

# 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

## The Application of Manipulator Robot for Nuclear Plant Maintenance

三菱重工業株式会社	光畑 幸史	Yukifumi KOHATA	Member
三菱重工業株式会社	藤田 淳	Jun FUJITA	Member
三菱重工業株式会社	大西 献	Ken ONISHI	Member
三菱重工業株式会社	津張 博之	Hiroyuki TSUHARI	Member
三菱重工業株式会社	細江 文弘	Fumihiko HOSOE	Member

In the maintenance works at nuclear power plant, robots are used because of high radiation, narrow space and underwater work. Various robots are needed because there is various maintenance works. This is inefficiency. As the solutions, we developed manipulator robots for the access of specialized tools. This study shows manipulator robots developed by MHI, application example to maintenance works and effectiveness of manipulator robots. When robotization of maintenance works are considered, manipulator technology is very effective solution means. We achieved efficiency improvement and the reliability improvement by developing a high generality manipulator.

Keywords: Power Plant Maintenance, Manipulator, Robot

## 1. 緒言

原子力発電所では定期的に各種保全工事を行なっている。保全工事は主として検査と補修であり、専用工具（例えばカメラや溶接装置）を対象箇所へアクセスさせ、その目的作業を実施する。

対象箇所の中には、狭い・水中・放射線量が高いといった物理的環境条件から、人による作業が困難又は不可能な場所も多く、人に代わってロボットに作業を行なわせる技術を開発し、実工事で使用している。しかし、保全作業の種類・対象は多種多様で、さらに今後も増えると考えられる。作業毎にロボットを設計開発すると、製作期間、費用面で非効率であり、信頼性低下の原因となるため、共通のロボットで種々の作業を行ないたい。その解決策として、人の腕のように自由度が高く、可動範囲が広い多関節マニピュレータ型ロボット（以降マニピュレータと略称する）を専用工具のアクセス手段として応用することが考えられる。

本稿では原子力発電所の保全工事に適用する装置に求められる仕様、弊社で開発したマニピュレータの特長、マニピュレータ型ロボットを応用した保全工事の適用事例及びマニピュレータの適用の有効性について紹介する。

## 2. マニピュレータ<sup>[1][2][3][8]</sup>

### 2.1 特長

マニピュレータとは、モータ、減速器、角度検出センサで構成される回転リンクを積み上げて配置した構造で、人の腕のような動きが可能なロボットである。マニピュレータの例として弊社 PA10 の鳥瞰図を図 1 に示す。

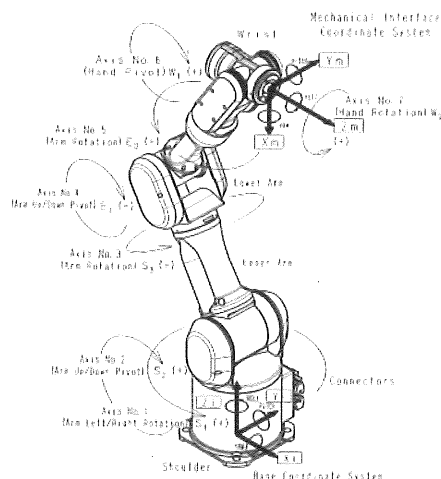


図 1 多関節マニピュレータ PA10

マニピュレータ (PA10) は、以下のような特徴を有している。

- ① 比較的小型で、他機構の装置より広い可動範囲と高い自由度が得られる。
- ② 自重に対する可搬質量の比率が大きい。

連絡先: 光畑 幸史  
三菱重工業株式会社 神戸造船所  
〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1  
E-mail: yukifumi\_kohata@mhi.co.jp

- ③ 制御ソフトの変更で動作を自由に変更できる。
- ④ 冗長自由度を有する7軸構成であるため、障害物回避に有効である。

これらのメリットを生かし、各方面でマニピュレータが活躍している。

[9]

