

8. 非対称誤り特性を有するガス検知システムの基礎的要件と構成法*

齋藤 剛**, 池田博康**, 杉本 旭***

8. Basic Requirements and a Construction Method for a Gas Detection System with Asymmetrical Failure Characteristics*

by Tsuyoshi SAITO**, Hiroyasu IKEDA** and Noboru SUGIMOTO***

Abstract : Gas detection systems in chemical plants are utilized for many purposes, e.g., to prepare material gas, to control process reactions, to monitor product quality and so forth. In a case that a gas detection system is used as a safety interlock system, which compels the plant operation to stop when it detects the leakage or the accumulation of flammable or toxic gas into the work environment, its structure must be essentially different from other systems so that its failure never causes an accident even if it causes false trips. The gas detection system with such asymmetrical failure characteristics, however, still has not been developed because it is basically impossible to generate the energy of sensor signal output from the state that objective dangerous gas does not exist in a monitored area atmosphere.

In this report, a construction method to realize the gas detection system having the asymmetrical failure characteristics is deduced from logical considerations concerning generalized structural requirements of hazard detection systems. This method is also examined by applying to a trial system composed of a gas-chromatograph with a thermal conductivity detection unit (TCD) and a 3-channel diverse programmable logic controller. In this method, the asymmetrical failure characteristics are functionally achieved by automatically and frequently testing the normalcy of the TCD before every gas detection operation. The normalcy of the TCD is judged by comparing a preset pattern and a response waveform of the TCD corresponding to a dummy input of the dangerous gas. The gas-chromatograph is adopted to obtain the high reproducibility of the response waveform in the normalcy diagnosis operations and to confirm the normalcy of gas filtering function to separate interference gases from the atmosphere. From experimental results, it is confirmed that the trial system is able to execute the objective operation sequence composed of the gas detection and the normalcy diagnosis under the condition of the asymmetrical failure characteristics. Moreover, the safety performance of the trial system is quantitatively evaluated on the basis of the frequency of the operation sequence.

Keywords; Chemical process, Safety interlock system, Gas detection, Asymmetrical failure characteristics, Normalcy diagnosis, Gas-chromatograph, 3-channel diverse programmable logic controller.

* 平成 11 年 11 月 第 42 回自動制御連合講演会, 平成 11 年 11 月 第 32 回安全工学協会研究発表会, 平成 12 年 8 月 日本機械学会 2000 年度年次大会において, 本研究の一部について発表した。

** 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

*** 北九州市立大学国際環境工学部環境機械システム工学科 The University of Kitakyusyu, Faculty of Environmental Engineering, Department of Mechanical Systems and Environmental Engineering

1. はじめに

近年、産業の発展に伴い、各種化学プラントや製造プロセスで使用されるガス状物質はますます多様化しており、その中でも、半導体製造工程等で見られるように、従来のガス類に比較して極めて強い毒性を有するものや広い爆発限界範囲を持つもの、自然発火性などの特異な危険性を持つものが大量に使用されつつある¹⁾。このため、ガスの漏洩を本質的に防止する本質安全設計の導入ばかりでなく、作業環境のガス濃度を常に監視し、異常を検知したらガスの供給を遮断するシステム（インターロックシステム）の構築が、災害防止対策上、重要となってきた^{2), 3)}。

ただし、プロセス制御や品質管理のために種々の物理量を検出するセンサシステムと、災害防止のために特定の危険状態が生じていないことの判断に基づいて運転を許可するインターロックシステムでは、実現すべきシステムの特徴が明らかに異なる。すなわち、後者では、信頼性よりも安全性が優先されなければならない。危険でないときに運転を停止してしまう故障は起こり得ても、危険なときに誤って運転を継続してしまう危険側故障だけは決して起こさないという非対称な誤り特性が要求される。

しかし、ガス検知システムに関する現行の国内法規⁴⁾や国際規格⁵⁾では、検知精度や応答性等に関する規定はあっても非対称誤り特性に関する要求は示されていない。このため、現実には、災害防止に関連するか否かに関わらず、基本的に同じ構造のシステムが利用されている。また、接触燃焼式や半導体式等の多くのガス検知センサ⁶⁾が研究・実用化されているが、非対称誤り特性を実現したものはない。特に、断線等を自動的に診断する技術は確立しつつあるが、センサ表面の汚れといった検知機能自体の故障や劣化は考慮されておらず、ガス検知システムが正常に作動していたことは、検査員の定期的な検査校正によって事後証明されるのみである。

本報では、自動化された検知動作の過程で、ガス検知に先んじてシステムの正常性確認を実行することにより、非対称誤り特性を機能的に実現するガス検知システムの構成法を検討し、一実現例として、熱伝導度センサを検知器とするガスクロマトグラフと異種多重化論理に基づく三重化プログラマブルコントローラ⁷⁾（以下、単に三重化PLCと呼ぶ）を用いたガス検知システムを提案する。動作確認実験の結果から提案する構成法を検証し、実プラントへ適用する際の解決すべき課題等について考察する。

2. 非対称誤り特性を持つ検知手段の構成論理

2.1 インターロックシステムと検知手段の条件

一般化されたインターロックシステムの論理モデルをFig. 1に示す。ここで、 C は作業領域、 D は危険検知手段（以下、単にセンサと呼ぶ）、 G はAND回路、 N は否定演算回路である。作業領域 C の状態を2値の論理変数 $H \in \{1, 0\}$ で表し、運転を停止すべき危険な状態にあるときを $H = 1$ と表す。また、センサ D は $H = 1$ のときに信号エネルギーが高レベル側にある信号出力 $f(H) = 1$ （典型的にはON信号）を生成するとし、さらに、AND回路 G は領域 C が危険でなく（ $H = 0$ ）かつセンサ D の出力の否定 $\overline{f(H)}$ が1のときに限り、作業命令 $M \in \{1, 0\}$ （命令ありを1とする）に応じて運転 $E \in \{1, 0\}$ （運転中を1とする）を許可するものとする。全ての要素が正常であれば運転 E は次式で表される。

$$E = \overline{f(H)} \wedge M \quad (1)$$

しかし、Fig. 1のシステムでは、故障や劣化のためにセンサ D が $H = 1$ にも拘らず $f(H) = 1$ を出力できない場合、誤って $E = 1$ となる危険側故障を生じる。このことを論理的に表現するために、各要素の動作状態を各々 $D^* \in \{1, 0\}$ 、 $N^* \in \{1, 0\}$ 、 $G^* \in \{1, 0\}$ で表し、正常時を1、故障時を0とすれば、運転は改めて次式で表される。

$$\begin{aligned} E &= \overline{f(H)} \wedge N^* \wedge G^* \wedge M \\ &= \overline{(H \wedge D^*)} \wedge N^* \wedge G^* \wedge M \\ &= \overline{(H \wedge D^*)} \wedge N^* \wedge G^* \wedge M \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)より、危険側故障の可能性を排除するためには、否定演算回路 N を用いず、センサ D が $\overline{H} = 1$ のときに直接 $f(\overline{H}) = 1$ を生成・出力し、正常でないときには \overline{H} に関わらず $f(\overline{H}) = 0$ （典型的にはOFF信

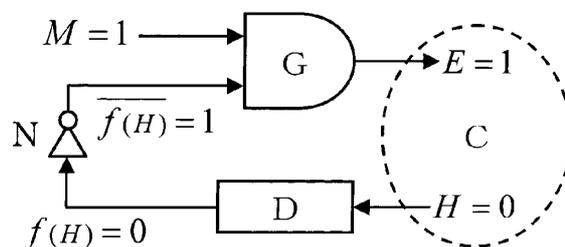


Fig. 1 Logical model of interlock system including NOT function.
否定演算機能を含むインターロックシステムの論理モデル

号)となる特性を持つべきことが分かる。すなわち、

$$f(\bar{H}) = \bar{H} \wedge D^* \quad (3)$$

このとき、運転は次式で表される。

$$\begin{aligned} E &= f(\bar{H}) \wedge G^* \wedge M \\ &= \bar{H} \wedge D^* \wedge G^* \wedge M \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)に対応するインターロックシステムの論理モデルをFig. 2に示す。センサDの出力 $f(\bar{H}) = 1$ が正に単調な論理的關係(これをユネイトな關係⁸⁾と呼ぶ)で伝達され、 $E=1$ が得られることが分かる。

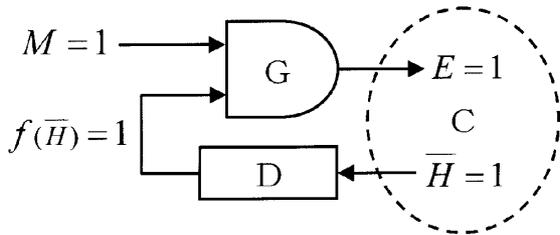


Fig. 2 Logical model of interlock system conforming equation (4).

