

ボイラ用安全弁の新機構と安全制御システムの開発に関する研究

清水尚憲* , 齋藤 剛* , 池田博康*

Development of a Fail-safe Safety Valve and Safety Control System for Boilers

by Shoken SHIMIZU*, Tsuyoshi SAITO* and Hiroyasu IKEDA*

Abstract: Boilers with high-performance control systems recently have been manufactured for power sources and heating and hot water supplies. These kinds of boilers have computerized control systems that enable high efficiency and fine operation without boiler operators. However, accidents such as explosion and destruction caused by over-pressure of boiler drums or high-pressure vessels may happen when sensors and controllers checking temperature, pressure, water level, and flames fail. Many explosion accidents are caused by the failure of sensors for boiler controls. In order to solve this safety problem, failsafe flame detectors for combustion control systems were developed in our former research project.

In this paper, steam temperature or pressure control, another important boiler control, is used for boiler system safety because the relationship between the temperature and the pressure of steam is unique. The following two safety elements for steam temperature control and steam overpressure have been proposed and applied to an actual boiler experimentally.

1) A new type of thermal switch with a reed-switching mechanism driven by a thermostatic ferrite material and two permanent magnets.

The thermostatic ferrite and permanent magnets have their own Curie temperatures, which are the changing points of their magnetic characteristics. When the steam temperature is over the Curie point of the thermostatic ferrite, a contact point of the reed switch element opens, and then a combustion valve shuts off. The interlock system using this thermal switch can be separated from the conventional temperature control system. As a result of experimental application of this switch to the actual boiler, the safety interlock function was verified to work even if the switching characteristics of the switch had a small off-delay.

2) A new type of safety valve constructed by a rare-earth permanent magnet with smart fluid.

Opening pressure of this safety valve can be set only by a magnetic force that makes magnetic or Magneto-Rheological fluid seal the valve seat. As this valve uses a constant magnetic force instead of a conventional spring force for the seal, force adjustment and leakage inspection are not necessary. In a preparatory experiment, it was proved that the seal performance was superior in the case of the mixture of the above two fluids. When this valve, filled with the mixed fluid, was installed in the actual boiler, its performance was confirmed through experiments.

Keywords: Boiler, Thermal switch, Thermostatic ferrite, Reed switch, Safety valve, Smart fluid, Magnetic seal, Failsafe, Interlock

1. はじめに

ボイラは近年高性能なタイプが次々と製品化されている。また、動力用、暖房・給湯用などその使用環境も様々である。このような中で、ボイラ制御は近年コンピュータによる高度な制御技術が採用されており、機能的には高いレベルの運転が可能となっている。しかし、センサや制御方式の中には、故障が起こると重大な災害を引き起こす可能性があるものがある。筆者らは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、フェールセーフなONディレー素子とOFFディレー素子を開発してきた。さらに、安全燃焼システムに関する検討を行い、プレバージが規定時間以上行われない時は点火を許可しない燃焼制御回路と、炎検知センサとして従来から使用されている熱電対、UV管、超音波センサをフェールセーフ化するための要件を提案してきた¹⁾。一方、ボイラ制御において安全上もう一つ重要な安全分野として、温度制御システムが挙げられる。すなわち、蒸気温度と圧力が一意的関係にあることから、容器や配管破壊に至る過度の圧力上昇を蒸気温度により監視することが可能である。そのため、従来熱電対やサーミスタ等の温度センサの利用が検討されてきたが、前者は検出精度や応答性が十分でなく、後者は制御のフェールセーフ化が困難とされているので、圧力スイッチや安全弁が今だに多く採用されているのが現状である。

そこで、本研究では、温度制御系のフェールセーフな制御要件を明確にすることを試み、従来の機械圧力スイッチに代わって、磁性材料の物性を利用して制御に依存しない温度スイッチを開発する。これは、強磁性体を加温するとキュリー温度以上で常磁性体となるという物理特性を利用してフェールセーフな特性を持たせたものであり、異常な温度上昇時にボイラの燃焼を遮断するインターロックを構成できる。今回は、実規模ボイラに適用できる仕様の温度センサを試作し、この温度スイッチの機能を検証して安全性能を評価する。

また、ボイラには、インターロックとは別に安全弁が装備されるが、従来の一般的な機械バネ式安全弁はシール部の性能劣化に伴う蒸気漏洩に起因する固着を危惧するために、定期的な点検が義務づけられている。本研究では、永久磁石の不変の磁気特性を利用して、磁気に応答する機能性流体を組み合わせた新しい液膜シール構造を提案し、一定のシール性能を維持できる磁気式安全弁を開発する。そのため、まず基礎実験用試作弁にて磁気式安全弁の基本特性を説明し、実際的な使用を考慮して設計した改良型安全弁を簡易貫流蒸

気ボイラに適用して、その機能を評価する。

2. フェールセーフな温度スイッチの開発

2.1 開発した温度スイッチの基本原則

Photo. 1 及び、**Fig. 1** に試作した温度スイッチの外観及び構成を示す。この温度スイッチはボイラ内部の蒸気圧力に対する飽和蒸気温度を監視するもので、高温高湿環境下において作動可能な感温フェライトとリードスイッチから構成される。感温フェライトはMn-Zn系のフェライトで、キュリー温度に達すると相転移によって透磁率が変わり、強磁性体から常磁性体へと変化する。一方、永久磁石のキュリー温度は、感温フェライトのキュリー温度よりもはるかに高い（例えば、フェライト磁石で約450）ため、感温フェライトの性質が変わる温度であっても永久磁石の性質は変化しない。この2つのキュリー温度の差によって生じる特性を利用してリードスイッチの接点を開閉することができ、感温フェライトのキュリー温度を温度制御の遮断温度と設定すると、この接点出力は温度制御のインターロックとして機能する。**Fig. 2 (a)** は感温フェライトのキュリー温度以下のときの動作を示しており、磁石、感温フェライト、リードスイッチ部を一巡する磁束 Φ_1 によりスイッチ接点は閉じ、磁石外部への漏れ磁束 Φ_2 はほとんどない。周囲温度が上昇するに従って Φ_2 は増大し、**Fig. 2 (b)** のようにキュリー温度を超えると、感温フェライト内部を通る磁束はなくなり、接点を通る磁束は Φ_1 と Φ_2 がほぼ等しくなって相殺される。この接点は外力が存在しないとき常時開となるようバネ特性を持たせてあるため、リードスイッチの接点出力はオフとなる。また、磁石や感温フェライトが破壊して磁束を喪失しても、オフ接点出力は保証される。**Table 1** に今回開発した温度スイッチの仕様を示す。

