

原子力発電所におけるドローンの利用

田中 健一 (原子力技術センター 参事)



1. はじめに

ドローンの利用拡大については、“空の産業革命”として首相官邸主導のもとロードマップが定められ、“環境整備”，“技術開発”および“社会実装”に関わる方針が示されている⁽¹⁾。“空の産業革命が起こる”と期待される分野は、農業、林業、水産業分野、災害発生時の被災状況把握や救助などの支援、緊急時の医療活動支援、また、測量や施設の点検などと多岐にわたる。

ところで、ここでいうドローンとは、航空法上無人航空機と分類されるものであり、狭義には機体の重量が100g以上のマルチコプターと呼ばれているものを指している。一口にドローンと言っても大きさや構造はその用途に従い多種多様のものが存在している。ドローンを用いて業務の改革、改善を行おうと

する者は、適用しようとする業務の特性や用いる環境などの特徴を考慮し、どのようなドローンを自らの業務に適用していくかという選択を行うことが求められる。

本稿では、原子力発電所に点検業務において“どのような対象にはどのような仕様のドローンが必要であるか”について、筆者が所有する3種類のドローン飛行経験をもとに説明する。

2. ドローンに関する規制

(1) 航空法上の規制

国土交通省は、図1に示すように、ドローンを屋外で飛行させる場合の飛行形態を“飛行に伴うリスク”に応じて3つのカテゴリーに分類し、カテゴリー毎に必要な手続き（許可や承認）を定めている⁽²⁾。適切な許可・承

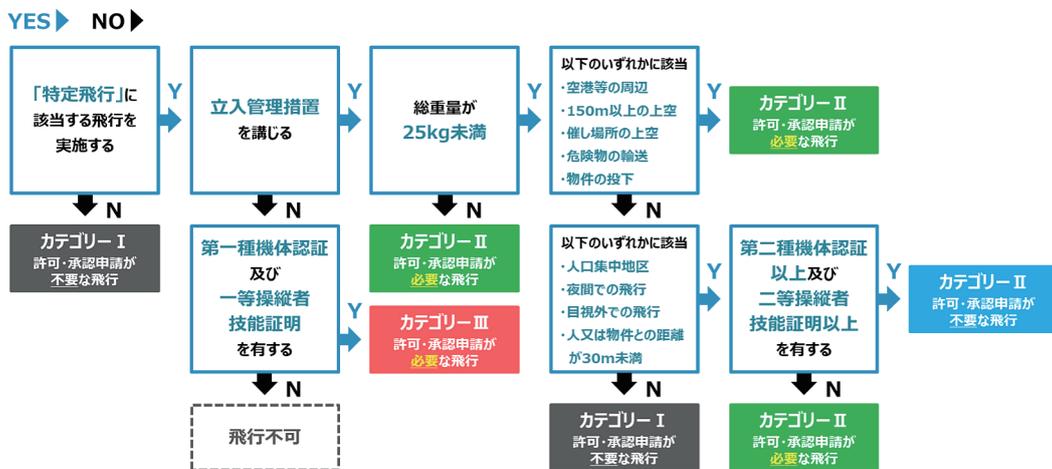


図1 飛行カテゴリー決定のフロー図⁽²⁾

認を取得せずに飛行させた場合は処罰の対象となる⁽³⁾。“飛行許可・承認が必要となる空域および方法での飛行（特定飛行）”に該当するカテゴリー II および III の飛行では、機体の登録、機体識別のための登録記号の表示およびリモート ID の搭載、操縦者の技能証明取得、飛行許可・承認の申請、飛行計画の通報および飛行日誌の記載が必須となる。

なお、ここでいう“飛行に伴うリスク”は、有人航空機の安全およびドローンの飛行区域における一般公衆の安全に対する脅威に対して想定されている。このリスクが十分に小さいと判断される飛行は、カテゴリー I に分類され、飛行許可・承認は不要とされている（“特定飛行”に該当しない）。

