令和2年度補正産業保安高度化推進事業

防爆ドローンの要件に関するガイドライン

2021 年 3 月

経済産業省

目次

1　背景と目的 1
2　適用範囲 2
3　一般事項 3
3.1　関連法令等 3
3.1.1　航空法 3
3.1.2　電波法 5
3.1.3　労働安全衛生法 7
3.1.4　高圧ガス保安法 7
3.1.5　消防法 8
3.2　プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン Ver2.0 9
3.3　プラント内における危険区域の精緻な設定方法に関するガイドライン 10
3.4　国内における防爆型式検定 10
3.5　防爆に関する用語 11
3.5.1　爆発性雰囲気用の電気機器のグループ 11
3.5.2　防爆構造 11
3.5.3　機器保護レベル（EPL） 13
3.5.4　危険区域の分類 14
3.6　海外の防爆ドローンの開発・販売状況 15
4　防爆ドローンを危険区域で飛行させる際の課題 18
4.1　現存する防爆指針の範囲内での課題 18
4.2　落下した場合の防爆機能への影響 19
4.3　衝突・落下した場合の衝撃火花 21
5　ガイドラインの方針 23
6　現存する防爆指針の範囲で防爆ドローンの安全性の確認に必要な要件 24
6.1　危険区域と防爆適応規格 24
6.2　ゾーン 2 用防爆ドローン 26
6.2.1　モーター 26
6.2.2　バッテリー 27
6.2.3　カメラ 28
6.2.4　その他 28
6.3　ゾーン 1 用防爆ドローン 28

6.3.1 モーター 29
6.3.2 バッテリー 29
6.3.3 カメラ 29
6.3.4 その他 29
7 落下を考慮した上で防爆ドローンの安全性の確認に必要な要件の考察 31
7.1 落下のリスク評価に関する考察 31
7.1.1 衝撃落下試験（高所からの落下に対するリスク評価） 31
7.1.2 自由落下試験（比較的低い位置からの落下に対するリスク評価） 32
7.2 インターロック 32
7.3 材料に関する考察 33
8 今年度の事業の評価及び将来の課題 35
8.1 今年度の事業の評価 35
8.2 特殊防爆への対応 35
8.3 ドローン用モーターに関する IEC 防爆規格の検討 39
ANNEX A: 構造仕様と防爆型式検定における試験 1
A.1 構造仕様 1
A.1.1 帯電試験 1
A.1.2 衝撃火花 1
A.2 必要な試験項目 1
A.2.1 衝撃試験 1
A.2.2 落下試験 2
A.3 ゾーン 2 用防爆ドローン 3
A.4 ゾーン 1 用防爆ドローン 6
ANNEX B: 危険区域への一時的侵入に関するリスク評価 7
ANNEX C: ユースケース調査結果 10
C.1 ユースケースと防爆ドローンに求められる機能 10
C.2 ユースケースと求められる防爆性能 11
C.3 まとめ 12
ANNEX D: プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン VER2.0 の本ガイドラインとの関連箇所 14

1　背景と目的

現在、建設インフラをはじめとする、産業インフラの点検においてドローンの活用が具体化され実用段階に入っている。また、プラントにおいては、ドローンを活用することにより、高所からの撮影が容易になり、塔類等の高所や大型石油貯槽タンク等の日常点検や、災害時の迅速な点検を行うことが可能になり、プラントの保安力向上や労働災害撲滅に繋がることが期待されている。加えて、画像処理技術や AI の進歩、ビッグデータ・IoT を活用した高度なスマート保安を導入することにより、ドローンを活用した点検等が重大事故の防止に繋がり、画像を活用した機械診断の実装による技術継承の実現、ベテラン技術者の減少への対応等、保安力の向上につながることも期待されている。

一方、石油精製、石油化学を含む化学工業等のプラントにおけるドローンの飛行は、プラント設備への落下等、安全に活用されなければ重大な事故に至る可能性があり、一部のプラントにおいて実証実験は行われているものの、本格的な実用には至ってはいない状況にある。また、労働安全衛生規則第 280 条により、「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」で使用する電気機械器具については、労働安全衛生法に基づく型式検定に合格したものとする必要があるが、ドローンの防爆性能に係る技術的要件や試験方法は確立しておらず、現時点で型式検定に合格したドローンは存在しない。

平成 30 年度に実施した「プラントにおけるドローンの活用ニーズ・事例調査」でも、調査対象 39 事業所のうち 30 事業所以上が、非防爆機器であるドローンが誤って防爆エリアへ侵入・落下してしまうことを懸念しており、非防爆エリアでの飛行であっても、使用するドローンが防爆機器でないことが、プラントでのドローン活用が急速に進まない一つの阻害要因となっていることが分かる。さらにドローンでの点検中に、腐食等の可能性がある部位が発見された場合は、設備の近傍に接近して詳細に確認すべきであるが、設備近傍は防爆エリアと設定されている場合が多いため、遠くからズームアップ機能付きカメラ等で撮影せざるを得ない。しかしながらプラント設備など複雑な構造物を対象とする場合、ズーム機能のみでは所望の撮影が困難なケースが多く、また、このような構造に起因する風、乱流の中で十分鮮明な撮影を実現することも困難である。

加えて、防爆対応のドローンと認定されるためには、一般電気品規格である「工場電気設備防爆指針」に従った検定に合格しなければならない。しかしながら、落下時において防爆性能を維持できるか、落下や設備接触時のメカニカルスパーク対策等、ドローン特有の課題に関して明確な指針が示されていないこともあり、防爆ドローンの開発が進んでいない状況にある。

そこで本ガイドラインでは、ドローンに係る近年の他分野の動向、プラントにおけるその活用への期待と、普及が進んでいない現状を踏まえ、防爆対応のドローンを実現するに当たっての課題点を洗い出し、明確な指針を示す等により、防爆ドローンの開発・実装に繋げることを目的とする。

2　適用範囲

本ガイドラインは、石油精製、化学工業（石油化学を含む）等のプラントで活用するドローンを対象とする。ドローンを飛行させるエリアは、そのプラント事業者の管理下にある私有地の屋外及び屋内を対象とし、プラント事業者の管理下にないエリアは含まないものとする。粉じんを扱う事業所（製粉や化学物質微粒子等）は屋内の非常に限られた場所が多いため、可燃性の粉じんは今回は対象外とする。

ゾーン 2 およびゾーン 1 で飛行させることを意図したドローン（以下、それぞれ「ゾーン 2 用ドローン」、「ゾーン 1 用ドローン」とする。）を対象とし、ゾーン 0 で飛行させることを意図したドローン（以下、「ゾーン 0 用ドローン」とする。）は対象外とする。

プラント等で使用される電気機械器具（機器）は、防爆検定に合格したものでなければ使用できない。合格には、構造規格を満たすことが必要である。なお、構造規格第 5 条により、規格に適合しない電気機械器具のうち、国際規格等に基づき製造されたものであって同等以上の防爆性能を有するものは、規格に適合しているものとみなされるが、その基準として、工場電気設備防爆指針が用いられている。防爆検定においては、対象となる危険区域に応じて防爆性能に係る要求事項が異なる。危険区域は、通常の状態における爆発性雰囲気の存在・生成・持続に基づいて定義されている。地震その他、予想を超える事故などに起因するもので、発生の頻度が極めて少なく、かつ可燃性ガス蒸気の漏洩が大量で、防爆電気設備の防爆対策の範囲を超えるような場合は想定していない（JNIOSH-TR-NO.44, 2.2.1 解説②）[1)]。そこで本ガイドラインも通常の状態における爆発性雰囲気に対する防爆を対象とし、災害時の利用は対象外とする。なお、災害時におけるプラントでのドローンの活用のための注意事項は「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン Ver2.0」[2)]の第 4 章に整理されている。

参考文献

1） 労働安全衛生総合研究所，労働安全衛生総合研究所技術指針 ユーザーのための工場防爆設備ガイド JNIOSH-TR-NO.44 : 2012, （2012）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/doc/tr/TR_No44.pdf,（アクセス日 2021 年 1 月 19 日）

2） 石油コンビナート等災害防止3省連絡会議（総務省消防庁、厚生労働省、経済産業省），プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン Ver2.0,（2020）, https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200327009/20200327009-2.pdf,（アクセス日 2021 年 1 月 19 日）

3　一般事項

3.1 関連法令等

3.1.1　　航空法

ドローンの活用は航空法による規制に基づいて実施される必要がある。したがって、航空法第132条により無人航空機の飛行の制限がされている空域で飛行を実施する場合、 航空法第132条の2により規定されている方法以外による飛行を実施する場合には、地方航空局長の許可・承認を受ける必要がある。

第九章　無人航空機

（飛行の禁止空域）

第百三十二条　何人も、次に掲げる空域においては、無人航空機を飛行させてはならない。ただし、国土交通大臣がその飛行により航空機の航行の安全並びに地上及び水上の人及び物件の安全が損なわれるおそれがないと認めて許可した場合においては、この限りでない。

一　無人航空機の飛行により航空機の航行の安全に影響を及ぼすおそれがあるものとして国土交通省令で定める空域

二　前号に掲げる空域以外の空域であって、国土交通省令で定める人又は家屋の密集している地域の上空

（飛行の方法）

第百三十二条の二　無人航空機を飛行させる者は、次に掲げる方法によりこれを飛行させなければならない。ただし、国土交通省令で定めるところにより、あらかじめ、第五号から第十号までに掲げる方法のいずれかによらずに飛行させることが航空機の航行の安全並びに地上及び水上の人及び物件の安全を損なうおそれがないことについて国土交通大臣の承認を受けたときは、その承認を受けたところに従い、これを飛行させることができる。

一　アルコール又は薬物の影響により当該無人航空機の正常な飛行ができないおそれがある間において飛行させないこと。

二　国土交通省令で定めるところにより、当該無人航空機が飛行に支障がないことその他飛行に必要な準備が整っていることを確認した後において飛行させること。

三　航空機又は他の無人航空機との衝突を予防するため、無人航空機をその周囲の状況に応じ地上に降下させることその他の国土交通省令で定める方法により飛行させること。

四　飛行上の必要がないのに高調音を発し、又は急降下し、その他他人に迷惑を及ぼすような方法で飛行させないこと。

五　日出から日没までの間において飛行させること。

六　当該無人航空機及びその周囲の状況を目視により常時監視して飛行させること。

七　当該無人航空機と地上又は水上の人又は物件との間に国土交通省令で定める距離を保って飛行させること。

八　祭礼、縁日、展示会その他の多数の者の集合する催しが行われている場所の上空以外の空域において飛行させること。

九　当該無人航空機により爆発性又は易燃性を有する物件その他人に危害を与え、又は他の物件を損傷するおそれがある物件で、国土交通省令に定めるものを輸送しないこと。

十　地上又は水上の人又は物件に危害を与え、又は損傷を及ぼすおそれがないものとして国土交通省令で定める場合を除き、当該無人航空機から物件を投下しないこと。

（捜索、救助等のための特例）

第百三十二条の三　第百三十二条及び前条（第一号から第四号までに係る部分を除く。）の規定は、都道府県警察その他の国土交通省令で定める者が航空機の事故その他の事故に際し捜索、救助その他の緊急性があるものとして国土交通省令で定める目的のために行う無人航空機の飛行については、適用しない。

無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン:

飛行の禁止空域、飛行の方法などの具体的な記述は、国土交通省が定める「無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン」[1)]等にある。例えば、飛行の禁止空域は、ア) 地表又は水面から 150m 以上の高さの空域、イ) 空港等の周辺（進入表面等）の上空の空域、ウ) 人口集中地区の上空の空域である。これらの空域で無人航空機を飛行させようとする場合には、安全面の措置をした上で、国土交通大臣の許可を受ける必要がある。飛行の方法についても、以下のア）~カ）ルールによらずに無人航空機を飛行させようとする場合には、安全面の措置をした上で、国土交通大臣の承認を受ける必要がある。

ア) 日中（日出から日没まで）に飛行させること

イ) 目視（直接肉眼による）範囲内で無人航空機とその周囲を常時監視して飛行させること（目視外飛行の例：FPV（First Person’s View）、モニター監視）

ウ) 第三者又は第三者の建物、第三者の車両などの物件との間に距離（30m）を保って飛行させること

エ) 祭礼、縁日など多数の人が集まる催し場所の上空で飛行させないこと

オ) 爆発物など危険物を輸送しないこと

カ) 無人航空機から物を投下しないこと

3.1.2　電波法

ドローンの操縦や、搭載したカメラからの映像伝送には電波が使用されていることから、ドローンの活用は電波法の規制に基づいて実施する必要がある。

（無線局の開設）

第四条　無線局を開設しようとする者は、総務大臣の免許を受けなければならない。ただし、次の各号に掲げる無線局については、この限りでない。

一　発射する電波が著しく微弱な無線局で、総務省令に定めるもの

二　二十六・九メガヘルツから二十七・二メガヘルツまでの周波数の電波を使用し、かつ、空中線電力が〇・五ワット以下である無線局のうち総務省令で定めるものであつて、第三十八条の七第一項（第三十八条の三十一第四項において準用する場合を含む。）、第三十八条の二十六（第三十八条の三十一第六項において準用する場合を含む。）若しくは第三十八条の三十五又は第三十八条の四十四第三項の規定により表示が付されている無線設備（第三十八条の二十三第一項（第三十八条の二十九、第三十八条の三十一第四項及び第六項並びに第三十八条の三十八において準用する場合を含む。）の規定により表示が付されていないものとみなされたものを除く。以下「適合表示無線設備」という。）のみを使用するもの

三　空中線電力が一ワット以下である無線局のうち総務省令で定めるものであつて、第四条の三の規定により指定された呼出符号又は呼出名称を自動的に送信し、又は受信する機能その他総務省令で定める機能を有することにより他の無線局にその運用を阻害するような混信その他の妨害を与えないように運用することができるもので、かつ、適合表示無線設備のみを使用するもの

総務省電波利用のホームページに記載されている国内でドローン等での使用が想定される主な無線通信システム：

ドローンの操縦や、画像伝送のために、電波を発射する無線設備を利用する。他の無線通信に妨害を与えないように、周波数や一定の無線設備の技術基準に適合する小電力の無線局等は免許を受ける必要はない。一般には電波法令に基づき、無線局の免許を受けなければならない。表 3-1 は総務省電波利用のホームページに、記載されている国内でドローン等での使用が想定される主な無線通信システムについて整理したものである。（総務省電波利用のホームページ：https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/）[2)]

表 3-1 国内でドローン等での使用が想定される主な無線通信システム

（総務省電波利用のホームページより https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/）[2)]

<table>
<tr><th>分類</th><th>無線局免許</th><th>周波数帯</th><th>送信出力</th><th>利用形態</th><th>備考</th><th>無線従事者資格</th></tr>
<tr><td rowspan="3">免許及び登録を要しない無線局</td><td>不要</td><td>73MHz 帯等</td><td>※1</td><td>操縦用</td><td>ラジコン用微弱無線局</td><td rowspan="3">不要</td></tr>
<tr><td rowspan="2">不要
※2</td><td>920MHz 帯</td><td>20mW</td><td>操縦用</td><td>920MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用特定小電力無線局</td></tr>
<tr><td>2.4GHz 帯</td><td>10mW/MHz</td><td>操縦用画像伝送用データ伝送用</td><td>2.4GHz 帯小電力データ通信システム</td></tr>
<tr><td>携帯局</td><td>要</td><td>1.2GHz 帯</td><td>最大1W</td><td>画像伝送用</td><td>アナログ方式限定※4</td><td rowspan="4">第三級陸上特殊無線技士以上の資格</td></tr>
<tr><td rowspan="3">携帯局陸上移動局</td><td rowspan="3">要
※3</td><td>169MHz 帯</td><td>10mW</td><td>操縦用
画像伝送用
データ伝送用</td><td rowspan="3">無人移動体画像伝送システム（平成28年8月に制度整備）</td></tr>
<tr><td>2.4GHz 帯</td><td>最大1W</td><td>操縦用画像伝送用
データ伝送用</td></tr>
<tr><td>5.7GHz 帯</td><td>最大1W</td><td>操縦等加伝送用
データ伝送用</td></tr>
</table>

