
資 料

スルザーモノチューブボイラを採用した 40,000kW発電プラントの制御について

中 島 隆 基

Control of 40,000kW Industrial Steam Power Plant Equipped
with a Sulzer Monotube Boiler

Takamoto Nakashima

The industrial steam power plant equipped with a Sulzer Monotube boiler has been running smoothly since trial operations at the close of 1962.

All the plant is controlled by a comparatively few operators from a central control room, excepting the starting and stopping of the turbines.

The control of a once-through boiler is known to be rather difficult, but with Sulzer Monotube boiler it can be done as easily as a drum-type boiler. And further with the adoption of tube-type mills which has a larger storage capacity of pulverized coal, the boiler can follow up the sudden changes in the load of about 10% keeping the deviation of the steam pressure within $\pm 2.5 \text{ kg/cm}^2$.

The usual fluctuation of the steam pressure and temperature that take place at normal operation are $\pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$ and $\pm 2\sim 3^\circ\text{C}$ or less respectively.

1. ま え が き

工場需用電力の増大と作業用蒸気の高圧化に対応し、これらの最も合理的で経済的な供給の確保をはかるため、スルザーモノチューブボイラを採用した40,000kW高圧高温自家発電プラントを建設し、昭和37年末から連続運転に入り、昭和38年3月3日官庁の使用認可を得て営業運転を開始した。

本発電所はわが国ではじめてのスルザーモノチューブボイラを採用したのをはじめ、タービン、微粉炭燃焼装置、蒸気再熱器、給水処理系統等にいずれも比較的類例の少ない新方式をとりいれて、効率のよいことと自家発電の使命である長期安定運転ができることを主眼として計画設計された画期的なものであるが、本稿では制御系統について簡単な説明を行ない、制御に関する二、三の試験結果について報告する。

2. 発電所の系統

表1に40,000kW発電プラントの設備概要、図1に発電所全体の概略系統図を示す。新プラントは定期検査その他による停止時の不足電力を小さくする目的でトップ、ベースの2台にタービンを分割し、ベースタービンに入る熱再熱蒸気系統で旧プラントと連絡して、常時はこのラインで30~60t/hrの作業用蒸気を新プラントから送りだしている。トップまたはベースタービンが停止した場合は、旧ボイラでベースタービンを運転し、あるいは熱再熱蒸気を旧プラントに導いて旧タービンを運転する等旧プラントと組合わせて種々の運転方式が可能となる。

トップタービンをバイパスしてボイラの発生蒸気を直接再熱蒸気系統に供給するための減圧減温装置は設置せず、そのような必要のある場合はボイラの固有制御用として設備してある高圧バイパス弁を兼用することとしている。

