

石炭火力発電の自動化と制御

Automation and Control System for Coal-Fired Thermal Power Plant

近年、世界的なエネルギー情勢の変化により石炭資源が再び脚光を浴び、国内外で石炭火力発電所の建設、計画が推進されている。その内容には石油火力に代わるものとしての性格もあり、石炭火力であっても石油火力と同程度の運用が求められている。

一方、固体燃料プラント特有の特性に関連して解決してゆかねばならない課題も多い。日立グループ関連各社では、大容量石炭火力発電の負荷追従性の向上と運転自動化を目指し、従来の石炭火力発電、大容量石油火力発電で確立した技術をベースとし、大容量石炭火力発電の制御方式の設計とシミュレーションによる検証を推進してきた。この論文は、その概要について紹介する。

飯岡 康弘* Michihiro Ioka
村松 勝* Masaru Muramatsu
花岡 浩** Hiroshi Hanaoka
本田紀一郎*** Kiichirō Honda

1 緒言

石炭火力発電所の建設が増大するとともに、大容量貫流ボイラプラントへの石炭燃焼導入も本格化している。プラント運用は重原油燃焼ボイラプラントと同程度の自動運転、負荷調整運転を目指すなど高度化の傾向を強めている。このようなニーズに対応し、日立グループ関連各社ではこれまで 350 MW 火力発電所向けにミル回りを含む自動化システムを昭和 54 年 10 月に納入する一方、大容量石炭火力発電の自動化、負荷調整制御システムの設計を推進してきた。

この論文では、大容量石炭火力発電に対するプラント制御方式とシミュレーションによる検討結果の一例についてその概要を紹介する。

2 石炭火力発電所に対する運転上のニーズと対応

2.1 ニーズと問題点

石炭火力発電所は、石油火力発電所に代わるものとして建設されるため、発電所に対するニーズも中間負荷運用としての石油火力発電所と同程度、あるいはそれに近い性能が要求されている。

図 1 は運転制御システムに関するニーズ、問題点及びその対応を示す。具体的には石炭火力発電であっても、運転特性として負荷追従性の向上と起動時間の短縮が、また操作性では最近の自動化プラントと同程度の省力化が要求されている。

一方、石炭は固体燃料として、液体、気体燃料と違った特性があるため、次に述べるような問題点がある。

(1) 燃料系の特性

燃料系の容量、慣性が大きく応答遅れも大きいため、主蒸気圧力、温度に影響を与える。また 1 台のミルに 6～8 本の石炭バーナがあり、これらが同時に点火、消火するために、ミル台数増減時に燃料量変動が大きい。

(2) 炭種の多様性と性状変化

石炭は褐炭から無煙炭まで炭種が非常に多く、一つのボイラでも発熱量の大きく違う石炭が使用されるため、カロリーなどが変化する。

(3) 炉内圧変動

塵埃対策のため、火炉は平衡通風方式を採用しているが、急激な負荷変化時に、火炉圧が大きく変化することがある。

(4) ミル回りの操作性

ミル回りの補機類が多く、運転に高度な判断を必要とするため、従来起動条件、状態確認及び起動・停止操作に熟練と労力を要していた。

(5) 塵埃、石炭の詰まり

塵埃による計器の誤動作、機器の石炭詰まりによって、これまではパトロール、処置に多くの労力を要するとともに、運転上の支障があった。

2.2 対応策

前述の問題点のうち、ミル回りの操作性と石炭詰まりに関しては、自動化などの対応を別途紹介済み¹⁾であり、ここでは特に制御性に関する対応を中心に述べる。

最適な石炭火力発電制御方式の検討に先立ち、諸外国の最新石炭火力発電の調査、米国、英国、西独などのバブコック社との連携による石炭火力発電制御の現状把握を行ない、石油火力で築いた制御技術を基に、大容量石炭火力発電の基本制御方式を検討した。

更に石炭燃焼ボイラの特性を踏まえた上で、プラントへのニーズを満たすためには、ボイラ機器特性の改善とともに、その機器特性に最も適合する制御方式の採用により、問題点

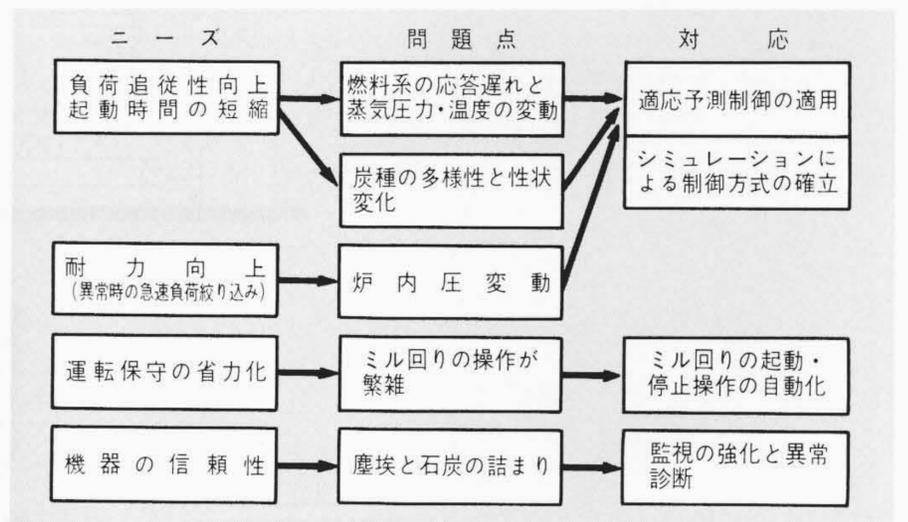


図 1 石炭火力発電所運転制御上のニーズ、問題点とその対応
石炭火力プラント運転の効率化を図るためのニーズを分類し、その問題点とそれに対応できる運転制御技術を表わした。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所電力事業本部 *** バブコック日立株式会社呉工場

