

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総括研究報告書

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

研究代表者 大塚輝人 （独）労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所
化学安全研究グループ 首席研究員

研究要旨 R3 年度研究項目 4 点について検討した結果は以下のとおりであった。

(1) ガス検知機とインターロックの利用による EPL（防爆性能）
評価・運用方法

保護方策に対する故障率からダウンタイムの期待値を計算し、APIRP505:1997 の基準と照らし合わせることで、換気有効度を定量化した。また、ダウンタイムの考え方をインターロック等の監視機器によって担保する方法に拡張することで、インターロックに必要な機能安全のレベルについて考察した。

(2) IECEx スキームにおける認証の信頼性確保方法

IECEx スキーム上での ISO/IEC17025、ISO/IEC17065 による監視評価軽減について調査した。二つの規格内で信頼性確保に寄与する内容について確認した。

(3) 検定制度によらない安全確保措置と我が国での適用可能性に係る提言

PEP に関して、IEC TC31 SC31J WG2 において現在議論されている資料を基に各国意見の整理を行い、我が国における可用性についての検討を行った。

(4) 新たな手法による防爆性能の評価方法と提言

ドローンが現行の防爆検定になじまないことから、どのような形で安全を担保するべきかの検討を行った。また、我が国において未導入である砂詰め防爆に関して、模擬的な試験を実施し、試験の実施ができるか、また防爆技術として我が国で利用できるかについて検討し、ほぼ問題が無いことを確認した。

研究分担者

遠藤 雄大

独立行政法人労働者健康安全機構
労働安全衛生総合研究所研究員

牧野 良次

国立研究開発法人産業技術総合研
究所・安全科学研究部門・主任研
究員

久保田 士郎

国立研究開発法人産業技術総合研
究所・安全科学研究部門・研究グ
ループ長

A. 目的

Internet of Things(IoT)技術を受け、生産活動を補助する機器が発展を続けている。デジタルでの記録は、物理的な制約を受けづらいため、収集間隔を短く設定することが可能であり、記録を長期さかのぼることも容易になっている。また、深層学習を用いた AI 技術によって、推移の予測を含めてより生産活動を効率的に行うことができるようになってきている。また、作業者を補助するための、マニュアルや通信をデジタルデバイスに置き換えることは、単に資料量を多くするというだけの意味ではなく、検索技術や映像からの判断といった新たな切り口によって情報提供が可能になる。一方可燃性物質を扱うような場所では、爆発性の混合気が生成する可能性があり、デジタルデバイスを構成する電子機器は潜在的にその着火源になる。そのため、労働安全衛生法では、そういった場所で労働者が働く場合に、着火源とならないための何らかの措置を施した電気機械器具、すなわち防爆電気機械器具のみが利用を認められている。

先に述べたように、IoT に用いられるようなデジタルデバイスは、開発サイクルが極めて短く、防爆品として開発利用することが困難である。防爆技術自体は可燃性物質の隔離、消炎に関する既往の研究を踏まえて、確立されているが、その限界に対する尤度については未だ検討の余地がある。国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission:IEC)では、Technical Committee-31(TC-31)での検討を踏まえて、IEC60079 シリーズとして着火性能を有さないことを示すための試験方法を提示している。我が国においても、電気機械器具防爆構造規格によって IEC の提示する防爆規格を受け入れている。本研究では、我が国での安全性を損じることなく、IEC との整合性を高めるための調査研究を行う。

B. 研究概要

本研究では、以下の4項目についての調査研究を行っている。

(1) ガス検知機とインターロックの利用による EPL (防爆性能) 評価・運用方法

諸外国の防爆規制の状況を踏まえて、ガス検知機とインターロックの併用による機能安全の考え方の適用方法についての検討を行う。機能安全の考え方に立脚したりリスク低減等を考慮した運用の評価について、事例の収集と整理をおこなう。

(2) IECEx スキームにおける認証の信頼性確保方法

国際規格に基づく認証制度 (IECEx スキーム) を取り入れて独自の検定

制度を持たない国（オーストラリアなど）や、今後防爆機器認証制度を導入しようとしている国（マレーシアなど）で実施や検討がなされている、検定制度によらない安全確保の方策についての調査を行う。それらの調査を踏まえた上で、安全性確保と新技術導入に関連する事例の収集と分析を EU、米国等の独自の検定制度を運用している国についても調査し、その良い点と課題について明確にする。

(3) 検定制度によらない安全確保措置と我が国での適用可能性に係る提言

(2)で調査した結果を踏まえて、検定制度によらない安全性確保措置を我が国の検定制度に適用する可能性について提言を行う。

(4) 新たな手法による防爆性能の評価方法と提言

IEC での規定があるものの国内未導入の規格、例えば砂詰め防爆等についての問題点や、除電器等高電圧を利用するため一般的な防爆試験になじまない機器に関しての防爆試験法を検討する。

初年度である令和 2 年には、(1)について先行して行った研究の結果を再構成するとともに、論点整理を行った。令和 2 年度は、COVID-19 の影響もあり、(2)として IEC のスキームである遠隔監視による立会試験について、優先して委員会形式をとって検討した。(3)については、IEC へ新規提案された portable or personal electrical product の考え方について、我が国の現状に鑑み検討考察を行った。(4)については、ドローンに見られるような高高度からの墜落試

験についての調査を行った。

C. 研究結果

1. ガス検知機とインターロックの利用による EPL（防爆性能）評価・運用方法

以下では、機能安全の考え方を基に、ダウンタイムを議論する。その結果から、換気有効度を定量化する方法について考察し、次に同等のダウンタイムを達成するために放出抑制方策やインターロックシステムに要求される性能について述べる。なお、本稿については安全工学会誌に投稿した論文を基に構成しており、詳細については資料 1.1, 1.2 を参照されたい。なお、資料 1.1、1.2 に関しては著作権が安全工学会に帰するため、デジタル上では非公開とする。

1.1 換気有効度の定量化の必要性

爆発性雰囲気はガス状の可燃性物質(可燃性ガス)又は可燃性粉塵が放出されることで生じる。爆発性雰囲気が存在する程度は労働安全衛生法上、危険箇所として分類される。昨年度の本研究報告では、IEC 60079-10:2002 を基とした現行の JIS C60079-10:2008 による判定と、IEC 60079-10-1:2015 による判定を比較することで、危険性の増減を考察した。その結果、IEC 60079-10-1:2015 は、JIS C60079-10:2008 の安全率の範囲で解釈することが可能であることを結論付けた。いずれの判定表も、換気度と希釈度の呼び方の違い、

Negligible Extent の明示等、微細な違いがあるが、ほぼ同等である。本稿でも換気度と希釈度については同じものとみなす。いずれの判定方法においても、可燃性物質が存在する区域において、可燃性ガスの放出等級と換気度、及び換気有効度から危険箇所を判定している。表1には、危険箇所判定の表として、JIS C60079-10:2008 に基づいた、厚生労働省平成20年9月25日基発第0925001号通達 参考の表を示した。

表1における非危険区域は、無視できる程度の狭い範囲 (Negligible Extent 以下, NE) を含んでおり、可燃性ガスの放出量に対して十分な希釈をすることで爆発性雰囲気構成する範囲が殆どない状態を許容している。

以下に各要素についての基準を記す。

危険箇所

1) 特別危険箇所：

爆発性雰囲気が通常の状態において、連続し長時間にわたり、又は頻繁に生成する区域をいう。

2) 第一類危険箇所：

通常の状態において、爆発性雰囲気をしばしば生成するおそれがある区域をいう。

3) 第二類危険箇所：

通常の状態において、爆発性雰囲気を生成するおそれが少なく、また、生成した場合でも短時間しか持続しない区域をいう。

放出等級

1) 連続等級：

連続的な放出又は高頻度、若しくは長期にわたって発生すると予測できる放出

2) 第一等級：

通常運転中に周期的、又はときどき発生すると予測できる放出

3) 第二等級：

通常運転中には発生しない、又は低頻度で短時間だけ発生すると予測できる放出

換気度(希釈度)

1) 高換気：

可燃性ガスが放出している際も、放出箇所から離れるとその濃度は急速に低下し、放出が停止した後は、可燃性ガスは検知されない。

2) 中換気：

可燃性ガスが放出されている際は、可燃性ガスは定められた範囲内に制御され、放出が停止した後は、過大な濃度の可燃性ガスは検知されない。

3) 低換気：

可燃性ガスが放出されている際は、爆発下限界を越える濃度の可燃性ガスが検知され、放出が停止した後も、爆発性雰囲気が残ることを防止できない。

換気有効度

1) 良：実質的に連続した換気が存在する。

2) 可：通常運転中に換気が予測でき

表1 危険度区域分類表
 (厚生労働省平成20年9月25日基発第0925001号通達 参考の表)

放出等級	換気度						
	高換気度			中換気度			低換気度
	有効度「良」	有効度「可」	有効度「弱」	有効度「良」	有効度「可」	有効度「弱」	有効度「良」、「可」又は「弱」
連続等級	非危険箇所	第二類危険箇所	第一類危険箇所	特別危険箇所	特別危険箇所(当該箇所と非危険箇所との間は第二類危険箇所)	特別危険箇所(当該箇所と非危険箇所との間は第一類危険箇所)	特別危険箇所
第一等級 a)	非危険箇所	第二類危険箇所	第二類危険箇所	第一類危険箇所	第一類危険箇所(当該箇所と非危険箇所との間は第二類危険箇所)	第一類危険箇所(当該箇所と非危険箇所との間は第二類危険箇所)	第一類危険箇所(条件によっては特別危険箇所) ^{c)}
第二等級 b)	非危険箇所	非危険箇所	第二類危険箇所	第二類危険箇所	第二類危険箇所	第二類危険箇所	第一類危険箇所(条件によっては特別危険箇所) ^{c)}
<p>注 a) 第一等級の放出源の付近に連続等級の放出源がある場合には、第一類危険箇所及び第二類危険箇所を広めにとること。</p> <p>b) 第二等級の放出源の付近に第一等級又は連続等級の放出源がある場合には、第二類危険箇所を広めにとること。</p> <p>c) 換気的能力が非常に低く、爆発性雰囲気を実質的に連続して存在する場合、特別危険箇所となる。</p>							

