

引火性ガス環境で人に代わって情報収集や作業をする 無人モビリティの防爆設計

大西 献*

*三菱重工株式会社 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1
 *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 1-1-1 Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe, Hyogo, Japan
 *E-mail: ken_onishi@mhi.co.jp

キーワード：防爆 (explosion proof), 無人モビリティ (unmanned mobility), 内圧防爆 (pressurized enclosure), 耐圧防爆 (flameproof enclosure), 非接触給電 (contactless power supply).
 JL 0004/21/6004-0276 ©2021 SICE

1. はじめに

身のまわりには引火性ガスを取り扱う場面が多々ある。ライターやガスコンロなど“意図して火をつける”ものを除き、ガソリンスタンドなどでは“偶然に火がついてしまう（爆発する）”ことがないしくみになっており、そのための措置を“防爆”という。電気を使用する機器はすべて引火性ガスの爆発の原因すなわち点火源となる可能性があり、爆発を予防すべく、防爆のための厳密な規格¹⁾に則り、防爆型式検定を取得する必要がある。

筆者らは以前、石油ガスプラントにおけるロボットのニーズとマーケットについて論じた²⁾（図1）。

ここで石油ガスプラントとは、アップストリームと呼ばれるプラットフォーム（リグともいう）や船に掘削と生産設備・貯蔵設備を備えたFPSO (Floating Production, Storage and Offloading system), ダウンストリームと呼ばれる精製工場や化学製品工場、その間をつなぐパイプラインや備蓄タンクなどを指す。ほとんどすべての設備が引火性ガス環境下にあり危険なため、インシデント（たとえば暴風雪や引火性ガス漏れ検知時など）後の状況確認はもちろん日常の点検業務などでもロボットによる無人化への期待が高い。

この石油ガスプラントにおけるロボット化ニーズは、産

業競争力懇談会 (COCON) が2011年から4年間議論してきた³⁾「災害対応ロボットを日常使いにも共用し、ロボットの費用対効果を改善することにより社会実装を図る」ビジネスモデルに合致し、一見好都合である。しかし、引火性ガス環境で動作するロボットは、防爆型式検定の取得が必要であり、技術的な壁が現場へのロボットの適用を阻んできた。本稿では、石油ガスプラントの引火性ガス環境で人に代わって情報収集や作業をするロボットをいかに防爆化するか、その設計手法について述べる。以降、塗装用の防爆マニピュレータなどとは異なる用途や特徴を明確にするために、ロボットを無人モビリティと称す。

2. 防爆の基本（無人モビリティに適用可能な防爆方式）

無人モビリティに搭載されるバッテリーやコントローラ、サーボモータやセンサなどの電気品はすべて点火源となりうる。無人モビリティを防爆化する基本的な考え方は、石油ガスプラントで常用される照明やポンプなどの通常の防爆機器と変わらないが、適用できる防爆方式は限定される。たとえば、携帯式のガス検知器などに適用される本質安全防爆方式は、機器全体のエネルギーを点火にいたらない低いレベルに制限する方法であるが、移動やマニピュレーションなどある程度大きなエネルギーを必要とする無人モビリティに適用するのは難しい。また、小型センサなどに適用される樹脂充填防爆方式は、電気品をすべて樹脂で包んで引火性ガスとの接触を絶つ方式であるが、モータなどの可動部を完全に樹脂で充填することは難しくメンテナンスもできなくなってしまう。結果、無人モビリティには、防爆構造としては最も一般的な耐圧防爆方式および内圧防爆方式を（なんとか工夫して）採用することになる。耐圧防爆方式のしくみを図2に、内圧防爆方式のしくみを図3に示す。

一般的には、耐圧防爆構造は、物自体が重く大きくなるが、作ってしまえば特に気をつかうことなく使えて便利である。一方、内圧防爆構造は、気密性やインターロックの維持メンテナンスなど取り扱いが難しい反面、容器としては規定の最低内部圧力 50 [Pa] の内圧に耐えるだ

		インシデント対応	日常使い		
初動 → 災害の段階 → 復旧	高度な機能	異常の発見（ガス濃度・温度の計測 計器の読み取り等）	予兆検知	→	運転中に巡回
		災害規模確認			
	バルブ操作 スイッチ操作 サンプリング	給油 タッチアップ	→	停止して点検	
	ドア開閉	パイプやタンク減肉検査			
救助					
	高度な機能	消火	防爆性能が必要		
		規模計測 物資運搬	タンク内清掃		

