

解説

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

—防爆技術を中心として—

Explosion-proof Robotics Technology Contributing to Prevent and Response to the Flammable Gas Disaster in the Petrochemical Facilities

大西 献* *三菱重工 (株)
Ken Onishi* *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd

1. はじめに

災害対応ロボットの社会実装はいろいろな意味で難しい。日本では過去様々な災害対応ロボットが開発されてきたが、1995年阪神淡路大震災、1999年東海村JCO臨界事故、2011年東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第一原子力発電所事故などに際し、少なくとも初動段階で国産の災害対応ロボットが現場投入されたことはなかった。実際、福島第一原子力発電所事故で真っ先に現場投入されたロボットは、当時iRobot社が米国の大きな軍事マーケットに支えられて量産し改良を重ねてきた遠隔操作型移動ロボット“Packbot”であった。この状況を打開せんと2011年度から4年間、産業競争力懇談会（産業界の有志で構成し、競争力強化にかかわる政策提言をとりまとめる社団法人、COCONと略称）において産官学集って議論した。詳細は各年度の報告書[1]を参照されたいが、災害対応ロボットが日本で社会実装されていない理由を一言でいうと「継続的でボリュームの大きいニーズ、すなわち災害対応ロボットのマーケットの欠如」である。「いつ起きるか分からない災害に備える“専用”ロボットを維持することは費用対効果が望めず購入できない」といった現状を脱却し、マーケットを創造するためには、「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」ことが必要であると結論づけた。

2. ロボットによるマーケットの創出

2.1 背景

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、トンネルなどでの災害発生時、引火性ガス雰囲気の中、危険を冒して災害現場に立ち入る人の代わりに状況確認作業をするファーストレスポンスとしての遠隔操作型ロボット（図1）を開発した。防爆に関する国際IEC規格60079シリーズに整合する「工場電気設備防爆指針（国際整合技術指針）Ex2015」[2]に基づく防爆

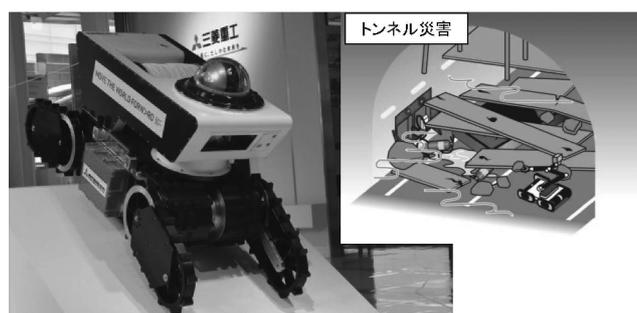


図1 遠隔操作型の“桜II号（防爆仕様）”

		災害対応	日常使い		
初動	異常の発見（ガス濃度・温度の計測 計器の読み取り等）	災害規模確認	予兆検知	高度な機能	運転中に巡回
		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		
災害の段階	救助	ドア開閉	パイプやタンク減肉検査	高度な機能	停止して点検
		救火	防塵性能が必要		
復旧	規模計測 物資運搬	タンク内清掃			

図2 石油ガスプラントでロボットに求められる機能

型式検定を、大容量バッテリーを搭載した無線移動可能なロボットとして国内で初めて取得することができた[3]。引火性ガスが充満したタンク内部を除くほぼすべての危険場所（ゾーン1）で、水素ガスを含むほぼすべての引火性ガス（グループ：IIB+H₂，温度等級：T3）に対応している。しかし、トンネル災害対応“専用”ロボットでは、例えば消防やトンネル管理組織などにニーズはあるものの、マーケットは限定的であることは前述のとおりである。

2.2 石油ガスプラントにおけるロボットマーケット

石油ガスプラントでは、“災害対応”だけでなく、巡回点検など“日常使い”に同じロボットを共用できる可能性がある。石油ガスプラントでの災害対応と日常使いとでロボットに要求される機能を図2に、ロボットをプラントに導入するメリットを図3に整理する。災害対応の初動（ファーストレスポンス）と、日常使いとして巡回点検に求められる機能は似通っていることが分かる。実際には基本機能として以下も求められる。

