

# DSS(毎深夜起動停止)火力プラント用デジタル制御システム

## Digital Control Systems for Thermal Power Plants of Daily Startup and Shutdown Operation

原子力発電プラントの建設が進むにつれ、火力発電プラントは大幅な負荷変化や夜間の最低負荷運転、あるいはDSS(毎深夜起動停止)が要求される、いわゆる中間負荷火力としての運用が必要になってきた。最近では、DSS運転に対する要求が強くなっている。

二川原誠逸\* *Seitsu Nigawara*  
 東 敏彦\*\* *Toshihiko Higashi*  
 縄田 豪\*\*\* *Tsuyoshi Nawata*

DSS火力プラントは、その運用面から急速起動停止操作を少人数で、しかも容易に行なわなければならない、そのためには高性能のデジタル制御技術が必要になってくる。

本稿では、DSS火力プラント向けに開発された幾つかのデジタル制御システムについて述べ、また、これらを実プラントに適用して、機器寿命管理やプラント起動時間の短縮に大きな成果を得たので、その内容について述べる。

### 1 緒 言

大容量原子力発電プラントの建設に伴い、原子力発電はエネルギーコスト面からベース負荷運用となり、ピーク負荷は水力発電が分担し、残された中間負荷を火力発電が受け持つ形態になってきた。このため、負荷変化特性に優れ、低負荷での高効率安定運転と起動停止特性の良好な中間負荷火力が要求されている<sup>1)</sup>。

部分負荷での熱効率向上は、エネルギー資源問題から特に重要視されているため、新設火力では変圧ボイラプラントが多く採用されている。一方、既設火力では最低負荷の切下げや変圧運転への転換、また負荷応答性の改善など、中間負荷火力への転換が図られているが、電源構成での原子力発電の比率増大に伴い、最近ではDSS(Daily Startup and Shutdown: 毎深夜起動停止)の要求が強くなってきた。

DSS火力プラントは、運用面から少人数でプラントの急速起動停止操作を高頻度で行なわなければならない、そのため大きな負荷変化と、それに伴う機器寿命管理が不可欠になってくる。

このような要求に応じるため、新しい制御技術を導入した各種デジタル制御システムを開発し、実機に適用して良好な結果を得たので、以下にその内容について述べる。

### 2 DSS火力の問題点と対応技術

中間負荷火力の中でも、DSS火力プラントは深夜停止、早朝起動という運用面と、起動損失の低減から急速起動停止操作が要求される。急速起動停止での問題点としては、負荷応答などの運転特性、運転操作性及び機器寿命管理が挙げられる。これらの問題は、プラント機器での対応はもちろんのこと、制御面では自動化技術や予測制御技術、高速演算技術などを駆使したデジタル制御技術により可能になってくる。

図1にDSS火力プラントの問題点とその対応技術について示したが、日立製作所はボイラ、タービン主機及び補機制御について、新設火力はもとより、既設火力への適用をも前提としたデジタル制御システムをいち早く開発し、実用化した。

### 3 ボイラ用デジタル制御システム

#### 3.1 ボイラ蒸気温度制御システム

図2に、450MW超臨界圧貫流プラントの起動特性の例とDSS運用上の問題点を示す。本図の起動例は、プラント停止中(8時間停止)、ボイラをホットバンキング状態に保って煙

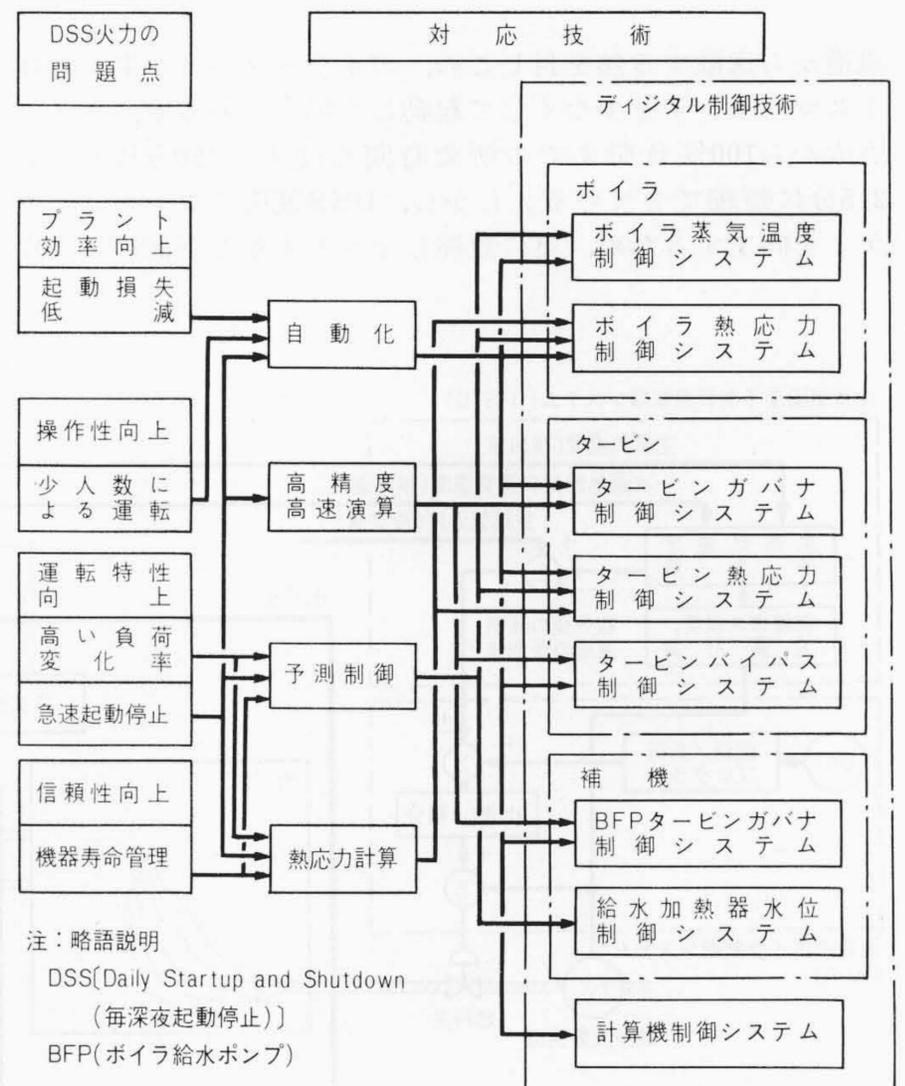


図1 DSS火力の問題点とその対応技術 DSS火力プラントの問題点に対しては、自動化技術、予測制御技術あるいは高速演算技術を駆使したデジタル制御技術で対応できる。

