

J A E R I - M
93-066

ITER炉内コンポーネントの
遠隔保守修理機器の設計と試作開発

1993年3月

近藤 光昇・柴沼 清・角館 聡・寺門 拓也
金森 直和・堀田 政孝・岡 潔・多田 栄介
宗像 正*・本多 啓三*・村上 伸*
安達 潤一**

JAERI-M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。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）まで、お申し込みください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

ITER 炉内コンポーネントの遠隔保守修理機器の設計と試作開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

近藤 光昇⁺・柴沼 清・角館 聡・寺門 拓也
金森 直和・堀田 政孝⁺・岡 潔・多田 栄介
宗像 正^{*}・本多 啓三^{*}・村上 伸^{*}・安達 潤一^{**}

(1993年2月24日受理)

ITER (国際熱核融合実験炉) のCDA (Conceptual Design Activity) において、炉内コンポーネントであるダイバータと第1壁アーマータイル等の遠隔保守修理機器として、炉内に軌道を展開し、軌道上をマニピュレータを搭載したビークルが走行し、作業を行う軌道走行型炉内保守修理システムが設計され、主案として採用された。本システムの特徴は、炉内作業の基盤となる軌道の高い機械的安定性によるマニピュレータの高精度な位置決め、及びビークルの高い機動性による効率的な保守作業が可能なことである。本システムの概念の有効性は1/5縮小モデルの試作試験により実証された。さらに、本システムの重要機器であるダイバータ保守用の伸縮型マニピュレータの1/1スケールの部分モデルをはじめ、ダイバータ冷却配管の管内アクセスによる溶接・切断ヘッド部、第1壁アーマータイルの表面損傷計測装置等の試作試験を行い、今後、本格的に展開されるITER工学設計に対して、有効なデータベースを構築した。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

+ ITER 開発室

* (株) 東芝

** 川崎重工業(株)

Design and Development of Remote Maintenance System
for ITER-CDA In-vessel Components

Mitsunori KONDOH⁺, Kiyoshi SHIBANUMA, Satoshi KAKUDATE
Takuya TERAKADO, Naokazu KANAMORI, Masataka HOTTA⁺
Kiyoshi OKA, Eisuke TADA, Tadashi MUNAKATA^{*}
Keizoh HONDA^{*}, Shin MURAKAMI^{*} and Jun-ichi ADACHI^{**}

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 24, 1993)

In the CDA (Conceptual Design Activities) of ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), a rail-mounted vehicle system was designed and adopted as a primary option of the in-vessel remote maintenance system for divertor and first wall/armor tile. In maintenance, two sets of semi-circular rails are deployed in the vacuum vessel and a circle of the rails is formed. Two sets of vehicles with manipulators travel along the rail, and carry out maintenance of damaged in-vessel components. Features of the system are 1) high positioning accuracy of the manipulator by high mechanical stability of the rail, a base structure for in-vessel maintenance, and 2) effective maintenance operation by high mobility of the vehicle. Feasibility of this vehicle concept has been demonstrated by a 1/5 scale model of the system. In parallel with the feasibility study using the scale model, critical components of the in-vessel maintenance

+ Department of ITER Project

* Toshiba Corporation

** Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

system, such as a full-scale partial model of the telescopic manipulator for divertor handling, an internal-access pipe welder/cutter head for divertor cooling pipes, an inspection head to detect the damaged armor tiles, etc. have been fabricated and tested. By these feasibility studies, effective database for ITER-EDA (Engineering Design Activities) was established.

Keywords: ITER, CDA, Remote Handling, Vehicle, Manipulator, Divertor,
Armor Tile

目 次

1. はじめに	1
2. 設計条件	3
2.1 ダイバータの環境条件	3
2.2 ダイバータの交換頻度	3
2.3 メンテナンス中の環境条件	3
2.4 メンテナンス上の制約条件	4
2.5 目標位置決め精度	4
3. ダイバータのメンテナンスの特徴	5
3.1 メンテナンスシナリオ	5
3.2 法線引抜と垂直引抜	11
3.3 配管の切断と再溶接	14
3.4 軌道走行型ビークルシステム	16
4. 第1壁 / アーマータイルのメンテナンスの特徴	21
4.1 第1壁 / アーマータイルのメンテナンスシナリオ	21
5. 遠隔機器の設計	23
5.1 軌道走行型ビークルシステム	23
5.2 ダイバータの位置決め制御	36
5.3 配管溶接・切断用レーザー光の長距離伝送	47
5.4 配管の切断 (オプション)	55
5.5 配管の溶接 (オプション)	61
6. 試作開発	63
6.1 軌道走行型ビークルシステム (1/5 縮小モデル)	63
6.2 ダイバータ交換用マニピュレータ (1/1 スケール部分モデル)	68
6.3 CO ₂ レーザー溶接・切断システム	72
6.4 第1壁表面観察	78
6.5 アーマータイル交換用マニピュレータへのニューラルネットワークの適用	97
6.6 リップシール溶接	112
7. まとめと今後の課題	127
7.1 ダイバータ関連のまとめ	127
7.2 第1壁アーマータイル関連のまとめ	129
7.3 今後の課題	129
謝 辞	132
参考文献	133

Contents

1. Introduction	1
2. Design Conditions	3
2.1 Environmental Conditions of Divertor	3
2.2 Frequency of Divertor Replacement	3
2.3 Environmental Conditions during Maintenance	3
2.4 Limitations on Maintenance Scenario	4
2.5 Positioning Accuracy	4
3. Features on Divertor Maintenance	5
3.1 Maintenance Scenario	5
3.2 Normal Replacement and Vertical Replacement	11
3.3 Pipe Cutting and Re-welding	14
3.4 Rail-mounted Vehicle System	16
4. Features on First Wall/Armor Tile Maintenance	21
4.1 Maintenance Scenario	21
5. Design on Remote Maintenance Devices	23
5.1 Rail-mounted Vehicle System	23
5.2 Divertor Position Control	36
5.3 Long Length Transmission of Laser Beam for Pipe Welding/Cutting	47
5.4 Pipe Cutting (Option)	55
5.5 Pipe Welding (Option)	61
6. Development	63
6.1 Rail-mounted Vehicle System (1/5-Scale Model)	63
6.2 Divertor Handling Manipulator (Full Scale Model)	68
6.3 CO ₂ Laser Welding/Cutting System	72
6.4 First Wall/Armor Tile Inspection System	78
6.5 Application of Neural Network to Armor Tile Handling Manipulator	97
6.6 Lip Seal Welding	112
7. Summary and Future Work	127
7.1 Summary on Divertor Handling	127
7.2 Summary on First Wall/Armor Tile Handling	129
7.3 Future Work	129
Acknowledgement	132
References	133

1. はじめに

ITER (国際熱核融合実験炉) のCDA (Conceptual Design Activity) で検討されてきた炉内遠隔保守修理¹⁾を対象とするコンポーネントは交換頻度の高いダイバータと第1壁アーマータイルである。CDAにおいては、これらの炉内保守修理作業用の遠隔機器の中心的役割を果たす装置として、軌道走行型ビークルシステムが提案され、主案として採用された。軌道走行型ビークルシステムは炉内保守の作業基盤となる軌道を炉内に展開し、その上を走行するビークルより構成され、作業対象物に応じて必要な遠隔機器をビークルに搭載して、炉内作業が行われる。

ダイバータは、プラズマ運転中におけるディスラプションにより誘起される電磁力や自重、地震力等の荷重がダイバータ板にかかるので遮蔽体に支持固定されている。一方、プラズマからの高熱負荷によるダイバータの損傷により、年1回程度の定期的修理が計画されている。そのため、ダイバータはプラズマ運転中は強固に支持固定され、交換時は容易に脱着できる支持構造が要求される。また、交換作業は作業時間を短期間に抑えるために、迅速・容易に実施可能なダイバータ交換用遠隔機器が必要となる。1トン以上の巨大重量物を所定の位置精度を確保しつつ、高 γ 線の環境下で実施するのは今までにない技術である。CDA設計では支持固定方法として水圧を利用したコッターを、ダイバータ交換用遠隔機器として伸縮式の多段アームを軌道走行型ビークルシステムに搭載した方式がそれぞれ主案として採用されている。これらは日本が提案したものでCDA終了後も引き続き実規模スケールの設計と部分試作を実施してきた。

第1壁アーマータイルは、トラス全体で数万枚に及び、損傷したタイルを同定するための表面計測、及び損傷したタイルを迅速に交換することが重要となる。表面計測については、炉内第1壁近傍の炉停止後の誘導放射能の線量(γ 線)は $\sim 10^7$ R/hであり、通常よく使用されているITVカメラが使用できない。また、耐放射線性カメラとして積算で $10^8 \sim 10^9$ Rまで使用可能なものが開発されているが、ITERの環境条件においてはせいぜい数10時間程度しか使用できない。そこで、レーザー光を用いた光切断法による表面計測方法を採用し、試作試験を実施した。一方、タイルの交換作業は自動制御によるマニピュレータによって実施する方法を採用している。しかし、ITERの第1壁表面すべてにアクセスするためにはマニピュレータのアーム長は約6m、自由度8程度必要となる。この様に大きなマニピュレータになると、アーム自身の撓みや関節部のガタによりアーム先端の手先位置は目標位置より大きくずれる可能性があり、目標タイルの迅速な交換は困難と考えられる。この問題を解決するための1つの手法として、人間の視神経回路網を模擬したニューラルネットワークを応用し、アームの撓みや関節部のガタを考慮(学習)できる制御法を設計に取り入れ、部分モデルを試作し、試験を行った。これらの第1壁アーマータイルタイルに関する一連の遠隔機器も作業基盤である軌道走行型ビークルシステムからなされる。

本報告書では、CDA終了以降に進展した成果をまとめたものであり、第2章では設計が進

展しているダイバータの交換に関する設計条件を、第3章ではダイバータの分解組立に密接に関連する構造的な特徴を明らかにするとともに必要とする遠隔機器を列挙し、第4章では第1壁アーマータイルのメンテナンスシナリオを示し、第5章では第3章、第4章で列挙した遠隔機器の設計を示し、第6章では設計をもとに試作した部分モデルの試験結果を示す。

2. 設計条件

炉内保守修理において、交換頻度が高く、保守修理の難易度が非常に高い炉内コンポーネントはダイバータである。ここでは、ダイバータ交換用遠隔機器及び関連するダイバータ構造の設計をする上での環境条件、制約条件を明らかにしている。

2.1 ダイバータの環境条件²⁾

表2.1.1にダイバータのプラズマ運転中の環境条件を示す。使用環境のうち、ディスラプション時の入射エネルギーがダイバータ板の損傷に対して支配的であり、ダイバータ板の交換頻度が1回/1年と設定されている。荷重に関してはディスラプション時の電磁力は非常に小さく、自重及び地震力に対する支持構造が必要となる。

2.2 ダイバータの交換頻度¹⁾

CDA設計では炉内コンポーネントの損傷程度により交換頻度は3つのカテゴリーに分類されており、ダイバータは交換頻度が最も高いクラス1に属し、計画的(定期的)に実施される。定期的に行われる頻度は上下ダイバータ板6枚を年1回交換し、不定期的に数枚を1年に2~3回実施する。

2.3 メンテナンス中の環境条件¹⁾

メンテナンス作業は表2.3.1に示す環境下で実施される。ダイバータのメンテナンス時間を極力抑えるためには炉停止後すぐに真空雰囲気のまま作業を開始することが望ましいが、数時間のオーダーでメンテナンスが完了する訳ではないので、真空容器内は大気圧、不活性ガスまたは空気雰囲気として実施される。これは、ダイバータのように1トン

以上もある重量物をハンドリングする遠隔機器の潤滑を必要とする機構部には非常に大きなヘルツ応力が発生するが、真空仕様で高ヘルツ応力に耐え得る潤滑剤の開発が困難と判断され、

表2.1.1 プラズマ運転中の環境条件

<u>使用環境</u>	
中性子壁負荷	: 0.4 MW/m ²
最大表面熱流速	: 15 MW/m ²
ディスラプション時の	
入射エネルギー	: 10~20 MJ/m ² (0.1~3 ms)
アーマー(CC)表面温度	: 1000°C
<u>荷重</u>	
自重	: 1 ton/module
電磁力(ディスラプション)	: 3.5 X 10 ⁴ Pa
地震	: 水平 0.3 G 垂直 0.2 G

表2.3.1 メンテナンス中の環境条件

雰囲気	: 不活性ガス/空気
圧力	: 大気圧
温度	: ~150°C
γ線線量率	: 1 X 10 ⁷ R/h
磁場	: 未定
湿度	: 未定

大気圧仕様とする。温度に関してはセンサー、駆動機構、潤滑剤等にとって非常に厳しい条件であり、採用する部品の選定や設計に大きな影響を及ぼしてくる。γ線線量率については $1 \times 10^7 \text{ R/h}$ と非常に高い。採用するセンサー等は、損傷する前に交換する必要があり、メンテナンス作業の効率化を考慮して、1000時間（約1ヶ月）に相当の連続使用に耐え得るものとする。すなわち集積で $1 \times 10^{10} \text{ R}$ を目標値と設定している。

2.4 メンテナンス上の制約条件

- (1) ダイバータの交換において、遠隔機器は炉内より対象とするダイバータにアクセスし、交換・撤去される。これは遠隔機器を含むメンテナンス空間を最小限に抑えるために採用されている。
- (2) 遠隔機器を炉内に挿入、及びダイバータを搬出入するためのメンテナンスポートは赤道面に 90° おきに4個設けられている。ポートの断面形状は高さ3400mm、幅1300mmである。
- (3) ダイバータ交換は同時に2ヶ所で行う。これはメンテナンス時間を極力低減するためである。
- (4) メンテナンスキャスクは4ヶ所のメンテナンスポートの外側に常設し、可能な限り占有空間を抑える。
- (5) ダイバータ配管の切断・再溶接は配管の内側より実施する。

2.5 目標位置決め精度

- (1) 隣接するダイバータ間の最終設置時のギャップは $\pm 0.5 \text{ mm}$ とする。
- (2) 搬送中のダイバータと炉内コンポーネントとの干渉（接触）を回避するためのギャップは $\pm 20 \text{ mm}$ とする。CDAではブランケット搬送に関してこの数値が設定され⁽¹⁾、ダイバータに関しては特に設定されていないので暫定値とし、今後の試作試験結果より最終決定するものとする。
- (3) 配管溶接部の設置精度は $\pm 0.2 \text{ mm}$ と設定する。第3章で詳述するが配管溶接・切断はCO₂レーザーを使用することを第1オプションとしているのでこの数値となっている。

3. ダイバータのメンテナンスの特徴

3.1 メンテナンスシナリオ¹⁾

図3.1.1にダイバータ板交換の概略のシナリオを示す。概略のダイバータ板の撤去の手順は①炉停止後、ダイバータ配管を切断、②ダイバータ板の支持解除、③ダイバータ板のジャッキアップ、④ダイバータ板の把持・搬送で、新しいダイバータ板は①ダイバータ板の所定位置への搬送、②ダイバータ板のジャッキダウン、③ダイバータ板の支持固定、④ダイバータ配管の再溶接の手順で再据付される。このシナリオにおいて設計上ポイントとなった項目を以下に列挙する。

(1) 配管の切断と再溶接

ダイバータの撤去に先立ってダイバータ配管を切断し、ダイバータの再据付後にダイバータ配管を再溶接する必要がある。この配管はダイバータから遮蔽領域を貫通し真空容器外側に配設されているので溶接切断作業は遮蔽領域の外側で実施することが作業員の接近性と作業空間の観点からは望ましい。しかし、この領域で配管を切断するとダイバータ側に残った配管の長さが大きくなってしまう。ダイバータ自体の搬送は炉内より幅1.3m、高さ3.4mのメンテナンスポートを通してなされるので、この残った配管を可能な限り短くすることがダイバータ搬送を容易に行うためには重要となってくる。そのため配管はダイバータ近傍で、即ち炉内において切断・再溶接することにした。一方、この領域での切断・再溶接部は空間的に非常に狭く、従来の配管用溶接・切断機のように配管の外側よりアクセスして作業を行う方法は厳しい。そのため、空間的に制約のない配管の内側より作業を行うこととし、その手段としてはCO₂レーザーを採用した。その理由は100Asch40の肉厚6mm程度のSUS配管の溶接と切断が出力を変えることにより可能であることと、溶接と切断の2つの作業の共通機器として扱えるからである。図3.1.2に管内アクセス式レーザー溶接・切断システムを応用したダイバータ配管の切断・再溶接の概念を示す。

(2) ダイバータ支持解除と固定²⁾

図3.1.3に示すようにダイバータ板の支持固定はダイバータ板の下部にある支持脚がダイバータ構造体の開口部に設置・嵌合された後、ダイバータ構造体側に内蔵されている水圧コッターを支持脚に打ち込むことによりなされる。また水圧コッターは隣接するダイバータ間の最終設置精度±0.5mmを確保するためにも利用される。

(3) ダイバータ板の受け渡し

遠隔機器によりダイバータ板を搬送するためにはダイバータ板を把持する必要がある。プラズマに直接対向するダイバータ板表面に把持するための開口部（以下、把持部と略称

する)を設けることはプラズマ運転中に発生するダイバータ板表面へのスパッタリングやエロージョンにより把持部形状が原形を保つことが困難であり、安全性及び構造上の観点から成立しにくい。そのため把持部はプラズマからの粒子が来ないダイバータ板の両側面に設置することとした。しかし、隣接するダイバータ間の最終設置精度は ± 0.5 mmと非常に小さく、このギャップを通過して遠隔機器のハンドが把持部にアクセスすることは現実的でない。そのためダイバータを把持・搬送する時は予め把持部が隣のダイバータ板表面より炉内に出るようにジャッキアップすることとし、この時点で遠隔機器にダイバータ板は受け渡される。ジャッキアップ及びジャッキダウンは水圧コッターと同じ原理を利用した水圧シリンダー(以下、「水圧ジャッキ」と呼称する)によってなされる。

図3.1.4にダイバータ板の受け渡しの基本シナリオを示す。

(4) ダイバータ板の把持・搬送

ダイバータは炉内よりメンテナンスポートを通過して炉外に搬出されるが、そのためにはダイバータを把持する機能と搬送する機能を持った遠隔機器が必要である。搬送する遠隔機器として軌道走行型ビークルシステムを独自に開発した。ビークルシステムは、プラズマ運転中は真空容器外側のメンテナンスキャスク内に収納されており、メンテナンス作業が開始されると軌道がメンテナンスポートを通過して真空容器内に入り、真空容器の中空部においてトロイダル方向に軌道が円環状に自動的に敷設され、その軌道上をビークルが走行する方法である。ビークルシステムはメンテナンスポートより対向する 180° のメンテナンスポートまでの半円の軌道を形成し、対向する 180° のメンテナンスポートからもう1組のビークルシステムが反対側の半円を形成し、全体として円環を形成する。円環状に形成された軌道は 90° おきの4つのメンテナンスポートより強固に支持・固定することにより軌道自身の撓み・捻れを抑え、ビークルの安定した走行を可能にさせる。ダイバータ板の把持についてはビークルに伸縮機構付きの多関節アーム(以下、「ダイバータ交換用マニピュレータ」と呼称する)を設置し、アームの手先部の把持機構によってなされる。ダイバータ交換用マニピュレータは軌道断面回りに 360° 回転可能で、上下のダイバータともハンドリングできるようになっている。

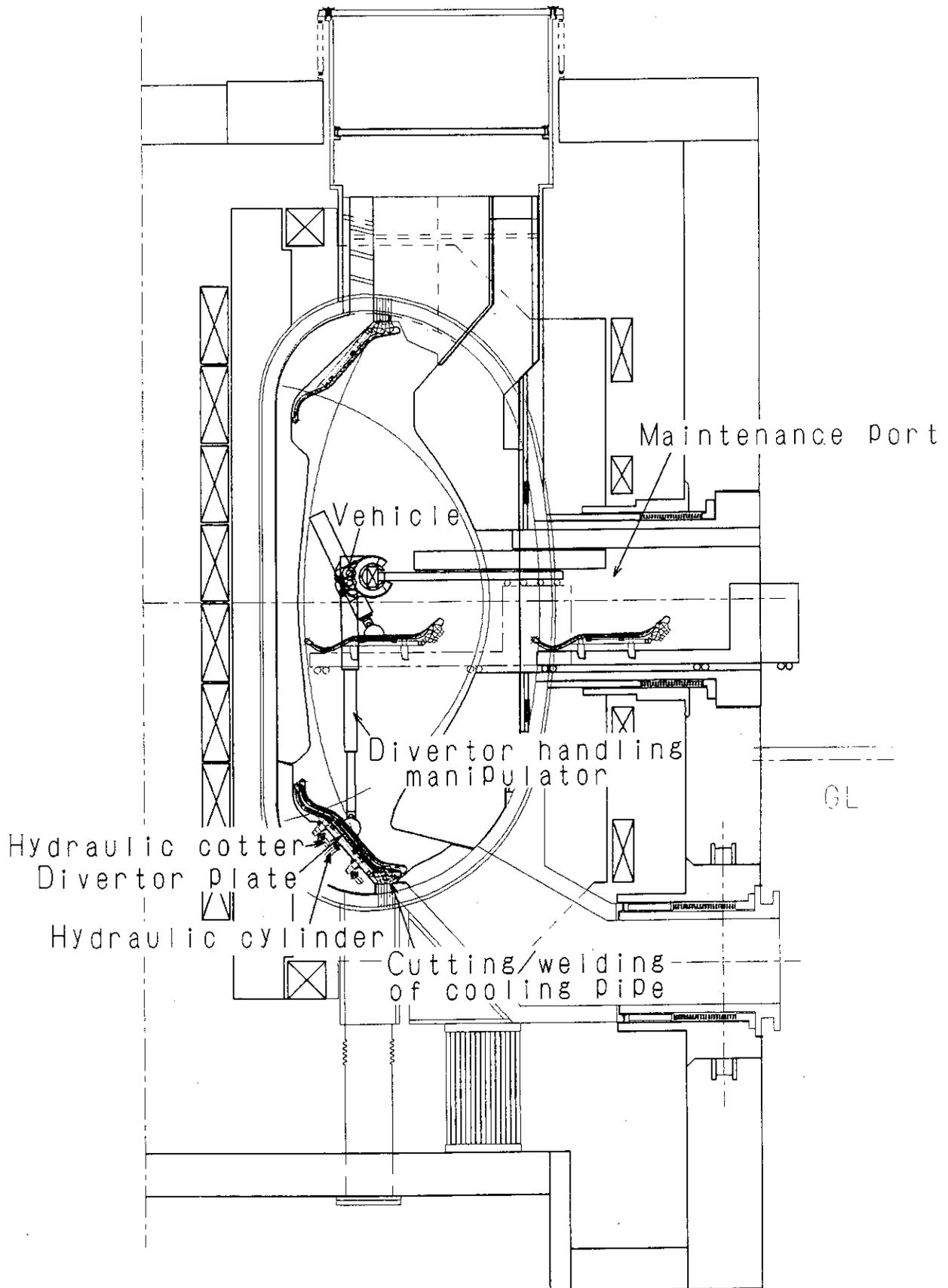


図3. 1. 1 ダイバータ板の交換シナリオ

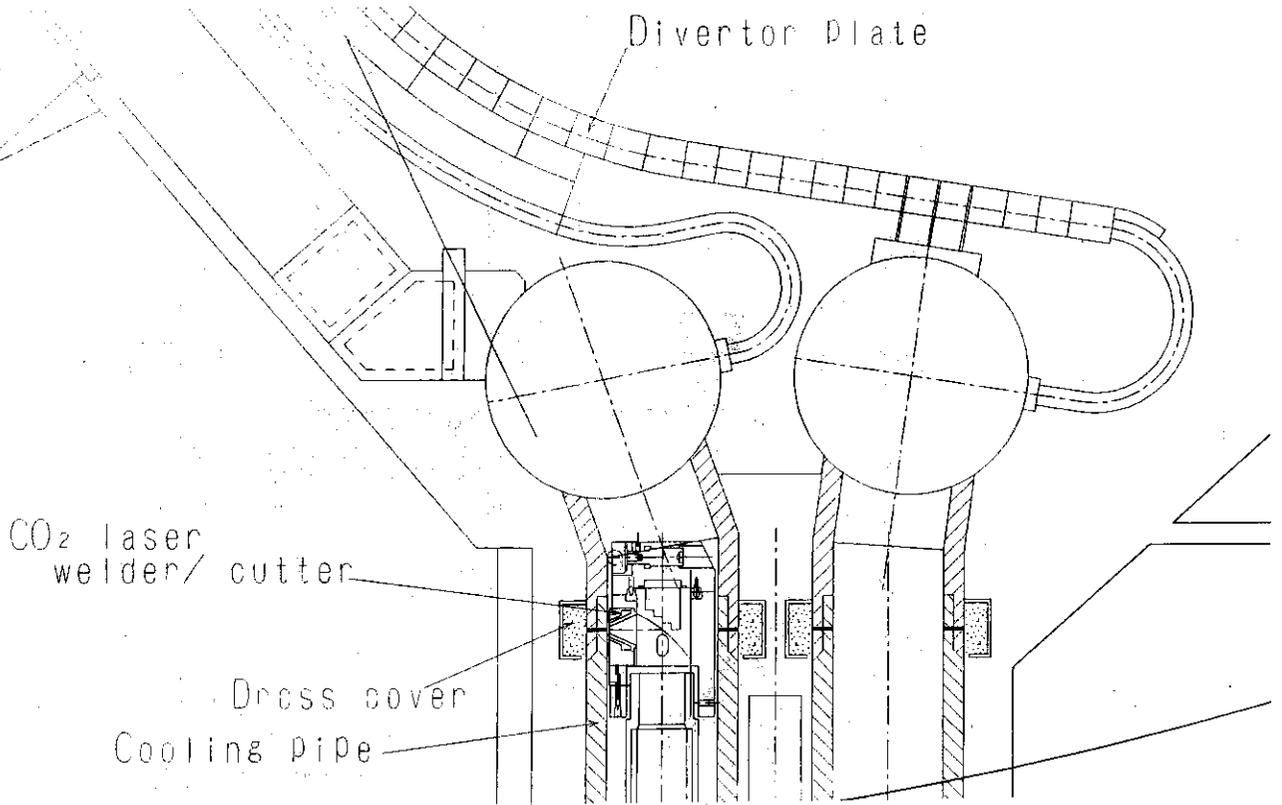
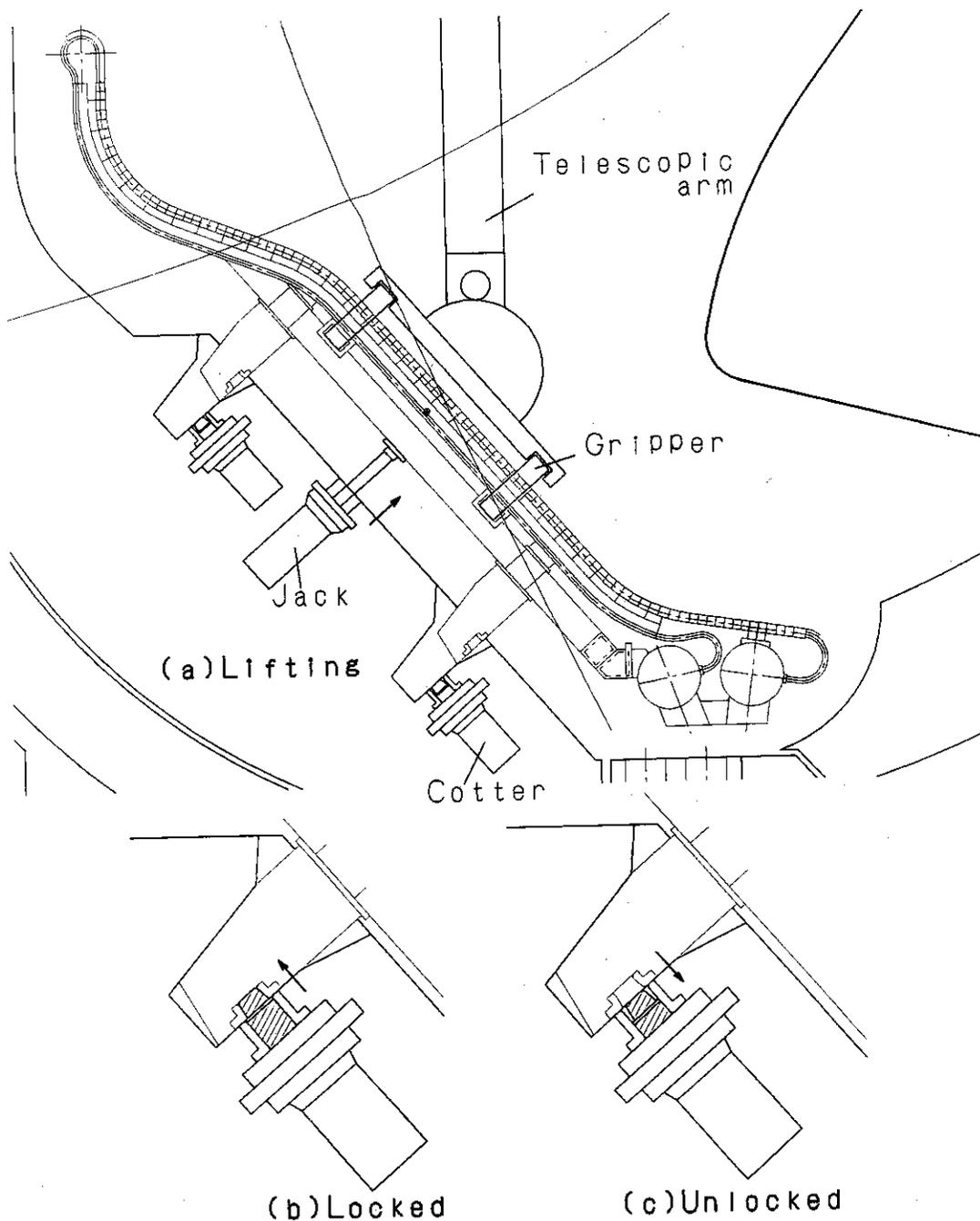


図 3. 1. 2 ダイバータ配管の切断・再溶接概念



Hydraulic locking and lifting

図3. 1. 3 水圧コッターによるダイバータの固定

Setting of Divertor

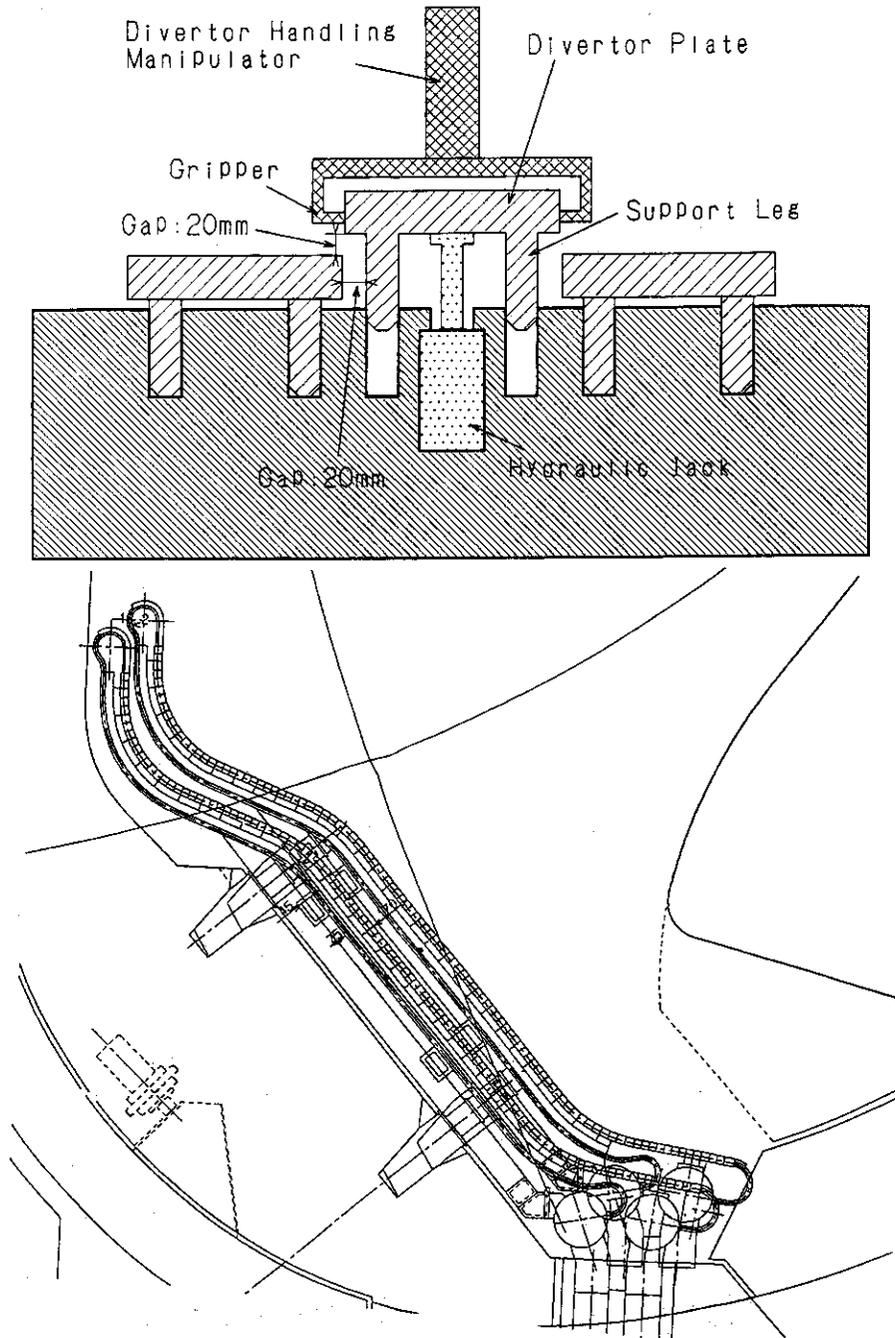


図 3. 1. 4 ダイバータ板の受け渡しの基本シナリオ

3. 2 法線引抜と垂直引抜

ダイバータ交換用マニピュレータがダイバータを把持するために、ダイバータ把持部を隣のダイバータ板表面よりプラズマ側に引き出す必要がある（以下、この動作を「引抜」と呼称する）。引抜動作はダイバータ構造体に内蔵された水圧ジャッキによってなされるが引抜方向の角度の違いによって水圧ジャッキの移動ストロークは変わってくる。引抜方向として、ダイバータ傾斜面の法線方向（法線引抜）と重力方向（垂直引抜）の2つについて検討した。CDA設計では垂直引抜が主案として検討されてきた。

3. 2. 1 検討前提条件

- (1) 隣接するダイバータ間のギャップは1mmと想定する。
- (2) ダイバータ交換用マニピュレータの位置決め精度を ± 20 mmと暫定的に仮定する。この位置決め精度は、実験により決定する必要がある。
- (3) ダイバータ交換用マニピュレータの位置決め精度が ± 20 mmなので水圧ジャッキにより、ダイバータ板は隣のダイバータ板表面より20mm以上引き抜いておく。
- (4) 水圧ジャッキの最大ストロークは200mm以下に抑える。ストロークを大きくするほど水圧ジャッキそのものの長さも大きくする必要があり、200mm程度までなら水圧ジャッキがダイバータ構造体内におさめる空間を確保できるからである。

3. 2. 2 比較

図3. 2. 1に垂直引抜の場合のジャッキアップ量を示す。隣のダイバータ板表面より20mm引き抜くためには、ジャッキアップ量は490mm必要となる。これは図中に示すインボード側の戻り配管が隣のダイバータ板表面と干渉させないために必要である。ジャッキアップ量490mmは現実的でない。図3. 2. 2に法線引抜の場合のジャッキアップ量を示す。ジャッキアップ量は170mmで200mm以下の条件を満足する。従って、引抜方向としては法線引抜を主案として設計を進めた。

3. 2. 3 課題

CDAにて検討された炉構造において法線引抜によりダイバータを撤去する場合、構造上、以下に示す矛盾する項目が摘出されており、EDA設計において整合性を図る必要がある。

- (1) 法線方向引抜のため、水圧ジャッキのシリンダー軸に剪断力が作用する。作用しない構造の変更が必要である。
- (2) 図3. 2. 3に法線引抜後の搬送経路を示すが、外側遮蔽領域でダイバータと干渉する。
- (3) ダイバータ交換用マニピュレータの位置決め精度が ± 20 mmなので法線引抜時においてダイバータは隣接のダイバータとギャップを20mm保つ構造にする必要がある。

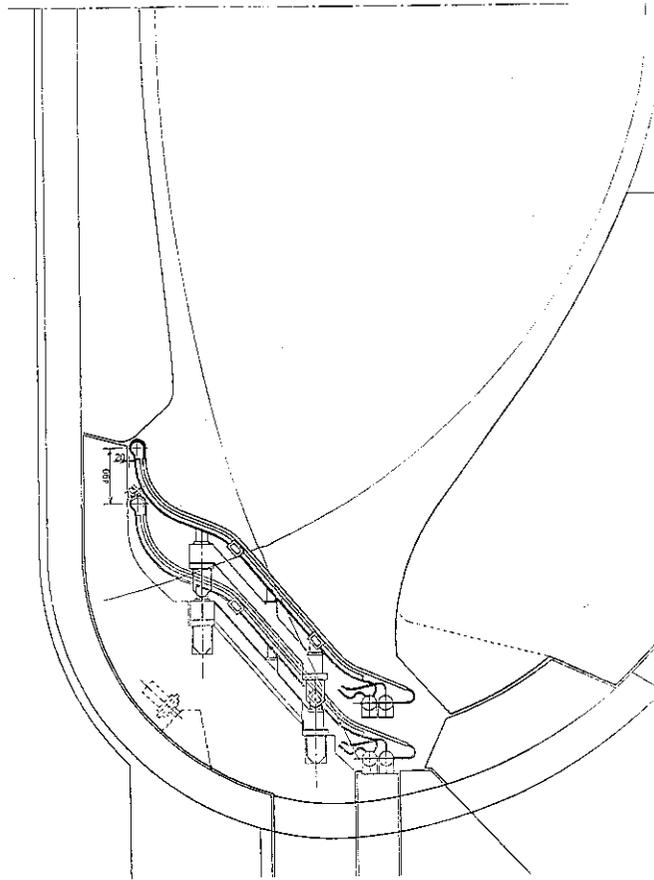


図 3. 2. 1 垂直引抜の場合のジャッキアップ量

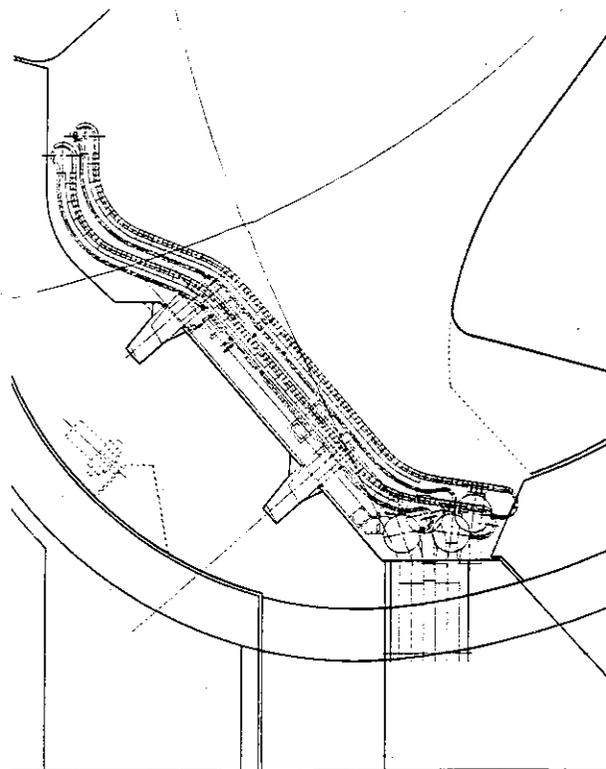


図 3. 2. 2 法線引抜の場合のジャッキアップ量



図 3. 2. 3 ダイバータ板の法線引抜後の搬送経路

3.3 配管の切断と再溶接

設計したCO₂レーザー加工システムはレーザービーム発生源である発振器、ビーム径を所定のサイズに補正するコリメーター、無酸素銅ミラーで構成されるビーム伝送系、溶接切断する配管内に挿入されるレーザー加工ヘッドからなる。共振器には焦点位置決め裕度の広いマルチモードビームを形成するのに有利な安定型共振器を採用した。

ITERクラスの大きさではレーザー発振器から配管を溶接・切断する加工点まで、およそ100m以上レーザービームを伝送することが要求される。この間、レーザービームは発散角が約0.002ラジアンで広がるため、加工点でのビーム径は、発振器を出たときのビーム径より約200mm大きくなる。一方、ダイバータ配管の内径は約100mmとなる(100A, sch 40の肉厚6mm)。この空間に加工ヘッドを設置する領域を考えるとビーム径は最大でも40~50mm程度に抑える必要がある。そこで発振器でのビーム径を40mmとし、加工点までのビームの発散は発振器と加工点の間に数カ所、凹面・凸面の各ミラーよりなるコリメーターを配置し、発振器出口ビーム径近くまで補正する。

レーザー加工ヘッドには2方式の集光光学系を検討した。すなわち、平面曲げミラーと集光レンズ(ZnSe製)からなるレンズタイプ加工ヘッド(図3.3.1)とパラボリックミラーからなるミラータイプ加工ヘッド(図3.3.2)である。主な構成は先端から、レーザービームを加工点に照射する加工ノズル、レーザービームの焦点を加工点付近に合わせる集光光学系、溶接切断する配管の真円度の誤差による焦点位置ズレを補正するノズルの管内壁倣い機構(ミラータイプのみ)、レーザービーム軸を配管の中心に保持するための加工ヘッドセンタリング機構、配管の位置決め機構及び外部駆動機構である。さらに光学系を冷却するための冷却循環系、アシストガス供給系及びエア供給系が備わっている。レンズタイプ加工ヘッドのレンズ(ZnSe)は炉停止後の誘導放射能(γ 線)による焦点距離のズレや、レーザー光の透過率の低下等に関する照射データがない現状では γ 線の影響のないミラータイプを主案とすることにした。ZnSeレンズについては別途、 γ 線照射試験を実施することにし、その結果を待って採用するかどうかの判断をすることとした。

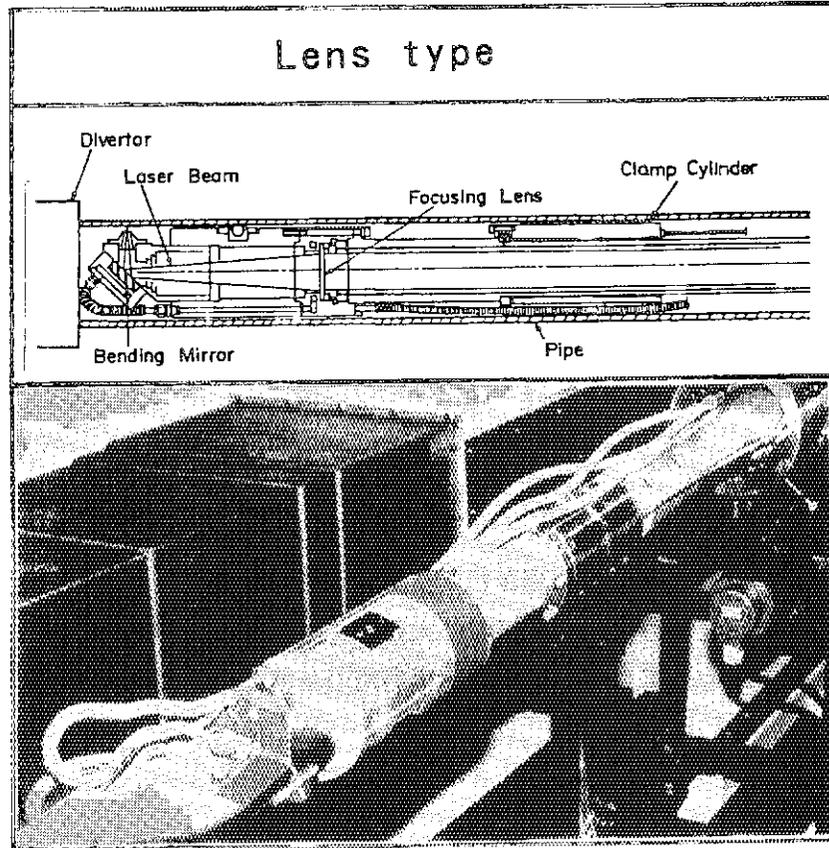


図 3. 3. 1 レンズタイプのレーザー加工ヘッド

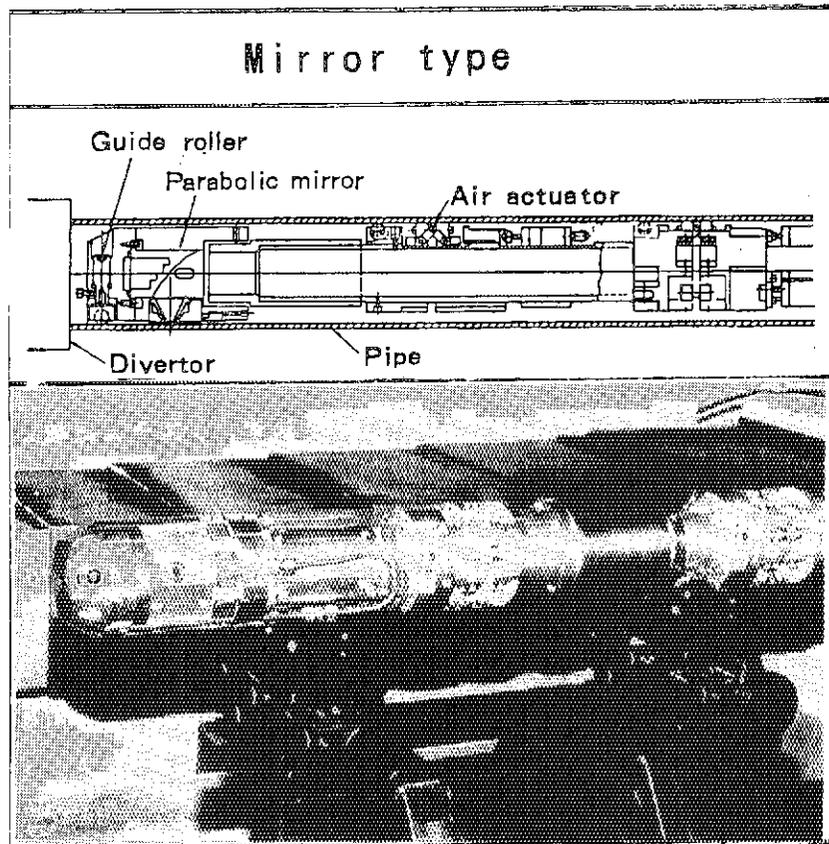


図 3. 3. 2 ミラータイプのレーザー加工ヘッド

3. 4 軌道走行型ビークルシステム^{1) 4) 5) 6)}

炉内遠隔保守・修理システムとしてJETやTFTRのような既存のプラズマ試験装置においては図3. 4. 1に示すような真空容器の外側に支持部を持つ長大な多関節ブーム⁷⁾を用いる方式が採用されており、既に実機が製作され、試験段階にある。製作された多関節ブームは関節数が5、長さが10 m程度のアームで一端が固定の片持ち梁構造となっている。各関節は重力方向の荷重に対しては剛構造となっているが水平方向の荷重に対しては非常に弱いいわゆるスカラー型の構造となっている。ITERにおけるダイバータの保守において多関節ブームを使用する場合、ダイバータ板の重量約1トンと把持機構(エンドエフェクター)の重量約2トンを支持するとともに、アーム長が約20 m程度必要となり以下に示す問題点が明らかとなった。

