

JAERI-Tech  
2003-047



JP0350380



## JT-60U 電子サイクロトロン加熱装置の 伝送系システム

2003年6月

横倉 賢治・平内 慎一・柴山 実・池田 佳隆  
森山 伸一・篠崎 信一・佐藤 文明・春日井 敦

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領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, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

## JT-60U電子サイクロトロン加熱装置の伝送系システム

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

横倉 賢治・平内 慎一・柴山 実\*・池田 佳隆<sup>+1</sup>

森山 伸一・篠崎 信一・佐藤 文明\*・春日井 敦<sup>+2</sup>

(2003年 2月13日 受理)

本報告書は、JT-60U 電子サイクロトロン加熱（ECH）装置の伝送系システムについて述べたものである。本装置は周波数 110GHz を使用した、MW 級の伝送系システムであり、基本設計、システム性能と特徴、建設での作業と過程、運転経験から建設に反映された改善について記述した。

本伝送系では1系統あたり 1.2MW、4 秒の大電力伝送を実証し、伝送損失は基本設計と同等である 20~25%を得た。

---

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

+1 原研・機構統合準備室

+2 核融合工学部

\* 業務協力員：日本アドバンストテクノロジー（株）

## Transmission System in JT-60U Electron Cyclotron Heating System

Kenji YOKOKURA, Shinichi HIRANAI, Minoru SHIBAYAMA\*, Yoshitaka IKEDA<sup>+1</sup>  
Shinichi MORIYAMA, Shinichi SHINOZAKI, Humiaki SATOH\* and Atushi KASUGAI<sup>+2</sup>

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

(Received February 13, 2003)

This report represents a MW-class RF transmission system at 110 GHz in JT-60U electron cyclotron heating system. Its basic design, performances, features, construction experiences, and improvements fed-back from the operation experiences are described. The transmission system has successfully demonstrated high power long pulse operation, e.g., 1.2MW for 4s with 20 ~ 25% of low transmission loss which agrees with the designed value.

Keywords: JT-60U, ECH, RF, Transmission System

+1 Preparations Office for JAERI-JNC

+2 Department of Fusion Engineering Research

\* Cooperative Staff : Nippon Advanced Technology Co.,Ltd

## 目次

1.	はじめに	1
2.	伝送システムの概要	1
3.	伝送システムの基本検討	4
3.1	目標性能	4
3.2	伝送経路	5
3.3	伝送路の伝送損失	6
3.4	伝送路の真空度分布	17
4.	構成機器の特徴と性能	18
4.1	整合器	21
4.2	DCブレーカー	22
4.3	ダミーロード	23
4.4	コルゲート直線導波管	30
4.5	マイターベンド	31
4.6	偏波変換器	31
4.7	真空排気用ステーション	32
4.8	R Fゲートバルブ	33
4.9	ダイヤモンドディスク真空窓	33
4.10	アーク検出器	35
4.11	コルゲートテーパー導波管	35
4.12	導波管切換器	35
4.13	方向性結合器	36
5.	建設での実際と改善	36
5.1	導波管の支持とアライメント方法	37
5.2	伝送路での放電防止対策と漏水対策	39
5.3	偏波測定の実際	42
5.4	伝送系の電気絶縁と接地系	46
5.5	機器配置と据付作業	46
6.	まとめ	57
	謝辞	57
	参考文献	58

## Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Transmission System	1
3. Basic Design of Transmission Line System	4
3.1 Target Specifications	4
3.2 Layout of Transmission line	5
3.3 Transmission Loss	6
3.4 Vacuum Pressure Distribution	17
4. Specifications and Features of Components	18
4.1 Matching Optics Unit	21
4.2 DC Break	22
4.3 Dummy Load	23
4.4 Straight Corrugated Waveguide	30
4.5 Miter Bend	31
4.6 Polarizer	31
4.7 Vacuum Pumping Station	32
4.8 RF Gate Valve	33
4.9 Diamond Vacuum Window	33
4.10 Arc Detector	35
4.11 Corrugated Taper Waveguide	35
4.12 Waveguide Switch	35
4.13 Directional Coupler	36
5. Experiences and Improvements in Construction and Operation	36
5.1 Support and Alinement of Waveguides	37
5.2 Protections for Arcing and Water Leakage	39
5.3 Polarization Measurement	42
5.4 Electrical Insulation and Earthing	46
5.5 Layout and Installation of Components	46
6. Summary	57
Acknowledgments	57
References	58

## 1. はじめに

電子サイクロトロン加熱（ECH）装置は、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安定に維持するための装置である。

日本原子力研究所では、ECH 装置に使用する 100GHz 帯域、MW 級で長パルス運転が行える大電力発振管であるジャイロトロンの開発を行ってきた。これまでに多くの改良を重ね、現在では 1MW、5 秒の発振に成功している。さらに定常運転に向けてデーターの取得、解析を進めている。

JT-60U ではこのジャイロトロンを用いて、110GHz の電子サイクロトロン波を用いたプラズマ高性能実験に着手するため、ECH 装置の建設を開始した。1998 年度に 1 系統を設置し、順次 1999 年度に 2 系統、2000 年度に 1 系統を建設し、現在合計 4 系統が稼働している。大電力、長パルスの ECH 装置はまだ開発途上にあり、多くの機器はいくつかの改良を経て信頼性の高い装置として変化を続けている。JT-60UECH 装置でも運転経験を経て、各機器の問題点を検討、再開発し、改良しながら順次系統を建設した。

本報告では ECH 装置の伝送系システムについて、基本設計、システム性能と特徴、建設での据付け作業の実際、建設過程、運転経験からの改造そして建設に反映された内容について述べる。

## 2. 伝送システムの概要

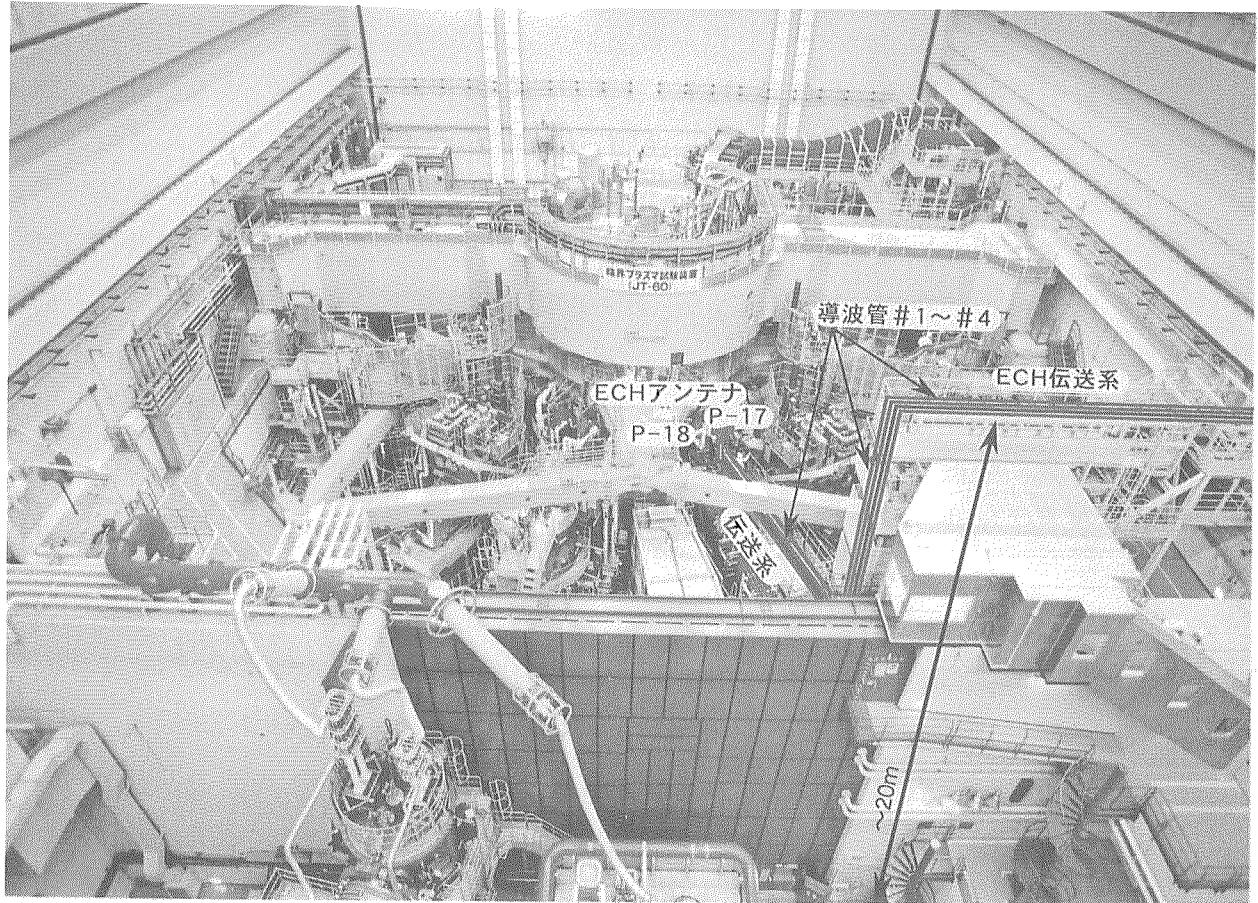
本伝送システムは、低損失で周波数 110GHz、MW 級の高周波を伝送する大電力伝送システムである。ジャイロトロンで発生させた大電力高周波を、JT-60U 実験棟 4F の R F 増幅室から JT-60U 本体室の、JT-60U 真空容器ポート P-17,18 の斜上ポートのアンテナまで、大電力高周波を低損失で伝送する機能を有する。伝送距離は約 50~60m であり、耐電力性能に優れ、低損失である条件を満たす約 20 種類になる高周波伝送機器と長さ 2 m 以下の真空コルゲート導波管を複数組み合わせてシステムを構成する。

JT-60UECH 装置は 4 つの系統（# 1、# 2、# 3、# 4）からなり、ジャイロトロンから発振する高周波電力は、単管当たり約 1MW で、合計 4 MW である。伝送システムでの損失を考慮すると、約 3MW の大電力高周

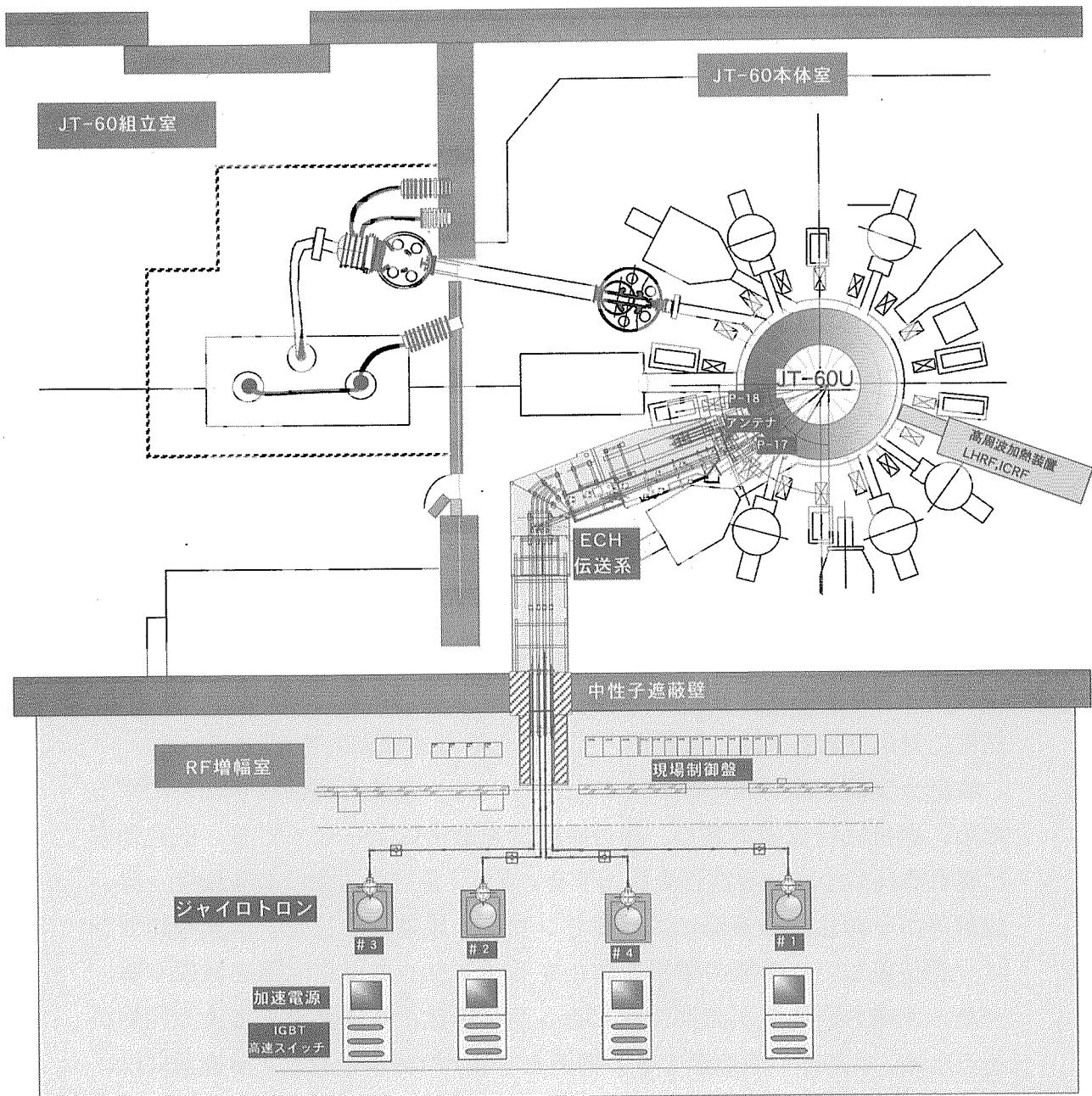
波電力を JT-60U プラズマに入射する。

各ユニットはアンテナ結合系、伝送系、大電力発振系、直流高圧電源系、真空排気設備を主体とする放電防止系、冷却水系、制御系から構成される。

第 1 図に JT-60U 本体室における ECH 装置の伝送系を示した写真を示す。また、第 2 図に ECH 装置の伝送系機器配置概要を示す。



第 1 図 JT-60 本体室における ECH 装置の伝送系



第2図 ECH装置の伝送系機器配置概要

### 3. 伝送システムの基本検討

伝送システムでは、高周波発振源であるジャイロトロンから出力された大電力の高周波電力を、プラズマ入射用アンテナまで、低損失で伝送出来るシステムを構築することが重要である。そのためには、システムを構成する伝送機器は、低伝送損失、高耐熱強度、低放出ガス、高耐放電であることが要求される。また、伝送系を構成する機器にはそれぞれの役割（詳細は 4.構成機器の特徴と性能の項で述べる）がある。低損失、高耐電力でありながら、高周波電力を計測する機能やプラズマ実験に応じた最適な偏波を制御する機能、高周波ビームを任意の方向へ変化させる機能、発振管のエージングや高周波電力測定に使用する模擬負荷としての機能、放電を検知して発振を停止させる機能等、種々の機能が求められる。

現在、ジャイロトロンは高電力、定常化を目指して、開発の段階にある。JT-60UECH 設備で実用化しているジャイロトロンの性能は、現在のところ 1MW-5 秒及び 1.2MW-4 秒で、今後ジャイロトロンは、より高性能になることが予想される。そこで JT-60UECH 伝送系では、ジャイロトロンの高性能化に対応できる、柔軟な構成とすることを基本原則とする。

核融合実験装置特有の制約されたスペースへの機器据付けを容易にするため、据付け自由度が高く、据付け精度を厳密にとらなくても、伝送効率に優れる径の小さい導波管を採用する。また、長パルス化による温度上昇、放電等が予測される機器には温度センサー、放電音センサー、放電光センサーを装着して、機器の破損を防止するインターロック回路を装備する。また、大電力高周波が直接作用するミラー等は、高周波損失による発熱があるため、水冷却で除熱ができる構造とする。冷却水を通水する機器には、漏水センサーを装備して、万一の漏水を迅速に検知する。

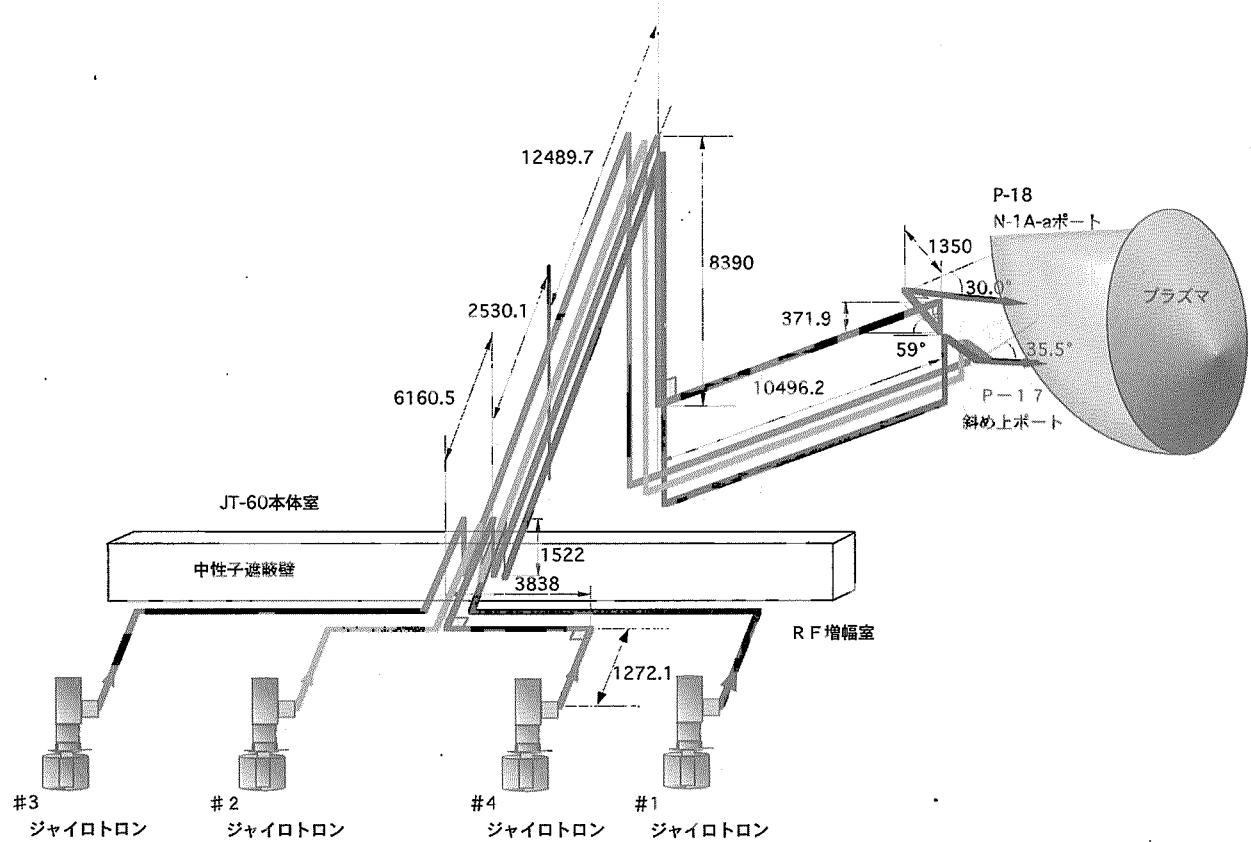
#### 3.1 目標性能

目標とする伝送電力は 110GHz、1 MW、5 秒以上であるが、伝送機器のうち必要なものを水冷却が可能な構造とすることで、特定の定常運転にも

対応可能とする。伝送損失は発振管からアンテナまでの伝送路で 20%以下を目標とする。伝送方式は真空コルゲート導波管の HE<sub>11</sub> モードとし、導波管据付け目標精度は 1mm / 10m とする。プラズマ実験目的に応じて偏波制御を実施する。また、高周波電力計測機能を発振管出力およびアンテナ入力に設ける。発振管の調整、エージングのために伝送路を任意に切換える機能を付加した模擬負荷（ダミーロード）を設置する。導波管内真空度は  $10^2$  Pa 以下を維持できるものとし、導波管等の接合部の真空リーク量は  $1.3 \times 10^{-10}$  Pa m<sup>3</sup> / sec 以下とする。導波管の放出ガス量はエージングが進んだ理想的な状態で  $4 \times 10^{-9}$  Pa m<sup>3</sup> / sec m<sup>2</sup> 以下を目標とする。

