

特集

大型プロジェクト(2)

実用原子力発電施設作業ロボットの研究開発

R & D of Advanced Robot for Nuclear Power Plant Facilities

安藤 弘 昭*
Hiroaki Ando

1. はじめに

現代社会においては、安全に対する十分な防護体制なしに実施しえない作業や、人間が直接アクセスできない作業(例えば、原子力発電施設における高放射線下における作業、海底石油生産等での水中作業、災害時等の消火救援作業等)が多数存在しているが、これら作業は経済社会の発展には必要不可欠で、その重要性が益々増加している。

それらの作業は自動化、ロボット化による解決が求められていることから、通商産業省工業技術院は、大型プロジェクトとして、これらの人間にとって極めて厳しい環境下における複雑な作業を、人間にかわって実行し得る高度作業システム、すなわち「極限作業ロボット」の研究開発(以下、「本プロジェクト」という。)を進めている。

本稿では、本プロジェクトの中の一つである「実用原子力発電施設作業ロボット」の研究開発の現状を中心として、以下について述べる。

- ・極限作業ロボットプロジェクトの概要
- ・実用原子力発電施設作業ロボットの研究開発計画

- ・実用原子力発電施設作業ロボットの昭和60年度の主な研究開発成果

2. 極限作業ロボットプロジェクトの概要

2.1 研究開発の概要

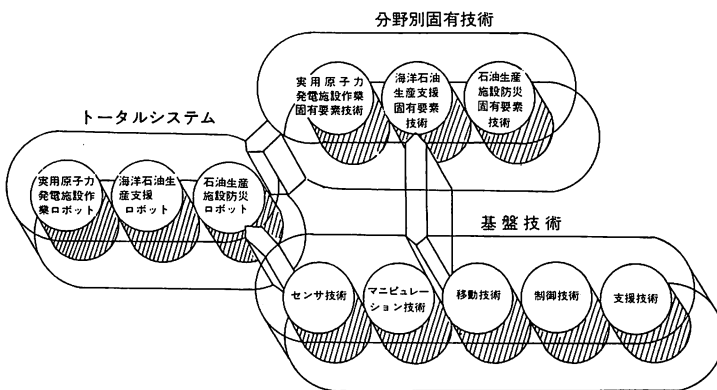
本プロジェクトで開発を目指すシステムは、原子力、海洋及び防災のそれぞれの分野において環境適応性が高く、機動作業性を有し、安全な遠隔から迅速、かつ、確実に制御し得る人間・ロボットシステムである。

- ① 研究開発の第一段階は、要素技術開発として原子力、海洋、防災の3分野に固有な技術である分野別専用技術と各分野に共通な技術である基盤技術に分けて実施する。
- ② 第二段階では、これらの成果をもとに原子力、海洋、防災の3分野のそれぞれのニーズを踏まえた専用機能を有するロボットを開発する。

(図-1参照)

この3分野のロボットの基本的開発目標を表1に示す。

本プロジェクトは昭和58年度から昭和65年度までの8年間で、研究開発費は約200億円を予定している。



注) 以下
「実用原子力発電施設作業ロボット」は「原子力ロボット」
「海洋石油生産支援ロボット」は「海洋ロボット」
「石油生産施設防災ロボット」は「防災ロボット」と略称する。

