

分析論文

原子力発電所の保全ロボットの現状と今後

— その1—三菱重工業株式会社の取り組み—

三菱重工業株式会社・谷口 優
masaru TANIGUCHI

三菱重工業株式会社・山上 真広
mahiro YAMAGAMI

1. はじめに

原子力産業用ロボットに求められるニーズは大きく、厳しい環境（狭あい、水中）での作業、作業員の被ばく低減、定検工程などの時間短縮、保全作業のコスト低減や品質の向上、その他重量物の搬送等の様々なものがある。これらのニーズやシーズは時代に応じて変化し、都度優先度を判断し、コスト評価による採否が行われてきた。

これらに適用されるロボット技術とは、これまでに培ってきた様々な要素技術の融合体である（図-1）。

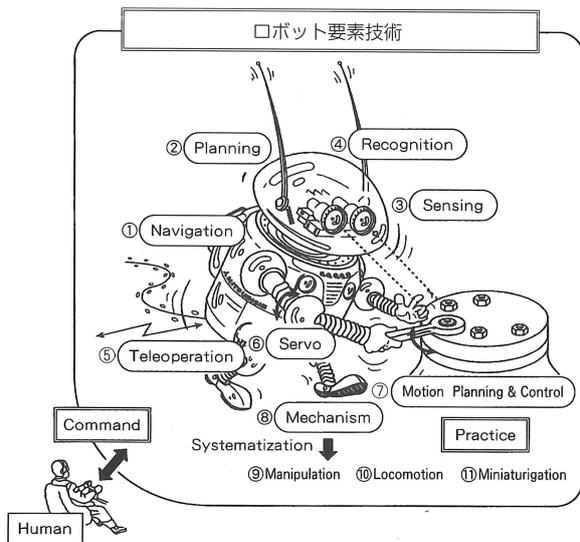


図-1 ロボットに求められる要素技術

当社は、特殊分野でロボット技術の適用を目指し、これまでマニピュレータ技術等の先進技術を導入してきた。1980年代初頭から、これらのロボット技術の一般向けへの転用や、2000年代に入って以降、次世代産業用ロボット、人間と共存するロボット、さらには家庭向けロボットの開発に至るまで着実に裾野を広げてきた。

本稿では、原子力発電所の保全に適用されている各種ロボット技術を紹介する。

2. 保全への取り組みの現状

本章では、ロボット技術の紹介に先立ち、その背景として原子力発電所における当社の保全への取り組み状況について以下に紹介する。

現在稼動している原子力発電所のプログラクティビティ（安全性・信頼性を前提とした経済性）を向上させるためには、3つの側面から取り組んでいく必要がある。まず1つ目は、運用面からの取り組みである。定検短縮や長サイクル運転は稼働率の向上に、定格熱出力運転や出力アップは実質発電効率の向上に寄与できる。2つ目は、安全面からの取り組みである。昨今、原子力関連施設における事故やトラブルにより原子力産業界への信頼感が低下しつつある。この信頼回復のためにも過去の事故やトラブルを繰り返さない、さらには新たな事象を未然に防止することが必要不可欠である。そのため、危険作業の削減や作業員の被ばく低減、機器・設備のトラブルを未然に防止することによりパブリックアクセプタンスを醸成していくことが必要である。3つ目は、体制面からの取り組みである。電力殿とのパートナーシップにより多様なニーズに対応するとともに、国内に止まらず広く海外の優れた技術との連携を図る等、グローバル化による総合力の向上を図っていく必要がある（図-2）。

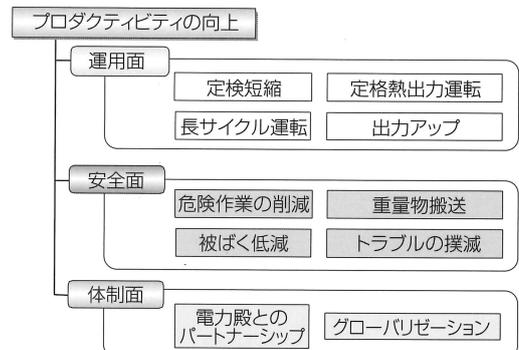


図-2 プロダクティビティ向上への取り組み

当社は原子力発電所のプラントライフ全体にわたって様々な技術で電力殿を支援し、設備利用率向上や高経年化対策に対する適切な保全を提案・実施している（図-3）。その中で機器や構造物に対する具体的な保全（検査、補修、劣化緩和等）を行っていくには、ロボット技術の適用が必要不可欠な状況にある。

