

大容量火力発電所の急速絞り制御(FCB)

Fast Cut Back Technics of Large Scaled Thermal Power Station

送電線側で系統事故が発生したとき、発電所を系統から切り放し事故前の負荷から所内負荷まで急速に絞り込んで所内負荷での運転を継続しながら事故の復旧を待つ、いわゆるFCBの機能を持ったプラントが増えてきている。本稿ではプラントの保護インターロックとの関連で、特に難しいとされているボイラへの給水と燃料の制御を中心に、シミュレーション解析を含め種々検討を行ない、実機テストでも良好な結果を得ることができたので報告する。

原嶋敏彦* Harashima Toshihiko
朽津元治* Kuchitsu Motoharu
福島弘一郎** Fukushima Kōichirō
佐藤美雄*** Satō Yoshio
森尾勝**** Morio Masaru

1 緒言

送電線系統に事故が発生したとき、発電所側に事故が波及する前に系統から切り放して発電所の負荷を所内負荷まで急速に絞り込むことにより運転を継続しながら系統事故の復旧を待ち、速やかに再併入し、当初の負荷まで上昇させる方式が採られるようになってきた。このような発電所負荷の急速絞り込みの機能を一般にFast Cut Back(以下、FCBと略す)と呼び、最近の大容量の火力発電所ではほとんどこの機能を備えている。ボイラやタービンがトリップすると再起動に時間がかかり、特に大容量の発電所では電力系統へ寄与する割合が大きいことから負荷の安全で確実な急速絞り込みが要請されている。

最近ではFCBを行なう際の問題点もしだいに明らかになり、種々の報告がなされている¹⁾。日立製作所では、過去の実プラントのデータを基にシミュレーション解析を含めた種類の検討を行ない、実機テストでも良好な結果を取めている。

本稿では、FCBで特に難しいとされてきた貫流ボイラの給水と燃料の急速絞り込みの問題点を明らかにすることにより、独自の制御方式を考案しFCB実機テストに成功したので、この方式を中心にFCBの方法について述べる。

2 FCB時のプラントの動き

FCBの検出から、動作、待機、復旧まで一連の動きを図1に示す。送電線系統事故が発生すると発電所を事故系統から解列する。タービン、発電機の負荷は事故前の負荷から所内負荷まで瞬間的に軽くなるので、タービン発電機は加速され、タービンの速度調定率に従いタービン加減弁及びインターセプト弁は急閉する。負荷運転中にタービン加減弁が無負荷位置、インターセプト弁が全閉になったということを各々の弁のリミットスイッチで検出してFCBの一連の動作指令を出す。このFCBの検出は、弁のリミットスイッチによる方法の代わりに発電機出力が急速に下がったことを検出する方法もある。FCBの指令が出るとボイラへの給水、燃料、空気の流量を一括して制御しているボイラ自動制御装置(ABC)は負荷目標値が実負荷に追従する、いわゆる負荷トラッキングモードに切り換わる。発電所は系統から解列されて所内の負荷だけになっているためボイラ、タービンの出力目標値はこの所内負荷量まで下がり、これに応じて給水、燃料、空気量があらかじめ決められた変化率で急速に絞り込まれる。しかし、FCB発生と同時にタービンの加減弁も絞り込まれて

いるのでボイラの蒸気圧力が高くなる。そこで蒸気を復水器へバイパスする一次過熱器バイパス弁、二次過熱器バイパス弁及びフラッシュタンク蒸気ダンプ弁を全開して主蒸気圧力の上昇を抑えている。火力発電所では、プラントを安全に運転し、かつ機器へ過大なストレスを与えないようにいろいろな保護インターロックが組まれており、このインターロックの領域に入ると安全のためプラント停止となる。上記の絞り込みは、プラントにストレスを与えないように、すなわち保護インターロックの領域に入らないように行なう必要がある。

図1のインターロックのほかにFCBを計画する際に下記の項目を検討し、実機でも問題のないことを確認している。

- (1) ボイラ側
 - (a) 主蒸気、再熱蒸気温度の上昇、下降
 - (b) 水壁、過熱器、再熱器メタル温度の上昇、上昇率及び管群間のばらつき
 - (c) 火炉出口及びガス再循環ファン(以下、GRFと略す)出口温度の上昇
- (2) タービン側
 - (a) 回転数上昇の影響
 - (b) タービン最終段、排気室の温度上昇
 - (c) 蒸気温度変化によるタービンロータの熱応力
 - (d) グランドシール蒸気源の確保とグランド部のメタル温度差の影響
 - (e) エゼクタ用蒸気源の確保
 - (f) 再併入後の負荷上昇の方法
 - (g) 万一、FCBが失敗したときの機器の制御

その他に周波数上昇による所内の電動機への影響などがある。

以下、給水制御及び燃料制御の詳細について述べる。

3 FCB時の制御方式

3.1 給水制御

3.1.1 給水系の運転状態

FCB関連の火力発電所の系統を図2に示す。通常の負荷運転時、給水ポンプ(以下、BFPと略す)は蒸気タービンにより駆動されており、この駆動蒸気源として主タービンの抽気(図2の例では高圧タービン出口)を使用している。