## 2.2 プラント保全へのマニピュレータ適用検討

保全工事に用いられる工具は、大きさや形が様々で、その使い方（動かし方）も異なる。可動範囲が広く、自由度が高いマニピュレータは、高い汎用性を有するため、複雑な動作要求に対応可能であり、保全工事に用いるロボットの共通化を考えた場合、非常に有効である。

また、同一箇所へ多種の作業を行なう場合、先端工具と制御ソフトを変えるだけで、全ての作業を同一ロボットで行なえる利点もある。このため、工具の開発を行えば、新知見を早期に保全工事に適用することが可能になる。

## 2.3 プラント保全へのマニピュレータ適用検討

原子力発電所の各種保全工事へロボットを適用するためには、使用環境や作業の特徴を考慮し、以下の要求を満たす必要がある。

- ・ 人手の作業と同等または、それ以上の精度を有すること。
- ・ 耐放射線性を有すること。
- ・ 防滴（除染時に水洗いができること）、防水（水中の場合）であること。
- ・ 狭隘部への搬入出を考慮し、小型軽量であること。
- ・ マニピュレータと制御装置の接続を一時的に外しても、原点復帰等のイニシャライズ作業無く、瞬時に起動すること。

これら要求仕様を元に、原子力発電所での保全工事に適用できるマニピュレータを設計・開発した。表1に主な仕様を示す。

表1 マニピュレータ型ロボット ベース仕様

軸数	7軸
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 10 <sup>6</sup> [Gy]
耐環境性	防滴 IP54(防水 IP67 も可)

## 3. 保全工事への適用事例

マニピュレータを保全工事へ応用した事例を以下に紹介する。

### 3.1 原子炉容器の非破壊検査<sup>[7]</sup>

PWR型原子力発電所の原子炉容器（以下RV）溶接

部の健全性をUTによる非破壊検査で確認する検査工事へマニピュレータを適用した。RVは検査時に水没した状態であるため、ロボットは完全防水構造とし、スラスタ（プロペラ）推力でRV内を自由に移動できる水中自航型台車にマニピュレータを搭載した構造とした。検査対象箇所の溶接線近傍まで台車で移動後、マニピュレータで検査用先端工具を動かし、検査を行う（図2）。先端工具は、RVの検査対象箇所毎に複数種類必要であるが、全ての先端工具をマニピュレータに装着可能で、順次交換することでRV溶接線全ての検査を1台のロボットで可能とした。複数の大掛かりな装置を使っていた従来に比べて、大幅な検査期間の短縮をこのロボットで実現した。

