

火力発電用ボイラの制御性能について

川崎重工業KK・ボイラ部* 世古口 言彦** 魚住 昌宏

1. ま え が き

近来、火力発電汽機の自動化は著しく進歩し、普及した。ところが、こうした技術の進歩と並行して大形火力発電プラントにも、電力需要の面から比較的大きなしかも急激な負荷変動に耐えるべき特性が、強く望まれるようになってきた。多くの場合、負荷変動に伴う技術的問題は、タービンならびに発電機側よりもむしろボイラ側であるとされている。ボイラを安全に運転し、かつその性能を十分に発揮するためには、ボイラの制御性能、ひいてはボイラの動特性の適否が基本的な問題となってくる。したがって、ボイラの設計に当っては、この面からも設計値の妥当性を確認し、同時に運転時の許容負荷変動限界をはあくする必要があるが、現段階では技術的にむずかしい。

さて、ボイラの負荷変動を制限する要素には、種々のものがあり、通常、圧力、蒸気温度およびドラム水位の変動が最も主要な要素となっている。以下には、これら諸要素に関する制御結果の実績値と、各種の負荷変動性状（階段状、正弦波状、定常不規則）についての簡単な理論的検討結果とを示し、制御結果からみたボイラ性能の一端を紹介する。

2. ボイラ制御性能の実績値について

ボイラ固有の動的な特性、すなわち動特性は、ボイラの形式、圧力と温度および蒸発量の大きさなどによって異なったものとなる。中でも、ボイラの形式によっては、かなり本質的な差がでてくる¹⁾。また、同じ形式であっても、設計方法が異ると動特性も当然変わって来て、許容負荷変動限界にも大きな差異が生ずる。もちろん、制御器機の内容もこれに関連してくるわけである。したがって、実際の制御結果をあらかじめ予測することは、はなはだ容易ではない。そこで、まずこれまで実施された制御性能試験結果を要約して示しておこう。

国内における火力発電用ボイラの制御性能試験例を表1～表3に掲げた。試験内容はそれぞれの試験でかなり

* 神戸市生田区東川崎町2

** 工学博士

	負 荷 変 動 性 状		過 熱 器 出 口 圧 力 変 化 (kg/cm ²)
	変 化 速 度	変 化 幅	
例 1	*) + 48%/mn	+ 12% (15s) *)	— 3.0 (20s) *)
	— 72%/mn	— 12% (10s)	+ 2.3 (10s)
	+120%/mn	+ 20% (10s)	— 4.5 (10s)
	— 80%/mn	— 20% (15s)	+ 3.3 (25s)
	+168%/mn	+ 28% (10s)	— 6.0 (20s)
	—112%/mn	— 28% (15s)	+ 6.0 (20s)
	階段状変化 (動物性試験)	0	*)
		1) (+20.4%)	+6.15%/mn
		0	
		2) (—21.4%)	—5.81%/mn
		—6.08%	
		3) (0)	+1.98%/mn
例 2	+ 30%/mn	+ 5% (10s)	
例 3	+54.5%/mn	+ 10% (11s)	—0.5 (11s)
	+40%/mn	+ 10% (15s)	—1.0 (15s)
	+48%/mn	+ 8% (10s)	—1.0
	+203%/mn	+8.5% (2.5s)	—1.0
	+ 6.65%/mn	+8.3% (75s)	—2.0
	+11.6%/mn	+5.8% (30s)	—1.0
例 4	+44.4%/mn	+11.1% (15s)	—
	—28%/mn	—14% (30s)	—
例 5	+150%/mn	+ 5 % (2s)	
	+100%/mn	+ 8.4% (5s)	
	+ 70%/mn	+11.7% (10s)	
	+130%/mn	+15 % (7s)	
	+170%/mn	+20 % (7s)	

相異がある。たとえば、負荷変化速度と負荷変化幅が種々様々である。表1に現われた負荷変化速度は、最小約7%/mn (%は定格負荷に対する比率を示す)、最大約200%/mn である。また、負荷変化幅は、最小5%、最大28%である。負荷変化速度が100%/mn 以上にも達する場合には、きわめて短時間で負荷の変化が終るから、