（2）小型無人機等飛行禁止法

「小型無人機等飛行禁止法」⁽⁴⁾は、同法で定めた重要施設およびその周囲概ね 300m の周辺地域の上空の飛行を禁止している。対象施設の敷地・区域の上空を“レッド・ゾーン”、周囲概ね 300m の上空を“イエロー・ゾーン”と呼ぶ。この重要施設には国の重要施設、外国公館など、防衛関連施設および空港に加え原子力事業所が指定されている。原子力事業所については、原子力発電所や核燃料取扱施設 22 カ所が挙げられている。ただし、次の 4 つの飛行については施設の設置されている都道府県公安委員会への通報を行うことで飛行禁止が解除される⁽⁴⁾。

- 対象施設の管理者又はその同意を得た者による飛行
- 土地の所有者が当該土地の上空において行う飛行
- 土地の所有者の同意を得た者が、同意を得た土地の上空において行う飛行
- 国又は地方公共団体の業務を実施するために行う飛行

「小型無人機等飛行禁止法」は、国の重要施設などへの外部からの破壊行為や情報盗取などを想定し、施設内で飛行および施設への外

部からの接近を禁止しているものである。飛行の禁止は、当該施設又は周囲での飛行がそのようなものでないことが明らかであり、飛行についてその旨を予め通報されることによって飛行禁止は解除されるものである。

（3）原子力発電所の敷地内での飛行

原子力発電所の敷地内において点検などでドローンを用いる場合、次のような飛行の状況になると想定される。

- 原子力発電所に設置されている建物や構造物の高さは航空法などに定められた飛行制限高度を超えるものはない。すなわち、有人航空機が原子力施設の敷地上空 150m 以上で飛行することはない。
- 原子力発電所の敷地内は立ち入りが制限されており、さらに、ドローンを用いた点検などを行う作業範囲を飛行区域として設定し、関係者以外の立ち入りを禁止することが可能である。
- 点検などのために行う飛行は原子力施設の管理の下で行われる業務である。

最初の 2 つの状況は許可・申請が不要なカテゴリー I の飛行であり、最後の状況は飛行禁止の解除対象であることから、公安委員会に通報することで全てで飛行禁止の解除ができる。

上記 3 つの事項それぞれに対し、最適化に関連する実際的な課題を考慮しなければならない。また、廃棄物、再使用／再利用を想定する資材を搬出するための全ての活動は、廃棄物管理の枠組みの下で行われる。この枠組みは、施設内での活動および施設外（オフサイト）での活動を網羅するものである。なお、この活動には、廃棄物、資材の再使用／再利用または埋設処分のいずれもが含まれる。