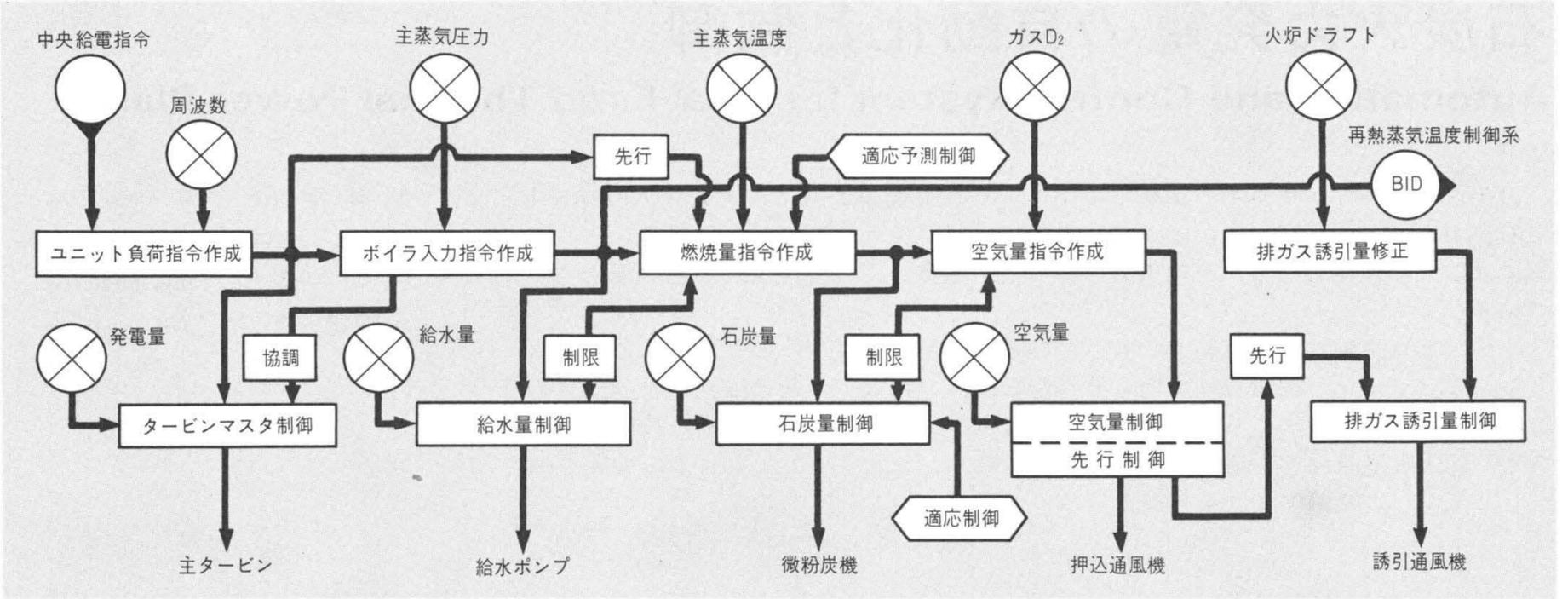


図2 大容量石炭火力プラント基本制御ブロック図 応答性を重視したフィードフォワード制御押込方式のほかに、適応制御方式も適用して負荷変化時の動的バランスをとることに重点をおいている。

を解決してゆく必要がある。このため、蒸気温度、ミルなどの各制御に対して適応予測制御を適用してゆく必要があるが、そのためにはデジタル制御技術の採用がより効果的であると考えられる。

3 石炭火力発電の制御

3.1 ボイラの特性と対応

石炭火力発電プラントでは、ボイラ本体の非線形な特性のほかにミル回りを中心とする燃料系にも同様の特性が加わり、両者を組み合わせたシステムは動的に複雑に変化する制御対象となる。石油火力発電プラントと対比して、燃料系に着目しただけでも石炭量調節のためミル台数を増減する際、燃料量の変動しやすく、ミルの慣性に関連して燃料供給の応答遅れが介在する一方、多種銘柄炭の使用とその性状のばらつきによりボイラ入熱量が変動するなどの違いがある。

これらの特性は、いずれもボイラ入力エネルギー量を不規則に変化させ、結果的に蒸気圧力、蒸気温度などを変動させる要因となり石炭火力発電の負荷追従性が石油火力発電よりも低く抑えられてきた。石炭火力発電の負荷調整運転を容易にしていくため、制御面ではボイラやミルの諸特性によく適合したシステムを組み立ててゆくことがこれまで以上に重要な意味をもつようになった。すなわち、負荷変動の各過程でボイラとタービン間、給水と燃料間、燃料と空気間及び空気と排ガス間のバランスを的確にとり、諸プロセス量を規定値内に維持することが要求される。このため、応答性を重視したフィードフォワード制御方式に加えて、適応予測制御方式を適用して動的なバランスをとることに重点をおいた制御システムにすることが肝要と考える。

