

貫流ボイラの負荷応答の改善

Improvement of Control Responsibility for Once-Through Boiler

Following the recent power system growth the boiler-turbine generator system has come to be demanded to have more dynamic load response. Especially, the main steam temperature control system is required to be more adaptable to the boiler's dynamic performance since it exerts a significant influence on load response characteristics.

By applying an "Over-under Firing Control" to the main steam temperature control system for once-through boiler a good result was obtained in the field test. The new control system has proved highly effective allowing the unit to operate on a ramp change in load of 50% at 5%/min.

This paper describes this new "Over-under Firing Control" method and the test results concerning subcritical once-through boiler-turbine system.

榎木 茂高* *Shigetaka Enoki*
河本 博好* *Hiroyoshi Kawamoto*
飯岡 康弘** *Michihiro Iioka*
武藤 博貞** *Hirosada Mutô*
小河内俊雄*** *Toshio Kogouchi*

1 緒 言

電力システムの容量増加に伴い、最近は大容量火力といえどもELD(自動経済負荷配分)ならびにAFC(自動周波数制御)運転されるようになり、起動・停止もひん繁に行なわれるようになってきた。このような状況に対応して発電プラントとして中央給電負荷指令に速応し負荷変動幅を大きくとれることなどが要求される。

発電プラントの負荷変動許容限界は、ボイラ・タービンなどの機器の容量と特性に密接に関係するとともに、自動制御方式によっても大きく左右される。

ボイラ自動制御対象の一つである主蒸気温度は、主機側の制限値からその許容変動幅がきびしく押えられ、かつ貫流ボイラの場合は燃料量と給水量のアンバランスが直接主蒸気温度に大きく影響する特性をもっている。このため負荷変動時の主蒸気温度制御の良否が発電プラントの負荷応答限界を決める一つの要因となる。

超臨界圧貫流ボイラは、すぐれた主蒸気温度制御特性ならびに負荷応答性が実証されているが、流体性状変化の大きい亜臨界圧貫流ボイラでは、主蒸気温度制御などにむずかしさがあった。

主蒸気温度制御系の負荷応答を向上させる方法として、負荷変動時ボイラへの燃焼量を先行的に制御するいわゆるオーバ・アンダ・ファイリング制御方式(以下、OUF制御方式と略す)があり、従来、貫流ボイラに対して採用されてきたが必ずしも十分ではなかった。

このほど、亜臨界圧貫流ボイラの主蒸気温度制御系に効果的な新しいOUF制御方式を導入し、実プラントにおいて負荷応答試験を行ない好結果を得た。

本制御方式を適用することによって、亜臨界圧貫流ボイラの負荷応答を改善できることを確認できたので、その制御方式と改善結果について述べる。

2 貫流ボイラの制御方式

2.1 基本的な制御方式

ボイラ自動制御方式の基本的なものとして、次の三つがある。

(1) ボイラ追従方式

本方式は負荷指令によってまずタービン加減弁を操作し、その結果生ずる主蒸気圧力の変動をもってボイラ入力量を制御するものである。本方式によれば、負荷指令に速応できるが、ボイラへの指令が遅れるため貫流プラントではボイラの圧力、温度変化が大きくなりがちである。

(2) タービン追従方式

これは、負荷指令によってボイラ入力量を操作し、その結果生ずる主蒸気圧力の変動をタービン加減弁で制御するものである。本方式によれば、安定な制御を行なうことはできるが、負荷指令に対する応答が遅れるなどの短所を持っている。

これまで自然循環ボイラでは例外なくボイラ追従方式が採用されてきた。

(3) ボイラ・タービン協調制御方式

貫流ボイラプラントでは上記両方式の長所を十分に取り入れたボイラ・タービン協調制御方式が採用されている。

この制御方式は、負荷指令によってタービン加減弁とボイラ入力量を同時に操作することを基本としたものであり、ボイラならびにタービンのそのときの能力を十分考慮に入れ、両者の協調をとりながら制御が行なわれる。本方式によれば、負荷指令に速応できるとともに安定な制御を行なうことができるので、主機の保護ならびに負荷応答改善に対して効果的である。

