

JAERI-M
94-082

電子サイクロトロン放射光による
電子温度測定用回折格子分光器のための
回折格子フィルターの設計

1994年6月

佐藤 正泰・伊世井宣明・石田 真一

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、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, 1994

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

電子サイクロトロン放射光による電子温度測定用
回折格子分光器のための回折格子フィルターの設計

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

佐藤 正泰・伊世井宣明・石田 真一

(1994年3月31日受理)

多くのトカマク装置において、回折格子分光器を用いてプラズマからの電子サイクロトロン放射 (ECE) の2倍高調波を観測して、電子温度を測定することが行われている。この測定において重要なことは、回折格子分光器の高次光を2倍高調波の信号に含ませないことであり、その為に、不要なECEの高調波を回折格子分光器に入れないことである。ここでは、 $R_0/a > 3\cos\theta$ (R_0 : 大半径, a : 小半径, θ : 視線と水平面がなす角度) のトカマクにおいて、回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合の除去すべき放射の周波数帯域を求めた。エシェレット格子理論を基に、トカマク装置から分光器までの伝送系の導波管のベンドの部分に挿入する場合のJT-60用の回折格子フィルター (GF) を設計した。製作されたGFの反射率の測定を行い、測定結果と理論を比較し、GFとしての最適設計の方針を述べる。

Design of Grating Filter for Grating Polychromator on
Measurement of Electron Temperature Profile
from Electron Cyclotron Emission

Masayasu SATO, Nobuaki ISEI and Sinichi ISHIDA

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

(Received March 31, 1994)

The electron temperature measurement from the second harmonic electron cyclotron emission (ECE) using a grating polychromator has been made in many tokamaks. It is important for the measurement using the polychromator not to allow to enter the higher harmonic ECE which would spoil the signals. Here, the emission which should be omitted is obtained in the case of tokamak with $R/a > 3 \cos\theta$ (R : major radius, a : minor radius and θ : the angle between the sight and the horizontal line). The grating filter for JT-60 are designed according to a theory of the echelette grating. The reflectance of the grating filter are measured. By comparison between the theory and the measurement, the design of the grating is optimized.

Keywords : ECE, Grating Polychromator, Grating Filter, Electron Temperature Profile, Tokamak, Diagnostics

目 次

1. 序	1
2. 除去すべき放射	2
2.1 除去すべき放射の周波数帯域	3
2.2 JT-60における除去すべき放射の周波数帯域	6
3. 回折格子フィルターの設計	7
3.1 回折格子フィルターの特徴と設計方針	7
3.2 VO型回折格子フィルター ($p \perp, s \perp$) の設計	8
3.3 HO型回折格子フィルター ($p //, s //$) の設計	9
4. 回折格子フィルターの形状	10
5. 回折格子フィルターの反射率	11
5.1 $p \perp$ 型回折格子フィルター (VO) の測定	11
5.2 $s \perp$ 型回折格子フィルター (VO) の測定	11
5.3 $p //$ 型回折格子フィルター (HO) の測定	12
5.4 $s //$ 型回折格子フィルター (HO) の測定	12
6. 考察	13
7. JT-60UにおけるGFのトロイダル磁場の適用範囲	13
8. まとめ	14
謝辞	15
参考文献	16
付録	37

Contents

1. Introduction	1
2. Omitted Higher Harmonic Emission	2
2.1 Stop Frequency Band of the Emission	3
2.2 Stop Frequency Band of the Emission in JT-60	6
3. Design of the Reflection Grating Filter	7
3.1 Characteristics and Design Principle of the Grating Filter	7
3.2 Design of the Vertically Oriented (VO) Grating Filter (p_{\perp} , s_{\perp})...	8
3.3 Design of the Horizontally Oriented (HO) Grating Filter (p_{\parallel} , s_{\parallel}) ..	9
4. Structure of the Echelette Grating Filter	10
5. Reflectance of the Grating Filter	11
5.1 Measurement of the p_{\perp} Type Grating Filter (VO)	11
5.2 Measurement of the s_{\perp} Type Grating Filter (VO)	11
5.3 Measurement of the p_{\parallel} Type Grating Filter (HO)	12
5.4 Measurement of the s_{\parallel} Type Grating Filter (HO)	12
6. Discussion	13
7. Applicable Toroidal Field for Grating Filter in JT-60U	13
8. Summary	14
Acknowledgement	15
References	16
Appendix	37

1.序

プラズマからの電子サイクロトロン放射(Electron Cyclotron Emission (ECE))^{1, 2)}を観測して、電子温度分布を測定することは、多くのトカマクで行われている。ECEを観測するには、フーリエ分光法^{3~5)}、回折格子分光法^{6~9)}、ヘテロダイナミックラジオメーター¹⁰⁾、メッシュフィルター法¹¹⁾等の多くの測定方法がある。フーリエ分光法は、ECEスペクトル全体が観測でき、絶対較正が容易である。回折格子分光法は、高電子温度において、高S/Nで、空間、時間分解能が良い。ヘテロダイナミックラジオメーターは、低電子温度において、高S/Nで、空間、時間分解能が良い。メッシュフィルター法は空間、時間分解能は悪いが装置が簡便である。それぞれの測定法に特徴がある。JT-60においては¹²⁾、上記の特徴を考慮して、先ず、絶対較正が容易であるフーリエ分光法を基にしたシステムの開発を行った後に¹³⁾、高空間、時間分解能のバルクプラズマの電子温度測定のために、回折格子分光器を基にしたシステムの開発を行っている^{14, 15)}。この回折格子分光器を基にしたシステムにおいて重要なことは、電子温度の測定に不要なECEの高調波の波を分光器に入る前に遮断することである。この理由を、以下に簡単に述べる。通常、電子温度測定には光学的に厚い異常波の2倍高調波ECEを用いている。又、回折格子分光器には常に高次光がある為に、ECEの2倍高調波の1次光と4倍高調波の2次光が出口スリットと同じ位置に出射する。この4倍高調波の2次光は電子温度測定には誤差を生じ、電子温度測定に悪影響を与える。これを有効に除去するには、分光器へ4倍高調波の光が入射しないようにすることである。回折格子分光器を用いた電子温度測定では^{6~9)}、この様な不要な高調波の波を遮断する為に、トカマク装置から分光器までの光の伝送系の導波管のバンドの箇所、フィルターを挿入している。多くのトカマクでは、このフィルターとして回折格子フィルターが用いられているが、トカマク用の回折格子フィルターについてまとめた報告書は、著者の知る限りではない。本論文は、JT-60用の回折格子フィルター(Grating Filter(GF))の設計についてまとめた

ものである。第2章では、トカマクにおける除去すべき放射の周波数帯域について考察し、第3章では、JT-60用の回折格子フィルターの設計を行い、第4章では、回折格子フィルターの形状について考察する。第5章では、製作された回折格子フィルターの反射率の測定を行い、第6章では設計と測定結果について考察し、第7章では製作した回折格子フィルターをJT-60の改造装置であるJT-60Uに適用した場合のトロイダル磁場の適用範囲について述べ、まとめを第8章で述べる。単位系はMKSAを用いる。

2. 除去すべき放射

回折格子を用いた分光器は、次の回折の式を基に分光している¹⁶⁾。

$$\sin(\Phi) + \sin(\Psi) = m\lambda/d \quad (2.1)$$

Φ : 入射角、 Ψ : 出射角、 m : 次数、 λ : 波長、 d : 格子定数。

この式から分かることは、波長 λ の m 次光と波長 $m\lambda$ の1次光が、分光器内の光路差条件が同じであり、同じ出口スリットに光が出射する。これを言い換えると、周波数 f の m 次光と周波数 f/m の1次光が、分光器内の光路差条件が同じである。波長 λ (周波数 f) の m 次光と同じ出口スリットに出射する1次光の波長と周波数を表1に示す。又、トカマクプラズマからのECEには、基本波から高調波までであるから^{2~5)}、これを考慮して n 倍高調波 (n 倍高調波のサイクロトロン周波数を nf_{ce} と略す。 $f_{ce} = eB/m_e$ 、 e は電荷素量、 m_e は電子質量、 B は磁束密度の大きさ) の m 次光と同じ出口スリットに出射する1次光周波数を表2に示す。この表から分かるように、電子温度を求める2倍高調波ECEの1次光 (周波数 $2f_{ce}$) と4倍高調波ECEの2次光が分光器内で同じ光路差条件になる。更に、トカマク装置においては、第1次近似で磁場はトロイダル磁場であり、トロイダル磁場は大半径に反比例するので、 nf_{ce} にも図1に示す様な空間依存性がある。この為に、他の高調波の高次光が2倍高調波ECEの1次光と同じ光路差条件になる光が存在する。この様な光は、電子温度測定には

ものである。第2章では、トカマクにおける除去すべき放射の周波数帯域について考察し、第3章では、JT-60用の回折格子フィルターの設計を行い、第4章では、回折格子フィルターの形状について考察する。第5章では、製作された回折格子フィルターの反射率の測定を行い、第6章では設計と測定結果について考察し、第7章では製作した回折格子フィルターをJT-60の改造装置であるJT-60Uに適用した場合のトロイダル磁場の適用範囲について述べ、まとめを第8章で述べる。単位系はMKSAを用いる。

2. 除去すべき放射

回折格子を用いた分光器は、次の回折の式を基に分光している¹⁶⁾。

$$\sin(\Phi) + \sin(\Psi) = m\lambda/d \quad (2.1)$$

Φ : 入射角、 Ψ : 出射角、 m : 次数、 λ : 波長、 d : 格子定数。

この式から分かることは、波長 λ の m 次光と波長 $m\lambda$ の1次光が、分光器内の光路差条件が同じであり、同じ出口スリットに光が出射する。これを言い換えると、周波数 f の m 次光と周波数 f/m の1次光が、分光器内の光路差条件が同じである。波長 λ (周波数 f) の m 次光と同じ出口スリットに出射する1次光の波長と周波数を表1に示す。又、トカマクプラズマからのECEには、基本波から高調波までであるから^{2~5)}、これを考慮して n 倍高調波 (n 倍高調波のサイクロトロン周波数を nf_{ce} と略す。 $f_{ce} = eB/m_e$ 、 e は電荷素量、 m_e は電子質量、 B は磁束密度の大きさ) の m 次光と同じ出口スリットに出射する1次光周波数を表2に示す。この表から分かるように、電子温度を求める2倍高調波ECEの1次光 (周波数 $2f_{ce}$) と4倍高調波ECEの2次光が分光器内で同じ光路差条件になる。更に、トカマク装置においては、第1次近似で磁場はトロイダル磁場であり、トロイダル磁場は大半径に反比例するので、 nf_{ce} にも図1に示す様な空間依存性がある。この為に、他の高調波の高次光が2倍高調波ECEの1次光と同じ光路差条件になる光が存在する。この様な光は、電子温度測定には