ボイラの諸プロセス量の中で、最も敏感に反応し主機の寿命とも密接に関連をもつ蒸気温度系と、ボイラプロセス量変

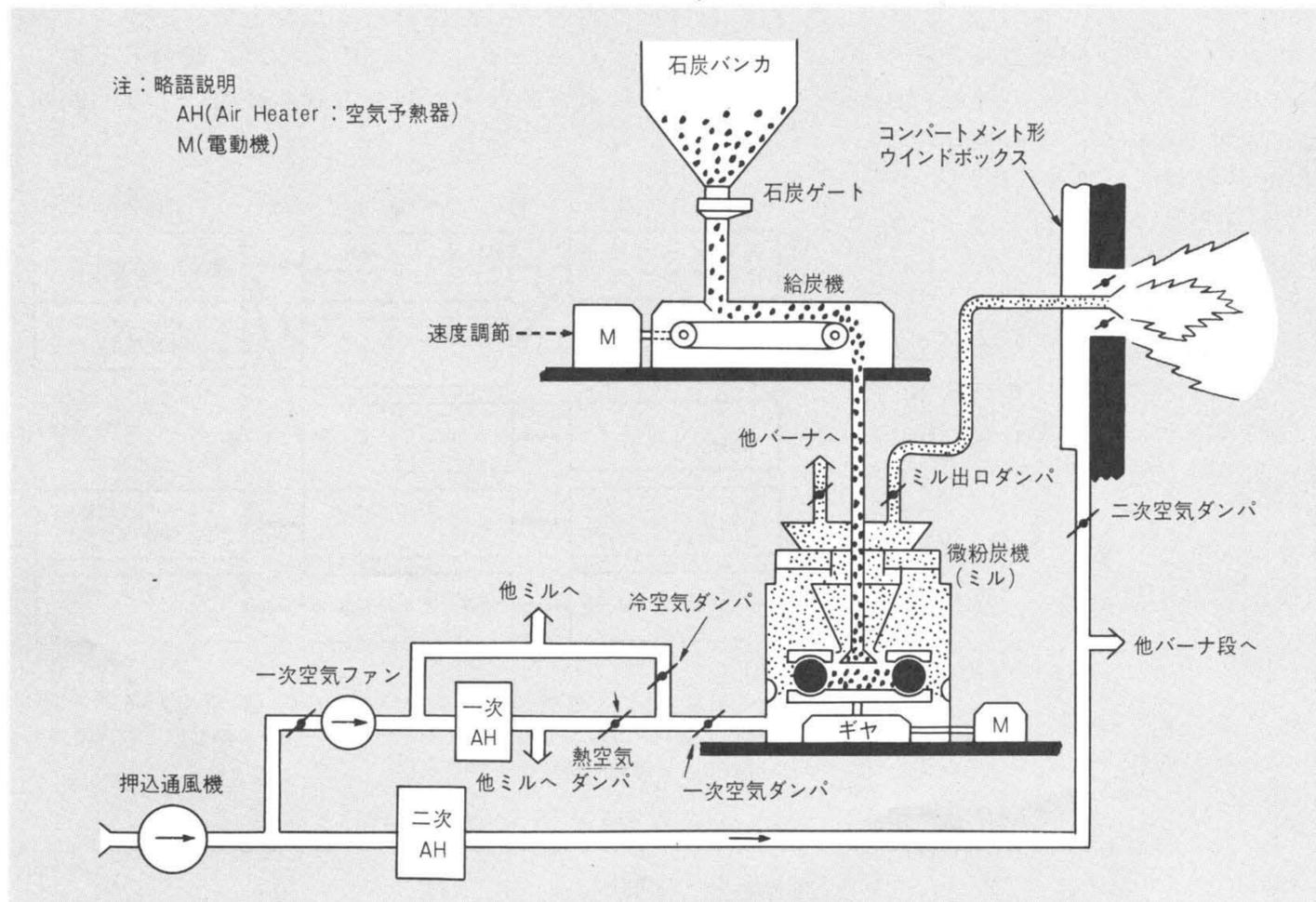


図3 ミル回り系統 大容量火力発電所に主に適用されるコールドエアシステムの場合を示し、複数組みのミルから成る大きなシステムを構成する。

動の主要な要因となる石炭供給系に適応制御方式を重点的に適用するとともに、制御装置自体に記憶・判断能力をもたせ本方式の導入を容易にしてゆくことが効果的であろう。なお、適応予測制御方式を実缶(350MW貫流ボイラ)に適用して、蒸気温度の変動を抑制する効果が確認されている。図2に石炭燃焼貫流ボイラの基本制御系の一例を示す。

3.2 ミル回りの制御システム

(1) ミル回り運転自動化システム

ミルの起動・停止プロセスは、プラントの起動・停止過程のほかに通常の負荷調整運転時にも介在してくる。したがって、ミル運転の自動化は省力効果のほかにプラントの負荷追従性向上にも寄与する意義をもっている。ミル回り系統を図3に、ミル起動プロセスと主要な操作ポイントを図4に示す。この連動プロセスでの操作にはオンオフ制御と調整制御とが存在する。中でも調整制御は対象が一次空気ダンパ、熱・冷空気ダンパ、給炭機速度などと多岐にわたる一方、負荷変化に合わせ適時、適量な操作が要求される対象でもあり、従来から熟練した運転員が対応してきた。したがって、ミルの運転自動化を進めるに当たっては検出端の信頼性向上などの対策とともに、高度な判断と操作を必要とする調整制御機能を制御システムに的確に組み入れてゆくことが必要となる。

ミル自動制御システムの機能構成は図4に示すように、ミル・石炭バーナ及び助燃用油バーナのオンオフ制御機能をMBC(Mill Burner Controls:ミルバーナ制御装置)に、調整制御機能をボイラ制御装置[APC(Automatic Plant Controls:プラント自動制御装置)又はABC(Automatic Boiler Controls:ボイラ自動制御装置)]にそれぞれ組み込み、両者が協調して一連のミル起動・停止の自動運転を図る。

