

Research Reports of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-91, 1991
UDC 621.181:536.532:681.01

小規模ボイラの燃焼制御回路と炎検知センサの フェールセーフ化に関する研究

清水尚憲*, 杉本 旭*, 池田博康*, 梅崎重夫*

Fail-safe Combustion Control and Flame Detective Sensor for Small-sized Boiler

by Shoken SHIMIZU*, Noboru SUGIMOTO*,
Hiroyasu IKEDA* and Shigeo UMEZAKI*

Abstract; As a function in a boiler becomes more complicated, a computer control system is applied for a boiler to advance its function. However, such advanced systems are not always safe, because of the complicated mechanisms. Small size boilers, which can be easily operated by workers without particular technique, have widely been used in small factories such as a laundry or a bakery. Though the majority of the small size boilers have the advanced control systems, serious accidents such as burst or explosion sometimes occur in the small size boilers, because of the complexity of control systems.

The main cause of the accidents is often associated with explosion of unburned gas in the furnace of the boiler. To prevent such accidents, it is necessary to develop a new type of sensors which are able to detect the unburned gas or the flame of the combustion gas.

The main aims of this study are;

- (1) to develop the fail-safe sensors which can monitor the combustion state of fuel in the furnace,
- (2) to develop the fail-safe control systems for small size boilers,
- (3) to evaluate the practicality and limitations of the developed sensors and the control systems.

Three types of flame detection sensors, that is, thermocouple, UV tube and ultrasonic sensors were developed by applying fail-safe mechanism.

A new control system which is composed of an AND gate, an OFF delay element and a window comparator was constructed. The AND gate is a kind of a logical element which has a function to be able to emit an output signal when two input conditions are satisfied. In case of applying the AND gate for the boiler, the AND gate functions to emit the output signal which permits the operation of the boiler, only when the self-check signal for the control circuit and the flame detection signal are normal. The new fail-safe control system can be achieved by the AND gate.

The OFF delay element functions to control the purge time and the fuel injection time in the furnace of the boiler.

*機械研究部 Mechanical Safety Research Division

The window comparator functions to emit the output signal when a signal from the flame detection sensor exists between upper and lower limits (window) of the comparator. If the signal level is higher or lower than the limitations, the output signal becomes zero. As a result, a new control system including the window comparator cuts off the supply of fuel immediately and operation of the boiler is shut down automatically.

The new control system developed enables to release fuel into the furnace and to ignite the fuel only when the whole control circuit is in normal state. Accordingly, the new control system makes possible to keep a boiler under safety conditions even when a worker misoperates.

Keywords; Boiler, Fail-safe, Control system, Sensor, Flame detection

1. 緒 言

ボイラによる労働災害は、最近では年間数件にまで減少しており、他の機械と比較しても災害発生率の低い機械と考えられている¹⁾。しかし、最近でも数年に一回はボイラを起因物とした死亡災害が発生しており、また、ある保険会社の調査²⁾によれば、保険契約のあるボイラ約 15,000 基のうち、この 10 年間で保険金支払の対象となったボイラ事故は約 1200 件もあることが判明している。このことは、ボイラの災害防止対策が依然として重要であることを示唆している。

近年のボイラ災害の特徴は、破裂災害の比率が相対的に減少するとともに（昭和 33 年～ 42 年の 50.0% から昭和 53 年～ 62 年の 25.5%^{1),3)}）、爆発災害の比率が相対的に増大したことである（同 24.0% から 54.0%）。このうち、破裂災害の減少は、材料技術の進歩によってボイラの構造上の強度が改善したためと考えられる。これに対し、爆発災害の増大は、ボイラ制御の複雑化に伴い制御系の異常や人間の操作ミスに起因した災害が増大しているためと考えられる。

特に、近年、ボイラ制御にもコンピュータを利用した高度な制御技術が導入されているが、この多くは制御の高機能化を目的としており、安全に対して十分な配慮がなされている訳ではない。そのため、人間の操作ミスや故障・ノイズ等の影響で制御に異常を生じると、これに起因して重大な事故を引き起こしかねない。

また、最近の傾向として、中小零細企業にも小型ボイラ（労安法施行令第 1 条 4 号参照）や簡易ボイラ（同 5 号）が導入される場合が多いが、これはボイラ技士以外でも扱うことができるため、ボイラの異常時に人間が適切に対応できずに、事故を生じな

いとも限らない。そこで、人間の操作ミスやボイラの異常時には、人間に代わって事故に至ることを防止するための、フェールセーフな安全制御システムが必要となる。

本研究の目的は、中小零細企業で数多く使用されている小規模ボイラ（伝熱面積が蒸気式で 3m²、温水式で 14m²、貫流式で 30m²以下のボイラで、小型、簡易ボイラを含む）に、フェールセーフな安全制御システムを導入することにある。ここでは、特に、未燃ガスの放出に伴う爆発災害が多いことを考慮して、この災害防止を目的としたフェールセーフ・システムを提案する。

本論文では、まず、ボイラ制御システムの基本的構成について概説し、このシステムでフェールセーフな制御を必要とする箇所を明らかにする。次に、爆発防止用安全制御回路（これは、燃焼制御回路のうち安全に係わる部分に相当する）と炎検知センサのフェールセーフ化について検討した結果を示す。

