

JAERI-Research

97-006



定常炉心試験装置の設計研究(第7編)
— ECRF加熱装置 —

1997年2月

山本 巧・牛草健吉・坂本慶司・今井 剛・宮 直之
栗田源一・永島圭介・北井達也・森 活春・菊池 満・永見正幸

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ㈱原子力資料サービス

定常炉心試験装置の設計研究（第7編）

— ECRF 加熱装置 —

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

山本 巧⁺¹・牛草 健吉・坂本 慶司⁺²・今井 剛⁺²
宮 直之・栗田 源一・永島 圭介・北井 達也
森 活春・菊池 満・永見 正幸

（1997年1月14日受理）

ECRF 加熱装置には、初期プラズマ電流立ち上げ補助及び高磁場中第一壁洗浄用プラズマ生成機能を有する ECR 予備電離/放電洗浄装置とプラズマ加熱及び電流駆動を効果的に行い、高性能な炉プラズマを定常的に安定に維持する機能を有する電子サイクロトロン加熱（ECH）装置がある。これらの2つのタイプの ECRF 加熱装置について、定常炉心試験装置におけるトリチウム取扱の安全性また放射線遮蔽と深く関係するアンテナシステム及び主要コンポーネント（ジャイロトロン）の製作を重点的に設計検討を行った。その結果、これらの ECRF 加熱装置はいずれも技術的に成立することが可能であることが明らかとなった。

本報告書では、これらの概念検討結果を示すものである。

The Design Study of the JT-60SU Device (No.7)
- The ECRF System of JT-60SU -

Takumi YAMAMOTO⁺¹, Kenkichi USHIGUSA, Keishi SAKAMOTO⁺², Tsuyoshi IMAI⁺²
Naoyuki MIYA, Gen-ichi KURITA, Keisuke NAGASHIMA, Tatsuya KITAI
Katsuharu MORI, Mitsuru KIKUCHI and Masayuki NAGAMI

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

(Received January 14, 1997)

The ECRF system is composed of two sub-systems. The one of them is the ECR preionization and discharge cleaning sub-system which assists ramp up of plasma current during start-up and cleans up the first wall under high magnetic fields. The other is ECH heating sub-system which is used to heat plasma and drive plasma current efficiently for sustainment of high performance plasma stably in a steady-state. For the two sub-systems, the safety study in treatment of tritium was carried out in JT-60SU. The design study of the antenna system was also performed concerning on shielding radioactive rays, and the investigation of main component such as a gyrotron was done. It is found that the ECRF system can be fabricated at a technological view point.

The results of conceptual examination of the ECRF system will be described in this report.

Keywords: Electron Cyclotron Radio Frequency (ECRF) System, Electron Cyclotron Heating (ECH) System

+1 Department of Fusion Facility

+2 Department of Fusion Engineering Research

目 次

1. はじめに	1
2. ECRF加熱装置	1
2.1 ECR 予備電離／放電洗浄装置	1
2.1.1 基本性能	1
2.1.2 基本機器構成	1
2.1.3 アンテナシステム	2
2.2 ECH 装置	3
2.2.1 概 要	3
2.2.2 アンテナシステム	10
2.2.3 伝送システム	55
2.2.4 発 振 管	67
2.2.5 電 源	73
3. ま と め	77
謝 辞	77
参考文献	77

Contents

1. Introduction	1
2. Electron Cyclotron Radio Frequency (ECRF) System	1
2.1 EC Resonance Start-Up / Discharge Cleaning Device	1
2.1.1 Basic Performance	1
2.1.2 Outline of Device	1
2.1.3 Antenna System	2
2.2 EC Heating and Current Drive System	3
2.2.1 Outline of System	3
2.2.2 Antenna System	10
2.2.3 Transmission Line System	55
2.2.4 Gyrotron	67
2.2.5 Power Supply System	73
3. Concluding Remarks	77
Acknowledgement	77
References	77

1. はじめに

本装置はECR予備電離装置とECH装置から構成される。

ECR予備電離装置の要求される基本性能は、プラズマ予備電離とともに初期プラズマ電流立ち上げ補助及び高磁場中第一壁洗浄用プラズマ生成機能を含むものである。

ECH加熱装置は、全体で40MWを1つの水平斜めポートから入射する。各ユニットはアンテナシステム、伝送システム、大電力発振部、直流高電圧電源部、一次冷却水設備、真空排気設備及び制御システムからなる。

RF電源は主に、大電力発振部の大電力発振器（ジャイロトロン）を駆動するために、直流高電圧電源（コレクタ電源）、ボディー・アノード電源、ヒータ電源及び超電導マグネット電源と付帯設備（水冷却装置、制御装置、冷凍機等）用電源からなる。

2. ECRF 加熱装置

2.1 ECR予備電離／放電洗浄装置

2.1.1 基本性能

本装置は、高磁場中で第一壁洗浄用プラズマ生成し、プラズマの起動時に効果的な予備電離を行うとともに、初期プラズマ電流を安定に且つ確実に立ち上げるための装置である。以下に基本仕様を示す。

- 1) 周波数 : 170 GHz (Bt=6.07Tにおいて電子サイクロトロン共鳴層)
110 GHz (Bt=3.93Tにおいて電子サイクロトロン共鳴層)
- 2) 入射電力
予備電離 : 1 MW (10秒運転)
放電洗浄 : 0.5 MW (連続運転)
- 3) 入射方式 : 正常波 (水平斜めポートから入射)
- 4) 電力パルス変調
変調周波数 : 20 Hz (最大)
変調度 : 100%

2.1.2 基本機器構成

本装置は、主にアンテナシステム、伝送システム、大電力発振部、直流高電圧電源部、一次冷却水設備、真空排気設備及び制御システムから構成される。アンテナシステムでは、中性子等の放射線遮蔽及びトリチウムの多重防護を考慮して、定常炉心試験装置における重水素-トリチウム放電にも対応できる構造を検討した。伝送システムは真空排気されたコルゲート導波管方式によって、大電力発振部から高周波電力をアンテナシステムに伝送する。大電力発振部の主要コンポーネントである大電力発振管（ジャイロトロン）は現在開発中であるが、1管当たりの発振電力を1MWと想定し、本装置の機器構成を検討した。定常炉心試験装置の初期運転試験では、広範囲なトロイダル磁場における運転が予想される。そのため、本装置では、170GHz帯の2系統の高周波系（伝送システム、大電力発振部）と110GHz帯の1系統を持つ。本装置では、アンテナシステム以外の高周波系は、次章で述べるECH装置の高周波系と同じ機器構成である。よって、詳細な高周波系の機器は次章のECH装置で説明する。又、ECH装置を整備した場合は、その一部を共用する。

1. はじめに

本装置はECR予備電離装置とECH装置から構成される。

ECR予備電離装置の要求される基本性能は、プラズマ予備電離とともに初期プラズマ電流立ち上げ補助及び高磁場中第一壁洗浄用プラズマ生成機能を含むものである。

ECH加熱装置は、全体で40MWを1つの水平斜めポートから入射する。各ユニットはアンテナシステム、伝送システム、大電力発振部、直流高電圧電源部、一次冷却水設備、真空排気設備及び制御システムからなる。

RF電源は主に、大電力発振部の大電力発振器（ジャイロトロン）を駆動するために、直流高電圧電源（コレクタ電源）、ボディー・アノード電源、ヒータ電源及び超電導マグネット電源と付帯設備（水冷却装置、制御装置、冷凍機等）用電源からなる。

2. ECRF 加熱装置

2.1 ECR予備電離／放電洗浄装置

2.1.1 基本性能

本装置は、高磁場中で第一壁洗浄用プラズマ生成し、プラズマの起動時に効果的な予備電離を行うとともに、初期プラズマ電流を安定に且つ確実に立ち上げるための装置である。以下に基本仕様を示す。

- 1) 周波数 : 170 GHz (Bt=6.07Tにおいて電子サイクロトロン共鳴層)
110 GHz (Bt=3.93Tにおいて電子サイクロトロン共鳴層)
- 2) 入射電力
予備電離 : 1 MW (10秒運転)
放電洗浄 : 0.5 MW (連続運転)
- 3) 入射方式
: 正常波 (水平斜めポートから入射)
- 4) 電力パルス変調
変調周波数 : 20 Hz (最大)
変調度 : 100%

2.1.2 基本機器構成

本装置は、主にアンテナシステム、伝送システム、大電力発振部、直流高電圧電源部、一次冷却水設備、真空排気設備及び制御システムから構成される。アンテナシステムでは、中性子等の放射線遮蔽及びトリチウムの多重防護を考慮して、定常炉心試験装置における重水素-トリチウム放電にも対応できる構造を検討した。伝送システムは真空排気されたコルゲート導波管方式によって、大電力発振部から高周波電力をアンテナシステムに伝送する。大電力発振部の主要コンポーネントである大電力発振管（ジャイロトロン）は現在開発中であるが、1管当たりの発振電力を1MWと想定し、本装置の機器構成を検討した。定常炉心試験装置の初期運転試験では、広範囲なトロイダル磁場における運転が予想される。そのため、本装置では、170GHz帯の2系統の高周波系（伝送システム、大電力発振部）と110GHz帯の1系統を持つ。本装置では、アンテナシステム以外の高周波系は、次章で述べるECH装置の高周波系と同じ機器構成である。よって、詳細な高周波系の機器は次章のECH装置で説明する。又、ECH装置を整備した場合は、その一部を共用する。

2.1.3 アンテナシステム

図2.1.1にプラズマ起動装置のアンテナシステムの概念図を示す。アンテナシステムは、本体真空容器の水平斜めポート（ECポート）と第1ゲート弁を介して連結しており、3系統の高周波回路（導波管アンテナ、第1と第2の真空窓、第2ゲート弁、マイタベンド）、2重構造の真空容器、EC気密室及び真空排気設備から成る。アンテナシステムは核発熱及び機器の放射化を抑えるために中性子遮蔽を施し、トリチウムの安全性の観点から3重防護を図った。

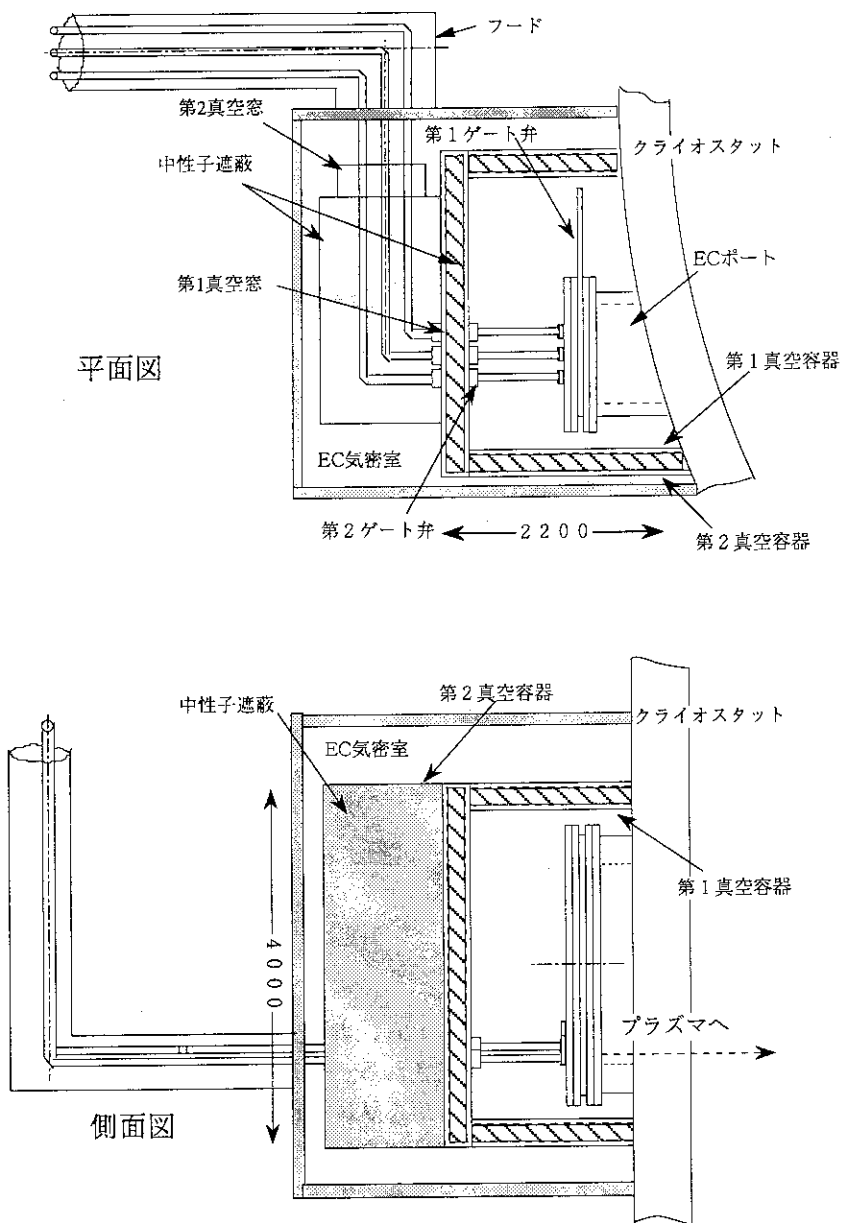


図2.1.1 プラズマ起動装置のアンテナシステム概念図

2.2 ECH装置

2.2.1 概要

2.2.1.1 基本性能

電子サイクロトロン加熱 (ECH) 装置は定常炉心試験装置 (JT-60SU) におけるプラズマ加熱・電流駆動を効果的に行い、高性能な炉心プラズマを定常的に安定に維持するための装置である。

ECH装置は、互いに独立した3つのユニット (A、B、C系) からなり、A系ユニットは8MW、B系とC系ユニットは各16MW、全体で40MWの高周波電力を750mm×2100mmの縦長楕円断面の1個の斜めポート (ECポート) からプラズマに入射する。B系とC系ユニットは同等なシステムである。各ユニットは主にアンテナシステム、伝送システム、大電力発振部、直流高電圧電源部、一次冷却水設備、真空排気設備及び制御システムから構成される。各ユニットのアンテナシステムは、ポロイダル方向に配列され、各高周波ビームはポロイダル方向に掃引され、広範囲な加熱・電流駆動分布制御ができる機能を持つ。アンテナシステムでは、中性子等の放射線遮蔽やトリチウムの多重防護を図り、定常炉心試験装置における重水素-トリチウム放電にも対応できる構造を検討した。伝送システムは真空排気されたコルゲート導波管方式によって、大電力発振部から高周波電力をアンテナシステムに輸送する。大電力発振部の主要コンポーネントである大電力発振管 (ジャイロトロン) は現在開発中であるが、1管当たりの発振電力を1MWと想定し、本装置の機器構成を検討した。A系ユニットは12系統の高周波系 (伝送システム、大電力発振部) を構成し、B系とC系では20系統の高周波系を持つ。1系統の高周波系の概念構成図を図2.2.1に示す。

初期調整試験時には、高電圧電源部、一次冷却水設備及び真空排気設備はJT-60Uの高周波加熱装置のものを使用すること及び計画の進展にともなって、本基本性能を満足するための各設備の増力・改造を行うことを考慮して、設計・検討した。A系の一部は前章に記述したプラズマ起動装置と共用する

2.2.1.2 設計条件

ECH装置では、設計条件はジャイロトロン性能に強く依存する。ここでは、現在、原研一東芝で開発中であるITER用170GHz、1MW、連続運転用ジャイロトロンを本装置のジャイロトロンの基本性能として設計・検討する。表2.2.1に基本設計条件を示す。

表2.2.1 基本設計条件

使用周波数	170GHz (150~220GHz (ステップ可変))
ユニット数	3 (A,B,C系)
入射電力	40MW (トーラス入力)
1ユニット 入射電力 大電力発振部出力	8MW (A系) 16MW (B,C系) 10MW (A系) 20MW (B,C系)
大電力発振管 (ジャイロトロン) 出力 効率 パルス幅	1MW 45~55% (エネルギー回収型) 連続
伝送方式 伝送電力 電力伝送効率	コルゲート導波管のHE11モード (導波管内は 10^{-2} Pa以下の真空度) 1MW 80%

表 2.2.1 基本設計条件 (続き)

入射ポート (ECポート) 個数 断面 長さ 第1ゲート弁	1個 (斜め入射) 2.1m×0.75m 5.4m (真空容器壁とポートフランジ間距離) 1個 (縦長楕円断面)
設置場所 大電力発振部 制御設備等 高電圧電源 水冷却設備	JT-60実験棟、RF増幅室II (52本の発振管) JT-60実験棟、3階計測準備室及び中央制御室 加熱電源棟/トランスヤード 1次冷却棟
アンテナシステム 入射方式 モード 入射角 掃引角度 1ユニット 第1ミラー 第2ミラー 偏波変換器 第2ゲート弁 導波管アンテナ 第1高周波真空窓 第2高周波真空窓 中性子遮蔽 コンクリート壁 遮蔽ブロック トリチウムの三重格納 第1次 第2次 第3次	3ユニット (各ユニットはポロイダル方向に配列) 斜め伝播正常波 50度 (磁気軸に対して) 最大9度 (ポロイダル方向) 1個 (可動、平面) 1個 (固定、曲面) 1式 (2個のコレクタミラー) 1個 (円形断面) 12個 (A系、2個は予備) 20個 (B,C系) 1式 (分散型) 1式 (分散型) 厚さ45cm 厚さ30cm、(プラズマを直視するブロック) 第1真空容器、第1真空窓 第2真空容器、第2真空窓、導波管 ECH気密室、導波管

2.2.1.3 主要機器

(1) アンテナシステム

アンテナシステムの概念図及び配置図を図2.2.2 (a)、(b)と図2.2.3に示す。1ユニットのアンテナシステムは高周波ビームの掃引、集光及び偏波変換用の4枚のミラー、12個 (A系) 及び20個 (B、C系) の導波管アンテナ、真空窓、2重の真空容器及び真空排気設備からなり、3つのユニットはポロイダル方向に3段重ねに配列する。アンテナシステムは核発熱及び機器の放射化を抑えるために中性子遮蔽構造及びトリチウムの安全性の観点から3重格納構造である。

(2) 伝送系システム

伝送システムは1ユニット当たり、12個 (A系) 及び20個 (B、C系) のコレクタ導波管によって、大電力発振部からの高周波電力をアンテナシステムまで輸送する。伝送システムは、主に、直線導波管、マイターバンド、高周波電力モニター装置、入力偏波調整器、高周波スイッチ、模擬負荷及び導波管支持部からなる。SUの本体室とRF増幅室IIの貫通部は放射線遮蔽構造である。導波管内

は 10^{-2} Pa以下に真空排気し、入力偏波調整器、高周波スイッチ、マイタバンド及び模擬負荷は水冷却構造となっている。

(3) 大電力発振部

1ユニットの大電力発振部は12個(A系)及び20個(B、C系)の1MWの大電力発振器からなり、3ユニットの大電力発振部が実験棟4階のRF増幅室Ⅱに設置される。1MWの大電力発振器は、ジャイロトロン(出力整合器を含む)、超電導マグネット、ジャイロトロンタンク、冷却水分岐装置及びFC冷却装置からなる。

(4) RF電源及び冷却設備

RF電源は主に直流高電圧電源(コレクタ電源)、ボディー・アノード電源、ヒータ電源(加速電源)、超電導マグネット電源、コレクタコイル用マグネット電源及び付帯設備(水冷却装置、制御装置、真空排気設備等)用電源からなる。受電設備及び直流高電圧電源の直流発生装置等は加熱電源トランスヤード及び加熱電源棟に設置される。

冷却設備としては、主にジャイロトロンのコレクタ、伝送系、アンテナシステムのミラー、真空窓及び電源等の冷却のため、約50MWの除熱が必要である。本体室内の機器の冷却は、管理された1次冷却水を使用する。高電圧電源部、一次冷却水設備及び真空排気設備はJT-60Uの高周波加熱装置のものを流用することを基本とするとともに、計画の進展にともなって基本性能を満足するために各設備の増力を行う。

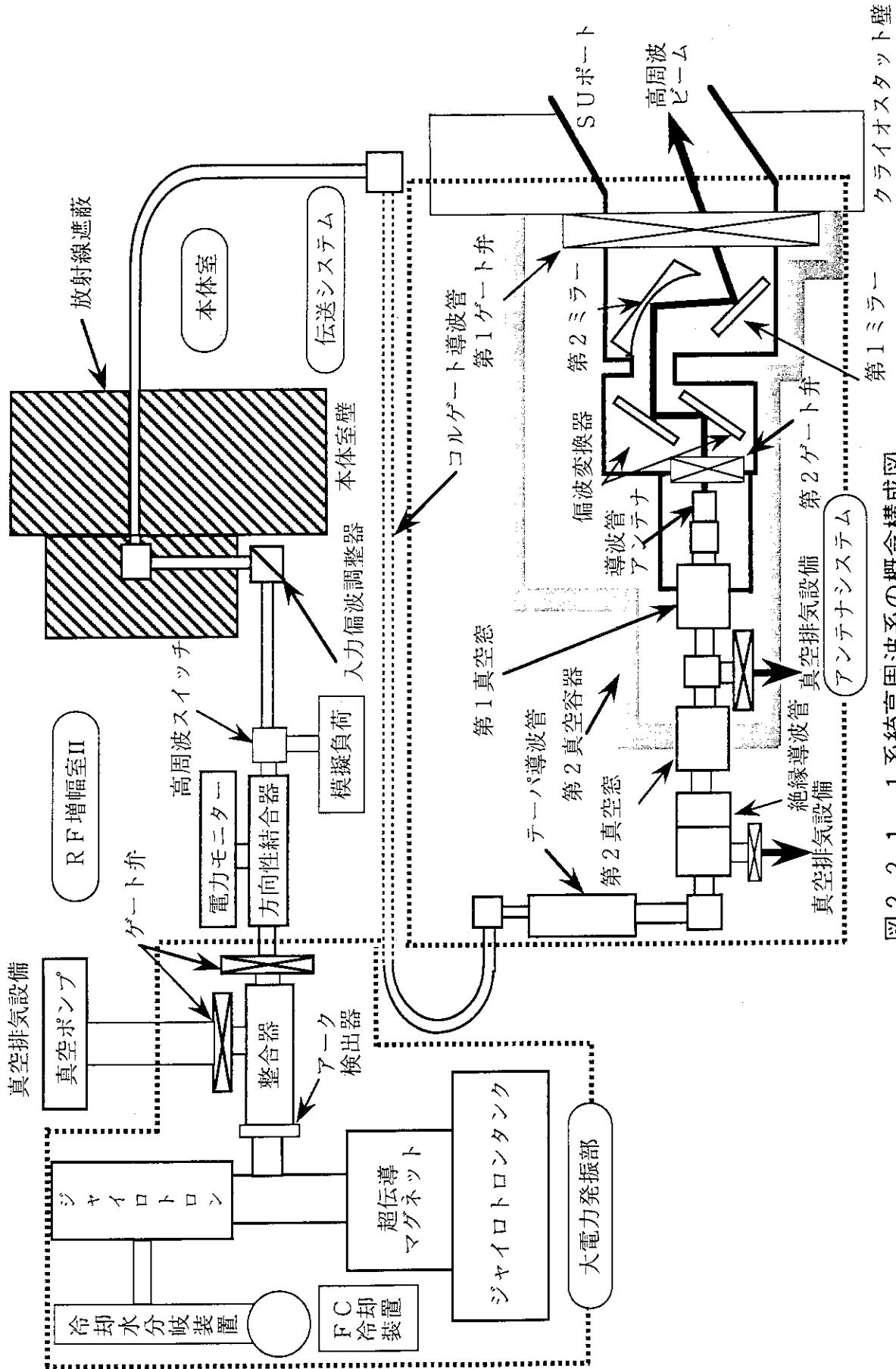


図2.2.1 1系統高周波系の概念構成図

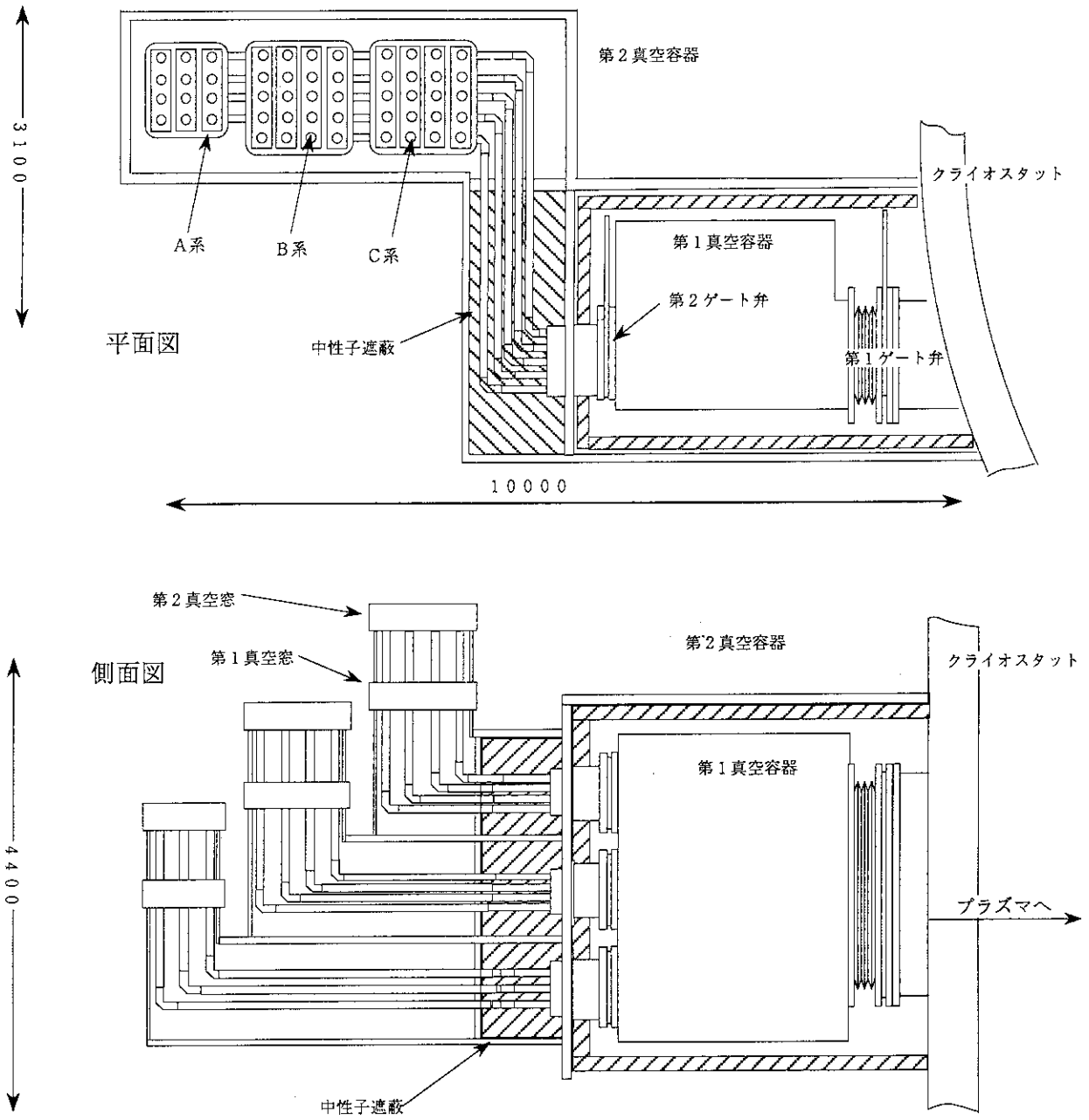


図 2.2.2 (a) アンテナシステム概念図

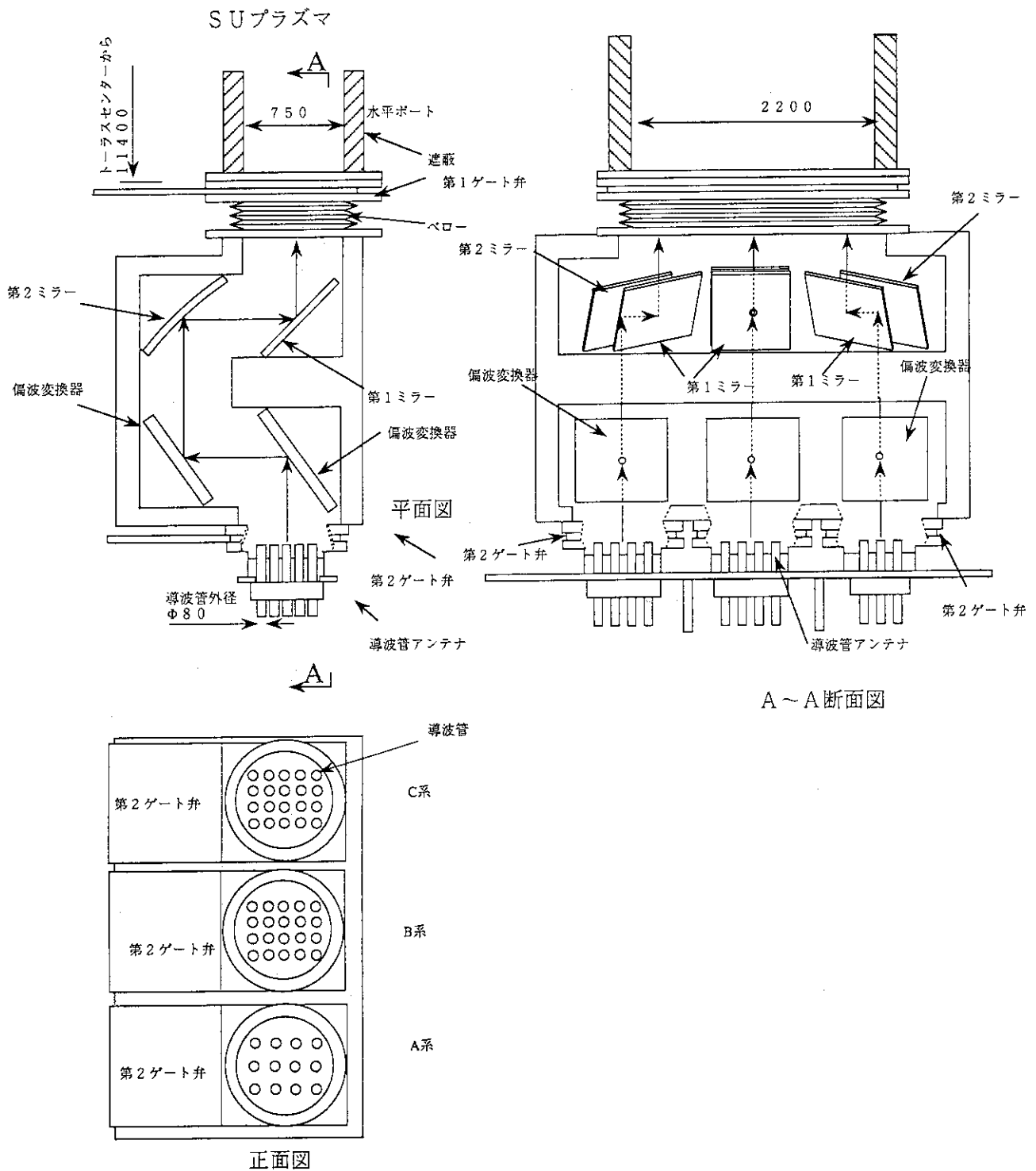


図 2.2.2 (b) アンテナシステムの概念図

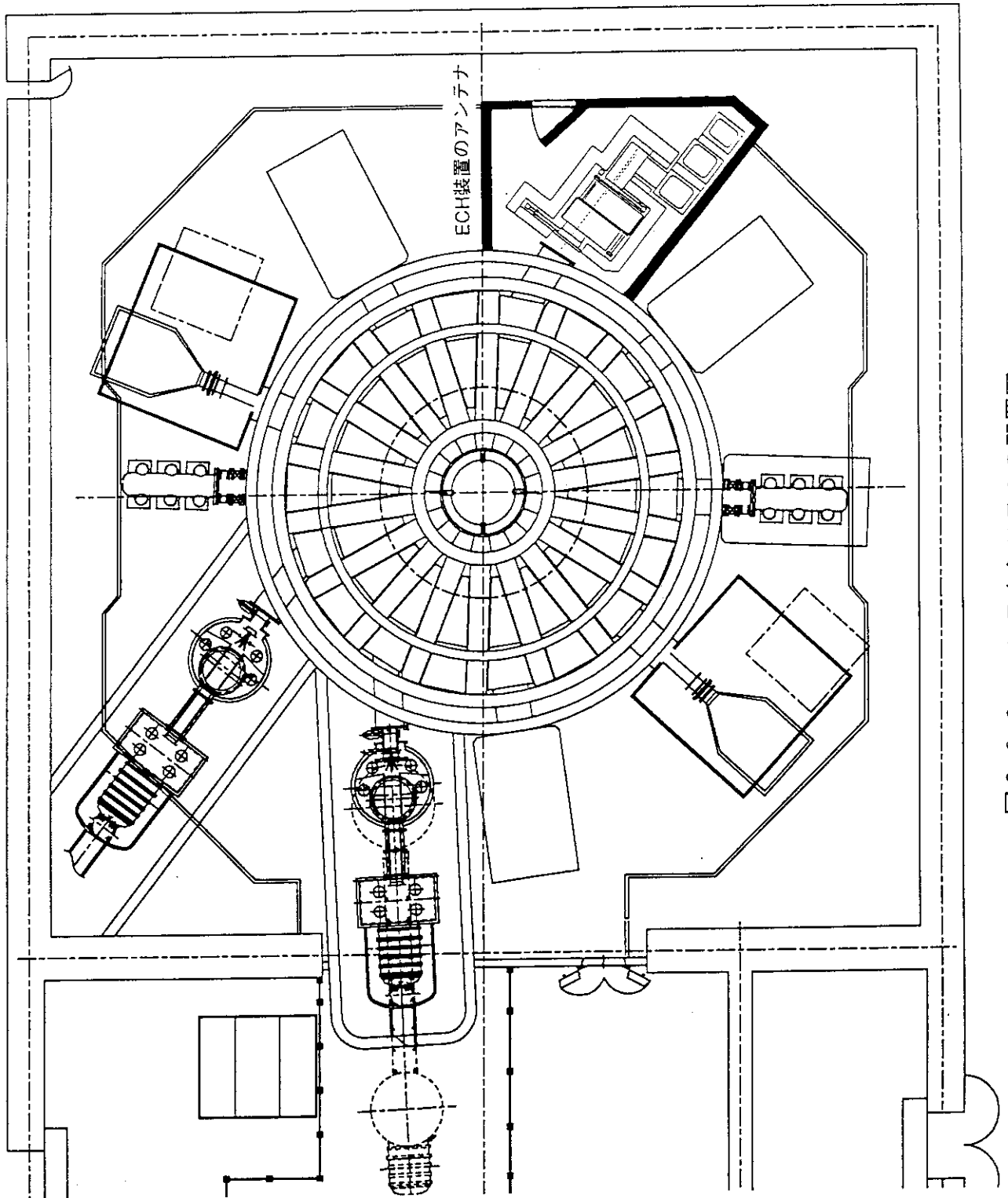


図 2.2.3 アンテナシステムの配置図

2.2.2 アンテナシステム

2.2.2.1 アンテナシステムの基本検討

2.2.2.1-1 ビーム光学系基本設計

アンテナシステムは3ユニットからなり各ユニットの高周波ビーム系は図2.2.4に示す様に、導波管アンテナ列(WG)、ゲート弁(GV1、2)及び4枚のミラー(M1、2、3、4)によって構成される。導波管配列より放射された高周波ビームはGV2のゲート弁を通過しミラーM4、M3、M2、M1で反射された後、ゲート弁GV1、入射ポートを介してプラズマに入射される。ここでM4は偏波方向を変換する偏波変換器、M3は楕円偏波変換器でそれぞれ平面ミラーに溝列(コルゲート)が施され、法線の回りに30度回転する。またM2は曲面ミラー、M1は平面ミラーで、M1をポロイダル面内で回転させることにより、高周波ビームをポロイダル面内で掃引する(最大9度)。表2.2.2に与えられたポート諸元を示す。また表2.2.3にアンテナシステムの諸元を表す。導波管間隔は、4×5の導波管配列(直径8cm)を直径75cmの円(ゲート弁サイズ)内に収める為に、12.76cm以下にする必要があることから、12.5cmと定めた。