いわゆる階段状変化（ステップ変化）に似たものとなる。厳密に考えれば、階段状変化というのは、無限大の変化速度を有するわけであるから、瞬間的に変化する過熱器出口の蒸気圧力には最もきびしい外乱性状となり、有限の負荷変化速度を有する場合に比して本質的な差を生ずることになる。すなわち、階段状に負荷が変化した

表1 制御性能試験例（その1）

過熱器出口 温度変化 (°C)	ドラム 水位変化 (mm)	再熱器出口 温度変化 (°C)	炉内圧 変化 (mmAq)		出典	備考
^{*)} - 2.0 (40s) + 2.0 (25s) - 8.0 (130s) + 4.0 (20s) - 7.0 (30s) + 14.0 (40s)		^{*)} - 4.0 (50s) 0 - 4.0 (30s) + 1.0 (20s) - 7.0 (40s) + 3.0 (30s)			電力 第42巻, 第6号 (昭33-6) P. 914-915	東電：千葉火力2号 (435t/h, 127atg, 125MW) 負荷変動時における A. C. C の追従状況を調査するため重油専焼にて行なった試験である。 ^{*)} 負荷変動の性状は 48%/mn の変化速度で、15秒間変化させた結果、12%の負荷変化になった。そのときの圧力, SH温度などがそれぞれ20秒, 40秒後に -3.0kg/cm ² , -2.0°Cの最大変化幅を生じる。すなわち () 内の秒数は、制御量の最大変偏を生じるまでの時間を示す。 上記のボイラで、石炭専焼の場合の結果、 ^{*)} 注. 1) 負荷一定で石炭量増加 () 内は燃料変化率 2) 負荷一定で石炭量減少 3) 石炭量一定で負荷減少 試験2) から、ボイラ時定数 $T_B=3.68mn$, $T_F=0.766mn$ を得ている。
	26 (30s)	+3.0 (60s)			電力 第42巻, 第1号 (昭和33-1) P. 99	東電：千葉火力1号 (125MW) で昭和32年7月のテストの結果、川鉄への負荷を模擬して、手動により変動負荷を与えた。ドラムレベルが許容値 (+25mm) を越えることがあるので負荷変化許容値は 5HW (125MW ベース)、つまり 4%程度である。周波数変動幅を ±0.2% におさめるには、10秒間に 25MW 程度であること。
+49 (15s) +48 (30s) +40 +35			+12 (15s) +4 (30s) +7 +4.5	1号缶 2号缶	火力発電 第9巻, 1号 (昭33-1) P. 8-18	新東京火力1号, 2号 (280t/h, 98atg, MCR66MW) における負荷急増時の A. B. C 性能試験。各制御量の変化は 15~30s で最大に達し。3~5分で回復安定状態になる。なお、1号ボイラはガス再循環、2号はバーナチルチング制御、試験は 60MW で行なった。 佐久間水力 60MW 調速機試験の際の汽缶 ABC 制御量の基準値 (63MW, 84.5atg, -7mmAq) 佐久間水力 95MW 調速機試験の際の汽缶 ABC 佐久間水力 90MW がパナテストに伴う No. 2.2B ABC 同上 基準値 (60MW, 88atg)
+20 +10			— —			
— —	+3 +6				火力発電 第12巻, 3号 (昭36-3) P. 249-254	四国、松山火力第1号機 (単胴放射形ボイラ 66MW) における水位応答特性を調べるための試験である。定常時蒸発量は、上から 225t/h, 250t/h である。
+30 +30 +45 +80 +100					火力発電 第8巻, 2号 (昭32-3) P. 87-94	東電：新東京火力1号ボイラ (単胴放射形ボイラ 280t/h, 98atg, MCR 66MW) で、60MW 運転時の ACC の追従を許さない範囲の急激で大幅な負荷変動の水位応答特性の試験結果。 最大水位の起こる時間は、負荷変化幅に関係なく、20~30秒である。

表 2 制 御 性 能 試 験 例 (その2)