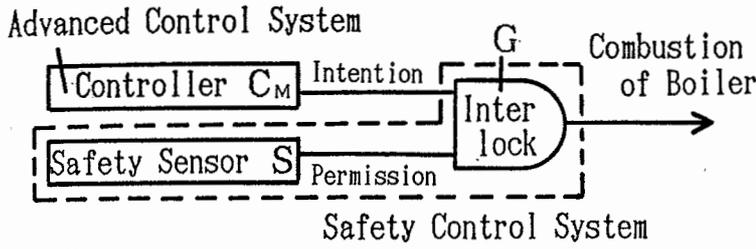
2. ボイラ制御システムの基本的構成

2.1 制御の階層化

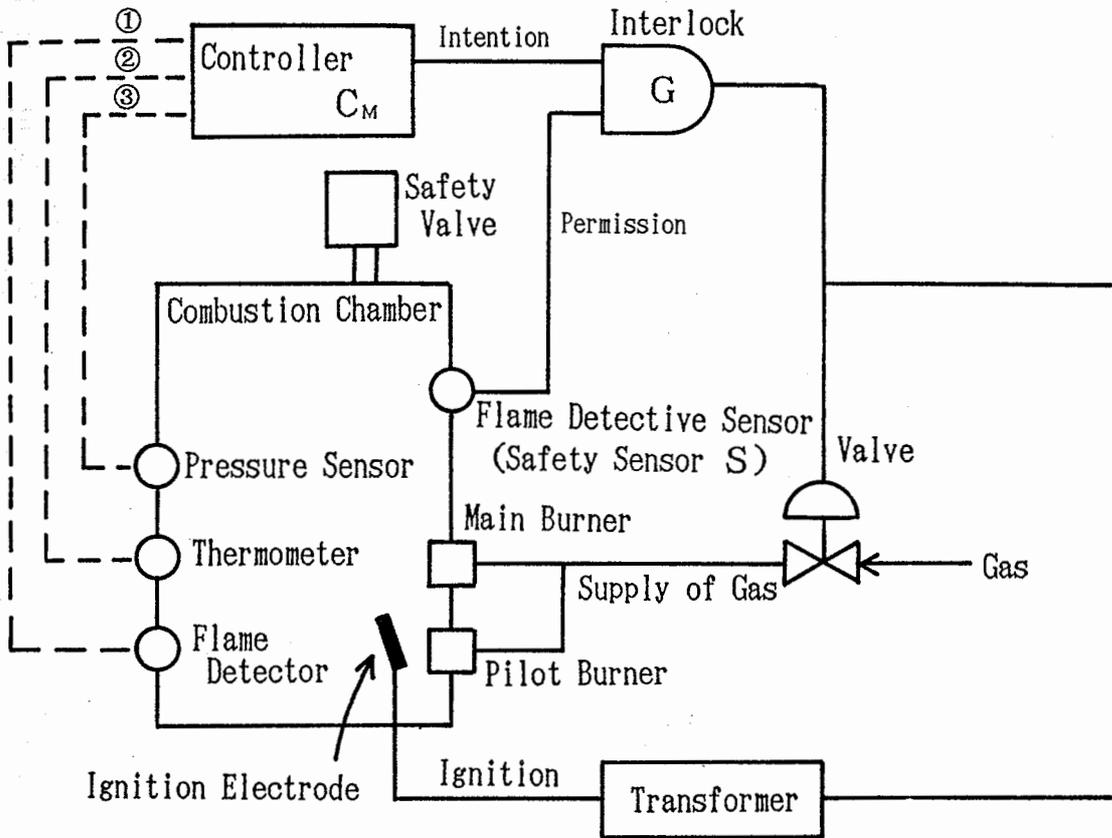
ボイラの運用時には、まず第 1 に安全性を考え、次に経済性を考える。従ってボイラ制御は、安全のための制御（安全制御）が、運用効率を上げるための制御（高機能化制御）に優先して行われる構成（優先制御）を必要とする。即ち、安全（下位）の条件の基に合理的な運転（上位）が行われるという意味で、ボイラ制御系は階層構成が採られなければならない。

Fig. 1 に、ボイラ制御システムの基本構成を示す。図で、温度、圧力、燃焼の各制御系は、コントローラ C_Mからの指令に基づいて、最も高い効率を維持するように制御される（高機能化制御）。しかし、万一、

(a)



(b)



① Combustion Control ② Temperature Control ③ Pressure Control

Fig. 1 Example of Boiler Control System
ボイラ制御のシステムの一例

ボイラの運転状態に安全に係わるような異常が生じたときは、高い効率を放棄してでも安全を確保しなければならない (安全制御)。このために設けられるのが安全制御システムであり、Fig. 1 に示すように、安全を確認するためのセンサ S と、このセンサからの情報に基づいて高機能化制御を許可するインタロック⁴⁾ G によって構成される。

2.2 安全制御システム

実際のボイラでは、事故の多くは破裂または爆発のいずれかの形態をとるから、安全の制御は、次の2つの条件に関して行う必要がある。

(1) 破裂防止

燃焼状態や水位等の異常によって、ボイラ内部の

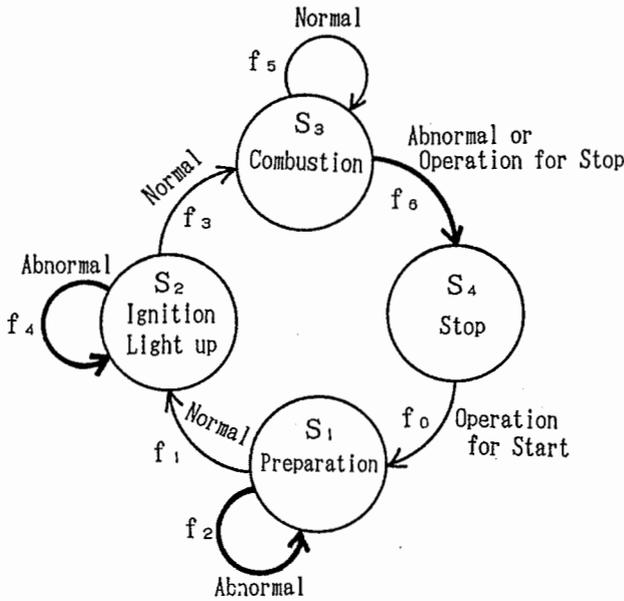


Fig. 2 State Transition of Boiler Operation
ボイラ運用の状態遷移図

圧力が異常に上昇して破裂に至ることのないように、圧力に異常が生じたときは、直ちにその圧力を開放するか、または燃焼を停止する。

(2) 爆発防止

炉内に残留した未燃ガスによって、爆発が生じることのないように、点火前のプレパージを必ず規定時間以上行くとともに、パイロット・バーナの不点火時やメイン・バーナの失火時には、未燃ガスを規定時間を越えて放出しない。

上記(1)の条件を満足させるため、ボイラ構造規格では、内部圧力が異常に上昇したとき、直ちに圧力を開放できる安全弁の設置を義務づけている。また、自動制御方式をとるボイラでは、圧力が正常であるときに限り燃焼を許可する制御が構成される場合も多い。

一方、爆発防止のための制御では、プレパージを一定時間以上行くとともに、未燃ガスを規定時間を越えて放出しないための制御が必要である。このとき、未燃ガスがないことは、バーナーの炎を検知するためのセンサ(炎検知センサ)で確認できる。

Fig. 2は、爆発防止のための安全制御システムの状態遷移図である。このシステムでは、まず、人間が起動操作を行うと(Fig. 2の f_0)、ボイラは起動時の状態 S_1 へと遷移して、炉内の未燃ガスのプレパージを行う。これが正常に完了すると、ボイラは点火

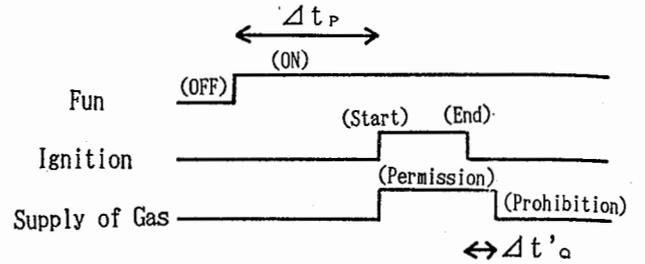


Fig. 3 Time-chart of Combustion Control
燃焼制御のタイム・チャート

時の状態 S_2 へと遷移して、パイロット・バーナへの点火と炎検知センサによる点火確認が行われる。

以上が正常に完了した後に、メイン・バーナが着火して、ボイラは定常運転時の状態 S_3 へと遷移する。ここでは、バーナの炎の監視によって未燃ガスがないことを常に確認しながら運転が継続され、失火が生じたときや人間が停止操作(Fig. 2の f_6)を行ったときは、直ちに停止時の状態 S_4 へと遷移する。

2.3 フェールセーフ化の対象

Fig. 2のシステムでは、状態 S_1 または S_2 で異常(プレパージや点火の失敗)が認められたときは、再試行によってそれが正常に完了しない限り、次の状態に進んではならない。また、 S_3 の状態でも異常(失火)が認められたときは、直ちに S_4 の状態に遷移する必要がある。

- 図の太線部分は、これらの各過程に相当する部分であり、事故防止のためにフェールセーフな制御を必要とする箇所である。これらの箇所のフェールセーフ化を図るには、少なくとも次の要素を必要とする。
- (a) 炎がないにも拘らず、誤って「炎あり」を通報することのない炎検知センサ。
 - (b) 点火あるいは、燃料供給を許可してはならないにも拘らず、誤って許可信号を出力することのない制御回路。

