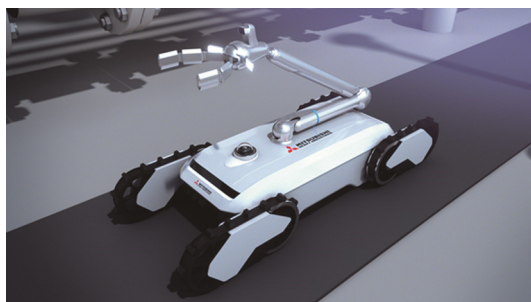


石油化学プラント向け自動巡回防爆ロボットの開発

Development of the Explosion-proof Autonomous Plant Operation Robot for Petrochemical Plants



宿谷 光司*²
Koji Shukutani

大西 献*¹
Ken Onishi

大西 典子*²
Noriko Onishi

岡崎 弘祥*³
Hiroyoshi Okazaki

小島 弘義*³
Hiroyoshi Kojima

小堀 周平*³
Syuhei Kobori

石油化学プラントを省人化しつつ、プラント巡回密度を上げて信頼性を確保するため、国内外の石油ガスオペレータは、プラント巡回点検のロボット化ニーズを持っているが、ロボットの防爆化が障壁となり、ニーズを満足するロボットはほとんどない。当社は引火性ガス雰囲気内で無線移動可能な陸上移動防爆ロボットを開発済みであり、この防爆モビリティ構築技術を活かして、現在、上記ニーズを満足すべく、プラント自動巡回防爆ロボットの開発を世界に先駆けて推進している。開発中のロボットは、地図情報及びセンサ情報により自律移動し、搭載するカメラやガス検知器等により、計器類の画像、熱画像やガス濃度などのプラント情報を自動で取得可能である。

1. はじめに

操業中の石油化学プラントでは、災害に至る前に異常を発見すべく点検員が定期的に巡回しているが、プラントには火災や爆発の危険が常に存在し、巡回場所は高所や狭隘部も多く、時には暴風雨、極寒など過酷な環境下であるため、石油ガスオペレータにとって従事者の安全確保は重要な課題となっている。また、巡回密度を向上しプラントの信頼性を確保することや、油価変動にかかわらず収益を確保すべく省人化・自動化により操業効率化を図る課題もある。

当社は 2014 年度より、トンネルやプラント等での災害発生時に人が容易に近づけない引火性ガス雰囲気における内部状況の確認作業を想定し、遠隔操作型の陸上移動防爆ロボットを開発した。そして、大容量バッテリーを搭載した移動ロボットとしては国内では初めて“国際整合防爆指針 (Ex2015)”⁽¹⁾に基づく防爆型式検定を取得した⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。本報では、引火性ガス雰囲気内で無線移動可能な防爆モビリティ構築技術の応用例として、遠隔操作型の陸上移動防爆ロボットを開発のベースとした石油化学プラントの巡回点検を行う自律移動型の防爆ロボット(以下 自動巡回防爆ロボット)の開発状況について述べる。

2. 自動巡回防爆ロボット(第一世代機)の概要

現在、国内外の石油化学プラント事業者と協力してプラント内を自動巡回し情報を収集する第一世代の自動巡回防爆ロボットを開発中であり、模擬プラントでの試験運用・改良を経て、早ければ 2019 年度から実プラントへ展開する計画である。開発中のロボットのシステムと仕様の概略を [図1](#)に示す。

自動巡回防爆ロボット(第一世代機)は、プラントのワンフロアを、事前に取得した地図情報及びセンサ情報により自律移動が可能であり、予め設定したスケジュール及び巡回ルートに従って走行させ、搭載する可視カメラ、サーモカメラ、ガス検知器等により、計器類の画像、温度やガス

*1 パワードメイン 原子力事業部機器設計部 主幹技師 工学博士 技術士(機械部門)