負荷変動 性 状		過熱器出口 蒸 気 圧 力		過熱器出口 蒸 気 温 度		ドラム水位		過剰空気率		炉 内 圧		総合的にみた 負荷変動許容値	
		制 限 変化幅	許容負荷 変 化 幅	制 限 変化幅	許容負荷 変 化 幅	制 限 変化幅	許容負荷 変 化 幅	制 限 変化幅	許容負荷 変 化 幅	制 限 変化幅	許容負荷 変 化 幅	最大変 化速度	最 大 変化幅
例 1	不規則 変 化	4%	6~13%	+8.3 ℃	4.7~ 9.5%	例A (千葉2号)		12%	6~13%	10 mmAq	5% (IDF速 度調節)		
						25mm	2.4%						
						例B (鶴見4号)							
						50mm	8 %						
例 2	階段状 変 化	—	17.6%	—	6.3%	—	8%	—	—	—	6.4%		
例	漸 変 (3MW /mn)		-100%		28%		12.8%		17%		114%	2.9% /mn	10MW (14.3%)

表 3 制 御 性 能 試 験 例 (その3)

例	負荷の変動 性 状	総合的に見た 負荷変動許容値		出 典	備 考
		最大負荷 変化速度 %/mn	最大負荷 変 化 幅 MW(%)		
例 1	漸 変	3.3	7 (16.5)	電力 第47巻, 第1号 (昭38—1) P. 110~112	東電: 鶴見4号 (280t/h, 98kg/cm ² , 60MW) 石炭専焼(上欄)と重油専焼(下欄)とについて, A.F.C 装置で制御する場合の許容制限幅と許容制御 速度を求めるために行なわれたもので主に制御装置に 重点をおいた試験である。
	階段状変化	—	4.5 (7.5)		
	漸 変	5	7 (16.5)		
	階段状変化	—	4.5 (7.5)		
例 2	漸 変	2	20 (26.6)	電力 第47巻, 第1号 (昭38—1) P. 337	九電: 荻田1号 (254t/h, 111.8kg/cm ² , 75MW) 単 胴曲管再熱形 AFC を実施するため, 負荷変動の可能 出力変動幅および変動速度を定めるための試験結果で ある。
		33	5 (6.7)		
	漸 変	3	30 (19.2)	電力 臨時増刊 (昭38) P. 1730~1734	九電: 荻田2, 3号 (542t/h, 179.6kg/cm ² , 156MW) 単胴曲管制御循環式再熱形。 同上
		32	15 (9.6)		
	漸 変	2以下	30 (18.2)	九電: 新港1号 (466t/h, 172.26kg/cm ² , 156MW) 制御循環式再熱形	九電: 大村1号 (230t/h, 91kg/cm ² , 66MW) 三胴放射形
		32以上	20 (12.8)		
	漸 変	3以下	13 (19.7)	電気学会雑誌 第82巻, 第882号 (昭37—1) P. 22~31	九電: 築上1号 (35MW)
		9以上	6 (9.1)		
	漸 変	1以下	6 (17.1)		九電: 築上3号 (55MW)
		18以上	4 (11.4)		
	漸 変	1以下	10 (18.2)		九電: 相浦3, 4号 (55MW)
		18以上	6 (11.9)		
	漸 変	2以下	8 (14.5)		
		10以上	5 (9.1)		

出 典	備 考
電研所報告 (火力60006) 昭36-1	東電：千葉2号 (435t/h, 139kg/cm ²), 新東京4号 (260t/h, 114kg/cm ²) 鶴見 4号 (280t/h, 98kg/cm ²) いずれも自然 循環ボイラで行なった実地試験と最適設 定による計算との結果より求めたもので ある。圧力制御法については, $T_B=5$ mn , $T_F=0.5\text{mn}$, $K_p=8$, $T_I=4.0\text{mn}$
電力 第47巻, 第1号 (昭38-1) P. 321-323 (昭37-1参照)	松山火力発電所2号 (75MW 再熱式) 重 油専焼蒸気温度制御系の改善により, 許 容変化幅を8°Cに制限しても, 11.5%の 負荷変動に対して温度偏差は2.8°Cにな る (アナコン計算結果). なお, 左記の各制御量の限界値は不明.
電力 第47巻, 1号 (昭和38-1) P. 112	新東京火力 No.4 コーネット (260t/h, 114kg/cm ²) での実地試験 (重油専焼70 MW) とアナコン計算値より, AFC装置 での制御幅と負荷変化幅の関係を求めた 左記の欄はアナコン計算による許容値 で, 実測の結果は2MW/mnで10MW階 段状変化で5MWである. neckになっ た制御量は空気過剰率である.