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

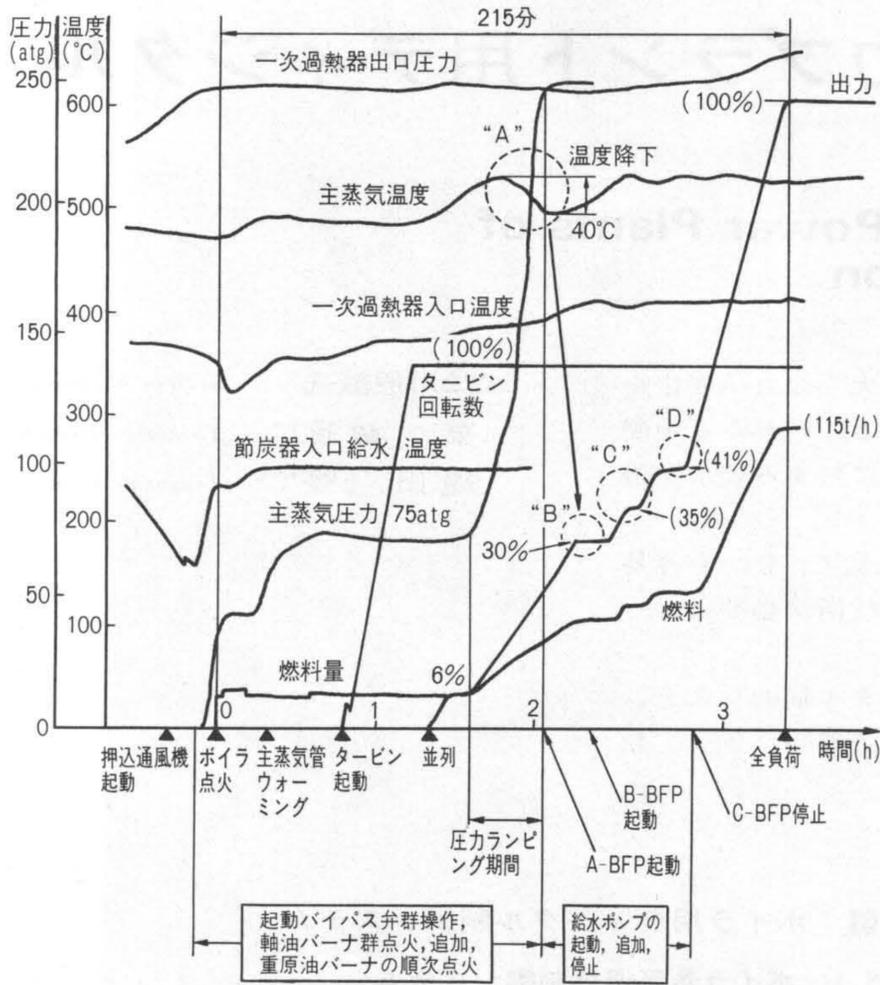


図2 450MW超臨界圧貫流プラントの起動特性 プラント起動時には起動バイパス弁群の操作、軽・重油バーナ群の点火追加、消火、BFP(ボイラ給水ポンプ)の起動、追加など複雑な操作を要し、蒸気温度も不安定で、起動時間を短縮するためには高度な技術を必要とする。

風道から逸散する熱を封じこめ、ボイラ～タービン間の温度 mismatching を少なくして起動した場合であるが、ボイラ点火から100%負荷までの所要時間を従来の350分程度から215分に短縮できている。しかし、DSS運用のフレキシビリティを向上するため、更に短縮しようとする下記のような

問題がある。

- (1) ボイラ点火前から圧力ランピング完了までの期間中、起動バイパス弁群に対して複雑な操作を要し、多数のバーナについても軽油バーナの点火、追加、重原油バーナの順次点火など多くの操作がある。
- (2) 圧力ランピングと称して、タービン加減弁の開度を固定しておき、主蒸気圧力を75atgから250atgに昇圧することによって、プラント出力を6%から30%まで上昇させるが、圧力ランピングが完了したころ、主蒸気温度が40°C程度降下する。このため、温度降下の回復を待つため一時プラントの出力増加運転を停止する必要がある。(図2の“A”, “B”部分)。
- (3) タービン駆動給水ポンプの起動、電動機駆動給水ポンプの停止操作時にも、蒸気温度、給水量の不安定を防ぐため、出力増加を停止している(図2の“C”, “D”部分)。

(1)の問題は主機の構造によって制約され、制御による時間短縮の余地は少ない。(3)の問題に対しては5.1節「BFP(ボイラ給水ポンプ)タービンガバナ制御システム」で述べることとし、ここでは前記(2)の問題に焦点をあて、蒸気温度変動のメカニズムを説明してマイクロコンピュータのコンパクト性、フレキシビリティを活用した蒸気温度制御システムについて述べることにする。

図3に、定圧貫流ボイラプラントの起動バイパス系統を示すが、プラント起動時には火炉水壁保護のため最低給水量(定圧貫流ボイラではボイラ定格の25%)を確保する必要から、202弁、207弁、240弁を開いて、起動損失の低減を図りながら205弁によってタービンに送気し、初負荷(6%程度)を確保している。次に圧力ランピング時には、止め弁201A弁を全開し減圧弁201弁を徐々に開いて昇圧しプラントの出力を増加する運転を行なうが、「制御」の面から見て次の問題がある。

- (1) 上記の二つの運転モードで、二次過熱器入口の蒸気エンタルピーが相違するため、これによって生ずる蒸気温度の変動を防止するのに必要な燃料量を、事前に算出することは極めて困難である。

