

最近の発電プラント用デジタル制御システムの動向

Recent Trends of Digital Control Systems for Power Plants

最近の火力、原子力発電プラントを取り巻く諸情勢は、長期的な原油の価格及び供給の不安定化に対応して急激に変化している。それとともにプラント制御システムに課せられた技術課題はますます高度化、複雑化しており、半導体素子の進歩に支えられたデジタル制御技術の有効性が一段と高まっている。

本稿はデジタル制御システムの発展過程と特長について述べ、それぞれのプラントのもつ制御課題との関連を明確にしなが、火力、原子力プラントへのデジタル制御システム適用の現状と将来の動向について述べる。

太組健児* *Kenji Takumi*
 松村重兵衛** *Jūbē Matsumura*
 加藤洋明*** *Yōmei Katō*
 渡部篤美**** *Atsumi Watanabe*

1 緒言

最近のデジタル制御技術の進歩により、従来アナログ制御装置及びリレーケンスによって実施されていた発電プラントの制御が、しだいに制御用計算機を含む広義のデジタル制御システムに置き換えられつつある。

デジタル制御システムは従来の制御システムに比べて制御性能、信頼性、保守性などの諸点で優れ、特に信号伝送装置との結合が容易という長所があり、今後の大規模な発電プラント制御システムとしてますます多用されてゆくものと考えられる。

デジタル制御システムは、水力プラントでも既にデジタル調速機制御装置などの形で実用化されているが、本稿はその導入が最も進んでいる火力、原子力プラントに焦点を絞って、適用の動向について述べる。

2 デジタル制御システムの発展

2.1 ハードウェア技術の進歩

デジタル制御システムを構成する装置のハードウェアは、LSIに代表される半導体技術の進歩により、信頼性及び性能が大幅に向上してきている。このハードウェア技術は、図1に示すように大きく二つのグループに分かれて発展してきている。

第1のグループは、情報の集中管理を目指した高速の制御用計算機(以下、計算機と略す。)である。この計算機はパラレル処理あるいはパイプライン処理などの処理技術を駆使して高速化を図っているが、音声や画像処理などの特殊処理をファームウェアとして内蔵し、更に高機能化を図る場合もある。

第2のグループは、高性能汎用マイクロコンピュータ(以下、マイクロコンピュータと略す。)であり、メモリや入出力装置を外付けにするマルチチップ構成をとっている。このマイクロコンピュータも半導体の高集積・高速化、低消費電力化、効率の良いオペレーティングシステムと高級言語の開発、などにより今後ますます性能が向上すると予想される。またこのマイクロコンピュータは、制御対象ごとの多様な制御機能を実施する上で強力な武器となっているが、今後の集積度の向上によりワンチップ化が可能になってゆくものと思われる。

更に、記憶装置の面でも大きな進展が見られ、主記憶装置

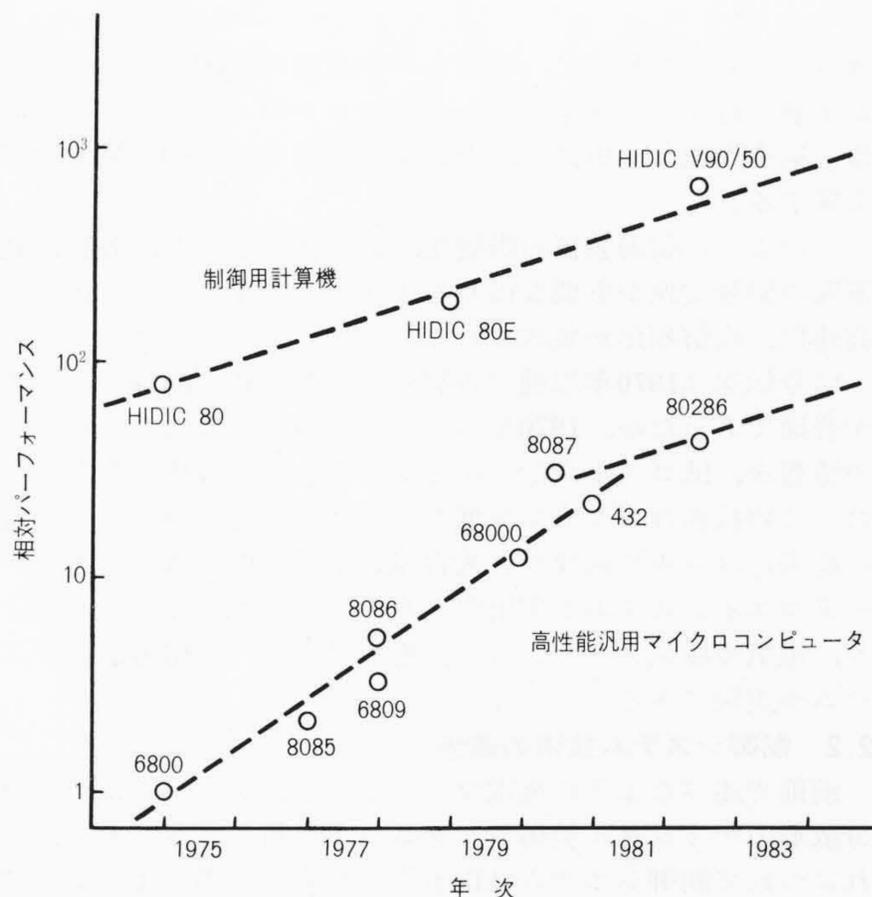


図1 制御用計算機とマイクロコンピュータの発展動向 マイクロコンピュータは10倍/5年の割合で性能が向上してきたが、最近では2倍/3年の割合となっている。

の最大容量も図2に示すように、20倍/5年から10倍/5年の割合で増加し、1981年には最大8Mバイトを実装した計算機が出現してきている。

このようなハードウェア技術の進歩により、かねてから日立製作所が積極的に推進し、実用化を達成したように従来アナログ制御装置が使用されていた部分にもマイクロコンピュータをベースとしたデジタル制御装置が用いられるようになり^{1),2)}、計算機と組み合わせた階層分散形構成が主流になりつつある。

