

JAERI-M
92-130

国際熱核融合実験炉用（ITER）炉内
観察システムの概念設計

1992年9月

小原建治郎・寺門 拓也・角館 聰・柴沼 清
多田 栄介・近藤 光昇*・竹下 博志**・坂本 正行**

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

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。
入手の問合せは、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）
あて、お申しこしください。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）で複写による実費頒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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

国際熱核融合実験炉用（ITER）炉内観察システムの概念設計

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

小原建治郎・寺門 拓也・角館 聰・柴沼 清
多田 栄介・近藤 光昇*・竹下 博志**・坂本 正行**

(1992年8月10日受理)

炉内観察システムは、ITERの炉内構造物であるダイバータ板やアーマタイルの損傷及び炉内落下物等の有無に関する情報を取得するためのシステムで、観察センサ、観察センサ走査用マニピュレータ、制御装置、情報処理装置から構成される。

これら構成機器のうち観察センサと走査用マニピュレータは、高温(150°C)、真空(あるいは不活性ガス雰囲気)、放射線場($10^7 R/hr$)の複合環境下での動作となるため、システムの設計にあたっては観察センサをはじめ、マニピュレータを構成する部品の特に放射線に対する環境強度がきわめて重要な要素となる。

本報告では、設計の第1段階として既存の視覚センサ(ファイバスコープ、ペリスコープ、ITV)を使用した場合のそれぞれのシステムについて比較、検討した。その結果ITVを使用したシステムは、機動性には優れるが耐熱、耐磁場、耐放射線性に問題がある。また、ペリスコープタイプは観察視野が大きくとれ、耐放射線性については比較的優れているが、機構上の制約から観察不能な箇所が生じる。これらに対しファイバスコープは、近接観察には適するが遠方からの観察では視野の大きさに制限が生じる他、スコープ全体が放射線照射の対象になるなど両者の中間的特徴を有することが明らかとなった。

以上の結果から、今後はファイバスコープとペリスコープについて高放射線下での連続的な画像観察試験を中心にこれらのセンサの現状での性能到達点を確認するとともに、ペリスコープ用ミラー材料の照射試験などシステムを構成する部品の耐放射線特性を中心としたデータベースの蓄積と開発を進める計画である。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

* (株)東芝

** 三菱電機(株)

Conceptual Design of In-vessel Viewing and Inspection
System (IVIS) for International Thermonuclear
Experimental Reactor (ITER)

Kenjiro OBARA, Takuya TERAKADO, Satoshi KAKUDATE
Kiyoshi SHIBANUMA, Eisuke TADA, Mitsunori KONDOH *
Hiroshi TAKESHITA ** and Masayuki SAKAMOTO **

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

(Received August 10, 1992)

Visual information on in-vessel components of ITER, such as divertor and armor tile, is taken by in-vessel viewing and inspection system (IVIS). The IVIS is consist of a visual sensor, a manipulator, a control system and a data processing system. In the IVIS, the sensor and the manipulator are operated under high temperature (about 150°C), high vacuum (about 10^{-8} Torr) and high radiation (about 10^7 R/hr) conditions.

In this report, we studied three different concepts of the IVIS using a fiberscope, a periscope and a industrial television (ITV), respectively. The ITV concept is simple and has high mobility, but radiation, heat and magnetic resistances of ITV are critical issues to apply it to the fusion device, such as ITER. On the other hand, the periscope concept is able to get a large visual field, and the radiation resistance is better than those another concepts. But, this concept has some dead angles by geometrical limitations of the mechanism. Feature of the fiberscope concept is intermediate between those of ITV and periscope ones.

* Toshiba Corporation

** Mitsubishi Electric Corporation

From conceptual design of the IVIS, we decided to carry out the irradiation tests of critical elements of fiberscope and periscope. The experimental results become the data base the engineering design of IVIS.

Keywords : ITER, In-vessel Components, Viewing and Inspection System, ITV, Fiberscope, Periscope, Radiation Resistance

目 次

1.はじめに	1
2.使用環境条件	1
3.観察センサ、方式の検討	1
3.1 イメージファイバ方式	2
3.2 ITV カメラ方式	4
3.3 ミラー（光学レンズ）方式	5
3.4 観察センサ、方式の比較・評価	7
4.マニピュレータの方式の検討	13
4.1 マニピュレータの基本構造	13
4.2 概略仕様	14
4.3 方式の比較、検討	15
4.4 保護機能の検討	16
5.制御及び観察面の特定方式の検討	28
5.1 制御方式	28
5.2 観察面の特定	28
5.3 観察作業時間の検討	29
6.まとめ	32
7.今後の予定	32
謝 辞	33
参考文献	34

Contents

1. Introduction	1
2. Working Environmental Conditions	1
3. Investigation of Visual Sensor System	1
3.1 Fiberscope System	2
3.2 ITV System	4
3.3 Optical Lens System	5
3.4 Comparison of the Three Systems	7
4. Investigation of Manipulator System	13
4.1 Basic Structure of the Manipulator	13
4.2 Major Specifications	14
4.3 Comparison of the Systems	15
4.4 Protective Functions	16
5. Investigation of Control and Locating System	28
5.1 Control System	28
5.2 Locating System of Visual Points	28
5.3 Working Hours	29
6. Conclusion	32
7. Future Plan	32
Acknowledgement	33
References	34

1. はじめに

炉内観察システム（以下、システムとする）は、国際熱核融合実験炉（以下ITERとする[1], [2]）の炉内、及び炉内構造物に関わる一連の点検・保守作業を行う基本システムとして位置づけられるもので、損傷箇所の特定と損傷の程度及び炉内落下物等の有無（ハウスキーピング）に関する情報を得ることを目的とする。

システムは、観察センサ、観察センサ駆動用マニピュレータ（以下、マニピュレータとする）、制御装置、情報処理装置の四つの主要な装置から構成され、中でも高温、真空、放射線下での動作が想定される観察センサとマニピュレータには高度の環境強度が要求される。

炉内観察システムの概念設計では、以上の観点に基づきITERの幾何学的諸条件と環境条件を考慮し、(1) 短時間に (2) 出来るだけ多くの情報を (3) 正確に取得することを目標に設計を行った。具体的には、上記目標を可能とする (1) 観察センサを含む観察方式を中心に (2) マニピュレータの方式と (3) 制御観察情報処理方式について評価、比較・検討を行った。

2. 使用環境条件

ダイバータやアーマプレートの交換に代表される保守作業の事前情報を得るために炉内観察では、大気開放に伴う炉内の汚染やその後の立ち上げ、内壁の表面清浄化に必要とされる諸々の手順を考慮した時、可能な限り真空を維持した状態で点検を行うことが望ましい。しかしながら一方では真空断熱となるため炉内の崩壊熱による観察センサやマニピュレータへの熱負荷は、乾燥窒素置換による大気圧状態に比べれば厳しいものとなる。また、炉内とその周辺で使用される限りシステムは強度の放射線に曝されることになり、耐放射線性はシステム全体の性能に大きくかかわっている。

現状では、システムの使用環境条件は必ずしも明確ではないが、今回の設計では以下の通りとした。

- (1) 温度：室温～150°C
- (2) 圧力：大気圧～ 10^{-8} Torr
- (3) γ 線による空間線量率： $\sim 10^7$ R/hr

3. 観察センサ、方式の検討

観察センサ方式の検討では、耐放射線性上、実用可能と考えられるイメージファイバ、ITV、ミラー（光学レンズ）の3方式を取り上げ、定量的に評価可能な項目についてはその目標値を定め比較・検討を行った。

1. はじめに

炉内観察システム（以下、システムとする）は、国際熱核融合実験炉（以下ITERとする[1], [2]）の炉内、及び炉内構造物に関わる一連の点検・保守作業を行う基本システムとして位置づけられるもので、損傷箇所の特定と損傷の程度及び炉内落下物等の有無（ハウスキーピング）に関する情報を得ることを目的とする。

システムは、観察センサ、観察センサ駆動用マニピュレータ（以下、マニピュレータとする）、制御装置、情報処理装置の四つの主要な装置から構成され、中でも高温、真空、放射線下での動作が想定される観察センサとマニピュレータには高度の環境強度が要求される。

炉内観察システムの概念設計では、以上の観点に基づきITERの幾何学的諸条件と環境条件を考慮し、(1) 短時間に (2) 出来るだけ多くの情報を (3) 正確に取得することを目標に設計を行った。具体的には、上記目標を可能とする (1) 観察センサを中心とした観察方式 (2) マニピュレータの方式と (3) 制御観察情報処理方式について評価、比較・検討を行った。

2. 使用環境条件

ダイバータやアーマプレートの交換に代表される保守作業の事前情報を得るために炉内観察では、大気開放に伴う炉内の汚染やその後の立ち上げ、内壁の表面清浄化に必要とされる諸々の手順を考慮した時、可能な限り真空を維持した状態で点検を行うことが望ましい。しかしながら一方では真空断熱となるため炉内の崩壊熱による観察センサやマニピュレータへの熱負荷は、乾燥窒素置換による大気圧状態に比べれば厳しいものとなる。また、炉内とその周辺で使用される限りシステムは強度の放射線に曝されることになり、耐放射線性はシステム全体の性能に大きくかかわっている。

現状では、システムの使用環境条件は必ずしも明確ではないが、今回の設計では以下の通りとした。

- (1) 温度：室温～150°C
- (2) 圧力：大気圧～ 10^{-8} Torr
- (3) γ 線による空間線量率： $\sim 10^7$ R/hr

3. 観察センサ、方式の検討

観察センサ方式の検討では、耐放射線性上、実用可能と考えられるイメージファイバ、ITV、ミラー（光学レンズ）の3方式を取り上げ、定量的に評価可能な項目についてはその目標値を定め比較・検討を行った。

1. はじめに

炉内観察システム（以下、システムとする）は、国際熱核融合実験炉（以下ITERとする[1], [2]）の炉内、及び炉内構造物に関わる一連の点検・保守作業を行う基本システムとして位置づけられるもので、損傷箇所の特定と損傷の程度及び炉内落下物等の有無（ハウスキーピング）に関する情報を得ることを目的とする。

システムは、観察センサ、観察センサ駆動用マニピュレータ（以下、マニピュレータとする）、制御装置、情報処理装置の四つの主要な装置から構成され、中でも高温、真空、放射線下での動作が想定される観察センサとマニピュレータには高度の環境強度が要求される。

炉内観察システムの概念設計では、以上の観点に基づきITERの幾何学的諸条件と環境条件を考慮し、(1) 短時間に (2) 出来るだけ多くの情報を (3) 正確に取得することを目標に設計を行った。具体的には、上記目標を可能とする (1) 観察センサを中心とした観察方式 (2) マニピュレータの方式と (3) 制御観察情報処理方式について評価、比較・検討を行った。

2. 使用環境条件

ダイバータやアーマプレートの交換に代表される保守作業の事前情報を得るために炉内観察では、大気開放に伴う炉内の汚染やその後の立ち上げ、内壁の表面清浄化に必要とされる諸々の手順を考慮した時、可能な限り真空を維持した状態で点検を行うことが望ましい。しかしながら一方では真空断熱となるため炉内の崩壊熱による観察センサやマニピュレータへの熱負荷は、乾燥窒素置換による大気圧状態に比べれば厳しいものとなる。また、炉内とその周辺で使用される限りシステムは強度の放射線に曝されることになり、耐放射線性はシステム全体の性能に大きくかかわっている。

現状では、システムの使用環境条件は必ずしも明確ではないが、今回の設計では以下の通りとした。

- (1) 温度：室温～150°C
- (2) 圧力：大気圧～ 10^{-8} Torr
- (3) γ 線による空間線量率： $\sim 10^7$ R/hr

3. 観察センサ、方式の検討

観察センサ方式の検討では、耐放射線性上、実用可能と考えられるイメージファイバ、ITV、ミラー（光学レンズ）の3方式を取り上げ、定量的に評価可能な項目についてはその目標値を定め比較・検討を行った。

以下に各項目の目標値を示す。

(1) 観察視野

観察センサの先端から2m先で外径1m程度の視野が得られること。

(2) 観察範囲

一台のシステムでトーラスの1/4が観察可能なこと。

(3) 解像度

(1) 項において20mm程度の欠陥(傷)が検知できること。

(4) 耐放射線性

~ 10^7 R/hrの空間線量率において観察画像が得られる他、使用時間が出来るだけ長いこと。

(5) 耐熱性

周囲温度150°C使用時の問題点が少ないこと。

3.1 イメージファイバ方式

3.1.1 観察視野

ファイバー先端に取り付ける対物レンズの画角を選択する事によって視野の大きさを変えることが出来る。画角30°の対物レンズを使用した場合、2m前方において外径1070mmの視野を確保できるが、画像分解能を高めるには画素数を多くする必要があり、結果としてイメージファイバの外径の拡大となり、可とう性を阻害する。

