



核融合施設及び原子力施設で作業するロボットの  
システムインテグレーションに関する研究

2004年7月

岡 潔

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課(〒319-1195 茨城県  
那珂郡東海村)あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料  
センター(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費  
頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research  
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy  
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

核融合施設及び原子力施設で作業するロボットの  
システムインテグレーションに関する研究

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター

岡 潔

(2004年6月1日受理)

現在のロボットは、アミューズメント、福祉、防災など、様々な分野への適用が要求されているが、実用的な環境条件下ではシステムとして成立しているロボットは少ない。これには以下の理由による。(1)ロボットシステムは要素技術の単なる集合体ではない。(2)ロボットの性能は、各種機能を持った多数の要素から構成されたシステム全体の性能として決定される。(3)ロボットを構成する各要素は、各々について吟味、調整、改善等の検討を通して、各要素間のバランスを保ちながらロボットシステム全体の中で最適化される必要がある。このため、多数の要素から構成されるロボットのシステムインテグレーションは、実際に使用可能なロボットを実現する上で最も重要な課題である。

本報では、このシステムインテグレーションに関する課題を解決するために、核融合施設の保守や原子力施設の事故時の救済を行う代表的なロボットシステムについて、開発に必要不可欠となる手法や要素技術について述べる。ここで対象とするロボットは、人に代わって厳しい放射線環境下で作業を行うロボットである。特に、ロボットに与えられた環境条件や作業条件からの観点だけでなく、ロボットのシステムバランスからそのロボットに必要となる要素技術の再構築と最適化の観点をも考慮して、実用的なロボットシステムの実現に向けた手法を提案した。これらのシステムインテグレーションを考慮した手法の提案により、核融合装置の保守や原子力施設の事故時の救済に対して実環境下で作業が可能なロボットシステムの実用化の推進に貢献した。

Study on System Integration of Robots Operated in Nuclear Fusion Facility  
and Nuclear Power Plant Facilities

Kiyoshi OKA

Center for Proton Accelerator Facilities  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 1, 2004)

A present robot is required to apply to many fields such as amusement, welfare and protection against disasters. There are however only limited numbers of the robots, which can work under the actual conditions as a robot system. It is caused by the following reasons: (1) the robot system cannot be realized by the only collection of the elemental technologies, (2) the performance of the robot is determined by that of the integrated system composed of the complicated elements with many functions, and (3) the respective elements have to be optimized in the integrated robot system with a well balance among them, through their examination, adjustment and improvement. Therefore, the system integration of the robot composed of a large number of elements is the most critical issue to realize the robot system for actual use.

In the present paper, I describe the necessary approaches and elemental technologies to solve the issues on the system integration of the typical robot systems for maintenance in the nuclear fusion facility and rescue in the accident of the nuclear power plant facilities. These robots work under the intense radiation condition and restricted space in place of human. In particular, I propose a new approach to realize the system integration of the robot for actual use from the viewpoints of not only the environmental and working conditions but also the restructure and optimization of the required elemental technologies with a well balance in the robot system. Based on the above approach, I have a contribution to realize the robot systems working under the actual conditions for maintenance in the nuclear fusion facility and rescue in the accident of the nuclear power plant facilities.

Keywords: System Integration, Robot, Remote Handling, Maintenance, Nuclear Fusion Facility,  
Nuclear Power Plant Facility

## 目 次

<b>1 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の動機	5
1.3 研究の目的と構成	6
1.3.1 研究の目的と内容	6
1.3.2 本論文の構成	12
<b>2 極限環境下における遠隔保守</b>	<b>14</b>
2.1 核融合炉内における定期的な遠隔保守	14
2.1.1 核融合炉内の構成機器と保守区分	14
2.1.2 核融合炉内機器の保守条件	17
2.1.3 核融合炉内機器の保守シナリオ	20
2.1.4 核融合炉内機器に付属する冷却配管の保守	21
2.2 核融合炉外における定期的な遠隔保守	23
2.2.1 NBI 装置の基本諸元及び構成	23
2.2.2 NBI 装置の保守	25
2.3 原子力事故時における遠隔保守	29
2.3.1 ウラン加工工場（JCO）臨界事故の概要	29
2.3.2 ロボット開発の経緯と環境条件	30
<b>3 配管内で作業を行うロボット</b>	<b>32</b>
3.1 ブランケット冷却配管保守の設計	32
3.2 枝管溶接・切断ロボット	36
3.2.1 枝管溶接・切断ロボットの移動機構	36
3.2.2 枝管溶接・切断ロボットの加工ヘッド	51
3.2.3 枝管溶接・切断ロボットの製作	55
3.2.4 枝管溶接・切断ロボットの機械試験	59
3.2.5 枝管溶接・切断ロボットによる溶接・切断試験	64
3.2.6 作業時間の推定	95
3.2.7 枝管溶接・切断ロボットのまとめ	97

3.2.8 枝管溶接・切断ロボットの課題	98
3.3 枝管非破壊検査ロボット	99
3.3.1 非破壊検査手法の検討	99
3.3.2 非破壊検査ロボットの機器構成	118
3.3.3 非破壊検査試験	124
3.3.4 枝管非破壊検査ロボットのまとめ	127
3.3.5 枝管非破壊検査ロボットの課題	127
3.4 配管保守ロボットのまとめ	128
<b>4 高放射線下でかつ狭隘な空間内で作業するロボットのための要素機器</b>	<b>129</b>
4.1 核融合炉内保守用計測・制御機器	129
4.2 距離センサ	134
4.2.1 背景と目的	134
4.2.2 距離測定方法	135
4.2.3 距離センサの構築	141
4.2.4 距離センサのまとめ	148
4.3 溶接・切断・観察用複合型光ファイバシステム	149
4.3.1 背景と目的	149
4.3.2 複合型光ファイバシステム	149
4.3.3 カップリング装置の集光特性	153
4.3.4 複合型光ファイバシステムのパワー伝送効率	159
4.3.5 画像観察	163
4.3.6 溶接・切断・観察用複合型光ファイバシステムのまとめ	168
<b>5 原子力事故時対応ロボットの設計と遠隔操縦システム</b>	<b>169</b>
5.1 仕様	169
5.2 移動機構の検討	173
5.3 マニピュレータの検討	179
5.4 耐放射線性の検討	182
5.5 ユニット化の検討	186
5.6 ロボットの製作	189
5.7 制御システム	195
5.8 特性試験	202
5.9 マン-マシンインターフェースの改善	206
5.9.1 背景	206

5.9.2	ダイレクトマスター・アーム方式の検討	207
5.9.3	操作試験	210
5.9.4	マンーマシンインターフェースの改善のまとめ	215
5.10	原子力事故時対応ロボットの設計と遠隔操縦システムのまとめ	216
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>217</b>
6.1	本研究の総括	217
6.2	今後の課題と展望	219
<b>謝辞</b>		<b>220</b>
<b>参考文献</b>		<b>221</b>

## Contents

<b>1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1    Background of the Research .....	1
1.2    Motive for the Research.....	5
1.3    Purpose and Configuration of the Research.....	6
1.3.1    Purpose and Contents of the Research.....	6
1.3.2    Configuration of the Paper.....	12
<b>2. Remote Maintenance System under the Severe Environment .....</b>	<b>14</b>
2.1    Regular Remote Maintenance inside the ITER .....	14
2.1.1    Main Components and Maintenance Classification in the ITER .....	14
2.1.2    Maintenance Conditions in the ITER .....	17
2.1.3    Maintenance Scenario of the Components in the ITER.....	20
2.1.4    Cooling Pipe Maintenance of Components in the ITER.....	21
2.2    Regular Remote Maintenance outside the ITER .....	23
2.2.1    Basic Specifications of the NBI Device.....	23
2.2.2    Maintenance of the NBI Device.....	25
2.3    Remote Maintenance for the Nuclear Power Plant Accident .....	29
2.3.1    Summary of the JCO Criticality Accident .....	29
2.3.2    Details of Development of a Robot and the Environment Conditions.....	30
<b>3. Cooling Pipe Maintenance Robot.....</b>	<b>32</b>
3.1    Design of the Blanket Cooling Pipe Maintenance.....	32
3.2    Welding/cutting Robot for the Branch Pipe .....	36
3.2.1    Traveling Mechanism of the Branch Pipe Welding/cutting Robot.....	36
3.2.2    Processing Head of the Branch Pipe Welding/cutting Robot.....	51
3.2.3    Fabrication of the Branch Pipe Welding/cutting Robot.....	55
3.2.4    Mechanical Test of the Branch Pipe Welding/cutting Robot.....	59
3.2.5    Welding and Cutting Tests by the Branch Pipe Welding/cutting Robot.....	64
3.2.6    Estimation of Working Time .....	95
3.2.7    Summary of the Branch Pipe Welding/cutting Robot .....	97

3.2.8	Issue of the Branch Pipe Welding/cutting Robot .....	98
3.3	Non-destructive Inspection Robot for the Branch Pipe.....	99
3.3.1	Study of the Non-destructive Inspection Method.....	99
3.3.2	Configuration of the Non-destructive Inspection Robot.....	118
3.3.3	Non-destructive Inspection Test.....	124
3.3.4	Summary of the Branch Pipe Non-destructive Inspection Robot.....	127
3.3.5	Issue of the Branch Pipe Non-destructive Inspection Robot.....	127
3.4	Summary of the Cooling Pipe Maintenance Robot.....	128
<b>4.</b>	<b>Elemental Devices for Maintenance Robots under High <math>\gamma</math>-radiation and Narrow Space</b> .....	<b>129</b>
4.1	Measurement and Control System for the ITER Maintenance Robot.....	129
4.2	Distance Sensor .....	134
4.2.1	Background and Purpose .....	134
4.2.2	Measuring Method of Distance .....	135
4.2.3	Structure of the Distance Sensor .....	141
4.2.4	Summary of the Distance Sensor .....	148
4.3	Composite Type Optical Fiber System for Welding, Cutting and Observation.....	149
4.3.1	Background and Purpose .....	149
4.3.2	Composite Type Optical Fiber System .....	149
4.3.3	Focus Characteristic of the Coupling Device.....	153
4.3.4	Power Transmission Efficiency of the Composite Type Optical Fiber System .....	159
4.3.5	Observation of Image .....	163
4.3.6	Summary of the Composite Type Optical Fiber System .....	168
<b>5.</b>	<b>Design of a Robot and the Remote Operation System for Nuclear Power Plant Accident</b> .....	<b>169</b>
5.1	Study of the Specifications.....	169
5.2	Study of the Traveling Mechanism.....	173
5.3	Study of the Manipulator .....	179
5.4	Study of the Radiation Resistant Parts .....	182
5.5	Study of the Unitization .....	186
5.6	Fabrication of the Robot .....	189
5.7	Control System .....	195
5.8	Performance Test .....	202
5.9	Improvement of the Man-machine Interface .....	206
5.9.1	Background.....	206

5.9.2	Study of the Direct Master Arm Method .....	207
5.9.3	Operation Test.....	210
5.9.4	Summary of the Improvement of Man-machine Interface.....	215
5.10	Summary of Design of a Robot and the Remote Operation System for Nuclear Power Plant Accident .....	216
<b>6.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>217</b>
6.1	Summarization of the Research.....	217
6.2	Future Issue and Vision.....	219
<b>Acknowledgements.....</b>		<b>220</b>
<b>References .....</b>		<b>221</b>

## 1 序論

本研究では、核融合炉内や原子力事故などの災害現場において、人の代わりに高放射線環境下で作業を行うロボットシステムの中でも、特に、狭隘な空間内で作業（タスク）を行うことが余儀なくされるロボットシステムの設計及びシステムインテグレーションについて検討する。さらに、それらのロボットに必要となる要素機器について検討する。

本章では、研究の背景と研究の動機、そして、この研究との関連性を述べ、本研究の目的と構成について述べる。

### 1.1 研究の背景

“永遠のエネルギー” この魅力あるものを手に入れるため、人類は弛みない努力をしてきた。多くの人は空に輝く太陽を思い浮かべ、それを如何に手に入れるか、日々研究を重ねてきたのではないだろうか。太陽は、銀河系宇宙の中でガスが互いの重力で引き寄せられた後、収縮してきたものだと考えられている。太陽の内部では、水素の原子核に加えて、ヘリウム・炭素・窒素・酸素等の原子核が介在した10種類もの核融合反応が、極めてゆっくりと続いている。そこでは、大きな重力による高密度の状態が反応を持続させ、その結果、中心部で1,500万度の高温状態が同時に維持されている。

核融合反応を起こすには、まず、原子を高温にして原子核と電子がバラバラのプラズマ状態にし、原子核同士を近づける。しかし、原子核は、プラスの電気を帯びているため、クーロン力で反発して容易に近づけることができない。そこで、さらに温度と密度を高めて一定の空間に閉じ込め、原子核同士が直接ぶつかりあうチャンスを増やして、十分な核融合反応を発生させる方法が有力と考えられている。

世界の技術先進各国は、これまで原子力平和利用研究の一環として過去半世紀にわたって平和目的のための制御核融合の研究を推進してきた。その研究の中心は、1億度以上の高温のプラズマを高い密度で長時間閉じ込めることがであった。現在、トカマク装置による臨界条件達成をはじめとする数々の大きな進歩に基づいて、核融合研究は、核融合炉の工学技術のほとんどすべてを取り入れた研究開発段階へと移りつつある[1][2]。

このプラズマを閉じ込める方法として、真空容器の周りにコイルを並べてつくる磁場と、プラズマの中心に電流を流してつくる磁場とで、磁力線のカゴをつくるトカマク型核融合装置が有望であると考えられている。この型の装置は、1950年代に旧ソ連（現ロシア）で最初に生まれた。それ以来、世界中で盛んに研究してきた[3]。

このような背景の下、「地上に太陽を」のキャッチフレーズで、1988年から欧州、ロシア、日本、米国の四極で協力し、Fig1.1に示す国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental

Reactor : ITER) として、トカマク方式による実験炉の設計活動が実施されている。この ITER 計画活動は、1988 年～1990 年にかけて概念設計活動 (CDA) が実施され、その結果は続いて実施された 1992 年～1998 年にかけての工学設計活動 (EDA) へと引き継がれた[4]～[6]。現在、工学設計活動報告がまとめられ[7]～[9]、着々と建設サイトの検討が進められている。

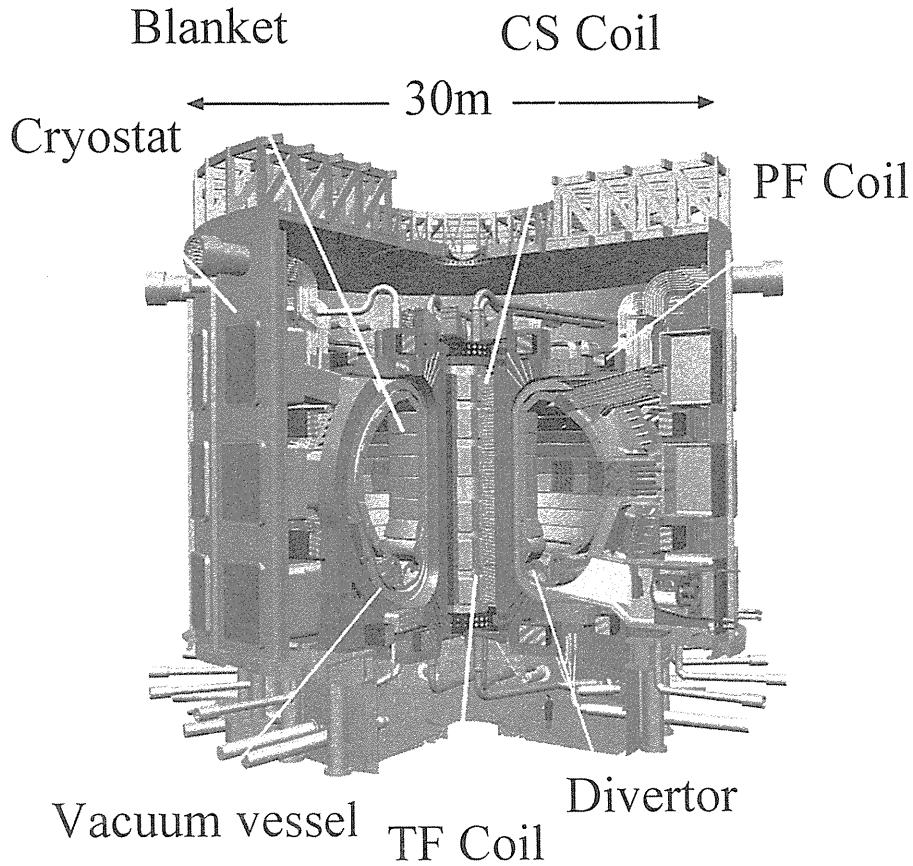


Fig.1.1 International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

ITER の中心部分を構成する真空容器、ブランケット及びダイバータ等の機器は、重水素と三重水素の反応 (DT 燃焼) による 14MeV の中性子により放射化され、それらの保守・交換は全て遠隔操作で行うことが ITER 計画の中で要求されている。ブランケットについては、ITER の段階的運転計画に従って、前半 (10 年間) の基本性能運転段階 (BPP) では遮蔽を目的とした遮蔽ブランケットを装着し、後半 (10 年間) の拡張性能運転段階 (EPP) では工学試験に必要な中性子フルーエンスを達成するため、トリチウムの増殖を行う増殖ブランケットに交換することが予定されている。また、ダイバータについては、プラズマからの厳しい熱・粒子負荷を受けるために定期的な保守・交換が想定されている。このため、これら炉内機器を対象とした遠隔保守技術の開発については、ITER 工学 R&D 計画の中でも重要な技術課題として位置づけられている。さらに、保守頻度の高い炉内機器については、遠隔操作に適した構造及び配置を優先することが設計方針に盛り込まれている。これらの機器を遠隔操作にて取り扱う技術の確立が ITER 成立の重要な課題の 1 つとして挙げられている[10]。このブランケットの交換に関しては、Fig.1.2 に示すように、

保守用セルを利用した遠隔保守機器及びモジュールの収納及びシール扉付きの搬送キャスクによるモジュールの搬送を基本としており、放射化ダスト等の建家内への飛散を防いでいる[11]。また、ブランケット保守用遠隔機器については、日本が幹事局となり Fig.1.3 に示すような実規模大ブランケット保守用ビークル型マニピュレータ[12]の開発を行っている。

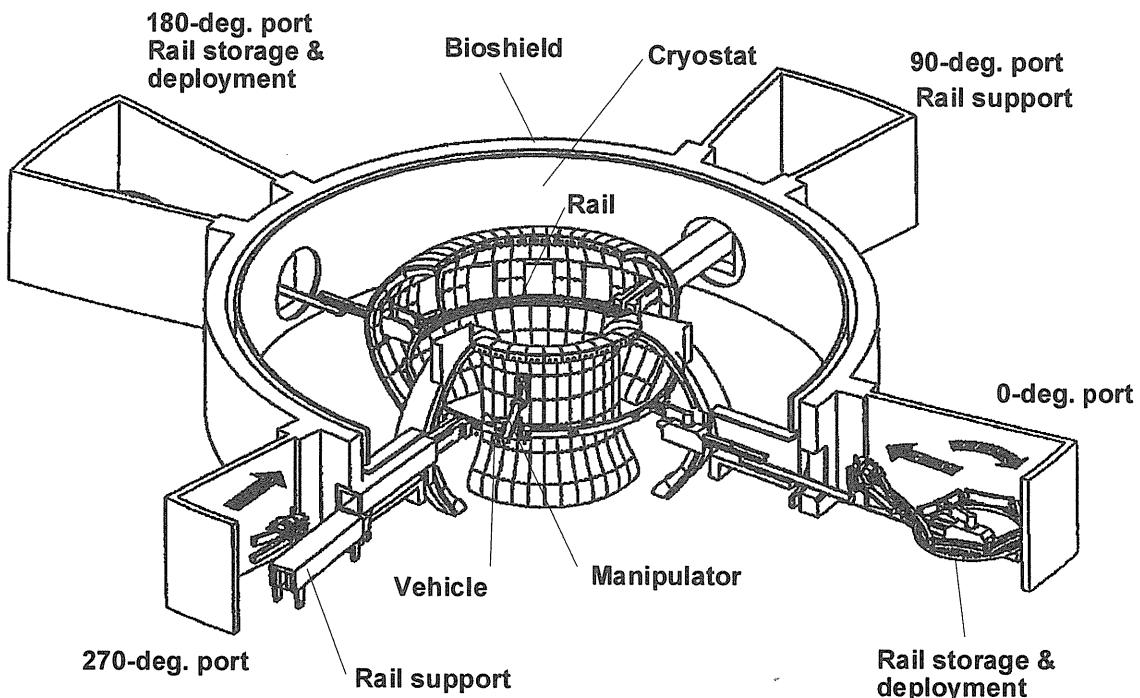


Fig.1.2 General layout of vehicle type in-vessel maintenance system [11]

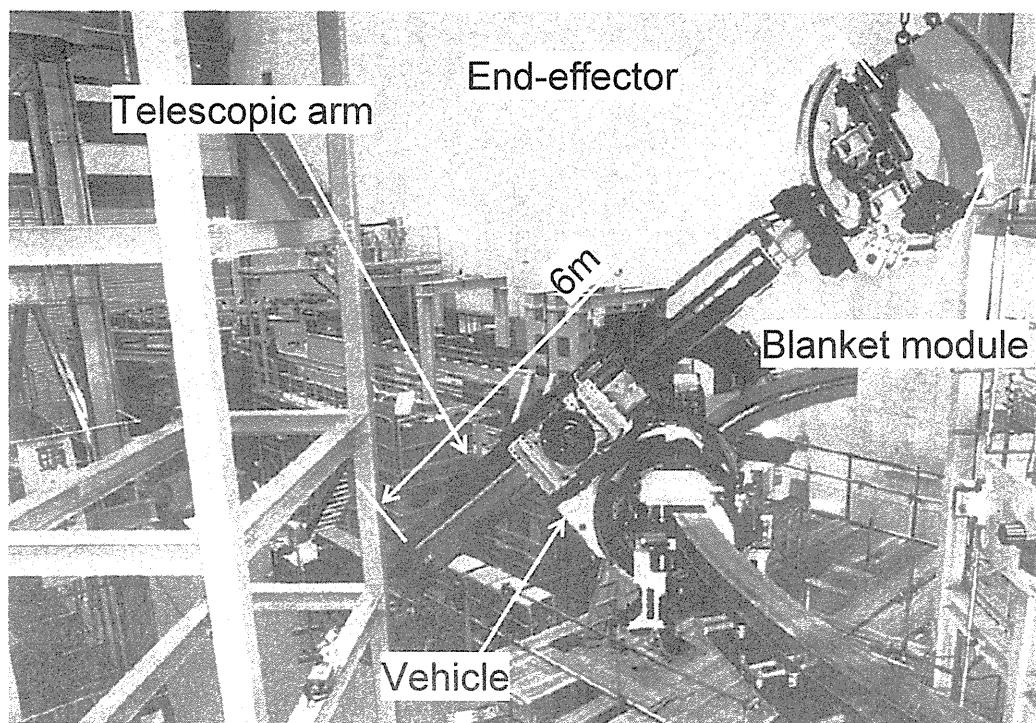


Fig.1.3 Blanket remote handling test platform [12]

他方、核融合炉あるいはその他のシステムによるエネルギー供給が安定するまで、原子力発電によるエネルギー供給が続けられるであろう。この原子力発電に関する施設について、平成11年9月30日に茨城県東海村にある（株）ジェー・シーオー（JCO）においてウラン燃料の加工の際に臨界事故が発生した[13]。事故発生直後、放射線の空間線量率が高く、付近に居た作業員は事故発生から数分以内という短時間で被曝の症状が現れ、事故現場への救助活動員のアクセスが困難となった。このため、事故現場の状況についての情報収集が不十分で、事故の收拾が大幅に遅れた。後日、このときの中性子の生物学的効果比（RBE）を考慮した吸収線量は20GyEq以上（GyEq：急性被曝を表す単位）であったことが報告されている[14][15]。Table 1.1にウラン加工工場臨界事故調査委員会報告[13]でまとめられたJCO事故に伴う被曝の状況について示す。この臨界事故のように、当初、予想しなかった原子力関連施設で事故が発生し、放射線により人がアクセスできない場合、事故をできるだけ安全かつ早く收拾させるために、事故現場に即座に侵入し、情報収集や事故拡大防止・停止処置作業を行う遠隔操作機器の開発も必要不可欠である。

Table 1.1 Contents of the exposure caused by the JCO accident [13]

分類	員数	備考
従業員		
事故発生時に作業に従事していた者	3名 <sup>注1)</sup>	1～4.5GyEq程度（12/20に放医研から退院） 6.0～10GyEq程度（東大医科研に入院中） 16～20GyEq程度（12/21に死去）
その他事故時に敷地内にいた者	56名	ホールボディカウンタ、フィルムバッチで検出。 最大の線量は64mSv（実効線量当量） <sup>注2)</sup>
水抜き作業等に従事した者	18名	ホールボディカウンタ、線量計で検出。 最大の線量は120mSv（1cm 線量当量） <sup>注2)</sup>
ホウ酸水注入に従事した者	6名	線量計で検出。 最大の線量は0.62mSv（1cm 線量当量）
防災業務関係者		
政府関係機関 (原研、サイクル機構の職員)	57名	フィルムバッチ、TLD（熱蛍光線量計）で測定した206名のうち、57名から検出。 最大の線量は9.2mSv（実効線量当量）
消防署員 (事故発生時に救助に従事)	3名	ホールボディカウンタで検出。 最大の線量は13mSv（実効線量当量）
一般住民 (JCO敷地近傍に滞在していた者)	7名	ホールボディカウンタで検出。 最大の線量は15mSv（実効線量当量）

注1) 血液中のナトリウム24の計測、染色体の分析、全身計測によるナトリウム24計数値及びリンパ球数によって推定。

注2) 実効線量当量とは、放射線の人体のいろいろな組織への影響を合計して評価するための単位。1cm線量当量とは、測定・評価の便宜上、実効線量当量等の代わりに導入された線量当量であって、身体表面から深さ1cmの位置における線量当量といった意味である。1cm線量当量は、実効線量当量より安全側に（高く）測定される。今回の事故に伴う中性子による被曝では2倍程度となる。

注3) 線量については暫定値を含む。

## 1.2 研究の動機

国際熱核融合実験炉（ITER）では、DT燃焼による14MeVの中性子により炉内機器は放射化され、プラズマ停止時の炉内の放射線強度は約1kGy/hとなるため、炉内機器の保守・交換作業は全て遠隔操作で行う必要がある。このため、主要な炉内機器であるブランケット及びダイバータの円滑な保守・交換作業は、ITER計画の中において重要な鍵となる。このブランケットは1個あたりの重量が4トンにもなり、炉内全域で400個以上も設置される。また、同様にダイバータについても、その重量は1個あたり11トン以上もあり、炉内全底で60個程度設置されている。従って、決められた保守期間内に手際良くかつ精度良く取り扱う遠隔保守技術の開発が望まれており、ITER日本ホームチーム（日本原子力研究所を主体とした日本におけるITERの設計・開発チーム）ではこれまでにブランケット保守用遠隔機器及びダイバータ保守用遠隔機器の設計及び研究・開発を進めてきた[16]。また、これらの機器の保守は高放射線環境下での作業となるため、それに対応するための耐放射線技術も開発してきた[17]。

このように、主要な炉内機器を正確に取り扱う技術の研究・開発は急速に進められてきたが、これらの機器に付帯している配管の取り扱いや、炉内機器と比較して放射線レベルは低い（約0.1Gy/h）が、それでも人による作業が困難な放射線区域になり、炉内機器と同様に遠隔にて保守・交換する対象となっている炉外機器については、未だに明確に解決されていない問題点が多い。それらは、以下に示す点が交換・保守の困難さの原因となっていると考えられる。

- (1) プラズマ停止時（ITER保守時）においても放射線レベルが極めて高い
- (2) 遠隔機器がアクセスすることが可能な作業空間が極めて狭く容易に近づけない
- (3) 高放射線環境下のため視覚確保が困難で、遠隔機器と機器間の正確な位置計測が困難

上記の点を考慮し、核融合実験炉を実現させるためには、以下のことが必要であると考える。

- (1) 狹隘な空間での遠隔保守作業技術の確立
- (2) 高放射線環境下での計測・制御技術の確立
- (3) システム全体の成立性を考慮に入れた遠隔保守機器の開発

ここで、システム全体の成立性を考えるとき、予想しなかった事象や事故が起こった場合、どのように対応するべきかを検討する必要もある。これは特に、核融合炉に限ったことではなく、原子力関連施設の事故にも適応できると考えられる。つまり、予想して起こる事故には対応可能であり、予想もしなかったことが起こる事故が問題なのである。核融合実験炉や一般の原子力施設の場合、最初から様々なケースを考慮しているため、なるべく保守しやすいように施設が建設されている。従って、事故が起こった場合、最悪でも、施設内で事故が沈静化するような構造が一般的である。ところが、JCO事故のように原子力事故が起こるまで、その施設が原子力関連のものであり、中性子が散乱する事故が発生する可能性がある施設であったということを付近の住民でさえ知らない場合がある。こうした状況を考えると、どのような不測の事態が発生したときにも、速やかに人間の代わりに高放射線環境下で作業を行うことができるロボットシステムを構築（インテグレーション）しておく必要もある。

## 1.3 研究の目的と構成

### 1.3.1 研究の目的と内容

これまでの原子力発電所における保守作業において、高放射線環境下で、かつ、狭隘な場所での作業についてはこれをロボットに行わせることが早くから検討されてきた。初期に開発されたロボットは燃料取替機や原子炉内検査装置のような特定の作業を行う単機能ロボットであった。その後のメカトロニクスの進歩によって、ロボット技術は急速に進展し、種々の作業を行う多機能ロボットが開発されるようになった。将来的には、移動機構まで備えて多種多様な作業を行える汎用性のある高機能ロボットの実用化が期待されている。これまで行われてきた原子力発電所用点検・保守ロボットの開発の流れ[18]をFig.1.4に示す。

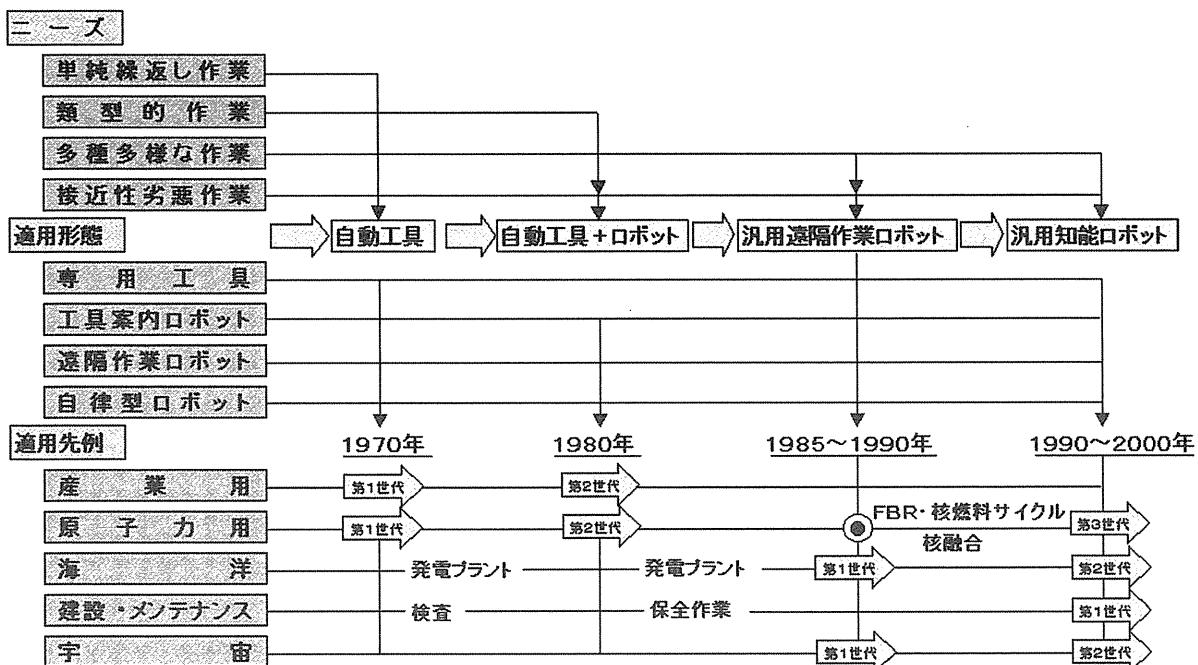


Fig.1.4 The flow of the development of the robot for the nuclear power plant maintenance [18]

原子力発電所の保守用に開発されたロボットで現在実用に供されているものは、専用機としての役割を持ったものが中心であるが、最近では、Fig.1.5に示す水中を自在に移動して炉内の点検を行う点検ロボット[19]や、Fig.1.6に示す原子炉格納容器内をモノレールに沿って移動し、点検を行うロボット[20]など汎用性を増したものが実用化されている。また、原子力発電所の原子炉(圧力)容器の供用期間中検査を実施するために、Fig.1.7に示すような曲面に対して安定した吸着性能を有する負荷分散型の磁気クローラを採用し、容器の溶接線に追従して超音波探傷する自走式検査ロボット[21]も開発されている。

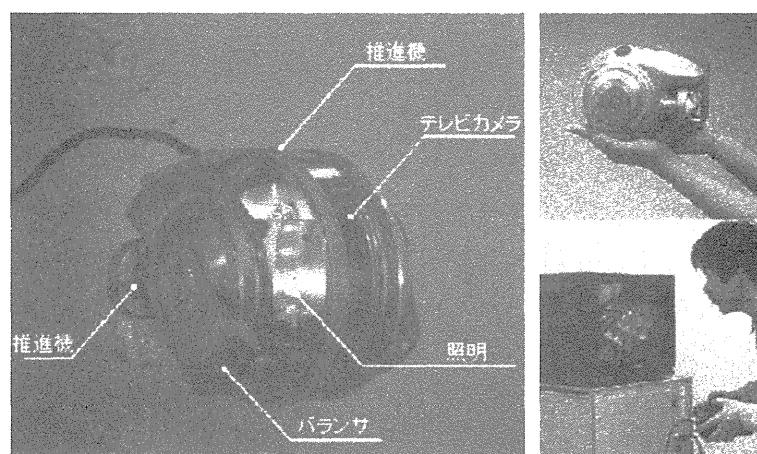


Fig.1.5 Remotely operated vehicles for reactor internals [19]

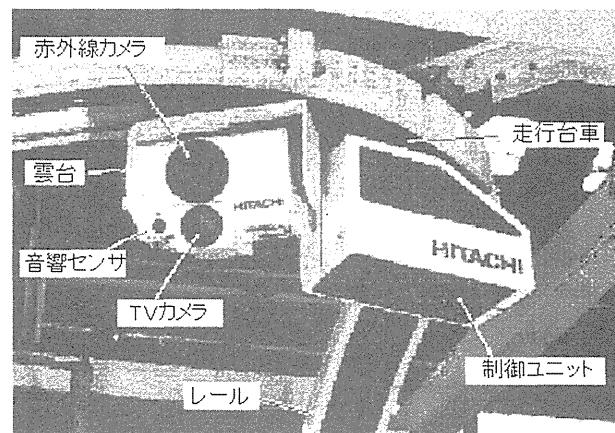


Fig.1.6 Monitoring vehicle in the nuclear reactor storage vessel [20]

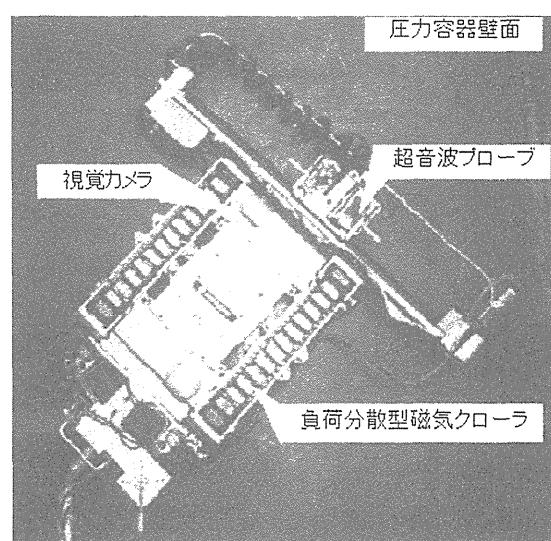


Fig.1.7 Wall surface robot with magnetic crawlers [21]

更に、Fig.1.8 に示すように、原子力発電所の設計情報などを持ち、自律的に移動して点検や保守作業を行う自律型ロボット[22]の開発も行われている。これは、将来の発電所の保守作業を支えるロボット技術として、高度なセンシング技術と移動・通信機能を備え、保守作業の高度化と効率化を図る原子力施設用知的保全システムである。このシステムは、(1) 運転中プラントの巡視点検作業を自律・遠隔で行う運転中点検システム、(2) 定期検査中に水中で点検作業を自律・遠隔で行う水中点検・作業システム、(3) 配管の溶接作業を自律・遠隔で行う全自动溶接システム、並びに、(4) これらの点検検査データを共用で管理するシステムから構成される。これらの各ロボットは、プラント内の建屋や水中を、システム内に持ったプラント情報と環境センサを駆使して自ら周囲環境を判断しながら自律的に移動し、レーザー振動計などの高度なセンシング機能を用いた機器点検や、力制御の行える7軸マニピュレータを用いた水中作業を行うものである。

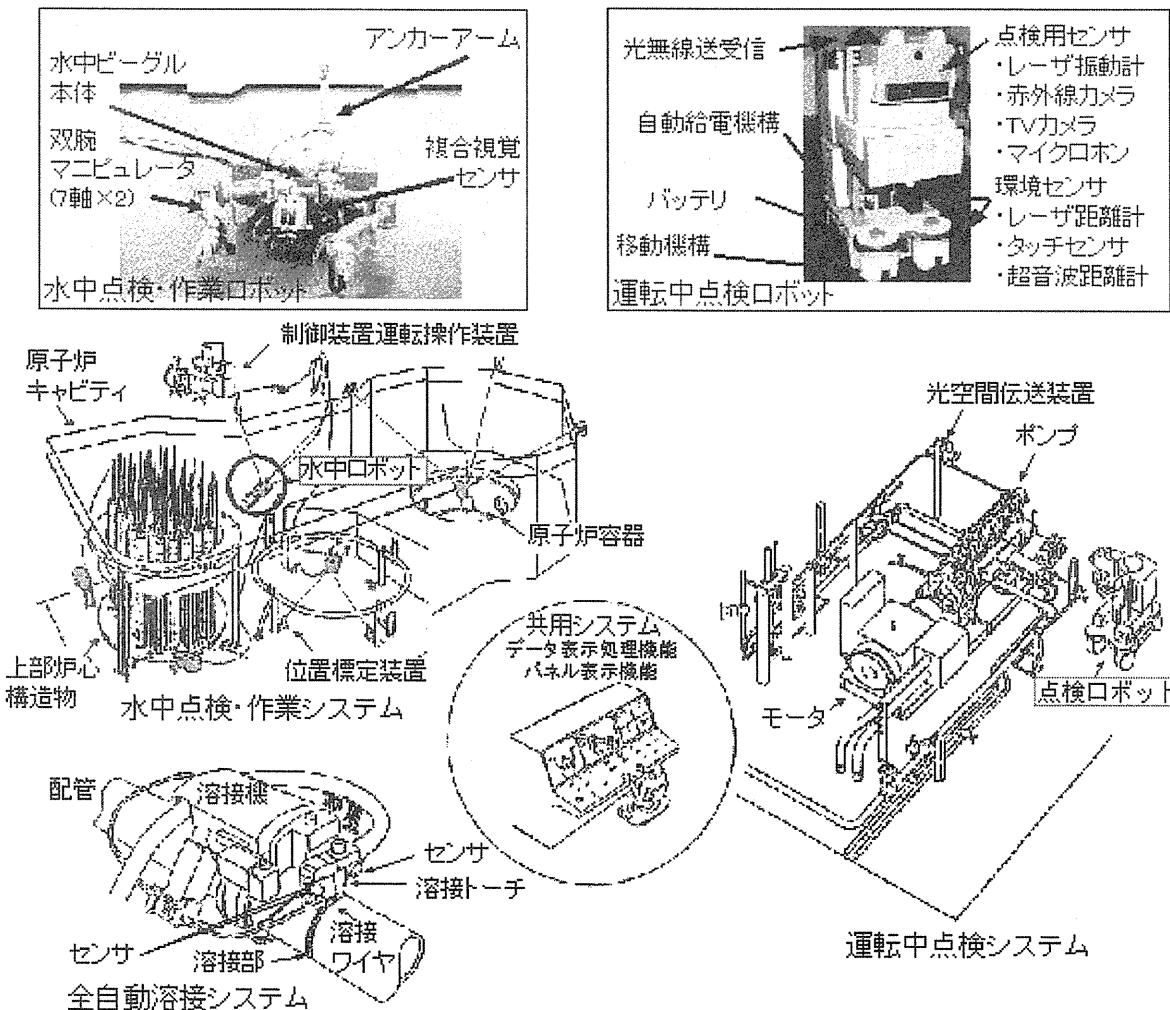


Fig.1.8 Intelligent maintenance system [22]

このように、原子力発電所内における点検・保守作業を行う様々なロボットの開発が進められている。しかしそれらは、人がアクセスできない放射線環境下ではあるが空間線量率は数 mGy/h であり、1kGy/h にもなる ITER 炉内保守環境と比較して極めて低い数値である。つまり、ロボット制御に必要不可欠となる電子機器（市販品）は集積線量で 100～1,000Gy 程度まで使用可能であると予想されるため、ロボット動作時間（寿命）も比較的長い。また、原子力発電所内で予め想定された作業を行うロボットであるため、JCO 事故のように遠隔による保守・点検作業が想定されていない原子力関連施設での、突発的な防災作業にそのまま適用することは困難である。

このような背景の下、本研究では、これまでに例のない高放射線環境下で、かつ、狭隘な空間で作業を行うことが必要となる核融合炉内や、一般的な原子力事故などの災害現場において、人の代わりに高放射線環境下で、かつ、狭隘な環境下での作業を行う遠隔操作機器（ロボット）のシステムインテグレーション時に必要不可欠となる手法及び要素機器について検討することを目的としている。

本研究では、まず、これまでの ITER 保守シナリオを成立させる上で明らかとなったロボットの種類や仕様及び機能を説明する。ロボットには大きく分けて炉内機器取り扱い用と炉外機器取り扱い用があり、そのうち、主要な炉内機器であるブランケットとダイバータについて ITER における保守区分と保守シナリオを説明し、ITER 計画の中で検討した結果、明らかとなった両機器の保守・交換時における重要な課題を説明する。

炉内機器の課題の 1 つとして、それぞれの機器に付属する冷却配管の取り扱いが挙げられる。各機器を交換する際に、付属している冷却配管をあらかじめはずしておき、新しい機器を設置後、冷却配管を再接続する必要がある。一般的には、冷却配管を着脱するには、配管の外部からアクセスして作業を行う。ところが、ブランケット及びダイバータは、核融合炉内から炉外への中性子ストリーミングを回避するため、互いの機器間に隙間がほとんどない。従って、炉内（プラズマ表面）からブランケットやダイバータにアクセスし、その裏側に設置されている冷却配管を保守することは不可能である。そこで、ITER 計画の中での配管保守シナリオにおいては、(1)各炉内機器に付属している冷却配管に配管内部からアクセスし、目的の場所に到達する、(2)配管切断後に各機器を取り除き新たな機器を設置後、再度、配管内部からアクセスして溶接する、(3)配管溶接後は配管内部から非破壊検査を実施し、接合部の健全性を確認するという一連の手順を提案してきた。本研究では、この保守シナリオにおいて、それぞれのタスクを実行可能な配管内アクセス型溶接・切断・検査ロボットシステムを提案している。このシステムでは、配管の溶接・切断に YAG(Yttrium Aluminum Garnet)レーザーを使用することとした。理由として、(1)遠隔地から光ファイバを使用したレーザーエネルギー伝送が可能である、(2)溶接と切断を同構造の機器にて実施可能である、(3)エネルギー集中が容易なため少ないエネルギーで溶接・切断可能であることが挙げられる。また、溶接後の非破壊検査方法としては、EMAT(Electro Magnetic Acoustic Transducer)を探触子として使用することを提案している。この理由として、(1)接触媒体が不要である、(2)放射線に強い材質で構成可能な探触子であることが挙げられる。それぞれのロボットシステムを構築後、各種の特性試験を実施する。試験では、各ロボットの機械的な健全性の確認と、試験配管を使用

した溶接・切断・検査を実施し、これら一連のタスクが遂行可能であることを実証した。さらに、本研究では、配管内という狭隘な空間内で溶接・切断というタスクを遂行しなければならないことから、レーザーエネルギーの伝送と溶接箇所の目視観察を行うための画像伝送を1本の光ファイバで行えば、レンズやミラーなどの光学系が兼用できるという点に着目し、これらを並行して達成することが可能な複合型光ファイバシステムを新たに考案した。さらに、考案したファイバシステムを使用した高エネルギー伝送試験により本ファイバが有用であることを明らかにし、この結果、配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットが成立することを示している。

2つめの課題としては、炉内外機器を狭隘な空間で取り扱うロボットに必要な計測・制御システムが挙げられる。炉内では放射線レベルが高く、各タスクを実施するロボットを観察するための映像取得装置（監視用カメラ）が使用できない。このため、ロボットが正確に動作しているかどうかを判断するため、実際に動作しているロボットの動作をコンピュータ上にて3次元グラフィックで模倣することが検討されてきた。ところが、腕の長さが6mで、可搬重量が4トンにもなるブランケット保守用マニピュレータでは、各関節のギアに起因するガタやバックラッシュ等により、マニピュレータ先端部分が大きく揺んでしまう。この揺みをリアルタイムにコンピュータ上で模倣するのは非常に困難であるため、マニピュレータ先端に位置補正用の距離センサを搭載し、ロボットと対象物間の距離を計測して位置を補正する方法がITER保守シナリオの中で検討されている。しかしながら、炉内は高放射線環境下であるため、通常の距離センサではすぐに使用不可能になってしまう。そこで、本研究では、高放射線環境下でも使用可能な距離計測方法を新たに提案する。これは、三角測量を基本とした距離測定方法で、センサ本体に放射線に強い部材を使用するだけではなく、遠距離からの計測においても距離測定精度の向上を図ることができる。また、センサ設置時に必要となる、各センサ固有の特性を把握するためのキャリブレーション作業が簡単であることを示す。さらに、本手法を基に距離センサを設計・製作してその有効性を明らかにし、この結果、高放射線環境下においてもロボットと対象物間の距離を計測して位置を補正することが可能であることを示している。

3つめの課題としては、核融合炉外や原子力関連施設で発生する突発的な事故に対応するためのロボットシステムの構築が挙げられる。1999年9月に起こったウラン燃料加工工場（JCO）事故の際には、放射線レベルが高く、事故現場への人のアクセスが困難であった。このため、事故現場の状況についての情報が不十分で、事故の收拾を大幅に遅らせた。このJCO事故のように、原子力関連施設で事故が発生し、放射線により人がアクセスできない場合、事故をできるだけ早く收拾するために、事故現場に即座に侵入し、情報収集や事故拡大防止・停止処置作業を行う必要があると一般的に言われている。これまでにも、Fig.1.9に示すように1983年度～1990年度にかけて極限作業ロボットの研究が行われてきた[23]。そこでは、各機能・性能をシステムの部分毎で捕らえると、かなり満足のいく成果が得られているが、ロボットシステムとして全体的に機能・性能をみると、当初のコンセプトからかなり隔たりがあったということが報告されている[23]。そして、システムというものが単に要素技術の積み重ねで実現できるものではなく、各要素技術がそれぞれ目標とするシステムに適合するように、また、各要素間に適正なバランスを持たせるよう検討・調整・改善を加えながら進め、完成させる性格を持ち、システムとしての機能・性能は、

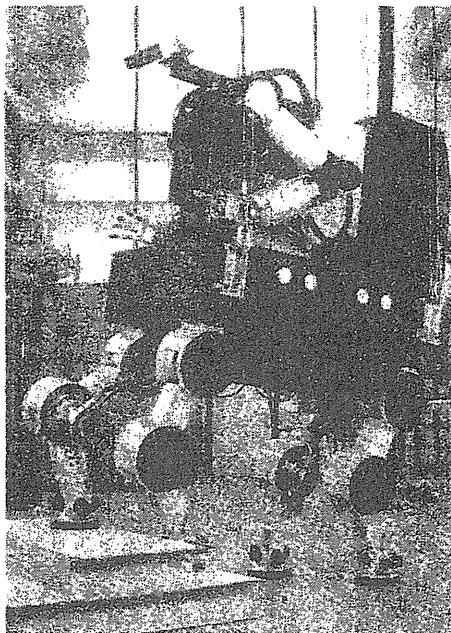


Fig.1.9 Advanced robot for nuclear power plant facilities [23]

個々の要素技術の複合機能・性能として現れることなどに起因するものであり、システム構築の困難さを物語る一面であることも報告されている[23]。このような背景を踏まえ、原子力関連施設の事故対応ロボットを開発するに当たり、本研究では、まずロボットに必要とされるタスクを検討する。要求されるタスクの内容とその作業対象を整理し、これより、ドアや階段等を容易に走行できるロボットのコンパクトさを要求する一方で、多種多様な情報収集及び事故時の各タスクが要求されることを明らかにする。しかし、全てのタスクを1台のロボットで実施することは困難であり、複数のロボットが必要となることを考慮し、今回開発するロボットは、1台のロボットとして完結するようシステムインテグレーションの観点から開発を進め、システムに合致する各要素技術を適用し、事故拡大防止・停止処置のタスクを達成することを主目的に、将来の改造と高度化を想定して開発を行うこととした。すなわち、将来の実用的原子力防災ロボット開発へ向けてのプラットホームとなることを目指した。また、核融合炉用保守ロボットの開発を通して蓄積された耐放射線技術を基に、本研究では、より高い放射線環境下においても、人に代わってタスクを達成できる耐放射線性に優れたロボットを開発することを目標とした。そして、本ロボットにより各種タスクを実施し、その結果から今後の研究・開発の方向を明らかにする。その一例として、本研究では、人間とロボット間のマン-マシンインターフェースを新たに検討し、ロボット操作性の向上を提案する。

以上、本研究は、核融合炉保守実現のために必要不可欠にもかかわらず、検討が不十分であった項目を明らかにし、その解決方法の提案を行うと共に、核融合炉外及び原子力関連施設等の高放射線環境下で、かつ、狭隘な場所で様々なタスクを達成するロボットシステムのインテグレーション方法を与える。

### 1.3.2 本論文の構成

本研究の構成は (Fig.1.10 参照), 第 2 章では本研究の背景である ITER 炉内及び炉外機器についての構成と保守区分や条件及び原子力事故時における各種のタスクについて説明する. また, 極限環境下でかつ狭隘な環境下での遠隔保守の必要性についても併せて説明する. 第 3 章では, 極限環境下でかつ狭隘な空間である配管内における溶接・切断・観察・検査の各タスクを達成するロボットについて提案する. 第 4 章では, 狹隘な空間でタスクを達成するために必要となる計測・制御技術等の要素機器について検討する. まず, ITER 用遠隔保守機器の制御システムを提案するとともに, 実規模大ブランケット保守用ビークル型マニピュレータの計測・制御システムを検討する. 次に, 核融合炉内外のマニピュレータに搭載可能で高放射線環境下での使用が可能な高精度距離測定センサについて提案する. また, 狹隘な配管内において溶接・切断・観察の各タスクを同一の光学系で実現可能とする複合型光ファイバシステムについて提案する. 第 5 章では, 原子力事故時等の高放射線環境下で情報収集や事故拡大防止・停止処置などの様々なタスクを達成するロボットを提案し, その設計について述べる. 第 6 章では本研究の結論及び今後の課題について述べる. 最後に参考文献から構成される.

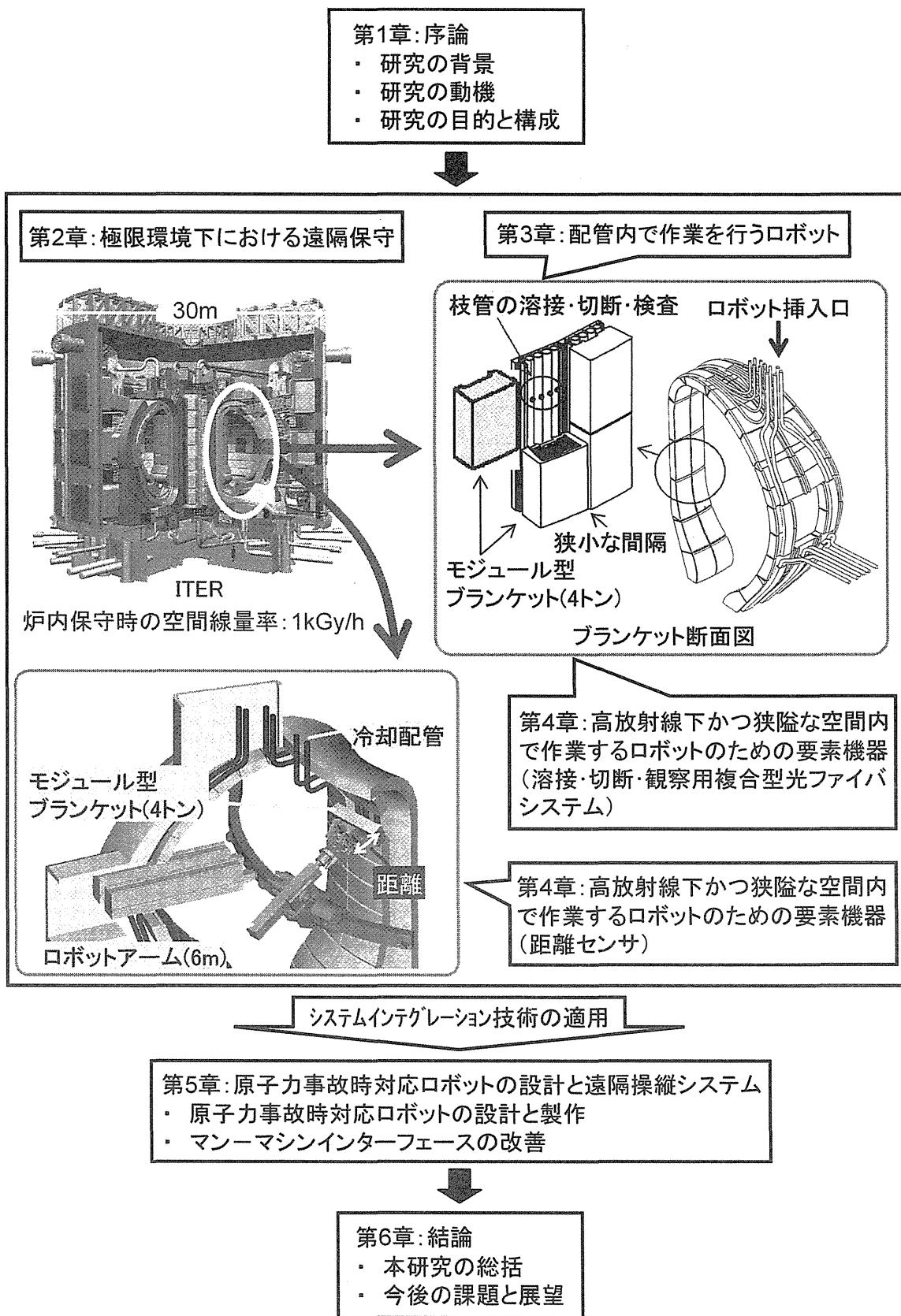


Fig.1.10 Structure of this paper

## 2 極限環境下における遠隔保守

本章では、定期的な遠隔保守が必要となる国際熱核融合実験炉（ITER）について、その全体計画である ITER 計画の中で示されている機器構成、保守区分、保守条件を説明する。また、原子力関連施設で不意の事故が発生した際の遠隔保守条件等について説明する。本章で説明する項目に基づき、第 3 章では核融合炉用冷却配管保守について、第 4 章では核融合炉内機器用の要素機器について、第 5 章では原子力事故時対応ロボットについて、それぞれ詳細な検討結果を述べる。

### 2.1 核融合炉内における定期的な遠隔保守

本節では、ITER を例に、核融合炉内に設置されている機器を対象として、保守区分、保守シナリオ、保守条件及び保守方式など、ITER 計画の中で検討してきた結果、明らかとなった遠隔保守について設計の概要を述べる。

#### 2.1.1 核融合炉内の構成機器と保守区分

ITER トカマクの中心部分は、Fig.2.1 に示すように遮蔽及び燃料となるトリチウムの増殖を行うブランケット、プラズマ中の不純物排気を行うダイバータ、プラズマのための高真空状態を維持する真空容器、プラズマの磁気閉じこめ、平衡位置制御及び立ち上げのための超伝導トロイダル磁場（TF）、ポロイダル磁場（PF）及び中央ソレノイド（CS）コイル及びこれら超伝導コイルの断熱のためのクライオスタット等の機器から構成される。これらの機器は、いずれも放射線から人を守るための遮蔽の内側に配置されており、遠隔操作による保守・交換を考慮する必要があるが、それらの使用条件、試験目的及び運転計画等の観点から保守・交換に対する要求事項が異なってくる。このため、ITER では Table 2.1 に示すような保守区分に従って主要機器を Table 2.2 のように分類し、それぞれに対応した遠隔保守設計及び技術開発を進めている。以下に、核融合炉内の主要な機器について説明する。

##### (1) 超伝導コイル[24]及び真空容器[25]

超伝導コイルは、クラスー 3（計画的な保守を考慮しない）に分類され、設計に際しては十分な安全率を考慮すると共に、端末部等の損傷頻度が高いと想定される部位を生体遮蔽の外側に配置し、作業員による保守を可能としている。また、異常時に超伝導コイルを交換することを想定し、交換シナリオ（手順と方法）及び遠隔操作機器の設計を実施し、建家内空間及び機器配置に反映している。異常時の交換は、重量物の取り扱いとなるため建家天井クレーンを用いた炉外で

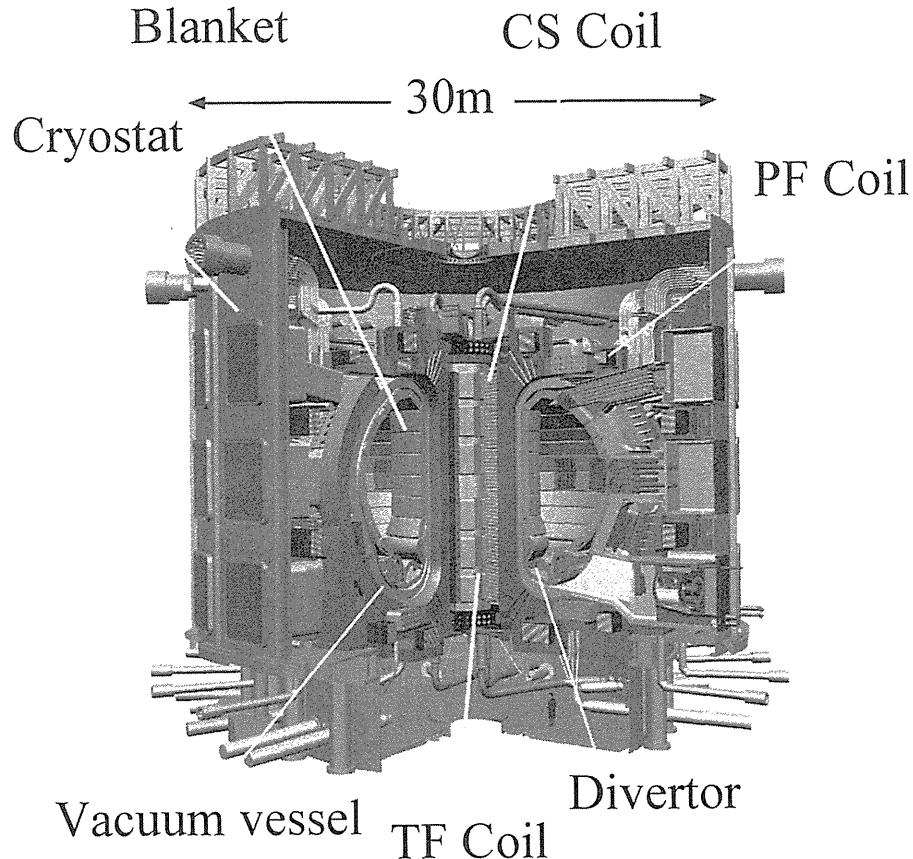


Fig.2.1 International Thermonuclear Experimental Reactor

Table 2.1 Maintenance Classification in ITER

Class	Definition and Design Approach
Class-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Components that require scheduled maintenance</li> <li>• Task should be achieved in the minimum time needed.</li> <li>• Shall not require opening of the cryostat</li> <li>• Feasibility of tasks shall be verified during the EDA</li> </ul>
Class-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Components that require in-frequent maintenance</li> <li>• Repair and replacement time should be short</li> <li>• Shall avoid opening of the cryostat where possible</li> <li>• Feasibility of tasks shall be verified during the EDA</li> </ul>
Class-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Components that do not expect maintenance but require maintenance in case of accident or failure</li> <li>• Maintenance procedure shall be defined during the EDA and the critical tasks should be accessed.</li> </ul>
Class-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Components that do not require remote maintenance</li> </ul>

Table 2.2 ITER Tokamak Components &amp; Maintenance Class

Component	Max. Payload	Class	Maintenance
Magnets		Class-3	Ex-vessel maintenance
• TF coil	700 ton		
• PF coil	1,200 ton		
• CS coil	1,400 ton		
Vacuum vessel	300 ton	Class-3	Ex-vessel maintenance
Blanket			In-vessel maintenance
• Blanket module	4 ton	Class-2	
Divertor			In-vessel maintenance
• Divertor cassette	25 ton	Class-1	

の作業となり、放射化ダストなどの最終格納は建家で行う計画となっている。

TF コイルの交換には真空容器の切断が必要となるため、真空容器も超伝導コイルと同様の保守区分に分類され、ポート中央で分割可能なセクター構造としている。Fig.2.1 の TF コイル下側に配置される下側 PF コイルについては、配置上建家天井クレーンによる保守・交換が困難なため、コイル巻線部のモジュール（パンケーキ）が損傷してもバイパスすることによって所定の性能が得られるように設計上裕度を持たせている。さらに、最悪の場合でも装置底部の空間にてコイル巻線が可能なよう機器配置及び遮蔽設計を施している。

## (2) ブランケット[26]

ブランケットは、ITER での段階的運転計画に従って遮蔽ブランケットから増殖ブランケットへの交換が予定されている。また、初期組立及びデコミッショニングでの組立・分解も想定されるため、ブランケットの組立・保守を行う遠隔保守機器は、ITER の重要なコンポーネントの一つに位置づけられる。このブランケットは、保守性の観点から Fig.2.2 に示すようなモジュール構造を採用している [27]。モジュールは、プラズマからの高熱負荷を受ける第一壁と将来増殖機能を担うブランケット部から構成され、遮蔽を担うブランケット後壁から分離された構造となっている。このため、局所的な損傷に対しては損傷を受けたモジュールのみの交換で対応できること、増殖ブランケットへの交換時には重量物であるブランケット後壁の交換を必要としないことなど保守性の向上と廃棄物量の軽減化を図っている。

保守区分は、このようなモジュール分割構造及び階層化構造を反映して、プラズマからの熱・粒子負荷を受ける遮蔽モジュールをクラス-2（頻度の少ない計画的な保守）に、また、ブランケット後壁をクラス-3（計画的な保守を考慮しない）にそれぞれ分類している。クラス-2であるモジュールの交換については、真空容器内でのモジュールの交換作業を実施する。ここでは、保守用セルを利用した遠隔保守機器及びモジュールの収納及びシール扉付きの搬送キャスクによるモジュールの搬送を基本としており、放射化ダスト等の建家内への飛散を防いでいる。

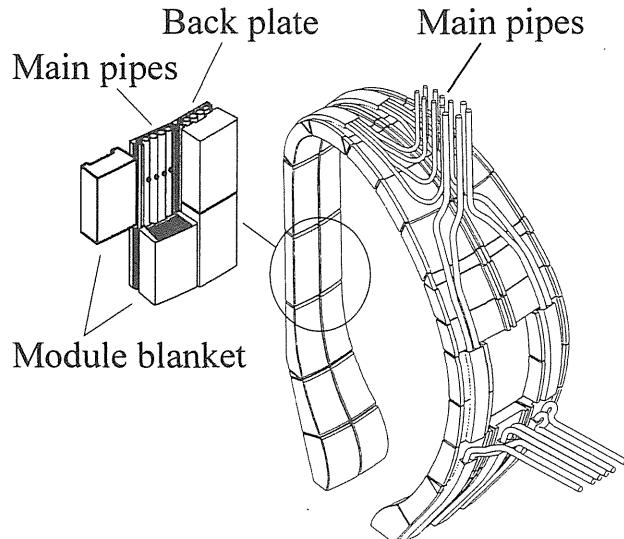


Fig.2.2 Blanket cooling pipe construction

### (3) ダイバータ[28]

ダイバータは、プラズマからの厳しい熱・粒子負荷のために定期的な保守を想定するクラス1の機器に分類される。このため、遠隔保守性を考慮し、Fig.2.3に示すように周方向に分割されたカセット式構造を採用している。カセットは、真空容器底部に敷設された2本のレールに支持固定されるが、カセット交換時にはそのレールに沿って周方向に搬送され、保守用の排気ダクト（保守用ポート）から炉外に取り出される。これらの作業は、ブランケットと同様に、放射化ダスト等の建家内への飛散を防ぐために真空容器内でのカセットの交換作業、搬送用キャスクを利用した遠隔保守機器及びカセットの収納・搬送を基本としている。さらに、廃棄物量の軽減のために、カセットは損傷頻度が高いと想定される高熱負荷受熱部位がカセット構造体から着脱できる構造となっており、カセット構造体の再利用を可能としている。

#### 2.1.2 核融合炉内機器の保守条件

ITER炉内機器の中でも特に重要な機器であるブランケット及びダイバータに関する主要な保守条件はTable 2.3に示す通りであり、炉内機器の保守を行う遠隔機器はこれらの条件を満足することが要求される。以下に、核融合炉内の主要機器であるブランケットとダイバータについて保守条件を示すと共に、各機器保守時の耐環境性について説明する。

##### (1) ブランケット保守

ブランケットは、基本性能運転段階（BPP）から拡張性能運転段階（EPP）に移行する際、遮蔽ブランケットから増殖ブランケットに交換することが予定されており、頻度は少ないが計画的に保守・交換を想定するクラス2の機器に分類されている。また、初期組立及びデコミッショニングでの組立・分解も想定されるため、ブランケットの組立・保守を行う遠隔保守機器は、ITER

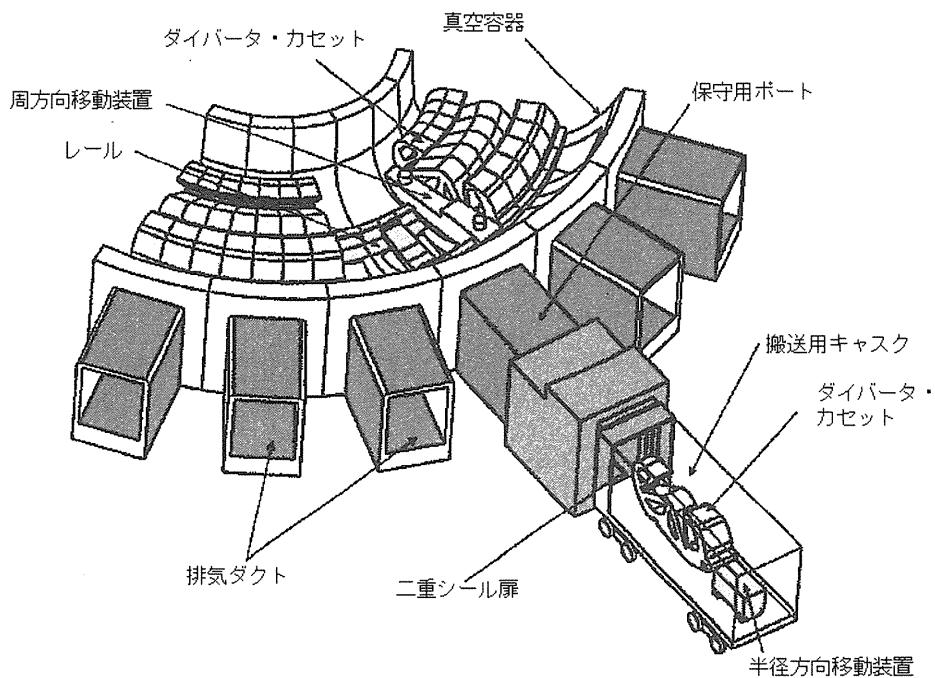


Fig.2.3 Schematic view of the cassette type divertor maintenance

Table 2.3 Main Design Requirements for In-vessel Maintenance

	Blanket maintenance	Divertor maintenance
Payload	4 ton/module	25 (11) ton/cassette
No. of module/cassette	740 (421) modules	60 (54) cassettes
Maintenance port	4 (equatorial ports)	4 (pumping ducts)
Frequency of replacement	few times for modules 1 for all modules	3 times / BPP 5 times / EPP
Time duration for replacement	2 months/module 2 years/all modules	2 months/cassette 6 months/all cassettes
Installation tolerance	2 mm step gaps between modules	2 mm step gaps between cassettes
Operating conditions	Gamma radiation : 1 kGy/h Temperature : 50 deg. C Atmosphere : 1 bar inert gas	

の重要なコンポーネントの一つに位置づけられる。

ブランケットは、遠隔保守性を考慮し約 740 個（その後の設計では 421 個に変更された）に分割されたモジュールとモジュールを支持する後壁から構成されている。各モジュールの重量は炉内保守システムの可搬性能及びモジュールを搬送する保守ポート開口面積から最大 4.5 トンと定めている。これらのモジュールは、90 度毎に配置された 4 個の保守用ポートを使用して 2 年間で交換することが要求される。据付精度は、隣接するモジュール間の相対ギャップとして 2mm 以内と規定されている。これらを満足する保守方式として、炉内に敷設した軌道を用いるビーカー型保守システム[29]を主案に選定した。

また、モジュールは、表面熱流束及び核発熱の除去のために水で冷却されており、各モジュールは冷却母管に枝管を介して接続されている。このため、モジュールの交換では、母管内を移動して枝管の溶接・切断を行うツールが要求される。この冷却配管保守ツールに関しては、2.1.4 節で詳細に説明する。さらに、ブランケット保守・交換を行う遠隔保守機器は、1kGy/h という強度なガンマ線環境下で動作するため、構成部品・機器は集積で 10MGy～100MGy の耐放射線性を有することが要求される。

### (2) ダイバータ保守

ダイバータは、プラズマからの厳しい熱・粒子負荷環境で動作するため、計画的に保守を想定するクラスター 1 の機器に分類され、その遠隔保守機器には Table 2.3 に示す条件を満足する性能が要求される。遠隔保守性を考慮し、ダイバータは合計 60 個（現在の設計では 54 個）のカセットに分割される。各カセットの重量は、約 25 トン（現在の設計では 11 トン）である。カセットの交換頻度として、BPP（10 年間）で 3 回、EPP（10 年間）で 5 回を想定しており、60 個のカセットを 90 度毎に配置した 4 個の保守用ポートを用いて 6 カ月で交換することが要求される。また、カセット 1 個の交換期間は 2 カ月と規定されている。カセット据付時には、隣り合うカセットとの段差を 2mm 以下とすること、ブランケット保守時と同様に、カセット交換時には冷却配管内をツールが移動して配管の切断・再溶接を行うことが要求される。ダイバータ遠隔保守機器には、ブランケット保守と同様な耐放射線性も要求される。これらを満足する保守方式として、ITER 計画においては、カセット式保守システム[30]を主案に選定した。

### (3) 耐環境性

ブランケット及びダイバータの保守・交換を行う作業環境は、1 気圧の不活性ガス雰囲気下で、約 1kGy/h のガンマ線及び約 50°C の温度条件となる。但し、炉内点検検査については、真空中で 150°C の温度条件も考慮することが要求される。この内、ガンマ線条件については、従来の技術ベースを大きく上回るものであり、遠隔保守機器に用いる部品・要素の耐放射線性の向上が不可欠である。

### 2.1.3 核融合炉内機器の保守シナリオ

ITER の遠隔保守設計では、炉内点検・検査、炉内での損傷部位の補修及び交換を基本的な手順としており、炉内機器に対する保守シナリオを Table 2.4 のように定めている。ここでは、核融合炉内の主要機器であるブランケットとダイバータについて保守シナリオについて記述する。

Table 2.4 Remote Maintenance Scenario in ITER

Operation	Maintenance Scenario
In-vessel viewing and inspection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access from the upper vertical port</li> <li>• Viewing of in-vessel components using periscope</li> <li>• Measuring of erosion using optical 3-D metrology</li> <li>• Leak detection and localization</li> </ul>
In-vessel repair	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access from the equatorial ports</li> <li>• Repair of first wall surface (e.g. plasma spray)</li> <li>• Repair welding</li> </ul>
Replacement of Class-1 components (Divertor)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access from the pumping ducts</li> <li>• Cassette handling using the cassette movers</li> <li>• Cooling pipe cutting/rewelding by the bore tools</li> <li>• Transportation using the confined transfer cask</li> </ul>
Replacement of Class-2 component (Blanket module)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access from the equatorial ports</li> <li>• Module handling using the vehicle manipulator system</li> <li>• Cooling pipe cutting/rewelding by the bore tools</li> <li>• Transportation using the confined transfer cask</li> </ul>

#### (1) ブランケットの交換

ブランケットの交換には、重量約 4 トンのモジュールを高い精度で安定に取り扱うために、炉内に敷設した軌道とその上を走行するビークル型マニピュレータを基本としたビークル型保守装置を採用した[31]。この装置は、90 度毎に配置された 4 つの保守用ポートを利用して軌道を炉内に敷設し、マニピュレータを搭載したビークルが軌道上を走行することによってブランケット・モジュールの着脱・搬送を行うものであり、1)軌道が 4 つの水平ポートで強固に支持され重量物を安定に精度良く取り扱うことができる、2)共通の軌道上を複数のビークル式マニピュレータを可動でき効率の良い保守作業が可能である、3)荷重支持の役割を担う軌道はモータ及びセンサ等の素子を持たない単純構造であり高い信頼性が期待できる、4)軌道を円形に収納するために収納空間を軽減でき建家の小型化が可能である、などの特徴を有している。

モジュールの交換・保守は、90 度毎の保守用ポートに配置された保守用セルを用いて実施する。0 度及び 180 度セルには、それぞれ 0~180 度及び 180~360 度の領域の保守を行う軌道及びビークル型マニピュレータが収納されている。各システムを単独で使用することによって 90 度及び

180 度の部分的な保守を、また、同時に使用することによって 360 度全周の保守を行うことができる。90 度及び 270 度の保守用セルには、軌道を支持する軌道支持装置と受渡装置が収納されている。受渡装置は、モジュールをビーカー型マニピュレータから受け取り、搬送用キャスクに移動するためのもので、搬送用キャスクにはダイバータと同様に二重シール扉が備えられている。本方式を実証するため、実規模大のモックアップ試験装置を製作して各種の基本性能試験を行い、その特性を評価した[32]～[34]。また、1)軌道の真空容器内への展開・収納技術[35]、2)大型・重量物の高精度自動取り付け技術[36]、3)狭隘取り付け時におけるかじり検出技術[37]、4)重量ブランケットの取り付け・取り外し時の衝撃荷重の防止技術[38]について、それぞれ検討が行われている。

## (2) ダイバータの交換

重量約 25 トンの各カセットは、通常運転時には真空容器底部の 2 本のレールに強固に固定され、プラズマ異常消滅時の電磁力を支持すると共に、所定の精度での据え付けを可能としている。カセットの保守・交換のために、90 度毎に 4 つの保守専用ポートが割り当てられており、1 つの保守用ポートから最大 15 個のカセットを交換する設計としている。このため、保守用ポート正面に位置するカセット（中央カセット）については、半径方向のみの移動で搬出を行い、他のカセットについては、真空容器底部のレールを利用して保守用ポートの位置まで周方向に移動した後、保守用ポートから搬出する。

この様に、カセット交換には、カセットを周方向及び半径方向に移動する周方向移動装置及び径方向移動装置という 2 種類の装置を主に用いる[39]。これらの装置は、いずれもダイバータ交換作業のために保守用ポートに接続される搬送用キャスクを用いて収納・搬送される。牽引車（トラクタ）等の径方向移動装置は、取り出したカセット或いは修復したカセットと一緒にトカマク・ピットとホットセル間を搬送される。搬送用キャスクには、カセット交換時に放射化ダスト等を建家内に飛散させないために、保守ポートとの接続面に二重シール扉が設置されている。なお、カセット交換性能の実証を目的として、欧州が幹事極となり、実規模の保守試験装置の製作が進められた[40]。

### 2.1.4 核融合炉内機器に付属する冷却配管の保守

前節までに述べたように、ITER では、DT 燃焼時に発生する 14MeV 中性子により、真空容器内に設置されたダイバータ及びブランケット等の炉内機器は放射化される。このため、これらの機器の保守・修理は全て遠隔機器による作業が前提になる。各炉内機器は、熱負荷除熱のため、いずれも強制冷却（水冷却）構造となり、その交換・保守に際しては、付属している冷却配管をあらかじめ切断しておく必要があり、撤去後、新たに機器を設置し、その冷却配管を再溶接する作業も必要である。さらに、中性子ストリーミング回避のため、非常に狭小なギャップでそれぞれ設置し、遮蔽領域を確保している。従って、それぞれの機器に付属する配管の保守時には、作業空間の確保が困難となり、通常考えられる配管外部からの溶接・切断・検査作業ではなく、溶接・切断・検査装置（ツール）が配管内からアクセスし、目的の場所にて、溶接・切断・検査作業を行うことが要求されている。

Fig.2.2 に示すように ITER のモジュール型ブランケット構造では、1 セクター（18 度）あたり、約 40 個のブランケット・モジュールが配置され、1 つのモジュールにはそれぞれ 2 系統の冷却配管が後壁から枝管によって接続されている。また、ブランケット上部からブランケット本体に冷却配管が供給されるため、クライオスタット内の超伝道コイル等の構造物の保守時には、接続されている母管を切断及び再溶接することが必要である。さらに、母管の切断時には配管の落下防止策を、再溶接時には配管同士を引き付ける機構が必要とされる。Table 2.5 に配管の仕様を、Table 2.6 に配管保守時の炉内の環境条件を示す。

Table 2.5 Specifications of the blanket cooling pipe

Item	Specifications
Main pipe (manifold)	SS316L, 100A, thickness of 6 mm
Branch pipe	SS316L, 50A, thickness of 3 mm
Minimum radius of curvature	400 mm

Table 2.6 Environmental conditions

Item	Condition
Atmosphere	dry nitrogen or ambient air
Pressure	1 bar
Temperature	$\leq 50^{\circ}\text{C}$
Radiation	$\leq 1\text{k Gy/hr}$
Contamination	tritium, activated dust, beryllium
Magnetic field	Zero

ブランケット・モジュールを交換する際の枝管の溶接・切断及び溶接検査は、以下に示す手順で行う。

- 1) 枝管溶接・切断装置が目的のブランケットまで移動し、枝管を切断する。
- 2) 枝管が切断されたブランケットはマニピュレータによって取り除かれる。
- 3) 新規ブランケットをマニピュレータが把持し、所定の位置へ設置する。
- 4) 枝管溶接・切断装置が目的のブランケットまで移動し、枝管を溶接する。
- 5) 枝管溶接部の非破壊検査を行う。
- 6) 枝管溶接部のリーク試験を行う。

なお、ダイバータの配管保守時にも上記と同様な手順となる。

以上のように、狭隘な空間である配管内を移動し、目的の場所で停止し、母管及び枝管を溶接・切断・検査することが可能な配管内アクセス型溶接・切断・検査ツールは、核融合炉内の主要機器であるブランケット及びダイバータの交換・保守の成立性が左右される重要な役割を担っている。

## 2.2 核融合炉外における定期的な遠隔保守

核融合を引き起こすために必要な1億度以上にプラズマを加熱する方法として、外部から“熱い”粒子を注入する中性粒子入射（NBI）加熱法がある。この方法では、最初にイオン源でイオンを生成し、次に静電加速装置によって高いエネルギーのイオンビームにする。さらに、電荷を持たない粒子ビームに変換してプラズマに入射する。これをイオンビームの中性化という。中性化後のビームは、電荷を持つイオンビームに対して電荷を持たないため“中性”粒子ビームと呼ばれる。

従来は、正イオンを加速した後に中性化していたが、正イオンではビームエネルギーが高くなると中性化効率が急激に低下し、ITERで必要な100万電子ボルトでは効率が殆どゼロになり中性ビームが得られなくなってしまう。ところが、負イオンを用いれば、高いエネルギー領域でも中性化の効率が高いため、装置全体の効率を高く保つことができる。また、負イオンビームは収束性が良いため、細い入射ポートから入射することができ、装置を小型化できる大きな利点もある。以上のような理由で、負イオンビームを用いたNBI加熱装置がITER加熱装置として採用され、現在、研究開発が進められている[41]。

### 2.2.1 NBI装置の基本諸元及び構成

ITER用NBI装置ビームラインの概念図をFig.2.4に示す。NBI装置は、Fig.2.5に示すように核融合炉外に設置され、核融合炉を加熱する機器の1つであるNBI装置は、プラズマ磁気面に接するようにクライオスタット外部に3台設置され、水平ポートを通じて真空容器にそれぞれ接続される。NBI装置は、イオン源、加速器、HV接続部、ビームライン、真空ダクト等から構成され、その中でもイオン源、加速器は、定期的な保守・交換作業が想定されている。これらの機器はプラズマからの中性子照射によって機器が放射化されてしまうため、補修及び交換を遠隔操作により行う炉外保守技術の開発が必須となる。

以下にNBI装置保守時の環境条件を示す。

- |            |                      |
|------------|----------------------|
| 1) 雰囲気     | : 循環空気及び窒素           |
| 2) 圧力      | : 1 bar              |
| 3) 温度      | : 50 °C以下            |
| 4) ガンマ線線量率 | : 0.1 Gy/h           |
| 5) 汚染物質    | : トリチウム、放射化ダスト、ベリリウム |
| 6) 磁場      | : コイルによる磁場は無し        |

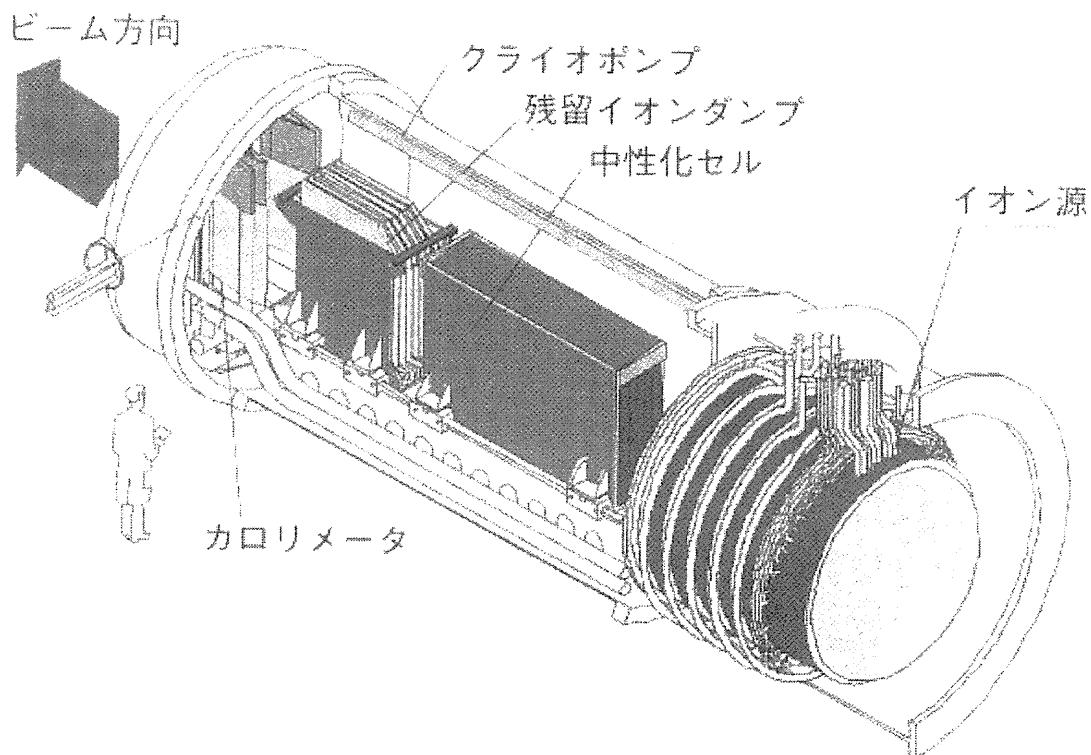


Fig.2.4 Overview of the Neutron Beam Injector

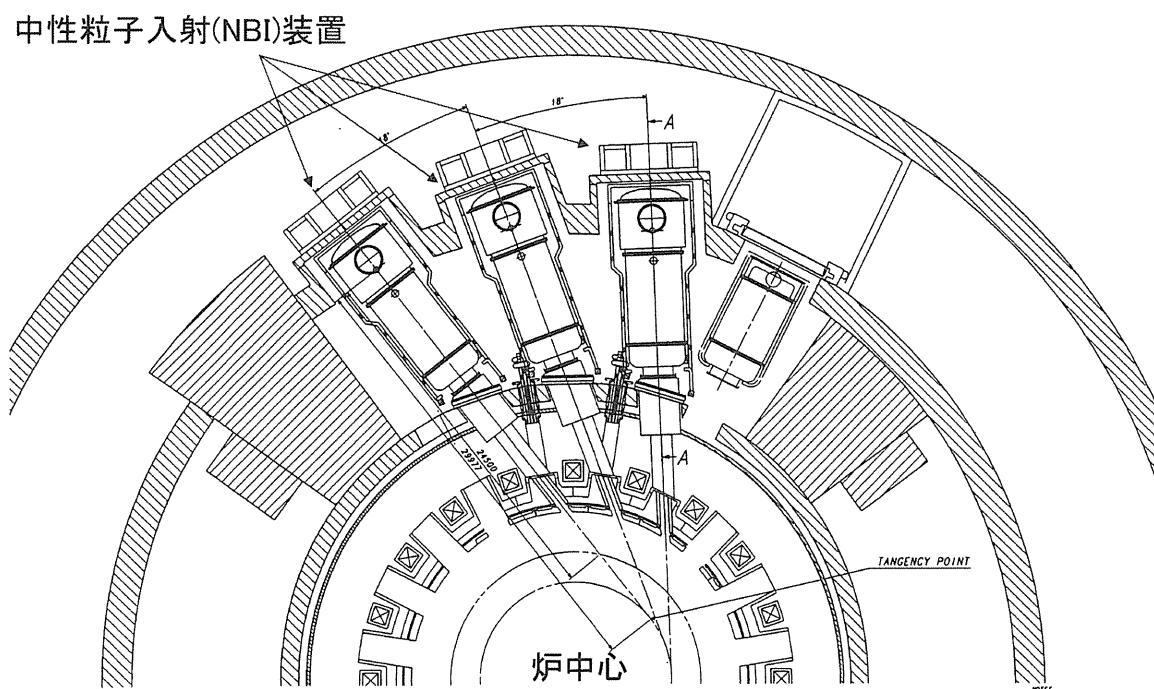


Fig.2.5 Installation of the NBI

NBI 装置の概要を以下に示す.