- (1) 片持ち梁構造なので先端に負荷された荷重から発生する撓み・捻れによる変形が大きい。特にダイバータ把持・持ち上げ時に大変形を生じ、振動が発生する。
- (2) 関節が水平方向の荷重に弱いので根元部関節の分解能が先端部の位置精度に大きく影響する。
- (3) 多関節ブームの動作には全関節を常に同期制御するとともに、振動制御も考慮する必要がある。
- (4) 各関節に駆動機構が必要であるので故障個所が分散し、対策が困難となる。
- (5) JET、TFTRにて実機が開発されているがこれらは振動制御技術は開発されておらず、またITERクラスの大きさ・可搬重量で高γ線環境下で必ずしも適用できるわけではない。

このような状況から多関節ブームの問題点を解決する炉内遠隔保守・修理システムとして軌道走行型ビークルシステムをCDAにおいて提案し、その特徴が多関節ブームより優れているという観点から主案として採用された。

3. 4. 1 基本概念

図3. 4. 2に軌道走行型ビークルシステムの概略図を示す。システムは軌道とビークルからなるユニットを2組備えており、それらは炉の運転中には180°で対向するメンテナンスキャスクに収納される。各ユニットは関節によって連結された円弧状リンクからなる半周分の軌道、マニピュレータを備え軌道上を走行するビークル、軌道やビークルを炉の中に搬入する軌道展開装置、軌道を折り畳んで収納する軌道収納装置から構成される。軌道は6個の円弧状リンクからなり、関節を屈曲させるためのアクチュエータや動力伝達機構、センサなどを持たない構造としている。炉内での保守・修理作業を行うときには、それぞれの円弧状リンクは軌道展開装置とビークルによって炉の中に受動的に展開され、半円を形成する。さらに180°で対向するメンテナンスポートから展開されたもう1つの半円状の軌道と結合して完全な円環状の軌道とする。その後、90°の位置にある水平ポートでの軌道支持装置による支持を含め、90°ごとに合計4ヶ所で軌道を支持する。

ビークルには保守・修理作業のためのマニピュレータ、軌道関節のロック機構の駆動機構、軌道の内周面側に設けられたラックギアと噛み合うピニオンギアからなる走行用駆動機構が備えられている。

3. 4. 2 軌道展開方式

軌道の炉内への展開の一連の動作を図3. 4. 3に示す。

- (1) 軌道はメンテナンスキャスク内の円形のガイドに沿って巻き取られるように収納されている。先端のリンクに取り付けられたビークルは同時にビークル保持アームに固定されている(図3. 4. 3(a))。
- (2) 2段のスライドアームが軌道とビークルとともに水平ポート内に進入する(図3. 4. 3(b))。
- (3) 先端のリンクがビークルとともに炉内に進入し、上段のスライドアーム先端のビークル保持アームを旋回して、軌道の先端のリンクとビークルをトロイダル方向(円周方向)に向ける(図3. 4. 3(c))。
- (4) ビークルの走行用駆動機構により先端のリンクをトロイダル方向に送り出すとともに、ポート内の残りのリンクを炉心方向にスライドさせる(図3. 4. 3(d))。
- (5) ポート内のリンクを炉内に押し出すことによって2番目のリンクを関節廻りに回転させ、炉内で連続的な円弧を形成する。その後ビークルによって関節をロックする(図3. 4. 3(e))。
- (6) 残りのリンクも同様にして炉内に展開する。この時90°ポートではローラで軌道の下面を案内する。
- (7) 対向するポートから展開されたもう1本の軌道と水平ポート正面で結合する(図3. 4. 3(f))。
- (8) 90°ポートから挿入された軌道支持装置の把持機構で軌道を把持した後、ローラが退避する。これにより軌道の展開と支持が完了する。
- (9) ビークルがスライドアーム先端のビークル保持アームから離れて軌道上を移動し、作業を行う。

3. 4. 3 主な特徴

このシステムには以下のような特徴がある。

- (1) 炉内に展開した軌道を4つのメンテナンスポート(水平ポート)から支持するので、作業の基準となる軌道の機械的安定性が高い。
- (2) 軌道にはアクチュエータや動力伝達がないので、機構が単純で信頼性が高い。
- (3) ビークルの機動性が高いので、効率的な保守・修理作業が可能である。
- (4) 軌道をメンテナンスキャスク内に巻いて収納するので、軌道収納時に大きなスペースを必要としない。

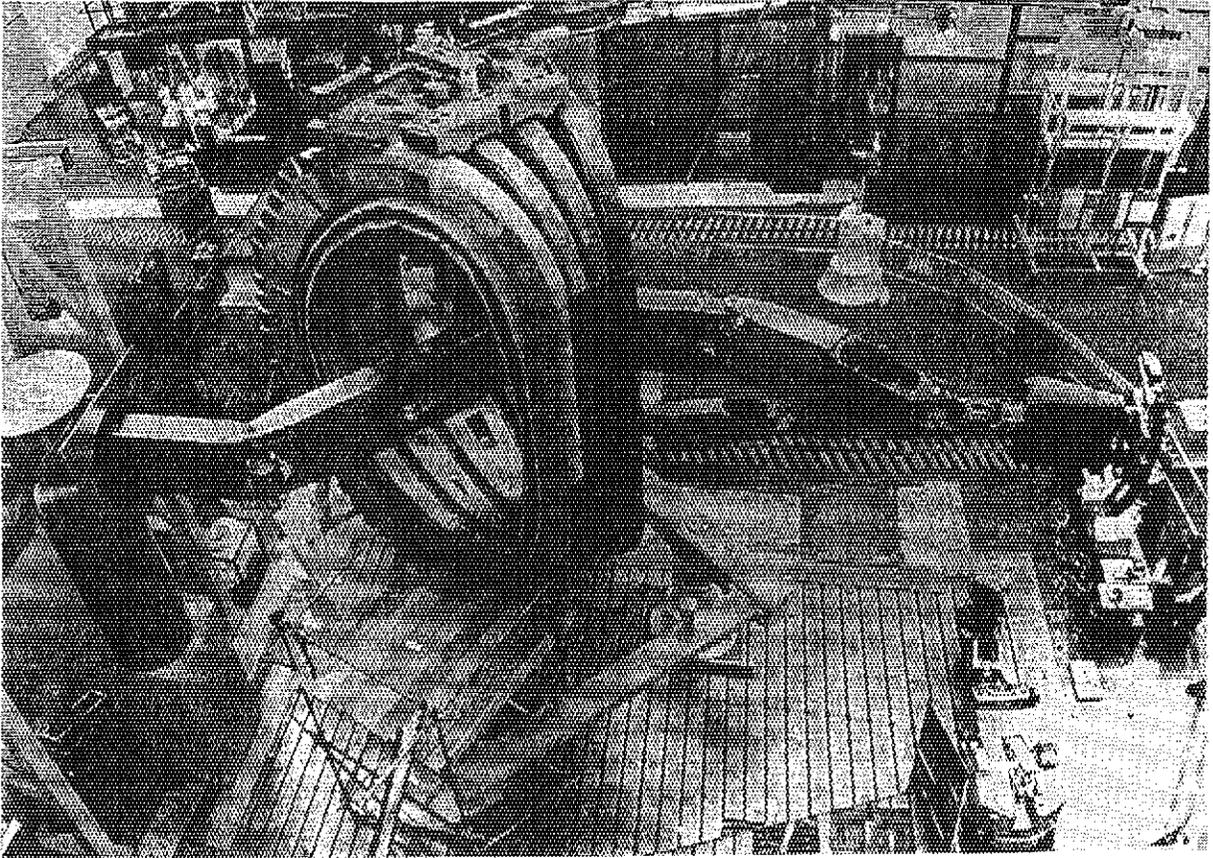


図 3. 4. 1 J E T の多関節ブーム

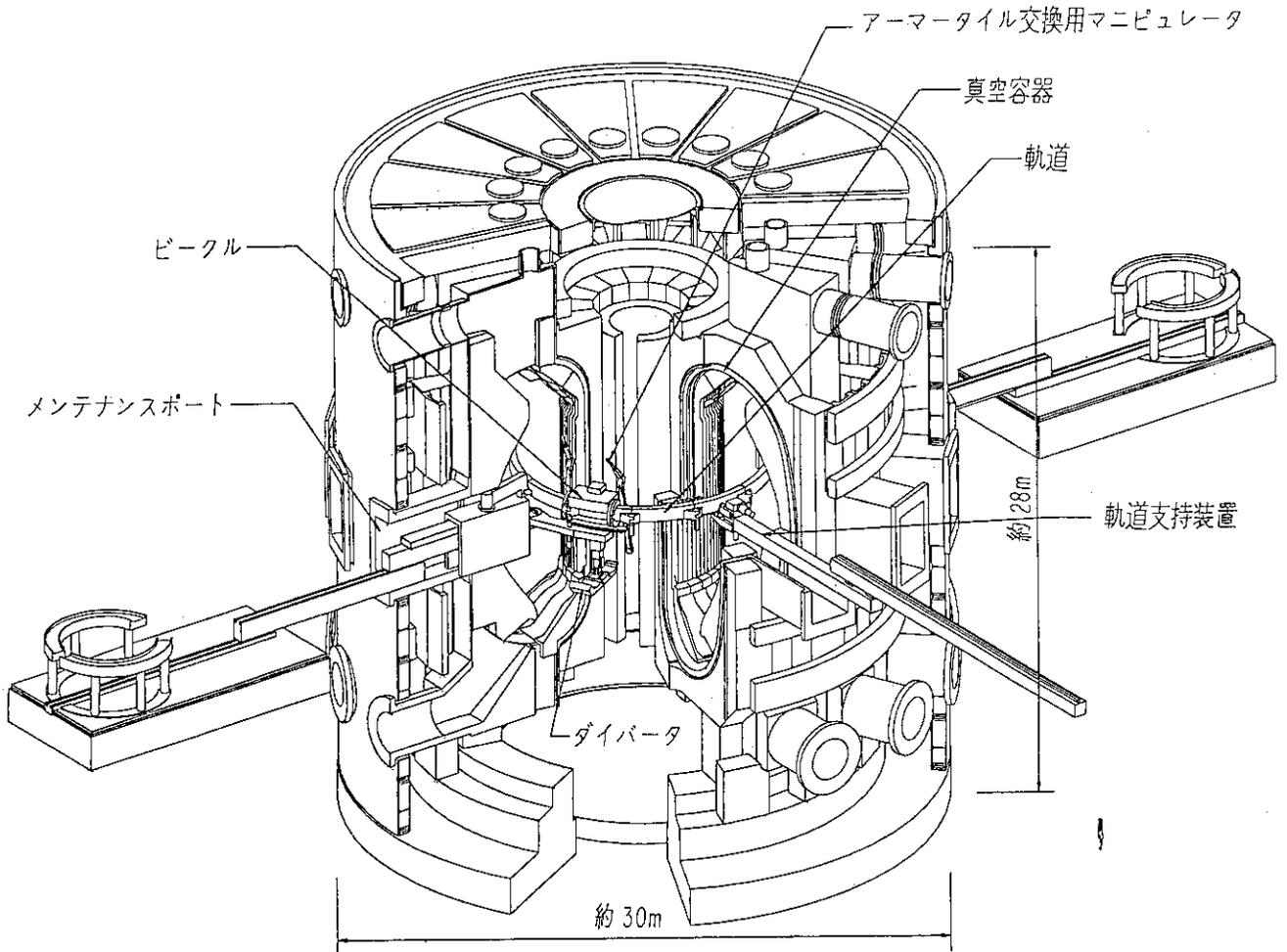


図3.4.2 軌道走行型ビークルシステムの概略図

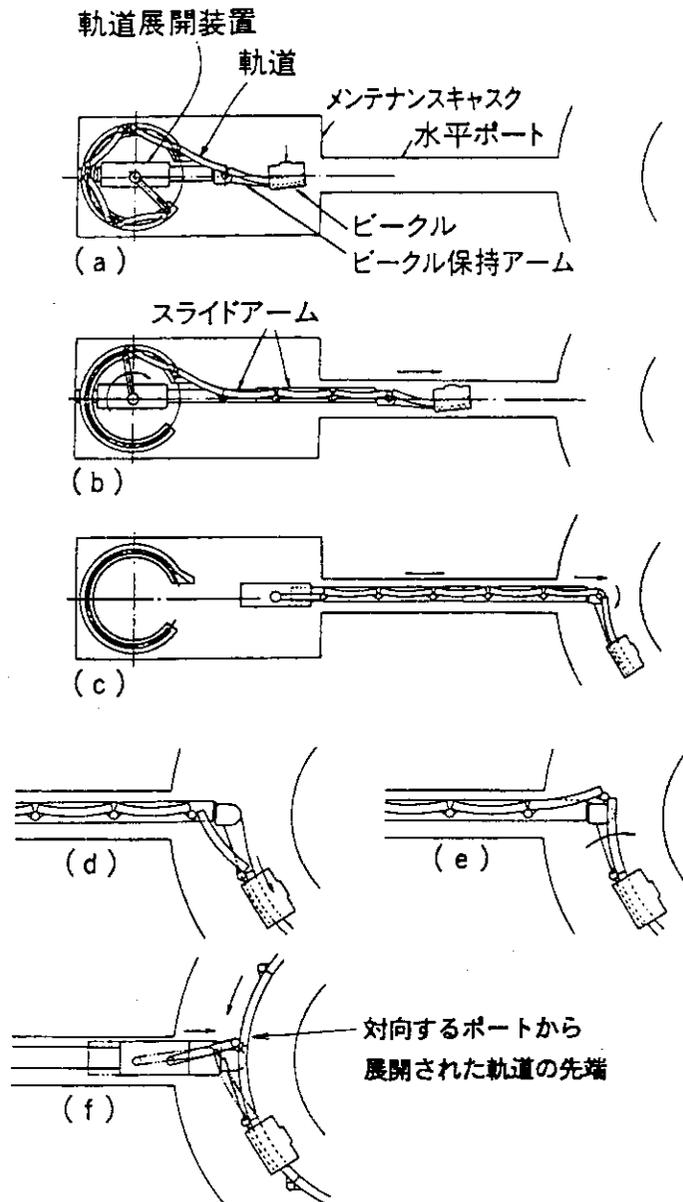


図 3. 4. 3 軌道の炉内への展開動作シーケンス

4. 第1壁／アーマータイルの メンテナンスの特徴

4.1 第1壁／アーマータイルのメンテナンスシナリオ¹⁾

図4.1.1に第1壁／アーマータイル交換の概略のシナリオを示す。概略の第1壁／アーマータイルの交換手順は、①炉停止後、メンテナンスポートより軌道走行型ビークルシステムを炉内に展開させる、②ビークルに搭載された第1壁表面観察システムにより損傷タイルの発見とその場所の同定、③ビークルに搭載されたアーマータイル交換用マニピュレータにより損傷タイルを交換、④軌道走行型ビークルシステムの撤去の順になされる。このシナリオにおいて設計上ポイントとなった項目を以下に列挙する。

(1) 第1壁表面観察

第1壁（アーマータイル）の表面計測は軌道走行型ビークルシステムに搭載された計測センサーにより定期的になされるがITERの第1壁領域は、ダイバータ領域を含めて約1100m²と広く、アーマータイル1枚の大きさが例えば10cm²の場合は総計で11万枚に、20cm²の場合は、27,500枚に及ぶ。そのためこの膨大な数のアーマータイルから損傷したタイルを発見することは単なる目視検査のような定性的な計測手段ではオペレータの作業負荷が増大するだけで、迅速かつ正確な判断を下すには現実的ではない。ここではアーマータイルの損耗の進展状況をその場で定量的に計測することを目的とし、損傷を検出するとともに損傷部表面形状の精密計測を自律的に行う計測法を採用する。計測方法は対象物表面にレーザースリット光を投射してできた輝線（光切断法）をTVカメラで撮像し、三角測量の原理により3次元形状を計測する方式を採用している。尚、耐放射線性の観点から、TVカメラとレーザースリット投光器との間はそれぞれ、イメージファイバーとライトガイドで接続される。計測は欠陥部検出の粗計測と、欠陥部のみの表面形状を精密計測する2段階よりなり、損傷したアーマータイルの位置も自律的に同定される。また、この計測法は損傷したアーマータイルの交換時にアーマータイルの精密位置計測にも応用される。

(2) アーマータイル交換

アーマータイルを迅速かつ正確に交換することにおいて重要なことはアーマータイルの正確な位置の測定とアーマータイル交換用マニピュレータの正確な手先位置決め精度の両立である。位置計測は上述の第1壁表面計測法を応用して精密に位置を同定させる。一方、アーマータイル交換用マニピュレータは全長約6mの長尺柔軟アームが採用され、アームの手先はアーム自身の撓みや関節部のガタにより目標位置から大きくずれる可能性がある。

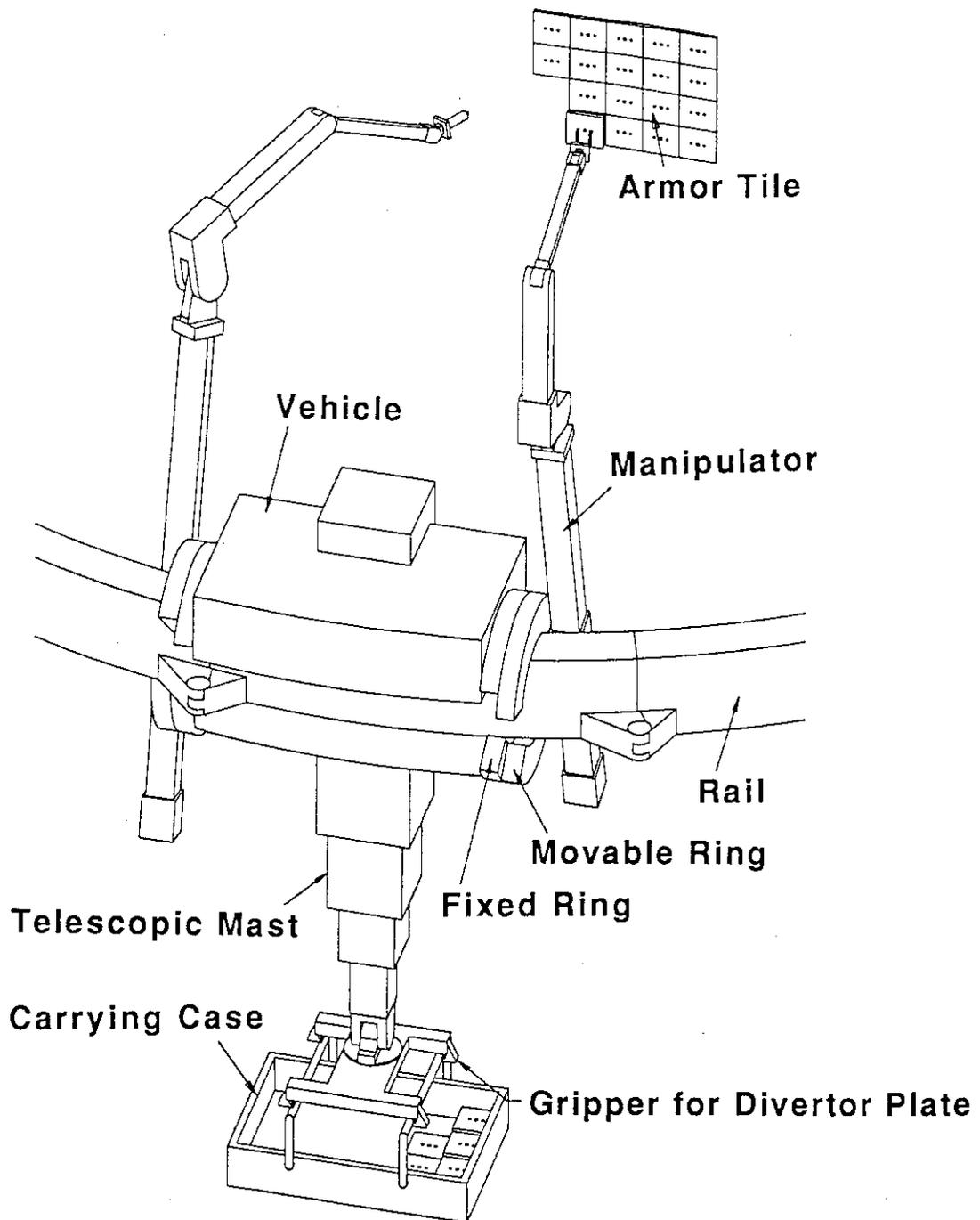


図4. 1. 1 第1壁/アーマータイルの交換シナリオ

5. 遠隔機器の設計

5. 1 軌道走行型ビークルシステム

第6章で示す1/5縮小モデルの軌道走行型ビークルシステムの試作試験結果をもとに実規模スケールの設計を実施しており、現在までの検討結果を報告する。

5. 1. 1 軌道の設計

(1) 軌道の形状と配置

幅1300mm、高さ3400mmのメンテナンスポートにおいて、ビークルに設置されているダイバータ交換用マニピュレータの軌道回り回転機構及びダイバータ交換用マニピュレータ自身の占めるスペースを考慮して、図5. 1. 1に示すように軌道の断面形状は矩形で幅250mm、高さ500mmとする。

一方、炉内における軌道の配置は、ダイバータ交換用マニピュレータが上下ダイバータにアクセスした時、軌道回りのモーメント負荷が過大にならないこと、軌道とインボードの間をダイバータが通過できること(図5. 1. 2)、軌道展開装置のためのスペースが十分に取れることなどを条件に、半径5500mm、赤道面からの高さ600mmを軌道中心としている。

(2) 軌道の分割と軌道支持装置の配置

軌道は炉内で展開された後、軌道支持装置を90°ポートより炉内に入れて軌道支持を行う。この時、軌道支持装置と軌道関節が干渉しないように軌道の分割角度を決定する必要がある。軌道と軌道支持装置の連結部は、軌道関節部との干渉を避けるため、図5. 1. 3(a)に示すように軌道関節部のトロイダル方向の占有空間である2.4°以上に離しておく必要がある。

軌道の分割数は、軌道を幅1300mmのメンテナンスポートより挿入するとき、軌道は円弧状になっているので分割数が少ないと円弧状の軌道がメンテナンスポート壁面と干渉してしまう。また、ビークルはメンテナンスポートを通過するとき、軌道の第1リンク(最初に炉内に挿入されていく軌道)に搭載されている。図5. 1. 3(b)に示すようにビークルの保持領域は約21°であり、この占有分だけ、他の軌道より長くする必要がある。勿論第1リンクもメンテナンスポートと干渉してはいけない。この様な制約をもとに軌道は、図5. 1. 3(c)に示すように第1リンク:41°、第2~第5リンク:27.5°、第6リンク:29°の6分割(180°分)とした。

5. 1. 2 軌道の強度解析

軌道走行型ビークルシステムによる炉内保守修理において、その作業の基盤となる軌道の強度・剛性を確保しておく必要がある。ここでは5. 1. 1節に示した軌道が構造強度上、成立するかどうかを予め把握しておくために構造解析を行った。

(1) 解析モデル

図5. 1. 4に軌道の解析モデルを示す。使用材料はすべてSUS304である。軌道本体、 0° 位置の軌道支持アーム、 90° 位置の軌道支持アームの断面形状は、

- ・軌道本体：250mm x 500mm、板厚12mm
- ・ 0° 位置の軌道支持アーム：500mm x 500mm、板厚40mm
- ・ 90° 位置の軌道支持アーム：1000mm x 500mm、板厚10mm

で、それぞれのアームと軌道はピン結合にてモデル化されている。

(2) 荷重条件 (図5. 1. 4)

以下に示す2ケースについて解析を行った。

- ①軌道自重：4.8トン
- ②作用荷重：軌道上 45° の位置に以下の荷重を負荷
 - ・垂直方向荷重：軌道の上から下向きに5トン（ビークル+ダイバータ荷重）
 - ・モーメント：軌道の内側の向きに2トン・m

(3) 拘束条件 (図5. 1. 4)

- ①すべての軌道支持アームの根元部を全変位及び全モーメントを拘束
- ②軌道支持アームの中間部（図における軌道側面から3763mmの支持位置接合面）ではローラーで支持されているので上下方向の変位を拘束

(4) 解析結果

①軌道の変形

図5. 1. 5に軌道の 45° 位置に作用荷重を負荷したとき（軌道自重は考慮されていない）の軌道の変形図を示す。図に示すように最大変形量は作用荷重点において発生しており、7.7mmであった。一方、図に示していないが軌道自重（4.8トン）のみの最大変形量も 45° 位置で発生し、1.8mmであった。

従って、（軌道の自重+作用荷重）の最大変形量は、

$$\textcircled{\text{C}} \text{最大変形量} = 7.7 + 1.8 = 9.5 \text{ mm となる。}$$

尚、図中には作用荷重による軌道各部の上下方向（Z方向）変位も示しており、軌道各部の上下方向変位は以下の通りである。

- ◎荷重点の軌道 : 7.7mm
- ◎展開側支持接合部 : 1.6mm
- ◎展開側支持アーム先端 : 1.0mm
- ◎ 90° 支持接合部 : 2.0mm
- ◎ 90° 支持アーム先端 : 1.3mm

②作用荷重による軌道の断面変形

図5. 1. 6に作用荷重（軌道の自重は考慮されていない）による軌道各部の断面変形を

示す。ビークルが止まっている位置での軌道の捻れ角度は 0.16° である。ビークルに装着されているダイバータ交換用マニピュレータの伸縮アームが最大に伸びたときの長さが約6 mなのでアーム先端での変位は約17 mmとなる。尚、軌道自重による断面変形は作用荷重による断面変形に比べて非常に小さく、その時の軌道の捻れ角度は無視している。

③応力

図5.1.7に軌道全体の応力分布を、図5.1.8に 90° 位置の支持アームの応力分布を、図5.1.9に軌道展開側支持アームの応力分布を示す。各部における発生最大応力を表5.1.1に示す。応力としては特に問題となる場所はない。

表5.1.1 軌道と支持アームの最大応力

荷重条件 \ 位置	展開側支持アーム	90° 位置支持アーム	軌道本体
軌道自重	0.8 Kgf/mm ²	1.2 Kgf/mm ²	0.5 Kgf/mm ²
ビークル+ダイバータ荷重	0.9 Kgf/mm ²	1.6 Kgf/mm ²	6.4 Kgf/mm ²
軌道自重+ビークル+ダイバータ荷重	1.7 Kgf/mm ²	2.6 Kgf/mm ²	6.9 Kgf/mm ²

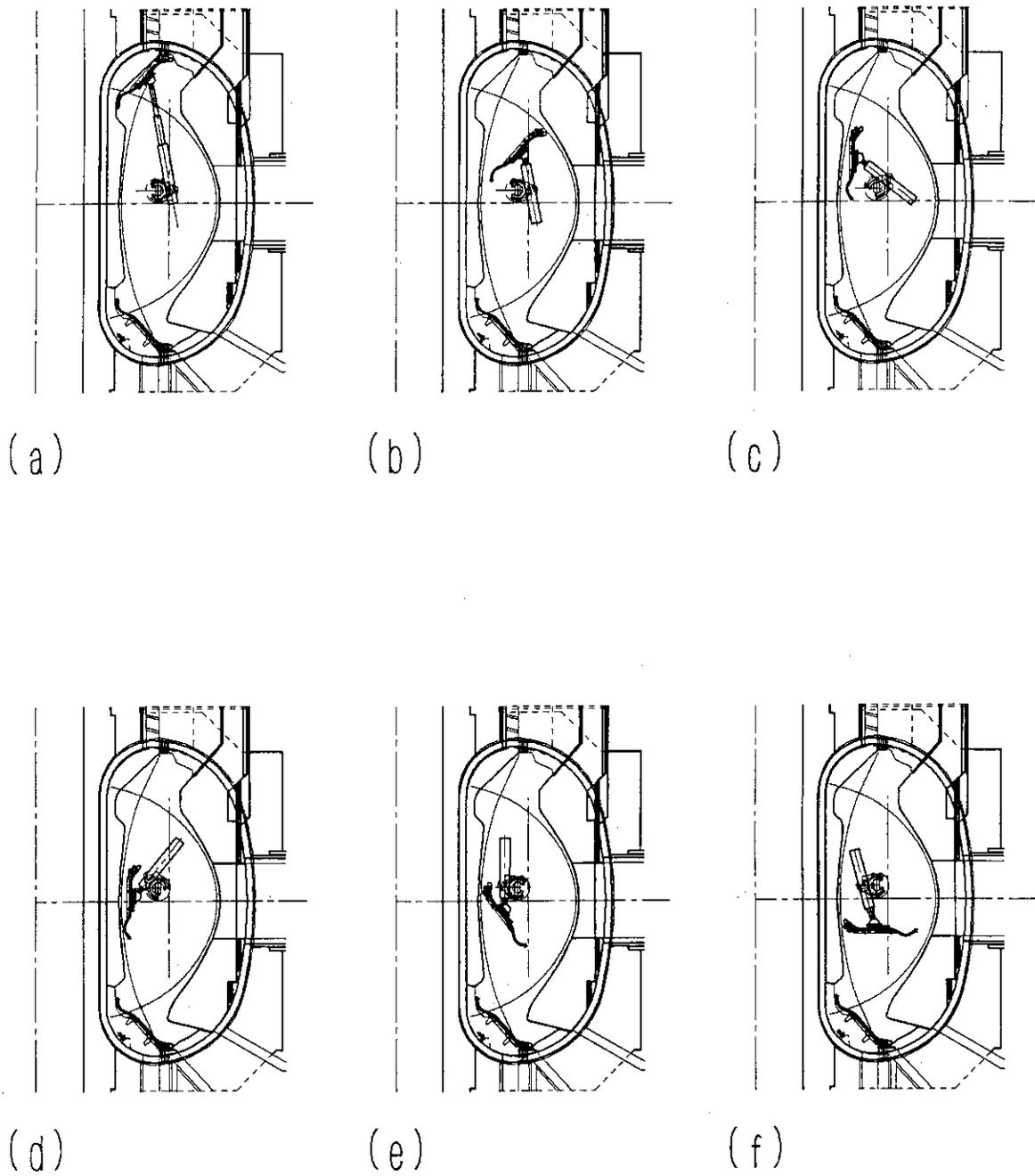
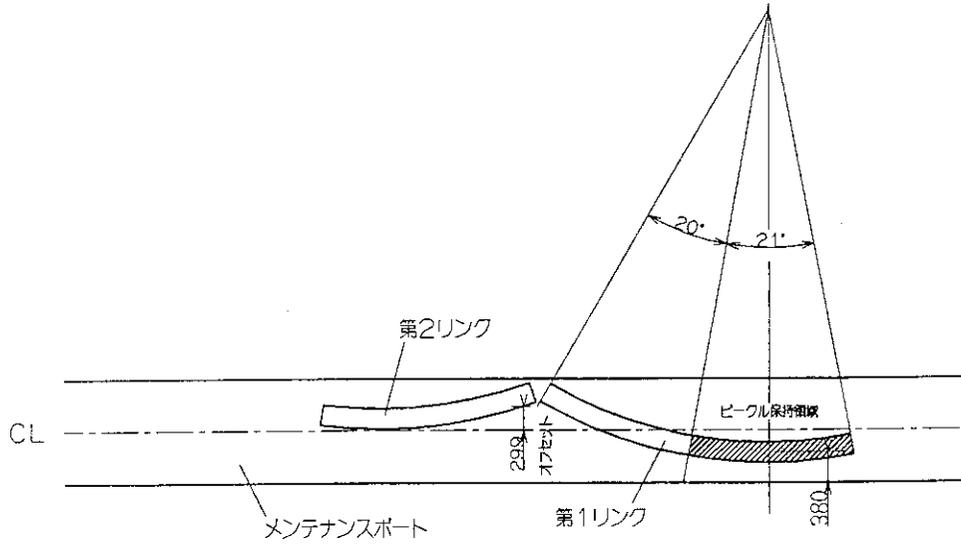
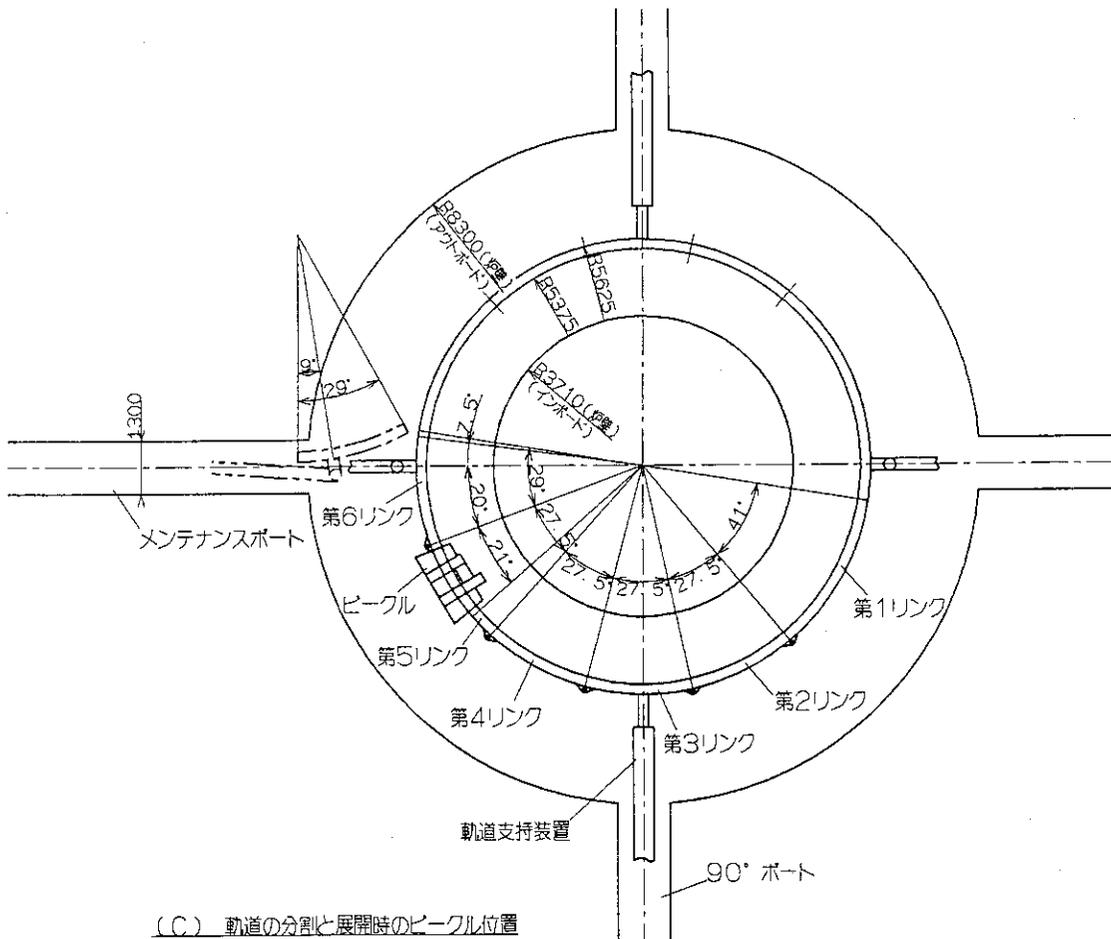


図 5. 1. 2 上側ダイバータのハンドリング



(b) メンテナンスポート内でのピープル保持位置



(c) 軌道の分割と展開時のピープル位置

図 5. 1. 3 軌道の分割 (2)

材 質 : SUS 304
 ヤング率 : 19700 kgf/mm²
 ポアソン比 : 0.3

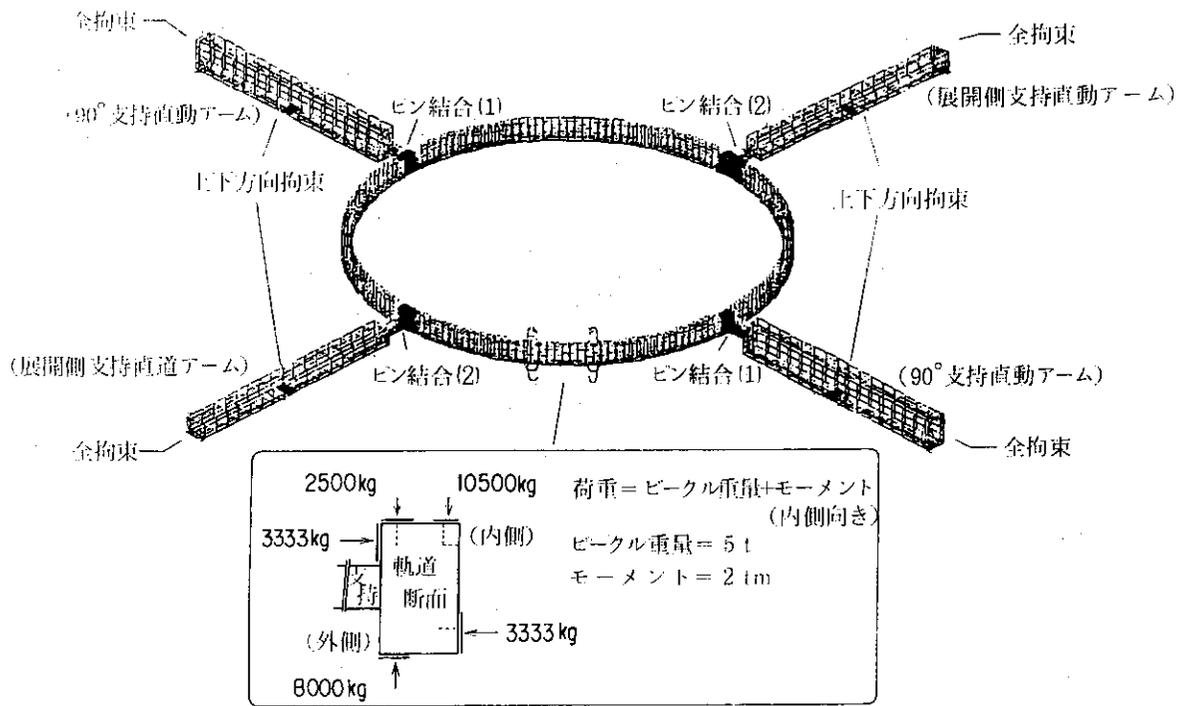


図 1.1 解析モデルの拘束・荷重条件

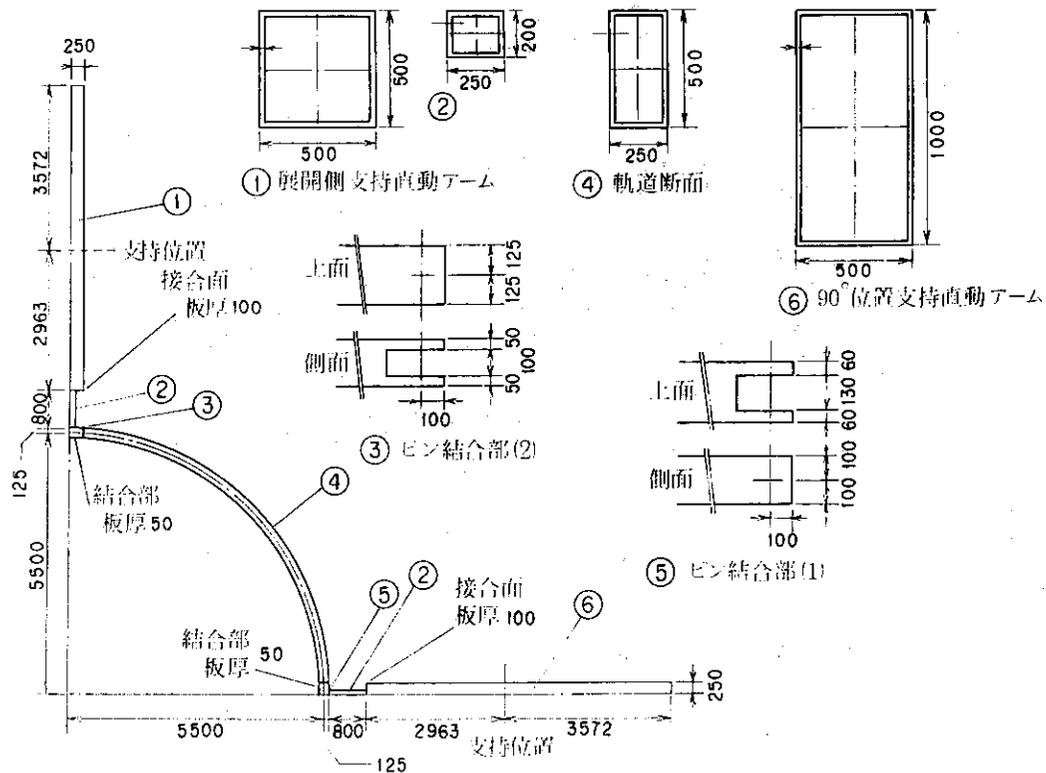
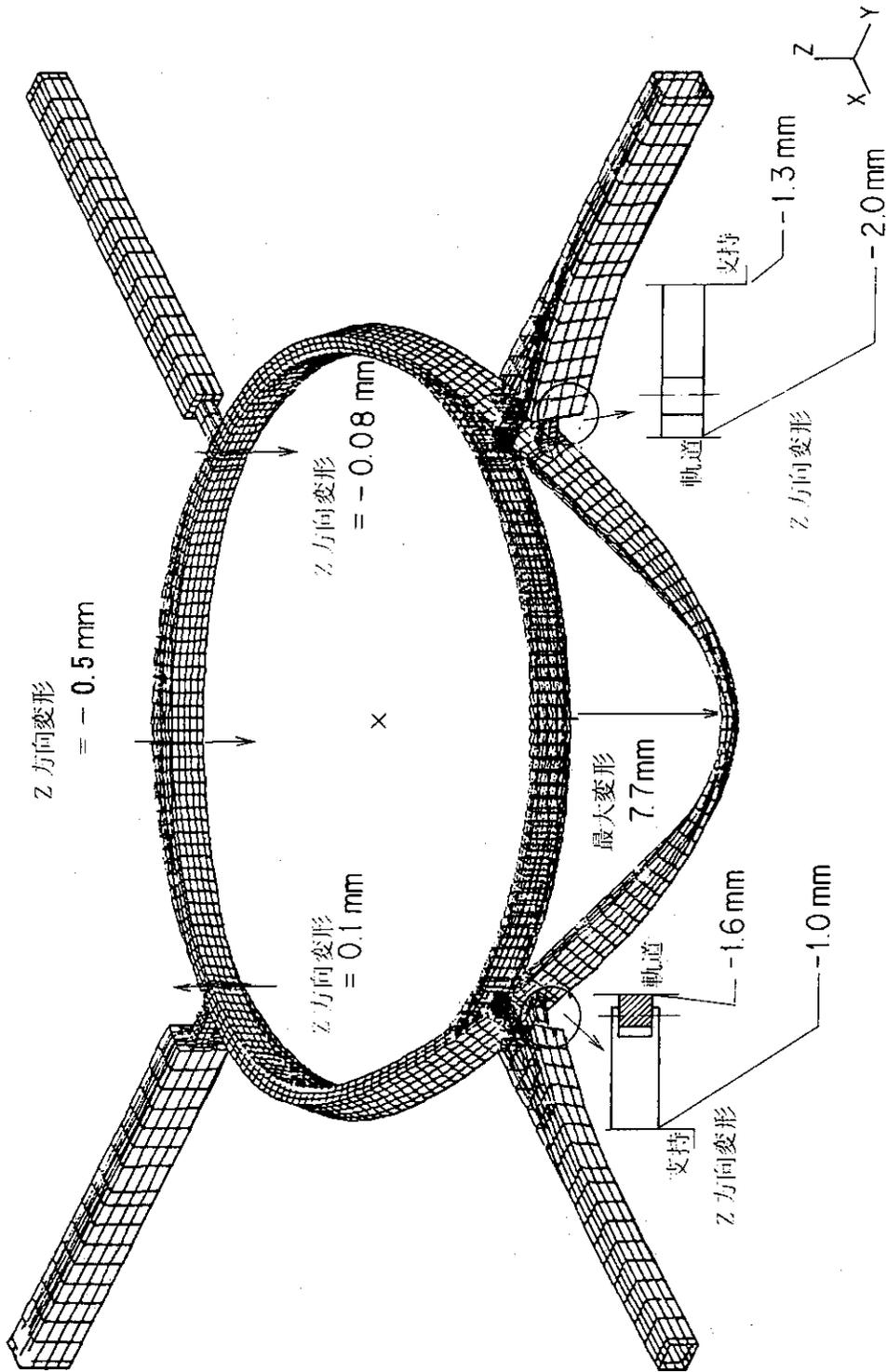
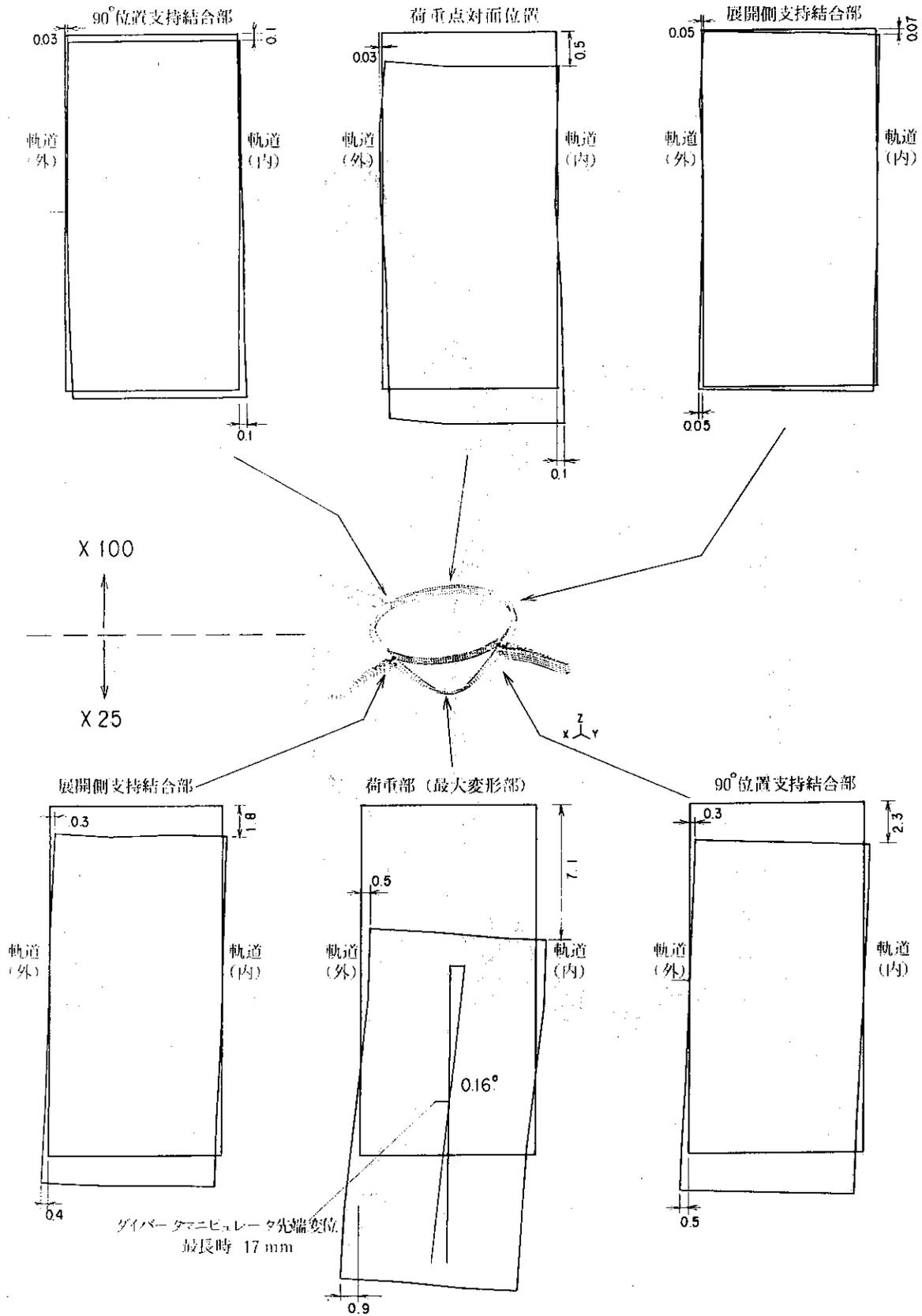