FCB発生時はボイラ給水量を、最小給水量(貫流式ボイ

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

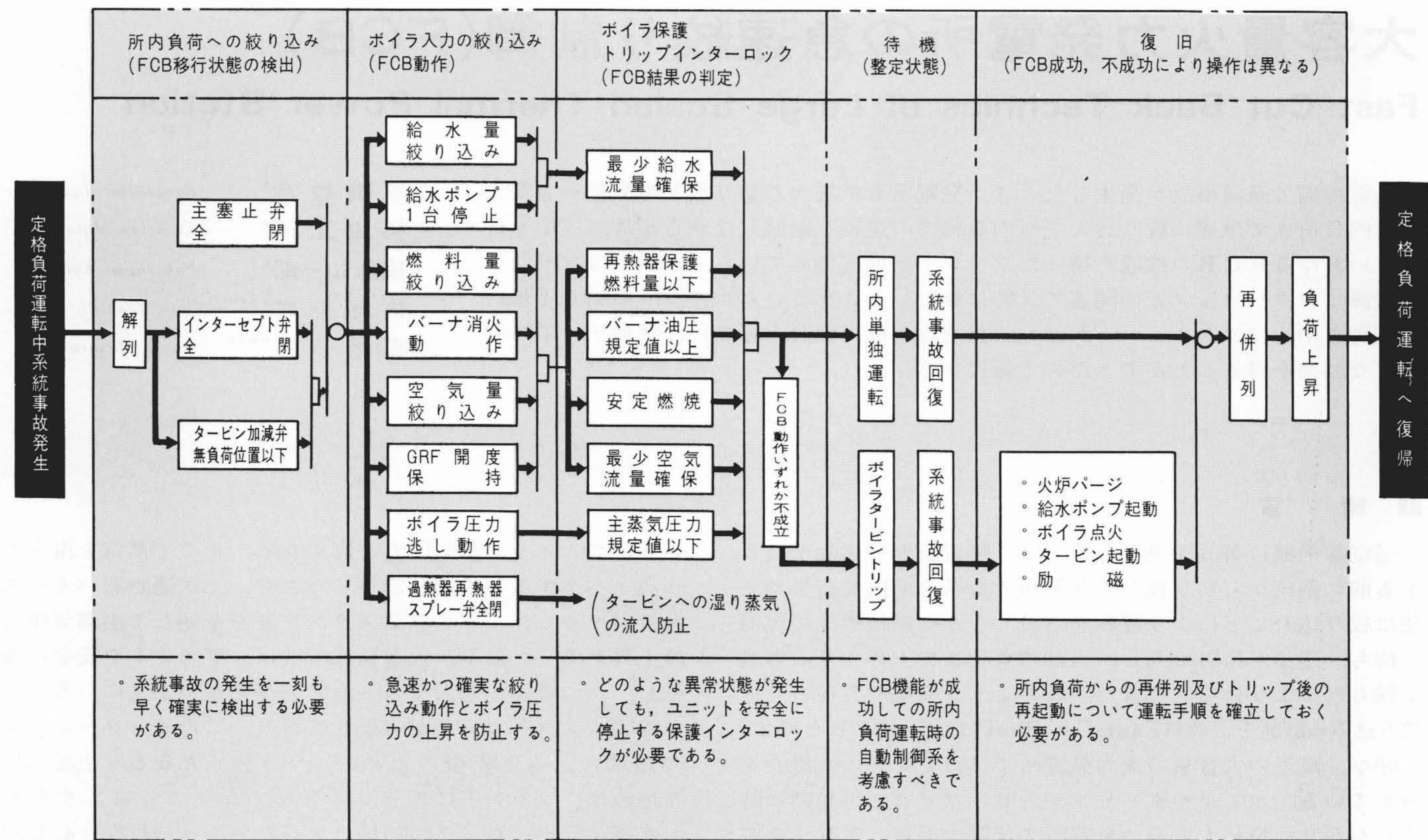


図1 FCB発生時の運転説明図 ボイラ入力への絞り込みは、ボイラ保護トリップインターロックに触れないように制御する。

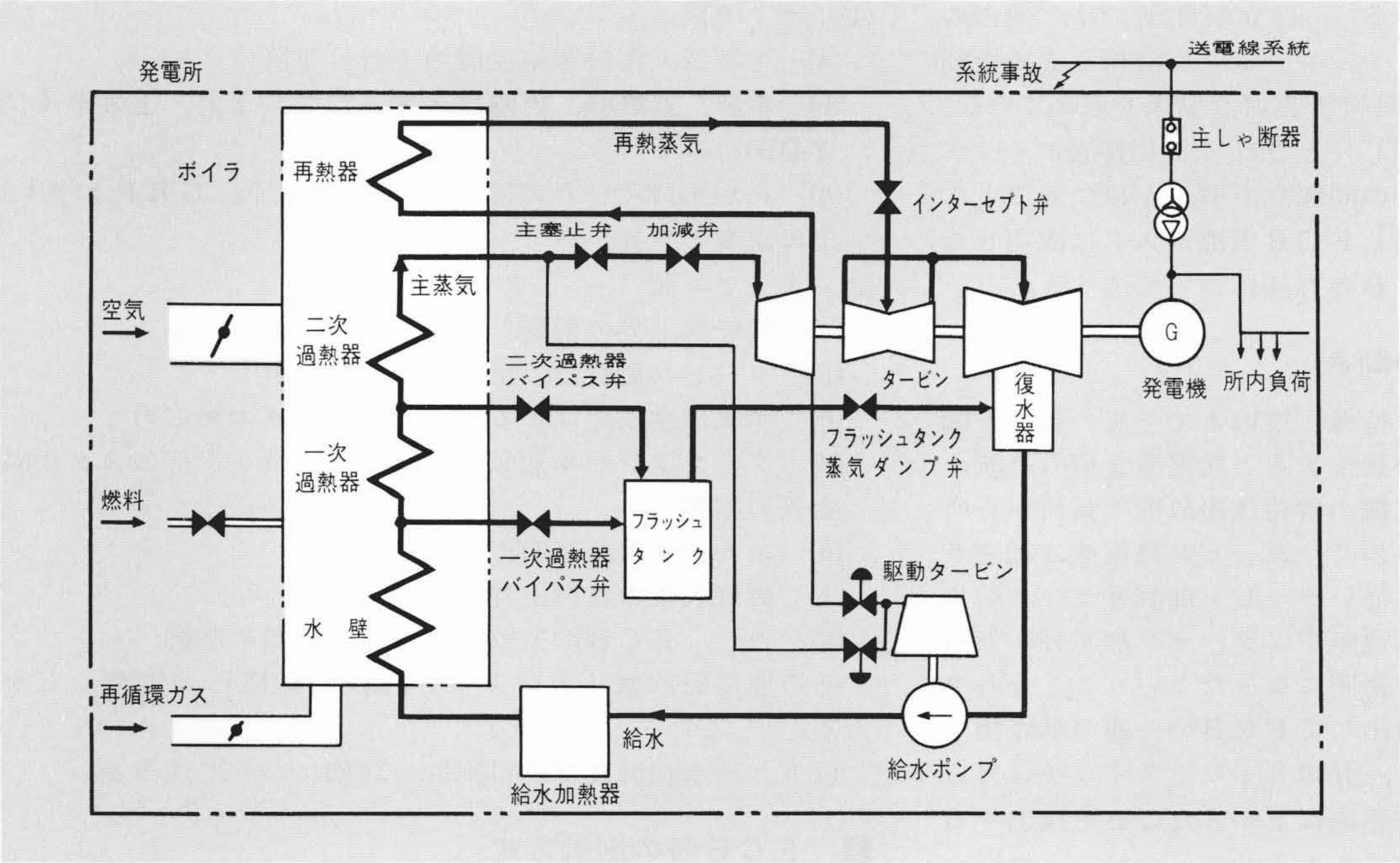


図2 貫流ボイラ火力発電所のFCB関連系統図 主しゃ断器を切り、所内負荷まで負荷を急速に絞り込むとき、ボイラの圧力上昇を防ぐため蒸気を復水器へ逃がしている。

ラの場合ボイラ最大定格の $\frac{1}{4}$)まで急速に減少させる必要がある。このため、2台のBFPが運転中の場合には、あらかじめ定めた1台をトリップさせて1台のBFPで最小給水量まで減少させる。FCB時には主タービン内をほとんど蒸気が流れなくなるため、BFPタービン駆動用蒸気の抽気圧力(低圧蒸気源)がなくなり、蒸気源は主蒸気(高圧蒸気源)に切り換わる。

3.1.2 給水制御上の留意点

FCBで給水制御が問題として取り上げられる理由は、貫

流ボイラでは給水流量の下限值があり、給水の絞りすぎが許されず、また給水の絞りが遅かったり絞り方が少ないと主蒸気圧力が制限値を超えてボイラトリップに至ることになり、成功させるための給水量の許容変化速度及び幅が比較的狭いことにある。