#### (1)イオン源・加速器

イオン源・加速器は直径約 4m, 長さ約 3m の真空容器内に設置され, 絶縁ガス (C2F6, 0.7MPa) が封入されている. 総重量は約 20 トンである. 外径 3m のイオン源の中には, 72 本のタンゲステンフィラメントがあり, 1000 秒間のパルスで約 640 ショット使用することが可能であると見込まれている. フィラメントは年に 1 回程度の交換頻度を想定しており, その場で交換する.

加速器はマルチホール・マルチステージタイプで, 3 段階のエクストラクターと 5 段階の加速器を通ったイオンは 1MeV に加速される. この加速器上に堆積したセシウムを取り除くために, レーザーアブレーション法によって, その場でセシウムの除去を行うか, もしくは, イオン源をホットセルに移動後, 洗浄作業を行う.

#### (2)ビームライン

ビームラインは, 内径 3.75m, 長さ 7m の真空容器内に, 中性子化セル, イオンダンプ, カロリメータ, クライオポンプ, ビームリミター, ファーストシャッター等によって構成されており, 総重量は 124 トンである. これらは故障時に一括して, 交換・保守が行われる.

#### (3)高電圧 (HV) 線

Fig.2.6 に示すように, 内径 1.5~1.8m, 長さ 3~4m の配管でイオン源・加速器から上部へと接続されている. 配管内には, 絶縁ガスが満たされており, ポテンシャルの異なった電源がイオン源に供給されている. 各電源ケーブルには冷却水とガス (D2, H2) が供給されている.

#### (4)ダクト

ダクトは NBI 装置から炉内までのビーム誘導時の外部との隔壁であり, 2 重境界構造となっている. 真空容器とクライオスタット間の真空モニタとして利用される. また, 隔離弁を開鎖すると NBI 装置のメンテナンス時は, 第一真空バウンダリからは二重の境界を保つ構造である.

### 2.2.2 NBI 装置の保守

Table 2.7 に ITER で定義されている NBI 装置の保守区分を示す. これより, イオン源, フィラメントはクラスー 1 (頻度の多い計画的な保守) であり, これらに対応した遠隔機器が必要である. また, それ以外の機器に関してはクラスー 3 (計画的な保守を考慮しない) として取り扱われることになっている.

ところで, NBI 装置のイオン源においては, 負イオンを安定に発生させるためにセシウムが必要となる. しかし, NBI 装置を長時間運転した後, セシウムは電極の支持部分の絶縁に付着する

ため、碍子の絶縁抵抗値が低下し、運転の継続が困難となる。このため、一定期間毎に碍子部分上に付着したセシウムの除去・清掃を行わなければならない。セシウムは、Fig.2.7 に示すように、イオン源のアルミナ製絶縁材部分に付着する。この部分に堆積したセシウムを取り除くために、Fig.2.8 に示したマニピュレータを使用してセシウム除去が行われる。セシウム除去の一方法として、レーザーアブレーション法が選定されている。また、保守性の観点から、著者は、セシウム除去時、イオン源全体を交換するのではなく、セシウム除去用装置（ツール）を使用して、その場で除去作業を行う方法を提案している[42]。同様にして、フィラメントもマニピュレータにて交換する方法を提案している[43]。Fig.2.9 にマニピュレータによる NBI 保守の概要を示す。

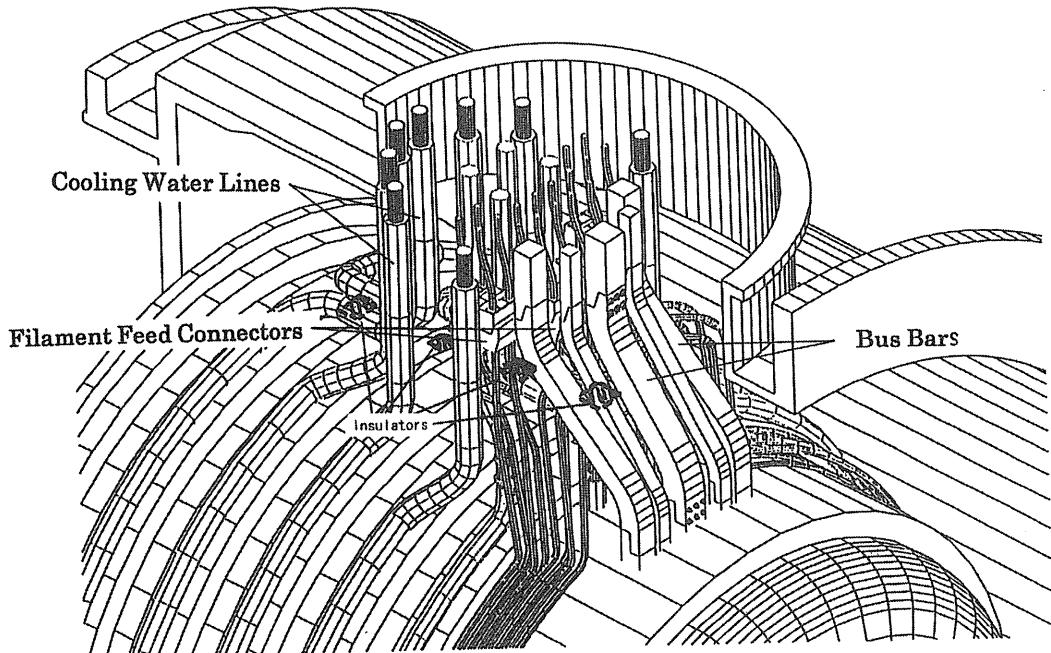


Fig.2.6 High voltage line

Table 2.7 Remote handling classification of NBI components

Class-1		Class-2		Class-3	
Component	Frequency	Component	Frequency	Component	Frequency
Ion source & accelerator	1 per year per NBI			Neutralizer	Accident
Filaments	2 per year per NBI			Ion dump	Accident
				Calorimeter	Accident
				Cryopump	Accident
				Beam limiter	Accident
				Beam duct	Accident

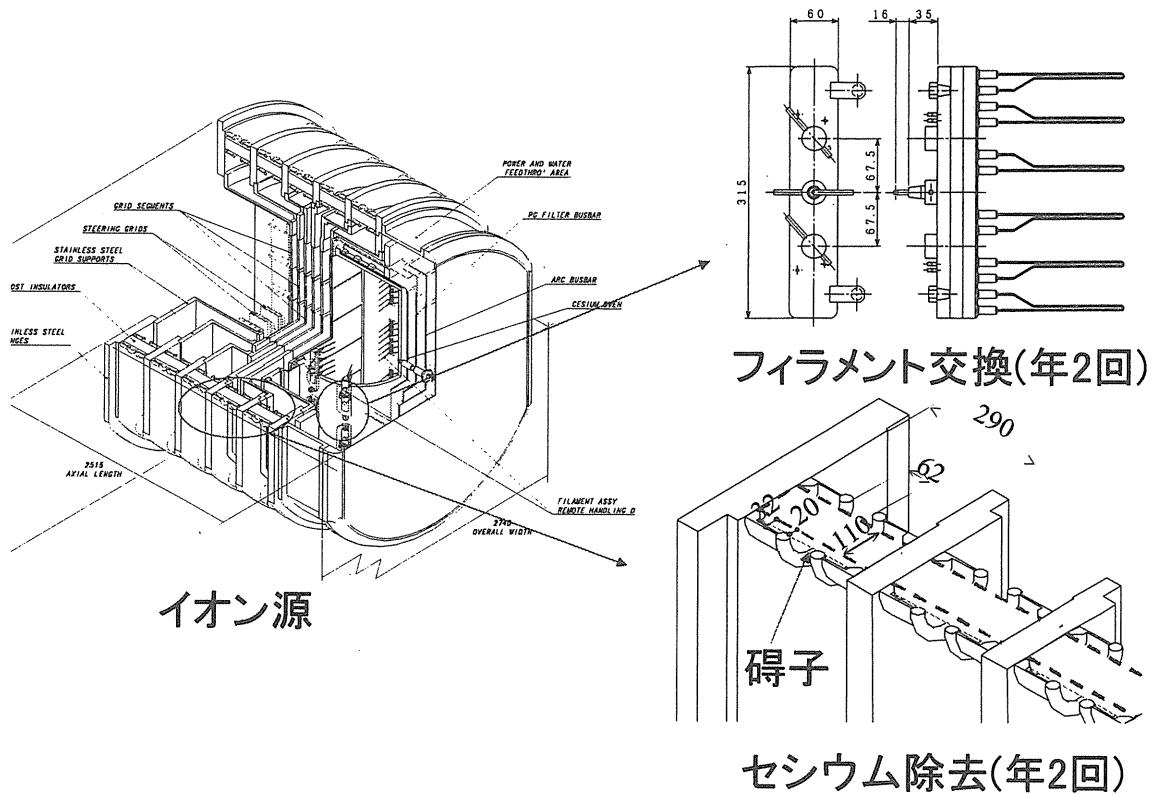


Fig.2.7 Filaments and insulators on NBI ion source

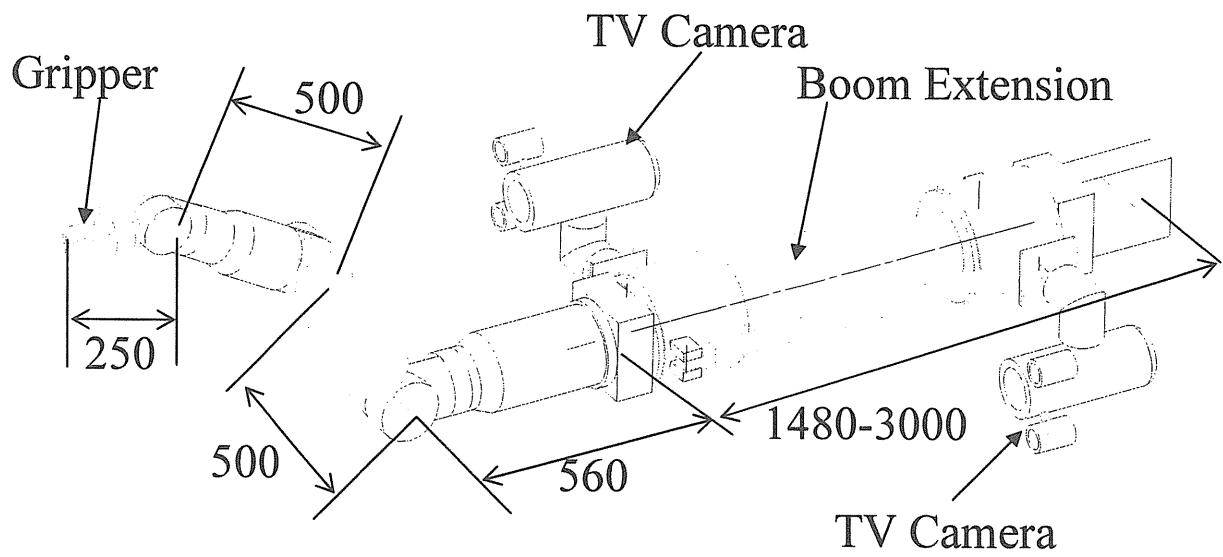


Fig.2.8 General manipulator for out-vessel maintenance in ITER

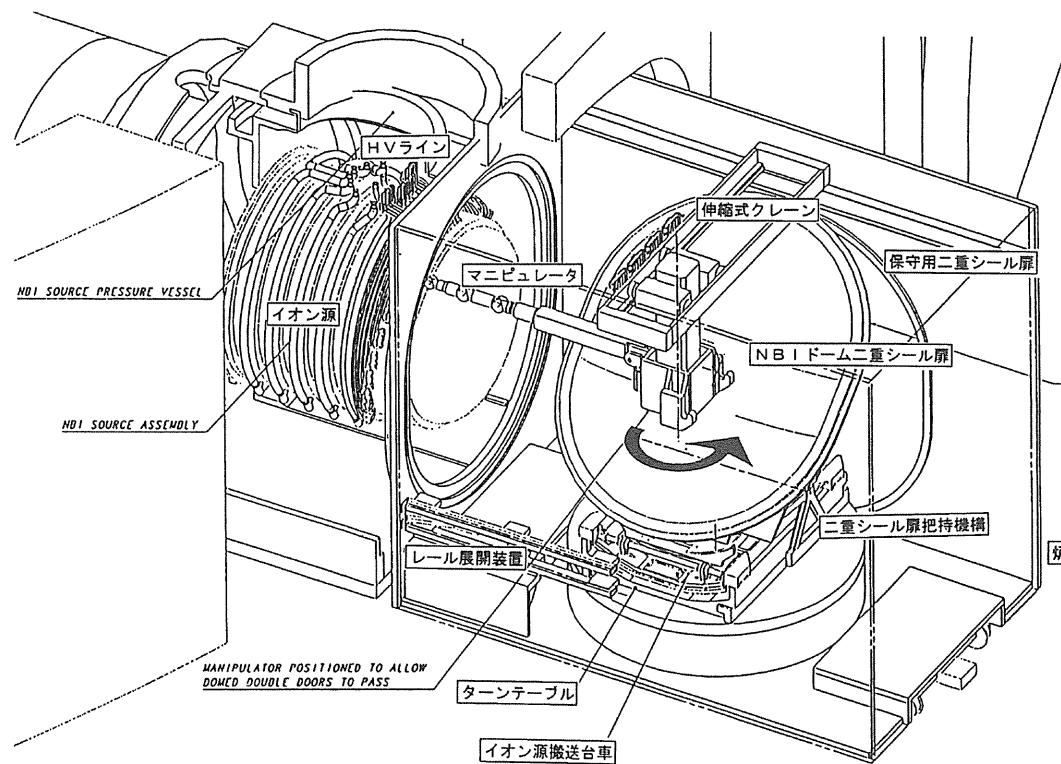


Fig.2.9 Outline of the NBI ion source maintenance

## 2.3 原子力事故時における遠隔保守

1999年9月30日に茨城県東海村にあるウラン燃料加工工場「㈱ジェー・シー・オー(JCO)」において発生した臨界事故では、わが国で初めての原子力・放射線事故による犠牲者を生むと共に、周辺の住民に対しても避難や屋内退避を強いる結果となった。以下に、事故の概要と、その保守について検討した結果を述べる。

### 2.3.1 ウラン加工工場（JCO）臨界事故の概要

JCOは、核燃料サイクル開発機構との契約に基づき、「常陽」の燃料用として、平成11年度に濃縮度18.8%，ウラン濃度380グラム・ウラン／リットル(gU/l)以下の硝酸ウラニル溶液を転換試験棟において約160l(約60キログラム・ウラン(kgU))製造することになっていた。製造に当たっては、1作業単位(以下、「バッチ」という)分の2.4kgU(溶液量は約6.5l)ずつ溶解を行い、輸送の単位である6～7バッチ分の約40lの硝酸ウラニル溶液を均一化することになっていた。作業は3人の作業員によって行われていた。本来であれば、ウラン粉末を、溶解塔で硝酸を加えて溶解すべきところを(許認可を受けた工程)，10l入りのステンレス鋼製の容器(いわゆるバケツ)でウラン粉末を溶解した後、硝酸ウラニル貯塔において濃度を均一にするという社内で作成した手順書(本来の許認可を受けた工程とは異なる行為)を無視し、5l入りのステンレス鋼製のビーカー及び漏斗を用いて、1バッチ(2.4kgU)以下で制限して管理すべき100リットル容量の沈殿槽に、9月29日には4バッチ(約9.6kgU)の硝酸ウラニル溶液を注入し、9月30日午前中には3バッチ(約7.2kgU)の硝酸ウラニル溶液を注入した(社内手順書とは異なる行為)。このため、同槽内の硝酸ウラニル溶液が臨界に達した。最初に瞬間的な激しい核分裂反応が起こり、その後、緩やかな核分裂反応が継続した。この臨界反応を停止させるために、沈殿槽外周の冷却水ジャケットからの水の抜き取りが行われ、さらに、臨界停止を確実にするためにホウ酸水が沈殿槽内に注入された。結果的に、約20時間にわたって臨界状態が継続した[13]。

この事故により、3人の作業員が大量の放射線量を被爆し(A:16～20GyEq以上, B:6～10GyEq, C:1.0～4.5GyEq)，そのうちの1人(A)は、事故から82日目に死亡した。このほか、ホールボディカウンタなどによる実測線量の評価から、事故発生時に敷地内にいた従業員56名(0.6～47.4mSv)，事故直後に作業員の救助に当たった消防士3名(4.6～9.4mSv)，臨界停止のための作業従事者24名(0.7～48mSv)，敷地近傍にいた一般住民7名(6.7～16mSv)，放射線モニタリング等防災業務従事者57名(0.1～9.2mSv)の被爆が確認されている[44]。

核燃料施設における臨界事故は、海外においても発生しており、これまでに少なくとも21件の事例(米国:7件、英国:1件、ロシア:13件)が報告されている。JCO事故とこれらの事故の類似性の観点からこれまでに反映すべきであった事項の摘出を行い、その全体的な傾向を調査し、事故のシナリオを分析した結果、ほとんどの臨界事故はウランあるいはプルトニウム溶液の取り扱い時に非安全形状の容器において起こっており、またいくつかの事例では、事故に至ったプロセスや原因において共通した問題があることが指摘されている[45]。例えば、作業効率を上げるための手順の考案や実行、用途の異なる容器の使用、許認可を受けていない作業手順の遂行などと

といった、安全規制に対する意識の欠如が原因で事故が起こっている。これらの事故は、当初、予想しなかったことが行われ、深刻な事故になっているものであり、核融合炉のような計画的な保守・交換作業とは異なった遠隔作業が要求される。

### 2.3.2 ロボット開発の経緯と環境条件

前節までに述べたように、原子力事故のほとんどが、当初予想されなかつたこと（計画になかつたこと）を実施して発生している。言い換えると、どこの組織にも必ずある小さな不備やコミュニケーション不足の積み重ねが事故の原因であるということが指摘されている[46]。いわゆる、人災・ヒューマンファクターに起因するところが多大である。このため、事故が発生する以前での、事故時対応作業の特定が困難であり、その都度、的確な判断と対応が要求されることが予想される。また、世界中で類似の施設において事故が発生しているという観点から、本研究では、原子力施設内の事故を想定し（特にJCOで発生した原子力事故を例にとり），検討を行った。

JCO事故では、放射線レベルが高く、事故現場への人のアクセスが困難であったため、事故現場の状況についての情報が不十分で、事故の收拾を大幅に遅らせた。このため、原子力施設で事故が発生し、放射線により人がアクセスできない場合、事故をできるだけ早く收拾するために、事故現場に侵入し、情報収集や事故拡大防止・停止処置作業を行うロボットの開発が必要となった。このような背景の下、原子力施設の事故対応ロボットを開発するに当たり、本研究では、まずロボットに必要とされる機能等を検討するため、要求される作業目的とその作業対象をTable2.8に示すようにマトリックス状に整理した。この結果、ドアや階段等を容易に走行できるロボットのコンパクトさを要求する一方で、多種多様な情報収集及び事故復旧のための作業が要求されることが明らかとなった。このため、全ての要求を1台のロボットで満足させることは困難であり、役割を分担した複数のロボットが必要であると考えられる。また、原子力防災ロボットの早急な整備が要求されていることから、約1年間の短期間で製作を完了することとし、今回開発するロボットは、事故拡大防止・停止処置の作業を行うことを主目的に、将来の改造と高度化を想定し、最終的にはTable2.8の網掛け部分の機能を満足するロボットとした。さらに、通常の点検通路を自走することにより情報収集や復旧作業が可能で、かつ、他の防災ロボットではあまり考慮されていない放射線に対する対策を施した「高放射線に耐えるロボット」を開発対象とした。製作後は、防災ロボットとしての各種試験を行うための研究・開発用機器（プラットフォーム）として使用することを目的とし、今後、実際の災害現場で作業可能なロボット開発に資することとした。

また、本研究では、以下の環境条件を想定している。

#### 【原子力施設内の事故想定環境条件】

- 1) ガンマ線線量率 : ~10 Gy/h
- 2) 霧囲気 : 大気（放射性物質による汚染あり）
- 3) 温度 : ~40 °C（火災等は考慮しない）
- 4) 湿度 : ~90 %（結露無し）
- 5) 照明 : 施設内電源喪失による消灯時にも対応可能とする
- 6) 障害物 : ドア、落下物、階段等

Table 2.8 Working target and objects

対応作業事項	対象						
	視覚	放射線	雰囲気	気象	聴覚	物体距離	重量
監視・計測	光学撮影 映像 超音波撮影 赤外線撮影	α線 β線 γ線 中性子線	ガス FP 煙濃度	温度 風向 風速 湿度 震度	音 超音波		
移動	廊下 コンクリート アスファルト ゴム フリー・アクセス板 グレーチング 溝越え	階段 通常階段 段差 らせん階段 はしご	野外 アスファルト 溝越え 芝 ダート 砂 雪面	高所位置 空中 天井 壁	配管内部 冷却配管 排水管 空気配管	水中 純水 海水 特殊溶剤	
障害物除去	建屋設備 ドア(引・押) 引戸 シャッター アコーティオン	小型軽量物 箱型 球型 多面体 破損物	大型軽量物 箱型 球型 多面体 破損物	小型重量物 箱型 球型 多面体 破損物	大型重量物 箱型 球型 多面体 破損物	泥・砂状物 化学反応物 泥 砂	液体 水 薬品
災害停止処置	機器操作 操作盤SW ハブル ボルト・ナット レバー	治具操作 切断 穴明け 溶接	消火 放水 化学溶剤 消火砂 酸素除去	漏電対策 電源停止 ケーブル切断	化学反応 中和剤 反応停止剤	中継作業	
人命救助	意識確認 呼掛け 応答確認	ハンドリング 抱きかかえ 引き上げ	搬送	走行機構 サスペンション			
汚染拡散防止	遮蔽壁 コンクリート 鉛 硼酸	フィルタ 土嚢 粘土 砂	ハンドリング	搬送			
除染	漏洩物除去 吸引 すくいとり 搔き出し	機械式除染 ハイドロジェット 吸引 こすり取り ストリッパブルコーティング 床研磨 スチームジェット 超音波		化学除染 化学除染剤 フレン洗净	汚染水 水中脱塩 蒸留	非接触処理 ビニールシート	
現場片づけ 作業員支援	遮蔽 γ線 中性子線	ハンドリング 重量物 危険物	搬送	安全対策 放射線セサ 被曝管理	作業支援 トランシーバ 映像 写真		
検査支援	遮蔽 γ線 中性子線	ハンドリング 重量物 危険物	搬送	安全対策 放射線セサ 被曝管理	作業支援 トランシーバ 映像 写真 計算機 LAN	セサ搭載 FPサンプリング 放射能計測 サーモグラフィ	

※FP : 核分裂生成物

### 3 配管内で作業を行うロボット

本章では、ITER 炉内機器に付属する冷却配管を保守することが可能なように設計・製作を行った枝管用溶接・切断・検査ロボットについて述べる。

#### 3.1 ブランケット冷却配管保守の設計

核融合実験炉(ITER)では、DT 燃焼時に発生する 14MeV 中性子により、真空容器内に設置されたブランケット等の炉内機器は放射化される。このため、これらの機器の保守・修理は全て遠隔機器による作業が前提になる。

各炉内機器は、熱負荷除熱のため、いずれも強制冷却（水冷却）構造となり、その交換・保守に際しては、付属している冷却配管をあらかじめ切断しておく必要があり、撤去後、新たに機器を設置し、その冷却配管を再溶接する作業も必要である。さらに、中性子ストリーミング回避のため、非常に狭小なギャップでそれぞれ設置し、遮蔽領域を確保している。このため、配管保守時は、作業空間の確保が困難となり、従来行われている配管外部からの作業ではなく、配管内からのアクセスによる溶接・切断作業が ITER 遠隔保守として要求されている[11]。

Fig.3.1 にモジュール型ブランケットの基本構成を示す。1 セクター（18 度）あたり、約 40 個のブランケットモジュールが配置され、1 つのモジュールにはそれぞれ 2 系統の冷却配管が後壁から枝管によって接続されている。また、ブランケット上部から冷却配管が供給されるため、クライオスタット内の超電導コイル等の構造物の保守時には、Fig.3.2 に示すような場所のブランケット母管を切断及び再溶接することが必要である。母管の切断時には配管の落下防止策を、再溶接時には配管同士を引き付ける機構が必要とされる。Table3.1 に配管の仕様を、Table3.2 に配管保守時の炉内の環境条件を示す。

ブランケットモジュールを交換する際の枝管の溶接・切断及び溶接検査は、以下に示す手順で行うことが ITER 炉内機器用冷却配管保守シナリオとして順当であると考え、著者がメンバーの一員である ITER 日本ホームチームは ITER 保守計画に対して提案してきた。この手順を Fig.3.3 に示す。

- 1) 枝管溶接・切断ロボットが目的のブランケットまで移動し、枝管を切断する。
- 2) 枝管が切断されたブランケットはマニピュレータによって取り除かれる[31]。
- 3) 新規ブランケットをマニピュレータが把持し、所定の位置へ設置する。
- 4) 枝管溶接・切断ロボットが目的のブランケットまで移動し、枝管を溶接する。
- 5) 枝管溶接部の非破壊検査を行う。
- 6) 枝管溶接部のリーク試験を行う。

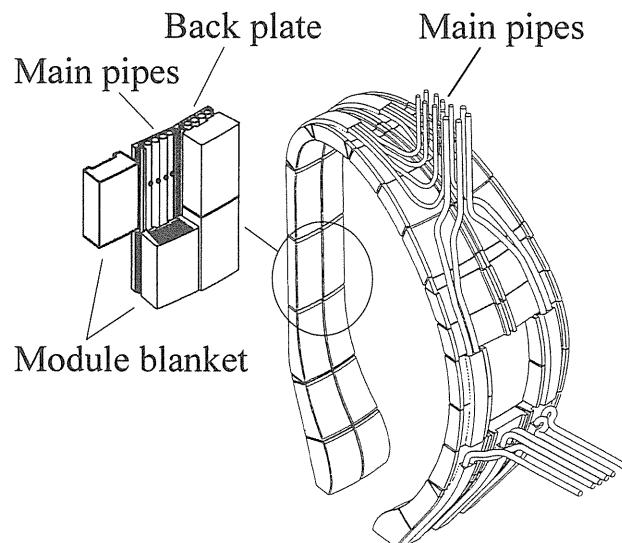


Fig.3.1 Blanket cooling pipe construction

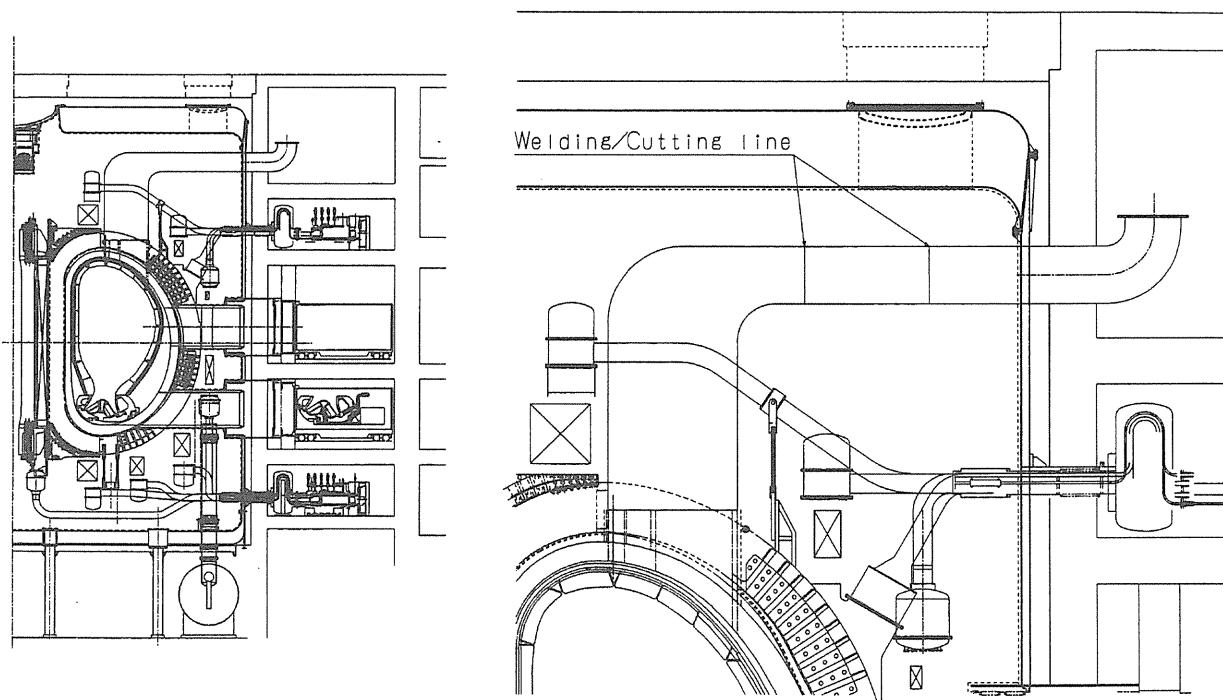


Fig.3.2 Pipe layout of upper port area

Table 3.1 Specifications of the blanket cooling pipe

Item	Specifications
Main pipe (manifold)	SS316L, 100A, thickness of 6 mm
Branch pipe	SS316L, 50A, thickness of 3 mm
Minimum radius of curvature	400 mm

Table 3.2 Environmental conditions

Item	Condition
Atmosphere	dry nitrogen or ambient air
Pressure	1 bar
Temperature	$\leq 50^{\circ}\text{C}$
Radiation	$\leq 1\text{k Gy/hr}$
Contamination	tritium, activated dust, beryllium
Magnetic field	Zero

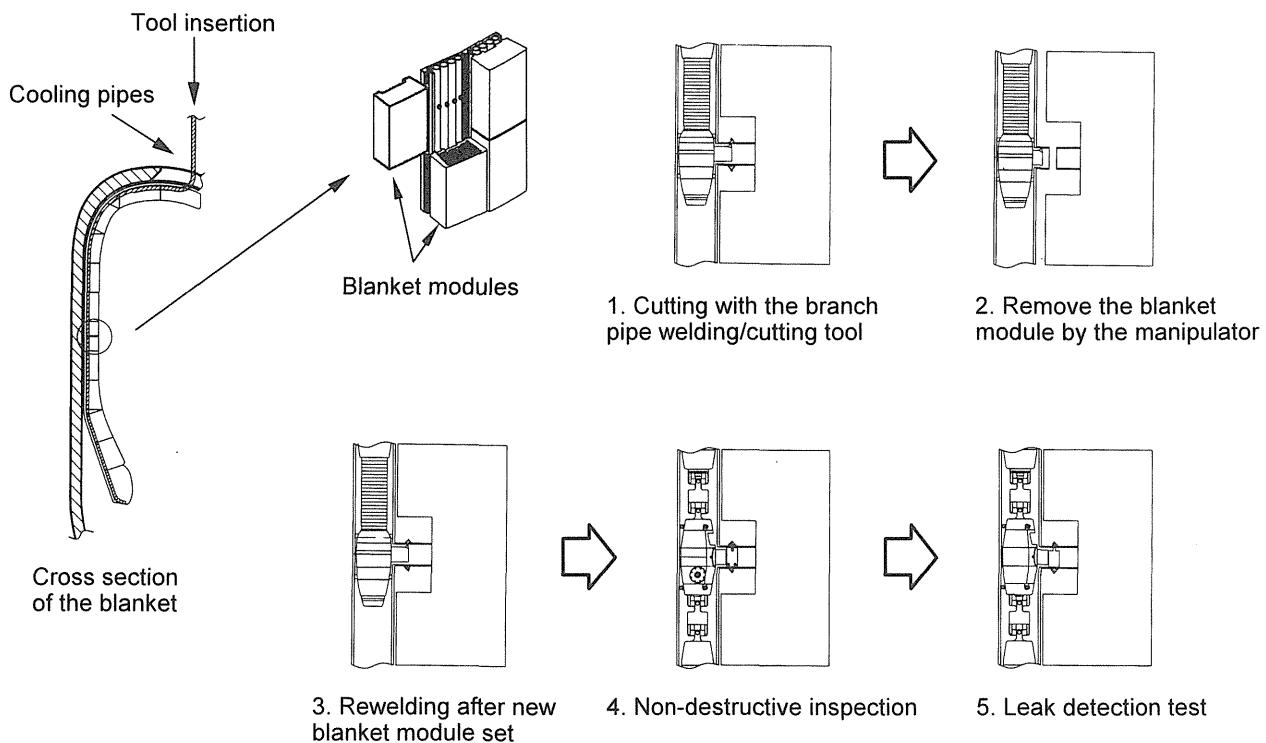


Fig.3.3 Schematic view of the procedure of the branch pipe maintenance from the inside of manifold

溶接・切断ロボットを配管内からアクセスさせ、目的の場所にて加工を行うこと及び溶接・切断のためのエネルギー伝送を確実に行うために、本システムでは、光ファイバによるエネルギー導光が可能な Nd :YAG (Nd : Yttrium Alminium Garnet, ネオジウム YAG 波長 1064nm) レーザー加工法を採用した。一般に、レーザーを使用した場合の加工には、以下の長所が挙げられる。

- (a) 加工表面上に光学的収束法により、微小スポットとしてエネルギー密度が高められるため、硬合金の加工に使用可能である。
- (b) エネルギー状態を変化させることにより、同一方法にて、溶接・切断の両方に対応可能である。
- (c) 加工ひずみや熱変形が少ない加工が可能である。

また、レーザー加工時のアシストガスに関しては、通常、酸素及びアルゴン等を使用する。しかし、ITER では炉内保守時に、真空状態から不活性ガスに炉内は置換される。従って、炉内雰囲気を保つため、加工点に吹き付けることが可能なガスとして窒素を選定した。このため、通常の環境条件に比べて若干のレーザー出力の増加が必要であることが予想される。

溶接後の非破壊検査については、通常の原子力施設では X 線による透過試験が義務付けられている。ところが、ITER 炉内は放射化するため、X 線検査を実施することは不可能である。このため、他の手段にて検査を実施する必要がある。現在、ITER では X 線検査に代わるような配管継ぎ手の非破壊検査手法を検討しているが、許認可を得るための手法の確立と法律化には相当の時間と試験結果が必要であると考える。このような観点から、本研究では、非破壊検査の一手法として、配管内を移動して目的の枝管の非破壊検査を行う方法を提案することとした。

配管内を移動するロボットはこれまでにも多く研究されてきた[47]～[50]。しかしながら、どの研究においても、管内での移動と目視検査しか行うことができない。われわれが要求されている作業は、配管内を走行し、目的の場所で、溶接・切断・非破壊検査を行うことである。このような背景と上記の検討に基づき、3.2 節に配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットについて、3.3 節に配管内アクセス型枝管非破壊検査ロボットについてそれぞれ検討した結果を述べる。

### 3.2 枝管溶接・切断ロボット

枝管溶接・切断ロボットには、ブランケットの上部配管から挿入後、曲率（母管中心最小半径400mm）を持つ内径約102.3mmの母管内を走行し、任意の枝管まで到達し、溶接・切断を行う機能が要求される。この幾何学的条件から、溶接・切断ツールを構成する台車の大きさは、長さ約20cm、配管の扁平率を考慮し直径が97mm程度以内に制限される。この大きさの台車の内部に、管内移動、位置決め・固定及び溶接・切断に必要な全ての機構を搭載することは困難である点に着目し、複数の台車に機能を分散してそれぞれを数珠繋ぎにしたロボットを考案した。本節では、本考案を基に行った、枝管溶接・切断ロボットの設計検討、製作、試験結果等について述べる。

#### 3.2.1 枝管溶接・切断ロボットの移動機構

##### 3.2.1.1 移動機構の仕様検討

狭隘な配管内でロボットを移動させるために、まずロボットに要求される仕様を検討し、整理した。

###### (1) 対象配管と経路

- ・母管形状：100A配管(内径102.3mm), 肉厚6mm, 曲率400mm(4箇所)
- ・枝管形状：50A配管(内径54.5mm), 肉厚3mm
- ・後壁(バックプレート)内に設置される冷却配管内の移動
- ・母管挿入口からブランケット最下部の枝管までの距離：15m

###### (2) アクセス方法

加工ヘッドと移動機構は、ブランケット上部配管から挿入され、母管内を垂直及び水平方向に移動して加工を行う枝管まで到達する。

###### (3) 移動機構の構成

移動機構は、加工ヘッドとの取り合いを考慮した構造とし、加工ヘッドを連結した状態で配管内の垂直及び水平方向に移動できる機能を搭載し、任意の位置決めを可能とする。移動機構は、駆動源、減速機構、移動用タイヤ(あるいは移動用伝達機構)、制御装置、ケーブル処理装置から構成される。

###### (4) 移動機構の基本諸元

- ・牽引力：加工ヘッドを連結した状態で、母管内にて全方向の移動がスムーズに行える牽引力を生じさせる必要がある。また、ロボット挿入口からブランケット最下部まで移動可能な牽引力が必要である。
- ・移動速度：ITER保守時の要求事項から、1m/min程度以上の移動速度を維持する必要がある。
- ・位置決め精度：加工ヘッドを連結した状態で、枝管部分での移動機構の位置決め精度は±10mm以内とする。繰り返し位置決め精度も同様とする。
- ・加工ヘッドとの取り合い：移動台車は加工ヘッドの前方あるいは後方に接続可能な構造とする。台車数の増加によって牽引力が増加可能な構造とする。また、加工ヘッドとの取り付け

には、母管曲がり部を考慮してリンク構造による接続とする。

- 枝管検知：移動台車は加工ヘッド上に搭載する枝管位置検出センサとの整合性を考慮し、センサからの情報によって任意に移動可能な構造にする必要がある。
- レスキュート対策：故障時を考慮し、タイヤあるいは移動伝達機構と母管との間に摩擦力を減少させることができない機械を搭載しておく必要がある。

以上のような検討結果を基に、次節以降で移動機構についての設計検討を進める。

### 3.2.1.2 移動機構の牽引力

前節までの概略仕様に基づき、移動機構の詳細設計を行った。移動機構には、加工ヘッドを連結した状態で母管内をスムーズに移動可能な牽引力が必要となるため、必要な牽引力の検討を行った。

母管経路は、前節で述べたように、垂直及び水平の全方向であり、途中には 400mm の曲率部が 4ヶ所存在する。また、実機の母管経路を想定した場合、Fig.3.1 に示すように、昇り傾斜部も考慮する必要がある。移動機構の牽引力算定に当たって検討するべき項目は、下記の通りである。

- 1) 母管内での直管部、曲がり部のケーブル摩擦力
- 2) 移動機構本体及び加工ヘッドの重量
- 3) ケーブル重量

移動機構を設計する上では、管路内のケーブル摩擦力を低減することが重要であるため、多種多様なケーブル類を 1 つにまとめたような複合ケーブルを使用せず、用途毎にバラバラの状態のケーブル類をステンレス製のフレキシブルチューブ内に収納する構造とした。これにより、ケーブルの可撓性を確保することとした。また、母管内での直管部及び曲率部のケーブル摩擦力については机上計算では正確な値を得ることは困難なため、移動機構の設計に先立ち、ケーブルの摩擦力を見極めることを目的とし、ケーブル牽引力試験を実施した。以下にその試験内容と結果を述べる。

#### (1) 牽引力確認試験

- 模擬試験配管路に挿入した試験ケーブルをバネ秤で水平方向に引き、試験ケーブルが水平方向に動き始めたときの力を測定する。
- 試験配管路は水平に設置し、段階的に配管路の長さを変えて測定する。試験配管路の形状としては、Fig.3.4 に直管を、Fig.3.5 に曲がり部を持つ配管をそれぞれ示す。配管の材質と形状はどちらも SUS304, 100A 配管を使用し、1m の直管を 4 つ、2m の直管を 4 つ、エルボ管を 4 つ使用してそれぞれの試験配管を構成した。この結果、直管は長さ 12m、曲がり部を持つ配管は、全長 15m 程度となった。
- 試験ケーブルは、実機を想定し、メタルケーブル類、エアホース、光ケーブルをフレキシブルチューブ内に挿入して 1 本のケーブルとした。試験ケーブルの断面を Fig.3.6 に示す。なお、本試験ケーブルの単位重量は、1.21kgf/m であった。

#### (2) 牽引力確認試験結果

上記試験条件の下、ケーブルの牽引力測定試験を実施した。試験結果を Table3.3 に示す。また、試験結果のグラフを Fig.3.7 に示す。この結果から以下のことが明らかとなった。

- 直管路でのケーブルの摩擦抵抗力の平均値 : 約 0.45Kgf/m
- 曲がり部を持つ配管路内でのケーブルの摩擦抵抗力の平均値 : 約 1.6Kgf/l ケ所
- 直管路での摩擦係数の平均値 : 約 0.344

以上の結果を、移動機構に必要となる牽引力の算定に資することとした。

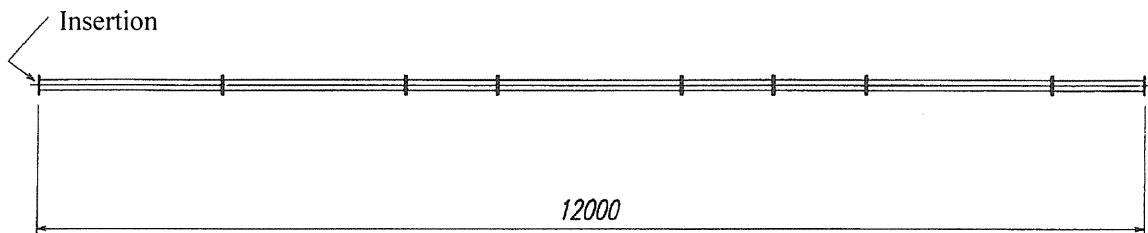


Fig.3.4 Schematic view of the straight pipe

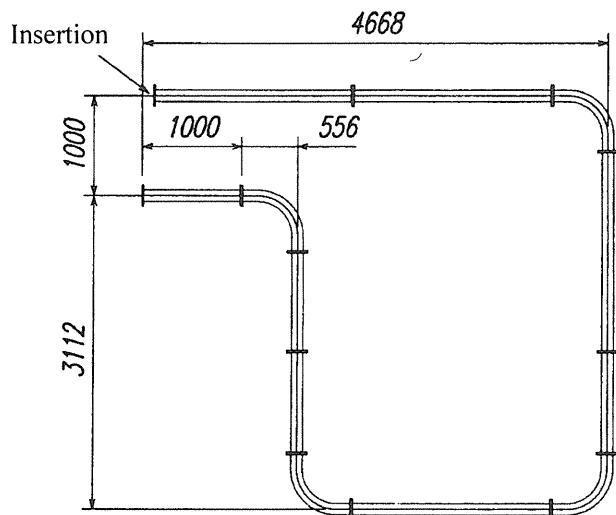


Fig.3.5 Schematic view of the pipe with bent parts

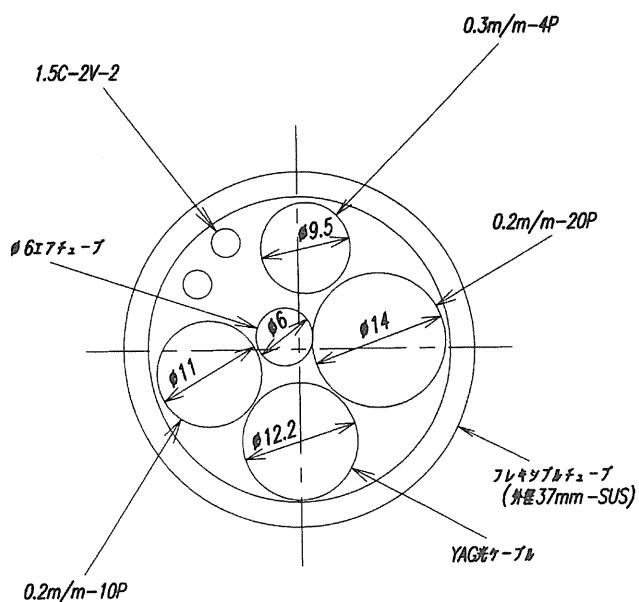


Fig.3.6 Cross section of the test cable

Table 3.3 Test result of the cable pulling test in straight and bent pipes

Straight pipe		Bent pipe		
Length (m)	Pulling power (Kgf)	Length (m)	Pulling power (Kgf)	No. of bent part
4	1.2	-	-	-
5	2.2	-	-	-
7	3.4	-	-	-
8	3.7	7.78	4.0	1
9	4.0	-	-	-
11	4.5	10.57	7.4	2
12	5.0	12.35	8.9	3
-	-	15.92	12.2	4

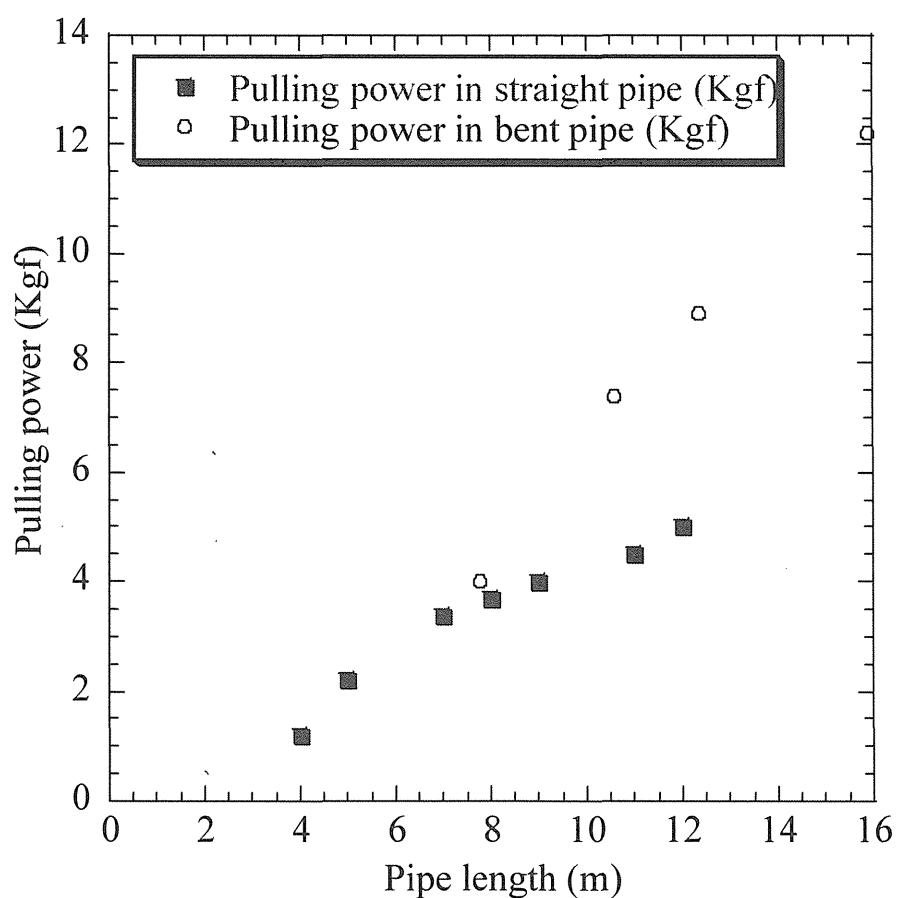


Fig.3.7 Result of the cable pulling test in the straight and bent pipe

次に、牽引力算定を行うため、Fig.3.1 に示す実機の配管路を以下のように想定した。

- |                        |         |
|------------------------|---------|
| ① 水平管部(全管部全長の 1/3 とする) | : 10m   |
| ② 上り傾斜管部(30 度勾配とする)    | : 4m    |
| ③ 曲管部(4 ヶ所)            | : 2.5m  |
| ④ 垂直下り及び下り傾斜管部         | : 13.5m |

以上、合計 30m の配管内を移動するものとして、以下のように各配管内の摩擦抵抗力を算定した。

- ① 水平管部摩擦抵抗力(F1)

単位長さあたりの抵抗力(r)を 0.45Kgf/m(実験値)とすると下記のようになる。

$$F1 = L \times r = 10 \times 0.45 = 4.5 \text{ Kgf}$$

- ② 上り傾斜管部抵抗力(F2)

ケーブル重量(w1)は上り傾斜管部分のみを考慮すると  $4m \times 1.21\text{Kgf}/m = 4.845\text{Kgf}$ 、加工ヘッド重量(w2)を 3.5Kgf(想定)とし、移動機構の総重量(w3)を 8Kgf(想定)とすると、移動物の総重量(W)は  $w1+w2+w3=16.4\text{Kgf}$  となる。また、摩擦係数は 0.344(試験値より想定)である。

従って、上り傾斜管部抵抗力は下記のようになる。なお、傾斜角度は 30 度とする。

$$F2 = W \cdot \sin\theta + W \cdot \cos\theta \cdot \mu = 13.1\text{Kgf}$$

- ③ 曲管部抵抗力(F3)

曲管部は 4 ヶ所あるので、下記のようになる。

$$F3 = 1.6 \times 4 = 6.4\text{Kgf}$$

従って、必要な牽引力 F は、下記のようになる。

$$F = F1 + F2 + F3$$

$$= 4.5 + 13.1 + 6.4 = 24\text{Kgf}$$

設計の余裕を考慮し、必要な牽引力を 30Kgf として設計を進めることとした。

### 3.2.1.3 走行方式の検討

配管内を走行させる機構としては、タイヤ(車輪)式、クローラ式、尺取虫式、スパイラル車輪式等、様々な方式が考えられる。しかしながら、ブランケット配管という冷却配管の仕様条件から、適用可能な機構が限定されると考えられる。本件において、移動機構を設計する上で考慮すべき主要な課題を以下に示す。

- ① YAG レーザー導光用光ファイバを先端の加工ヘッドまで切断させずに引き込む必要があり、移動機構の構成スペースが狭い。
- ② 母管曲率が管径 100A に対して R400mm と小さく、移動機構の構成スペースが制限される。
- ③ 母管管径に対して必要牽引力が 30Kgf と大きいため、牽引力発生機構の構成が困難である。
- ④ 母管管径に対して枝管管径が 50A と比較的大きいため、移動機構の凹部対策が必要である。

上記課題を踏まえて、①尺取虫方式、②車輪方式、③巻取り方式の 3 方式について比較検討を行った。その結果を、Table3.4 に示すとともに、以下に検討結果を示す。

- ・巻取り方式については、アンカ一点まで走行する牽引台車の動力、制御ケーブルが母管内を通過するためヘッドの断面積の大幅な小型化が必要であり、ステンレス製配管を加工するために必要となる 1kW の YAG レーザーを導光するためにはレンズ直径が 20mm 程度は必要となることから、現状の光学系を構成することは困難である。
- ・車輪方式については、走行速度が速くスムーズな走行が期待できるが、配管断面積の制約から車輪径を大きく確保できない。このため、枝管部の脱輪回避機構が必須であるが、スペースの制約上搭載が困難となる。
- ・尺取虫方式については、断続移動となり、平均移動速度等の問題があるが、構造がシンプルで信頼性が高い。他の方式と比較して一番実現性が高いと判断される。

以上の結果から、尺取虫方式で設計を進めるものとした。なお、尺取虫方式以外で有効な移動手段であると判断される車輪方式については、車輪個数、脱輪に関して、次節にて検討結果を述べる。

ところで、溶接・切断加工ヘッドは YAG レーザーによる溶接・切断方式となるため、移動機構との取り合いについてはその方式の特徴上、加工ヘッド部にレンズとミラーの設置が必要である。Fig.3.8 に示すように、加工ヘッド部にはレーザー光を伝送する光ファイバの接続と、溶接・切断時にはアシストガスの供給が必要となる。さらに、肉厚 3mm 程度のステンレス配管を加工するためには、YAG レーザー出力が 1kW 程度必要となることが予想されるため、光ファイバ内を伝送されたレーザー光は、一旦、レンズ系で広げ、さらに加工点上に絞り込む必要がある。このため、光学レンズはレーザー光による熱集中を緩和するという観点から、直径 20mm 程度は必要となる。これらの光学系部品から構成される加工ヘッド部の占有スペースは作業対象となる母管内径スペースと比較して極めて大きくなることが予想される。ここで、移動機構を加工ヘッド部の前方に配置するためには、移動機構用ケーブル類は加工ヘッド部を通過しなければならない。加工ヘッド部にはそのようなスペースを確保することは困難であるため、移動機構は加工ヘッドの後方に配置し、配管内走行時は加工ヘッドを移動機構で後押しするように走行する構成とした。なお、加工ヘッドの詳細については後述する。

Table 3.4 Comparison of the traveling mechanism for the YAG laser welding/cutting head

	尺取虫方式	車輪走行方式	巻取り方式
牽引力	○	△	○
	構造的に設置反力発生が容易で比較的大きな牽引力が出せる	1台では牽引力不足のため複数の走行台車の連結が必要となる	アンカー点で引張るため大きな張力を発生可能である
走行速度	×	○	△
	断続移動のため遅い	連続移動なので尺取虫方式より速い。台車を複数台連結し、出力増加によりさらに速く走行可能である	ヘッドの巻き取りは速いが、牽引台車の管路末端までの自走を含めると車輪式より遅い
加工ヘッドの構造	○	○	××
	特に考慮する必要はない	特に考慮する必要はない	牽引力の動力、制御ケーブルが母管内を通過するため、ヘッド断面積の大幅な小型化が必要となる
枝管部の通過	○	××	△
	脚面積が大きく、かつ、転がり動作がないため問題ない	脱輪の可能性がある	ヘッドは問題なし。牽引台車は尺取虫方式にしないと脱輪の可能性がある
曲率部の通過	○	△	△
	特に問題ない	台車が長くなるため通過可能な曲げ半径はやや大きくなる	ヘッドが牽引台車ケーブルと干渉し、引っ掛かる恐れがある
垂直管、傾斜管通過	△	×	×
	台車間のフレキシブルチューブの伸縮により、移動量がやや不安定になるため、枝管部での位置制御がやや複雑である	台車連結では上りはトルクの不均一により走行不安定になりやすい。降りでは、ケーブル線出量との協調御が必要である	降りでは、ヘッド移動は牽引ではなく、ケーブル繰り出しで制御が必要。牽引台車も車輪式とワイヤ繰り出しとの協調制御が必要である
レスキュー	○	△	×
	ケーブル巻取りで回収可能である	ケーブル巻取りで回収可能であるが、大きな巻取り力が必要である	アンカー状態での故障では回収困難であるため、特別な対策が必要となる
総合評価	○	×	×
	速度の問題はあるが、移動機構に依存した加工ヘッドの構造変更は必要なく、実現性が高い。また、構造がシンプルで信頼性も高い	実現のためには脱輪回避機能が必須であるが、スペース制約上、設置は非常に困難である	加工ヘッド内の光学系の大きさと形状を考慮する必要があるが、レーザー出力の関係上、光学系を小型化することは困難である

○ : 良好、大きな問題なし

× : 難あり、解決困難な問題あり

△ : やや難あり、やや難しい問題あり

×× : 致命的な問題あり

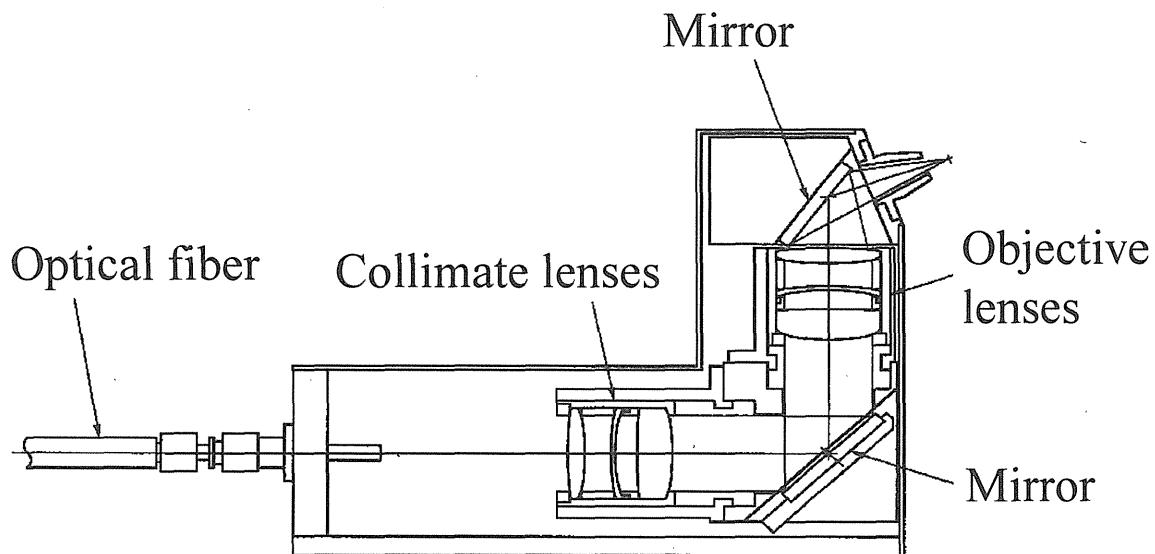


Fig.3.8 Schematic view of an optical system in processing head

### 3.2.1.4 車輪方式による移動の検討

本節では、車輪方式による配管内移動機構を検討する。まず、配管内スペースを考慮し、車輪の幅(有効面長さ)と車輪の外径を以下のように設定する。

車輪の有効面長さ(b) : 1.0cm

車輪の外径(d) : 2.5cm

車輪を熱硬化性ポリウレタン材とし、車輪にかけられる最大荷重を算出する。

最大圧縮応力(Pmax) : 6860N/cm<sup>2</sup>(構造上の安全率を考慮)

ウレタン材の弾性率(E1) :  $6.86 \times 10^5$ N/cm<sup>2</sup>

と、すると、車輪にかかる全荷重(P)はヘルツの式より以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 P &= (P_{\max}/0.59)^2 b \cdot d \cdot 1/2 \cdot E_1 \\
 &= (6860/0.59)^2 \times 1 \times 2.5 \times 1/2 \times 6.86 \times 10^5 \\
 &= 246.3 \text{ N} \\
 &= 25.1 \text{ Kgf}
 \end{aligned}$$

ところで、配管壁と車輪の摩擦係数を0.3と仮定すると、30Kgfの牽引力を得るための駆動車輪に必要な押し付け力は $30\text{Kgf}/0.3=100\text{Kgf}$ となる。車輪1個の許容押し付け力(P)は25.1Kgfのため、駆動車輪の設置に必要な個数は、 $100/25.1=3.99$ 個となる。以上の結果から、駆動車輪の設置はスペースの都合上、走行台車1台に対して2個取り付けるものとして走行台車は2台必要になる。

プランケット配管内を走行する上で、考慮しなければならないこととして、車輪の脱輪回避問題がある。この問題を検討するため、以下の検討を行った。

配管製作上の公差（JIS 公差）を考慮するとき、100A 配管の最大内径は 104.943mm、最小内径は 99.657mm である。その差は 7.943mm である。また、曲がり部の扁平率を考慮した内径は 97mm である。その他、考慮すべき寸法を下記にまとめる。

- |                    |                       |
|--------------------|-----------------------|
| 1) 母管公差(JIS) 最大内径  | : 104.943mm           |
| 母管公差(JIS) 最小内径     | : 99.657mm            |
| 上記の差               | : 7.943mm             |
| 2) 扁平率を考慮した曲がり管部内径 | : 97mm                |
| 3) 母管溶接開先加工代       | : 1.0mm               |
| 4) 車輪軸引側余裕寸法       | : 2.0mm               |
| 5) 車輪軸出側余裕寸法       | : 4.0m (ウレタンのつぶれ代を含む) |

上記 1)～5)を合計すると 14.943mm となる。つまり、車輪軸の伸縮代は直径 15mm 以上必要となる。次に、脱輪時を考慮するとき、Fig.3.9 のような状態を考える。この状態において、他の走行台車の走行力により枝管から車輪が抜け出そうとする力を  $F_1$  とすると、

$$F_1 = F \times 1/\tan\theta = 30 \times 1/\tan(87.7) = 1.2 \text{ Kgf}$$

駆動車輪回転力により、車輪が枝管より抜け出そうとする力  $F_2$  は、

$$F_2 = F \times 1/\sin\theta \times \mu \times \sin\theta = F \times \mu = 30 \times 0.3 = 9 \text{ Kgf}$$

車輪が枝管より抜け出そうとする力に対して反抗する力(反対側車輪押し付け力)は以下のようになる。

$$F_3 = 25.1 \text{ Kgf}$$

自力で枝管から抜け出すためには、 $F_3 < F_1 + F_2$  であることが必要なため、上記の場合、満足できない。従って、駆動車輪、アイドル車輪の全てに伸縮機構あるいは枝管回避機構を設けないと走行できないことが明らかとなった。この枝管回避機構を移動機構内に設置することはかなり困難であると判断される。このため、本件にて検討している環境条件下での配管内移動方式として、車輪方式は採用しないこととした。

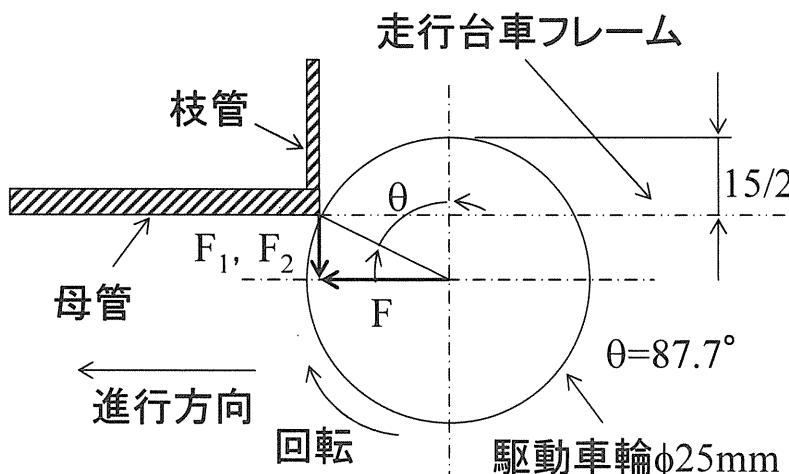


Fig.3.9 Wheel rotation model

### 3.2.1.5 尺取虫方式による移動の検討

本節では、尺取虫方式による配管内移動機構を検討する。尺取虫方式で最もシンプルな機構の構成は走行時の反力を受けるための支持脚 2 対と、進行方向に複数動作するスライド軸を有する構成と考えられる。この構成における動作手順は、以下のようになる。

- ① スライド軸従動側に設置された 1 対の支持脚を張り出して管壁に押し付けた状態でスライド軸を縮ませる方向に動作させる。 ..... 機構本体前進
- ② スライド軸駆動側に設置されたもう 1 対の支持脚を張り出し、管壁に押し付けてスライド軸従動側の支持脚を引き込む。
- ③ スライド軸を伸びる方向に動作させる。 ..... 機構本体停止
- ④ スライド軸従動側の支持脚を張り出し、スライド軸駆動側の支持脚を引き込む。

以上の動作を順次繰り返して移動を行う。基本的には、上記の構成で走行可能であるが、平均移動速度の観点から、③でのスライド軸を伸びる方向に動作させる時間は、機構本体は停止状態である。すなわち、ロスタイムとなる。本システムではこのロスタイムをなくすように、スライド軸とスライド軸の従動側に設置した 1 対の支持脚を有する移動機構 2 台をペアで使用する構成とした。これらのこと考慮した動作手順は以下の通りとなる。また、動作手順を Fig.3.10 に示す。

- ① 初期状態 : A,B 両移動機構スライド軸を伸び方向に、また、支持脚を引き込んでおく。
- ② A 移動機構の支持脚を張り出す。
- ③ A 移動機構のスライド軸を縮み方向に動作させる。 ..... 移動機構前進
- ④ B 移動機構の支持脚を張り出す。
- ⑤ A 移動機構の支持脚を引き込む。
- ⑥ B 移動機構のスライド軸を縮み方向に動作させる。同時に、A 移動機構のスライド軸を伸び方向に動作させる。 ..... 移動機構前進
- ⑦ A 移動機構の支持脚を張り出す。
- ⑧ B 移動機構の支持脚を引き込む。

以上の動作を順次繰り返して移動を行う。このように、一方の移動機構が前進中に他方の移動機構を前進可能なように移動準備をしておくことで、ロスタイムを軽減させ、移動を円滑に行うことが可能ないように構成する。

移動速度については、配管末端までの長さ 30m の移動時間を 30 分程度と想定し、1m/min 程度と ITER での保守シナリオは提案されている。移動機構の牽引力を 30Kgf と想定すると、5W 程度の動力が必要であり、機械効率及び余裕を考慮すると駆動源のモータ容量は 20W 程度が望ましい。しかし、20W のモータでは外径が  $\phi 30 \sim \phi 35\text{mm}$  程度となってしまい、狭隘な配管内での機器構成が困難である。そこで、小容量のモータを複数個使用することで駆動力を確保することにした。その結果、モータの容量を 2.7W クラス(外径 :  $\phi 10$ )と仮定して、直径 97mm のロボット内に 4 台搭載することが限度であると考える。このため、移動速度は 0.5m/min 程度と ITER での要求とは異なってしまうが、やむをえないと考える。以上の検討を基にした移動機構の詳細な設計については次節以降に述べる。

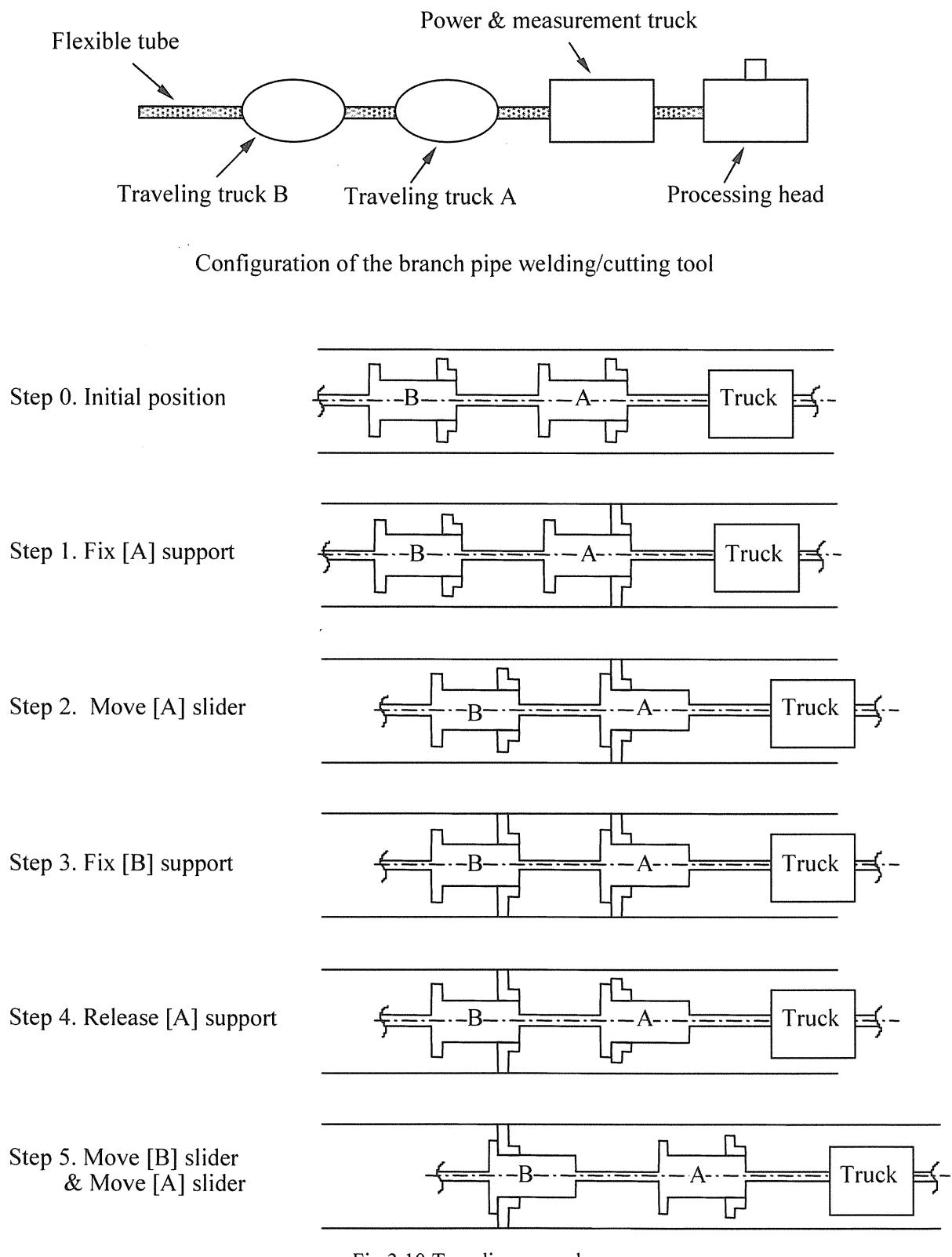


Fig.3.10 Traveling procedure

### 3.2.1.6 移動機構の詳細設計

前節までの検討結果を基に、配管内移動機構の設計を行った。本節では、尺取虫方式の移動機構について、その構造と機器仕様を説明する。

設計した移動機構を Fig.3.11 に示す。移動機構は A 及び B の 2 台から構成され、その内部構造は同一である。台車間はフレキシブルチューブを介して接続する。また、移動距離を測定するため、距離測定台車を連結している。

移動機構 A 及び B についての詳細を Fig.3.12 に示す。移動機構には、スライド軸と支持脚の 2 つの軸を使用して、前進・後進を行う。スライド軸の動作範囲は 60mm、動作速度 21mm/sec を想定し、駆動機構の構成を以下のように決定した。

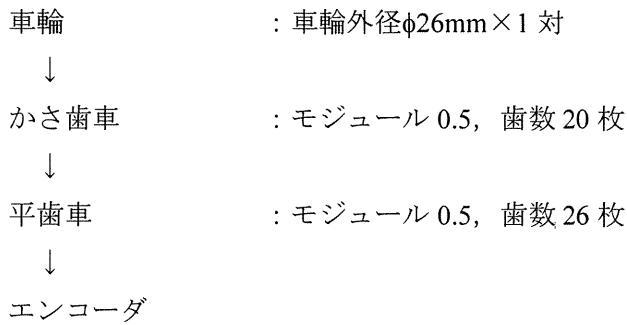
スライド動作範囲	: 60mm
スライド動作速度	: 21mm/sec
駆動構成	
DC モータ	: 2.77W × 4 台
↓	
減速機	: 減速比 1/3.71 × 4 台
↓	
ボールネジ	: ネジ径 4mm, リード 1mm × 4 台
↓	
スライド方向の負荷	: 出力 30Kgf

同様にして、支持脚の構成を以下のようにした。

支持脚動作範囲	: 8mm
支持脚動作速度	: 8mm/sec
駆動構成	
DC モータ	: 2.77W × 2 台
↓	
減速機	: 減速比 1/14 × 2 台
↓	
ボールネジ	: ネジ径 4mm, リード 1mm × 2 台
↓	
支持脚の負荷	: 出力 32Kgf

配管内を移動した距離を測定するために、距離測定台車を連結し、台車本体に走行距離計測センサを搭載することとした。走行距離センサは、車輪に接続したエンコーダにより走行距離を測定する。スプリングにより台車の外面より突き出した車輪を走行によって管壁と台車間に生じる相対的な動きを摩擦力によって回転させるため、滑りが生じる可能性がある。また、曲がり管部では車輪の接触位置によって距離が変化することが予想されるため、誤差が生じて高い精度を期待できない。このため、加工ヘッド側に枝管検知センサを搭載し、移動距離の補正を行いながら使用することにした。Fig.3.13 に計測台車の詳細を示す。台車内部には走行距離検知センサ、加工

ヘッド操作用電磁弁、加工ヘッド用支持脚に使用するエアシリンダ等を搭載する。以下に距離測定台車の構成を示す。



以上、設計した移動機構を使用してロボットの移動を行うが、配管内を走行する際には配管外部からのケーブルの処理についても考慮する必要がある。ケーブル処理の方法は、ドラムの巻取り、8の字積み重ね等の方法が一般に用いられる。8の字積み重ね方法は、実機でのスペース、運用条件を考慮すると不適当である。一方、ドラム巻取りによるケーブルの巻取り方法は、多回転の巻取りとなるため、ドラム側とケーブル処理装置の取り出し側とのケーブルのねじれ防止対策が必要である。通常、スリップリング、スイベルジョイント、余巻き方法等によってねじれのないようにする。実機製作時には、これらを反映して製作する必要がある。本研究では、試作品のため、ケーブル長は15m程度とし、ケーブル巻取りにはDCモータを使用し、移動機構の走行速度に追従してケーブルの送り出しを行うこととした。追従は、ケーブルの弛み量をセンサで検知し、弛み量を一定にしながらケーブルを送り出す構造とした。

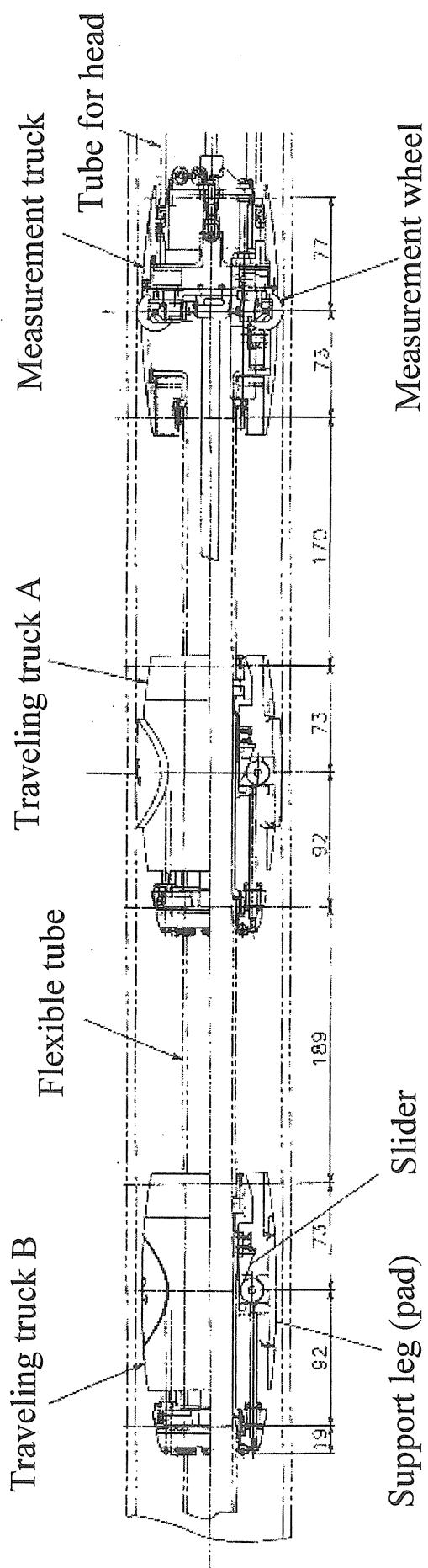


Fig. 3.11 Overview of the traveling mechanism

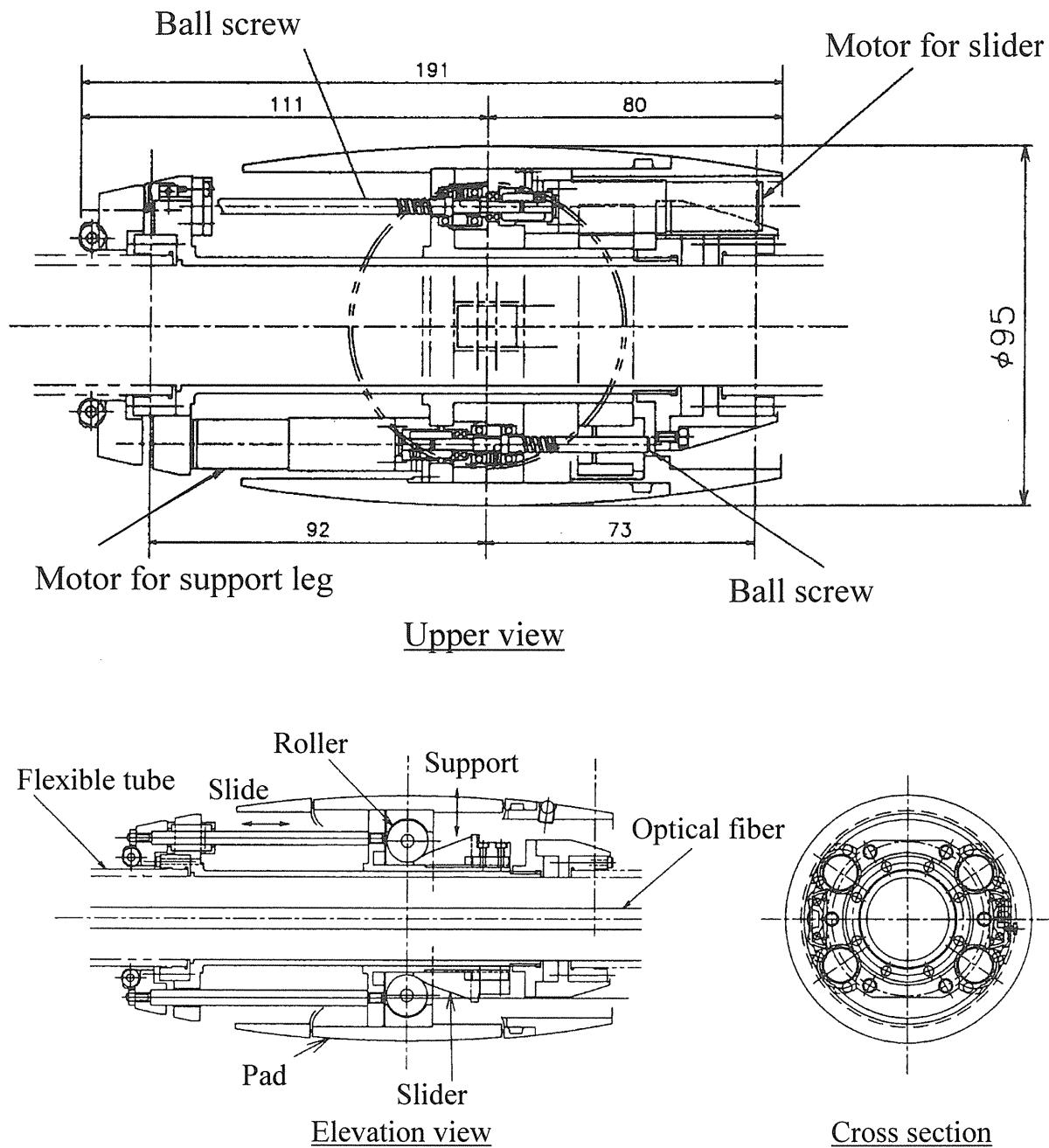


Fig.3.12 Detail design of traveling mechanism

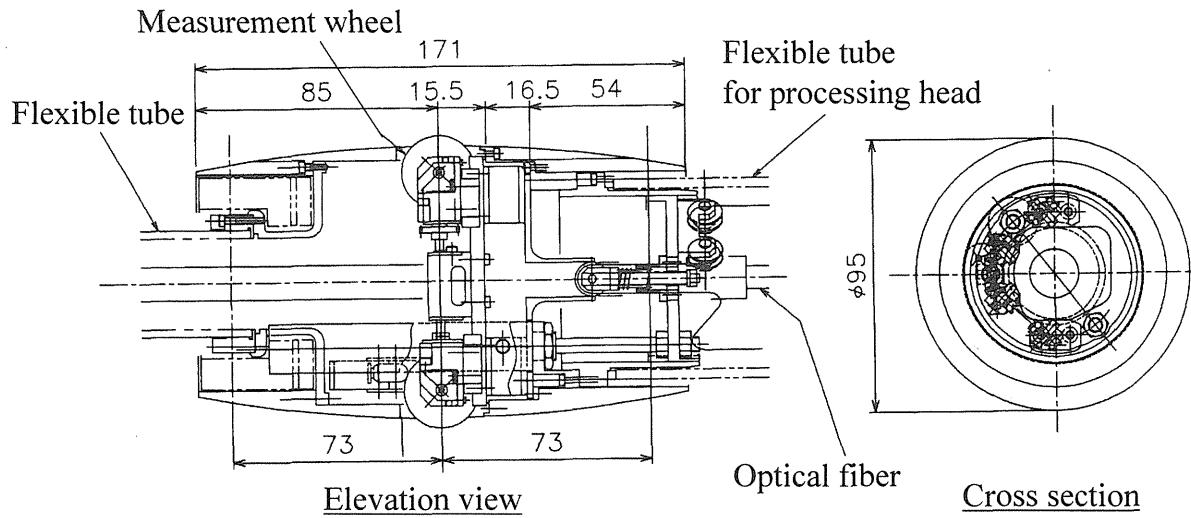


Fig.3.13 Detail design of measurement mechanism

### 3.2.2 枝管溶接・切断ロボットの加工ヘッド

#### 3.2.2.1 光学系の設計

狭隘な配管内を移動し、目的の枝管位置にて YAG レーザーによる溶接・切断を行うためには、レーザー光を加工点上に集中させるための光学系が重要である。本研究での対象となる配管肉厚は 3mm 程度であるため、溶接・切断時には、これまでの経験上から Pulse Wave (PW) で 1kW 程度のレーザーパワーが必要となる[51]。このパワーを伝送するためには、レーザー発振器の性能にも依存するが、現存する YAG レーザー発振器の仕様から、光ファイバの直径は 0.5mm 程度以上が望ましい。今回、加工実験で使用するレーザー発振器でのレーザー伝送に要求される性能として、ファイバの直径は 0.6mm 程度以上必要であった。また、レーザーの熱集中性能及びファイバの可撓性を考慮して、ファイバの直径を 0.6mm とした。ところで、今回使用するレーザー導光用ファイバの N.A は 0.2 である。このため、ファイバから発射されるレーザー光は、そのままの状態では広がってしまい、熱集中が行えず加工に適用できない。故に、レーザーの熱集中と溶接品質を確保するために、レンズ光学系を設置する必要がある。なお、レンズ光学系を使用したとしても、レーザーの焦点の大きさはファイバ径である  $\phi 0.6\text{mm}$  が最小となる。これらのことと鑑み、配管内の空間的な制約条件も考慮し、光学システムを Fig.3.14 に示すように設計した。光ファイバ先端から枝管内の加工点までのレーザー光路全体の長さは 208.5mm である。また、これを基に設計した加工ヘッドを Fig.3.15 に示す。