原稿受付 2020年1月4日

キーワード：Explosion-proof Robot, Oil & Gas Facilities

*〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1

*Hyogo-ku, Kobe-shi, Hyogo

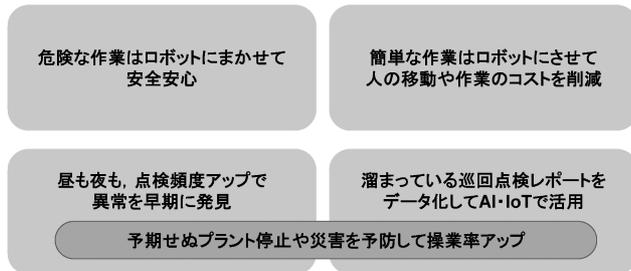


図3 石油ガスプラントへのロボット導入メリット

(基本機能①) 防爆性能

(基本機能②) 多層階のプラントを移動可能な階段昇降を含む踏破性能

(基本機能③) 遠隔操作だけでなく、ルーチンの巡回点検を自動でこなす自律移動性能

災害対応によるメリットはコスト換算しにくいですが、巡回点検に要している人件費の削減や、データ化されていない巡回点検データがプラント操業効率化にもたらす価値増加などよりも低いコストで、災害対応と日常使いに共用可能な機能を有するロボットを提供できれば、ロボットのマーケットが開ける可能性がある。

3. ロボットの防爆化技術

ロボットを防爆化する方法の基本的な考え方は、通常の防爆機器と変わらない。図4に爆発を引き起こす三つの要素(可燃性ガス、酸素、点火源(エネルギー))を示す。これら3要素が同時に存在する所に爆発の可能性が生じる。ロボットにおいて点火源とは、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すべてである。防爆構造はこのうち最低一つの要素を消去することにより爆発を生じさせない性能(防爆性能)を確保している。

防爆構造として代表的な耐圧防爆構造のしくみを図5に、内圧防爆構造のしくみを図6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扱いが難しい反面、物は非常に軽くできるメリットがある。

多層階のプラントを移動するロボットとしては、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。しかしロボット本体部から離れた場所に単独で装備するマニピュレータ先端カメラや、厳密な気密を要求する内圧防爆構造では実現し得ない機能要素、例えば空気の振動を電気に変換するマイクなどは、単独機器として耐圧防爆構造を採用するなど、適切に防爆構造を選択して一つのロボットとしてシステムアップしていく必要がある。

4. 石油ガスプラント向け防爆移動ロボットの開発

防爆性能を付加しながら、屋外で多層階のプラントを遠隔操作または自律で移動し、情報を収集するロボットは技術的にかなりチャレンジングである。ロボット導入によるコストダウン効果を求めるあまり高機能を追い求めがちだ

