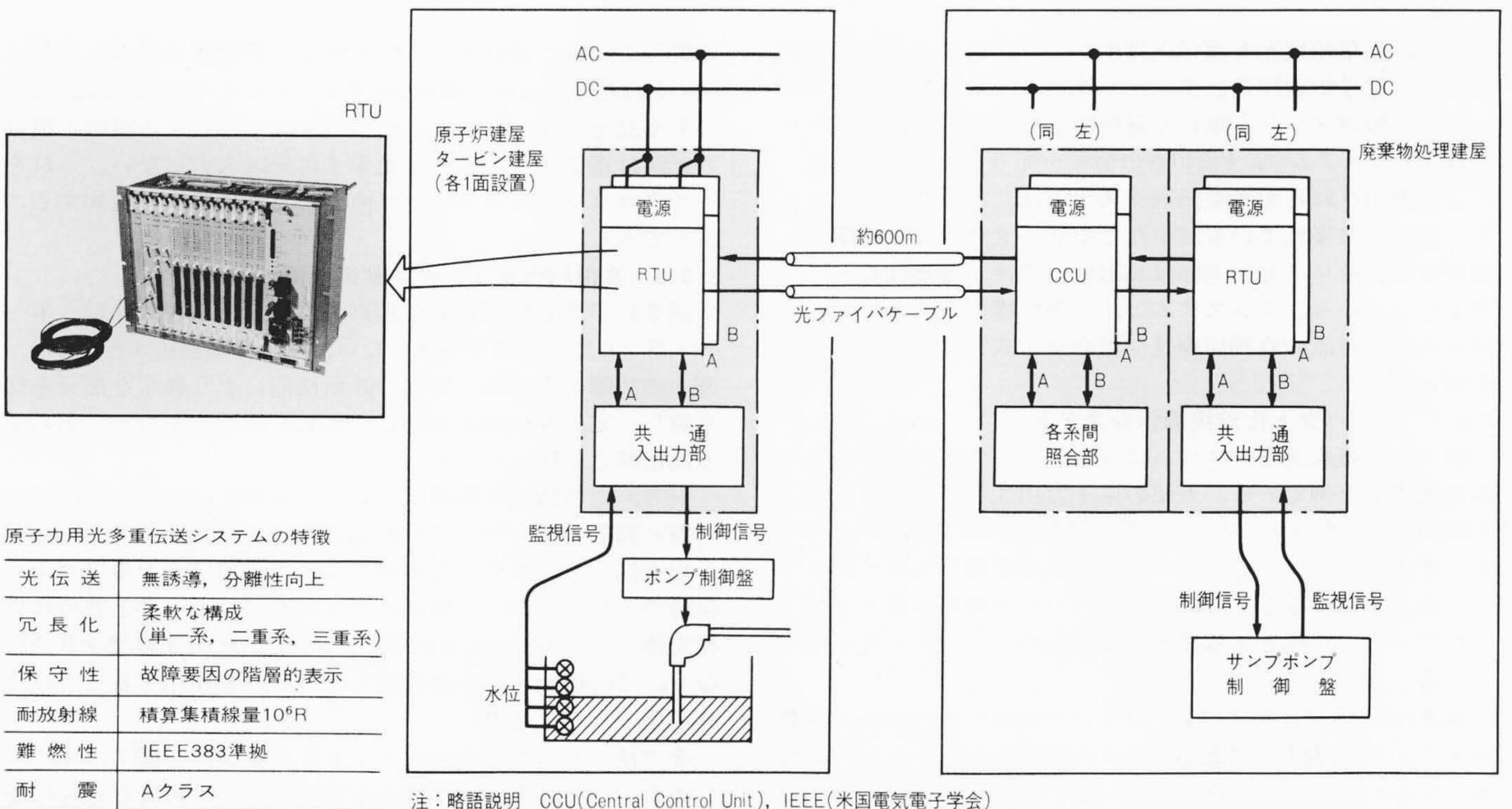
以上述べた総合デジタル監視制御システムとすることにより、信頼性、運転操作性及び制御性の向上を従来のアナログ制御装置に比べ容易に達成できる。

