

マニピュレータ型ロボットのプラント保全への適用

The Application of Manipulator Robot for Nuclear Power Plant Maintenance

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

In the maintenance works at nuclear power plant, robots are used because of high radiation, narrow space and underwater work. In light of manufacture period, cost and reliability, various maintenance works are requested to be done by one robot. As one of 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. The manipulator technologies in this study are able to apply to robotization needed under radiation environment.

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。保全工事の内容は、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。

これらの対象箇所の中には、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、保全作業の種類や作業対象は多種多様で、更に今後もこの種類は増えると考えられる。作業毎にロボットを設計開発しては、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、できれば共通のロボットで色々な作業を行ないたい。そのひとつの解決策として、人の腕のように自由度が大きく、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で使うための装置に求められる仕様と、弊社で開発したマニピュレータの特徴、及び、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と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 [1] [2] [3] [8]

2.1 特徴

マニピュレータとは、モータ・ギア・センサからな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。

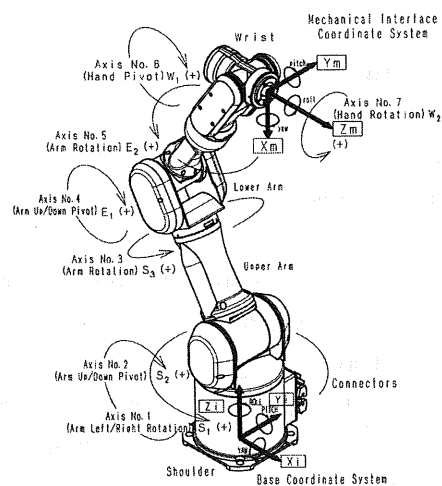


図 1 多関節マニピュレータ PA10

マニピュレータ (PA10) は、以下のような特徴がある。

- 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。
- ② 制御ソフトの変更で、動作を自由に変更できる。
- ③ 7 軸構成であり冗長自由度を有するため、障害物回避に有効である。

連絡先：藤田 淳、〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区
和田崎町 1-1-1、三菱重工業株式会社 神戸造船所、
電話：078-672-2756、e-mail：jun_fujita@mhi.co.jp

これらのメリットを生かして各方面でマニピュレータが活躍している。

2.2 保全工事へのマニピュレータの適用検討

保全工事の作業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。こういった作業に、可動範囲や自由度で高い汎用性を有するマニピュレータを用いることは、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は、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。

更には、工事直前に作業の種類が増えた場合や、先端工具の開発に時間を要し、その大きさや使い方（アクセス方法）が工事直前まで未定の場合には、汎用性の高いマニピュレータの採用は特に有効である。

2.3 原子力へ適用するための要求仕様

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から、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。以下表1にその主な仕様を示す。

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 10^6 [Gy]
耐環境性	防滴 IP54（防水 IP67 も可）

3. 保全工事への適用例

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[7]

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の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、スラスト（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て検査する（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。

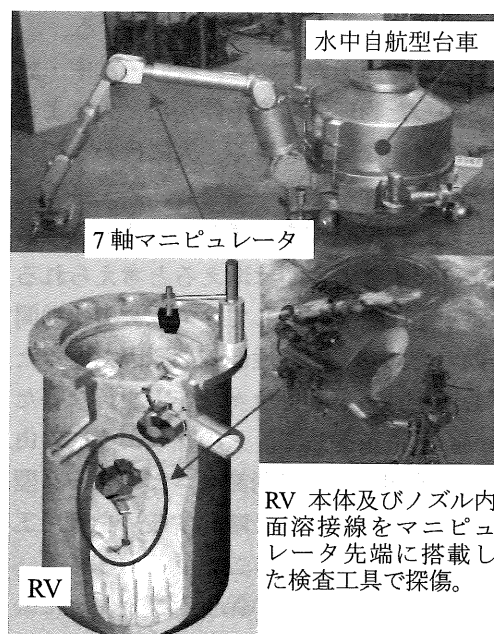


図2 原子炉容器非破壊検査装置

3.2 再処理工場内自動分析マニピュレータ[6]