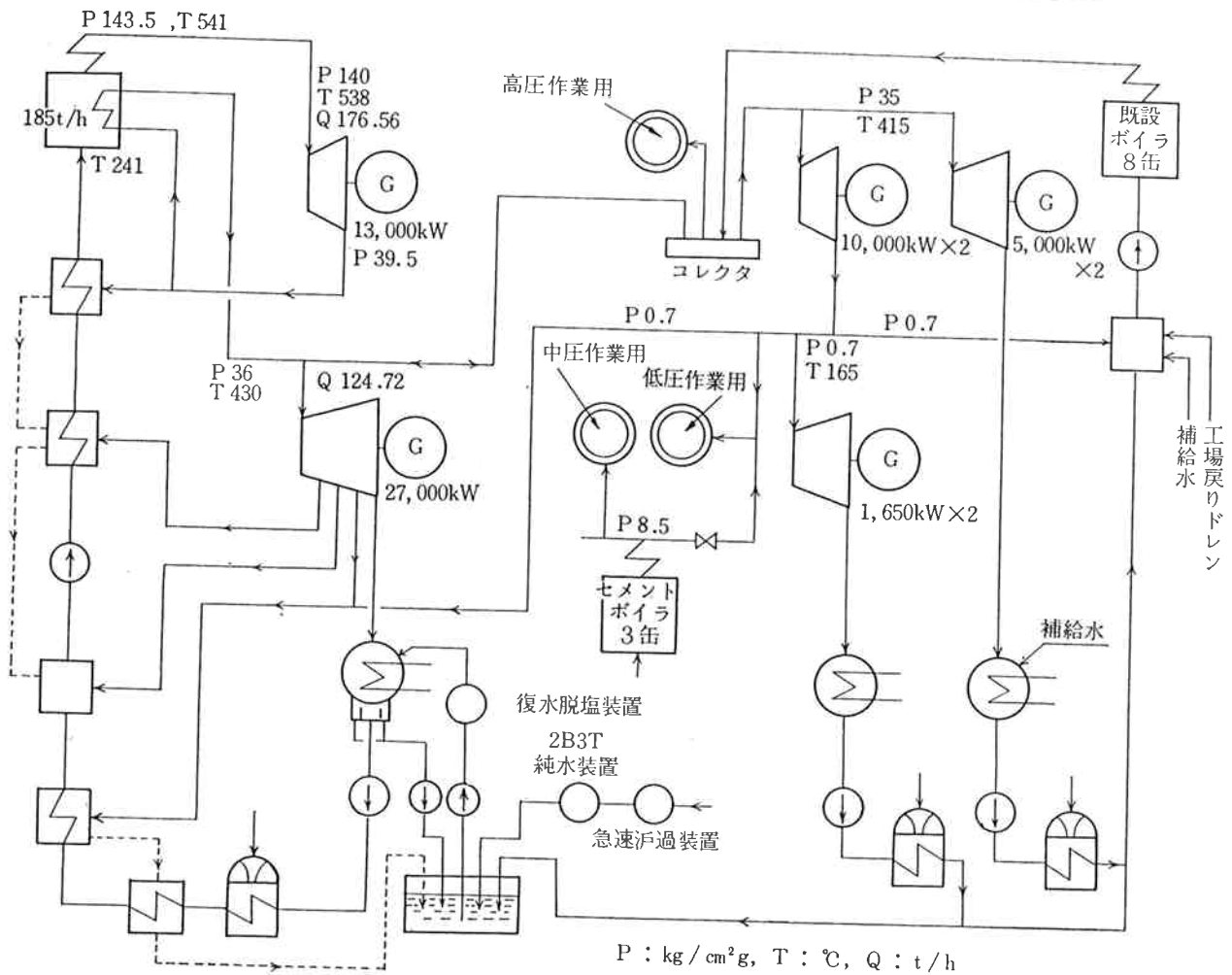


図 1 発電所概略系統図

3. 制御方式の概要

自家発電所として定期検査以外は年間無休運転を立前としており、プラントの制御は中央制御室で集中制御する方式とし、タービンの起動停止、ボイラのバーナの点火、切換え等を現場で行なう外は全部中央制御室で少数の運転員によって操作される。

〔1〕タービン系統

タービンには调速装置の外に、トップには背圧制御装置、ベースには前圧制御装置を備え、これらを選択使用して旧ボイラのACCと組合わせて再熱蒸気系統の圧力制御を行なっている。

特に貫流ボイラとの組合わせを考慮してトップタービンには入口圧力低下防止装置をもっており、主蒸気圧力が規定圧力の90%以下に低下すると自動的に負荷を制限して、規定圧力の80%で無負荷になるようにし、ボイラの保安装置としての役目を果している。

また、急激な温度低下からタービンをまもるために主

蒸気温度が 80°C以上低下した場合は、自動的にボイラの主塞止弁を閉止する装置をボイラ側に設けている。

〔2〕ボイラ系統

ボイラの制御系統は燃焼制御とスルザーモノチューブボイラ固有の内部制御およびバイパス制御の3系統から構成され、各々独立して単純かつ信頼性のある制御を行なっている。

燃焼制御装置は米国パーレ社のミニライン空気式で、従来の自然循環ボイラに採用されてきた方式と異なり、タービンの入口蒸気圧力をマスタ信号として、これを一定に保つように燃料量および燃焼を調節し、これに付随してミル系統および重油の温度制御を行なう。

固有制御装置はスルザー社独特のもので、ボイラの性能に密接な関連があるものとして、スルザー社自身が製作取りまとめを行なったものである。制御方式は誘導電気式を採用し、制御弁類はスルザー社製品を使用し、電気品はドイツのショッペ・アンド・フェーザ社製である。制御系統の概要を図2に示す。

(1) 給水制御

負荷に応じて燃焼制御装置によって燃料量が調節され、これとバランスを保つように給水量が調節されるもので、給水調整弁と給水ポンプ回転数制御装置とからな

る。時間遅れを少なくするため、第一次信号として気水分離器出口の飽和蒸気量をとっているが、最終的には蒸発部出口の湿り度を一定に保つように、飽和蒸気量と気水分離器ブロー量の対比が調整信号として使用される。