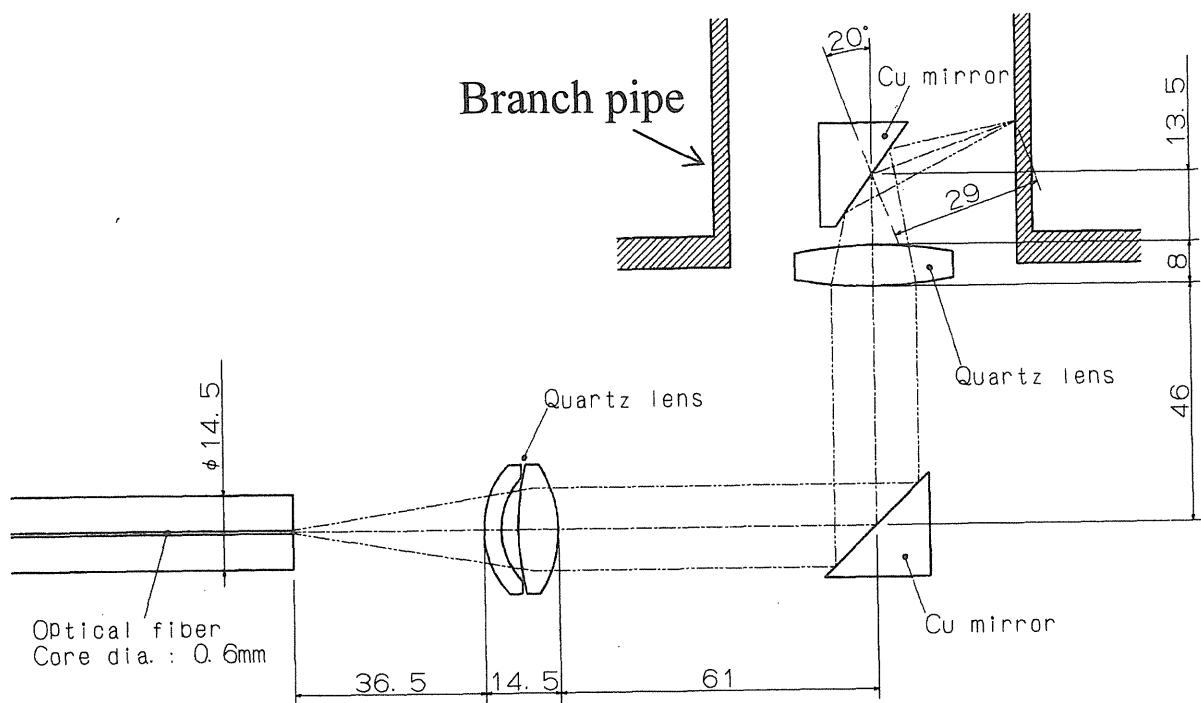


Fig.3.14 Schematic view of an optical system in the branch pipe

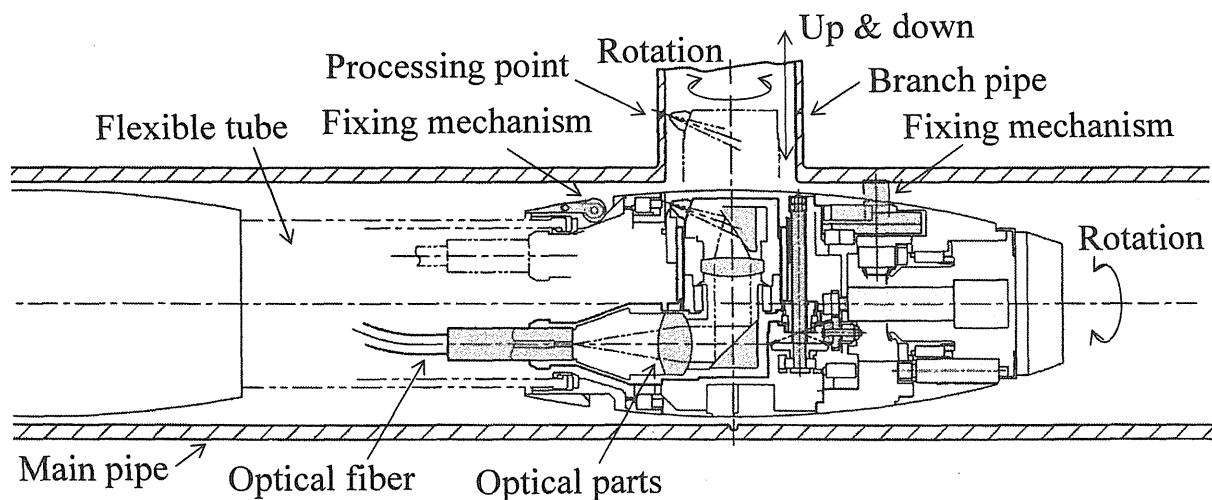


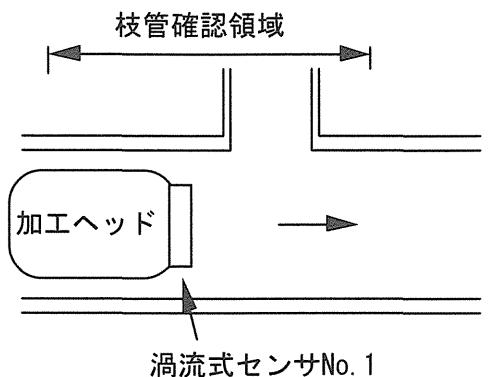
Fig.3.15 Detail design of a processing head

レーザー導光加工ヘッド内には、直径 0.6mm の純粋石英製の光ファイバ、直径 20mm のレーザー導光用純粋石英製レンズ及びレーザー反射用無酸素銅(OFHC)を使用する。レンズの大きさは、1kW のレーザー導光時にレンズを空冷するために必要となる最低限の大きさであり、これ以上小さくする場合には、水冷式の冷却システムを必要とする。システムの簡便性と実現性を考慮し、空冷式の冷却システムとするため、レンズ及びミラーの端部を切り欠いておき、加工時に必要となるアシストガスをファイバと同軸で導入し、レンズ及びミラーの切り欠きを通って、加工点上に吹き付ける構造を考案した。これによって、アシストガスとレンズ及びミラーの冷却を兼用することにした。また、所定のレーザーパワー及び焦点位置決め精度を得るために、ファイバ及びレンズ・ミラー間の相対位置が非常に重要である。このため、あえて微調整が可能なレンズ及びミラー固定方法とせず、ファイバとレンズ・ミラー光学系は一体型の構造とすることで、正確なレーザー導光を実現することとした。

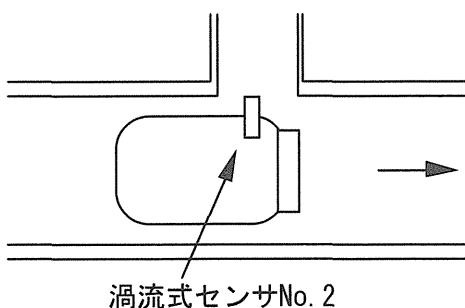
### 3.2.2.2 配管内での位置決め

枝管内で溶接・切断を行い、その品質を確保するためには、配管内での正確な位置決めを行う必要がある。このため、母管軸方向の微動、母管内での回転、枝管への伸縮、枝管内での回転の 4 つの動作が必要になる。これらの位置決め機構を利用し、加工ヘッドを母管内に正確に固定するための位置決め手順を考案した。Fig.3.16 に配管内の位置決め手順を示す。この一連の手順によって、配管内の任意の枝管に加工ヘッドを固定することにした。

## Step 1 母管内移動及び枝管検知



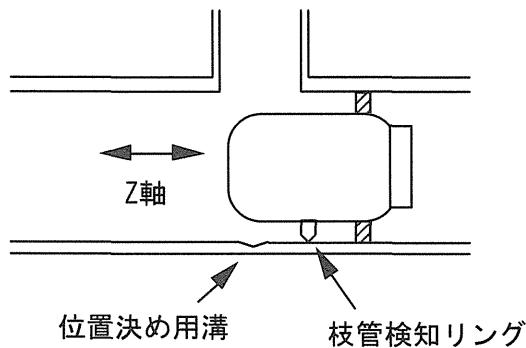
## Step 2 枝管開口部の検知



- 概略の位置はケーブルの送り出しから算出
- 渦流式センサの値が変化するところを探す

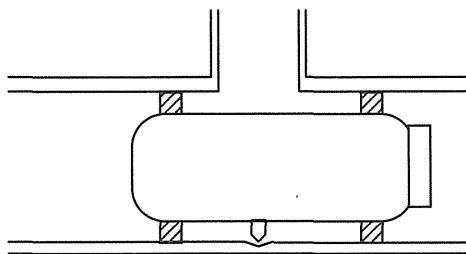
- 渦流式センサのピーク値が下降する点から、No. 2のセンサが枝管に入る距離だけ台車の移動

## Step 3 台車を配管内に固定（その1）



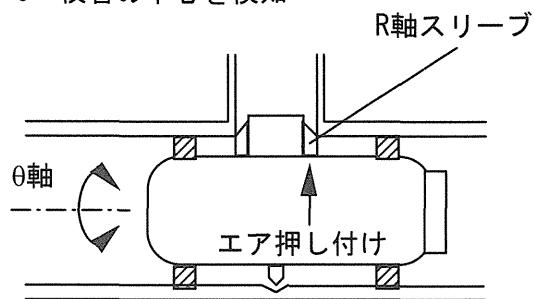
- 先端部の4点式固定ピンにより台車を固定
- リングを張り出し、Z軸動作により位置決め用溝を検知

## Step 4 台車を配管内に固定（その2）



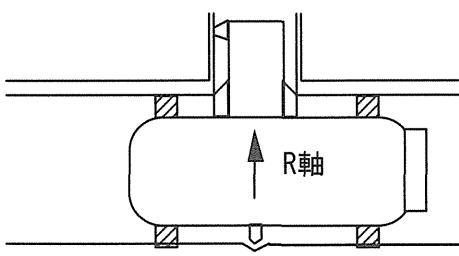
- 後部の4点式固定ピンにより台車を固定

## Step 5 枝管の中心を検知



- R軸スリーブをエアで押し付けながらθ軸を回転させ、枝管の中心を検出

## Step 6 ノズルを伸ばす



- スリーブの倣い動作にてセンタリングを行い、ノズルを伸ばす

Fig.3.16 Positioning method for a processing head

### 3.2.3 枝管溶接・切断ロボットの製作

前節までに検討した結果を基に、枝管溶接・切断ロボットを製作した。Fig.3.17 に製作したロボットの全体を示す。また、Fig.3.18 に詳細な構造を示す。ロボットは全部で 4 つの俵形状のトラックから構成されており、配管内での摩擦及び引っかかり防止を考慮している。それぞれの台車は、直径約 30mm のステンレス材のケーブル保護管を抱え込むように互いに連結されている。保護管内部には駆動及び信号線、ガス供給チューブ、光ファイバが一緒に挿入されている。また、この保護管は溶接・切断ロボットの駆動機構に不具合が生じた際に、外部からの引張力でロボットを回収するためのレスキュー用としても使用される。

第 1 台車には、配管内にロボットを固定する機構 (RF, RS 軸)、枝管位置検出機構 (Disk pin, Sleeve stopper)、加工ヘッド部を回転させる機構 ( $\theta$  軸)、加工ヘッド部を配管軸方向に微調整するための機構 (Z 軸)、伸縮型溶接・切断用ノズルを枝管内に挿入する機構 (R 軸)、溶接・切断を行うための光学系を回転させる機構 ( $\rho$  軸) が搭載されている。そして、溶接・切断時には、芯だし機構によって母管にヘッドの固定を行い、伸縮型ノズルが枝管内にアクセスし、枝管の加工を行う構造とした。

第 2 台車には、加工ヘッドを配管内に固定する機構のための駆動源と配管内を移動した距離を計測する機能を搭載している。

第 3, 4 台車は、移動用として使用する走行台車で、それぞれ対向する 2 つのパッドから構成される。この 2 台は互いに協調し、パッドを配管内壁に押し付け、配管軸方向にスライドする動作を繰り返しながら移動することが可能な尺取虫型の移動機構である。台車中央には、押し付け用のパッドが 180 度毎に 2 個設置されており、摩擦力増強のため表面には溝加工を施している。台車は互いに 90 度ずらして連結し、4 方向への押し付けを確保している。また、各台車は配管押し付け機構と軸方向スライド機構の 2 自由度をそれぞれ持つ構造とした。

配管外部から目的の枝管まで、全長 15m のケーブルを試作した。このケーブルは、直径 1200mm のドラムに 4 周分巻きつけてある。配管内をヘッドが移動するときには、ケーブルを協調して送り出すことが必要となるため、ヘッド走行時にケーブルの弛みを検知し、常に一定の弛みになるようにケーブルを送り出す機構としている。

本ロボットの主な可動軸は以下の通りとなる。

#### 1) Z 軸

- 動作方向 : 母管内における母管軸方向の微小位置決め
- 可動範囲 : 20mm
- 移動速度 : 30mm/sec
- 駆動方法 : 位置計測台車からチューブを通してエアを供給する

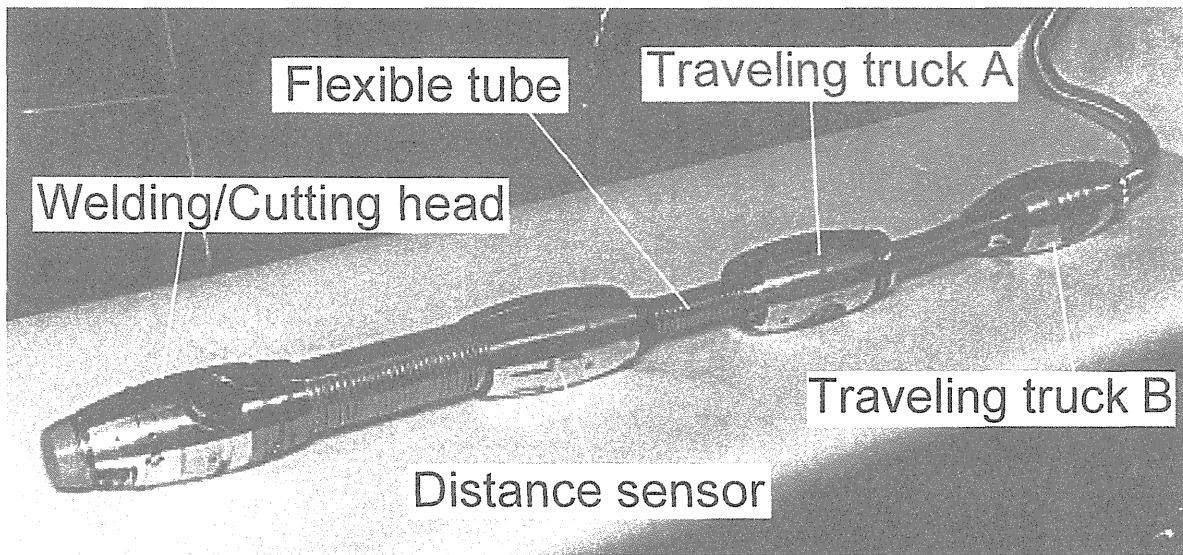
#### 2) $\theta$ 軸

- 動作方向 : 母管内でのヘッドの回転
- 可動範囲 : 360 度
- 回転速度 : 16sec/rev

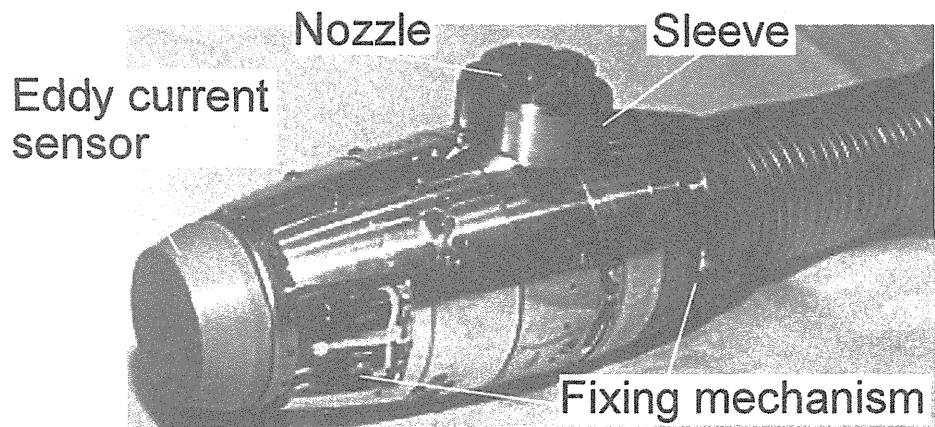
#### 3) R 軸

- 動作方向 : 枝管内挿入方向

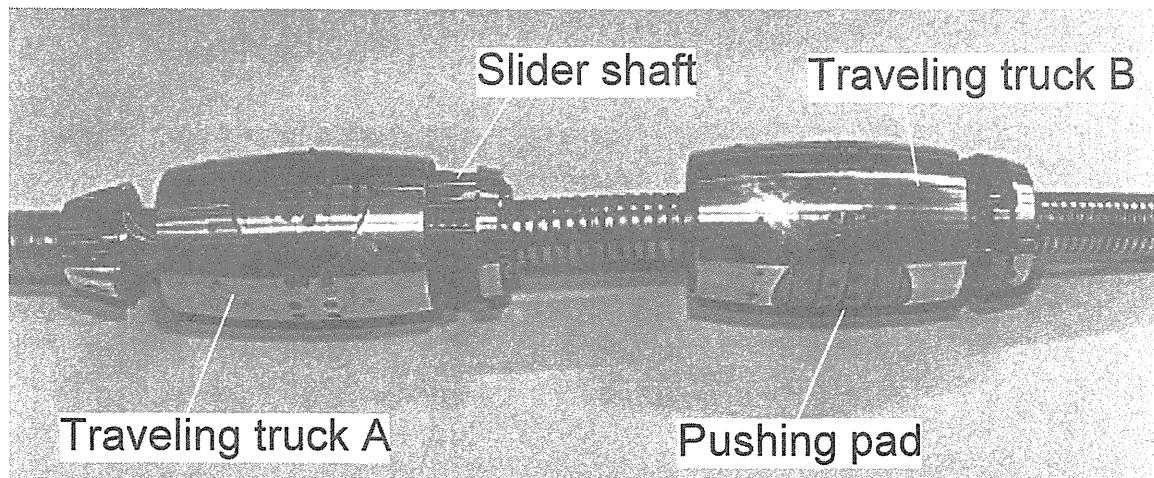
- 可動範囲 : 37mm(溶接可能範囲は枝管表面位置から 14.4mm～22.4mm の範囲)  
回転速度 : 0.3mm/sec
- 4)  $\rho$ 軸  
動作方向 : 枝管内の溶接・切断ノズルの回転  
可動範囲 : 360 度  
回転速度 : 15sec/rev
- 5) R 軸のスリーブ  
機能 : 溶接・切断ノズルを枝管内に挿入し、ノズルの最終位置決めを行う  
駆動方法 : 位置計測台車からチューブを通してエアを供給する
- 6) ディスクタイプ位置決めピン  
機能 : 母管内でのヘッドの最終位置決めを行う  
駆動方法 : 位置計測台車からチューブを通してエアを供給する
- 7) 移動機構  
動作方向 : 母管内前後方向  
牽引力 : 30Kg  
走行距離 : 4 つの曲がり部を通過し、30m 走行



(a) Over view of the internal access type welding/cutting robot for branch pipe



(b) Processing head of the welding/cutting robot for branch pipe



(c) Traveling trucks of the welding/cutting robot for branch pipe

Fig.3.17 Fabricated welding/cutting robot for branch pipe

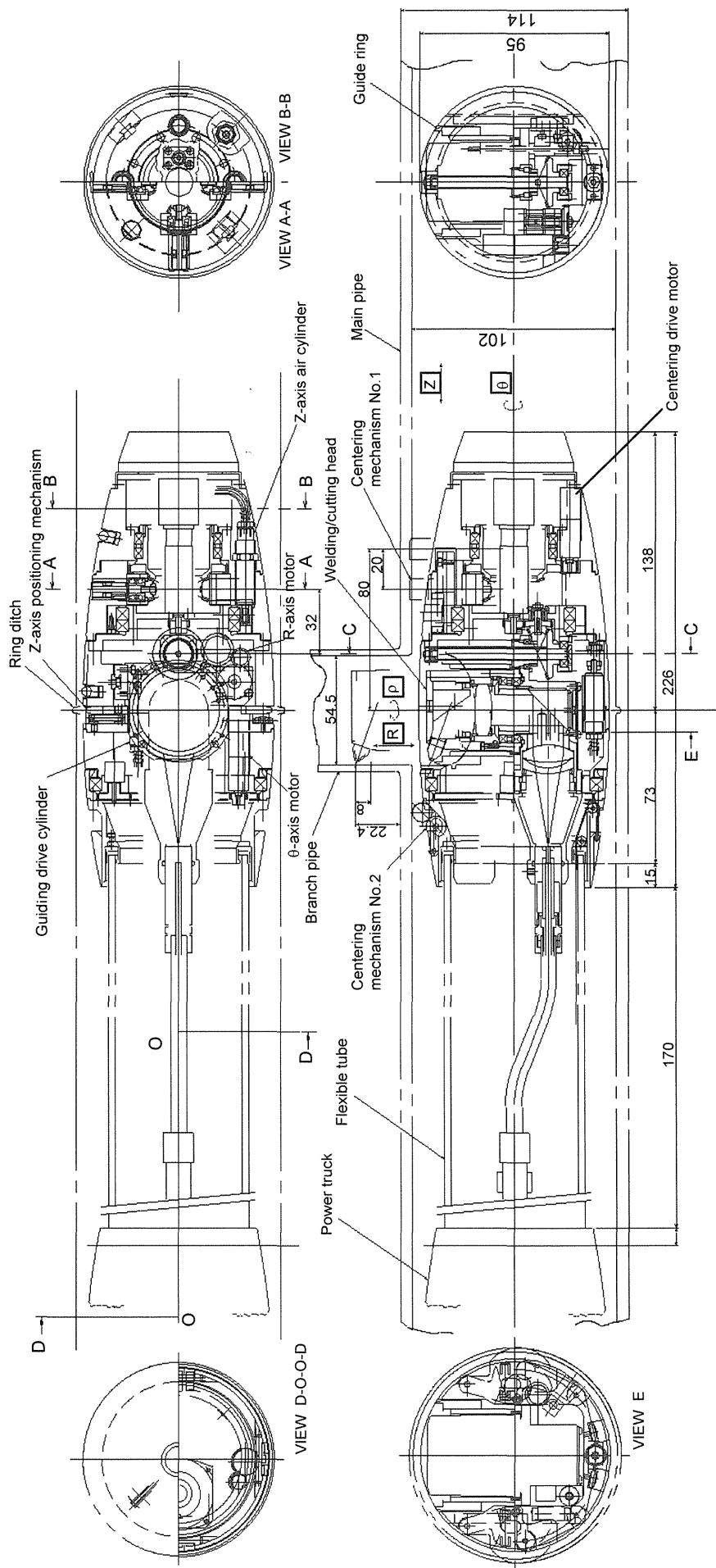


Fig.3.18 Detail of the processing head of welding/cutting robot for branch pipe

### 3.2.4 枝管溶接・切断ロボットの機械試験

#### 3.2.4.1 基礎特性試験

製作した移動機構台車を水平直管内に挿入し、ヘッド全体の位置決め精度、速度、牽引力の測定を行った。各軸動作には、汎用のロボットコントローラ(横河製 MA-1200)を使用して制御を行った。Table 3.5 に各軸の動作試験の結果を、Table 3.6 には移動機構部の動作試験結果をそれぞれ示す。

移動試験では、移動用パッドを一定回数駆動し移動台車を前・後進させた。この結果、ヘッドの移動動作とケーブル送り出しは、協調動作によってスムーズな移動が可能であることを確認した。また、枝管部を通過する際の移動台車の脱輪もなく、半径 400mm の曲管内でも問題なく移動することが確認できた。移動速度は約 0.5m/min と設計通りであったが、位置決め精度は、パッドの繰り返し押し付け回数に対して、移動量に 1 割程度の誤差が出た。これは、押し付けパッドと配管内面との摩擦力の不足によるものであると考えられる。また、同様にヘッド全体での牽引力を測定すると設計値の約 1/5 程度しか得られず、パッドの配管に対する摩擦力不足が確認された。これについては、パッドに貼り付けてある耐放射線性を考慮したポリイミド製の滑り止めゴムが硬く、滑るものと思われる。レスキュー時の引き抜き力については、全長 15 m で 4 力所の曲がり部を有する配管から約 30 Kg の力でツールを回収可能であることを確認した。

Table 3.5 Test results of each mechanism movement

Axis name	Range of movement	Movement speed	Actuator
RF (front support)	9 mm	0.20 mm/s	DC motor × 4
RS (back support)	10 mm	(20 mm/s)*	Air cylinder × 2
Z	20 mm	(20 mm/s)*	Traveling mechanism
ρ	360 °	12.9 s/rev	DC motor × 1
R	37 mm	1.27 mm/s	DC motor × 1
θ	0 ~ 360 °	14.8 sec/rev	DC motor × 1
Disk pin	6 mm	(30 mm/s)*	Air cylinder × 1
Sleeve stopper	5 mm	(30 mm/s)*	Air cylinder × 1

\* design value

Table 3.6 Test results of the traveling mechanism

Axis name	Range of movement	Movement speed	Actuator
Truck A pushing pad	8 mm	3 mm/s	DC motor × 2
Truck A sliding screw	60 mm	20 mm/s	DC motor × 4
Truck B pushing pad	8 mm	3 mm/s	DC motor × 2
Truck B sliding screw	60 mm	20 mm/s	DC motor × 4
Cable winding	4 rotation	0.5 m/min	DC motor × 1

### 3.2.4.2 配管内位置決め精度試験

枝管に対する溶接・切断の加工精度を確認するため、加工ヘッドの位置決め精度試験を行った。加工位置の最終位置精度は、以下の合計値となる。

- (1) 母管とヘッド本体の軸芯位置合せ精度
- (2) R 軸の位置決め精度
- (3)  $\rho$  軸の軸芯及び傾斜精度
- (4) レーザー光軸精度

以下にそれぞれの試験内容及び結果を述べる。

#### (1) 母管とヘッド本体の軸芯位置合せ精度試験

本試験は 2 通りの方法で実施した。それぞれについて以下に述べる。

測定①：前後の支持脚(RF 軸及び RS 軸)を張り出した状態で母管とヘッド間の隙間をギャップゲージにより測定した。Fig.3.19 に測定位置と測定値を示す。結果は最大偏差 0.15mm で  $\delta_1 = \pm 0.075\text{mm}$  であった。

測定②：ヘッド先端の枝管検知センサ部にダイヤルゲージを設置し、RS 軸は支持、RF 軸は軽く張り出した状態で枝管検知センサ部を回転させて母管とヘッド本体のズレを測定した。Fig.3.20 に測定位置と測定値を示す。結果は最大偏差 0.10mm で  $\pm 0.05\text{mm}$  であった。

#### (2) R 軸の位置決め精度

R 軸位置決め精度は目標停止位置でのバラツキを測定した。目標位置の設定はエンコーダーとし、精度測定基準位置は枝管の端部とした。測定は母管水平・垂直及びヘッド水平・垂直位置において行い、結果、偏差は 0.18mm であった。配管姿勢による優位差は見られなかった。したがって、 $\delta_2 = \pm 0.09\text{mm}$ (偏差 : 0.18/2)である。

(3)  $\rho$ 軸の軸芯及び傾斜精度

$\rho$ 軸精度については、枝管中心軸に対する $\rho$ 軸回転中心軸芯ズレ及び傾斜ズレを測定した。Fig.3.21(a)及びFig.3.21(b)にそれぞれの測定状況を示す。測定位置は0度から315度まで45度刻みでそれぞれ測定し、以下の結果を得た。

軸芯ズレの最大偏差は0.53mm,  $\delta_3 = \pm 0.265\text{mm}$  の精度である。

傾斜ズレの最大偏差は0.39mm,  $\delta_4 = \pm 0.195\text{mm}$  の精度である。

## (4) レーザー光軸精度

レーザー光軸精度は、ノズル先端のレーザー出射口からのレーザー出力位置を測定した。

ノズルの開口部は $\phi 2\text{mm}$ で、ここに罫線入りの半透明シートを貼り、模擬レーザー光を照射し、焦点位置ズレを目視にて確認した。その結果、偏差は0.1mmであった。

よって、 $\delta_5 = \pm 0.05\text{mm}$ (偏差:0.10/2)である。

以上の結果から、総合精度を求める。ここで、(2)のR軸の位置決め精度は、(1)の母管とヘッド本体の軸芯位置合せ精度を包含した精度であるため、総合精度は(2)～(4)の合計となる。従って、以下の結果を得た。

枝管径方向精度  $\delta_r = \delta_3 = \pm 0.265\text{mm}$

枝管軸方向精度  $\delta_s = \delta_2 + \delta_4 + \delta_5 = (\pm 0.09) + (\pm 0.195) + (\pm 0.05) = \pm 0.335\text{mm}$

枝管径方向精度及び軸方向精度はFig.3.22のようになり、枝管に対してレーザー光軸の枝管軸方向のズレ幅は0.67mmの範囲に入ることが明らかとなった。

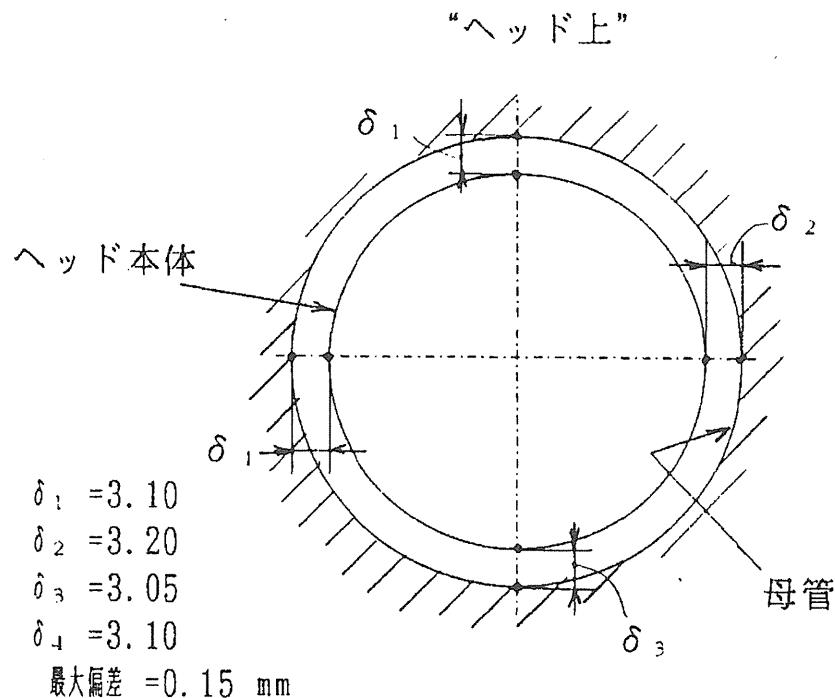


Fig.3.19 Measurement of axis-center accuracy (1)

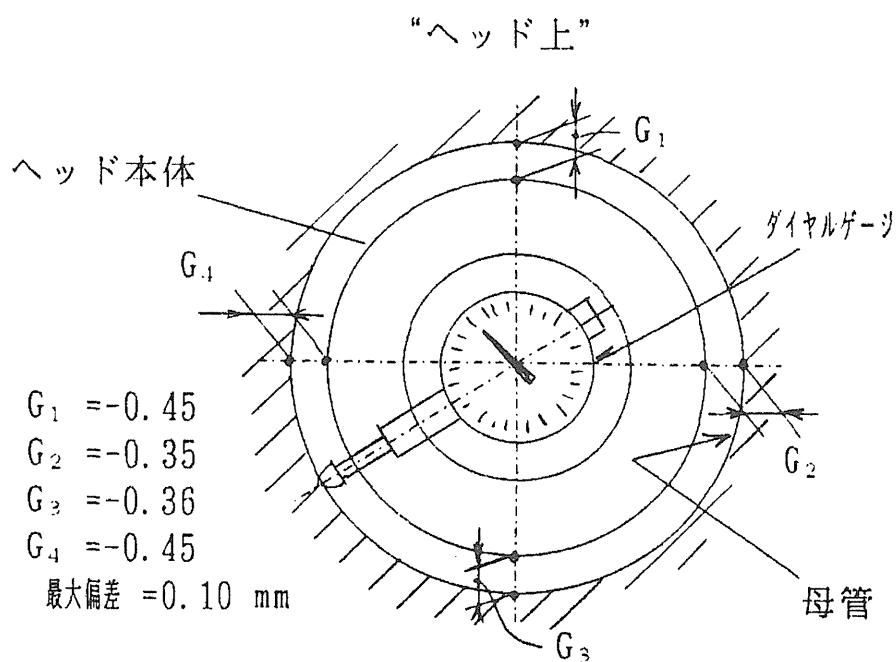
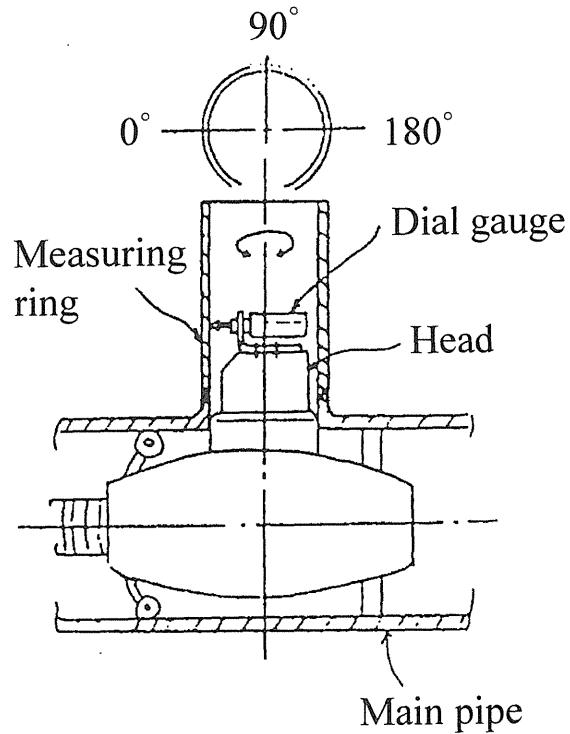
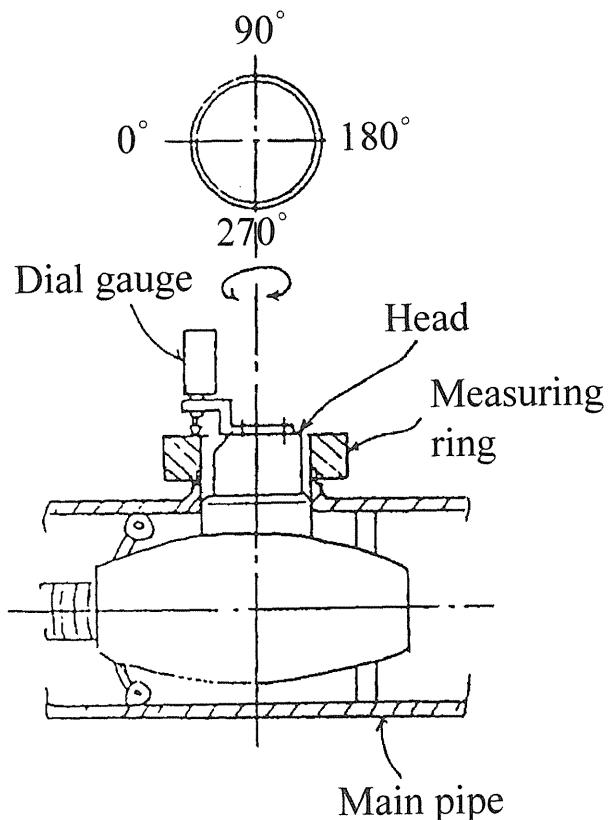


Fig.3.20 Measurement of axis-center accuracy (2)



(a) Measurement of  $\rho$ -axis center displacement



(b) Measurement of  $\rho$ -axis tilt displacement

Fig.3.21 Measurement test of  $\rho$ -axis displacement

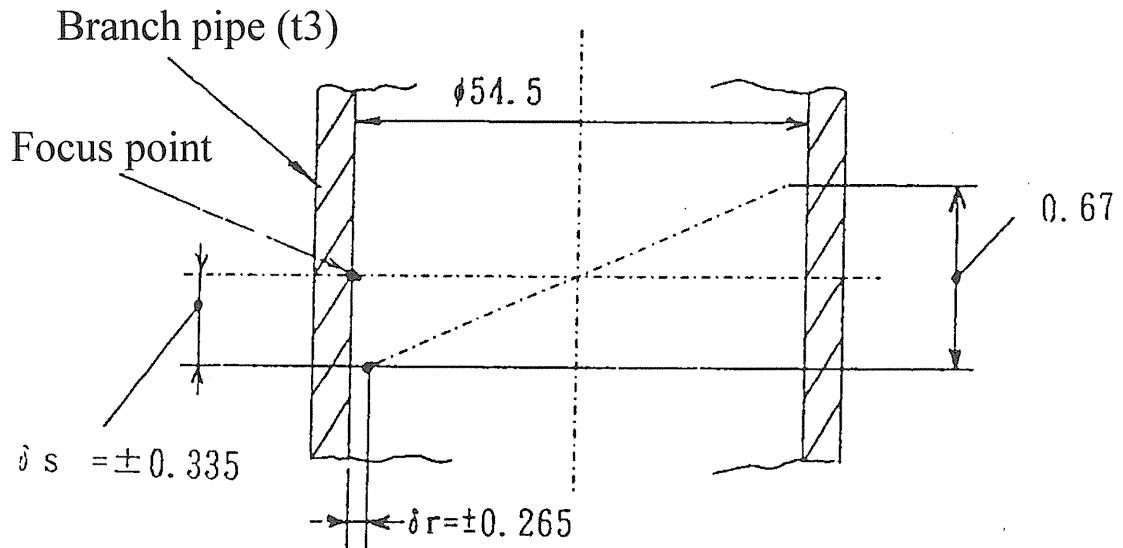


Fig.3.22 Positioning accuracy in branch pipe

### 3.2.5 枝管溶接・切断ロボットによる溶接・切断試験

製作した配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットを使用して、実際に溶接・切断が可能かどうかの試験を行った。Fig.3.23に実際の配管を模擬したモックアップ試験装置を示す。2本の曲がり管と枝管が接続された1本の直管から構成され、様々な加工姿勢を保つことができる試験装置である。実際にロボットを配管内に挿入した試験の様子をFig.3.24に示す。

本試験では、最大出力2kWのYAGレーザー発振器(LAY-659F)から出射されたレーザー光はコア径0.6mmで長さ20mの光ファイバ内を伝送され、加工ヘッド内の集光光学系により集光されて試験配管に照射される。試験配管として以下に示すような配管を使用した。

#### 試験配管

配管の材質 : SUS316L  
 (Fe=bal., Cr=16.3%, Ni=12.7%, Mo=2.1%, C=0.02%, P=0.023%,  
 S=0.001%)

#### 母管の形状

内径	: 102.3mm
肉厚	: 6mm
曲率	: 400mm

#### 枝管の形状

内径	: 54.5mm
肉厚	: 3mm

次節以降に各試験結果を記載する。

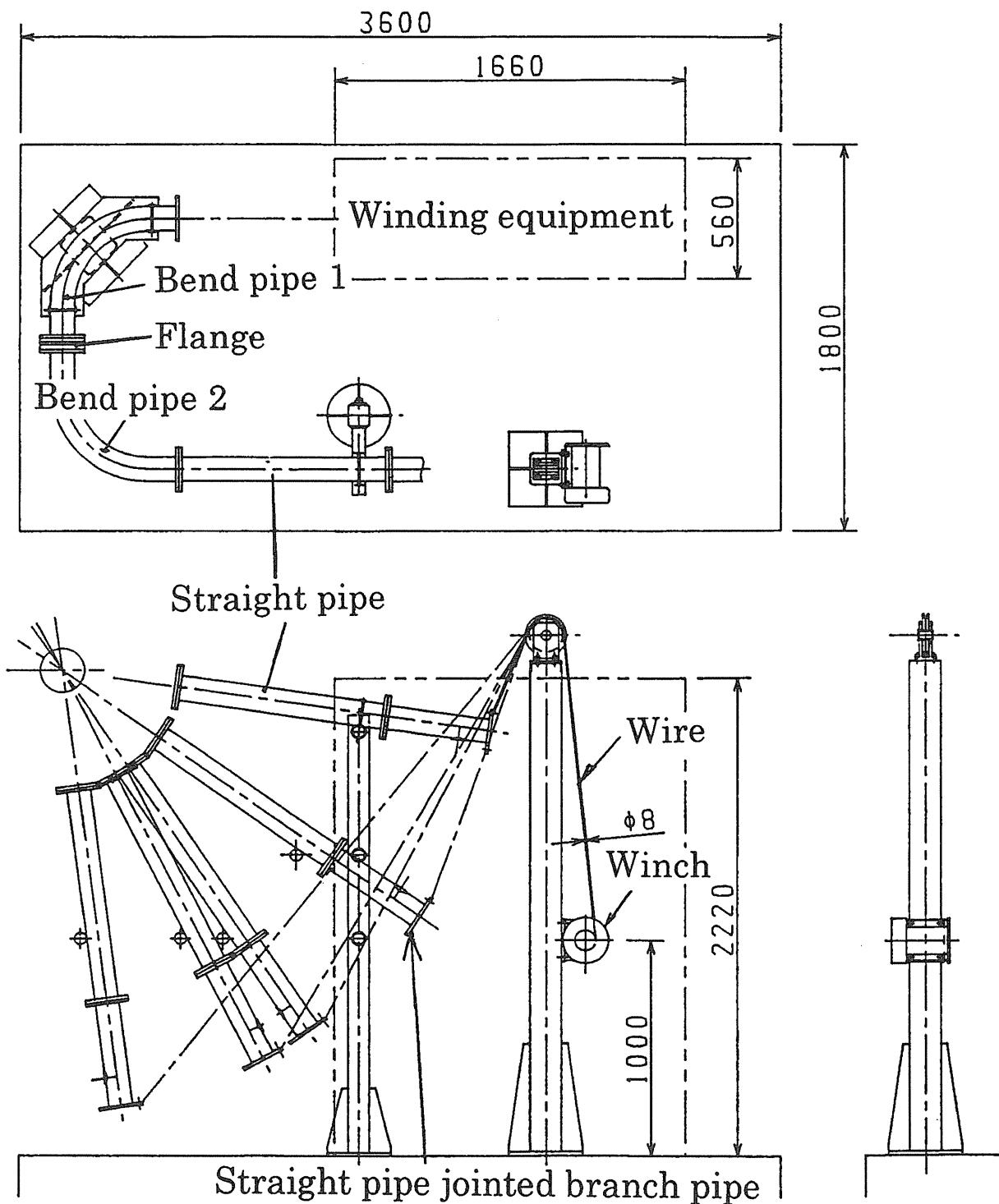
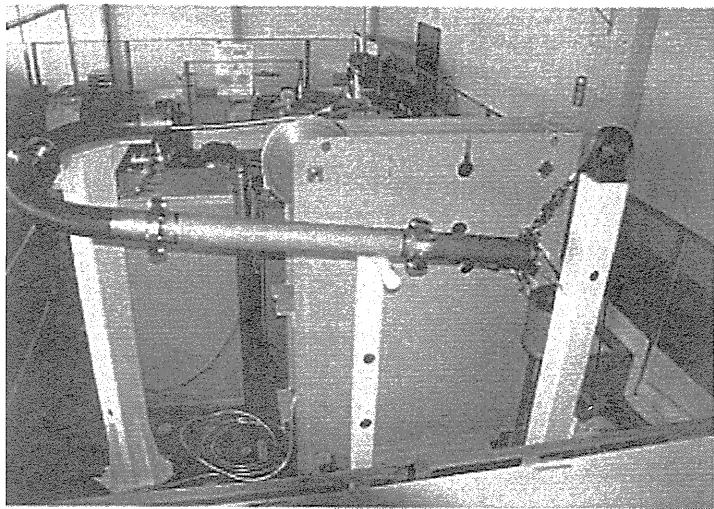
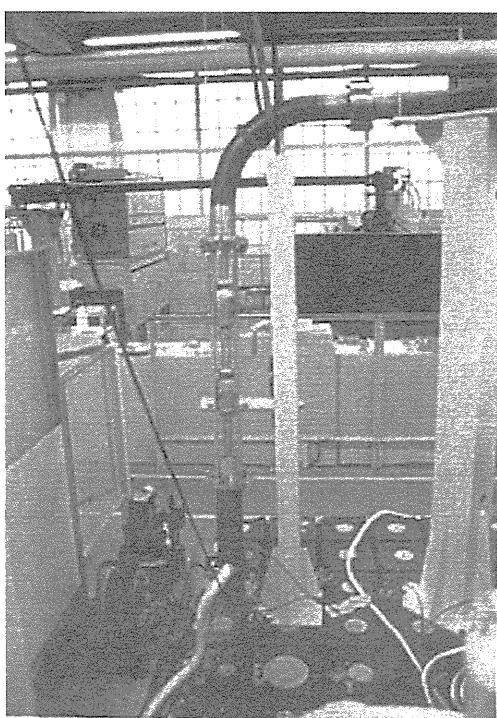


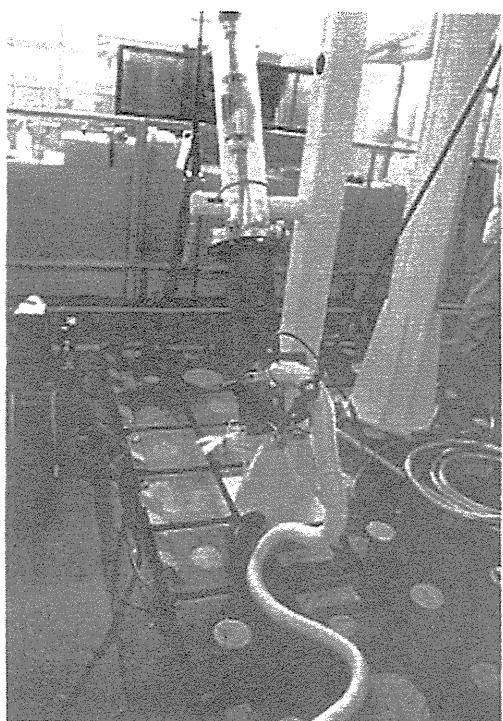
Fig.3.23 Overall of the mock-up test system



(a) Cable winding equipment for the robot and manifolds



(b) Appearance of the robot setting



(c) Mock-up view of the laser processing

Fig.3.24 Mock-up test stand

### 3.2.5.1 溶接試験

溶接試験では、レーザー出力、溶接速度、焦点はずし距離をパラメータとした基礎試験と、実際に炉内での溶接条件を模擬するために、配管ギャップをパラメータとした応用試験を行った。溶接試験後は、ビード外観検査、断面マクロ観察、放射線透過試験(RT : JISZ3104)、引っ張り試験を実施し、健全性の評価を行った。なお、ロボットは母管配管内に水平に設置して試験を行っている。

レーザー出力はこれまでの経験上、PWで900～1100W程度の出力をパラメータとした。溶接速度は、1000Wで貫通する条件0.5m/minを中心として0.4, 0.5, 0.6m/minとした。また、焦点はずし距離として、焦点近傍の余裕を見るため、-1.0, 0, +1.0, +1.5mmのように変化させて試験を行った。以下に試験に使用したパラメータを示す。なお、配管の開先形状は、配管が多少ずれても接合可能なように20度の傾斜を持っている。引っ張り試験に関しては、溶接試験後に試験配管を切り出し、Fig.3.25に示すような試験片形状に加工して行った。

レーザー出力(PW)	: 900, 1000, 1100 W
レーザー発振器の周波数	: 40Hz
効率(duty)	: 50%
溶接速度	: 0.4, 0.5, 0.6 m/min
シールドガス	: 窒素
ギャップ量	: 0, 0.5, 1.0, 1.5 mm
ワークディスタンス	: 2mm
焦点位置	: -1.0, 0, +1.0, +1.5 mm
ロボットの姿勢	: 水平位置

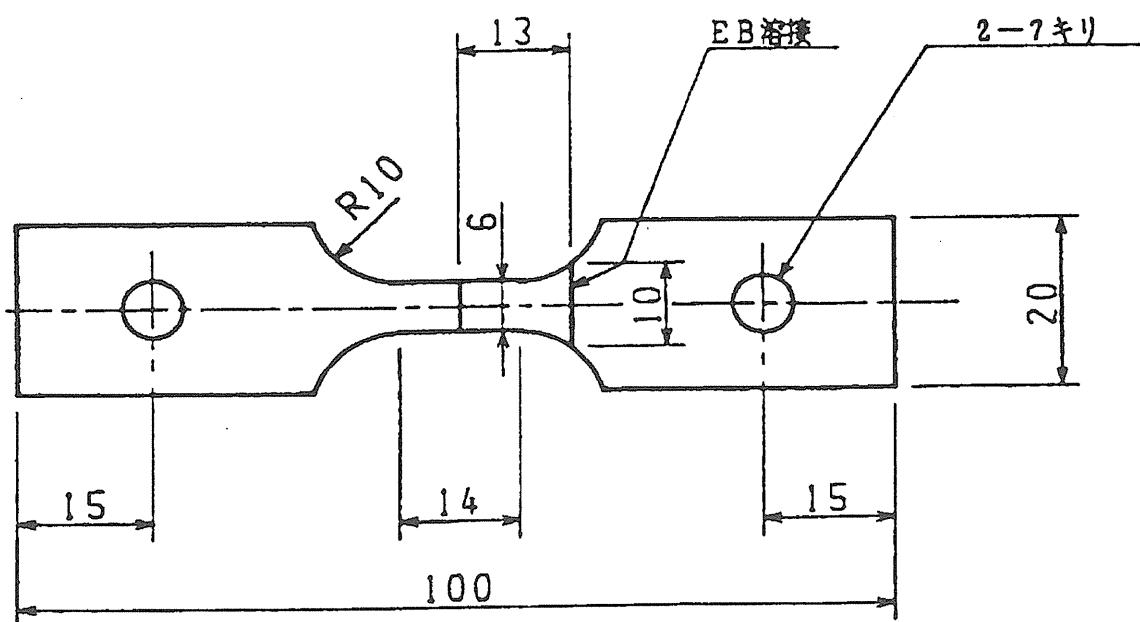


Fig.3.25 Specimen for tensile test

以下にそれぞれの試験結果を述べる。

#### (1) 焦点はずし距離の変化による溶接試験

レーザー出力を 1100W, 溶接速度を 0.5m/min, シールドガスには窒素を使用し, 焦点はずし距離を-1.0～+1.5mm まで変化させて溶接を行った。なお, マイナス方向は配管から離れる方向で, プラス方向は配管に近寄る方向とする。Fig.3.26 にビード外観及び断面マクロ試験結果を示す。どの条件においても溶接は貫通しており, 断面マクロにおいても変化はなかった。また, RTにおいても特に問題がなく, どの条件においても無欠陥であった。

引っ張り試験結果を Table3.7 に示す。焦点はずし距離が+1.5mm の場合が 549MPa となり, やや高いが, どの条件においても約 520MPa 近傍であり, -1.0～+1.5mm の範囲においては, 引っ張り強度には変化が少ないことがわかった。これによって, ノズルの位置がずれて, レーザー焦点位置が多少ずれても良好な溶接が可能であることが明らかとなった。

#### (2) レーザー出力の変化による溶接試験

溶接速度を 0.5m/min, シールドガスには窒素を使用し, レーザー出力を 900, 1000, 1100W と変化させて溶接試験を行った。Fig.3.27 にビード外観及び断面マクロ試験結果を示す。レーザー出力が 900W のときは非貫通であった。このため, RTにおいては, 900W のときには溶接部の中央に開先線が見られたが, 内部欠陥はなかった。レーザー出力が 1000 及び 1100W の時は溶接が貫通しており, RTにおいても無欠陥を確認した。

引っ張り試験結果を Table3.8 に示す。レーザー出力が 900W の場合の引っ張り強さは他の場合と比較して約 20～30MPa ほど小さく, 500MPa 程度であった。これによって, レーザー出力は 1000 または 1100W 程度が良いという結果を得た。

#### (3) 加工速度の変化による溶接試験

レーザー出力を 1000W, シールドガスには窒素を使用し, 溶接速度を 0.4, 0.5, 0.6m/min と変化させて試験を行った。Fig.3.28 にビード外観及び断面マクロ試験結果を示す。溶接速度 0.4, 0.5m/min においては十分に貫通していることがわかるが, 0.6m/min では貫通できなかった。内面のビードは速度変化による差はなく, 酸化は見られなかった。RTにおいては, どの条件においても無欠陥であった。

引っ張り試験結果を Table3.9 に示す。どの条件においても 520Mpa, 521Mpa, 529Mpa と似通った値であり, 特に問題は見られなかった。これによって, レーザーが貫通することを考慮し, 溶接速度は 0.4 または 0.5m/min が良いという結果を得た。

#### (4) ギャップ溶接試験

ITER 炉内にプランケットを設置するとき, プランケットに付属する枝管と, プランケット後壁との接続時, ギャップ 0 で正確に接続することは困難であると考える。よって, 枝管接続時にどの程度までのギャップであれば枝管接続可能かどうかの見極めを行うため, 枝管の開先をずらした状態, すなわちギャップを含んだ場合の溶接試験を行った。ギャップは, 枝管の肉厚(3mm)と

レーザーの焦点能力( $\phi 0.6\text{mm}$ )を考慮すると、あまり大きな値は設定できない。このため、0, 0.5, 1.0, 1.5mm ずつ開先に沿ってずらした状態で溶接試験を行うこととした。溶接条件としては、レーザー出力 1100W, 溶接速度 0.5m/min とし、シールドガスには窒素を使用した。溶接後は、ビード外観、断面マクロ、RT、引っ張り試験をそれぞれ行い、その健全性を評価した。

Fig.3.29～3.32 にギャップ 0～1.5mm での断面マクロ試験結果を示す。マクロ観察は上下左右の4断面について実施した。ギャップが 0mm の場合は上下左右で似たような形状であるが、下側のビード断面は他のビードと比較し、若干盛り上がり部分が大きいことがわかる。ギャップが 0.5mm の場合も左右の断面はほとんどズレが生じていないため、ギャップが 0mm の場合と類似した形状となっている。しかし、上側には多少のアンダーカットが生じていることがわかる。ギャップが 1.0 及び 1.5mm の場合も上側の断面にアンダーカットが見られる。また、ギャップが 1.5mm の場合には上側のビード断面は溶け込み不足であり、裏側まで貫通していない。RT 試験において、溶接部内部に関してはどの条件においても無欠陥であったが、ギャップが 1.0 及び 1.5mm の場合は溶け込み不足のため、開先線が見られた。

それぞれのギャップ試験片における引っ張り試験を実施した。試験結果を Table3.10 に示す。ギャップの生じた上部及び下部に関しては、引っ張り強さが減少しているのに対して、ギャップがほとんど生じていない左右に関しては引っ張り強さの変化が少ないことがわかる。以上の結果から、ギャップが 0.5mm の場合までは引っ張り試験の値に変化が少なく、位置ズレが許容されていることがわかる。これより、フィラーを使用しない溶接においては、最大ギャップ量を 0.5mm 程度以内に抑える必要があるといえる。

## (5) まとめ

上記の溶接試験結果をまとめると、以下のことが明らかとなった。

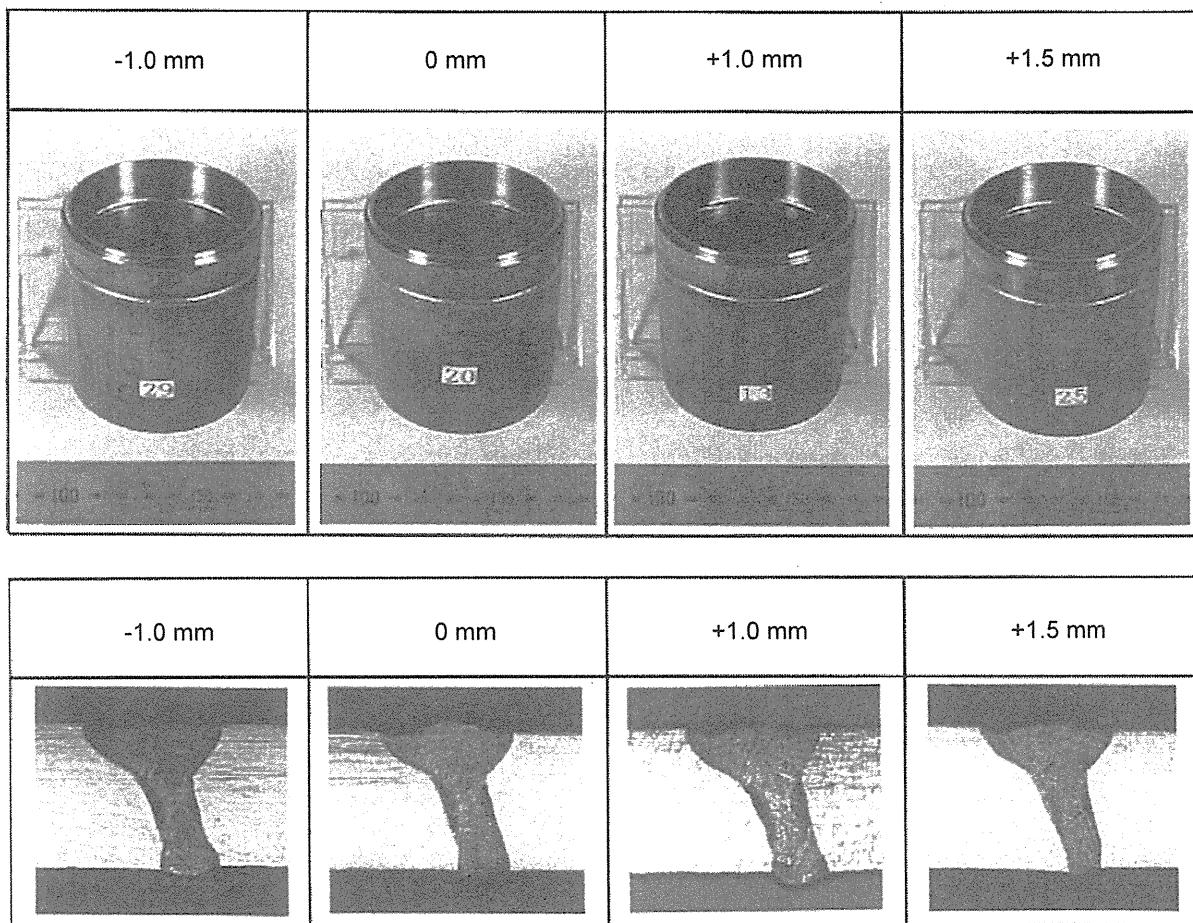
- ① 開発した配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットを使用して、SUS316L、肉厚 3mm の 50A 枝管を溶接する場合の適正条件は以下のようになる。

レーザー出力 : 1100W

溶接速度 : 0.5m/min

焦点はずし距離 : -1.0～+1.5mm まで許容可能

- ② ITER 炉内を想定した場合の枝管溶接時の許容ギャップ量は、0.5mm とすることで、引っ張り試験の値に変化がなく、位置ズレが許容可能である。



[Processing conditions]

Laser power : 1100W, Welding speed : 0.5 m/min, Frequency : 40Hz, Duty : 50%

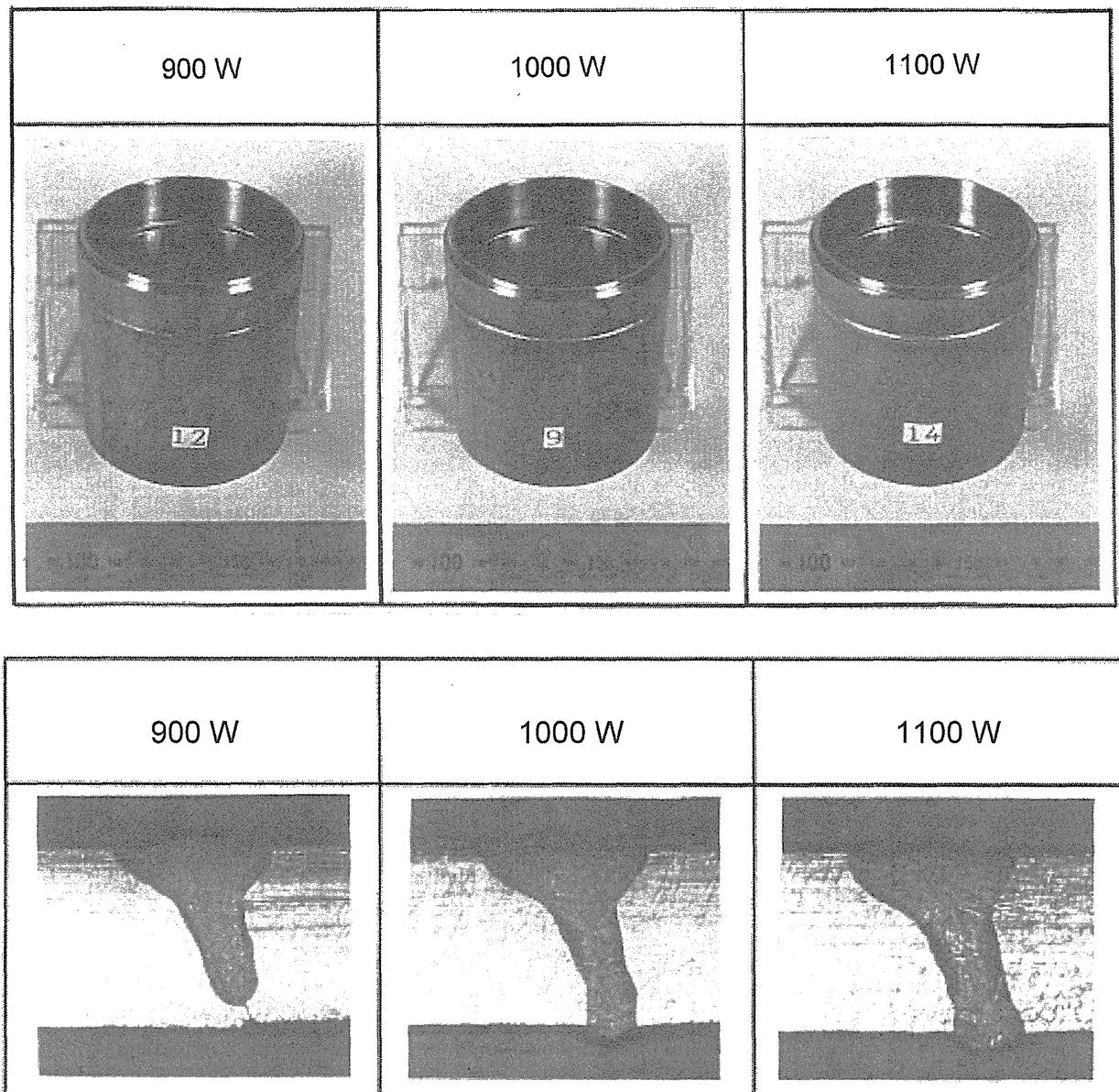
Work distance : 2mm, Weld joint : butt joint, Gap : 0mm

Fig.3.26 Results of the appearance and macroscopic tests as a parameter of defocus

Table 3.7 Results of tensile tests in the parameter of defocus

Defocus (mm)	No.	Proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Break part
-1.0	1	273	522	57	Weld part
	2	270	524	48	Base metal
	3	282	540	54	Base metal
	Ave.	275	529	53	-
0	1	244	516	56	Weld part
	2	256	514	46	Weld part
	3	274	524	56	Base metal
	Ave.	258	518	53	-
+1.0	1	281	528	54	Base metal
	2	255	495	55	Base metal
	3	264	530	46	Base metal
	Ave.	267	518	52	-
+1.5	1	289	559	59	Base metal
	2	282	534	52	Base metal
	3	285	553	44	Base metal
	Ave.	285	549	52	-

[Welding conditions] Laser power : 1100W, Welding speed : 0.5 m/min



[Processing conditions]

Welding speed : 0.5 m/min, Defocus : +1.0mm, Frequency : 40Hz, Duty : 50%

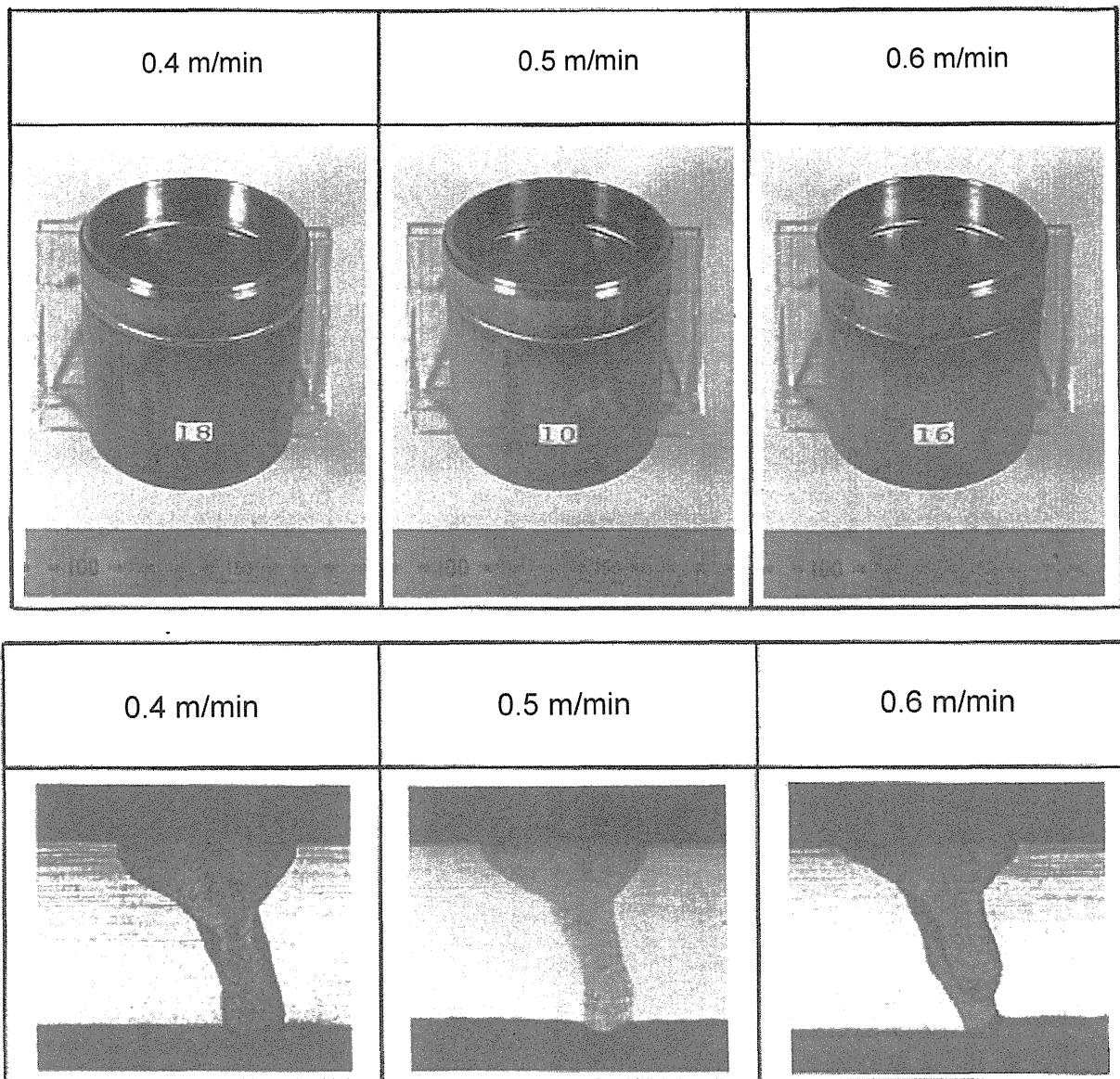
Work distance : 2mm, Weld joint : butt joint, Gap : 0mm

Fig.3.27 Results of the appearance and macroscopic tests as a parameter of laser power

Table 3.8 Results of tensile tests in the parameter of laser power

Laser power (W)	No.	Proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Break part
900	1	231	466	36	Weld part
	2	257	532	50	Base metal
	3	252	503	39	Weld part
	Ave.	247	500	42	-
1000	1	231	532	57	Weld part
	2	264	521	54	Base metal
	3	271	533	59	Base metal
	Ave.	255	529	57	-
1100	1	281	528	54	Base metal
	2	255	495	55	Base metal
	3	264	530	46	Base metal
	Ave.	267	518	52	-

[Welding conditions] Welding speed : 0.5 m/min, Defocus : 0mm



[Processing conditions]

Laser power : 1000W, Defocus : +1.0mm, Frequency : 40Hz, Duty : 50%

Work distance : 2mm, Weld joint : butt joint, Gap : 0mm

Fig.3.28 Results of the appearance and macroscopic tests as a parameter of welding speed

Table 3.9 Results of tensile tests in the parameter of welding speed

Speed (m/min)	No.	Proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Break part
0.4	1	258	532	55	Base metal
	2	277	518	51	Base metal
	3	259	509	52	Base metal
	Ave.	265	520	53	-
0.5	1	231	532	57	Weld part
	2	264	521	54	Base metal
	3	271	533	59	Base metal
	Ave.	255	529	57	-
0.6	1	285	521	32	Weld part
	2	272	532	51	Base metal
	3	262	510	42	Base metal
	Ave.	273	521	42	-

[Welding conditions] Laser power : 1000W, Defocus : 0mm

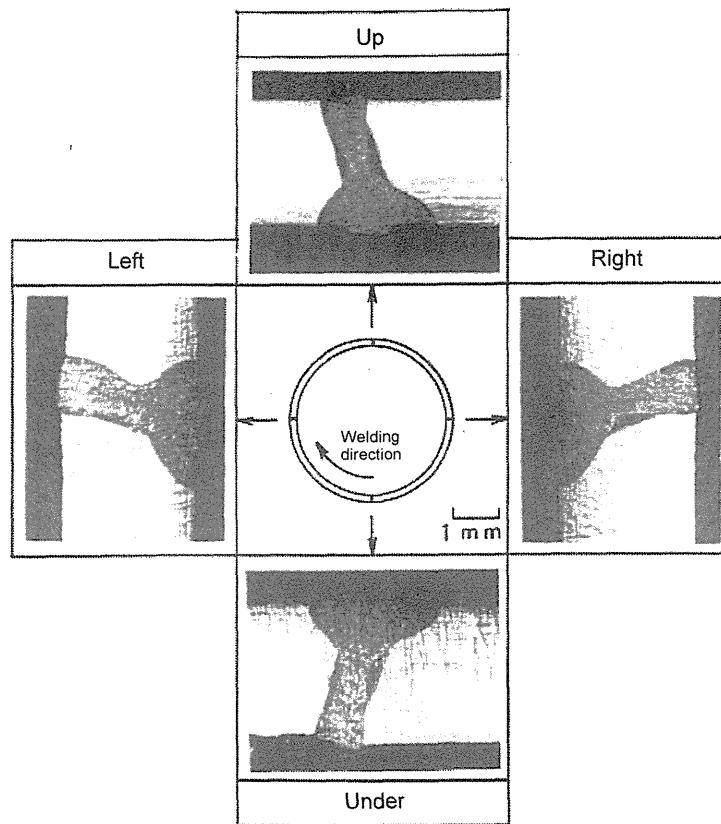


Fig.3.29 Results of the macroscopic test as a parameter of 0 mm gap

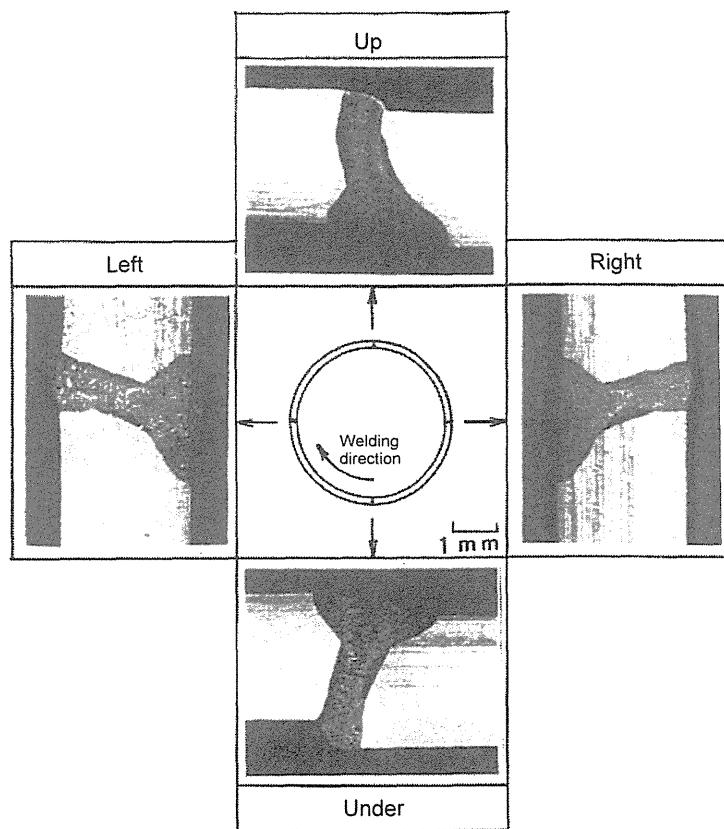


Fig.3.30 Results of the macroscopic test as a parameter of 0.5 mm gap

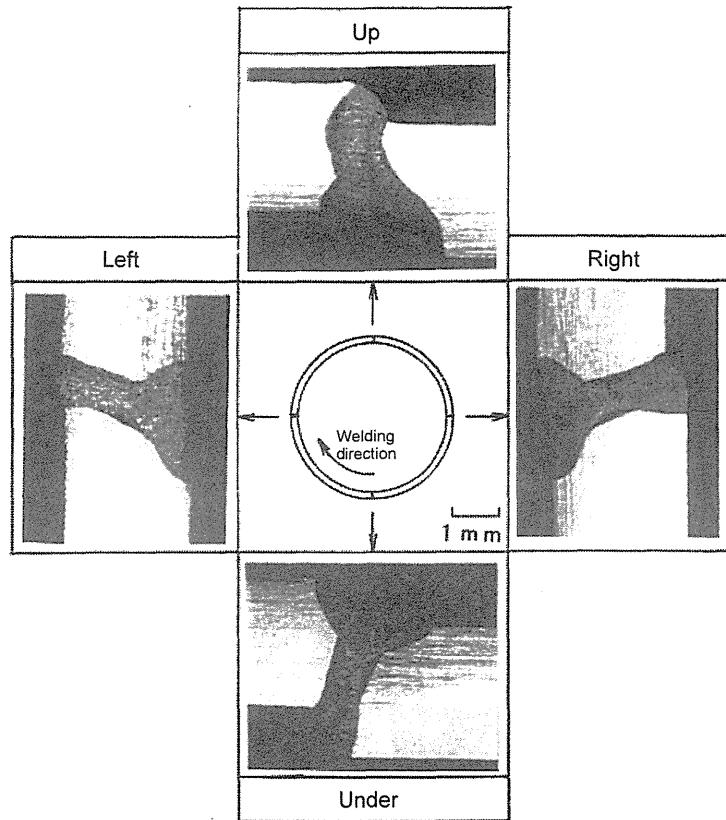


Fig.3.31 Results of the macroscopic test as a parameter of 1.0 mm gap

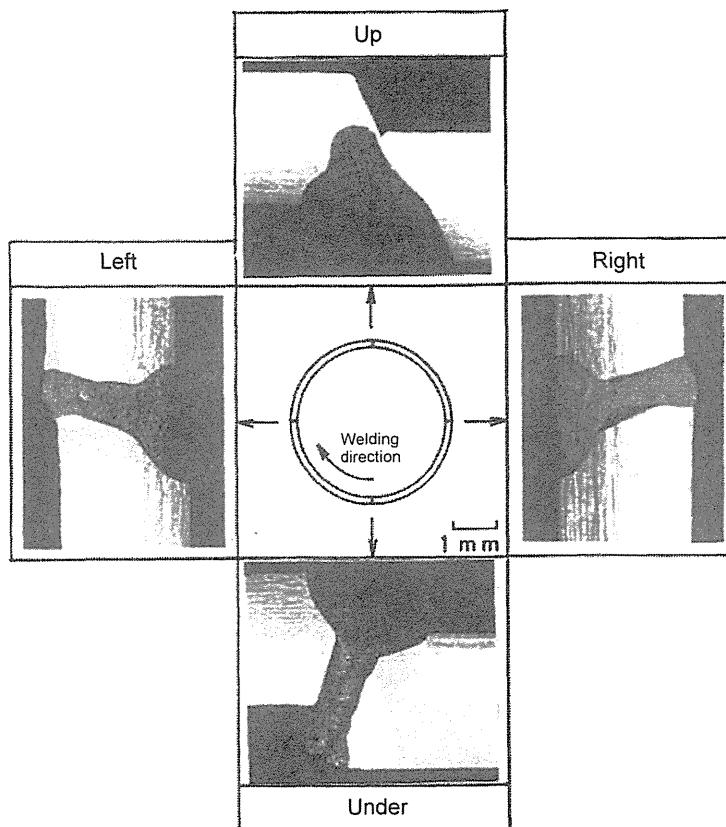


Fig.3.32 Results of the macroscopic test as a parameter of 1.5 mm gap

Table 3.10 Results of tensile tests in the parameter of gaps

Gap (mm)	Position	Proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Break part
0	Up	244	516	56	Weld part
	L, R	256	514	46	Weld part
	Under	274	524	56	Base metal
	Ave.	258	518	53	-
0.5	Up	275	520	33	Weld part
	L, R	290	547	47	Base metal
	Under	276	559	40	Base metal
	Ave.	280	542	40	-
1.0	Up	224	332	15	Weld part
	L, R	264	510	45	Base metal
	Under	222	533	43	Weld part
	Ave.	237	458	34	-
1.5	Up	-	-	-	-
	L, R	276	544	48	Weld part
	Under	205	489	37	Base metal
	Ave.	241	517	43	-

[Welding conditions] Laser power : 1100W, Welding speed : 0.5 m/min

### 3.2.5.2 切断試験

切断試験では、溶接試験と同様に、レーザー出力、切断速度、焦点はずし距離をパラメータとした基礎試験を実施した。切断試験後は、切断面観察、断面マクロ観察、切断面の粗さを測定することにより、切断性能の評価を行った。なお、ロボットは母管配管内に水平に設置して試験を行っている。

レーザー出力はこれまでの経験上、PWで900～1100W程度の出力をパラメータとした。切断速度は、1000Wで貫通する条件0.8m/minを中心として0.7, 0.8, 0.9m/minとした。また、焦点はずし距離として、焦点近傍の余裕を見るため、-1.0, 0, +1.0mmのように変化させて試験を行った。以下に使用したパラメータを示す。

なお、配管の形状は溶接試験時と同様の試験配管とし、20度傾けた状態でノズルからレーザー光を出射することで、配管からの反射光やスパッタ等により光学系が汚れることを防ぐことにした。

レーザー出力(PW)	: 900, 1000, 1100 W
レーザー発振器の周波数	: 40Hz
効率(duty)	: 50%
溶接速度	: 0.7, 0.8, 0.9 m/min
アシストガス	: 窒素
ワークディスタンス	: 2mm
焦点位置	: -1.0, 0, +1.0 mm
ロボットの姿勢	: 水平位置

以下にそれぞれの試験結果を述べる。

#### (1) 焦点はずし距離の変化による切断試験

レーザー出力を1000W、切断速度を0.8m/min、アシストガスには窒素を使用し、焦点はずし距離を-1.0～+1.0mmまで変化させて切断を行った。なお、マイナス方向は配管から離れる方向で、プラス方向は配管に近寄る方向とする。Fig.3.33にビード外観及び断面マクロ試験結果を示す。どの条件においても切断は可能であり、断面マクロ観察においても特に変化は見られなかった。

切断面の粗さ測定の結果をTable3.11に示す。焦点はずし距離を-1.0, 0, +1.0と変化させた場合、中心線平均粗さ(以下; Ra)はそれぞれ、10.2, 8.9, 8.3μmとなり、-1mmの場合の値がやや大きくなつた。また、最大高さ(以下; Rmax)も75.9, 64.4, 58.7μmと、-1mmの場合の値がやや大きい。また、ドロスの高さはそれぞれ1.6, 1.3, 1.5mm程度であった。これらはおそらく、レーザー光の焦点位置が配管に近いほうがレーザーの熱集中が大きくなり、配管切断時の溶け出しが多く行われ、表面粗さが滑らかになったのではないかと考えられる。故に、レーザー焦点位置は0～+1.0mmの場合においてやや良好な切断が得られたのであろう。

## (2) レーザー出力の変化による切断試験

切断速度を 0.8m/min, アシストガスには窒素を使用し, レーザー出力を 900, 1000, 1100W と変化させて切断試験を行った. Fig.3.34 にビード外観及び断面マクロ試験結果を示す. レーザー出力を変化させても外観上は特に変化が見られなかった.

切断面の粗さ測定の結果を Table3.12 に示す. レーザー出力を 900, 1000, 1100W と変化させた場合, Ra はそれぞれ, 10.5, 8.3, 9.0 $\mu\text{m}$  となり, 900W の場合の値がやや大きかった. また, Rmax もそれぞれ, 81.3, 58.6, 58.7 $\mu\text{m}$  となり, 900W の場合の値がやや大きくなつた. また, ドロス高さは, それぞれ 1.2, 1.5, 1.3mm であった. 本試験において, 全体的にあまり変化は見られないが, レーザー出力を 1000~1100W にしたほうが, 若干, 切断面の表面粗さが滑らかである.

## (3) 加工速度の変化による切断試験

レーザー出力を 1000W, アシストガスには窒素を使用し, 切断速度を 0.7, 0.8, 0.9m/min と変化させて試験を行つた. Fig.3.35 にビード外観及び断面マクロ試験結果を示す. 切断速度を変化させても外観上は特に変化が見られなかった.

