シミュレータによるボイラ用バーナ 自動切換装置の開発*

佐川隆一**, 曾我一利**, 黒崎泰充**

概 要

船舶の巨大化に伴う人員増の抑止と船の安定運転をはかるため、機関室の高度の自動化が要請されていることは周知であるが、特にタービン船においては急激な操船の際の負荷変動に対処するボイラの操作、なかでも、バーナの自動切換装置には、高信頼度、高性能なものが見当らないようである。この自動切換装置はあくまでもACCおよびボイラとのマッチングという面からとらえるべき性格のものである。すなわちバーナの燃焼が安定に行なわれるよう、その動作範囲を保持すべきことは無論であるが、ボイラの蒸気圧の変化を抑制し、かつボイラの状態が安定、かつ速やかに新しい状態に取れんすることが最終目標であり、バーナ自動切換装置はボイラシステム、否、全推進主機システムの鎖の一環としてこれを眺めて初めて問題が解決するということとなる。本研究は、これら全システムを適切なシミュレータおよび実装置を組合せ構成させそのうえでいかなるバーナ切換シーケンス制御を行なうのが適切であるかを見出すための探索的実験研究であり、本論文はその結果に関するものである。

前記の主旨に即し、バーナ自動切換装置を付したボイラにおいては、在来のACCも見直す必要があることは当然である。本研究では、さしあたりボイラは圧力応答のみをシミュレートするよう油流量とカナルタンク系によるシミュレータを作成し、該油量は標準容量の船用ボイラ燃料流量に等しくとり、かつ標準的なボイラ圧力の近似動特性(可変)をもつよう計画した。こうすれば、模擬バーナおよび燃料管系は実機と全く同一容量、サイズのものでとすることができる。他方、ACC装置も市販のものを装備することができ、その三要素モードを適切に使い分け、かつ全体としての組合せに対して適切なバーナ自動切換方式を実在系レベルで評価することができ、アナコン計算などより遙かに実用的な結果を得ることができる。ただ、実ボイラ系と異なる点は燃焼過程がないので、蒸気圧を油レベルの形でシミュレートされる点のみである。

本研究の対象は、蒸発量80T/H級のものであり、バーナは等サイズ4本とし、内3本が自動切換の対象となっている。

Developing an Automatic Burner Control System for Marine Boiler

by Ryuichi Sagawa, Kazutoshi Soga, Yoshimitsu Kurosaki

Abstract

In the marine boiler automation, the automatic burner control is an important and difficult problem. This paper is the outline of our developmental research to find an appropriate design of burner control system.

Considering that the burner control system is closely coupled with ACC and the boiler itself, our test system is composed of a boiler simulator (construted with oil tanks), conventional ACC equipments and specially designed electronic change-over circuits.

These circuits are endowed with versatile functions, among them are sequential on-off of burners, the jumping over sequence, the counter measure in clash astern operation etc.

The entire system characteristics were examined by experiments to give minimum steam pressure variation and system settling time.

*原稿受付 昭和44年5月19日 **正会員, 川崎重工(株)神戸市生田区東川崎町2-14

1. ま え が き

最近, 船舶は著しく巨大化の傾向を示しているが, 運転保守人員の増加を防ぎ, 他方, 運転の安定化を図るため, 必然的に高度の自動化が要求されている。機関係のブリッジコントロール, ノーマンウォッチなどその要求は極度に高度であるが, 他方, タービン船においてはクラッシュアスターン時, マスバリング時などの機関操作が複雑で, これに対処できる信頼性の高い高性能自動操作方式がまだ確立されていない現状である。これらの場合, ボイラでは大幅かつ急激な負荷変動に十分に追従するためのバーナの自動切換装置とACC装置との関連動作が決定的となる。

すなわちバーナ自動切換装置はACCすなわちボイラのエネルギーバランスをつかさどる制御の一部分として, システム的には握る必要があり, それ自体の性能や信頼性はいうまでもなくACC装置やボイラ, 燃料配管系統の特性ともうまくマッチングせねばならない。すなわち, 燃焼が安定であるように制御すべきことはもちろん, ボイラ蒸気圧の変化を抑制し, ボイラ状態が安定かつ速やかな応答をもって新しい定常状態に収れんすることが最終目標である。