誤差を生じるので不要であり、これを有効に除去するには、分光器へこの様な光が入射する前に、GFで除去する。ここでは、議論を簡単にするために、多くのトカマクで満足される $R_0/a > 3\cos\theta$ (R_0 :大半径、 a :小半径、 θ :視線と水平面がなす角度)の場合についてGFで除去すべき放射についての一般論を述べる。JT-60は $R_0/a > 3$ であり、この場合にあてはまる。但し、ここでは、アンテナの指向性を考慮しない。

2.1 除去すべき放射の周波数帯域

GFで除去すべき放射は、電子温度が得られる2倍高調波ECEの1次光と基本波、高調波ECEの高次光が同じ光路差条件になる放射であり、その周波数帯域を求める。ここでは、ECEの高調波の次数を n で、回折の次数を m で表し、それぞれの光について、GFで除去すべき周波数を求める。又、 n 倍高調波ECEの m 次光と同じ光路差条件になる1次光の周波数を、高次光表示周波数と呼び、 f_{nm} で表す($f_{nm} = n/mf_{11}$)。 f_{nm} の空間依存性を図2に示す。先ず、結論を次に示す。電子温度を求めるのに必要な光は、3倍高調波と重ならない2倍高調波であり、その周波数は低磁場端の3倍高調波周波数(この周波数を f_{31}^L と定義し、式は(2.2)で与える。)以下である。GFで除去すべき周波数は低磁場端の4倍高調波周波数(この周波数を f_{41}^L と定義し、式は(2.8)で与える。)以上である。即ち、結論は「除去すべき周波数は f_{41}^L 以上であり、 f_{31}^L 以下を除去してはならない。」である。この結論を以下に検証する。

$n=1: R_0/a > 3\cos\theta$ の場合、基本波ECEのいずれの次数の光も測定すべき2倍高調波ECE

と分光器内で同じ光路差条件にならないので、除去する必要はない。 f_{11} 、 f_{12} 、 f_{13} は(図2でX印参照。)、電子温度測定領域より低い。

$n=2: 2$ 倍高調波ECEは測定すべき光であり、除去すべきでない。図2で、 f_{21} 、 f_{22} 、 f_{23} (+印で表示、 f_{22} は f_{11} と重なっている。)を参照。しかしポートの傾き角度によっては、磁場の空間依存性の為に、低磁場側の3倍高調波ECEと測定すべき2倍高調波ECEが同じ周波数になる場合がある。(図2で、 f_{31} 以上の周波数が f_{21} に存在する。)この周波数が重なる場合、2倍高調波ECEの3倍高調波

ECEによる吸収の効果を考慮せずには簡単には電子温度を求めることはできないので、通常、電子温度測定には、この重なる周波数帯域は用いられていない。よって、2倍高調波ECEと3倍高調波ECEが重なる周波数帯域は、GFで除去しても良い。しかし、3倍高調波ECEと重ならない2倍高調波の周波数帯域は、電子温度測定に用いるのでGFで除去してならない。即ち、2倍高調波ECEが3倍高調波ECEの低磁場端と重なる周波数 (f_{31}^L) 以下を除去してはならない。 f_{31}^L と f_{31}^L に対応する2倍高調波ECEの空間位置(r_{ov})は次式で与えられる。

$$f_{31}^L \equiv \frac{3f_{ce}R_0}{R_0+a \cos \theta} = \frac{2f_{ce}R_0}{R_0+r_{ov} \cos \theta} \quad (2.2),$$

$$r_{ov} = \frac{-R_0 + 2a \cos \theta}{3 \cos \theta} \quad (2.3).$$

$n=3, m=1$: 3倍高調波ECEの1次光は1次光であるので、除去する必要はない。(図2で、 f_{31} を参照)しかし、 $n=2$ の項で述べた様に、2倍高調波ECEと3倍高調波ECEが重なる周波数帯域は、通常の電子温度測定には用いられていないので、GFで除去しても良い。即ち、 f_{31}^L 以上は除去しても良い。

$n=3, m=2$: 3倍高調波ECEの2次光の高次光表示周波数 (f_{32}) は、磁場の空間依存性を考慮すると、

$$\frac{3/2f_{ce}R_0}{R_0+a \cos \theta} < f < \frac{3/2f_{ce}R_0}{R_0-a \cos \theta} \quad (2.4)$$

にある。測定すべき2倍高調波ECEの1次光周波数が不等式(2.4)を満足しない場合と満足する場合に分けて考察する。

測定すべき2倍高調波ECEの1次光周波数が不等式(2.4)を満足しなければ、GFで光を除去する必要はない。これは、2倍高調波ECEの1次光の低磁場端の周波数(この周波数を f_{21}^L と定義する。)が上の不等式の右辺より大きい場合であり、即ち、

$$\frac{3/2f_{ce}R_0}{R_0-a \cos \theta} < \frac{2f_{ce}R_0}{R_0+a \cos \theta} \equiv f_{21}^L \quad (2.5)$$

であり、変形すると、 $\cos \theta < \frac{R_0}{7a}$ である。

測定すべき 2 倍高調波ECEの 1 次光周波数が不等式(2.4)を満足する場合について以下述べる。測定すべき 2 倍高調波ECEの 1 次光の低磁場端の周波数 (f_{21}^L) が 3 倍高調波ECEの 2 次光の高次光表示周波数 (f_{32}) と一致する周波数を捜す。この高次光表示周波数の 1 次光の周波数以上がGFで除去する放射である。 f_{21} が、ある空間位置 r_1 での f_{32} と一致する高次光表示での条件は、

$$\frac{3/2f_{ce}R_0}{R_0+r_1 \cos \theta} = \frac{2f_{ce}R_0}{R_0+a \cos \theta} = f_{21}^L L \quad (2.6),$$

$$r_1 = \frac{-R_0+3a \cos \theta}{4 \cos \theta} \quad (2.7)$$

である。よって、この 1 次光の周波数は $2f_{21}^L$ であり、低磁場端の 4 倍高調波ECEの周波数(f_{41}^L)である。これを改めて書くと、

$$f_{41}^L L \equiv \frac{4f_{ce}R_0}{R_0+a \cos \theta} \quad (2.8)$$

である。即ち、測定すべき 2 倍高調波ECEの 1 次光周波数が不等式(2.4)を満足する場合、低磁場端の 4 倍高調波ECE周波数(f_{41}^L)以上がGFで除去する周波数である。

$n=3, m=3$: 3 倍高調波ECEの 3 次光は基本波ECEの 1 次光と分光器内で同じ光路差条件となるので、基本波ECEの場合と同じである。(図 2 で f_{33} 参照、 f_{33} は f_{11} と重なっている。) 即ち、 $R_0/a > 3 \cos \theta$ の場合、3 倍高調波ECEの 3 次光は測定すべき 2 倍高調波ECEと分光器内で同じ光路差条件にならず、除去する必要はない。

$n=3, m>4$: 3 倍高調波ECEの 4 次光以上の光の高次光表示周波数は基本波ECEの 1 次光のそれより小さくなり、除去する必要はない。(図 2 で f_{34} 参照)

$n=4$: 3 倍高調波ECEの 2 次光の除去すべき周波数は f_{41}^L 以上であり、 f_{41}^L は低磁場側の 4 倍高調波ECEの周波数である。3 倍高調波ECEの 2 次光の除去すべき光を除去すれば、4 倍高調波ECEはすべて除かれる。図 2 で、 f_{41} 、 f_{42} (□印で表示、

f_{42} は f_{21} と重なっている)を参照。

$n>4$: 4倍高調波ECEがすべて除去されれば、4倍以上の高調波ECEはすべて除かれる。

図2で、 f_{51} 、 f_{52} 、 f_{62} (◇印で表示、 f_{62} は f_{31} と重なっている。)を参照。

以上の考察から、先の結論が検証された。即ち、除去すべき周波数は f_{41}^L 以上であり、 f_{31}^L 以下を除去してはならない。

2.2 JT-60における除去すべき放射の周波数帯域

トカマク実験のトロイダル磁場は、必ずしも最大値で実験するわけではなく、その実験目的にあったトロイダル磁場が選ばれるので、トロイダル磁場は広範囲に変わる。常にトロイダル磁場の変更に対応して最適のGFを選んでショット毎にGFを変更することは、JT60の場合、GFを人手によらず自動的に変更できる様にしない限り、不可能である。ここでは、GFを人手で変更する事を前提として、1枚のGFで、できるだけ広範囲のトロイダル磁場の運転に対応できるように、GFの設計を進める。このために、2.1で得られた結論「ECE測定から要求される除去すべき周波数は f_{41}^L 以上であり、 f_{31}^L 以下を除去してはならない。」を次の様に解釈する。GFのカットオフ周波数(定義は付録、図A2の f_c を参照、ここでは、プラズマ測定から決めた周波数と言う意味を込めて f^{cut} と略す。)が f_{41}^L 以下で、 f^{cut} が f_{31}^L 以上であれば、上の結論を満足するので、「 $f_{31}^L < f^{cut} < f_{41}^L$ を満足する様なGFを製作すれば上記の目的に合う。」と解釈する。