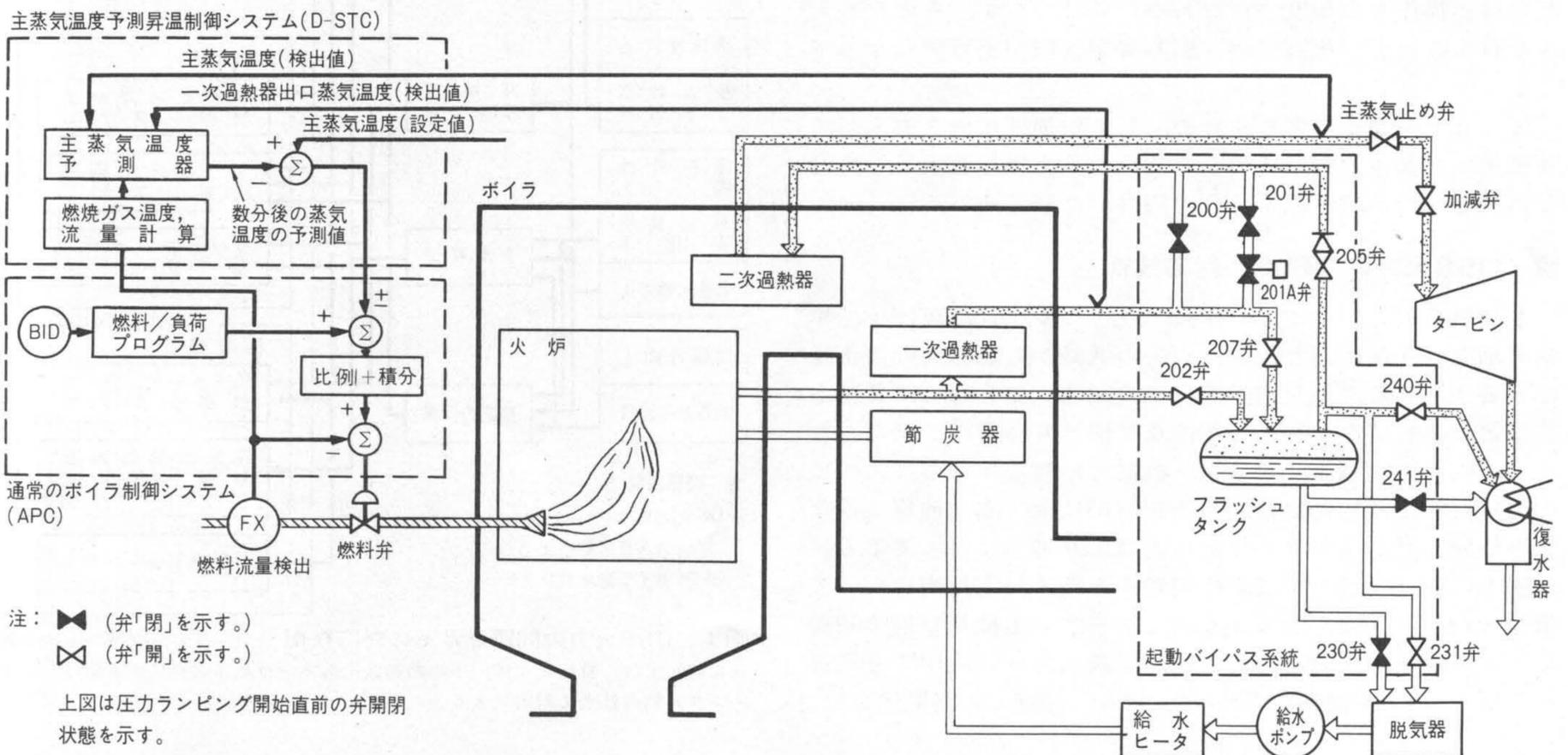


図3 定圧貫流ボイラプラントの起動バイパス系統と蒸気温度予測昇温制御システム(D-STC) 圧力ランピングによりプラント出力を増加したときの蒸気温度の制御が最も困難で、これを解決するためカルマンフィルタを内蔵した主蒸気温度予測器を用いている。

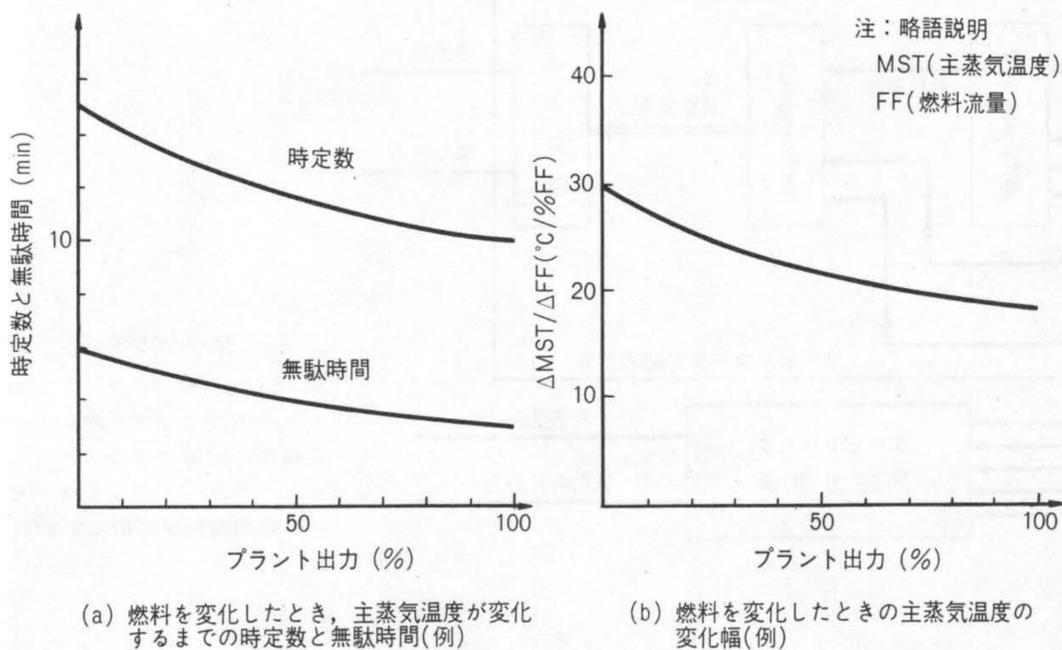


図4 主蒸気温度/燃料特性 燃料変動の効果が主蒸気温度となって現われるまでの時定数と無駄時間は、ボイラの負荷帯によって相違し、しかも各々大きい。

(2) 図4に例を示したが、特に低出力帯では燃料を変化した場合に主蒸気温度の変化となって現われるまでの時定数と無駄時間が大きい。

この問題に対しては偏差検出、(比例+積分)演算、フィードバック出力といった古典的制御方式は無効であり、従来から圧力ランピング時には「出力要求信号により燃料量をプログラム制御する」オープンループ制御が採用されていた。

そこで、従来のマクロ的なプラント特性、入力、出力端だけに着目したフィードバック論に代わって、状態変数の概念を導入し、入力、出力の外に、プロセスの内部状態を精密に数式化し、状態変数の推移行列を導いて数分後の蒸気温度を予測するシステムを開発した<sup>2)</sup>。

予測制御の効果、方式は従来から報告されているが<sup>3)</sup>、ここでは図3に示すように、数分先の主蒸気温度予測値を検出信号として使用することにより、既設のボイラ制御システムとの整合がとれる方式とした。

