貫流式過給ボイラの特性*

玉木 恕 乎**・長内 敏 雄**・黒 須 顕 二**
村山雄二郎***・小 林 道 幸***・一 色 尚 次****

概 要

ボイラを小形、軽量にするには、水と蒸気の流動を確保するため系統を貫流形式とし、さらに、ボイラでの伝熱を増進させて伝熱面積を減少させるため燃焼ガスを加圧する方法とを結びつけた、貫流式過給ボイラが最も良い方法と考えられる。船舶技術研究所では、独自で開発した本方式ボイラの研究を長年実施しているが、このたび実用規模に近い蒸発量 15 t/h、過給圧力 2.8 ata の貫流式過給ボイラの試作に成功し、ボイラの運転によってその特性を調べた。

本ボイラは、ボイラから排出される排気ガスで駆動する過給機の自立運転により、給気を加圧してボイラへ供給する方式の貫流ボイラであって、一種のボイラと過給機とが組合わさった複合機関であるから、その特性は在来のボイラと比べ、静的にも動的にもかなり異なる。これらの特性が把握されていなければ安定なボイラの運転をうることは難しく、また、ボイラ制御系の設計ができない。加えて、ボイラを完全自動化するには、特性を包括した電算機による制御が必要とされる。

本報告は、各種の実験によってえられた本ボイラの特性と新しく開発した制御方式について述べ、さらに、これらの結果から、今後、本方式ボイラを設計していく際に必要となるいくつかの項目と問題点について、考察を加えている。

The Characteristics of a Once-through Supercharged Boiler

By Hiroya Tamaki
Toshio Osanai
Kenji Kurosu
Yujiro Murayama
Michiyuki Kobayashi
Naotsugu Isshiki

Abstract

For the purpose of getting compact marine boilers, a once-through supercharged boiler having the steam capacity of 15 t/h and the supercharging pressure of 2.8 ata was made and the characteristics required of the boiler when it is put to practical use were obtained through experiments. Furthermore, in order to realize perfect automation of this boiler plant, various kinds of automatic operations and control experiments by means of a control device where a mini-computer was employed were carried out. A hardware system and a fundamental software system of the direct digital control system of the boiler is also described in this report.

1. ま え が き

ボイラを小形、軽量にするには、水と蒸気の流動を確保するため、系統を貫流形式とし、さらに、ボイラでの

伝熱を増進させるため燃焼ガスを加圧する方式とを結びつけた貫流式過給ボイラが最も良い方法と考えられる。船舶技術研究所では以前から独自で開発した貫流式過給ボイラについての研究を推進し、すでに2基の小形ボイラの試作に成功してその可能性を実証するとともに、これに関する多くの経験を積み重ねた¹⁾。その後、これらの経験をもとに本方式の実用化をねらい、新たに蒸発量 15 t/h、過給圧力 2.8 ata の貫流過給ボイラを試作し実験によって各種の特性を調べた。このボイラではまた、

* 原稿受付 昭和49年3月4日

船用機関国際シンポジウム一般講演(昭和48年11月13日)

** 正会員 運輸省船舶技術研究所(三鷹市新川6-38-1)

*** 運輸省船舶技術研究所(三鷹市新川6-38-1)

**** 正会員 東京工業大学(東京都目黒区大岡山2-12-1)

電算機による計算機制御の自動化を行なっているが、この方面でもいくつかの新しい制御方法を開発している。本報告は、これらの実験結果とその考察について述べる。

本ボイラの形式は、ボイラから排出された燃焼ガスが駆動する過給機の自立運転によって、給気を加圧しボイラへ供給する過給ボイラである上に、水と蒸気の系統は貫流形式である。したがって、本ボイラは、貫流ボイラと過給機とが組合わさった一種の複合機関と見ることができ、全体の特性は通常のボイラと比べるとかなり異なっている。その理由は、ボイラ系統と過給機系統との特性が相互に干渉し合うためであり、ボイラプラント全体の特性は静的にも動的にも在来ボイラより複雑になる。本方式を今後実用化していくには、特性を完全には握して安定な運転を行なうことが要求され、さらに、加えて完全自動化を実施していく上でも特性を包括した電算機による制御が必要とされる。本研究はこれらの目的を達成するために実施された。