2.2 ボイラ・タービン協調制御方式

図1はボイラ・タービン協調制御方式を採用した貫流ボイラプラントの基本制御システムを示したものである。本制御系は、大別して次の三つから構成されている。

(1) ユニット負荷指令作成制御系

(2) タービン制御系

(3) ボイラ制御系

これら制御は、おもに電子式アナログ制御装置によって行なわれる。

2.2.1 ユニット負荷指令作成制御系

本制御系は中央給電指令所からの負荷指令を受信し、そのときの発電プラントの能力に応じたユニット負荷指令を作成

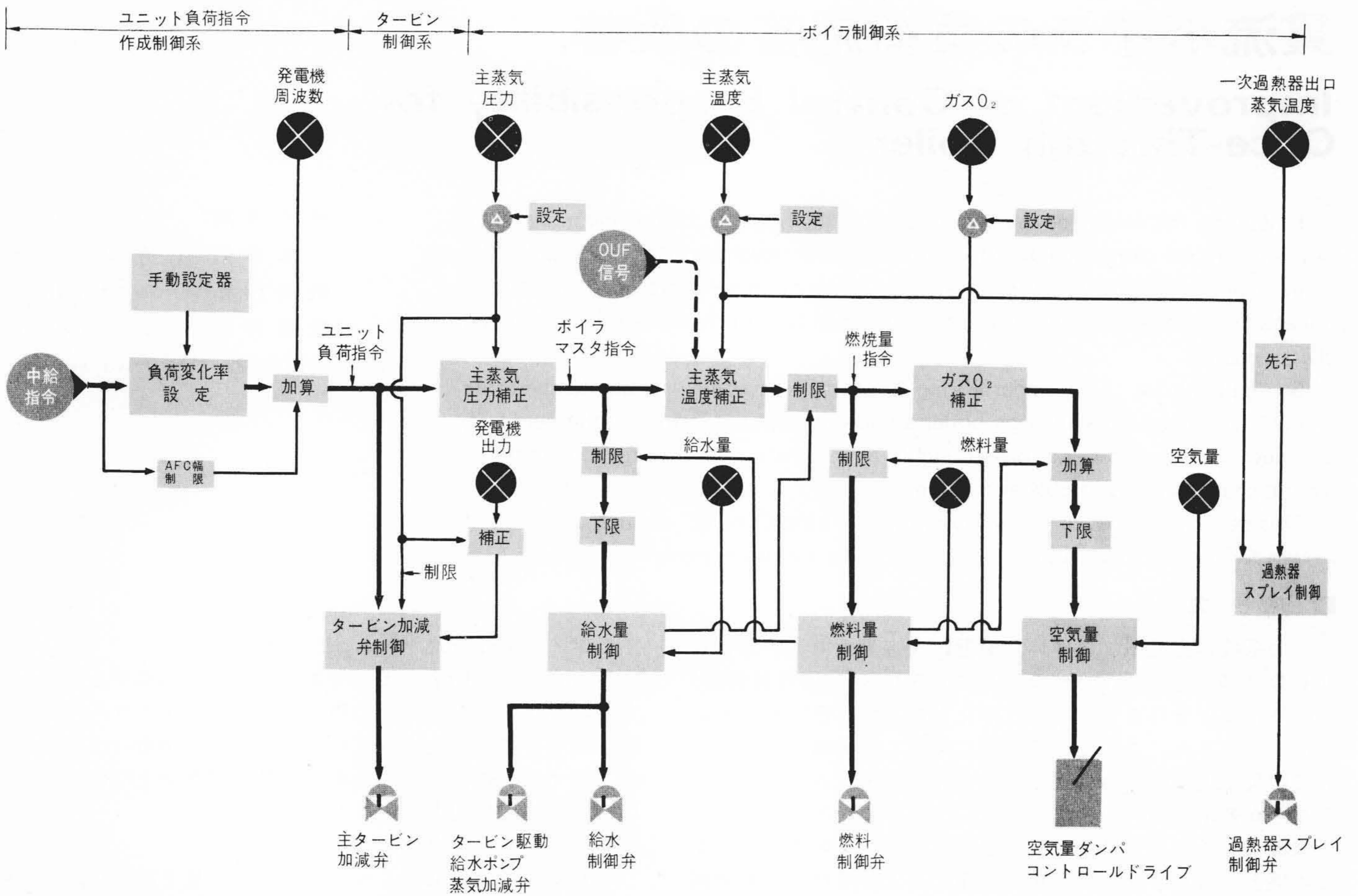


図1 発電プラント自動制御基本系統 大容量貫流ボイラプラントに適用し、ボイラ・タービン協調制御を行なうための基本系統図である。

Fig. 1 Fundamental Automatic Plant Control Block Diagram

する。各電力会社の電力系統運用の方法によって異なるが、一般には、中央給電指令所から各発電所に対してELD信号(自動経済負荷配分信号)とAFC信号(自動周波数制御信号)とが与えられる。中央給電指令所から着信するELD信号は、おもにステップ状信号であるため、発電プラントに適した規定の変化率で変わる、ランプ状の信号に変換する。この変化率は設定器によって任意に調整できる。AFC信号に対しては、ステップ状信号そのものが発電プラントの負荷指令として処理されるので、その変化幅を発電プラントとして許容できる範囲に押えるためにAFC幅の制限を設けている。一般には、ELD+AFC、ELD単独、AFC単独(ベース負荷手動設定)のいずれの組合せでも可能なように制御系を構成する。

一方、系統周波数変動を小さくするために、最近の火力発電所は、ガバナフリー運転を行なっている。ユニット負荷指令信号に対してガバナフリー運転による負荷調整分に見合った信号を上乗せすることによってタービンならびにボイラへの指令信号を補正し、ガバナフリー運転を効果的に行なえるようにしている。

2.2.2 タービン制御系

ユニット負荷指令に従ってタービン加減弁を操作し、発電プラントの出力を制御する。ボイラ追従方式の場合、タービン加減弁が主蒸気圧力の変動に無関係に制御されるため、ボイラ側の制御がむずかしくなる欠点がある。このタービン加減弁開閉の行き過ぎを防ぐため、主蒸気圧力偏差によってタ

ービン加減弁の開閉操作を制限させ、主蒸気圧力が定常値に戻ったとき発電量が指令値に一致するように発電量フィードバック回路に主蒸気圧力補正を加えている。すなわち、負荷変動時ボイラの蓄熱エネルギーを有効に利用しつつ、ボイラ側と協調をとりながらすみやかにタービン加減弁が応答できる構成としている。さらに、負荷変動幅が大きすぎるなどによって主蒸気圧力偏差が過大になる場合には、発電量制御を中止して主蒸気圧力制御(ボイラ追従)に切り替えるようにする。

2.2.3 ボイラ制御系

ユニット負荷指令に従って、ボイラ入力量を操作し、最終的には主蒸気圧力などを規定値に制御する。まずユニット負荷指令に主蒸気圧力偏差による補正を加えてボイラマスタ指令信号とする。主蒸気圧力の変動は、ボイラ出力がそのときの要求負荷に見合ったものになっていないことを表わしている。すなわち、タービン加減弁操作によってボイラ蓄熱エネルギーが一時的に持ち出される(または戻される)ことになるので、このボイラ蓄熱エネルギー過不足分の補正をボイラへの指令信号に対して行なってやる必要がある。このため、主蒸気圧力偏差の比例分をユニット負荷指令にバイアス的に加えて給水量ならびに燃焼量をその時の指令値よりも過剰(または不足)気味に入れてやるいわゆるオーバ・アンダ・ポンピングおよびファイアリング動作を行なわせる。ここでは、主蒸気圧力偏差を最終的にゼロに戻す積分制御も並行して行なわれる。

次に、ボイラマスタ指令は、次の制限動作を受けて給水量指令信号となる。まず、燃料制御系で異常が生じ燃料偏差過大となった場合には、給水量を抑制して主機の保護を行なうとともに蒸気温度が大きく変動するのを防止する。貫流ボイラは、給水量が不足するとボイラチューブを過熱する危険があるので、いかなる場合においても最小給水量を確保する必要があるため、下限のリミッタを設けている。この給水量指令に従って、給水ポンプ出口側に設置された給水制御弁またはタービン駆動給水ポンプの蒸気加減弁を操作することによってボイラへの給水量を制御する。