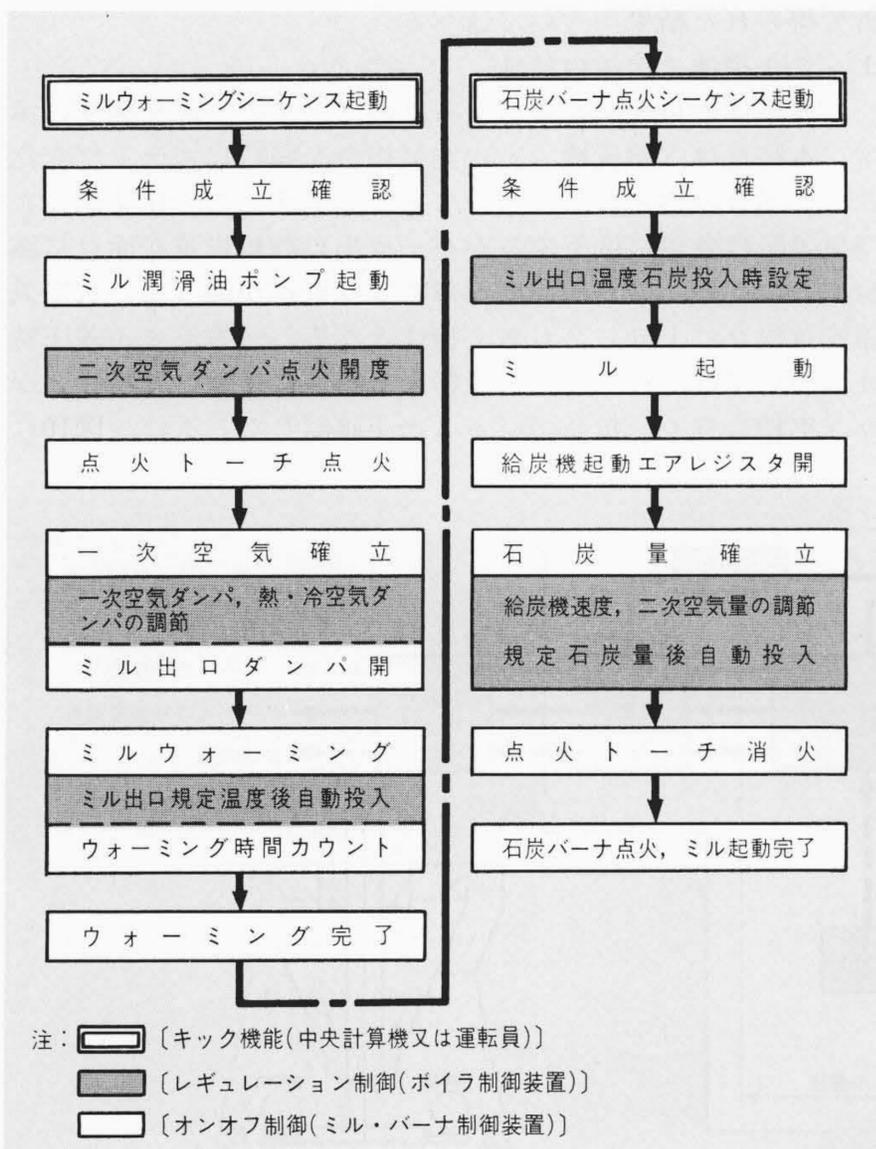


図4 ミル起動プロセスと機能構成 制御装置に記憶・判断能力をもたせ、高度な判断と操作を必要とする調整制御を含め、ミル運転の自動化を図る。

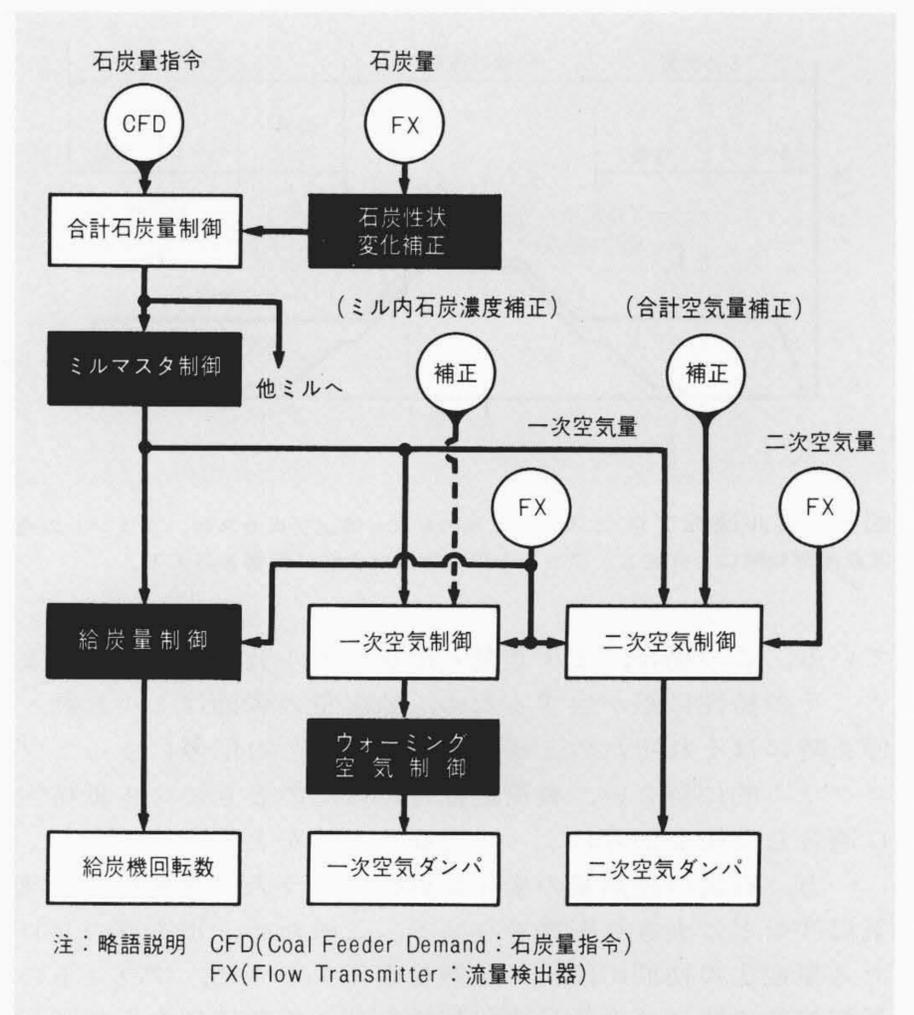


図5 ミル回り石炭・空気制御系統 ミル起動・停止、負荷増減などの運転条件によって変化するミル動特性に適合して最適な操作信号を与え、ミル運転の応答性向上と安定化を図る。

このため、それぞれの制御装置に記憶・判断能力をもたせ、プラント起動・停止スケジュールからプラントレベルの判断を要するミル起動・停止トリガ機能は、運転員又は中央計算機にもたせたシステムとすることが妥当と考える。

(2) ミル回り石炭・空気制御

石炭性状の異なる多種銘柄炭を燃焼し、かつ負荷調整運転を行なうボイラに適合した制御システムを構成するに当たって、次の点に考慮を払う必要がある。

- (a) 燃料量指令によって給炭量、搬送用一次空気量などを並列操作して給炭の応答性を向上させる。
- (b) ミルへの給炭量を計測して、制御のフィードバック信号として組み込み、制御の安定化を図る。
- (c) 必要により二次空気量をミル単位に調節して、燃焼性を改善する。
- (d) 石炭の性状変化に対応して自動補正を行ない、ボイラの諸プロセス量の変動を抑制する。
- (e) ミルの静・動特性に適応した操作量を与え、ミル起動・停止時及び通常負荷運転時の燃料量の最適化を図る。

ミル回り制御系統の例を図5に、ミル運転のプロセスを図6に示す。ミル起動に先立って行なうミルウォーミングに際しては、一次空気量増加に伴ってボイラのプロセス量を変動させぬように調節することが肝要となる。このため、ミル出口温度制御系や排ガス再循環制御系との協調をとりながら、一次空気量をプログラムの増加させる方法をとる。

ミルに流入した石炭は、粉碎、再循環のプロセスを繰り返して、規定粒度になってからバーナへ搬送される。このようなメカニズムに関連して、ミル特有の静特性、動特性が生じてくる。日立E形ミルの特性例を図7に示す。これは、ミルへの給炭量をステップ状に増減させたときのバーナ流入石炭量の挙動を示したもので、動的に非線形な特性をもって変化し

