

火力発電所のデジタル制御技術

Digital Control Technology for Thermal Power Station

近年、火力発電所での制御技術発展の基礎となったベース火力から中間負荷火力運用へのニーズの変遷、更に信頼性の高いデジタルハードウェア出現などの背景から、マイクロコンピュータを応用したデジタル制御装置が採用されつつある。本稿はこれらの状況について概説するとともに、日立製作所でのデジタル制御技術の火力発電所への具体的な適用例として、ボイラ制御装置、タービン制御装置への適用例を紹介する。

丸山英久* *Maruyama Hidehisa*上田源三* *Ueda Genzō*東 敏彦* *Higashi Toshihiko*飯岡康弘* *Iioka Michihiro*

1 緒 言

大容量原子力発電所が続々稼働に入りつつある現在、いきおい火力発電所は中間負荷分担の役割を負わざるを得ない電力事情になりつつある。このため、火力発電所は変圧運転を含めたより柔軟性の高い、使いやすさが要求されてきている。これを実現するために、従来広く採用されてきたアナログ式制御装置に加えて、大形のユニットコンピュータと組み合わせた制御システムを中心に制御技術の開発が行なわれ、実質面で火力発電所運転員の負担軽減、省力化に役立ってきたが、一方、性能面及びコスト面から限界に近づいてきたことも否めない。

また、LSI (Large-scale Integrated Circuits) の開発を中心として、信頼性の高いデジタル制御器具が製作され、これを用いた新しい制御技術も生まれつつある。日立製作所では、これら技術動向に注視し、ニーズに合った制御装置の開発を行ない、既に一部実用化することにより、従来装置で実現できなかった壁を破ろうとしている。

本稿ではこの動向を基にして新しく実用化した制御装置について紹介する。

2 火力制御技術の動向

現在、火力発電所の制御技術は、その全容を一新しようとしている。技術革新への潮流は静かに、しかも、広く、深くその基盤に浸透し、実効性と信頼性の確認が着実に進められている。

その誘因の一つは、エネルギー資源情勢の世界的変動の中での今後の火力発電所の果たすべき役割の変遷であり、また一つはあまりにも肥大化し、複雑化した火力制御システム自体の自己矛盾に起因する。

一方、この革新を支えるシーズは、半導体技術の頂点に開花したマイクロコンピュータ(以下、MPUと略す)と、これを用いてシステムの機能向上及び合理化、並びにシステムの簡素化、信頼性の向上とを同時に実現しようとする応用技術の発達である。

1980年代には、原子力発電が電力総需要の3割以上を分担してベースロードを負い、火力発電所には需要変動に応ずる可調整能力の期待がいつそう強まることになるが、この趨勢への対応策は既に計画中の制御システムに折り込まれ検討されている。

(1) 起動時を含む低負荷での安定運転と効率向上

(2) 負荷変動に対する応答性の向上

(3) Daily Start Stopに対応する起動、停止及び低負荷域の自動化

などは今後の火力発電所の必須課題であり、更に既設火力の改造などにおいては、

(4) 制約されたスペースの有効活用に対応する装置筐体の小形軽量化

(5) 機能、特性の追加、変更に対するフレキシビリティの拡大

(6) 配線追加工事の容易化、又は無用化に対応する多芯化、プレハブ化及びシリアル伝送化

などを考慮している。

また、ユニット容量の大規模化と制御内容の高度化は、運転及び保全の任に当たる人々への負担の増加や人間性を疎外するものであってはならない。したがって、監視制御の面では特に次の事項に重点をおいている。すなわち、

(7) ボイラ・タービン・発電機の一体化監視制御

(8) 適時、適項重点集約化表示

(9) 事故の自動分析と対応策の表示

(10) 予防保全監視装置の充実

などである。

さて、これらの諸目標を達成する手段としてコンピュータの導入が様々な形で提唱されている。1台又は多重化された一組みの大形コンピュータですべてを包括制御する方式や、容量速度の不足分を衛星コンピュータで補う方式、あるいは複数の小形コンピュータを大形コンピュータが総括制御する階層制御システムなどがあるが、このようなまずコンピュータを前提とした議論は、コンピュータが非常に高価なものであった時代の名残であり、もはやその必要はない。今やMPUはコンピュータとしてではなく、デジタルコントローラとしてシステムのニーズに即して駆使される道具となりつつある。表1にこれらの代表例を紹介し、次章以降にこれらを応用して構成されたボイラ制御やタービン制御装置の実例について概説する。これらの装置は従来コンピュータが適用されてきた応用分野、すなわちデータ処理、監視、記録、性能計算及び運転指令値の補償といった間接業務用ではなく、主機の制御、操作に直結するコントローラ又はレギュレータであることを特筆するとともに、このような新分野への計算機制御技術の適用で特に配慮した事項について次に記述する。

(1) 機能に即したハードウェアの分割構成

* 日立製作所大みか工場

表1 デジタル制御用ユニット機能一覧表 HIDIC 80は集中監視制御用, HIDIC 08はボイラ制御, タービン制御装置及びガバナ制御装置に, HISEC 04はバーナ制御装置にそれぞれ中枢制御ユニットとして組み込まれ, またSTUは信号伝送の合理化に期待されている。

