

産業用火力発電所の計装制御

Instrument Control of Thermal Power Station for Industries

平 賀 昭 二* 西 村 昭*
Shōji Hiraga Akira Nishimura

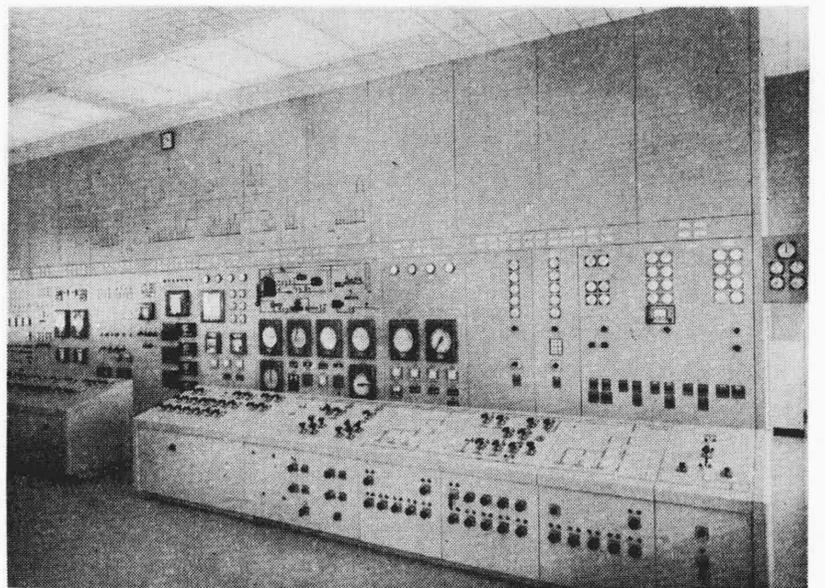
内 容 梗 概

オートメーションの普及とともに、工業計器も著しい進歩を見せ、最近では火力発電所においても国産の工業計器を用いて計装制御するようになった。日立製作所でも昭和33年より産業用ボイラの自動燃焼制御装置を製作納入し、これを基にして火力発電所にも適用し満足できる制御結果を得ている。本稿においては、おもに産業用火力発電所の計装制御の原理および方式を説明し、さらに実際に適用している計器および制御結果について述べる。

1. 緒 言

重化学工業の急速な発展に伴い、これらに不可欠な重要負荷の無停電給電を確保するとともに、あわせてこれら重化学工業に必要な蒸気を供給し、工場全体の熱エネルギーを総合的に利用するための産業用火力発電所の建設が、ここ数年来飛躍的に増加している。

従来重化学工業では、重要負荷に対しては緊急時自家発電を利用し、一方変化の多い工場用熱負荷に対しては別にボイラを設置して手動制御で処理する例が多かった。しかし近年発電プラント、制御装置および計測技術の大幅な進歩によって一つの産業用火力発電所で上記両者の要求を満足させることが可能となり、かつ経済的にも有利となってきた。このような産業用火力発電所を高効率に運転するためには、装置を自動化して、中央制御する必要があるが、特にボイラ計装制御の適否が発電所全体の効率に大きな影響を与えている。以下産業用火力発電所の計装制御についてボイラ自動制御(ABC)を中心に述べる。



第1図 産業用火力発電所中央制御盤

2. 産業用火力発電所の計装

産業用火力発電所においても全発電設備を中央制御盤で監視計測制御するのが、最近の傾向である。すなわち主機および主要な補機は中央制御とし、状態監視、計測も完備して一貫した運転を容易にして、発電所効率を高め、かつ緊急時には迅速に処理できるようにしている。第1図は産業用火力発電所の中央制御盤の一例である。

