

1. 序 論

梅崎 重夫*

1.1 はじめに

工作機械等による労働災害を防止するには、機械は故障し、作業者はミスを犯すことをまず認めた上で、仮にこれらが起きても、作業者に危害を及ぼさない構造を、システムの設計段階で構築しておくことが基本である。この設備対策は、我国では本質安全化対策¹⁾と呼ばれているものであるが、近年の機械制御技術の急速な進歩と、電子化された安全装置や部品類等の普及に伴い、本質安全化対策のあり方も大幅な見直しを迫られている。また最近では、工作機械等の本質安全化に関連した国際規格として、ISO規格や欧州安全規格(EN規格)²⁾等が整備され、これらの規格内容を考慮した安全対策の実施が、我国でも強く望まれている。

そこで本安全資料では、上記国際規格等の内容も考慮しながら、従来の本質安全化対策ではあまり触れられていなかった本質安全化の手順(第2章)、本質安全化のための安全制御システムの構成法(第3章)、安全制御システムの故障解析法(第4章)等について新たに提案を行うことにしたものである。また、工作機械等の本質安全化のために利用できる安全手段(固定ガード、可動ガード、安全装置、安全リレーや安全スイッチ等の部品類など)を参考資料1にまとめた。

以上の提案を行うにあたっては、筆者らが研究を進めてきた安全確認形の制御システム³⁾⁻⁵⁾に関する成果が技術的基礎となっている。なお、(社)日本労働安全衛生コンサルタント会が実施したアンケート調査⁶⁾によれば、工作機械等の製造者の中には、欧州安全規格の水準を、今後我国で実施すべき「望ましい設備安全対策」の目安と考えている事業場も多く、この

水準と基本的に整合する設備安全対策を技術指針、手順書、対策事例集等の形で整備すべきとの意見が強かった。そこで本安全資料では、欧州安全規格と基本的に整合する設備安全対策の一つの試論としても本安全資料を利用できるよう配慮した。

以下は、各章と参考資料の背景と概要である。

1.2 各章と参考資料の背景と概要

(1) 工作機械等の安全対策手順

欧州では、工作機械等の安全対策手順としてリスク・アセスメント方式による安全対策手順(参考資料3参照)を義務づけている。しかし、リスク・アセスメントは、元々は「未知」の危険によって重大な災害を起こすことの多い航空機、化学プラント、原子力発電所等の巨大システムの潜在危険性の評価に利用されてきたものであり、機械の使用状態と危険状態が「既知」であり、安全対策も定型化された工作機械等を対象としたとき、このような手法が適切とは言えない場合もある。

また、我国では災害の多くは中小規模の事業場で発生しており、このような事業場の現場でも簡単に実施できる安全対策手順を開発しておく必要がある。そこで第2章では、工作機械等の危険な可動部による災害を対象に、中小規模の事業場の現場でも簡単に実施できる安全対策手順として、管理区分方式による安全対策を提案した。

この方式は、現場の作業員や安全管理者が日常的に行っている安全確認の行為を安全対策手順として書き下したものであり、具体的には、作業を危険性の程度に応じて非管理作業(特に追加の安全対策を講じなくとも、作業員の安全が本質的に確保されている作業)、管理1作業(隔離の原則に基づいて作業員の安全を確保できる作業)、管理2作業(停止の原則に基づいて

*機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety
Research Division

作業者の安全を確保できる作業)、管理3作業(隔離と停止のいずれの原則によっても、作業者の安全を確保できない危険点近接作業)の4種類に分類し、各々の管理区分毎に最適な安全手段を選定できる方式としている。

(2) 機械制御回路の安全化手法

我国の労働災害防止対策では、機械の信頼性の向上や作業者に対する教育・訓練の強化によって災害発生件数の減少を図ることも多い。これに対し、第3章で提案する安全確認形の制御システム^{3)~5)}では、機械は故障し、作業者はミスを犯すことをまず認めた上で、仮にこれらが起きても、作業者に危害を及ぼさない構造をシステムの設計段階で構築しておくことを基本とする。これは、欧州規格に規定された設備安全対策の基本的考え方とも整合する。

安全確認形の制御システムの特徴は、機械の制御に関連した災害を解析する際に顕著に表れる。たとえば、工作機械等による労働災害の中には、作業者が誤って起動用の光線式センサを遮光したために、機械が突然運転を開始して、作業者が被災するケースがある。このような災害は、我国では作業者の不注意として片づけられる場合が多い。また、災害の中には安全装置や安全スイッチ等の安全関連機器が故障したとか、作業者が意図的に安全関連機器を無効化したことが原因で発生する災害も多い。これらの災害の原因も、我国では作業者が安全関連機器を有効に保持していなかったことが原因として、作業側の問題として捉える場合が多い。