放出等級に関わる要因は、放出時間や放出箇所の数に加えて、放出源の可燃性ガスと混合される保護ガスの流量や圧力制御機器、また混合や遮断に関わる機器(以下、安全関連機器)の特性などが要因として挙げられる。

換気度については放出された可燃性ガスによる爆発性雰囲気生成速度である放出特性と、爆発性雰囲気を拡散する換気速度から求める。放出特性は、可燃性ガスの放出箇所の開口部の面積や放出源の圧力、及び可燃性ガスの物理特性を基に放出される可燃性ガスを希釈する割合から判定される。換気速度は、対象とする領域の体積と保護ガス(通常は空気)の供給を制御する給気、排気量から定まる。このように、換気度に関わる要因も放出等級と同様、放出源の圧力や爆発性雰囲気を拡散する保護ガスの流量、及びそれらを制御する安全関連機器の特性が要因として挙げられる。

危険箇所に関わる機器は、希釈や換気に関わる機器だけでなく放出に関わる機器も含まれる。爆発性雰囲気を生じさせにくくするには、希釈や換気に関わる機器はもちろん、可燃性ガスを遮断または保護ガスと混合する機器も合わせて正しく動作することが必要となる。

さらに、放出等級と換気度が放出源の可燃性ガスの混合や遮断に関わる機器の特性や圧力に依存するということは、換気能力に関わる機器だ

けでなく、放出に関わる機器についても、それらが正しく動作する程度が危険箇所決定に関与することになる。

表1からは、強制換気によって放出源からの可燃性混合気が適切に換気されている場合に、放出源が連続放出等級であったとしても非危険箇所とすることが可能であることが示されているが、換気有効度に関する定量的な指標が無い場合、十分な安全性があるかどうかを示すことは困難である。そこで、給排気や換気に関わる機器を制御する機器が正しく動作する割合、及びこれらを正しく動作させるための運用手順を合わせて換気有効度とすることを提案する。これにより、IEC 60079-10-1 に基づき判定した危険箇所を、第二類危険箇所や非危険区域に改善する際の具体的な保護方策の改善に繋げやすくなる。

なお、本稿では以後、危険箇所決定に関わる可燃性ガスの放出量や濃度、保護ガスの給気、排気などを制御する機器を安全関連機器とし、保護方策はこれらの安全関連機器から構成されるものとする。また、特に可燃性ガスの放出抑制に関わる安全関連機器から構成される保護方策を“放出抑制保護方策”、保護ガスによる希釈や換気に関わる安全関連機器から構成される保護方策を、“希釈保護方策”と称することにする。

1.2 ダウンタイムの算出方法

ダウンタイムを算出するために必要な計算方法を以下に示す。こ

安全関連機器の定期的な保守間隔内に保護方策の機能が喪失している時間は、安全関連機器が故障している時間とそれらの故障が検知されてから修復されるまでの時間の合計である。定期的な保守間隔 T_{op} [h]の間、安全関連機器の故障が生じたことで保護方策の機能が喪失した状態にある平均時間 t_{ce} [h] は以下で算出できる。

¹

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

ここで λ_d は安全関連機器の単位時間あたりの危険側故障率、 λ_{du} はそのうちの検知できない故障率、 λ_{dd} は検知できる故障率であり、以下の関係がある。

$$\lambda_d = \lambda_{du} + \lambda_{dd} \quad (2)$$

MRT は定期的にシステムを修復するテスト(Proof Test, 以下, 定期テスト)を実施することで検知できない危険側故障 λ_{du} を修復する際の平均修理時間[h]である。また $MTTR$ は故障が検知された後、修復するまでの平均修復時間[h]である。式(1)は保守間隔の中で発生する1回の故障に対して

のダウンタイムが、検知できない故障が発生した場合には、その期待値として保守間隔の半分に、修理時間を加えたもの、検知できる故障が発生した場合には、修理時間が必要なことを示している。

保護方策を構成する安全関連機器が故障している間は爆発性雰囲気が生じる可能性があると考えられる。また安全関連機器の故障が検知され修理している間も爆発性雰囲気が生じる可能性がある。故障を検知した場合は修復時間を早くすることが必要だが、修復までの時間が長くなる場合は、その間に対象区域にある電気機器の電源を断にする、または点火や発火要因を対象区域から遠ざけるなどの処置も選択肢となる。また、故障が検知されない場合は故障が継続し爆発性雰囲気生成が継続する可能性があるので保守間隔を短くするなどの手段も必要になる。

運転時間 T_{opy} [h]を1年間の故障件数を考慮したダウンタイムを T_{cey} [h] とすると、式(1)から

$$\begin{aligned} T_{cey} &= \lambda_d T_{opy} t_{ce} \\ &= \lambda_{du} T_{opy} \left(\frac{T_{op}}{2} + MRT \right) + \lambda_{dd} T_{opy} MTTR \end{aligned} \quad (3)$$

この安全関連機器が停止している年間平均の時間の期待値である、ダウ

¹ IEC 61508-6:2010 Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems- Part 6:

Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3

ンタイム T_{cey} を先に挙げた危険箇所の時間による定量的な表現と比較することで、故障率等の指標から直接危険箇所の判定に結び付けることができる。

ただし、希釈保護方策，例えば，放出される可燃性ガスを区域外に放出する局所排気ポンプなどの希釈に関わる安全関連機器が正しく動作している間は爆発性雰囲気が生じないよう区域内の可燃性ガスの濃度が保たれていても，この安全関連機器が故障することで爆発性雰囲気となる可能性が生じる，すなわち危険箇所が悪化することは念頭に置いておく必要がある．時間的な要因をここでは、リスクの中の発生頻度についての情報を考えており、ハザードについては大きく変化しないことを期待している。表 1 に示された通り、NE が適用できるのは高換気の時のみである。

式(3)から，爆発性雰囲気を生じさせないためには，故障を検知したときの迅速な対応を図ることに加えて保護方策を構築する安全関連機器の λ_{ad} ，および特に λ_{du} が十分小さいものを選定することが必要になることが分かる．また，検知されない危険側故障により爆発性雰囲気生成が継続する可能性があるので定期テストの間隔 T_{op} を短くするなどの手段が必要になる。

1.3 ダウンタイムの算出例

可燃性ガスを取り扱う環境下での

爆発性雰囲気生成頻度と保護方策が正しく動作することの関係を確認するために，図1に示す可燃性ガスを扱う処理装置を例に説明する。

なお，ここに挙げた装置例は実際の装置を模擬したものであり，可燃性ガスを取り扱う環境下で保護方策を構成する安全関連機器の故障率及び故障検知時の修復時間と関連付け説明するための例として挙げたものである。

可燃性ガスを発生する材料を工程に取り込み材料の処理を行うものとする．タンクから供給される可燃性物質はヒータにより加熱されガス化され，その蒸気圧でバルブが“開”のときのみ処理室に送られる．処理室では別配管で送られる N_2 と混合され使用される．処理後はユーティリティから装置に供給される空気希釈され排出口から屋外に排出される．なお図中の動作監視と故障発見時の修復に関わる機能は必要に応じて設けられる。

処理室から装置内に漏洩放出される可燃性ガスの放出量，濃度は，処理室内の可燃性物質の温度と圧力，及びバルブの開閉で制御される．これらの安全関連機器が適切に動作すれば，装置内へ漏洩，放出される可燃性ガスの放出量や濃度は想定される範囲内に収まるものとする．漏洩，放出された可燃性ガスは希釈，換気され装置外に排気される．これらの安全関連機器が適切に動作すれば，装置内は想定される希釈状態に保た