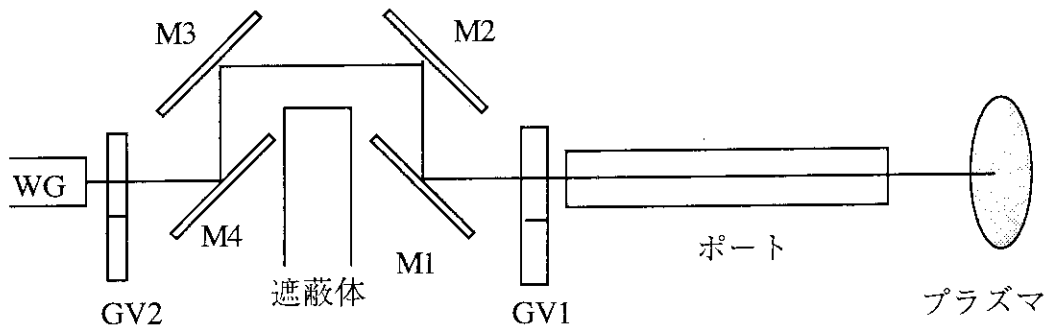


図2.2.4 アンテナシステム構成

表2.2.2 ポート諸元

ポート高さ	2.1 m
ポート幅	0.75 m
ポート長さ	5.38 m
ポート出口-プラズマ磁気軸間距離	3.2 m

表 2.2.3 アンテナシステム諸元

周波数	170GHz
ビーム電力/1ビーム	0.80MW
ユニット数	3 (A,B,C系)
ビーム本数	(縦×横)
A系	3×4
B系	4×5
C系	4×5
ユニット設置間隔	
A系-B系 (WG)	1.10m
(M1)	0.8m
B系-C系 (WG)	1.04m
(M1)	0.74m
導波管 (WG)	コルゲート導波管
内直径	60mm
外直径	80mm
管軸間距離	125mm
伝送モード	HE11
ゲート弁 内直径	750mm
偏波変換ミラー ($\lambda/4$ 型) (M4)	
入反射角	45度
最大回転角	30度
偏波変換ミラー ($\lambda/8$ 型) (M3)	
入反射角	45度
最大回転角	30度
曲面ミラー (M2)	
入反射角	45度
焦点距離	6.0m
平面ミラー (M1)	
入反射角	45度
最大回転角	9度
WG-M4 間距離	0.8m
M4-M3 間距離	0.9m
M3-M2 間距離	1.3m
M2-M1 間距離	0.95m
M1-ポート入口 間距離	1.2m

図2.2.5にアンテナシステムのビーム光学系配置とポート出入口におけるビーム強度分布を示す。また図2.2.6 (a) (b)にビームを掃引した場合の光学系配置とビーム強度分布を示す。図2.2.5より全ビームをポート内に入射できること、またビームの9度の掃引が可能であることが分かる。各要素の設置可能なスペースは下記のとおりである。

- ・ 第1ゲート弁/ベローズ設置スペース (M1-ポート入口間距離) → 8.0 cm
- ・ 遮蔽体設置スペース (M1-M4間距離) → 4.0 cm
- ・ 第2ゲート弁設置スペース (WG-M4間距離) → 4.0 cm

また要素の位置干渉性については、A、B、C系のM1ミラー及びM1ミラーとM2-M3間のビームの間で見られるが、後述のようにビームの照射を受けないM1ミラーの角部(図2.2.7参照)を切欠くことにより解消できる。

図2.2.7 (a) (b) (c)にそれぞれA、B、C系の各ミラー上のビーム強度分布を示す。横軸は入/反射ビーム軸を含む面(入射面)とミラー表面との交線の方向の位置を示す。図2.2.5及び6のビーム光学系のミラーは、図2.2.7のミラー枠の縦、横長さを辺とする長方形として描いたもので、ビームが照射されない部分を含んでいる。図2.2.7 (c)に示す様に、M1、M2ミラーは角部を図の様に切欠くことができるので、上述のミラーどうしの位置干渉を解消することが可能である。一方、M4、M3ミラーについては、法線のまわりに最大30度回転させるため、両場合を含むミラーサイズ(ピーナツ状)が要求される。

表2.2.4に各ミラー位置におけるビームスポットサイズ、ビームの重り合いによる最大強度因子(単一ビームピーク強度に対する比)及びピーク熱負荷(銅材を仮定)を示す。偏波変換器で制御される偏波方向が決定されると、この値に基づいてミラーの最大熱流束を求めることができる。実際のピーク熱負荷を求める為には、入射ビームがTEモードである場合、 $\cos \alpha$ 、TMモードに対しては $1/\cos \alpha$ の因子が表の値に掛けられる(α :入射角)。さらにコルゲートミラーに対しては、溝による増大因子を掛ける必要がある。偏波変換器の熱流束は一般にコルゲート形状のため、平滑ミラーの数倍になる。

表2.2.4 ビームスポットサイズと強度因子(*)

ミラー	スポットサイズ(**)	強度因子(*)	熱負荷(W/cm ²)
M1	9.9 cm	1.5	10
M2	8.7 cm	1.1	10
M3	5.2 cm	1.0	24
M4	3.0 cm	1.0	74

(**) ビームの $1/e$ 電場半径

(*) ビームの重量を考慮した相対強度

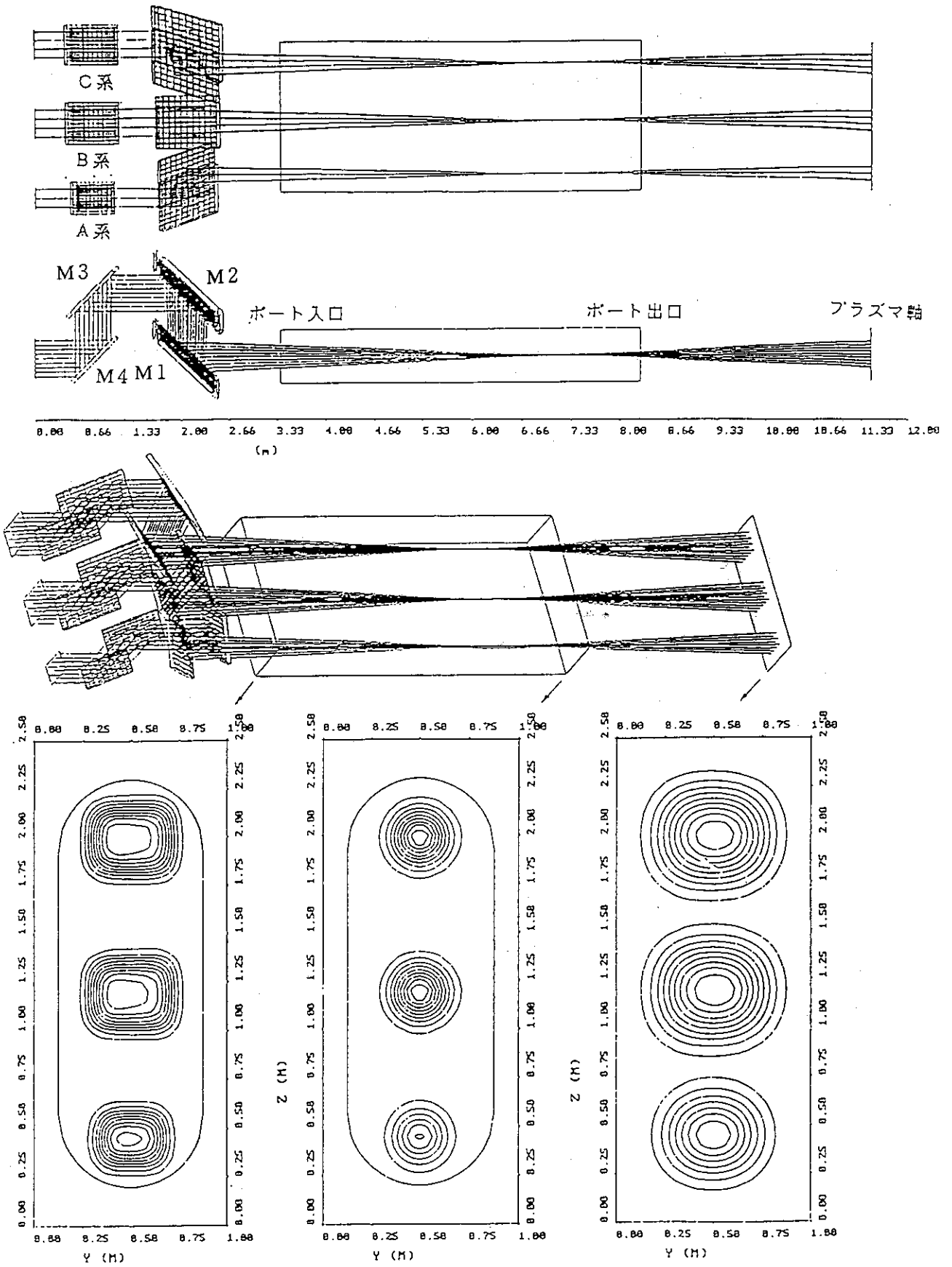


図 2.2.5 高周波ビームの光学系と EC ポート内のビーム強度分布

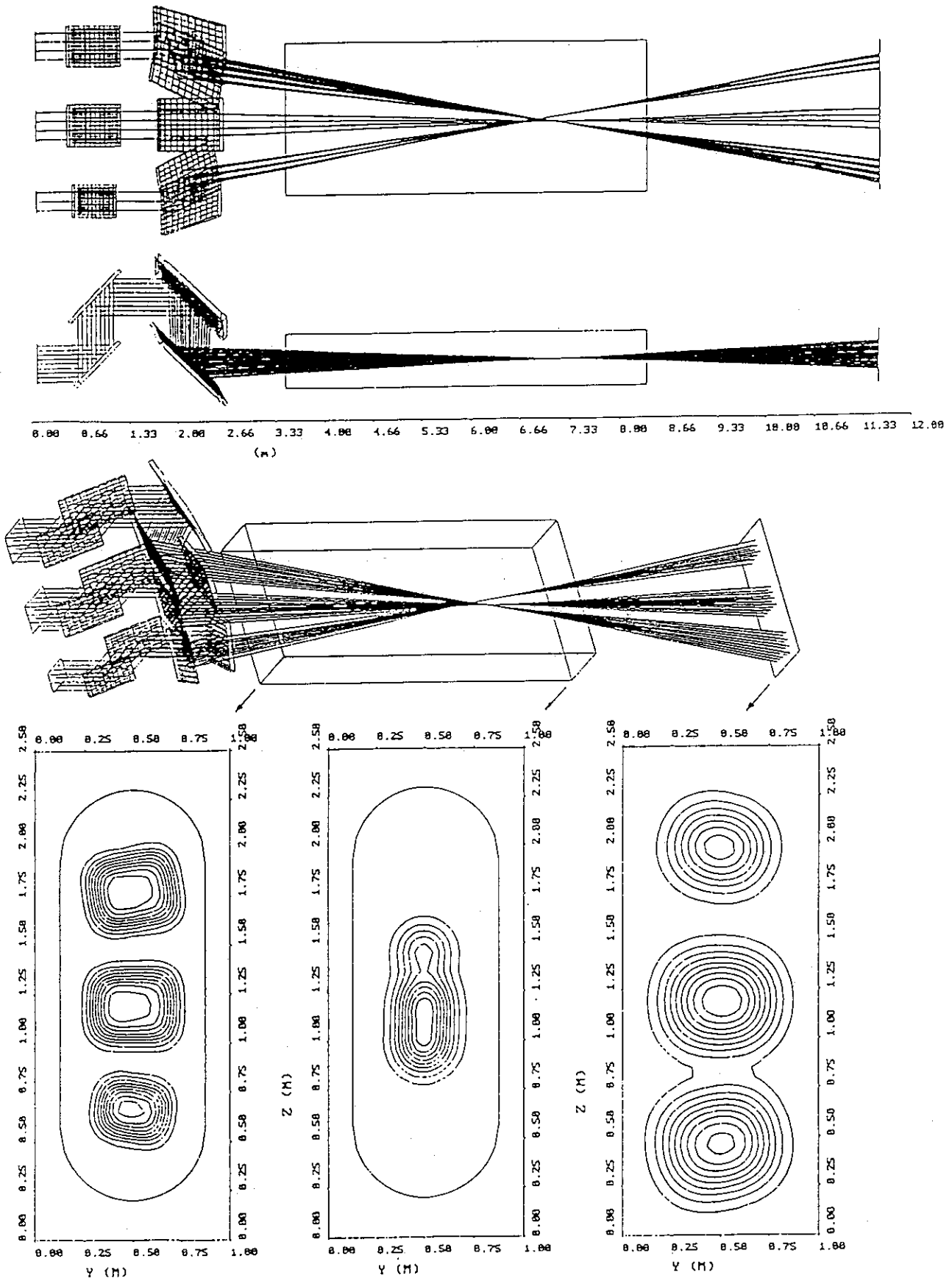


図 2.2.6 (a) ビーム掃引時 (9度掃引) のビーム光学系とポート内ビーム強度分布

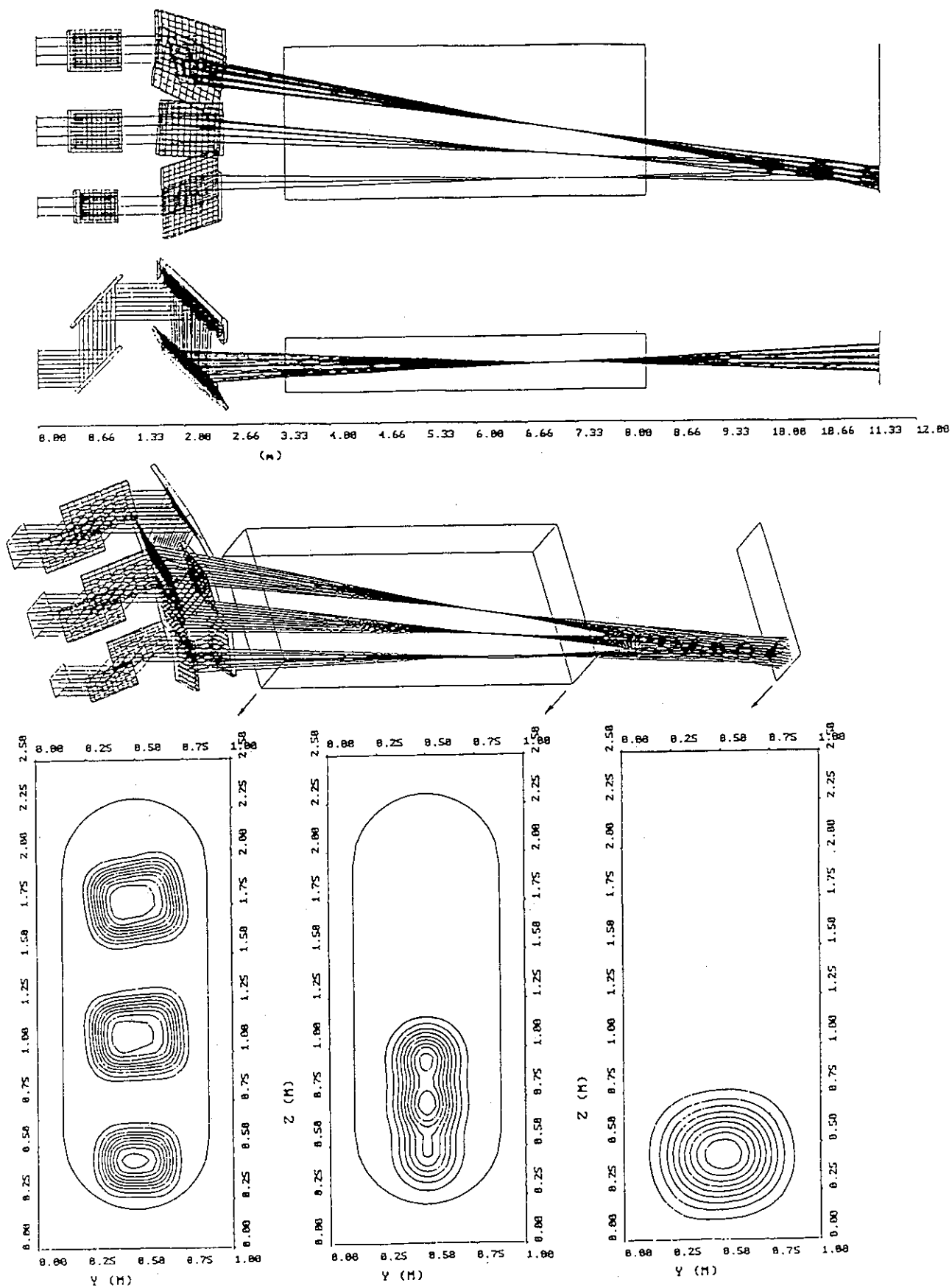


図2.2.6 (b) ビーム掃引時 (片寄せ) のビーム光学系とポート内
ビーム強度分布

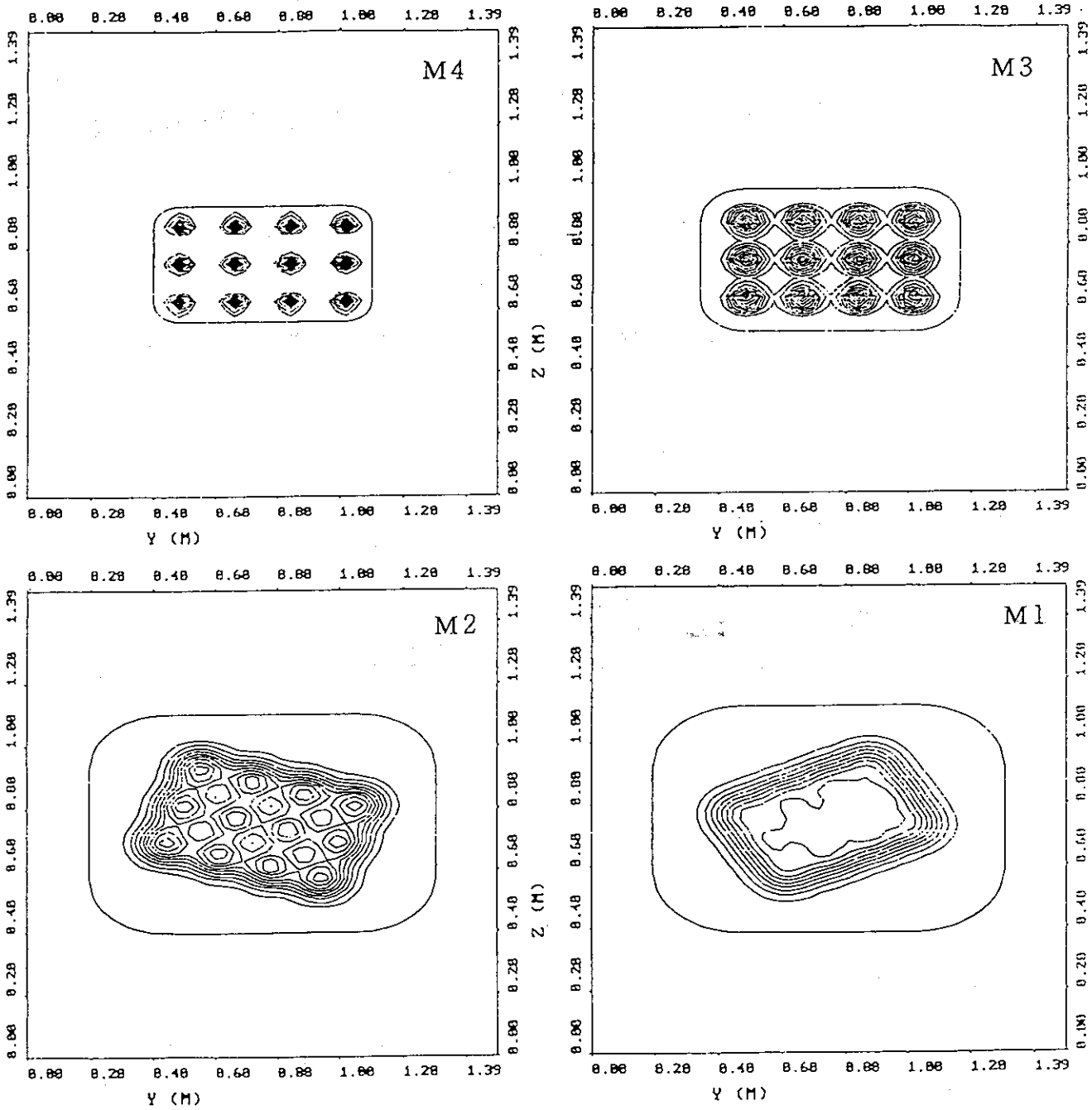


図2.2.7 (a) A系ミラー上のビーム強度分布 (9度掃引時)

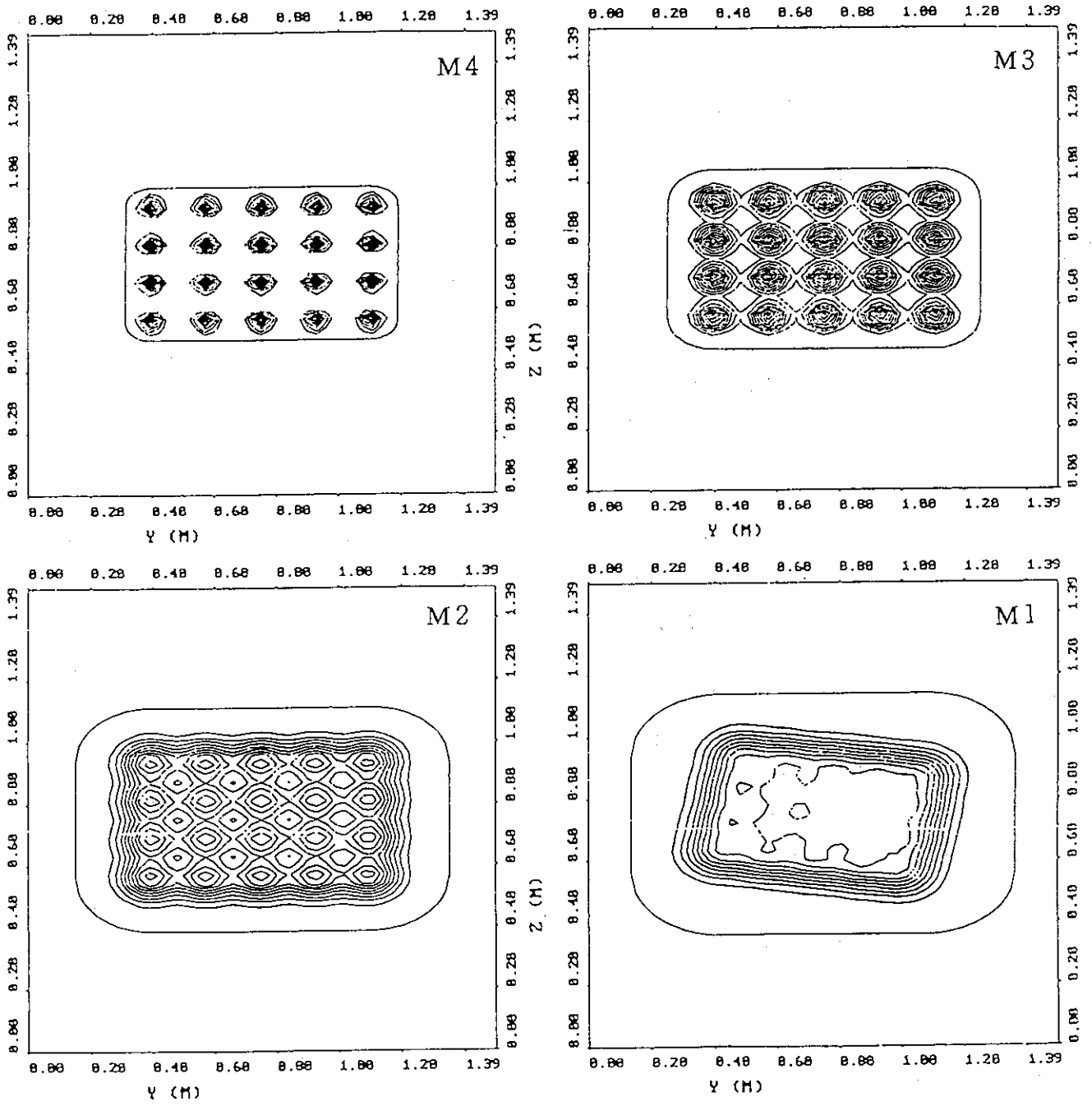


図 2.2.7 (b) B系ミラー上のビーム強度分布 (9度掃引時)

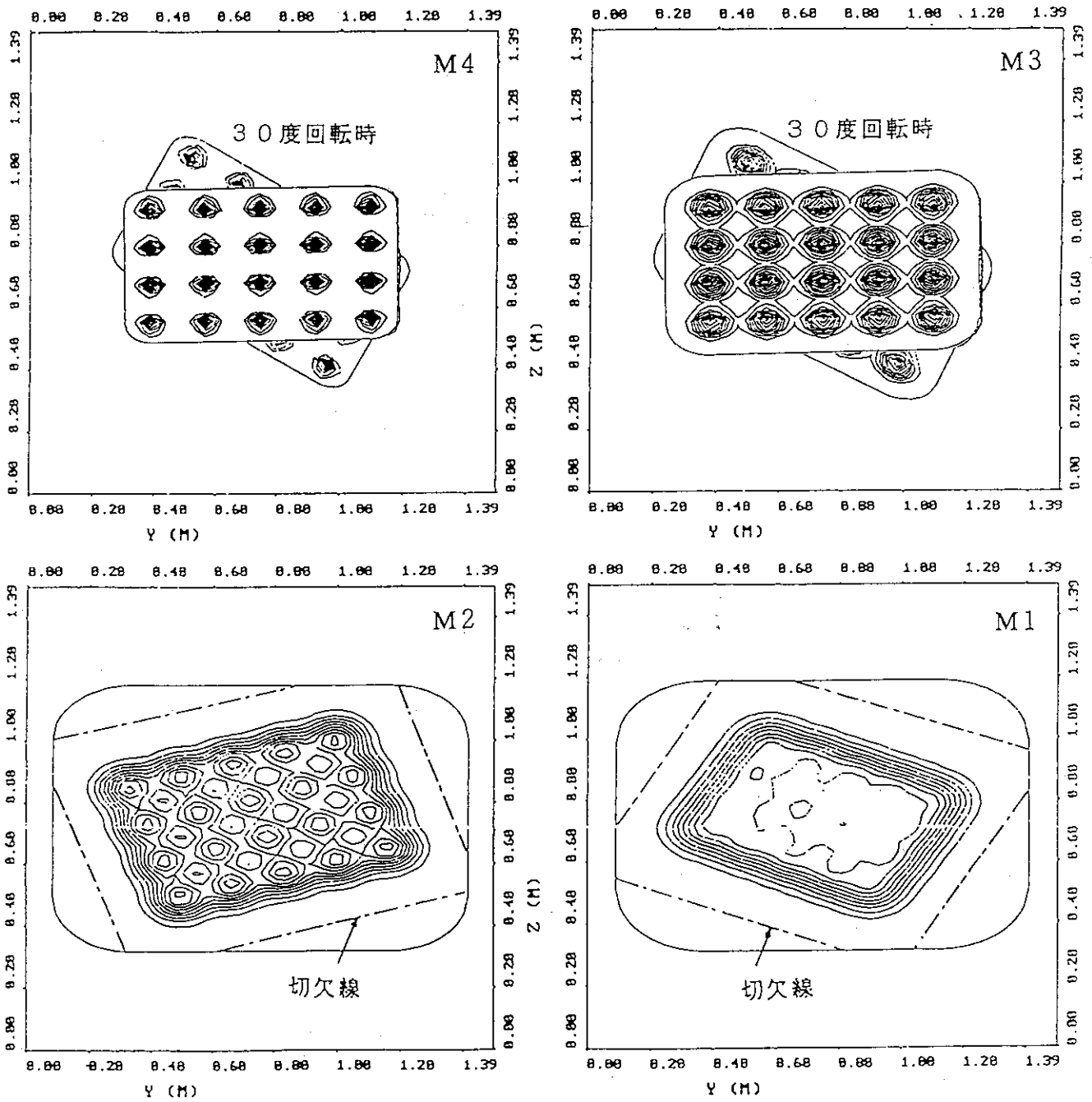


図2.2.7 (c) C系ミラー上のビーム強度分布 (9度掃引時)

