

安全の観点から考える人と機械の共存

上野 泰史^{*1} 宮内 賢治^{*1} 福井 孝男^{*1} 関野 芳雄^{*1} 藤田 俊弘^{*1}

Coexistence of human and machine from the standpoint of Safety

Yasushi Kamino^{*1}, Kenji Miyauchi^{*1}, Takao Fukui^{*1}, Yoshio Sekino^{*1}, Toshihiro Fujita^{*1}

Abstract -- The International Safety Standards have a 3-level hierarchical system, which includes the Basic Safety Standards (for the basic concepts and the general principle for design), and the Machine Safety Standards (for detailed safety requirements). The Basic Safety Standards are now subjected to review, and the proposed draft features a demand for engineer's commitment to ergonomic designing. The move simply suggests close relations between ergonomic design and safety.

The following report provides IDEC's various safety solutions that epitomize the company's concept of "creating optimal environments through human machine interface," in conformity to the section of "safety of machinery" of the International Safety Standard.

Keywords: Safety, International standard, Safety SUI, Interlock, Safety switch

1. はじめに

近年、「安全」というキーワードが非常に重要視され、人に対する安全配慮への意識が高まっている。

身近な例として自動車に着目すると、従来はスピードや馬力など基本性能の向上が追求され、各メーカは性能重視で競い合っていた。しかし、現在では性能に加えてハイブリッド車に見られる CO₂ 削減などの環境保全や、エアバック、ABS、衝突安全ボディなどの安全性に訴求ポイントが移行してきている。

自動車事故から身を守る代表的な安全対策としてシートベルトの着用が義務づけられているが、最近では6歳未満の幼児に対するチャイルドシート着用の義務づけや、走行時の携帯電話の使用禁止などの事故予防を目的とした法令改正案がまとめられ、国家レベルで安全意識の高まりが感じられる。安全を確立するためには、このように明確な法令や規格が制定され、その内容が理解・実践される必要がある。

一方、FA(Factory Automation)などの産業分野でも前述した自動車と同様に安全を重視する流れがあり、従来のようにただ単に機械の生産性向上や効率化を図るだけでなく、現在では環境保全や安全性の配慮が、人と機械が共存する HMI(Human Machine Interface)環境における重要な要件となっている。

自動車と FA 作業現場における安全対策を図 1 に示す。作業現場における安全対策は、従来のヘルメットなどの防護具と作業者の教育や訓練に依存する受け身の安全から、うっかりミスなどのヒューマンエラーは必ず起こるものと仮定し、ヒューマンエラーが事故につながらない

よう機械設備自体に予防手段を設ける積極的な安全へと展開している。また、積極的な安全を確立するためには、自動車と同様に明確な法令や規格が制定され、その内容が理解・実践される必要があり、現在その制定が急がれている。

本稿では作業現場における安全を推進する上で活用する安全規格を取り上げ、われわれが提唱する「人と機械の最適環境の創造」において、安全規格に基づき具現化した安全対策について報告する。

2. 国際安全規格の活用

2.1 安全規格におけるグローバル化の流れ

環境保全のため環境管理の国際規格 ISO14001 が実際に運用され始めているのと同様に、HMI 環境における安全性についても国際安全規格 ISO12100 が近い将来活用されるものと考えられる。

