原子力発電所向けロボット開発の歩みと新分野への展開

The Development of Robots for the Nuclear Power Plants and their Application to New Fields

藤田 淳 *1 Jun Fujita
曽田 大輔 *2 Daisuke Soda
村田 長太郎 *3 Chotaro Murata
津張 博之 *3 Hiroyuki Tsuhari

当社は原子力発電所の運転開始以降，プラント主要機器の保全作業向けに多種多様なロボットを開発・運用して，プラントの安定運転に貢献してきた。また，福島第一原子力発電所事故（以下，福一事故）を受け，早期の収束・安全な廃止に向けて，ロボット技術で社会ニーズに応えるべく取り組んでいる。本報では，当社の原子力分野におけるロボット開発の歩みとして，開発したロボット事例とその技術を紹介するとともに，ここで培ったロボット技術の強みを活かし，原子力以外の新分野への展開にチャレンジする現状を紹介する。

1. はじめに

当社の原子力ロボット開発の歩みは，原子力発電所の運転開始とともに始まる（図1）。原子力発電所では，安定運転を継続するために，計画的にプラントを停止し定期的に検査や修繕，取替えといった保全作業が行われる。これら作業は，高放射線下・狭隘・水中などの作業員が容易に近づけない環境で行われる。その作業を安全に効率よく行うためには，人に代わり作業を行うことができるロボットの導入が必須であり，当社は 1970 年代以降，こうしたロボットの開発を行ってきた。

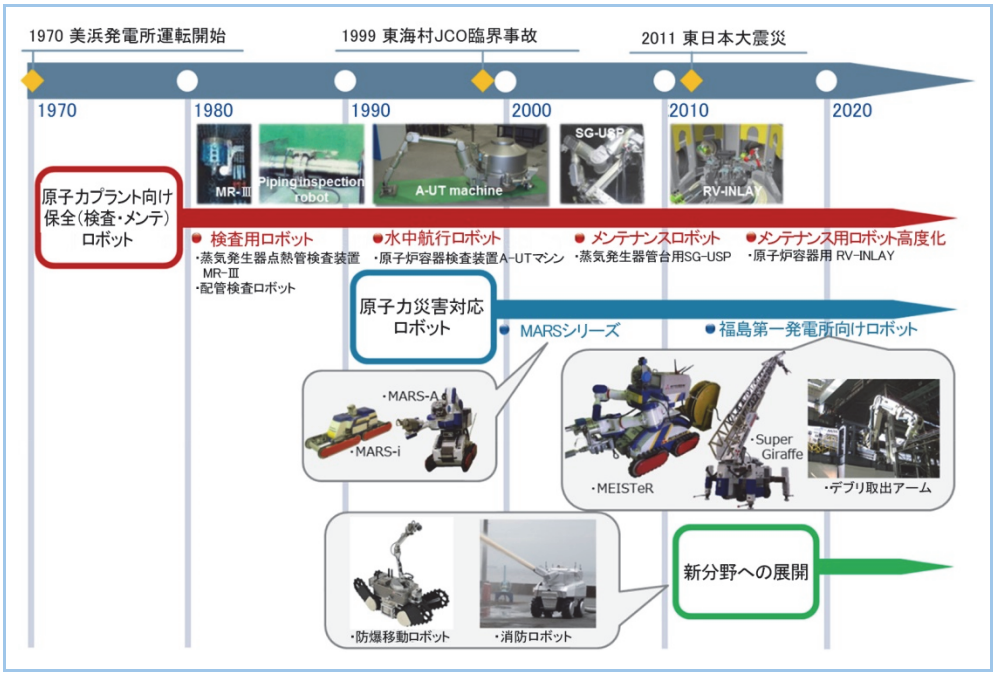

図1 ロボット開発の歩み

*1 原子力セグメント機器設計部 主席技師 技術士（機械部門）
*2 原子力セグメント機器設計部 次長
*3 原子力セグメント機器設計部

原子力発電所の保全作業では，上記特殊環境への適応が必要であるのに加え，計画に沿った保全を行うため，短期間での新規ロボット開発が求められる場合がある。このニーズに応える一つのキー技術として，様々な保全作業に共通的に適用可能な“多関節マニピュレータ”を開発し，数多くの保全作業に導入する中で，改良を加え技術を磨いてきた。(2章)

2011 年の福一事故を受けて，ロボットに期待されるニーズは更に高まった。事故・災害現場では機動性や遠隔操作性に優れたロボットが求められる。当社は，発電所の保全で培ったマニピュレータ技術を応用するとともに，高い走行性能を兼ねそろえた汎用性の高い移動型作業ロボットを開発してきた。また，未知の環境での遠隔操作性向上のため，“環境認識に基づく操縦支援技術”を新たなキー技術として習得し，今後本格化する廃止作業においてこれらを効果的に適用する計画である。(3章)

このように，当社は原子力分野でのロボット開発を通じて，極限環境における様々な作業ニーズに適応したロボットを一から開発・設計可能とする技術の蓄積・人材の育成を行ってきた。これが当社ロボット技術の強みであり，これまで培った技術・経験をベースに，今後も最先端の技術をタイムリーに取り込むことで，原子力分野での更なる貢献を目指すとともに，新たな分野・事業へも積極的にチャレンジしていくこととしている。(4章)