3.1.2 観察範囲

アーム先端部に対物レンズを取り付けることにより直視方向が、また側視アダプタの取付によって側視方向の観察が可能となる。

3.1.3 解像度

画角30°の対物レンズを使用し、2m前方にて20mmの欠陥を検知するために必要な画素数(N)を求める。

ファイバ径を12μm(コア径;8μm, クラッドの厚み2μm)としたときの点分解能(R1)と点検知能(R2)は次式によって求められる。

$$R1 = K1 \cdot \frac{H}{\sqrt{N}} = 2.044 \cdot \frac{H}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

$$R2 = K2 \cdot \frac{H}{\sqrt{N}} = 0.463 \cdot \frac{H}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

H ; 観察視野の大きさ

ここでR1, R2をそれぞれ20mmとしたとき, (1), (2)式から求められる画素数は, それぞれ11958本及び614本となる。従って, 上記性能を満たすためには約12000本の画素数が必要となる。

この画素数にてイメージファイバを構成し, ジャケットに可とう性を持つステンレスを使用した場合の外径は約15mmとなり, その曲げ半径は200~300mm程度になる。

3.1.4 必要照度

イメージファイバで観察した画像をITVで撮影する場合に必要とされる照度(E0)は次式で示される。

$$E_0 = \frac{m^2}{X \cdot R_{co} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot N_a} \cdot E_1 \quad (3)$$

$$\log X = -\beta 1/10$$

β ; イメージファイバの伝送損失 (dB/m)

l ; "の長さ (m)

R_{co} ; "のコア占積係数

N_a ; "の開口数

Z₁ ; 対物レンズ系の透過係数

Z₂ ; 接眼レンズ系の透過係数

m ; 2/3inch管への拡大倍率

E₁ ; 撮像面照度 (lux)

ここで, $\beta = 0.03$, $R_{co} = 0.38$, $N_a = 0.3$, $Z_1 = Z_2 = 0.86$, $l = 20$, $m = 2$, ITVに高感度カメラを使用し, 撮像面で必要とされる照度を対象物の反射率等を考慮して仮に10 luxとした時のE0を求めると約1859 luxとなる。また, この照度を2m前方において得るために必要な光束(F)は93444 lmとなり, 効率を21 lm/wとしたときのワット数は4450wで500wのハロゲンランプが9灯必要となる。

イメージファイバの場合, 同一ケーブル内にライトガイドを組み込み照明として使用することも可能であるが, これについては導入する光量とその方向, ファイバ径等考慮した上で決めなければならない。

3.1.5 耐放射線性

イメージファイバは放射線照射によって着色化し, 伝送損失を増加させる。その原因は波長の吸収帯毎に異なるが, 一般的にはファイバ内に含有するドーパントやある種の不純物によって引き起こされる。

対策としては, ファイバの原材料, 製造法等の観点から種々検討されているが現在とところ比較的耐放射線性のあるファイバとして純粋石英(塩素フリー, 水酸基; 800ppm)を使用した

ものが一部実用化されている。

表3.1に耐放射線性について示す。本ファイバーの主要仕様を、図3.1に放射線照射後の伝送特性について示す。本ファイバーは高速増殖炉の原子炉圧力容器の外観検査用に開発されているもので、使用時の環境条件は温度200°C、空間線量率～ 10^3 R/hrであり、ITER炉内の空間線量率に比べ格段に低いものである。

以上の状況から、イメージファイバ（光学レンズも含む）の高空間線量率下での可視領域の伝送損失については、あらたに試験を開始し、現状での性能到達点を確認しておくことが急務である。

3.1.6 耐熱性

イメージファイバの場合、耐熱性が問題となる個所は対物レンズとファイバとの接触部のシール方法及びファイバ最外周のジャケットの材質である・これについては耐熱仕様のシール法とステンレス製の可とう管の採用により、200°Cまでは問題なく使用出来る。

3.1.7 ファイバの自在性

ファイバをマニピュレータに沿わせ、駆動する時となるのはマニピュレータの自在性である。自在性を屈曲半径の観点から画素数と関連づけてみると概略、表3.2で示される。

先の解像度から必要とされる画素数は先の検討では約12000本であり、その屈曲半径は250mとなる。この値がマニピュレータの駆動性を特に阻害するものでないことは“JT-60その場コーティング装置”において実証されている[4]。

3.2 ITVカメラ方式

ITVカメラは、撮像管式と固体撮像素子式（CCD）大別される。表3.3に市販品のうち代表的なものの性能について比較した結果を示す。これによると耐放射線性については、ウェスチングハウス社製のETV-1250が他に比べ較的な優れているとみられたため、白黒画像での観察を前提に本製品を対象に以下の検討を進めた。

3.2.1 観察視野

ITVに使用されている一体型レンズの画角は38°である。これにより2m前方での水平視野及び垂直視野を求めるときそれぞれ1.086m、0.806mとなり目標視野の1mΦをほぼ満足する。

3.2.2 観察範囲

イメージファイバと同様、直視のみで全域の観察が可能であるが、直視観察しにくい個所については側視アタッチメントが活用出来る。

3.2.3 解像度

解像度は走査線の本数によって決められる。2m前方での水平視野については、視野の大きさ

が1086m、走査線の本数が550本であることから1画素あたり1.97mmとなり、2cmの欠陥を判別するに充分な解像度を有していることがわかる。

3.2.4 必要照度

ITVの場合、被写体に必要とされる最低照度は1 luxといわれている。これを基に、観察面での反射率、色調を考慮すると共により正確な画像を得ることを前提に必要照度を100 luxとする。

この場合2m前方で必要とされる光束(F)は次式で求められ、5027 lmとなる。

$$F = 4 \pi \cdot L^2 \cdot E_0 \quad (4)$$

L ; 被写体までの距離 (m)

効率21 lm/wのランプで照明したときのワット数は293wとなり、500wのハロゲンランプ1個で充分な照度が得られる。

3.2.5 耐放射線性

耐放射線性仕様のETV-1250は、最大空間線量率 $2 \times 10^6 R/h$ で $10^8 rad$ まで使用可能であるといわれている。図3.2に(株) キュー・アイにて過去に実施された本カメラを使用しての観察画像と空間線量率について試験した結果について参考までに示す[5]。

尚、カラー画像の場合は型式ETV-1256を使用するが、この場合の最大空間線量率は $1.4 \times 10^6 R/h$ で集積線量は $4 \times 10^7 rad$ である。

3.2.6 耐熱性

使用部品、接着剤等からの制約により、耐熱性については60°Cであり、仕様値である150°Cを満たすことが出来ない。強制冷却等の対策を講じる必要がある。

3.2.7 マニピュレータへの組み込み性

カメラヘッドの外形寸法は、外径32cm、長さ305mmであり、マニピュレータへの取り付け、空間的制約については特に問題はない。但し、ケーブル処理とその耐放射線性/自在性については配慮が必要である。

3.3 ミラー(光学レンズ)方式

3.3.1 観察視野

基本的には、対物レンズの設計次第で視野の大きさは自由に設定出来る。但し、広角にした場合は像の歪も大きくなるため、観察範囲については画像の精度を考慮した上で決める必要がある。

3.3.2 観察範囲

ミラー方式は先述の2方式に比べ光軸調整の制約上、機動性に問題がある。従って、その観察範囲はマニピュレータの方式（多関節方式、極座標方式）に大きく依存する。特にアウトボードの上、下部は可視領域の範囲外になることも考えられる。

図3.3にペリスコープの概念と同ペリスコープによるITER炉内観察のCADシミュレーションの視点を図3.4に各視点からの観察結果を示す。

3.3.3 解像度

レンズ、ミラーを通して得られた画像は、画像処理（反転処理他）した後、ITVカメラで観察される。従って解像度についてはITVと同等と評価される。

3.3.4 必要照度

ミラー方式の場合必要とされる照度(E)は次式から求められる。

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot T \cdot R \cdot \frac{L_0}{[F(1+m)]^2} \quad (5)$$

F ; レンズFナンバ

m ; 光学系倍率

R ; ミラーの反射率

T ; レンズ透過率

L₀ ; 物体輝度

ここで、E = 100, F = 10, m = 6.6x10⁻³, R = 0.85, T = 0.4, とした時のL₀は2.34x10⁴ 1mとなる。この値は2m先の物体の輝度であるため実際に必要な光源は距離の2乗倍、ワット数で約4500Wとなり、500Wのハロゲンランプが9個必要となる。また、本方式の特徴である観察範囲を大きくとるためにはさらに多くのランプが必要と考えられる。

3.3.5 耐放射線性

レンズの材料に純粋石英を使用した場合には、~10⁹rad程度まで使用可能と言われている。しかしながら、ペリスコープ系に不可欠なアルミ蒸着製ミラーは、大気、放射線下では水酸化アルミの生成による腐食が激しく実用上問題がある。これに替わる物としてレンズと同材質のプリズムの使用が考えられるが、光量損失が大きく検討すべき課題が多い。

一方、イメージファイバが連続した構成物であるのに対しミラー方式ではレンズとミラー間が空間として構成されるため放射線照射の対象となる部分が少なく、具体的な対策を講じることによって放射線下での使用も充分考えられる。

3.3.6 耐熱性

2章で設定した温度範囲で使用している限り、レンズ、ミラー単品への影響はそれほど大きい

とは考えられないが、長尺になることや照明装置を併設した場合にはかなりの高温になると予想されるため、光軸のズレ、その他周辺部品への影響は厳しいものとなる。

3.3.7 マニピュレータとの関連性

観察視野を大きく確保するためにはレンズ径を大きくする必要があり、結果として鏡筒の拡大化につながる。また自在性を期待できる構造とはなりづらいため、炉内への出し入れに相当する長さがそのまま炉室上部に設置される機器と干渉する恐れもある。

3.4 観察センサ、方式の比較・評価

前項において検討した各方式を項目毎に比較・評価した結果を表3.4に示す。

比較項目のうち、メンテナンス性、技術的難易度については以下の観点からの評価である。

- イメージファイバ（イメージガイド）

イメージファイバの交換部が長くなり、また真空バウンダリ部の処置に伴う手順が回避出来ない。

技術的難易度については、過去に製作された“JT-60 その場コーティング装置”[4] の実績を考慮した。

- ITV カメラ

カメラヘッド部がカートリッジ式となっているため、交換が容易である。また、カメラから引き出すケーブルの耐放射線性と自在性については課題であるが、交換頻度は低いと考えられる。

現状の仕様では ITV の冷却法が大きな問題となる。

- ミラー

レンズの交換は、装置全体の解体につながると考えられる。また、長尺の鏡筒製作、振動、熱に対する光軸調整と再現性等課題が多い。

但し、過去に製作された“JT-60 真空容器内構造点検装置”[6] の実績は今後の参考になる。

表 3.1 耐放射線性イメージファイバ
主要仕様 [3]

項目	No. 1	No. 2
コア材質	純粋石英(Cl-Free, OH-800ppm)	
△n	1 %	
画素数	30,000	
照射長	20 m	20 m
線引温度	高	高

