

電源開発株式会社竹原火力発電所3号700MW用

大容量石炭火力発電所総合デジタル制御システム

Distributed Digital Control System for Coal-Fired Large Power Plant

エネルギー源の多角化政策のひとつとして、石炭火力の建設が増大している。国内最大容量の超臨界圧貫流形石炭火力の建設に当たり、石油火力並みの負荷調整運用に供すること、起動・停止過程を含め運転の全自動化を図ること、多銘柄の海外炭を利用すること、環境保全を強化することなどの仕様が前提となった。これらの要求を満たすため運転制御面では、マイクロプロセッサを用いた機能階層分散形総合デジタル制御システムを世界に先駆け構築すること、現代制御理論に基づく適応制御方式を確立することなどの新技術をもって対応し、昭和58年3月、営業運転の運びとなった。負荷変化3%/分の安定運転の実現など、初期の目標を達成した。本稿では、制御システムの内容と運転実績について報告する。

新海卓郎* *Takurô Shinkai*
 小笠原勝典* *Katsunori Ogasawara*
 飯岡康弘** *Michihiro Iioka*
 小松喜一郎*** *Kiichirô Komatsu*
 佐藤美雄**** *Yoshio Satô*

1 緒言

石油から石炭への転換が世界的に進行しているが、内容には国情に応じて若干の違いが見られる。表1に示すように、運用とボイラ形式とのかかわりを見ると米国では貫流形定圧ボイラが主にベース負荷運用に、自然循環形ボイラが主に負荷調整用に供されている。西ドイツでは最近貫流形変圧ボイラが負荷調整に用いられるようになった。一方、我が国では近年になってから大容量石炭火力の建設が始まり、石油火力で実績を積んだ貫流形定圧ボイラが負荷調整用に供されている。

電源開発株式会社竹原火力発電所3号は、石炭専焼貫流形定圧ボイラプラントとして計画され、昭和58年3月から営業運転を始め順調に稼動している。本稿では、運転制御の面からの課題と対応技術、及び運転結果について報告する。

2 技術課題と対応

本制御システムを計画するに当たって図1に示すような課題を設定し、分散形総合デジタル制御システムを構築することを基本方針として対応することにした。

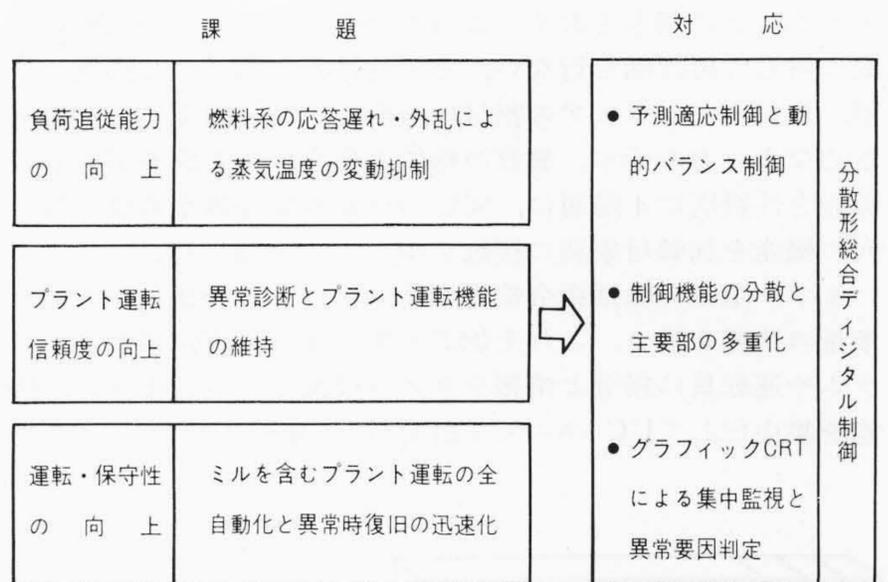
(1) プラントの負荷追従能力の向上

石炭燃焼貫流形ボイラプラントの多くは、従来、負荷変化

表1 大容量石炭火力プラントの運転・制御の動向 国によって運用法、ボイラ形式などに行き方の違いが見られる。

	運用	ボイラ形式	運転自動化	石炭火力比率*	炭種
米 国	負荷調整 又はDSS**	自然循環形 (定圧又は変圧)	部分自動化	49%	少ない
	ベース負荷	貫流形(定圧)			
西ドイツ	負荷調整 又はDSS	貫流形(変圧)	同上	63%	多い
日 本	負荷調整 (将来DSS)	貫流形(定圧) (将来変圧)	全自動化	8%	多い

注：略語説明など * 原子力、水力、石油・LNG(液化天然ガス)火力などとの対比(1976年時点)
 ** DSS(毎日起動・停止)



注：略語説明 CRT(Cathode Ray Tube)

図1 大容量石炭火力運転・制御の課題と対応 分散形総合デジタル制御システムを構築して、プラントの負荷追従能力と信頼性の向上を図る。

率は約1%/分で運用されてきたが、本プラントでの目標値は石油火力と同程度の値(3%/分)に設定した。過去、変化率が制約されてきた主な要因は、微粉炭機(以下、ミルと略称)の応答遅れやミル起動・停止時の燃料量変動などによってプロセス変数(特に、蒸気温度)が大きく変動することにある。このような課題への対応として、現代制御理論に基づいた適応制御アルゴリズムを組み入れたシステムの確立を目指した。

(2) プラント運転信頼度の向上

制御システムの機能が時代とともに複雑化し、高度化する道を歩んできたが、石炭関連設備が加わりシステム規模が巨大化してきた。このようなシステムに故障が発生した場合、これを的確に判定でき、代替装置を用いてプラントの運転を継続できることが要請される。