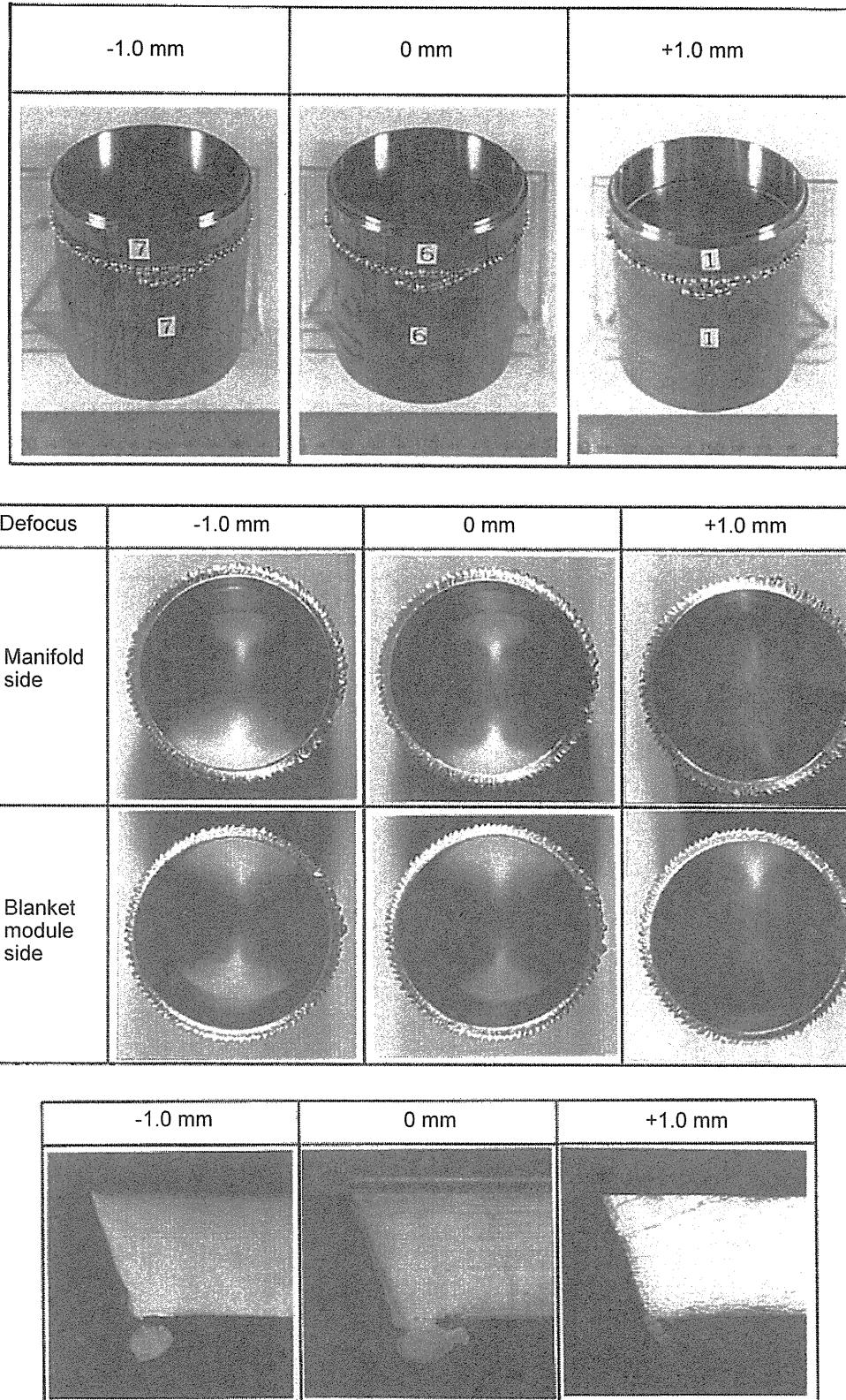
切断面の粗さ測定の結果を Table3.13 に示す. 切断速度を 0.7, 0.8, 0.9m/min と変化させた場合, Ra はそれぞれ, 8.3, 8.3, 9.9 $\mu\text{m}$  であり, 切断速度が速くなるほど, 値が大きくなつた. また, Rmax もそれぞれ, 58.1, 58.6, 76.0 $\mu\text{m}$  となり, 切断速度 0.9m/min 場合の値がやや大きくなつた. また, ドロス高さは, それぞれ 1.4, 1.5, 1.2mm であった. 切断速度が速いと, 雜に切れてしまうのであろう.

## (4) まとめ

上記切断試験の結果をまとめると, 以下のことが明らかとなつた.

- ① 開発した配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットを使用して, SUS316L, 肉厚 3mm の 50A 枝管を切断する場合, アシストガスに窒素を使用しているため, いずれの条件においても切断面に酸化膜のない良好な切断が可能となつた.
- ② 本件での切断条件範囲においては, 切断面の粗さは Ra8.3~10.9 $\mu\text{m}$ , ドロスの高さは 1.1 ~1.6mm 程度であり, 常に安定した切断が可能であった. アシストガスが窒素のため, 配管周囲にドロスが付着するが, これには酸化膜が存在していない. 従つて, このままの状態, つまり, 切断面の研磨など機械加工をしないで, 再溶接が可能ではないかと考えられる. これについては次節にて述べる.
- ③ 切断条件の余裕を考慮して, 本試験におけるパラメータの中心条件である以下を適正条件とすることにした.

レーザー出力	: 1000W
切断速度	: 0.8m/min
焦点はずし距離	: 0mm



[Processing conditions]

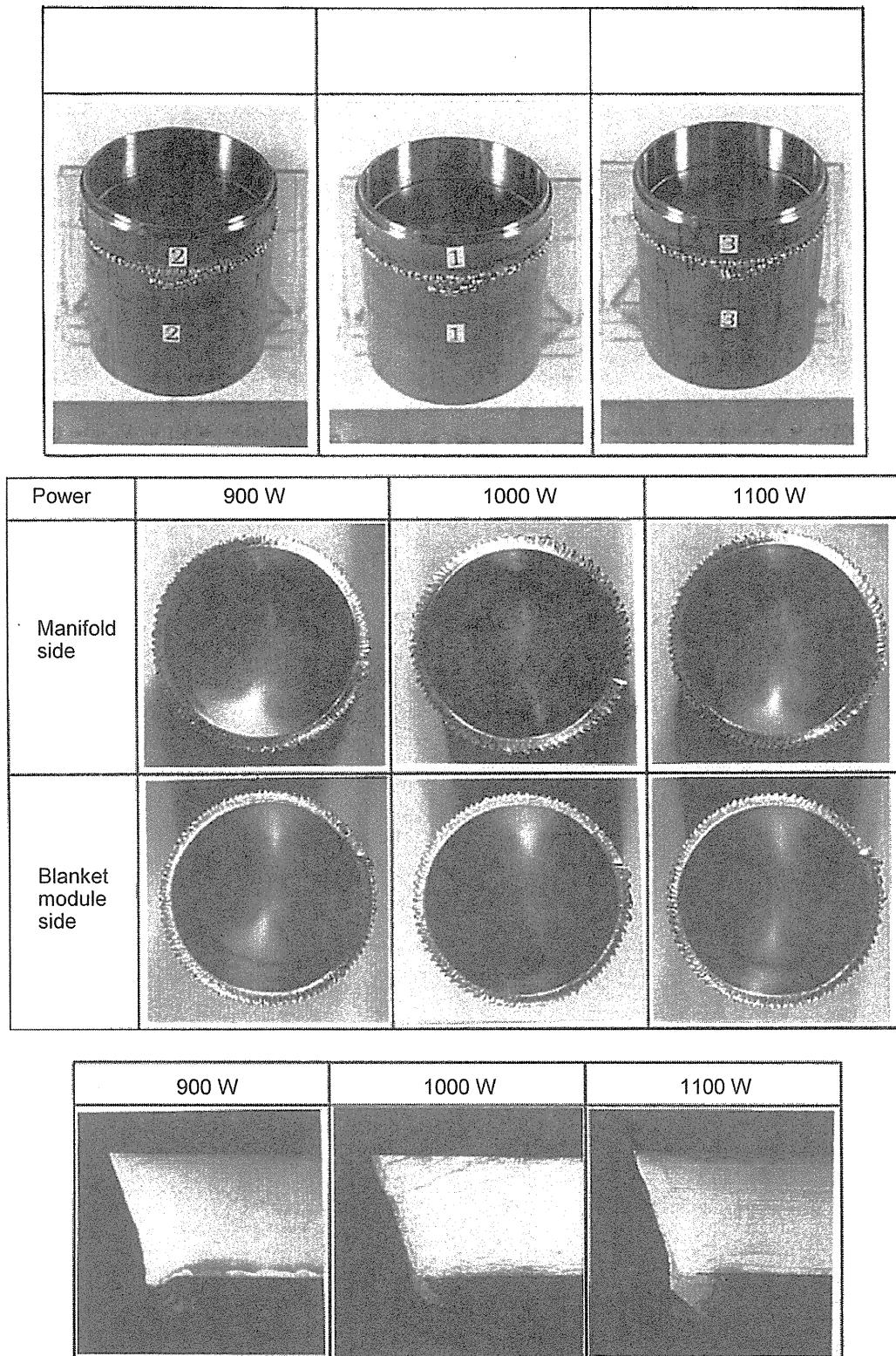
Laser power : 1000W, Cutting speed : 0.8m/min, Frequency : 40Hz, Duty : 50%, Work distance : 2mm

Fig.3.33 Results of the appearance and macroscopic tests as a parameter of defocus

Table 3.11 Results of surface roughness tests in the parameter of defocus

Defocus (mm)	No.	Ra (μm)	Rmax (μm)	Dross height (mm)
-1.0	1	10.2	72.2	1.5
	2	9.4	79.4	1.7
	3	11.0	76.0	1.5
	Ave.	10.2	75.9	1.6
0	1	7.0	46.0	1.3
	2	12.2	82.6	1.3
	3	7.6	64.6	1.2
	Ave.	8.9	64.4	1.3
+1.0	1	10.4	62.6	1.3
	2	6.6	45.0	1.6
	3	8.0	68.4	1.6
	Ave.	8.3	58.7	1.5

[Cutting conditions] Laser power : 1000W, Cutting speed : 0.8 m/min



[Processing conditions]

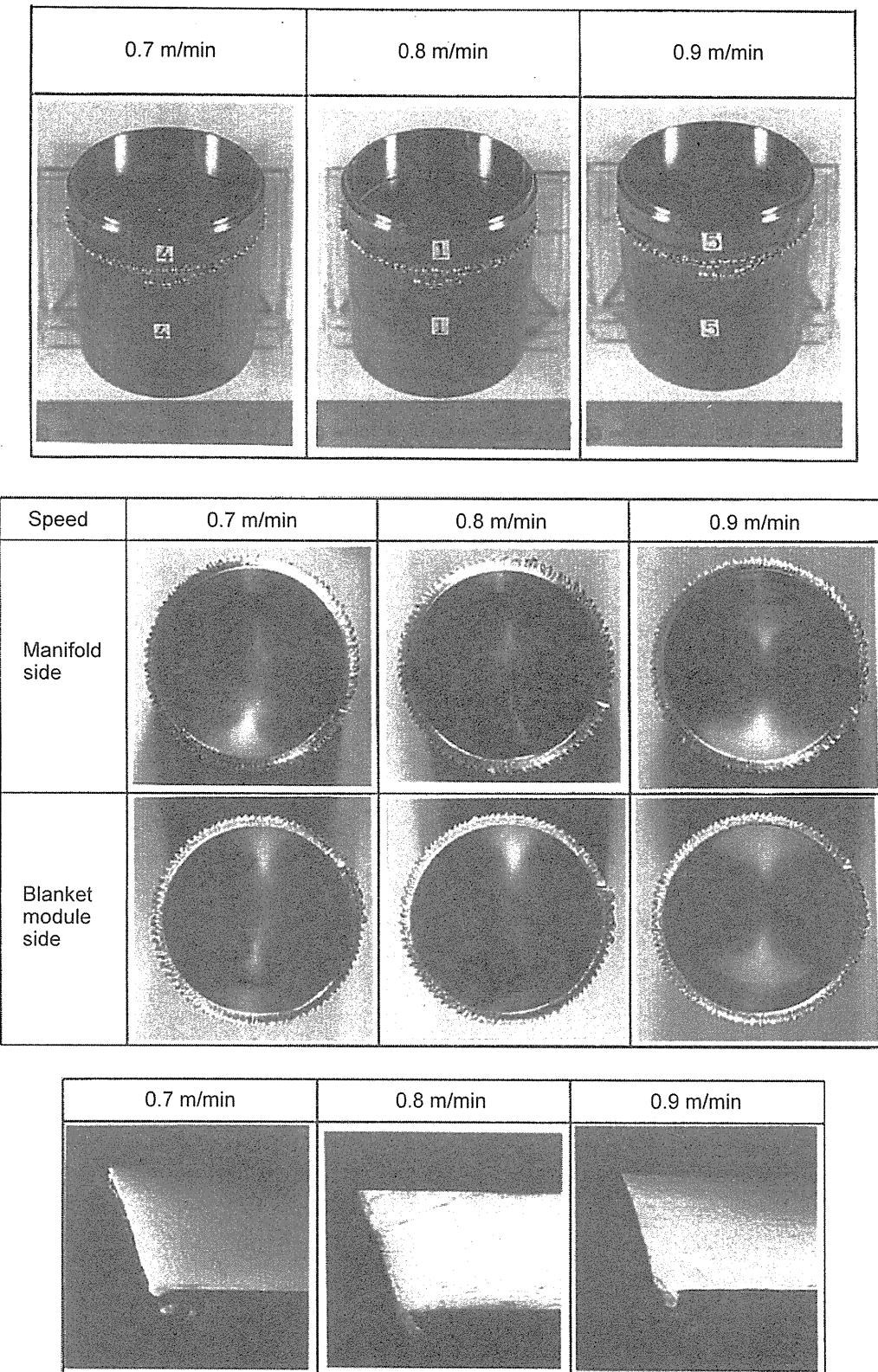
Cutting speed : 0.8m/min, Defocus : +1.0mm, Frequency : 40Hz, Duty : 50%, Work distance : 2mm

Fig.3.34 Results of the appearance and macroscopic tests as a parameter of laser power

Table 3.12 Results of surface roughness tests in the parameter of laser power

Laser power (W)	No.	Ra (μm)	Rmax (μm)	Dross height (mm)
900	1	10.4	78.0	1.2
	2	12.6	85.2	1.1
	3	8.4	80.6	1.3
	Ave.	10.5	81.3	1.2
1000	1	10.4	62.6	1.3
	2	6.6	45.0	1.6
	3	8.0	68.4	1.6
	Ave.	8.3	58.6	1.5
1100	1	9.6	60.6	1.2
	2	8.0	56.4	1.2
	3	9.4	59.2	1.5
	Ave.	9.0	58.7	1.3

[Cutting conditions] Cutting speed : 0.8 m/min, Defocus : +1.0mm



[Processing conditions]

Laser power : 1000W, Defocus : +1.0mm, Frequency : 40Hz, Duty : 50%, Work distance : 2mm

Fig.3.35 Results of the appearance and macroscopic tests as a parameter of cutting speed

Table 3.13 Results of surface roughness tests in the parameter of cutting speed

Cutting speed (m/min)	No.	Ra (μm)	Rmax (μm)	Dross height (mm)
0.7	1	6.8	53.2	1.5
	2	9.4	54.4	1.6
	3	8.6	66.6	1.4
	Ave.	8.3	58.1	1.5
0.8	1	10.4	62.6	1.3
	2	6.6	45.0	1.6
	3	8.0	68.4	1.6
	Ave.	8.3	58.6	1.5
0.9	1	10.4	68.6	1.2
	2	9.6	71.4	1.3
	3	9.8	88.0	1.3
	Ave.	9.9	76.0	1.2

[Cutting conditions] Laser power : 1000W, Defocus : +1.0mm

### 3.2.5.3 再溶接試験

ITER では、マニピュレータによってブランケットを撤去した後、新しいブランケットを設置する。ブランケットを取り替えるときは枝管部を溶接・切断するが、この時、後壁に設置されている冷却配管は取り替えることができない。つまり、炉内に配管が残された状態である。その冷却配管を再度利用して、新規のブランケット冷却配管を接続する。このため、冷却配管は再溶接が必要となる。

冷却配管の再溶接を検討するとき、ブランケット後壁に残される配管はレーザー一切断を行った状態であるが、一方、新規ブランケットには新規の冷却配管が付属している。従って、機械加工された綺麗な接続面を持っていると判断される。故に、本件では、レーザー一切断面を持つ配管と機械加工された配管との再溶接試験を実施することにし、その溶接特性を評価する。なお、ロボットは母管配管内に水平に設置して試験を行っている。

試験条件については、前節までに得た結果を基に行うものとし、レーザー加工面を持つ配管の切断条件として、レーザー出力 1100W、切断速度 0.8m/min、焦点はずし距離 0mm で行った試験配管を再利用した。本配管と機械加工面を持つ新規の配管を使用して溶接試験を行った。試験条件として、レーザー出力 1100W、溶接速度 0.5m/min、焦点はずし距離 0mm という条件で行った。溶接試験後、ビード外観検査、断面マクロ観察、放射線透過試験(RT : JISZ3104)、引っ張り試験を実施し、健全性の評価を行った。

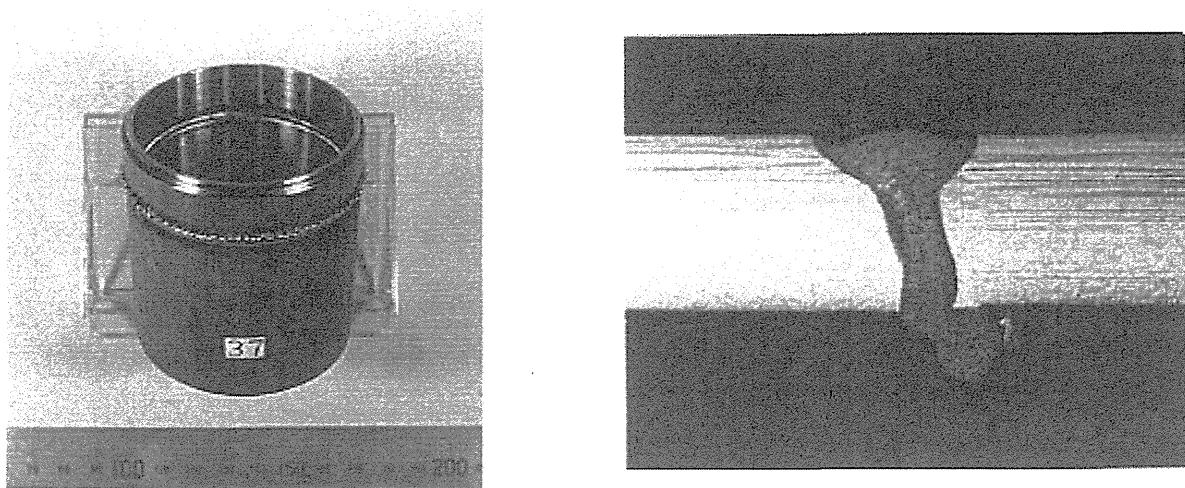
再溶接試験後のビード外観及びマクロ観察結果を Fig.3.36 に示す。溶接後の配管外側に切断時のドロスが見えるが特に問題なく溶接可能であった。また、溶け込み形状は通常の溶接試験結果と類似しており、特に問題がないといえる。RTにおいても問題がなく、溶接ビード内にブローホール等の内部欠陥もなく無欠陥であった。

引っ張り試験結果を Table3.14 に示す。再溶接試験配管の引っ張り強さは平均で 524MPa であり同条件での溶接試験結果が 518MPa で、ほぼ同値である。

以上の結果から、下記のことがいえる。

- ① 再溶接では配管外側にドロスが付着した状態ではあるが、再溶接は可能であり、溶け込み形状も通常の溶接試験時の結果と同等であった。また、無欠陥溶接であった。
- ② 再溶接試験配管の機械特性試験においても、通常の溶接試験を行った配管と同等な強度が得られた。

以上、開発した配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットで、レーザー一切断後の機械加工をしていない枝管の再溶接も可能であることが実証された。これは、レーザー一切断に窒素を使用したため、切断面に酸化膜が付着しておらず、そのままの状態で溶接可能であったためと考えられる。これによって、ITER 炉内配管の保守シナリオにおいて、アシストガスに窒素を使用することは妥当であると実証された。



(a) Bead appearance

(b) Macroscopic observation

[Processing conditions]

Laser power : 1100W, Welding speed : 0.5m/min, Defocus : 0mm, Frequency : 40Hz, Duty : 50%,  
Work distance : 2mm, Weld joint : butt joint, Gap : 0mm

Fig.3.36 Result of rewelding test

Table 3.14 Results of tensile tests in rewelding test

No.	Proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Break part
1	264	533	62	Base metal
2	267	514	54	Base metal
3	266	526	60	Base metal
Ave.	266	524	59	-

[Welding conditions] Laser power : 1100W, Welding speed : 0.5m/min, Defocus : 0mm

### 3.2.5.4 モックアップ溶接・切断試験

前節までの溶接・切断試験では、溶接・切断ロボットを母管に対して水平に設置し、上向きの枝管内にノズルを伸ばすようにして試験を行い、レーザー溶接・切断条件の洗い出しを行った。このため、ロボットがどのような姿勢においても溶接・切断可能かどうかの判断は行っていない。本節では、この点を鑑み、実機と同様な姿勢にロボットを設置し、実際の姿勢で溶接・切断が可能かどうかの検討を行った。

試験装置として、Fig.3.24 に示すモックアップ試験装置を使用し、一定の角度に配管を傾け、ロボットを配管内部に設置して溶接・切断試験を行うこととした。ITER では、Fig.3.37 に示すように炉内のポロイダル方向全周にブランケットが設置されている。これらブランケットのなかで、代表的な位置である No.1, 7, 13 の位置をそれぞれ模擬して溶接・切断試験を行うことにした。No.1 のブランケットは地面に対して母管の設置角度が 28 度とした。同様に、No.7 は 83 度、No.13 は 8 度の角度とした。また、溶接・切断条件は前節までの結果を踏襲する。以下に試験条件をまとめ示す。

#### 【溶接試験条件】

レーザー出力(PW)	: 1100 W
レーザー発振器の周波数	: 40Hz
効率(duty)	: 50%
溶接速度	: 0.5 m/min
シールドガス	: 窒素
ワークディスタンス	: 2mm
焦点位置	: 0mm
ロボットの姿勢	: No.1(=28 度), No.7(=83 度), No.13(=8 度)

#### 【切断試験条件】

レーザー出力(PW)	: 1000W
レーザー発振器の周波数	: 40Hz
効率(duty)	: 50%
溶接速度	: 0.8m/min
アシストガス	: 窒素
ワークディスタンス	: 2mm
焦点位置	: 0mm
ロボットの姿勢	: No.1(=28 度), No.7(=83 度), No.13(=8 度)

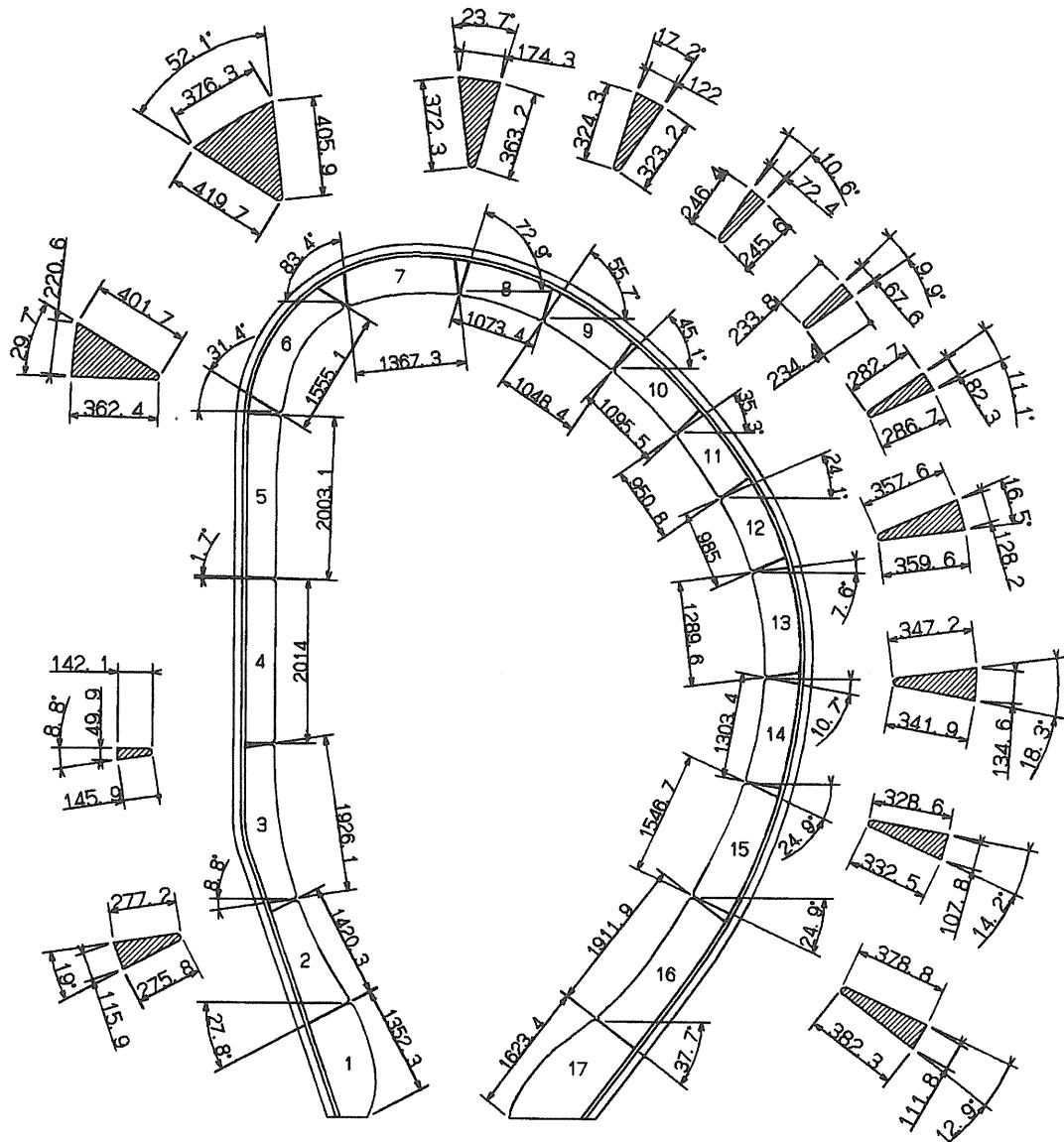


Fig.3.37 Location of the blanket modules

### (1) 溶接位置精度確認試験

溶接試験を実施する前に、ロボットの配管内での位置決め動作の確認を行った。この確認試験では、ロボットが所定の位置に停止したあと、枝管内にノズルを伸ばし、配管内面の表面層のみを溶融するレーザー出力(150W)にて加工を行い、溶融幅の1/2の位置と配管開先とのズレを測定することとした。このズレ量により枝管溶接・切断ロボットの位置ズレ量を評価する。各試験における測定点は、枝管内の0, 90, 180, 270度の4点とした。

溶接位置精度確認試験の結果をTable3.15に示す。母管の据付角度が28度の場合の一周期あたりの位置ズレ量は±0.12mmであった。また、据付角度が83度の場合は±0.19mm、8度の場合は±0.11mmであった。また、据付角度が変化した場合の同じ位置でのズレ量は最大で0.34mmとなつた。この程度のズレ量であれば特に問題なく溶接可能であるため、特別な位置補正を行わずにこのままの状態で溶接試験を行うものとする。

Table 3.15 Results of the positioning accuracy in the various postures welding

Measurement position	Blanket No.			Error
	No.1 (=28deg)*	No.7 (=83deg)*	No.13 (=8deg)*	
1	-0.12	-0.05	-0.29	0.24
2	-0.35	-0.25	-0.43	0.18
3	-0.31	-0.04	-0.27	0.27
4	-0.18	0.13	-0.21	0.34
Error	±0.12	±0.19	±0.11	-

\* Angle means the tool position against ground

unit : [mm]

## (2) 溶接試験

溶接時におけるロボットの姿勢の影響を把握するため、上記の位置にてロボットを固定し、溶接試験を行った。溶接試験後、①ビード外観検査により表面欠陥の評価、②断面マクロ観察にて溶融部の形状の評価、③放射線透過試験(RT : JISZ3104)により溶接部の内部欠陥及び融合不良の評価、④浸透探傷試験(PT)により溶接表面の割れの評価、⑤引っ張り試験により試料の機械強度の評価、⑥配管長手方向の長さ測定による収縮量の評価をそれぞれ実施し、姿勢変化による溶接への影響評価を行った。

枝管溶接・切断ロボットを 28, 83, 8 度にそれぞれ固定して溶接を行った結果、以下の結果を得た。

### ① ビード外観試験

外観上はどの角度に変化させても溶接部表面及び内面ともに酸化が見られず、良好な溶接が確認できた。

### ② 断面マクロ観察

Fig.3.38～3.40 にそれぞれの角度での断面マクロ観察の様子を示す。どの角度に変化させても開先が全て溶融されており、問題なく溶接できることを確認した。

### ③ 放射線透過試験

どの角度に変化させても融合不良はなく、溶接部にポロシティの発生もなかった。

### ④ 浸透探傷試験

どの角度においてもビード表面に割れは確認されず良好な溶接が確認できた。

### ⑤ 引っ張り試験

JISZ2241-1980(ISO6892)での引っ張り試験を実施した。試験片は Fig.3.25 と同等である。

Table3.16 にブランケット No.13(=8 度)の場合の試験結果を示す。窒素雰囲気下での溶接と空気雰囲気下での溶接についての比較も行っている。この結果から、窒素雰囲気下においては溶接部の強さが母材と比較して 30MPa 程度減少していることがわかる。しかしながら、破断部は母材であり溶接部には目立った変化が見られなかった。つまり、溶接部は母材よりも強度が向上しているということがわかった。また、空气中における溶接では母材とほぼ同等の引っ張り強さが得られている。

#### ⑥ 長手方向の収縮量

引っ張り試験に使用しなかった配管(ブランケット位置 No.1 及び No.7)について、溶接時の長手方向の収縮量を計測した。この結果を Table 3.17 に示す。表中の姿勢については Fig.3.38～3.40 と同等である。溶接前の試験配管の合計長さは 66mm であったが、溶接を行うことによって、平均で 0.42mm の収縮が確認された。

以上、溶接試験の結果、溶接後の配管の収縮が見られたが、ロボットの姿勢による溶接品質への影響は特にないと考えられる。よって、どの姿勢においても配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットは溶接が可能であることが実証された。

Table 3.16 Results of tensile tests in the various postures

Item	No.	Proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Break part
Base metal	1	277	506	Base metal
	2	279	493	Base metal
	3	281	511	Base metal
	Ave.	279	503	-
No.13 (=8deg) in nitrogen	1	230	452	Base metal
	2	244	484	Base metal
	3	243	474	Base metal
	Ave.	239	470	-
No.13 (=8deg) in air	1	256	499	Weld part
	2	246	470	Base metal
	3	250	482	Base metal
	Ave.	251	484	-

Table 3.17 Shrinkage quantity in the various postures welding

Blanket No.	Test No.	Measurement position				Ave.	Shrinkage quantity
		1	2	3	4		
No.1 (=28deg)	1	65.65	65.65	65.61	65.51	65.61	0.39
	2	65.68	65.56	65.47	65.46	65.54	0.46
	3	65.57	65.77	65.68	65.68	65.70	0.30
No.7 (=83deg)	1	65.70	65.58	65.39	65.56	65.56	0.44
	2	65.71	65.51	65.41	65.64	65.57	0.43
	3	65.52	65.60	65.50	65.49	65.53	0.47
Ave.	-	-	-	-	-	-	0.42

unit : [mm]

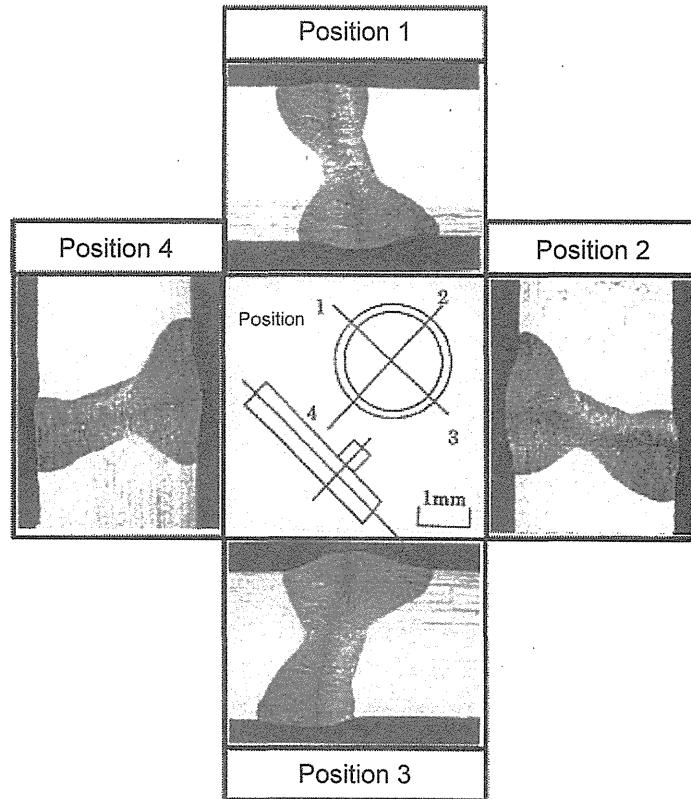


Fig.3.38 Result of the macroscopic test of the various posture welding  
at position of No.1 blanket (=28deg)

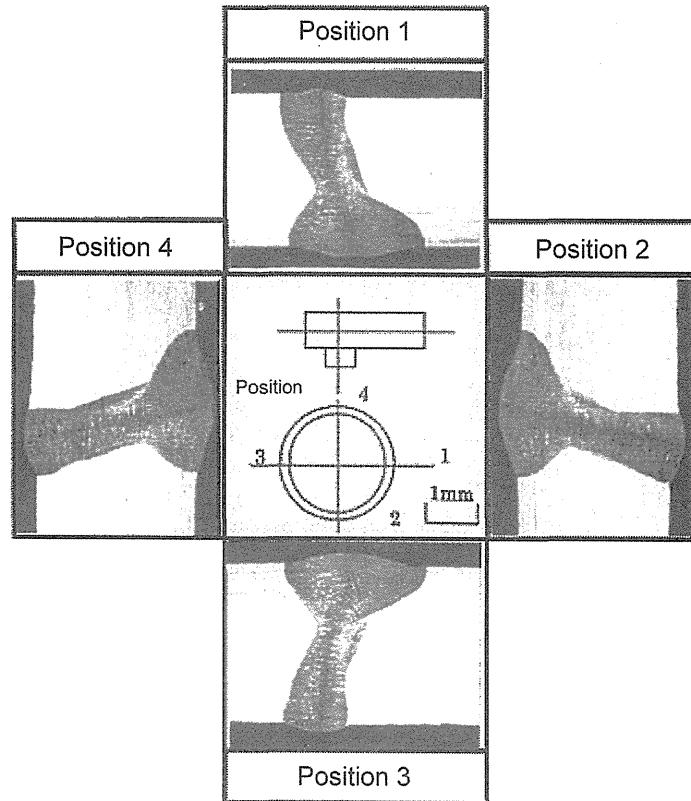


Fig.3.39 Result of the macroscopic test of the various posture welding  
at position of No.7 blanket (=83deg)

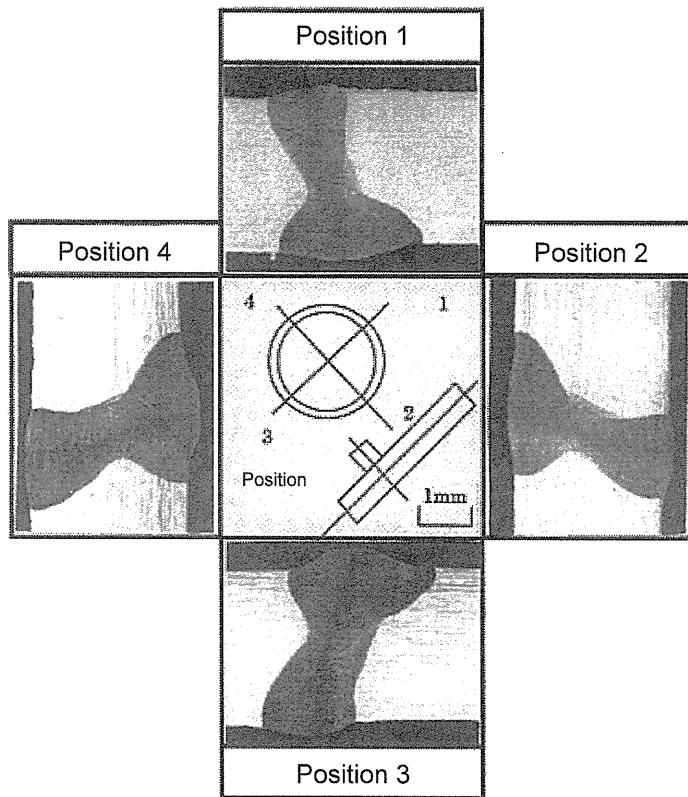


Fig.3.40 Result of the macroscopic test of the various posture welding  
at position of No.13 blanket (=8deg)

### (3) 切断試験

切断時におけるロボットの姿勢の影響を把握するため、溶接時と同様にロボットの姿勢を変化させて切断試験を行った。切断試験後、切断面の品質の確認のための観察と、切断位置精度を確認するため、切断した配管の長さを計測した。

切断した枝管(ブランケットに付属する側)の長さを測定した結果を Table3.18 に示す。ブランケット No.13(=8 度)の時のズレ量が大きく、 $\pm 0.27\text{mm}$  であった。また、各位置での再現性は 3 の位置で最大であり、 $\pm 0.30\text{mm}$  であった。ズレ量と再現性の両方を考慮すると最大で $\pm 0.57\text{mm}$  ずれる可能性がある。

切断面の品質に関しては、ドロスのつき方にややばらつきがあったが、ほぼ類似の切断面が得られた。また、再溶接に十分対応可能な切断面であった。

以上、ロボットの姿勢に関係なく、切断品質において良好な結果を得ることができた。ただし、切断時の位置決めの再現性にややバラつきがある点は、今後の課題である。

Table 3.18 Results of the positioning accuracy in the various postures cutting

Blanket No.	Test No.	Measurement position				Error
		1	2	3	4	
No.1 (=28deg)	1	50.80	50.97	50.93	50.77	±0.10
	2	50.79	50.95	50.90	50.75	±0.10
	3	50.74	50.94	50.90	50.76	±0.10
No.7 (=83deg)	1	50.50	50.62	50.38	50.29	±0.17
	2	50.40	50.65	50.34	50.26	±0.20
	3	50.49	50.67	50.45	50.40	±0.14
No.13 (=8deg)	1	50.57	50.92	50.79	50.40	±0.27
	2	50.41	50.93	50.78	50.47	±0.27
	3	50.45	50.97	50.74	50.51	±0.27
Reproducibility		±0.20	±0.18	±0.30	±0.26	-

unit : [mm]

### 3.2.6 作業時間の推定

前節までに、配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットを使用して、実配管内での走行及び位置決め動作を行った。また、実際に溶接・切断を実施した。これらの結果を基に、ITER ブランケット配管内での作業時間の推定を行った。Table3.19 に結果を示す。溶接・切断時間は、母管内での位置決め動作時間を含めたとしても 1 つの枝管で 5 分程度である。一方、母管内の走行時間は 30m 走行した場合、移動機構のロスを考慮し 0.4m/min とした場合には 75 分となる。これは当初検討していたものと比較して大幅に遅いといえる。移動機構部の見直しでもう少し速度向上が望めるかもしれないが、大幅な速度向上は、機構上困難であると思われる。これについては今後の課題である。

Table 3.19 Working time for welding/cutting in ITER blanket cooling pipe

作業ステップ		動作時間(秒)	
①母管内走行	実配管では曲がり部が多いため走行ロスを考慮し、平均速度 0.4m/min を想定する	(75 分) 30m	
②走行停止	枝管の位置を検知して停止		
③ヘッド部枝管位置合わせ	後支持脚(RS 軸)を張り出すと同時に位置決め用ディスクピンを張り出す	1	
	前支持脚(RF 軸)張り出し	38	
	移動機構により母管軸方向に引き寄せる ※位置決め用ディスクピンが母管の溝に入り移動停止	10	
	θ軸の原点位置まで右回転して停止 ※動作時間は半周を想定	17	120
	位置決め用 R 軸スリーブを伸ばす(ストッパ解除) ※R 軸が若干伸びる	3	
	θ軸が枝管の位置合わせを行うため左回転する ※位置決め用 R 軸スリーブが枝管に入り回転が停止する	17	
	R 軸が伸びる ※設定位置まで伸びた後、位置決め用 R 軸スリーブ用ストッパが ON になる	34	
④溶接・切断作業	ρ軸回転 切断の場合 26 秒(ビッシングを含む) 溶接の場合 51 秒(オーバーラップを含む)	51	51
⑤ヘッド部を格納	ρ軸戻し回転 切断の場合 16 秒 溶接の場合 24 秒	24	58
	R 軸を収納する	34	
⑥位置決め機構を格納	θ軸を原点位置まで戻す ※動作時間は半周を想定	17	56
	後支持脚(RS 軸)を収納する 同時に位置決め用ディスクピンを戻す	1	
	前支持脚(RF 軸)を収納する	38	
⑦母管内戻り走行		(75 分)	
	合計		285 (4'45")

### 3.2.7 枝管溶接・切断ロボットのまとめ

配管保守ロボットの成立には、曲率半径 400mm で、内径 102.3mm の配管内を約 20m 自走し、内径 54.5mm、肉厚 3mm の枝管を溶接・切断することが設計条件であった。しかし、配管の曲がり部を走行可能とするため、ロボットの形状に制限が生じる。本研究ではこの点に着目し、溶接・切断及び移動機構を機能ごとに分離した連結型配管保守ロボットを考案した。そして、溶接・切断には、狭い場所で溶接・切断可能なように、光ファイバでエネルギー伝送可能な YAG レーザーを適用した。また、配管内を移動するための機構としては、枝管部、すなわち不連続部で脱輪しないこと及び配管内が狭いという理由により、従来のタイヤ式では構成が困難となった。そこで、本研究では、枝管径より大きなパッドを押し付け、枝管部で脱輪しないで走行するパッド押し付け型走行機構を考案した。この走行機構は、2つの台車で構成し、1台の台車が配管内にパッドを押し付け、両者を、スライドさせることにより移動し、次にもう一方の台車のパッドを配管内に押し付け、両者をスライドさせるということを互いに繰り返し前進する、いわゆる、尺取虫型走行とした。これらの考案を基にロボットを設計・製作して性能試験を実施し、半径 400mm、内径 102.3mm の配管内を枝管部での脱輪もなく 0.5m/min で目的の枝管まで円滑に移動可能であることを実証した。また、内径 54.5mm の枝管内にノズルを伸ばし、枝管の溶接・切断が行えることを示した。さらに、開発した枝管溶接・切断ロボットを使用して、内径 54.5mm、肉厚 3mm の SUS316L 製枝管に対する最適な溶接・切断条件を取得した。溶接時における溶接可能な許容ギャップについても併せて検討を行い、施工可能な条件を明らかにした。また、レーザー切断時に窒素をアシストガスとして使用することで、配管切断後の再溶接には、機械加工をしない配管切断面においても再溶接可能であることを示した。さらに、配管内でのロボットの多様な姿勢での溶接・切断が可能であることを示した。

以上の結果から、ITER ブランケットに付属する冷却配管の溶接・切断シナリオが成立する見通しを得ると共に、世界で初めて、曲率半径 400mm、直径 102.3mm という狭小な配管内を自走し、内径 54.5mm の枝管部において溶接・切断可能なロボットシステムを成立させた。

以下に、枝管溶接・切断試験の結果得られた最適な施工条件を示す。

#### (1) 溶接条件

レーザー出力	: 1100W(PW)
溶接速度	: 0.5m/min
周波数	: 40Hz
効率	: 50%
シールドガス	: 窒素
ワークディスタンス	: 2mm
焦点ずらし距離	: 0mm
最大許容ギャップ	: 0.5mm (フィラーなし)

## (2) 切断条件

レーザー出力	: 1000W(PW)
溶接速度	: 0.8m/min
周波数	: 40Hz
効率	: 50%
アシストガス	: 窒素
ワークディスタンス	: 2mm
焦点ずらし距離	: 0mm

## 3.2.8 枝管溶接・切断ロボットの課題

本ロボットを開発して試験を行った結果、配管内面と押しつけパッド間の摩擦力がやや不足していることが判明したため、今後はより正確な位置決め精度を達成するために、押しつけ機構の改善を図る必要があると考える。また、作業時間については、配管内の走行時間がほとんどであり、改善が必要である。しかしながら、移動機構の構造上、大幅な速度向上が望めない。これについて今後の課題である。

ここで、高品質なレーザー溶接・切断を実施するためには、配管内での正確な位置決め作業が必須である。このため、本ロボットはヘッド本体を配管内に固定するための機構を加工ヘッド内部に搭載し、正確な位置決めを実現している。現状では、モックアップ試験時にロボットの位置決めの様子を人の目視により確認可能であるが、ITER配管内でのロボットの位置決めの様子を確認することはできない。また、溶接・切断時に、健全な施工が実施されているかどうかの確認作業も必要であるが、現状では、対応する方法がない。これらの問題を解決するためには、加工ヘッド内部に監視機能を搭載し、溶接・切断作業前後に配管外部から人の目による確認を行う必要がある。しかしながら、現状の枝管溶接・切断ロボットの加工ヘッドには観察用の光学系を設置する空間的な余裕がない。また、枝管内部に伸びるノズルは、加工時に必要となるアシストガスを吹き付ける形状になっているため、施工上の観点から、加工点を観察することは困難である。

本件は非常に重要な課題であり、最優先で解決する必要があると考える。

### 3.3 枝管非破壊検査ロボット

冷却配管の溶接部については、非破壊検査及びリーク検査を実施し、溶接品質を確認すると共に、構造健全性を保証することが必要である。このため、配管溶接後の非破壊検査についても溶接・切断作業と同様に、配管内からのアクセスによる作業が要求されている。ところで、溶接後の非破壊検査については、通常の原子力施設ではX線による透過試験が義務付けられている。しかしながら、ITER炉内は放射化するため、X線検査を実施することは不可能である。このため、他の手段にて検査を実施する必要がある。現在、ITERではX線検査に代わるような配管継ぎ手の非破壊検査手法を検討しているが、国の許認可を得るための手法の確立と法律化には相当の時間と試験結果が必要であると考える。

本節では、このような観点から、炉内の主な構造物であるブランケットを対象として、冷却配管に内側からアクセスし、曲がり部を通じて任意の枝管を非破壊検査するロボットの開発について述べるとともに、ITERブランケットを対象にした非破壊検査試験とその結果について記述し、将来のITER炉内配管の非破壊検査の一手法として提案することとした。

#### 3.3.1 非破壊検査手法の検討

##### 3.3.1.1 非破壊検査の手法

被検体を破壊せずに欠陥の検査を行う非破壊検査手法[52]としては、放射線透過試験(RT)、超音波探傷試験(UT)、電磁超音波探傷試験(EMAT)、磁気探傷試験(MT)、電磁誘導試験(ECT)及び浸透探傷試験(PT)が一般的に使用されている。これらの検査手法の相対的な性能比較をTable3.20に示す。ITERでは、炉内が強度なガンマ線環境であること、高温環境下で使用可能であること、非破壊検査時の接触媒体が不要であること、構造部材の殆どがSUS316L鋼であることに着目し、本研究では、ITER保守シナリオにおいて非破壊検査の手法にEMATを使用することを提案する。

EMATは、電磁気的作用によって金属内に非接触で超音波を送信・受信することができる。EMATには超音波の駆動力にローレンツ力を用いるローレンツ型と、強磁性体内の磁区構造の変化を利用する磁歪(じわい)型がある。本研究では、ITERの冷却配管内壁を検査するという観点から、ローレンツ型が適用できることに着目し、ITERの枝管に適応可能なEMATの形状を考案して、配管内アクセス型枝管非破壊検査ロボットに搭載することにした。

Fig.3.41に示すように、ローレンツ型のEMATは、一般的に、平面コイルと永久磁石から構成されている。EMATを金属に近づけ、コイルに高周波電流を流すと、物質表面に時間的に変化する磁場が生じ、この変化を打ち消そうとする方向、つまり、コイルの電流とは逆方向に渦電流が励起される。渦電流は永久磁石が作る静磁場と作用しあい、金属内の自由電子に働くローレンツ力を産み出す。その結果、金属結晶はローレンツ力を受けた電子との衝突などの相互作用によって運動し、超音波の起振源となる。一般に、電子に働くローレンツ力が機械的な振動源に変換される過程は複雑であるが、常温で100MHz以下の周波数の場合、発生する超音波の振幅がローレ

ンツ力に比例すると近似することができる。通常の超音波計測では、ほぼこの条件が満足されているため、ローレンツ力そのものを超音波の振動源として考えることができる。ローレンツ力の方向はフレミングの左手の法則に従っている。Fig.3.42 に SH(Shear Horizontal)波斜角 EMAT を示す。EMAT は磁石セグメントを多数組み合わせ、一定の間隔で磁界方向が変化する周期磁界を発生させる。他方、被検面に平行な方向に電流が流れるコイル形状とすることにより、被検体表層に水平方向の渦電流が発生する。この渦電流は、被検面と直角方向成分の磁界との相互作用により超音波を発生する。このとき、磁界の方向が一定周期で変化しているため、各位置で発生する超音波の位相は、磁石幅( $D$ )の周期で 180 度毎に変化しており、各点での超音波の位相は、以下の式で示される方向( $\theta$ )で一致し、合成波面を形成する。

$$D \cdot \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

ただし、 $\lambda$  は超音波の波長とする。

故に、超音波は  $\theta$  方向に伝搬する。一般に、磁石幅( $D$ )は固定であり、超音波の波長  $\lambda$  についても被検体の条件によって決定されるため、超音波の屈折角を変化させるためには周波数を変える方法が妥当である。超音波の屈折率は周波数が高くなるほど小さく(被検体表面と垂直な方向に)なり、周波数が低くなるほど大きく(被検体表面に平行な方向に)なる。

EMAT の長所と短所を以下にまとめて示す。

- ① 従来の超音波探傷法では不可欠な油等のカプラント(接触媒体)が不要で、安定な探傷が可能である。
- ② 高温等の耐環境性に優れている。
- ③ 特殊なモードの超音波(SH 波や表面波等)が発生可能である。
- ④ 電気－音響変換効率が低いため、必要な検出性を得るために、大出力送信装置と低雑音で高い増幅率を有する受信装置が必要となる。

EMAT については、従来その耐熱性・耐放射線性から、高速増殖炉及び軽水炉のループ室内機器の運転中若しくは供用期間中検査を対象として開発してきた。EMAT の現状技術とブランケット冷却配管検査に要求される条件の比較を Table3.21 に示す。

本研究では、ブランケット冷却配管に適用可能な非破壊検査手法として位置づけるために、枝管の形状に対応して直径 54.5 mm 以内に探傷素子を小型化し、肉厚の 10 %程度の欠陥の検出を可能とするように EMAT の構築を行うこととした。次節以降に ITER 用冷却枝管に適した EMAT の設計・製作について述べる。

Table 3.20 Relative Comparison of NDT Methods

NDT Method	Austenite Steel		Other Metal	
	Inner Flaw	Surface Flaw	Inner Flaw	Surface Flaw
RT	◎	△	◎	△
UT	△	△	◎	△
EMAT	○	△	○(Magnetic:◎)	△
MT	×	×	×	◎(Magnetic)
ECT	×(Thin plate:△)	△	×(Thin plate:△)	△
PT	×	◎	×	◎

◎: very good

○: good

△: depend on purpose and conditions

× : difficult

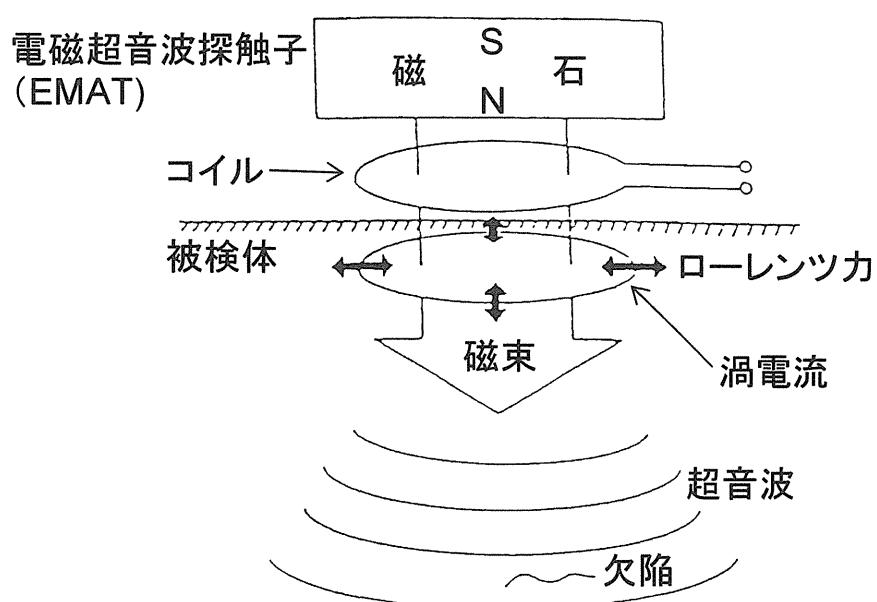


Fig.3.41 Principle of EMAT

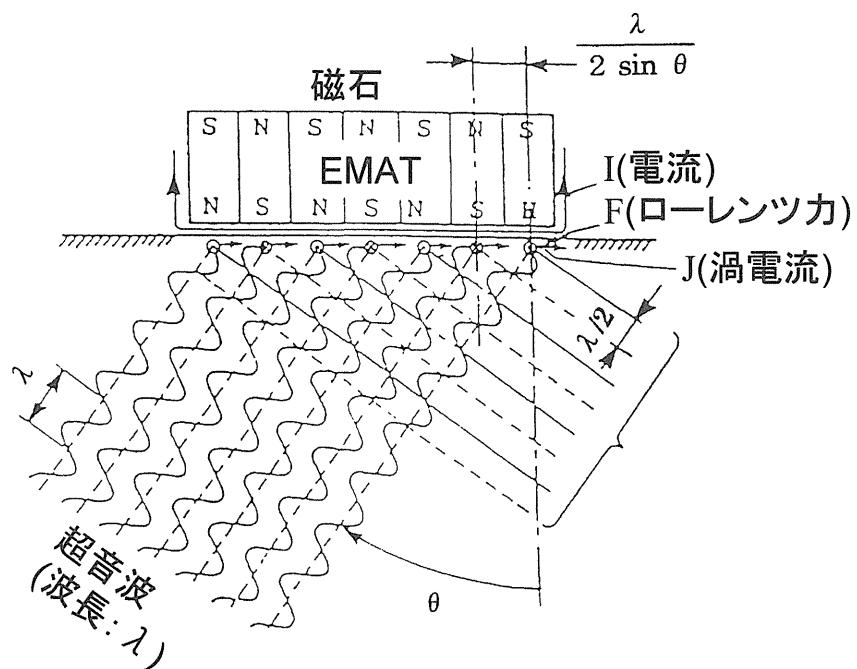


Fig.3.42 SH wave of EMAT

(実際には振動方向は紙面方向であるが、便宜上紙面と平行に記した)

Table 3.21 Present Status and Target of EMAT R&amp;D

	Present Status	ITER Requirements
γ-radiation	10 Gy/h	~1kGy/hr
Total Dose	10 MGy	10~100 MGy
Atmosphere	Air or Inert gas	Inert gas
Temperature	~350°C	~50°C
Capability (Relate to thickness)	10% <i>t</i>	10% <i>t</i>

### 3.3.1.2 センサの構成と配置

EMAT を非破壊検査の手法として選択し、配管内ロボットに搭載するためには、その形状に合致するように製作する必要がある。基本的に、EMAT は送受信素子 1 組（2 個）で使用し、それぞれにコイルと永久磁石で構成されている。そして、それらを適切に配置して送信側から対象物に超音波を送信し、欠陥からのエコーを同構造の受信側で検知することにより、検査対象物の欠陥を検知する仕組みである。従って、枝管の曲率と欠陥位置に合わせて、EMAT の送受信素子の位置関係を決定する必要がある。一般に、EMAT の送受信素子を配置する方法として、Fig.3.43 に示すように、①透過法、②タンデム法、③反射法がある。どの方法による欠陥探傷が良いかを検討するため、各配置での探傷試験を行った。本試験においては Table3.22 に仕様を示す EMAT を試作し、試験を行うこととした。試験では、肉厚 3mm の SUS316L 材 50A 配管もしくは板厚 4mm の平板試験片に YAG レーザー溶接を施し、溶接ビードの熱応力集中部に肉厚に対して 30% の深さの人工スリットを入れたものを検出することにした。これら 3 種類の配置法について、50A 配管の内面側から探傷を行う上で、次の観点から最適な EMAT センサの探触子配置の検討を行った。

- ・ 大電流を送信用 EMAT に流し、微小信号を受信用 EMAT で受信するため、送信信号の受信側への影響が少ないこと。
- ・ 板厚が薄いため各種の超音波モードが混在しやすいことが考えられる。故に、主となる超音波信号以外のモードの超音波が少なく、欠陥からの反射エコーもしくは透過エコー以外の超音波ノイズが少ないこと。
- ・ 欠陥による超音波エコーの検出レベルが大きいこと、すなわち、検出感度が高いこと。
- ・ 送受信用 EMAT を組み合わせた形状が小さいこと。

以下にそれぞれの方法による試験結果を示す。

Table 3.22 EMAT specification for arrangement tests

Frequency	700KHz
Wave mode	SH ultrasonic wave
Beam angle	About 64.4 degree
Heat proof temperature	150 degree C
Magnet	
- Material	SmCo, 8 elements
- Height	7.5mm
- Width	5.0mm
Coil	
- Material	Polyamide based print-coil
- Length	30mm
- Width	12mm

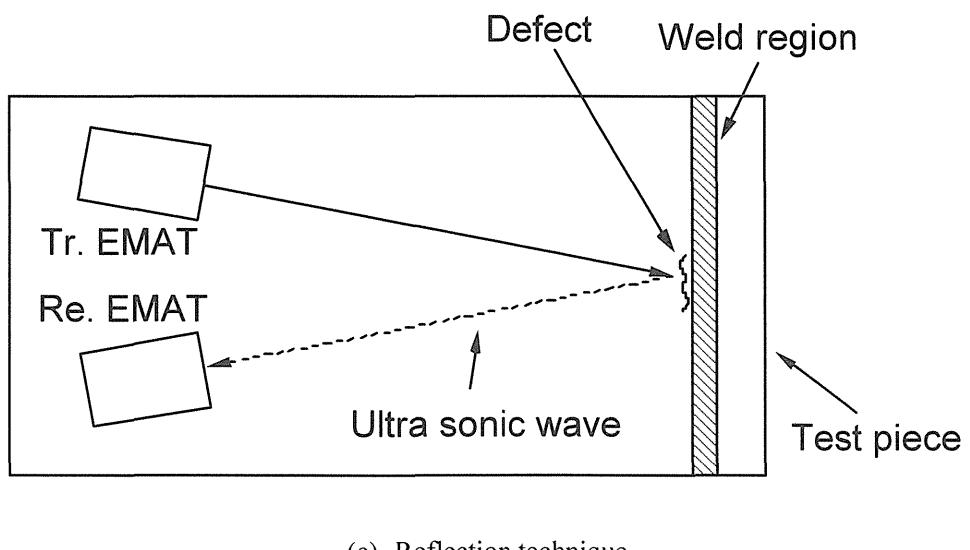
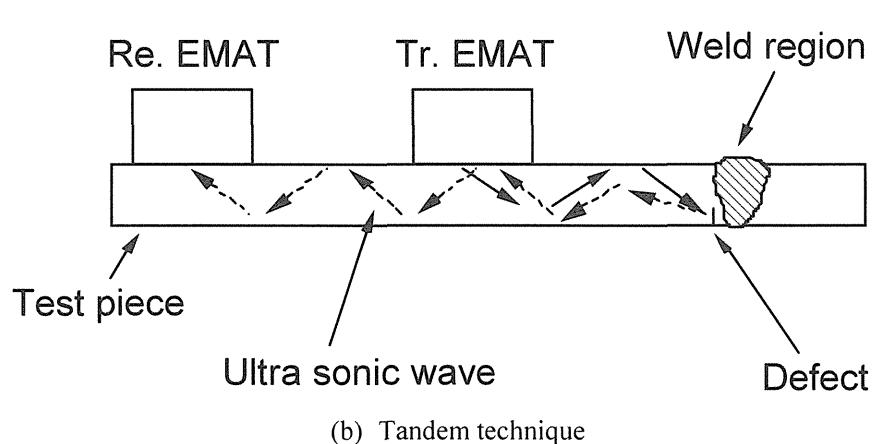
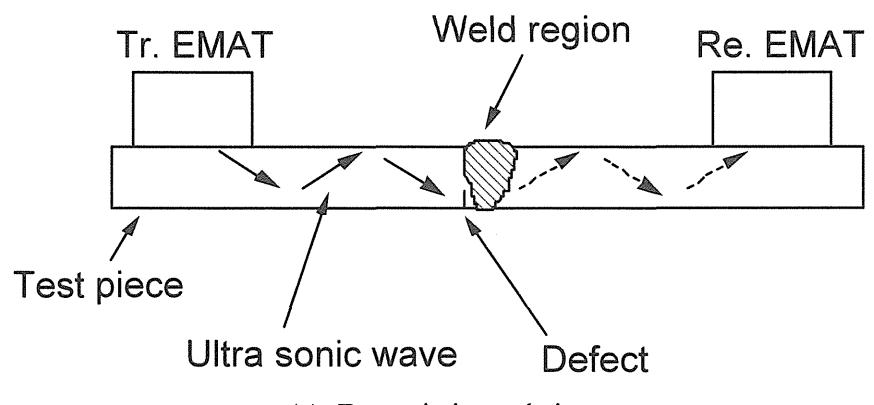


Fig.3.43 EMAT arrangement methods

### ① 透過法

溶接部を挟むように同一直線状に送信用 EMAT と受信用 EMAT を対向させて配置し、送信用 EMAT から受信用 EMAT に透過してくる超音波を検出する。超音波は配管の軸方向と平行な方向に進み、超音波の伝搬経路上に欠陥がある場合、欠陥で反射した超音波は受信用 EMAT には到達しないため、透過する超音波が少なくなり、欠陥の有無を検知する。

Fig.3.44 に透過法の配置で得られた探傷波形を示す。無欠陥部分での探傷波形と比較し、30%スリット部分の探傷波形では、ほぼ同じ時間に得られるエコー信号のレベルが、特に内部スリット部分で小さくなっている。しかし、無欠陥部分のエコー信号に比較して、欠陥による信号レベルの変化が非常に小さいことから、かなり注意深く観察しないと見逃す可能性がある。また、得られる信号エコーの時間が前後することから、4 回底面に反射して得られる信号と、5 回底面に反射して得られる信号等が一緒に検出されているものと考えられる。従って、ある経路ではスリットによる超音波の反射が生じるが別の経路ではあまり影響されないなどの理由で、著しい信号の変化が見られないものと推定される。これは、肉厚 3mm に対して 1 回底面を反射する距離が 12mm 程度と、試作した EMAT センサの長さ(有効長 9mm)に比べて短いためである。受信感度を考慮するとセンサの長さをこれ以上短くすることは難しいため、信号処理等で信号レベルの変化を抽出する必要があるが、実際には溶接形状変化等による信号変化が考えられ、これらの識別は困難と考えられる。

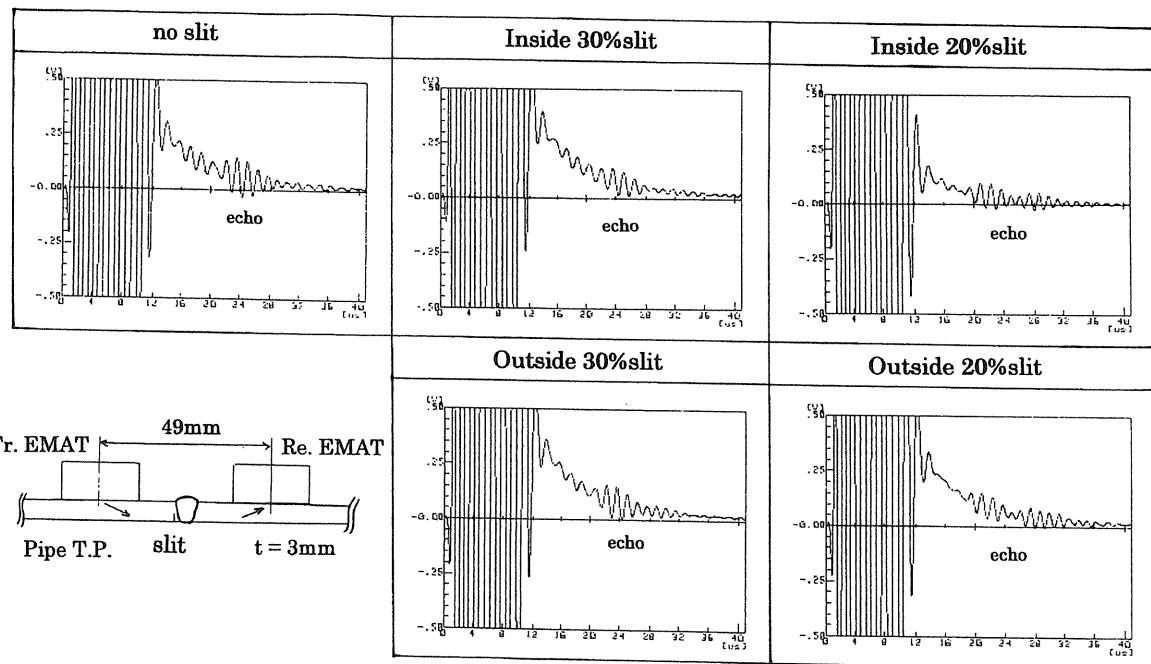


Fig.3.44 Result of NDI using the transmission technique

## ② タンデム法

送信用 EMAT と受信用 EMAT を同一直線状に前後させて配置し、欠陥により反射してくる超音波を検出し、欠陥の有無を検査する。超音波は透過法と同様に配管の軸方向と平行な方向に進む。欠陥が無い場合、超音波エコーは得られないが、EMAT の原理上、超音波は前後方向に発生するため、別経路での超音波エコーが検出される可能性がある。

Fig.3.45 にタンデム法の配置で得られた探傷波形を示す。送信用 EMAT の前後方向に超音波が発生する関係上、無欠陥部分においても超音波ノイズの信号エコーが得られている。これに対し、スリットからの反射エコーは、超音波の伝搬経路が長くなることから、これらの超音波ノイズより遅れて得られる。このため、送信信号による影響を避けることができる上、超音波ノイズと欠陥エコーとの識別がしやすくなっている。しかし、逆に、信号伝搬経路が長いために、超音波の減衰や散乱も多く、信号エコーレベルが小さくなっている。また、原理的にターゲットとする位置に欠陥が存在している場合に、検出感度は最も良く、その位置から外れるに従い検出感度は低下するため、実際の探傷においては管軸方向に走査する必要がある。

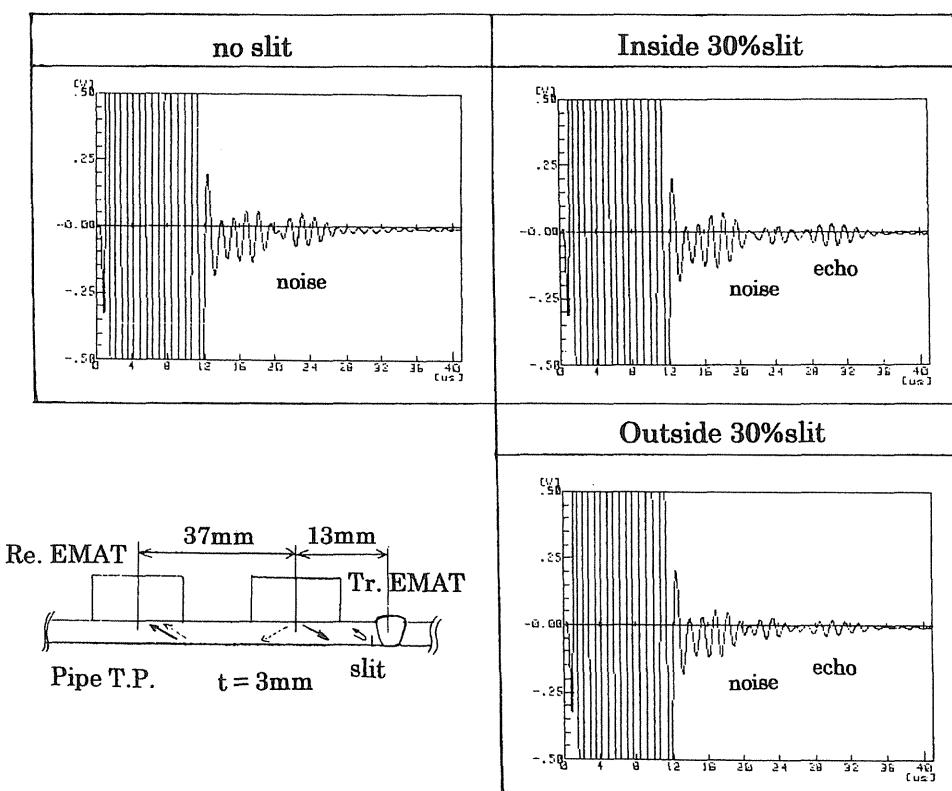


Fig.3.45 Result of NDI using the tandem technique

### ③ 反射法

送信及び受信用 EMAT を “V” の字に配置し、タンデム法と同様に欠陥から反射してくる超音波を検出して欠陥の有無を検査する。超音波は、EMAT の配管の軸方向に対して傾けた角度に進む。欠陥が無い場合、超音波エコーの反射は得られない。

Fig.3.46 に反射法の配置で得られた探傷波形を示す。30%スリットで、ノイズレベルよりやや大きな信号エコーが得られている。タンデム法と同様に、原理上、ターゲット位置に欠陥がある場合に最も検出感度が良い。他の探傷波形と比較して、信号のエコーレベルはおよそ 1/5 以下になっている。これは、信号伝搬経路がひときわ長いことに加えて、EMAT センサを管軸方向に対して斜めに配置したことにより被検体表面との間に隙間が生じたことによるものと考えられる。試作した EMAT センサは、磁石に多少の丸みを持たせているが、直線状に磁石を配置している関係上、曲面に対して斜めに配置するとセンサの中央部が浮いてしまう。Fig.3.46 の右側の 2 つの波形は、参考までに平板試験片の端面から反射してくる信号エコーを記録したものと、50A 配管の試験片の外側にセンサを配置し、端面から反射してくる信号エコーを記録したものである。これより、平板試験片に対して、配管試験片の外面にセンサを配置した場合、板厚の違い及び超音波の散乱による影響もあるが、端面からの信号レベルは 37%程度に低下している。さらに、配管試験片の外面にセンサを配置した場合と比較して、内面にセンサを配置した場合にはおよそ 60%に信号レベルは低下する。従って、この “V” の字配置を行う場合、配管の曲率に沿わせた EMAT センサを製作することで、検出感度を向上させることが可能であると考える。

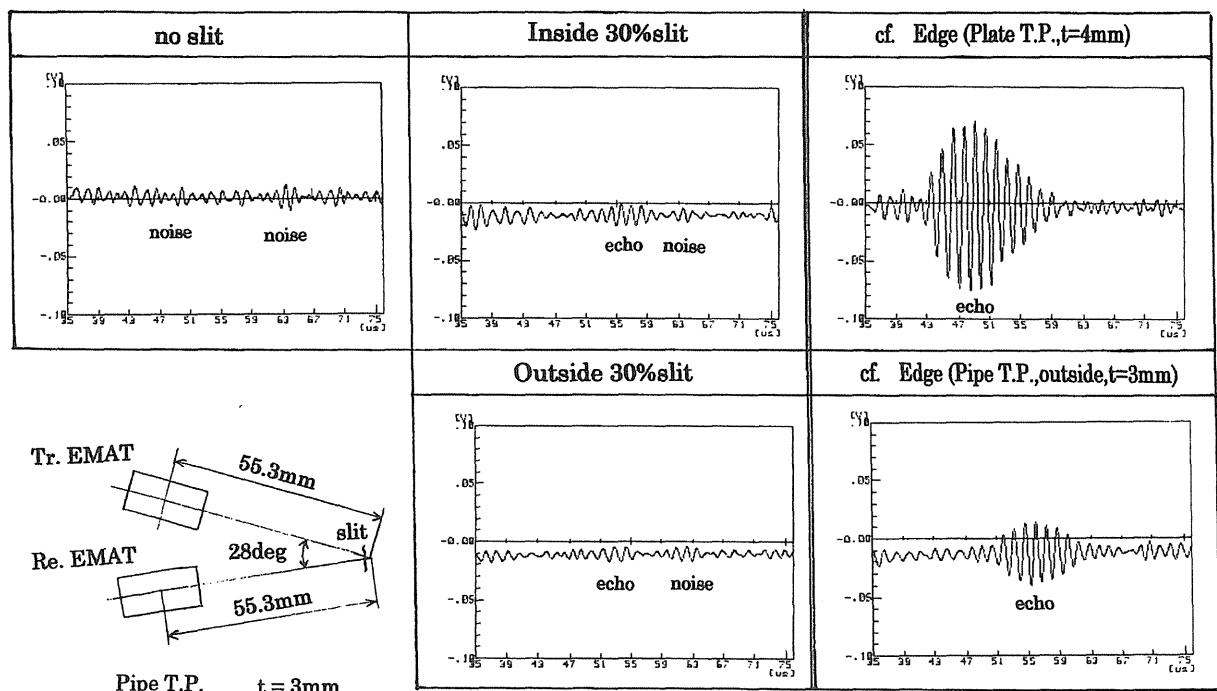


Fig.3.46 Result of NDI using the reflection technique

以上の結果から、EMAT 探触子配置についての評価は Table3.23 に示すようになる。

これより、探触子の配置としては、タンデム法か、反射法が望ましい。しかし、基本的に検出感度がまだ十分であるとはいえない。これら 2 つの手法のうち、タンデム法については EAMT センサの仕様を変更しなければ現状より感度向上は望めないが、反射法については製作方法を変更することで検出感度の向上が可能であると考えられる。従って、探触子配置としては、反射法の“V”の字配置を採用するものとしてセンサを再製作後、欠陥検出性能試験を行い、反射法の場合の EAMT の感度向上を狙う。

Table 3.23 Results of the arrangement test

センサの配置	送信信号の影響	超音波ノイズ	検出感度(検出性)	寸法形状	総合評価
透過法	× 路程が短い	× 別経路の信号 有り	× レベル変化が 小さい	△ 管軸方向に 長い	× ノイズとの 識別が困難
タンデム法	○ 路程がやや 長い	○ 管軸方向の 走査が必要	△ 信号レベルが 小さい	× 管軸方向に 長い	△ 検出感度が やや低い
反射法	○ 路程が長い	○ 管軸方向の 走査が必要	× センサの 再製作が必要	○ 管軸方向に 短い	△ 検出感度の 向上が必要

### 3.3.1.3 センサの形状

前節までに EMAT の配置について検討を行い、3 つの配置方法のうち反射法について、感度向上が期待できるとの結果を得た。この結果に基づき、ITER の冷却配管の検査対象である 50A の枝管形状に合致した EMAT を製作し、その感度向上について検討する。

Fig.3.47 及び 3.48 に前回までに検討を行った EMAT と 50A 配管の内面の曲率に合致して製作した EMAT についてそれぞれ示す。製作した EMAT を使用して比較試験を行った結果を Fig.3.49 に示す。この結果より、平板試験片での感度を 100%とした場合、配管試験片の内表面からの探傷における感度は、最初に試作した EMAT センサでは約 23%となるのに対して、50A 配管の内面の曲率に合致した EMAT では約 63%と、3 倍近くまで感度が向上していることがわかる。

この再試作した EMAT センサを用いて配管試験片に施したスリット欠陥の探傷試験を行った結果を Fig.3.50 に示す。なお、この結果は、A/D 変換機(DM-901：岩通社製)の出力をパソコンで取得したもので、10 回分の波形の平均値をプロットしている。この同期加算平均処理により、そのままの信号波形と比較してランダムノイズが若干低減されている。平均回数(N)に対して、 $1/\sqrt{N}$  にランダムノイズを低減可能である。

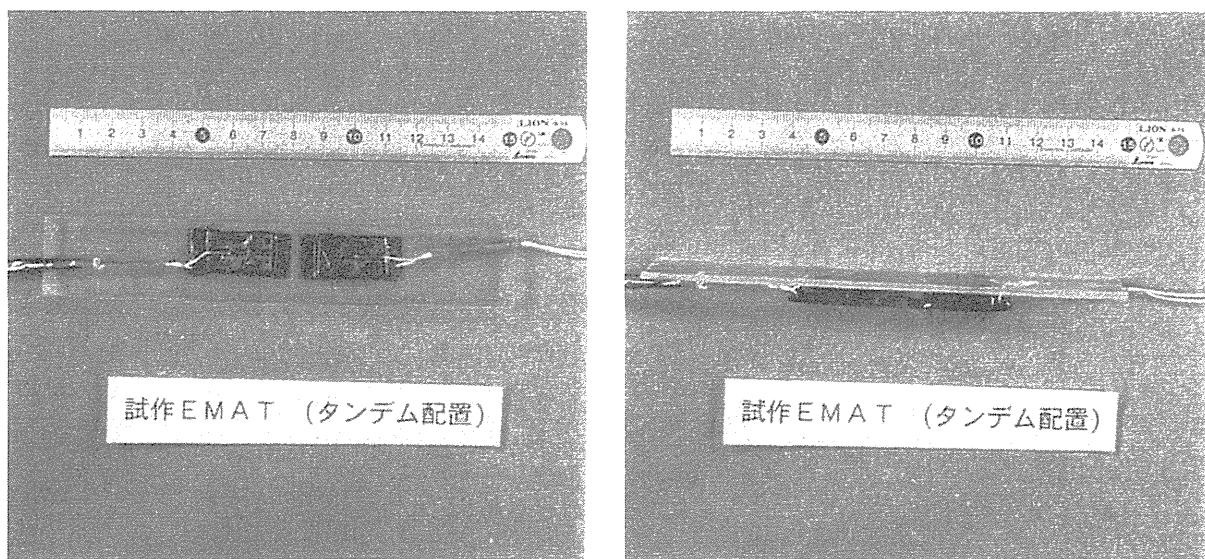


Fig.3.47 1st prototype EMAT with tandem technique

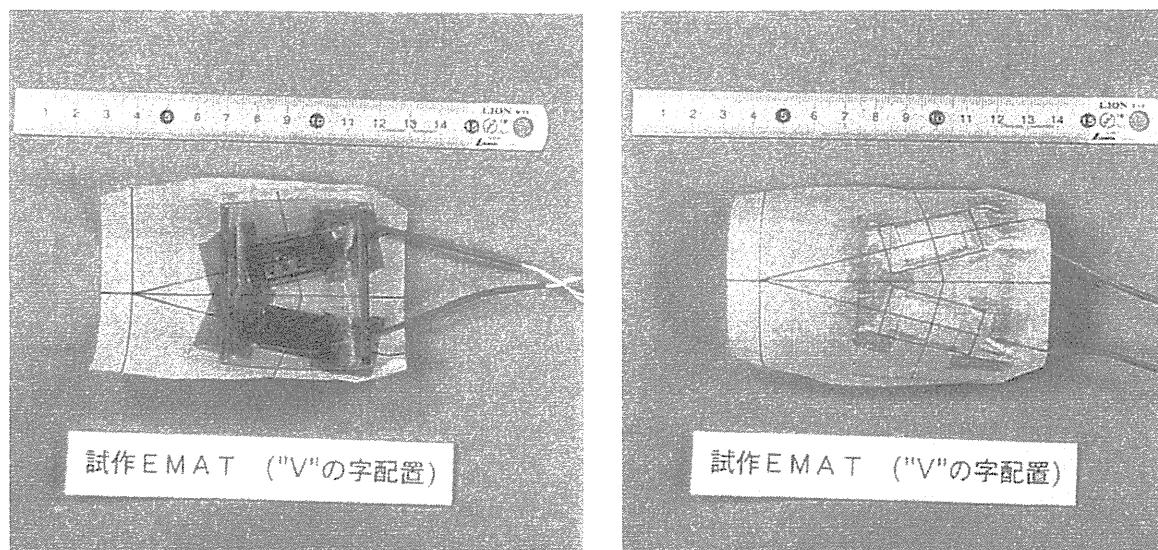


Fig.3.48 2nd prototype EMAT with reflection technique

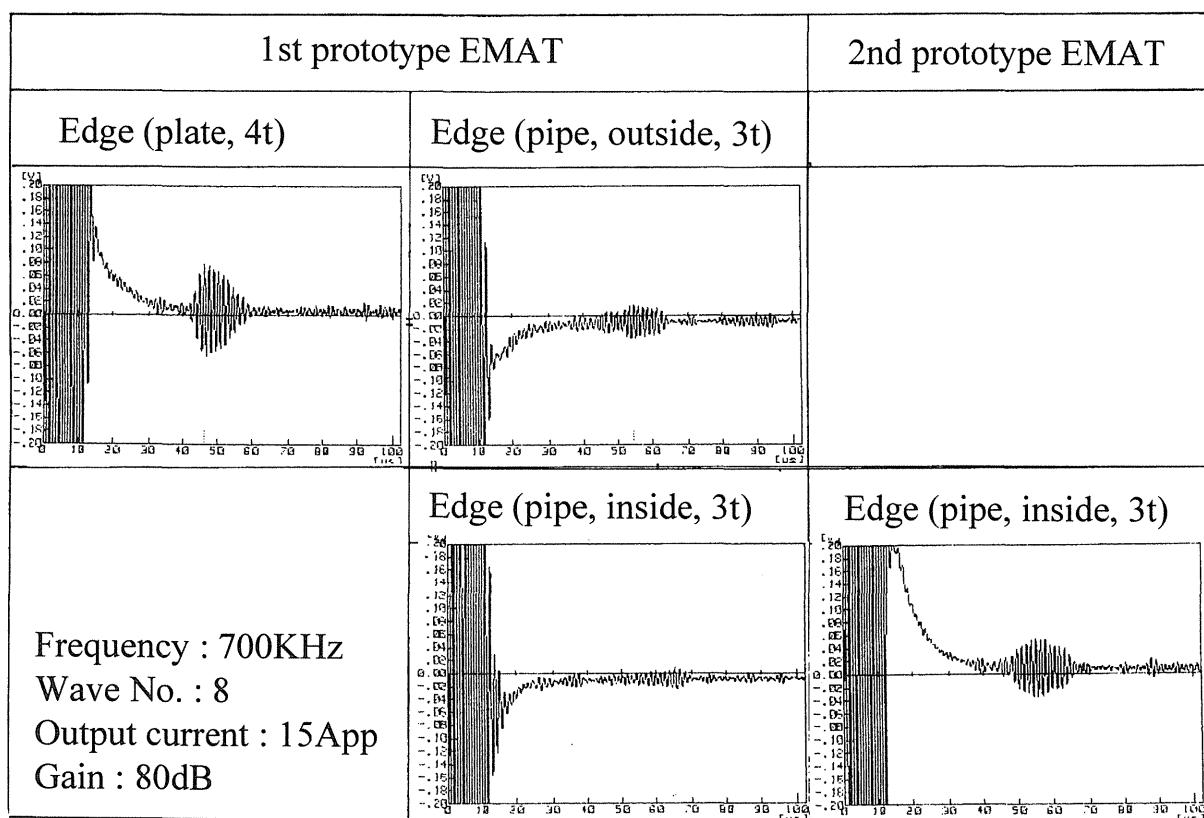


Fig.3.49 Comparison test with 1st and 2nd prototype EMAT

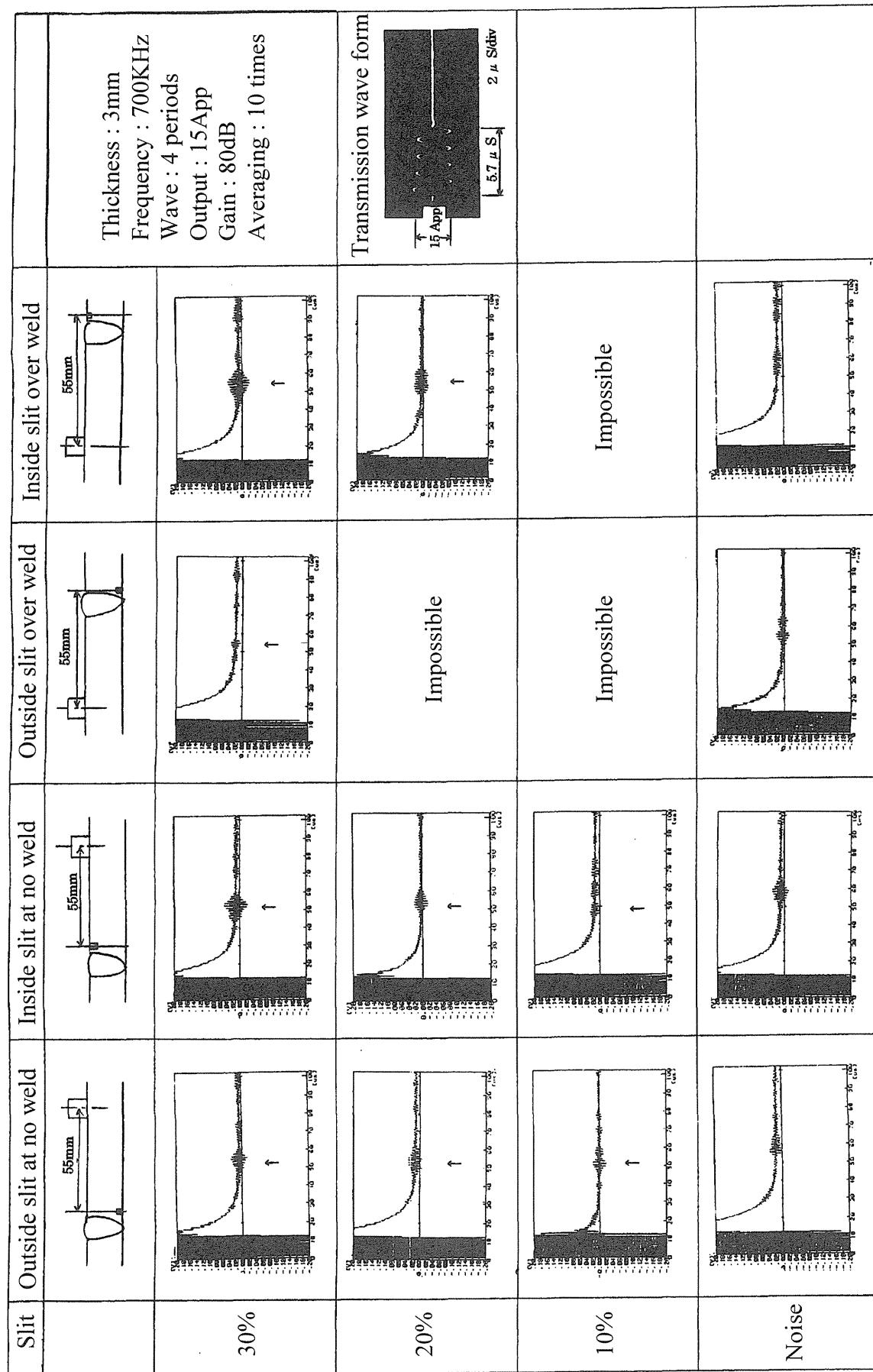


Fig.3.50 Results of non-destructive inspection test (NDIT) with the prototype EMAT based on the reflection technique