図-1 極限作業ロボットの研究開発計画の概要

* 極限作業ロボット技術研究組合 技術部長

〒105 東京都港区芝公園3-5-8 機械振興会館内

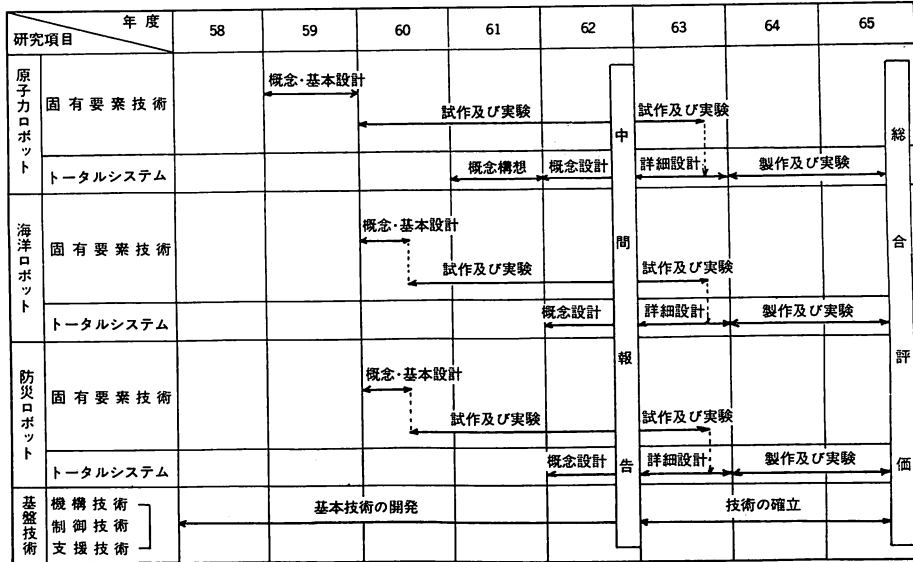


図-2 極限作業ロボット研究開発スケジュール

スケジュールを図-2に示す。

2.2 本プロジェクトの構成

極限作業ロボットの開発に当っては、運動、思考、感覚等について、電気工学、機械工学、生物学、人間工学、心理学、計算機工学、情報工学、画像処理工学、その他多くの工学分野における先端技術の開発とその高度な有機的結合が必要であり、関係研究機関の密接な連携によって始めて達成が可能となる。

本プロジェクトは、国の研究機関及び極限作業ロボット技術研究組合（鉱工業技術研究開発組合法に基づき、民間企業18社及び関係法人2団体により構成）で開発している。国の研究機関は、工業技術院機械技術研究所及び電子技術総合研究所が参加し、3分野のロボットに共通な基盤技術である機構技術、制御技術及び支援技術の研究開発を担当している。一方、研究組合は3分野のロボットの固有要素技術及び夫々のトータルシステムの研究開発並びに基盤技術である機構技術及び支援技術の研究開発を担当している（表2参照）。

3. 原子力ロボットの研究開発計画

原子力ロボットの研究開発は、現在、要素技術の開発を進展するとともに、最終的にこれら要素技術開発の成果と既存技術とを取り入れて開発するロボット（以下「トータルシステム」という。）の概念構想の検討を昭和61年度からスタートしている。開発の全体スケジュールやトータルシステムの構想を以下に述べ

表1 極限作業ロボットの基本的開発目標

項目	目標
原子力ロボット	原子力発電所等の原子力関連施設において、作業環境内を移動し、遠隔のオペレータの支援を得ながら、原子力プラント機器設備等の点検、修保等高度な作業を行えるロボットを開発する。
海洋ロボット	海洋石油開発関連施設において、海中を3次元移動し作業位置と姿勢を保ちつつ、遠隔のオペレータの支援を得ながら、保守、点検、修理等高度な作業を行えるロボットを開発する。
防災ロボット	石油生産施設等において生じた災害時に、遠隔のオペレータの支援を得ながら、災害現場を移動しつつ災害状況把握、災害の拡大防止、救援等高度な作業を行えるロボットを開発する。

る。

3.1 研究開発計画

図-3に原子力ロボットの研究開発スケジュールを、図-4にイメージ図を示す。また、図-5にトータルシステムと開発要素技術項目との関連を示す。

3.2 トータルシステムの構想

3.2.1 ロボットに期待する作業

放射能レベルの高い領域等での各種計測、弁の開閉やグランド部の増締、弁、ポンプ、熱交換器等の分解や点検、異常時における情景の転送等。

3.2.2 トータルシステムの目標

場所、対象機器、発生する事象、実施する作業内容等が多岐にわたる作業に柔軟、かつ、効率よく対応す

表2 極限作業ロボット開発の研究分担一覧表

研究項目		研究担当機関
基盤技術	機構技術	機械技術研究所 電子技術総合研究所 富士電機総合研究所 安川電機製作所
	制御技術	機械技術研究所 電子技術総合研究所
	支援技術	電子技術総合研究所 国際ロボット・エフ・エー 技術センター
原子力ロボット	高信頼性技術	三菱電機 三菱重工業 発電設備技術検査協会
	耐放射線技術	日立製作所 発電設備技術検査協会
	移動技術	日立製作所 日東 発電設備技術検査協会
	マニピュレーション技術	三菱重工業 ファナック 発電設備技術検査協会 富士通 東芝
	遠隔操作技術	三菱電機
海底石油生産支援ロボット	海中走行位置保持技術	三井造船 川崎重工業 住友電気工業
		沖電気工業
		川崎重工業 小松製作所
	海中マニピュレーション技術	川崎重工業 小松製作所
	管理制御技術	沖電気工業 三井造船
	防災ロボット	耐性技術
探索技術		松下技研 日本電気
対処作業技術		石川島播磨重工業 神戸製鋼所 国際ロボット・エフ・エー 技術センター