3. 原子力発電所におけるドローンの利用

原子力発電所におけるドローンの利用として、図 2 で示す 3 つの用途を挙げることができる。これらについて以下に説明する。

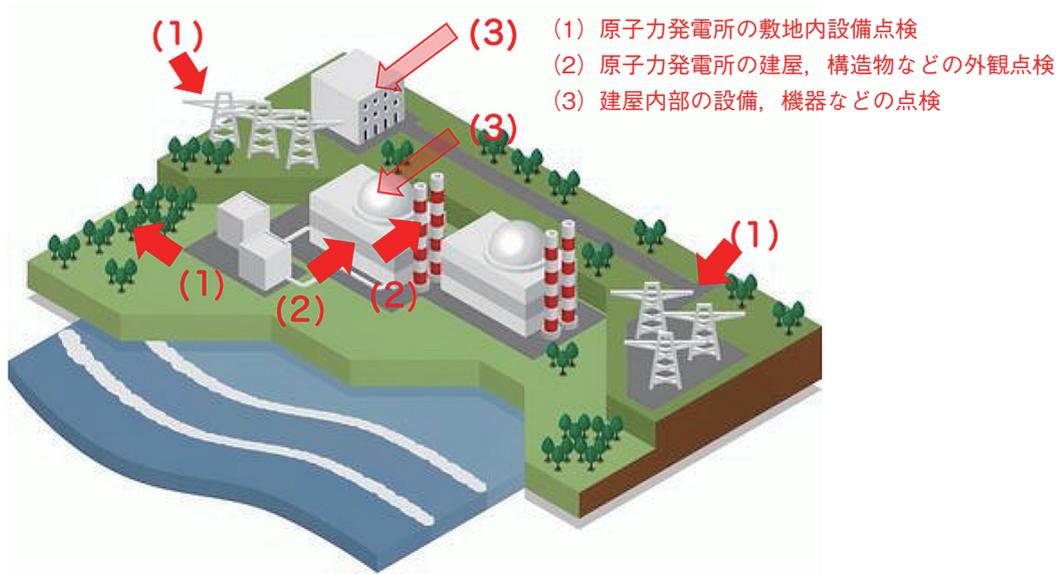


図2 原子力発電所でのドローン利用箇所の例

(1) 原子力発電所の敷地内設備点検

敷地内設備の点検として所内の送電線点検，敷地境界（フェンス，PP 設備など）および敷地内地上設備（屋外配管など）点検がある。このようなドローンを用いた点検は，原子力発電所に限らず，送電線の点検や敷地内の設備点検には数多い実績が存在する。

広範囲の点検（広範囲の飛行）を行う場合には，“ウェイポイント”と呼ばれる自律型飛行機能を用いることで作業の合理化を図ることができる⁽⁵⁾。

なお，ウェイポイントとは，電子地図上にドローンの通過ポイントを配置してポイントごとに高度や速度，カメラ向き，撮影などを設定することができる自立飛行機能をいう。自立航行は，電子地図に配置されたポイントの経度・緯度および高度並びに方位の情報とGPSを利用して自動操縦で行うものである。

(2) 原子力発電所の建屋，構造物などの外観点検

ドローンを用いた建屋，構造物などの外観点検も，原子力発電所を含め種々の工業施設において多くの実績がある。原子炉建屋，タービン建屋および廃棄物貯蔵建屋などの外壁，スタックなど構造物並びにスイッチヤードな

ど屋外施設の外観点検にドローンを活用することには次のような利点がある⁽⁶⁾。

- 高所点検の代替手段（高所作業を行わないことによる労働災害リスクの低減）
- 高所の設備点検の容易化，足場設置の費用削減
- 点検画像のデータベース化
- 映像や画像を撮影し，過去の画像との比較分析
- 点検頻度向上による設備管理強化
- 死角となる箇所の点検，死角となる場所を高所から撮影し，各部署と情報共有が可能

(3) 建屋内部の設備，機器などの点検

原子力発電所を含めて種々の工業施設などにおいて建屋内部の設備，機器などの点検についても同様に多くの実績がある。ドローンを用いた屋内の設備，機器などの点検においても屋外における利用と同様の利点がある。

特に，“点検箇所が高所にある，又は，接近経路が複雑”で，かつ，放射線量が高い箇所に点検では，作業者の被ばくを低減することが可能になる。

4. 原子力発電所での利用例

(1) 国内における利用例

国内の原子力発電所の利用例として次のようなものがある。

(1) 屋外利用の例：中部電力㈱、浜岡原子力の緊急時の放射線測定の計画⁽⁷⁾

- (a) 計画内容：重大事故が発生した事態を想定して、ドローンを使って周辺調査する飛行試験を実施
- (b) 使用ドローン：NTT e-Drone Technology 製 ZION PRO 800
- (c) 計画の内容：浜岡原子力発電所が面する海域でドローンを飛行させて、放射性物質の濃度や放射線量の調査を行う。

(2) 屋内利用の例：中部電力㈱浜岡原子力発電所タンク内点検⁽⁸⁾

- (a) 点検内容：放射性液体廃棄物貯蔵タンク内の目視点検
- (b) 使用ドローン：スイス社製 ELIOS 2
- (c) ドローン利用の利点：
 - ⇒ 作業量を大幅に削減
 - ⇒ 作業員の負担軽減や安全性向上、被ばく低減に寄与

(2) 海外における利用例

海外の原子力発電所の利用例として次のようなものがある。

(1) 屋外利用の例：原子炉建屋の外壁点検⁽⁹⁾

- (a) 実施内容：プレーリー島の原子炉建屋2棟の外壁点検に小型無人航空機を使用して、2日間作業を完了した。
- (b) 得られた効果：
 - ⇒ 通常クレーンを用いて約1週間の作業を必要とする点検コストを削減
 - ⇒ クレーンが不要になったことで、作業員は点検の大半を地上で行うことが可能になり安全性が向上
 - ⇒ リアルタイムで高解像度の画像が提供可能であり、より質の高いデータを提供