これらの産業用火力発電所の計装として、復水タービン使用の場合と背圧タービン使用の場合の例をそれぞれ第2,3図に示す。

第2,3図に示すボイラの計装とタービンの計装とを表にまとめると第1,2表のようになる。

ボイラは、すべて中央制御盤において監視制御され、タービンは常時の監視は中央制御盤で行なわれ、起動および停止はタービン起動盤にて行なわれる。

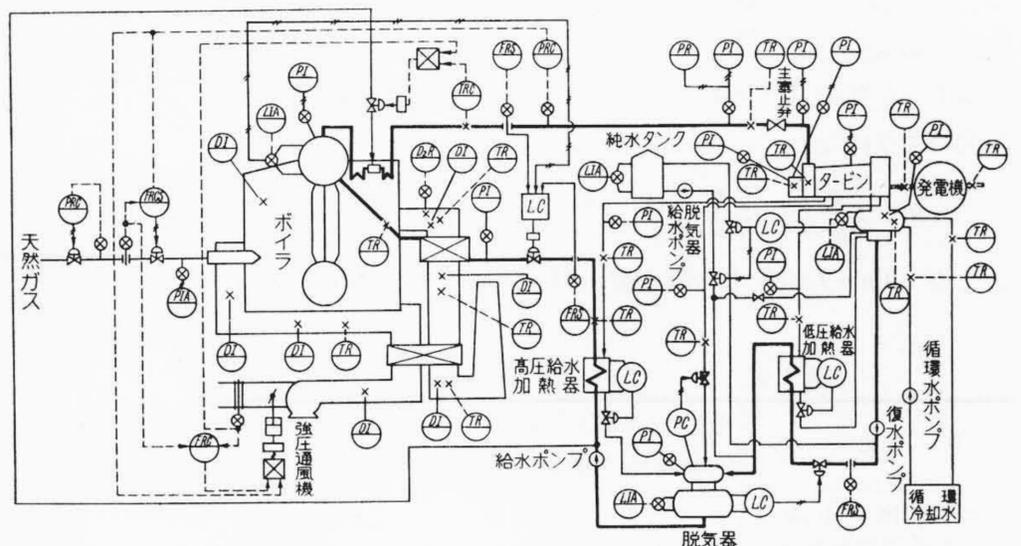
3. 産業用火力発電所のボイラ自動制御

産業用火力発電所の計装全般は前述のとおりであるが、火力発電所で最も重要な計装制御は、ボイラ自動制御(Automatic Boiler Control)いわゆるABCである。ここではまずABCの原理および方式について述べる。

3.1 ABCの原理

ボイラ制御は基本的には次の二つの制御に大別される。

* 日立製作所国分工場



第2図 復水タービン系統の計装図

(a) 熱量バランス

ボイラからは蒸気によって常に外部へ熱が取り去られるので、その分だけ空気と燃料を供給し、燃焼により熱を補給し熱量バランスをとらねばならない。

(b) 重量バランス

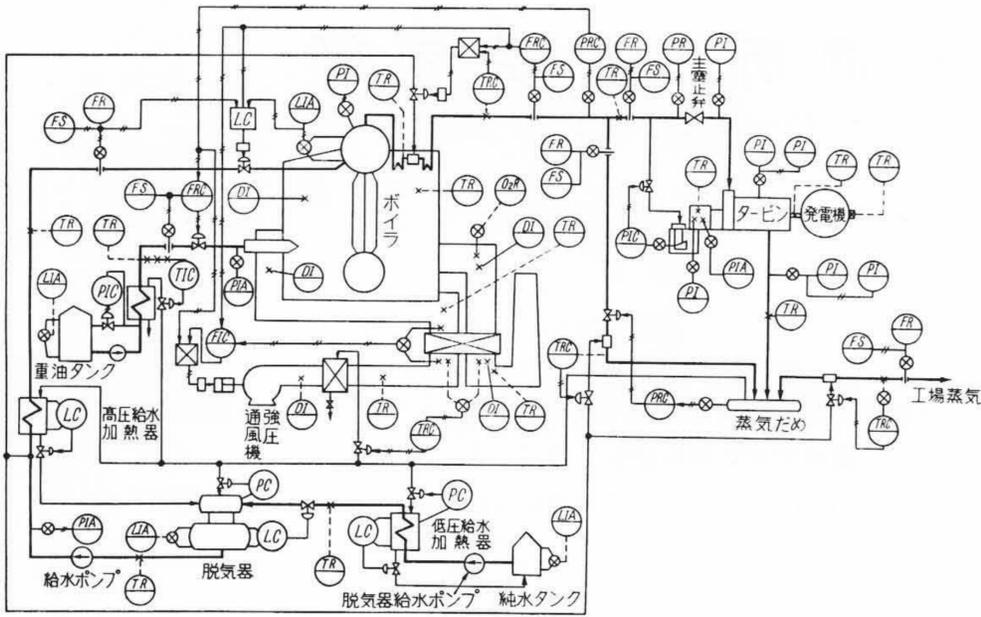
ボイラからは蒸気が外部に取り出されるので給水して水の重量バランスを保たねばならない。

上記(a), (b)の基本的な考え方に従って制御方式が決定されるのであるが、制御方式を説明するまえにドラムを有する自然循環式ボイラの特性を説明する。

3.1.1 ボイラ特性

(1) 燃料供給量と吸収熱量の関係

炉内への燃料供給量の変化に対する吸収熱量の変化の応答時間



第3図 背圧タービン系統の計装図

には、炉内の熱容量や燃焼の遅れのために数分程度の時間遅れがある。この現象は経験的に次の一次遅れの形の伝達関数で表わされる。

$$q = \frac{b}{T_F \cdot S + 1} \dots\dots\dots (1)$$

ここで T_F : 燃焼(炉内)の時定数 (s)

$$b = \frac{\Delta B}{B_0} : \text{燃料量の変化率}$$

$$q = \frac{\Delta Q}{Q_0} : \text{吸収熱量の変化率}$$

- B_0 : 定常状態における燃料量 (kg/s)
- Q_0 : 定常状態における吸収熱量 (kcal/s)
- ΔB : 定常状態よりの燃料量の変化量 (kg/s)
- ΔQ : 定常状態よりの吸収熱量の変化量 (kcal/s)