図1 石油ガスプラントでロボットに求められる機能
 石油ガスプラントでは、一般の工場と同じく、異常やその予兆の早期発見のため日常的に巡回点検しているが、引火性ガス環境となる可能性があり危険なため、日常はもちろんインシデント（たとえば暴風雪や引火性ガス漏れ検知時など）後の状況確認などでもロボット、特に無人モビリティへの期待が高い。

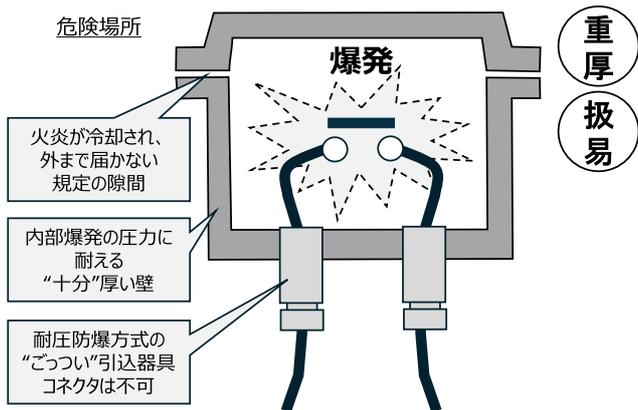


図2 耐圧防爆方式のしくみ

耐圧防爆容器内へ引火性ガスが侵入し、容器内部の電気品が引き金になって爆発が起こっても、耐圧防爆容器が外部に漏れだすエネルギーを削ぎ、容器外部の引火性ガスの点火に必要なエネルギーに至らないので、容器外部に引火しない。

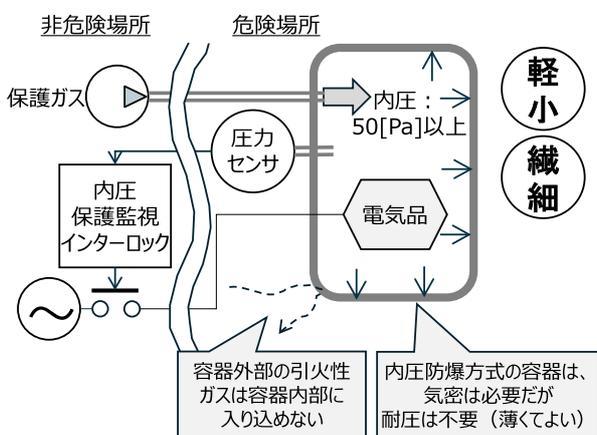


図3 内圧防爆方式のしくみ

内圧防爆容器内の保護ガスの内圧が、引火性ガスのある容器外圧より高く保たれており（陽圧）、引火性ガスの侵入を防ぐので、容器内部の電気品は容器外部の引火を引き起こさない。

けでよく、非常に軽くできるメリットがある。

多層階の石油ガスプラントを移動する無人モビリティとしては、自身の寸法や質量を小さく抑える必要があり、内圧防爆構造が適していると考えられる。一方、無人モビリティが連続稼働するために自動充電する固定設備（以下「ステーション」という）としては、重さや大きさよりも取り扱い性を優先して、耐圧防爆方式が適していると考えられる。

3. 無人モビリティ本体の防爆化技術

筆者らは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」(2014～2017年度) 開発委託と助成を受け、大容量バッテリーを搭載した遠隔操作型モビリティとして国内で初めて防爆型式検定を取得した⁴⁾。現在これを無人化し、石油ガスプラントを自動巡回するタイプを開発中である⁵⁾。開発中の無