2.2.2.1-2 偏波変換器の検討

2.2.2.1-2.1 加熱・電流駆動における偏波の検討

(1) 偏波面の検討

電子サイクロトロン周波数帯の高周波が磁化プラズマ中を伝播する場合は、偏波面を考慮する必要がある。図2.2.8に偏波面の座標系を示す。

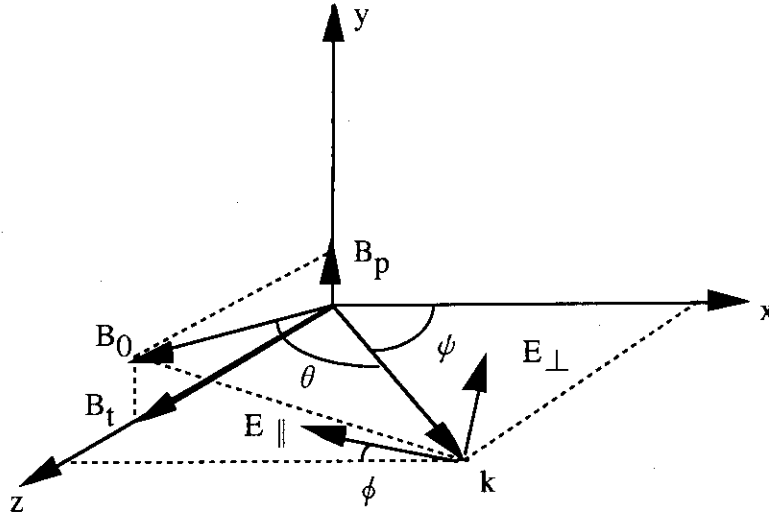


図2.2.8 偏波面の座標系

θ は磁場 B_0 と波ベクトル k との角度、 ψ は x 軸（磁気面の法線）と波数ベクトルとなす角度（入射角）、 ϕ は xz 面と楕円偏波の主軸となす角度。 θ 、 ϕ 及楕円偏波率 R_{\pm} は次式によって表わせる。

$$\frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} = -j \frac{2 \cos \theta}{(f_{ce}/f_0) \sin^2 \theta (1 \pm \sqrt{1 + 4 \cos^2 \theta / (f_{ce}/f_0)^2 \sin^4 \theta})} \equiv -j R_{\pm}$$

$$\cos \theta = \sin \psi / \sqrt{1 + (B_p/B_t)^2}, \quad \cos \phi = 1 / \sqrt{1 + (B_p / \cos \psi B_t)^2}$$

B_p はプラズマ境界におけるポロイダル磁場、 B_t はプラズマ境界におけるトロイダル磁場である。 f_{ce} は電子サイクロトロン周波数、 f_0 は高周波周波数である。式中の \pm の $+$ は正常波、 $-$ は異常波を示し、 $\phi \neq 0^\circ$ の時、偏波は楕円偏波となる。

(2) 偏波面精度の検討

楕円偏波率 R_{\pm} 及び偏向角 ϕ の高周波を入射した場合の正常波の電力の励起効率 η_0 は次式で表わせる。

$$\eta_0 = \frac{1}{(1 + \beta^2 R_+^2)(1 + R_+^2)} \left\{ (1 + \beta R_+^2)^2 \cos^2 \delta \phi + (1 + \beta)^2 R_+^2 \sin^2 \delta \phi \right\}$$

$\beta = R/R_+$ 、 $\delta \phi = \phi_0 - \phi$ 、 ϕ_0 はプラズマ境界における正常波の偏向角。

正常波に変換されなかった高周波は異常波となり、プラズマ中を伝播する。異常波の励起効率は $\eta \sim 1 - \eta_0$ となる。トーラスの外側から伝播する異常波は、プラズマ中の遮断層によって反射される。反射された波は真空容器壁で再度反射され、プラズマ境界で正常波に一部変換される。最終的には、真空容器壁の反射率が十分大きければ、入射した高周波電力は正常波によってプラズマに吸収される。

(3) SUにおける検討

高周波ビームはトーラスの外側から入射され、波のモードは正常波である。ビームと最外殻磁気面と交叉する点の B_p/B_t を $B_p/B_t = (1 + a/R_0) a/q_a R_0$ と近似する。 a はプラズマ小半径、 q_a は安全係数、 R_0 は大半径。

SU: $a = 1.4 \text{ m}$, $R_0 = 4.8 \text{ m}$, $q_a = 6.4$

$B_t(a) = 5.769 \text{ T}$ @ $B_t(0) = 6.25 \text{ T}$

$f = 170 \text{ GHz}$, 190 GHz , 210 GHz

表2.2.5に偏向角及び楕円偏波率の計算結果を示す。

表 2.2.5 入射角に対する偏向角及び楕円偏波率

入射角 (ψ) 度	偏向角 (ϕ) 度	楕円偏波率 (jE_{\perp}/E_{\parallel})		
		170GHz	190GHz	210GHz
20	3.59	0.355	0.386	0.415
25	3.72	0.436	0.470	0.500
30	3.90	0.514	0.547	0.578
35	4.10	0.587	0.618	0.647
40	4.40	0.655	0.683	0.707

図 2.2.9 に $f = 170\text{GHz}$, 210GHz の励起効率の計算結果を示す。図中の実線は $\beta \leq 1$ を示し、点線は $\beta > 1$ を示す。 $R = 1$ は円偏波である。 $0.8 \leq \beta \leq 1.2$ 及び $|\delta\phi| \leq 10^\circ$ の設定誤差範囲において、両周波数とも、97%以上の励起効率を得られる。正常波の楕円偏波率が大きいほど（入射角が大きいほど）、偏向角の設定精度は緩和される。

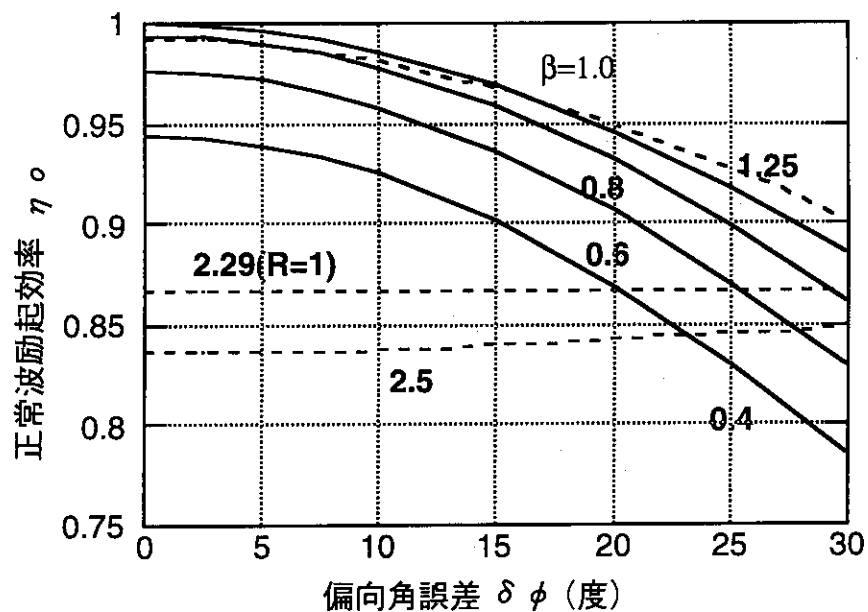
2.2.2.1-2.2 偏波変換器の概念設計

表 2.2.6 で定義した諸量（図 2.2.10 参照）に対し、与えられた 170GHz の楕円偏波を生成する為の条件を求め、表 2.2.7 にまとめた。ここで、M4ミラー（図 2.2.4）に入射するビームの偏波方向（電界方向）は入射面内（入反射ビーム光軸を含む面、M3, M4において、入射面は水平面内にある）にあるとし、偏波変換は理想的に行われるとする。ビームを掃引するためにM1ミラーを回転させると、M3ミラーにおける楕円偏波の軸の向きが変化する為、ビームの掃引角 χ に対する変化も示した。表 2.2.8 に偏波変換器の溝方向と入射面のなす角度の範囲を示す。ここで、 $\phi_{90}=0$ 、 $\phi_{180}=0$ は、溝列が入射面と平行であることを示す。変換器ミラーはこの角度範囲で回転させればよい。

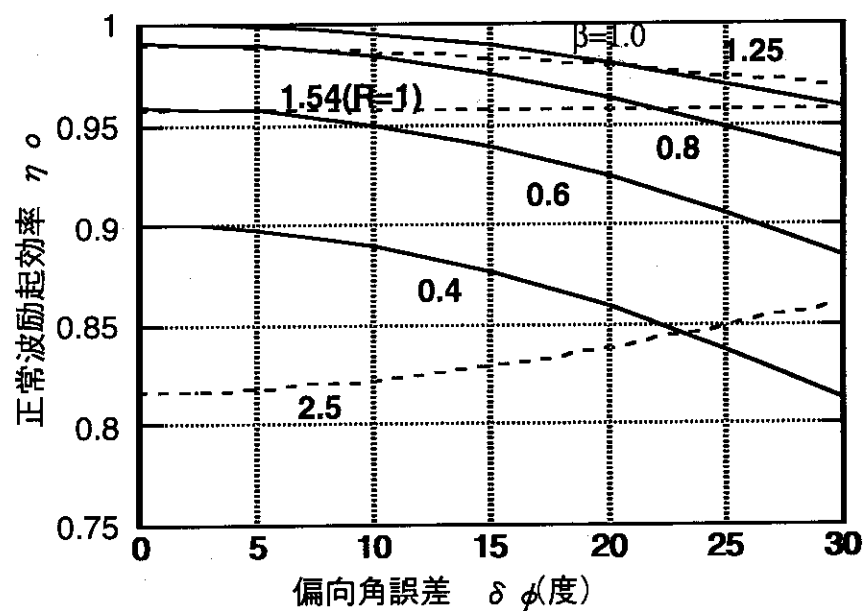
溝の形状については、文献 [1] で計算例が示されている。文献に示されたグラフ（図 2.2.11）より、溝形状が周期 0.6λ (λ : 波長) の正弦関数である場合、垂直入射に対する溝の深さは 90 度の位相差 Ω を生じさせるために 0.24λ 及び $\Omega = 180$ 度に対しては 0.35λ を必要とすることが分かる。溝列が入射面に平行 ($\psi = 0$) でかつ入射角が 45 度である場合の周期および深さはこれらの値を $\sqrt{2}$ 倍すればよい（波長が $\sqrt{2}$ 倍になっていることと等価）。溝列と入射面のなす角度 ψ が 0 でない場合は小さい $\psi (\leq 10$ 度) に対し、位相差 Ω は $\sim 0.7 \times \psi$ (度) 程度変化する。

表 2.2.6 角度の定義

α	入射角
Ω	溝方向を基準とする反射TEモードと反射TMモードの位相差
$\Delta\Omega$	所望位相差 Ω (90 度また 180 度) からのずれ角
Ψ	ミーム伝播ベクトルと磁気面の法線ベクトルのなす角
ϕ	水平面と楕円偏波の長軸のなす角度
κ	長軸方向電界に対する短軸方向電界の比
γ	ビーム伝播ベクトルと水平面のなす角
θ_{90}	M3ミラー反射楕円偏波の長軸と入射面のなす角度
ψ_{90}	M3ミラー溝方向と入射面のなす角度
θ_{180}	M4ミラー反射波電界方向と入射面の茄子角度
ψ_{180}	M4ミラー溝方向と入射面のなす角度



(a) 周波数：170 GHz、入射角：25度 ($R_{\pm}=0.436$)



(b) 周波数：210 GHz、入射角：35度 ($R_{\pm}=0.647$)

図 2.2.9 偏向角誤差による正常波励起率
(a) 170 GHz (b) 210 GHz

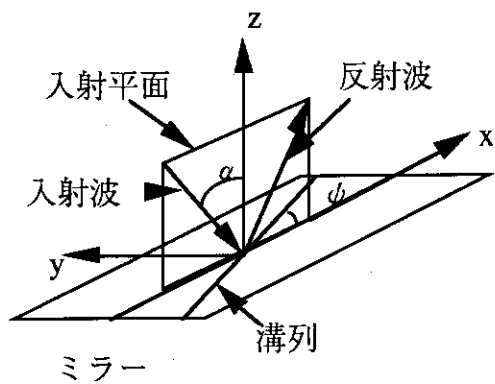


図 2.2.10 入射平面と溝方位角 ψ との関係

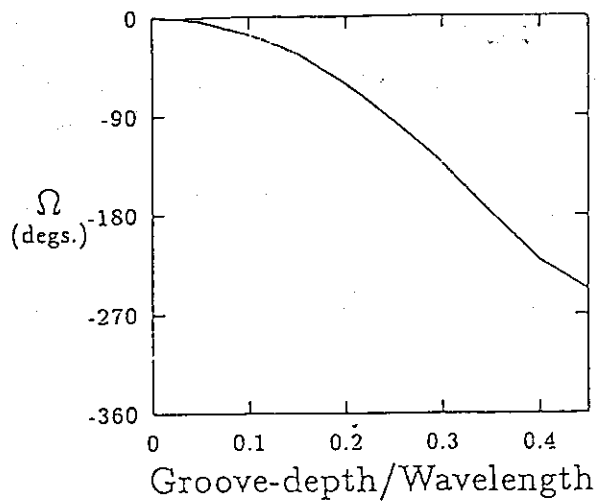


図 2.2.11 正弦波形状コルゲートによる位相シフト
(垂直入射時、周期と波長の比：0.6)

表 2.2.7 偏波変換器条件

ユニット	Ψ (度)	ϕ (度)	κ	γ (度)	θ_{90} (度)	ψ_{90} (度)	θ_{180} (度)	ψ_{90} (度)
A	20	-3.59	0.355	0.0	-3.58	-2.53	15.99	5.6
				9.0	4.97	3.52	24.54	8.7
	40	-4.40	0.655	0.0	-4.38	-3.10	28.85	10.3
				9.0	4.12	2.92	37.36	13.4
B	20	-3.59	0.355	-4.5	-6.77	-4.8	12.8	4.5
				4.5	2.23	1.58	21.8	7.7
	40	-4.4	0.655	-4.5	-7.28	-5.16	25.96	9.2
				4.5	1.72	1.22	34.96	12.5
C	20	-3.59	0.355	0.0	-3.58	-2.53	15.99	5.6
				-9.0	-12.54	-8.94	7.02	2.4
	40	-4.4	0.655	0.0	-4.38	-3.1	28.85	10.3
				-9.0	-13.39	-9.65	19.84	7.0

表 2.2.8 偏波変換器回転角度範囲

ユニット	ψ_{90} (度) (M3)	ψ_{180} (度) (M4)
A	0.2 ± 3.4	9.5 ± 4.0
B	-1.8 ± 3.4	8.5 ± 4.0
C	-6.1 ± 3.5	6.5 ± 4.0

偏波変換器が理想的でなく、所望位相差 Ω から $\Delta\Omega$ のずれがある場合、反射波にどのような影響があるかを検討した。一例として、偏向角 $\theta_{90}=-3.9$ 度、楕円偏波率 $\kappa=0.514$ の楕円偏波を生成する場合($\Psi_{90}=30$ 度)を想定する。この場合 $\psi_{90}=-2.76$ 度、 $\psi_{180}=8.30$ 度である。表 2.2.9 にずれ角 $\Delta\Omega$ に対する偏向角 θ_{90} 、楕円偏波率 κ 、および M4 ミラーの電力損失率(反射電界の所望方向 $\theta_{180}=23.3$ 度からのずれに相当する電力損失)を示す。表 2.2.9 より楕円偏波偏向角 θ_{90} の所望値からのずれは $\sim 0.7 \times \Delta\Omega$ で、偏向角の変動は位相差と同程度になる。M4 ミラーの電力損失については、ずれ角 $\Delta\Omega$ が 10 度程度以下であれば無視できる。更に、図 2.2.11 は、周波数を 17.0 GHz とすれば、溝深さの製作誤差 $10 \mu\text{m}$ 当たり、位相差 90 度近傍で $\Delta\Omega \sim 3$ 度、 180 度近傍で $\Delta\Omega \sim 3.5$ 度程度のずれが生じることを示す(入射角 45 度、 $\psi=0$ 度とする)。

表 2.2.9 位相誤差に対する評価

$\Delta \Omega$ (度)	κ	θ_{90} (度)	電力損失 (M4)
0	0.514	-3.90	0.0
5	0.511	-7.37	3.0×10^{-4}
-5	0.511	-0.43	3.0×10^{-4}
10	0.501	-10.72	1.2×10^{-3}
-10	0.501	2.92	1.2×10^{-3}
20	0.464	-16.67	4.7×10^{-3}
-20	0.464	8.87	4.7×10^{-3}

電子サイクロトロン電流駆動の物理側から要求される楕円偏波を生成する場合、偏波器ミラーに施された溝列と入射面とのなす角度は浅く (~ 10 度)、要求される回転角度は ± 4 度程度である。高周波ビーム電界ベクトルと溝列との角度も浅い。このことより、溝列による電場およびジュール熱流束の増倍率も小さいと考えられる (因子 < 2)。

位相差 Ω からのずれ $\Delta \Omega$ に対して、敏感なのは楕円偏波の長軸の偏向角で、ずれ角と同程度に変化することが分かった。ずれ角 $\Delta \Omega$ はミラーの回転角度 (ϕ) や溝列の製作誤差に起因し、容易に偏向角程度 (ϕ 、 $\theta_{90}=3 \sim 4$ 度) になるが、2.2.2.1 \sim 2.2.2.2に示す様に、偏向角や楕円偏波率の所望値からのずれは許容できる。

2.2.2.2 アンテナシステムの機器検討

アンテナシステムを構成する部品は大きく分けると9つの部品に分けられる。本体容器から順に第1ゲート弁、アンテナ部ミラー、第2ゲート弁、導波管アンテナ配列、第1真空窓モジュール、第2真空窓モジュール、絶縁導波管、テーバ管が設置される。

本節では、これらの部品のうち重要と思われる下記項目について検討を行った。

- (1) アンテナ部ミラー間の干渉
- (2) アンテナ部ミラーの設置方法及び駆動機構
- (3) アンテナ部ミラーの冷却
- (4) 真空窓交換機構
- (5) 大口径真空ゲート弁

2.2.2.2-1 アンテナ部ミラー間の干渉の検討

アンテナシステムのミラーは、3系（A系、B系、C系）列あり、それぞれが4枚で構成され合計12枚を持つ。表2.2.10に、偏波変換器の役割を果たすM3及びM4の動作、中心位置及び寸法を示す。

また、表2.2.11に、プラズマへ高周波ビームを導くミラー（M1、M4）の動作及び各ミラーの中心位置及びミラーサイズの寸法を示す。

表2.2.10 偏波変換器の動作、ミラー中心位置及びミラー寸法

		偏波変換器 (M4)		偏波変換器 (M3)	
機能 動作		斜め入射するための楕円偏波に変換する機能をもつ各系2枚のコルゲートミラーからなる。ミラーは反射面の垂直に対し30度回転する。			
	A系	座標	-1100, 0, 800	座標	-1100, -900, 800
		寸法	710×370×50	寸法	825×458×50
	B系	座標	-60, 0, 800	座標	-60, -900, 800
		寸法	877×495×50	寸法	1000×583×50
	C系	座標	-1040, 0, 800	座標	1040, -900, 800
		寸法	877×495×50	寸法	1000×583×50

(単位 mm)

表 2.2.1.1 アンテナ部ミラーの動作、ミラー中心位置及びミラー基本寸法

		第1ミラー (M1)		第2ミラー (M2)		
機能 動作		高周波ビームをポロイダル方向に9度掃引するための可動機構をもつ。ミラーは強制水冷とし、取り替え可能な構造である。		A系12本(B,C系は20本)の導波管アンテナから放射された高周波ビームを第1ミラーに伝送する。ミラーは固定で強制水冷とし取り替え可能な構造である。		
	A系	座標	-800, 0, 2100	座標	-1100, -900, 2100	
		寸法	1100×732×50	寸法	1100×705×50	
B系	座標	-60, 0, 2100		座標	-60, -900, 2100	
	寸法	1200×750×50		寸法	1200×724×50	
C系	座標	740, 0, 2100		座標	1040, -900, 2100	
	寸法	1320×876×50		寸法	1330×863×50	

M1ミラーは干渉防止のため表2.2.1.2に示す切断部あり (単位 mm)

これらのアンテナシステムの12枚のミラーのうち、互いが物理的位置関係において干渉する可能性があるのは、各系 (A系、B系、C系) 列のM1ミラー間のみである。各系のM1ミラーが単独に干渉しない動作を可能にするために、次の4つのケースを想定して干渉のチェックを行った。

- CASE-1 高周波ビームは全て平行。
- CASE-2 A系、C系を9度内側に掃引、B系は平行。
- CASE-3 A系ビームを平行、B、C系高周波ビームとA系高周波ビームをクロス
- CASE-4 C系ビームを平行、A、B系高周波ビームとC系高周波ビームをクロス

CASE-1を除いてM1ミラーが干渉する。そこで、お互いのミラーが干渉しないように寸法の変更及びミラーの一部を切断する必要がある。干渉する各ケースについて、M1ミラー上のビームの強度分布を図2.2.1.2に示す。図上の各ケースにおける必要ミラー寸法を示す線は、スポットサイズの2倍の距離で引いている。この結果をもとにミラー上でのビーム強度分布とM1ミラー間の干渉部分を考慮した切断寸法を表2.2.1.2に示す様に設定した。このときのミラー上のビームの強度分布と切欠き寸法を図2.2.1.3に示す。全てのケースについて干渉部分がなくなる。

表 2.2.1.2 M1ミラーの切断寸法

A系 M1ミラー	180×900を切断
B系 M1ミラー	1200×700×50に寸法変更
C系 M1ミラー	250×750を切断

ミラー上の切欠き位置は図2.2.1.3参照 (単位mm)

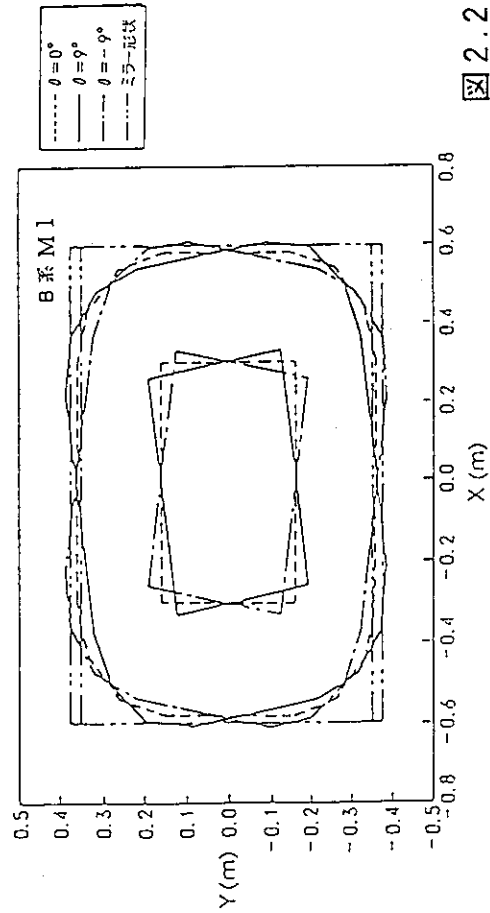
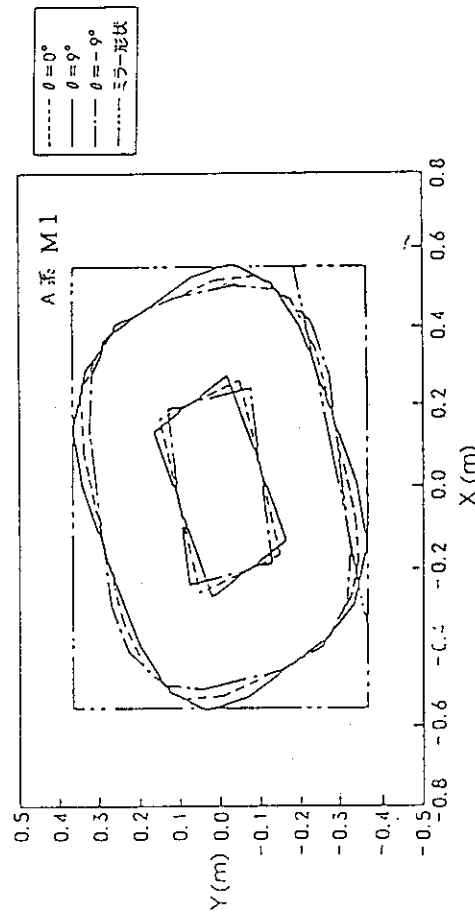
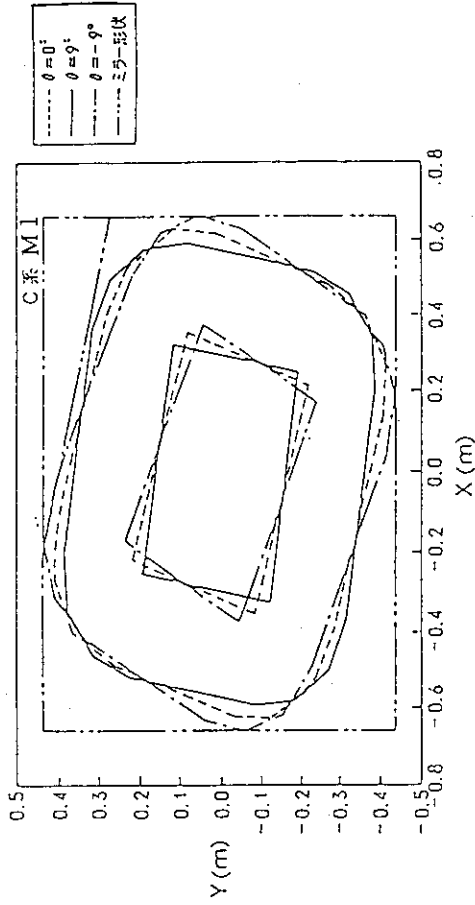


図 2.2.1.2 M1 ミラー必要寸法と切欠線
(ビームスポットの 2 倍の距離で必要ミラー寸法を設定)

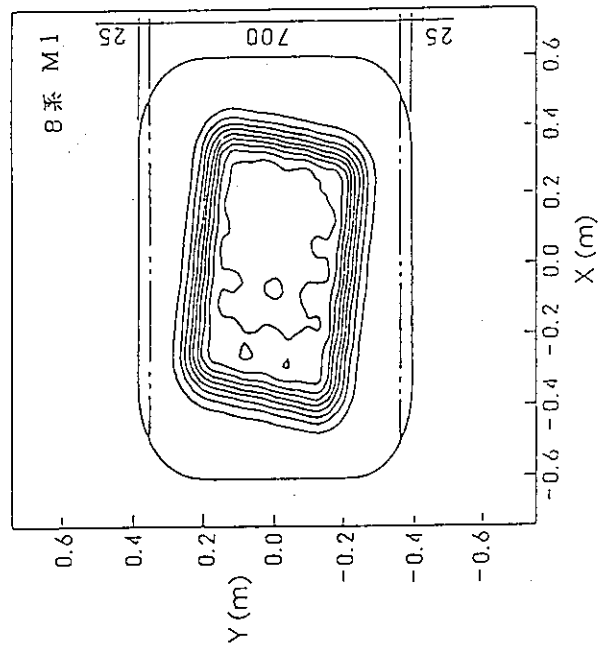
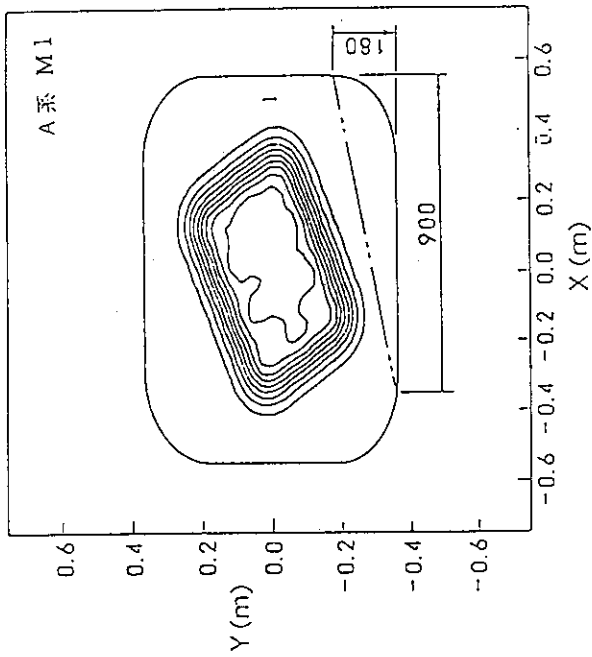
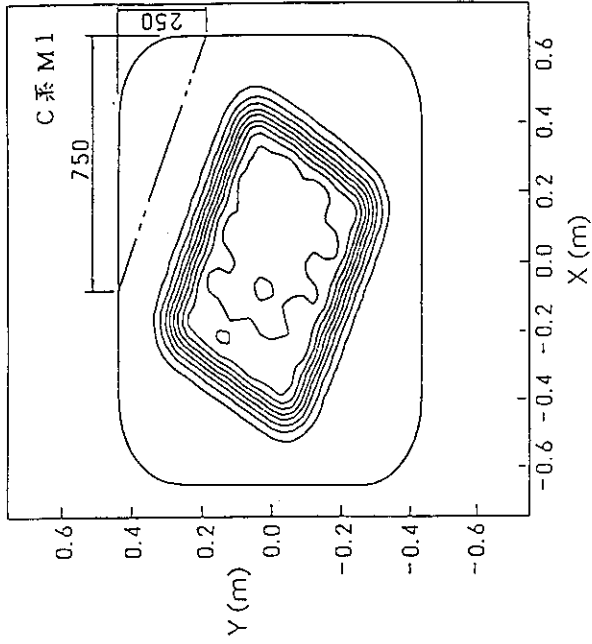


図2.2.1.3 M1ミラー上のビームの強度分布と切断寸法

2.2.2.2-2 アンテナ部ミラーの設置方法及び駆動機構の検討

第1真空容器及びその周辺の構成部品の配置、アンテナシステムのミラー（A、B、C系列の合計12枚のミラー）の駆動機構及び設置位置と保守交換時の手順の検討結果を以下に示す。

図2.2.14に第1真空容器周辺の第1ゲート弁、第2ゲート弁及び各ミラーの配置および駆動機構を含んだ寸法を示す。定常運転時の各ミラーの基本動作は、表2.2.10に示した様に偏波変換器の役割を果たすM3及びM4については、平行に配置された各ミラーが反射面に対し垂直に30度の回転動作のみである。また、M2ミラーは固定、前項で干渉チェックしたようにM1ミラーは、ビームを9度掃引する回転運動である。

従って、M1及びM3、M4各ミラーは、設置後は保守点検の場合を除き、定常運転では、回転運動の機能とミラーの設定位置の検出が基本動作である。これらの基本動作に加え下記項目に留意して、構造概念設計を行った。

- (1) 駆動源には、エアモータを使用し磁場の影響を回避する。
- (2) エアモータは大気側に配置し、ベローズ式の回転導入機により、真空容器内部と遮断する。
- (3) 位置検出のエンコーダは、駆動力伝達用シャフトのねじれ等による誤差を防ぐためモータ側でなくミラー本体の回転軸に取り付ける。
- (4) 位置検出には、光エンコーダを使用し位置検出の光信号は、光ファイバにて真空容器外部の制御盤に導く。
- (5) 各ミラーの保守点検用の第1真空容器側に常設のゲート弁は、本体容器との位置干渉を防ぐためゲート取り出し方向を、基本的に導波管アンテナ側か上下方向にする。
- (6) ミラーの保守点検交換用の第1真空容器側に常設のゲート弁は、位置干渉を防ぐため設置位置をそれぞれM3、M4ミラー用ゲート弁に対して、M1、M2ミラー用を外側に配置する。図2.2.14では、長方形のゲート弁を同番ミラーごとに、合計4台設置した場合の図面である。
- (7) ミラーの保守点検交換用の第1真空容器側に常設のゲート弁は、M1ミラー間どうしの位置間隔が狭いため各ミラーごとにゲート弁を設置する場合は、A系とC系のゲートの引き出し方向をそれぞれ上下とする。
- (8) ミラーの保守点検及び冷却水配管やギヤ等の消耗部品の交換は、放射化されたダスト等を漏らさないためにホットセルで行う。
- (9) ミラーの保守点検及び交換時はゲート弁を有した構造のキャスク（図2.2.15）を用い第1真空容器から取り出して、ホットセルに移動させる。

2.2.2.2-3 アンテナ部ミラーの冷却の検討

アンテナ部ミラーの温度上昇の熱源として、主に高周波の反射損失（ジュール損）、核発熱及び輻射熱が考えられる。本項では、アンテナ部ミラーのB、C系の核発熱、輻射熱及びジュール損失を計算し、冷却水量の概算の評価を行った。

表2.2.13に各ミラーの高周波による熱流束、スポットサイズS及びビームの重畳度Fを示す。

M3、M4は偏波変換器であるため平滑ミラーの熱流束に2倍の因子を乗じている。M1は反射面がプラズマに面しているためダメージを小さくするためSUSを使用した場合のジュール損失を評価した。M1～M3ではアルミのジュール損失を評価した。