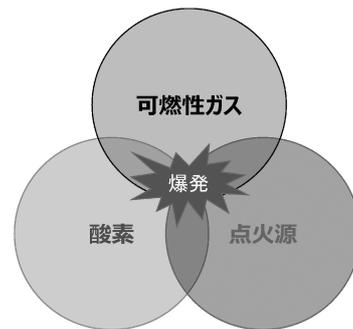


図4 爆発を引き起こす3要素

耐圧防爆容器内の電気品が引き金になって爆発が起こっても、耐圧容器が点火源のエネルギーを削ぐので、容器外部には引火しない

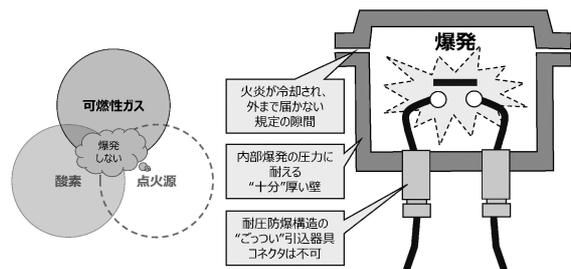


図5 耐圧防爆構造とは

内圧防爆容器内の保護ガス内圧が、容器外部の引火性ガスの侵入を防ぐので、容器内部の点火源(電気品)から容器外部に引火しない

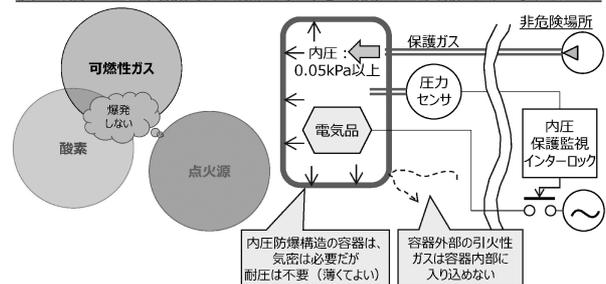
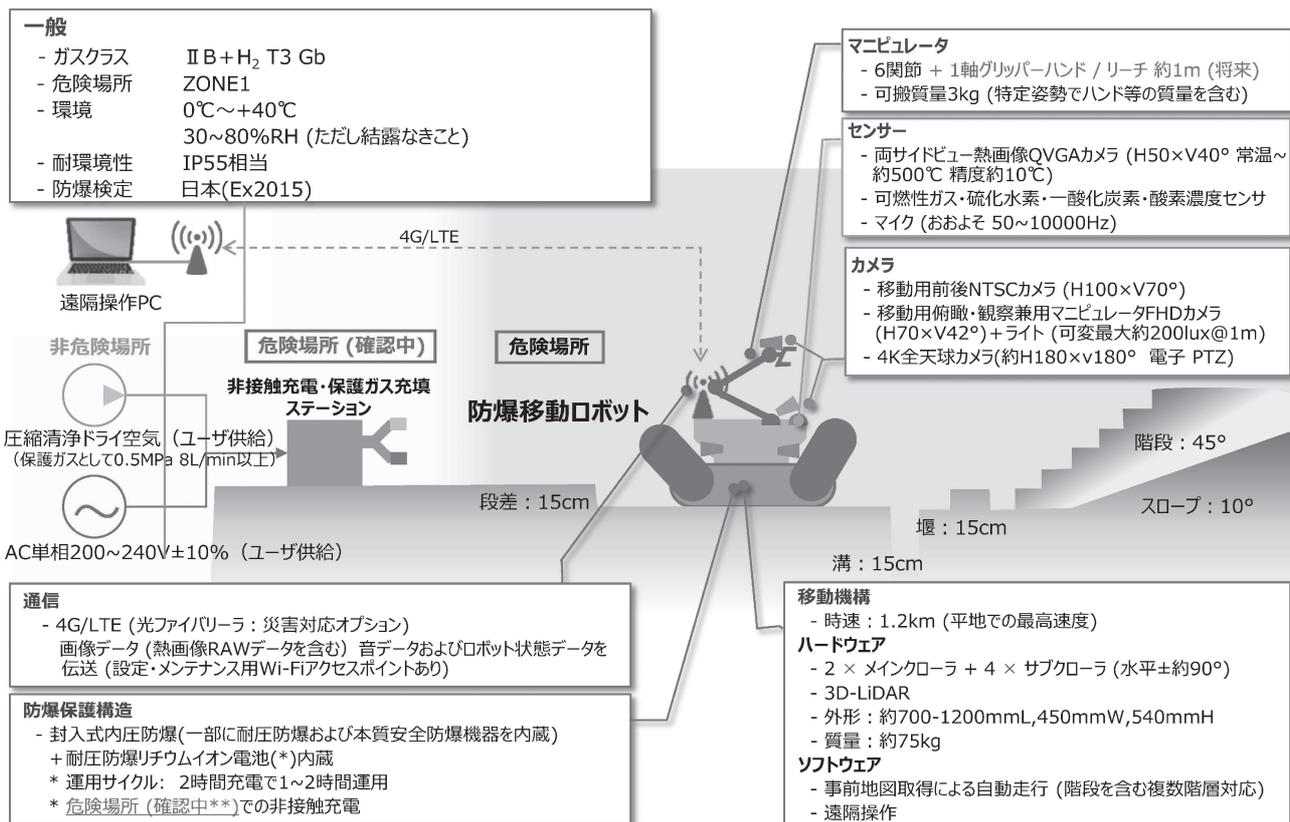