式(4)に対応するインターロックシステムの論理モデル

式(3)、(4)は、鉄道・機械システム・化学プラントの各分野において、経験的に知られてきた安全対策上の信号処理技術を論理的に一般化した式である。例えば、タンク内の液面レベルを監視する場合、通常、上限監視には音叉の原理を用いた振動式レベルセンサが、また、下限監視には液体を介して超音波振動を伝達する透過型レベルセンサが利用される⁹⁾。振動式レベルセンサは、音叉部が液体に触れると振動が減衰して出力が減少する特性を持つ。このため、上限監視において液体が存在しない状態($\bar{H}=1$)でセンサ出力が最大($f(\bar{H})=1$)となり、断線や振動体の破損等($D^*=0$)による出力の低下($f(\bar{H})=0$)を危険と見なして検出できる($E=0$)。他方、透過型レベルセンサによる下限監視では、液体が存在しないか又はセンサが故障すると超音波振動が十分に生成/伝達されずに出力が低下し、式(3)に示した非対称誤り特性が実現される。

2.2 非対称誤り特性の実現手法

式(3)に従えば、非対称誤り特性を持つガス検知システムには、監視領域の混合気体中に危険ガス成分が含まれていない状態から直接エネルギーを生成・抽出できるセンサが必要となる。しかし、ガス

検知センサは、本質的に、検知対象となるガス成分(以下、これを危険ガスと呼ぶ)に起因する特定の物理化学的変化を捉え、これを信号エネルギーに変換するトランスデューサであって、明らかに式(3)の条件を満足しない。このため、何らかの工夫が必要となる。

式(3)を満たしつつ、監視空間内に特定の危険物質や障害物が存在しないことを検知する手法は、原理的に次の四つに大別できる。

- 監視空間に何らかのエネルギーを放射し、危険物質に阻害されずに通過したエネルギーを検出する、
 - 特定の素子や要素の特性を利用し、Fig. 1で回路Nが行っている否定演算を物理的に実現する、
 - センサにオフセット入力を与え、その出力を二つの異なるしきい値を持つ比較演算回路(これをウィンドウコンパレータ¹⁰⁾と呼ぶ)によって処理する、
 - 監視空間の危険検知動作に先んじて、擬似的に入力された危険物質を検出してセンサの正常性を確認し、非対称誤り特性を機能的に達成する。
- 以下、ガス検知システムへの適用を考慮しつつ、各手法を説明する。

1) 手法A

手法Aは、投光器と受光器よりなる光線式安全装置や前述の透過型レベルセンサ等に見られる手法で、これら四つの手法のうち最も一般的な手法である。手法Aでは、感受要素に達したエネルギーが真に放出要素から放射されたエネルギーであることを確認できれば、式(3)の条件が満足される。

ガス検知方式のうち、ガス分子に赤外線あるいは紫外線領域の光を当てると、その分子構造に固有な特定波長の光だけが吸収される現象を利用した光吸収方式^{11)、12)}には、この手法Aが適用可能である。一例として、非分散型赤外線式センサの構成をFig. 3に示す。光源より照射される赤外線の特長成分の強度を検出し、基準値との差から危険ガス濃度を

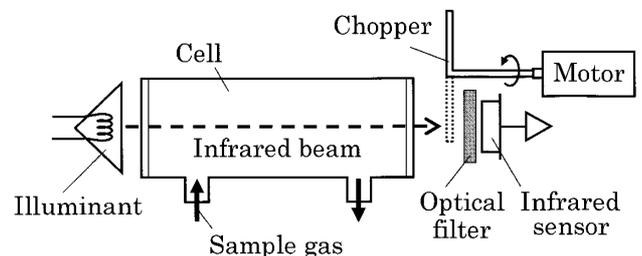


Fig. 3 Non-dispersive infrared absorption type of gas detection sensor.

非分散型赤外線式ガス検知センサ

検知するもので、原理的に危険ガスの存在を出力が低下する特性で検知できる。さらに、Fig. 3 に示した例では、外乱光の影響を除去するためにチョッパで赤外線を断続しているが、これにより投受光子自体の正常性を確認することも可能である。現状では、測定系の光学的変化や温度変化の影響を受け易い等の問題¹¹⁾があるが、非対称誤り特性を実現し得るガス検知方式の一つとして期待される。

2) 手法B

手法Bの例として、ロボットの関節駆動用モータの通電状態を監視する過飽和特性を有する磁性体コア（過飽和磁性体コア）を用いた電流センサ¹²⁾をFig. 4 に示す。モータ駆動電流が流れると、コアが磁氣的に飽和して励磁コイルから入力される交流信号が十分に伝達されず、抽出コイルの出力が低下する。コアの破損や断線等の故障時にも同様の出力低下が起こるため、式(3)を物理的に満足できる。ただし、過飽和磁性体コアと同様の機能をもつガス検知に利用可能な素子又は要素は知られておらず、手法Bをガス検知システムへ応用することは大変困難である。

3) 手法C

ウィンドウコンパレータは、アナログ信号のレベル検定に利用される演算回路で、入力電圧（センサの出力）がある定められた範囲にあるときに限りON信号を出力する機能を持つ。手法Cは、検知対象の危険物質や状態と等価な擬似的危険をオフセット入力としてセンサに与え、これに対するオフセット出力が真の危険を検知した出力に重畳する構成とした上で、センサ出力をウィンドウコンパレータでレベル検定するものである。オフセット入力 $H_0 \in \{1, 0\}$ に対して $f(H_0) \in \{1, 0\}$ が出力されるとすると、ウィンドウコンパレータの検定出力 $W_0 \in \{1, 0\}$ (正

常時を 1 とする) は次式で与えられる。

$$W_0 = (\overline{f(H)} \wedge f(H_0)) \vee (f(H) \wedge \overline{f(H_0)}) \tag{5}$$

式(5)の右辺第2項より、 $f(H) \wedge \overline{f(H_0)} = 1$ が起こると（すなわち、センサは正常であるが、オフセット入力の変動又は消失した状況で、真の危険が発生すると）危険側故障を生じることが分かる。このため、例えば、過大な荷重を検知するセンサでは、 $f(H_0) = 1$ を自重等の初期荷重によって得る構造とし、オフセット入力 H_0 の不変性を保証する。 $f(H) \wedge \overline{f(H_0)} = 0$ が保証されれば、 $f(H_0) = 1$ で等価的にセンサの正常状態 $D^* = 1$ が表され、式(3)の条件を満たしつつ否定演算機能を実現できる。すなわち、

$$W_0 = \overline{f(H)} \wedge f(H_0) = \overline{f(H)} \wedge D^* \tag{6}$$

ガス検知システムに手法Cを適用する場合、正常性確認用として、作業環境から抽出した試料ガスに常に低濃度の危険ガスを混合しておく方法が考えられる。しかし、他の検知手段や制御手段を用いずに物理的方策のみでガスの混合濃度を一定に保つことは一般に困難である。さらに、混合濃度が一定であっても、表面の汚れ等の影響でセンサ感度が低下する過程で、この低下の度合いと全く一致して真の危険ガス濃度が上昇した場合には、誤って運転が継続される恐れがある。