図 5. 1. 4 解析モデル



荷重条件：軌道上45°の位置に垂直方向荷重5トン（ビークル+ダイバータ）
 及び軌道の内側の向きにトン・mを負荷。軌道自重は考慮されていない。

図5. 1. 5 軌道の変形図



荷重条件：軌道上45°の位置に垂直方向荷重5トン（ピークル+ダイバータ）
 及び軌道の内側の向きにトン・mを負荷。軌道自重は考慮されていない。

図5.1.6 軌道各部の断面変形

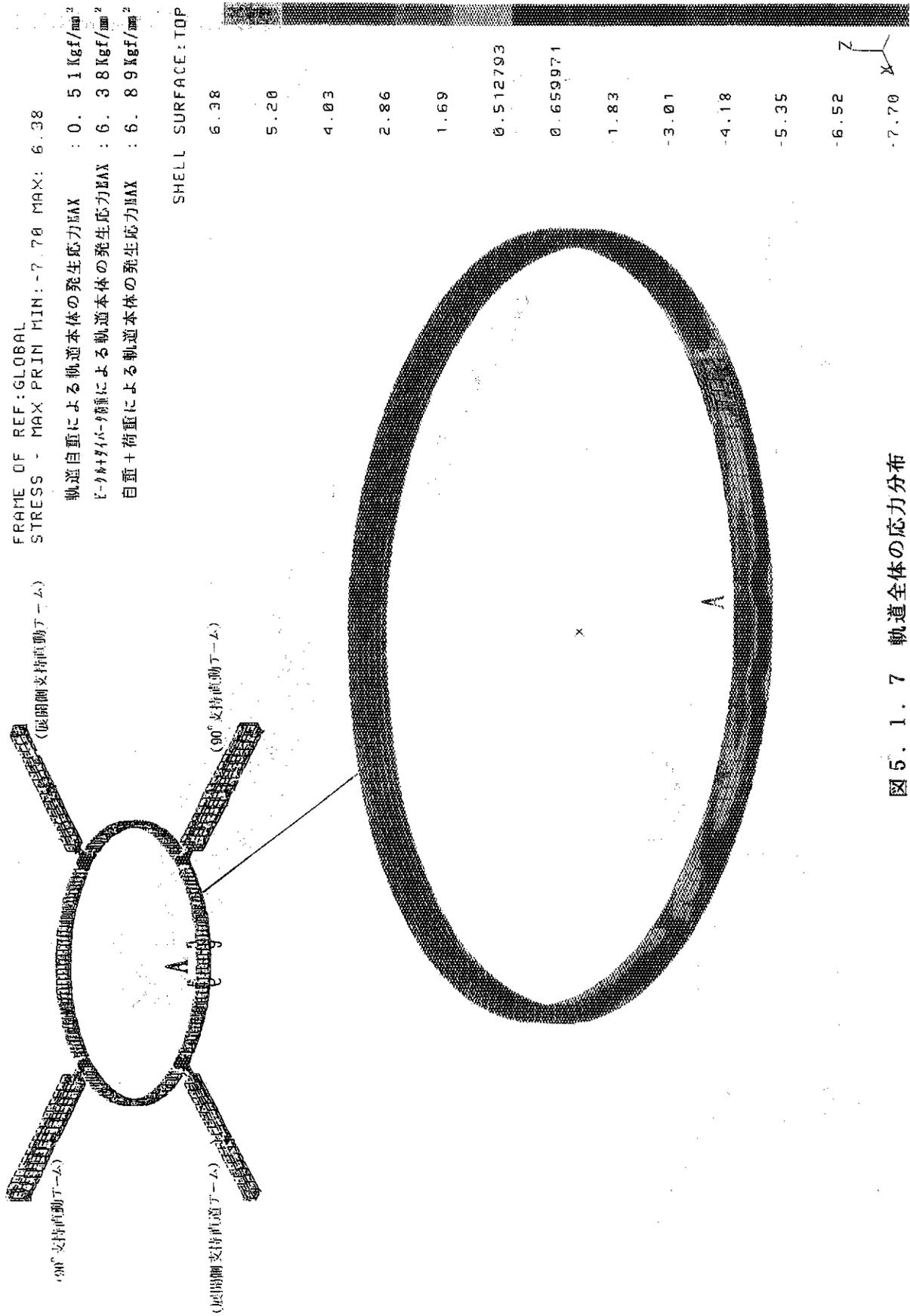


図 5. 1. 7 軌道全体の応力分布

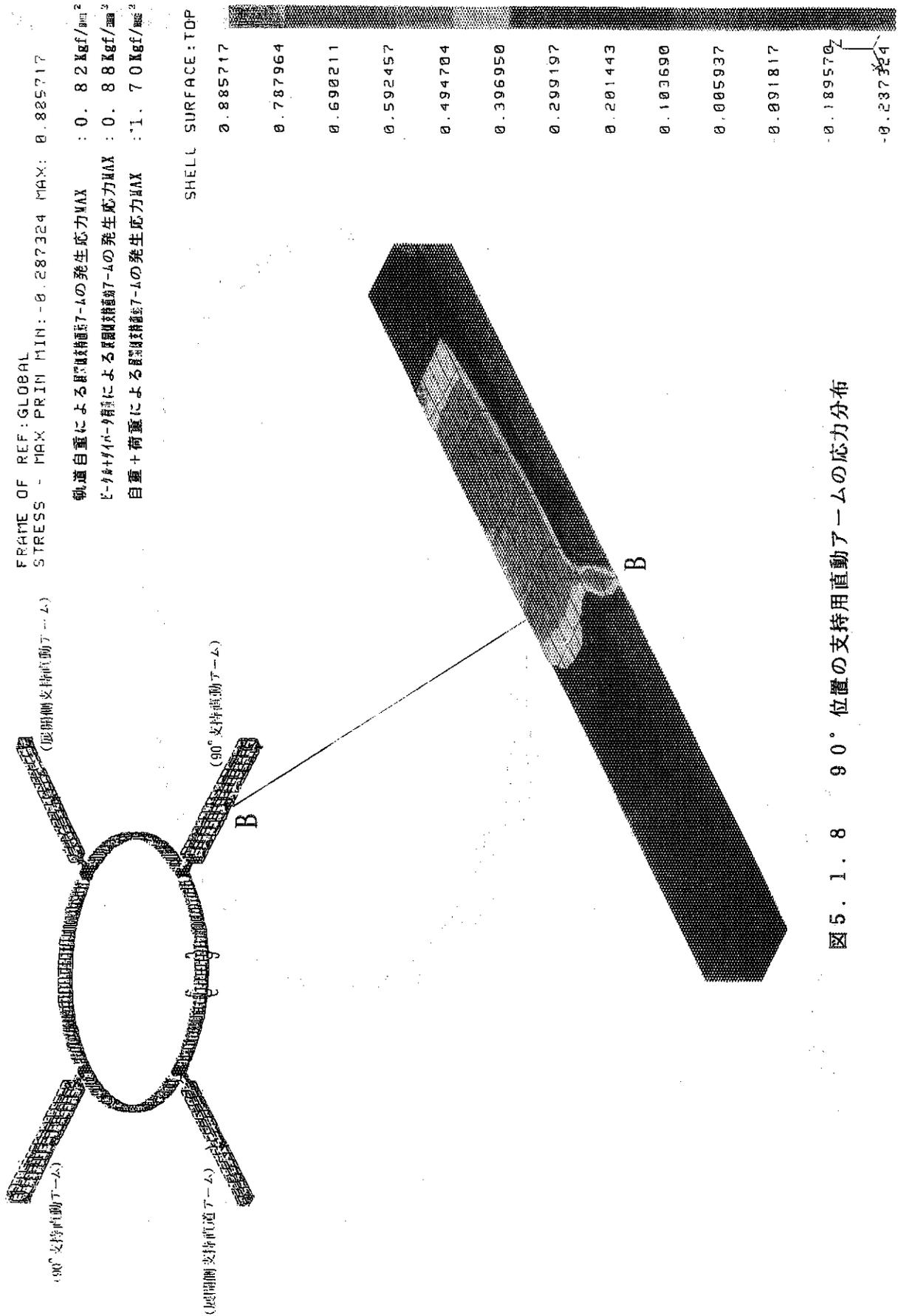


図 5. 1. 8 90° 位置の支持用直動アームの応力分布

FRAME OF REF: GLOBAL
 STRESS - MAX PRIN MIN: -0.807956 MAX: 1.45
 軌道自重による90° 軌道軸組7-4の発生応力MAX : 1. 18 Kgf/mm²
 E-90° パーテ種による90° 軌道軸組7-4の発生応力MAX : 1. 45 Kgf/mm²
 自重+荷重による90° 軌道軸組7-4の発生応力MAX : 2. 63 Kgf/mm²

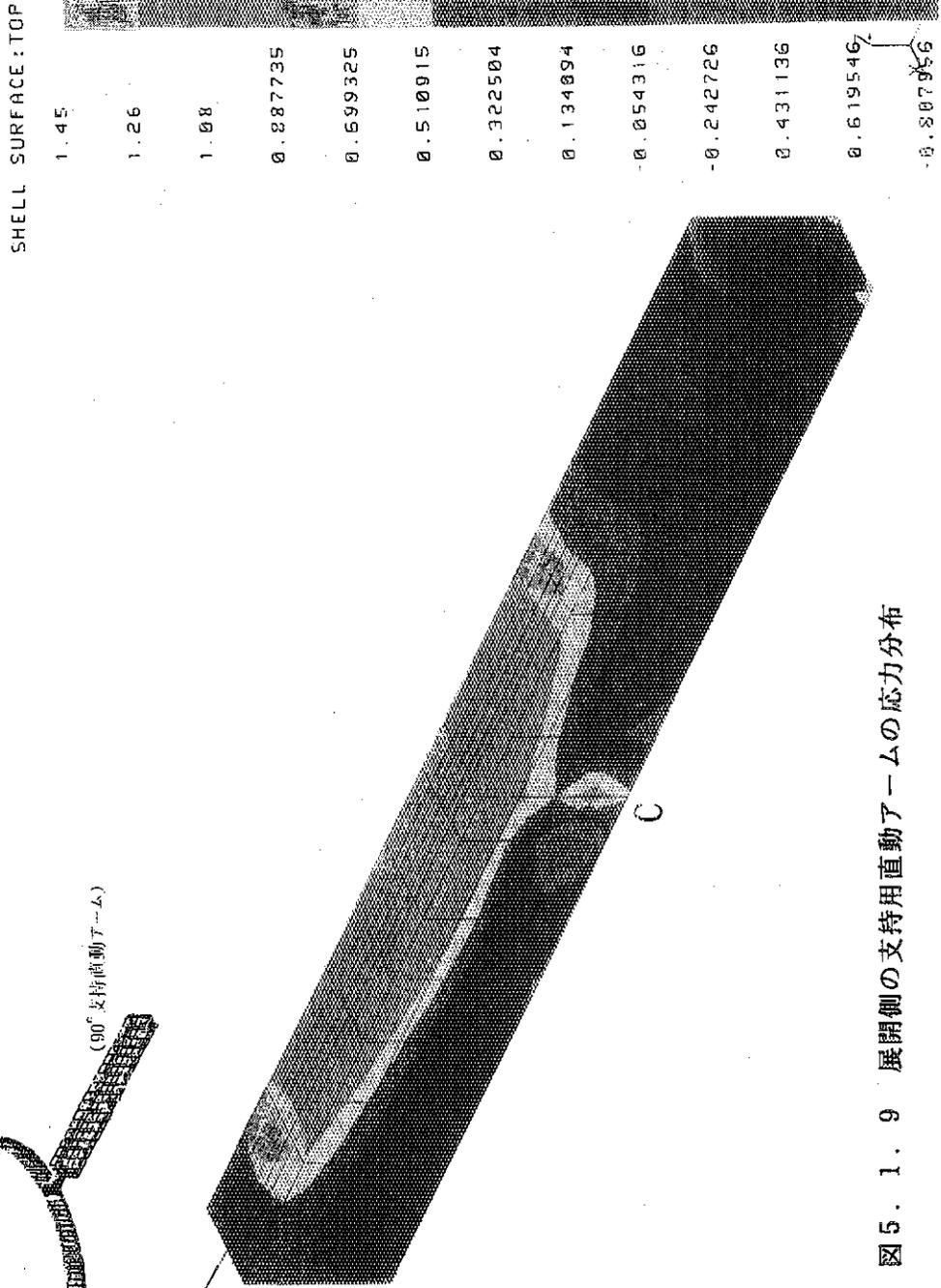
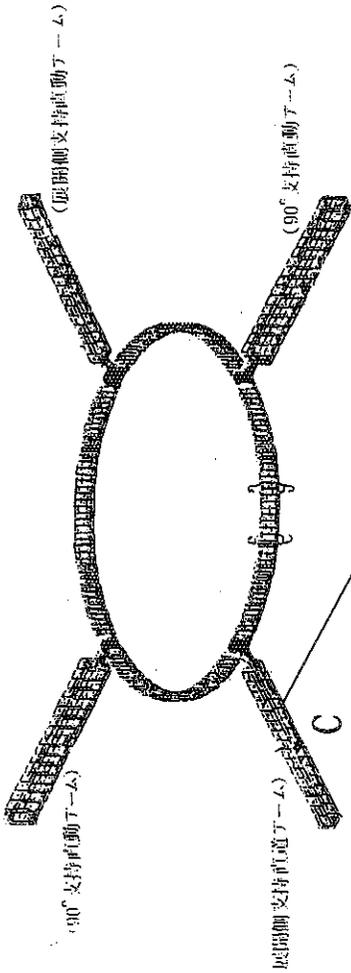


図5. 1. 9 展開側の支持用直動アームの応力分布

5. 2 ダイバータの位置決め制御

ダイバータは2. 5節で示したように搬送中は炉内コンポーネントとの干渉を回避するためにギャップを20 mm以上確保し、最終設置時には隣接するダイバータ間のギャップを0. 5 mmと設定している。これらの制約条件を解決するため、ここではダイバータ交換用マニピュレータのエンドエフェクター（手先部）に搭載された数種類のセンサーを用いたダイバータの位置決め制御について検討した。

5. 2. 1 ダイバータの搬送・位置決め時における基本的考え方

図5. 2. 1にダイバータのエンドエフェクターに設置された外界検出センサーの配置とエンドエフェクターの自由度構成を示す。

- (1) ダイバータ交換用マニピュレータのエンドエフェクターに取り付けた外界検出用のセンサーを用いて第1壁等の炉内構造物との距離を監視しながら、マニピュレータを動作させて炉内構造物との衝突を回避する。
- (2) 外界検出用のセンサーによる炉内構造物との距離計測が十分でない場合は、炉内構造物との距離が十分に取れる範囲でティーチングプレイバック動作を行う。
- (3) ダイバータの挿入あるいは引抜時は後述するエンドエフェクターの揺動軸（ α 軸）及び回転軸（ β 軸）のトルク検出機能と外界検出用のセンサーを用いてセルフロックがかからないように監視・動作させる。

5. 2. 2 外界検出センサー及びセンシング機能

(1) 超音波距離センサー

以下に示す4つのセンシング機能として使用する。

機能①：ダイバータ撤去時の搬送されているダイバータのトーラス方向の位置及び回転角（ β 軸回り）、及びエンドエフェクターとダイバータとの距離と揺動角（ α 軸回り）の検出

機能②：ダイバータ設置時における設置場所のトーラス方向の位置及び回転角（ β 軸回り）、及びエンドエフェクターとダイバータ設置場所の距離と揺動角（ α 軸回り）の検出

機能③：ダイバータ設置時における設置場所の径方向の位置の検出

機能④：エンドエフェクターの掌の前方と炉内構造物との距離及びエンドエフェクターの相対的な姿勢を検出

(2) 渦流式変位センサーA（掌に設置）

以下に示す2つのセンシング機能として使用する。

機能①：ダイバータにエンドエフェクターを近づけるときにエンドエフェクターとダイバータ板との距離とエンドエフェクターの相対的な姿勢を検出

機能②ダイバータを挿入及び引き抜くときに、エンドエフェクターとダイバータ板との距離とエンドエフェクターの相対的な姿勢を検出

(3) 渦流式変位センサーB (爪に設置)

以下に示す2つのセンシング機能として使用する。

機能①：ダイバータを設置する位置にエンドエフェクターを近づけるとときに、エンドエフェクター内におけるダイバータの周方向の位置とダイバータの回転角 (β 軸回り) の検出

機能②：ダイバータを挿入及び引き抜くときにエンドエフェクターとダイバータのトーラス方向の位置とダイバータの回転角 (β 軸回り) の検出

(4) 渦流式近接センサー (爪の先に設置)

以下に示す2つのセンシング機能として使用する。

機能①：ダイバータを把持するとき、ダイバータの側面の位置を検出

機能②：ダイバータを把持するとき、ダイバータの把持部の穴の位置を検出

(5) 揺動軸 (α 軸) のトルク検出

機能①：ダイバータを挿入あるいは引き抜くとき、セルフロックによる過大なトルクを検出

(6) 回転軸 (β 軸) のトルク検出

機能①：ダイバータを挿入あるいは引き抜くとき、セルフロックによる過大なトルクを検出

5. 2. 3 センシングによるダイバータハンドリングシーケンス

(1) ダイバータ撤去

①エンドエフェクターの掌がダイバータの平面部分と平行になるようにエンドエフェクターを誘導する (図5. 2. 2 (a))。→ティーチングプレイバック

②エンドエフェクターの爪を閉じる (図5. 2. 2 (b) 及び (c))。

→ティーチングプレイバック

③超音波距離センサーにより、撤去されるダイバータのトーラス方向の位置の検出及び撤去されるダイバータとエンドエフェクターの相対距離と傾きを求める (図5. 2. 2 (d))。→超音波距離センサーの機能①を使用

④ ③の検出結果をもとにエンドエフェクターの回転・傾きとトーラス方向の位置を補正する。

⑤把持するダイバータに衝突することなくエンドエフェクターをダイバータ把持位置まで近づく。近づく途中で把持するダイバータとエンドエフェクターが平行になるようにエンドエフェクターの姿勢を補正する (図5. 2. 2 (e) 及び (f))。

→超音波距離センサーの機能④と渦流式変位センサーAの機能①を使用

⑥把持部の穴の位置を検出する (図5. 2. 2 (g) 及び (h))。トーラス方向のセン

シングの時、エンドエフェクターの爪先を揃え、径方向のセンシングの時は把持部の穴の位置を検出する。→渦流式近接センサーの機能①と②を使用

⑦ ③⑥の検出結果をもとにエンドエフェクターの位置を補正してダイバータを把持する（図5. 2. 2 (i)）。

⑧ダイバータを引き抜く（図5. 2. 2 (j)）。

→渦流式変位センサーAの機能②、渦流式変位センサーBの機能②、揺動軸（ α 軸）のトルク検出機能及び回転軸（ β 軸）のトルク検出機能を使用

(2) ダイバータの設置

①エンドエフェクターの掌（ダイバータの平面部分）が隣接するダイバータと平行になるようにエンドエフェクターを誘導する（図5. 2. 3 (a)）

→ティーチングプレイバック

②周方向のセンシングにより隣接ダイバータのエッジの位置とエンドエフェクターとの相対的な傾き角を検出するとともに、隣接ダイバータとエンドエフェクターの相対距離を計測する（図5. 2. 3 (b)）。

→超音波距離センサーの機能②を使用

③エンドエフェクターを径方向に走査して、ダイバータの設置位置の径方向の位置を検出する（図5. 2. 3 (c)）。

→超音波距離センサーの機能③を使用

④ ②③の計測結果と渦流式変位センサーBを用いて把持中のダイバータを設置位置に挿入するときの姿勢を求め、エンドエフェクターの姿勢を補正する

→渦流式変位センサーBの機能①を使用

⑤ダイバータを挿入する（図5. 2. 3 (d)及び(e)）。

→渦流式変位センサーAの機能②、渦流式変位センサーBの機能②、揺動軸（ α 軸）のトルク検出機能及び回転軸（ β 軸）のトルク検出機能を使用

⑥エンドエフェクターの爪を開く（図5. 2. 3 (f)）。

→ティーチングプレイバック

⑦エンドエフェクターを所定の位置に戻す（図5. 2. 3 (g)）。

→ティーチングプレイバック

- ティーチングプレイバック
- ②周方向のセンシングにより隣接ダイバータのエッジの位置とエンドエフェクターとの相対的な傾き角を検出するとともに、隣接ダイバータとエンドエフェクターの相対距離を計測する（図5. 2. 3 (b)）。
 - 超音波距離センサーの機能（2）を使用
- ③エンドエフェクターを径方向に走査して、ダイバータの設置位置の径方向の位置を検出する（図5. 2. 3 (c)）。
 - 超音波距離センサーの機能（3）を使用
- ④ ②③の計測結果と渦流式変位センサーBを用いて把持中のダイバータを設置位置に挿入するときの姿勢を求め、エンドエフェクターの姿勢を補正する
 - 渦流式変位センサーBの機能（1）を使用
- ⑤ダイバータを挿入する（図5. 2. 3 (d) 及び (e)）。
 - 渦流式変位センサーAの機能（2）、渦流式変位センサーBの機能（2）、揺動軸（ α 軸）のトルク検出機能及び回転軸（ β 軸）のトルク検出機能を使用
- ⑥エンドエフェクターの爪を開く（図5. 2. 3 (f)）。
 - ティーチングプレイバック
- ⑦エンドエフェクターを所定の位置に戻す（図5. 2. 3 (g)）。
 - ティーチングプレイバック

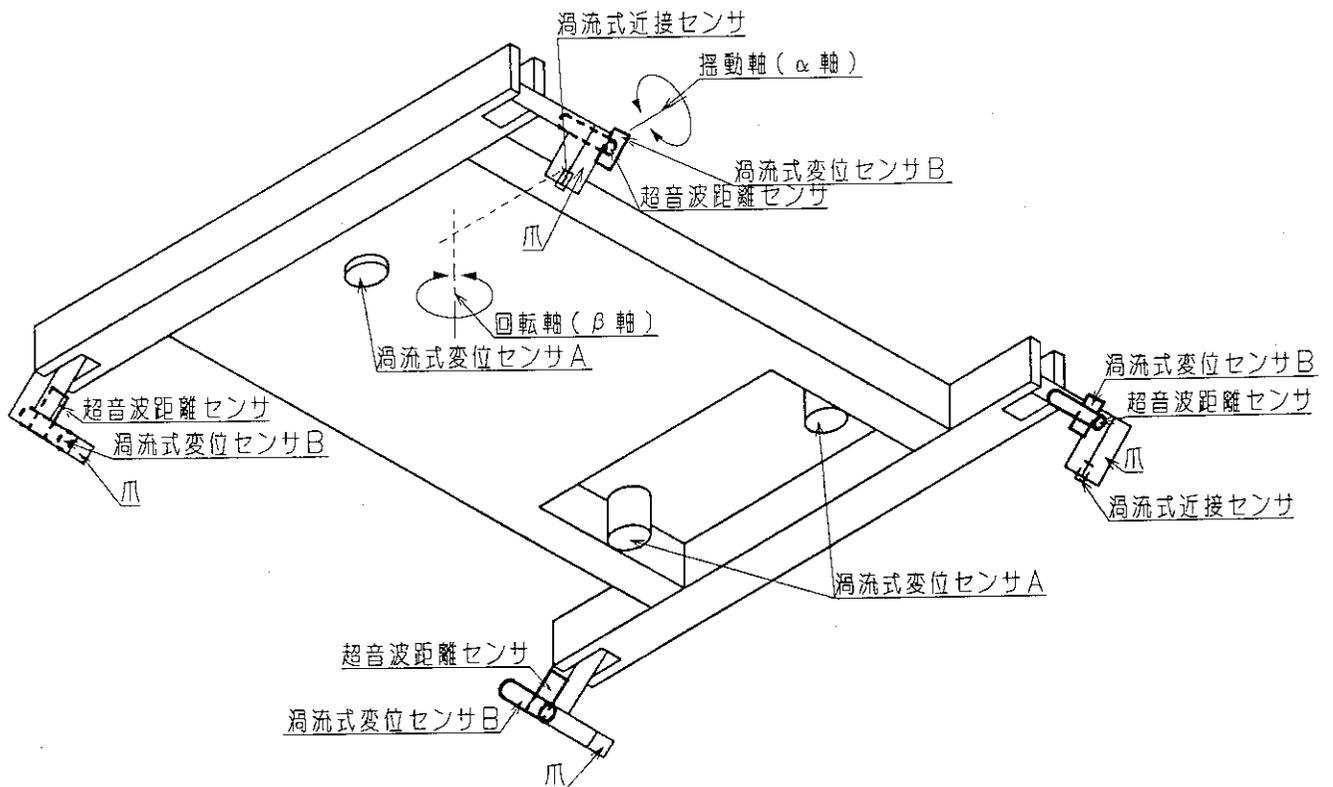
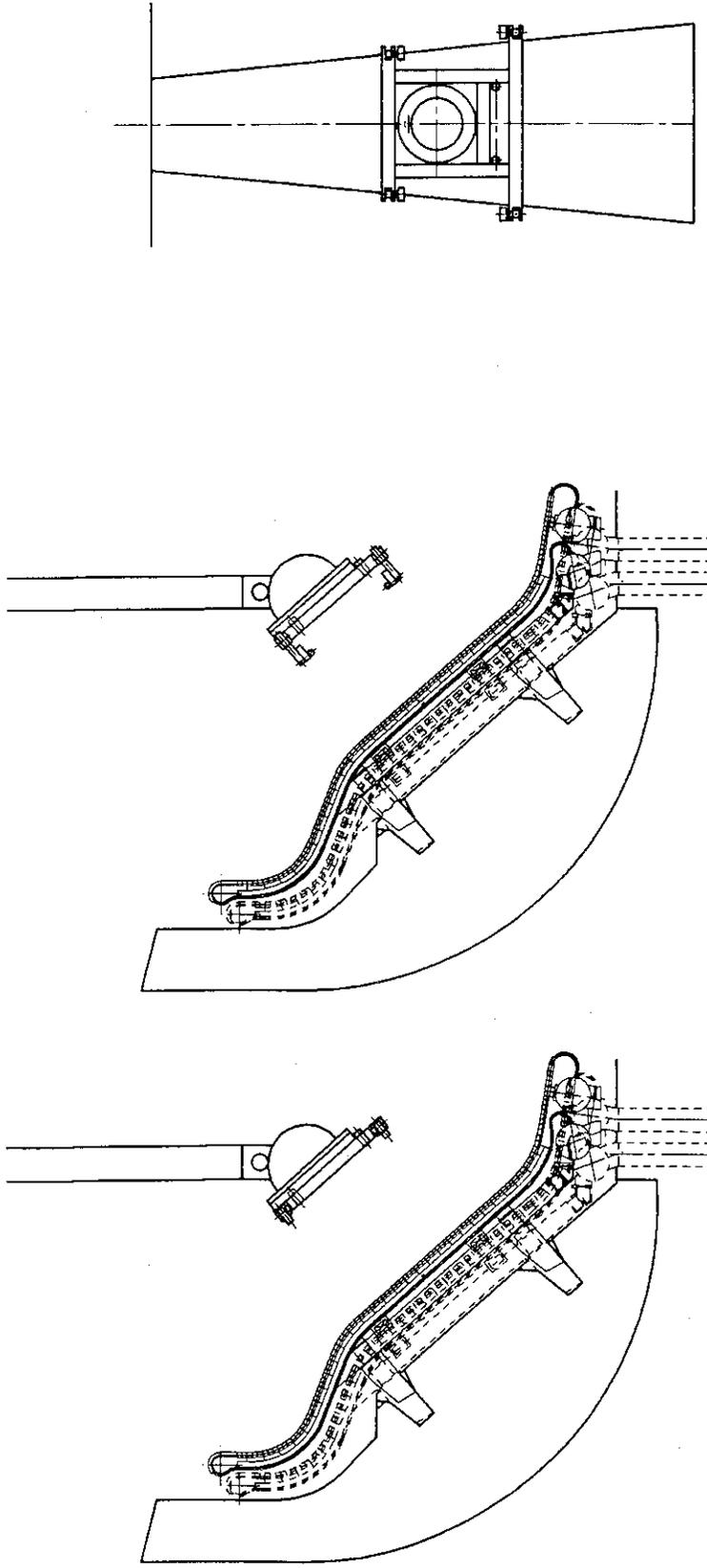


図5. 2. 1 外界検出センサーの配置

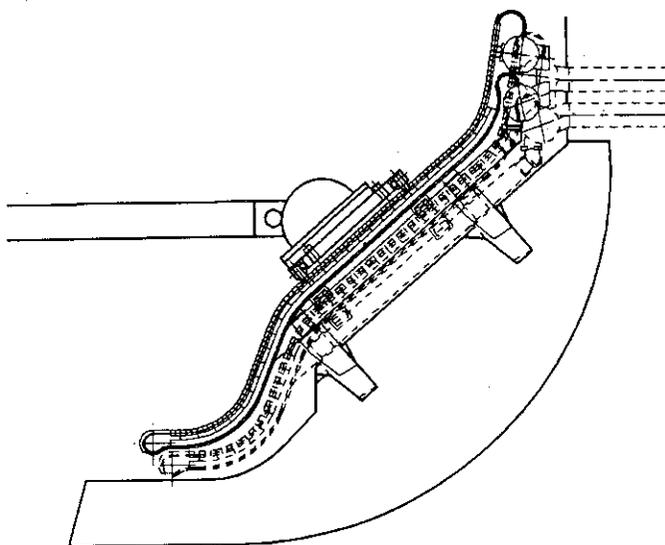


(c) (b)をエンドエフェクタから見た図

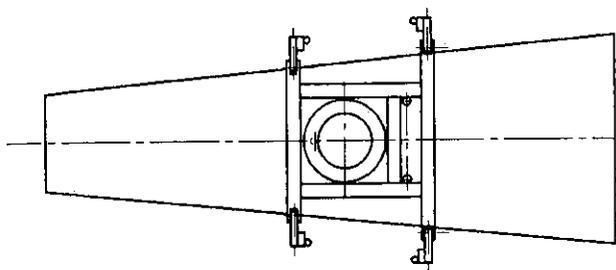
(b) 爪を閉じる

(a) 準備姿勢

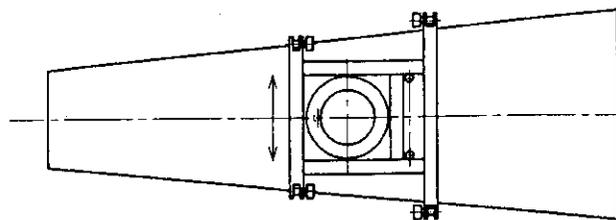
図5. 2. 2 ダイバータ撤去のシーケンス (1/4)



(f) アクセス終点

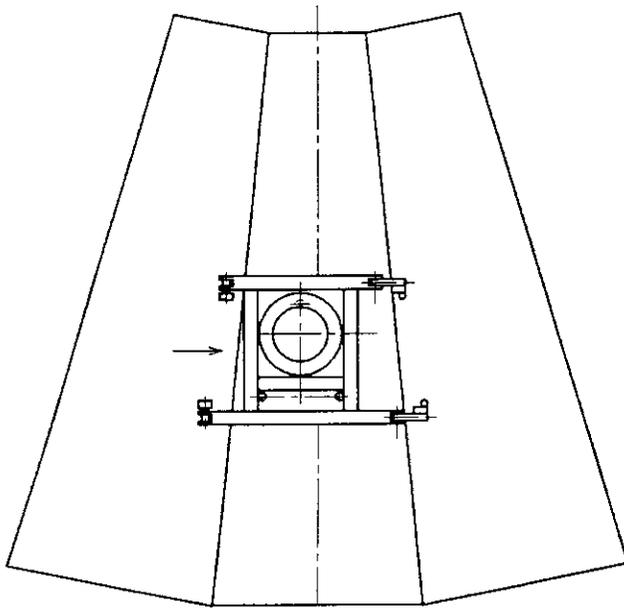


(e) ダイバータへアクセス

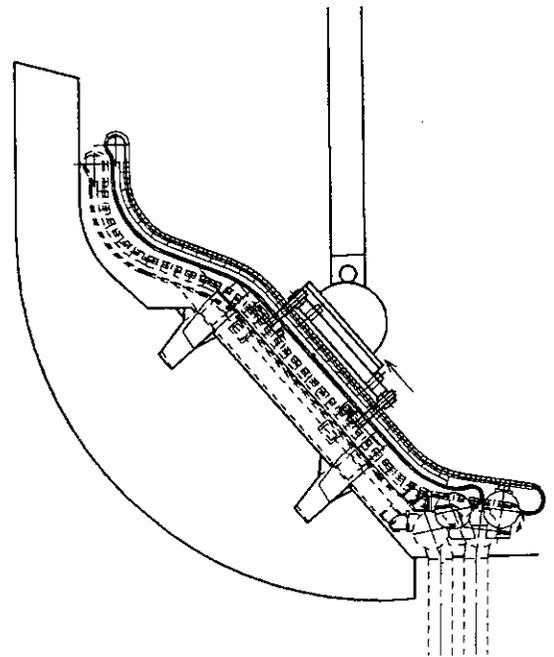


(d) 周方向センシング

図 5. 2. 2 ダイバータ撤去のシーケンス (2/4)

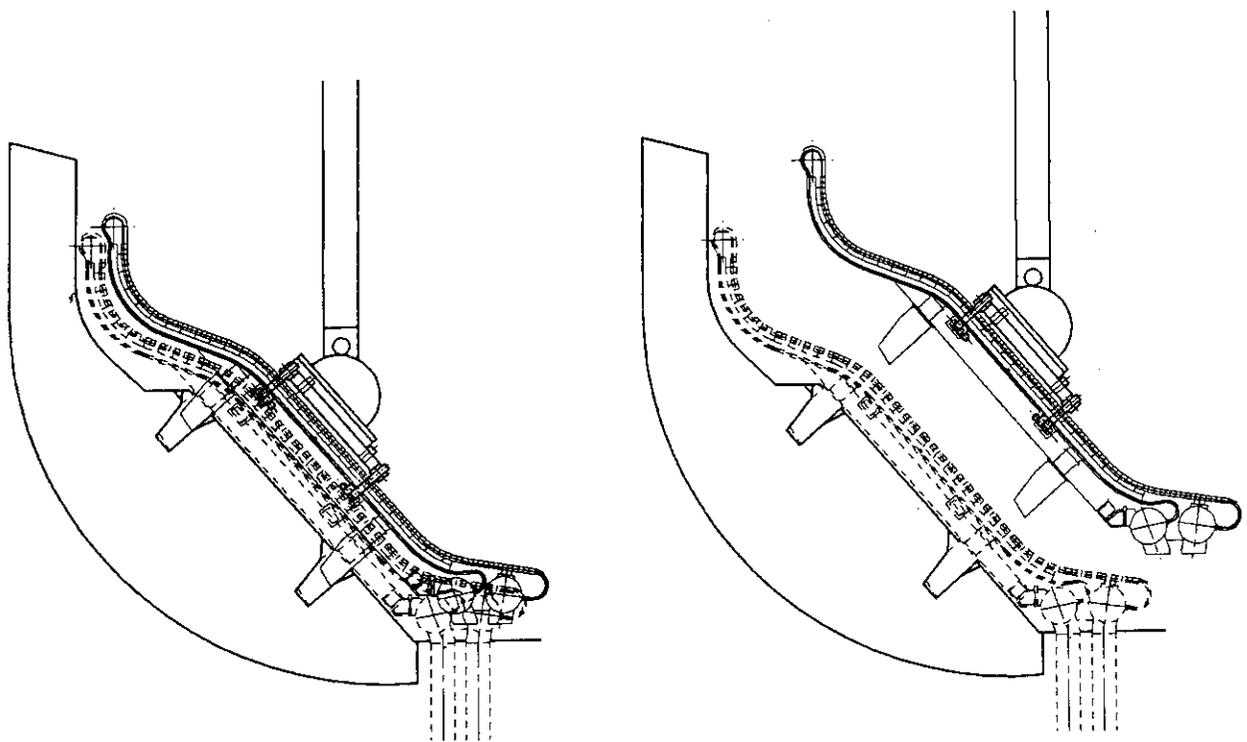


(g) 爪先をそろえる



(h) 把持部(穴)の検出

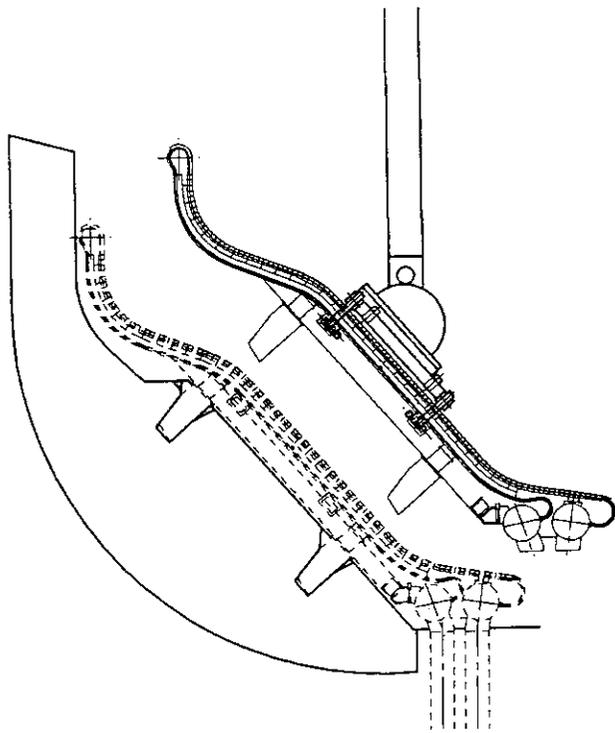
図5. 2. 2 ダイバータ撤去のシーケンス (3 / 4)



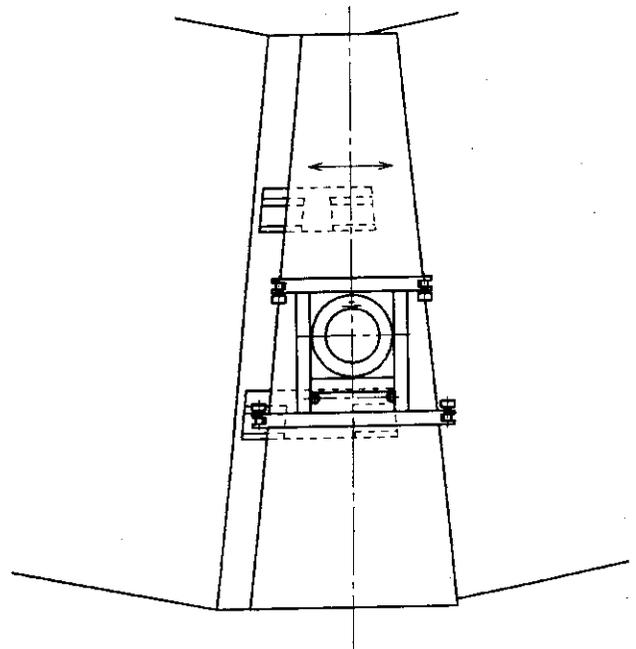
(i) 把持

(j) 引き抜き

図5. 2. 2 ダイバータ撤去のシーケンス (4 / 4)

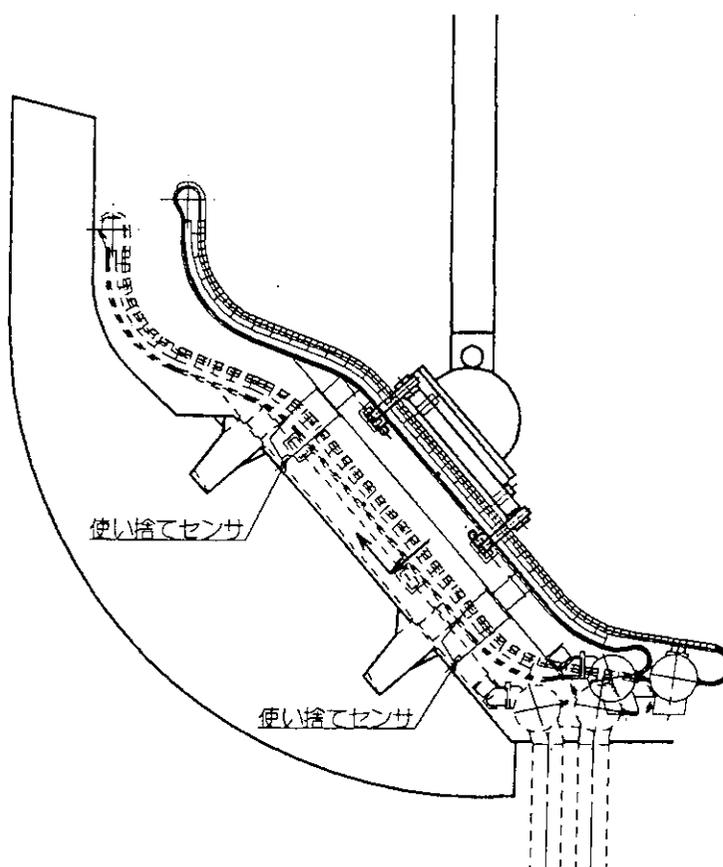


(a) 準備姿勢



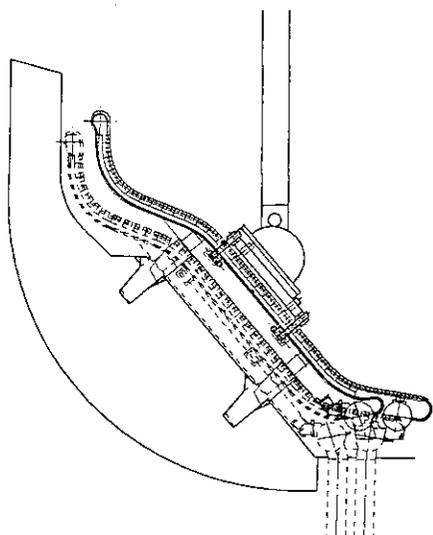
(b) 周方向センシング

図 5. 2. 3 ダイバータ設置のシーケンス (1 / 3)

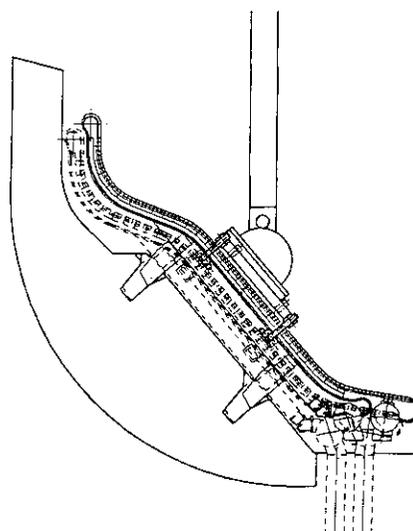


(c) 径方向センシング

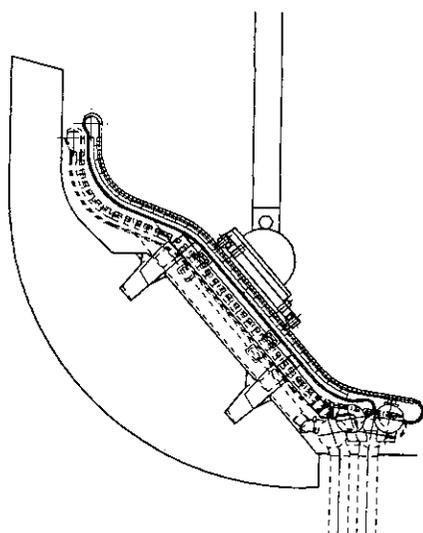
図5.2.3 ダイバータ設置のシーケンス(2/3)



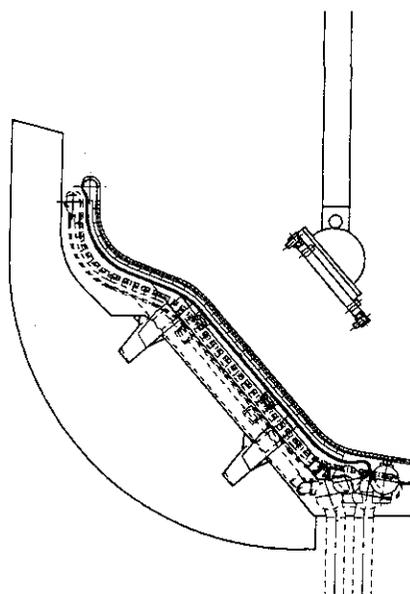
(d) 挿入中



(e) 挿入終了



(f) 爪を開く



(g) エンドエフェクタ退避

図 5. 2. 3 ダイバータ設置のシーケンス (3 / 3)

5.3 配管溶接・切断用レーザー光の長距離伝送

3.1節のダイバータのメンテナンスシナリオで示したように、ダイバータ配管の溶接・切断は配管の内側よりCO₂レーザーにより行う。レーザー発振器から加工点（溶接・切断位置）までの距離が短いほどレーザーのエネルギー損失は少なく済むが、レーザー発振器を炉本体室内に設置した場合、プラズマ運転中の漏洩磁場等による外乱で故障する可能性があるため炉本体室の外側に設置せざるを得ない。ここでは、レーザー発振器を炉本体室の外側に設置し、加工点において所用の出力を提供するレーザー光の長距離伝送技術についての検討結果を報告する。

5.3.1 レーザー発振器の設置場所

ダイバータは上下にあるので、レーザー発振器1つから上下の配管までレーザーを伝送する方法と、2つのレーザー発振器を上側の配管用と下側の配管用に1つずつ用意した方法の2案について検討した。図5.3.1と図5.3.2に建屋の縦断面図を示す。図においてH33の部屋に発振器を1台設置し、上下の配管に伝送する方法とH32の部屋とT47の下の部屋（W16）に1台ずつ設置して上下配管に別々に伝送する案について検討し、その結果を表5.3.1に示す。

表5.3.1 レーザー発振器の設置場所と伝送距離

発振器の数	発振器の設置場所		伝送距離		反射ミラー数
			上	下	
1台	H33		上	140m	9
			下	130m	11
2台	上	H32	110m		8
	下	W16	75m		10

（注）反射ミラー数はコリメータを構成する枚数を含めていない。

5.3.2 レーザー光の長距離伝送系の設計

前節の検討結果によると発振器の設置をいずれの場所としても100m前後の伝送距離が必要となる。この長距離伝送を可能とする概略の設計を以下に示す。

（1）ビーム径拡大による長距離伝送

レーザービームは発振器出力におけるビーム径に反比例するビーム拡がり角度により拡がっ

ていく。一方、ビーム伝送に使用できる空間には制約があるので、伝送中のビーム径は小さく抑える必要がある。

ここで、ビーム伝送に使用できる許容空間の径を D (mm)、発振器の出口でのビーム径を d_0 (mm)、伝送距離を L (m)、ビーム拡がり角度を ϕ (mrad) とすると、伝送可能な条件は以下のようになる。

$$D > d_0 + L\phi$$

ここで、一般的にビーム伝送で使用する値として、

$d_0 = 50$ mm、 $\phi = 2$ mrad、 $D = 200$ mm とすると、
条件式を満たす L は、 $L = 75$ m

一方、 $d_0 = 100$ mm、 $\phi = 1$ mrad、 $D = 200$ mm とすると、
条件式を満たす L は、 $L = 100$ m となる。

(2) コリメータ (ビーム整形光学系) の配置

伝送途中で許容空間を超えるビーム径を小さくするためにコリメータを設置する必要がある。許容空間 ϕ を炉本体室の外、炉本体室内、配管内でそれぞれ以下のように設定するとコリメータを含めたビーム伝送系は、図5.3.3のようになる。

- ◎炉本体室の外： 許容空間 $\phi = 200$ mm、伝送距離 $L = 80$ m
- ◎炉本体室内： 許容空間 $\phi = 100$ mm、伝送距離 $L = 40$ m
- ◎配管内： 許容空間 $\phi = 60$ mm*、伝送距離 $L = 10$ m