(2) 蒸気圧力応答の特性

ボイラを集中系プロセスとして蒸気圧力応答の特性式を求めると次のようになる。

$$p = \frac{q}{T_B \cdot S} - \frac{w}{T_W \cdot S} (1 - \gamma) - \frac{\gamma f}{T_W \cdot S} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $T_B = T_W$ (缶水の時定数) + T_K (缶体の時定数) (s)

第1表 ボイラ計装

測定点	圧力計		温度計		流量計		水面計		ド ラ 計	その他
	指示	記録	指示	記録	指示	積算	指示	記録		
蒸気	ボイラ出口主蒸気	○	○	○	○	○				
	一次過熱器出口蒸気		○							
給水	胴節炭器入口給水	○		○	○	○				○
	給水純度									○
	缶水 PH									○
空気	押込通風機出口空気								○	
	蒸気式空気予熱器出口空気			○						
	空気予熱器出口空気			○					○	
	風箱								○	
ガス	炉内ガス								○	
	汽缶出口ガス			○					○	
	空気予熱器出口ガス			○					○	
	ガス O ₂									○
重油・燃料ガス	バーナ前重油	○								
	重油	○		○	○	○				
	重油タンク									○
	バーナ前燃料ガス	○								
	燃料ガス				○	○				
その他	ABC 空気	○								

$$\gamma = \frac{(\text{缶水のエンタルピ}) - (\text{給水のエンタルピ})}{(\text{蒸気のエンタルピ}) - (\text{給水のエンタルピ})}$$

$$p = \frac{\Delta P}{P_0} : \text{蒸気圧力の変化率}$$

$$w = \frac{\Delta W}{W_0} : \text{蒸気流量の変化率}$$

$$f = \frac{\Delta F}{F_0} : \text{給水流量の変化率}$$

P_0 : 定常状態の蒸気圧力 (kg/cm²)

W_0 : 定常状態の蒸気流量 (kg/s)

F_0 : 定常状態の給水流量 (kg/s)

ΔP : 定常状態よりの蒸気圧力の変化量 (kg/cm²)

ΔW : 定常状態よりの蒸気流量の変化量 (kg/s)

ΔF : 定常状態よりの給水流量の変化量 (kg/s)

(2)式はまた次のように変形することができる。

$$p = \frac{q}{T_B \cdot S} - \frac{w}{T_W \cdot S} - \frac{\gamma}{T_W \cdot S} (f - w) \dots\dots\dots (2)'$$

(2)'式で右辺の第1項は吸収熱量の影響を、第2項は蒸気流量の影響を、第3項は給水の過不足の影響を表わしている。

(3) ボイラの蒸気圧力応答の総合特性

ボイラ制御において、蒸気圧力の検出点はドラムの発生蒸気圧力よりも圧力が少し下った場所である。したがって蒸気圧力の応答の特性式も圧力検出点の状態のものでなければならない。

いま圧力損失が蒸気流量の自乗に比例するとして2次の微小量を無視すると

$$\frac{p - p_r}{w} = 2 \left(1 - \frac{P_{T0}}{P_0} \right) \dots\dots\dots (3)$$

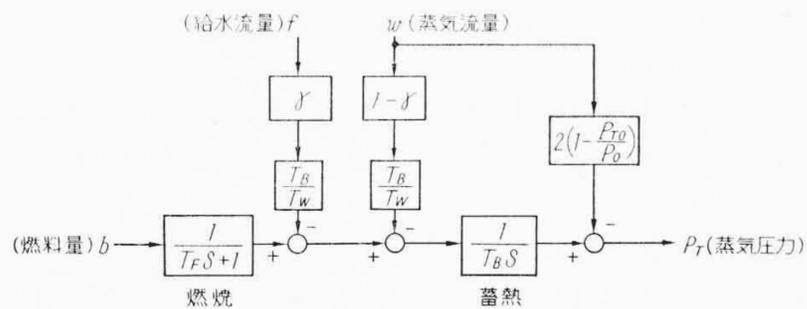
ここで検出点の蒸気圧力は $P_{T'} = P_{T0}(1 + p_r)$ で表わされる。