図3はこの構成の概念を示したもので、制御・保護など実際のプロセスの操作に直接かかわる最下位の第3階層は危険

* 日立製作所原子力事業部 工学博士 ** 日立製作所電力事業部 *** 日立製作所エネルギー研究所 **** 日立製作所日立研究所

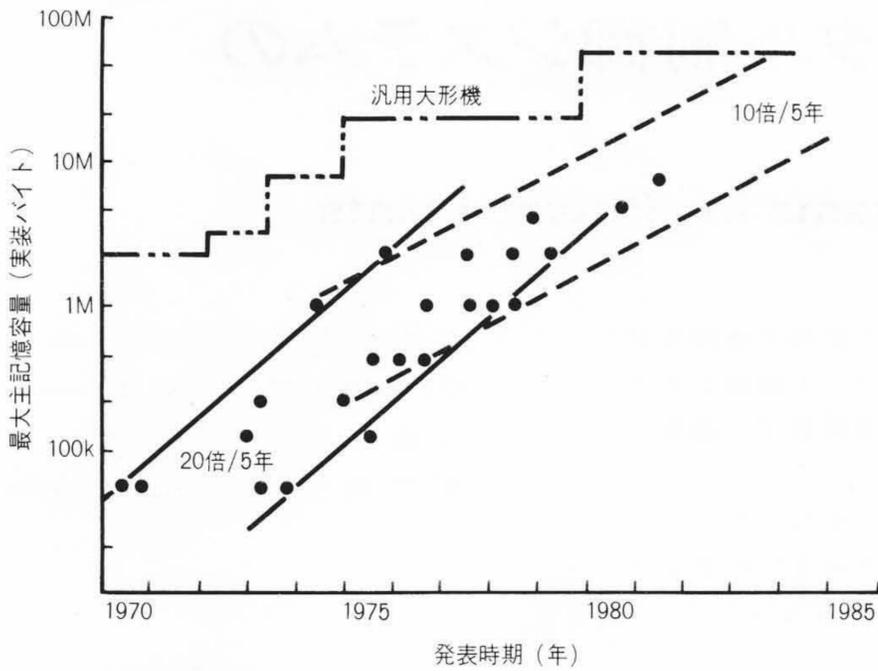


図2 制御用計算機の主記憶容量推移 制御用計算機の最大記憶容量は、20倍/5年から10倍/5年の割合で増大の一途をたどっている。

分散のため分散配置し、これらの相互間の協調はその上の第2階層で行なう。発電プラントでのマンマシン連係などの情報の集中管理は、更にその上の第1階層で一元的に集約して実施する。

このように制御装置の階層化、分散化が進むと、各制御装置間の信号交換が重要な役割を担うようになり、信号伝送の高速化、高信頼化が要求される。

信号伝送は1970年以前は各制御装置間の個別配線によるのが普通であったが、1970年代に入り広域に分散したプロセスの情報を、低コストで伝送するシリアル伝送技術が開発された。この技術はますます発展しており、発電プラントでも近い将来には音声や画像など大容量の情報を取り扱う光方式データウェイシステムが実用化されると予想される。これにより、電気や磁気ノイズに強く、応答性の優れた信号伝送システムが実現できる。

2.2 制御システム技術の進歩

前節で述べたように発電プラントの制御システムは、階層分散形のデジタル制御システムへと移行してきており、それにつれて制御システム技術も大きな変貌を遂げようとしている。

表1に制御上のニーズに対応したデジタル制御システムの特長を示し、以下にその内容について説明する。

表1 デジタル制御システムの特長 制御上の各ニーズに対応したデジタル制御システムの特長を示す。

制御上のニーズ	デジタル制御システムの特長
制御性の向上	高度な制御・判断機能 (予測・適応制御など)
信頼性・保守性の向上	素子の少数化による固有信頼性の向上 多重化構成、自己診断機能によるシステム信頼性の向上 特性の経年変化、ドリフトなし プラント設備診断
柔軟性・拡張性の向上	制御特性、ロジックの変更追加が容易
大規模システムの集中管理	豊富な周辺機器 高速データ処理機能 データ伝送装置との結合が容易



図3 階層分散形制御システム概念 オペレータの管理する情報は中央に集中化され、制御・保護機能は制御対象ごとの分散化が進む。

(1) 制御性の向上

従来のアナログ制御では、古典的な比例・積分制御が中心であったが、デジタル制御ではその記憶能力と演算処理性を生かした学習制御や最適制御などの新しい制御技術が開発されている。その一例として日立製作所はプラントの特性モデルを制御装置に内蔵し、そのモデルを参照しながらカルマンフィルタを用いて状態量の将来変化を予測し制御する予測制御技術³⁾や、プラントの特性変化をオンラインで逐次同定しながら制御する適応制御技術をいち早く開発し、これを実際の火力プラントに適用して良好な結果を得ている。