ここで、JT-60のECE測定用の二つのポートについて、除去すべき放射の周波数帯域を具体的に決定する。JT-60のECE測定用のポートは、水平面とそれぞれ 7.6° 、 46.7° の角度をなし、ここではそれぞれS4ポート、IN2Sポートと呼ぶ(図3参照)。JT-60の大半径(R_0)、小半径(a)、トロイダル磁場(Bt)の最大値は、それぞれ3m、0.95m、4.8Tである。よって、S4ポート、IN2Sポート共に、条件 $R_0/a > 3\cos\theta$ を満たすので、2.1の議論を適用できる。

1枚のGFで対応できるトロイダル磁場の運転領域を捜す。各ポートについて、Bt

に対応する f_{31}^L 、 f_{41}^L を表3に示す。例えば、最大トロイダル磁場4.8Tの f_{31}^L （S4ポートの場合、306.9GHz）を下回らない f_{41}^L のBt（S4ポートの場合、4T）まで、1枚のGFで対応可能である。このように考えていくと、表4に示す様に、JT-60の場合、 $2T < Bt < 4.8T$ に対して、3枚のGFで対応が可能であることがわかる。ここでは、 f^{cup} を1枚のGFで対応する f^{cup} の周波数領域の中間値と定義する。

3.回折格子フィルターの設計

3.1回折格子フィルターの特徴と設計方針

エシェレット格子の理論¹⁷⁾を基にして、回折格子フィルターを設計する。文献17によれば、入射方向がほぼ水平面にあるとした時に、溝方向が鉛直線にある回折格子をVertically Oriented grating(VO型回折格子)と、溝方向が水平にある回折格子をHorizontally Oriented grating(HO型回折格子)と呼び、更に、入射光の電場方向と回折格子の溝の方向により、回折格子フィルターは次の4つに分類されている（図A1参照）。ここでは、記号は文献17に従い、それを以下に示す。又、VO型回折格子、HO型回折格子のGFをそれぞれVOGF、HOGFと略す。

(1)p偏光、VO型回折格子：シンボルp⊥

(2)p偏光、HO型回折格子：シンボルp//

(3)s偏光、VO型回折格子：シンボルs⊥

(4)s偏光、HO型回折格子：シンボルs//

文献17のうちGFの設計に関係する箇所を付録に再録する。文献17によれば、回折格子の溝が偏光の電場の方向と直角のGF（p⊥型とs//型）では、その特性が理論の予想値と完全に一致し、回折格子の溝が偏光の電場の方向と平行のGF（s⊥型とp//型）では、 λ_c 、 λ_o は理論の予想値と一致しないが、p//型GFの λ_s はこの理論の予想値とほぼ一致する（付録参照、 λ_s 、 λ_c 、 λ_o の定義については付録参照）。図A3

に対応する f_{31}^L 、 f_{41}^L を表3に示す。例えば、最大トロイダル磁場4.8Tの f_{31}^L （S4ポートの場合、306.9GHz）を下回らない f_{41}^L のBt（S4ポートの場合、4T）まで、1枚のGFで対応可能である。このように考えていくと、表4に示す様に、JT-60の場合、 $2T < Bt < 4.8T$ に対して、3枚のGFで対応が可能であることがわかる。ここでは、 f^{cup} を1枚のGFで対応する f^{cup} の周波数領域の中間値と定義する。

3.回折格子フィルターの設計

3.1回折格子フィルターの特徴と設計方針

エシェレット格子の理論¹⁷⁾を基にして、回折格子フィルターを設計する。文献17によれば、入射方向がほぼ水平面にあるとした時に、溝方向が鉛直線にある回折格子をVertically Oriented grating(VO型回折格子)と、溝方向が水平にある回折格子をHorizontally Oriented grating(HO型回折格子)と呼び、更に、入射光の電場方向と回折格子の溝の方向により、回折格子フィルターは次の4つに分類されている（図A1参照）。ここでは、記号は文献17に従い、それを以下に示す。又、VO型回折格子、HO型回折格子のGFをそれぞれVOGF、HOGFと略す。

- (1)p偏光、VO型回折格子：シンボルp⊥
- (2)p偏光、HO型回折格子：シンボルp//
- (3)s偏光、VO型回折格子：シンボルs⊥
- (4)s偏光、HO型回折格子：シンボルs//

文献17のうちGFの設計に関係する個所を付録に再録する。文献17によれば、回折格子の溝が偏光の電場の方向と直角のGF（p⊥型とs//型）では、その特性が理論の予想値と完全に一致し、回折格子の溝が偏光の電場の方向と平行のGF（s⊥型とp//型）では、 λ_c 、 λ_o は理論の予想値と一致しないが、p//型GFの λ_s はこの理論の予想値とほぼ一致する（付録参照、 λ_s 、 λ_c 、 λ_o の定義については付録参照）。図A3

によれば、入射角 45° 付近では、 $P\perp$ 型、 $s//$ 型、 $p//$ 型のGFがシャープなフィルター特性を持っているから、この三つのタイプが電子温度測定用の回折格子分光器のGFとして適当であり、 $p\perp$ 型GFはカットオフ $\Delta\lambda_c$ が他のどのGFよりも狭いので、最も適していると期待できる。

回折光の最も長い波長($\lambda_{0\alpha}$) (VOGFとHOGFに対して、それぞれ文献17の式(2)及び(5)が対応)はGFの透過率が半分になる波長である。これが表4の f^{cup} (1枚のGFで対応する f^{cup} の周波数領域の中間値)になるように格子定数(d)を決める。GFは導波管のバンドの部分に設置するので、入射角は $\alpha=45^\circ$ である。GFに入射する光の拡がり角(ϵ)により、GFの特性が異なる。導波管を伝播するECEの光の拡がり角が分からないので、得られた格子定数(d)と適当な拡がり角 ϵ に対するGFのカットオフ周波数(f_c)、飽和周波数(f_s) (f_s の定義について付録参照)を求め、これらの値がECE測定からの f^{cup} の最大値と最小値を比較し、許容される拡がり角を求める。第5章において、測定された反射率を設計値と比較して、拡がり角についての考察を行う。

3.2 VO型回折格子フィルター($p\perp$ 、 $s\perp$)の設計

VOGFの透過率が半分になる周波数は文献17の式(2)の次式で与えられる。

$$\lambda_{0\alpha}/d = \sin \alpha + 1 \quad (3.1)$$

入射角 $\alpha=45^\circ$ を代入すると、

$$\lambda_{0\alpha}/d = 1.7071 \quad (3.2) \quad \text{である。}$$

この $\lambda_{0\alpha}$ の周波数が f^{cup} になるような格子定数(d)を求めると、

$$d = 0.5858 c / f^{cup} \quad (3.3).$$

表4に示されている f^{cup} に対して得た格子定数(d)を表5に示す。GFに入射する光の拡がり角を求める事は難しいが、この拡がり角がカットオフ周波数、飽和周波数を決める。文献17によれば、VOGFのカットオフ周波数、飽和周波数は、文献17の式(3)の次式で与えられる。

$$\lambda/d = \cos \epsilon \{ \sin (\alpha - \epsilon) + 1 \} \quad (3.4)$$

$$\lambda/d = \cos \epsilon \{ \sin (\alpha + \epsilon) + 1 \} \quad (3.5)$$

これらの式を周波数の式に変換すると、

$$f_c = [d/c \cos \epsilon \{ \sin (\alpha - \epsilon) + 1 \}]^{-1} \quad (3.6)$$

$$f_m = [d/c \cos \epsilon \{ \sin (\alpha + \epsilon) + 1 \}]^{-1} \quad (3.7)$$

拡がり角 $\epsilon = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ に対する f_c, f_m を表6に示す。表4の f^{cup} と比較するとおよそ $\epsilon < 5^\circ$ であれば、 $f_c \sim \max(f^{cup})$ 、 $f_m \sim \min(f^{cup})$ であるので、GFの格子定数としては、表5を採用する。

3.3 HO型回折格子フィルター(p//、s//)の設計

HOGFの透過率が半分になる周波数は文献17の式(5)の次式で与えられ、

$$\lambda_{oa}/d = \cos \theta \quad (3.8)$$

入射角 $\theta = 45^\circ$ を代入すると、

$$\lambda_{oa}/d = 0.7071 \quad (3.9) \text{ である。}$$

この λ_{oa} の周波数が f^{cup} になるような格子定数(d)を求めると、

$$d = 1.414 c / f^{cup} \quad (3.10)$$

表4に示されている f^{cup} に対して得た格子定数(d)を表7に示す。文献17によれば、HOGFのカットオフ周波数、飽和周波数は、文献17の式(6)で与えられる。

$$\lambda/d = \cos (\theta + \epsilon) \{ 1 - \sin (\epsilon / \cos \theta) \} \quad (3.11)$$

$$\lambda/d = \cos (\theta - \epsilon) \{ 1 + \sin (\epsilon / \cos \theta) \} \quad (3.12)$$

これらの式を周波数の式に変換すると、

$$f_c = [d/c \cos (\theta + \epsilon) \{ 1 - \sin (\epsilon / \cos \theta) \}]^{-1} \quad (3.13)$$

$$f_m = [d/c \cos (\theta - \epsilon) \{ 1 + \sin (\epsilon / \cos \theta) \}]^{-1} \quad (3.14)$$

拡がり角 $\epsilon = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ に対する f_c, f_m を表8に示す。表4のカットオフ周波数と比較するとおよそ $\epsilon = 2^\circ$ の時であっても、 $f_c \sim \max(f^{cup})$ 、 $f_m \sim \min(f^{cup})$ を満

足しない。 $\epsilon = 2^\circ$ の時の f_{min} が f^{cut} の最小値になる格子定数 (d) は次式を用いて与えられる。

$$d = f_{\text{min}}^{-1} c / [\cos(\theta - \epsilon) \{1 + \sin(\epsilon / \cos \theta)\}] \quad (\epsilon = 2^\circ) \quad (3.15)。$$