*100A配管を想定

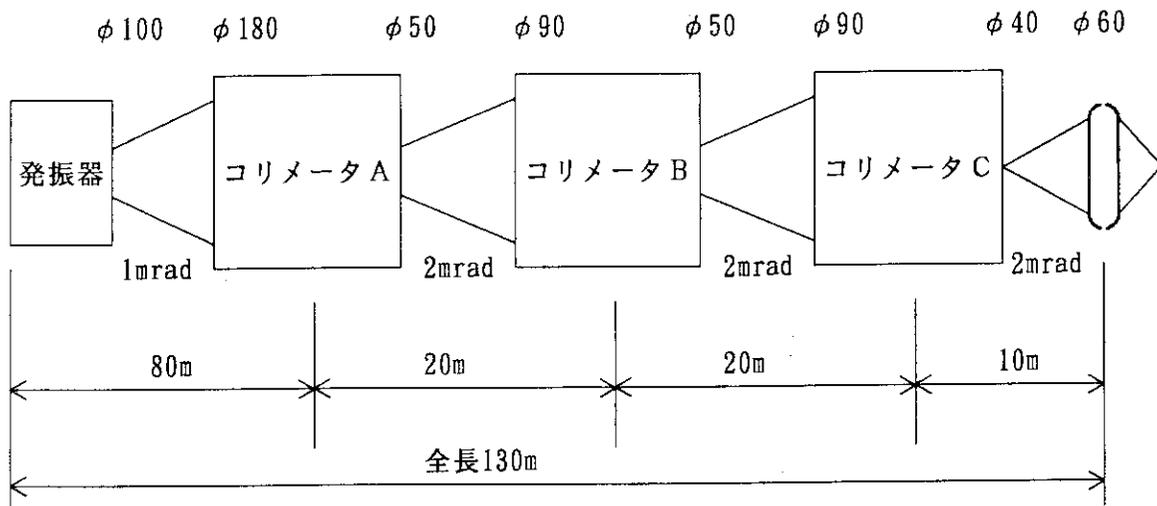


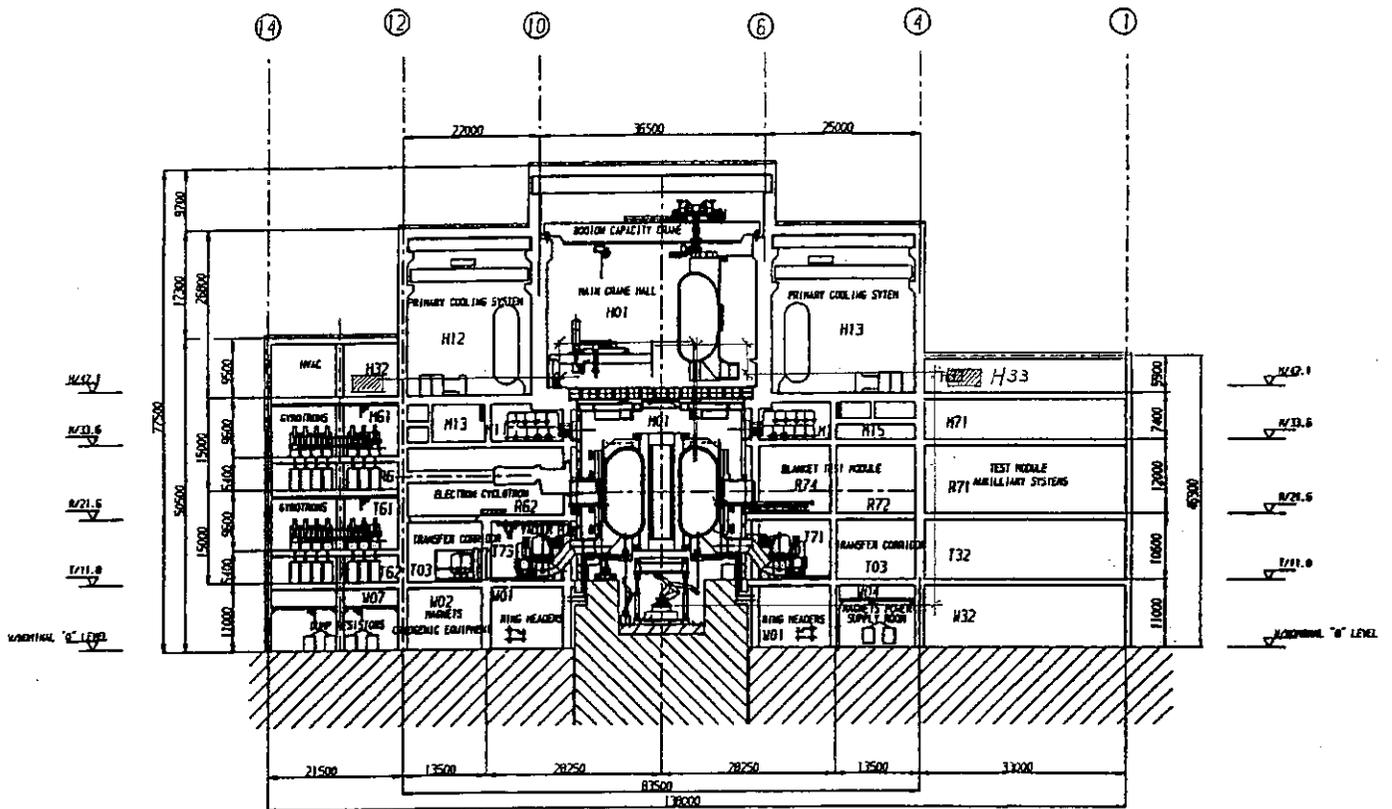
図5.3.3 レーザービームの長距離伝送系

(3) 反射ミラーによる出力低下

長距離伝送においては、5.3.1節で示したように反射ミラーは11枚必要となる。反射ミラーの1枚当たりの減衰率を η_0 、反射ミラー枚数をNとすると、全体の出力の減衰 η は

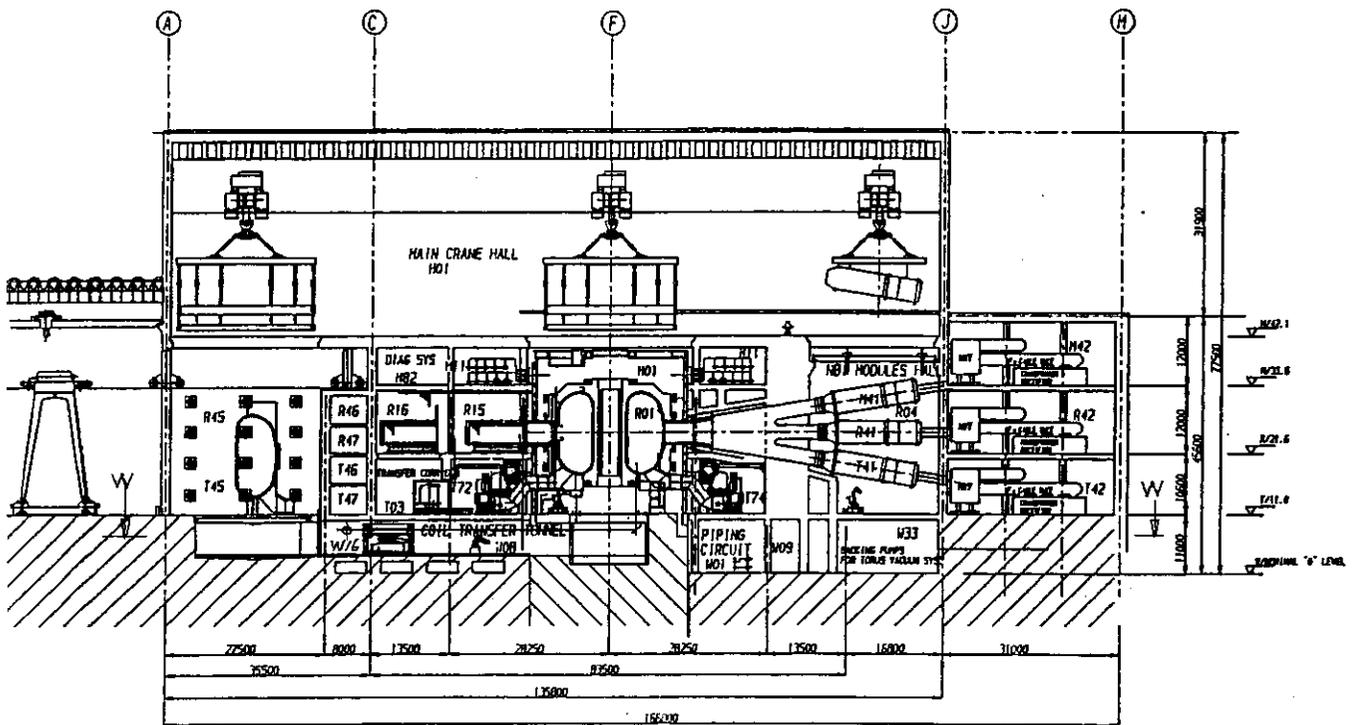
$$\eta = \eta_0^N \quad \text{で表される。}$$

銅製の反射ミラーは $\eta_0 \approx 0.98$ なので、 $\eta \approx 0.8$ となる。配管の溶接・切断を行う加工点に必要なレーザーのパワーは第6章で示すとおり約5KW必要なので、レーザー発振器の出口でのパワーは約6.2KW必要となる。



SECTION A-A

図 5. 3. 1 レーザー発振器の設置場所 (1)



SECTION B-B

図 5. 3. 2 レーザー発振器の設置場所 (2)

5. 4 配管の切断（オプション）

ダイバータ配管のメンテナンス時の切断はレーザーにより配管の内側より切断する方法を採用している。レーザーによる概略の配管切断方法は、レーザービームを配管表面に照射し、配管表面を局所的に溶融させ、アシストガスにより溶融部を吹き飛ばして切断される。そのため、切断表面は溶融物の再付着により部分的に凹凸となってしまう。切断された配管を再使用する場合、再溶接のために切断部を開先加工しなければならない問題点がある。ここではレーザーによる切断方式のオプションとして切断面が非常に良好で、開先加工が不要なディスクカッターにより配管の内側より切断する方式について検討した。

5. 4. 1 ディスクカッターの切断原理

配管の内側より切断するディスクカッターの切断原理を図5. 4. 1に示す。図に示すように円盤状のカッター刃を配管内表面に押し付け、回転させながら更にカッター刃の押し付け力を高めていき、配管に剪断力による滑り変形を起こさせて切断する。

5. 4. 2 カッター刃押し出し機構

図5. 4. 2にカッター刃押し出し機構の原理を示す。図5. 4. 2（1）のように回転軸中心とカッター刃中心とを一致させておき、図5. 4. 2（2）、（3）のように順次、偏心軸を回転させるとカッターが回転軸から離れる方向に押し出されていく。カッター刃中心の軌跡は、図5. 4. 2（4）のようになる。回転軸と偏心軸を独立な2つのモータで駆動すれば、ストロークの制御はカッター刃の回転と独立にできるが、駆動部が大型化する。一方、回転軸と偏心軸の回転を同一のモータで駆動し、両者への回転数を伝達する歯車比を少し異なるようにして相対的な偏心軸の回転を発生させることにより、カッター刃の押し出しも可能である。この場合、カッター刃押し出しのストロークを回転とは独立には制御できないが、駆動部がコンパクトになる。ここでは、駆動部のコンパクト化の観点から、回転軸と偏心軸の回転を同一のモータで駆動する方式とした。

図5. 4. 3にディスクカッター式切断機の駆動部分を示す。駆動モータからのトルクを伝える中間軸（1）、ベベルギア（1）、回転軸に固定されたベベルギア（2）、ギア（1）、カッター刃送り軸（偏心軸）に固定されたアーム、回転軸の回りに設けられたアームを回転させるためのギア（4）及びギア（1）からのトルクをギア（4）に伝えるための中間軸（2）（ギア（2）及びギア（3）が固定されている）である。ギア（1）とギア（4）の歯数をわずかに変えることにより、カッター刃送り軸（偏心軸）が回転軸に対して相対的に回転するようになっている。

ここで回転軸を回しているギア（1）と偏心軸を回しているギア（4）の歯車比を仮に50：51と設定した場合のカッター刃の動きを図5. 4. 4をもとに以下に説明する。

①回転開始時（管内挿入時）

カッター軸／カッター刃送り軸、カッター刃送り軸／回転軸の偏心量が等しいため、カッター刃と回転軸の軸心は一致している。

②管内表面に接触

回転軸が3回転した状態では、ギア(1)とギア(4)の歯車比を50:51に設定しているため、カッター刃送り軸の回転数は、 $3 \times 50 / 51 = 2.94$ 回転である。すなわち、カッター刃送り軸の回転軸に対する相対的な回転数は約、 $3 - 2.94 = 0.06$ 回転であり、その角度は $360 \times 0.06 = 21^\circ$ である。

この時のカッター刃の中心は、点P(カッター刃送り軸中心)を中心として点O(回転軸中心=開始時カッター刃中心)から約 21° 回転した位置にある。この時のストロークは $OQ = S_1$ で表される。

③切断(破断)時

回転軸が12回転すると、カッター刃送り軸は $12 \times 50 / 51 = 11.76$ 回転することになり、カッター刃送り軸に対する相対回転数は $12 - 11.76 = 0.24$ 回転となり、その角度は約 85° となる。この時、カッター刃中心は点Pを中心として約 85° 回転した位置Qにきており、カッター刃のストロークは $OQ = S_2$ となる。

④最大ストローク時

回転軸が25.5回転すると、カッター刃送り軸は $25.5 \times 50 / 51 = 25$ 回転し、カッター刃送り軸の相対回転数は0.5回転となり、その角度は 180° である。すなわち、カッター刃中心は点Pを中心として点Oと相対した位置にきており、カッター刃のストローク(S_3)はカッター軸/カッター刃送り軸偏心量の2倍になっている。

⑤刃ストローク戻り途中

回転軸が更に回転していくと、カッター刃中心(Q)と回転軸中心(O)とのなす角度は逆に 180° より小さくなっていく。カッター刃のストローク OQ は、それにつれて小さくなり、最終的にはQはOの位置に復帰する。

以上のように本設計のディスクカッター切断装置は、回転軸をある一定角度で回転させながら、同時にカッター刃送り軸をわずかに減速させて回転させ、これにより生じるカッター刃送り軸の回転軸からの相対的な偏心により、カッター刃をストロークさせて、管内壁に押し付けることにより切断する。

5.4.3 回転軸回転数とカッター刃ストロークの関係

回転軸と偏心軸の回転を同一のモータで駆動する場合の回転軸回転数とカッター刃ストロークの関係は以下ようになる。

回転軸と偏心軸の歯数比を $n_1 : n_2$ とすると、回転軸が1回転した時の偏心軸の回転数は n_1 / n_2 であるので、偏心軸の回転軸に対する相対的な回転数は $(1 - n_1 / n_2)$ となる。従って、回転軸の回転数をNとすると、偏心軸の相対的な回転数は $(1 - n_1 / n_2)$ である。

一方、偏心軸の偏心量を e (mm) とすると、偏心軸が θ ($^\circ$) 回転した時、カッター刃のストローク y (mm) は、 $y = 2e \cdot \sin(\theta / 2)$ となる。従って、回転軸の回転数Nとカッター刃ストローク y (mm) との関係は次式のようになる。

$$y = 2e \cdot \sin [180 (1 - n_1 / n_2) N]$$

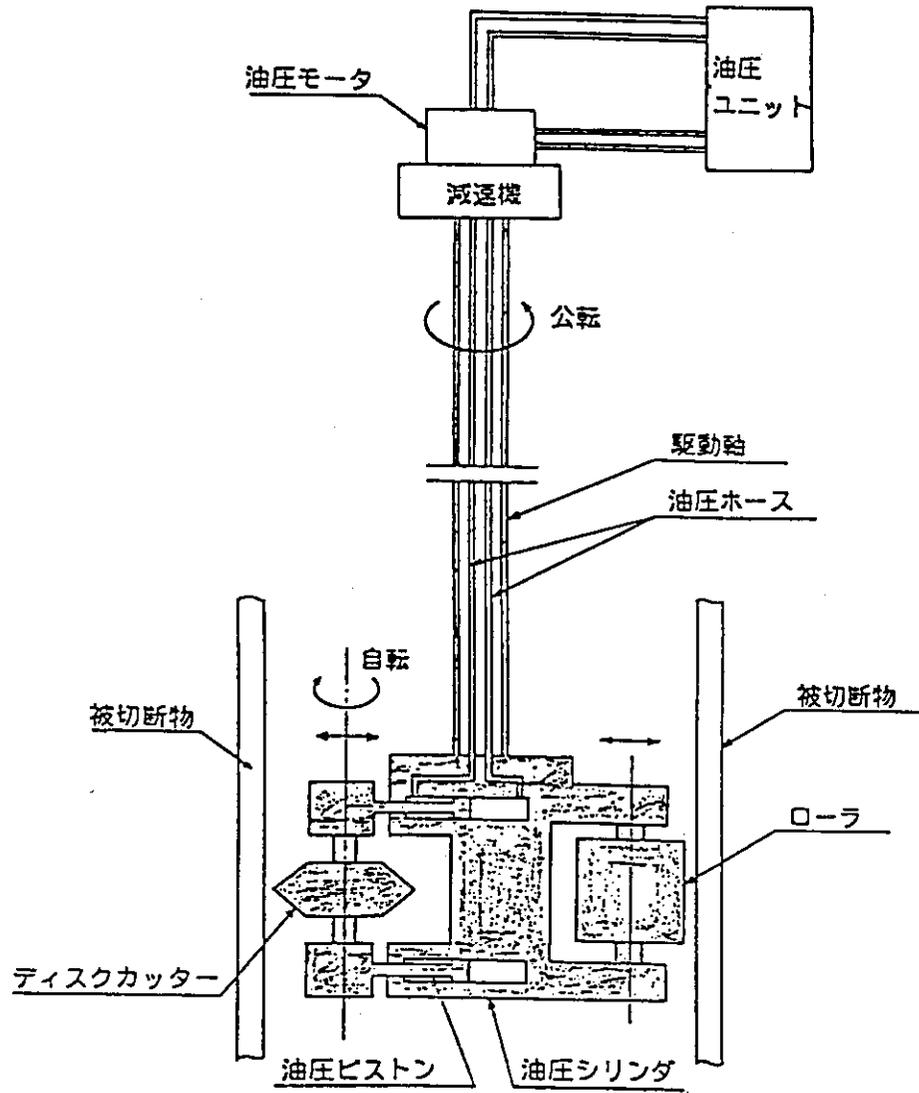


図 5. 4. 1 ディスクカッターの切断原理

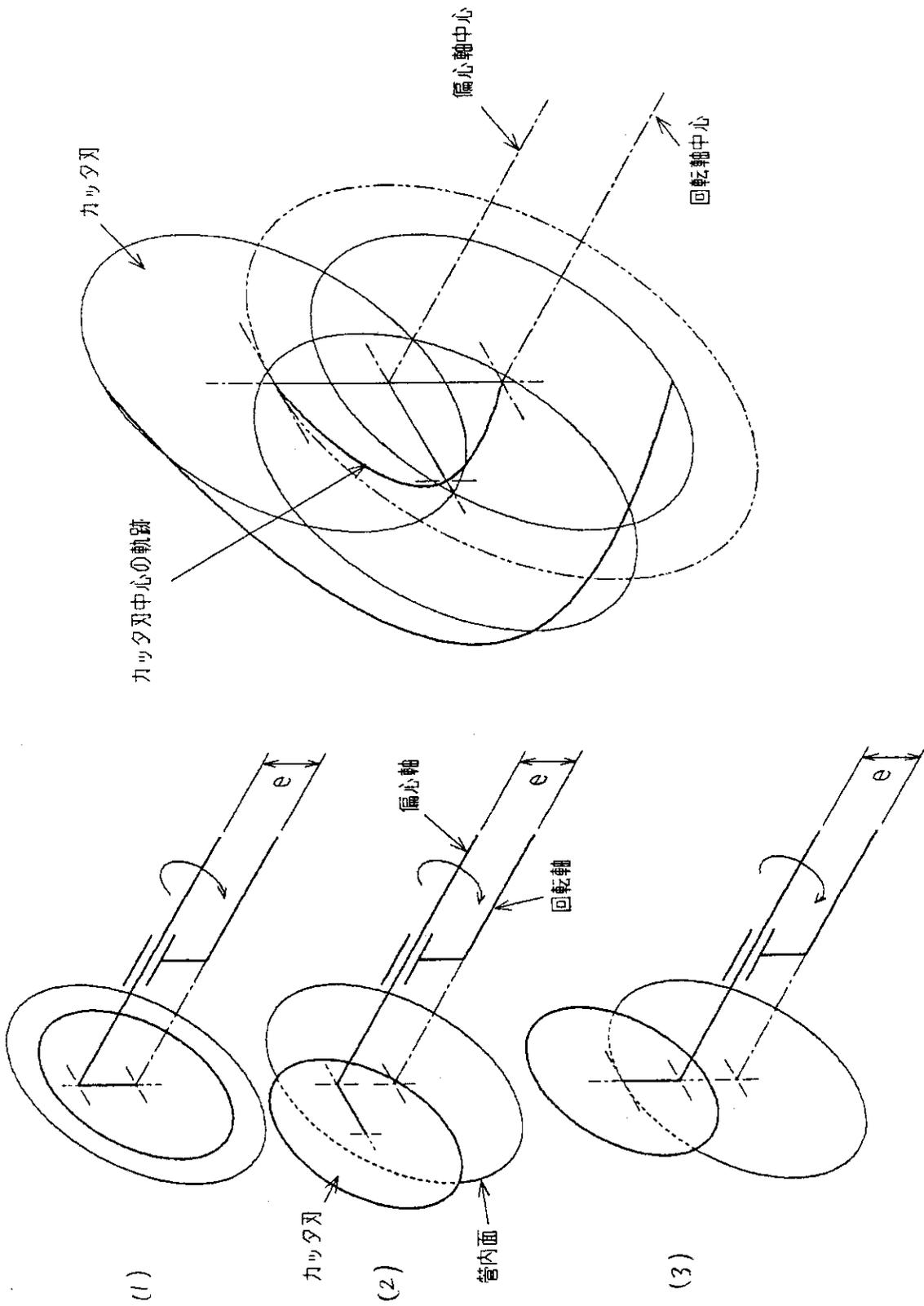
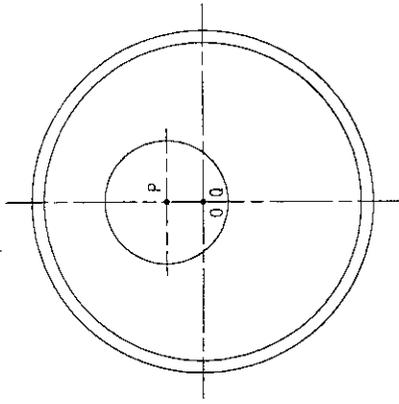
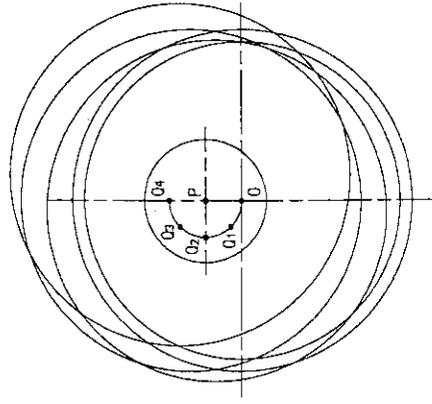


図 5. 4. 2 カッター刃の押し出し機構の原理

回転開始前



カッター刃最大ストローク時



回転軸、偏心軸、カッター刃中心軸
の位置の変化

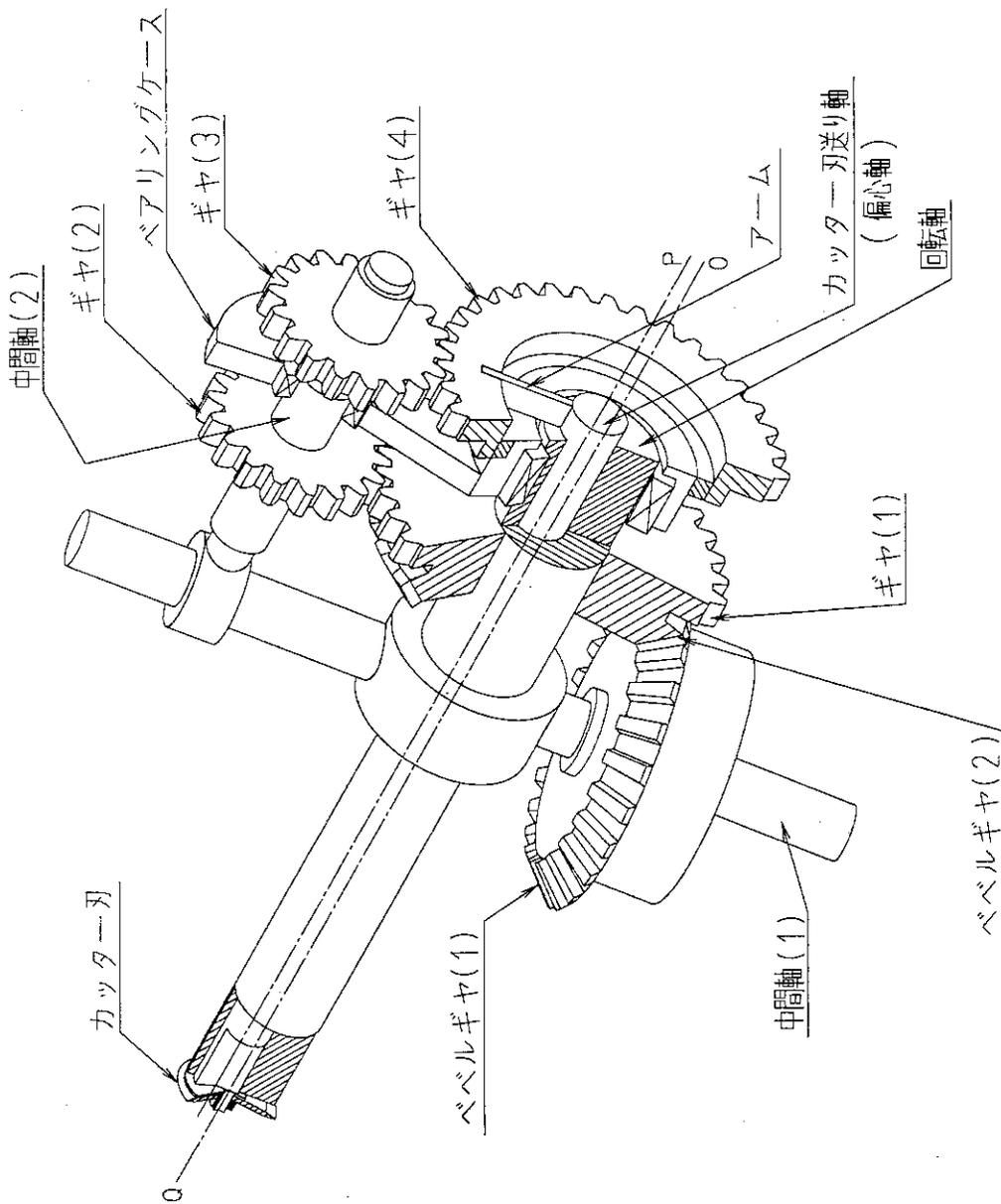
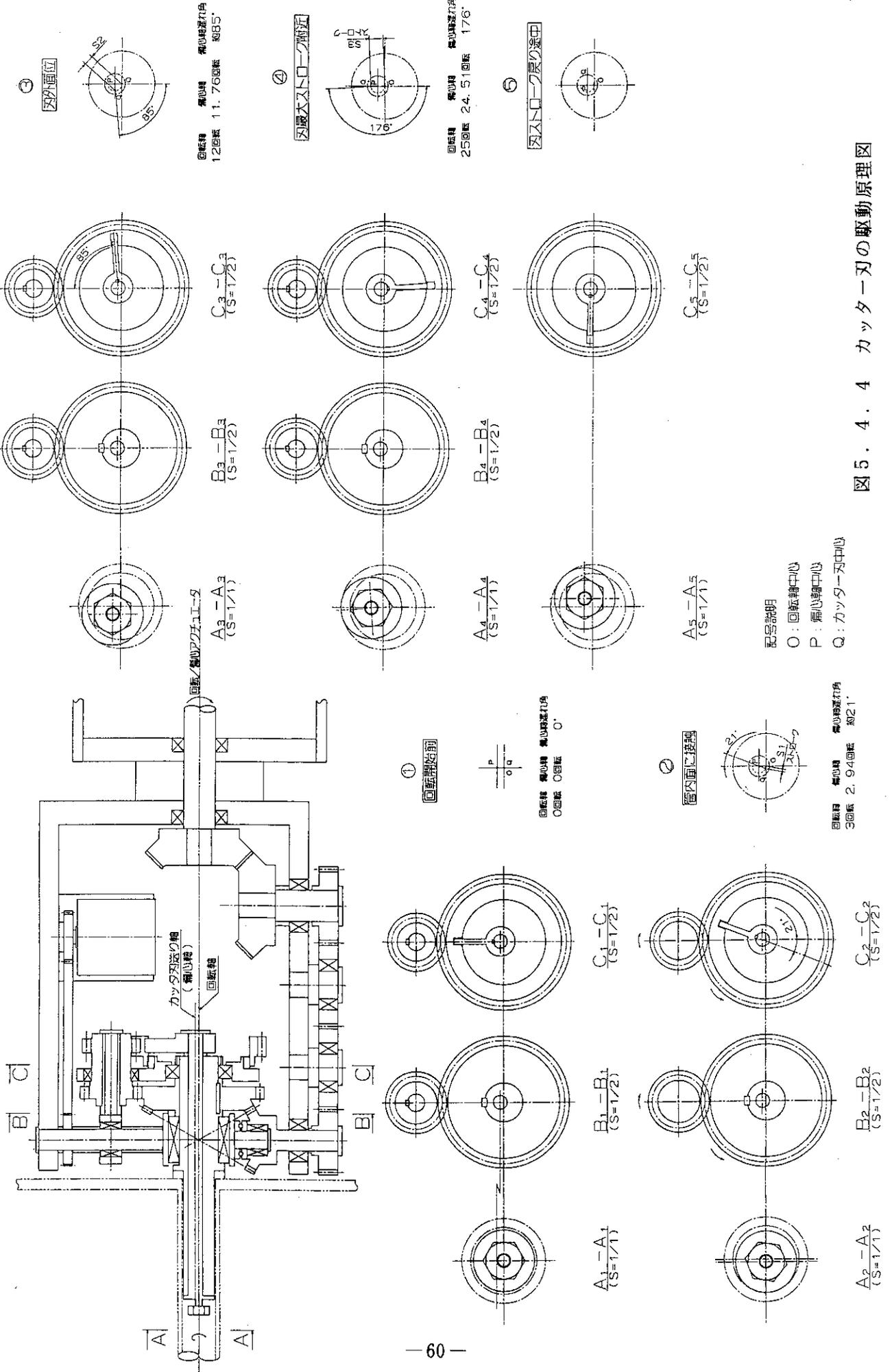


図5. 4. 3 カッター刃の駆動部概略図



5.5 配管の溶接（オプション）

ダイバータ配管のメンテナンス時の溶接はレーザーにより配管の内側より溶接する方法を採用している。ここではレーザーによる溶接方式のオプションとしてTIG溶接により配管の内側より溶接する方式について検討した。

5.5.1 TIG溶接ヘッドの構造

TIG溶接ヘッドの構造を図5.5.1に示す。ヘッド部には、溶接トーチの回転駆動機構、フィラーワイアドライブ、芯出し機構を設けている。芯出し機構は、溶接トーチの上下2ヶ所に設け、それぞれの位置で周方向に3ヶ所ボールベアリングをバネで管内面に押し付ける構造としている。TIGトーチと反対側にファイバースコープを取り付け、モニターで監視しながら開先位置合わせを行う。溶接ヘッドの開先位置合わせは溶接ヘッド送り軸の送り量を調節して行う。ワイアの送りは、溶接ヘッド部にワイアドライブを取り付け、配管外部のワイアドラムより引き込んでいる。溶接トーチは、内面を1周溶接する毎に逆回転させて元に戻し、順次、多層溶接していく。トーチ電源ケーブル、シールドガス、ファイバーケーブルは送り軸に固定する。

5.5.2 溶接配管の開先加工

溶接する配管が、新規に搬入・設置した配管の場合は、溶接部を搬入前に開先加工しておくものとする。ダイバータプレートのみ交換し、冷却配管を再使用する場合、ディスクカッターによる切断面は、外面の方が突き出たテーパ状で、かつ、表面が滑らかであるので、ダイバータプレートの接続配管の溶接部を切断面と同様な形状に加工しておけば、通常の開先面と同様、TIGによる多層肉盛り溶接が可能である。

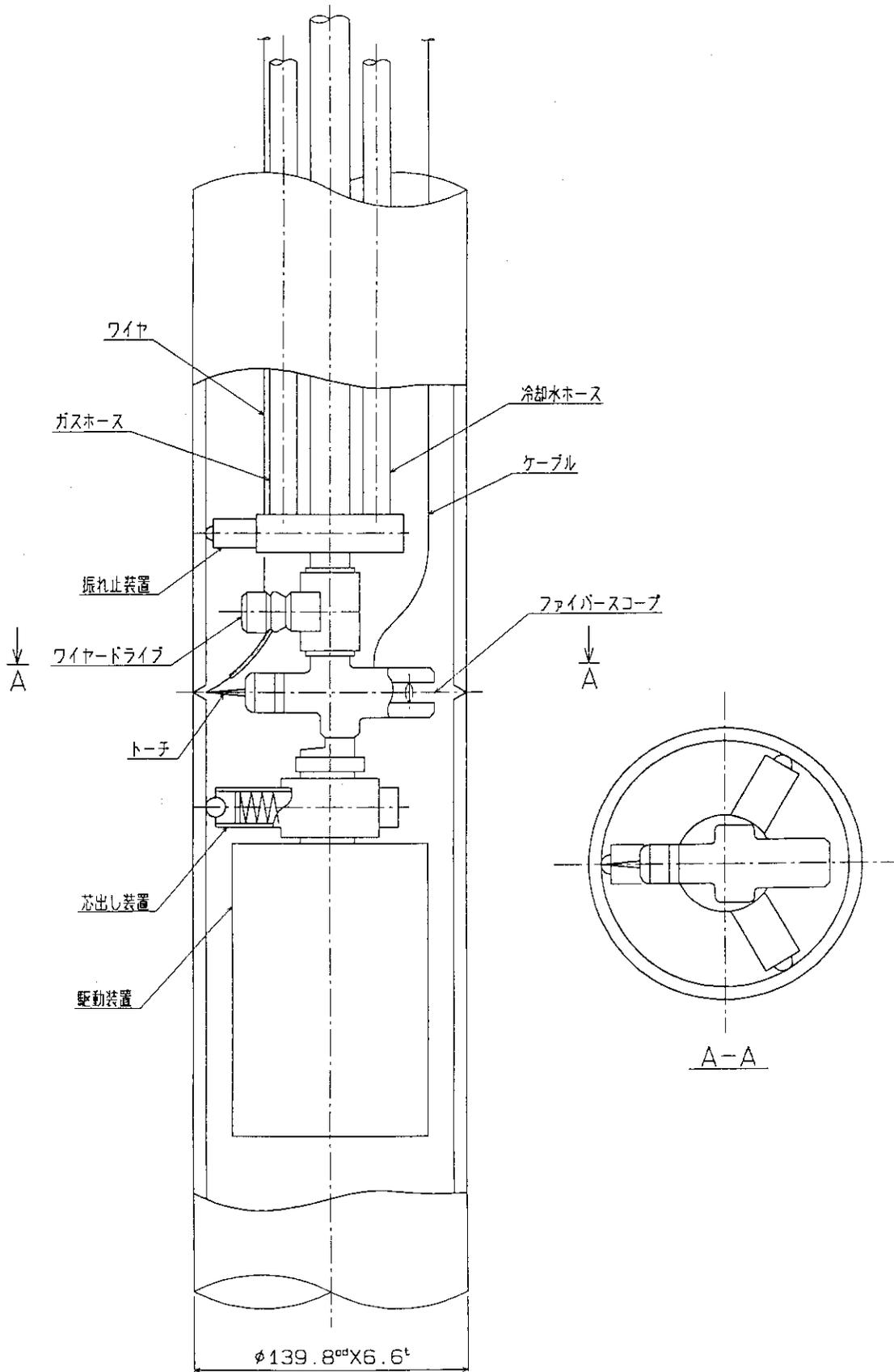


図 5. 5. 1 TIG溶接ヘッド部の構造

6. 試作開発

6. 1 軌道走行型ビークルシステム (1/5 縮小モデル)^{5), 8)}

3. 4 節で述べたように炉内保守修理システムとして、軌道走行型ビークルシステムを設計し、基本原理を明らかにした。ここでは、軌道走行型ビークルシステムの基本動作原理と軌道走行型ビークルシステム固有の特徴である、軌道の安定性やビークルの高機動性を実証するために1/5縮小モデルを試作した。

6. 1. 1 基本構成

図6. 1. 1に1/5縮小モデルの全景を示す。このモデルは模擬キャスクに収納される軌道展開装置、関節で連結された6本の円弧状リンクからなり、半円を形成できる軌道、軌道展開時には軌道の送り出しを行い、展開後は軌道上を走行するビークル、ビークルに搭載され、揺動・旋回・把持が可能なエンドエフェクターを先端に備え、伸縮・揺動可能なテレスコープ型のダイバータ交換用マニピュレータ、同じくビークルに搭載され、軌道廻りの回転や伸縮の自由度など計8自由度を備えたアーマータイル交換用マニピュレータ、展開された軌道の間及び終端を支持する軌道支持装置、模擬ポート、模擬真空容器(形状はFERを模擬)とその中に設置した模擬ダイバータ等からなる。主要な駆動機構には小型で簡易なインクリメンタル型エンコーダー付きサーボモーターを全部で26個組み込んでいる。

制御装置は、4軸同時制御可能なロボットコントローラが5台、これらのロボットコントローラを統括するとともに単純な動作のサーボモーターのON/OFFを制御するシーケンサ、操作パネル等から構成される。

6. 1. 2 動作試験

(1) 軌道の展開・収納

軌道を収納した状態から展開するまでは長く連続した同期動作が必要であるため、各駆動軸を独立に原点に戻す通常の原点復帰動作は不可能となる。そこで収納から展開までの途中で複数個(11個)の原点を設け、各原点から隣の原点までの移動を行う動作プログラムを作成し、それぞれのプログラムの先頭にその場が原点であると設定できる命令を入れた。これにより、機械がいずれかの原点にあれば、電源の投入時にそのまま動作が開始できるので、容易に教示再生ができる。尚、原点間の途中で電源を遮断した場合には、最寄りの原点に誘導すればよい。2台のロボットコントローラを順次動作させる自動運転により軌道の展開と収納を実現した(図6. 1. 2)。展開及び収納に要する時間はそれぞれ約25分であった。

(2) 軌道の機械的安定性

ビークルを模擬した30kgの錘(≒4000Kg ÷ 5³ = 30Kg)を軌道上に負荷した際の撓みを図6. 1. 3に示す各点で測定した。撓みの最大は支持点間の中間点(45°)に荷

重を負荷した時で約1.3 mmであった。

(3) マニピュレータの動作

軌道の展開後に、ビークルを走行させダイバータ交換用マニピュレータ(図6.1.4)を用いた教示再生動作により、模擬ダイバータのハンドリングができることを確認した。また、アーマータイル交換用マニピュレータ(図6.1.5)を動作させて第1壁のあらゆる領域にアクセスできることも確認した。

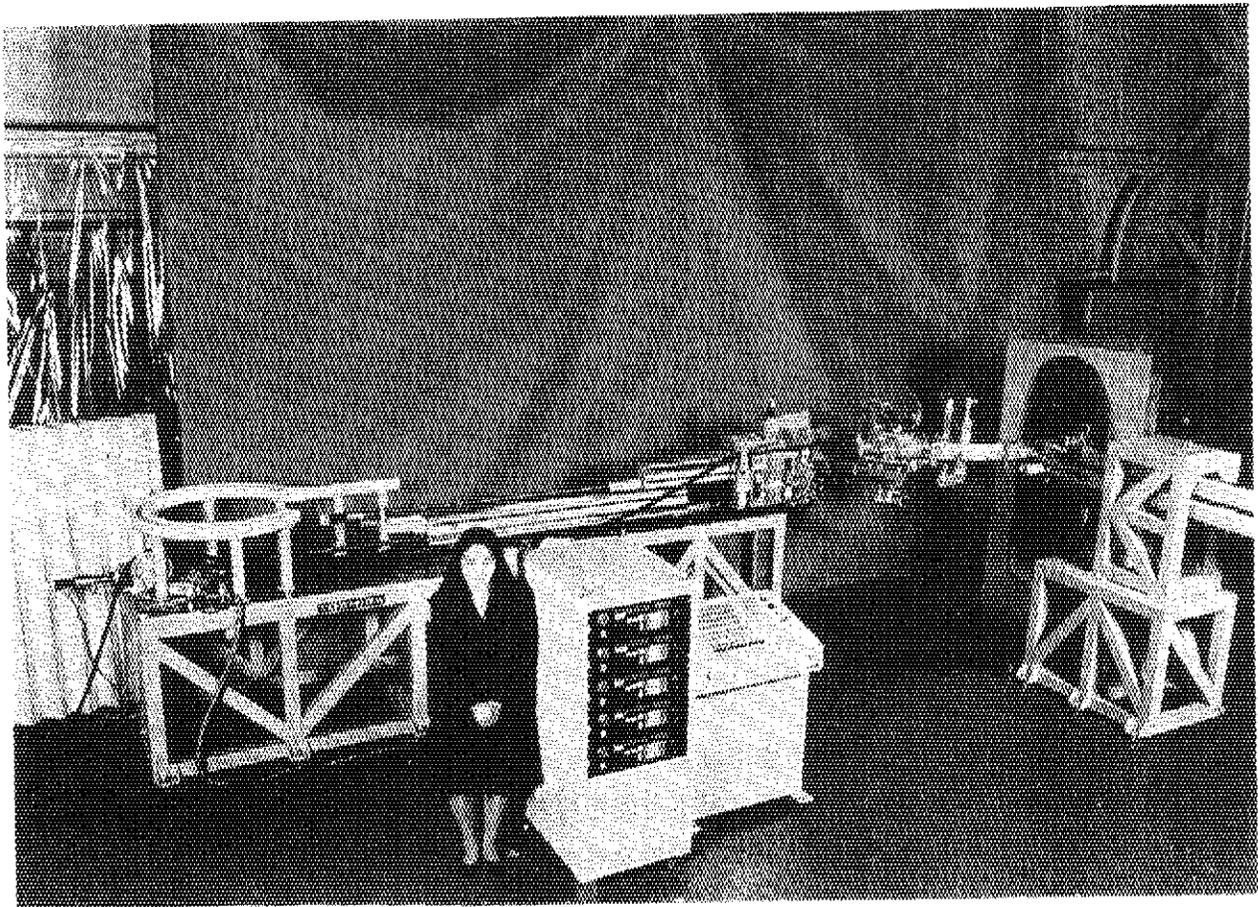


図6.1.1 軌道走行型ビークルシステム(1/5縮小モデル)の全景

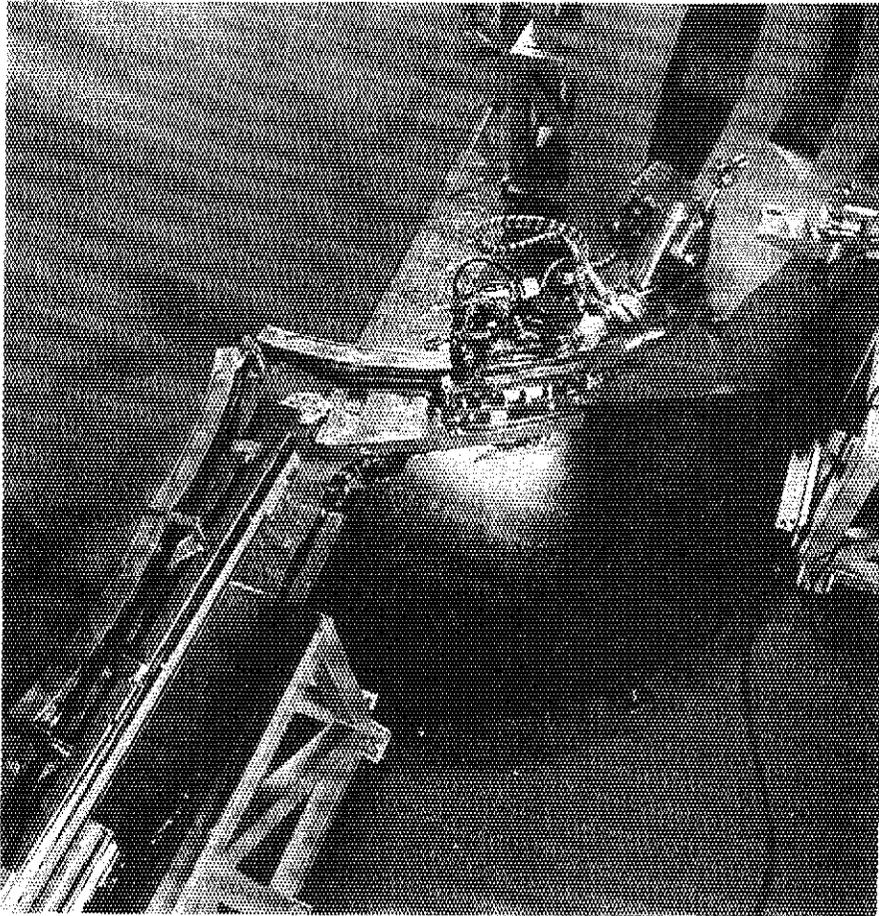
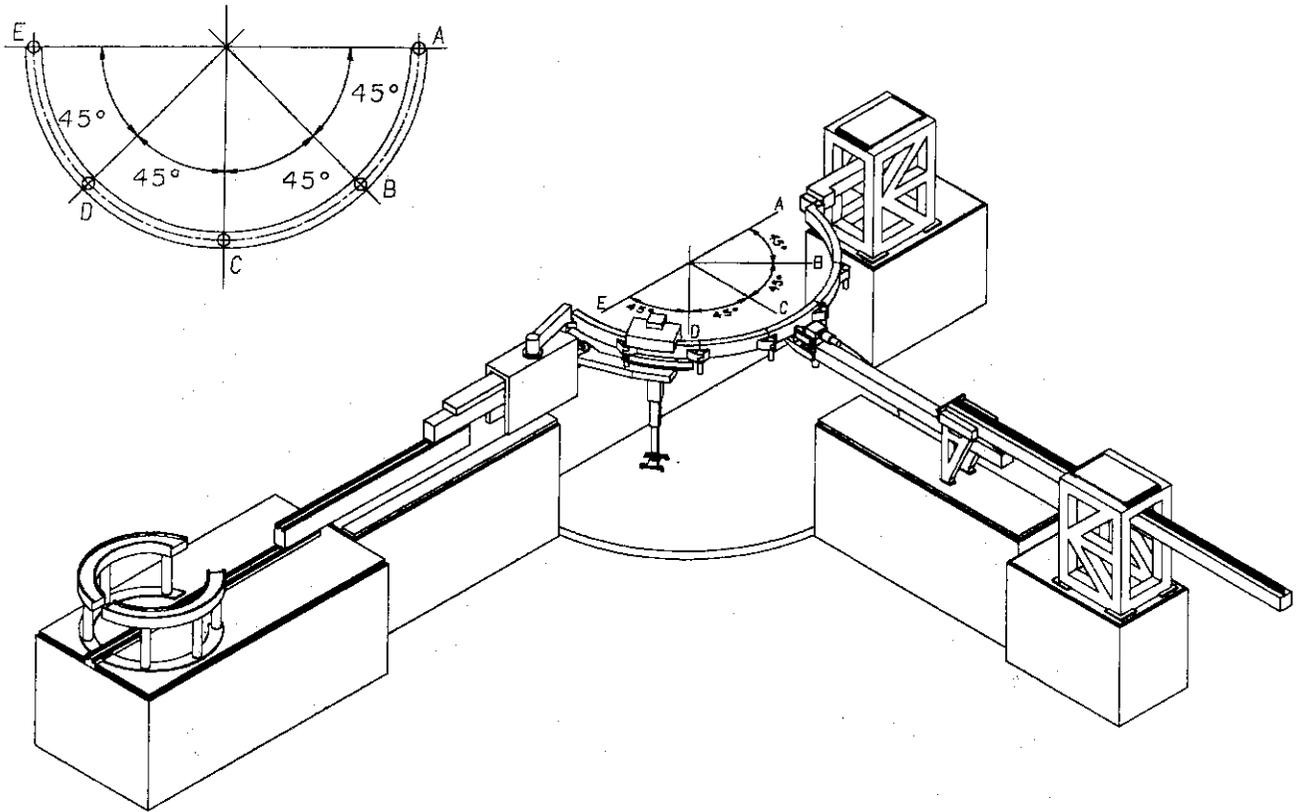