この結果から、ノイズレベルについては 50A の配管溶接部の形状変化からの反射エコーがあるため、32~57mVpp と高い反面、スリットからの反射エコーは 30~70mVpp とほとんどノイズレベルである。そして、S/N 比が明らかに 1 を超えるエコーは内面 30%t スリットのみであった。ただし、内面 30%t スリットで S/N 比はおよそ 1.26~1.74 で、母材側からと溶接金属を介してからでは、ともに同じ検出信号レベルが得られている。

以上、50A 配管の内側からの探傷を目的に、寸法形状を小さくした EMAT センサを試作し、欠陥検出試験を行った結果、次のことが明らかとなった。

- ① EMAT センサの配置は、センサ寸法及び超音波ノイズの面からは、反射法で“V”の字配置が良いと考えられる。しかし、枝管の溶接部までの距離 20mm 程度や、検査ヘッド部の枝管内への伸縮量を考慮すると、センサをより短くするか送受信 EMAT の開き角度を大きくする必要があるが、検出感度の点から困難と考えられる。
- ② 50A 配管の内面の曲率に合わせたセンサとすることで、曲率の影響による感度低下を抑えることが可能である。
- ③ 2 回目に試作したセンサ面の長さ 19mm の EMAT においては 30%t スリットに対して、S/N 比が最大 1.75 と 2 以上の欠陥信号が得られなかった。

以上の点を鑑み、枝管の溶接部の検査に EMAT センサを適用するには、さらなる検出感度の向上を行う必要がある。

### 3.3.1.4 センサの配置角度

前節までに 50A 配管の内面の曲率に合致するようにセンサの形状について検討を行ってきた。その結果、30%t の内面スリットに関して、S/N 比が 1.27~1.74 のように検出感度が向上した。しかしながら、実際に ITER 冷却配管内で使用するためにはさらなる感度向上が望まれる。そこで、送受信用 EMAT の配置角度に着目し、感度向上を目指した最適な配置について検討を行うことにした。

Fig.3.51 に示すように、これまでに検討を行ってきた送受信用 EMAT の配置角度を 26 度とし、送受信用 EMAT の角度を広めに配置した場合の角度を 80~120 度に変化させて、平板試験片を使用して比較試験を行った。平板試験片には板厚に対して 10, 20, 30, 50%t の人工スリットを施した。Fig.3.52 に EMAT と同平面上(平板の内面)にスリットを施した場合の試験結果を示す。同様に、Fig.3.53 には EMAT と反対平面上(平板の外側)にスリットを施した場合の試験結果を示す。それぞれの試験では、64 回分の波形の平均値をプロットしている。これらより、無欠陥部分での信号レベルをノイズレベルとして各大きさのスリット欠陥から反射エコー信号の S/N 比をスリット検出性能として求めた。送受信間角度に対するスリット検出性は Fig.3.54 に示すように送受信間角度が 100 度の場合が最も良い S/N 比が得られている。反対に、これ以上の角度になると無欠陥部分での信号レベルも高くなるため、S/N 比は低下している。スリット欠陥に対する検出性能については、最も S/N 比の良い送受信間角度 100 度の場合において、20%スリット以上が S/N 比で 2 以

上あり、検出が可能であった。そして、これまでに検討していたセンサ配置とのスリット欠陥の検出性の比較では、Fig.3.55 に示すように送受信間角度を 100 度とした配置の方がおよそ 2 倍近い S/N 比が得られていることがわかる。以上の結果から、送受信間角度を 100 度にするとともに、検査箇所までの距離を短く EMAT を配置することで、スリット欠陥の検出性能が向上可能であることを明らかにした。

以上の結果より、50A 配管の内面の曲率に合わせた形状で、センサの配置角度を 100 度とした EMAT を製作して、ロボットに搭載することにした。

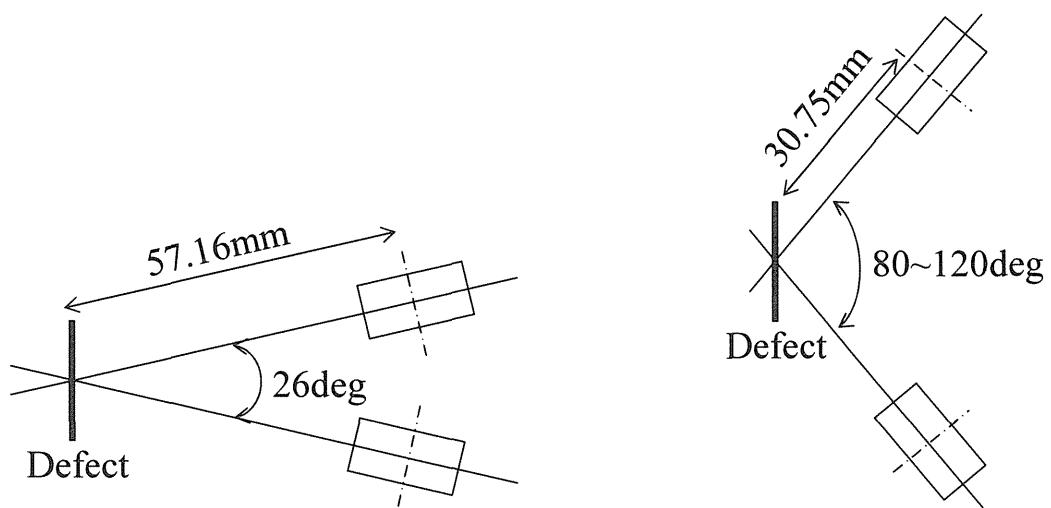


Fig.3.51 Comparison of the arrangement of EMAT

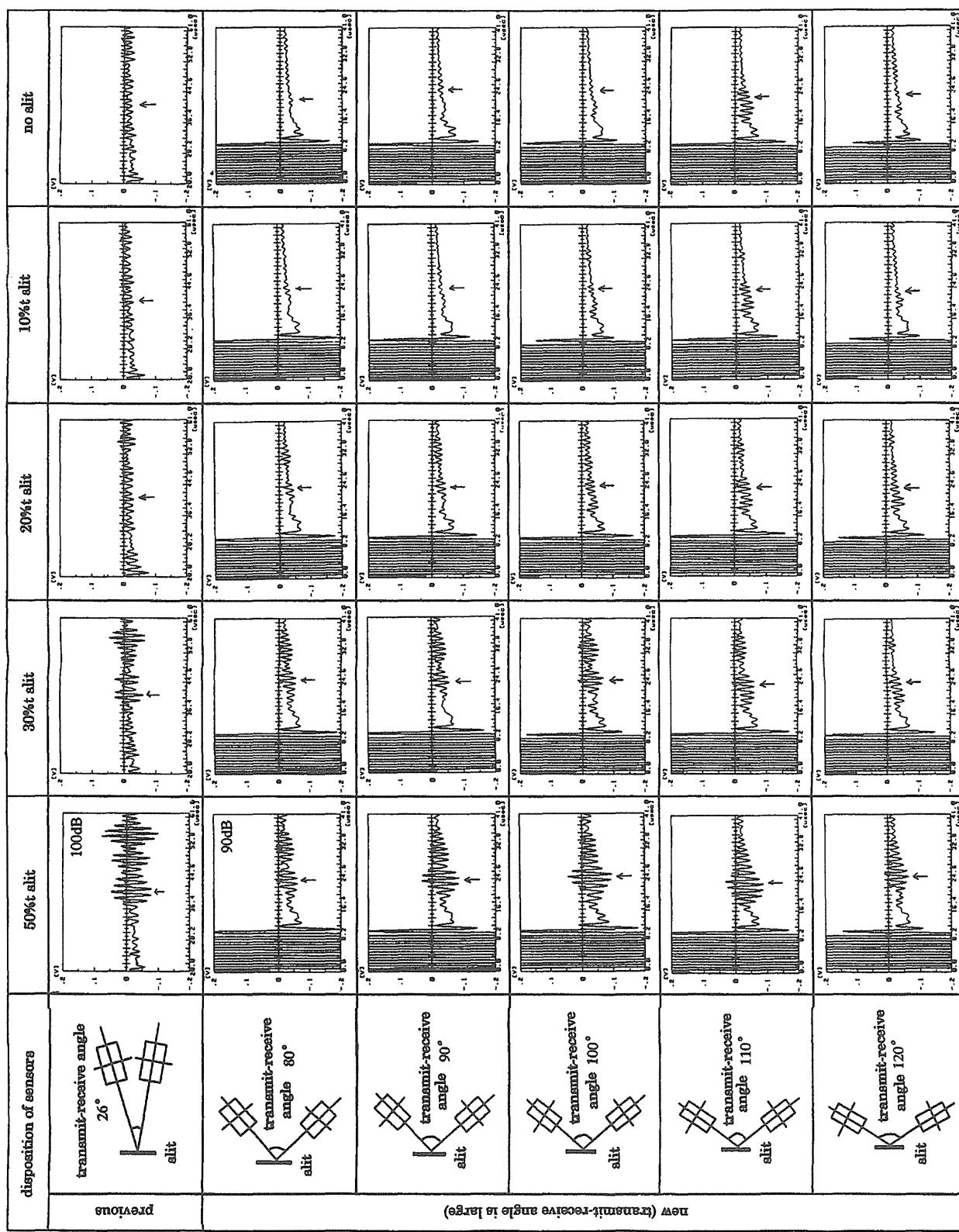


Fig.3.52 Wave form of the angle test in the case of inside defect

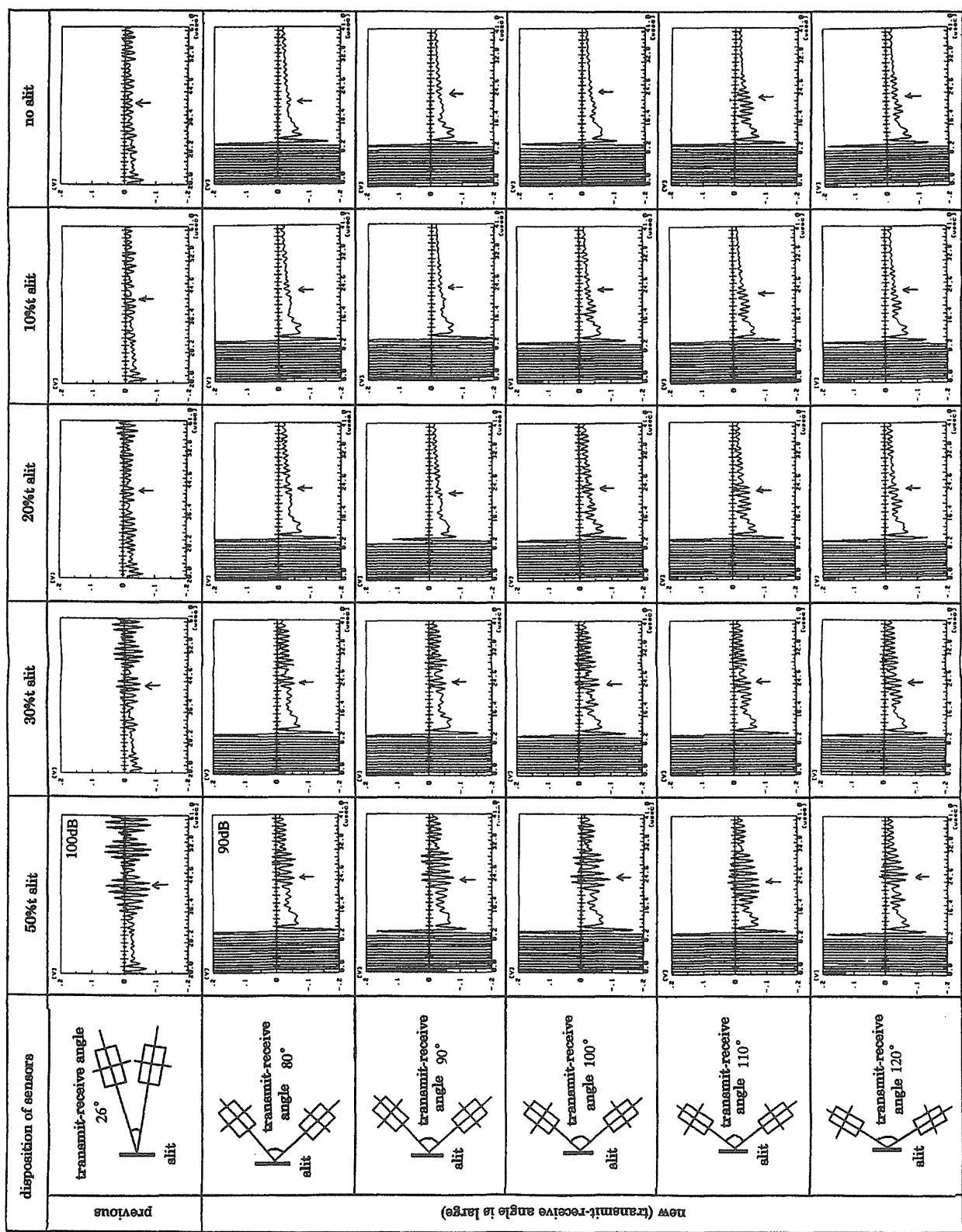


Fig.3.53 Wave form of the arrangement test in the case of outside defect

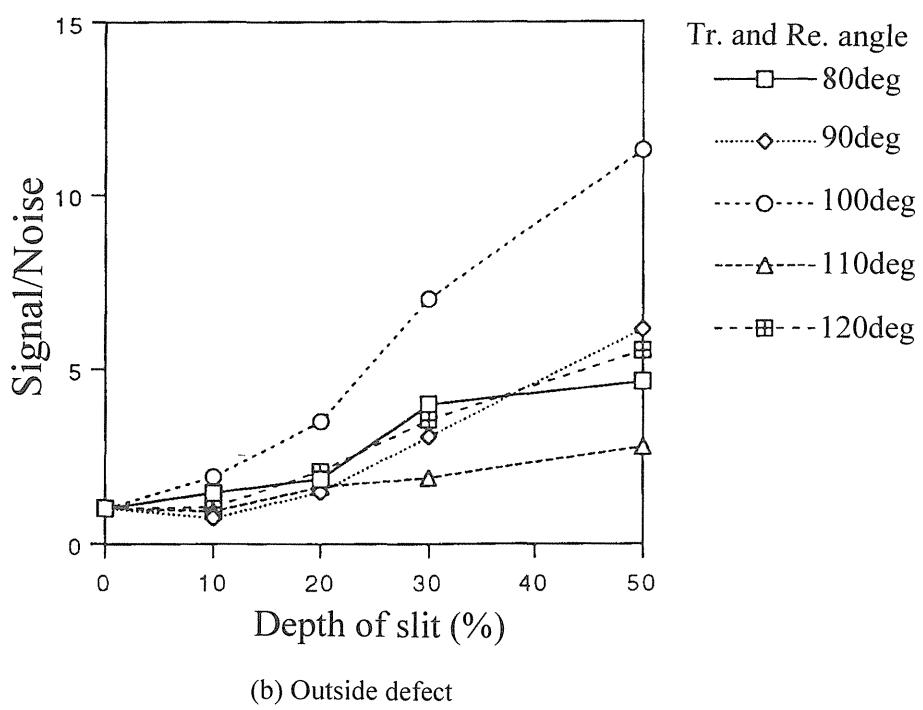
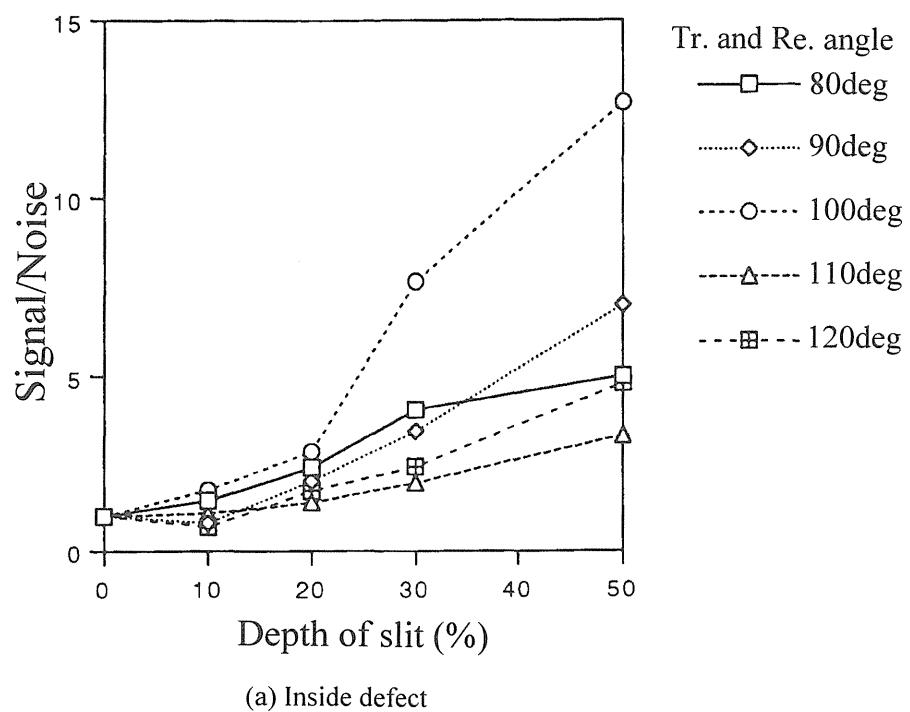


Fig.3.54 Detectability of the slit depth in various sensor arrangement

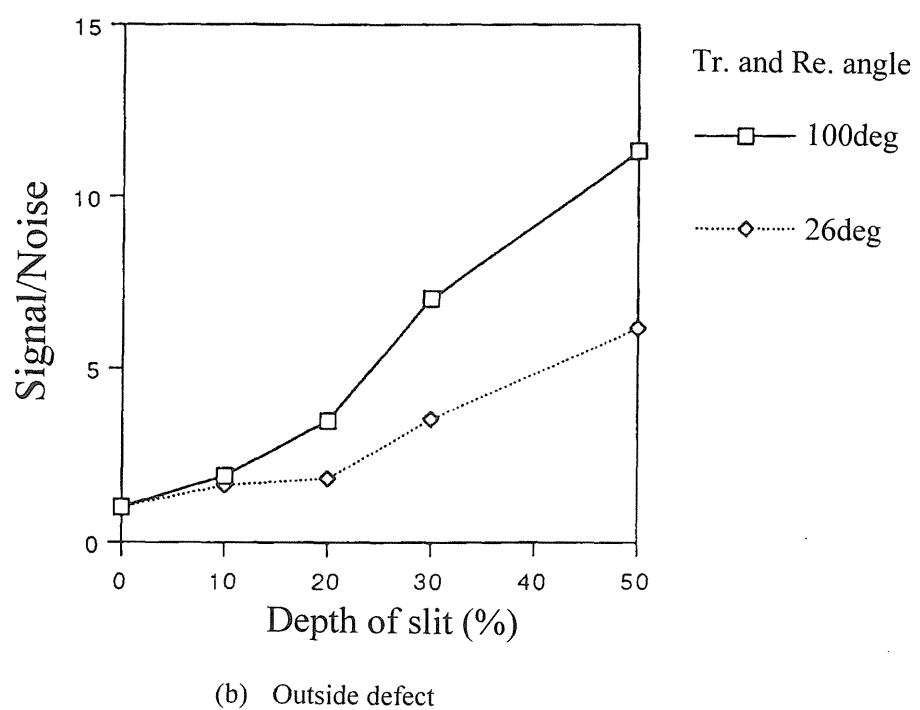
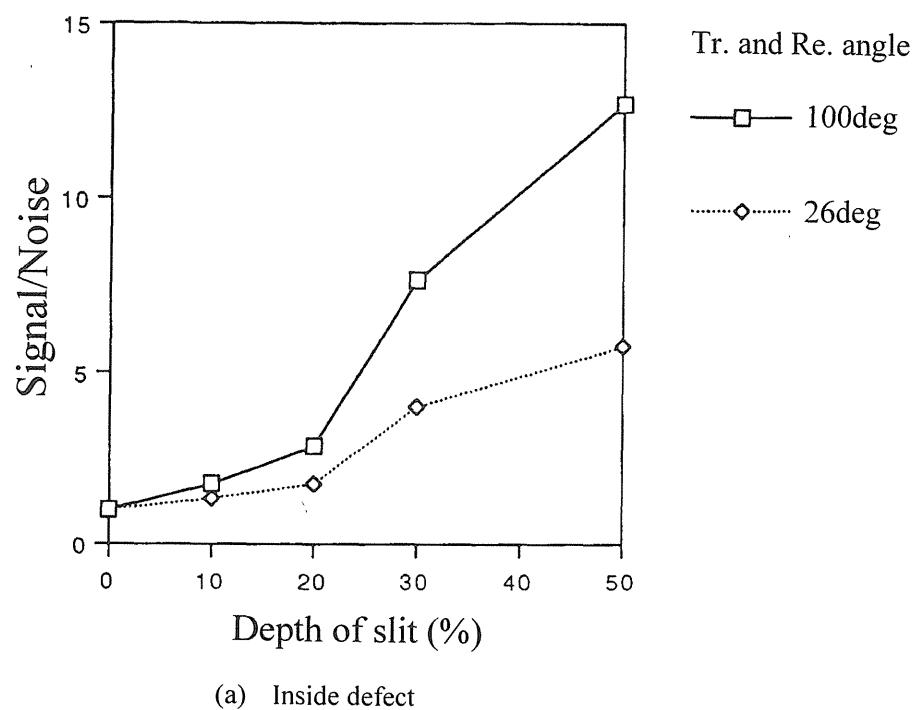


Fig.3.55 Detectability of the slit depth in sensor arrangement of 26 and 100 degrees

### 3.3.2 非破壊検査ロボットの機器構成

非破壊検査用センサの基礎性能試験結果を踏まえ、実際に配管溶接部の非破壊検査を行うことが可能なロボットを検討した。そして、①非破壊検査時にセンサと被検体間の接触媒体を必要としないこと、②溶接部に信号を透過させ易いこと、③耐放射線性の実績があること等を考慮し、電磁超音波探触子(EMAT)を搭載することが可能な非破壊検査ロボットの設計と製作を行った。

プランケットに付属する枝管を非破壊検査する際、非破壊検査ロボットは、溶接・切断ロボット同様にプランケットの上部配管から挿入後、曲率(母管中心最小半径400 mm)を持つ母管内を走行し、任意の枝管まで到達し、非破壊検査を行う機構が必要である。このとき、配管内を移動可能な機構は、溶接・切断ロボットと同様に、長さ20 cm程度、直径が97 mm程度以内(配管の扁平率を考慮する)の構造体に搭載することが要求されるため、いくつかの台車に機能を分散し、それを数珠繋ぎにすることで、移動、配管内での固定、非破壊検査、の各機能を達成することとした。

非破壊検査ロボットの場合、溶接・切断ロボットとは異なり、レーザー溶接・切断用光学システムをヘッド内部に搭載する必要が無く、また、レーザー伝送用の光ファイバを導入する必要も無いため、配管内でのロボット構成に際して、空間的制約条件に若干の余裕がある。このような条件を鑑み、溶接・切断ロボットで検討を見送った車輪(タイヤ)による配管内移動方式を採用し、ロボットの移動機構の検討を行うことにした。

Fig.3.56に製作した枝管用非破壊検査ロボットを示す。ロボットは全部で6つの俵形状の台車から構成され、それぞれの台車は、ユニバーサルジョイントを使用して連結している。各台車間の距離を長めに接続することで、曲率を持った配管内を円滑に走行することが可能である。

第1及び第5台車は、配管内を移動するための移動機構である。溶接・切断ロボットの場合、YAG レーザーを伝送するための光学系をロボットの中心に搭載しなければならないという空間的な制約条件があり、移動機構部は押しつけパッドによる尺取虫走行を採用し、台車内部の空間の節約を図った。しかし、非破壊検査ロボットの場合、そのような空間的な制約条件がないため、移動手法には通常のタイヤ式走行を採用した。台車には耐放射線性を考慮し、走行用と反力受け用にポリイミド性のタイヤを搭載し、それぞれの台車は協調して動作することとした。タイヤは4輪とし、配管内の4方向への押し付けを実現した。また、配管内を走行中、どちらかの台車が枝管部に脱輪した場合、脱輪した方のタイヤは配管内への押し付け動作をやめ、タイヤを一旦収納し、枝管部を片方の台車で乗り越え、その後、収納したタイヤを正常動作に復帰したものとした。

第2台車は非破壊検査を行うためのセンサを搭載した台車である。台車を配管内に固定する機構、枝管位置検出機構、伸縮型の非破壊検査用センサヘッドを枝管内に挿入する機構(R軸)、非破壊検査用センサを枝管内で回転させる機構( $\rho$ 軸)が搭載されている。非破壊検査時には、芯だし機構によって母管に検査ヘッドの固定を行い、伸縮部が枝管内にアクセスし、枝管溶接部の非破壊検査を行う構造とした。

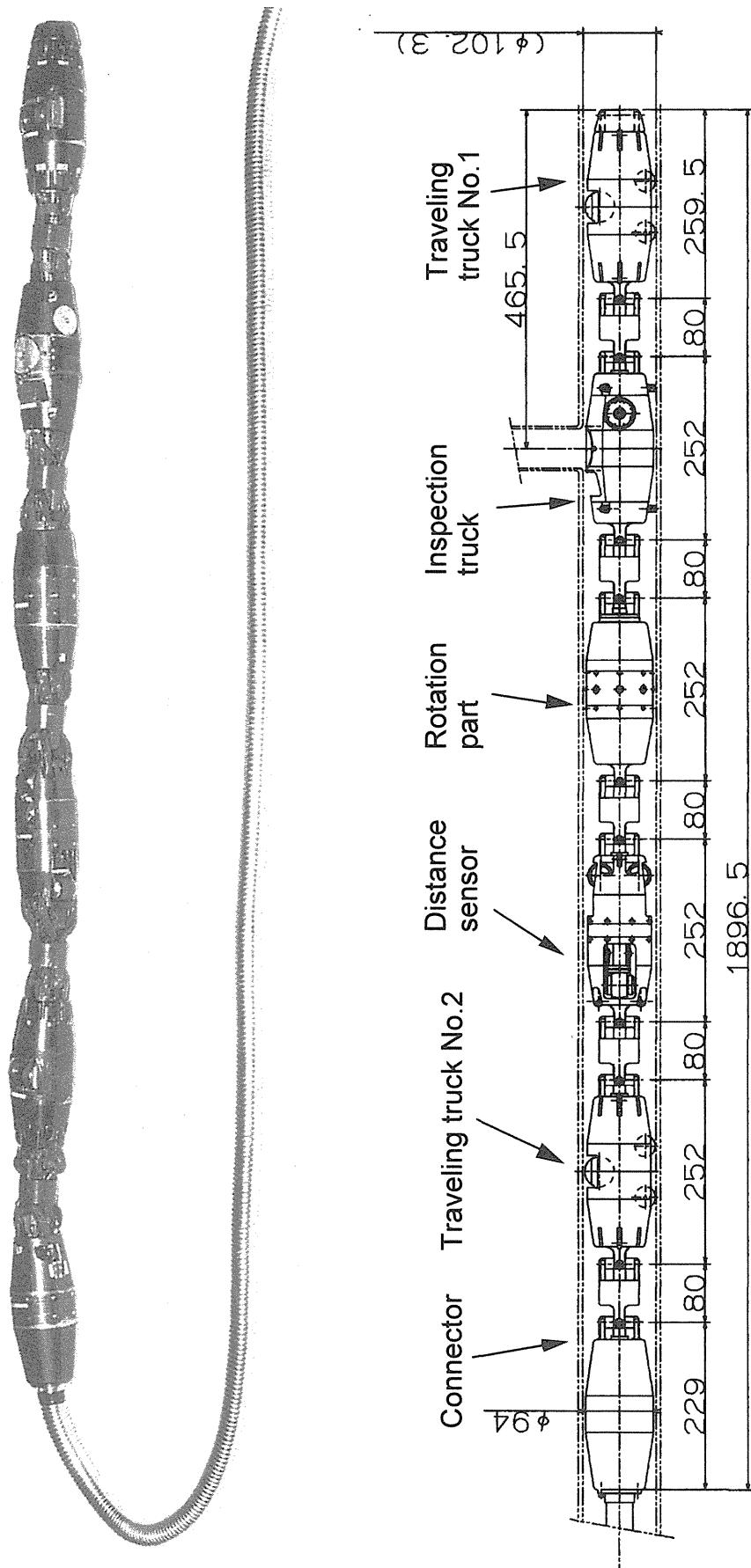


Fig.3.56 The non-destructive inspection robot with EMAT for the branch pipe

Fig.3.57 にロボットに搭載するために製作した EMAT の外観を, Table3.24 に EMAT の仕様を, Table3.25 にロボットの各軸の動作仕様をそれぞれ示す. 非破壊検査は送信側と受信側のそれぞれの EMAT を“V”の字になるように配置し, 反射信号を検知することによって, 溶接部の欠陥を検出する. Fig.3.58 に EMAT をロボットに搭載した様子を示す.

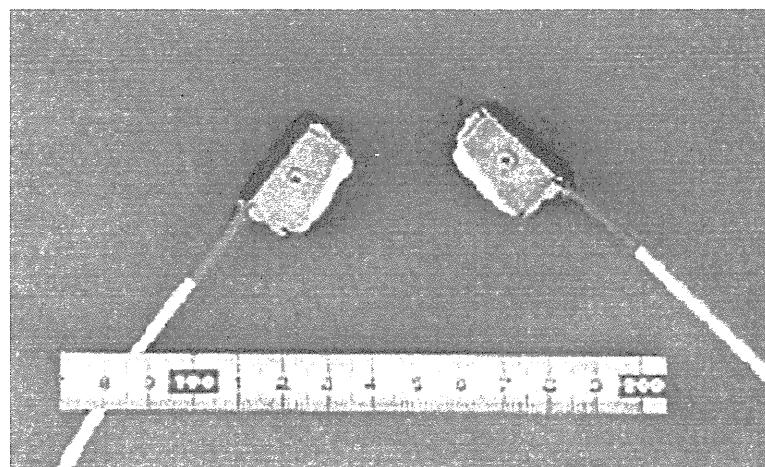
第 3 台車には, 第 1, 2 台車を配管内で回転させるための回転機構 ( $\theta$  軸) を搭載し, 配管内の枝管位置と EMAT を搭載した伸縮部との位相を合致させるために使用する.

第 4 台車は, 移動距離測定用の台車で, 距離測定用のローラを互いに 90 度ずらし, 配管内の 4 方向への押し付けを確保している. ロボットが移動することによってローラは回転し, 移動距離が計測される. 配管内への押し付け力は移動用台車と同様に, エアを供給することで実現している. 緊急時には, エアの供給を遮断することで, 移動用台車と距離計測用台車のタイヤはそれぞれ台車内へ速やかに収納され, ロボットを外部から引っ張ることで救済できるものとした.

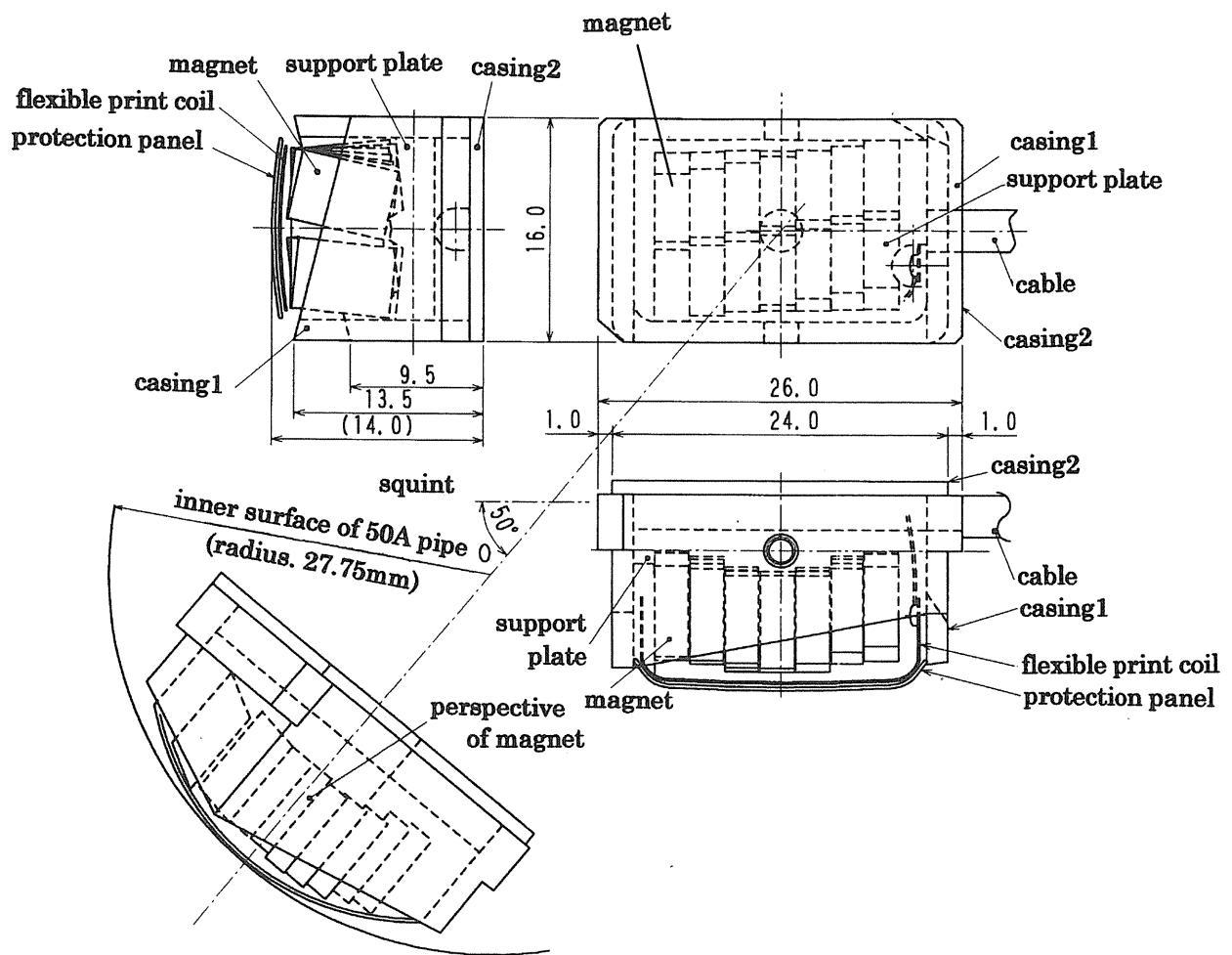
製作した非破壊検査ロボットを水平部と垂直部の立ち上がりと曲がり部を持つ配管内に挿入し, ヘッド全体の位置決め精度, 速度, 牽引力の測定を行った. 各軸動作には, 汎用のロボットコントローラと MMI (Man Machine Interface) 用に Windows NT を使用して動作制御を行った.

移動試験では, 移動用タイヤを配管内に押し付け一定距離を前・後進させた. 結果, 枝管部による移動台車の脱輪もなく, 半径 400 mm の曲管内でも問題なく移動することが確認できた.

移動速度は約 1.5m/min 程度と設計通りであったが, 距離計測部が 1 台しかなかったため, 枝管乗り越え時にローラが空回りし, 移動距離の計測に誤差が生じた. これは, 今後, 距離計測台車を 2 台に増設し, それに測定した距離を互いに補正することと, 枝管の数をカウントすることで, 移動距離の補正が図れるものと思われる. また, 2 台の移動台車での牽引力は設計値より低めで, 40 Kgf 程度であった. これは, 移動用タイヤをポリイミドで製作しているため, 通常のゴムタイヤより固く, 十分な押し付け力が得られていないためと推測される. このため, 将来, 実機での試験を実施後, 牽引台車の数を増加させることで牽引力を増加させることを検討する.



(a) Appearance of the fabricated EMAT



(b) Schematic view of the EMAT

Fig.5.57 Appearance of the fabricated EMAT for branch pipe inspection

Table 3.24 Specifications of the fabricated EMAT for the 50A pipe

Item	Specification
Inspection method	EMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer)
Frequency	700 kHz
Wave mode	SH ultrasonic wave
Beam angle	about 64.4 degree
Magnet	SmCo, 7 elements
Coil	polyamide based
Arrangement	V position (reflection technique), angle of 100 degree
Dimension - Length	(EMAT is shaped inner surface of 50A pipe) 26 mm (including case)
- Width	16 mm
- Height	14 mm

Table 3.25 Specifications of the tool movement

Axis name	Symbol	Range	Speed	Insertion stroke
EMAT up & down	R	27 mm	20 mm/sec	28 mm
EMAT rotation	$\rho$	$\pm 185$ deg.	90 deg./sec	-
Tool rotation	$\theta$	$\pm 185$ deg.	75.9 deg./sec	-

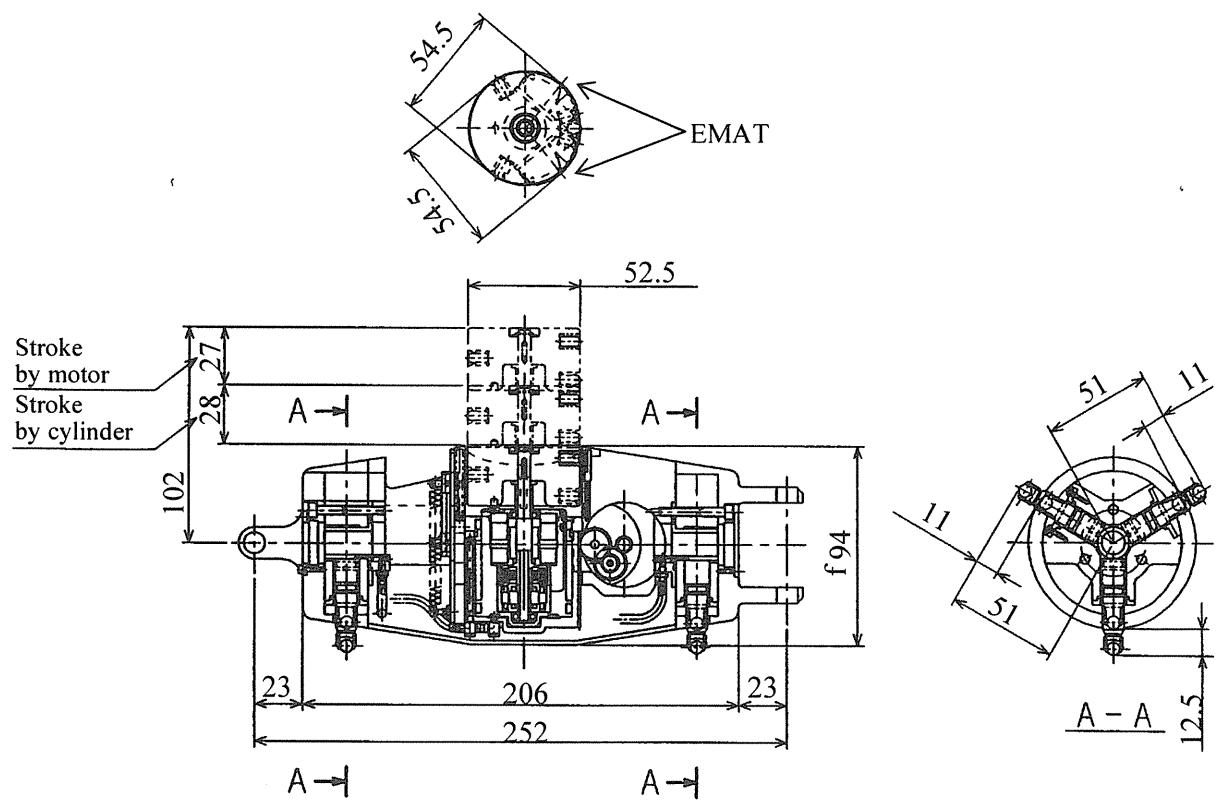
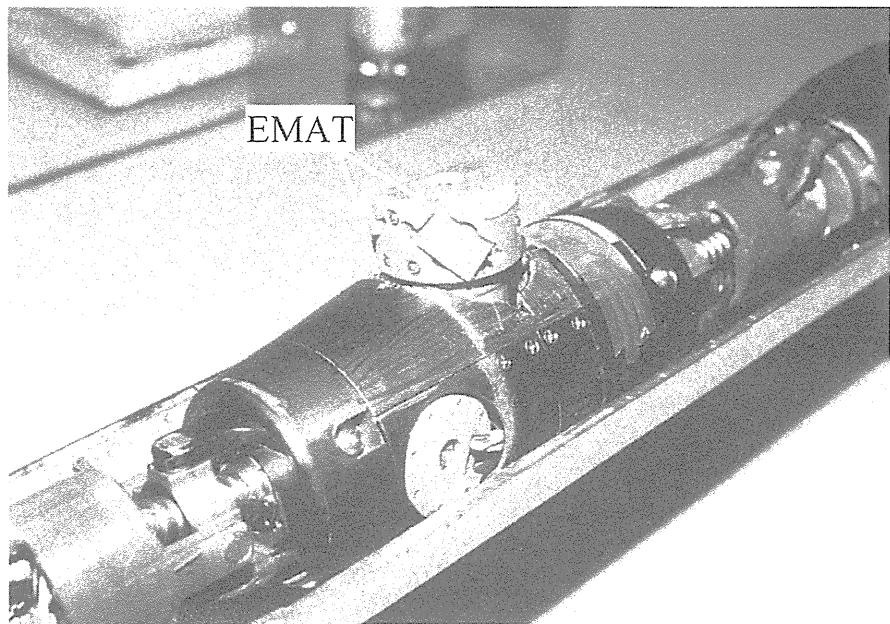


Fig.3.58 Inspection truck with EMAT

### 3.3.3 非破壊検査試験

非破壊検査ロボットの製作と並行して、YAG レーザーにより溶接した配管の非破壊検査試験を行い、製作した EMAT の性能評価を行った。YAG レーザーによる溶接を行う際、溶接部には欠陥が生じにくいため、溶接直後の欠陥を検査するのではなく、配管内に冷却水が実際に流されたときに発生すると予測される欠陥を人工的に作成し、それを検出することにした。模擬欠陥は、溶接部を挟んで前後及び配管の裏表の計 4 カ所（溶接後の熱応力集中部）にそれぞれ作成した。

Table3.26 に試験条件を、Fig.3.59 に試験状況をそれぞれ示す。センサは配管内に “V” の字に配置し、配管とセンサ間の接触媒体は使用せず、軽く押し付けた状態で非破壊検査試験を行った。Fig.3.60 に非破壊検査時の欠陥の検出信号を、Table3.27 に試験結果をそれぞれ示す。試験結果から分かるように、溶接部の手前であれば 10% の人工欠陥は検出可能となった。また、溶接部を越えて欠陥を検出しなければならない場合は、20~30% の人工欠陥を検出可能であった。

Table 3.26 Conditions of the basic performance test for the fabricated EMAT

Item	Condition
Objective	SS316L pipe with thickness of 3 mm inner diameter of 54.5 mm
Welding condition	YAG laser with assist gas of nitrogen
Defect shape	
- Depth	0, 20, 30 % depth of pipe thickness
- Inside defect size	15 mm long (34.4deg), 0.3 mm width
- Outside defect size	15 mm long (30.7deg), 0.3 mm width
Location of defect	surface and back near weld point with 1 mm

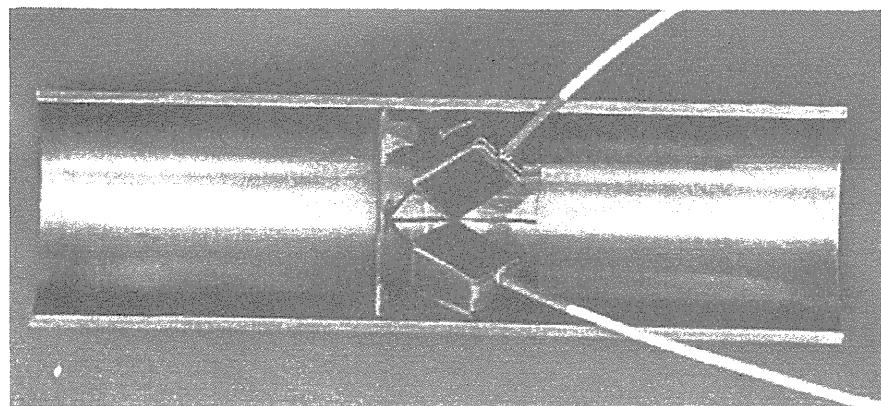
Table 3.27 Results of the non-destructive inspection test with EMAT

Depth of slit	A : Base metal (inside)	B : Base metal (outside)	C : Across weld (inside)	D : Across weld (outside)
30 % $t$	○	○	○	○
20 % $t$	○	○	○	×
10 % $t$	Δ	Δ	×	×

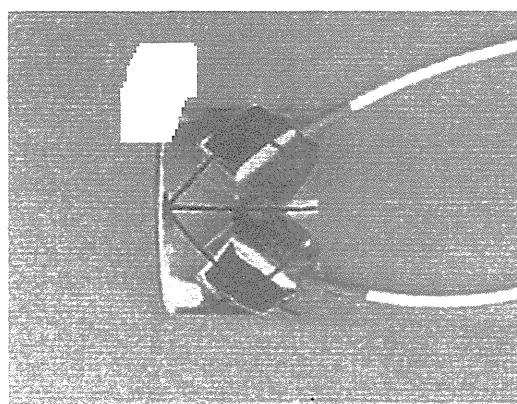
○:possible

Δ:low signal

×:difficult



Top view

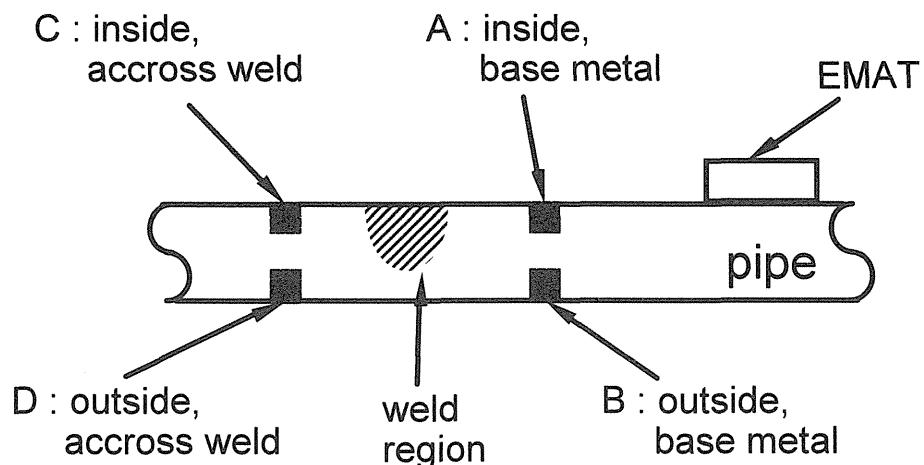


Back view



Side view

(a) Appearance of the EMAT sensor on the pipe



(b) Position of the artificial defects

Fig.3.59 Appearance of the fabricated EMAT for 50A pipe in non-destructive inspection tests

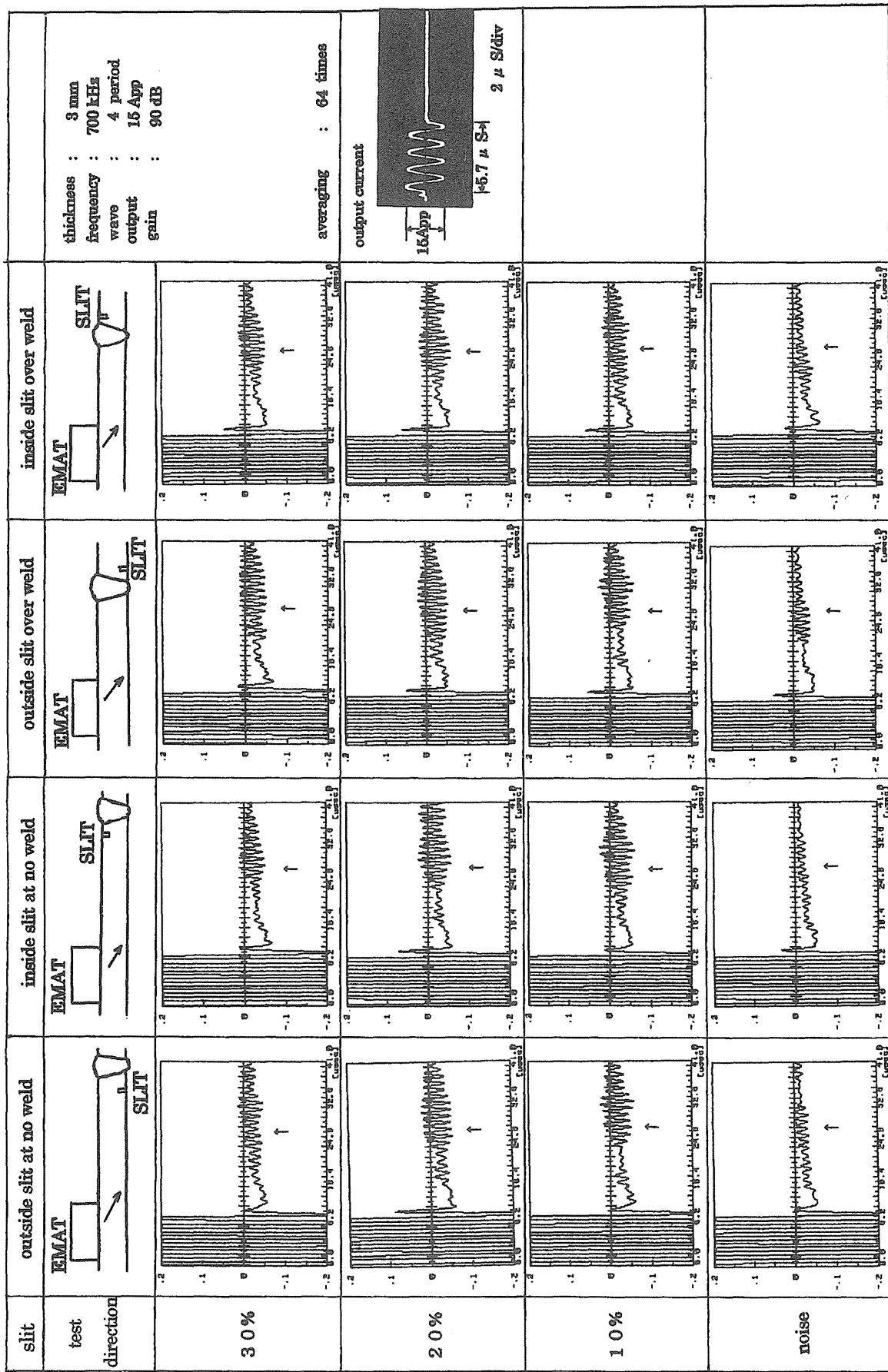


Fig.3.60 Wave form of the inspection tests with the fabricated EMAT

### 3.3.4 枝管非破壊検査ロボットのまとめ

ITER 保守における冷却配管の非破壊検査においては、強度なガンマ線環境下で使用可能であること、高温環境下で使用可能であること、非破壊検査時の接触媒体が不要であること、非破壊検査対象となる構造部材の殆どが SUS316L 鋼であることに着目し、非破壊検査の手法に EMAT を使用することを提案した。さらに、本研究では、ITER の冷却配管内壁を検査するという観点から、超音波の駆動力にローレンツ力を用いるローレンツ型 EMAT が適用できることに着目し、ITER の枝管に適応可能な EMAT の形状を考案した。具体的には、EMAT の送受信素子を配管内に “V” の字に配置した検出方法が、他の配置法である透過法やタンデム法と比較して検出感度が 2 倍程度向上することを示し、さらに、送受信素子の配置角度を 100 度とすることで、他の配置角度と比較し、検出感度が 2 倍以上向上することを明らかにした。本研究では、これらの検討結果を基に、ブランケット枝管（内径 54.5mm の配管）の形状に最適な EMAT センサを製作した。製作したセンサの検出感度を検証するため、YAG レーザーによる溶接部を挟んで前後及び配管の裏表の計 4 カ所（溶接後の熱応力集中部）にそれぞれ模擬欠陥を作成し、非破壊検査試験を行った。その結果、溶接部の手前にある 10% の人工欠陥を検出可能とし、溶接部を越えて欠陥を検出する場合、20~30% の人工欠陥を検出可能とした。次に、配管内アクセス型枝管非破壊検査ロボットを設計・製作して本センサを搭載し、半径 400 mm、内径 102.3 mm の配管内を、途中にある枝管部での脱輪もなく、目的の枝管に円滑に移動可能であることを実証した。

以上、配管内における非破壊検査手法及び配管内アクセス型ロボットの研究・開発によって、ITER 配管保守シナリオにおけるブランケット枝管の非破壊検査が成立可能となることを示した。

### 3.3.5 枝管非破壊検査ロボットの課題

非破壊検査試験においては、溶接部手前では 10% の人工欠陥が検出可能であったが、溶接部を越えると 20~30% の欠陥しか検出できない場合もあった。このため、今後はセンサの感度向上を目指すさらなる改善策が必要となる。しかしながら、現状ではこれ以上の改良は困難である。従って、他の非破壊検査手法との組み合わせによって、検査精度の補償を行うことを検討する必要がある。

### 3.4 配管保守ロボットのまとめ

ITER のブランケット冷却配管を対象として、配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボット及び非破壊検査ロボットを設計・製作した。本ロボットを使用して性能試験を実施し、それぞれのロボットにおいて、半径 400mm、内径 102.3mm の配管内を移動し、目的の枝管まで円滑に移動可能であることを実証した。また、内径 54.5mm の枝管内にノズルを伸ばし、枝管の溶接・切断・検査が行えることを示した。

開発した枝管溶接・切断ロボットを使用した溶接・切断試験では、内径 54.5mm、肉厚 3mm の SUS316L 製枝管に対する最適な加工条件を取得した。溶接時における溶接可能な許容ギャップについても併せて検討を行い、施工可能な条件を明らかにした。また、レーザー切断時に窒素をアシストガスとして使用することで、配管切断後の再溶接には、機械加工をしない配管切断面においても再溶接可能とした。さらに、配管内でのロボットの多様な姿勢での溶接・切断が可能であることを明らかにした。以上の結果、ITER ブランケットに付属する冷却配管の溶接・切断シナリオが成立する見通しを得た。

同様に、非破壊検査ロボットについて、内径 54.5mm、肉厚 3mm の SUS316L 製枝管に対する非破壊検査性能を明らかにした。現状では、検査対象となる配管の肉厚に対して、20%の欠陥であれば溶接部の前後及び配管の表裏において検知可能であることがわかった。しかし、さらなる検査性能を追及するためには、これ以上のセンサの改良は困難を要するため、他の非破壊検査手法との組み合わせによって、より精度の高い欠陥検出方法を検討する必要がある。

これらの配管内溶接・切断・検査ロボットにおいて、特に、高品質なレーザー溶接・切断を実施するために、溶接・切断ロボットには、配管内での正確な位置決め作業が必須である。このため、溶接・切断ロボット内部には高精度な位置決め機構を搭載し、正確な位置決めを可能にしている。しかし、ITER 配管内でのロボットの位置決めの様子を目視にて確認することはできない。また、溶接・切断時に、健全な施工が実施されているかどうかの確認作業も必要であるが、現状では、対応する方法がない。これらの問題を解決するために、本研究では、ITER 保守用ロボットに必要となる要素技術の 1 つとして、広義における監視機能を検討する。つまり、配管内加工時の加工位置の確認及び加工前後の状況確認や、炉内機器保守用ロボットの動作監視システムの検討を行うことにした。検討した結果は 4 章に述べる。

## 4 高放射線下でかつ狭隘な空間内で作業するロボットのための要素機器

本章では、核融合炉内において遠隔保守を行う際に必要となる計測・制御技術について述べるとともに、ロボット動作時に必要となるロボット先端位置と炉内壁面との距離を計測する距離センサについて検討を行っている。また、配管内作業を行う配管保守用ロボットに搭載可能な観察システムについて検討を行っている。

### 4.1 核融合炉内保守用計測・制御機器

ブランケット及びダイバータ等の炉内構造物を保守・交換する遠隔保守機器は Fig.4.1 に示す 2 階層で構成される計測制御システムで運転されるように計画された。第 1 階層で、ITER の運転を統括する CODAC (Command Control and Data Acquisition and Communications) より RH Supervisor (RH : Remote Handing) が各炉内構造物の保守に関する情報を受け取り、RH Task Planner が各遠隔保守機器の動作計画を行い、RH off-line simulator が動作計画の妥当性を確認する。その後、第 2 階層で保守対象毎に設けた Sub RH Supervisor が保守機器の動作を制御する。また、各保守対象からの計測データは RH Measurement で測定された後、RH on-line simulator に転送され遠隔保守機器の動作を実時間でシミュレーションする。

このように、計測制御システムは各遠隔機器の動作の計画を行い、実際に動作させると共に、計測データを収集し、それを必要に応じて利用する機能を有している。

この ITER の基本構想に則り、ブランケット及びダイバータ保守用モックアップ機器に対応して構築した計測制御システムを Fig.4.2 に示す。本計測制御システムは、原研（東海研）実験棟に設置したブランケット及びダイバータ遠隔保守モックアップ機器の性能を確認すると共に、遠隔保守に要求される制御性を検討するために開発したものである。

モックアップ用遠隔保守機器の動作を把握するため、①遠隔保守機器の動作を映像で記録する、②遠隔保守機器の動作をその関節角度より収集し記録する、③遠隔保守機器の動作を歪ゲージ、距離センサ等より収集し記録する、の 3 方式でデータを取得している。

本システムの計測機能として、Fig.4.3 に示すように各遠隔保守機器の動作を ITV カメラで監視し記録する VMS (Visual Monitoring System)、Fig.4.4 に示すように各機器の軸データ及び計測用センサの出力を収集し機器の動作を監視し評価する DAS (Data Acquisition System) 及び Fig.4.5 に示すように各機器の軸データを用いて 3 次元仮想空間表示を行う VRS (Virtual Reality System) より構成される。これは、収集したデータのうち、各関節の角度データを取得し、3 次元グラフィックを表示することで、炉内の状況を把握する構成としている。この 3 次元グラフィック装置は、将来、遠隔保守機器のオフライン教示に使用される予定である。

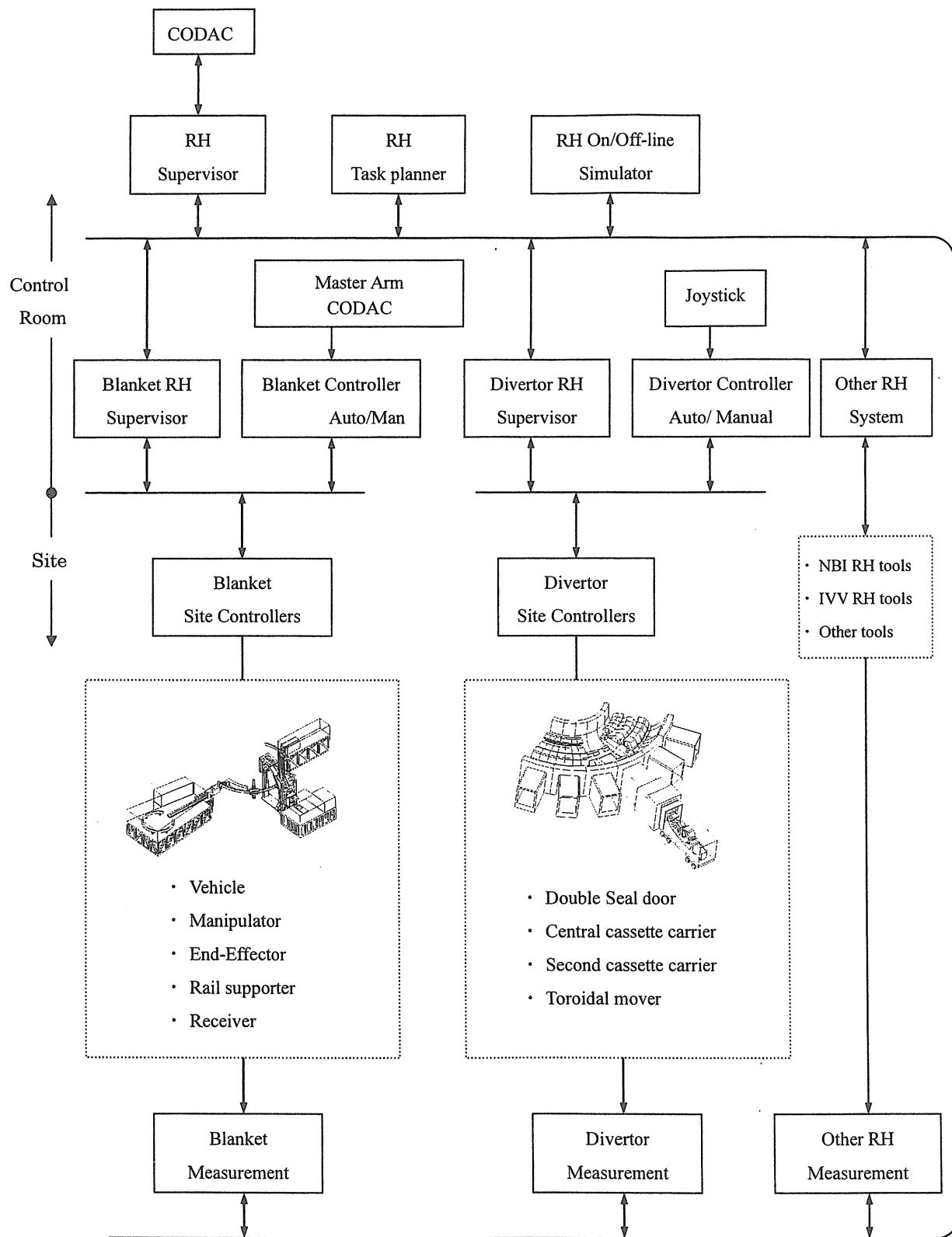


Fig.4.1 General block diagram of control system in ITER

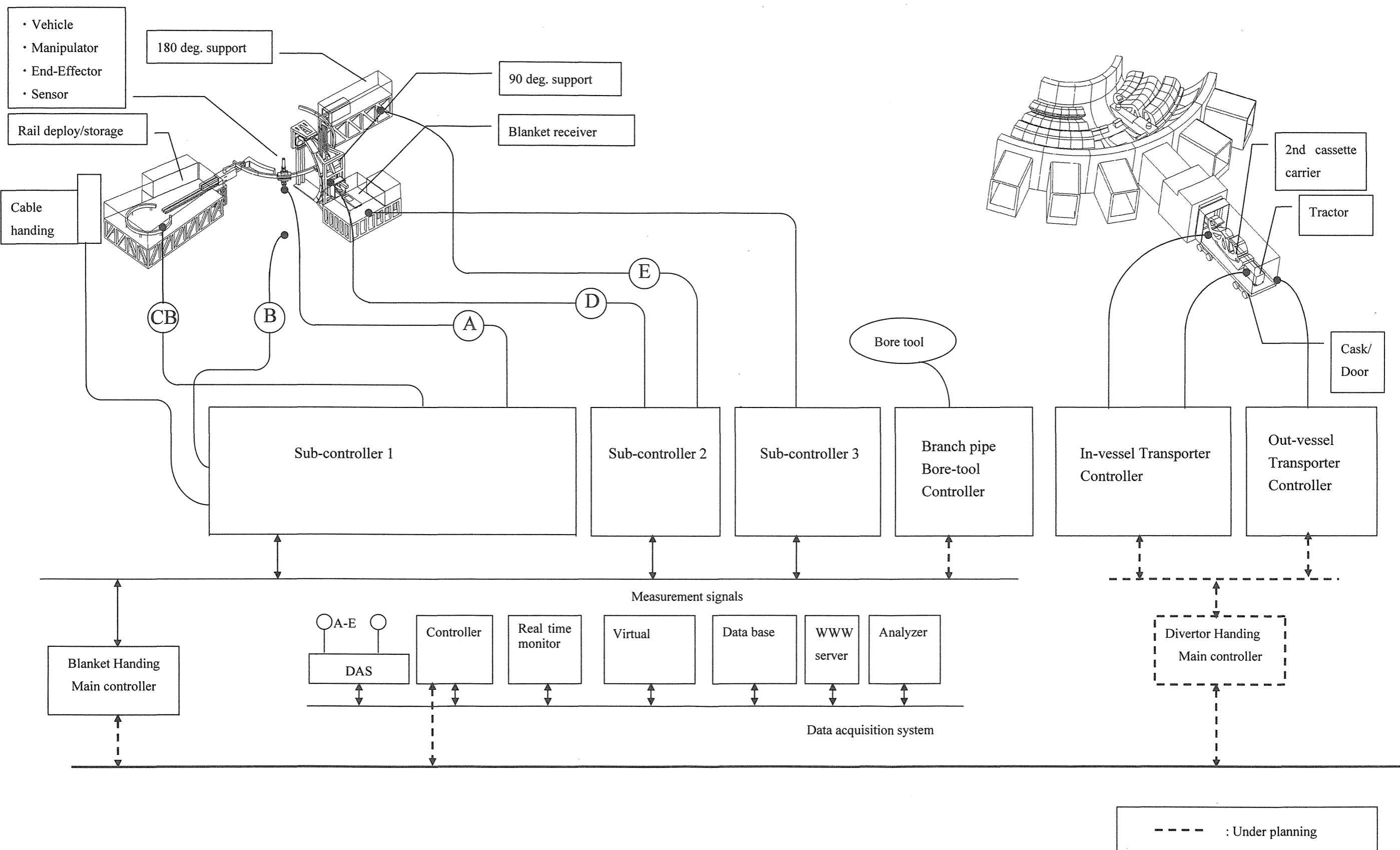


Fig.4.2 Actual block diagram of RH measurement and control system in mock-up system

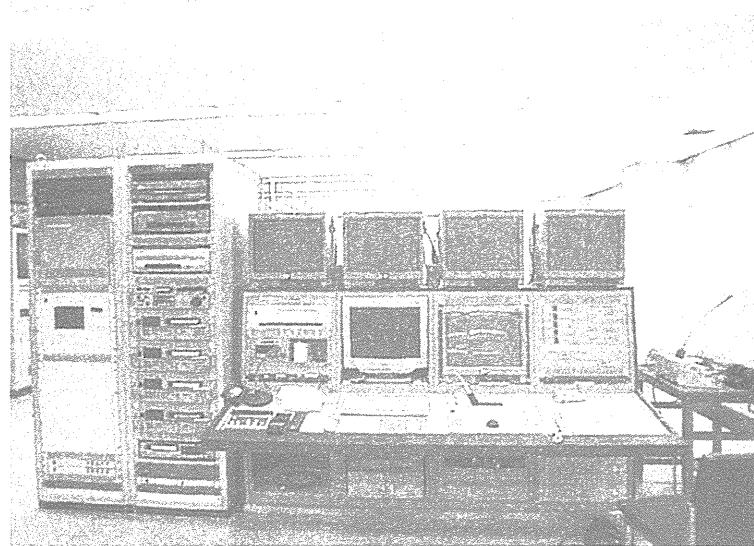
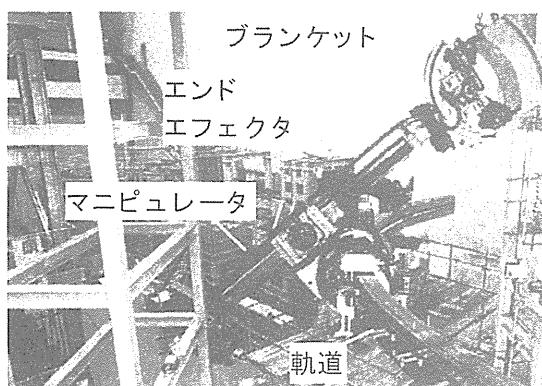


Fig.4.3 Overview of visual monitoring system (VMS)



Fig.4.4 Overview of data acquisition system (DAS)



(a) Real image



(b) 3-D image

Fig.4.5 Virtual reality system

## 4.2 距離センサ

### 4.2.1 背景と目的

ITER の炉内保守時は高放射線環境下となり、真空容器内部を構成するブランケット及びダイバータ機器等の保守・交換は全て遠隔操作で行うことが要求されるため、これまでに人の代わりに真空容器内機器の交換・保守を行う各種遠隔操作機器の開発を行ってきた[53]。核融合炉内で動作する遠隔操作機器は耐放射線を有する機器で構成され、レゾルバ若しくは光ファイバ式エンコーダなどにより各関節の回転角度を検出し、サーボモータで駆動される。また、仮想空間上で遠隔操作機器を模倣し、その動作と位置をリアルタイムに推定するシステムも提案している[54]。しかし、ITER での遠隔作業対象物は大重量で各関節のバックラッシュや構成部材の弾性変形などにより内界センサを用いたエンドエフェクタ先端位置の同定は困難であり、可搬重量が 4 トンで、その腕の長さが 6m にもなるブランケット保守用マニピュレータ[55]では手先位置が約 50mm も下がってしまう。このような事象に対応するため、ロボット動作時の教示方法に工夫を凝らし、たわみ量をキャンセルするような手法が提案されている[56]。しかしながら、遠隔操作機器を正確に動作させ、作業を安全に行うためには、上記手法とともにエンドエフェクタ先端から真空容器内壁あるいは構造物間までの距離測定を常に行って、遠隔操作機器の動作を補償する外界センサが必要である。

ところで、人の代わりに作業を行うロボットに搭載するカメラや距離センサにはさまざまな方法が提案されている。例えば、1 台のカメラからの映像取得だけではなく、複数台のカメラを使用するようなロボットビジョン[57]やリアルタイム距離画像入力による 3 次元画像計測[58]などが挙げられる。そして、さらに詳細な距離画像を生成するために液晶シャッタ式空間コード化レンジファインダ[59]、スキャン符号化レンジファインダ[60]なども提案されている。また、実際の作業現場での利用を目指した方法として、カメラ 2 台を組み合わせ、遠近両方の領域で距離計測を行うことが可能な遠隔操作型配電作業ロボット用のセンサシステム[61]もある。

ところが、これらの装置はシステムが大型または複雑である、キャリブレーションが面倒であったり、計測処理に時間がかかるという問題点がある。また、従来の市販されている距離センサなどでも明らかのように、センサの内部に PSD 及び CCD 等の半導体素子が使用されているということから、数 kGy/h のガンマ線強度が予想される核融合炉のような極限環境下では、数分程度の使用で動作不能になることがわかっている[62]。

このような背景を踏まえ、核融合炉内や原子力事故時等の高放射線環境下で作業するロボットに搭載可能な距離測定手法に基づく距離測定センサを開発した。本章の次節以降では、距離測定原理について述べるとともに、今回開発した距離測定センサの概要と特性試験結果を述べる。

## 4.2.2 距離測定方法

### 4.2.2.1 計測手法の比較

距離を測定する方法には様々な手法があるが、核融合炉内の遠隔操作機器や原子力事故時対応ロボットに搭載するセンサ特有の条件は、①放射線環境下で使用可能であること、②測定範囲と比較して測定精度が良いことである。さらに、③放射性物質にできるだけ近寄らないで遠距離からの計測が可能であること、④運用上の観点から1つのセンサで遠近両方すなわち測定範囲の広い計測が可能であることも望まれる。ここで、上記要求仕様を満足する方式としてレーザー光を利用したアクティブセンサに着目した。一般的に、レーザー光を使用し三角測量法の原理を基本とした距離センサでは、レーザー光を測定対象物に当て、対象物からのレーザー反射光(散乱光)を受け取る。レーザー光を受け取る側には、半導体素子(PSD, CCD等)が使われ、レーザー光がどの画素に入射したかを判断して距離を算出する方式が多い。また、スリット光を利用し、リアルタイムな距離画像計測を目指したシリコンレンジファインダ[63]も同様に半導体素子でレーザー光を受け取る方式である。これらの場合、センサの精度は受光部に使用される半導体素子の性能(分解能・受光特性など)に依存する。

一般的に半導体素子は放射線に弱いことから、それらの半導体素子を利用しなくても構成可能で、可能な限り単純な計測原理の距離センサが適している。そこで、三角測量法を基本に耐環境性と高い測定精度の維持が両立可能な距離計測手法を検討した。

Fig.4.6に示すように、従来の三角測量方式を使用した距離センサでは、スポットトレーザー光を発光素子に、CCDカメラ(またはPSD素子)を受光素子に利用する構成となる。このシステムでは、入射角 $\theta$ を受光素子であるCCDカメラに反射光が投影される位置ズレ $\Delta x$ として次式のように算出可能である。

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta x}{f}\right) \quad (1)$$

ここで、 $f$ は焦点距離であり、対象物までの距離 $D$ が次式から得られる。

$$D = L \tan\left\{\beta + \arctan\left(\frac{\Delta x}{f}\right)\right\} \quad (2)$$

以上のことから、このCCDカメラに投影されるスポット光の位置ズレからなす角を検出する場合には、利用するCCDカメラの受光素子の分解能に大きく依存する。なお、受光素子には、製造時における品質のバラツキや、素子上の受光位置と素子出力の比例関係からのズレが大きいので、高精度な距離測定には数多くの校正データを有する必要がある。また、耐放射線性を有するCCD及びCMDカメラも開発されている[64]～[67]が、コストが高く耐放射線性も不十分であり、高い放射線環境下では高密度で高精度な半導体素子を搭載したセンサの使用は困難である。

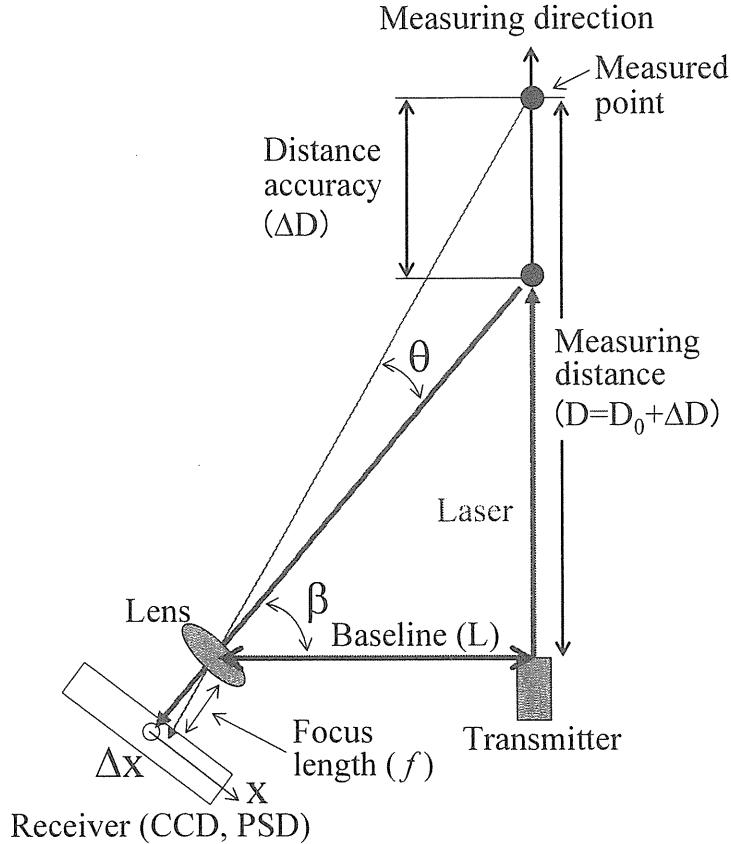


Fig.4.6 Principle of usual triangular measurement with CCD or PSD

この従来の方式に対し、移動ロボット用環境センサとして、回転式ミラーにより対象物からの反射光を受光素子のある一定の領域に集光させるようなシステムが提案されている[68]。つまり、受光素子に光が入ったかどうかを判断しさえすればよく、受光素子の性能に依存しない計測システムを構築可能となる。Fig.4.7にこのシステムの概念を利用し、ミラーの回転運動に注目した場合の距離計測手法の概念図を示す。

ミラーの回転角度を $\theta$ とすると、対象物までの距離 $D$ は次式により求まる。

$$D = L \tan \beta = \frac{L}{\tan(2\theta)} \quad (3)$$

$$\text{ここで, } \beta = \frac{\pi}{2} - 2\theta$$

この手法により、受光素子の性能による測定距離精度の問題点は解決され、ミラーの回転性能が測定距離の性能を決定する要素となる。

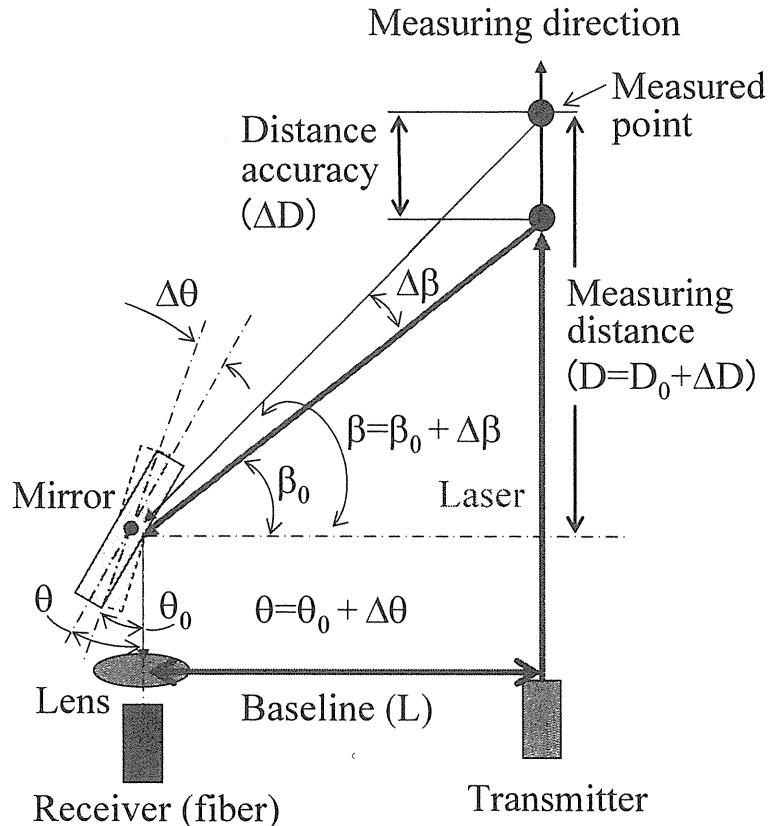


Fig.4.7 Principle of triangular measurement type of rotation way with mirror

一方、上記に述べた回転方式の距離センサでは、受光側に入射される対象物からの反射光の向きから距離測定を行うが、反射光の向きは一定で発光素子と受光素子間である基線長を変化させ、その基線長から距離測定を行う方式も考えられる。Fig.4.8 に基線長を可動させる距離センサ（以下、基線長可動型距離センサ）の概念図を示す。

この計測手法では、入射光が受光素子の中央に来るよう発光側を並進運動することにより、その移動量から対象物までの距離が次式のように算出可能となる。

$$D = (L_0 + \Delta L) \tan \beta \quad (4)$$

ここで、 $L_0$  は基線長を可動する前の初期値であり、基準基線長である。また、 $\Delta L$  は基線長の動作量を表している。この計測手法を用いることにより、上記に述べた回転方式でミラーを利用するシステムと同様に受光素子の性能に依存しない計測システムが構成可能である。この手法による測定距離精度は、基線長を変化させる並進性能により決定される。

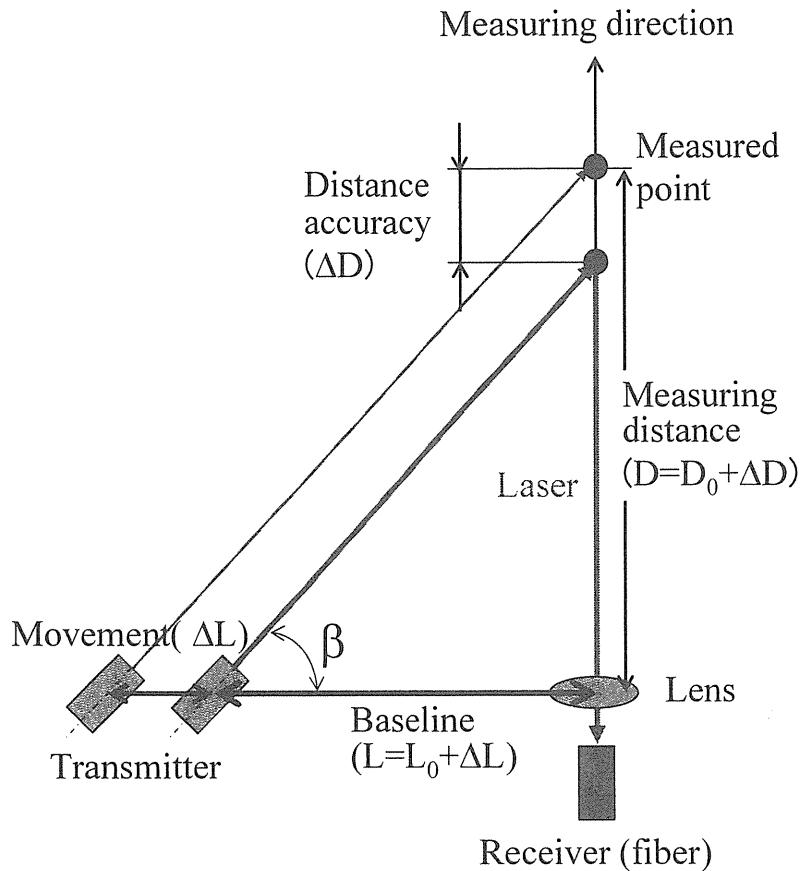


Fig.4.8 Principle of triangular measurement type of variable baseline

#### 4.2.2.2 キャリブレーション手法の比較

距離センサを遠隔操作機器に搭載し、センシングシステムを構築後、測定距離精度に組立て誤差や機器のバラツキなどが与える影響をできる限り消去するためには、センサの校正（キャリブレーション）が必要となる。三角測量法の場合、基線長と2つのなす角のキャリブレーションが必要であるが、ここでは簡単のため、一方のなす角を90度と仮定した場合のキャリブレーション手法を述べる。