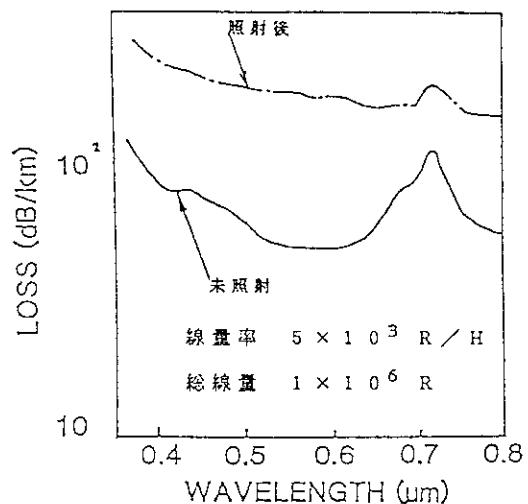


表 3.2 ファイバの画素数と最小屈曲半径

画素数	12000	16000	20000
外形寸法 (mm Φ)	12	12	15
曲げ半径 (mm R)	200	250	300

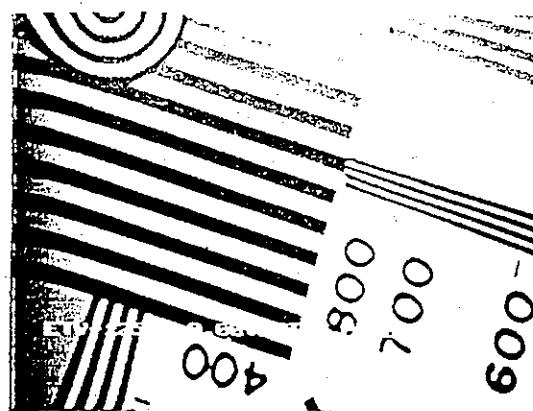
表 3.4 観察センサ、方式の比較・評価結果

項目	方式	イメージガイド	ITV カメラ	ミラー(プリズム)
視野	○	○	○	
観察範囲	○	○	△	
解像度	○	○	○	
照明の大きさ	×	○	×	
耐放射線性能	△	△	○	
耐熱性能	○	×	△	
大きさ(マニピレータへの影響)	○	○	×	
マニピレータへの組込性	○	△	○	
メンテナンス性	△	○	×	
技術的難度	○	○	×	
経済性	△	○	×	
耐磁場性能	○	×	○	

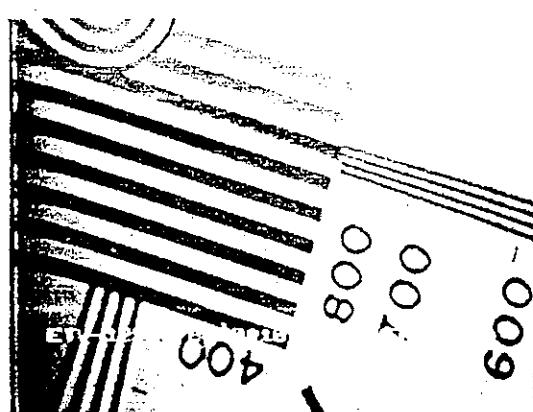
表3.3 I T V 性能比較表

メー カ 型 式	耐環境性			カメラ性能				コントローラ 位置	備考
	放熱 温 度	方 式	カラ ー	水平解像度 最低照度	寸法 (mm)	質量 (g)			
G 1 T - 125 N	80°C (電源分離)	2/3" 液晶管	カラ ー	250本 以上	—	175u×226u×324t	—	別置	原子力発電所に納入実績有り。
三 菱 G C D - 100	(18°R)	40°C 1/2" C C D	"	470本 以上	5Lx F1.4	60×50×128	500		
日 立 耐放射型 カラー ITV	18°R	70°C	2/3" サチコン	"	—	420×270×630	10,800	別置	電子冷却式パルメカに吸着している。
東 芝 IK-M 10.B	(18°R)	40°C 1/2" C C D	"	240本 以上	15Lx F1.6	φ17.5×51.82	25		
日 立 EM-1102	(n)	n	n	360本 以上	280Lx F1.6	φ17.5×58.2	n	別置	圧縮空気による冷却 3m先で285lx(2844灯)の照明付
ソニ XC-999	(n)	n	n	470本 以上	4.5Lx F1.2	22×22×128	95		
ATM-2010	18°	n	2/3" カルニコン	n	—	φ130×235.2	11,500	別置	水中用ケースに吸着時
Q1	—	18°	70°C 2/3" 液晶管	B/W 以上	500本 以上	—	260×120×315		
R1 (英國)	1.6×18°R at 1×18°Hr	53°C	"	n	1Lx以上	φ36×198.2	350	別置	レンズは含まず 補助照明をオフセットとして有している。 39mケーブル含む重量14kg
E T V - 1250 ガラス (米国)	18°R at 2×18°Hr	60°C	2/3" 液晶管	"	550本 以上	φ32×385.6	(450)		
E T V - 1256	4×18°R	50°C	カラ ー	300本 以上	—	φ32×340.2	450	n	• Q1が日本代理店となってい る。38mケーブル含む重量14kg • Q1が日本代理店となつてい る。

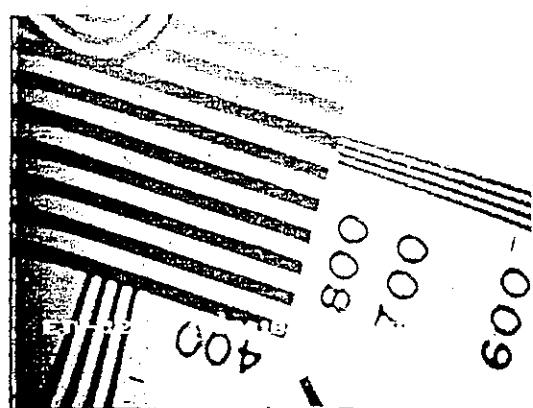
- () はメーカ資料に記載なき事項で推定に基づく。
- 耐磁場性能については定量的データの確認が出来なかつた。



(a) 未照射



(b) 6.0×10^5 R/h r



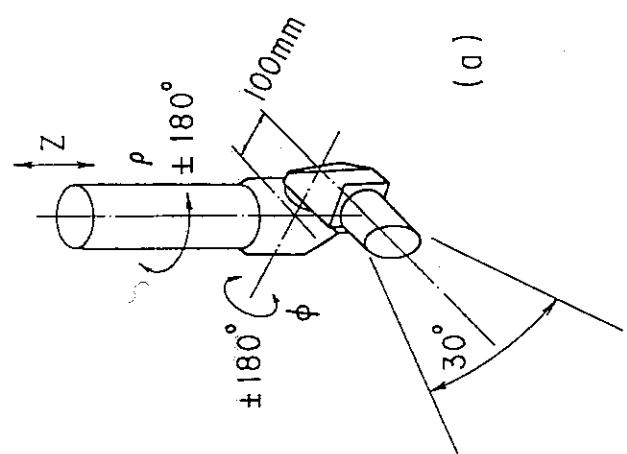
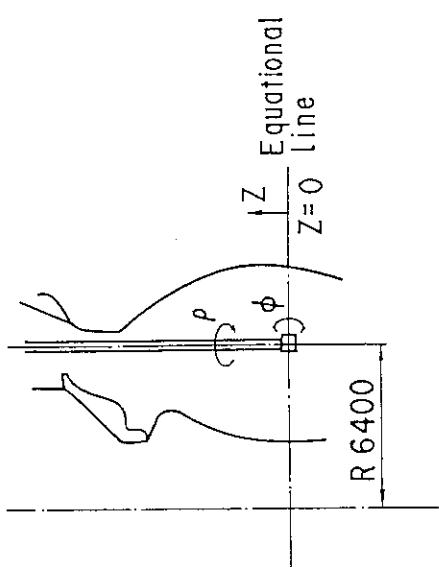
(c) 1.0×10^6 R/h r



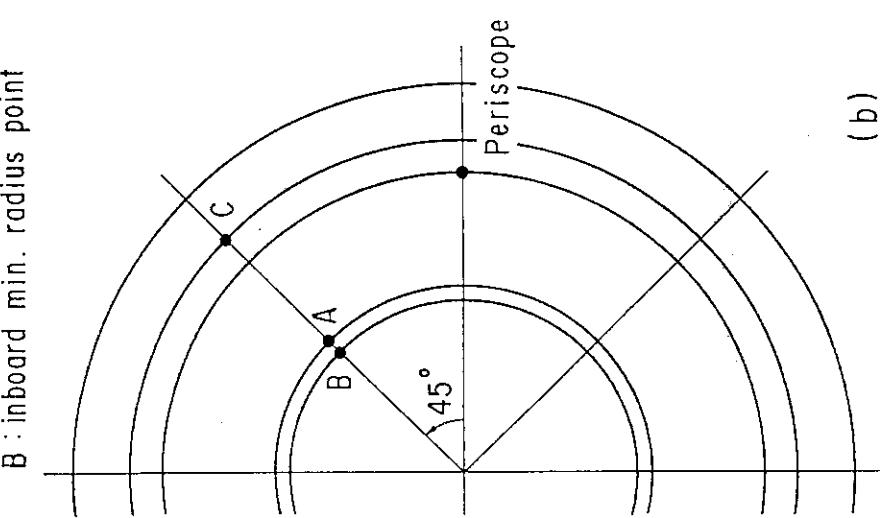
(d) 6.8×10^6 R/h r

図 3.2 観察画像の空間線量率依存性(ETV-1250/ウェスチングハウス社製)

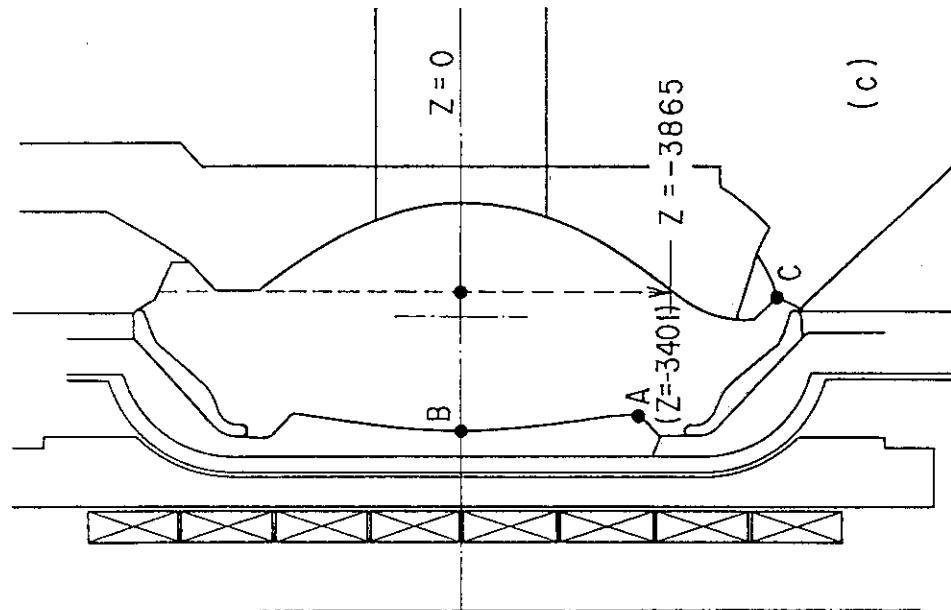
A : inboard max. radius point
 B : inboard min. radius point



(a)



(b)



(c)

図 3.3 ペリスコープの概念 (a) と同ペリスコープによる CAD シミュレーションによる炉内観察のための視点とターゲットポイント (b : トロイダル方向, c : ポロイダル断面)