### 3.2 伝送経路

第3図に伝送経路の鳥瞰図を示す。



第3図 伝送経路の鳥瞰図

伝送経路は、実験棟4FのRF増幅室に設置するジャイロトロンからJT-60U本体真空容器ポートのP-17、P-18斜上ポートまでであり、できる限り短距離でバンドの数が少ないことが望ましい。詳細検討の結果、本体室P-18用LHRF伝送系、結合系架台を利用して、上部にECH用の架台を増設して伝送経路を確保することにした。

伝送路の伝送機器は、高周波ビームが90度方向に転換するバンド（マイターベンド、方向性結合器、偏波変換器、アーク検出器）が9箇所（#4系統の場合）とコルゲート直線導波管で構成する。伝送経路の中間地点、JT-60U本体室とRF増幅室の間には中性子を遮蔽する貫通壁があり、ここでは2個のバンドを使用して、L字を組み合わせた伝送路形状をしている。

建設時の総伝送距離は、ジャイロトロン-整合器-DCブレーク端からアンテナ側の最終バンドまで、#1系統：～56082mm、#2系統：～48995mm、#3系統：～53997mm、#4系統：～48680mmである。

### 3.3 伝送路の伝送損失

#### 3.3.1 直線導波管の伝送損失

伝送路を構成する高周波機器は、それぞれの役割を持つ伝送機器で構成される。導波管は、導波管断面において中心部分に伝送エネルギーが集中するHE11モードを適用した、真空排気コルゲート円形導波管を採用した。

モード変換損失は、導波管内径が小さいほど軽減できるが、導波管内径が小さいと、内部の最大高周波電界が大きくなり高周波放電が発生しやすくなる欠点がある。これに対して導波管内径が大きくなると、広帯域で高い伝送効率が得られるが、導波管の直進性や導波管間を接合する時に生じる据付け精度に対して敏感になり、結果的に損失を増加させる懸念がある。

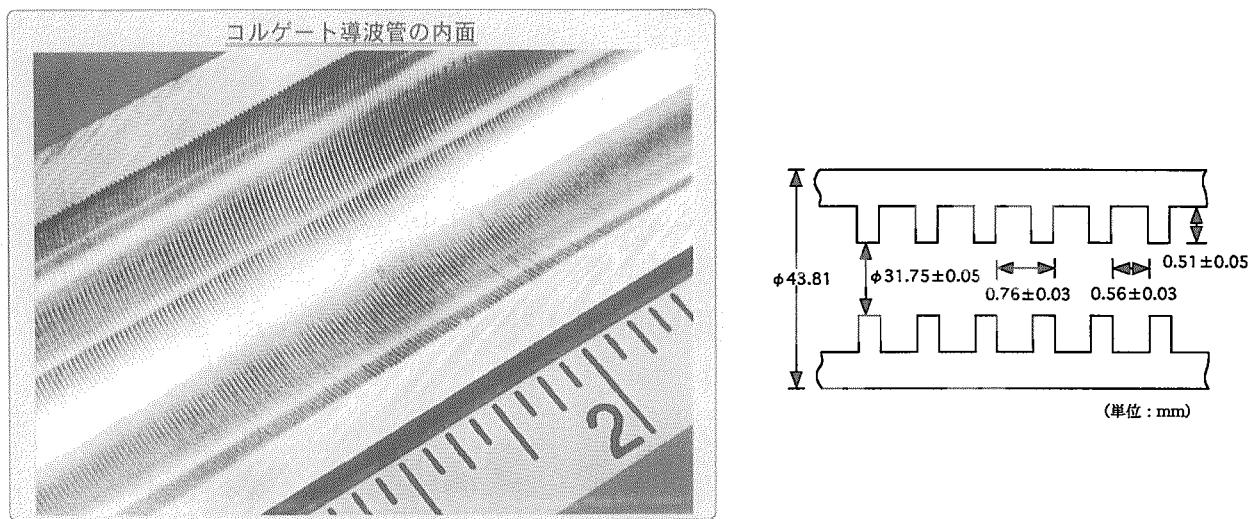
これらの特性から本装置では、伝送路の多く（敷設距離が長く高低差もあり、敷設スペースが狭い場所）は小口径（Φ31.75mm）の導波管とし、アンテナ近傍の比較的直線性が得られる数メートルについては、より大口径（Φ60.3mm）の導波管とした。理由として、アンテナ周辺のスペース等の空間的制約から、プラズマに高周波ビームを有効に入射するためには、

アンテナミラーの配置や形状を適切にする必要があり、導波管径を大きくして、アンテナに進入する高周波ビーム径を太くした。また、導波管径が大きい程、導波管内部での最大高周波電界が小さくなり、高周波放電の危険性が小さくなる利点もある。

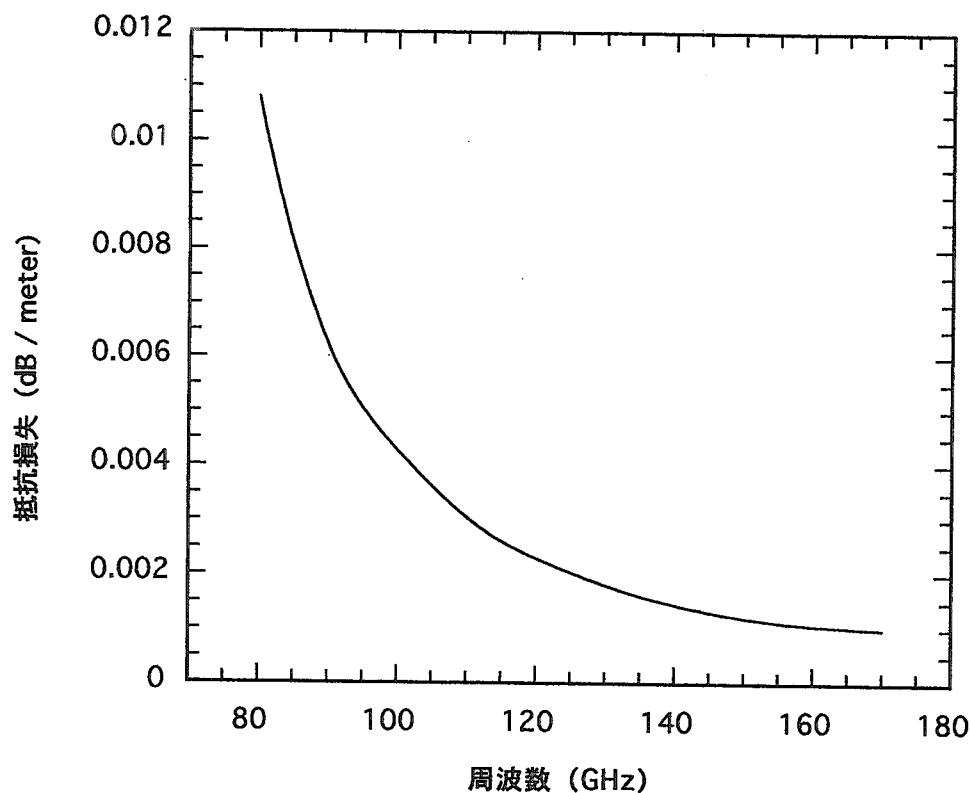
導波管の材質は距離が長く、径が小さい  $\phi 31.75\text{mm}$  の導波管では、高周波の表面抵抗に係わる電気伝導度が  $3.5 \times 10^7$  ( $1 / \Omega \text{m}$ ) と良好なアルミニウムを使用した。また、距離が短く、径が大きく、トカマク真空容器に近接した場所では、ベーキング温度が高いことなども考慮して、電気伝導度  $1.4 \times 10^6$  ( $1 / \Omega \text{m}$ ) は劣るが、強度に優れたステンレススチールを使用した。

第4図に JT-60UECH 設備で採用した  $\phi 31.75\text{mm}$  導波管内面のコルゲート寸法と導波管内部構造写真を示す。また、採用したコルゲート導波管の周波数に対する抵抗損失特性<sup>[3]</sup>を第5図に示す。

採用したコルゲート導波管の抵抗損失特性から、本設備における伝送系での  $\phi 31.75\text{mm}$  導波管による伝送損失は、伝送距離を 48~56mとした場合 3.3~3.9% 見込まれる。



第4図 JT-60ECH設備で採用した  $\phi 31.75\text{mm}$  導波管内面のコルゲート寸法と導波管内部構造



第5図 採用したコルゲート導波管の周波数に対する抵抗損失特性

### 3.3.2 敷設精度による伝送損失

#### (1) 軸傾斜

第6図に導波管径  $\phi 31.75\text{mm}$  と  $\phi 60.3\text{mm}$  のコルゲート導波管を使用した場合の軸傾斜角に対するモード変換損失を示す。

HE11 コルゲート導波管伝送損失評価式<sup>[1][2]</sup> 軸傾斜を  $\delta$  (rad) とした場合のモード変換損失評価式 (%) は、

$$2.2 (\delta \cdot a / \lambda)^2 \times 100 \% \quad [a: \text{導波管半径 mm}, \lambda: \text{波長 mm}]$$

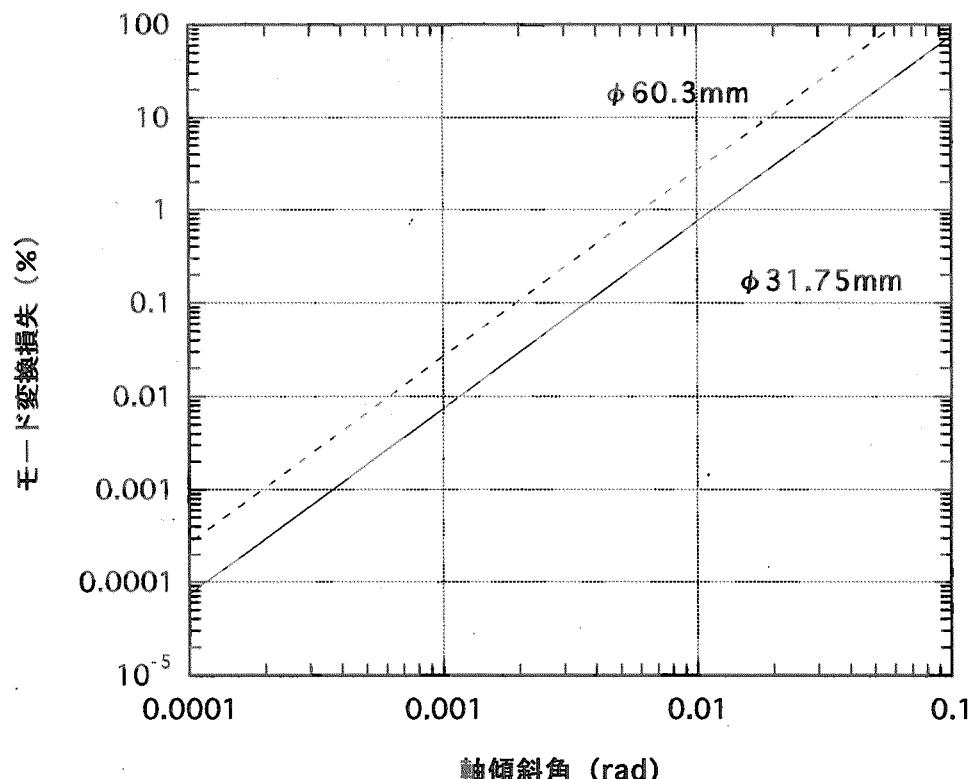
で表される。

建設時の軸傾斜据付け精度は直線部で  $1\text{mm} / 10\text{m}$  で規定して据付けを実施した。計算から  $\phi 31.75\text{mm}$  の導波管では、 $1\text{mm} / 10\text{m}$  で据付けできれば  $0.0001\%$  以下の損失で問題にならない。しかし実際の現場では、作業性の著しく悪い中性子遮蔽壁内等での敷設作業があり、この精度を維持するこ

とはなかなか難しいのが現状であった。一部にある作業性の悪い場所の敷設精度は、最悪でも軸傾斜角  $10\text{mm} / 10\text{m}$  以内は確保するとして作業実施している。

本設備では、据付け精度の軸傾斜誤差から生じるモード変換損失を軽減できる、小口径の導波管を選択しているが、この導波管の場合、導波管の内面をコルゲートに加工する機械的制限から、限られた長さ（2 m 以内）の導波管を組み合わせて、敷設している。これらの接合箇所は、構造的に軸傾斜は極めて発生しにくい構造（第7図参照）であるが、接合箇所は、1系統で50箇所以上になることから、大きな応力がかかった場合のみ、真空漏れや傾斜角度が変化する可能性がある。

敷設作業は、レーザー光とアライメント治具を用いて精度を確認しながら、伝送機器と各接続箇所の調整と敷設を繰り返し実施した。敷設作業方法の実際は「5.1 導波管の支持とアライメント方法」で述べる。

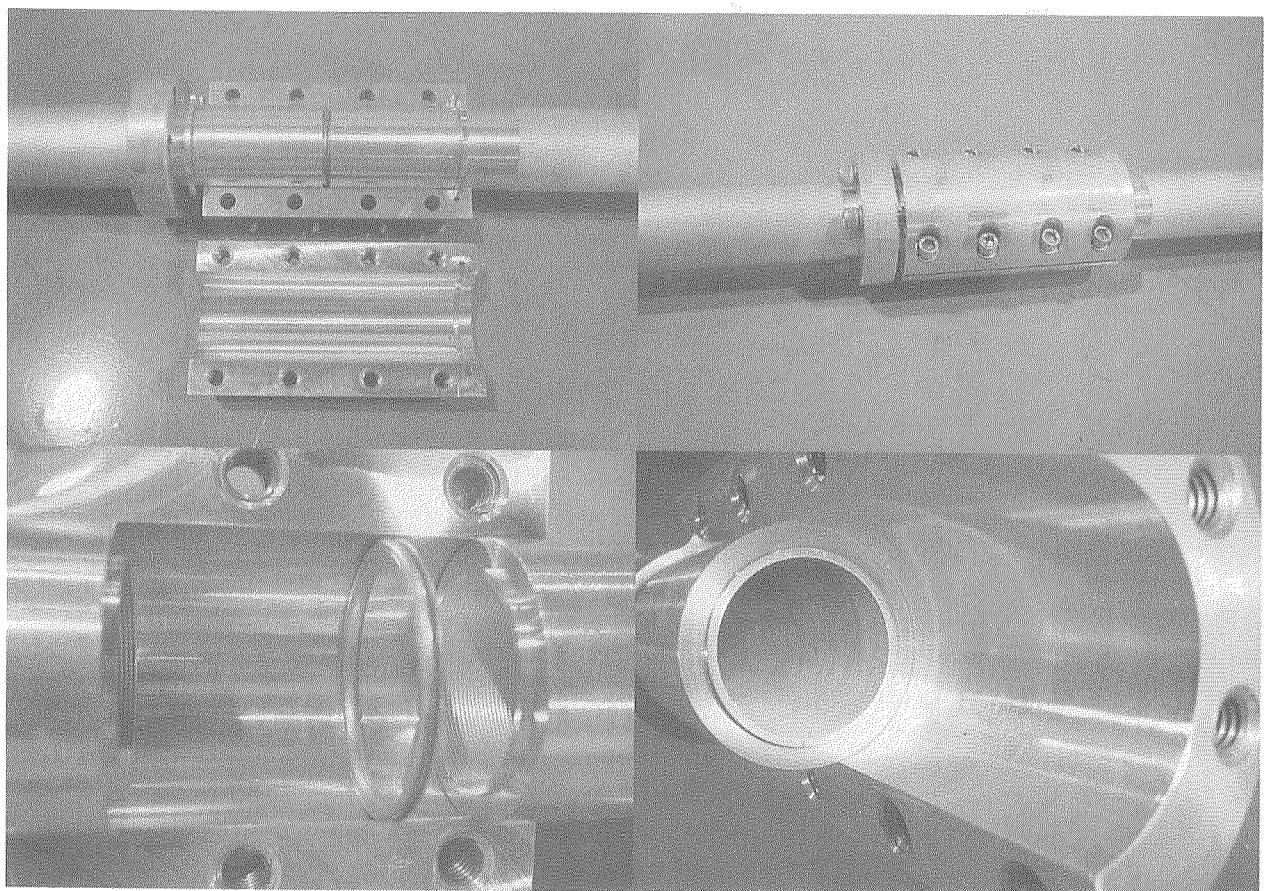


第6図 導波管径  $\phi 31.75\text{mm}$  と  $\phi 60.3\text{mm}$  のコルゲート導波管を使用した場合の軸傾斜角に対するモード変換損失

## (2) 軸ずれ

前述した軸傾斜でも触れたが、本設備で使用した導波管の接合場所は、カップリングと称するアルミニウム製の長さ約 137.5mm、 $\phi 75\text{mm}$  の半円柱製の金物で導波管を包み込むように、8 本のボルトで固定する。同時に軸方向は 4 本のボルトで締めつけ、メタルガスケットで真空シールを行う構造である。

第 7 図に実際の導波管の接合部の構造写真を示すが、軸ずれの発生は極めて生じにくい構造である。



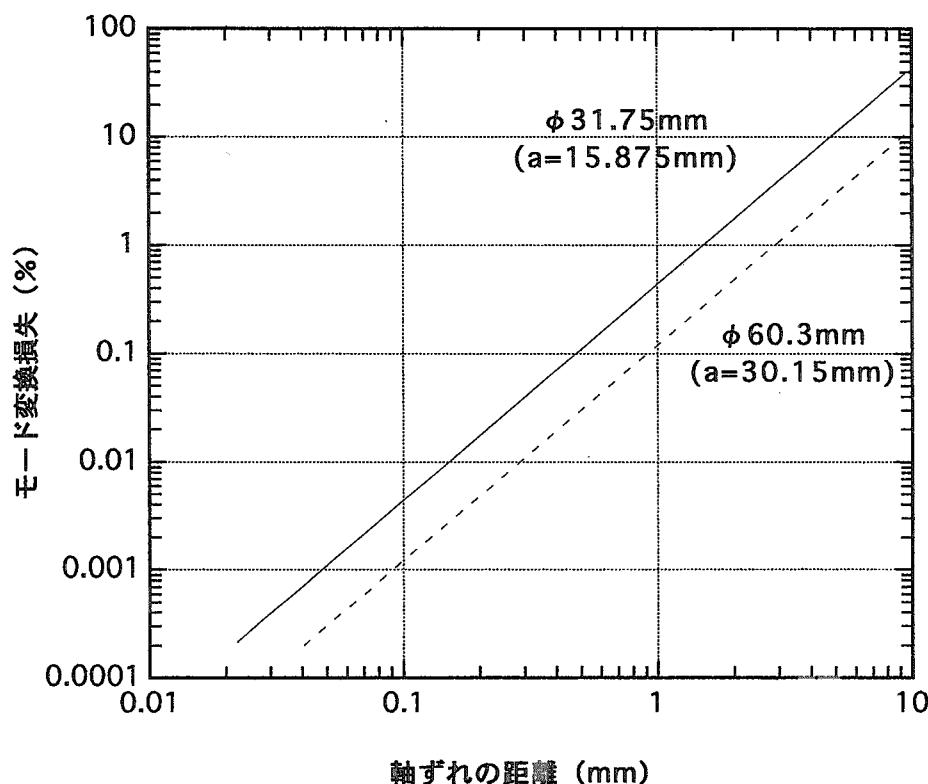
第 7 図 導波管接合部の構造

第8図に導波管径  $\phi 31.75\text{mm}$  と  $\phi 60.3\text{mm}$  を使用した場合の軸ずれの距離に対するモード変換損失を示す。HE11 コルゲート導波管伝送損失評価式<sup>[1] [2]</sup> 軸ずれの距離を  $\Delta$  (mm) とした場合のモード変換損失評価式 (%) は

$$1.1 (\Delta / a)^2 \times 100 \text{ (%)} \quad [a: \text{導波管半径 mm}]$$

で表される。

前述した導波管継手構造のため、軸ずれが発生することは極めてまれであると考えられるが、ボルトの緩み等（ボルトの緩みが発生すると真空リークにより発見されるので非現実的な事象であるが）による 0.1~0.2 mm の軸ずれが発生したとしても  $\leq 0.01\%$  程度の伝送損失であることが判る。