本論文は, 船用ボイラと標準形ACC装置に対し, 上記諸目的を満足するためのバーナ切換シーケンスとして, いかなるモードが適当であるかを見出すための研究に関するものである。

本研究においては, ボイラに対して圧力応答のみをシミュレートできるシミュレータを作成しそれを流通する油流量を標準船用ボイラ燃料流量に等しくするとともに, 標準的なボイラの圧力応答特性をもつよう計画した。こうすれば模擬バーナおよび燃料管系は実機と全く同一容量サイズのものとすることができる。他方, ACC装置も市販のものを用いることができ, これらの組合せに対し, 局部的にも全体的にも適切なバーナ自動切換装置を実在系レベルで評価でき, アナコンなどよりはるかに実用的精度の高い結果を期待できる。また逆にバーナ自動切換を行なったボイラシステムに対して, どのようなACCの特性が望ましいかを判定することもできた。

2. ボイラシミュレータ

一般にボイラでは炉への供給燃料量はACCおよび調量弁によって制御される。この制御動作はバーナ切換弁動作に比較して数倍遅いためバーナ切換を行なうと, 一時的に燃料の過不足が生じ, ボイラへの外乱となる。この外乱または蒸気流量外乱による蒸気圧力変化

図1 全体装置概略図 (ボイラシミュレータおよびバーナ切換装置)

の大きさはボイラの圧力応答特性およびACC特性によって左右される。後述のような模擬ボイラおよび模擬バーナを製作し, これらを市販ACC装置と結合し図1に示すようなボイラシミュレータを試作した。

2.1 模擬ボイラ ドラム形ボイラでは, 燃料供給から蒸気圧力が発生までにつぎの過程を経る。

(1) 炉内特性 炉内の燃焼において燃料供給等価熱量 Q_B から蒸発部の吸収熱量に影響 Q_e をおよぼす

図2 炉内特性シミュレータ

で、経験的にむだ時間 L 、時定数 T_F によって表わされる遅れをもつとされ、この過程を図2のように構成した。

$$\frac{q_e}{q_b} = \frac{1}{T_F S + 1} e^{-LS}$$

本シミュレータでは、 Q_0 は定常時の給熱量にシミュレートした流通油量、 Q_B 、 Q_e はともに炉にシミュレートしたタンクへの入出油量、 A_1 はタンクの表面積、 H_0 は定常時タンク油面高さとする。

$$q_e = \frac{\Delta Q_e}{Q_0}, \quad q_b = \frac{\Delta Q_B}{Q_0}, \quad T_F = \frac{A_1 H_0}{Q_0} = \frac{A_1}{B}$$

初期に流量が整定しているとき、 $H_0/Q_0 = 1/B = \text{一定}$ となるようにシミュレータを設計すれば、 T_F は H_0 、 Q_0 に無関係となる。

(iv) ボイラドラム特性 蒸発部の吸収熱量 Q_e とドラムから蒸気量の持ち去る熱量 Q_s の差により、近似解析のおよび実験的に蒸気圧力が積分的に変化すると扱うのが通常であり、この積分時間、すなわちボイラ時定数 T_B の系を図3に示すようにシミュレートし

図3 ボイラドラムシミュレータ

た。なお、ドラムより取り去る蒸気量は持ち去る熱量に比例し、(エンタルピー一定) また、ドラムの給水制御は完全に行なわれていると仮定した。

$$T_B \frac{dh}{dt} = q_e - q_s \quad T_B = \frac{A_2 H_m}{Q_0} \quad h = \frac{\Delta H}{H_m}$$

$$q_s = \frac{\Delta Q_s}{Q_0} = \frac{\Delta F}{F_0}$$

本シミュレータでは、 A_2 はタンク断面積、 Q_s は排出油量、 F は排出弁の開口面積、また、 H_m は、蒸気圧力であり、シミュレータではタンク油面の検出範囲である。この H_m および A_2 の値を一定とすると、 T_B の値は Q_s に逆比例し、実系におけると同様である。なお、時定数 T_B の値を変えるには検出範囲 H_m を変え