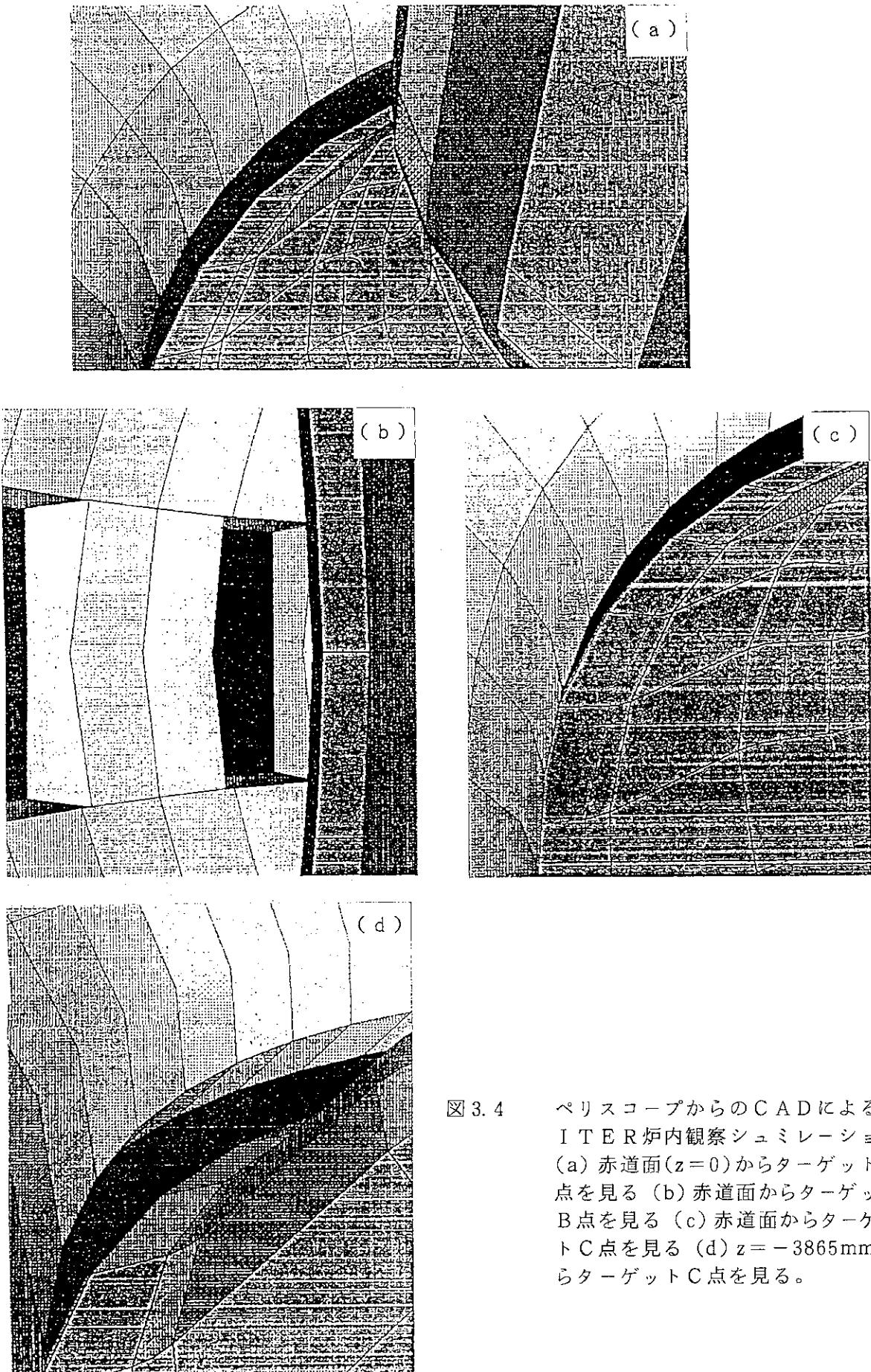


図 3.4 ペリスコープからの CAD による
ITR 炉内観察シミュレーション
(a) 赤道面($z=0$)からターゲット A
点を見る (b) 赤道面からターゲット
B 点を見る (c) 赤道面からターゲッ
ト C 点を見る (d) $z=-3865\text{mm}$ か
らターゲット C 点を見る。

4. マニピュレータの方式の検討

3章での検討の結果、現状では撮像管式ITVカメラによるものが他の2方式に比べ、総体的に有利と考えられた。従って本章ではITVカメラを主体にファイバースコープの装着も可能なマニピュレータを想定し、以下に示す項目を前提条件に方式の検討を行った。

- (1) マニピュレータは炉上部（上部ポート）から炉心に向かって挿入する。現在検討されている取り合いスペースを図4.1に示す。
- (2) マニピュレータ1台あたりの観察範囲は90°としトロイダル平面上4個所に設置する。
- (3) 観察センサの耐放射線性を考慮し、マニピュレータの動作速度については、出来るだけの高速化を図る。
- (4) 使用時の効率化をはかるため、待機時はクライオスタッフの上部まで上昇させておくものとする（形状、寸法上からの検討）。

以上をもとにマニピュレータの基本的な方式に極座標方式と多関節方式を選び両者の比較、検討を行った。

4.1 マニピュレータの基本構造

極座標、多関節方式それぞれの自由度と想定される各軸の長さを図4.2に示す。いずれも方式も炉内への挿入、引き出しのための機能を持ち、そのストロークは約18mで、これをそのまま上部に引き上げた場合は図4.3に示すように建屋クレーンと干渉する。これを避けるためにはマニピュレータ自身に伸縮機能を付加するなどの対策が必要であるがこれについても検討する。マニピュレータの所有する各軸名称と機能を表4.1に示す。

表4.1 マニピュレータの所有軸

軸名 方 式	Z	ϕ	$\theta 1$	A	$\theta 2$	$A\theta$
極座標方式	○	○	○	○	●	○
多関節方式	○	○	○	●	○	○

(1) Z 軸

マニピュレータ全体を垂直方向に上下させる。

(2) ϕ 軸

Z軸を中心にマニピュレータを左右に回転させる。

(3) θ 1 軸

先端部アームを上下方向に回転させる関節。

(4) A 軸

先端部アームを θ 1 を中心に前後進させる。

(5) θ 2 軸

θ 1 軸の先端にある関節で、上下方向に回転する。

(6) A θ 軸

最先端部の関節で、水平方向に回転したセンサの向きを変える。

4.2 概略仕様

4.2.1 駆動軸の配置

図4.4にマニピュレータ駆動系の軸列配置を示す。A, θ 1, ϕ 軸の駆動源はZ軸として吊り下げられる駆動ヘッド部に取り付けられ、磁性流体シール式回転導入機（以下、回転導入機とする）を介して炉内に動力が伝達される。一方、 θ 2, A θ 軸の駆動源は軸近傍に取り付けられ、駆動源自体が炉内環境に置かれる。表4.2に各軸駆動方式、駆動範囲、速度を示す。速度については“JT-60その場コーティング装置”[4]に比べ、約3倍の速さになっている。

4.2.2 各軸の重量と慣性モーメント

表4.3に各軸の重量概算と軸回りの慣性モーメント(GD2)の計算結果を示す。トータル重量は極座標方式が多関節方式に比べ若干重く、また θ 1, θ 2 軸の慣性モーメントについては多関節方式の方が大きく制振制御に配慮する必要のあることを伺わせる。

4.2.3 回転導入機と中継軸の軸径の検討

回転導入機を介して炉内に動力が伝達される A, θ 1, ϕ 軸のうち、 θ 1 軸について(1)回転導入機の軸に加えられる捻り応力と(2)回転導入機に接続され、動力を伝達する軸（以下、中継軸とする）に加えられる捻れ角について概算した。

回転導入機の回転軸を ϕ 20mm とし、トルクは極座方式で 134kg・cm、多関節方式では 223kg・cm とした。その結果、捻れ応力はそれぞれ 0.85kg/mm^2 , 1.42kg/mm^2 となり、SUS の許容疲労強度 (10kg/mm^2) に比べ充分小さく問題はない。

中継軸の捻れ角の計算では、軸の外径／内径を極座標方式では $42.7\text{mm}/39.4\text{mm}$ 、多関節方式では $42.7\text{mm}/37.1\text{mm}$ とした。その結果前者では 2.35° 、後者では 2.5° となり、“JT-60その場コーティング装置”[4]の 2.77° に比べ小さく問題にはならない。

4.2.4 伸縮機能（装置）の検討

前項までの検討では、マニピュレータ自体伸縮機能をもたないため、上昇限時には図4.3に示すようにクレーンのビーム下面と干渉し、寸法的には成立しない。従って上限時のマニピュレータの全長 (26.25m) については少なくとも 22.2m 以下にする必要があるが、そのためには 26.

$$25 - 22.2 = 4.05\text{m}$$

即ち、4m程度のストロークを持つ伸縮装置が必要である。

検討の結果、基本的には駆動ヘッド部（A, $\theta 1$, ϕ 軸の駆動源を収納する）から炉内へ動力を伝達する方式と伝達しない方式（従って駆動源は各軸近傍に置かれ炉内環境に曝される）の二通りが考えられた。図4.5に構想図を示す。以下に各方式の概要と問題点を述べる。

(1) 駆動ヘッド部から動力を伝達する方式

- ・伸縮と動力の伝達が同時に可能な構造として、機械的ガタの少ないボールスライド軸を採用する。
- ・駆動ヘッド部は巻取り装置によるホイスト方式とし、ヘッドの下部に伸縮機構を設ける。
- ・支柱、A, $\theta 1$ 軸ともボールスライド軸による伸縮方式を採用する。
- ・本方式の場合、伸縮部の外径は約300mmとなる。
- ・問題点としては長尺な(5m)ボールスライド軸の製作上の問題。
- ・横方向からの支持のとれない各駆動軸のスラスト方向の受けの問題。
- ・巻き上げ装置ワイヤ部のシール方法などがある。

(2) 駆動ヘッド部から動力を伝達しない方式

- ・この場合は伸縮のみとなり、機構としてはシリンダ駆動、ボルネジ駆動、ラック・ピニオン駆動、ワイヤ／チェーン駆動が考えられる。
- ・このうちシリンダ、ラック・ピニオン駆動ではシリンダやラックが上部に突き出す形となり不適である。一方、チェーン／ワイヤ駆動では真空シールに問題がある。
- ・以上からボルネジ駆動による伸縮法とリニアボールベアリングあるいはリニアガイドによるガイド方式との組み合わせが最適と考えられる。図4.6にリニアボールベアリングを使用した場合の伸縮装置の概念図を示す。
- ・本方式の場合、伸縮部の最大径は230mm程度となる。
- ・問題点としては炉内環境下で動作可能な動力源の開発と長尺(～5m)ボルネジの製作がある。

4.2.5 位置決め精度の検討

マニピュレータの位置決め精度は、駆動軸を構成する機械部品のバックラッシュ、捻れ、ベルトの伸び等に起因する(1)機械精度、エンコーダ等検出器による(2)検出器精度(3)制御系精度3種の合計となる。

表4.4はそれぞれについて概算し、マニピュレータのアームを最大限伸ばした時のアーム先端での位置ズレ量を求めたものである。

4.3 方式の比較、検討

以上から極座標方式と多関節方式の2方式について、(1)動作時間(2)動作範囲と観察可能な領域(3)所要動力他の観点から比較、検討した。

表4.5、表4.6、表4.7に結果を示す。動作時間の比較では、水平、垂直、斜行の3種類の動作

について同一距離を走行させた場合について検討したがいずれにおいても多関節方式の方が優れている。(2)については極座標方式の場合、炉の下部に死角領域が出来るが多関節方式ではすべての領域が観察可能である。所要動力については両方式にそれほどの違いは見られないが、ケーブルの引き回しについては軸間距離が変化する A 軸を持つ極座標方式の方が不利である。

4.4 保護機能の検討

人のアクセスが困難な環境下で使用される本装置に置いては、故障時の対策については当初からその基本的な考え方を設計に取り入れて置く必要がある。

4.4.1 オーバーランに対する保護

各軸のオーバーランに対する保護は、エンコーダのカウント値を基準とするソフトリミットを第一段階に据え、ソフトリミットを超えた場合についてはリミットスイッチ、タッチセンサー等による機械的リミットを第二段階として準備する。

4.4.2 過負荷に対する保護

電気的保護として、インダクションモータによる駆動軸ではサーマルリレー、サーボモータによる駆動軸ではサーボドライバの持つ保護機能（過電流、過電圧、過負荷等）によって対処する。また、機械的な保護としてトルクリミッタを取り付ける。

4.4.3 動作軸のスティックに対する対応

炉内に挿入されたマニピュレータに駆動軸が、ある動作状態から動かなくなった場合の対応はきわめて困難である。これについては“JT-60 その場コーティング装置”[4] 経験を取り入れ、アクセス出来る軸系については各軸の駆動側に手動ハンドルを設け人為的に動作可能とする。また、炉内からの引き抜きが出来ない軸については、ギヤ等の噛み合いを外部から強制的に解除するアーム解除装置（偏心軸受け、シャーピン、レバー、ワイヤから構成）によってアームを一本の棒状にし、引き抜く。

表 4.2 極座標方式、多関節方式マニピュレータの各軸毎の駆動方式
駆動範囲、駆動速度（“JT-60その場コーティング装置”
[2]との比較で示す）

項目		極座標方式	多関節方式	In-Situ Coating (JT-60)
Z 軸	装置昇降	ドラムーワイヤー吊上方式 1850.0 mm 3000 mm/min 11Kw 1450 rpm	ドラムーワイヤー吊上方式 1850.0 mm 3000 mm/min 11Kw 1450 rpm	ドラムーワイヤー吊上方式 7720 mm 1268 mm/min 1.5Kw 1450 rpm
Y 軸	接着回転	ギヤ变速 -180° ~ +180° 180° /min 50W 1300 rpm	ギヤ变速 -180° ~ +180° 180° /min 50W 1300 rpm	ギヤ变速 -180° ~ +180° 70° /min 50W 1300 rpm
A 軸	アーム前進後退	ラック&ピニオン 3000 mm 1000 mm/min 0.75Kw 1450 rpm	なし	ラック&ピニオン 3000 mm 300 mm/min 40W 1300 rpm
θ1 軸	第一アーム回転	ギヤ变速 -90° ~ +90° 180° /min 0.4Kw 1450 rpm	ギヤ变速 -90° ~ +90° 180° /min 0.75Kw 1450 rpm	ギヤ变速 -90° ~ +45° 70° /min 40W 1300 rpm
θ2 軸	第二アーム回転	なし	ギヤ变速 -90° ~ +90° 180° /min 0.2Kw DC サーボ (DC75V 4.2A)	なし
Aθ 軸	アーム先端回転	ギヤ变速 -90° ~ +90° 360° /min 0.04Kw DC サーボ (DC75V 1.2A)	ギヤ变速 -90° ~ +90° 360° /min ←	なし