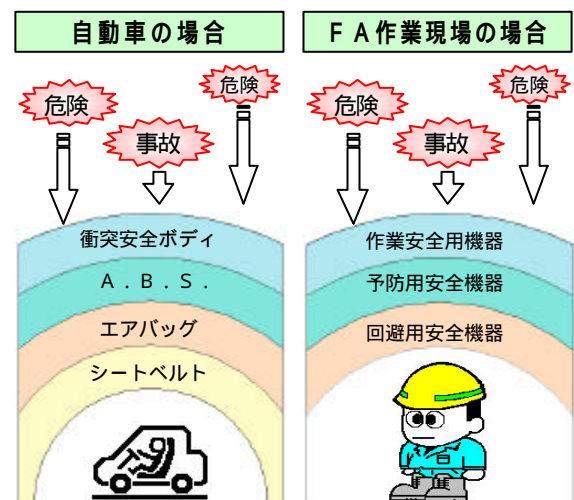


図1 自動車と作業現場の安全対策

Fig.1 Measures for safety at car and workshop

*1: 和泉電気株式会社

*1: IDEC IZUMI Corporation

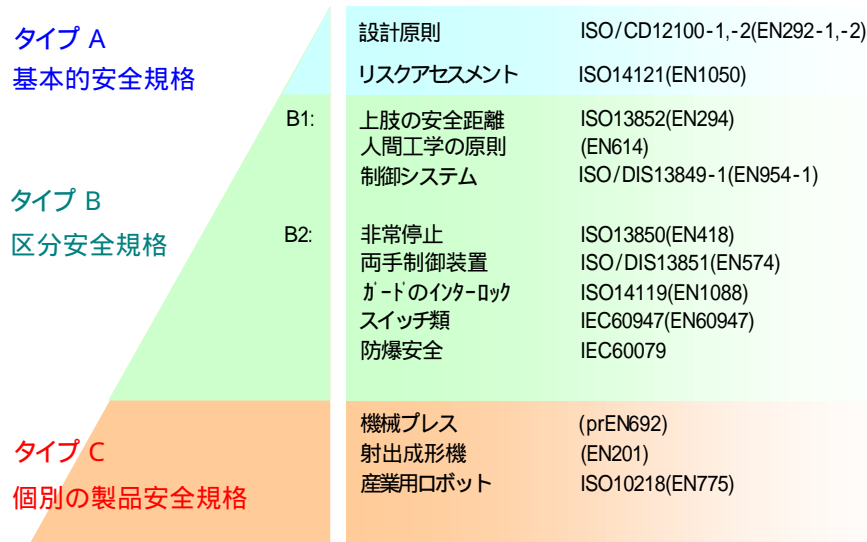


図 2 国際安全規格の 3 階層構造

Fig.2 Hierarchical system of International safety standards

欧州では、CEN¹と CENELEC²により機械の安全性に関する基本概念や設計の原則を規定する欧州安全規格 EN292 が制定されており、実に幅広く活用されている。この EN292 が、ウィーン協定³により国際安全規格 ISO 12100 として審議中⁴であり、わが国においても ISO12100 の JIS 化が検討されている。つまり、E N 規格が ISO⁵・IEC⁶ の国際規格を通じて JIS 規格になるというグローバル化の流れが存在し、国際安全規格 ISO12100 がわれわれにとって身近なものになりつつある。^{[1][2][3][4][5][6]}

2.2 国際安全規格の体系

国際安全規格は図 2 に示すような階層性を持つ体系で構成される。上位からタイプ A、B、C 規格の 3 階層に別れ、下位規格が上位規格に準拠する。タイプ A、B、C 規格の定義は次の通りである。^{[5][7]}

- (1)タイプ A 規格（基本的安全規格）:「あらゆる機械に対して共通に適用できる基礎概念、設計原則および一般的側面を規定する規格」で、すべての安全性の規格はタイプ A 規格に従う。
- (2)タイプ B 規格（区分安全規格）:「広汎な機械にわたって適用できる安全性に関する一側面、または安全関連装置の一形式を取り扱う規格」で、タイ

プ B 規格は可能な限り設計の詳細でなく設計の目的を扱う。特に安全関連装置については、より最適な安全設計を期待するために制約を最小にしている。

- (3)タイプ C 規格（個別の製品規格）:「特定の機械に対する詳細な安全要求事項を規定する規格」で、特定の機械にとっての重要なすべての危険を扱う。その際、関連するタイプ B 規格を引用する。