3.3 最近の代表的適用例

総合デジタル監視制御システムは、技術の進歩に合わせて小規模な構成から段階的に範囲を拡大していくことが望ましい。以下に最近の代表的な適用例を述べる。

3.3.1 原子力用光多重伝送システム<sup>3)</sup>

総合デジタル監視制御システムの基幹となるものの一つ



原子力用光多重伝送システムの特徴

光伝送	無誘導, 分離性向上
冗長化	柔軟な構成 (単一系, 二重系, 三重系)
保守性	故障要因の階層的表示
耐放射線	積算集積線量10 <sup>6</sup> R
難燃性	IEEE383準拠
耐震	Aクラス

注：略語説明 CCU(Central Control Unit), IEEE(米国電気電子学会)

図3 原子力用光多重伝送システムの廃棄物処理設備への適用例 排水ポンプ約60台分の制御を行なうために、約340点の信号を、原子炉建屋及びタービン建屋と廃棄物処理建屋間数百メートルを光ファイバケーブルで伝送する。高信頼化のため、二重化構成並列運転方式とするほか、電源も交流・直流切替付き合せ方式を採用している。

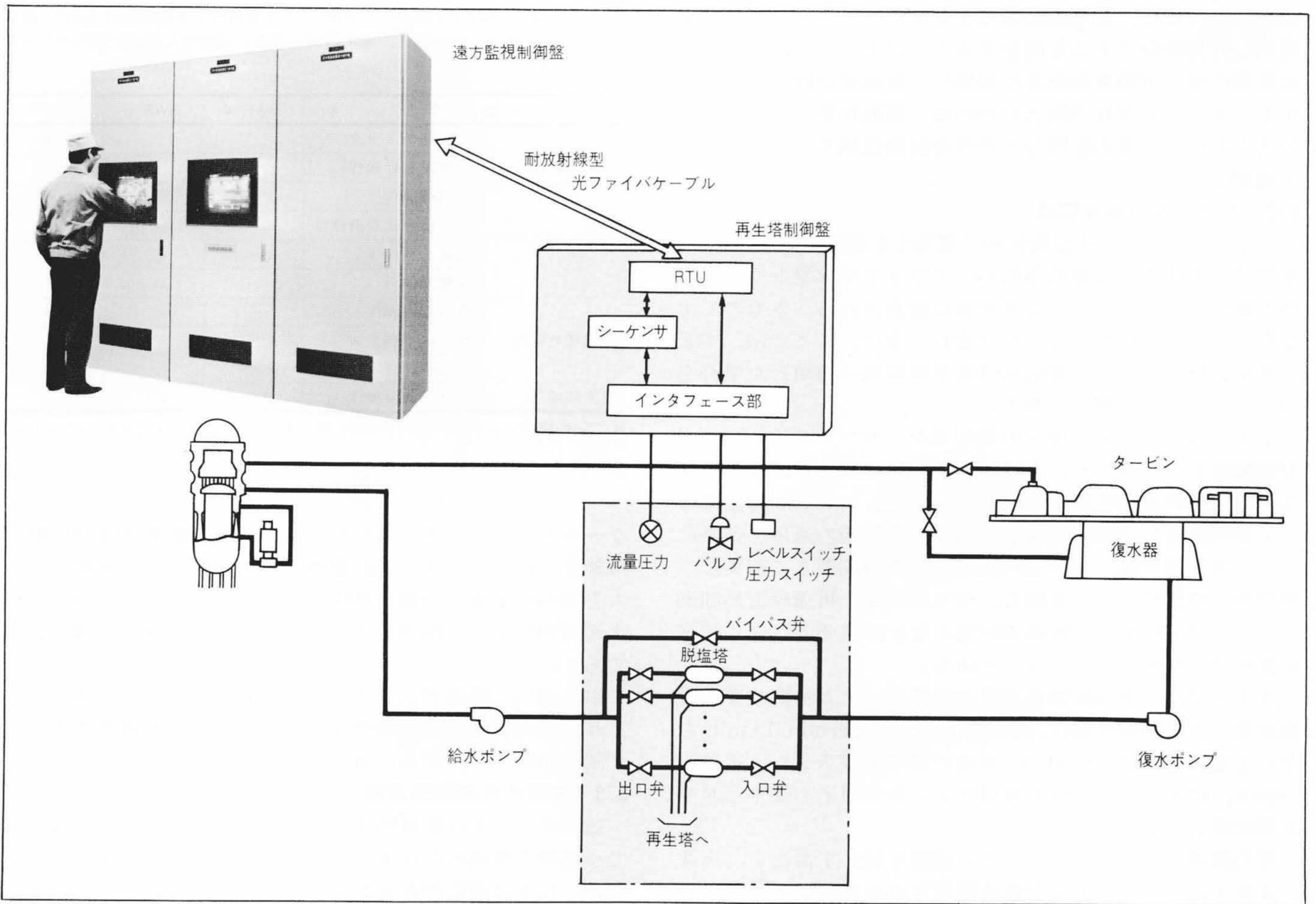


図4 コンパクト化監視操作システムの復水脱塩システムへの適用例 現場～制御室間約350mを、約820点の信号が光ケーブルを介して伝送される。CRTタッチオペレーションを全面的に適用し、操作盤上の表示灯及びスイッチを基本的になくしている。CRTは2台搭載し、系統表示とスイッチ表示を分担するとともに、相互にバックアップしている。

として、高信頼度光多重伝送技術がある。図3にその適用例を示す。原子炉建屋及びタービン建屋にある多数の排水用ポンプを、数百メートル離れた廃棄物処理建屋内の操作室から制御するシステムで、約340点の信号を光多重伝送している。