※1 500m の距離において、電界強度が 200 μV/m 以下のもの。

※2 技術基準適合証明等（技術基準適合証明及び工事設計認証）を受けた適合表示無線設備であることが必要。

※3 運用に際しては、運用調整を行うこと。

※4 2.4GHz 帯及び 5.7GHz 帯に無人移動体画像伝送システムが制度化されたことに伴い、1.2GHz 帯からこれらの周波数帯への移行を推奨しています。

3.1.3　労働安全衛生法

労働安全衛生法は第二十八条の二（事業者の行うべき調査等）において、事業者は「労働者の危険又は健康障害を防止するため必要な措置を講ずるように努めなければならない」と規定しており、「必要な措置」には、ガスや蒸気の調査・措置も含まれる。それらの措置を講じてもなお爆発または火災のおそれのある箇所においては、事業者と労働者ともに適切な防爆構造を有する電気機械器具でなければ使用してはならないと規定されている。

労働安全衛生規則（昭和四十七年労働省令第三十二号）の以下の条項において、法に定められた「必要な措置」が具体的に規定されている。

（通風等による爆発又は火災の防止）

第二百六十一条　事業者は、引火性の物の蒸気、可燃性ガス又は可燃性の粉じんが存在して爆発又は火災が生ずるおそれのある場所については、当該蒸気、ガス又は粉じんによる爆発又は火災を防止するため、通風、換気、除じん等の措置を講じなければならない。

（爆発の危険のある場所で使用する電気機械器具）

第二百八十条　事業者は、第二百六十一条の場所のうち、同条の措置を講じても、なお、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電気機械器具(電動機、変圧器、コード接続器、開閉器、分電盤、配電盤等電気を通ずる機械、器具その他の設備のうち配線及び移動電線以外のものをいう。以下同じ。)を使用するときは、当該蒸気又はガスに対しその種類及び爆発の危険のある濃度に達するおそれに応じた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。

2　労働者は、前項の箇所においては、同項の防爆構造電気機械器具以外の電気機械器具を使用してはならない。

3.1.4　高圧ガス保安法

高圧ガス保安法令において関連する条項は以下の通りである。可燃性ガス（アンモニア及びブロムメチルを除く）の高圧ガス設備に係る電気設備は、その設置場所及び当該ガスの種類に応じた防爆性能を有する構造のものであることが規則で定められている。

一般高圧ガス保安規則（昭和四十一年通商産業省令第五十三号）

（定置式製造設備に係る技術上の基準）

第六条　製造設備が定置式製造設備（コールド・エバポレータ、圧縮天然ガススタンド、液化天然ガススタンド及び圧縮水素スタンドを除く。）である製造施設における法第八条第一号の経済産業省令で定める技術上の基準は、次の各号に掲げるものとする。ただし、経済産業大臣がこれと同

等の安全性を有するものと認めた措置を講じている場合は、この限りでなく、また、製造設備の冷却の用に供する冷凍設備にあっては、冷凍保安規則に規定する技術上の基準によることができる。

一～二十五［略］

二十六　可燃性ガス（アンモニア及びブロムメチルを除く。）の高圧ガス設備に係る電気設備は、その設置場所及び当該ガスの種類に応じた防爆性能を有する構造のものであること。

二十七～四十三［略］

2［略］

コンビナート等保安規則（昭和六十一年通商産業省令第八十八号）

（製造施設に係る技術上の基準）

第五条　製造施設（製造設備がコールド・エバポレータ、特定液化石油ガススタンド、圧縮天然ガススタンド、液化天然ガススタンド及び圧縮水素スタンドであるものを除く。）における法第八条第一号の経済産業省令で定める技術上の基準は、次の各号に掲げるもののほか、第九条から第十一条までに定めるところによる。ただし、製造設備の冷却の用に供する冷凍設備にあっては、冷凍保安規則に規定する技術上の基準によることができる。

一～四十七［略］

四十八　可燃性ガス（アンモニア及びブロムメチルを除く。）の高圧ガス設備に係る電気設備は、その設置場所及び当該ガスの種類に応じた防爆性能を有する構造のものであること。ただし、ジメチルエーテルに係る試験研究施設に係る電気設備であって、経済産業大臣がこれと同等の安全性を有するものと認めた措置を講じているものについては、この限りでない。

四十九～六十五［略］

2［略］

3.1.5　　消防法

危険物施設で火気及び電気器具等を使用する際に遵守する事項についての関連規定は以下のとおりである。

危険物の規制に関する政令（昭和三十四年政令第三百六号）

第二十四条　法第十条第三項の製造所等においてする危険物の貯蔵及び取扱いのすべてに共通する技術上の基準は、次のとおりとする。

一～十二［略］

十三　可燃性の液体、可燃性の蒸気若しくは可燃性のガスがもれ、若しくは滞留するおそれのある場所又は可燃性の微粉が著しく浮遊するおそれのある場所では、電線と電気器具とを完全に接続し、かつ、火花を発する機械器具、工具、履物等を使用しないこと。

3.2 プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン VER2.0

経済産業省はプラント保安分野におけるドローンの安全な活用の促進に向け、2019 年 3 月、消防庁、厚生労働省と連携し、石油精製、石油化学等のプラント屋外でドローンを安全に運用するための「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン」初版 [3]を策定し、国内外企業の先行事例を盛り込んだ「活用事例集」とともに公表した。さらに、2020 年 3 月、屋内でのドローン活用の安全要件を整理し、その際に必要なリスクアセスメントやリスク対策を盛り込む形で「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン Ver2.0」[4]として初版のガイドラインならびに「活用事例集」改訂するとともに、「目視検査の代替可能性に関する考察」を取りまとめた。関連資料は、下記 URL よりダウンロード可能である。
（https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200327009/20200327009.html）[5]

「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン Ver2.0」は、第 1 章 概要、第 2 章 通常運転時におけるプラントでのドローンの活用方法、第 3 章 設備開放時等におけるプラントでのドローンの活用方法、第 4 章 災害時におけるドローンの活用方法、第 5 章 関連法令等の構成となっており、第 2 章では、通常運転時において非危険区域の上空で一般のドローンを活用する際のリスクアセスメントやリスク対策について、危険区域への落下のリスクも考慮して、整理されている。具体的には「ドローン運用事業者の選定」、「操縦者の要件」、「使用する機体の要件」、「飛行計画書の作成と提出」、「事前協議等の実施」、「ドローンを活用した点検等の実施」、「飛行記録等の作成と提出」のように節ごとに整理されている。いずれも、非危険区域のみならず危険区域で防爆ドローンを活用する際にも考慮しなければならない項目が多い。例えば、「飛行計画書の作成と提出」では(1) ドローンの飛行目的・計画 (2) リスクアセスメント (3) リスク対策について、それぞれ記載があり、(3) リスク対策については、(ア) 爆発性雰囲気を生成する可能性がなく火気の制限がないエリアにおけるリスク対策の例、(イ) 爆発性雰囲気を生成する可能性があるエリア近傍や火気の制限があるエリアの近傍における追加のリスク対策の例（プラント内での飛行環境に応じ、下記一般的な対策に加え、複数の対策を組み合わせることが望ましい）のように分けて示されている。防爆ドローンの運用においても遵守することが望ましい。

「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン VER2.0」は非危険区域でのドローンの活用を対象としたのに対して、本ガイドラインは防爆ドローンの活用が対象である。すなわち危険区域での活用が対象であり、運用上は危険レベルの異なる危険区域への侵入も考

慮する必要がある。例えばゾーン 2 で活用するための防爆ドローンがゾーン 1 に意図せず侵入する可能性があり、ANNEX B で検討した。

3.3 プラント内における危険区域の精緻な設定方法に関するガイドライン

第2等級放出源（通常運転中には発生しない又は低頻度で短時間だけと予測できる放出）の周りは、一般的にはゾーン 2（ガス、蒸気又はミスト状の可燃性物質と空気との混合物質で構成する爆発性雰囲気が通常運転中に生成する可能性がなく生成しても短時間しか持続しない区域）として定義される。プラント内には多くのバルブやフランジが存在するため、第2等級放出源がいたるところ存在し、詳細リスク評価が実施されなければ、プラントの殆どは少なくともゾーン 2 となり、防爆機器以外の電気機器以外は持ち込めない。そこで経済産業省は、法令が定める保安レベルを低下させることなく、危険区域の精緻な設定が可能となるように、最新の IEC 規格（IEC 60079-10-1 Edition 2.0 2015-09）[6)]に基づき危険区域を精緻に設定する方法を、「ガイドライン」として取りまとめた。プラント事業者が同ガイドラインに沿った安全な運用を図ることを目的として、自主行動計画についても示した。以下の URL でガイドライン、自主行動計画などがダウンロード可能となっている。

（https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/hipregas/hourei/guideline_.html）

プラント内で一般のドローンあるいは防爆ドローンをより広範囲で活用するために、プラント内の放出源まわりについて「プラント内における危険区域の精緻な設定方法に関するガイドライン」[7)]等を用いて詳細リスク評価して、危険区域の分類を明確にすることが極めて重要である。

3.4 国内における防爆型式検定

石油・ガスプラントに代表される爆発性雰囲気が存在する事業所内の危険区域では、防爆構造の電気機械器具（機器）を使用しなければならないことになっている。これらの電気機器が防爆構造の基準や規格を満たしているかどうかの判断が必要である。そこで、第三者機関、国内では厚労大臣の登録を受けた登録型式検定機関において、型式検定を受検し、合格することが必要となっている（以下、「型式検定」とする。）。

型式検定の合格の基準として「電気機械器具防爆構造規格（昭和 44 年労働省告示第 16 号。以下、「防爆構造規格」という。）に準拠した構造の機器であることが求められる。現在、多くの海外メーカーは国際規格である IEC 規格に準拠して製造する例が多い。防爆構造規格は、現在の IEC 規格と比較して、基準や範囲などが異なっている箇所があるが、防爆構造規格第 5 条「規格と関連する国際規格等に基づき製造されたものであって、規格に適合する電気機械器具と同等以上の防爆性能を有することが試験等により確認されたものは、規格に適合しているものとみな

す」との規定に基づき、平成 27 年 8 月 31 日付け基発 0831 第 2 号「電気機械器具防爆構造規格第 5 条の規定に基づき、防爆構造規格に適合するものと同等以上の防爆性能を有することを確認するための基準等について」において IEC 規格に基づいて製造された防爆構造電気機械器具が提示された。防爆構造電気機械器具の基本的な規格としての「電気機械器具防爆構造規格」の運用においては、労働安全衛生総合研究所により次の3つの指針が発行され、推奨基準として使用されている。

- NIIS -TR -NO.39 工場電気設備防爆指針（ガス蒸気防爆 2006）[8)]
- NIOSH-TR-46 工場電気設備防爆指針（国際整合技術指針 2015）[9)]
- RIIS-TR-82-1 工場電気設備防爆指針（粉じん防爆 1982）[10)]

また、電気設備に関する防爆の基本事項、防爆電気設備の計画、施設及び保守等に関して、工場電気設備防爆指針を補完するものとして、労働安全衛生総合研究所技術指針「JNIOSHTR-NO.44 ユーザーのための工場防爆設備ガイド(2012)」[11)]が労働安全衛生総合研究所から発行されている。

本ガイドラインでは国際規格をベースに整理された JNIOSH-TR-46 工場電気設備防爆指針（国際整合技術指針 2015、2018）[12)]に準拠して記述する。

3.5 防爆に関する用語

3.5.1 爆発性雰囲気用の電気機器のグループ

防爆構造については、世界的に IEC 規格による分類が一般的である。また、我が国においても JIS 等ではこの分類を踏襲している。ここでは、IEC に準拠した分類と用語によって、簡単に説明する。また、防爆構造規格は、以下のように、対象とする産業別で区分されている。

- グループ I：主に石炭鉱山等を対象
- グループ II：主に揮発性、可燃性、爆発性の気体を取り扱う石油プラント、化学工場等を対象
- グループ III：主に、可燃性、爆発性の粉じんを取り扱う産業（工場）を対象

今回のドローンに関しては、グループ II の産業での使用を前提とした内容として記載する。

3.5.2 防爆構造

1） 耐圧防爆構造（記号 d）

耐圧防爆構造とは、防爆機器の容器内部で爆発性ガスの爆発が起こった場合に、その圧力に耐え、かつ爆発火炎が外部に伝搬しない（外部に引火しない）構造である。主に、変圧器やモーター、電力盤など電力が大きい機器等に使用される例が多い。重圧な構造から、一般同様の機器

と比較して、寸法と重量が増加する傾向となる。なお、機器保護レベル（EPL。詳細は 3.5.3 参照）による区分（db、dc 等）があり、それぞれの区分の対応については要件がある（詳細は関係 IEC 規格等参照のこと）。

2） 内圧防爆構造（記号p）

内圧防爆構造とは、防爆機器容器の内部に不活性ガス等を圧入（外部の圧力を超える値）し、爆発性ガスがその容器の内部に侵入しないようにした構造である。測定器やカメラなど市販品を容易に防爆化する際に用いられる例が多い。ただし、不活性ガスボンベや圧力センサなどが必要なことから、機構も複雑となり、各種制限を受けやすい機器である。なお、機器保護レベル（EPL。詳細は 3.5.3 参照）による区分（pxb、pyb 等）があり、それぞれの区分の対応については要件がある（詳細は関係 IEC 規格等参照のこと）。

3） 安全増防爆構造（記号 e）

安全増防爆構造とは、火花や高温を発しない機器で、接触不良や断線などが起こりにくい構造である。必要とする条件から、ブラシレス型モーター、ケーブル接続箱など限られた範囲の機器が対象となる。なお、機器保護レベル（EPL。詳細は 3.5.3 参照）による区分（eb、ec 等）があり、それぞれの区分の対応については要件がある（詳細は関係 IEC 規格等参照のこと）。

4）油入防爆構造（記号 o）

油入防爆構造とは、火花、高温を生じる部分を保護液に納め、液上部に存在する爆発性ガスに着火しない構造である。構造の性質上、限られた機器のみの対応であることから、実例は必ずしも多くはない。なお、機器保護レベル（EPL。詳細は 3.5.3 参照）による区分（ob、oc 等）があり、それぞれの区分の対応については要件がある（詳細は関係 IEC 規格等参照のこと）。

5）樹脂充填防爆構造（記号 m）

樹脂充填防爆構造とは、火花、高温を生じる部分を樹脂の中に封入した構造である。通常の電気基板を容易に防爆化することは可能であるが、樹脂の中に封入するため、このような状態に馴染まない基板や部品は使用できない。なお、機器保護レベル（EPL。詳細は 3.5.3 参照）による区分（ma、mb 等）があり、それぞれの区分の対応については要件がある（詳細は関係 IEC 規格等参照のこと）。

6）非点火防爆構造（記号 n）

非点火防爆構造とは、通常の動作および予想される特定の事象が生じた場合に、周囲のガスに点火させない構造である。比較的構造が容易であり、計測器や検知器など多くの機器が対象となる。ただし、制限区域（ゾーン）が限定（ゾーン2のみ）されているため、危険区域では使用できない。なお、機器保護レベル（EPL。詳細は 3.5.3 参照）による区分（nC、nL 等）がある。特にこの規格では多岐にわたる区分となっており、それぞれの区分の対応については要件がある（詳細は関係 IEC 規格等参照のこと）。

7）本質安全防爆構造（記号 i）

本質安全防爆構造とは、正常時および事故時に発生する電気火花、高温部が爆発性ガスに着火しない構造（電気エネルギーが小さい）である。可燃性ガス等が充満している最も危険な区域でも使用可能（条件を満たす場合）である。このため、各種センサでの利用が多い。ただし、電力制限から、消費電力の大きい機器は対応ができない。なお、機器保護レベル（EPL。詳細は 3.5.3 参照）による区分（ia、ib 等）があり、それぞれの区分の対応については要件がある（詳細は関係 IEC 規格等参照のこと）。