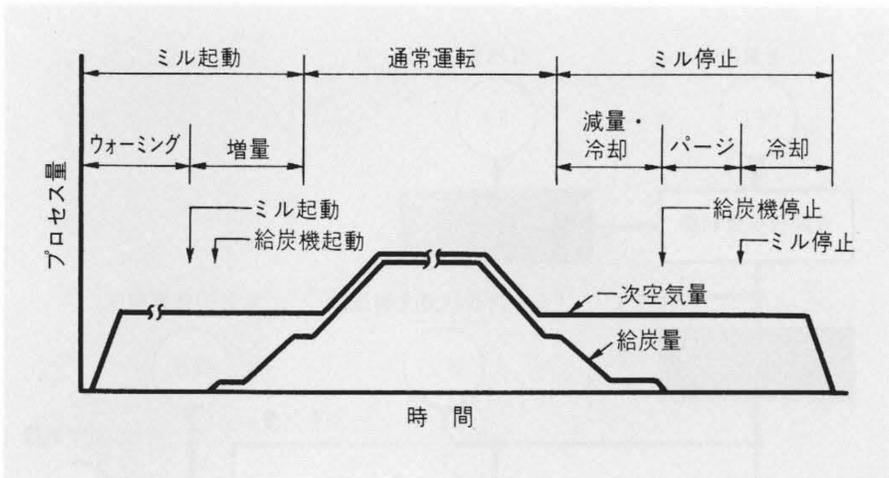


図6 ミル運転プロセス ミルの起動・停止プロセスは、プラントの通常負荷運転時にも介在し、プラントの負荷追従性能に影響を与える。

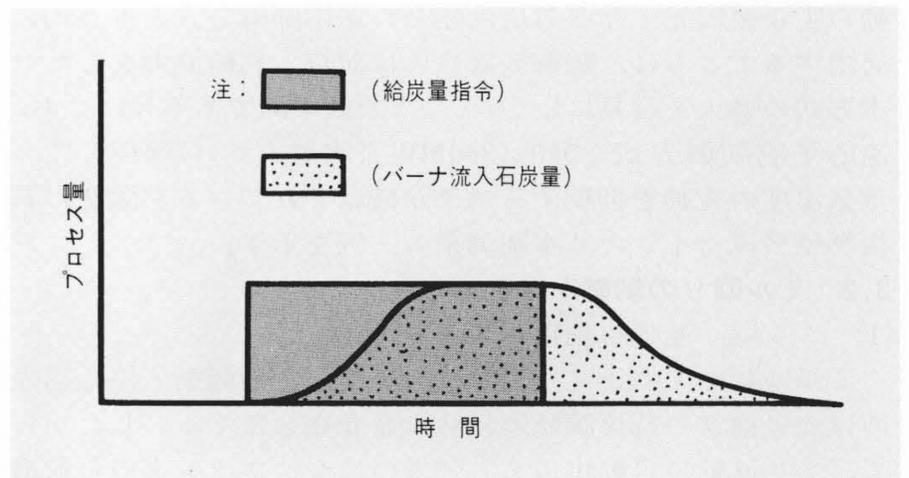


図7 ミル応答特性例 ミルの粉碎、再循環などのメカニズムに関連して、バーナ流入石炭量の挙動は非線形な特性を示す。

ている。この場合、ミル起動・停止やミル負荷増減などによってその特性に差が生ずるため、給炭量の調節はミル起動・停止時にはそれぞれのミル動特性に適合した信号によってプログラマ的行ない、負荷運転時にはそのときのミル動特性に適合した指令信号によって行なう方法をとる。

一方、石炭の発熱量の変化は直接ボイラ入熱を変化させ蒸気温度などに大きな影響を与える。このため、ボイラのプロセス量変化の初期の段階で発熱量変化をとらえ、プラントの運転状態や他プロセス量変化特性などの複数情報から判断して石炭量信号を補正する方法をとる。また、粉碎性の変動によってミル内の循環量、すなわち石炭の濃度が変化する特性があるが、炭種による粉碎性のばらつきが大きい場合にはミル内石炭濃度補正機能を付加し、搬送用一次空気を調節することによってミル内の循環・搬送の円滑化を図る。

4 シミュレーションの結果

石炭燃焼貫流ボイラ、石炭燃焼ドラムボイラで、負荷追従性と急速負荷絞り制御での挙動解析のシミュレーションをデジタル計算機を用いて実施した。その概要とシミュレーション結果について次に述べる。

4.1 目的

本シミュレーションの目的は、石炭燃焼ボイラの負荷追従特性、ランバックなどの急速負荷絞り込み時での蒸気温度、炉内圧変動などの挙動特性を解析し、ボイラ制御方式と試運転調整時の調整指針を確立することにある。

4.2 シミュレーションモデル

シミュレーションモデルについては、既に定圧貫流ボイラ、ドラムボイラ、変圧貫流ボイラ、タービン、給水ポンプなどのシミュレーションモデルが完成し、多くの実績をもっている。

これらのモデルは、プラントの非線形特性と細分化を考慮したモデルである。このたびミル回りのモデルを開発し、これに実績のある貫流ボイラモデルをベースに石炭燃焼貫流プラントシミュレーションモデルを完成した。図8に、このたび開発したミル回りモデルについての基本構成を示す。

本モデルは、給炭機系、一次空気通風機系及びミル系から成る。特にミル系については、ミル内部を集中定数系で近似し、石炭粉碎機構、ドラム、粉炭再循環機構、分級器及び輸送管モデルに分割し、詳細に模擬した。

4.3 シミュレーション結果と考察

前述した石炭燃焼貫流ボイラに対し、シミュレーション解析で得られた結果について述べる。

(1) ミル単体モデルの特性

ミル単体の特性解析を行なったので、その一例を図9に示す。本特性は、給炭機、一次空気指令を同時にステップ変化させた場合の応答を示すものである。ステップ変化時、一次空気差圧は急速に低下するがバーナ出口微粉炭量が徐々に減少するに従い、微粉炭濃度が薄くなり抵抗が減って一次空気差圧は徐々に上昇し落ち着く特性となる。一方、ミル差圧特性については、バーナ出口微粉炭量特性に一致した特性となり、実機に良く一致していることを確認した。次に、図10に