第8図 導波管径  $\phi 31.75\text{mm}$  と  $\phi 60.3\text{mm}$  を使用した場合の  
軸ずれの距離に対するモード変換損失

### 3.3.3 伝送機器固有の損失

#### (1) ギャップ

伝送機器で伝送路にギャップが存在する機器には、RF 真空ゲートバルブ、ダイヤモンド真空窓、真空排気用ステーション（ギャップ型）、DC ブレーク、マイターベンド、導波管切換器がある。代表的な導波管ギャップが生じる伝送系機器にトカマク真空容器と導波管真空領域を隔離する真空ゲートバルブがある。

第9図に導波管径  $\phi 31.75\text{mm}$  と  $\phi 60.3\text{mm}$  を使用した場合の導波管ギャップの距離に対するモード変換損失を示す。HE11 コルゲート導波管伝送損失評価式<sup>[1] [2]</sup> ギャップの距離を  $d$  (mm) とした場合のモード変換損失評価式 (%) は、

$$0.11 (d \cdot \lambda / a^2)^{1.5} \times 100 (\%) \quad [a: \text{導波管半径 mm}, \lambda: \text{波長 mm}]$$

で表される。

ギャップでの損失は導波管径が大きい程損失は小さいことも考慮し、本設備では内径  $\phi 60.3\text{mm}$  の特殊ゲートバルブを開発した。一般の真空ゲートバルブは、バルブの厚みで導波管ギャップが生じ、最小の厚みの真空ゲートバルブを選択しても、真空フランジ間で約 75mm のギャップが生じる。

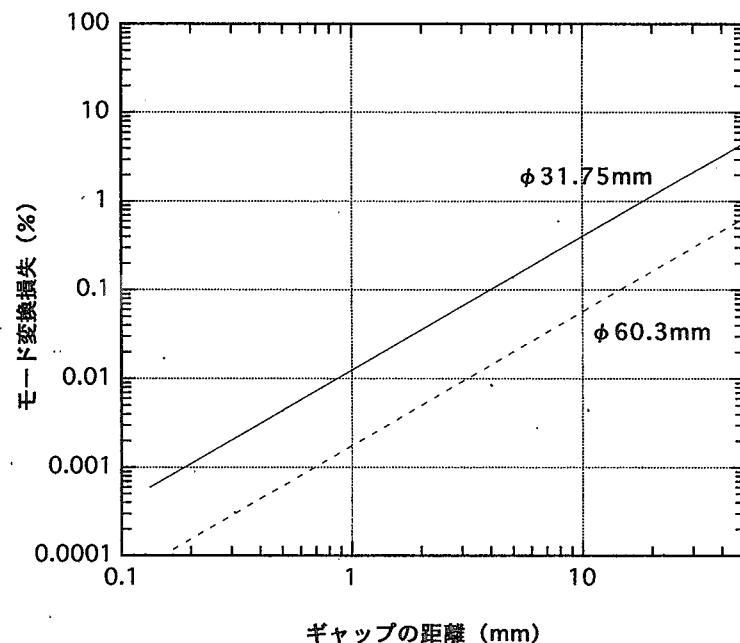
本設備では、ゲートバルブの真空シール用プレートが可動するスペースに内径  $\phi 60.3\text{mm}$ 、長さ 34.2 mm のコルゲート加工した円形リングを配置し、ゲートバルブフランジ内にコルゲート導波管を挿入することで、導波管ギャップを 39.2mm から 4.5 mm まで短縮する特殊バルブである。真空封止時にはコルゲート加工した円形リングは、バルブの下側に収納され、通常のメタルシール真空ゲートバルブとなる。

高周波伝送時のゲートバルブ内構造図を第10図に示す。本ゲートバルブの開発により、伝送損失は約 0.4% から約 0.02% にまで減少した。

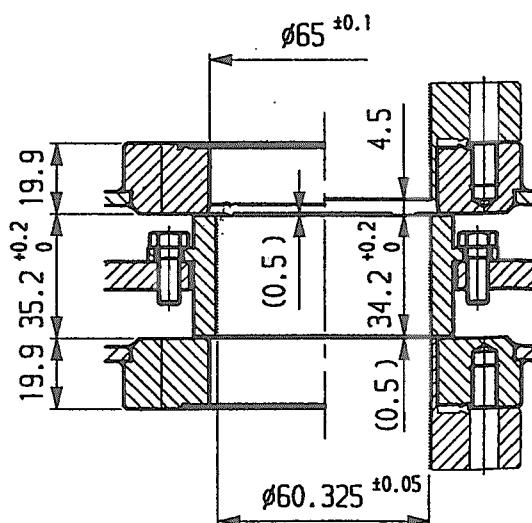
その他の導波管ギャップが生じる伝送機器として、導波管径  $\phi 31.75\text{mm}$  と  $\phi 60.3\text{mm}$  を使用した 2 種類のダイヤモンド真空窓を製作した。2 種類の真空窓を製作した理由には、取付場所のスペースの制約と、径を小さく

することによりコストを下げるこつがあった。より高周波電力密度や伝送損失の点で有利な  $\phi 60.3\text{mm}$  と高コストパフォーマンスの  $\phi 31.75\text{mm}$  2種類の真空窓を取付場所の状況に応じて設置している。

真空窓の導波管ギャップ長は約 4.5mm でギャップから生じるモード変換損失は  $\phi 31.75\text{mm}$  で約 0.12%、 $\phi 60.3\text{mm}$  で約 0.017%である。



第9図 導波管径  $\phi 31.75\text{mm}$  と  $\phi 60.3\text{mm}$  を使用した場合の導波管ギャップの距離に対するモード変換損失



第10図 高周波伝送時のゲートバルブ内構造

## (2) マイターベンド

マイターベンド ( $\phi 31.75\text{mm}$ ) の伝送損失はモード変換損失とミラーの表面抵抗によるが、ミラーの表面抵抗損失はおおよそ銅のミラー部で 0.1% 程度である。一方、HE11 モードにおけるモード変換損失は、平面ミラーの場合約 1.3% であるが、位相補正ミラーにすることにより、約 0.9% に減らすことができた。したがって、マイターベンドでの伝送損失は約 1% 程度になると見積もられる。

### 3.3.4 伝送総損失の評価

伝送系を構成する代表的な高周波機器の中で、損失が考えられる機器は以下の通りであり、第 11 図に伝送路と高周波伝送機器の予想される伝送損失をまとめた。各機器における伝送損失は、4 項構成機器の特徴と性能でも述べ、本設備における伝送損失を総合すると約 20% になる。

#### (1) 整合器

整合器内のミラー調整の精度により、損失は変化するが理想的に調整した場合を仮定する。

設置数 : 1

損失 :  $\sim 6\%$

#### (2) 導波管

各系統により、導波管敷設長が異なる。

敷設距離 :  $\phi 31.75\text{ mm}$   $48\sim 56\text{ m}$

$\phi 60.3\text{ mm}$   $\sim 1.5\text{m}$

損失 : 最長系統で  $\sim 4\%$

#### (3) マイターベンド

設置数 : 4

損失 :  $\sim 1\%/\text{個}$  合計  $\sim 4\%$

(4) 方向性結合器

設置数：2

損失： $\sim 1\%$ /個 合計 $\sim 2\%$

(5) 偏波変換器

設置数：2

損失： $\sim 1.3\%$ /個 合計 $\sim 2.6\%$

(6) 導波管切換器

設置数：2 (#4)、1 (#1～3)

損失：プラズマ方向 $\sim 0.01\%$ 、ダミー方向 $\sim 1\%$

      プラズマ方向合計 0.01～0.02%

(7) 真空排気ステーション

設置数：2 (#4 ギャップ型)、1 (#1～3 スリット型)

損失：ギャップ型 $\sim 0.01\%$ 、スリット型 $\sim 0.03\%$

      合計 0.02～0.03%

(8) RF 真空ゲートバルブ

設置数：1

損失： $\sim 0.02\%$

(9) ダイヤモンドディスク真空窓

設置数：1 (#1、#4 ディスク径  $\phi 106\text{mm}$ )、

      1 (#2、#3 ディスク径  $\phi 65\text{mm}$ )

損失：#1、#4 $\sim 0.017\%$ 、#2、#3 $\sim 0.12\%$

(10) アーク検出器

設置数：1

損失： $\sim 1\%$

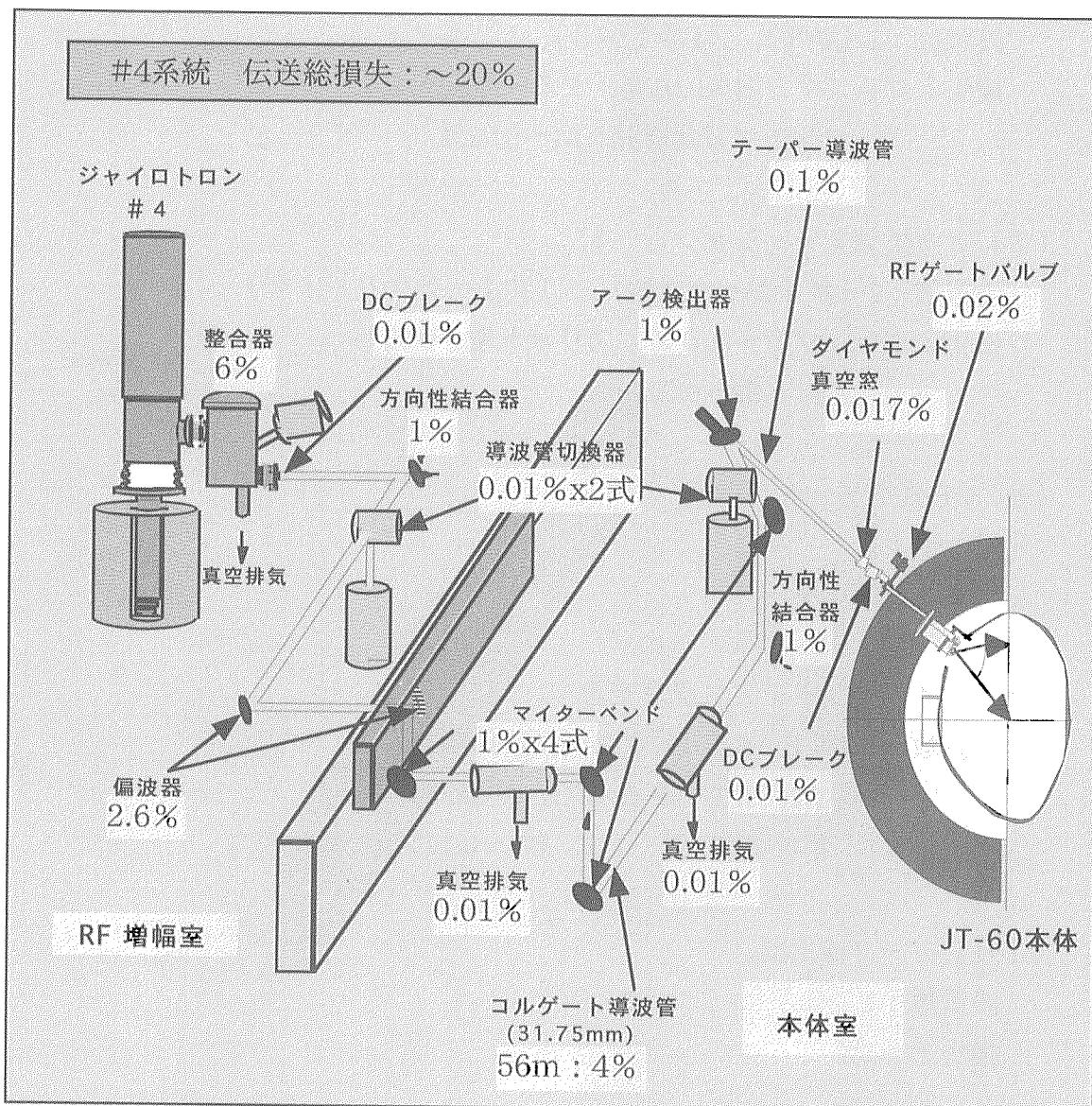
(11) DC ブレーク

設置数：2

損失： $\sim 0.01\%$  合計 $\sim 0.02\%$ 

## (12) テーパー導波管

設置数：1

損失： $\sim 0.1\%$ 

第11図 伝送系で予想される総伝送損失

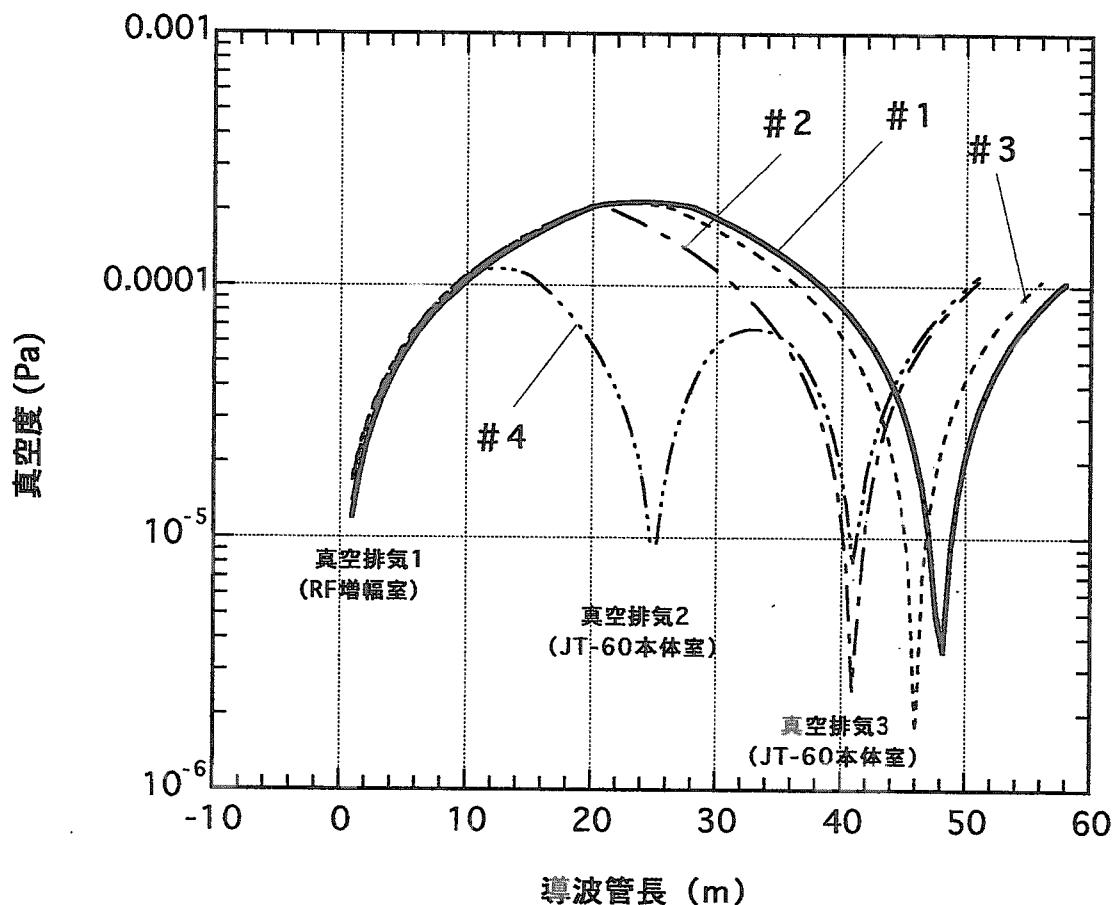
### 3.4 伝送路の真空度分布

伝送系のコルゲート導波管内は、高周波伝送時の放電を防止するために、高真空 ( $10^2 \sim 10^3$  Pa) に排気している。導波管は RF 増幅室から中性子遮蔽壁を通り、JT-60U 本体の真空容器ポートまで接続されている。導波管の長さは系統により異なり、ジャイロトロン側の整合器から JT-60U 本体アンテナ側のダイヤモンド真空窓まで約 50~60m の長さである。導波管内を常に  $10^{-2}$  Pa 以下に保つために、真空排気ポンプ(ターボモレキュラーポンプ：公称排気速度 200 l / s) を RF 増幅室側と JT-60U 本体室側の 2 力所に設置している。導波管の内径は  $\phi 31.8\text{mm}$  のため排気コンダクタンスが小さいので、数ヶ所から排気することが望ましいが、初期の建設段階では費用削減のため、伝送路に 2 力所、模擬負荷(ダミーロード)部に 1 箇所の真空排気とした。

第 1 2 図に導波管内からの放出ガスが理想的に小さい場合 ( $4 \times 10^{-9}$  Pa m<sup>3</sup> / sec m<sup>2</sup>) に、直線コルゲート導波管を仮定した、真空度分布予測を示す。# 1 から # 3 系統は 2 箇所、# 4 系統は 3 箇所からの真空排気である。

真空度分布予測では  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  Pa 台で推移するが、実際の系では伝送系機器が 1 系統に 20 箇所以上、導波管の接続箇所を含めると 1 系統で 50 箇所となる。機器の中にはジャイロトロンのエージング等で高周波ビームを打ち込んで、冷却水で除熱するダミーロードや体積が大きく、放出ガスも大きい整合器等も含まれる。また、導波管接続箇所からの真空リークの発生への対応やジャイロトロンの交換作業、整合器内での高周波ビームの調整等で繰り返し大気開放操作が実施されることが多く、理想的な真空を維持することは、なかなか難しい環境である。

実際の運転経験から、真空排気部での真空度は  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  Pa 台を推移することが多く、導波管内で最も真空度の上昇する場所で、条件の悪い場合は  $10^{-3}$  Pa 台後半まで上昇すると推定する。今後、長パルス大電力伝送化により、ますます伝送系内での放電防止対策が必要とされることから、2000 年度に建設した # 4 系統では、伝送路の 20~30m 付近に真空排気ポンプを増設して、3 台の真空ポンプとダミーロード部に 1 台の真空ポンプを追加している。



第12図 導波管内からの放出ガスが理想的に小さい場合 ( $4 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3/\text{sec m}^2$ ) に、直線コルゲート導波管を仮定した、真空度分布予測

#### 4. 構成機器の特徴と性能

伝送機器の主な共通機器性能を以下に示す。

- ・伝送モード : HE11
- ・モード変換損失 :  $\leq 1.0\%$
- ・抵抗損失 :  $\leq 1.0\%$
- ・最大高周波電力 : 1MW
- ・最長パルス幅 : 5.0秒
- ・最短パルス間隔時間 : 1/55

- ・最高ベーキング温度 : 150 °C
- ・真空リーク量 :  $1.3 \times 10^{-10}$  Pa m<sup>3</sup>/sec 以下
- ・周波数 : 110GHz
- ・ミラー材質 : 分散強化銅

