

JAERI-M
93-101

k-スペクトロメータを用いたジャイロトロン
の発振モード解析

1993年5月

春日井 敦・坂本 慶司・前原 直・恒岡まさき
永島 孝

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。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。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

k-スペクトロメータを用いたジャイロトロンの発振モード解析

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

春日井 敦・坂本 慶司・前原 直

恒岡まさき・永島 孝

(1993年4月1日受理)

120GHz, 500kW, TE_{12,2} ウィスパリングギャラリーモードジャイロトロンの発振モードの測定を行った。波数計 (k-スペクトロメータ) を用いることにより, ジャイロトロンの設計モードである, TE_{12,2} のウィスパリングギャラリーモードの発振が確認できた。またジャイロトロンは, 軸方向磁場を調節することにより, TE_{9,3}, TE_{6,4} のモードで発振することがわかった。

さらにk-スペクトロメータを用いた測定の結果, 主モードの他にいくつかの不要モードが観測された。これらのモードは, 主モードがジャイロトロンのキャビティとk-スペクトロメータの間の伝送路で, モード変換した結果であると考えられる。

Mode Analysis of Gyrotron Oscillation
using a k-spectrometer

Atsushi KASUGAI, Keishi SAKAMOTO, Sunao MAEBARA
Masaki TSUNEOKA and Takashi NAGASHIMA

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

(Received April 1, 1993)

Experimental analysis of an oscillation mode 500kW gyrotron at 120GHz with a TE_{12,2} whispering gallery mode is reported. Using a k-spectrometer, the oscillation mode was measured. As a result, the oscillation mode was confirmed to be TE_{12,2} whispering gallery mode, which coincide with the designed value. Also, it is recognized the gyrotron is operated at TE_{9,3} or TE_{6,4} mode by adjusting the axial magnetic field.

In addition to the major mode, some spurious modes were observed. These modes are considered to be caused by a mode conversion from the main mode in the transmission line between the gyrotron cavity and the k-spectrometer.

Keywords : k-spectrometer, Gyrotron, Whispering Gallery Mode, Mode Conversion, Oscillation Mode

目 次

1. 序 論	1
2. ジャイロトロン	1
3. k-スペクトロメータを用いたモード解析	2
3.1 測定装置と測定原理	2
3.2 測定結果	3
4. 伝送路でのモード変換	4
4.1 計算方法	4
4.2 計算結果	5
5. 考 察	6
5.1 ジャイロトロンが発振モード	6
5.2 伝送路でのモード変換	6
6. ま と め	7
謝 辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Gyrotron	1
3. Mode Analysis using a k-Spectrometer	2
3.1 Experimental Setup	2
3.2 Experimental Result	3
4. Calculation of Mode Conversion in the Transmission Line	4
4.1 Calculation Method	4
4.2 Calculation Result	5
5. Discussions	6
5.1 Oscillation Mode of the Gyrotron	6
5.2 Mode Conversion in the Transmission Line	6
6. Summary	7
Acknowledgments	8
Reference	8

1. 序 論

電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) のためのミリ波源として、ジャイロトロンの開発を行っている。ジャイロトロンの高周波数化 (100GHz帯) に伴い、ジャイロトロンの電磁波発振部である共振器 (キャビティ) の熱負荷が過大となり、これがジャイロトロンの高出力化を妨げてきた。これを解決するために、ウィスパリングギャラリモード (回廊モード、 $TE_{m,n}; m \gg n$) をジャイロトロンの発振モードとして用いることが提案された。このモードは高次モードであるにもかかわらずモード競合が少なく、ジャイロトロンのキャビティの径を大きくすることができるため、高出力化が可能となった⁽¹⁾。

今まで、ウィスパリングギャラリモードを発振モードとするジャイロトロンの発振モードは、計算との比較によって確認されているが、直接測定した例は少ない。そこで、日本原子力研究所で開発中の $TE_{12,2}$ のウィスパリングギャラリモードを発振モードとする、120GHzジャイロトロンの発振モードを、波数計 (k-スペクトロメータ) を用いて測定した。さらにミリ波伝送路、特にテーパ部でのモード変換についての計算コードを作成し、伝送路でのモード変換量を計算した。

第2章にジャイロトン、第3章にk-スペクトロメータを用いたモード解析の測定結果、第4章で伝送路でのモード変換の計算結果、第5章に考察、第6章にまとめを述べる。

2. ジャイロトン

ジャイロトロンはサイクロトロン共鳴メーザ (CRM) の原理を利用したマイクロ波電子管である。特徴として、空洞の構造が単純で、電子ビームとマイクロ波回路のサイズを比較的大きくすることができる。このため、ミリ波帯 (数10GHz~150GHz) において、大電力 (100kW以上) を効率よく発振させることが可能である。ジャイロトロンの基本構成は、図1に示すように、電子ビームを発生させるマグネロン入射型電子銃、電子ビームと相互作用しミリ波を励起する空洞共振器 (キャビティ)、電子ビームを受けとめ出力導波路を兼ねるコレクター、および出力窓に大別できる。さらにジャイロトロンを動作させるシステムとして、CRM動作に必要な高精度外部磁場を作り出すための(超電導)磁石、電子ビームを安定に引き出すための高精度、高安定化直流電源が必要である。

電子銃部において、帯状の放射領域から出た中空円筒状の電子ビーム (hollow beam) は、アノード、カソード間の電位により、外部磁場に垂直方向の旋回エネルギーが与えられ、サイクロトロン運動をしながらボディの電位により加速され、キャビティへ引き出される。そして電子銃からキャビティにかけて増加する外部磁場により、サイクロトロン運動の角速度を増加させ、電子の軸方向エネルギーを旋回運動エネルギーに変える。

1. 序 論

電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) のためのミリ波源として、ジャイロトロンの開発を行っている。ジャイロトロンの高周波数化 (100GHz帯) に伴い、ジャイロトロンの電磁波発振部である共振器 (キャビティ) の熱負荷が過大となり、これがジャイロトロンの高出力化を妨げてきた。これを解決するために、ウィスパリングギャラリーモード (回廊モード、 $TE_{m,n}; m \gg n$) をジャイロトロンの発振モードとして用いることが提案された。このモードは高次モードであるにもかかわらずモード競合が少なく、ジャイロトロンのキャビティの径を大きくすることができるため、高出力化が可能となった⁽¹⁾。

今まで、ウィスパリングギャラリーモードを発振モードとするジャイロトロンの発振モードは、計算との比較によって確認されているが、直接測定した例は少ない。そこで、日本原子力研究所で開発中の $TE_{12,2}$ のウィスパリングギャラリーモードを発振モードとする、120GHzジャイロトロンの発振モードを、波数計 (k-スペクトロメータ) を用いて測定した。さらにミリ波伝送路、特にテーパ部でのモード変換についての計算コードを作成し、伝送路でのモード変換量を計算した。

第2章にジャイロトン、第3章にk-スペクトロメータを用いたモード解析の測定結果、第4章で伝送路でのモード変換の計算結果、第5章に考察、第6章にまとめを述べる。

2. ジャイロトン

ジャイロトロンはサイクロトロン共鳴メーザ (CRM) の原理を利用したマイクロ波電子管である。特徴として、空洞の構造が単純で、電子ビームとマイクロ波回路のサイズを比較的大きくすることができる。このため、ミリ波帯 (数10GHz~150GHz) において、大電力 (100kW以上) を効率よく発振させることが可能である。ジャイロトロンの基本構成は、図1に示すように、電子ビームを発生させるマグネロン入射型電子銃、電子ビームと相互作用しミリ波を励起する空洞共振器 (キャビティ)、電子ビームを受けとめ出力導波路を兼ねるコレクター、および出力窓に大別できる。さらにジャイロトロンを動作させるシステムとして、CRM動作に必要な高精度外部磁場を作り出すための(超電導)磁石、電子ビームを安定に引き出すための高精度、高安定化直流電源が必要である。

電子銃部において、帯状の放射領域から出た中空円筒状の電子ビーム (hollow beam) は、アノード、カソード間の電位により、外部磁場に垂直方向の旋回エネルギーが与えられ、サイクロトロン運動をしながらボディの電位により加速され、キャビティへ引き出される。そして電子銃からキャビティにかけて増加する外部磁場により、サイクロトロン運動の角速度を増加させ、電子の軸方向エネルギーを旋回運動エネルギーに変える。

キャビティでは、旋回運動のエネルギーを持つ中空円筒状の電子ビームが、キャビティ内で結合強度が大きいモードの電場と結合し、電子のエネルギーが高周波の電磁エネルギーに変換される。

外部磁場であるキャビティの磁場強度を変化させることにより、共振周波数および、電子ビームのキャビティへの入射位置が変わり、電子ビームと結合するモードを変えることができる。図2に本実験に用いたジャイロトロンについての、キャビティモードの結合強度の径方向分布、図3にキャビティ磁場と電子銃磁場に対するモードマップの例を示す。発振条件を変えることにより、TE_{12,2}、TE_{9,3}、TE_{6,4}モードなどを励起させることができる⁽²⁾。

3. k-スペクトロメータを用いたモード解析

3.1 測定装置と測定原理

図4に測定装置の構成を示す。ジャイロトロン内部のキャビティで励起されたミリ波は、ジャイロトロン内部のアップテーパー部（φ17mm→φ101.6mm）、コレクター部、出力窓（φ101.6mm）を経て外部導波管に導かれる。さらにダウンテーパーとアダプターテーパーにて、k-スペクトロメータと接合する直径63.5mmまで径を小さくし、k-スペクトロメータでモード分析される。さらにミリ波は、サンプラーで発振波形を確認される。（サンプラーは、導波管に穴を開け、矩形の基本導波管を取付けた構造で、検出されるモードには様々なモードが混在し、発振モードの弁別は困難である。）そして、終端部に取付けたダミーロードでRF出力の測定が行われる（写真1）。

k-スペクトロメータでは、各モードの固有値に対応した放射角で、導波管の表面に開けられた結合孔（写真2）から、ミリ波がガウス型の電力分布を持つ平行ビームとして放射される。導波管中に伝送されるミリ波は、そのモードに応じた固有の放射角を有する。その放射角θは以下のようなになる⁽³⁾。

$$\theta = \text{Arc cos}\left(\frac{k_v}{k_0}\right)$$

$$k_v = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{\chi'_{mn}}{k_0 a}\right)^2}$$

χ'_{mn} : $J'_m(x_{mn})=0$ のn番目の解
 J'_m はm次のベッセル関数の微分

$$k_0 = 2\pi/\lambda$$

キャビティでは、旋回運動のエネルギーを持つ中空円筒状の電子ビームが、キャビティ内で結合強度が大きいモードの電場と結合し、電子のエネルギーが高周波の電磁エネルギーに変換される。

外部磁場であるキャビティの磁場強度を変化させることにより、共振周波数および、電子ビームのキャビティへの入射位置が変わり、電子ビームと結合するモードを変えることができる。図2に本実験に用いたジャイロトロンについての、キャビティモードの結合強度の径方向分布、図3にキャビティ磁場と電子銃磁場に対するモードマップの例を示す。発振条件を変えることにより、TE_{12,2}、TE_{9,3}、TE_{6,4}モードなどを励起させることができる⁽²⁾。

3. k-スペクトロメータを用いたモード解析

3.1 測定装置と測定原理

図4に測定装置の構成を示す。ジャイロトロン内部のキャビティで励起されたミリ波は、ジャイロトロン内部のアップテーパー部（φ17mm→φ101.6mm）、コレクター部、出力窓（φ101.6mm）を経て外部導波管に導かれる。さらにダウンテーパーとアダプターテーパーにて、k-スペクトロメータと接合する直径63.5mmまで径を小さくし、k-スペクトロメータでモード分析される。さらにミリ波は、サンプラーで発振波形を確認される。（サンプラーは、導波管に穴を開け、矩形の基本導波管を取付けた構造で、検出されるモードには様々なモードが混在し、発振モードの弁別は困難である。）そして、終端部に取付けたダミーロードでRF出力の測定が行われる（写真1）。

k-スペクトロメータでは、各モードの固有値に対応した放射角で、導波管の表面に開けられた結合孔（写真2）から、ミリ波がガウス型の電力分布を持つ平行ビームとして放射される。導波管中に伝送されるミリ波は、そのモードに応じた固有の放射角を有する。その放射角θは以下のようなになる⁽³⁾。

$$\theta = \text{Arc cos}\left(\frac{k_v}{k_0}\right)$$

$$k_v = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{\chi'_{mn}}{k_0 a}\right)^2}$$

χ'_{mn} : $J'_m(x_{mn})=0$ のn番目の解
 J'_m はm次のベッセル関数の微分

$$k_0 = 2\pi/\lambda$$

放射角が小さい場合は、その放射波を反射板で反射させた後に、受信ホーンによりミリ波の測定を行う。反射板と受信ホーンの角度を変化させることによって、放射角の異なるミリ波を測定することができ、その放射角から各モードを判断することができる（図5）。

円形導波管の表面の孔から放射される電磁波は、導波管表面磁界に垂直方向の偏波面を持っているが、TE波では H_ϕ 、 H_z が存在するのに対し、TM波では H_ϕ のみである。ここで、 z は円形導波管において波の進行方向、 ϕ は円形導波管の方位角方向を表す。つまり、TM波の偏波面は E/k のみであるから、受信ホーンの偏波面を波数ベクトルと垂直にしたときには、TEモードのみ検出されTMモードは検出されない。よって受信ホーンの向きを変えることにより、波数ベクトルと垂直方向の電場と平行方向の電場を測定することができる。さらに、 k -スペクトロメータによって各モードを分離できるので、検出器と周波数計を組み合わせて、各モードの周波数を独立に測定できる利点がある。