種 別		大形計算機制御装置	小形計算機制御ユニット	プログラマブル ロジック・コントローラ	信号伝送ユニット	
機 種 名		HIDIC 80	HIDIC 08	HISEC 08/06/04	機種名	STU
項 目					項目	
主記憶装置	語 長 (ビット)	16+1(パリティ)	16+2(パリティ)	16+2(パリティ)/16+1(パリティ)/16+1(パリティ)	最大配線長	入力回路~STU間: 500m 送受間:2,000m
	最 大 容 量 (語)	64K	64K	32K/4K/2K		
	種 類	IC/コア	IC/コア	コア/IC(ROM/RWM)/ IC(ROM/RWM)	伝 送 路	結合方法:パルストランス 使用ケーブル:0.9mm ² ツイストシース
	サイクルタイム(μs)	0.25/0.65	0.55/1.2	1.2/2.0/2.0		
演 算 速 度 (μs)	0.6/1.3 (加減)	3.1/3.5 (加減)	4.0/2.0/2.0(1命令)	伝 送 方 式	チェック方式:反転2 連送 同期方式:フレーム同期	
入出力制御	制 御 方 式	DMA, プログラム制御	DMA, プログラム制御, メモリインタフェース	プログラム制御	転 送 速 度	4.96ms/32点
	転 送 速 度	1.8/1.3MW/s, 40/20kW/s	400kW/s, 2kW/s, 20kW/s	—	入 力 点 数	32点/ユニット
プロセス 入出力装置 (最大実装 点数)	ア ナ ログ 入 力	416点	416点	—	注: DMA=Direct Memory Access PCL=Process Control Lan- guage ROM/RAM=Read Only Memory/ Random Access Memory STU=Signal Transmission Unit	
	ア ナ ログ 出 力	60点	60点	—		
	デ ィ ジ タ ル 入 力	1,024点	1,024点	2,048点/1,024点/384点		
	デ ィ ジ タ ル 出 力					
割 込 入 力	512点	512点	なし			
ソ フ ト ウ ェ ア		1.高級制御用コンパイラ (PCL)使用可 2.アセンブラ	1.高級制御用コンパイラ (PCL)使用可 2.アセンブラ	1.アセンブラ		

(2) 信頼性, 保全性及び操作性の徹底的追究
などがその重点指向である。

前述の低負荷域や変動負荷運転への対応には, ボイラ, タービンなどの主機やバーナ, 給水ポンプなどの補機及び各種検出器類の性能や耐久性の改善も必要であるが, これらの画期的改善は比較的困難であり, 制御の改善によりこれを補完しなければならない。一方, 従来方式の制御装置にこれを期待することは, 信頼性と経済性とに犠牲を強いることになる。また, ユニット監視制御用コンピュータにすべてを期待することは, リスクと困難を伴う。MPUを駆使した新制御システムではこの問題を適切に解決することが可能であり, また, この点を十分検討し機能に即した従来方式の構成を計画しなければならない。重要な各制御機能, 保護機能の独立性を確保することと, 各機能間の協調制御性の向上とを両立させたものとしなければならない。

制御装置のMPU化はその適用を誤らなければ, 部品点数は著しく減少し, 信頼度も数倍に向上する。このことは従来の装置では一部品一機能であるのに対し, MPU化された装置では一部品がシリアルに複数の機能を処理し得ることからも推考できる。しかし, そのためにあらかじめ適切な保守の手段を講じておかなければ事故時の迅速な対応は極めて困難となる。

また, この種の装置の普及には特別の訓練を要しないものでなければならない。そのため容易なプログラミングと迅速なトラブルシューティングが可能となるよう平易な言語体系と, 扱いやすいメンテナンスツールを準備している。

3 ボイラ制御装置

3.1 概 要

ボイラ制御装置の代表的システムとして, ボイラ自動制御装置(以下, ABCと略す)とバーナ自動制御装置(以下, ABSと略す)とがあり, これらは前述のニーズを背景としてMPUを応用したデジタル制御装置へと転換されつつある。この

うち, ABCは特にシステム規模が大きく, その故障時にはプラント全体に大きな影響を与えるため, 同事故防護システム実現への強い要請がある。デジタル化指向の第一歩としてMPU技術を駆使したABC異常診断システムを開発した。

本システムはABCの異常を迅速に検出して, 中央操作室のディスプレイ装置に異常制御ブロックを表示し, 運転員の事故対応操作に供するとともに, 別置のタイプライタに故障状態の詳細情報を打ち出し, その後のトラブルシューティングを容易とするものである。本製品については別の機会に詳細を紹介することとし, 本稿では, バーナ制御にMPUを適用した新しいデジタル式ABSを取りあげ次に述べる。

3.2 デジタル式ABS

昭和40年代初期から火力発電所の自動化範囲が拡大し始め, バーナ制御装置も遠隔手動方式から本格的自動化へと拡張していった。同制御装置はいわゆるワイアードロジック方式のハードウェア構成をとり, これまで多くの運転実績を積み重ねてきた。

最近, 燃料の多様化などによってバーナ制御システムは規模拡大, 複雑化の傾向を強め, 同システムに対する要請内容が保守性及び拡張性の向上に重点がおかれるなど大きく変化してきた。本デジタル式ABSは, これらの新しい要請に応ずるものである。