表 1 40,000kW 発電プラント設備概要

ボイラ 型 蒸気圧力 蒸気温度 蒸発量 給水温度 燃焼方式 再熱器型式 再熱温度 製造者名	式 力 度 量 度 式 式 度 名	屋外式スルザーモノチューブ再熱型 143.5kg/cm ² g (過熱器出口) 541°C (過熱器出口) 185t/hr 241°C (節炭器入口) 微粉炭 (ドライボットム型) 蒸気加熱式 433°C 石川島播磨重工業KK	
微粉炭装置 ミル型式 容量	式 量	石川島FWチューブ式圧力型 14.15t/hr×2	
タービンおよび発電機 型 キロワット数 蒸気圧力 蒸気温度 背圧 発電機力率 発電電圧 製造者名	式 数 力 度 圧 率 電 名	(トップタービン) 背圧タービン 13,000kW 140kg/cm ² g (主塞止弁前) 538°C (主塞止弁前) 39.5kg/cm ² g 86.7% 11kV 東京芝浦電気KK	(ベースタービン) 復水タービン 27,000kW 36kg/cm ² g (主塞止弁前) 430°C (主塞止弁前) 722mmHg 90% 11kV 東京芝浦電気KK
給水処理装置 汚過装置 純水装置 前置汚過器 ポリシャ	置 置 器 ー	重力式急速汚過器 150m ³ /hr×2系列 2床3塔型 1,100m ³ /d×2系列 セルローズフィルタ 常用 35m ³ /hr×3系列 最大 57m ³ /hr 外部再生混床型 常用 35m ³ /hr×3系列 最大 57m ³ /hr	
作業用蒸気		熱再熱蒸気管を既設コレクタと連絡し、工場作業用蒸気を供給するとともに既設プラントとの相互融通用にもあてる。	
発生電力		40,000kVA変圧器を通じて66kVに昇圧し、工場内の66kV系統に送電する。 所内電力は7,500kVA変圧器を通じて3,300Vおよび440Vに降圧して使用する。	
制御装置 ボイラ トップタービン ベースタービン	ラ	内部制御} S&F社(独)製誘導電気式 バイパス制御} A C C ベーレ社製空気式 背圧制御 前圧制御	