##### (1) ミラー回転型

Fig.4.7に示す受光素子性能に依存しない回転式の場合には、最初に基線長 $L$ となす角 $\beta_0$ の初期姿勢値における対象物までの距離 $D_0$ を測定する。次に、初期姿勢からミラー回転機器の分解能に応じた角度 $\Delta\theta$ だけ回転し、対象物までの距離 $D(D=D_0+\Delta D)$ を測定する。ここで、初期姿勢である基線長 $L$ 、なす角 $\theta_0$ は次式と正接の和の公式より計算される。

$$\tan \beta_0 = \tan \left( \frac{\pi}{2} - 2\theta_0 \right) = \frac{D_0}{L} \quad (5)$$

$$\tan(\beta_0 + \Delta\beta) = \tan \left\{ \left( \frac{\pi}{2} - 2\theta_0 \right) + 2\Delta\theta \right\} = \frac{D}{L} \quad (6)$$

これより、以下のようになる。

$$L = \frac{\Delta D \pm \sqrt{\Delta D^2 - 4D_0(D_0 + \Delta D)\tan^2(2\Delta\theta)}}{2\tan(2\Delta\theta)} \quad (7)$$

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{L}{D_0} \right) \quad (8)$$

実際のキャリブレーションでは、回転角度を変化させて上記の測定を複数回実施する必要がある。上式より明らかのように、基線長  $L$  を求める際には 2 次方程式を解く必要があり、計算誤差の影響も考慮する必要がある。また、 $L$  の誤差が  $\theta_0$  の算出結果に影響を与えることがわかる。

## (2) 基線長可動型

Fig.4.8 に示す基線長可動式の場合には、最初に、初期位置・姿勢（基準基線長  $L_0$ 、なす角  $\beta$ ）において、対象物からのレーザー投影スポットが受光素子の中央に来るようレーザースポットの発光軸上に対象物を設置する。次に、この配置における対象物までの初期測定距離  $D_0$  を測定する。最後に、初期位置・姿勢から発光側の並進分解能に応じた並進量  $\Delta L$  だけ発光素子を並進させ、対象物までの距離  $D(D = D_0 + \Delta D)$  を測定する。具体的な関係式を以下に示す。

$$\tan \beta = \frac{D_0}{L_0} \quad (9)$$

$$\tan \beta = \frac{D_0 + \Delta D}{L_0 + \Delta L} \quad (10)$$

以上の 2 式により、初期位置・姿勢  $L_0$ 、 $\beta$  は次式により算出可能である。

$$L_0 = \frac{\Delta L}{\Delta D} D_0 \quad (11)$$

$$\beta = \arctan \left( \frac{\Delta D}{\Delta L} \right) \quad (12)$$

これより、基線長可動型距離センサの場合、基準基線長  $L_0$  の算出には、乗算・除算をそれぞれ 1 度行えば良い。さらに初期位置・姿勢が独立に算出可能であることから、回転式のミラーを使用した手法と比較し、容易かつ計算誤差の影響を受けにくいキャリブレーションが可能となる。

#### 4.2.2.3 測定距離精度の比較

前節までに、受光素子の性能に依存しない、2通りの距離計測手法について示した。次に、この2通りの手法を使用して距離センサを構成したときの距離測定精度について述べる。

##### (1) ミラー回転型

ミラー角度を回転させる方式の場合、ミラー角度  $\theta$  と回転角度分解能  $\Delta\theta$  だけ回転した場合の関係式は、式(5), (6)より表され、ミラーの回転偏差  $\Delta\theta$  より生じる測定距離偏差  $\Delta D$  が距離  $D$  における測定精度となり、次式が得られる。

$$\Delta D = \frac{(L^2 + D_0^2) \tan(2\Delta\theta)}{L - D_0 \tan(2\Delta\theta)} \quad (13)$$

これを回転分解能  $\Delta\theta$  で偏微分すると、次式が成立する。

$$\frac{\partial \Delta D}{\partial \Delta\theta} = \frac{2L(L^2 + D_0^2)}{\{L \cos(2\Delta\theta) - D_0 \sin(2\Delta\theta)\}^2} \quad (14)$$

上式より、測定距離精度  $\Delta D$  は回転角度の分解能  $\Delta\theta$  に比例しない。すなわち、分解能が 10 倍向上（例えば、回転分解能  $\Delta\theta$  を 1.0 度から 0.1 度）しても、測定距離精度はおよそ 1 倍から 2.2 倍程度であり、回転分解能の向上が測定距離精度向上に貢献する割合は小さいといえる。

##### (2) 基線長可動型

基線長可動型の場合、基準基線長  $L_0$ 、ならびにそこから並進分解能  $\Delta L$  だけ発光素子が並進した場合の関係式は式(11), (12)で表され、発光素子の並進分解能  $\Delta L$  に生じる測定距離偏差  $\Delta D$  は距離  $D$  における測定距離精度となる。故に、 $\tan\beta$  を消去し  $\Delta D$  について解くと次式が導かれる。

$$\Delta D = \frac{D_0}{L_0} \Delta L \quad (15)$$

これより、上式を  $L_0$  で偏微分すると、次式で表現される。

$$\frac{\partial \Delta D}{\partial L_0} = -\frac{D_0}{L_0^2} \Delta L \quad (16)$$

ここで、 $D_0 > 0$ ,  $L_0 > 0$ ,  $\Delta L > 0$  であるので、上式右辺は常に負となる。これより、基線長可動型の場合には、測定距離範囲の如何に関わらず、基線長の増加により測定距離に比例して測定距離精度が向上することがわかる。つまり、測定距離精度の向上に対して、どの測定距離範囲において

も基準基線長の増加による効果が期待できることを示している。

また、式(15)より、 $\Delta D$  を $\Delta L$  で偏微分すると、

$$\frac{\partial \Delta D}{\partial \Delta L} = \frac{D_0}{L_0} \quad (17)$$

となる。ここで、上式右辺は常に正であるので、並進分解能 $\Delta L$  が小さくなるほど、測定距離精度 $\Delta D$  は向上する。また、基準基線長ならびに測定範囲が同じであれば、測定距離精度 $\Delta D$  は並進分解能 $\Delta L$  に比例することがわかる。これより、目標測定距離精度に対する機器の設計が容易であるといえる。

#### 4.2.3 距離センサの構築

##### 4.2.3.1 センサの設計

前節までの距離測定手法を検討した結果、本件で提案した新しい距離測定手法である基線長可動型距離センサを設計・製作することにした。この方式であれば、基本的には基線長部分の変動にのみ依存して対象物までの距離を測定可能である。また、センサの測定精度は受光部の性能に依存しないため、従来、受光部に使用していた CCD や PSD 等の半導体素子の代わりに、放射線に比較的強いが CCD や PSD ほど高画素にできない光ファイバを介した光学系とすることで、距離センサを構成可能である。

設計したセンサの概略を Fig.4.9 に示す。本センサは、放射線環境下に設置するセンサヘッド、通常環境下に設置する制御装置、センサヘッドと制御装置間を接続する光ファイバ及び電気ケーブルで構成される。センサヘッドは、レーザー投光用光ファイバ、レーザー光反射用ミラー、ミラー移動用直動機構、直動機構駆動用モータ、対象物からのレーザー反射光受光用レンズ及び反射光伝送用光ファイバから構成される。制御装置は、ファイバから伝送されたレーザー光を受光する CCD カメラ、受光したレーザー光を 2 値化する画像処理装置、直動機構を駆動するモータ制御用アンプ等から構成される。距離を計測する際、制御装置から光ファイバを通して投光されたレーザー光は、直動機構を用いた台座上に設置してあるミラーによって反射され、測定対象物に投光される。測定対象物上に投影されたレーザー光の映像は、受光側の集光レンズによって光ファイバに入射し、センサヘッド後段（通常環境下）に設置した制御装置内の画像処理装置の画面上でスポット像をほぼ真円に近い形状で結像する。

画像処理装置は、この像の 2 値化を行い、重心位置座標を計算し、画面中心からのズレ量を算出する。このズレ量からスポット像の重心を画面の中心へ移動させるためのミラーの位置補正量 ( $=\Delta L$ ) を算出し、受光したレーザー光が常に画面の中心に集光するように、ミラーを搭載した直動機構を制御する。これによって、距離の測定が可能となる。一連の距離計測手順及びレーザー光取得時の映像例を Fig.4.10 及び Fig.4.11 にそれぞれ示す。

本測定手法をセンサの原理として採用し、設計・製作する際、直動機構の駆動には耐放射線性の高いモータが、レーザー光の投光及び受光には耐放射線性の高い光ファイバが、またレーザー

光の集光及び反射を行うレンズ・ミラー等の光学系にも同様に石英系を材料とした耐放射線性の高い部品が使用でき、著しく耐環境性を高めることができると期待できる。さらに、受光ファイバにて対象物の画像を取得することができるため、通常環境下においてモニタ上で対象物を観察しながら距離を測定可能である。

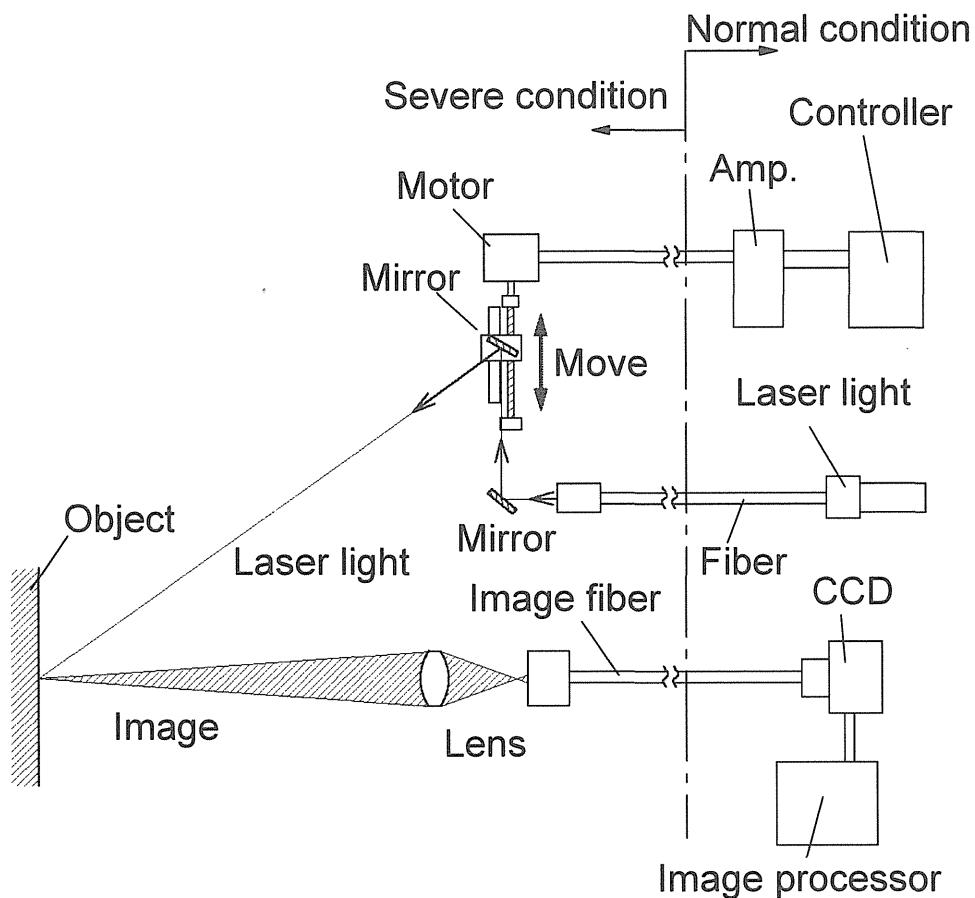


Fig.4.9 Schematic drawing of the range finder

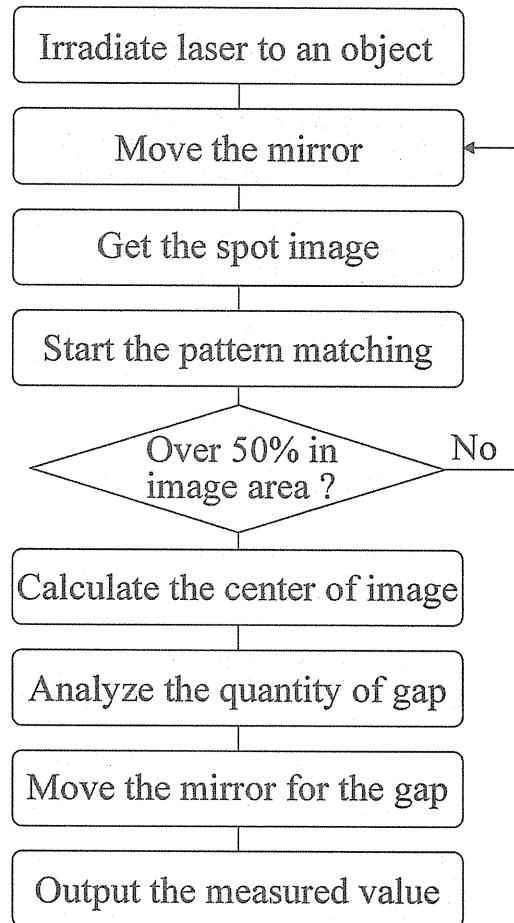


Fig.4.10 Algorism of the movement of the variable baseline

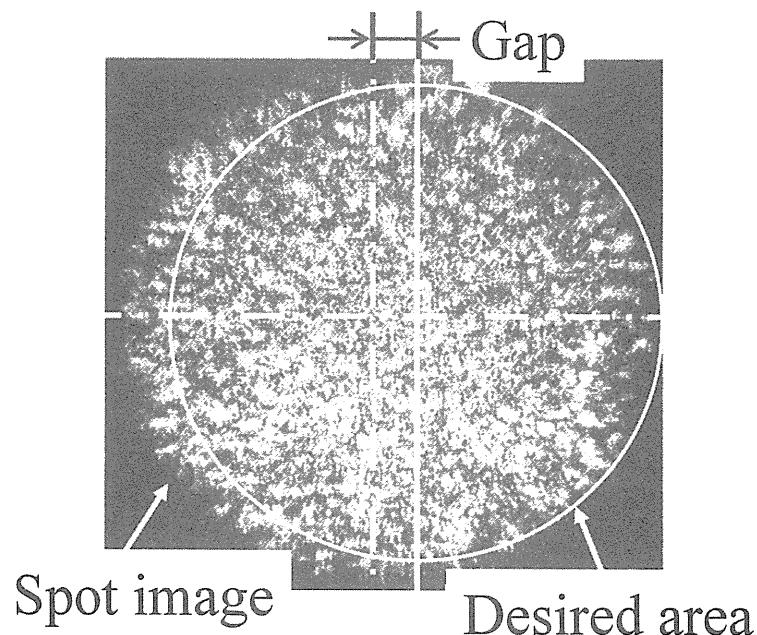


Fig.4.11 Spot image in measuring

#### 4.2.3.2 センサの製作

本設計に基づいて製作した基線長可動型距離センサを Fig.4.12 に示す。レーザー光源には波長 685nm、出力 10mW 以下のものを使用し、光ファイバにて導光した。本センサの基準基線長を 225mm、ミラー移動可能範囲（基線長可動範囲）を 50mm にすることで、センサから対象物までの測定可能距離を 900～1,100mm（測定範囲 200mm）とした。ここで、直動機構に使用したボールネジのリードを 10mm、モータの回転分解能を 1,000ppr とすると、ボールネジの動作分解能は  $10/1,000=0.01\text{mm}/\text{ppr}$  となる。従って、測定距離分解能は  $200/50\times0.01=0.04\text{mm}$  となる。ところで、ボールネジに起因するミラー移動量のズレを検討する場合、ボールネジの仕様（カタログ値：絶対位置決め精度  $\pm 0.02\text{mm}$ ）から、ボールネジに起因する可動ミラーの位置決め精度は  $\pm 0.02\text{mm}$  となる。また、同様に、モータに起因するミラー移動量のズレを検討する場合、モータの仕様（カタログ値：モータの停止位置決め精度  $\pm 1^\circ$ ）から、ボールネジの停止位置決め精度は  $\pm 1/360\times 1,000$ （モータの回転分解能）= $\pm 2.77778\text{ppr}$  となり、モータに起因するミラー移動量のズレは、 $0.01$ （ボールネジの動作分解能） $\times 2.77778=\pm 0.02778\text{mm}$  となる。従って、これらのミラー移動量のズレを合計すると  $\pm 0.02 \pm 0.02778=\pm 0.04778\text{mm}$  となり、測定距離誤差は  $200$ （測定範囲）/ $50$ （基線長可動範囲） $\times (\pm 0.04778)=\pm 0.1911\text{mm}$  となる。このように、計算によって容易に精度が検討可能な点も基線長可動型距離センサの特徴の 1 つである。なお、受光部に使用した光ファイバの 1 本のコア径は  $8\mu\text{m}$ 、画素数は 6,000 である。一方、可動ミラーの制御は汎用パソコン(CPU: i486DX, OS: MS-DOS, モータ駆動用ボード)で行い、画像処理は市販の画像処理装置(シャープ製 IV-S10)を利用した。画像処理結果は RS-232C 経由でパソコンへデータ入力される。

ここで、本センサには、石英を主な材料とし、耐放射線性が 3MGy の光ファイバ[62]を使用し、同様に集光レンズ及び反射ミラーにおいても、石英を主材料とした耐放射線性が 200MGy 以上のもの[62]を使用している。また、直動機構を駆動するモータには、別途、ガンマ線照射試験を行った結果、20MGy 程度までの耐放射線性を確認したサーボ機構搭載型ステッピングモータを採用している。これらの部品構成によって、今回開発した距離センサの想定耐放射線性能は光ファイバに依存して 3MGy 程度で、一般の距離センサ(1kGy 程度)[62]の 3,000 倍である。仮に JCO 事故程度（ガンマ線へ換算した場合の空間線量率：20Gy/h）の放射線環境下であれば、通常は 50 時間程度で故障するセンサが 15 万時間程度まで動作可能となる。故に本センサは耐放射線性に優れているといえる。

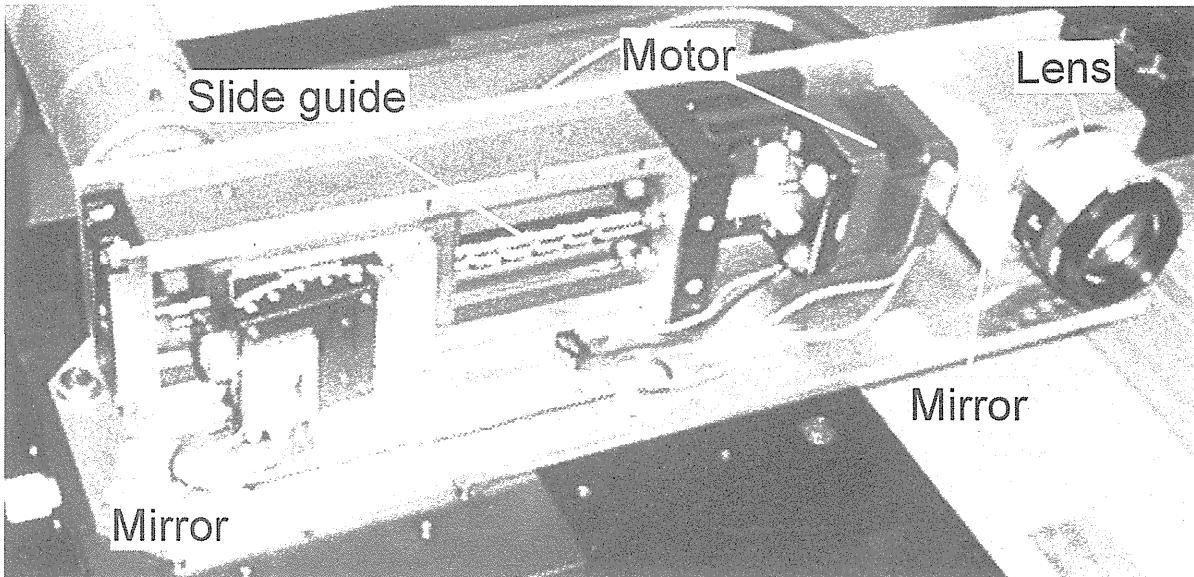


Fig.4.12 The variable baseline type distance sensor

#### 4.2.3.3 特性試験結果

製作したセンサを使用し、通常環境下で基礎特性試験を行った。試験では、 $10\mu\text{m}$  の測定精度が保証されているリニアスケール上に測定対象物を設置し、その測定対象物を製作したセンサ前方  $900\text{mm} \sim 1,100\text{mm}$  の範囲で移動させ、リニアスケールの出力値と、製作したセンサからの出力値を比較した。各測定点における距離計測の結果とリニアスケール値との誤差の関係を Fig.4.13 に示す。各測定点における分解能は  $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 、誤差は約  $-0.1 \sim 0.3\text{mm}$  程度となった。つまり、本センサは、精度  $0.01\%$ 程度であり、核融合炉内(高放射線環境下)で使用するセンサとしては、十分、高精度な距離計測結果である。さらに、市販されている耐放射線性を有しないレーザー式距離センサ(キーエンス製 LF-2510)では、 $2\text{m}$  先での分解能が  $\pm 0.5\text{mm}$  (16 回平均値: カタログ値) であり、これと比較しても遜色ないといえる。また、予想測定距離誤差は  $\pm 0.1911\text{mm}$  であり、ほぼ同様な値となった。多少の数値の開きは、レーザー光を画像処理装置で 2 値化する際、センサ周辺の散乱光等の変化によって、2 値化の領域が変動するため、その重心を算出する際に誤差が生じるものと考えられる。その他にも、センサ製作時におけるレンズ光軸のズレや直動機構の位置ズレ等光学・機械的な要因等が原因であると考えられる。

次に、センサ前方  $900$ ,  $1,000$ ,  $1,100\text{mm}$  の位置における各計測点近傍での距離増加量について計測した結果を Fig.4.14 に示す。結果、計測距離が遠くなるほど、増加量のバラツキが大きくなっていることがわかる。これは、レーザースポット光を受光するレンズが固定焦点であるため、 $900\text{mm}$  の位置でのスポット径が一番大きな映像であり、計測距離が遠くなるほど、取得できるスポット径が小さくなる。従って、画像処理装置でスポット径の重心計算をする際に計算精度が落ちるために、増加量のバラツキが大きくなると考えられる。ただしこれは、ズームレンズ等を使用して、できるだけスポット径を拡大した映像を取得して重心計算することで、増加量のバラツキを改善することが可能である。

一方、パソコンによるモータ駆動制御時間および画像処理結果のパソコンへのデータ転送時間等も含めて、測定時間は1点当たり約0.9sec程度である。ここで、市販のレーザー式距離センサ（キーエンス製LF-2510）においても、高精度計測時（ $\pm 0.5\text{mm}$ ）には複数回測定し平均する必要があり、処理時間は0.64sec（40msec×16回）かかる。これより、測定距離精度、及び汎用機器のみの構成であること等を考慮すると本センサは処理時間に対しても遜色ないといえる。

また、今回は制御装置や画像処理装置に汎用品を利用したが、専用機器化やCCDカメラの受光素子（PD）への置換えなどにより処理時間の短縮が可能となり、複数点計測時にも十分耐えうる距離センサが実現できると考えられる。

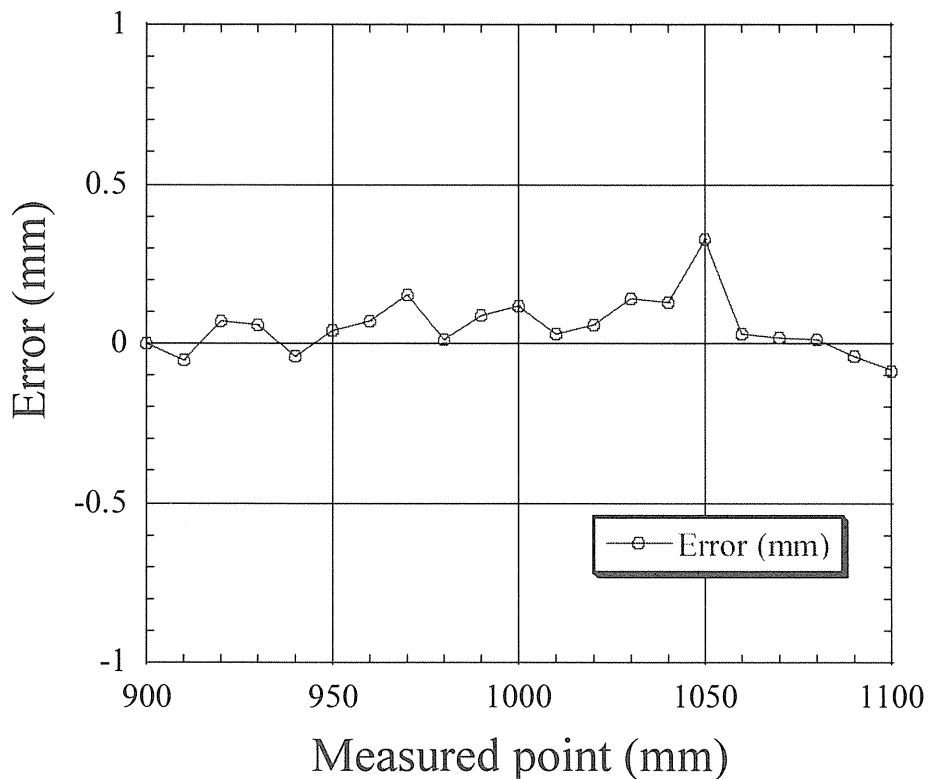


Fig.4.13 Test result of the fabricated distance sensor

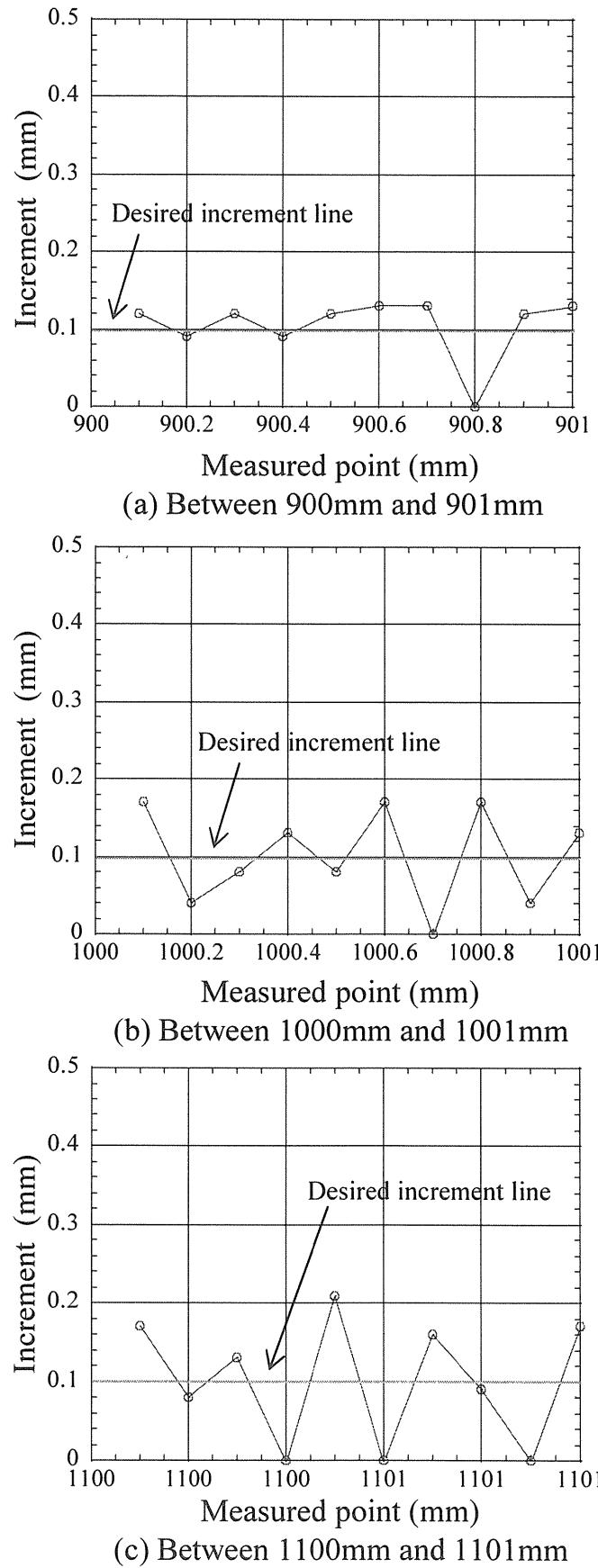


Fig.4.14 Increment test result

#### 4.2.4 距離センサのまとめ

核融合炉内等の高放射線環境下で作業するロボットに搭載可能で、ロボットと対象物間の距離を測定することが可能な距離測定手法について、新たに基線長可動型距離測定センサを考案した。本センサの適用性を検討するために、従来の距離測定方法や、レーザー光をミラーで回転させるような方式との比較・検討を行い、以下の優位性を明らかにした。

- (1) 乗算と除算を1回ずつ行うことにより、基準基線長を求めることが可能であり、計算誤差が少なくキャリブレーションが容易な方式である。
- (2) 基準基線長の増加が常に測定距離精度の向上を保証する方式となっている。
- (3) 直動機構の分解能の向上が常に測定距離精度の向上を保証する方式となっている。

さらに実際に、本手法に基づく基線長可動型距離センサを設計・製作し、下記の結果を得た。

- (1) 計測範囲 900～1,100mmにおいて、計算上の測定距離誤差を±0.1911mmとした。
- (2) 上記の計測範囲での実際の測定誤差は-0.1～0.3mm、分解能 0.1～0.2mmであり、ほぼ設計通りであった。
- (3) 放射線環境下で使用可能な機器にて本センサを構成し、従来のセンサと比較して集積線量で3,000倍の耐放射線性があることを示した。

以上、高放射線環境下において使用可能であると判断される距離手法を提案し、実際にセンサを製作してその性能を評価した。これにより、ITER炉内計測及び炉内保守用ロボットに搭載する距離測定センサとして使用可能であることを示した。

また、以上のように新しく開発した基線長可動型距離センサの有効性を確認したが、次に述べるような研究がさらに望まれる。

- (1) ズームレンズ倍率(焦点距離)と測定距離精度との関連性。
- (2) ズームレンズの光軸ズレが測定距離精度へ及ぼす影響。
- (3) 距離計測時の画像処理ならびに探索アルゴリズム最適化。
- (4) 高放射線環境下におけるセンサの特性試験。
- (5) 放射線環境下で作業する実機ロボットへの搭載。
- (6) 処理時間の短縮を実現する距離センサの開発。

## 4.3 溶接・切断・観察用複合型光ファイバシステム

### 4.3.1 背景と目的

ITER 真空容器内の各炉内機器は、熱負荷除熱のため、いずれも強制冷却（水冷却）構造となり、その交換・保守に際しては、付属している冷却配管をあらかじめ切断しておく必要があり、撤去後、新たに機器を設置し、その冷却配管を再溶接する作業も必要である。さらに、中性子ストリーミング回避のため、非常に狭小なギャップでそれぞれ設置し、遮蔽領域を確保している。このため、配管保守時は、作業空間の確保が困難となり、従来行われている配管外部からの作業ではなく、配管内からのアクセスによる溶接・切断作業が要求されている。

このような背景の下、第3章で述べたように、炉内の主な構造物に付属している冷却配管を対象として、各冷却配管の内側からアクセスし、曲がり部を通って任意の枝管・母管を溶接・切断・検査するシステムの開発を進めてきた。この配管内アクセスによる溶接・切断ロボットが任意の場所で配管の加工を行うためには、目的の場所まで配管加工用のパワーを伝送する必要がある。また、溶接・切断前後や加工中の確認作業（インプロセスマニタリング）も必要である。

この溶接時のインプロセスマニタリングに関して、YAG レーザー溶接時の異常時モニタリングを行う研究がなされている[69]。また、原子炉の蒸気発生器の補修時には、レーザー溶接用ファイバの外周上にモニタリング用光ファイバを 17 本配置し、溶接部の温度計測や特定波長の光のセンシング情報をもとに良好な溶接を保証するシステムが検討されている[70][71]。しかしながら、配管内での溶接・切断作業のため、その作業状況を目視で監視することは極めて困難である。

配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボットには、溶接・切断を行うための光ファイバやレンズ光学系、アシストガスを伝送する配管、配管内での正確な位置決め動作を行うための多くの駆動機構及び配管内移動機構を搭載している。加えて、配管溶接・切断作業は高ガンマ線環境下で、かつ、配管内という限られた空間内で行われるため、溶接・切断前後の加工点の確認や、溶接中の品質管理を行うための観察用光ファイバを、別途、ロボット本体に搭載することは空間的制約条件から困難である。このため、溶接・切断用光ファイバ及びレンズ光学系を、観察光学系としても使用することに着目し、レーザー光の伝送と画像伝送を併用することが可能な方法を考案した。そして、配管内という狭隘な空間において、溶接・切断加工の状況や加工前後の観察を行うことを目的に、1 系統の光ファイバとレンズ光学系で溶接・切断・観察作業を可能とする複合型光ファイバシステムの開発を行った。本節では、開発した複合型光ファイバシステムの概要と性能を述べる。

### 4.3.2 複合型光ファイバシステム

これまでにってきた YAG レーザー光による溶接・切断試験結果から、厚さ 3~4mm の SUS 材を溶接・切断するために使用するレーザー出力は、PW で 1,000W 程度必要である。このため、既存の YAG レーザー発振器からレーザー伝送用ファイバにレーザーを集光する際、ファイバコアの

直径は 0.6~0.7mm 程度必要となる。また、画像観察を行うためには、視野範囲を確保するための映像伝送用ファイバが数千~2 万画素程度必要である。これらの条件を鑑み、可視光(400~800nm)とレーザー光 (Nd : YAG 波長 1064nm) を同時に伝送可能なように、コア間隔 10 $\mu\text{m}$  で 15,000 画素を有する溶融一体型のイメージファイバの中心に、コア径 0.7mm、クラッド径 0.75mm のレーザー伝送用ファイバを設置した石英系光ファイバを考案した。すなわち、口径の異なる光ファイバを 1 本（同軸）の光ファイバとして溶融一体化した複合型光ファイバを製作した。Fig.4.15 と Table4.1 に設計した複合型光ファイバの断面図と仕様をそれぞれ示す。ファイバの長さは約 18m と 1m、最大外径を 2mm 程度とし、耐放射線性を考慮して石英を主材料として製作した。また、YAG レーザー光と映像を 1 本のファイバに導光するために、レーザー光と画像を分離・統合する必要がある。そこで、Fig.4.16 に示すようなカップリング装置を考案し設計・製作した。この装置は、400~800nm の波長を透過し、それ以外の波長を反射させることができ、すなわち、画像とレーザー光を分離することが可能なダイクロイックビームスプリッタ、画像を取得する CCD カメラ、各レンズ及びミラーを冷却する冷却系（水冷式）から構成される。これによって、高出力な YAG レーザー光と画像の分離・統合を行うこととした。

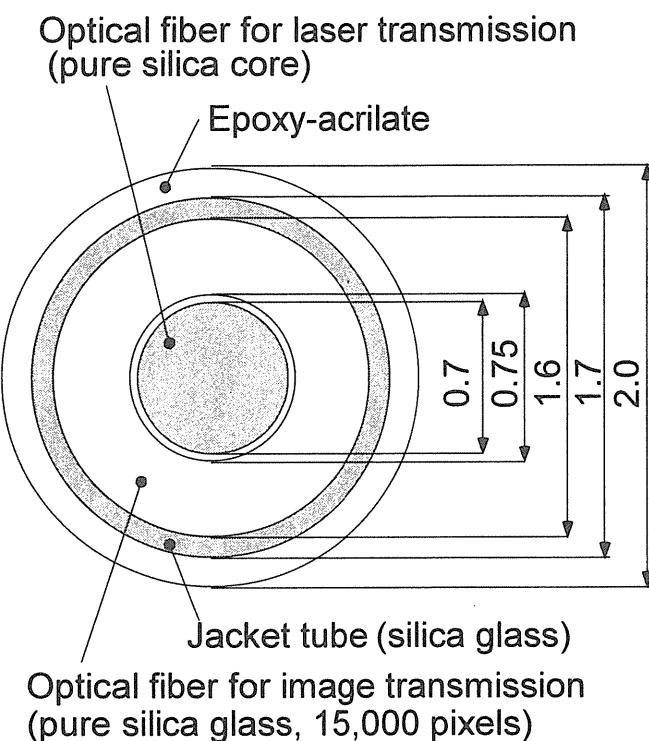
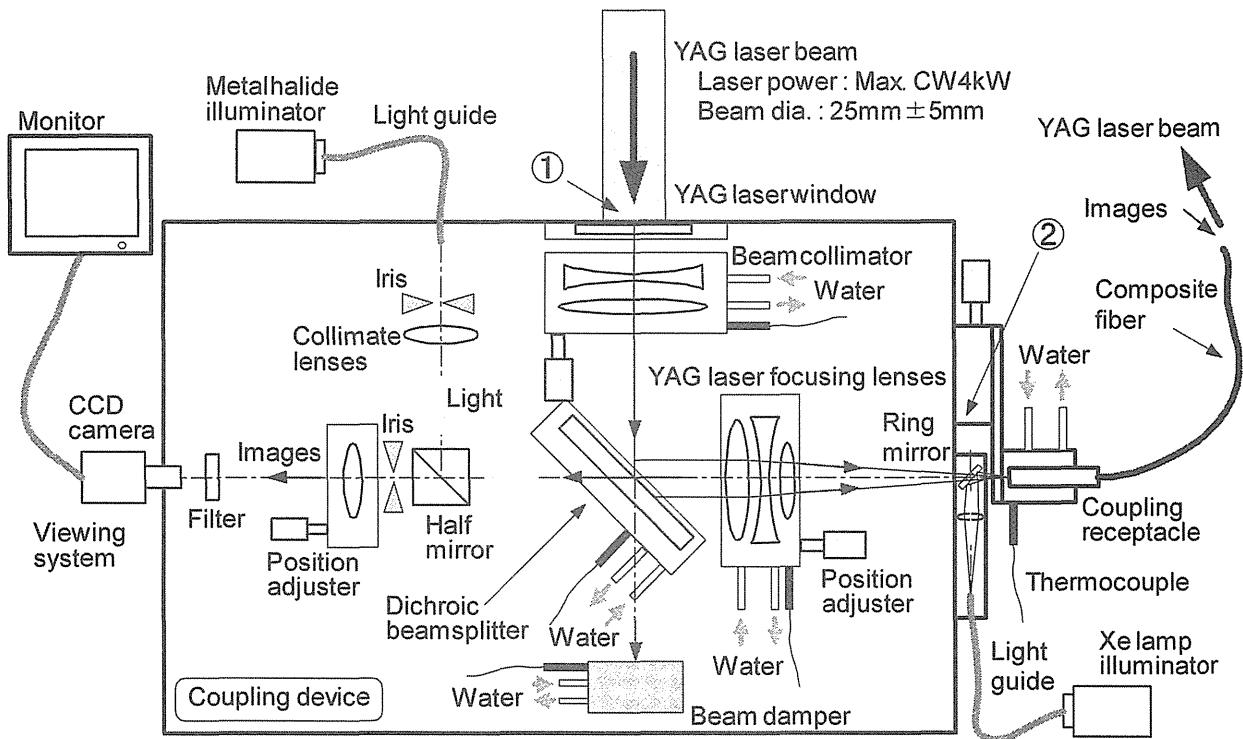


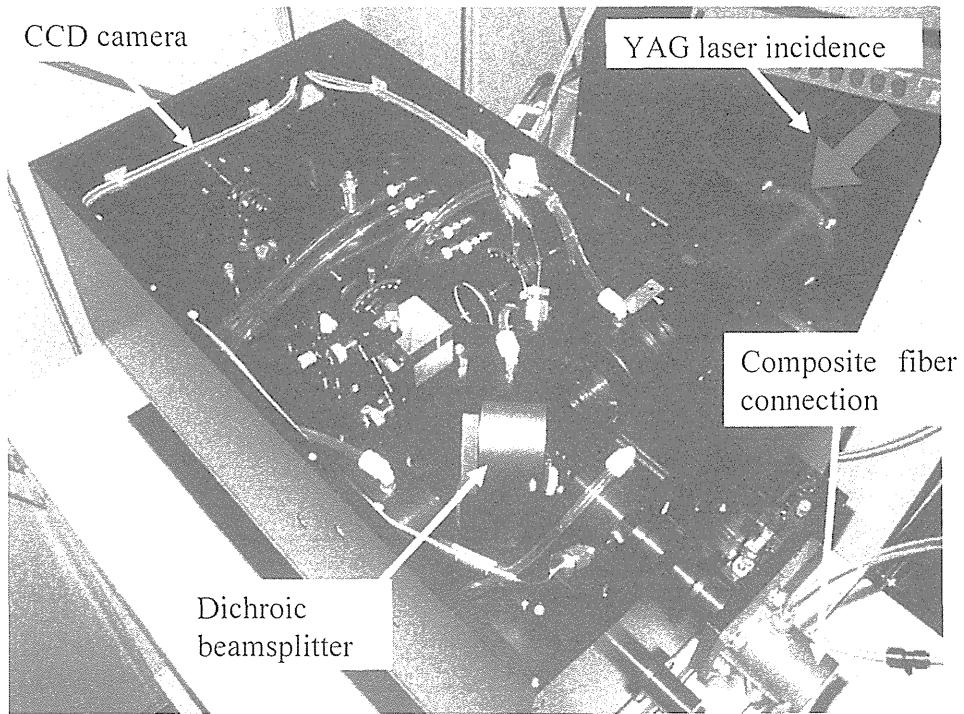
Fig.4.15 Schematic view of the composite fiber

Table 4.1 Specifications of the composite fiber

Items	Specifications
Material	pure silica
Length	17.8 m, 1m
Outer dia. of composite fiber	about 2.0 mm
Max. allowable bending dia.	250 mm
Laser transmission	
- core diameter	0.7 mm
- clad diameter	0.75 mm
Image transmission	
- core spacing	10 $\mu\text{m}$
- number of pixels	15,000 pixels



(a) Schematic view of the coupling device



(b) Inside view of the coupling device

Fig.4.16 The coupling device for YAG laser and images transmission

#### 4.3.3 カップリング装置の集光特性

複合型光ファイバ用カップリング装置に YAG レーザービームを入射してファイバ入射光学系の集光特性を測定し、複合型光ファイバに導光するために十分な特性が得られているかどうかを検証する。また、カップリング装置の冷却部位におけるレーザー入射時の温度変化を測定して冷却効果を確認する。

##### 4.3.3.1 試験方法

Fig.4.17 に示すように、複合型光ファイバ用カップリング装置のファイバ入射光学系の焦点位置にピームプロファイラーを設置し、YAG レーザービームのスポット径を直接測定する。その際の測定パラメータとして、ファイバ入射光学系の光軸方向の位置を設計上の焦点位置に対して  $\pm 10\text{mm}$  の範囲において 1mm ピッチで移動させながら測定を行うこととした。なお、測定に用いるビームプロファイラーは、PROMETEC 社製 UFF100 である。ビームプロファイラーのビーム検出用ニードルのピンホール径は、測定レーザービームのパワー密度によって適切なものを選択する。今回使用したニードルのピンホール径は  $\phi 15\mu\text{m}$  である。集光特性の測定は、ファイバへ導光するレーザー出力および、その時のレーザー発振形態 (CW or PW) で行うべきであるが、PROMETEC 社製ビームプロファイラーUFF100 は、PW (Pulse Wave) のレーザーを測定することができないため、ファイバへ導光するレーザー出力条件の一つである平均出力 1000W の PW は、CW (Continuous Wave) 1000W と 2000W の結果を参考することとした。

各冷却部位の温度測定は、Fig.4.17 に示す YAG レーザー入射コリメータレンズホルダ、ダイクロイックビームスプリッタホルダ、複合型光ファイバ入射レンズホルダ、ビームダンパーの 4 箇所の冷却部位にセットしたシース熱電対 (K : クロメル・アルメル) を用いて行うものとした。なお、測定の際のカップリング装置入口のレーザー出力は CW1000W と PW1000W の 2 種類で、測定時間はレーザービーム入射開始から連続で約 10 分間とした。但し、この時のパルス設定は、繰返周波数 40Hz、デューティ 50% である。

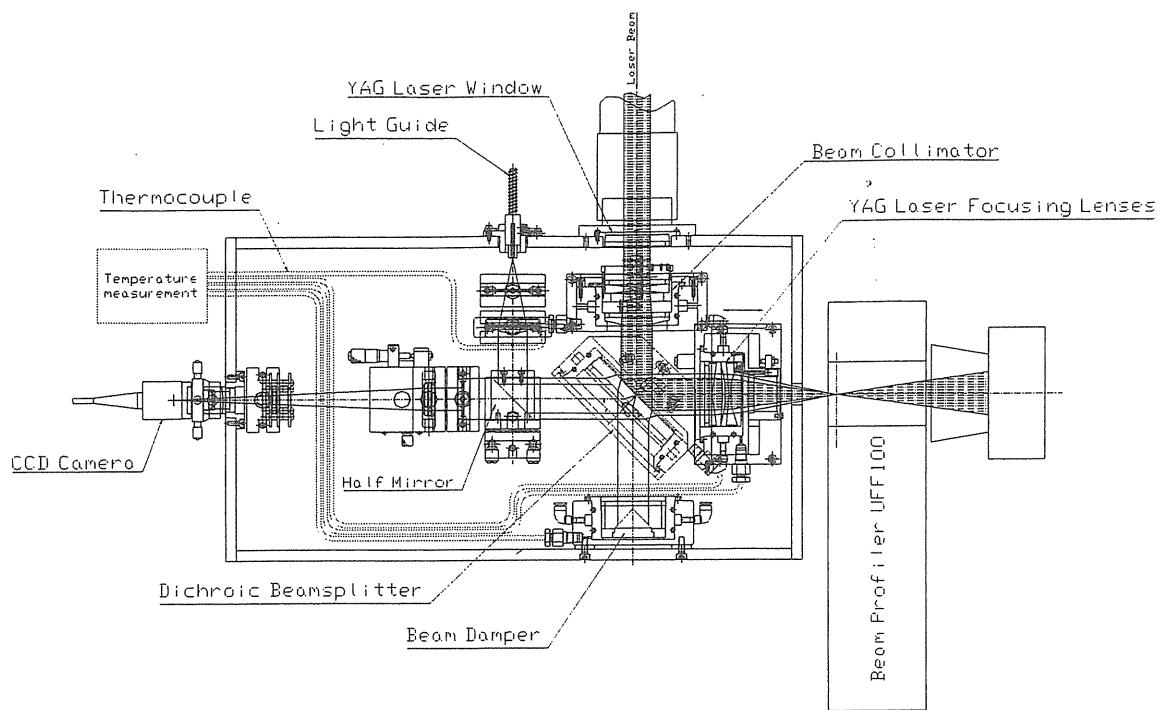
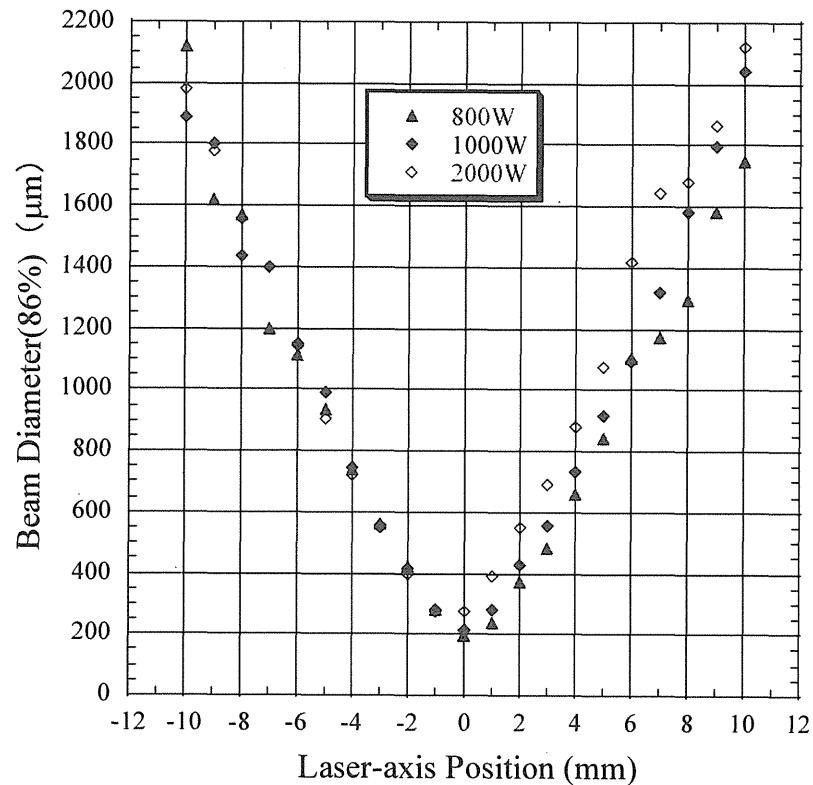


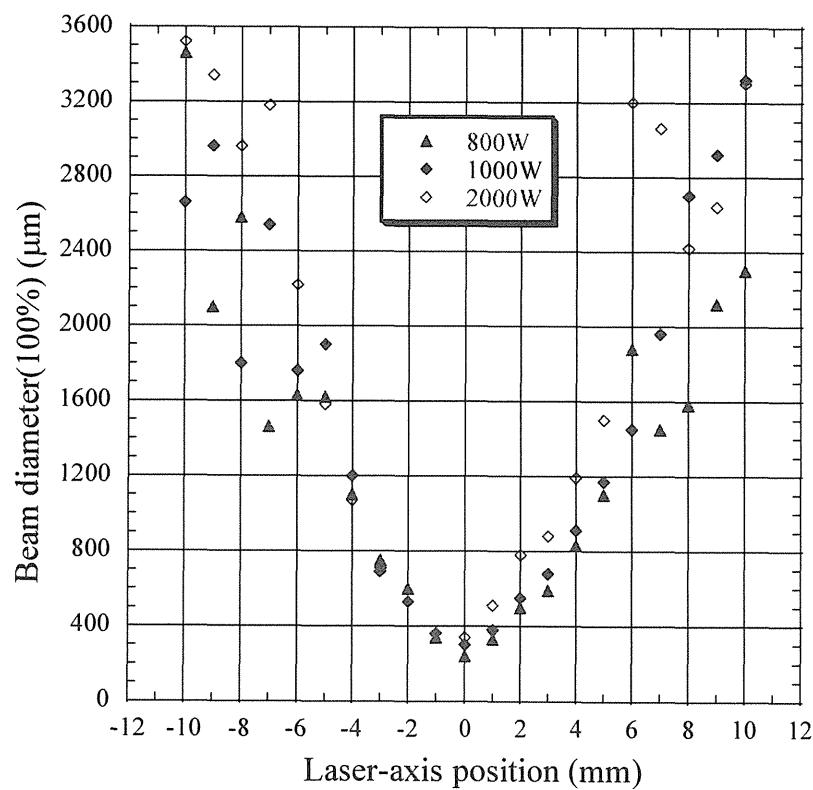
Fig.4.17 Experimental setup for beam profile measurement at the focus point

#### 4.3.3.2 試験結果

集光特性の測定結果を Fig.4.18 に示す。ここで、光軸方向位置は、0 を設計基準位置、+（プラス）方向を集光レンズがファイバから離れる方向、-（マイナス）方向を集光レンズがファイバに近づく方向とする。また、ビームプロファイラ UFF100 で計測した 86% ビーム径は、ビームの空間強度分布がガウシアン分布であるビームの  $1/e^2$  ビーム径（約 13.5%）に相当する。集光特性の測定結果から、このファイバ入射光学系の焦点位置は光軸方向位置でほぼ設計基準位置（光軸方向位置の 0）に、そのスポット直径（100%）は、0.34mm 以下に絞られていることがわかる。なお、今回使用した集光光学系はレンズ 3 枚構成であり、その合成焦点距離は  $f=100\text{mm}$  である。また、集光光学系への入射ビームの直径は、CW800W と CW1000W の場合が約 24.0mm、CW2000W の場合が約 28.8mm であるため、ファイバへの入射角度は CW800W と CW1000W の場合が全角で 13.5 度、CW2000W の場合が全角で約 16.1 度となる。これは、ファイバの N.A.(0.2) で決まる許容入射角 23 度に対して、十分小さい値となっている。さらに、集光特性の結果が示すように、入射角度 13.5 度 (CW800W と CW1000W) の時の焦点位置でのスポット直径は 0.3mm 以下に、入射角度 16.1 度(CW2000W)の時でも 0.34mm 以下となっており、レーザービームの特性としては、コア径 0.7mm のファイバに対して十分なクリアランスを持って導光可能なことを示している。



(a) Beam diameter of 86%



(b) Beam diameter of 100%

Fig.4.18 Beam waist curve for various laser powers

光軸方向の焦点位置の位置決めについては、安全にファイバ導光できる条件をファイバ端面でのレーザービームスポット径がファイバコア径の 80%以下になっていることとすると、光軸方向位置決め許容範囲は、ビームウェストポイントを中心とする約±2.1mm となる。焦点近傍（光軸方向位置-1mm, 0mm, +1mm）におけるビーム空間強度分布は Fig.4.19 に示す。なお、横縞状になっているように見えるが、これは測定器の計測方式に起因するもので、回転ニードルをスキャンさせることによって空間強度分布を計測しているためであり、実際のビームが横縞状になっているわけではない。

レーザー入射条件 PW1000W の場合における集光特性の評価であるが、基本的にはレーザーのビーム品質はレーザーの平均出力に依存するため、CW1000W の場合と同じと考えられる。但し、念のために CW2000W の場合のデータも採取し、CW よりビーム品質が悪くなる場合の上限という意味合いで計測を行った。つまり、PW1000W の場合の集光特性は限りなく CW1000W の場合に近いと考えられるが、悪い方には CW2000W の場合との間に存在するといえる。また、CW2000W の入射条件を実現するためにファイバへの入射角度は 16.1 度としたが、これは経験的に知る N.A.=0.2 のファイバに対する安全入射角度（N.A. で 0.15 相当）17.3 度以内にあり、ファイバ導光可能範囲にある。但し、実際の PW1000W は、CW800W 及び CW1000W と同じく入射角度 13.5 度で実現可能であるため、その意味でも PW1000W が CW1000W にビーム品質が近いことを示している。

YAG レーザー入射コリメータレンズホルダ、ダイクロイックビームスプリッタホルダ、複合型光ファイバ入射レンズホルダ、ビームダンパーの各冷却部位の YAG レーザー入射時の温度変化を、シース熱電対を用いて測定した結果を Fig.4.20 に示す。各冷却部位に流す冷却水の流量は約 0.5l/min、入射レーザー出力はカップリング装置入口で CW1000W と PW1000W の 2 種類とした。結果に見られるように、10 分間での温度上昇が 2°C 以下に抑えられており、冷却効果が認められた。

#### 4.3.3.3 まとめ

複合型光ファイバ用カップリング装置に、CW で 1000W、PW で 1000W までの YAG レーザービームを入射して、ファイバ入射光学系の集光特性を測定し、焦点位置でのスポット直径（100%）が、0.34mm 以下に絞られていることが明らかとなった。これは、本件で開発したコア径約 0.7mm の複合型光ファイバに導光するために十分小さい値である。また、同時にカップリング装置の冷却部位における温度変化を測定した結果、十分な冷却効果が確認できた。

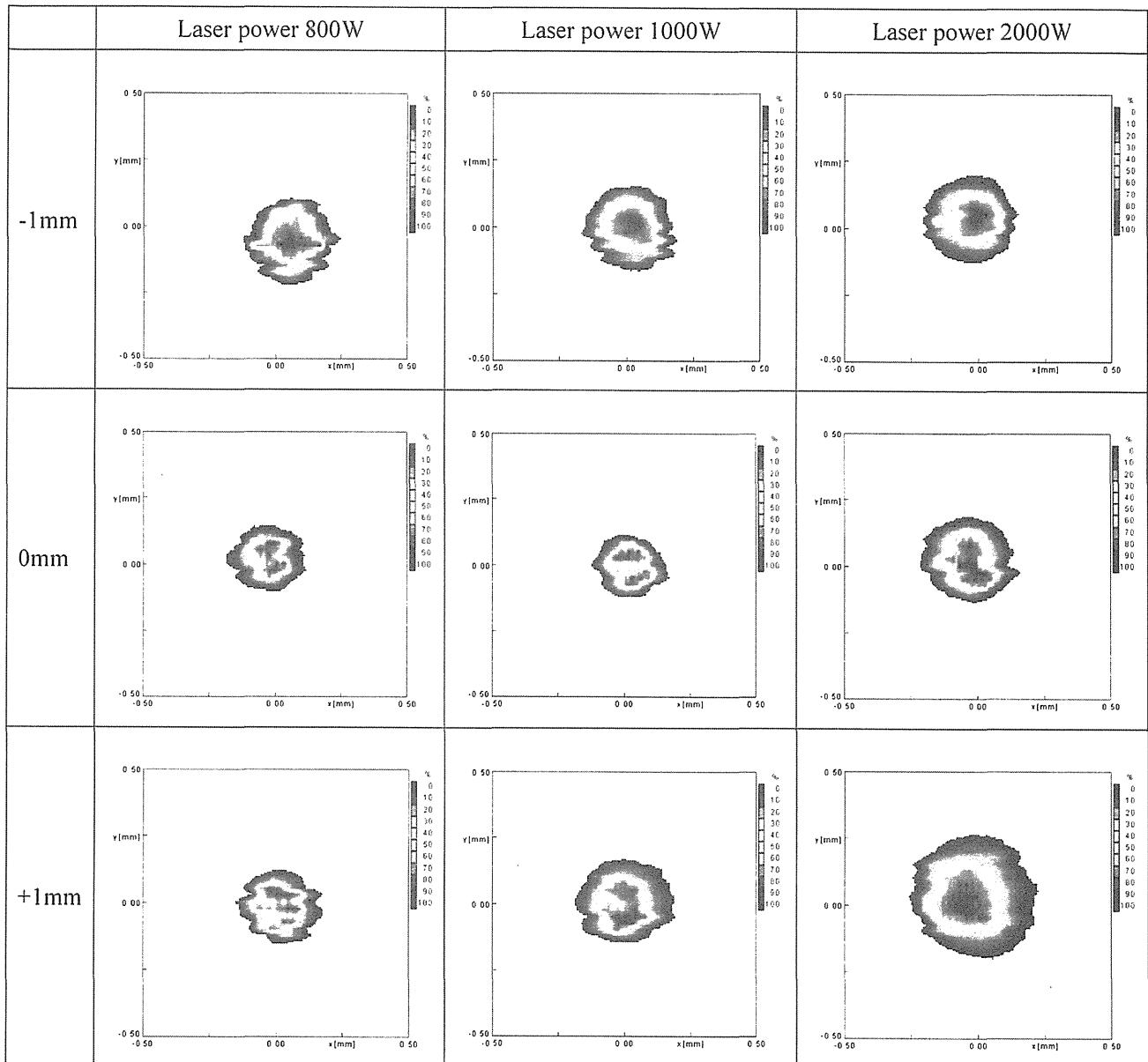
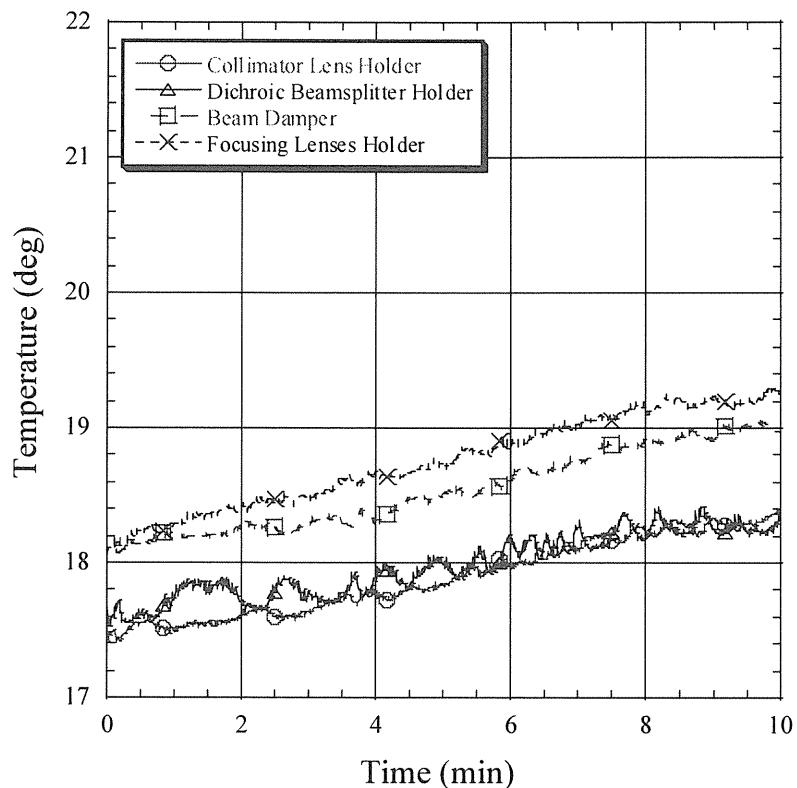
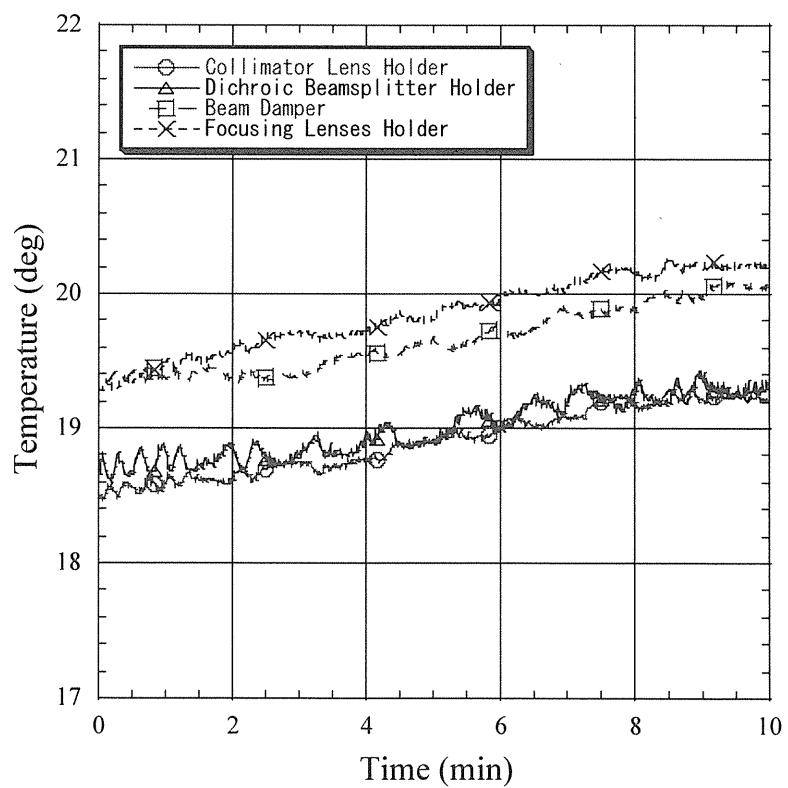


Fig.4.19 Beam profiles at various focus point



(a) Incident laser power : CW1000W



(b) Incident laser power : PW1000W

Fig.4.20 Temperature increase curve at the cooling parts in focusing test

#### 4.3.4 複合型光ファイバシステムのパワー伝送効率

カップリング装置に YAG レーザービームを入射し、複合型光ファイバにレーザービームを導光してその伝送ロスを測定し、ファイバの破壊の要因となるようなレーザーパワーの損失を検証する。

##### 4.3.4.1 試験方法

Fig.4.21 に示すように、カップリング装置に YAG レーザービームを入射し、複合型光ファイバにレーザービームを導光してファイバ出射端から出力されるレーザー出力をレーザーパワーメータ (COHERENT 社製 LM-2500) 及び表示器 (COHERENT 社製 Lab Master Ultima) を用いて測定することとした。但し、使用する複合型光ファイバは、ファイバ長 1m の試験用ファイバとする。また、Fig.4.21 に示す①と②の箇所でのレーザー出力を前もって上記パワーメータで測定しておく、ファイバ出射端でのレーザー出力と比較することによりレーザーパワー伝送効率を評価することとした。さらに、YAG レーザー入射コリメータレンズホルダ、ダイクロイックビームスプリッタホルダ、複合型光ファイバ入射レンズホルダ、ビームダンパー、複合型光ファイバセプタクルの各冷却部位の温度変化を測定する。レーザー出力は CW800W, CW1000W, PW1000W とした。なお、測定時間はレーザー導光開始から約 180 秒間とする。

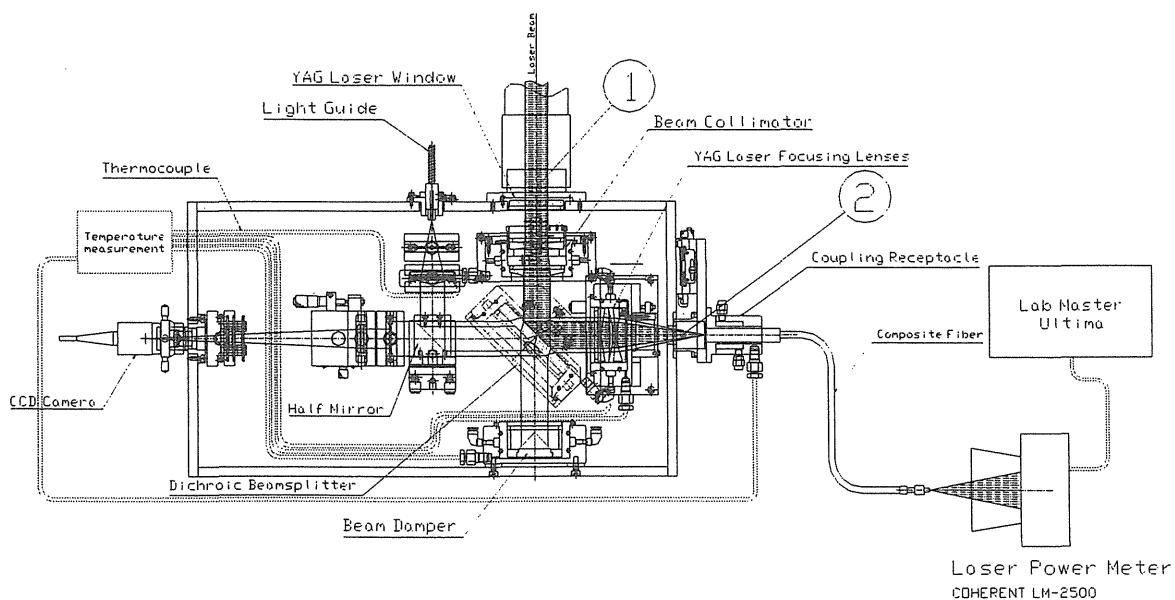


Fig.4.21 Experimental setup for measurement of coupling efficiency

#### 4.3.4.2 試験結果

パワー伝送効率の測定結果を Table4.2 に示す。この測定結果が示すように、ファイバ長 1m の複合型光ファイバの伝送ロスは、約 7~8% となった。これは、ファイバ入出射端面でのフレネル反射の理論値（入出射端合計で約 6.8%）を考慮し、これを差し引けば、特に大きなロスは発生していないといえる。但し、パワーメータの測定精度が  $\pm 5\%$  であるので、必ずしもフレネル反射以外のロスが 0.2~1.2% であるといった精密な議論ができるほど測定精度は良くない。ここでは、ファイバを破壊に至らしめるような大きなロス（例えば 10, 20% など）が存在しないことを確認したと評価するのが妥当である。

次に、ファイバ伝送効率安定性の測定結果を Table4.3 及び Fig.4.22 に示す。ここで、ファイバ伝送効率の安定性に関する測定は、パワーメータの応答性を考慮して、ファイバ導光開始約 90 秒後からの 60 秒間の測定とした。この測定結果では、CW800 及び CW1000 の時のレーザー発振において、ファイバ伝送効率の変動幅は  $\pm 1\%$  以下であり、十分安定した導光状態が保たれているといえる。PW1000 の場合は、その変動幅が  $\pm 2.5\%$  と若干大きいが、これはレーザー発振器出力のデータ取り込み時のサンプリング速度が遅いため、パルス発振時のパワーレベルの変化が中途半端に取り込まれてしまっているためと考えられ、実際には CW 時と変わらない安定性が得られていると推測される。また、ファイバ入射ビームはファイバコア径に対して十分に絞られた状態で導光しているため、カップリング装置の振動や熱影響による変形等での入射状態の変動要因を考えにくいため、ファイバ伝送効率が安定しているということは、複合型光ファイバ自身に劣化が起きていないことを示すものと考えられる。

ファイバ導光時の各冷却部位の温度変化 (PW1000W の場合のみ) を Fig.4.23 に示す。ファイバ導光時の各冷却部位は、ファイバ導光時間が短い (180 秒) こともあり、温度変化がほとんど計測されていないが、カップリング装置へ 10 分間レーザー導光した場合の立ち上り部分とほぼ同じ傾向と考えられる。

#### 4.3.4.3 まとめ

測定結果では、1m の複合型光ファイバでの伝送ロスは 7~8% となった。これは測定誤差を考慮しても、高出力レーザーを伝送させるファイバとして十分な伝送性能を示しているといえる。

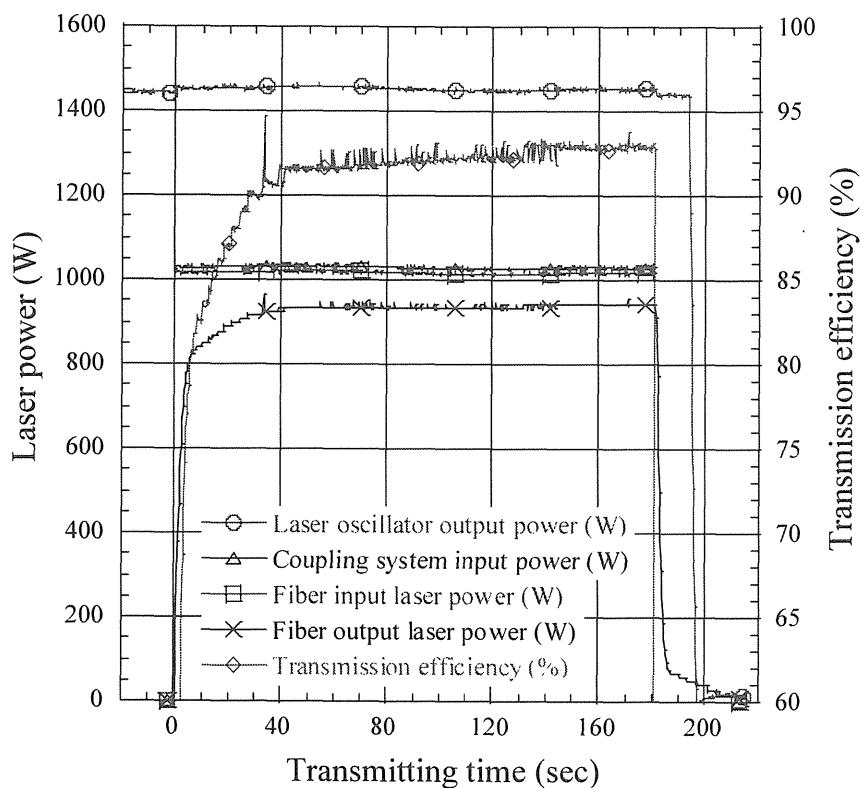
また、ファイバ導光時の各冷却部位の温度変化には特に異常は見られず、この結果からもファイバ導光が正常に実現されている。

Table 4.2 Transmission loss for coupling device and composite fiber (1m length)

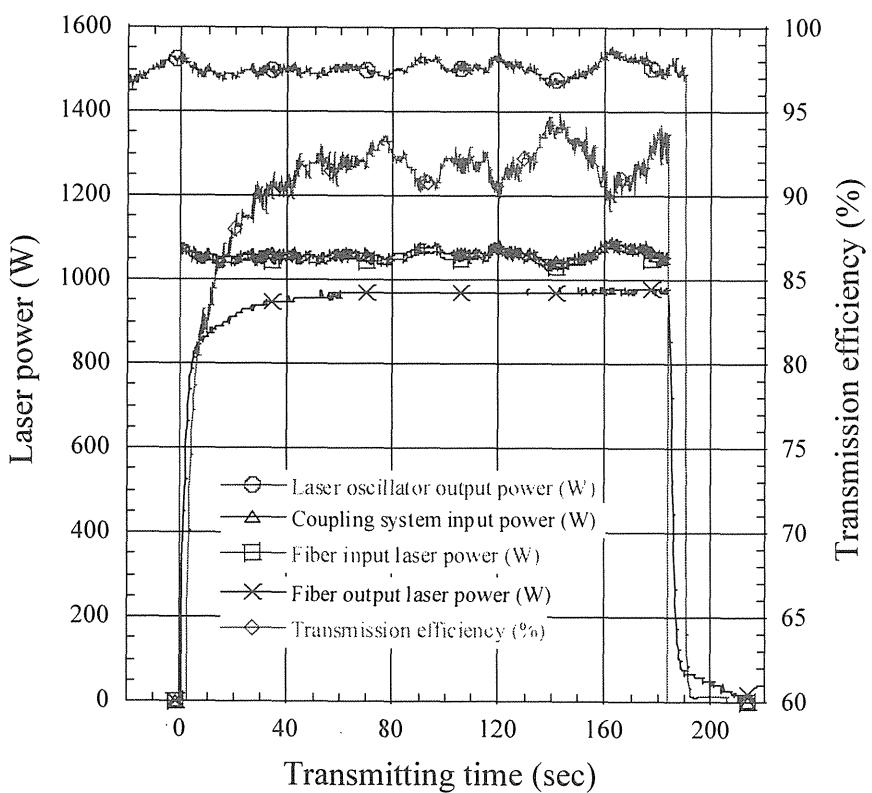
Incident laser characteristics		CW800W	CW1000W	PW1000W
Laser power (Watt)	Incident power (Measuring point①)	835	1027	1067
	Incident power (Measuring point②)	827	1015	1053
	Output power	769	940	969
Transmission loss (%)	Coupling System (Incident power①- Incident power②) / Incident power①×100	1.0	1.2	1.3
	Composite Fiber (Output power - Incident power②) / Incident power②×100	6.9	7.3	7.9
	Total loss (Coupling System + Composite Fiber)	7.9	8.5	9.2

Table 4.3 Stability for transmission efficiency

parameter	Incident laser characteristics		
	CW800W	CW1000W	PW1000W
Laser output power stability (%)	±0.9	±0.5	±0.5
Transmission efficiency through the composite fiber (%)	93.1	92.7	92.1
Transmission efficiency stability (%)	±0.9	±0.7	±2.5



(a) Incident laser power of CW1000W



(b) Incident laser power of PW1000W

Fig.4.22 Results of transmission efficiency through the composite fiber

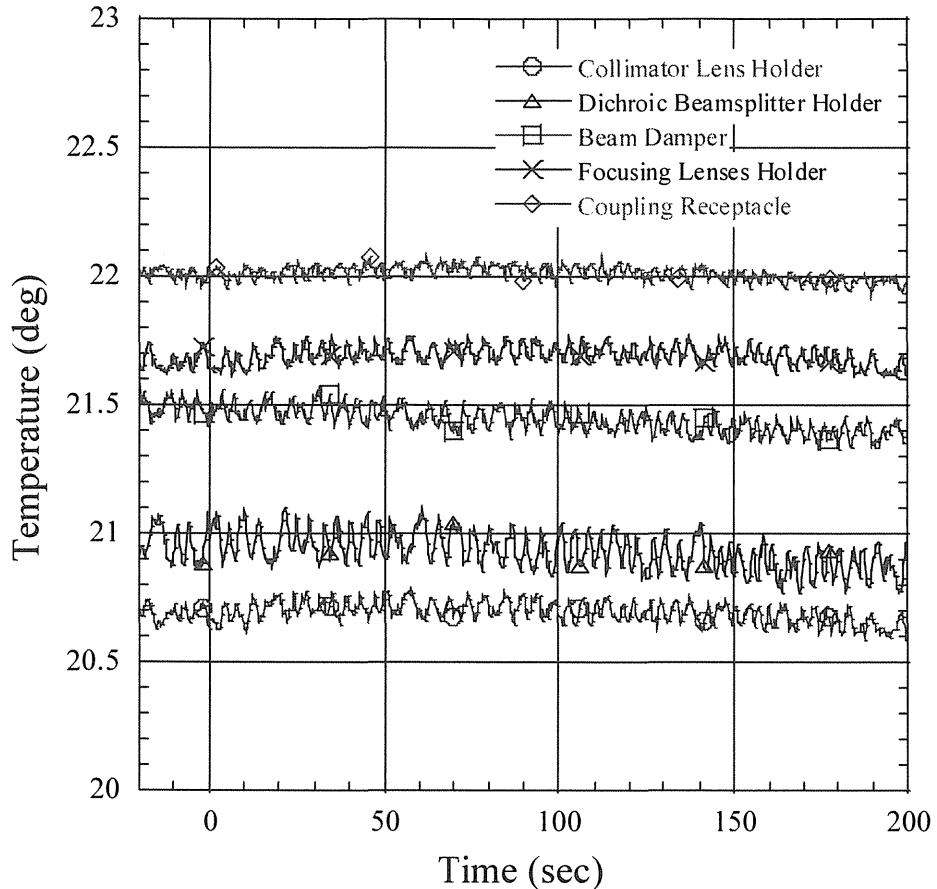


Fig.4.23 Temperature increase curve at the cooling parts with laser power of PW1000W

#### 4.3.5 画像観察

YAG レーザーを複合型光ファイバに導光した場合、レーザービームをカップリングするファイバ入射部においては、レーザー伝送用ファイバの外側に配置しているイメージ伝送用ファイバ部にレーザービームが漏れ出る割合が大きいと予想される。これにより、イメージガイド部が劣化して画像伝送性能が悪くなることが考えられる。このため、レーザー導光前後で画像を比較し、レーザー導光による画像伝送性能の劣化があるかどうかを確認する必要がある。ここでは、カップリング装置に YAG レーザービームを入射し、複合型光ファイバにレーザービームを導光し、複合型光ファイバから得られる画像の劣化状況を検証する。

##### 4.3.5.1 試験方法

Fig.4.24 に示すように、カップリング装置に YAG レーザービームを入射し、17.8m の複合型光ファイバに CW800W, CW1000W, PW1000W のレーザービームを 30 秒間それぞれ導光して、レ

一ガービーム導光前後での複合型光ファイバから得られる画像の変化を観察する。画像観察時には、Fig.4.25 に示す配管内アクセス型枝管用溶接・切断ヘッドを模擬した小型加工ヘッドをファイバ出射端に結合した。枝管用溶接・切断ヘッドにおいては、ファイバからのレーザー光をレンズ系により一旦平行光にし、途中、銅ミラーを使用してレーザー光を屈折させ、さらに、ミラーにより集光したレーザー光をノズル先端から出射して対象物の加工を行っている。このため、実機を模擬した本画像観察用ヘッドにおいても、レーザー伝送と画像伝送を同一の光路として設計・製作した。故に、画像の結像比が 1 対 1 となり、観察可能な視野範囲は画像伝送用のファイバ外径と同程度の  $\phi 2\text{mm}$  となっている。画像の解像度を確認するためにテストターゲット (USAF1951 クロームタイプ：外観写真を Fig.4.26 に示す) を観察する。なお、このテストターゲットは 0 番～7 番のグループで構成されており、1 つのグループは互いに直交する 2 方向のパターン (3 ラインペア) で、Table4.4 に示すような 1mm 当りのラインペア数となっている。

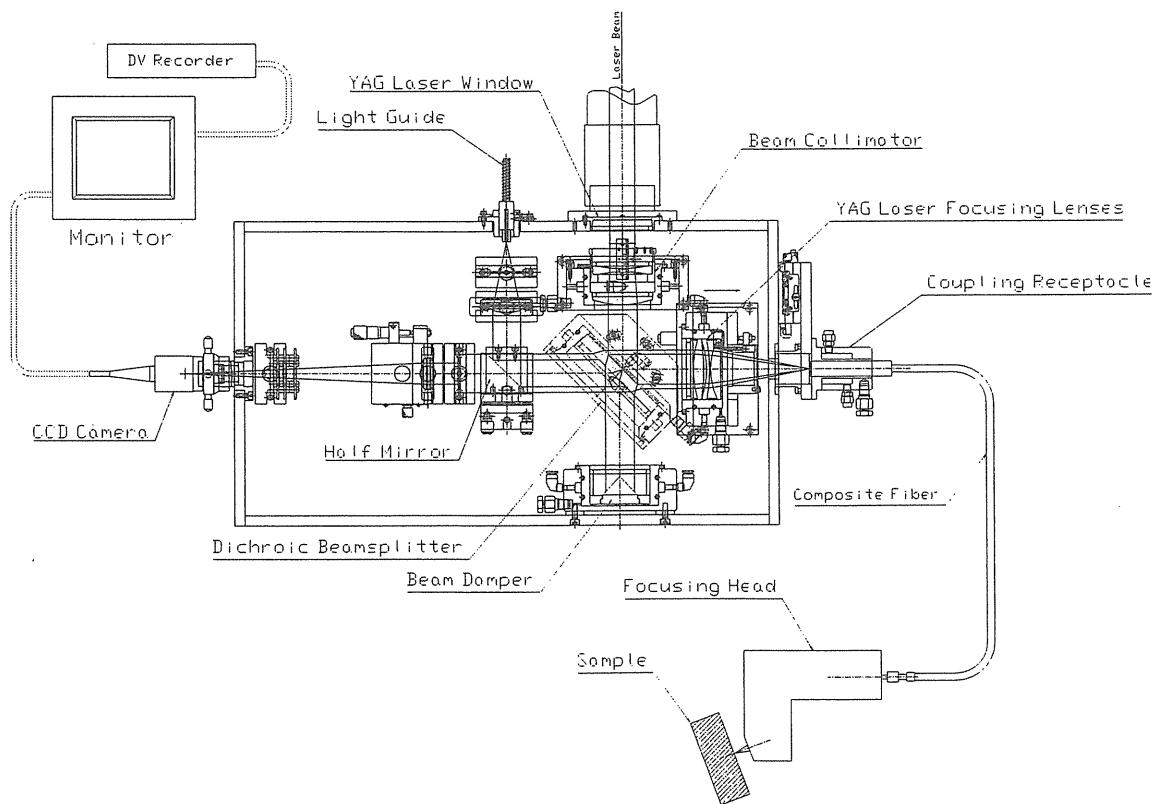


Fig.4.24 Experimental setup for observation of image transmission

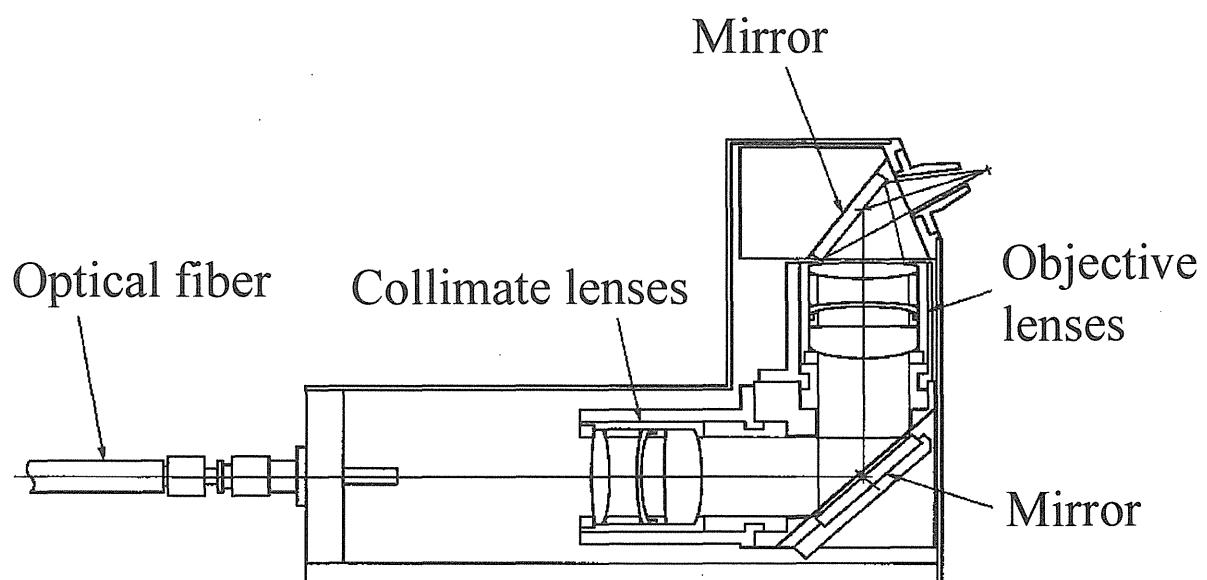


Fig.4.25 Imitated objective lens of the welding/cutting robot for branch pipe

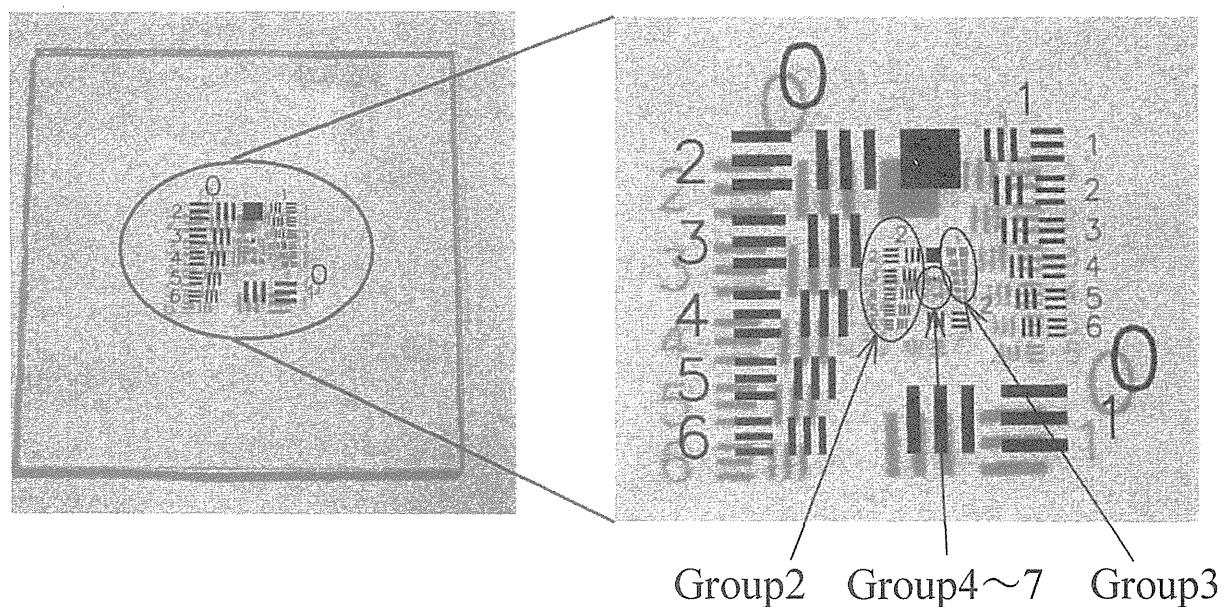


Fig.4.26 Overview of the test target

Table 4.4 Number of line pair per mm

Line Number	Group Number						
	0	1	2	3	4	5	6
1	1	2	4	8	16	32	64
2	1.12	2.24	4.49	8.98	17.95	36	71.8
3	1.26	2.52	5.04	10.1	20.16	40.3	80.6
4	1.41	2.83	5.66	11.3	22.62	45.3	90.5
5	1.59	3.17	6.35	12.7	25.39	50.8	102
6	1.78	3.56	7.13	14.3	28.51	57	114