図4にその一例を示す。

(2) 信頼性・保守性の向上

制御システムとプラント自体の両面で信頼性・保守性が向上している。まず制御システムに関しては、半導体の集積度の向上による使用素子数の減少、及び重要処理部分の多重化によって高信頼化を図るとともに、装置自体に自己診断機能

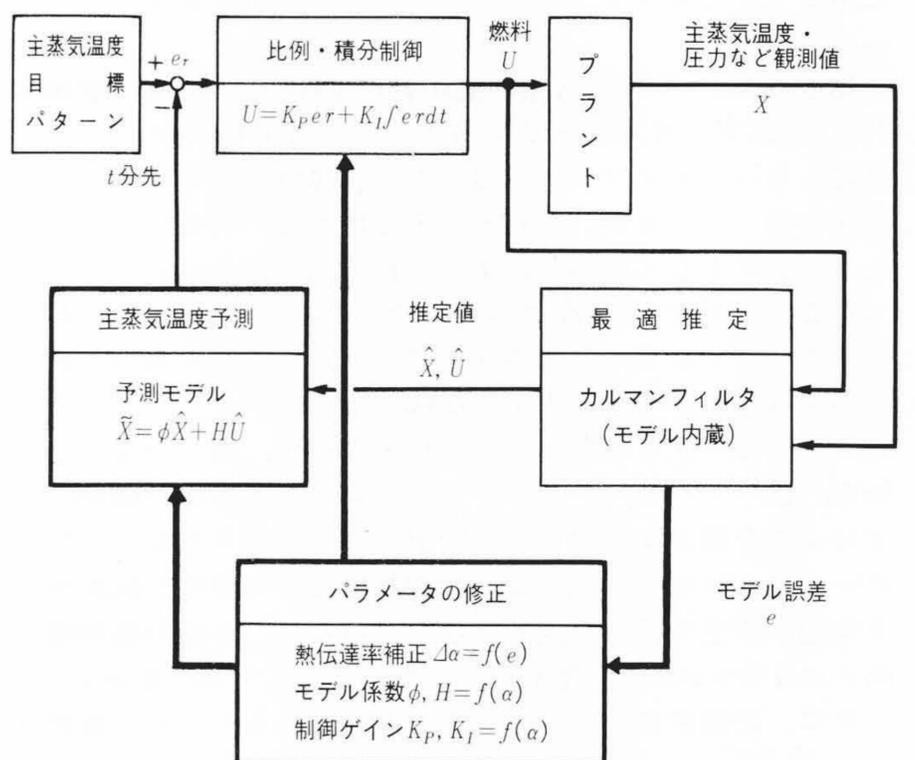


図4 主蒸気温度適応予測制御方式 t分先の最も確かな状態変数X-hatをカルマンフィルタ理論によって予測し、目標パターンと比較して制御することを特徴とする方式である。

をもたせることによって信頼性・保守性の向上を図っている。また、デジタル演算の特質として特性の経年変化やドリフトがない。

次にプラント自体に関しては、計算機の高度な論理判断機能を利用して、熱応力や振動などのプラントの異常原因の分析や機器性能の劣化判断などの技術が開発されてきている。

(3) 柔軟性・拡張性の向上

環境付帯設備の追加やプラント運用方式の変化などに伴って、制御ロジックは運転開始後も追加変更される場合が多い。デジタル形の場合にはビルディングブロック式に規模を拡張でき、ソフトウェアの追加・変更だけで制御ロジックの変更ができる。

(4) 大規模システムの集中管理

デジタル技術に基づく信号伝送技術やマンマシン関係用機器の進歩によって、大規模システムでも情報の集中管理が容易になっている。

3 火力プラントデジタル制御システムの動向

3.1 火力でのデジタル制御システムの必要性

原油の価格は、最近やや低下したとはいえまだ高水準にあり、火力プラントでは脱石油化が推進されて、新設火力のほとんどが石炭燃焼、又はLNG(液化天然ガス)燃焼になるとともに、既設火力でも両者への燃料転換が各所で急ピッチで進められている。

また、限られた燃料の有効利用のため、プラント高効率化の要求が一段と強くなり、新形式の高効率プラントとしてガスタービンと蒸気タービンとを組み合わせたコンバインドプラントが登場して既に実用運転に入っており、従来から主蒸気圧力を一段と高めた超々臨界圧火力も計画段階に入ってきた。

更に、原子力プラントの建設が進められ、電力系統全体に占める原子力比率が増大する結果、従来大容量火力が担っていた基底負荷が原子力に置き換えられ、大容量火力といえども中間負荷運用、更にはDSS(Daily Startup and Shutdown :

毎深夜起動停止)運用を余儀なくされる事態となってきた。

しかし一方で、火力プラントはなお我が国の電力事業を支える最大の柱であり、電力供給信頼性の確保はもとより、運転員の少数化、環境規制への対応、発電所運営の合理化などの従来ニーズに対してもいっそうの努力を傾注しなければならないことはもちろんである。

このような現在の火力プラントを取り巻く諸情勢を考えると、プラント制御システムに課せられた技術課題は、多面的かつ高度なものである。これらの諸課題は前述のデジタル制御システムの利点なくしては解決が極めて困難であり、その導入に拍車がかかっているゆえんである。

