

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)
調査報告書

2021年3月
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

目次

1	背景と目的	5
2	ガイドラインの概要(体制、委員会、章構成)	6
3	関連するガイドラインおよび防爆規定の調査	8
3.1	関連法令等	8
3.1.1	航空法	8
3.1.2	電波法	10
3.1.3	労働安全衛生法	12
3.1.4	高圧ガス保安法	12
3.1.5	消防法	13
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	14
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	15
3.4	国内における防爆型式検定	15
3.5	防爆に関する用語	16
3.5.1	爆発性雰囲気用の電気機器のグループ	16
3.5.2	防爆構造	16
3.5.3	機器保護レベル(EPL)	18
3.5.4	危険区域の分類	19
4	ユースケース調査	22
4.1	ユースケースと防爆ドローンに求められる機能	31
4.2	ユースケースと求められる防爆性能	32
4.3	まとめ	33
5	防爆構造に関する検討	34
5.1	危険区域と防爆適応規格	34
5.2	ゾーン2用防爆ドローン	36
5.2.1	モーター	36
5.2.2	バッテリー	37
5.2.3	カメラ	38
5.2.4	その他	38
5.3	ゾーン1用防爆ドローン	38
5.3.1	モーター	39
5.3.2	バッテリー	39
5.3.3	カメラ	39

5.3.4	その他.....	39
6	性能仕様調査(プロドローン)	41
7	海外調査	42
7.1	海外における防爆ドローンの開発・販売状況	42
7.2	IECEx 認証モーターの調査.....	43
7.3	API によるガイド	44
8	防爆機器の衝撃試験	46
8.1	目的	46
8.2	試験概要	46
8.3	衝撃試験	46
8.3.1	衝撃試験装置(HYGE)	46
8.3.2	試験条件	49
8.3.3	試験体	51
8.4	実験結果	56
8.4.1	試験後の試験体	56
9	防爆機器の帶電試験	67
9.1	目的	67
9.2	試験方法	67
9.2.1	準拠規格及び測定手順.....	67
9.2.2	測定機器及び試験装置の構成.....	68
9.3	試験試料	69
9.4	測定結果	70
9.5	帶電性評価	71
9.6	まとめ	71
10	今後の展望	72
10.1	今年度の事業の評価.....	72
10.2	特殊防爆への対応	72
10.3	ドローン用モーターに関する IEC 防爆規格の検討	76

別添一覧

1. 性能仕様調査結果
2. 防爆ドローンの要件に関するガイドライン

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、現時点では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、使用的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。

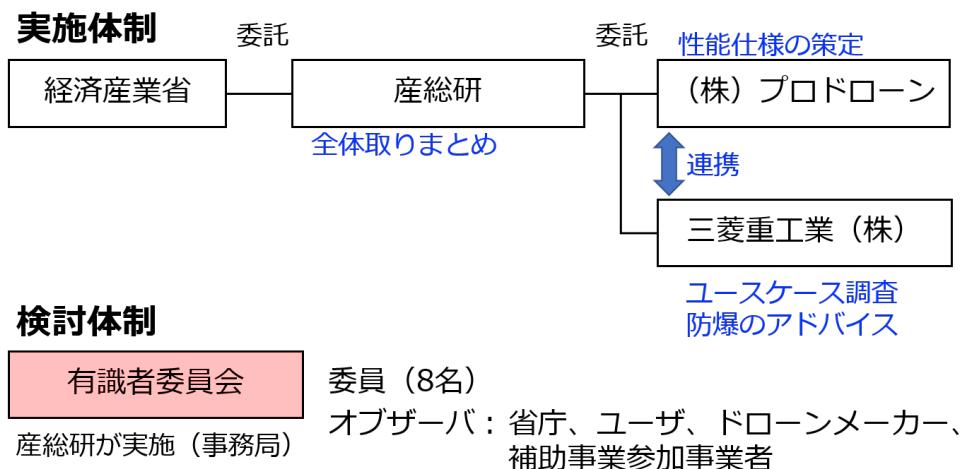
加えて、防爆対応のドローンと認定されるためには、一般電気品規格である「工場電気設備防爆指針」に従った検定に合格しなければならない。しかしながら、落下時において防爆性能を維持できるか、落下や設備接触時のメカニカルスパーク対策等、ドローン特有の課題に関して明確な指針が示されていないこともあり、防爆ドローンの開発が進んでいない状況にある。

そこで本調査では、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 ガイドラインの概要(体制、委員会、章構成)

本事業の実施体制を図 2-1 に示す。国立研究開発法人産業技術総合研究所が本事業を受託し全体をとりまとめた。防爆ドローンが満たすべき性能仕様の調査を株式会社プロドローンに、ユースケース調査および防爆構造に関する調査を三菱重工業株式会社に再委託した。

防爆対応のドローンを実現するための指針をガイドライン(別添)として整理するにあたり、8名の専門家からなる委員会を設置した。委員はプラント安全、ドローン、防爆に関する専門家、および登録型式検定機関から招聘した(ガイドライン末尾に委員名簿を掲載)。さらにオブザーバーとしてドローンメーカー、石油・石油化学関係工業会、行政からは経済産業省、厚生労働省、総務省消防庁が委員会に参加して意見聴取することにより、幅広い視点から防爆対応のドローンを実現するにあたっての課題点、防爆ドローンの開発・実装に繋げるための指針を整理した。



ガイドラインの構成は以下の通りである。第 1 章、第 2 章はそれぞれ背景と目的、適用範囲にあてた。第 3 章は一般事項として関連法令、ガイドライン、防爆に関する基本事項、および海外の防爆ドローンの開発・販売状況を記載した。第 4 章では防爆ドローンを危険区域で飛行させる際の課題、現存する防爆指針の範囲内での課題、落下した場合の防爆機能への影響、および衝突・落下した場合の衝撃火花の 3 つに整理した。第 5 章はガイドラインの方針の説明である。現存する防爆指針を遵守して防爆ドローンを製作することが要件となることから、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 で実用化を目指すことを想定して設計された可能性がある。

ーン 2 での活用を目的とした防爆ドローン、ゾーン 1 でも活用できる防爆ドローンの順番で分けて整理した。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 章で整理した。

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。

3 関連するガイドラインおよび防爆規定の調査

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に危害を与える、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る、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。

(検索、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検索、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・ニ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⁾

分類	無線局 免許	周波数帯	送信出 力	利用形態	備考	無線従事 者資格
免許及び 登録を要し ない無線 局	不要	73MHz 帯等	※1	操縦用	ラジコン用 微弱無線局	不要
	不要 ※2	920MHz 帯	20mW	操縦用	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	
		2.4GHz 帯	10mW/ MHz	操縦用画像 伝送用デー タ伝送用	2.4GHz 帯 小電力デー タ通信シス テム	
携帯局	要	1.2GHz 帯	最大1W	画像伝送用	アナログ方 式限定※4	
携帯局陸 上移動局	要 ※3	169MHz 帯	10mW	操縦用 画像伝送用 データ伝送 用	無人移動体 画像伝送 システム (平成28年 8月に制度 整備)	第三級陸 上特殊無 線技士以 上の資格
		2.4GHz 帯	最大1W	操縦用画像 伝送用 データ伝送 用		
		5.7GHz 帯	最大1W	操縦等加伝 送用 データ伝送 用		

※1 500m の距離において、電界強度が $200 \mu V/m$ 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対応し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的な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)の周囲は、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 60079-14¹³⁾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。

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 ユースケース調査

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プ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

表4-1に調査したユースケースをまとめた。表4-2から表4-11に各社ごとの詳細内容を記載した。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。

表 4-1 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) <ul style="list-style-type: none"> └ 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	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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

表 4-2 化学 A 社

項目	調査結果
使用目的	日常/定期検査、災害時検査。鋸、保温材や板金の劣化等の画像撮影
対象 (飛行高度)	パイプラック(10m)、大型タンク・製造プラント(30~40m)、蒸留塔(60m)
対象との距離	5 m 程度まで接近したい
飛行時間	場所指定なら 15 分で可。自動操縦での巡回なら 15 分では不足
カメラ	カメラの可動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 関連	リスク評価により定めた非危険区域での飛行がメイン
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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) ・ 非防爆ドローンの数倍の重さのドローンでは使いにくい

表 4-3 化学 B 社

項目	調査結果
使用目的	①正常運転時の目視点検(貯槽、配管ラック等) ②異常、事故時の状況確認。接近する ③運転時巡回点検時の高所巡回
対象 (飛行高度)	定量値は伺えていないが、配管ラック、タンク、フレアスタック等を想定されており、その程度の飛行高度は必要
対象との距離	接近して可能な限り死角を減らしたいニーズあり。ただし、落下のリスクが高いのでリスクアセスメントの結果に応じて距離を決定するものと思われる
飛行時間	30~60 分
カメラ	サーモビューカメラのニーズ高い。通常のカメラ画像と並べて状況確認
危険区域との 関連	ゾーン 2 で問題ない。ゾーン 1 は落下時のリスクが高く想定していない
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水素を扱っているプラントも多いので、ガス種別は水素が含まれることが望ましい。 ・ ドローンにアームを付けて、UT で肉厚計測等の作業ができるとよい ・ 巡回点検はプログラムを組んで自動で実施したい ・ 落下のリスクを非常に懸念しており、安全対策、活用範囲の策定が必要

表 4-4 化学 C 社

項目	調査結果
使用目的	①運転時、定検時のプラント高所の目視点検(配管ラック、タンク内部等) ②遠隔地、タンクエリア等の広範囲の目視点検 ③加熱炉断熱性能の熱画像診断 ④異常発生時の現場確認
対象 (飛行高度)	対象として配管ラック、タンク、フレアスタック等を想定されている。 (飛行高度は 200m 程度)
対象との距離	可能な限り接近して死角を減らしたいニーズあり。
飛行時間	60 分
カメラ	サーモビューカメラのニーズ高い。通常のカメラ画像と並べて状況確認。 通常のカメラの画質は適度でよいが、将来的に AI による画像での異常診断が可能なレベルを求められている。
危険区域との関連	ゾーン 2 で問題ない。ただし、異常発生時は可能な限り発災現場に近づくことを考えゾーン 1 対応が望ましい。
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自律飛行を採用するためにはガイドラインの見直しが必要と考える。 ・ 飛行許可申請に時間がかかるており、ドローン推進のために改善必要。

表 4-5 電気ガス業 D 社

項目	調査結果
使用目的	<p>①日常の巡回点検(人が巡回して、ゲージ・温度・ガス濃度の計測記録、匂い・振動や異音の有無チェック等)を代替し人手削減</p> <p>②インシデント(地震や津波後、積雪など)時の状況確認をすばやく実施</p>
対象 (飛行高度)	<p>①日常巡回するのは平屋～2階建てのプラントで、人が届く程度</p> <p>②インシデント時の高所はタンク(～40m 高)、フレアスタック(～90m 高)も 対象 ※他ユーザでニーズが大きかったパイプラック(～10m 高)には本事業所では歩廊があり、1回/年の点検でのドローンニーズは少ない</p>
対象との距離	目視だけで済む点検はほとんどない(ものによっては触診したい)
飛行時間	<p>①巡回点検の代替は、90 分から 120 分と長い。ドローンでなくローバのイメージかと推測</p> <p>②インシデント時は 10～30 分でドローンの可能性あり</p>
カメラ	特にコメントなし ガス検知があるとよい
危険区域との関連	危険区域のほぼ全体がゾーン 2 であるため、ゾーン 2 対応のドローンでひとまず使える。ゾーン1対応があると望ましいが、場所は非常に限定されており、大きく重くなるのであればかえって使いにくい
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> ・ ①は完全自律飛行(ルート自動飛行)が必要(人が操縦するのであればかえって手間が増える) ・ ②防爆であれば機器やタンクの上空を飛べるようになれば有効。 ・ 適用事例やガイドラインがあると導入しやすい

表 4-6 電気ガス業 E 社

項目	調査結果
使用目的	①運転時、構内パトロールをドローンで代行 あらかじめ設定したルートを自律飛行し、画像を取得 ②運転時、高所・遠方(将来的には海上)にある設備を遠隔操作で点検
対象 (飛行高度)	対象としてフレアスタックのパイロットバーナ点検(80m)、地上式 LNG タンク 上部(~60m)で、飛行高度は 100m 程度
対象との距離	(ガイドラインによる非防爆エリアからでは実用に耐えない)
飛行時間	①120 分 ②20 分
カメラ	カメラの画質に関する具体的な要求はないが、将来的に AI による画像での異常診断が可能なレベルを求められている。 センサとして-20°Cを検知できれば、LNG の漏洩を検知できる。
危険区域との 関連	ゾーン 2(水素なし)で問題ない。ゾーン1はさほど多くないし、ゾーン1でドローンを飛ばすことは現状では想像できない。ただし、異常発生時は可能な限り発災現場に近づくことを考えゾーン 1 対応が望ましい。
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> 将来的には海上も巡回したいので、手続き運用の統合や簡素化希望 最初のステップとして、②の作業の一部でもドローンで実施できれば効率化につながっていく。 落下時の設備損傷防止機能が必須

表 4-7 電気ガス業 F 社

項目	調査結果
使用目的	①高所の配管を足場レスで(できれば)自動検査 ②災害時の現場確認で、固定カメラの死角を補う
対象 (飛行高度)	①LNG 地上タンクの外槽や高所の配管 ②はプラント全般
対象との距離	(ガイドラインによる非防爆エリアからでは実用に耐えない)
飛行時間	20 分
カメラ	カメラの画質に関する具体的な要求はないが、将来的に AI による画像での異常診断が可能なレベルを求められている。
危険区域との 関連	ゾーン 2(水素なし)
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> できるところからスマートルートでよい ②もできれば自動ルート飛行が望ましい

表 4-8 石油石炭製品 G 社

項目	調査結果
使用目的	日常/定期検査: 高所配管、タンクヤード浮屋根等の目視検査 発災時(火災、漏洩): 発災時の現場確認・撮影
対象 (飛行高度)	タンク(20m)、タワー(40m)。飛行高度は 50m 程度必要。
対象との距離	近づける程よい(死角を減らす)。
飛行時間	点検でまとめたデータを取得するために 60 分は必要。
カメラ	安定して撮影できることが望ましいが、撮影後画像安定化処理で処置できるレベルであれば問題ない。
危険区域との関連	<ul style="list-style-type: none"> ・ 発災時はゾーン 0 であれば発災箇所にかなり近づいて状況確認が可能であり有意義。ゾーン 1 であっても現状の確認手法よりも十分近づけるので有意義。 ・ 日常点検においてはほぼ全体がゾーン 2 であるため、ゾーン 2 用のドローンで十分。
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガス検知器はあった方がよい。 ・ 航行の安全性の規格、その規格を満足しておれば運転中の装置の上を飛行してよいなどのガイドラインが必要。 ・ 操作ミスしても破損リスクが低いのでかご型にした方がよい。

表 4-9 化学 H 社

項目	調査結果
使用目的	外面腐食点検、ガス漏洩点検、設備不良監視、台風等災害時の現場確認。 足場設置の軽減、高所での労災リスク軽減、労力軽減、狭隘箇所の点検
対象 (飛行高度)	フレアースタック、蒸留塔、避雷針、タンク(30m)、配管、保温耐火材、フレアースタック煙道等の入槽困難箇所、槽内、オイリー排水設備、地下タンク、冷水塔ファン、コーンルーフタンク等の高所の内部、海底配管
対象との距離	(コメントなし)
飛行時間	(コメントなし)
カメラ	360°カメラ(確認場所を後からも確認できるように)希望
危険区域との関連	多くの場所がゾーン 1 という認識
そのほか	機能要求: 防水防塵、照明(確認希望場所を照射)、他と干渉しない周波数帯域、保護カバー(労災防止)、ガス検知器(HC、O2、H2S)、軽量化、距離計測(腐食箇所やスラッジの大きさ把握)、スピーカー・マイク機能、耐熱性

表 4-10 石油石炭製品 I 社

項目	調査結果
使用目的	①日常の巡回点検(凹や鋸など人が見て分かるレベルの異常を見たい) ②入構管理(人を追う) できれば良いレベル ③インテリジェントな監視
対象 (飛行高度)	構造物や人を見る。10 数 m 程度
対象との距離	不定(ただし、接触(非破壊検査など)はしない方向で考えている)
飛行時間	現状(15 分)は短すぎる
カメラ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 映像が単に取得できるだけでなく、インテリジェントな処理を組み合わせて楽にしたい ・ 固定カメラ+ドローンカメラで設備費用の削減効果を検討中 ・ 近赤外・遠赤外も使っているが効果は未知数
危険区域との 関連	<ul style="list-style-type: none"> ・ ほとんど非防爆で、ゾーン 2 が点在する感じ ・ 非防爆エリアのみのフライト運用も考えられなくないが、エリアを気にしなくて済む防爆であるとありがたい
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大きさより軽量であることが安全上重要 ・ 小さい方が望ましい(1m 程度以下なら運用可能) ・ 顔認識、人物属性や群衆の検知、画像鮮明化などの技術を使いややすくマージして欲しい ・ ドローンだけ防爆でも使いづらい。システム提案を望む