以後、第3章では(b)の、第4章では(a)のフェールセーフ化について検討した結果を示す。

3. 爆発防止用安全制御回路のフェールセーフ化

3.1 時間軸上のフェールセーフ処理

ボイラでは、プレパージ量 P [m^3/s] は、パージの継続時間 Δt_P [s] によって規定され、未燃ガスの放出量 Q [m^3/s] も、その放出時間 $\Delta t'_Q$ [s] によって

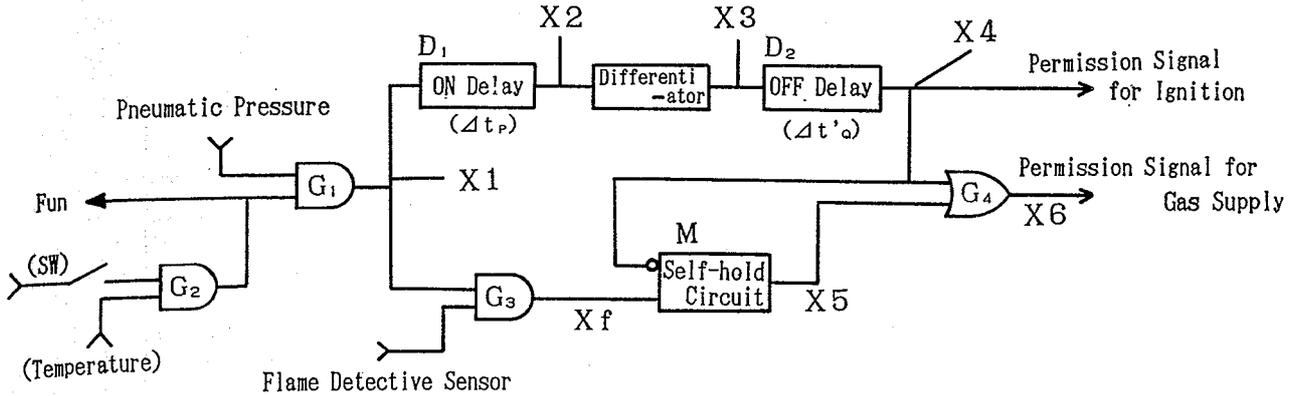


Fig. 4 Combustion Control Circuit having a Fail-safe Characteristics
フェールセーフな燃焼制御回路

規定される。言い換えれば、爆発防止に関する安全の条件は、時間の関係に置き換えることができ、これは次式で表すことができる。

$$\Delta t_P > \Delta t_{\min} \quad (1)$$

$$\Delta t'_Q < \Delta t'_{\max} \quad (2)$$

ただし、 Δt_{\min} は爆発防止のために必要なプレパージ時間であり、 $\Delta t'_{\max}$ は許容される未燃ガスの放出時間である。

(1)式と(2)式の関係为满足させるには、時間 Δt_P と $\Delta t'_Q$ の計測手段(計時手段)を必要とする。重要なのは、この手段が常に正常な状態にあるとは限らないことである。例えば、 Δt_P の計時手段は、故障のため Δt_{\min} までプレパージ時間を継続できないかもしれない。また、 $\Delta t'_Q$ の計時手段は、故障により $\Delta t'_{\max}$ を越えて未燃ガスを放出するおそれがある。これらは、いずれも重大な事故の原因となりかねない。そこで、仮に計時手段が故障した場合にも、以上のような事態を生じることのないように、計時手段の誤り方を規定する必要がある。

3.2 フェールセーフな計時手段

いま、このことを Fig. 3 の爆発防止用安全制御回路(燃焼制御回路)のタイムチャートで考えてみる。もし、炉内に未燃ガスがある場合、プレパージが所定の時間(Δt_P に相当、図では30秒)行われていないにも拘らず、この計時手段に誤りが生じて点火が行われると爆発のおそれがある。言い換えれば、点火の許可信号は、ファンの回転開始信号が立ち上がった

てから少なくとも30秒以上遅れて立ち上がる必要があり、この立ち上がり及早まる側の誤りは許されない。従って、故障時には必ず遅れ時間が30秒より長くなるフェールセーフなONディレー⁵⁾を用いて、プレパージ時間の計時を行うものとする。

一方、点火操作時の未燃ガスの放出時間($\Delta t'_Q$ に相当、図では5秒)が誤って延長されると、許容限界を越えた未燃ガスが炉内に蓄積し、これに何らかの理由によって着火すると爆発事故に至ることがある。言い換えれば、ガス放出の許可信号は、点火終了後少なくとも5秒を越えて生成してはならず、時間が延長する側の誤りは許されない。従って、故障時には必ず遅れ時間が5秒より短くなるフェールセーフなOFFディレー⁵⁾を用いて、ガス放出時間の計時を行うものとする。

3.3 安全制御回路の構成

Fig. 4に、試作した安全制御回路の構成を示す。図で、 $G_1 \sim G_3$ は、フェールセーフなANDゲート⁵⁾である。 D_1 はフェールセーフなONディレーであり、プレパージ時間 Δt_P を計測する役割を担う。

D_2 はフェールセーフなOFFディレーであり、これを微分回路と直列接続することによって、点火操作の時間 $\Delta t'_Q$ を制限するためのフェールセーフなパルス幅制限処理回路を構成する。また、同図で、自己保持回路Mは、プレパージが行われたことを記憶する処理を行う。

ガス供給の許可信号X6は、ゲート G_4 でOFFディレーの出力信号X4と自己保持回路Mの出力信号X5の論理和として生成される。X4は、点火トランスを

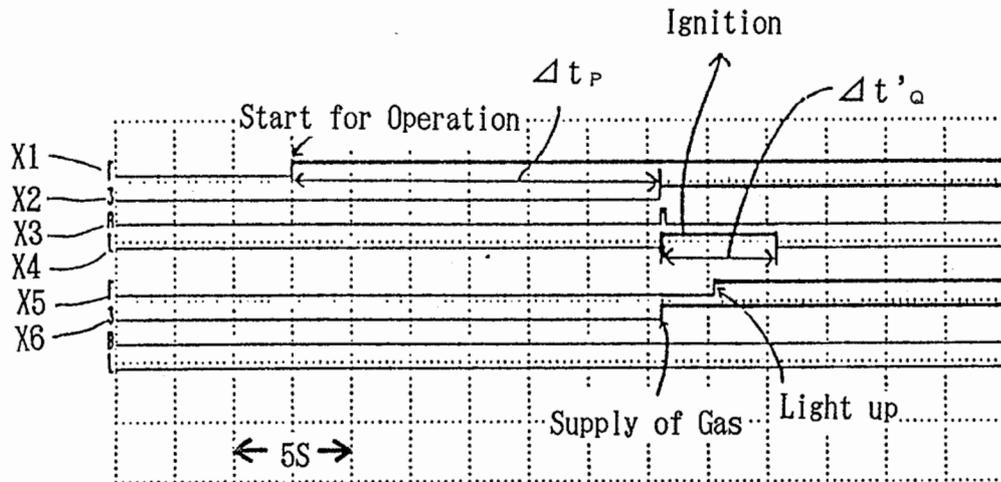


Fig. 5 Output Characteristics of Combustion Control Circuit
燃焼制御回路の出力特性

作動する点火信号の許可信号であるとともに、点火の際にバルブを開けるための信号を兼ねる（点火するしなに拘らず、バルブは駆動される）。

さらに、X4はトリガ信号として自己保持回路Mの○印側に入力される。点火して炎検知センサに炎ありを示す信号が生じると、ゲートG₃に出力信号Xfを生じ、Xfはリセット信号としてMに入力される。トリガ信号X4が生じているうちにリセット信号Xfが入力されると、X4は自己保持されX5が出力される。自己保持の解除は失火等により、リセット信号XfがOFFすることで実行される。したがって、自己保持回路Mの出力X5は、点火操作後、炎があることの確認に基づくガス供給の許可信号を示す。