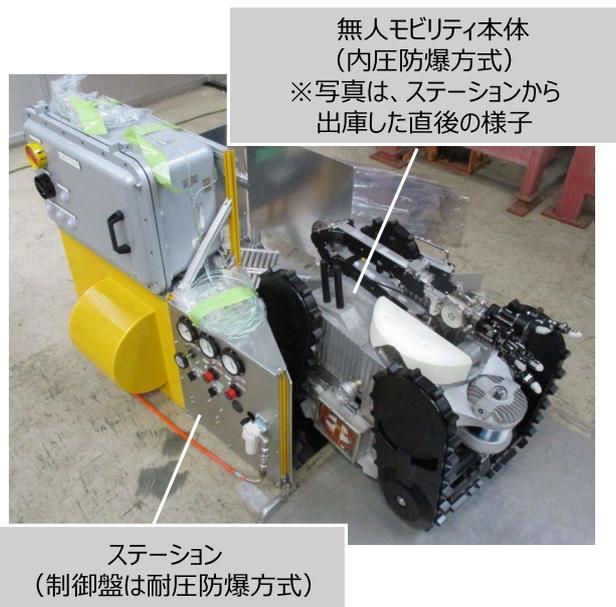


図4 石油ガスプラント向け防爆無人モビリティ
内圧防爆方式の無人モビリティ本体（図右のクローラタイプのロボット）と、自動充電および内圧維持のための保護ガスの自動充填をする耐圧防爆方式のステーション（図左）との組み合わせで、プラントの自動巡回を実現する。

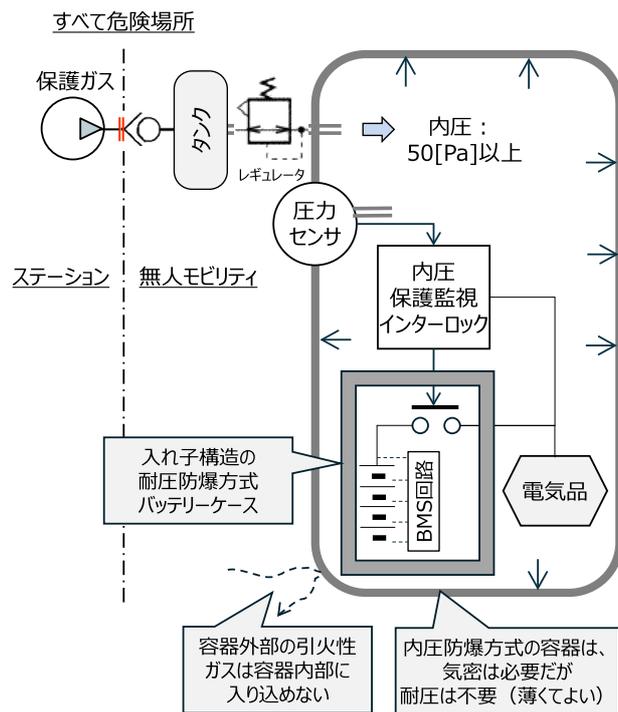


図5 防爆無人モビリティの内圧防爆システム概要

内圧は、引火性ガスがある外圧より、保護ガス（この図では通常の圧縮空気）によって高く維持され、保護ガスは、ステーションでの充電と同時に、モビリティ内のタンクへ充填される。また、ステーションで内圧が低下し、内圧保護監視インターロックが働くと、内圧防爆容器である無人モビリティ内の電気品へのバッテリーからの電気の供給が遮断される。

人モビリティの外観を図4に、その内圧防爆システムの概要を図5に示す。本稿ではこの無人モビリティを例に防爆化技術について解説する。

内圧防爆方式はもともと、耐圧防爆方式にできないような大型の現場制御盤に適用する方式であり、内圧の維持に必要な保護ガスを、非危険場所からホースで供給することが多い。しかし無人モビリティの場合、ホースを引きずって活動することはできないため、特別の工夫が必要である。前述の無人モビリティでは、本体内に小型（約200 [cc]）のタンクを装備し、ステーションに帰還するたびに保護ガスとして、石油ガスプラントで常用される圧縮空気（約0.5 [MPa]）をタンクに自動充填することで、無人モビリティ活動中は、このタンクからレギュレータを介して低圧（前述の50 [Pa] 強）の保護ガスを内圧防爆容器である無人モビリティ本体内部へ供給し続ける。万一内圧が低下した場合は、内圧保護監視インターロックが作動し、内圧防爆容器内の電気品への電気の供給を断つことが規定に定められている。通常の内圧防爆システム（たとえば図3に示す現場制御盤）では非危険場所から供給されている元の電気を遮断するが、無人モビリティの場合、容器内のバッテリーから無人モビリティ内部電気品へ供給している電気を断つことしかできず、バッテリーのセル自体は帯電状態を維持したまま無人モビリティ内に残留し、そのままでは発火源となってしまう。よって、バッテリーだけをさらに別の防爆方式で保護する必要があり、この無人モビリティでは耐圧防爆方式を採用した。耐圧防爆方式のバッテリーケースを、内圧防爆方式の無人モビリティ本体に外付けすることも考えられるが、耐圧と内圧の2つの防爆容器間のケーブルやコネクタが引火性ガス雰囲気下となるためさらに追加の防爆化措置が必要となり、無人モビリティが大型化する。これを避けるため、内圧防爆方式の無人モビリティ本体内部に、図6に示す耐圧防爆方式のバッテリーを入れ子構造とした。