表 4-11 保守サービス J 社

項目	調査結果
使用目的	<ul style="list-style-type: none"> 正常運転中の日常検査において、接触・非破壊検査をドローンで代替 人が巡回していることをドローンが代替
対象 (飛行高度)	プラントのフロアが 20~30m で、ここから 100m くらいまでがドローンの範囲。ドローンを使用する高さは一般的に 100m 以下
対象との距離	プラント内に侵入、対象に接触を目指している
飛行時間	現状、非防爆ドローンでは 20 分程度
カメラ	<ul style="list-style-type: none"> NDI 機器(主に UT～超音波探傷装置) 人の五感を代替するなら高度なセンサが必要。空撮 + α で有効となる 隔離した状態で設備撮影しながら、赤外線かレーザでガスの漏洩を検知するのが有効と考える(プラントで扱う可燃性物質。水素だけではない)
危険区域との 関連	<ul style="list-style-type: none"> ゾーン 2 でプラントのほぼ全域がカバーされると考える ゾーン 2 を自由に点検するドローンが必要 いくら防爆ドローンであってもゾーン 1 での使用は難しいと考える
そのほか	<ul style="list-style-type: none"> 重くなれば墜落時の危険性が発生する 落下対策としてパラシュートではどこに行くかわからない。落下速度をコントロールしながら安全な場所に降ろす必要がある 大きいと接近できない。モーター4 機でペイロードが大きいドローンが必要 ドローン用の検査機器が開発されていないので、~10 kg 程度のペイロードが必要

4.1 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るれば、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多い。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。

4.2 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。

- 危険区域のほとんどがゾーン 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、トレーニングなどの窓口で、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、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。

4.3 まとめ

現状は、定期修理の際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聽かれたことを付記する。

5 防爆構造に関する検討

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。5.1 節で防爆電気機械器具として必要な適応範囲などを示す。5.2 節、5.3 節ではゾーン 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(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)を対象として防爆構造に関する検討を行う。

5.1 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 5-1 危険区域と防爆適応規格表(電気機器)

電気機器	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	モータ一部の方 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 5-2 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

5.2 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。

5.2.1 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になどに、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。

5.2.2 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。

5.2.3 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。

5.2.4 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グ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。

5.3 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。

5.3.1 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。

5.3.2 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。

5.3.3 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。

5.3.4 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 5-3 示す。

表 5-3 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 対象ガス: II B+H2 T4	ゾーン1対応			ゾーン2対応		
		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	○	○	×	○	○	○
L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	— ※1	× ※2	(○)	— ※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)	リレーなどスイッチなど、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 —: 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

6 性能仕様調査(プロドローン)

ドローンを防爆化するための方法を検討し提案する。その際、ドローンを構成する材料としての適否を判定するための検討を補助した。ドローンの性能仕様として飛行性能(ペイロード/飛行時間/速度/耐環境性)、搭載センサ種類、自律化程度、防爆スペック(危険場所、対象ガス、防爆方法など)、落下時に着火源とならない対策(パラシュート、プロテクタ、エアバッグ等)を明示した。

検討結果を別添資料に示した。別添資料では以下の内容を記述している。

1. 防爆ドローンの性能仕様案 概要
 2. 防爆ドローンの性能要件
 3. 機体～既製部品による構成
 4. 課題
 5. 落下耐性:予防的要件
 6. 性能に影響する項目 補足
 7. 落下耐性:事後要件
 8. 性能要件まとめ
 9. 今後にむけた提案
- 第1章では概要では防爆ドローンとして求められる性能を満たすための対応案を抽出することから要件をまとめている。
 - 既存の防爆対応部品を用いて防爆ドローンを構成することは可能であったが、離陸重量は34kgとなり、離陸に必要な電力は5000W以上で、通常用いられるバッテリーでは90秒程度のフライトしか実現できないことが判明した。ここから航続時間、揚力の余裕度、運動性能、落下耐性の4点を求められる性能として規定した。
 - 引き続き4章でこれらを課題として要件に紐づけている。
 - 8章が性能要件としてのまとめとなる。
 - 揚力の余裕度については添付資料の通りであるが、指標(例)については経験的な数値を示した。一般的にドローン用のモータは推奨のプロペラとセットで販売されていることが多い。こうしたセットにおいては推力と回転数(電圧)の相関などの性能が開示されていることが多いが、機体の安定性を重視する場合はモータシステムの応答性が高い範囲で設計することが望ましく、多くの場合概ね最大推力の6割程度の範囲となる。また回転数の増減の範囲が広いことは、外乱や機体の重量バランスの悪さをカバーする能力を高めるため、より安定した動作が期待できる。
 - 運動性能については、熟練度の高い操縦者がフライト確認の際に行う作業を基準としている。

7 海外調査

7.1 海外における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問わらず)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 7-1)。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 7-1 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)

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)

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)

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)

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。

7.2 IECEx 認証モーターの調査

国外で認証されている防爆モーターのうち、ドローンに適用可能な防爆モーターの有無を調査した。具体的には IEC(International Electrotechnical Commission)において認証されている防爆モーターについて調査した。

調査の手順は以下の通りである。まず IECEx System (International Electrotechnical Commission System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres) のホームページ¹⁾において“View Certificates & Licenses”を選択し“IECEx Certificates”的ページ²⁾にアクセスする。当該ページにおいて“Type of certificate/report”について“Equipment and Component”を選択し、“Keywords”について“motor”を入力することにより防爆モーターを検索した。さらにその中から、ウェブブラウザの検索機能を用いて品名(検索結果の“Equipment”列に記載されている)に“motor”が含まれているものを抽出した。対象国は米国およびドイツとし、対象年は 2016~2020 年とした。ドローン用のモーターは小型・計量であることが求められるため、手のひらに乗る程度の大きさのもの、重量 2kg 以下のものを対象とした。回転数については 5000rpm 以上を対象とした。モーターの原理として、誘導モーター(かご型ローター)は一般的に大型高出力型のモーターであることから、今回のドローンに搭載するような小型、高回転型とは仕様が異なることが多いため、“induction motor”および“asynchronous motor”は対象外とした。

抽出された防爆モーターについて、上記の条件で絞り込み、最終的に残ったモーターを防爆ドローンに適用可能な防爆モーターとした。

結果として、防爆ドローンに適用可能と考えられる防爆モーターを見つけることはできなかった。調査した件数と結果を表 7-2 に示す。

表 7-2 IECEx 認証モーターの調査結果

対象国	対象年	"IECEx Certificates"において"motor"で抽出された件数	うち、品名に"motor"が含まれている件数	調査結果 (防爆ドローンに適用可能と考えられる防爆モーター)
米国	2016	73	24	該当なし
	2017	75	30	
	2018	70	37	
	2019	102	63	
	2020	90	30	
独国	2016	55	20	該当なし
	2017	90	49	
	2018	99	70	
	2019	114	85	
	2020	82	52	

7.3 APIによるガイド

API(American Petroleum Institute)は 1919 年に標準化団体として設立されたアメリカの石油および天然ガスの業界団体であり、700 を超える標準を開発している。API は 2019 年に「API Guide to Developing an Unmanned Aircraft System Program」を公表した³⁾。このガイドは、石油および天然ガス業界の企業が無人航空機システム(unmanned aircraft system: UAS)プログラムを開発する際に役立つものとして作成された。対象は石油および天然ガスセクターの企業だけでなく、商用 UAS 業界のサービスプロバイダーなども含む。このガイドは、UAS の安全性と確実な運用について取り上げている。

API によるガイドの目次は下記の通りである。

- DEFINING USE CASES
 - Examining Needs, Current Internal and External Capabilities, Identifying Gaps
- ASSESSING CAPABILITIES

- Determining Return on Investment, Safety Management Systems, Risk Tolerance, Company Culture
- PROGRAM ELEMENTS
 - Safety Manuals, Insurance & Liability, Flight Standards & Procedures, Regulatory Compliance, Testing & Authorization
- DATA & SECURITY
 - Data, Security
- PROGRAM IMPROVEMENT
 - Sharing Incidents and Near Misses, Capturing Lessons Learned, Stakeholder Engagement, Updating Procedures & Plans, Continuous Improvement
- FLYING IN CONTROLLED vs. UNCONTROLLED AIRSPACE
 - Outside in FAA Airspace, Uncontrolled Airspace, Inside Fixed Equipment
- CONCLUSION

目次からもわかる通り、API のガイドは米国の石油・天然ガス業界への UAS 導入の有効性および機密情報漏洩などの潜在的なリスクについて主に UAS の運用面から説明したものである。このガイドには無人航空機の防爆化やプラント内での危険区域に関する記述はなく、本事業の目的である防爆ドローンの要件仕様設計に直接役立つ情報を得ることはできなかった。

参考文献

- 1) IECEEx ウェブサイト, <https://www.iecex.com/>(アクセス日 2020 年 11 月 26 日)
- 2) IECEEx Certificates ページ, <https://www.iecex-certs.com/#/home>(アクセス日 2020 年 11 月 26 日)
- 3) API, International Electrotechnical Commission System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres, <https://www.api.org/~media/Files/Policy/Safety/API-Guide-for-Developing-a-UAS-Program-in-the-Oil-and-Natural-Gas-Industry.pdf>(アクセス日 2020 年 11 月 26 日)

8 防爆機器の衝撃試験

8.1 目的

従来の防爆検定試験ではリスク評価の方法が整理されていない高所からの落下に関して、リスク評価方法の一つとして落下衝撃に相当する衝撃試験を行った。

8.2 試験概要

地面を模擬した重量物を動かすことで落下現象を模擬する。具体的には、一般財団法人 日本自動車研究所(JARI)の所有する衝撃試験装置(HYGE)を用いて実施する。衝撃試験装置(HYGE)の台の上に、金属製の板を設置し、台を所定の速度まで加速する。台の前方には、試験体を吊るすための櫓を設置し、試験体に板を所定の速度で衝突させる。試験体を吊るしたワイヤーは衝突後、固定された枠から離れる構造になっており、試験体は前方に飛散する。そのため、前方に受け止めるための構造を有する。

8.3 衝撃試験

8.3.1 衝撃試験装置(HYGE)

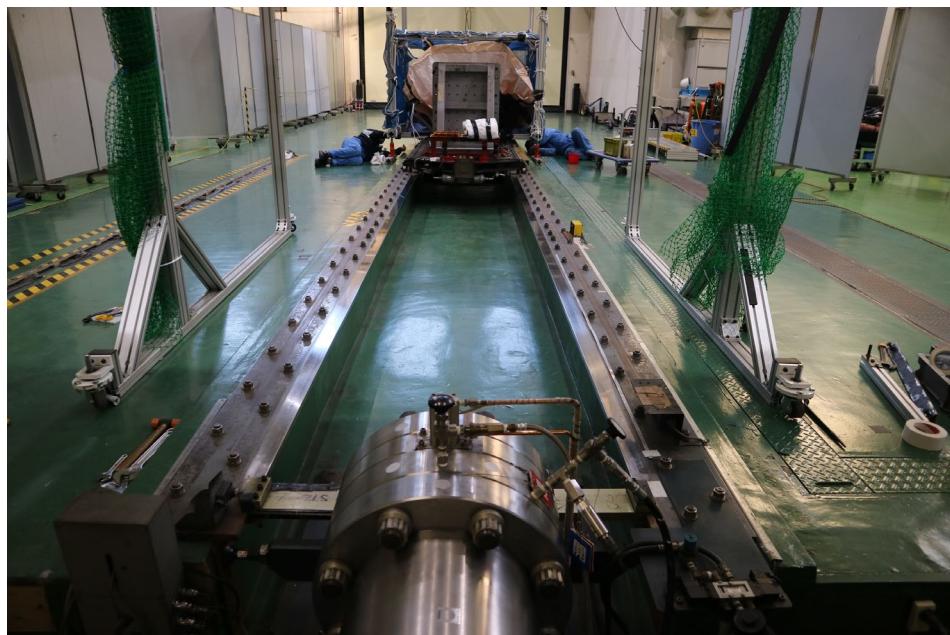


図 8-1 衝撃試験装置(HYGE)(ピストン作動部と前方レール)

実験には一般財団法人 日本自動車研究所(JARI)の所有する衝撃試験装置(HYGE)を用いた。図 8-1 は衝撃試験装置(HYGE)のピストン部(先端のみ)とその前方の溝付き(溝深さ 35cm、幅 110cm)レール部を示す。レールには長さ 3.5m の台車が設置されている。衝撃試験ではこの

台車を瞬時に加速する。シリンダー内の気体を高圧に昇圧し、所定の圧で解放することでピストンを前方へ高速で駆動する。試験ではあらかじめ台車をピストンに接した状態にしてある。

図 8-2 は衝撃試験装置(HYGE)のピストン部(先端のみ)とそれに接触した台を示す。台の上に金属製の板(タテ 900mm、ヨコ 750mm)を設置した。

レールの外に試験体を吊るすための枠組みを設置し、模擬ドローンをワイヤーで吊るした状態の写真を図 8-3 に示す。この枠組みはレールの外に設置されているので、試験時も静止状態である。試験体に対して台に設置した金属製の板(図中右下)が高速衝突した際に、ワイヤーは容易に外れるよう工夫されている。そのため、吊るされた枠組みとは無関係に試験体は飛翔する。衝突後、試験体は台の前方に設置された回収用の櫓に設置された 1t 土嚢袋と樹脂製の網により減速され、安全に回収される。

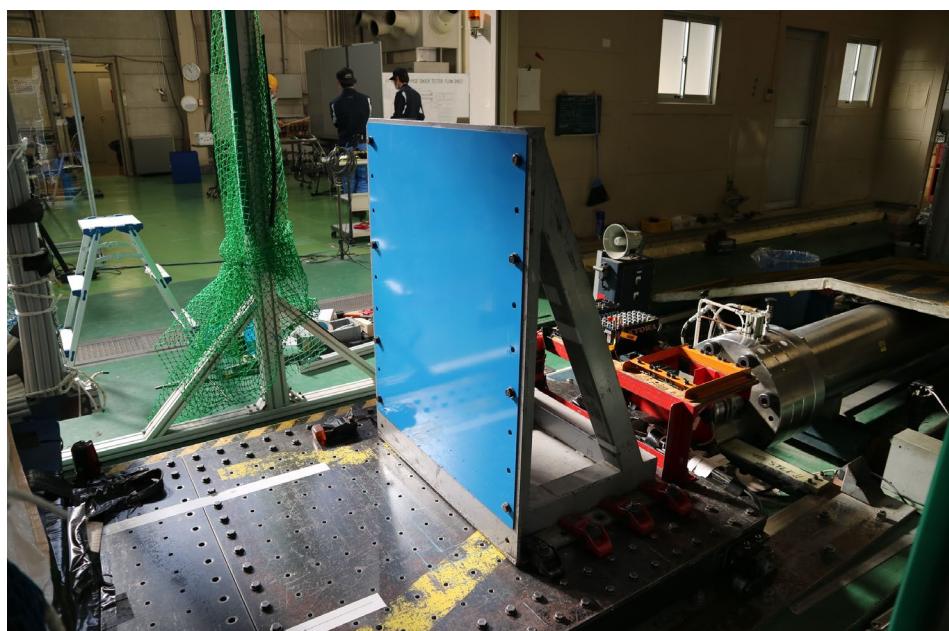


図 8-2 衝撃試験装置(HYGE)(ピストン部に接触した状態の台)

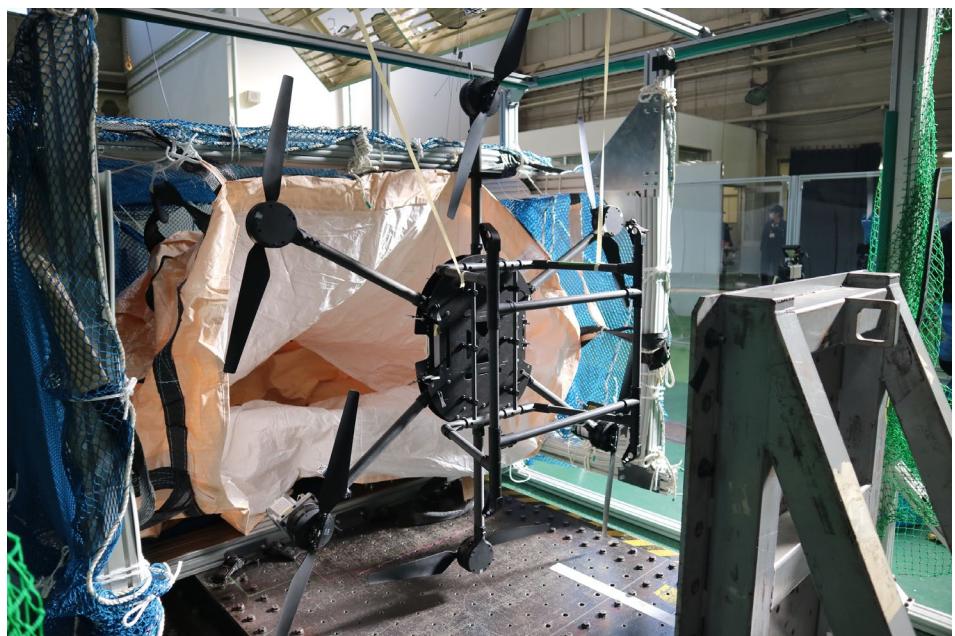


図 8-3 衝撃試験装置(HYGE)(模擬ドローンを設置した様子)



図 8-4 衝撃試験装置(HYGE)(カメラの設置状況)



図 8-5 衝撃試験装置(HYGE)(ショット後の台)

8.3.2 試験条件

衝突速度はドローンの終端速度として想定される 17m/s(時速 61.2km)とした。

No.1 模擬防爆ドローンの衝撃試験(2 ショット)

市販の防爆モーターと防爆容器をドローン用のフレームに取り付けて、模擬ドローンを構成する。衝突試験後の防爆モーターと防爆容器への影響を調査する。墜落時の姿勢が脚部フレームからの状況が多いことを受けて、衝突の方向は足フレームになるようにする。衝突試験を 3 台程度のカメラを用いて高速度撮影を実施した。

模擬防爆ドローンの構成は以下のようである。

- No.1-1 模擬防爆ドローン(安全増モーター1、耐圧モーター1、耐圧容器 1)
- No.1-2 模擬防爆ドローン(安全増モーター1、耐圧モーター1、耐圧容器 1)