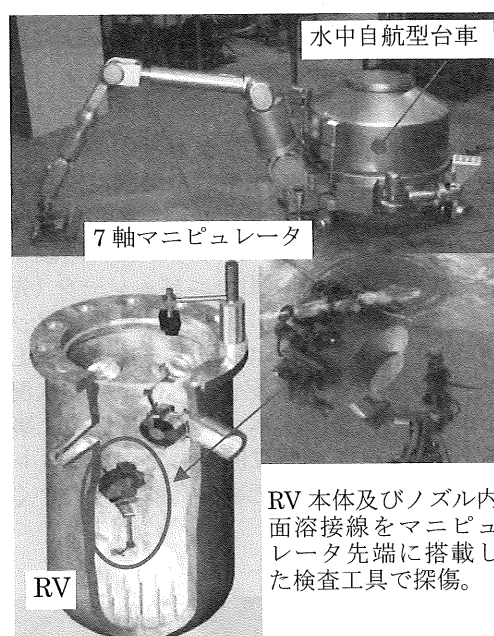


図2 原子炉容器非破壊検査装置

### 3.2 再処理工場内自動分析マニピュレータ<sup>[6]</sup>

再処理工場内の分析ボックス内で、ビーカや試験管を用いて試験体の分析を行なう作業は、試験体が少量の場合、繊細で正確な作業が要求され、また、化学反応の待ち時間が長い理由から、ロボットによる自動化が要望されている。ロボットに要求される仕様は、分析ボックス内に入る大きさで、故障に対するメンテナンス性が考慮されていることであり、分割モジュール設計を取り入れ、故障モジュールのみ交換可能なマニピュレータを開発した（図3）。マニピュレータの制御やメカ部の設計思想は先行ロボットを踏襲しつつ、耐食性を考慮したオールステンレス仕様とし、MSM\*1による手動操作でモジュール分割及び復旧が可能となるよう設計した。このマニピュレータにより、再処理工場での24時間連続分析作業が可能となった。

\*1 : MSM (Master Slave Manipulator) 再処理工場の設備

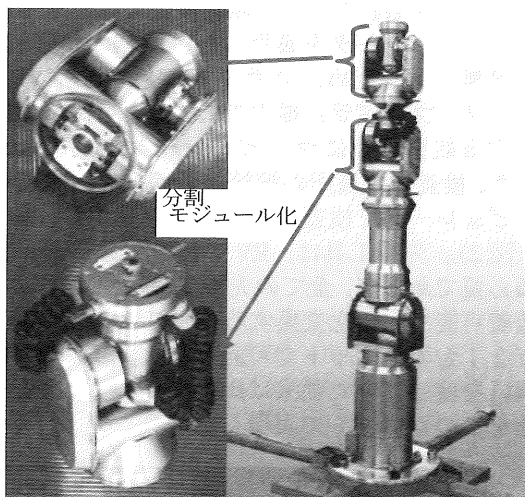


図3 分析用マニピュレータ

### 3.3 原子力防災支援ロボット [4][5]

1999年に発生したJCO事故を教訓に、放射線環境下で事故収束作業支援を行なう作業用ロボットを開発した(図4, 図5)。このロボットは、階段や不整地を走行できる台車に作業用マニピュレータ(先端にツールチェンジャを搭載し、各種工具をワンタッチで取り付け可能)とカメラマニピュレータを搭載し、遠隔操作でドア/弁の開閉、配管開孔、現場の状況把握が可能なロボットである。本ロボットは保全工事とは直接関係が無いが、この時に開発したマニピュレータ技術がベースとなり、保全工事の高度化に大きく貢献している。

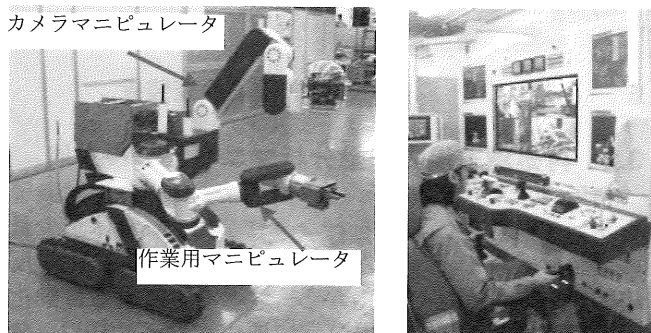


図4 原子力防災支援ロボットと操作卓



図5 マニピュレータ操作によるドア開け通過

### 3.4 蒸気発生器出入口ノズル保全工事

PWR型原子力発電所の蒸気発生器(以下SG)の水室1次系出入口ノズル溶接部の健全性検査及び応力

緩和と、各種補修を行なう工事にマニピュレータを適用した(図6)。SG水室内は放射線量が極めて高く、人の作業は数分が限度であり、仮に人の作業を想定した場合は、人海戦術にならざるを得ない。保全工事が必要なSGの台数を考えると、作業者の被ばくは膨大な量となり、現実問題としてロボット化無しでは保全工事が成り立たない状況にある。この工事へ適用したロボットは、SG水室内にマニピュレータのベースとなる旋回支柱とスライドテーブルを設置し、そこへマニピュレータ(先端にはツールチェンジャを搭載)を取り付ける構造で、保全対象箇所の出入口ノズル部に各種先端工具をアクセスさせることが可能である。また、マニピュレータ先端をマンホール(直径400mm)から水室外に出すことで、作業者が水室に入らなくても先端工具を容易に交換でき、作業者の被ばく低減に寄与している。