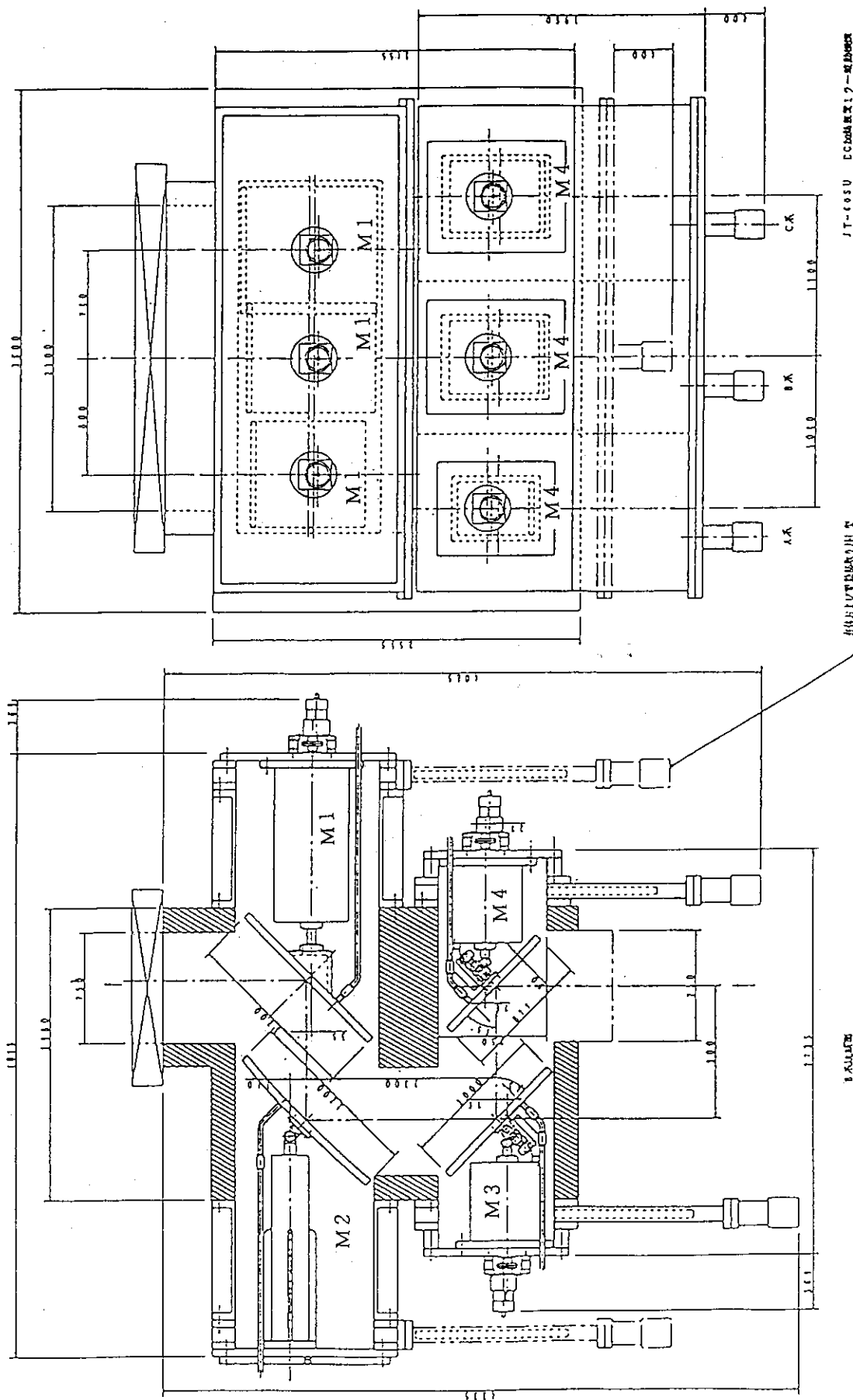


図 2.2.1.4 第 1 真空容器とミラーの取り合い

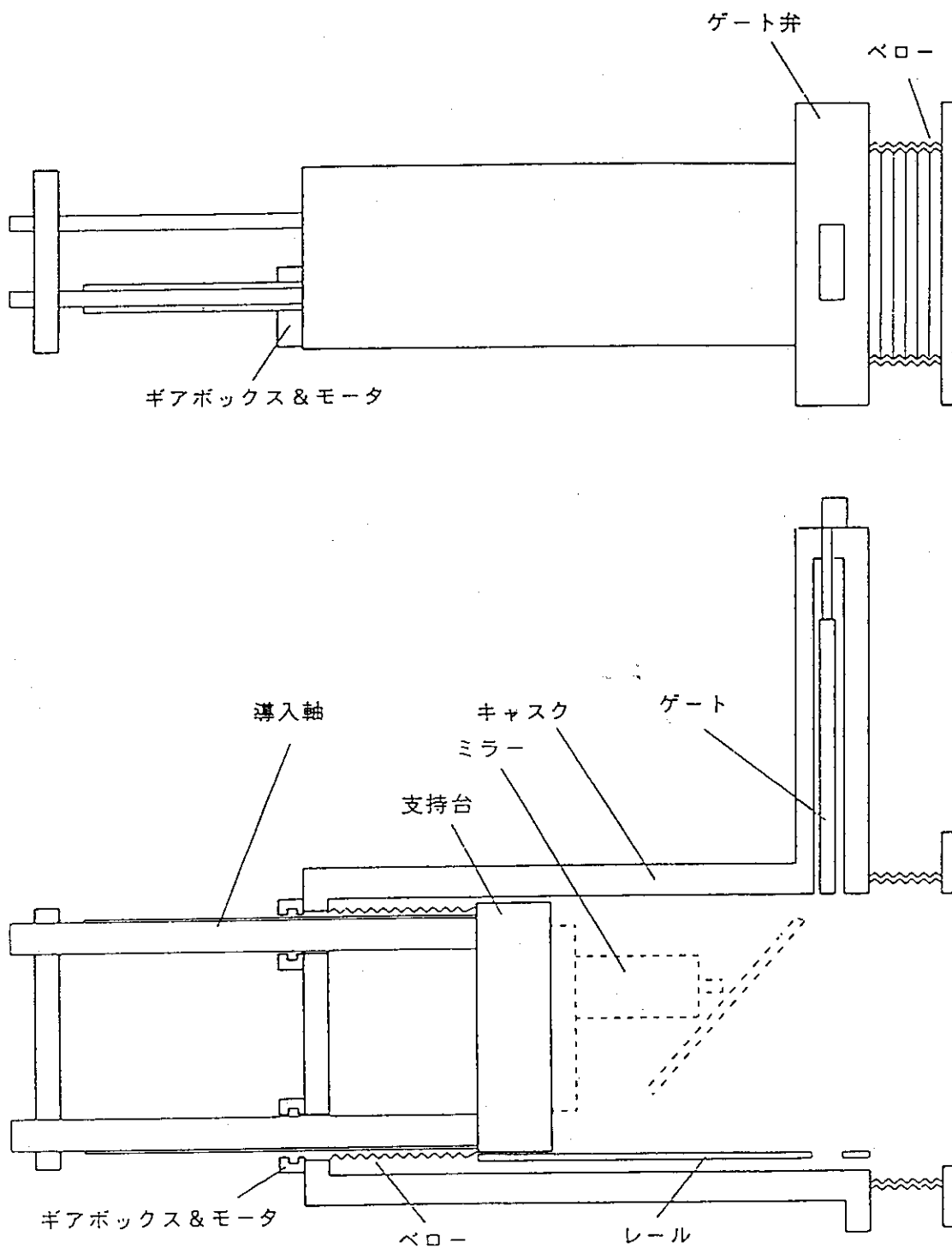


図2.2.15 ミラー用キャスク

表2.2.13 ミラー上のビームによる発生する熱流束

	最大熱流束 (W/m ²)	平均熱流束 (W/m ²)	ビームの 重畳度F	スポットサイズ S (m)
偏波変換器(M4)	1.5×10 ⁶	7.4×10 ⁵	1.0	3.0×10 ⁻²
偏波変換器(M3)	5.0×10 ⁵	2.4×10 ⁵	1.0	5.2×10 ⁻²
第2ミラー(M2)	1.0×10 ⁵	1.0×10 ⁵	1.1	8.7×10 ⁻²
第1ミラー(M1)	6.0×10 ⁵	1.0×10 ⁵	1.5	9.9×10 ⁻²

表2.2.14にB、C系ミラーの温度上昇と冷却水量の概算見積の結果を示す。冷却モデルは図2.2.16に示す様な、反射面から9mmの位置に12mm間隔に冷却水洞(8mm角の断面)を配置した場合を想定し、1次元の仮想水面モデルで計算した。また、計算に使用した金属の特性値を表2.2.15に示す。M1とM2はプラズマに面しているため、この熱流束に核発熱1m²×5cmのミラーに対し0.75(W/cm³)、輻射熱1m²の表面積のミラーに対し1.0×10⁴(W/m²)を重畳した。表2.2.14の中の最大熱流束と最大熱流束総量の定義は、最大熱流束は高周波ビームのジュール損失による最大熱流束、最大熱流束総量はさらに核発熱と輻射熱を重畳したものである。また、発熱量はジュール損失による発熱量と核発熱と輻射熱による発熱量を重畳したものである。

アンテナ部ミラーは、コルゲート導波管に比べ高周波ビームの口径が広がっているため、コルゲート導波管のマイターバンド部に比べ熱流束の低く核発熱や輻射熱を重畳して考えても、熱流束が最大になるM4ミラーのビームのスポット位置でも150℃以下になると見込まれ、使用上問題がないと思われる。冷却水の温度上昇を10℃に抑えるならば、アンテナ部ミラー全体で約1.3m³/分の冷却水流量が必要と見込まれる。

表2.2.14 B、C系各ミラーの温度上昇と冷却推量の概算見積

	M1	M2	M3	M4
核発熱(W)	3.75×10 ⁴	3.75×10 ⁴		
熱流束(W/m ²)	3.75×10 ⁴	3.75×10 ⁴		
輻射熱(W)	1.0×10 ⁴	1.0×10 ⁴		
熱流束(W/m ²)	1.0×10 ⁴	1.0×10 ⁴		
最大熱流束(W/m ²)	0.6×10 ⁶	0.1×10 ⁶	0.5×10 ⁶	1.5×10 ⁶
最大熱流束総量(W/m ²)	6.5×10 ⁵	1.48×10 ⁵	0.5×10 ⁶	1.5×10 ⁶
B,C系発熱量(W)	1.7×10 ⁵	7.4×10 ⁴	5.3×10 ⁴	5.3×10 ⁴
最大表面温度T ₃ (℃)	92+ΔT ₁	48+ΔT ₁	76+ΔT ₁	147+ΔT ₁
冷却面温度T ₂ (℃)	33+ΔT ₁	47+ΔT ₁	65+ΔT ₁	105+ΔT ₁
冷却水出温度T ₁ (℃)	40	40	40	40
温度上昇ΔT ₁ (℃)	10	10	10	10
冷却水量(l/min)	237	106	76	76

M3、M4は偏波変換器をであるため平面鏡のジュール損失に2倍の因子を乗じている。

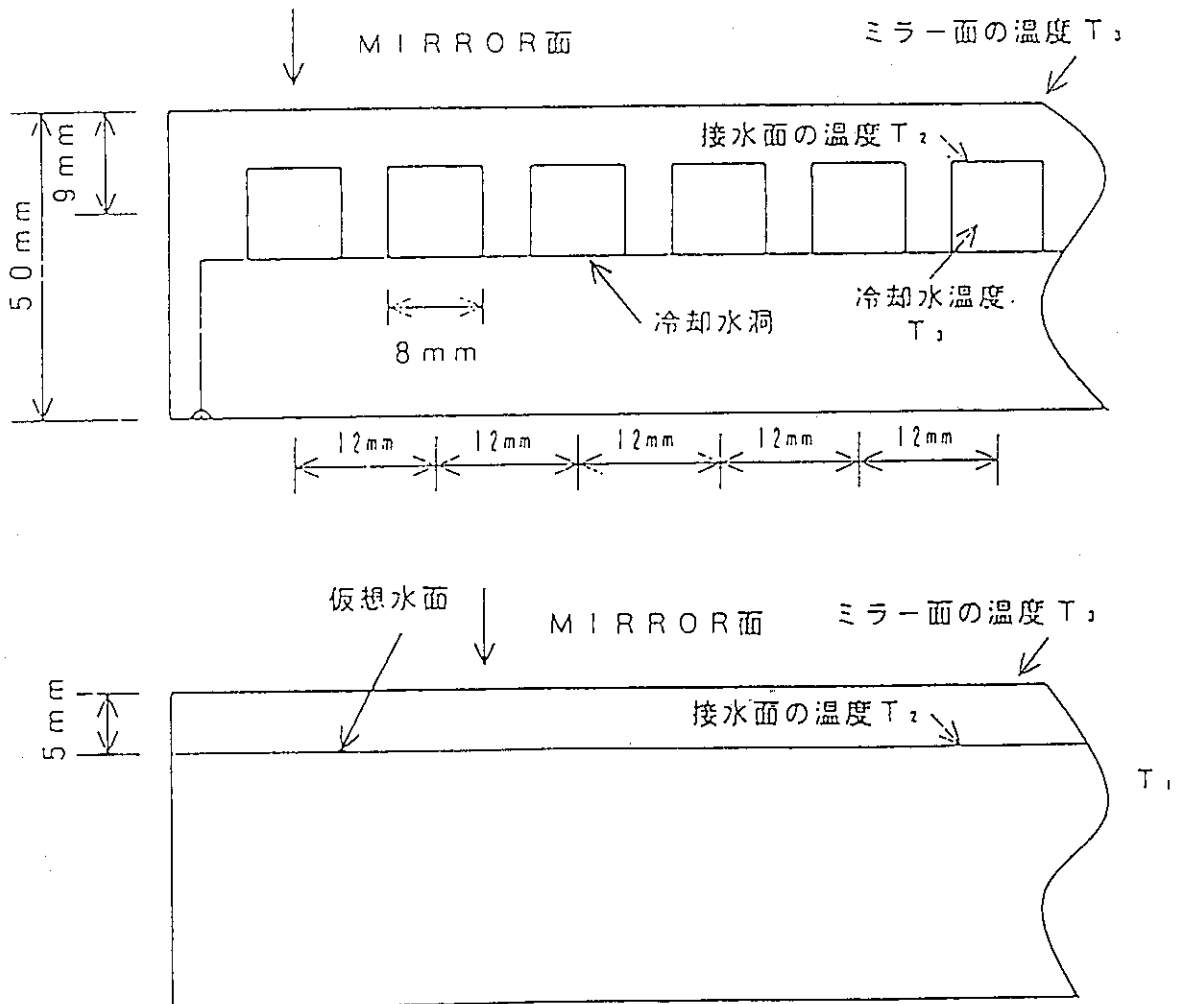


図2.2.16 ミラー冷却モデル

表 2.2.15 金属の特性表

材質	アルミ	SUS316
熱伝導率 λ (W/m ² K)	233	164
熱通過率 K (W/m ² k)	1.40×10^4	1.24×10^4
熱膨張係数 (1/K)	23.6×10^{-6}	18.5×10^{-6}
電気伝導度 σ (S/m)	2.8×10^7	1.35×10^6
密度 (kg/m ³)	2.70×10^3	8.03×10^3

ω : 角周波数 (170 GHz)

σ : 電気伝導度では温度係数を今回は省略した。

2.2.2.2-4 真空窓交換機構の検討

アンテナシステムには、放射性物質を多重防護的に遮断する第1真空窓と第2真空窓があり、本検討では、両者共に頑強な HE_{11} モードの分散型真空窓を採用した。これらの真空窓モジュールの構造は基本的に同一とし、4系統の導波管束に対する真空窓を1個のモジュールとし、各ユニットは3個(A系)、5個(B、C系)のモジュールを構成する。1モジュールごと交換可能な構造にする。また、真空窓モジュールは、基本的には大気圧である。放射化に対しては、中性子遮蔽を施して1日後には保守作業できる位置に真空窓モジュールを設置する。トリチウム等の放射性物質の安全性の観点から、外気と隔離するようゲート弁を設置し、使用後は真空窓モジュールをキャスク内に回収する。

真空窓モジュール構造は、基本仕様に加え下記項目に留意する必要がある。

- (1) 真空窓の保守点検及び交換時はゲート弁を有した構造のキャスクを用いて真空窓モジュールから取り出して、ホットセルに移動させる。
- (2) 真空窓モジュールは、基本的には大気圧であるが、外気と隔離するよう常設ゲート弁を真空窓モジュール側にも設置する。常設ゲート弁は長方形のゲート弁を各系一ごとに、合計3台設置する。
- (3) 真空窓モジュールはキャスク内では、図2.2.17に示す様にレール上を移動し、モジュール内部の定位置に移動する。
- (4) 真空窓の保守点検及び冷却水配管やギヤ等の消耗部品の交換は、放射化されたダスト等を漏らさないためにキャスクで運びホットセルで行う。
- (5) 導波管と真空窓の接続部のベローズは交換部品(真空窓側)に取り付ける。
- (6) 導波管と真空窓の接続部はメタルシールを使用する。
- (7) 冷却水配管はベローで覆い、導波管部と真空窓のシールがはずれた場合トリチウム障壁も果たす構造にする。
- (8) 図2.2.18に示す様に第1真空窓と第2真空窓を一体構造とし場合、Fabry-Perot効果を防止するための調整をホットセルで行う。図2.2.17では、真空窓ブロックとの気密は2重ベロー内の圧力をあげて押しつける構造である。また、圧力差によって真空窓ブロックにかかる力はベローではなくブロック全体で支える。
- (9) 保守点検時および非常事態時に真空窓モジュールの独立をはかるゲート弁は、真空モジュールに接続される導波管束を1個のゲート弁で閉じる。

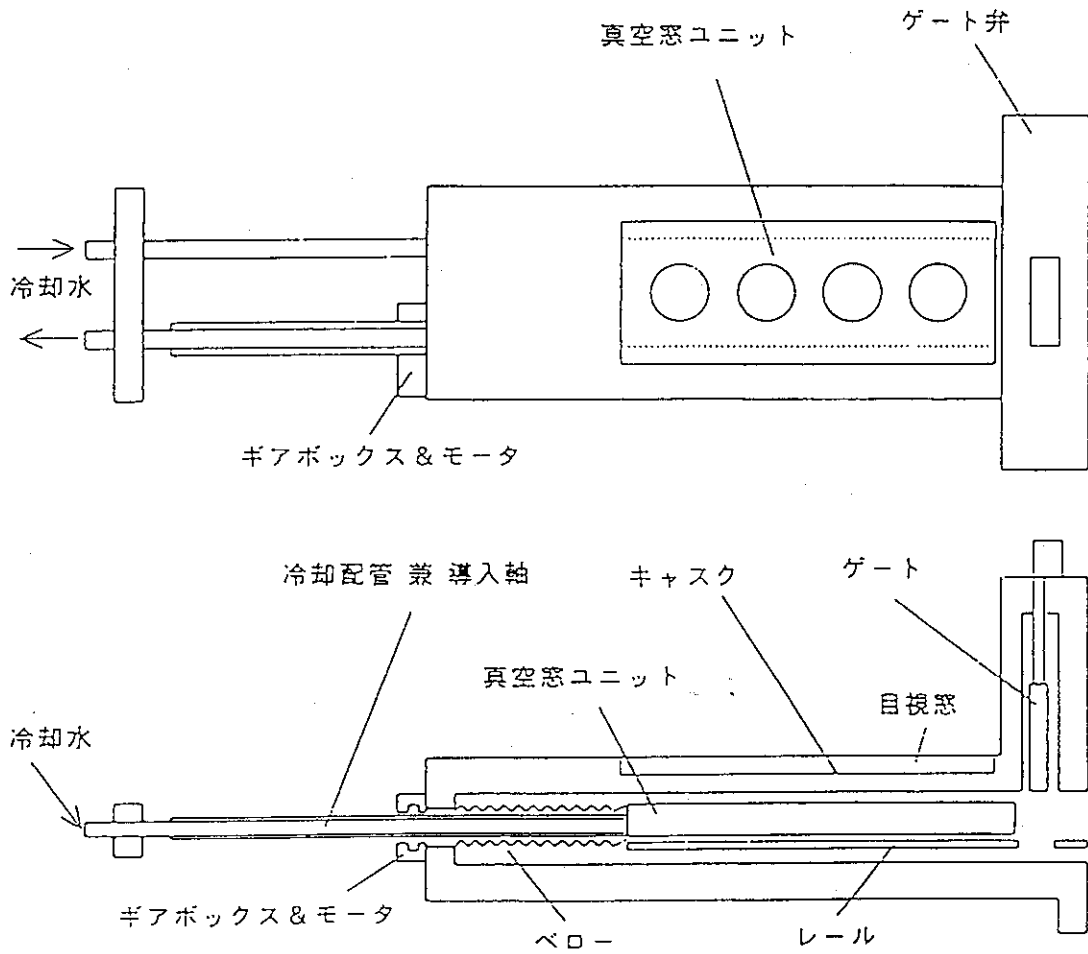


図2.2.17 キャスクと真空窓ユニット

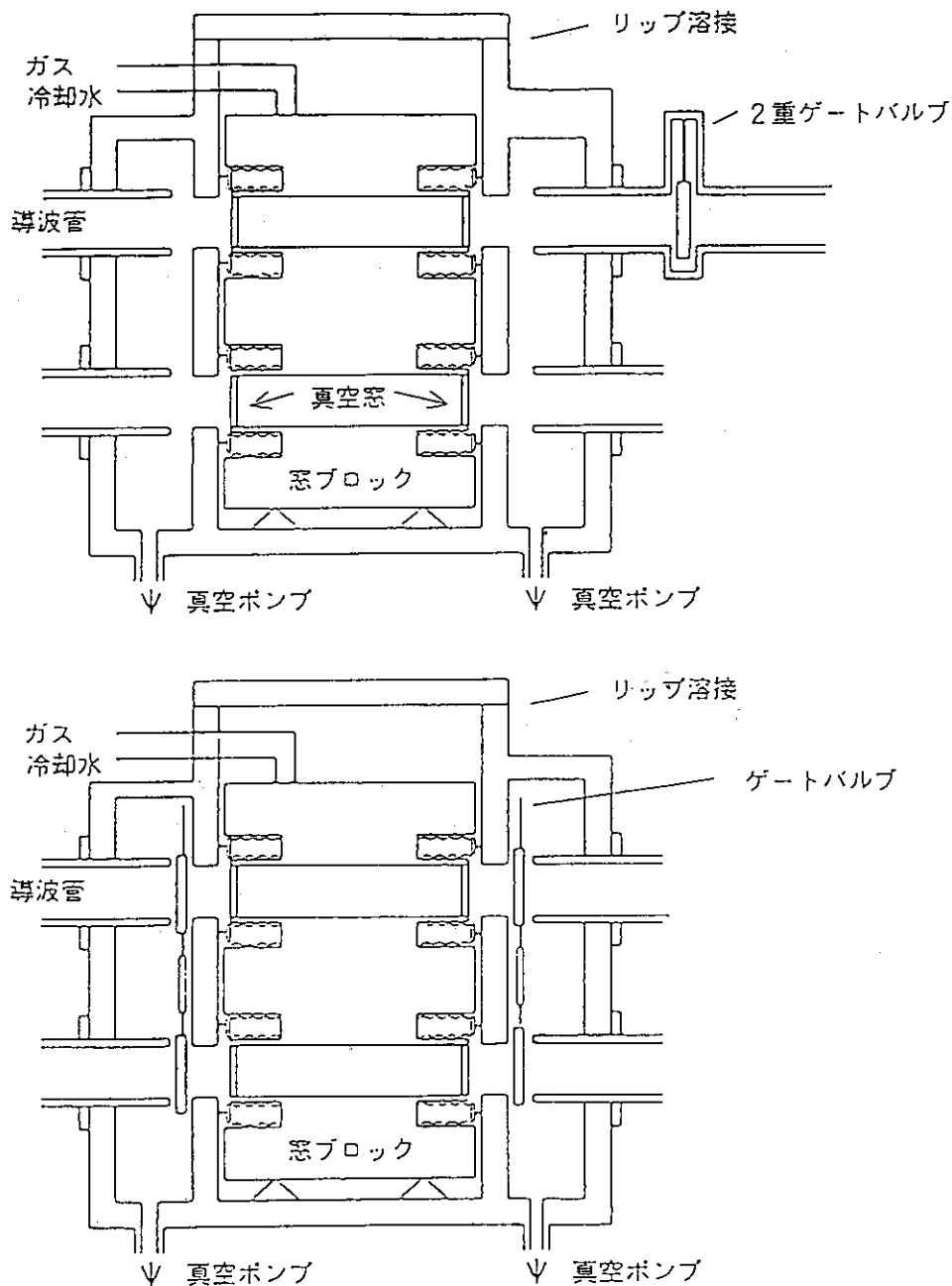


図 2.2.18 第1、第2真空窓一体構造の真空窓モジュール

2.2.2.2-5 大口径ゲート弁の検討

アンテナシステムでは、多数のゲート弁があり、主な役割は放射性物質を遮断すると同時に各モジュールごとの気密の独立性をはかる。これらのゲート弁のうち、量産品でないと思われる大口径の製造実績について、その調査の結果を以下に示す。

最も大口径であるのは第1ゲート弁である。次にアンテナシステムのミラー保守交換用のゲート弁、第2ゲート弁、真空窓モジュールの独立をはかるゲート弁順である。この第1ゲート弁はJT-60SUのECポートに、縦長楕円断面の第1ゲート弁をベローを介して設置し、保守・修理等に対して本体真空容器と真空中に遮断する。断面は750mm×2100mmである。

今回、調査した結果では、この仕様を満たす縦長楕円断面のゲート弁は製造実績は確認されなかった。しかし、海外のメーカーで長方形のゲート弁において最大実績762×150mmの差圧1.0barもの実績があり、R&Dプランにおいては、2000×600mmを計画していることが分かった。

特徴としては、口径の形状を、円形、楕円、方形と自由に設定できる。構造は、ベローでつながれた2枚のゲートを持ち閉位置で、内部からシール面に押しつけて内外差圧に耐える構造である。閉位置では内部に配置した多数の対のバイトンボールが2枚のゲートを、内部からフランジ面へ押しつける構造である。開位置ではボールは凹部に収納される。バイトンボールの弾性を利用しているため耐差圧は、1.0barということであった。(図2.2.19参照)

次の大口径は、アンテナシステムの合計12枚のミラー保守点検交換用のゲート弁である。このゲート弁も隣接するミラー間との位置干渉の関係から考えると円形開口ゲート弁は利用できず、第1ゲート弁と同様に方形ゲート弁を使用する。

第2ゲート弁は各ユニットにつき1個の円形のφ750のゲート弁を設置し、アンテナシステムの運転・保守等に1ユニットの独立性を保持する機能を持つ。このゲート弁と真空窓モジュールの独立をはかるゲート弁は、ほぼ同口径であり、空間的位置干渉がおこる可能性が低い円形開口のゲート弁が使用可能である。調査結果では、円形の大口径ゲート弁について、1方向差圧1気圧については円形開口直径1500mmまでは製作実績VAT-Series10(図2.2.20参照)があることが分かった。従って、第2ゲート弁と真空窓モジュールの独立をはかるゲート弁は、この円形開口ゲート弁が使用可能である。

バイトンボールの弾性を利用してため耐差圧は、1.0 bar。
特徴 ・ ・ 口径の形状を、円形、楕円、方形と自由に設定できる。

VATLOCK 型
~ 600 x 2000 mm (24" x 80")
最大実績 762 x 150 (mm)
(2000 x 600 mm は R&D プラン)
差圧 1.0 bar
圧力範囲 1×10^{-9} mbar ~

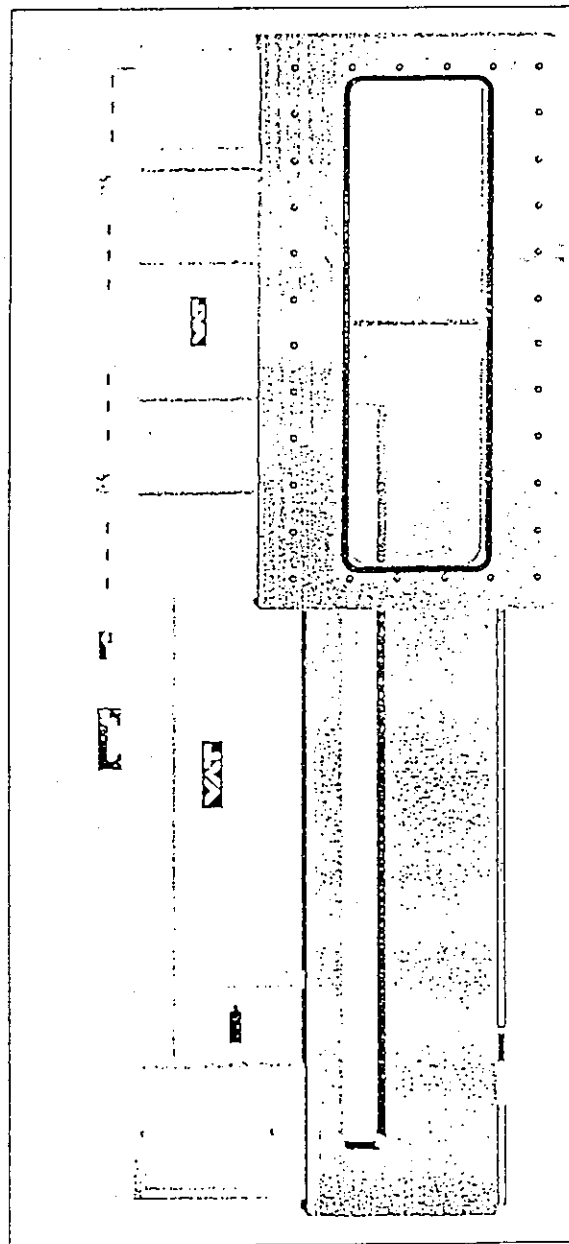


図 2.2.19 大口径矩形ゲート弁

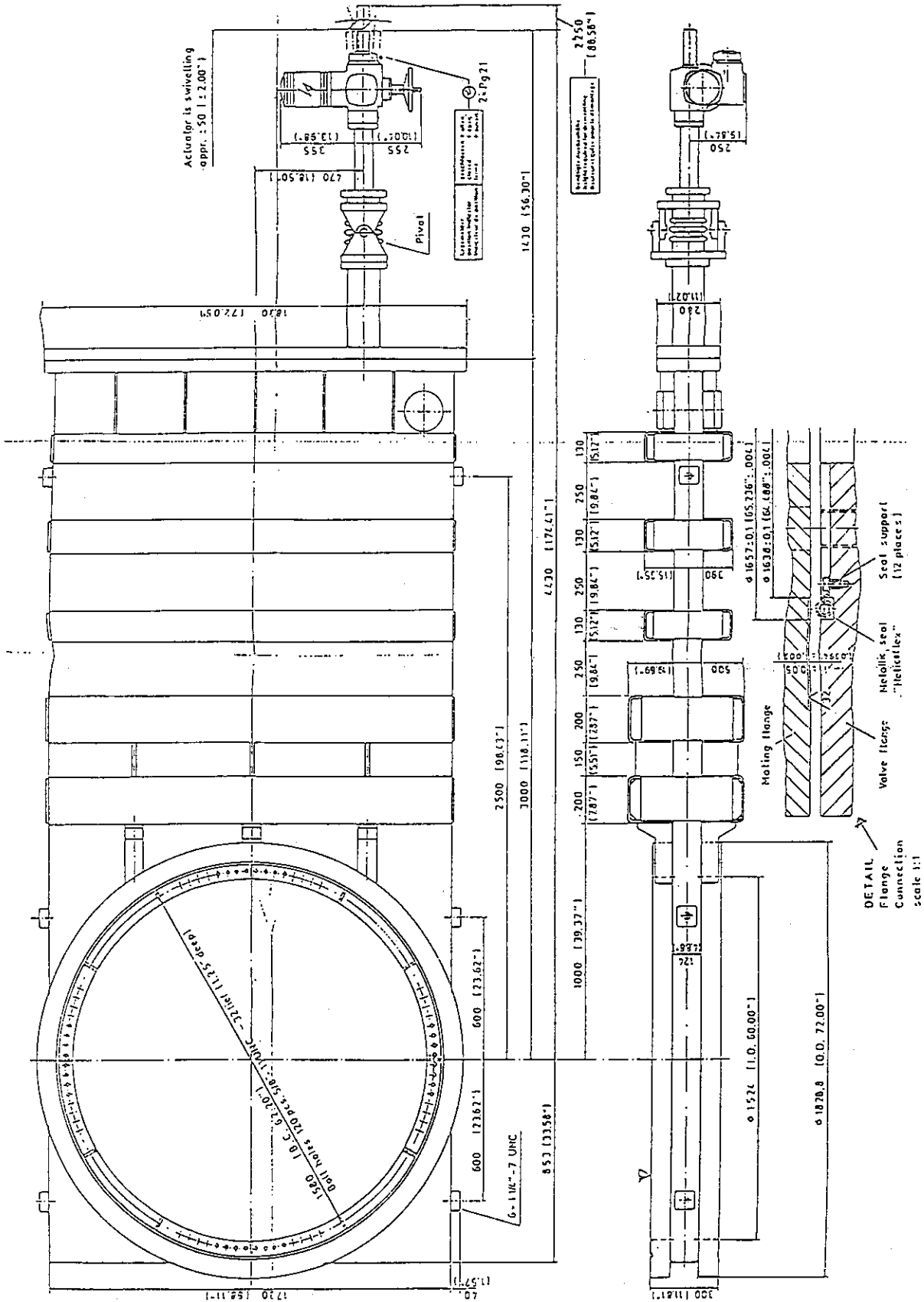


図 2.2.2.0 大口径円形ゲート弁

2.2.2.3 アンテナシステムの放射線遮蔽

2.2.2.3-1 目的

JT-60SUの真空容器はECH装置用の大口径のポート（ECポート）を有する。このポートと隣接するように真空容器を囲むトロイダル磁場コイルが並ぶ。さらにこのポートはクライオスタットを貫通している。この体系において真空容器内で発生した中性子がECポートを経由してTFコイルに到達し、コイルに影響を与える。ECポートからの漏洩中性子を評価し、コイルにおける核発熱を求める。ECポート出口に設置する装置機器の核発熱及び放射化を評価する。さらにクライオスタットの外周への作業者の接近性を判断するためにD-T放電停止後の線量当量率及び本体建て屋内の安全評価値として空気の放射化を求める。