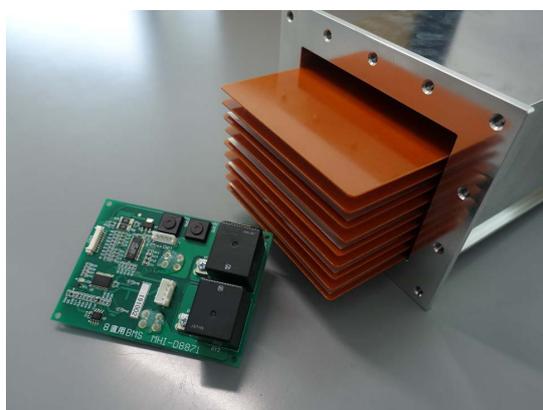


図6 防爆無人モビリティ内蔵の耐圧防爆バッテリー
内圧防爆インターロックが作動したときにバッテリーからモビリティ内部電気品への電気供給を断つ回路と、バッテリーマネジメントシステム (BMS) とを一体化し、バッテリーセルとともに耐圧防爆容器内に収めた。耐圧容器にふさわしく、分厚いジュラルミン製である。

4. ステーションの防爆化技術

ステーションには無人モビリティ本体を自動充電する機能が必要である。石油ガスプラントは通常屋外であり、耐環境性を考慮すると非接触で充電することが望ましい。しかし、ステーションの給電側も、無人モビリティの受電側も防爆機器であり、非接触給電の電磁波を妨げない非導電材料として、静電気が帯電するプラスチック材は使用できず、ガラスのみが候補となる。耐圧防爆方式の送電コイルケースと、内圧防爆方式の無人モビリティに内蔵された受電コイル部の外観を図7に示す。

防爆指針に定める容器外部への衝撃試験（指定先端形状の1 [kg] の重りを対象素性に応じた高さからぶつけて健全性を確認する試験）と、ステーション送電側の耐圧防爆要件に合致するガラスは、風冷強化したとしてもそれぞれ約10 [mm] 厚が必要であり、おのずと送電と受電のコイル間距離は30~40 [mm] と長くなってしまふ。防爆機器に非接触給電を採用するためには、この距離での高い電力伝送効率の達成とともに、漏洩する電磁界が防爆性能に影響を与えないことを評価しなければならない。長距離での高効率の電力伝送を実現するために、トランスなどに古くから採用されている磁界結合（電磁誘導）方式の中でも、送受電に用いるコイルを「共振（共鳴）状態」とすることでコイル間の距離が長くても高効率で電力を伝送できる磁界共鳴方式を採用した。また、漏洩する電磁界の防爆性能への影響はつぎの2つに分けて評価した。1つ目は、漏洩電磁界によって周囲の磁性材料に生じる渦電流熱が引火性ガスを爆発させないかであり、非接触給電の最大出力での発熱を実測し、防爆規定にガス種別ごとに定められている最高温度以下であることを確認した。2つ目は、漏洩電磁界によってループ状の導電性構造物のギャップに生じるスパークが、引火性ガスを爆発させないかであり、防爆規定に引用されているガイド⁹⁾に従ってアセスメントを実施した。このガイドには、ガス種別ごとに点火に至らない“安全”な電磁界の周波数と強度が示されており、非接触給電の最大出力で発



図7 防爆の非接触給電システムの外観
防爆機器であるがゆえに、送電側（図左）と受電側（図右）のコイル間距離はおのずと30~40 [mm] と長くなってしまふ。電力伝送効率の高い方法が求められる上、防爆機器としては、漏洩電磁界によって周囲の磁性材料に生じる渦電流熱や、ループ構造物のギャップに生じるスパークが、引火性ガスを爆発させないかの評価も必要である。

