

危険箇所※1における インターロックの考え方

(独) 労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所

大塚 輝人 Teruhito Otsuka

1. はじめに

労働安全衛生規則（安衛則）第280条では、引火性の物の蒸気又は可燃性ガスが爆発の危険のある濃度に達するおそれのある箇所において、防爆性能を有する防爆構造電気機械器具でなければ使用してはならないとされている。ここでいう防爆性能とは、燃焼の3要素である可燃物・空気・点火源の内、想定される爆発性雰囲気に対して点火源とならない、例えば最大安全隙間によって火炎が外部にでんばすることを防ぐような性能を指している。そのため、目的の機能を果たす電気機械器具が爆発性雰囲気内で同時に存在しても爆発には至らず、安全な操業が可能になる。防爆機器の一例として、着火性の火花放電を起こさない本質安全防爆構造を持ったスマートフォ

ンとヘッドセットと、危険箇所でも着脱可能な防爆性能を持ったバッテリーを図1に示した。一方、先に挙げた3要素が同時に存在しなければ、同様に爆発災害を防ぐことができ、可燃物の検知によって電気機械器具の点火能力を除く、いわゆるインターロックも爆発を防ぐ方法となる。国際規格である International Electrotechnical Commission (IEC) の IEC60079-10-1: 2020では、ある場所における可燃物の放出と当該可燃物を希釈する換気、そしてその換気の継続性で危険箇所を判定している。可燃物の放出は、配管の継ぎ手等も潜在的な漏洩源と考えており、連続等級 (continuous)、通常の操業で排出のある第一等級 (primary grade)、通常の操業では漏洩を想定していない第二等級 (secondary grade) に分類される。各々の放出量を仮定して換気

図1 Zone 1で利用可能な Android スマートフォンと WiFi 接続可能な Android ヘッドセット (左) と危険箇所でも交換可能なバッテリー (右)



※1
危険箇所
本稿では危険箇所の区分について原文での標記のまま使用しているが、Zone 0=特別危険箇所、Zone 1=第一類危険箇所、Zone 2=第二類危険箇所と考えて差し支えない。

量との釣り合いによってどの程度の爆発性混合気となるかを想定することで、希釈度 (dilution) も高 (high)、中 (medium)、低 (low) に分類される。換気の継続性は「換気有効度 (availability of ventilation)」として良 (good)、可 (fair)、弱 (poor) の三段階で評価されるが、これは時間的な概念であり、換気の停止が可燃物の発生と同時になければ良いことを前提としている。つまり、時間的な概念の利用が否定されているわけではなく、単に明確な定量的基準として採用されていないというのが現状である。表1として危険箇所を判定するために利用される、IEC60079-10-1: 2020の Table D.1に示された表を引用した。IEC60079-10-1: 2020では、人工換気を利用して危険箇所の種類を変更したり、範囲を縮小したりすることが可能であり、その継続性についても自然換気よりも良くすることができる旨が明記されている。

以下では、既存の危険箇所判定との比較に

より、濃度監視を伴ったインターロックシステムの可用性を考察する。本稿は、厚生労働科学研究費補助金労働安全衛生総合事業 JP-20JA1002を受けて行った研究¹⁾の一部を再構成したものである。

2. 我が国における現状

労働安全衛生総合研究所技術指針 TR-No.39では、インターロックに関して以下の記述がある。

1550 電気設備の防爆対策の特例

(1) 換気装置とインターロックを持つ防爆対策の特例

建家の内部は、換気の程度によって、爆発危険箇所の範囲が狭くなるか、より危険度の低い爆発危険箇所となるか、あるいは非危険場所となる。したがって、全体強制換気又は局所強制換気を活用して爆発危険箇所の種別

表 1 危険箇所の分類表 (IEC 60079-10-1 : 2020 Table D.1 から抜粋引用し、矢印を加えた)