3.2 測定結果

代表的なジャイロトロンが発振波形を図6に示す。上は k -スペクトロメータの受信ホーンをTE_{12,2}モードの放射角に対応する位置に合わせて測定した発振波形、下はサンプラーで測定した発振波形である。両者は同じショットの波形であるが、TE_{12,2}モードのみを k -スペクトロメータで見たときは安定した発振波形になっている。したがって、ジャイロトロンTE_{12,2}モードの発振は安定していると判断できる。

(1) TE_{12,2} 発振モード

k -スペクトロメータにおいて、検波器の受信偏波面を波数ベクトルと垂直 ($E \perp k$) とした。前述のように、本実験に用いたジャイロトロンモードマップは図3のようになるが、発振の主モードがTE_{12,2}となるようにキャビティ磁場 (C_1, C_2)、電子銃磁場 (G_1, G_2)、ビーム電圧などのパラメータを調節した。表1に発振条件を示す。この条件において、 k -スペクトロメータの検波器の角度を変化させて、検波器に受信されるRFパワーを測定した。その結果を図7に示す。顕著なピークとして、TE_{11,2}、TE_{12,1}、TE_{11,3}、TE_{10,2}、TE_{9,2}、TE_{13,3}などが得られた。そして、これらのモードの周波数の全てが主モードと同じ120.18GHzであった。さらに、検波器の向きを90度回転し、受信偏波面を波数ベクトルと平行 (E/k) にして、同様の測定を行った結果を図8に示す。 $E \perp k$ のときと同様に主モードのTE_{12,2}は120.18GHzであった。偏波面を E/k にしたときは、TEモードのほかにTMモードも検出されるので、TM_{12,1}やTM_{12,2}なども検出されている。しかも、これら全てのモードの周波数は、主モードと同じ120.18GHzであった。

(2) TE_{9,3} 発振モード

発振の主モードがTE_{9,3}になるようにキャビティ磁場などを調節し(表1)、検波器の偏波面をE_{⊥k}、E//kとして測定した結果をそれぞれ図9、図10に示す。主モードの周波数は121.80GHzであり、その他の出現したモードの周波数もメインモードのTE_{9,3}と同じ121.80GHzであった。

(3) TE_{6,4} 発振モード

発振の主モードがTE_{6,4}になるようにキャビティ磁場などを調節し(表1)、検波器の受信偏波面をE_{⊥k}、E//kとして測定した結果をそれぞれ図11、図12に示す。主モードの周波数は119.49GHzであり、その他の出現したモードの周波数も主モードのTE_{9,3}と同じ119.49GHzであった。

(4) キャビティ磁場に対する発振モード

ビーム電圧、アノード電圧、ビーム電流、電子銃磁場を固定して、キャビティ磁場のみを変化させ、k-スペクトロメータを用いて発振パワー、発振周波数を調べた。その結果を図13に示す。キャビティ磁場が4.55Tから4.75Tまでの間に、TE_{8,3}(114.14GHz)、TE_{12,2}(120.13GHz)、TE_{9,3}(121.84GHz)の3つのモードが出現した。これは図3のモードマップと一致する。

4. 伝送路でのモード変換

4.1 計算方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

キャビティからk-スペクトロメータまでのミリ波伝送路でのモード変換として主なものに、テーパ部でのモード変換が挙げられる。ここではまず、テーパ部でのモード変換に限定して計算する。

テーパ部での発生モードが、主モードに比べて非常に小さく、発生モード(進行波、反射波)、主モードの反射波は、主モードの進行波のみによって生ずると仮定する。モード結合方程式は、以下のようなになる。

(2) TE_{9,3} 発振モード

発振の主モードがTE_{9,3}になるようにキャビティ磁場などを調節し(表1)、検波器の偏波面をE_{⊥k}、E//kとして測定した結果をそれぞれ図9、図10に示す。主モードの周波数は121.80GHzであり、その他の出現したモードの周波数もメインモードのTE_{9,3}と同じ121.80GHzであった。

(3) TE_{6,4} 発振モード

発振の主モードがTE_{6,4}になるようにキャビティ磁場などを調節し(表1)、検波器の受信偏波面をE_{⊥k}、E//kとして測定した結果をそれぞれ図11、図12に示す。主モードの周波数は119.49GHzであり、その他の出現したモードの周波数も主モードのTE_{9,3}と同じ119.49GHzであった。

(4) キャビティ磁場に対する発振モード

ビーム電圧、アノード電圧、ビーム電流、電子銃磁場を固定して、キャビティ磁場のみを変化させ、k-スペクトロメータを用いて発振パワー、発振周波数を調べた。その結果を図13に示す。キャビティ磁場が4.55Tから4.75Tまでの間に、TE_{8,3}(114.14GHz)、TE_{12,2}(120.13GHz)、TE_{9,3}(121.84GHz)の3つのモードが出現した。これは図3のモードマップと一致する。

4. 伝送路でのモード変換

4.1 計算方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

キャビティからk-スペクトロメータまでのミリ波伝送路でのモード変換として主なものに、テーパー部でのモード変換が挙げられる。ここではまず、テーパー部でのモード変換に限定して計算する。

テーパー部での発生モードが、主モードに比べて非常に小さく、発生モード(進行波、反射波)、主モードの反射波は、主モードの進行波のみによって生ずると仮定する。モード結合方程式は、以下のようなになる。

$$\frac{da_p}{dz} = -\gamma_p a_p$$

$$\frac{db_p}{dz} = -\gamma_p b_p + C_{pp}^{++} a_p$$

$$\frac{da_s}{dz} = -\gamma_s a_s + C_{sp}^{++} a_p$$

$$\frac{db_s}{dz} = -\gamma_s b_s + C_{sp}^{+-} a_p$$

a_p : 主モード (進行波)、 b_p : 主モード (反射波)、 a_s : 発生モード (進行波)、
 b_s : 発生モード (反射波)
 C : 結合系数、 γ : 伝搬定数

境界条件として、 $a_p(0)=1$ 、 $b_p(0)=0$ 、 $a_s(0)=0$ 、 $b_s(0)=0$ を入れて、方程式を解けば、

主モード (反射波)

$$b_p(0) = - \int_0^L C_{pp}^{++} \exp(-2 \int_0^z \gamma_p d\xi) dz$$

発生モード (反射波)

$$b_s(0) = - \int_0^L C_{sp}^{+-} \exp(- \int_0^z (\gamma_p + \gamma_s) d\xi) dz$$

発生モード (進行波)

$$a_s(L) = \exp(- \int_0^L \gamma_s dz) \int_0^L C_{sp}^{++} \exp(- \int_0^z (\gamma_p - \gamma_s) d\xi) dz$$

となる。

4.2 計算結果

ジャイロトロンのカビティから k -スペクトロメータまでは、 $\phi 17\text{mm} \rightarrow \phi 101.6\text{mm}$ 、長さ1000mmの曲線アップテーパー、 $\phi 101.6\text{mm} \rightarrow \phi 63.26\text{mm}$ 、長さ750mmの曲線ダウンテーパー、 $\phi 63.26\text{mm} \rightarrow \phi 63.5\text{mm}$ 、長さ10mmの直線アップテーパーの3つがあり、それぞれでモード変換量を計算した。入射モードをそれぞれ、TE12,2、TE9,3、TE6,4としたときの計算結果を表2、表3、表4に示す。ここでは、 k -スペクトロメータの

データと比較するために、発生モード（進行波）のみを計算した。テーパー部でのモード変換では、方位角方向のモード数（ TE_{mn} の m ）は変化しないので、モード変換として、主モードが $TE_{12,2}$ のときは半径方向のモード数を5まで、主モードが $TE_{9,3}$ 、 $TE_{6,4}$ のときは半径方向のモード数を6まで考慮した。

その結果、主モードが $TE_{12,2}$ では、 $TE_{12,2}$ モードのまま伝送する効率が約93%であり、主モードが $TE_{9,3}$ では伝送効率が約78%、主モードが $TE_{6,4}$ では伝送効率が約70%の計算結果が得られた。メインモードが $TE_{9,3}$ 、 $TE_{6,4}$ で伝送効率が低いのは、このジャイロトロンでは、本来 $TE_{12,2}$ モードの出力を考えているので、ミリ波伝送路であるテーパー部の形状などが、 $TE_{12,2}$ 以外のモードに対し最適化されてないためである。

5. 考察

5.1 ジャイロトロンの発振モード

ジャイロトロンの設計モードである $TE_{12,2}$ (120.18GHz)のほかに、競合モードとして $TE_{6,4}$ (119.49GHz)、 $TE_{9,3}$ (121.80GHz)、 $TE_{8,3}$ (114.14GHz)がある。ところが、 k -スペクトロメータで受信した、全てのモードの周波数は、主モードと同一の周波数であった。例えば、 $TE_{12,2}$ (120.18GHz)を主モードとすれば、全てのモードは120.18GHzであり、 $TE_{6,4}$ (119.49GHz)を主モードとすれば周波数は119.49GHzであった。2倍高調波を見るために、サンプラーの後に120Hz近傍の周波数がカットオフとなる導波管をつけたが、RFパワーは検出されなかった。よって2倍以上の高調波は発振していないと考えられる。もし同時に2つ以上のモードが発振しているとしたら、 k -スペクトロメータで分析したモードの中には、複数の周波数が混在するはずであるが、観測された周波数が主モードの周波数のみであったことから、 k -スペクトロメータで分離された不要モードは、キャビティで発振した主モードが、テーパーなどの伝送路を伝搬する過程において、モード変換したものであると考えられる。したがって、 $TE_{12,2}$ モードと同時に他のモードが発振していることはなく、ジャイロトロンの設計モードの $TE_{12,2}$ の単一モードが発振していることが確認された。

5.2 伝送路でのモード変換

キャビティでは同時に複数のモードが発振していないという考えを裏付けるため、 k -スペクトロメータで分析されたモードと計算によって得られたテーパー部でのモード変換量を比較した。 k -スペクトロメータにより分離されたモードは、モードにより結合度が異なるので、各モードの強度比を求めるため結合度を考慮し補正した。そして、これらの強度比を計算値と比較した。メインモードが $TE_{12,2}$ 、 $TE_{9,3}$ 、 $TE_{6,4}$ のときの比較をそれぞれ図14、図15、図16に示す。まず、メインモードが $TE_{12,2}$ のときに

データと比較するために、発生モード（進行波）のみを計算した。テーパー部でのモード変換では、方位角方向のモード数（ TE_{mn} の m ）は変化しないので、モード変換として、主モードが $TE_{12,2}$ のときは半径方向のモード数を5まで、主モードが $TE_{9,3}$ 、 $TE_{6,4}$ のときは半径方向のモード数を6まで考慮した。

その結果、主モードが $TE_{12,2}$ では、 $TE_{12,2}$ モードのまま伝送する効率が約93%であり、主モードが $TE_{9,3}$ では伝送効率が約78%、主モードが $TE_{6,4}$ では伝送効率が約70%の計算結果が得られた。メインモードが $TE_{9,3}$ 、 $TE_{6,4}$ で伝送効率が低いのは、このジャイロトロンでは、本来 $TE_{12,2}$ モードの出力を考えているので、ミリ波伝送路であるテーパー部の形状などが、 $TE_{12,2}$ 以外のモードに対し最適化されてないためである。

5. 考察

5.1 ジャイロトロンの発振モード

ジャイロトロンの設計モードである $TE_{12,2}$ (120.18GHz)のほかに、競合モードとして $TE_{6,4}$ (119.49GHz)、 $TE_{9,3}$ (121.80GHz)、 $TE_{8,3}$ (114.14GHz)がある。ところが、 k -スペクトロメータで受信した、全てのモードの周波数は、主モードと同一の周波数であった。例えば、 $TE_{12,2}$ (120.18GHz)を主モードとすれば、全てのモードは120.18GHzであり、 $TE_{6,4}$ (119.49GHz)を主モードとすれば周波数は119.49GHzであった。2倍高調波を見るために、サンプラーの後に120Hz近傍の周波数がカットオフとなる導波管をつけたが、RFパワーは検出されなかった。よって2倍以上の高調波は発振していないと考えられる。もし同時に2つ以上のモードが発振しているとしたら、 k -スペクトロメータで分析したモードの中には、複数の周波数が混在するはずであるが、観測された周波数が主モードの周波数のみであったことから、 k -スペクトロメータで分離された不要モードは、キャビティで発振した主モードが、テーパーなどの伝送路を伝搬する過程において、モード変換したものであると考えられる。したがって、 $TE_{12,2}$ モードと同時に他のモードが発振していることはなく、ジャイロトロンの設計モードの $TE_{12,2}$ の単一モードが発振していることが確認された。

5.2 伝送路でのモード変換

キャビティでは同時に複数のモードが発振していないという考えを裏付けるため、 k -スペクトロメータで分析されたモードと計算によって得られたテーパー部でのモード変換量を比較した。 k -スペクトロメータにより分離されたモードは、モードにより結合度が異なるので、各モードの強度比を求めるため結合度を考慮し補正した。そして、これらの強度比を計算値と比較した。メインモードが $TE_{12,2}$ 、 $TE_{9,3}$ 、 $TE_{6,4}$ のときの比較をそれぞれ図14、図15、図16に示す。まず、メインモードが $TE_{12,2}$ のときに