国際安全規格の頂点に位置するタイプ A 規格には、ISO12100(EN292)「機械類の安全性 - 基本概念、設計のための一般原則」と ISO14121(EN1050)「機械類の安全性 - リスクアセスメントの原則」の 2 つの規格があり、機械の安全を構築するうえで機械が持つ危険源を見つけ、評価するリスクアセスメントが重要視されている。

安全とは「受け入れ不可能なリスクがないこと (Freedom from unacceptable risk)」であり、別の言い方をすれば、残留リスク (Residual risk) が残っていても、広く受け入れ可能なリスク (Acceptable risk) であれば、「安全 (Safety)」として認めるということである。なお、リスクとは「傷害および健康障害の発生確率とそのひどさの

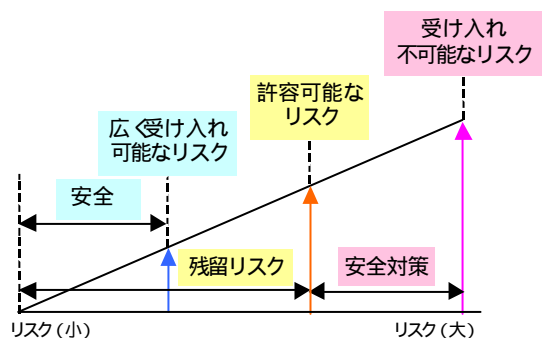


図 3 許容可能なリスクと安全

Fig.3 Acceptable risk and safety

¹ CEN: 欧州標準化委員会 (European Committee for Standardization の仏語に由来)。

² CENELEC: 欧州電気標準化委員会 (European Committee for Electrotechnical Standardization の仏語に由来)。

³ ウィーン協定: ISO・CEN 技術協力協定。

⁴ ISO12100 は現在、委員会原案 CD (Committee Draft) の段階。国際規格 ISO の制定手順として、新業務項目提案 NP 作業部会原案 WD CD 国際規格案 DIS 最終国際規格案 FDIS ISO の段階がある。

⁵ ISO: 国際標準化機構 (International Organization for Standardization)。

⁶ IEC: 国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission)。

組み合わせ」のことである。図3に許容可能なリスクと安全の範囲を示す。^{[2][3][5]}

リスクアセスメントを実施した結果、低減しなければならない残留リスクがあると判明した場合には、安全対策として本質安全設計による危険源の除去、およびリスクの低減を行い、かつ、除去できない危険源に対して安全防護によるリスクの低減を行う。最後まで低減できない残留リスクに関しては、使用者への情報提供（表示および文字による機械本体の表示など）と警告を行い、機械安全を確保することが必要となる。

3. 本質安全設計と安全防護による安全対策

3.1 本質安全設計によるリスク低減

機械の設計段階でリスク低減するために配慮する事項が国際安全規格 ISO12100 に記載されており、表1にISO/CD12100-2 3 項で示される本質安全設計によるリスク低減対策の例を要約して示す。^{[2][7]}

設計によるリスクの低減対策は、表1に示す通り機械自体や制御システムの安全設計、および作業者の危険区域への介入低減などいろいろな観点から配慮されている。なかでもISO/CD12100-2 3.6 項に「人間工学原則の遵守」がリスク低減対策としてあげられており、安全と人間工学に重要な関係があることがわかる。人間工学は「使いやすさ」の科学といわれており、機械の設計に人間工学を適用する場合、われわれが提唱する人と機械の最適環境を創造することにつながる。

われわれは、これまでも人と機械の最適環境の創造を目指し、押しボタンスイッチやLED表示灯などのSUI (Solid User Interface)や、LCDディスプレイ上にタッチスイッチを有するGUI (Graphical User Interface)、およびCCスイッチに代表されるGUI上にSUIの特長を組み合わせたSUI on GUIを提案し報告してきた。^{[8][9][10][11][12]}