*2 パワードメイン 原子力事業部機器設計部 主席技師

*3 パワードメイン 原子力事業部機器設計部

濃度などのプラント内の情報を取得することを目的としている。試作した自動巡回防爆ロボットの外観及び機器構成を図2に示す。

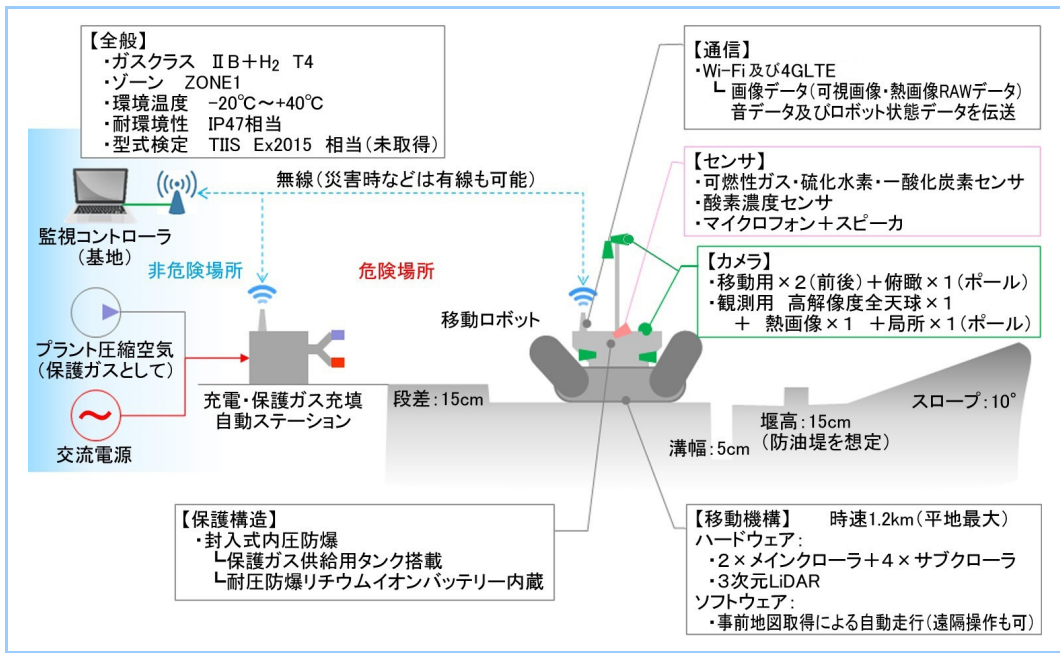


図1 自動巡回防爆ロボットのシステムと仕様概略

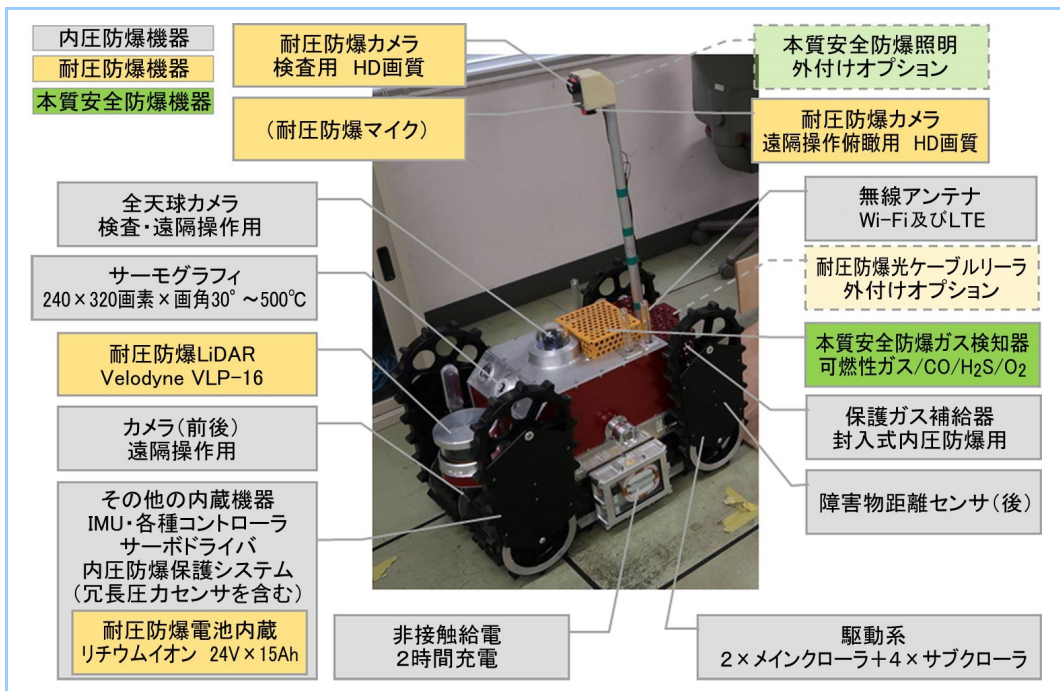


図2 ロボット外観及び機器構成

初期の遠隔操作型ロボットは、開発コンセプトとしてロボットの設置やメンテナンスに揚重装置を必要とせず、人手でハンドリングできる軽量さを実現するため、ロボットの防爆構造として、耐圧防爆構造よりシステムは複雑だが、軽くできる内圧防爆構造を採用した。自動巡回防爆ロボットの防爆性能は、これを維持しておりZone1(例えば、通常の運転、操作に伴う蓋の開閉等によって引火性ガスを放出する開口部付近のように、爆発性雰囲気をしばしば生成する可能性のある場所)に対応する。また、走破性能は本ロボットのソフトウェアアップデートだけで階段昇降を含むマルチフロアに対応できるよう、クローラ駆動方式や内圧防爆による軽量化コンセプト(全体質量60kg)は初期の遠隔操作型ロボットを維持しつつ、自律での巡回及び情報収集を行うために以下の仕様追加及び改良を行った。