表1 模擬ボイラ主要々目

炉一次遅れ時定数	T_F	50秒以下可変
炉むだ時間	L	約5秒
ボイラ時定数	T_B	250秒以下可変
No.1タンク断面積	A_1	4800 cm ²
No.2 "	A_2	4800 cm ²
規定油レベル(規定蒸気圧)	H_m	65 cm
供給油量定格	Q_0	6 m ³ /h

ればよい。表1に模擬ボイラの主要な要目を示す。

2.2 模擬バーナ装置 直接圧力形バーナと同一流量特性をもつ固定オリフィス絞りでシミュレートした模擬バーナ4本のうち3本を自動バーナ、1本をベースバーナとした。各部配管は実ボイラと同一寸法のものを使用し、また、実験油も実燃料油と同一粘度のものを用いた。模擬バーナ装置の主要要目は表2のとおりである。

表2 模擬バーナ主要々目

燃料流量最大合計量	6 m ³ /h
バーナ形式	メカニカルアシスト
バーナ本数	4本
バーナ圧力使用範囲	上限 35 kg/cm ² 下限 7 kg/cm ²
調量弁上流圧力設定値	38.5 kg/cm ²

2.3 ACC装置 主蒸気圧力制御部のみとし、三要素空気調節計を用いた。図4にボイラシミュレータのブロック線図を示す。線図中シミュレータ G_3 は周波数応答試験結果より求めた値で、図9にこのボード線図を示す。なお、各調節計の調整値はジグザ・ニコルズの最適調整法により求めた。

図4 ボイラシミュレータブロック線図

2.4 バーナ切換時の過渡特性 バーナ使用油圧範囲を図5に示す。いまマスターシグナルが増加し、C点に達し、さらにマスターシグナルが増加するとき、バーナ本数を増加させないと燃料流量をバーナの使用範囲内でマスターシグナルに追従させることができない。バーナ本数を増加させるとバーナチップの抵抗が小さくなるので燃料圧力、すなわち、バーナチップ背圧は減少し、燃料流量は増加し、図5中D点に飛び移りその時の流量はマスターシグナルの要求量より大である。この点はACC調量弁開度一定の条件より求まる。

このようにして燃料流量を $Q_{min} \sim Q_{max}$ の範囲で制御することができる。ここでバーナ切換を行なうには、図5中のC、C'、C''およびA、A'、A''点を燃料流量(マスターシグナル)で検出し、このシグナルでバーナ切換を行なうか(b系)、これに対応する切換点を燃料油圧で検出しバーナ切換を行なえば(B系)よい。このときバーナ切換点での流量を $Q_A > Q_C$ になるように選ぶとマスターシグナルが Q_A と Q_C の間で

図5 バーナ流量圧力特性

図6 バーナハンチング現象

整定すべきときには、バーナ流量が図5中の点A→B→C→D→Aなる経路を経るリミットサイクルを発生する。この実験例を図6に示す。

上記の $Q_A < Q_C$ なる条件が静的に満足されていても、バーナチップとACC調量弁流量特性を加味した調量弁の実効流量特性が調量弁開度からみたときに、バーナ切換点まわりでヒステリシス機能を含んでいるので、これが等価的に位相遅れ要素となり、ACCの特性を適当に調整しておかないと、リミットサイクルを発生しうる。図4中の K_V が調量弁の実効流量特性