4) 手法D

手法Dは、正常性確認と危険検知からなる検知プロセスを繰り返し実行することで、非対称誤り特性を機能的に実現する手法である。手法Cで同時に行われていた正常性確認と危険検知を時間的に独立させることで、センサの正常性ばかりでなく擬似的な危険の入力についても検定が行われる。このため、手法Cで指摘した問題を解決でき、広く一般のセンサに適用することが可能である。

ここで、正常性確認のために入力される擬似的危険を改めて $H_q \in \{1, 0\}$ で表す。 $H_q = 1$ に対してセンサが予め設定された出力として $f(H_q) = 1$ を出力すれば、センサは正常であるとする。すなわち、

$$f(H_q) = H_q \wedge D^* \tag{7}$$

そして、 $f(H_q) = 1$ が一旦確認されれば、続いて行う危険検知動作の間もセンサは正常であると見なす。式(7)は論理的表現であるが、実際の正常性確認は、ある設定された入力に対するセンサの出力（応答波形）が予め設定された波形と一致すれば、センサ機能を正常であると判断するものである。

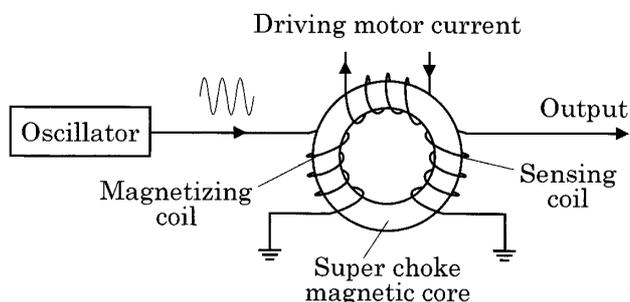


Fig. 4 Current sensor using super choke magnetic core.
過飽和磁性体コアを用いた電流センサ

手法Dでは、 Hq が消失あるいは変動すれば、センサに故障や劣化が生じたのと同様、 $f(Hq) = 1$ は得られない。ただし、 $f(Hq) = 1$ でセンサの正常性を判断するには、 $f(Hq) = 1$ が真に Hq の応答として生成されたことの証明を必要とする。すなわち、少なくとも以下の三つの条件が確認される必要がある。

- 条件1) $f(Hq) = 1$ として認められるセンサ出力は、電磁ノイズ等の影響では生じない十分に大きいレベルの信号エネルギーを有すること、
- 条件2) Hq の印加に応じて $f(Hq)$ が $0 \rightarrow 1$ に立ち上がることを、
- 条件3) Hq の消失に応じて $f(Hq)$ が $1 \rightarrow 0$ と立ち下がることを。

これらを確認する方法については後に詳述する。

$f(Hq) = 1$ が確認され、その後、 $(f(\bar{H}) = 1)$ となった場合のみ運転が許可されるインターロックシステムの論理モデルをFig. 5に示す。システムの運転を $E' \in \{1, 0\}$ で表すと、これは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} E' &= f(Hq) \wedge \overline{f(H)} \wedge N^* \wedge G^* \wedge M \\ &= (Hq \wedge D^*) \wedge (\overline{H} \vee \overline{D}^*) \wedge N^* \wedge G^* \wedge M \\ &= Hq \wedge D^* \wedge \overline{H} \wedge N^* \wedge G^* \vee M \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)で述べた前提より、 $f(Hq) = 1$ で $D^* = 1$ が保証されるため、その後 $\overline{f(H)} = 1$ を得る過程では常に $\overline{D}^* = 0$ とおける。

このことを時間推移の論理的表現¹³⁾を導入してより詳細に示す。まず、手法Dの最も基本的な検知サイクルのタイムチャートをFig. 6に示す。ここでは、時刻 t_0 から時刻 t_2 までの1回の検知サイクルにおいて、二つのタイミングパルス P (時刻 $t_0 \sim t_1$)、 Q (時刻 $t_1 \sim t_2$)を順に生成する。ただし、 P と Q は同時刻に1とならないとし、時刻 t (ただし $t_0 \leq t < t_2$)で常に次式が成立しているとする。

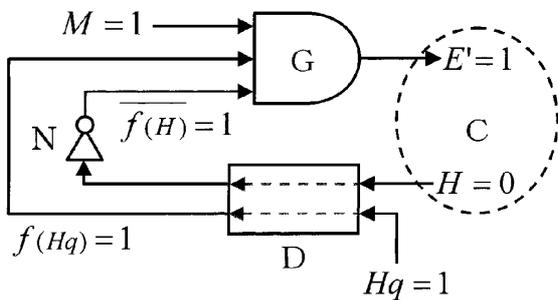


Fig. 5 Logical model of interlock system which functionally realizes asymmetrical failure characteristics.
非対称誤り特性を機能的に実現するインターロックシステムの論理モデル

$$P + Q = 1 \quad (9)$$

式(9)は単なる論理和演算ではなく、時間軸上の加算である(このことを強調するために和の記号として“+”を用いている)。これより、 $P = 1$ の間に $f(Hq) = 1$ が確認され、かつ、 $Q = 1$ の間に $\overline{f(H)} = 1$ であった場合に限り、時刻 t_0 から時刻 t_2 の間で連続して $E' = 1$ が許可される関係は改めて次式で表される。

$$\begin{aligned} E' &= [(f(Hq) \wedge P) + (\overline{f(H)} \wedge Q)] \wedge G^* \wedge M \\ &= (Hq \wedge D^* \wedge P) \wedge G^* \wedge M \\ &\quad + (\overline{H} \wedge N^* \wedge Q) \wedge G^* \wedge M \end{aligned} \quad (10)$$

Fig. 6の検知サイクルを周期的かつ自動的に実行する過程で、右辺第1項と第2項の両方が0となった場合に運転を停止すれば、非対称誤り特性を持つインターロックシステムが機能的に構成される。

一方、前述の三つの条件を考慮して、 $f(Hq) = 1$ から $D^* = 1$ を判断する方法を論理的に一般化すれば、タイミングパルス P を P_1, P_2, P_3 の三つに分割し、各区間での Hq の変化(論理的には $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$)に追従できた結果として $f(Hq) = 1$ を得る関係と表せる。すなわち、 P_1, P_2, P_3 の各時間区間に対応する Hq を各々 Hq_1, Hq_2, Hq_3 とおけば、 $f(Hq) = 1$ が次式の関係で生成されるようにする。

$$f(Hq) = \overline{f(Hq_1)} \wedge P_1 + f(Hq_2) \wedge P_2 + \overline{f(Hq_3)} \wedge P_3 \quad (11)$$

ただし、 Hq_2 のレベル(大きさ)は $f(Hq_2) = 1$ が十分大きな信号として得られるよう決定される。式(11)は、特定の入力に対するセンサ出力と予め設定した波形との一致からセンサの正常性を判断する