2. 装置の概要

2.1 ボイラ装置 ボイラの要目については、すでにその一部を本誌に発表済み²⁾であるが、詳細を表1に示す。ボイラの形式は、これまでの2基のボイラと同じく、自立運転を行なう貫流式過給ボイラである。蒸発量が15 t/hと増大したため、これまで水と蒸気の系統が単管貫流であったのを4管並列貫流とし、各伝熱面の接合部には集合管寄せを設けた。全負荷時における過給圧力は2.8 ataになる。負荷は1本のバーナで10対1まで変更が可能である。起動時と低負荷時には、過給機圧縮機の前に設置したブースタ送風機を補助に使用して加圧した給気をボイラへ送り込んで運転するが、定格の30

%以上の負荷では、過給機のみを使用する完全自立運転となる。この際には、給気はブースタ送風機をバイパスして過給機が大気を直接吸入し、加圧してボイラへ送り

表1 ボイラ要目

設置年月日	45-3-31
形式	4管並列貫流船研式過給ボイラ
蒸発量	t/h 15
蒸気出口圧力	kg/cm ² 150
蒸気出口温度	°C 540
炉内ガス圧力	ata 2.8
負荷調節範囲	t/h 1.5~15
バーナ本数	圧力噴霧空気補助×1
制御方式	計算機制御
燃焼室容積	m ³ 3.76
燃焼室熱発生率	10 ⁶ kcal/m ³ h 3.93
ボイラ管材料	高圧部 STBA24S-H STB35S-H 低圧部 STB35S-H
ボイラ管寸法	高圧部 45×7, 45×6, 45×6 (mm) 低圧部 45×3.5 (mm)
ボイラ管長さ	m 1120
伝熱面積	m ² 133.9
主ポンプ	3連プランジヤ型形
吐出圧力	kg/cm ² 200
最高流量	t/h 16.5
駆動方式	VS継手 200kW電動機
ガスタービン機	形式 VTR-400 入口ガス温度 600 °C 定格時回転数 17,200 rpm 圧力比 2.75:1 定格時流量 5.65 kg/s
ブースタ送風機入力	kW 37
燃焼ガス側制御法	(I) 可変ピッチ施回ガスノズル (II) ダンパ (III) ガスタービン蒸気吹込 (IV) 圧縮機バイパス (V) ガスタービンバイパス

図1 ボイラプラントの熱流線図

込む。過給機は、既製のディーゼル機関用排気過給機をなんら手を加えることなくそのまま使用している。図1にボイラプラントの全負荷時における熱流線図を示す。

過給ボイラの運転を安定に保つには空気と燃焼ガスの圧力のある程度制御してやる必要があるが、本ボイラでは、(1)過給機圧縮機入口のダンパで圧縮機入口の圧力を変える、(2)過給機ガスタービンへ蒸気を吹込んでガスタービンの入力を増加させる、(3)エコノマイザ部に設置した2段の可変ピッチ旋回ガスノズルのピッチを変えることにより過給機ガスタービンの背圧を変化させる。(4)過給機圧縮機を出た圧縮された空気の一部をボイラを通さずに直接ガスタービン入口へパイパスし、過給機の入出力を調整するとともに圧縮機のサージングを避ける、(5)ボイラを出た燃焼ガスの一部を過給機ガスタービンを通さずにパイパスさせ、ガスタービンへの入力を減少させる。という5方法を開発した。ボイラの負荷と要求される条件に応じて、上記5方法を適宜使い別け特性の改善と安定な運転を実施している。

ボイラ装置の全景を図2に、本体部とエコノマイザ部の断面を図3に示す。向って左のシリンダが本体部で、右のシリンダがエコノマイザ部であり、その中間に過給機が設備されている。ボイラの水・蒸気系統は図1に示すように、原水がまず、原水ポンプによって圧送され、急速ろ過器とイオン交換塔を通して処理された後、純水タンクに蓄えられる。つぎに処理水は脱気器給水ポンプで加圧され、エコノマイザ下部にある低圧予熱部にはいる。低圧予熱部はコイル状に巻かれた3列の管群からなり、管内の水はここで旋回ガスノズルによって旋回を受けた燃焼ガスと熱交換を行なう。低圧予熱部で加熱された温水は脱気器にはいり、ここで脱気される。脱気された水は主給水ポンプにはいり加圧され、高圧の温水はエコノマイザ上部の高圧予熱部にはいてさらに加熱される。高圧予熱部はコイル状に巻かれた3列の管群からできている。なお、ボイラ管は4管並列のため、低圧と高圧予熱部の出入口にはそれぞれ管寄せを設けている。エコノマイザを出た高圧の熱水はつぎにボイラ本体部にはいる。ボイラ本体入口の管寄せには、沸騰部での並列4管の流量を安定に均一化するためのオリフィスが設けてあり、熱水はオリフィスを通して加熱管にはいる。熱水はまず、水冷壁でふく射伝熱面を形成している最内側のコイル管内を下から上へ通過する間に沸騰し、ついで2層目のコイル管内を上から下へ通過する間に蒸発完了し、さらに、最外側のコイル管内を下から上へ通過していく間に設定された過熱温度にまで加熱され、集合して1本の管となってボイラを出る。ボイラを出た蒸気は蒸気溜へ行き、必要に応じて使用される。