2.2 実験結果と考察

試作した温度スイッチの動作の検証と性能評価を行なうため、実規模小型ボイラ（多管式貫流ボイラ、最高圧力0.98MPa）を実験対象とした。温度スイッチの感温部は、直接蒸気に接する缶体上ヘッダの前方部分に10Aのソケットを設置し、そこに温度スイッチをねじ込み設置した。さらに端子より制御ボックスまで配線し、端子部分はシリコン製のゴムパッキンにて保護した（**Fig. 3** 参照）。

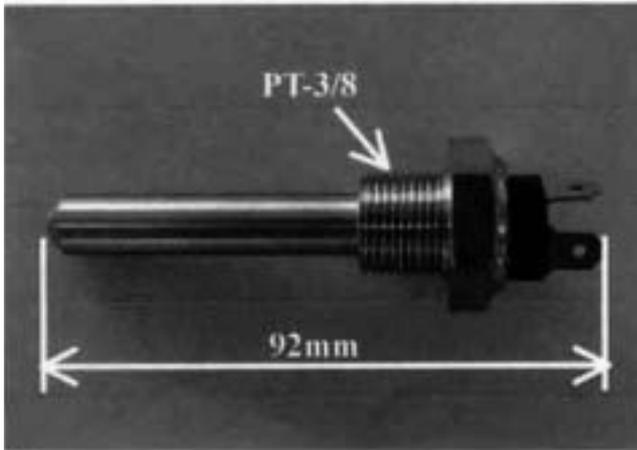


Photo. 1 Trial model of thermal switch.
試作した温度スイッチ

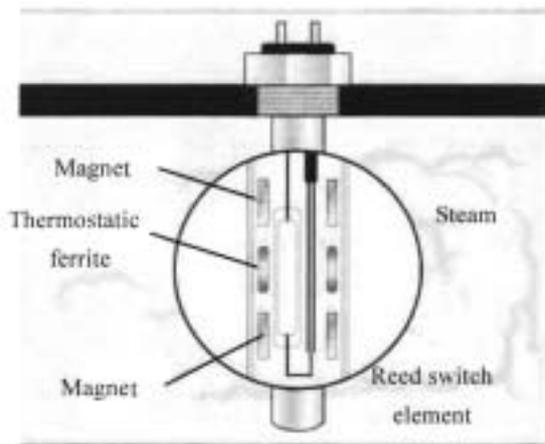


Fig. 1 A structure of thermal switch.
温度スイッチの構成

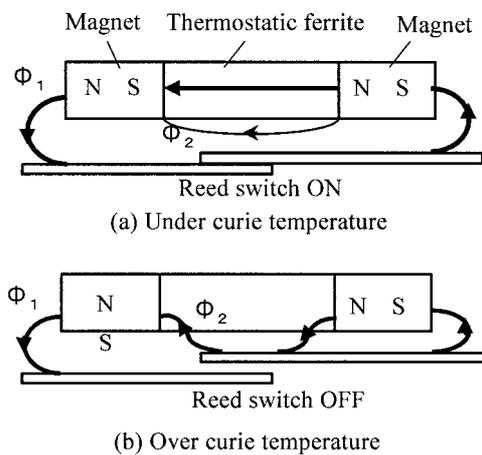


Fig. 2 Principle of reed switch action.
リードスイッチの動作原理

Table 1 Specification of thermal switch.
温度スイッチの仕様

項目	規格
温度特性	動作温度 (OFF 温度) 184±3.5℃
接点	形式 ブレーク接点
	最大開閉電圧 100V.DC
	最大開閉電流 0.3A.DC
	最小開閉電流 1mA/DC5V
	最大開閉容量 6W.DC
	最小開閉容量 0.1mW
接触抵抗 150mΩ Max	

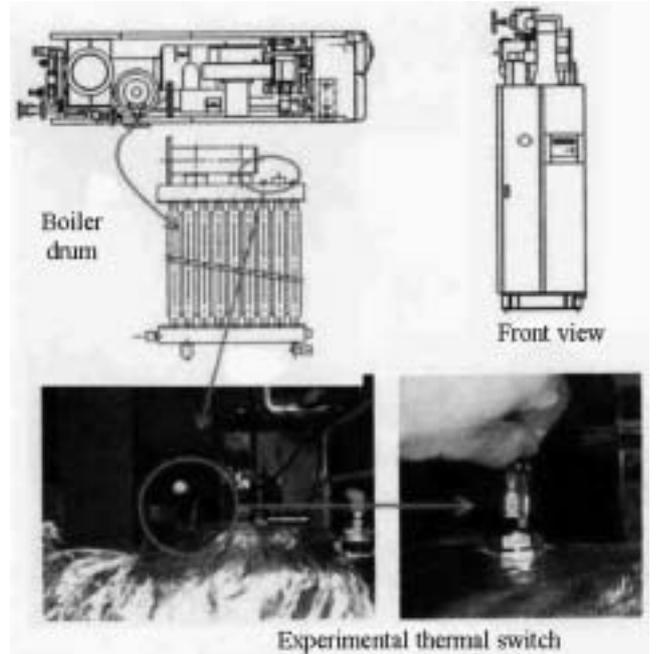


Fig. 3 Setting condition of thermal switch.
温度スイッチの取付け位置

対象ボイラを燃焼運転してボイラ内部温度が上昇するとき、温度スイッチがオフとなって燃焼を停止した後、再びオンとなる過程をFig. 4 に示す。実験に使用した温度スイッチは、動作温度が183 (対応圧力0.98MPa) と設定されたものであるが、若干の応答遅れ T_1 (Fig. 4 では $\Delta\theta_1$ に相当) を伴ってオフとなり、応答遅れ T_2 ($\Delta\theta_2$ に相当) を伴ってオンへ復帰する。このようなヒステリシス特性は磁気回路をもつ温度スイッチには不可避であるが、安全上の観点からはスイッチ接点の開く側、すなわちオフディレー T_1 を短くするか、あるいは $\Delta\theta_1$ を小さくすることが望ましい。そこで、対象ボイラの異なる運転モードにおいて、これらの特性がどう影響を受けるかを実験により検証した。