(2) 屋内利用の例：建屋内の設備配置と放射能分布の把握⁽¹⁰⁾

- (a) 実施内容：詳細が不明な状況下における自動航行を行うアルゴリズムを開発した。このシステムをドローンに実装し、放射能分布を含めた3Dマッピングを行った。

- (b) 得られた効果：ドローンの飛行環境に対して十分の情報が得られない状況下の高所であつ高線量の環境下の点検を安全かつ効果的に実施することを可能にした。

(3) 福島第1原子力発電所での利用

福島第1原子力発電所の建屋内に高線量の箇所が存在する。このような箇所では線量を低減し、作業環境の改善を行うためには、線量分布および汚染状況の把握が必須である。このような情報を得るためにタービン建屋内でドローンを用いて以下の測定を行っている。

- (a) 使用箇所：1Fの3号機 逆洗弁ピットタービン 建屋オベフロ
- (b) 実施内容：飛行性能試験、3次元復元図を作成
- (c) 使用ドローン：“RIZER”
- (d) レーザーを利用した SLAM (Simultaneous Localization and Mapping：自己位置推定と環境地図作成を同時に行う機能) による制御：GPS 波の届かない屋内環境下であっても安定した飛行が可能

5. 原子力発電所でドローン利用する場合の考慮点

原子力発電所におけるドローンの利用は、先述の通りいくつかの実例がある。これらの利用に今後さらに活用を拡大していくために確実にしておくべき事項について説明する。

原子力発電所の屋内外を問わずドローンの機能および考慮すべき点として次が挙げられる。

- (1) 狭隘箇所での飛行：屋内の設備、機器などの点検では狭隘部を飛行することになり、狭隘部での飛行安定性に考慮が必要
- (2) 接触、衝突：屋内の設備、機器などの点検時に接触や衝突によるダメージ
- (3) セキュリティ：点検時に撮影した映像(写真、動画)の漏洩。外部からの飛行制限
- (4) 放射線の影響：装備されているセンサー、コントローラへの放射線の影響
- (5) 画像取得：光学カメラ、レーザスキャナーなどの選択
- (6) 360度(全方位)カメラ：点検時の人の行動に即した映像の取得

表1 使用経験を参考にしたドローン

機種	MAVIC MINI	AIR2S	PHANTOM 3
重量	249 g / 199 g (日本)	595 g	1,216g
寸法	折りたたんだ状態：140×81×57 mm (L×W×H) 展開時：245×289×55 mm (L×W×H)	折りたたんだ状態：180×97×77 mm (L×W×H) 展開時：183×253×77 mm (L×W×H)	対角寸法：350mm (プロペラ除く)
飛行時間	30分 (無風で14km/hの速度で飛行時に測定) 18分 (日本向け) (無風で12km/hの速度で飛行時に測定)	31分	約23分

この検討では、市販の3種類のドローンの使用経験を参考にした。3種類のドローンは表1の通りである。3種類とも世界ドローンシェアの7割以上を占めるDJI社製(中国製)である。

(1) 狭隘部での飛行

屋内の設備や装置などはいずれも原子炉の運転制御、放射線監視などの重要設備であり、ドローンの接触や衝突により破損させるようなことがあってはならない。接触や衝突による設備などへ与えるダメージは機体の重量、ブレード(プロペラ)の大きさ、形状、材質および回転力に依存する。ブレードの接触では、ドローンの重量によりブレード(プロペラ)の大きさ、形状および回転力が変化することから、重量の重いドローンのブレードが接触した方が、軽いものよりダメージが大きい。衝突についても重量が重い方がダメージは大きい。

PHANTOM3では、屋内壁にブレードが接触した際石膏ボードを数ミリ程度えぐるというダメージを与えた。AIR2SのブレードはPHANTOM3のものより軽量であるため壁と接触しても表面に傷をつける程度であるが、ブレードが薄く作られているため“鋭利な刃物”のように細いケーブルであれば簡単に切断する。MAVIC MINIの場合は、壁に接触しても傷を与えるようなことはなく、むしろブレードが破損した。