一方、ボイラマスタ指令は、主蒸気温度偏差による補正を加えられて燃焼量指令となる。この主蒸気温度補正ならびに制御方式については別項2.3において記述する。

燃焼量指令は、給水制御系での異常発生により給水量偏差過大になった場合には、燃焼量を抑制する制限動作を受ける。これは、前述の給水量制限と相対するもので、燃焼量と給水量間に極端なアンバランスが生じたときには、安全側に互いに制限させるようにする。燃焼量指令は、燃料制御系と空気量制御系に並行して与えられ、負荷に応じた燃料量および空気量を供給する。ボイラの効率を上げるため低 O_2 運転を行なう場合は、負荷変動時空気量が不足気味になるので、これを防止する必要がある。このため、燃料量偏差が過大になったときには、それに見合った分空気量を増加させ、逆に空気量偏差が過大になったときには、燃料量を減少させ、常に空気量が不足しないようにする。空気量による制限動作を受けた信号は、燃料量指令となり燃料制御弁を操作して燃料量を制御する。

一方、燃焼量指令は、煙道ガス O_2 偏差による補正を受けて空気量指令となる。空気量は、燃焼量指令信号によって先行制御されるが、空気量と燃料量の比率が最適となるように最終的には修正され空気量は、再調整される。低負荷域では、燃焼用空気量が不足し燃焼が不安定になりやすいので、最小空気量を確保する必要があるため、下限のリミッタを設けている。この空気量指令に従って、強圧通風機入口側に設置されたペーン駆動用コントロールドライブを操作することによって空気量を制御する。

2.3 貫流ボイラの制御上の特徴

貫流ボイラは、自然循環ボイラと異なりボイラの蓄熱エネルギーが相対的に小さいこと、燃料量ならびに給水量がともに主蒸気圧力と主蒸気温度に対して直接影響を与えるなどの特徴をもっている。自然循環ボイラにおいては、燃焼系と給水系を分離して扱うことができるが、貫流ボイラの場合には、燃焼系と給水系が密接に関連するので制御系の構成には特別の注意が必要である。また、亜臨界圧貫流ボイラは、超臨界圧貫流ボイラに比較してその流体性状の変化が大きいため、制御上むずかしさがある。

2.4 主蒸気温度制御方式

貫流ボイラの主蒸気温度制御は、図1に示すように次の2点を基本として両者を併用する方式を採用している。

(1) 燃料量／給水量比率制御

ボイラマスタ指令による燃焼量制御をベースとして、主蒸気温度偏差による修正動作を行なう。

(2) 過熱器スプレイ制御

一次過熱器出口に設置された減温器へのスプレイ量を制御するものであり、おもに過渡的な主蒸気温度変動を抑えることを目的としている。

貫流ボイラの主蒸気温度制御においては次のようなボイラ

特性に特に考慮を払う必要があり、これら特性にできるだけ適合した制御方式を組むことが肝要である。

(1) 蒸気温度制御系のボイラ時定数が大きいいため、制御結果が現われるまで相当の時間遅れがある。

(2) 負荷変動時には、ボイラの蓄熱エネルギーの出入りがあり、過渡的にエネルギーの過不足を生ずるが、これに対するボイラ入力量の適切な補正を行なう必要がある。

負荷変動時において、過渡的な主蒸気温度変動を抑える手段としてボイラ・タービン協調制御方式において採用されている過熱器スプレイ制御が有効であるが、これは出てきた変動を抑える方向のものである。主蒸気温度変動の根元となるボイラ入力量のアンバランスを防止すること、すなわち負荷変動時における燃焼量制御を的確に行なうことがより効果的と考えられる。負荷変動時の燃焼量制御で効果的な方法として次に述べるO U F制御方式を採用している。

3 O U F制御方式

3.1 従来の制御方式

燃焼量制御として、ボイラマスタ指令によるプログラム制御を基本としている。これは、ボイラ静特性に基づき、その時々ボイラ負荷に見合った燃焼量を投入してゆくものである。一方、負荷変動時には、前述のようにボイラ蓄熱エネルギーの過不足などに対する補正を必要とするが、このボイラ動特性に適合した燃焼量制御として、O U F制御方式が効果的である。これまで使用してきたO U F制御方式の一例は図2に示すとおりである。

O U F制御信号は、発電プラントに対する中給負荷指令信号よりじかに取り出すようにして速応性を持たせている。すなわち、中給指令と負荷変化率設定後のユニット負荷指令との偏差を取り、これの上下部をカットした信号④をO U F制御信号とする。

このO U F制御信号は、図1の主蒸気温度補正回路に加えることにより燃焼量を加減する。O U F信号は、中給より負荷変化指令が着信した時のみ発生するようにしており、ユニット負荷指令が目標値に達した時点でゼロに復し、その後も負荷指令一定運転中はこの値を保持している。その時々負荷に見合った燃焼量のほかに図2のようなO U F制御信号を燃焼量指令に上乘せすることにより、負荷変動時のボイラ蓄熱エネルギーの動的変動分を先行して補償する効果をもたらす。この方法は、貫流ボイラの負荷応答を向上させるのに有効であり実用されている。

3.2 O U F制御方式の改善

前述のO U F制御方式を適用した発電プラントにおいて、負荷変化率ならびに変化幅を大きくしてゆくと、主蒸気温度変動も大きくなる。一例として負荷変化率4%/min、変化幅100→50%の場合の負荷応答試験結果を示すと図3になる。

主蒸気温度変動は、負荷変化中においては小さく押えられている。

これは、アンダファイアリング制御による燃焼量の絞り込みが効(き)いているためと考えられる。しかし、実負荷が目標値に到達した後に、主蒸気温度が上昇する傾向がある。この原因として、アンダファイアリング制御信号が図2のようにユニット負荷指令が目標値に達した時点で打ち切られるため、その後生ずるボイラエネルギー収支のアンバランスの結果があとになって現われてくるためと考えられる。