8）特殊防爆構造（記号 s）

特殊防爆構造とは、上記の構造に属さない構造で、安全性が試験その他で担保された構造である。そのため、使用制限が多く付加され、使用場所も限定される例が多い。

3.5.3　機器保護レベル（EPL）

構造別に分けられている内容のほか、機器保護レベル（equipment protection level, EPL）のカテゴリーでも区分される。この考え方は、リスクアセスメントの一部として適宜採用することが可能である（IEC 60079−14[13]参照）。この EPL は、点火源となる可能性に基づいて機器に割り当てる保護レベルであって、爆発性ガス雰囲気の区分をするものである。

1）EPL Ga

極めて高い保護レベルをもつ機器であって、爆発性ガス雰囲気で使用し、通常運転中、想定内の機能不全時又は稀な機能不全時でも点火源とはならないものを示す。

2）EPL Gb

高い保護レベルをもつ機器であって、爆発性ガス雰囲気で使用し、通常運転中又は想定内の機能不全時でも点火源とはならないものを示す。

3）EPL Gc

強化した保護レベルをもつ機器であって、爆発性ガス雰囲気で使用し、通常運転中は点火源とはならず、かつ、ランプの故障などのように通常想定される機能不全時にも着火源とはならないための何らかの追加の保護が講じられているものを示す。

ここで、「機能不全（malfunction）」とは、防爆に関して機器又は部品が意図した機能を果たさない状態を指している。以下に、例を示す。

- 機器の構成部分又は部品の故障
- 外乱（例えば、衝撃、振動、電磁界）
- 設計の誤り又は欠陥（例えば、ソフトウェアのエラー）
- 電源又は他の外部供給源の障害
- 操作者の誤操作に起因する制御不能（特に、携帯形機器の場合）

次に、「想定される機能不全（expected malfunction）」とは、実際上、日常的に生じる障害又は機器の機能不全を指している。

「稀にしか生じない機能不全（rare malfunction）」とは、起きるとしても稀にしか起きない類の機能不全を示し、二つの相互に独立した予測可能な機能不全であって、それらの一方だけでは点火源とならないが、両者が組み合わされると点火源となるものは稀に生じる機能不全の一つとみなすとされている。

3.5.4 危険区域の分類

危険区域(hazardous area):機械器具（以下、「機器」という。）の組立て、設置及び使用のために特別な予防策を必要とする量のガス状の爆発性雰囲気が存在する、又は存在する可能性がある区域。

非危険区域(non-hazardous area):機器の組立て、設置及び使用のために特別な予防策を必要とする量のガス状の爆発性雰囲気が存在しないと予測できる区域。

危険度区域:次に示す 3 種類に区分する。

ゾーン 0(Zone 0):ガス、蒸気又はミスト状の可燃性物質と空気との混合物質で構成する爆発性雰囲気が連続的に、長時間又は頻繁に存在する区域。

ゾーン 1(Zone 1):ガス、蒸気又はミスト状の可燃性物質と空気との混合物質で構成する爆発性雰囲気が通常運転中でもときどき生成する可能性がある区域。

ゾーン 2(Zone 2):ガス、蒸気又はミスト状の可燃性物質と空気との混合物質で構成する爆発性雰囲気が通常運転中に生成する可能性がなく生成しても短時間しか持続しない区域。

3.6 海外の防爆ドローンの開発・販売状況

海外における防爆ドローンの開発・販売状況等についてインターネットを中心に調査した結果、（第三者認証を得ているかどうかに関わらず）防爆ドローンとして紹介されているものが 4 機種見つかった（表 3-2）。なお、IEC 防爆機器規格適合試験制度（IECEx）や爆発性雰囲気の中で使用される機器に適用される欧州指令（ATEX 指令）の認証を得たうえで販売されているドローンは確認されなかった。また、落下した場合の防爆性能への影響に関してインターネットユーザーから質問があったが、開発元からの回答は確認されなかった。以下 4 機種のドローンについて調査結果を記す。

表 3-2 インターネット上で防爆として紹介されているドローン

ドローン	国	価格	第三者認証
ドローン A	アメリカ	$83,792（約 930 万円程度）	×
ドローン B	アメリカ	$3,500（約 40 万円程度） Out of stock	×
ドローン C	スペイン	-	×
ドローン D	フランス	非公開	×

1） ドローン A（アメリカ）

https://www.larsonelectronics.com/product/148151/explosion-proof-drone-3-flight-modes-3-2m-range-c1d1-c2d1-nec-cec-atex-iecex

最大距離 5.15 km、飛行時間 22 分、最大速度（無風）18 m/s の性能をもつと紹介されている。爆発性ガス雰囲気に対応したグループ II の安全増防爆構造で、ゾーン 0 から 2 まですべての危険区域に対応していると説明されているが、ATEX 認証については「pending」との記載がある。また IECEx 認証についての記載はない。

2） ドローン B（アメリカ）

https://intrinsicallysafestore.com/product/intrinsically-safe-drone/

重量 500 g、サイズ 382 mm×382 mm×89 mm、飛行時間 25 分、最大速度 18 m/s の性能をもつと紹介されている。名称は Intrinsically Safe Drone であるが、防爆構造に関する具体的な説明はない。対象危険源はガスであり、ゾーン 2（相当）に対応していると説明されている。第三者認

証を目指している旨の記事が 2019 年に掲載されたが、その後認証に至ったとの情報は掲載されていない。

3）ドローン C（スペイン）

http://sanjorgetecnologicas.com/?tag=explosive-atmospheres-drone

具体的な性能に関する情報はない。爆発性雰囲気で使用することが意図されており、堆積物の内部、石油およびガスの貯蔵容器、または揮発性で爆発の可能性のある雰囲気を持つ他の閉じ込められたコンテナなどの危険な施設の検査での使用が想定されているとのことである。第三者認証を得たとの記載はない。2018 年に開発を継続する旨の記事が掲載されたが、その後情報は更新されていない。

4）ドローン D（フランス）

https://www.aeronewstv.com/en/industry/drones/2522-first-explosive-environments-certified-drone.html

重量 4.2kg、翼幅 1200 mm、飛行時間 8 分から 15 分の性能をもつと紹介されている。帯電防止のために木製プロペラが装備されているとのことだが、構造についてその他の情報はない。対象危険源はガス/蒸気であり、石油プラットフォーム、化学処理プラント、または石油精製所の保守または診断操作に活用することが意図されている。ATEX による認証を受けているとの記載があるものの、2020 年 10 月時点で販売されているという事実は確認できない。

参考文献

1) 国土交通省 航空局，無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン，（2019），https://www.mlit.go.jp/common/001301393.pdf，（アクセス日 2021 年 1 月 19 日）
2) 総務省，電波利用のホームページ，https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/，（アクセス日 2021 年 1 月 19 日）
3) 石油コンビナート等災害防止3省連絡会議（総務省消防庁、厚生労働省、経済産業省），プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン，（2019），https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/koatsu_gas/pdf/014_s01_00.pdf，（アクセス日 2019 年 1 月 20 日）
4) 石油コンビナート等災害防止3省連絡会議（総務省消防庁、厚生労働省、経済産業省），プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライ Ver2.0，（2020），https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200327009/20200327009-2.pdf，（アクセス日

2020 年 1 月 19 日）
5) 経済産業省，プラント保安分野におけるドローンの安全な活用の促進に向け、「ガイドライン」と「活用事例集」を改訂しました -目視検査代替の検証を実施 / タンク等の屋内での活用を促進, https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200327009/20200327009.html,（アクセス日 1 月 21 日）
6) IEC, IEC 60079-10-1:2015 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres,（2015）
7) 経済産業省，プラント内における危険区域の精緻な設定方法に関するガイドライン,（2020）, https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/hipregas/hourei/guideline_.html,（アクセス日 2020 年 1 月 20 日）
8) 産業安全研究所，産業安全研究所技術指針 工場電気設備防爆指針（ガス蒸気防爆 2006）NIIS-TR- NO.39:2006,（2006）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/doc/tr/TR_No39.pdf,（アクセス日 1 月 21 日）
9) 労働安全衛生総合研究所，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（国際整合技指針 2015）JNIOSH-TR-46:2015,（2015）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html,（アクセス日 1 月 21 日）
10) 産業安全研究所，産業安全研究所技術指針 工場電気設備防爆指針（粉じん防爆 1982）RIIS-TR-82-1,（1982）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html（アクセス日 1 月 21 日）
11) 労働安全衛生総合研究所，労働安全衛生総合研究所技術指針 ユーザーのための工場防爆設備ガイド, JNIOSH-TR-NO.44：2012,（2012）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/doc/tr/TR_No44.pdf,（アクセス日 2021 年 1 月 19 日）
12) 労働安全衛生総合研究所，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（国際整合技指針 2018）JNIOSH-TR-46:2018,（2018）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html,（アクセス日 1 月 21 日）
13) IEC, IEC 60079−14:2013 Explosive atmospheres - Part 14: Electrical installations design, selection and erection,（2013）

4　防爆ドローンを危険区域で飛行させる際の課題

4.1 現存する防爆指針の範囲内での課題

現状では、防爆ドローンの構成部品の調達自体に課題が存在している。例えばモーターでは、化学プラントにおける点検等の使用目的に適したサイズのドローンに適用可能でありかつ防爆型式検定に合格したものは、2020 年 10 月末時点で日本国内では製造されていない。日本において防爆型式検定に合格しているモーターは構造規格に基づく安全増防爆構造のものがほとんどであり、登録型式検定機関へのヒアリングでは、現実的にドローンに適用可能なサイズのモーターの検定をした経験はないとのことであった。

モーター等の防爆ドローンの製作に必要な主要部品が調達困難である現状に加えて、ドローンの防爆化とその他の性能向上は一般にトレードオフの関係にあることについても検討しなければならない（図 4-1）。現行の防爆指針に基づきドローンを防爆化する場合、モーターやバッテリー等の飛行に必要な部品に適切な防爆構造をもたせる必要があるが、防爆化した場合ドローンの重量は増加することになる。また、化学プラント等におけるドローンの使用目的に応じて搭載物を付加するが、これらの搭載物も同様に防爆化しなければならない。一例としてカメラの場合、固定型であっても可動型であっても防爆化が必要であるが、可動型の場合は可動させるためのモーターも防爆化する必要が生じ、より重量が増加する。一般に搭載物を高機能にするほど、それを防爆化するために重量が増加することになる。重量が増加した結果、ドローンの航続時間や航続距離が短くなるというトレードオフが生じる。また、防爆化にコストがかかるため、防爆ドローンの価格は一般の非防爆ドローンより高額となる。上記は、防爆性能の要件が厳しいゾーン 1 用ドローンにおいてより顕著である。

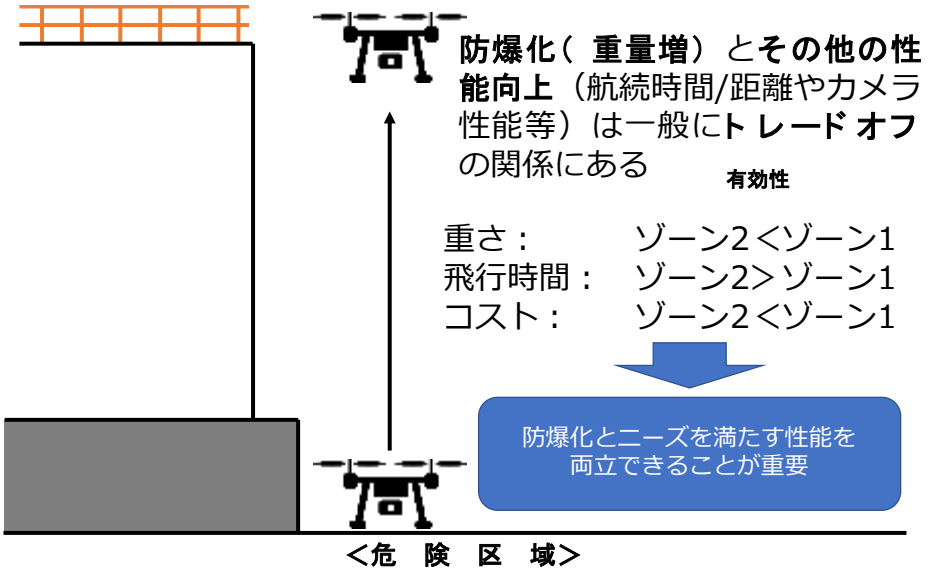

図 4-1 ドローンの防爆化とその他の性能向上のトレードオフ

4.2 落下した場合の防爆機能への影響

防爆指針において電気機器の落下のリスクに関する評価は、1 m 以上の高さから、水平なコンクリート製の床の上に 4 回落下させる試験によって行われる。ただし、試験の対象は、携行型電気機器又は人体装着式の電気機器となっており、ドローンのように数 m~150m のように高い高度からの落下リスクを想定したものではない（具体的には ANNEX a を参照されたい）。したがって、現状の試験では落下時の衝撃等によっても防爆機能が維持されるかどうかを評価できない。具体的にどのような試験を実施すべきかが検討課題である。

ゾーン 2 用ドローンが落下する場合（図 4-2）と、ゾーン 1 用ドローンが落下する場合（図 4-3）に分けて記述する。まず、ゾーン 2 用ドローンが落下した際に防爆機能が維持される場合、落下した場所がゾーン 2 ならばそこに留まることは規程に反しないが、落下した場所がゾーン 1 ならばそこに留まることは規程に反する。防爆機能が失われる場合、落下した場所がゾーン 2 であってもゾーン 1 であっても非防爆ドローンが危険区域に留まる状況となり、着火リスクが高まることが懸念される。次に、ゾーン 1 用ドローンが落下した際に防爆機能が維持される場合、落下した場所がゾーン 2 であってもゾーン 1 であってもそこに留まることは規程に反しない。防爆機能が失われる場合、落下した場所がゾーン 2 であってもゾーン 1 であっても非防爆ドローンが危険区域に留まる状況となり、着火リスクが高まることが懸念される。以上を表にまとめると表 4-1 のようになる。

なお、落下速度を減速させる措置としてパラシュートの利用が考えられるが、落下位置をコントロールできないためプラント等の危険区域での利用には不向きと考えられ、今後の課題とする。