このような命題の解決策として、制御装置自体が自動診断・措置を行なえるようにすること、手動運転困難な部位に対し

* 電源開発株式会社 ** 日立製作所大みか工場 *** バブコック日立株式会社 呉工場 **** 日立製作所日立研究所

て冗長化が図れること、機能の分散化を進めユニット計算機が故障しているときにもサブシステムを用いて運転を継続できることなどを旨とした。

(3) 運転・保守の省力化

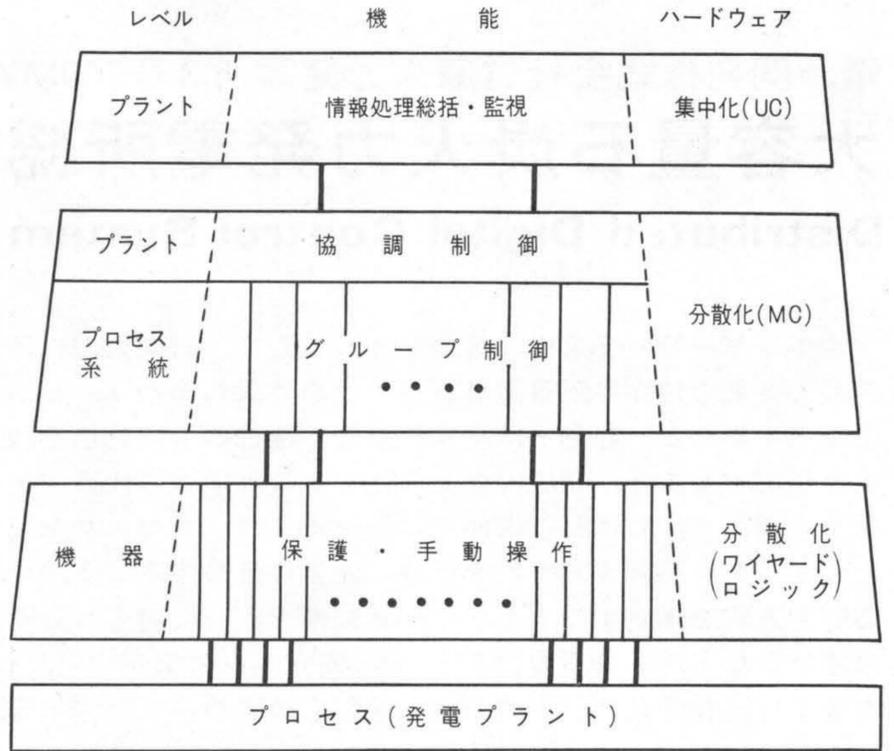
本発電所では、少人数(3~4人/シフト)の運転員で対応できるようにプラントの起動・停止運転、及び通常運転の全過程を自動化することとした。石油火力で確立した技術が基礎となるが、新課題としてミル周りの運転自動化があり、ミルモデルを用いた解析によってミル特性を把握する手法をとった。一方、高度に自動化されたプラントでは、運転員が常に運転状況を的確に把握できること、異常時には迅速に措置できることの必要性が増大する。このような課題に対しては、プラントの運転状態や異常箇所をカラーCRT(Cathode Ray Tube)を用いて集中監視できるシステムの確立を目指した。

3 制御システムの構築

3.1 構成上の基本的な考え方

デジタル装置がもつ記憶・判断能力、及び構成上のフレキシビリティを活用して、高性能・高信頼化システムを組み上げることに基本をおく。このため、プラントの制御機能構成に対して再評価を行ない、その特性差に着目して機能の分割、及びハードウェアの割付けを行なった。図2に、その基本的な考え方を示す。異質の機能の集合体から成る縦方向の機能を性質別に4階層に、同質の機能の集合体から成る横方向の機能を制御対象別に複数グループに分類した。

まず、上位の総括指令監視機能はプラント全体にかかわり多量の情報を扱い、これを加工・集約化して下位のサブシステムや運転員に指令と情報を与える役割をもつことから、機能を集中化してUC(ユニット計算機)に分担させた。