本報は，当社ロボット開発の歩みとして，原子力分野で開発したロボットとその技術を紹介するとともに，新分野への展開を目指して取り組んでいる最近の事例を紹介する。

2. 原子力発電所の保全作業ロボット開発の取組み(技術の蓄積)[1][2]

PWR(Pressurized Water Reactor)原子力発電所の運転開始以降，当社はプラント主要機器の保全作業向けに多種多様なロボットを開発・運用して，プラントの安定運転に貢献するとともに，原子力向けロボット技術を蓄積・研鑽してきた(図2)。

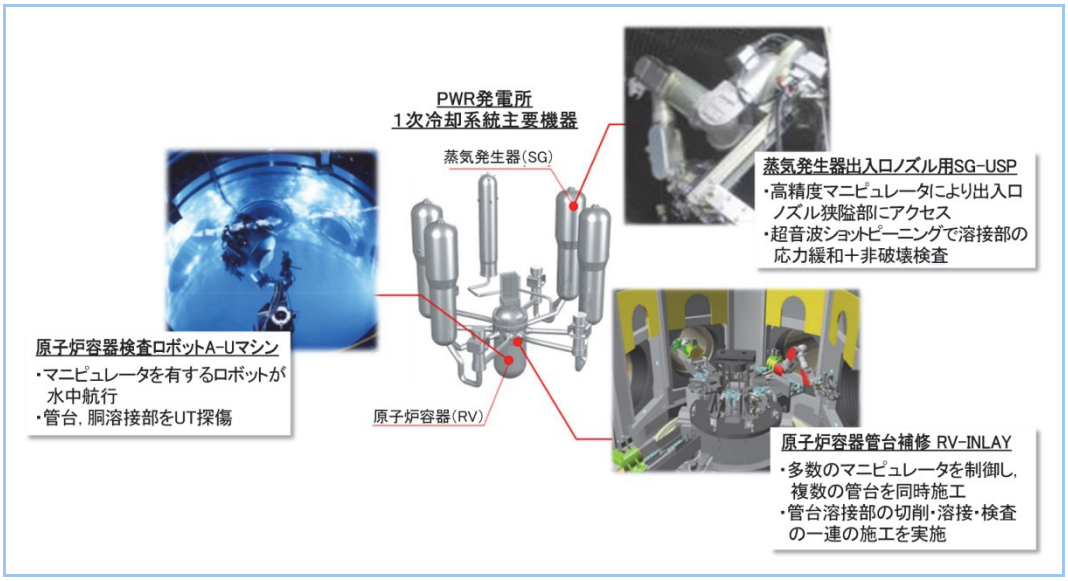

図2 PWR 発電所主要機器の保全(マニピュレータを用いた代表例)

原子力発電所の保全作業(検査や修繕，取替え)では，高放射線下・狭隘・水中などの厳しい環境において，用途に応じたセンサや工具(ツール)を対象箇所へ案内する必要がある。保全対象機器やその現場環境はさまざまであり，要求される作業毎に専用のロボットが必要となるが，ツールを案内する部分を共通化することで，開発期間の短縮やロボットの信頼性を向上できる。こうした背景から，人の腕や手と同じような動作が得意なマニピュレータを開発し，これを一つのキー技術として様々なロボットに共通的に適用している。本章では，当社の原子力発電所向け保全作業ロボットの多くで用いている，多関節マニピュレータ及びそのマニピュレータを用いたロボットの事例を紹介する。

2.1 多関節マニピュレータ(代表的なキー技術)

多関節マニピュレータの特徴は,①比較的小さなロボットで広い可動範囲と高い自由度が得られること,②制御ソフトにより動作を自由に設定できることであり,作業毎に必要なツールさえ開発すれば,様々な保全作業へ汎用的に用いることができる。

マニピュレータを原子力発電所の保全作業に適用するための必須要求及びそれらに対する当社の取組みの例を以下に示す。

(1) 耐放射線性を有することが必要

・関節の角度検出器に放射線に強いレゾルバを使用し,電線の被覆や絶縁材をはじめロボットで使用する樹脂には,耐放射線性に優れた材料を選定

・部品の放射線劣化による寿命を精度良く把握し,ロボットに応じて最適な遮へい構造を採用

(2) 狭隘部への搬入出を考慮し,小型軽量化が必要

・関節のモータはロボット毎の要求(定格・瞬時出力)に合わせてカスタマイズした特注の巻線とし,モータケースとロボット本体を共用化して直接放熱するよう工夫

・市販サーボドライバを必要軸数だけ装備すると,ロボットの大型化は避けられないため,多軸一体のモータドライバを自社開発

(3) 人手の作業と同等または,それ以上の動作精度が必要

・各関節の制御アルゴリズムや制御ソフトウエアも全て自社開発

このような取組みは,一般産業向けとは異なる,原子力という特殊環境に適用するロボットの開発の根幹をなすものであり,これら技術を結集した結果,原子力発電所の保全作業ロボットの共通技術として適用可能な7軸多関節マニピュレータを実現している(図3)

軸数	7軸
全長/質量	1317 [mm] / 40 [kg]
先端取扱重量	10 [kgf]
アクチュエータ	ACサーボモータ
繰返し位置決め精度	0.1 [mm]
角度センサ	レゾルバ(絶対角度)
耐放射線性	集積線量 106 [Gy]
耐環境性	防滴IP54(防水IP67 も可)