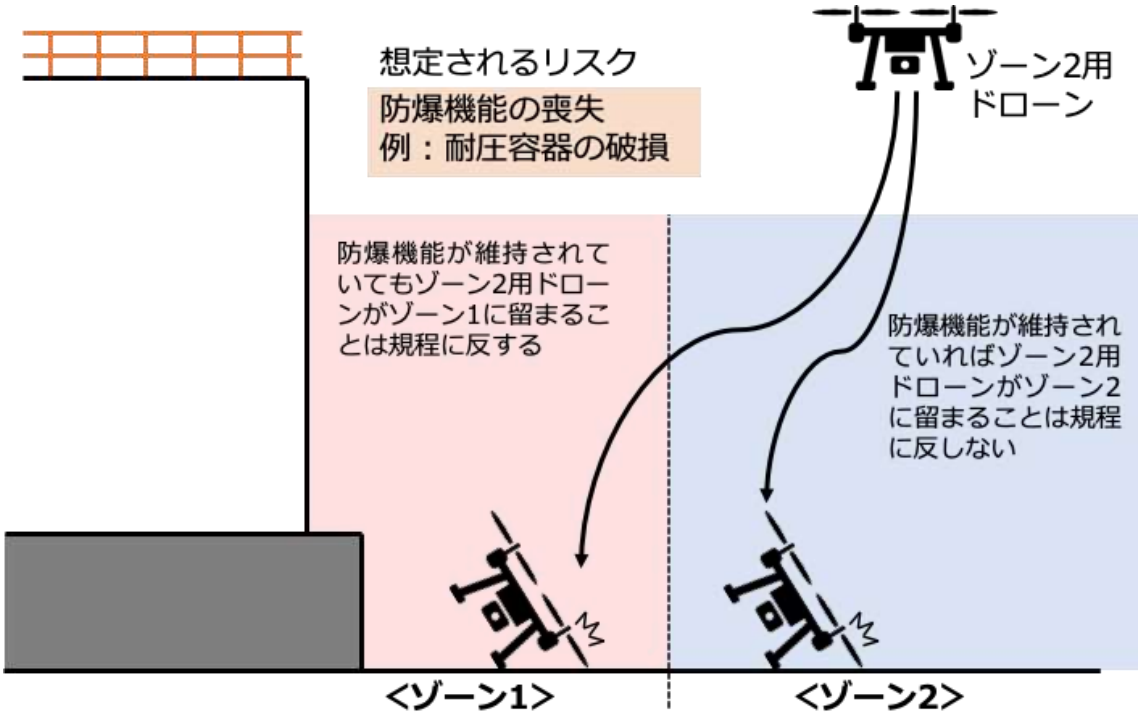

図 4-2 落下した場合の防爆機能への影響（ゾーン 2 用ドローン）

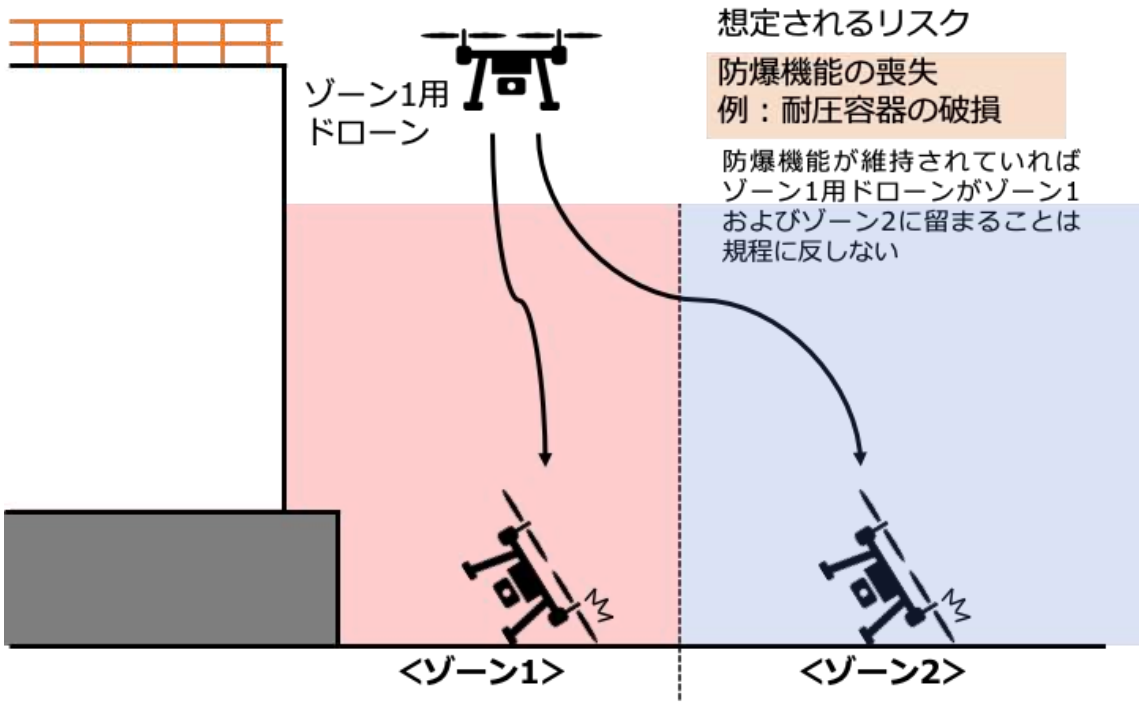

図 4-3 落下した場合の防爆機能への影響（ゾーン 1 用ドローン）

表 4-1 落下した場合の防爆機能への影響と規程との関係

〇規程の範囲内 ×規程の逸脱

	ゾーン 2 に落下	ゾーン 1 に落下
ゾーン 2 用 ドローン	防爆機能維持 〇 防爆機能喪失 ×	防爆機能維持 × 防爆機能喪失 ×
ゾーン 1 用 ドローン	防爆機能維持 〇 防爆機能喪失 ×	防爆機能維持 〇 防爆機能喪失 ×

4.3 衝突・落下した場合の衝撃火花

ドローンが強風のあおりや操作ミス等によって危険区域内の設備装置等に衝突した場合、あるいは落下した結果、危険区域内の設備装置等や地面に衝突した場合に衝撃火花が発生する可能性がある。ここでは金属と金属が接触する際に発生する火花を衝撃火花という。金属の材質、接触する際の金属と金属の角度、可燃性ガスの濃度、湿度等の状況に依存して、着火リスクが変化する [1)]。

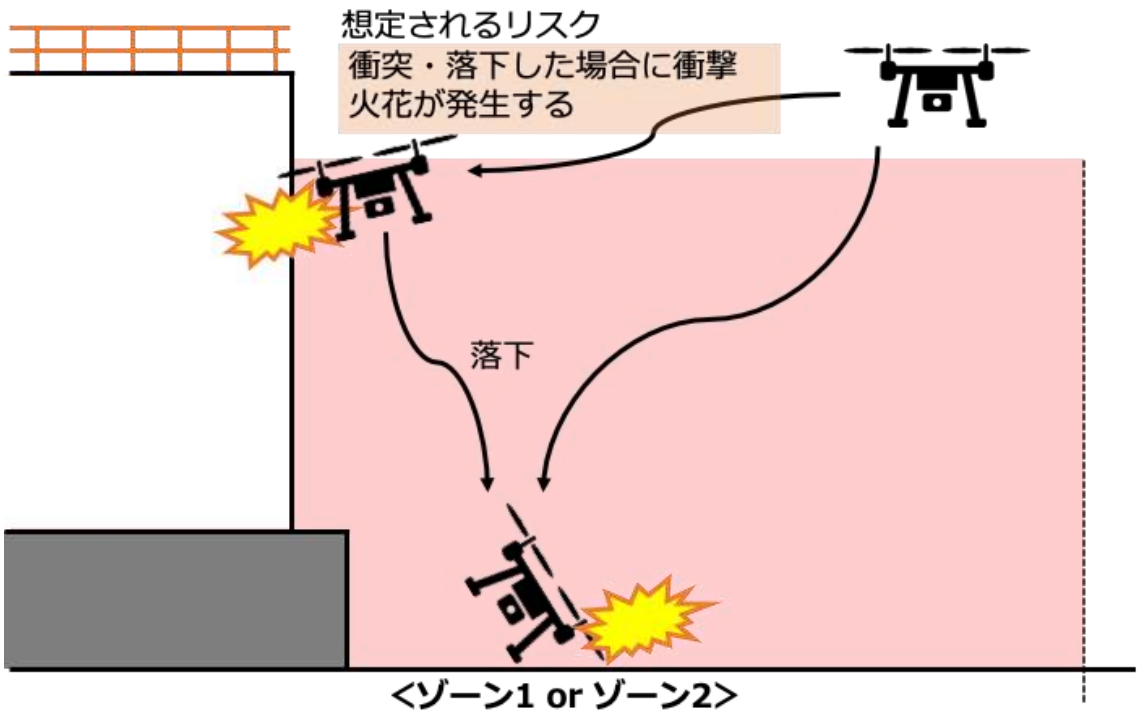

図 4-4 衝突・落下した場合の衝撃火花

ここでは軽量であることからドローンでの使用ニーズがあるアルミニウムに注目する。材料としてアルミニウムを使用した場合、外部からの衝撃による火花によって周辺ガスに着火する危険性が指摘されている（一部のガス）。アルミ合金と炭素鋼との間に生じる衝撃摩擦火花は可燃性ガス

に対して着火爆発する危険性が高く、メタンガスが湧出する石炭鉱山をはじめ可燃性ガスの雰囲気中で作業する工場を有する各種産業においては十分に注意しなければならない [2]。工場電気設備防爆指針（国際整合技術指針）第 1 編 総則（JNIOSH-TR-46-1:2015）8.3[3]においてグループ II の電気機器について記載されている。グループ II では、EPL Ga（ゾーン 0 に相当）ではアルミニウムに関して使用制限が課されている（含有率は 10%以下でなければならない）。一方、EPL Gb（ゾーン 1 に相当）および EPL Gc（ゾーン 2 に相当）双方においてアルミニウムに関する要求事項はなく、質量分率 100 %のアルミニウムを使用することも認められる。高所から落下する可能性のあるドローンについてこの規程で十分着火リスクが低減されるかどうか検討を要する。

参考文献

1) 高岡三郎, 衝撃火花の着火危険性, 安全工学, 4-4, pp.255-261,（1965）
2) 内田ら, アルミ合金の摩擦火花によるメタンガス着火性 -表面処理による着火抑制効果-, 資源・素材学会誌, 108-9, pp.650-652,（1992）
3) 労働安全衛生総合研究所, 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（国際整合技指針 2015） JNIOSH-TR-46:2015,（2015）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html,（アクセス日 1 月 21 日）

5　ガイドラインの方針

ドローンは無人航空機であり、構造上人が乗ることができない機器であって、遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができるものである。一方、防爆構造の電気機器は、落下試験など様々な検定試験を受けて防爆性能を損なうことが許されず、強固な構造にせざるを得ない。ドローンは、モーター、バッテリー、制御部、カメラなどの電気部品から構成され、各部品に防爆構造付加した場合、一般のドローンよりも重量が大幅に重くなる可能性がある。飛行させることと防爆構造化（重量が重くなること）とはトレードオフ関係にあって、例えば、工場電気設備防爆指針（国際整合技術指針）に規定されている現存の試験に合格する電気部品を用いた飛行可能な防爆ドローンの製作も課題である。 現存する防爆指針を遵守して製作することが要件であり、第 6 章に「現存する防爆指針の範囲で防爆ドローンの安全性の確認に必要な要件」として、主要部品について防爆構造ごとに主な試験等を示した。ユースケース調査において、プラント内はゾーン2の箇所がゾーン 1 よりも広いこと、ゾーン2での利用ニーズの方が多かった。さらには、ゾーン2における使用を目的とした防爆ドローンの方が、ゾーン 1 におけるそれより重量を軽くできることから、まずはゾーン2での活用を目的とした防爆ドローン（以下、「ゾーン2用防爆ドローン」とする。）、ゾーン 1 でも活用できる防爆ドローン（以下、「ゾーン 1 用防爆ドローン」とする。）の順番で分けて整理する。

さらに、現存する防爆指針等では高所からの落下のリスクは考慮されておらず、新たなリスク評価の基準等の整備が必要である。第 7 章にて「落下を考慮した上で防爆ドローンの安全性の確認に必要な要件の考察」を示した。また、高所からの落下の際に生じる可能性が考えられる衝撃火花については、第 4 章にて「4.3 衝突・落下した場合の衝撃火花」で提示した。さらに、現在の国内防爆検定関連規則や指針では、高所を飛行する防爆機器を対象とした基準が必ずしも提示されていないため、既存の防爆構造に該当しない場合であっても安全性を担保して判断できる手法の一つである「特殊防爆構造」の適用の可能性について、第 8 章で整理する。

現存する防爆指針の範囲で防爆型式検定に必要な具体的な試験方法、ゾーン 2 用の防爆ドローンが何らかの要因でゾーン 1 に侵入する、いわゆる危険区域への想定外の一時的侵入については ANNEX B に整理した。

6　現存する防爆指針の範囲で防爆ドローンの安全性の確認に必要な要件

ここでは、現存の防爆指針で示された防爆の電気機械器具に対する範囲から、防爆ドローンの防爆上の安全性に関する確認に必要な要件を記載する。

6.1 危険区域と防爆適応規格

防爆電気機械器具として必要な適応範囲などを表に示す。

表 6-1 危険区域と防爆適応規格表（電気機器）

電機機器	ゾーン 2	ゾーン 1	ゾーン 0	備考
モーター	dc, ec, n, pyb, pzc, ic	db, eb, pxb, ib	該当なしと判断*	
バッテリー	dc, ec, n, pyb, pzc, mc	db, eb, pxb, mb	該当なしと判断*	動作時容量（電流値）から本質安全防爆構造(i)に該当する製品が存在しないと判断
アンテナ	dc, ec, n, pyb, pzc, ic	db, eb, pxb, ib	-	
GPS	dc, ec, n, pyb, pzc, ic	db, eb, pxb, ib	-	
カメラ	dc, ec, n, pyb, pzc, ic	db, eb, pxb, ib	ia	
制御機器	dc, ec, n, pyb, pzc, ic	db, eb, pxb, mb, ib	ia, ma	バリア回路部分
ランプ	dc, ec, n, pyb, pzc, ic	db, eb, pxb, ib	ia	モーター部の方向確認用など。LED

- 各危険区域に対応する防爆型式検定に必要な防爆構造を記号で記載
- 記号は次の通りである（詳細は「3.5.2」参照。ここではガス蒸気を対象）。

d：耐圧防爆構造（保護レベル db=EPL Gb、dc=EPL Gc）

e：安全増防爆構造（保護レベル eb=EPL Gb、ec=EPL Gc）

n：非点火防爆構造（要件が多岐に渡っているため、保護レベル記号は割愛）

p：内圧防爆構造（保護レベル pxb=EPL Gb、pyb, pzc=EPL Gc）

m：樹脂充填防爆構造（保護レベル ma=EPL Ga、mb=EPL Gb、mc=EPL Gc）

i：本質安全防爆構造（保護レベル ia=EPL Ga、ib=EPL Gb、ic=EPL Gc）

- ＊ 今回想定される屋外用ドローンに使用可能な機器として判断
- 各部品において防爆適応規格のいずれかを選択し対応する想定
- 油入防爆構造はドローンでの利用を考えない
- s 特殊防爆構造については、カテゴリー、使用条件など限定された内容が指示されることからこの表には記載しない

表 6-2 危険区域と防爆適応規格表（非電気機器）

非電機機器	ゾーン 2	ゾーン 1	ゾーン 0	備考
プロペラ	対応可能	対応可能	対応可能	条件：静電気対策可能な材質
フレーム	対応可能	対応可能	対応可能	条件：静電気対策可能な材質

6.2 ゾーン 2 用防爆ドローン

検討するドローンのタイプとしては、ユースケース調査結果に基づき、屋外の飛行を想定し、カメラ等のセンサを搭載したドローンであって、遠隔または自律で飛行できる程度の大きさを想定したものである。このような条件から、防爆構造としては、耐圧防爆・内圧防爆・安全増防爆・樹脂充填防爆の各構造が候補として挙げられる。このうち、内圧防爆構造は、機器内部の圧力低下時に電源を遮断する機能が必要であり、防爆ドローンの場合、その機能が作動すると停止となり墜落につながるため、検討候補から外すこととした。検討の方針としては、できるだけ軽量となる防爆構造を指向するため、まず安全増防爆構造の適用を検討し、これが適用できない機器については、耐圧防爆構造を検討する流れとしている。樹脂充填防爆構造は、防爆機器をコンパクトかつ軽量にできる可能性が高いが、残念ながら現在国内では、樹脂充填防爆構造の機器を製造可能な事業者が非常に少ないため、今回は、単に適用可能かどうかの検討にとどめ、適用条件の詳細までは触れないこととした。以下に、ドローンを構成する機器ごとに、ゾーン 2 に適用可能な防爆構造を詳述する。機器としては、モーター、バッテリー（およびコネクタ）、カメラ、およびその他（コントローラやアンテナ等）とする。

ところで、ガス配管のパイプ内やガス等のタンク内部の検査など、一部の限られた目的に特化した機器として使用するための超小型のドローンのニーズもある。これらの多くは、ゾーン 1 または 0 のエリアであり、防爆機器としてそのようなドローンを開発する場合、非常に制限が多い状況である。これらの条件を満たす電気機器や部品等、要素開発の課題も多いため、今回のガイドラインではそのような機器についての記載は省略するが、現在の IoT 等の技術開発スピードを鑑みると、近い将来、実現の可能性も高いことも考えられる。

6.2.1 モーター

ドローンのモーターは、小型で高出力・高トルク、かつ非常に頻繁な加減速を繰り返す使い方をするため、ほとんどが永久磁石式の同期電動機（いわゆるサーボモータ）を使用している。一般施設内のポンプなどには、安全増防爆構造のモーターが使用されているが、非常に厳密な運転条件（始動・運転シーケンスなど）を定めた上で温度検知などの検査を行い、防爆型式検定認証されている。それと比較して、ドローンのモーター使用条件はこのようなモーターとは異なっている仕様である。これから、単純にこのような安全増防爆構造のモーターを防爆ドローンのモーターに転用することは困難と考えられる。また、樹脂充填防爆構造では、モーターの回転部と固定部の間などに、十分なコンパウンド厚さが確保できない等の理由で適用できないと考えられる。耐圧防爆構造は適用可能である。