これに加え、FCB時BFP駆動蒸気源の変化や給水圧力などのプラント状態が大幅に変化し、自動回路で追従するのが困難な上に、タービン駆動BFPは低流量域でシステムゲ

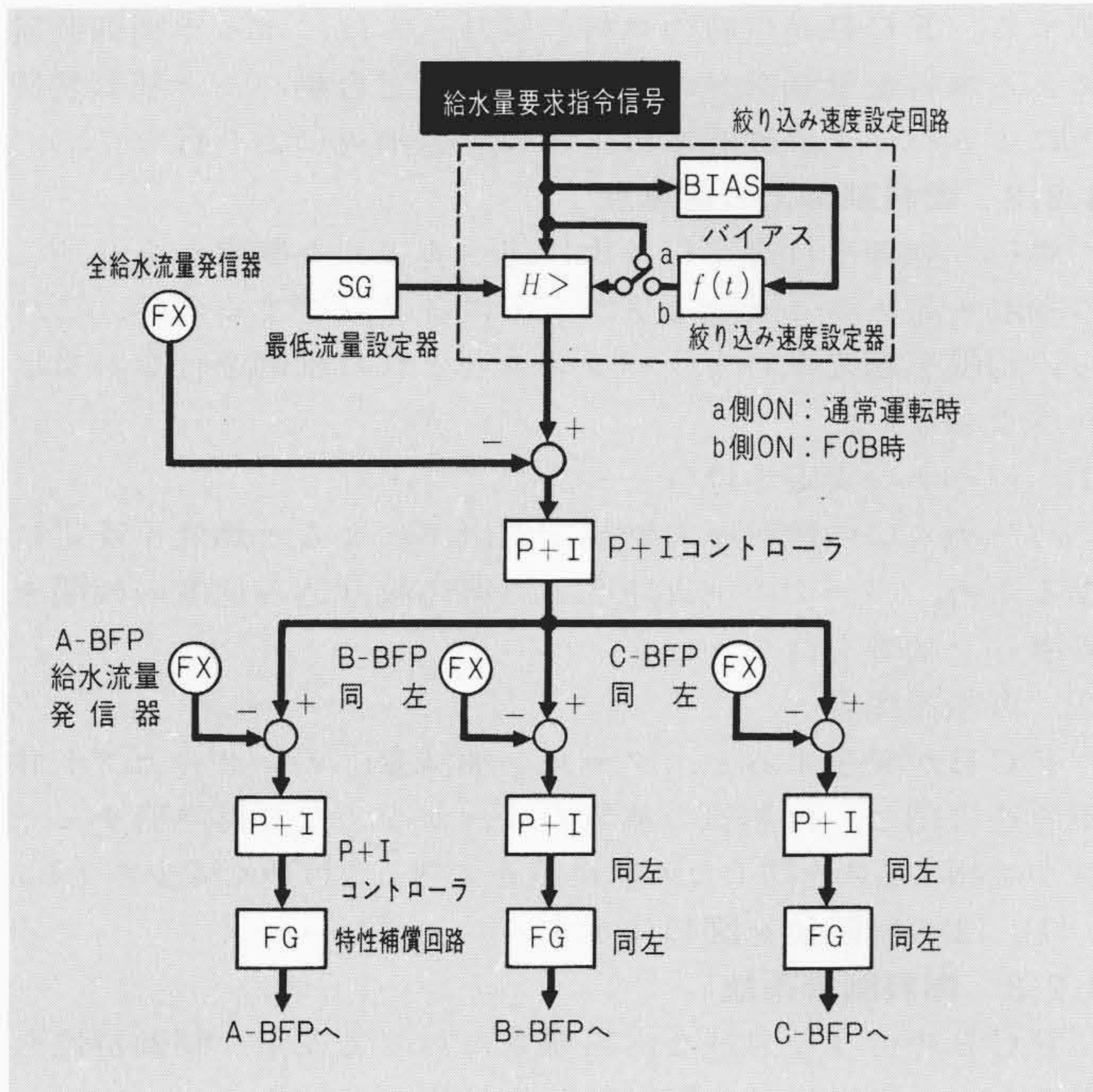


図3 給水制御系統 給水制御の要求信号回路にFCB用回路を追加している。

インが大きくなるため、小幅な制御信号の変化でも給水量が大幅に変動し安定な制御を継続しにくい状況にある。

これらの問題点に対する解決策として日立製作所では次に述べるような対策を行なっている。

3.1.3 FCBに対する給水制御上の対策

(1) 先行予測制御方式

FCB時、負荷はステップ状に急変するため、これに対する給水制御の追従をフィードバック制御だけで行なったのでは大きな偏差が出て、大きなアンダシュート又は制御遅れが生じてボイラはトリップする。そこでFCB時の給水制御に対し、先行予測制御回路を設けて急速に、しかも安定にボイラの最低流量まで低下可能なものとしている。この方法は、給水制御系を自動のままFCB発生で強制的にガバナ設定器をあらかじめ予測したFCB後の安定位置付近に先行してもらっていき、その後の過渡的な変化や目標値からのずれ分をフィードバック制御で吸収させる方法である。具体的方法を図3、4、5に示して説明する。

通常の負荷運転では、負荷要求信号から全給水要求信号を作り、この信号と全給水量との偏差を制御器で演算し、運転中の各ポンプの目標信号として各ポンプに与えている。各ポンプでは、この目標信号と各ポンプの給水量との偏差をとり、この差に応じた制御信号を各ポンプに与えている。

この回路で通常運転中は、負荷要求信号からバイアス量が演算器を通してFCB時の初期値を常時計算しておき、FCBが発生すると直ちに切換スイッチをFCB用の変化プログラム発生器側(図3のb側)へ切り換えてFCB時の給水要求信号を高値選択器を通して各BFPへ与えられるようにしている。

このFCB時給水要求信号の設定値を図4に示す。この設定値は同図(a)に示すように、FCBが発生するとBFPタービンのガバナを予測位置まで移動させるためのステップバイアスを加え、その後給水量をアンダシュートなく最低流量まで急速に降下するよう一定の降下率で要求信号を降下させる。