表1 ISO/CD12100-2 で示される本質安全設計によるリスク低減対策例

Table 1 Risk reduction models through inherently safe products design (according to ISO/CD12100-2)

ISO/CD 12100-2	リスク低減対策（要約）
条項 3.1	鋭利な端部および角部、突出部の回避
条項 3.2, 3.	本質安全設計の採用（機械構成部品の安全距離確保、可動要素の運動エネルギーの制限、本質安全防爆設計など）
条項 3.3	機械設計および製作に関する一般的技術知識の配慮（機械的応力設計や材料選定など）
条項 3.5	構成部品間のポジティブな機械的作用の原理の適用（強制開離機構の採用）
条項 3.6 ・ 3.6.1 ・ 3.6.2 ・ 3.6.3 ・ 3.6.4 ・ 3.6.5 ・ 3.6.6 ・ 3.6.7	人間工学原則の遵守 ・ ストレス発生の回避 ・ 人間の動作、移動特性との適応 ・ 騒音、振動、高温等の回避 ・ 作業リズムと連続自動運転サイクルとの連動回避 ・ 適切な照明の採用 ・ 手動制御器のスイッチ、レバー等の適切な配置 ・ 指示、表示等の適切な配置設計
条項 3.7 ・ 3.7.1 ・ 3.7.2 ・ 3.7.3, 4 ・ 3.7.5 ・ 3.7.6 ・ 3.7.7 ・ 3.7.8 ・ 3.7.9, 10 ・ 3.7.12	制御システム設計時の安全原則の適用 ・ 機構の起動 / 停止の論理的原則の適用 ・ 動力中断後の再起動防止 ・ 信頼性のある構成部品の使用 ・ 重要構成部品の2重系化 ・ 自動監視の使用 ・ 再プログラム時の安全機能維持 ・ 手動制御器関連の原則（人間工学的配置） ・ 制御 / 運転モードの取り扱い留意事項 ・ 不具合の発見支援診断システムの採用
条項 3.8	空圧 / 油圧設備の危険源の防止
条項 3.9	電氣的危険源の防止（感電保護など）
条項 3.10, 3.11, 3.12, 3.13	危険源への暴露機会の制限（設備の信頼性向上、作業の自動化、保全の容易さなどによる）
条項 3.14	機械の安定性に関する配慮