温度スイッチが作動する運転モードとして、Table 2 に示すように、冷態からの起動、0.8MPa圧力待機からの起動 (100% 燃焼)、0.8MPa圧力待機からの起動

(50% 燃焼) について実験を行なった。その結果、待機圧力状態から100%燃焼時の温度スイッチオフにおける動作温度のずれ $\Delta\theta_1$ が最大となり、そのときの内部圧力も最大になった。これは、温度スイッチ内部の熱容量により急激な圧力上昇に伴う温度上昇の伝達が遅れたことが原因と考えられるが、実際のボイラ運転において遅れ時間8秒は許容できる値であると考えられる。一方、燃焼停止後の温度低下は過程においては、ボイラの熱容量が大きいいため、温度スイッチオン時の動作温度のずれ $\Delta\theta_2$ は $\Delta\theta_1$ より小さい傾向が観測された。

Table 2 Experimental result of switching characteristics functioned by thermal switch.
温度スイッチの動作特性実験結果

	Thermal switch OFF				Thermal switch ON			
	P_1	θ_1	T_1	$\Delta\theta_1$	P_2	θ_2	T_2	$\Delta\theta_2$
	MPa	°C	sec	°C	MPa	°C	sec	°C
From cooling mode	1.26	193	12	10	0.96	183	0	0
From 0.8MPa (100% combustion)	1.36	197	8	14	0.80	177	47	-6
From 0.8MPa (50% combustion)	1.07	188	48	5	0.91	181	4	-2

本来、ボイラ運転を実行するための制御は、安全を確認して運転を許可するインターロックの出力を条件に行なわれなくてはならない。この温度スイッチを直接燃焼弁の開閉回路へ接続することで、機能的ボイラ制御とは独立したインターロックとして安全を確認することができる。ただし、今回試作した温度スイッチは、Table 1 で示したように直接燃焼弁を駆動できる接点容量を有していないため、別途フェールセーフなスイッチング手段を設ける必要がある。

今後は、温度スイッチの構造を工夫してオフディレイ時間をさらに短くするとともに、大容量接点を内蔵するように改良する必要がある。これらの課題が解決されて、簡便で安価な温度インターロックシステムが実用化されることを期待する。

3. 蒸気用磁気式安全弁の開発

3.1 安全弁の基礎的要件とシール性能

ボイラや圧力容器の破裂を防止する安全方策のうち、安全弁は、他の方策が作動しない状況においてその機能を果たすことが要求される最終的な手段である。このため、設定した吹出し圧力においても弁が開放しない、いわゆる弁の固着は完全に解消されなければならないが、この要求に対して最も重要となるのが、弁座面での内部流体の漏洩防止である。

例えば、蒸気用安全弁において弁座面から蒸気が漏

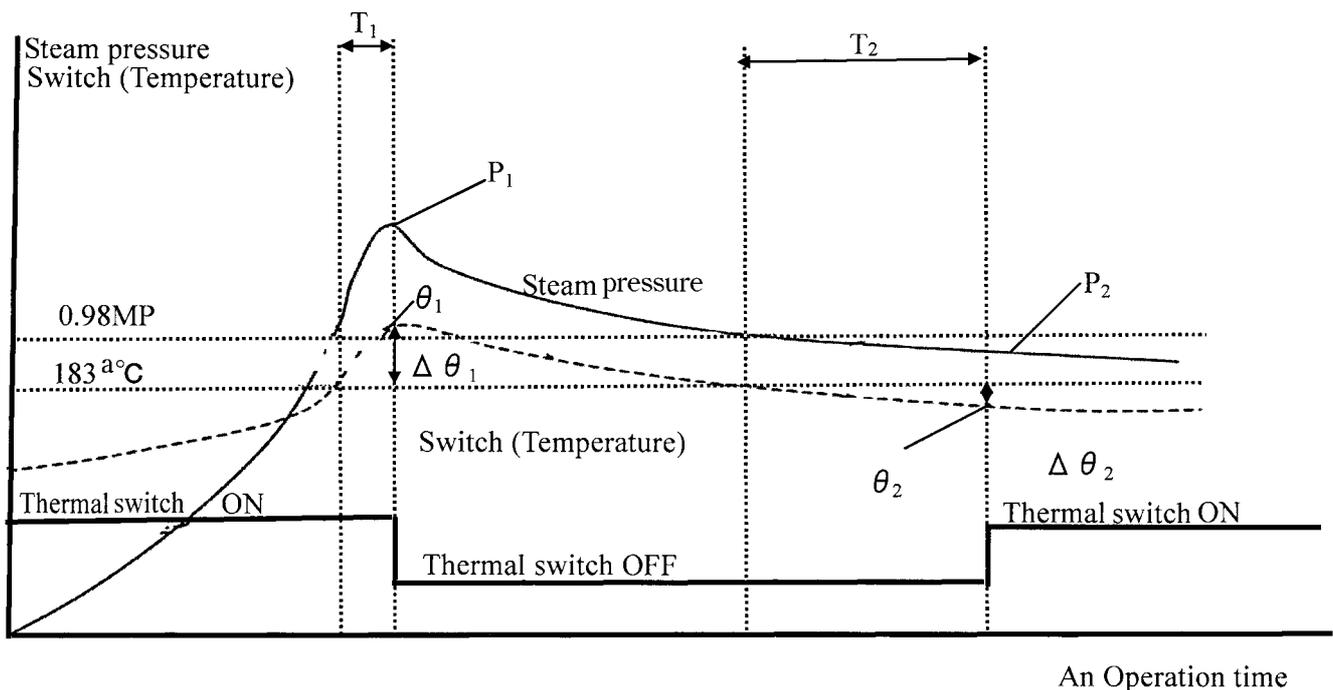


Fig. 4 Experimental chart expressing switching process of thermal switch
温度スイッチの動作過程図