図6 内圧防爆構造とは

が、筆者らはまず災害対応用としての遠隔操作と、日常使い用としての自動情報収集(巡回点検)に機能を絞り、その実現性を別報[4]で論じ、石油ガスプラントを自動巡回点検するロボットの開発状況[5]と実プラントでの実証試験の状況[6][7]を速報した。

石油ガスプラントの災害対応と自動巡回点検の共用を目指すロボットの仕様を図7に、開発中のプロトタイプ機の防爆機器構成を図8に示す。クローラ駆動系は災害対応向けと同等性能を維持しつつ、プラント内を自律走行するための3D-LiDAR、信頼性の高い自動充電を可能とする非接触充電システムを新たに防爆化して搭載した。巡回点検用として、6自由度マニピュレータにカメラを装備して巡回点検員に近い視野を確保し、プラント機器の発する音情報を収集する防爆マイクも装備した。また、熱画像カメラとガス検知器を装備し、プラントの熱・ガスの分布と経時変化をプラントオペレータへ提示する。基本的には内圧防爆構造であるが、部分的に耐圧防爆構造などのパーツを組み合わせてシステムアップした。システムアップにあたり、特に難しかった箇所・防爆の検定機関から指摘を



** CENELEC technical report "PD CLC/TR 50427:2004 Assessment of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation -Guide"に適合

図7 石油ガスプラント向け防爆移動ロボットの仕様

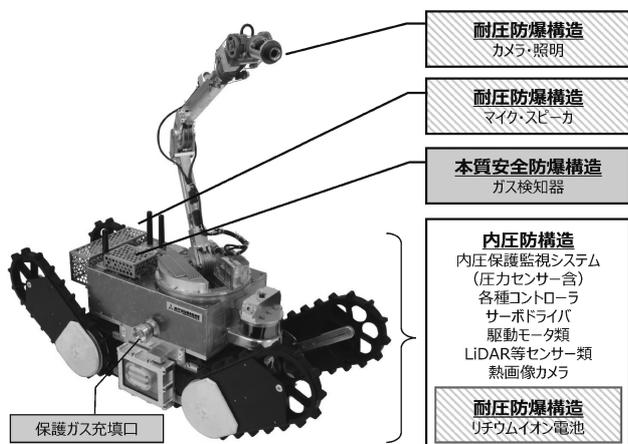


図8 防爆移動ロボットの防爆機器構成

受けた箇所を以下に列記する。今後、ロボットの防爆化開発をする際の参考となれば幸いである。

- ① 静電気対策：防爆機器には静電気蓄積を防止する目的で、非金属材料使用の制限がある。例えば、アンテナや非接触給電のコイル面などは、金属材料が使えず、この使用制限の影響を受ける箇所である。今回アンテナは、静電気制限 φ20 [mm] 以下のプラスチック構造とし、衝撃試験 (質量 1 [kg] のおもりを規定高さからぶつけて機能を失わないことを確認する試験) に耐え、所定の耐熱性・耐環境性を有する UL 認定ポリカーボネート材を使用した。また、非接触給電のコイル面は、静電気制限を受けないガラスを使用した。上記衝撃試

験に耐えるには厚さが約 10 [mm] の強化ガラスが必要であったが、コイル間距離が広がってしまっても効率よく非接触で電力供給できる磁気共鳴結合システムを新規開発した。

- ② 耐電圧への対応：ロボットはバッテリー駆動であり、当初バッテリー最大電圧約 30 [V] で電気機器を構成すればいいと考えていたが、非接触給電とはいえ商用 200 [V] 電源に接続されることを想定する必要が生じた。今回はガス検知器として本質安全防爆構造を採用したため、絶縁距離などの制限に関して検知器の設計に大きな影響を受けた。
- ③ 非接触給電への対応：非接触給電は電磁波によりエネルギーを伝達する手段であり、防爆上は電磁波強度は非常に安全側に制限されている。無線通信程度であれば問題ないが、数 10~数 100 [W] の電力を伝達するための電磁波をどのように評価して防爆認定するかについては、世界的にも実績ある評価方法がない。現在、防爆規定で参照されている別規格に適合 (電磁波により周囲の構造物に誘起されるエネルギーが引火を引き起こすエネルギーに比べ十分小さいことを確認) し、かつ無用な電磁波を発生しないよう多重のインターロックを付加することで認定が取得できないか、防爆検定機関と相談中である。