O U F制御動作を、負荷指令が目標値に達した後もある程度持続させることによって、第2波以降の主蒸気温度の変動を

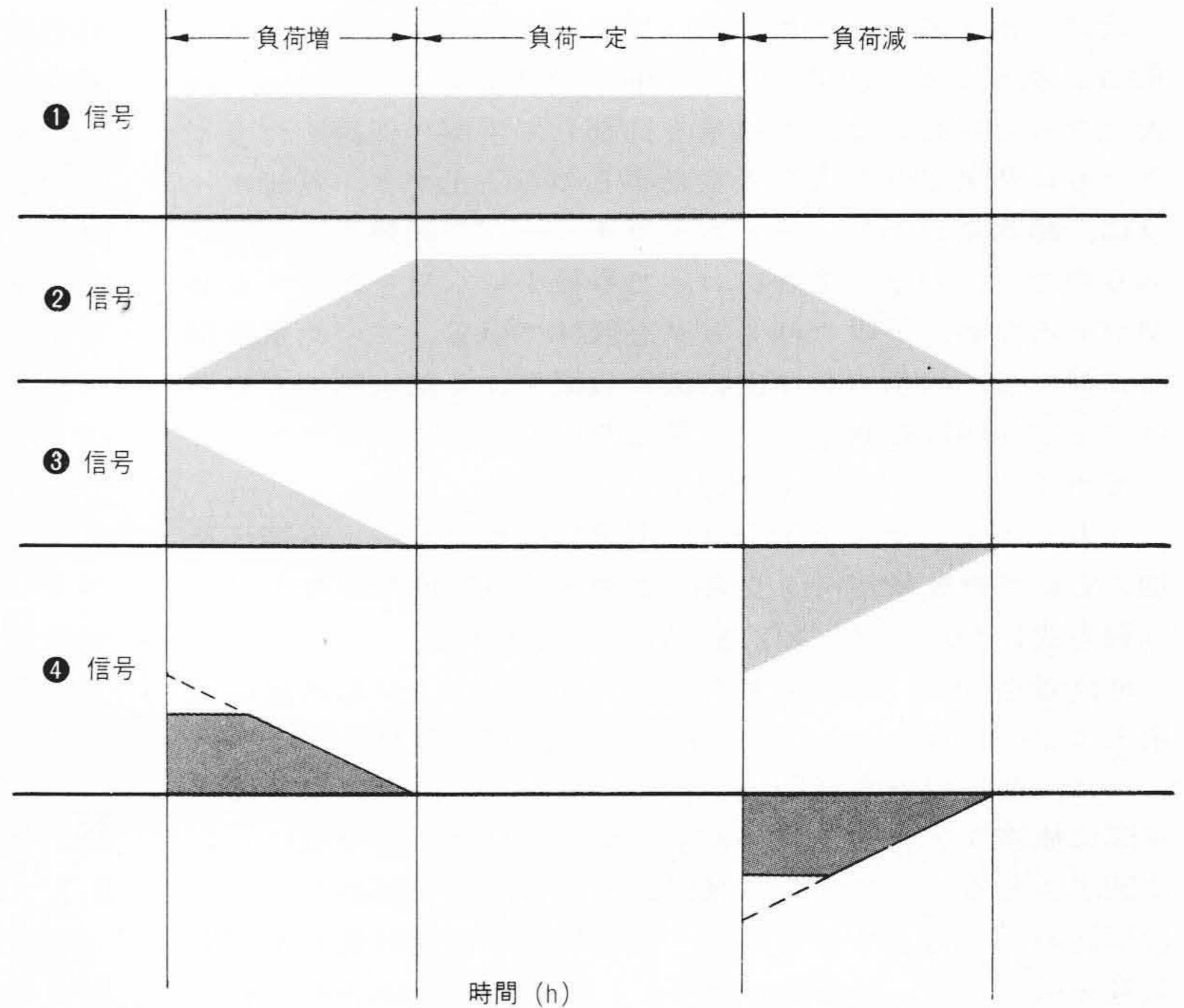
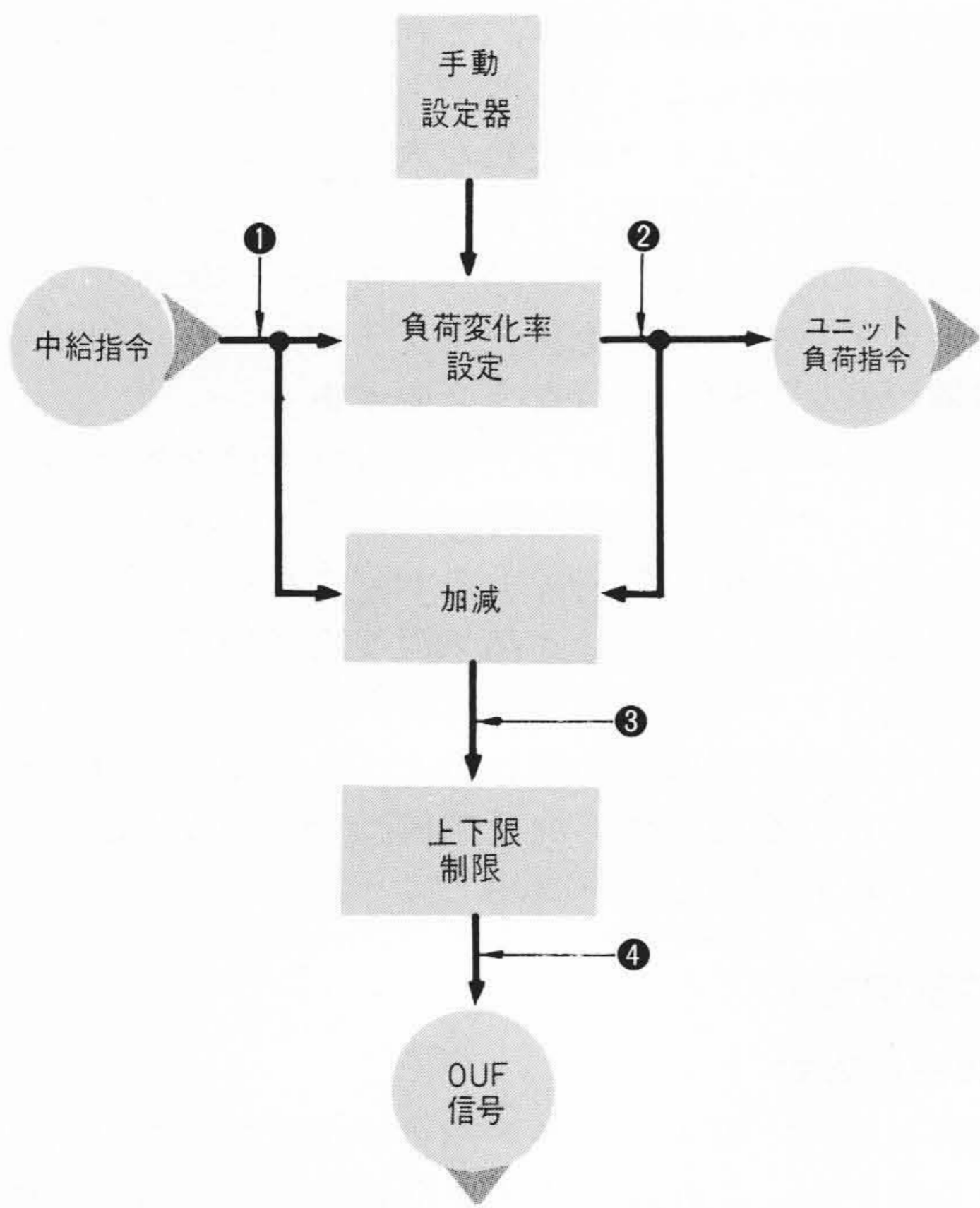