図5に現在の火力が直面する諸情勢とデジタル制御技術の関連を示す。

まず、図5で石炭火力は石油火力に比べて特に微粉炭ミルを含む燃料系の応答が遅く、遅い動特性の克服が第1の技術課題となり、DSS火力やコンバインド火力に要求される急速起動のニーズと併せて、デジタル技術による予測・適応制御の適用が特に有効である。

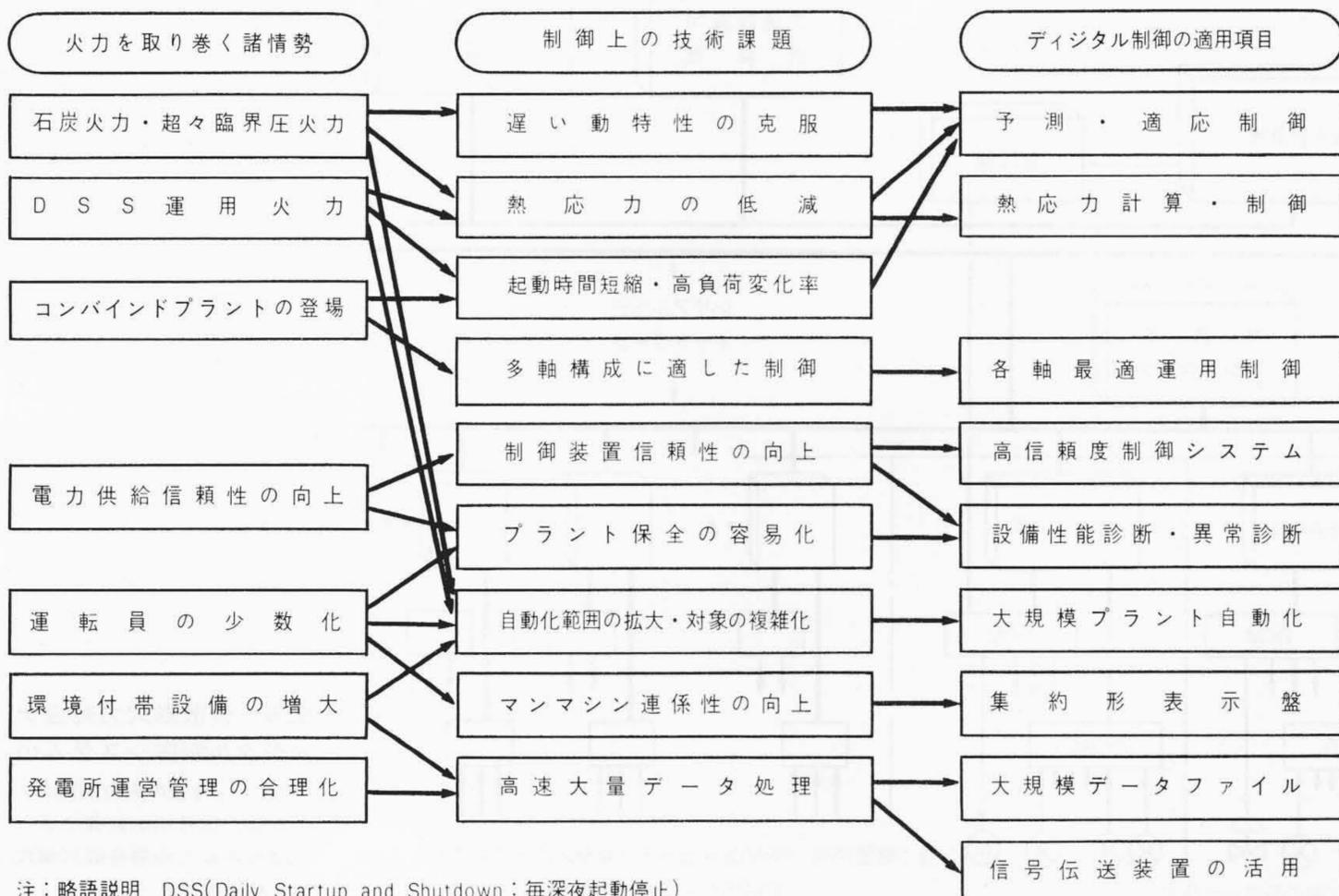
次に、耐圧部の肉厚の大きい超々臨界圧火力や、起動停止頻度の高いDSS火力では、ボイラやタービンの熱応力の低減が大きな技術課題であり、シミュレーション技術を応用した熱応力計算が大いに役立つ。

一方、高信頼性火力として要求される制御装置信頼性の向上、及びプラント保全の容易化に対しては、デジタル技術のもつ素子の少数化による固有信頼性の向上、冗長化によるシステム信頼性の向上、設備性能・異常診断による保全性の向上などの利点が活用できる。

更に、自動化範囲の拡大と対象の複雑化、マンマシン関係性の向上、高速大量データ処理といった運転、管理面の課題に対してもデジタル技術は必要欠くことのできないものとなっている。

3.2 火力プラント制御への適用の現状と今後の動向

火力プラントユニットの全体制御としてのユニット計算機



注：略語説明 DSS(Daily Startup and Shutdown : 毎深夜起動停止)