洩すると、その際に析出するCaやMgがスケールとして溜まり、弁の固着を引き起こす。あるいは、漏れた蒸気が水滴となって弁周辺に付着すると、錆付き・腐食・凍結を生じて安全機能が失われる場合がある。このため、安全弁に関する規格類²⁾では弁のシール性能が重要事項として規定されており、これに応える様々な技術的対策が講じられてきた³⁾。

現在、ボイラ等で現在広く使用されているバネ安全弁は、金属同士の面接触で流体をシールするため、その流体圧力の1.5～2.0倍の押しつけ圧力をバネの反発力によって生成して、弁を弁座に押しつける構造を持つ。しかし、この構造では、内部流体圧力の上昇に応じて弁座面圧が低下するため、吹出し圧力付近でのシール性能の低下が物理的に避けられない。また、機械的シールは一般に大変デリケートで、接触面のわずかな傷や凹凸によって容易にその機能が失われ、一旦漏洩が生じて弁座面に損傷や異物のかみ込みが起これば、シール機能は回復しない。そして、固着の不安が解消されないため、安全弁の運用では定期的な性能検査が義務付けられているが、この検査の際の強制的な弁開放が漏洩を引き起こす原因の一つとなっており、矛盾を生じている。

そこで、本研究では、永久磁石による磁気吸引力で弁の吹出し圧力を設定し、さらに磁場にตอบสนองして液体中の分散粒子が凝集する機能性流体を用いて弁座のシールを実現することを試みる。この構造により、磁界の強さのみに依存する特性で蒸気をシールするため、圧力の上昇に伴ってディスクにかかる荷重が減少してもシール性能を維持することが可能となる。

3.2 磁気式安全弁の原理と構造

基礎実験用に試作した安全弁の外観を**Photo 2**に、その構造を**Fig. 5**に示す。ディスクと本体の双方に同じ大きさのリング形永久磁石が設置されており、これらの磁気吸引力によって吹出し圧力までディスクを保持する構造である。

一定の空隙をおいた磁極間の磁気吸引力は一般に次式で与えられる⁴⁾。

$$F = \frac{1}{2\mu_0} B^2 A \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 A は磁極面積、 B は永久磁石による空隙部の磁束密度である。新しい安全弁を開発するにあたり、本研究が永久磁石の作る磁気吸引力に着目した一つの理由は、近年、ネオジウム-鉄-



Photo. 2 Trial model of magnet loaded safety valve.
磁気式安全弁の構造

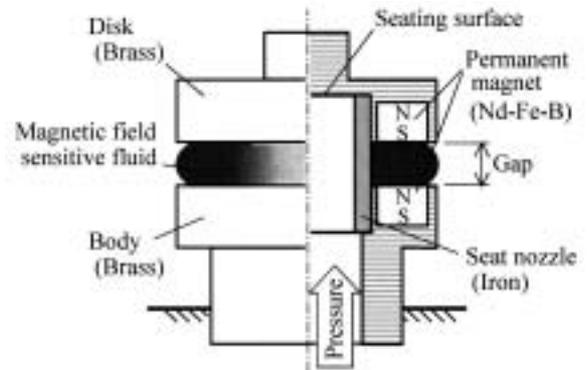


Fig. 5 Schematic structure of magnet loaded safety valve.
磁気式安全弁の構造

ボロン (Nd-Fe-B) 系やサマリウム-コバルト (Sm-Co) 系といった希土類磁石の磁気特性が大変向上しており、その経時劣化や温度変化は無視できるほど小さく、長期にわたり設定した吹出し圧 (押し付け力) を保証できる点にある。磁気特性の安定性を示す例として、パルス着磁されたNd-Fe-B磁石の常温における15,000時間後の永久減磁率を**Table 3**に示す⁵⁾。磁石の寸法比を最適化することで経時劣化がより少なくなることが分かる。なお、このデータは1994年に報告されたものであり、現在では着磁技術の進展に伴い減磁率はさらに小さくなっている。また、温度による永久減磁を示す例として、Sm₂-Co₁₇系磁石の573Kでの永久減磁率を3つの試料について測定開始時の残留磁束密度を100%として測定した結果を**Table 4**に示す。温度による永久減磁は比較的短時間で飽和することが一般に知られており、測定開始後1時間で1.0～1.4%減磁した後は1000時間後もほとんど変化していない。さらに、各磁性材料の諸特性値を**Table 5**に示す⁶⁾。Nd-Fe-B系磁石を使用すればより大きな磁束密度が得られるのに対し、Sm-Co系磁石を使用した場合には100Kの温度変化においても5%程度の増減しかない。

Table 3 Permanent loss factor of Nd-Fe-B magnet after 15000 hours⁴⁾.
Nd-Fe-B系磁石の15000時間後の永久減磁率

Diameter × Thickness	Permanent loss
φ 10 mm × 12 mm	-0.156 %
φ 10 mm × 7 mm	-0.235 %
φ 10 mm × 3 mm	-0.270 %

Table 4 Permanent loss factor of Sm₂-Co₁₇ magnet at 573 K.
573 KでのSm₂-Co₁₇系磁石の永久減磁率

Elapsed time (h)	Permanent loss (%)		
	A	B	C
1	-1.0	-1.4	-1.4
50	-1.0	-1.0	-1.0
100	-1.0	-1.4	-1.0
500	-1.0	-1.4	-1.4
1000	-1.0	-1.4	-1.4