図6. 1. 2 軌道の展開動作



NO	LOADING POINT	DEFLECTION (mm)				
		A	B	C	D	E
1	A	0.19	0.13	0.05	-0.01	0.01
2	B	0.06	1.28	0.54	0.04	0.04
3	C	0.04	0.44	0.70	0.53	0.05
4	D	0.01	0.08	0.57	1.24	0.09
5	E	0.01	0.02	0.08	0.22	0.46

LOAD : 30 kg

図 6. 1. 3 軌道の撓み試験結果

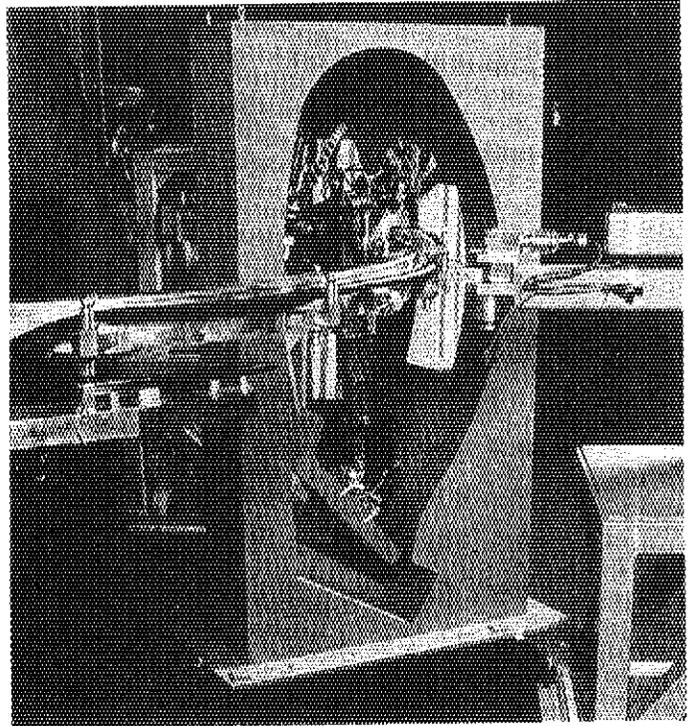
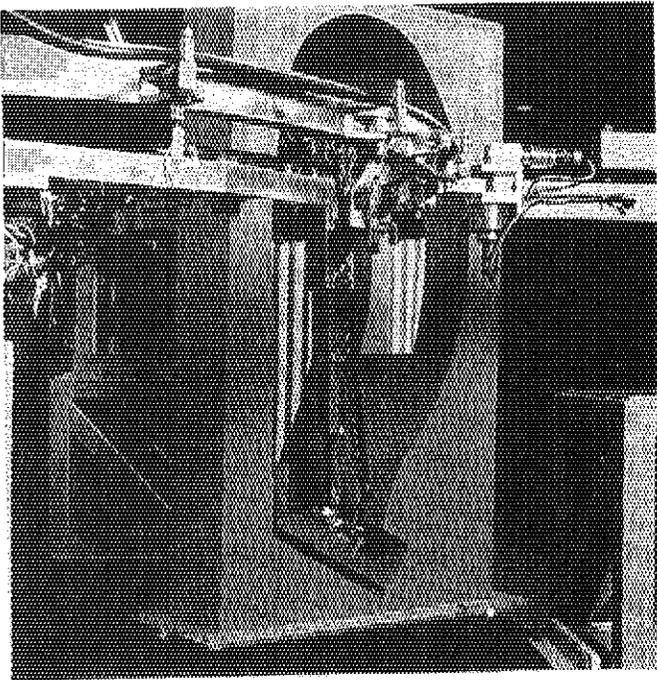


図 6. 1. 4 ダイパータ交換用マニピュレータ

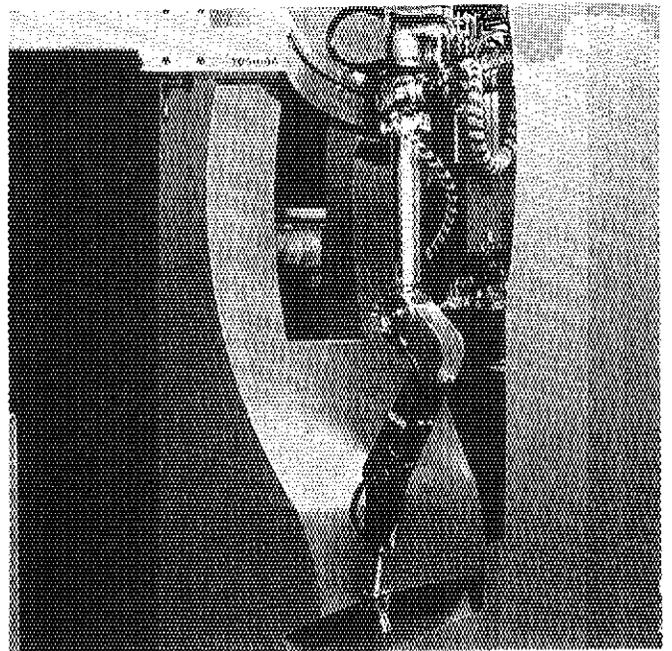
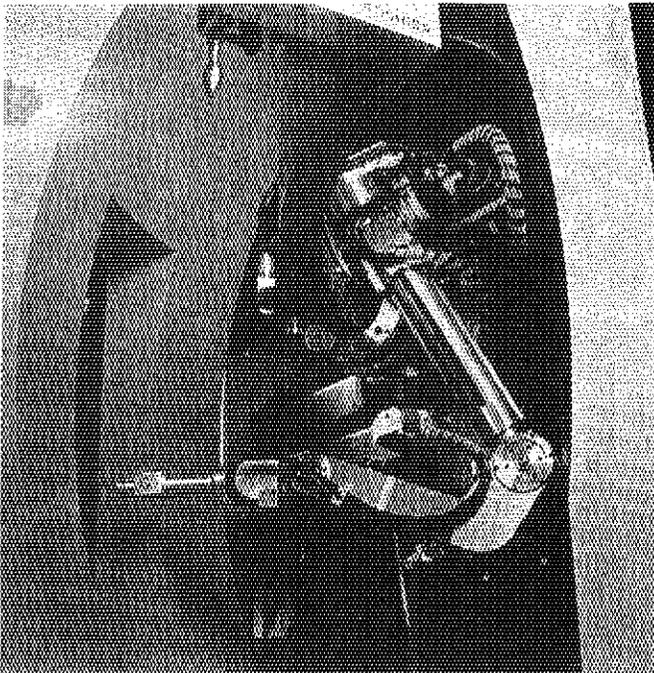


図 6. 1. 5 アーマータイル交換用マニピュレータ

6. 2 ダイバータ交換用マニピュレータ (1/1スケール部分モデル)

上下にあるダイバータの交換は、炉の縦断面中央に展開された軌道上を走行するビークルに搭載されたダイバータ交換用マニピュレータにより行われるが、ダイバータ交換用マニピュレータは軌道廻りに回転し、更に約6 m伸びて、上下のダイバータにアクセスしなければならない。こうした従来にない長大なストロークと大可搬重量を持つマニピュレータの実現性を立証し、技術的問題点を明らかにするため、1/1スケールのダイバータ交換用マニピュレータを試作した。

6. 2. 1 基本構成

図6. 2. 1にダイバータ交換用マニピュレータの1/1スケールの部分モデルを示す。軌道廻りに360°回転可能な回転機構、最大ストローク6500 mm (最小ストローク: 3200 mm)の3段のテレスコープ型伸縮アーム、伸縮アームの先端に取り付けられたエンドエフェクターよりなる。エンドエフェクターは水平軸回りの揺動(±70°)、エンドエフェクターの面に垂直な軸回りの回転(360°)、及び左右2つずつの爪を独立に動作させる2自由度の計4自由度の構成となっており、最大可搬重量は1. 2トンである。回転機構は支持架台に対して前後に250 mm移動可能な模擬軌道に固定されている。

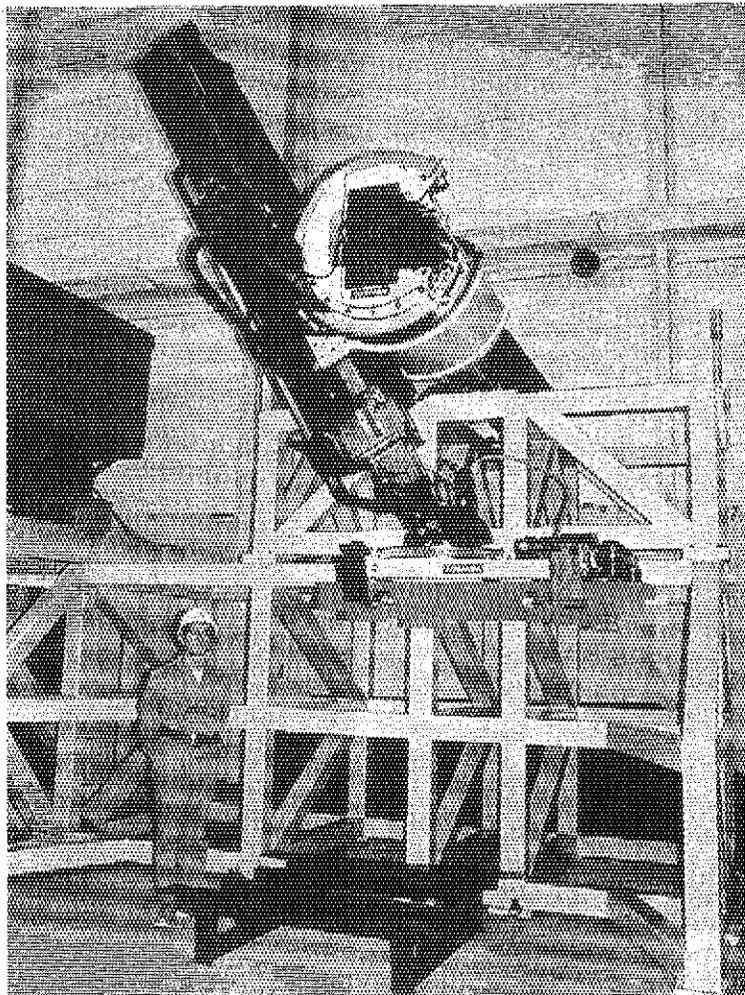


図6. 2. 1 ダイバータ交換用マニピュレータ (1/1スケール) 部分モデル

6. 2. 2 伸縮アームの機械的特性試験

(1) ガタの測定

図6. 2. 2に示すように伸縮アームを水平に伸ばし、全長4. 4 mの状態で行転機構をブレーキにて固定した後、先端に上向きに徐々に力を加えて中間筒、内筒の変位を測定した。行転機構のガタを含む先端のガタは

$$\delta_1 = 13 \text{ mm} \text{ であった。}$$

このうち、行転機構のガタ ($\delta_3 = 1. 2 \text{ mm}$) をアーム先端に換算した値を除くと外筒を含む伸縮アーム単独のガタ (δ) は、

$$\delta = \delta_1 - \delta_3 \times (4400 / 450) = 1. 3 \text{ mm}$$

となる。

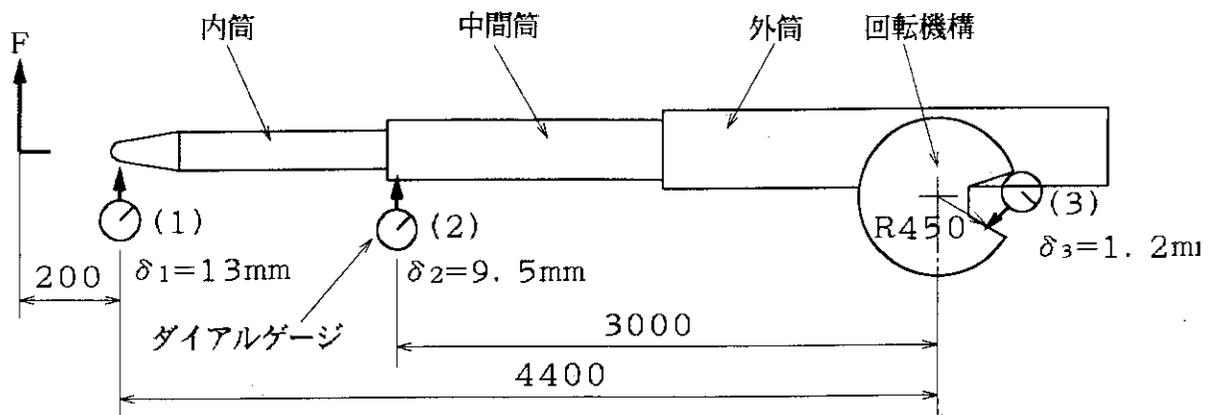


図6. 2. 2 伸縮アームのガタの測定

(2) 固有振動数の測定

固有振動数は伸縮アームの内筒先端にピックアップを取り付け、エンドエフェクター取付部先端をハンマリング（加振）して共振させ、自由振動の変位波形より固有振動数を求めた。測定された固有振動数は約4. 5 Hzであった。

6. 2. 3 動作試験

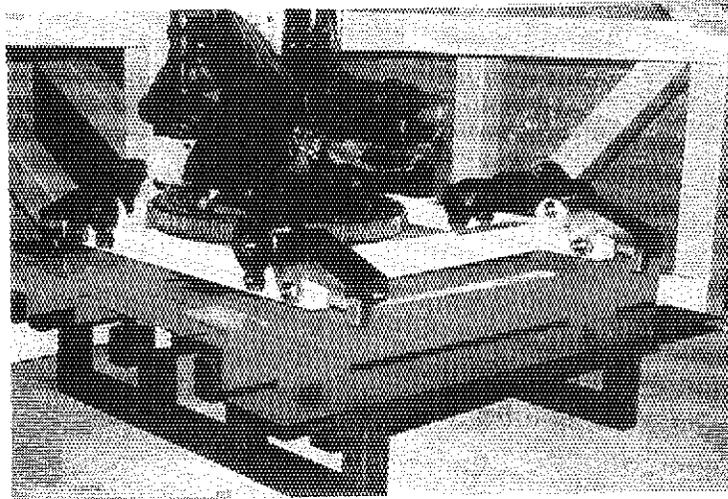
(1) 模擬軌道の移動試験

部分組立状態の模擬軌道の移動試験により、駆動系のバックラッシュを測定した。バックラッシュは0. 1 mmで、良好な調整が行われている。

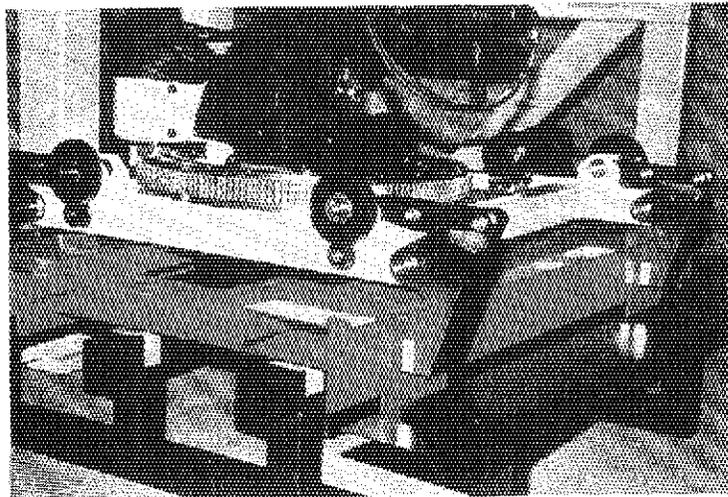
(2) ダイバータ板の把持試験

図6. 2. 3のように下側の模擬ダイバータ板の把持・搬送動作、及び上側ダイバータ板の把持・搬送を模擬した動作の教示・再生の自動運転を行った。各軸及びエンドエフェクターは円滑に動作し、特に問題なる点はなかった。

今後、図6. 2. 4に示す試作中のダイバータモデル（1/1スケール）を用いて機械的特性試験や把持・搬送試験を実施する予定である。



(a) 模擬ダイバータにアクセス



(b) 模擬ダイバータを把持

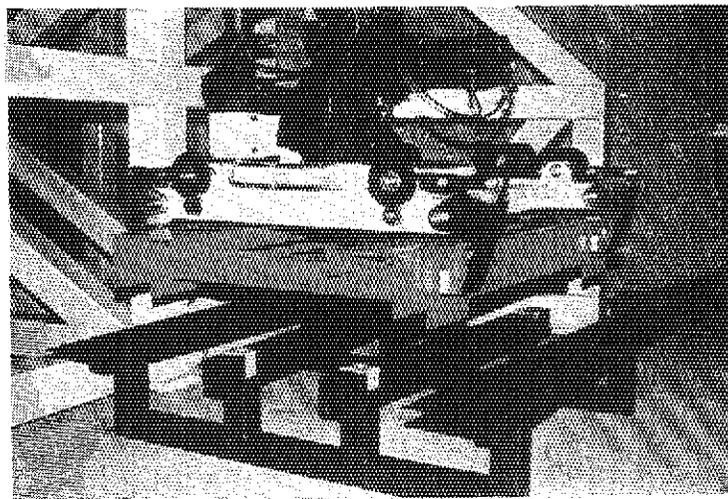


図 6. 2. 3 模擬ダイバータ板の把持試験

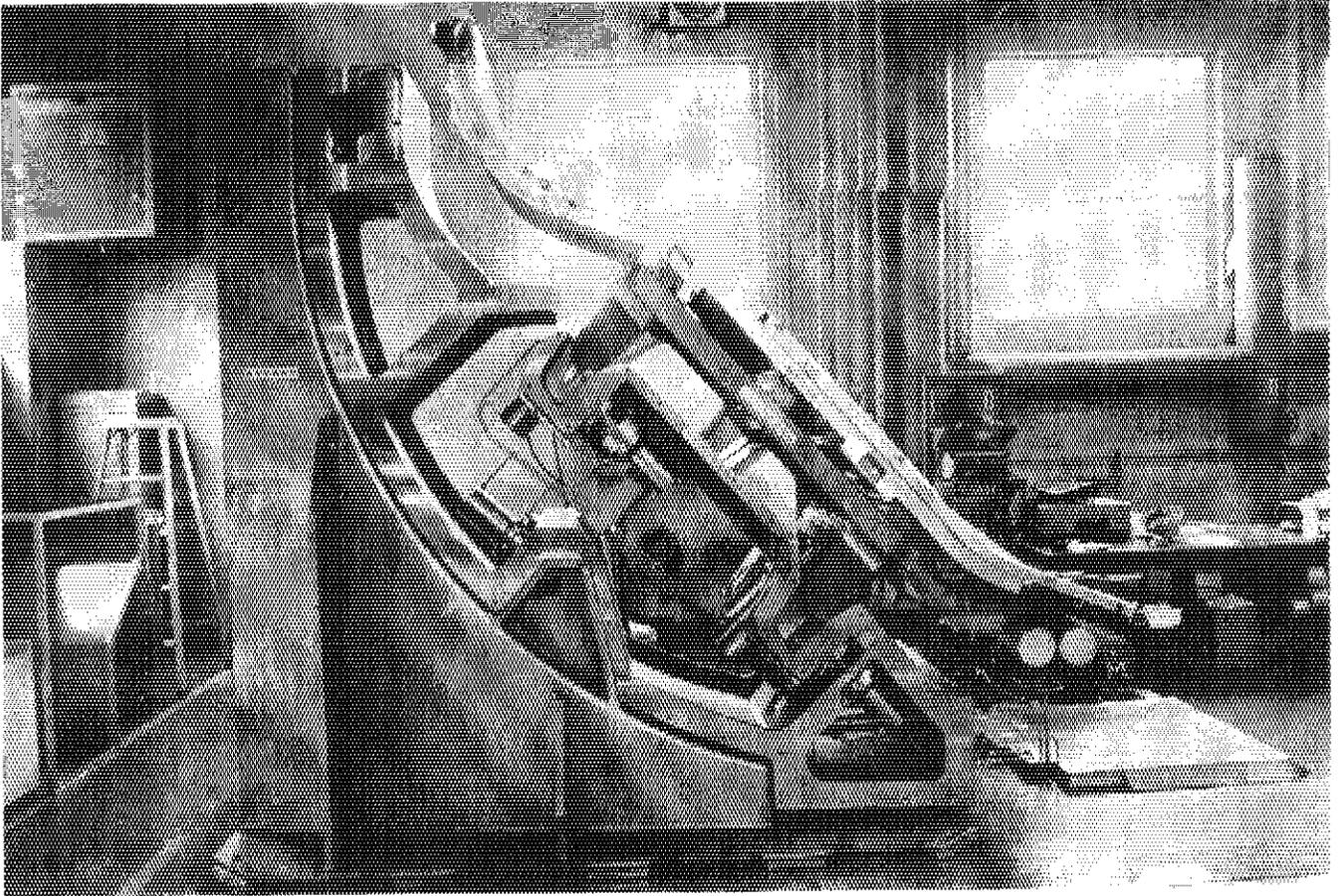


図6. 2. 4 ダイバータモデル (1/1スケール)

6.3 CO₂レーザー溶接・切断システム

ITER-CDAにおいて検討されている配管は、外径： $\phi 34.0 \sim 165.2$ mm、肉厚： $3.0 \sim 5.0$ mmのSUS配管である。このような配管を内側よりアクセスし、CO₂レーザーで溶接切断する時に重要なことは、1) 配管の内周の全周に亘ってレーザー光が加工点で、均一に集光する加工ヘッドの開発、2) 配管の肉厚全域で溶接され、母材以上の継手強度を確保可能な最適な溶接条件のデータ取得、3) 同様に切断時の最適な条件のデータ取得である。これらは配管設計及び、遠隔による溶接切断システムの設計に直接影響を及ぼす項目であり、事前に基本データを取得しておく必要がある。ここでは、最も頻繁に溶接・切断がなされるダイバータ配管用の加工ヘッドを試作し、最適な溶接切断条件を明らかにした。

6.3.1 基本構成

試作したパラボリックミラータイプの加工ヘッドを図6.3.1に示し、主要諸元を以下に示す。

(1) 基本仕様

- ①加工配管径： 100 A、sch 40、内径 $\phi 102$ mm、 $t 6$
- ②ビーム径： $\phi 40$ mm (ヘッド最小径 $\phi 44$ mm)
- ③集光：パラボリックミラー (焦点距離 $f = 51.5$ mm)
 焦点設定位置 切断用 D. F. = -1.5 ± 1 mm
 溶接用 D. F. = -0.5 ± 0.5 mm

(2) 機構諸元

- ①集光部分倣い機構：スプリング押し付けによる機械式倣い
 倣いストローク ± 1.5 mm
 精度 ± 0.1 mm
 押し付け力 $1.8 \sim 3.6$ kgf
- ②センタリング機構：エア駆動 (ペローズ) による3点同期支持方式
 センタリング精度 ± 0.1 mm
- ③軸方向案内機構：2組の3等配固定車輪による管内案内
 車輪外接円径 $\phi 100$ mm
- ④ヒューム進入防止対策：不活性ガスによるミラーの汚れ防止
 吹き付け個所 ミラー、ノズル先端、加工ヘッドのシャフト内
- ⑤冷却水、アシストガス用配管
 管外にて回転動作に追従
 パラボリックミラー冷却配管は細管の撓みにより倣い動作に追従
- ⑥回転駆動機構：回転制御可能なブラシレスDCモータと歯付きベルトによる動力伝達

6. 3. 2 溶接・切断試験

配管試験片に加工ヘッドを取り付けた後、レーザー出力、加工速度、デフォーカスポイント（溶接・切断する配管内表面からの焦点設定位置までの距離D. F.）、アシストガス流量をパラメータにレーザー溶接（図6. 3. 2）及び切断（図6. 3. 3）試験を実施した。

全周に亘って全厚溶接（図6. 3. 4）が得られた最適な溶接パラメータは、

- ◎レーザー出力：4. 5 kW（加工点の出力）
- ◎加工速度：800 mm/min
- ◎D. F.：-1. 0 mm
- ◎アシストガス：He, 75 ℓ/min

同様に切断（図6. 3. 5）についての最適なパラメータは、

- ◎レーザー出力：4 kW（加工点の出力）
- ◎加工速度：1000 mm/min
- ◎D. F.：-0. 5 mm
- ◎アシストガス：O₂, 50 ℓ/min

であった。

尚、図6. 3. 6に示すように1回切断した後のパラボリックミラーの写真を示す。付着したスパッタやヒュームを取り除くため、切断1回毎にミラーを洗浄する必要がある。また、毎回洗浄し、40回使用した後のミラー表面を図6. 3. 7に示すが、レーザー光の反射率は約50%低下する。

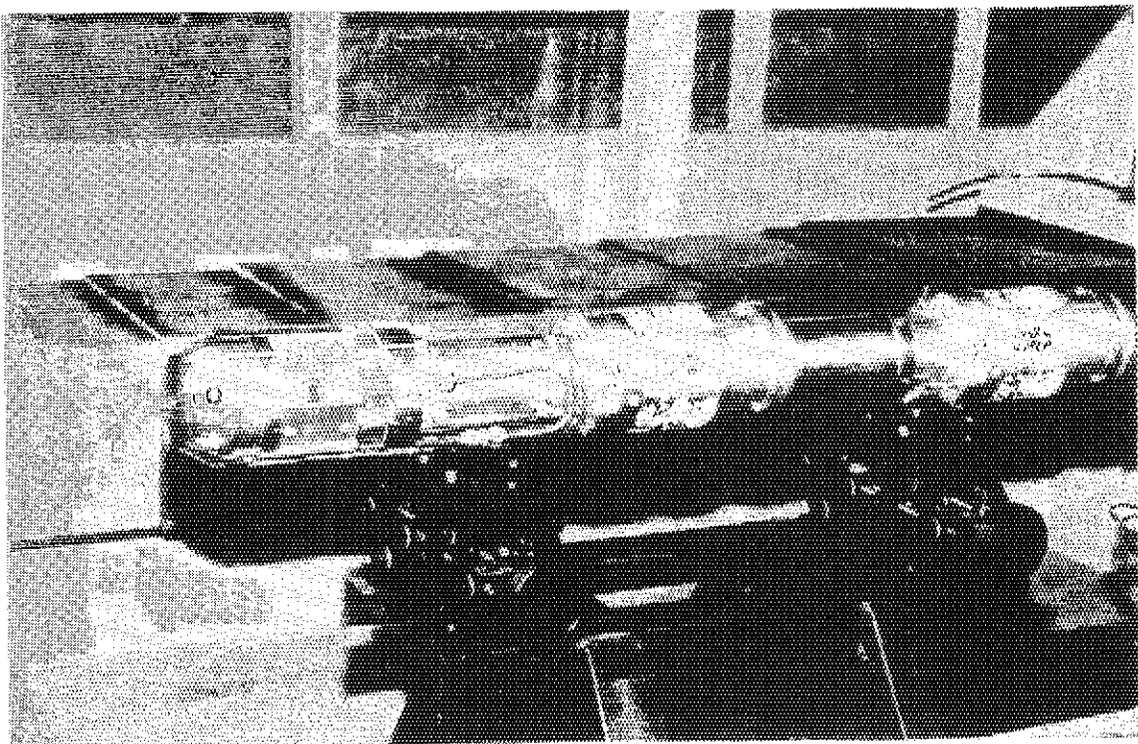
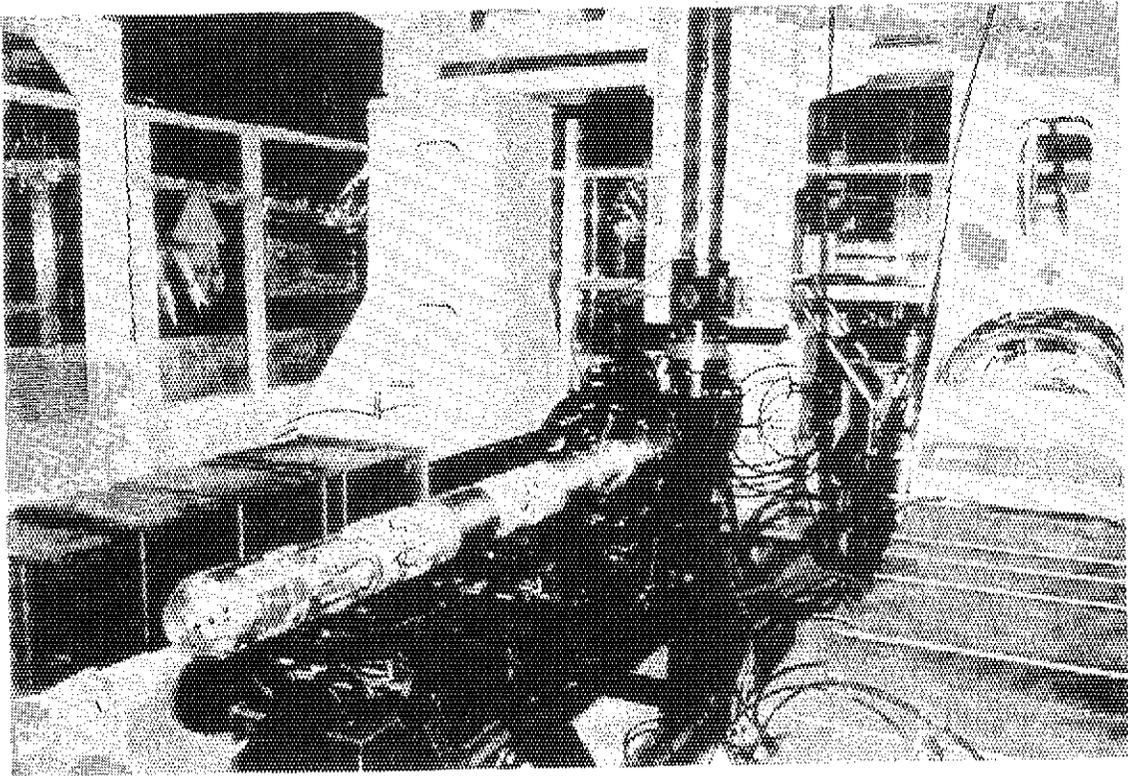


図 6. 3. 1 試作したパラボリックミラー系加工ヘッド

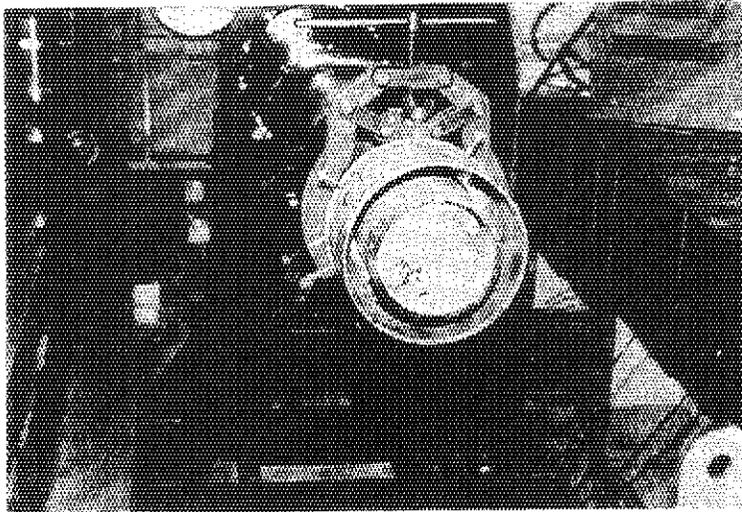


図 6. 3. 2 レーザー溶接状況

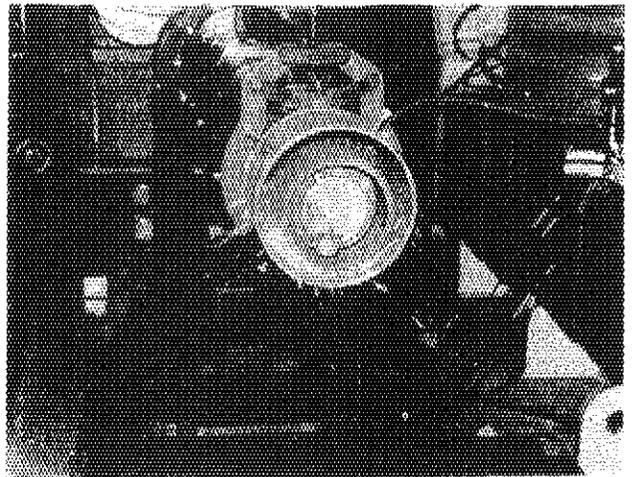
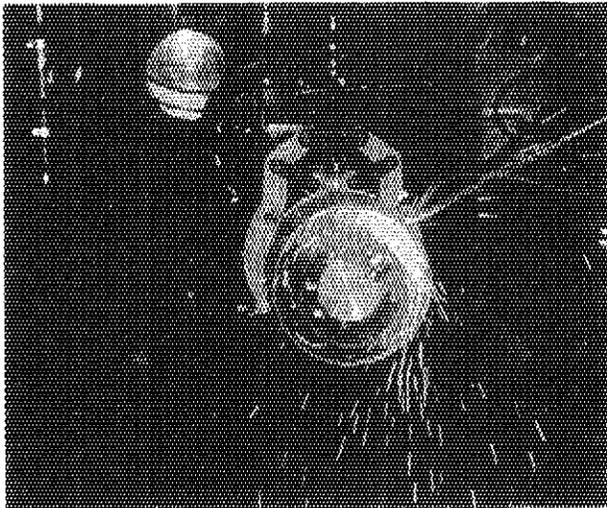


図 6. 3. 3 レーザー切断状況

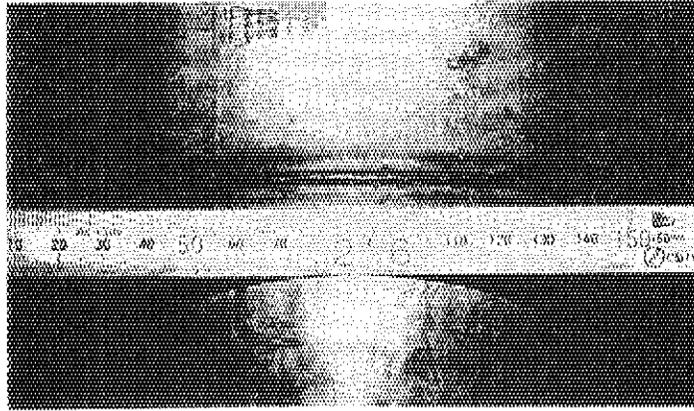


図 6. 3. 4 溶接試験結果

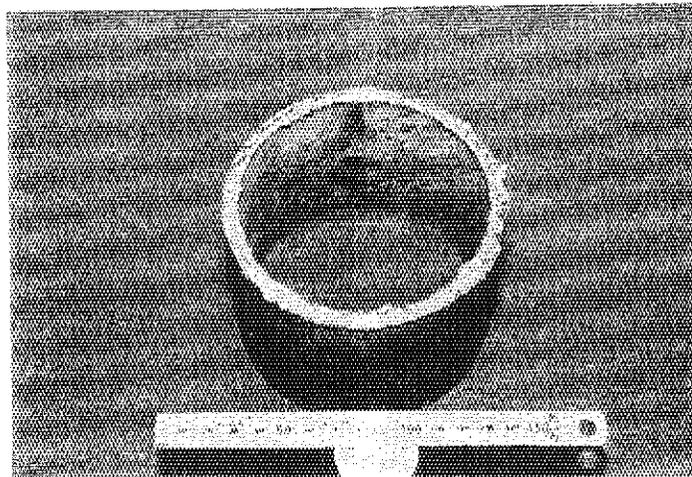


図 6. 3. 5 切断試験結果

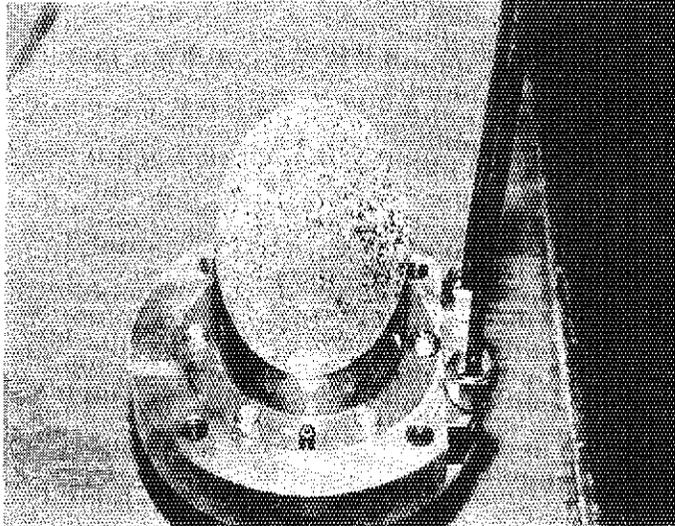


図 6. 3. 6 切断後のミラー表面（切断回数：1回）



図 6. 3. 7 使用後のパラボリックミラー（溶接回数：40回）

6. 4 第1壁表面観察⁹⁾

プラズマに直接対向する第1壁アーマータイルやダイバータは、その表面が損傷するために定期的に交換するコンポーネントに指定されている。これらの表面の損傷を正確に検出することは炉の信頼性を確保する上で、重要なファクターである。一方、炉内は誘導放射能により高 γ 線（ $\sim 10^7$ R/h）雰囲気のため、表面観察として非常に簡便な既存のITVカメラなどは瞬時にその機能を喪失してしまう。ここでは高 γ 線雰囲気でもその機能を喪失しない方法として、レーザー光を第1壁表面に照射し、その反射光から表面形状を計測する装置を試作し、その基本的特性を明らかにした。

6. 4. 1 計測システム

(1) 計測原理

3次元物体の表面計測法として、①システムが簡易、②測定精度が良好、③計測時間が短いことから光切断法を採用した。原理を図6. 4. 1に示す。計測対象物にスリット光を照射して対象物表面に生じる輝線（光切断線）を光軸がスリット光光軸と斜めに交差するように配置したTVカメラで撮像する。この時、カメラの座標系 X_c と、物体の計測に適した物体の座標系 X の透視変換は、同次座標系を用いて次式で表せる。

$$X_c = C \cdot X \quad \dots \dots \dots (6. 4. 1)$$

ただし、 $X_c = (h_{xc}, h_{yc}, h_{zc}, h)^t$: カメラの座標系

h : スケーリングパラメータ

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{pmatrix} \quad X = (x, y, z, \ell)^t$$

ここで、透視変換行列 C の各要素をカメラパラメータと呼ぶ。また、スリット光の平面を $x = 0$ 平面、レンズの主点が x 軸上にあるように物体の座標系を選べば、光切断線の物体座標系の x 成分は常に0であるため、3次元位置の計測に必要なカメラパラメータの数は減少し、次式の関係になる。

$$\begin{pmatrix} h_{yc} \\ h_{zc} \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ z \\ \ell \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (6. 4. 2)$$

ここで、カメラパラメータは、スリット光とレンズの主点間の距離 D 、光軸の傾き θ 、光軸回りの回転 α 、レンズの主点と受光面までの距離 F を用いて次式で求められる。

$$C = \begin{pmatrix} -\cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha \sin \theta & -\cos \alpha \sin \theta & D \cos \theta \\ -\sin \alpha \cos \theta / F & \cos \alpha \cos \theta / F & D \cos \theta / F \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (6. 4. 3)$$

従って、カメラパラメータを求めておけば、映像信号を処理して求めたTVカメラ撮像面上の輝線の各点の2次元位置 $X_c = (h_{yc}, h_{zc}, h)^t$ から、対象物表面の輝線の3次元位置

$X = (y, z, \varrho)$ が求められる。

さらに、対象物表面全体の3次元位置は、輝線をそれと直交する方向に要求精度に応じたピッチで走査するようにセンサヘッドを動かすことにより計測できる。この時、計測データの座標系は、スリット長さ方向がy軸方向、スリット投射方向がz軸方向、スリット光走査方向がx軸方向となっており、その値はセンサーから見た相対値である。

(2) 計測システムの構成及び仕様

計測システムの構成を図6.4.2に示す。スリット光源には半導体レーザー、TVカメラにはCCDを用い、映像信号は画像処理装置により処理し、輝線上の3次元位置の座標を算出する。核融合炉の放射線環境を想定して、高γ線領域である炉内には、センサーヘッドとして撮像レンズとスリット光投光器のみを設置し、炉外遠方にTVカメラとレーザー源とを設置し、その間にはそれぞれイメージファイバーとライトガイドで接続することにより対処した。センサーヘッドの撮像レンズには、自律計測時、粗計測と精密計測で視野を遠隔で切り換えられるように電動ズームレンズを使用した。画像処理装置で算出された3次元座標値データはコンピュータへ転送され、コンピュータで表面形状を算出し、その結果をCRT上にグラフィックで表示する。計測システムの主な仕様を表6.4.1に示す。

自律計測法開発のための試験装置は、前述した計測システム、ロボット、及び損耗穴加工した模擬タイルから構成され、ロボットを動作させ、ロボットハンドに取り付けた計測システムで模擬タイル表面を形状計測する。

(3) 自律計測制御アルゴリズム

自律計測のロボット動作アルゴリズムを図6.4.3に示す。自律計測では、まず粗計測により設定値以上の損耗の有無を判定する。次に損耗が検出された場合、その部分のみを精密計測するためのロボット動作(計測開始位置までの動作、計測のための動作、スリット光走査回数)を自律的に計画し、かつ実行する。

6. 4. 2 センサーの測定精度の評価試験

(1) 試験方法

図 6. 4. 4 に評価試験に用いた装置の構成を示す。試験手順は以下の通りである。

- ①使用するセンサーの測定値は y , z 座標値であるので、センサーヘッドを上向きに置き、 $y-z$ テーブルに取り付けた測定マークが TV 画面の中心になるようにセットする。
- ② $y-z$ テーブルにより測定マークを y/z 方向に適当な距離動かし、TV カメラで撮像する。測定マークの移動、撮像は移動方向・移動量を変えて、10 数点行う。
- ③ TV 画面上の測定マークの結像位置と $y-z$ テーブルの移動方向・移動量との対応から、カメラパラメータを最小自乗法により求める。
- ④前項で求めたカメラパラメータを使い、測定マークの TV 画面上の結像位置に相当する y , z 座標値を算出し、 $y-z$ テーブルの移動量と比較する。

尚、図 6. 4. 5 に粗計測時と精密計測時のセンサーの計測条件を示す。

(2) 試験結果

試験により得られた誤差 ($y-z$ テーブルの移動量を真値とみなしたときのセンサーの測定値の誤差) を表 6. 4. 2 (粗計測) と表 6. 4. 3 (精密計測) に示す。なお、使用した $y-z$ テーブルの分解能は 0.01 mm で、精度は 0.05 mm である。

表より最大誤差は以下の通りである。

◎粗計測モード y 座標値: -0.47 mm 、 z 座標値: -0.94 mm

◎精密計測モード y 座標値: -0.06 mm 、 z 座標値: 0.18 mm

以上の結果より、

- ①粗計測モードでの $y-z$ テーブルを基準としたセンサーの測定誤差の最大値は y , z 座標値とも、 $y-z$ テーブルの位置決め誤差より一桁大きい。従って、表 6. 4. 2 の測定誤差が基本的にセンサーの誤差であると考えられる。
- ②精密計測モードでの測定誤差の最大値は、 y 座標では $y-z$ テーブルの位置決め誤差とほぼ同程度である。従って、測定結果はセンサー自身の測定誤差に $y-z$ テーブルの位置決め誤差が重畳されている可能性があり、センサー自身の y 座標の精度は表 6. 4. 3 の値より小さい可能性がある。また、 z 座標では $y-z$ テーブルの位置決め誤差の 4 倍程度であり、 $y-z$ テーブルの位置決め誤差を多少含んでいる可能性がある。

6. 4. 3 タイル表面の損耗計測試験

(1) 試験方法

図 6. 4. 6 に示す模擬タイル表面の広い範囲を粗計測し、設定値以上の大きさの損耗部の検出を行い、検出された場合、損耗部のみの局部表面形状を自律的に精密計測する。損耗検出の基準点は基板面とするが、実際にはタイル間の隙間が狭いので TV カメラの撮像画面中心から離れたタイル間の隙間の基板面上のスリット光はタイルにより死角となり、1つのスリットの測定ではタイル上面エッジ点のように 2点を同時に計測できない場合がある。そのため 1つのスリットで基板面上の点は 1点しか計測できないことを前提にセン

サーを別の位置に移動させて計測し、基板面上の3点を計測して第1壁面を求める方法を取った。

(2) 試験条件

① 視野範囲、カメラ角度、スリット投光器位置

視野の範囲は粗計測時はタイル5～6枚、精密計測時は粗計測時の1/6とする。

- ◎粗計測時 : 視野範囲 260 mm
カメラ角度 30°
投光器位置 最長位置(基準位置)から130 mm
- ◎精密計測時 : 視野範囲 44 mm
カメラ角度 45°
投光器位置 最長位置(基準位置)

これらの幾何学的配置を図6.4.5に示す。

② 走査ピッチ

- ◎粗計測時 : 2.0 mm, 5.0 mm

- ◎精密計測時 : 1.0 mm

③ タイル間の隙間 : 1 mm (暫定値)

④ タイルの配置 : 図6.4.6に示す。

⑤ 損耗と判定する設定値(粗計測時)

- ◎深さ(Z_t) : 1.5 mm, 3.0 mm

- ◎面積 : 10 mm², 100 mm²

(3) 損耗(欠損)部検出のアルゴリズム

粗計測において、損耗部はタイル表面から Z_t (設定値)以上深い領域と予め設定しておく。この場合、タイル間の隙間部の計測値もタイル表面から Z_t 以上に深いので、損耗領域はタイル間の隙間も含めた図6.4.7(a)のようになる。タイル間の隙間を損耗領域と認識させないための補正を行うため以下に示す2つの処理を実施している(図6.4.7参照)。

① 設定値 Z_t より深い領域の収縮・膨張処理

タイル間の隙間が1 mmと狭いことを利用して、図6.4.7(b)に示すように、タイル表面の高さ分布で設定値 Z_t より深い領域を一定の幅だけ収縮させてタイル間の隙間を消去する。次に図6.4.7(c)のように同じ幅だけ膨張させると損耗領域だけが残る。

② 損耗領域の輪郭線探索処理

輪郭線探索のアルゴリズムを図6.4.8をもとに説明する。

- i) 光切断線に沿って、順次、左から右に走査し、最初に設定値 Z_t より深い点(開始点)を探索する。
- ii) 開始点A1が発見できたら、次は Z_t より浅くなる終了点(B1)を探索する。
- iii) 終了点B1が発見できたら、この一連の作業を中断し、輪郭の探索に移る。
- iv) 点A1から次の切断面の点A1'に移り、点A1'の深さが設定値 Z_t より深い場合

- は左へ、浅い場合は右へ探索していき、点A 2を見つける。
- v) 点B 1からもiv)と同様に、点B 1'へ移り、点B 1'の深さが設定値より深いなら右へ、浅いなら左へ探索していき、点B 2を見つける。
- vi) iv)とv)の作業を繰り返す、順次、A 3, A 4、・・・、B 3, B 4・・・と見つけていき、損耗部の輪郭線をたどる。
- vii) 穴の一番下の断面までくると、点Aと点Bの位置関係が左右逆転するので、損耗輪郭線の終了とする。