これに対し安全確認形の対策では、災害の原因をインタロック機構等の設備対策の欠陥として捉える。ここでインタロック機構とは、安全装置からの情報に基づいて機械の運転を許可したり禁止したりする機構であり、機械の異常動作(不意作動、暴走等)や作業者の異常な行動(誤操作、危険領域への進入等)が発生したときは、直ちに機械を停止させて安全を確保する役割を担う。

ここで重要なのは、インタロック機構が故障すると作業者に危害が及ぶおそれがあることである。このため安全確認形の制御システムでは、インタロック機構の故障時には必ず安全側(機械を停止させる側)となるように機械の制御システムを構成する。この特性の実現を目的としたのがフェールセーフ技術である。

なお、我国の実情を考慮した場合、作業者が安全関連機器を意図的に無効化することを防止する技術(タンパ・レジスト技術)は特に重要である。そこで第3章では、インタロック、フェールセーフ、タンパ・レジスト等の安全技術について、その概要を述べた。ま

た、非常停止回路、再起動防止回路、ガードインタロック回路、行き過ぎ防止回路、電磁リレーや電磁弁の周辺回路等を構成する際の安全化手法についても述べた。

(3) 機械制御回路の安全性評価法

第4章では、インタロック機構が故障しても作業者に危害を及ぼさないことを確認するための手法として、FMEAを用いた故障解析法を提案した。

この手法による故障解析では、故障の形態を単一故障、同時多重故障、非同時多重故障の3種類に分けて解析を行う。このうち同時多重故障には、共通要因に基づく同時多重故障(単一の原因によって複数の要素が同時に所要の機能を失う故障)と、個別要因に基づく同時多重故障(異なる原因によって複数の要素が同時に所要の機能を失う故障)がある。また、非同時多重故障とは、最初に起こった故障が発見されずに「潜在」し、その後、他の故障が発生したときに、これら二つの故障が複合的に作用して機械の危険な動作を起こすような故障である。

また、第4章では、欧州規格で提案されているカテゴリ(参考資料5参照)の意味には「設計者が故障に対する安全確認をどの程度まで実施したか」という意味もあることを述べ、この観点から故障対策のレベルを6段階に再整理した。このうち、レベル5は同時二重故障、レベル6は同時三重故障が起きた場合においても、それぞれ安全を確保できることが確認された水準である。このレベル6の故障対策が施された素子には、参考資料1に示すフェールセーフICがある。

(4) 機械の本質安全化のための安全手段一覧

参考資料1では、機械の本質安全化のために利用できる固定ガード、可動ガード、安全装置、安全リレー、安全スイッチ、論理IC等を対象に、その特徴と構造要件を示し、実際の安全対策に利用できるようにした。

これらの手段の中には、当研究所が独自に、あるいは他の機関と共同して開発したものも多い。たとえば、回転ゼロ確認センサ(No.15)やフェールセーフIC(No.21)は、欧州規格で規定されている工作機械のインタロック機構(参考資料4参照)等にも広く適用できるものである。

以上、本安全資料の記載内容の概要を述べた。これらの内容は時間的制約から必ずしも満足すべきものではないが、今後我国で実施すべき望ましい安全水準を検討する上で参考にして頂きたい。

なお、参考資料1に記載した安全手段は、今回は紙面の都合上、当研究所で機能を確認したものや、当所の実験設備に使用実績のあるものに限らざるを得なかった。これらについては、今後機会を見つけて順次

内容を充実して行きたい。

1.3 用語の意味

本安全資料で用いる用語は次のような意味を持つ。

(1) 工作機械等

JISB0105に定める工作機械（主として金属の工作物を切削・研削等によって不要物を取り除き、所要の形状に作り上げる機械）及びこれらと同一の製造ラインで使用される搬送装置、産業用ロボット、プレス機械、成形機等を言う。

(2) 安全手段

工作機械等の危険な可動部と作業者の接触による労働災害を防止するための手段の総称。固定ガード、可動ガード、安全装置、安全スイッチや安全リレー等の部品類、フェールセーフ回路、インタロック機構等が該当する。

(3) (狭義の)本質安全化

機械の駆動源の出力を人体に危害を及ぼさない程度に小さくしたり(たとえば産業用ロボットの電動機出力を80W未満にするなど)、挟圧箇所を作らないようにして(たとえば、挟圧箇所の間隔を手指を挟むおそれのない6mm以下にするなど)、機械作業の安全を本質的に確保すること。

(4) (広義の)本質安全化

機械の設計・製造段階で(狭義の)本質安全化を図ったり、作業方法の改善等によってあらかじめ危険な状態を排除したり、あるいは作業の実態に応じた適切な安全手段を設計・選択し、これを機械に適用(内蔵)することによって事前に機械作業の安全を確保すること。