本体は通常品(6 プロペラ型)を利用し、通常モーター(合計 6)の上に耐圧モーター、安全増モーターを強力接着剤で固定、耐圧容器も本体中央に強力接着剤で固定した。試験機体は 2 セット準備し、それぞれ No.1-1 と No.1-2 とした。両者は脚部フレーム以外同じ構成である。試験機体の総重量は約 17kg(バッテリー無)である。

以下にモーター、容器、ドローン本体のサイズと重量を示す。

A 社製 安全増防爆モーター(AC)	約 80 × 80 × 90mm(モーター部) + 75 × 60 × 54mm(端子部)、約 2.1kg
B 社製 耐圧防爆サーボモーター(AC)	約 72 × 121 × 108mm、約 1.9kg
C 社製 耐圧防爆容器(アルミ製)	約 225 × 135 × 155mm、約 7kg(スイッチボックス想定品)
本体 P 社製通常品(6プロペラ)	中央 約 500 × 400 × 45mm モーターーム Φ30 × 約 1350mm

機体条件(脚部フレーム構造が異なる)

No.1-1:脚部フレーム 一段形 約 740 × 510 × 400mm

No.1-2:脚部フレーム 二段形 約 850 × 510 × 500mm

No.2 防爆容器の衝撃試験

すべての試験体について防爆容器の正面方向から衝突試験を実施した。No.2-3 は衝撃緩衝効果の考察を意図した緩衝材(発泡スチロール)の効果有無の基本確認試験である。

- No.2-1 D 社製・安全増防爆(アルミ鋳製)接続端子箱利用想定品
- No.2-2 D 社製・安全増防爆(ステンレス製)接続端子箱利用想定品
- No.2-3 D 社製・安全増防爆(ステンレス製) + (厚さ約 50mm 発泡スチロール:本体正面衝突面に取り付け)
- No.3-2 E 社製・耐圧防爆カメラケース(鉄製+ガラス)

以下に容器のサイズと重量を示す。

D 社製 安全増防爆容器 (アルミ鋳製)	約 250 × 200 × 140mm、約 5kg 肉厚 約 10mm
D 社製 安全増防爆容器 (ステンレス製)	約 200 × 200 × 150mm、約 3.5kg 肉厚 2mm ステンレス鋼(SUS304)
E 社製 耐圧防爆容器 (鉄製・ガラス面有)	約 150 × 120 × 60mm、約 7kg 肉厚 約 10mm、ガラス厚さ 約 12mm(強化ガラス)

8.3.3 試験体

各試験体の写真を示す。

No.1 模擬防爆ドローン



図 8-6 No.1-1 模擬防爆ドローン



図 8-8 No.1-1 A 社製安全増防爆モーター

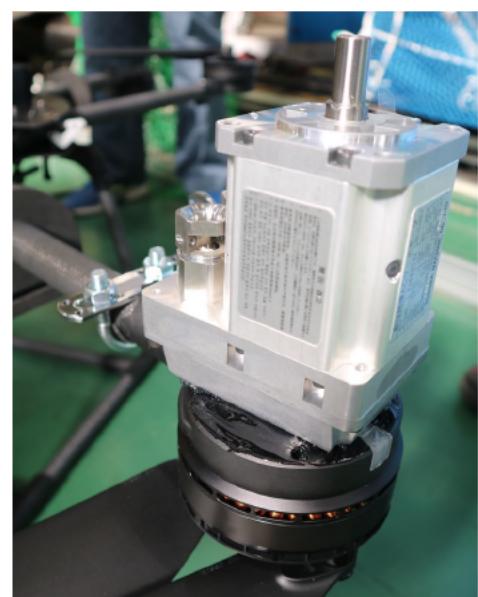


図 8-7 B 社製耐圧防爆モーター

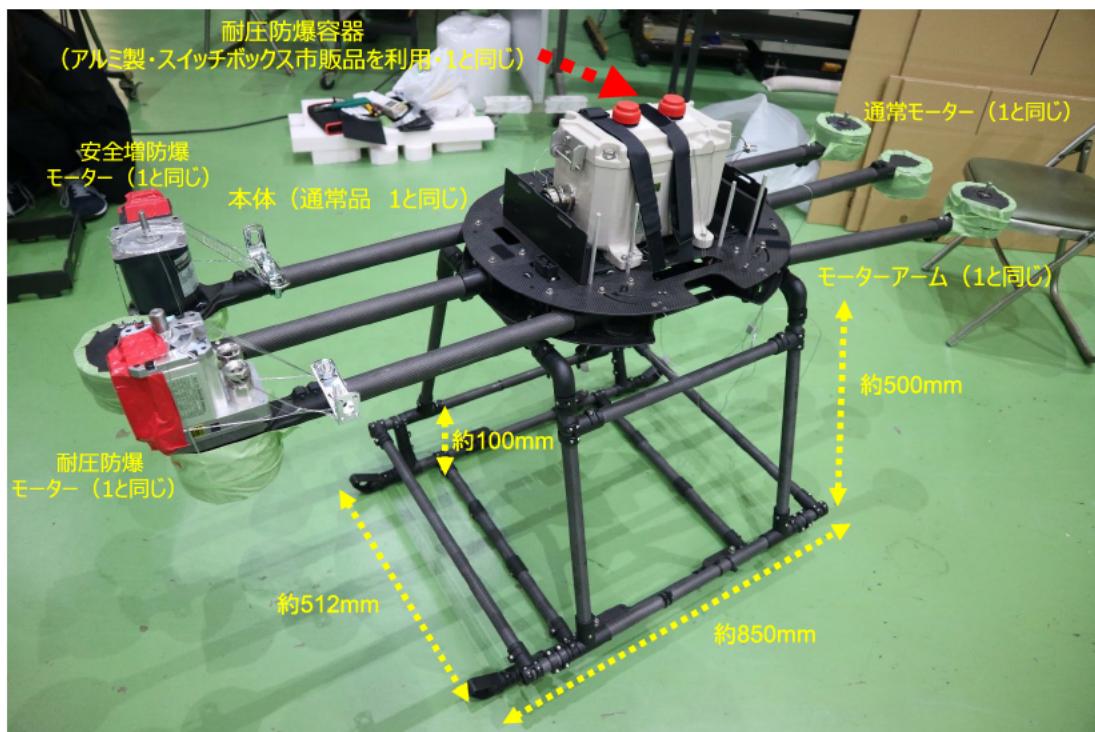


図 8-9 No.1-2 模擬防爆ドローン

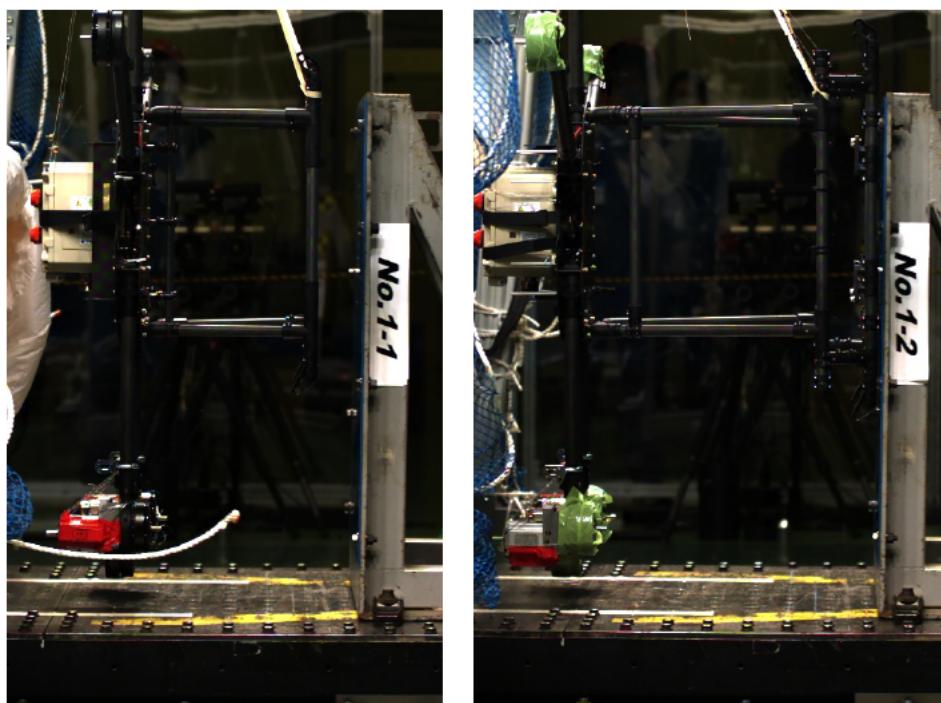


図 8-10 No.1-1 と 1-2 の脚部フレームの比較(左 No.1-1、右 No.1-2)

No.2 防爆容器の衝突試験



図 8-11 No.2-1 D 社製安全増防爆容器(アルミ鋳製)

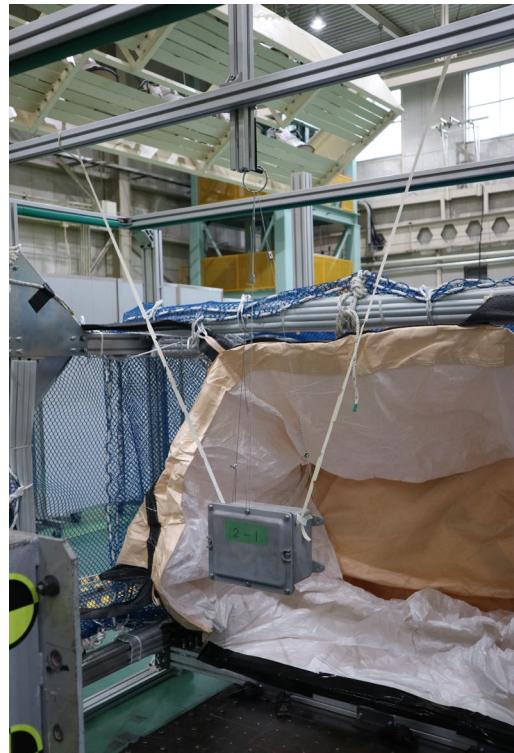


図 8-12 No.2-2 D 社製安全増防爆容器(ステンレス製)



図 8-13 No.2-3 D 社製安全増防爆容器(ステンレス製) + 発泡スチロール



図 8-14 No.3-2 E 社製耐圧カメラケース(鉄製 + ガラス)



図 8-15 No.3-2 E 社製耐圧カメラケース(鉄製+ガラス)

8.4 実験結果

8.4.1 試験後の試験体

図 8-16～図 8-23 にショット後の模擬防爆ドローン試験体の写真を示す。図 8-24 は高速度撮影画像である。図 8-26～図 8-30 にショット後の防爆容器試験体の写真を示す。表 8-1、表 8-2 に模擬防爆ドローンの衝撃試験の結果および防爆容器の衝撃試験の結果を整理した。

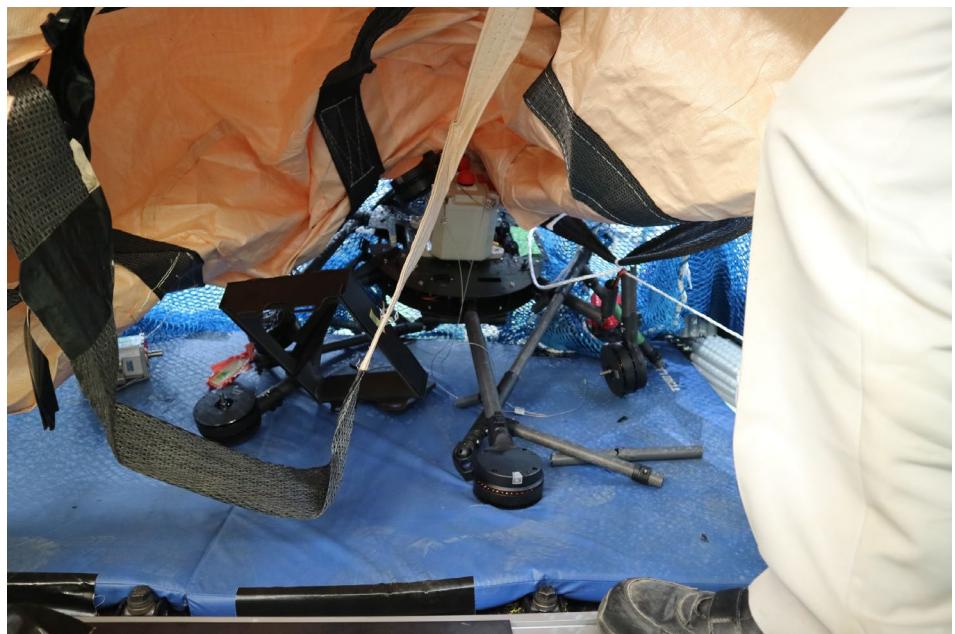


図 8-16 No.1-1 ショット後の模擬防爆ドローン(回収用檻の中)



図 8-17 No.1-1 ショット後の模擬防爆ドローン

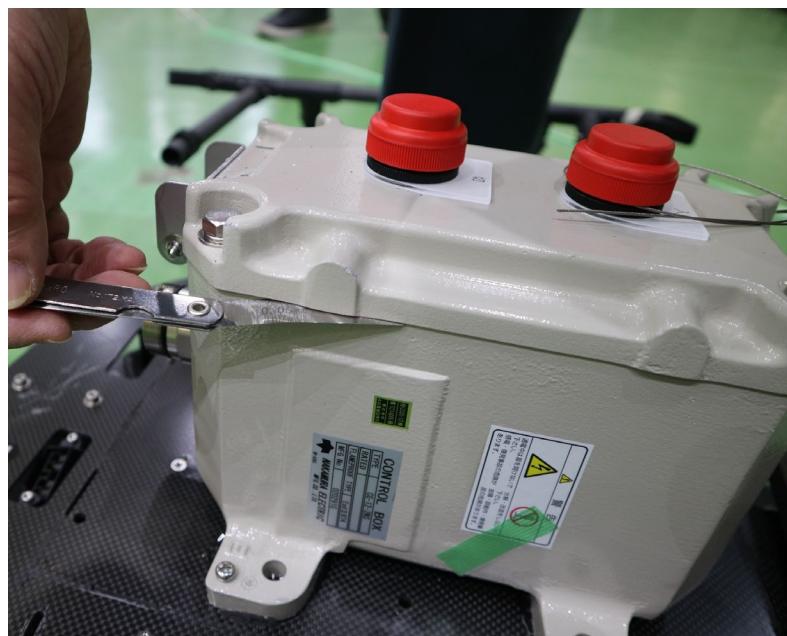


図 8-18 No.1-1 ショット後の防爆容器、C 社製耐圧防爆容器(アルミ製)

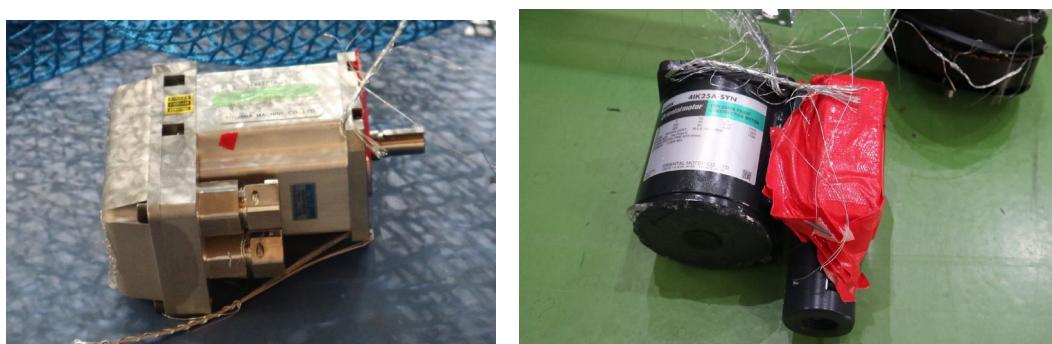


図 8-19 No.1-1 ショット後の防爆モーター

左)B 社製耐圧防爆モーター 右)A 社製安全増防爆モーター

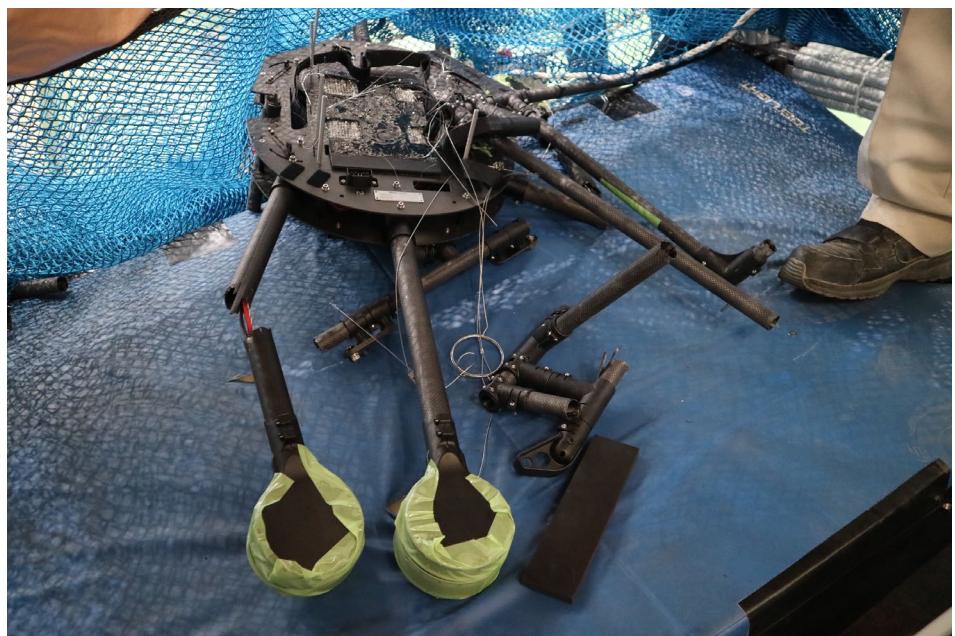


図 8-20 No.1-2 ショット後の模擬防爆ドローン(回収用檻の中)