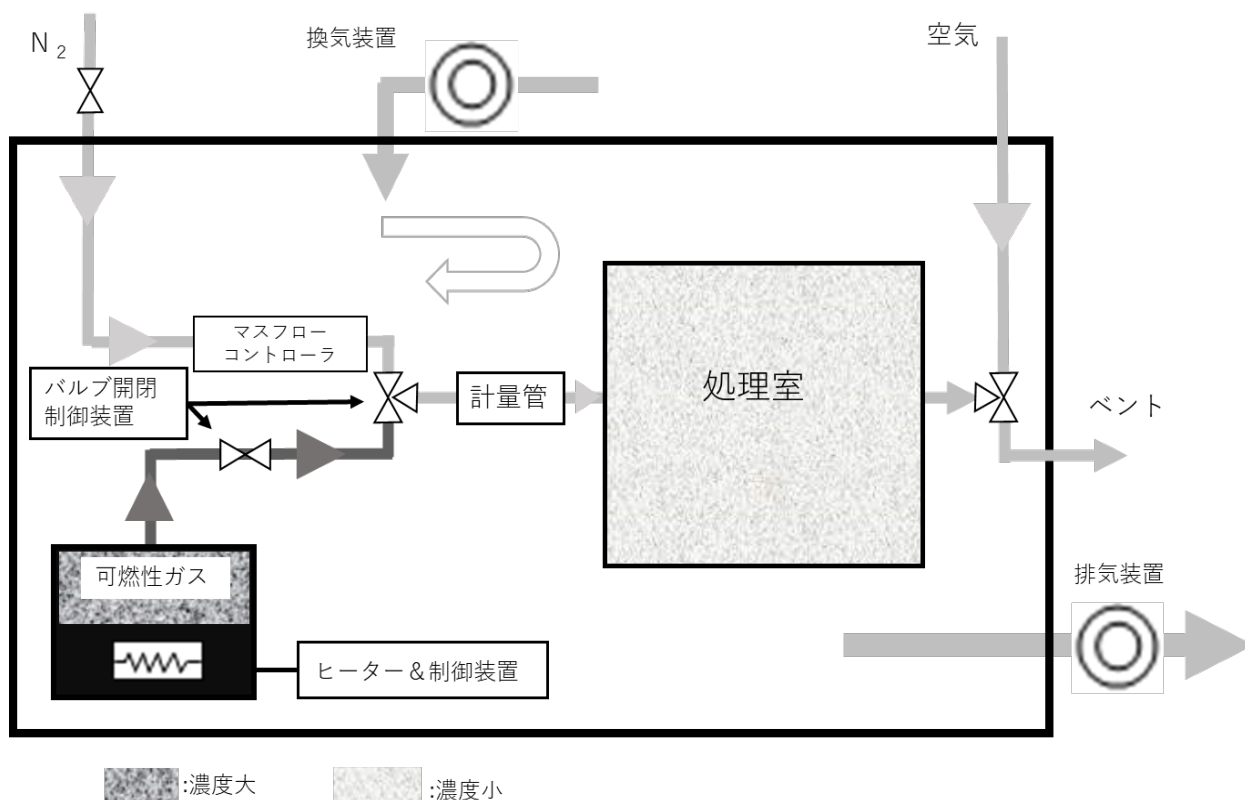


図1 可燃性物質を扱う処理装置

れるものとする。表2に、これら安全に関わる希釈保護方策の機器の仕様例として挙げる。漏洩，放出された可燃性ガスは希釈保護方策で高換気状態が保たれるものとする。他方，放出抑制に関わる加熱用ヒータとバルブとバルブに開閉信号を送る機器に関わる安全関連機器は可燃性ガスの放出量や濃度を想定される範囲内に収めるものの信頼性については配慮しない。

検知できない故障は定期保守の段階で検知し修理する。危険側故障を検知したときは，修理して正常状態に修復する。ダウンタイムは定期保守の間隔の時間 T_{op} にも影響する。 T_{op} や MRT , $MTTR$ をどのように設定するかも保護方策の一つである。

表2の例では MRT , $MTTR$ 共に 8 h 以内に修復するものとする。定期的な保守間隔 T_{op} を 1 年間とすると，式(3)から，これら安全関連機器により構成される保護方策の1年あたりのダウンタイム T_{cey} は，25.6h となり装置の内部は第一類危険箇所となるが， T_{op} を 3 ヶ月とすると保護方策のダウンタイムは，6.9h となり第二類危険箇所と判定できる。このように，保護方策のダウンタイムから判定される危険箇所は，希釈や換気に関わる安全関連機器の故障率だけでなく，故障検知時の修復時間や保守間隔にも依存する。例えば，放出抑制に関わる安全関連機器は特に制御せず可燃性ガスは常時放出されていると仮定すると可燃性ガス放出等級は連続

表2 装置内のゾーンを主に希釈で制御する保護方策の例

安全関連 機器	安全に関わる箇所 X			動作仕様		故障率		T_{cey} [h]
	放出	希釈	換気	想定範囲	危険側故障	λ_{du}	λ_{dd}	
給排気ポン プ		X		5~10m ³ /s	<3 m ³ /s	2.50×10^{-7}	4.75×10^{-6}	---
換気用ファ ン			X	3~5m ³ /s	<2 m ³ /s	4.00×10^{-7}	3.60×10^{-6}	---
希釈保護方策				---	---	6.50×10^{-7}	8.35×10^{-6}	---
定期テストは1年ごと (T_{op} =8760 h)				---	---	---	---	25.6
定期テストは3ヶ月ごと (T_{op} =2190 h)				---	---	---	---	6.87

等級となり、 T_{op} を1年間とすると装置内部は第一類危険箇所だから、表1から、該当する換気有効度は“弱”となる。 T_{op} を3ヶ月とすると第二類危険箇所では換気有効度は“可”ということになる。

次に放出抑制保護方策の例として、放出抑制に関わる加熱用ヒータとバルブ&開閉機器の制御で可燃性ガスの放出濃度が爆発下限界の1/4になるまで抑制する場合を考える。希釈に関わる安全関連機器は、高換気するものの信頼性については配慮しない。この場合の安全に関わる機器の仕様例を表3に示す。表3の例でも *MRT*, *MTTR* 共に 8 h 以内に修復するものとする。定期的な保守間隔 T_{op} を1年間とすると、式(3)から、放出抑制保護方策の1年あたりのダウンタイム T_{cey} は、32.9 h となる。 T_{op} を3ヶ月

とすると保護方策のダウンタイムは、8.5 h となる。

定期テストの期間の T_{op} が3ヶ月の場合、可燃性ガスが放出される時間が10時間未満であることから、希釈抑制に関わる安全関連機器の信頼性は特に配慮しなくても、換気度が中以上であれば可燃性ガスの放出等級が第二等級となり、表1より装置の内部は第二類危険箇所となる。

従来、放出等級は危険箇所を判定する際の前提とするだけであったが、可燃性ガスの放出量や濃度を制御できる場合は、これら安全関連機器による保護方策が正しく動作する度合いからダウンタイムを判定することで放出等級と関連づけでき、かつ IEC 60079-10-1 に基づき危険箇所を設定する際の管理手順構築に繋げることができると思う。

表3 装置内のゾーンを主に放出抑制で制御する保護方策の例

安全関連 機器	安全に関わる箇所 X			動作仕様		故障率		T_{cey} [h]
	放出	希釈	換気	想定範囲	危険側故障	λ_{du}	λ_{dd}	
加熱用ヒータ	X			100~120°C	> 130°C	7.00×10^{-7}	2.80×10^{-6}	---
バルブ& 開閉機器	X			25~30deg	> 35deg	1.50×10^{-7}	3.50×10^{-7}	---
放出抑制保護方策				---	---	8.50×10^{-7}	3.15×10^{-6}	---
定期テストは1年ごと ($T_{op} = 8760$ h)				---	---	---	---	32.9
定期テストは3ヶ月ごと ($T_{op} = 2190$ h)				---	---	---	---	8.43

保護方策の定期的な保守間隔の間で保護方策の機能が喪失している時間と、この機能が修復されるまでの時間の合計を保護方策のダウンタイムとして危険箇所を判定した。ダウンタイムは安全関連機器が正しく動作する程度であり機能安全で定義される安全関連機器の安全度水準 (Safety Integrity Level, 以下, SIL) と関係づけられる。

SILの値を示す目標機能失敗尺度には、保護機能の危険側故障の平均頻度 (Probability of Failure per Hour 以下, PFH) と、作動要求あたりの設計上の機能故障平均確率 (Probability of Failure on Demand, 以下, PFD_{avg}) の2つがある。爆発性雰囲気を生じないためには保護ガスの流量や圧力を制御する安全関連機器は常時正しく動作しなくてはならない。このため、本論文においては、故障率とのつながりから、高頻度作動要

求または連続的なモードに対するとして、 PFH を利用する。

式(3)は、機能安全における安全関連機器の構造は、入力と出力が直結したいわゆる 1oo1 (1 out of 1) を想定したものである。この場合、 PFH は λ_{du} に等しくなる。表2の例では、 λ_{du} を 6.50×10^{-7} で保護方策は SIL2 となる。 T_{op} を1年間としたときの保護方策のダウンタイムは 25.6h となり装置の内部は第一類危険箇所となる。SILを判定する際は PFH 以外にも、故障したときの保護方策の喪失につながらないための冗長性 (HFT) や、危険側故障と安全側故障との割合 (SFF) も考慮しなくてはならない。例えば HFT を 0, SFF を 60% 以上と仮定した場合は同じ故障率でも SIL の値は 1

に制限される。²

なお、安全関連機器としては、SIL1 程度であっても、保護方策として機能安全における診断機能を有した 1oo2D(1 out of 2 with diagnostics) のような構造にすることで定期保守間隔を1年以上に設定しても装置の内部は第二類危険箇所とできる可能性はあるが、これについては本稿の範囲外とする。表2の例では、保守間隔を1年として λ_{du} を 6.50×10^{-7} としたときの爆発性雰囲気生成される時間を 25.6 h と判定している。危険箇所の時間による定量的な表現により、この時間を特別危険箇所、第一類危険箇所、第二類危険箇所における年間各 1000 時間以上、1000 時間未満 10 時間以上、10 時間未満になるよう判定すると λ_{du} は各、 2.5×10^{-5} 以上、 2.5×10^{-7} 以上 2.5×10^{-5} 未満、 2.5×10^{-7} 未満となる。

希釈保護方策のダウンタイムが爆発性雰囲気生成に繋がるとして、放出等級が連続等級で高換気度の時の爆発性雰囲気生成時間と関連づけると、 λ_{du} と危険箇所との関連は表4で示される。

運転時間を1年、*MRT*、*MTTR*を各8時間と設定した条件の下では、表4から換気有効度と保護方策のダウンタイムが比較できる。換気有効度の“可”、“弱”は、保護方策の検知できない危険側故障率 λ_{du} の、 2.5×10^{-7}

未満、 2.5×10^{-7} 以上 2.5×10^{-5} 未満に対応し、機能安全における安全関連機器の構造を 1oo1 とした条件の下での保護方策の SIL2、SIL1 程度に該当する。