図7 調量弁有効流量特性

であり、図7に示すようになる。この特性は複雑な非線形特性であるので、最も問題となりうるバーナ1本～2本時を図8のように単純化して解析を行なった。すなわち、この非線形部の伝達関数は図8より

$$G_N = g(E) + jb(E)$$

$$\text{実数部} = g(E) = \frac{n}{\pi E} [E\pi - 4k \cos \theta]$$

$$\text{虚数部} = b(E) = \frac{n}{\pi E} 4k \sin \theta$$

図8

図9 ボイラの周波応答線図

E は入力振幅、すなわち、本シミュレータでは弁開度の振幅を示す。 n は線形部分の弁開度に対する流量ゲインで図8で示す傾きである。 a , M は、図8で示すバーナ切換時の弁開度および燃料流量を示す。 k は $-(M/n) + a$ で θ は $\sin^{-1} a/E$ である。つぎにマイナーループおよびメジャーロープの伝達関数は、おのこの

$$G(S) = \frac{G_2 G_N}{1 + G_2 G_N} = \frac{G_N}{G_N + 1/G_2}$$

$$G'(S) = \frac{G_1 G_2 G_3 G_N}{1 + G_2 G_N + G_1 G_2 G_3 G_N}$$

安定性については、 $-G_N$ と $1/G_2$ および $-G_N$ と $1/[G_2(1 + G_1 G_3)]$ のナイキスト線図よりおのこの安定性を論ずることができる。ここで調量弁最大開度 100%，燃料最大量 6m³/H とし無次元数表記をすると、

$$M = 0.1 \quad a = 0.07$$

$$n = \frac{\Delta Q_B / Q_{B0}}{\Delta X / X_0} = \frac{0.65/6}{14/100} = 0.774$$

$$X_0: \text{調量弁最大開度}$$

$$Q_{B0}: \text{燃料最大量}$$

となり、この値を用いてナイキスト線図を書くと図10のようになる。これより当実験に使用したシミュレータは十分安定であり、また、リミットサイクルは全く発生しなかった。

れを防ぐために各バーナの点滅の間には T_B 秒の待ち時間を設け、油圧が定常に復するのを待つことも行なえるようにしてある。ほかにエネルギーアンバランス量を示すものとして(燃料流量-蒸気流量)シグナルがあり、これをバックアップシグナルとしての実験も行なった。

4. バーナ切換シーケンスおよび補助機器

4.1 B系シグナル 燃料油圧シグナル $S_U \cdot S_L$ または $S_U \cdot S_L$ と $S_D \cdot S_I$ の組合せによる B_{ON} B_{OFF} シグナルにつづき、さらに過去の履歴を記憶して開閉すべきバーナを指定させるために、つぎのようなインターロックをもっている。

(イ) バーナ点火および消火の順序を規定する。

(ロ) B_{ON} シグナルが ON から OFF になっても、 B_{OFF} シグナルが ON となるまで前の状態を持続し、同様に、 B_{OFF} が OFF となっても B_{ON} が ON となるまで前の状態を持続するフリップ・フロップ特性をもたせる。

(ハ) B_{ON} または B_{OFF} が2回以上連続して ON となってもそれぞれ T_B 秒経過するまではつぎのバーナ切換を行なわせない。これについてはすでに述べた。

上記のとおり (イ)~(ハ) を考慮したバーナ切換シーケンス回路を図13に示す。この回路のD素子が待ち時間 T_B を生じさせるための遅延素子である。

4.2 b 系シグナル b 系シグナルのバーナ切換シーケンスを図14に示す。切替えるべきバーナ本数の2

図13 B系シーケンス回路

図14 b系シーケンス回路

倍個のシュミットアンプの動作点を調整して、アナログ入力量でバーナ着火シグナル $B_i'ON$ を発生させる。

4.3 飛越シーケンス バーナ着火シグナル B_i' が ON または OFF になったときより T_A 秒後に正常着火または消火シグナル $E_1 \cdot \hat{E}_i$ でつぎのような飛越し動作を行なう。なお、 B_i は切換弁動作シグナルであり、また、 T_A は B_i' の指示どりの結果がバーナに表れているかどうかを判断する待時間である。

(イ) バーナ増加時 B_{II}' が ON となり T_A 秒後でも不着火 (E_2OFF) であるときはそのバーナ B_{II} を閉じ、次段のバーナ B_{III} を着火する。同時に B_{III}' は B_{IV} に対応させる。さらに B_{III} が T_A 秒後にも不着火の (E_3OFF) ときはその B_{III}' を B_{IV} に対応させる。