2.2.2.3-2 モデル

2次元（X-Y）輸送計算による線束、核発熱分布を求める。真空容器、TFコイル、ECポート、クライオスタットおよびアンテナ機器を含むZ軸方向（垂直方向）無限平板モデルとする。ECポートのZ軸方向の高さは210cmであるため、このようなスリット形状に近似したX-Y平板モデルで充分である。

(1) 配置

- 機器の配置を詳細に記述したモデルを図2.2.2.1に示す。図中の番号は右上に表示してある構造材の番号であり、その原子個数密度及び組織割合を表2.2.1.6(a)(b)に示す。
- ECポートは幅75cm、その外側に厚さ35cmのポート遮蔽体を設ける。ポート遮蔽体の内側は厚さ4cmのチタン合金でコーティングされている。
- ポート遮蔽体の真空容器付け根部はTFコイルに対する遮蔽を強化するために厚さ70cmとした。ポートとクライオスタットの接続部はベローズ構造のため遮蔽体の厚さは20cmである。
- ECポートの出口は、中性子ストリーミングによる外部の放射化を防ぐため、厚さ45cmのコンクリートの遮蔽体で囲むとともに、プラズマを直視する線上には厚さ30cm、長さ111.2cmの遮蔽ブロックを設置した。

(2) 線源強度

- 全プラズマの中性子発生量： 14 MeV 中性子 $1 \times 10^{20} \text{ n/sec}$
- 年間： $1 \times 10^{20} \times 2 \times 10^3 = 2 \times 10^{23} \text{ n/year}$
- 空間分布： 一様分布

(3) 運転パターン

1週間連続運転し、その後4週間停止するパターンを4回繰り返す運転後、炉を停止する運転スケジュールとした。

(4) 中性子発生量の規格化

プラズマの表面積 418 m^2 と計算モデル上の表面積との比より以下のようなになる。計算モデル上の表面積Sは

$$S = 2\pi(380+60)/4 = 1.63 \times 10^3 \text{ cm}^2 \text{ より、規格化計数 } f_n \text{ は、}$$

$$f_n = 1 \times 10^{20} \times 1.63 \times 10^3 / (418 \times 10^4) = 3.91 \times 10^{16} \text{ (n/sec)}$$

また、放射化計算には

$$f_n = 2 \times 10^{23} / 4 \times 1.63 \times 10^3 / (418 \times 10^4) / (3600 \times 24 \times 7) = 3.213 \times 10^{13} \text{ (n/sec)}$$

(5) 中性子束分布

D-T運転時の全中性子分布の等高線図を図2.2.2.2に示す。

(6) 超伝導線の核発熱

ポートを経由してTFコイルに到達する中性子が、超伝導コイル導体に与える核発熱を求めた。TFコイル導体部のプラズマ側で、核発熱は 0.16 mW/cm^3 であり、設計目標値を満たす。クライオスタット側では、遮蔽厚みが少ないベローズ部からの回り込みのため局所的に目標値 1 mW/cm^3 を上回る 1.7 mW/cm^3 となった。

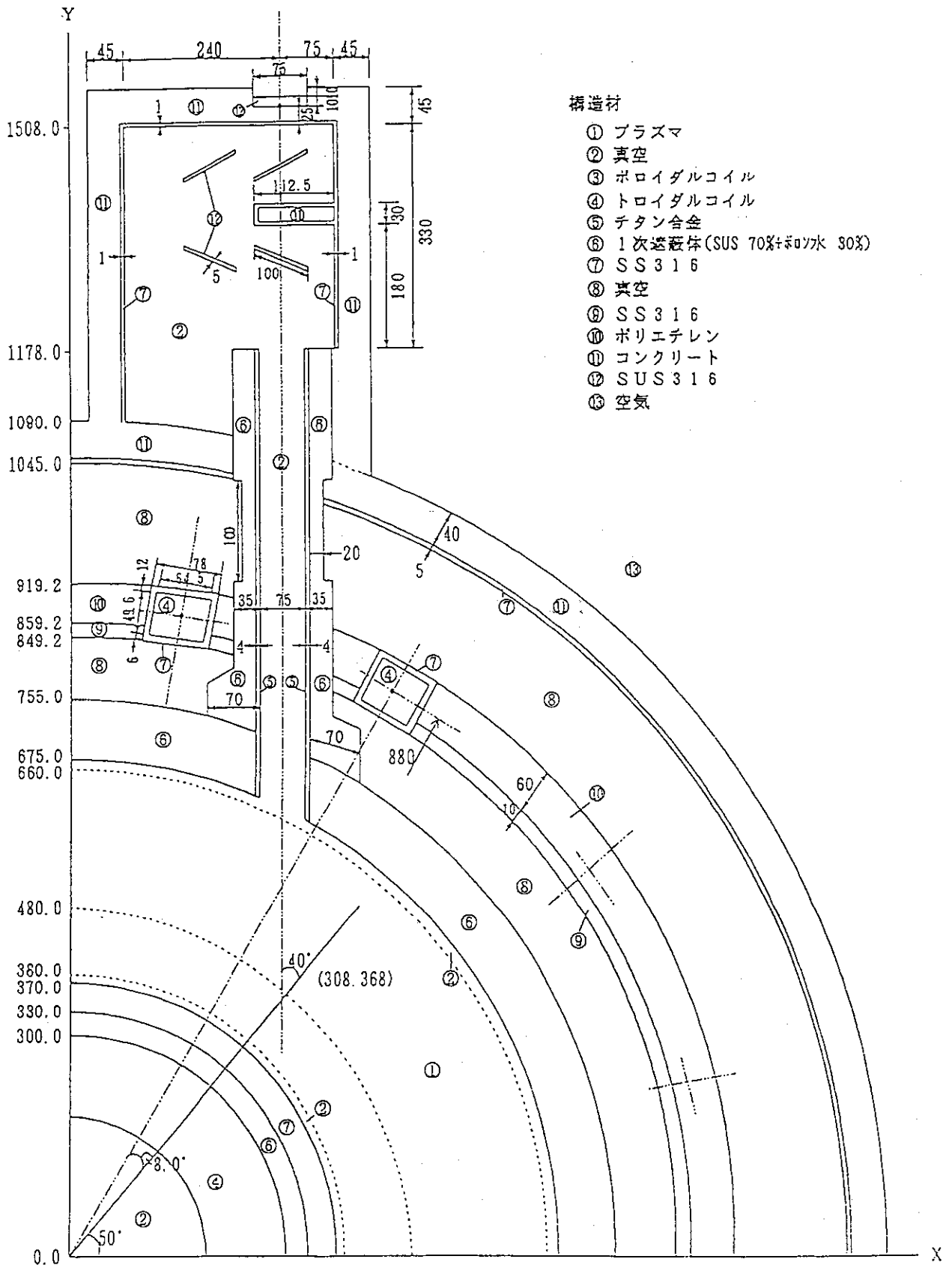


図 2.2.21 ECポート、2次元 (X-Y) モデル図

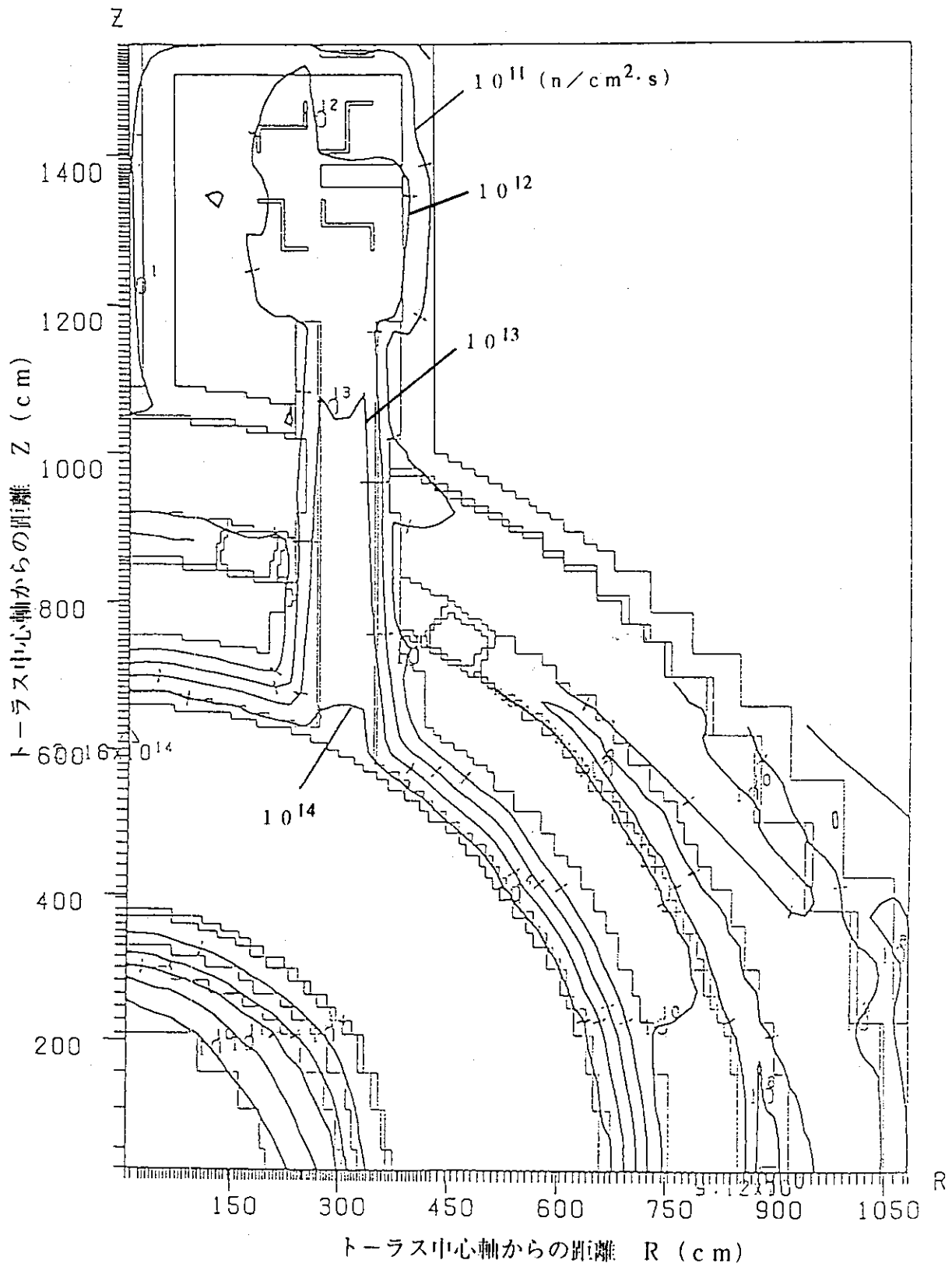


図 2.2.2 2 D-T 放電中線束分布、全中性子線等高線図

表 2.2.16 (a) 原子個数密度一覧表 (barn. atom/cm³)

No.	材料名	元素	原子個数密度
1	プラズマ	² H	1.000 x 10 ⁻¹⁰
2	SS316	Mn	1.731 x 10 ⁻¹
		Ni	9.724 x 10 ⁻¹
		Cr	1.555 x 10 ⁻¹
		Mo	1.239 x 10 ⁻¹
		Fe	5.484 x 10 ⁻¹
3	水	H	6.700 x 10 ⁻²
		O	3.350 x 10 ⁻²
4	銅	Cu	8.493 x 10 ⁻²
5	インシュレータ	H	2.033 x 10 ⁻²
		C	1.792 x 10 ⁻²
		O	2.551 x 10 ⁻²
		N	1.950 x 10 ⁻³
		Si	6.884 x 10 ⁻³
		Al	2.158 x 10 ⁻³
		Ca	2.300 x 10 ⁻³
6	液体ヘリウム	⁴ He	1.837 x 10 ⁻²
7	コンクリート ($\rho=2.22\text{g/cm}^3$)	Na	6.935 x 10 ⁻⁴
		Fe	6.079 x 10 ⁻⁴
		O	4.123 x 10 ⁻²
		C	3.004 x 10 ⁻⁴
		H	6.364 x 10 ⁻³
		Si	1.680 x 10 ⁻²
		K	2.734 x 10 ⁻⁴
		Ca	3.301 x 10 ⁻³
		Mn	6.082 x 10 ⁻⁵
8	空気	N	4.220 x 10 ⁻⁵
		O	1.170 x 10 ⁻⁵
9	ポリエチレン	H	7.700 x 10 ⁻²
		C	3.850 x 10 ⁻²
10	チタン合金	C	1.776 x 10 ⁻⁴
		Fe	1.194 x 10 ⁻⁴
		Al	5.930 x 10 ⁻³
		Ti	4.984 x 10 ⁻²
		V	2.094 x 10 ⁻³
		H	3.308 x 10 ⁻⁴
		N	9.520 x 10 ⁻⁵
O	2.167 x 10 ⁻⁴		
11	¹⁰ B	¹⁰ B	1.410 x 10 ⁻¹

表 2.2.16 (b) 構造材の組織割合表

No.	混合材名	材料名	組成比
13	トロイダルコイル (SCM)	SS 3 1 6	0.367
		銅	0.369
		インシュレータ	0.044
		液体ヘリウム	0.220
14	ポロイダルコイル (SCM)	SS 3 1 6	0.607
		銅	0.219
		インシュレータ	0.046
		液体ヘリウム	0.130
15	一次遮蔽体 (1) (D-D用)	水	0.99
		¹⁰ B	0.01
16	一次遮蔽体 (2) (D-T用)	SS 3 1 6	0.7
		一次遮蔽体 (1)	0.3

2.2.2.3-3 アンテナ機器配置

ECポート出口には加熱・電流駆動用高周波を準光学的に入射するためのミラー、その駆動機器、導波管束、二重の真空境界となる導波管アンテナブロックが遮蔽体内部に配置されている。図2.2.23のA,B,C,Dがミラーである。その具体的形状は図2.2.14に示すものであるが、計算モデルでは面積1m×1m厚さ5cmのSUS316を置いたものとした。ミラーAとDの間には厚さ30cm長さ112.5cmの遮蔽体を置き、E'にある導波管アンテナブロックへ到達する中性子を減少させている。

2.2.2.3-4 核発熱と放射化

図2.2.23に示すA,D,E,E'に沿った核発熱を図2.2.24に、B,Cに沿った核発熱を図2.2.25に示す。ミラーAの発熱は8.2mW/cm³となり、第一壁の概略5W/cm³に比べ十分低い値である。ミラーCの発熱3.2mW/cm³がBの2.4mW/cm³よりもわずかながら大きいのは、図2.2.22の中性子束分布に見られるように、中性子束はミラーAの真横よりも斜め前方に流れるためである。これらミラーの核発熱は表2.2.17にまとめた。今後のアンテナ機器の設計に供する。

表 2.2.17 D-T放電中核発熱率 (W/cm³)

評価点	中性子	ガンマ線	合計	構造材
A	8.557E-3	7.388E-2	8.243E-2	SUS316
B	6.069E-4	2.327E-2	2.388E-2	SUS316
C	2.493E-3	3.036E-2	3.285E-2	SUS316
D	2.973E-4	1.661E-2	1.691E-2	SUS316
E	2.465E-5	4.074E-3	4.098E-3	SUS316
F	6.016E-6	1.519E-4	1.579E-4	Cu
G	5.585E-5	1.727E-3	1.783E-3	Cu

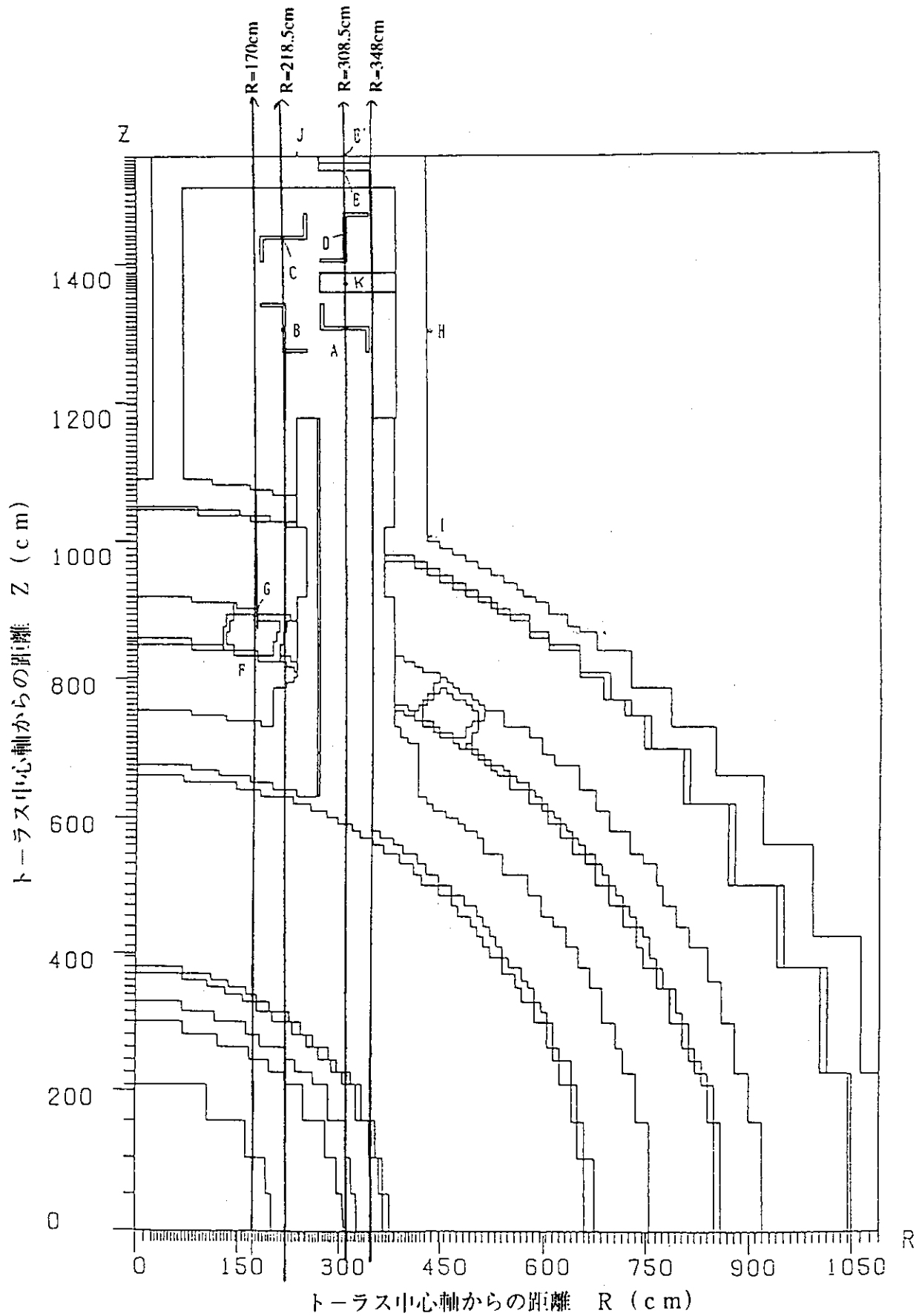


図 2.2.2.3 放射化についての評価断面と評価点位置

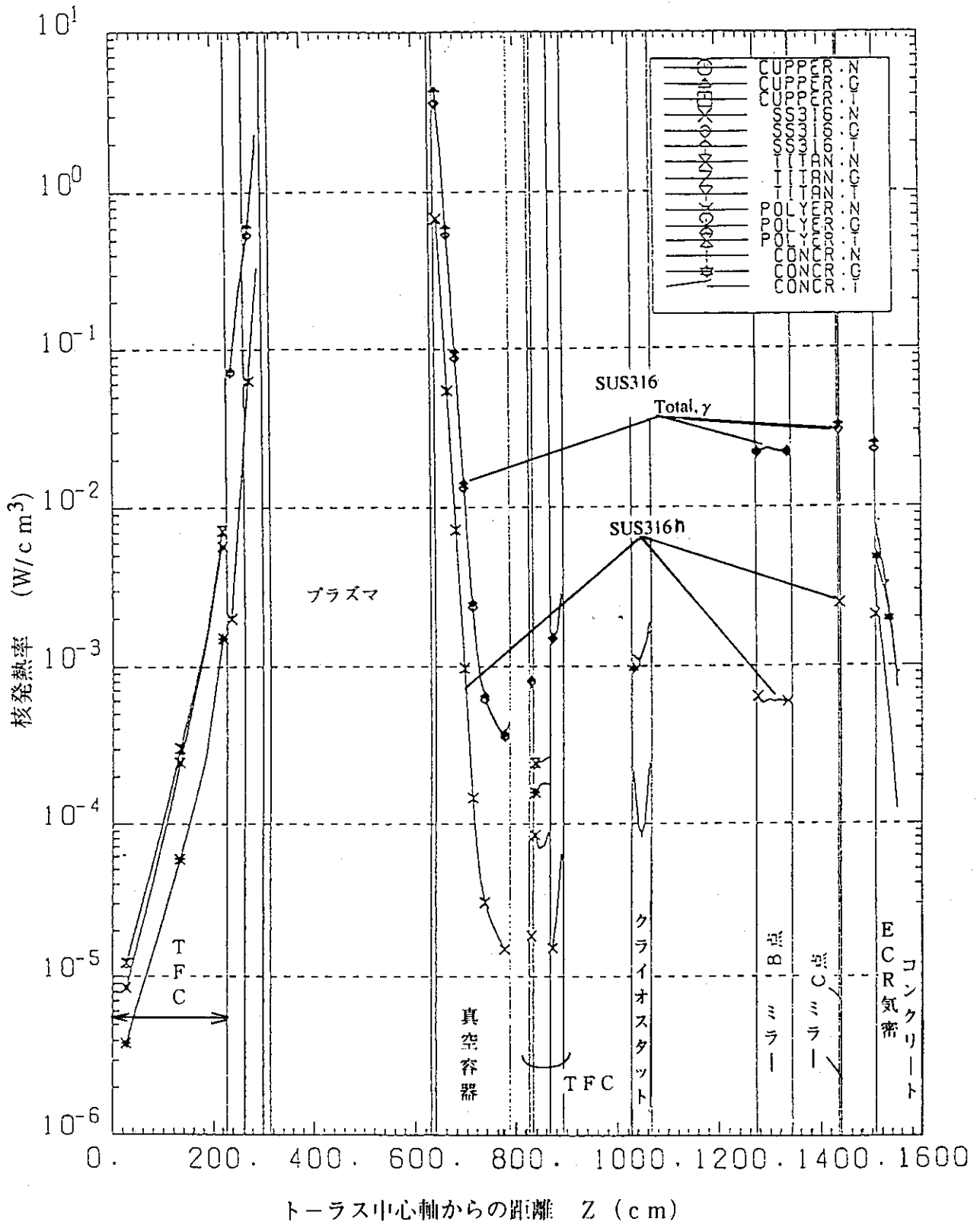


図 2.2.25 D-T放電中 核発熱率 (R=218.5 cm、Z軸線上)

2.2.2.3-5 周辺の安全性

D-T放電停止1日後のガンマ線線量当量分布図を図2.2.26に示す。図2.2.23に示すE,H,I,J点の線量当量率を表2.2.18にまとめた。

表2.2.18 D-T放電停止後のガンマ線線量当量率(mrem/時)

評価点 停止時間	E	H	I	J
1日後	6.36E+1	8.24E+2	1.08E+2	6.32E+2
1ヶ月後	1.45E+0	8.25E-1	1.62E-1	2.95E+0
1年後	1.93E-1	6.48E-2	1.51E-2	2.91E-1

(1) ポート出口

ECポート出口ではミラーとその駆動機器を厚さ45cmの遮蔽体で囲んである。計算モデルとして、遮蔽体は1cmのSUS316と44cmのコンクリートから構成される。ミラーAの真横の位置、H点ではD-T放電停止後1日で820mrem/時、1カ月後で0.8mrem/時の線量当量率となった。この値は1日後の設計目標である2mrem/時を満たさない。その原因としてコンクリート部のガンマ線源スペクトルを調べた。図2.2.27に現れているように、2.75MeVおよび1.37MeVのガンマ線を放出する²⁴Naの寄与が大きいことが判明した。この放射性同位元素は半減期が15時間であることから、4日後には接近が可能となる。

(2) クライオスタット

クライオスタットは放射化した炉本体からのガンマ線を遮蔽する。運転停止後、あまり時間を置かずに作業者が炉本体室に入域できることが必要である。クライオスタットは計算モデルでは、5cmのSUS316と40cmのコンクリートとした。ECポート出口付近、I点ではD-T放電停止後1日で108mrem/時、1カ月後で0.16mrem/時の線量当量率となった。この値も設計目標を満たせず、接近は不可能である。線量当量率への寄与はコンクリート中の²⁴Naと考えられるので、数日後には接近が可能である。これを低減するために遮蔽厚みを増やすことは重量を急激に増大させるので好ましくない。むしろNa成分の少ないコンクリートの検討、構造設計における外側ライナーのガンマ線遮蔽効果についての検討が必要である。

(3) 空気の放射化

プラズマ実験中はクライオスタットの周辺にはある程度の中性子束が存在するので、これと空気を構成する元素とが核反応を起こして放射性物質をつくる。この放射性気体を屋外に排気する際、あるいは炉本体室内で作業する際は安全基準を満たさなければならないため、空気の放射化量を求める必要がある。

ここではD-T運転時におけるポート出口およびクライオスタット周辺、図2.2.3のH,I,J点の放射化生成率を計算で求め、生成放射性気体について考察した。各放射性同位元素の生成率を、2次元中性子輸送計算で得た中性子束とFUSION-40の核反応断面積から求めたものが、表2.2.19に示す。

D-T運転3,000秒直後の放射能Rは次のようになる。

$$R=S[1-\exp(-\lambda T)] \text{ (/sec/cm}^3\text{)}$$

ここでSは空気1気圧における生成率で、元素組成と同位体存在比を表2.2.19の数値に乗じたものである。 λ は放射性同位元素の崩壊定数、Tは運転時間3,000秒である。検討結果は局所的なものであるが、⁴¹Arは1日後においても目標の濃度限界 $1 \times 10^4 \text{ Bq/cm}^3$ 以下とはならない。

空気の放射化がクライオスタット外側で距離の2乗に反比例するものとして、10mから20mまでの空間平均を行い、さらに減衰の時間平均を施すと、8時間の作業域平均濃度は $1.1 \times 10^2 \text{ Bq/cm}^3$ となり、まだ目標を満足しない。したがって、⁴¹Arの生成率を下げるための遮蔽体の追加、あるいは換気空調系による希釈が必要である。前者は寸法干渉、重量、コスト増加の面から大幅変更は望ましくない。後者はトリチウム閉じこめを考慮したシステムとして検討しなければならない。

表 2.2.19 D-T放電中の空気の放射化物生成率

評価点 放射化物	H	I	J
$^{12}\text{C} (n,2n)^{13}\text{N}$			
$^{14}\text{N} (n,2n)^{13}\text{N}$	8.798E+5	3.017E+5	3.197E+7
$^{14}\text{N} (n,P)^{14}\text{C}$	2.019E+10	4.246E+9	2.509E+10
$^{15}\text{N} (n, \gamma)^{16}\text{N}$	2.824E+5	5.943E+4	3.633E+5
$^{16}\text{O} (n,2n)^{15}\text{O}$	2.148E+4	8.629E+3	1.191E+6
$^{16}\text{O} (n, P)^{16}\text{N}$	6.341E+6	1.844E+6	1.301E+8
$^{18}\text{O} (n, \gamma)^{19}\text{O}$	2.042E+6	4.368E+5	3.009E+6
$^{38}\text{Ar} (n, \gamma)^{39}\text{Ar}$	9.084E+9	1.911E+9	1.118E+10
$^{40}\text{Ar} (n, 2n)^{39}\text{Ar}$	1.266E+8	3.953E+7	3.426E+9
$^{40}\text{Ar} (n, \gamma)^{41}\text{Ar}$	7.463E+9	1.569E+9	9.182E+9

2.2.2.4 アンテナシステムのトリチウム多重格納構造及び真空排気設備

2.2.2.4-1 多重格納

トリチウム障壁と多重防護についての安全性を評価するために、表 2.2.20 に示す ECH 装置のトリチウム境界について検討した。ECH 装置では、アンテナシステムが基本的にトリチウム境界を成す。図 2.2.28 に ECH 装置の概念構成図を示す。アンテナシステムは第一真空容器、第二真空容器及び ECH 気密室の構成により、3 重の防護機能を有し、且つ本体真空容器とアンテナシステム及び各ユニット間の独立した気密性を保つために、第 1 ゲート弁及び第 2 ゲート弁を備えている。高周波系においては、2 個の真空窓によりトリチウムを遮断し、大電力発振部等の機器が設置される RF 増幅室 II はトリチウム処理の必要のない区域とした。

表 2.2.20 ECH 装置のトリチウム境界

	第一次格納	第二次格納	第三次格納
ECH 装置	第一真空容器 第一真空窓	第二真空容器 第二真空窓、 導波管	ECH 気密室、 導波管

2.2.2.4-2 真空排気設備

アンテナシステムにおける真空排気設備（図 2.2.28 参照）は、ミラー及び導波管等から放出されるガス及びトカマクから流入されるガスによる放電を防ぎ、安定な電力送電を行うために、アンテナシステム内を所定の圧力以下に排気する。排気されたガスはトリチウム取扱の安全性からトリチウム処理設備によって処理される。第 1 真空排気設備は第 1 真空容器内を差動排気し、JT-60SU の一次格納系の排気設備に接続される。第 2 真空排気設備では、第 1 と第 2 真空窓間、第 2 真空容器内と伝送システムの導波管内の圧力を 1×10^{-2} Pa 以下に維持し、且つトリチウム漏洩を検知する機能及び漏洩した場合、トリチウムを除去できる構造にする必要がある。第 1 と第 2 真空排気設備は、機器の保守等において、各ゲート弁の開閉操作に連動して第 1 及び第 2 真空容器内を排気する機能を持つ。第 2 排気設備は JT-60SU 設備の二次格納系の処理設備に接続される。ECH 気密室の換気は三次格納系の処理設備に接続され、処理される。