3.4 制御回路の特性

Fig. 5に、試作した回路を用いて燃焼制御特性を実測した結果を示す。炉内温度が正常であれば、スイッチをONにすることによってファンが始動する。送風圧力が規定どおりなら、スイッチONと同時に出力信号(X1 = 1)を生じる。X1はファンの駆動の動作確認信号を示す。

X1 = 1が Δt_p の間(図では15秒)継続すると、ONディレーがX2 = 1を出力する。ここで、 Δt_p は必要とされるプレパージの時間に相当し、X2 = 1は排気が行われたことの確認を示す。

次に、X2の立ち上がりパルス(X3)をOFFディレーが $\Delta t'_a$ (図では5秒)だけ延長する(X4 = 1)。それと同時にX4がX6として出力される。点火ト

ランスの駆動時間内にガスに点火すれば、炎センサから「炎あり」の信号が送られ、X4が0となった後も自己保持回路Mの出力X5によりX6の出力が続き、燃焼が継続される。

もし、トランス駆動時間内(X = 1)に点火が行われなければ、ガスバルブは点火トライアルの終了と同時に閉じる。また、運転中に失火した場合、炎センサからの信号が絶たれ、自己保持回路Mがリセットされ(X5 = 0)、ガスバルブ駆動許可出力X6は0となる。さらに、運転中に温度異常が生じれば、X1の出力は0となり、上と同様にMがリセットされてガスの供給は禁止される。

4. 炎検知センサのフェールセーフ化

4.1 安全確認センサの構成

未燃ガスを検知する危険検出センサでは、その検知能力は危険状態にならないと証明できない。一方、未燃ガスのない正常な燃焼状態の安全確認のためには、「炎が存在している」ことを常時検出・通報すればよく、これにより検知能力が証明される。このような安全確認の炎検知センサは、次の2つのタイプに分類できる。

第一に、検知対象である炎のエネルギーを直接検出して安全情報を抽出するセンサである。このようなセンサを直動変換型センサと呼ぶ。第二に、検知対象(炎)に外部からエネルギーを放射し、検知対象によって変調された放射エネルギーを抽出することによって、

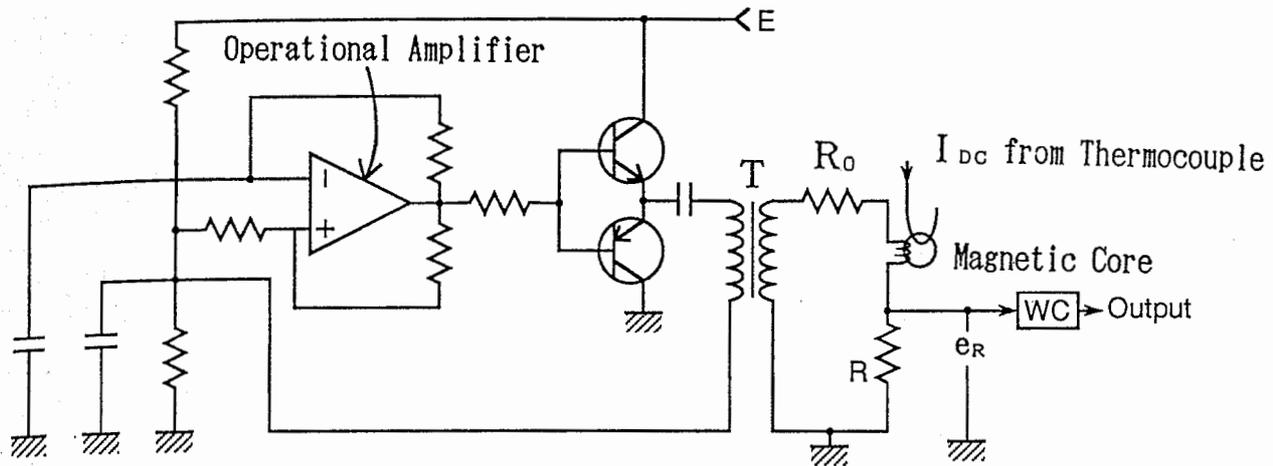


Fig. 6 Fail-safe Current Sensor
フェールセーフな電流センサ

安全情報を得るセンサである。このようなセンサを変調変換型センサと呼ぶ。

すべてのセンサは、上述のような直動変換型センサと変調変換型センサに分けることができる。これらのセンサでは、(安全)情報が物理的エネルギーを介して伝達する過程において、エネルギーが外部環境等の影響を受けるから、誤りを生ずる可能性がある。したがって炎検知センサでは、安全情報(炎あり)を高エネルギー(エネルギーあり)で伝達しなければならない。また、フェールセーフな信号伝達は情報がないにもかかわらずエネルギーを出力してはならない。

4.2 ボイラシステムにおける炎検知

失火状態で蓄積された未燃ガスへの着火よりボイラが爆発する場合があるが、この場合、安全な状態とは「未燃ガスが存在しない」ことである。換言すれば、「ガスが正常に燃焼している」ことであり、安全を示すために利用する物理特性は炎の持つエネルギーとなる。

炎検知センサは、この炎の持つエネルギーを検出して、ガスの供給に許可を与えるための情報を提供する。ここで、炎検知センサに要求される条件を挙げると、次のようになる。

- ① 炎があるときに限り出力を発生すること。
- ② 炎がないとき、あるいは疑似炎で偽の出力信号を発生しないこと。
- ③ センサ出力は、少なくとも数 V 程度の出力レベルがあること。

- ④ 失火後、2秒以内にガス供給を遮断して、未燃ガスの放出を防ぐこと。

- ⑤ 着火後直ちに起動して、燃焼継続を許可できるような出力を生成すること。

①については、炎の持つエネルギーをトランスジューサにより直接あるいは変調して抽出する形態があるが、実際のトランスジューサは燃焼に伴う物理化学現象、即ち発熱、発光あるいはイオン化現象等を捉えて、炎を検知することになる。

②に関しては、現在使用されている炎検知センサではセンサ故障時あるいは疑似炎により誤って検知信号出力を生成する恐れがあり、フェールセーフ化の検討が充分なされていない。

③に関しては、ノイズによる影響を受けにくくするため、後段の信号処理回路の入力として十分な出力レベルを確保するためである。

④に関しては、小規模ボイラでは、失火遮断時間を概ね $\Delta t = 2s$ としていることから、炎検知センサが失火を検知して OFF 信号となるまでの時間を 2 秒未満(ガス供給弁の応答時間があるため)と設定した。また、⑤は、起動時の応答特性を向上させるためである。

本論文では、直動変換型と変調変換型の 2 種類の既存のセンサを、以上の条件をすべて満たすフェールセーフな炎検知センサに転換することを試みる。そこで直動変換型センサの代表として熱電対を、変調変換型センサの代表として UV 管と超音波センサを取り上げる。

4.3 熱電対による炎検知

(1) 熱電対の問題点

熱電対は、炎の持つ熱エネルギーを電気信号に変換するトランスデューサであるが、通常その出力レベルは数 10mV 程度であり、明らかに 4.2 節の条件③を満足していない。このため、フェールセーフな増幅回路を構成して、熱電対の出力を増幅し、③の条件を満足するような出力を得る必要がある。