Grade of Release	Effectiveness of Ventilation						
	High Dilution			Medium Dilution			Low Dilution
	Availability of ventilation						
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor	Good, fair or poor
Continuous	Non-hazardous (Zone 0 NE)	Zone 2 (Zone 0 NE)	Zone 1 (Zone 0 NE)	Zone 0	Zone 0 + Zone 2	Zone 0 + Zone 1	Zone 0
Primary	Non-hazardous (Zone 1 NE)	Zone 2 (Zone 1 NE)	Zone 2 (Zone 1 NE)	Zone 1	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 or Zone 0
Secondary	Non-hazardous (Zone 2 NE)	Non-hazardous (Zone 2 NE)	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 1 and even Zone 0

及び範囲を低減するとともに、換気装置とインターロックをもたせることにより、一般の電気機器を使用することも可能となる場合がある。

(2) ガス検知器とインターロックをもつ
電気設備

爆発性雰囲気が存在する範囲が狭く、持続時間も短い場合は、放出源の周囲の環境をガス検知器で検知し、爆発性ガスの濃度が爆発下限界の25%以下の場合に限り、ガス検知器とインターロックをもたせることにより、一般の電気機器を使用することも可能である。

「(1) 換気装置とインターロックを持つ防爆対策の特例」に関しては、ガス検知器と換気装置間にインターロックを持たせ、放出が多い場合には換気風量を大きくするという形の制御を示している。IEC60079-10-1: 2020では、

On the other hand, artificial ventilation that serves the areas exposed to explosion conditions usually has a good availability because it incorporates technical means to provide for high degree of reliability.

の記載があり、自然換気に比べて人工換気は信頼性を高くすることも可能である。(good availability は換気有効度が「良」であることを意味している)

しかし、「(2) ガス検知器とインターロックをもつ電気設備」については、昭和35年11月22日基発第990号通達によって指定される、安衛則第283条に示された安衛則第280条に対する修理作業等の適用除外の措置に該当しないとされている。以下に当該通達を示す。

「爆発又は火災の危険が生ずるおそれがない措置」とは、隔壁による完全隔離、局所排気、作業対象物としての配管、容器等の内部の可燃物の完全排気、又は不活性ガスによる置換等の措置であって、当該ガス、蒸気又は粉じんの危険性に対して、適応するものをいうこと。

したがって、現在我が国ではガス検知器とインターロックをもつ電気設備は利用することができない。

3. 危険箇所の時間的区分

労働安全衛生総合研究所技術指針 TR-No.44では、American Petroleum Institute Recommended Practice 505 (以下 API RP505) を引用して、以下の時間的な基準について言及している。

API RP505では、爆発性雰囲気の生成時間が年間1,000時間を超える場合を特別危険箇所に、1,000時間から10時間の場合には第一類危険箇所に、10時間から1時間の場合には第二類危険箇所に相当するという目安を示している。

ただし、上記の API RP505からの引用は1997年版からのもので、現行版である2018年版では該当する表が削除されており、なぜ削除されたのかの理由は示されていない。それでも、API RP505同様に国際的に引用される危険箇所分類である英国 Energy Institute Model Code of Safety Practice Part 15: Area Classification for Installations Handling Flammable Fluid にも、現行2015年版に Table 1.2として、上記と同じ危険箇所と可燃性混合気の年間の存在時間の関係について示されている。ただし、そこには非危

表2 放出等級と危険箇所の時間的基準 (Energy Institute Model Code of Safety Practice Part 15 より引用)

Grade of release	Likely to occur in normal operation	Presence of flammable atmosphere hours/yr in open area	Zone
Continuous	Yes	Greater than 1000	Zone 0
Primary	Yes	1000 - 10	Zone 1
Primary	Yes	Fewer than 10	Zone 2
Secondary	No	Greater than 10	Zone 1
Secondary	No	Fewer than 10	Zone 2

危険箇所との閾値についての記載はない。EI-MCSP15の表では放出等級と直結した形で危険箇所が提示されている。表2に同表を引用した。

4. 機能安全による機器のダウンタイムの計算と換気有効度との関連付け

表1は換気度=dilutionとして考えれば、平成20年9月25日厚生労働省基発第0925001号通達で指定された判定表と基本的に同じものである。ここで換気有効度は、good (良)、fair (可)、poor (弱)の三段階で評価されることになるが、同規格の中で、下記の定性的な評価基準が示されているのみである。

- good: ventilation is present virtually continuously;
- fair: ventilation is expected to be present during normal operation. Discontinuities are permitted provided they occur infrequently and for short periods;
- poor: ventilation which does not meet the standard of fair or good, but discontinuities are not expected to occur for long periods.