各排気設備における排気容量及び機器構成は今後検討する。

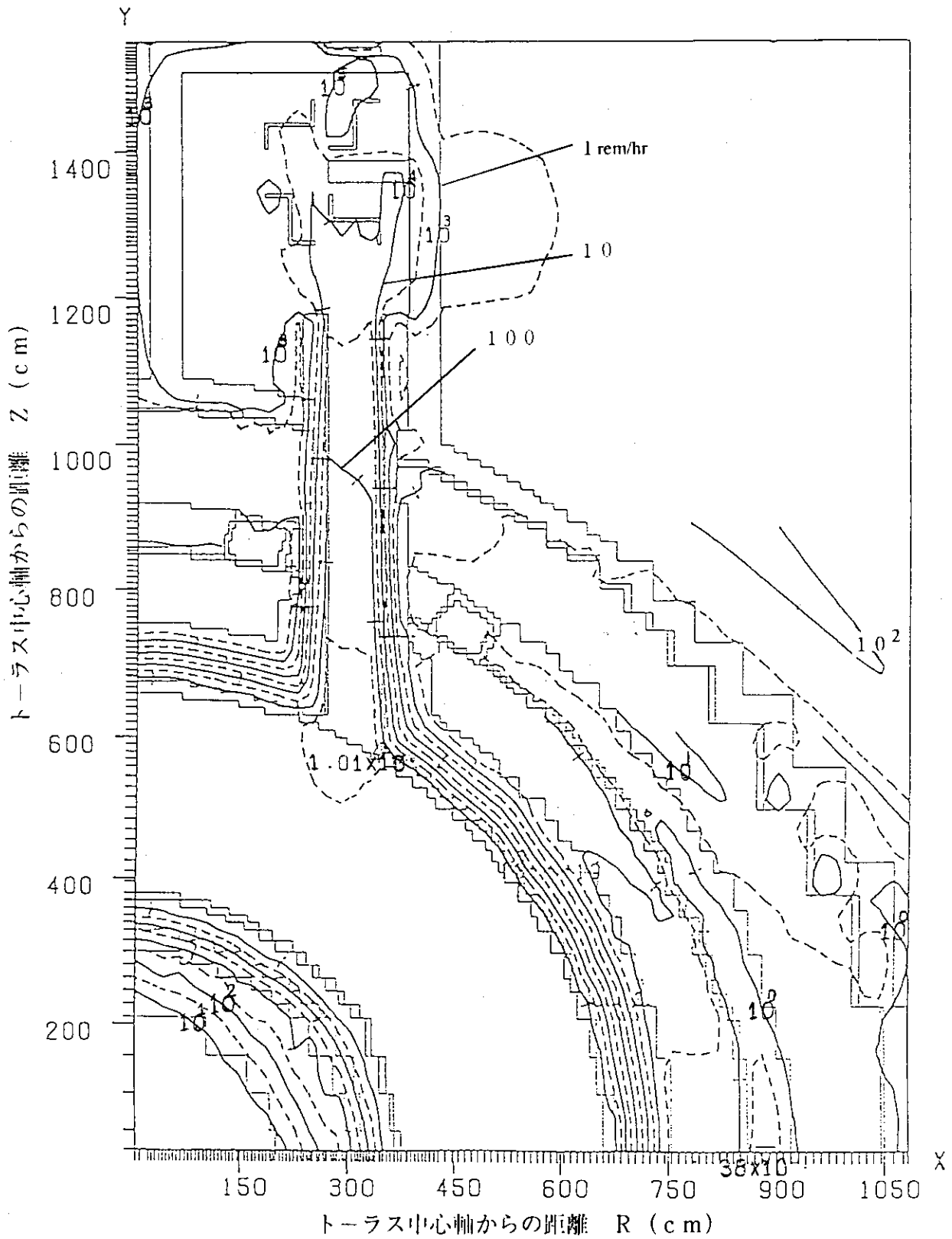


図2.2.26 D-T放電停止後、ガンマ線線量当量率（1日後等高線図）

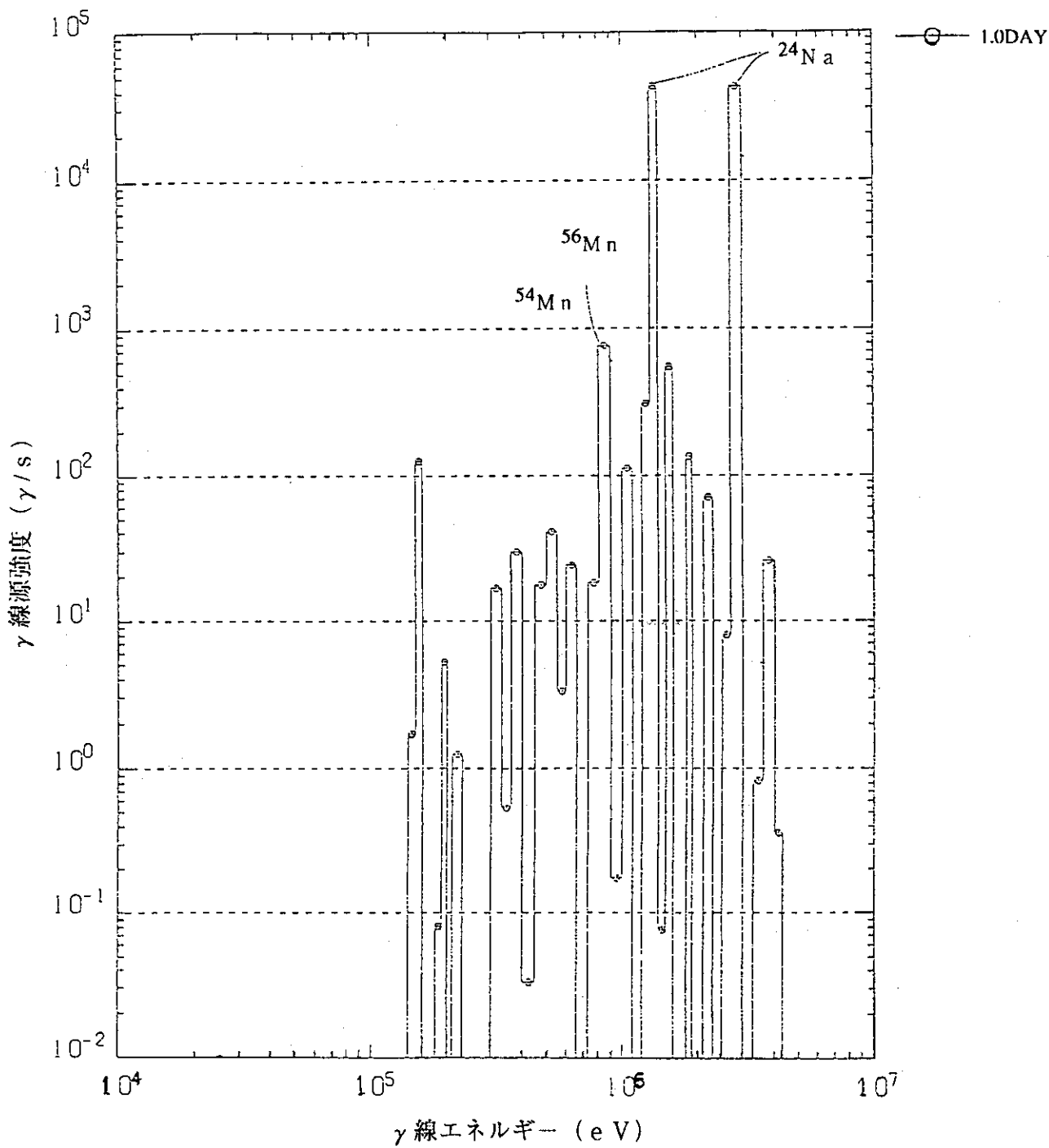


図 2.2.27 放電停止 1 日後のガンマ線源スペクトル (コンクリート部点 K)

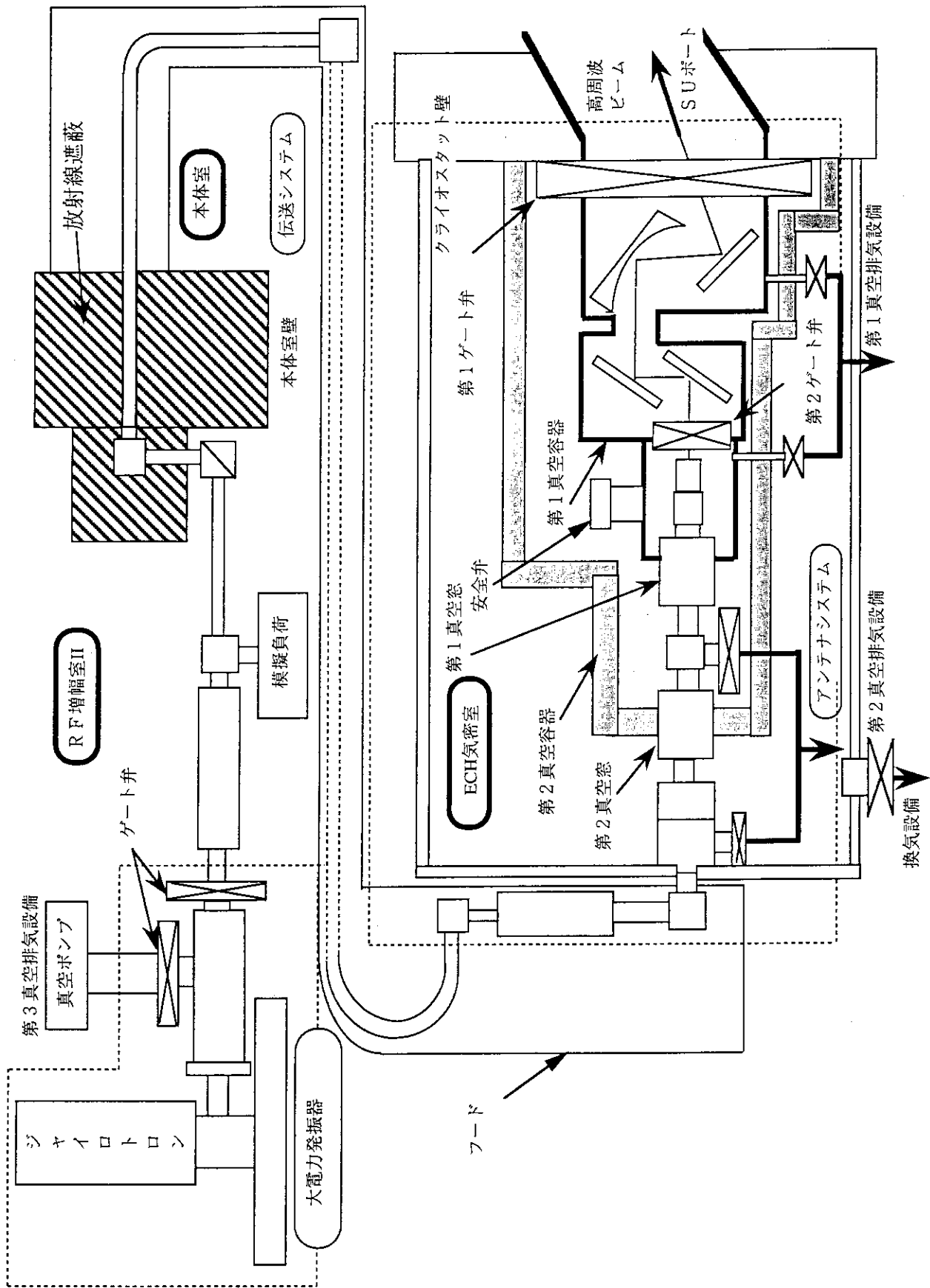


図 2. 2. 28 ECH装置のトリチウム多重格納

2.2.2.5 アンテナシステムのまとめ

(1) アンテナシステムの設計

アンテナシステムの高周波ビーム光学系について基本設計検討を行い、各要素の相対的な設置位置、サイズ、位置干渉性について調べた。物理仕様及び幾何学的な制約条件を一応満足する基本設計を構築することができた。ミラーどうしの位置干渉では、ミラー形状を最適化することにより、A、B、C系のビーム掃引様式に関係なく、位置干渉をさけるミラー配置ができた。核発熱及び高周波損によるミラーの熱負荷を考慮した冷却構造、高周波ビームの掃引及び偏波面の調整のためのミラー回転駆動構造及び交換・保守作業を検討して、ミラーの機器設計を行った。

アンテナシステムの最重要コンポーネントであり、且つ現在開発中である高周波真空窓の機器設計では、現時点で最も実現性のある HE_{11} モードの分散型の真空窓を採用した。交換保守等を考慮して4個の真空窓をモジュール化した構造を検討した。真空窓の詳細な構造及び設置位置では、開発状況、アンテナシステムの放射線遮蔽効果、トリチウム境界及び点検・交換作業等をさらに検討して、今後、機器設計を進めていく必要がある。本設計では、分散型の真空窓を採用したが、偏波に関係のない真空窓が開発されれば、M3、M4ミラーは不用となり、アンテナシステムは簡素化され、コンパクトになる。偏波面の調整は、本体室から隔離された伝送システムに新たに設置される偏波変換器によって行われる。

(2) アンテナシステムの放射線遮蔽とトリチウムの多重格納

真空容器内で発生した中性子がECポートによって、周辺機器に与える影響を2次元輸送計算で評価した。ECポート出口に設置するアンテナシステムのミラーの核発熱及び全体の放射化を求めた。クライオスタットの外周でのD-T放電停止後の線量当量率が1日後でも接近が困難な108 mrem/時となったが、主にコンクリート中の半減期の短い ^{24}Na のためであると考えられる。空気の放射化では、 ^{41}Ar は1日後においても目標の濃度限界 $1 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$ を上回り、雰囲気ガスをHe等の希ガスにする必要がある。

ECポートに関する中性子遮蔽及びアンテナシステムの放射化では、SUの目標設計値を部分的に満足していないため、今後、中性子輸送の数値計算を含めて、最適設計検討が必要である。特に、図2.2.29に示す様に、本節で検討した高周波ビームラインを考慮し、部分的にポート断面を狭くしたポート設計を行えば、中性子束の流出は軽減でき、アンテナシステムの各機器や空気等の放射化は効果的に改善されると思われる。

真空窓の設置位置は、中性子遮蔽の効果とトリチウムインベントリー及び安全防護に関わる境界設定を検討して、決定する必要がある。

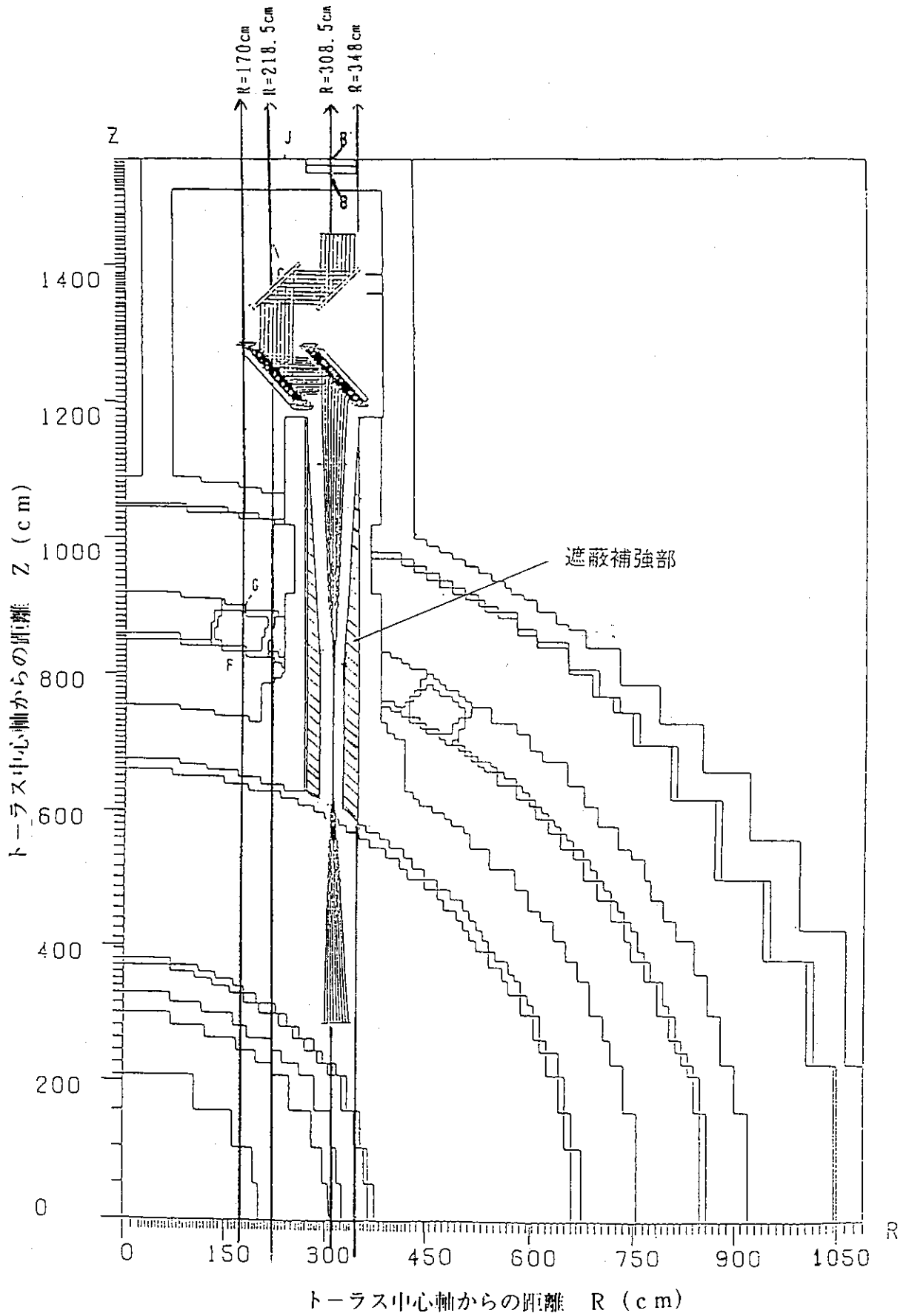


図 2.2.29 ECポートの中性子遮蔽補強

2.2.3 伝送システム

2.2.3.1 伝送システム基本検討

伝送システムは、主にアンテナシステムと大電力発振部をつなぐ高周波回路により構成され、大電力高周波を効率よく長距離に伝送する。以下に、高周波回路要素であるコルゲート導波管、マイタベンド、テーパ導波管、方向性結合器及び入力偏波調整器（偏波変換器）の基本検討について述べる。

2.2.3.1-1 コルゲート導波管

本設計では、伝送モードとして、伝送効率の高い、最も現実的なオーバーサイズのコルゲート円形導波管の HE_{11} モードを適用する。コルゲート導波管は、図2.2.30に示す様に、壁面が伝播方向に対して垂直に櫛状になっており、これにより軸方向と方位角方向の表面インピーダンスに異方性を持たせ、壁面のジュール損失を非常に小さくしたものである。

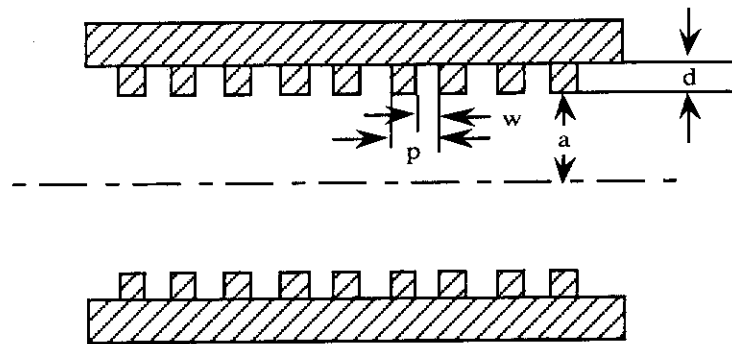


図2.2.30 コルゲート導波管の断面形状

図2.2.31に、コルゲート導波管半径 a における HE_{11} モードの電力減衰率の周波数依存性を示す。但し、 $p=0.3\text{mm}$ 、 $w=0.15\text{mm}$ （図2.2.30を参照）及び電気伝導率 $=3.53 \times 10^7 / \Omega \cdot \text{m}$ （アルミ材）とした。導波管半径が20cmにおいて100mの導波管長で、周波数150~200GHzの帯域で電力減衰率は0.1%以下である。110GHzにしても、100mで0.6%程度の減衰であり、広帯域で高い伝送効率を得られる。大口径の導波管程、減衰率が小さく周波数帯域が広いが、導波管の直進性や導波管どうしの接合部の不整合に対して、不要モードへの発生に敏感となり、結果的に損失を増加させる。大口径の導波管では、製作及び設置精度をより厳しくする必要がある。

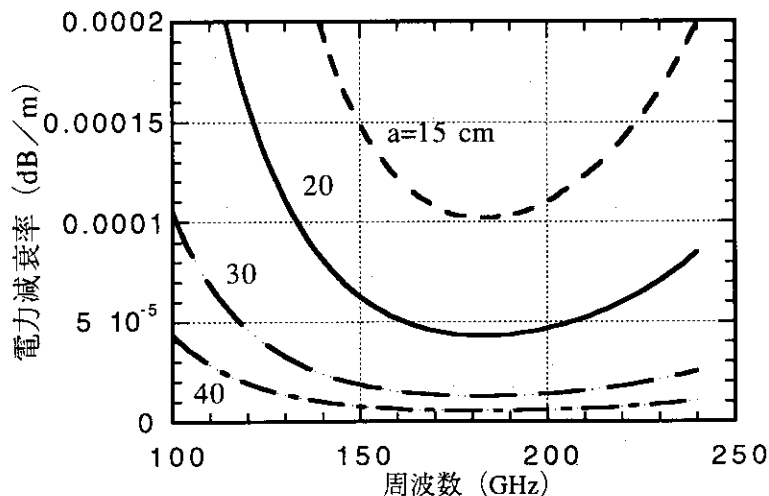


図2.2.31 コルゲート導波管の電力減衰率

2.2.3.1-2 マイターバンド

(1) マイターバンド損失の評価

平面ミラーをもつマイターバンドの HE_{11} モードのモード変換損、 γ_{con} 及ジュール損 γ_j は次式で近似される文献[2]。

$$\gamma_{con} = 2.4(\lambda/D)^{3/2} \quad (dB) \quad \text{----- Eq.(1)}$$

$$\gamma_j = 400(R_s/Z_0) \cos \theta \quad (\%) \quad \text{----- Eq.(2)}$$

$$= 400(R_s/Z_0) / \cos \theta \quad (\%) \quad \text{----- Eq.(3)}$$

$$R_s = \sqrt{\pi Z_0 / \sigma \lambda}$$

λ は波長、 $D=2a$ は導波管の直径、 R_s は表面抵抗、 $Z_0=377\Omega$ は真空インピーダンス、 σ はミラーの電気伝導度、 θ はミラーへの入射角。Eq.(2)はH-面反射、Eq.(3)はE-面反射における損失を示す。表2.2.2.1に周波数170、190、210GHzの計算結果を示す。但し、 $\sigma=5.6 \times 10^7 / (\Omega m)$ とした。

表2.2.2.1 マイターバンドの損失

導波管の内径 (mm)	31.75	38.1	44.45	50.8	63.5
モード変換損 (%) 170GHz	0.73	0.55	0.44	0.36	0.26
190GHz	0.61	0.47	0.37	0.30	0.22
210GHz	0.53	0.40	0.32	0.26	0.19
ジュール損 (%) 170GHz	0.16				
(E面) 190GHz	0.17				
210GHz	0.18				

高周波の総合損失は導波管の内径31.75mm(1.25inch)でも1%以下となる。モード変換損失は、位相補正ミラーを使用すると約30~40%程度、改善される。製作・組み立て精度に依存する不完全性からくるモード変換損失が重要になる。不完全性からくるモード変換損失は径が大きいほど敏感となる。

(2) ミラーの熱負荷

図2.2.3.2に示すマイターバンドのミラーの熱負荷を検討する。ミラー表面で発生した高周波電力のジュール損はミラー表面での熱負荷となる。熱負荷は水冷却チャンネルによって除熱される。 HE_{11} モードにおけるミラー表面での熱負荷を次式によって近似する。

$$q = q_0 J_0^2(x_1 r / R_0) \quad \text{----- Eq.(4)}$$

$$q_0 = Q / \{ \pi R_0^2 J_1^2(x_1) \} \quad (W/m^2)$$

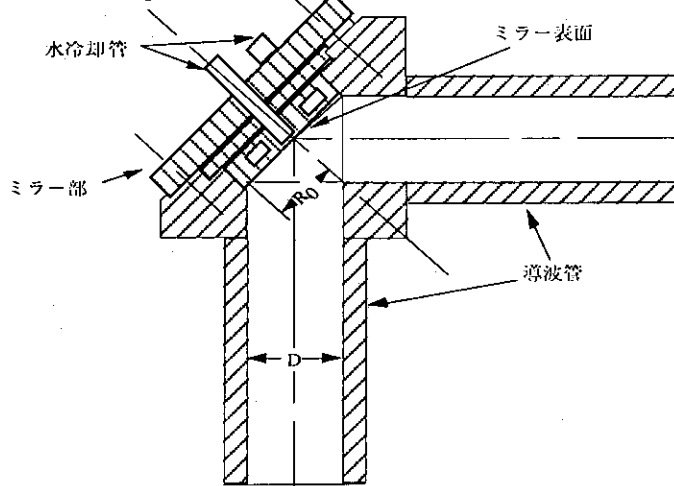


図2.2.3.2 マイターバンドの構造図

r はミラーの半径方向の位置、 J_n は n 次のベッセル関数、 x_1 は0次のベッセル関数の1番目の根である。 $R_0 = D_0 = D / (2 \cos 45^\circ)$ 、 Q はジュール損(W)である。ミラーの表面温度を評価するために有限要素法を用いて計算する。図2.2.3.3に計算モデルを示す。ミラー面に垂直な軸に対して軸対称とする。ハッチング部のみを計算範囲とし、 $D = 31.75 \text{ mm} (1.25 \text{ inch})$ 及 $38.1 \text{ mm} (1.5 \text{ inch})$ の2ケースの温度分布の定常解を求めた。水冷却チャンネルの位置は両ケース共同じである。図中の D_1 は $60 \text{ mm} (D = 31.75 \text{ mm})$, $70 \text{ mm} (D = 38.1 \text{ mm})$ とした。ミラー部の材料は銅とし、熱伝導率は 380 W/mK 、水冷却面における熱伝達係数は $2 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、温度依存性は無いと仮定した。節点数は141、要素数60。ミラー表面及冷却チャンネル表面以外は断熱とし、入り口の冷却水の温度は 40°C である。両ケース共、前項で求めた最大ジュール損 0.18% ($f = 210 \text{ GHz}$)及び 1 MW の伝送電力から Q は 1.8 kW とした。

図2.2.3.4にミラー表面の温度分布を示す。 $D = 31.75 \text{ mm}$ においても、最高温度は 140°C 以下、最高の冷却面温度は 120°C となる。ミラー面の中心が最高温度となる。

高周波損失及ミラーの熱負荷の観点からみて、導波管径は、 $31.75 \text{ mm} (1.25 \text{ inch})$ でも設計は可能である。しかし、裕度を考慮して、導波管の径を 40 mm とすることが最適と思われる。

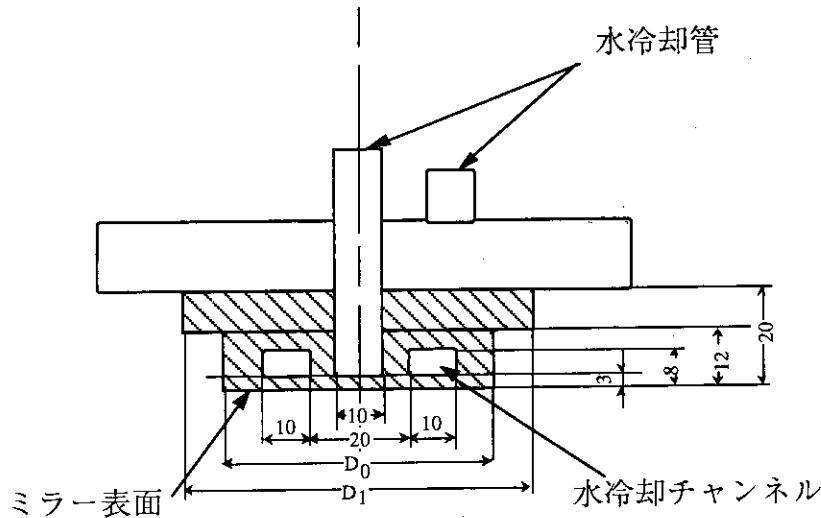


図2.2.3.3 ミラー部の計算モデル

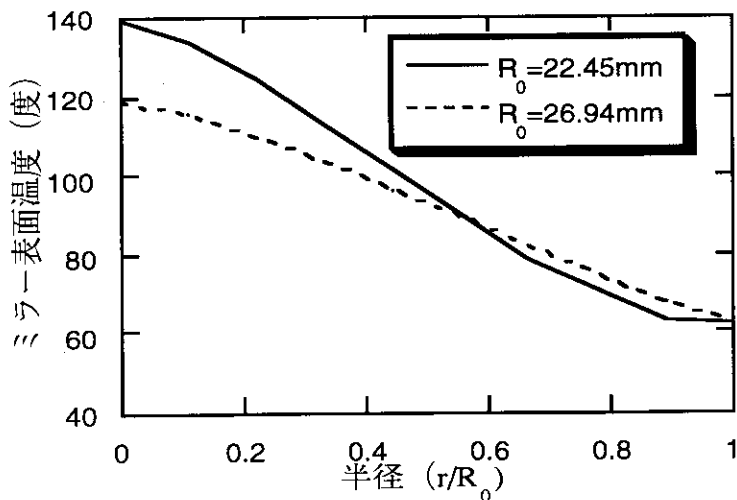


図2.2.3.4 ミラー表面の温度分布

(2) 位相補正ミラー

伝送システムのコルゲート導波管(直径: $D=31.8\text{mm}$)、アンテナシステムのコルゲート導波管(直径: $D=60.3\text{mm}$)のマイタバンドとして、位相補正ミラーを用いたものが考えられる。位相補正ミラーを用いる場合は、伝送システムの導波管に対して $L=80\text{mm}$ 、アンテナシステムに対して $L=60.4\text{mm}$ としてミラー形状を求めた。図 2.2.3 5 に示すミラーの形状関数 h をミラー中心の接平面からの変位とし入射光軸から接平面までの距離 r の関数で表すと図 2.2.3 6 (a) (b) の様になる。位相補正ミラーを用いると、伝送効率はそれぞれ 99.5%、99.8% に向上する。

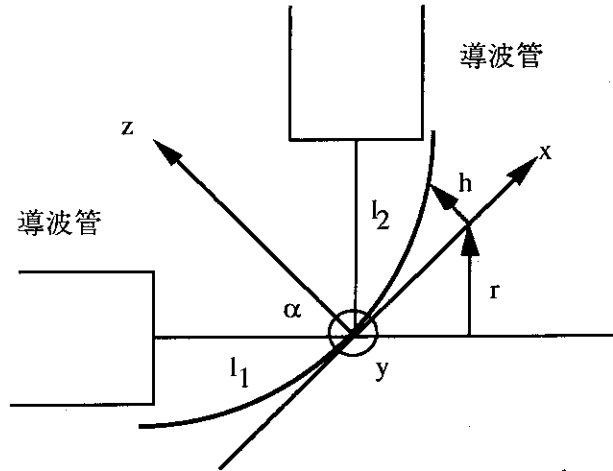
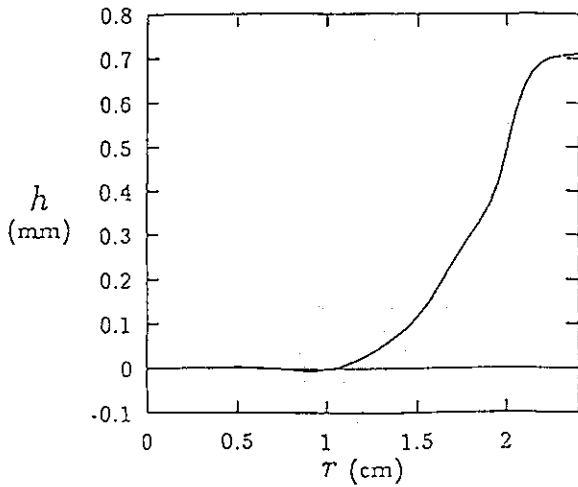
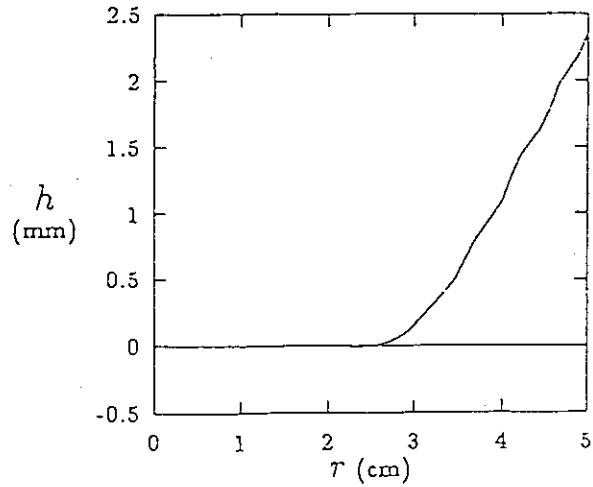


図 2.2.3 5 位相補正マイタバンド構成 ($r^2 = x^2 \cos^2 \alpha + y^2$)



(a) 伝送システム



(b) アンテナシステム

図 2.2.3 6 位相補正マイタバンドのミラー形状関数

2.2.3.1-3 方向性結合器

方向性結合器は入射電力をモニターするための高周波回路であり、伝送電力に比例した高周波を取り出す。図2.2.37の様にマイタバンド面を多数の結合孔のある仕切り板を介して、矩形の副導波管を設け方向性結合器を構成する。バンドはHバンドすなわち電界が入射面に対して垂直となる様に反射させるものとする。今、周波数 f 、主導波管を半径 a の HE_{11} コルゲート導波管、副導波管を $b \times c$ の TE_{10} 矩形導波管 (c を電界方向とする) とし、これら2つの導波管を仕切る板 (厚さ t) に m 個の結合孔 (半径 ρ) を設けるものとする。総結合度 C_m (電界振幅) は、 $z_j = (j-(m+1)/2)l$ として

$$C_m = C_0(f, a, b, c, \rho, t) \sum J_0(\chi_{11} z_j \cos \alpha / a) \cos \alpha, \quad J_0(\chi_{11}) = 0$$