現在国内の石油事業者と協力して実プラントでのロボット遠隔操作および自動巡回の実証試験を実施中である。図9にその状況を示す。

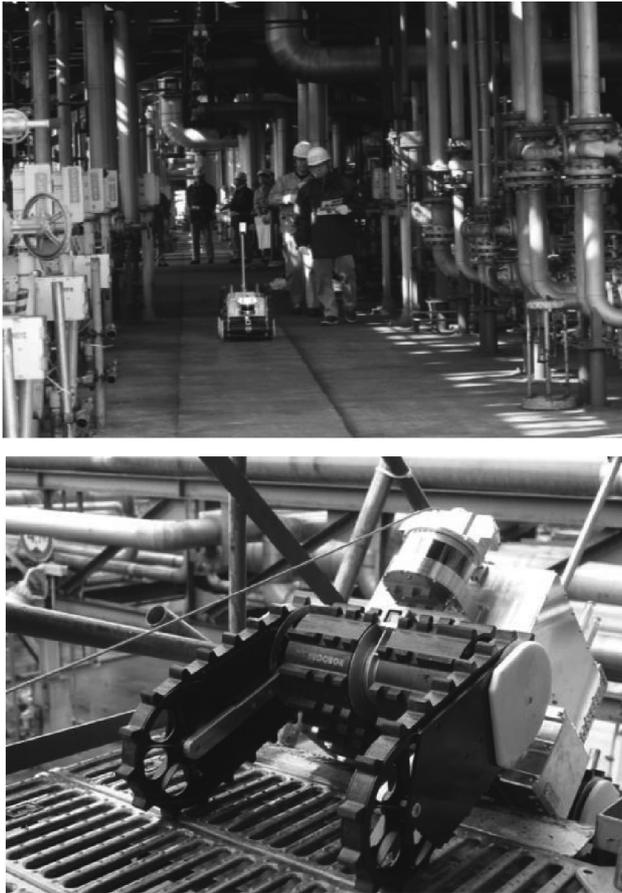


図9 防爆移動ロボットの実プラント実証試験

5. さ い ご に

災害対応ロボットとしては、非常時にオプションで有線操作を可能とする自動光ファイバドラムも開発中である。一方、巡回ロボットとしては、データを蓄積し、将来は高度な処理をするためのクラウドシステムや、使いやすいマ

ンマシンシステムの構築が今後の課題である。災害対応と日常使いとを共用することが、ロボットの費用対効果を改善し、災害対応ロボットのマーケットをも創出する良い先例となることを期待しつつ、石油ガスプラント向け防爆移動ロボットの完成度を高め、メンテナンス体制を整備して製品化を進めていく予定である。

参 考 文 献

- [1] 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）。
- [2] 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。
- [3] 大西献，宿谷光司，岡崎弘祥，ほか：「引火性ガス雰囲気内探査ロボットの開発」，第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM，1Y3-03，2016。
- [4] 大西献，宿谷光司，岡崎弘祥，ほか：「防爆性能を有する移動ロボットの開発」，第 35 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM，1E3-04，2017。
- [5] 大西献，宿谷光司，岡崎弘祥，ほか：「防爆移動ロボットのプラント自動巡回点検への応用」，第 36 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM，3F3-03，2018。
- [6] 小堀：「移動型の防爆ロボットの实用化—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」，vol.89，no.8，2019。
- [7] 大西献，宿谷光司，ほか：「防爆移動ロボットによる石油ガスプラント巡回点検」，第 37 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM，1G1-03，2019。



大西 献 (Ken Onishi)

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，現在三菱重工業株式会社パワードメイン原子力事業部技監・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。

（日本ロボット学会正会員・フェロー）