図5 火力を取り巻く諸情勢とデジタル制御技術の関連 最近の火力を取り巻く情勢による制御技術課題は、デジタル制御技術の適用によって解決できる。

による自動化は、既に十数年にわたる歴史を経て年々その取扱範囲と深さを拡大してきているが⁴⁾、最近では石炭燃焼プラントでも全自動起動停止を含む高度な自動化が達成されている。

中央制御室でのマンマシン関係の点でも、制御盤の小形化、CRT(ブラウン管表示装置)によるプラント状態の集約表示、音声告知装置による音声情報の利用など、少人数の運転員でプラントの運転監視ができるように種々の改善が図られている。

日立製作所はマイクロコンピュータを応用した小形、専用のデジタル制御装置の重要性に早くから着目し、鋭意開発を進めた結果、表2に示すように他社に先駆けてデジタル制御装置のラインアップを完了し⁵⁾、多数の製作、納入実績をもっている。

デジタル制御装置は各種用途のものが開発され、ほとんどプラントの全制御に対して適用可能となっているが、このような制御システムでの計算機を含む各装置間の信号伝送は、

表2 デジタル制御装置製作実績 日立製作所は火力及び原子力プラント用デジタル制御装置を多数製作、納入済みである。

制御装置名	納入第1号機		製作セット数			
	納入先	納入年	納入済み	製作中	合計	
火力プラント用	主タービン用電子油圧ガバナ	昭和発電株式会社 市原#6 175MW	1977	8	17	25
	給水ポンプタービン用電子油圧ガバナ	カナダ・バトルリバー #5 375MW	1979	9	8	17
	タービン昇速制御装置	カナダ・ポプラーリバー #2 300MW	1977	18	12	30
	ボイラ自動制御装置	電源開発株式会社 竹原#1 250MW	1978	17	13	30
	自動バーナ制御装置	キューバ・カルロス・ド・セスペデス #3 169MW	1977	27	8	35
	補機シーケンス制御装置	電源開発株式会社 松島#1 500MW	1980	5	5	10
原子力プラント用	主タービン用電子油圧ガバナ	—	—	0	2	2
	給水ポンプタービン用電子油圧ガバナ	東京電力株式会社 福島第二#4 1,100MW	1983	2	2	4
	原子炉給水流量制御装置	—	—	0	1	1
	原子炉再循環流量制御装置	—	—	0	1	1
	自動出力調整装置	東京電力株式会社 福島第二#4 1,100MW	1983	1	0	1
	制御棒動作時間記録装置	—	—	0	1	1
	走行形中性子束校正装置	東京電力株式会社 福島第二#2 1,100MW	1981	2	0	2
	制御棒制御監視システム	同上	1981	2	0	2
	自動燃料交換機	東京電力株式会社 福島第一#4 784MW	1976	3	1	4
	制御棒駆動装置自動交換装置	日本原子力発電株式会社 東海#2 1,100MW	1977	5	1	6
	遠隔自動・半自動供用期間中検査装置	同上	1980	2	1	3