(3)式は(1), (2)を用いて次のとおり表わされる。

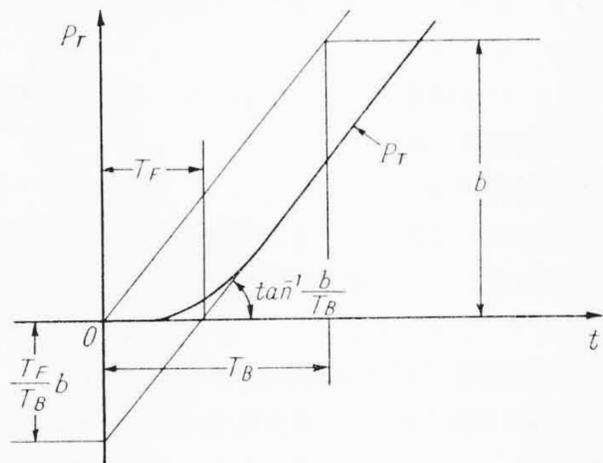
第2表 タービン計装

測定点	圧力計		温度計		流量計		水面計		その他	
	指示	記録	指示	記録	指示	積算	指示	記録	指示	記録
蒸気	主さい止弁前蒸気	○	○							
	主さい止弁後蒸気	○								
	調整段後蒸気	○								
	抽気帯蒸気	○								
	脱気器内蒸気	○								
気	タービン排気	○	○							
	*復水器真空	○								
	**タービンバイパス蒸気					○	○			
油	調整受油	○								
	軸受排油							○		
	油冷却器出入口油							○		
復水	*復水器ホットウエル復水							○	○	
	*復水器ホットウエル水位									○
	*復水器ホットウエル水位									○
給水	純水タンク水位									○
	脱気器出口給水							○		
	脱気器水位									○
その他	給水加熱器出口給水							○		
	*復水器冷却水出入口							○		
	油冷却器出入口水							○		
	振動計									○

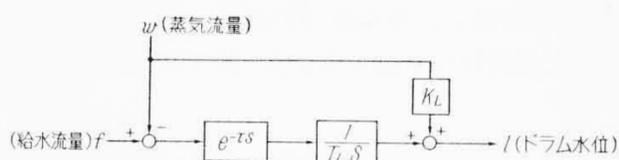
注 * 復水タービンの場合のみ計測
** 背圧タービンの場合のみ計測



第4図 蒸気圧力応答のブロック線図



第5図 燃料量変化に対する蒸気圧力応答



第6図 ドラム水位応答のブロック線図

$$\dot{p}_r = -2\left(1 - \frac{P_{T0}}{P_0}\right)w + \frac{b}{T_B \cdot S(T_F \cdot S + 1)} - \frac{\gamma f}{T_W \cdot S} - \frac{(1-\gamma)w}{T_W \cdot S} \dots (4)$$

(4)式をブロック線図で表わすと第4図のようになる。次に蒸気流量と給水流量を一定に保ち、燃料量をステップ的に**b**だけ変化させた場合を考える。

蒸気流量と給水流量は一定で $w=f=0$

燃料量の変化はステップ的であるから b/s である。

上記の条件を(4)式に代入すると次のようになる。

$$\dot{p}_r = \frac{b}{T_B \cdot S^2} \cdot \frac{1}{T_F \cdot S + 1} \dots (5)$$

$$\therefore p_r = \frac{T_F \cdot b}{T_B} \left\{ \frac{t}{T_F} - (1 - e^{-\frac{t}{T_F}}) \right\} \dots (6)$$