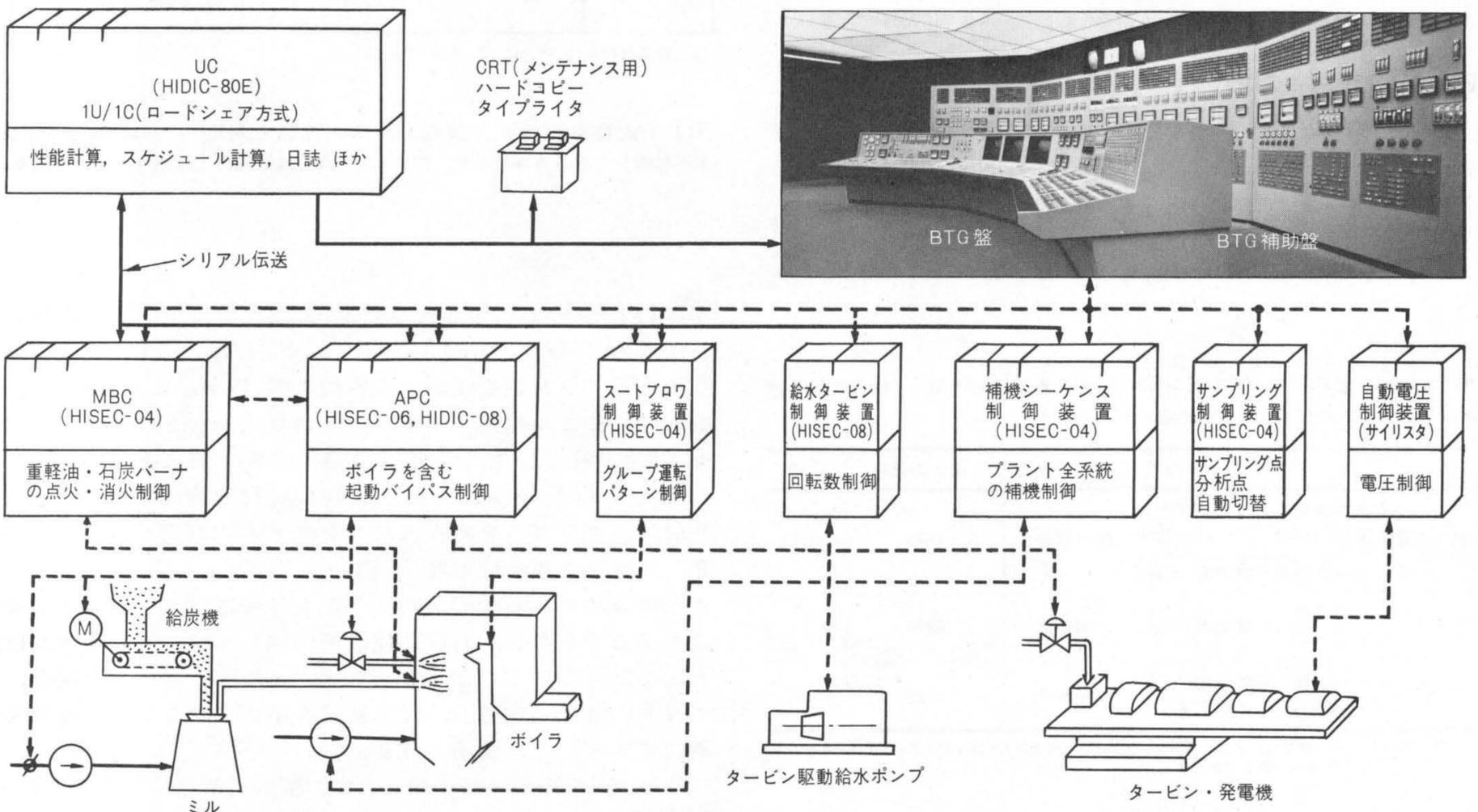


注：略語説明 UC(ユニット計算機), MC(マイクロコントローラ)

図2 システム構成上の考え方 機能の階層・分散化を図り、サブシステムに記憶・判断能力をもたせた高信頼化システムを構築する。

中位の制御機能は、制御対象単位のグループ制御とこれらを統括する協調制御とに分類される。これらの機能はプロセス系統にかかわり、分散している制御対象と結合して直接制御を行なう役割をもつことから、機能も分散化して複数のMC(マイクロコントローラ)に分担させた。

下位の保護・手動操作機能は、プロセス系統の機器にかかわり分散している機器と結合して、後備保護を行なう役割をもつ



注：略語説明 MBC(ミル・バーナ制御装置), APC(プラント自動制御装置)

図3 電源開発株式会社竹原火力発電所3号監視・制御システムの構成階層・分散システムが形成されている。

ユニット計算機を上位に据え、マイクロコントローラ群を配置した機能

ことから、回路構成の最も単純なワイヤードロジックに分担させた。

このような考え方を基に構成した本プラントの制御システム(主要部)を図3に示す。UCと監視操作機能を集約化した中央操作盤を上位に据え、これにMC群を配置した機能階層分散形総合デジタル制御システムを形成している。MCからUCへの情報は直列信号伝送ラインを通じて取り込まれる。

3.2 システム構成上の特徴

信頼性や運転・保守性の向上に対する重点施策について、具体例を基に報告する。

プラントの起動停止時に必要な高度な制御機能は過去UCに依存していたが、本システムでは、この機能を原則として下位のサブシステムに分担させる方式を採用し、同システムの独立性を強化した。ミル起動過程の例を表2に示す。従来システムでは、UCがシーケンス進行途中での判定・指示に介入する一方、直接制御も行っていたが、本システムでは前者の機能をミル・バーナ制御装置が、後者の機能をボイラプラント制御装置が分担し、UCはキック指令だけを出す(計算機除外時には運転員が代行)方式となっている。

次に、システムのかなめとなる部位に対して、多重化構成を適用した。デジタル装置は、その本質的な特性(部品数減少と診断能力)からアナログ装置に比べて信頼度が増加することからシングル構成を原則としたが、デジタル装置がもつ

表2 ミル起動制御に対する機能分担(部分表示) ユニット計算機からキック指令だけを受け、サブシステムがミルの自動起動制御を行なう。

機能	本システム			従来システム		
	UC	MBC	APC	UC	MBC	APC
ミルウォーミング開始指令	○	-	-	○	-	-
トーチ点火	-	○	-	-	○	-
一次空気量増加	○	-	-	-	-	○
冷熱空気自動投入指令	○	-	-	-	○	-
石炭バーナ点火指令	○	-	-	○	-	-
ミル, 給炭機始動	-	○	-	-	○	-
給炭量増加	○	-	-	-	-	○
給炭機自動投入指令	○	-	-	-	○	-