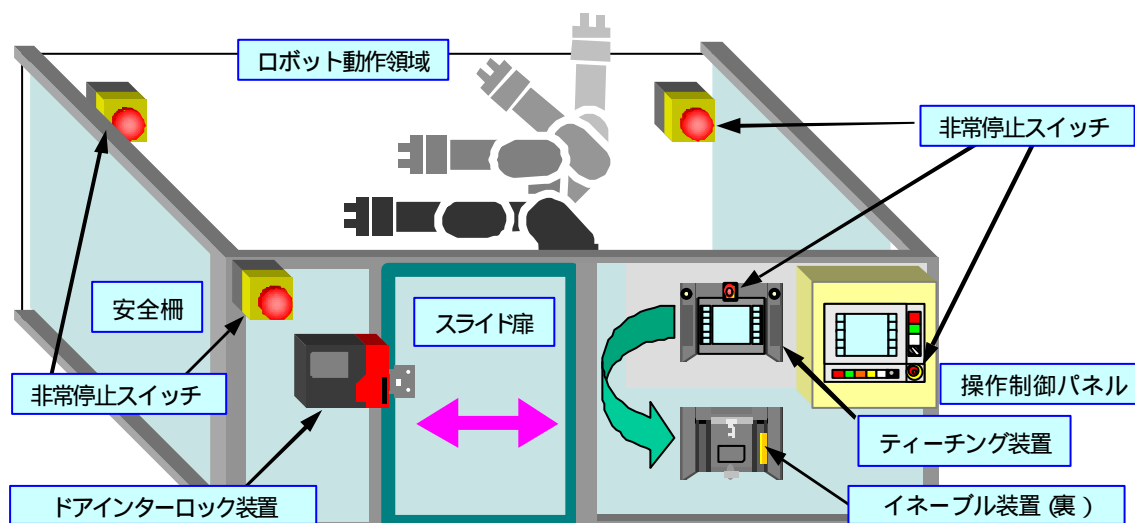


図4 安全を配慮した HMI 環境のモデル

Fig.4 A HMI environment model concerning safety

これらの SUI、GUI、SUI on GUI は使用環境に応じて最適なものが用いられ、HMI 環境において相互に特長を生かしながら共存関係にある。^[10]

また SUI のうち、事故予防や事故回避を目的とした非常停止スイッチ、イネーブル装置、ドアインターロック装置など安全と直接関わるものを特に Safety SUI と称する。これらは用途上、操作ミスなどのヒューマンエラーが直接事故に結びつく可能性があるため、人間工学原則の配慮だけでなく、国際安全規格に要求される構造要件に適合し、安全面から HMI 最適環境の創造を支援する。Safety SUI などを使用した HMI 最適環境のモデルとして図 4 にロボットを使用した設備を示す。^{[5][9]}

3.2 安全防護によるリスク低減

前述したように国際安全規格 ISO12100 では、本質安全設計によるリスクの低減でなお除去できない危険源に対して、安全柵とドアインターロック装置の組み合わせなど安全防護によるリスクの低減を行うことが規定されている。

災害は人と機械が共存する空間で発生する。つまり、人と機械が同一空間内に同時に存在しない場合は、人が機械の可動部に接触するなど災害が発生する危険性はなく安全が確保されている状態である。すなわち、人と機械を空間的に分離すること（隔離の原則）、あるいは時間的に分離すること（停止の原則）が安全防護の原則である。具体的な方法として次のような方法が考えられる。

^{[5][13]}

- (1) 隔離の原則：安全柵による安全防護
- (2) 停止の原則：ドアインターロック装置などの安全装置による安全防護

これら隔離の原則と停止の原則のモデルを図 5 に示す。

工作機械などによる労働災害は、作業者が機械の危険な可動部と接触することによって発生するが多い。このような災害を防止するには、まず機械の危険な可動部の動作領域を安全柵などで囲うことによって作業者と機械を空間的に分離することが基本となる。しかし、実際の作業では両者の作業領域が重なるため、隔離によ

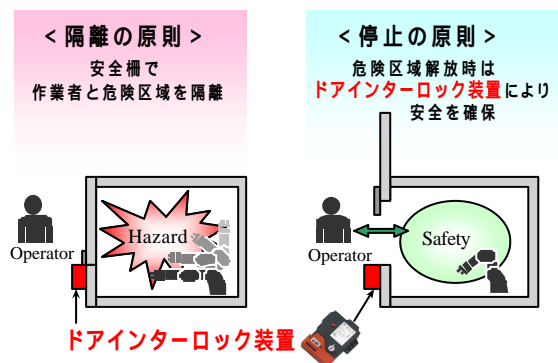


図 5 隔離の原則と停止の原則

Fig.5 Principles of "Separating" and "Stoppage"

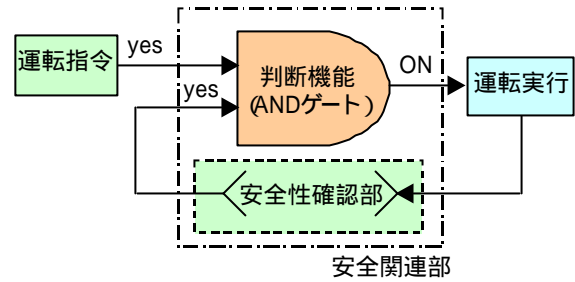


図 6 安全確認型システムの考え方

Fig.6 Principle of the safety acknowledge type system

ては安全を確保できないことも多い。

このため、多くの機械では機械の動作領域に人体が進入しそうなことを検出する安全装置を設け、この装置からの情報に基づいて、機械の運転を許可したり、禁止したりするシステムを設けている。このようなシステムをインターロックと称し、^[14] これは人と機械が共同して作業を行う HMI 環境においては重要原則のひとつとなる。