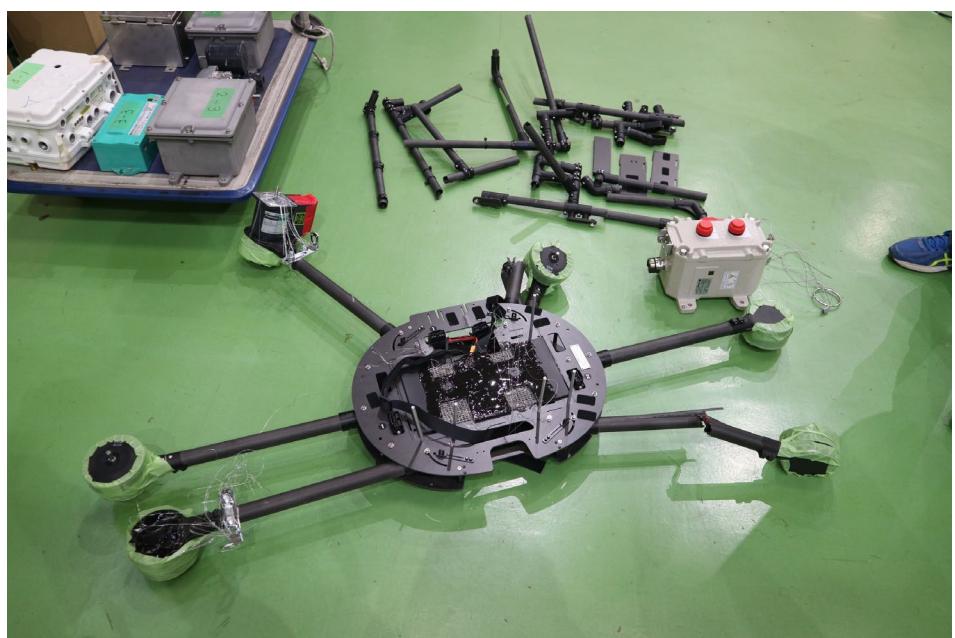


図 8-21 No.1-2 ショット後の模擬防爆ドローン

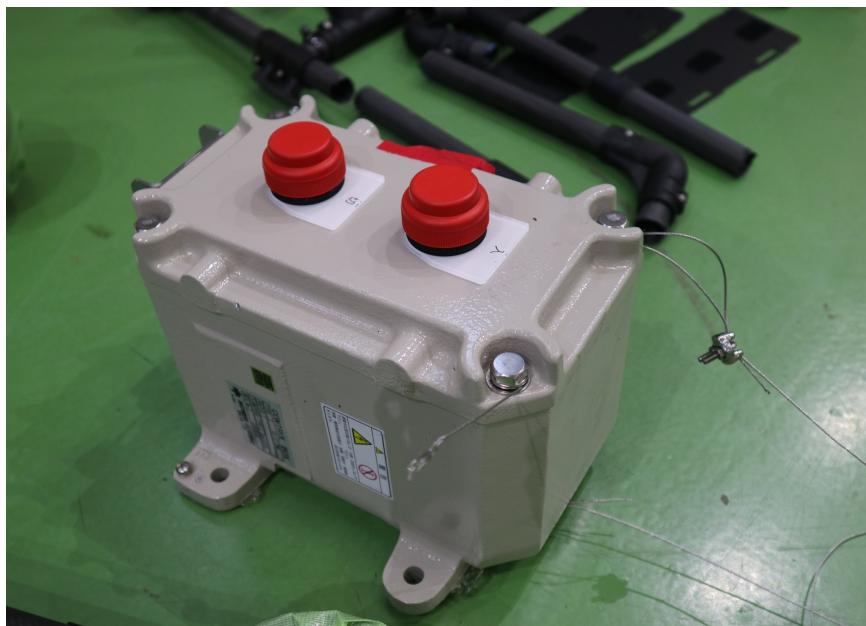


図 8-22 No.1-2 ショット後の防爆容器、C 社製耐圧防爆容器(アルミ製)



図 8-23 No.1-2 ショット後の防爆モーター

左)B 社製耐圧防爆モーター 右)A 社製安全増防爆モーター

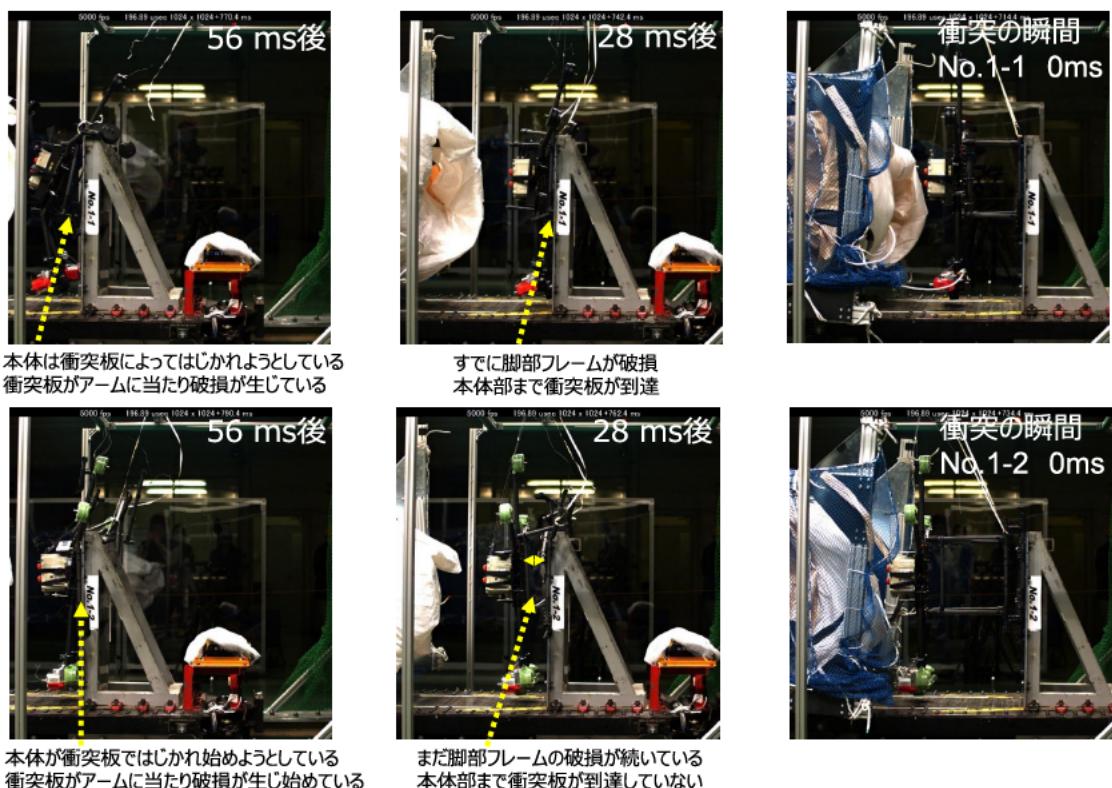


図 8-24 模擬防爆ドローンの衝撃試験結果の一例(高速度撮影画像)

表 8-1 模擬防爆ドローンの衝撃試験結果

各部	No.1-1	No.1-2
モーターアーム	ほぼすべてが破損 本体からねじ切れる状態なし (ケーブル切断なし・アーム内部動力ケーブルの効果) アーム:6本中5本が一か所以上で大きな破断	半数以上が大きな破損なし 本体からねじ切れる状態なし (ケーブル切断なし・内部動力ケーブルの効果) アーム:6本中4本は大きな破断なし
脚部フレーム	本体根元部ですべて破損 大きな塊として折れた状態	本体根元部ですべて破損 細かく破損した部分が多い状態 二段構造部の最初に衝突する箇所の破壊物が多い
本体中央	外観上の大きな破損なし 一部が潰れた状態を確認 防爆容器:試験前と比較して一部の隙間 0.02mm 拡大(防爆指針許容範囲内<スキ最大 0.15mm>)	外観上の大きな破損なし 一部が潰れた状態を確認 耐圧容器:試験前と比較して一部の隙間で 0.01mm 拡大(防爆指針許容範囲内<スキ最大 0.15mm>) 容器が本体中央からが外れた (接着効果が弱かったと判断)
安全増防爆モーター	外観上の大きな破損なし (軸を回すと試験前と比較して、回転抵抗があるなど異常を確認)	外観上の大きな破損なし (軸を回しても試験前と比較して、同様と考えられる)
耐圧防爆モーター	外観上の大きな破損なし	外観上の大きな破損なし

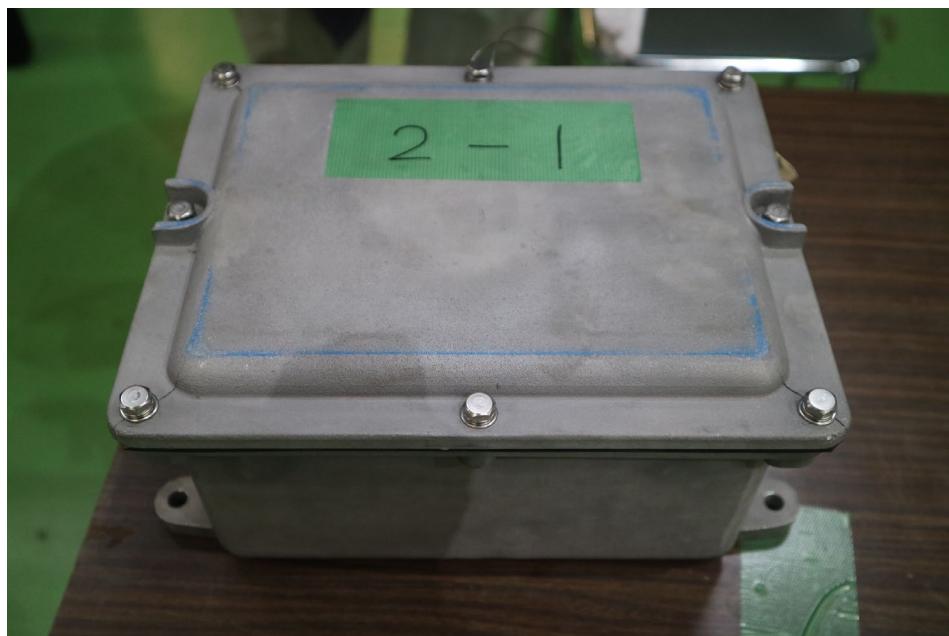


図 8-25 No.2-1 ショット後の防爆容器、D 社製安全増防爆容器(アルミ鋳製)



図 8-26 No.2-1 ショット後の防爆容器破損箇所、D 社製安全増防爆容器(アルミ鋳製)

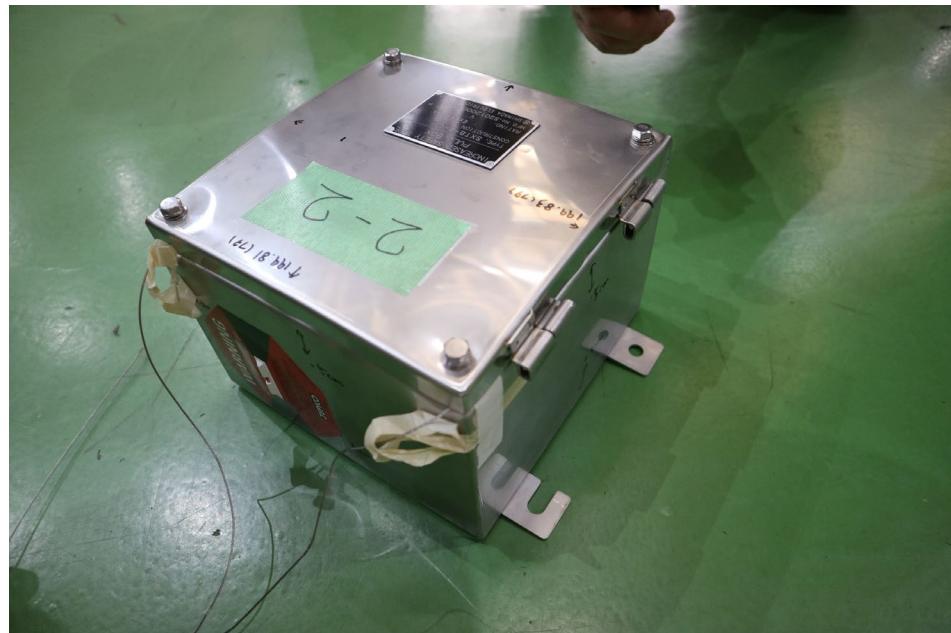


図 8-27 No.2-2 ショット後の防爆容器、D 社製安全増防爆容器(ステンレス製)

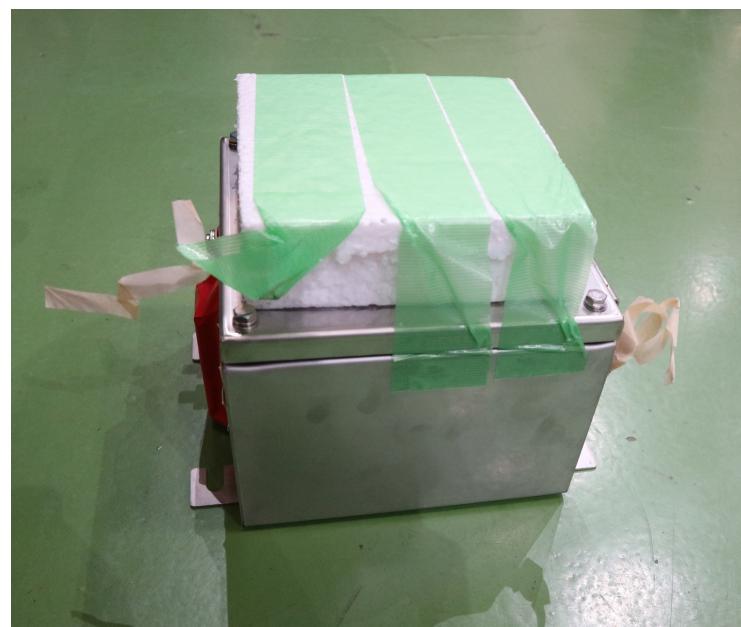


図 8-28 No.2-3 ショット後の防爆容器
D 社製安全増防爆容器(ステンレス製)前方に発泡スチロール

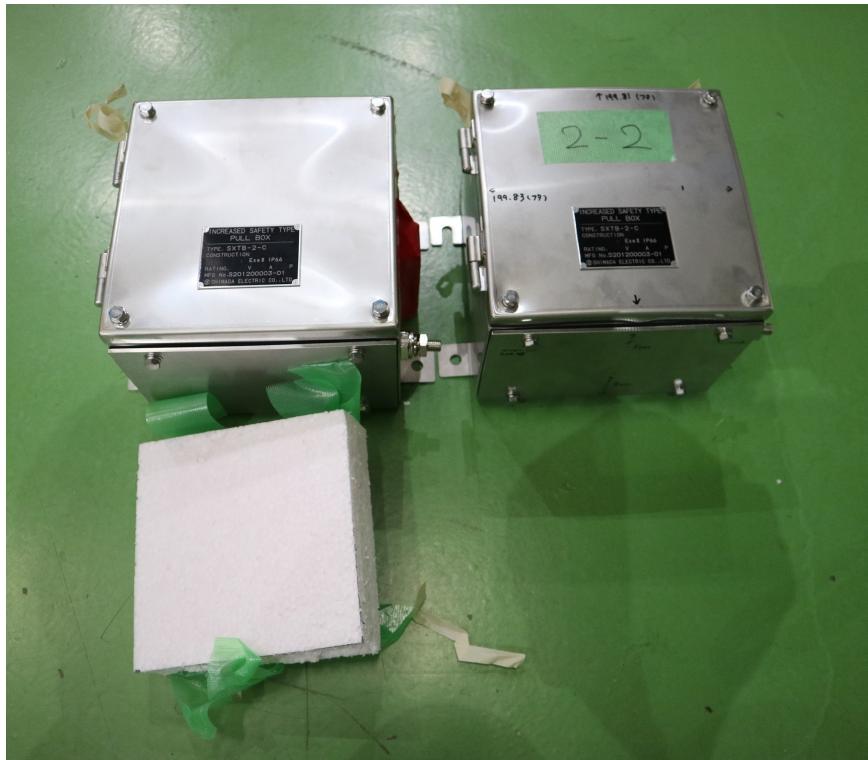


図 8-29 ショット後の防爆容器(No.2-2 と No.2-3 の比較)

D 社製安全増防爆容器(No.2-3 発泡スチロール付き)