ついて考える。テーパーのみのモード変換では方位角方向のモード次数は変化しないので、半径方向のモード次数のみが変化したときのモード変換量を比較した。その結果、測定と計算では良い一致が見られた。したがって、 k -スペクトロメータで観測されたモード($TE_{12,n}$, $TM_{12,n}$, $n \neq 2$)は、ミリ波伝送路でのモード変換として説明できる。同様に、 $TE_{9,3}$, $TE_{6,4}$ モードについても、半径方向のモード次数の変化を考えると、測定値と計算値の良い一致が得られた。

しかしながら、テーパー部だけでは説明できないモードが観測された。これらのモードは、方位角方向のモードのみがメインモードと1つだけずれたモード($TE_{m \pm 1, n}$)、あるいは、それらのモードから派生したモードである。したがって、これらのモード変換は、導波管の接合面での軸ずれによるモード変換、出力窓、DCブレイクでのモード変換、伝送路のたわみによるモード変換などであると考えられる。ウィスパリングギャラリーモードに対する、これらの部分でのモード変換の評価は、いまだ報告されていないので、今後の課題として重要である。

6. まとめ

本研究において得られた結果は次のとおりである。

- (1) 120GHz, 500kW, ジャイロトロンが発振モードを、 k -スペクトロメータを用いた測定により、発振の設計モードである $TE_{12,2}$ の発振が確認された。
- (2) 軸方向磁場を調整することにより、 $TE_{9,3}$, $TE_{6,4}$ のモードで発振することがわかった。
- (3) メインモードから発生した不要モードは、ジャイロトロンキャビティと k -スペクトロメータの間のミリ波伝送路でモード変換したものである。

ついて考える。テーパーのみのモード変換では方位角方向のモード次数は変化しないので、半径方向のモード次数のみが変化したときのモード変換量を比較した。その結果、測定と計算では良い一致が見られた。したがって、 k -スペクトロメータで観測されたモード($TE_{12,n}$, $TM_{12,n}$, $n \neq 2$) は、ミリ波伝送路でのモード変換として説明できる。同様に、 $TE_{9,3}$, $TE_{6,4}$ モードについても、半径方向のモード次数の変化を考えると、測定値と計算値の良い一致が得られた。

しかしながら、テーパー部だけでは説明できないモードが観測された。これらのモードは、方位角方向のモードのみがメインモードと1つだけずれたモード ($TE_{m \pm 1, n}$)、あるいは、それらのモードから派生したモードである。したがって、これらのモード変換は、導波管の接合面での軸ずれによるモード変換、出力窓、DCブレークでのモード変換、伝送路のたわみによるモード変換などであると考えられる。ウィスパリングギャラリーモードに対する、これらの部分でのモード変換の評価は、いまだ報告されていないので、今後の課題として重要である。

6. まとめ

本研究において得られた結果は次のとおりである。

(1) 120GHz, 500kW, ジャイロトロンの発振モードを、 k -スペクトロメータを用いた測定により、発振の設計モードである $TE_{12,2}$ の発振が確認された。

(2) 軸方向磁場を調整することにより、 $TE_{9,3}$, $TE_{6,4}$ のモードで発振することがわかった。

(3) メインモードから発生した不要モードは、ジャイロトロンのキャビティと k -スペクトロメータの間のミリ波伝送路でモード変換したものである。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、実験、測定の準備などに終始協力いただいた、RF加熱研究室、藤田秀男氏、菊池正也氏に感謝致します。また、有益な助言、議論をしていただいた、(株)東芝の満仲義加氏、林健一氏、小室三男氏、假家強氏に感謝致します。さらに、島本進核融合工学部部長、今井剛RF加熱研究室室長、山本巧RF装置試験室室長には終始激励をいただいたことに深く感謝致します。

参考文献

- (1) B.G.Danly et al : IEEE Trans. Plasma Sci. PS-13(6), 383-388.(1985)
- (2) T.Sugawara et al : " 500kW WHISPERING GALLERY MODE GYROTRON ",
14th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Wave, (1990)
- (3) W.Kasperek et al : Int. J. ELECTRONICS, 64, 5 (1988)
- (4) L.Solymar : IRE Trans. MTT-7, 397-383 (1959)
- (5) 飯口真一 : " 導波管に対する一般的な伝送方程式" 、信学誌、44, 6, 955 (1961)
- (6) 小口文一 : " マイクロ波およびミリ波回路" 、丸善、東京(1964)

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、実験、測定の準備などに終始協力いただいた、RF加熱研究室、藤田秀男氏、菊池正也氏に感謝致します。また、有益な助言、議論をしていただいた、(株)東芝の満仲義加氏、林健一氏、小室三男氏、假家強氏に感謝致します。さらに、島本進核融合工学部部長、今井剛RF加熱研究室室長、山本巧RF装置試験室室長には終始激励をいただいたことに深く感謝致します。

参考文献

- (1) B.G.Danly et al : IEEE Trans. Plasma Sci. PS-13(6), 383-388.(1985)
- (2) T.Sugawara et al : " 500kW WHISPERING GALLERY MODE GYROTRON ",
14th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Wave, (1990)
- (3) W.Kasperek et al : Int. J. ELECTRONICS, 64, 5 (1988)
- (4) L.Solymar : IRE Trans. MTT-7, 397-383 (1959)
- (5) 飯口真一 : " 導波管に対する一般的な伝送方程式" 、信学誌、44, 6, 955 (1961)
- (6) 小口文一 : " マイクロ波およびミリ波回路" 、丸善、東京(1964)

表1 各モードの発振パラメータ

メインモード		TE12,2	TE9,3	TE6,4
発振周波数		120.18GHz	121.80GHz	119.49GHz
ビーム電圧		65kV	74.8kV	74.5kV
アノード電圧 (対カソード)		35.2kV	32.2kV	32.2kV
ビーム電流		15.5~15.7A	~17.5A	~17.4A
ボディ電流		626~660mA	328mA	90mA
ヒータ電流		63.2A	64.8A	64A
外部磁場 コイル電流	C1	51.37A	52.24A	51.17A
	C2	51.37A	52.24A	51.16A
	G1	19.66A	18.32A	18.10A
	G2	24.45A	24.08A	24.52A
パルス幅		1ms	1ms	1ms
出力		~160kW	~150kW	~170kW

表2 TE_{12,2}のモード変換量の計算値

Frequency 120.18GHz

	φ17-φ101.6 1000mm 曲線アップテーパ	φ101.6-φ63.26 750mm 曲線ダウンテーパ	φ63.26-φ63.5 10mm 直線アップテーパ	Total
TE _{12,1}	1.379%	0.744%	0.020%	2.161%
TE _{12,2}	96.714%	96.817%	99.913%	93.444%
TE _{12,3}	0.453%	1.219%	0.043%	1.715%
TE _{12,4}	0.033%	0.235%	0.013%	0.281%
TE _{12,5}	0.008%	0.031%	0.006%	0.045%
TM _{12,1}	0.363%	0.731%	0.001%	1.095%
TM _{12,2}	0.950%	0.185%	0.001%	1.136%
TM _{12,3}	0.041%	0.022%	0.001%	0.064%
TM _{12,4}	0.009%	0.011%	0.001%	0.021%
TM _{12,5}	0.032%	0.005%	0.001%	0.038%

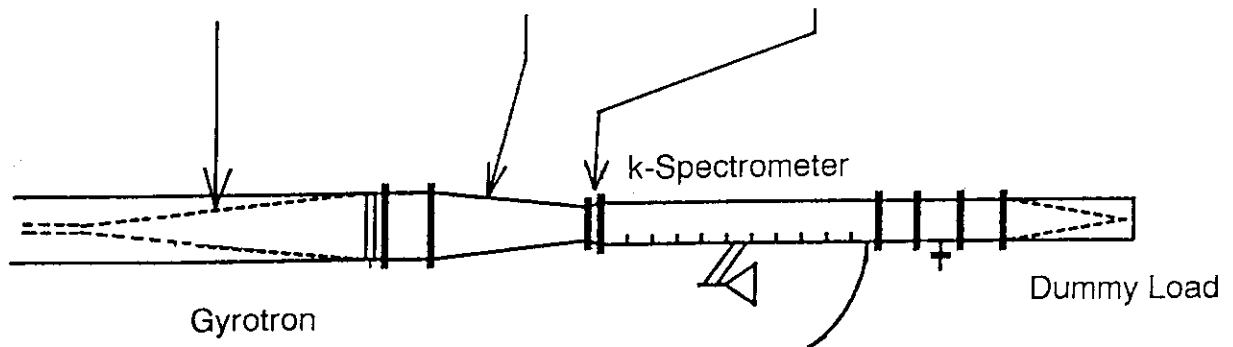


表3 TE_{9,3}のモード変換量の計算値

Frequency 121.80GHz

	φ17-φ101.6 1000mm 曲線アップテーパ	φ101.6-φ63.26 750mm 曲線ダウンテーパ	φ63.26-φ63.5 10mm 直線アップテーパ	Total
TE _{9,1}	0.007%	0.085%	0.005%	0.097%
TE _{9,2}	1.988%	8.065%	0.030%	10.083%
TE _{9,3}	98.907%	83.566%	99.895%	77.766%
TE _{9,4}	2.591%	6.819%	0.049%	9.459%
TE _{9,5}	0.058%	0.192%	0.014%	0.264%
TE _{9,6}	0.019%	0.064%	0.007%	0.090%
TM _{9,1}	0.030%	0.019%	0.000%	0.049%
TM _{9,2}	0.852%	0.804%	0.000%	1.656%
TM _{9,3}	0.126%	0.367%	0.000%	0.493%
TM _{9,4}	0.008%	0.015%	0.000%	0.023%
TM _{9,5}	0.004%	0.004%	0.000%	0.008%
TM _{9,6}	0.001%	0.002%	0.000%	0.003%

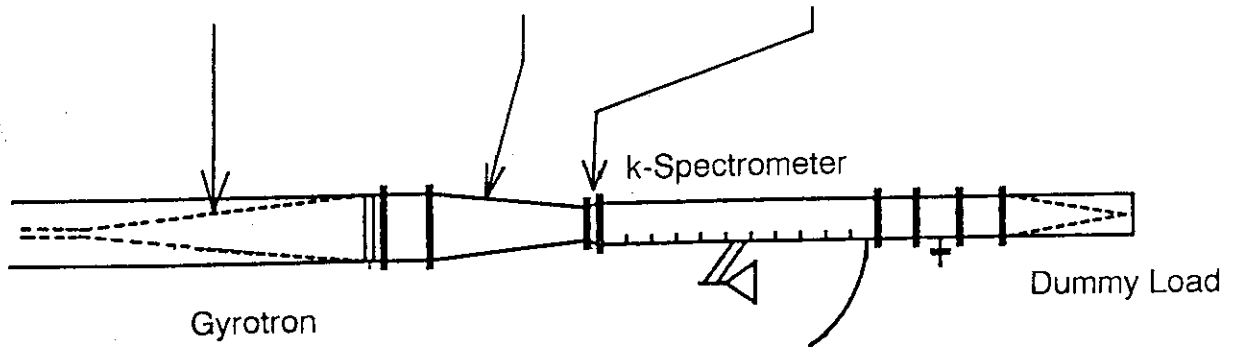
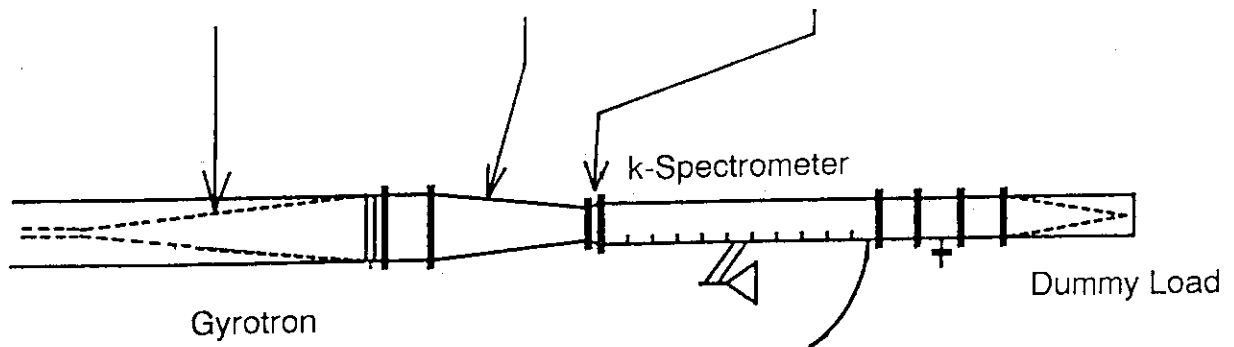