図1, 2に本デジタル式ABSのシステム構成と機能及びロジックキャビネットの外観を示す。本装置は, その中枢となるロジックキャビネット, 中央監視操作盤上のオペレーターズコンソール, 現場操作箱, 及び検出端, 操作端から構成される。本デジタル式ABSの機能は多様であり, その主要なものとして, バーナ個々に対応した自動点火・消火制御を行なう基本的な機能のほかに, 全バーナに共通するバーナ本数制御などの高度な制御機能及び火炎喪失検出などのボイラ保護機能がある。

バーナ制御装置を取り巻く主要な環境条件とこれらに対応した技術について, 日立製作所の新旧バーナ制御装置を対比

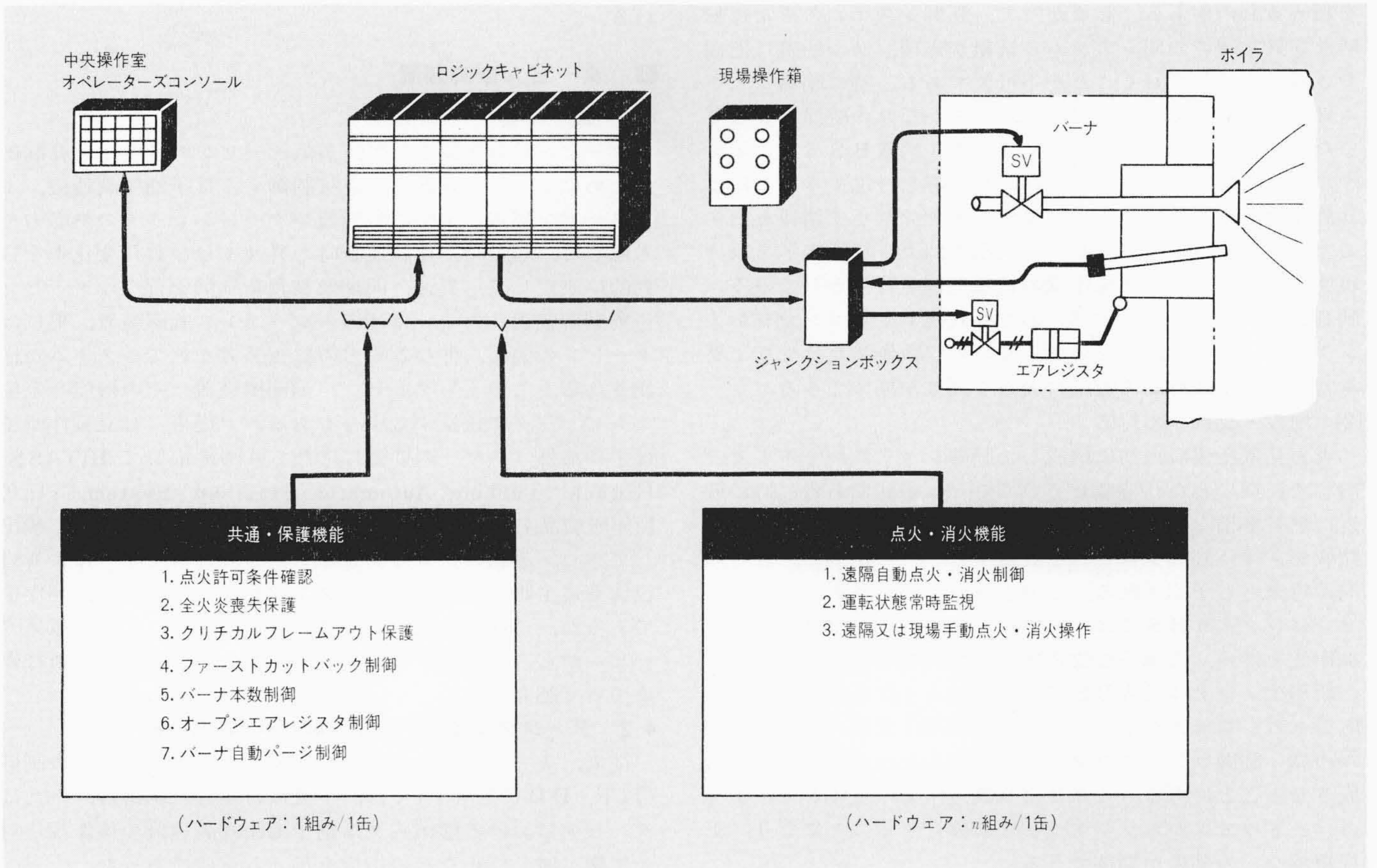


図1 デジタル式自動バーナ制御システム構成と機能 共通・保護部は上記各機能別に、また点火・消火部はバーナ1~4セル単位にハードウェアを区分し、独立・安全性の確保に留意している。