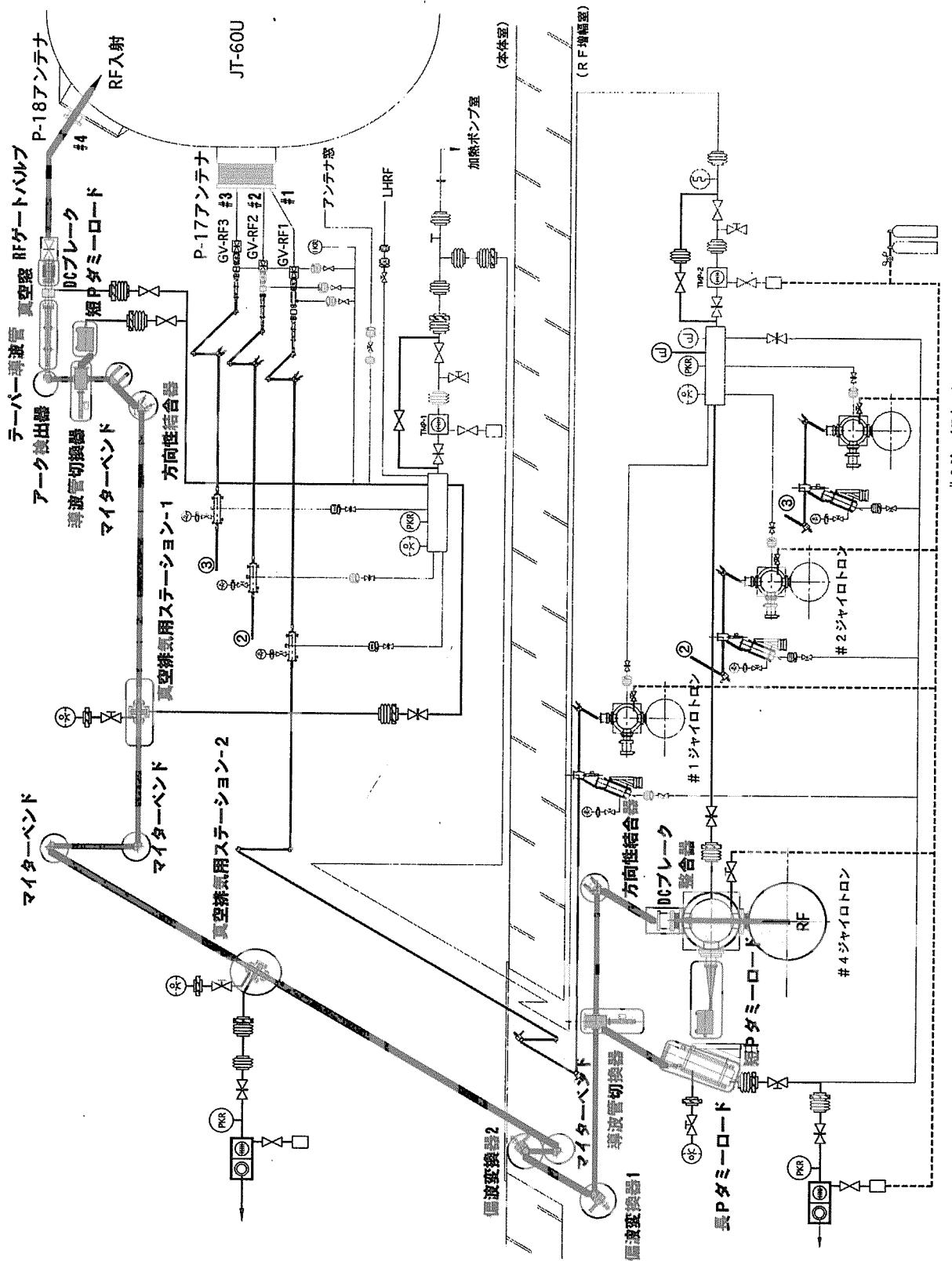
ジャイロトロンで発振された高周波ビームが、アンテナへ到達する伝送路では、それぞれの役割を持つ伝送機器で構成されている。

第13図に本設備の伝送機器構成図を示す。

まず、ジャイロトロンで発生した大電力高周波ビーム ( $\leq \phi 80\text{mm}$ ) は、整合器に入り、 $\phi 31.75\text{mm}$  のコルゲート導波管に導くために、2枚のミラーを使用して高周波分布を整形し、導波管に適合した高周波電界分布 ( $\leq \phi 30\text{mm}$ ) に整合される。

導波管と整合器の間には、ジャイロトロン電位と伝送系を電気的に絶縁するアルミナでできた DC ブレーク、ジャイロトロンから出力された高周波電力やアンテナに伝送する高周波電力を、熱的に測定する役割を持つパルスダミーロードがある。また、ジャイロトロン近くとアンテナ近くには、高周波ビームを直角に方向転換し、入反射高周波電力をモニターができる方向性結合器、高周波ビームをアンテナ方向とダミーロード方向に切換えることができる導波管切換器がある。

高周波ビームは、2台で対になった偏波変換器、高周波シールドしながら導波管内を真空排氣ができる真空排氣用ステーション、JT-60U 真空容器領域と伝送系の真空領域を隔離するダイヤモンドディスクでできた真空窓、この真空窓の放電を監視するアーク検出器、導波管径を  $\phi 31.8\text{mm}$  から  $\phi 60.3\text{mm}$  に変換するテーパー導波管、JT-60U 真空容器電位と伝送系電位を電気的に絶縁する DC ブレーク、開状態では、導波管間のギャップを埋めるために、可動式のコルゲート導波管が付いた RF 全金属真空ゲートバルブを通過してアンテナへ導かれる。



第13図 ECH設備の伝送機器構成図

#### 4.1 整合器

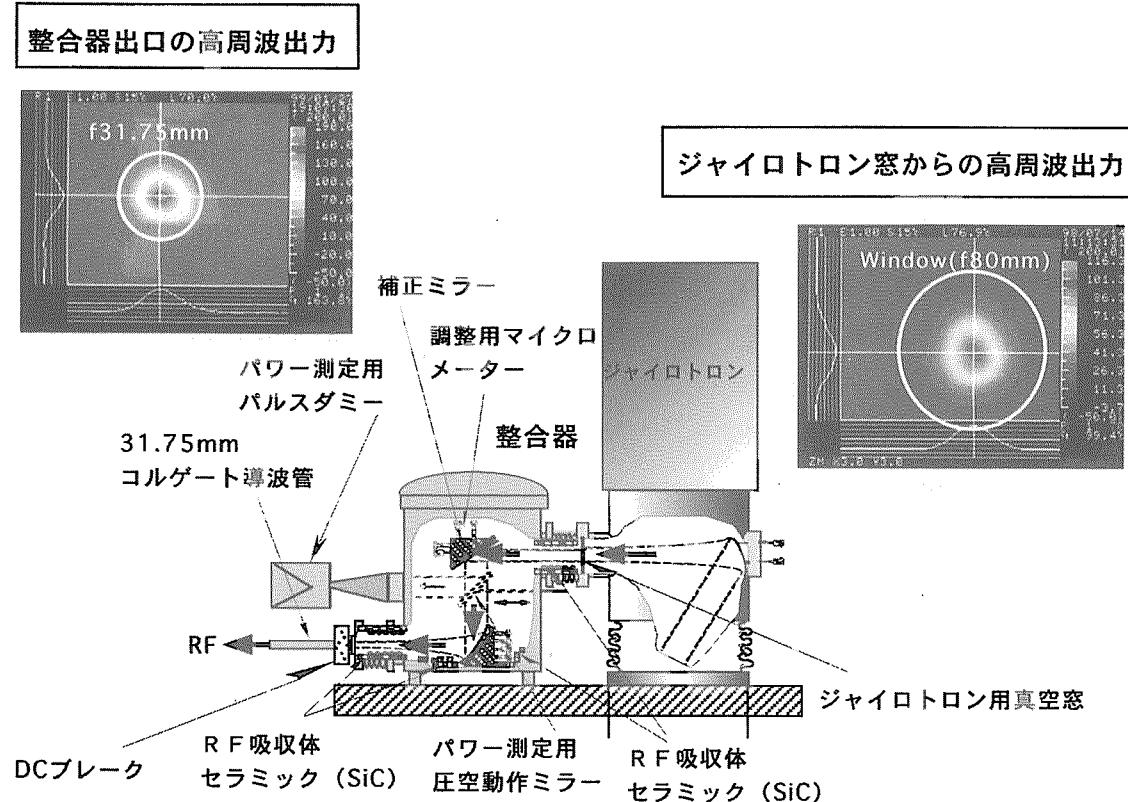
ジャイロトロンで発生した大電力高周波ビーム ( $\leq \phi 80\text{mm}$ ) を低損失コルゲート導波管に導くために、2枚のミラーを使用して高周波分布を整形し、導波管側に対応した高周波電界分布 ( $\leq \phi 30\text{mm}$ ) に整合する役目を担うのが整合器である。高周波ビームの導波管に対する入射角度と位置を正すために、2枚のミラーの位置、傾きを厳密に調整する。この作業は、高周波ビームを最適なモードで導波管側へ伝送したり、整合器内での損失をできるだけ低減したりする上で重要なもので、以後のパワーアップ、長パルス化の限界性能に、大きくかかわることになる。

整合器の内部には、3枚目の駆動ミラーがあり、ジャイロトロンからの高周波電力を測定するために、高周波ビームの方向を  $90^\circ$  変化させ、電力測定用パルスダミーロードへ導く。定常状態でこのミラーは、高周波ビームの通過位置から外れた場所にあるが、高周波電力測定時に圧縮空気によりビーム通過位置に挿入される。

整合器の高周波入口と出口には、整合器内で発生した不要モードやコルゲート導波管に結合されなかった高周波成分を吸収するために、炭化珪素セラミック製のリングを設置している。1998年に製作した#1系統ではこの炭化珪素セラミックのかわりに、テフロンチューブに冷却水を通して、不要高周波成分を吸収していた。真空領域でもある整合器内への冷却水テフロンチューブの挿入は、真空リークや水漏れの危険が大きいため、#2系統から炭化珪素セラミックを用いる方式に改良した。

整合器内で発生した放電を防止するために、運転での経験を生かして改良した場所には、さきほど述べた高周波吸収体の変更の他、高周波ビームを導く  $\phi 31.75\text{mm}$  のコルゲート導波管周辺部がある。整合器内の不要高周波の一部が導波管外に散乱して、周辺のベローズやセラミック DC ブレークを破損させたことがあり、これらの部品への高周波散乱を防止する遮蔽板の設置やセラミック吸収体で保護する処置を実施している。

第14図に整合器の内部構造図と整合器入口と出口における、高周波ビーム分布の赤外温度計画像を示す。



第14図 整合器の内部構造図と整合器入口と出口における、高周波ビーム分布の赤外温度計画像

#### 4.2 DC ブレーク

##### 4.2.1 JT-60U 真空容器電位との電気絶縁

セラミック DC ブレークは 2 種類の構造のものを使用している。ひとつはトカマク真空容器電位との電気絶縁に使用しているもので、内径  $\phi$  60.3mm の RF ゲートバルブと、真空窓との間に挿入しているものである。取り合いは規格の ICF-114 フランジで、アルミナメタライズ管内にコルゲ

ート導波管を挿入して、導波管ギャップにより電気絶縁する構造である。DC ブレークの導波管間のギャップ長は約 3.8mm であり、HE11 モードにおけるモード変換損失は約 0.01%、耐電圧性能は約 5KV である。また、導波管間のギャップからの高周波漏れは、1MW が伝送される時におおよそ 100W であり、セラミックを通して放出される。

#### 4.2.2 ジャイロトロン発振管電位との電気絶縁

もう 1 箇所のセラミック DC ブレークは、整合器と導波管の間に挿入し、ジャイロトロン発振管電位との電気絶縁に使用している。JT-60U 真空容器電位とのセラミック DC ブレークと異なり、導波管の片端は整合器内真空中に挿入されており、またもう片端はセラミック DC ブレークを介して、整合器と電気的に絶縁されており、真空封止を兼ねた構造である。

ジャイロトロンで発振された高周波ビームは、整合器のミラーで整形し、 $\phi 31.75\text{mm}$  のコルゲート導波管に適合した HE11 モードの高周波ビームとして、導波管の中心軸に沿って伝送される。ここで、ビームの軸がずれていた場合、DC ブレーク側に高周波ビームが回り込み、構造上セラミックを破損することが懸念された。運転を重ねる中で、実際にセラミックの割れを経験したことから、DC ブレーク側に高周波が回り込まないように、整合器と導波管電位の空間距離を最小限に狭めた高周波シールドを取り付ける改良を行った。

### 4.3 ダミーロード

JT-60U 高周波加熱装置で使用しているダミーロードは、大きくわけて以下の 3 種類である。

- ・大電力、連続入射を許容できる導波管型 1MW-CW ダミーロード
- ・大電力、5 秒連続入射を許容できるタンク型 1MW-5sec ダミーロード
- ・ジャイロトロンの調整、パワー計測用として使用する短パルスダミーロード (1MW-50~200msec)

#### 4.3.1 導波管型 1MW-CW ダミーロード

この導波管型ダミーロードは 31.75mm の導波管内部に溝の深さを変えたコルゲート形状を設けて高周波ロスを増加させ、伝送電力の約 75%を冷却水で熱吸収する構造である。導波管型ダミーの出口には吸収できなかった伝送電力約 25%を吸収するタンク型のダミーロードを付属させる。このダミーロードはプラズマへ入射するのと同等の大電力長パルスの条件で、ジャイロトロンの調整、エージングに活用できることが大きな特徴である。また、タンク型のダミーロードと複合して使用することにより、ジャイロトロン側への反射電力が非常に小さいという長所を持つ。

この導波管型 1MW-CW ダミーロードの材質は、マイターベンドのミラーに使用されている分散強化銅（300°Cにおいて熱伝導率 3.3W/cm-K）と同じで、非常に熱サイクルに対して強く、冷却水での除熱に適した良好な熱伝導性能を有する。導波管の内部は表面抵抗と高周波吸収を増すために、薄いニッケルメッキ（～ $\mu\text{m}$ ）が施されている。

高周波電力 1MW を連続で入射した場合の導波管ダミーロードの内部では、冷却水温度：20°C、冷却水流量：4 liters / sec の条件でおおよそ 230°C（最高部）に上昇する。高温度でも高強度を維持出来る分散強化銅を使用しているため、この温度上昇に対しても構造上の不具合は発生しない。運転中の温度モニターとして、導波管ダミーロードの外筒から 2.5mm 内部に熱電対を挿入し、3 力所について温度計測を実施している。

##### （1）高周波性能

- 周波数：108～112GHz
- 高周波モード： $\text{HE}_{11}$
- 入射電力：1MW-CW /  $10^2\text{Pa}$
- 吸収電力  $\text{HE}_{11}$ ：67～80%
- 総反射電力：～1%

##### （2）機械性能

- ・ダミー導波管材質：分散強化銅
- ・冷却水ジャケット：304ステンレス鋼
- ・ダミー導波管内径：31.75mm
- ・ダミー導波管長さ：1880 mm
- ・最大許容真空度： $10^{-1}$  Pa

### (3) 冷却水系性能

- ・運転時冷却水温度：15～35°C
- ・最大入口圧力：1.2 Mpa
- ・必要流量：4 l/s
- ・入口/出口の圧力差：525 kPa
- ・冷却水配管径：25 mm

#### 4.3.2 タンク型 1MW-5sec ダミーロード

このダミーロードは、円柱の形状をした長さ約 1500mm、直径約 500φ のタンク型ダミーロードで、円柱の端部から斜め方向より入射した高周波が、内部で反射を繰り返すことにより、一様に拡がらせ、抵抗損失により 95% の高周波電力を熱に変え、冷却水で除熱する構造のものである。ダミーロードの下部には真空排気用のポートがあり、1 MW 入射時の高周波もれが、0.1W 以下となるように、小さな穴を数多く開けた高周波シールドが取り付けてある。高周波シールドは、できるだけ排気コンダクタンスを大きくとる構造としてあるが、真空ポートを通して、高周波が漏れ出さない制約により、排気コンダクタンスは約 6 l/s である。

このタンク型 1MW-5sec ダミーロードは、反射電力が約 5 % あり、これがジャイロトロン側に逆戻りすること、また冷却水が接していない真空ポートの温度上昇が大きく、冷却されるまでの時間が長い欠点がある。これらの欠点を把握した上で決めた運転条件を厳守することが必要である。

このタンク型 1MW-5sec ダミーロードにおいて高周波電力～1MW 約 3 秒入射で、真空ポートの高周波シールドが溶融した事例がある。この問題を解決するため、排気コンダクタンスを犠牲にして、高周波シールドの厚み

を増し、熱容量を大きくする改良を行った。改良型高周波シールドは、真空排気ポートのコンフラットフランジのエッジを利用して、真空シールと高周波シールドを両立させる方式で、無酸素銅製円板（厚さ 4~6mm）に  $\phi 1\text{mm}$  の穴を 213 個開けた真空ガスケットを兼用した高周波シールドとした。

#### (1) 高周波性能

- ・周波数：100~180GHz
- ・高周波モード： $\text{HE}_{11}$
- ・入射電力：1MW-5sec /  $10^{-1}\text{Pa}$
- ・吸収電力  $\text{HE}_{11}$ ：～95%
- ・総反射電力：～5%
- ・真空ポートからの高周波漏れ：～10 mW (110GHz)
- ・真空排気ポートの排気コンダクタンス：6 l/s

#### (2) 機械性能

- ・材質：インコネル、304 ステンレス鋼
- ・導波管内径：31.75mm
- ・最大許容真空度： $10^{-1}\text{ Pa}$

#### (3) 冷却系性能

- ・運転時温度：15~35°C
- ・最大入口圧力：550 kpa
- ・必要流量：40 l/min
- ・入口/出口の圧力差：210 kPa

### 4.3.3 パルスダミーロード

#### (1) 1MW-50msec ダミーロード

このダミーロードは、1MW-50msec 仕様のダミーロードでジャイロトロ

ンのパラメーター調整や、ジャイロトロンから出力される高周波電力の計測、プラズマへ入射する高周波電力の計測等に使用されるもので、アルミニウム製のコーンと炭化珪素セラミック製の円筒と冷却水流路で構成される。

入射した高周波ビームはアルミニウムのコーンにより反射され、コーンと状炭化珪素セラミック円筒表面で反射を繰り返しながら、最終的には炭化珪素セラミックに吸収される。その炭化珪素セラミックの外側を流れる冷却水により除熱される。

このタイプのダミーロードは、炭化珪素セラミックと直接冷却水が接しているため、なんらかの原因で過大な高周波エネルギーが加わった場合に、炭化珪素セラミックが破損して、冷却水が導波管内に漏れ出す危険がある。実際にジャイロトロンの調整中(500KW-40msec)に、炭化珪素セラミックにひび割れが発生して、冷却水が導波管内に漏れた経験がある。高周波ビームの入射軸のずれにより、アルミのコーンの中心を外れた高周波ビームが、ある方向の一部に集中して、セラミックの破損が生じたことがひび割れの原因であると推定された。このような高周波ビームの軸ずれを防止するには、セッティング時の慎重なビーム調整が必要である。

## (2) 1MW-200msec パルスダミーロード

このダミーロードは 1MW-200msec 仕様の小型のダミーロードで、1MW-50msec パルスダミーロードで経験した問題点を改善した構造である。

長さ約 620mm、直径約  $\phi$ 325mm の円柱型のダミーロードで、タンク型ダミーロードと類似した構造である。高周波を円柱端部斜め方向より入射し、内部で反射を繰り返させることにより高周波を吸収、冷却水により除熱する。主構成材料はアルミニウムで、高周波が直接あたる内表面には、高周波をより吸収しやすくするために、炭化チタンをコーティングしている。反射電力は約 1% で小さい。

1MW-50msec パルスダミーロードと比較し、冷却水が流れる部分が金属材料で隔離される構造のため、破断して冷却水が導波管内に漏れ出すような不具合は極めて発生しにくい。