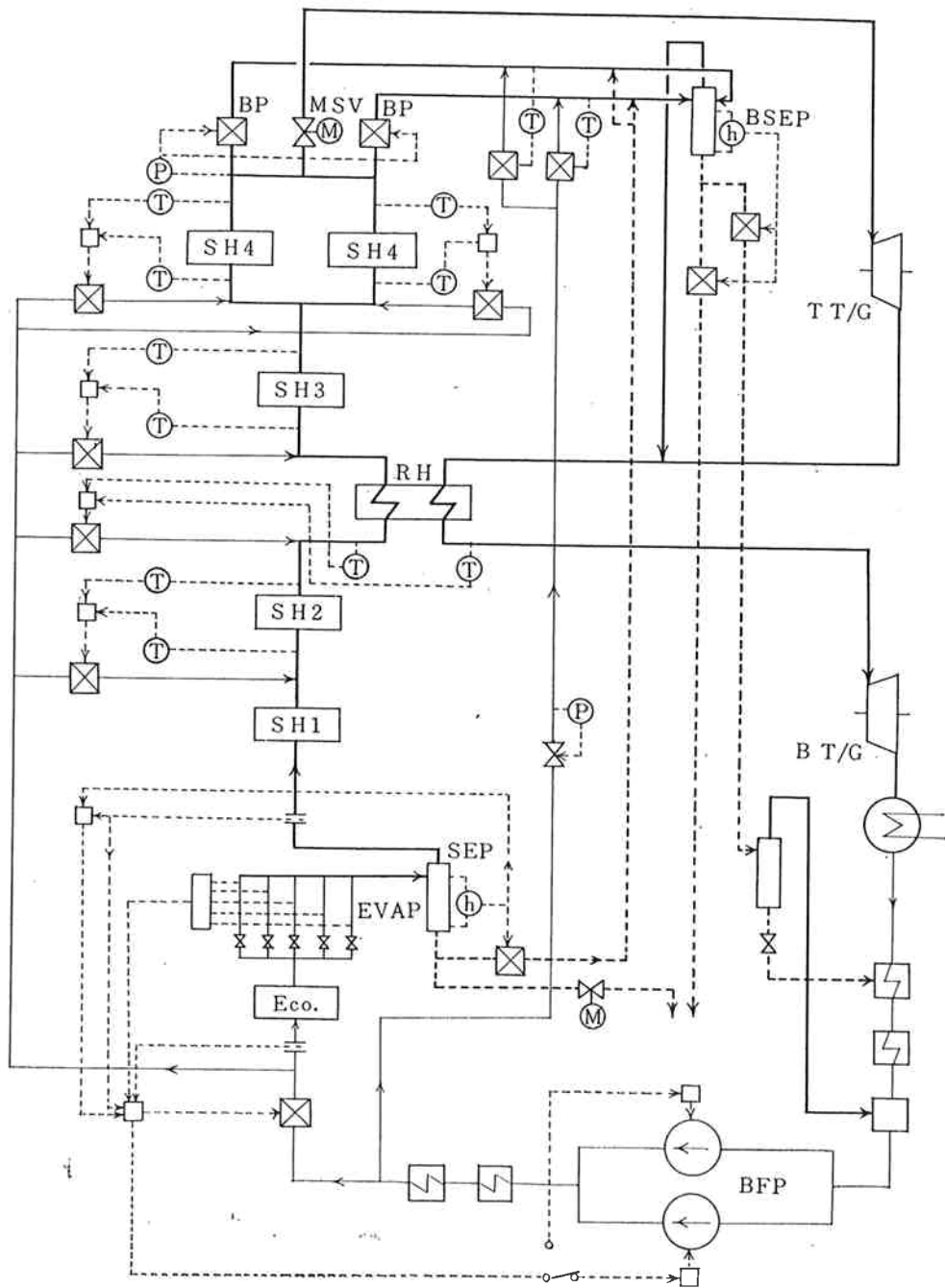


図 2 ボイラ固有制御系統

ブロー量としては気水分離器の水位が代用される。さらに、蒸発部パイロチューブの出口温度が燃料と給水とのバランス状態を表わすものとして調整信号に使用され、湿度信号との共用または温度信号単独の制御ができるようになっている。

この外、給水流量がフィードバックされて回路の安定をはかっており、さらに蒸発部の流動安定を確保するため最大負荷時の30%流量をミニマムフローとしておさえる装置をもっている。

操作部としては応答の速い給水調整弁がまず作動し、

最終的には給水ポンプの回転数が調整されて給水調整弁の開度は元の状態に戻る。

(2) 蒸気温度制御

主蒸気、再熱蒸気とも温度制御はスプレ方式とし、主蒸気は3段、再熱蒸気は1段を採用している。スプレは、入口温度を予備信号、出口温度を主信号として入口側に注入するもので、再熱蒸気温度の場合予備信号には高圧蒸気入口温度をとり、スプレも高圧蒸気入口側で行なっている。

(3) 気水分離器水位制御

気水分離器水位はブロー弁によって比例制御される。

(4) 圧力制御 (バイパス弁制御)

ボイラ出口圧力を信号としてバイパス弁が作動する。バイパス弁は入口圧力、すなわちボイラ出口圧力を一定にするように作動するもので、通常運転時には常用圧力の数%増で作動しはじめるように設定しておき、安全弁に先立って作動する。

バイパス弁はボイラ起動用としても使用されるもので、最小開度を設定できるようになっている。

なお、前にも述べたようにトップタービンをバイパスして再熱蒸気系統に蒸気を送る必要がある場合はこの弁を減圧弁に代用することもできる。

(5) バイパス制御

バイパス弁からバイパス気水分離器に流入する蒸気の温度を制御するためにスプレ弁が設けられ、スプレ水は節炭器入口の給水をとって、圧力制御装置を備えてスプレ水圧力を制御する。

バイパス気水分離器にはブロー弁を2箇もっており、水位を信号にとって比例制御を行なう。2箇のブロー弁は2段に作動するもので通常運転時には1箇のみ作動し、起動時には2箇とも作動する。

[3] 補機系統

補機類は殆んどが自動調整になっており、中央制御の立前からモータのスイッチは特殊のものを除き全部中央制御室に集めており、現場には中央制御室で停止ロックしたときのみジョグスイッチで運転できるようにしている。

予備機をもった重要な補機は全部自動切換えまたは自動起動ができるようになっており、スルザー社製 1,840 kW 給水ポンプもウォーミングなしで起動ができるので自動切換え方式を採用している。

[4] インターロック

各設備にはそれぞれ起動停止のインターロックを設けて安全で確実な運転ができるようにしている。プラントの危急停止インターロック系統図を図3に示す。タービンが2台になっているため非常に複雑なように見えるが、個々については一般の発電所と大きな相違はない。他の発電所と特に違っているのはトップ、ベースいずれの発電機の遮断器がトリップしてもタービンを無負荷運転で残しておくことなく、全プラントを危急停止させることになっていることである。これは系統安定のために特に採った措置で、この理由については後で述べる。