直後の過熱器出口蒸気圧力は, 過熱器内の圧力損失の増減量だけ瞬間的に変化し, 制御することはできない. この過熱器内の圧力損失の大きさは 5at ないし 10at 程度 (定格負荷において) のものであるから, 負荷変動の幅によっては圧力変化量の大部分がこの圧力損失の増減量

に支配されることがある. したがって, 同じ負荷変化幅であっても, 変化速度の大きい場合ほど温熱蒸気圧力は大きく変わることになる. また, 圧力変化を修正する燃焼量操作が, 十分な速さで追いつくか否かによっても制御結果は違ってくる. この意味において, 燃料の種類が決定的な要因となる. 燃焼量操作の追いつきのよいものは, 重油およびそれとほぼ同程度のガス (天然ガス, 高炉ガスなど) で, 石炭はずっと悪くなる.

次に, 過熱器出口蒸気温度変化は, 制御方式も多種多様で, 関係因子が圧力の場合よりももっとふえるために, その挙動をはっきりと理解できないことが多い. 現状では, 類似のボイラにおける制御性能実績から推測するにとどまるといっても過言ではないようである. さらに, 温度の変化幅をいくら位まで許すかということになると問題はますます複雑であって, 今後の研究課題となっている.

ドラム水位の変動は, 蒸気流量と燃焼量のそれぞれ変化の影響を受けるが, 実際には蒸気流量の変化が主要な原因となるようである. 特に, 蒸気流量変化に伴う水位の逆応答は, 給水加減器の作動によって修正できない程度に早く現われる (水位の最大偏差は負荷変化後15秒ないし30秒位に現われる) ものであるから, ボイラの構造が水位の最大偏差を決定づける²⁾. 著者らの研究によると, 水位の変動のしやすさ (逆応答時の最大偏差)は,

表 4 ボイラの制御性能

(%)は定格負荷に対する負荷変化率を示す)

対 象	項 目 単 位	負荷変化 速 度 %/min	負 荷 変 化 幅	最 大 偏 差 率			備 考
				主蒸気圧力 at/%	主蒸気温度 °C/%	ドラム水位 mm/%	
川 崎 BC-85 ボイラ (20MW)	14MW~18MW	階段状変化	±10%~±40%	-0.103±0.05 ^{*)}	+0.756±0.31 ^{*)}	+0.95±0.13 ^{*)}	*) : 信頼係数95% に対する信頼区 を示す. 川崎製鉄 KKに納入したボ イラの結果.
	4MW~5MW	階段状変化	~±5%	-0.088	-0.35	+1.90	
	6MW→15MW	8.6	6MW→15MW	-0.039	+0.39	+0.43	
火 力 発 電 必 携	階段状変化	—	—	—	0.5~2	4~6	ドラムボイラの値 を示す. 火力発電 技術協会発行
貫 流 ボ イ ラ A (75MW)	2.3	74.5MW→57MW	—	-0.23	+0.31	—	火力発電14巻2号
	4.8	70MW→54MW	—	-0.23	+0.100	—	同上 8号
	3.7	56MW→70MW	—	-0.25	+0.26	—	同上
貫流ボイラ B (156MW)	2.56	50MW	—	-0.160	0.160	—	同上 7号
貫流ボイラ C (20MW)	4.8	19MW→16MW	—	-0.170	-0.68	—	同上 9号
	4.4	15MW→18MW	—	-0.150	+0.80	—	同上