表4 TE6, 4のモード変換量の計算値

Frequency 119.49GHz

	φ17-φ101.6 1000mm 曲線アップテーパ	φ101.6-φ63.26 750mm 曲線ダウンテーパ	φ63.26-φ63.5 10mm 直線アップテーパ	Total
TE6,1	0.007%	0.041%	0.002%	0.050%
TE6,2	0.165%	0.409%	0.006%	0.580%
TE6,3	5.622%	8.645%	0.035%	14.302%
TE6,4	91.215%	78.267%	99.889%	69.371%
TE6,5	2.215%	11.526%	0.053%	13.749%
TE6,6	0.142%	0.388%	0.015%	0.545%
TM6,1	0.002%	0.003%	0.000%	0.005%
TM6,2	0.008%	0.005%	0.000%	0.013%
TM6,3	0.413%	0.458%	0.000%	0.871%
TM6,4	0.199%	0.245%	0.000%	0.444%
TM6,5	0.010%	0.011%	0.000%	0.021%
TM6,6	0.002%	0.002%	0.000%	0.004%



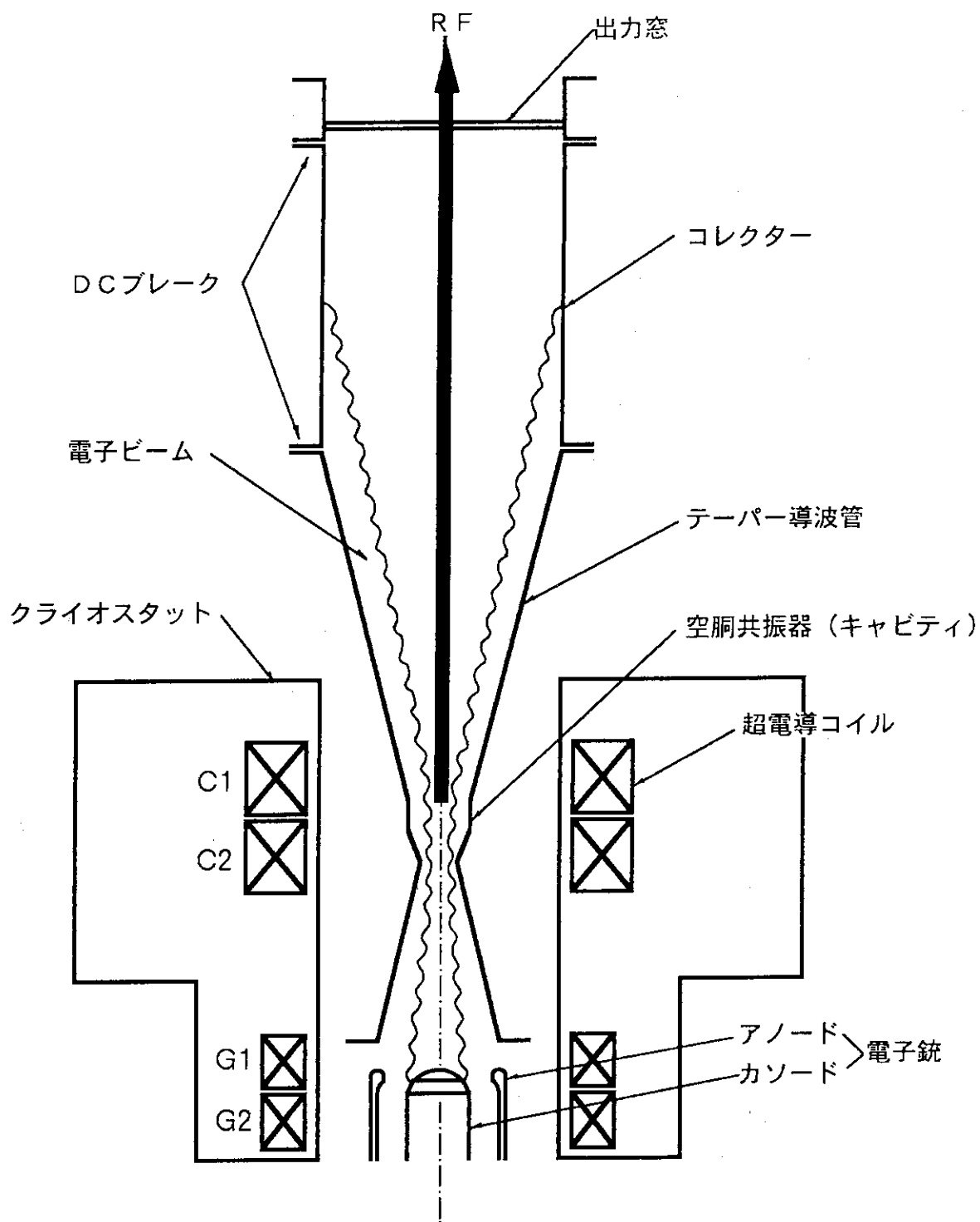


図1 ジャイロトロンの基本構成

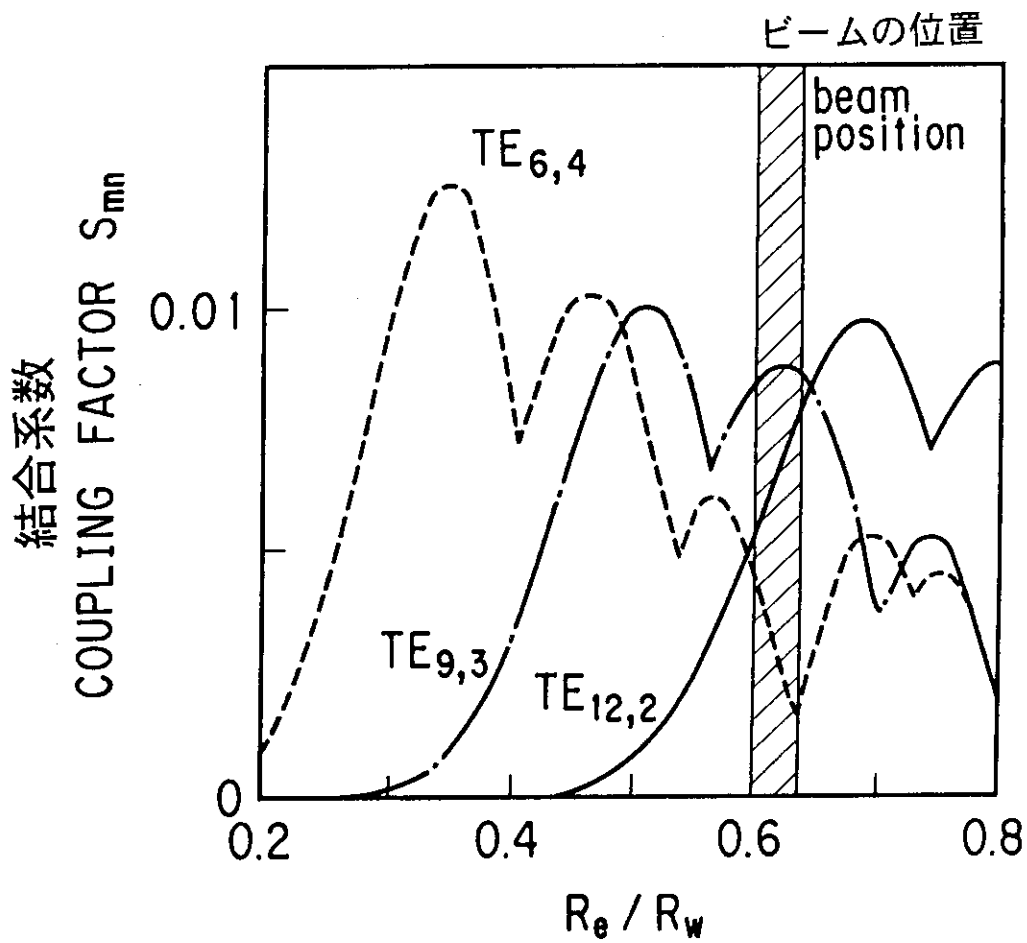


図2 キャビティモードの結合強度の径方向分布

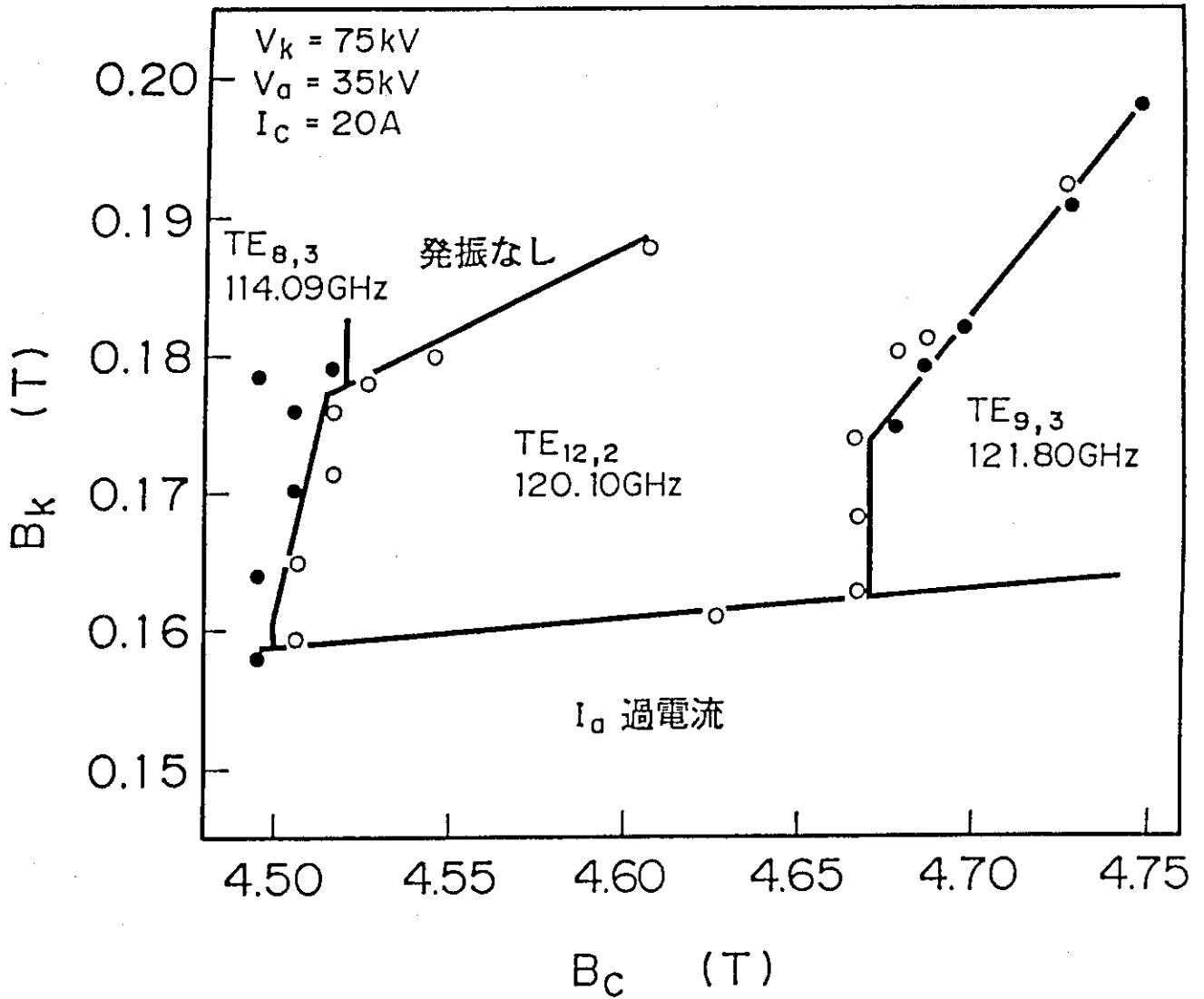


図3 キャビティ磁場と電子銃磁場に対するモードマップ

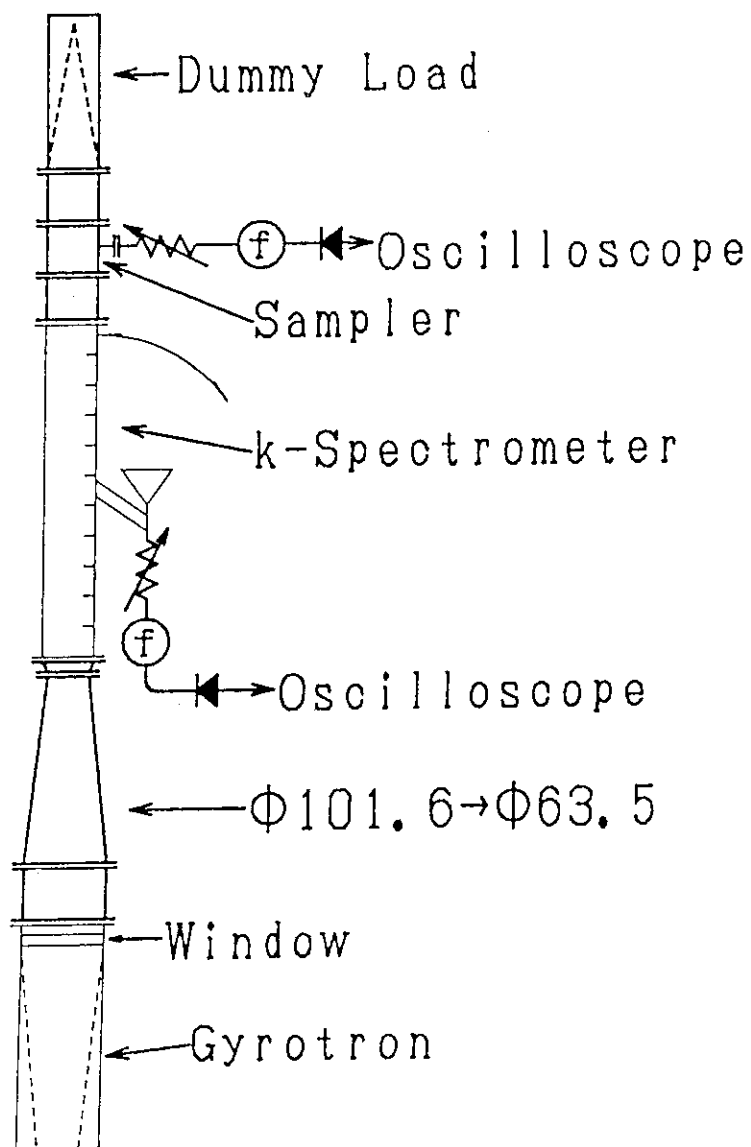
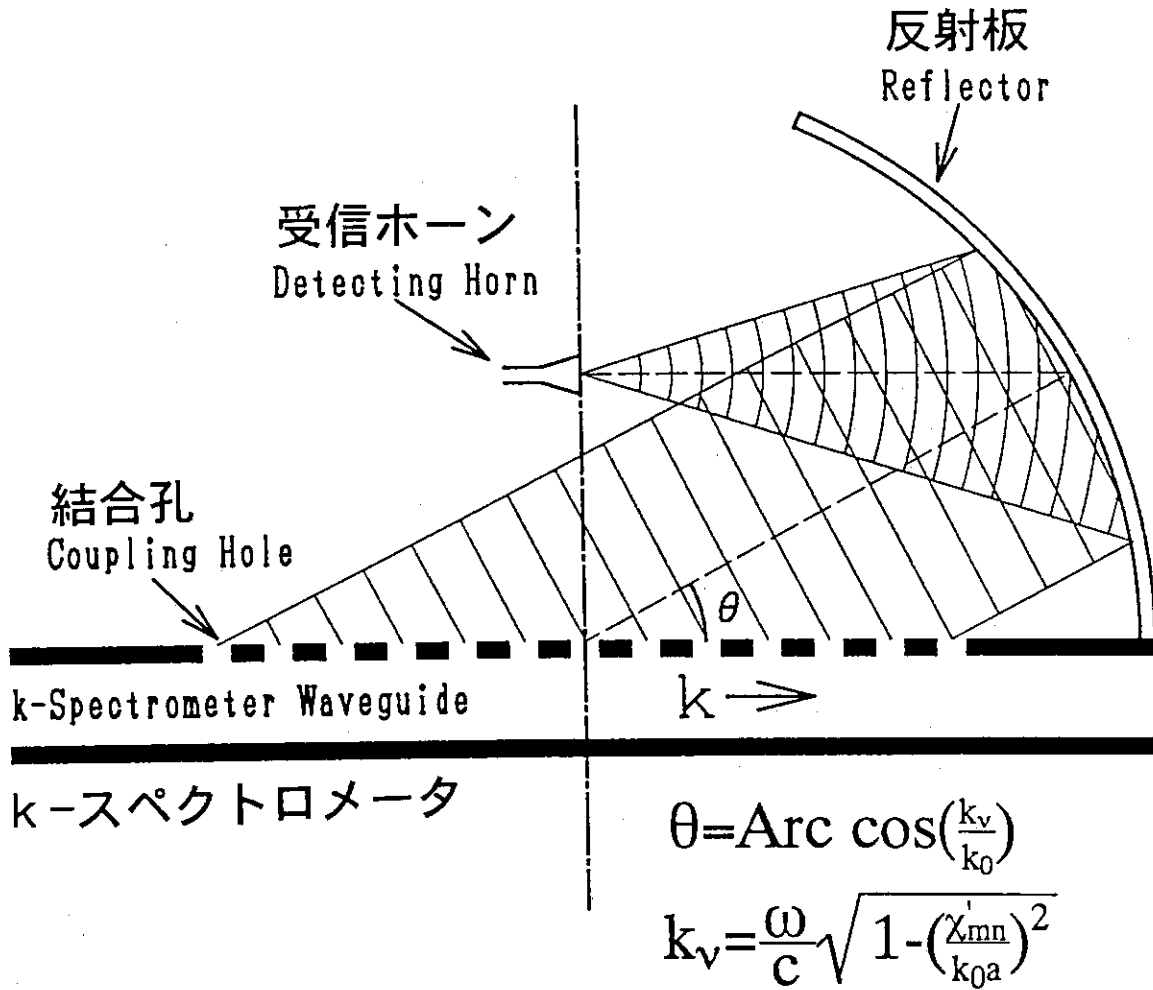
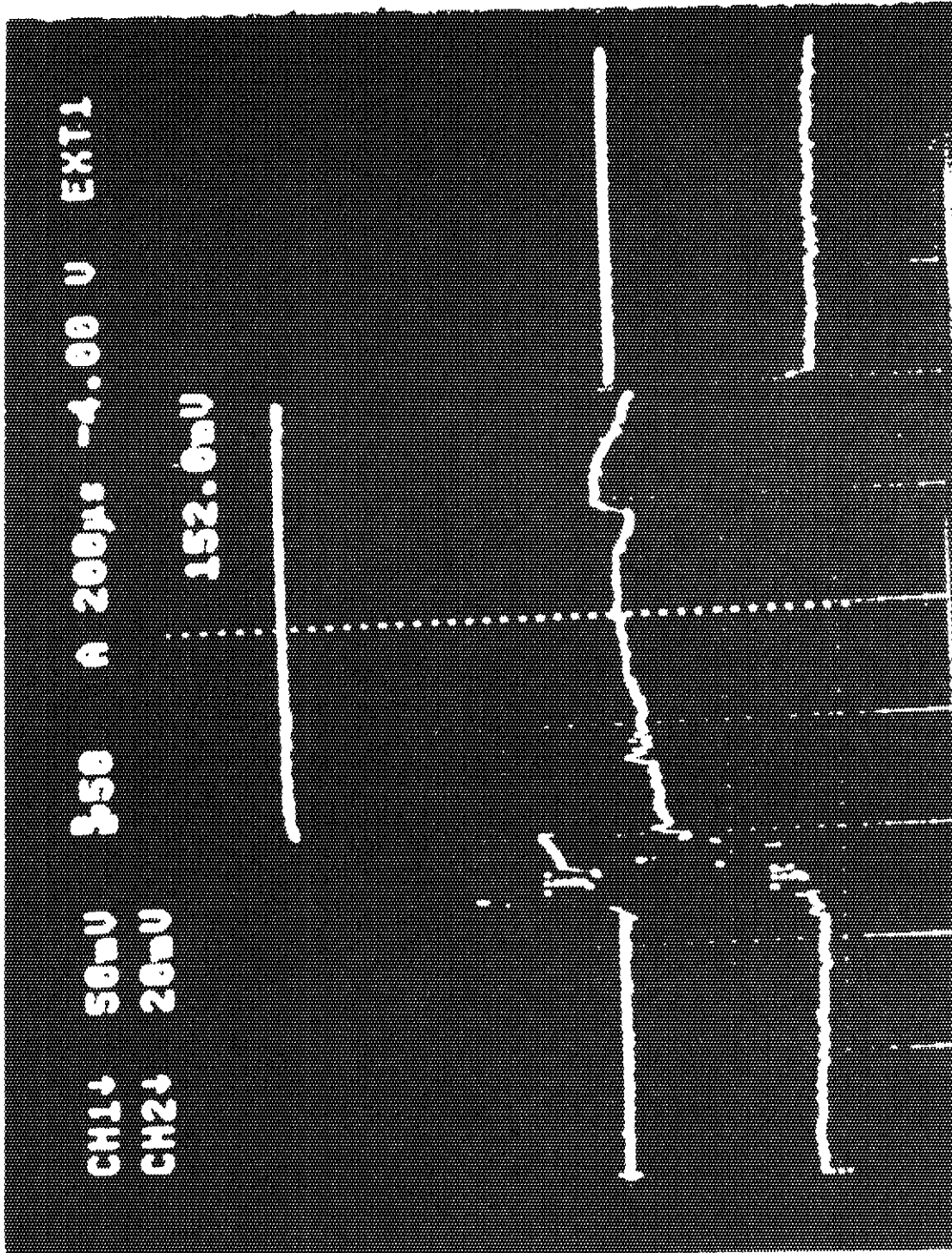