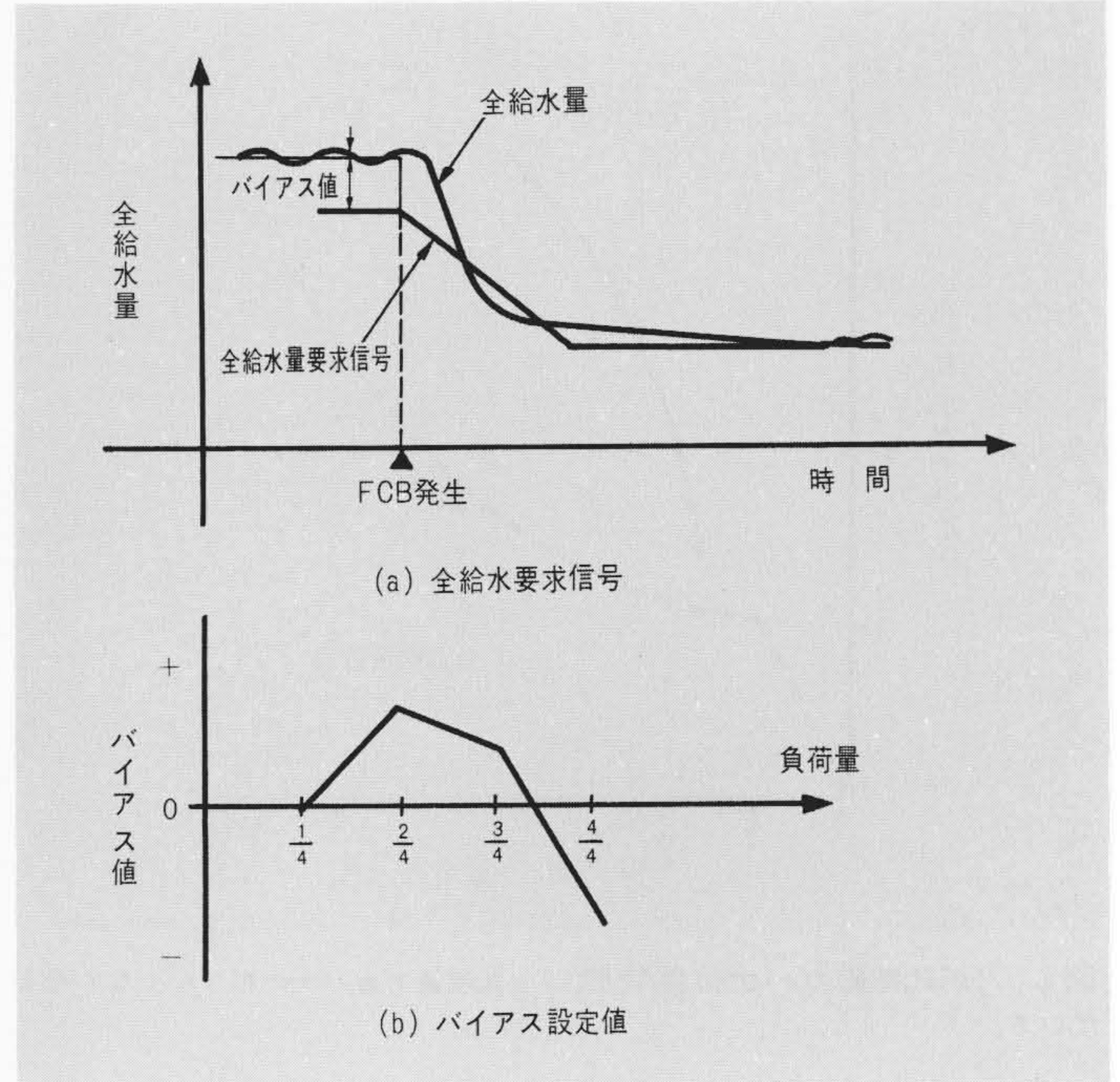


図4 FCB時給水制御設定値 全給水要求信号及びバイアス値の例を示す。

ステップバイアスの値は同図(b)に示すようにFCB前の負荷の関数として設定できるようにして、この設定値はBFPの駆動力よりFCB前後のガバナ位置を求め、その差分として与えられる。

以上の動作をBFPタービンのガバナ特性曲線上で例示すると図5に示すようになる。通常の運転では負荷とともに運転軌跡の上を動き、FCB後の運転位置は、同図上F点で示したほぼ一定の位置になる。そこでA点で運転しているとき、FCBが発生した場合には、ガバナを直ちにFCB後のガバナ位置B点に移し、ガバナの制御動作により、蒸気源の切換えなどを行ないF点で安定させている。バイアス値の設定はA点とB点の差分として設定されている。