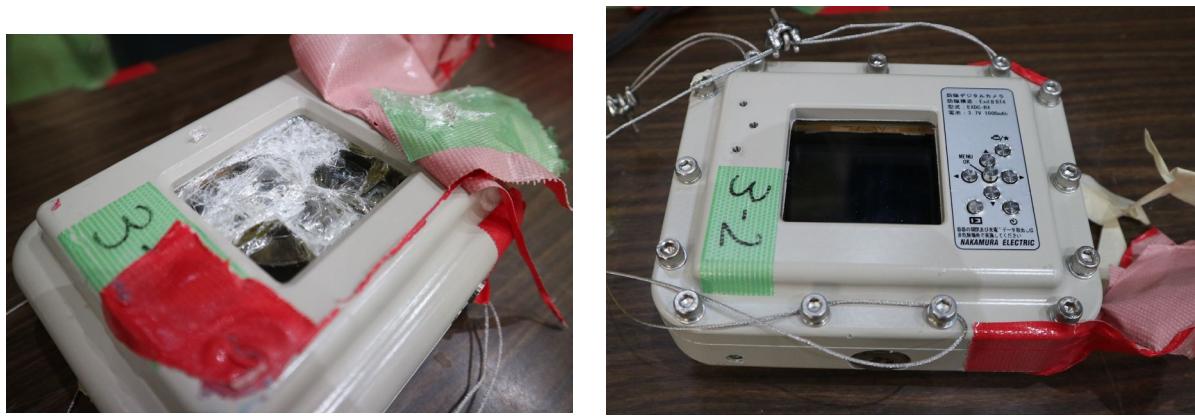


図 8-30 No.2-4 ショット後の防爆容器、E 社製耐圧カメラケース

表 8-2 防爆容器の衝撃試験結果

No.	機器名称	試験結果
2-1	D 社製 安全増防爆 (アルミ鋳製)	外観上で明らかな変化は4角の亀裂のみ(上蓋) 4角～すべてに亀裂が発生(幅約2mm、長さ30mm程度・一例) ノギス測定による結果:数ミリ程度の変化部分確認 外観上で下部の大きな変化はない
2-2	D 社製 安全増防爆 (ステンレス製)	外観上で明らかな変化は4角の変形(上蓋箇所)、中央付近の盛り上がり 水平方向変化は比較的小さい 衝撃を受ける方向(垂直)変位最大5mm 凹む 底面変形(中央付近5.75mm 凹む)
2-3	D 社製 安全増防爆 (ステンレス製) +(発泡スチロール)	外観上で明らかな変化は4角の変形(上蓋箇所)、中央付近の盛り上がり 水平方向変化は比較的小さい 取付前面中央付近4.1mm 凹む 衝撃を受ける方向(垂直)4.7mm 凹む 底面変形(中央付近4.3mm 凹む)
3-2	E 社製 耐圧防爆 カメラケース (鉄製+ガラス)	外観上で明らかな変化は観察できなかった 正面ガラス面のみ、破損 背面ガラス面も含めて外観上の変化は観察できなかった 内蔵したデジタルカメラは正常動作確認

試験結果:

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。

衝撃試験による評価基準

今回の衝撃試験条件からは次のことが考えられる。

- 耐圧防爆容器に関しては、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。
- 安全増防爆容器に関しても、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。

高度からの落下リスクを考慮した衝撃試験の対応

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、防爆機器を評価する方法の一つとして、

- 再現性のある試験機器の利用(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)
- などを行う方法としてのリスク評価は妥当と考える。

9 防爆機器の帶電試験

9.1 目的

一般的なドローンにおいて、プロペラ、筐体カバーの材質として、プラスチックやカーボンファイバーが多く使用されている。防爆形のドローンを検討した場合でも同様の材質を利用することが考えられる。このような材質を使用する場合、一般では大きな課題はないものの、防爆エリアにおいて防爆機器として使用する場合は、静電気対策が必要になる場合がある。

そこで、防爆ドローンに使用する可能性が考えられる一部の部品に関して、防爆電気機器として要求される静電気帯電性能を評価することを目的として、ドローンでの使用が考えられる素材の表面抵抗を測定し、評価を行った。

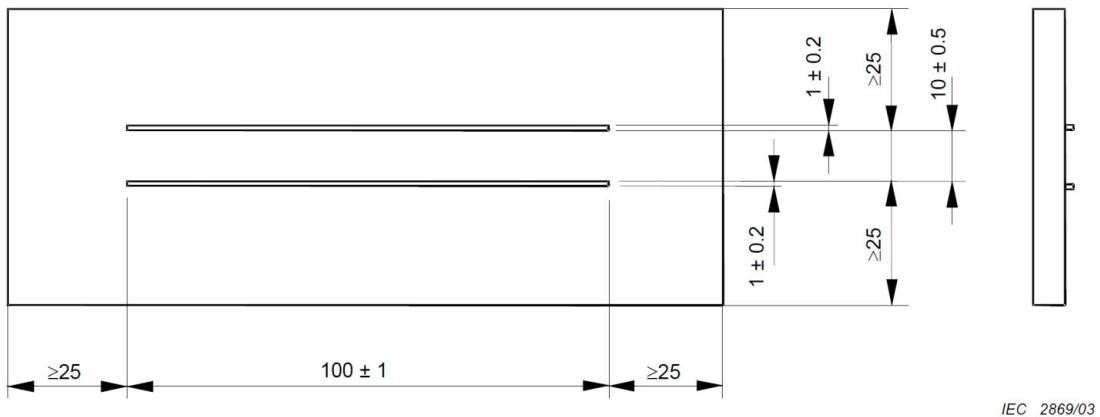
9.2 試験方法

9.2.1 準拠規格及び測定手順

労働安全衛生総合研究所技術指針国際整合防爆指針第 1 編 JNOSH-TR-46-1:2015(IEC 60079-1:2011(Explosive atmospheres – Part 0: Equipment – General requirements 整合) の箇条 26.13(容器の非金属材料部分の表面抵抗試験)に規定する試験方法に準拠して測定を実施した(実際の試験は、防爆検定試験機関に委託)。測定手順は次のとおりである。

- 1) はじめに、試験片を、まず蒸留水で、次にイソプロピルアルコールで洗浄し、最後にもう一度蒸留水で洗浄した後、乾燥させた。
- 2) 図 9-1 に示すように、試験片に導電性塗料(銀ペースト)又は導電性テープを塗布又は貼付して 2 本の平行な電極(電極の長さ 100±1 mm, 電極の間隔 10±0.5 mm)とした。
- 3) 温度(23±2)° C、相対湿度(50±5)%に維持した試験室に 24 時間以上、放置し前処理した(環境になじませる)。前処理後、引き続き、同じ温湿度条件で測定を行った。
- 4) 電極間に直流電圧 V (V)を(65±5)秒間印加し、電流 I (A)を測定した。
- 5) 表面抵抗 R (Ω)は、次式で得られる。

$$R = V / I$$



単位:mm

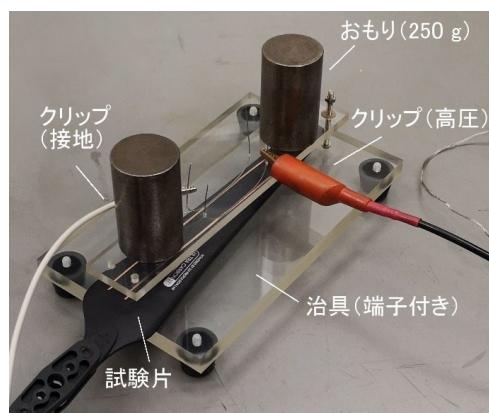
図 9-1 導電性塗料の電極を塗布した試験片の一例

9.2.2 測定機器及び試験装置の構成

試験片(電極付き)の治具への取り付け及び測定機器の接続を図 9-2 に示す。ここで、治具は試料片上の電極に配線が確実に接触するためのおもり(250 g)を備える構造である。使用した測定機器は次の通りである。

- 直流電源: YOKOGAWA 製、2560A
- 電流計(エレクトロメータ): Keithley 製、6517
- 電圧計: ADVANTEST 製、R6452E
- 測定電極: 導電性ペースト ドータイト; TYPE D-550

(ペーストが試験片に完全に付着しない場合、代わりに銅テープを用いた。)



(a) 治具への固定



(b) 測定機器及び配線

図 9-2 試験装置の構成の一例

9.3 試験試料

試験試料は、構成パーツごとに分解して試験片とし、それぞれに導電性ペーストを塗布するか、または銅テープを貼付して導電性電極を取り付けた。試験片及び電極の取付けの様子を図 9-3 に示す。



No. 1 プロペラ大(表)(銅テープ)



No. 2 プロペラ大(裏)(銅テープ)



No. 3 丸棒(左)(銅テープ)



No. 4 丸棒(右)(銅テープ)



No. 5 プロペラ(表)(銅テープ)



No. 6 プロペラ(裏)(銅テープ)



No. 7 ボックス短(銀ペースト)



No. 8 ボックス長(銀ペースト)



No. 9・10 ボディ底部(銀ペースト)



No. 11 ボディ上部(銀ペースト)

図 9-3 試料の外観(電極の取付け位置)の一例

9.4 測定結果

測定結果を表 9-1 に示す。

表 9-1 ドローン材料の表面抵抗(測定値)

材料番号	電圧 V (V)	電流 I (A)	表面抵抗 R (Ω)	備考
1	1	5.9×10^{-4}	1.7×10^3	
2	1	6.6×10^{-4}	1.5×10^3	
3	0.1	2.6×10^{-3}	38	
4	0.01	3.1×10^{-3}	3.3	
5	1	2.3×10^{-2}	43	電極長 50mm、補正済
6	1	1.6×10^{-2}	64	電極長 50mm、補正済
7	0.1	4.2×10^{-3}	24	
8	0.1	1.9×10^{-3}	53	
9	500	1.9×10^{-11}	2.6×10^{13}	厚さ 0.5mm
10	500	2.0×10^{-10}	2.5×10^{12}	厚さ 0.5mm
11	500	2.1×10^{-10}	2.4×10^{12}	厚さ 0.5mm

9.5 帯電性評価

この試験結果から、防爆機器の材料としてその帯電性を評価すると以下のことが示された。

- 1) プロペラ(大及び小)、丸棒及びボックス(長、短)は、いずれもカーボンファイバー製であり、その表面抵抗は $3.3\Omega \sim 1.7\text{ k}\Omega$ と小さく、導体に分類できるものと考えられる。これから、帯電性はないと評価できる。ただし、絶縁材が介在し非接地導体になると帯電するのみならず、火花放電を発生する可能性が考えられるので、これらの材料で作られた部材は、確実に相互に導通するように組み立てることが望ましいと考える。
- 2) ボディはプラスチック材料で作られており、その表面抵抗は $1012\sim 1013\Omega$ のオーダーである。これから、JNIOSH-TR-46-1:2015 に定める帯電防止材料の条件($R < 109\Omega$)を満たさないため、帯電性があると評価される。ただし厚さが 0.5 mm であるため、帯電しても着火性放電を発生する可能性は低いと考えられ、グループ IIC(水素、アセチレンなど)以外の物質が対象であれば、ドローンの材料と使用することは可能と考えられる。なお、グループ IIC も対象とする場合、厚さは 0.2 mm 以下としなければならない(その他のグループでは 2 mm 以下)。

9.6 まとめ

防爆ドローンを想定した、通常のドローンで使用されている材料を対象に、防爆構造電気機器に適用される試験方法を用いて、その表面抵抗を測定した。その結果をまとめると次のとおりである。

- カーボンファイバーを用いた部材は、最大でも 103Ω の測定値が示された。これから、非帯電性と評価できる。
- プラスチック材料を用いた部材は、 $1012\sim 1013\Omega$ の測定値が示された。これから、帯電性であると考えられるが、厚さが 0.5 mm しかないため、グループ IIC のガス以外であれば、そのまま使用しても問題ないと考えられる。また、グループ IIC も対象とする場合は、厚さを 0.2 mm 以下にするなどの改良が必要と考えられる。

10 今後の展望

10.1 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・技術的要件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、今後も更なる検討課題として、特殊防爆構造に関する検討（10.2 節）及びモーターに関する防爆機能の確認に関する検討（10.3 節）を示す。

10.2 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 60079-33¹⁾）。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⁾）。

ここでは、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た。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。

10.3 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つたため、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、現時点での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） JNOSH-TR-46:2015, (2015),
<https://www.jnosh.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)

防爆ドローン性能仕様

1

目次

1. 防爆ドローンの性能仕様案 概要 p.3
2. 防爆ドローンの性能要件 p.4
3. 機体～既製部品による構成 p.6
4. 課題 p.8
5. 落下耐性：予防的要件 p.10
6. 性能に影響する項目 補足 p.12
7. 落下耐性：事後要件 p.14
8. 性能要件まとめ p.17
9. 今後にむけた提案 p.19

2

1. 防爆ドローンの性能仕様案 概要

防爆化された既製部品で仮想的に防爆ドローンを構成した結果：
重量 約34kg、想定離陸電力 5000W、想定巡航時間 90秒

↓ 実用的ではない

仮想ドローンの課題から、**求められる性能**および性能を満たすための**対応案**を抽出

仮想ドローンの課題	求められる性能	対応案
航続時間が短い (電力量不足)	航続時間	<ul style="list-style-type: none">防爆バッテリーの新規設計新型バッテリーの検討（全固体電池など）
本体重量に対する モーター出力が小さい (電力不足)	揚力余裕度	<ul style="list-style-type: none">モーター、プロペラの最適化
安定性が足りない (重量バランス 不適切)	運動性能	<ul style="list-style-type: none">運転制御方式の変更（制御周波数向上、PID設定変更等）外乱に対する姿勢制御能力の定量的検証回転センサ付きモータの採用（レスポンス性向上は確認済み）高トルクモータ採用（俊敏な回転数変化を実現）
落下時の性能が 考慮されていない	落下耐性	<ul style="list-style-type: none">衝突試験を実施し、防爆構造が破綻しない構造を確認する落下や衝突の際に電源供給を停止する仕組みの装備

求められる性能として4種が抽出された → 対応案を上表に、性能を判定する指標を表2に提示

3

2. 防爆ドローンの性能要件 (1)

<基本的な考え方>

- 防爆機器としてのドローンを既製部品により構成し、課題を抽出する。
 - 防爆ドローンとしての特殊な事情を考慮する。
※ただし対応の選択肢を規定することは望ましくなく、具体的な実装については規定しない。
基本的に具体的な実装例は規定や提示をすべきではないが、他に選択肢が無いと思われる場合は注釈を追加した上で例示する。
- 今回スコープ外としたが、ICE（内燃機関）、燃料電池など今後検討が必要と考える

<既製部品による構成>

- 防爆モータ、およびバッテリーと電気部品を格納可能な防爆ボックスを搭載したドローンを構成し、
- この課題から対応策を検討し、
- 対応策群から性能要件を定義する。

4

2. 防爆ドローンの性能要件 (2)

<防爆ドローンとして想定される特殊な状況>

- 1) 重量増（通常のドローン比）
- 2) 落下や衝突

重量増については以下の二点に分けられる。

- 1-1) 離陸重量の増加
- 1-2) 慣性モーメントの増加

落下や衝突は現状で防爆検定に規定されていないため、「落下や衝突により防爆性が破綻しない」ことを基準として要件を定義する。

- 2-1) 事象に至らないための要件～予防的要件

・飛行性能

- 2-2) 事象が発生した際の要件～事後要件

・構造（材料についてはドローン固有の検討事項ではない）
・壊れ方設計
・インターロック

5

3. 機体～既製部品による構成

・防爆ドローンの現状（現状で調査範囲内で見つけることはできない）

海外で事例を見ることができたが、正規の認証（ATEX指令）が満たされておらず、現状販売されていない。また、限定的な用途での防爆となっている。

・現在販売されており、入手可能な部品で構成する場合、以下のような構成となる。

1) 防爆モータ

A社製 耐圧防爆モータ（図1）（性能は表1を参照）

3.9kg（モータ）× 4個 + 2.3kg（アンプ）× 2個 = 20.2kg



図1 防爆モータ

出典：A社Web

2) 防爆ボックス

B社製 アルミニウム耐圧防爆ボックス

周辺プラグ含めて約5.2kg

3) 防爆対応可能なバッテリー

C社製

235g × 6直列 = 約1.4kg (44.4V 2860mAh)

6

3. 機体～既製部品による構成

- 前記の部品にて構成される機体
- 重量：約34kg (8.5kg/rotor)
- 想定離陸電力：5000W程度
- 想定巡航時間：90秒
- ※専用のプロペラ設計が必要と考えられる

表1 防爆モータ仕様

出典参照：A社Web

モーター出力	200W
防爆型式検定	耐圧防爆検定合格品
モーター方式	マグネット8極3相Y結線
定格トルク	0.404N・m
最大トルク	1.91N・m
定格回転数	3000r/min
電動機慣性モーメント	$0.18 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
許容最大慣性モーメント	$0.36 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
質量	1.9kg
動作温度範囲	0～+40°C

7

4. 課題

<課題>

- 航続時間が短い（電力量が足りない）
- 本体重量に対するモーター出力が小さい（電力が足りない）
- 安定性足りない（重量バランスが不適切）～瞬時電流供給能力が足りない、回転数制御が遅い
- 落下・衝突時の性能が考慮されていない

<開発要素>

1) 電力量増加

- 対応案1：防爆バッテリーの新規設計（必要な電力量を持つバッテリーの防爆化）
- 対応案2：異種バッテリーの採用（全個体電池など。ただし現時点で技術的に不確実）
- 算出例
離陸重量10kg、10Ah (6cell) のバッテリーとすると電力量は約190Wh (80%利用時)
単位重量あたり電力を 150W/kg (一般的なマルチコプターでの参考値) とすると、
 $190\text{Wh} / (150\text{W/kg} \times 10\text{kg}) = \text{約}7\text{分半}$

2) 出力増加

- 対応案1：モータの大型化（必要な重量に対応可能なモータの防爆化）
- 対応案2：プロペラの大型化（モータに合わせたプロペラの設計）

8

4. 課題

<開発要素～続き>

3) 安定性向上

- ・ピッチ（前後方向）、ロール（左右方向）、ヨー（水平回転方向）の慣性モーメントがすべて大きくなり、重量バランスが特異なものとなる。以下のような対応が検討可能である。
 - ・対応案1：フライトコントローラーの制御則変更（制御周波数の向上、PID設定変更など）
 - ・対応案2：センサ付きモータの採用（レスポンス性向上は確認済み）
 - ・対応案3：高トルクモータ採用（俊敏な回転数変化を実現）
 - ・検証には、NEDOが公開した性能評価基準（<https://www.nedo.go.jp/content/100898607.pdf>）の研究開発結果を参照。