#### 4.3.5.2 試験結果

17.8m の複合型光ファイバに CW800W, CW1000W, PW1000W のレーザーを 30 秒間ずつ導光し、テストターゲットを観察した。本試験条件すべてにおいて、複合型光ファイバへレーザーを入射した前後で画像の変化はなかった。観察画像結果例を Fig.4.27 に示す。従って、コア部を伝送するレーザーが周囲の画像伝送用イメージファイバへ漏れ出して、同ファイバを劣化させるような現象は起きていないといえる。

また、レーザービーム導光試験開始前後に、複合型光ファイバ両端面の状態を観察し、ダメージ等による変化がないことを確認した。このファイバ端面の観察には、金属顕微鏡（OLYMPUS 製 BHT）を用いた。なお、USAF 分解能テストターゲットによる画像の解像度の確認により、グループ 4（ライン番号 6 の暗部の間隔 : 17.5μm）までラインペアについては比較的鮮明に観察できることが明らかとなった。ただし、暗部の間隔は以下の式で決定される。

$$\text{暗部の間隔 } (\mu\text{m}) = \frac{1\text{mm}}{1\text{mm} \text{当たりのラインペア数} \times 2} \times 1000$$

#### 4.3.5.3 まとめ

CW で 1000W, PW で平均出力 1000W (ピーク出力 2000W) までのレーザー出力における複合型光ファイバへの導光では、ファイバへレーザーを入射した前後において、伝送される画像の変化は認められなかった。従って、コア部を伝送するレーザーが周囲の画像伝送用イメージファイバへ漏れ出して、同ファイバを劣化させるような現象は起きていないといえる。但し、レーザービームが全く漏れ出していないとは考えられないでの、画像伝送用イメージファイバに熱的耐久性があるか、もしくはイメージファイバを変質させるほどレーザービームを吸収していないとも考えられる。

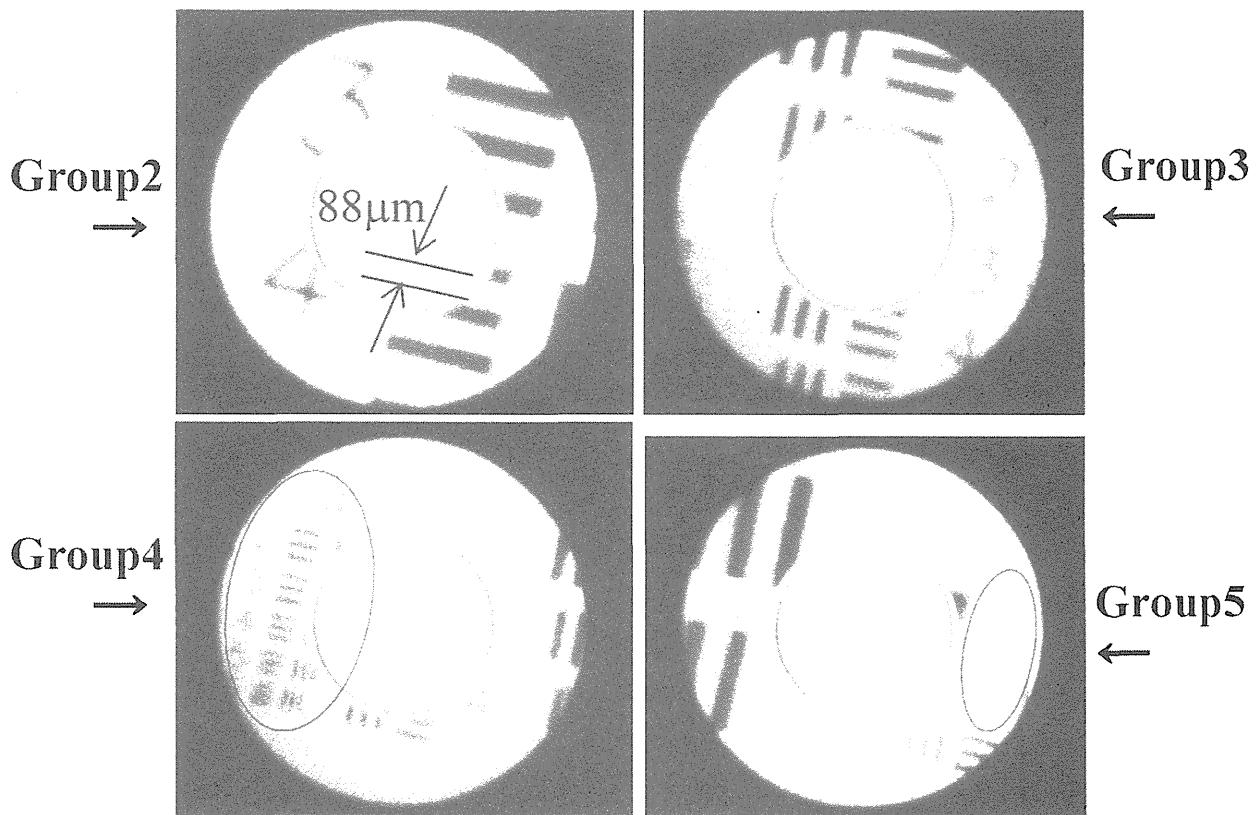


Fig.4.27 Observation test results using the test target

#### 4.3.6 溶接・切断・観察用複合型光ファイバシステムのまとめ

ITER の冷却配管に対して高品質な溶接・切断を行うためには、溶接・切断前後の状況確認、正確な焦点位置合わせ、溶接時の溶接光の常時確認が必要となる。これには、目視観察機能が有効であるが、従来の 1kW レーザーに加えて、画像の伝送用光学系が別途必要となる。しかし、配管内が狭く、2 つの系統の光学系を並列して構成できないという新たな課題があった。本研究ではこの点に着目し、空間の有効利用と、2 つの光学系の焦点位置を一致させるために、枝管溶接・切断ロボットに搭載している、レーザー導光用レンズ及びミラーを画像伝送と兼用し、レーザー光と画像の光軸を同一化する機構を考案した。具体的には、レーザー導光用光ファイバを中心に、周囲に画像伝送用極細径光ファイバを 15,000 画素同軸化した複合型光ファイバを世界で初めて考案した。さらに、レーザー光と、画像を取り出すために、YAG レーザー光の 1064nm と画像の 400 ~800nm の波長の違いに着目し、ミラーによりレーザー光の反射と画像の透過を同時にできるカップリング装置を考案した。そして、これらのシステムを製作し、1kW のレーザー光を伝送し、実用的な 90% 以上の伝送効率を得た。以上の結果、1 本の光ファイバと 1 つの光学システムで、1kW の YAG レーザー光と画像の並列伝送を世界で初めて達成した。これにより、狭い配管内の高品質な溶接・切断を可能とし、ITER 炉内機器用配管保守シナリオの成立に大きく貢献した。

なお、今回の試験は、CW1000W 及び PW1000W までのレーザー伝送を検証したが、同ファイバにおいては、さらに高出力のレーザーパワーを伝送できる可能性を秘めていると考えられる。今後、さらなる高出力レーザー透過試験を行い、複合型光ファイバの性能評価を実施することが望まれる。また、今回の条件においても、レーザー伝送部のコア径をさらに細くし、観察する画像を見やすくすることは可能であることを付記しておく。

## 5 原子力事故時対応ロボットの設計と遠隔操縦システム

平成 11 年 9 月末に発生した JCO の臨界事故では、放射線レベルが高く、事故現場への人のアクセスが困難であった。このため、事故現場の状況についての情報が不十分で、事故の収拾を大幅に遅らせた。この臨界事故のように、原子力施設で事故が発生し、放射線により人がアクセスできない場合、事故をできるだけ早く収拾するために、事故現場に即座に侵入し、情報収集や事故拡大防止・停止処置作業を行うロボットの開発が必要であると考えられる。日本原子力研究所における著者が中心となるプロジェクトチームは、これまで原子力施設用ロボット及び核融合炉用保守ロボットの開発を通して養ってきた知見や経験等を生かし、「事故時情報遠隔収集ロボット」(RESQ: Remote Surveillance Squad) [72]の開発と並行して、より放射線レベルの高い環境下で作業が可能なロボットを開発した。

本章では、このプロジェクトで開発されたロボットの設計とその実用的な遠隔操縦方法について記述する。

### 5.1 仕様

原子力事故時、人の代わりに事故現場に即座に侵入し、情報収集や事故収拾活動を行うことが可能なロボットについて、要求される作業環境条件の検討を行い、その結果からロボットの仕様を決定する。

原子力事故時対応ロボットは、その使命と緊急性から、設計・製作期間を 1 年間とする制約条件を設け、この期間内で対応可能な範囲内で設計・製作を行うこととした。原子力事故という環境から、極力、放射線に対応するため、各部材・機器等には『耐放射線』を考慮したものを使用する。また、現状レベルではロボットの要求仕様が達成不可能なものや、製作期間の制約により対応不可能な機器に関しては、機器毎に他のロボットまたは作業員による迅速な取り替えが容易な構造とした。また、ロボットを事故現場へ搬送するために、ロボット搬送車両を用いる。ロボット搬送車両は現場まで他の車両にて牽引可能なコンテナ車等とし、コンテナ内にはロボットを操作可能なコントローラを搭載することとした。

JCO 事故を念頭に置き、以下に示す設計条件を考慮してロボットの設計を行うこととした。

#### (1) 施設内の想定雰囲気

- |            |                            |
|------------|----------------------------|
| 1) ガンマ線線量率 | : $\sim 10$ Gy/h           |
| → 集積線量     | : $\sim 10^5$ Gy 程度 (目標値)  |
| 2) 雰囲気     | : 大気 (放射性物質による汚染あり)        |
| 3) 温度      | : $\sim 40$ °C (火災等は考慮しない) |

4) 湿度 : ~90 % (結露無し)

(2) ロボットの作業環境条件

1) 走行場所 (施設内)

コンクリート, アスファルト, グレーチング, リノリウム床等で幅 100cm 程度

2) 障害物

ドア : 幅 90cm, 高さ 180cm, 開き戸

ノブの高さ 90cm~100cm, 押引動作, 開閉に必要な力として 5Kgf·m 程度

階段 : 有効幅 90cm, 段差 22cm, 角度 40 度程度

踊り場 : 有効幅 180cm, 有効な奥行き 120cm 程度

溝 : 幅 20cm 程度, 深さ 20cm 程度

落下物 : 1 つの落下物の重量がロボットの半分以下程度の重量で、一辺が 90cm 程度  
の立方体とし、床との静止摩擦係数を 0.3 とする

原子力事故時対応ロボットを設計・製作するため、作業効率と安全性の観点からロボットの基本的な作業形態を検討すると、以下のようになる。

- 常に独立した 2 台以上のロボットが同時に移動及び作業を行う。
- 互いのカメラの映像も参考にしてロボットは動作する。
- 1 台のロボットにつき最低 1 人のオペレータが操作を行う。2 人以上でも操作可能とする。

上記環境条件及び作業形態を考慮し、原子力事故に対応するため、以下に示す仕様を基本としてロボットの設計・製作を行うこととした。なお、各構成部材及び機器については、極力、耐放射線性（電子機器に関しては  $10^2\text{Gy}$  程度を想定）のものを使用し、電子機器については、容易に交換可能なユニット構造化を図るものとする。

(1) ロボットのサイズ

ドア、通路幅、階段の踊り場等を移動するための形状条件により、ロボット 1 台の走行機構とそれに搭載した装置の大きさを、700mm (W) × 900mm (L) × 1700mm (H) 程度以内とする。また、ロボット重量に関しては、施設内を移動するということと、極限環境ロボットプロジェクトでのロボット重量（約 760Kg）を鑑み、総重量 500Kgf 以下を目指す。

(2) ロボットの想定走行環境・速度等

- 通路及び階段の踊り場を通過し、階段の昇降を可能とする。
- 平坦地において人と同程度(2~4km/h 程度)の走行能力を有し、階段は可能な限り速く移動する。
- 落下物を押しながら除去することを可能とする。
- 溝を乗り越えて走行することを可能とする。

(3) 走行機構

走行安定性の観点からクローラタイプを基本とする。なお、階段昇降時には、走行安定性を確保するために、形状を変更することも検討する。

(4) アーム

- 双腕多関節型マニピュレータ 1 台を搭載する。1 本の腕が 6~7 自由度とする。

- ・ マニピュレータの動作として、上記自由度以外に、ロボット腰部が回転・傾斜する。
- ・ 可搬重量は 1 本の腕でエンドエフェクタを接続しない状態（力覚センサ及びマルチコネクタ等を含まない）で 10kg 程度とし、エンドエフェクタとして、2 本指以上の把持機能を有するハンドを搭載する。
- ・ マニピュレータ先端は、他のエンドエフェクタとロボットにより交換可能なコネクタ取り合いとする（エア、電気等を混合したマルチコネクタ構造等）。
- ・ ドア及び鍵の開閉を円滑に行うため、マニピュレータとエンドエフェクタの結合部には力センサを搭載する。
- ・ マニピュレータの各関節に使用するモータには、レゾルバ程度の性能と耐放射線性が期待できる回転検出器を使用する。
- ・ マニピュレータは有線及び無線を使用した力帰還型バイラテラルマスタースレーブシステムの構成を基本とする。このとき、制御系のサンプリング周期は 1msec 程度を目標とする。なお、無線による通信の遅れ対策等の最適化は今後の開発課題とする。また、オペレータにはグラフ表示等による力情報の提示も行うものとする。力情報の提示はできる限り高速に行うものとする。
- ・ センサ、無線装置、バッテリ、制御装置等の電子機器に関しては、1 つの大きさが双腕マニピュレータの可搬重量以下の大きさとし、ロボットにより容易に交換可能な機構とする。

#### (5) 視覚及び聴覚

- ・ ロボットに搭載するカメラの台数は、前後左右に 1 台ずつ、マニピュレータ本体（腕の先端近く）に各 1 台搭載する。
- ・ カメラ接続部にワンタッチコネクタ等の採用により、ロボットにより取付け／取外しが容易に行える構造とする。また、電源に関しては、ロボット本体から給電する。
- ・ ロボットの進行方向と左右両サイドについては、常時監視可能とする。
- ・ ロボットに搭載するカメラのうち、前面に搭載するカメラは、パン、チルト、ズームを可能とする（プリセット機能付き）。また、ヘッドマウントディスプレイに対応したカメラ（2 眼ステレオ方式等）とする。
- ・ マニピュレータが作業を行う方向に対して、暗闇でも作業可能なようにハロゲンランプ等のライトを搭載する。
- ・ マイクとスピーカを搭載し、現場の音を収集すると共に、オペレータの声を伝達可能とする。

#### (6) 距離センサ

階段、通路幅等を計測可能なように、距離計測用センサを搭載する。近くから遠方（1m～5m）まで測定可能とする。

#### (7) 操作卓

- ・ 走行はジョイスティック、マニピュレータはマスターーム等により走行とマニピュレータの操作がそれぞれ可能とする。なお、走行用とマニピュレータ用は独立で操作可能とする。
- ・ ロボットの 5 方向（前・後・左・右・ハンド部）の画像を表示するカラーモニタ、ヘッドマウントディスプレイ等を搭載し、オペレータがロボットの状態を把握可能とする。

- ・ オペレータの操作支援として、状態監視画面を設置する。画面にはロボットの動作をグラフィック表示し、マニピュレータの関節角度、角速度、エンドエフェクタの動作指令及び予測速度等その他必要となる情報を表示する。
- ・ オペレータの指令を受けマニピュレータの各軸に伝送する信号を生成するコントローラを有する。また、操作信号を発信することでロボットは動作するが、その指令がこないときロボットは停止し続ける。

(8) ロボットに搭載する制御コントローラ

- ・ ロボット制御に使用する制御装置には、単純な動作プログラム等（データの送受信等の基本的なもの）を搭載可能とする。なお、故障時に制御コントローラ全体及び一部を容易に交換可能な構造とする。
- ・ ロボットに搭載する制御システムは、将来、制御システムの変更が可能な構成とする。

(9) ロボットの制御方式

- ・ 無線による指令を受けてオープンループで制御を行うものとする。
- ・ 双腕マニピュレータは、マスタースレーブ方式にてそれぞれの腕を単独動作させることを基本とする。

(10) 電源（駆動源）

- ・ バッテリによる駆動とする。
- ・ バッテリ以外に、商用電源からの電源供給でロボットの動作が可能とする。

(11) 通信

- ・ 操作はすべて無線（SS 無線等）により行われるものとするが、有線でも制御可能なように無線と有線の両方を搭載する。
- ・ 映像はすべて無線（SS 無線等）により伝送されるものとするが、有線でも確認可能なように無線と有線の両方を搭載する。
- ・ JCO 事故時での避難勧告範囲を参考にし、制御可能範囲を 500m程度（見通し距離）とする。
- ・ 通信装置は容易に交換可能とする。
- ・ リピータによる通信範囲の拡大も可能とする。
- ・ 高速通信を確保するため、ロボットの制御と画像の伝送系統は別系統とする。また、通信の混線をさけるように考慮する。

(12) その他の対応

- ・ 除染作業を行うため、水による洗浄が行える防滴構造とする。なお、コネクタの取り外し等の作業は、除染終了後、ロボット本体に水滴がない状態（十分に乾燥した状態）にて行うものとする。
- ・ ロボットの動作に異常が生じた場合、異常動作による破壊等の暴走を回避するための対策を講じる。

(13) ロボット搬送車両

- ・ ロボット搬送車両は現場まで他の車両にて牽引可能なコンテナ車等とする。また、コンテナ部は車両部から分離可能とし、トラック等の車両に搭載可能で防雨型構造とする。
- ・ ロボット用の操作卓を搭載した搬送車両とする。
- ・ 操作卓を駆動するために必要な電源を供給可能とする。

- ・ ロボットを搬送及び設置する事を可能とする。また、ロボットは当該搬送車両内で密閉された領域に保管可能とする。
- ・ ロボットを展開及び収納するため、昇降用リフター等を有する。

以上の仕様を基に、原子力事故時対応ロボットを設計・製作する。

## 5.2 移動機構の検討

原子力施設内で自由に移動するため、ロボットには移動機構が必要である。移動機構には様々な方式があるが、走行安定性、機動性、階段昇降性能という観点から、クローラタイプの移動機構を検討することとした。クローラタイプには、左右独立2クローラ、左右独立4クローラ、左右独立6クローラなど、様々なタイプがある。これらの特徴を整理し、どの方式が良いかを検討した。Table5.1 及び 5.2 に検討結果を示す。高傾斜度の踏破、踊り場での旋回機能、操作性能等、総合的に判断した結果、東工大が研究を行った TAQT[73]を移動機構の基本機構として採用することにした。

上記の移動機構を採用するとし、実際に原子力事故時対応ロボットに搭載するために、最適なクローラの形状を検討した。検討に使用したモックアップモデルの階段の仕様を以下に示す。

階段ステップ高さ	: 220mm
階段幅	: 900mm
段数	: 5 段
階段傾斜角度	: 30
踊り場有効奥行き	: 1200mm
踊り場有効幅	: 1800mm

この階段を使用し、Fig.5.1 に示すように、台車及びクローラの試作機を製作し、クローラ間距離、クローラ直径、クローラ幅、スプロケット間ピッチをパラメータとして検討を行った。また、以下に示す方針により台車及びクローラを製作した。

### ① タイプ I

- ・ 試作台車の全長が約 1000mm とする。
- ・ 前後のクローラに階段のエッジを 2ヶ所接触させて階段を昇降する。
- ・ クローラを垂直に立てた状態で旋回可能とする。

### ② タイプ II

- ・ 試作台車の全長が 1200mm 以下とする。
- ・ 前後のクローラに階段のエッジを 3ヶ所接触させて階段を昇降する。
- ・ クローラを垂直に立てた状態で旋回可能とする。

### ③ タイプ III

- ・ 試作台車の全長が 1200mm 以上とする。
- ・ 前後のクローラに階段のエッジを 4ヶ所接触させて階段を昇降する。

- ・ クローラを垂直に立てた状態で旋回可能とする。

上記方針を基に、Table5.3 に示すような台車及びクローラの寸法を試作した。

実際に試験を実施し、下記の成果が得られた。

- ・ タイプ I では階段昇降が不安定であるが、踊り場での旋回範囲は小さい。
- ・ 階段昇降に関しては、タイプIIIが一番クローラが長いため、安定した昇降ができた。
- ・ タイプ II に関しては、階段昇降も安定し、かつ、踊り場での旋回も比較的円滑に行えた。

以上の検討結果から、タイプIIの台車及びクローラ寸法で原子力事故時対応ロボットの移動機構を設計することとした。

Table 5.1 Comparison of crawler type (1)

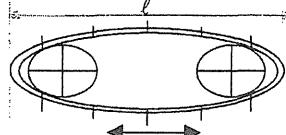
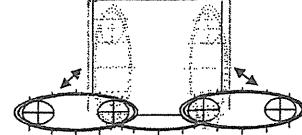
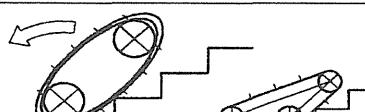
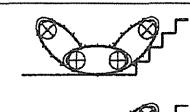
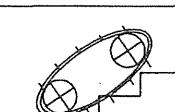
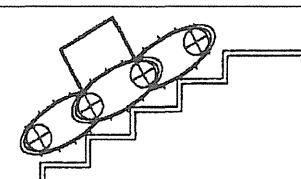
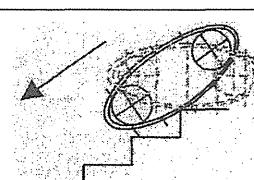
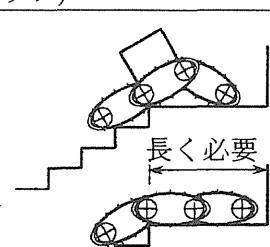
移動方式	左右独立2クローラ	左右独立6クローラ
概略機構図	2モータ, 3モータ(日立) 	10モータ(LMF), 2モータ(Andros) 
代表的な機種	TSR200(Cybernetix)	LMF(Cybernetix), Andros VI-A(Remotec)
昇 降 方 式	上り口  <ul style="list-style-type: none"><li>傾斜30度以上だと後転</li><li>可変形状式では対応可</li></ul>	 長く必要
	階段  <ul style="list-style-type: none"><li>点接触</li><li>上下動し下り方向は不安定</li></ul>	 Andros: 点接触(クローラピッチ≠階段ピッチ)
	下り口  <ul style="list-style-type: none"><li>瞬時転回がある</li><li>可変形状式も同様</li></ul>	 長く必要
昇降力	摩擦力	摩擦力(グリップ力)
特 徴	最大傾斜 32°	45°
	踊り場旋回 1600mm	1200mm以上
評 価	高傾斜の階段 ×	○
	安定性 ×: 瞬時転回と上下動あり	○: クローラ端が浮きやすい
	操作性 (階段移動時) ○: 半自動走行	×: 上り/下り口の遠隔操作が困難
	速度 ○: Max.10m/min以下	○: 7m/min以下
	狭い踊り場 ×: ロボット長lが長く, 旋回軌道が不安定	○: 折り畳み旋回, 旋回軌道安定
	総合評価 ×: 高斜度の階段に対応困難	△
課題	-	-

Table 5.1 Comparison of crawler type (2)

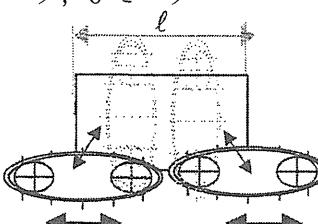
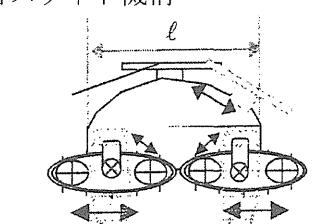
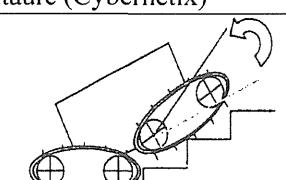
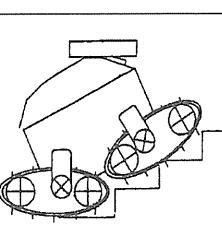
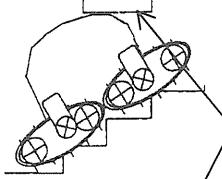
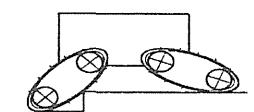
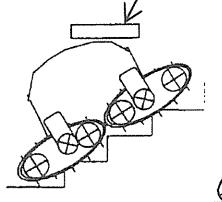
移動方式	左右独立4クローラ	左右独立4クローラ
概略機構図	8モータ, 6モータ 	荷台スライド機構 
代表的な機種	MF3 (Telerobo), Centaure (Cybernetix)	TAQT(東工大)
昇 降 方 式	上り口  ・可変形状式では対応可	 荷重の加わるリンクが中央にあり、クローラが階段に2点接触するため安定走行可能
	階段  ・クローラ先端は推力に関与しない ・前後クローラの姿勢安定性に操作ノウハウが必要	 搭載物をスライドして重心を前側にでき、前後クローラに均等な荷重(摩擦力)が得られて安定
	下り口  クローラ角の入力にノウハウが必要	 グリップ力
昇降力	グリップ力	グリップ力
特 徴	最大傾斜 45°	40°
	踊り場旋回 1200mm程度(推定)	1200mm(推定)
評 価	高傾斜の階 段 ○	○
	安定性 △: クローラ端が浮きやすい	○: クローラが2点接地し安定
	操作性 (階段移動時) △: 上り/下り口の遠隔操作が困難	◎: クローラ回転軸まわりのトルク制御で半自動的に走行可
	速度 ○: 10m/min以下	○: 10m/min以下
	狭い踊り場 ○: 折り畳み旋回, 旋回軌道安定	○: 折り畳み旋回, 旋回軌道安定
	総合評価 △	◎: 最適化の可能性あり
課題	-	幅0.9m, 奥行1.2mの踊り場対応と安定走行の両立, クローラ形状の最適化

Table 5.2 Comparison of ability of each crawler type (1)

クロ ーラ	メーカー名	Remotec			Cybernetix	
	型式	Andros V-A	Andros VI-A	Mini Andros	Centaure	LMF
主要 仕様	サイズ	1150×720× 1100	1320×430 ×1110	1070×700 ×940	1000 × 500 ×1150	850×850× 1900
	重量	276Kg	158Kg	86Kg	320Kg	880~1120Kg
	可搬重量	27Kg	10Kg	7Kg	5~15Kg	25~100Kg
	電源供給方式	バッテリ	バッテリ	バッテリ	バッテリ	バッテリ
	通信方式	有線	有線	有線	有線	有線
移動 能力	移動速度	3.2km/h	1.4km/h	1.8km/h	0.3km/h	0.4km/h
	最大傾斜	45°	45°	45°	40°	45°
	旋回	1300mm	1400mm	1300mm	900×1000	1200mm
耐環 境性	使用温度	常温	常温	常温	-20~50°C	-10~55°C
	使用湿度	-	-	-	-	100%
	防水性	有	有	有	-	-
	防爆性	無	無	無	-	-
	耐放射線性	30Gy	30Gy	30Gy	10 <sup>4</sup> Gy	10 <sup>4</sup> Gy

Table 5.2 Comparison of ability of each crawler type (2)

クロ ーラ	メーカー名	Redzone Robotics		Telerobo	MHI	東工大
	型式	Pionner	Houdini	MF3	危険物処理 ロボット	TAQT
主要 仕様	サイズ	1200×750 ×1400	1000×800 ×1000	2260×754 ×1080	2200 × 1000 ×900	1300×860× 970
	重量	150~300Kg	250~450Kg	400Kg	1150Kg	310Kg
	可搬重量	16Kg	110Kg	20, 80Kg	25Kg	100Kg
	電源供給方式	有線	有線(油圧)	有線	ガソリン エンジン	バッテリ
	通信方式	有線	有線	有線	有線	無線
移動 能力	移動速度	0.5km/h	1km/h	0.6km/h	0.3km/h	0.5~2km/h
	最大傾斜	45°	45°	45°	25°	40°
	旋回	-	-	2000mm	2500mm	1300mm
耐環 境性	使用温度	65°C	50°C	常温	常温	常温
	使用湿度	100%RH	100%RH	-	-	-
	防水性	有	有	-	有	-
	防爆性	無	無	無	無	無
	耐放射線性	10 <sup>5</sup> Gy	10 <sup>4</sup> Gy	-	-	-

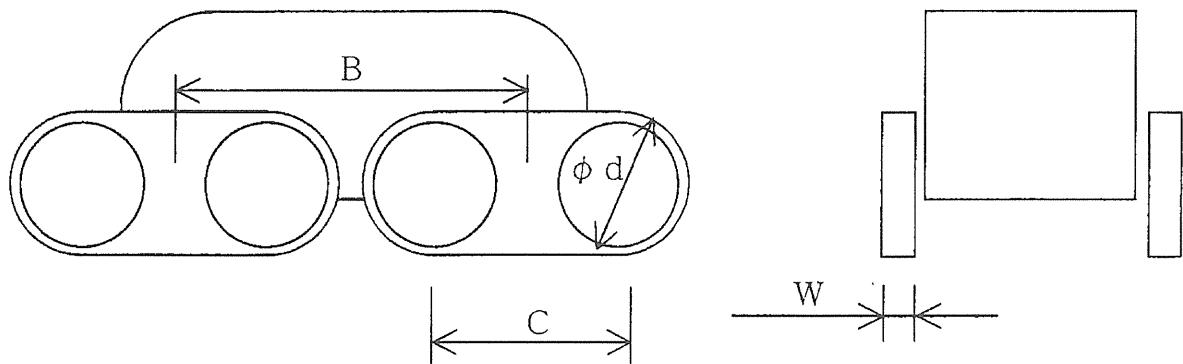


Fig.5.1 Shape of the prototype crawler

Table 5.3 Specifications of the prototype crawler

Type	Shape (unit : mm)			
	Distance (B)	Diameter ( $\phi d$ )	Width (W)	Pitch (C)
Type- I	478.0	228.0	50.0	240.0
Type- II	576.2	266.2	50.0	300.0
Type- III	688.0	228.0	50.0	450.0

### 5.3 マニピュレータの検討

ロボットに搭載するマニピュレータに関して検討を行い、形状、アーム重量、可搬重量、動作範囲、耐放射線性、原子力施設内での使用実績等を考慮した結果、現状では、三菱重工製 PA-10 を選択することが妥当であると判断した。双腕マニピュレータとするため、同一構造のマニピュレータを左右対称に接続して使用する。Fig.5.2 にマニピュレータ単体を、Fig.5.3 に 2 本のアームを組み合わせた外観を示す。また、Table5.4 にマニピュレータの仕様を示す。

マニピュレータ先端には、ツールチェンジャーを取り付けておき、エンドエフェクタを交換する構造とする。マニピュレータ本体内にはエアー系のホースを通すことが困難なため、エンドエフェクタ部へは電源供給のみを行う構造とし、力覚センサを含めて着脱可能とする構造とした。

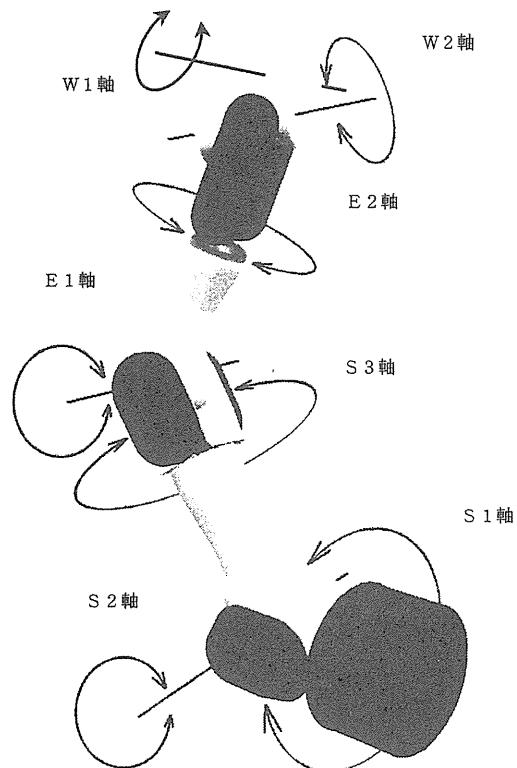


Fig.5.2 Overview of a manipulator

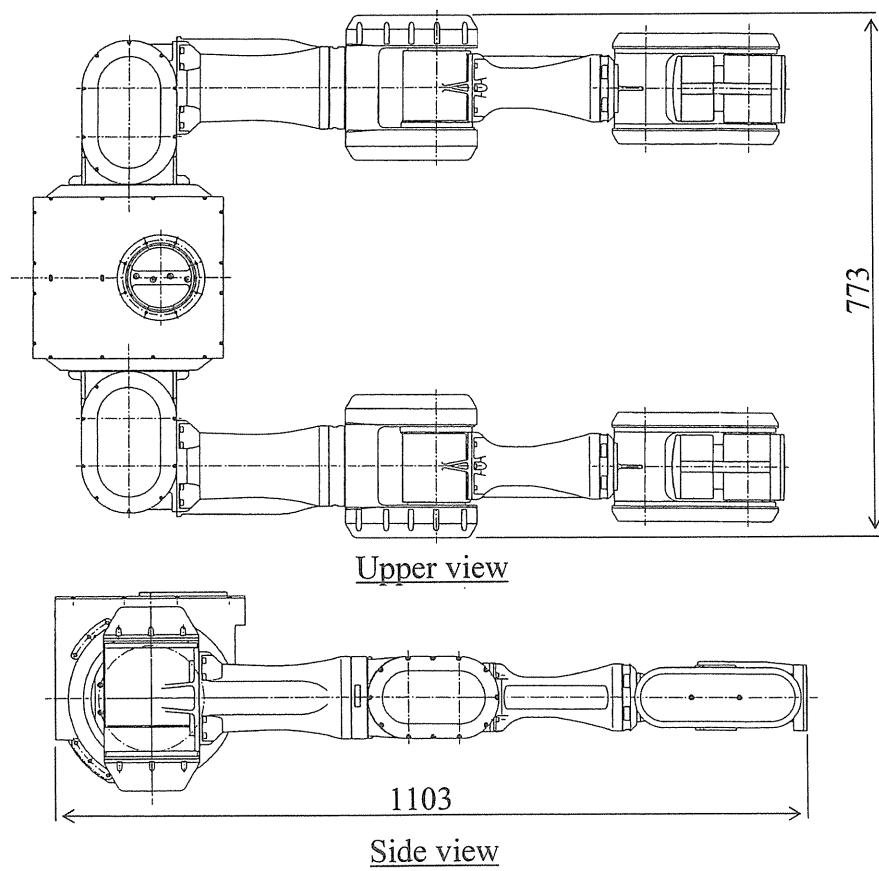


Fig.5.3 Design of the dual arm

Table 5.4 Specifications of the manipulator

項目	仕様		
名称	双腕マニピュレータ		
形式	垂直多関節		
関節数	14 (右マニピュレータ 7+左マニピュレータ 7)		
関節構成	肩側より R-P-R-P-R-P-R (R は回転関節, P は旋回関節を示す)		
関節名称	肩側より S1-S2-S3-E1-E2-W1-W2 (S は肩関節, E は肘関節, W は手首関節を示す)		
マニピュレータ長	肩リーチ	: 280mm (胴体中心～S2 間)	
	上腕	: 450mm (S2～E1 軸間)	
	下腕	: 460mm (E1～W1 軸間)	
	手首リーチ	: 53mm (W1～メカニカルインターフェース面間)	
関節動作範囲	軸名称	メカニカルリミット (度)	
		右マニピュレータ	左マニピュレータ
	S1 (回転)	±180	←
	S2 (旋回)	+94～-129	+129～-94
	S3 (回転)	±180	←
	E1 (旋回)	±143	←
	E2 (回転)	±270	←
	W1 (旋回)	±180	←
	W2 (回転)	±180	←
可搬重量	10Kg (エンドエフェクタ, 力覚センサ, ツールチェンジャ質量を除く)		
駆動方式	AC サーボモータ		
回転検出器	ブラシレスレゾルバ		
エンドエフェクタ 結合方式	メカニカルインターフェース面に取り付けた電動式ツールチェンジャ		
エンドエフェクタ	DC モータ ON/OFF 駆動		
	6 軸力覚センサ内臓		
備考	エンドエフェクタ用配線は、マニピュレータケーシングに内臓		

## 5.4 耐放射線性の検討

原子力事故時に作業を行うためには、放射線環境下での作業が必須となる。このため、ロボットを構成する各機器の耐放射線性に関して検討を行う必要がある。JCO 事故の場合の放射線強度はガンマ線に換算すると数 Gy/h 程度であった。この状態で作業が何時間も継続される場合を考慮し、作業時間を 100 時間（約 4 日間）としても、集積線量で少なくとも  $10^3$ Gy の耐放射線性は必要と考える。また、これ以上の事故が発生すると仮定した場合、 $10\text{Gy}/\text{h}$  で  $10^4 \sim 10^5$ Gy まで耐えるとすると、 $1,000 \sim 10,000$  時間程度作業可能、あるいは、 $10^2\text{Gy}/\text{h}$  で  $10^4 \sim 10^5$ Gy まで耐えるとすると、 $100 \sim 1,000$  時間程度の作業可能とすることが望まれる。

ロボットに必要な機器を整理すると、構造部品、駆動機器及び制御部品（電子部品）に大別される。このうち、ロボットに必要となる構造部材に関しては、無機材料がほとんどであるため、特に支障なく、放射線環境下で使用可能である。駆動機器に関しては、モータ及び回転検出器（レゾルバ）は磁石とコイルのみであり、無機材料とみなせるため比較的放射線に強い。駆動機器のうち、有機材料であるクローラに使用するゴム[74]及び高分子材料[75]に関しても、材料選択を適切に行えば放射線環境下で問題なく使用可能であると判断できる。また、ケーブル類に使用される絶縁被覆材料についても同様である。検討を行う必要があると判断される機器は、制御部品（電子部品）である。電子部品は、ほとんどが半導体を主体とする集合部品であり、放射線環境下ではその絶縁劣化が問題となる。

極限作業ロボットプロジェクト[23]では、いくつかの半導体部品の照射実験を行っている。その結果から、集積線量で  $10^2$ Gy 程度は使用可能である。また、耐放射線バイポーラ集積回路素子の開発[23]も並行して行っており、これらの材料を使用して電子部品を構成すれば、 $10^4$ Gy までは使用可能であると予想される。しかしながら、本件で検討している条件下では 100 時間程度で劣化して使用不可能になる。このため、放射線に弱いと判断される電子部分については、他のロボットにて即座に交換可能な構成にしておき、定期的に交換することで放射線環境下での作業を継続することにした。さらに、交換し易くすることで、将来、放射線に強い半導体素子ができた場合にも、即座に入れ替え可能である。

電子部品が故障した場合、即時交換作業を行うが、ロボットに電源を供給するバッテリ及び電源装置に関しては、耐放射線性が不明である。これらの機器はその役割及び形状から、ロボット搭載部品として重要な位置づけとなるため、以下の条件でガンマ線照射し、耐放射線性を確認することにした。

### 照射試験体

リチウムイオンバッテリ	: 日本電池製 LFS100 (電圧出力 : 4V) , 3 台
電源装置	: スタビライザー製アーム用電源, 2 台
試験場所	: 日本原子力研究所 高崎研究所
照射条件	
線源	: Co60 ガンマ線
線量率	: $10^3$ Gy/h (JCO 事故の 100 倍)
照射時間	: 100 時間
集積線量	: $10^5$ Gy

### (1) リチウムイオンバッテリ

リチウムイオンバッテリを、通常環境下とガンマ線環境下にそれぞれ設置し、100時間の照射試験を行った。バッテリにはダミー抵抗を接続し、バッテリを放電し、ダミー抵抗間に流れる電圧を測定する。リチウムイオンバッテリの場合、電圧値一定で放電が行われるため、100時間放電後に残り電圧が3.4V以上あれば正常である。

Fig.5.4に照射試験の様子を、Fig.5.5に照射中のバッテリの電圧変化を示す。試験の結果、照射100時間後のバッテリ電圧、電流、温度ともに特に異常は無かった。照射後に、充電を行ったが、特に異常がないことを確認した。これによって、バッテリは集積線量で $10^5\text{Gy}$ までは耐放射線に優れており、ロボットに搭載するこが可能である。

### (2) 電源装置

電源装置を通常環境下とガンマ線環境下にそれぞれ設置し、100時間の照射試験を行った。試験では、5V及び100V出力にダミー抵抗を接続してダミー抵抗間の電圧を測定し、規定電圧の±10%以内であることを確認する。照射試験後は、ロボットアーム（三菱重工製 PA-10）に搭載し、アーム動作が正常かどうかの確認を行う。

Fig.5.6に照射試験の様子を示す。照射試験の結果、電源装置No.1は照射27分後に5V出力が遮断された。また、No.2に関しても照射40分後に5V出力が半分に低下し、照射65分後に5V出力は遮断された。このため、100時間照射後の電源を製作メーカにて分解動作確認を依頼した。その結果、各IC及びフォトカプラに異常が見られた。外観上の変化として、ヒューズガラス管の変色、プリント基板の半田レジストの変色、セメント抵抗の変色が見られた。Table5.5に電源装置に搭載された部品の照射結果についてまとめたものを示す。なお、正常/異常の判断は、異常な部品を特定した後に新品と交換し、電源が正常に動作することを確認したことにより、交換していない部品は正常と判断した。

本試験により、電源装置の制御部と電力部に分割し、電力部はロボット本体内に設置し、制御部を交換することにした。また、同じ機能を持つICでも製作メーカにより耐放射線性に差異があるため、より壊れにくい部品を選定する。なお、交換する主要部品の構成は以下のようになる。

制御部（要交換）：パワートランジスタ、各種IC、フォトカプラ、ファンモータ等

電力部（非交換）：トランス、抵抗、コンデンサ、ダイオード、バイポーラトランジスタ等

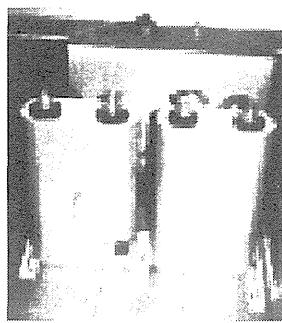


Fig.5.4 Appearance of irradiation test of lithium-ion battery

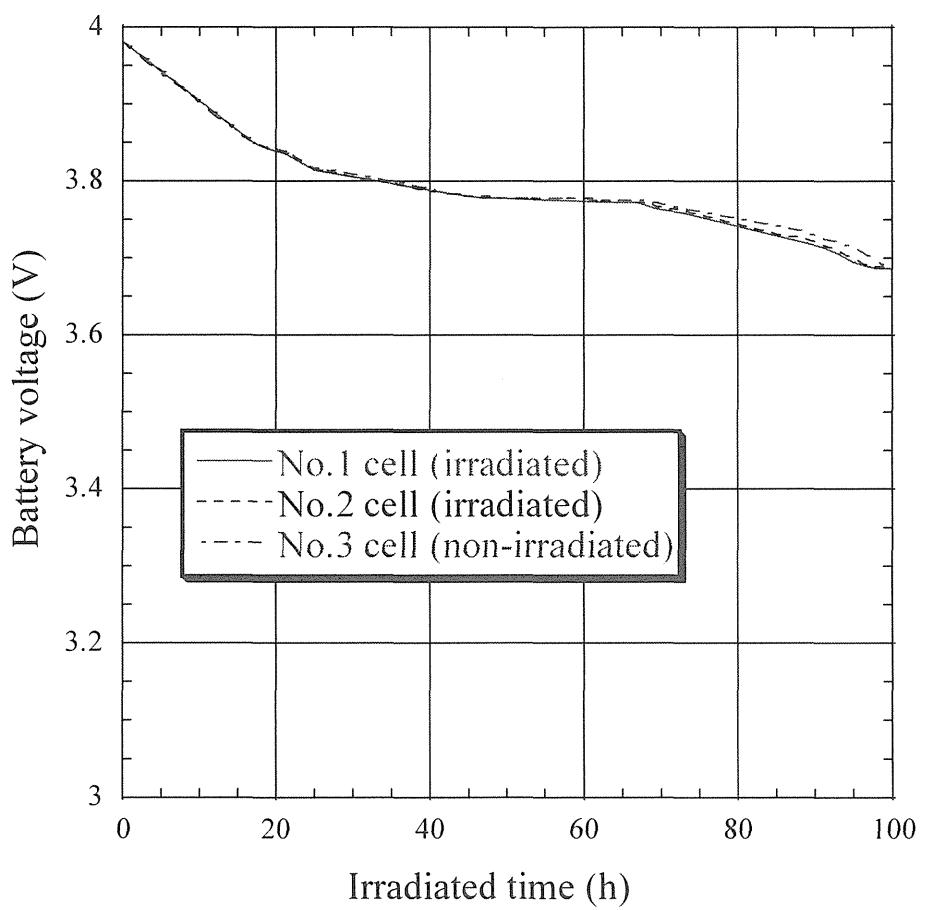


Fig.5.5 Irradiation test result of the lithium-ion battery

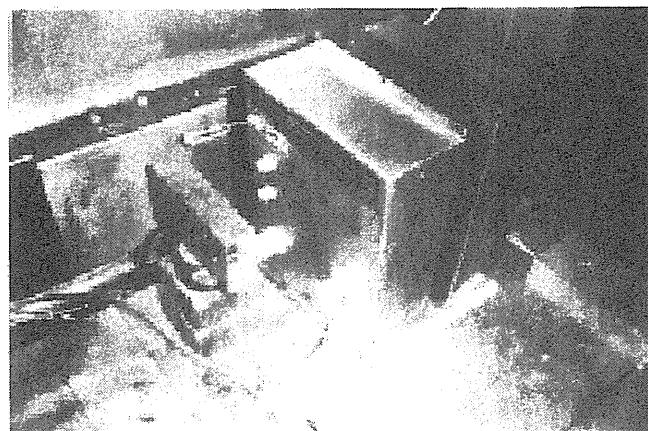


Fig.5.6 Appearance of irradiation test of power supply

Table 5.5 Irradiation test result of the power supply

部品名	電源装置 No.1	電源装置 No.2
ファンモータ	全て異常	全て異常
パワートランジスタ	製作メーカにより異常と正常 が混在する	製作メーカにより異常と正常 が混在する
MOS FET	全て異常	全て異常
フォトカプラ	全て異常	全て異常
スイッチング制御 IC	全て正常	全て正常
CMOS IC	14 個 (2 台分) のうち 2 個が異常	
オペアンプ	異常	異常
コンパレータ (A 社製)	異常	異常
コンパレータ (B 社製)	全て正常	全て正常
バイポーラトランジスタ	全て正常	全て正常
ダイオード	全て正常	全て正常
抵抗	全て正常	全て正常
コンデンサ	全て正常	全て正常

## 5.5 ユニット化の検討

前節までの照射試験結果を基に、ロボットに搭載したまま交換対象としない部品と、放射線に弱いと判断されるため交換対象とする部品とに振り分ける必要がある。そして、交換をする部品をいくつかに分割してユニット化し、他のロボットにて交換可能にする必要がある。ユニット化を行う上での設計条件としては、①ロボットが把持可能であること、②ユニットを設置時にロボット本体の防滴性を確保すること、③機械的に結合する時に電気的にも結合可能であること、④ロボットのみで作業可能であること、などが挙げられる。このうち、ロボットが把持可能な条件としては、大きさ、質量（8Kg程度）、把持部の形状と重心位置、把持部の収納などを考慮する必要がある。また、交換作業を補助するため、ガイドを設ける、上下動のみあるいはスライドするのみなどの一方向の動きとする、誤挿入の防止、などを考慮する必要がある。以上のこと考慮して交換を必要とする部品について検討を行った結果、Table5.6に示すように8種類11箇所のユニット化を行うこととした。ユニットの着脱方法としては、工具を利用して一定の回転角度を与えることで固定する機構（Fig.5.7参照）、手を離すとバネ力によって自動的に機器が収納される機構（Fig.5.8参照）、重力方向に機器を設置可能で固定にはマグネットを利用する機構（Fig.5.9参照）などの方式を検討することにした。これによって、各機器の故障時及び定期的な交換時において迅速な対応が可能である。また、将来、放射線に強い半導体素子ができた場合にも、ユニット毎に即座に機器を入れ替え可能である。

Table 5.6 List of unit parts

ユニット名	構成部品	交換方式	備考
頭部 (パン・チルト)	CPU・RAM 等の高集積 IC, CCD カメラ, 光学式エンコーダ	<u>機械的結合</u> テーパーロック式, 専用工具で操作 <u>電気的 I/F</u> スプリングコンタクト式	距離センサ及びライトも一体で交換, 1ヶ所
上部制御部	CPU・RAM 等の高集積 IC	<u>機械的結合</u> 磁石式, ダイヤル操作 <u>電気的 I/F</u> プローブ式と, スプリングコンタクト式の併用	マニピュレータ用サーボドライバ, 無線通信装置などから構成される, 1ヶ所
CPU	CPU・RAM 等の高集積 IC, 有線通信用の光変換素子	同上	冷却ユニットと一体, 1ヶ所
サーボ	CPU・RAM 等の高集積 IC	同上	台車駆動用, 1ヶ所
電源	CPU・RAM 等の高集積 IC	<u>機械的結合</u> 磁石式, ダイヤル操作 <u>電気的 I/F</u> スプリングコンタクト式	所定の耐放射線性能を有しない部品のみを交換する, 1ヶ所
充放電管理	CPU・RAM 等の高集積 IC	同上	1ヶ所
ハンド	手先 CCD カメラ, 力センサ	<u>機械的結合</u> 電動式, 遠隔操作 <u>電気的 I/F</u> プローブ式と, スプリングコンタクト式の併用	ツールチェンジャにより一体で着脱, 左右 1ヶ所ずつ
カメラ	CCD カメラ	<u>機械的結合</u> バネ式 <u>電気的 I/F</u> スプリングコンタクト式	後方 1ヶ所, 左右 1ヶ所ずつ

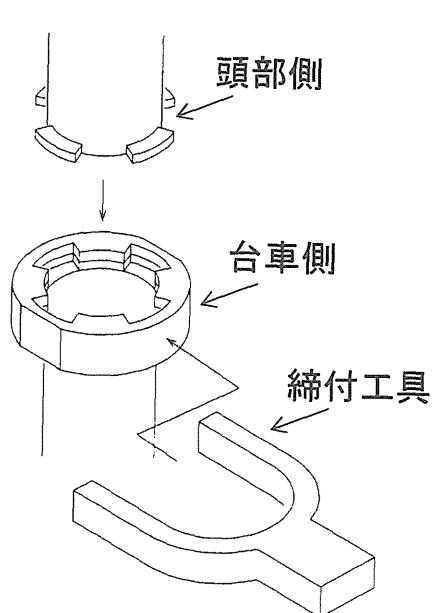


Fig.5.7 Taper lock method

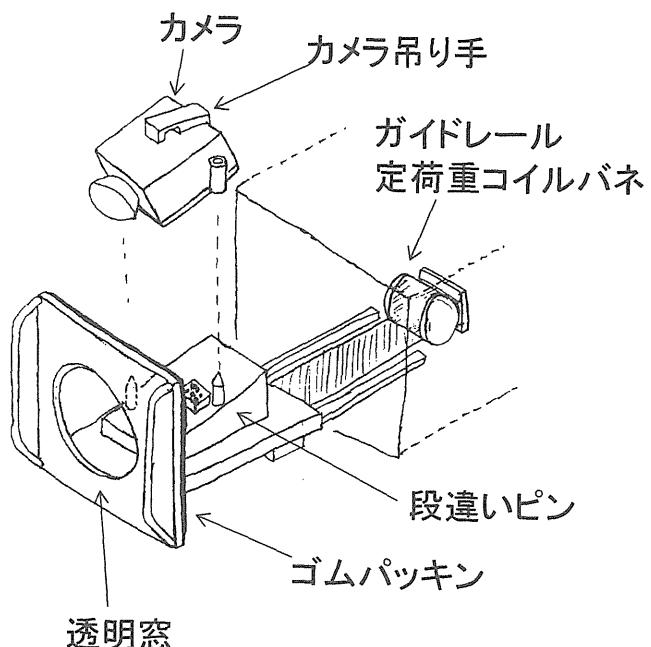


Fig.5.8 Spring method

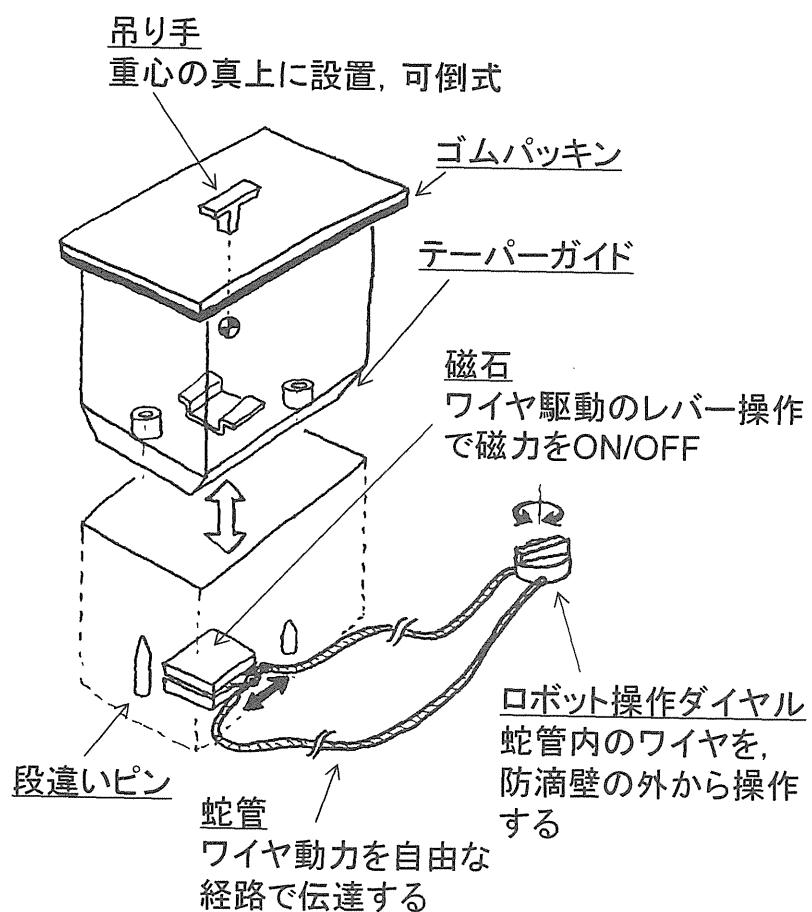


Fig.5.9 Magnet method

## 5.6 ロボットの製作

前節までに検討した結果を反映し、原子力事故時対応ロボットを製作した。製作したロボットを Fig.5.10 に、ロボット搬送用コンテナ及び操作卓を Fig.5.11 に、仕様を Table5.7 にそれぞれ示す。ロボットは、「放射線に耐えるロボット」から、「Radiation-proof Robot」と名付け、通称「RaBOT」とした。RaBOT は、映像、音声及び距離情報を収集するための機器を搭載した頭部、複雑な作業を可能とする双腕型バイラテラル・マスタースレーブ・マニピュレータ、階段、段差、堰等の走行上障害となる構造物に対しても安定した走行が可能な独立 4 輪クローラから構成される。また、障害物を乗り越えるときに RaBOT が傾いた場合にも、RaBOT の胴部（上半身）を走行台車上で円弧状に前後移動する重心移動機構により、RaBOT 全体のバランスを安定に保つような「重心バランス制御機能」も搭載した[73]。

RaBOT の大きさは、施設に付属する一般的なドアと階段を容易に通過できるという条件から決定され、70cm 幅とした。4 輪独立クローラによる走行性能として、平地走行速度は約 2km/h、階段斜度は 40 度まで昇降可能とした。また、独立したクローラ毎に、平地以外の階段等の走行時にモータのトルクが各々最小になるような「トルク制御機能」を装備した。これにより、床面の形状に合わせてクローラが「倣う」ように走行でき、安定した走行が可能となった。

RaBOT に搭載した双腕アームのうち、1 本のアームの自由度は人の腕と同じ 7 自由度であり、取扱い重量は最大 15kg である。ドアやバルブの開閉にはロボットアーム先端部に取り付けた専用の治具を使用する。これらの治具の交換も RaBOT 自身が現場で行うことが可能である。ロボットアームの先端部に付属するハンドには、何かを持ちまたは接触した反力（触感）が直接操作員に伝わるように力覚センサを備えており、力を加減しながら作業を行うことができる。これにより、より繊細で複雑な作業も可能となる。なお、ハンドは簡単に着脱可能で、様々な用途のハンドに交換可能である。

RaBOT には、頭部に人の両目の役割を果す 2 台のカメラが搭載されているが、頭部のカメラだけでは RaBOT の足周りの状況が死角となり十分に観察できない。そこで、RaBOT の移動や作業を確実に行うために、頭部の 2 台のカメラ以外に、左右・後方・ロボットアーム手先を含め、RaBOT 全体で合計 7 台のカメラを搭載した。また、頭部カメラで対象物を確認しつつ、頭部に搭載した距離センサ（第 4 章で説明）により、前方 1~5m 程度の距離を分解能 1~10mm 程度（距離に比例）で測定可能とした。これによって、ドアの幅、階段の傾斜角度、障害物までの距離等を計測及び算出することが可能である。一般にカメラ情報だけでは実際の大きさを判断することは容易でないことから、このセンサの距離または形状情報を基に事故の復旧に向けてより詳細な作業計画を立てることができる。

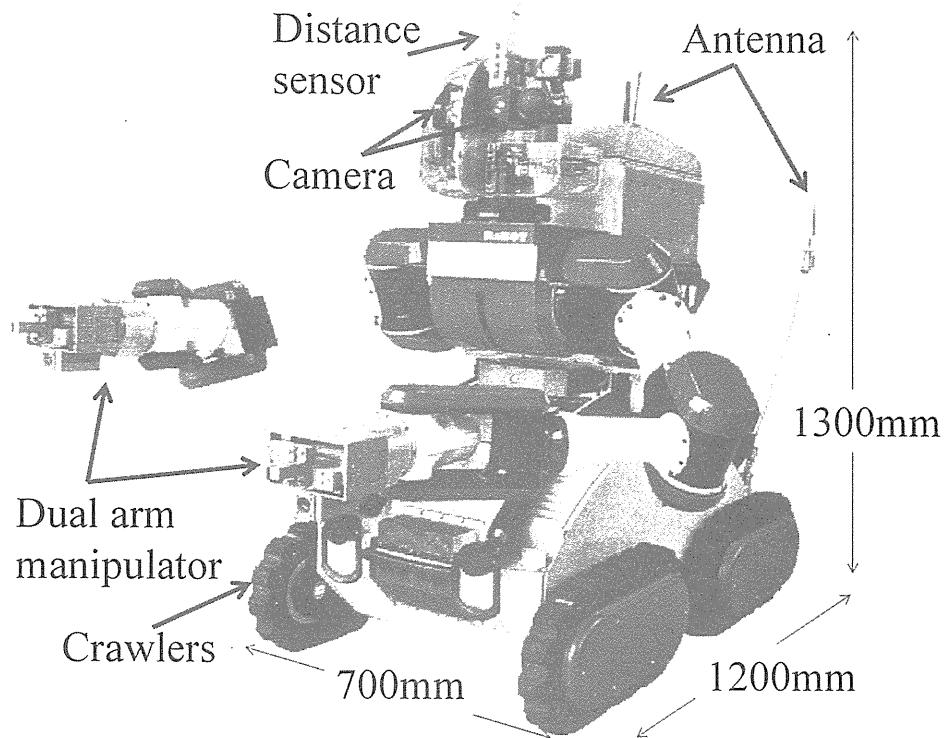


Fig.5.10 Radiation-proof robot (RaBOT)

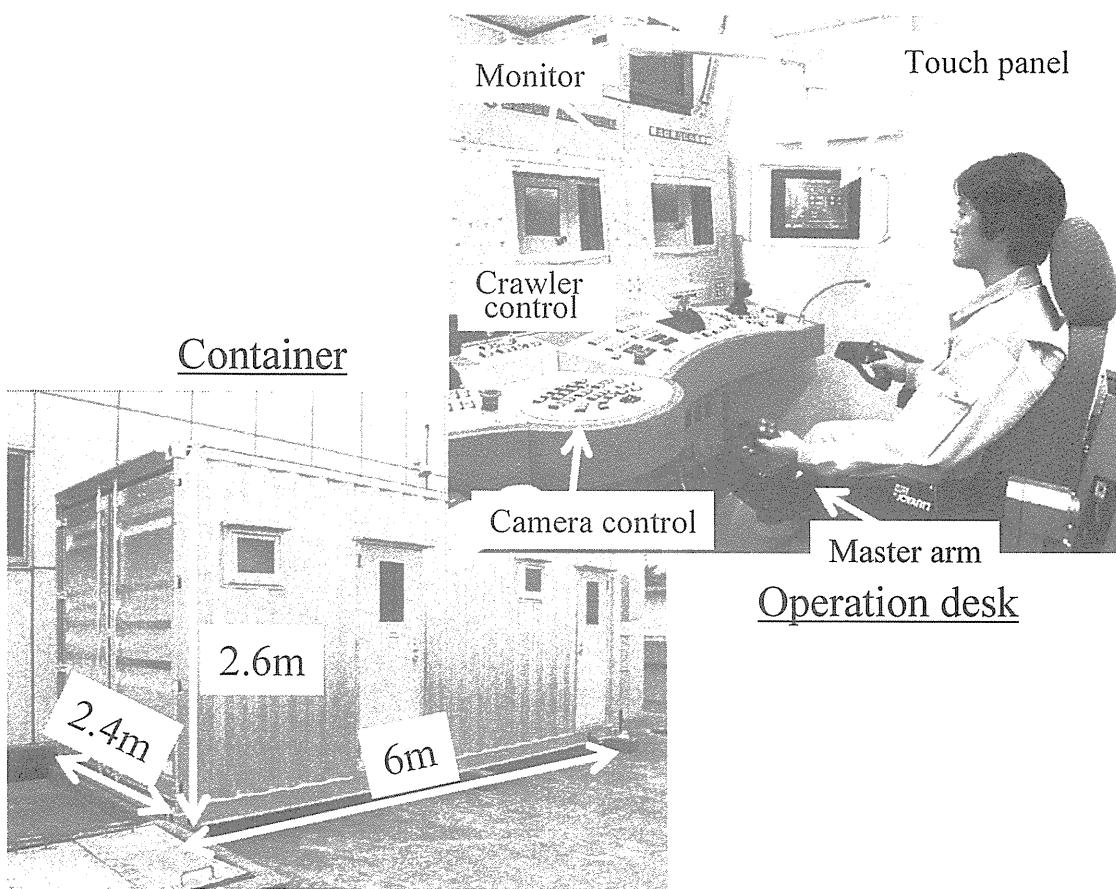


Fig.5.11 Container for carry of RaBOT and the operation desk in container

Table 5.7 Specifications of RaBOT

項目		仕様
ロボット	外形寸法[mm]	幅 700×長さ 1200×高さ 1300
	軸構成	走行軸 4 軸, 搖動軸 4 軸, 重心移動軸 1 軸, 旋回軸 1 軸, マニピュレータ 7 軸×2, パン軸 1 軸, チルト軸 1 軸
	走行	搖動軸トルクセンサを用いた対地適応（トルクゼロ）制御
	防水	勘合時に IP-54 を満足できるよう設計
	防爆	気密構造とする
	周囲温度	~40°C
	冷却	熱交換器として大型ヒートシンクを搭載し, 循環ファン搭載
	ユニット	ワンタッチコネクタを用いた電子部品ユニットの着脱機構 磁石による固定
	電源	AC 駆動, バッテリ駆動の無瞬停切替 AC 駆動時のフロート充電対応 配線の端子台取り合い
	電池	Li-ion 電池 25Ah×26 セル 安全対策として電池群単位でヒューズを装着 電池駆動時の動作時間は 2.5~5 時間程度（動作に依存）
	サーボ	フルデジタル 8 軸一体サーボを搭載
	距離センサ	距離測定可能範囲 : 1~5m, 分解能 : 1~10mm
	立体視	パン・チルト部に 2 台のカメラを組込み、立体視が可能
	カメラ	外部同期カメラ使用による, 時分割伝送をサポート (2ch 使用)
	セレクタ	最大 7 台のカメラを接続し, 表示カメラを任意に選択可能
	カメラ	7 台接続 (台車側 5 台, ハンド 2 台)
	マイク	ロボット周辺の音を収集するマイクを装備
	スピーカ	操作卓側の音声を伝えるスピーカを装備
	力覚センサ	ツール側に力覚センサを搭載
	ツールチェンジヤ	電動式ツールチェンジヤを装備
	ハンド	2 指ハンドを装備 白黒カメラを 1 台搭載
通信	有線	複合ケーブルにより送受信(通信停止時、ロボット自動停止機能付)
	制御無線	2.4GHz 帯 DS-SS 無線機を搭載(通信停止時、ロボット自動停止機能付)
	中継器	単純中継器 3 台, 壁越え中継器 2 台を使用して通信距離の延長が可能
	画像無線	Motion Jpeg 画像圧縮を用いた 2.4GHz 帯 DS-SS 無線機を搭載 時分割伝送を用いて 2 画面まで同時送信可能
操作卓	形態	液晶 4 画面, タッチパネル 1 画面の据え付け型操作卓
	教示器	マスターアーム, ダブルレバー, フットスイッチ, ジョイスティック等
	ロボット映像	選択した 2 台のカメラの映像を 2 台のモニタに表示

原子力事故が発生した場合、RaBOTは長さ6m、幅2.4m、高さ2.6mのRaBOT搬送専用のコンテナに収納されて事故現場まで搬送される。RaBOTの操作はコンテナ内に設置されたFig.5.11に示す操作卓を用いて、RaBOTから伝送されてくる映像をモニターで確認しつつ操作する。RaBOTの操作には光ファイバを使用した有線接続による操作または2.4GHz帯の周波数を使用する特定省電力無線による操作が可能である。2本のロボットアームは、操作卓に設置された市販のマスターアームを使用することによって操作する。クローラによる走行運転は、ペダルまたはレバーにより操作する。ペダルを使用すれば、両腕でロボットアームを操作しながら同時に走行も可能である。RaBOTが収集した情報はすべてコンテナ内の制御装置で集中管理される。RaBOTのバッテリ駆動には、コンパクトで長寿命が期待できるリチウム・イオン二次電池を採用しており、無線による操作の場合のバッテリ寿命は、作業状況にも依存するが、約5時間程度の連続作業が可能である。

JCO臨界事故程度（～10Gy/h）かそれ以上高い放射線レベルで事故が発生した場合、ロボットに使用している部品寿命の観点から、作業時間に制限があり、実質的な事故の復旧は困難となる。これらの背景を下に、高い放射線レベルに耐えられるロボットを開発するため、ロボットアーム、走行機構、バッテリ、電源（制御部を除く）等のRaBOT本体を含めた主要機器には、 $10^5$ Gy（従来の防災ロボットの1,000倍）までの放射線に強い部品を使用した。また、カメラ、各種制御機器等の放射線に弱い部品（寿命100Gy程度）はユニット化し、現場にて容易に新品と交換できる機構とした。このユニット化部品の交換により、RaBOTの主要機器の寿命である $10^5$ Gyまで継続して作業を行うことができる。ユニット構造の概要をFig.5.12に示す。RaBOTが故障時かあるいは定期的な交換を要するとき、他のロボットがRaBOTの側面にある回転機構を回転させ、RaBOTの上半身を左右どちらかに回転させる。これによって、RaBOT内部に搭載している電子部品の各ユニットを取り出すことができる。ユニット化部品と組み込みの一例をFig.5.13に、カメラユニットの概要をFig.5.14に示す。なお、各ユニット化部品の重量は、ロボットアームの取扱い重量15kgを考慮し、10kg以下とした。ユニット化により、RaBOTの場合、短時間の交換で継続的な作業が可能となり、他のロボットまたは人による全ユニット化部品の交換時間はそれぞれ1時間及び10分程度を目標としている。なお、交換試験については5.8節で述べる。

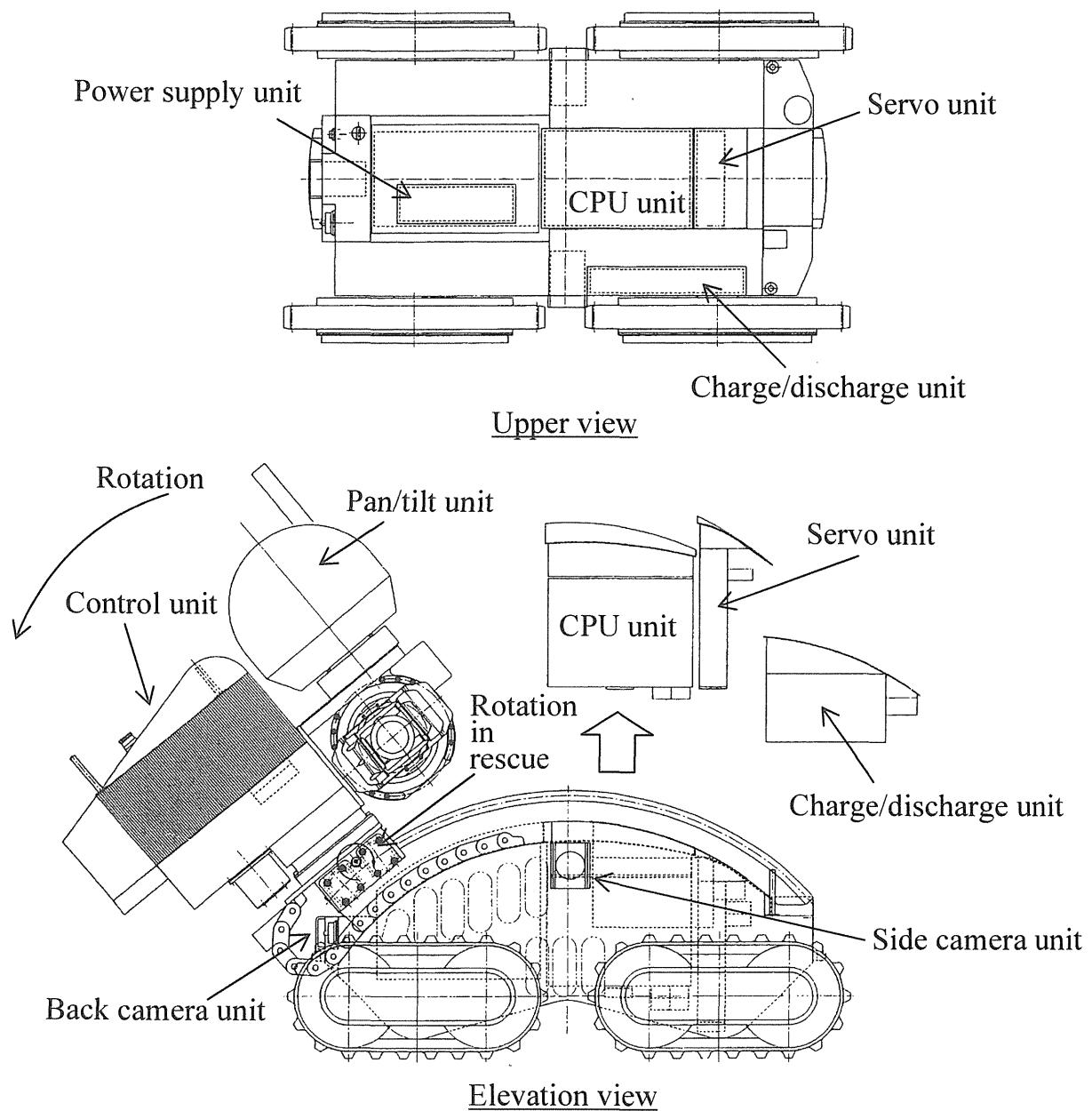


Fig.5.12 Schematic view of the unit system

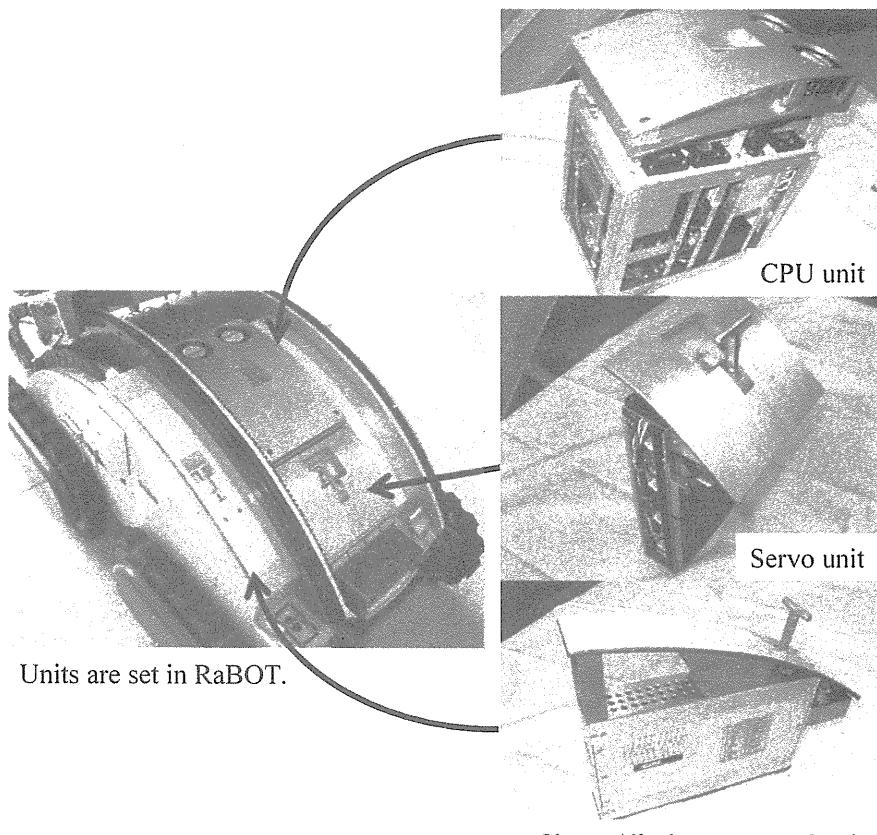


Fig.5.13 Appearance of unit installation

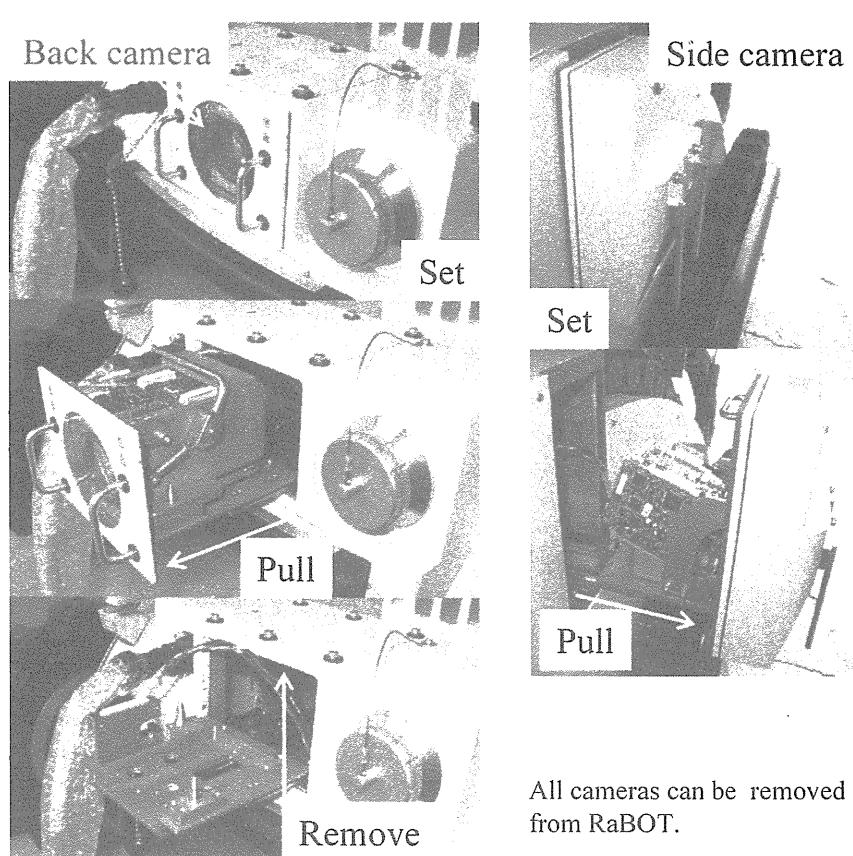


Fig.5.14 Appearance of camera unit removal

## 5.7 制御システム

RaBOT を制御するシステムは、操作卓側に搭載する上位コントローラと、RaBOT 本体側に搭載する下位コントローラに分かれる。コントロールシステムの概要を Fig.5.15 に示す。上位コントローラには、VME バスをベースとした制御システムを構成し、操作者からの指令信号を受け取り、PCI バスをベースとした制御システムを持つ RaBOT 本体側に、メモリ共有ボードを介して有線あるいは無線により伝達される。通信は有線、無線ともに上位側が下位側に対して指令データ等を 1 回送信し、受信した RaBOT 側は状態データ等を 1 回返送し、同期を取りながら通信を行う。また、通信周期は有線の場合は 10mSec で無線の場合には 100msec～1,000msec を目標としており、1 回の送受信をこの時間内で完了するものとする。有線と無線の切換については、特に切り換えるというものではなく、絶えず両方通信を行うものとする。上位側で操作された指令値を有線、無線を通じて計 2 回 RaBOT 側に送信し、RaBOT 側はどちらか先に受信した指令値に従って制御を行う。また、逆方向として RaBOT 側が状態値を送信する場合にも同じく有線、無線を通じて計 2 回を上位側に送信し、上位側はどちらか先に受信した状態値を使ってモニタなどを行う。ここで、「どちらか先に」という事を識別するために、送信するデータの先頭に「送信カウンタ」を設け、受信側は前回受信した送信カウンタから更新されている事により先に来たデータとして判断できる。以上により、例えば、RaBOT がエレベータなどに乗車し、有線での通信が途切れた場合でも無線のデータが更新されていくため、上位側と RaBOT 側の通信は途切れることなく自動的に切り換え可能である。

有線、無線ともに通信が遮断された場合の処理として、それぞれの通信に対する監視時間を設ける。有線用及び無線用の監視時間が両方とも経過しても上位側からデータが送信されてこない場合には、異常と判断して全てのサーボに対してブレーキ停止を行うものとした。但し、上位側が通信を再開できた場合には、ブレーキ停止状態から自動的に制御を復旧できるものとした。これによって、最低限のフェールセーフ機能を満足している。

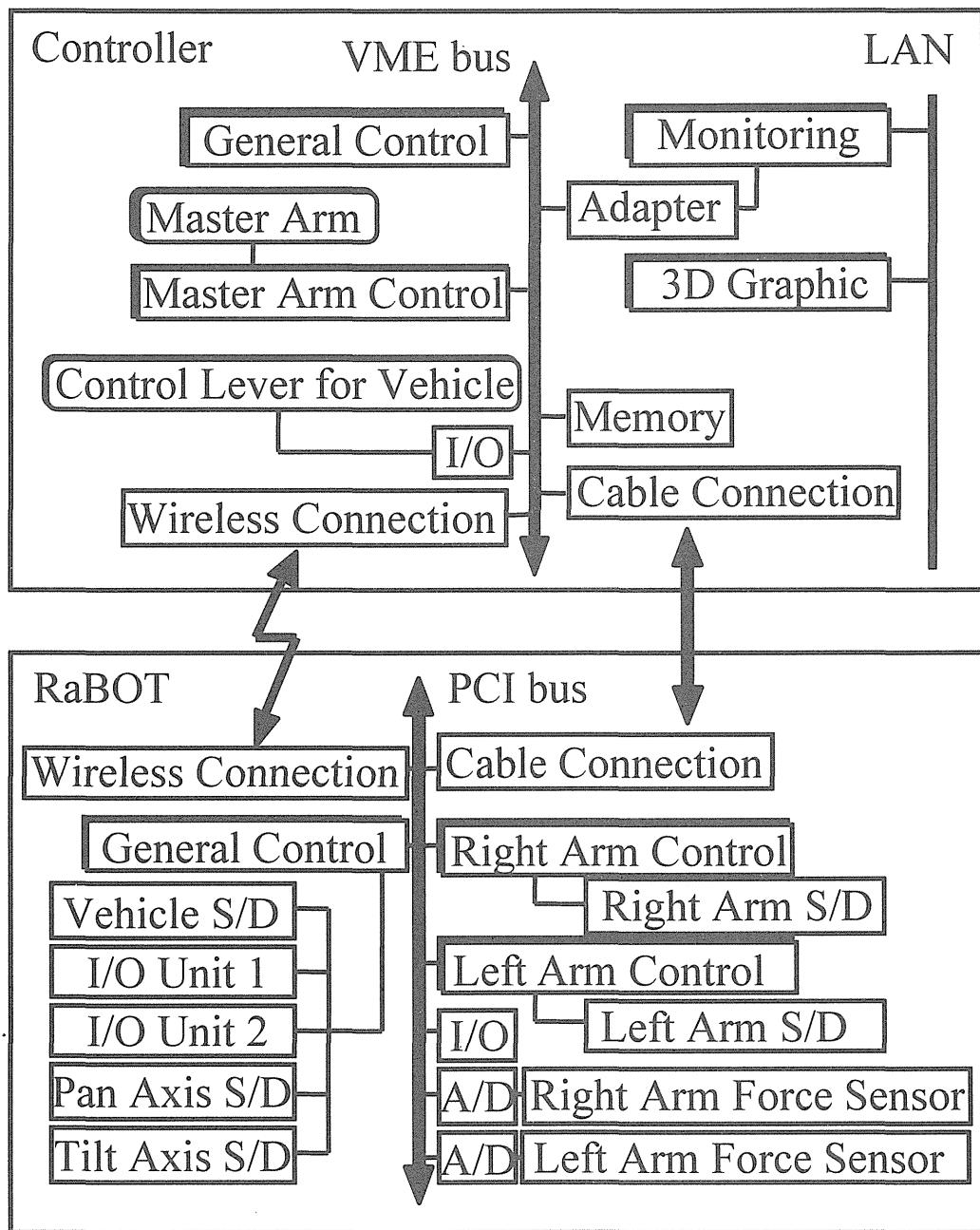


Fig.5.15 Configuration of control system for RaBOT

### (1) クローラの速度制御

台車の制御時, Fig.5.16 に示すような構成とすると, クローラの基本動作として, 前進, 後進, 右回り, 左回り, その場旋回等あるが, 基本的には上位からの指定を以下のように振り分ける.