4. トップタービントリップ時の問題

[1] 試験の目的

前述のとおり、本計画ではトップタービンをバイパス

する減圧弁は設けず、ボイラバイパス弁を兼用することとしている。計画的な運転時にはこれで何等問題はないが、トップタービントリップの場合、蒸気がこの弁を通して再熱蒸気ラインに流れ、再熱蒸気系統の圧力に大きな変動がなく安定した運転ができるかどうかには大きな危惧があった。

バイパス弁は当初油圧弁が予定されていたが途中から電動弁に変更された経緯もあり、この弁の作動状況および旧プラントに及ぼす影響について試験することとなり、11月下旬のトップタービン調速試験時および12月下旬の2回に亘って試験を行なった。

[2] 試験結果

図4に試験記録を示す。これはトップタービンの50%負荷調速機試験のときのもので、運転状態その他は次

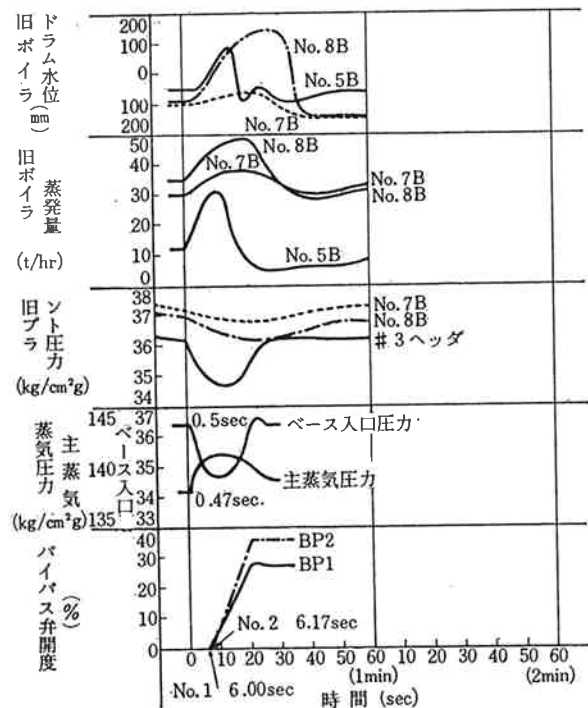


図4 トップタービン調速機試験時記録(50%負荷)

のとおりである。

- (1) 旧ボイラは No. 5, 7, 8 の3 缶を熱再熱蒸気系統と併用。旧ボイラ合計蒸発量77t/hr。
- (2) ベースタービンは約75%負荷で運転。
- (3) ボイラバイパス弁設定 148kg/cm²g
- (4) ボイラは燃料、給水とも手動制御。
- (5) 計測は新プラントはオツシロ、旧プラントは計測員の連続記録による。記録中主蒸気圧力は最大 141 kg/cm²g を示しているが、圧力計では 154kg/cm²g に達した。従って、主蒸気圧力の記録は時間的変化の状況のみをみることにする。