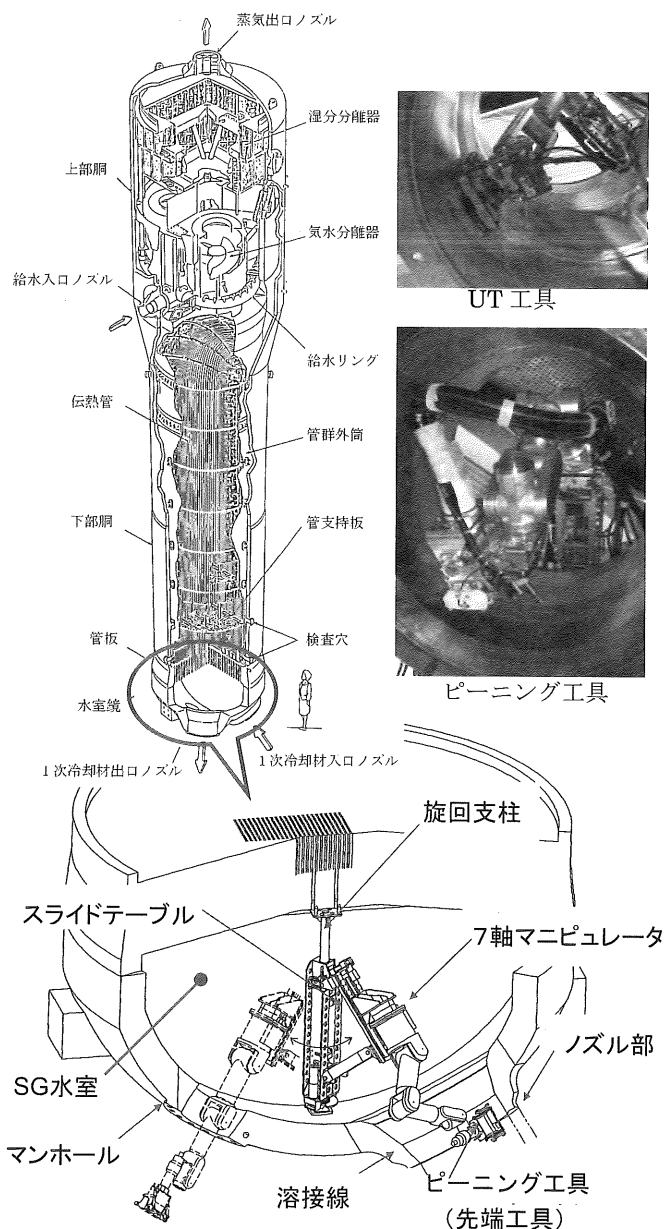


図6 蒸気発生器出入口ノズル保全装置

### 3.5 原子炉容器出入口ノズル保全工事

PWR 型原子力発電所の原子炉容器（以下 RV）の出入口ノズル溶接部管台内面 INLAY 工事\*2 に、マニピュレータ技術を適用している（図 7）。

定期検査中は、炉内構造物からの放射線を遮断するため、原子炉キャビティを水で満たしている。そのため、工事対象のノズルは水中であり、工事を実施するため、円筒容器を用いて気中環境を創出している。

ノズル内は放射線量が極めて高く、人の作業を想定した場合、十分な除染作業が必要となる。また、円筒容器内は狭隘な作業環境であるため、同時稼働機材や人員にも制約がある。

これら課題を解決し、被ばく低減、複数ノズル同時施工による高速化などを実現するため、各作業の自動化を行った。自動化にあたっては、装置構成が最小となるよう検討を行い、切削など専用装置で行う作業と溶接、検査等マニピュレータで行う作業とを区分した。