注：実績は1983年4月現在

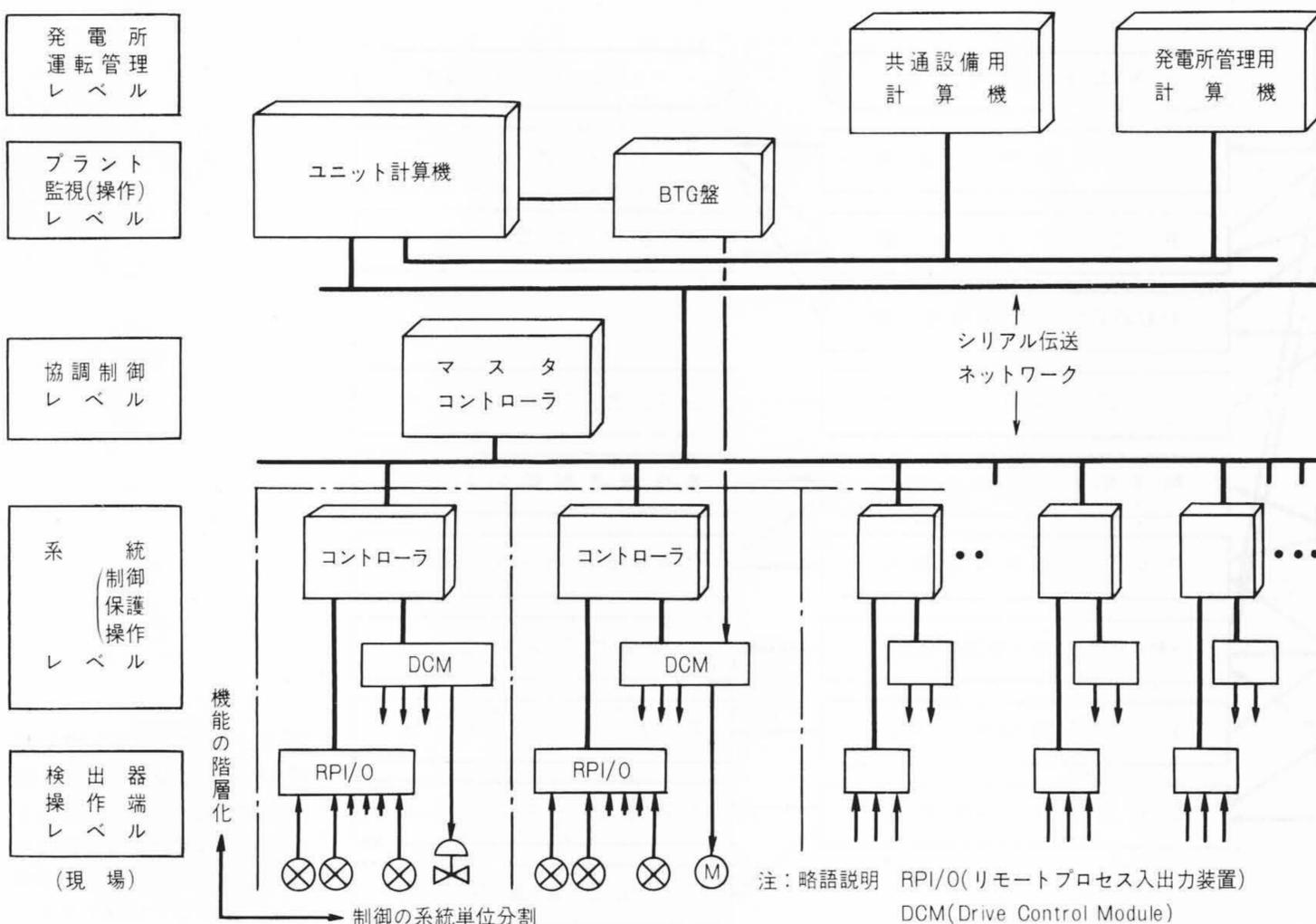


図6 分散形火力総合デジタル制御システムの一例 今後の火力制御システムは、信号伝送装置によって結合された階層分散形構成へと移行してゆく。

専用のシリアル信号伝送装置を用いることが効率的であり、現在既に700MW石炭燃焼プラントで実用化されている。

本方式は大規模制御システムに適したものであり、近い将来全面的なデータウェイに拡大されて、プラントトータルな分散形総合デジタルシステムとして採用される気運にある。

図6に本方式を採用した分散形火力総合デジタル制御システムの一例を示す。

火力制御の今後のもう一つの大きな課題は、機器異常診断の拡充と新センサの開発、ロボット技術の応用によるパトロールの省略など、更に徹底した高信頼性化、省人化にあると考えられる。

4 原子カプラントデジタル制御システムの動向

4.1 原子カプラント制御への適用

国内での原子カプラントは、現在稼働中の軽水炉型原子カ発電所だけでも24基(うち沸騰水型原子カ発電所は12基)を数えるに至っている。石油資源の乏しい我が国での原子カの比重はいっそう増大する傾向にあり、単機容量の増大化、よりいっそうの安全性向上及び信頼性向上のため、各種設備の高度化をもたらしている。一方、原子カ発電所では各種設備を中央制御室から監視制御する方式を採用しており、更に米国、スリーマイル島発電所の事故を契機として、より高度な運転信頼性への要求が高まり、監視制御設備も必然的に膨大になってきている。したがって、本設備の合理的設計により、運転信頼性を確保しながら運転員の負担低減を図ってゆくことが肝要である。このような状況の下で、原子カの運転制御面での課題と、その解決策としてのデジタル技術との関連は

以下のとおりである。

まず第1の課題は電力の安定供給のため、プラント諸設備自体はもちろんのこと、それを制御する監視制御装置の高信頼化を図ることである。それには、監視制御装置の単体としての信頼性向上はもとより、デジタル技術の応用による有機的な冗長設計により更に高信頼化を図ることが可能となる。この代表的な例はユニット計算機の冗長化構成、主要制御装置の多重化構成^{6),7)}などである。

第2には、プラント設備の膨大化による運転員の負担増大を緩和する必要がある。その解決策として、プラント運転の自動化及び運転ガイド装置の導入などが図られている⁸⁾。

第3には、発電総量に占める原子カ比率の増大により、原子カでも日負荷調整など出力調整運転の必要性が高まってきた。一方、プラント側としては燃料に厳しい熱的制限を設けて、その熱的制限内で運転することにより燃料の健全性を確保することが要求される。したがって、日負荷調整を実行するために、きめ細かな炉心監視と制御を行なう必要があり、これには従来のアナログ装置では困難であったデジタル特有の制御技術が有効に活用されている。

原子カプラントでは、各種の改良が図られ放射能の低減は目覚ましいものがあるが、保守点検に伴うある程度の被曝は避けられない。しかし、デジタル制御技術の導入による保守点検の自動化などで、被曝を更に低減することが可能であり、燃料交換装置の自動化、供用期間中の点検装置の自動化などが推進されている。