引ずること
問題はない
の弁を通
力に大き
大きな危
途中から
別状におよ
こととな
び12月下
エンの50%
の他は次

0%負荷)
5000
(2mm)
引熱蒸気系
トは計測
最大141
14kg/cm²g
昇間的変化

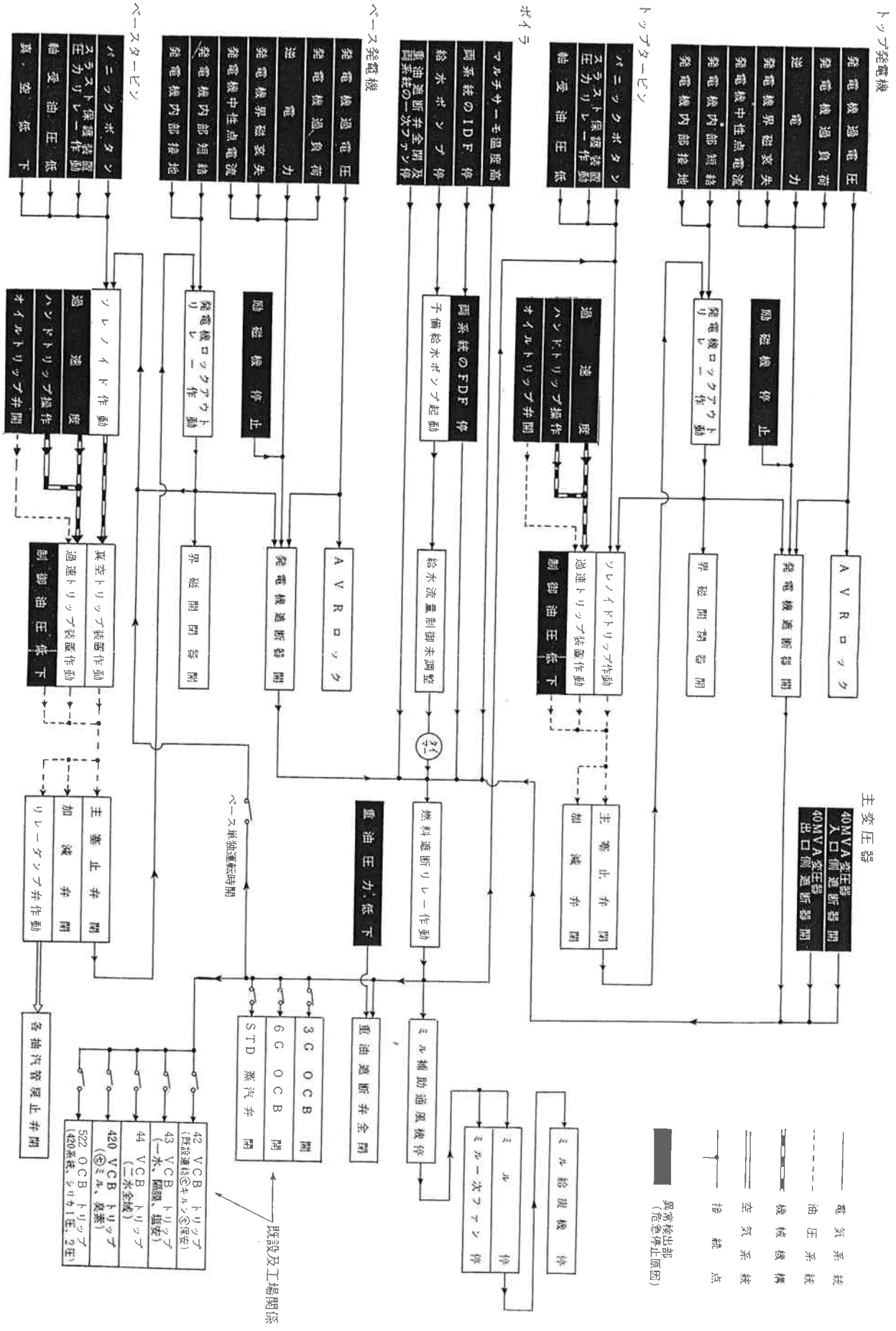


図 3 危急停止インターロック系統図

図でわかるようにボイラバイパス弁の作動には相当の時間遅れがあり、トップタービンがトリップしてから約 6 sec 後に開きはじめている。しかも弁が開きはじめてからリフトが約 7mm になるまではバルブポートの面積が殆んどゼロに近いから、実際に蒸気が流れるのはタービントリップ後 6~10 sec 後となる。このため再熱蒸気圧力は約 10 sec 後に最低に対してはいる。

この試験結果に基づいて、トップタービントリップ時にベースタービンを前圧制御にしておいてベースタービンの蒸気消費量をできるだけ小さくし、作業用蒸気も選択遮断によってなるべく減少するとして、再熱蒸気系統の圧力変動を近似式で試算した結果図 5 および 図 6 を得