マニピュレータ、マニピュレータベース（マニピュレータを出入口ノズルの間で移動させる）、ターンテーブル（切削装置など大型工具をノズルに搬入出す）を円筒容器底面のプラットフォームに常設し、切削装置などの専用装置は使用時に都度搬入出す構成としている。

マニピュレータで作業を行う際は、作業に応じた工具をツールマガジンに載せ、ターンテーブル上に設置し、マニピュレータ自身で先端の工具を交換している。これにより、段取り替え時に人が介在する必要が無く、各種作業の完全遠隔化を実現した。主要な全作業を遠隔で行うことで、従来工法と比較し、大幅な被ばく低減が図れ、複数管台同時施工による高速化の実現で、工期の短縮も図れる。

また、この工事へ適用したマニピュレータは前項の工事に適用したものと設計コンセプトを共有しており、設計のモジュール化により、設計、製作期間を削減している。

### 3.6 蒸気発生器出入口ノズルの非破壊検査

PWR 型原子力発電所の蒸気発生器（以下 SG）の水室 1 次系出入口ノズル溶接部の健全性検査を行なう工事に、マニピュレータを適用した（図 8、図 9）。3.4 項の保全装置は、放射線量の高い SG 水室内作業として巡回支柱の設置、スライドテーブルの搬入及び設置が必要であった。

今回の装置は、水室外部より管板面歩行型ロボット（マニピュレータベース）を取付け、その後マニピュレータをマニピュレータベースに搭載する手順とし、完全遠隔で作業を行い、SG 水室内作業を排除した。これにより、SG 出入口管台溶接部の非破壊検査における大幅な被曝低減を可能とした。

マニピュレータベースは、管板面を歩行し、管板面の任意の位置に移動できるため、ノズル部の検査だけでなく、水室内の他の保全工事に適用することも可能となっている。

また、狭隘な SG ループ室への機材搬入を容易にするため、3.4 項のマニピュレータに 3.2 項のマニピュレータ分割機構を採用し、マグネシウム合金、チタン合金等の軽量材を採用することで、装置の可搬性を向上させた。