(2) フェールセーフな増幅回路の構成

熱電対で発生する微弱な電圧をフェールセーフに増幅するには、直流出力を何らかの手段で断続させて、交流信号として増幅する方法がある。これはフェールセーフな信号処理の常套手段であるが、断続させる回路の故障で断続信号のみが直接増幅回路に入力するような誤りを配慮するならば、熱電対で発生する直流電流をフェールセーフな方法で検出する方がよい。そこで、この直流電流を可飽和磁性体コアによる変調変換型センサで抽出する方法を採用した。

Fig. 6 に熱電対で発生する直流電流 I_{DC} を検出対象とする電流センサの基本構成を示す。トランス T は、万一この送信側に故障が生じた時でも、可飽和磁性体コアに直流電流が流れないようにするため設けてある。WC は、フェールセーフなウィンドウ・コンパレータ⁵⁾であり、前出のフェールセーフ AND ゲートの 2 入力を共通にしたものである。このフェールセーフなウィンドウ・コンパレータは入力レベルに対して上下異なるしきい値 ($V_L < V_H$) を持ち、これらしきい値の間 (すなわち、ウィンドウ) に入力があるときに限り出力信号 (論理値 1) を生じる素子である。さらに、この素子はウィンドウより高いレベルであっても、低い入力レベルであっても出力は 0 となり、また素子内部の回路が故障したときは出力 0 となるフェールセーフな特性を持つ。

Fig. 7 に示すような測定回路を用いて、可飽和磁性体コアによる変調出力特性 (すなわちインダクタンスの変化) を実測したところ、直流電流 I_{DC} の通電によって、抵抗 R の端子電圧の出力レベルは増加することが分かる。したがって Fig. 6 の回路で巻線 N_1 の入力信号を e 、抵抗 R の端子電圧を e_R 、巻線 N_1 のリアクタンスを X_O として、抵抗 R の端子側からみた出力側のインピーダンスが十分大きいものとするれば、正常な動作状態では、 e_R は次式で定まる。

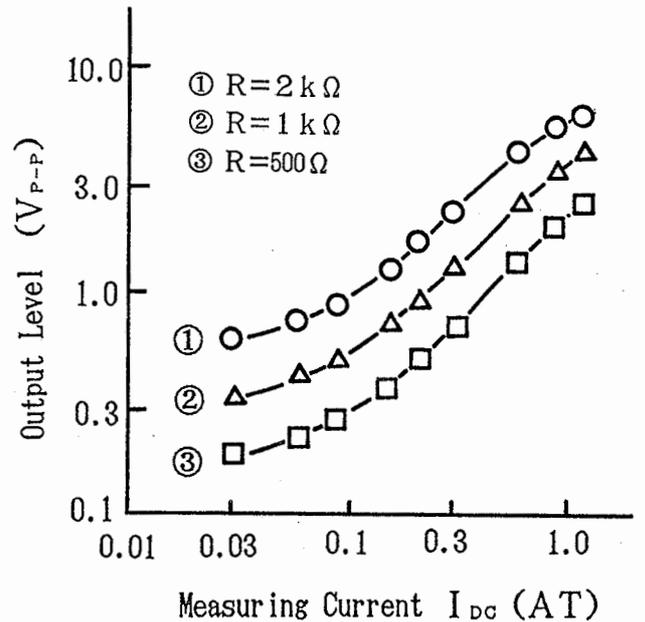
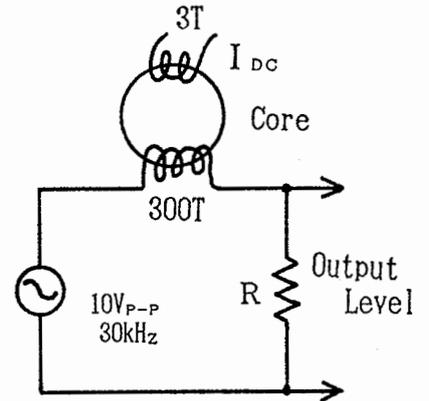


Fig. 7 Inductance Change according to Direct Current Generated By Super Saturable Magnetic Core
可飽和磁性体コアの直流電流に対するインダクタンスの変化

$$e_R = e \frac{R}{R_O + R + jX_O} \quad (3)$$

ここで、もし、抵抗 R が断線すると、出力信号 e_R は大レベル $e (> e_R)$ 、すなわち直接トランスの出力レベルとなる。故に、電流が流れていないのにも拘らず、抵抗 R に断線が生じても誤りの出力を生じないようにするには、WC の上側のしきい値 V_H の設定は、次式に基づかなければならない。

$$V_H < e \quad (4)$$

また、WC の下側のしきい値 V_L を所定の電流が流

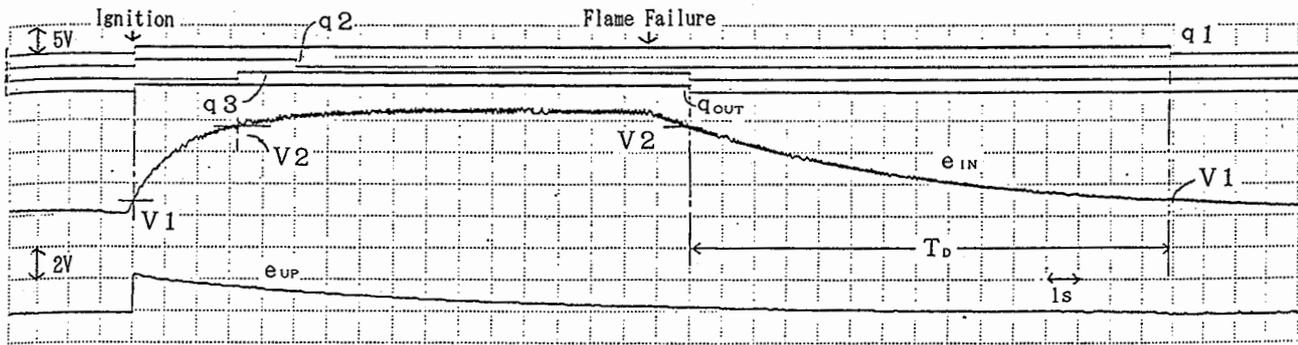


Fig. 8 Response of Thermocouple and Sequence Flow of Fail-safe Flame Detective Sensor for Thermocouple
熱電対の応答とフェールセーフ炎検知センサの動作

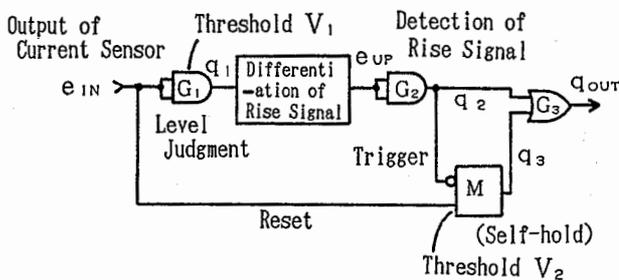


Fig. 9 Fail-safe Flame Detective Sensor Improved Response for Thermocouple
応答性を改善したフェールセーフ炎検知センサ

る。これによると熱電対自体の熱容量の影響により、特に立ち下がりが遅いことが分かる。

Fig. 9 は、Fig. 6 の電流センサを用いて出力応答特性を改善した論理回路のブロック図である。ここで、ゲート G_1 は熱電対 (すなわち電流センサ) の出力レベル e_{IN} が上昇する過程に対して低レベルしきい値 V_1 で出力を生じ、この出力信号は次段の自己保持回路 M のトリガ信号となる。また、自己保持回路 M は、電流センサ出力 e_{IN} に対して高レベルのしきい値 V_2 ($V_2 > V_1$) を持ち、この信号をリセット側入力として、 V_2 より高いレベルの入力がトリガ信号を自己保持する。