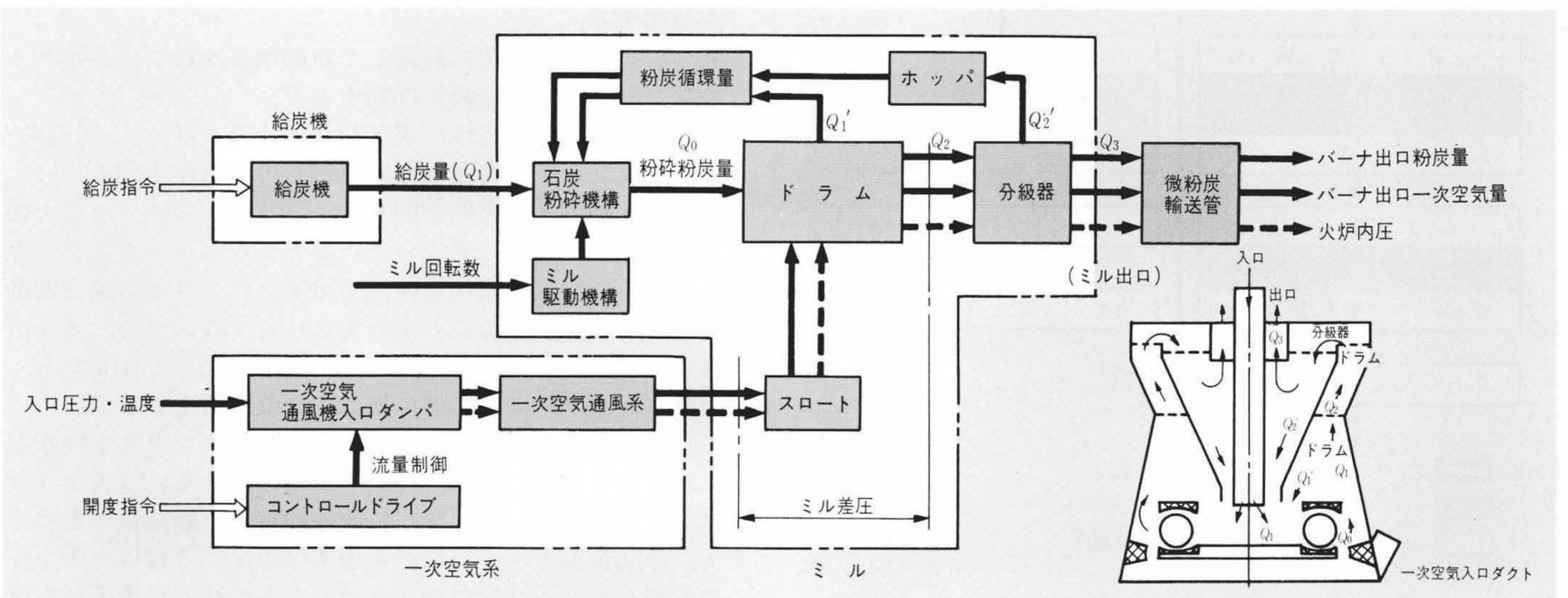


図8 ミル回りモデルの基本構成 給炭機系、一次空気系、ミル系及び輸送管モデルから構成される。

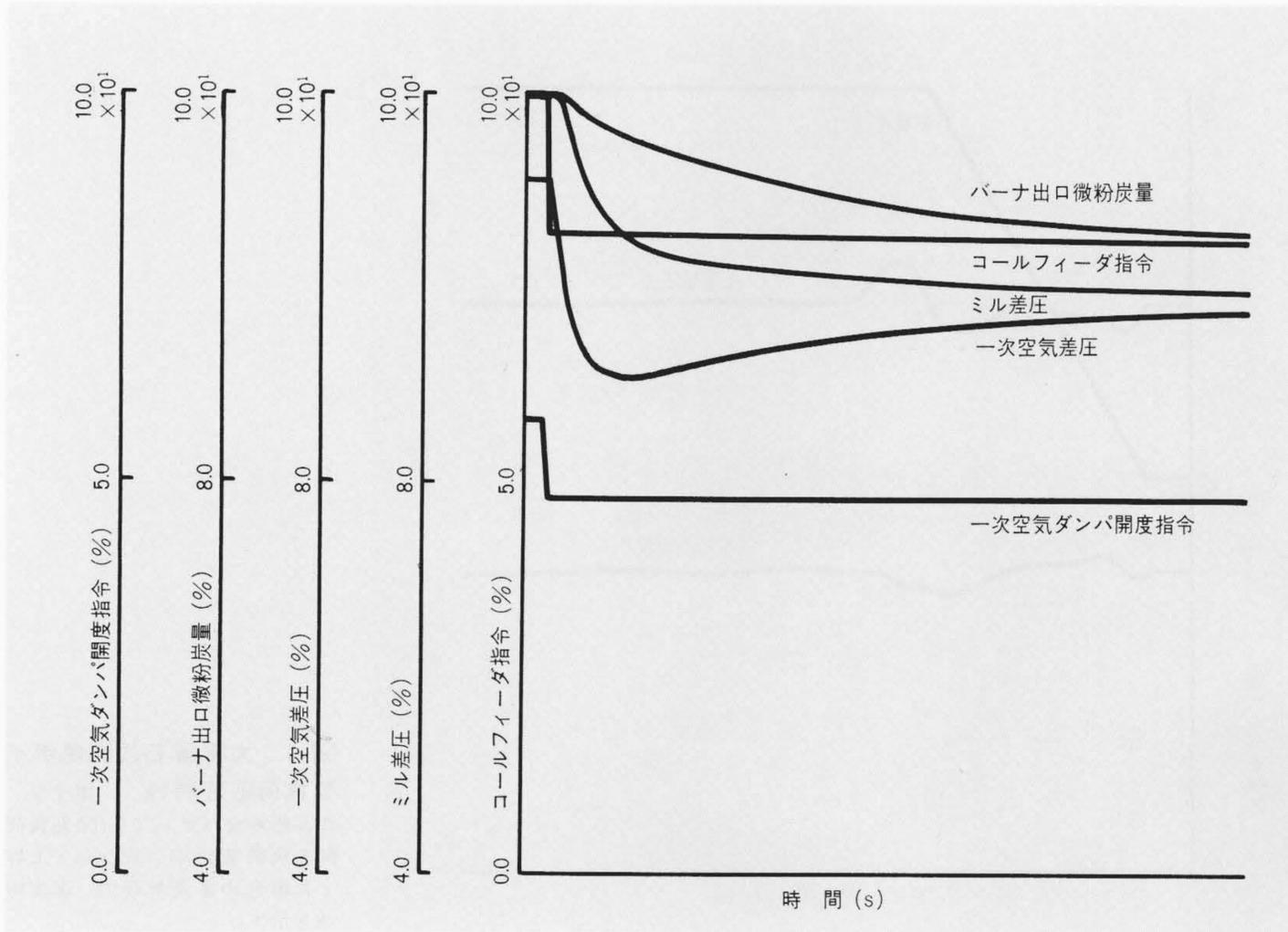


図9 ミルモデルステップ
応答(1) ミルモデル単体での
コールフィーダ、一次空気ダンパ
開度指令を同時にステップに下げ
た場合の一次空気、ミル差圧及び
バーナ出口微粉炭量の応答特性を
示す。

給炭量だけを操作量としたステップ応答を示す。

図9、10から、給炭機、一次空気流量を同時に操作するほうが、一次空気差圧、ミル差圧、バーナ出口微粉炭量共に速い応答特性を示すことが分かる。

(2) 負荷応答特性

図11に、ミルモデルに貫流ボイラ本体モデルを組み合わせ、50%負荷から100%負荷まで変化率3%/minで変化させた場合の応答の一例を示す。蒸気圧力・温度は規定値に入っている。

(3) 炉内圧応答特性

石炭燃焼ボイラの炉内圧シミュレーション結果から、IDF (Induced Draft Fan: 誘引通風機)ランバック動作時での火炉ドラフトの挙動解析結果の一例を図12に示す。本例は100%負荷から50%負荷まで負荷変化率100%/minで急速に絞り込んだ場合を示すが、FDF (Forced Draft Fan: 押込通風機)入口ベーンとIDF入口ダンパを、先行的に一定時間急速に絞り込む回路を設けることにより、同図に示すような良好な火炉ドラフト特性を得ることができた。