各磁場に対するこの d の値を表9に示す。この表9の格子定数に対応する拡がり角 $\epsilon = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ に対する f_c, f_{min} を表10に示す。 $\epsilon = 2^\circ$ の f_{min} は f^{cut} の最小値に等しく、 $\epsilon = 2^\circ$ の f_c は f^{cut} の最大値より大きくなっている。表9の格子定数を持ったフィルターは表4から要求されるフィルタよりなだらかな特性である。 $\epsilon = 5^\circ$ の場合、 f_{min} は f^{cut} の最小値より小さく、 f_c は f^{cut} の最大値より大きくなっている。この場合は、適用できるトロイダル磁場の範囲が狭くなる。しかし、 $\epsilon = 2^\circ$ としてGFを設計する。即ち、表9の格子定数のGFを製作する。

4. 回折格子フィルターの形状

JT-60では、歴史的な経緯から、IN2Sポートでは、導波管の短い方を電場の方向とし、S4ポートでは、導波管の長手方向を電場の方向としている。ここでは、導波管の長手方向を電場の方向とした方が伝送損失が少ないので、導波管の長手方向を電場の方向とし、長手方向が角にくるバンドをEバンド、逆をHバンドとここでは定義する。導波管のバンドとGFの溝方向を図4に示す。

GFの溝形状については、文献17では特に言及していない。PLT装置で使用されているGF⁸⁾と同じGFを溝形状をここでは採用する。図5にその溝形状を示す。ここでは、この溝形状が文献17の理論と合うことを確認する。文献8の図3(b)によれば、p \perp 型のGFの測定された反射率が50%になる波長は、1.377mmあり、この回折格定数は0.838であり、よって λ/d は1.64である。文献17によれば、これは式(3.2)で与えられ、1.71である。^{S//}型のGFも同様に文献8の図3(a)と定性的に合っている。又、更に奥野ら^{18~19)}が開発した回折格子の効率を計算するコードを用いて、PLT装置のGFの溝形状が、文献17の理論と合うことを別の観点から確認する。こ

足しない。 $\epsilon = 2^\circ$ の時の f_{min} が f^{cut} の最小値になる格子定数 (d) は次式を用いて与えられる。

$$d = f_{\text{min}}^{-1} c / [\cos(\theta - \epsilon) \{1 + \sin(\epsilon / \cos \theta)\}] \quad (\epsilon = 2^\circ) \quad (3.15)。$$

各磁場に対するこの d の値を表9に示す。この表9の格子定数に対応する拡がり角 $\epsilon = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ に対する f_c, f_{min} を表10に示す。 $\epsilon = 2^\circ$ の f_{min} は f^{cut} の最小値に等しく、 $\epsilon = 2^\circ$ の f_c は f^{cut} の最大値より大きくなっている。表9の格子定数を持ったフィルタは表4から要求されるフィルタよりなだらかな特性である。 $\epsilon = 5^\circ$ の場合、 f_{min} は f^{cut} の最小値より小さく、 f_c は f^{cut} の最大値より大きくなっている。この場合は、適用できるトロイダル磁場の範囲が狭くなる。しかし、 $\epsilon = 2^\circ$ としてGFを設計する。即ち、表9の格子定数のGFを製作する。

4. 回折格子フィルタの形状

JT-60では、歴史的な経緯から、IN2Sポートでは、導波管の短い方を電場の方向とし、S4ポートでは、導波管の長手方向を電場の方向としている。ここでは、導波管の長手方向を電場の方向とした方が伝送損失が少ないので、導波管の長手方向を電場の方向とし、長手方向が角にくるバンドをEバンド、逆をHバンドとここでは定義する。導波管のバンドとGFの溝方向を図4に示す。

GFの溝形状については、文献17では特に言及していない。PLT装置で使用されているGF⁸⁾と同じGFを溝形状をここでは採用する。図5にその溝形状を示す。ここでは、この溝形状が文献17の理論と合うことを確認する。文献8の図3(b)によれば、 $p \perp$ 型のGFの測定された反射率が50%になる波長は、1.377mmあり、この回折格定数は0.838であり、よって λ/d は1.64である。文献17によれば、これは式(3.2)で与えられ、1.71である。 $S //$ 型のGFも同様に文献8の図3(a)と定性的に合っている。又、更に奥野ら^{18~19)}が開発した回折格子の効率を計算するコードを用いて、PLT装置のGFの溝形状が、文献17の理論と合うことを別の観点から確認する。こ

のコードを用いて得られたVOGFのE波（電場方向が溝方向と直角）について入射角45°、回折格子の溝の角度 $\alpha=70^\circ$ 、 $\beta=20^\circ$ の回折格子の反射率の結果を図6に示す。反射率が50%になるのは l/d が0.76である。文献17の実測例では0.8であり、定性的にあっている。

5.回折格子フィルターの反射率

製作したp \perp 型、s//型、p//型、s \perp 型のGFの格子定数(d)、カットオフ周波数(f_c)、ブレイズ角度(θ_{blaze})を表11に示す。この中には、一部JT-60用のGFでないものも含まれている。通常のブレイズ波長の定義に従うと、ブレイズ角度は、エシェレット格子の長い溝の傾き角と一致する。製作したGFの反射率をフーリエ分光器¹³⁾を用いて測定した。測定概念図を図7に示す。バンド部に平面鏡を挿入した場合の反射率を1にノーマライズして、GFの反射率を求める。光源としては、マイクロ波吸収帯を用いた液体窒素温度と室温の温度差の黒体放射である²⁰⁾。

5.1 p \perp 型回折格子フィルター(VO)の測定

p \perp 型の典型的なGFの例として、S4ポート、Bt=3.0~3.5T用($d=0.73\text{mm}$)（表5参照）のGFの測定された反射率を図8に示す。このGFの目標としては $f^{\text{app}}=224\sim 256\text{GHz}$ である。（表4参照）図から $R(f_c)=0.1$ 、 $R(f_{\text{cut}})=0.9$ として、 f_c 、 f_{cut} を読み取ると、 $f_c\sim 255\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}\sim 233\text{GHz}$ である。 $R(f)$ は周波数 f でのreflectivityを表す。これは $\epsilon=5^\circ$ の場合の $f_c=250\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}=233\text{GHz}$ （表6(a)参照）と良い一致を示す。このp \perp 型のGFは、他のGFに比べ、非常にシャープなフィルター特性を持ち、回折格子分光器用のGFとしては、最も適する。カットオフ($f_{\text{cut}}\sim f_c$ の間)を $\epsilon=5^\circ$ として設計すれば良い。しかし、高い周波数領域に透過する領域があり、これを除去する為に、他のタイプのGFを併用することが望ましい。

5.2 s \perp 型回折格子フィルター(VO)の測定

のコードを用いて得られたVOGFのE波（電場方向が溝方向と直角）について入射角45°、回折格子の溝の角度 $\alpha=70^\circ$ 、 $\beta=20^\circ$ の回折格子の反射率の結果を図6に示す。反射率が50%になるのは l/d が0.76である。文献17の実測例では0.8であり、定性的にあっている。

5.回折格子フィルターの反射率

製作したp \perp 型、s//型、p//型、s \perp 型のGFの格子定数(d)、カットオフ周波数(f_c)、ブレイズ角度(θ_{blaze})を表11に示す。この中には、一部JT-60用のGFでないものも含まれている。通常のブレイズ波長の定義に従うと、ブレイズ角度は、エシェレット格子の長い溝の傾き角と一致する。製作したGFの反射率をフーリエ分光器¹³⁾を用いて測定した。測定概念図を図7に示す。バンド部に平面鏡を挿入した場合の反射率を1にノーマライズして、GFの反射率を求める。光源としては、マイクロ波吸収帯を用いた液体窒素温度と室温の温度差の黒体放射である²⁰⁾。

5.1 p \perp 型回折格子フィルター(VO)の測定

p \perp 型の典型的なGFの例として、S4ポート、Bt=3.0~3.5T用($d=0.73\text{mm}$)（表5参照）のGFの測定された反射率を図8に示す。このGFの目標としては $f^{app}=224\sim 256\text{GHz}$ である。（表4参照）図から $R(f_c)=0.1$ 、 $R(f_{\text{cut}})=0.9$ として、 f_c 、 f_{cut} を読み取ると、 $f_c\sim 255\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}\sim 233\text{GHz}$ である。 $R(f)$ は周波数 f でのreflectivityを表す。これは $\epsilon=5^\circ$ の場合の $f_c=250\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}=233\text{GHz}$ （表6(a)参照）と良い一致を示す。このp \perp 型のGFは、他のGFに比べ、非常にシャープなフィルター特性を持ち、回折格子分光器用のGFとしては、最も適する。カットオフ($f_{\text{cut}}\sim f_c$ の間)を $\epsilon=5^\circ$ として設計すれば良い。しかし、高い周波数領域に透過する領域があり、これを除去する為に、他のタイプのGFを併用することが望ましい。

5.2 s \perp 型回折格子フィルター(VO)の測定

s \perp 型の典型的なGFの例として、 $d=1.27\text{mm}$ のGFの測定された反射率を図9に示す。このGFの目標としては $f^{\text{opt}}=138\text{GHz}$ である。図から $R(f_c)=0.27$ 、 $R(f_{\text{cut}})=0.9$ として、 f_c 、 f_{cut} を読み取ると、 $f_c \sim 444\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}} \sim 184\text{GHz}$ である。 $\epsilon = 5^\circ$ の場合の f_c 、 f_{cut} ($f_c=144\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}=134\text{GHz}$)と比較すると、 f_c 、 f_{cut} に共に良い一致を示さない。これは文献17から予想されることである。(図A3(文献17の図4の再録)参照)

5.3 p//型回折格子フィルター(HO)の測定

p//型の典型的なGFの例として、IN2Sポート、 $Bt=3.0 \sim 3.5\text{T}$ 用($d=1.62\text{mm}$)GF(表9参照)の測定された反射率を図10に示す。このGFの目標としては $f^{\text{opt}}=242 \sim 276\text{GHz}$ である。(表4参照)図から $R(f_c)=0.45$ 、 $R(f_{\text{cut}})=0.9$ として、 f_c 、 f_{cut} を読み取ると、 $f_c \sim 340\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}} \sim 223\text{GHz}$ である。これを表10(b)と比較すると、 $\epsilon = 2^\circ$ の場合の場合よりも $\epsilon = 5^\circ$ の場合($f_c=329\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}=215\text{GHz}$)の f_c 、 f_{cut} に関して良い一致を示す。このp//型のGFの場合は、 $\epsilon = 5^\circ$ として、 f_c 、 f_{cut} が要求する周波数に合う様に格子定数を設計すれば良い。