図2 従来のOUF制御方式 OUF信号は、負荷指令信号の変化中のみ発生し、同信号が目標値に達した後ゼロに戻る。

Fig. 2 "Over-Under Firing Control" Method before Improvement

押えることが期待できる。この点に着目した改良形OUF制御方式の一例を示したのが図4である。

ユニット負荷指令の微分信号を変化率制限装置によって両端に傾斜をもたせた信号④をOUF制御信号とする。この方法によると、ユニット負荷指令が目標値に達した後も任意の時間OUF制御動作を持続させることができる。すなわち、ユニ

ット負荷指令が目標値に達した時点で微分信号はなくなるが、変化率制限装置出力はこの時点から設定された変化率に従って徐々に変化することになり、負荷整定するまで必要なOUF信号を作りうる。

また、OUF動作の立上りに対しても任意の傾斜を選定できるとともに、負荷変化率設定値の大小によりOUF信号の高さも変わることになるなどの特徴を持っている。この方式によればボイラの動特性により適合したOUF制御を行なうことができ、安定した応答性のよい主蒸気温度制御が可能となる。

4 負荷応答試験結果

4.1 試験の概要

本制御方式を中国電力株式会社玉島発電所2号機に適用して試験を実施した。発電プラントのおもな仕様は表1に示すとおりである。発電プラントの制御方式には図1に示すボイ

表1 発電プラントのおもな仕様 負荷応答試験を実施した発電プラントの本体仕様を示す。

Table 1 Main Specifications of the Power Station

| | |
|-------------|-------------------------|
| ○ボイラ形式 | B & W UPボイラ |
| 蒸発量(最大連続) | 1,110t/h |
| 蒸気圧力(過熱器出口) | 175kg/cm ² g |
| 蒸気温度(過熱器出口) | 571°C |
| 蒸気温度(再熱器出口) | 541°C |
| 通風方式 | 強圧通風 |
| 燃焼方式 | 重油, 原油各専焼 |
| ○タービン形式 | タンデムコンパウンド |
| 定格出力 | 350MW |