図5に装置の写真を示すが、3台のデジタルコントローラのうち、1台は温度予測用であり、推移行列を計算するためにアセンブラ語を用いている<sup>4)</sup>。本システムは1面の盤で構成できるので、既設プラントにも追設が容易である。

### 3.2 ボイラ熱応力制御システム

タービン熱応力制御システムと対をなすべき、ボイラ熱応力監視装置<sup>5)</sup>の開発も完了している。本装置を用いてボイラ蒸気温度を熱応力によって制御することは、DSS火力にとってその効果は大きく、今後、ボイラ・タービンの協調制御の面からも、ボイラ熱応力制御は不可欠なものになってくるであろう。

## 4 タービン用デジタル制御システム

### 4.1 タービンガバナ制御システム

日立製作所は、火力・原子力発電所向け主タービン及び給水ポンプ駆動用タービンのD-EHG(電子油圧式調速機)を実

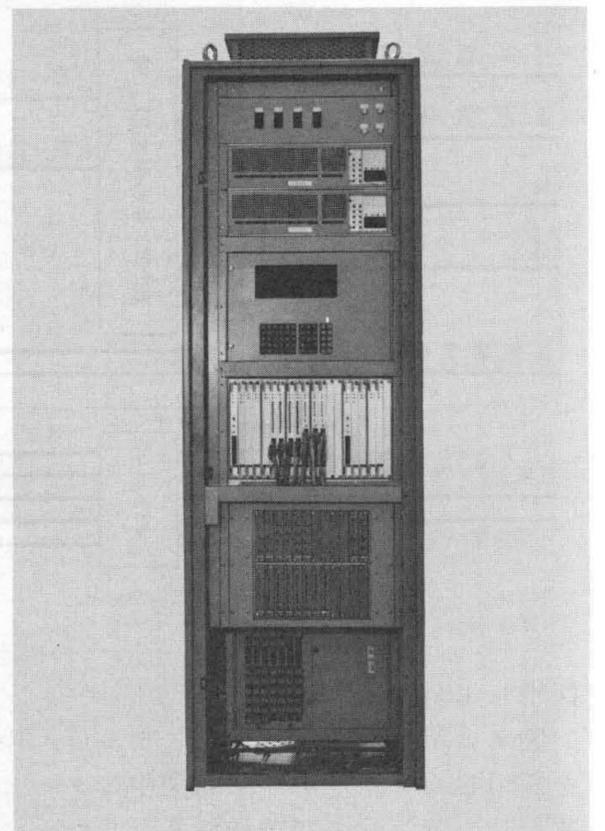


図5 ボイラ昇温制御装置(D-STC) 制御装置は3台のマイクロコンピュータ、電源装置、既設のボイラ制御装置とのインターフェース用回路などで構成されているが、コンパクトな構造であり、既設プラントにも容易に追設可能である。

プラントに適用済みであるが<sup>\*)</sup>、D-EHGは、そのフレキシビリティ、高精度制御性能の点からDSS火力向けのシステムでもある。

### 4.2 タービン熱応力制御システム

タービンの急速な起動及び負荷変化を実現するためには、タービンロータに発生する熱応力を制限値内に抑え、この制限値を有効に活用することが必要である。

タービンロータの熱応力は、図6にも示すように、高・中圧タービンロータの表面及び内孔部について高い精度で計算できるようになった<sup>6)</sup>。この結果、従来、タービン起動が mismatch チャートにより一義的に決められていたため、ボイラの発生蒸気変動に対応できず、応力制限値に大きなマージンをもっていたが、本計算によりタービンの最適起動が可能になった。

タービンロータの熱応力は、タービン流入蒸気温度をベースに計算され、またロータ内孔熱応力は熱伝達によりかなりの時間遅れをもって発生する。したがって、タービン流入蒸気条件を予測し、予測熱応力によりタービンを起動制御することが必要になってくる。このため、本システムでは6~9分先の予測熱応力により、制限値逸脱を防止している。

タービン熱応力予測制御機能は、タービン自動起動装置 HITASS(Hitachi Turbine Automatic Startup System)に組み込まれたり、ユニット計算機に組み込まれて、タービンの起動制御が行なわれる場合が多い。

### 4.3 タービンバイパス制御システム

火力発電プラントで、更に高速の起動が可能となるためには、制御上の工夫によるだけでは不十分で、蒸気系統、プラント起動方式を改革する必要がある。

タービンバイパスシステムは欧州で発達したものであり、フランス(ALSTHOM社)では中圧タービン起動方式を、またドイツ(BBC社、KWU社)では高・中圧タービン起動方式を