次章では、原子力発電所における主要機器の保全に着目したロボット技術を述べる。

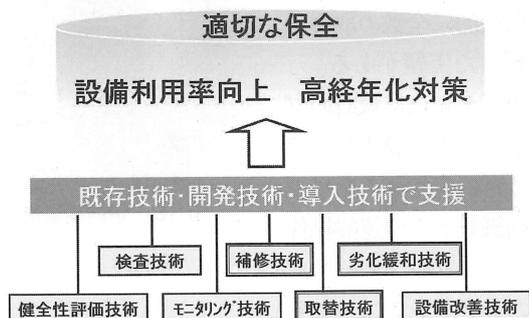


図-3 原子力発電所の適切な保全を支える技術

3. 原子力発電所の主要機器へのロボット技術の適用状況

3-1) 原子炉容器

原子炉容器各部位の劣化モード及び保全技術は以下に示すものがある（表-1、図-4）。

原子炉容器は運転開始以来、1回/10年の頻度でISI（供用期間中検査）を実施している。従来のUT（超音波探傷）検査装置では、大型で構造が複雑なため、

装置の運搬や組立・解体・除染等の段取りに時間がかかっていた。また、作業や保管にも広範囲なスペースが必要であった。

このような状況を改善するため、当社は小型で構造が簡易なUT検査装置（A-UTマシン）を開発した（図-5）。小型・軽量化により運搬が容易となり、組立・解体・除染等の段取り時間も短縮でき、検査工程の大幅短縮が可能となった。また、作業や保管スペースも低減でき、他の定検作業との調整も容易となった。現在は、将来の水中作業ロボットを目指し、汎用性や機能の更なる高度化に向けた開発を行っている。

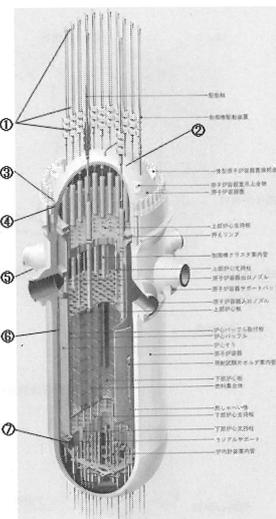


図-4 原子炉容器

原子炉容器の炉内計装筒管台の保全対策として昨今当社が取り組んできているものには、内面ウォータージェットピーニング（WJP：Water Jet Peening）による劣化緩和と万一内面に傷があった場合のドリル切削による補修がある。炉内計装筒管台は水深約18m下の所にあるため、案内ポールの先端に搭載したWJP装置（図-6）やドリル切削装置（図-7）を管台にアクセスしたのち、遠隔操作により施工を行う。

当社は各装置を用いて、現在までにWJPで8プラント、ドリル切削で1プラントの施工を行っている。さらに、これらの技術を応用し、炉内計装筒管台外面の

表-1 原子炉容器に対する保全技術

| No. | 部位 | 保全技術 |
|-----|------------------------|--|
| ① | キャノピシール溶接部 | ・キャノピシールECT/UT ・キャノピシール補修 |
| ② | 上蓋管台貫通部 | ・上蓋管台ECT/UT ・スリーブ補修 ・690材溶接補修 ・頂部温度低減 |
| ③ | 蓋フランジシート面 | ・レーザ点検 |
| ④ | 胴フランジシート面 | ・レーザ点検 |
| ⑤ | 管台セーフエンド | ・異材継手用特殊UT/ECT ・ウォータージェットピーニング ・690材Tigクラッディング |
| ⑥ | 胴部（照射領域） | ・内表面特殊UT/ECT |
| ⑦ | 炉内計装筒管台貫通部 管台母材J溶接部 | ・小口径用ECT/UT ・複雑形状溶接部ECT ・ウォータージェットピーニング ・ドリル切削補修 ・レーザクラッディング |