① 内圧防爆構造(封入式)の採用

開発のベースとした遠隔操作型の陸上移動防爆ロボットは、防爆構造として、容器内に保護ガスを加圧封入し、容器内圧を外気圧より高くすることで引火性ガスが容器内へ進入することを防ぐ内圧防爆構造のうち、容器が気密構造である密封式を採用していた。しかし、防爆機能を維持するためには、保護ガスとして不活性ガス(N₂)を封入する必要があり、付帯設備が大きく、また運用も複雑であった。そこで、ロボット内圧を維持するための蓄圧タンクを搭載し、漏洩した保護ガスを補充する構造に改造することで、内圧防爆構造のうち封入式を採用した。これに伴い防爆規定により保護ガスをエアとすることが可能となり、運用を簡便にした。図3に防爆構造の概略を示す。

内圧防爆構造では内圧を常時監視し、バウンダリが破損した際に電源を遮断する保護回路を搭載するよう防爆規定に定められている。ロボット内部にバッテリーを搭載する場合、内圧防爆構造のみでは、バウンダリを形成するロボット本体が破損した際に、保護回路により電源を遮断してもエネルギーを有するバッテリーが引火性ガスに触れ、発火源となる可能性がある。そこで、内圧防爆構造のロボット本体に、耐圧防爆構造のバッテリーを内包する入れ子構造を採用している。