※) 本特集号(小特集論文)、本田、外:「大容量タービンデジタル制御システム」参照

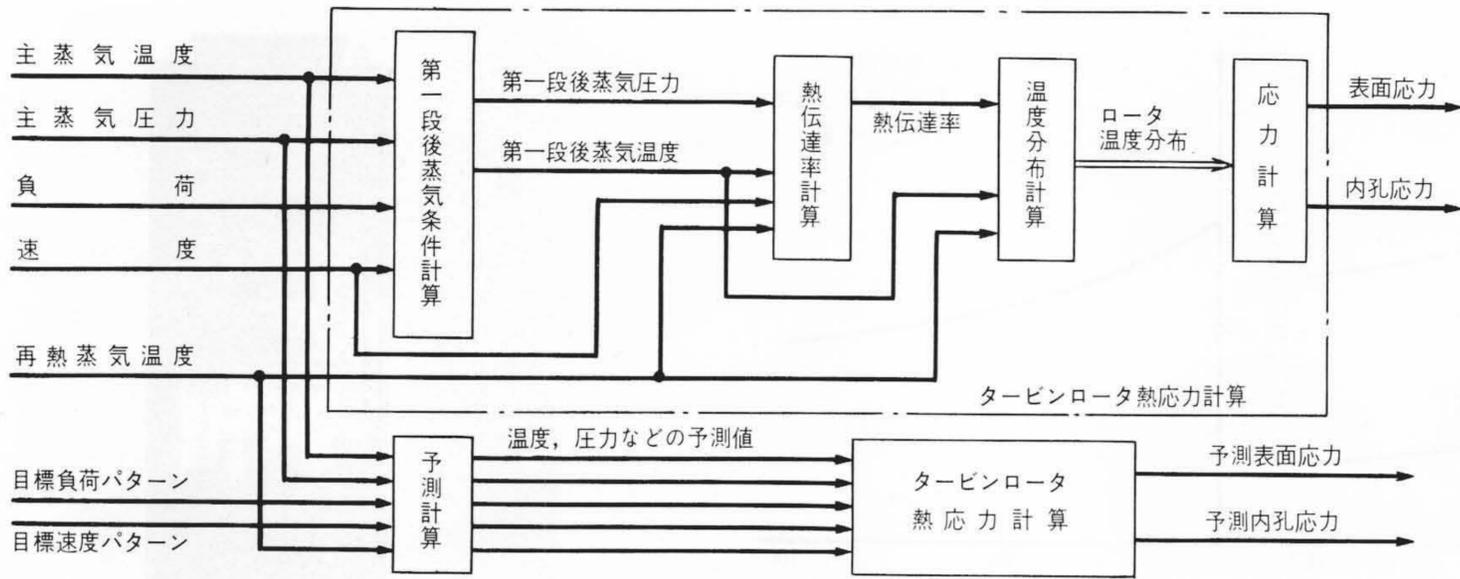


図6 タービン熱応力計算フロー図 タービンロータの表面及び内孔熱応力が高精度で計算できるようになり、予測熱応力によるタービンの最適起動が可能になった。

採用している。

図7に示したバイパスシステムは、中圧タービン起動方式を採用したものであり、同図中にタービン昇速、発電機併入運転時の蒸気弁の開閉状態を示したが、タービンバイパスシステムの特長としては、

- (1) タービンの熱応力を低減した起動が可能である。
  - (2) 再熱器を蒸気冷却可能であるので、起動時の燃料制御が容易である。
  - (3) 送電線事故により所内単独負荷に移行することが、石炭燃焼プラントの場合にも可能である。
- などが挙げられる。今後、新設されるDSS運用石炭燃焼プラントへの適用が考えられる。

## 5 補機用デジタル制御システム

### 5.1 BFPタービンガバナ制御システム

図2で、領域“C”、“D”部分で示した出力増加中断の一つの理由として、給水ポンプの起動、追加、停止操作が複雑であることが挙げられる。図8に示したように、本システムは従来のAPC(ボイラ制御装置)がもっていない次の機能を補完するものであり、これによりプラント運転での協調制御が図

られる。

- (1) タービン駆動給水ポンプA、Bの自動昇速
- (2) プラント起動停止時の、電動機駆動ポンプとタービン駆動ポンプとの自動切換
- (3) 負荷上昇下降時のポンプ運転台数自動切換

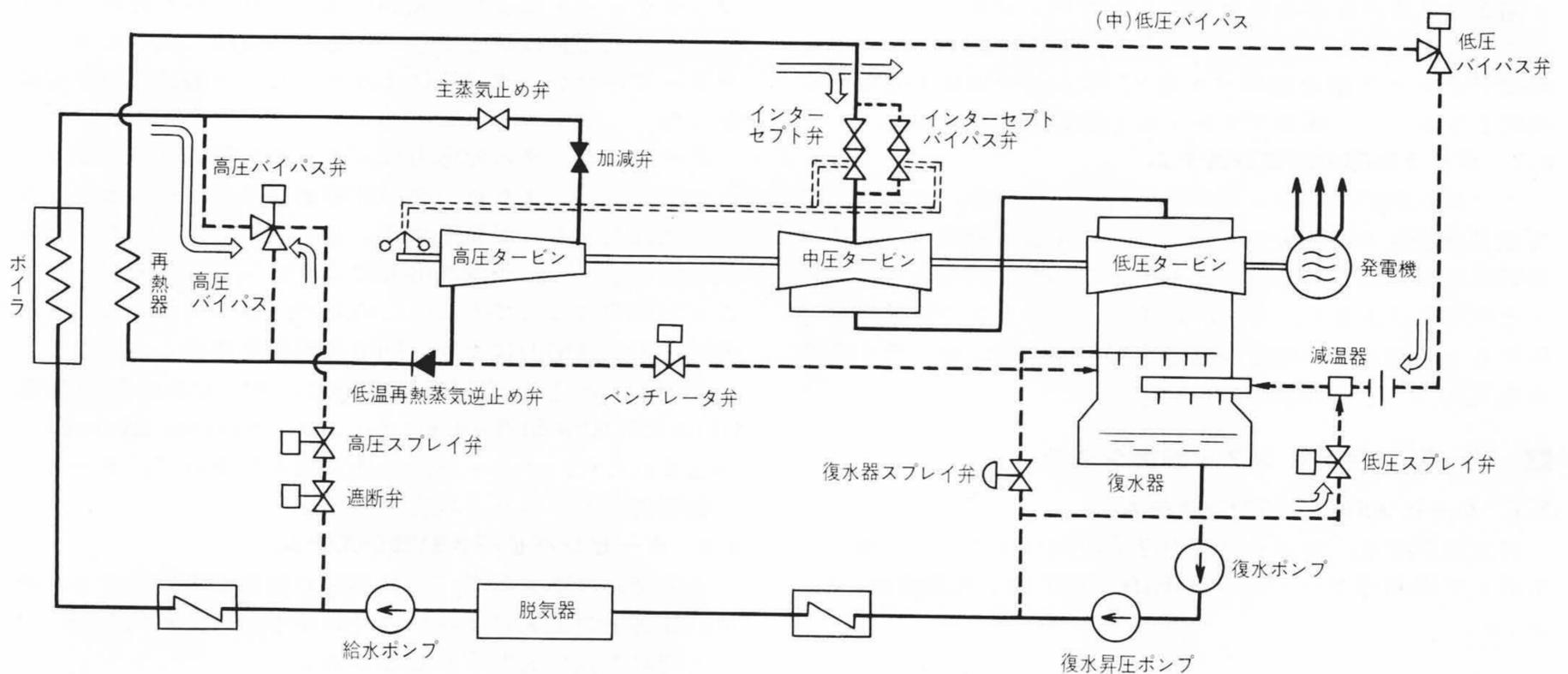
なお、本システムも、図5に示したようなコンパクトな構造となっており、既設プラントへの追設が容易である。

### 5.2 給水加熱器水位制御システム

従来、給水加熱器の水位制御には空気式フィードバック水位制御装置が使用されていた。しかし、プラントの急速起動停止や大きな負荷変化時には、給水加熱器流入ドレン量の過渡的变化や、負荷減少時に生じるドレンのフラッシングにより安定した水位制御ができない。しかも、給水加熱器の水位急上昇はタービン保護上から避けなければならない。このため水位を安定できる新しい制御技術が望まれていた。