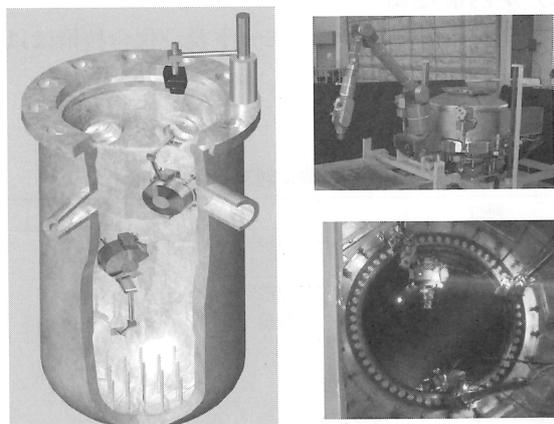


図-5 原子炉容器UT検査装置（A-UTマシン）

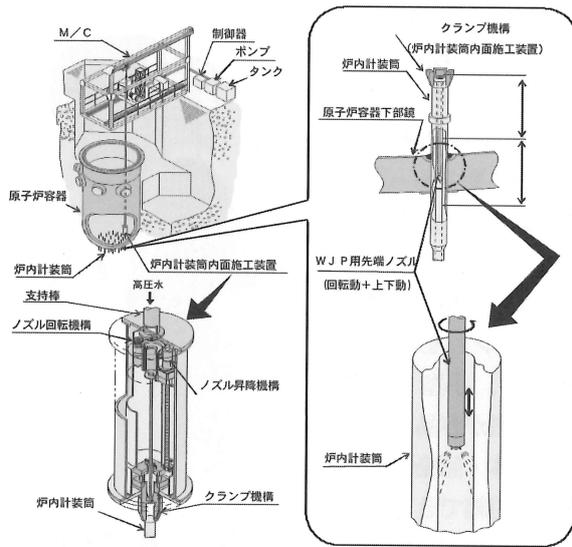


図-6 炉内計装筒管内面用WJP装置

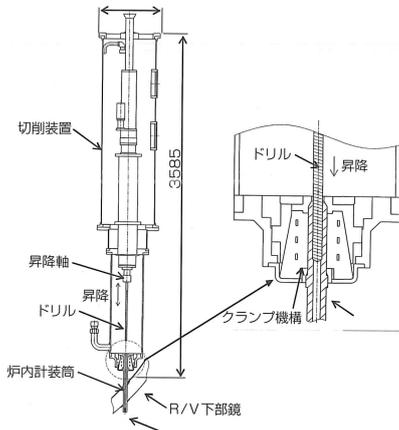


図-7 炉内計装筒管内面用切削装置

J溶接部や出入口管台セーフエンド部へのWJP適用を目指して開発を進めている。

3-2) 炉内構造物

炉内構造物各部位の劣化モード及び保全技術は以下に示すものがある (表-2、図-8)。

表-2 炉内構造物に対する保全技術

| No. | 部位 | 保全技術 | 炉内構造物 取替技術 |
|-----|------------|-------------------------------|---------------|
| ① | バツルフォーマボルト | ・ボルトUT点検技術 ・バツルフォーマボルト取替技術 | |
| ② | ハレルフォーマボルト | ・ボルトUT点検技術 | |
| ③ | 炉心そう、溶接部 | ・炉心そう溶接部 ・UT点検技術 | |
| ④ | 燃料案内ピン | ・燃料案内ピン ・取替技術 | |
| ⑤ | 制御棒クラスタ案内管 | ・摩耗計測技術 ・案内管取替技術 | |

炉内構造物は、高度に放射化、汚染しているため、付近は高線量となり、万一保全作業を行う場合には原則水中での遠隔作業となる。

海外で損傷事例のあったバツルフォーマボルトについて、国内プラントでは予防保全的に全数の取替工事を行った実績がある。

キャビティ上に仮設のプラットフォームを設置し、それに2台の取替装置を吊下げ、制御盤からの遠隔操作によりバツルフォーマボルトの各アドレスにアクセスを繰り返しながら、全数を取替える工事である (図-9、図-10)。本工事において当社は世界最速の約24本/日の施工能率を達成している。