(2) 低流量域補償回路

タービン給水ポンプの特性は、ポンプ系システムとの関連

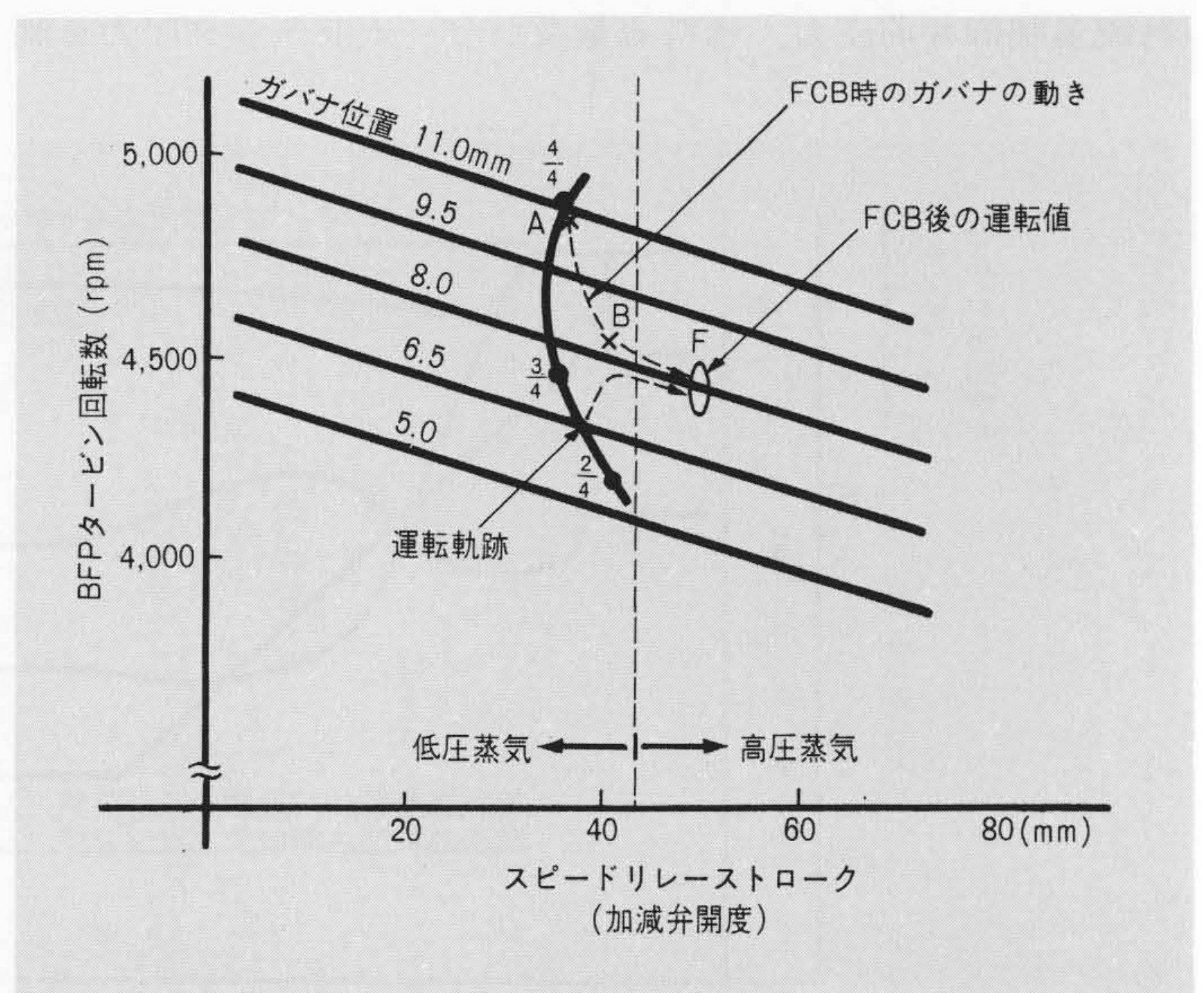


図5 BFPタービンガバナ特性曲線 ガバナ特性曲線上でFCB時の動きを示している。

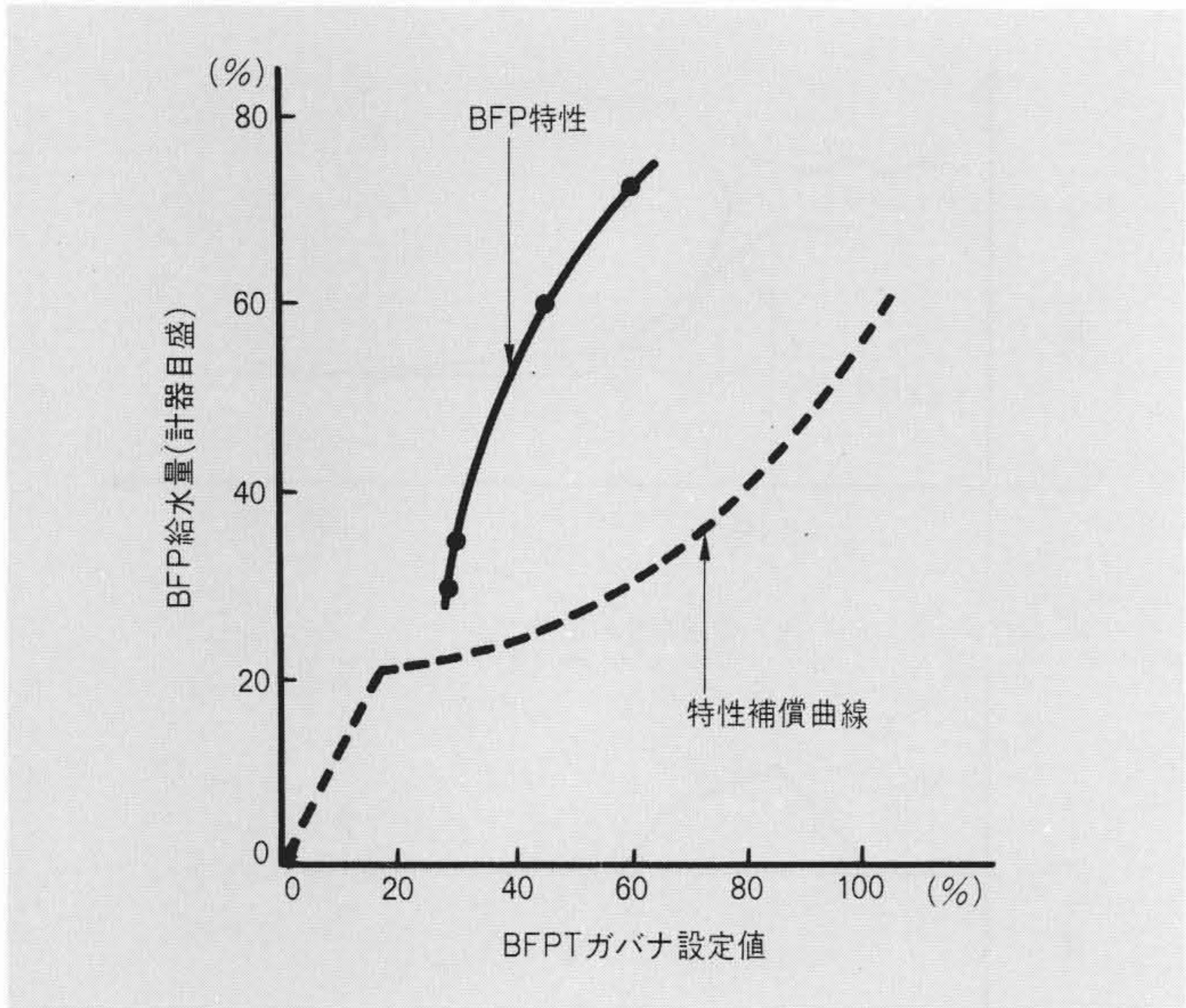


図6 BFP流量ガバナ位置特性 低流量でガバナの動きが少なくなっている。

より図6に示すように低流量域ではガバナ位置の変動に対する給水量の変動量が大きくなっている。そこで、FCB時などの低流量制御を安定化するため、図6に破線で示すような特性補償を図3のBFP制御回路で、特性補償回路としてガバナ設定信号に加え線形化する必要がある。

これらの回路により低流量域が安定に行えるようになった。

3.1.4 テスト結果

以上の対策を行なって実施した実機でのFCBテストの結果を図7に示す。

給水量のアンダシュートはなく、少し多めの給水からゆっくりと最小流量に落ち着いている。主蒸気圧力高トリップに対する余裕は十分あるので、このほうが安全サイドになる。

ガバナ制御信号の動きは、初期バイアス値で最終値付近に行っているが、給水要求信号と全給水量との偏差により一度増加し再び予想した安定値付近に戻ってきている。

3.2 燃料制御

3.2.1 燃料制御

燃料の制御は、燃料流量制御弁、燃料圧力制御弁により燃料流量制御弁前圧力、燃料流量及びバーナ前ヘッダ圧力を制

御する。FCB発生時の燃料の絞り込みは、ボイラ制御装置による燃料流量制御弁の急速絞り込みと自動バーナ制御装置とによるバーナの最低本数までの急速消火により行なう。

3.2.2 燃料制御上の留意点

燃料の制御を行なうには次に述べるような制限があり、この制限を超えると安全上プラントはトリップするので、これらの制限を超えないようバランスのとれた制御を行なわなければならない。

(1) バーナの安定燃焼

バーナ入口の燃料圧力が規定値以下になると燃焼不安定になるため、バーナの消火速度と燃料の絞り込み速度の相関を考慮した制御を行なう。

(2) 再熱器保護

FCBが発生すると、タービン加減弁、インターセプト弁が急速に閉じ、再熱器の蒸気の流れがなくなり再熱器チューブが焼損するのを防ぐため燃料量をできるだけ速く減少させる。

(1)、(2)の制限値を図11に示す。

3.2.3 燃料制御系統

FCBのような急速な応答要求に対して安定な制御特性を得るため、図8に示す制御系統を採用している。

(1) 絞り込み速度設定回路

バーナの消火パターンに適合した燃料絞り込み指令信号を作る。

(2) 燃料流量調節弁

基本的には、燃料流量のフィードバックによる比例・積分制御であるが、弁の非線形性をフィード、フォワード信号で補正する。

(3) 燃料圧力制御

基本的には燃料圧力のフィードバックによる比例・積分制御であるが、燃料流量制御系との協調をとるため、燃料絞り込み指令値と流量偏差信号を先行的に加える。

3.2.4 燃料絞り込み速度

バーナ弁は短時間で開閉操作を繰り返すことができないため、バーナ弁をフィードバック操作パラメータとして使用できず一定パターンの消火操作をとっている。このため、燃料流量調節弁前圧力、バーナヘッダ圧力及び燃料流量の三つの制御量を、燃料圧力調節弁、燃料流量調節弁の二つの操作量で制御する必要がある、バーナ弁の消火パターンに適合した燃料絞り込み速度を設定している。