(注) 本研究分担は、昭和60年度現在を示す。

るために、自律制御方式に支援された高度な遠隔操作機能を有する高機能汎用ロボット。

3.2.3 トータルシステムの基本要領

表3にトータルシステムの各システムに要求される機能と目標仕様を示す。

4. 昭和60年度の研究開発の成果

開発中の要素技術のうち、4脚床面移動技術、多本指マニピュレーション技術及び視覚情報処理技術の研究開発概要並びに昭和60年度の研究開発の成果を以下に述べる。

4.1 4脚床面移動技術

脚による移動システムは、人間が活動することを前提とした環境でロボットが作業する場合の移動方式として一つの理想的な形態である。しかし、これを実現するためには解決しなければならない課題が多い。

まず、慣性モーメントを有する脚を操作することにより発生する大きな負荷トルクを制御できるアクチュエータの開発が必要であり、同時に過大なトルクの発生を抑え、高速に制御できるサーボメカニズムの開発が必要である。次に、様々な形状をもつ通路をロボットが安定でしかも高速に移動するために、姿勢のダイナミックな制御が必要である、すなわち、多数の関節を協調して制御し、通路形状に適應した歩容で歩行する制御方法の開発が必要である。次に、ロボットは予め教示されなくても、通路をその時々状況に応じて進まなくてはならない。また、途中には階段、凹凸、あるいは障害物があり、これにも適應しなければならない。したがって、知覚によって得られる情報と蓄積

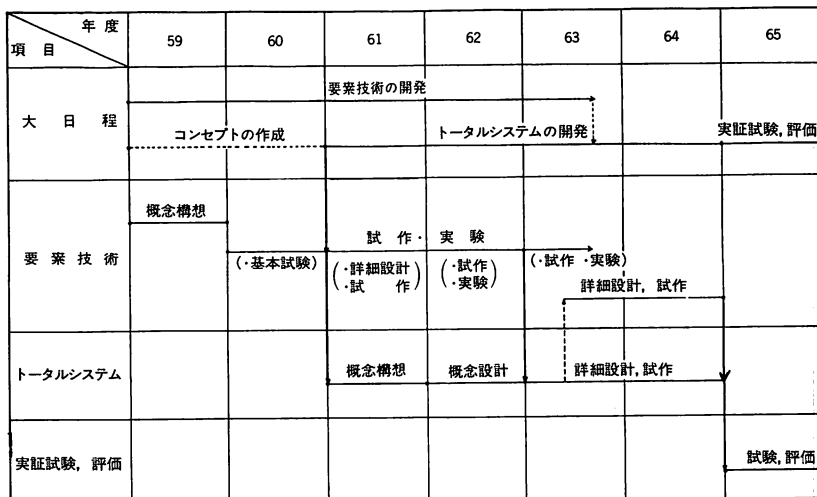


図-3 原子力ロボット研究開発マスタープラン

表3 トータルシステムの基本要項(その1)

項目	要求される機能	目標仕様
床面移動システム	<ul style="list-style-type: none"> 階段昇降、段差・堰・配管等の跨ぎ越え、くぐり抜け 安定姿勢確保(移動時、作業時) 有効に活動できる速さ 平地は人並み、作業場所では確実に接近作業ができる 	<ul style="list-style-type: none"> 4脚歩行 知能運動制御 小型・軽量アクチュエータ
壁面移動システム	<ul style="list-style-type: none"> 人用通路を經由して壁面へ乗り移る 溶接線等の小凹凸乗り越え、配管等の跨ぎ越え 非磁性体にも適用 	<ul style="list-style-type: none"> 負圧吸着走行機構 複数の上記機構を柔軟な節体幹で連結した複合機構 小型・軽量アクチュエータ
マニピュレーションシステム	<ul style="list-style-type: none"> 弁、ポンプ等の分解・点検 工具の使用及び持ち換え 諸形状の対象物やバッキン等の不定形、軟弱物の取扱 揚重設備の使用等 人並の精度、信頼度、速度、力 	<ul style="list-style-type: none"> 双腕繊細感覚付4本指マニピュレータ 多感覚バイラテラル制御 力感覚に基づく自律制御 小型・軽量アクチュエータ 小型・薄型・可撓性触覚センサ
情報処理システム	<ul style="list-style-type: none"> オペレータの疲労軽減を図った遠隔操作を基本とし人並の精度、信頼度、速度を確保 視覚立体計測、高速処理機能 臨場感の高い知覚情報の提供 	<ul style="list-style-type: none"> 単眼立体計測機構 視覚情報処理装置 光空間伝送システム