ドラムの水面積のほか、蒸発部の体積と圧力とからなる一つの無次元特性値の大きさと循環比とによって決まることが、明らかになっている。現在国内で稼働中の多数のボイラをかかるとの特性値と比較してみると、3倍ないし4倍程度のばらつきがある。つまり、同じ容量のボイラであっても、水位変動のしやすさにはずいぶん差があるということである。表中の水位変化の値は、逆応答時の最大偏位を示しているものであるから、こうしたボイラ構造の影響をも考えて検討することが必要で、単に制御結果だけを比較するときには、かなり大きなひらきが見られる。表2の例1に出ているように、水位の許容変化幅は必ずしも同じではない。水位変化の上限は、ヤリオーバー防止の目的をもって決められ、下限は降水管への蒸気の吸込みが起らないように定められる。これらには、ドラム内部装置の設計が関係する。水位の許容変化幅が25mmないし50mm程度である場合には、

な負荷変動でもって簡単に許容限界をこえることになり、負荷の許容変動限界が水位によって決まる。

再熱蒸気温度の制御結果が、過熱器出口蒸気温度のそれに比して特に悪くなる要素はない。やはり理論的に解析することはむずかしく、経験値をもとにして推測しなければならない。

従来、通風方式はほとんど平衡通風であったが、最近になって強圧通風方式が採用されはじめ、炉内圧がプラスの値をとるようになった。平衡通風方式では、炉内圧をマイナス数mmに保ち、負荷、変動時にもなるべくプラスにならぬことが一つの運転条件となっている。ところが、強圧通風方式では、もともとプラスであるから、炉内圧の変動幅を制限する目安は直接的にはなくなったといえる。しかし、問題の重点を過剰空気率変動に置いて考えるべきであろう。

表1～表3に示した実績は、すべてドラム付きボイラのものであり、貫流ボイラは含まれていない。最近、火力発電における貫流ボイラの試験成績がいくつか発表されているから、それらの制御性能結果をドラム付きボイラと対比してみよう(表4)。

表4には、当社の強制循環ボイラ(川崎BC-85型ボイラ)について調べた制御性能をも、参考のために記入した。表中に示した制御量の最大偏差率は、定格出力の1%変化に対する主蒸気圧力、主蒸気温度およびドラム水位の最大偏差のさ大きさを意味する。すでに述べたように、制御量の最大偏差は負荷変動性状によって区別して評価しなければならない。すなわち、負荷の階段状変化と一定速度の負荷変化とに大別したが、前者のほうが後者よりもきびしい条件となる。また、同じ負荷変化速度の場合でも、負荷変化幅の大小によって制御の難易が実

際上あるはずであるから、この値も併記した。

3. 各種負荷変動性状における制御性能の検討例

以上に示した制御性能の実績値からわかるように、ボイラによって結果が大きく異っている。したがって、一般的な標準値があって、それでもって制御結果を一律に予測するときには、大きな誤差を覚悟しなければならない。場合によっては、全く意味のないことも起こりうるであろう。

また、問題となる負荷変動の性質が必ずしも階段状変化とか、典型的な周期的変化に限定されないのが普通である。たとえば、表5に示す定常不規則変化のように、分散 σ_e を有する負荷変化のために、分散 σ_e を有する制御量の変化を発生し、この分散の大きさで検討することが好ましい場合もある。

そこで、一例としてこれら種類の外乱に対する制御性能の検討結果を示そう。

検討例として、川崎BC-285型ボイラをとりあげる。すなわち、蒸発量285t/h、105atg、541°C、重油専焼ボイラを考えよう。

制御性能を表わすのに、許容負荷変動限界値で示すこととし、各制御量の許容変動幅としては、過熱器出口蒸気圧力を4%(分散2%)、ドラム水位を $\pm 100\text{mm}$ および過熱器出口蒸気温度を8.3°C(分散4.2°C)とする。