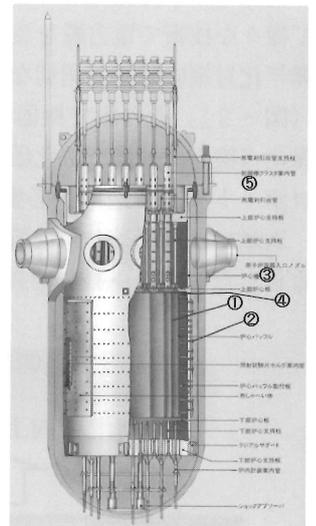


図-8 炉内構造物

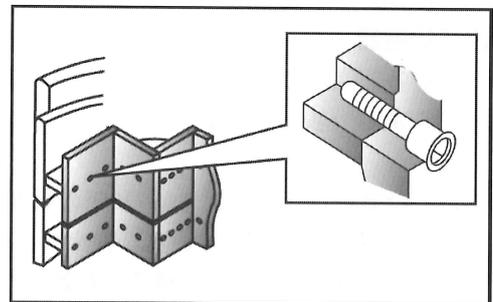


図-9 バツルフォーマボルト

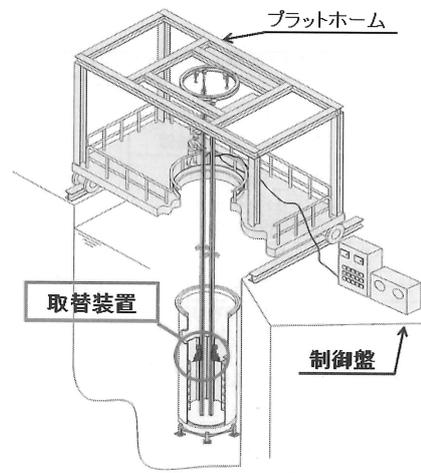


図-10 バツルフォーマボルト取替装置

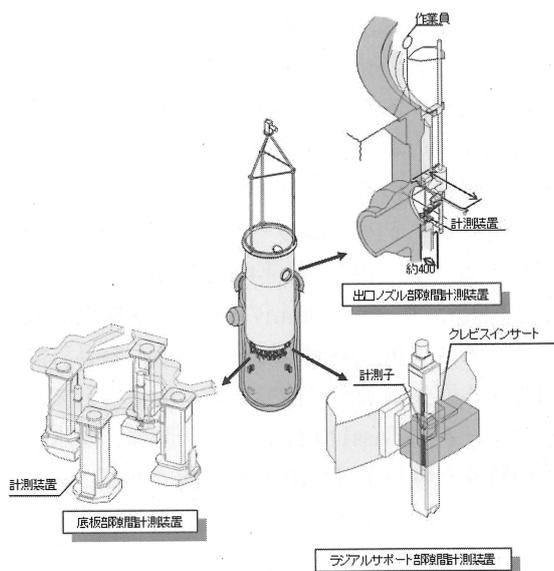


図-11 炉内構造物取替用隙間計測装置

当社は、バツフルフォーマボルトの全数取替技術に止まらず、炉内構造物一体取替を実現するため、国家プロジェクトや電力殿と共同で高精度の隙間計測装置を開発した(図-11)。既設の原子炉容器と新しい炉内構造物との取合い部は、通常は水中でかつ高線量であるため人が直接アクセスできない所であるが、この据付精度は約0.5mmという極めて高精度を満足することが要求されるものである。昨年世界初の本工事の施工を当社が担当し、要求通りの計測精度を満足する結果が得られ、無事工事を完了した。

3-3) 蒸気発生器

蒸気発生器各部位の劣化モード及び保全技術には以下に示すものがある(表-3、図-12)。

蒸気発生器は、定期検査毎に伝熱管の健全性確認のためにECT検査を実施している。装置導入当初の「電

表-3 蒸気発生器に対する保全技術

| No. | 部位 | 保全技術 | |
|-----|-----------------|--|-----------|
| ① | 伝熱管 | <ul style="list-style-type: none"> 全自動ECT検査技術 インテリジェントECT検査技術 ショットピーニング技術 レーザースリーブ技術(施栓) メカニカルプラグ技術(施栓) | 蒸気発生器取替技術 |
| | | <ul style="list-style-type: none"> 管支持板高圧水洗浄技術 スラッジランシング | |
| ② | 出入口管台 セーフエンド | <ul style="list-style-type: none"> 縦波UT技術(フェーズドレイUT技術) 超音波ピーニング、ワイヤピーニング技術 セーフエンド取替技術 | |