6.2.2 バッテリー

検討の前提として、バッテリーは通常のドローンで利用されているリチウムイオン二次電池を検討対象としており、飛行における姿勢変化なども考慮してシールド形に限定した。検討対象となっている防爆構造において、バッテリーを使用する際の条件として直列のみと規定されている。シールド形のリチウムイオン二次電池の市販状況を鑑み、バッテリーの容量は数 Ah～25Ah 以下と考えた。必要な電圧は、バッテリーを直列接続するものとし、1つの防爆ドローン内には、バッテリーは 1 つのみで、モーターを駆動させる他の電源はないと仮定した。

安全増防爆構造が適用可能な条件は次の通りである。防爆容器内のバッテリーは、過放電を防止するデバイスを装備するとともに、4 個以上電池を直列に接続する場合は、逆充電を防止する対策を講じる必要がある。通常は、適切なヒューズと、バッテリーマネジメントシステムとで対策する。ゾーン 2 へ適用可能な EPL レベル Gc を有する安全増防爆構造“ec”においては、半導体や電解コンデンサを含む基板の使用が認められるため、これらの対策を実現することは可能と考える。ただし、リレーなどアーク及びスパークを引き起こす可能性のある機器は含めてはならず、基板と外部との接続部には、電圧に応じた絶縁空間距離と沿面距離の確保が必要である。

樹脂充填防爆構造“mc”や耐圧防爆構造“dc”によるバッテリーの適用も可能であるが、安全増防爆構造に比べて一般的に製造管理の手間がかかり、質量が大きくなるなど、採用するメリットが少ないと考えられる。

リチウムイオン2次電池は充電して繰り返して使用するため、このバッテリーが防爆ドローン本体から容易に切り離し・接続できる機構を有することは、ユーザビリティにとって重要である。非危険区域では通常のコネクタを使用できるが、危険区域では規格に準拠した部品を使用しなければならない。これから、ニーズ調査の結果に基づき、できるだけ制限が少ない方法として、バッテリーの取り付け・取り外し、充電などは非危険場所のみで行う運用とし、危険場所ではこれらの作業を行わない想定とした。

国内では、プラントで多く使用されている防爆コンセントが市販されている。これは、活線状態での分離・接続を意図して設計されており、分離前にメカニカル的に電路が遮断されるインターロック機能を有し、耐圧防爆や安全増防爆構造で適切に保護し、1 種場所・水素ガス対応のものは大型の構造である。これに対し、2 種場所限定とした場合、危険区域内では分離・接続をしない限定条件を付加することによって、安全増防爆構造の簡易な分離・接続器具が可能と考えられる。ただし、端子台ボックスとして考えた場合、安全増防爆構造の機器は実績もあるが、大型になりやすく、さらに分離・接続に工具を必要とするため、ユーザビリティが低いと考えられる。

6.2.3　カメラ

カメラは、基板とレンズで構成される。前述のように、アーク及びスパークを引き起こす機器を含まない基板は、安全増防爆構造が適用可能である。安全増防爆構造の容器にカメラを入れる場合、光路をいかに確保するかが設計問題となることが予想される。安全増防爆構造の容器として、裸充電部を内蔵する容器の保護等級は、IP54 以上である必要があり、容器にガラスを装備することが一般的であるが、ガラス部には別途衝撃試験が要求されるため、肉厚の強化ガラスにするなど注意が必要である。赤外線カメラの場合、通常のガラスは必要な赤外波長を透過しないので、Ge ガラスなどの特殊ガラスが必要であるが、Ge ガラスは構造的な強度が弱く、衝撃試験をクリアできないことが多いので、ガードをつけるなど、設計的な工夫が必要となる。

カメラは耐圧防爆構造も適用可能である。樹脂充填防爆構造の場合、光路を維持しつつ、適切に樹脂を充填する作業が難しいと言われており、利用する際にはこのようなことも考慮する必要がある。

6.2.4　その他

防爆ドローンを構成するほかの機器等として、コントローラやこれらの付属機器としての GPS や Bluetooth などの無線のアンテナもある。コントローラの基板には、リレーやスイッチなど、アーク及びスパークなどが生じる可能性のある部品が取り付けられている事が考えられ、安全増防爆構造の適用は難しい。また、プログラムの書き込みや、機器のメンテナンス等を考えると、樹脂充填防爆構造は使い勝手が悪い可能性がある。これから、容易な対応として耐圧防爆構造も考えられるが、大きさ、重量の面の課題もあるため、これらを総合的に判断する必要がある。電波を送受信するアンテナは、金属や導通性樹脂の内部に設置すると機能しないため、耐圧防爆容器の外またはガラスなど電波透過材料内に配置せざるを得ない。現在、主流になっている基板パターンで構成されているアンテナであれば、安全増防爆構造や樹脂充填防爆構造が適用可能であり、さらに耐圧防爆容器の外に配置することも可能である。

6.3 ゾーン 1 用防爆ドローン

ゾーン 2 対応の内容について検討してきたが、ゾーン 1 対応の場合、安全増防爆構造を利用する際は機器の制限が増え、パターンアンテナを除く基板類はすべて安全増防爆構造を適用させることが困難になる。それと比較して、耐圧防爆構造は、ゾーン 2 対応とゾーン 1 対応とでは、容器の大きさや重さに大きな違いはない。ただし、対象となるガス種別によって仕様条件が大きく異なるため、特に制限が多く、基準値の要求が高い水素ガスに対応する機器とする場合は、構造などで許容範囲や値が狭いことから、他のガス種と比較して製造上の対応が厳しい箇所が多い。

6.3.1 モーター

ゾーン 2 対応と同様、耐圧防爆構造が適用可能である。

6.3.2 バッテリー

ゾーン 2 対応と異なり、安全増防爆構造は適用できず、耐圧防爆構造や樹脂充填防爆構造が適用できる。

6.3.3 カメラ

ゾーン 2 対応と異なり、安全増防爆構造は適用できず、耐圧防爆構造が適用できる。

6.3.4 その他

ゾーン 2 対応と同様、耐圧防爆構造が適用可能である。

ドローンを構成する機器ごとに、ゾーン 2 およびゾーン 1 に適用可能な防爆構造の可能性を表 6-3 示す。

表 6-3 ゾーン 2 およびゾーン 2 に適用可能な防爆構造の可能性

構成機器	検討した仕様例	ゾーン1対応			ゾーン2対応		
	対象ガス：ⅡＢ＋H2 T4	耐圧 "db"	樹脂充填 "mb"	安増 "eb"	耐圧 "dc"	樹脂充填 "mc"	安増 "ec"
電池ボックス	シールド形リチウムイオン組電池（4 直列以上） ・直列接続のみ、かつドローン内で唯一の電源 ・リレーなどアークやスパークを生じる可能性のある素子を含まない逆充電保護および過電流防止デバイスを装備	○	○	×	○	○	○
└市販コネクタ（端子箱は使い勝手が悪い）	危険場所で挿抜しない（警告表示） IP54 以上、30N 以上の引張に耐える 他	ー ※1	× ※2	(○)	ー ※1	× ※2	○
モータ	永久磁石式サーボモータ	○	×	×	○	×	×
フライトコントローラ ESC（スピードコントローラ）	リレーやスイッチなど、アークやスパークを生じる可能性のある素子を含む基板類	○	○	×	○	○	×
アンテナ（GPS・LTE・Wi-Fi）	基板タイプや同軸ケーブルタイプ ※3	○	○	○	○	○	○
カメラ	アークやスパークを生じる可能性のある素子を含まない基板・レンズと容器ガラス	○	× ※2	○	○	× ※2	○

○：適用可　×：適用不可　ー：適用可だが不向き

注記：防爆構造を共用する（例えば、電池とコントローラを1つの耐圧防爆容器にまとめる）ことは設計自由である

※1 市販品はあるが、危険場所での挿抜を想定した大型品

※2 充填しきれない箇所があると予想される

※3 防爆専用アンテナを製作すると、無線機との組み合わせで電波法への準拠が必要
電波を通す材料は通常非導電材料であるので、面積や太さに制限がある

7　落下を考慮した上で防爆ドローンの安全性の確認に必要な要件の考察

7.1 落下のリスク評価に関する考察

落下によりドローンに与えられる衝撃を評価するには、ドローンが地面等に衝突する瞬間の速度（終端速度）を規定する必要がある。終端速度はドローンが落下を始める際の高度に依存する。プラント内でドローンを活用する際には飛行計画書の作成が必須であるため、ここでは最高飛行高度は既知として整理する。

7.1.1　衝撃落下試験（高所からの落下に対するリスク評価）

2020 年 4 月に経済産業省により策定された「水素燃料電池ドローンにおける高圧ガスの安全のためのガイドライン」[1)]の内、「1.3.1 実証試験の方法」に記載された試験方法が高所からの落下に対するリスク評価方法として有効と考えられる。同ガイドラインでは一般財団法人日本自動車研究所（以下、JARI）における衝突試験設備（HYGE） を用いて、ドローンに搭載した高圧ガス容器の衝撃試験を実施した。高所からの落下試験を実施する代わりに、150m 相当の高度からの落下を想定し、ドローンは治具を用いて所定の位置に吊るしておき、そのドローンに対して十分に質量の大きい台車を衝突させる。衝突速度は落下時の最高速度に設定することで落下による衝撃を模擬した試験である。

そこで、これを参考に国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）では、水素燃料電池ドローンと同様の試験を JARI の HYGE を用いて模擬した防爆ドローンの衝撃落下を想定した試験を実施した（以下、衝撃落下試験と称する）。

はじめに、ドローンの高所からの落下速度の見積もりには、NEDO 事業の「平成29年度成果報告書 ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト／性能評価基準等の研究開発／無人航空機等を活用した物流システムの性能評価手法等に関する研究開発」[2)]が参考になる。具体的には、落下姿勢は水平(通常又は上下反転)とし、無人航空機を 150m の高度から落下させ落下速度が計測された。実験値と自由落下の仮定で求められる落下速度が比較され、理論値の方が開始から早い時間で終端速度に到達し、実験値の最大落下速度（終端速度 14.6m/s）と比較してわずかながら速度が大きい結果が得られている。すなわち、自由落下の仮定のもとで求められる落下速度の方が危険側の評価となっている。

そこで、実際の運用で考えうる落下姿勢と落下速度は、最高飛行高度と防爆ドローンの機種毎に設定する。衝突速度を「落下時の最大速度」として設定することで同試験を用いて落下によるリスク評価を実施できる。試験後、防爆機能を保持していることが防爆ドローンの要件になる。

今回の試験の結果、今回の試験条件では、防爆機器・容器に関しては、外観等の観察と測定から、変形や破損が生じたが部分的な変化であることが示された。そこで、次のことが考えられる。

- 耐圧容器に関しては、変形などがなく、隙間に変化がなければ防爆機器上の大きな損傷はないと考えられる
- 安全増に関しても、亀裂・外形に変形がなければ防爆機器上の大きな損傷はないと考えられる

今回の試験を実施した結果、限定された条件ではあるが、一定条件下での機器評価を行うことができた。この結果から、本試験方法の有効性が示されたため、同様の試験を実施することを提案する。その場合、防爆機器を評価する方法の一つとして、下記を行う方法としてのリスク評価は妥当と考える。

- 再現性のある機器の利用（均一な条件設定）
- 衝撃条件を変化させて、試験対象機器に対する実際の衝撃試験（異なる条件下における機器評価）
- 試験後にその製品の外観検査の実施（実態の確認）

7.1.2 自由落下試験（比較的低い位置からの落下に対するリスク評価）

比較的低い位置で使用する場合について、防爆ドローンを想定される最高飛行高度までクレーン等で吊るして、実際の運用で考えうる落下姿勢にて大型のコンクリート板の上に落下させる試験を実施する。試験後、防爆機能を保持していることが防爆ドローンの要件になる。

以上の評価方法は最高高度から実際に落下させる試験であり、落下に対する十分なリスク評価になりうる。

試験にあたっては手順書を作成し、さらにドローンの重量が重くなる場合は特に安全性に留意して実施することが望ましい。

7.2 インターロック

前節「落下のリスク評価に関する考察」にて整理した試験方法は、現在実施されている防爆指針における落下試験、衝撃試験と比して、非常に厳しい。よって、これに耐えうる防爆構造を有するためにはさらなる堅牢化が要求され、その結果、防爆ドローンに用いられる電気機器部品の重量は大きくなる。これは防爆ドローンの安全な飛行には不利に働く。

ところで、防爆指針ではインターロックの概念が応用されている。JNIOSH TR-39 工場電気設備防爆指針 [3)]の「1550 電気設備の防爆対策の特例（２）ガス検知器とインターロックをもつ電気設備」が相当する。具体的には、爆発性雰囲気の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。これは、使用場所において、爆発性雰囲気と着火源を同時に存在させない措置である。

基本的なインターロックの考え方としては成立するものの、使用する機器や方法、条件などから最適なシステム設計が必要となる。これから、電源遮断の時間や残留エネルギーなど、それらの条件に照らし合わせて最適な値が必要となることから、実際の設計では、このような条件を検討して開発しなければならない。爆発性雰囲気と着火源を同時に存在させない措置として、インターロックの応用を提案する。例えば、ゾーン2用の防爆ドローンについて、上述のような落下試験を実施せず、従来の指針に従った条件で型式検定を取得した防爆ドローンのプラント内飛行を考える。この防爆ドローンが仮にゾーン2用の仕様の場合、ゾーン2用の防爆機能を失ってはならない条件を満たすために、実際に飛行する高度から落下した場合、落下の瞬間にインターロックの機能を使用し、ドローンの構成電気機器（カメラも含む）への電源の供給を遮断することで着火源のリスクとならない機能である。ただし、バッテリー部分だけは着火源のリスクが生じるため、このバッテリー部分（構成容器を含む）のみ、上述の落下試験を実施して防爆機能が失われないことが明らかになれば、原理的には着火のリスクは回避可能である。

プラントの上空は非危険区域も広く存在すると考えられる。その範囲内での活用を設計できる場合、万が一の落下に備えてバッテリー部分について新しい基準のもと落下試験を行うことによって検定取得することも可能と考えられる。

7.3 材料に関する考察

防爆ドローン製作にあたり、できるだけ軽量化が望ましいことは事実である。反面、防爆構造として、構造の種類によっては、筐体（容器）が一定以上の強度を持たなければならない必要がある。これらの要件や製造コストからアルミニウム（合金を含む）を主とした材料が選択される可能が高い。このアルミニウムは、以前より金属同士の摩擦や衝撃による火花が、一部の可燃性ガスに着火するエネルギーを持つことが知られている。そこで、この衝撃による火花エネルギーについて、各種文献を調査した。

この問題は、主に衝撃の程度が大きいとされる石炭鉱山坑内や船の揺れ（海洋運行）など船舶関係の防爆環境で特に注目されていたことから、これらの研究機関の文献を中心に調査を行った。

その結果、金属間の接触には落下および高速のように衝撃的なものと、摩擦のような発熱的なものがあるが、衝撃的な場合は軟鋼、工具鋼、ジュラルミン、ステンレス、アルミ系合金については、水素を爆発させるエネルギーがあることが示されていた。また、Zn 系合金でも衝撃エネルギーが増大すると、水素の場合、爆発の危険があることが示されていた。金属摩擦による着火は、発生火花による場合と摩擦熱による場合とあるが、通常は区別し難く、この両方を含めている。ガスの発火点として、水素 560℃、プロパン 466℃となっているが、ガスの発火点は計測方法によっ