給気は起動時にはブースタ送風機を使って送風する。送風して最低負荷で点火した後は、過給機ガスタービン入口のガス温度が上昇を開始し、過給機の回転は徐々に上り、負荷増加とともに自立運転にはいる。過給機圧縮

図2 ボイラ装置全景写真

1. ボイラ	6. 燃焼室	11. 第1段旋回ノズル
2. エコノマイザ	7. 蒸発部	12. 低圧予熱部
3. 過給機	8. 過熱部	13. 第2段旋回ノズル
4. バーナ	9. 圧縮機	14. 高圧予熱部
5. パイロット・バーナ	10. ガス・タービン	15. 煙突

図3 ボイラ装置断面図

機で加圧された給気は、レジスタを通りバーナスロート部のスワラで旋回を受け、スワラを出たところで燃料と混合し燃焼する。燃焼ガスは火炉内でふく射と対流によって熱を水冷壁伝熱面に与え火炉出口に到達し、ここで

上向きに反転して狭い管間隙で構成されている対流伝熱面を約100m/sの高速で通過しながら管内流体と熱交換し、上部で再び反転してつぎの間隙の対流伝熱面を今度は上から下へ高速で通過する間に管内流体と熱交換を行なう。この対流伝熱面での燃焼ガス的高速流動を可能としたことが本ボイラの特長の一つであり、伝熱を大幅に増進させた結果、伝熱面積を大きく減少させている。ボイラ本体部を出た燃焼ガスは、過給機ガスタービンにはいりこれを駆動して給気を圧縮する動力をかせぐ。ガスタービンからの排気はまだ熱量を保有しているので、エコマイザを通して低圧予熱部と高圧予熱部とで熱交換した後煙突へ抜ける。この両予熱部を通過する燃焼ガスの速度は約30m/sであり、ここでの熱伝達率も大きい。

2.2 制御装置 本ボイラの制御装置は、ミニコンピュータを中央処理装置として用いたデジタル制御装置であり、完全自動化をねらいとして製作されたものである。システムは図4に示すような構成をしている。シ

図4 システムの構成

表2 制御装置主要機器要目

演算部	機種	FACOM-R
	素子	磁気コア
	語長	16ビット+1パリティ
	サイクル	1.5 μ s
	容量	8 K語
	命令数	28種
プロセス入出力装置	割込	1レベル
	デジタル入力	DI/A
	デジタル出力	DO/A, DO/B
	アナログ入力	AI-ADC/O, AI-MPX/O
	切換周期	250 μ s
	出力形式	符号+11bit
	選択回路	半導体スイッチ
	アクチュエータ用出力	TIM/B
	出力時間幅	$\frac{1}{8}$ 秒の0~256倍
	アナログ出力	
	出力電流	0~20.5mA

ステムの目標はプラントの完全自動化にあるが、それは自動定常運転、自動発停、自動監視の三つのサブシステムから成っている。これらの三つのサブシステムを実現するための有力な手段が、DDC (直接デジタル制御)、シーケンス制御、および自動データ処理であり、これらの機能間を有機的に結びつけ、有効に機能を発揮させるものが自動診断、自動調整、および予測の諸システムである。主な機器は、中央処理装置、プロセス入出力装置、操作盤、DDC用現場盤より成っている³⁾。主要機器の要目は表2のとおりである。