Table 5 Magnetic properties of rare-earth magnets⁵⁾.
希土類磁石の諸特性値

Material	Residual magnetic flux density	Temperature coefficient	Curie temperature
Nd-Fe-B	1.43 T	-0.12 %/K	593 K
Sm-Co ₅	0.85 T	-0.05 %/K	1000 K
Sm ₂ -Co ₁₇	1.13 T	-0.03 %/K	1100 K

弁座のシールを実現するため、ノズルの材質を強磁性体（鉄）とし、対面する永久磁石の間に磁場に応答して分散粒子が凝集する特性をもつ機能性流体を充填した。分散粒子の凝集力は磁場の強さのみ依存し、ディスクが受ける荷重とは無関係である。このため、ディスク荷重が減少する吹出し圧力付近においても、永久磁石の作る磁場が変化しない限りシールとして十分機能し、弁座の気密性を維持することが可能である。充填する機能性流体として、磁性流体とマグネトロロジ流体（Magneto-Rheological fluid, 以下, MR流体と呼ぶ）の2つを検討した。

磁性流体は、液相中に直径5～10 nmの磁性微粒子を界面活性剤により安定に分散させたコロイド溶液であり、真空装置の回転軸用シールなどに広く利用されている。磁性流体の特性は、粘性を無視できる範囲であれば、Bernoulliの式に磁界の条件が加わった式で表

され、磁界が一様でなければ、磁性流体の位置の差が圧力の差となって現れる。すなわち、磁性流体を用いたシールの耐圧は次式で近似される⁷⁾。

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M dH \quad (2)$$

ここで、 ΔP は圧力差、 P_1 は磁界 H_1 における圧力（低圧側）、 P_2 は磁界 H_2 における圧力（高圧側）、 M は磁性流体の磁化の強さである。ただし、磁性流体によって得られるシール性能は1段あたり20～30 kPa程度が限界とされており⁸⁾、現実にも大気圧程度の低圧を仕切る用途がほとんどである。

一方、MR流体は、合成油等の流体中に直径数 μm 程度の強磁性粒子を分散させた懸濁液である。無磁界の状態では低粘度の液体として振る舞うが、外部より磁界を印加すると分散していた粒子が互いに連結してクラスタと呼ばれる架橋構造を形成し、磁場強度に応じた降伏値が誘起する特性をもつ。磁界でのMR流体の流動特性は次式で近似できる。

$$\tau = \begin{cases} \tau_{MR} + \eta \cdot \dot{\gamma} & (\tau > \tau_{MR}) \\ G \cdot \gamma & (\tau \leq \tau_{MR}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 τ はせん断応力、 γ はせん断ひずみ、 η は磁界に依存しない塑性粘度、 G はクラスタの剛性率であり、また、 τ_{MR} は磁界の印加によって生じる降伏値で、その大きさは磁界 H の関数⁹⁾として与えられる。この特性のため、MR流体によるシールでは、式(2)の右辺に誘起降伏値 τ_{MR} の影響が加わるため、その耐圧は次式で近似される。

$$\Delta P = \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M dH + C \tau_{MR} \quad (4)$$

ここで、 C はシール部の形状や厚さ等により決まる定数である。この結果、磁性流体の場合に比べて3～10倍のシール耐圧が得られるとされている^{10), 11)}。

以上の機能性流体を用いたシールでは、磁性体である分散粒子は磁界に拘束されて圧力に抗する。しかし、分散媒である液体は磁界の影響を受けないため、長時間圧力を受け続ければ少なからず流動する。結局、磁場に応答する機能性流体のシール耐圧は、凝集した粒子間の微小隙間に入り込んだ分散媒がその表面張力によって支え得る仕切り圧によって決定される¹¹⁾。したがって、さらに微小な磁性粒子を混入させて粒子間隙を狭め、さらに分散媒の表面張力を磁力の作用で増大

させられれば、より高いシール耐圧が得られると考えられる。これは、MR流体の分散媒を磁性流体に置換することを意味する。この考え方に基づき、本研究では、MR流体に磁性流体を混入した流体（Mixture of MR fluid and Magnetic fluid, 以下MMMと呼ぶ）を新たに作成し、そのシール性能についても検討することとした。

3. 実験結果と考察

3.3.1 安全弁の諸元と試料流体

Fig 5 に示した実験用安全弁では、永久磁石に外径34 mm×内径20 mm×厚さ1.8 mmのNd-Fe-B系磁石を用い、また、長さが異なる5種類のノズルを用意して間隙を調節できるようにした。MR流体を充填していない状態で間隙を1.0~2.0 mmまで変化させたときの磁束密度と磁気吸引力をFig. 6 に示す。両者とも間隙の減少に対して単調に増加する特性を示し、また、磁石間にはほぼ均一な磁界が形成されていることを確認した。また、磁性流体とMR流体は共に分散媒の主成分がポリ α オレフィンである流体を選定した。Table 6 に試料として用いた流体の主な諸元を示す。

3.3.2 流体充填時の磁気吸引力

弁本体を機械的に固定し、ロードセルを介してディスクを引っ張る方法で、流体の充填による磁気吸引力の変化を測定した。得られた結果をFig. 7 に示す。実験誤差を考慮すれば、磁性流体を充填した場合は空隙の場合と変化なく、MR流体とMMMの場合は荷重が増加し、MMMで最も大きくなった。この理由として、流体充填に伴う磁気的な変化よりも、各流体の流動特性の違いが大きく影響していると考えられる。すなわち、磁性流体では界面活性剤の効果により磁界を印加しても粒子同士は結合せず、磁界と平行な方向にはほとんど抗力を生じないが、MR流体では粒子同士がクラスタを形成し、これを引き離す力が必要となる。さらにMMMでは、磁性流体の分散粒子がクラスタに付着し、より強固な構造が構成されたために荷重が増加したと推察される。