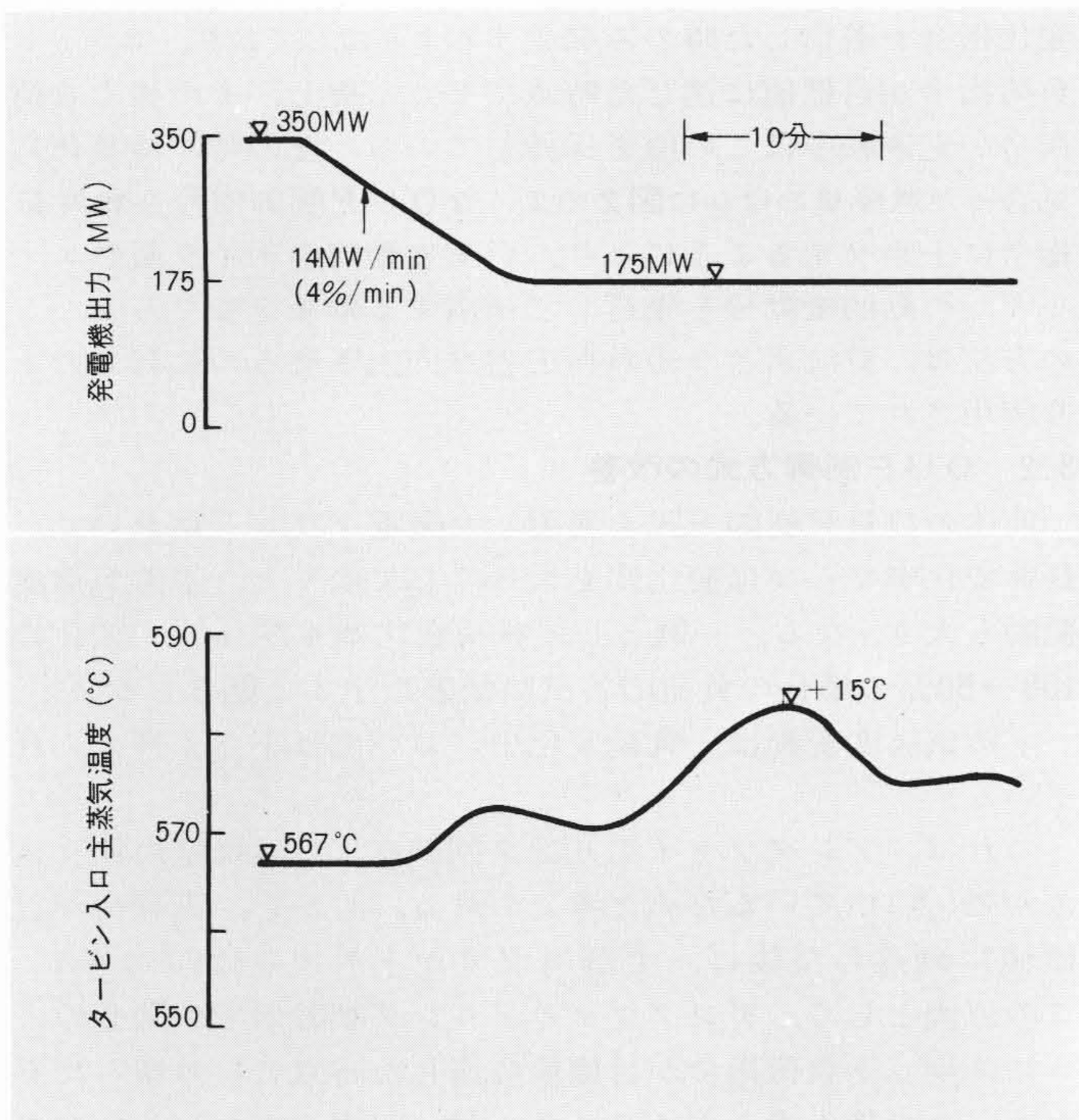


図3 負荷応答特性 従来のOUF制御方式で高負荷変化率とした場合、主蒸気温度応答の第2波以降に大きな変動が現われる。

Fig. 3 Response Characteristics

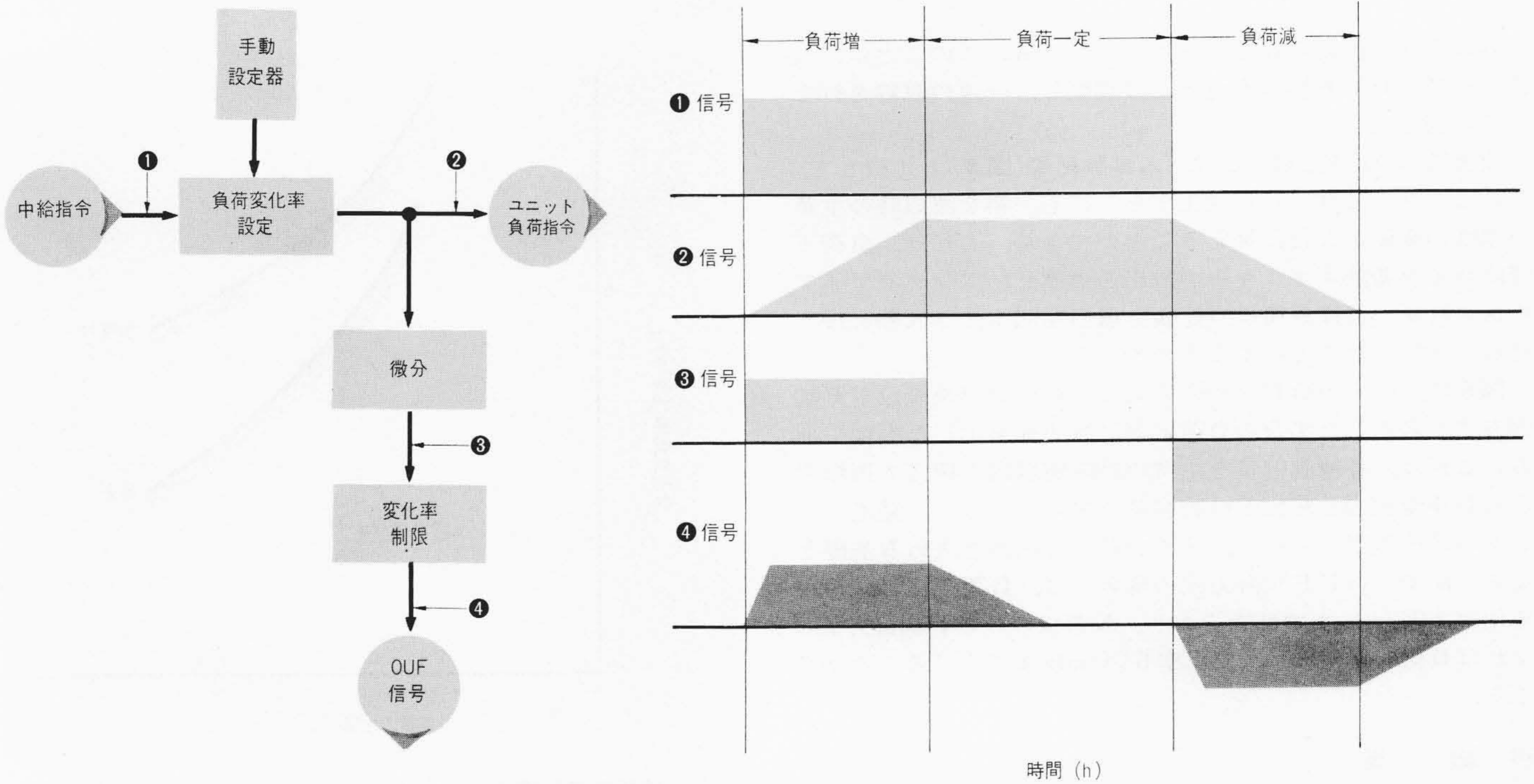


図4 改善後のOUF制御方式 OUF信号は、負荷指令信号が目標値に達した後も任意の時間持続する。

Fig. 4 New "Over-Under Firing Control" Method

ラ・タービン協調制御方式を適用し、主蒸気温度制御用過熱器スプレイ方式には、1段スプレイ方式を採用している。

ボイラ・タービンはある基準の整定状態で運転し、任意の負荷変化率ならびに変化幅を選んで、中給負荷指令信号をステップ状に変化させる方法によって試験を実施した。

4.2 試験の結果と検討

改善後のOUF制御方式を適用した場合の負荷応答試験結果の一部は図5に示すとおりである。これは、負荷変化率を5%/min、負荷変化幅を50%として、負荷上昇時と負荷下降