制御プログラムは、既述のようにつぎのプログラムから成立っている。

(1) 自動起動・停止……自動起動・停止機能は、起動準備プログラム、着火プログラム、昇温昇圧プログラム、通常停止プログラム、緊急停止プログラムより成り、運転員が出口蒸気圧力、出口蒸気温度、蒸気流量を設定して与えれば、自動的に設定値までボイラを運転する。ただし、止め弁などの設備の点からの制約と安全性を考慮して、冷態から着火までの起動準備プログラムは、シーケンスモニタ方式を採用している。

(2) 自動データ処理……実験に必要なデータを、いろいろのモードでプリントあるいはテープのパンチの形で出力するものである。

(3) DDC ……本ボイラには蒸気変換弁を備えており、制御ループとしては変換弁出口の圧力と温度によって減圧弁と注水弁を操作し、設定値に一致するようフィードバックループを作っている。自動ボイラ制御としては、本ボイラの動特性にむだ時間が大きいことを考慮した有限時間整定応答系を採用している⁴⁾。

(4) 自動調整……制御方式としてPID アルゴリズムを用いた時のパラメータ調整には、本システムは限界感度法を自動化し、最適値を自動的に表から算出してパラメータの初期調整を容易にしている。

(5) 自動診断……本システムの方法は、検出器の信頼度を事前確率として用い、検出器の故障か、プラントの故障かを判別可能としている。また、検出器群をグループ化し、多数決の論理を用いてグループパターンを作り、これと故障パターンとの比較で診断する方法をとっている。さらに、故障パターンとして、異常を生じた過渡時のパターンを用い、早期診断を可能にしている⁵⁾。

(6) 故障予測……状態量の微小変化を検出して、故障の予測を行なうもので、詳細は3.3で述べる。

3. 実験結果

3.1 静特性 実験の結果、本ボイラは初めの目的通りの性能がえられ、これまでの船用ボイラと比較して大幅な小形、軽量が達成された。

過給ボイラでは、火炉内の燃焼が加圧燃焼となるため燃焼時間が短くなり、燃焼室熱発生率は大きくとれる。船舶技術研究所が開発してきた本形式の3基のボイラおよ

び他形式の過給ボイラにおける燃焼室熱発生率の実績と在来の船用ボイラのそれとを火炉内圧力に対してプロットしたのが図5であるが, 同図によっても過給圧を上げると燃焼室熱発生率が大きくとれることがわかる。

C: 在来形船用ボイラ

S: 過給ボイラ

- 1: 船研式過給1号ボイラ
- 2: 船研式過給2号ボイラ
- 3: 船研式過給3号ボイラ (15t/h)
- 4: Velox ボイラ
- 5: Foster Wheeler ボイラ

図5 過給ボイラの燃焼室熱発生率

ボイラ対流伝熱面における伝熱では, 燃焼ガス側の熱伝達率 α_g が支配的であるが, 管群に対する伝熱の場合には一般に次のように表わせる。

$$\alpha_g = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = C_1 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.5}$$

$$= C_2 v^{0.6} d^{-0.4} \nu^{-0.3} \lambda^{0.7} (C_p \cdot r)^{0.3} \quad (1)$$

ここで,

Nu : ヌセルト数

λ : ガスの熱伝導率

d : 代表長さ(ガスの通過路の幅または径)

Re : レイノルズ数

Pr : プラントル数

v : ガスの流速

ν : ガスの動粘性係数

C_p : ガスの定圧比熱

r : ガスの比重

C_1, C_2 : 定数

過給ボイラでは, ガスの速度と比重を上げることができ, ガスの通路が狭くなることが加わって, 熱伝達率が在来のボイラに比べて4~5倍となる。本ボイラでは, 伝熱面でこのように高い伝熱が行なわれても水と蒸気の流動を確保するよう, 給水は貫流方式を採用している。

実験によって確かめられた本ボイラの特長値と, 在来形の船用ボイラの特長値とを比較したのが表3である。同表からわかるように, 本ボイラはこれまでのボイラと比べ, 火炉容積で約1/6に, 伝熱面積で約1/3に減少している。その上, 過給による給気の温度上昇があるので, 在来のボイラで見られる容積の大きい空気予熱器は必要でなくなり, ボイラ全体がコンパクトになっている。