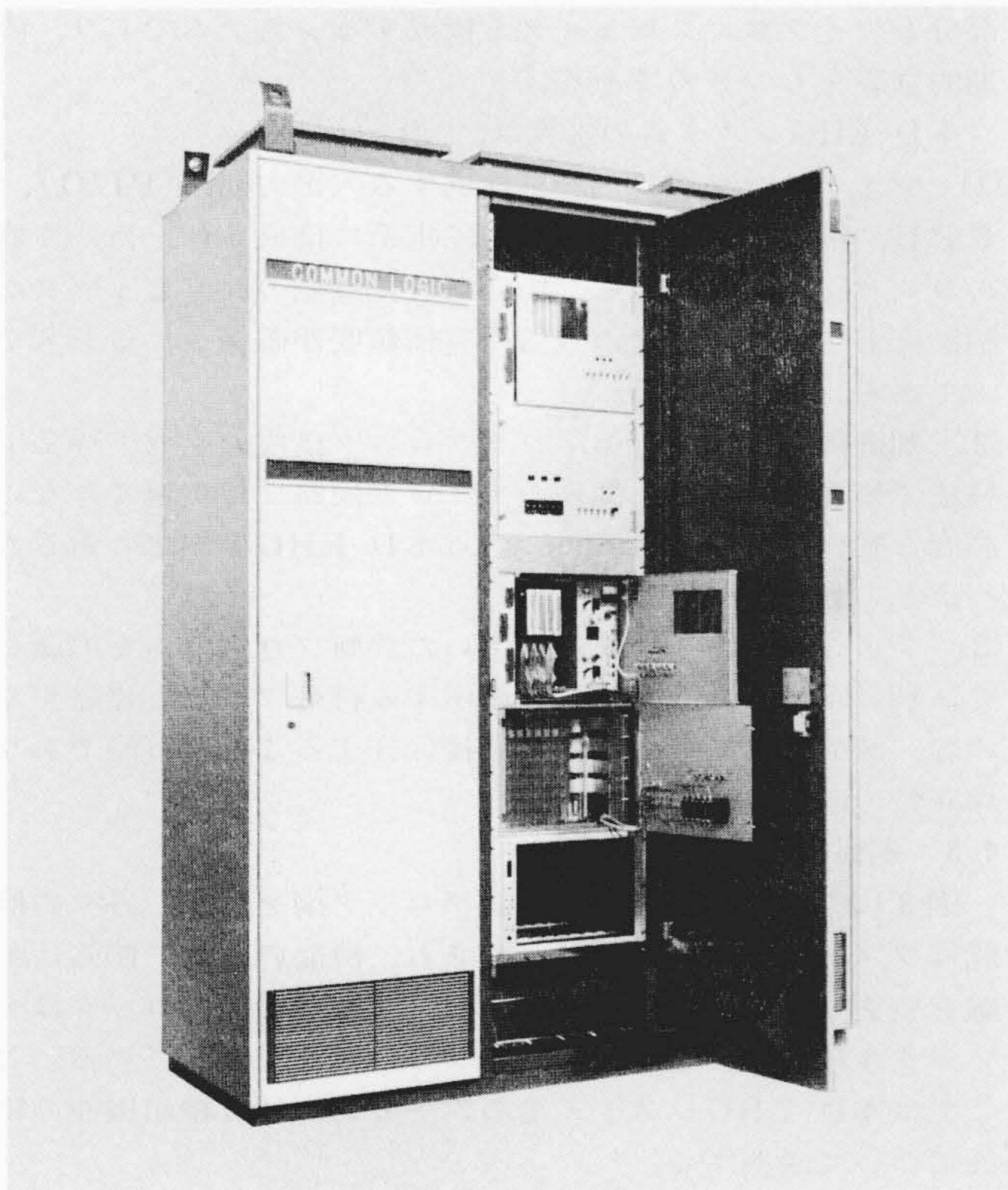


図2 デジタル式自動バーナ制御装置ロジックキャビネット 点火・消火ロジック部では、一対のデジタル制御ユニットとリレーユニットが1セルのバーナに対応し、図は1面に2セル分収納した例を示す。PI/Oユニットの追加により、1制御ユニットで4セルまで制御できる。

させ表2に示す。本デジタル式ABSはバーナ制御特有の条件を十分に満たすことに重点をおき、発電用ボイラ専用の制御装置を指向した。このうち特に重点をおいた点について次に述べる。

(1) 運転・保守の情報提供への対応

バーナ制御システムはバーナ本数や燃料種類などによって規模が拡大し、その入出力インタフェースだけでも1,000点

表2 バーナ制御装置のニーズと対応技術 自動診断機能付加により、ハードウェア故障時事故波及をロックし、故障プリント板を表示するとともに、増設・改造にはプログラム修正を中心としてフレキシブルに対応できる。

No.	ニーズ	従来ワイアードロジック式での対応技術	デジタル化で更に追加した技術
1	制御装置異常時での故障検出と修復時間の低減	(1)シーケンス進行及び渋滞表示 (2)入力信号個別状態表示	(1)自動診断によりプリント板単位に故障表示 (2)出力信号個別状態表示
2	燃料の種類変更による増設・改造にフレキシブルに対応	(1)プリント板追加及び配線の大幅改造を実施	(1)変更の多くはプログラム修正で対応 (2)キャビネット寸法は従来の60%減
3	ボイラ保安に直結したシステムとしての安全性及び信頼性の向上	(1)機能及びバーナ別にハードウェアを分離配置 (2)入出力インタフェースに電磁リレー介在	(1)自動診断によりハードウェア故障時操作端動作ロック