気駆動2軸式直行アーム型」から、世界初の歩行ロボット「電気駆動クランプ式4本足方向型」の採用、全自動探傷(2本同時探傷)を可能とした「空気駆動4本足管板歩行型(MR-II)」、さらに4本同時探傷が可能な「電気駆動シングルポール・アーム型(MR-IIA)」、最新型の「同(MR-III)へと変遷を遂げている(図-13)。

さらに、検査で指示が見つかった場合の補修法としては、レーザ、ろう付け、機械式によるスリーブ補修(図-14)やメカニカルプラグ(施栓)補修が適用されている。

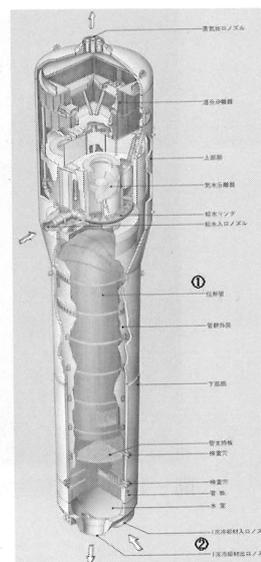


図-12 蒸気発生器

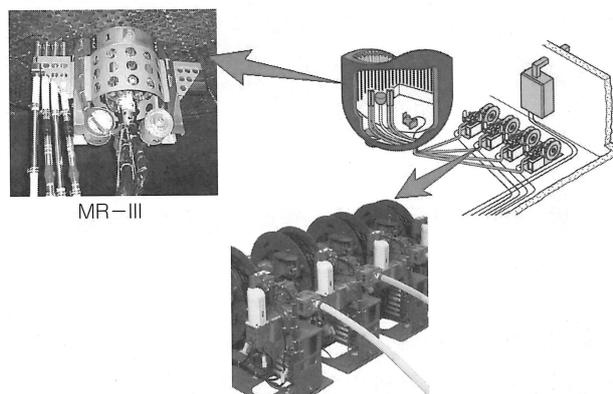


図-13 蒸気発生器伝熱管ECT検査装置

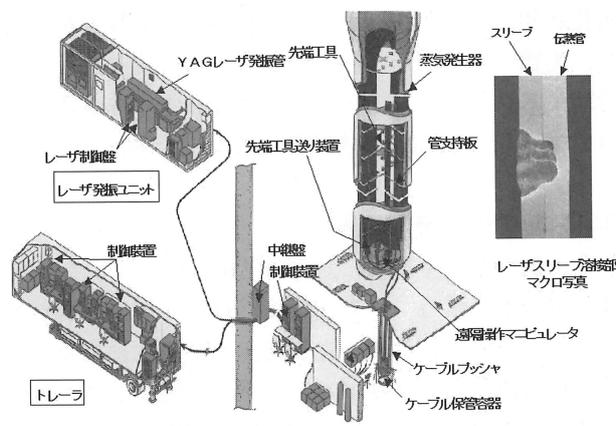


図-14 蒸気発生器伝熱管レーザースリーブ補修装置

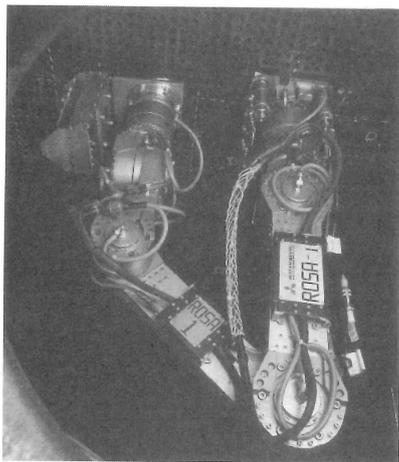


図-15 蒸気発生器伝熱管補修用案内装置

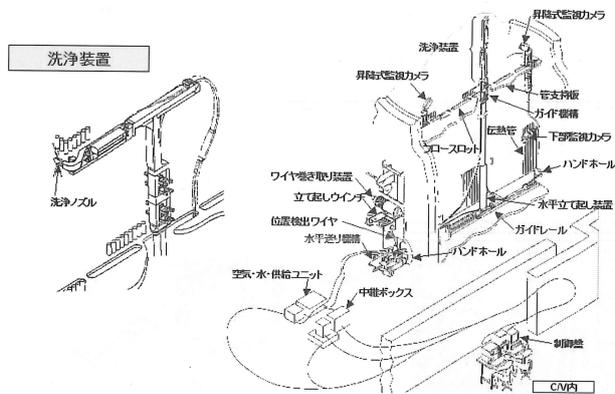


図-16 蒸気発生器伝熱管支持板高圧水洗浄装置

各補修装置は、管板部に事前に設置する案内装置（図-15）を介して伝熱管の各アドレスにアクセスすることが可能である。

さらに、伝熱管拡管部の残留応力低減を目的とした劣化緩和工法として、ショットピーニング装置を開発し、実機への適用を行っている。また、管支持板部に付着するスケールを除去するための高圧水洗浄装置についても年々適用実績を増やしている（図-16）。

3-4) その他配管・機器

その他の配管や機器に対する遠隔ロボットについては、常時水を張っている使用済燃料ピットの壁面や床面のような所に割れ等により漏えいが発生した場合の応急補修法として、水中でも補修が可能な「当て板補修装置」及び「コーティング補修装置」を開発した（図-17、図-18）。今後のニーズとしては、既存のラ

イニングの上面に、より耐食性の優れたライニング材を溶接で貼り合わせる工法がある。恒久補修法となる本工法を実現するため、当社では「水中オーニング装置」の開発への取り組みを行っている。

また、可搬式の多用途ロボットとして当社の開発した「汎用ロボットPA10シリーズ（PA10-7C）」をここで紹介する（図-19）。質量40kgの軽量アームでペイロード10kgf、リーチ930mmのACモータ駆動方式を採用している。7軸を駆使しているため、容易に障害物を回避する冗長制御が可能である。用途としては、クリーンルーム（Class1/0.2 μ m）や、防塵、防水、原子力等の特殊な環境下での対応も可能である。