以下では、換気の継続性を換気装置の故障率と紐づけるため、機能安全の考え方を利用

する。運転時間 T_{opy} を一年間=8760 h とし、その運転中における定期点検間隔を T_{op} とし、ある装置の危険側故障の内、定期点検の際にしか見つけえない故障の発生率 λ_{du} [h^{-1}]、定期点検の際に発見された故障を修理する時間を MRT [h]、定期点検以外で発見可能な故障の発生率を λ_{dd} [h^{-1}]、その際の修理に必要な時間を $MTTR$ [h] とすれば、装置故障によって期待どおりに動かない年間のダウンタイム T_{cey} [h] は以下の式で表せる。

$$T_{cey} = \lambda_{du} T_{opy} \left(\frac{T_{op}}{2} + MRT \right) + \lambda_{dd} T_{opy} MTTR \quad (1)$$

定期点検の間で定期点検の際にしか見つけえない故障の発生確率が同じであるとする、故障の発生から発見までにかかる時間の期待値は時間の積分値として $T_{op}^2/2$ に対し区間 T_{op} で平均することになるので、定期点検の間隔の半分となる。第一項はその期待値に修理時間を加えて一度の故障で機能していない時間とし、そこに発生回数として発生率と運転時間をかけたものである。第二項は直ちに故障が発見される場合を想定して、故障の発生率と運転時間をかけて得られる故障の発生回数の期待値に、修理時間をかけたものである。いずれも独立であることから、和としてダウンタイムは評価されている。

式(1)に従って、例えば換気システムの故障について、 $MRT=MTTR=8$ h, $T_{op}=1$ y=8760 h, $10 \lambda_{du}=\lambda_{dd}=6.0 \times 10^{-6} h^{-1}$ とした場

合、ダウンタイムは23.5 h と計算できる。このダウンタイムは、3章で引用した時間基準からは Zone 1 と判定することが可能である。この場合連続等級の放出源に対して、poor（弱）の換気有効度を持つと解釈されることとなる。

同じ例で、定期点検の期間を3か月に1度 ($T_{op}=2190$ h) とした場合、ダウンタイムは6.2 h と計算でき、Zone 2 に対応するものと考えられる。これは表1白抜き矢印が示すように、連続等級の放出源に対して、換気有効度が poor（弱）から fair（可）になったことと対応づけることができる。以上は、IEC60079-10-1: 2020で定性的に指定された換気有効度について、機能安全の考え方から定量的に評価することが可能となったことを示している。

5. 非危険箇所 (Zone 2 Negligible Extent) の時間的閾値

非危険箇所と Zone 2 との線引きについても、例えば、放出等級連続 (Continuous) と第二等級 (Secondary) とで100倍以上の放出時間の違いがあることから、換気有効度可 (Fair) の列を見ることで、非危険箇所とみなせる時間区分は、Zone 2の最大値10 h の、少なくとも1/100である0.1 h 未満であることが期待される。(表1グレーの矢印参照)

ダウンタイム0.1 h は、3章で引用した第二類危険箇所1 h よりも小さく、より安全側の指標である。ただし、実機で達成するには不可能ではないものの、困難な値である。例えば、4章と同じモデルで定期点検の期間を3か月に1度 ($T_{op} = 2190$ h) にし、 $10 \lambda_{du} = \lambda_{dd}$ を保って λ_{du} のみ変化させた場合、 λ_{du} は 10^{-8} h^{-1} 程度になる。