(ロ) バーナ減少時 B_{IV}' が OFF となり T_A 秒経っても消火不能 ($\hat{E}_4ON$) のときはそのバーナ B_{IV} を再び開き低位のバーナ B_{III} を消火する。同時に、 B_{III}' は B_{II} に対応させる。さらに、 B_{III} が T_A 秒後に消火不能 (E_3ON) のときは、 B_{IV}' を B_{II} に対応させる。

以上の飛越しシーケンス回路のなかで第2段目の回路を図15に示す。

図15 飛越シーケンス中の $B'III$ と $BIII$ のシーケンス回路

この回路と $B'II$ と BII の回路および $B'IV$ と BIV の回路を接続したものが飛越シーケンス回路である。

4.4 クラッシュアスターンシーケンス 図12に示すように、蒸気流量の減少率がある値以上 (Dシグナルが ON) となったとき、または、オペレータの意志によりクラッシュアスターン準備シグナル C_2 が ON でかつ操縦弁の時間的微分値がある以上になったとき、自動バーナを一度に全部消火する瞬時消火、または B系シグナルのバーナ切換シーケンス中の待時間 T_B をバイパスし順次消火のいずれかを事前選択により行なう。

4.5 警報シーケンス 飛越しシーケンスが逐次働いて、最終的に着火シグナル B_i' と正常点火シグナル E_i の数に差が生じかつこの状態が T_c 秒続くとエマージェンシーランプが ON となる。なお、エマージェンシーストップシグナル Z を取り出すことも可能である。

4.6 バーナ切換インデックス切換シーケンス

B-b系のインデックス切換はつぎの方法で自動または手動で行なうことができる。自動切換では蒸気流量の変化率の絶対値 $|dQ/dt|$ がクラッシュアスターン操作時のそれと同様以上になったとき、B系シグナルからb系シグナルでのバーナ切換制御になり、 $|dQ/dt|$ の値が小にもどると再びB系シグナルでのバーナ切換制御にもどる。

4.7 バーナ切換弁全開全閉シグナル

バーナ切換電磁弁 M_i' は、 B_i シグナルが ON となると励磁されエアシリンダを働かせてバーナ切換弁 M_i を開き燃料をバーナチップに流す。ここで、バーナ切換弁が途中で開の状態はスティックなどの不調を示すので、これを見出すため、全開全閉で動作するリミットスイッチ $\hat{m}_i$ m_i を設け、このリミットスイッチのシグナルをフレームアイシグナルと組合せて使用した。

4.8 フレーム・アイ・シグナル

本シミュレータでは油に着火しないので、手動で働く模擬フレーム・アイ・シグナル F_i と G_i を設けた。 F_i と G_i は実ボイラでは同一のシグナルであるが、人為的に着火時および消火時に故障状態を作り出すために、2種のシグナルに分けた。模擬フレームアイ点火シグナル F_i 、 G_i とバーナ故障状態の関係を表4に示す。

表4 フレームアイシグナルとバーナ故障状態の関係

シグナル	故障状態	着火可能 消火可能	着火可能 消火不能	実プロセスに 対応なし
着火可能シグナル	F_i	ON	ON	OFF
消火不能シグナル	G_i	OFF	ON	OFF
				ON

4.9 正常着火および消火不能シグナル

4.7および4.8を組合せてつぎのシグナルを作り出す。

$E_i = F_i \cdot m_i$ (正常着火シグナル)

$\hat{E}_i = G_i + \hat{m}_i$ (消火不能シグナル)

4.10 燃焼シミュレート弁

本研究においては、

図16 燃料シミュレート系図

実ボイラと異なり燃料を燃焼させない。ゆえに燃料が噴出していてもバーナに点火できない場合には、燃料油をボイラシミュレータに流さずに、ダミイチップを通して、排油タンクにもどした。すなわち、正常にバーナチップに燃料油が流れるのはつぎのような条件のときである。図16に概略図を示す。

$$M_i' = F_i \cdot B_i + F_i \cdot \hat{m}_i + G_i \cdot \bar{B}_i$$

5. 試験結果

模擬持ち去り蒸気流量、すなわち、図1のシミュレータ・タンク No.2 よりの流出油量を模擬タービン操縦弁によって全系に対する負荷外乱として変化させ、そのときの蒸気圧力変化量、燃料油圧変動、およびバーナ切換特性を実測オシロデータをもとに比較検討した。