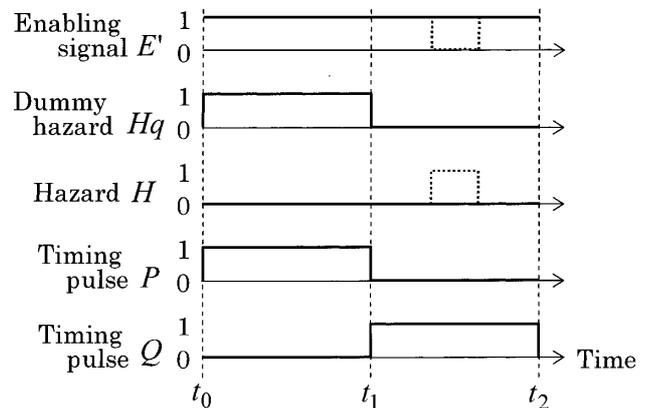


Fig. 6 Logical model of interlock system which functionally realizes asymmetrical failure characteristics.
非対称誤り特性を機能的に実現するインターロックシステムの論理モデル

際に、最低限要求される条件である。なお、本研究で採用した式(11)を満足する具体的方法については3.3節で詳しく述べる。

以上をまとめると、式(3)、(4)を満足するガス検知システムを構築する手法として、光吸収方式のセンサに手法Aを適用するものと、手法Dに従って機能的に非対称誤り特性を実現するものの二つが挙げられる。本研究では、より一般化された手法として手法Dに着目し、これを適用したガス検知システムの構成法を検討する。

2.3 ガス検知システムへの適用

手法Dを適用する場合、ガス検知システム特有の問題として、以下の2点を検討しておく必要がある。

1) 検定入力の変現性

ガス検知システムでの正常性確認は、検知対象の危険ガスを希釈するか又は代替ガスを用いて調製した擬似的な危険ガス(以下、これをテストガスと呼ぶ)を、何らかの方法で一定量分センサに接触させ、これに対する応答波形を設定した波形と比較する方法で行われる。ただし、このような波形の比較を行う場合、もともと再現性の高い出力波形が得られることが前提であり、少なくともテストガスとセンサとの接触を常に同じ条件で繰り返すことが必要となる。ところが、漏洩ガスが自然に拡散してセンサに到達する拡散式ガス検知器¹⁴⁾では、テストガスに監視領域の成分不明の混合ガス(すなわち、検知地点の大気)が混入する可能性が高く、さらには、どのような濃度分布や速さでガスがセンサに接触するか予め確定することはまず不可能である。また、ポンプ等によってガスを強制的に吸引する吸引式ガス検知器¹⁴⁾においても、温度や気圧の変化に起因する流量の変動や導入配管内で生じる乱流等の影響により、応答波形が定まらない恐れがある。

2) 除去フィルタの正常性確認

特定のガスだけに反応する完全な選択性を有するガスセンサは一般に存在せず、必ず危険ガス以外のガスの影響を受ける。典型的な例として、ある濃度のガスに対する定電位電解式一酸化炭素(CO)センサの指示値の変化をTable 1に、定電位電解式フッ化水素(HF)センサの指示値の変化をTable 2に示す。センサに影響を及ぼすガス(以下、これを干渉ガスと呼ぶ)のうち、指示値を増大させるガスは、誤報の原因となり好ましくないが災害の直接原因となる恐れはない。しかし、指示値を減少させる干渉ガスは、インターロックシステムを無効化する原因となり、完全に除去されなければならない。このた

め、通常のガス検知器では、捕集口からセンサまでの配管上に活性炭等を内包したフィルタが設置される。ただし、この場合には、センサだけでなくフィルタの正常性も確認されなければ、ガス検知が正しく行われていることを保証できない。フィルタの正常性は、混合ガス中から干渉ガスを除去できたことをもって示される。しかし、これまでの議論のとおり、混合気体中に特定のガス成分が含まれていないことを確認するには特別の工夫が必要となる。一つの方法として、テストガスに予め干渉ガスを混入しておき、フィルタの除去能力の低下をセンサ出力の低下として検出する方法が考えられるが、適用可能な干渉ガスの種類や数に限界がある。

Table 1 Influence of interference gas on potentiostatic electrolysis type of CO sensor.

定電位電解式一酸化炭素センサにおける干渉ガスの影響

Gas	Concentration	Change of indicated value
Chlorine (Cl ₂)	3.5 ppm	-12.9 ppm
Ozone (O ₃)	2.1 ppm	-10.0 ppm
Nitrogen dioxide (NO ₂)	10.0 ppm	-4.0 ppm
Ethylene (C ₂ H ₄)	10.0 ppm	1.0 ppm
Methanol (CH ₃ OH)	4.0 ppm	10.0 ppm

Table 2 Influence of interference gas on potentiostatic electrolysis type of HF sensor.

定電位電解式フッ化水素センサにおける干渉ガスの影響

Gas	Concentration	Change of indicated value
Ammonia (NH ₃)	25.0 ppm	-2.0 ppm
Hydrogen (H ₂)	5.0 %	-1.0 ppm
Nitrogen dioxide (NO ₂)	7.7 ppm	1.0 ppm
Chlorine (Cl ₂)	1.0 ppm	3.0 ppm
Fluorine (F ₂)	5.0 ppm	4.0 ppm

以上の問題は、個々のガス検知システムの仕様や条件を考慮しつつ、何らかの工夫によって解決されなければならない。本研究では、比較的容易にこの要求を満たすガス検知システムの一構成法として、ガスクロマトグラフの利用を提案する。

3. ガス検知システムの構成と要素

3.1 システムの構成

提案するガス検知システムの構成をFig. 7に示す。式(10)、(11)に基づく手順に従ってガスクロマトグラフにガスを注入することで、非対称誤り特性を実現しつつ危険ガスを検知する。ただし、後述する

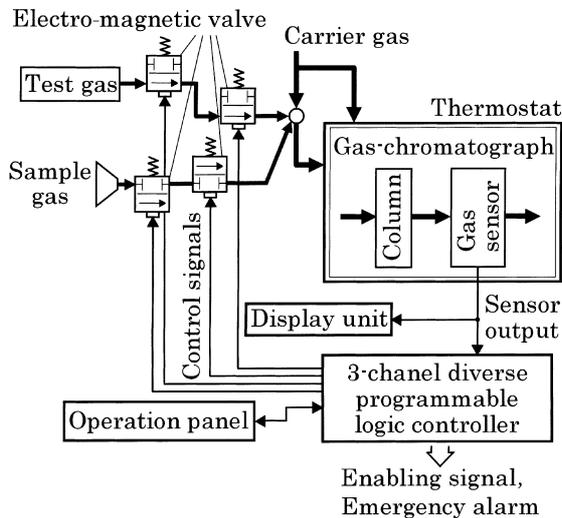


Fig. 7 Composition of gas detection system with functional asymmetrical failure characteristics.
機能的な非対称誤り特性を有するガス検知システムの構成

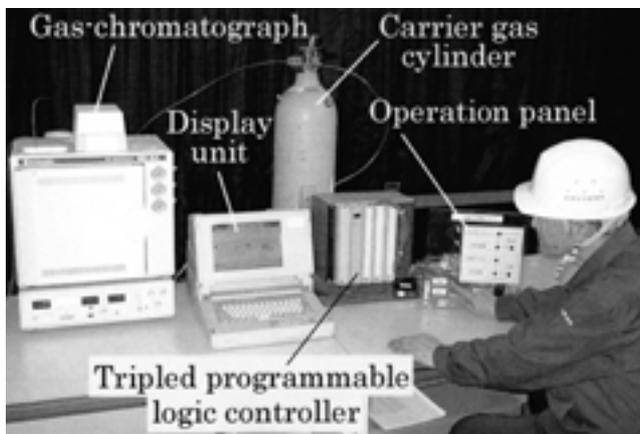


Photo 1 Trial model of gas detection system.
ガス検知システムの試作モデル

ように、このための電磁弁等の制御及びセンサ出力の検定は三重化PLCによって行われる。ガスクロマトグラフとして島津製作所製GC-8APTを、三重化PLCとしてPilz社製PSS-3100を用いて試作したシステム(以下、単に本システムと呼ぶ)をPhoto 1に示す。