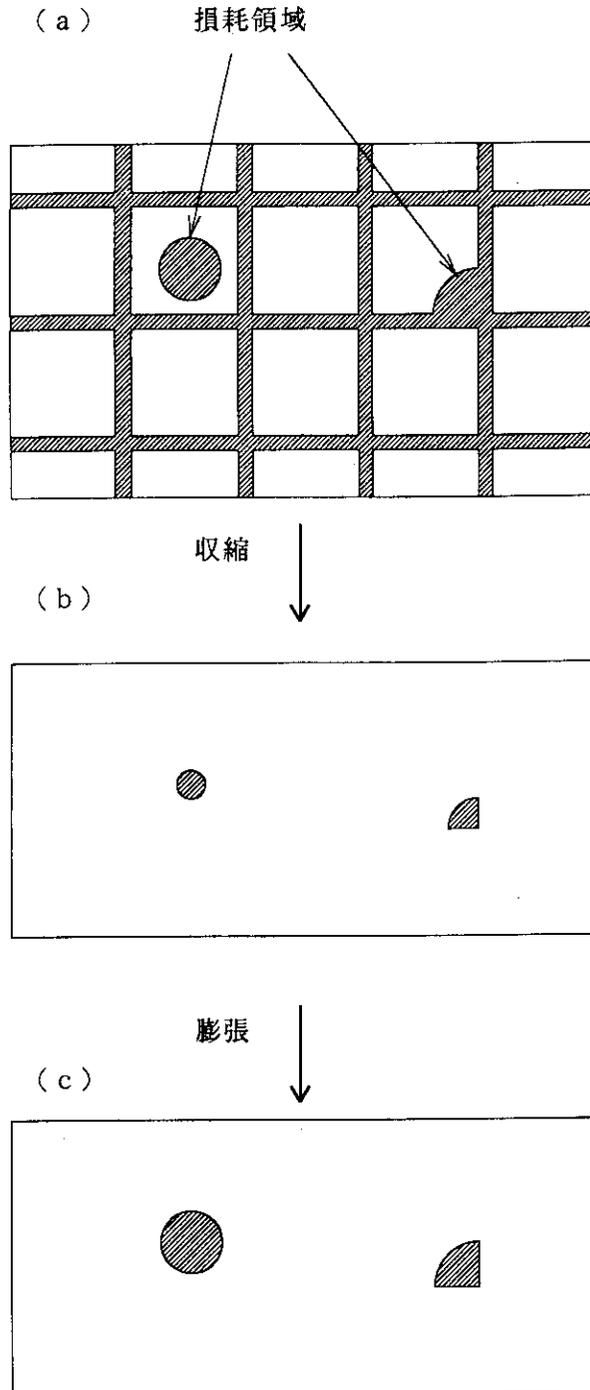


図 6. 4. 7 収縮・膨張処理によるタイル間の隙間の除去

(4) 試験結果

表6. 4. 4に、粗計測と精密計測結果を示し、計測結果の3次元グラフィック表示の一例を図6. 4. 9に示す。試験より以下のことが明かとなった。

①損耗Bはすべてのケースで検出されたが、損耗Aは設定深さが深かったり、設定面積が大きい時、検出されないことがあった。これは後述する損耗部の特徴パラメータ（損耗部の縦／横長さ、面積）の測定（算出）精度に起因するためであると考えられる。ただし、特徴パラメータの測定誤差は後述するように、センサー自身の測定精度に基づいて発生する誤差の範囲内であると推定される。

②損耗部輪郭線図形の特徴パラメータの計測誤差は表6. 4. 4から、

L_x : 走査ピッチ2mmの時、最大 -9. 0mm
走査ピッチ5mmの時、最大 ±9. 0mm

L_y : 最大 -15. 68mm

であった。

得られた特徴パラメータは、センサー自体の誤差から損耗形状等に起因して決まる下記の誤差範囲内にほぼ入っている。

i) L_x

L_x 、 L_y の算出にあたっては、センサーの測定精度（誤差）にセンサー固有の分解能を加えた誤差を使う必要がある。

粗計測時のセンサーの精度は、

X方向 : ±0. 13mm

Y方向 : ±0. 47mm

Z方向 : ±1. 10mm

であり、分解能は

X方向 走査ピッチ（2mmまたは5mm）

Y方向 : 0. 47mm

Z方向 : 0. 94mm

であるので、測定値の誤差は

X方向 e_x : ±2. 13mmまたは5. 13mm

Y方向 e_y : ±0. 94mm

Z方向 e_z : ±2. 04mm

更に、特徴パラメータ算出に際しては、これらセンサー自体の誤差に起因して発生する下記の誤差が加味される。

Z方向の測定値が誤差を持っているため、誤差により設定値以上の深さになる場合とない場合がある。従って、Z方向の測定値の誤差がX方向のどの程度の誤差となるかを以下に検討してみた。

設定深さの損耗部輪郭線は損耗の穴の傾斜面上の等高線であるため、傾斜面の傾きを ϕ

とすると、傾斜面上の設定Z座標に対応する点のX座標算出の誤差は、Z座標の誤差の $1/\tan\phi$ 倍となる。一方、設定深さは基準面と傾斜面上とのZ座標の差として求めるため、設定値以上の深さの点のX座標算出の誤差は、 $e_z + e_z/\tan\phi$ となる。これにX座標の誤差が加わる。

また、 L_x はX座標値の差を取るため、その誤差は更に2倍となる可能性がある。従って、 L_x の誤差の最大値は次式で求まる値と予想される。

$$E_{max}(L_x) = 2[e_z(1 + 1/\tan\phi) + e_x] \quad (1)$$

従って、 L_x の最大誤差は下記のように予想される。

損耗A

$\tan\phi = 1/2$ であるので、

・走査ピッチ：2 mmの時、

$$2[2.04 \times (1 + 1/0.5) + 2.1] = 16.4 \text{ mm}$$

・走査ピッチ：5 mmの時、

$$2[2.04 \times (1 + 1/0.5) + 5.1] = 22.4 \text{ mm}$$

損耗B

$\tan\phi = \infty$ であるので、

・走査ピッチ：2 mmの時、

$$2[2.04 \times (1 + 0) + 2.1] = 8.3 \text{ mm}$$

・走査ピッチ：5 mmの時、

$$2[2.04 \times (1 + 0) + 5.1] = 14.3 \text{ mm}$$

ii) L_y

L_y の誤差も L_x と基本的に同様であり、センサのY、Z座標値の誤差 e_y 、 e_z により次式のように決定される。但し、今回の L_y を求めるアルゴリズムでは、各スリット光走査断面での設定深さ以上の深さを比較し、その最大深さ長を L_y としている。従って、損耗部のY座標の最大値と最小値が隣接するスリット光断面に振り分けられる可能性があり、 L_y の誤差はY座標値の誤差分の2倍加算される可能性がある。この結果、 L_y の誤差の最大値は次式で表すことができる。

$$E_{max}(L_y) = 2[e_z(1+1/\tan\phi) + 2e_y]$$

従って、 L_y の最大誤差は、 L_x の場合と同様であるので、
損耗A：16.0mm、損耗B：7.8mm と推定される。

iii) 面積

走査して計測した光切断線の各断面で L_y と同じ誤差を含むので、面積の最大誤差は、
(Y方向最大誤差) \times [$L_x + (L_x$ 最大誤差)]

と考えられる。

この予想誤差を計測誤差と比較すると、表6. 4. 4に示すように、面積の計測（算出）値は、いずれもハードウェア上の条件から推定される誤差の範囲内であることが判る。

表6. 4. 1 計測システムの仕様

項 目	仕 様
半導体レーザー	波長 780 nm、50 mW X 3
TVカメラ	CCD (H768 X V493)
イメージファイバー	石英ガラスファイバー、5万画素
撮像ズームレンズ	焦点距離 12.5 ~ 75 mm
スリット光軸 - 撮像レンズ 光軸との交差角	45°
粗計測時：	
◎視 野：200 mm	
◎分解能：y方向（スリット光長さ方向）0.81 mm	
z方向（スリット光投射方向）1.14 mm	
精密計測時：	
◎視 野：34 mm	
◎分解能：y方向（スリット光長さ方向）0.14 mm	
z方向（スリット光投射方向）0.19 mm	

表 6. 4. 2 粗計測時の y-z テーブルの移動量を真値とみなした時の
センサーの測定値の誤差

計測マークの原点 からの移動距離		計測マークの TV画面上の結像位置		センサの測定値		測定値の誤差	
y座標 [mm]	z座標 [mm]	X*1	Y*1	y座標 [mm]	z座標 [mm]	y座標 [mm]	z座標 [mm]
-60.00	50.00	150	397	-60.14	49.81	-0.14	-0.19
-60.00	0.00	187	385	-59.79	-0.41	0.21	-0.41
-60.00	-50.00	218	376	-59.98	-49.17	0.02	0.83
-30.00	-30.00	206	320	-30.47	-30.48	-0.47	-0.47
-30.00	0.00	186	322	-29.83	0.09	0.17	0.09
-30.00	30.00	165	326	-30.08	29.47	-0.08	-0.53
0.00	50.00	148	260	0.10	50.55	0.10	0.55
0.00	0.00	185	259	0.10	0.58	0.10	0.58
0.00	-50.00	217	258	0.16	-49.60	0.16	0.40
30.00	-30.00	205	198	30.15	-30.94	0.15	-0.94
30.00	0.00	185	196	30.05	-0.38	0.05	-0.38
30.00	30.00	163	194	29.87	30.31	-0.13	0.31
60.00	50.00	147	124	59.95	50.05	-0.05	0.05
60.00	0.00	184	133	59.99	0.12	-0.01	0.12
60.00	-50.00	216	141	59.93	-50.01	-0.07	-0.01

*1 TV画面上の位置は下記の通り。

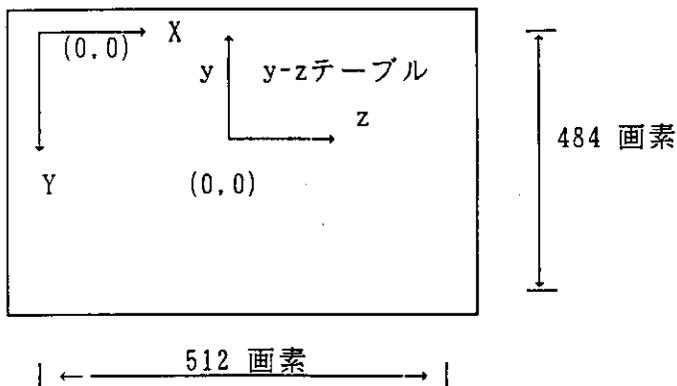


表6.4.3 精密計測時のy-zテーブルの移動量を真値とみなした時の
センサーの測定値の誤差

計測マークの原点 からの移動距離		計測マークの TV画面上の結像位置		センサの測定値		測定値の誤差	
y座標 [mm]	z座標 [mm]	X*1	Y*1	y座標 [mm]	z座標 [mm]	y座標 [mm]	z座標 [mm]
-10.00	5.00	163	372	-10.00	5.04	0.00	0.04
-10.00	0.00	187	372	-10.01	0.18	-0.01	0.18
-10.00	-5.00	212	372	-10.02	-4.90	-0.02	0.10
-5.00	-2.00	198	312	-4.98	-2.17	0.02	-0.17
-5.00	0.00	188	312	-4.98	-0.14	0.02	-0.14
-5.00	2.00	178	312	-4.98	1.90	0.02	-0.10
0.00	5.00	162	253	-0.02	5.04	-0.02	0.04
0.00	0.00	187	253	0.00	-0.05	0.00	-0.05
0.00	-5.00	211	253	0.02	-4.96	0.02	0.04
5.00	-2.00	196	195	4.94	-2.01	-0.06	-0.01
5.00	0.00	186	194	5.01	0.04	0.01	0.04
5.00	2.00	177	194	5.00	1.88	0.00	-0.12
10.00	5.00	161	135	10.02	5.05	0.02	0.05
10.00	0.00	185	136	9.98	0.13	-0.02	0.13
10.00	-5.00	210	136	10.02	-5.02	0.02	-0.02

*1 TV画面上の位置は下記の通り。

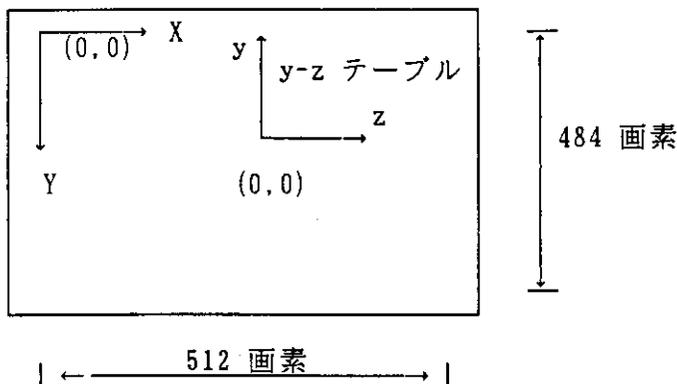


表 6. 4. 4 粗計測と精密計測結果

計測条件			粗計測結果					精密計測結果					
検出用の損耗の大きさ (設定値)			走査 ピッチ m m	走査 数	検出した 損耗 種類	計測誤差			走査 ピッチ m m	走査 数	計測誤差 (m m)		
種類	深さ Z t (m m)	面積 S (m m ²)				Δ L x (m m)	Δ L y (m m)	Δ S (m m ²)			損耗部中心座標の誤差 Δ x	Δ y	損耗深さ 誤差 Δ z
B	1.5	10.0	2.0	30	B	+7.0	-0.76	+1.0	1.0	48	+1.0	+2.92	+0.31
A	1.5	10.0	2.0	30	A	-9.0	-9.58	-201.0	1.0	30	+4.5	-2.31	+0.06
B	1.5	100.0	2.0	30	B	+7.0	-0.29	+29.0	1.0	48	+1.5	+3.61	+0.32
B	3.0	10.0	2.0	30	B	+5.0	-1.23	-27.0	1.0	46	+2.0	+2.96	+0.31
B	3.0	10.0	2.0	30	B	+5.0	-0.76	-25.0	1.0	46	+2.0	+3.04	+0.10
A	3.0	10.0	2.0	30	A	-3.0	-4.48	-57.0	1.0	30	+3.5	-2.84	+0.30
B	3.0	100.0	2.0	30	B	+1.0	-1.30	-47.0	1.0	42	0.0	+2.79	+0.31
B	1.5	10.0	5.0	12	B	+9.0	-0.83	+97.0	1.0	49	+6.0	+3.09	-0.51
A	1.5	10.0	5.0	12	A	-9.0	-15.68	-256.0	1.0	30	+1.5	-8.47	+0.52
B	1.5	100.0	5.0	12	B	+9.0	+0.66	+135.0	1.0	49	+6.0	+3.77	-0.30
A	1.5	100.0	5.0	12	A	+1.0	-10.54	-134.0	1.0	40	+4.5	-2.98	+0.06
B	3.0	10.0	5.0	12	B	+9.0	-4.0	+7.0	1.0	49	+5.5	+3.22	-0.30
B	3.0	100.0	5.0	12	B	+9.0	-2.14	+50.0	1.0	49	+6.0	+3.60	-0.30

(注) Δ L x : x 方向最大長さ L x の測定誤差
 Δ L y : y 方向最大長さ L y の測定誤差
 Δ S : 損耗部の面積 S の測定誤差

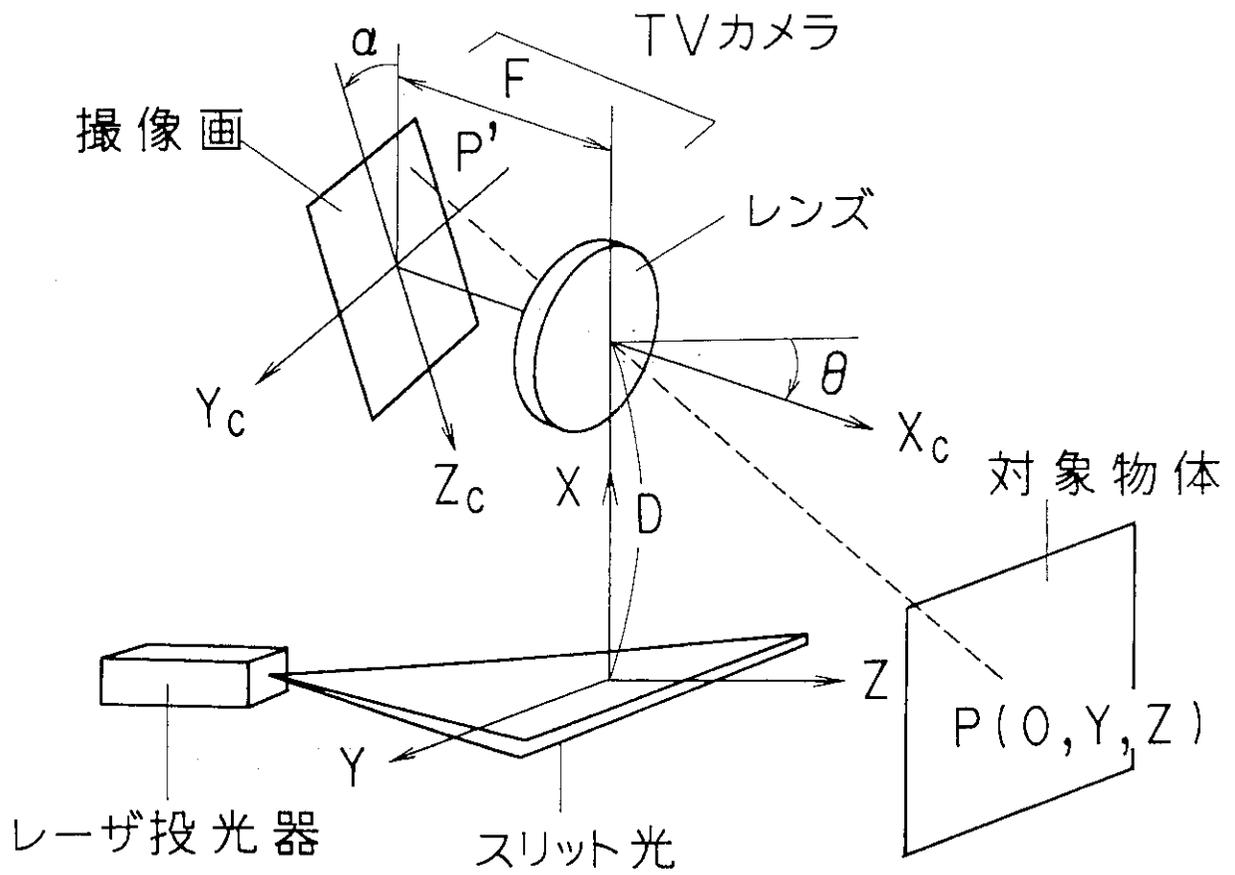


図 6. 4. 1 三次元位置の計測原理

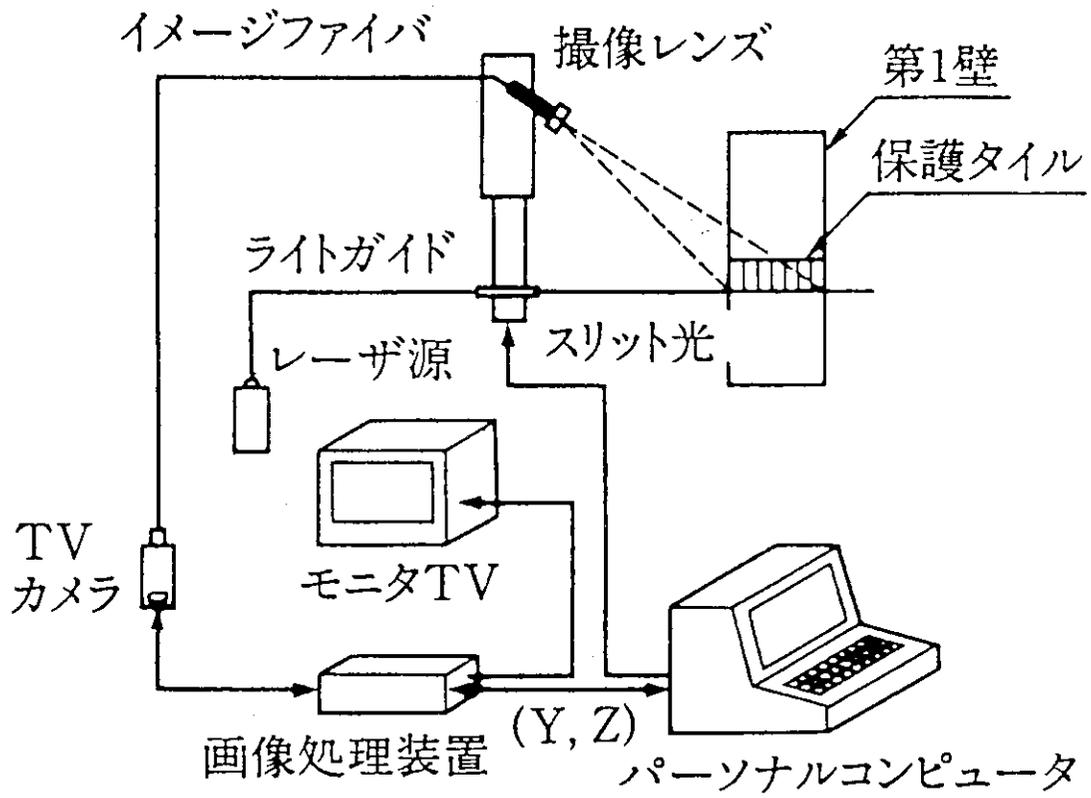


図 6. 4. 2 計測システムの構成図

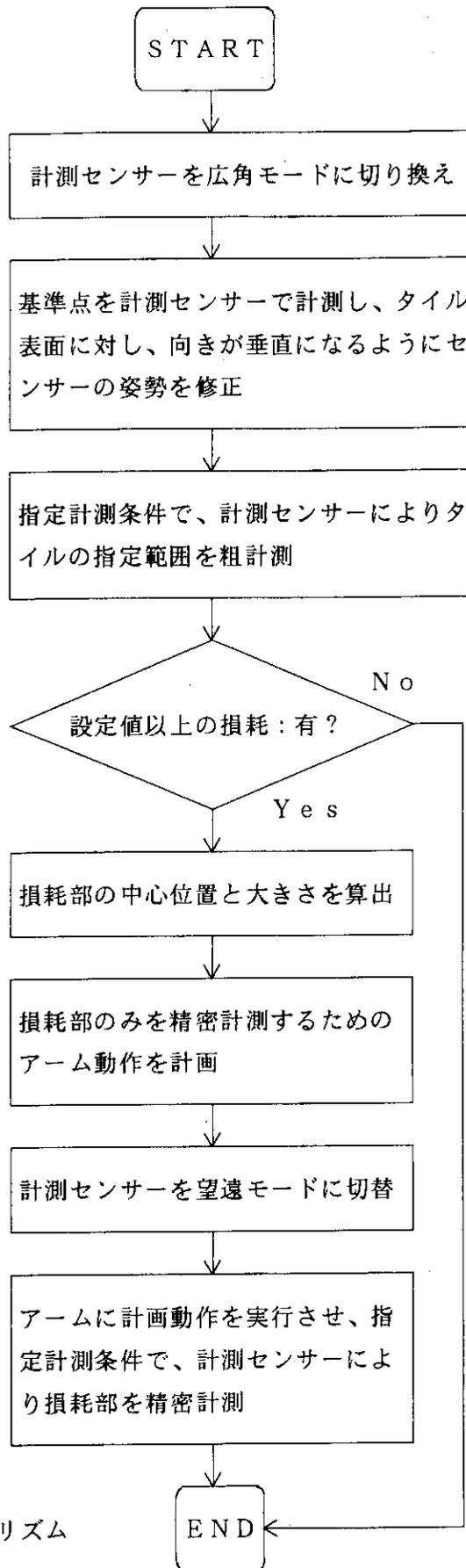


図 6. 4. 3
自律計測の制御アルゴリズム

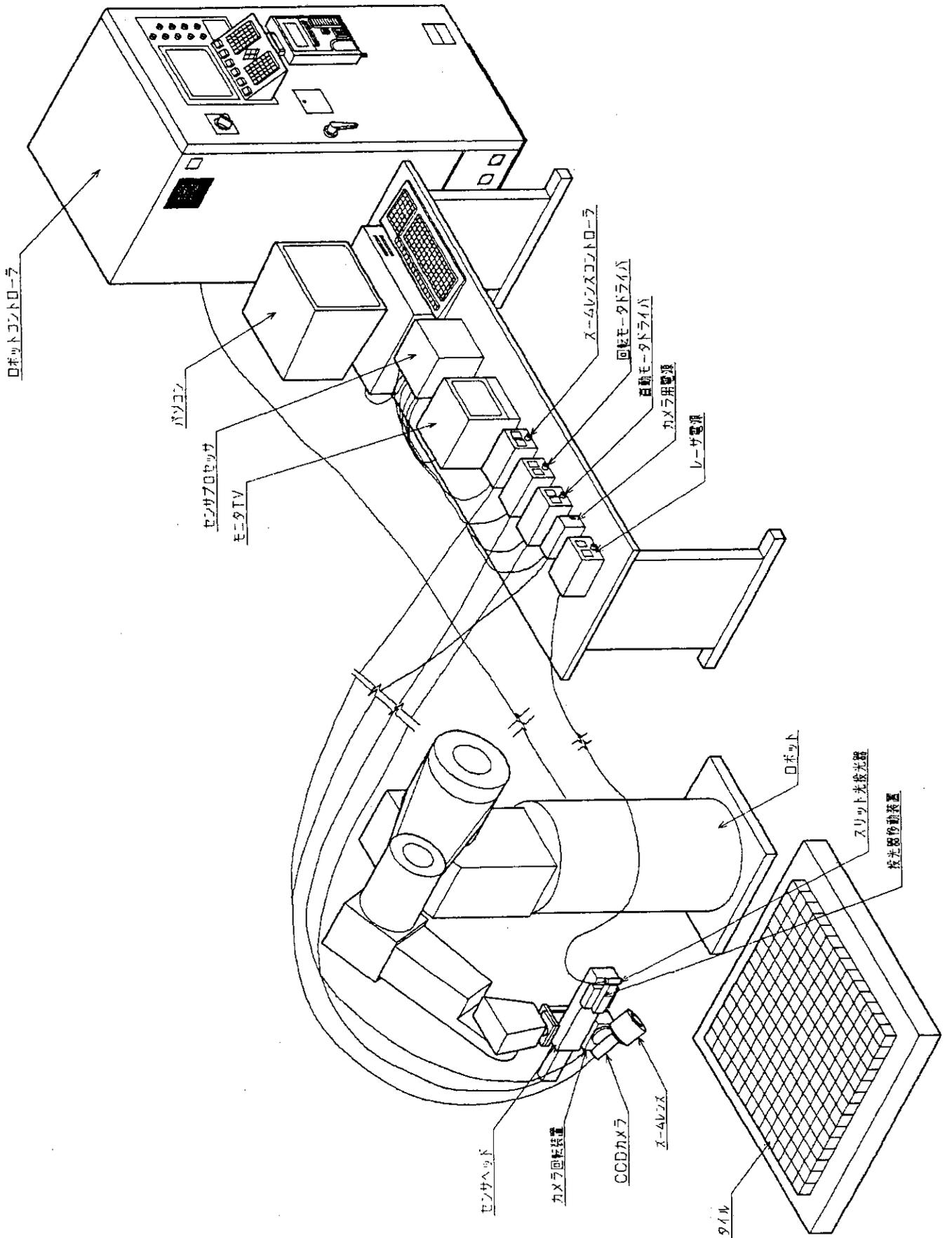


図 6. 4. 4 自律計測試験装置

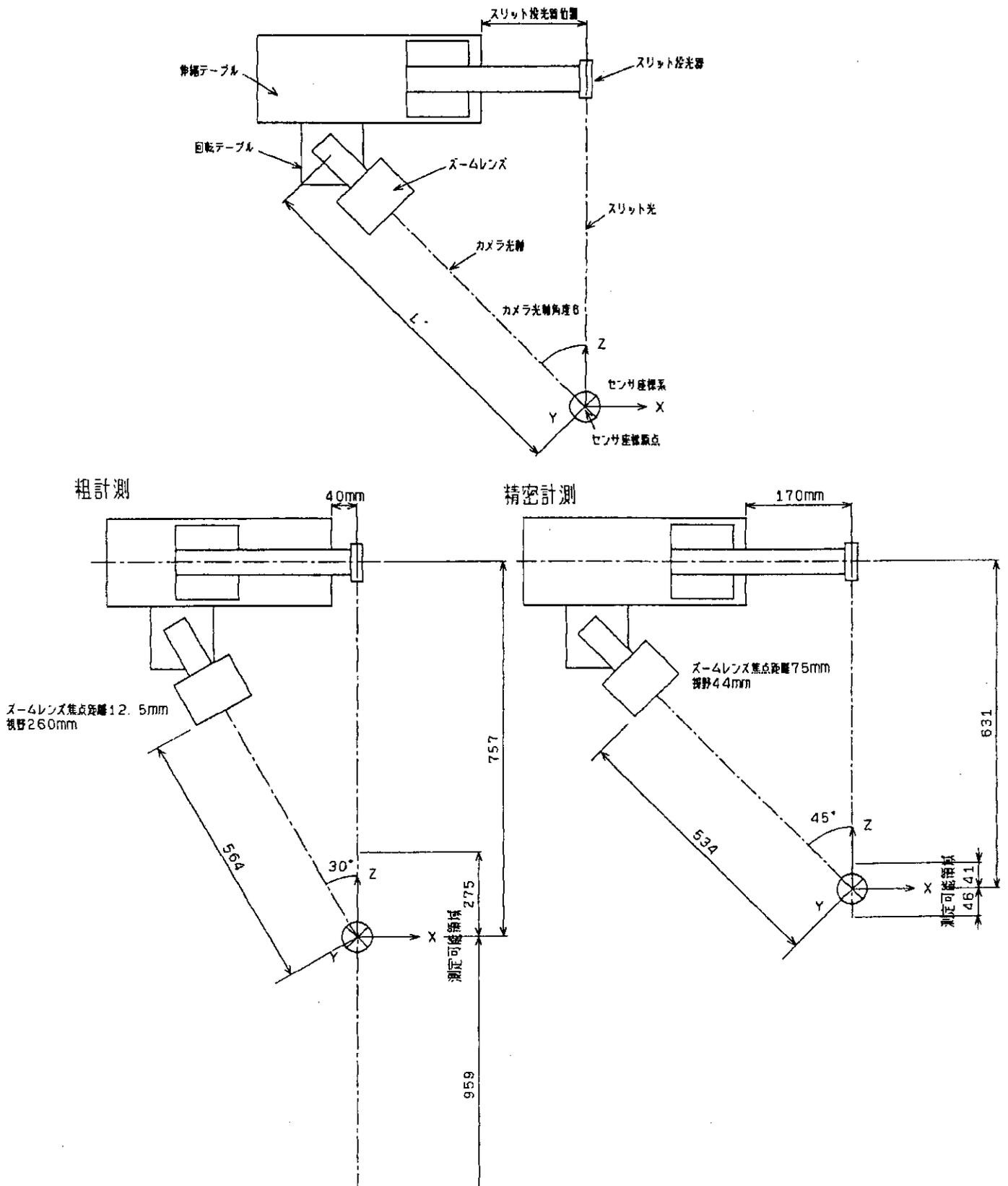


図 6. 4. 5 粗計測時と精密計測時のセンサーの計測条件

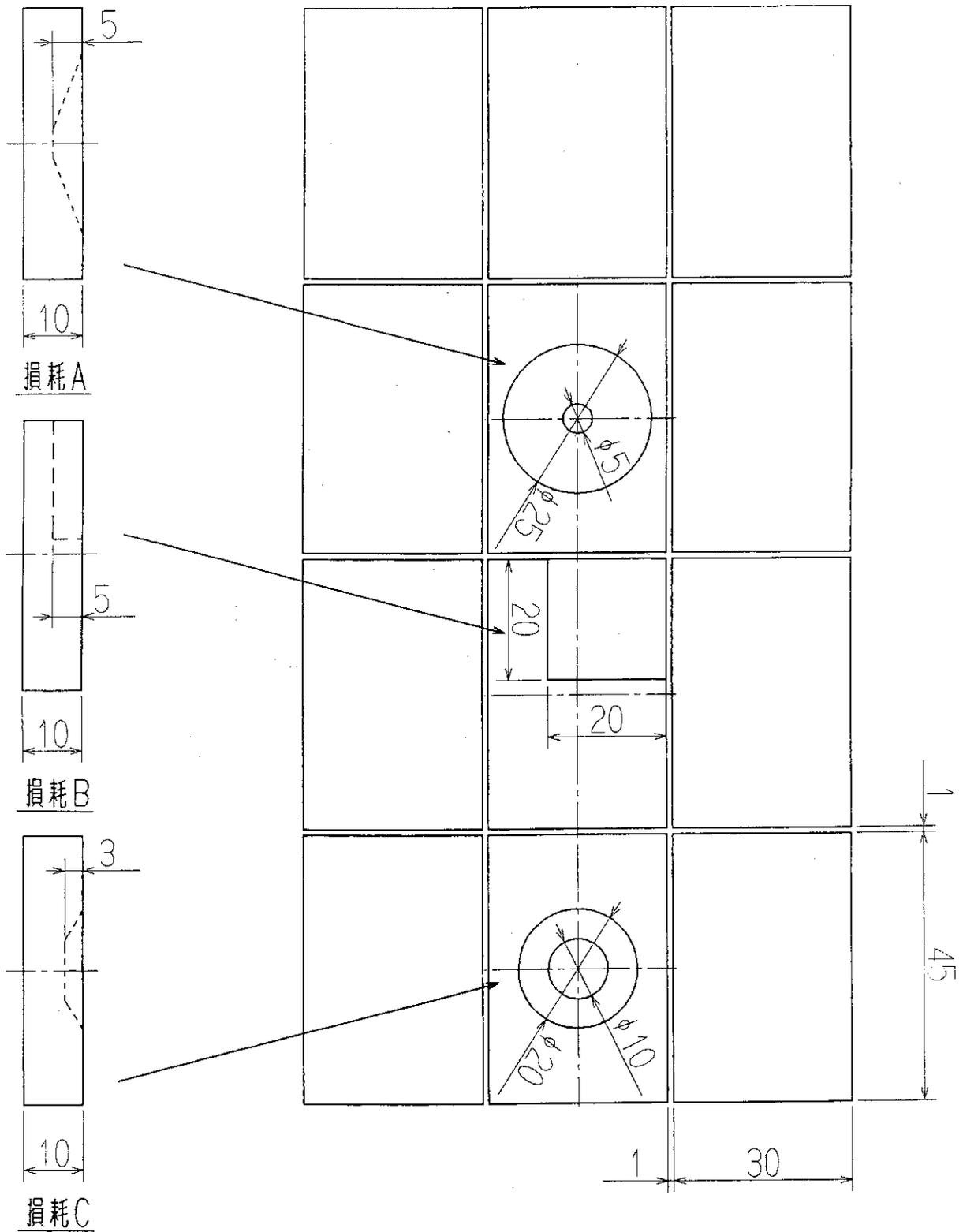
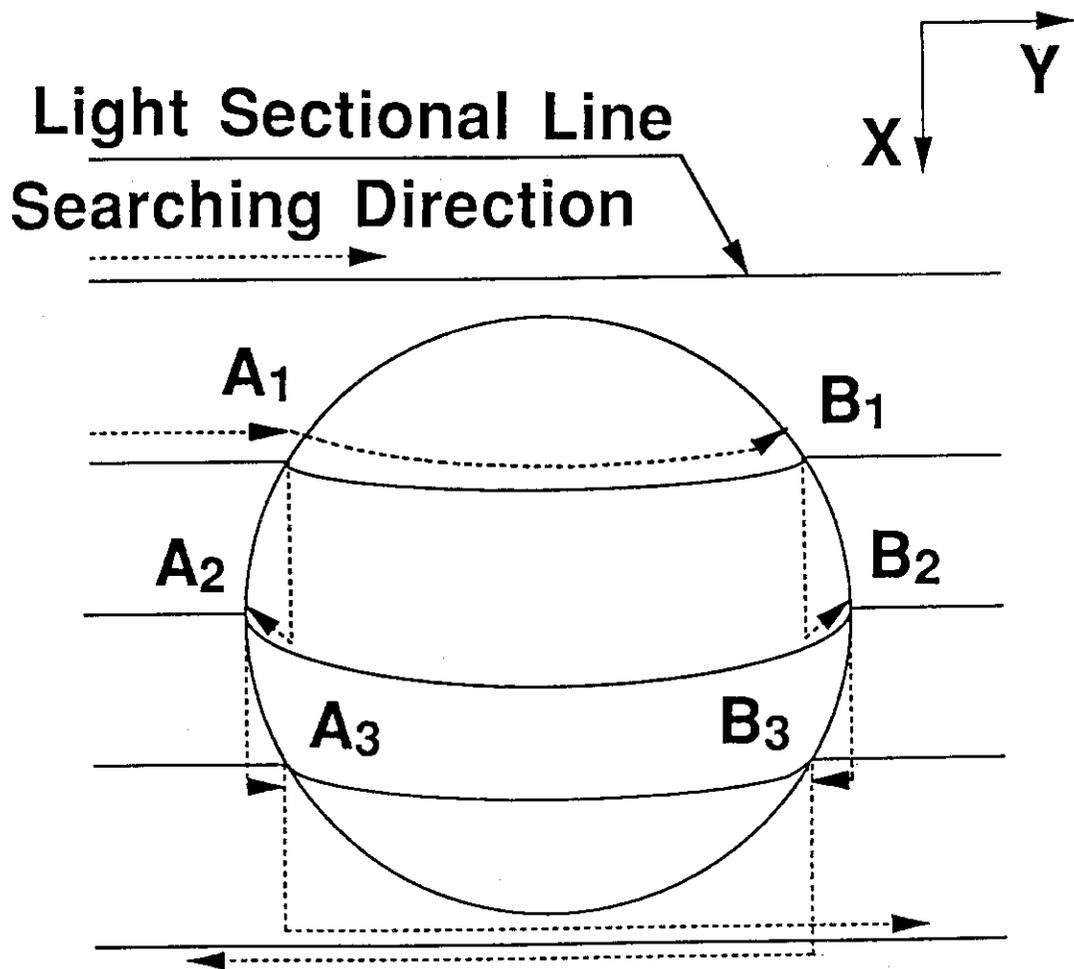


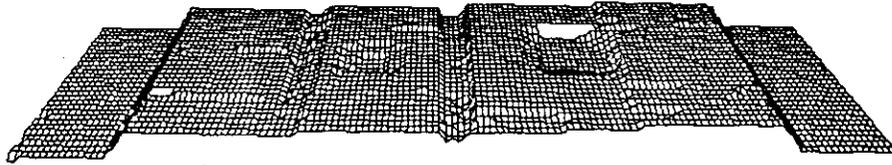
図 6. 4. 6 模擬アーマータイルの損耗形状とその配置



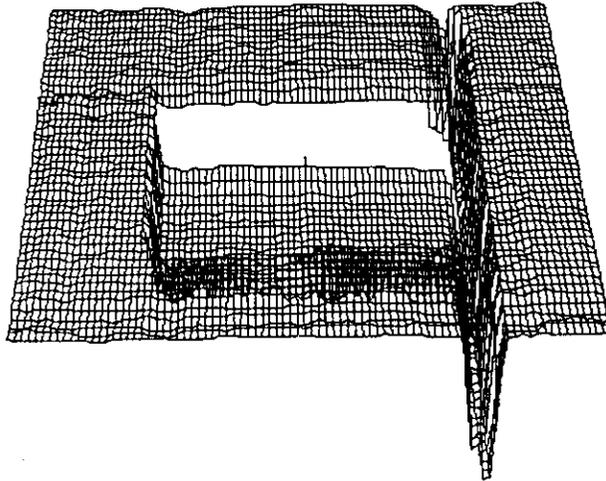
Algorithm for Defect Detection

図 6. 4. 8 輪郭線探索のアルゴリズム

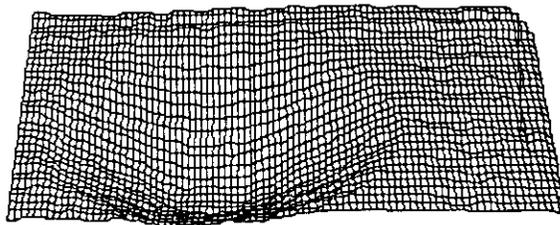
三次元グラフィック表示画面 b:w2d1a1.dat



三次元グラフィック表示画面 b:21d1a1.dat



三次元グラフィック表示画面 b:22d1a1.dat



(注) 計測結果は表6.4.4の第1行の結果である

図6.4.9 自律計測試験の計測結果

6. 5 アーマータイル交換用マニピュレータへのニューラルネットワークの適用^{10) 11)}

タイルの交換作業は自動制御によるマニピュレータによって実施する方法を採用しているが、ITERの第1壁表面すべてにアクセスするためにはマニピュレータのアーム長は約6 m、自由度8程度必要となる。この様に大きなマニピュレータになるとアーム自身の撓みや関節部のガタによりアーム先端の手先位置は目標位置より大きくずれる可能性があり、目標タイルを迅速に交換できないことが発生するかもしれない。この問題を解決するための1つの手法として、人間の視神経回路網を模擬したニューラルネットワークを応用してアームの撓みや関節部のガタを考慮(学習)した制御法を設計に取り入れ、部分モデルを試作し、試験を行った。

6. 5. 1 基本構成

図6. 5. 1にアーマータイル交換用マニピュレータの手先位置補正にニューラルネットワークを適用したシステムの基本構成の全景を示す。自由度4、全長1600 mmの位置補正検証用マニピュレータ、ロボットコントローラ、画像処理装置及びコンピュータで構成されている。各構成要素の機能を以下に示す。

表6. 5. 1 マニピュレータの仕様

(1) 位置補正用マニピュレータ

表6. 5. 1に基本仕様を示す。アーム先端位置ズレを強調するためにアーム径を小さくすることによりアームの撓みを大きく取るとともに、関節部のハーモニックドライブギアも弾性変形を生じやすい柔構造となっている。尚、実験においてはアーム先端に5 kgのダミーウェイトが取り付けられている。

(2) 基準プレート

幅1250 mm、長さ2000 mmの長方形の板に半径5 mmの穴が50 mmの間隔で格子状にあけられている。

(3) 画像処理装置

マニピュレータの先端に取り付けたTVカメラの画像から、測定点(基準プレートの任意の穴)の位置を計測する。計測方法はTV画面に写った穴の中心(重心)位置を2値化により計測し、TV画面の基準点(マニピュレータの手先位置に相当)からのズレ量を位置信号として出力する。

自由度	θ_1 : 第1アーム回転 θ_2 : 第1アーム伸縮 θ_3 : 第2アーム回転 θ_4 : 第3アーム回転
動作範囲	θ_1 : $\pm 180^\circ$ 以上 θ_2 : 650 mm θ_3 : $+60^\circ \sim -180^\circ$ θ_4 : $\pm 120^\circ$
動作速度	θ_1 : $10^\circ / s$ θ_2 : $50 \text{ mm} / s$ θ_3 : $10^\circ / s$ θ_4 : $20^\circ / s$
アーム長	L_1 : 800 mm L_2 : 400 mm L_3 : 400 mm
可搬重量	5 kg
本体重量	30 kg
先端変位の設計値	最大20 mm (水平伸長時) →主減速機(ハーモニックドライブ)の弾性変位+アーム部材の弾性変位

(4) コンピュータ

コンピュータは以下の機能を実行する。

- ① マニピュレータの手先を目標位置に移動する時の、マニピュレータの各関節角度を計算する。
- ② 画像処理装置からの計測信号をGPIB インターフェースを介して取り込み、マニピュレータの先端位置と対応づけて記憶させる。
- ③ 手先位置補正用ニューラルネットワークを構築し、位置補正のための学習と位置補正用データの算出を行う。

(5) ロボットコントローラ

コンピュータより、マニピュレータの手先目標位置に対応する各関節角をRS-232Cを介して読みとり、マニピュレータのモータを駆動する。

6.5.2 マニピュレータの機構特性

試作したマニピュレータの機構特性を計測した。尚、マニピュレータの重量を表6.5.2に示す。

表6.5.2 マニピュレータの重量

1軸	11kg	2軸	1.4kg
第2アーム	4.81kg	3軸	4.25kg
第3アーム	0.19kg	4軸	2.66kg
第4アーム	0.15kg	エンドエフェクター	4.81kg
		全重量	29.27kg

(1) 測定方法

図6.5.2に示す13個所に±5kgf以内の荷重を加えて撓み量と撓み角を測定した。荷重はロードセルで、変位はダイヤルゲージとマグネスケールで測定した。尚、各測定点での撓み量と撓み角は被測定部分（アームやハーモニックドライブ等）をはさむ2測定点間の変位の差として測定した。

(2) 測定結果

各測定点での最大撓みとガタを表6.5.3に示す。試作したマニピュレータが約5kgfの荷重にて、最大で約20mm程度撓むことがわかり、ほぼ設計値通りである。

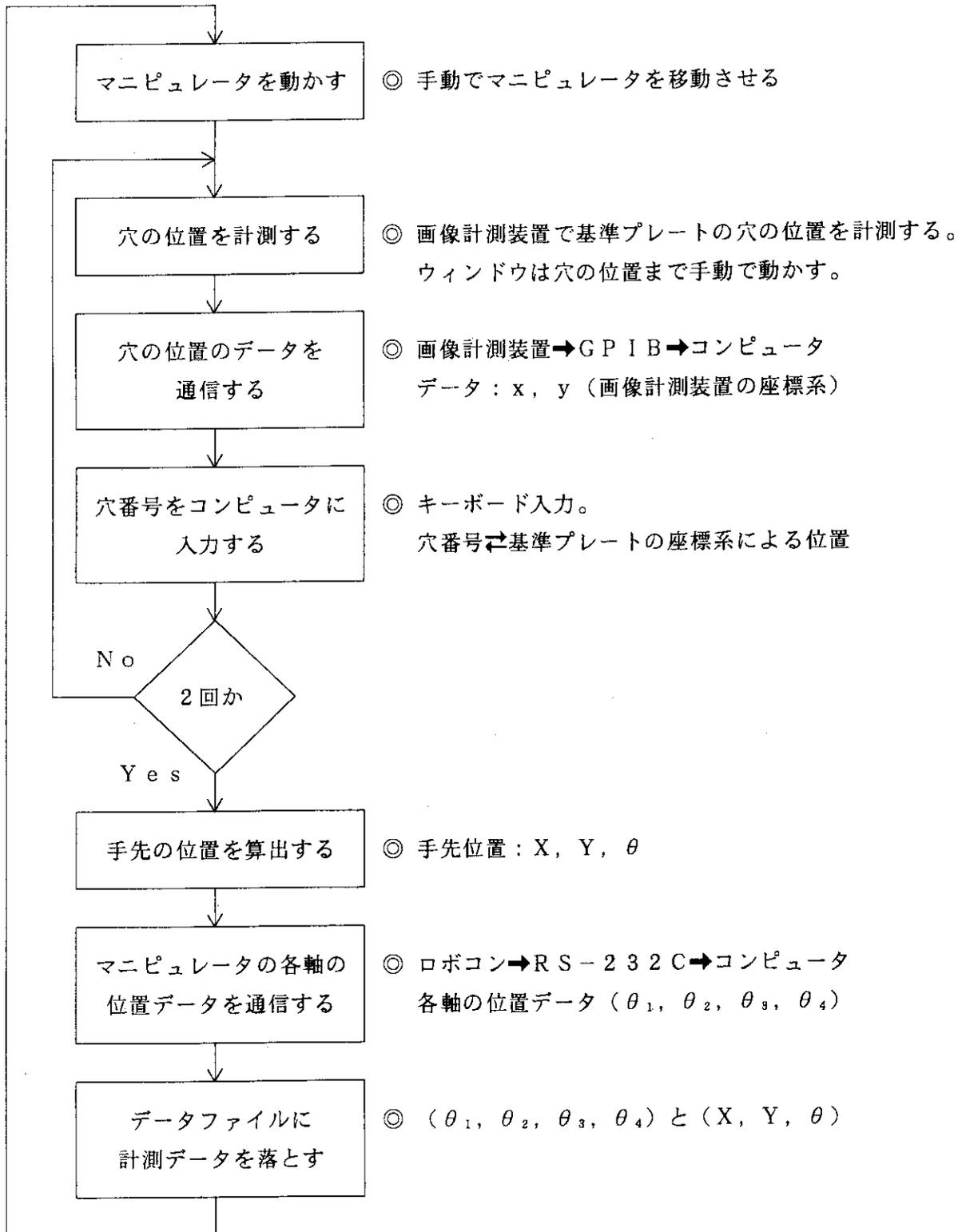
表 6. 5. 3 各測定点での最大撓みとガタ

測定点	最大撓み		ガタ(mm)
	正の荷重 mm/Kgf	負の荷重 mm/Kgf	
P ₁	0.15/4.5	-0.072/-4.9	0.06
P ₂	0.11/4.5	-0.067/-4.9	0.03
P ₃	0.12/4.5	-0.072/-4.9	0.03
P ₄	1.46/4.4	-1.05 /-5.1	0.28
P ₅	1.63/4.4	-1.21 /-5.1	0.28
P ₆	1.60/4.6	-1.25 /-5.3	0.35
P ₇	1.88/4.6	-1.47 /-5.3	0.35
P ₈	4.44/4.6	-4.25 /-5.3	0.58
P ₉	3.73/4.3	-3.33 /-4.7	0.53
P ₁₀	4.96/4.3	-4.56 /-4.7	0.64
P ₁₁	5.80/4.3	-5.47 /-4.7	0.53
P ₁₂	17.50/5.1	-14.9 /-4.8	2.22
P ₁₃	17.50/4.8	-16.9 /-4.6	2.08