図3 多関節マニピュレータ

以下,本マニピュレータを用いた保全作業ロボットの事例を紹介する。

2.2 原子炉容器検査ロボット(A-UT マシン)

PWR 原子力発電所の主要機器である原子炉容器(RV:Reactor Vessel)の溶接部に対して,超音波探傷(UT:Ultrasonic Testing)や渦電流探傷(ECT:Eddy Current Testing)を行うロボット(図4)。RV から発せられる放射線の影響を減らすために,検査は RV に水を張った状態で行う必要があることから,ロボットは完全防水とし,スラスタ(プロペラ)による推力で水中を自由に移動できる水中航行型台車(水中台車)にマニピュレータを搭載した構造とした(図5)。探傷はマニピュレータ先端に取り付けた探傷ツールで行うが,ツールの交換はロボットを気中に吊り上げることなく,水中にてワンタッチで着脱・交換が可能である。更に2台のロボットを同時運用可能とすることで,検査期間の短縮を実現している。

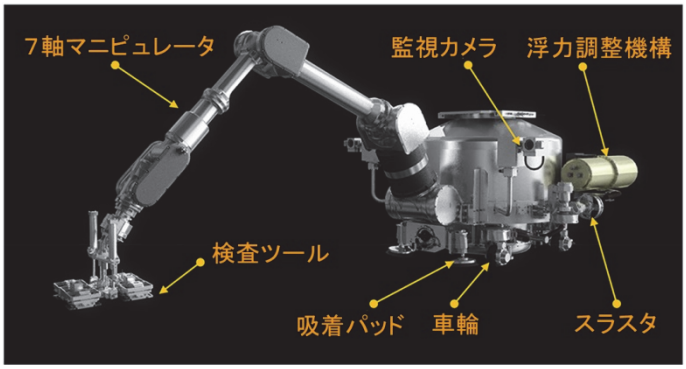

図4 A-UT マシン

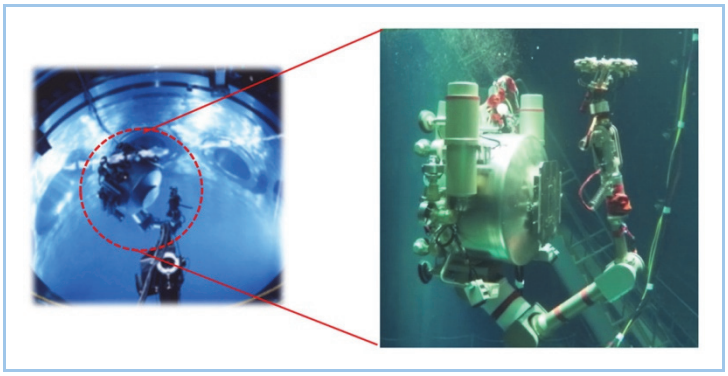

図5 水中航行し RV 検査を行う A-UT マシン

なお，A-UT マシンは 1995 年より運用を開始し，改良を繰り返しながら，現在まで延べ 46 回の適用実績を持ち，2020 年に一般社団法人日本保全学会が新たに創設した保全遺産(※1)の第1号として認定された。

(※1)保全遺産：“歴史に残る保全技術関連遺産であり，かつ人類の文化的遺産”と定義

2.3 原子炉容器管台補修ロボット（RV-INLAY）(3)

原子炉容器（RV）管台と1次冷却材管との溶接部（ニッケル基系 600 合金）は応力腐食割れ（PWSCC：Primary Water Stress Corrosion Cracking）の懸念があることから，溶接部表面を切削し，耐 PWSCC 性に優れたニッケル基系 690 合金を肉盛溶接して材料改善する工法に使用するロボット（図6）。RV 内の放射線量の高い環境において，肉盛溶接前の開先形状計測，溶接，溶接部非破壊検査といった複数の作業に対し，マニピュレータを用いて行うもので，本ロボットの導入により人による作業の大部分を削減できた。

本ロボットのシステム構成及び概略動作手順は以下の通りである。

- RV 内にマニピュレータ及びツールマガジンを搭載したプラットフォームを設置
- マニピュレータベースがプラットフォーム上を円周状に移動することで，マニピュレータを施工対象の管台の正面に位置決め
- マニピュレータは，プラットフォーム中央のツールマガジンに搭載されている各種作業用ツールの中から，必要なツールを選択して装着
- マニピュレータ（ベース含む）を操作し，管台溶接部に対し必要な施工を実施

プラントのループ数（施工対象の管台数）に応じて，マニピュレータを複数搭載し，先端ツールを交換しながら，複数管台の同時施工が可能であり，工期短縮に大きく貢献している。このロボットは，ツール交換や管台内施工の全ての動作において，お互いが接触しないよう高度な制御を行い，これら動作を完全遠隔で実現させた画期的なロボットである。