検討結果を表6に示す。以下には、この表に関して簡単な説明を加えよう。

まず、圧力変動特性に関与するボイラ特性値には、ボイラ時定数 T_B と燃焼の時定数 T_F がある。 T_B は、ボイラの構造と主要目から算定できる値であるが、 T_F は経験的に推定しなければ決められない値である。通常 T_F の値は燃料の種類特に燃焼装置の形式によって異なるとされているが、数秒ないし1分程度である。燃料に石炭を用いる場合には大きく、重油、ガスを燃料とする場合には小さい値になる。この検討では、 $T_F=0.17$ 分と想定した。

一つのボイラについて、 T_B と T_F が定まると、圧力の主制御器 G_M の設定値は、Ziegler-Nicholsの最適調整公式から決めることができる。この主制御器だけでなく、より良好な制御性能を得るため、蒸発量変化を検出し、これによって燃料量を加減する制御器 G_e を付加する場合がある。この制御器の設定も圧力の変動が小さくなるように選定すべきであるが、表には $G_e=1$ として圧力を制御する場合を示した。

次に、圧力変化の許容値を前記のように $\pm 4\%$ とす

る。この許容限界は負荷変動性状が階段状に変わる場合とか、正弦波状に変わる場合に比較される値である。

負荷が不規則に変化する場合には、圧力変動幅が瞬間的ではあるが、はなはだ大きくなることもある。こうした発生ひん度の小さい圧力変動をも許容値 ($\pm 4\%$) 以内にはいるよう制限することは、統計学的にみて実際的でない。そこで、圧力変動幅が許容限界の $\pm 4\%$ をこえる危険率が 5% 以下であるという条件を考えることにする。したがって、この条件を満足する圧力変動幅の分散は 2% である。

以上のように、負荷の階段状変化と正弦波状変化については、許容圧力変化率を $\pm 4\%$ とし、また不規則変化については、許容圧力変化率 σ_e を 2% として許容負荷変動の限界 (Δg_u , g_u および σ_e) を算定した。なお、圧力変動の分散の算定には、簡単のために制御機器をとりはずしたボイラ単位に対する値を示した。

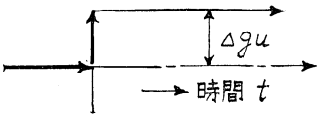
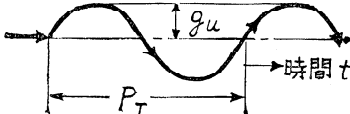
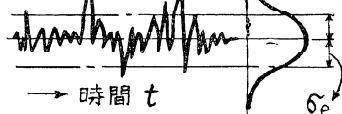
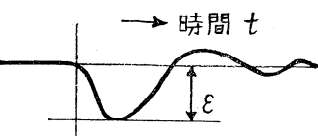
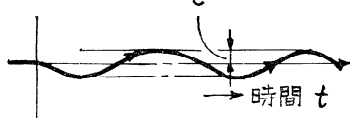
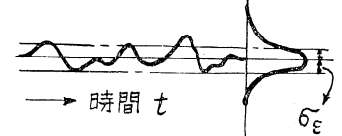
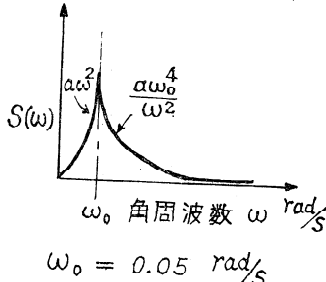
次に、ドラム水位変動に関与するボイラ特性値には、

水位時定数 T_A と、ボイラの構造から決まる無次元数 h^* とがある。特に、負荷変動時の水位変化幅は特性値 h^* と比例関係にあることが理論と実験とによって明らかにされている³⁾。したがって、 h^* の値が小さいものほど水位変動幅は小さくなる。 h^* と T_A について従来の実験値を表中に示したが、BC ボイラの h^* は実績値の約 $1/4$ 程度である。許容水位変動幅 ($\pm 0.1\text{m}$) からみた許容負荷変動は負荷の階段状変化がもっともか酷な条件であるため、許容負荷変動限界はかかる条件下で算定することにした。

算定に当っては、上記の特性値 h^* と当社の実験資料とに基いて行なった。なお、負荷変化としては、燃焼量と蒸発量との各変化についてそれぞれ検討し、両者が同時に増加または減少する場合についても示した。