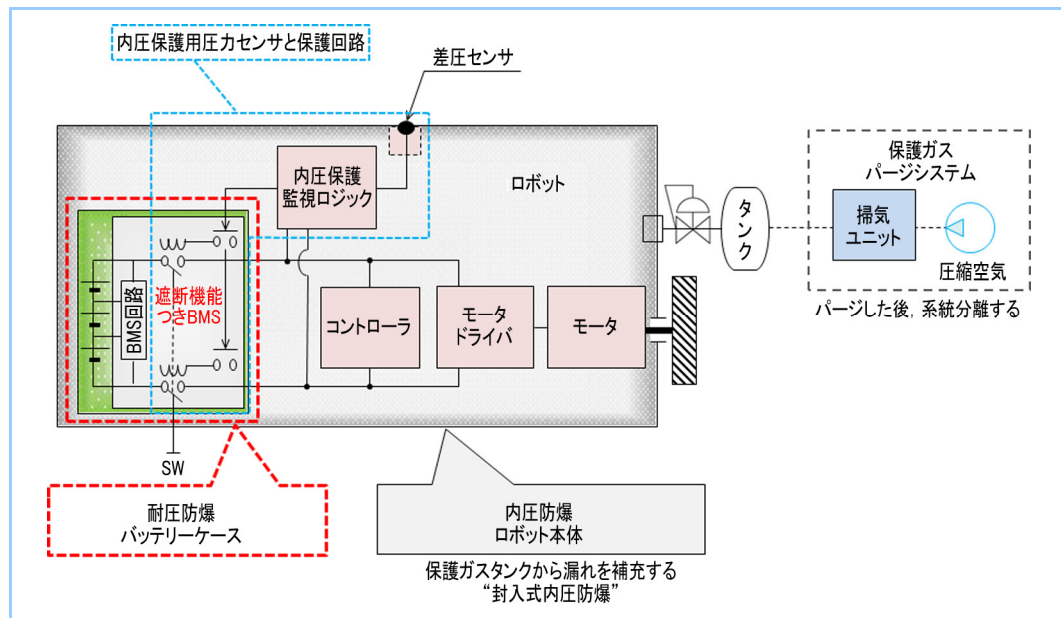


図3 ロボットの防爆構造

② 内蔵バッテリーを自動充電する給電システム

屋外の悪環境(雨、埃など)での充電を想定し、非接触給電とした。防爆上の制限である帯電防止と、非接触給電の電磁波による発熱防止を両立する材料はガラスしかなく、防爆構造上の強度を満足するために厚さ6~10mmの強化ガラスが必要である。これにより、給電側と受電側の距離は通常非接触給電装置に比べて離れてしまうが、この条件でも十分(2時間充電して1時間ロボットが稼働)な給電を実現するために、磁気共鳴方式を採用した。試作検証中の給電システムの概要を図4に示す。自動巡回防爆ロボット(第一世代機)では給電は非危険場所で行うが、第二世代機では危険場所でも実施する計画である。防爆規定上、引火性ガス雰囲気内での電磁波の放射は保守的に規制されているが、実際の電磁界強度データをもとに防爆検定機関と協議を開始している。