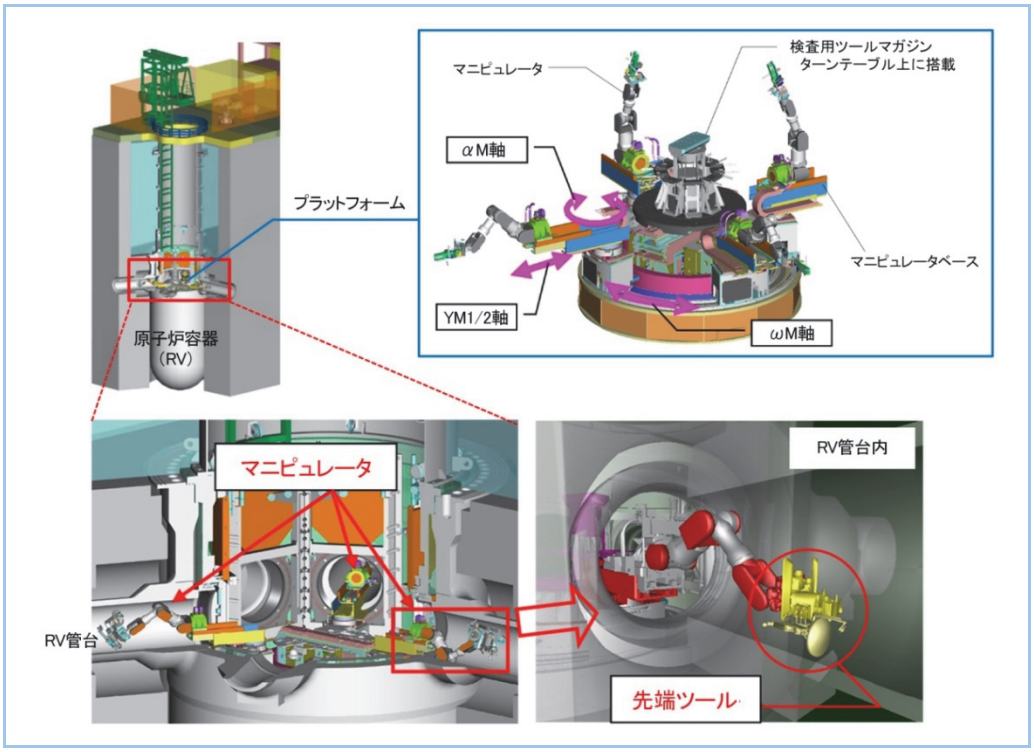

図6 原子炉容器管台補修ロボット

2.4 蒸気発生器管台出入口ノズル溶接部保守点検ロボット(SG-USP)

PWR 原子力発電所に特有の機器である蒸気発生器(SG:Steam Generator)の出入口ノズルと1次冷却材管との溶接部に対する経年劣化対策として,応力緩和処置(超音波ショットピーニングUSP, Ultrasonic Shot Peening:金属表面に小径球を連続的に衝突させる等で物理的な力を加え,圧縮応力を付与する施工)及び非破壊検査を行うロボット。SG 水室は放射線量が高く人が長時間いられない環境であり,ロボットでの作業が必要である。このロボットは SG 水室の天井にある管板にぶら下がって管板歩行可能なマニピュレータベースに,マニピュレータを搭載した構造である(図7)。狭隘な水室マンホールを介してロボットを設置するため,マニピュレータは2分割構造で小型軽量化し,マニピュレータベース,2分割のマニピュレータは,全てワンタッチでメカ的・電気的に着脱可能なものとした。この構造・方式を採用し,ロボットの設置は,水室マンホールの外から,マンホール近傍の管板に分割設置し,検査時はマニピュレータベースが管板歩行し,対象部位にアクセスする運用とした。これにより,ロボットの設置・検査・撤去の全作業工程において,高線量の水室内に立ち入る作業を不要としている。

3. 原子力災害対応用ロボットの開発(技術の拡大)

1999 年の東海村 JCO 臨界事故の際に,原子力事故・災害におけるロボットの必要性が注目され,そして 2011 年の福一事故を受けて,ロボットは必須の技術としてその開発ニーズは一気に高まった。原子力事故・災害現場では,予め想定された作業だけでなく,その状況に応じた汎用作業(ドア開け,レバー操作,手すりの切断等)が要求される。従って,当社が原子力発電所の保全作業用ロボット開発で培った,可動範囲や自由度に優れたマニピュレータは非常に有効である。一方で,事故・災害現場では,人が近づけない範囲が拡大するため,機動性や遠隔操作性に優れたロボットが求められる。当社は,発電所の保全で培ったマニピュレータ技術を応用するとともに,福一事故対応にも適用可能な,高い走行性能を兼ね備えた汎用性の高い移動型作業ロボットを開発してきた。

本章では,それらロボットの例を紹介するとともに,通常の発電所とは異なり,未知の事故・災害現場での遠隔操作性向上のため,新たなキー技術として身に着けた“環境認識に基づく操縦支援技術”を紹介する。