3.2 ガスクロマトグラフ

ガスクロマトグラフは、移動相である試料ガスの各成分とカラムに充填された固定相との親和性の差を利用して、混合気体の各成分を時間軸上に分離するための機器である。一般に、試料導入部、分離カラム、検出部(ガスセンサ)、恒温層から構成される(Fig. 8)。天然ガープラントでの硫化水素の漏洩監視¹⁵⁾に利用される例もあるが、産業用としては、主に事業所内の大気や水質の分析あるいは原料や製品の品質管理に利用されている。

ガスクロマトグラフでは、固定相に吸着し難いガスを移動相としてカラム内に流しつつ(以下、このガスをキャリアガスと呼ぶ)、試料導入部より試料ガスを注入する。キャリアガスが注入されてから検知器(センサ)に到達するまでの時間を t_c とすると、試料ガス中のある成分が検知器に到達するまでの時間(以下、これを保持時間と呼ぶ)は、キャリアガスの保持容量を V_R 、キャリアガスの流量を F とすると次式で与えられる¹⁶⁾。

$$t_R = t_c(1 + \mu) = \frac{V_R}{F}(1 + \mu) \quad (12)$$

ここに、 μ は移動相と固定相に分布する試料ガス量の比で、カラム固定相と各成分との吸着特性を表

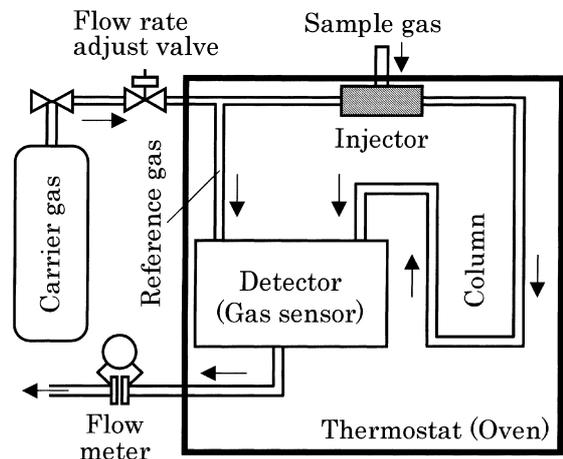


Fig. 8 Typical composition of gas-chromatograph.
典型的なガスクロマトグラフの構成

し、カラム温度に応じて変化する¹⁷⁾。すなわち、保持時間 t_R は、カラム固定相と各成分との吸着特性だけでなく、キャリアガス流量とカラム温度によって変化する。例として、本研究で用いたガスクロマトグラフにおけるキャリアガス流量とカラム温度の違いによる窒素 (N_2) と酸素 (O_2) の保持時間の変化をFig. 9に示す。キャリアガス流量とカラム温度が一定ならば、固定相への吸着力の弱い成分から順にカラムより流出し、ガスセンサによって濃度が測定される。単一成分の試料ガスがキャリアガスに注入されたとき、その注入量を Q 、カラムの構造で決まるガスクロマトグラフの理論段数を n 、センサのゲイン係数を G とすると、時刻 t でのセンサ出力波形 $y(t)$ (すなわち、クロマトグラム) は、理論的には、次式の正規分布波形として与えられる。

$$y(t) = \frac{GQ}{F\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(t-t_R)/2\sigma^2} \quad (13)$$

ただし $\sigma = t_R/\sqrt{n}$ である。現実には、カラムの構造や試料ガス注入量等の条件によっては、出力波形が理想的な正規分布波形とならない場合もある。実際、本研究で使用したガスクロマトグラフでは、試料ガス (ここでは窒素 (N_2)) の注入量が多くなるにつれて波形のひずみが大きくなり、保持時間が短くなる特性が見られた (Fig. 10)。しかし、ガスクロマトグラムは、あくまでもガス成分と固定相物質の化学的性質に基づく物理現象の結果であり、カラム温度・キャリアガス流量・資料ガス注入量などの条

件が同一であれば常に同じ形状の波形となる。このため、前章で述べた再現性の問題を回避でき、センサ機能の正常性確認に利用できる。換言すれば、本システムでは、上記の各条件が精度良く調節できていることもセンサ機能に含めて検定される。

一方、ガスクロマトグラフによれば危険ガスと干渉ガスの分別は容易に実現でき、さらに、この分離のためのカラムの正常性はセンサ機能の確認に含めて検定可能である。ただし、危険ガスと保持時間が同じで、かつ、センサ出力を減少させる特性を持つ干渉ガスが混入した場合には、センサの正常性が確認されても判断に危険側誤りを生じ得る。

そこで本システムでは、ガス固有の熱伝導度によって素子表面の熱放散状態の変化から濃度を検知する熱伝導度センサ^{1), 16)} をガスクロマトグラフの検出部に用いることとした。あらゆるガスの中で、水素 (H_2) が最も高い熱伝導度を持ち、ヘリウム (He) がこれに続く。このため、ヘリウム (He) をキャリアガスとすれば水素 (H_2) 以外のガス成分は必ずセンサ表面の温度を上げる側に作用するので、危険ガスと水素 (H_2) の保持時間が異なるようにするだけで危険側故障の可能性を解消できる。

3.3 検知サイクル

本システムの検知サイクルのタイムチャートをFig. 11に示す。ただし、検出すべき危険ガスを一成分とし、テストガスとして危険ガスをキャリアガ

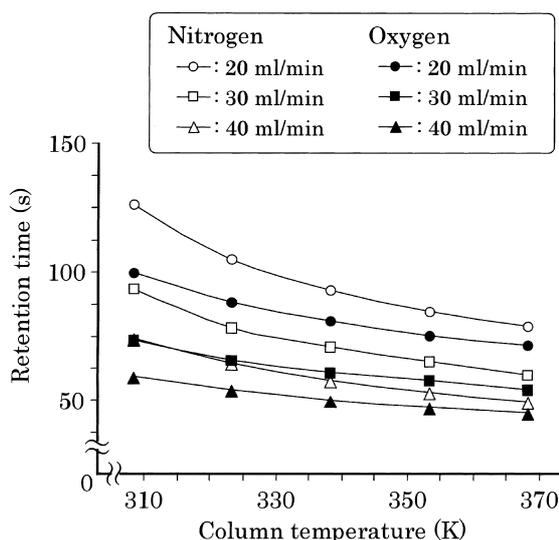


Fig. 9 Variation of retention time caused by the difference in the flow rate of carrier gas and column temperature.
キャリアガス流量とカラム温度の違いによる保持時間の変化

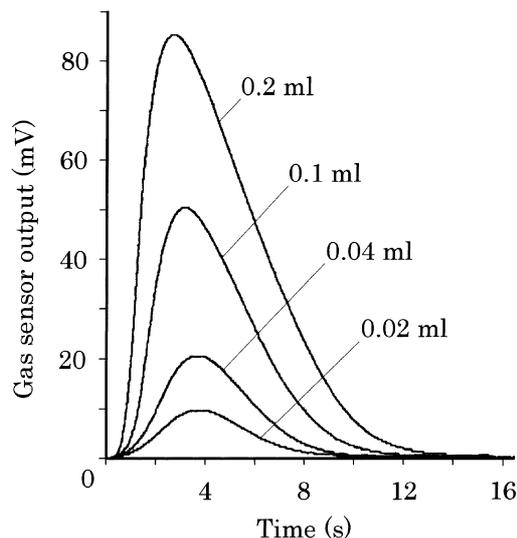


Fig. 10 Relationships between injected volume of sample gas and shape of gas-chromatogram.
試料ガス注入量とガスクロマトグラム形状の関係