図4 測定装置の構成



- 各モードの固有値に対応した放射角で電磁波が放射される

図5 k-スペクトロメータの模式図



K-スペクトロメータで
測定した発振波形

サンプラードで測定した
発振波形

図6 代表的なジャイロトロンの発振波形

Mode Spectrum $\vec{E} \perp \vec{k}$

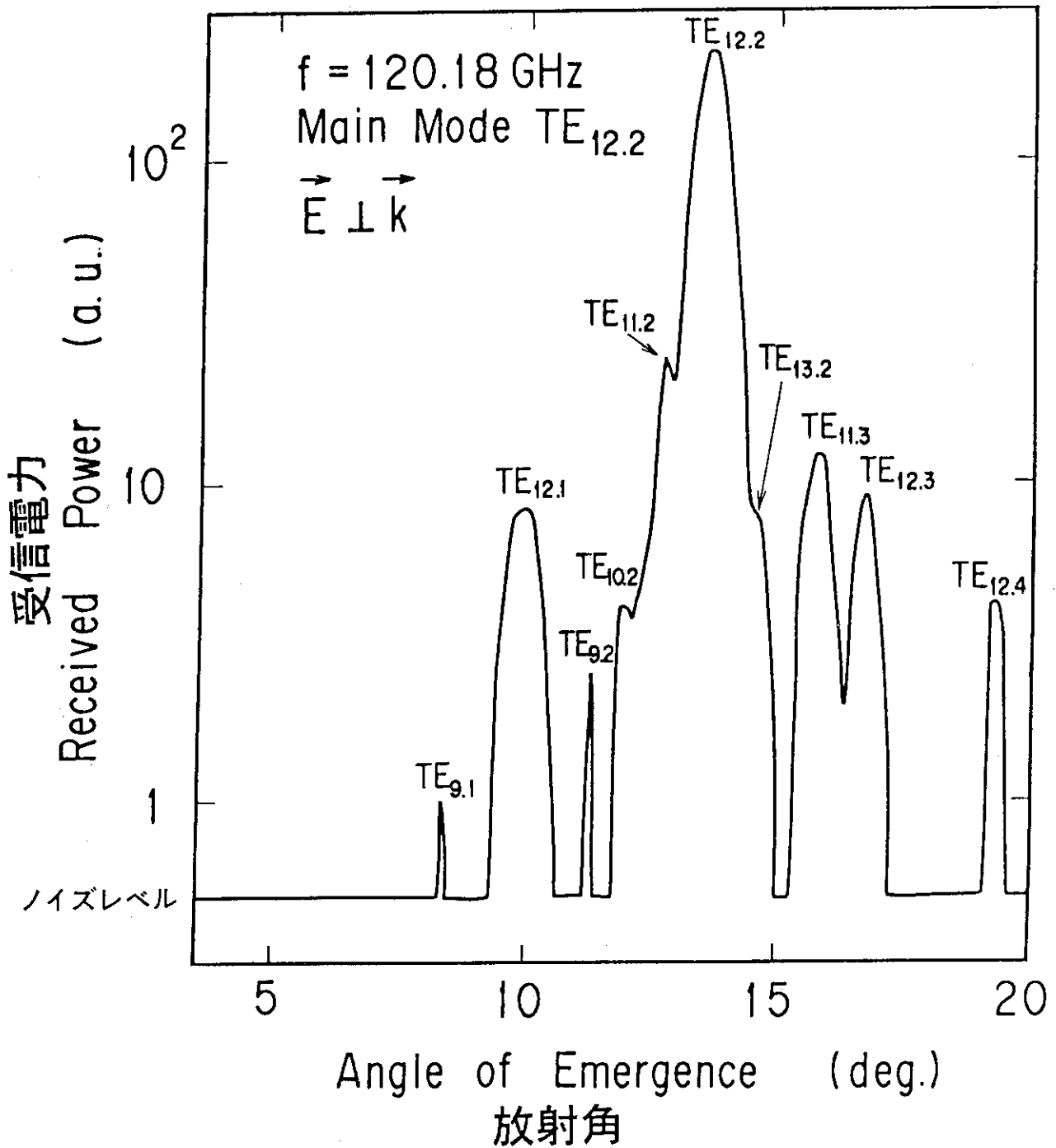


図7 主モード $\text{TE}_{12,2}$ ($E \perp k$) のときのモードスペクトラム

Mode Spectrum $\vec{E} // \vec{k}$

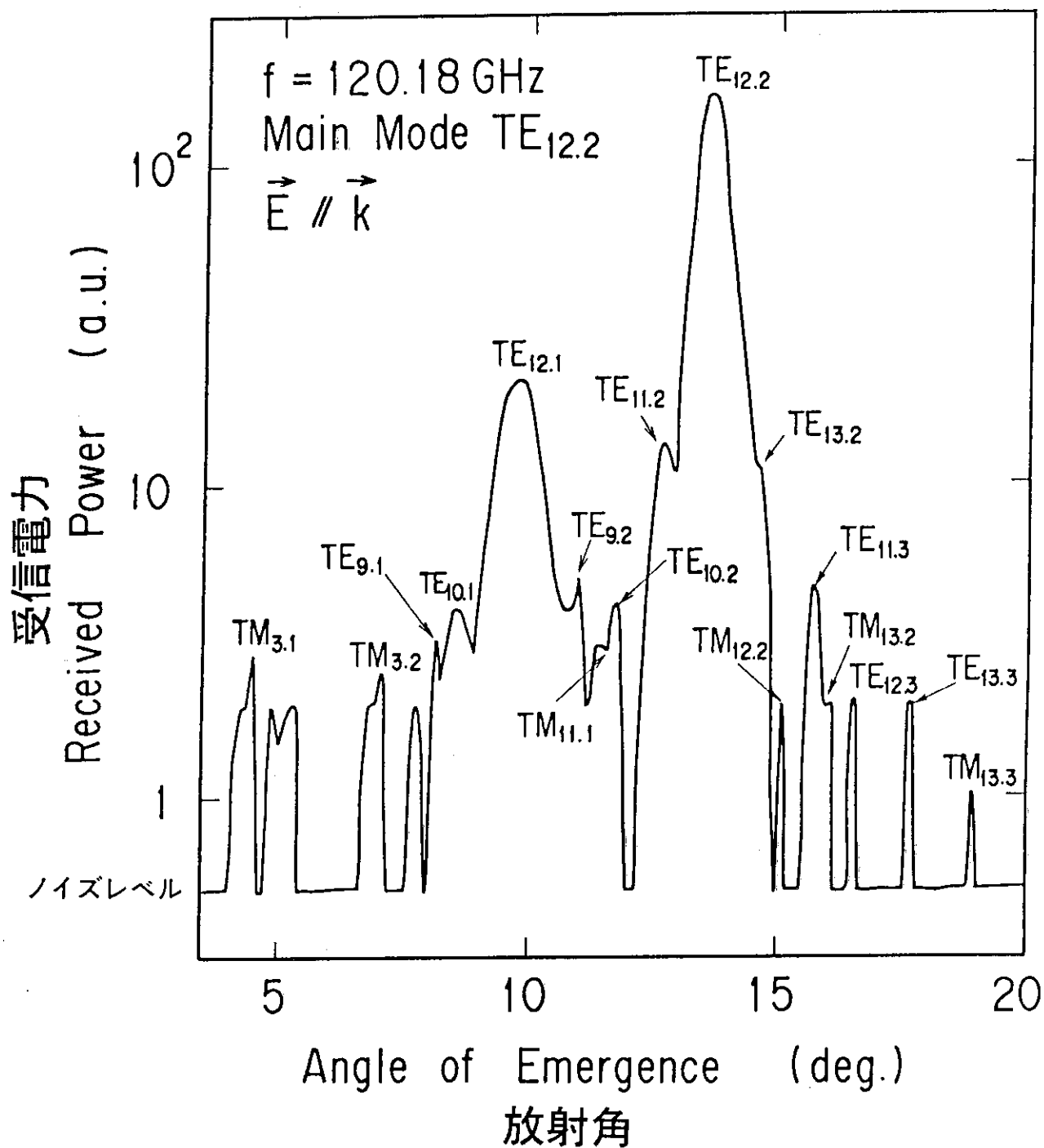


図8 主モード $TE_{12,2}$ ($E // k$) のときのモードスペクトラム

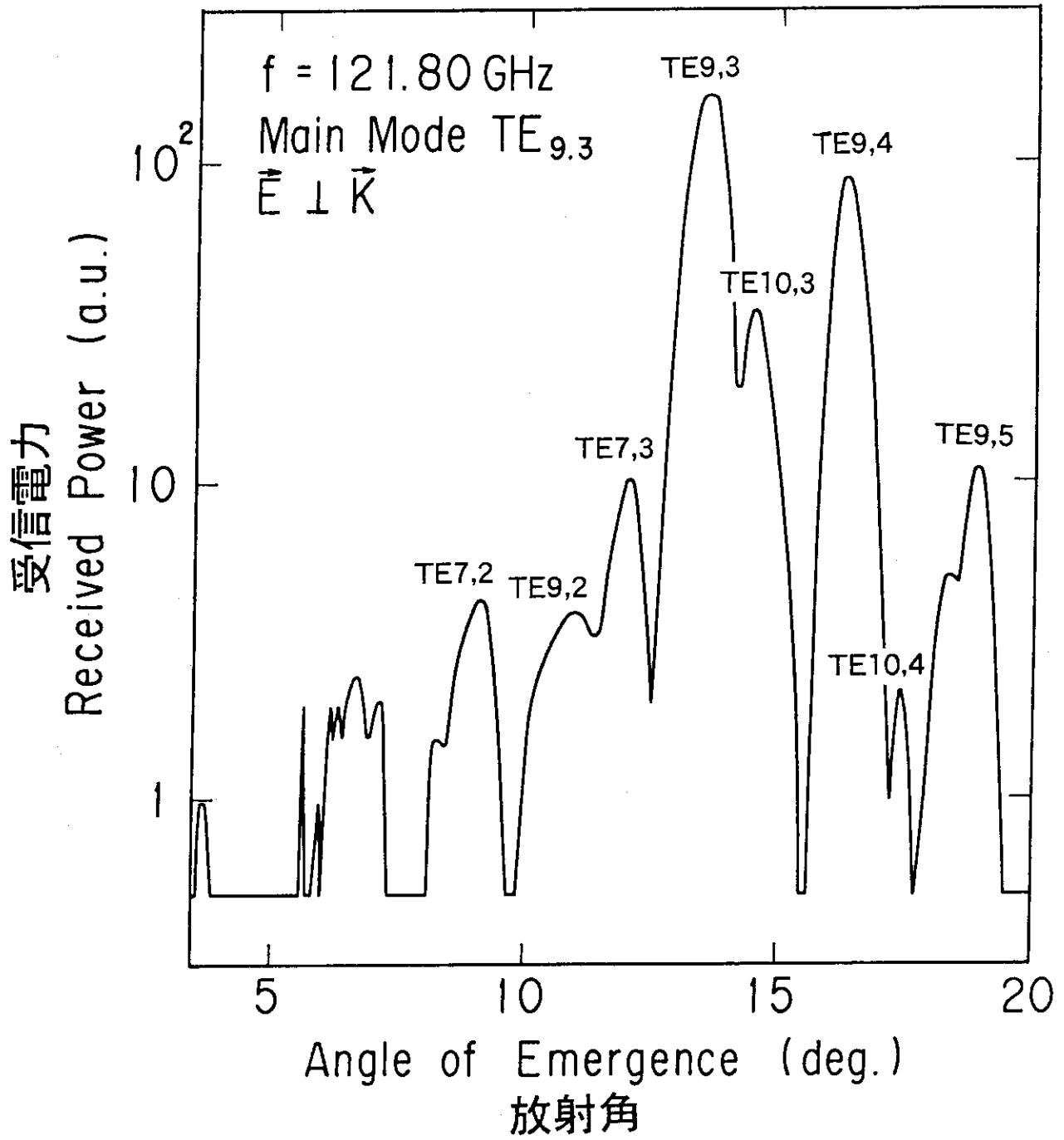


図9 主モード $\text{TE}_{9,3}$ ($E \perp k$) のときのモードスペクトラム