4) 落下耐性向上

- ・落下で機体が損傷した際、防爆構造が破綻しないことが求められる。
 - ・対応案1：予防的対策（詳細は次節以降で記述）
 - ・対応案2：発生後対策（詳細は次節以降で記述）

9

5. 落下耐性：予防的要件（1）

<飛行性能に関する規定>

- #### 1) 重量バランス（特に水平方向～ピッチとロール～の小規模な動きに関する慣性モーメント）
- 特にモータの防爆構造の重量増が大きいため、周辺部の重量が増加し、この結果ピッチ（前後方向の傾斜）およびロール（左右方向の傾斜）の姿勢制御則が大きく変化する。
- ・PID設定など基本的調整で対応できる範囲であれば問題なし。
※ PID制御は制御工学におけるフィードバック制御の一種であり、6軸や9軸のセンサ情報を入力値、モータ回転数を出力値として、目標値との偏差、その積分、および微分の3つの要素によって行うもの。
 - ・ただしモータとプロペラの対応速度は物理的な限界があるため、基本的に外乱に対する姿勢制御能力は悪化する。この定量的な検証を行う必要がある（外乱耐性に関する計測方法案については経済産業省公開の性能手順評価書を参考に簡便な計測手法を参照）
<https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200529004/20200529004.html>

10

5. 落下耐性：予防的要件 (2)

<飛行性能に関する規定～続き>

2) カメラ自由度の低下を補う機能による制約

- 一般的にはカメラをジンバルに装着し、撮影方向の自由度を高めているが、カメラ自体を防爆構造として可動させることが難しい（ジンバル構造を防爆対応することが困難なため）。また可視光以外を対象とする撮像装置の場合、防爆構造として採用する外殻の対象波長に対する吸収率（透過率）を考慮する必要がある。
- ・実装の困難さが予測されるが、防爆構造のジンバルを否定しない要件とする。
 - ・ジンバルを装備しない場合、カメラ方向の制御は機体の水平回転方向制御に依存するため、必要な十分な緻密さを有する必要がある。
 - ・吸収率については使用するカメラ（撮像素子）に依存するため、これを規定しない。
(市販カメラ利用方法の提示)

3) 各種センサの制約

- 露出しているGNSSアンテナ、通信アンテナ、その他センサが防爆対応している必要がある。こうした対応により、GNSSアンテナや制御・映像信号を送受信する通信アンテナについては、送受信性能に影響が及ぶ可能性がある。
- なお、その他のセンサ（ガスセンサ・LiDARなど）については、製品ごとに大きな差異があり、本検討では対象としない。
- ・受信性能の確認が必要なため、特に次の二点について計測方法案を提示する
 - ・GNSSアンテナ、通信アンテナ（LTE、2.4G、920Mなど）

11

6. 性能に影響する項目 補足(1)

以下の項目については予防的要件として留意すべきであるが、「防爆ドローン」ならではの要素が無い、もしくは希薄となるため、**検討対象としない**。

<電磁波外乱>

- ・プラント施設の検査や点検を行う場合、通常の環境よりも多くの磁性体（鉄など磁化率の高い構造体）が想定されるため、特に地磁気センサなどに依存したドローンはこれを留意する必要がある。

<地磁気センサ>

- ・地磁気センサ異常を回復可能もしくは補助可能な手法を有すること。
- ・可能であれば方位検知を地磁気センサに頼らないこと。
- ・電磁波外乱と同様で、一般的な運用に比較して地磁気を正確に検知できない環境が想定される。

<機器信頼性>

- ・一般的なドローンに比較して重量が増加する傾向があるため、同じモータ・プロペラを使う場合回転数が上昇し、各部に機械的負荷が増える傾向がある。このため効率や熱なども勘案し、耐久性も考慮する必要がある（離陸重量に応じた適切なモータとプロペラを選定する場合はこの限りではない）
- ・なお、上記事項は大型ドローンを設計する場合には、一般的に検討される事項であるため、検討対象から除外した。

12

6. 性能に影響する項目 補足(2)

<モータ余裕度>

- ・前記項目と同じ理由から、離陸重量に対し、トルクと回転数と揚力について十分な余裕を持つ設計とすること。

<通信>

- ・外乱に対して十分な耐性を有する通信方式（周波数ホッピングなど）を採用すること。
- ・可能であれば、異なる二種類以上の電波方式により制御可能であること。
- ・防爆構造によっては送受信性能が悪化することがあるため、留意する必要がある。

<カーボン素材の耐久性の課題（表面コーティングの制約）>

- ・筐体の帯電性などに制約があるため、一般的に用いられる耐紫外線・耐油性などを目的としたコーティングを施すことができないケースが想定される。
- ・長期間にわたる機能と性能維持のため留意する必要がある。

<着脱構造の制約>

- ・電池は容易な交換が望まれているが、コネクタなどの接続部に関して制約がある。
- ・着脱構造の変更は特定周波数での振動や接続部の耐久性に影響するため、十分留意する必要がある。
- ・汎用の接続・分岐箱の基準は改めて引用する必要はない。

13

7. 落下耐性：事後要件(1)

<構造・壊れ方設計>

- ・一般的な運用速度は落下に対して高くなく、またプロペラガードなど接触耐性を高める器具が装備される前提として、衝突は考慮しない。
- ・落下については、過去の性能評価基準（NEDOプロジェクト）において、以下のような事項が示されている。
 - 1) 終端速度はほぼどのドローンも毎秒15m/sとなる
参考：NEDOが公開した性能評価基準（<https://www.nedo.go.jp/content/100898607.pdf>）
 - 2) 落下の際脚部が地表に接触し、引き続きアームおよび本体が接触し、これらの構造が衝撃を吸収する効果がある。
- ・上記を鑑み、
15m/s以上の衝突試験（本試験では17m/sで設定）を実施し、防爆構造が破綻しない構造を確認する。今回の試験、および以前の水素タンク搭載の際の衝突試験の知見から、機体に耐衝撃構造を装備することで十分に防爆構造を保護しうる構造は実現できると思われる。
次ページは今回の試験の様子、および水素タンク衝突試験の際に検討される耐衝撃構造の例である。

14

7. 落下耐性：事後要件(1)図



図4 防爆構造+ドローン 衝撃試験の様子

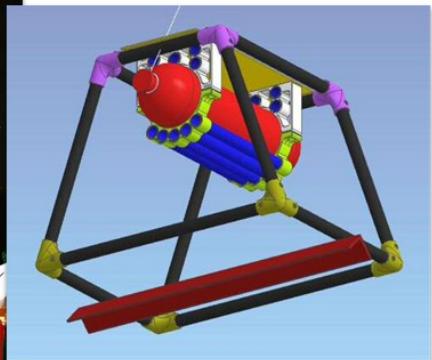


図5 水素タンク耐衝撃構造例

15

7. 落下耐性：事後要件(2)

<インターロック>

- ・落下や衝突の際に電源供給を停止する仕組みが装備される場合は以下を勘案する。
 - 1) 電源供給停止基準が妥当である（同時に誤停止が抑止されている）
 - 2) 電源供給停止装置の構造・構成が妥当である。
- 上記を満たす場合、バッテリーを含む防爆構造以外の防爆構造については、落下と衝突を勘案する必要はない。
- ・参考情報
現状では、落下の際地物と人への障害を低減するため、落下を検知してモータを停止する機能が一部のドローンで実装されている。
ドローンの落下はPCやスマートフォンの落下検知（規定時間0Gを検知）とは異なるロジックでの検出が必要であり、今後の継続的な検討が必要である（ただし、落下検知手法については本要件書のスコープ外である）

16

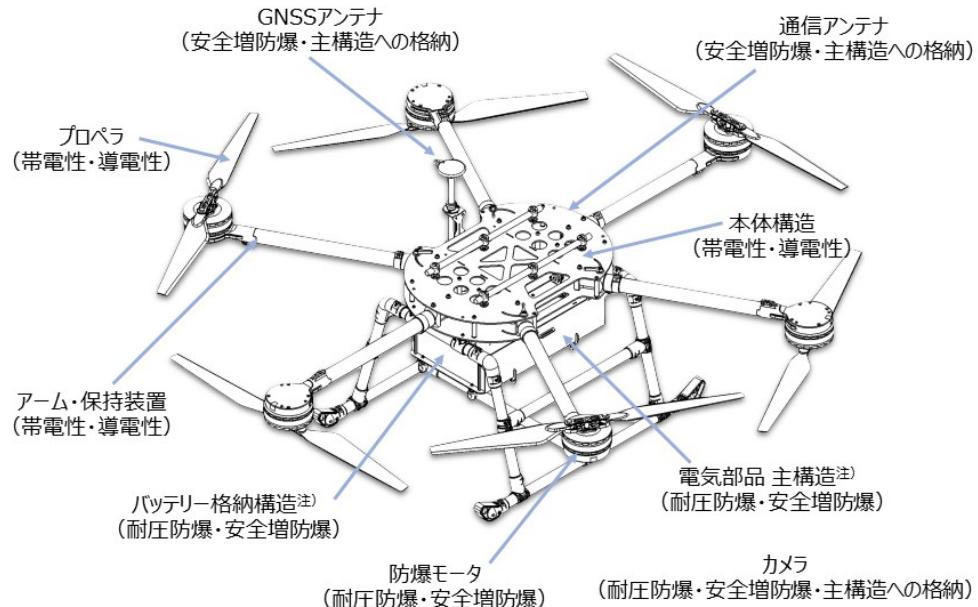
8. 性能要件まとめ

表2 性能を基準とした要件

項目	説明	指標（例）
揚力余裕度	既存の機体を改造して製作する場合、重量増加による揚力の余裕度が低下する。十分な性能範囲であってもこの余裕度は外乱耐性に影響するため、余裕度に留意する必要がある。また、センサなどを後付けする場合の重量増加も含めて勘案する。	離陸重量が最大離陸重量の60～70%程度であること
航続時間	想定する作業時間を明確に規定する	作業時間+5分を基準に設計する。もしくは航続時間-5分を作業時間として規定する
運動性能	ユーザ操作による最大のピッチ方向操作とロール方向操作、およびスロットル操作で不安定にならないことを確認する。	ピッチ方向、ロール方向、スロットルについて最大と最小を毎秒2回、毎秒1回で繰り返し不安定な挙動とならないこと
落下耐性1	通常の姿勢で落とした場合、フライトコントローラーおよびバッテリーを含む防爆構造が破綻しないこと。	17m/sでの落下で防爆構造物にかかる加速度が一定値以下であることを確認する（適切な衝撃緩和構造を持つ） ※本数値を明示するには更なる検証が必要
落下耐性2	上記落下耐性1が満たせない場合、防爆構造物への電源遮断で対応する。	落下の際、電源供給を停止できること

17

8. 性能要件まとめ



注) 各種機器が搭載されるためバッテリー・電気部品は通常ドローンの上部に格納される

図6 ドローン構成を基準とした要件

18

9. 今後に向けた提案

継続して検討すべき課題

- モーターについては既存の検定合格基準から踏み込み、できるだけ軽量化できる構造を検討する
- 防爆構造だけでなく、墜落などの場合に周囲構造物へ影響を与えない構成を検討する。具体的には開傘の仕組みを持つパラシュートや衝撃を緩和する保護機構などである（プラント等でも使用可能な火薬なども検討）。
- 検定合格後には、それらの知見を活用し、粉塵に対応した防爆構造を検討し、鉱山などプラント以外の市場開拓も検討したい

新しい防爆規格により小型防爆モーターが実現された場合のドローンのメリット

- より小型化が可能となるため、耐風性を維持する範囲でより狭隘な空間でのフライトが可能となり、点検範囲、点検できる設備の種類が格段に多くなることが予想される
- より多様なモーターを利用することができますため、機体に最適なモーターを選択できるようになり、機体設計の自由度が犠牲にならない
- 現状の重量バランスと大きく変わらない構成（重量）となるため、墜落などにおける衝撃緩和のための構造が比較的容易となる

別添 2

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

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

目次

<u>1</u>	<u>背景と目的</u>	1
<u>2</u>	<u>適用範囲</u>	2
<u>3</u>	<u>一般事項</u>	3
<u>3.1</u>	<u>関連法令等</u>	8
<u>3.1.1</u>	<u>航空法</u>	8
<u>3.1.2</u>	<u>電波法</u>	10
<u>3.1.3</u>	<u>労働安全衛生法</u>	12
<u>3.1.4</u>	<u>高圧ガス保安法</u>	12
<u>3.1.5</u>	<u>消防法</u>	13
<u>3.2</u>	<u>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</u>	14
<u>3.3</u>	<u>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</u>	15
<u>3.4</u>	<u>国内における防爆型式検定</u>	15
<u>3.5</u>	<u>防爆に関する用語</u>	16
<u>3.5.1</u>	<u>爆発性雰囲気用の電気機器のグループ</u>	16
<u>3.5.2</u>	<u>防爆構造</u>	16
<u>3.5.3</u>	<u>機器保護レベル(EPL)</u>	18
<u>3.5.4</u>	<u>危険区域の分類</u>	19
<u>3.6</u>	<u>海外の防爆ドローンの開発・販売状況</u>	15
<u>4</u>	<u>防爆ドローンを危険区域で飛行させる際の課題</u>	18
<u>4.1</u>	<u>現存する防爆指針の範囲内での課題</u>	18
<u>4.2</u>	<u>落下した場合の防爆機能への影響</u>	6
<u>4.3</u>	<u>衝突・落下した場合の衝撃火花</u>	6
<u>5</u>	<u>ガイドラインの方針</u>	23
<u>6</u>	<u>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</u>	24
<u>6.1</u>	<u>危険区域と防爆適応規格</u>	34
<u>6.2</u>	<u>ゾーン2用防爆ドローン</u>	36
<u>6.2.1</u>	<u>モーター</u>	36
<u>6.2.2</u>	<u>バッテリー</u>	37
<u>6.2.3</u>	<u>カメラ</u>	38
<u>6.2.4</u>	<u>その他</u>	38
<u>6.3</u>	<u>ゾーン1用防爆ドローン</u>	38

<u>6.3.1 モーター</u>	39
<u>6.3.2 バッテリー</u>	39
<u>6.3.3 カメラ</u>	39
<u>6.3.4 その他</u>	39
<u>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</u>	31
<u>7.1 落下のリスク評価に関する考察</u>	31
<u>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)</u>	31
<u>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)</u>	32
<u>7.2 インターロック</u>	32
<u>7.3 材料に関する考察</u>	33
<u>8 今年度の事業の評価及び将来の課題</u>	35
<u>8.1 今年度の事業の評価</u>	72
<u>8.2 特殊防爆への対応</u>	72
<u>8.3 ドローン用モーターに関する IEC 防爆規格の検討</u>	76
<u>ANNEX A: 構造仕様と防爆型式検定における試験</u>	1
<u>A.1 構造仕様</u>	1
<u>A.1.1 帯電試験</u>	1
<u>A.1.2 衝撃火花</u>	1
<u>A.2 必要な試験項目</u>	1
<u>A.2.1 衝撃試験</u>	1
<u>A.2.2 落下試験</u>	2
<u>A.3 ゾーン 2 用防爆ドローン</u>	3
<u>A.4 ゾーン 1 用防爆ドローン</u>	6
<u>ANNEX B: 危険区域への一時的侵入に関するリスク評価</u>	7
<u>ANNEX C: ユースケース調査結果</u>	10
<u>C.1 ユースケースと防爆ドローンに求められる機能</u>	31
<u>C.2 ユースケースと求められる防爆性能</u>	32
<u>C.3 まとめ</u>	33
<u>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</u>	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、現時点では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、使用的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に危害を与える、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る、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。

(検索、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検索、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。

キ) 日中(日出から日没まで)に飛行させること

ク) 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)

ケ) 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

コ) 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

サ) 爆発物など危険物を輸送しないこと

シ) 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・ニ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⁾

分類	無線局 免許	周波数帯	送信出 力	利用形態	備考	無線従事 者資格
免許及び 登録を要し ない無線 局	不要	73MHz 帯等	※1	操縦用	ラジコン用 微弱無線局	不要
	不要 ※2	920MHz 帯	20mW	操縦用	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	
		2.4GHz 帯	10mW/ MHz	操縦用画像 伝送用デー タ伝送用	2.4GHz 帯 小電力デー タ通信シス テム	
携帯局	要	1.2GHz 帯	最大1W	画像伝送用	アナログ方 式限定※4	
携帯局陸 上移動局	要 ※3	169MHz 帯	10mW	操縦用 画像伝送用 データ伝送 用	無人移動体 画像伝送 システム (平成28年 8月に制度 整備)	第三級陸 上特殊無 線技士以 上の資格
		2.4GHz 帯	最大1W	操縦用画像 伝送用 データ伝送 用		
		5.7GHz 帯	最大1W	操縦等加伝 送用 データ伝送 用		

※1 500m の距離において、電界強度が $200 \mu V/m$ 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対応し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的な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

4) 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)。

5) 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)。

6) 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 60079-14¹³⁾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問わらず)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	×

5) 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。

6) 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。

7) 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。

8) 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

- 14) 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)
- 15) 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)
- 16) 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)
- 17) 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)

- 18) 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)
- 19) IEC, IEC 60079-10-1:2015 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres, (2015)
- 20) 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)
- 21) 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)
- 22) 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)
- 23) 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)
- 24) 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)
- 25) 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)
- 26) 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的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。