第1・5図に JT-60U 真空容器近傍に据付けた 1MW-200msec 用パルスダミーロードと高周波伝送経路、伝送系周辺機器配置の写真を示す。

高周波電力計測は、冷却水の流量と温度変化を冷却水の出入り口で計測することにより、入熱量を求める方式である。

a) 高周波性能

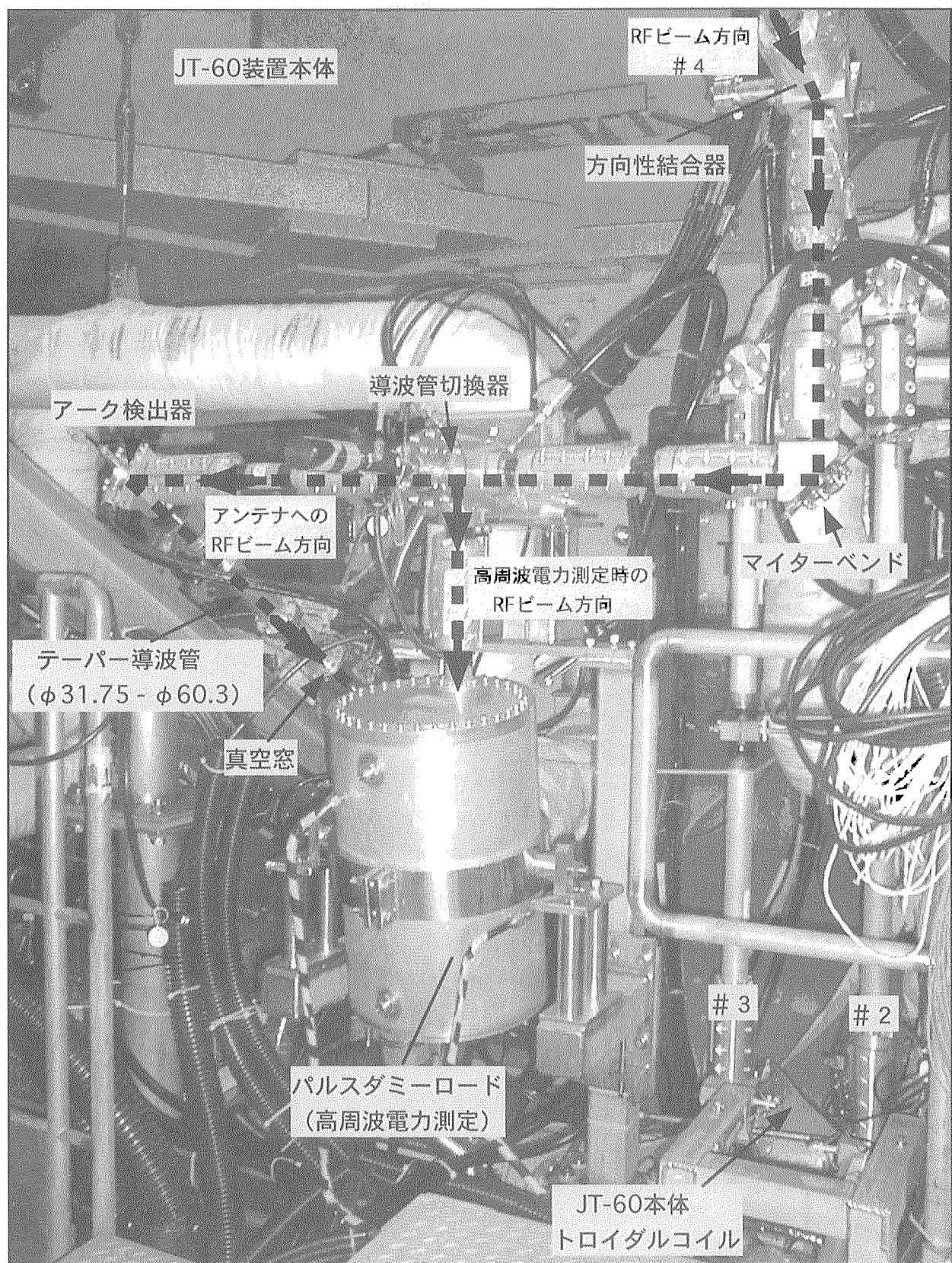
- ・周波数：100～120GHz
- ・入射電力：1MW-200msec /  $10^{-1}$ Pa
- ・総反射電力： $\sim 1\%$

b) 機械性能

- ・ダミーロード材質：アルミニウム
- ・ダミー導波管内径：31.75mm
- ・最大許容真空度： $10^{-1}$  Pa
- ・外形：620mm x 325mm  $\phi$
- ・重量：32 kg

c) 冷却系性能

- ・運転時温度：15～35°C
- ・最大入口圧力：500 kPa
- ・必要流量：10 l/min



第15図 JT-60U 真空容器近傍に据付けた 1MW-200msec 用パルスダミーロードと高周波伝送経路、伝送系周辺機器配置

#### 4.3.4 パルスダミーロード用テーパー導波管

ジャイロトロンの発振調整と発振電力の計測のために、ジャイロトロンからの高周波ビームを整合器の駆動ミラーで  $90^{\circ}$  方向に変えて、電力計測用のパルスダミーロードへ導く。この長さ 779mm のテーパー導波管は、高周波ビームの軸ずれが微妙にあっても、テーパーで補正が可能なパルスダミーロード専用の導波管であり、高周波の入口直径  $\phi 195\text{mm}$  から高周波の出口直径  $\phi 31.75\text{mm}$  まで、径を絞る役割を持つ。テーパー導波管の内面は導波管と同じように、コルゲート状に加工されている。

#### 4.4 コルゲート直線導波管 ( $\phi 31.75\text{ mm}$ )

コルゲート導波管は、導波管断面において中心部分に伝送エネルギーが集中する HE11 モードを使用することで、高い伝送効率を実現する。導波管内面のコルゲート形状は間隔  $3/8$  波長で、深さ方向は  $1/4$  波長である。

本設備では伝送路の約 95% に  $\phi 31.75\text{ mm}$  の内径の導波管を使用している。この導波管は 100~180GHz までの広い高周波帯域に対応している。導波管の材質はアルミニウム合金 (ALUM/6061-T6) 製で、設置精度が良好な場合の伝送ロスは、110GHz で約  $7\% / 100\text{m}$ 、180GHz で約  $2.5\% / 100\text{m}$  である。コルゲート加工表面精度は  $0.8\mu\text{m}$  で規定されている。表面処理は機械加工後に (1) 水酸化ナトリウムを用いたエッティング (2) 酸洗い (中性化) (3) アセトン洗浄 (4) 水洗浄 (5) 乾燥の順で行われる。放出ガスは、エージングガス脱しが終了した最良の条件で  $\sim 4 \times 10^{-9}\text{ Pa m}^3 / \text{sec m}^2$  と小さい。

コルゲート導波管は、製作加工の制約で最長 2m となるため、組み合わせて接続し、伝送系を構成している。接合部はアルミニウム合金製のヘリコフレックスメタル O リングと導波管接続専用の接合金具で結合する。(第 7 図参照) 組立における直線性を重視し、また真空封止機能を持ち合わせた専用接合金具である。

このコルゲート導波管での平均電力密度は、1MW 伝送において  $126\text{kW/cm}^2$  である。

#### 4.5 マイターベンド

内径  $\phi 31.75\text{mm}$  のコルゲート導波管内を、HE11 モードで伝送する高周波の方向をミラーにより、 $90^\circ$  変化させるベンドである。ミラーには熱応力に対して強い分散強化銅を使用、表面は少し湾曲させた鏡面仕上げである。

伝送損失はモード変換損失とミラーの表面抵抗による。表面抵抗損失は分散強化銅のミラ一部で 0.1% 程度である。また、HE11 モードにおけるモード変換損失は、平面ミラーの場合約 1.3% であるが、位相補正ミラーにすることにより、0.9% に減らすことができた。

1MW の高周波電力を 5 秒間伝送すると、ミラー中心部の温度は約  $200^\circ\text{C}$  程度まで上昇するが、分散強化銅の使用で、熱疲労を防止できる。また、除熱用に銅パイプの冷却水配管が接続されており、ミラーを冷却できる構造である。

温度上昇により発生する放出ガス対策として、ミラ一部を直接真空排気できる、ICF-70 の真空排気用ポートが付属している。排気コンダクタンスは小さく、高周波を外部に漏らさないため、ミラ一部に数ミリの穴を数個あけたポートである。

#### 4.6 偏波変換器

電子サイクロトロン加熱においては、プラズマ実験目的に応じて偏波を制御することが求められる。コルゲート状に溝を切ったミラーを回転させ、高周波ビームが溝に入射する角度をえることにより、任意の橈円偏波に制御する。

JT-60UECH 設備の場合、2 台の偏波変換器<sup>[4]</sup> [5] の 2 種の回転ミラーを用いて制御する。幅が半波長以下の溝と深さのコルゲートミラーに進入した平行な電界の成分は、溝には侵入できず、一方垂直な電界成分は溝に侵入、溝の底で反射され、位相がずれて反射される。溝の深さを  $\lambda/4$  にすると位相差を  $\pi$  にすることができる。また、溝の深さを  $\lambda/8$  にして、偏波の

方向が溝と  $45^{\circ}$  になるように直線偏波を入射すると円偏波になる。この角度を変えることにより、任意の梢円度の高周波ビームとすることができます。

#### 4.7 真空排気用ステーション

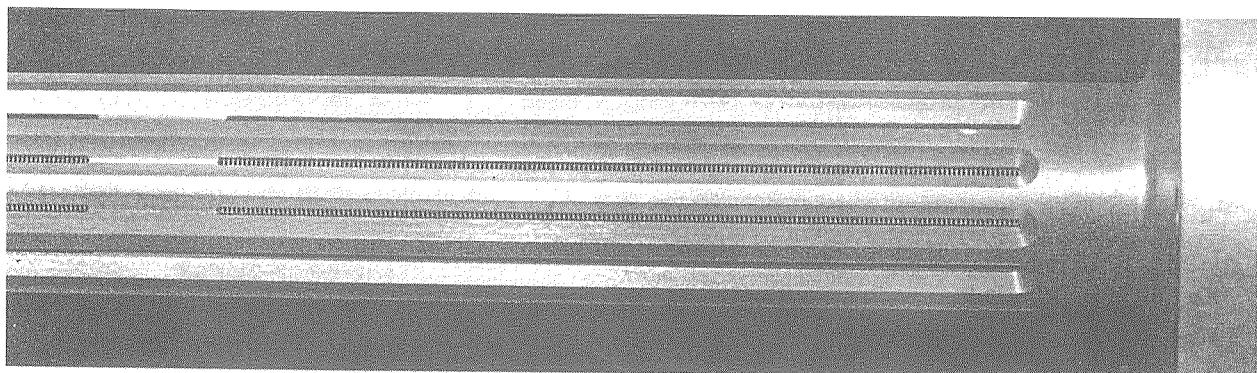
コルゲート型導波管内の真空排気は、このステーションより実施する。本設備で使用している、導波管真空排気用ステーションは2種類である。

1998年、1999年度に建設した#1、#2、#3系統については、スリット型を使用しているが、2000年度に建設した#4系統はコストパフォーマンスに優れたギャップ型を使用している。

##### 4.7.1 スリット型

導波管内のコルゲート状の溝に合わせて、導波管の外面を削りおとして 0.51mm の溝を残し、0.56mm のスリット穴を真空用の排気口としたもので、排気コンダクタンスは約 300 l/sec が得られる。高周波電力の伝送ロスは約 0.03% で高周波電力 1MW-5 秒伝送時に約 2°C (排気口部の導波管はアルミニウム製で熱容量は  $2.44 \text{ J/cm}^3\text{-K}$ ) 程度の温度上昇があると考えられるが、導波管の熱容量と高周波入射間隔を考慮すれば問題にならない。また、スリットからの高周波漏れは 110GHz、1MW 伝送時に数W程度である。

第16図に真空排気スリット部の構造写真を示す。



第16図 真空排気スリット部の構造

#### 4.7.2 ギャップ型

構造はスリット型に比較し簡単で、導波管の加工がいらない。コルゲート導波管間に約 1mm のギャップを設け、高周波伝送ロスを極力減少させ、かつ真空排気も可能とした構造である。

欠点はスリット型に比べ排気コンダクタンスが約 5 l/sec と小さいことであるが、導波管の開口径は  $\phi 31.75$  mm と小さいことと、導波管長が 50~60 m になる実際の伝送路では、問題にならない排気コンダクタンスである。

高周波の伝送ロスは約 0.01% と小さく、構造が簡単でコストパフォーマンスに優れた導波管真空排気用ステーションである。2000 年度に建設した #4 系統に使用している。

#### 4.8 RF ゲートバルブ

RF オールメタルゲートバルブは長さ 34.2mm、内径  $\phi 60.3$  mm のコルゲート導波管を内蔵しており、真空ゲートバルブとしての機能と高周波ビームを効率良く伝送する機能の 2 つの役割を持つ。

高周波ビームを伝送する場合（バルブ開の位置）では開口部分にコルゲート導波管が移動して、ゲートバルブの伝送路ギャップを 39.2mm から 4.5mm まで縮小する。ゲートバルブでの伝送ロスは～0.02% 程度の小さいモード変換損失である。また、バルブを閉止状態にすると、コルゲート導波管は移動してメタルシールのプレートにより完全な真空封止状態になる。

#### 4.9 ダイヤモンドディスク真空窓

JT-60U 本体真空容器領域アンテナ側と高周波発振源側の伝送系との真空領域隔離用の真空窓である。常温での誘電体損失、熱伝導に優れたダイヤモンドを窓材として使用している。

コルゲート導波管間のギャップの中心にダイヤモンドディスクを配した構造で、ダイヤモンドの厚さは 1.7mm であり、ダイヤモンド径は  $\phi 106$  mm

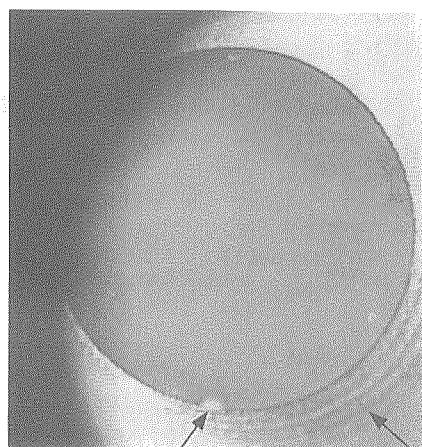
のものと  $\phi 65\text{mm}$  の 2 種類を使用している。1998 年に製作した #1 系統と 2000 年に製作した #4 系統には、 $\phi 60.3\text{mm}$  のコルゲート導波管を使用した  $\phi 106\text{mm}$  のダイヤモンドディスクを使用した。コストを下げる必要と取付場所のスペースの制約から 1999 年に製作した #2, #3 号機は、 $\phi 31.75\text{mm}$  のコルゲート導波管を使用した  $\phi 65\text{mm}$  のディスクを使用した。

ディスク径  $\phi 106\text{mm}$  の真空窓は、トラブルもなく使用しているが、ディスク径  $\phi 65\text{mm}$  の真空窓は、エージング初期に、導波管のエッジ部とダイヤモンドディスクの間に小さな放電痕が発見された。ディスクを監視しているアーカンセンサーにより異常が検出され、解体検査した結果判明した。その後、放電痕を清掃して運転を続けているが、現在まで異常は発生していない。

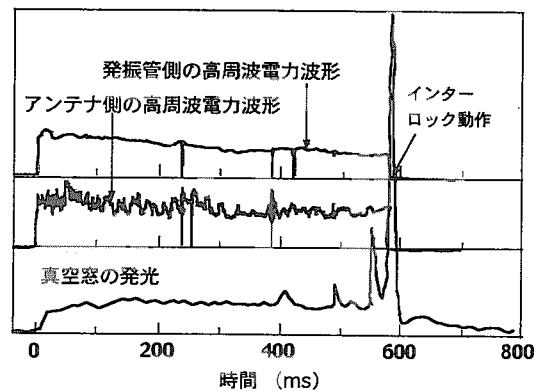
第 17 図にエージング過程で放電したダイヤモンド真空窓の放電痕とアーカンセンサーでインターロックが作動した時の、高周波電力波形と真空窓の発光強度の波形を示す。

現在、ダイヤモンド窓の優れた熱電導特性を利用して、高周波伝送時のダイヤモンドディスク温度上昇を、プラズマへの ECH 入射電力の指標として活用している。

ダイヤモンドディスク真空窓



エージング過程での真空窓放電



放電痕

コルゲート導波管内面

第 17 図 エージング過程で放電したダイヤモンド真空窓の放電痕とアーカンセンサーでインターロックが作動した時の、高周波電力波形と真空窓の発光強度の波形

#### 4.1.0 アーク検出器

アーク検出器はダイヤモンドディスク真空窓の放電保護インターロックのために、取り付けられている。通常のマイターベンドのミラー部に、短い光ファイバーを内蔵した構造である。

第17図に示すように、真空窓の発光により、ジャイロトロンの発振は停止して、放電による損傷を最小限にしている。

#### 4.1.1 コルゲートテーパー導波管（ $\phi 31.75\text{mm}$ から $\phi 60.3\text{mm}$ ）

導波管径の変換に使用するもので、 $\phi 31.75\text{mm}$  のコルゲート導波管から、 $\phi 60.3\text{mm}$  のコルゲート導波管へ変換する。

アンテナ周辺のスペース等の空間的制約から、プラズマに高周波ビームを有効に入射するためには、アンテナミラーの配置や形状を適切にする必要があり、導波管径を大きくして、アンテナに進入する高周波ビーム径を太くした。また、導波管径が大きい程、導波管内部での最大高周波電界が小さくなり、高周波放電の危険性が小さくなる利点もある。

#### 4.1.2 導波管切換器

導波管切換器は、ジャイロトロンから発振された高周波ビームをプラズマ入射方向又は、ダミーロード入射方向側に切換えるものである。

構造はマイターベンドのミラーと短い導波管が同一軸にある構造で、圧縮空気でミラーを上下方向に移動することにより、伝送方向を切換える。プラズマ方向は、スルー状態の短い導波管が位置する空間を高周波ビームは直進する。またダミーロード方向は、切換軸が上側に移動し、高周波ビームは軸の端にあるミラーにより  $90^\circ$  方向転換され、下部方向の導波管へ伝送される。

伝送損失はプラズマ方向の場合 0.01%、ダミー方向の場合約 1% になる。

### 4.1.3 方向性結合器

基本構造は、マイターベンドミラーに高周波が漏れだす微小な穴を設け、そこから漏れ出る高周波を、伝送電力のモニターとする。漏れ出た高周波は、ホーン、アンテネーター、検波器を通して電圧信号となる。

本設備では、発振管出力とアンテナ入力に2式が設置してあり、伝送路の2箇所で入射電力と反射電力がモニターできる。

## 5. 建設での実際と改善

導波管の敷設にあたり、まず敷設するルートの検討、距離の推定を行った後、機器の配置、支持、敷設方法を検討した。

JT-60U での ECH 設備の建設は 3 年間、3 回に分けて順次実施された。1998 年の #1 系統建設当時は、将来の増設を考慮して、架台の規模や機器据付けスペース等の確保に苦慮した。特にスペースの限られた JT-60U 真空容器周辺、中性子遮蔽壁内の機器の配置と作業性の検討には、多くの労力を要している。

伝送ルートの決定では、ベンドの数を抑え、距離をできるだけ短くできるルートをとることと作業性の確保を条件にして、限られた領域での架台の設置、導波管の敷設を実施している。

伝送ルートは、JT-60U 実験棟 4 階 RF 増幅室から、中性子遮蔽壁を通過して JT-60U 本体室へ貫通、P-18 伝送系増設架台上を通り、～10m 下の JT-60U 真空容器レベルへ、ここで P-18 結合系増設架台を通って、JT-60U の P-17、18 ポートへ至るルートである。

ここで、スペースの限られた機器の配置と作業性の検討の中で、特に修正を余儀なくされた代表的な 2 事例をあげる。

当初の基本検討で、JT-60U 真空容器 P-17 ポートには 3～4 ユニットの ECH 設備を設置する計画であった。しかし、アンテナの設計や伝送系機器の配置を検討するなかで、3 ユニットが限界であることが判明、P-17 斜上ポート周辺は 1998～1999 年度に建設した #1～#3 系統で、埋め尽くされた。

この作業のなかで、 $\phi 106\text{mm}$  のダイヤモンドディスク真空窓が 3 台配置出来ず、#2 と #3 のダイヤモンドディスク径を  $\phi 65\text{mm}$  に変更した（コスト削減の目的もあったが）経緯がある。