ここで、 α は入射角、 C_0 はマイタバンドのミラー中心における単一結合孔に対する結合度である。電力結合度は C_m^2 で与えられる。結合孔の間隔 l は、ミラー上で観測した入射高周波の伝播定数が $k \sin \alpha$ (k : 波数) であることから $l = (2n+1)\pi / (\beta + k \sin \alpha)$ 、($n=0,1,2, \dots$) で与えられる。ここで $\beta = \sqrt{k^2 - (\pi/b)^2}$ は副導波管基本モードの伝播定数である。特に $\beta = k \sin \alpha$ の場合は $b = \pi / (k \cos \alpha)$ となる。表2.2.2.2に方向性結合器設計諸元の一例を示す。この例では1 MW伝送時に、方向性結合器の出力電力が ~ 10 mWとなる。

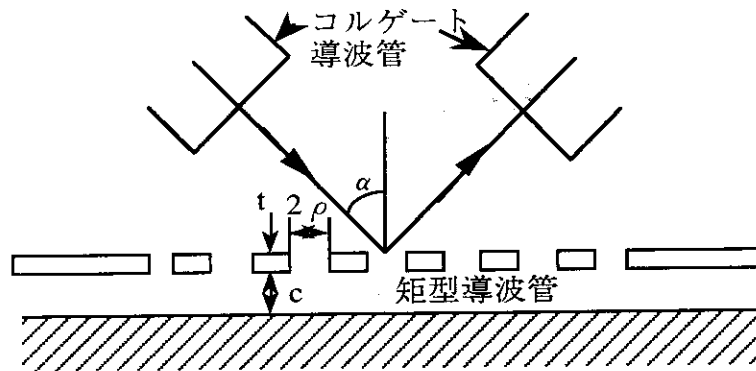


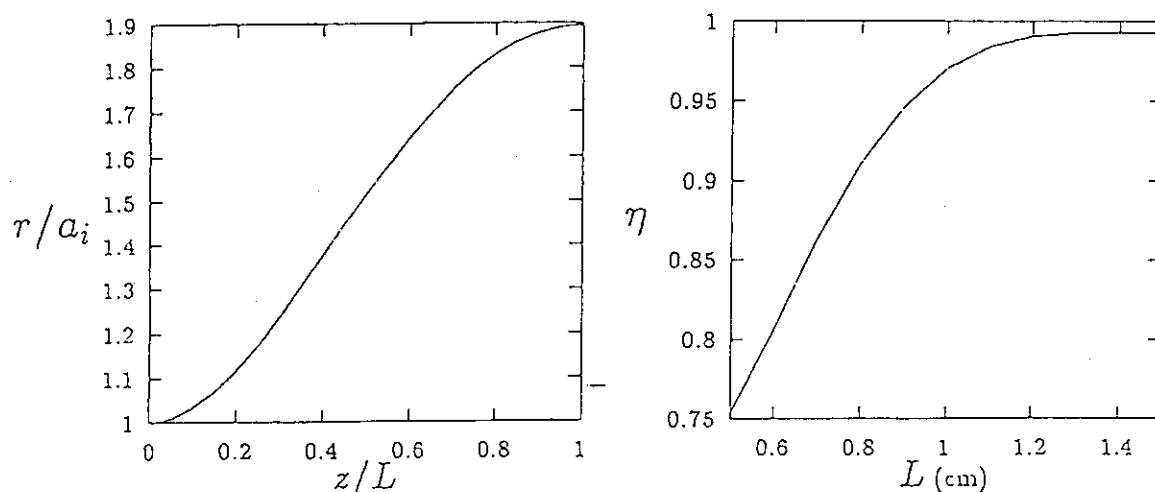
図2.2.37 マイタバンド型方向性結合器

表2.2.2.2 方向性結合器設計諸元

周波数 (GHz)	170
導波管直径 (mm)	31.8
副導波管断面 (mm)	1.24 × 0.62
結合孔直径 (mm)	0.2
仕切板厚 (mm)	0.1
結合孔間隔 (mm)	0.623
結合孔数	30
電力結合度 (10^{-9})	11.0

2.2.3.1-4 テーパ導波管

伝送システムの導波管（直径 $2a=31.8\text{mm}$ ）をアンテナシステム内の導波管（直径 60.3mm ）に変換するテーパ導波管として図2.2.3.8に示す様に両導波管にスムーズに接続される曲線テーパを考えると同図に示す HE_{11} の伝送効率 η が得られる。伝送効率を99%以上にする為に管長 L を1.2m以上にする必要がある。

図2.2.3.8 テーパ導波管の形状と伝送効率 η

2.2.3.1-5 入力偏波調整器（偏波変換器）

(1) コルゲートミラーによる偏波変換器

図2.2.3.2に示すマイタバンドに法線回りに回転可能なコルゲートミラーを設置した偏波変換器を考える。コルゲートミラーは伝送効率向上の為に位相補正ミラーとしても使用できる。入射波電界ベクトルが入射面に平行であるとし、入射面に対する反射波電界の所望偏向角を θ_r とする。入射角 α が45度の場合の電界の偏向角 θ_r とコルゲート方向角 ψ （図2.2.10参照）との関係を図2.2.3.9に示す。コルゲートの形状については、文献[1]で計算例が示されている。そこに示されたグラフ（図2.2.11）より、コルゲート形状が周期 0.6λ （ λ :波長）の正弦関数である場合、垂直入射に対するコルゲートの深さは楕円偏波変換器(位相差 $\Omega=90$ 度)に対し 0.24λ 、直線偏波変換器(位相差 $\Omega=180$ 度)に対しては 0.35λ であることが分かる。コルゲートが入射面に平行（ $\psi=0$ ）でかつ入射角が α である場合の周期および深さはこれらの値を $1/\cos\alpha$ 倍すればよい（波長が $1/\cos\alpha$ 倍になっていることと等価）。コルゲートと入射面のなす角度 ψ が0でない場合は小さい ψ に対し、数値計算の結果、位相差の変化分 $\Delta\Omega$ は ψ の程度になることが分かる。直線偏波変換器のコルゲートが $\psi=0$ で最適化されている場合、この位相誤差により反射波は楕円偏波となり所望方向に直交する電界成分が生じる。 $\Delta\Omega \sim \psi$ とすれば、その電力比率は数値計算より $\sim 0.03\theta_r^4$ で与えられ、この値が損失因子となる。この損失因子は θ_r が45度を越えると急激に増大す為、大きな θ_r に対しては以下に述べるルーフトップ型の偏波変換器が望ましい。

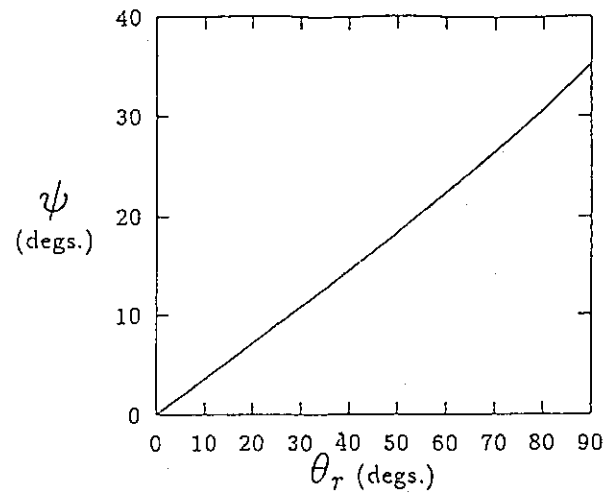


図 2.2.39 電界偏向角 θ_r とコルゲートとの関係 ($\alpha = 45$ 度の場合)

(2) ルーフトップ型偏波変換器

ルーフトップ型偏波変換器の構成を図 2.2.40 に示す。偏波変換器の第 1 および第 3 ミラーは平面ミラーとする。また、第 2 ミラーは入力波と位相共役な反射波を生成する位相補正ミラーである。3 枚のミラーで反射させることによって、入射波の電界の入射面に垂直な成分は出力端で逆向きとなる一方、平行な成分の向きが保存されることから、変換器全体を導波管軸回りに回転することによって、偏波方向を任意に変化できる。電界の偏向角の変化量は回転角の半分である。ルーフトップ型偏波変換器のビーム光学系パラメータを、図 2.2.40 に示す様に、導波管半径 a を用いて下記の様に定めた。

M_1 - M_2 , M_2 - M_3 中心間距離= $5a$, M_1 - M_3 中心間距離= $6a$

入力導波管- M_1 、出力導波管- M_3 中心間距離= $2a$

変換器は導波管半径 $a = 15.9\text{mm}$ とすれば、直径 143mm 、長さ 175mm の円筒内の収納される。前述の様に、偏波変換器の第 2 ミラーは入力波と位相共役な反射波を生成する位相補正鏡とする。

この時、 M_2 ミラーの入射角は $\sin^{-1}(3/5) = 36.87^\circ$ 、 M_1 、 M_2 ミラーの入射角は 63.43° となる。位相補正鏡の形状を、ミラー中心における接平面からの高さ h で表し、周波数 170GHz で最適化した M_2 の位相補正鏡形状を図 2.2.41 に示す。ここで r は入射ビーム軸からミラー面までの距離を表す。図 2.2.41 の形状を有する位相補正鏡による HE_{11} モード伝送効率率は 99.8% である。

更に、第 2 ミラーを、 $\lambda/8$ のコルゲートミラーとし、面に垂直な軸に対して回転させると、任意な楕円偏波が生成される。

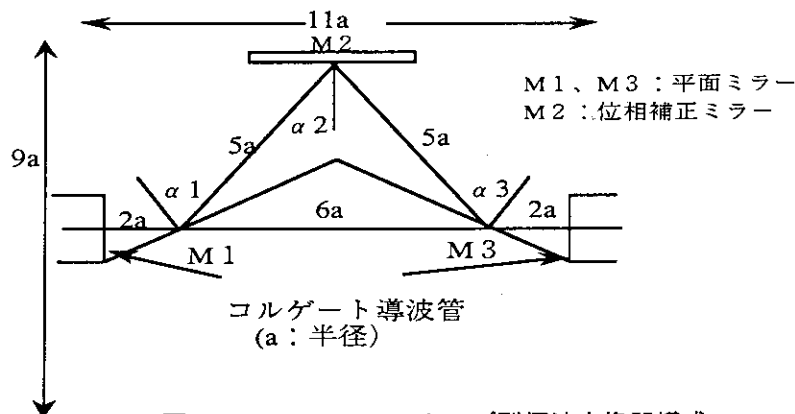


図 2.2.40 ルーフトップ型偏波変換器構成
($\alpha_2 = \sin^{-1}(3/5)$, $\alpha_1 = \alpha_3 = \pi/4 + \alpha_2/2$)

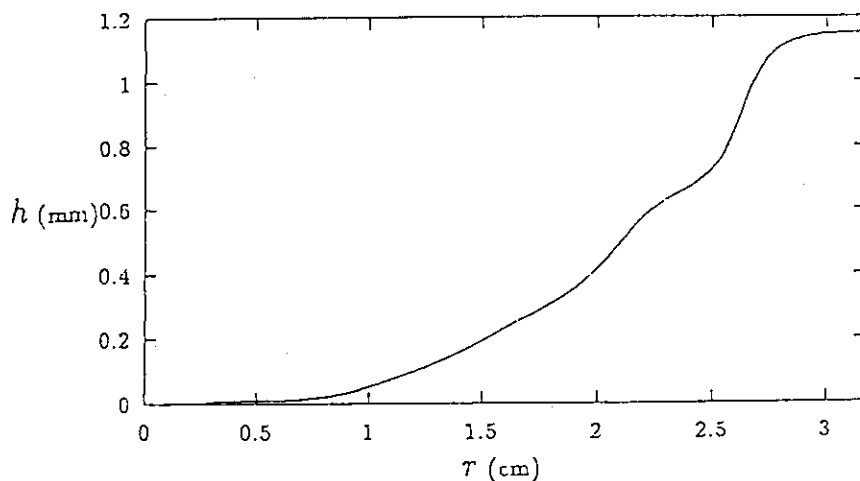


図 2.2.41 ルーフトップ型偏波変換器内位相補正ミラーの形状関数

2.2.3.1-6 伝送損失

文献[3]に示されている伝送路要素の損失評価式を表2.2.23にまとめた。導波管伝送損失の内、ジュール損失は無視可能で、半径差、軸ずれ、楕円変形によるものについても $\Delta \sim 0.1 \text{ mm}$ であれば無視できる。導波管設置誤差で特に注意を要するのは導波管軸の傾きである。マイターバンドにおける損失については、回折/モード変換損失、ジュール損失および導波管軸傾斜($\sim 1 \text{ mrad}$)を考慮すると、1バンドあたり1%以下と評価される。

表2.2.23 伝送損失評価式

損失要因	評価式 (a:導波管半径、 λ :波長)
HE11コルゲート導波管	
半径差 (Δ)	$1.2 (\Delta/a)^2$
軸ずれ (Δ)	$1.1 (\Delta/a)^2$
軸傾斜 ($\delta \text{ rad.}$)	$2.2 (\delta a/\lambda)^2$
楕円変形 (Δ)	$0.4 (\Delta/a)^2$
ギャップ (d)	$0.11 (d\lambda/a^2)^{1.5}$

2.2.3.2 伝送システムの機器検討

伝送システムの基本仕様は、1ユニットあたり12個(A系)及び20個(B、C系)のコルゲート導波管によって、大電力発振部からの高周波電力をアンテナシステムまで伝送する。伝送システムの主な機器は、直線導波管、マイターバンド、入力偏波調整器(偏波変換器)、方向性結合器(高周波電力モニター装置の一部)、高周波スイッチ、模擬負荷及び導波管支持部からなる。導波管内は 10^{-2} Pa 以下に真空排気し、導波管は冷却構造を備える。

本節では、これらの伝送システムの主要部品であるコルゲート導波管の配管、支持及びアライメント方法及びコルゲート導波管束の真空排気設備の規模を検討した。

2.2.3.2-1 コルゲート導波管の支持及びアライメント方法の検討

具体的な導波管の配管経路及び伝送システムの各要素が確定していないが、その大半は直線の導波管で構成される。本項では、導波管の支持構造とアライメント方法を検討する。

4個のコルゲート導波管を一組の導波管束として組み立てて、A、B、C系列の部品の共通化を図り、図2.2.42に示す様に3束(A系)及び5束(B、C系)の導波管束により、コルゲート導波管束ユニットを構成し、支持する構造を検討する。導波管束の支持方法については、下記項目に留意し今後、検討していく必要がある。

- (1) 設置空間の極小化のため隣合う導波管の接続位置を交互になる様にする。
- (2) 熱膨張の吸収は基本的にバンド部分で行う構造とする。
- (3) 導波管の接続部における軸ずれを低減し、且つ真空シールできる接続方式を検討する。
- (4) バンド接続部周辺、導波管接続部等の伝送損失が集中し発生する因子の箇所を中心に水冷却構造とする。
- (5) 支持枠は導波管が、たわんで軸ずれを起こさない間隔で設置する。
- (6) マイターバンドに位相相補正ミラーを使用する場合は、導波管束設置時のアライメントは、レーザ等のアライメント光が反射するようダミーのミラーを用いる。

図2.2.42に示した導波管束のアライメント方法は、図2.2.43に示したアライメント治具を用い次に示す手順で行う。

(1)導波管ユニット単体

- ・センターリングを両端にセットした導波管をアライメント治具に取り付ける。
- ・図2.2.4.3のように、機械加工精度で位置出しした2本のセンターリングポールの先端と2個のセンターリングが1直線に並ぶように軸を合わせる。
- ・4本の導波管の軸を揃える。

(2)導波管設置工事時

- ・上記アライメント治具を用いて4本の可視レーザの位置と軸を合わせる。
- ・センターリングから穴空きバンドに光軸を通し、その軸上に、前記4本の可視レーザユニットを配置し、センターに穴のあいたダミーのバンドミラー部からレーザ光を導入し、導波管出口のセンターリングを通るように導波管固定治具を設置する。
- ・順番に、センターリングしながら導波管ユニットを継ぎ足していく。

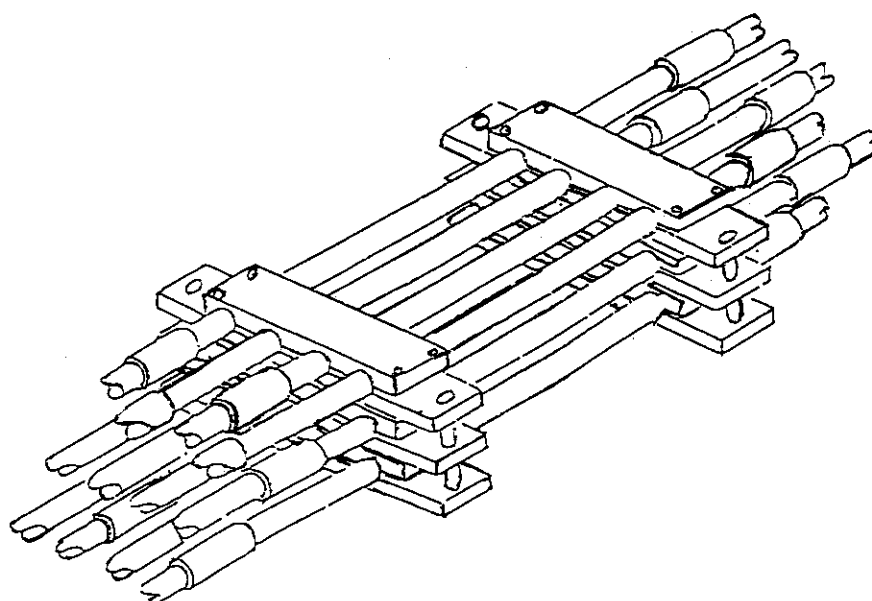


図 2.2.4 2 導波管束ユニットの支持構造

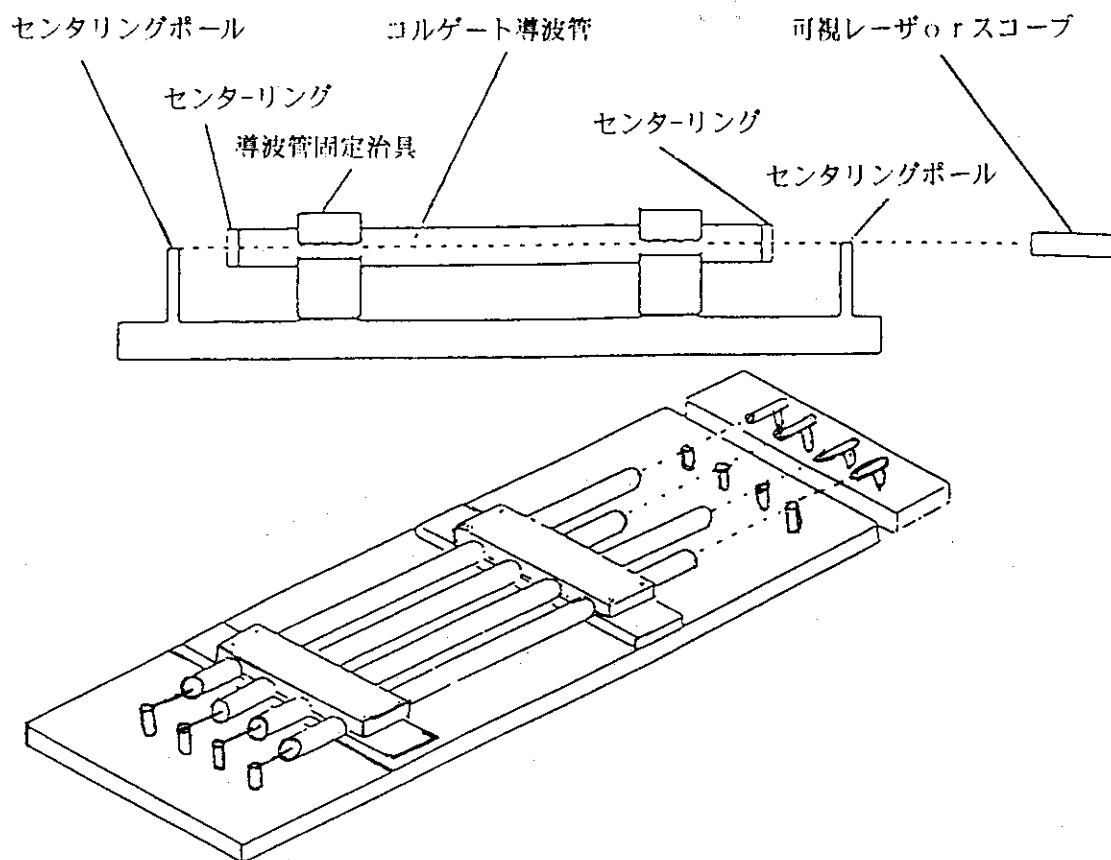


図 2.2.4 3 導波管束ユニットのアライメント治具

2.2.3.2-2 コルゲート導波管束の真空排気設備の検討

本節では、これらの伝送システム部品中での主要部品である内径40mmのコルゲート導波管束の真空排気設備の規模を検討した。表2.2.24に、真空排気は100mの直管の導波管の並列に配置したモデルによって、3ケースを想定して到達圧力を見積り比較した。

表2.2.24 到達圧力

ケース	条件	アルミ素材	エイジング後
片端より排気	A系の導波管に対して1箇所の排気装置を配置した場合。	$1.3 \times 10^{-1} \text{ Pa}$	$1.8 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
	B、C系の導波管に対して各1系統の排気装置を配置した場合。	$1.4 \times 10^{-2} \text{ Pa}$	$1.9 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
2ヵ所(両端より排気)	A系の導波管に対して2系統の排気装置を配置した場合。	$3.2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$	$7.8 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
	B、C系の導波管に対して各1系統の100mごとに排気装置を配置した場合	$3.4 \times 10^{-2} \text{ Pa}$	$7.9 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
2ヵ所	A系の導波管に対して2系統の排気装置を配置した場合。	$9.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$	$5.6 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
	B、C系の導波管に対し各1系統の50mごとに排気装置を配置した場合	$1.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$	$5.7 \times 10^{-4} \text{ Pa}$

条件 導波管の内径 $2a=40\text{mm}$ 、導波管の全長 $L=100\text{m}$

A系統 12並列

B、C系統 20並列

アルミ材の単位面積あたりの放出ガス量

エイジング処理後 $4.0 \times 10^{-9} \text{ (Pam}^3/\text{m}^2\text{sec)}$

素材(真空導入20H後) $4.1 \times 10^{-7} \text{ (Pam}^3/\text{m}^2\text{sec)}$

コルゲート管の内面積 $2(2\pi aL) \text{ (m}^3\text{)}$

分子流のコンダクタンス $C=121(2a)^3/L=3.9 \times 10^{-3}/L \text{ (m}^3/\text{sec)}$

分子ポンプの到達圧力 $P_0=2.66 \times 10^{-4} \text{ (Pa)}=2 \times 10^{-6} \text{ (torr)}$

分子ポンプの排気能力 $S_0=50 \text{ (l/sec)}=5.0 \times 10^{-2} \text{ (m}^3/\text{sec)}$

コルゲート導波管のコンダクタンスが大きいため排気装置の設置場所によっても多少到達真空度が増減するのが表2.2.24に示した計算結果からもわかる。真空排気は100mの直管の導波管の並列に配置したモデルによって見積った。従って、実際には裕度をもたす必要がある。また、放出ガス量も素材使用時の到達真空度で判断すると、 10^{-2} Pa 以下に真空排気するためには少なくとも各系統の経路中に2箇所以上の排気装置が必要である。

また、コルゲート導波管束100mに対し2台の真空排気装置を設置した場合のコンダクタンスは $C=1.9 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{sec)}$ であり、B、C系も 10^{-3} 台のコンダクタンスになり、真空排気用の分子ポンプの容量は、50 (l/sec)でも100 (l/sec)でも、実効排気速度には大きく影響しない。従って、真空ポンプの排気容量を大きくするよりの排気装置の箇所を多くするほうが効果的である。

2.2.3.3 伝送システムのまとめ

伝送システムでは、具体的な伝送経路を設定していないが、伝送距離を100m及びコーナーを10箇所と想定して、高周波系1系統あたりの総合損失を評価した。表2.2.25にその結果をまとめた。

表 2.2.25 伝送システムの総合損失

高周波回路要素	仕様	伝送損失 (%)
直線コルゲート導波管	100m	1.1 ¹⁾
マイターベンド	10個	8.0
テーパ導波管	2個	2.0
方向性結合器	1個	0.8
偏波変換器	2個	1.0
高周波スイッチ	1個	0.5
DCブレーク、伸縮調用整導波管	5個	1.8 ²⁾
総合計		15.2

- 1) : 2mの長尺の導波管を50個接続して、1箇所接続に0.02%の損失を考慮した。
 2) : 導波管径4cm、導波管間のすき間2cmとして評価した。

今後、具体的な導波管経路や各高周波機器を決定して、導波管の接続方法や設置方法を高周波性能を含めて検討する必要がある。特に、要求される製作精度や設置精度を検討する必要がある。

2.2.4 発振管

発振管（ジャイロトロン）は所定の周波数で大電力高周波を発生する電子管であり、ECH装置の大電力発振部の主要コンポーネントである。装置のシステム設計はジャイロトロンの性能に強く依存し、ジャイロトロンの最大発振電力は高周波系の系統数に大きく影響を与える。本節では、JT-60SUにおいて要求される周波数及び発振電力を満足するジャイロトロンを検討する。ITERの工学設計活動（ITER/EDA）において、原研が開発しているジャイロトロンが最有力候補として考えられる。以下に、原研-東芝で開発しているITER用ジャイロトロンについて述べ、JT-60SUのジャイロトロンの仕様を示す。

2.2.4.1 ITER用ジャイロトロンの開発

2.2.4.1-1 開発の概要

原研においては、ITER/EDAの下で、ジャイロトロンの開発研究を積極的に行っている。1994年には、周波数110GHz、発振電力400kW（4秒）及び効率50%のジャイロトロンを実証した。特に、効率改善のために、電子ビームの電位降下型エネルギー回収機能（CPD）を実証した。CPDは効率改善の利点のみならず、コレクターの熱負荷軽減及び高電圧電源の仕様の緩和を導いた。1995年から、ITER用ジャイロトロン（170GHz、1MW、連続）の開発に着手した。発振モードを決定するための短パルス用ジャイロトロンにおいて、共振器モード（TE_{31,8}）により1.13MWの発振に成功した。現在、170GHz、500kWのCPDを備える長パルス用ジャイロトロンを1996年の12月までに開発する予定である。

2.2.4.1-2 170GHz/1MWジャイロトロンの基本設計

170GHz/1MWジャイロトロンの基本パラメータを表2.2.26及びジャイロトロンの概略構造図を図2.2.44に示す。発振モードは高次モード（体積モード）を採用し、発振効率～30%とした。電子ビームのエネルギー回収のために、コレクターとボデー間に40kVの減速電圧を印加して、高周波の発振に寄与しなかった電子ビームエネルギーを電源電力に変換し、発振効率を改善す

る。共振器で発振した高次モードの高周波をモード変換器によって、出力窓の熱負荷の軽減に適した高周波モード（電界分布）に変換する。準光学的モード変換器によって、変換効率は90%以上が期待される。

高電力の発振を定常的に得るためには、共振器壁の熱負荷が重要な要因となっている。銅製の共振器及び冷却能力を考慮すると、共振器壁の熱負荷を 2 kW/cm^2 程度以下にする必要がある。1 MWを発振させるためには、共振器のモードを高次モードにして、共振器を大きくする必要がある。本ジャイロトロンでは、熱負荷、モード変換器の効率及び陰極の大きさ等を考慮して、TE_{31,8}モードを選択した。図2.2.45にビーム電流に対する高周波出力、CPD電圧、共振器の熱負荷及び全効率の計算結果を示す。ビーム電流45 Aにおいて、1 MW高周波出力、モード変換器の効率を含んだ全効率50%以上の性能が期待される。

モード変換器は、準光学型を採用し、ジャイロトロンの中に組み込まれる。モード変換器は1個の放射器、3枚の平面ミラーと4枚の曲面ミラーによって構成され、共振器で発生した高次モードの高周波を、出力窓において、窓の半径方向に対して台形の電力分布に変換する。93%の変換効率が期待される。出力窓から出力した高周波は2枚のミラーによって、コルゲート導波管に伝送される。

ジャイロトロン出力真空窓は主要開発要素であり、現在では最大出力を制限している。本ジャイロトロンでは、2重デスク窓の表面冷却を採用し、デスク材料はサファイヤである。2枚のデスクの間に令媒（FC-75）を流して、高周波電力による熱負荷をデスク表面を通して除熱する。出力真空窓の性能は、デスク温度分布による熱応力によって決まる。デスクの温度は、高周波の吸収電力とデスク材の熱伝導度及令媒とデスク間の熱伝達率に依存する。高周波の吸収電力は、伝送電力、デスク材の誘電損失率及デスクの厚さによって決定される。図2.2.46に1 MWの伝送電力におけるデスク表面温度の時間変化を示す。デスク温度上昇は約5秒程度で飽和し、最大温度は200℃となる。熱疲労等を考慮すると、材料の誘電損失率と熱伝導度及び構造等検討して、上昇温度を下げる必要がある。

表2.2.26 ITER用ジャイロトロンの基本パラメータ

基本パラメータ	諸元
発振周波数	170 GHz
発振モード	TE _{31,8} /TE _{-31,8}
共振器半径	17.9 mm
共振器長/波長	11.3
共振器のQ値	2135
共振器での磁場強度	~6.8 T
ビームの半径 (TE _{31,8} /TE _{-31,8})	9.1 / 9.6 mm
ビームのピッチファクター	~1.0
ビームエネルギー	~80 keV
ビーム電流	~45 A
発振効率	~30%
共振器のオーミック損 (最大)	~2.3 kW/cm ²
モード変換器	導波管型 (ヘリクス)
ミラー (ジャイロトロン内)	7枚 (放物曲面: 1、曲面: 2、平面: 4)
ミラー (ジャイロトロン外)	2枚 (曲面: 2)
出力効率	93.1% (モード変換器-真空窓)
	88.1% (モード変換器-コルゲート導波管)
	87.5% (モード変換器-HE ₁₁ モード)
出力真空窓	2重デスクのサファイヤ