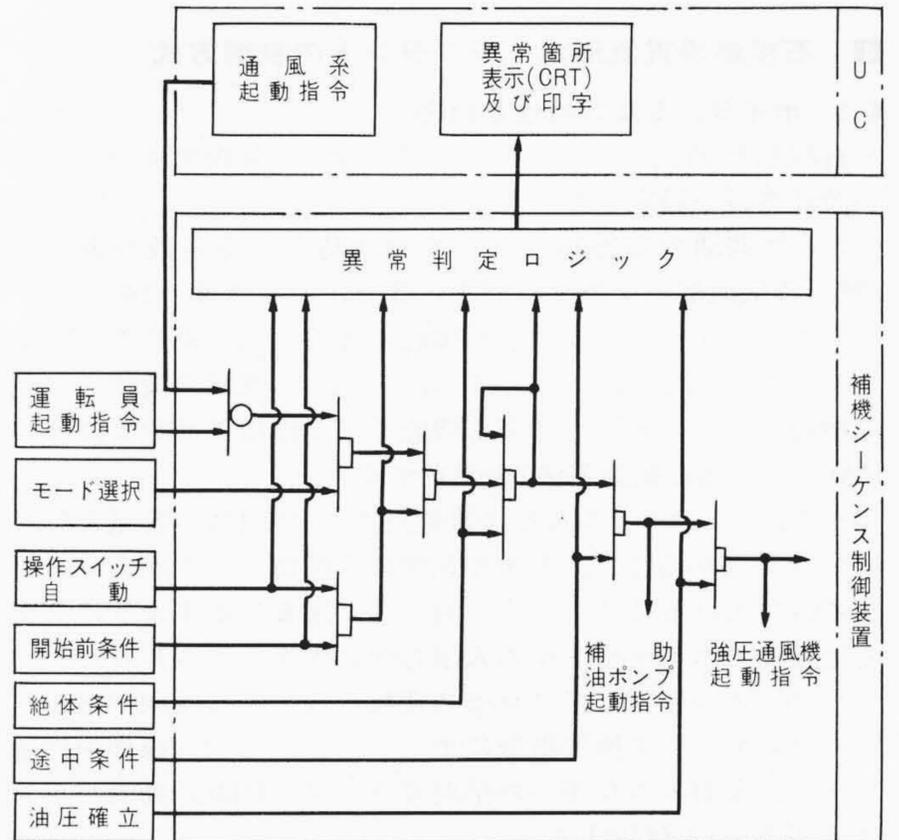
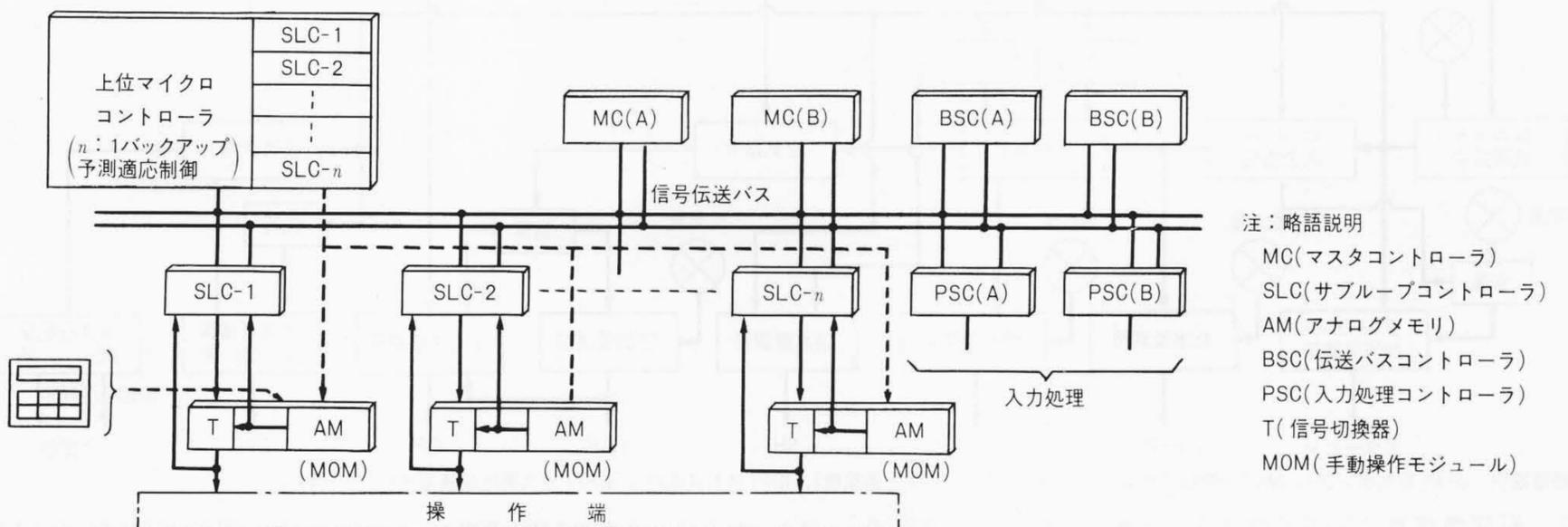


図5 異常診断方式(部分表示) 通風系の起動過程を通じて、前条件、シーケンス進行状態を診断し、渋滞時には故障箇所が表示される。

他の特性(多重化しやすい)を生かし、手動運転の難度が高い部位に対して後備装置をおくこととした。ボイラプラント制御システムの例を図4に示す。まず、システム全体にかかわるマスタコントローラなどを二重化(デュアル方式)し、故障時には待機系に自動的に切り換える。更に、複数台から成るSLC(サブグループコントローラ)に対しては、 $n:1$ バックアップ方式を適用した。すなわち、上位マイクロコントローラにSLCの制御機能を内蔵させ、故障時には別置の伝送ライン(同図中点線で示す。)を通じて当該SLCに代わり自動運転を続行する。

次に、プラントの起動・停止過程で故障が発生した場合、異常箇所を判定し細目を運転員と保守員に提示する機能をサブシステム全体に付加した。通風系の起動過程の例を図5に示す。補機シーケンス制御装置は、起動前条件や起動過程の渋滞有無を診断し、その内容(検出端、操作端を含め個別)をUCに伝送する。CRT画面上の内容と印字記録を基に、通風系の対応操作と系の復旧を行なう。



注: 略語説明
 MC(マスタコントローラ)
 SLC(サブグループコントローラ)
 AM(アナログメモリ)
 BSC(伝送バスコントローラ)
 PSC(入力処理コントローラ)
 T(信号切替器)
 MOM(手動操作モジュール)

図4 APCシステムの構成 機能分散のほか主要部の二重化又は $n:1$ バックアップ手法によって、高信頼化が図られている。

4 石炭燃焼貫流形ボイラプラントの制御方式

4.1 ボイラ、ミルの特性と対応

石炭燃焼貫流ボイラの特性を見定め¹⁾、制御アルゴリズムの設計方針を設定した。

ボイラ共通の応答特性として無駄時間と時定数が大きい(例：蒸気温度系で無駄時間1～3分、時定数6～10分)。このため、フィードバック修正機能の応答が遅れ系を不安定とする。この課題解決策としては、プロセス変数の変化を早期に検知しフィードバック修正機能を早く作用させるところのPAC(予測適応制御手法)を確立する。

一方、ボイラやミルなどは蓄積特性(流体自体の容量と熱容量)をもっていること、系統相互間には動特性の差があることを考慮に入れる必要がある。例えば、図6に示すように負荷変化過程でボイラやミルの入出力間に生ずるエネルギーのアンバランスが原因してプロセス変数が変動する傾向がある。その対応策として操作指令にオーバ(又はアンダ)操作を作用させて、入力エネルギーの早期確立を図るDBC(動的バランス制御手法)を付加する。

4.2 APC(ボイラプラント制御)方式

APCシステムは中央給電指令に忠実に追従して、発電所の出力を自動調節する役割を担う。指令に速やかに応答すること、常に主蒸気温度などのプロセス変数を規定値内に維持す

ることが基本的な要件となる。このような条件及び前述の特性を考慮して構成した制御システムの基本ブロック線図を図7に、プラントの構成を図8に示す。速応性を重視したフィードフォワード制御を基本として、これにフィードバック制御を併用させ安定化を図っている。前述の予測適応制御を主蒸気温度系に適用し、燃焼量と過熱器スプレー量を調節するとともに、動的バランス制御を燃焼量指令系、ミル系及び排ガス量指令系に付加した。