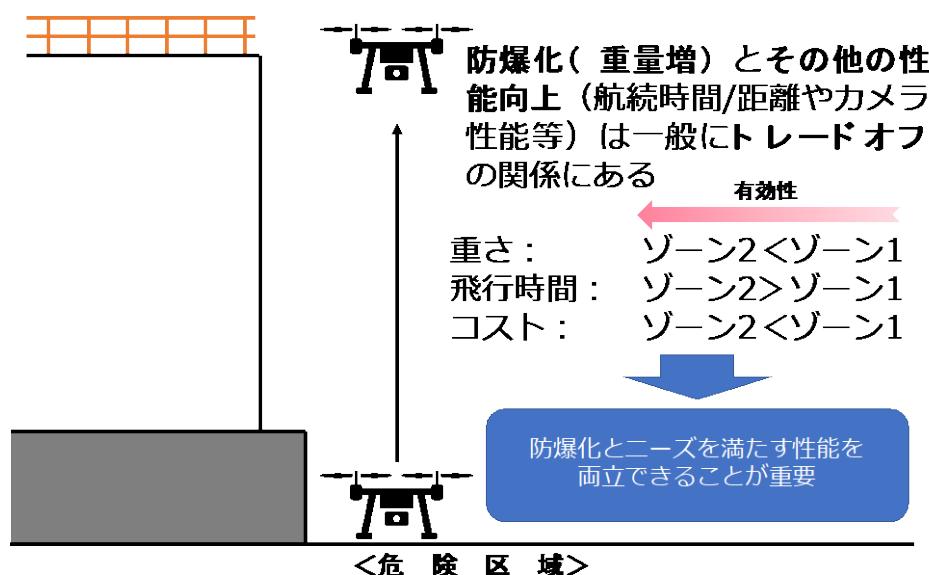


図 4-1 ドローンの防爆化とその他の性能向上のトレードオフ

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。

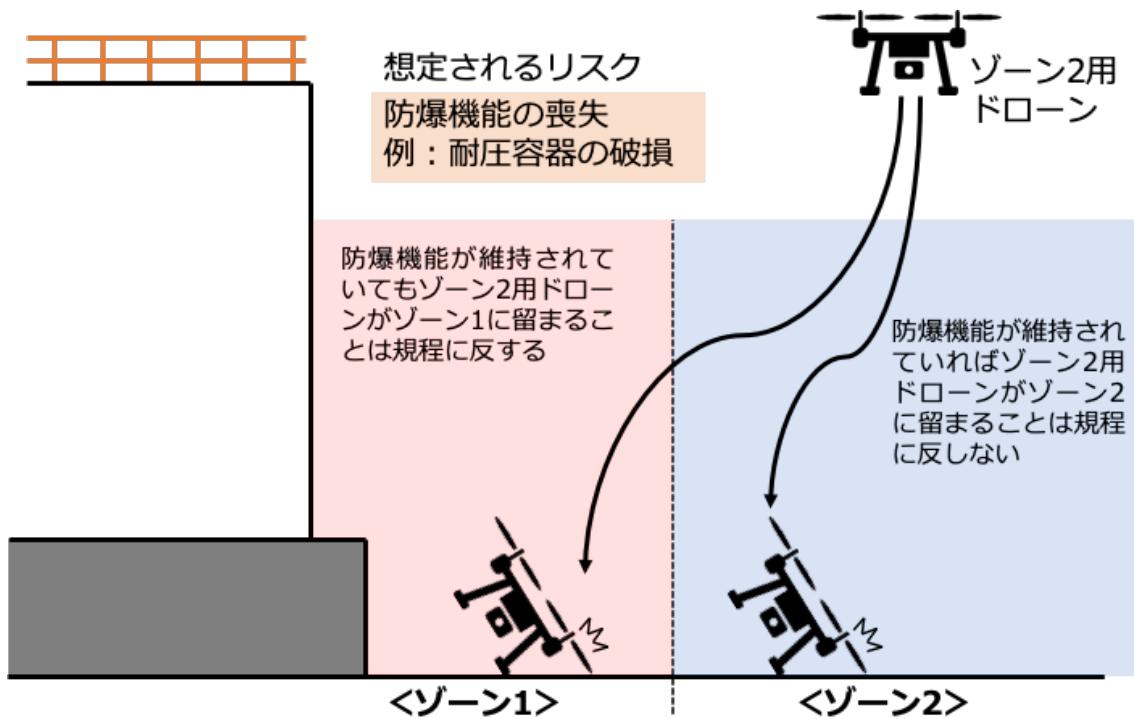


図 4-2 落下した場合の防爆機能への影響(ゾーン 2 用ドローン)

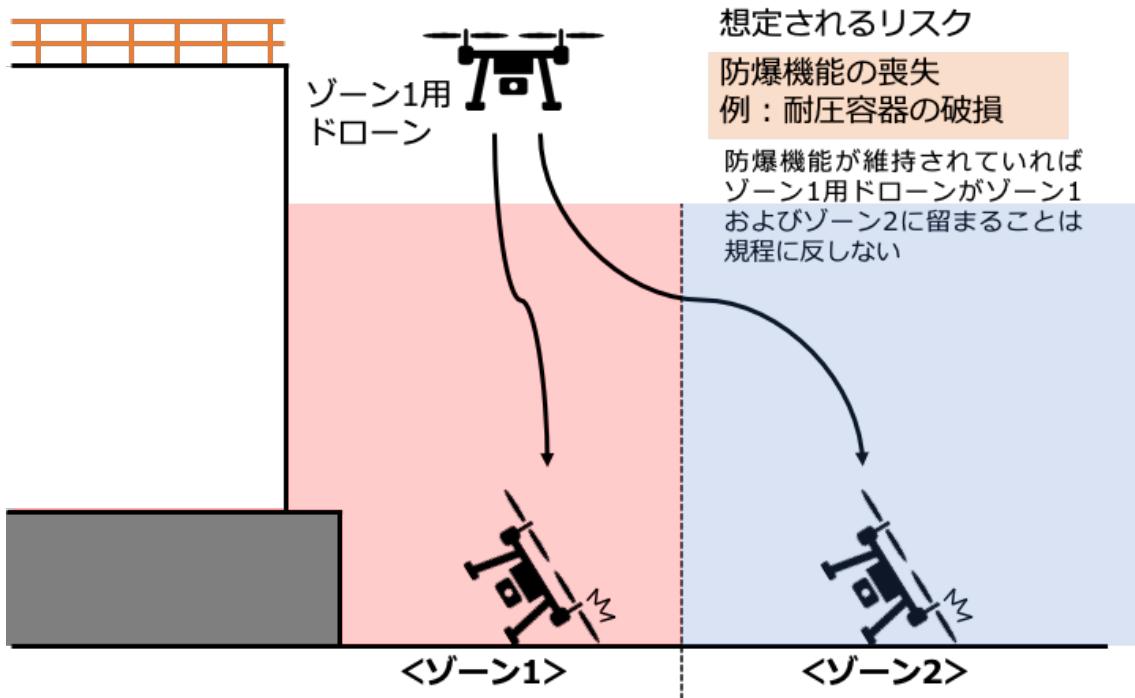


図 4-3 落下した場合の防爆機能への影響(ゾーン 1 用ドローン)

表 4-3 落下した場合の防爆機能への影響と規程との関係

○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 ○ 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 ○ 防爆機能喪失 ×	防爆機能維持 ○ 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⁾。

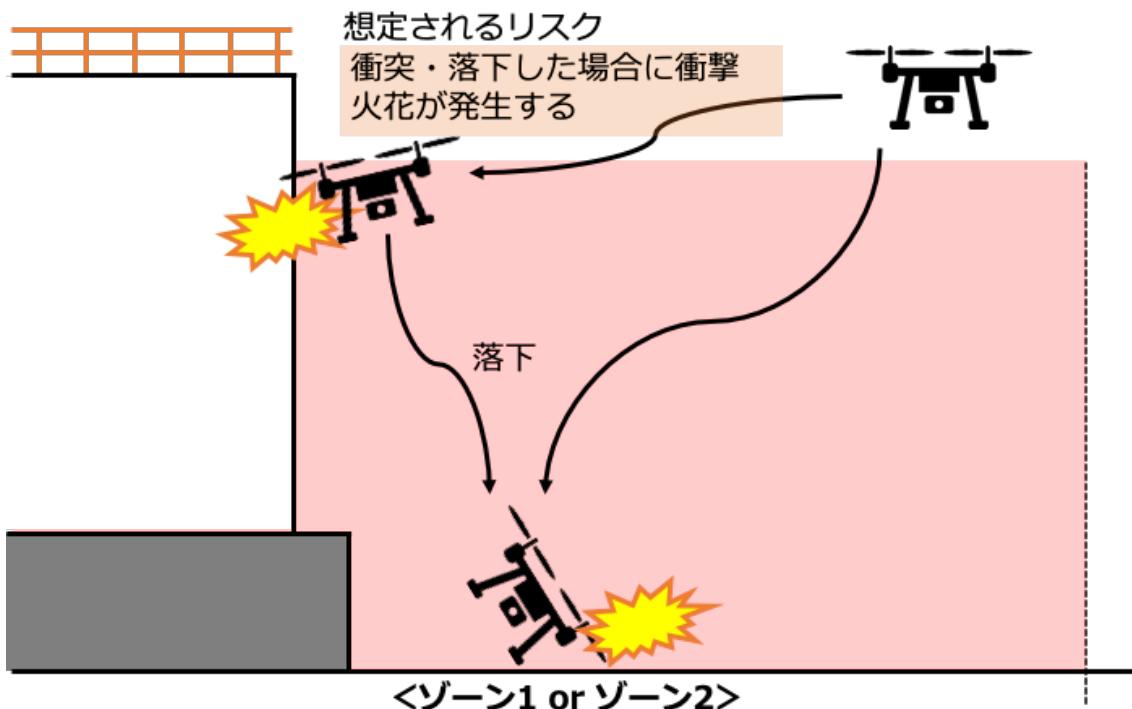


図 4-4 衝突・落下した場合の衝撃火花

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)8.3³⁾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

- 2) 高岡三郎, 衝撃火花の着火危険性, 安全工学, 4-4, pp.255-261, (1965)
- 3) 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)
- 4) 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
(国際整合技術指針 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、一般的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 6-4 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	パリア回路部分
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 6-5 危険区域と防爆適応規格表(非電気機器)

非電気機器	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になどに、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グ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、パーソナル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 6-6 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 対象ガス: II B+H2 T4	ゾーン1対応			ゾーン2対応		
		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	○	○	×	○	○	○
L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	— ※1	× ※2	(○)	— ※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)	リレーなどスイッチなど、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 —: 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。JNOSH 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性が高い。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°C、プロパン 466°Cとなっているが、ガスの発火点は計測方法によつ

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、アルミ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

- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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・技術的要件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、今後も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 60079-33¹⁾）。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。

- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 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つたため、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、現時点での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

- 4) IEC, IEC 60079-33:2012 Explosive atmospheres - Part 33: Equipment protection by special protection 's', (2012)
- 5) 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） JNOSH-TR-46:2015, (2015),
<https://www.jnosh.johas.go.jp/publication/tr.html>, (アクセス日 1月 21 日)
- 6) IEC, IEC 60079-26:2014 Explosive atmospheres - Part 26: Equipment with Equipment Protection Level (EPL) Ga, (2014)

9 構造仕様と防爆型式検定における試験

9.1 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。

9.1.1 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。

9.1.2 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。

9.2 必要な試験項目

9.2.1 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(JNOSH-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 13¹⁾)。重い(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部部分とする。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)°C 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)。

9.2.2 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)°C 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。

9.3 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-7 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-8 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-9 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-10 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-11 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-12 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。

9.4 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)

10 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 (JNOSH-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: 連續的に、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、JNOSH-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、上述の附属書 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 61241-14⁴⁾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-13 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 60079-10-1⁵⁾および IEC 60079-10-2⁶⁾にも引用されている。

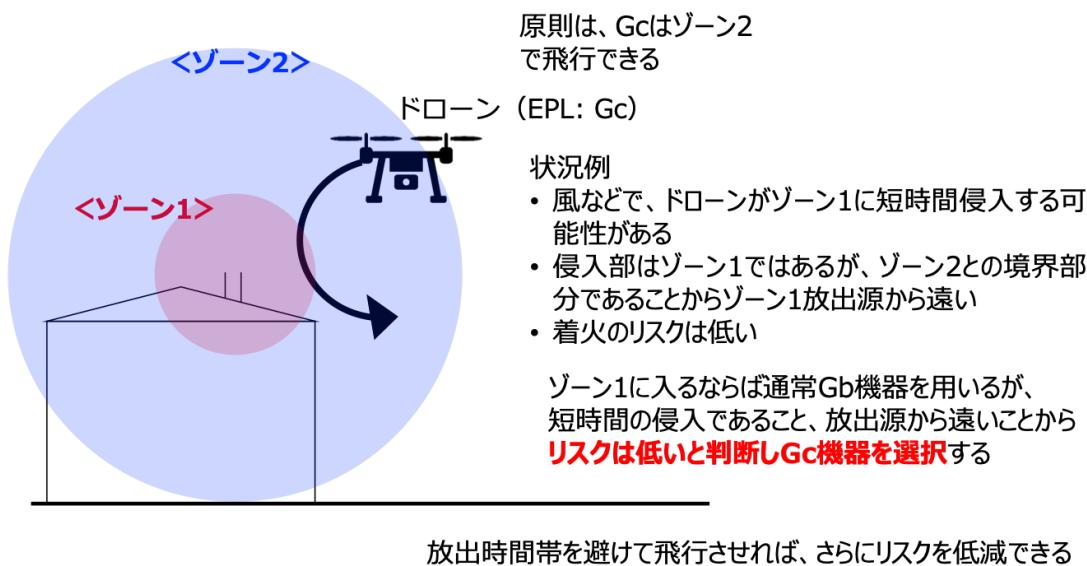
表 B-14 リスクを考慮した場合の危険区域と EPL の関係の例

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 EPL 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-5 危険区域への一時的侵入に関するリスク評価

参考文献

- IEC, IEC 60079-0:2017 Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements, (2017)
- IEC, IEC 60079-14:2013 Explosive atmospheres - Part 14: Electrical installations design, selection and erection, (2013)
- 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)
- IEC, IEC 61241-14:2004 Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Part 14: Selection and installation, (2004)
- IEC, IEC 60079-10-1:2015 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres, (2015)
- IEC, IEC 60079-10-2:2015 Explosive atmospheres - Part 10-2: Classification of areas - Explosive dust atmospheres, (2015)

11 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プ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。

11.1 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るれば、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。

11.2 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。

- ③ 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。

- ④ 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。

11.3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-15 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) <ul style="list-style-type: none"> └ 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 ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・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

12 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

飛行計画書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

防爆ドローン性能仕様

目次

1. 防爆ドローンの性能仕様案 概要	p.3
2. 防爆ドローンの性能要件	p.4
3. 機体～既製部品による構成	p.6
4. 課題	p.8
5. 落下耐性：予防的要件	p.10
6. 性能に影響する項目 補足	p.12
7. 落下耐性：事後要件	p.14
8. 性能要件まとめ	p.17
9. 今後にむけた提案	p.19

1. 防爆ドローンの性能仕様案 概要

防爆化された既製部品で仮想的に防爆ドローンを構成した結果：
重量 約34kg、想定離陸電力 5000W、想定巡航時間 90秒



仮想ドローンの課題から、**求められる性能**および性能を満たすための**対応案**を抽出

仮想ドローンの課題	求められる性能	対応案
航続時間が短い (電力量不足)	航続時間	<ul style="list-style-type: none">防爆バッテリーの新規設計新型バッテリーの検討（全固体電池など）
本体重量に対する モーター出力が小さい (電力不足)	揚力余裕度	<ul style="list-style-type: none">モーター、プロペラの最適化
安定性が足りない (重量バランス 不適切)	運動性能	<ul style="list-style-type: none">運転制御方式の変更（制御周波数向上、PID設定変更等）外乱に対する姿勢制御能力の定量的検証回転センサ付きモータの採用（レスポンス性向上は確認済み）高トルクモータ採用（俊敏な回転数変化を実現）
落下時の性能が 考慮されていない	落下耐性	<ul style="list-style-type: none">衝突試験を実施し、防爆構造が破綻しない構造を確認する落下や衝突の際に電源供給を停止する仕組みの装備

求められる性能として4種が抽出された → 対応案を上表に、性能を判定する指標を表2に提示

2. 防爆ドローンの性能要件 (1)

<基本的な考え方>

- ・防爆機器としてのドローンを既製部品により構成し、課題を抽出する。
- ・防爆ドローンとしての特殊な事情を考慮する。

※ただし対応の選択肢を規定することは望ましくなく、具体的な実装については規定しない。

基本的に具体的実装例は規定や提示をすべきではないが、他に選択肢が無いと思われる場合は注釈を追加した上で例示する。

今回スコープ外としたが、ICE（内燃機関）、燃料電池など今後検討が必要と考える

<既製部品による構成>

- ・防爆モータ、およびバッテリーと電気部品を格納可能な防爆ボックスを搭載したドローンを構成し、
- ・この課題から対応策を検討し、
- ・対応策群から性能要件を定義する。

2. 防爆ドローンの性能要件 (2)

<防爆ドローンとして想定される特殊な状況>

- 1) 重量増（通常のドローン比）
- 2) 落下や衝突

重量増については以下の二点に分けられる。

- 1-1) 離陸重量の増加
- 1-2) 慣性モーメントの増加

落下や衝突は現状で防爆検定に規定されていないため、「落下や衝突により防爆性が破綻しない」ことを基準として要件を定義する。

- 2-1) 事象に至らないための要件～予防的要件
 - ・飛行性能
- 2-2) 事象が発生した際の要件～事後要件
 - ・構造（材料についてはドローン固有の検討事項ではない）
 - ・壊れ方設計
 - ・インターロック

3. 機体～既製部品による構成

- ・防爆ドローンの現状（現状で調査範囲内で見つけることはできない）
　海外で事例を見ることができたが、正規の認証（ATEX指令）が満たされておらず、現状販売されていない。また、限定的な用途での防爆となっている。
- ・現在販売されており、入手可能な部品で構成する場合、以下のような構成となる。