3.3.3 吹出し圧力

弁本体入口側から空気圧をかけ、各流体を充填した際の吹出し圧力の違いを測定した。5回の測定より得られた吹出し圧力の平均値をFig. 8 に示す。磁性流体、MR流体（32 vol%）、MR流体（40 vol%）、MMMの順に吹出し圧力が高くなった。ただし、磁性流体の場合は、比較的低い圧力でまず前漏れが生じ、その漏れが連続的となった後に弁が全開となる動作であった。このため、磁性流体を安全弁のシールに用いることは困難と判断した。これに対し、MR流体とMMMの場合

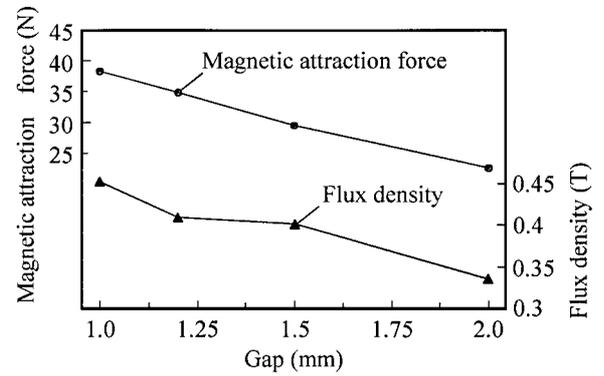


Fig. 6 Magnetic flux density and magnetic attraction force as functions of gap distance.
空隙の違いによる磁束密度と磁気吸引力の変化

Table 6 Sample fluids for experiments.
試料流体

Magnetic fluid (SIGMA HI-CHEMICAL Inc., P-206)	
Dispersed particles	Mn-Zn ferrite (Diameter \approx 10 nm)
Base liquid	Poly- α -olefin
Saturation magnetization	20 mT
Specific gravity	1.06
Magneto-rheological fluid (LORD Co., MRF-132LD)	
Dispersed particles	Iron (Diameter \approx 3 μ m)
Base liquid	Poly- α -olefin
Percent Iron	32 vol %, 40 vol %
MMM (Mixture of the above fluids)	
Mixture ratio	MR particle : 40.0 vol % Mn-Zn ferrite : 2.1 vol % Poly- α -olefin : 57.9 vol %

は、弁が開くまでは前漏れは一切確認されず、良好なシール特性が確認できた。試作した安全弁の構造上、各流体のシール耐圧は吹出し圧力とほぼ等しいと見なせる。

すなわち、MR流体では粒子濃度の濃い方がより高い圧力に耐え、また、MMMではさらにシール耐圧が上昇したと言え、シール性能が凝集したクラスタの間隙に強く依存することが示された。

3.3.4 吹出し圧力の誤差範囲

MR流体とMMMを充填した場合について、吹出し圧力の誤差範囲（=最大圧力値 最小圧力値）を比較した結果をFig. 9 に示す。最大でも14.7 kPaの誤差範囲に

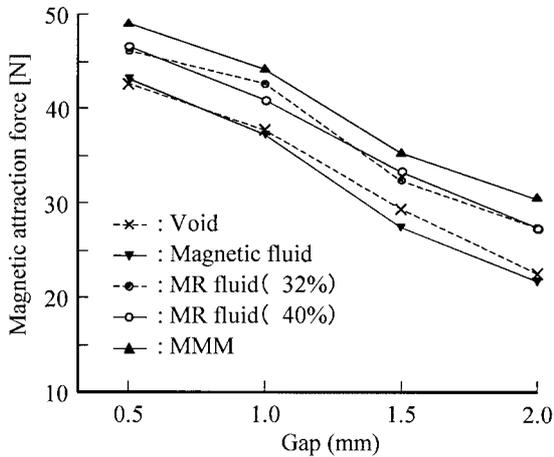


Fig. 7 The change of magnetic attraction force by filling sample fluids into the gap.
試料流体の充填による磁気吸引力の変化

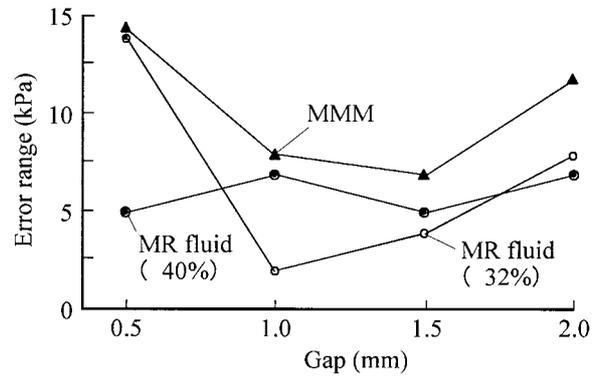


Fig. 9 Error range of popping pressure.
吹出し圧力の誤差範囲

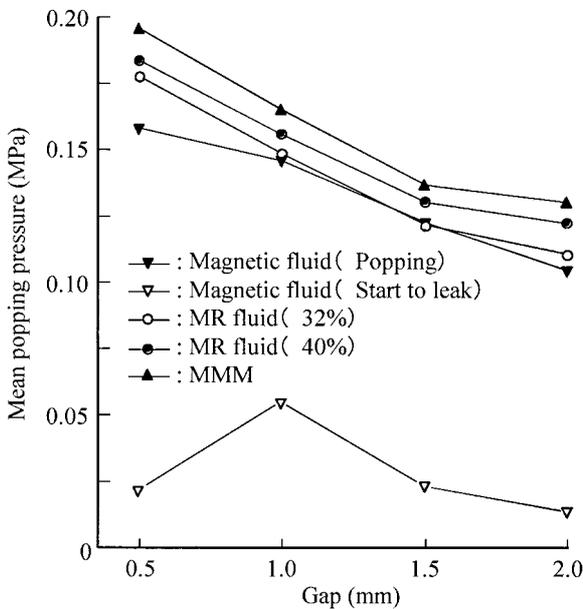


Fig. 8 Relationship between filled fluids and mean popping pressure.
充填流体と吹出し圧力の平均値との関係