スで希釈したものが利用可能であると仮定する。区間Aは、注入されたテストガスがカラムを通過してセンサに達するまでの時間で、ここでは無条件に運転を許可する。区間Bでは、テストガスに対するセンサ出力と予め設定した値（現実には、時間軸上と振幅軸上の各々にある許容幅を持つ領域として設定する。以下、これを確認エリアと呼ぶ）を比較し、立ち上がりの検定を行う。同様に、区間Cではピーク値の検定を、区間Dでは立ち下りの検定を行う。これら全ての検定において出力が確認エリア内にあるためには、センサ機能が正常であるばかりでなく、カラムの分離機能が正常であること、ならびに、流量・温度・注入量の条件が設定した値に制御されている必要がある。以上を経て、区間F開始時に作業環境の大気を試料ガスとして注入する。危険ガス検知では、区間F及び区間Hで検出される成分は干渉ガスであるので無条件に運転が許可され、区間Gでの出力のみを評価して運転の継続を判断する。ただし、区間G及びF, Hの設定では、干渉ガスの影響ばかりでなく、注入量等の影響による出力波形の変動も考慮に入れ、その長さを決定する必要がある。

3.4 三重化PLC

非対称誤り特性を持つインターロックシステムを実現するには、以上の検知サイクルを実行する制御系にも故障時に出力がOFFとなる特性が要求される。ただし、確認エリア及び検知タイミングの記憶、確認エリアでのセンサ出力の比較演算、試料導入部（本システムでは小型電磁弁（株コガネイ製 130E1-2-SR）とステンレス製計量管を用いて構成している）

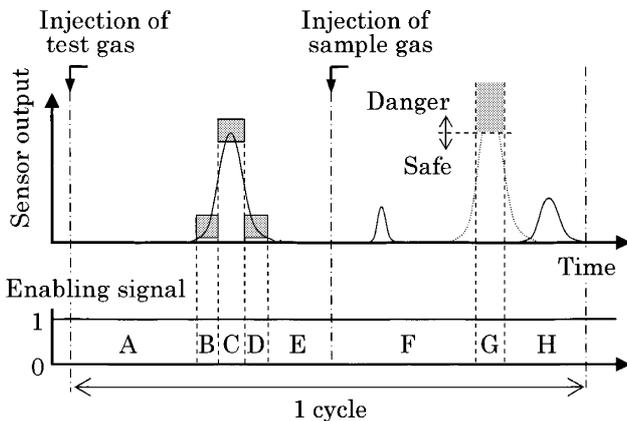


Fig. 11 Time chart of detection cycle applied to proposed gas detection system.
提案するガス検知システムの検知サイクルのタイムチャート

の開閉制御からなる複雑な手順を、既存のハードワイヤードな回路¹⁸⁾で実現することは大変困難である。そこで、本システムでは、非対称誤り特性を持つ制御回路として三重化PLCを用いることとした。三重化PLCの基本構成をFig. 12に示す。32 bitのMOTOROLA社製、16 BitのINTEL社製とSIEMENS社製の三つの独立したCPUが、外部からの入力に対して並列に信号処理を行った後、照合用メモリ（デュアルポートラム, DPR）を介して各CPUの演算結果を相互に比較し、全ての結果が一致した場合のみ運転許可信号を出力する構成である。各CPUは同じ演算機能を持っているが、アセンブラコード及び処理速度を異にしてあり、互いに独立性が確保されている。また、メモリ・バスライン・クロック回路等も全て三重化され、さらに、各CPUチャンネルで相互にセルフチェックが実行されている。これらのことから、同時多重故障によって演算処理が危険側に誤る可能性が著しく低く（公称では 4×10^{-20} 回/h^m）、機能的に非対称誤り特性を実現していると言える。

提案する検知サイクルの実行では、特に、アナログ信号波形の比較演算とタイマ計時機能が重要となる。アナログ-デジタル変換（AD変換）は、Fig. 12に示したのと同様の三重化構成が採用されたモジュールにより行われる。入力された信号は三つの独立したAD変換回路を介して各々のCPUで処理される。変換結果が一致しなければ、システムの運転は許可されない。さらに、モジュール内部のDA変換回路でテスト入力を生成することでAD変換機能を一定周期で検定しており（この正常性確認は手法Dに分類される）、異常時には処理を中断する。一方、タ

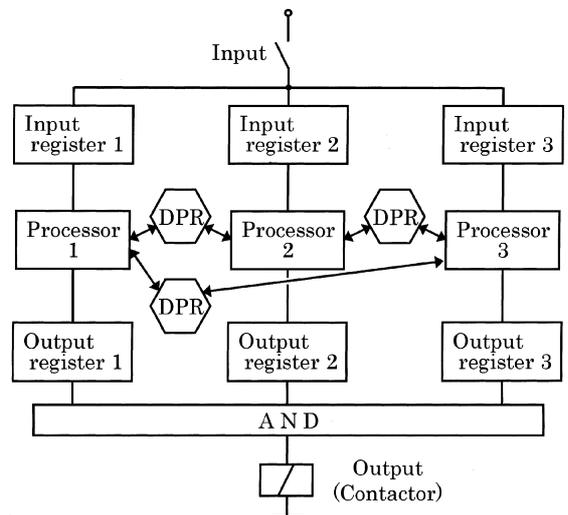


Fig. 12 Schematic structure of 3-channel diverse programmable logic controller.
三重化PLCの基本構成

イマ機能は、三つのCPUが独立してクロックパルスをカウントし、1タクト（本研究では50ms）以内の誤差で一致した場合のみ、処理結果の出力が許可される仕組みである。

4. 動作確認実験

窒素（ N_2 ）を危険ガスと見立て、これを大気中から検出する想定で、本システムの動作を確認した。

実験では、キャリアガスにヘリウム（He）を、分離カラムにMolecular Sieve 13 X（内径3mm、長さ2m）を用い、キャリアガス流量を30ml/min、カラム温度を65℃、テストガスとして注入する窒素（ N_2 ）の量を0.3mlとした。また、Fig. 11に示した手順に従い、立ち上がり時、ピーク時、立ち下がり時の3個所に確認エリアを設けた。詳細は述べないが、予備の実験として、上記の条件で窒素（ N_2 ）を検出した際の保持時間とピーク値のばらつき及びAD変換モジュールの分解能を調べ、本システムの制御機能の限界を明らかにした上で、これらの確認エリアの時間軸上の許容幅を±0.6s、振幅軸上の許容幅を±5mvと決定した。さらに、本実験では、危険ガス濃度の変化を注入する大気の変化する量を再現したため、クロマトグラムの変動を考慮し、危険ガス検知時間（Fig. 11で区間G）を4sとした。窒素（ N_2 ）の平均保持時間は67.2s、検知サイクル周期は180sである。

実験結果の例として、正常性確認の後、試料ガスとして0.3mlの大気を注入した場合をFig. 13に、0.6mlの大気を注入した場合をFig. 14に示す。Fig. 13では、センサ出力が全ての確認エリアを通過したため正常と判断され、その後、試料ガス中の窒素（ N_2 ）量が許容レベル以下であったため、運転許可信号が継続して出力された。Fig. 14では、正常性確認後、許容レベル以上の窒素（ N_2 ）量が検知され、運転許可信号が停止するとともに緊急通報信号が出力された。一方、正常性確認時にテストガス入力の変動した場合の動作として、テストガス注入量が減少した場合をFig. 15に、注入タイミングが遅れた場合をFig. 16に各々示す。Fig. 15ではピーク値の確認が、また、Fig. 16では立ち上がりの確認が得られず、いずれも運転許可信号が停止するとともに故障通報信号が出力された。以上の結果、本システムが所用の検知動作を実行できることが確認された。