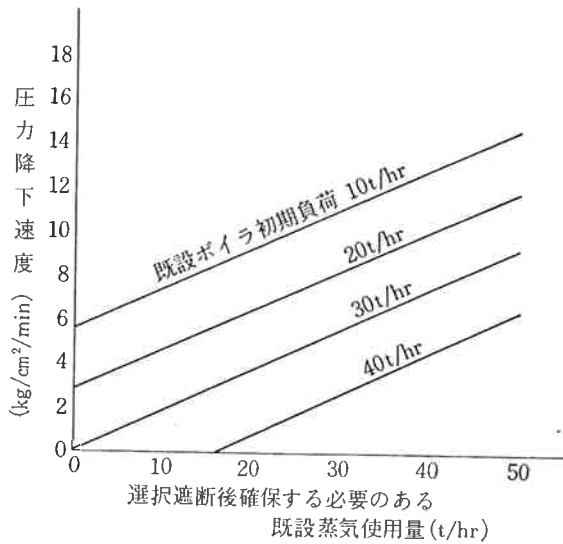


図 5 トップタービントリップからバイパス弁開までの圧力降下速度

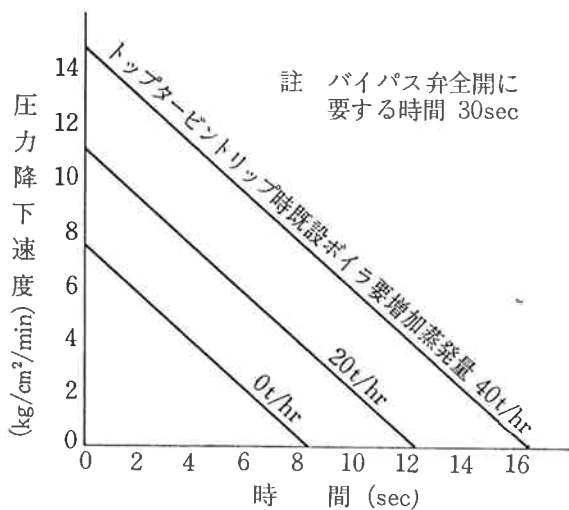


図 6 バイパス弁が開き、蒸気が流れはじめてからの圧力降下速度

た。

一方旧ボイラについては許容圧力降下速度の問題もあるが、この場合自己蒸発による気泡発生によりドラム水位が変動する影響の方が大きい。ドラム水位の変動速度は圧力変動速度または蒸発量の変化に比例する。当社の No. 5~8 ボイラの場合図 7 のようになる。

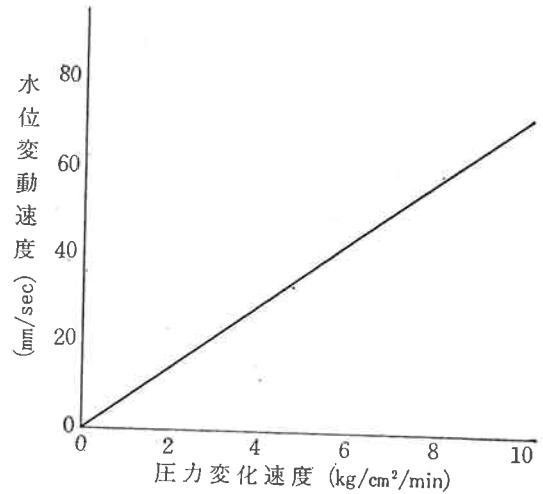


図 7 ドラム水位変動速度

[3] 対策

ベースタービン前圧制御とし、作業用蒸気を選択遮断方式を採れば、確保すべき既設蒸気使用量が小さい場合には数秒間の過渡状態以後は殆んど影響を与えないですむこととなるが、旧ボイラの併用缶数および所要増加蒸発量が一定せず、旧ボイラのドラム水位が上昇してプラミングをおこす心配もあり、一方トップタービンのトリップ事故または発電機の遮断器がトリップするような事故は稀であるところから、発電機の遮断器がトリップした場合は新プラント全体を危急停止するインターロックを設定した。

5. 負荷変動時の追従試験

[1] 試験方法

40,000 kW プラントにかかる工場負荷を一定とし、外部電源と電力の授受を行ないながらボイラ、タービンを自動で運転し、瞬間的に外部電源との連絡を遮断してプラントに負荷の急変を与えた。

試験時の電力系統は図 8 のとおりで、新プラントにかかる工場負荷は約 20,000 kW とし、外部電源との授受を 2,000 kW とし、プラントの瞬時負荷変動が約 10% になるようにした。