収まっている。この値は、JIS規格で規定される許容範囲の約半分であり、磁気式安全弁が高い精度で吹出し圧力を設定できることが示された。しかし、流体や間隙の違いと誤差との間に有意な相関は見られず、このため、生じた誤差は磁界が作用する間隙へMR流体を充填する際に気泡が混入するなど、シールを均一に実現できなかったことに起因すると考えられる。

3.4 改良型安全弁の構造

前述した安全弁は、本研究で提案する磁気式安全弁の原理を最も単純に実現しているが、磁気回路が閉じていないこと、一部に鉄を使用していることなど、実際のボイラへの適用上改善すべき点が多い。さらに、前述したようにシール部に流体が不均一に充填され、吹出し圧力がバラつく問題もあった。そこで、これらの問題を解決できる新しい磁気式安全弁を考案した。改良型磁気式安全弁の外観をPhoto 3に、その構造をFig. 10に示す。



Photo. 3 Improved type of magnetic safety valve.
改良型磁気式安全弁

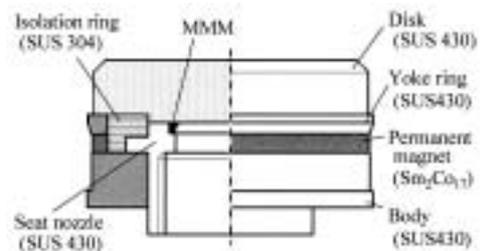


Fig. 10 Schematic structure of improved type of magnet loaded safety valve.
改良型磁気式安全弁の構造

改良型磁気式安全弁では、広く一般に採用されている安全弁の仕様を考慮し、ノズル径を20 mmとし、吹出し圧力0.5 MPaを目標に設計を行った。さらに、閉磁路が構成されるため磁氣的に有利となるため、高温での使用を考慮し、温度特性に優れる $\text{Sm}_2\text{-Co}_{17}$ 系磁石（外径50.6 mm×内径44.6 mm×厚さ3.5 mm）を採用した。また、耐腐食性を考慮し、非磁性体部品をSUS 304、磁性体部品をSUS 430で製作した。ただし、最も重要な改良点は、この弁では、ノズル口内側に設けられたシール部に流体を塗布した状態でノズルとディスクを押し付けた後、磁石とヨークを所定の位置に取り付ける手順で組み立てられるようにした点にある。すなわち、流体がその流動性により均一に広がった後から磁界を印加できるため、均一なシールの実現が期待できる。なお、前述した基礎実験結果より、充填流体にはMR粒子：Mn-Znフェライト：ポリ α オレフィンの体積分率が45：3：52のMMMを採用した。

予備の実験として、水槽中にて空気圧をかける方法で吹出し圧力と気密性を測定した。5回の測定の結果、吹出し圧力は 0.553 ± 0.009 MPaであり、概ね設計目標の吹出し圧力を達成できたばかりでなく、JIS規格で規定される許容範囲の約半分という高い吹出し精度を実現できた。また、吹出しを生じる前に弁座からの空気漏れは一切なく、目的の気密性が確保されていることも確認できた。

3.5 実環境試験と評価

蒸気圧を印加した場合の弁動作を確認するため、製作した改良型磁気式安全弁を簡易貫流蒸気ボイラ（三浦工業製、SU-200F）に設置して実環境試験を行った。ボイラ及び試験用配管の構成をFig.11に、また、その構成部品をTable 7に各々示す。ここでは、磁気式安全弁の入口側及び出口側の圧力を測定するとともに、安全弁内部の蒸気温度及び安全弁本体の温度を計測する。

実際のボイラの運用でよく見られる動作として、常温まで冷めた停止状態から炉を点火し、徐々に蒸気圧力及び温度を上昇させたときの様子をFig.12に示す。入口側圧力が約0.3 MPaに達した170秒後あたりから安全弁内部に高温の蒸気が回り込み、急激に温度が上昇するが、ほぼ設定圧力で弁が作動した。また、Fig.13は、ボイラを一時停止させ、約0.4 MPaの圧力が保持された状態から、再び圧力を上昇させたときの様子である。Fig.12の場合に比べ、長時間高温の蒸気に曝され、弁本体がより高温になったが、ほぼ設定圧力で弁が作動した。以上の結果、実際のボイラでの使用にお

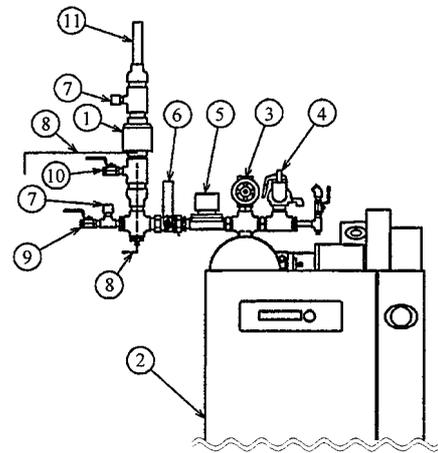


Fig. 11 Experimental equipment to evaluate valve performance under the practical use.
実環境試験装置の構成

Table 7 Components of experimental equipment.
試験装置の構成要素一覧

No.	Component
1	Magnet loaded safety valve
2	Steam boiler (MIURA Co.,Ltd., SU-200F)
3	Primary steam valve
4	Full bore spring loaded safety valve
5	Solenoid operated valve (for emergency shut-off)
6	Lever cock (for emergency shut-off)
7	Pressure transducer
8	K type thermocouple
9	Lever cock (for pressure relief)
10	Lever purge valve
11	Steam outlet tube