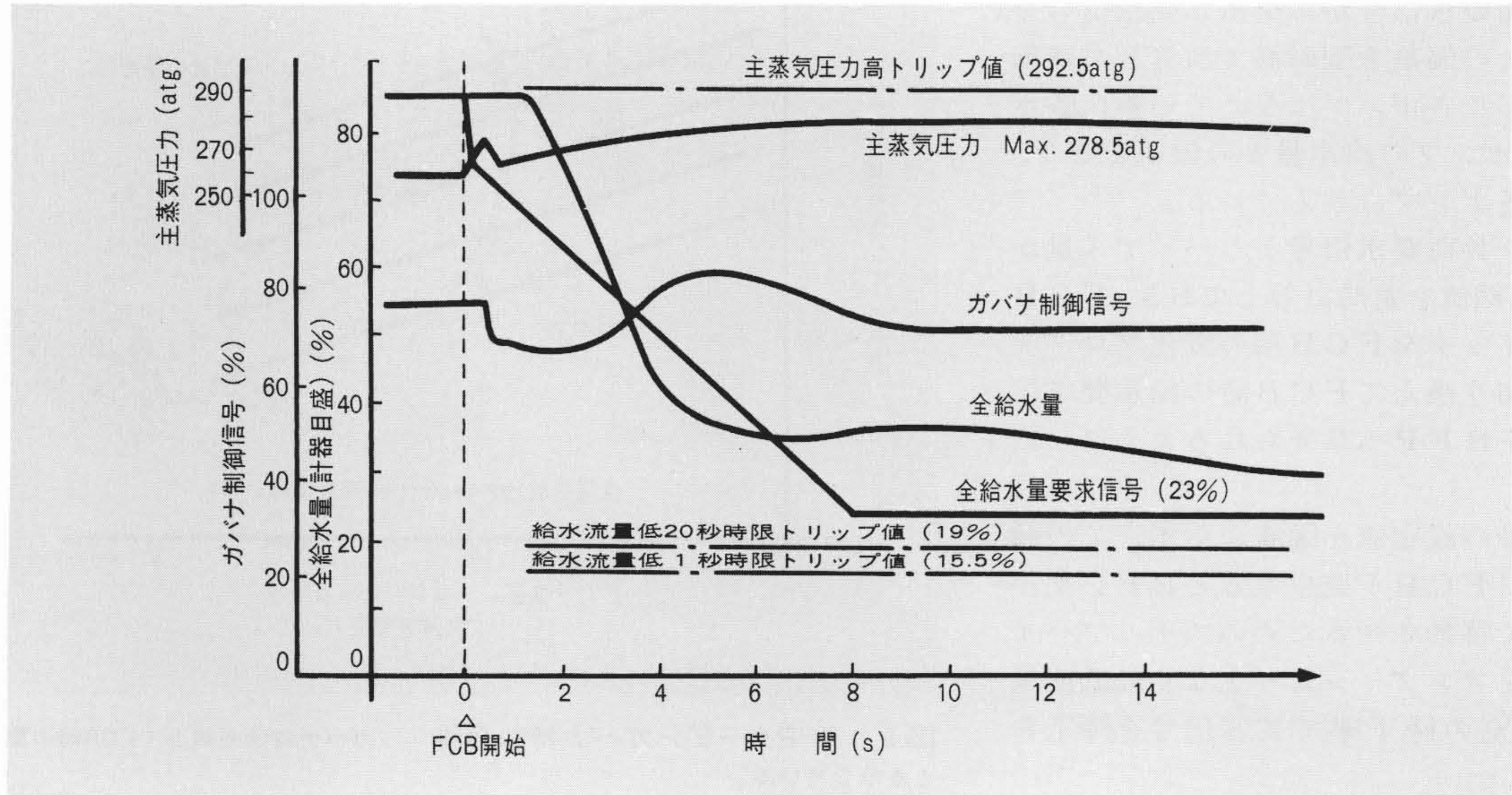
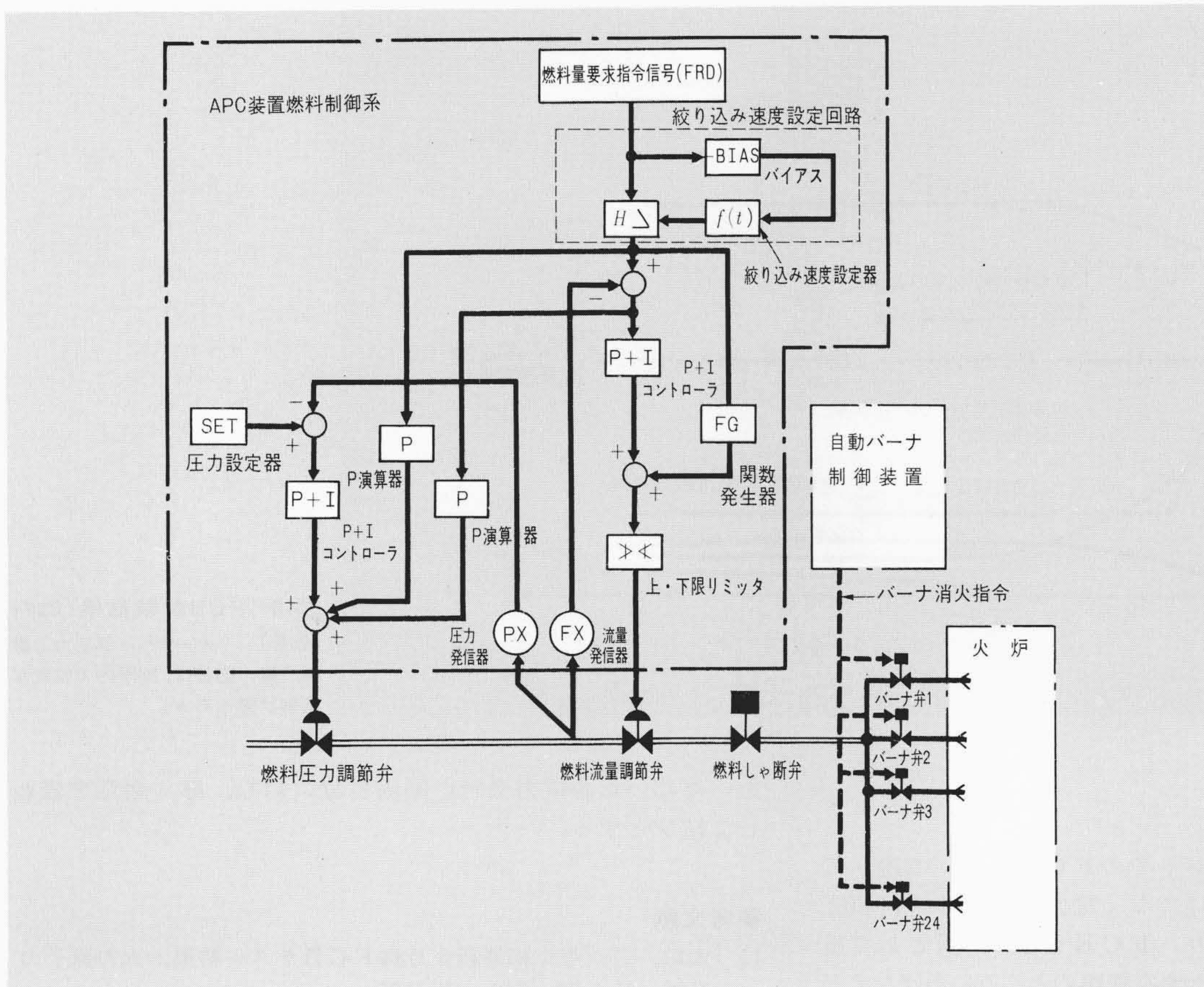