この回路の動作シーケンスを Fig. 8 に示す。ゲート G_1 は、電流センサのアナログ出力信号 e_{IN} に対して低いしきい値 (V_1) で出力を生じている ($q_1 = 1$)。この出力信号 $q_1 = 1$ のみにより、ガスバルブの開放許可を与えると、バーナ失火後からバルブ閉鎖までかなりの遅れ (T_D) を生じる。そこで、自己保持回路 M でリセット側入力端子を高レベルのしきい値 (V_2) で自己保持し、これにより熱電対電流の減少 (e_{IN} 低下) 時、直ちに出力 $q_3 = 0$ となる。

れるときのレベルに設定すれば、燃焼によって生ずる熱電対の電流が流れていて、かつ、センサ回路が正常であるときのみ出力を生ずるフェールセーフな回路構成を実現できる。

(3) 応答性の改善

次に 4.2 節の時間遅れの条件④、⑤を検討する。一例として、実際に炎検知に利用されている熱電対の応答特性を Fig. 8 の e_{IN} に示す。この e_{IN} は熱電対 (CA, $40\mu V/^\circ C$) をブタンガスバーナで加熱した後、加熱停止したときの熱電対出力電圧の変化であ

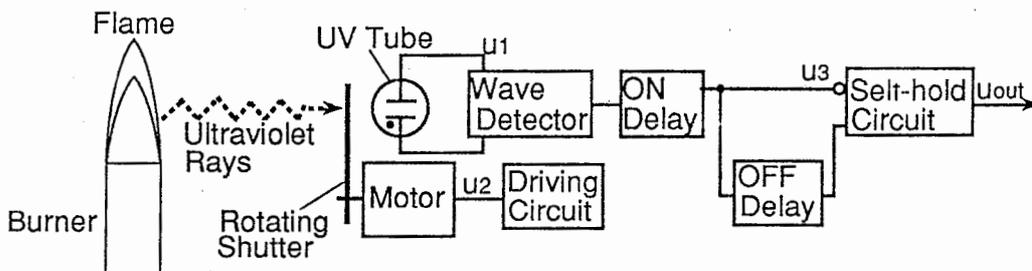


Fig. 10 Self-checking method of chopping type for UV tube
UV 管用チョッピング型自己検査方式

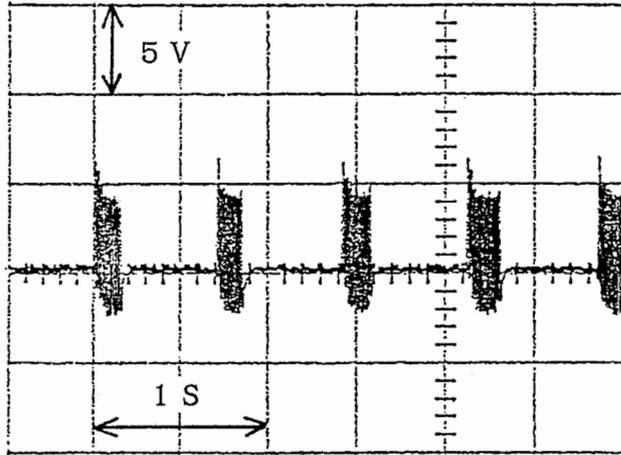


Fig. 11 Modulated Output Form of UV Tube
UV 管の変調出力波形

したがって、微分出力信号 e_{UP} (すなわち q_2) と自己保持回路の出力信号 q_3 の論理和 q_{OUT} をパルス開放許可出力とすれば、熱電対電流の立ち上がり立ち上りに高速応答を得ることができる。ただし、炉壁の蓄熱の影響を受けにくい位置に熱電対を設置する必要がある。

4.4 UV 管によるフェールセーフな炎検知

(1) UV 管による炎検知

UV 管は紫外線光電管とも呼ばれ、炎が放出する微弱な紫外線を高速に感知するものである。炎から放出される光の持つ波長は、可視領域から赤外領域が殆どであり、紫外線領域は 1% にも満たない。しかし、可視光線や赤外線を利用したセンサでは、炎だけでなく、炎によって熱せられた炉壁などからの放射 (その多くは赤外領域である) の影響を受けるのに対し、紫外線を利用したセンサではこれらの影響を受けることなく炎検知ができるという利点がある。

(2) フェールセーフ処理

UV 管は、光電面への紫外線入射により放出される光電子が電離して、放電状態となる現象を利用したものであり、入射光量に比例して出力パルス数が増加する特徴がある。また、UV 管における放電は高電圧の印加を必要としており、UV 管は変調変換型センサであるといえる。

しかし、紫外線入射がなくてもバックグラウンドによる過渡的な放電や、UV 管電極間の残留イオンの存在、UV 管への伝送線の浮遊容量による過渡放電電

流等によって、不要の誤放電を生ずる恐れがあり⁶⁾、4.2 節の条件①、②を満足しない。

そこで、Fig. 10 に示すように検査信号を用いて UV 管の正常性を確認する構成として、UV 管受光部前面にモーターによる回転シャッターを設けて、入射光を断続させる方式とした。機械式の検査信号生成手段を用いたのは、使用した UV 管の炎検知時の出力パルス周期が 100 Hz 程度であり、また応答の時間遅れが 2 秒まで許容できるためである。

Fig. 11 は、検査信号周期 0.72s により変調された UV 管出力である。入射した炎は、LP ガス用のブンゼン式ガスバーナの燃焼炎であり、UV 管はこのバーナから 30 cm 離して設置した。変調された UV 管出力信号がフェールセーフ処理されるための回路構成は Fig. 10 に基づく。変調された UV 管出力 u_1 は、フェールセーフな ON ディレーにより自己保持出力として生成される。すなわち、変調出力の立ち上がりより t_1 (=約 0.3s) 遅れて自己保持がセット (u_3) され、このセット信号の立ち上がりより t_2 (=約 0.9s) 遅れて自己保持のリセットを行う。このとき OFF ディレー時間 t_2 以内に再びセット信号が入力される (すなわち、正常な炎検知) と、自己保持回路は出力 u_{OUT} を保持する。したがって、この自己保持出力はフェールセーフな特性を実現できることになる。なお、燃焼の空気流量や炎の燃焼状態 (完全燃焼か不完全燃焼) を変えたところ、それぞれの波形の相違は見られなかった。

なお、UV 管が変調されていないパルスを出力していることは、自己放電等の故障状態を意味している。この故障発生時には、Fig. 12 に示すように自己保持出力は t_2 だけの偽の出力を発生してしまうが、これは 2 秒以内に消滅するため許容できるものである。

4.5 超音波センサによるフェールセーフな炎検知

(1) 超音波による炎検知

超音波センサは、Fig. 13 のようにセラミック振動子を持つ送・受信器を一对で持ち、規定周波数の超音波を送信、受信するものである。超音波を送信器より炎に照射すると、受信器でその反射波を抽出することにより炎の存在を検知することができる。この現象は、超音波が密度の違う媒質 (空気と炎) の境界面で屈折して伝播することにより起こる。したがって、超音波センサは送信器が検査信号発生器の役割を担い、受信器で反射波を受信していれば、炎の存在と