ドローンを用いて屋内(狭隘部)で設備、機器などの点検を行う場合は機体重量の軽い

ものを用いるべきである。また、ドローンはブレードが設備、機器などと接触するようなことのないような構造が望ましい。

(2) セキュリティ

ドローンを原子力発電所のような重要インフラ施設で利用する場合のセキュリティ管理としては、映像などの点検情報の盗取、漏洩と飛行の妨害(“ドローンの乗っ取り”)への対策が必須である。現在一般に流通しているドローンのほとんどがWiFiを用いて操縦およびデータ通信を行っている。屋内で使用している場合、WiFiの出力から原子力発電所の敷地外からこれらの行為を行うことは難しいと言えるが、“絶対大丈夫”という訳ではない。このような行為を防止する手段としては通信電波の暗号化などがあるが、最も効果的な方法としては、ドローンを飛行させている区域およびその周辺への関係者以外の立ち入り又は接近を禁止し、徹底することであろう。

また、米国ではスマートフォンなどからの情報漏洩が懸念され、政府機関での利用について特定の国で製造されたものに対して使用制限が講じられている例もある。この点を踏まえて使用するドローンを選択することが好ましい。さらに言えば、国産のものが望ましいと言える。

(3) 放射線の影響

ドローンに装備されているセンサー、コントローラは全て半導体で構成されている。このようなものを放射線の存在する場所で使用

する場合には相応の耐放射線であるべきである。また、飛散性のある放射性物質が存在する箇所での使用を行うのであれば放射性物質が付着しづらく、除染が容易な構造、材質であることが求められる。

(4) 画像取得

ドローンを用いた点検では、点検箇所を撮影し、映像を確認することになる。撮影の方法としては光学カメラを用いるものとレーザスキャナーを用いるものがある。後者については、“現場の状況把握”という観点で3次元形状の取得で有効である。レーザスキャナをドローンに装着して画像取得を行うことも可能であるが、レーザスキャナー自体が相当の大きさ重量を持つため装着できるドローンも大型となる。レーザスキャナーは現場の情報把握において大変有効な機器ではあるが、これを搭載したドローンの屋内での利用は相応の広い空間がある区域など対象箇所が制限される。

(5) 360度カメラ

屋内点検の行動パターンとしては、図3のような例が考えられる。

今、屋内に設置されている装置A,B,Cを点検するとする。

- ① Aの近くで点検項目に従い点検を行う。
- ② Bに移動し、同様に点検を行う
- ③ Cに移動し、同様に点検を行う

このように点検を行う場合、A,B,Cの点検を行うとした場合であっても、移動の間も周囲を観察している。すなわち、装置間を移動する際は、進む方向だけでなく全方向に注意を払っている。施設の不具合は指定された装置の点検だけではなく、移動時に対象以外で発見する場合もある。

ドローンに装着されているカメラは画角が広く、撮影方向を変化させることができるが、原則前方の一方向を撮影する仕様となっている。上述のような行動をドローンで再現するためには360度(全方位)カメラが必要となる。

6. まとめ

(1) 屋外での利用

原子力発電所を含む各種の工業施設では、屋外のドローンの利用について数多くの実績がある。今後もその延長線上で利用を拡大し、巡視点検業務の効率化を進めていくことになるであろう。