て変動があること、爆発現象は多分に確率的であり、対象ガスと金属材料が使用目的上、定まったときは現状では実験によって確認する必要がある。

調査した試験は、そのほとんどが直接金属同士の衝突（衝撃）、摩擦によって発生した火花による着火試験であった。これから、表面に塗装などの金属衝撃火花が発生しにくい対応をすることによって、これらの問題を回避することは可能である。グループⅠの防爆機器は、アルミニウム製の筐体を使用できない規定であるが、可搬型機器など革ケースを装着することによって、衝撃火花を防止した規定にもなっている。このような事例を参考にするならば、アルニニウム製容器も同様にある一定以上の塗装面（厚さ）とし、決められた試験条件をクリアし、安全性を担保することによって、材料に関する問題を解決することは可能と考える。

参考文献

1) 経済産業省，水素燃料電池ドローンにおける高圧ガスの安全のためのガイドライン，(2020), https://www.meti.go.jp/press/2020/04/20200410002/20200410002-2.pdf,（アクセス日 2021 年 1 月 22 日）
2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成 29 年度成果報告書 ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト／性能評価基準等の研究開発／無人航空機等を活用した物流システムの性能評価手法等に関する研究開発，（2018）
3) 産業安全研究所，産業安全研究所技術指針 工場電気設備防爆指針（ガス蒸気防爆 2006），NIIS-TR-NO.39:2006,（2006），https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/doc/tr/TR_No39.pdf,（アクセス日 2021 年 1 月 21 日）

8　今年度の事業の評価及び将来の課題

8.1 今年度の事業の評価

現行の防爆指針では、携行型電気機器については人が携行時に誤って落とす可能性を考慮し、1 m 以上の高さから落下させる試験を実施している（運用上は人体の高さを想定して 1 m 程度の高さから落下させている）。今回の事業で検討しているドローンは、一定時間、一定程度の高度を飛行することが前提であり、万が一のトラブルの場合には一定の高度から落下する可能性が考えられる。現行の防爆指針では、このような一定高度を飛行する防爆機器は考慮されておらず、試験方法も定義されていない状況である。このような背景から、防爆構造の電気機器の落下耐性を試験する手順の確立が将来の課題である。また、落下耐性を補完する技術としてインターロックが考えられる。ただし、これも既存の防爆手法・技術的要求事項として定められたものではない。防爆機器の安全性を担保する手法の一つとしてのインターロックの有効性を検定するための各種規格や指針などの環境整備も今後の課題となる。

ドローンの基幹部品のひとつにモーターがある。現行の防爆指針は大型モーターを想定した検定が念頭に置かれており、ドローンに搭載するような小型モーターは基本的に考慮されていない。このため、現状の規格や指針などでは課題が多い状況である。

以上のように、今年度の事業で検討した結果、現行の防爆指針では、ドローンの防爆性能の評価に関して検定を実施することが困難であることが分かった。また、ドローンという新しい技術に対して現行の防爆指針が必ずしも内容を網羅していないことも示唆された。これを踏まえて、今後の更なる検討課題として、特殊防爆構造に関する検討（8.2 節）及びモーターに関する防爆機能の確認に関する検討（8.3 節）を示す。

8.2 特殊防爆への対応

防爆ドローンというカテゴリーとして検討した場合、既存の IEC60079 シリーズの中に総合的な規格や試験が規定されていない状況である。モーターやバッテリーなどの各使用機器に関しては、それぞれの規格の中での仕様や試験が定められており、それらを満足する構造にしなければならない。このように、従来の規格の体系として対応が必ずしも十分ではない機器を危険区域で使用するために、特殊防爆構造（s）が規定されている（IEC 60079-33[1)]。国内では「工場電気設備防爆指針（国際整合技術指針 2015）第 10 編特殊防爆構造“s”」[2)]）。

このガイドラインでは、基本的には世界標準である IEC 規格に準拠した機器を対象に検討している。これは、現在、国内外問わず防爆機器を製造するメーカー、ユーザー、検定機関などの多くが各国独自の規格ではなく、IEC 規格を受け入れているためである。このような背景から、この特殊防爆についても IEC60079-33（若しくはこれに準拠した「国際整合技術指針」）に沿って検討した内容で記載する。

この IEC60079-33 では、既存の規格に採用されている防爆手法や技術的な要求事項以外にも有効なものが存在することを前提とし、それを用いて安全性の確保を図ろうとすること、具体的には、有効な手法の範囲を限定せずに、革新的なもの又は未知のものであっても、有効であれば受け入れることとしている。このため、既存の規格のような形で技術的な要求事項を示すことはせず、代わりに、機器の安全性を確保するために提示された方法が有効であるか否かを見極める能力をもつ者 （個人または組織など）を「独立検証者」に任命し、その者によって有効性の検証を行い、機器の安全性を確保するとされている。このことから、「国際整合技術指針」においては、独立検証者の役割が極めて重要であり、国内において検定の技術的基準として用いる場合、検定制度の運用に関して独立検証者の役割、権限等を明確にすることが求められるとしている。IEC60079-33 は、既存の防爆構造規格が適用できないときに、IECEx システムの製品認証スキームでの認証に用いる要求事項の一式を規定するものであり、特定形式による適合性評価規定を緩和する規格の作成に関する ISO/IEC の規則に従って、一人または複数の独立検証者を使うとしている。特殊防爆構造の目的は、その機器の機能上又は動作上の制約によって、既存の防爆構造（または組合せ）では十分な評価ができないが、特殊防爆構造によって所望の EPL（IEC60079-26（EPL 関係規定））[3)]が得られる場合に、機器又は機器の部品若しくは部分の設計、評価、試験を許容することにある。既存の防爆構造に適合させようとした機器が、当該機器の要求事項の全てには適合しないとき、次の条件を同時に満たす場合に限り、この規格の下で検討することができるとされている。

1）既存の防爆構造に完全に適合することが事実上、不可能なことを明確に示すことができる。

2）同等の EPL を確立するために、追加の対策を適用している。

特殊防爆構造は、故障（機能失敗）モードの特定、および特定した故障（機能失敗）モードにおける点火危険源の評価に基づいている。この点に関して、機器に設定した EPL の評価の結果、得られた安全性は EPL の要求事項を満たすとともに、該当する場合、少なくとも既存の防爆構造に対して定められたレベルに対応した EPL と同等となる。

他の既存の防爆構造とは異なり、特殊防爆構造は、試験にかける機器の故障 （機能失敗） モードを特定するために、故障モード・影響解析（FMEA）、故障の木解析（FTA）、故障モード・影響および致命度解析 （FMECA）などの信頼性工学の手法や手順の適用を必要とすることがある。また、特定した故障（機能失敗）モードの故障確率が、既存の防爆構造で予想される故障（機能失敗）と同程度の確率であることを証明することが必要となることがある。完全なライフサイクルのための条件を考慮することが必要であり、機器の運転寿命が尽きるまで EPL を確実に維持するために、何らかの制約を機器使用における必須事項に含めることもできる。

特殊防爆構造による評価や試験は、既存の防爆構造のように規定することができない。これから、製造者と独立検証者との間で、かなりの協議が必要になることが予想される。該当する EPL を確実に達成するために、独立検証者によって追加の評価や試験を指摘されることもある。

IEC60079-33 に基づいて検証を行うに当たっては、次のことを含め、この規格で規定する手引き（ガイダンス）に従うことが求められる。

1） EPL に整合させるために、いくつかの異なる検証水準を適用すること（IEC61508 シリーズに示す手法に類似の概念）。
2） 1 人以上の独立の人物または組織（独立検証者）が常に関与すること。
3） 製造者と共に、必須の安全要求事項を設定するための判断基準の調査又は決定に関与したことがある者を使用しないこと。

「国際整合技術指針」に定める特殊防爆構造の適用範囲は次の通りである。

1） 既存の IEC60079 シリーズの規格が適用できない防爆手法を使用する電気機器
2） 設計及び構成が、既存の防爆構造規格に完全には適合しない電気機器であって、一つ以上の既存の防爆構造を使用するもの
3） その用途が防爆構造規格のパラメータの範囲外の電気機器

これから、防爆ドローンについて考察した。

1） モーター、バッテリー、関連制御回路、関連各センサ、アンテナ類、筐体などは、既存のいずれかの防爆規格を満たす構造での製造は可能である。
2） 防爆構造とする機器および使用場所は明確であり、EPL の設定も可能である。
3） ただし、現在の防爆規格は定置型や携帯型などの機器を想定しており、一定以上の高度を飛行する防爆構造の移動体は想定されていない。
4） このような移動体に対する具体的な追加規定（必要な事項の有無の検討も含めて）や試験方法などは明確にされていない。

このように、ドローンで使用する各電気機器類は、既存の防爆構造規格を満足する内容で製作することは可能と考えられる。ただし、これらの機器を組み合わせたものとしてのドローンを総合的に防爆機器として評価（検査・認証等を含む）する場合、既存の規格や要求される構造の試験に対しては、明確な判断ができない内容も含まれていると考える。

その一つが落下試験である。現在の IEC 規格や防爆指針等では、携行形電気機器又は人体装着式の電気機器については、1 m 以上の高さから水平なコンクリート製の床の上に 4 回落下させる試験が記載されている。この根拠としては、これらの機器（携帯形電灯やガス検知器、無線機など）は人が装着・持ち運ぶ前提であり、万が一、持ち運んでいる際に何らかの理由で落下して

機器等の破損につながるリスクが考えられるからである。今回のドローンは、人体には装着しないため、この規定外と考えられるものの、一方で飛行する機器であり、基本的には一定以上の高度で使用する機器であることから、落下試験を行うという考え方もある。

もう一つが、使用する金属材料についてである。金属と金属が衝突すると、その衝撃の程度によって発生する火花（衝撃火花）が、使用する環境の可燃性ガスに着火するリスクが考えられる。これから、防爆エリアにおいては、使用する金属材料に対する制限が定められている（詳細はIEC 規格、防爆指針等）。現在の IEC 規格や防爆指針等では、石油プラント等グループⅡで使用する防爆機器筐体の金属材料としては、一部の例外規定を除いてアルミニウム（100%。合金を含む）の使用が認められている。それとは異なり、石炭鉱山（炭鉱）等のグループⅠでは、原則アルミニウムの使用は認められていない。これは、炭鉱においては、落石や金属機器（材料）同士の接触や衝突の確率はプラント等よりも高く、特に作業員が装着するガス検知器などは採掘機械器具との接触が多いことが考えられる。そのため、携帯形機器の場合、IEC 規格では例えば革ケースによる保護を施すことによって、筐体がアルミニウムでも使用可能となっている。つまり、金属同士の直接衝突を回避する何らかの方法（革ケースや一定厚さ以上の塗装、樹脂被覆など）によって、安全性が認められている。

これから、ドローンに関しても、モーターや電池容器などの筐体にアルミニウムが使用されることが考えられる。現在の規格等では特に制限はないものの、落下試験同様、使用する条件が規格作成時の条件とは異なっている。そのため、万が一高所からの落下、または高所での衝突によって生じる金属同士の衝撃火花は考慮されていない。これから、安全性の検討は必要である。

次に、既存の防爆構造規格を満足し、実際の運用時のトラブル発生でも防爆構造または安全性能を維持するための方策を検討した。その中の一つとして、インターロック機能を利用した機器の有効性が考えられる。つまり、モーター、バッテリーなど各電気機器は既存の防爆構造規格を満足する機器とし、万が一、墜落などによって各電気機器が仮に破損して防爆構造が満足できない状況に陥ったとしても、バッテリーから各電気機器への電源は完全に遮断、分離される機能（インターロック）を有することによって、安全性が担保されることを想定している。この場合、例えば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）を使用することによって、対応は可能と考えられる。ただし、現在、具体的で適切なインターロック機能を有する回路はないため、実際の回路の開発も必要である。

衝撃吸収構造も防爆機能を維持させるために重要と考えられ、今後開発が必要である。

このように、特殊防爆構造の適応範囲としては、

1） 既存の IEC60079 シリーズの規格が適用できない防爆手法を使用する電気機器

2） 設計及び構成が、既存の防爆構造規格に完全には適合しない電気機器であって、一つ以上の既存の防爆構造を使用するもの

3） その用途が防爆構造規格のパラメータの範囲外の電気機器

4） 既存の IEC60079 シリーズ（IEC60079-33 を除く）の規格が適用できる機器であるが、既存の防爆構造への適合の可能性がないことが明確に立証され、かつ、同等の EPL を達成するための追加の方法が適用されているもの

国際規格としての IEC 規格に基づく特殊防爆構造による認証は、IECEx 各認証機関の運用によっており、現状では、その認証機関の数は少なく、認証数も同様に少ない状況である。

8.3 ドローン用モーターに関する IEC 防爆規格の検討

現在、プラント等で使用されている電気機器、特に防爆モーターの規格は、ポンプやコンプレッサー、駆動装置などの動力源としての要求が多いため、事実上大型モーターを前提した規格となっている。近年では、塗装や自動製造工程におけるロボットアームなどでの利用も増え、以前の防爆モーターと比較して小型にはなったものの、基本的に駆動電力は商用電力である。さらに、回転数は必ずしも高速ではなく、レスポンスも一部のロボットを除いて要求されるスペックも高いものではない事例が多い。それと比較して、ドローンのモーターは小型であり、基本的には電池駆動（リチウムイオン電池）、高速回転、高レスポンスなど、基本的な仕様が大きく異なっている。これから、ドローンを防爆化する場合のモーターについては、このような仕様を満足しながら防爆機能を有する必要がある。従来の IEC 規格ではこのようなモーターへの対応が考慮されていなかったため、IEC 規格に対して新たな種別などの対応が必要と考えられる。ここではモーターを一例としたが、そのほかの電気部品等（カメラ用ジンバルなど）についても、新たに検討する必要性が考えられる。現在、IEC 防爆規格の技術委員会としては TC31 が存在するが、現時点でこの委員会に防爆ドローンに関する課題などの質問や審議はまだ未提出の状況である。このように、ドローンに特化した防爆の IEC 規格は世界的にも存在しないため、先鞭をつけることによってこの分野をリードできる可能性がある。

参考文献

1) IEC, IEC 60079-33:2012 Explosive atmospheres - Part 33: Equipment protection by special protection 's',（2012）

2) 労働安全衛生総合研究所, 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（国際整合技指針 2015） JNIOSH-TR-46:2015,（2015）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html,（アクセス日 1 月 21 日）

3) IEC, IEC 60079-26:2014 Explosive atmospheres - Part 26: Equipment with Equipment Protection Level (EPL) Ga,（2014）

ANNEX A: 構造仕様と防爆型式検定における試験

A.1 構造仕様

ドローンについては、プロペラやフレーム等、主に非電気機械器具等の防爆性能については、ゾーン2とゾーン1のどちらにも共通した内容であることから、それらに関係する構造仕様と試験方法の主な内容は下記の通りである。なお、詳細は各構造規格や防爆指針を参照して頂きたい。

A.1.1 帯電試験

プラスチックなどの樹脂については、静電気帯電にともなう可燃性のガス、蒸気への放電着火の危険性が考えられる。特に、一般的なドローンの場合、軽量化を進めるため、本体フレームや脚、機器カバー、プロペラ(フィン)、そのほか樹脂部品などが多く使用される例が多い。そこで、これらの静電気放電による爆発・火災を防止する上で必要な、機器類部品の静電気帯電防止性能・導電性能試験等を行う必要がある。

A.1.2 衝撃火花

現状の国際整合技術指針では、金属製容器及び容器の金属製部分の材料の組成についての規定がある。グループ II の電気機器の容器の構造材料は、機器保護レベル(EPL)に応じて、質量分率で次のいずれの値も超えるものを含んではならない。

- EPL Ga の場合

総量で 10 %のアルミニウム、マグネシウム、チタン及びジルコニウム

総量で 7.5 %のマグネシウム、チタン及びジルコニウム

- EPL Gb の場合

総量で 7.5 %のマグネシウム、チタン及びジルコニウム

- EPL Gc の場合

ファンの羽根、ファンフード及び通気スクリーンが EPL Gb の要求事項を満たすことのほかには制限はない。

A.2 必要な試験項目

A.2.1 衝撃試験

防爆構造の電気機器は、高さ h から垂直落下する質量 1 kg の重すい(錘)による影響の試験を行う。高さ h は、電気機器の用途に応じて規定されている(JNIOSH-TR-46-1 工場電気設備防爆指針(国際整合技術指針第 1 編　総則)　表 13[1])。重すい(錘)には、直径 25 mm の半球状の焼入れ鋼製の衝撃頭を取り付ける。毎回の試験の前に、衝撃頭の表面が良好な状態にあることを確認する必要がある。