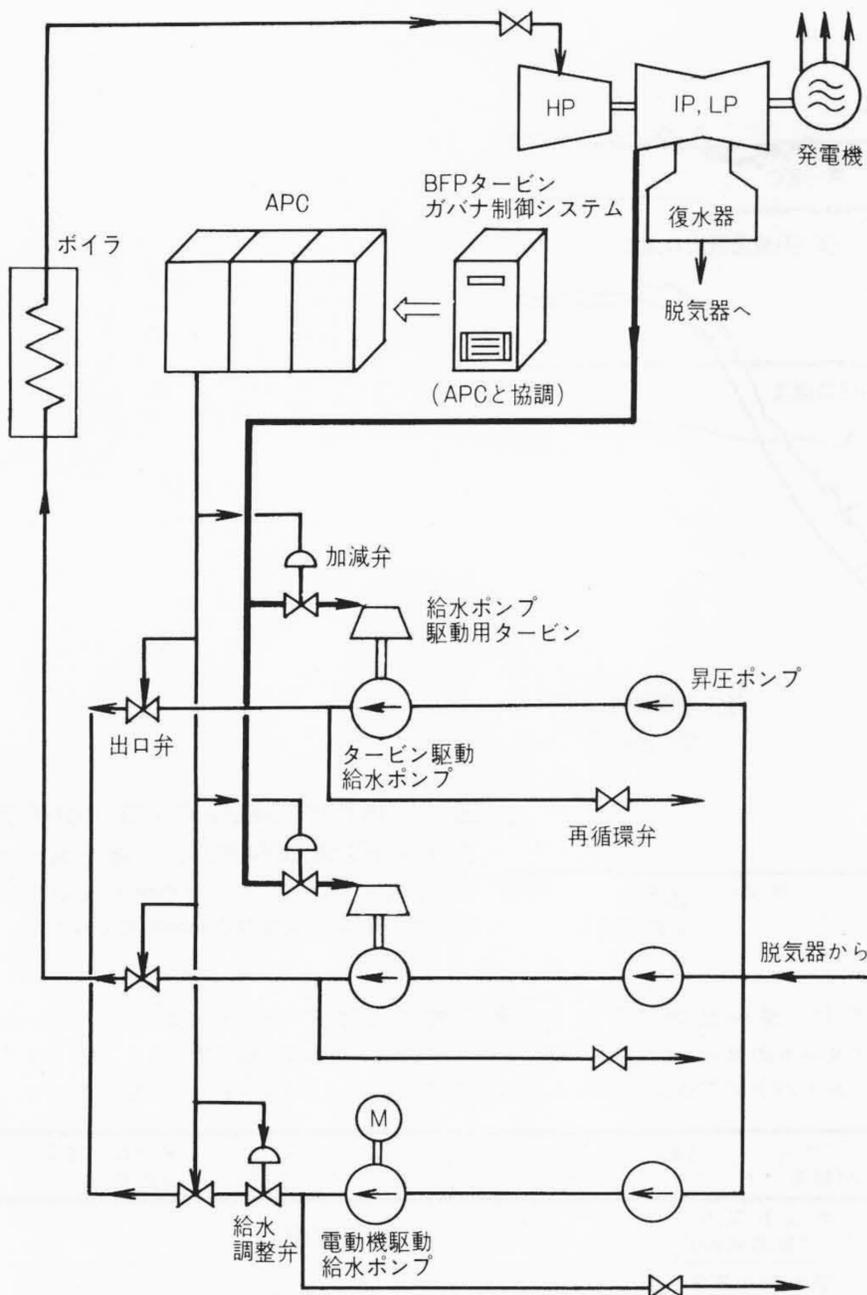
このような要求に対処するため開発されたのが、デジタル式フィードフォワード水位制御システムである<sup>7)</sup>。

図9にフィードフォワード水位制御方式を示すが、本制御方式は水位調節弁前ドレンのフラッシュを給水加熱器出口ドレン温度と調節弁前圧力の検出によって予測し、二相流を流



注：----- (タービンバイパスシステム特有の系統)  $\blacktriangle, \blacktriangleright$  (蒸気弁閉状態を示す。)  $\triangle, \triangleright$  (蒸気弁開状態を示す。)  $\longrightarrow$  (タービン昇速、発電機併入運転時の蒸気の流れ状態を示す。)

図7 タービンバイパスシステム このシステムは、DSS運用を行なう新設の石炭燃焼プラントに適用すると効果が大きい。



注：略語説明 HP(高圧タービン), IP(中圧タービン), LP(低圧タービン), APC(ボイラ制御装置)

図8 給水系統とBFPタービンガバナ制御システム BFPタービンガバナ制御システムはAPCと協調をとり、BFPタービン加減弁、給水調整弁などを調節してタービン昇速や給水ポンプ切換制御を行なう。

すべき必要な弁開度を先行的に決定する弁前フラッシュ予測による先行制御と、流出入ドレン量のアンバランスを発生しないように流入ドレン量の予測先行制御を、従来の水位偏差によるフィードバック制御に付加したものである。

本制御システムを600MW級火力発電プラントの給水加熱器モデル試験装置により、その効果を検証した。図10に負荷降下(約5%/分)時の試験結果を示すが、水位変動が従来方式に比べ約1/3に抑えることができた。

給水加熱器はカスケードに接続されているため、それぞれの水位制御を集約して一つのデジタル制御システムを構成しているが、給水加熱器の水位制御装置として個々に分散、独立に設けることもできるようになっている。

## 6 実機適用実績

### 6.1 ボイラプラントへの適用例

450MW超臨界定圧貫流ボイラプラントに対し、デジタル式のボイラ蒸気温度制御システムを適用した実機試験結果を図11に示す。同図中、各時刻での数分後の蒸気温度予測値を③で示したが、この予測値を用いて燃料量を先行制御するため、実際の主蒸気温度②は予測値より小さくなっている。温度変化幅も+4.5～-8℃以内に制御され、ボイラ点火から100%負荷までの所要時間は180分以内であった。