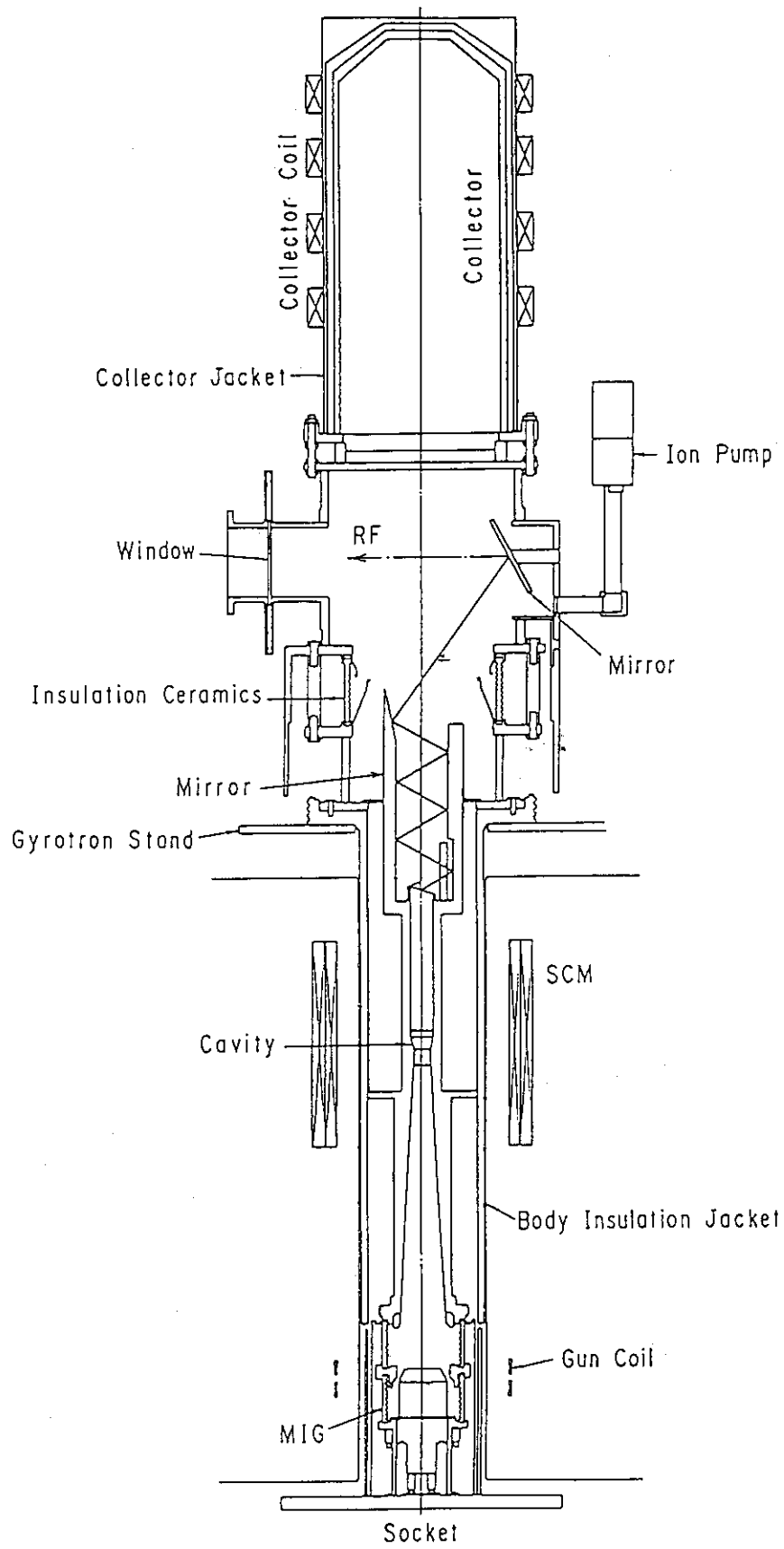


図 2.2.4 4 長パルス運転用ジャイロトロン概略構造図

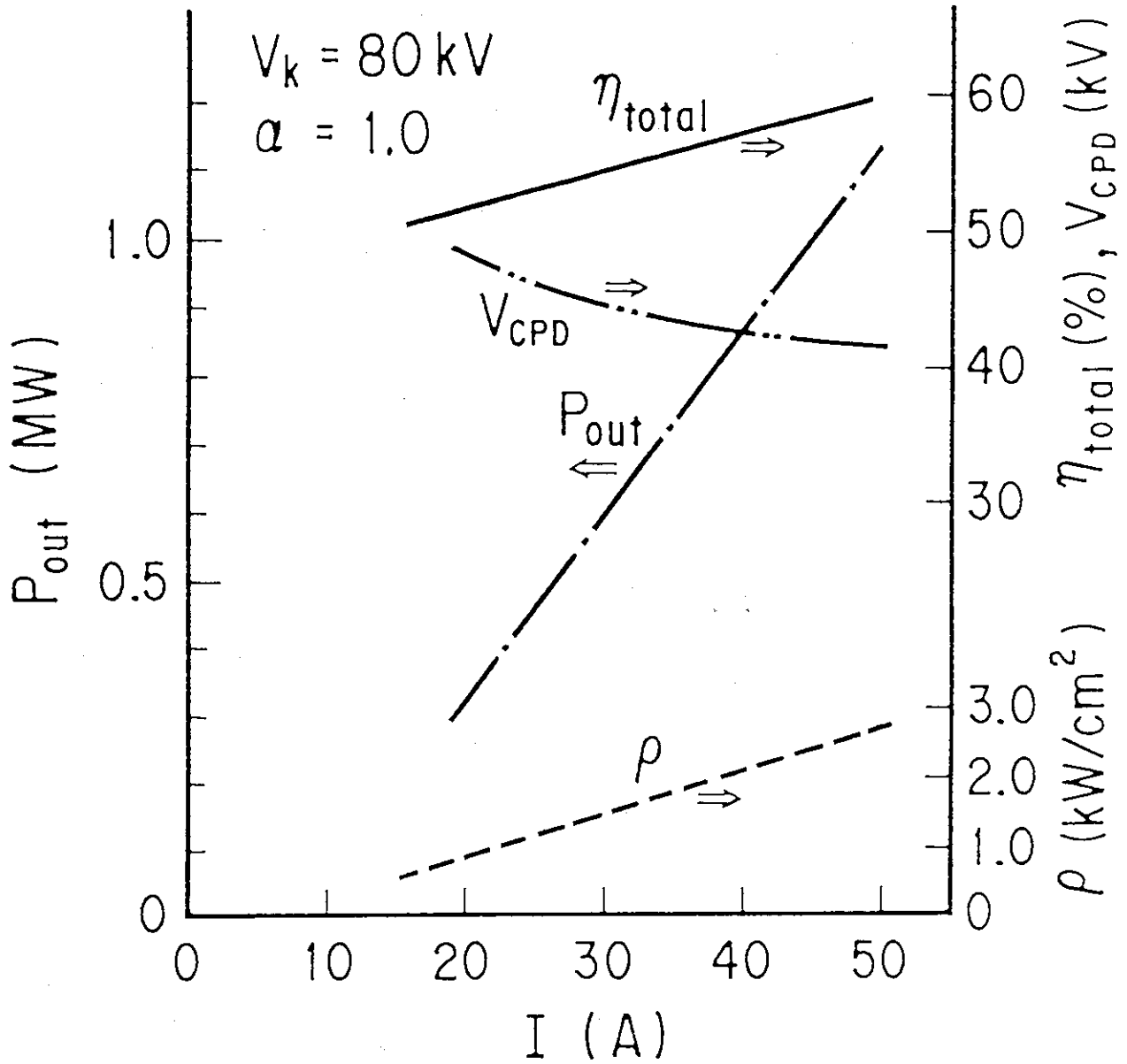


図2.2.45 発振電力 P_{out} 、CPD電圧 V_{cpd} 、共振器壁の熱負荷 ρ 及び総合効率 η_{total} のビーム電流依存性

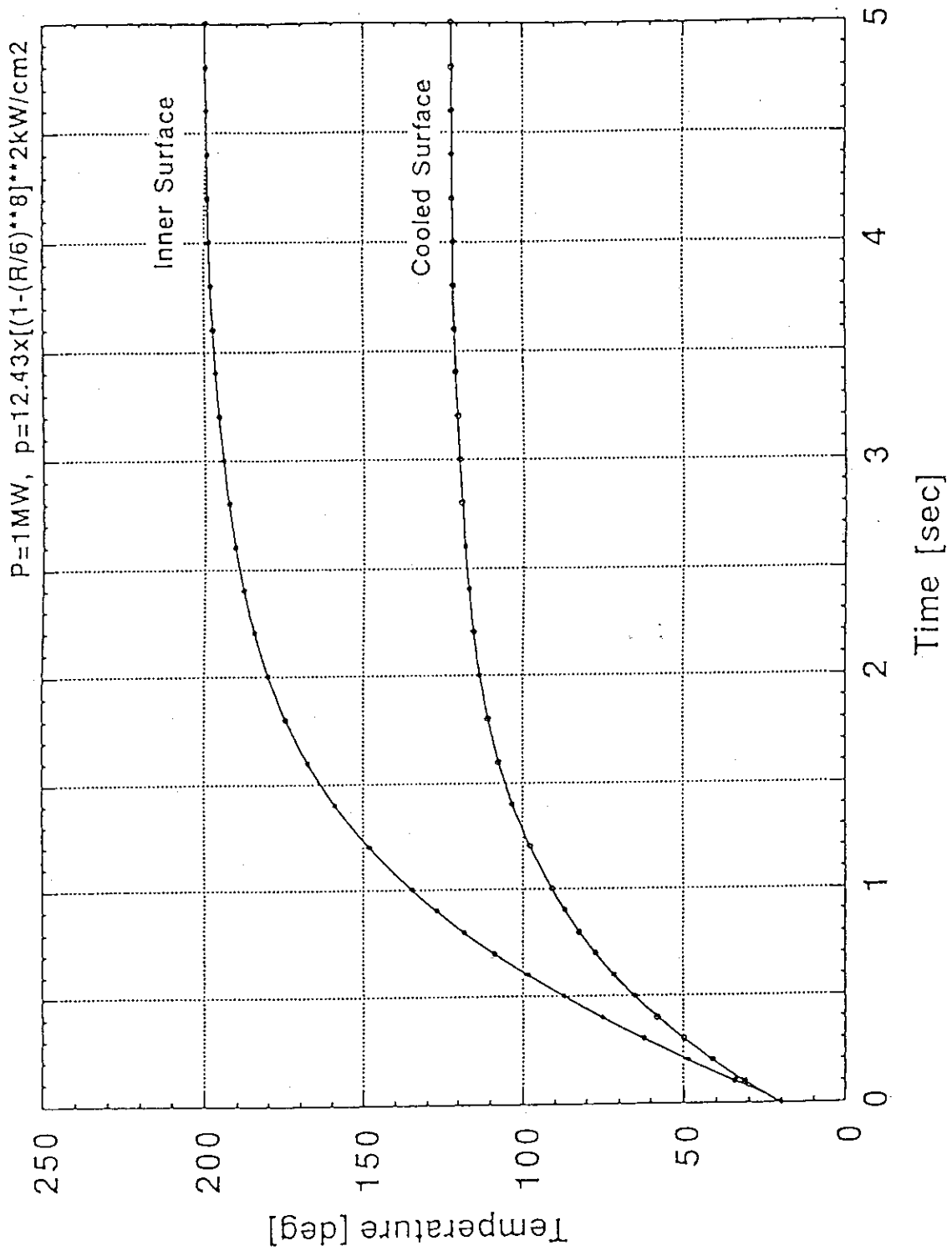


図2.2.4.6 二重真空窓ディスク温度の時間変化

2.2.4.2 JT-60SUのジャイロトロン

JT-60SUにおけるECH装置は、物理的機能の要求から広帯域周波数（150～220GHz）のジャイロトロンが必要である。ジャイロトロンの発振モードをステップ的に選択して周波数を可変にする。ジャイロトロンの基本パラメータはITER用1MW/170GHzジャイロトロンをベースにして設計検討する。表2.2.27に基本仕様を示す。

表2.2.27 JT-60SU用ジャイロトロンの基本仕様

形式	電位降下型コレクタ搭載（エネルギー回収） モード変換器搭載（強制水冷却）
発振周波数	150～220GHz（ステップ可変）
高周波出力	1MW
効率	45～55%
出力モード	HE ₁₁ コルゲート導波管モードと結合 出力整合器搭載（強制水冷却）
ビーム電圧 電子銃カソード電位 共振器（ボデー）電位	80kV、90kV（最大） -46kV、-60kV（最大） 34kV
ビーム電流	40A、45A（最大）
ヒータ電圧	25V×10A（交流）
発振周波数	150～220GHz（ステップ可変）
コレクタ冷却 流量 圧力	純水冷却 ～0.7m ³ /分 ～1MPa
窓冷却 流量	純水冷却 ～0.1m ³ /分

特に、広帯域の周波数を実現するためには、共振器の発振モードの周波数とモード変換器及び真空窓の周波数特性を検討し、整合性をとる必要がある。

2.2.5 電源

2.2.5.1 電源機器

ECH装置の電源は主にジャイロトロン駆動用の電源である。ジャイロトロンを駆動するためには主に高電圧直流電源（コレクタ電源）、ボデー・アノード電源（加速電源）、ヒータ電源、超伝導マグネット電源、コレクタコイル用マグネット電源が必要である。図2.2.47にジャイロトロンの電源単線結線図を示す。コレクタ電源は、ジャイロトロンに主電力を供給する電源であり、1台のコレクタ電源で、2本のジャイロトロンを駆動する。図2.2.48にA系のコレクタ電源の構成図を示す。その他の電源はジャイロトン1本に1台設ける。A系では6台のコレクタ電源、B系とC系では10台のコレクタ電源を設ける。A系の1台は予備である。ジャイロトロン用電源に関する機器リスト及び設置場所を表2.2.28に示す。

表2.2.28 ジャイロトロン用電源に関する機器リスト及び設置場所

番号	機器名称	設置場所	個数
1	受電用VCB盤	トランスヤード	3個
2	コレクタ電源用昇/降圧変圧器	トランスヤード	26台
3	コレクタ電源用サイリスタ制御装置	加熱電源棟	26台
4	コレクタ電源用高電圧変圧整流器	トランスヤード	26台
5	コレクタ電源用直流フィルター	加熱電源棟	26台
6	コレクタ電源用保護計測装置1	加熱電源棟	26台
7	コレクタ電源用高速スイッチ盤	加熱電源棟	26台
8	コレクタ電源用直流リアクトル	加熱電源棟	26台
9	コレクタ電源用保護計測装置2	加熱電源棟	26台
10	コレクタ電源用高速スイッチ制御盤	加熱電源棟	26台
11	コレクタ電源用高速スイッチ制御電源	加熱電源棟	26台
12	アノード・ボデー電源	RF増幅室	52台
13	ヒータ電源	RF増幅室	52台
14	超伝導マグネット電源	RF増幅室	52台
15	コレクタコイル電源	RF増幅室	52台
16	サージブロッカー	RF増幅室	52台
17	ジャイロトロンタンク	RF増幅室	52台
18	超伝導マグネット	RF増幅室	52台

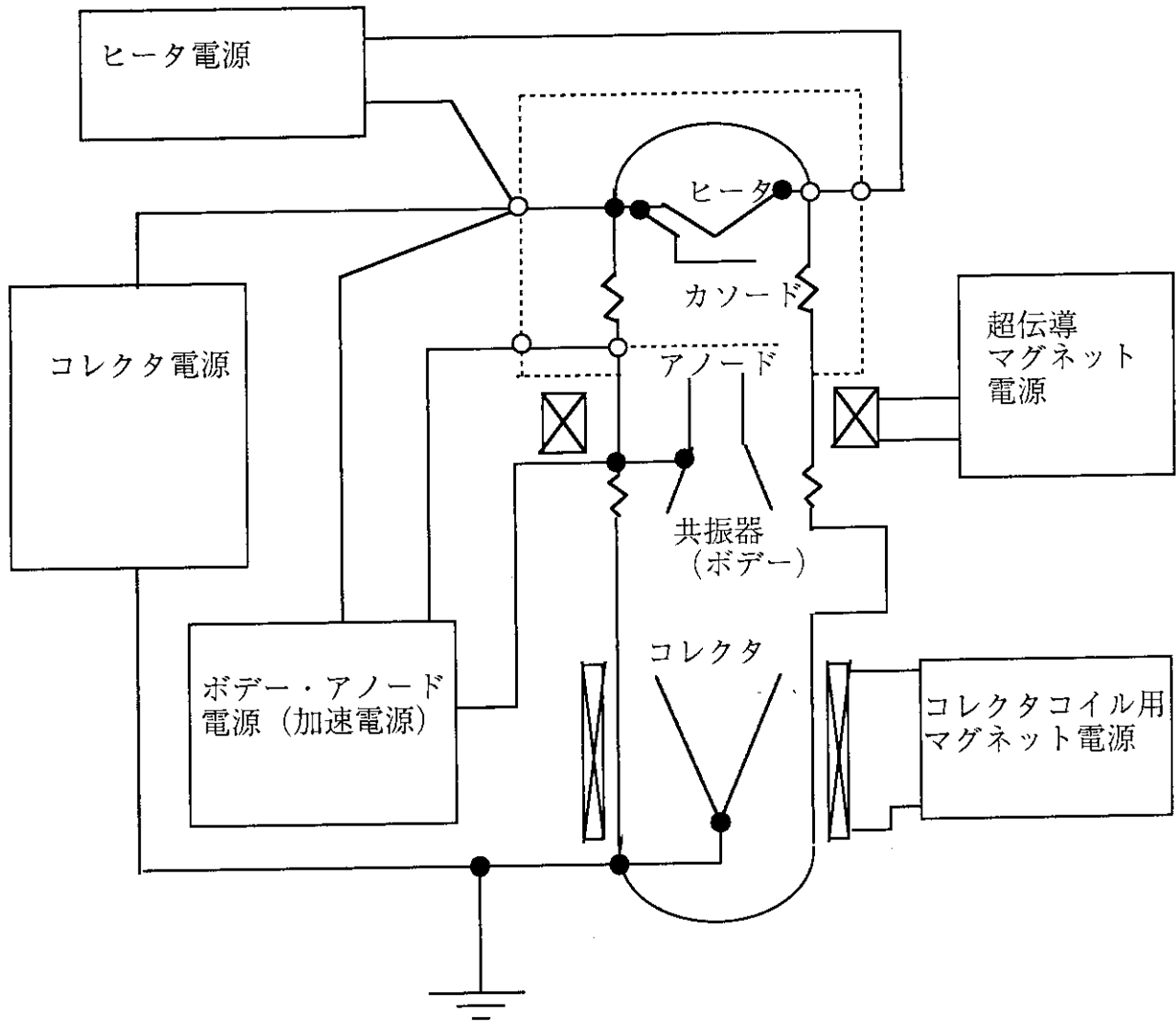


図 2.2.47 ジャイロトロン電源単線結線図

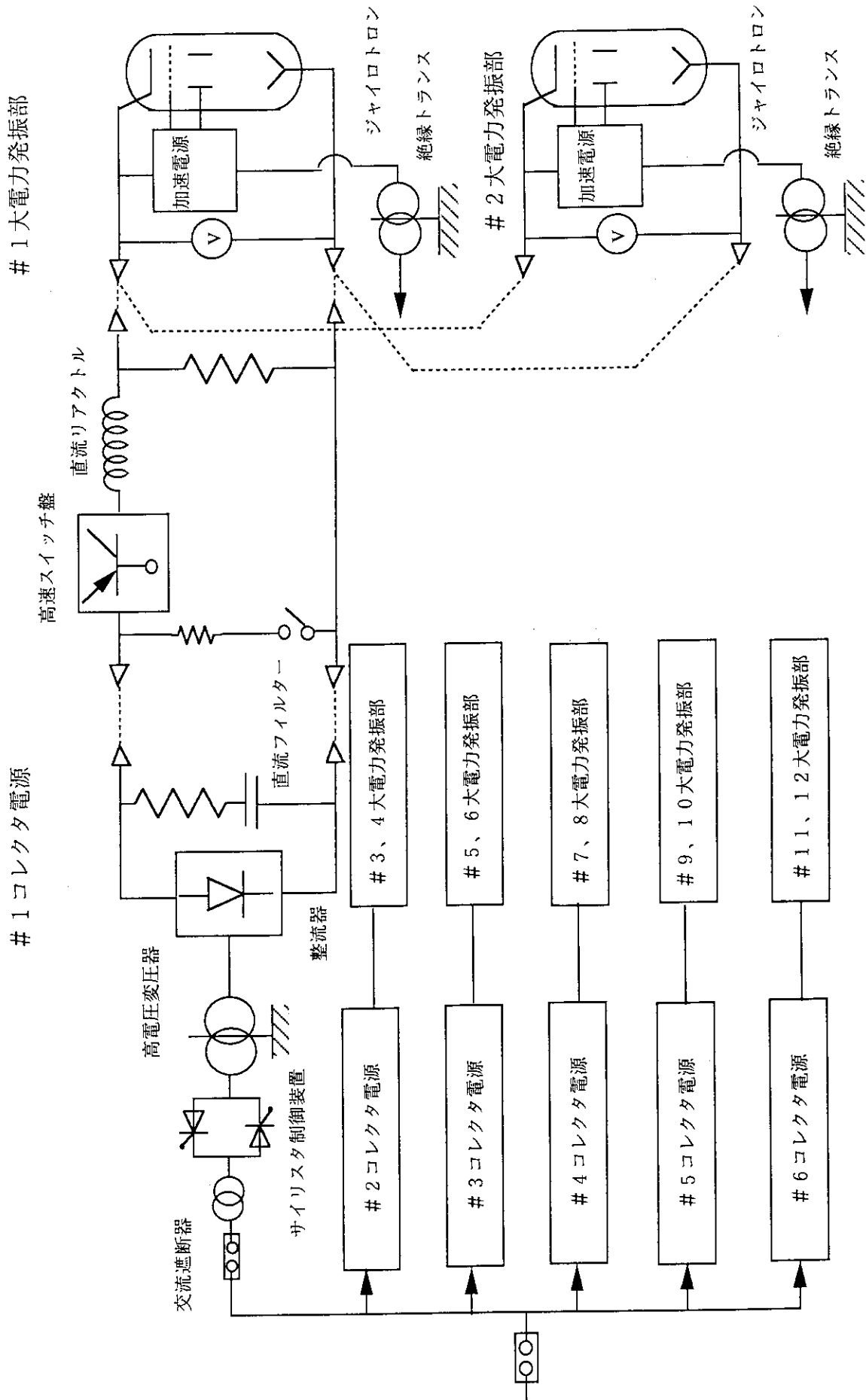


図2.2.48 A系コレクタ電源の構成図

2.2.5.2 各電源の性能及び設備容量

2.2.5.2-1 電源の要求性能

(1) コレクタ電源

1. 直流出力電圧	50~70 kV
2. 出力電流	90 A
3. 電圧安定度	商用電源効果
	定常負荷変動
	再現性
	±1.0%
	±5.0%
	±1.0%
4. ジャイロトロンへの 流入エネルギー	10 J

(2) 加速電源

1. 直流出力電圧	-50~-100 kV
2. 出力電流	0.3 A
3. 電圧安定度	商用電源効果
	定常負荷変動
	再現性
	±0.2%
	±0.5%
	±0.2

ジャイロトロンを安定にCPDモードで駆動するためには、加速電源は繊細な電圧制御が要求される。

現在、ジャイロトロンは開発中であるため、電圧や電流の立ち上げ/下げ時間等は明確ではないが、今後ジャイロトロンの試験結果から、明確にする必要がある。

2.2.5.2-2 設備容量

A系ユニットのコレクタ電源の容量は、ジャイロトロンの効率を50%として、20MW (40A × 50kV × 10本)、及びB系とC系ユニットでは、40MWとし、電源効率を96%とすると、A系のユニットの交流実効受電容量は、21MVA 及びB系とC系ユニットでは、42MVAとなる。力率の設計目標を70%にすると、3ユニット分の総交流受電容量は約150MVAである。受電は18kVの定常系から供給され、受電設備及び直流高電圧電源の直流発生装置等は加熱電源トランスヤード及び加熱電源棟に設置される。

高電圧電源部はJT-60Uの高周波加熱装置のものを流用することを基本とするともに、基本性能を満足するための各設備の増力を行う必要がある。

3. ま と め

JT-60SUのECH装置設計では、装置の主要コンポネントである大電力発振管（ジャイロトロン）の出力を1MWとして、システム設計を検討した。本設計では、本体室のトリチウム取扱の安全性及び放射線遮蔽と深く関係する本体真空容器の周辺機器であるアンテナシステムを重点的に設計検討を行った。

アンテナシステムでは、1個の斜めECポートから40MWの高周波を入射し、ポロイダル方向に9度掃引できるアンテナミラー配置を構築した。特に、本体の真空容器内に発生する中性子の遮蔽を評価し、アンテナシステム機器の放射化を検討した。SUにおける放射化の目標設計値を満足するには、放射線遮蔽の補強が必要であることを示した。高周波ビームの準光学設計を考慮して、ECポートの中性子遮蔽を補強することができることを明らかにした。これは、アンテナシステム機器の放射化を軽減し、保守・維持等の放射線作業の環境条件を著しく緩和し、放射化の目標設計値を満足するものと期待される。トリチウムの多重防護を考慮して、3重格納構造を検討した。特に、開発が進行中である真空窓の機器健全性を評価する必要がある。

伝送システムでは、1MWの伝送電力を効率よく伝送するために、真空排気された導波管とコルゲート導波管の HE_{11} モードを選択し、主要高周波部品を検討した。伝送システムのコンパクト化及び高周波部品の製作・組み立て精度の緩和を考慮すると、導波管の径が小さいほど好ましい。導波管の最小径はマイターバンドにおけるミラーの熱負荷によって決定され、ミラーの熱解析から裕度を含めて40mmの導波管径が適切であることを示した。この径の導波管中の最大電界強度は、真空度 1×10^{-2} Paにおける放電電界強度より十分小さく、安全かつ安定に1MWの電力を伝送できる。100mの伝送システムにおける伝送効率は、85%と評価され、設計仕様を満足した。

発振管は、ECH装置の最重要コンポネントであり、現在開発段階にある。170GHz、1MWのジャイロトロンの開発がITER/EDAの下で進行しており、1998年までに開発を完了する予定である。本ECH装置のジャイロロンでは、ITER用ジャイロトロンの性能を基本仕様とし、物理要件の多様性とアンテナシステムのコンパクト化を考慮して、周波数可変を仕様を含めた。今後の開発成果を期待する。

ECH装置における主電源は、ジャイロロン駆動用のコレクタ電源であり、電源容量はジャイロトロンの効率に依存する。電位降下型エネルギー回収機能をもつ、50%効率のジャイロロンでは、1本当たり、50kV直流高電圧のコレクタ電源により、40Aの電流が供給される。電位降下型エネルギー回収機能は、従来型に比較し、著しく高電圧電源の仕様を緩和した。本設計では、2本のジャイロロンを1台のコレクタ電源によって駆動し、ジャイロトロンのon-off及び管内放電時の高速電流遮断を高速スイッチによって行う。コレクタ電源の総受電容量は、70%の力率を想定して、150MVAである。

謝 辞

JT-60SUの設計研究を進めるに当たって、終始、有意義な議論、教示をいただきました炉心プラズマ研究部岸本部長、核融合装置試験部船橋部長始め、関連各室長、各室員に、また、核融合工学部RF加熱研究室室長始め、各室員に感謝致します。

また、以下の方々の設計協力のあったことを付記して、感謝の意を表します。

設計研究協力者：(株)東芝；海老沢克之、伊藤保之、小林伸次

参 考 文 献

- [1] K.W.Kopp, W.Kasperek, and E.Holzauer, Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 13(10) 1619 (1992)
- [2] J.Doane, C.P.Moeller, INT. J. ELECTRONICS, 77, 489 (1994)
- [3] W. Kasperek, Proc. 8th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and ECRH, 423-444, (1993)

3. ま と め

JT-60SUのECH装置設計では、装置の主要コンポネントである大電力発振管（ジャイロトロン）の出力を1MWとして、システム設計を検討した。本設計では、本体室のトリチウム取扱の安全性及び放射線遮蔽と深く関係する本体真空容器の周辺機器であるアンテナシステムを重点的に設計検討を行った。

アンテナシステムでは、1個の斜めECポートから40MWの高周波を入射し、ポロイダル方向に9度掃引できるアンテナミラー配置を構築した。特に、本体の真空容器内に発生する中性子の遮蔽を評価し、アンテナシステム機器の放射化を検討した。SUにおける放射化の目標設計値を満足するには、放射線遮蔽の補強が必要であることを示した。高周波ビームの準光学設計を考慮して、ECポートの中性子遮蔽を補強することができることを明らかにした。これは、アンテナシステム機器の放射化を軽減し、保守・維持等の放射線作業の環境条件を著しく緩和し、放射化の目標設計値を満足するものと期待される。トリチウムの多重防護を考慮して、3重格納構造を検討した。特に、開発が進行中である真空窓の機器健全性を評価する必要がある。

伝送システムでは、1MWの伝送電力を効率よく伝送するために、真空排気された導波管とコルゲート導波管の HE_{11} モードを選択し、主要高周波部品を検討した。伝送システムのコンパクト化及び高周波部品の製作・組み立て精度の緩和を考慮すると、導波管の径が小さいほど好ましい。導波管の最小径はマイターバンドにおけるミラーの熱負荷によって決定され、ミラーの熱解析から裕度を含めて40mmの導波管径が適切であることを示した。この径の導波管中の最大電界強度は、真空度 1×10^{-2} Paにおける放電電界強度より十分小さく、安全かつ安定に1MWの電力を伝送できる。100mの伝送システムにおける伝送効率は、85%と評価され、設計仕様を満足した。

発振管は、ECH装置の最重要コンポネントであり、現在開発段階にある。170GHz、1MWのジャイロトロンの開発がITER/EDAの下で進行しており、1998年までに開発を完了する予定である。本ECH装置のジャイロロンでは、ITER用ジャイロトロンの性能を基本仕様とし、物理要件の多様性とアンテナシステムのコンパクト化を考慮して、周波数可変を仕様を含めた。今後の開発成果を期待する。

ECH装置における主電源は、ジャイロロン駆動用のコレクタ電源であり、電源容量はジャイロトロンの効率に依存する。電位降下型エネルギー回収機能をもつ、50%効率のジャイロロンでは、1本当たり、50kV直流高電圧のコレクタ電源により、40Aの電流が供給される。電位降下型エネルギー回収機能は、従来型に比較し、著しく高電圧電源の仕様を緩和した。本設計では、2本のジャイロロンを1台のコレクタ電源によって駆動し、ジャイロトロンのon-off及び管内放電時の高速電流遮断を高速スイッチによって行う。コレクタ電源の総受電容量は、70%の力率を想定して、150MVAである。

謝 辞

JT-60SUの設計研究を進めるに当たって、終始、有意義な議論、教示をいただきました炉心プラズマ研究部岸本部長、核融合装置試験部船橋部長始め、関連各室長、各室員に、また、核融合工学部RF加熱研究室室長始め、各室員に感謝致します。

また、以下の方々の設計協力のあったことを付記して、感謝の意を表します。

設計研究協力者：(株)東芝；海老沢克之、伊藤保之、小林伸次

参 考 文 献

- [1] K.W.Kopp, W.Kasperek, and E.Holzauer, Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 13(10) 1619 (1992)
- [2] J.Doane, C.P.Moeller, INT. J. ELECTRONICS, 77, 489 (1994)
- [3] W. Kasperek, Proc. 8th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and ECRH, 423-444, (1993)

3. ま と め

JT-60SUのECH装置設計では、装置の主要コンポネントである大電力発振管（ジャイロトロン）の出力を1MWとして、システム設計を検討した。本設計では、本体室のトリチウム取扱の安全性及び放射線遮蔽と深く関係する本体真空容器の周辺機器であるアンテナシステムを重点的に設計検討を行った。

アンテナシステムでは、1個の斜めECポートから40MWの高周波を入射し、ポロイダル方向に9度掃引できるアンテナミラー配置を構築した。特に、本体の真空容器内に発生する中性子の遮蔽を評価し、アンテナシステム機器の放射化を検討した。SUにおける放射化の目標設計値を満足するには、放射線遮蔽の補強が必要であることを示した。高周波ビームの準光学設計を考慮して、ECポートの中性子遮蔽を補強することができることを明らかにした。これは、アンテナシステム機器の放射化を軽減し、保守・維持等の放射線作業の環境条件を著しく緩和し、放射化の目標設計値を満足するものと期待される。トリチウムの多重防護を考慮して、3重格納構造を検討した。特に、開発が進行中である真空窓の機器健全性を評価する必要がある。

伝送システムでは、1MWの伝送電力を効率よく伝送するために、真空排気された導波管とコルゲート導波管の HE_{11} モードを選択し、主要高周波部品を検討した。伝送システムのコンパクト化及び高周波部品の製作・組み立て精度の緩和を考慮すると、導波管の径が小さいほど好ましい。導波管の最小径はマイターバンドにおけるミラーの熱負荷によって決定され、ミラーの熱解析から裕度を含めて40mmの導波管径が適切であることを示した。この径の導波管中の最大電界強度は、真空度 1×10^{-2} Paにおける放電電界強度より十分小さく、安全かつ安定に1MWの電力を伝送できる。100mの伝送システムにおける伝送効率は、85%と評価され、設計仕様を満足した。

発振管は、ECH装置の最重要コンポネントであり、現在開発段階にある。170GHz、1MWのジャイロトロンの開発がITER/EDAの下で進行しており、1998年までに開発を完了する予定である。本ECH装置のジャイロロンでは、ITER用ジャイロトロンの性能を基本仕様とし、物理要件の多様性とアンテナシステムのコンパクト化を考慮して、周波数可変を仕様を含めた。今後の開発成果を期待する。

ECH装置における主電源は、ジャイロロン駆動用のコレクタ電源であり、電源容量はジャイロトロンの効率に依存する。電位降下型エネルギー回収機能をもつ、50%効率のジャイロロンでは、1本当たり、50kV直流高電圧のコレクタ電源により、40Aの電流が供給される。電位降下型エネルギー回収機能は、従来型に比較し、著しく高電圧電源の仕様を緩和した。本設計では、2本のジャイロロンを1台のコレクタ電源によって駆動し、ジャイロロンのon-off及び管内放電時の高速電流遮断を高速スイッチによって行う。コレクタ電源の総受電容量は、70%の力率を想定して、150MVAである。

謝 辞

JT-60SUの設計研究を進めるに当たって、終始、有意義な議論、教示をいただきました炉心プラズマ研究部岸本部長、核融合装置試験部船橋部長始め、関連各室長、各室員に、また、核融合工学部RF加熱研究室室長始め、各室員に感謝致します。

また、以下の方々の設計協力のあったことを付記して、感謝の意を表します。

設計研究協力者：(株)東芝；海老沢克之、伊藤保之、小林伸次

参 考 文 献

- [1] K.W.Kopp, W.Kasperek, and E.Holzauer, Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 13(10) 1619 (1992)
- [2] J.Doane, C.P.Moeller, INT. J. ELECTRONICS, 77, 489 (1994)
- [3] W. Kasperek, Proc. 8th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and ECRH, 423-444, (1993)