衝撃試験は、使用可能な状態にある電気機器の完成品に対して行う。ただし、これが不可能なときは（例えば、透光性部品の場合）、該当する部品を取り外し、これを本来の取付け用枠又はこれと同等な枠に取り付けて試験を行う。文書に、正当である根拠を示しているときは、空の容器で試験を行ってもよいことになっている（箇条 24 参照）。試験は、2 個以上のサンプルに対して行う。また、各サンプルに対して位置を変えて 2 箇所ずつ試験を行うことになっている。

衝撃を加える箇所は、最も弱いと考えられる箇所で、かつ、衝撃を受けると見込まれる外面部分とする。容器を別の容器で保護しているときには、集成体の外面の部分だけを衝撃試験にかける。

電気機器を鋼鉄製の台の上に取り付け、衝撃を加える面が平らであるときは、衝撃の向きがその面に垂直となるように、また、衝撃を受ける面が平らでないときは、衝撃の向きが衝撃点の表面における接線に垂直となるようする。この台は、質量 20 kg 以上とする、又は床に堅固に固定する若しくは（例えば，コンクリート中に固めるなど）床に埋め込む。衝撃頭がサンプルに当たった時、1 回以上跳ね返りを示すことがある。衝撃頭は、それが静止するまでサンプル表面から取り除いてはならない。

製造者の要請によって、電気機器に対し機械的損傷のリスクが「低」の試験を行うときは、この特別な使用条件があることを明示するため、電気機器に記号 X を表示する。

試験は、周囲温度（20±5）℃で行う。ただし、指定した周囲温度の範囲内の低温側において耐衝撃性が低下することが材料データから分かっている場合、低温側試験温度で行う。

電気機器の容器又は容器の一部が非金属材料で作られているときは、試験は、第 1 編　総則（26.7.2）に従って、高温側試験温度及び低温側試験温度の両方で行う。

判定基準は、電気機器の防爆構造を損なう損傷が生じてはならない（表面的だけの損傷、塗装の剥離、他電気機器の類似の部品の破損及び小さな凹みは、無視する）。

A.2.2 落下試験

落下試験は、衝撃試験に加えて、すぐに使用可能な状態になっている携行形電気機器又は人体装着式の電気機器は、1 m 以上の高さから、水平なコンクリート製の床の上に 4 回落下させる。落下試験におけるサンプルの姿勢は、最も不利と考えられる姿勢とする。

交換可能なバッテリパックを備えた機器の場合、落下試験は、バッテリパックを機器に取り付けて行う。

電気機器が金属材料製の容器をもつときは、試験は、周囲温度（20±5）℃で行う。ただし、指定した周囲温度の範囲内の低温側において、耐衝撃性が低下することが材料データからわかっている場合、第 1 編　総則（26.7.2）に従って低温側試験温度で行う。

電気機器の容器又は容器の一部が非金属材料で作られているときは、試験は、第 1 編　総則(26.7.2)に従って低温側試験温度で行う。

判定基準は、電気機器の防爆構造を損なう損傷が生じてはならない(表面的だけの損傷、塗装の剥離、他電気機器の類似の部品の破損及び小さな凹みは、無視する)。

ドローンが落下する場合、その際の条件や本体形状、重量などによっても大きく異なるため、詳細なデータが必要である。現在、使用されている業務用ドローンで仮定すると、開放空間での落下の場合、概ね 20kg の本体重量で、空気抵抗係数が1の場合、約 25m 以上の高度であれば落下速度が律速となるデータが得られている。これから、シミュレーションによって、一定以上の高さからの落下速度を導き、地上での衝突時に防爆性能が損なわれない対応(バンパー等の設置など)の検討も有効である。

A.3 ゾーン 2 用防爆ドローン

ゾーン 2 でのみ適用できる防爆構造で製作した機器は、その規格に指示された試験が実施される。主な適用試験を表に示す。

表 A-1　防爆指針による要求事項の適用試験

防爆構造等	試験の種類
耐圧防爆構造(d)	温度試験，熱安定性試験，衝撃試験，過圧試験，基準圧力測定，引火試験
安全増防爆構造(e)	温度試験(電池を含む)，熱安定性試験，衝撃試験，耐電圧試験，IP 試験
本質安全防爆構造(i)	温度試験，熱安定性試験，衝撃試験，落下試験，耐電圧試験，IP 試験，ケーブル引張試験，火花点火試験
樹脂充填防爆構造(m)	温度試験，熱安定性試験，衝撃試験，落下試験，耐電圧試験，ケーブルの引留め試験
非点火防爆構造(n)	温度試験，熱安定性試験，衝撃試験，IP 試験，耐電圧試験

また、個別の構造における試験項目と方法、判定基準は、表の通りである。

表 A-2 耐圧防爆構造の試験項目・方法・判定基準

項目	検査方法	判定基準
温度測定	第 1 編の箇条 26.5.1 によること。	第 1 編の箇条 26.5.1 に適合していること。
熱安定性試験	第 1 編の箇条 26.8 及び 26.9 によること(適用の場合)。	目視による状態確認による他、後に続く試験によって確認する。
衝撃試験	第 1 編の箇条 26.4.2 によること。	第 1 編の箇条 26.4.2 に適合していること。
過圧試験 (容器の耐圧力試験)	第 2 編の箇条 15.1 によること。	第 2 編の箇条 15.1 に適合していること。
基準圧力測定	第 2 編の箇条 15.1 によること。	第 2 編の箇条 15.1 に適合していること。
引火試験	第 2 編の箇条 15.2 によること。	第 2 編の箇条 15.2 に適合していること。

＊ 第 1 編等とは、JNIOSH-TR-46 シリーズ 工場電気設備防爆指針(国際整合技術指針)を指す(以下、同様)。

表 A-3 安全増防爆構造の試験項目・方法・判定基準

項目	検査方法	判定基準
温度測定	第 1 編の箇条 26.5.1 によること。	第 1 編の箇条 26.5.1 に適合していること。
熱安定性試験	第 1 編の箇条 26.8 及び 26.9 によること。	目視による状態確認による他、後に続く試験によって確認する。
衝撃試験	第 1 編の箇条 26.4.2 によること。	第 1 編の箇条 26.4.2 に適合していること。
耐電圧試験 (絶縁耐力)	第 5 編の箇条 6.1 によること。	第 5 編の箇条 6.1 に適合していること。
IP試験 (容器の保護等級)	第 1 編の箇条 26.4.5 によること。	第 1 編の箇条 26.4.5 に適合していること。

表 A-4 本質安全防爆構造の試験項目・方法・判定基準

項目	検査方法	判定基準
温度試験 （電池）	第 1 編の箇条 26.5.1 によること。 （第 6 編の箇条 10.5.3 によること。）	第 1 編の箇条 26.5.1 に適合していること。 （第 6 編の箇条 10.5.3 による測定の結果、最高表面温度の許容値を超えないこと。）
熱安定性試験	第 1 編の箇条 26.8 及び 26.9 によること（適用の場合）。	目視による状態確認による他、後に続く試験によって確認する。
衝撃試験	第 1 編の箇条 26.4.2 によること。	第 1 編の箇条 26.4.2 に適合していること。
落下試験	第 1 編の箇条 26.4.3 によること。	第 1 編の箇条 26.4.3 に適合していること。
耐電圧試験	第 6 編の箇条 10.3 によること。	第 6 編の箇条 6.3.13 及び 10.3 に適合すること。
IP試験 （容器の保護等級）	第 1 編の箇条 26.4.5 によること。	第 1 編の箇条 26.4.5 に適合していること。
ケーブル引張試験	第 6 編の箇条 10.9 によること。	第 6 編の箇条 10.9 によること。
火花点火試験	第 6 編の箇条 10.1 によること。	第 6 編の箇条 10.1.5.4 によること。

表 A-5 樹脂充填防爆構造の試験項目・方法・判定基準

項目	検査方法	判定基準
温度測定 （最高表面温度）	第 1 編の箇条 26.5.1 によること。 （第 7 編の箇条 8.2.2 a)によること。）	第 1 編の箇条 26.5.1 に適合していること。 （第 7 編の箇条 8.2.2 に適合していること。）
熱安定性試験	第 7 編の箇条 8.2.3 によること。	第 7 編の箇条 8.2.3 に適合していること。
衝撃試験	第 1 編の箇条 26.4.2 によること。	第 1 編の箇条 26.4.4（26.4.2 の試験に関する判定基準の箇条）に適合していること。

落下試験	第 1 編の箇条 26.4.3 によること。	第 1 編の箇条 26.4.3 に適合していること。
耐電圧試験	第 7 編の箇条 8.2.4 によること。	第 7 編の箇条 8.2.4 に適合していること。
ケーブルの引留機能試験	第 7 編の箇条 8.2.5 によること。	第 7 編の箇条 8.2.5 に適合していること。

表 A-6 非点火防爆構造の試験項目・方法・判定基準

項目	検査方法	判定基準
温度測定	第1編の箇条 26.5.1 によること。	第 1 編の箇条 26.5.1 に適合していること。
熱安定性試験	第 1 編の箇条 26.8 及び 26.9 によること。	目視による状態確認による他、後に続く試験によって確認する。
衝撃試験	第 1 編の箇条 26.4.2 によること。	第1編の箇条 26.4.2 に適合していること。
IP 試験	第 1 編の箇条 26.4.5 によること。	第 1 編の箇条 26.4.5 に適合していること。
耐電圧試験	第 8 編の箇条 6.5 によること。	第 8 編の箇条 6.5 に適合していること。

A.4 ゾーン 1 用防爆ドローン

ゾーン 1 でのみ適用できる防爆構造の試験についても、上記ゾーン 2 用の試験内容と基本的には同じ（ゾーン 1 で使用可能な防爆構造に限る）である。

参考文献

1）労働安全衛生総合研究所, 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（国際整合技指針 2015） JNIOSH-TR-46:2015, （2015）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html,（アクセス日 1 月 21 日）

ANNEX B: 危険区域への一時的侵入に関するリスク評価

ゾーン 2 で運用することを前提としたドローンが強風のあおりや操作ミスによってゾーン 1 に一時的に侵入する可能性が想定されうる（飛行性能は正常に保たれており短時間でゾーン 2 に戻ることができるとする）。この可能性を考慮した場合、ゾーン 1 での飛行が認められるに十分な防爆性能を有するドローンを使用するべきかどうかが問題になる。本 ANNEX では、この問題について「機器保護レベル（Equipment Protection Level: EPL）」の考え方を適用したリスク評価と機器選定の考え方を整理する。

EPL は点火源となる可能性に基づいて機器に割り当てる保護レベルであり、リスクアセスメントへの応用が意図されたものである。グループ II の機器に対しては Ga、Gb、および Gc という EPL が設定されており、極めて高い防爆性能を持つ機器には Ga、高い防爆性能を持つ機器には Gb、強化された防爆性能を持つ機器には Gc が割り当てられる（防爆性能が高い順に Ga、Gb、Gc となる）。国際整合指針では機器に対しては EPL が割り当てられているのであって、「使用可能な危険区域」が割り当てられているのではないことに注意が必要である。EPL の考え方は IEC 60079-0（General requirements）[1]、60079-14（Electrical installations design, selection and erection）[2]等の国際規格に示されているが、わが国においては国際整合防爆指針 2015（JNIOSH-TR-46:2015）[3]から導入された比較的新しい考え方である。

EPL のリスクアセスメントへの応用について説明する準備として、危険区域の定義を確認しておく。下記の通り、危険区域は爆発性雰囲気が発生する頻度のみに基づいて定義されている。

- ゾーン 0：連続的に、長時間又は頻繁に存在する区域
- ゾーン 1：通常運転中でも、ときどき生成する可能性がある区域
- ゾーン 2：通常運転中に生成する可能性がなく、生成しても短時間しか持続しない区域

しかしながら、リスクは爆発性雰囲気が発生する頻度だけでなく、実際に爆発した場合の損害の程度にも依存する。したがって、JNIOSH-TR-46-2:2015 附属書 G で述べられているように、真のリスクアセスメントでは頻度と想定される損害の双方を考慮すべきである。このことを説明するために、上述の附属所 G では下記のような例が示されている。

遠距離にあって十分に安全が確保された小規模のポンプ場の所有者にとっては、そこがゾーン 1 であったとしても、爆発に関係するガスの合計量が少量であり、爆発による生命及び財産に対するリスクが無視できるのであれば、ゾーン 2 用の電動機付きポンプを稼働させることは理にかなっている。

上記のような、リスクと危険区域において必要とされる防爆性能との関係について、IEC 61241-14[4]では次のように整理されている。まず、危険区域とそこで求められる防爆性能との通常一般的な関係を表 B-1 の通りとした。

表 B-1 危険区域と EPL の一般的関係

危険区域	EPL
ゾーン 0	Ga
ゾーン 1	Gb
ゾーン 2	Gc

その上で、表 B-1 に示されている EPL とゾーンの関係の代わりに、リスクに基づいて（つまり発火の結果を考慮して）EPL を決定することができるとした。このことによって、状況に応じて表 B-1 に示されているものよりも高い EPL が必要とされる場合もあれば、低い EPL が許容される場合もあることになる。例えば表 B-2 のようである。先に引用した附属書 G の例のように、爆発性雰囲気の発生頻度の観点からゾーン 1 ではあるものの、損害の程度が低いと考えられることからリスクは低いと判断し、EPL が Gc である機器の使用を許容するという例である。なお、EPL は危険区域を区分するための規格 IEC 60079-10-1[5]および IEC 60079-10-2[6]にも引用されている。

表 B-2 リスクを考慮した場合の危険区域と EPL の関係の例

危険区域	EPL
ゾーン 0	Ga
ゾーン 1	Gb, Gc
ゾーン 2	Gc

以上の考え方を応用して、ゾーン 2 で運用することを前提としたドローンが強風のあおりや操作ミスによってゾーン 1 に一時的に侵入する可能性について考察する。例として次のような状況を考える。ユースケース調査から、一般に事業所の中のゾーン 1 は限られた範囲で存在していることが分かった。例えばタンクのベント付近である。ゾーン 2 はそれを取り囲むように設定されている。ドローンをゾーン 2 で運用することを考えると必要とされる ELP は Gc である。

ここで、風などによってゾーン 1 に短時間ではあるが侵入する可能性を考慮すると Gb のドローンが必要なのではないかという懸念があった。しかしながら、実際のリスクを考えればドローンの EPL として Gc が許容される可能性がある。ゾーン 1 に侵入する可能性があるもののそれは短時

間である。さらにゾーン 1 に侵入するとしてもそれはゾーン 2 との境界部分であり、ゾーン 1 の排出源からは離れていると考えられる。このような状況で着火による損害のリスクが十分低いと判断されれば、EPL が Gc のドローン使用を許容することは理にかなっていると考えられる。あわせてゾーン 1 での放出時間帯を避けてドローンを運用すれば、さらなるリスク低減を達成することが可能である。以上を図 B-1 で示した。