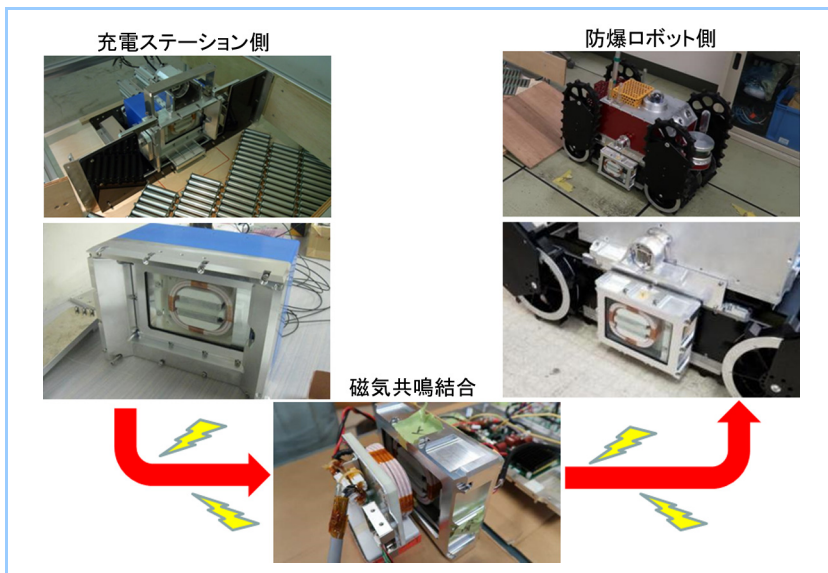


図4 給電システムの概要

③ 長期間稼働のための充電・充填ステーションの構築

ロボットの長期間の稼働を実現するために、ロボットが搭載するバッテリーへの給電と、ロボット内圧を維持するための蓄圧タンクへのエア充填とを合わせて行うステーションを構築し、ロボットがステーションに帰還するタイミングで、充電と充填を同時に実施できるようにした。ステーションは、できるだけ少ないセンサでロボットを正確に充電システム及び充填システムに位置決めできるように、ローラを用いた微い機構を採用しており、ロボット進行方向に対してステーションのローラを斜めに配置することで、ロボットは直進動作のみで最奥の壁と片方の側壁に接する位置まで案内される。試作したステーションを図5に示す。

ステーションは、狭いオフショアプラントへの設置を想定し、1m×1m まで小型化し、ロボットと同様、揚重装置を必要とせず、人手でハンドリング可能なように質量 60kg に軽量化している。

④ プラント内を自動巡回する自律移動システムを装備

ハードウェアとして、3D レーザレンジファインダ (LiDAR) を新たに防爆化して搭載した。耐圧防爆の独立した構造として、内圧防爆のロボットのどの位置にでも柔軟に取り付け変更可能とした。また、SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) と呼ばれる自己位置推定と環境地図作成を行うソフトウェアパッケージを導入し、これら高度なソフトウェア処理を可能とするハイスペックなコンピュータを内蔵した。ロボットが環境地図情報をもとに LiDAR の情報と比較して自己位置を推定している状況を図6に示す。



図5 ステーション外観

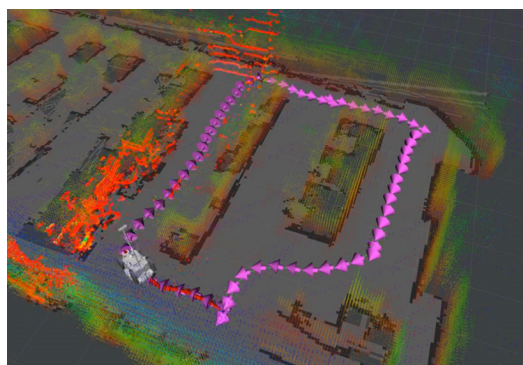


図6 自己位置推定の状況

⑤ プラント情報収集のためのセンサを装備

ロボット本体上部に設けたポール上に小型の耐圧防爆カメラを装備し、巡回点検員に近い視野を確保した。将来はロボットにマニピュレータを装備し、先端に耐圧防爆サーモカメラを搭

載することで、広い観察視野を得る計画である。また、プラント機器の発する音情報を収集する耐圧防爆マイクロフォンも単体で開発済みである。更に、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計画である。

⑥ IoT プラットフォームの構築

ロボットとプラントオペレータをつなぐ無線通信手段として、Wi-Fi だけでなく LTE も常備するとともに、災害時の通信インフラ途絶に対応する手段として、有線通信用光ファイバーをオプションとして後付けできる構成とした。

伝送されたプラント情報から機器の異常を検知するため、環境条件(天候や時間など)によらず異常を検出する画像等の処理技術と、特定された場所ごとに経時比較してプラントオペレータに提示するデータ蓄積・処理システムを構築中である。このデータはセキュアクラウドを介して遠隔地でも監視でき、必要に応じてロボットの自動稼働スケジュールを編集するなど可能である。また、自律化が難しい作業(例えば、汚れた計器を読み取る、将来第二世代機で予想されるスイッチ盤を操作する、バルブを操作しサンプリングするなど)も同じプラットフォームを介して遠隔操作することを予定している。