まず、予測制御手法の概念を図9に示す。カルマンフィルタの原理に基づき、ボイラ過熱器内流体の特性を物理式で表わしたモデルを用いて、はじめに蒸気温度の現在値を計算する。これと実蒸気温度との偏差をとり、評価ファクタを加えて最尤蒸気温度を計算する。更に、同一モデルを用いてその時点の燃料量などボイラ入力量に基づきn分先の蒸気温度を算定する。この予測された蒸気温度を燃焼制御系のフィードバック修正信号として用いることによって、蒸気温度が変化し始めた初期段階で燃焼量を調節することが可能となる²⁾。予測適応制御の効果を高めるため、動的バランス制御を併用させた。すなわち、負荷指令に見合って作成される静的(プログラムの)な燃焼量指令に、ユニット負荷指令をインデックスとしたオーバ・アンダファイリング信号を加えることによって、負荷増減時に過渡的に生ずる入力エネルギーの遅れを補償する。

次に、ミル周りの制御方式を図10に示す。まず、主要な操

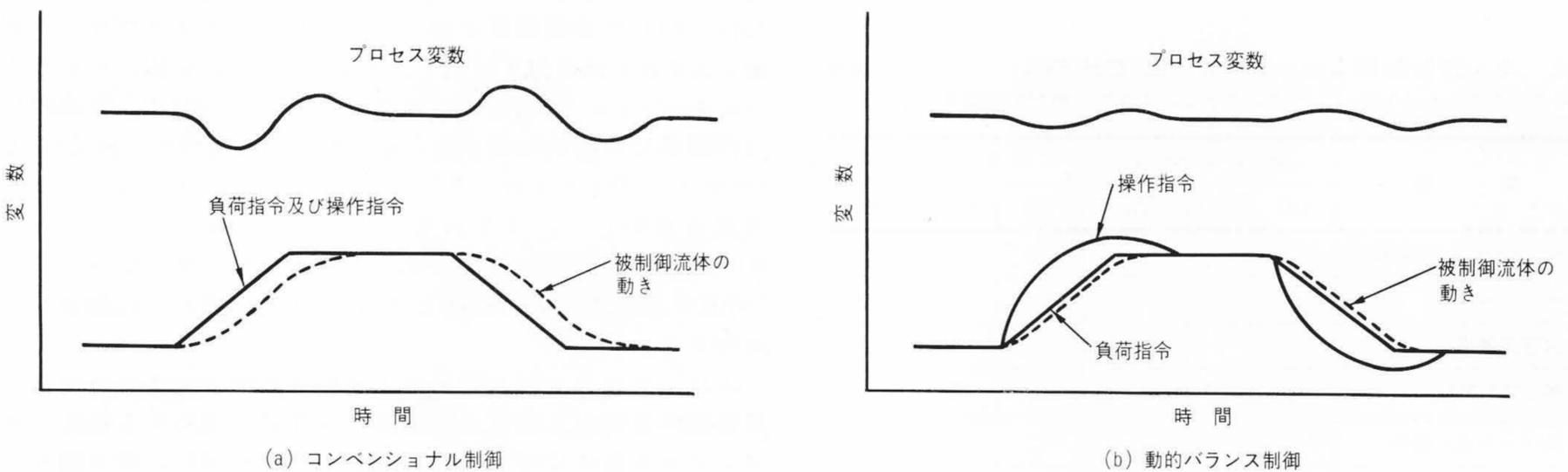
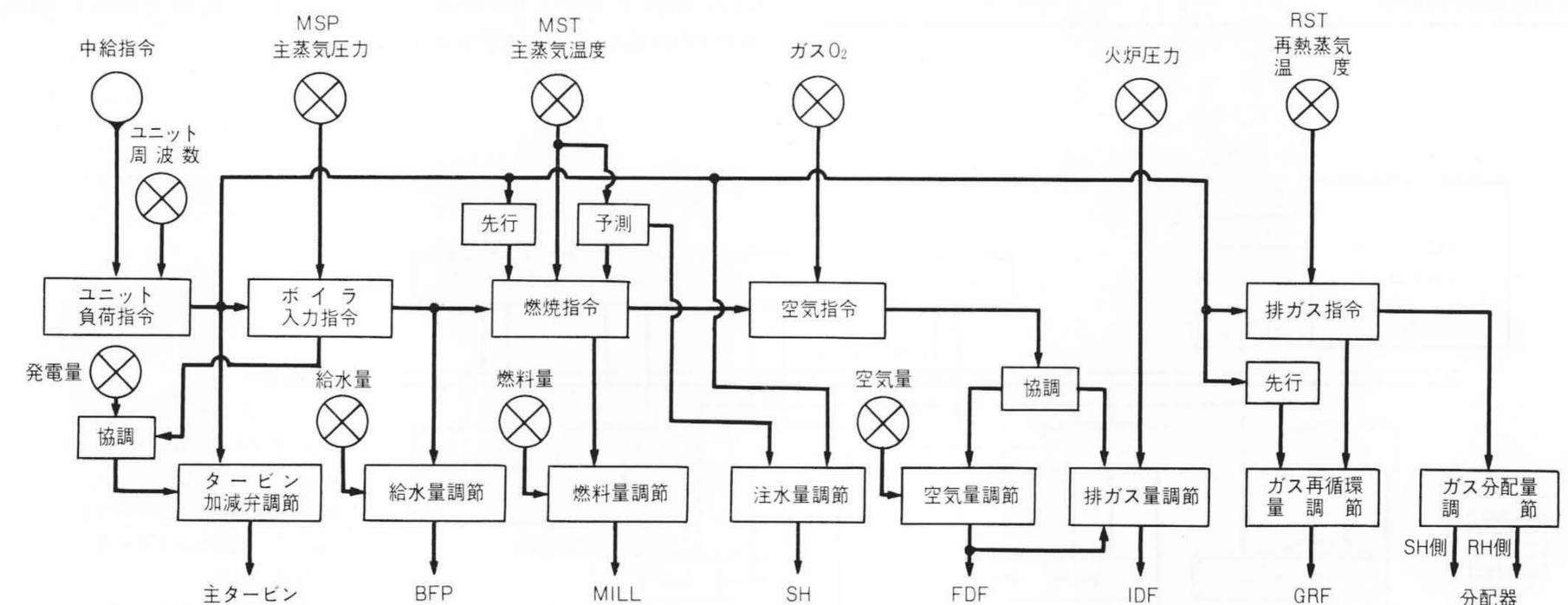
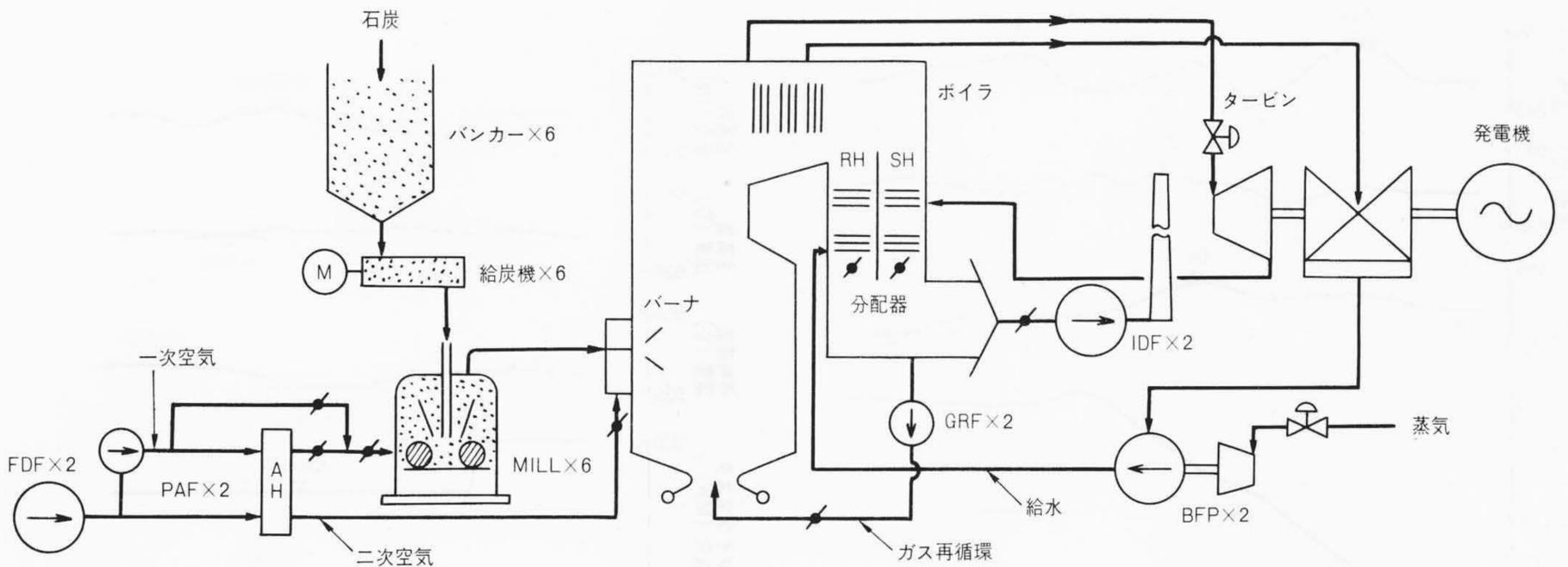