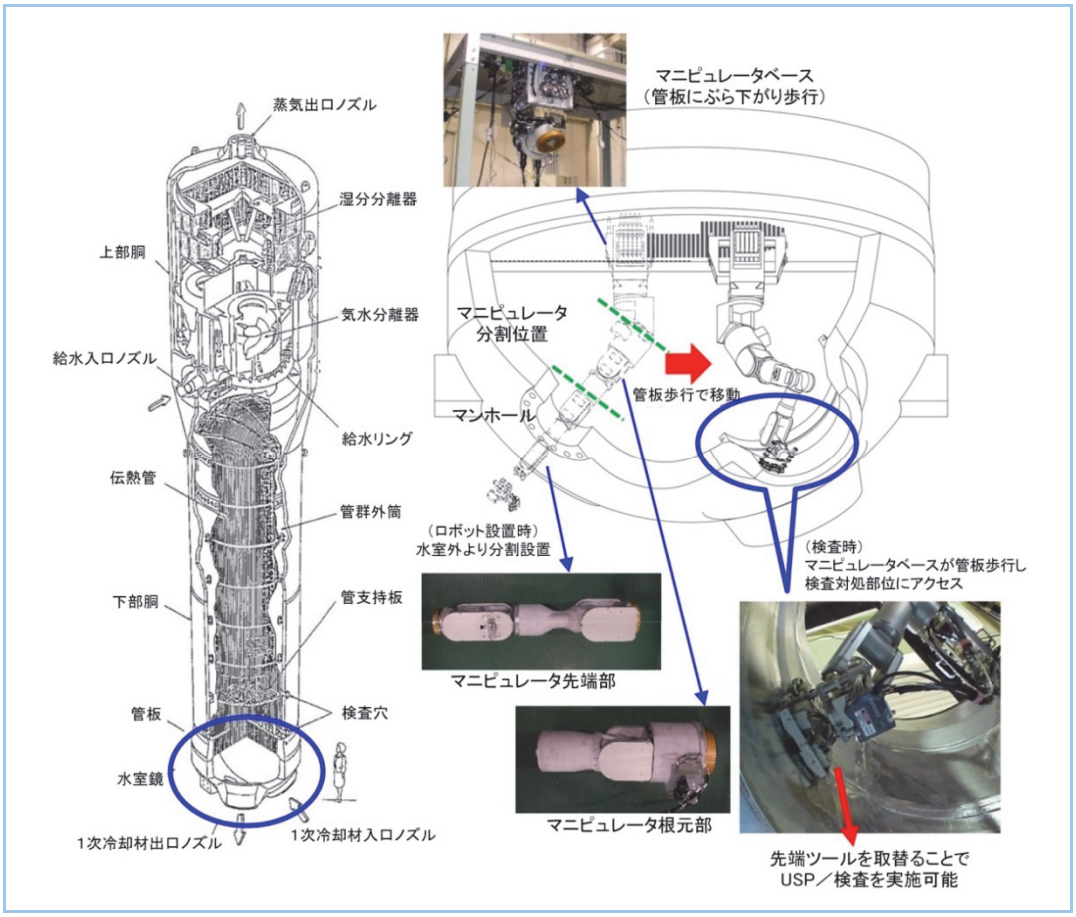

図7 蒸気発生器出入口ノズル溶接部保守点検ロボット

3.1 原子力災害対応 高所作業用ロボット(Super Giraffe)[4]

福一事故後に，事故・災害現場で高所にあるバルブ操作等を遠隔操作で行う作業を想定したロボット開発プロジェクトが NEDO で公募され(※2)，同プロジェクトに参画して開発したロボット(図8)。4輪駆動4輪操舵のタイヤ駆動方式を採用し，前後走行だけでなく左右・斜め走行，その場旋回も可能な機動性の高さを有している。特徴は8mの高さまで伸びる梯子状のリフト機構であり，その先端に搭載したマニピュレータで高所での作業が可能である。駆動源として電気自動車用の大容量のリチウムイオンバッテリーを搭載し，約5時間の遠隔稼働が可能である。

(※2)本ロボットの開発は，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：New Energy and Industrial Technology Development Organization)の委託事業“災害対応無人化システム研究開発プロジェクト”により行われた。

3.2 原子力災害対応 双腕作業ロボット(MEISTeR)

遠隔操作で人に代わってさまざまな作業を行えるよう作業用マニピュレータ2本を搭載した移動ロボット。福一事故後の作業で，建屋内部の汚染状況を調査するために，床面のコンクリートを円筒形状に削り取り持ち帰る作業(コアサンプリング)が必要となった。建屋内部は放射線量が高く，内部の詳細な状況が把握できていない環境であり，人に代わってロボットで作業を行う必要があった。当社は 1999 年の JCO 臨界事故時に開発した原子力災害対応ロボットを当該工事向けに改造し，MEISTeR として現場に投入した(図9)。

MEISTeR は，人間の腕のように2本のマニピュレータを持つ双腕ロボットで，左右マニピュレータに搭載するツールの組み合わせによりさまざまな作業を行うことができる，汎用性の高い作業ロボットである。また，4つの走行クローラで走行面の段差や傾斜を把握し，ロボットの重心を安定させるために上体位置を自動で制御することで，悪路走行や階段昇降も可能な高い機動性を有している。