1) 防爆モータ

A社製 耐圧防爆モータ（図1）（性能は表1を参照）

$$3.9\text{kg} \text{ (モータ)} \times 4\text{個} + 2.3\text{kg} \text{ (アンプ)} \times 2\text{個} = 20.2\text{kg}$$

2) 防爆ボックス

B社製 アルミ耐圧防爆ボックス

周辺プラグ含めて約5.2kg

3) 防爆対応可能なバッテリー

C社製

$$235\text{g} \times 6\text{直列} = \text{約}1.4\text{kg} \text{ (44.4V 2860mAh)}$$



図1 防爆モータ

出典：A社Web

3. 機体～既製部品による構成

- 前記の部品にて構成される機体

重量：約34kg (8.5kg/rotor)

想定離陸電力：5000W程度

想定巡航時間：90秒

※専用のプロペラ設計が必要と考えられる

表1 防爆モータ仕様

出典参照：A社Web

モーター出力	200W
防爆型式検定	耐圧防爆検定合格品
モーター方式	マグネット8極3相Y結線
定格トルク	0.404N・m
最大トルク	1.91N・m
定格回転数	3000r/min
電動機慣性モーメント	$0.18 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
許容最大慣性モーメント	$0.36 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
質量	1.9kg
動作温度範囲	0～+40°C

4. 課題

<課題>

- 1) 航続時間が短い（電力量が足りない）
- 2) 本体重量に対するモーター出力が小さい（電力が足りない）
- 3) 安定性足りない（重量バランスが不適切）～瞬時電流供給能力が足りない、回転数制御が遅い
- 4) 落下・衝突時の性能が考慮されていない

<開発要素>

1) 電力量増加

- ・対応案1：防爆バッテリーの新規設計（必要な電力量を持つバッテリーの防爆化）
- ・対応案2：異種バッテリーの採用（全個体電池など。ただし現時点で技術的に不確実）
- ・算出例

離陸重量10kg、10Ah（6cell）のバッテリーとすると電力量は約190Wh（80%利用時）
単位重量あたり電力を 150W/kg（一般的なマルチコプターでの参考値）とすると、
 $190\text{Wh} / (150\text{W/kg} \times 10\text{kg}) = \text{約7分半}$

2) 出力増加

- ・対応案1：モータの大型化（必要な重量に対応可能なモータの防爆化）
- ・対応案2：プロペラの大型化（モータに合わせたプロペラの設計）

4. 課題

<開発要素～続き>

3) 安定性向上

- ・ピッチ（前後方向）、ロール（左右方向）、ヨー（水平回転方向）の慣性モーメントがすべて大きくなり、重量バランスが特異なものとなる。以下のような対応が検討可能である。
 - ・対応案1：フライトコントローラーの制御則変更（制御周波数の向上、PID設定変更など）
 - ・対応案2：センサ付きモータの採用（レスポンス性向上は確認済み）
 - ・対応案3：高トルクモータ採用（俊敏な回転数変化を実現）
 - ・検証には、NEDOが公開した性能評価基準
(<https://www.nedo.go.jp/content/100898607.pdf>) の研究開発結果を参照。

4) 落下耐性向上

- ・落下で機体が損傷した際、防爆構造が破綻しないことが求められる。
 - ・対応案1：予防的対策（詳細は次節以降で記述）
 - ・対応案2：発生後対策（詳細は次節以降で記述）

5. 落下耐性：予防的要件（1）

<飛行性能に関する規定>

1) 重量バランス（特に水平方向～ピッチとロール～の小規模な動きに関する慣性モーメント）

特にモータの防爆構造の重量増が大きいため、周辺部の重量が増加し、この結果ピッチ（前後方向の傾斜）およびロール（左右方向の傾斜）の姿勢制御則が大きく変化する。

- PID設定など基本的調整で対応できる範囲であれば問題なし。

※ PID制御は制御工学におけるフィードバック制御の一種であり、6軸や9軸のセンサ情報を入力値、モータ回転数を出力値として、目標値との偏差、その積分、および微分の3つの要素によって行うもの。

- ただしモータとプロペラの対応速度は物理的な限界があるため、基本的に外乱に対する姿勢制御能力は悪化する。この定量的な検証を行う必要がある（外乱耐性に関する計測方法案については経済産業省公開の性能手順評価書を参考に簡便な計測手法を参照）

<https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200529004/20200529004.html>

5. 落下耐性：予防的要件 (2)

<飛行性能に関する規定～続き>

2) カメラ自由度の低下を補う機能による制約

一般的にはカメラをジンバルに装着し、撮影方向の自由度を高めているが、カメラ自体を防爆構造として可動させることが難しい（ジンバル構造を防爆対応することが困難なため）。

また可視光以外を対象とする撮像装置の場合、防爆構造として採用する外殻の対象波長に対する吸収率（透過率）を考慮する必要がある。

- ・実装の困難さが予測されるが、防爆構造のジンバルを否定しない要件とする。
- ・ジンバルを装備しない場合、カメラ方向の制御は機体の水平回転方向制御に依存するため、必要な十分な緻密さを有する必要がある。
- ・吸収率については使用するカメラ（撮像素子）に依存するため、これを規定しない。
(市販カメラ利用方法の提示)

3) 各種センサの制約

露出しているGNSSアンテナ、通信アンテナ、その他センサが防爆対応している必要がある。こうした対応により、GNSSアンテナや制御・映像信号を送受信する通信アンテナについては、送受信性能に影響が及ぶ可能性がある。

なお、その他のセンサ（ガスセンサ・LiDARなど）については、製品ごとに大きな差異があり、本検討では対象としない。

- ・受信性能の確認が必要なため、特に次の二点について計測方法案を提示する
- ・GNSSアンテナ、通信アンテナ（LTE、2.4G、920Mなど）

6. 性能に影響する項目 補足(1)

以下の項目については予防的要件として留意すべきであるが、「防爆ドローン」ならではの要素が無い、もしくは希薄となるため、**検討対象としない**。

<電磁波外乱>

- ・プラント施設の検査や点検を行う場合、通常の環境よりも多くの磁性体（鉄など磁化率の高い構造体）が想定されるため、特に地磁気センサなどに依存したドローンはこれを留意する必要がある。

<地磁気センサ>

- ・地磁気センサ異常を回復可能もしくは補助可能な手法を有すること。
- ・可能であれば方位検知を地磁気センサに頼らないこと。
- ・電磁波外乱と同様で、一般的な運用に比較して地磁気を正確に検知できない環境が想定される。

<機器信頼性>

- ・一般的なドローンに比較して重量が増加する傾向があるため、同じモータ・プロペラを使う場合回転数が上昇し、各部に機械的負荷が増える傾向がある。このため効率や熱なども勘案し、耐久性も考慮する必要がある（離陸重量に応じた適切なモータとプロペラを選定する場合はこの限りではない）
なお、上記事項は大型ドローンを設計する場合には、一般的に検討される事項であるため、検討対象から除外した。

6. 性能に影響する項目 補足(2)

<モータ余裕度>

- ・前記項目と同じ理由から、離陸重量に対し、トルクと回転数と揚力について十分な余裕を持つ設計とすること。

<通信>

- ・外乱に対して十分な耐性を有する通信方式（周波数ホッピングなど）を採用すること。
- ・可能であれば、異なる二種類以上の電波方式により制御可能であること。
- ・防爆構造によっては送受信性能が悪化することがあるため、留意する必要がある。

<カーボン素材の耐久性の課題（表面コーティングの制約）>

- ・筐体の帯電性などに制約があるため、一般的に用いられる耐紫外線・耐油性などを目的としたコーティングを施すことができないケースが想定される。
- ・長期間にわたる機能と性能維持のため留意する必要がある。

<着脱構造の制約>

- ・電池は容易な交換が望まれているが、コネクタなどの接続部に関して制約がある。
- ・着脱構造の変更は特定周波数での振動や接続部の耐久性に影響するため、十分留意する必要がある。
- ・汎用の接続・分岐箱の基準は改めて引用する必要はない。

7. 落下耐性：事後要件(1)

<構造・壊れ方設計>

- 一般的な運用速度は落下に対して高くなく、またプロペラガードなど接触耐性を高める器具が装備される前提として、衝突は考慮しない。
- 落下については、過去の性能評価基準（NEDOプロジェクト）において、以下のような事項が示されている。
 - 終端速度はほぼどのドローンも毎秒15m/sとなる
参考：NEDOが公開した性能評価基準（<https://www.nedo.go.jp/content/100898607.pdf>）
 - 落下の際脚部が地表に接触し、引き続きアームおよび本体が接触し、これらの構造が衝撃を吸収する効果がある。
- 上記を鑑み、
15m/s以上の衝突試験（本試験では17m/sで設定）を実施し、防爆構造が破綻しない構造を確認する。今回の試験、および以前の水素タンク搭載の際の衝突試験の知見から、機体に耐衝撃構造を装備することで十分に防爆構造を保護しうる構造は実現できると思われる。
次ページは今回の試験の様子、および水素タンク衝突試験の際に検討される耐衝撃構造の例である。

7. 落下耐性：事後要件(1) 図



図4 防爆構造+ドローン 衝撃試験の様子

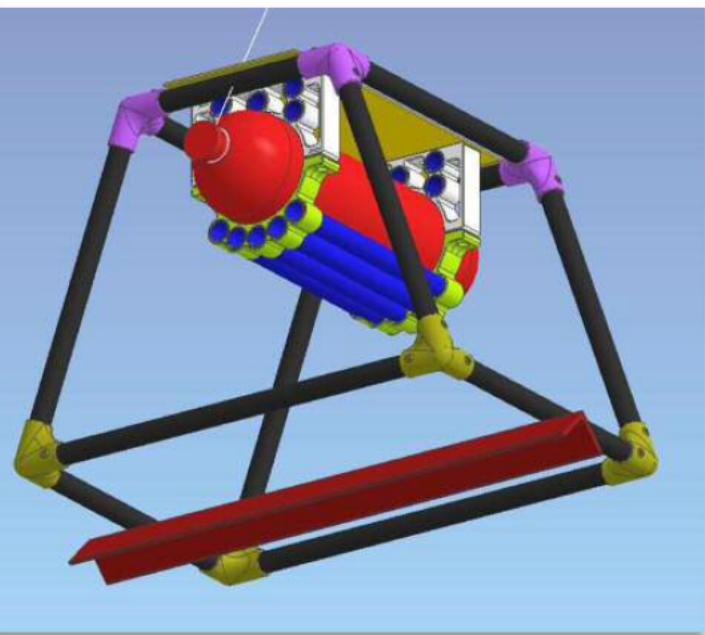


図5 水素タンク耐衝撃構造例

7. 落下耐性：事後要件(2)

<インターロック>

・落下や衝突の際に電源供給を停止する仕組みが装備される場合は以下を勘案する。

- 1) 電源供給停止基準が妥当である（同時に誤停止が抑止されている）
- 2) 電源供給停止装置の構造・構成が妥当である。

上記を満たす場合、バッテリーを含む防爆構造以外の防爆構造については、落下と衝突を勘案する必要はない。

・参考情報

現状では、落下の際地物と人への障害を低減するため、落下を検知してモータを停止する機能が一部のドローンで実装されている。

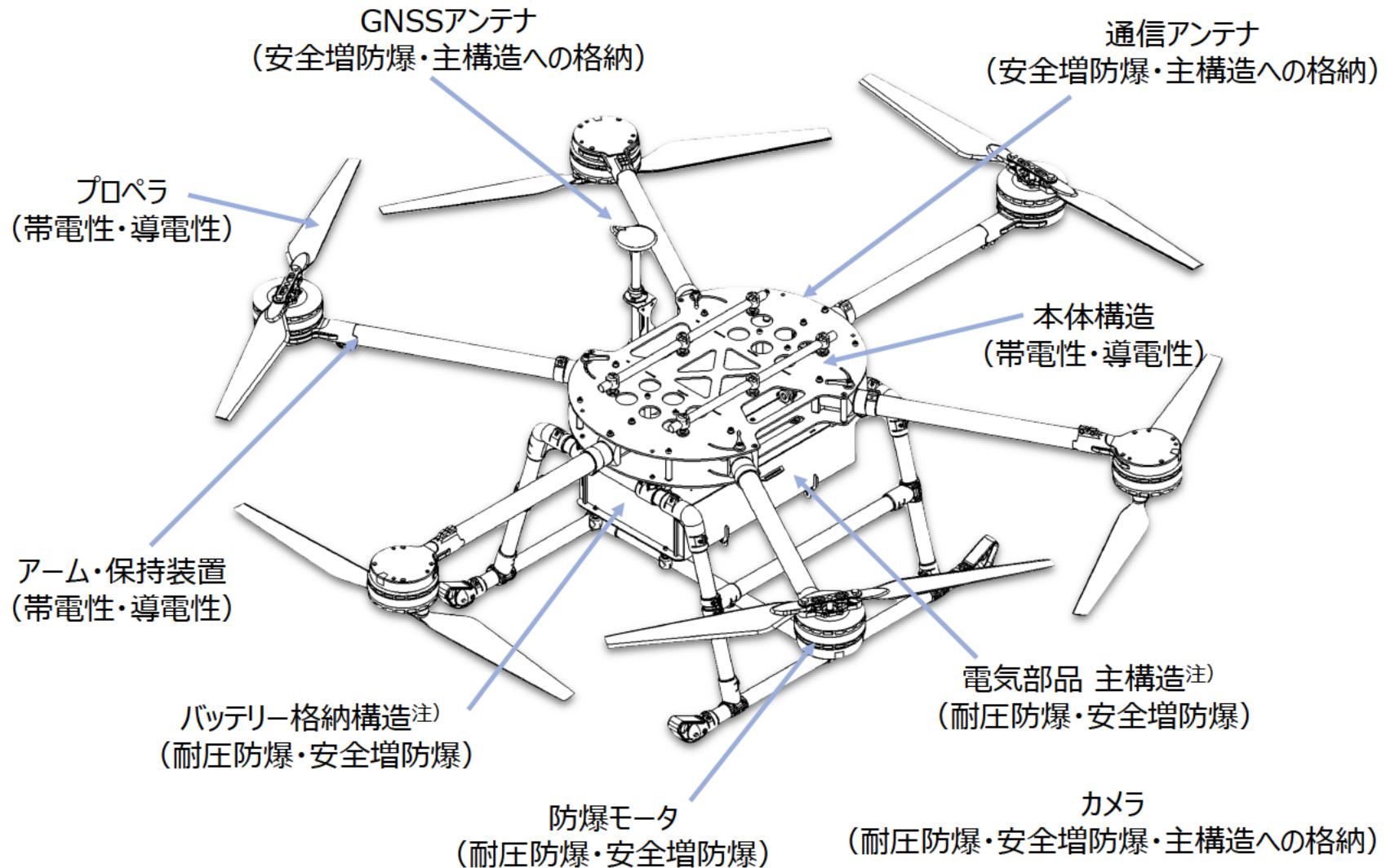
ドローンの落下はPCやスマートフォンの落下検知（規定時間0Gを検知）とは異なるロジックでの検出が必要であり、今後の継続的な検討が必要である（ただし、落下検知手法については本要件書のスコープ外である）

8. 性能要件まとめ

表2 性能を基準とした要件

項目	説明	指標（例）
揚力 余裕度	既存の機体を改造して製作する場合、重量増加による揚力の余裕度が低下する。十分な性能範囲であってもこの余裕度は外乱耐性に影響するため、余裕度に留意する必要がある。また、センサなどを後付けする場合の重量増加も含めて勘案する。	離陸重量が最大離陸重量の60～70%程度であること
航続時間	想定する作業時間を明確に規定する	作業時間 + 5分を基準に設計する。もしくは航続時間 - 5分を作業時間として規定する
運動性能	ユーザ操作による最大のピッチ方向操作とロール方向操作、およびスロットル操作で不安定にならないことを確認する。	ピッチ方向、ロール方向、スロットルについて最大と最小を毎秒2回、毎秒1回で繰り返し不安定な挙動とならないこと
落下耐性 1	通常の姿勢で落下した場合、フライターコントローラーおよびバッテリーを含む防爆構造が破綻しないこと。	17m/sでの落下で防爆構造物にかかる加速度が一定値以下であることを確認する（適切な衝撃緩和構造を持つ） ※本数値を明示するには更なる検証が必要
落下耐性 2	上記落下耐性1が満たせない場合、防爆構造物への電源遮断で対応する。	落下の際、電源供給を停止できること

8. 性能要件まとめ



注) 各種機器が搭載されるためバッテリー・電気部品は通常ドローンの上部に格納される

図6 ドローン構成を基準とした要件

9. 今後に向けた提案

継続して検討すべき課題

- モーターについては既存の検定合格基準から踏み込み、できるだけ軽量化できる構造を検討する
- 防爆構造だけでなく、墜落などの場合に周囲構造物へ影響を与えない構成を検討する。具体的には開傘の仕組みを持つパラシュートや衝撃を緩和する保護機構などである（プラント等でも使用可能な火薬なども検討）。
- 検定合格後には、それらの知見を活用し、粉塵に対応した防爆構造を検討し、鉱山などプラント以外の市場開拓も検討したい

新しい防爆規格により小型防爆モーターが実現された場合のドローンのメリット

- より小型化が可能となるため、耐風性を維持する範囲でより狭隘な空間でのフライトが可能となり、点検範囲、点検できる設備の種類が格段に多くなることが予想される
- より多様なモーターを利用することができるため、機体に最適なモーターを選択できるようになり、機体設計の自由度が犠牲にならない
- 現状の重量バランスと大きく変わらない構成（重量）となるため、墜落などにおける衝撃緩和のための構造が比較的容易となる