ここで使用される光多重伝送システムは、本質的に耐ノイズ性・分離性に優れているばかりでなく、柔軟な冗長化構成、高保守性、そして光伝送路は高耐放射線性、難燃性などの特徴をもっている。本システムは、二重化構成とするほか、電源も交流・直流の自動切換及び付合せ方式を採用し高信頼化を図っている。

### 3.3.2 コンパクト化監視操作システム

図4は、復水脱塩システムにコンパクト化監視操作システムを適用した例である。上記の原子力用光多重伝送システムを採用し、少ないケーブルで多量の情報を伝送するほか、CRTタッチオペレーションなどの高度化技術を取り入れてマンマシン性を向上するとともに、従来のリレー回路に代わりマイクロプロセッサ化とすることにより盤のコンパクト化を図っている。

図5はCRTタッチオペレーションの画面の例である。多数のスイッチをCRT上に表示しタッチ操作を行なうことにより、あらかじめ計算機に記憶された多数の系統図から選択したり、あるいはサブループの状態表示などを行なうことができる。

CRTタッチオペレーションの原理は以下のとおりである。CRTの前面に、発光素子と受光素子を一对の組合せとして一

定間隔で縦横に規則正しく配列する。発光素子はあらかじめ定められた順番に従い順次ONする。もしそのときCRT画面上のある点を指差していると、指の位置に相当する縦軸と横軸の光路は遮ぎられ、当該受光素子に光は入力しない。これをマイクロコンピュータにより検出し、指の位置を検知することができる。

### 3.3.3 高信頼化デジタル制御装置

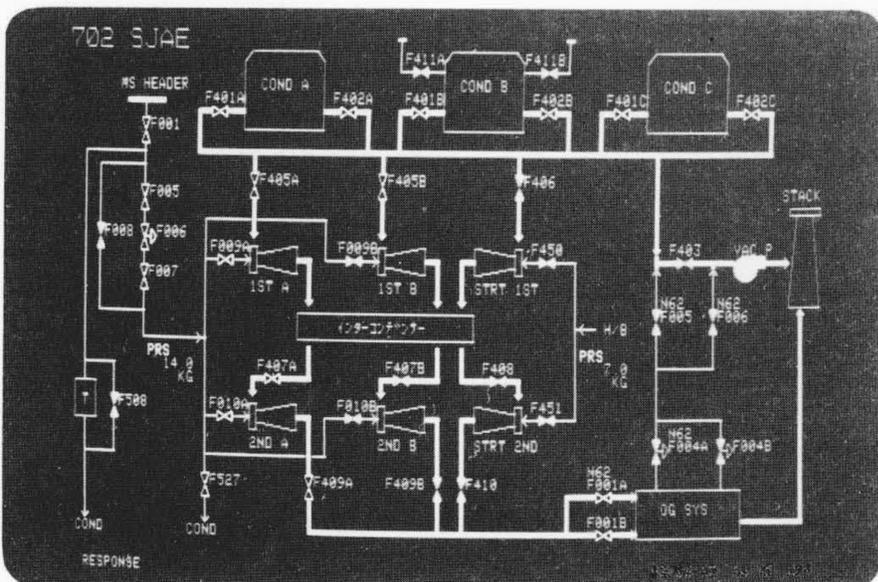
図6に示す主要制御系用制御装置は三重系構成とし、単一のトラブルでは機能を喪失しないように考慮を払うとともに、万一の故障の際には、高度の診断機能により異常な部分を切り離し、冗長な機能を縮退して運転を続行するなど、あらゆる高信頼化を図っている。