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多い理由から、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。

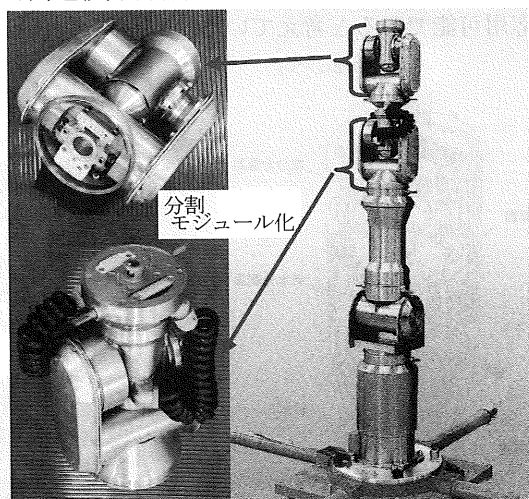


図3 分析用マニピュレータ

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6）。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。

3.4 再処理工場内機器の目視検査

六ヶ所再処理工場内のセル（コンクリート壁で隔離された部屋）内タンクや配管等の機器を目視検査する工事へマニピュレータを適用した（図7、図8）。セル

内へのアクセスルートは直径約200mm、長さ約800mmのIESホールのみであり、ここからカメラをセル内へ送り込み、検査対象機器近傍へカメラを案内する必要がある。細長いインタベーションホールを通過できるロッド型ロボットの先端にマニピュレータを搭載し、セル内でカメラを自在に動作させ、機器の目視検査を可能とした。