(6)式を図示すると第5図のとおりである。

第5図より明らかなようにボイラの圧力制御性は T_B/T_F が大きいほど良いことがわかる。

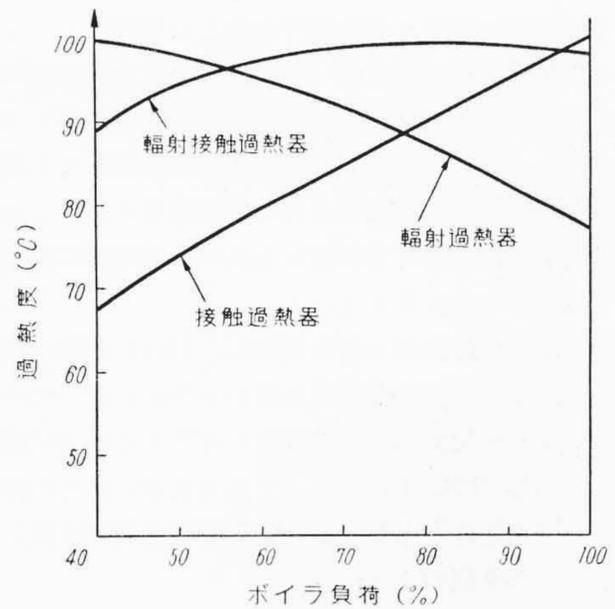
(4) ドラム水位応答の特性

ドラム水位の応答は、一般的には第6図のような簡単なブロック線図で表わされる。

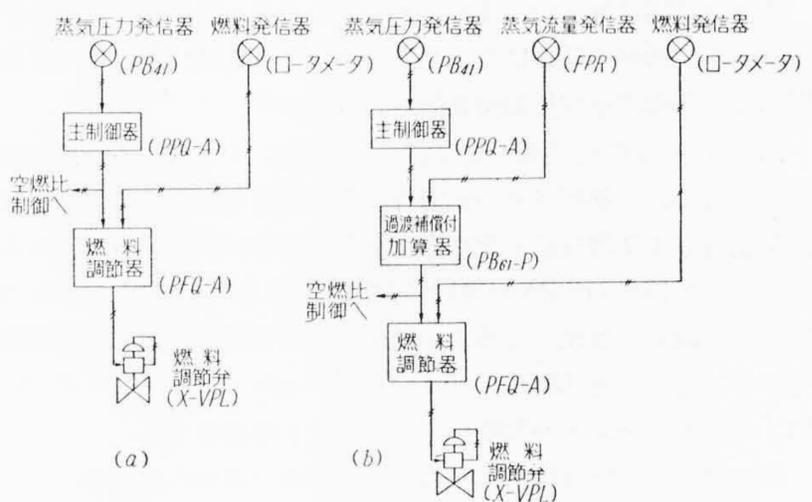
第6図で K_L はドラム水位の蒸気負荷変化に対する逆応答に関係する常数で、 τ は給水温度の影響を表わす時定数であり、現象的には K_L は泡立ちの現象を、 $e^{-\tau s}$ は縮小の現象の影響を示すものである。

(5) 過熱蒸気温度応答の特性

過熱蒸気温度の過渡応答はボイラの形式によって異なるので過渡応答は省略し静特性のみ記す。過熱器は、伝熱方式で分けると接触過熱器、輻射過熱器、輻射接触過熱器の3種類になり、負荷



第7図 過熱器の温度特性



第8図 主制御系統図

と過熱度との関係は、第7図のようになる。

3.2 ABCの方式

ボイラ自動制御(ABC)はボイラ形式、補機の種類により使用される制御装置も種々であるが一般には次の三つの主要制御を含んでいる。

(1) 自動燃焼制御 (Automatic Combustion Control)

通常 ACC と呼ばれ、次の三つの制御より成る。

- (a) 主制御 (負荷に応じた燃料および燃料用空気の供給)
- (b) 空燃比制御 (最適な燃料/空気比の維持)
- (c) 炉内圧制御 (安定した燃焼を行なうための炉内圧の一定保持)

(2) 給水制御 (Feedwater Control)

通常 FWC と呼ばれ負荷に応じた最適給水量の調整を行なう。

(3) 蒸気温度制御 (Steam Temperature Control)

通常 STC と呼ばれ発生蒸気の過熱蒸気温度の調整を行なう。このほかにボイラ形式に応じて微粉炭機、重油温度および圧力、空気予熱器、給水ポンプなどの局所的な制御を行なう。

3.2.1 自動燃焼制御方式

(1) 主制御

ボイラ特性より明らかなように自然循環式ボイラでは、過熱器出口の蒸気圧力を一定に保つように制御することによって負荷に応じた燃料を供給できるので、主制御は上記理由と蒸気圧力をタービンの許容値内に収める目的から蒸気圧力一定制御を行なう。第8図にその実例として日立空気作動式主制御系統を示す。

()内の記号は、日立工業計器の形式である。

第8図に示すように主制御系統は、蒸気負荷の変動を過熱器出口蒸気圧力発信器 (PB41) で検出し、主制御器 (PPQ-A) で設定値

と比較させ比例+積分+微分動作を加えた制御信号によって燃料調節弁 (X-VPL) を作動させ、燃料を調節し過熱器出口蒸気圧力が一定になるように制御する。また燃料の制御に対しては、燃料量をロータメータ式燃料量発信器で正確に測定して負帰還し燃料調節器 (PFQ-A) で主制御器よりの制御信号と比較させ、比例+積分の制御動作によって制御精度を高めると同時に操作端の外乱をマイナーループで吸収させている。

一般的には (a) の制御システムを採用し、(b) の制御システムは負荷変動が激しく、かつ蒸気圧力検出箇所がドラムに近いために蒸気負荷変動に対する蒸気圧力応答が遅れが存在する場合に採用し、過渡補償付加算器 (PB₆₁-P) によって蒸気流量の変化の微分値を制御系に入れて速応性をもたせる。第 7 図の主制御システムをブロック線図で示すと第 9 図のようになる。

第 9 図で点線の制御システムは第 8 図 (b) の制御システムに対応する。

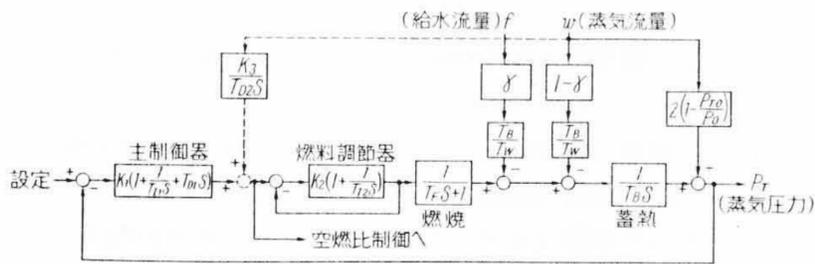
(2) 空燃比制御

空燃比制御は基本的には空気と燃料の比率を最適値に保つことであるが、燃料の種類によって実際の制御システムは異なる。第 10 図に空気作動式空燃比制御システムの一例を示す。