5.4 s//型回折格子フィルター(HO)の測定

s//型の典型的なGFの例として、S4ポート、 $Bt=4.0 \sim 4.8\text{T}$ 用($d=1.27\text{mm}$)と $Bt=3.0 \sim 3.5\text{T}$ 用($d=1.75\text{mm}$)の2つのGF(表9参照)の結果を述べる。 $Bt=4.0 \sim 4.8\text{T}$ 用のGFの目標としては、 $f^{\text{opt}}=307 \sim 341\text{GHz}$ である。(表4参照)このGFの測定された反射率を図11(a)に示す。図から $R(f_c)=0.52$ 、 $R(f_{\text{cut}})=0.9$ として、 f_c 、 f_{cut} を読み取ると、 $f_c \sim 344\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}} \sim 227\text{GHz}$ である。これを表10(a)の $\epsilon = 5^\circ$ の場合の $f_c=418\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}=274\text{GHz}$ と比較すると、 f_{cut} に関して良い一致を示す。 $Bt=3.0 \sim 3.5\text{T}$ 用のGFの目標としては、 $f^{\text{opt}}=224 \sim 256\text{GHz}$ である。(表4参照)このGFの測定された反射率を図11(b)に示す。図から $R(f_c)=0.48$ 、 $R(f_{\text{cut}})=0.9$ として、 f_c 、 f_{cut} を読み取ると、 $f_c=252\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}=195\text{GHz}$ である。これを表10(a)の $\epsilon = 5^\circ$ の場合の $f_c=305\text{GHz}$ 、 $f_{\text{cut}}=200\text{GHz}$ と比較すると、 f_{cut} に関して良い一致を示す。このs//型のGFの場合は、 $\epsilon = 5^\circ$ として、 f_{cut} が

要求する周波数に合う様に格子定数を設計すれば良い。

6. 考察

ここでは、測定結果を基に理想的なGFについて考察する。p⊥型のGFはシャープなフィルター特性を持ち、かつ、減衰領域で反射率が低く、高周波数側にある反射する部分があるを除けば、理想的なGFある。それに対して、s//型又はp//型のGFは緩やかなフィルター特性を持ち、かつ、減衰領域で反射率が高い測定結果が出ている。回折格子分光器用のGFとしては、p⊥型のシャープなフィルター特性を活かして、p⊥型のGFをメインフィルターにして、p⊥型の欠点である高周波数側にある反射する部分を、s//型又はp//型の他のGFを組み合わせることにより除去することが望ましい。p⊥型及びp//型のGFは、拡がり角度 (ϵ) を 5° として、 $f_c \sim \max(f^{\text{cut}})$ 、 $f_{\text{cut}} \sim \min(f^{\text{cut}})$ になる様に格子定数を決定し、s//型のGFは、拡がり角度 (ϵ) を 5° として、 $f_{\text{cut}} \sim \min(f^{\text{cut}})$ になる様に、格子定数を決定する。

7. JT-60UにおけるGFのトロイダル磁場の適用範囲

JT-60装置は、プラズマ性能の一層の向上を計るために、現有設備を最大限に活用しつつ、一部設備の改造や機器の追加を行い、JT-60U装置に改造した^{2,2)}。ECE計測に関すれば、測定ポートを水平ポートに変更した。ここでは、JT60用に製作したGFをJT-60Uに適用した場合のトロイダル磁場の適用範囲について述べる。JT-60Uの水平ポートの場合の f_{31}^L 、 f_{41}^L のトロイダル磁場依存性を表1-2に示す。製作したGFの $\epsilon=2^\circ$ 、 $\epsilon=5^\circ$ の f_c 、 f_{cut} を表1-3に示す。第5章のGFの反射率の測定では、拡がり角度 $\epsilon=5^\circ$ の f_c 、 f_{cut} が理論良い一致を示している。又、回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合の除去すべき放射の周波数帯域は、 f_{41}^L 以上であり、 f_{31}^L 以下を除去すべきでないので、 $f_{\text{cut}}(\epsilon=5^\circ) = f_{31}^L$ を満足するトロイダル磁場が最大値(B_1^{max})である。

要求する周波数に合う様に格子定数を設計すれば良い。

6. 考察

ここでは、測定結果を基に理想的なGFについて考察する。p \perp 型のGFはシャープなフィルター特性を持ち、かつ、減衰領域で反射率が低く、高周波数側にある反射する部分があるを除けば、理想的なGFある。それに対して、s//型又はp//型のGFは緩やかなフィルター特性を持ち、かつ、減衰領域で反射率が高い測定結果が出ている。回折格子分光器用のGFとしては、p \perp 型のシャープなフィルター特性を活かして、p \perp 型のGFをメインフィルターにして、p \perp 型の欠点である高周波数側にある反射する部分を、s//型又はp//型の他のGFを組み合わせることにより除去することが望ましい。p \perp 型及びp//型のGFは、拡がり角度 (ϵ) を 5° として、 $f_c \sim \max(f^{\text{cut}})$ 、 $f_{\text{cut}} \sim \min(f^{\text{cut}})$ になる様に格子定数を決定し、s//型のGFは、拡がり角度 (ϵ) を 5° として、 $f_{\text{cut}} \sim \min(f^{\text{cut}})$ になる様に、格子定数を決定する。

7. JT-60UにおけるGFのトロイダル磁場の適用範囲

JT-60装置は、プラズマ性能の一層の向上を計るために、現有設備を最大限に活用しつつ、一部設備の改造や機器の追加を行い、JT-60U装置に改造した^{2,2)}。ECE計測に関すれば、測定ポートを水平ポートに変更した。ここでは、JT60用に製作したGFをJT-60Uに適用した場合のトロイダル磁場の適用範囲について述べる。JT-60Uの水平ポートの場合の f_{31}^{\perp} 、 f_{41}^{\perp} のトロイダル磁場依存性を表1.2に示す。製作したGFの $\epsilon=2^\circ$ 、 $\epsilon=5^\circ$ の f_c 、 f_{cut} を表1.3に示す。第5章のGFの反射率の測定では、拡がり角度 $\epsilon=5^\circ$ の f_c 、 f_{cut} が理論良い一致を示している。又、回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合の除去すべき放射の周波数帯域は、 f_{41}^{\perp} 以上であり、 f_{31}^{\perp} 以下を除去すべきでないので、 $f_{\text{cut}}(\epsilon=5^\circ) = f_{31}^{\perp}$ を満足するトロイダル磁場が最大値(B_1^{max})である。

要求する周波数に合う様に格子定数を設計すれば良い。

6. 考察

ここでは、測定結果を基に理想的なGFについて考察する。p \perp 型のGFはシャープなフィルター特性を持ち、かつ、減衰領域で反射率が低く、高周波数側にある反射する部分があるを除けば、理想的なGFある。それに対して、s//型又はp//型のGFは緩やかなフィルター特性を持ち、かつ、減衰領域で反射率が高い測定結果が出ている。回折格子分光器用のGFとしては、p \perp 型のシャープなフィルター特性を活かして、p \perp 型のGFをメインフィルターにして、p \perp 型の欠点である高周波数側にある反射する部分を、s//型又はp//型の他のGFを組み合わせることにより除去することが望ましい。p \perp 型及びp//型のGFは、拡がり角度 (ϵ) を 5° として、 $f_c \sim \max(f^{\text{cut}})$ 、 $f_{\text{st}} \sim \min(f^{\text{cut}})$ になる様に格子定数を決定し、s//型のGFは、拡がり角度 (ϵ) を 5° として、 $f_{\text{st}} \sim \min(f^{\text{cut}})$ になる様に、格子定数を決定する。

7. JT-60UにおけるGFのトロイダル磁場の適用範囲

JT-60装置は、プラズマ性能の一層の向上を計るために、現有設備を最大限に活用しつつ、一部設備の改造や機器の追加を行い、JT-60U装置に改造した^{2,2)}。ECE計測に関すれば、測定ポートを水平ポートに変更した。ここでは、JT60用に製作したGFをJT-60Uに適用した場合のトロイダル磁場の適用範囲について述べる。JT-60Uの水平ポートの場合の f_{31}^L 、 f_{41}^L のトロイダル磁場依存性を表1 2に示す。製作したGFの $\epsilon=2^\circ$ 、 $\epsilon=5^\circ$ の f_c 、 f_{st} を表1 3に示す。第5章のGFの反射率の測定では、拡がり角度 $\epsilon=5^\circ$ の f_c 、 f_{st} が理論良い一致を示している。又、回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合の除去すべき放射の周波数帯域は、 f_{41}^L 以上であり、 f_{31}^L 以下を除去すべきでないので、 $f_{\text{st}}(\epsilon=5^\circ) = f_{31}^L$ を満足するトロイダル磁場が最大値(B_1^{max})であ

り、 $f_m(\epsilon=5^\circ) = f_{41}^L$ を満足するトロイダル磁場が最小値(B_i^{\min})である。ここで注意することは、 B_i^{\max} 以上のトロイダル磁場の場合は測定すべき放射をGFで除去するので、GFを挿入したままで測定すべきでないが、 B_i^{\min} 以下のトロイダル磁場の場合は除去すべき放射を除去しないので、GFを挿入したまま測定した場合は、高次光を含んだ信号が得られることを念頭におく必要がある。JT-60Uに製作したGFを適用した場合、電子温度測定に悪い影響を与えないトロイダル磁場の最小値、最大値 (B_i^{\min} 、 B_i^{\max}) を表14に示す。