表 4.3 各軸重量と軸回り慣性モーメント

軸名称	極座標方式		多関節方式	
	重量(kg)	G D ² (kg·cm ²)	重量(kg)	G D ² (kg·cm ²)
Z	630	2.73	619	2.69
φ	30.6	0.0433	30.6	0.0425
A	71	4.37	-	-
θ 1	76.3	0.9	121.3	1.641
θ 2	-	-	θ 1 に含む	9.98
A θ	θ 1 に含む	0.125	θ 1 に含む	0.125
合 計	807.9		770.9	

表 4.4 各軸の位置決め精度

軸名称	極座標方式	多関節方式
Z	± 0.237 % (± 55.37 mm)	± 0.237 % (± 55.37 mm)
A	± 0.135 % (± 4.05 mm)	-
φ	± 0.251 % (± 0.91°)	± 0.251 % (± 0.91°)
θ 1	± 0.623 % (± 1.12°)	± 0.623 % (± 1.12°)
θ 2	-	± 0.217 % (± 0.40°)

表 4.5 動作時間の比較

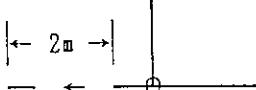
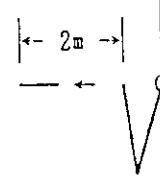
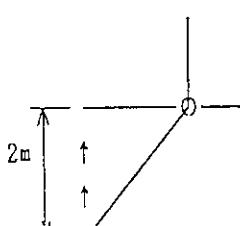
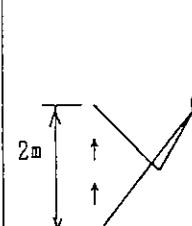
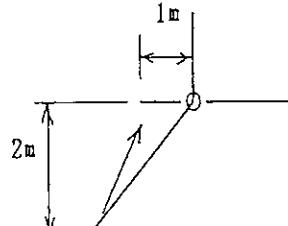
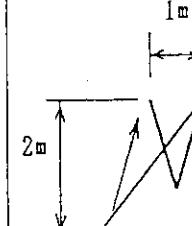
項目	極座標方式	多関節方式
1 動作性能 1) 水平動作	 <p>120秒 (Δ軸 2m 120秒) (θ1軸 70° 23秒) (θ2軸 140° 47秒)</p>	 <p>47秒 (θ1軸 70° 23秒) (θ2軸 140° 47秒)</p>
2) 垂直動作	 <p>60秒 (Δ軸 1m 60秒) (θ1軸 42° 14秒)</p>	 <p>30秒 (θ2軸 90° 30秒)</p>
3) 斜行動作	 <p>120秒 (Δ軸 2m 120秒) (θ1軸 42° 14秒)</p>	 <p>47秒 (θ1軸 30° 10秒) (θ2軸 140° 47秒)</p>

表 4.6 動作範囲と観察可能領域の比較

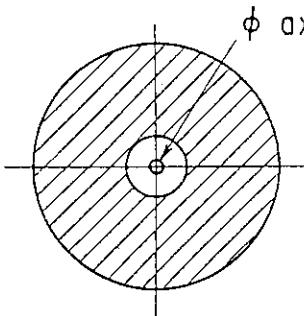
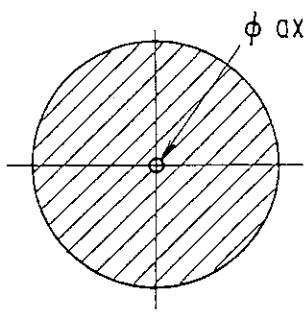
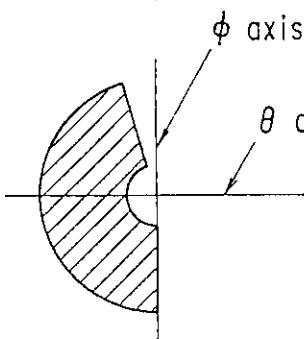
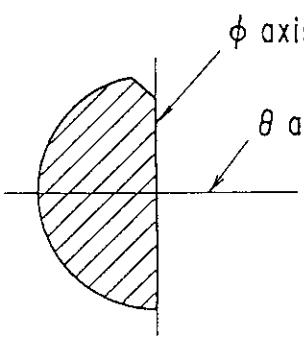
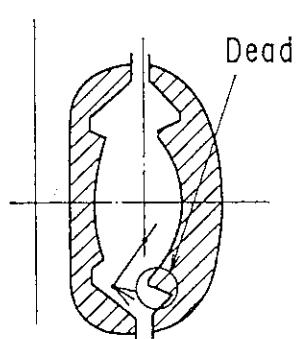
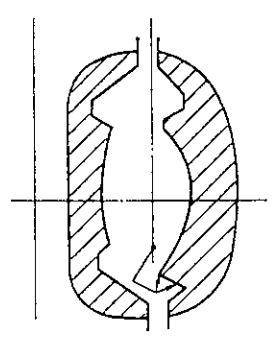
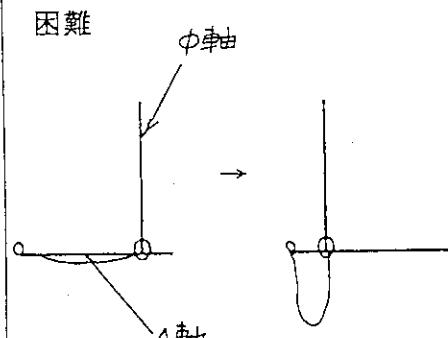
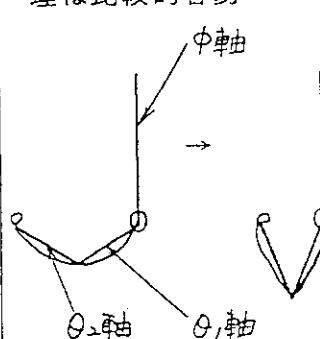
Item	Polar coordinate form	Articulated form
Motion range Horizontal plane		
		
Observation range		

表 4.7 所要動力容量とケーブル処理他の比較

項 目	極 座 標 方 式	多 関 節 方 式		
動力	Z 軸 Φ 軸 A 軸 θ 1 軸 θ 2 軸 A θ 軸	1.1 Kw 0.05 Kw 0.75 Kw 0.4 Kw なし 0.04 Kw	1.1 Kw 0.05 Kw なし 0.75 Kw 0.2 Kw 0.04 Kw	
内部導入ケーブル	観察センサー用 A θ サーボモータ用 なし	1式 1式 なし	← ← θ 2 サーボモータ用 1式	
フレキシブルケーブルの処理	観察センサーと支点軸との距離が変化するためケーブル処理が困難		観察センサーと支点軸との距離が変化しないためケーブルの処理は比較的容易	
各部の大きさ (動力伝達あり)				
スライド部	約 φ 310 mm	約 φ 260 mm		
アーム 部	約 φ 200 mm	約 φ 270 mm		

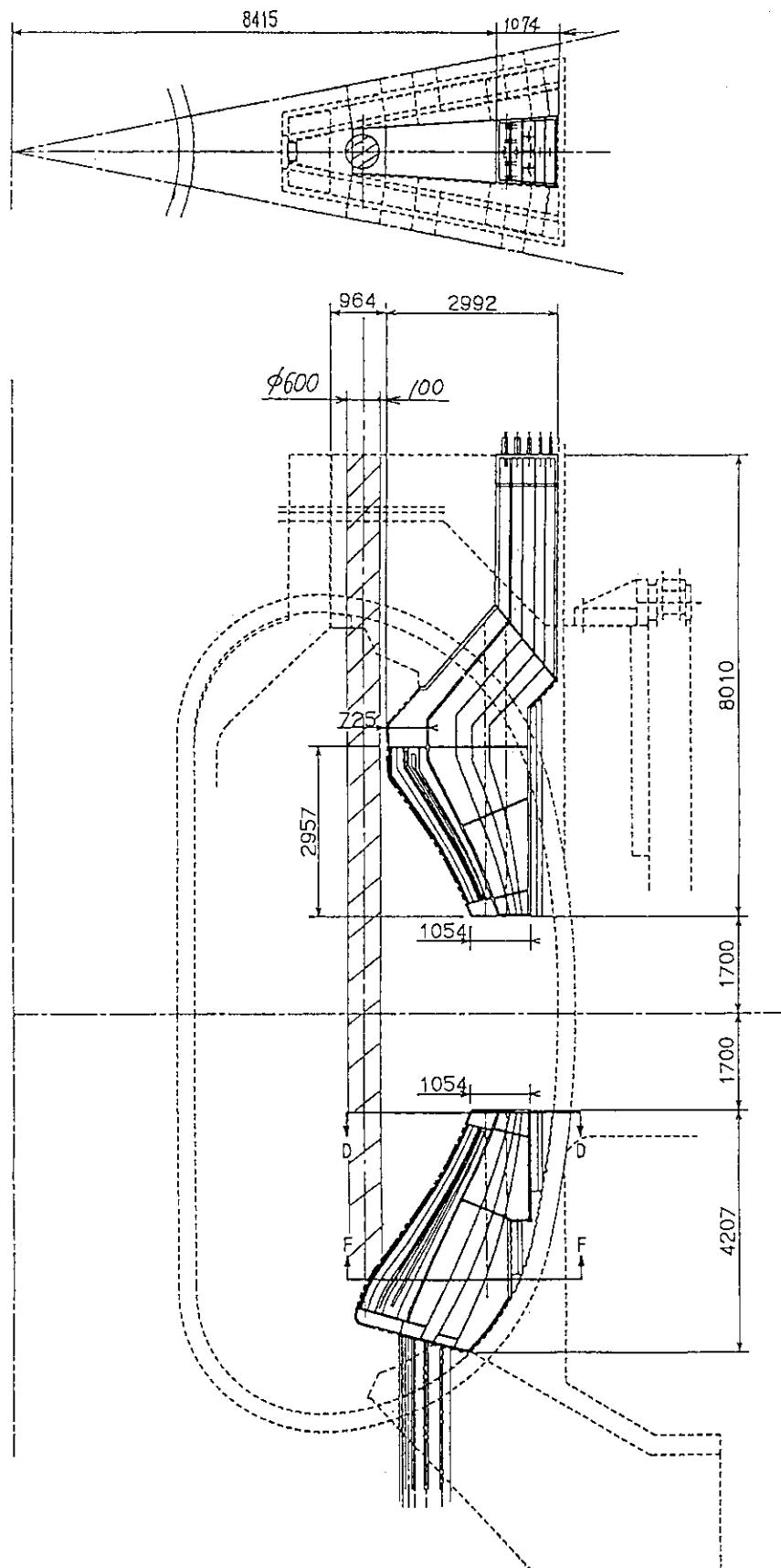


図 4.1 炉内観察装置取り合いスペースの検討（単位：mm）
(中央の斜線部が挿入予定箇所)

Polar coordinate form	Articulated form
	<p>unit : mm</p>
	<p>unit : mm</p>
Polar coordinate form	Articulated form
5 degrees	<p>unit : mm</p>
	<img alt="Diagram of a polar coordinate articulated arm mechanism. It consists of a vertical Z-axis segment of length 23,0

