

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. 今後に向けた提案	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

 **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	- 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	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	- 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	- 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）

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

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

235g × 6直列 = 約1.4kg（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	$0.18 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^3$
許容最大慣性モーメント	$0.36 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^3$
質量	1.9kg
動作温度範囲	0～+40℃

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と、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、通常的环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。
 - 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。

7. 落下耐性：事後要件(1) 図

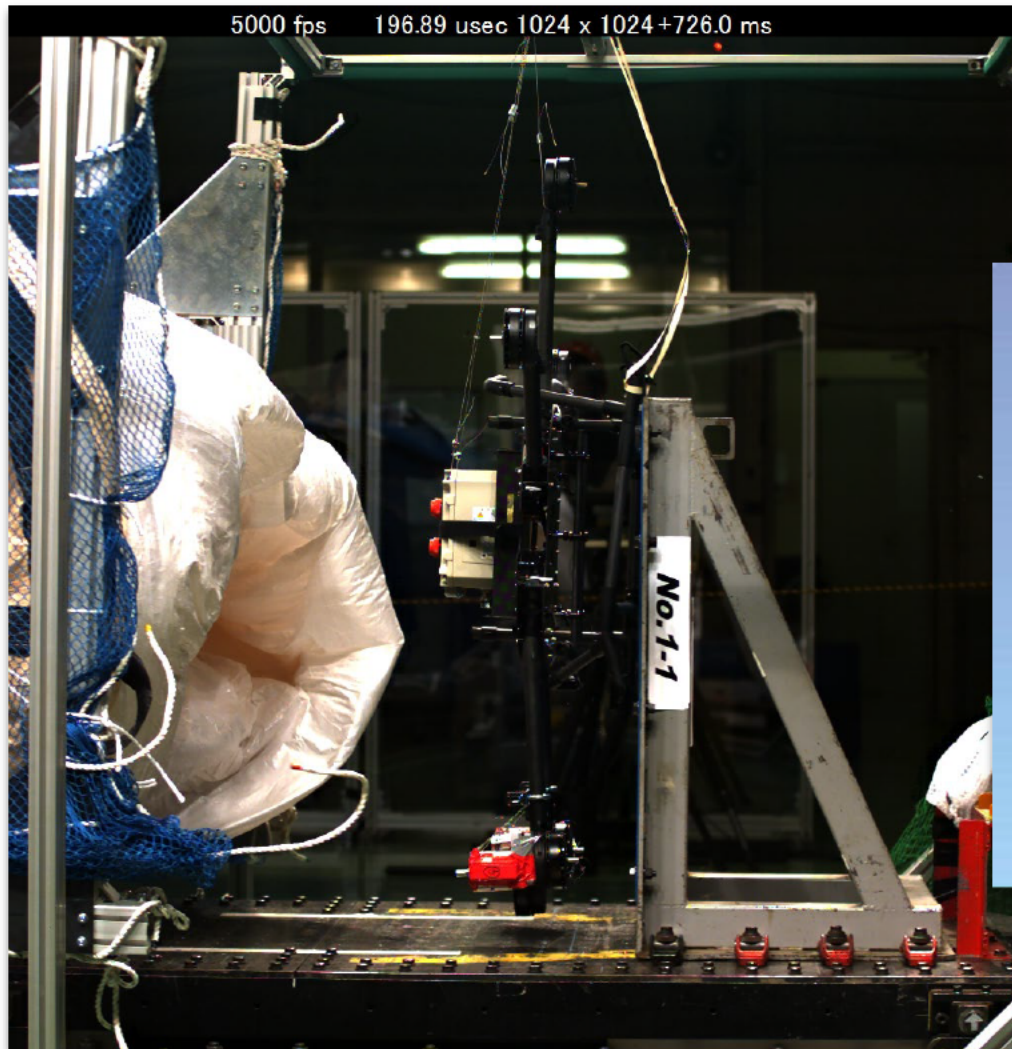


図4 防爆構造+ドローン 衝撃試験の様子

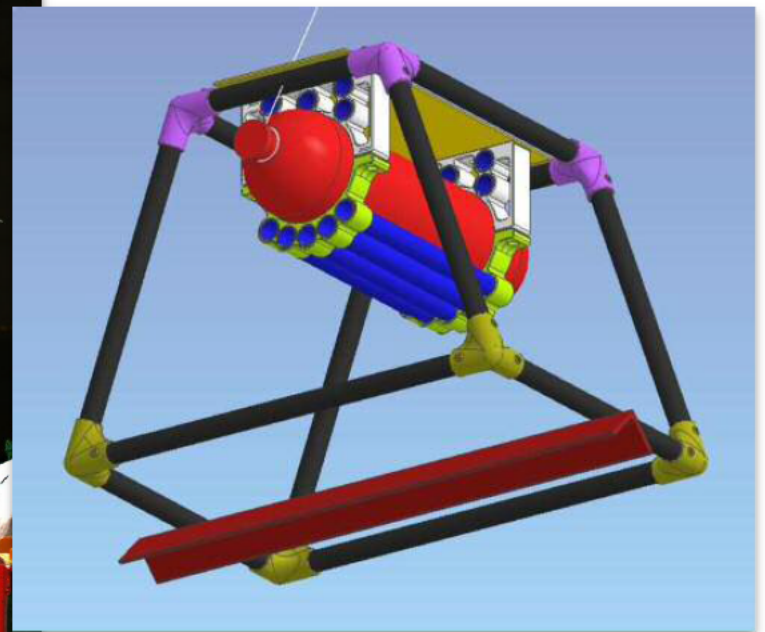


図5 水素タンク耐衝撃構造例

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。

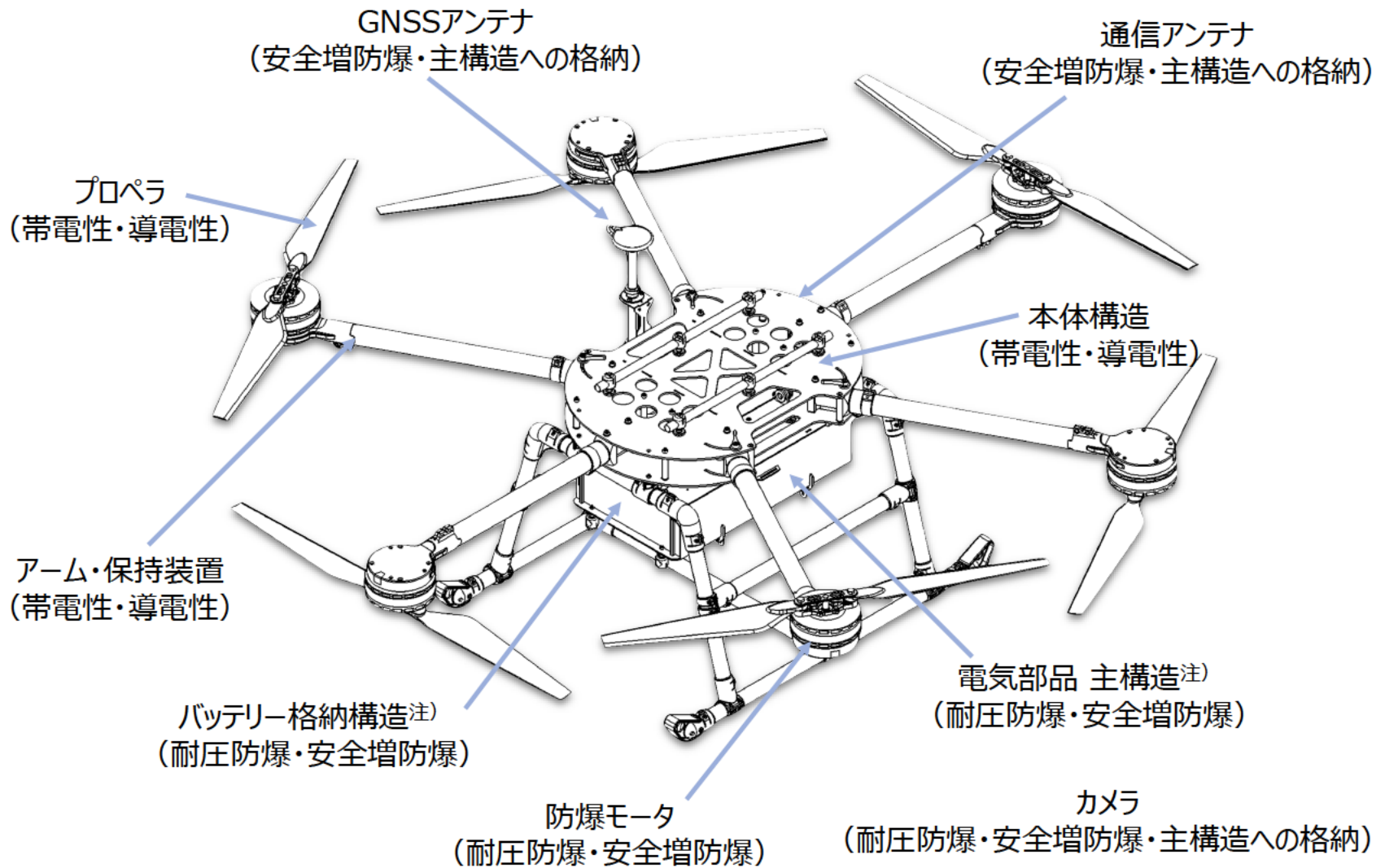
ドローンの落下はPCやスマートフォンの落下検知（規定時間0Gを検知）とは異なるロジックでの検出が必要であり、今後の継続的な検討が必要である（ただし、落下検知手法については本要件書のスコープ外である）

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しないこと
落下耐性 1	通常の姿勢で落下した場合、フライトコントローラ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