8.まとめ

1. トカマク ($R_0/a > 3\cos\theta$: R_0 :大半径、 a :小半径、 θ :視線と水平面がなす角度) において、プラズマからの電子サイクロトロン放射光 (ECE) の2倍高調波を観測して、電子温度を測定することが行われている。回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合に重要なことは、2倍高調波の信号に回折格子分光器の高次光の信号を含ませないことである。回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合の除去すべき放射の周波数帯域は、低磁場端のECEの4倍高調波周波数以上である。ここで留意するのは、2倍高調波と重なる低磁場端の3倍高調波以下を除去すべきでない事である。
2. エシェレット格子の理論を基にして、回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合の回折格子フィルター (GF) の設計、製作を行った。製作した4種類のGFの反射率の測定を行い、導波管内を伝播する光の拡がり角度を求めた。その結果は、拡がり角度を 5° とした設計が測定と比較的良い一致を示した。それぞれのGFの特徴を以下に記述する。

p \perp 型 (p偏光、回折格子溝が入射面に直角) : カットオフ周波数 (この周波数以上の光がカットされる) と飽和周波数 (この周波数以下の光がカットされない) について設計値と良い一致を示す。他のGFに比べ非常に急峻な遮断特

り、 $f_{\perp}(\epsilon=5^{\circ}) = f_{4,1}^{\perp}$ を満足するトロイダル磁場が最小値(B_i^{\min})である。ここで注意することは、 B_i^{\max} 以上のトロイダル磁場の場合は測定すべき放射をGFで除去するので、GFを挿入したままで測定すべきでないが、 B_i^{\min} 以下のトロイダル磁場の場合は除去すべき放射を除去しないので、GFを挿入したまま測定した場合は、高次光を含んだ信号が得られることを念頭におく必要がある。JT-60Uに製作したGFを適用した場合、電子温度測定に悪い影響を与えないトロイダル磁場の最小値、最大値 (B_i^{\min} 、 B_i^{\max}) を表14に示す。

8.まとめ

1. トカマク ($R_0/a > 3\cos\theta$: R_0 :大半径、 a :小半径、 θ :視線と水平面がなす角度) において、プラズマからの電子サイクロトロン放射光 (ECE) の2倍高調波を観測して、電子温度を測定することが行われている。回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合に重要なことは、2倍高調波の信号に回折格子分光器の高次光の信号を含ませないことである。回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合の除去すべき放射の周波数帯域は、低磁場端のECEの4倍高調波周波数以上である。ここで留意するのは、2倍高調波と重なる低磁場端の3倍高調波以下を除去すべきでない事である。
2. エシェレット格子の理論を基にして、回折格子分光器を用いて電子温度を測定する場合の回折格子フィルター (GF) の設計、製作を行った。製作した4種類のGFの反射率の測定を行い、導波管内を伝播する光の拡がり角度を求めた。その結果は、拡がり角度を 5° とした設計が測定と比較的良好一致を示した。それぞれのGFの特徴を以下に記述する。
 p_{\perp} 型 (p 偏光、回折格子溝が入射面に直角) : カットオフ周波数 (この周波数以上の光がカットされる) と飽和周波数 (この周波数以下の光がカットされない) について設計値と良好一致を示す。他のGFに比べ非常に急峻な遮断特

性を持ち、かつ、減衰領域で反射率が低いことが、メインフィルターとして適する。但し、高周波数側に不要な反射帯域があり、これを補う為に他のGFで除去する必要がある。

s//型 (s偏光、回折格子溝が入射面に平行) : 飽和周波数は設計値と良い一致を示す。遮断特性が急峻でない為、p⊥型GFの不要帯域を阻止するのに用いる。

p//型 (p偏光、回折格子溝が入射面に平行) : カットオフ周波数と飽和周波数が、設計値と良い一致を示す。遮断特性が急峻でない為、p⊥型GFの不要帯域を阻止するのに用いる。

s⊥型 (s偏光、回折格子溝が入射面に直角) : カットオフ周波数と飽和周波数が、共に設計値と良い一致を示さず、GFとして適さない。

3. JT-60トカマクにおいては、実験目的に応じてプラズマ中心のトロイダル磁場を広範囲に変える。まとめの1.の結論から、GFのカットオフ周波数と飽和周波数が低磁場端における3倍高調波と4倍高調波の間にあるように設計される。従って、プラズマ中心磁場の範囲は、GFのカットオフ周波数と飽和周波数により制限されるため、基本的にGFの遮断特性が急峻であるほど、広い範囲のプラズマ中心磁場に対して用いることが可能となる。又、プラズマ中心磁場の最小値を与える条件は、カットオフ周波数が4倍高調波と等しくなる場合であり、最大値を与える条件は、飽和周波数が3倍高調波と等しくなる場合である。

謝辞

回折格子の効率を計算するコードの使用させて戴いた事に対して、熊本大学の奥野洋一先生と熊本電波高等専門学校の松田豊稔先生に感謝致します。草稿を読んで、貴重なコメントを戴いた事に対して、炉心プラズマ第2実験室の長島章氏に感謝致します。

性を持ち、かつ、減衰領域で反射率が低いことが、メインフィルターとして適する。但し、高周波数側に不要な反射帯域があり、これを補う為に他のGFで除去する必要がある。

s//型 (s偏光、回折格子溝が入射面に平行) : 飽和周波数は設計値と良い一致を示す。遮断特性が急峻でない為、p⊥型GFの不要帯域を阻止するのに用いる。

p//型 (p偏光、回折格子溝が入射面に平行) : カットオフ周波数と飽和周波数が、設計値と良い一致を示す。遮断特性が急峻でない為、p⊥型GFの不要帯域を阻止するのに用いる。

s⊥型 (s偏光、回折格子溝が入射面に直角) : カットオフ周波数と飽和周波数が、共に設計値と良い一致を示さず、GFとして適さない。

3. JT-60トカマクにおいては、実験目的に応じてプラズマ中心のトロイダル磁場を広範囲に変える。まとめの1.の結論から、GFのカットオフ周波数と飽和周波数が低磁場端における3倍高調波と4倍高調波の間にあるように設計される。従って、プラズマ中心磁場の範囲は、GFのカットオフ周波数と飽和周波数により制限されるため、基本的にGFの遮断特性が急峻であるほど、広い範囲のプラズマ中心磁場に対して用いることが可能となる。又、プラズマ中心磁場の最小値を与える条件は、カットオフ周波数が4倍高調波と等しくなる場合であり、最大値を与える条件は、飽和周波数が3倍高調波と等しくなる場合である。

謝辞

回折格子の効率を計算するコードの使用させて戴いた事に対して、熊本大学の奥野洋一先生と熊本電波高等専門学校の松田豊稔先生に感謝致します。草稿を読んで、貴重なコメントを戴いた事に対して、炉心プラズマ第2実験室の長島章氏に感謝致します。

参考文献

- 1) M. Bornatici, R. Cano, O. De Barbieri and F. Engelmann, Nucl. Fusion 23 (1983) 1153.
- 2) A. E. Costley, R. J. Hastie, J. W. M. Paul and J. Chamberlain : Phy. Rev. Lett, 33 (1974) 758.
- 3) A. E. Costley, and TFR Group : Phy. Rev. Lett, 38 (1977) 1477.
- 4) M. Sato, K. Sakai, K. Kawahata, H. Kojima and K. Miyamoto, Jpn J Appl. Phys. 19 (1980) 577.
- 5) K. Kawahata, M. Sato, T. Tetsuka, N. Noda and K. Sakai : Jpn J Appl. Phys. 20 (1981) 1633.
- 6) W. R. Rutgers and D. A. Boyd : Phys. Lett, 62A (1977) 498.
- 7) R. M. Sillien, H. W. Piekaar, Th. Oyevaar and W. Werner : Infrared Phys. 24 (1984) 511.
- 8) A. Cavallo and R. Cutler: Rev. Sci. Instrum 56 (1985) 931.
- 9) K. Kawahata, K. Sakai, R. Ando, S. Ohara, and J. Fujita: Jpn J Appl. Phys. 27 (1988) 2349.
- 10) TRF Group and NRL Submillimeter Group : (Proc. 7th Europ. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Lausanne, 1975) 14a.
- 11) K. Kawahata, M. Sato, T. Yoshida and K. Sakai : Jpn J Appl. Phys. 19 (1981) 1002.
- 12) JT-60 実験: 核融合研究第65巻別冊 (1991年3月) .
- 13) 佐藤正泰、横溝英明、長島章 : 核融合研究第59巻別冊 (1988年3月) 49.
- 14) S. Ishida, A. Nagashima, M. Sato, N. Isei, and T. Matoba : Rev. Sci. Instrum. 61 (1990) 2834.
- 15) S. Ishida, M. Sato, N. Isei, A. Nagashima, T. Matoba, N. Iwama and M. Teranishi : submitted to Rev. Sci. Instrum.
- 16) 工藤恵栄: 分光の基礎と方法、(オーム社、東京、1985年) 第6章
- 17) E. Kudo, T. Ogawa and T. Arai: Sci. Light 21 (1971) 45.
- 18) Y. Okuno and K. Yasuura: IEEE Trans. Antenas and Propagation AP-30 (1982) 580.

- 19)K. Yasuura and Y. Okuno: J. Opt Soc Am. 72 (19982) 847.
- 20)F. J. Stauffer G. D. Tait and D. A. Boyd, (Proc. 4th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Miami, 1979) 74.
- 21)J. A. R. Samson, Pied Publications, USA, 1967, Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectrpscopy, Chap. 2.
- 22)H. Ninomiya and JT-60 team, Phys. Fluids B4 (1992) 2070.