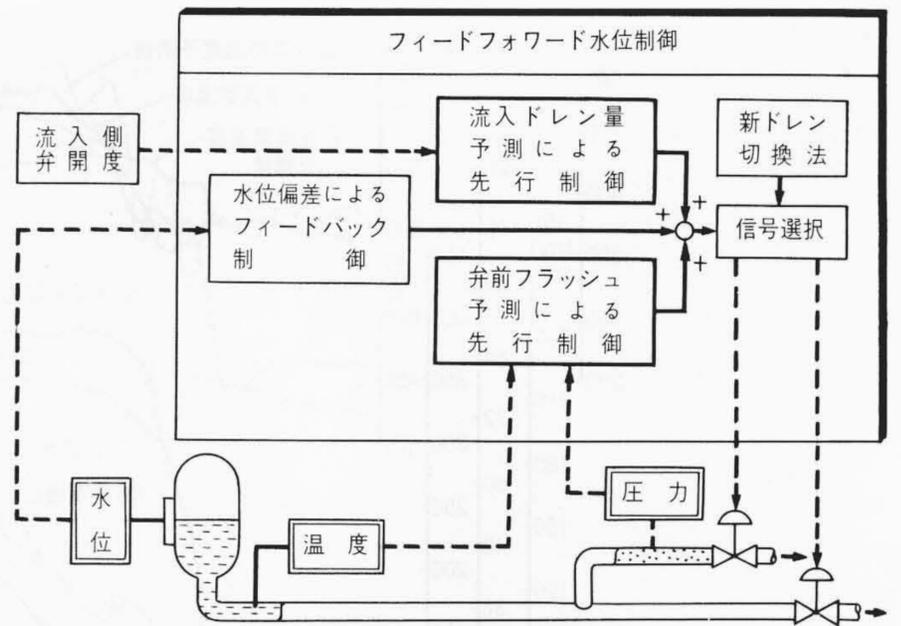
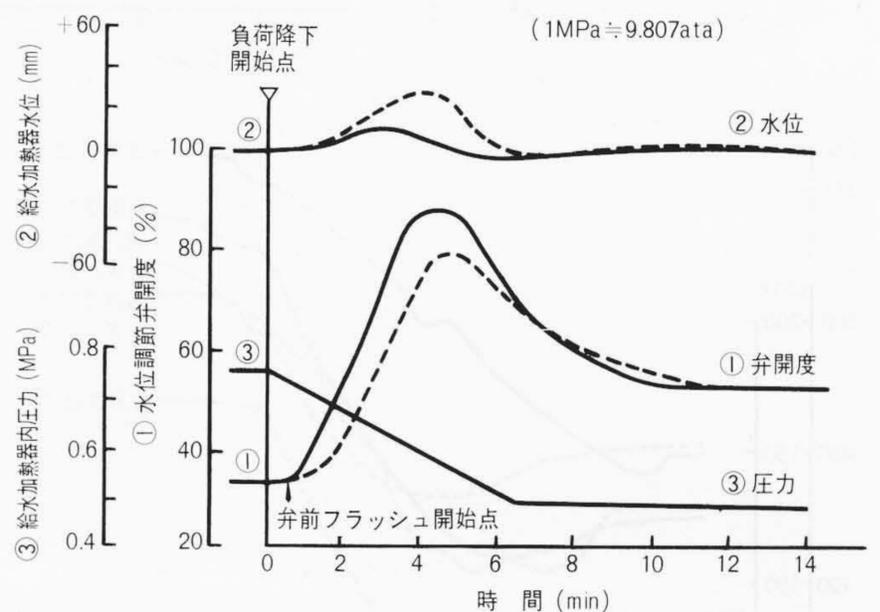


図9 給水加熱器のフィードフォワード水位制御方式 従来の水位偏差によるフィードバック制御に、調節弁前フラッシュ及び流入ドレン量の予測先行制御が付加されている。



実験条件：圧力変化率 0.042MPa/min

制御方式：----- (空気式フィードバック), ——— (デジタル式フィードフォワード)

図10 フィードフォワード水位制御特性(モデル試験結果) 調節弁前フラッシュ予測による先行制御の制御特性を従来方式と比較したモデル試験結果を示す。水位変動が従来方式に比べ約1/3になっている。

### 6.2 タービンプラントへの適用例

最近運転された375MW変圧プラントに、デジタル式の主タービンガバナ制御システム、BFPタービンガバナ制御システム及びタービン熱応力制御システム(ユニット計算機に組込み)を適用し、良好な結果を得た。

本プラントはDSS火力として計画され、プラント起動時間も8時間停止後のホットスタートで、ボイラ点火から全負荷まで100分以内を目標にした自動化プラントである。ここでは、起動時間短縮のためBFP切換操作を負荷上昇と並行させて行なう一方、タービン熱応力予測制御による負荷修正機能をもっている。

図12にホットスタートの起動試験結果を示すが、タービン通気から全負荷まで73分で起動している。この間、中圧タービンロータ表面熱応力により、約4分間の負荷修正制御が発生している。