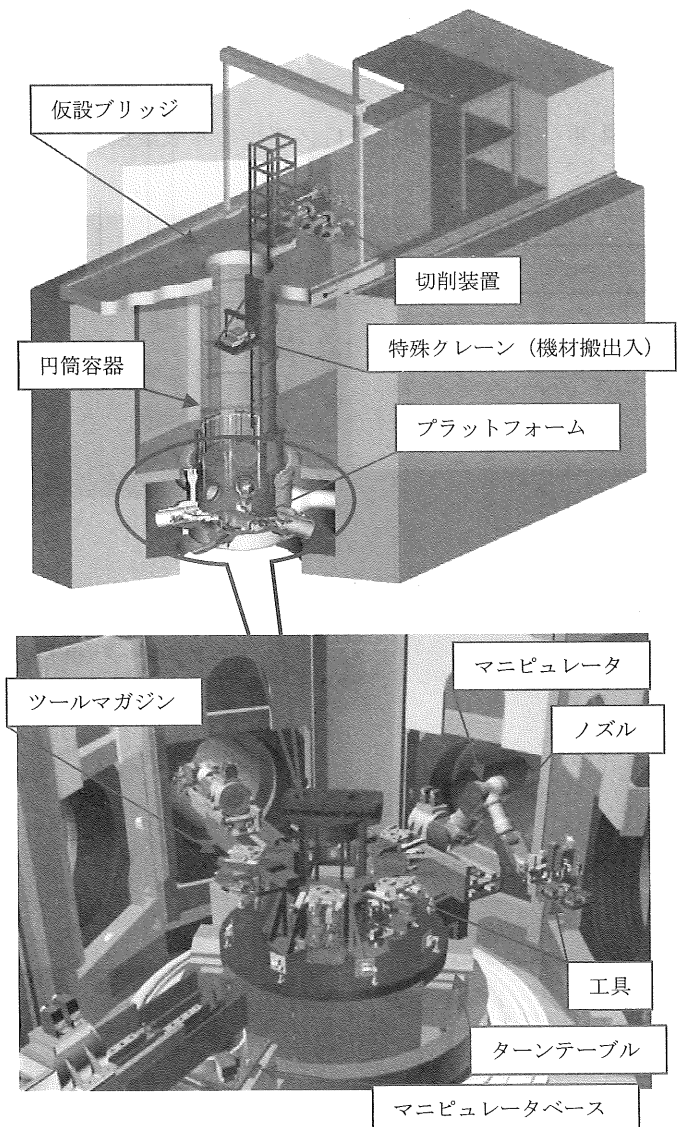


図 7 原子炉容器出入口ノズル保全工事

\*2: INLAY 工事 管台内面の 600 合金を削り取り、耐 PWSCC 性に優れる 690 合金を溶接し、一次冷却材と接する管台内面材料を置き換える工事

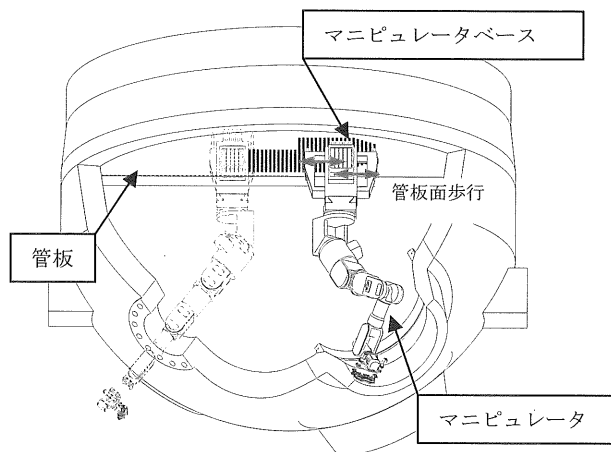


図 8 蒸気発生器出入口ノズルの非破壊検査装置

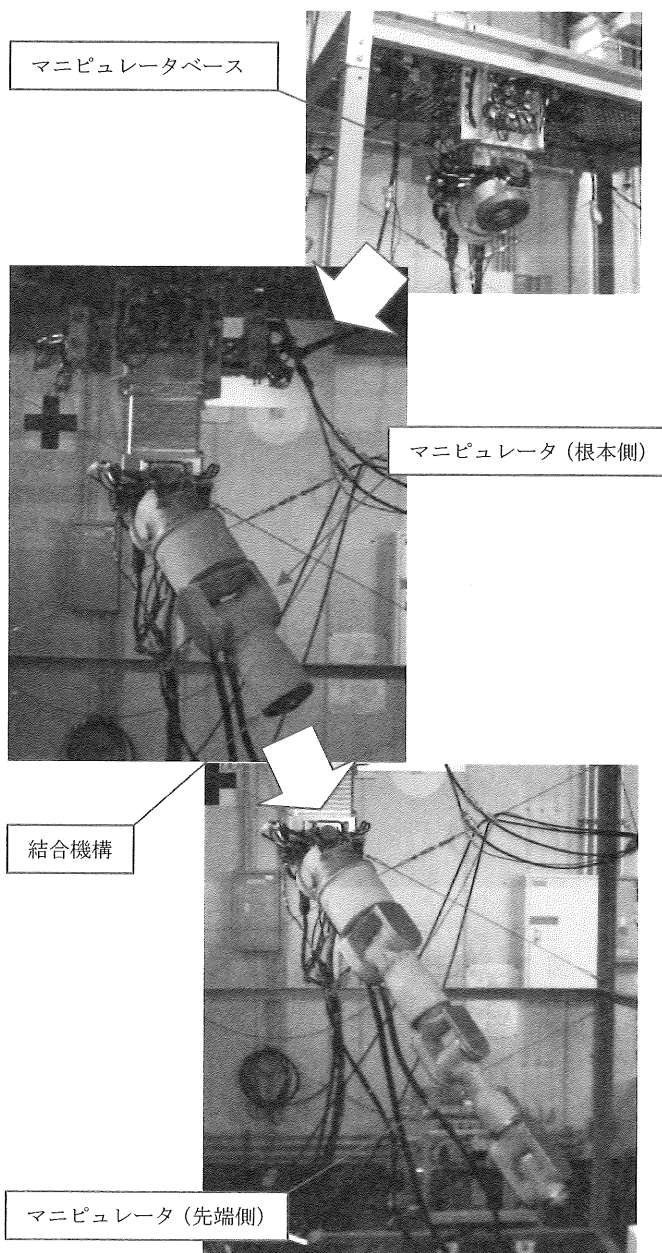


図 9 マニピュレータ設置状況

#### 4. 結言

- 1) 原子力発電所での各種保全工事に、人に代わって作業を行なうロボットを開発し、適用してきた。しかし、保全工事の種類は多種多様であり、保全工事ごとに専用ロボットを設計製作することは非効率であり、かつ信頼性向上が困難になるため、ロボットの共通化が要望された。
- 2) 汎用性の高いロボット（可動範囲・動作自由度）として、多関節マニピュレータ型ロボットが挙げられる。制御ソフトの変更により、多種多様な動きを1台のロボットで実現できることが最大の利点であり、複雑な動作を作業毎に要求される保全工事のロボット化には、非常に有効な解決手段となる。
- 3) 原子力発電所内での適用を考慮した仕様を検討し、ベースとなるマニピュレータを開発した。保全工事で用いる専用工具の対象箇所へのアクセス手段として、このマニピュレータを用いることで、ロボットの共通化と共に、信頼性の高い保全工事を実現している。
- 4) 本稿で紹介したマニピュレータ技術をはじめ、様々なロボット技術を応用し、原子力発電所において、現在は未着手の領域の保全工事に取り組んでいきたい。更に、放射線環境下全般（再処理施設や核融合炉、宇宙等）で必要な各種作業のロボット化へも応用可能であると考えている。