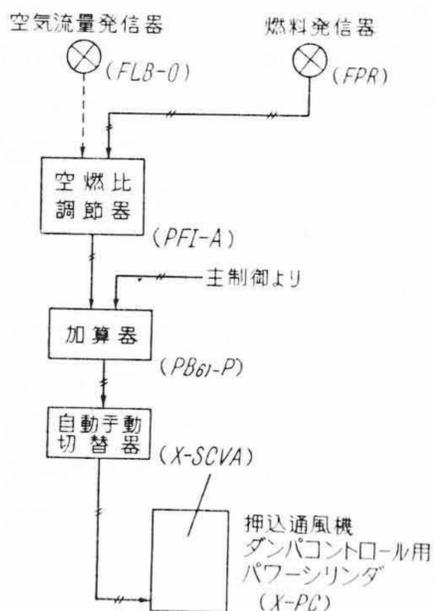
第 10 図の空燃比制御システムは負荷の変動に対しては主制御の制御信号で燃料を制御させると同時に空気流量も制御させ、さらに空気流量および燃料量をそれぞれ空気流量発信器 (FLB-O) および燃料量発信器 (FPR) で個別に測定し空燃比調節器 (PFI-A) で空燃比が最適空燃比となるように比例+積分動作を加えた制御信号によって押込通風機ダンパコントロール用パワーシリンダ (X-PC) を作動させダンパ開度を変え空気量を再調整する。

次に燃料の検出方法にはいろいろあるので簡単に述べる。

- (a) 重油またはガスの専焼の場合は直接燃料を測定する。ただし蒸気流量で代表させる場合も多い。
- (b) 微粉炭焚または石炭焚の場合は直接燃料を測定することは困難なので、すべて蒸気流量にて代表させる。
- (c) 重油 (またはガス) と微粉炭の混焼の場合は、燃料は蒸気流量で代表させ、制御システムとしては、微粉炭を基準とし重油



第 9 図 主制御システムブロック線図



第 10 図 空燃比制御システム図

(またはガス) に対しては補正する系とする。

(3) 炉内圧制御

炉内圧制御は平衡通風式ボイラの場合、火焰の安定および冷空気の浸入の防止のために炉内を大気圧より低く保つためのものである。

第 11 図に空気作動式炉内圧制御システムの一例を示す。

第 11 図の炉内圧制御システムは、炉内圧を炉内圧発信器 (FLR-O) で検出し炉内圧調節器 (PPI-A) で設定値と比較し比例+積分動作を加えた制御信号によって誘引通風機ダンパコントロール用パワーシリンダ (X-PC) を作動させダンパ開度を変え、ガス量を調節し炉内圧を一定に保つ。

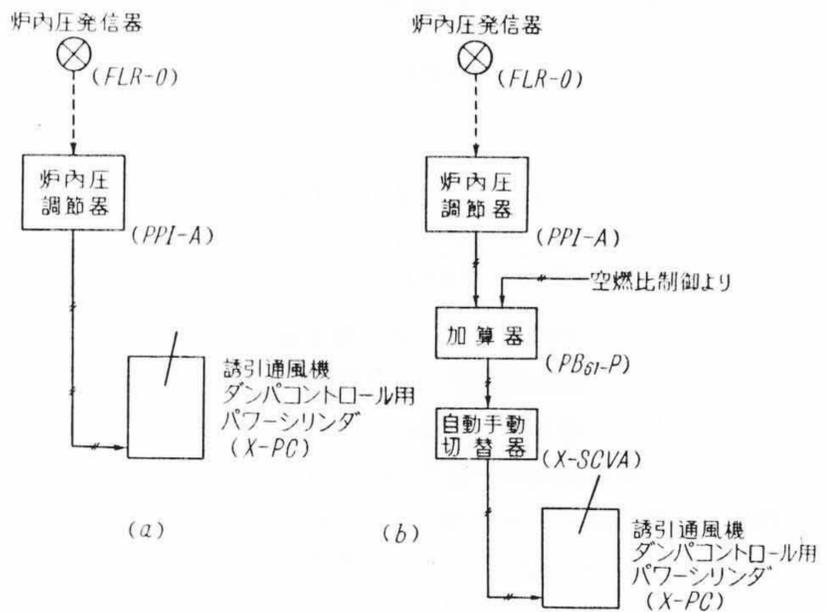
一般には (a) の制御システムで十分であるが、負荷変動が激しい場合は (b) の制御システムを採用する。