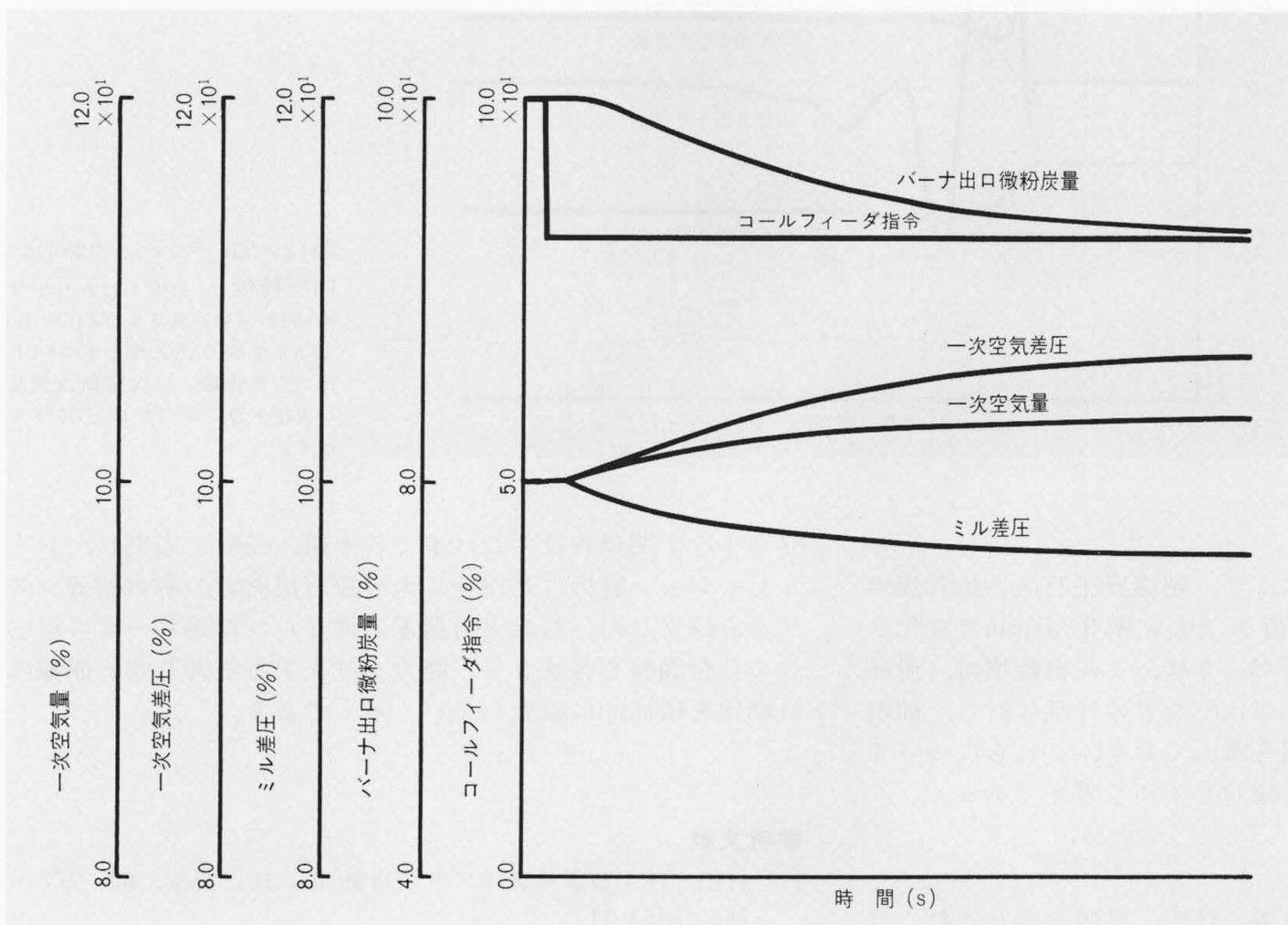


図10 ミルモデルステップ
応答(2) ミルモデル単体での
コールフィーダ指令だけをステッ
プに下げた場合の各差圧とバーナ
出口微粉炭量の応答特性を示す。
ただし、一次空気ダンパ開度は一
定とする。