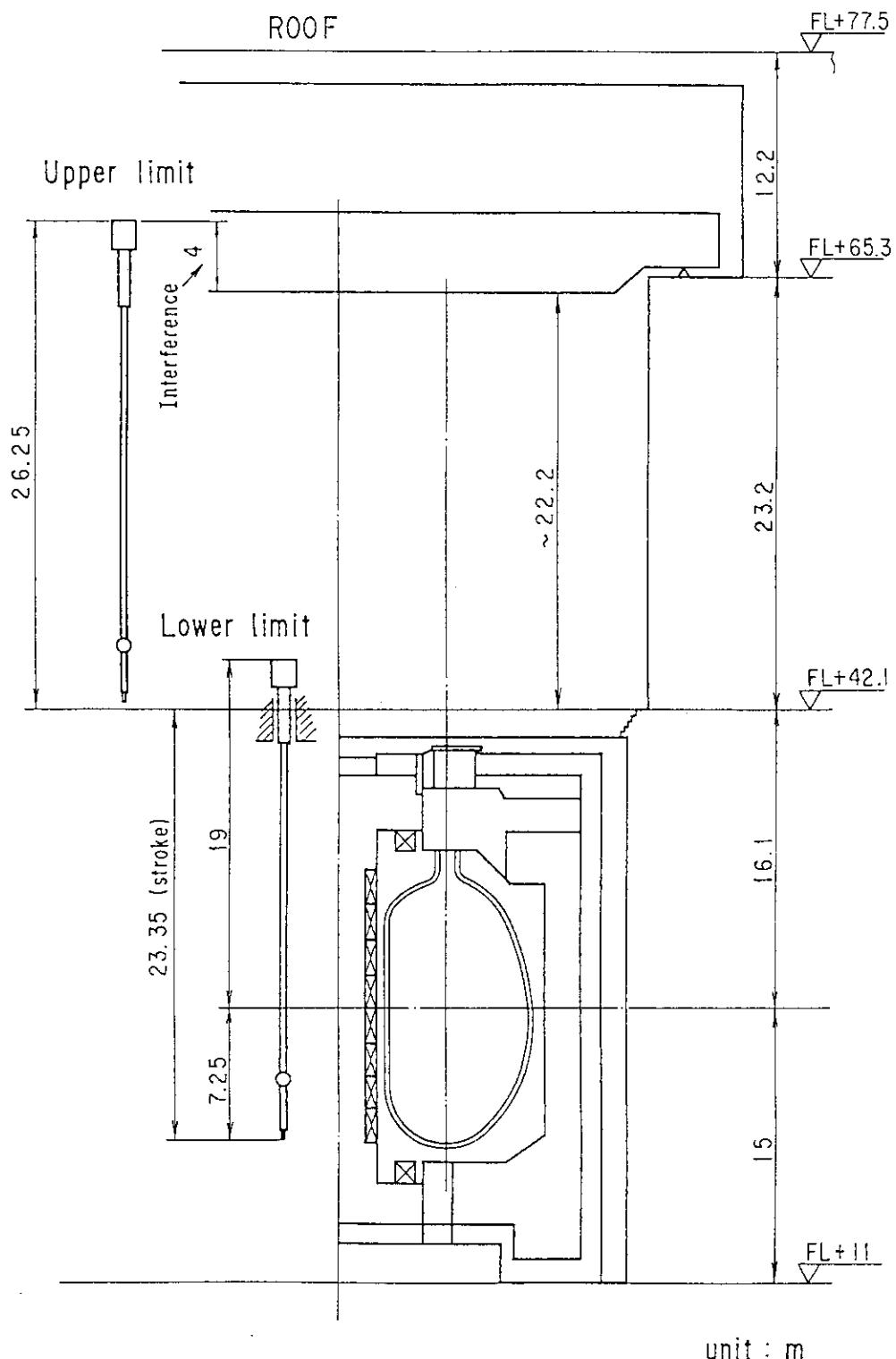


図 4.3 マニピュレータと建屋クレーンとの干渉（単位：m）

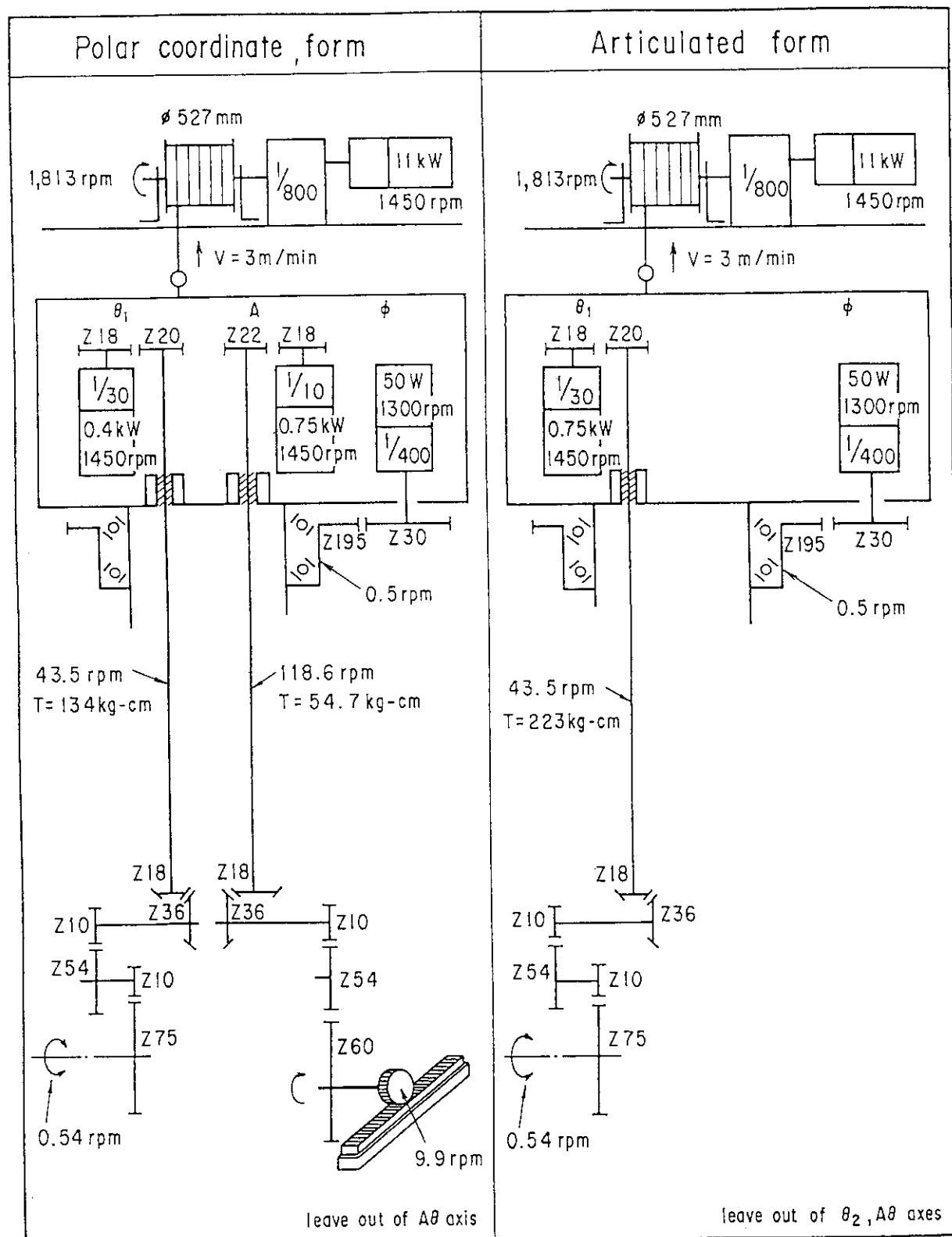


図 4.4 極座標方式, 多関節方式各マニピュレータの駆動軸配列

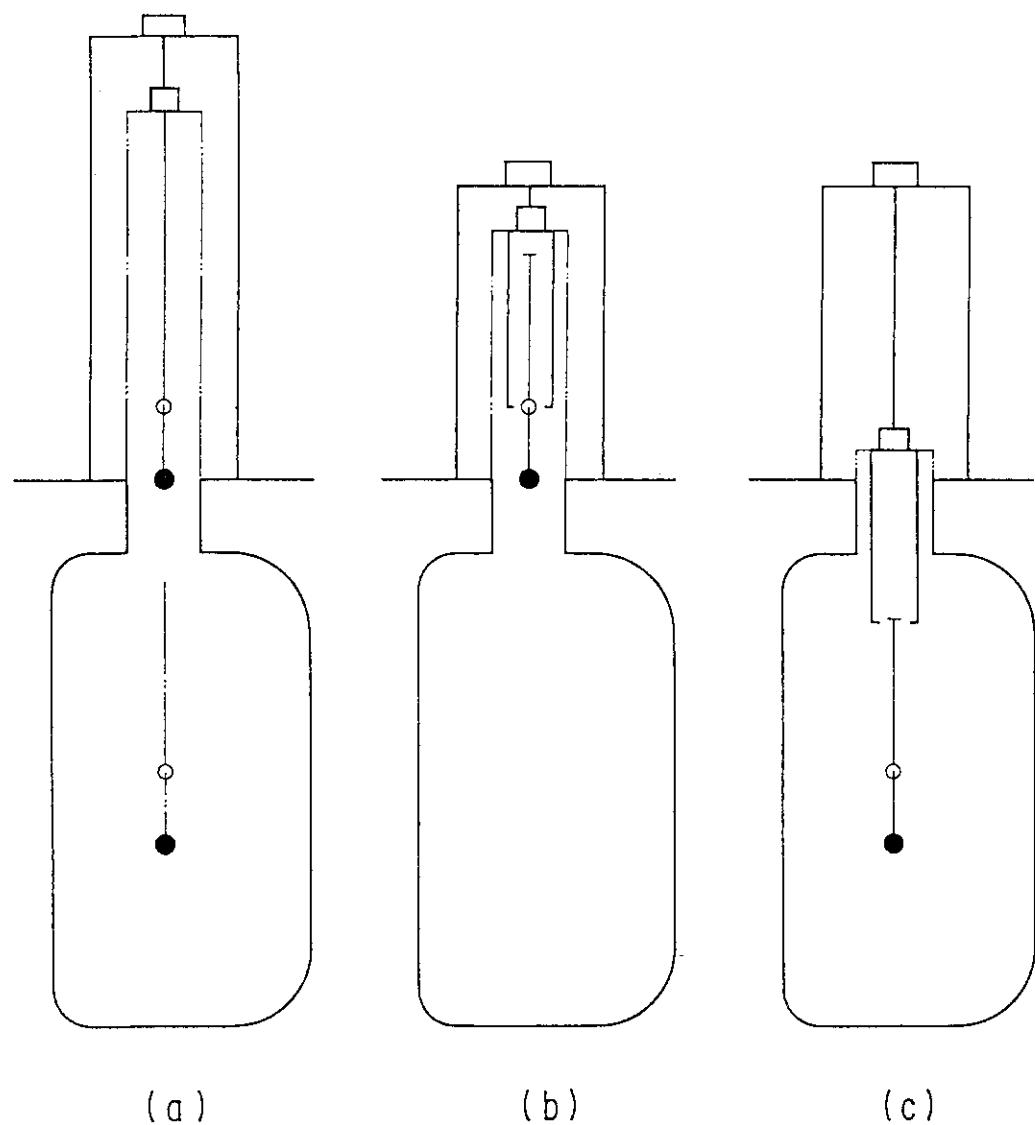


図 4.5 伸縮装置構想図 (a) 伸縮機能なし (b) 伸縮機能あり／
引き抜き状態 (c) 伸縮機能あり／挿入状態

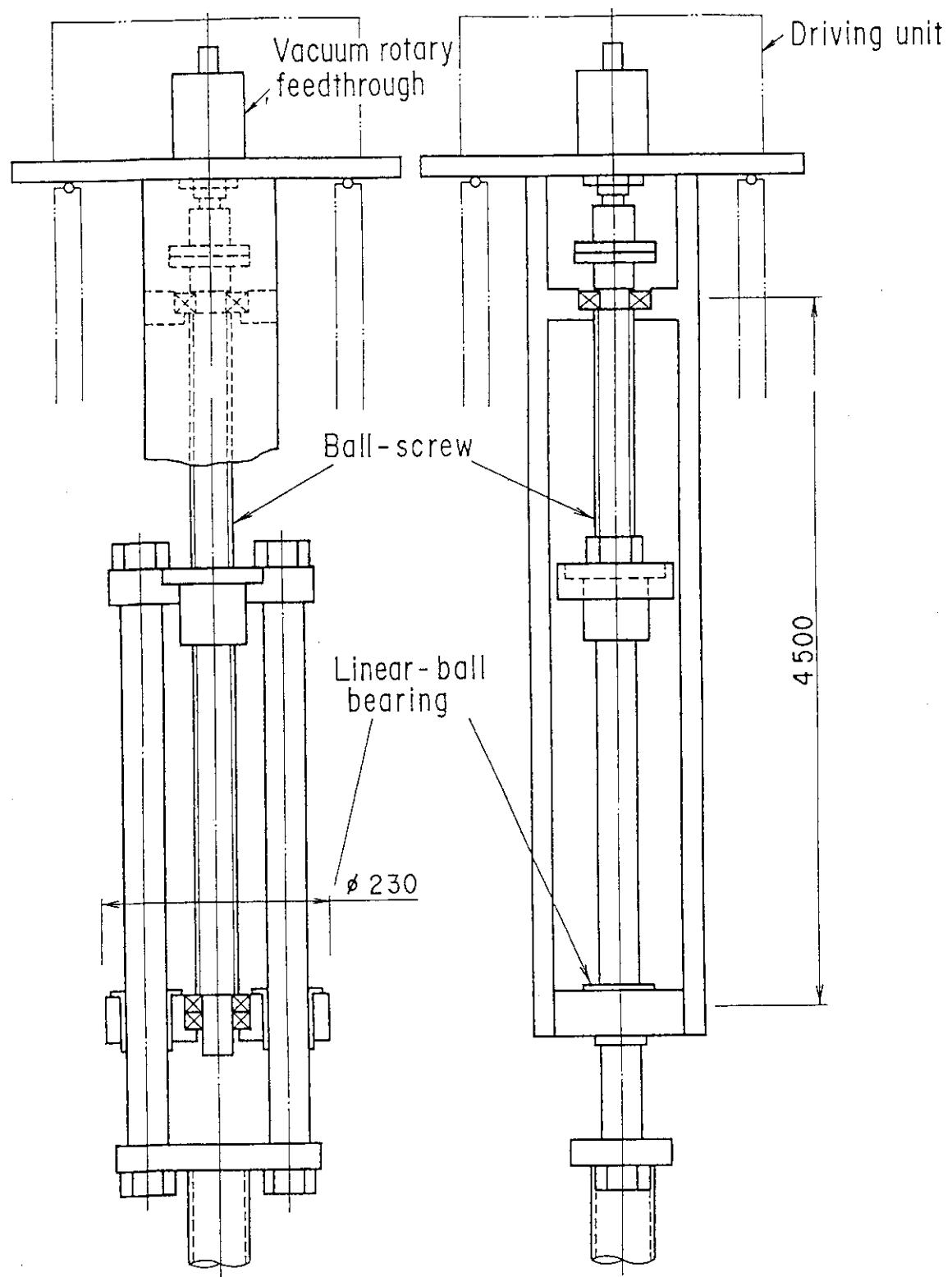


図 4.6 ボールネジ駆動とリニアボールベアリングガイド方式による伸縮装置概念図

5. 制御及び観察面の特定方式の検討

5.1 制御方式

図5.1に制御システムの概念図を示す。

基本的には常設した4台のマニピュレータを、1台の制御装置で順次切り換えながら操作する。極座標方式と多関節方式では、制御の対象となるモータの数や各軸の動作角度指令値が異なってくるが制御の方式に基本的な違いはない。

運転モードから必要とされる機能としては自動運転と手動運転があり、通常の操作は自動によって行う。自動モードには(1)炉内全域を定められたパターンに従い順次観察するモード(2)キーボードから入力された観察座標のみ観察モード(3)自動運転時のパターンの登録、変更の操作に必要なモードが考えられる。手動モードは各軸を自由に操作出来るモードで、マニピュレータの調整時及び教示時に使用する。

以上のような操作において特に重要なことは、常時アームと壁面との位置関係が把握でき、相互の衝突が回避出来るシステムとなっていることである。そのための機能として、(1)マニピュレータの炉内への挿入、引き出しなどの定まった動作には特定のパターンを設定し、各軸の関節角度を制限する(2)アーム先端及び後端と壁面との距離を求め、衝突を回避するためのソフトリミット(3)ソフトリミットを超えた場合のメカニカルストップなどが必要である。

各軸の制限では、サーボモータによって駆動される軸ではサーボコントローラによって速度制御、位置決めを行い、他のモータの場合は高速と低速の切り換えが可能なコントローラを使用して位置決めを行う。速度の切り換えは目標位置と現在位置との差を求め自動的に行う。