を超えるものがある。したがって、制御システムの正常運転時及び異常時での同システムの情報が迅速、かつ的確に把握できるようにしておくことが不可欠である。特に制御システム異常時での故障箇所検出には、従来かなりの時間を要していたことを経験している。本デジタル式ABSではデジタルのもつ能力を活用し、自動診断機能を付加することにより故障箇所をプリントカード単位にまで分割して情報を出すこととした。このほか、数多い入出力個々に状態表示を設け現場設置の検出端及び操作端の情報把握を容易としている。制御システムの状態を細部にわたり直視できるマンマシンインタフェースを指向したので、常時の点検作業だけでなく異常時の修復作業時間の短縮に大きな効果が期待できる。

(2) 増設・改造への対応

火力発電所建設当初に構成した制御システムがそのまゝの内容で長期にわたり持続していくことはまれである。特に最近燃料事情などの環境条件の変動により、ボイラの燃料種類変更を伴い制御システムを改造するケースが多く、この傾向は将来とも予測される。このような場合、従来のワイアードロジック式ABSではハードウェアの大幅な組替え及び追加作業を伴い、大規模な改造作業を余儀なくされていた。

新形デジタル式ABSでは、このような条件に柔軟に対応できるシステムを指向した。その基本は変更のポテンシャルの高い制御ロジックをプログラマブルなハードウェアで構成させることにある。これにより改造作業の主体がこれまでのハードウェアからソフトウェアに移行することになり、工程短縮などの効果が期待できる。

一方、ロジックキャビネットの床面積を従来形の30~40%にまで縮小させたことで、スペース上の制約を受ける既設プラントでの増設が一段と柔軟性をもつようになった。

(3) 高信頼度確保への対応

バーナ制御装置は、ボイラ燃焼の中心的役割を担うものだけにボイラ保安と密接に関連するので、常に高信頼性を底流に据えて臨まねばならない。

バーナ制御システムを総括してとらえ、これを大形ハードウェアに集中することは現用ハードウェアにより実現可能であるが、同システムの異常時、波及範囲が拡大する方向となり必ずしも適切ではない。本デジタル式ABSでは制御機能ブロック単位に故障時の波及度を評価し、**図1**に示すように全バーナに共通する機能とボイラ保護機能に対してワイアードロジック方式を適用するとともに、バーナ個々に対応した点火・消火機能に対してはストアードロジック式のハードウェアを分散的に配置する構成とした。共通・保護機能ブロックは更に**図1**に示す小項目機能(7機能)単位に独立したプリント板に実装され、プリント板単位に診断回路を内蔵して、同ブロック部の故障が下位の点火・消火ブロックへ波及しないようにしている。一方、点火・消火機能ブロックは複数バーナ単位に独立したデジタル式制御ユニットにまとめられている。各ユニット内には診断機能を内蔵させ、CPU(中央演算処理装置)、メモリ、及びPI/O(プロセス入出力)各プリント板単位に故障を検出して動作をロックさせ、同ブロック部の故障がバーナ操作端へ波及するのを防止している。

一方、バーナ制御システムの検出端及び操作端は屋外に設置されるなど、これらと取り合う電子回路にとっては厳しい環境下にあり、ノイズ及び接点接触面に特に留意していかなければならない。本デジタル式ABSでは、従来形ABSで実績のある思想を踏襲して、入出力インタフェースに電磁リレーを介在させ、外部との絶縁を徹底し信頼性の強化を図って

いる。

4 タービン制御装置

4.1 概要

タービン制御装置として、蒸気タービンの速度、負荷制御のためにタービン制御弁を直接制御する電子油圧調速機、またタービン周辺の補機の状態及びタービンロータの熱応力を考慮して、起動時、連続運転時の昇速率及び負荷変化率を自動的に決定して、昇速、同期及び負荷制御を行なうタービン自動制御装置、あるいは補機のシーケンス制御装置、更にはタービンの偏心、伸び差などの監視装置などでシステムが構成される。このうちタービン自動制御装置はその機能を上位コンピュータに統括する場合もあるが、従来、日立製作所では主に海外ユーザーの要望に応じて単独製品として“HITASS”(Hitachi Turbine Automatic Start-up System:日立製作所製品名の略称)のタービン自動制御装置を数多く輸出してきた。運転のフレキシビリティと海外ユーザーによる自己保守に主眼をおいたデジタル化製品を既に受注、製作中であるが、これらに関しては別の機会に譲りここでは蒸気タービンからみて最も中核的な位置にある調速装置の最新技術について紹介する。

4.2 デジタル形電子油圧式調速機(D-EHG)

従来、火力発電所の起動・停止操作などの計算機直接制御(以下、DDCと略す)では、主機に附属した制御器、例えばタービンにおける機械式又は電子油圧式調速機の操作端に対して増、減、停止などの指令を与えるものであった。

ここに述べるデジタル形電子油圧式調速機(以下、D-EHGと略す)は、従来のアナログ演算器を用いた電子油圧式調速機に代わって、進歩の著しいマイクロコンピュータそのものがタービン調速機の重要機能を果たす、いわばタービンの一部分をマイクロコンピュータで構成するシステムであり、画期的意義をもつものである。