表3 在来形船用ボイラと貫流式過給ボイラとの性能比較

	単位	在来形船用ボイラ	貫流式過給ボイラ
蒸発量	t/h	72.5	15.0
蒸気圧力	kg/cm ²	86.5	15.0
蒸気温度	°C	515	540
燃焼室ガス圧力	ata	1.0	2.8
燃焼室容積	m ³	44	3.76
燃焼室熱発生率	kcal/m ² h	0.68×10 ⁶	3.93×10 ⁶
伝熱面積	蒸発部	m ²	944
	過熱部	m ²	547
	エコノマイザ	m ²	—
	総計	m ²	1491
伝熱面平均熱負荷	kcal/m ² h	2.72×10 ⁴	8.96×10 ⁴
備考		エコノマイザなし, 空気予熱器 1,972m ²	過給ボイラは, 過給のため給気温度上昇するから空気予熱器の必要なし

過給ボイラの特長の一つとして, 各負荷における運転時のガス側圧力降下の分配を求めると図6の結果となる。本図は空気比を1.1にした実験の値であるが, この図からも本ボイラでの伝熱の増進は, ボイラ本体部とエコノマイザ部における対流伝熱面での大きな圧力降下によって達成されていることがわかる。また, ボイラ系統(水

- I: 空気レジスタとスワラでの圧力降下
- II: ボイラでの圧力降下
- III: ガスタービンでの圧力降下
- IV: エコノマイザでの圧力降下

図6 ボイラにおける圧力降下の分配

・蒸気系)と過給機系統(空気・燃焼ガス系)との間には、両系統の圧力と温度が相互に干渉し合うため、ガスタービンへの蒸気吹込みなど過給機系統へ制御手段を講じないと、狭い条件の範囲内でしかボイラとして安定に運転できないという特性を持っている。

本ボイラの水・蒸気系は4管並列貫流であるが、過給ボイラであるため伝熱面熱負荷は高く、ある運転条件範囲で並列管同志の間で位相が異なる熱流力的な振動が発生する。本ボイラではこの振動を抑制するため、蒸発部入口に絞りオリフィスを設けているが、管内面にスケールが付着するなどで蒸発部管内の流動抵抗が増加すると、蒸気圧力と蒸気温度の条件によっては上述の熱流力的振動を誘起し、運転不安定におちいることがある。

3.2 動特性 自立運転を行なう過給ボイラでは、静特性のところで述べたボイラ系統と過給機系統両者の特性がその時間遅れでも相互に関連し合うので、動的な特性も在来ボイラと異なる。これに加え、自立運転では急激な負荷上昇時に風量を先行させることが困難であり、負荷変動の運転操作を難しくしている。本ボイラでは、過給ボイラ一般に付随するこれら過渡特性を改善するのに、過給機ガスタービンへ蒸気を吹込むという簡便で効果が大きい方法を開発し、負荷上昇時に風量先行を可能としている。この蒸気吹込法は、過渡時のみでなく整定時でもボイラ系統と過給機系統の平衡が成立たない際や、運転条件の範囲を広げるのに有効な方法である。

図7は燃料量と給水量との比を一定に保ったまま、負荷を増加させた時のボイラの過渡応答を示す。実験は制御装置を作動させずに負荷のみを突変させた時の結果である。図中の実線は蒸気吹込を行なわなかった時のボイラの応答を示し、破線は負荷突変時に2分間だけガスタービンへ蒸気を吹込んだ時に示したボイラの応答である。蒸気吹込みを行なわなかった時は、ボイラは負荷突変から約5分間不完全燃焼を起こし、ボイラが整定するまでに長い時間を要するのに対し、2分間だけ蒸気吹込みを行なうと、風量があらかじめ増量されるため、燃焼にはほとんど遅れがなく、ボイラ全体も負荷変動に伴ってよく追従していることが実験からわかる。

3.3 制御特性 ここでは制御システムによる実験結果を、とくに予測システムについてそ

図7 ボイラの過渡応答の1例(負荷増加時)

図8 有限時間応答系の実験例(設定値変更)

の詳細を述べる。

3.3.1 DDC DDCによる目標値変更に対する有限時間応答系の実験結果を図8に示す。同図は設定値を変更してから各諸元がDDCによってどのように整定するかを示している。

3.3.2 自動調整 限界感度法を用いた自動調整のフローダイアグラムを図9に示す。限界振動の判定には

図9 限界感度法による自動調整のフローダイアグラム

図10 自動調整制御の実験例

動径法を用いた。位相平面の両軸に、信号 x とその時間微分 $\dot{x}$ をとって軌跡を描かせると、軌跡の動径は振動の振幅を表わす。動径法とは、この位相面上の軌跡の動径の大きさで限界振動を判定するものである。自動調整を行なったテスト例を図10に示す。