1.4 危険箇所判定でNE相当となる時間的基準

表1における非危険区域は、爆発性雰囲気が無いということではなく、可燃性ガスが放出される時間および滞留する範囲が無視できる程度の区域であることを指している。無視できる程度としては、IEC 60079-10-1:2020 では可燃性ガスが放出されることで生じる爆発性雰囲気の範囲(体積)が 0.1m^3 、または容器の1.0%以下の小さい方の体積で、かつ、その範囲の可燃性ガスの平均濃度がLFLの50%程度とされている。以上は爆発が発生した場合の被害の大きさを基準とした閾値と考えられるが、同様に時間的な閾値について以下では検討する。

表1で、高換気の下、第二等級放出源で換気有効度が可である場合に、非危険箇所であることが示されている。換気有効度を希釈保護方策のダウンタイムと関連付けて考えた場合、放出等級についての状況と独立に、換気有効度を設定できる。したがって、同一のダウンタイムを示す希釈保護方策の下、放出等級が連続の場

² IEC 61508-2: 2010 Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems- Part 2:

Requirements for electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems

表4 高希釈時の λ_{du} と放出等級と爆発性雰囲気生成に繋がる時間との関係

放出等級 (可燃性ガス放出頻度)	λ_{du} と爆発性雰囲気生成に繋がる時間		
	$\lambda_{du} : 2.5 \times 10^{-9}$ 未満 (換気有効度良)	$\lambda_{du} : 2.5 \times 10^{-7}$ 未満 (換気有効度可)	$\lambda_{du} : 2.5 \times 10^{-7}$ 以上 2.5×10^{-5} 未満 (換気有効度弱)
連続等級 ($> 10^{-1}$)	0.1 時間未満	10 時間未満	10 時間以上 1000 時間未満
第一等級 ($10^{-3} \sim 10^{-1}$)	0.01 時間前後 (0.1 時間～0.001 時間)	1 時間前後 (10 時間～0.1 時間)	10 時間前後 (100 時間～1 時間)
第二等級 ($< 10^{-3}$)	0.001 時間未満	0.1 時間未満	0.1 時間以上 10 時間未満

合と第二等級の場合とを比較すると、そこには放出時間で 100 倍超の差が存在する。したがって、高換気、連続等級、換気有効度可である場合には年間 10 時間を超えない爆発性雰囲気が存在しうる可能性があるが、放出源のみ異なる同じ換気有効度のシステムで放出等級を第二等級と見なせる場合には、年間 0.1 時間未満の爆発性雰囲気が存在しうるということとなる。したがって、この年間 0.1 時間という閾値は現在の危険箇所判定に整合する。高換気の場合にこの年間 0.1 時間を基準として連続等級でも NE 相当と見なせる故障率 λ_{du} として 2.5×10^{-9} を対応させることができる。前節で換気有効度可、弱について記した表 4 には良について、 λ_{du} を 2.5×10^{-9} に対応させたものも同時に示した。残念ながら、この故障率を保証することは現実的ではなく、したがって、連続等級、および第一等級の時には、希釈保護方策単体で非危険区域とするのは非現実的であるということに

なる。ただ、IEC 60079-10-1 では換気有効度が良の場合は、“保護方策は故障しないもの”とされていることから、換気有効度“良”の場合の故障率がこのような厳しい要求となるのは当然かもしれない。

再度以上の議論は爆発性雰囲気の大きさが、保護方策の停止時間に大きく影響されないことを仮定していることを指摘しておく。

1.5 保護方策の組み合わせ

可燃性ガスを取り扱う環境下において、放出抑制保護方策と希釈保護方策を組み合わせることで爆発性雰囲気生成頻度を低減するための具体的な手順を、前報で用いた可燃性ガスを扱う処理装置、図 1 を適用事例（ケーススタディ）として説明する。図 1 に示す可燃性ガスである材料を工程に取り込み材料の処理を行う装置では、処理室から装置内に漏洩放出される可燃性ガスの放出量、濃度は、処理室内の可燃性物質の温度と圧力、

及びバルブとバルブに開閉信号を送る機器で制御される。

この例では、放出抑制に関わる保護方策と希釈保護方策ごとに2種類の安全関連機器で構成している。放出抑制に関わる加熱用ヒータとバルブとバルブに開閉信号を送る機器の制御で可燃性ガスの放出濃度が LFL の 1/4 になるまで抑制するものとする。また、漏洩、放出された可燃性ガスは装置に給排気ポンプで供給される空気や換気用ファンで希釈され屋外に排出される。空気供給や換気後の排気に関わる機器で装置内は高希釈状態が保たれるものとする。

危険側故障を検知したときは、修理して正常状態に修復する。この例では危険側故障を修復する際の平均修理時間 MRT [h] と故障が検知された後、修復するまでの平均修復時間 $MTTR$ [h] は共に 8 h 以内とし定期的な保守期間 T_{op} は 1 年間または 3 ヶ月とする。装置の安全に関わる機器の仕様例は表 2、3 のとおりとする。

ここでは定期的な保守期間を 1 年、希釈保護方策の λ_{du} を 6.50×10^{-7} としている。爆発性雰囲気生成に繋がる時間としてのダウンタイムは 25.6 h となるが、この時間は可燃性ガスの放出が連続等級のときの算定値であり、可燃性ガス放出時間が年間 1000h 以上を想定した場合である。一方で、放出抑制保護方策についても定期的な保守期間を 1 年、 λ_{du} を 8.50×10^{-7} とすると、この保護方策の平均ダウンタイムは 32.9 h となり、

表 2 の連続等級のときの可燃性ガス放出時間(年間 1000 h 以上)の 30 分の 1 以下になる。すなわち、希釈保護方策に放出抑制保護方策を組み合わせることで爆発性雰囲気生成に繋がる時間を 25.6 h の 30 分の 1、すなわち 1 時間以下に低減できることになる。このことは、IEC TS 60079-42 に示される、「運転時間が 2 年以下の条件のもと、 λ_{du} が $10^{-5} \sim 10^{-7}$ の際のリスク緩和係数(Risk Reduction Factor (RRF))を 10~100 に設定できる」ことにも合致する。

以上二つの保護方策を組み合わせることによって、爆発性雰囲気が形成される時間が年間 10 h 以上であったものを、年間 10 h 未満とすることができ、合理的かつ現実的な機材で第一類危険箇所から、第二類危険箇所に危険性を下げることができることを示した。

1.6 ガス検知機とインターロック

可燃性物質が扱われる環境下で爆発性雰囲気が生成される可能性を低減するためには、保護方策が正しく動作すること、危険側故障が検出された場合は爆発性雰囲気が生成される前に迅速に点火源や発火要因を遠ざけるなどの対応がとられることはもちろん、保護方策の検出できない危険側故障率 λ_{du} が十分低いことが前提条件となる。しかしながら、実際の装置では保護方策を構成する安全関連機器の λ_{du} は必ずしも正確に把握されているとは限らない。また、

放出抑制保護方策と希釈保護方策については2つの保護方策の間に想定以上の共通原因故障があることや、何れかの λ_{du} が正確に把握されていないことなども考えられる。

ここでは前節と同様に、放出抑制保護方策と希釈保護方策を補完するための監視機器を設けた場合について、動作監視と故障発見時の修復に関わる機能を設けた図2を適用事例として説明する。放出源からの放出や希釈、換気に関わる安全関連機器の動作、または滞留しやすい箇所の濃度を監視し、想定した以上の濃度を検知した場合は爆発性雰囲気が生じ

たものとして保護方策の修復や、点火や発火要因を対象区域から遠ざけるなどの処置をする。

保護方策がダウンしている間は爆発性雰囲気が生じる可能性が考えられるが爆発性雰囲気が生じた状態(以下、危険状態)とは限らない。これに対し可燃性ガスの監視機器が爆発性雰囲気を検知したときは既に危険状態にある可能性があるため点火源や発火要因を迅速に遮蔽する(インターロック)などを組合せた監視システムとしての対応が必要となる。