図6 動的バランス制御の効果 ボイラ及びミルの蓄積効果を補償する手法(動的バランス機能)を適用する。



注：略語説明 BFP(給水ポンプ)、MILL(微粉炭機)、SH(過熱器)、FDF(強圧通風機)、IDF(誘引通風機)、GRF(ガス再循環通風機)、RH(再熱器)

図7 石炭燃焼貫流形ボイラプラント基本制御ブロック線図 フィードフォワード制御方式を基本として、これに負荷変化時の変動を抑制する動的バランス制御方式を付加する。



注：略語説明 AH(空気予熱器)

図8 石炭燃焼発電プラントの系統構成(概要) 特性を異にするプラントの諸操作対象の協調を図り、給電指令に速応できるシステムを構成する。

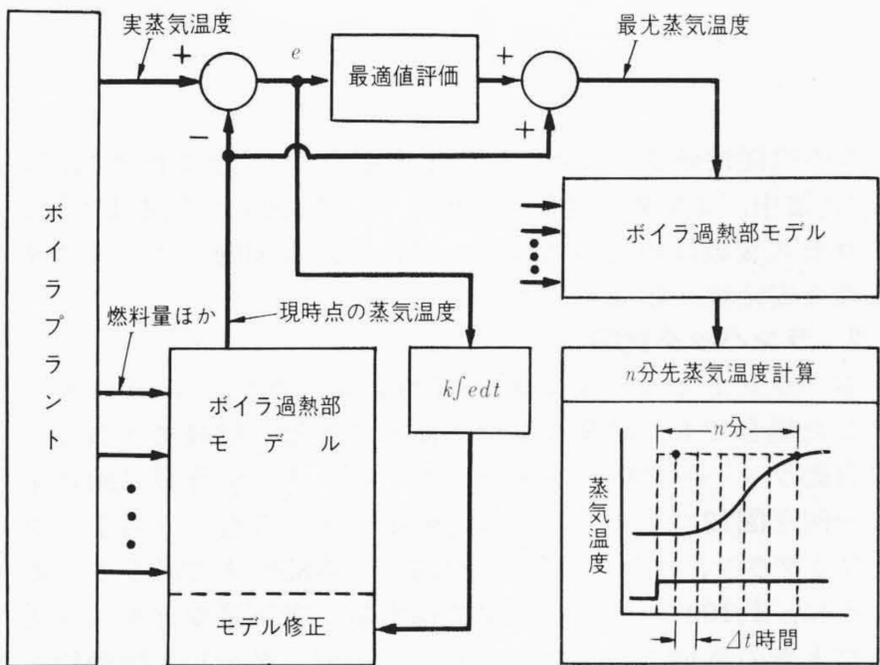


図9 蒸気温度の予測手法 制御装置に内蔵したモデルを用いて、n分先の蒸気温度を計算する。

作量(給炭量、搬送用一次空気量、燃焼用二次空気量及び乾燥用熱・冷空気量)をミルマスタ指令によって並列・先行制御することを基本とした。

多銘柄炭の性状の差によってミル内の循環比、粉炭濃度などが変化して、結果的にミルの応答性などに影響を与えることが考えられるが、その影響を抑制することを目的として、先の並列先行制御に新しくミルレシオ制御を併用させた。すなわち、ミル差圧と一次空気差圧との比から演算した補正信号を給炭機指令に加えて、ミルレシオを規定値に維持する。ミルレシオ調節機能には給炭量を過渡的にオーバ・アンダフィードする特性もあり、ミルの応答を速めるように作用する。一方、ミルの起動(停止)時のミル内の保有炭が確立(排出)する間の蓄積特性を考慮して、給炭機操作回路に初期給炭指令機能を付加する一方、ミル差圧から石炭量を算定しこれをミル起動・停止過程の燃料量フィードバック信号に用いた。

5 試験結果

前述の制御システムを用いて、プラントの試運転調整試験を実施した。本ボイラプラントの定格諸元は出力700MW、主蒸気圧力246atg、主蒸気温度及び再熱蒸気温度543℃で、E形

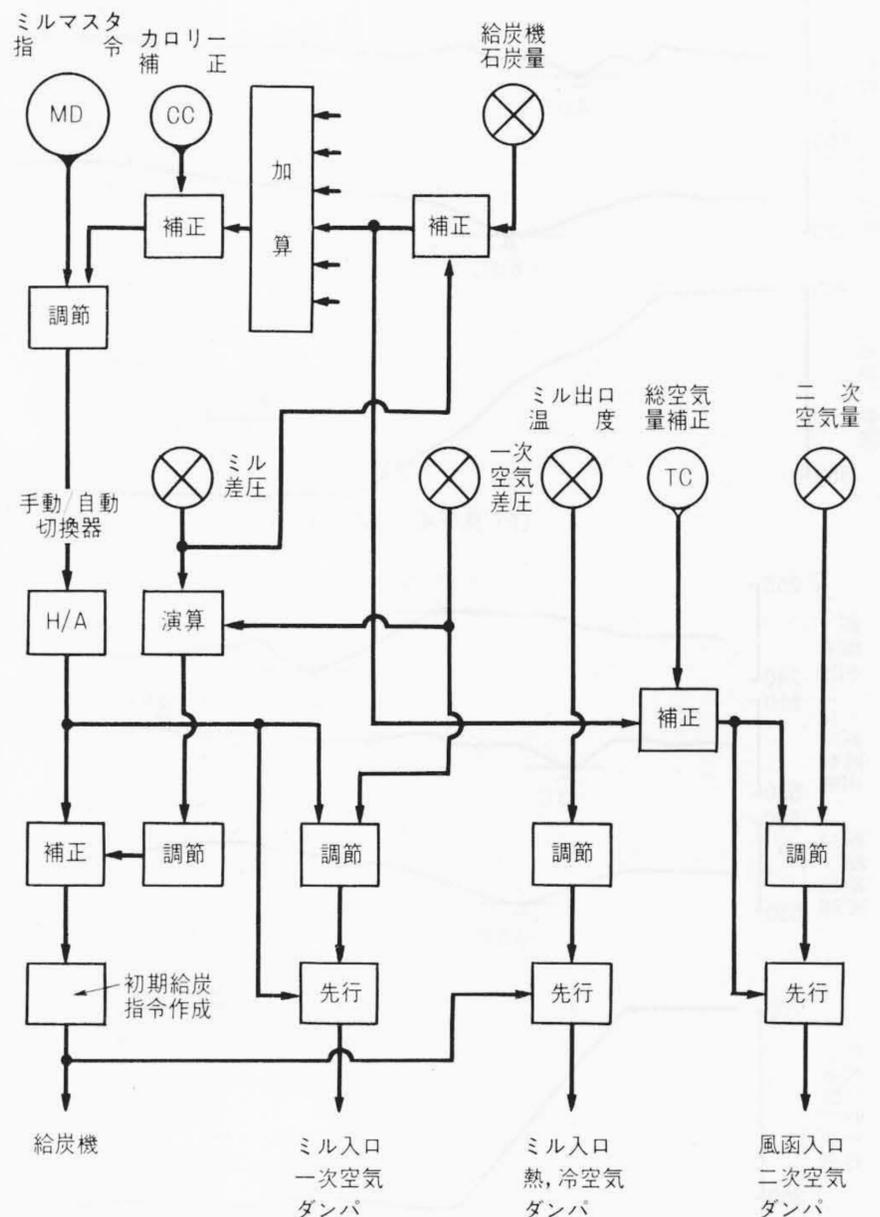


図10 ミル周り基本制御ブロック線図 ミルマスタ指令による並列・先行制御とミルレシオ制御とを併用して、速応・安定化を図る。

ボールミル6台(1台予備)をもち、石炭100%、重油50%の設備をもっている。

プラントの起動停止試験では、ミルの起動停止を含め海水・復水系稼動から定格負荷までの範囲にわたって安定した自動運転ができることを確認した。ここでは、主に負荷変化試験結果について報告する。