(5) 工作機械等の可動部による危険

第2章の表1に示す「からまれ」、「摩擦および摩耗」、「切断」、「せん断」、「突刺し」、「衝撃」、「挟圧」、「引張り込み」の危険を言う。

(6) 隔離の原則

安全対策時の基本原則の一つであり、作業者の作業領域と機械の危険な可動部の動作領域を空間的に分離することによって作業者の安全を確保する方法。機械の危険な可動部の動作領域を固定ガード等で囲み、作業者の身体から確実に隔離する方法が一般的である。

(7) 停止の原則

安全対策時の基本原則の一つであり、①機械の危険な可動部が完全に停止したことを機械側で確認した後、作業者が可動部の動作領域に進入するのを許可するか、または、②作業者が機械の危険な可動部の動作領域に進入しそうなときは直ちに機械を停止させるかの、いずれかの方法によって作業者の安全を確保する

方法。同一作業領域における機械による作業と人間による作業を時間的に分離することによって、作業者の安全を確保する。

(8) 危険点近接作業

「隔離の原則」や「停止の原則」に基づいて安全対策を行うのが困難な作業において、機械の危険な可動部が停止していないときに、作業者がやむを得ず可動部に近接して行う作業を言う。材料の送給、教示、保全、動作確認、清掃等の作業が代表的である。

(9) 安全確保領域

機械の危険な可動部の動作に対して安全を確保すべき領域であり、機械の危険な可動部の動作領域や、安全隙間、安全距離等を考慮して設定した領域を言う。

(10) 最大動作領域

機械の危険な可動部の最大の動作領域であり、可動部本体の動作領域だけでなく可動部に取り付けられた工具、ハンド、ワーク等の動作領域を含む。

(11) 安全隙間

作業者の人体が、機械の危険な可動部と固定ガード、支柱、壁面等の構造物の間に挟まれることを防止するために、最大動作領域と構造物の間に設ける隙間(参考資料2参照)。

(12) 安全距離

安全装置等が人体を検出してから機械が停止するまでに、人体が最大動作領域内に到達するおそれのない最短の距離(参考資料2参照)。

(13) 完全停止

機械の駆動源等を遮断することにより機械が完全に停止し、再起動しない状態。

(14) ホールド停止

機械の駆動源等を遮断することなく、機械が一時停止している状態。

(15) 作業の安全管理区分

機械作業を必要とされる安全対策の水準(レベル)に応じて分類したもの。

(16) 固定ガード

溶接などによって機械と一体構造になっているか、または、特殊な工具を使用しない限り機械から取り外しできない構造のガード。

(17) 可動ガード

人間の力によって開閉する構造のガード。

(18) 安全情報

安全装置等によって生成される情報であり、安全が確認されているときに限り生成されるエネルギーを伴った情報。電気信号では、通常、安全を高エネルギー状態、危険及び故障を低エネルギー状態に対応させる。

(19) 安全装置

安全情報の生成手段であり、ガード式安全装置、手動操作式安全装置、非接触式存在検知装置、接触式存在検知装置等に分類される。

(20) ガード式安全装置

ガードが閉じてから機械を運転することによって、作業者の安全を確保する構造の安全装置。動力または機械自身の動作によって開閉（開または閉のいずれか一方でも可）する構造のガードを利用する。

(21) 手動操作式安全装置

手でボタンを操作する等の方法によって、作業者の手指を安全確保領域から離れた位置に固定することにより作業者の安全を確保する構造の安全装置。

(22) 非接触式存在検知装置

作業者が機械の安全確保領域に進入しそうになったとき、これを光等の非接触式手段で検知する構造の安全装置。たとえば、光線式安全装置がある。

(23) 接触式存在検知装置

作業者が機械の安全確保領域に進入しそうになったとき、これをマットスイッチやバンパ等の接触式手段で検知する構造の安全装置。

(24) インタロック機構

安全情報に基づいて、機械の駆動源や危険な可動部の動作を許可したり、禁止したりする機構。

(25) フェールセーフ回路

故障が発生しても、機械が必ず安全側（停止側）となるように工夫された回路。

(26) 安全部品

可動ガード、安全装置、インタロック機構、フェールセーフ回路等で使用される安全スイッチ、安全リレー、電磁弁等の部品類。

(27) 安全スイッチ

インタロック機構で使用されるスイッチであり、故障時に安全側となる性質を持つもの。

(28) a 接点タイプのスイッチ

通常は接点が開いており、押しボタン操作等によって接点が開く構造のスイッチ。

(29) b 接点タイプのスイッチ

通常は接点が開いており、押しボタン操作等によって接点が開く構造のスイッチ。

(30) 一人作業

当該作業への従事を予定された、単一の作業者によって行われる作業。

(31) 共同作業

当該作業への従事を予定された、複数の作業者によって行われる作業。

(32) 第三者

当該作業への従事を予定されていない作業者。または作業者以外の者（通行人など）。

(33) 緊急安全条件

当該条件を満たさないときには、直ちに災害を生じる可能性があるため、安全確保のために速やかに機械を停止させることが必要な条件。

(34) 支援安全条件

当該条件を満たさなくとも直ちに災害を生じることはないが、そのまま放置すると緊急安全条件を満足できなくなるおそれがあるため、安全確保のために何らかの対策をとることが必要な条件。