表1 回折の高次の波長と周波数の関係

波長 λ (周波数 f) の m 次光と同じ出口 slit 位置に出射する1次光の波長及び周波数				
m	1	2	3	4
波長 λ	λ	2λ	3λ	4λ
周波数 f	f	$(1/2)f$	$(1/3)f$	$(1/4)f$

表2 周波数 nf_{ce} の m 次光と同じ出口スリット位置に出射する一次光周波数

周波数 f_{ce} の m 次光と同じ出口 slit 位置に出射する1次光の周波数				
m	1	2	3	4
f_{ce}	f_{ce}	$(1/2)f_{ce}$	$(1/3)f_{ce}$	$(1/4)f_{ce}$
$2f_{ce}$	$2f_{ce}$	f_{ce}	$(2/3)f_{ce}$	$2f_{ce}$
$3f_{ce}$	$3f_{ce}$	$(3/2)f_{ce}$	f_{ce}	$(3/4)f_{ce}$
$4f_{ce}$	$4f_{ce}$	$2f_{ce}$	$(4/3)f_{ce}$	f_{ce}
...				
nf_{ce}	nf_{ce}	$(n/2)f_{ce}$	$(n/3)f_{ce}$	$(n/4)f_{ce}$

表3 各トロイダル磁場に対応する f_{31}^L , f_{41}^L

$$f_{31}^L \equiv 3 f_{ce} R_0 / (R_0 + a \cos \theta), f_{41}^L \equiv 4 f_{ce} R_0 / (R_0 + a \cos \theta)$$

Bt/T	S4port		IN2Sport	
	f_{31}^L /GHz	f_{41}^L /GHz	f_{31}^L /GHz	f_{41}^L /GHz
2.0	127.9	170.5	138.0	184.0
2.5	159.8	213.1	172.5	230.0
3.0	191.8	255.7	207.0	276.0
3.5	223.8	298.4	241.5	322.1
4.0	255.7	341.0	276.1	368.1
4.5	287.7	383.6	310.6	414.1
4.8	306.9	409.2	331.3	441.7

表4 カットオフ周波数 (f^{cutp}) 及び $f^{cuta} (= 1/2(\max(f^{cutp}) + \min(f^{cutp})))$

Bt/T	S4port		IN2Sport	
	f^{cutp} max min	f^{cupa}	f^{cutp} max min	f^{cupa}
2.0~ 2.5	170.5 159.8	165.2	184.0 172.5	178.3
3.0~ 3.5	255.7 223.8	239.8	276.0 241.5	258.8
4.0~ 4.8	341.0 306.9	324.0	368.1 331.3	349.7

表5 VOGF (p_⊥, s_⊥) の f^{cupa} に対応する格子定数(d)

Bt/T	S4port	IN2Sport
	d/mm	d/mm
2.0~2.5	1.0638	0.9856
3.0~3.5	0.7324	0.6791
4.0~4.8	0.5424	0.5025

表6(a) VOGF (p_⊥, s_⊥) の表5の格子定数(d)に対応する f_c, f_{sa}
S4ポート

$$f_c^{-1} = d/c \cdot \cos \epsilon \{ \sin(\alpha - \epsilon) + 1 \}$$

$$f_{sa}^{-1} = d/c \cdot \cos \epsilon \{ \sin(\alpha + \epsilon) + 1 \}$$

			f _c f _{sa} /GHz (S4port)			
ε	Bt/T	d/mm	2°	5°	10°	20°
f _c	2.0~2.5	1.0638	167.76	172.32	181.98	210.95
f _{sa}			162.98	160.29	157.41	157.43
f _c	3.0~3.5	0.7324	243.51	250.12	264.14	306.20
f _{sa}			236.57	232.66	228.48	228.50
f _c	4.0~4.8	0.5424	329.03	337.97	356.91	413.74
f _{sa}			319.65	314.38	308.73	308.76

表6(b) VOGF (p_{\perp}, s_{\perp}) の表5の格子定数(d)に対応する f_c, f_{sa}
IN2Sポート

$$f_c^{-1} = d/c \cdot \cos \varepsilon \{ \sin(\alpha - \varepsilon) + 1 \}$$

$$f_{sa}^{-1} = d/c \cdot \cos \varepsilon \{ \sin(\alpha + \varepsilon) + 1 \}$$

			$f_c \quad f_{sa}/\text{GHz (IN2Sport)}$			
ε	Bt/T	d/mm	2°	5°	10°	20°
f_c	2.0~2.5	0.9856	181.08	185.99	196.41	227.69
f_{sa}			175.91	173.01	169.90	169.92
f_c	3.0~3.5	0.6791	262.80	269.94	285.07	330.46
f_{sa}			255.31	251.10	246.59	246.61
f_c	4.0~4.8	0.5025	355.16	364.80	385.25	446.59
f_{sa}			345.04	339.34	333.25	333.28

表7 HOGF (p//, s//) の f_{cupa} に対応する格子定数(d)

Bt/T	S4port	IN2Sport
	d/mm	d/mm
2.0~2.5	2.566	2.377
3.0~3.5	1.768	1.638
4.0~4.8	1.308	1.212

表8(a) HOGF (p//, s//) の表7の格子定数(d)に対応する f_c , f_{sa}
S4ポート

$$f_c^{-1} = d/c \cdot \cos(\theta + \epsilon) \{1 - \sin(\epsilon / \cos \theta)\}$$

$$f_{sa}^{-1} = d/c \cdot \cos(\theta - \epsilon) \{1 + \sin(\epsilon / \cos \theta)\}$$

			f_c f_{sa} /GHz (S4port)			
ϵ	Bt/T	d/mm	2°	5°	10°	20°
f_c	2.0~2.5	2.566	180.20	207.28	269.55	515.42
f_{sa}			152.24	135.80	114.62	87.47
f_c	3.0~3.5	1.768	261.54	300.83	391.21	762.57
f_{sa}			220.95	197.09	166.36	126.94
f_c	4.0~4.8	1.308	353.51	406.63	528.80	1030.7
f_{sa}			298.65	266.40	224.86	171.59

表 8(b) HOGF (p//, s//) の表 7 の格子定数(d)に対応する f_c , f_{sa}
IN2Sポート

$$f_c^{-1} = d/c \cdot \cos(\theta + \epsilon) \{1 - \sin(\epsilon / \cos \theta)\}$$

$$f_{sa}^{-1} = d/c \cdot \cos(\theta - \epsilon) \{1 + \sin(\epsilon / \cos \theta)\}$$

			f_c f_{sa} /GHz (IN2S port)			
ϵ	Bt/T	d/mm	2°	5°	10°	20°
f_c	2.0~2.5	2.377	194.53	223.76	290.98	567.19
f_{sa}			164.34	146.60	123.74	94.42
f_c	3.0~3.5	1.638	282.29	324.71	422.26	823.09
f_{sa}			238.49	212.73	179.56	137.02
f_c	4.0~4.8	1.212	381.52	438.83	570.68	1112.4
f_{sa}			322.31	287.51	242.67	185.18

表 9 HOGF (p//, s//) の $\epsilon = 2^\circ$ の時の (f_{cup}) に対応する格子定数(d)

Bt/T	S4port	IN2S port
	d/mm	d/mm
2.0~2.5	2.445	2.265
3.0~3.5	1.745	1.618
4.0~4.8	1.273	1.179

表10(a) HOGF (p//, s//) の表9の格子定数(d)に対応する f_c , f_{sa}
S4ポート

$$f_c^{-1} = d/c \cdot \cos(\theta + \varepsilon) \{1 - \sin(\varepsilon / \cos \theta)\}$$

$$f_{sa}^{-1} = d/c \cdot \cos(\theta - \varepsilon) \{1 + \sin(\varepsilon / \cos \theta)\}$$

			f_c f_{sa} /GHz (S4port)			
ε	Bt/T	d/mm	2°	5°	10°	20°
f_c	2.0~2.5	2.445	189.12	217.53	282.89	551.42
f_{sa}			159.77	142.52	120.29	91.79
f_c	3.0~3.5	1.745	264.98	304.80	396.37	772.62
f_{sa}			223.86	199.69	168.55	128.62
f_c	4.0~4.8	1.273	363.23	417.81	543.34	1059.1
f_{sa}			306.86	273.73	231.04	176.31

表10(b) HOGF (p//, s//) の表9の格子定数(d)に対応する f_c , f_{sa}
IN2Sポート

$$f_c^{-1} = d/c \cdot \cos(\theta + \varepsilon) \{1 - \sin(\varepsilon / \cos \theta)\}$$

$$f_{sa}^{-1} = d/c \cdot \cos(\theta - \varepsilon) \{1 + \sin(\varepsilon / \cos \theta)\}$$

			f_c f_{sa} /GHz (IN2Sport)			
ε	Bt/T	d/mm	2°	5°	10°	20°
f_c	2.0~2.5	2.265	204.15	234.82	305.37	595.24
f_{sa}			172.47	153.84	129.85	99.09
f_c	3.0~3.5	1.618	285.78	328.72	427.48	833.26
f_{sa}			241.43	215.36	181.78	138.71
f_c	4.0~4.8	1.179	392.19	451.12	586.65	1143.5
f_{sa}			331.33	295.55	249.46	190.36

表11 製作したGFの格子定数(d), カットオフ周波数(f_c), ブレーズ角度 (θ_{blaze})

p \perp 型、

- S4, $d=0.54\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=329\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=338\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=40^\circ$
 S4, $d=0.73\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=244\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=250\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=40^\circ$

s//型、

- S4, $d=1.27\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=363\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=418\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=20^\circ$
 S4, $d=1.75\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=265\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=304\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=20^\circ$

p//型、

- IN2S, $d=1.18\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=392\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=451\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=20^\circ$
 IN2S, $d=1.62\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=286\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=329\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=20^\circ$
 , $d=0.54\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=857\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=985\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=40^\circ$

s \perp 型、

- IN2S, $d=0.50\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=355\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=365\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=40^\circ$
 IN2S, $d=0.68\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=263\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=270\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=40^\circ$
 , $d=1.27\text{mm}$, $f_c(\epsilon=2^\circ)=140\text{GHz}$, $f_c(\epsilon=5^\circ)=144\text{GHz}$, $\theta_{\text{blaze}}=20^\circ$

表12 J T - 60 U の水平ポートの場合の f_{31}^L , f_{41}^L のトロイダル磁場依存性

Bt	f_{31}^L /GHz	f_{41}^L /GHz
2	129.8	173.1
2.1	136.3	181.7
2.2	142.8	190.4
2.3	149.3	199.1
2.4	155.8	207.7
2.5	162.3	216.4
2.6	168.8	225.0
2.7	175.3	233.7
2.8	181.7	242.3
2.9	188.2	251.0
3	194.7	259.6
3.1	201.2	268.3
3.2	207.7	276.9
3.3	214.2	285.6
3.4	220.7	294.3
3.5	227.2	302.9
3.6	233.7	311.6
3.7	240.2	320.2
3.8	246.7	328.9
3.9	253.1	337.5
4	259.6	346.2
4.1	266.1	354.8
4.2	272.6	363.5