5.2 観察面の特定

観察面を特定する方法としては炉内壁をトロイダル方向、ポロイダル方向それぞれに座標分割し、分割された壁面毎に番地をつけ管理する。

分割に際しての考え方を以下に示す。

- ・1区画を1.5mの距離から観察する。
- ・この時のITVによる観察視野は約81cmx61cmとなることから1区画の基本的な大きさと60cm角とする。
- ・観察距離が1.5mとれない座標についてはさらに細分化した座標を設定する。

以上により求めた各方向での座標分割数は、トロイダル方向で88座標、ポロイダル方向で46座標となる。図5.2に座標分割案を示す。

5.3 観察作業時間の検討

4章で述べたように、センサをはじめとする観察装置の耐放射線性を考慮したときマニピュレータの動作速度には高速性が望まれる。ここではこれまでに検討してきたマニピュレータの動作先度をもとに1/4トーラス（ボロイダル方向で96座標、トロイダル方向で22座標）の全内壁面を観察するために必要な作業時間を概算する。検討にあたっての前提条件を次に示す。

- ・各軸の動作速度は表5.1に従った。
- ・各軸は独立に動作させる方式とした。
- ・観察手順は座標番号順に従うものとした。
- ・各座標での観察時間（マニピュレータの停止時間）は5秒とした。

以上から観察に要する時間は約23時間と概算された。

表5.1 各軸動作速度

軸 速度	高 速	低 速	高速から低速への 切り替え距離
Z	3000mm/min	600mm/min	500mm
Φ	180°/min	36°/min	30°
A	1000mm/min	200mm/min	170mm
θ	180°/min	36°/min	30°
A θ	180°/min	36°/min	30°

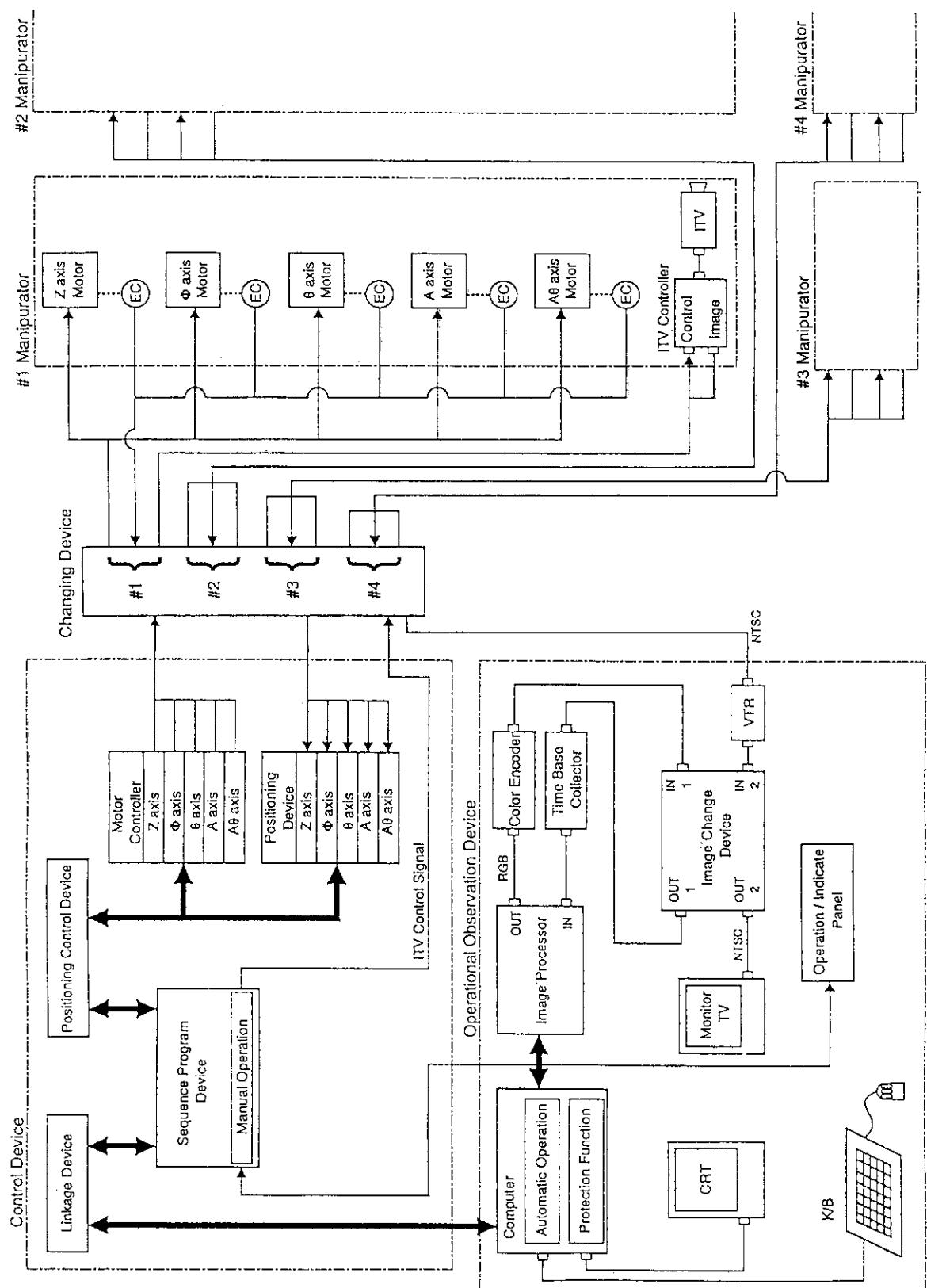


図 5.1 制御システム概念図

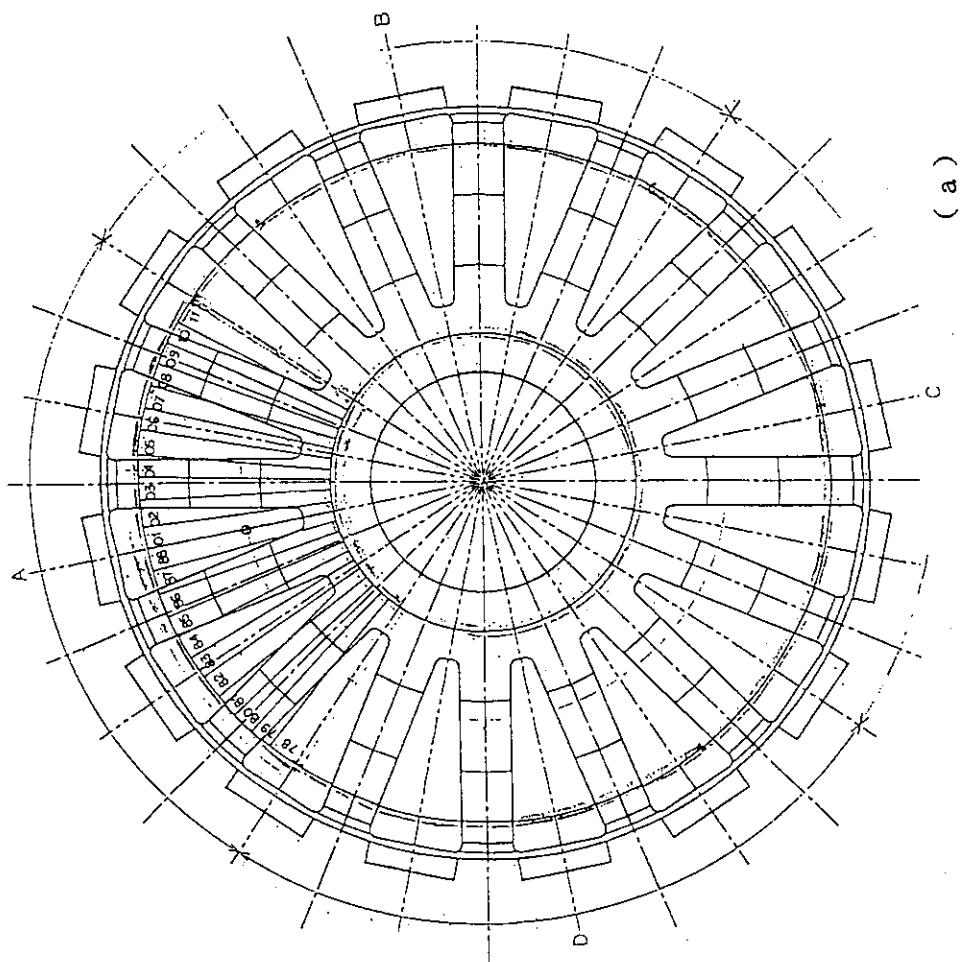
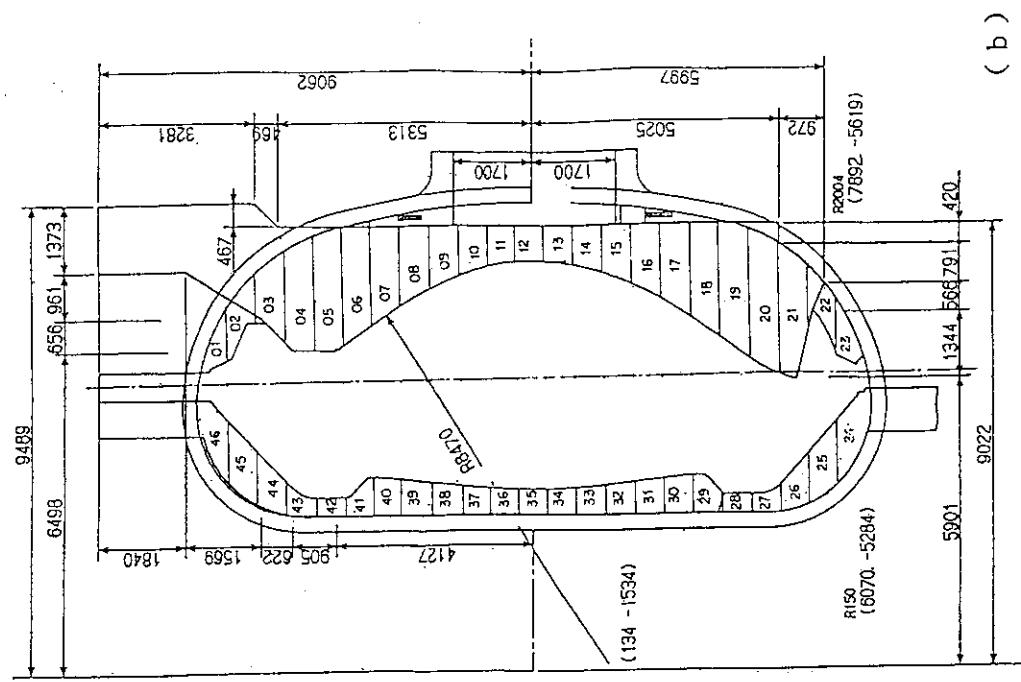