また、安全対策を支える基本原則に Failure to Safety(安全側故障)がある。^[15] Failure to Safety の考えは、安全が立証できない場合、決して「安全」とは認めないというのが鉄則である。安全とは、単に災害が発生していない状態をいうのではなく、具体的な危険に対して、その危険による災害が発生しないための安全対策を実現して初めて、その危険に対して安全といえるのである。

インターロックにおいても、危険区域を監視し作業者が危険区域に近づいた危険情報を機械に与えて停止させる「危険検出型」のシステムと、作業者が危険区域に存在しない安全情報を機械に与えて運転を許可する「安全確認型」のシステムの 2 つの形態がある。^{[4][5][16]}

両者の違いは安全装置が故障したときに顕著に現れ、前者は危険情報の伝達が故障したときに機械に「安全」という判断をさせてしまうことに対し、後者は安全情報の伝達が故障したときにも機械に「危険」という判断をさせることができる。つまり後者の安全確認型システムが Failure to Safety であり、HMI 最適環境において、インターロックは安全確認型の形態とする必要がある。以上に述べた安全確認型システムの考え方を図 6 に示す。

^{[4][5][16]}

わが国の従来の労働災害防止対策では、機械の信頼性向上や作業者の教育・訓練の強化によって災害発生件数の減少を図る場合が多い。これに対し、本稿で説明する安全確認型の制御システムでは、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、仮にヒューマンエラーが起きても、作業者に危害をおよぼさない構造を設計段階で構築しておくことが基本となる。これは、国際安全規格 ISO12100 に規定された安全対策の基本的考えとも整合するため、ISO12100 を含め国際安全規格の内容を

理解・実践することが、われわれが提唱する「人と機械の最適環境の創造」への近道となる。[7][14]

4. 人と機械の最適環境を創造する ドアインターロック装置の役割

以上「安全」のキーワードを重要視し、国際安全規格に基づいたリスクアセスメントや、事故を予防し、リスクを低減する安全対策を進めることが人と機械の最適環境の創造につながると提案したが、実際に図4で示したロボット設備を例にドアインターロック装置の役割を考える。

ロボット動作領域は、人が可動部に接触する恐れがあり危険区域といえる。よって、隔離の原則に従い安全柵で人と危険区域を隔離する。

しかし、実際の作業においては、調整・設定、ティーチング、工程の切替、清掃、保全など作業者は危険区域に進入せざるを得ないため、安全柵には扉が設けられ、その扉部分には安全確認型のドアインターロック装置を設置し作業者の安全を確保する。なお、Safety SUIのドアインターロック装置には、次のような国際規格に基づいた安全性の配慮が考えられ実践される。[5][7][8][17][18]

- (1)停止の原則、再起動防止制御を満たすインターロック機構の採用(ISO14119、ISO12100-2 3.7.2)
- (2)ドアを開けたとき、万一接点が溶着していても回路を確実に遮断する強制開離機構の採用(IEC60947-5-1、ISO12100-2 3.5)
- (3)ドアが開いているときに機械を運転させないため、専用アクチュエータ以外での操作を防ぐ、誤操作防止機構の採用(ISO14119)
- (4)惰性運転など機械の危険な状態が終わるまでドアをロック解除させない独自のドアロック機構の採用(ISO14119)
- (5)ドアが確実にロックされるまでは運転可能とならないよう、制御のメイン回路上にロック/ロック解除状態をモニタする接点の設置(ISO14119)
- (6)動力部の断線や故障などによるロック解除を防ぐため、バネでロック、動力(ソレノイド)でロック解除する構造の採用(ISO14119)