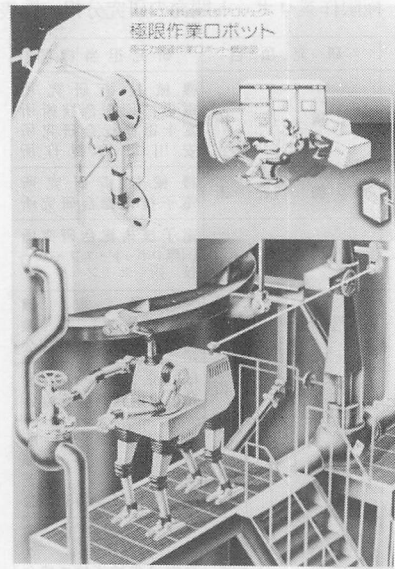


図-4 原子力ロボットのイメージ

表3 トータルシステムの基本要項(その2)

項目	要求される機能	目標仕様
その他のシステム	<ul style="list-style-type: none"> ロボットに異常が生じても機器等に悪影響を与えない機能 ロボットの補修を容易かつ迅速にできるような構造及び異常箇所を検知する機能 地震時、停電時において機器等に悪影響を与えない機能 	<ul style="list-style-type: none"> 主要ユニットの故障を予知・診断する内蔵自己診断技術及び外部から診断できる技術 機構部、駆動部等に異常が生じても最低機能を維持する機能縮退制御 知能制御部に異常が生じても悪影響が外部に出ることを防止する修復制御 補修性向上のためのモジュール化構造
	耐放射線性	<ul style="list-style-type: none"> 設計条件 <ul style="list-style-type: none"> 温度 70℃ 相対湿度 90% 放射線量率 100R/h 少なくとも定期検査期間(約3箇月間)はメンテナンスフリー

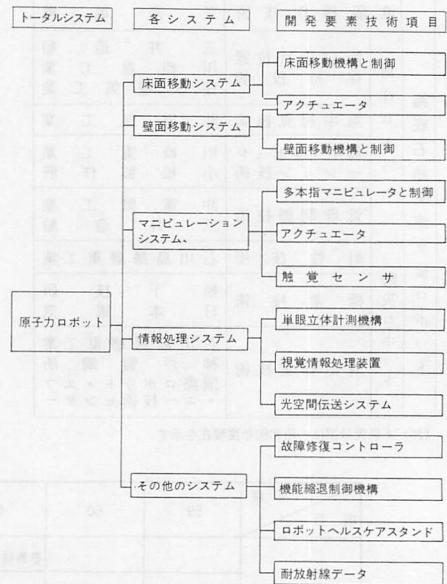


図-5 トータルシステムと開発要素技術項目との関連

された知識を利用して自律的に移動する人工知能技術の開発も必要である。

昭和60年度に、単脚機構を試作し、様々な歩容で歩行させ、4脚機構開発のためのデータを得た。(図-6参照)脚は腰関節、膝関節及び足首関節の3自由度の可動部を持ち、特にコンパクト化、軽量化、また駆動リンク部の遊び低減などの工夫をしている。また、状態を計測し制御するために、各駆動のモータ軸、関節軸の角度、角速度、姿勢などを検出するポテンシオメータやエンコーダを取り付けている。