3.3.3 異常予測 異常には、停電で代表される突発的なものと、定常値からの偏差が徐々に大きくなり、やがてあるしきい値に達して、初めて検出されるようなものとする。ここで述べる異常予測システムは、後者のような場合を対象としたもので、つぎの三つの目的を持っている。

- (1) 運転中の過渡的現象として、状態の変化がきめられた時間内に、与えられた運転限界を越える可能性があるかどうかを判定すること。
- (2) コントローラの動作点が、飽和領域に到達するか、もし到達した場合、その時間およびそこから脱出する時間を予測すること。
- (3) 状態量の変化が、最大または最小値に達する時間とその値を予測すること。

予測の方法は、計算機による高速シミュレーションである。例として、蒸気変換弁出口温度 x の予測について説明する。注水弁開度を u 、入口温度(ボイラ出口温度)を V とすると、

$$x_k = a_1 \cdot x_{k-1} + a_2 \cdot u_{k-n-2} + a_3 \cdot V_{k-n-2} \quad (2)$$

によって、 k サンプル時の値が求められる。 n はむだ時間を示す。ここで、蒸気変換弁は、DDCによりPI動作による制御がなされているので、

$$du_k = K_p(x_{k-1} - x_k) + K_I(R - x_k) \quad (3)$$

図 11 予測制御の実験例

さらに, u の変化領域として

$$0 \leq u_k \leq 100 \quad (4)$$

を与える, ここで, K_p, K_I は制御定数, R は目標値, k はサンプル値番号を表わす.

これらの数式を用いて逐次計算を行ない, 数分~20分位まで予測する.

予測を実際に行なった結果を一例として図 11 に示す

図 12 蒸気変換弁出口温度の予測値に対するボイラ出口蒸気温度の推定値誤差の影響

図 13 予測システムのブロック・ダイアグラム

が, この結果を検討してみると, 高速シミュレーションを行なう時の初期値である $x(0), u(0), V(0)$ の値が, 予測の結果に大きく影響することが明らかになった. 例えば, 図 12 はボイラ出口蒸気温度の推定値誤差を変数にとって, 50 分後の蒸気変換弁出口温度の予測をプロットしたものである. これから, ボイラ出口温度の 1℃ の相異は, それが 50 分間ホールドされるため 270℃ の変化となって現れる. このような理由から, ボイラ出口蒸気温度の正確な値を推定するために, カルマン・フィルタの理論⁹⁾を用いて, ボイラ出口温度の最適推定値を求め, 予測の精度を上げる方式をとっている. 以上の主旨を, ブロック・ダイアグラムに表わしたものを図 13 に示してある.

さらに, 図 14 にはカルマン・フィルタを用いた蒸気温度の推定結果の一例を示した. この方法は, 圧力などノイズの多いシステムでは特に有効となる.

図 14 カルマン・フィルタによる蒸気温度の推定

4. 考 察

4.1 ボイラの装置についての考察 本ボイラの製作と運転を通してえられた経験から, 将来の本形式ボ

イラ設計に考慮すべき点はつぎのとおりである。

(1) ボイラ系統と過給機系統のマッチング 自立運転を行なう過給ボイラでは、ボイラ系統と過給機系統が静的にも動的にも相互に干渉し合うから、両系統の圧力と温度の条件は常に適合していることが要求される。このマッチングは、また、全力負荷の条件で成立たなければならないことはもちろんであるが、さらに、すべての負荷条件においても成立つことが必要であり、そのように設計せねばならない。これが在来形のボイラと大きく異なる要求性能である。安定した運転を行なうには、ボイラの特性に影響を与える諸因子をまず見出し、諸因子によるボイラ運転可能域の多次元マップを、運転にはいる前にあらかじめ計算か実験によって求め、それらにのっとり運転制御を行なうことが望ましい。伝熱面の汚れや過給機の翼付着による性能低下など経時変化によってもボイラ特性は大きく変わってくるから、設計に当っては設計当初から余裕を持たせるとともに、両系統のマッチングが常に適正に成立つよう制御できる機能を設備するよう配慮せねばならない。