一方、この機能を既設プラントに適用するためには、既設の盤と同等のスペースに収める必要がある。そこでコンパクト化を図ったシステムを開発した。その中核となるプロセス信号の入出力部は、三重系のマイクロプロセッサと並列に情報交換し、プロセス出力信号に対する2 out of 3 論理演算を行なう。この機能を半導体技術を駆使し高集積化することにより小型・合理化した。

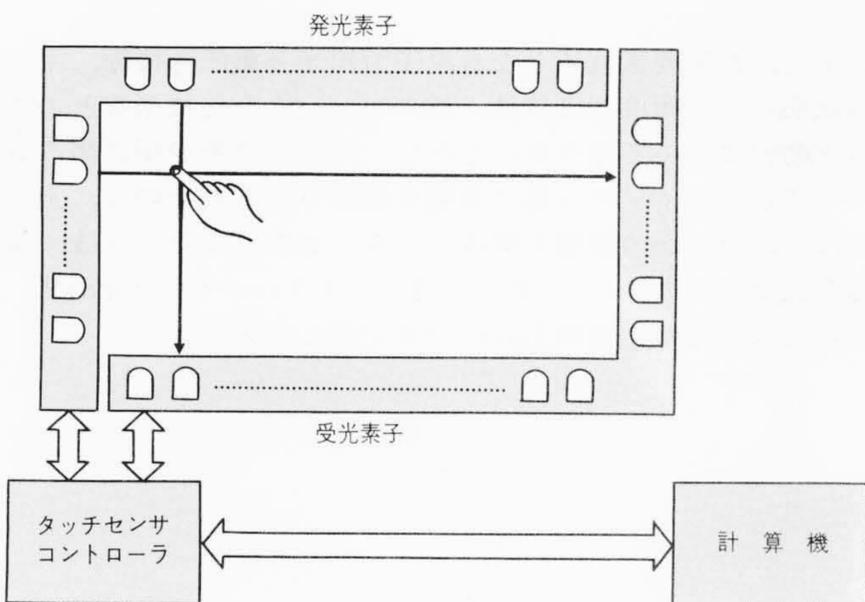
その他、最近の代表的なデジタル化製品を図7に示す。走行式中性子束校正装置は中性子検出器の感度変化を校正用の検出器を用いて比較校正し、プロセス計算機の炉心監視予測計算に寄与するものである。本装置では、マイクロプロセッサの機能により、操作を自動化し省力化するとともに、

系統一覧			
系統番号	系統	系統番号	系統
A32	所内電源系	N41	発電機系
B22	原子炉系	N43	発電機冷却系
B35	再循環系	N44	発電機密封油系
E51	原子炉隔離時冷却系	N62	オフガス系
G33	原子炉浄化系	N71	循環水系
N11	主蒸気系/補助蒸気系	P41	補機冷却海水系
N21	給水系/復水系/復水器空気抽出系	P42	原子炉補機冷却系
N33	タービンランド蒸気系	P43	タービン補機冷却系
N36	抽気系	P61	所内蒸気系

(a)



(b)