図7 FCB試験結果(給水関係) 主蒸気圧力高、給水流量低の制限内で安定に絞り込みを行なっている。



種々の制限を考慮して燃料絞り込み速度を決めるために、シミュレーション解析により速度を決めている。

図9にシミュレーションの結果を示す。同図は各負荷帯からFCBが発生したものとして、燃料絞り込み速度の設定を変えシミュレーションした結果を示すものである。図中の◎印はシミュレーションの結果上記制限条件を満足したものを、×印はバーナヘッド圧力高でトリップするものを示す。斜線は、バーナ弁を一定パターン(0.5秒間隔で2本ずつ消火)で消火したときに上記制限条件にかかりユニットトリップになる絞り込み速度を示す。

3.2.5 テスト結果

図10に実機テストの例を示す。

- ### (1) バーナヘッダ圧力の応答

9 秒後に $0.3\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ に下がったが、制限値(下限： $0.08\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ 上限： $0.6\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$) に対し余裕のある安定した応答が得られている。

- ## (2) 燃料流量の応答

16秒後に設定流量に整定している。再熱器保護の制限燃料量以内にあり、安定した応答を示している。

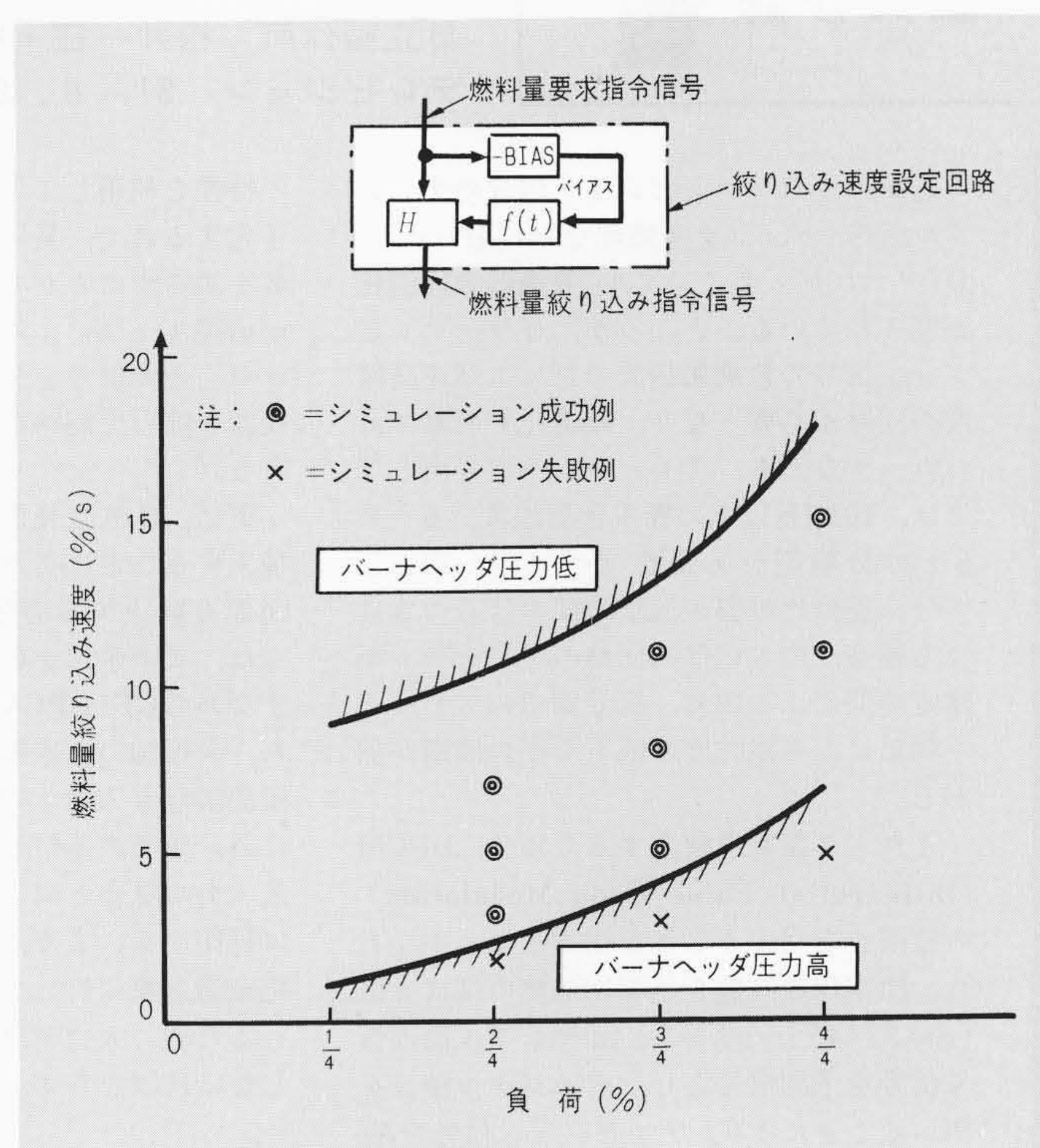
- ### (3) 燃料流量調節弁前の燃料圧力応答

ほとんど変動がなく安定した応答となっている。このため、燃料流量制御が安定している。

4 今後の課題

近年、火力発電所の単機容量が増大し、単機当たりの送電系統への寄与する割合が大きくなってきたこと、電力の供給と需要の差が縮まってきたこと、石炭焚き火力の見直しが行なわれていること及び尖頭負荷を受け持つ中間負荷火力として変圧運転方式が検討され始めていることからF C Bに対して次に述べるような課題が残されている。

- (1) ドラム形ボイラでの FCB、特にドラムレベルの制御方式を確立すること²⁾。
 - (2) 石炭焼きプラントでの FCB の方式を確立すること。
 - (3) 変圧運転プラントでの FCB の方式を確立すること。
- などがあげられる。