(2) 過給機の信頼性 過給ボイラでの過給機の役割は大きく、機能からいって単なるボイラ用補機ではない。過給機が一たん故障あるいは機能低下すると、ボイラは直ちにその機能を喪失する。その意味では、過給ディーゼル機関における過給機の役割よりもはるかに重く、過給機に対して信頼性向上が望まれる。さらに、耐久性に対する過給機への仕様もボイラ並みが必要とされる。

(3) 広負荷バーナの開発 自立運転を行なう過給ボイラでは、広負荷範囲でしかも全範囲にわたって火炎が安定し、燃焼特性が良いバーナを必要とする。過給ボイラに装備するバーナが広負荷範囲のものでなく、バーナの最低負荷が比較的高いところにあると、起動時に送風動力を余計必要とする。そうすると、ブースタ送風機は容量が大ききものを設備しなければならなくなる。また、バーナの火炎形状が不安定で負荷によって形状が大きく変わるような時は、火炉内での収熱と過給機の圧縮機特性とが結びついて、条件によっては燃焼振動を誘起し、ボイラの運転が不安定になる。

(4) 熱応力への配慮 過給ボイラでは伝熱面の熱負荷が全般に高いから、熱応力は一般に大きい。また、ボイラと過給機とを結ぶガスダクトは高温でしかも圧力がかかっているため、応力が高い。このように、材料、構造、製造、加工、すえ付けの各段階では、熱応力に十分な配慮が要求される。ボイラをシステム的に見ると、過給機ガスタービンにはいる燃焼ガスの温度をシステムが成立つ限度まで下げる全体設計とすること、などもこの方面への一つの解決策である。

4.2 制御装置についての考察 本制御系の製作と運転を通してえられた経験から、デジタル制御装置を今後製造していく上で考慮を払うべき点はつぎのとおりである。

(1) 操作盤のデザインは、特にワイヤード・ロジック方式と併用する場合に操作盤としては簡単になるが、その設計は、ハードウェアのみならずソフトウェアとの関係をも決定してしまうものであるから、設計当初に熟慮することが望ましい。

(2) ポンプ、操作端および各補機類は、操作盤から任意に手動に切換えて操作できるよう設計する。特に、ワイヤード・ロジック方式と併用の時に、操作端を独立操作できるように注意がいる。すべてを自動シーケンスの中でのみ操作できるようにしておくと、変則運転の時に困難が生じる。

(3) 警報、インターロックおよび危険防止の処理回路（たとえば、失火時の燃料停止弁回路や過給機の過回転時のボイラ停止回路など）は、デジタル制御系と独立に併設した方が望ましい。

(4) ミニ・コンピュータは、制御用として演算速度、信頼度の点で問題はないが、ハードウェアでの多レベルの割込処理、浮動小数点演算など、プログラミングやメモリ・プロテクトなどの点で性能向上が望まれる。

(5) 理想的には、1台の制御用計算機に多種類の制御能力を要求しないで、直接制御を行なうミニ・コンピュータと、それと合わせてより高級な制御を行なう計算機とを結び、全体で階層的制御系を形作る方が1計算機システムより無理のない、より良い制御動作が行なわれると考えられるので、このようなシステムの開発が待たれる。

5. む す び

実用規模に近い貫流式過給ボイラを製作し、これにミニ・コンピュータを用いた制御装置を設備した。このボイラの運転により、自立運転を行なう過給ボイラについて多くの特性が実験によって求められ、今後、本形式ボイラを設計する際に必要な多くの資料がえられた。また、電子計算機によるボイラの制御実験では、プラントの完全自動化をめざして、多くの制御方法や新しい診断法、予測法を開発し、本ボイラプラントに適用した実験で良好な結果をえた。

このように、貫流式過給ボイラの試作と新しいボイラの制御方法の開発に成功したが、今後はえられた結果と考察をもとに、船用ボイラの高性能化と完全自動化の開発を推進していく考えである。

文 献

- 1) Isshiki, N. and Tamaki, H., IMAS 69, 4 d, (1969).
- 2) 一色, 玉木, 日本船用機関学会誌, 4-8 (昭44-10), p. 62-66
- 3) 黒須, 村山, 小林, 和田, 玉木, 船舶技術研究所報告, 9-2 (昭47-3), p. 17-103
- 4) 黒須, 村山, 小林, 稲坂, 日本船用機関学会誌, 7-11 (昭47-11), p. 41-57
- 5) Terano, T., Kurosu, K. and Murayama, Y., The 5 th

World Congress of IFAC, (1972)

- 6) Kalman, R. E. and Bucy, R. S., Trans. of the ASME, J. of Basic Engg., 82(1960), p. 35

〔質 疑 応 答〕

〔質 問〕

Mr. R.W. Dickinson (Manager Maritime Reactors, Babcock & Wilcox Co., Lynchburg, Virginia, U.S.A.)