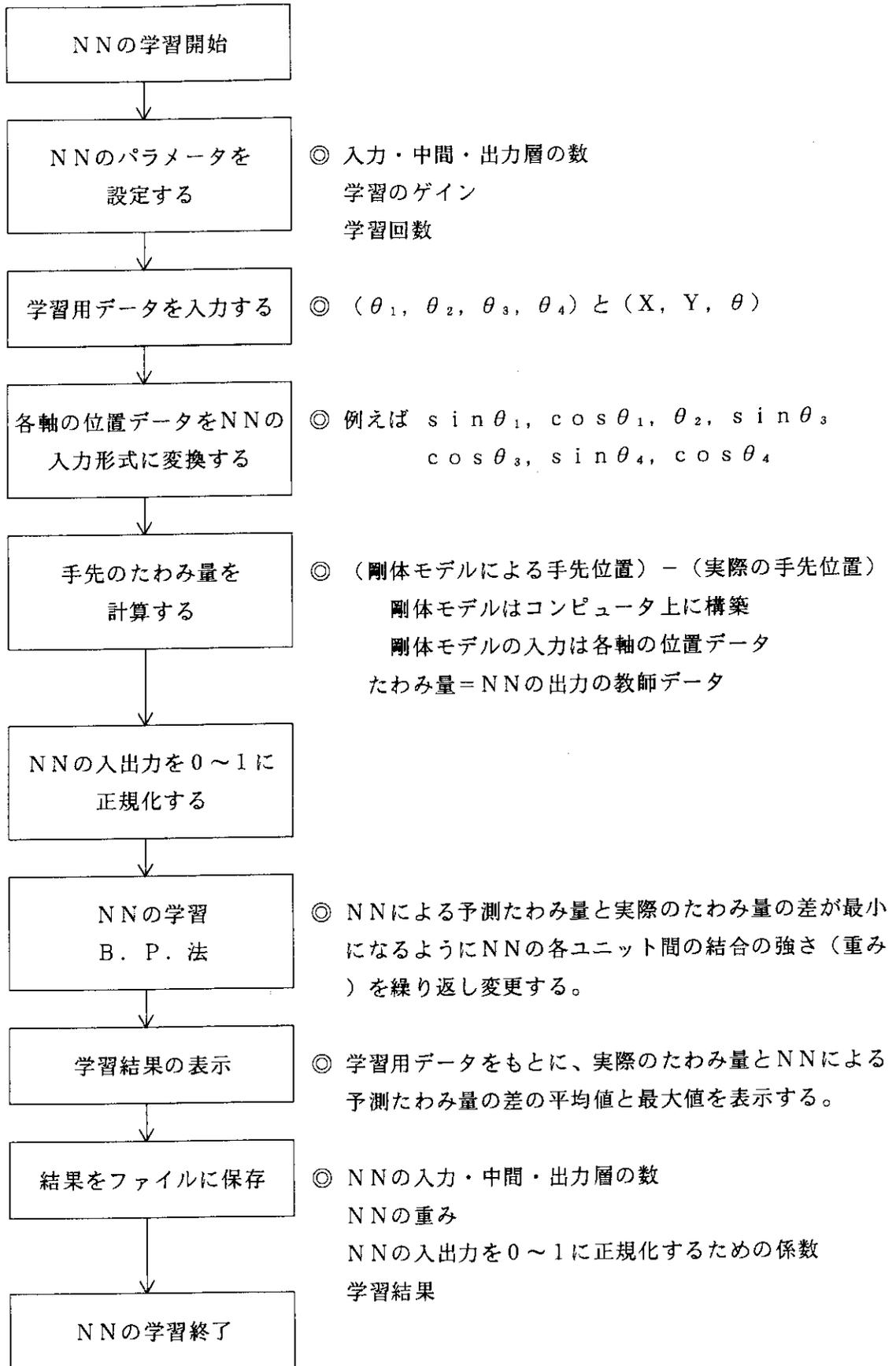
6. 5. 3 手先位置補正へのニューラルネットワークによる学習手順

学習用のデータ収集、ニューラルネットワークの学習、位置補正のそれぞれの実験手順を以下にフローチャートで示す。

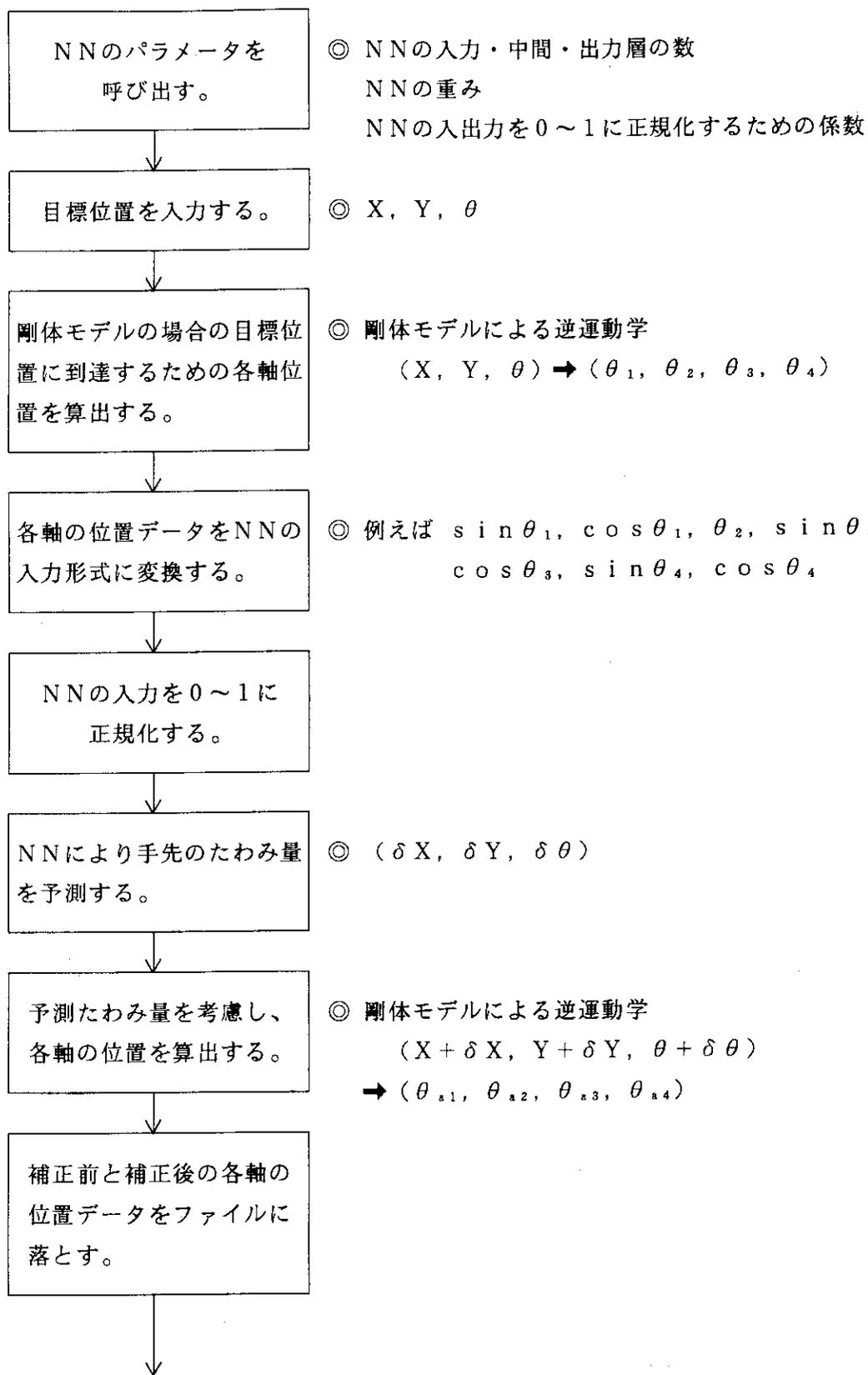
(1) 学習用のデータ収集



(2) ニューラルネットワーク (NN) の学習



(3) 位置補正



NNのパラメータを呼び出す。

- ◎ NNの入力・中間・出力層の数
- ◎ NNの重み
- ◎ NNの入出力を0~1に正規化するための係数

目標位置を入力する。

- ◎ X, Y, θ

剛体モデルの場合の目標位置に到達するための各軸位置を算出する。

- ◎ 剛体モデルによる逆運動学
 $(X, Y, \theta) \rightarrow (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$

各軸の位置データをNNの入力形式に変換する。

- ◎ 例えば $\sin \theta_1, \cos \theta_1, \theta_2, \sin \theta_3, \cos \theta_3, \sin \theta_4, \cos \theta_4$

NNの入力を0~1に正規化する。

NNにより手先のたわみ量を予測する。

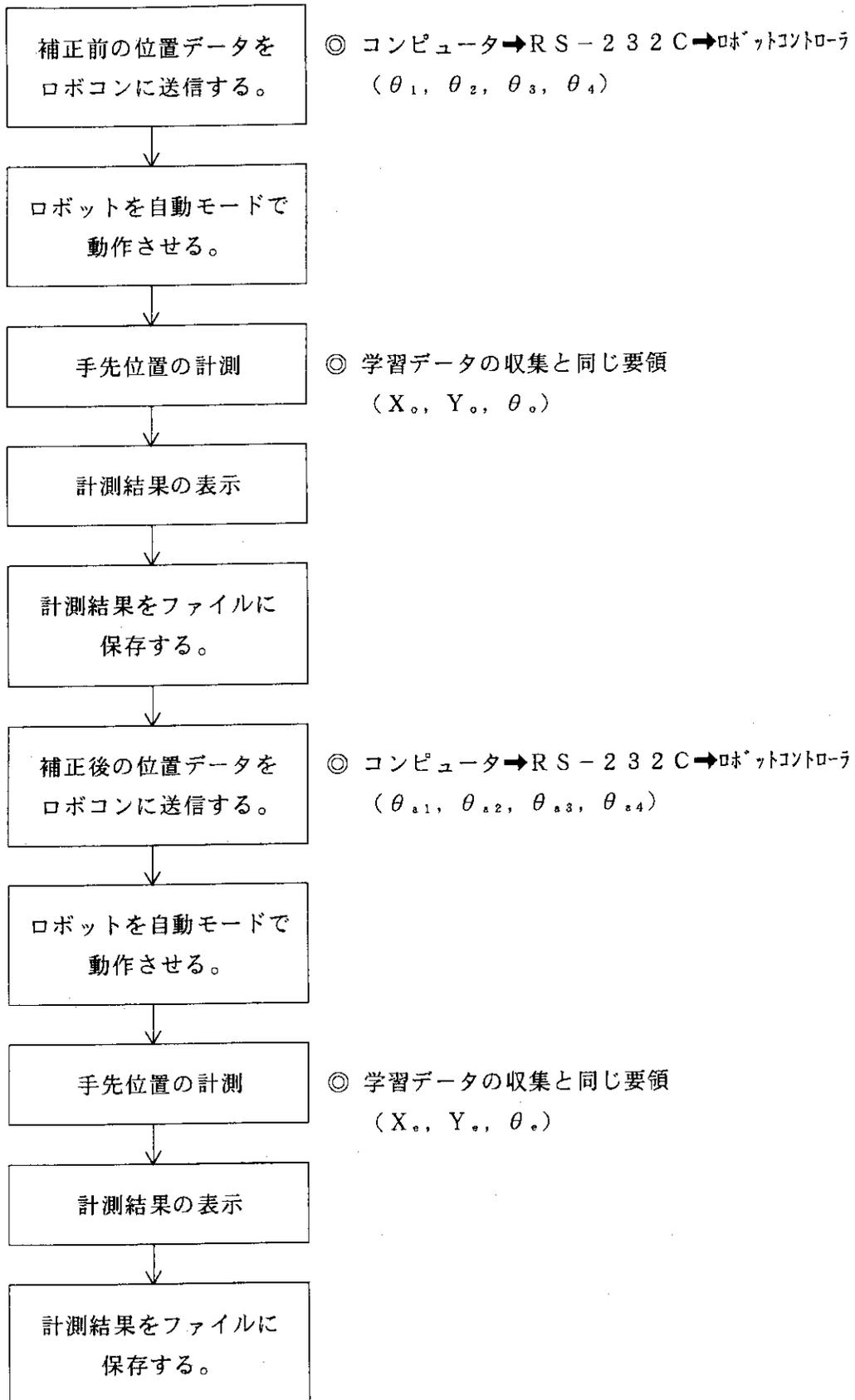
- ◎ $(\delta X, \delta Y, \delta \theta)$

予測たわみ量を考慮し、各軸の位置を算出する。

- ◎ 剛体モデルによる逆運動学
 $(X + \delta X, Y + \delta Y, \theta + \delta \theta) \rightarrow (\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}, \theta_{a4})$

補正前と補正後の各軸の位置データをファイルに落とす。

次頁へ



6. 5. 4 実験結果

(1) 学習データ

学習データとして図6. 5. 3に示す以下の7通りについて用意した。

1 軸だけが変位した場合の学習 (図6. 5. 3 (a))

- ① $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 800 \text{ mm}$, $\theta_3 = 0^\circ$ に固定し、
 $-120^\circ < \theta_4 < +120^\circ$ に変化させたとき。
- ② $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 800 \text{ mm}$, $\theta_4 = 0^\circ$ に固定し、
 $-180^\circ < \theta_3 < +60^\circ$ に変化させたとき。
- ③ $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$, $\theta_4 = 4^\circ$ に固定し、
 $150 \text{ mm} < \theta_2 < 800 \text{ mm}$ に変化させたとき。
- ④ $\theta_2 = 800 \text{ mm}$, $\theta_3 = 0^\circ$, $\theta_4 = 0^\circ$ に固定し、
 $-15^\circ < \theta_1 < +25^\circ$ に変化させたとき。

2 軸が変位した場合の学習 (図6. 5. 3 (b))

- ⑤ $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 800 \text{ mm}$ に固定し、
 $-120^\circ < \theta_3 < +60^\circ$, $-120^\circ < \theta_4 < +120^\circ$ に変化させたとき。

プレートのある矩形領域に手先を移動した場合の学習 (図6. 5. 3 (c))

- ⑥ θ_1 軸の中心を原点として、水平方向 (x) $1300 \text{ mm} \sim 1600 \text{ mm}$
 垂直方向 (y) $-150 \text{ mm} \sim +150 \text{ mm}$ の矩形領域
- ⑦ θ_1 軸の中心を原点として、水平方向 (x) $1000 \text{ mm} \sim 1300 \text{ mm}$
 垂直方向 (y) $-500 \text{ mm} \sim -200 \text{ mm}$ の矩形領域

(2) ニューラルネットワークの入力層

- ① ユニット数: 4 (各軸の位置データをそのまま使用)
- ② ユニット数: 7 (θ_1 , θ_3 , θ_4 を \sin , \cos にし、 θ_2 はそのまま使用)
- ③ ユニット数: 10 (①と②の混合)

(3) 学習結果

表6. 5. 1に学習結果を示す。入力層の形式に関する比較をすると、

- ① ユニット数がいずれの場合も目標予測精度 2.0 mm の $1/3$ 以内の誤差に収まっている。
- ② 学習時間を考えるとユニット数: 7の場合が良い。

学習データについてはデータ数の適正化は図っていないが、

- ③ 1軸のみの補正ではできるだけ多くのデータを用い、予測精度は目標予測精度 2.0 mm の $1/3$ 以内の誤差に収まっている。
- ④ 2軸を変化させた場合は、入力層と出力層の間の非線形性が強いいため学習回数を多くして

も予測精度は良くなる。

- ⑤矩形領域内のデータでは、各軸とも変化が少ないので入力層と出力層の間の非線形性が少ないため、予測精度は高い。

(4) 手先位置の補正結果

学習により生成したニューラルネットワークにより、各軸の位置データを用いて手先位置を補正し、実際にマニピュレータを動作させて評価した。

表6.5.2は表6.5.1のNo.12~No.15の学習により得られたニューラルネットワークを用いて位置補正システムの検証を行った結果である。いずれの場合も目標精度2 mmをクリアしている。

表 6. 5. 1 学習結果

No.	入力	中間	ゲイン	学習データ	データ数	学習回数	実際の撓み量と予測撓み量との誤差					
							平均			最大		
							X mm	Y mm	θ deg	X mm	Y mm	θ deg
1	4	10	0.001	①	40	100,000	0.21	0.23	0.10	0.63	0.59	0.23
2	7	10	0.001	①	40	20,000	0.19	0.16	0.10	0.57	0.38	0.22
3	10	20	0.001	①	40	18,000	0.06	0.08	0.10	0.23	0.39	0.23
4	7	10	0.001	②	61	20,000	0.13	0.22	0.10	0.41	0.64	0.29
5	10	20	0.001	②	61	17,000	0.10	0.11	0.10	0.30	0.34	0.27
6	7	10	0.001	③	11	20,000	0.14	0.13	0.04	0.32	0.30	0.11
7	10	20	0.001	③	11	20,000	0.04	0.10	0.01	0.09	0.29	0.01
8	7	10	0.001	④	33	20,000	0.14	0.13	0.13	0.54	0.42	0.26
9	10	20	0.001	④	33	15,000	0.09	0.12	0.10	0.40	0.28	0.32
10	7	10	0.001	⑤	64	500,000	0.72	2.96	8.68	2.01	7.37	29.64
11	10	20	0.001	⑤	64	400,000	0.26	1.55	3.04	0.81	5.54	9.68
12	7	10	0.001	⑥	49	20,000	0.11	0.16	0.06	0.25	0.45	0.27
13	10	20	0.001	⑥	49	40,000	0.14	0.15	0.06	0.40	0.47	0.27
14	7	10	0.001	⑦	49	20,000	0.10	0.09	0.03	0.30	0.21	0.11
15	10	20	0.001	⑦	49	20,000	0.08	0.09	0.03	0.28	0.21	0.09

表6.5.2(a) X=1300~1600mm, Y=-150~150 mmの矩形領域内の補正結果

No.	目標位置			補正前			No.12の補正結果			No.13の補正結果		
	X mm	Y mm	θ deg	X mm	Y mm	θ deg	X mm	Y mm	θ deg	X mm	Y mm	θ deg
1	1450	0	-43	1444.9	-11.5	-44.5	1450.0	0.5	-43.2	1450.3	-0.5	-43.3
2	1450	150	-36	1445.8	137.7	-37.7	1450.3	149.5	-35.9	1450.0	149.5	-36.0
3	1450	-150	-45	1444.1	-161.6	-46.2	1450.1	-150.3	-45.2	1450.4	-150.8	-44.9
4	1300	0	-47	1295.0	-8.4	-48.0	1300.0	-0.8	-47.3	1300.0	-0.6	-46.9
5	1550	0	-22	1545.8	-15.5	-24.0	1550.6	-1.1	-21.9	1550.4	-1.1	-22.0
6	1300	150	-40	1295.3	140.7	-41.4	1300.3	149.5	-39.9	1300.2	149.5	-40.0
7	1300	-150	-54	1295.2	-157.5	-54.8	1300.3	-150.4	-54.1	1300.0	-150.4	-54.3
8	1550	150	-6	1448.5	133.9	-9.8	1552.0	148.2	-6.2	1551.3	148.3	-6.3
9	1550	-150	-27	1544.8	-165.4	-29.1	1550.4	-151.0	-26.9	1550.4	-151.1	-27.0

表6.5.2 (b) X=1000~1300mm, Y=-500~-200 mmの矩形領域内の補正結果

No.	目標位置			補正前			No. 14の補正結果			No. 15の補正結果		
	X mm	Y mm	θ deg	X mm	Y mm	θ deg	X mm	Y mm	θ deg	X mm	Y mm	θ deg
1	1150	-350	-70	1147.3	-355.0	-70.3	1149.6	-350.6	-70.1	1149.5	-350.5	-70.0
2	1150	-200	-79	1148.7	-204.4	-78.9	1149.9	-200.0	-79.0	1149.8	-199.9	-79.0
3	1150	-500	-80	1148.1	-505.1	-79.9	1149.8	-500.2	-80.0	1149.6	-500.5	-80.1
4	1000	-350	-100	1002.5	-354.6	-99.0	999.9	-350.2	-99.9	999.9	-350.2	-99.9
5	1300	-350	-64	1295.5	-357.2	-64.6	1299.7	-350.7	-64.0	1299.5	-350.9	-64.1
6	1000	-200	-96	1002.0	-203.9	-95.2	999.9	-200.4	-96.0	999.9	-200.4	-95.9
7	1000	-500	-100	1002.1	-505.1	-99.0	1000.1	-500.4	-99.0	1000.0	-500.5	-99.9
8	1300	-200	-61	1295.8	-207.1	-61.7	1299.9	-200.5	-61.1	1299.8	-200.5	-61.1
9	1300	-500	-65	1294.8	-507.7	-65.6	1299.5	-500.6	-65.1	1299.5	-500.8	-65.1

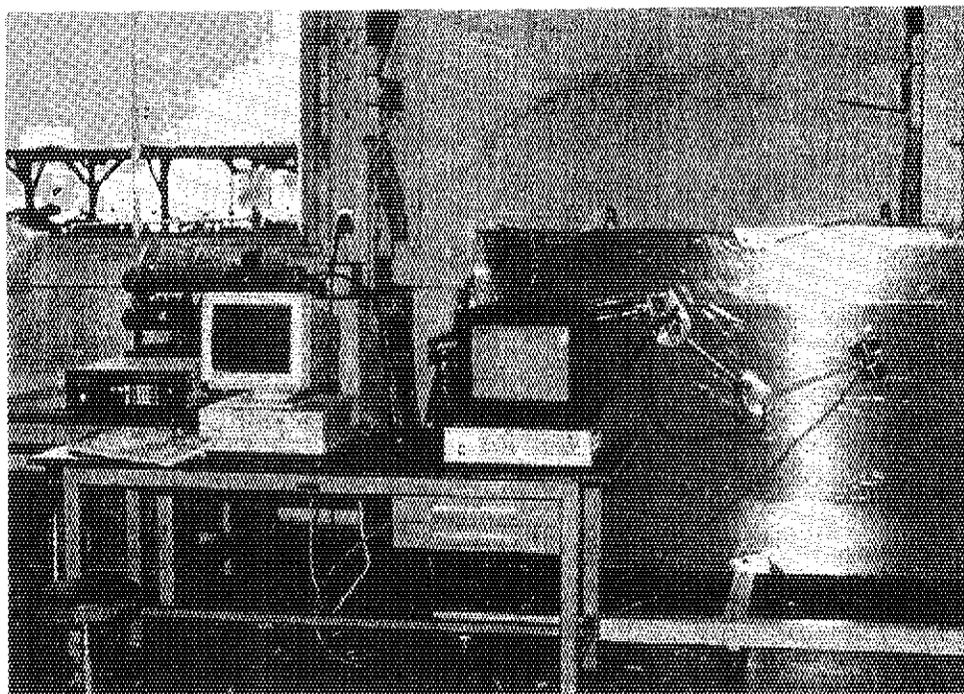
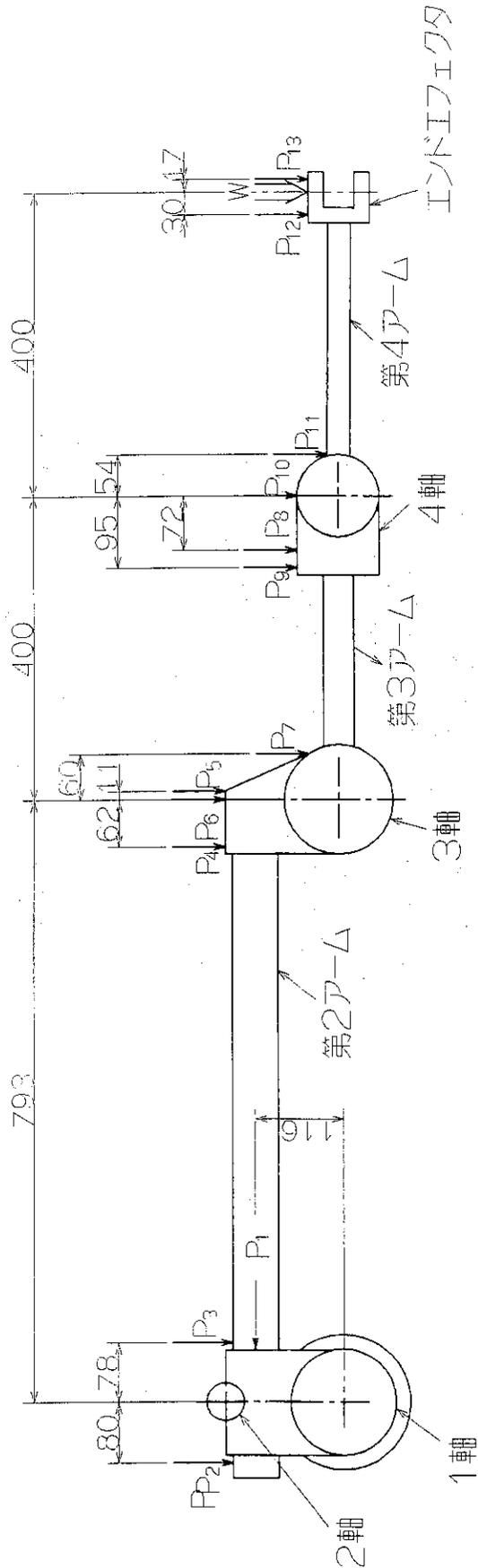


図 6. 5. 1. アーマータイル交換用マニピュレータの手先位置補正システム

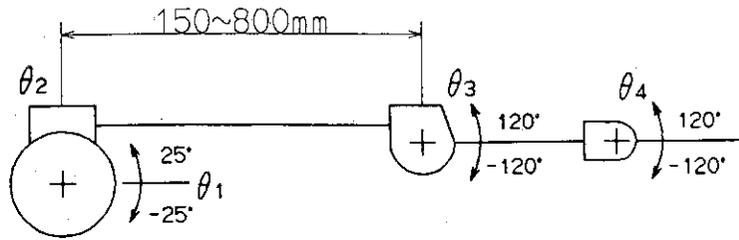


マニピュレータ姿勢: 1軸=0°, 2軸(1軸, 3軸間)=793mm, 3軸=0°, 4軸=793mm

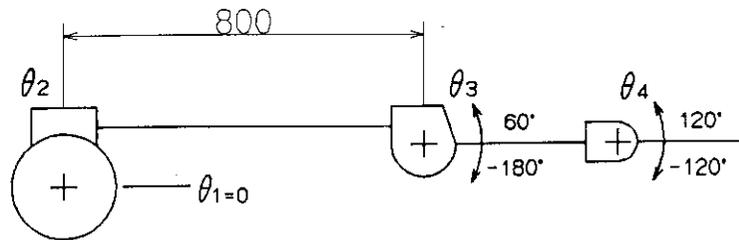
W: 荷重点

P₁~P₁₃: 測定点

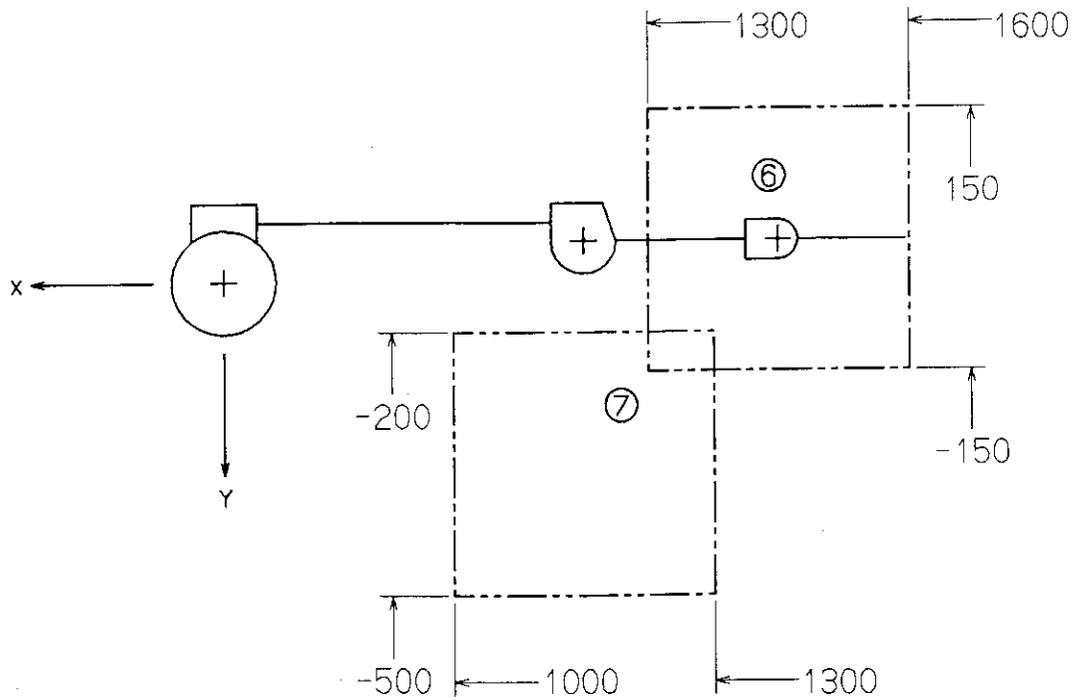
図 6. 5. 2 アームの撓みの測定点



(a) 1軸だけが変位した場合の学習



(b) 2軸だけが変位した場合の学習



(c) 矩形領域に手先を移動した場合の学習

図 6. 5. 3 学習用データ収集の領域

6. 6 リップシール溶接

プラズマ運転中は真空容器によりその中は真空に保持されている。一方、真空容器内にある炉内コンポーネント（第1壁、ダイバータ、ブランケット）を保守・修理する時、遠隔機器の挿入や損傷コンポーネントを搬出するためには真空バウンダリーを破る必要がある。通常、この真空バウンダリーはリップシール溶接によりなされている。例えば、赤道面にあるメンテナンスポートは幅1.3m、高さ3.4mの領域の周囲を遠隔によりリップシール溶接する必要がある。この様な大きな領域を溶接する時、位置決め精度に起因するリップ面間のギャップや段差が溶接性に大きな影響を及ぼす。ここでは、ITERで想定されるリップシール材（平板）により溶接性が保持される許容ギャップや段差を直線部、コーナー部、T字溶接部について実験により求めた。

6. 6. 1 溶接条件

予備試験をもとに以下の溶接パラメータを用いて実験を行った。

- ◎溶接電源 : インバータ制御パルスTIG溶接電源（定格300A）
- ◎ピーク電流 : 150A
- ◎ベース電流 : 30A
- ◎タングステン電極 : $\phi 3.2$
- ◎溶接装置 : 産業用ロボット
- ◎溶接速度 : 800mm/min（標準条件）
500~700mm/min（高入熱条件）
- ◎リップシール材 : SUS304、1mm t X 50 X 200
- ◎スペーサ : 厚みゲージ
厚さ：0.1mm、0.3mm、0.5mm
0.7mm、1.0mm

6. 6. 2 ギャップ溶接

前節の溶接条件をもとにギャップ量を0.1~1.0mmで変化させて溶接試験を実施した（図6.6.1）。
図6.6.2にギャップ量0.1~0.5mmの溶接結果を、
図6.6.3にギャップ量0.7~1.0mmの溶接結果を示す。写真から明らかなように許容ギャップ量は0.5mm（高入熱条件を用いれば0.7mm）と判断される。

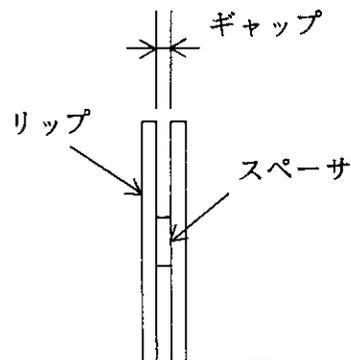


図6.6.1 ギャップ溶接

6. 6. 3 目違い溶接

同様の溶接条件をもとに目違い量を1.0~2.5mmで変化させて溶接試験を実施した(図6. 6. 4)。図6. 6. 5に目違い量1.0~2.0mmの溶接結果を、図6. 6. 6に目違い量2.5mmの溶接結果を示す。図から明らかなように許容目違い量は2.0mm(高入熱条件を用いれば2.5mm)と判断される。

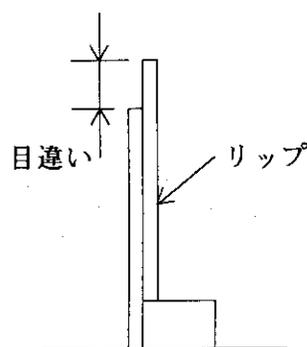


図6. 6. 4 目違い溶接

6. 6. 4 コーナー部の溶接

図6. 6. 7に示す2枚の供試材をろう付けしてコーナー部の試験体とした。尚、この試験体は次節のT字部の溶接にも用いている。

図6. 6. 8~6. 6. 10に溶接試験結果を示す。ギャップ及び目違いの無い試験片に対しては、加工速度800mm/minの標準条件で良好な結果が得られている(図6. 6. 8)。また、ギャップ0.5mm(図6. 6. 9)及び目違い1mm(図6. 6. 10)の試験片については、加工速度600mm/minの条件で良好な結果が得られた。それぞれの断面観察結果を図6. 6. 11に示す。

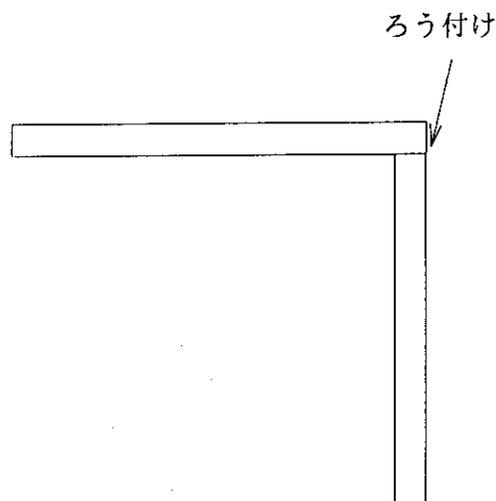


図6. 6. 7 ろう付けによる供試材

尚、目違い2mmの場合、一部に溶接不良が発生した(図6. 6. 12)。これは目違い量の厳密な設定が困難(一部で2mmを越えた可能性あり)であることに起因するものと思われる。目違いに基づく溶接不良部の断面観察結果を図6. 6. 13に示す。

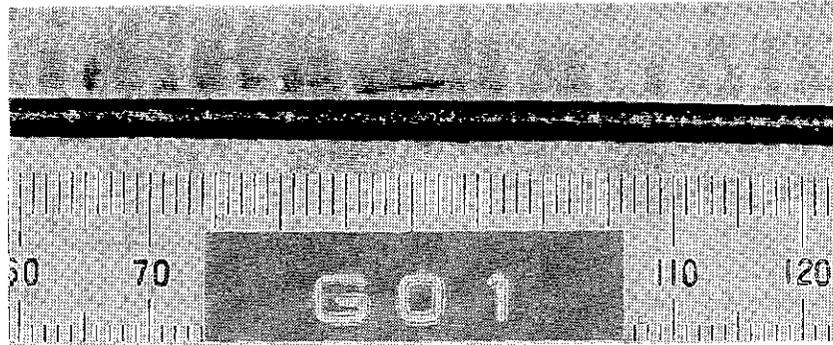
ギャップ付きのコーナー部リップシール試験体における溶接不良の例を図6. 6. 14に、断面観察結果を図6. 6. 15に示す。ここではギャップ0.5mmに対し、加工速度800mm/minの標準条件を適用したために溶接不良が発生したものと考えられる。

以上よりコーナー部においても許容されるギャップ: ~0.5mm、目違い: ~2mmは可能と思われる。尚、この許容値において溶接継手部を浸透探傷試験を実施したがインディケーションは認められなかった。

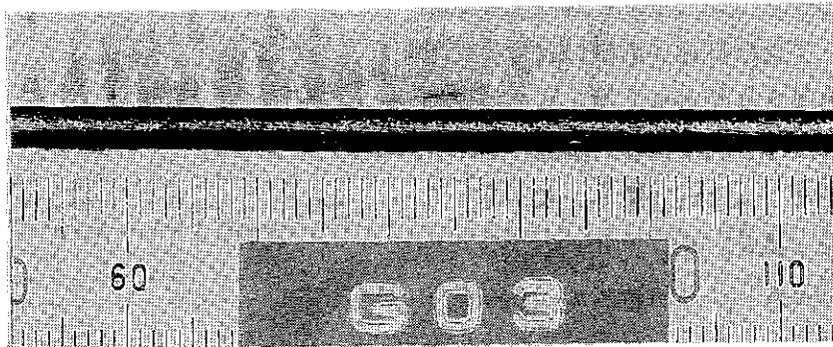
6. 6. 5 T字部の溶接

図6. 6. 16~6. 6. 18にT字部リップシール溶接試験結果を示す。図中の手順①及び手順②は溶接施工手順を示す。試験結果はコーナー部溶接と同様にギャップ及び目違いの無い試験片に対しては加工速度800mm/minの標準条件を適用(図6. 6. 16)し、図6. 6. 17にギャップ0.5mmの試験片に、図6. 6. 18に目違い1.0~1.5mmの試験片には加工速度600mm/minを適用してそれぞれ良好な結果が得られた。尚、こ

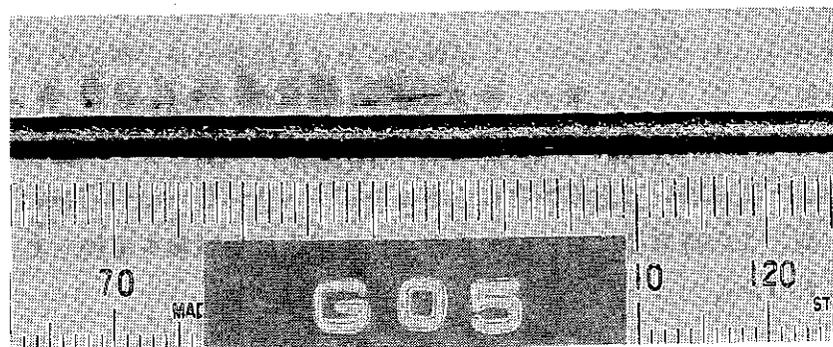
の許容値において溶接継手部を浸透探傷試験を実施したがインディケーションは認められなかった。



ギャップ 0.1mm (800mm/min, 標準条件)

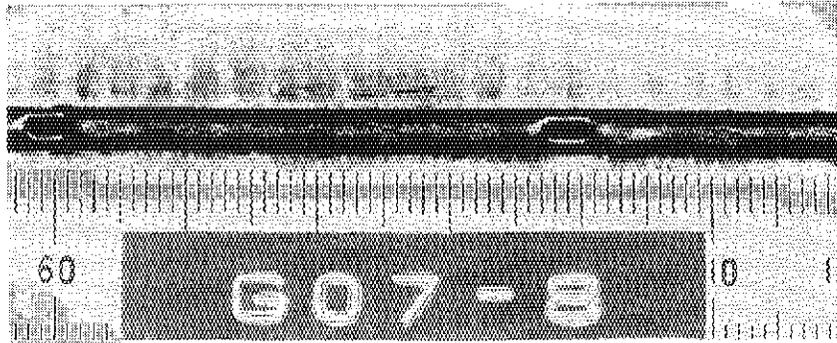


ギャップ 0.3mm (800mm/min, 標準条件)

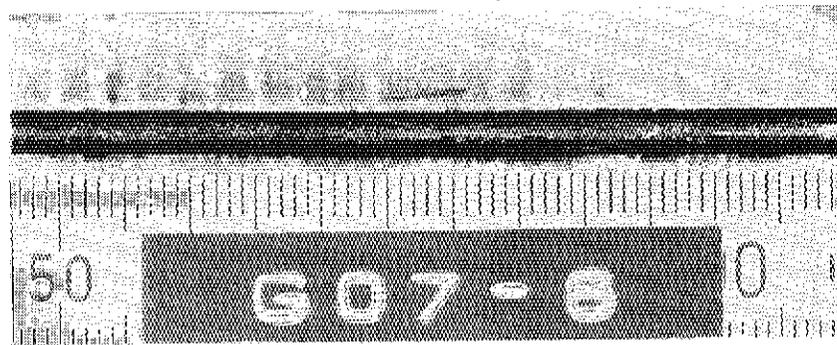


ギャップ 0.5mm (800mm/min, 標準条件)

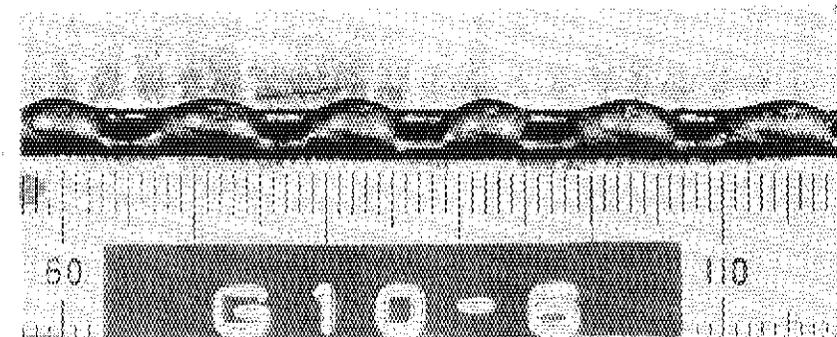
図 6. 6. 2 ギャップ量0.1~0.5mmの溶接結果



ギャップ 0.7mm (800mm/min, 標準条件)

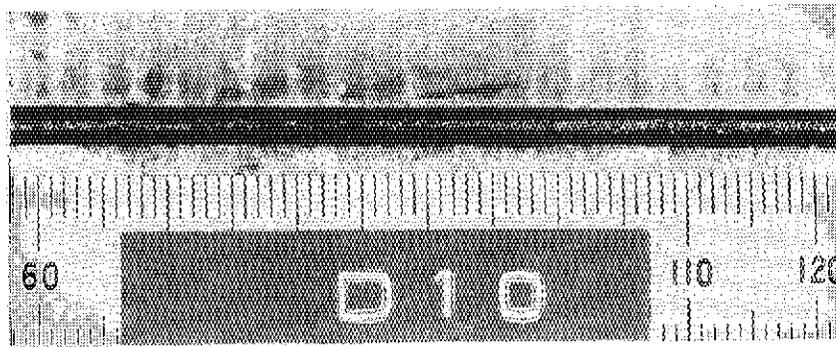


ギャップ 0.7mm (600mm/min, 高入熱条件)

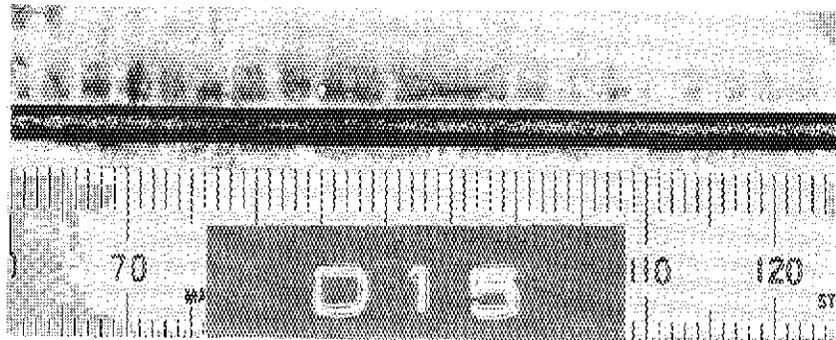


ギャップ 1.0mm (600mm/min, 高入熱条件)

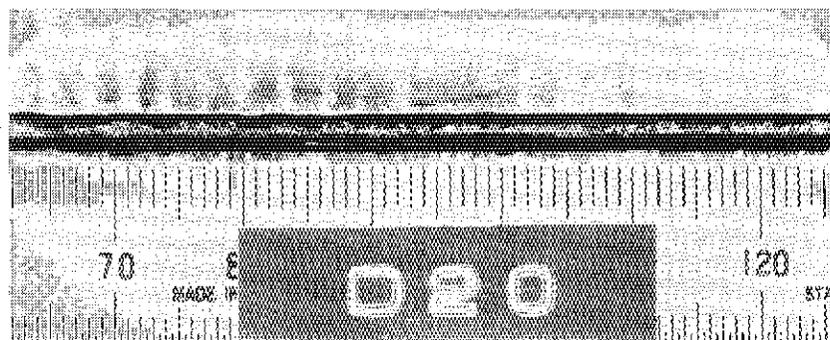
図 6. 6. 3 ギャップ量0.7~1.0mmの溶接結果



目違い 1.0mm (800mm/min, 標準条件)

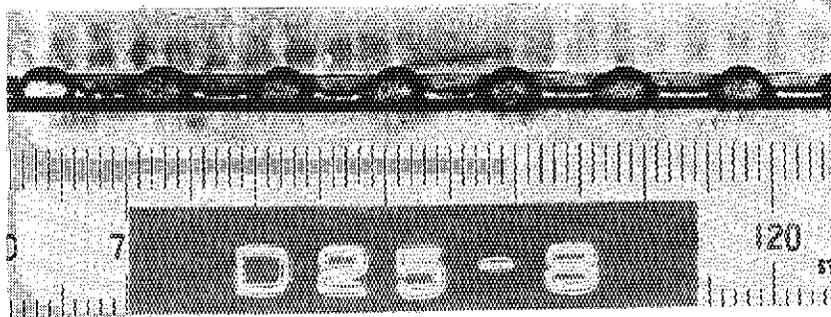


目違い 1.5mm (800mm/min, 標準条件)

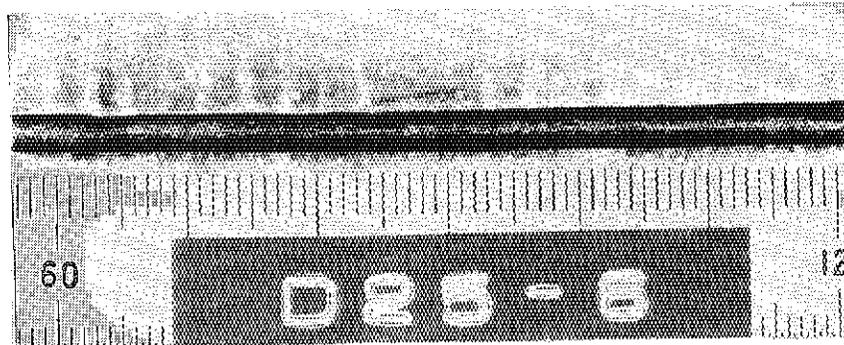


目違い 2.0mm (800mm/min, 標準条件)