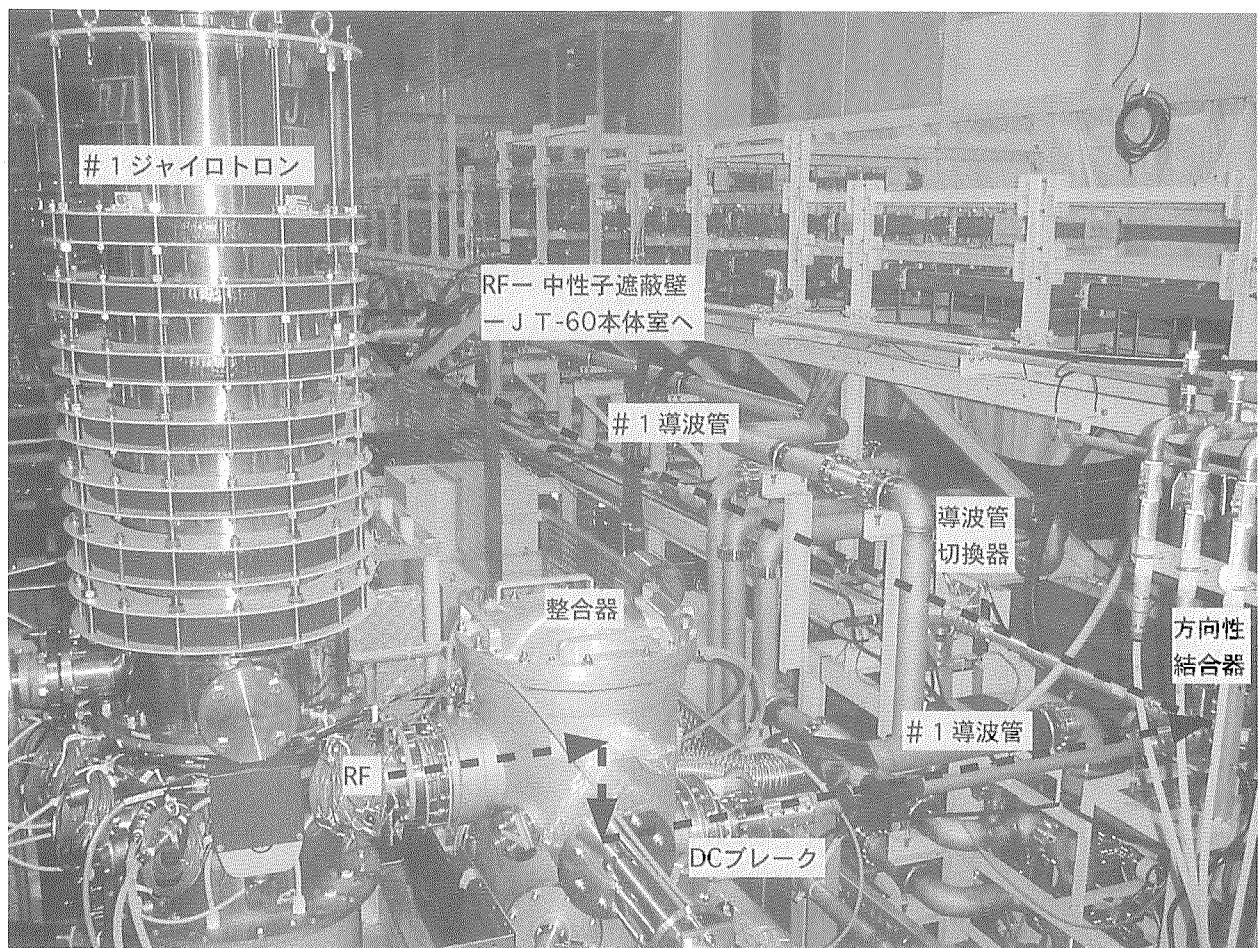
また、中性子遮蔽壁内は、1998～1999 年度に建設した #1～#3 系統により、床面が占有された。偏波変換器は、回転機構を内蔵するために、故障の時に実験中でも自由に出入りのできるように、本体室側でなく増幅室側からアクセス可能な中性子遮蔽壁内への設置が必要であった。ベンドの中でも外形の大きなこの偏波変換器は、中性子遮蔽壁内での作業性をより悪化させた。このため、2000 年度に増設している #4 系統では、他の系統よりも高さレベルを 250mm 上げることにより、他系統導波管との干渉を回避している。実際に、ベンドの数と同じにして、導波管の高さレベルを上げることは、ジャイロトロン設置のレベルを上げることに繋がり、建家の天井の高さ（クレーンの有効長）の制限で、ジャイロトロンを吊り出せないという問題が生じる。この問題は、吊りワイヤーの代わりに、吊り上げ距離を極端に短くした、専用吊り治具を製作して解決した。

第 18 図に RF 増幅室に設置されたジャイロトロンと伝送系を示す。

### 5.1 導波管の支持とアライメント方法

- (1) 導波管接続部の軸ずれを抑制するカップリング金具を使い、同時に金属シールで真空封止ができる接続方式にする。
- (2) 熱膨張の吸収はベンド部分で行う構造とする。
- (3) 導波管支持は、たわみの生じない間隔とする。
- (4) JT-60U 電気絶縁管理の観点から導波管の電位を固定治具と隔離する。
- (5) 導波管固定治具には上下、左右の調整機能を設ける。
- (6) アライメント治具を用いて可視レーザー光の位置と軸を合わせる。

本来、可視レーザーは導波管の中心軸を通して、導波管軸やベンドのつなぎ角度を調整することが望ましい。しかし実際の伝送系では、位相補正用ベンドミラーの使用により、レーザー光の到達距離が限られることが障



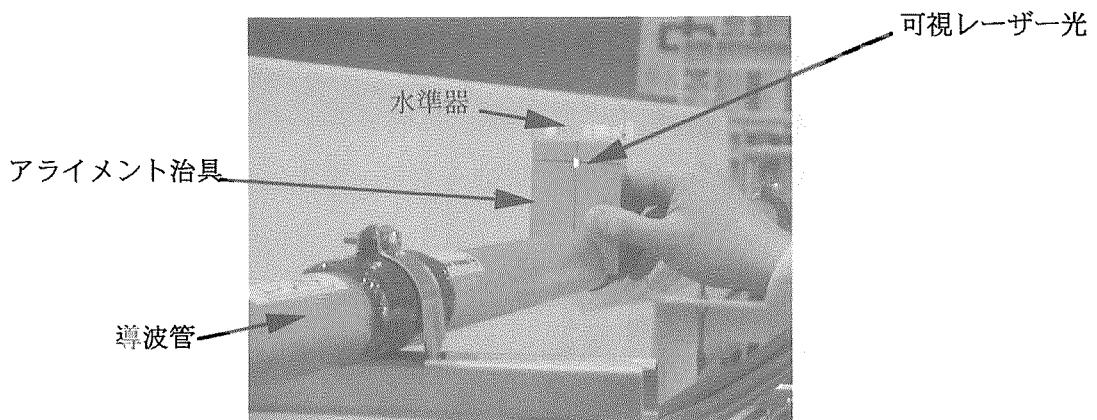
第18図 RF増幅室に設置されたジャイロトロンと伝送系

害となり、限られた短期間での据付け作業ではいくつかの制約が発生し、必ずしも理想的な調整を行うことはできなかった。

本設備のアライメント作業では、理想的な方法の代わりに、導波管の外管面を基準にして治具を用い、可視レーザー光の位置と軸を合わせることにより、導波管の敷設作業を実施した。(第19図参照)

特に敷設作業では、軸傾斜角の変位を出来るだけ小さくすることが重要で、 $\phi 31.75\text{mm}$  の導波管を使用する場合、少なくとも  $1\text{mm} / 1\text{m}$ （導波管軸傾斜のモード変換損失～0.03%）以内、長い直線場所では  $1\text{mm} / 10\text{m}$  の精度を目標に据付けを実施した。垂直、水平器を付属したセンタリングマーカーと水平自動調整機能付可視レーザーユニットをアライメント治具として用い、導波管外管面にセットして、距離を変えながら調整した。

実際の導波管敷設作業時のアライメント作業写真を第19図に示す。これらの据付け作業の結果、1.2MW、4秒の大電力伝送を実証し、伝送損失は基本設計と同等である20～25%を得た。



第19図 建設での導波管敷設作業時のアライメント作業写真

## 5.2 伝送路での放電防止対策と漏水対策

伝送系の放電防止を目的として放電光センサー、アコースティックセンサー、温度センサーを、放電が予測される伝送系機器に設置して、放電破壊を未然に防止するシステムを構築した。また、伝送系内部を真空排気することにより、耐電圧をあげると共に、ベンドのミラー部の様な伝送損失が大きく、発熱しやすい箇所は水冷却ができる構造としている。

### 5.2.1 真空排気

大電力管で発生した大電力高周波をプラズマに安定に入射するためには、伝送路内を高真空に保ち、高周波放電を防止する。

真空排気は、第20図に示す真空排気系統で実施される。

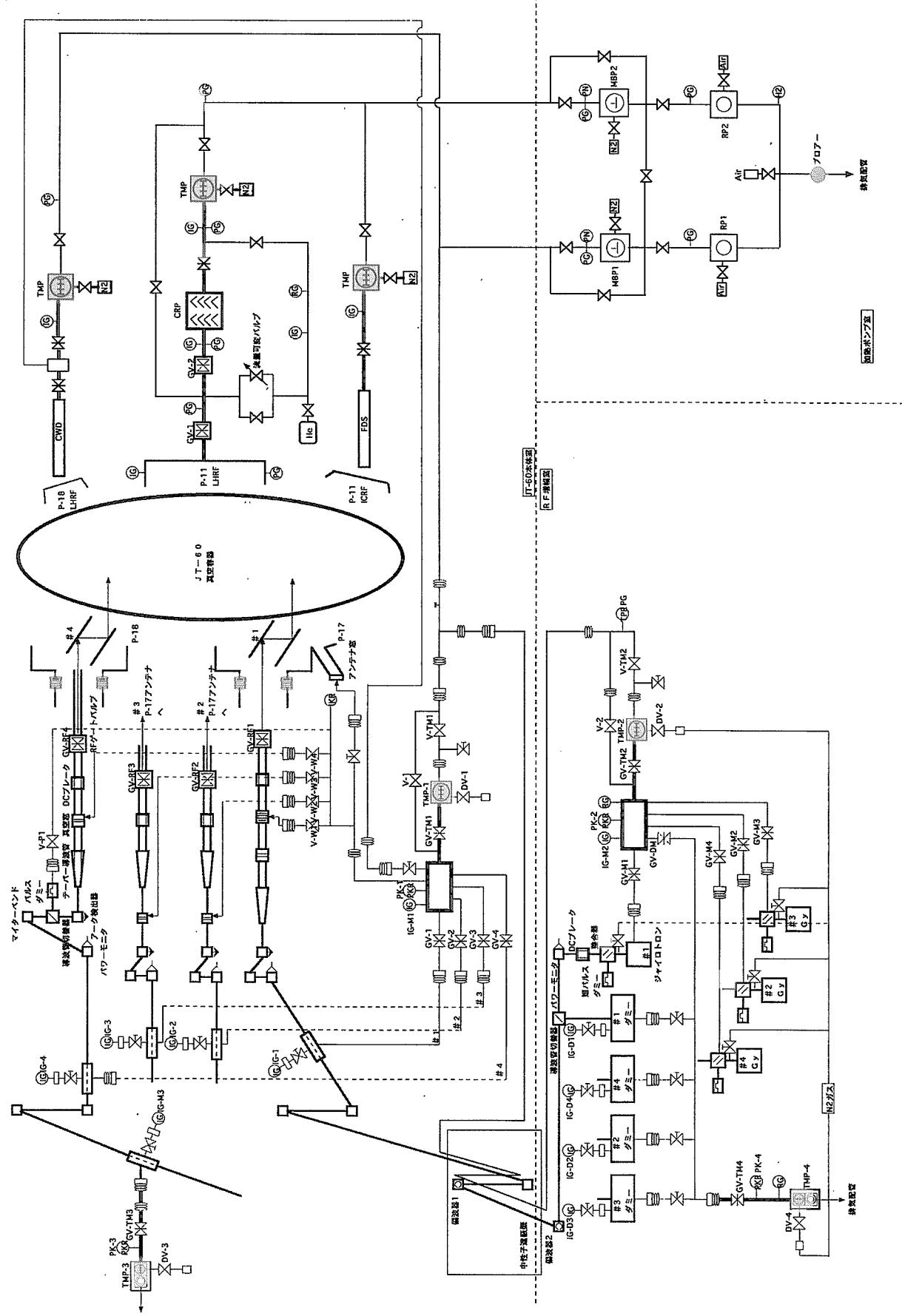
主排気ポンプは広圧力領域型ターボ分子ポンプで、 $\sim 1\text{Pa}$  の圧力まで排気能力を有する。導波管の径は $\phi 31.75\text{mm}$  で、排気コンダクタンスが小さいため、主排気系の排気速度は排気コンダクタンスに見合った容量としてある。導波管の真空排気場所は、JT-60U 本体室に1箇所（#4系統は2箇所）、RF 増幅室に1箇所、ダミーロード部に1箇所である。導波管内の真空度は運転条件により異なり  $10^{-5}\sim 10^{-3}\text{Pa}$  で推移する。

ECH 設備の真空排気系は、ジャイロトロンの交換や整合器でのミラー調整のために大気にする回数が、一般の超高真空排気系に比べて格段に多くなる。そのため、粗引き排気系の排気容量を大きくすることで、排気時間を短縮することが運転効率上重要であり、高周波加熱装置 LHRF、ICRF の粗引き排気系と共に用いている。

### 5.2.2 放電センサー

伝送系の高周波部品各部の放電による損傷を防止するため、本体室、増幅室の伝送機器にセンサーを設けて、各部から検知される信号を分析して、高周波電力の遮断や高周波電力伝送の各種情報の取得のために用いている。

機器の特徴に合わせ、放電光センサー、アコースティックセンサー、温度センサーを設置している。特にダイヤモンドディスク真空窓は光ファイバーを用いた放電光センサーにより監視して、放電を検知した時ジャイロトロンの発振を停止するインターロック回路が組まれている。また、アコースティックセンサーは、ベンド等のミラーでの放電音を監視して、放電光センサーと同様のインターロック動作をする。温度センサーは熱電対が主で温度が上昇する多くの機器に取り付けてあり、特にダイヤモンドディスク真空窓では、ダイヤモンドディスクの温度上昇を計測して、伝送された高周波電力を推定するのに用いている。



第20図 真空排気系統

### 5.2.3 冷却水配管と漏水対策

冷却水系統については、特に JT-60U 本体室放射線管理区域内での漏水を未然に防ぐことを第一に考え、仮に漏水が発生しても速やかに漏水をくい止める対策をした。

使用する配管、結合金具の器具類には、信頼性の高い高耐圧用ホースとスエージロックを使用した。また、冷却水は閉ループとし、貯槽水量の小さいチラーユニットを使用することで、万が一に漏水が発生した場合でも限られた水量だけの漏水にとどめる対策をしている。

さらに、冷却する高周波伝送機器には、水受けと漏水センサーを用いた漏水検知システムを整備した。RF 増幅室では、一次冷却水を使用しているために、漏水検出により、冷却水出入り口電動バルブを遮断するインターロックを設けている。

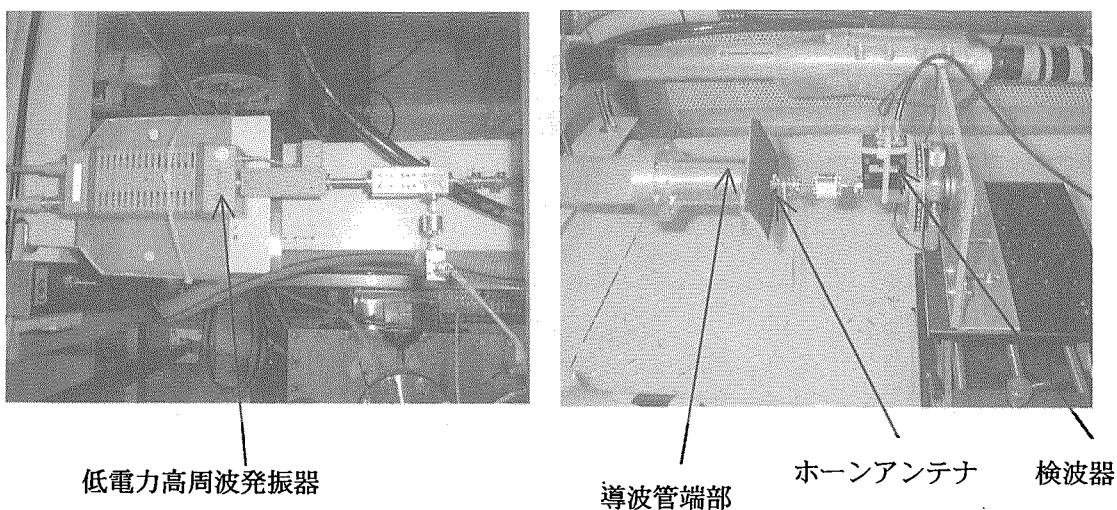
### 5.3 偏波測定の実際

偏波変換器は、コルゲートミラーを回転させ、高周波ビームの電場の向きと溝の向きの関係を変化させることにより、ジャイロトロンの出力である直線偏波を、任意の楕円偏波や円偏波に変えることができる機器である。

本設備では、モーター駆動の 2 種の異なったコルゲートミラー内蔵の偏波変換器 2 台を設置し、それぞれのミラーを回転させ、プラズマ加熱やプラズマ電流駆動に適した、偏波を作りだしている。

偏波測定では、ジャイロトロンの代わりに低電力高周波発振器を、実際に敷設された伝送系で連続発振させ、JT-60U 本体室アンテナ近傍にホーンアンテナを設置して導波管端部での電界分布を計測する。

第 21 図に偏波測定時の増幅室に設置した低電力高周波発振器部と本体室に設置したホーンアンテナ部の写真を示す。



第21図 偏波測定時の增幅室に設置した低電力高周波発振器部と本体室に設置したホーンアンテナ部の写真

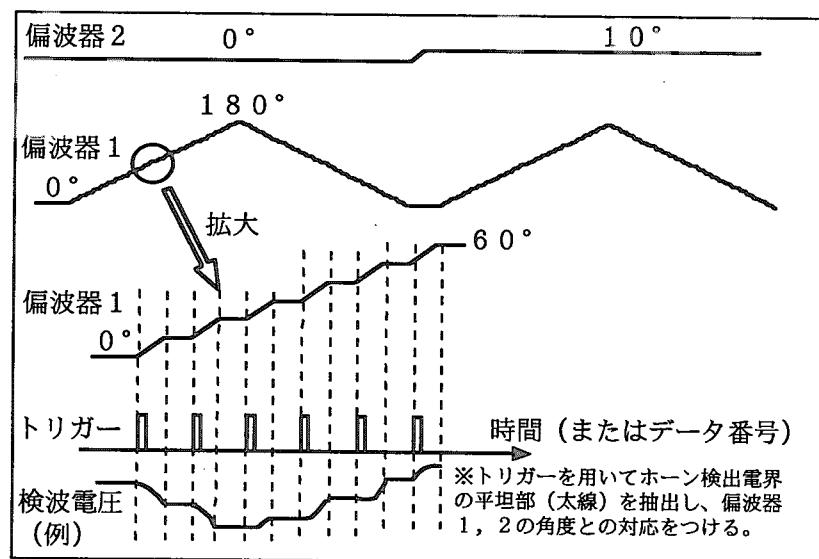
実際の測定では、2台の偏波変換器のミラー回転角度に対して、導波管出口に設置したホーンアンテナの回転角度に対するホーン検出電界から偏波角、梢円度を算出する。あるホーンアンテナの角度に対して、2種類の偏波変換器ミラー角度を10度刻みで、それぞれ0度から180度までえることになり、角度の組み合わせだけで361通りになる。このため、測定効率を上げるために、偏波測定用実時間制御プログラムを作成し、測定を自動化している。第22図に偏波測定タイムチャート示す。

測定は、偏波変換器 1 の 10 度毎のタイミングでトリガーを出力し、ホーン検出電界を記録する。偏波変換器 1 が 0 度から 180 度、180 度から 0 度までスキャンした時点で、偏波変換器 2 の角度を変更し、再度偏波変換器 1 を 10 度毎で動作させる。

偏波変換器 2 のひとつの角度に対して、偏波変換器 1 の角度スキャンを 2 度繰り返すのは、ノイズ除去のため同じ角度に対する、複数のサンプリングデーターを平均化するためである。さらに、ひとつの角度で 1 秒間固定し、0.1 秒毎でサンプリング、10 点のデーターを平均化する。この繰り返しを偏波変換器 2 で、10 度ステップごと 0 度から 180 度まで行う。