5.1 バーナ切換インデックス別によるバーナ切換特性

クラッシュアスターン時のバーナ切換インデックス別のオシロデータの一例を図17に示す。

図17 クラッシュアスターンデータ

いずれの場合も、バーナ切換動作は正常に働いていることがわかる。バーナ切換インデックス (e) の場合は調量弁が大きくリセットワインドアップ現象を起こしている。三要素 ACC では、蒸気流量が増加し、蒸気圧力が減少するとき、蒸気圧力偏差は増加するので(燃料流量-蒸気流量)、シグナルの値が正となり、バーナが油圧上限となってもこの値が負になるまでバーナを増加できず、リセットワインドアップを起こすその結果、蒸気圧力変動が大きく整定時間も長くなる

なお, ACC が蒸気流量検出要素を持たないときは, (燃料流量-蒸気流量)の値が蒸気圧力微分値に対応するのみで, 上記のような現象は起こらないはずである。

切換インデックス(d)は三要素 ACC の系で, バーナ切換を行なったものである。燃料油圧が上限圧力35 kg/cm² を越えているのは, 蒸気圧力微分値を計算するD動作調節計が不完全微力動作であり, 蒸気圧力微分値が負になってからD調節計出力が負にまるまで約20秒程度の時間遅れがあり, この間, バーナ切換動作がおくれるためである。

最大蒸気圧力変化量 φ_m の値を比較すると, わずかづつであるが燃料油圧, 燃料流量, 燃料マスターシグナルでの切換の順に φ_m が小さくなっており, エネルギアンバランス・シグナルを付加したときは, 燃料油圧単独のときに比べて 1~1.2% 大となっている。

切換インデックス (b) または (c) の b シグナルでの切換を行なったとき, 燃料流量変化速度の速い場合は, 燃料油圧が上限圧力に達しない前にバーナ切

換が行なわれている。この現象は図11に示すバーナの流量-圧力特性中の切換点の dQ/dp の値が小さい場合の

図18 クラッシュアスターンモード

図19 クラッシュアスターンデータ

ほうが大きく現われている。なお, 切換インデックス (b) と (c) を比較すると, 燃料油圧が上限に達する前にバーナ切換が行なわれる傾向は(c)のほうが大きい。これは燃料流量より燃料マスターシグナルのほうが先行シグナルとなっているためである。また, 燃料油圧シグナルでの切換では燃料油圧がバーナ使用範囲の下限 7kg/cm² 以下に下がっているのは, バーナ切換シグナル中の待時間 T_B によるものである。 T_B の値を 0.5 秒程度に小さくしてもバーナの切換動作は正常に働いていた。

5.2 クラッシュアスターン時の制御特性 燃料

油圧, 燃料流量および燃料マスターシグナルを用いた切換を中心に図18に示すような蒸気流量変化モードのクラッシュアスターン時の制御特性について試験した図19にこのデータの一例を示す。

(i) 蒸気圧力変化の比較 蒸気圧力の最大変化量 φ_m の値について種々のクラッシュアスターン時のデータよりつぎのことが確認された。

a. 速いクラッシュアスターン (t_1, t_2 が小さい) ほど φ_m の値は小さくなる。図20参照のこと。

b. 最低蒸気流量 (a) での経過時間 t_3 が, 大きく φ_m の値に影響し, t_3 が長いと φ_m が大きくなる

c. 蒸気流量が変化している時間, すなわち ($t_1 + t_2$) 時間がボイラの炉時定数 T_F より短かい範囲では, この間にドラムより流出する蒸気流量が一定であれば, φ_m の値はほぼ同じである。図22参照のこと
これは短時間の蒸気流量変化では, ドラムへの加熱熱

図20 クラッシュアスターン時の蒸気圧力最大変化量 (φ_m)

図21 クラッシュアスターン時の蒸気圧力最大変化量 (φ_m)