3. 今後の展開

国内の石油化学プラントは、ほとんどが陸上の精製などを行うダウンストリーム設備であり、巡回点検時も万一の事故時も、人による対応が比較的容易なため、必然的に人による対応を代替するロボットへ求められる性能とコストパフォーマンスには高い要求がある。一方、主として海外に存在する石油・天然ガスの採掘などを行うアップストリーム設備、特に洋上の設備では、通常運転時でも作業環境は厳しく、現場での人材コストが高く、また事故時には人が全く寄り付けなくなり収束・復旧が困難になることから、プラントの省人化ニーズは極めて高いと考えられる。しかし、これら引火性ガスが存在する環境で、すべての機器を自動化することは容易ではない。そのため、自動化、省人化への IoT プラットフォームを構成する一つの機器として、情報を収集したり、バルブ操作やサンプリングなどの作業を実施するプラント自動巡回防爆ロボットへの期待は大きいと考えられる。自動巡回防爆ロボットのコンセプトモデルを図7に示す。

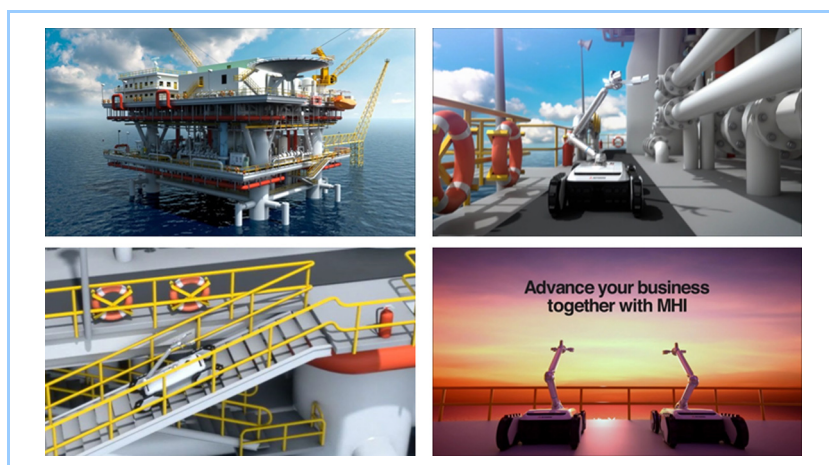


図7 自動巡回ロボットコンセプト

今後、海外も含めてプラント巡回点検ロボットのマーケットを拡大していくために、海外規格(IECEx や ATEX などの海外防爆規格など)の取得、マニピュレータや階層間階段の自律移動技術の開発などはもちろん、ユーザと協力し、実プラントでの試験運用を通じて、自律動作の信頼性向上、収集したプラント情報の解析・異常診断技術の実装などステップバイステップで開発と検証を進める必要がある。課題は多く、困難な道ではあるが、着実にプラント自動巡回防爆ロボットの製品化を加速していきたい。

4. まとめ

当社は、引火性ガス雰囲気内で無線移動可能な防爆モビリティ構築技術の開発に取り組んでいる。本報では、当該技術の応用例として、石油化学プラントの自動巡回点検を行う自律移動型の防爆ロボットについて紹介した。今後、国内外のプラントにおける実証試験・評価を実施するとともに、小型マニピュレータや自律での階段昇降機能の開発を行い、バルブ操作等の軽作業や多層階の巡回を可能としていく。そして、2019年度までにマニピュレータを搭載した自動巡回ロボットのプロトタイプを実プラントに導入し、段階的に機動性や異常検知、情報処理機能を拡充していく。

なお、引火性ガスの中で、長時間・無線で移動できる技術は、プラント運転支援だけでなく、プラント検査にも適用可能であり、2016年に遠隔操作型防爆移動ロボットの防爆型式検定取得を発表して以来、パイプやタンクの共用期間中または共用停止直後の検査への適用可能性に関する問い合わせを数多くいただいている。実際の検査に際しては、モビリティだけでなく、検査機器（例えば超音波プローブやレーザセンサなど）自体の防爆化も簡単ではないが、今後もユーザーと協力して、プラントの健全性維持と長寿命化に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 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)
- (3) 大西献ほか, 防爆性能を有する移動ロボットの開発, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1E3-04 (2017)
- (4) 大西献ほか, 防爆移動ロボットのプラント自動巡回点検への応用, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3F3-08 (2018)