この MEISTeR を福一事故後の瓦礫の散乱する建屋内に投入し，完全遠隔操縦によるコアサンプリングを世界で初めて成功させた(図 10)。

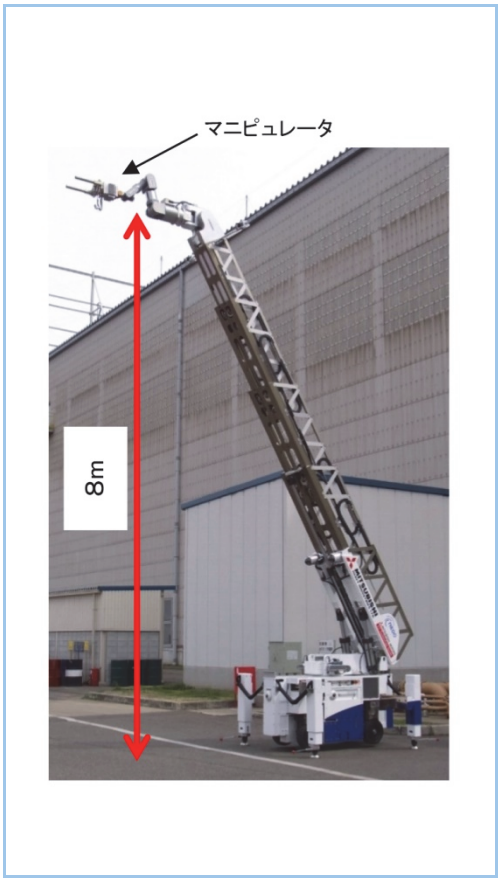

図8　高所作業用ロボット Super Giraffe

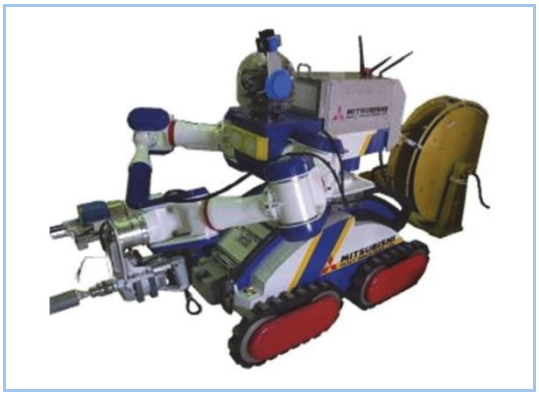

図9　双腕作業ロボット　MEISTeR

図 10　MEISTeR によるコアサンプリング作業

3.3　環境認識に基づく操縦支援技術（新たなキー技術）

事故・災害が発生すると，現場の状況は平常時とは異なる未知の環境へと一変する。通路，壁，路面等の周囲環境が分からない状況で，遠隔操縦でロボットを目的の場所へ移動し，作業を行うことは容易ではなく，オペレータの負担や作業時間の増大にも繋がる。こうした課題を解決するため，ロボットの周囲環境を認識し，その情報をリアルタイムでオペレータに効果的に提示する操縦支援技術を開発した。

ロボット搭載カメラのそのままの映像（自らがロボットに搭乗している目線の映像）のみを基に遠隔操縦する場合，カメラ映像では奥行きが分かりにくく，周囲との距離感が把握しにくい。カメラを複数搭載する場合も，ロボットの周囲全体を把握するためには，多数の映像情報から判断する必要があるためオペレータの負担は大きく，僅かな判断ミスにより障害物との衝突，高所からの滑落等につながる危険がある。

これらを解決する技術として，ロボットの前後左右に搭載したカメラ映像を合成し，地上面投影映像に補正してリアルタイムでオペレータに提示する疑似俯瞰画像技術をロボットに搭載した（図 11）。これによりオペレータはロボットを上空から見下ろすように周囲を一望できるようになった。なお，本技術は当時一部の乗用車に搭載されていたが[5]，ロボットへの応用は未だなく，ロボットごとに異なるカメラの種類や搭載位置に対し，画像の補正を簡単に行えるようアルゴリズムを開発している。

また3次元距離センサ（LIDAR）を用いて周囲環境を計測し，ロボットの移動に合わせてリアルタイム表示させる技術をロボットに搭載した。これによりオペレータはロボット周囲の状況を立体的な環境情報としてリアルタイムで把握できるようになった（図 12）。

従来のカメラ映像に加え，上記の環境認識に基づく操縦支援技術を組み合わせることで，現場のロボットの周囲状況を的確にオペレータに伝えることができ，遠隔操縦性を各段に向上させることができた（図 13）。