放出抑制や希釈の保護方策のダウンタイム中に可燃性ガスが発生し滞

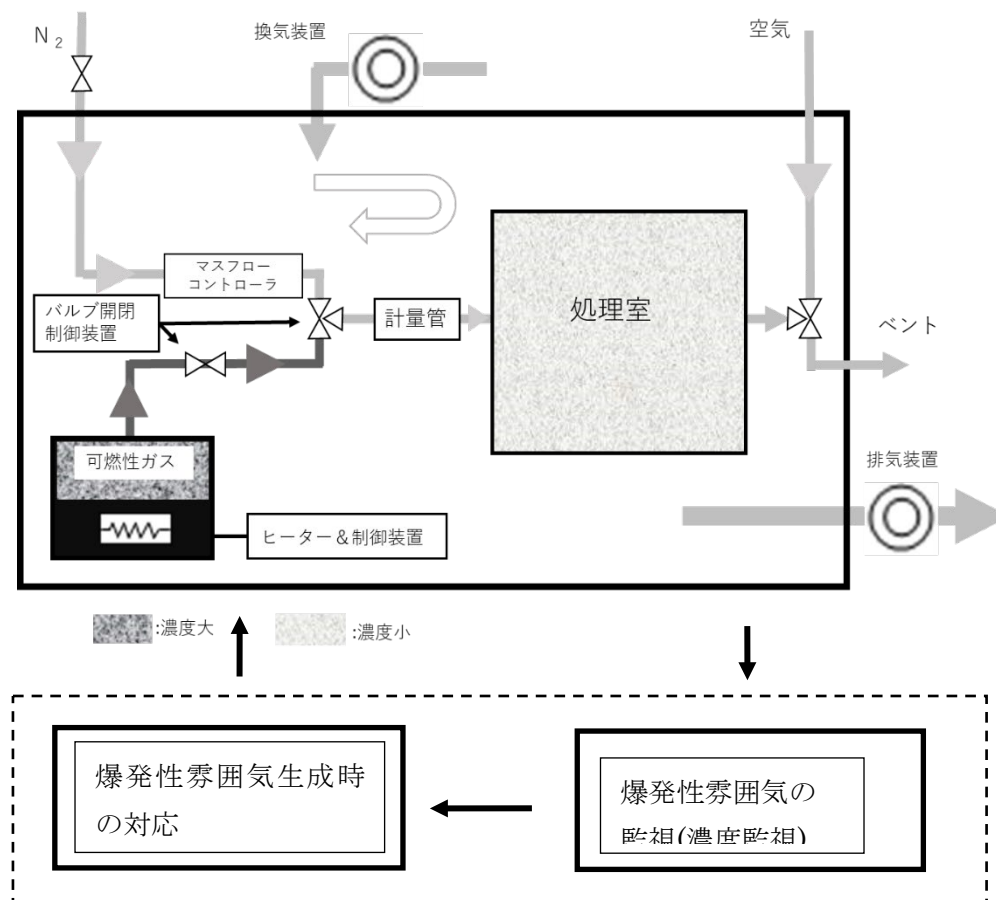


図2 保護方策に監視機能のある可燃性ガスを扱う処理装

留などで爆発性雰囲気が生じたときは監視システムが正しく動作することが必要である。爆発性雰囲気は放出抑制保護方策と希釈保護方策が共にダウンしたときに生じるから、監視システムが正しく動作することに対する指標としての SIL は低頻度モードでの PFD_{avg} が適していると考ええる。 PFD_{avg} の選定にあたっては前報を参照されたい。図2の構造は、機能安全における入力と出力が直結した安全関連機器の入出力構成にあたる 1oo1 を想定したものであり、 PFD_{avg} は以下で求められる。

$$PFD_{avg} = \lambda_d \times t_{da} \quad (4)$$

$MRT[h]$ と $MTTR[h]$ は共に 8 時間以内としたときの監視機器によるインターロックシステムの仕様例を表5に挙げる。インターロックを構成するガス濃度計と点火要因の電源を遮蔽するリレーを挙げている。監視機器

によるインターロックが正しく動作すれば装置内に爆発性雰囲気が生じた際は、それを検知し修理して正常状態に修復する

ここでは、監視システムの λ_{du} を 9.00×10^{-7} とし運転期間 T_{op} を 1 年間とした場合のダウンタイムは 35.3h となる。表 2、3 の例では、運転期間を 1 年とした場合の放出抑制保護方策のダウンタイムは 25.6h と、32.9h であるから、監視システムのダウンタイムはこれら元の保護方策のダウンタイムと同程度である。

すなわち、表 2、3 の例での運転期間を 1 年とした場合の希釈保護方策に、この例での監視システムを組み合わせることで爆発性雰囲気生成に繋がる時間を 1 時間以下に低減でき、この監視システムも放出抑制保護方策と同様 IEC TS 60079-42 に示される RRF が 30 程度である、と解釈できる。

可燃性ガスを扱う装置内で放出抑制保護方策と希釈保護方策を組み合

表5 監視機器によるインターロックの例

監視機器	動作仕様		故障率		T_{day} [h]
	想定範囲	危険側故障	λ_{mdu}	λ_{mdd}	
ガス濃度計	> LFL1/4	感度低下	1.50×10^{-7}	2.85×10^{-6}	---
電源遮断リレー	回路断	動作しない	7.50×10^{-7}	6.75×10^{-6}	---
インターロック保護方策	---	---	9.00×10^{-7}	9.60×10^{-6}	---
定期的な保守期間 1 年 ($T_{op} = 8760$ h)	---	---	---	---	35.3
定期的な保守期間 3 ヶ月 ($T_{op} = 2190$ h)	---	---	---	---	9.37

わせることで、爆発性雰囲気生成される可能性を低減する手法を提案した。

図1に示す例では、定期的な保守期間を3ヶ月とし、希釈保護方策の λ_{du} を 6.50×10^{-7} とすることでダウンタイムは6.87hとなる。放出抑制保護方策の定期的な保守期間を3ヶ月とし、 λ_{du} を 8.50×10^{-7} とすることでダウンタイムは8.43hとなり、連続等級のときの可燃性ガス放出時間の100分の1以下に低減される。この時間は可燃性ガスの放出等級の第二等級に該当する。この放出抑制保護方策と希釈保護方策と組み合わせることで爆発性雰囲気生成に繋がる時間は6.87hの100分の1以下の0.1h未満に低減できる。上記 λ_{du} の値は機能安全における1001を想定すると共にSIL2となる。すなわちSIL2相当の放出抑制保護方策と希釈保護方策で無視できる程度に狭い範囲としての非危険区域を確保できることになる。

もちろん可燃性ガスが放出される度合いが既に第二等級であることが既知の場合は放出抑制保護方策を算定する必要はない。

監視システムは放出抑制保護方策と同様、希釈保護方策を補完する保護方策になりうることを示した。図1の例では、 λ_{du} を各々 8.50×10^{-7} 、 6.50×10^{-7} とし、定期的な保守期間を1年とした放出抑制保護方策と希釈保護方策で爆発性雰囲気生成に繋がる時間を1時間以下に抑えている。更に、図2に示した λ_{du} を 9.00×10^{-7} と

した監視システムを追加することで爆発性雰囲気生成に繋がる時間を0.1h未満に低減できる。運転期間を1年とした場合、上記 λ_{du} の値は、機能安全における1001を想定すると(4)より PFD_{avg} が 4.03×10^{-3} でSIL2となる。すなわち定期的な保守期間を1年としたSIL2相当の監視システム、放出抑制保護方策、希釈保護方策で非危険区域として確保できることになる。

IEC 60079-10-1では非危険区域(NE)とするためには、可燃性ガスが放出する箇所から少し離れるだけで可燃性ガスは検知されない状態、すなわち可燃性ガスが滞留する範囲が狭くなくてはならない。このため、放出抑制保護方策や監視システムだけで非危険区域として確保することはできない。放出抑制がダウンしたとき、また監視システムが可燃性ガスを検知したときは、たとえその時間が短時間でも放出された可燃性ガスが滞留する可能性があり、また滞留する範囲を特定しきることもできない。そのため、非危険区域を確保するための放出抑制保護方策や監視システムは、高希釈性能を有した希釈保護方策の補完として用いるべきである。

2. IECEx スキームにおける認証の信頼性確保方法

IECEX スキーム内で信頼性を確保する方法について検討する際に、IECEX で関係機関が実際に作業判断

するための Operational Document (OD)が存在する。その OD003 に Assessment procedures for IECEx acceptance of applicant Ex Certification Bodies (ExCBs), Ex Testing Laboratories (ExTLs) and Additional Testing Facilities (ATFs) として、ExCB、ExTL、ATF についての評価手順が記されている。評価は事務局を介して IEC に認定されている評価者によって行われる。IECE x OD003-1 は、IECEx 認証スキームのための評価者の任命と監視についてであり、OD003-2 は IECEx 02、IECEx 認定機器スキームで動作する ExCB および ExTL の評価、監視評価、および再評価となっている。評価は、新規の後、2.5 年で迎える中間評価、5 年目の再評価が全ての認証機関 (ExCB)、試験機関 (ExTL)、試験施設 (ATF) に課されている。さらに、ISO/IEC 17025 と ISO/IEC 17065 の未取得機関には、毎年 of 監視評価が加えて課される。このことは ISO/IEC 17025 と ISO/IEC 17065 によって、認証機関あるいは試験機関、試験施設として要件が満たされていることを示している。したがって、ISO/IEC 17025 と ISO/IEC 17065 は 認証書 CoC、試験報告書 ExTR の信頼性を向上させるものであると考えられる。以下では ISO/IEC 17025 と ISO/IEC 17065 について、IECE x に 資する部分を抽出する。

2.1 ISO/IEC 17025 試験所及び校正機

関の能力に関する一般要求事項

2017 年版が最新である。試験を行う機関に対して、データの正しさを担保するための要求事項を示した規格である。以下に ISO/IEC 17025:2017 の要求事項を、規格の節のレベルで挙げる。ただし、5 については、節見出しが存在しないため、内容から見出しにふさわしいと考えられるものを記載してある。

4 一般要求事項

4.1 公平性

4.2 機密保持

5 組織構成に関する要求事項

5.1 法人または法人の一部であること

5.2 マネジメントの特定

5.3 活動の範囲を明確化・文書化

5.4 規制当局及び認可を与える機関の要求事項の満足

5.5 実施事項

5.6 責務

5.7 マネジメントの実施事項の確実性

6 資源に関する要求事項

6.1 一般

6.2 要員

6.3 施設及び環境条件

6.4 設備

6.5 計量トレーサビリティ

6.6 外部から提供されるサービス

7 プロセスに関する要求事項

- 7.1 依頼, 見積仕様書及び契約のレビュー
- 7.2 方法の選定, 検証及び妥当性確認
- 7.3 サンプルング
- 7.4 試験・校正品目の取扱い
- 7.5 技術的記録
- 7.6 測定不確かさの評価
- 7.7 結果の妥当性の確保
- 7.8 結果の報告
- 7.9 苦情
- 7.10 不適合業務
- 7.11 データの管理及び情報マネジメント

8 マネジメントシステムに関する要求事項

- 8.1 選択肢
- 8.2 マネジメントシステムの文書化 (選択肢 A)
- 8.3 マネジメントシステム文書の管理 (選択肢 A)
- 8.4 記録の管理 (選択肢 A)
- 8.5 リスク及び機会への取組み (選択肢 A)
- 8.6 改善 (選択肢 A)
- 8.7 是正処置 (選択肢 A)
- 8.8 内部監査 (選択肢 A)
- 8.9 マネジメントレビュー (選択肢 A)