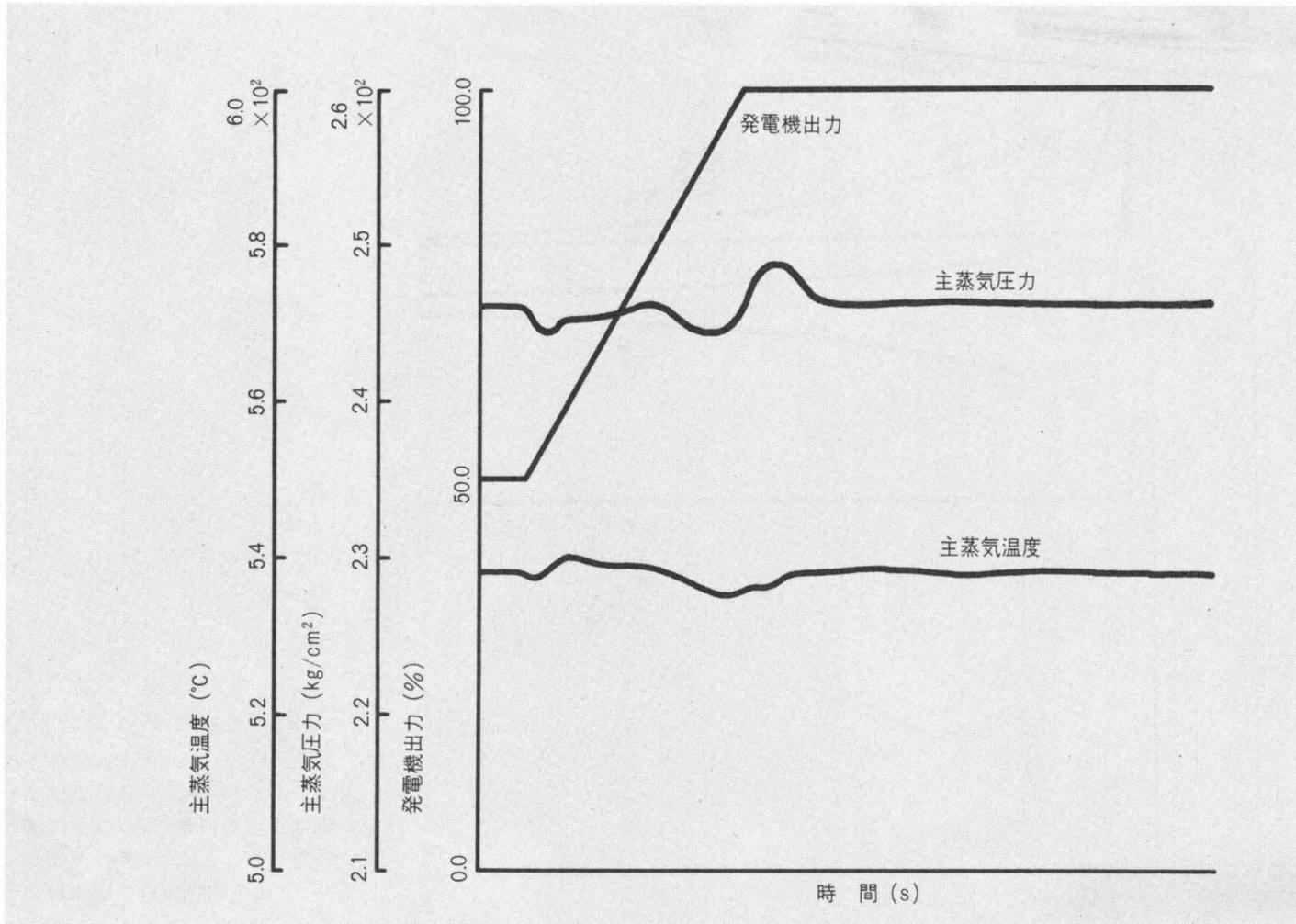


図11 大容量石炭燃焼ボイラ負荷応答特性 ボイラ、ミル組み合わせ、50~100%負荷間を負荷変化率3%/minで上昇した場合の主蒸気圧力、温度特性を示す。

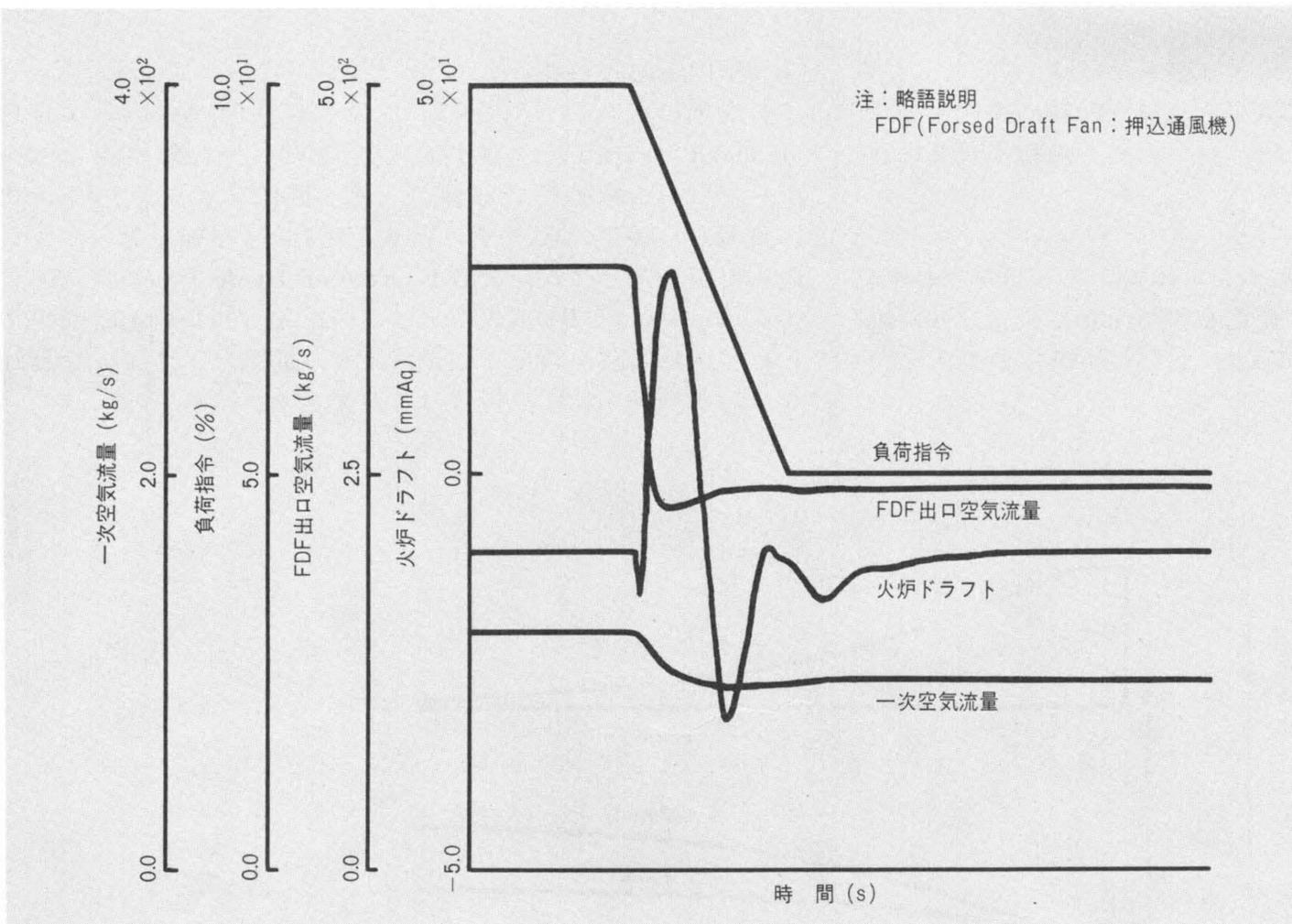


図12 IDFランバック時の炉内圧特性 IDF1台トリップ時100%→50%負荷まで変化率100%/minで絞り込んだときのFDF出口空気流量、一次空気流量及び火炉ドラフトの炉内圧特性を示す。

4.4 今後の課題

本シミュレーション結果により、超臨界圧石炭燃焼貫流ボイラで50%負荷から100%負荷まで変化率3%/minで変化させることができる見通しを得た。今後、ミル台数増減、炭種の変化、ボイラ本体の経時的変化率などの外乱に対し、前項で述べた適応予測制御の適用を考えており、これらについてもシミュレーションによって検討してゆく考えである。

5 結 言

石炭火力発電に関する諸外国の技術、経験を採用入れ、日

立グループ関連各社のこれまでの実績、経験を応用し、シミュレーション解析に基づいて大容量石炭火力の基本制御システムを確立した。石炭火力発電に課せられた諸ニーズに対応して負荷調整を容易とし、能力を拡大する制御方式と運転の自動化を積極的に拡充していく考えである。

参考文献

- 1) 村松, 外; 石炭燃焼ボイラの自動化, 日立評論, 60, 777~782 (昭53-11)