図6.6.5 目違い1.0~2.0mmの溶接結果



目違い 2.5mm (800mm/min, 標準条件)



目違い 2.5mm (600mm/min, 高入熱条件)

図6.6.6 目違い2.5mmの溶接結果

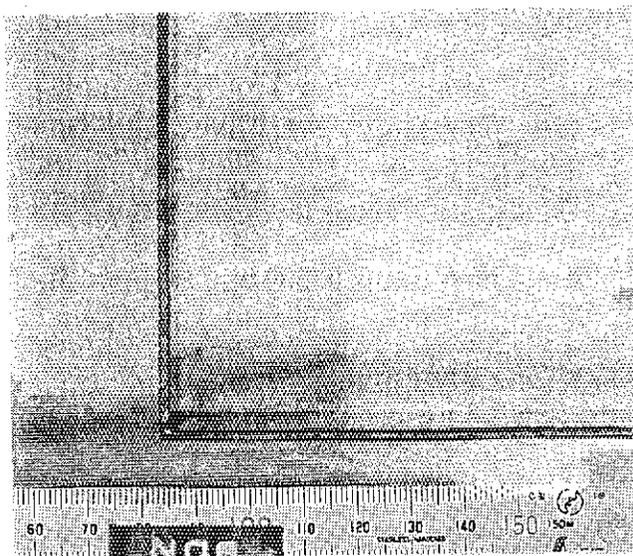
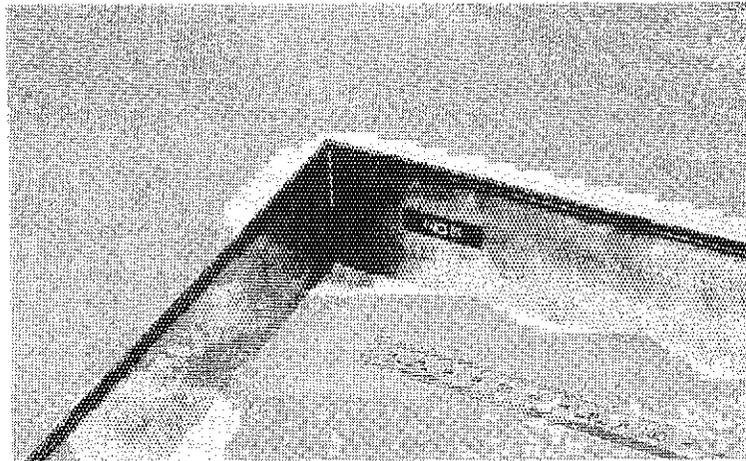
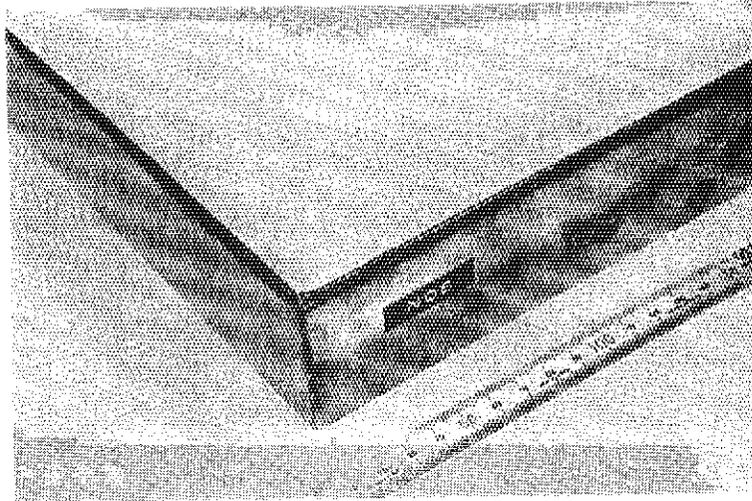


図 6. 6. 8 コーナー部リップシール溶接結果
(ギャップ、目違いとも無し、加工速度800mm/min)

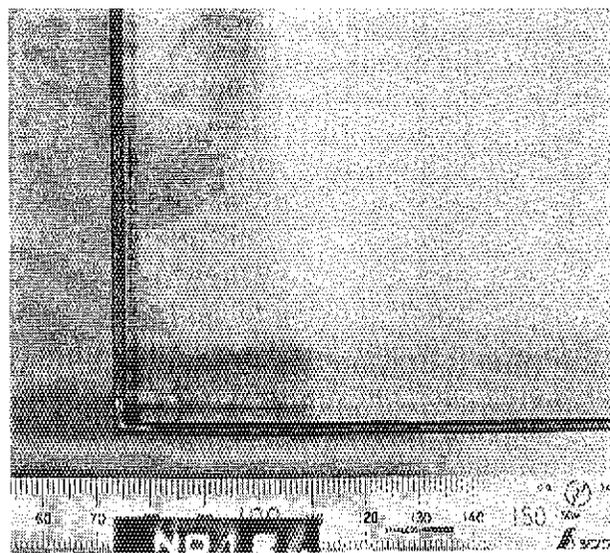
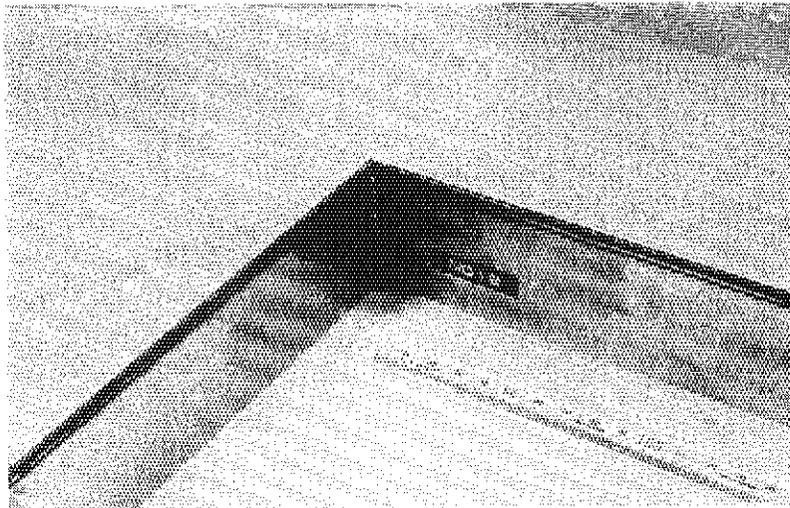
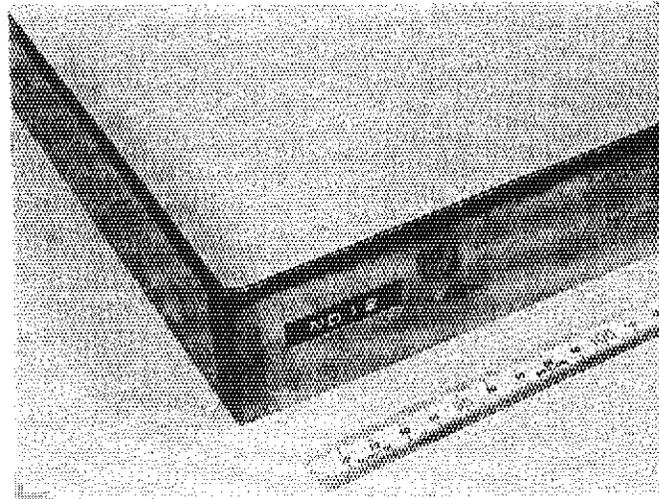


図 6. 6. 9 コーナー部リップシール溶接結果
(ギャップ0.5mm、加工速度600mm/min)

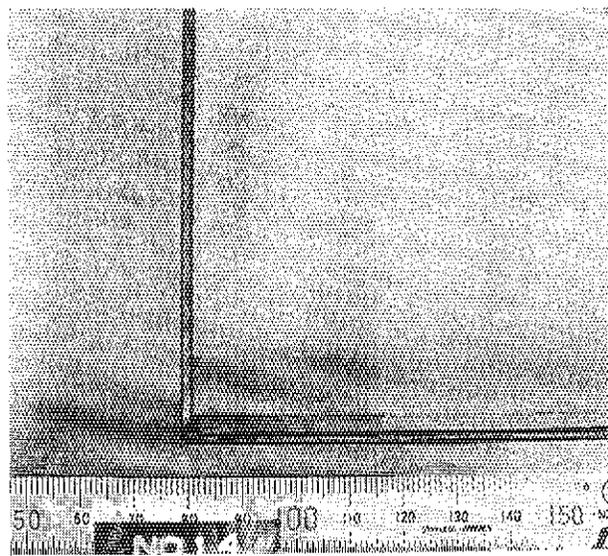
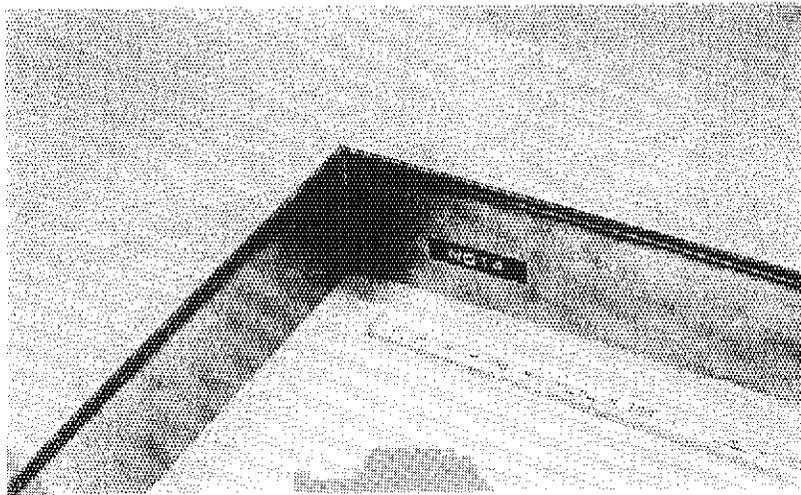
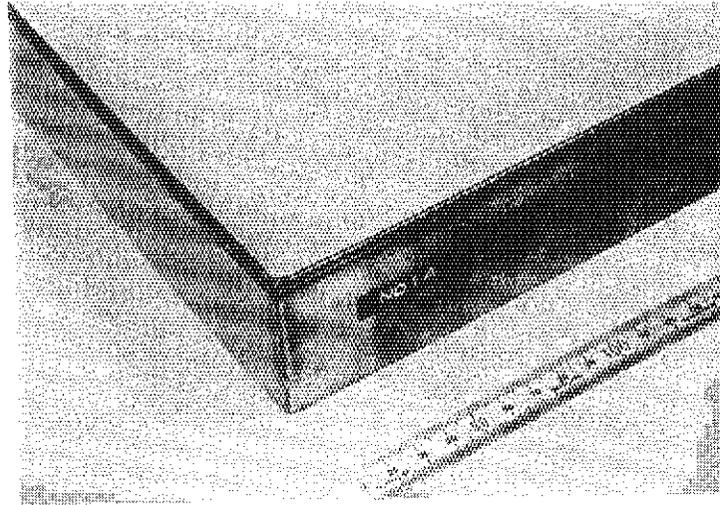
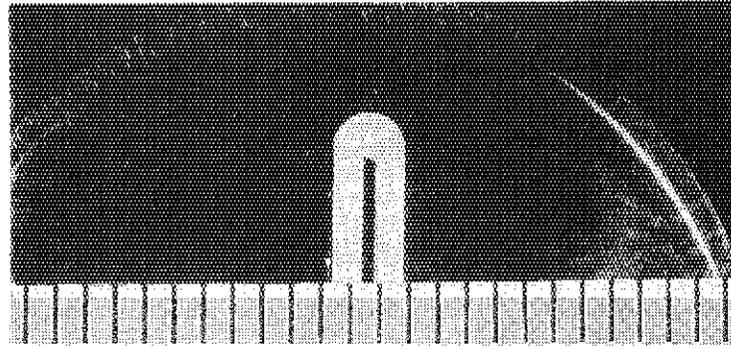
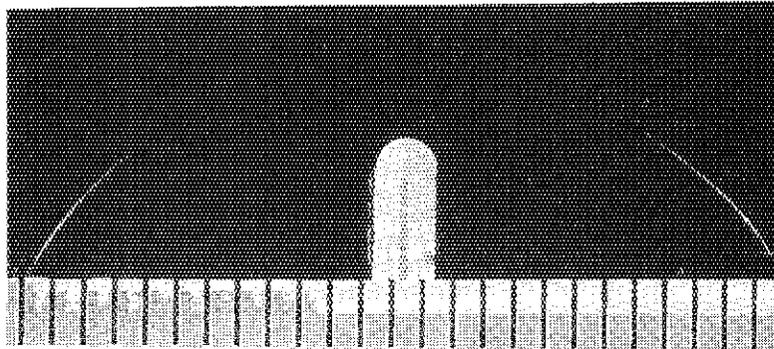


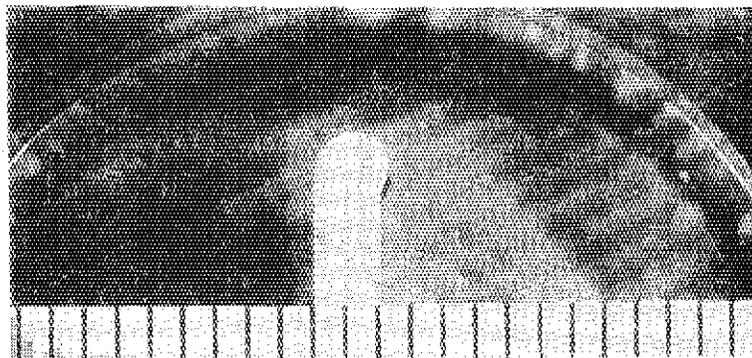
図6. 6. 10 コーナー部リップシール溶接結果
(目違い1.0mm、加工速度600mm/min)



a) ギャップ、目違いともに無し、加工速度800mm/min



b) ギャップ0.5mm、加工速度600mm/min



c) 目違い1.0mm、加工速度600mm/min

図6.6.11 リップシール溶接部断面観察結果

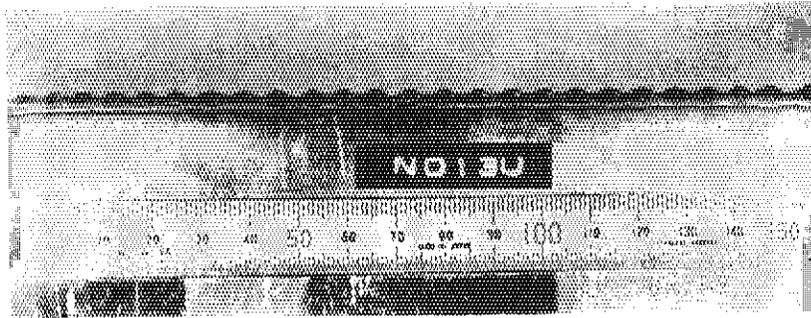


図 6. 6. 1 2 目違い2mmにおける溶接不良（加工速度600mm/min）

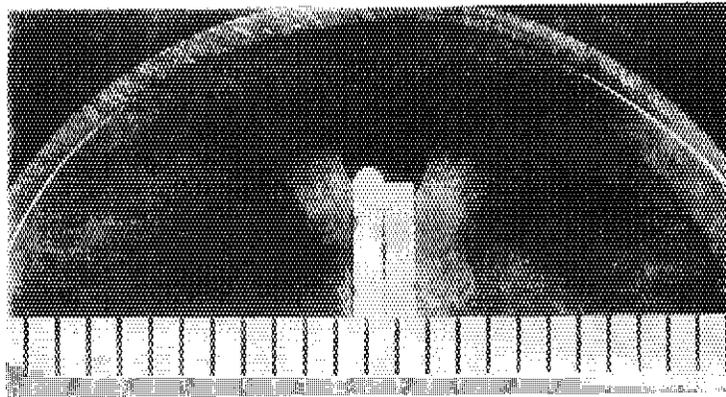


図 6. 6. 1 3 目違い2.0mmの断面観察結果（加工速度600mm/min）

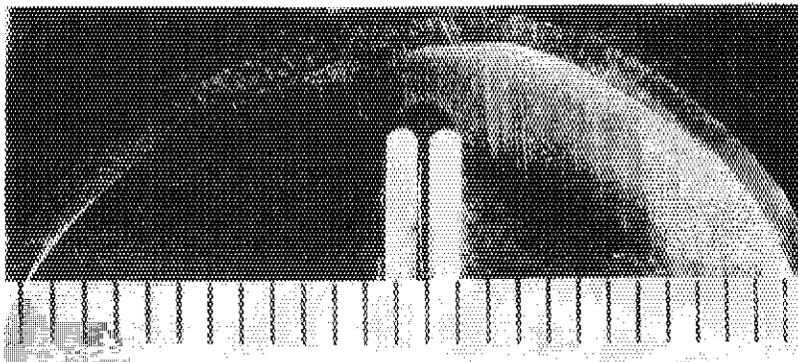


図 6. 6. 1 4 ギャップ0.5mmの断面観察結果（加工速度800mm/min）

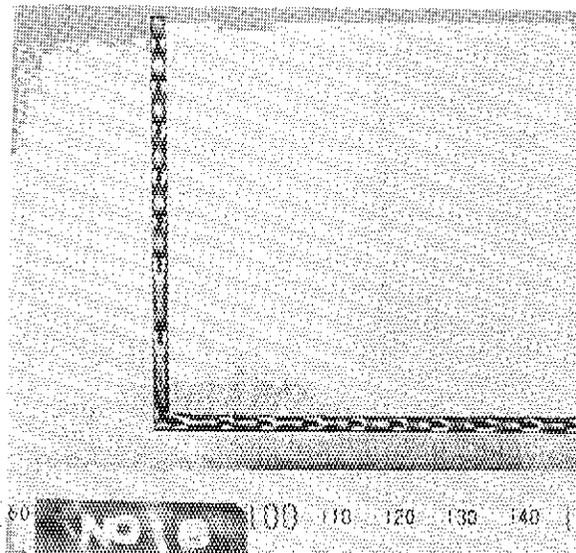
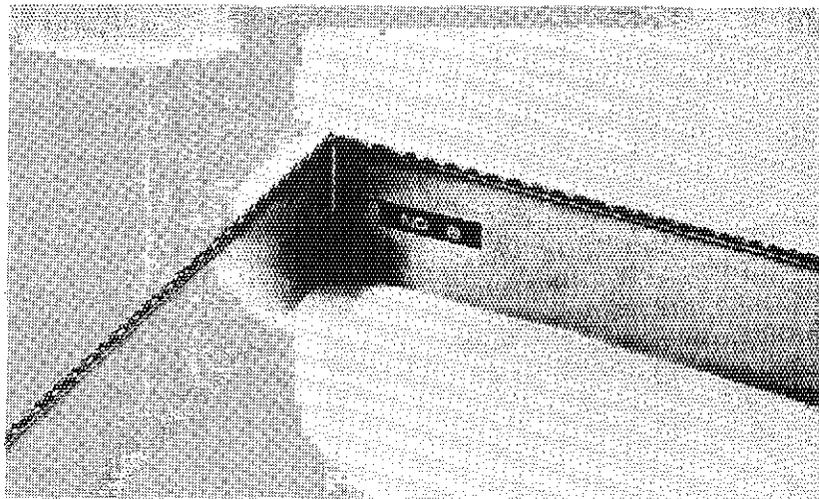
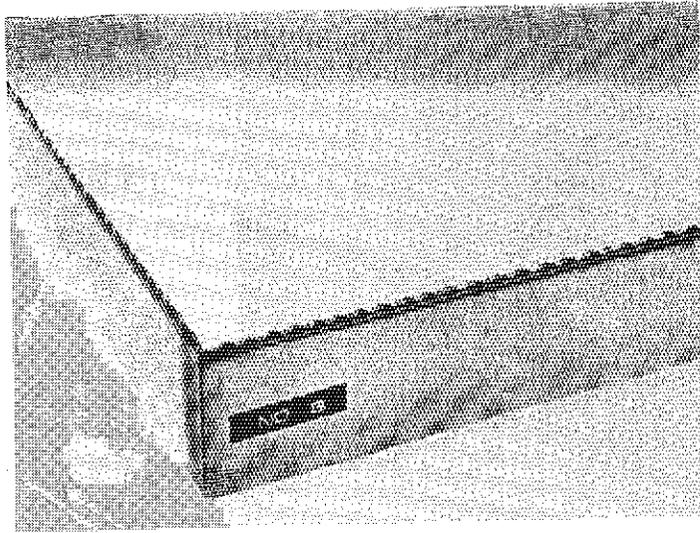
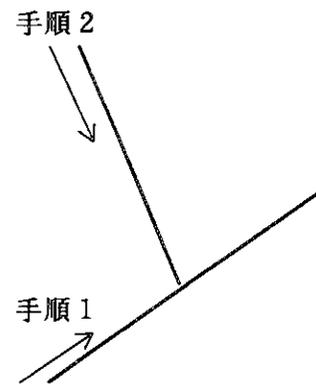
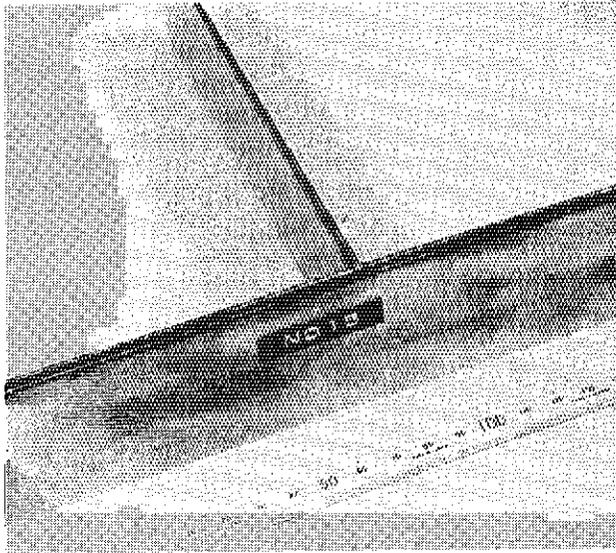


図6.6.15 コーナー部リップシールの溶接不良
(ギャップ0.5mm、加工速度800mm/min)



溶接手順と方向

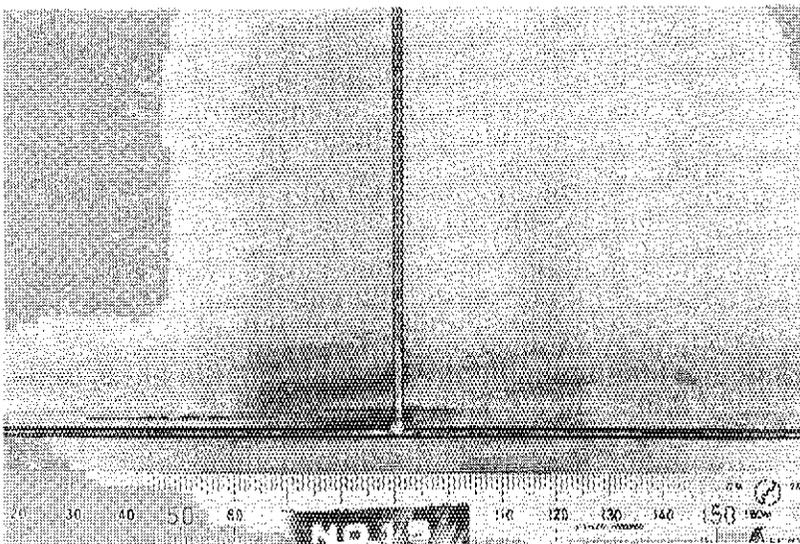
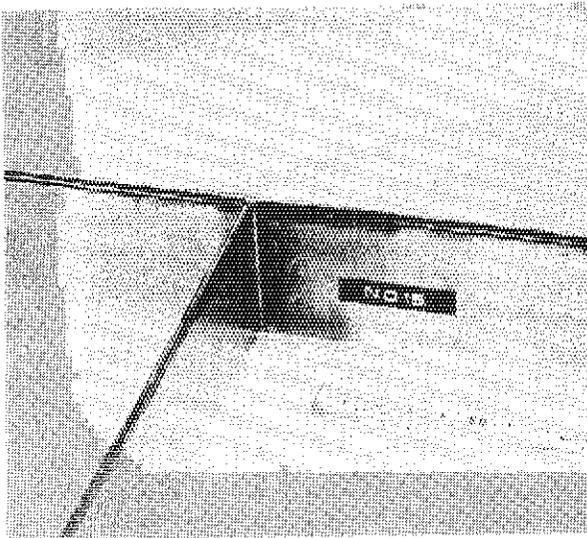
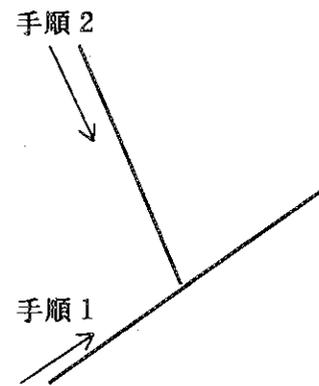
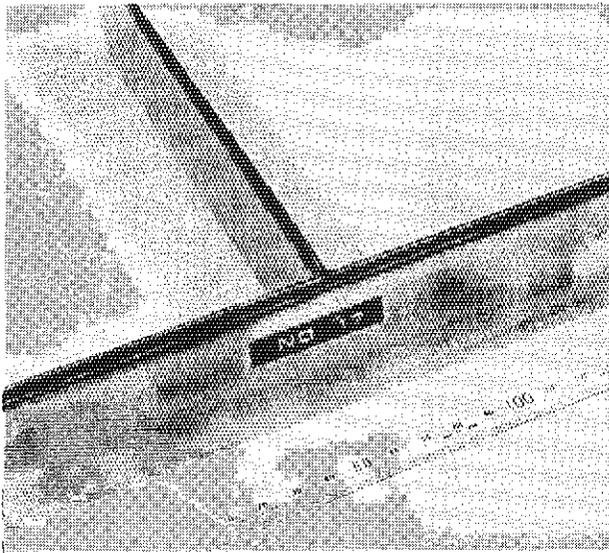


図 6. 6. 16 T字部リップシール溶接結果
(ギャップ・目違いともに無し、加工速度800mm/min)



溶接手順と方向

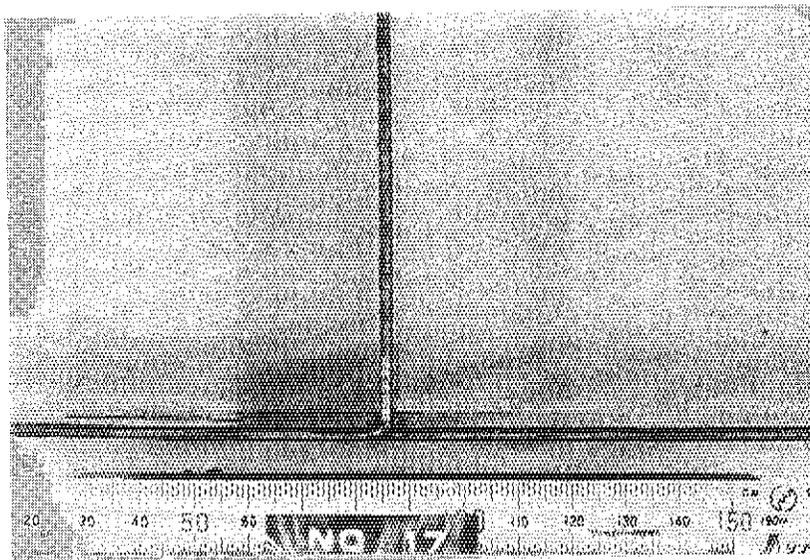
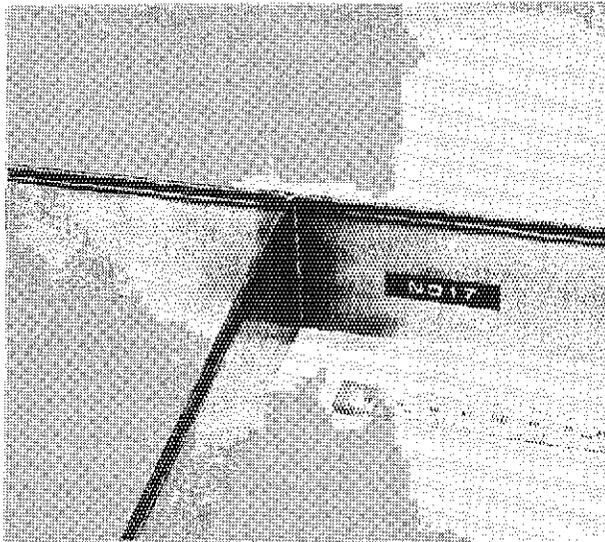
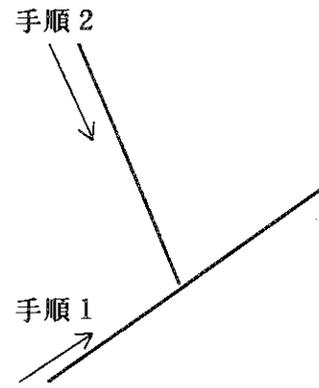
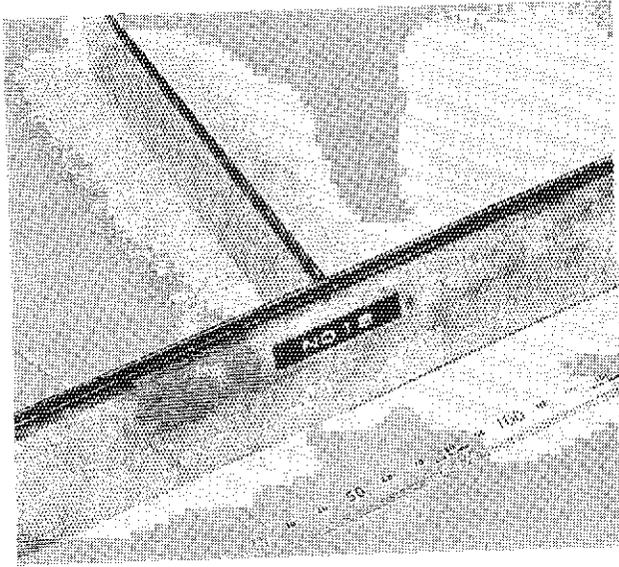


図 6. 6. 17 T字部リップシール溶接結果
(ギャップ0.5mm、加工速度600mm/min)



溶接手順と方向

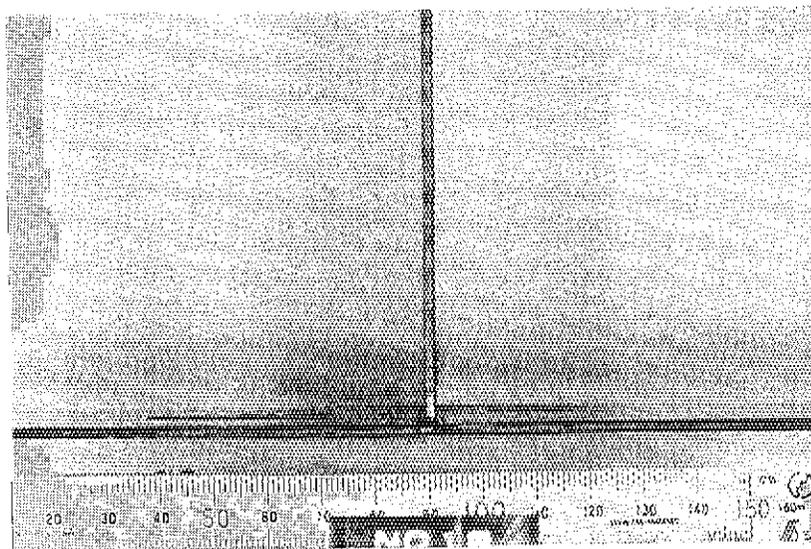
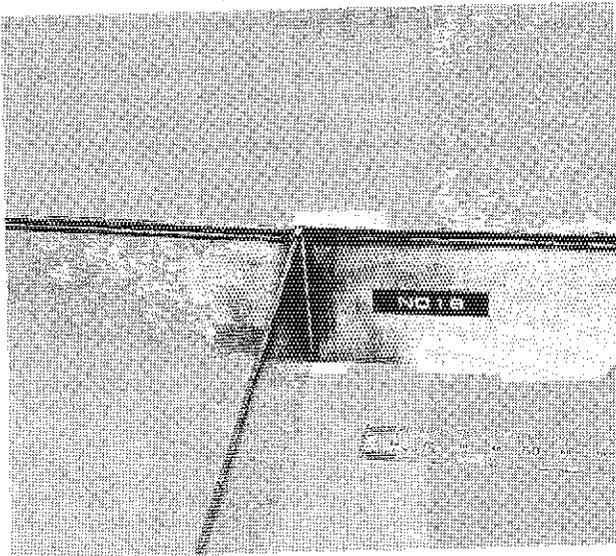


図 6. 6. 18 T字部リップシール溶接結果
(目違い1.0~1.5mm、加工速度600mm/min)

7. まとめと今後の課題

ITER-CDAを基礎に、日本で実施してきた炉内コンポーネントの遠隔保守修理機器の設計と試作開発の成果と今後の課題を以下にまとめる。

7.1 ダイバータ関連のまとめ

7.1.1 設計の成果

- (1) 損傷したダイバータ板を把持・搬送するにあたっては、ダイバータ板の把持部（側面）を隣接のダイバータ板表面より出すために、水圧シリンダーによって予めダイバータ板はジャッキアップされる。ジャッキアップ方向として、ダイバータ板傾斜面の法線方向を採用した。その時のジャッキアップ量は161mm必要である。
- (2) 軌道走行型ビークルシステムの軌道の設計を実施した。軌道の断面形状は幅250mm、高さ500mmの矩形で、半径5500mm、赤道面からの高さ600mmを軌道中心とした。また、幅1300mmのメンテナスポートを通させるため、軌道を第1リンク：37°、第2～第5リンク：31.2°、第6リンク：18.2°の6分割構造とした。
- (3) 設計した軌道について強度解析を実施した。ビークルが1トンのダイバータ板をを把持搬送中に生じる軌道の最大変形量は9.5mmであった。また、その時の軌道本体の最大応力は6.9Kg f/mm²であった。
- (4) ダイバータ交換用マニピュレータの設計を実施し、ダイバータ板の位置決め制御方法を検討した。ダイバータ板を炉内で把持・搬送中に炉内構造物との距離が十分にある場合はティーチングプレイバック動作で行い、距離が近く炉内構造物との干渉が有り得る領域ではマニピュレータ先端のエンドエフェクターに取り付けられている超音波距離センサー、渦流式変位センサー、渦流式近接センサーを使用して制御することとした。
- (5) ダイバータ配管の溶接・切断用のCO₂レーザービームの長距離伝送方法について検討した。レーザー発振器から配管の溶接・切断位置までの距離は約130mである。伝送途中のビームの拡がりを抑えるため伝送系途中にコリメータを3個設置し、最終的に配管内でビーム径をφ60mmに抑えた。伝送系には反射ミラーが11枚必要であり、反射ミラー部でのレーザーのパワーの減衰を考慮すると発振器出力に対して、加工点でのパワーは約80%に低下する。配管溶接においては、加工点でのパワーは5KW必要なので、レーザー発振器の出口でのパワーは約6.2KW必要である。

(6) 配管の溶接・切断方法のオプションとして、配管の内側よりTIG溶接し、ディスクカッターで切断する方法の概念検討を実施した。今後、試作による検証が必要である。

7. 1. 2 試作・試験による成果

- (1) 軌道走行型ビークルシステムの1/5縮小モデルを試作開発し、基本性能試験を実施した。軌道の展開・収納の制御にはキャスク位置と軌道が完全に展開された位置の間に11個の原点を設け、各原点から隣の原点までの移動を行う動作方法を採用した。軌道の展開及び収納とも、設計通りの性能を示し、所用時間はそれぞれ約25分であった。
- (2) また、ビークルを模擬した荷重(約30Kgの錘)を軌道上に負荷した際の撓みを測定した。最大撓みは支持点の間の中点(45°)に荷重を負荷したときで約1.3mmと軌道の機械的安定性が良好であることが確認された。
- (3) ダイバータ交換用マニピュレータの1/1スケールモデルを試作し、伸縮アームの機械的特性試験を実施した。アーム長を4400mmに伸ばした時のアーム自身のガタは1.3mmで、固有振動数は約4.5Hzであった。
- (4) 配管の溶接切断用のCO₂レーザー溶接切断加工ヘッドを試作し、最適な溶接切断条件を試験により求めた。加工ヘッドはパラボリックミラータイプで100A、sch40のSUS配管で実施した最適なパラメータは、溶接時：レーザー出力4.5KW、加工速度800mm/min、焦点設定位置-0.5mm、切断時：レーザー出力4.0KW、加工速度1000mm/min、焦点設定位置-0.5mmであった。
- (5) 真空シールとして使用するリップシール材(平板)により溶接性が保持される許容ギャップや段差を直線部、コーナー部、T字溶接部について実験により求めた。溶接はTIGで実施し、得られた許容ギャップと段差は、以下の通りである。

	許容ギャップ量	許容段差量
◎直線部	0.5mm	2.0mm
◎コーナー部	0.5mm	2.0mm
◎T字溶接部	0.5mm	1.5mm

7. 2 第1壁アーマータイル関連のまとめ

- (1) アーマータイル交換におけるマニピュレータのアームの変形や関節部のガタに起因する手先位置のズレを補正する制御方法としてニューラルネットワーク応用した学習により位置を補正するシステムを試作開発した。アーム長：約1.6m、自由度：4、水平伸長時に最大20mm変形するマニピュレータを用いて実験した結果によると、手先位置でのズレ量は目標精度の2mmをクリアし、ニューラルネットワークを用いた位置補正システムが有効であることがわかった。
- (2) 第1壁アーマータイル表面の損傷状況を観察するシステムを試作開発した。計測方法は、対象物に半導体レーザーのスリット光を照射し、対象物表面に生じる輝線（光切断線）を光軸がスリット光光軸と斜めに交差するように配置したTVカメラで撮影する方法を取った。試験は模擬タイル表面に予め円形の損耗領域を設けそれを計測し、計測誤差を求めた。計測により得られた特徴パラメータは、センサー自体の誤差から損耗形状に起因して決まる誤差範囲内にほぼ入っていることがわかった。

7. 3 今後の課題

以下に示す課題を解決するためには、1/1スケールの遠隔機器の設計・試作・試験を実施し、炉内構造物との整合性を取る必要があり、ITER-EDAの限られた期間を考慮すると、早急に着手する必要がある。

7. 3. 1 ダイバータハンドリング

(1) ダイバータの位置決め

ダイバータを最終位置に位置決めするには、ダイバータそのものの位置決め精度とハンドリングする遠隔機器の位置決め精度の整合性を取らなければならない。現状の設計においては、隣接するダイバータ間のギャップ・段差を0.1mm以下にする仕様となっている。しかし、遠隔機器側の位置決め精度は軌道走行型ビークルシステム及びダイバータ交換用マニピュレータの撓み・ガタによる位置ズレ及び炉内構造物の変形（経年変形を含む）に大きく依存しており、また、従来の産業用ロボットに比べハンドリング重量や遠隔機器そのものの大きさは非常に大きく、位置決め精度を0.1mm以下に抑えることは非常に厳しい仕様と言える。実規模の遠隔機器と炉内構造物の試作・試験により綿密に位置決め精度を決定する必要がある。

(2) 水圧シリンダーとの協調

ダイバータの受け渡しが確実になされたかのセンシングが必要である。これを解決するに

は、ダイバータが確実に最終位置に設置されたかの確認と位置精度の設定が必要となる。例えば、ダイバータに埋め殺しセンサーを設置することも一案である。また、ダイバータが所定の位置より傾いて渡された場合、支持脚が水圧シリンダーにより、スムーズに移動できない場合も有り得る。これを解決するには、各水圧シリンダーの移動量の管理（センシング方法）が必要である。また、ダイバータを最終位置に据え付けた後、そのダイバータが隣接のダイバータとギャップ・段差があるかを計測する手段、更にギャップ・段差の補正方法を確立しておく必要がある。

(3) 配管の切断・再溶接とハンドリング

レーザーによる配管の溶接においては、開先間のギャップが大きいと確実な継手強度が確保できないことが予想される。通常、溶接部におけるCO₂レーザーのビーム径はφ0.2mm程度であり、突き合わせ溶接の場合はギャップが0.2mm以上になるとビームが突き抜け、溶接不能となる。一方、長さが10m以上の配管を精度良く位置決めすることも遠隔操作の観点からはたやすく解決できる課題ではない。許容ギャップを大きく取れる開先形状の最適化とともに、実験により許容ギャップ量を求める必要がある。そして、その許容ギャップ量以内に位置決めできる配管ハンドリングシステムの設計・試作も必要である。

また切断においては、原理的に配管部材をレーザーにより溶融し、アシストガスにより吹き飛ばす方法でなされる。ドロスを軽減するとともに、切り口を鋭くし開先加工を不要とすることは重要である。その1つの手段として、パルス式レーザーの応用も考えられる。今後、パルス式レーザーによる切断試験を実施する予定である。

(4) アーマーのみの交換の必要性

現状の設計ではダイバータ板の交換は約1トンのモジュールごとに炉内より撤去・搬送・交換する方法を考えている。しかし、軽微な損傷、例えば一部のアーマーの損耗のような場合に、ダイバータ板ごと交換するのは炉の稼働率を確保する上では得策とは言えない。損耗したアーマーをIn-situで修理・交換することを今後検討する必要がある。

(5) 軌道走行型ビークルシステム

1/1スケールを製作するにあたっては、軌道そのもの、軌道関節ロック機構の最適構造、ケーブル処理方法等、製作前に個別に要素設計・試作による健全性及び製作性を確立しておく必要がある。

7.3.2 アーマータイルハンドリング

(1) 第1壁表面観察システム

今までの試験では模擬タイルに特定の2種類の形状の損耗を与えて実験を行ったが、損耗形状の違いにより、測定誤差が大きく変わっている。実機での損耗形状は予想ができないので、損耗形状に依存しない測定誤差を得るための改良が必要である。また、アーマータイル

の損耗形状及び大きさがどの程度であれば、そのタイルの交換時期とするかの明確な仕様が無いのが現状である。早急にその仕様を決め、その仕様を満足させる分解能を得なければならない。

(2) ニューラルネットワークを応用した手先位置の補正

今回の実験から、ニューラルネットワークを応用した手先位置補正システムが有効であることがわかった。しかし、搬送機である軌道走行型ビークルシステムのガタ・変形や炉内構造物そのものの変形は考慮されておらず、特に炉内構造物の変形を学習データに取り入れるのは困難である。従って、最終的な位置決めには何らかのセンサーを使用することも重要である。

(3) 目標タイルの同定

第1壁表面観察システムにより数万枚に及ぶタイルから損耗したタイルを発見した後、そのタイルを交換するためには、タイルの明確な場所を同定しなければならない。炉内形状の変化に対しての所定のタイルの位置の変化、アーマータイル交換用マニピュレータ自身の撓み・ガタによるタイルの位置の変化等の要因により目標のタイルと違ったタイルに手先がアクセスする可能性がある。炉内に基準点を設け、その基準点と目標タイルの位置関係、及び基準点と遠隔機器の位置関係が容易にわかる炉内構造物の設計とセンシング方法を確立することが、1つの解決策として考えられる。

(4) 隣接のタイル間の段差・ギャップの管理

タイル交換後の隣接のタイル間の段差・ギャップの許容値が現状では明確化されていない。タイル設置時のタイル間の干渉（接触）回避のための遠隔機器の位置決め精度と密接な関係があり、早急に許容値を設定する必要がある。また、段差・ギャップを容易に計測できるセンシングも重要な要素である。

(5) タイルの固定

タイルの固定は交換のしやすさからボルトによる機械的締結方法が取られている。しかし、ボルト締結はボルトは緩むものであると考える必要がある。ボルトの緩み止め構造が現実的なのか、あるいはクイック着脱できる新たな機械的締結構造を検討する必要がある。尚、既存の試験装置、例えばJT-60U、JET、TFTRでの初期締付トルクやどの程度での緩みで増締めを実施しているかの実績も参考にしなければならない。

7. 3. 3 メンテナンス全般

(1) 遠隔機器の故障時の対策

メンテナンス中に軌道走行型ビークルシステム、ダイバータ交換用マニピュレータ、アーマータイル交換用マニピュレータ、水圧コッター等が故障しても損傷した炉内コンポーネン

トを円滑に炉外に搬出・撤去できるバックアップを施さなければならない。

(2) 遠隔機器の耐環境性

現状での遠隔機器の設計は、目的とする機能が十分に達成できることを主眼に実施している。しかし、実機での環境、すなわち $\sim 10^7$ R/h (γ 線線量率)、高温(ベーキング後は 180°C)、真空または不活性ガス雰囲気等に対応できるセンサー(視覚センサーも含む)、駆動部品、潤滑剤等を設計に反映させなければならない。

謝辞

本設計検討及び試作開発については、炉構造研究室及びITER開発室の方々から多くの有意義な助言を頂き、深く感謝します。また、本研究開発を進めるにあたり、多くのご支援と貴重な助言を頂いた島本 進 核融合工学部長、及び松田 慎三郎 ITER開発室国内設計グループリーダーに深く感謝致します。

トを円滑に炉外に搬出・撤去できるバックアップを施さなければならない。

(2) 遠隔機器の耐環境性

現状での遠隔機器の設計は、目的とする機能が十分に達成できることを主眼に実施している。しかし、実機での環境、すなわち $\sim 10^7 \text{R/h}$ (γ 線線量率)、高温(ベーキング後は 180°C)、真空または不活性ガス雰囲気等に対応できるセンサー(視覚センサーも含む)、駆動部品、潤滑剤等を設計に反映させなければならない。

謝辞

本設計検討及び試作開発については、炉構造研究室及びITER開発室の方々から多くの有意義な助言を頂き、深く感謝します。また、本研究開発を進めるにあたり、多くのご支援と貴重な助言を頂いた島本 進 核融合工学部長、及び松田 慎三郎 ITER開発室国内設計グループリーダーに深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) T. Honda et al., "ITER ASSEMBLY AND MAINTENANCE", ITER Documentation Series, No. 34, IAEA, 1991.
- 2) T. Kuroda et al., "ITER PLASMA FACING COMPONENTS", ITER Documentation Series, No. 30, IAEA, 1991.
- 3) H. Fukushima et al., "Fabrication and test of hydraulic jacks for the application to divertor support system of Fusion Experimental Reactor", Proc. 14th Symp. on Fusion Eng., San Diego, Oct. 1991, pp. 580-583.
- 4) M. Obama et al., "In-vessel remote maintenance system for FER", 16th Symp. on Fusion Technology, London, Sept. 1990.
- 5) K. Shibayama et al., "Development of in-vessel remote maintenance system for Fusion Experimental Reactor(FER)", Proc. '91 Internat. Symp. on Advanced Robot Technology, Tokyo, Mar. 1991, pp. 127-133.
- 6) K. Shibayama et al., "Recent developments in remote maintenance for Fusion Experimental Reactor in JAERI", Proc. 14th Symp. on Fusion Eng., San Diego, Oct. 1991, pp. 592-595.
- 7) T. Raimondi et al., "Trends in remote handling device development", Fusion Eng. and Design 18(1991)445-452.
- 8) 村上 他, 核融合実験炉内補修用ビークルマニピュレータの開発, 第9回日本ロボット学会 学術講演会 予稿集, Nov. 1991, pp. 333-336.
- 9) 柴沼 他, 核融合実験炉(FER)用第1壁遠隔形状計測装置の開発, FAPIG 126(1990) 15-20.
- 10) 篠原 他, ニューラルネットワークを用いた柔軟マニピュレータの位置補正制御, SICE合同シンポジウム, Sept. 1992.
- 11) 松本 他, 柔軟マニピュレータの位置補正システムの開発, 第2回FANシンポジウム, Oct. 1992.