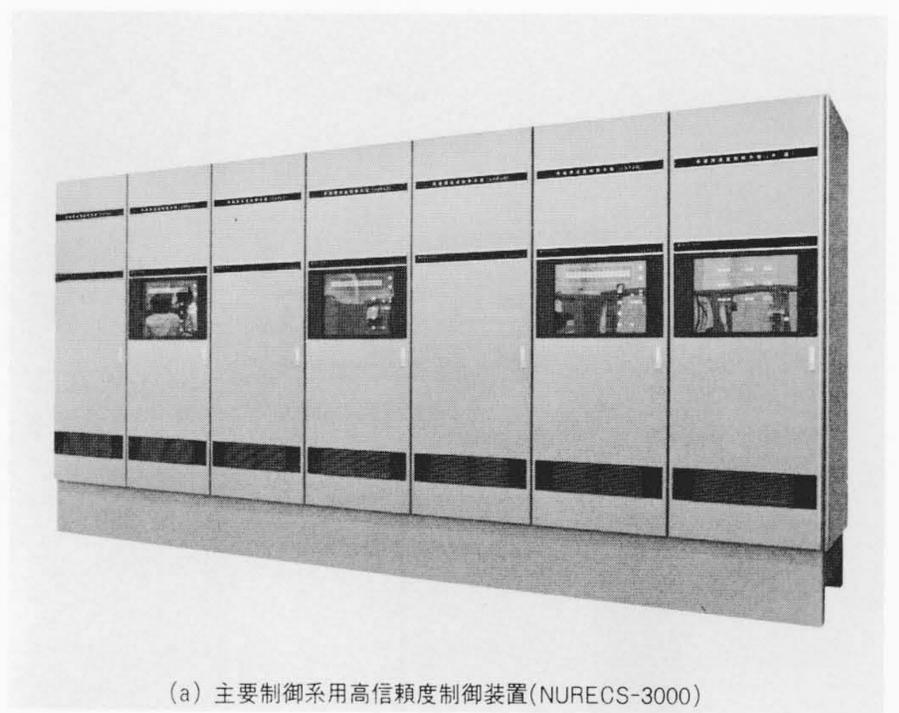


(c)

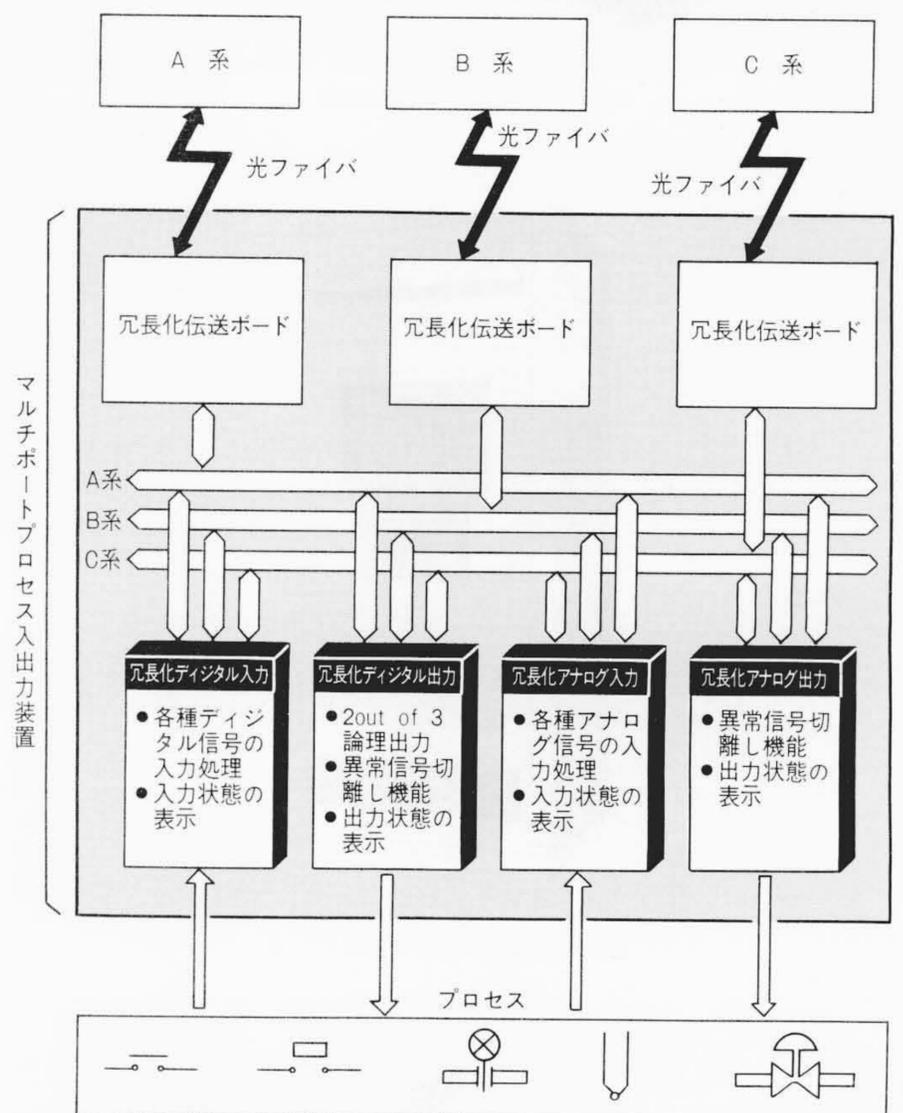
図5 CRTタッチオペレーションの画面例と動作原理 (a)はCRTの画面選択スイッチの表示であり、希望のスイッチに指を触れることにより選択できる。(b)選択された画面により、サブシステムの状態を表示することができる。(c)CRTの前面に発光素子と受光素子を並べて、光路が指で遮られる位置を検出する。