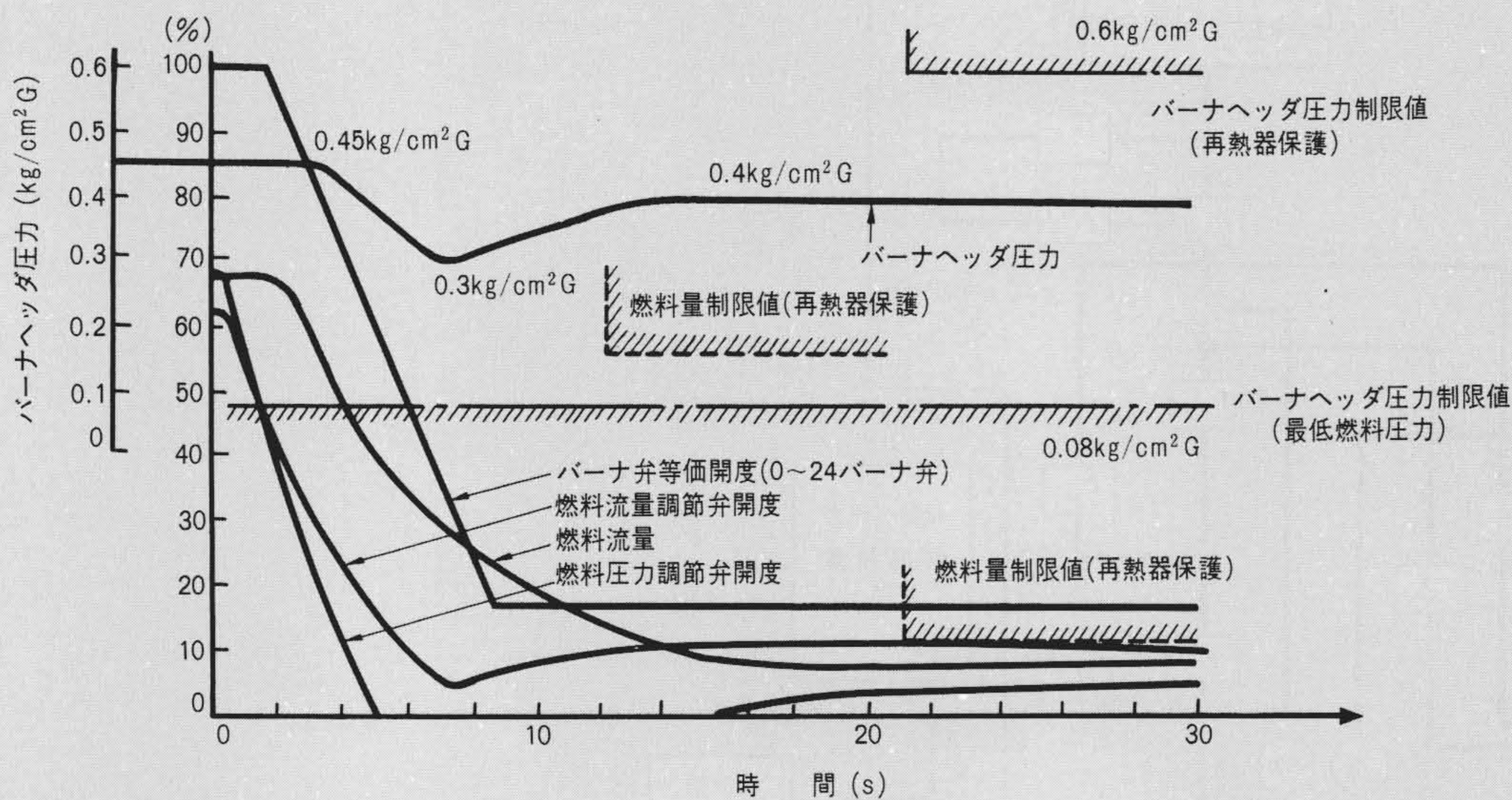


図10 FCB試験結果(燃料関係) バーナヘッド圧力, 燃料流量の応答は, 制限内で安定な制御状態にある。

5 結 言

以上, 貫流ボイラ発電プラントでのFCBについて述べてきたが, 現在, 火力発電所だけでなく電力系統全体の信頼度向上が不可欠になってきており, FCBもその一貫として重要な課題となっている。4の今後の課題のところにあげたテーマを中心として, いっそうの検討を重ねていく考えである。

終わりにFCBの計画に際し, 種々有益な御意見や御指導

をいただいた各電力会社の関係各位に対し, 厚く謝意を表わして結びとする。

参考文献

- 1) 太田, 二ツ寺: 相浦新2号機FCBテスト結果, 火力原子力発電, Vol. 28, 248, 7 (1977)
- 2) 小内: ファーストカットバック, 火力原子力発電, Vol. 25, 212, 421 (1974)

論文抄録

“Continuous Feedback” DPCM方式によるカラーテレビ信号用A/D変換器

日立製作所 松井一征・吹抜敬彦

テレビジョン 31-8, 656 (昭52-8)

近年, カラーテレビジョン信号のデジタル伝送, デジタル処理などに用いるA/D(アナログ・デジタル)変換器の経済化が望まれている。ところが, カラーテレビジョン信号の色副搬送波のために高速高精度の回路が必要となり, 経済化が困難であった。すなわち, テレビジョン信号用としては, 10MHz以上の標本化周波数, 6~9 bitの分解能が必要で, かつカラー用としては, 並列比較器の遅延時間のばらつきによる雑音, 標本化保持回路のアパーチャ不確定時間による誤差, 復号側でのアパーチャ効果による飽和度の低下などの問題が加わる。

これらの問題を解決するために, DPCM(Differential Pulse Code Modulation)の技術を応用することを提案した。すなわち, 標本化周波数を色副搬送波のほぼ n 倍($n=3, 4, \dots$)とし, n サンプル前の復号信号を予測信号とし, デジタル積分を用いることにより, テレビジョン信号をA/D変換できる。このA/D変換器では, 視覚

の特性を利用して予測誤差信号を非直線量子化するので, 量子化器に用いる比較器の数を減らすことができる。また, A/D変換が帰還ループによって行なわれるので, アナログ予測信号を発生する局部復号D/A変換器を除いて回路精度を緩くすることができる。

更に, D/A変換器の後に低域フィルタを挿入することにより, 色副搬送波に関する問題も解決する方法を見いだした(筆者らは, この手法をContinuous FeedbackすなわちCF-DPCMと名付けた)。すなわち, 大振幅の色副搬送波が入力されても, 予測信号も入力と同様に滑らかに変化するため, 予測誤差信号が平坦になるので, 直流入力の場合と同じように量子化器が正確に動作する。また, デジタル積分回路は色副搬送波に対して無限大の利得をもっていているため, 入力と出力の色副搬送波が一致しなければならず, 飽和度の低下も生じない。

Continuous Feedback DPCM方式の性

能を確認するため, 色副搬送波の4倍の標本化周波数で動作する7bitのA/D変換器を試作した。非直線量子化特性は, 最大ステップが $\pm 38/128$ の19レベルMidtread形(0-1-1-2-2-4-4-8-8-8)とした。Continuous Feedback用低域フィルタには, 6MHz 7次Wagnerフィルタを用いた。また, 比較器にはDual Monolithic IC Comparator($\mu A711$)を, 論理回路にはSchottky TTL ICを用いた。

試作したA/D変換器の周波数特性は, 利得の偏差を ± 1 dB, 遅延の偏差を ± 50 ns以内に抑えることができた。また, DPCM特有のEdge-Busyness妨害は, 一般の画像では気にならなかった。更に, 消費電力は12Wに, 大きさは12cm $\times$ 27cmに抑えることができた。

以上述べたように, CF-DPCMにより回路の規模, 速度, 精度に対する要求が緩和され, 従来よりも小形で経済的なカラーテレビジョン用A/D変換器を実現できた。