現時点での利用状況を改善してより効果的な利用を目指すのであれば、ウェイポイントのような自立型飛行形態に対して深層学習機

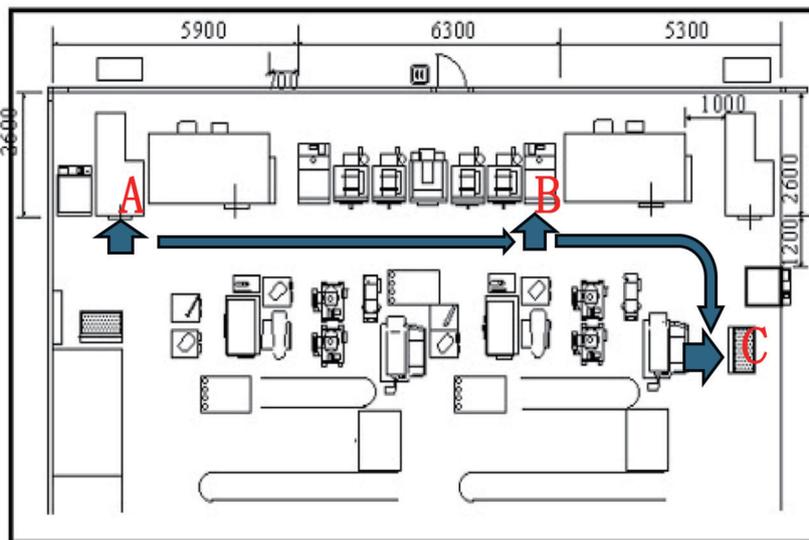


図3 屋内点検の行動パターン例

能をドローンの制御に応用し、飛行中のカメラ画像から移動方向を自律的に判断させる技術が求められる。

また、屋外であることから施設の外部から“ドローン制御の乗っ取り”や“ドローンが収集した情報の盗取”に対する対策も必須の事項である。

(2) 屋内での利用

屋内の利用についても国内外でいくつかの利用実績がある。特に、作業者に対して放射線被ばくのリスクや高所作業などの労働災害のリスクの高い箇所での利用拡大が進んでいくであろう。

屋内だけでなく屋外にも共通の事項ではあるが、ドローンの使用自体が新たなリスクを発生させることにもなる。この点については、本稿で説明した事項がリスクを発生させない又は低減するために有効である。これをまとめると以下の通りとなる。

- 屋内で使用するドローンは可能な限り小型で軽量であること
- ブレードが露出しておらず、接触などで装置などにダメージを与えない構造であること
- 重要インフラである原子力発電所の情報セキュリティ対策が万全であること、これについては国産であることが望ましい。
- 施設点検の行動パターンから全方位を撮影できるカメラ（360度カメラ）の装着が望ましい。
- 高線量の箇所での使用に耐えられる“耐放射線”であること、また、放射性物質が付着しづらく、除染が容易な構造、材質であること
- レーザスキャナは機器形状などを3次元形状で取り込むには有効であるが、その装着にはドローンの大型化が避けられず、狭隘な箇所での使用に制限を受けことになる。3次元形状の取り込みは、光学カメラを用いた SfM (Structure From Motion) が望ましい。(SfM は、ある対象を撮影した複数枚の写真から対象の形状を復元する技術の総称。SfM ソフトウェアを使えば、複数の写真を入力することで、3次元モデルの作成が容易になる。)

なお、現時点では原子力発電所の屋内外で使用することについて法令上の規制を受ける

状況ではないが、使用は保安規定に定める要項、要領および手順書などの下に実施すべきである。

参考文献

- (1) 首相官邸ホームページ, “空の産業革命に向けたロードマップ 2022”, (https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogata mujinki/kanminkyougi_dai6/siryous3_2.pdf) (https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi_dai18/siryous4.pdf)
- (2) 国土交通省ホームページ, “無人航空機の飛行許可・承認手続”, (https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html#anc01)
- (3) 国土交通省ホームページ, “無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール”, (https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)
- (4) 警視庁, “小型無人機等飛行禁止法関連”, (<https://www.npa.go.jp/bureau/security/kogatamujinki/index.html>)
- (5) ドローン BUSINESS 研究所, (https://note.com/drone_biz_lab/n/n5d1a6efe8eb8)
- (6) 四日市コンビナート先進化検討会, (<https://www.yokkaichikonbinato-senshinka.jp/result/drone.html>)
- (7) 中部電力ホームページ (https://www.chuden.co.jp/resource/seicho_kaihatsu/kaihatsu/kai_library/news/news_154_04.pdf)
- (8) 中部電力ホームページ (<https://www.chuden.co.jp/resource/ham/211104dronewokatuyoushitatenken.pdf>)
- (9) World Nuclear News, “US utility uses drones for nuclear plant inspections” (<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-utility-uses-drones-for-nuclear-plant-inspections>)
- (10) The Robot Report, “SwRI demos drone autonomy inside nuclear power plant” (<https://www.therobotreport.com/swri-demos-drone-autonomy-nuclear-power-plant/>)