時について行なったものである。主蒸気温度の変動は、負荷上昇時ならびに下降時ともに制限値の+10°C以下に押えられている。ここでは、負荷上昇時の主蒸気温度の変動のほうが負荷下降時のそれよりも大きく現われている。これは、OUF制御信号を負荷上昇時と下降時と同じ特性の信号とし、負荷下降時のOUF制御を主として調整したことによるものである。ボイラ特性は、負荷上昇時と下降時とで異なるので、OUF制御信号を負荷上昇時と下降時とで区別して、それぞれに最適な信号とすることによって、負荷上昇時の主蒸気温度変動を

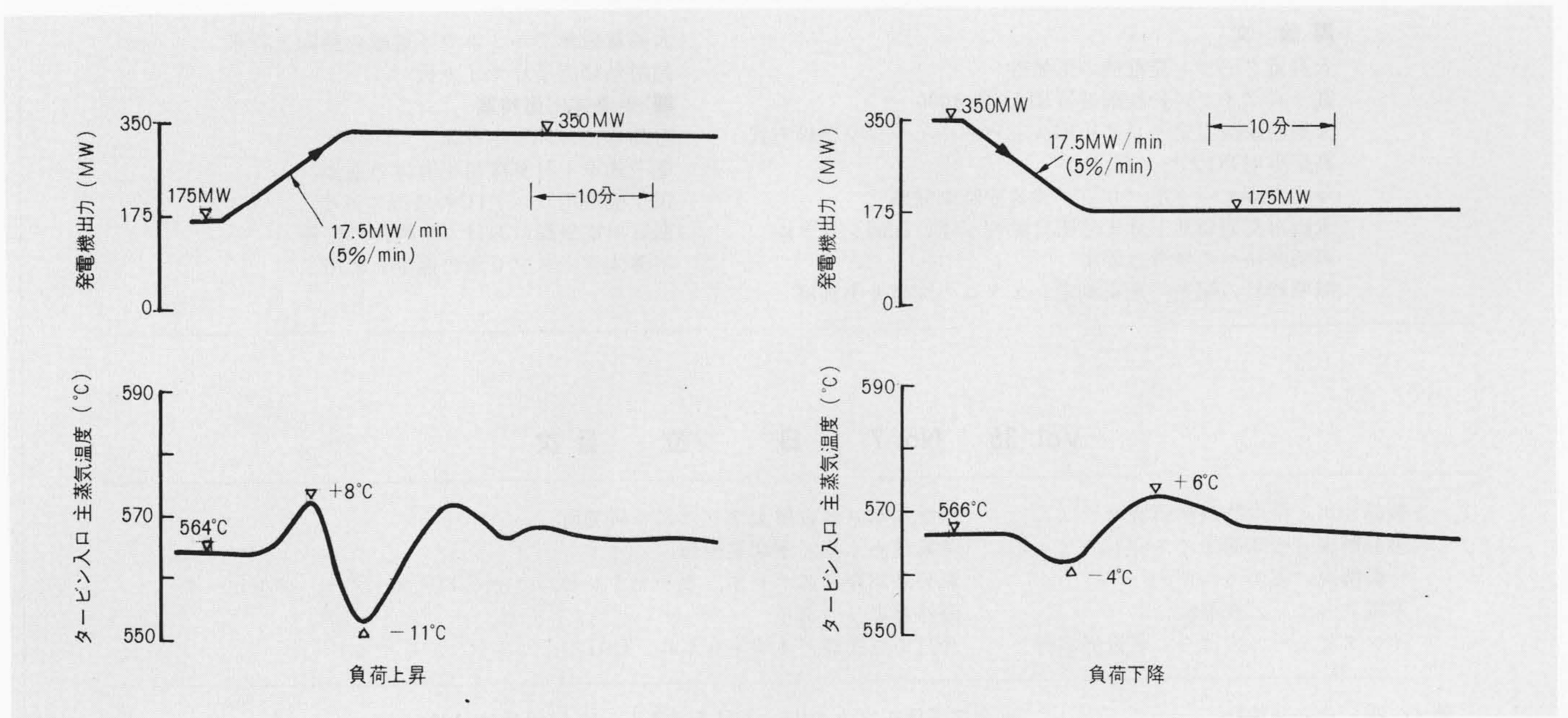


図5 負荷応答特性 改善後のOUF制御方式適用によって、主蒸気温度の変動は第2波以降も小さく押えられている。

Fig. 5 Response Characteristic

さらに小さく押えられることが期待できる。このことは、負荷上昇時のOUF制御を主として調整し、一連の試験を行なって確認した。

改善前のOUF制御方式による試験結果(図3)と比較して、これよりさらに高い負荷変化率としても、第2波以降の主蒸気温度の変動を大幅に押えることができた。これは、負荷下降時ボイラ蓄熱エネルギーの放出を考慮し、アンダファイアリングさせ、目標負荷に到達後も適当期間ボイラ入熱を押し込むようにしたことによるものである。

図6は、従来のOUF制御方式ならびに改善後のOUF制御方式を適用した場合の負荷応答許容曲線を示したものである。これは、各種制御量を主機の制限値以内に押えて運転できる負荷変化幅と変化率の許容値を表わすもので、発電プラントの系統運用にあたり、その負荷応答限界を決める基礎となる。従来のOUF制御方式の場合には、負荷変化幅50%、変化率3%/minまで可能であり、改善後のOUF制御方式によれば負荷変化幅50%、変化率5%/minまで上げることができる。