以上が代表的な要件となるが、これらの要件を満たすドアインターロック装置を図7に示す。[5] ドアインターロック装置は、特に事故を予防し、安全を確保することから「安全スイッチ」と称される。

安全スイッチは大きくドアロック付き/無しの2タイプに分けられ、機械の安全レベルにより使い分ける。機械の惰性動作の有無および惰性動作時間が選択の基準となり、図8にその基準および考え方を示す。図中の簡易式で表されるように、機械の惰性動作によりドアロック無しの安全スイッチでは危険源と人を時間的に分離する停止の原則が守られないと判断される場合は、ドアロッ

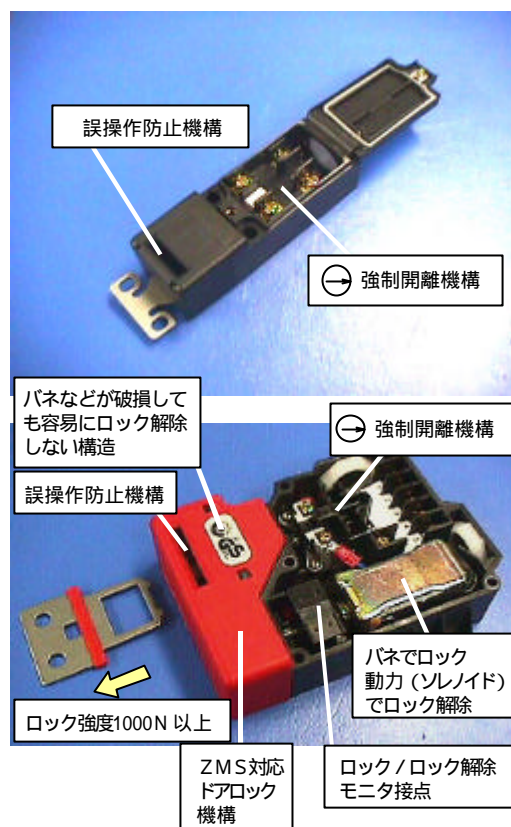


図7 安全スイッチ

Fig.7 Safety switch

ク付き安全スイッチを使用し惰性動作対策とする。

また、惰性動作以外にも機械の安全レベルは様々であり、対象とする機械の危険性が高ければ安全性能も高くする必要がある。ISO13849-1(EN954-1)「機械の安全性 - 制御システムの安全関連部分」では、安全に関わる制御システムの安全機能の維持能力を順に高レベルとしてカテゴリB、1、2、3、4とランク分けしており、高度なカテゴリでは安全スイッチに安全リレーモジュールを組合せ、制御回路の故障対策を行うなど安全レベルに適合した制御システムを構築する必要がある。[19]

安全を確立していくうえでは、本質安全設計に基づく使いやすさを追求し、国際規格に基づいた安全性の配慮

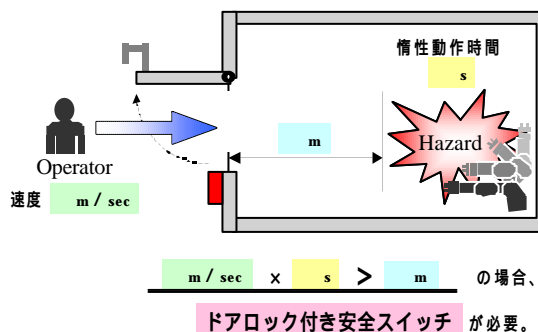


図8 機械の惰性動作対策の考え方

Fig.8 Principle of measures against inertial working

および Safety SUI の安全レベルに応じた適切な選択により安全対策を推進することで、HMI 最適環境は創造される。

5. おわりに

本稿では、HMI 環境における「安全」について、人文学の原則を含む国際安全規格に基づき、その重要性とわれわれが提案する安全面の配慮を述べてきた。

また、国際安全規格のグローバル化の流れに伴い、今後わが国でも機械安全の基本となるタイプ A 規格を頂点とした規格体系化が進み、F A などの産業分野を中心として急速な安全意識の高まりが予測される。