この一連の測定は、ホーンアンテナの角度ごとに実施し、10度ステップごと0度から180度でホーンアンテナの角度を変更する。

実時間制御プログラムにより得られたホーン検出電界は、パーソナルコンピューターに一時保存し、データー解析時に使用する。



第22図 偏波測定のタイムチャート

偏波測定により得られた、ホーン検出電界データー（第23図）は、橜円を表す関数

$$E = \{ a \cdot \sin^2(\theta - \phi) + b \cdot \cos^2(\theta - \phi) \}^{1/2}$$

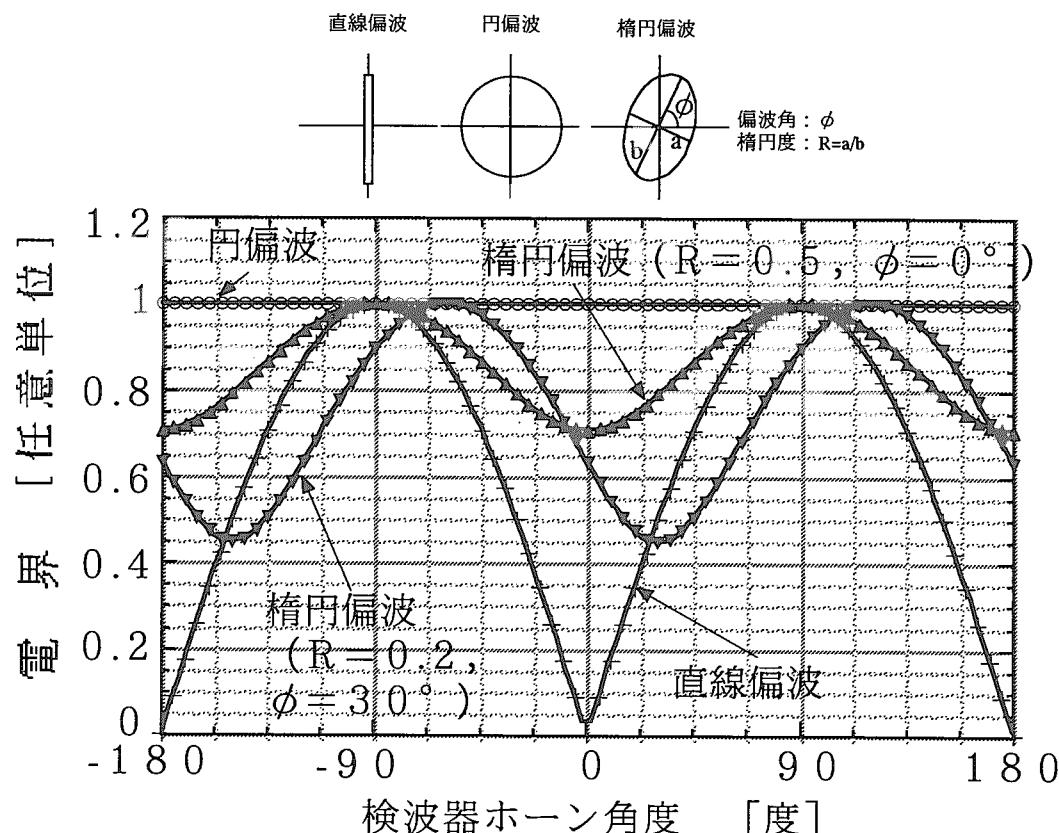
E : 電界

a/b : 橜円度

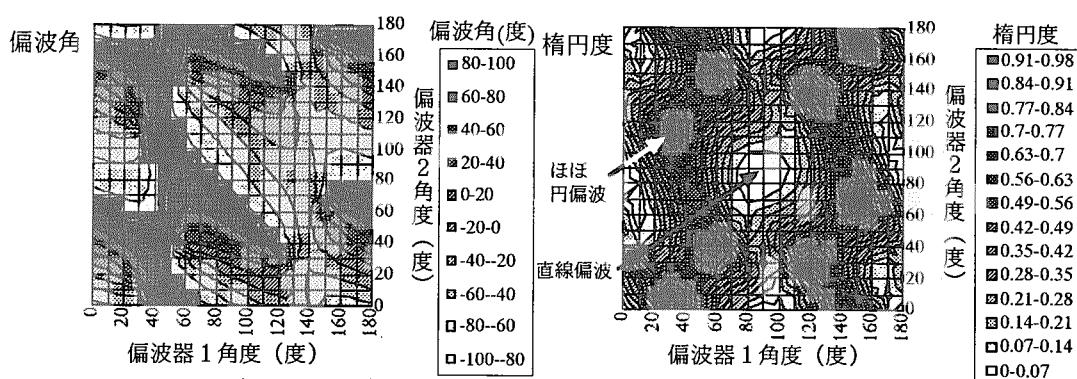
$\theta$  : ホーン角度

$\phi$  : 偏波角

でフィッティングすることにより、関数の係数から偏波角、橢円度を求めることができる。等高線グラフ化した偏波角、橤円度を第24図に示す。



第23図 ホーンアンテナ角度に対する検出電界



第24図 等高線グラフ化した偏波角、橤円度

## 5.4 伝送系の電気絶縁と接地系

JT-60U では、装置本体周辺に数多くの計測器、加熱装置、各架台等が配置されている。JT-60U 本体と周辺設備間では、ワンターンループの形成による電磁力で機器破損するのを防止するため、JT-60U 本体と各設備では、設備間の電気絶縁と接地系の管理を徹底させている。

ECH 設備の伝送系では、機器の電気絶縁、接地系を第 25、26 図に示す、本体室、RF 増幅室における電気絶縁、接地系統図を作成した。

原則として設備の架台と JT-60U 真空容器電位との間は 2 重の絶縁を行い、本設備により、JT-60U 真空容器が接地した場合は、接触点を即時に発見できるように、必ず設備間の取り合い位置で接地系および JT-60U 真空容器電位から隔離できる取り合い場所を設けている。また、導波管はジャイロトロン電位からも隔離され、独自に一点接地としている。

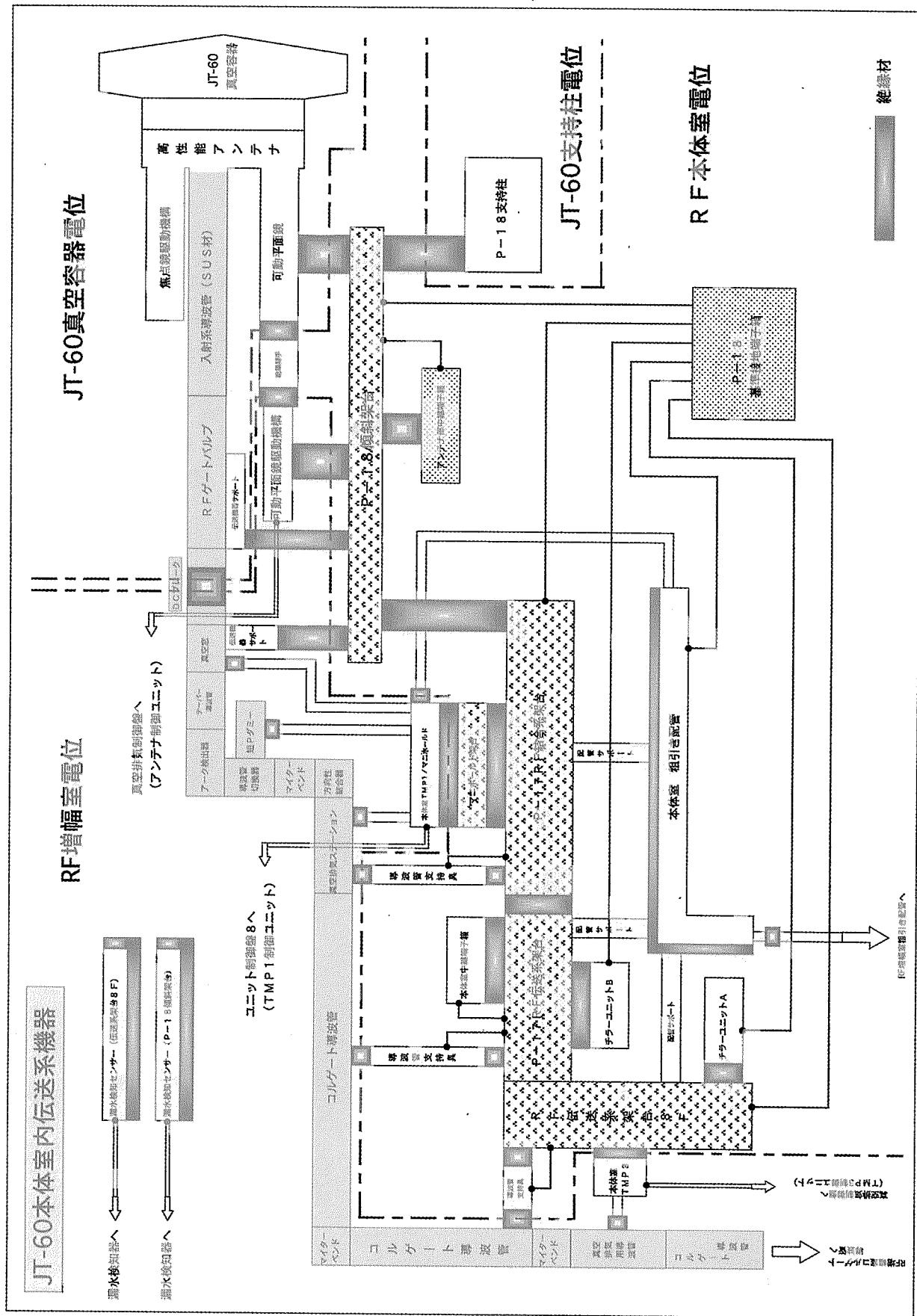
## 5.5 機器配置と据付作業

第 3 図に伝送系導波管ルートの鳥瞰図を示したように、伝送系機器の据付調整は、JT-60U 実験棟 4F の RF 增幅室から中性子遮蔽壁を経て JT-60U 本体室 RF 伝送系架台、結合系架台、P-17、P-18 高性能化アンテナまで実施した。

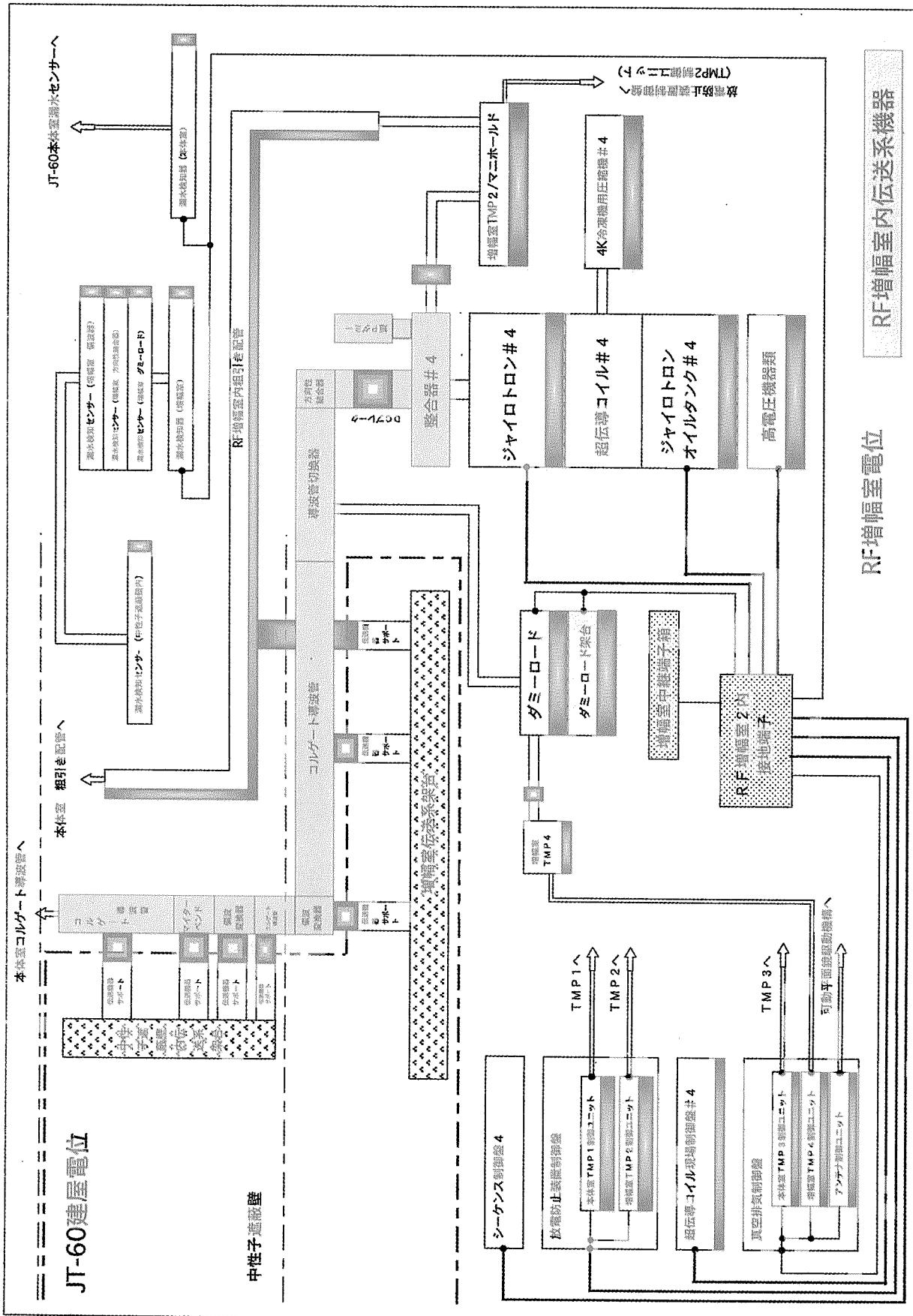
### 5.5.1 RF 增幅室

第 27 図に RF 增幅室における据付機器の詳細配置図を示す。設置されている伝送機器は導波管、偏波変換器、導波管切換器、ダミーロード、方向性結合器、整合器、短パルス用ダミーロードである。ダミーロードは、メインテナンスを容易にするため、移動ができるように可動車輪付架台に設置している。

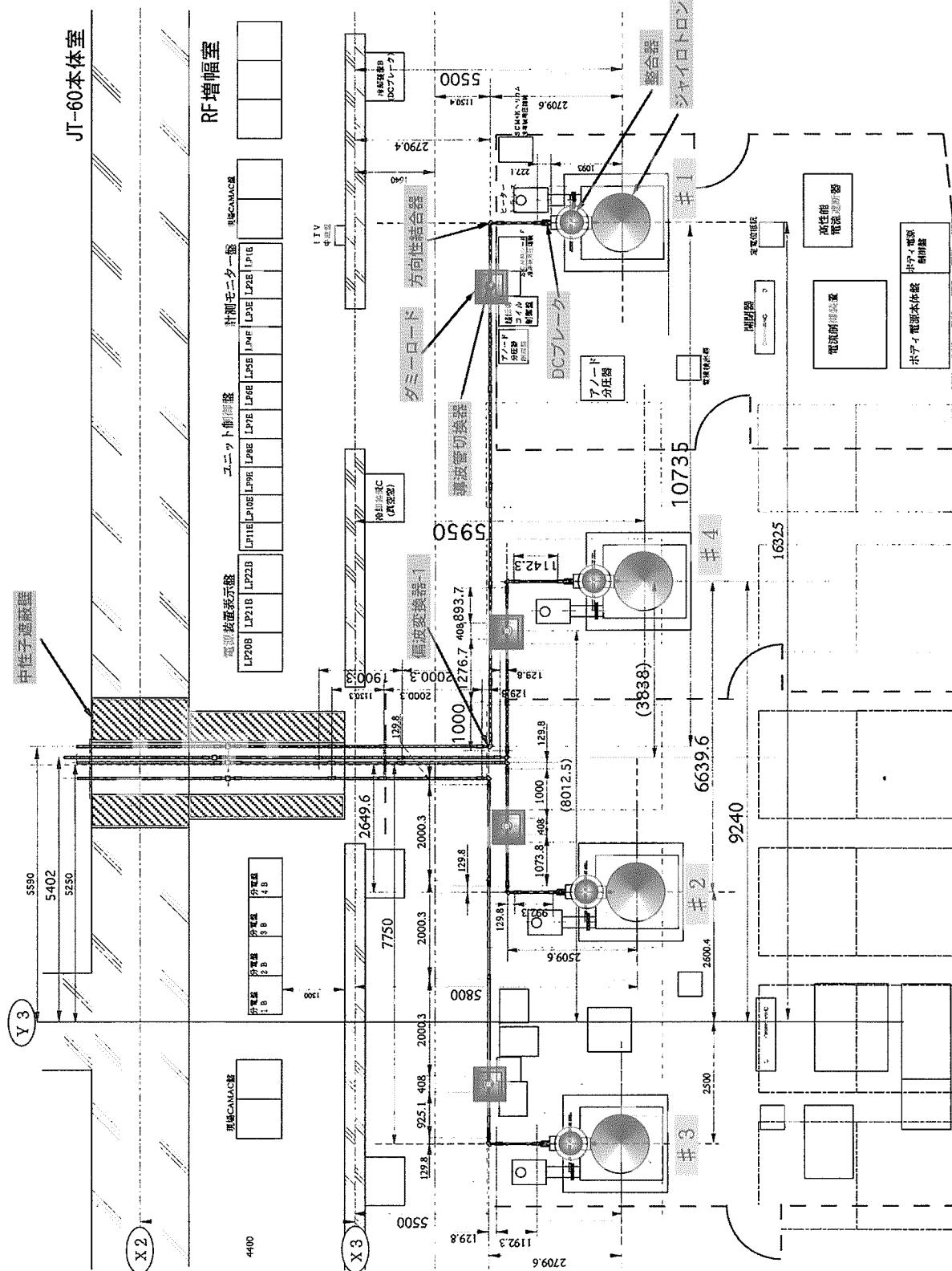
ジャイロトロン及び整合器については専用架台を製作し、据付調整を実



第25図 本体室における電気絶縁、接地系統図



第26図 RF増幅室における電気絶縁、接地系統図



第27図 RF増幅室における据付機器の詳細配置図

施した。#1から#3系統と#4系統では、導波管の高さレベルに250mmの高低差をつけることで、中性子遮蔽壁内での導波管敷設作業を容易にしている。

整合器の据付調整では、整合器、DCブレーキ、導波管据付け後に、方向性結合器のミラーを取り外し、方向性結合器側より可視レーザー光を照射して、整合器ミラー中心にレーザー光があることを確認している。実際には、機器の据付け調整が完了後に、高周波ビームにてミラーの角度軸調整を実施している。

#### (1) 具体的な実作業

- ・据付け調整機器：導波管、偏波変換器、導波管切換器、ダミーロード、方向性結合器、整合器、短パルス用ダミーロード、DCブレーキ
- ・冷却水配管：偏波変換器、導波管切換器、ダミーロード、方向性結合器、整合器、短パルス用ダミーロード
- ・圧空配管：真空排気装置、導波管切換器
- ・放電音センサー取付と計測ケーブル敷設
- ・熱電対取付と計測ケーブル敷設
- ・制御、計測ケーブル敷設と結線：方向性結合器（電力計測用）、短パルスダミーロード（温度計測用）、偏波器（制御ケーブル用）、整合器（温度計測用）、導波管切換器（制御用）
- ・漏水検出：偏波器、導波管切換器、ダミーロード、方向性結合器、整合器、短パルス用ダミーロード
- ・真空排気系機器据付：真空バルブ、真空計、絶縁継手等増設機器の据付、配管と制御、計測線の配線、敷設（真空計；専用ケーブルを增幅室の真空排気系盤まで敷設、結線。バルブ類；真空排気盤端子とバルブとの間を敷設、結線）