3.2.2 給水制御方式

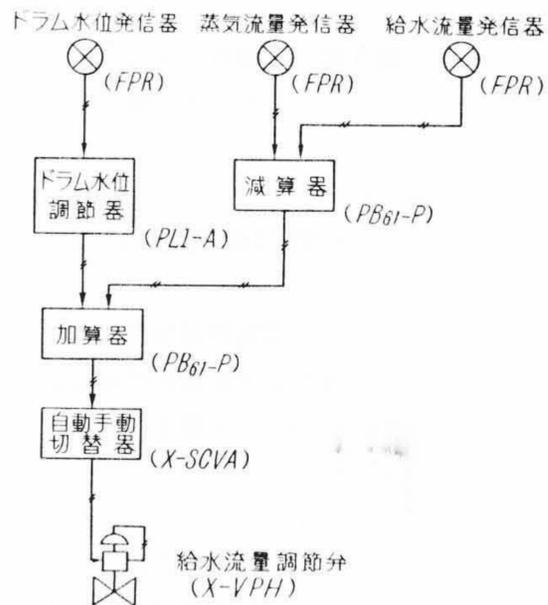
給水制御方式は 1 要素から 3 要素制御までであるが、産業用火力発電所の場合はほとんど全部 3 要素制御が採用されているので、3 要素制御について説明する。

第 12 図に空気作動式給水制御システムの一例を示す。

第 12 図の給水制御システムでは、蒸気流量は負荷変化に応じてただちに变化するが、ドラム水位は泡だちおよび縮小などの現象によって給水量変化の検出には時間遅れがあるので、最初は蒸気流量と給水流量をそれぞれ蒸気流量発信器 (FPR) および給水流量発信器 (FPR) で検出し、減算器 (PB₆₁-P) で蒸気流量と給水流量の差に比例した制御信号を給水調節弁 (X-VPH) に伝達し給水量を



第 11 図 炉内圧制御システム図



第 12 図 給水制御システム図

調節し、次にドラム水位発信器 (FPR) でドラム水位を検出し、ドラム水位調節器 (PLI-A) で設定値と比較し比例+積分動作を加えた制御信号によってドラム水位が規定水位になるように給水流量を再調整する。

3.2.3 蒸気温度制御方式

過熱蒸気温度をタービンの許容値内に収めるために、制御方式としては過熱器に与える熱量を制御するものと減温装置を使用する方式があり、前者は過熱器を通る高温ガス量を制御したり (ガスバイパス方式、ガス再循環方式がこれに相当する)、チルチングバーナの制御を行なう。後者では過熱器出口または途中で水を噴射して温度を一定に保つ。

産業用火力発電所では過熱に要する熱量も少ないので、多くの場合スプレイ方式を採用していて、この場合の空気作動式蒸気温度制御系統の一例を第13図に示す。

第13図において過熱蒸気温度は蒸発量により変化するが、ボイラの保有熱のために蒸気温度の変化となるまでには遅れがあり、かつ温度の検出器にも1分程度の遅れが伴うので、まず蒸気流量 (または空気流量) を蒸気流量発信器 (または空気流量発信器) (FPR)

によって検出し、制御信号を送り注水調節弁 (X-VPH) を作動させ、注水流量を調整する。次に蒸気温度調節器 (PVQ-A) によって蒸気温度と設定値を比較し、比例+積分動作を加えた制御信号で蒸気温度が設定値になるように注水量を再調整する。

一般には産業用火力発電所では (a) の制御系統を採用するが、過熱器の吸収熱量が全吸収熱量の20%以上になると (b) のように減温器出口の蒸気温度を減温器出口蒸気温度発信器 (VB₃₁) で測定し、制御系統に加算し制御精度を高めると同時に操作端の外乱をマイナーループで吸収させる場合が多い。