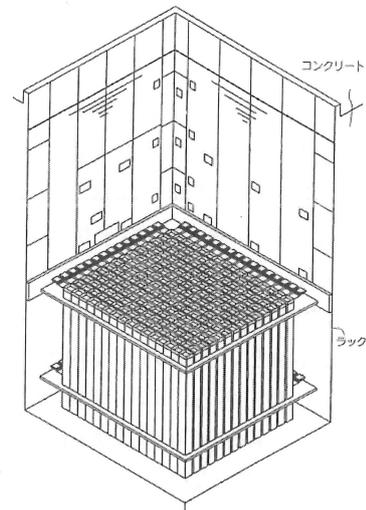


図-17 使用済燃料ピット

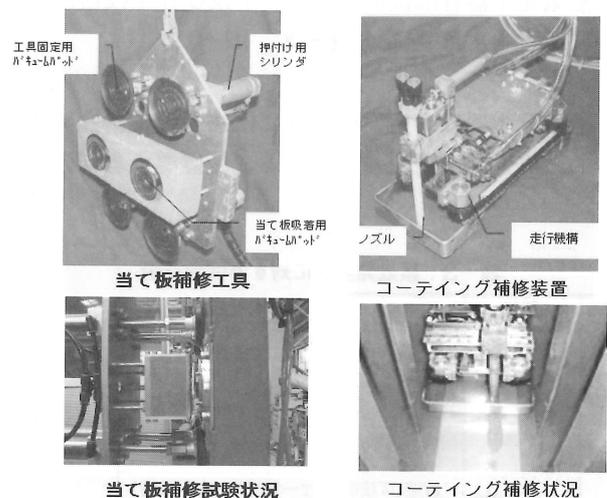


図-18 使用済燃料ピット応急補修装置

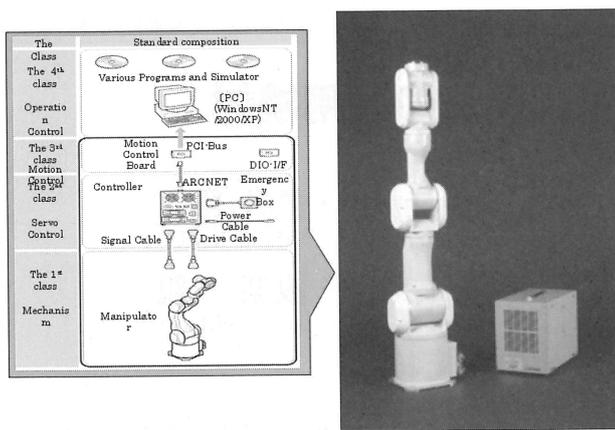


図-19 汎用ロボットPA10シリーズ

原子力発電所の運転中の点検や、一般災害、ビル火災など、人が容易に立ち入れない場所において、現場の状況をリアルタイムに把握したいというニーズから、当社は遠隔操作により、現場の状況をリアルタイムに伝える遠隔点検ロボットを開発している(図-20)。この遠隔点検ロボット(MHI MARS-i)は、階段、段差の走行(段差25cm、傾斜角度45°)と、踊り場等の狭い部の通行を両立させた高機動性と、PHS回線を使用した完全遠隔操作を実現している。さらに、1回線で制御/カメラ映像の送受信が可能であり、バッテリー交換の容易なニッカドバッテリーを使用して、フル充電で約2時間の連続運転を実現している(MARS: Mitsubishi Accident support Robot System)。