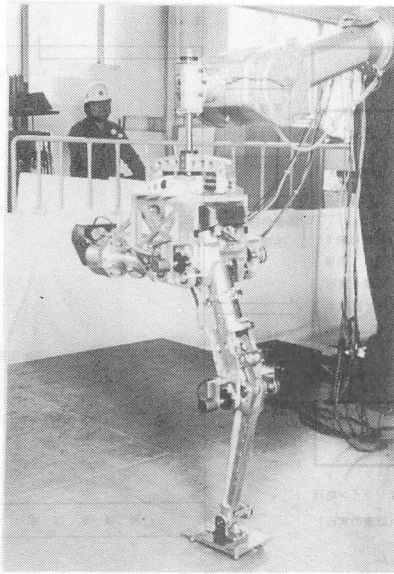


図-6 脚機構試作機

4.2 多本指マニピュレーション技術

原子力施設内の作業とその必要機能からみて、マニピュレータに求められる基本要素として、小型・軽量性、高パワー、繊細性、器用性、そして高度な知能が不可欠である。すなわち、大小さまざまな形状の対象物のハンドリングが必要とされるが、小型工具・ビス、ナット、小径ハンドル等への対応は大きな形状の“ハンド”では困難である。また、小型化は、原子力施設内の作業対象物回りの空間、その接近ルートは極めて狭くなっているのが通常であるから、最優先する課題といえる。

次に、グランドパッキン等の変形物を扱うためには非常に繊細な作業を要求されるが、一方では大径のハンドル回し、ボルトの締付け、重量の重い専用工具のハンドリング等に代表される力作業も必要とされる。かつ、スレーブマニピュレーの動作が遅いことは、通常の間人感覚と異なるため、マスターマニピュレータの操作者の肉体的、精神的疲労を著しく増加させると言われており、力と速度の両方を確保するために、大きなパワーの発揮が求められる。また、汎用、専用工具の操り、特に汎用工具の自在な取扱い、既に述べた種々の形状物の取り扱いには器用さが求められる。

さらに、これらの作業を実用的速度・精度で実行できるためには、操作者の指示に基づいて、自律的に作業を実行するための高度な知能を付加する必要がある。特に、人間と共同して行う作業においては重要であり、環境認識と自律判断機能が実用的速度・精度で行われ

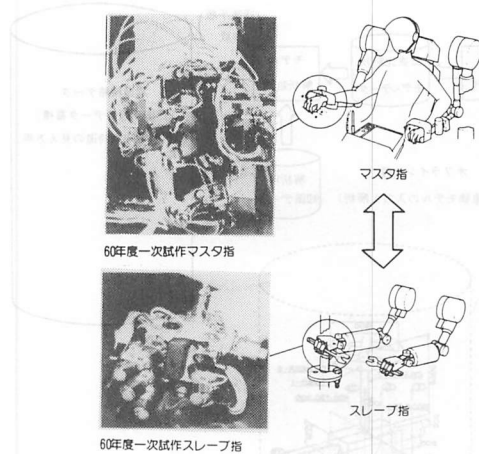


図-7 4本指の指マニピュレータの試作

ることが期待される。

これら、小型軽量、パワー、繊細、器用、知能の達成レベルは個々にも相当高度なものを狙う必要があるが、さらに、開発を困難にしているのが、これらの要因が互いに関連しており、一方を解決しようとするとは他方に悪影響を及ぼすことである。パワーを上げるためには大きなアクチュエータを適用する必要があるが、これは、重量、形状増加に直結する。また、繊細さを確保するためには、微小力を検知できるセンサを必要とするが、これもセンサ実装の形状を複雑化し、寸法の増加を伴うことになる。さらに、器用さは腕、指部の自由度を増すことから始まるが、それに伴う構造の複雑さアクチュエータ数の増加による重量、寸法を増やすことになる。これらを解決するためにはお互いのトレードオフを図りながら、十分な設計の対応を行っていく必要がある。

また、マニピュレータは前述の如く、最終的には自律的に作業を実行できることが求められる。

これについては、最も実現性の高い遠隔制御方式（多感覚バイラテラル制御）から着手し、オペレータの操作をより容易、かつ、確実にするための支援制御（多感覚バイラテラル支援制御）を付加することを考えていく。最終的な制御機構は、遠隔制御、自動、自律制御が渾然一体となって融合したものでなくてはならない。また、視覚情報をフルに活用し、自律化度合を高めるように配慮する。

以上のことから、マニピュレータシステムの開発は、ハードウェアとしての繊細感覚多本指マニピュレータの開発と、その操作性、及び高知能性を実現するためのインテリジェントマニピュレータの開発を進め、ト