5. 実プラントへの適用と課題

本システムを実プラントへ適用する際の課題として、Fig. 11に示した検知サイクルの時間的制約に

ついて述べる。

本システムの危険ガス検知は検知サイクルを1周期とする非連続監視であり、作業領域の大気注入後の危険ガスの保持時間が危険ガス検知までの遅れとなる。前章の実験では保持時間は約67秒であったが、危険ガスの種類や実験条件によっては1時間を超える場合もある。ところが、現行の一般高圧ガス保安規則では、警報発信までの許容遅れは30秒以下（ただし、一部の特定のガス⁴⁾を除く）と規定されており、実プラントへ適用する際には保持時間の短縮が必須になることが予想される。ただし、ガスクロマトグラフィーの高速化については、保持時間がカラム温度とキャリアガス流量に大きく依存することを利用した昇温分析法等、多くの手法が提案・実用化されており²⁰⁾、ここでは詳細な検討を行わないが、これらの手法の本システムへの導入は技術的に困難ではないと考えられる。

一方、本システムでは、正常性確認動作を毎検知サイクルで行い、その周期を窒素（ N_2 ）の保持時間やガス充填時間等を考慮して180sとした。しかし、この周期は、本来、適用する実プラントのリスクレベルに応じて定量的に決定されるべきである。すでに筆者らは、周期的に正常性確認を実行することで機能的に非対称誤り特性を実現するシステムの安全性性能（危険側故障率）を定量的に評価する手法について報告した²¹⁾。この手法に基づき、本システムの正常性確認周期の決定方法を示す。

本システムが、試料導入部を含むガスクロマトグラフ系と制御系（三重化PLC）の二つのサブシステムに分割でき、これらの直列システムとしてモデル化できると仮定する。ガスクロマトグラフ系の故障率を λ_G [回/h]、制御系の故障率を λ_C [回/h]、ガスクロマトグラフ系及び制御系が構造として有する非対称誤り率を各々 η_G 、 η_C [回/回]とすると、時刻 t での危険側故障の発生確率 $p(t)$ は次式となる。

$$p(t) = 2 - e^{-\lambda_G \eta_G t} - e^{-\lambda_C \eta_C t} \quad (14)$$

正常性確認や自己診断が行われない場合、システムの全寿命 τ_{lc} [h]における単位時間当りの平均危険側故障発生率 $P_m(\tau_{lc})$ [回/h]は次式で与えられる。

$$P_m(\tau_{lc}) = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{T}{2} (\lambda_G \eta_G + \lambda_C \eta_C) \quad (15)$$

ただし、議論を容易にするため、 $\lambda_G \eta_G T \ll 1$ 、 $\lambda_C \eta_C T \ll 1$ と仮定する。

一方、正常性確認を周期的に行う場合、ガスクロマトグラフ系の正常性確認周期を τ_G [h]、制御系の自己診断周期を τ_C [h]とすると、平均危険側故障

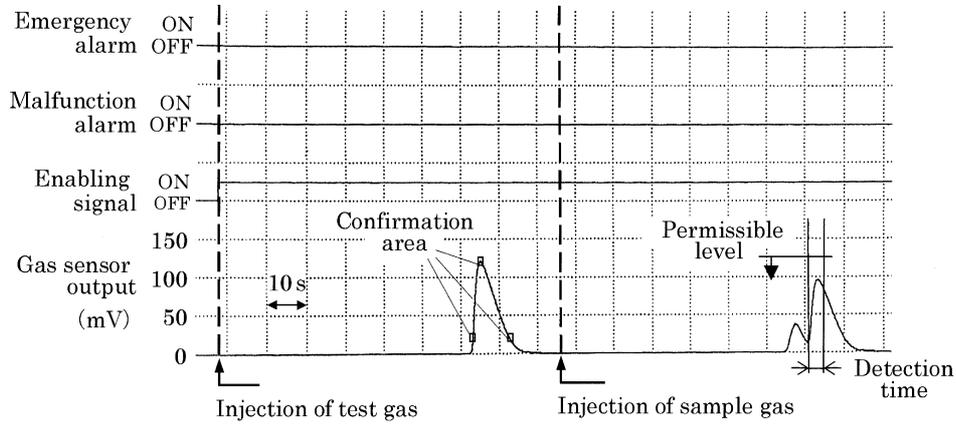


Fig. 13 Sensor output and enabling signal in case that the air of 0.3 ml in volume was injected as sample gas.
 試料ガスとして0.3mlの大気が注入された場合のセンサ出力と運転許可信号

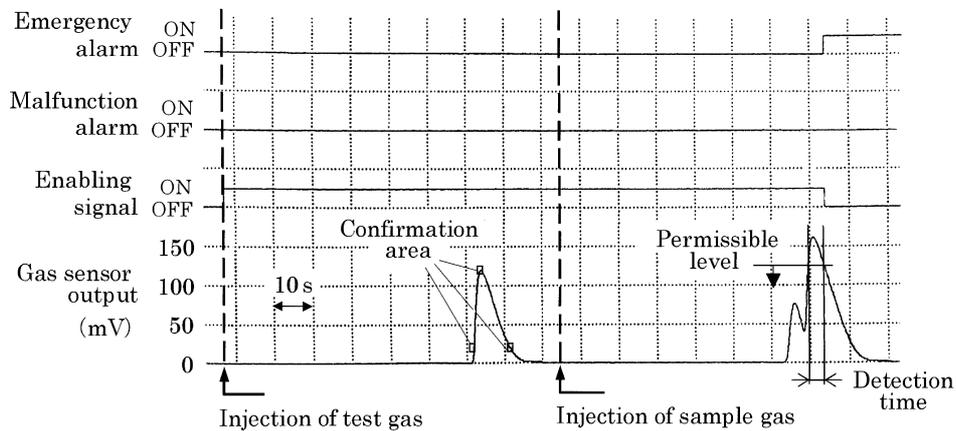


Fig. 14 Sensor output and enabling signal in case that the air of 0.6 ml in volume was injected as sample gas.
 試料ガスとして0.6mlの大気が注入された場合のセンサ出力と運転許可信号

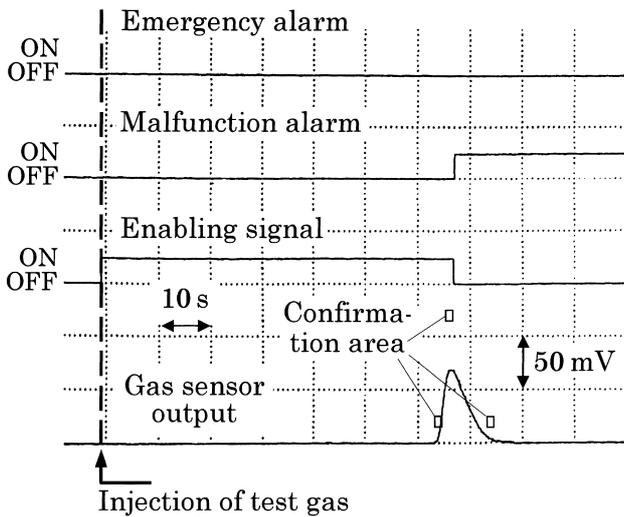


Fig. 15 Sensor output and enabling signal in case that the injection volume of test gas decreased.
 テストガスの注入量が減少した場合のセンサ出力と運転許可信号