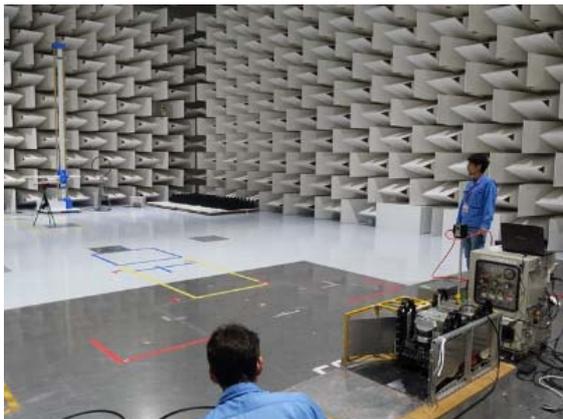


図8 非接触給電の漏洩電磁界の実測

電磁界がループ状の導電性構造物（大きなコイルのイメージで、たとえば非接触給電システムの周囲のパイブラック群など）を貫通することで、ループのギャップに引火性ガスを爆発させるに足るエネルギーのスパークが発生することが想定される。CENELEC ガイドに基づき、電波暗室内で非接触給電システムの漏洩電磁界を実測し、爆発しないかどうかを評価する。

生ずる電磁界を実測して評価した（図8）。

5. さいごに

実例をもとに、無人モビリティの防爆化について、主たる技術課題に絞って詳述した。

近年、経済産業省では、石油ガスプラントなどの設備の高経年化や高齢化による人材不足をIoTやAIなどを活用して補うべくスマート保安を推進中であり、ロボットやドローンなどの防爆化技術の開発だけでなく、規制緩和にも取り組んでいる。防爆の認証制度は、国際的には、IEC（国際電気標準会議）の下でIECEXシステム（IEC 防爆機器規格適合試験制度）として運用されており、日本では、このIEC 60079シリーズに日本固有の特殊事情を加味した電気設備防爆指針¹⁾が規格として運用されている。基本的な技術事項についてはIECEXと整合しており、国際的な相互認証も進んではいるが、IECEXの型式検定だけで防爆機器の使用を自国内で許可している国は世界的には少数であり、いまでも国ごと・地方ご

とに（日本でも）検定を取得し直さなくてはならない。

例示した防爆無人モビリティは、国内で有効な電気設備防爆指針¹⁾にもとづく防爆型式検定だけでなく、IECEXとヨーロッパで有効なATEXにもとづく防爆型式検定を取得し、2022年に世界のスマート保安市場に投入すべく開発を加速中である。検定取得の手間が少しでも削減され、活発な産業活動につながるよう、さらなる規制緩和に向けての意見集約や国際化に努力していきたい。

（2021年1月6日受付）

参考文献

- 1) TIIS: TIIS 技術資料 Ex2015 上巻/下巻（対応国際規格 IEC60079 シリーズ）、公益社団法人産業安全技術協会（2015）
- 2) 大西 献：石油ガスプラントなどでのガス爆発災害の予防と対応に貢献するロボット技術、日本ロボット学会誌、**38-3**, 25/28（2020）
- 3) COCN 産業競争力懇談会：2011/2012 年度推進テーマ「災害対応ロボットと運用システムのあり方」、2013 年度「災害対応ロボットセンター設立構想」、2014 年度「災害対応ロボットの社会実装」プロジェクト最終報告（COCN の HP 参照）
- 4) 大西、宿谷、岡崎、ほか：引火性ガス雰囲気内探査ロボットの開発、日本ロボット学会学術講演会予稿集、1Y3-03（2016）
- 5) 小堀周平：移動型の防爆ロボットの実用化—石油化学プラントを自動巡回点検するロボット—、アグネ技術センター「金属」、**89-8**（通巻 1195 号）（2019）
- 6) CENELEC: *Assessment of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation - Guide* (CLC/TR50427:2004)

[著者紹介]

おおにし けん 君
大 西 献 君



1986年東京大学工学部精密機械工学科卒業、同年三菱重工業株式会社に入社、原子力・一般産業・家庭用向けロボットの企画・開発・設計製造に従事、現在、同社原子力セグメント技監・主幹技師。技術士（機械部門ロボット）、Professional Engineer（機械および電気）、博士（工学）、気象予報士、日本機械学会フェロー・正員、日本ロボット工業会会員、日本ロボット学会フェロー・正会員。