5.1 負荷追従試験

石炭専焼の自動運転状態で負荷変化させたときの運転結果

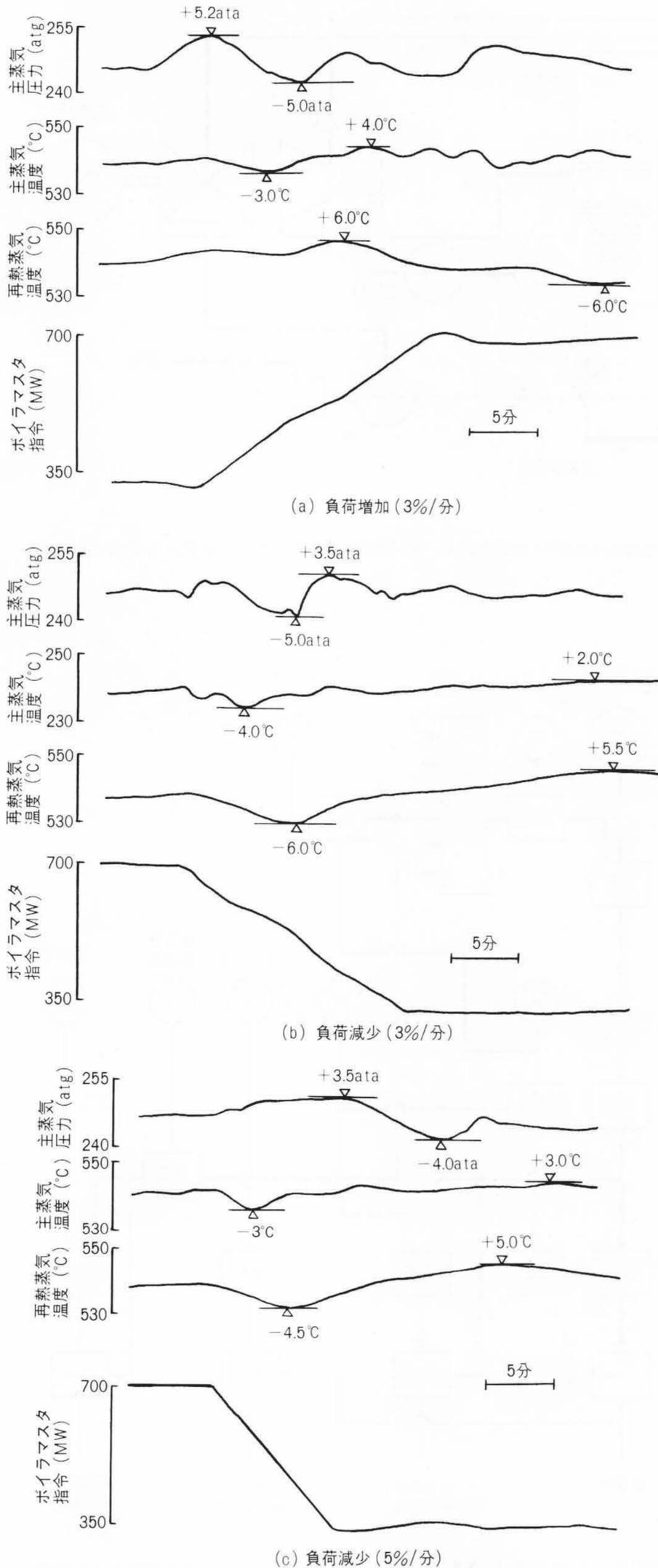


図11 負荷変化時の応答特性 3%/分以上の負荷変化に対して、安定した応答特性をもっている。

の例を図11に示す。同図(a)及び(b)は負荷変化率3%/分、変化幅50%として負荷上昇と下降させたときのものである。途中ミル2台の起動と停止が介在したが、主要なプロセス変数(MST, RST, MSP)は規定値内に抑えられている。一方、

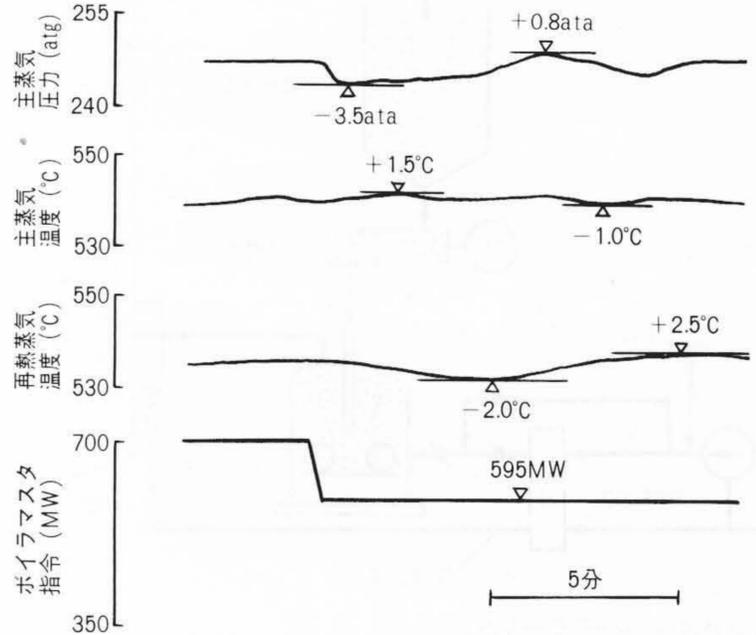


図12 負荷急減時の応答特性 プラント異常時の負荷急減に対しても、安全な運転を維持している。

ミルの追従性確認のため、負荷変化率を5%/分に上げて試験した(途中、ミル2台起動・停止あり)。同図(c)で見ると、プロセス変数は規定値内に入っており、本制御システムの速応性と安定性が確認された。

5.2 ランバック試験

本プラントでは主要な補機(給水ポンプ及びミル)がトリップした場合でも、健全な補機を使って運転が継続できるように自動ランバック機能をもたせている。その実作動試験結果の一例を図12に示す。これは運転中のミル5台のうち1台をトリップさせ、プラント負荷を100%から85%まで減少させるように、約100%/分の変化率で給水量と空気量などを絞り込んだときの挙動を示すものである。一方、タービン駆動給水ポンプ(50%容量)を1台トリップさせ、プラント負荷を100%から50%まで急減させるランバックテストにも成功した。

いずれの試験でも火炉ドラフトをはじめとするプロセス変数は制限値内に入っており、このような異常発生下でも安全な運転を継続できることが確認された。

6 結 言

電源開発株式会社竹原火力発電所3号用700MW超臨界圧貫流形石炭燃焼ボイラプラントは、現在順調な営業運転を行なっている。また、大容量火力プラント用として開発した適応制御方式、及び分散形総合デジタル制御システムは、プラントの性能や信頼性向上に寄与することが確認された。本プラントの運転を通して得られた経験と実績を今後の石炭火力の建設に生かしてゆきたいと考える。

終わりに、本システムの完成に向け共に努力された関係各位に対し感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 飯岡, 外: 石炭火力発電の自動化と制御, 日立評論, 62, 4, 301-306(昭55-4)
- 2) 藤井, 外: カルマンフィルタを用いたボイラの蒸気温度予測制御, 計装, 増刊号113-115(1983)