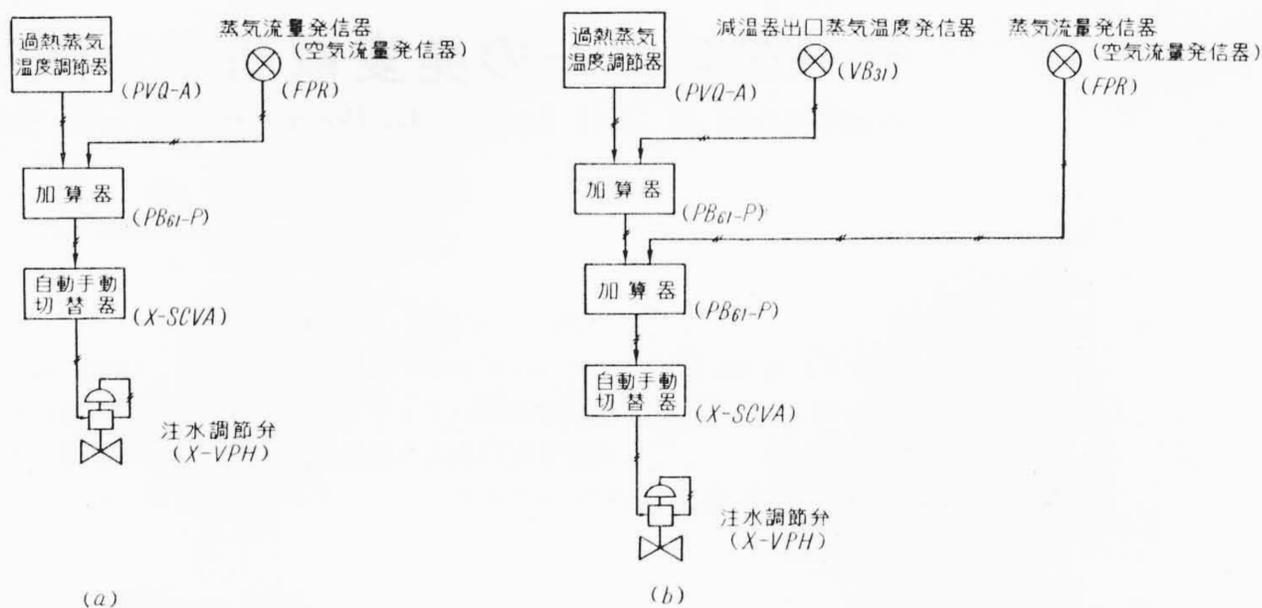
3.3 ABC の性能

ABC の性能は、制御機器の精度に支配されることはもちろんであるが、ボイラ特性および機器の調整によっても大きく影響される。

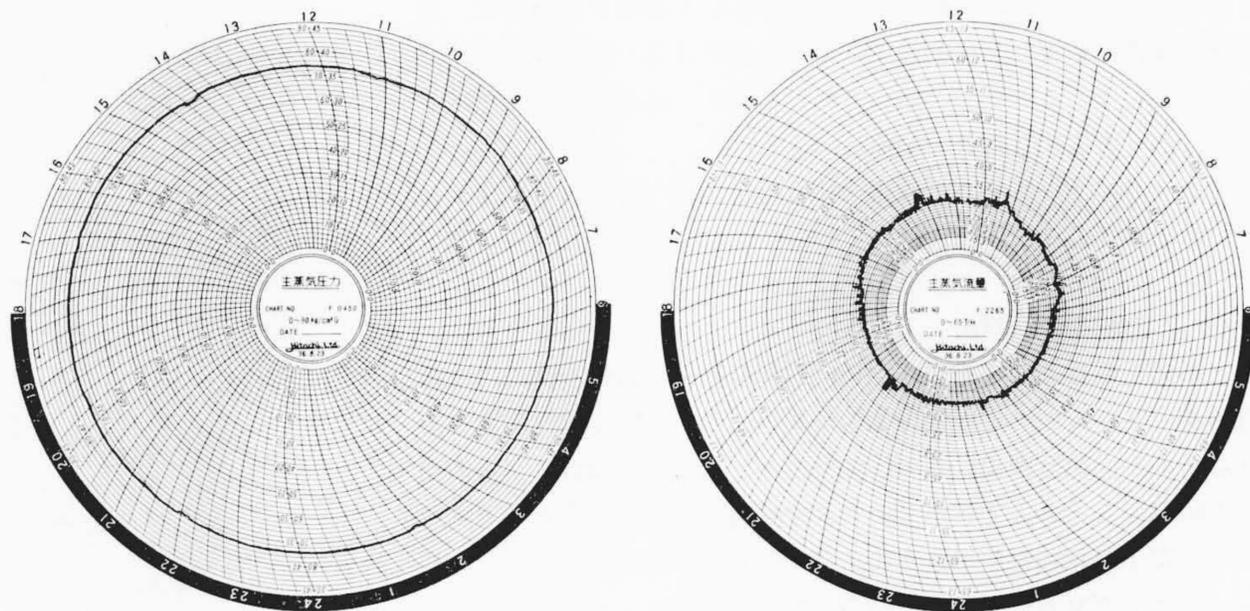
日立空気式 ABC の性能の保証値は、下記のとおりでこれを満足する実績を取っている。

(a) 主蒸気圧力の変動値は、最大連続負荷の20%の急激な変化に対し設定圧力の5%以内

(b) ABC 運転可能負荷範囲は、最大連続負荷の25%以上次に実際の ABC 制御結果の一例を第14図に示す。



第13図 蒸気温度制御系統図



第14図 主蒸気圧力制御のチャート

5. 結 言

以上産業用火力発電所の計装制御に関し、ボイラ自動制御を中心としてボイラ特性を解析し、これに基づいて自動制御の原理および方式を述べた。

ボイラの自動制御は、古くから行なわれてきているが方式、装置および調整などすべて経験によって決定され、かつ改良され今日に至っている。しかし最近ではアナログあるいはデジタル計算機などを使用してボイラ動特性の解析を行ない制御系統を定性的のみならず定量的にもは握して最適制御系統を設計し、現地調整に対しても最適調整点を与え、より高度の制御をより能率よく行なっている。

産業用火力発電所のボイラ自動制御装置は、従来国産品の開発が遅れていたが、上記のように自動制御技術の進歩と国産工業計器の急速な進歩とによってしだいに広範囲に使用されるようになり、日立製作所においても多数の日立空気式ボイラ自動制御装置を納入し、すぐれた運転実績を取っている。

参 考 文 献

- (1) 石谷清幹：ボイラ要論，山海堂
- (2) 菅原菅雄：蒸気ボイラ及蒸気原動機，丸善