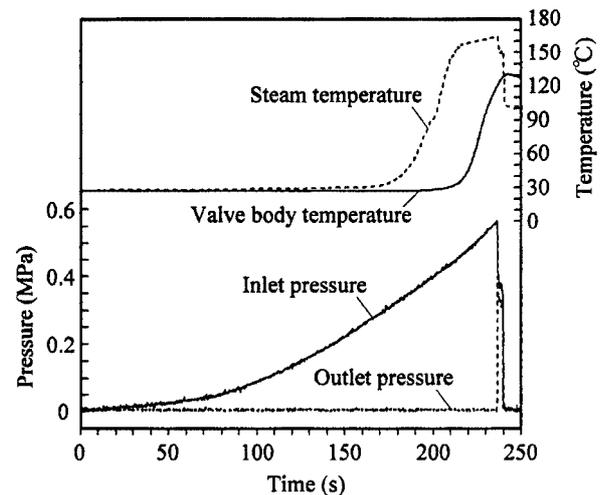


Fig. 12 Experimental result obtained under the situation that the boiler is started from completely stop condition.
実験結果の一例（ボイラを完全停止状態から起動させた場合）

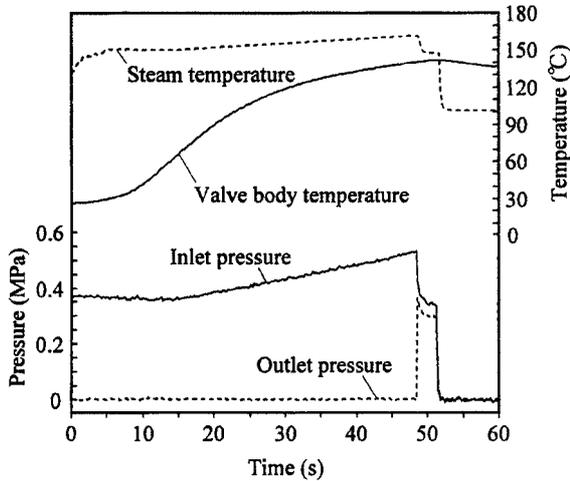


Fig. 13 Experimental result obtained under the situation that the boiler is restarted after temporarily stop.
実験結果の一例（一時停止状態からボイラを再起動させた場合）

Table 8 Relationships between popping pressure and valve body temperature.
吹出し圧力と本体温度の関係

Fluid	Popping Pressure	Valve body temperature	Relative error
Dry air	0.553 MPa	15.0 °C	—
Steam	0.566 MPa	119.6 °C	2.35 %
Steam	0.534 MPa	140.4 °C	-3.45 %

いても、提案する磁気式安全弁が有効に機能することが確認できた。

ただし、吹出し圧力の精度に関しては予備的実験時よりもバラつきが大きくなった。Fig. 12, 13に示した実際のボイラでの使用時と予備的実験時の弁動作を比較するため、吹出し圧力及び弁開放時の本体温度をまとめたものをTable 8に示す。吹出し圧力の誤差と本体温度との間に有意な相関が見られないことから、誤差を生じる理由については、温度ばかりでなく、蒸気に含まれる水分や蒸気に曝される時間といった影響を考慮する必要があると考えられ、今後の課題とした。

4. まとめ

蒸気用ボイラ等の比較的小規模なボイラはボイラ技士以外の作業者が取り扱うことができるため、運転異常時に適切な対応が期待できず、事故に至る危険性を否定できない。そこで、作業者の操作ミスやボイラの異常時には、作業者に依存せず必ず災害を防ぐこと

のできるシステムを構築しておく必要がある。

本研究では、既に提案したボイラ燃焼の安全制御システムに加えて、2つの重要安全要素として、温度制御システムのインターロック用のフェールセーフな温度センサと、ボイラ制御システムに依存しない最終的な過圧防止手段である安全弁について研究開発を行った。前者の温度センサは、ボイラの炉内温度を直接監視して設定温度に到達した時には確実に燃焼を遮断させることができ、その安全回路を専用回路とすることで機能的な制御による判断を必要としない簡便で安価な温度インターロックを実現した。また、後者の安全弁は、シール部の漏洩を完全に解消するために、永久磁石による磁気吸引力で吹出し圧力まで弁を保持し、さらに磁場に感応する機能性流体により弁座のシールを実現する新しい構造を提案した。

いずれの要素も基本性能と所要の安全機能を実現できることを確認したが、今後実用化に向けて、個体差の収斂やさらなる精度の向上を検討したい。

謝辞

本研究について多大な御協力をいただいた三浦工業株式会社の古川秀夫氏、安藤秀朗氏、森松隆史氏、NECトーキン株式会社の大内俊則氏、阿部和裕氏ならびに北九州市立大学の杉本旭氏に深謝します。

参考文献

- 1) 清水, 杉本, 池田, 梅崎, 小規模ボイラの燃焼制御回路と炎センサのフェールセーフ化に関する研究, 産業安全研究所研究報告RIIS-RR-91 (1991) pp.13-25.
- 2) 例えば, 蒸気用及びガス用ばね安全弁 JIS B 8210, 1994.
- 3) 笹川敬史「安全弁の技術」理工学社, pp.54-59, 2001.
- 4) 山田一, 宮沢永次郎, 別所一夫「基礎磁気工学」丸善, p.164, 1975.
- 5) 超高性能希土類-鉄系磁石の安定性と応用調査委員会「Nd-Fe-B系磁石の経時変化とその応用」電気学会技術報告, 484号, p.11, 1994.
- 6) 「TDK 技術資料」TDK, p.5, 2001.
- 7) 武富荒, 近角聡信「磁性流体-基礎と応用-」日刊工業新聞社, 1988.
- 8) 中江利昭監修「レオロジー工学とその応用技術」フジテクノシステム, p.779, 2001.
- 9) W. I. Kordonski, S. R. Gorodkin, Z. A. Noviova「The influence of ferro particle concentration and size on MR fluid properties」Proc. 6th Int.

Conf. on ERF and MRS , pp.535-542 , 1997.

- 10) W. I. Kordonsky , S. R. Gorodkin 「Magnetorheological fluid based seal」 Proc. 5th Int. Conf. on ERF and MRS , pp.704-709 , 1995.
- 11) T. FUJITA , K. YOSHIMURA , Y. SEKI , Gjergj Dodbiba, Toshio MIYAZAKI 「Characterization of magnetorheological suspension for seal」 Proc. 7th Int. Conf. on ERF and MRS , pp.709-715 , 1999.

(平成16年1月15日受理)