あるいは同じ数字を濃度監視と連動するイ

ンターロック回路について適用したとして、1年に0.1時間の割合は 10^{-5} に相当し、これをインターロック回路の起動に関するオンデマンドでの故障率と解釈すれば、原子力発電所などで求められるようなレベルの低頻度での故障率が必要になってしまう。

以上のように単体での達成は困難であるものの、そのような場合であっても換気システムの故障検知に加えて、放出の監視によるインターロックを行うなど、多重化することで達成は可能な数字である。

また、図1に示した危険箇所では交換可能なバッテリーについて、電池出力が使用目的に応じられるかはその用途によるものの、二次電池も存在することを確認している。インターロックと当該防爆電池が利用できるのであれば、可搬式機材であっても本稿の議論は適用可能で、インターロック作動後は単に防爆電池が危険箇所内に存在するだけとなり、これは実用上点火源にはなりえない。

6. インターロックの作動条件

これまではインターロックによる可燃性物質と点火源との分離について、同時性をダウンタイム観点から定量化し、非防爆機器を利用するにあたっての基準を Zone 2 Negligible Extent と同等になるよう閾値を考察した。したがって、インターロックのトリガは可燃性物質濃度でとることになる。アメリカとカナダにはインターロックのトリガ要件として20%LFL (Lower Flammable Limit) と40%LFLが設定されている。アメリカにおいては、API RP505の6.8.2(d)に20%LFLでのアラーム発報、(e)に40%LFLでの電源断の基準が示されている。カナダでも、Canadian Electric Code C22.1 18-068 c) の i) に20%LFLでのアラーム発報、iii) に40%LFLでの

電源断の基準が示されている。カナダでの要件には、適当な防爆機器が利用できない場合に限ること、また利用できないとは認証された機器が市場で入手可能であるにもかかわらず、所有者または設置者がたまたまその機器を所有していない場合を意味するものではない旨注記がある。

なお、平成29年1月12日 基発0112第4号「危険物乾燥設備における爆発災害の防止について」の一部改正についての通達で、30%LFL^{※2}での発報と50%LFLでの電源断について言及されている。安衛則上は第322条で、地下作業場等において、30%LFLでの作業者の退避を義務付けている。

7. おわりに

その漏洩による影響が無視するという意味で Zone 2 Negligible Extent 標記での非危険箇所である以上、危険箇所のある/なしの二元的な取り扱いでなく、漏洩のリスクは定量的に評価される必要がある。換気有効度は、定量的判断の難しい指標であったが、時間的な危険箇所の判定を受け入れられれば、機能安全の考え方から定量判定が可能となる。同様に故障率によって期待どおりに動かない時間であるダウンタイムを評価することで、点火源の空間的な排除だけでなく、時間的な隔離についても整理が可能であることを示した。

ITを利用したいいわゆるスマート保安を導入するにあたって、当該機器の防爆化が大きな壁となっていることは否めない。しかし、防爆性能自体はいわゆる枯れた技術として存在しているため、ニーズが高ければ実装することは難しくはない。本稿で示した考え方は、最新技術を反映した場合や、出力と重量とのトレードオフがあるドローンなど何らかの理由で実装に至らない機能へも、爆発災害を引き起こさない目的で適用可能な定量的リスク

評価の方法である。2章で引用したとおり、現時点ではインターロックは安衛則第280条に対する適用除外措置とはなっていないが、将来的に受け入れられることを著者は願っている。

参考文献

- 1) 国際的な防爆規制に対する整合性確保のための調査研究、<https://mhlw-grants.niph.go.jp/project/165027> (参照日: 2024年6月1日)。

おおつか●てる少と

早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。名古屋大学工学部から博士(工学)。労働省産業安全研究所化学安全研究部に入所・配属。数度の改組を経て、現在(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 研究推進・国際センター/化学安全研究グループ首席研究員。主にガス爆発における爆風に関する研究、熱分析、災害の原因調査・分析に加えて、研究所国際関係業務に従事。

※2 LFL

厳密には通達上は爆発下限界で示されているので、LEL (Lower Explosion Limit)であるべきだが、ここでは比較のためLFL表記としている。