図22 クラッシュアスターン時の
蒸気圧力最大変化量 (ϕ_m)

瞬時消火、待時間 T_B にバイパス消火を行なったときのバーナ切換特性について検討した。データの一例を図23に示す。

- 瞬時消火のときがいちばん ϕ_m の値が小さく、つぎにバイパス消火、 T_B 待時間による消火の順に ϕ_m の値が大きくなっていく。また、この傾向はおそいクラッシュアスターンほど大きく表われていく。
- 瞬時消火を行なうと燃料油圧がバーナ上限を大きく越える。これは燃料圧力による正常な切換えシーケンスに先行してバーナを一方的に動作させるためである。

図23 瞬時消火クラッシュ T_B 時間バイパス クラッシュアスターン燃料
油圧シグナル シグナル

(イ) バーナ切換弁速度の影響 バーナ切換弁開閉時間 T_c を変えたときの燃料油圧変化の一例を表5に示す。

$T_c=6$ sec としたときバーナが1本より2本に増加するとき 1.5kg/cm^2 ほど上限圧力を越えたが、この間の時間は約2～3秒であった。なおバーナが減少するときは下限より行き過ぎることはなく、バーナ切換弁開閉速度を変えたことによる影響は非常に少なかった。

(ロ) ACC調整値変更の影響 蒸気流量外乱モードを同じにして、蒸気圧力調節計の調整値を表6に示す範囲で変化させ実験を行なった。

ただし、バーナ切換インデックスは燃料油圧シグナルである。蒸気圧力変化量について比較すると、 ϕ_m の

量は炉の遅れ特性のためあまり変化せず。蒸気圧力は、蒸気流量の変化のみによって起こされるためである。

(ロ) 瞬時消火の影響 油圧シグナルを用い、

表5 バーナ切換弁速度別最大油圧比較表

バーナ切換弁 開閉所要時間	バーナ切換 (増加) 時燃料最大油圧		
	No. 2 バーナ	No. 3 バーナ	No. 4 バーナ
$T_c \approx 0.5$ sec.	35.5	35	35
$T_c \approx 6$ sec.	36.5	35	35

表6 ACC調整値別 ϕ_m 比較表

ACC調整値		蒸気圧力 最大変化量	蒸気圧力最大 アンダー シュート量
Kp	$1/T_i \text{ min}^{-1}$	ϕ_m (%)	ϕ_m^* (%)
6.7	0.2	6.9	2.4
※6.7	0.2	6.9	1.4
6.7	0.5	6.9	4.5
4	0.2	6.8	2.0
10	0.2	6.6	3.6
10	0.13	7.0	3.4

なお、※印は最適 ACC 調整値である。

値に大きい違いは表われていない。ACCの調整が最適値より離れてくるとアンダーシュート量 ϕ_m^* が大きくなり、以後の整定時間が長くなる。バーナ切換動作に関しては、ACC調整値変更による影響は少なかった。

5.3 スローアスターン時のバーナ切換特性 蒸気流量変化がゆっくりしたスローアスターン時のバーナ切換特性の一例を図24に示す。これらのデータをまとめた図25よりつぎのことが確認される。

- 蒸気流量変化速度が下がるに従って ϕ_m は大きくなる。 $t_1=150\sim 200$ sec のところで ϕ_m が最大となりさらに t_1 が長くなると ϕ_m は減少していく。すなわち ϕ_m が最大となる蒸気流量変化速度がある。
- 蒸気流量変化時間 t_1 が約 500 sec 以上のゆっくりした値になると蒸気圧力には一定速度入力 (ランプ入力) による定常圧力偏差が表われる。

5.4 くり返し負荷時のバーナ切換特性 定常平衡状態より定格蒸気流量の 100～40% の三角波状の負荷変動を周期60 sec で与えたときのデータを図26に示す。バーナ切換インデックスは燃料油圧。燃料流量、および燃料マスターシグナルで試験したが、バーナ切換はいずれにおいても正常に働いている。バーナ切換のひん度は燃料油圧と燃料流量ではほとんど同じで、燃料マスターシグナルのときは、マスターシグナルが蒸気流量変化に応じて変化するので、バーナ切換ひん度が非常にひん繁である。燃料油圧、燃料流量シグナルの場合にバーナ切換ひん度が少ないのは、調量弁系