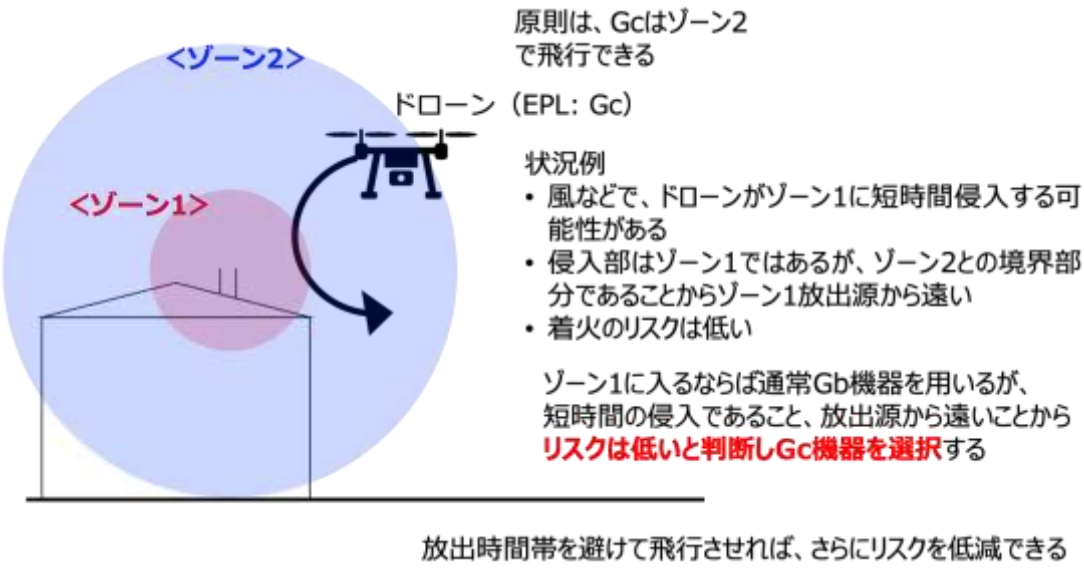

図 B-1 危険区域への一時的侵入に関するリスク評価

参考文献

1) IEC, IEC 60079-0:2017 Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements, （2017）
2) IEC, IEC 60079-14:2013 Explosive atmospheres - Part 14: Electrical installations design, selection and erection,（2013）
3) 労働安全衛生総合研究所, 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（国際整合技指針 2015） JNIOSH-TR-46:2015,（2015）, https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/tr.html,（アクセス日 1 月 21 日）
4) IEC, IEC 61241-14:2004 Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Part 14: Selection and installation,（2004）
5) IEC, IEC 60079-10-1:2015 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres,（2015）
6) IEC, IEC 60079-10-2:2015 Explosive atmospheres - Part 10-2: Classification of areas - Explosive dust atmospheres,（2015）

ANNEX C: ユースケース調査結果

2020 年 9 月から 10 月にかけて、国内で防爆ドローンの潜在ニーズがあると予想される事業者 10 社（業種別では、石油石炭製品製造業（いわゆる石油元請）2 社、電気ガス業 3 社、化学業 4 社、およびプラント保守サービス業 1 社）に協力いただき、防爆ドローンのユースケースを調査した。本来この類のニーズ調査としては、現地に赴き、実際の現場を見ながらニーズを聴取する方法が望ましいが、コロナ禍では現地出張や多人数でのブレストミーティングは難しいと判断し、以下の方法をとることとした。

（STEP1）共通のユースケース調査票を策定し、事業者へ連絡
（STEP2）事業者ごとに社内でユースケースを集約いただき、調査票に記入・返信
（STEP3）調査票を見た上で、詳細や疑問点をリモートで聴取
（STEP4）全調査結果を集約

以下に、集約した結果から見えてきた防爆ドローンの一般化したユースケースと、このユースケース実施に必要なドローンとしての機能や防爆性能について述べる。

C.1 ユースケースと防爆ドローンに求められる機能

事業者がドローンを利用したいと考えているユースケースとしては、以下の3つのパターンがあり、いずれも防爆性能が要求される。

ユースケース 1

プラントを定期的に停止させて設備の検査や補修をするいわゆる定修において、人が行う検査（の一部）をドローンで代行して作業を効率化するニーズが高い。対象は、階段や梯子昇降を要する高所（大型タンクや製造プラントの高所）や、人が実施する場合は足場の組立や高所クレーン等を要する設備（パイプラックや蒸留塔、フレアスタックや煙突など）であり、配管や設備表面・保温材表面の錆びや劣化などの検査を目的とする。後者は、プラント運転中に足場なしで検査ができれば、プラント停止までに必要な検査計画や補修資材の準備等ができるのでより効率的である。

今回ニーズを調査した事業者の大部分が、通常の非防爆ドローンを用い、プラント内道路などの“遠目”または 2019 年度に発行されたガイドラインに基づく危険区域の設定により“緩和”された非危険区域からの設備検査を試行中であり、ニーズが明確であった。それ故、危険区域を飛行でき、より設備に近寄ることで緻密な検査が可能になるドローンの防爆化に対する期待も高い。操作は目視内での遠隔操作が主体であるが、飛行時間に関しては、現状の小型通常（非防爆）ドローンの 15 分より長い時間、機能に関しては、より高画質の画像撮影のための高解像度カメラと

ホバリングなど部分的な自動飛行を望む声が多い。さらに、接触しての非破壊検査（超音波探傷や板厚検査）機能を望む声もあった。

ユースケース 2

プラント運転中に通常人が行っている日常の巡回点検を防爆ドローンで代行して省人化するニーズが高いが、要求されるユースケースはさらに2つに分けられる。1つ目は巡回点検員がドローンを持ち運んで部分的に高所点検に利用するケースであり、これに利用する防爆ドローンに要求される機能は、上記ユースケース 1 と同等またはより小型軽量化である。2つ目はドローンで自律巡回飛行をするケースであり、無人運転などレベル 3 以上の高い機能が要求される。プラントは金属製の高所構造物が多く、多くの事業者が非防爆ドローンの試行中に経験しているように GPS をロストする上に、プラントやパイプラックの内部など屋根のある半屋内を飛行するので、GPS 以外のより高度な自己位置評定方法、例えば画像などを利用した方法が必要である。検査も、単に画像を取得するだけでなく、AI 等を利用した画像解析・診断機能との組み合わせ、ガス検知器や巡回点検員の五感にかわる画像以外の高度なセンサが必要である。また、60 分以上の飛行時間を求める声が多い。

ユースケース 3

プラントで何かのインシデントが発生した時に、人に代わって情報収集をする安全面でニーズも高い。インシデントとしては、大きく 2 つあり、1 つ目は、設備常設のガス検知器や火災報知器などが反応し、作業員が全員退去になった場合である。2 つ目は、台風や地震などの直後にプラントの健全性を確認する場合である。いずれも遠隔操作でよいが、目視外での操作が求められるため、ある程度の自動・自律機能によるサポートは必要である。

C.2 ユースケースと求められる防爆性能

ドローンのような電気機器では、それを構成する電気品のすべてが、プラントで発生する可能性のある引火性ガスに対する着火源になり得る。着火源たる電気品を引火性ガスから適切に“防護”することで、ドローンの防爆性能が達成されるが、防爆ドローンが稼働する環境条件によって“防護”に必要な技術レベルが異なり、爆発する危険の程度が高いほどその達成は難しくなる。環境条件としては以下の2つである。

① 防爆ドローンの稼働を想定する場所で、引火性ガスが発生し、爆発性雰囲気が生成される頻度や時間に応じて、「危険区域」が区分されている。危険レベルが高い順に、ゾーン 0→ゾーン 1→ゾーン 2→非危険区域が定義されているが、今回対象とする防爆ドローンに関して

は、よほど小型のものでない限りゾーン 0 への適用は難しいと考えられるため、防爆ドローンの防爆性能に影響するのは、ゾーン 1 対応とするか、ゾーン 2 対応とするかの差である。

② 防爆ドローンの稼働を想定する場所で、発生する可能性のあるガスの種類に応じて、「ガスグループと温度等級」が区分されている。ガスの種類は非常に多いが、今回対象とする石油ガス化学分野で想定される引火性ガスの中で、防爆ドローンの防爆性能に影響があるのは、水素ガスの存在の有無である。

ユースケース 1 および 2

殆どの事業者は、危険区域に関しては、ゾーン 2 対応で当面はカバーできると考えていることが分かった。非防爆ドローンでの点検を試行している事業者にとっては、危険区域とゾーン 2 の両方で飛行できる運用となり、危険区域を決定するリスクアセスメントなどの事前作業・現地でのガス検知作業など様々な制約から解放されるので非常に有益と考えていることが分かった。一方、ゾーン 1 対応までは不要な理由は事業者により異なるが、概ね以下に分かれる。

- そもそもゾーン 1 はない、または危険区域の殆どがゾーン 2 である
- ゾーン 1 は、危険な場所であり、そもそもドローン飛行を想定していない（消防本部から許可されないと考えている）

なお、ゾーン 1 としては、トレンチなどの窪みで、引火性ガスが滞留する可能性のある場所、バルブなどの近傍で、引火性ガスが発生する可能性が高い場所である。

ガスグループと温度等級に関しては、水素ガス対応ニーズは、おおよそ半分であり、対応要否は、防爆性能を達成するためのコストを含めたバランスで決定すべきであると考える。

ユースケース 3

何が起こっているか分からないインシデント後の状況確認のためには、ゾーン 1 対応が必要と回答した事業者が多かった。ただし、ゾーン 1 対応で十分か、ゾーン 0 対応が必要ではないのかについては、防爆ドローンのユースケース 1 および 2 での使用実績を見極めながら今後議論していく必要があろう。

C.3 まとめ

現状は、定修時に非防爆ドローンを使ってスポット的に高所点検を実施しているが、防爆ドローンを使ってより広い範囲を長時間点検するニーズがある。ただし、技術的にその達成が比較的困難でないゾーン 2 対応の防爆ドローンでも当面のニーズがカバーできる。

また、運転中に巡回点検の人の代替するニーズがある。ただし，巡回点検のうち、高所のみを防爆ドローンで代替できるだけでも、最初のステップとしては効果があると思っていることが分かった。

ドローンとしての機能や防爆性能をまず最小限で実現し、作業実績を積み重ねるとともに、機能と防爆性能の両方をバランスよく順次進化させていくことが肝心である。ただし、ドローンの機能や防爆性能が高機能になる代わりに、ドローン機体が大型で重くなり、飛行中の接触で人や設備へ危害を与える場合や、墜落によりプラント内で防爆性能を喪失するなど、リスクが増えることはあってはならない。安全装置などを工夫するとともに、いかに最適な防爆構造を採用して軽量化し、本質的な安全性を高めるかが求められる。

昨今のドローンの進化は早い。一般に防爆型式検定の取得には時間がかかるため、防爆ドローンの機能の更新サイクルの長期化が懸念される。このことが、防爆ドローンの普及の障害にならないか不安視する声も聴かれたことを付記する。ユースケース結果を表 C-1 にまとめる。

表 C-1 ユースケース調査結果のまとめ

項目	調査結果
使用目的	日常/定期検査での錆・保温材や板金の劣化等の画像撮影、風雨雪後の点検 インシデント時の調査
対象 （飛行高度）	飛行高度は一般に 100m 以下。（パイプラック（10m）、大型タンク・製造プラント（30～40m）、蒸留塔（60m）など）
対象との 距離	遠隔操作が主体の定期検査では、5 m 程度まで接近したい （日常の巡回点検ニーズは、より近距離に自律制御で接近）
飛行時間	飛ばす気になる現状の小型ドローン（非防爆）は運用時間が短い。 場所指定なら 15 分で検査可能だが、自動操縦での巡回なら 15 分では不足
カメラ	パンチルトの必要性は観察場所によって異なる。高解像度が望ましい
危険区域 との関係	ゾーン2対応で当面のニーズはカバーできる。 （ゾーン1が必要と答えたユーザは少数。そもそも想定外感もあり） └ 危険区域のほぼ全体がゾーン 2 └ 敷地内に部分的にゾーン 2 がある。 └ リスク評価により定めた非危険区域での飛行がメインだが 防爆ドローンがあれば非危険区域とゾーン 2 の両方で飛ばせる運用となり非常に有益 ・状況が不明なインシデント時の調査には、より高い防爆性能が望ましい ・水素ガス対応ニーズは、約半分
その他	・防爆化＝重量化による落下リスク増を懸念する。軽量化が希望 ・防爆化で他の機能が制限されるなら使えない（ドローンの進化が早い） ・将来的に接触・非破壊検査を目指すなら危険区域への侵入必須

ANNEX D: プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン VER2.0 の本ガイドラインとの関連箇所

ここでは、「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン VER2.0」（運用ガイドライン）と本ガイドラインとの関連箇所について、主な点を比較検討した結果を記載する。以下、各項目の冒頭に記載した章番号と章タイトルは運用ガイドラインのものである。

2.2 操縦者の要件

操縦者の要件として、運用ガイドラインでは「航空法の規定に従った操縦を行うために必要な技量を習得した操縦者でなければならない」となっている。

（参考情報）本ガイドライン本編には記載していないが、ドローンを取り巻く社会状況の変化が早いことに鑑み、現在国交省において国による操縦者の技能に関する証明制度（操縦ライセンス）の創設について議論されている。

2.3 使用する機体の要件

使用する機体の要件として、運用ガイドラインでは「飛行のリスクに応じて航空法の規定及び電波法の規定による要求事項を満たす機体でなければならない」となっている。本ガイドラインでは、これらの内容も踏まえ、さらに防爆制限区域での使用から、危険区域で飛行させるためには、防爆型式検定に合格した機体でなければならないことを記した。

2.4 飛行計画書の作成と提出

飛行計画所の作成と提出として、運用ガイドラインでは「飛行エリアに応じてリスクアセスメントを実施し、飛行計画書に記載する。特にプラントにおける最大のリスクは、爆発性雰囲気を生成する可能性があるエリア及び火気の制限があるエリアへの侵入や落下が生じ、設備破損やバッテリーの破損による発火、引火による大事故が生じる点である」となっている。本ガイドラインでは、使用する機体の要件と同様に、防爆制限区域での使用を考慮して以下を記した。

- 衝撃試験・自由落下試験の提案
- インターロックの提案
- 機体に適切な塗装を施すことにより、設備等への接触時の火花発生リスクの低減の提案
- ゾーン 2 用ドローンが一時的にゾーン 1 に侵入する可能性（ゾーン 1、2 境界部分）を考慮すべき場合においても、機器保護レベル（EPL）の考え方によるリスク評価結果に基づいてゾーン 2 用ドローンを適用できる可能性を提示

3 設備開放時等におけるプラントでのドローンの活用方法

設備開放時等におけるプラントでのドローンの活用方法として、運用ガイドラインでは「爆発性雰囲気を生成する可能性がなく、火気の制限がないことを前提」として「設備開放時等においては、屋外と屋内それぞれでの利用が想定され（中略）る」となっている。本ガイドラインでは、これを踏まえ通常の状態における、屋外での中型・大型防爆ドローンの活用を想定した。

4 災害時におけるドローンの活用方法

災害時におけるドローンの活用方法として、運用ガイドラインでは「災害時は、（中略）プラント内の従業員の安全確保をはじめ迅速な現場確認等を目的としたドローンの活用が可能である」となっている。このような状況を踏まえ、防爆構造の機器は通常の状態における爆発性雰囲気の存在・生成・持続に基づいた中での使用が前提とされていることから、本ガイドラインでは災害時を対象外とした。

参考文献

1） 石油コンビナート等災害防止3省連絡会議（総務省消防庁、厚生労働省、経済産業省），プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライ Ver2.0」，（2020），https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200327009/20200327009-2.pdf，（アクセス日 2020 年 1 月 19 日）

令和2年度補正産業保安高度化推進事業
（防爆ドローンの要件に関するガイドラインや仕様設計等の調査）
有識者委員会　委員等名簿

委員長

新井 充	東京大学名誉教授

委員

大塚 輝人	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 上席研究員
木村 雄二	工学院大学名誉教授
久保 博史	エヌ・シー・エス株式会社 代表取締役
土屋 武司	東京大学教授
門間 淳	日揮グローバル株式会社・IEC/TC31 メンバー
山隈 瑞樹	産業安全技術協会 常務理事（業務執行理事）
若倉 正英	保安力向上センター常務理事・安全工学会理事

オブザーバー

株式会社 A.L.I. Technologies
株式会社自律制御システム研究所 (ACSL)
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
石油化学工業協会
石油連盟
一般社団法人日本産業用無人航空機工業会（JUAV）
株式会社プロドローン
ペガラジャパン合同会社
三菱重工業株式会社
経済産業省産業保安グループ高圧ガス保安室
経済産業省製造産業局産業機械課次世代空モビリティ政策室
経済産業省石油精製備蓄課
経済産業省製造産業局素材産業課
厚生労働省労働安全部安全課
総務省消防庁予防課危険物保安室

事務局

産業技術総合研究所 安全科学研究部門・環境創生研究部門