測定時間も数分の一以下としている。

スクラムタイミングレコーダは、制御棒動作の健全性を計測するものであり、定期検査時の詳細なデータ処理やスクラム発生時の全制御棒の動作監視の作業を省力化する。従来は放電記録計を用い、データの読み取り、計算、レポートの作成などを人手に頼っていたが、これを完全自動化している。



(a) 主要制御系用高信頼度制御装置(NURECS-3000)



(b) コンパクト化システムの基本構成

図6 主制御用高信頼度制御装置 (a)給水系、再循環系、タービン制御系用制御装置として三重化し、2 out of 3 論理により高信頼化している。(b)既設リブス用としてコンパクトな制御装置を開発した。その中核は信号の選択部を高集積化し合理化したマルチポートプロセス入出力部である。

更に、この情報を上位計算機に結合し、より合理化された高度の情報処理システムを実現するよう検討を進めている。

デジタル放射線モニタ<sup>4)</sup>は、マイクロプロセッサの機能によりハードウェアを標準化し、保守性を向上させている。また、前置増幅器と計数率計間を光信号伝送とし耐ノイズ性を向上させている。



(a) 走行式中性子束校正装置



(b) スクラムタイミングレコーダ



(c) デジタル化放射線モニタ

図7 最近のデジタル化計測制御装置 (a) 中性子検出器の感度変化を校正用の検出器を用いて比較校正する。操作と記録の自動化を図っている。(b)スクラム時の制御棒の動作状態を計測し、データを自動編集し出力する。(c)デジタル技術により放射線モニタのハードの標準化と計測精度の向上を図っている。

#### 4 今後の課題

更に、運転性、信頼性の向上と合理化を図っていくためには、以下の課題を解決していく必要がある。

##### 4.1 安全保護系のデジタル化

テスト機能を強化し、2 out of 4 論理を採用すると、従来のリレーロジックではハードウェア量が膨大となる。そこで、マイクロプロセッサを適用しハードウェア物量の増大を抑制する必要がある。安全系にはより高いシステム信頼性が要求されるため、ソフトウェアの開発から検証に至るまでの基準<sup>5)</sup>を確立するため、現在検討を進めている。

##### 4.2 自動化拡大とマンマシンインタフェースの高度化

運転及び点検保守の省力化のため、原子炉の主要な起動・停止操作を中心に自動化を進めてきた。今後はその範囲を広げ、起動の準備や運転中の操作あるいは将来原子力に要求される自動出力制御の範囲の拡大にも対処していく必要がある。その場合、運転信頼性の面から、各系統にまたがる操作の協調性や階層構成の上位と下位の機能分担と整合性が重要となる。

一方、マンマシンインタフェースで重要なことは、いかに最適な情報をあらゆる運転局面で提供できるかにある。マンマシン性のいっそうの向上を図るソフトウェアの研究を推進中であるが、運転員の意見を反映し開発を行なう必要がある。

#### 5 結 言

以上、計装制御設備の技術動向をサーベイし、系統ごとのデジタル化からそれを組合せ統合し、高度のメリットを追求する総合化へと研究開発を進めるねらいと経緯を明らかにした。

また、基幹要素技術となる原子力用光多重伝送技術、主要制御系用高信頼度制御技術、盤のコンパクト化技術などの実用化動向について述べた。しかし、更にこれを適切に組み合わせる総合デジタル化の真価を発揮させるためには、上述のほか、幾つかの課題を解決してゆく必要がある。今後、電力会社などの助言・べんたつを得て、よりいっそうの経済性、信頼性及び運転性の向上に向けまい進したい。

#### 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) 若林, 外: 原子力発電所デジタル制御システム, 日立評論, 65, 9, 619~624(昭58-9)
- 3) 野口, 外: 最近のBWR用計測制御システム, 日立評論, 66, 4, 323~326(昭59-4)
- 4) K. Mizuno, et al.: The Micro-Processor Controlled Process Radiation Monitoring System for Reactor Safety System, IAEA-SM(Nov.1984) Use of Digital Computing Devices in Systems Important to Safety.
- 5) ANSI/IEEE-ANS-7.4.3.2-1982, Application Criteria for Programmable Digital Computer Systems in Safety Systems of Nuclear Power Generating Stations.