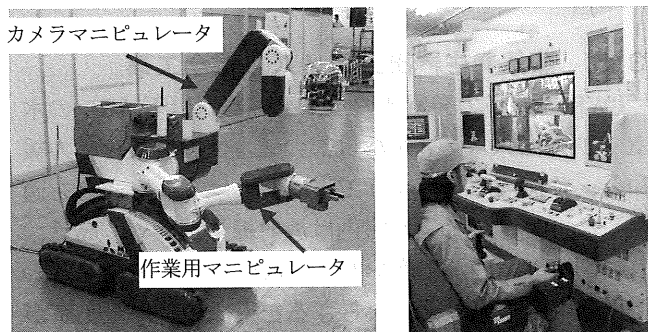


図4 原子力防災支援ロボットと操作卓

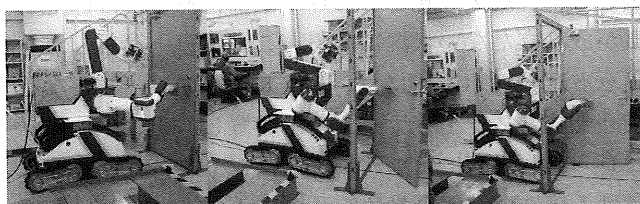


図5 マニピュレータ操作によるドア開け通過

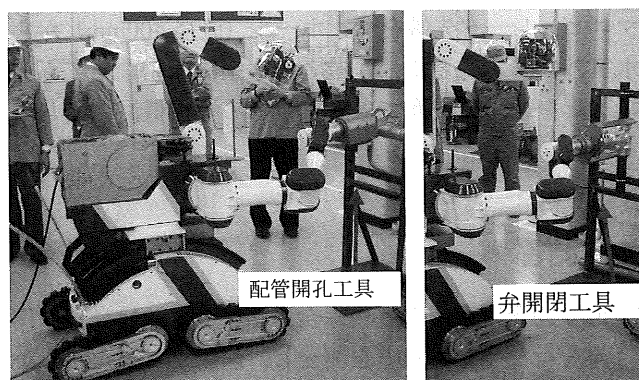


図6 配管開孔および弁開閉

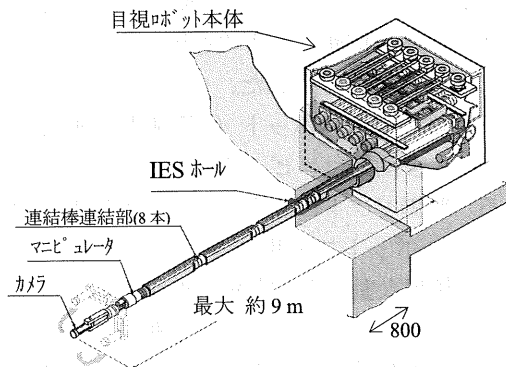


図7 再処理工場機器目視検査ロボット

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

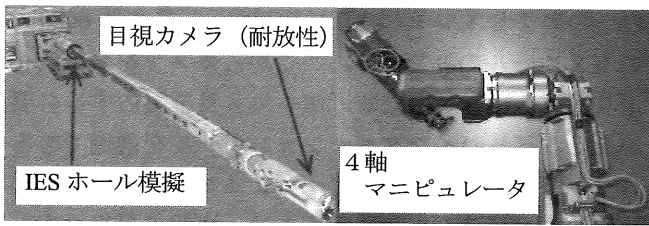


図8 目視検査ロボットマニピュレータ

3.5 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8）。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、作業者の被曝は膨大な量となり、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、作業者の被曝低減に寄与している。

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、かつ信頼性低下の原因となるため、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、高機能で高い信頼性の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。

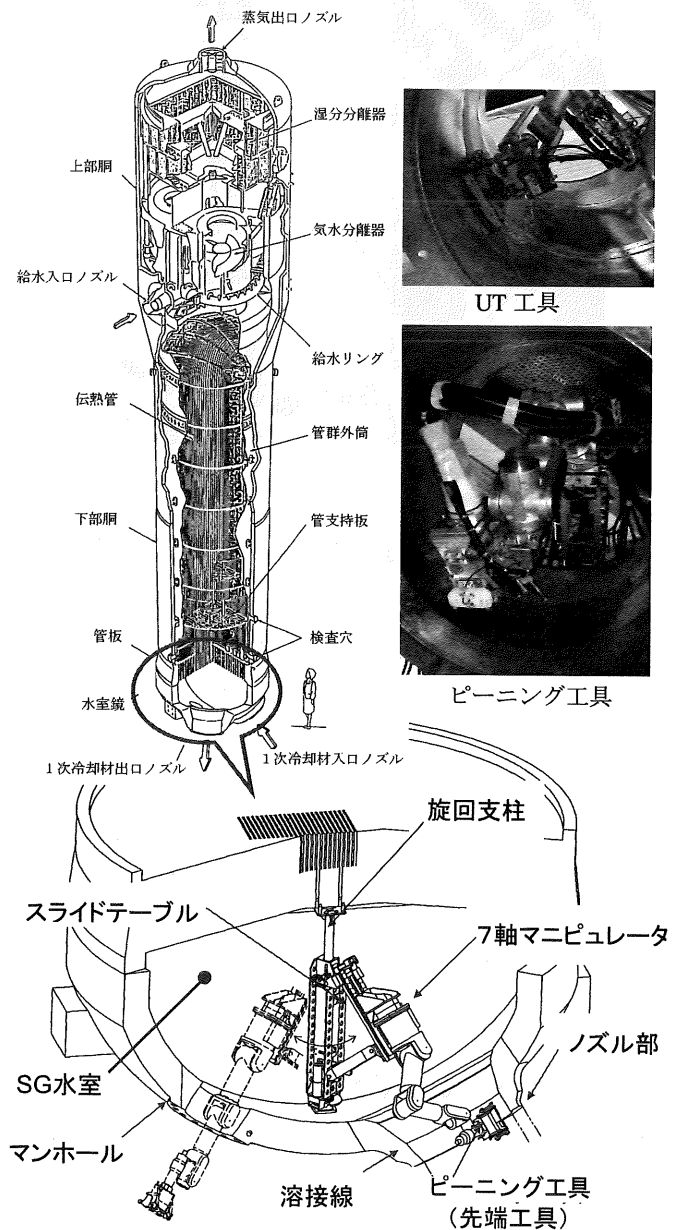


図8 蒸気発生器出入口ノズル保全装置

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