原子力施設での作業を想定したロボットとしては、経済産業省委託事業において原子力防災ロボット(MHI MARS-A、T)を開発している(図-21)。作業用ロボット(MARS-A)の主な要求仕様としては、災害発生時に人が入っていけない環境下において災害の状況を把握し、被害の拡大を食い止めるための様々な機能を有している(表-4)。運搬用ロボット(MARS-T)は、約50kgまでの重量物の運搬や散水除染のためのノズルの操作を行える機能を有している。

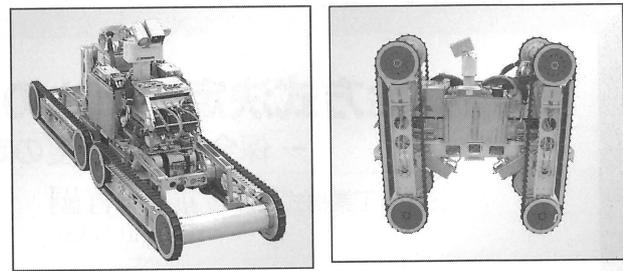


図-20 遠隔点検ロボット(MHI MARS-i)

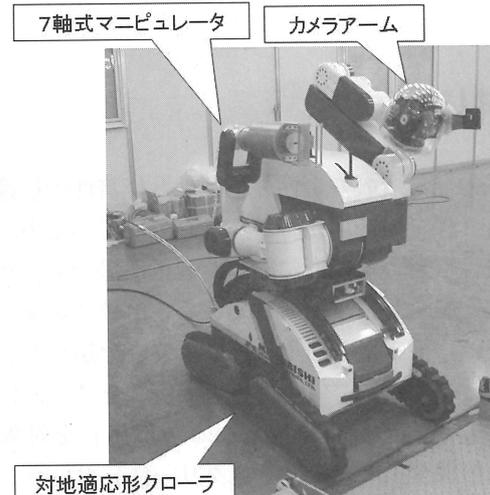


図-21 原子力防災ロボット(MHI MARS-A)

表-4 MARS-Aの主な仕様

| | |
|------|--|
| 作業機能 | <ul style="list-style-type: none"> ● ドアの開閉 ● バルブの開閉 ● 配管開孔 ● ぶき取り除染 |
| 移動機能 | <ul style="list-style-type: none"> ● 階段：角度40°を昇降、踊り場の奥行き1mで旋回 ● 速度(最大)：2km/h(平地)、0.5km/h(階段) |

4. むすび

本稿において、これまで当社が開発又は導入し実機に適用した保全ロボットを紹介した。

今後も、高度な特殊ロボット技術を駆使し、様々な保全ニーズに対応した保全ロボットの開発や実機適用を行っていききたい。

(平成17年2月28日)