過熱蒸気温度の動特性については、下記の過熱器総合時定数 T_u が一つの目安になる。この時定数 T_u は過熱器における鋼材の熱容量、保有蒸気量、蒸気の

表 5 負 荷 変 動 性 状

変動性状	階 段 状 変 化	正 弦 波 変 化	定 常 不 規 則 変 化
負荷の変化			
制 御 量 の 変 化			
記 号 説 明	ΔG_u : 負荷変化幅 ε : 制御量最大偏位	g_u : 負荷変化幅 P_T : 負荷変動周期 ε : 制御量最大偏位	σ_e : 負荷の分散 (負荷変化幅に相当) σ_ε : 制御量の分散 (制御量の偏位に相当)
備 考		3分周期について検討する。	負荷のスペクトル密度 は次図のものとする  $\omega_0 = 0.05 \text{ rad/s}$

時間から決定されるもので、次式で算出する。

$$T_u = T_{Ku} \left(1 + \frac{k_1 + k_2}{2} \right)$$

$$\text{ここに, } T_{Ku} = \frac{W_{uK} \cdot C_K}{\alpha_0 \cdot A_{ui}}, \quad k_1 = T_{gu}/T_{Du},$$

$$k_2 = T_{gu}/T_{Ku}$$

$$T_{gu} = \frac{W_{uD}}{G_u}, \quad T_{Du} = \frac{W_{uD} \cdot \bar{C}_p}{\alpha_0 A_{ui}}$$

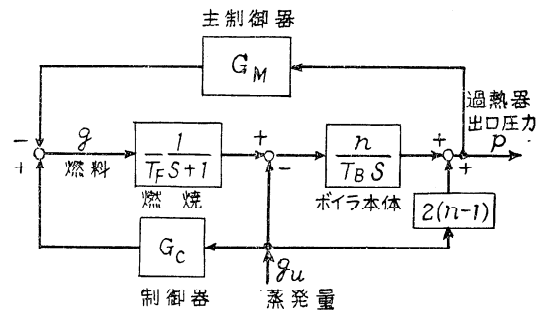
W_{uK} : 過熱部鋼材重量, W_{uD} : 過熱部保有蒸気量,
 A_{ui} : 伝熱面積 (内面基準), α_0 : 管内壁の熱伝達率,

C_K : 鋼材比熱, $\bar{C}_p$: 蒸気の平均定圧比熱

温度制御としては、水噴射方式を想定する。通常、水噴射は制御性を向上させるために、2段以上に分けることが多いが、ここでは図に示したような1段の水噴射で代表させる。また、蒸気温度偏差だけでなく、燃焼ガス側のエネルギー変化をも検出して注水量を加減する方法がよく用いられるが、この場合には制御結果が相当に改善されるようであるから、この点を含みに入れて表中の値を評価する必要がある。なお、本例の制御方式での制御