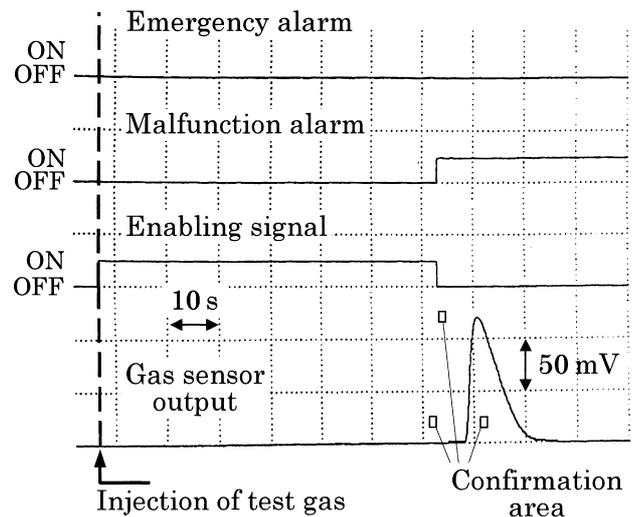


Fig. 16 Sensor output and enabling signal in case that the injection timing of test gas was delayed.
 テストガス注入のタイミングが遅れた場合のセンサ出力と運転許可信号

率 $P_m(\tau)$ [回/h] は次式で与えられる。

$$P_m(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau p(t) dt = \frac{\lambda_G \eta_G \tau_G}{2} + \frac{\lambda_C \eta_C \tau_C}{2} \quad (16)$$

ただし、 τ は τ_G 及び τ_C の関数である。

前述したように、三重化PLCには異種冗長化や周期的な自己診断が導入され、その危険側故障率（すなわち、右辺第二項）は 4×10^{-20} 回/hである。しかし、ガスクロマトグラフについては、その寿命が使用環境に大きく左右されること、分析機器としての使用が主であること等の理由から、平均故障率に関する有意な情報を得られなかった。そこで、試料導入部に用いた電磁弁及び小型電磁リレーの寿命に基づき、ガスクロマトグラフィー系の故障率 λ_G を 7.6×10^{-5} 回/hと仮定する。この値は、平均故障間隔(MTBF)に換算すると約1.5年であり、一般的なガス検知警報機の寿命が1~3年とされていることから概ね妥当な値と言える。また、非対称誤り率 η_G については最悪値として $\eta_G = 1$ とする²¹⁾。以上の仮定に基づき式(16)を計算した結果として、正常性確認周期と危険側故障率の関係をFig. 17に示す。

前章の動作確認実験では、正常性確認周期 τ_G を180sとしていたが、この設定での非対称故障率 $P_m(\tau)$ は約 1.8×10^{-6} と算出される(Fig. 17に黒丸で表示)。また、Fig. 17より、仮に本システムに要求される目標危険側故障率が 1×10^{-5} ならば周期 τ_G を約15minまで延長できるが、 1×10^{-7} の場合には9.5sに1回以上の確認が必要となることが分かる。

6. おわりに

本報では、非対称誤り特性を有するガス検知システムの実現を目的として、まず、危険検知に先んじてシステムの正常性確認を周期的に実行するシステムの構成論理を一般化し、次いで、熱伝導度センサを検知器とするガスクロマトグラフと異種多重化論理に基づく三重化PLCを用いて、この構成論理を適用したガス検知システムを構築した。実プラントへの適用にはまだいくつかの課題を残しているが、実験の結果、本システムが所用の動作特性を満足しており、緊急時にガス供給を遮断するインターロックシステムとして利用可能なことを示した。

提案した構成論理に基づけば、適用するシステムのリスクレベルに応じて要求されるセンサ系の安全性能仕様の決定が容易となり、例えば、高リスク対応とするためには高頻度な危険検知と正常性確認の実行が要求される。本システムでは保持時間と正常性確認周期からその安全性能が評価でき、今後のガスクロマトグラフィー技術の進展によっては、高リスク対応のガス検知システムの実現が期待される。

参考文献

- 1) 半導体製造における安全対策・管理ハンドブック, リアライズ社, (1993), pp.267-285.
- 2) 中野信夫: 半導体工場向けガス検知・警報器の現状と課題, クリーンテクノロジー, Vol.10, No.9 (2000), pp.48-52.
- 3) 特集: プラントの安全を監視するガスセンサー・システム, 計測技術, Vol.29, No.8 (2001), pp.1-19.
- 4) 例えば, 一般高圧ガス保安規則関係基準(省令補完基準), 高圧ガス保安協会 (1992).
- 5) IEC61779, Electrical apparatus for the detection and measurement of flammable gases Part:1~Part:7 (1998).
- 6) 岩崎禎: 各種ガスセンサの特性と応用, 労働衛生工学, No.38 (1999), pp.7-11.
- 7) 池田博康: コンピュータを利用した安全制御技術の実態調査, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-No.19 (1999), pp.5-8.
- 8) 基発第464号, 工作機械等の制御機構のフェールセーフ化に関するガイドライン (1998).
- 9) Center for chemical process safety of AIChE, Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes, 米国化学工学会 (1993), p.387.
- 10) 桑川壮一, 杉本旭, 他: 安全制御のための基本

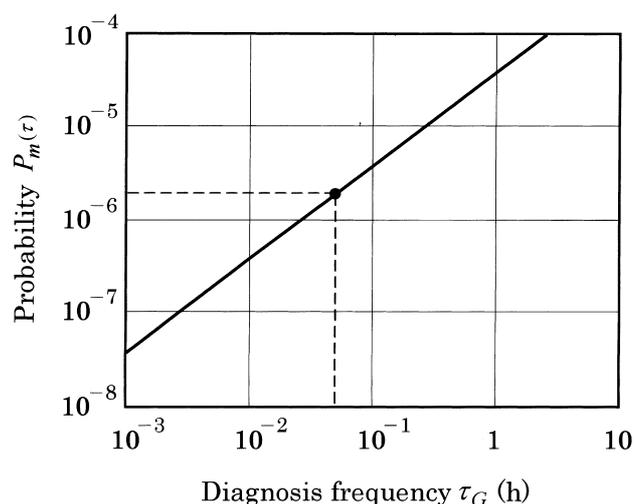


Fig. 17 Relationship between frequency of normalcy diagnosis τ_G and probability of failure to danger $P_m(\tau)$.
正常性確認周期と危険側故障率の関係

- 要素，産業安全研究所特別研究報告，RIIS-SRR-90 (1990)，pp.46-49.
- 11) 大橋克旬，渡辺敏弘：産業用ガス検知器，計測技術，Vol.29，No.8 (2001)，pp.2-3.
 - 12) 杉本旭，蓬原弘一，池田博康：シーソー作業ロボットを使った安全作業システム，機論，57-538，C (1991)，p.1997.
 - 13) 蓬原弘一，向殿政男：超音波パルスレーダによるフェールセーフな障害物検出，電学論，Vol.110，D，No.3 (1989)，pp.218-226.
 - 14) 産業用ガス検知警報工業会編：産業用ガス検知警報器 (技術資料'95)，(1995)，pp.19-28.
 - 15) John A. Kramer：Hydrogen sulfide detectors and determination，Turbomachinery International，Vol.33，No.7 (1992)，pp.30-32.
 - 16) プロセス計測制御便覧，日刊工業新聞社，(1960)，pp.511-517.
 - 17) 津田孝雄：クロマトグラフィー—分離のしくみと応用—，丸善，(1995).
 - 18) 梅崎重夫，清水尚憲，小林茂信，他：人体と立体的形状を持つ物体の識別を目的とした二次元ブランキングシステムの開発と評価，産業安全研究所特別研究報告，NIIS-SRR-No.24 (2002)，p.20.
 - 19) Guide to Programmable Safety Systems，Pilz Automation Technology，Vol.2，Ed.1 (2002)，p.39.
 - 20) 竹内正博：ガスクロマトグラフィーの最新技術，化学工学，Vol.64，No.4 (2000) pp.203-204.
 - 21) 梅崎重夫，池田博康，齋藤剛，杉本旭：プログラマブルな電子制御装置を利用した安全制御システムの最適設計法に関する基礎的考察，産業安全研究所特別研究報告，NIIS-SRR-No.24 (2002)，pp.5-18.

(平成 14 年 8 月 22 日受理)