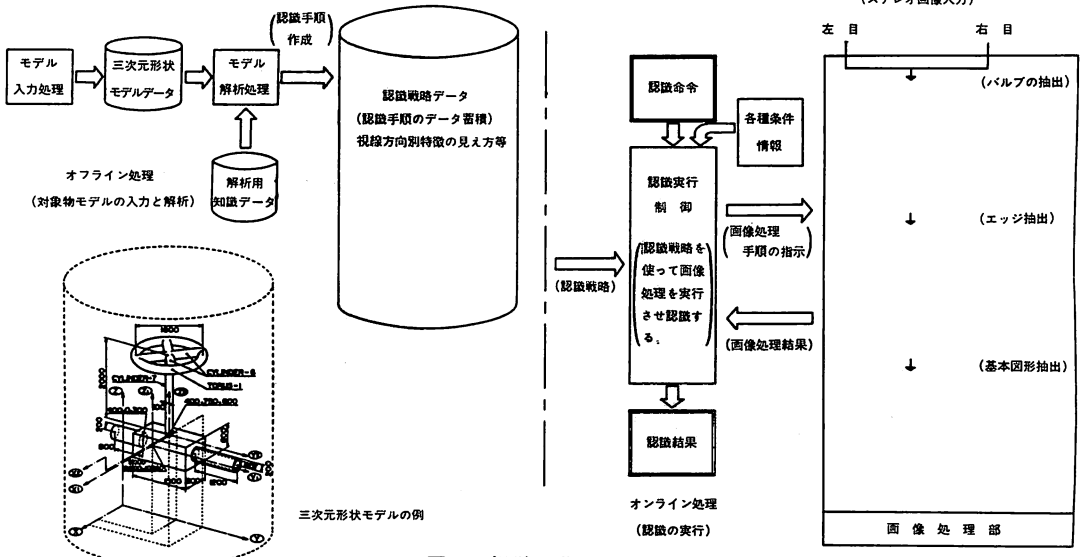


図-8 視覚認識システム

ータルシステムへと結びつけていく。

昭和60年度に、図-7に示す4本指の指マニピュレータの試作を行い基本動作の確認を行った。写真の下はスレーブ指マニピュレータであり、ほぼ人間指の寸法である。写真の上はマスタ指であり、力覚及び接触覚をオペレータに伝達する発生機構が内蔵されている。

4.3 視覚情報処理技術

視覚を用いた情報処理システムとして、知識情報処理を利用した3次元形状モデルに基づいた視覚認識技術を研究開発している。以下に、物体を認識するシステムを実現する上で、従来問題となっている点を述べ、その問題を解決するために開発しているシステムを紹介する。

実用的な物体認識システムを実現するため、従来次のような問題点がある。

- (1) 処理速度が遅い
- (2) 多種・多様な物体を認識できる柔軟性が乏しい
- (3) 3次元的世界の認識が困難であった
- (4) 幅広い環境条件下で認識できない

これらの問題点のうち、処理速度と柔軟性については、認識システム全体の構成を工夫し、かつ、高速処理が可能な装置によって対処することとし、他は認識方法によって対処することとした。

以上の方針で検討し、開発を進めている視覚認識システムの構成原理を図-8に示す。システムは基本的には、対象物のモデルを入力すれば、その物体の認識ができるモデルベースシステムとした。これにより原子力施設の限定された多種・多様な物件に対応できる柔

軟性を実現できるようにした。また、システム構成としては、処理に時間のかかる3次元モデル入力やモデル解析の部分であらかじめオフラインで処理しておきその結果を、認識を実行する認識実行制御部へ認識戦略という形で与える。さらに、画像処理部を高速処理用ハードウェアで実現し、処理の高速化を図っている。

昭和60年度に、三次元視覚情報を高速に処理できる視覚情報処理装置の設計及びその一部機能の確認を行った。また、自律作業のための物体把握プログラムの第一段階のものを完成し、その方式の有効性を確認した。

5. おわりに

第4章で詳細説明を省略した壁面移動機構、アクチュエータ、触覚センサ、単眼立体計測機構、光空間伝送システム、故障修復コントローラ、機能縮退制御機構、ロボットヘルスケアスタンド、耐放射線技術及び基本仕様の研究開発についても意図した成果を上げている。

原子力ロボットの研究開発は、このように順調に進んでおり、今後はこれら得られた情報等も参考にしつつ研究開発を深化させていくとともに、トータルシステムの構築のための研究開発も進め、昭和65年度に実証試験・評価を行うこととしている。

今後機会があれば、その後の研究開発の進捗状況を紹介したい。

出典

工業技術院大型プロジェクト；極限作業ロボット研究成果発表会，予稿集（極限作業ロボット技術研究組合），昭和61年11月17日発行