表6 制御性能の計算例

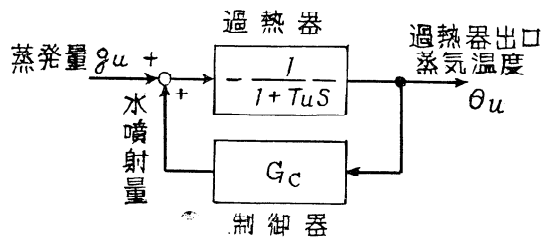
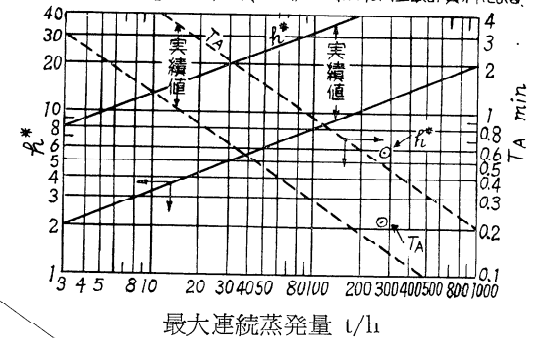
圧力変動特性	ボイラ	ボイラ時定数	T_B	min	4.0
		燃焼の時定数	T_F	min	0.17
	主制御器 G_M	比例定数	k_p	—	17
		積分時間	T_I	min	0.56
		微分時間	T_d	min	—
	制御器 G_C	比例定数	k'_p	—	1.0
		積分時間	T'_I	min	—
	許圧変化率	階段状, 正弦波状	ε	%	± 4.0
		定常不規則	σ_ε	%	2.0
		定常不規則変化	σ_e	%	13.8
水位変動特性	ボイラ	水位時定数	T_A	min	0.22
		水位特性値	h^*	—	5.7
	許容水位変化		m		± 0.10
	許変容動負限荷界	燃焼量 階段状変化	Δg_u	%	152
		蒸気量 階段状変化	Δg_u	%	91
		燃焼量と蒸気量との階段状変化	Δg_u	%	57
	過熱器	過熱器時定数	T_u	min	1.67
		比例定数	k_p	—	0.45
	制御器 G_C	積分時間	T_I	min	0.67
		積分時間	T_I	min	0.67
過熱蒸気温度変動特性	許容温度変化率 ($+8.3^\circ\text{C}$)	階段状, 正弦波状	ε	%	3.7
		定常不規則	σ_ε	%	1.85
	許変容動負限荷界	階段状変化	Δg_u	%	7.5
		正弦波状変化	g_u	%	13.0
		定常不規則変化	σ_e	%	7.6
		定常不規則変化	σ_e	%	7.6



$$G_M \begin{cases} = k_p & \text{(P動作)} \\ = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I S} \right) & \text{(PI動作)} \\ = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_d S \right) & \text{(PID動作)} \end{cases}$$

$$G_C \begin{cases} = k'_p & \text{(P動作)} \\ = k'_p \left(1 + \frac{1}{T'_I S} \right) & \text{(PI動作)} \end{cases}$$

(注) 本図は火力発電 Vol. 14, No. 1 (1963-7) に掲載した川橋設計資料による。



$$G_C \begin{cases} = k_p & \text{(P動作)} \\ = k_p \left(1 + \frac{1}{P_I S} \right) & \text{(PI動作)} \end{cases}$$

器 G_e の設定値は、Ziegler-Nichols の最適調整公式および自乗制御面積最小の条件から決めることができる。

次に、温度変化の許容値としては、I.E.C. で規定されている 8.3°C を基準値にとり、負荷変動性状が階段状および正弦波状の場合には、過熱器における温度上昇幅（過熱度）との比をもって、許容変化率 ε の値とした。さらに、負荷が不規則に変化する場合には、圧力変動特性の場合と同様に、許容限界値を分散 σ_e として求め、負荷の許容限界値の目安とした。

4. 結 び

火力発電用ボイラの制御性能について、最近の実績値と、種々の負荷変動性状に対する許容負荷変動限界の解析値とを示し、これに簡単な解説を加えた。十分に言及できなかった点が多いが、それでも制御面からみたボイラの性能がどの程度のものであり、問題点はおおよそどのあたりにあるかが見出せるものと思う。要するに今後

の研究課題としては、実物ボイラの詳細な制御性能試験を行ない、ボイラの設計条件との関係を明確にすることが必要であろう。それには、ボイラの形式とか負荷変動性状の影響を考慮しなければならないであろうし、各制御量の許容変動限界についても、妥当な値を決定するにはどうすればよいかを、検討し直さなければならないと思われる。

注.

- 1) たとえば 過熱蒸気温度変化と ボイラ 形式については、
世古口，魚住：日本機械学会関西支部第 212 回講演会前刷（1963, 6, 28, 9～12 P
- 2) 世古口，魚住：火力発電，vol. 14, No. 3, (1963—1), 26～34 P
- 3) 注 2) 参照のこと。 h^* の定義は，

$$h^* = V_e / A \cdot L^2$$

V_e : ドラム水面下の汽水混合部体積標 m^3

A : 標準水位におけるドラム水面積 m^2

L^2 : 許容水位変動幅 m