Have you had sufficient operating experience to be convinced there are no tube vibration or support erosion problems?

Mr. L.E. Triggs (Combustion Engineering Inc., U.S.A.)

What fuel was used in your testing?

Prof. K. Nishikawa (Kyushu University, Fukuoka, Japan)

In the equation of (1) heat transfer coefficient, the term $(v \cdot r)^{0.6}$ can be constant, if the mass velocity G/F is constant, where F = flow cross sectional area. I cannot understand why the heat transfer coefficient of gas side in the supercharged boiler becomes 4 ~ 5 times higher than that in the conventional boiler. Does it mean that the supercharged boiler can adopt the narrow gas passage in construction?

Please explain this reason.

〔回 答〕

質問に答える前に、討論に加わられたかたがたに対し感謝致します。

Dickinson氏は、ボイラ管振動と管支持材の浸食について、これまでのボイラの運転で経験があったかどうかを質問されました。

本ボイラが建造されて以降、ボイラは高負荷で約3,000時間と低負荷で約4,000時間の運転をしておりますが、著者らのボイラの管配置ならびに構造では燃焼ガスの流れによる管振動は、これまで観察されていません。振動については、本文で述べたように、管内気液二相流により誘起された熱流力的な管内流体の振動は経験されました。参考までに、図15にパネル構造をなす蒸発部の管配置の詳細を示します。同図に見られるように、図15 パネル管構造の詳細

管と管との間は溶接でシールする構造となっているので、パネル構造は剛であり、燃焼ガスの流れによっては振動は生じないと考えます。つぎに、高温領域でのボイラ管浸食についてのお尋ねですが、これもこれまでは観察されていません。

Triggs氏のご質問に対し、表4に使用燃料の性状を示します。使用燃料は残渣油であり、日本工業規格によるA重油とC重油です。C重油は燃焼実験のみに使用し、A重油はその外の実験、例えば、過渡実験、制御実験、電算機使用の高度な制御実験などの燃料油として使用しました。

表4 使用燃料油性状

	単 位	A 重 油	C 重 油
比 重	15/4℃	0.847	0.940
引火点	℃	79	125
流動点	℃	-5.0	13.0
粘 度	30℃ 50℃ 80℃	cSt. cSt. cSt.	4.65 2.93 105.3
成 分			
炭 素	%	85.52	—
水 素	%	13.51	—
硫 黄	%	0.69	2.50
窒 素	%	0.020	—
ナトリウム	ppm	<20	39.0
バナジウム	ppm	< 5	46.8
残留炭素分	%	0.23	7.40
灰 分	%	Trace	0.03
水 分	%	Nil	0.05
発熱量	高 位 位	kcal/kg	10,850
	低 位 位	kcal/kg	10,120

西川教授は、著者らのボイラの伝熱について討論されました。

一般に、ボイラの対流伝熱面でのガス側の熱伝達率は、燃焼ガスの比重以外の物性値が変らない条件では、本文の(1)式の替りにつぎのように簡単に表わすことができます。

$$\alpha_g = C_g \alpha^{-0.4} (v \cdot r)^{0.6} \quad (5)$$

(5)式に示されるように、もし、質量速度 $G/F (=v \cdot r)$ が一定ならば $(v \cdot r)^{0.6}$ の項は一定となるから、ガス側の熱伝達率は、西川教授が意見を述べられたように、ガス通路の大きさのみの関数となります。著者らの過給ボイラの伝熱での特長は、燃焼ガスの質量速度が在来ボイラのそれに比べてはるかに高くたったことにあります。本ボイラの対流伝熱面で、燃焼ガスの質量速度の実績値は最大負荷時には $50 \sim 60 \text{ kg/m}^2\text{s}$ に達します。これを、在来ボイラの平均的な値である $3 \sim 5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ と比較すると、その大きさがわかりいただけると思います。この高い質量速度に加えガス通路の狭いことが、本ボイラでのガス側の熱伝達率を大きくしている理由です。実験結果を熱平衡から計算すると、ガス側の熱伝達率は $300 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ に達しております。