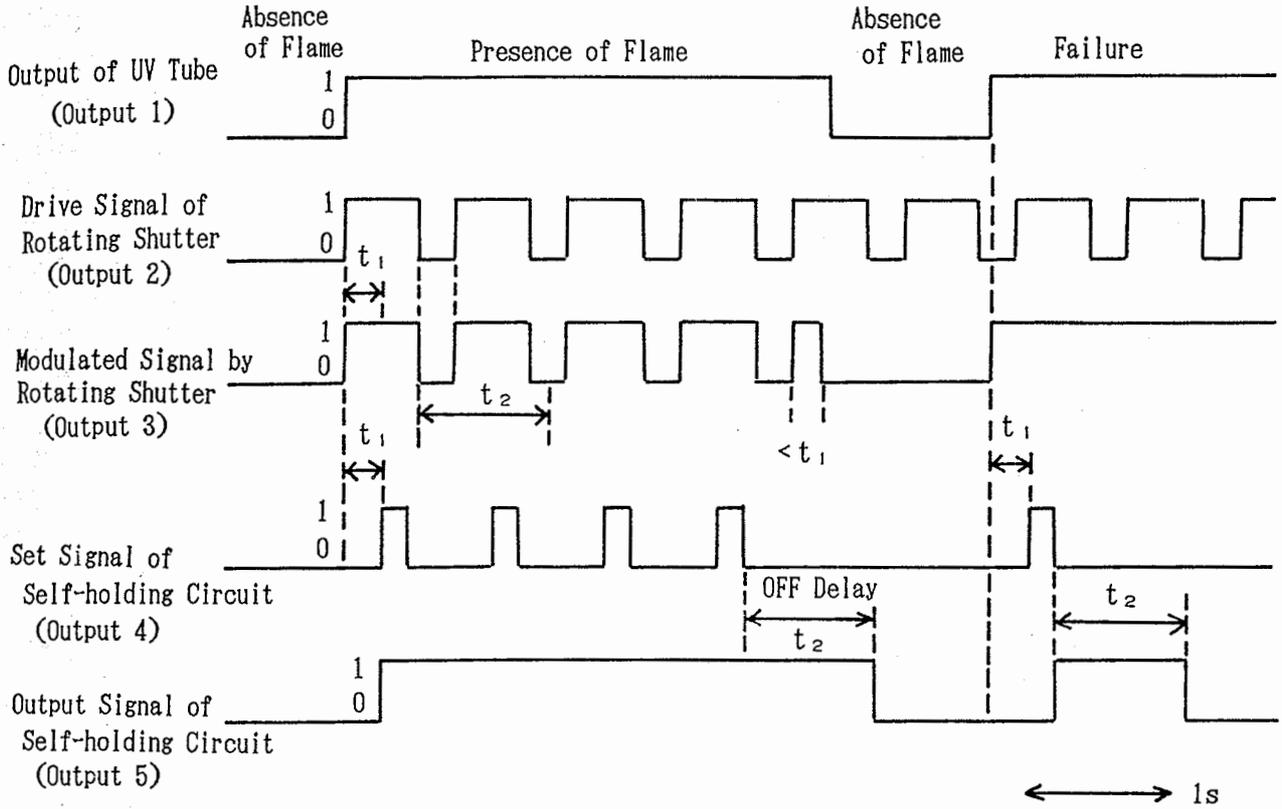


Fig. 12 Sequence Flow of Fail-safe Signal Process for UV Tube
UV 管におけるフェールセーフな信号処理

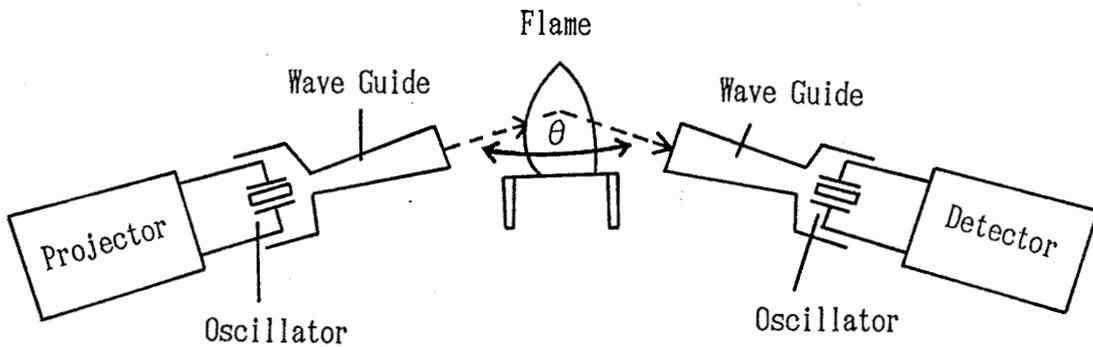


Fig. 13 Flame Detection by Ultrasonic Sensor
超音波センサによる炎検知

超音波センサの正常性を証明できることになる。

しかし、超音波センサを用いて炎からの反射波を受信する場合、場合によっては炎からの反射波の受信レベルと炉壁からの反射波による受信レベルが同等となる恐れがある。そのため、4.2 節の条件①、②を満足しない。

(2) フェールセーフな超音波信号処理方法

炎と外乱 (炉壁等) との弁別を確実にを行うためには、炎自体の特徴が抽出されねばならない。そこで、LP ガス用のブンゼン式ガスバーナの燃焼炎に 40 kHz の超音波を照射し、その反射波を受信したところ、Fig. 14 に示す受信波形が得られた。これは超音波センサの送・受信器配置角度 110° 、バーナと送・受信器間隔 60 mm の場合である。受信波形によると約 13 Hz

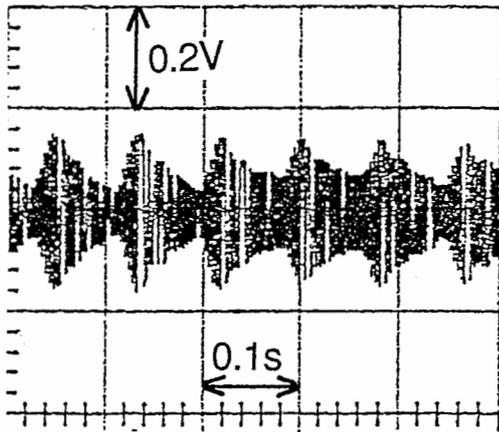


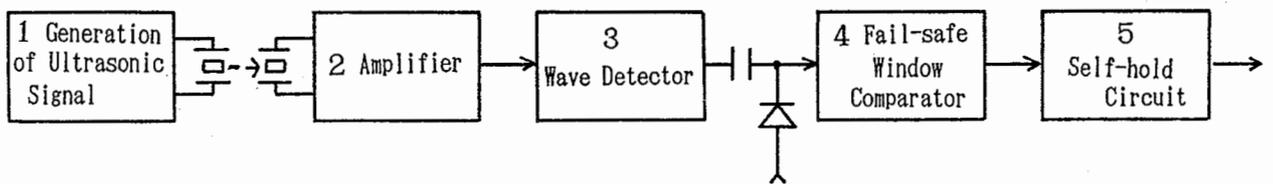
Fig. 14 Receiving Wave Form of Ultrasonic Sensor
超音波センサの受信波形

の変調信号（40 kHz の包絡線）が観測されており、この変調信号が炎の存在を意味する。この変調現象は、炎のゆらぎに起因しており、これは対流や生成ガスの膨張のため未燃ガス中に乱れが生じ、燃焼速度が変動して燃焼反応面が移動しているためと考えられる。

フェールセーフな信号処理は、変調された受信信号の包絡線検波により実現される。すなわち、送信器による検査信号（40 kHz）が、13 Hz で変調された信号を受信器で受信したときのみ炎有りと判断する構成とする。