更に原子カプラントでは、各種の運転管理情報を記録保存しておく必要があり、これには高速・大容量の信号伝送とデ

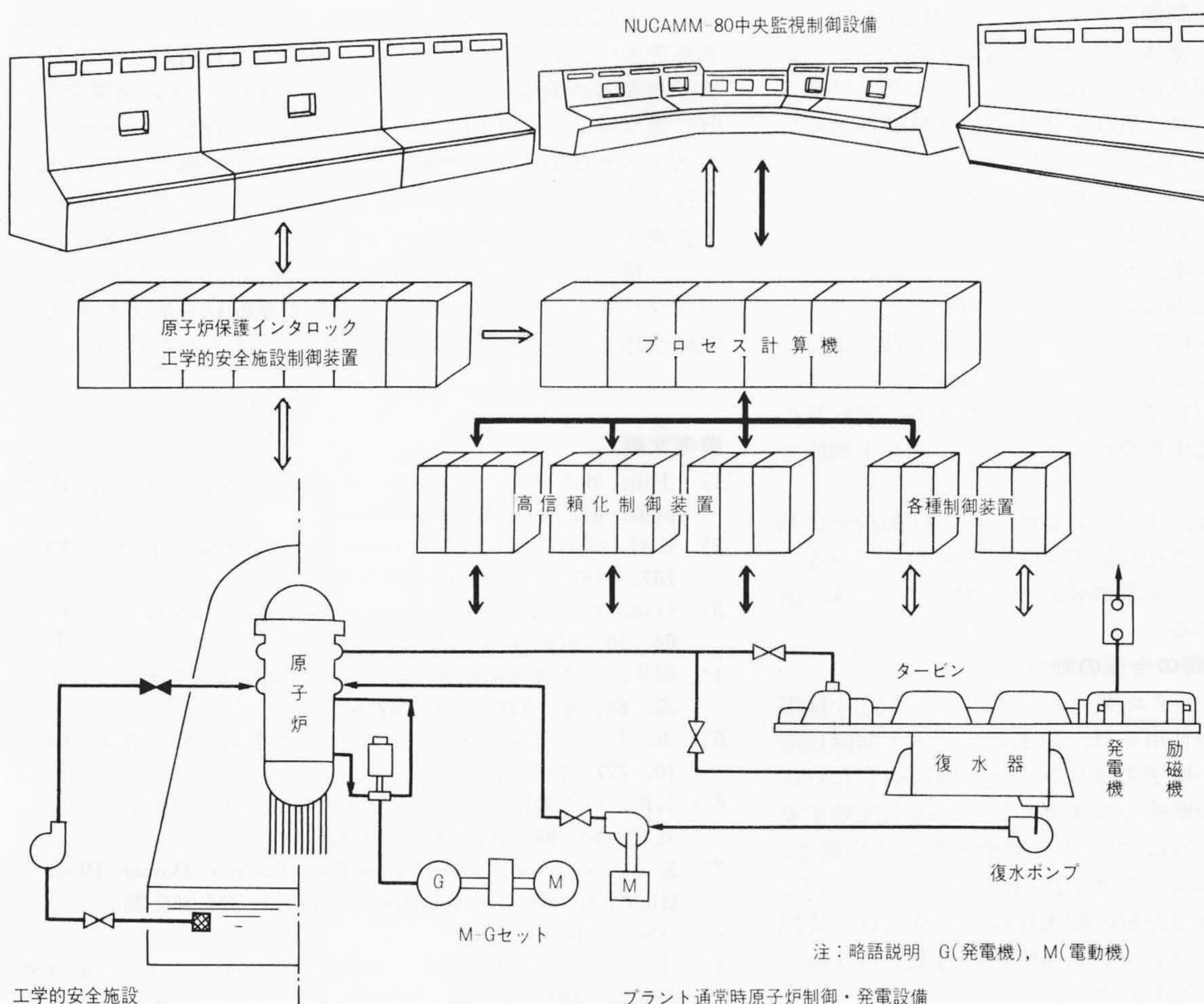


図7 原子カプラントの監視制御システム構成例 原子カプラントもデジタル制御システムが採用され、信頼性及びマンマシン連係性の向上を図っている。

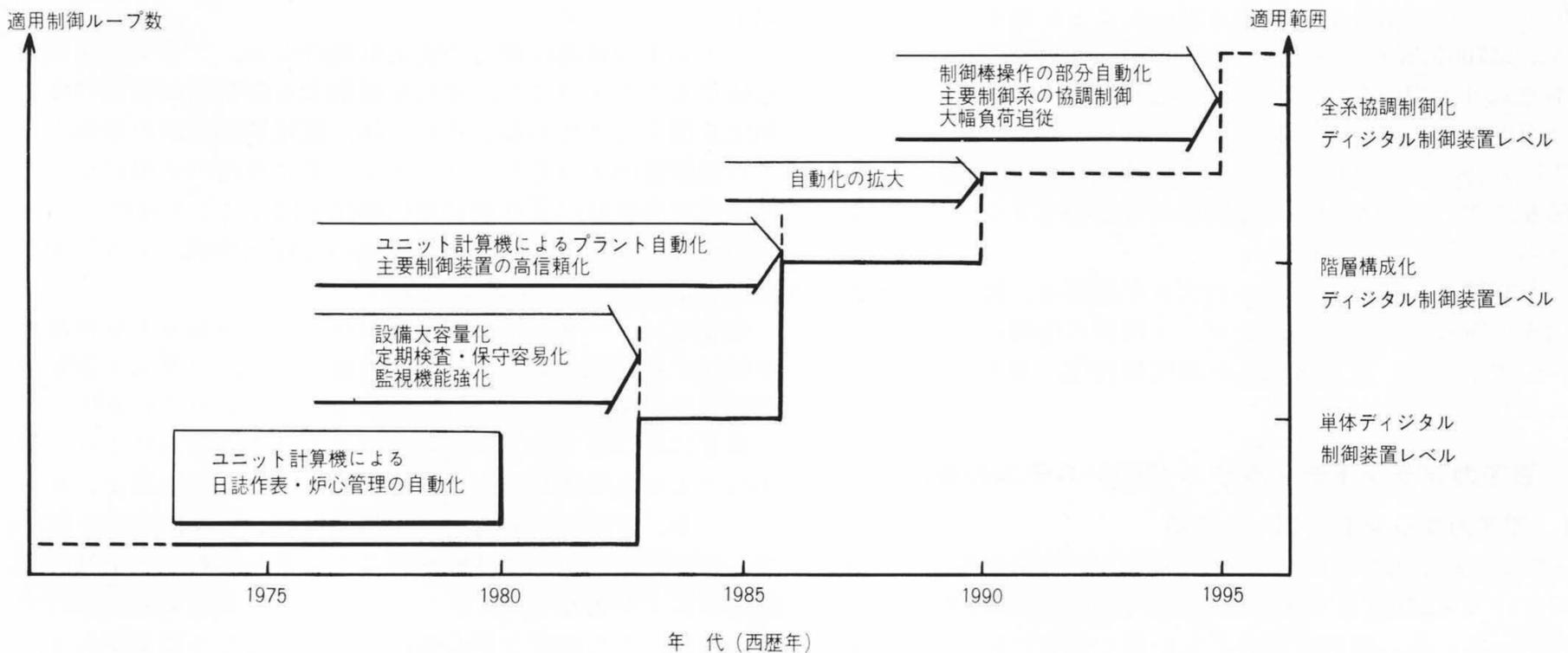


図8 原子力プラントデジタル制御の変遷 原子力プラントに課せられた制御課題の高度化につれて、デジタル制御システムの適用がますます進んできている。

ータ処理機能をもつ計算機の利用が有効である。

このように原子力へのデジタル技術の適用は、各種課題の解決に最も有効な手段のひとつであると考えている。

4.2 自動化機器への適用

現在日立製作所が建設中の国内最新の1,100MW級BWR(沸騰水型原子炉)原子力プラントでは、人間工学的検討に基づいて改良を加えた新形制御盤NUCAMP-80及び各種高信頼化制御装置を設置した大幅なデジタル制御方式が採用されている。図7にこの監視・制御システムの全体構成を示す。本システムでは、ユニット全体を総括監視制御するユニット計算機を上位に、その計算機からの操作指令によって、プラント機器を駆動するデジタル制御装置を下位に位置させる分散形階層制御方式としている。

ユニット計算機は、ユニットの総括監視制御を行なうもので、主要機能としては次の項目がある。まずプラントの総括監視機能としては原子炉系、タービン系などの系統運転状態の監視、ユニット運転上あるいは安全上必要なプラントパラメータの監視とCRT表示機能、炉心・プラントの性能計算及び結果の表示記録機能などがある。また制御機能としては、プラントを総合的に監視してデジタル制御装置に運転目標値を与え、それらを駆動する高度なインテリジェント機能をもつ。

デジタル制御装置は、上位の計算機からの制御指令に基づいて、プラント機器を直接に制御する機能をもっている。原子力プラント用デジタル制御装置の具体例としては、前出の表2に示すものがある。

4.3 原子力プラント制御の今後の動向

初期商業用BWRでデータロギング、プラント性能計算用としてプロセス計算機が使用され、以来デジタル制御技術の進歩に呼応して、その原子力プラントへの適用がしだいに拡大してきた。これらの歴史を踏まえて、近く運転開始する1980年代後半のプラントでは、プラント起動・停止の自動化、高信頼化給水再循環制御装置などが採用されるに至っている。