図 5.2 トロイダル方向、ポロイダル方向座標分割案
(a) トロイダル方向
(b) ポロイダル方向

6. ま　と　め

- (1) ITERの炉内観察装置として、実画像情報を視覚的に得るという観点からの検討を行った。
- (2) その結果、観察センサに撮像管式ITVカメラを使用し、多関節方式のマニピュレータによって炉内を走査する方式が他の方式に比べ総体的に有利であると考えられた。
- (3) これはITVが他の観察センサに比べ扱い易く、機動性に富み、マニピュレータの動作特性にさほどの制約を加えないという理由による。
- (4) しかしながら耐環境性のうち、放射線については図3.2に示したように $\sim 1 \times 10^7 R/hr$ の空間線量率で画像でハレーションを起こしたように不鮮明となる。また、耐熱性についても現状では60°C以下に抑える必要がある。
- (5) 一方ファイバスコープについては、LWRや再処理施設等の放射線場で一部実用化されており、装置としての具体的な検討には最適であるが耐放射線性については使用されている放射線場がITERの炉内環境に比べきわめて低い。
- (6) その点ペリスコープは電子部品の使用もなく、放射線に曝される部分も少ないため放射線下では比較的有利であるが、ミラーの腐食、透過率、光軸調整、機動性などに関して検討すべき課題が多い。
- (7) また、観察される対象物側からの検討も重要である。すなわち、現在考えられている炉内第一壁としての黒鉛材料は、光の反射が極めて小さく観察には不向きな材料である。ましてやその表面に形成される微小なクラックや凹凸を識別するには、照明装置を含む光学上の詳細な検討が必要である。
- (8) 以上述べたように、炉内観察装置の実現には多くの解決すべき課題があるが、特に耐放射線性についてはその第一段階として、装置を構成する既存の機器、部品の耐放射線性について調査、試験し、その性能到達点を把握する必要がある。そうした結果を基に現実的な設計、検討をする他、開発に見込まれる要素については新たな試験が必要である。
- (9) 一方視覚的な情報とは別に、放射線には影響されない特定波長の赤外線やレーザ光線を信号とし、画像処理装置との組み合わせによる方法の検討なども必要であると考える。
- (10) いずれにしろ、炉内観察装置はITERの保守、点検上不可欠な装置であり、またその開発に時間がかかることからも早急に具体的検討を進める必要がある。

7. 今後の予定

以上述べてきたように、炉内観察システムは高温、真空（あるいは乾燥不活性ガス雰囲気）、放射線場というきわめて過酷な環境下で使用されることになり、性能の維持を含む全体の健全性はシステムを構成する個々の要素（部品）の環境強度に大きく依存する。特に $10^7 R/hr$ という高い空間線量率中での耐放射線性はシステムの方式を選定し、設計を進めていく上でクリ

6. ま　と　め

- (1) ITERの炉内観察装置として、実画像情報を視覚的に得るという観点からの検討を行った。
- (2) その結果、観察センサに撮像管式ITVカメラを使用し、多関節方式のマニピュレータによって炉内を走査する方式が他の方式に比べ総体的に有利であると考えられた。
- (3) これはITVが他の観察センサに比べ扱い易く、機動性に富み、マニピュレータの動作特性にさほどの制約を加えないという理由による。
- (4) しかしながら耐環境性のうち、放射線については図3.2に示したように $\sim 1 \times 10^7 R/hr$ の空間線量率で画像でハレーションを起こしたように不鮮明となる。また、耐熱性についても現状では60°C以下に抑える必要がある。
- (5) 一方ファイバスコープについては、LWRや再処理施設等の放射線場で一部実用化されており、装置としての具体的な検討には最適であるが耐放射線性については使用されている放射線場がITERの炉内環境に比べきわめて低い。
- (6) その点ペリスコープは電子部品の使用もなく、放射線に曝される部分も少ないため放射線下では比較的有利であるが、ミラーの腐食、透過率、光軸調整、機動性などに関して検討すべき課題が多い。
- (7) また、観察される対象物側からの検討も重要である。すなわち、現在考えられている炉内第一壁としての黒鉛材料は、光の反射が極めて小さく観察には不向きな材料である。ましてやその表面に形成される微小なクラックや凹凸を識別するには、照明装置を含む光学上の詳細な検討が必要である。
- (8) 以上述べたように、炉内観察装置の実現には多くの解決すべき課題があるが、特に耐放射線性についてはその第一段階として、装置を構成する既存の機器、部品の耐放射線性について調査、試験し、その性能到達点を把握する必要がある。そうした結果を基に現実的な設計、検討をする他、開発に見込まれる要素については新たな試験が必要である。
- (9) 一方視覚的な情報とは別に、放射線には影響されない特定波長の赤外線やレーザ光線を信号とし、画像処理装置との組み合わせによる方法の検討なども必要であると考える。
- (10) いずれにしろ、炉内観察装置はITERの保守、点検上不可欠な装置であり、またその開発に時間がかかることからも早急に具体的検討を進める必要がある。

7. 今後の予定

以上述べてきたように、炉内観察システムは高温、真空（あるいは乾燥不活性ガス雰囲気）、放射線場というきわめて過酷な環境下で使用されることになり、性能の維持を含む全体の健全性はシステムを構成する個々の要素（部品）の環境強度に大きく依存する。特に $10^7 R/hr$ という高い空間線量率中での耐放射線性はシステムの方式を選定し、設計を進めていく上でクリ

テカルパスとなる。

しかしながら現状では、ファイバスcopeやペリスcopeそしてITVについてこのような高放射線下において画像の変化を連続的に観察、記録したという報告をはじめ、耐放射線性特性に関するデータベースが不足しており、その蓄積が必要である。このため、今後の予定として、以下に示す部品、要素について放射線照射試験を中心とした開発・試験を行い、今後の設計に反映する計画である。

(1) ファイバスcopeとペリスcopeの耐放射線性

それぞれの素材に関する試験ではなく、実画像を観察出来る形に試作し、放射線照射量をパラメータに照射下での画像観察を行い、両観察センサの現状における耐放射線性についての性能到達点を把握する。

(2) ファイバスscopeの可視領域における劣化の改善

従来のファイバスcopeは、 $10^8 R$ 以上の集積線量では可視領域での劣化が進み、ITERで必要とされる $10^{10} R$ までの使用には耐えることができない。このため、 $10^8 R$ 以上の可視領域での劣化を抑え、可視特性を改善する方法を開発する。

(3) ペリスcope用ミラーのコーティング材の開発

汎用されているアルミ蒸着製ミラーは、放射線照射下では腐食が促進され、反射率が低下する。これに代わる材料としていくつかのコーティング材による試料を製作し、照射量と反射率の関係を試験する。

(4) ITVの耐放射線性、耐熱性についての改善の可能性について

今回の調査で取り上げたITVは、耐放射線仕様として市販されているものの中では最高といわれているものである。しかしながら耐放射線性については図3.2に示すように、 $\sim 7 \times 10^6 R/hr$ が限界であり、耐熱性では $60^\circ C$ 程度に制限されている。

従って、今後ITERへの適用にあたってはそのための改善を必要とするが、主なものとしては半導体を始めとする電気部品の環境強度を高めることが最大の課題と考えられる。そのための調査、試験も早急に手掛けなければならない。

謝　　辞

本設計検討の実施にあたり、炉構造研究室、ITER開発室の方々から多くの有意義な助言を頂いた。また、炉内観察システムの設計・調査を担当して頂いた、(株)三菱電機及び(株)東芝の各担当者の方々に謝意を表します。

そして本研究を進めるにあたり、多くのご支援を頂いた核融合工学部 島本 進 部長には深く感謝致します。

テカルパスとなる。

しかしながら現状では、ファイバスcopeやペリスcopeそしてITVについてこのような高放射線下において画像の変化を連続的に観察、記録したという報告をはじめ、耐放射線性特性に関するデータベースが不足しており、その蓄積が必要である。このため、今後の予定として、以下に示す部品、要素について放射線照射試験を中心とした開発・試験を行い、今後の設計に反映する計画である。

(1) ファイバスcopeとペリスcopeの耐放射線性

それぞれの素材に関する試験ではなく、実画像を観察出来る形に試作し、放射線照射量をパラメータに照射下での画像観察を行い、両観察センサの現状における耐放射線性についての性能到達点を把握する。

(2) ファイバスscopeの可視領域における劣化の改善

従来のファイバスcopeは、 $10^8 R$ 以上の集積線量では可視領域での劣化が進み、ITERで必要とされる $10^{10} R$ までの使用には耐えることができない。このため、 $10^8 R$ 以上の可視領域での劣化を抑え、可視特性を改善する方法を開発する。

(3) ペリスcope用ミラーのコーティング材の開発

汎用されているアルミ蒸着製ミラーは、放射線照射下では腐食が促進され、反射率が低下する。これに代わる材料としていくつかのコーティング材による試料を製作し、照射量と反射率の関係を試験する。

(4) ITVの耐放射線性、耐熱性についての改善の可能性について

今回の調査で取り上げたITVは、耐放射線仕様として市販されているものの中では最高といわれているものである。しかしながら耐放射線性については図3.2に示すように、 $\sim 7 \times 10^6 R/hr$ が限界であり、耐熱性では $60^\circ C$ 程度に制限されている。

従って、今後ITERへの適用にあたってはそのための改善を必要とするが、主なものとしては半導体を始めとする電気部品の環境強度を高めることが最大の課題と考えられる。そのための調査、試験も早急に手掛けなければならない。

謝　　辞

本設計検討の実施にあたり、炉構造研究室、ITER開発室の方々から多くの有意義な助言を頂いた。また、炉内観察システムの設計・調査を担当して頂いた、(株)三菱電機及び(株)東芝の各担当者の方々に謝意を表します。

そして本研究を進めるにあたり、多くのご支援を頂いた核融合工学部 島本 進 部長には深く感謝致します。

参考文献

- [1] 解説／ITER, 核融合研究, Vol.65, No1 (1991) 25.
- [2] 解説／ITER, 核融合研究, Vol.65, No2 (1991) 142.
- [3] 妻沼孝司 他：電気学会研究会資料, EIM - 87 - 14 (1987).
- [4] 小原建治郎 他：JAERI - M 88 - 117 (1988).
- [5] (株) キュー・アイ：私信
- [6] 吉行 健 他：JAERI - M 87 - 070 (1987)