図29 アスターン時の蒸気圧力変化量 (φ_m)

よる。したがって、バーナ切換が行なわれなくても、 φ_m の値は三要素のときと変わらず、かえって二要素のときはバーナ切換を行なうと、燃料流量の外乱が大きくなり整定が悪くなる。

なお比較のおそいクラッシュアスターンのときの瞬時消火は、蒸気圧力変化量 φ_m を小さくするという点では効果的であるが、リセットワインドアップ現象を起こしやすい。これはA.C.C.のフィードフォワードがないと速応性がなく過渡現象が大きくなるためである。

5.7 バーナ切換インデックス自動切換 図30は蒸気流量変化率があるきめられた値より大きいときは蒸気流量シグナルで、小さいときは燃料油圧シグナルでバーナ切換を行なったデータと燃料油圧シグナル単独でバーナ切換を行なったときのデータを比較して示す。このデータからもわかるように自動切換を行なったときもバーナ切換動作にはなんら問題なく正常に働く。B-b系の自動切換を行なったデータでは、前半が蒸気流量シグナルによる切換で、後半のバーナ本数増加時が燃料油圧によるバーナ切換である。途中で燃料油圧がバーナ使用油圧範囲以下に下がっているのは、二

図30 クラッシュアスターン時オシロデータ

要素A.C.C.の場合はクラッシュアスターン命令としての蒸気流量が、一度減少して再び増加するときフィードフォワードシグナルがないため、マスターシグナルはおくれて増加するが、一方、バーナ切換インデックスは蒸気流量シグナルであるため、蒸気流量の増加に従ってバーナの本数を増加するためである。

6. 結 言

ボイラ動特性、三要素A.C.C.、直接圧力形バーナの制御上の関連性、ならびにバーナ切換制御方式に対する実用上の指針を握できた。おもな結果を列記すると

- (イ) バーナ切換インデックスとしてはA.C.C.の燃料マスターシグナル、燃料流量シグナルも実用しうるが、燃料油圧シグナルでのバーナ切換が最も実用的であり問題も少ない。
- (ロ) クラッシュアスターン時の操縦弁の開閉操作は許されるかぎり急速であることが蒸気圧力の変化を少なくする面で好ましい。逆にこの時間を長くしていくと蒸気圧力変化が極大となる点が存在する。なお、本研究においてバーナ切換はいずれの場合も正常に動作する。
- (ハ) バーナ切換弁の開閉時間は本研究の範囲では他に対して影響を及ぼさない。
- (ニ) くり返し負荷時はその周期が1分程度以下の場合では、その平均値のステップ変化と大して変らない。またこの時もバーナ切換は正常に動作する。
- (ホ) 負荷の時間的変化がある値以上になったとき、バーナ切換インデックスを燃料油圧から蒸気流量に切換えても蒸気圧力変化には大して影響しない。
- (ヘ) 蒸気流量のフィードフォワードを除いたA.C.C.では、バーナ切換回数が非常に少なくなり、クラッシュアスターン時などでのバーナの瞬時消火シーケンスの効果は相対的に大きい、逆にリセットワインドアップが大きい。

本実験的研究は昭和42年度運輸省試験研究補助金を受けて実施したものであり、また実施に当っては、当機械研究室山田重康室長ならびにボイラ部池田部長はじめ各位のご助言を賜った。またシーケンス回路の設計製作については、立石電機(株)中研のかたがたに多大のご協力を得た。これら各位に深甚の謝意を示す。

文 献

1. 大八木栄司ほか 4 名船用ボイラの自動バーナ制御方式 三菱重工技報 Vol. 3, No. 3 p14~21 (May 1966)
2. 桑山邦夫 山本真 バーナ自動運転装置 東芝レビュー Vol. 22 No. 1 P. 95~99 (January, 1967)
3. JOHN E. GIBSON Nonlinear Automatic Control. Mc Graw-Hill 1963