これは、発電設備の設備容量の膨大化による運転員の負担増の緩和、高信頼性化、マンマシン連係性の向上というニーズに沿って開発、導入が図られたものである。

更に1990年代に入ると、図8に示すようにプラント起動・停止の自動化の充実と拡大、制御棒操作の自動化、大幅負荷追従装置、各種制御装置間の協調制御、伝送方式の合理化などの開発を実施し、社会状況を勘案しながら採用を推進してゆく。

5 結 言

以上述べたように計算機を含めたデジタル制御システムは、その機能性、信頼性、保守性、伝送結合性などの大きな利点をもつ。日立製作所は早くからこの点に着目し、火力、原子力などの発電プラントデジタル制御システムを開発し、既に実プラントに適用している。光方式を含むデータウェイシステムを使用した分散形総合デジタル制御システムは、今後のプラント制御の主役となるであろう。また、高精細表示装置や音声入出力機器などマンマシン連係機器の進歩によって、情報のよりいっそうの集約化、高密度化が可能となり、単にプラントの自動制御にとどまらず運転員を加えた人間-機械全体システムの高度化が達成されてゆくものと考えられる。

参考文献

- 1) 上田, 外: マイクロコンピュータの電力事業への応用, 日立評論, 61, 4, 237~240(昭54-4)
- 2) 松村: 電力設備とエレクトロニクス, 日本機械学会誌, 85, 767, 1169~1174(昭57-10)
- 3) 程塚, 外: 大形ボイラ制御システムの新しい動向, 日立評論, 64, 10, 773~776(昭57-10)
- 4) 射場, 外: 火力発電所における計算機制御システム, 日立評論, 64, 6, 407~410(昭57-6)
- 5) 東, 外: 火力発電所全デジタル制御装置, 日立評論, 64, 10, 777~780(昭57-10)
- 6) 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)
- 7) K. Asami, et al.: Development of Nuclear Power Plant High Reliable Control System, IAEA-SM-265/39 (Oct., 1982)
- 8) 上下, 外: 原子力プラントの運転状態監視システム, 電気学会雑誌, 102, 9, 48~51(昭57-9)