#### 参考文献

- [1] 大西, 大西, “可搬式汎用知能アーム —オープンロボットの提案—”, 1994, 日本ロボット学会誌, Vol.12No.8.
- [2] 大西, “可搬式汎用知能アーム PA-10 のオープンコントローラ”, 1998, 日本ロボット工業会誌, No. 121.
- [3] OONISHI, “The Open Manipulator System of the MHI PA-10 Robot”, 1999, 30th ISR 予稿集.
- [4] ISOZAKI, NAKAI, “Development of a work robot with a manipulator and a transport robot for nuclear facility emergency preparedness”, Advanced Robotics, Vol. 16, No. 5, PP. 371-375(2002).
- [5] 今村, 磯崎, 小華和, 中井 “原子力防災支援システム開発—作業ロボット及び重量物運搬用ロボットの開発—” 日本原子力学会秋の大会予稿集 Vol. 2001 第2冊分 311頁.
- [6] 柴山・林原・大西 “再処理施設における自動分析用ロボットアームの開発” 日本原子力学会 1997 秋の大会 予稿集
- [7] 日本ロボット学会実用化技術賞：大道・本村・深川・西原・小西・谷口・青山・吉岡 “改良型原子炉容器超音波探傷装置の開発” 日本ロボット学会誌 Vol.12 No3,1994
- [8] 日本ロボット学会実用化技術賞：大西・時岡・大西・弘津・大道・白須 “可搬式汎用知能アームの実用化” 日本ロボット学会誌 Vol.18

No1,2000

[9] 藤田・大西 “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 予稿集