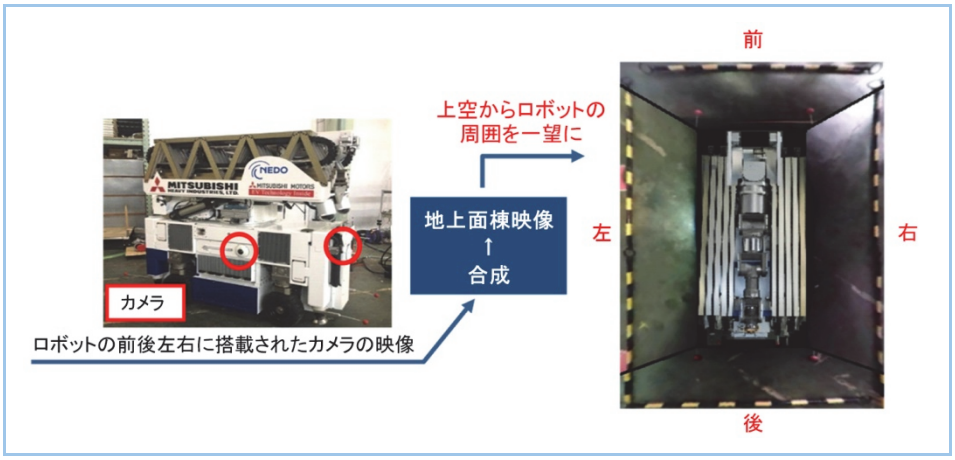

図 11　疑似俯瞰画像技術

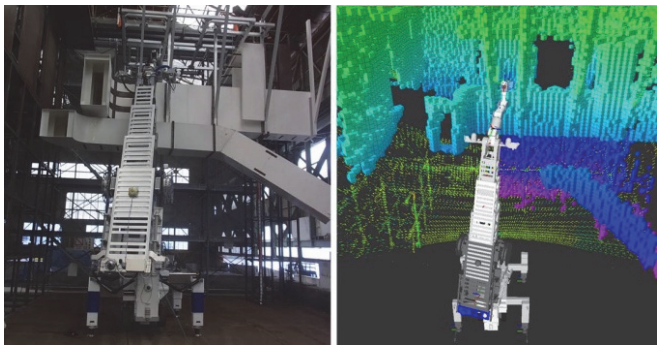

図 12　LIDAR による周囲環境情報提示

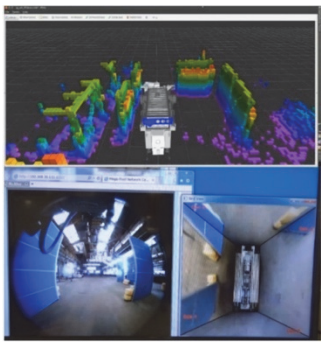

図 13　操作支援技術の組合せ表示

4. 原子力で培ったロボット技術の強みを活かして（新分野への展開）

ここまで，原子力発電所の保全作業や災害対応の分野で蓄積したロボット技術及び開発したロボットを紹介した。原子力分野でのこれまでの取組みで培った，当社のロボット技術の強みは以下である。

・人が近づけない“極限環境”に対応
　放射線環境，狭隘部，水中，悪路・不整地等，厳しい環境に適用するロボットの開発が可能
・自由度の高い“カスタマイズ設計”が可能
　メカ，エレキ，ソフトの設計・開発エンジニアが一所に結集し，市販品で対応できない部品，制御アルゴリズムは自社開発するなど，幅広いカスタマイズ設計に対応
・原子力プラントメーカとしての“総合力”
　ロボットエンジニアだけでなく，プラント・機器設計者，保全技術者，装置オペレータが一体となり，高難度工事を高品質で遂行する総合力の発揮

今後もこれまで培った技術・経験に磨きをかけ，絶えず最先端の技術をタイムリーに取り込みながら，原子力分野での更なる貢献を目指していく。また原子力分野以外にも，当社ロボット技術の強みを活かせる分野として，防災・減災・テロ対策などが考えられ，これら新たな分野・事業への展開も積極的にチャレンジしていくこととしている。本章では，このような新分野展開の至近の事例として，防爆移動ロボット，消防ロボットを紹介し，これらロボットの開発において，まさに現在進行形で技術の習得・高度化に取り組んでいる“自律制御技術”について紹介する。

4.1　防爆移動ロボット[6][7][8][9]

引火性ガス発生による爆発の危険性のある石油ガスプラントや化学工場，トンネル事故現場等では，防爆性能を有する機材しか使用できない。当社では，こうした環境での情報収集を行うためのロボットを開発し，移動ロボットとして国内で初めて防爆型式認定を取得した（図 14 左）。ロボット内圧力を大気より常に高く保つことで，ロボット外部の引火性ガスがロボット内部に侵入しない内圧

防爆構造を採用した。この陸上移動防爆ロボットの開発により，当社は移動ロボットを防爆仕様にし，かつ軽量化による高い踏破性を獲得する技術を確保し，現在はマニピュレータを搭載した次世代防爆ロボットの開発に取り組んでいる（図 14 右）。この防爆ロボットに，自律走行制御技術を搭載し，洋上油田や石油ガスプラント等の無人巡回点検の実現を目指し技術開発を進めている。

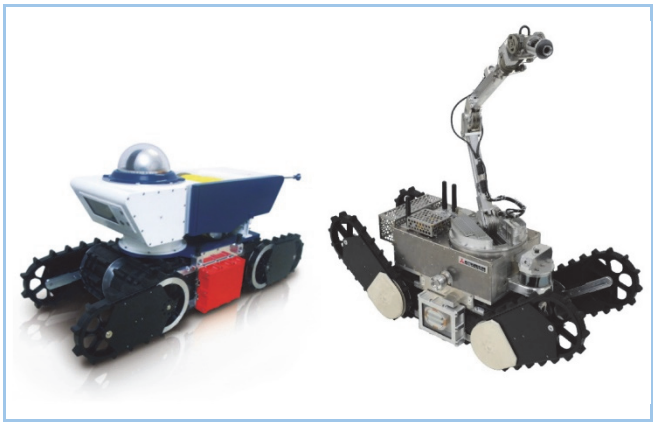

図 14　防爆移動ロボット

4.2　消防ロボット[10]

石油化学コンビナートにおけるタンク火災は，規模が大きく消火が困難な特殊災害である。大きな課題として火炎からの輻射熱が大きいことや，爆発の危険があることから，災害現場に人が容易に近づけないことが挙げられる。こうした状況で，消防隊員に代わって消火や冷却等の消防活動を行うロボットに期待が寄せられ，ロボットシステムの開発プロジェクト（5か年）が総務省消防庁で公募された(※3)。当社はこのプロジェクトに参画し，放水砲ロボットとホース延長ロボットを開発した。