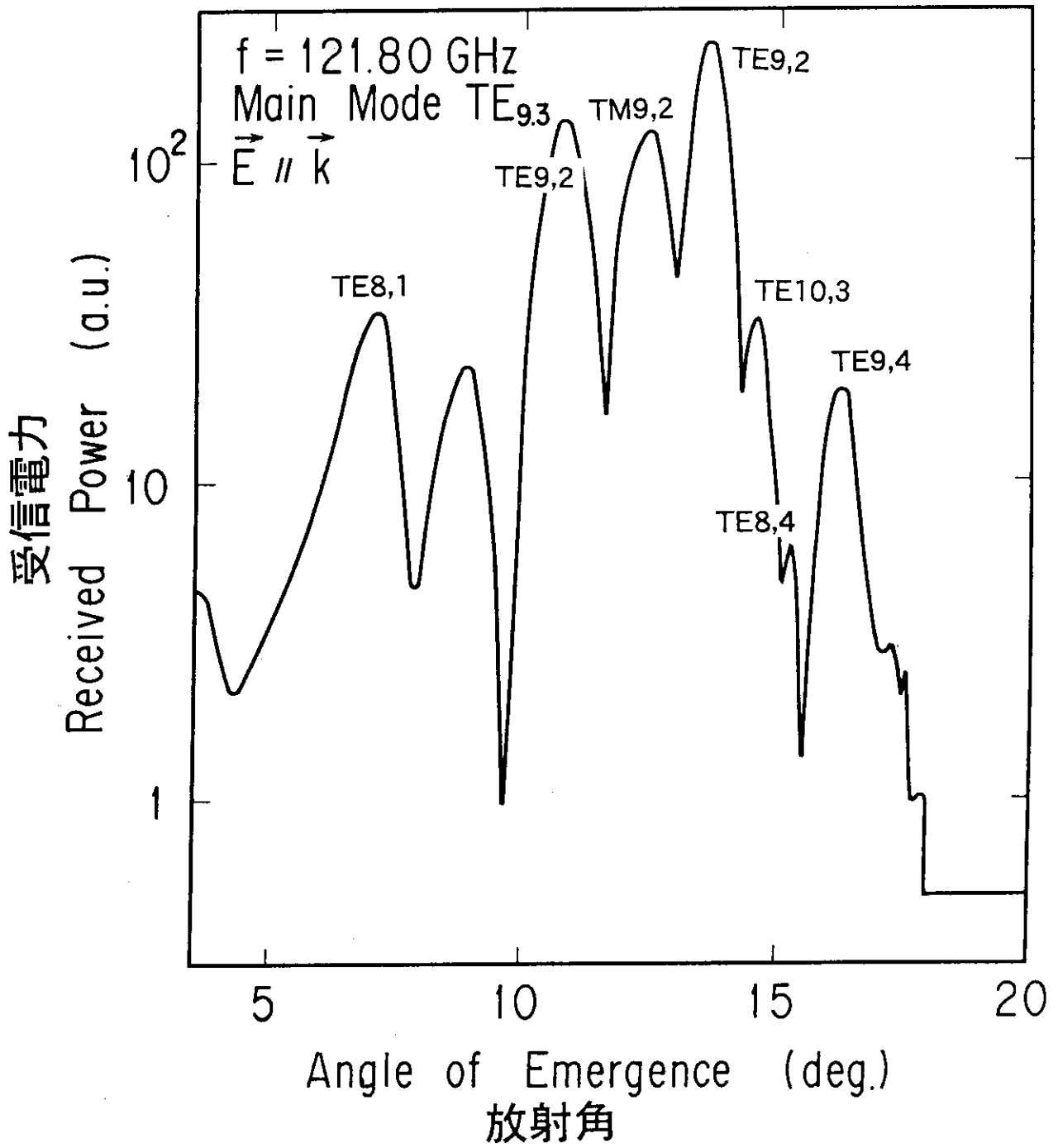


図10 主モード $TE_{9,3}$ ($E \parallel k$) のときのモードスペクトラム

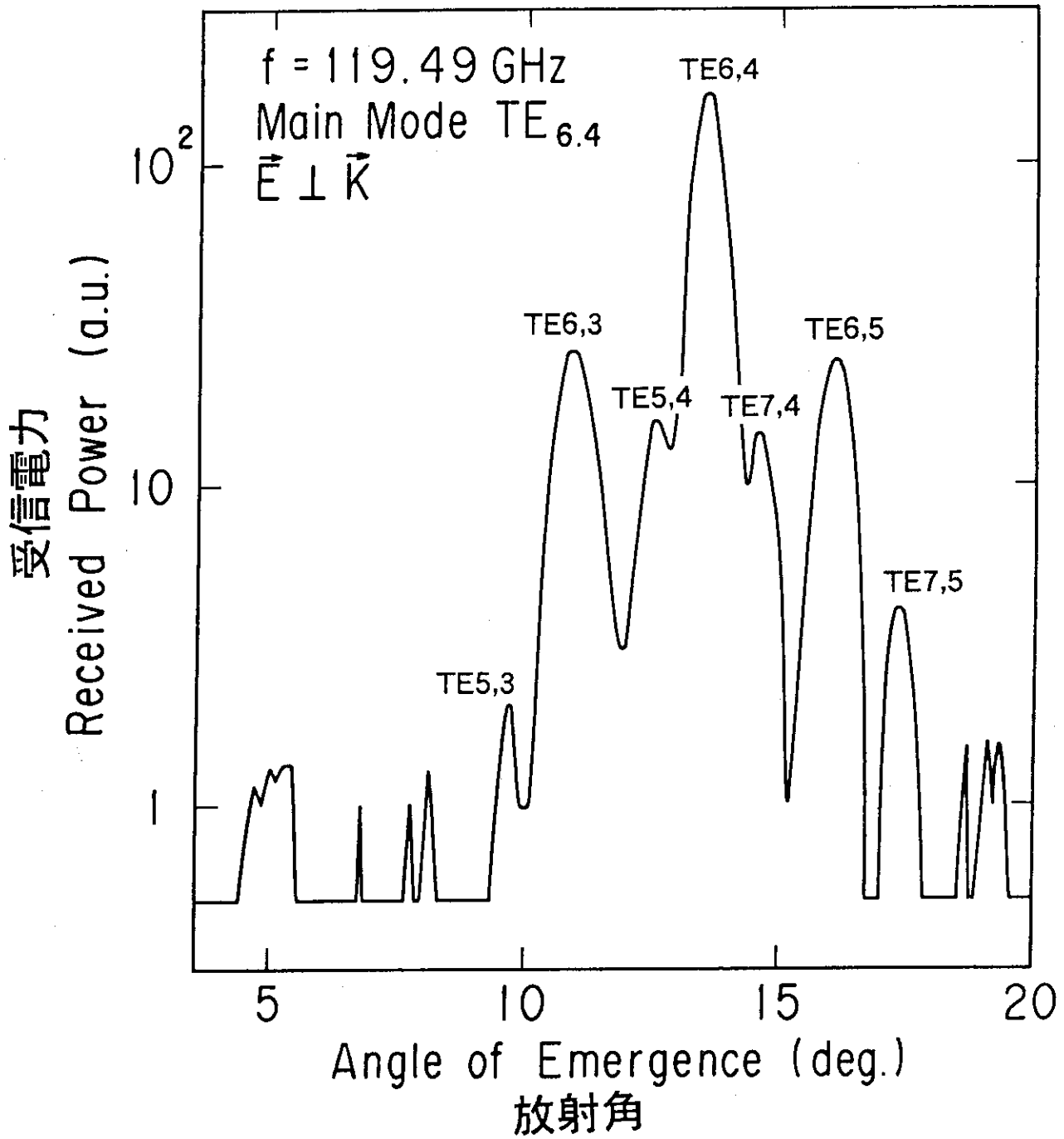


図11 主モード $\text{TE}_{6,4}$ ($E \perp k$) のときのモードスペクトラム

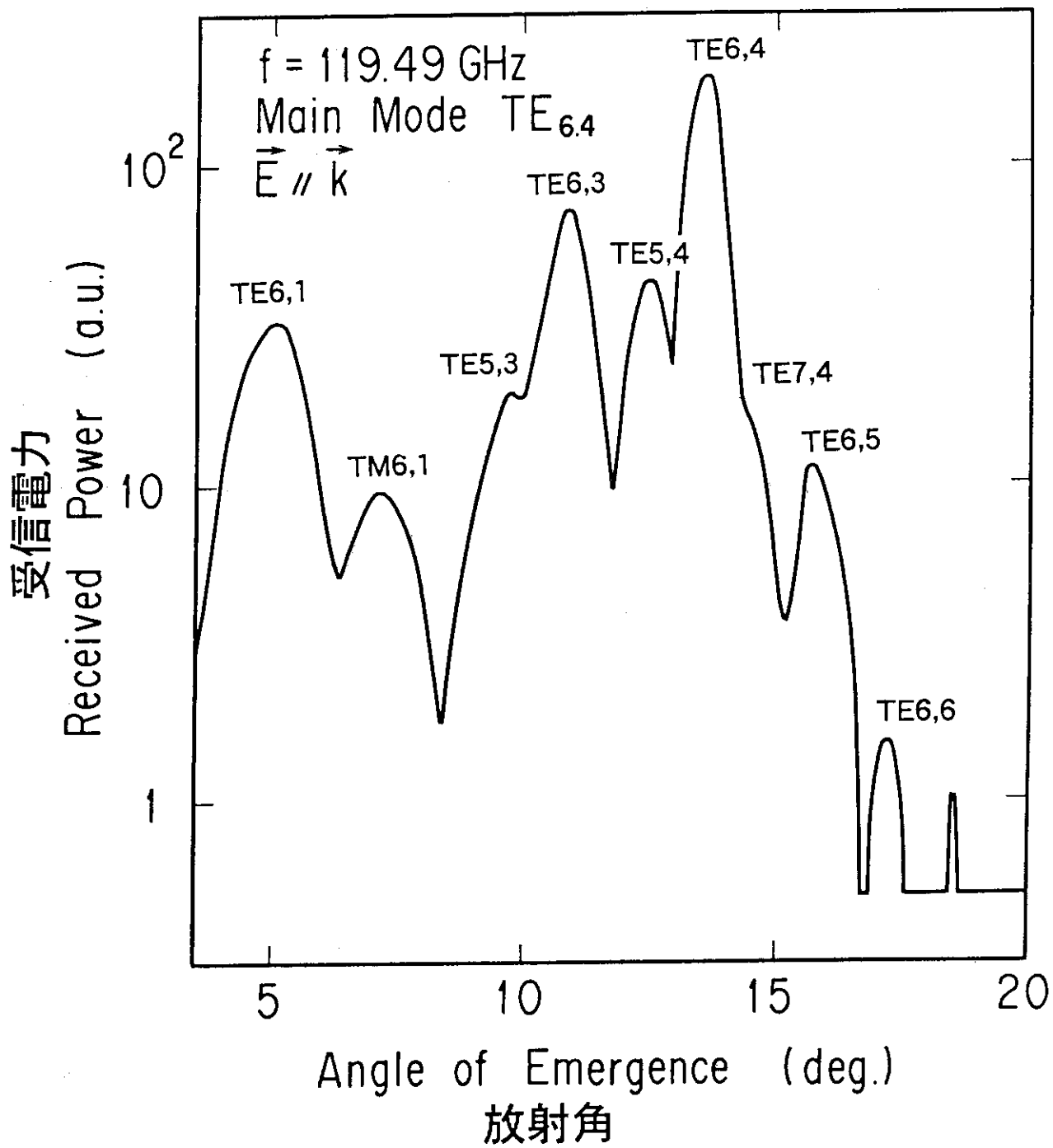


図12 主モード $TE_{6,4}$ ($E \parallel k$) のときのモードスペクトラム

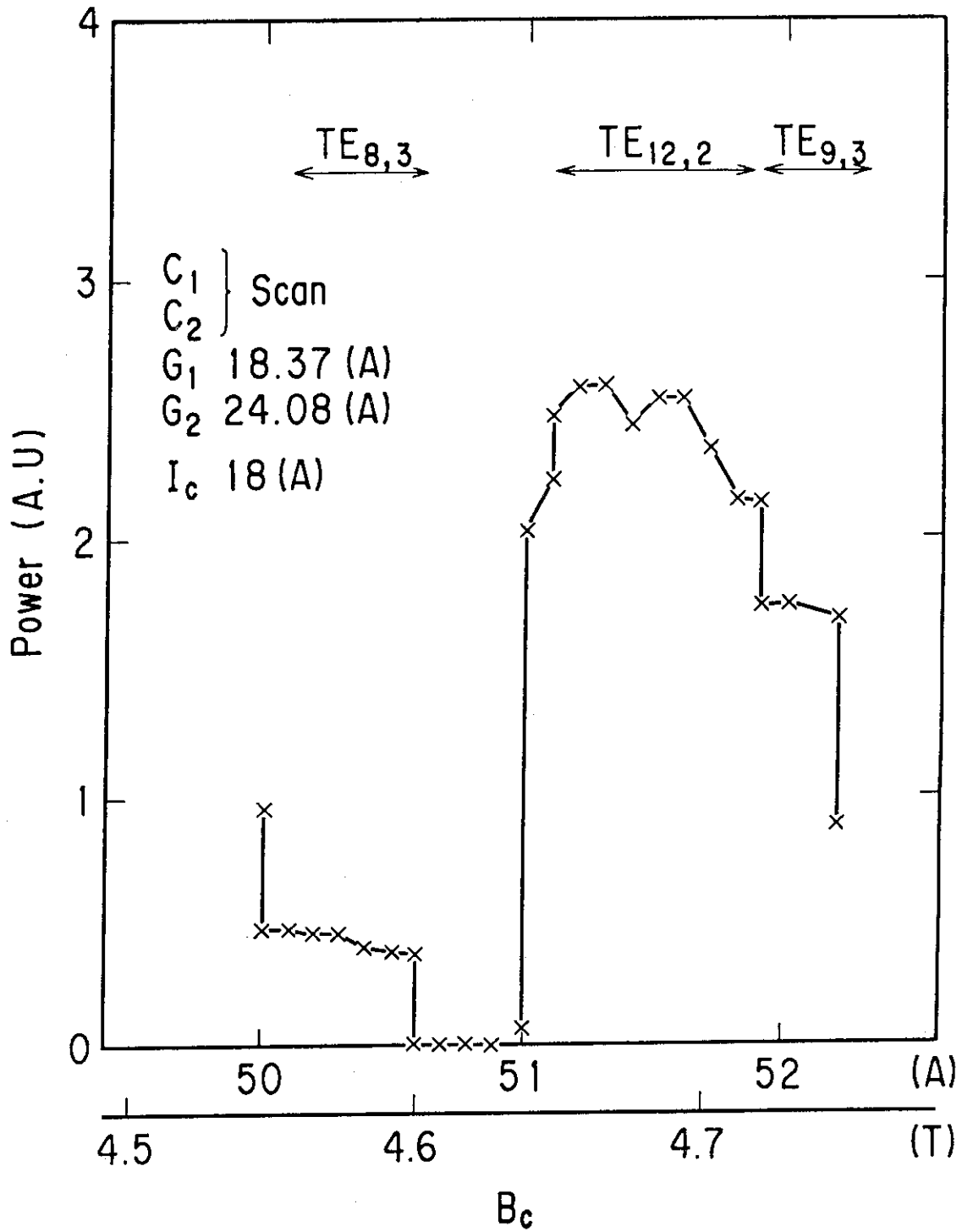
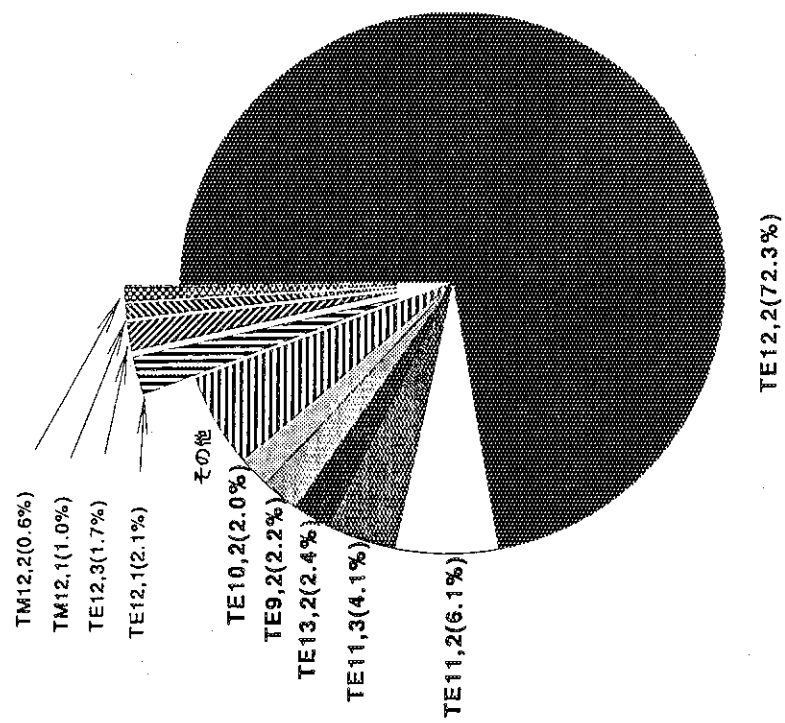


図13 キャビティ磁場に対する発振モード

測定結果



計算結果

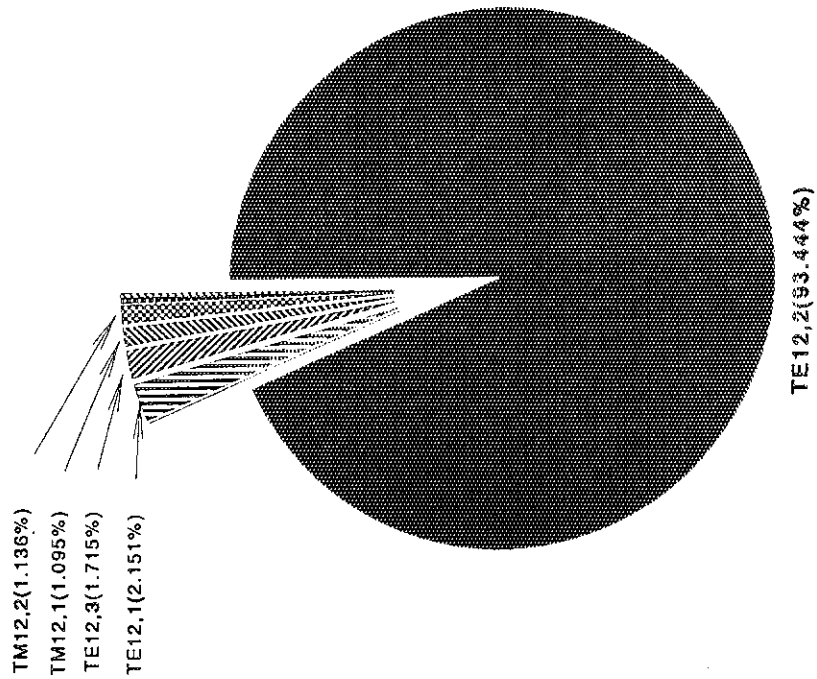
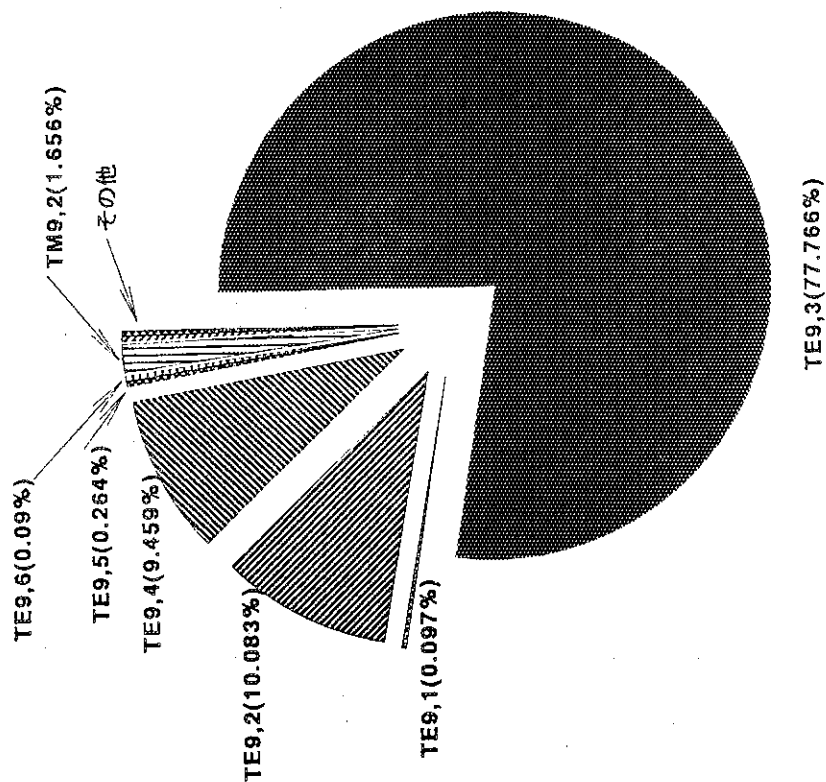