本D-EHGシステムの特長は、

- (1) マイクロコンピュータを構成する入出力回路(PI/O)、CPU、電源装置などはすべて二重系に構成され、万一片側のコンピュータが故障した場合でも待機側のコンピュータが制御を引き受け、従来の数倍の高信頼度が確保されるシステムである。
- (2) 制御機能は、ビルディングブロック構成のソフトウェア技法で処理されるが、従来のアナログ回路では実現できない高度な制御が可能である。この点本D-EHGは知恵のあるガバナといえる。
- (3) デジタルの論理機能を用いた診断プログラムを内蔵して、別に用意した故障箇所を明示する特殊ツールと連動するので、装置をユーザーにより直接保守することが可能であり保守性の向上に役立つ。

4.3 制御機能

図3に本D-EHGの基本機能ブロック図を示す。各々の機能はソフトウェアパッケージ化され、機能の追加、削除は配線を変更せずに容易に実現できる。また各機能ブロックはデジタル技術の粋を駆使して巧妙な役割を果たしている。ここでは本D-EHGシステムでのタービンの速度検出機能の特長について説明する。

タービン速度の検出機能は、調速機として従来も最も重要な回路部分であった。従来のアナログ演算器を用いた調速機では、**図4**に示すように速度検出器を2個設け、2個の速度検出値のうちレベルの高い信号値を検出値の真値として使用す