#### 5.5.2 中性子遮蔽壁内貫通口

中性子遮蔽壁内貫通口内にはマイターベンド、偏波変換器、導波管、冷

却水配管が設置される。また、機器には漏水検出対策が実施される。

貫通口内は照明設備、RF 増幅室の開口部出入り口には簡易階段を取り付け、作業性の改善をしている。本体室側の開口部は据付工事後に密閉壁としている。

#### （1）具体的な実作業

- ・機器据付け調整：導波管、偏波器、マイターベンド
- ・冷却水配管：偏波器、
- ・音センサー取付けと計測ケーブル敷設
- ・熱電対と計測ケーブル敷設と結線
- ・漏水対策：偏波器、マイターベンド
- ・照明器具：貫通口内 1 個所

### 5.5.3 JT-60U 本体室

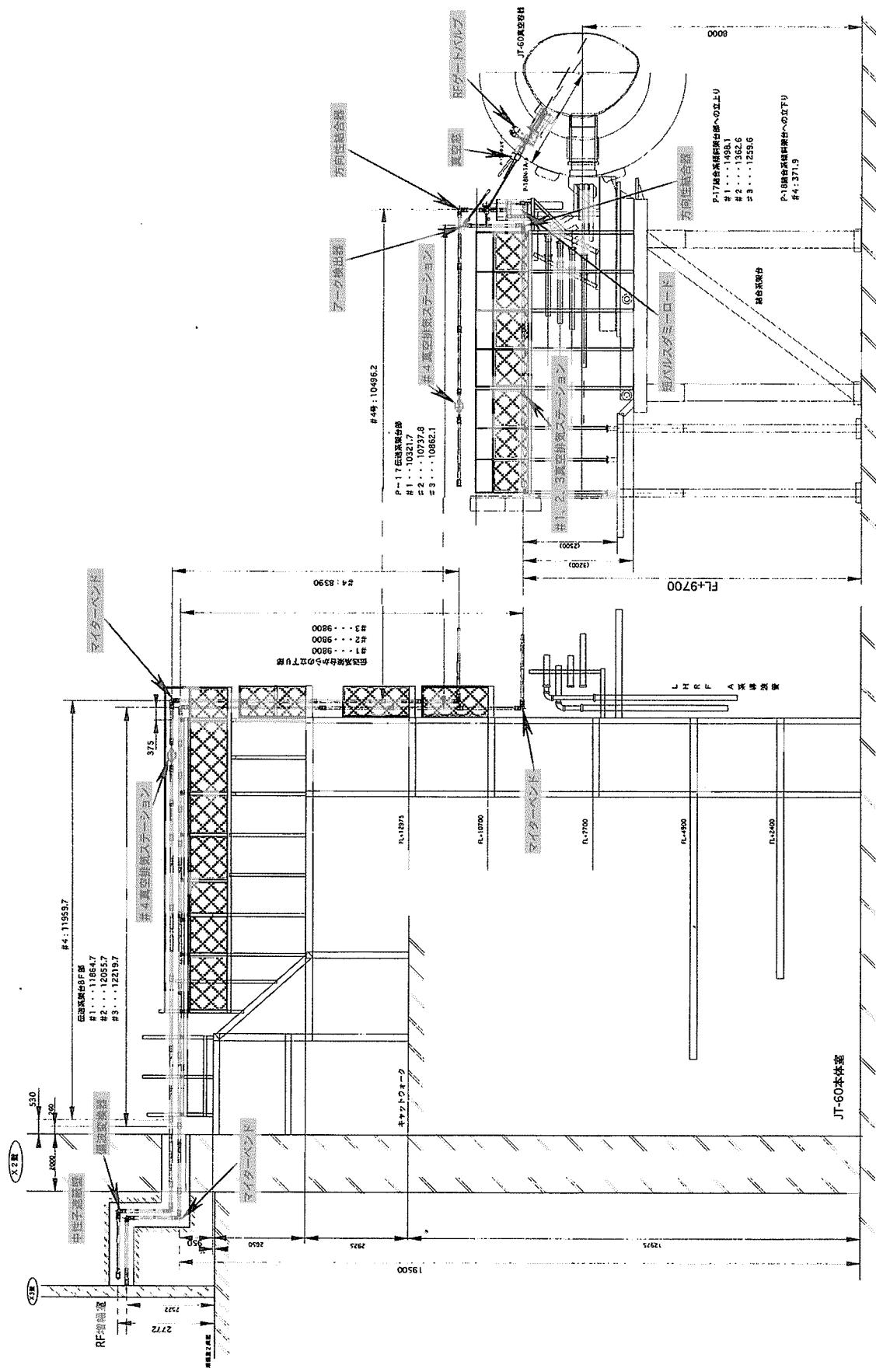
#### （1）伝送系架台内

この場所は本体室床から約 20m の位置で、LHRF 既設架台を利用し、ECH 用架台を増設して伝送機器を据付けてある。据付け機器は導波管、マイターベンドである。据付け場所が高所となるため転落防止網や工具等の落下防止対策をして、安全処置を十分に実施した。

第 28 図に JT-60U 本体室における据付け調整機器と伝送系架台の詳細断面図を示す。

#### 1) 具体的な実作業

- ・機器据付け調整：導波管、マイターベンド
- ・冷却水配管：マイターベンド
- ・音センサー取付と計測ケーブル敷設（増幅室-本体室）
- ・漏水対策：マイターベンド
- ・照明器具：伝送系架台下 1 個所



第28図 JT-60U本体室における据付け調整機器と伝送系架台の  
詳細断面図

## (2) 結合系架台内

導波管は、本体室伝送系架台約 20m高から約 10m高の位置まで垂直に敷設し、水平方向へ約 15m JT-60U の真空容器方向へ据付を行う。据付機器は導波管、マイターベンド、真空排気用ステーション、方向性結合器である。真空排気装置、冷却水チラーユニットのもこの架台内である。また、導波管が敷設するフロアの結合系架台入り口に開閉扉を設置して、架台内への作業性を改善している。

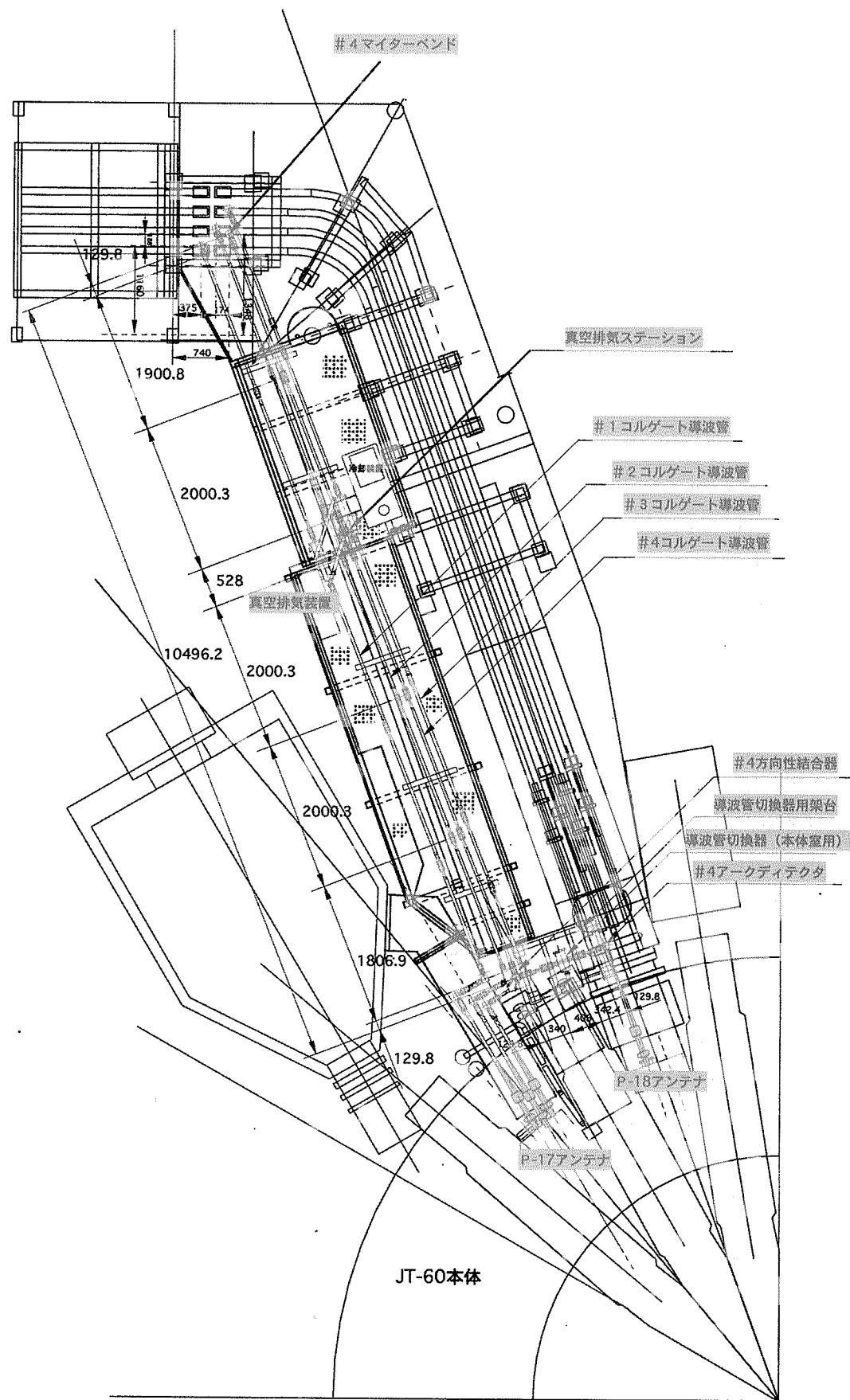
### 1) 具体的な実作業

- ・機器据付け調整：導波管、方向性結合器、真空排気用導波管、マイターベンド
- ・冷却水配管：方向性結合器、マイターベンド
- ・圧空配管：真空排気装置
- ・真空排気系機器：真空バルブ、真空計、絶縁継手等増設機器、配管と制御、計測線の配線、敷設（真空計；専用ケーブルを增幅室の真空排気系盤まで敷設、結線。バルブ類；本体室P-17部端子盤とバルブとの間を敷設、結線）
- ・音センサー取付と計測ケーブル敷設（増幅室- 本体室）
- ・計測ケーブル敷設と結線（増幅室- 本体室計測制御盤内絶縁アンプ- 本体室機器）：方向性結合器（電力計測で同軸 2 本）
- ・漏水対策：方向性結合器、マイターベンド、（受け皿製作、取り付け、ドレン配管敷設等）
- ・開閉扉の設置：導波管が敷設するフロアの結合系架台入り口設置

## (3) P-17、18 本体真空容器傾斜架台周辺

第29図に JT-60U 本体室における伝送系機器の平面据付け図を示す。

据付けする機器は導波管、マイターベンド、アーク検出器、テーパー導波管、真空窓、DC ブレーク、R F ゲートバルブである。アンテナポート周辺は作業性が非常に悪いので、周辺機器への配慮や落下防止対策等の安全処置が必要である。また、伝送系機器取付けでは機器間の取付け間隔が狭いので、取付け専用架台等を設置している。



第29図 JT-60本体室における伝送系機器の平面据付け図

R F ゲートバルブからアンテナ間には、ベーキング用ヒーターがあり、導波管からカプトン等で電気絶縁して取り付け、保温材を巻いている。

真空排気系では、JT-60U 真空容器 P-17 ポート傾斜架台下の真空配管分岐部（ティ一管 約F L 9095 mm）より P-17 斜め上ポート部ビューポート差動配管フランジ（C F- 3 4）までに真空排気用配管及び機器類（真空弁、絶縁フランジ及びフレキシブル管等）がある。真空配管部にかかる応力等を考慮し、十分なサポートを設けている。特にビューポートフランジ部には応力のかからない構造とするため、ベローズ配管を用いている。

P-17 本体真空容器傾斜架台周辺は機器の電気絶縁についても重要で、特に JT-60 真空容器電位からの絶縁は十分に注意をして据付を実施した。

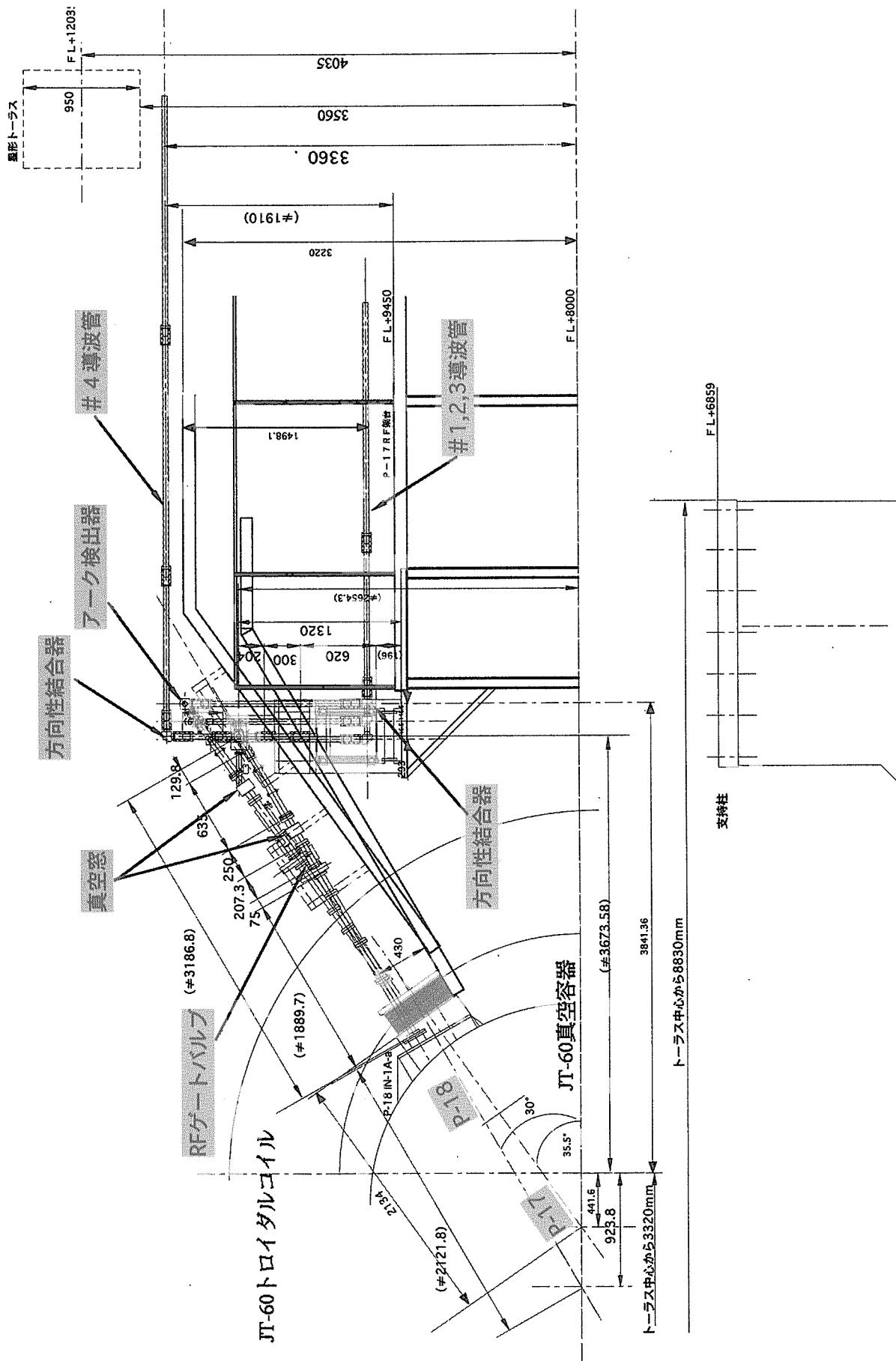
第30図に P-17、18 真空容器付近の伝送系機器の据付け詳細図を示す。

#1 から #3 系統は P-17 ポートで結合系架台の床面に沿って敷設。#4 系統は結合系架台架台フロアレベルから 1910mm 上部の、人間が立って作業しても頭がぶつからない位置に導波管が敷設してある。

アンテナへの進入角度は、JT-60U 真空容器ポートの角度により決定され、#1 から #3 系統は水平位置より 35.5°、#4 系統は水平位置より 30° である。

### 1) 具体的な実作業

- ・伝送機器据付け調整：導波管（60.3 φ、31.75 φ）、マイターベンド、アーク検出器、テーパー導波管、真空窓、DC ブレーク、R F ゲートバルブ
- ・冷却水配管：マイターベンド、真空窓、アーク検出器
- ・圧空配管：R F ゲートバルブ
- ・音センサーと計測ケーブル敷設と結線（機器- 増幅室）
- ・熱電対と計測ケーブル敷設と結線（機器- 増幅室）：真空窓と予備補償導線
- ・のぞき窓用差動排気配管：CF-70 フランジ構成で SUS-304 配管。
- ・ベーキングヒーターと保温材：アンテナと R F ゲートバルブ間の導波管
- ・漏水対策：マイターベンド、真空窓、アーク検出器（受け皿製作、取り付け、ホース敷設）
- ・真空排気系機器据付け



第30図 P-17、18真空容器付近の伝送系機器の据付け詳細図

## 6. まとめ

本報告書は、JT-60UECH 装置の伝送系システムについて述べたものである。主な内容は①基本設計、②システム性能と特徴、③建設での作業と過程、④運転経験から建設に反映された改善について記述した。

①基本設計では、主に伝送経路と伝送損失について、②システム性能と特徴では構成機器の性能、特徴、開発、改良について、③建設での作業と過程では導波管、伝送機器敷設での軸調整方法や核融合装置特有の電気絶縁、接地方式の実際について、④運転経験から建設に反映された改善では放電防止対策、漏水対策、偏波測定方法の確立等について述べた。

これらの成果は、全長約 50~60m の導波管と約 18 台の伝送機器で構成する伝送系 1 系統あたり、110GHz、1.2MW、4 秒の大電力伝送実証につながり、また伝送損失は基本設計と同等である 20~25% を得た。

## 謝辞

本装置を完成、実用化させるまでに、多くの技術者の方々の貴重な技術力と労力の援助を得ました。特に RF 装置試験室員には、設計から建設まで多大の労力と援助を得ました。また、ジャイロトロン、高周波機器では今井剛加熱工学研究室長を始めとする加熱工学研究室員の協力を得ました。この場を借りてお礼申し上げます。

JT-60UECH 設備の設計、建設の基礎を築き、また御指導頂きました NBI 装置試験室山本巧室長、建設から装置完成、運転駆動まで御指導頂きました RF 装置試験室藤井常幸室長にお礼申し上げます。

終始御指導、御配慮頂きました核融合装置試験部、清水正亞部長、二宮博正次長にお礼申し上げます。

### 参考文献

- 「1」 山本 巧 他、：JAERI-Research 97-006 定常炉心試験装置の  
設計研究（第7偏）-ECRF 加熱装置- (1997).
- 「2」 W. Kasperek, Proc. 8th Joint Workshop on Electron Cyclotron  
Emission and ECRH, 423-444, (1993).
- 「3」 J. L. DOANE, 私信
- 「4」 J. L. DOANE, "Grating Polarizers in Waveguide Miter Bends," Int.  
J. Infrared Millim. Waves, 13, 1727 (1992).
- 「5」 久保 伸、：核融合研究 第66卷第6号 電子サイクロトロン加熱  
におけるアンテナ・伝送系 (1991)

## 国際単位系 (SI) と換算表

表 1 SI基本単位および補助単位

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

表 3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表 2 SIと併用される単位

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

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

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

表 5 SI接頭語

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

(注)

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

表 4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

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

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

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

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

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

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

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

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

## 換 算 表

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

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

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

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

$$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J} \text{ (計量法)}$$

$$= 4.184 \text{ J} \text{ (熱化学)}$$

$$= 4.1855 \text{ J} \text{ (15°C)}$$

$$= 4.1868 \text{ J} \text{ (国際蒸気表)}$$

$$\text{仕事率 } 1 \text{ PS} \text{ (仮馬力)}$$

$$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$$

$$= 735.499 \text{ W}$$

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100	
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1	

照 射 線 量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	

線 量 當 量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

セイコーエレクトロニクス  
加熱装置の仕様システム

R100

古紙配合率100%  
白色段階の再生紙を使用しています。