われわれは、「安全」の考え方に関して、グローバルな視点で率先して本質的な安全思想に基づいた国際安全規格に適合させると共に、今後も引き続き安全の観点から人と機械の最適環境の創造に対して提案していく所存である。

謝辞

日頃より安全に対する考え方をご指導いただく安全技術応用研究会各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 丸山: 機械安全の国際規格と C E マーキング; 日本規格協会, (1998)
- [2] 向殿: ISO「機械安全」国際規格; 日刊工業新聞社, (1999)
- [3] 機械類の安全性 国際規格の現状 (国際規格の JIS 原案について); 日本機械工業連合会, (1998)
- [4] 蓬原, 糸川: 安全への新たなアプローチ; 安全技術応用研究会, (1996)
- [5] 山本, 上野, 福井, 松本: 欧州規格に対応した安全機器の開発; IDEC REVIEW 1999, 和泉電気株式会社
- [6] 石田: グローバル化する規格と当社の活動; IDEC REVIEW 1999, 和泉電気株式会社
- [7] ISO/CD12100-1,-2: 1998, Safety of machinery -- Basic concepts, general principles for design
-- Part 1: Basic terminology, methodology
-- Part 2: Technical principles and specifications
- [8] 関野: EN/IEC 規格と安全機器; IDEC REVIEW 1996, 和泉電気株式会社, p10-p18
- [9] 福井, 上野, 松本, 藤田: 操作における安全性を追求した 3 ボジションイネーブルスイッチの開発; 計測自動制御学会ヒューマン・インターフェース部会, 第 14 回ヒューマン・インターフェース・シンポジウム論文集, p659-p664, (1998)
- [10] 荻野, 石野, 中島, 松本, 米澤, 辻, 藤田: モバイル形操作表示器を用いた HMI 環境の最適化; 計測自動制御学会ヒューマン・インターフェース部会, 第 14 回ヒューマン・インターフェース・シンポジウム論文集, p295-p300, (1998)
- [11] 中井, 関野, 笠間, 藤井, 辻, 藤田: GUI と SUI の融合によ

る新しい HMI 操作表示環境の構築; 計測自動制御学会ヒューマン・インターフェース部会, 第 14 回ヒューマン・インターフェース・シンポジウム論文集, p493-p498, (1998)

- [12] 米澤, 荻野, 石野, 中島, 松本, 辻, 藤田: モバイル形操作表示器によるロボットティーチングの操作性向上; 計測自動制御学会, システム / 情報合同シンポジウム'98 論文集, (1998)
- [13] 糸川: 機械安全の基本と技術基準の動向; 平成 9 年度安全技術講演会 (特別講演会) 講演概要集, p1-p10, (1997)
- [14] 梅崎, 杉本: 機械制御回路の安全化手法; 産業安全研究所安全資料, NIIS-SD-NO.13, p19-p34, (1996)
- [15] 梅崎, 糸川: 機械プレス of の安全に関する欧州規格と我国関係法令との比較; 産業安全研究所安全資料, NIIS-SD-NO.14, p41-p63, (1996)
- [16] 杉本: 工作機械制御回路のフェールセーフ化手法; 平成 9 年度安全技術講演会 (特別講演会) 講演概要集, p22-p29, (1997)
- [17] ISO14119: 1998, Safety of machinery -- Interlocking devices associated with guards -- Principles for design and selection
- [18] IEC60947-5-1: 1997, Low-voltage switchgear and controlgear Part 5-1: Control circuit devices and switching elements -- Electromechanical control circuit devices
- [19] EN954-1: 1996, Safety of machinery -- Safety-related parts of control systems -- Part 1: General principles for design