(35) フェールセーフ機能

安全手段に故障が発生しても、これに起因して人身災害が生じることのないように、システムをあらかじめ定められた安全状態に固定し、故障の影響を限定する機能。

(36) フールプルーフ機能

作業者が誤った操作をしても、これに起因して人身災害が生じることのないように、あらかじめ操作装置等に盛り込まれた機能。

(37) タンパ・レジスト機能

作業者の故意によっては安全手段を無効とできないように、安全手段に盛り込まれた機能。

(38) 安全制御システム

システムに要求される全ての安全機能を統合して実現するものであり、インタロック機構、フェールセーフ回路、安全装置、可動ガード、安全部品等の組み合わせによって得られる制御システムの総称。

(39) 安全確認形の制御システム

安全制御システムの一形態であり、安全が確認できるときに限り機械の危険な可動部の運転を開始・継続するという過程を繰り返すこと（逐次安全確認）によって、機械作業を進めていくシステムの形態。安全装置等が生成する安全情報をユネイトに伝達して、機械の運転を制御するため、作業者が安全確保領域に進入したときや、安全手段の故障時には、安全情報の生成・伝達が停止して、機械の運転も停止することを特徴とする。

(40) 階層化安全制御

安全のための制御（安全制御）と、システムの運用効率を上げるための制御（高機能化制御）を両立させた制御系。安全制御が高機能化制御に優先して行われる構成を特徴とする。安全性と生産性を両立させるために不可欠な制御である。

(41) 危険側移行率

発生するすべての故障数に対する、危険側となる故

障数の比。安全手段の故障対策がどの程度の水準（レベル）にあるかを評価する際の指標である。

(42) 非対称誤り特性

システムまたはシステムを構成する要素に誤り（故障を含む）が生じたとき、安全側となる誤りの頻度が危険側となる誤りの頻度よりも著しく高くなる特性、あるいは、安全側にしか誤らない特性。危険側移行率が具体的数値としての比を表すのに対して、非対称誤り特性は誤り発生時に安全側となる傾向を示す。

(43) ユネイトな情報伝達

システム又はそれを構成する要素に入力がないにもかかわらず、誤って出力が発生することを許容しない情報伝達（第3章の表7参照）。

(44) 多重故障

複数の単一故障が同時にまたは時系列的（非同時）に起こる場合の故障を言う。共通要因に基づく多重故障（単一の原因によって複数の要素が所要の機能を失う故障）と、個別要因に基づく多重故障（異なる原因によって複数の要素が所要の機能を失う故障）がある。

(45) 非同時多重故障

単一の故障が発生したときに、当該故障が発見（検出）されないために潜在し、続けて他の故障が起こるような場合の故障を言う。

(46) 同時多重故障

複数の故障が同時に発生する故障を言う。

(47) FMEA

Failure Mode Effect Analysis の略。故障に対する定性的解析手法であり、要素（部品など）の故障の型（モード）ごとに、故障がシステムに及ぼす影響を解析する。

謝 辞

本安全資料の参考資料1を作成するにあたり、(株)山武商会、日本信号(株)、ジック・オプティック・エレクトロニック(株)、(株)小森安全機研究所、日本ヘンクストラ(株)、(株)ソルトン、三菱アルミニウム(株)から貴重な資料を頂いた。また、理研オプテック(株)、東洋電機(株)、ロス・アジア(株)、SSRエンジニアリング(株)、(株)フォトニクスのカatalog等を参照させて頂いた。誌上を借りて深い謝意を表す。

参考文献

- 1) 秋山、機械の安全性、中央労働災害防止協会（1971）
- 2) 日本規格協会、機械の安全に関するEN規格集（第

3版）（1995）

3) 糸川・杉本・深谷・佐藤・江川・清水、安全制御における計測技術、産業安全研究所特別研究報告、RIIS-SRR-86,NO.1（1986）pp.18-72

4) 杉本・糸川・深谷・池田・梅崎他、安全確認形安全の基本構造、機論、54-505、C（1988）pp.2284-2292

5) 杉本・梅崎・池田・糸川・深谷、安全制御システムの基本構成、産業安全研究所研究報告、NIIS-RR-95（1996）に掲載予定

6) 日本労働安全衛生コンサルタント会、工作機械等の制御機構のフェールセーフ化に関する促進事業報告書（1996）

（平成8年3月7日受理）