5 結 言

亜臨界圧貫流ボイラの主蒸気温度制御系に新しく適用したオーバ・アンダ・ファイアリング制御方式の内容とその成果について述べた。

本制御方式を適用することにより亜臨界圧貫流ボイラの負荷応答を最大、負荷変化幅50%、変化率5%/minまで向上できることが確認できた。

今後、オーバ・アンダ・ファイアリング制御信号を負荷上昇時と下降時でそれぞれ最適にすることによりさらに負荷応答特性を改善することが可能と考える。

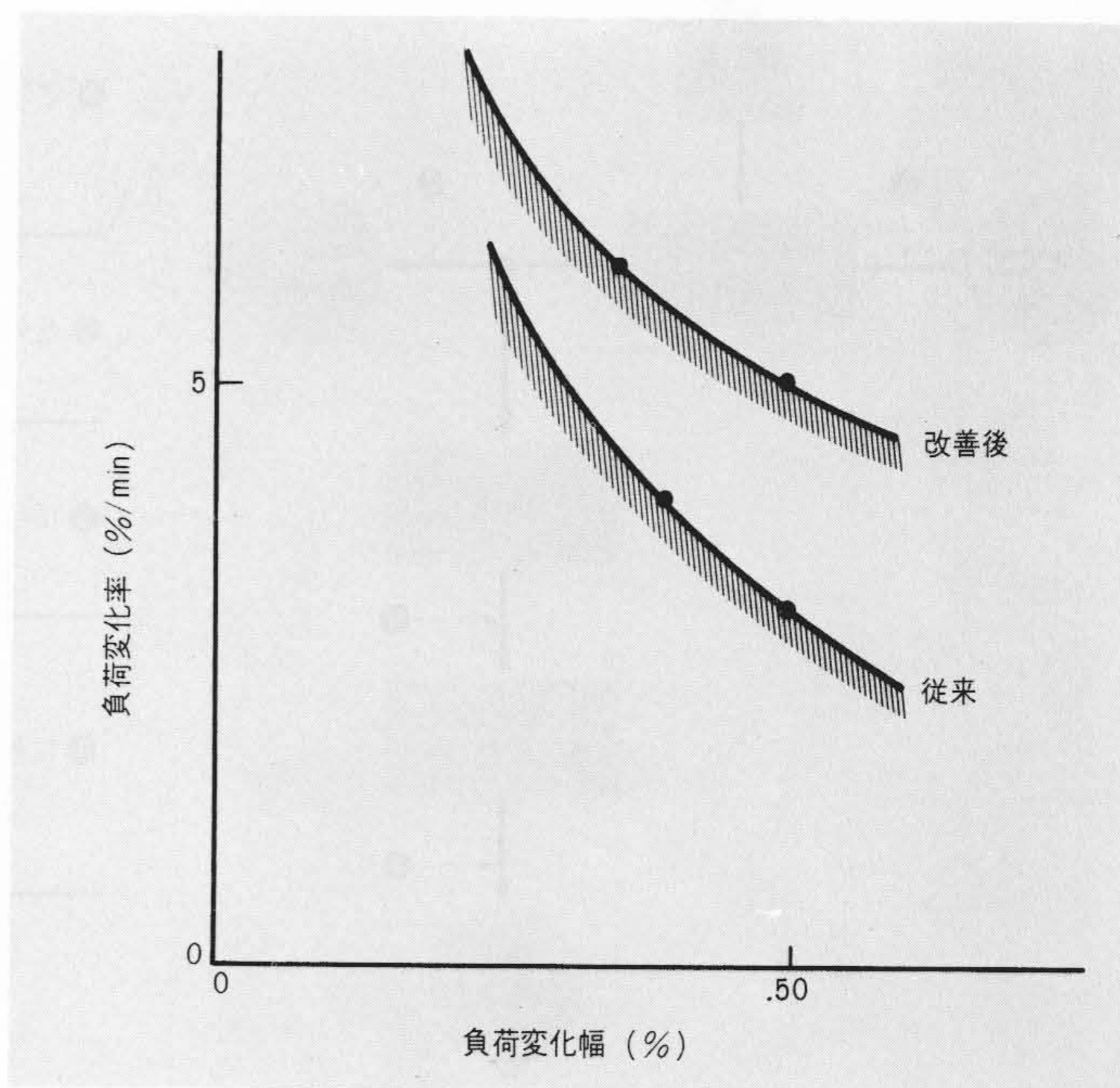


図6 負荷応答許容曲線 新OUF制御方式の適用によって、発電プラントの負荷応答許容範囲が拡大される。

Fig. 6 Capability Curve of the Unit on Change in Load

終わりに、本制御方式の適用にあたり、ご指導とご協力をいただいた中国電力株式会社関係者のかたがたに謝意を表する次第である。

Vol. 55 No. 7 日立評論 目次

■ 論文

- 大容量タービン発電機の信頼性
- 電子式ボイラ自動制御装置HIACS-1000
- 大形回転機固定子コイル用スーパーハイレジン絶縁方式
- 高炉専用TOプラント
- マイクロモータ用ブリッジ式速度制御回路
- 大阪市交通局地下鉄1号線自動列車運行制御システム
- 照明回路への半導体応用
- 照明器具の配光、光束測定システムの開発と実施例

大容量耐熱アルミニウム電線の動向と将来
超耐熱整流子片マイカ板

■ 半導体応用特集

- 自動車における半導体
- 電子式卓上計算機用半導体の進歩
- 民生機器用リニアICの最近の進歩
- 家庭用電気品における半導体の応用
- 半導体ディスプレイの進歩と応用

Vol. 35 No. 7 日立 目次

- 製品ルポ/微生物科学研究所
- 製品解説/後楽園アイスパレスビル
- 一般解説/省エネルギー
- 家電コーナー/洗濯機
- インタビュー/すばらしき世界旅行

- 科学ルポ/名古屋大学プラズマ研究所
- 美術館めぐり/寧楽美術館
- 新製品紹介/ステレオ、カラーテレビ、カセットレコーダー、バルヒーター
- 海外だより/タイ
- 今月の豆知識/4チャンネル、CAI

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 郵便番号 100
 取次店 株式会社 オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 郵便番号 101 振替口座 東京 20018番