前進	: C1=C2=C3=C4 全て+方向
後進	: C1=C2=C3=C4 全て-方向
右回り	: C1=C3>C2=C4, 後進は逆
左回り	: C1=C3<C2=C4, 後進は逆
その場旋回 (右)	: C1=C3=-C2=-C4
その場旋回 (左)	: -C1=-C3=C2=C4

上記は, 平坦な場所を走行する場合のみに有効であり, 段差や凹凸面のある場合, 上記の方法では前後クローラの速度差がないためうまく動作できない(突っ張ったり, 引きずったりする). よって, 実際に使用する速度は, 台車に搭載した 4 つのクローラ部分のそれぞれ中心に位置する軸(以下, 遥動軸)の角度から適切な値を計算した補正值を使用する. Fig.5.17 にクローラ速度と遙動軸の関係について示す. 速度を  $V$  とし,  $V_f$  を前方クローラの速度,  $V_r$  を後方クローラの速度,  $\theta_f$  を前方クローラの遙動軸角度,  $\theta_r$  を後方クローラ輪の遙動軸角度とすると以下の関係式が成立つ.

$$V_f = V / |\cos \theta_f|$$

$$V_r = V / |\cos \theta_r|$$

但し, 上記した補正式は共に分母が 0 になる可能性があるため, 実際の計算上影響のない領域はこの式を使用し, その他の領域は  $V_f=V$ ,  $V_r=V$  とする. 影響のない領域として, 以下の値を定める.

$$-45^\circ < \theta_f (\theta_r) < 45^\circ$$

なおこの方法で平面を走行させた場合  $\theta_f$  ( $\theta_r$ ) は 0 となり, 更に  $V_f=V$ ,  $V_r=V$  となることから, 平面走行においてそのまま適用できる.

### (2) 遥動軸の制御

遙動軸を制御する方法として各軸角度制御, 各軸速度制御, ゼロトルク制御を検討した. それぞれを以下に述べる.

#### (a) 各軸角度制御

- ・ 各軸角度制御は, 走行姿勢や狭隘姿勢などで, 軸指定とその軸の目標角度が与えられ, 速度や加減速パラメータで補間し動作する. 軸指定は複数を任意に指定可能とした.
- ・ 動作速度はパラメータで指定し, 操作卓側からダウンロードする.
- ・ 上位からの目標角度が各軸の稼動範囲を超えて指定されている場合, エラーを出力することなく自動的に稼動範囲内に修正する.

#### (b) 各軸速度制御

- ・ 軸指定とその軸の動作速度を与えて速度を積分し, 現在の目標角度に加算し動作させる.
- ・ 速度指令が各軸の速度リミットを越えるような指定がされている場合, 指定速度を速度リミットに置き換えて処理を継続する.

- 上位からの速度指令を目標角度に加算しつづけた結果、目標角度が各軸の稼動範囲を超える様な場合は、エラーを出力することなく自動的に稼動範囲に修正する。

(c) ゼロトルク制御

遙動軸が外力を受けるとその外力に従って遙動軸を動作させる。この制御方法により台車は凹凸面に対して各クローラの接地面を地面に倣わせることとした。

遙動軸ゼロトルク制御は、台車が凹凸のある面を走行する場合にその面に対して各軸を倣わせる事で、台車本体への衝撃吸収を行ったり、グリップ力を高めたり、その他段差乗り越えには欠かせない制御である。遙動軸にはそれぞれひずみセンサが取り付けられており、軸にかかるトルクを検出する事により遙動軸を動作させる。Fig.5.18に遙動軸のゼロトルク制御の概念を示す。クローラにかかる力  $F_{f1}(F_{r1})$  と  $F_{f2}(F_{r2})$  がそれぞれ釣り合ったところで遙動軸速度  $V_{sf}$  と  $V_{sr}$  はそれぞれ0となり、遙動軸に対する速度がなくなる。ただし、力  $F$  はセンサ入力であり、遙動軸に比べ応答性が非常に高いため、制御上発振等の危険がある。従って、力  $F$  は使用する前に平均化処理（過去 50msec）とローパスフィルタを導入して値を算出している。

ところで、階段昇降にて遙動軸のゼロトルク制御を行った場合、重量の多くを支える後方クローラが不安定となり、トルクのかかり方が予想できない。また、グリップ力の確保と、クローラが階段に対してグリップできるポイントが限られている点からも、力に対して逃れるようなゼロトルク制御は好ましくない。従って、階段昇降では遙動軸が動作しない方がより安定した動作となる。しかし、台車の動作は平地走行から、段差乗り越え、階段昇降と一連のものであり互いに切り離して考えることは出来ない。すなわち、平地走行でゼロトルク制御を使用するならば、階段昇降でも同様の制御を使用する必要がある。この状況に対応するため、台車の傾斜角度によって変動する特殊な角度リミットを設け、階段昇降時と平地の凹凸走行時では、遙動軸の角度リミットをアクティブに変更して対応することにした。

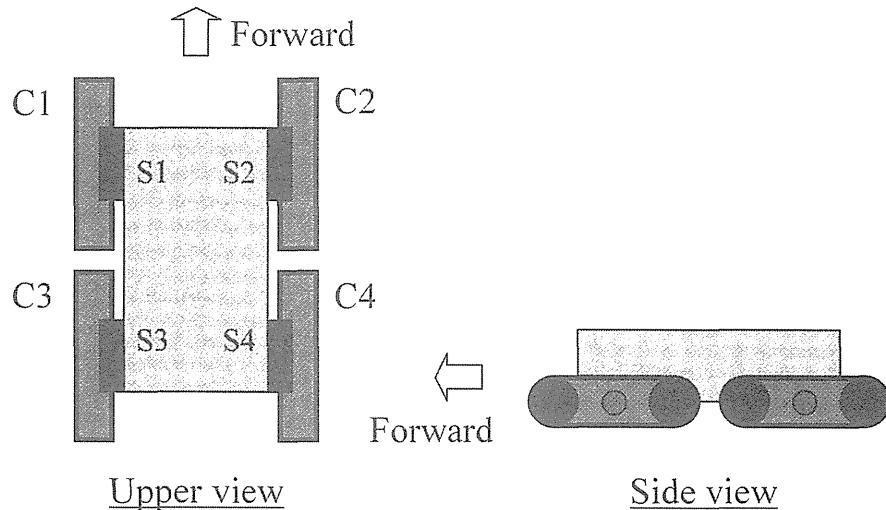


Fig.5.16 Configuration of the crawler of RaBOT

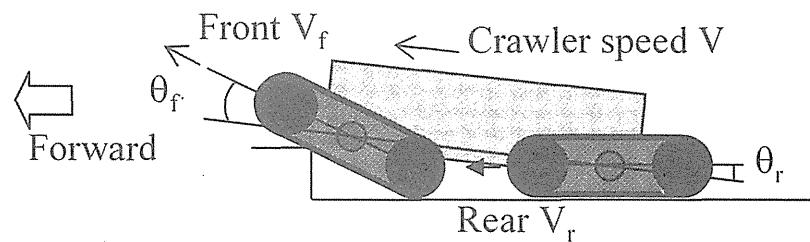


Fig.5.17 Relationship between crawler speed and angle

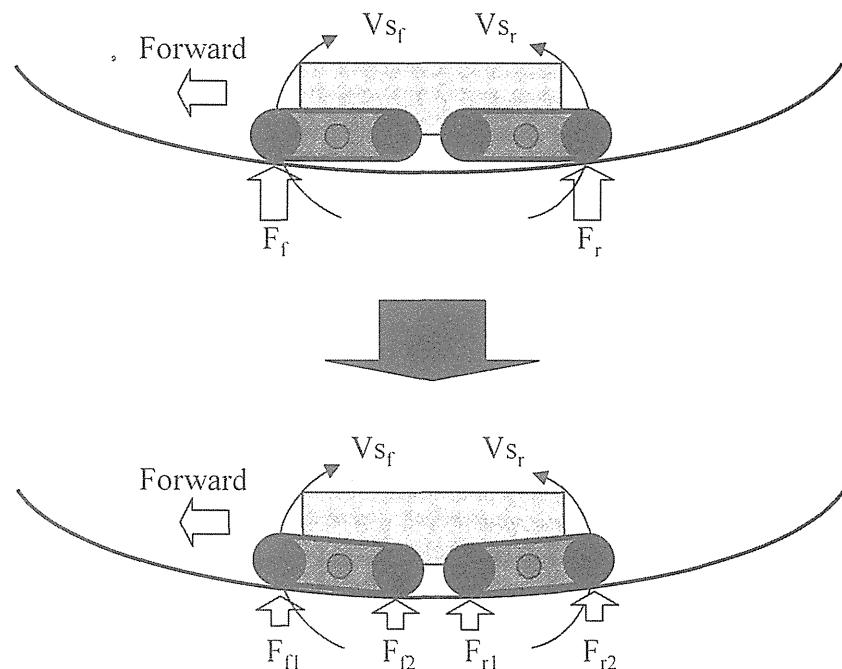


Fig.5.18 Zero-torque control

## (3) 双腕アームの座標系

双腕アーム（三菱重工製 PA-10）は Fig.5.19 に示すような座標系を持ち、以下の 5 種類がある。

- ・ 作業環境座標系：作業座標系は、右腕・左腕共通の座標系であり、動かない座標系である（揺動軸 0°、重心移動軸 0°、旋回 0°における双腕座標系である）。
- ・ 双腕座標系：双腕座標系は、右左共通の座標系であり、マニピュレータの取り付け原点の座標系である。
- ・ 工具座標系：工具座標系は、工具先端の座標系であり、右腕・左腕毎にある。
- ・ 重力座標系：重力座標系は、工具座標系を重力方向に合わせた座標系であり、右腕・左腕毎にある。
- ・ ベース座標系：マニピュレータの基準座標系であり、右腕・左腕毎にある。

また、操作卓に設置した市販（三井造船製 JOYARM）のマスターアームの座標系を Fig.5.20 に示す。

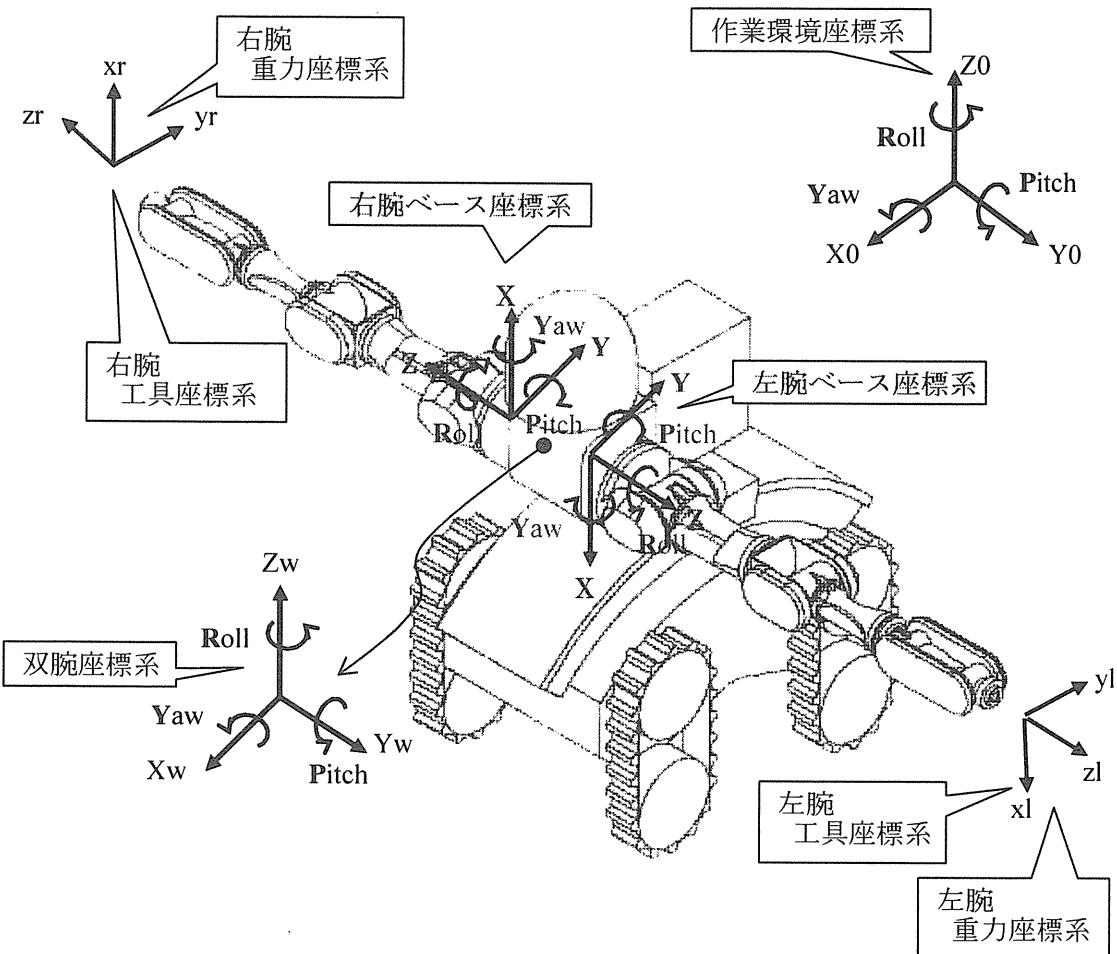


Fig.5.19 Reference frame of RaBOT

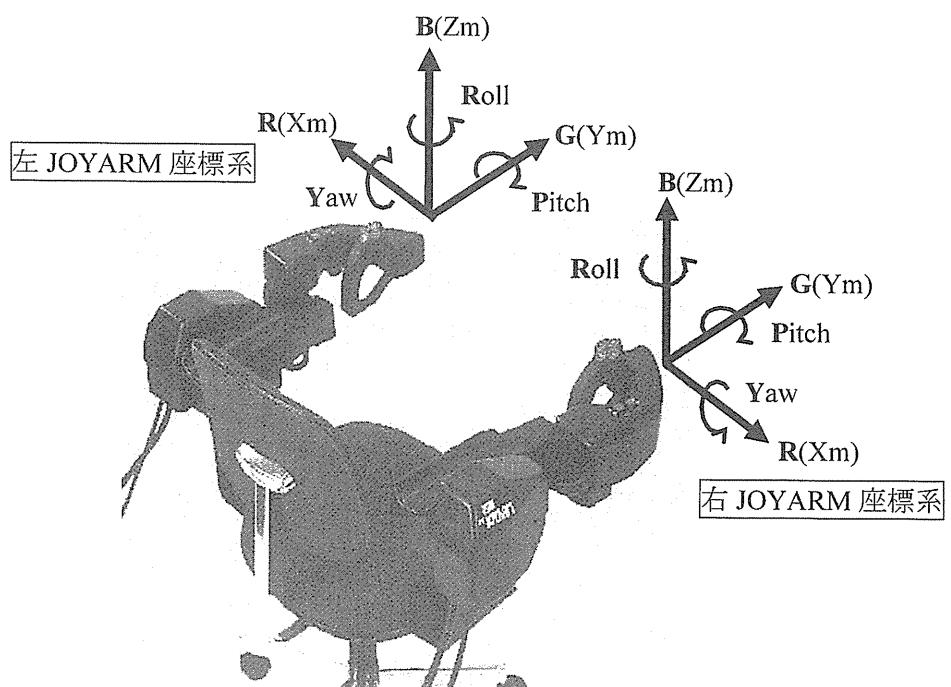


Fig.5.20 Reference frame of the master arm

## 5.8 特性試験

RaBOT は製作を完了後、各機構単独の基本特性試験を実施し、その性能を確認した。さらに様々な作業を実施することで、RaBOT の性能及び操作性を確認した。試験は全てコンテナ内の操作卓から実施し、操作者は RaBOT から送信されてくる映像のみを利用して RaBOT を遠隔操作した。

Fig.5.21 は階段昇降試験の様子である。RaBOT は階段の傾斜角度に対応して、転倒しないように胴部が前方に傾き、RaBOT 全体の重心位置を安定に保つ「重心バランス制御」が有効に働いている。また、走行機構の「ゼロトルク制御」により 4 つのクローラが階段の形状に倣って、各自独立に動作している。これらによって階段走行が安定に行われている事が確認できた。なお、40 度の階段を 10 段昇降する場合、所要時間は 3 分程度であった。

Fig.5.22 にドアの開閉試験の様子を示す。操作者は、マスターアームを使用してドアを開ける際に、RaBOT 頭部に搭載したカメラと右アーム先端に取り付けたカメラを利用してドアの前面と側面からドアノブとツールの位置関係を確認する。ドア開けの手順としては、左アームが把持したドア開けツールをドアノブに掛け、ドア開けツールの自重によりドアノブを回転させる。ドアノブが回転した状態で、ツールに付属したゴムの取手を引っ張ることでドアを開ける。ドアが開く時、ドアの円弧軌道は左アームの動作範囲を越えるため、左アームのみでのドア開けは困難である。従って、ドアがある程度空く状態まで体を左回転させ、操作を左アームから右アームに交代する。ところが、ドアにはドアクローザが取り付けられており、一旦手を離すとドアは自動的に閉まる。これを回避するため、左アームと右アームの両方の協調操作が必要となる。つまり、左アームでドアを少し開けた状態で左アームの動作を停止し、右アームをドアの隙間に inser。その後、左アームはドア開けツールを離し、ドアが閉まらないように右アームでドアを押し開けることが必要になる。この手順を習得し、ドアを開けることができた。このドア開け作業時、RaBOT がドアの前に正対した状態から、習熟した操作者がドア開けにかける時間は、10～15 分程度である。

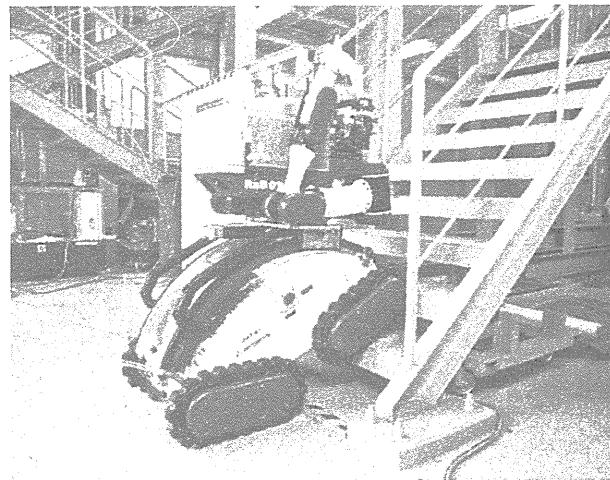


Fig.5.21 Traveling test through stairs

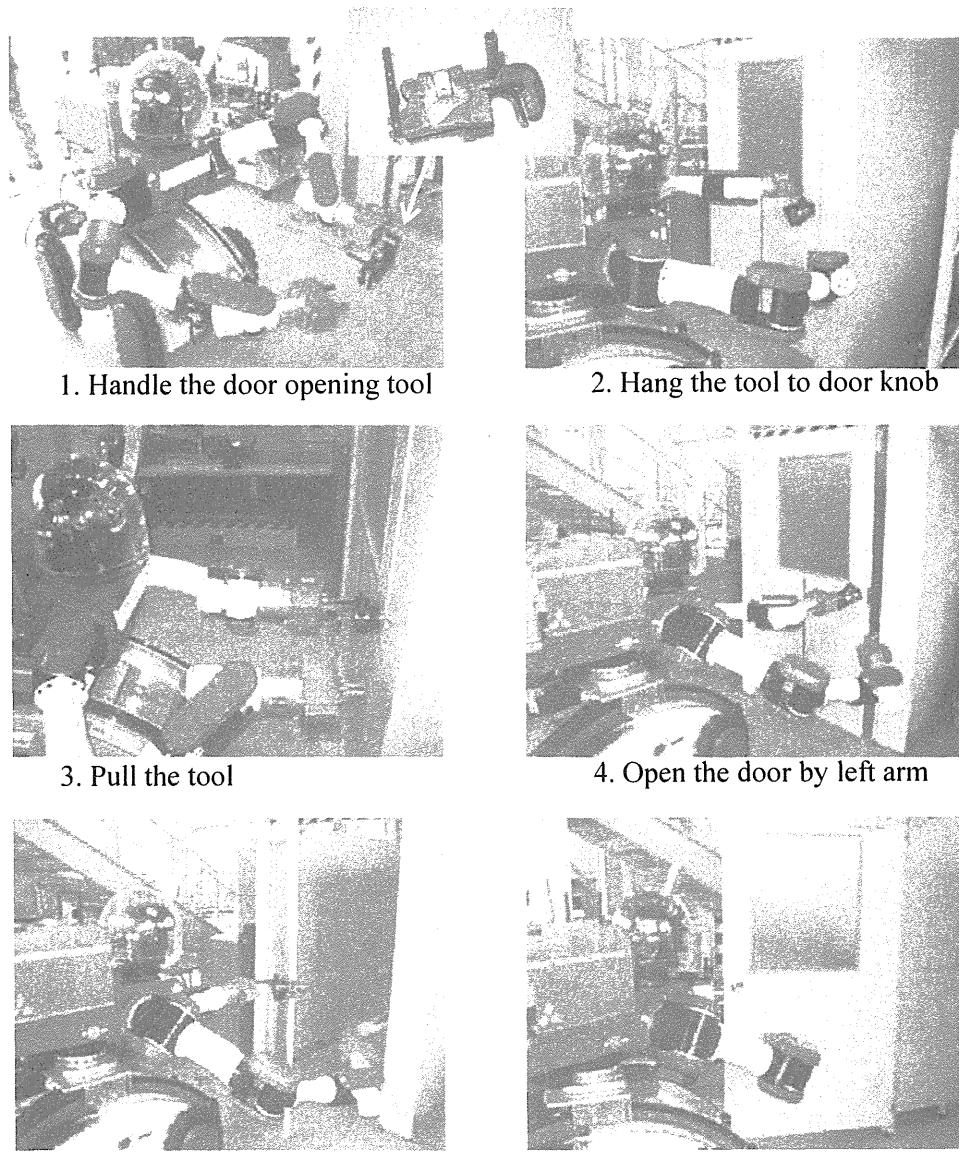


Fig.5.22 Door opening test

Fig.5.23 はバルブ開閉試験の様子である。ロボットアーム先端のハンドを交換し、バルブ開閉用ツールに交換してバルブを開閉する。バルブを開閉するとき、頭部カメラと左ハンドにあるカメラでバルブ開閉ツールの回転中心にバルブの中心を合わせる。また、開閉具合に応じてハンドルが前後に移動するため、その移動量に合わせてロボットアームを前後に移動させる必要がある。これらの要領を習得することで、バルブの開閉を行うことができた。

RaBOT に搭載した各ユニットが他のロボットにより正常に交換可能かどうかの検証を行うため、各ユニットの固定機構を模擬した RaBOT のダミーロボットを製作して交換試験を行った。特徴的なユニット交換試験として、サーボユニットと電源装置ユニットをそれぞれ交換した。結果、それぞれの所要時間は 24 分及び 76 分必要であった。Fig.5.24 にサーボアンプを交換している様子を示す。本作業を人が行った場合、交換時間はわずか数分である。RaBOT による交換作業で長時間かかる理由としては、第 1 に操作者の技術不足が挙げられる。すなわち、マスターアームに慣れることが非常に難しく、相当時間訓練を行わないと思うような作業ができない。第 2 に RaBOT からの映像情報だけでは作業の臨場感が十分に得られず、慎重に作業を行う必要があるため効率が良くないことが主な原因と考えられる。

以上、様々な遠隔作業試験結果から、原子力事故が発生し、その復旧活動を行う場合のあらゆる作業には、熟練者による操作が必須であることがわかった。そして、万が一の事態に備え、技術力を常に一定に保つための訓練を行っておくことも重要である。今後、これらの改善を進めていく必要があると考える。

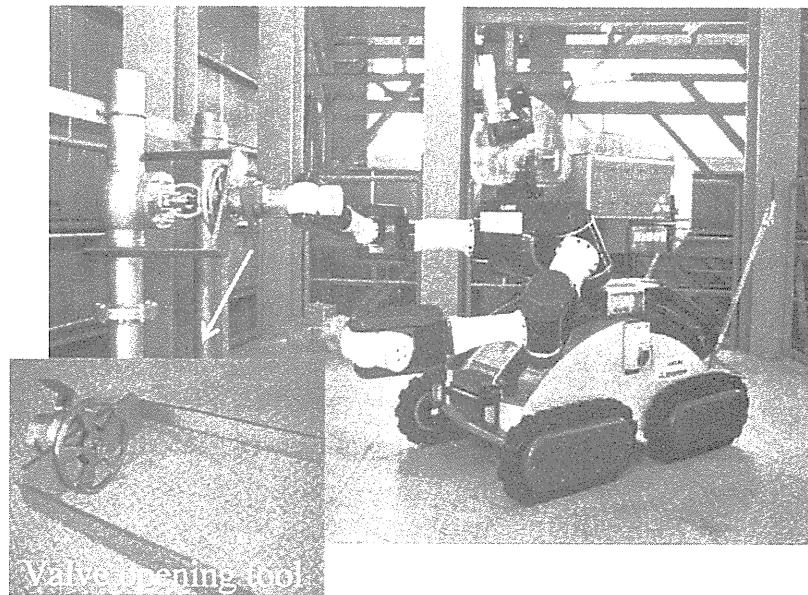


Fig.5.23 Valve opening test

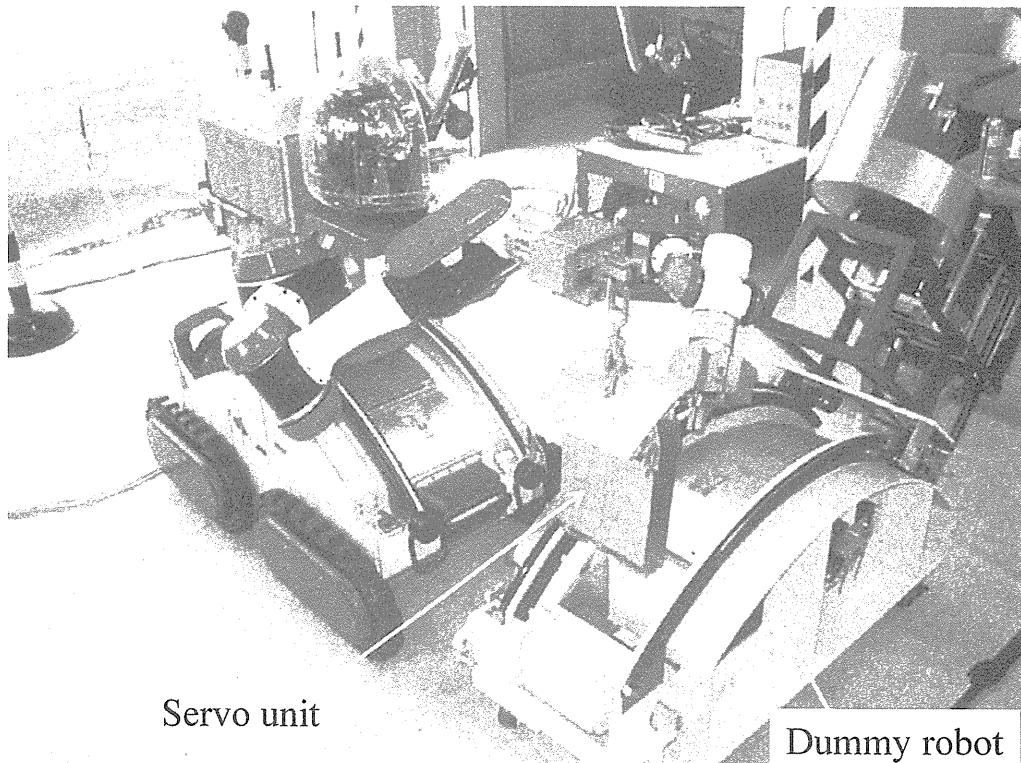


Fig.5.24 Servo unit replace test using dummy robot

## 5.9 マン－マシンインターフェースの改善

### 5.9.1 背景

遠隔操作を行う上で、その臨場感は非常に大切であり、遠隔操縦のための視覚情報や力覚情報等の提示方法が数多く研究され提案されている[76]～[78]。これらを用いると、視覚情報だけでなく、触覚情報も操作者に伝わり、操作者の作業効率を高めることができる。また、現在、バイラテラル制御では、操縦されるロボットが対象物から受ける反力をロボットマニピュレータのようなアクチュエータを有する機構を介して操作者に提示する方法が用いられている[79][80]。しかしながら、これらの方法では操作部の機構が大きく複雑になったり、操作者に拘束されている不快感を与えるなどの問題がある[81]。本システムで使用しているマスターアームシステムも本質的にはこれと同じ問題を抱えている。

RaBOT は有線または無線によって遠隔地から長時間操作するため、着座式の操作卓を採用し、長さ約 6m の船積み用コンテナの内部を改造して搭載している。このコンテナはロボットを収納・搬送する際にも使用する。コンテナ内で操作者がロボットから得られる情報は、ロボット本体に取り付けた 7 つのカメラ映像、ロボットの各軸値、ロボット頭部に取り付けた距離センサ値及びマニピュレータの先端に取り付けてある力覚センサ値である。操作者はこれらの情報を基に、的確なロボット操作を行う必要がある。一方、ロボットと操作者間のマン－マシン・インターフェースには、ロボット走行用のスライド式レバー、頭部カメラ制御用のトラックボール、双腕マニピュレータ操作用マスターアームとして力フィードバック機能付きアームレスト型 6 軸ジョイスティック、各種動作モード及び映像切替用ボタン・パネル等を使用している。本システムに採用しているマスターアームは、いわゆる、異構造タイプのマスターアームであり、操作者からの 6 軸方向の速度/位置指令を RaBOT のアーム先端速度指令/位置情報に変換している。また、アームには力覚センサを搭載しており、操作者はアームからの力覚情報を得ることができる。この力覚情報は非常に重要であり、テレロボティクスの遠隔臨場感を達成するには欠くことができないと考えられる。しかし、これらのシステムを実際に使用してみると、その力覚情報を操作者が的確に感じることは難しく、これらの情報を基に作業を行うにはかなりの熟練を要することが判明した。加えて、大量の情報を操作者に伝達するために、操作システムが大型化してしまい、コンテナを災害現場へ輸送するにはかなりの煩雑さを伴う。

このような背景の下、本節では、遠隔操作性能を維持しつつ、操作熟練者でなくても遠隔操作が比較的容易で、緊急時にロボットを即座に現場へ急行させることが可能なように、RaBOT アーム操作用マスターアームシステムの簡単化及び搬送性の向上を目指したシステムについて検討を行った。

### 5.9.2 ダイレクトマスターーム方式の検討

遠隔操作システムの小型化を図るため、操作者の腕 자체をマスターームとして利用するダイレクトマスターームシステムを検討した。これによってシステムの大幅な簡素化と操作性の向上が考えられる。本研究では大型の反力提示装置を使用しないで、操作者に臨場感を与えつつ実作業を行うことを可能とした建設機械の遠隔操作システム[82]に着目した。このシステムでは、麻痺肢の機能再建に用いられる機能的電気刺激（Functional Electrical Stimulation；以下FES）の技術[83]を用い、無侵襲な表皮電極によって運動方向に対する拮抗筋を刺激して力情報を伝達するヒューマン・インターフェースとしている。また、この手法を適用することで、操作者が視覚情報を併用しなくても力覚だけで作業できること[84]も有用であると考える。そこで、本手法をRaBOTの操作を簡単に行うための1つのアプローチとして捕らえ、RaBOTのマスターームとして検討した。

ダイレクト・マスターームシステムにおいては、操作者自身の何らかの身体状態量をRaBOTへの運動指令として用いる必要がある。本研究では磁気式3次元位置姿勢センサを用いて検出した操作者の骨格運動を運動指令とすることにした。また、RaBOTの手首には力覚センサが取り付けであり、この力覚センサの値から、各関節に働くトルクを算出する。操作者には磁気式3次元位置姿勢センサ及び表面電極を上肢に取り付け、磁気センサより得られる値から計算される各関節角度[85][86]を指令値としてアームの各軸に与え、表面電極にてアームの力情報を操作者に与える。

ダイレクトマスターーム方式によりRaBOTを遠隔操作するため、Fig.5.25に示すようなシステムを構成した。本システムでは、RaBOTのアームの各軸角度値とアーム先端部に取り付けた力覚センサからの6軸分の力センサの値は、イーサネットを介してパソコンに取り込まれる。パソコン内で各軸トルクと操作者への刺激値を計算後、刺激装置を介して操作者に伝えられる。また、操作者の腕の動きは磁気式位置センサによって取得し、RS-232Cを介してパソコンに取り込まれる。そして、イーサネットを介してRaBOTへ指令される。なお、無線によるRaBOT操作時には時間遅れが発生するとの観点から、本システムでは、有線のイーサネットを使用することで時間遅れを模擬した。

本システムでは、RaBOTのアーム構造は操作者と同構造であるため、角度検出のためのエンコーダやトルクを発生させるためのサーボモータなどを装備していた既存のマスターーム装置が不要になった。操作者はFig.5.26に示すように2つの磁気式位置姿勢センサを手の甲と肘にそれぞれ取り付けた。また、FESによる反力提示を得るために、Fig.5.27に示すように操作者の右腕、①尺側手根伸筋、②尺側手根屈筋、③上腕二頭筋のそれぞれモーターポイントに電極パッドを貼り付けた。これによって、操作者の手関節の背屈方向(wrist joint 1)、尺屈方向(wrist joint 2)、そして肘関節(elbow joint)の屈曲方向の筋を刺激する。これは、エンドエフェクタが受けた力の方向を知るために、少なくとも3方向の受動トルクが必要なことと、これらの筋のモーターポイントが表皮電極で刺激しやすい位置にあるためである。また、本研究では発生筋力と筋疲労とのトレードオフを考えて、刺激信号は周波数100Hz、幅400μsのパルス信号とし、振幅電圧を変えることにより発生筋力を制御する。なお、表皮電極を用いた場合、モーターポイントまでの電気抵抗が大きいために比較的高い電圧（0～180V）を要するが、パルス信号のため流れる電流は微小である。本システムを使用して操作者がRaBOTの操作を行えば、RaBOTの手先に感じる力を操作者が感じることができ、それに応じたRaBOTの操作が円滑に行える。

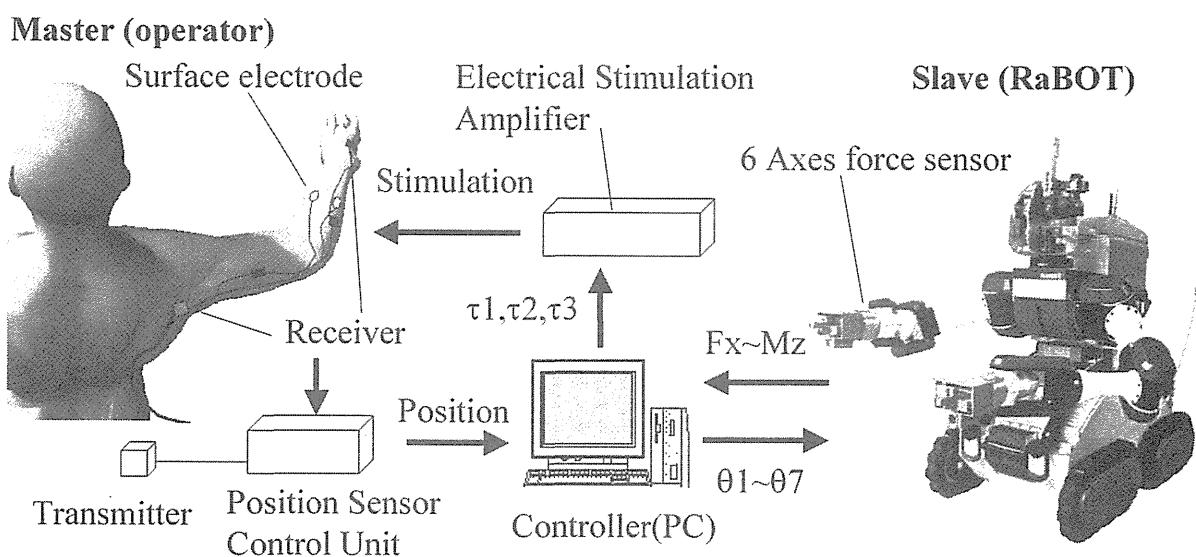


Fig.5.25 Configuration of the direct master arm system with FES

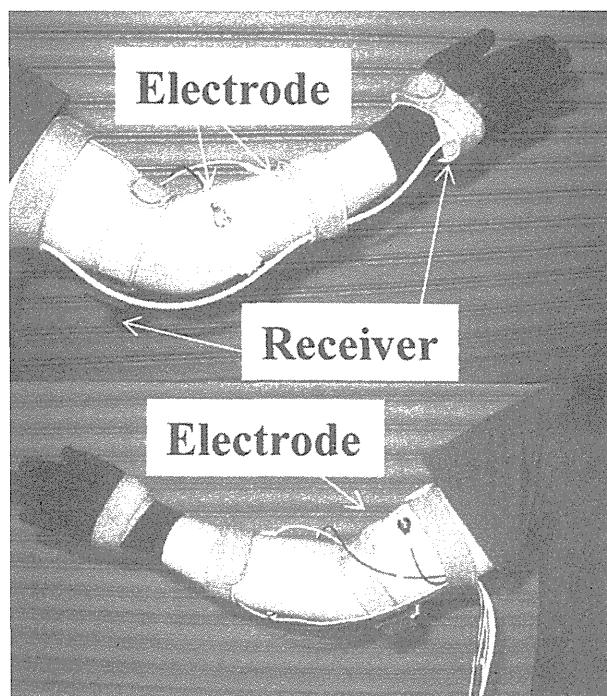


Fig.5.26 Appearance of the master arm

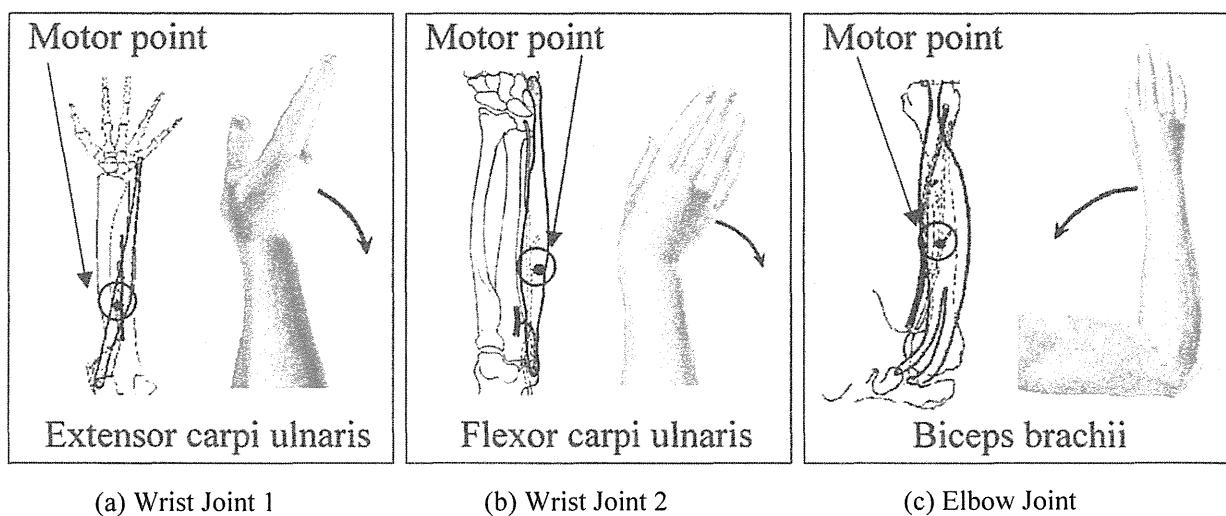


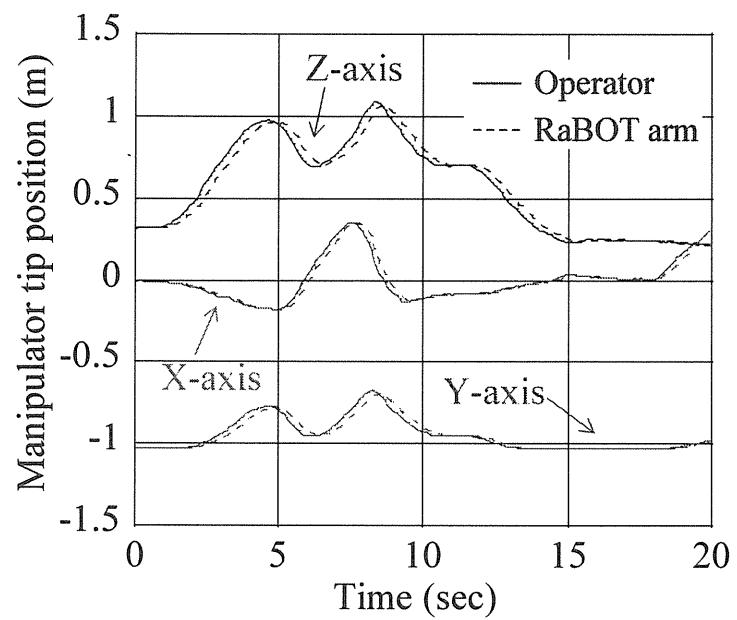
Fig.5.27 Forearm motions controlled by FES, stimulated muscles and motor points

### 5.9.3 操作試験

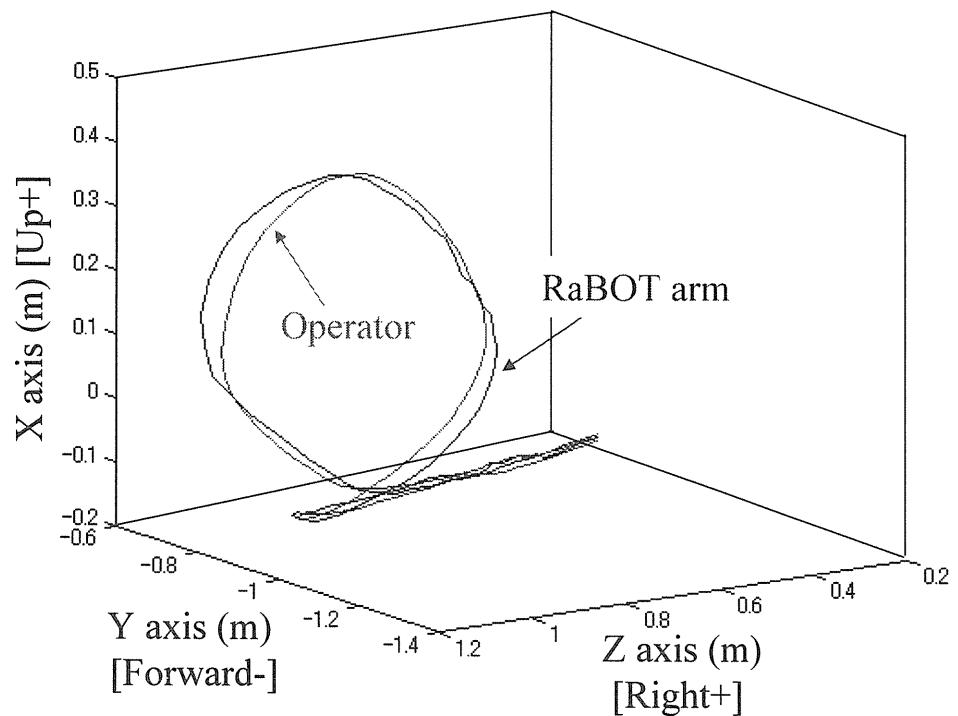
本システムを構築後、操作試験を行った。本システムでの動作試験の結果として、Fig.5.28 に磁気式位置センサのレシーバ及び電極パッドを操作者の腕に貼り付けて RaBOT のアームを制御している状態を示す。本システムでは安定した制御を行うために、制御周期を 100msec に固定し実験を行った。Fig.5.29 に操作者が円弧状の軌跡を描いたときのアーム先端の位置を示す。実験の結果、多少の時間遅れはあるものの、操作者の腕の動きから各関節角度を計算した結果を指令値としてアームが追従動作することを確認した。また、ダイレクトマスターアームのため、これまでの操作卓ではどうしても避けて通ることができなかつた特異点問題について、特に考慮をしなくとも問題なくアームを制御することが可能である。これにより、操作者が訓練を必要とせず、アーム操作が容易に可能であった。



Fig.5.28 Remote operation test by the direct master arm system



(a) 2-dimension



(b) 3-dimension

Fig.5.29 Result of the circular trajectory

次に、RaBOT に一定の力を掛けた時、操作者にどのくらいの力がかかったかを把握するため、FES による反力提示試験を行った。Fig.5.30 に示す RaBOT のアームを前方に伸ばした状態で、上下左右方向から力を加え、その反応を計測した。その結果、Fig.5.31(a)～(d)に示すように外部からの刺激に対応した反力提示が得られることを確認した。この図からも明らかのように、RaBOT のアームを上方向に押し上げた場合、操作者の上腕二頭筋が縮む方向に作用した。この結果、腕が上方に引っ張られるような感覚になり、自然と腕が上に上がった。アームを右方向に押した場合、尺側手根伸筋が刺激され、腕の外側表面が縮むような感覚を受けた。これにより、自然と手首が外側に開いた。また、アームを下方向に押し下げた場合、腕の腹側にある尺側手根屈筋が刺激され、手首が下に引っ張られるような感覚を受けた。しかしながら、アームを体の内側に押した場合、特に刺激を感じなかつた。これは、電極を貼り付けた筋肉が 3 方向しかなく、腕を内側に曲げるような刺激を感じる筋肉を使用していないからである。これを解決するには、長掌筋などに代表とされる手首の内側へ作用する筋肉[87]を刺激する電極を貼り付ける必要がある。これについては、実際の作業を行い、本システムに搭載する必要があるかどうかの検討を行っていくものとする。

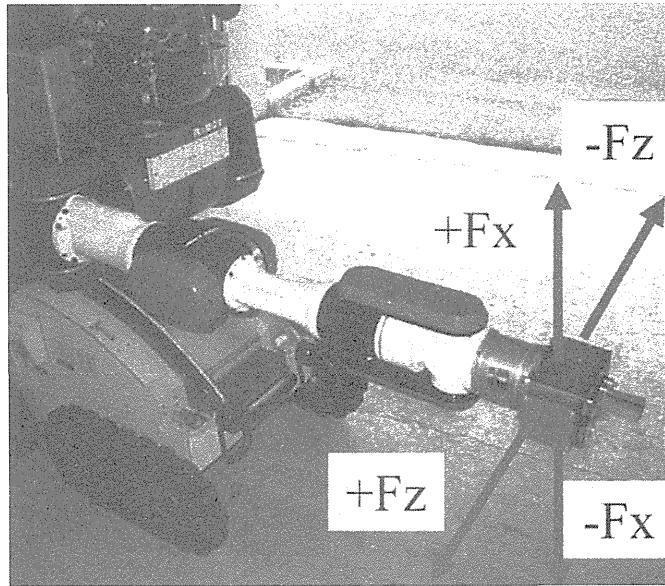
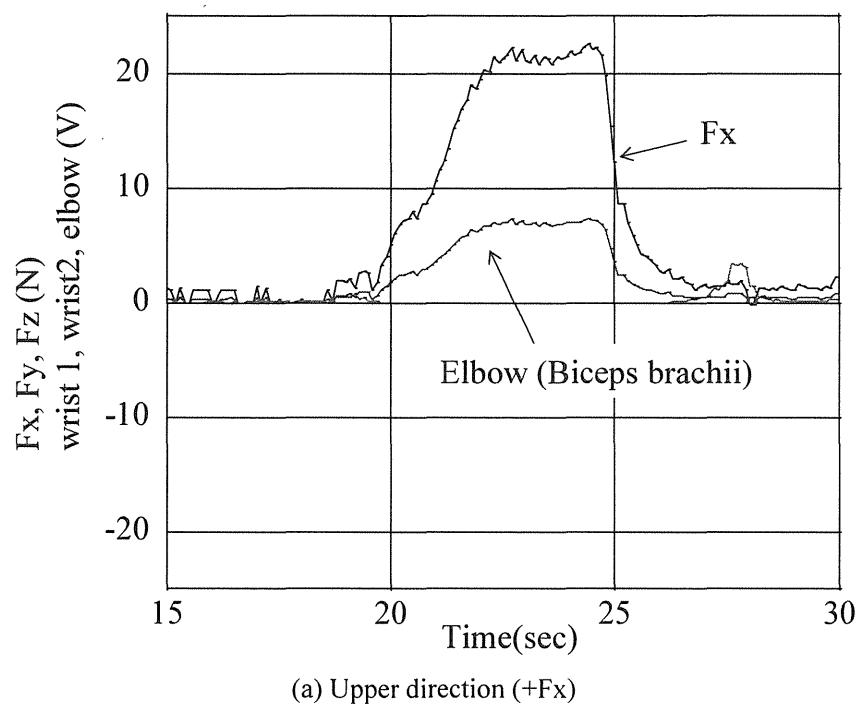
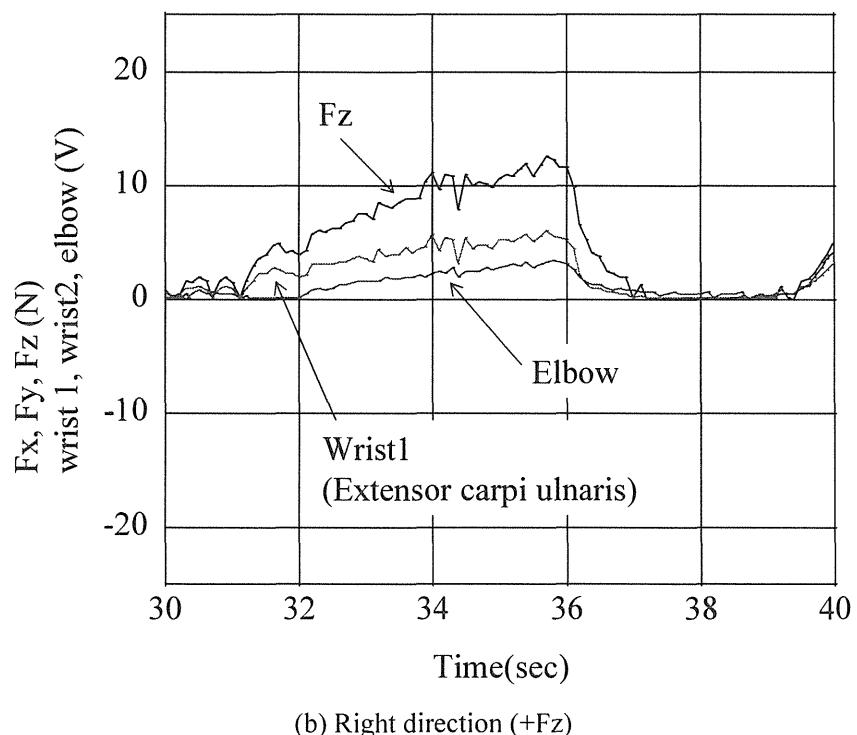


Fig.5.30 Reaction force test with FES



(a) Upper direction (+ $F_x$ )



(b) Right direction (+ $F_z$ )

Fig.5.31 Reaction force on the direct master arm system

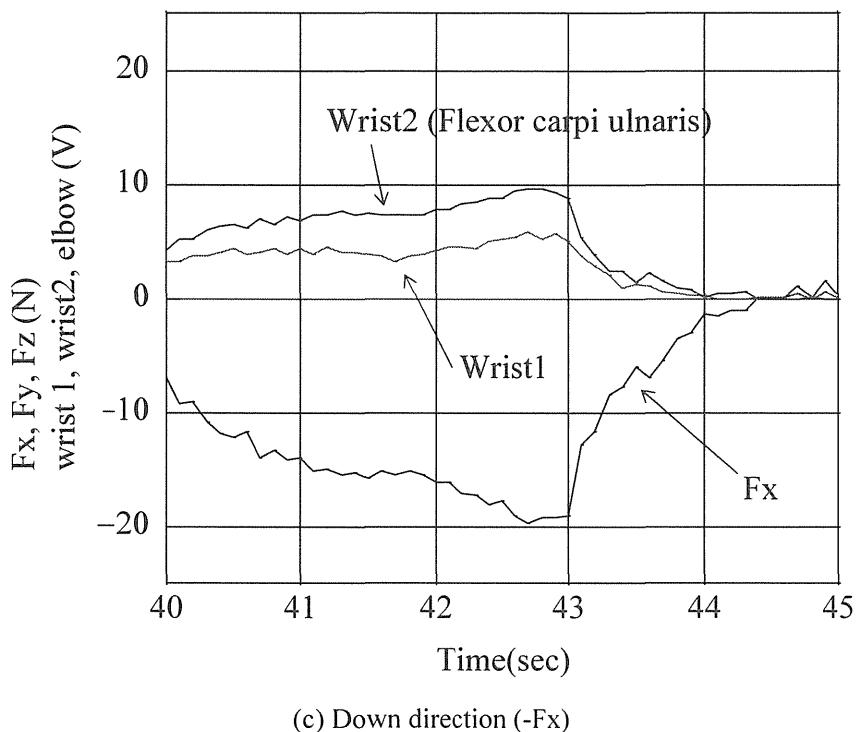
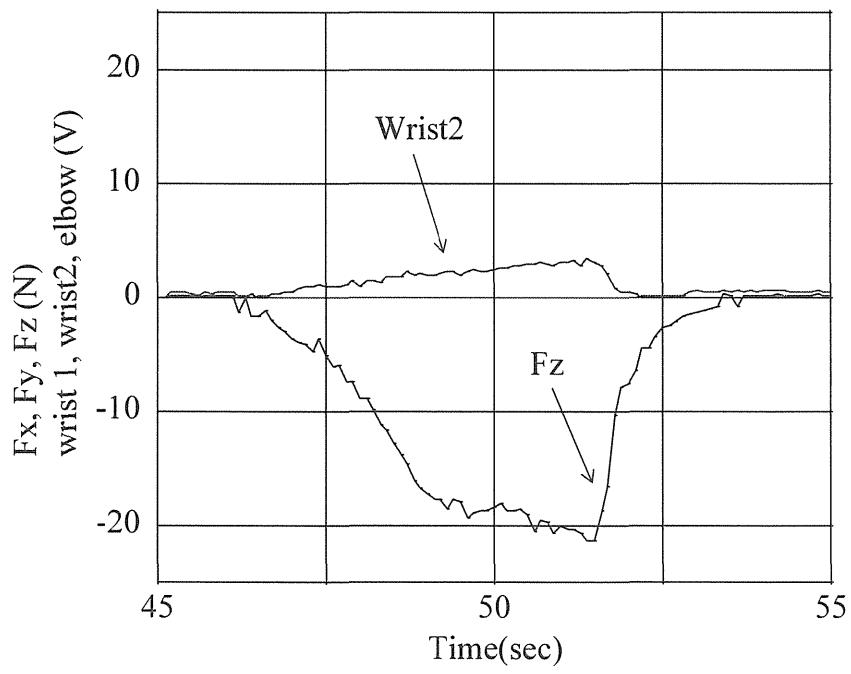
(c) Down direction (- $F_x$ )(d) Left direction (- $F_z$ )

Fig.5.31 Reaction force on the direct master arm system

#### 5.9.4 マン-マシンインターフェースの改善のまとめ

RaBOT の遠隔操作方法として既存の操作システムではなく、人間の腕をマスターアームとして使用するダイレクトマスターアームシステムを検討し、以下のことを明らかにした。

- ・ 腕に取り付けた 2 つの磁気式位置姿勢センサ（位置 3 次元、姿勢 3 次元）によって、マスターアーム片腕 7 自由度の角度を、操作者の腕の動きに対応して実時間で生成することができ、それらは、RaBOT のアームへの角度指令信号として使うことができる。
- ・ 腕の皮膚表面に貼り付けた 3 対の表面電極によって、3 つの筋力に的確に力を発生させることができる。これらの力を操縦者の動作を生み出す筋力と拮抗させることによって、操作者に RaBOT のアームにかかる力を反力として提示することができる。
- ・ 操作者の腕をマスターアームとして使用することで、操作システムを大幅に小型化することができる。このため、大型の操作卓（コンテナ）が不要となり、災害現場への移動も容易になる。
- ・ 訓練を受けてない操作者でも、問題なく RaBOT のアーム制御を直感的に行える。

今後、本システムを利用した実作業を行い、その有用性を見極めるとともに、実際の災害現場にて遠隔操作を可能とする最適なマスターアームシステムについて検討を行っていく。

## 5.10 原子力事故時対応ロボットの設計と遠隔操縦システムのまとめ

RaBOT は、放射線環境下での作業を実現するために、①ロボットアーム、走行機構、バッテリ等の本体機器に放射線に強い部品を使用し、②放射線に弱いカメラや制御機器等の電子部品については他のロボットにて交換可能な重量と形状としてユニット化し、簡易着脱コネクタを用いて現場で容易に交換できる構造とした。従来のロボットの場合、故障時の工場での修復期間は 1 ヶ月程度はかかることが予想され、実質的な作業の継続は不可能であったが、本方式では、ロボットによる総交換時間を 5 時間程度とした。これによって、放射線に対する寿命が  $10^5 \text{ Gy}$  程度となり、当初の目標を満足し、高放射線環境下の事故現場での継続的な情報収集や試料採取が可能となった。

動作性能については、平地走行、階段昇降、マスターアームによるアーム操作をそれぞれ有線及び無線によって行い、速度、再現性、操作性を確認した。また、RaBOT によるドアの鍵開け、ドアの開閉、バルブの開閉、ブレーカの投入／遮断作業を各種ツールを使用して行い、それぞれの作業が可能なことを確認した。

ユニット化に関する部品交換試験に関しては、模擬ロボットを使用して各種のユニット交換（電源、サーボアンプ、カメラ、充放電管理装置、制御装置等、合計 11ヶ所）を行い、交換時間及び交換性を確認した。しかしながら、現在のシステムでは操作方法が難しい、視覚情報が乏しい等の理由により、それぞれの作業には相当の時間がかかることも明らかとなった。これらの課題を解決するために、本研究では、ロボットの腕を自分の腕のように動かす方法に着目し、操作卓の小型化に関する提案を行った。つまり、オペレータの腕自身をロボットアームの制御に利用するという、ダイレクトマスターアーム方式を検討した。具体的には、肘と手の甲に磁気式 3 次元位置センサを貼り付け、オペレータの腕の骨格運動を腕の 3 次元位置情報として、ロボットアームの各軸制御に利用した。また、ロボットに搭載した力センサから、アームに働く力情報を取得し、ロボットアームの反力として、電極パッドを通じ、オペレータの筋肉に電気刺激を与えた。その結果、既存の操作卓と比較して、コンパクトで直接的な操作を実現した。これは、操作に熟練を必要としないため、事故現場においてオペレータの確保が容易となる。また、人の動きを忠実に再現可能なため、従来、前方のみだった作業範囲が、オペレータの腕の動作範囲まで拡大でき、作業範囲が大幅に拡大した。この結果、操作システムの大幅な小型化に成功した。これにより、災害時に操作卓を搭載した大型のコンテナを搬送する必要が無くなったため、事故への迅速な対応が可能となった。

## 6 結論

### 6.1 本研究の総括

現在のロボットは、アミューズメント、福祉、防災など、様々な分野で需要が見込まれているが、本当に利用可能なものの、システムとして全体的に成立しているものはなかなか存在しない。また、FAで使用されるマニピュレータ以外に、実社会において作業可能な、いわゆる「ロボット」はもうしばらくは存在しないと思われる。それは、システムというものが単に要素技術の積み重ねで実現できるものではなく、各要素技術がそれぞれ目標とするシステムに適合するように、また、各要素間に適正なバランスを持たせるように検討・調整・改善を加えながら進め、完成させる性格を持ち、システムとしての機能・性能は、個々の要素技術の複合機能・性能として現れることなどに起因するものであり、システム構築の困難さが現在のロボット構築の問題点だからである。

本研究では、このシステム構築の困難さを念頭に置き、実際に使用可能なロボットシステムを構築するという観点から研究を進め、例として、核融合炉内や原子力事故などの災害現場において、人の代わりに高放射線環境下でかつ狭隘な環境下での作業を行う遠隔操作機器（ロボット）のシステムインテグレーション時に必要不可欠となる手法及び要素機器について検討を行った。これは、ロボットに与えられた環境条件、作業条件からそのロボットのシステムを構築し、システムのバランスからそのロボットに必要となる要素技術を再検討し、そのロボットに適合した要素技術を的確に盛り込むという手法を提案している。つまり、最初にシステム全体の成立性とその妥当性を検証し、その後、さらに各ロボットに必要となる要素機器の研究・開発により、ロボットシステム全体の完成度を高めている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、核融合炉内及び原子力災害事故で必要とされるロボットに対する問題点を定義した。そして、高放射線という環境条件と、核融合炉内及び配管内などの空間的に狭隘な環境下であることを最初から考慮したロボット構築が必要であり、システムインテグレーションの重要性を述べた。

第2章では、核融合炉内に配置される各機器の説明とそれらの保守区分、保守シナリオ、保守条件及び保守方式などITERでの遠隔保守設計の概要について述べた。また、JCO事故に代表される原子力施設における臨界事故について説明し、世界的にも類似の事故があることを述べ、JCO事故に対応したロボットシステムを構築することで、他の原子力施設においても適用可能であるロボットシステム構築の重要性と意義を述べた。

第3章では、高放射線・狭隘な空間であるITER用冷却配管を保守するロボットについて検討し、内径102.3mm、曲率400mmを有する配管内を自在に移動し、目的の枝管位置で正確に停止し、内

径 54.5mm、肉厚 3mm のステンレス製枝管の溶接・切断及び非破壊検査を行うことが可能なロボットシステムを提案した。溶接・切断ロボットでは、YAG レーザーを伝送可能な光学システムを搭載し、高精度な位置決め機能を駆使して、高品質な溶接・切断が可能なことを実証した。また、非破壊検査ロボットでは、非破壊検査時の探触子配置と、枝管内面の曲率を考慮した探触子の最適化を図ることで、肉厚に対して 10~20% 程度の亀裂を検知することが可能な電磁超音波探触子を開発した。これらのロボットシステムによって、炉内機器交換時の冷却配管保守の成立性を実証した。さらに、ITER の成立性を裏付けた。

第 4 章では、ITER 炉内保守時に必要となる計測・制御システムについて述べるとともに、炉内で動作するロボットに搭載可能とし、高放射線環境下で使用可能な距離センサを提案した。本センサは既存のセンサで使用される半導体素子を使用しないでセンサヘッドを構成するだけにとどまらず、センサ構築時に必須となるキャリブレーションが簡単化できることを示した。また、実証試験により、本センサで 1m 先の距離計測時に 0.1mm の分解能で距離計測が可能であることを示した。これにより、市販されている耐放射線性の無い既存センサと比較しても遜色ないセンサ精度であることを明らかにした。次に、従来のレーザーパワー伝送用光ファイバの機能を維持しつつ、レーザー加工点上の状況を観察可能な複合型光ファイバを提案した。これは配管内保守ロボットに搭載可能であり、1 本のファイバにより溶接・切断及び観察を可能とし、既存のロボットシステムに搭載した光学システムをそのまま使用することができ、ITER 用冷却配管保守シナリオの成立性を高めた。

第 5 章では、原子力事故時に施設内を自由に移動し、人の代わりに作業を行うことが可能なロボットを提案した。本ロボットでは、耐放射線性という観点から、ロボット本体に放射線に強い機器を使用するだけではなく、現在の技術では達成不可能な電子機器の耐放射線性についても着目し、電子機器損傷時に、人または他のロボットにより災害現場で素早く交換可能なユニットシステムを提案した。これにより、従来であれば 100Gy 程度で故障し、修理が必要であったロボットシステムが、 $10^5$ Gy 程度まで使用可能であることを示した。例えば JCO 事故の環境下で、従来であれば 100 時間程度しか耐えられなかつたロボットが、故障箇所のユニット交換作業を行いつつ連続作業時間を 100,000 時間程度、従来の 1,000 倍まで使用可能であることを明らかにした。また、本ロボットのマンーマシンインターフェースにも着目し、常に訓練を行っている作業員でない人でも容易にロボットを操作可能なシステムの提案を行った。これによって、さらなるロボットの操作性能向上の可能性を開いた。

本研究全体を通して、ロボット開発時にはシステム全体を見渡し、与えられた環境条件と作業条件を考慮し、的確なシステムインテグレーションを行うことが最も重要であることを示した。また、それぞれのロボットシステムに合致した各要素機器の開発によって、ロボット全体の成立性と妥当性の完成度を高めることができたのではないかと考える。また、本研究で研究・開発した手法や要素機器は、例えば、距離センサであればガラス製造工場などの高温環境下における液面レベル計測センサとして計測機器分野において、複合型光ファイバであれば腹腔鏡手術時のレーザー治療方法として医療分野において、それぞれ応用可能であると期待する。

## 6.2 今後の課題と展望

日本における高放射線環境下のロボット開発は、その環境条件の難しさから、「極限作業ロボット」以来停滞している。それは、電子機器の高度化と集積化によるロボットの高度化と、放射線環境下で作業可能なロボットとでは、求められる性能に相反するものがあるからである。このため、世の中には多くのロボットがあれども、緊急を要するJCO事故時において誰も対応できなかつた。そして、多くの人が高放射線環境下で作業を行い犠牲となつた。そこには、未だに体系化された極限環境下におけるロボット構築の手法が確立していないからといえる。

本研究が取り組んだ極限環境下及び狭隘な空間で作業するロボットのシステムインテグレーションは、ITER保守のシナリオ成立、原子力事故時の対応方法として、その方向性の正しさを示すことができた。しかし、これを実際の環境下で使用するためには、「実証試験」という課題を克服する必要がある。高放射線という環境下で実験を行う場合、実験装置全てが高放射線環境下に曝されるため、容易に行うことはできない。放射線に曝されて損傷した機器は、その後二度と使用できなくなることも覚悟しなければならない。これが、高放射線環境下でのロボット開発を妨げている原因かもしれないし、今後の課題でもある。

ロボット開発には多くの知識と高尚なセンスが必要であると考える。それは、著者のこれまでに培ってきた経験と多くの研究者によって開発された様々なロボットを参考することで容易に想像できる。本研究では、与えられた環境条件と作業条件により、その目的に合致したロボットのシステムインテグレーションを行つた。それは、通常環境下と異なり、高放射線・狭隘空間という環境下でのロボット開発である。これまでにも多くのロボットが放射線環境下で作業することをうたいつつも、その開発は満足に達成されておらず、この問題から目を背けていた。いわゆる「今後の課題」として、耐放射線問題は放置されてきた。これは、システムインテグレーションと適度なバランス感覚の欠落である。我々ロボット開発者にとって必要なものは、まさにこのシステムインテグレーションとバランス感覚ではないだろうか。今後も、「使えるロボット」、「役に立つロボット」、「応用できる要素技術」を念頭においてロボットの研究・開発に貢献していきたい。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、日本原子力研究所松田慎三郎理事、日本原子力研究所那珂研究所関昌弘所長、日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部関省吾部長、また、本研究の遂行をご快諾頂き、ご支援下さった日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部(旧)炉構造研究室小泉興一室長、日本原子力研究所那珂研究所 ITER トカマク本体開発室柴沼清室長、日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部核融合炉材料開発推進室(前)竹内浩室長、日本原子力研究所東海研究所横溝英明副所長、日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター池田裕二郎次長にも厚くお礼申し上げます。さらに、日本原子力研究所で研究する機会を与えて頂き、公私にわたり常に数々の貴重なご助言とご指導・ご鞭撻を与えて下さった日本原子力研究所那珂研究所 ITER 安全設計室多田栄介室長、並びに、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました名古屋大学先端技術共同研究センター大日方五郎教授に心より感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 日本原子力研究所那珂研究所(編), 核融合炉をめざして—核融合研究開発の現状一, 日本原子力研究所, 1997.
- [2] S. Barabaschi (Chairman), et al., Fusion Programme Evaluation Board Report, 1996.
- [3] 山本賢三, 核融合の 40 年—日本が進めた巨大科学, ERC 出版, 1997.
- [4] ITER EDA Documentation Series No.7, Technical Basis for the ITER Interim Design Report, Cost Review and Safety Analysis (FDR), IAEA, Vienna, 1996.
- [5] ITER EDA Documentation Series No.9, ITER Interim Design Report Package and Relevant Documents, Cost Review and Safety Analysis (FDR), IAEA, Vienna, 1996.
- [6] R. Aymar et al., ITER Project, A Physics and Technology Experiment, Proc. 16th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Montreal, Canada, F1-CN-64/01-1, 1996.
- [7] ITER EDA Documentation Series No.16, Technical Basis for the ITER Final Design Report, Cost Review and Safety Analysis (FDR), IAEA, 1998.
- [8] 日本原子力研究所那珂研究所(編), 核融合炉をめざして—核融合研究の進展と拡がり一, 日本原子力研究所, 2000.
- [9] ITER 工学設計活動報告, 日本原子力学会誌, Vol.44, pp.16-89, 2002.
- [10] 関 昌弘(編), 核融合炉工学概論, 日刊工業新聞社, 2001.
- [11] 角館 聰, 岡 潔, ITER 設計報告, プラズマ・核融合学会誌, Vol.73, Supplement, pp.229-237, 1999.
- [12] 柴沼 清, 小原建治郎, ITER 工学 R&D における成果, プラズマ・核融合学会誌, Vol.75, Supplement, pp.45-54, 1999.
- [13] 原子力安全委員会・ウラン加工工場臨界事故調査委員会, ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告, 1999.
- [14] 明石真言, 石博信人, 高放射線被操作業員に対する緊急時対応とその被爆線量評価, 日本原子力学会誌, Vol.42, No.8, pp.720-725, 2000.
- [15] 加藤和明, 臨界事故と放射線防護, パリティ, Vol.15, No.9, pp.31-39, 2000.
- [16] 角館 聰, 深津誠一, 中平昌隆, 武田信和, 安達潤一, 松本泰弘, 炉内保守システムの開発, プラズマ・核融合学会誌, 第 73 卷, 第 1 号, pp.29-41, 1997.
- [17] 岡 潔, 小原建治郎, 角館 聰, 富永竜一郎, 赤田民生, 耐放射線性機器の開発, プラズマ・核融合学会誌, 第 73 卷, 第 1 号, pp.69-82, 1997.
- [18] 濱田 彰一, 原子力発電所 (PWR) メンテナンスロボットの開発動向, 火力原子力発電, 410 (11), pp.1428-1438, 1990.
- [19] 湯口康弘, 島村光明, 木村元比古, 炉内水中遠隔操作ビークル, 東芝レビュー, Vol.57, No.8,

pp.60-63, 2002.

- [20] 妹尾誠, 平川博将, 田中敬二, 古賀和則, 原子力発電プラント用移動式小型監視点検装置の開発と実機への適用, 火力原子力発電, 483 (12), pp.1405-1411, 1996.
- [21] 内藤紳司, 磁気クローラ式吸着移動ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.606-608, 1992.
- [22] 松田桂一, 岡野秀晴, 小林正宏, 戸倉武彦, 原子力プラント用知的保全システム, 火力原子力発電, 489 (6), pp.691-700, 1997.
- [23] 極限作業ロボット技術研究組合, 工業技術院大型プロジェクト・極限作業ロボット研究開発技術報告書, pp. 1-200, 1990.
- [24] 安藤俊就, 高橋良和, 中嶋秀夫, 辻 博史, ITER 工学 R&D における成果, プラズマ・核融合学会誌, Vol.75, Supplement, pp.7-19, 1999.
- [25] 小泉興一, ITER 工学 R&D における成果, プラズマ・核融合学会誌, Vol.75, Supplement, pp.20-25, 1999.
- [26] 小原祥裕, 竹内 浩, 河村 弘, ITER 工学 R&D における成果, プラズマ・核融合学会誌, Vol.75, Supplement, pp.35-44, 1999.
- [27] E. Tada, et al., The Blanket and Divertor Maintenance Concept for ITER, 16th IEEE/NPSS, Vol. 1, pp.399-405, 1995.
- [28] 秋場真人, 鈴木 哲, ITER 工学 R&D における成果, プラズマ・核融合学会誌, Vol.75, Supplement, pp.26-34, 1999.
- [29] K. Shibanuma, et al., Development of In-vessel Remote Maintenance System for Fusion Experimental Reactor (FER), Proc. 91 Int. Symp. on Advanced Robot Technology, pp.127-133, 1991.
- [30] E. Martin, et al., Design of the ITER Divertor Remote Handling System, Proc. 19th Symp. on Fusion Technology, pp.16-20, 1996.
- [31] S. Kakudate, M. Nakahira, K. Oka, K. Taguchi, Development of Blanket Remote Maintenance System, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 10, No. 2, pp.78-87, 1998.
- [32] S. Kakudate, E. Tada, K. Oka, S. Murakami, K. Taguchi, et al., Mockup test of Rail-mounted Vehicle Type Maintenance System for Fusion Experimental Reactor, Fusion Technology, pp. 1411-1414, 1994.
- [33] K. Oka, S. Kakudate, S. Fukatsu, M. Nakahira, K. Taguchi, et al., Mock-up Tests of Rail-mounted Vehicle Type In-vessel Transporter/manipulator, 16th Symposium on Fusion Engineering , IEEE/NPSS, Vol. 1, pp. 224-227, 1995.
- [34] S. Kakudate, K. Oka, K. Shibanuma, E. Tada, Y. Matsumoto, et al., Mechanical Characteristics and Position Control of Vehicle / Manipulator for ITER Blanket Remote Maintenance, Proc. 5th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-5), 1999.
- [35] S. Kakudate, K. Shibanuma, Rail Deployment and Storage Procedure and Test for ITER Blanket Remote Maintenance, Fusion Engineering and Design, Vol.65, pp.133-140, 2003.
- [36] S. Kakudate, K. Shibanuma, Sensor Based Control Test for Remote installation of ITER Blanket Module, Fusion Engineering and Design, Vol.65, pp.33-38, 2003.
- [37] S. Kakudate, K. Oka, et al., Status of The Extended Performance Tests for Blanket Remote Maintenance in ITER L6 Project, Nuclear Fusion, Vol.42, pp.243-246, 2002.

- [38] S. Kakudate, K. Oka, et al., Mechanical Characteristics and Position Control of Vehicle/manipulator for ITER Blanket Remote Maintenance, *Fusion Engineering and Design*, Vol.52, pp.993-999, 2000
- [39] N. Takeda, K. Oka, K. Akou, Y. Takiguchi, Development of Divertor Remote Maintenance System, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 10, No. 2, pp.88-95, 1998.
- [40] C. Damiani, et al., The Divertor Test Platform, *19th Symp. on Fusion Technology*, Sept. 16-20, 1996, Lisbon.
- [41] 奥村義和, 渡辺和弘, ITER 工学 R&D における成果, *プラズマ・核融合学会誌*, Vol.75, Supplement, pp.65-71, 1999.
- [42] 岡 潔, 柴沼 清, ITER NBI 保守用セシウム除去装置の概念設計, *JAERI-Tech 2003-004*, 2003
- [43] K. Oka, E. Tada, "Design of Remote Handling Equipment for the ITER NBI", *JAERI-Tech 99-055*, 1999
- [44] 科学技術庁事故調査対策本部, *株ジェー・シー・オー東海事業所臨界事故による人への線量の状況と今後の取り組みについて*, 平成 12 年 1 月 31 日原子力安全委員会報告, 2000
- [45] 渡辺憲夫, 海外の核燃料施設における臨界事故の原因分析・JCO ウラン加工工場臨界事故との類似性, *日本原子力学会誌*, Vol.42, No.11, pp.1204-1214, 2000
- [46] 佐相邦英, ウラン加工工場臨界事故とヒューマンファクター, *安全工学*, Vol.39, No.5, 2000
- [47] 佐藤多秀, 実用ロボット技術に必要なもの～壁面ロボット, 管内ロボットを例に～, *日本ロボット学会誌*, Vol.12, No.8, pp.1132-1136, 1994
- [48] 藤原 茂, 金原了二, 岡田徳次, 実森 肇, 分節型主要配管内検査点検ロボットの開発, *日本ロボット学会誌*, Vol.12, No.2, pp.318-327, 1994
- [49] 川口圭史, 吉田乙雄, 車谷治通, 菊田 隆, 鉄管内走行ロボットの開発, *日本ロボット学会誌*, Vol.14, No.1, pp.137-143, 1996
- [50] 田口 幹, 河原崎徳之, ユニット型小口径配管内走行検査ロボットの開発, *日本ロボット学会誌*, Vol.15, No.2, pp.230-235, 1997
- [51] K .Oka, M. Nakahira, S. Kakudate, E. Tada, K. Obara, K. Taguchi, N. Kanamori, Development of Remote Bore Tools for Pipe Welding/Cutting by YAG Laser, *JAERI-Tech (96-035)*, 1996
- [52] 日本非破壊検査協会, *非破壊検査便覧*, 1979
- [53] 多田栄介, 柴沼清, 国際熱核融合実験炉(ITER)の遠隔保守, *プラズマ・核融合学会誌*, Vol.73, No.1, pp.21-28, 1997
- [54] K. Oka, S. Kakudate, N. Takeda, Y. Takiguchi, K. Akou, Measurement and Control System for ITER Remote Maintenance Equipment, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.10, No.2, pp.139-145, 1998
- [55] S. Kakudate, M. Nakahira, K.Oka, K. Taguchi, Development of blanket remote maintenance system", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.10, No.2, pp.78-87, 1998
- [56] 吉見 卓, 角館 聰, 多田栄介, 辻 光一, 宮川信一, 久保智美, 大重量物を扱うマニピュレータのための制御システムの開発 (ITER ブランケット遠隔保守ビークル型マニピュレータへの適用), *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.6, pp.766-774, 2001
- [57] 谷内田正彦, ロボットビジョン, 昭晃堂, 1990
- [58] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990

- [59] 佐藤宏介, 井口征士, 液晶レンジファインダ-液晶シャッタによる高速距離画像計測システム, 電子情報通信学会論文誌(D), J71-D-7, pp.1249-1257, 1988
- [60] 服部数幸, 佐藤幸男, スキャン符号化法による小型高速レンジファインダ, 電子情報通信学会論文誌(D-II), J76-D-II-8, pp.1528-1535, 1993
- [61] 脇迫 仁, 白石一成, 村井真二, 橋口幸男, 石川伸一, 鶴田健吾, 丸山佳長, 矢野京二, 中島盛之, 遠操作型配電作業ロボットの距離センサシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.156-161, 1997
- [62] K. Obara, S. Kakudate, K. Oka, K. Taguchi, A. Ito, K. Koizumi, K. Shibanuma, T. Yagi, Y. Morita, T. Kanazawa, E. Tada, High  $\gamma$ -rays irradiation tests of critical components for ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) in-vessel remote handling system, JAERI-Tech 99-003, 1999
- [63] K. Sato, A Yokoyama, S. Inokuchi, Silicon Range Finder - A Real-time Range Finding VLSI Sensor, Proc. Custom Integrated Circuits Conference '94, pp.339-342, 1994
- [64] (株)ニューフェス, NUF407
- [65] IST Corporation., R981
- [66] 三菱重工業株式会社, 耐放射線カメラ
- [67] NEC, 耐放射線カラーCCD テレビカメラ
- [68] 高増 潔, 加藤純一, 大園成夫, 移動ロボット用環境センサの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.3, pp.31-34, 1987
- [69] 上向賢一, 井上尚志, 安田耕三, 宮 幹雄, 中林督博, 松繩 朗, YAG レーザ溶接における溶接異常時のモニタリング信号挙動, 溶接学会論文集, Vol.20, No.3, pp.369-377, 2002
- [70] 石出 孝, 名倉保身, 穂坂重孝, 赤羽 崇, 長島 是, レーザ溶接インプロセスモニタリング技術の開発とその実用化, 第 27 回レーザ熱加工研究会論文集, pp.123-133, 1992
- [71] 石出 孝, 名倉保身, 松本 長, 赤羽 崇, YAG レーザ溶接インプロセスモニタリング技術の開発, 第 31 回レーザ熱加工研究会論文集, pp.177-193, 1994
- [72] 小林忠義, 宮島和俊, 柳原 敏, 原研における事故対応ロボットの開発(その 1)情報収集ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.6, pp.706-709, 2001
- [73] S. Hirose, T. Sensu, S. Aoki, The TAQT Carrier : A Practical Terrain-Adaptive Quadru-Track Carrier Robot, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, pp.2068-2073, 1992
- [74] 濱口忠男, 耐放射線性高分子材料の最近の動向, 工業材料, Vol.32, pp.71-80, 1985
- [75] 濱口忠男, 耐放射線性有機材料, 放射線と産業, Vol.66, pp.4-8, 1995
- [76] 館 瞳, テレロボティクスの世界, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.770-772, 1993
- [77] 館 瞳, テレグジスタンス, 計測と制御, Vo.30, No.6, pp.465-471, 1991
- [78] 横小路泰義, マスター・スレーブ制御の理論, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.794-802, 1993
- [79] 岩田洋夫, フォースディスプレイ, 計測と制御, Vol.30, No.6, pp.472-477, 1991
- [80] 内山 勝, 力覚に基づいたロボットの行動, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.8, pp.1164-1170, 1993
- [81] 鷹巣征行, 柳原好孝, 遠隔臨場マニピュレータ, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92 講演論文集, pp.181-186, 1992

- [82] 村上龍大, 長谷川清泰, 大橋太郎, 柳原好孝, 大日方五郎, 中山 淳, 永作 清, 島田洋一, 機能的電気刺激を用いた遠隔操縦システム, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.12, pp.1132-1137, 2000
- [83] 半田康延, 星宮 望, 機能的電気刺激(FES)による麻痺上下肢の制御, 医用電子と生体工学, Vol.24, No.1, pp.1-7, 1986
- [84] 巖見武裕, 三浦弘樹, 長谷川清泰, 中山 淳, 大日方五郎, 宮脇和人, 柳原好孝, 機能的電気刺激により反力提示する新しいバイラテラル遠隔制御システムの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.8, pp.844-851, 2002
- [85] 及川健一, 志賀加奈子, 吉田真由美, 藤田欣也, 磁気式3次元位置計測装置を用いた上肢7関節角度の算出法, 第19回バイオメカニズム学術講演会論文集, pp.161-162, 1998
- [86] 藤田欣也, 及川健一, 磁気式3次元位置計測装置を用いた上肢7関節角度の算出法, 第16回バイオメカニズムシンポジウム講演論文集, pp.131-139, 1999
- [87] John H. Warfel, 矢谷令子／小川恵子(訳), 図説 筋の機能解剖 第4版, 医学書院, 1993

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	$J/s$
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバー	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度	$^\circ C$	
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$
放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
吸収線量	グレイ	Gy	$J/kg$
線量当量	シーベルト	Sv	$J/kg$

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ' , "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	$\mu$
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここで省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	$\text{\AA}$
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

## 換算表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s/m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g/(cm} \cdot \text{s)})$

動粘度  $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$

エネルギー・仕事を熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$	= 4.1855 J (15 °C)
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仮馬力)
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	= 735.499 W
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$		1	100		1	3876		1	100
	$3.7 \times 10^{10}$	1		0.01	1		$2.58 \times 10^{-4}$	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

核融合施設及び原子力施設で作業するロボットのシステムインテグレーションに関する研究



古紙配合率 100%  
白色度 70% 再生紙を使用しています