Fig. 15 に、その構成ブロックと動作シーケンスを示す。変調された受信信号は検波器（包絡線検波器）

(a) Block Diagram



(b) Sequence Flow

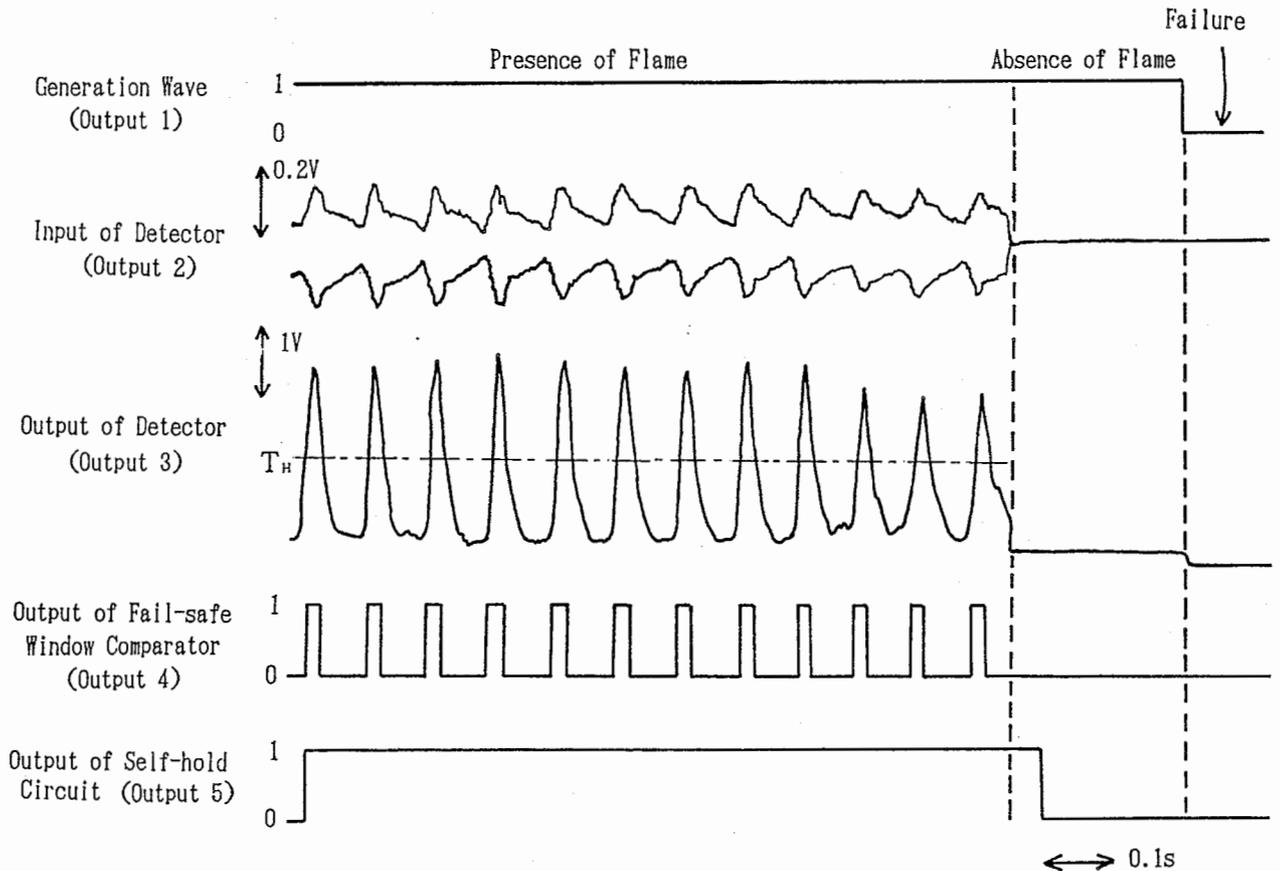


Fig. 15 Constitution and Sequence Flow of Fail-safe Ultrasonic Sensor for Flame Detection
炎検知用超音波センサの構成と動作シーケンス

により変調信号分（13 Hz 成分）のみとなり、これがフェールセーフなウィンドウ・コンパレータに入力されレベル検定される。そして、ウィンドウ・コンパレータ出力は自己保持されて最終的に炎有りの出力信号となる。なお、自己保持の回路のセット、リセット信号の前処理（ディレー時間の設定）は、Fig. 10 に準ずる。また、検波回路は具体的には絶対値回路とローパスフィルタにより構成され、その構成要素の故障により検波出力は零か直流にシフトするため、後段で弁別が可能となる。

また、炎の燃焼状態により変調信号の周波数に変動があるか否か調べたところ、空気流量が変化させても受信周波数は 12 ~ 15 Hz の間に収まっており、また、受信レベルのばらつきも大きくなく、ウィンドウ・コンパレータの検定に対して支障とはならないことが確認された。

5. 結 言

ボイラシステムは、工場だけでなく、病院、ホテル等の様々な場所で利用されている。特に、小規模ボイラ（ここでは、小型、簡易ボイラを含む）は中小零細企業で使用される場合が多いが、これはボイラ技士以外でも扱うことができるため、ボイラの異常時に人間が適切に対応できずに、事故を生じないとも限らない。そこで、人間の操作ミスやボイラの異常時には、人間に代わって事故に至ることを防止するための、フェールセーフな安全制御システムが必要となる。

本研究では、ボイラ制御系にフェールセーフな安全制御システムを導入するための基礎的考察を行い、以下の項目に関する試作と評価を行った。

1) 現状のタイマに代えて、フェールセーフな ON ディレー素子と OFF ディレー素子を新たに開発し、これを利用してフェールセーフな燃焼制御回路を構成した。これは、人間の操作ミスや制御回路の故障が生じて、未燃ガス規定時間を越えて放出することはなく、かつ、プレバージが規定時

間以上行われなときは、点火を許可しない構成の回路である。

2) 熱電対、UV 管、超音波センサをフェールセーフな炎検知センサとして改善するための実験的検討を行った。特に、熱電対式のセンサでは、可飽和磁性体を用いた電流センサと高速応答制御回路を試作し、安全性の向上を図る上で有用なことを確認した。

今後は、UV 管を利用した炎検知センサでは、可動部のない信頼性の高いシャッタ方式の検討を行う。また、超音波を利用した炎検知センサでは、実際のボイラでの実験を行う。さらに、燃焼制御系以外の温度制御系や圧力制御系に対しても、フェールセーフな安全制御系を導入していく予定である。

謝 辞

本研究の調査、実験についてご協力いただいた（株）三浦工業の一色龍興氏、ならびに日本信号（株）の坂井正善氏、蓬原弘一氏に深謝します。

（平成 4 年 4 月 30 日受理）

参 考 文 献

- 1) 産業安全年鑑，中央労働災害防止協会，昭和 33 年～平成 2 年版。
- 2) 南，ボイラ事故の動向，ボイラ年鑑，日本ボイラ協会（平成 2 年版）pp. 111-120.
- 3) 最近のボイラとその取扱い，日本ボイラ協会（平成元）p. 270.
- 4) 蓬原・杉本・向殿，安全作業におけるインタロックの構造と実現，電学論，Vol. 107-D，No. 9（1987）.
- 5) 糸川・杉本・深谷・梅崎・池田・清水，安全制御のための基本要素，産業安全研究所特別研究報告，RIIS-SRR-90（1990）.
- 6) UV tron の使い方，浜松ホトニクス技術資料 ET-04（1988）.