6 の資源に校正とトレーサビリティについての要求事項が記されており、計測値の信頼性についてたどることが可能である。

7.6 の測定不確かさの評価に関して

は、IECEX 防爆規格では安全率を考慮しているため、不確かさについては対象外である (IEC60079-0:2017 Ed.7.0 26.1 note 参照)。ただし、機関としての力量評価としては、IECEX の試験機関として Proficiency Testing Program への参加が義務付けられており、一定のレベルであることの確認がなされている。

8 のマネジメントシステムについては、ISO9001 の要求事項に従うという選択肢 B も存在し、8.1 で規定されている。

以上の点により、試験自体の体制、資源、実施、報告が ISO/IEC17025 によって網羅されているといえる。

2.2 ISO/IEC 17065 適合性評価—製品、プロセス及びサービスの認証を行う機関に対する要求事項

2012 年版が最新である。以下に ISO/IEC 17065:2012 の要求事項を、規格の節のレベルで挙げる。

4. 一般要求事項

- 4.1 法的及び契約上の事項
- 4.2 公平性のマネジメント
- 4.3 債務及び財務
- 4.4 非差別的条件
- 4.5 機密保持
- 4.6 情報の公開

5 組織運営機構に関する要求事項

- 5.1 組織構造及びトップマネジメント
- 5.2 公平性確保のメカニズム

6 資源に関する要求事項

6.1 認証機関の要員

6.2 評価のための資源

7 プロセス要求事項

7.1 一般

7.2 申請

7.3 申請のレビュー

7.4 評価

7.5 評価結果のレビュー

7.6 認証の決定

7.7 認証文書

7.8 認証された製品の登録簿

7.9 監視評価

7.10 認証に影響を与える変更

7.11 認証の終了，範囲の縮小，一時停止又は取消し

7.12 記録

7.13 苦情及び異議申立て

8 マネジメントシステム要求事項

8.1 マネジメントシステムに関する選択肢

8.2 マネジメントシステム文書 (選択肢 A)

8.3 文書管理 (選択肢 A)

8.4 記録の管理 (選択肢 A)

8.5 マネジメントレビュー (選択肢 A)

8.6 内部監査 (選択肢 A)

8.7 是正処置 (選択肢 A)

8.8 予防処置 (選択肢 A)

防爆に関しては CoC、QAR(Quality Assessment Report=品質監査報告書)を発行するにあたっての基準である

が、ExTR に関するレビューが 7.3 でなされており、7.4 の評価と 7.5 の評価結果のレビューでも ExTR が参照される。したがって、ExTR の信頼性を向上させるにあたって、試験機関としてのみならず、ExTR の確認が可能である能力が必要となる。また、8.1 には ISO/IEC17025 同様に ISO9001 の要求事項に従うという選択肢 B も存在する。IECEx OD010-2 の 3 に、特に ExTR の確認手順が記されている。

以上から、IECEx では他所で作成された ExTR を信頼するための手続きとして、年一回の監視評価と ISO/IEC17025、ISO/IEC17065 の取得とがトレードオフとして選択肢として存在する。ISO/IEC17025、ISO/IEC17065 の取得に加えて ISO9001 があれば、ExTR の信頼性は一定向上すると考えてよい。

3. 検定制度によらない安全確保措置と我が国での適用可能性

「危険場所での使用に関する証明書のない携帯用電気機器についての手引き」として、現在 IEC の 60079 シリーズに関する更新を担当する Technical Committee 31(TC31) の Sub-committee である SC31J 内の WG2 で、認証品が利用できない電気機器について、危険箇所へ持ち込む場合のガイドラインが案として議論されている。IEC TS 60079-48 として COVID19 によって当初の予定から

大きく遅れているものの、2022/3/18に、原案に対しての投票結果が TC31 に回覧された。投票結果の意見に翻訳を添えたものを資料 3.1 として、また、そこで採択された意見について反映したものを資料 3.2 として添付した。両資料とも IEC TC31 の内部資料に相当することから、デジタル上では非公開とする。なお、規格の TS は技術仕様書であることを示している。技術仕様書は、将来的に国際規格として合意される可能性はあるが、現時点では次のような文書を指す。

- ・国際規格として承認されるための必要な支援が得られていない
- ・コンセンサスの形成が疑わしい
- ・その主題がまだ技術開発の途上にある
- ・国際規格として直ちに発行することが不可能な理由が他にある

以下では、提案 TS の概要を記すとともに著者のコメントを付し、また、投票結果に記されたコメントから重要と考えられる内容について、著者コメントを添えつつ抜粋した。

3.1 提案 TS 概要とコメント

1) 商業上の利益が見込めないなど防爆型式認定を事実上受ける予定がない、または防爆対応しにくいスマートウォッチ、Bluetooth イヤホンなどの機器などを防爆エリアで使用するためのガイダンス（手引き）の内容として作成され、現実的な対応（内容）と考える。

2) TS 上では、危険箇所としての規制記載ではなく、EPL となっているものの、主に第二類危険箇所を意識したものである。第一類危険箇所も含めた記載も存在する。

3) TS に従うことによって、該当する機器であれば何でも使用できる印象をもってしまいが、本文中では、原則防爆機器として市販化されているジャンルの機器は防爆機器を使う前提となっている。例としては iPhone を使いたいが、android 機器で防爆製品があるので、iPhone は使えず、防爆品の android 機器を使うなどの前提となる。このような背景から、TS に該当する電気機器で、実際に防爆エリアで使用されるような電気機器はかなり限られたものであることは昨年の報告通りである。

4) あくまで個人が身につけてポケットなどに入れる、または腰や首からぶら下げるなどの機器に限定、電源内蔵であっても通信線に接続するような機器は除外となっている。

5) 一般事項において特に気になった点は、「外部表面温度 60°C 以下」の項目である。付属書 A には「電熱服 (Electrically Heated Clothing)」が記載されている。このような機器の使用を前提とすると 60°C 記載は適切と考える。この電熱服の発想は日本では考えにくく、委員および関係者などが実際にそのような環境、例えば厳寒のガス等プラント・北海石油プラントなどの作業現場を体験したことが基になっているのかもしれない。

6) モーターはブラシレスであれば問題ないようである。

7) PEP1 (Gc, Dc) は、主にスマートウォッチを前提とした内容と推察される。本文中の「4.5 V」の制限は

IEC60079-11 から採用、電流容量制限は代表的なスマートウォッチのバッテリー仕様をもとにしたと推察される。

8) PEP1 であっても EPL*b (*は G や D が入る。以下同様) 該当場所については、さらに電力制限や材料制限の記載がある。これらと比較して、*c 該当場所はそのような記載はないため、対応機器の範囲が広い状況である。

9) PEP2 該当の場合、*c 該当場所であっても、「DC9 V 以下、約 9,000 mAh」の定義である。これは家庭用ハンディレコーダー（動画）を想定（参考例：P 社製家庭用ハンディビデオのリチウムイオン電池は 3.7V、約 2000mA）したものと考えられる（スマホ、タブレット等は防爆機器有、市販のノート PC はそのままでは認めない方針（DELL、HP など海外主力の機器は電池容量が大きいものが多い。ただし、日本の P 社製モバイルノート PC のバッテリーは「7.6V、約 5000mA」）。

10) 携行機器から、落下試験は重要視されている。

11) 衝撃（落下）試験は、同じ機器に対して 6 回行うが、そのうち 4 方向（壊れやすいと考えられる方向で各向 1 回ずつ）で行うことから、残り 2 回はそれ以外の方向となる。

12) 落下試験の合否判定は、「容器の健全性が損なわれてない、バッテリー等が外部に飛び出さない・外れない、意図どおりに機器が作動」という条件である（大型のもの、重量物のものは不利。時計類、イヤホン類は問題が生じないと判断）。

この TS 提案での安全性に関する記述としては、

- ・基本、防爆品（検定合格品）を使用する前提ながら、どうしても入手できそうもない機器があるので、それを活用したい（DX・IoT 等に絡んでいるのかもしれない）

- ・バッテリー関係に関する内容（電気容量、落下時に異常が生じない）は、具体的な数値が記載

- ・第二類危険箇所であれば、問題は生じにくいとの判断があるのではないかと推察

今までの内容を考察すると、主に時計類、イヤホン類が主な想定機器と予想される。そのような機器であれば、リチウムイオン電池であっても、それらに使用されている容量は大きいわけでもなく、一体構造の製品が多いため、衝撃等にも強く、壊れないことが予想される。このようなことを背景に、「別規格ではなく、60079-0 に付属書等の形とする」案は妥当性があると考えられる。なお、電圧・電流だけで検討する（インダクタンス、キャパシタンスは考慮しない）と、電気火花着火曲線（60079-11 等）からは、着火ポイントの記載がないエリアである（参考（水素ガス等の場合）：12V・3A だと着火、10V はグラフ外の値（5A 以上））。これから、現状のワイヤレスイヤホン類だと問題はないと考えても妥当と思われる（参考：イヤホン（片耳）約 40mAh、3.7V リチウムポリマー電池、0.04W 程度のものが多いようである）。また、「PEP2 該当の場合、*c 該当場所であっても、「DC9 V 以下、約 9,000 mAh」の記載も妥当性があると思われる。

衝撃試験については、必ずしも公的検定機関で行う前提での記載ではないため、「施設の所有者又は運営者、あるいは施設の所有者又は運営者が

認めた別の者が実施」から、利用者（事業者）自らの実施も可能で、自己責任の内容と考える。また、試験の実施についての記載はあっても、そのエビデンス（証拠データなど）についての具体的な記載はない。この点については、もっと明確な指示が必要と考える。