放水砲ロボット（図 15）は，1MPa の水圧で放水量 4000L/min，射程距離約 70mの放水能力を有する放水砲を装備した移動台車で，遠隔操縦に加え，地図上の指定した場所へ自律走行することも可能である。ホース延長ロボット（図 16）は，放水砲ロボットとポンプや消火栓等の水源の間に 4000L/min を送水できる 150A ホース（単位長さあたり 2kg）を最大 300m敷設するロボットである。放水砲ロボットと同様に遠隔操縦及び自律走行が可能で台車部分や耐輻射熱性能も同等である。どちらのロボットも，火災現場での火炎からの輻射熱対策として，20 [kW/m^2]の輻射熱に耐える性能を有している。

本ロボットは，2019 年に千葉県市原市消防局へ実証配備され，有事の際にいつでも出動できるよう，日々消防隊員の方々によって，ロボットの運用訓練がされている。今後は，ロボットのメンテナンス性や操作性の向上等，実際の運用における現場ニーズを収集し，ロボットの改良を行う予定である。

(※3)本ロボットシステムは消防庁消防研究センターが実施した“エネルギー・産業基盤火災対応のための消防ロボットの研究開発”の成果であり，当社は本システムを構成する“放水砲ロボット”，“ホース延長ロボット”及び全体システム設計を担当した。

図 15　放水砲ロボット

図 16 ホース延長ロボット
(左:放水砲ロボットとともに火災現場へ自律走行)
(右:火災現場へ到着後,水源に向かってホース敷設)

4.3 自律制御技術の開発

オペレータの遠隔操縦を必要としない新しい技術として,自動運転に代表されるようなロボットの自律制御技術の開発に取り組んでいる。防爆移動ロボットや消防ロボットには,自律制御に必要なセンサとして LIDAR や IMU(慣性計測装置)が搭載されており(消防ロボットには GPS も搭載),予め周囲の環境情報(電子地図)を取得してロボットに保存してあるデータと,センサによる計測データを比較することで,自分の位置を逆計算で求めることができる(自己位置推定)。自身の現在位置から目的地までの経路を決定するアルゴリズムや,その動作制御プログラムを開発することで,人が地図上に指定した位置へロボットが自動で移動する技術が実現している(図 17)。今後この技術を発展させ,ロボットの自律動作の精度向上を目指している。

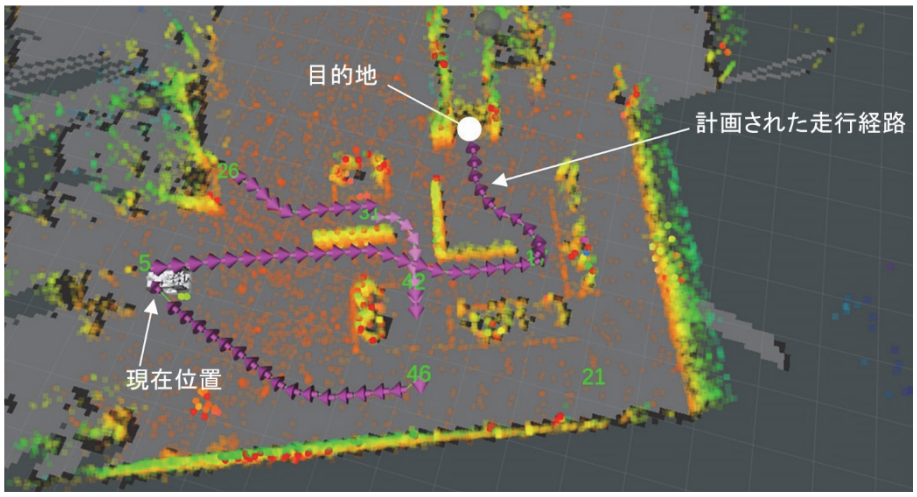

図 17 自律走行による自己位置推定及び目的地への経路決定

5. おわりに

当社は,原子力発電所での保全作業ロボットの開発を通じて,ロボット技術を培うとともに,原子力発電所の安定運転に貢献してきた。また,原子力事故・災害対応のロボット開発にも取組み,技術を拡大してきた。今後も原子力分野に限らず,特殊環境でのロボットニーズは高まると予想されることから,当社技術の強みを活かし,また最先端の技術を取り入れながら,さまざまなニーズに対応可能なロボット技術により,日本の重要なインフラを支えていきたい。

参考文献

(1) 藤田淳ほか,マニピュレータ型ロボットのプラント保全への適用,日本保全学会第6回学術講演会要旨集,C-4-2,(2009)
(2) 光畑幸史ほか,マニピュレータ型ロボットを適用したプラント保全技術,日本保全学会第7回学術講演会要旨集,A-5-8,(2010)
(3) 下鍋典昭ほか,原子炉容器出入口管台高速化 INLAY 技術,日本ロボット学会誌 Vol.30 No.1, pp.47～48,(2012)
(4) 藤田淳ほか,災害対応ロボット Super Giraffe の開発,日本ロボット学会誌 Vol.32 No.2, pp.148～150,

(2014)
(5) 日産自動車株式会社、インテリジェントアラウンドビューモニター
https://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/iavm.html
(2020 年 10 月アクセス確認)
(6) 宿谷光司ほか, 石油化学プラント向け自動巡回防爆ロボットの開発, 三菱重工技報 Vol.55 No.4 (2018) パワードメイン 新事業特集
(7) 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)
(8) 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)
(9) 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)
(10) 藤田淳ほか, 石油コンビナート火災に対応可能な消防ロボットシステムの実現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 論文集, 2A1-A02, (2020)