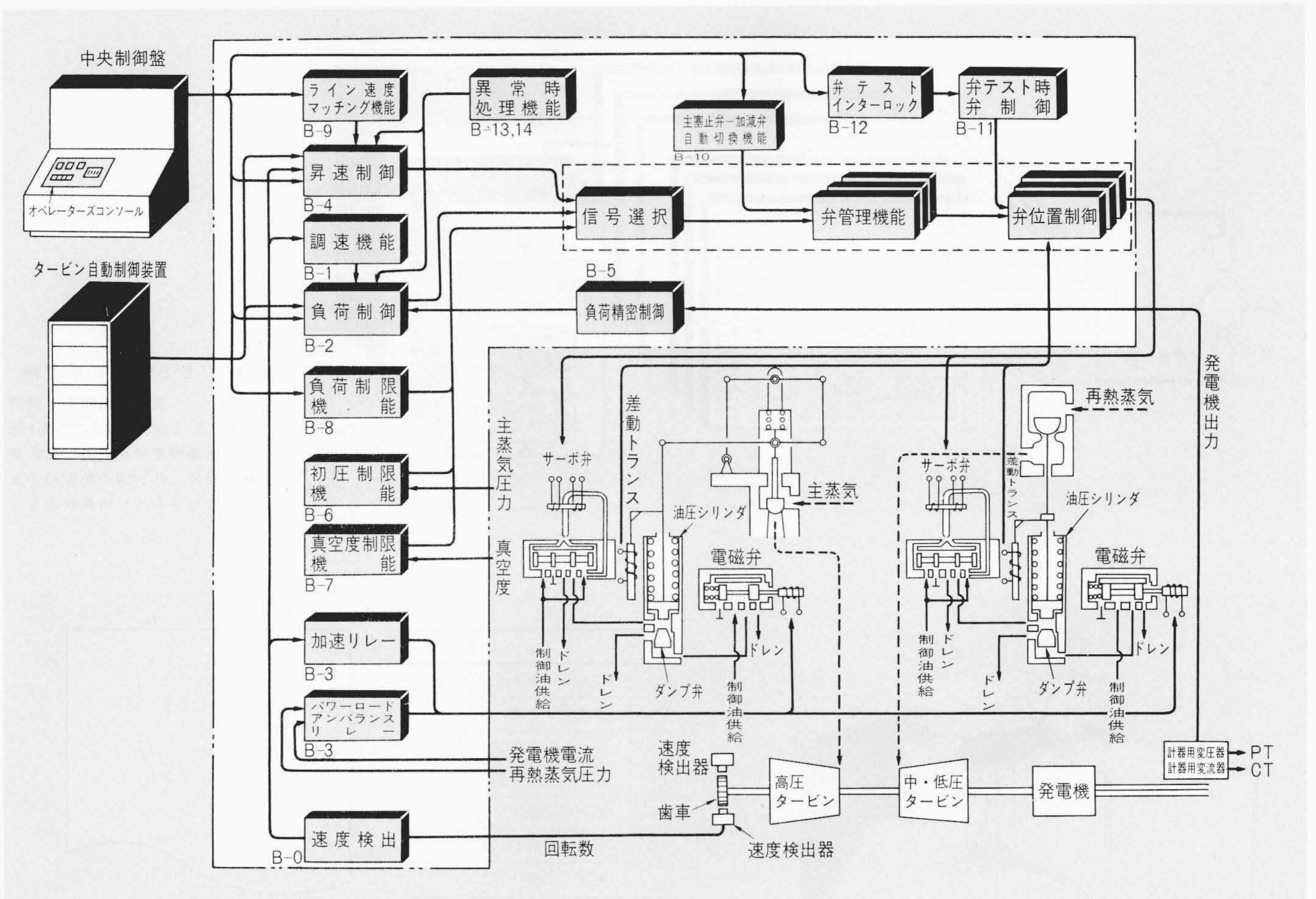


図3 D-EHG機能ブロック図 2点鎖線内の大部分がソフトウェアで処理する機能であり、多様なユーザー側のニーズに柔軟に対応できる。

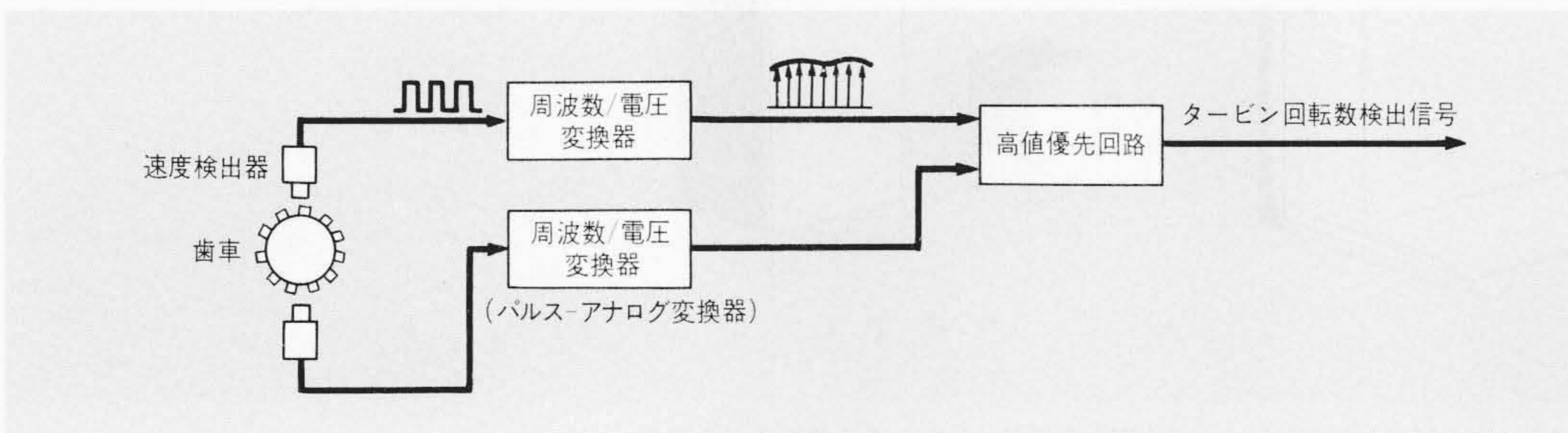


図4 従来の速度検出方式 従来は2箇の速度信号のうち、信号値の高いほうを選択する方式が採用された。この方式では、回路の故障による速度信号値の増大によって、蒸気弁を閉制御する欠点があった。

る方式とか、あるいは速度検出値と速度指示値の偏差信号を得る回路を2系列設け、次段に高値優先回路を設け、タービン制御弁を閉じる向きの信号を後段の制御回路へ送る方式を採用している。いずれの方式でも、速度検出値が異常に大きいモードの故障に対しては、制御弁を閉じる方向の信号を発し、タービン保安の点から安全といえるが、電力系統あるいはボイラへの悪影響があるし、更にとどの検出器が故障したのか発見しにくい問題があった。

本D-EHGでは図5に示す方式を採用して上記の問題を解決しており、正にデジタル方式の本領を発揮したものであるといえる。

その主な特長は、

(1) タービン速度がほぼ零速度から定格速度の広範囲にわたって高精度なデジタル計数が可能であること。

(2) 検出器は3個設けるが3個の計数値のうち、相互の差が最小である信号を真値とみなす論理判断をCPU内で実行する。

(3) 合理性チェック：慣性のあるタービン速度が急変するはずはない、急変した場合は検出器、又は該当PI/Oは異常であると判断する機能をもつ。

図5の低速カウンタと高速カウンタは、上記(1)の目的のためのもので、タービン速度が低速の場合には、検出遅れ時間が1秒程度あっても支障ないが、一方、得られるパルス情報が少ないので、1秒間の長時間に入力するパルスを低速カウンタで計数する。高速の場合には、検出遅れを小さくする必要があり、パルス情報は多いので、タービン回転数に相当する入力パルス318個の期間中に250kHzの発振器からのパルスが何個含まれるかを高速カウンタで計測する。この計数値を