図 14 TE12, 2 モードを主モードとしたときの計算と測定との比較

計算結果



測定結果

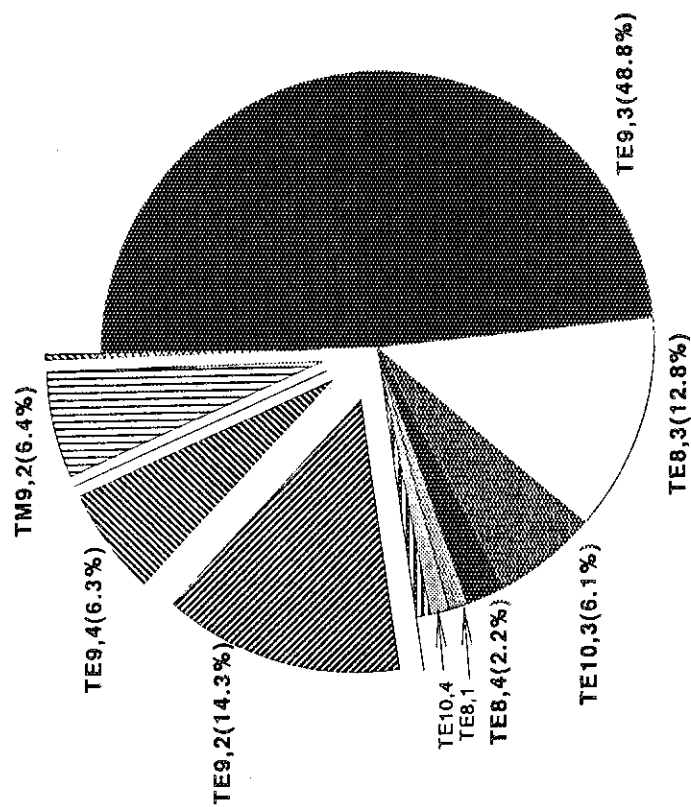
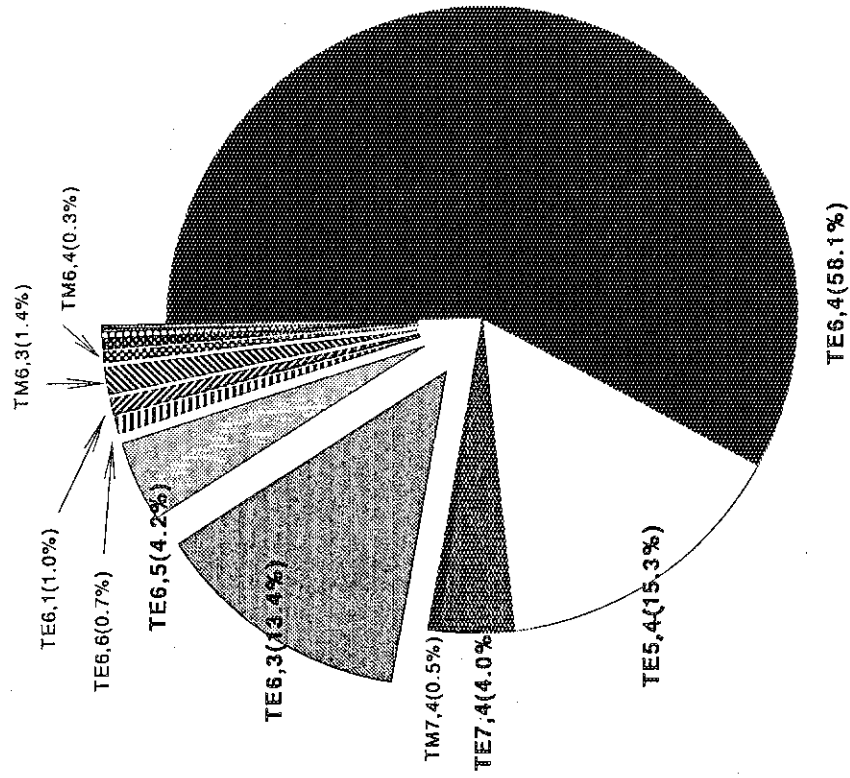


図15 TE9, 3モードを主モードとしたときの計算と測定の比較

測定結果



計算結果

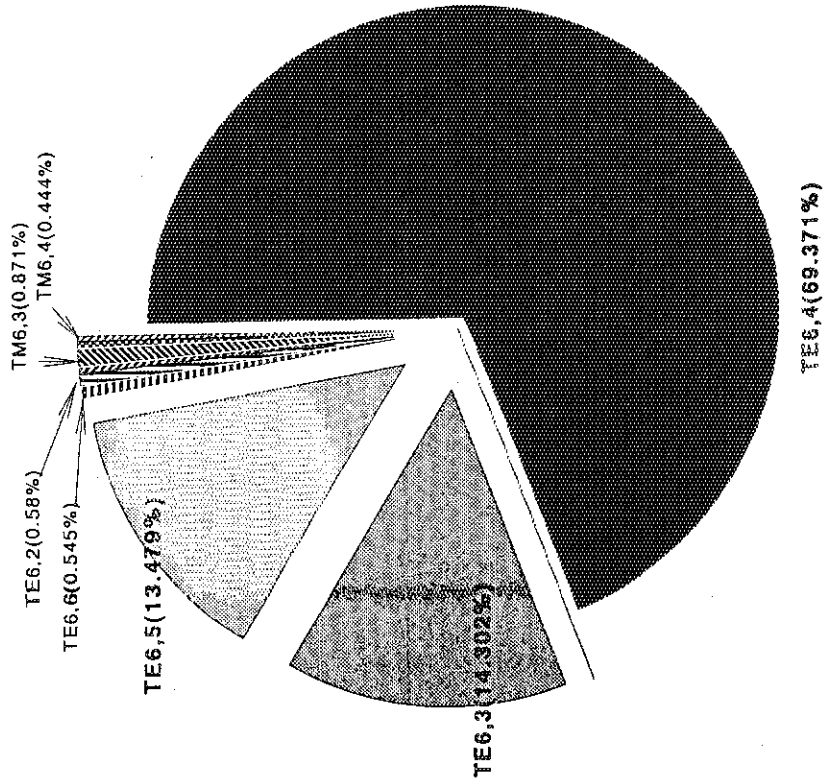


図16 TE6, 4モードを主モードとしたときの計算と測定の比較

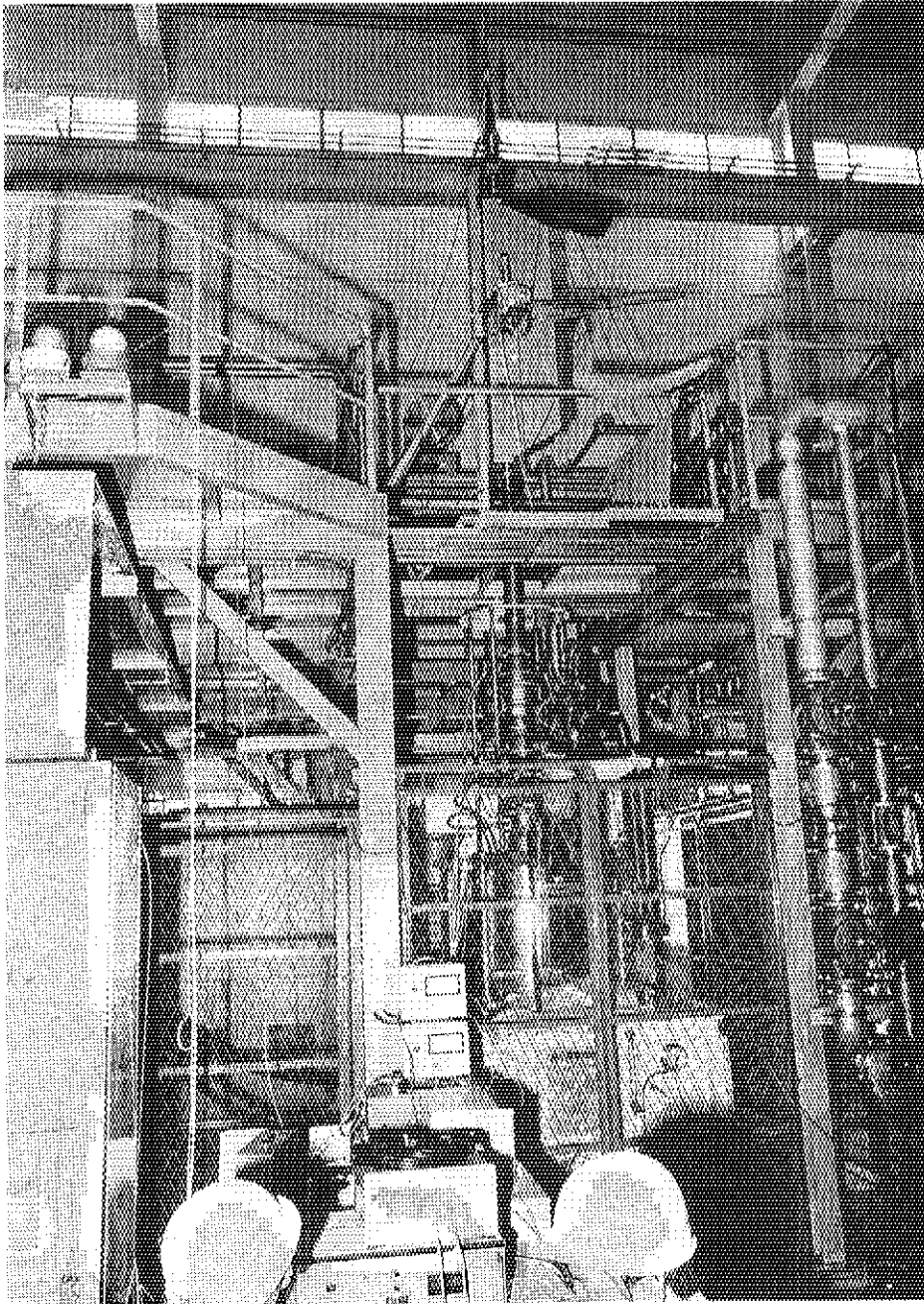


写真1 測定の様子

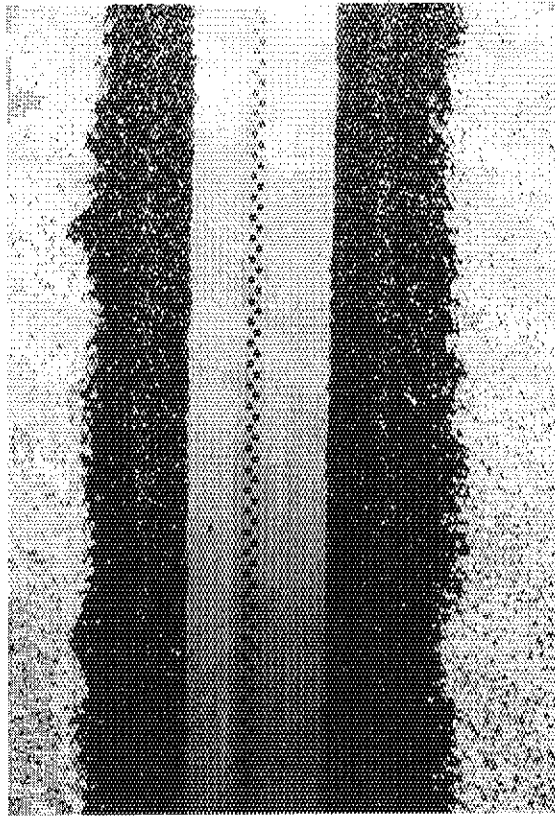


写真2 k-スペクトロメータの表面の結合孔