3.2 各国提出コメントの傾向と解析

・スイス：IEC 60079-0に有益な附属書を追加して、規格の数を最小限に抑えることに賛成。

・チェコ：反対

この提案は現在の慣行に反しており、安全性の低下につながる。

・ドイツ：賛成できない

労働安全衛生問題の標準化に関するドイツの規制による。ただし、このTS案への協力、関心あり。

・フランス：反対

60079-0で定義されている簡易機器の概念で十分、製造者がEx適合と宣言していない機器を選択する自由をユーザーに与えるやり方は危険。

・イタリア：賛成

・オランダ：反対

オランダの国家労働安全衛生法との矛盾、労働条件令。

EU間でも意見の相違があり、本提案が修正（再修正も含めて）されて規格となるか、それとも総則の一部になるかについては不明である。

ここで、反対表明している「スイス、チェコ、フランス、オランダ」はコメントなしの反対投票で本気度を想定できるが、ドイツは「賛成できない（反対との明言は避ける）」と表明しつつも、複数の修正コメントを提出している（TS案への協力、関心あり）。防爆関係で有力な、オーストラ

リア、アメリカ、英国、中国などからはハッキリとした反対意見はない。アメリカについては、類似のULがあり、このような考え方が成り立っている。

（UL121203：Recommended Practice for Portable/Personal Electronic Products Suitable for Use in Class I, Division 2, Class I, Zone 2, Class II, Division 2, Class III, Division 1, Class III, Division 2, Zone 21 and Zone 22 Hazardous (Classified) Locations）

必ずしも反対国が多いわけではないので、形は別として何らかの規格化は行われるように考える。ただし、規格化されても実際に活用する国についてはかなり不透明、特に国内法との整合性がとりづらく取り入れられるか国ごとによる可能性が高いと考える。

4. 新たな手法による防爆性能の評価方法

4.1 ドローンの運用

産業保安高度化を目指して、プラント等でのドローンの利用が検討されている。しかしながら、ドローンを危険箇所で動かした場合に、通常の防爆機器で検討されているものに加えて、以下の着火爆発危険性がある。

・非電気機器としての着火リスク

EUでは、EN ISO 80079-36等の規格が指定されている。我が国の防爆型式検定は、現在電気機械器具を対象としたものであることから、これらの非電気機器に関する点火リスクは対象とされていない。ローター等のこすれ、落下時の摩擦、衝撃によ

って火花を生じるリスクが存在する。

- ・落下したときに防爆性確保

昨年指摘したとおり、従来の防爆型式検定で課されている、携帯式のものについての落下試験では、ドローンが運用されているような高度をカバーできていない。

通常の運用から落下するということは、その時点で何らかの不具合が生じていることを示唆しているが、そのような状況下でも防爆性が確保されている必要がある。

仮にドローンに高々度からの落下試験を適用するとして、どの高さから落下させるか、ワーストケースとしてどのような壊れ方を想定して試験するか、どの防爆構造を前提にするかなどを決めなければならない。また、落下後も電池が残ることから、残留するエネルギーが存在する。

現状の固定機械を対象に定められた防爆規格の適用は重量が増し、操縦性が低下することは明確であり、かつ、重量の増加は落下時の運動エネルギーの増加のために、落下時に人への危害やプラントの機材を傷つける危害を増大させる。

以上を踏まえつつ、海外の動向と軽量化に資する候補と考えられる二つの方法、すなわち最も簡単な防爆構造として非点火防爆と、インターロックによる従来品の利用について検討した結果を以下に示す。

4.1.1 海外調査

海外の関係者に対して web ミーティングやメールなどによって情報収集を行った。以下にドローンの防爆化に関する各国からのコメントを記した。なお、ドイツおよびフランス

に対しては調査期間を通じてコンタクトを継続したが、回答が得られなかった。

1) シンガポール

シンガポールでは Ministry of Manpower へコンタクトを取った。シンガポールでは、石油・化学産業におけるドローンの運用に関する新しいシンガポール規格の策定を開始した。この規格は 2024 年第 1 四半期に完成する予定である。

この規格は、ドローンに関してパイロットの能力、耐空性、安全性、安全性などを含んでおり、プロセス環境におけるドローンの応用、リスクアセスメントや緊急時対応計画も含まれている。この規格のワークグループは、ドローンの防爆タイプの可能性を検討している。規格の開発は、ワークグループの最終決定や概要のドラフト作成など、かなり予備的な段階にあり、2024 年第 1 四半期に規格が発行され正式に採用される前に、関連する外部ステークホルダーとの公開レビューの段階が存在する。規格がパブリックコメントに付される準備が整い次第、

<https://www.enterprisesg.gov.sg/quality-standards/standards-for-companies/comment-on-draft-standards>

にて公開されるが、これは 2023 年第 4 四半期になる予定である。

また、民間の化学企業から以下の情報を得ることができた。

- ・屋外タンクの屋根の目視検査に球体の保護カゴに収まるタイプの小型ドローンを監査用に活用したことがある。
- ・防爆型のドローンの利用を希望し

ているものの、防爆化によって非常に重くなる可能性が高く、飛行時のリスクが増大することを懸念している。

2) オーストラリア

現時点では、電気機械器具として解釈する以上、新規の防爆技術が確立されない限りは IEC60079 シリーズを適用されることになる。IEC 60079-0 や特定の保護技術規格で要求されている落下試験など、IEC60079-0 で指定されている以上の追加試験を行う必要がある。

また、エネルギー制限と封じ込めによってバッテリーとモーターを着火源としないことは従来の防爆技術と同じであるが、軽量化のために使われているマグネシウムや、非金属材料についての検討も必要である。

3) クロアチア

ドローンは有用であるものの、危険な場所で安全に使用方法を確立した上で、認証する方法を考える必要がある。現在の IEC 規格はドローンに十分適合しておらず、要求される機器保護レベルを確保するためには、全く新しい技術が要求されると考えられる。したがって、IEC の枠組みの中では当面特殊防爆の適用によることが考えられる。

4.1.2 非点火防爆によるドローンの実現可能性

非点火防爆構造（タイプ n）は、IEC60079-15:2010 では nC、nA、nR の 3 種が存在したが、IEC60079-15:2017 では nC の内、耐圧防爆構造と原理を同じくする接点封入デバイスは dc として耐圧防爆構造へ、nA については ec として安全増防爆構造へ移動され

ている。nR は、ガス、蒸気及びミストの侵入を制限するように設計された容器として定義される。EPL としては Gc 相当であり、労働安全衛生法でも、第二類危険箇所へのみ利用が認められた構造で、他の防爆構造に比べて簡易であるといえる。

労働安全衛生総合研究所技術指針工場電気設備防爆指針（国際整合技術指針 2020）第 8 編 非点火防爆構造 “n” TR-No. 46-8:2020 (IEC60079-15:2017) では、

4.2 潜在的点火源

通常運転時及びこの編で特定する通常予期される事象において、機器は次による。

- a) 運転時に、アーク又は火花を発生してはならない。ただし、アーク又は火花が、箇条 7~10 に定める方法の一つによって、周囲の爆発性雰囲気の点火源にならないようにしたときはこの限りではない。
- b) 機器の温度等級に相応する最大値を超える最高表面温度となつてはならない。ただし、表面の温度又は高温の箇所が、箇条 7~10 に定める方法の一つによって周囲の爆発性雰囲気の点火源にならないようにしたとき、又は箇条 5 の規定によって安全であると示されたときはこの限りではない。

4.3 機器に対する要求事項

通常運転中に周囲の雰囲気に着火する能力のあるアーク、スパーク又は高温表面を生じる機器又はコンポーネントは、次の一つ以上の方法によって着火に対して保護しなければならない。これらの手法は、全て機器保護レベル Gc となる。

- a) 非点火性コンポーネント（箇条 7 参照）
- b) ハーメチックシールデバイス（箇

条 8 参照)

c) シールデバイス (箇条 9 参照)

d) 呼吸制限容器 (箇条 10)。

とされている。4.3 の a)～c)が nC、d)が nR を規定してる。このように、使用される場所が限定されているため、防爆構造も限定した内容であり、一般の電気機器を非点火防爆にするための対応は、他の防爆構造と比較すると対応しやすいと考えられる。ただし、表面温度や沿面距離などの規定は他の関連規格同様の内容も含まれることから、一部については必ずしも対応しやすいとは言えない内容もある。

カメラについては、ジンバルの構造などを除けば、比較的適応しやすい。ESC などの制御回路についても、無接点化、表面温度など一部内容については詳細な検討が必要であるが、多くの機器が適応できる可能性がある。

モーターに関して、メーカーやサイズによっても異なるものの、小型ドローンに比較的多く利用されている直径約 20～30mm のものは巻き線コイル部の局数が 10～16 個程度、中型サイズのもは直径約 40～50mm で 20～30 個程度、大型機器用のもが直径約 80～90mm で 40～50 個程度である。アウターローター側の内側に強力な永久磁石（主にネオジム系）が使用されており、このような構造を検討すると、通常動作時に発熱箇所は主にコイル部であるが、アウターローターの高速回転によって放熱効率も良いことが予想される。アウターローター自体は無電力で、筐体自身が外部空気と触れており、高速回転によって放熱される構造である。これらのことから、防爆化を検討す

る場合、最高温度測定や樹脂などによるコイル部の固定等、検討すべき項目を明らかにして対応する必要がある。

4.1.3 インターロックによるドローンの実現可能性

現在存在するドローンに対しての応用として、落下を含む不具合の発生時に着火源とならないための一つの対策として、インターロック機能の導入が考えられる。ただし、現状では防爆の考え方にはインターロックは明示されてはおらず、運用を示唆する EN 規格、ATEX 指令が存在するにとどまっている。

我が国でもインターロックの利用は検討されてきたものの、安衛則 283 条に示される適用除外に該当しない根拠として、昭和 35 年 11 月 22 日基発第 990 号の解釈通達が存在し、みとめられてはいない。そのため、本報告書でも同等のリスクとなるという根拠を示すべく 1 章に、その基準となるべき考え方を述べた。ここではそのインターロックの利用が可能であった場合についてのドローンにどのように適用が可能かを主眼として述べる。