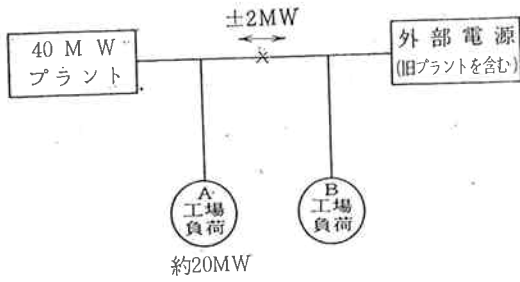


図8 負荷変動試験系統

なお、試験は微粉炭専焼で行なった。

〔2〕試験結果

蒸気流量、蒸気圧力などオツシログラフの結果を図9および図10に示す。

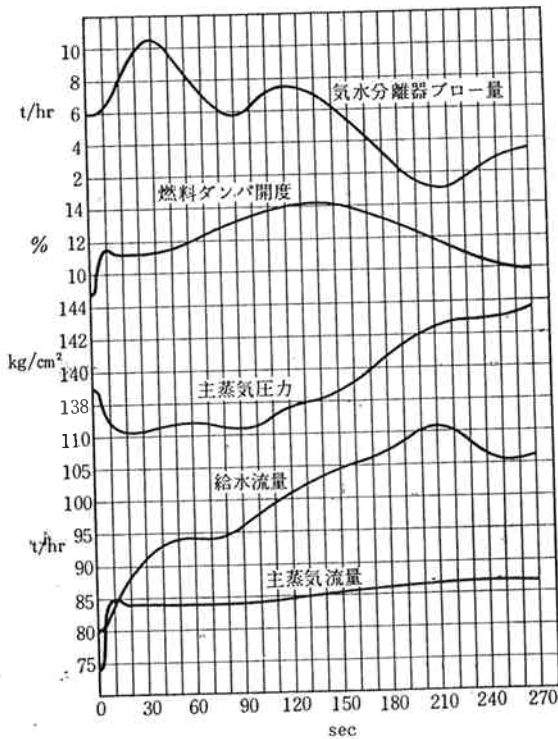


図9 負荷変動試験結果 (負荷上昇)

(1) 負荷上昇時 蒸気流量は10秒間で 74t/hr から 85t/hr に達し、次いで 84t/hr に減少した後最終的には 86.5t/hr で整定した。この間に主蒸気圧力は 139kg/cm²g→136.4kg/cm²g→143.5kg/cm²g と変化した。

主蒸気温度は図に示されていないが、3分後に最大約 4°C の変化に止った。

(2) 負荷減少時 蒸気流量は10秒間に 96t/hr から 88t/hr に減少し、主蒸気圧力の変化は最大 -2.5kg/cm², +1.5kg/cm² にすぎなかった。

主蒸気温度の変化は負荷上昇時とほぼ同じ状況である。

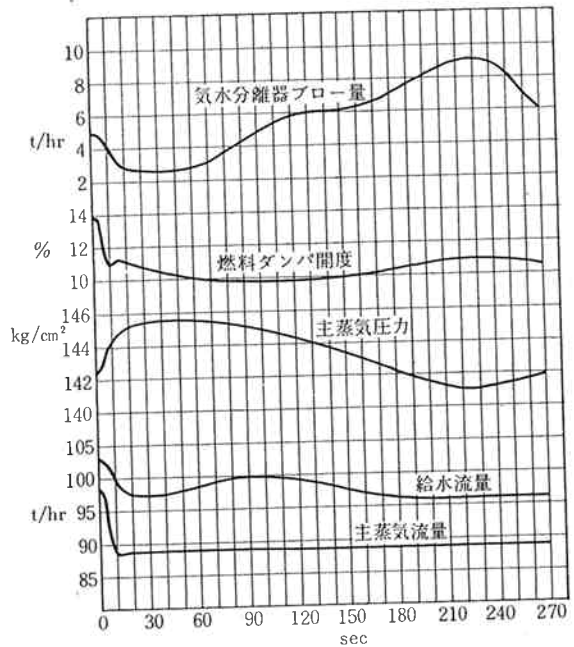


図10 負荷変動試験結果 (負荷減少)

一般に貫流ボイラは蓄熱容量が小さいのでドラム型のボイラに比して安定性が悪いといわれているが、本試験結果からみると制御性は良好で、10%程度の負荷急変に対して問題なく応答できることが確認された。本プラントでは微粉炭ミルに横型ボールミルを採用している。貫流ボイラの場合燃料としては応答性の速い重油が最もよいことはいうまでもないが、微粉炭燃焼の場合蓄熱容量の小さい貫流ボイラには堅型ミルよりも石炭の蓄積量の大きい横型ボールミルの方が制御性がよいという説を裏書きしたものである。

6. むすび

一般に貫流ボイラは制御がむつかしいといわれているが、スルザーモノチューブボイラでは気水分離器で蒸発域と過熱域とが確然と区分され、ドラムボイラと同様の制御ができる上に、内部制御と外部制御(燃焼制御)とを区分して独立させ、複雑な制御問題をはっきり区分してできるだけ他と独立させる方法をとって外乱による混乱を少なくするようにしている。一方本プラントはトップ、ベースと2台のタービンをもっており、作業用蒸気の抽出、旧プラントとの併用等非常に複雑な系統になっているにもかかわらず、制御性は非常に優秀で、通常運転時微粉炭専焼で主蒸気圧力 ±0.5kg/cm², 主蒸気温度 ±2~3°C 程度の変動に止っている。

夜間負荷と昼間負荷を変更する必要がある場合など、負荷の移行は極めて急速に行なっているが、追従性もよく圧力、温度の変化は僅少である。

わが国ではじめてのボイラを採用し、類例の少ない新しい方式を沢山にとりいれているだけに、運転開始後の成果に大きな期待がかけられていたのであるが、性能、

制御の優秀性と運転員の努力とによって優秀な成績で運転を継続中であり、当社発展の一大支柱となるものと確信する。