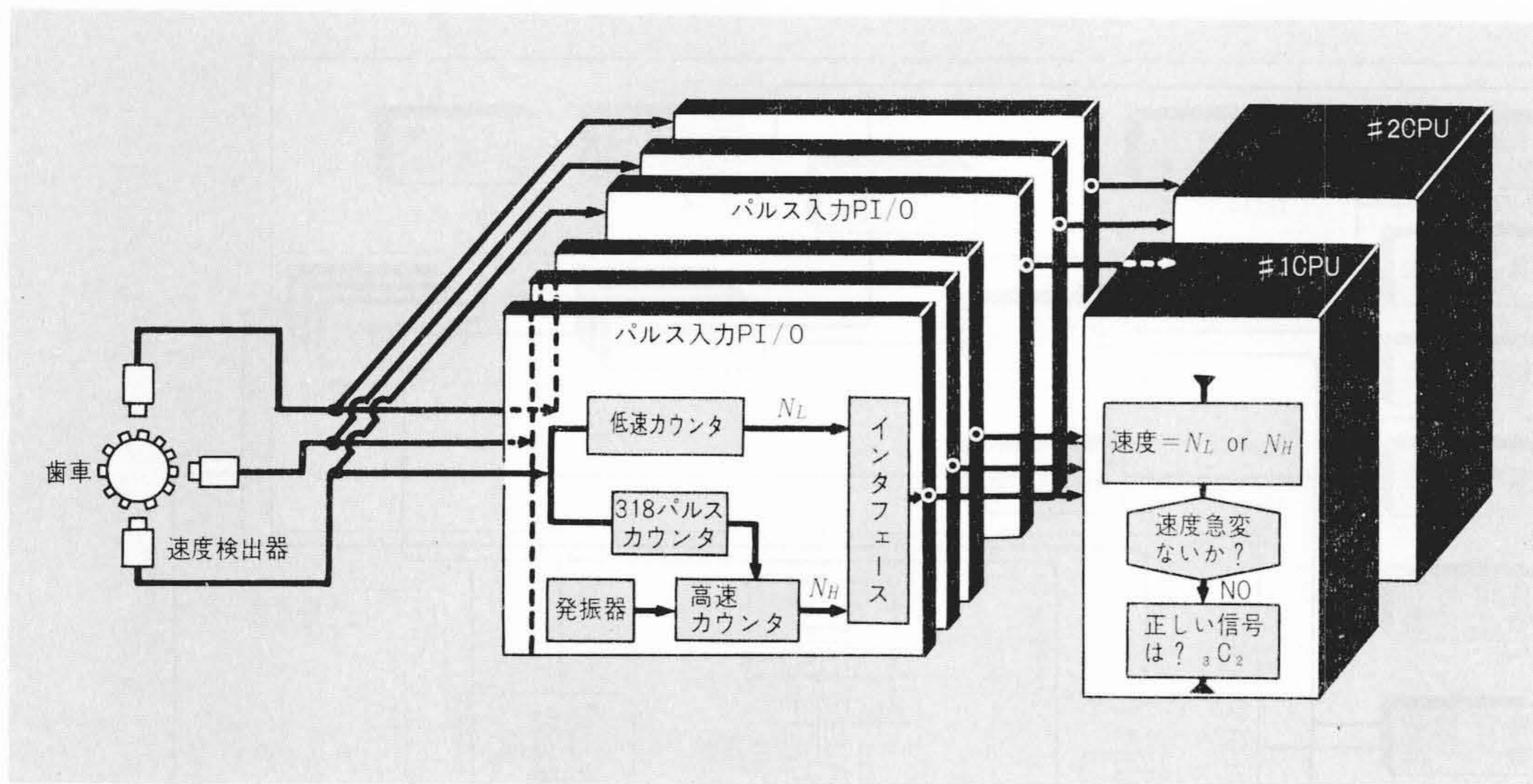


図5 D-EHGでの速度検出器 速度検出器を3個使用しているが、PI/Oでの高・低速広域高精度検出、CPUでの多数決優先、非合理的急変のチェック機能をもった特長がある。

No.	名称
①	シミュレータコンソール
②	タイプライタ
③	シミュレータユニット
④	紙テープリーダ
⑤	紙テープサブライヤ
⑥	紙テープワインダ
⑦	紙テープ受けかこ

```

T/M START
KIND 01 OK
KIND 02 OK 1 2
KIND 04 OK
KIND 17 OK 1 2 NG 3
KIND 20 OK 1 2 3
KIND 00
T/M END
    
```

タイプアウト例

概略寸法

図6 専用保守用ツール タイプライタを使用してCPU、PI/Oに関してプリント板ごとに故障箇所を知ることができる。タービンを簡略化したモデルも内蔵しているので、故障修理後、簡単な機能試験が可能である。

N_H とすれば、タービン回転数 $\propto 1/N_H$ の関係が成立する。

このような高信頼化・高級機能化は、図3のブロック図の各機能で随所に検討を加えてある。例えば、負荷制御機能では、サーボモータのような可動部品、あるいは長時間積分のための低漏洩電流特性のコンデンサなどは使用していない。

4.4 保守の便宜

図6に附属の保守用特殊ツールを示す。このツールにより、CPUの正常性のチェック、PI/Oでは故障プリント板に関して、実装されたプリント板の位置を表示できる。D-EHGとユーザーとの会話は、ツール内蔵のタイプライタを使用するわけで、保守に関しては高度なデジタル電子技術を要しない。

以上、本D-EHGシステムは従来のアナログ形の電子油圧

ガバナを単にデジタル装置に置き換えしたものではなく、高信頼化、高度の機能付与、保守の容易化を目指したものである。

5 結 言

近年の火力発電所に課せられた使命をまっとうするためには、プラントシステムに考慮を払うのはもちろんのことであるが、制御装置による解決の比重もますます増大してきている。

本稿では、制御装置へのデジタル技術の導入を軸として今後の展望をも含めて紹介したが、我々はこれを基盤として更に開発を進め、真のニーズにマッチした制御システムを提供し、社会の発展を願うものである。大方の御批判、御指導を仰ぎたい。