大型のモーターを搭載する固定式の機器と違い、ドローンは検査用など極限られた時間での使用となり、機器のメンテナンスは固定式の機器と比較して各段に良好な状態を維持できるであろう。この観点から、防爆構造の簡略化の可能性はある。大きな違いは、ドローンでは落下衝突の可能性もある。そこで、仮にインターロックを落下衝突前に作動させることが可能であれば、電源が遮断されるのであるから、防爆構造の簡略化の有効性を担保できるであろう。

以上は、適切な墜落を自動検知するセンサ（加速度や圧力、電圧・電流センサなど）と絶縁型電力供給回路（コンバーター）が開発されたことが大前提となる。

現時点では、衝撃を感知して 40ms の作動時間が必要とされており、例えば落下時速 50km となる高さでの使用を想定すると、インターロックは地面から 7.2m の距離で作動する必要がある。このような条件を満たすシステムが開発できれば、強固なインターロックシステムを開発したといえるであろう。

また、落下衝突の衝撃を感知して作動するインターロック機能はある程度開発されているが、それでは火花が発生した後の作動となり、適切なインターロックとは言い難い。したがって、インターロックの確立の難点は、地面に当たる 40ms 以上前に作動できるかどうかである。

インターロック自体の故障については、1章で考察した通りの SIL が適用できるようにロジックを整えることができるが、遮断された電源としての電池自体は残るため、残留エネルギーによる着火リスクは考慮しなければならない。既に本質安全防爆の 2 次電池は存在することから、適切なドローン筐体を含む落下試験の際に、同電池が防爆性能を失わないよう確認する必要はある。

4.2 砂詰め防爆構造

砂詰め防爆構造は、IEC 60079-5:2015 - Explosive atmospheres - Part 5: Equipment protection by powder filling "q" で規定された防爆構造であるが、国内では電気機械器具防爆構造規格の対象外とされており、特殊防爆構造として取り扱われ

ている。

同構造の国内導入が除外された理由の一つに、日本は湿度が高いため、電気機械器具の筐体内に充填されるガラス粒体に水気を含み絶縁性が維持されず、防爆性能が確保されないおそれがあるとの懸念があることが挙げられる。

上述の理由から、輸入品の特殊防爆構造で検定合格した製品についても、使用する際には湿度に対する十分な配慮が必要とされている。

ただし、これまでに高湿度環境が砂詰め防爆構造器具の防爆性能に及ぼす影響の有無については実験的に確認されていない。

仮に砂詰め防爆構造が国内に導入されれば、現在よりも使用可能な防爆電気機械器具の選択肢が拡大するため、危険箇所を保有する国内事業場においてより柔軟な防爆対策が可能となると考えられる。

砂詰め防爆構造が日本の夏季を想定した高温高湿度環境下でも問題なく機能することが確認されれば、当該防爆構造の国内導入が促進されると考えられる。

そこで本研究では、砂詰め防爆構造電気機械器具を模擬した試験サンプルを製作し、これを用いて高温高湿度環境が防爆性能に及ぼす影響の有無を各種実験により調査した。

4.2.1 試験サンプル

試験サンプルは、保護等級 IP65 を有する汎用容器内に、電気抵抗（20 Ω）付の基板を設置（IEC 60079-5:2015 の 4.3.1 節で要求される容器壁との離隔距離を確保）し、IEC 60079-5:2015 の 4.2.1 節で要求される固体ガラスの粒体を充填したものである。電気抵抗への給電用にビニルキャブ

タイヤケーブル（電線：0.75sq×2 芯）を、ケーブルグランドを介して容器内へ引き込んでいる。また、圧力試験および保護等級（IP）試験用に容器にタケノコ（チューブ接続用アダプタ）を取り付けている。

4.2.2 試験サンプルの妥当性

高温高湿度環境下での防爆性能評価実験に先んじて、試験サンプル容器の圧力試験および、防塵（IP5X）及び防水（IPX4）の保護等級試験を実施し、試験サンプル容器が砂詰め防爆構造器具の筐体として IEC 60079-5:2015 で要求される性能を有することを確認した。これらの試験は、充填物を取り除いた状態で実施した。

容器の圧力試験は、IEC 60079-5:2015 の 5.1.1 節で規定された方法で実施した。試験の結果、圧縮空気 50 kPa を容器内に 13 秒間印加しても容器の恒久変形は確認されなかった。

容器の保護等級試験は、IEC 60529:2013 の箇条 13（IP5X）、IEC 60529:2013 の箇条 14（IPX4、Spray nozzle を使用する手順）に従い実施した。試験の結果、防塵性能については、容器内を減圧状態（-2 kPa）で浮遊粉じん中に 8 時間さらしても容器内への粉じんの侵入は認められなかったため、IP5X を満たす。また、防水性能については、10 ml/min で 5 分間の放水を受けても容器内への浸水は認められず、IPX4 を満たすことを確認した。

以上の結果から、試験サンプル容器が、IEC 60079-5:2015 の要求を満たすことを確認した。

4.2.3 耐電圧試験

充填物として使用するガラス粒体

の耐電圧特性を、常温常湿度（23℃、55%RH）、常温高湿度（23℃、70%RH）、高温高湿度（40℃、70%RH）の 3 通りの環境下で試験した。

本試験は、IEC 60079-5:2015 の 5.1.3 節の試験手順に従って実施した。ただし、本手順は常温常湿度のみを対象としたものであるため、常温高湿度、高温高湿度での試験においては記載された温湿度を読み替えて実施した。

試験では、ガラス粉体が充填されたプラスチック製容器内に、試験用電極対（間隔 10 mm）を設置し、上記 3 通りの条件下で 24 時間の前処理を実施した後、電極対に 1000 V を印加し漏れ電流の測定を行った。

試験の結果、いずれの条件においても、漏れ電流は 1 μ A 未満であり、充填物の耐電圧特性に問題は確認されなかった。

4.2.4 温度等級

試験サンプルの温度等級を試験した。本試験は、IEC 60079-5:2015 の 5.1.4 節記載の試験手順に従って実施した。

容器内の抵抗器に消費電力が 3.65 W となるように 0.425 A の直流電流を通電し、抵抗器中央直上（部品自体には触れない）かつ、容器の壁から 5 mm 以上の箇所に熱電対を設置して温度を測定した。

本実験は 23.2℃、39.6 %RH で実施し、温度上昇率が 2 K/h 以下となった時点で最高温度に到達したとみなした。

実験の結果、温度上昇は 49.43 K であり、周囲温度が 40℃（日本の夏季を想定）の場合、抵抗器の最高表面温度は 89.43℃（40℃+49.43 K）となり、温度等級は T5（最高表面温度

100℃以下) に分類される。

温度等級 T5 の器具は、発火点 100℃ 超の可燃性ガスに対応できるため、二硫化炭素（発火点 90℃）等を除くほとんどの種類の可燃性ガスに対応できる。

以上より、砂詰め防爆構造器具の試験サンプルの温度等級は、周囲温度 40℃ を想定した場合でも T5 に分類でき、ほとんどの種類の可燃性ガスに対応できることが確認された。

4.2.4 まとめ

日本の夏季の高温高湿度環境が砂詰め防爆構造器具の防爆性能に与える影響を評価するために、充填物（ガラス粒体）の耐電圧試験および、試験サンプルの温度等級試験を実施した。

その結果、充填物の耐電圧特性について、高温高湿度環境においても低下は認められなかった。また、試験サンプルの温度等級は、周囲温度を 40℃ としても T5 に分類でき、ほとんどの可燃性ガスに対応することを確認した。

以上の結果より、日本の夏季を想定した高温高湿度環境においても、砂詰め防爆構造器具の防爆性能に問題が生じる可能性は低いと考えられる。

実施した各種実験の詳細については、添付資料を参照されたい。

D. まとめ

R3 年度研究項目 4 点について検討した結果は以下のとおりであった。

(1) ガス検知機とインターロックの利用による EPL（防爆性能）評価・運用方法

保護方策に対する故障率からダウ

ンタイムの期待値を計算し、APIRP505:1997 の基準と照らし合わせることで、換気有効度を定量化した。また、ダウンタイムの考え方をインターロック等の監視機器によって担保する方法に拡張することで、インターロックに必要な機能安全のレベルについて考察した。

(2) IECEx スキームにおける認証の信頼性確保方法

IECEx スキーム上での ISO/IEC17025、ISO/IEC17065 による監視評価軽減について調査した。二つの規格内で信頼性確保に寄与する内容について確認した。

(3) 検定制度によらない安全確保措置と我が国での適用可能性に係る提言

PEP に関して、IEC TC31 SC31J WG2 において現在議論されている資料を基に各国意見の整理を行い、我が国における可用性についての検討を行った。

(4) 新たな手法による防爆性能の評価方法と提言

ドローンが現行の防爆検定になじまないことから、どのような形で安全を担保すべきかの検討を行った。また、我が国において未導入である砂詰め防爆に関して、模擬的な試験を実施し、試験の実施ができるか、また防爆技術として我が国で利用できるかについて検討し、ほぼ問題が無いことを確認した。

E. 健康危険情報

なし

F. 研究発表

(1) 論文発表

1) 大塚輝人, 持田智, 古谷隆志安全工学. ゾーン算定における換気有効

度の定量化. 安全工学. 2022; 61:
141-148

2) 大塚輝人, 持田智, 古谷隆志安全
工学. 機能安全を踏まえた精緻な判
定による非危険区域の確保. 安全工
学. 2022/5/12 受理

G. 知的財産権の出願・登録状況

なし