表1にタービンプラントの起動時間、及びBFP切換所要時間を示すが、いずれもDSS火力プラントとして十分な成果を得た。

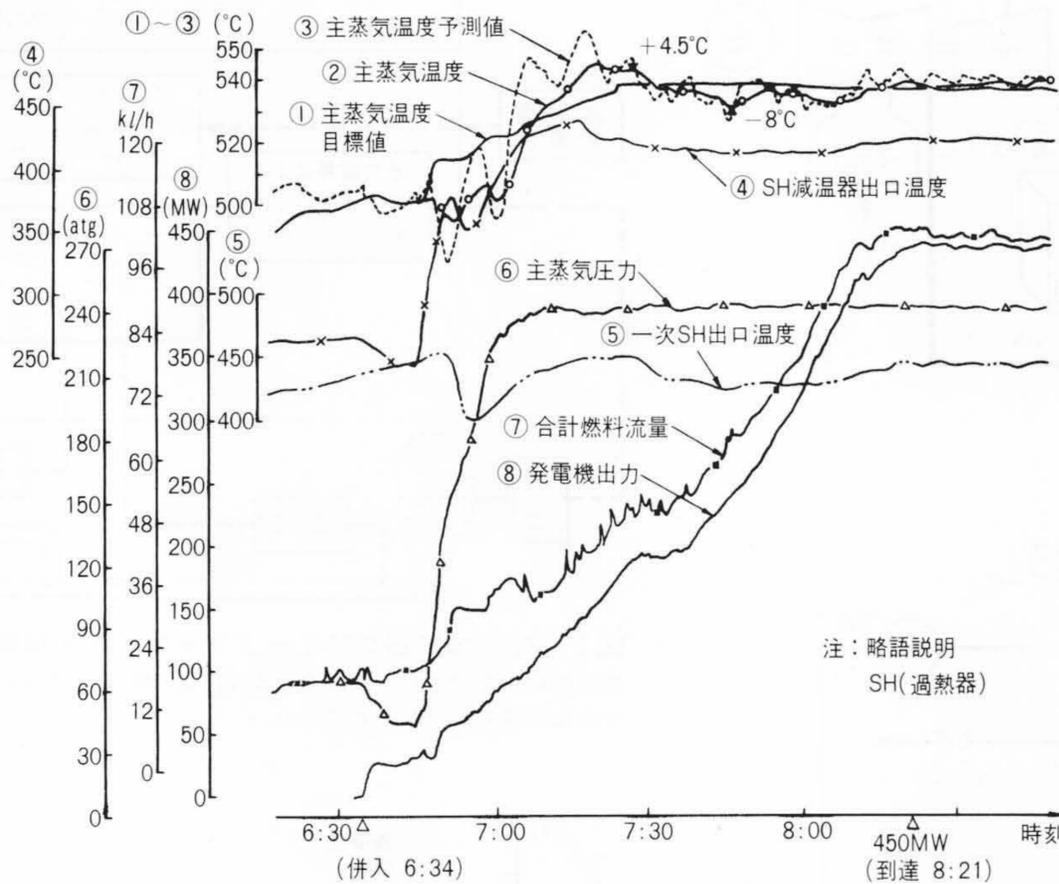


図11 450MW超臨界定圧貫流ボイラプラント起動試験結果 蒸気温度の予測信号を用いて、ボイラ点火から100%負荷までの所要時間は180分以内であった。

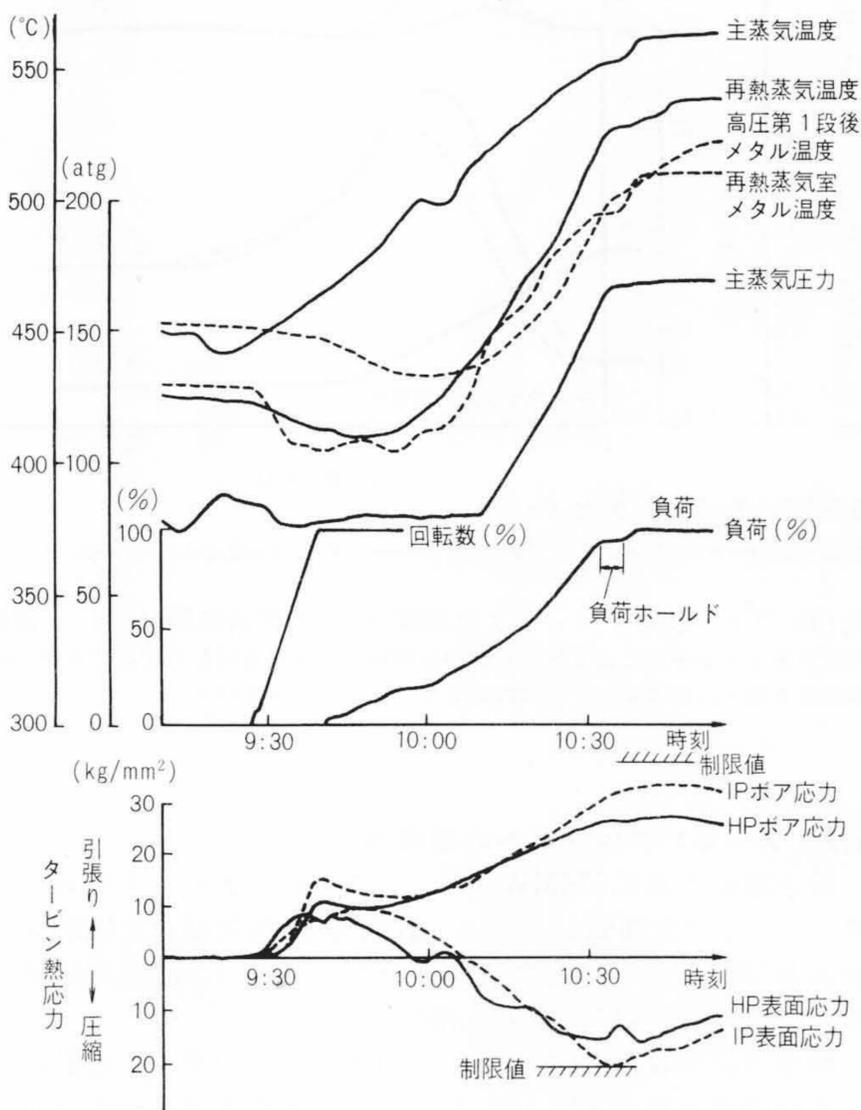


図12 タービン熱応力を考慮したプラント急速起動試験結果 8時間停止後のホットスタートの試験結果を示し、タービン通気から全負荷まで73分で起動している。この間、中圧タービンロータ表面熱応力で約4分間の負荷修正制御がかかった。

表1 タービンプラント起動時間の実績 ホットスタート、ウォームスタートのタービン通気から全負荷までのタービン起動時間を示す。BFPタービンガバナ制御システムによるBFP切替は負荷上昇と並行して行なっている。

起動モード	起動時間	タービン通気～並列	並列～全負荷	タービン通気～全負荷(合計)
ホットスタート (8時間停止)		15分	58分	73分
ウォームスタート (32時間停止)		16分	96分	112分
ウォームスタート (56時間停止)		15分	139分	154分

項目	切替動作		切替動作	
	M/T切替	T/M切替	IT/2T切替	2T/IT切替
BFP切替 所要時間	5～6分	6～7分	2～3分	5～6分

注：略語説明 M(電動機駆動BFP) T(タービン駆動BFP)

設プラントのDSS運用にも有効である。

終わりに、これらシステムを開発するに当たり、多くの顧客各位から有益な助言をいただいた。ここに深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 上野, 外: 中間負荷火力用変圧運転プラント, 日立評論, 59, 4, 265~268 (昭52-4)
- 2) 藤井, 外: カルマンフィルタを用いたボイラの蒸気温度制御, 計装, 26, 3, 113~115 (昭58-2)
- 3) M. Tomizuka, et al.: Optimal Finite Preview Problems (Why and How is Future Information Important?) Trans. ASME, J. of Dyn. Sys. Mea. and Control. Dec. 1975. p. 319~325
- 4) 東, 外: 火力発電所全デジタル制御装置, 日立評論, 64, 10, 777~780 (昭57-10)
- 5) 宮垣, 外: ボイラ熱応力監視装置, 日立評論, 65, 6, 391~396 (昭58-6)
- 6) 松本, 外: ロータ熱応力予測タービン制御システム, 計測自動制御学会論文集, 16-6, 905~912 (昭55-12)
- 7) 中村, 外: 配管内熱水の自己蒸発現象を考慮したフィードフォワード水位制御に関する研究, 日本機械学会論文集, 48, 436, 1904~1912 (昭57-12)

7 結 言

我が国の産業構造の変革により、火力発電プラントの中間負荷運用が進んでおり、なかでも既設火力のDSS化が注目されている。本論文では、DSS火力プラント用に開発・実用化したデジタル制御システムについて述べたが、これらシステムはスタンドアロン形のシステム構成も可能であり、既