表14 J T - 60 U に、製作した G F を適用した場合、電子温度測定に悪い影響を与えないトロイダル磁場の最小値、最大値 (B_t^{\min} , B_t^{\max})。空欄は $B_t = 2T \sim 4.2T$ の間であれば問題ないことを示す。

perpendicular		
d	Btmin	Btmax
0.54	3.7	
0.73	2.7	3.5
0.5	4	
0.68	2.9	3.8
1.27		2
parallel		
d	Btmin	Btmax
1.27	3.2	4.2
1.75	2.4	3
1.18	3.5	
1.62	2.5	3.3
0.54		

表13 製作した G F の $\epsilon = 2^\circ$, $\epsilon = 5^\circ$ の f_c , f_{sa}

perpendicular						
d	epsilon[do]	fc[GHz]	f _{sa} [GHz]	epsilon[do]	fc[GHz]	f _{sa} [GHz]
0.54	2	330.5	321.1	5	339.5	315.8
0.73	2	244.5	237.5	5	251.1	233.6
0.5	2	356.9	346.9	5	366.6	341
0.68	2	262.5	255	5	269.6	250.8
1.27	2	140.5	136.5	5	144.3	134.3
parallel						
d	epsilon[do]	fc[GHz]	f _{sa} [GHz]	epsilon[do]	fc[GHz]	f _{sa} [GHz]
1.27	2	364.3	307.8	5	419.1	274.6
1.75	2	264.4	223.4	5	304.1	199.3
1.18	2	392.1	331.3	5	451	295.5
1.62	2	285.6	241.3	5	328.5	215.2
0.54	2	856.9	723.9	5	985.6	645.7

$Bt=4T, R_0=3.4m$

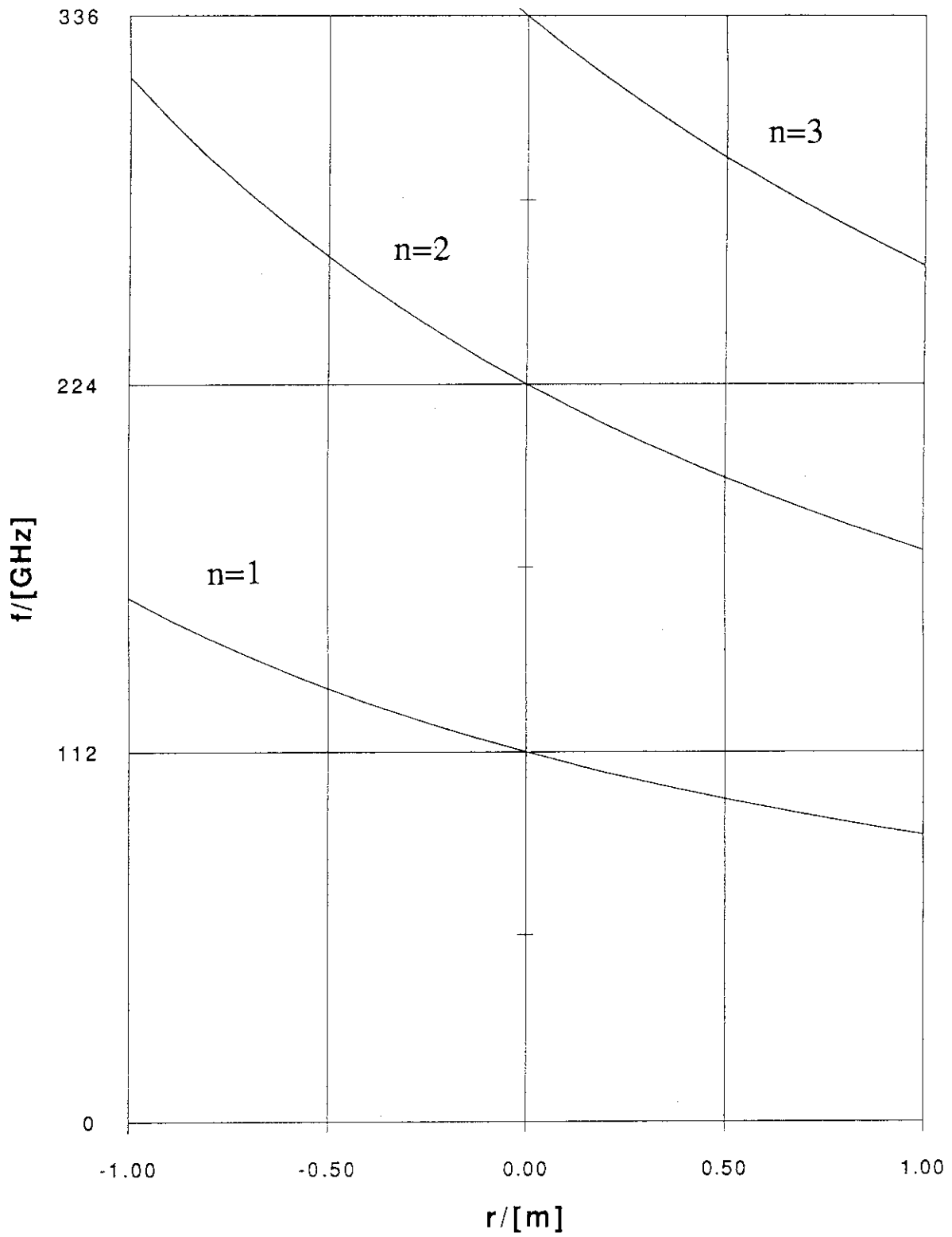


図1 トカマクにおけるトロイダル磁場の空間依存性 ($R_0=3.4m$, $a=1.0m$, $Bt=4T$ の場合)

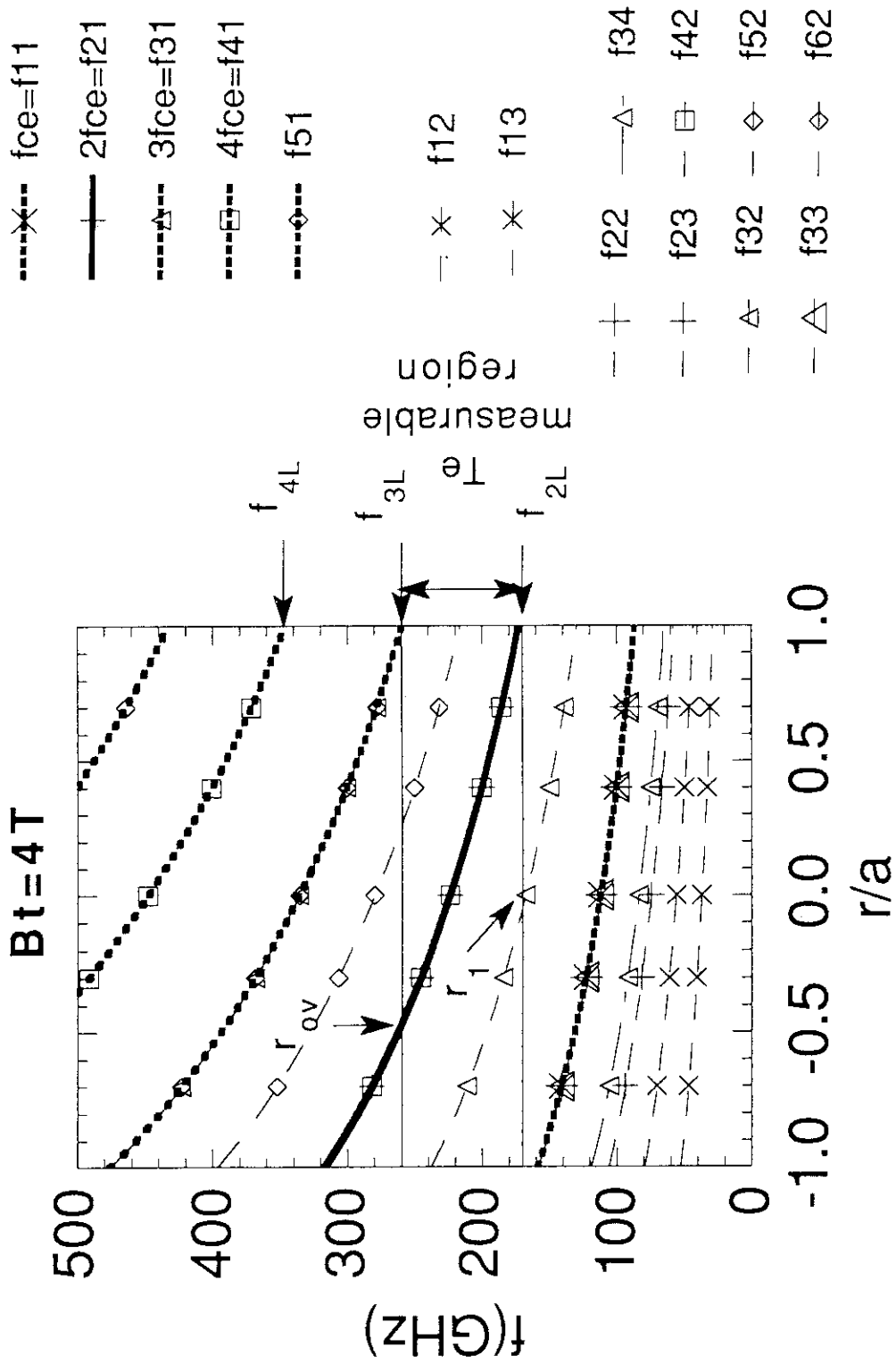


図2 トカマクにおける f_{nm} の空間依存性 ($R_0 = 3.4$ m, $a = 1.0$ m, $Bt = 4$ T の場合)

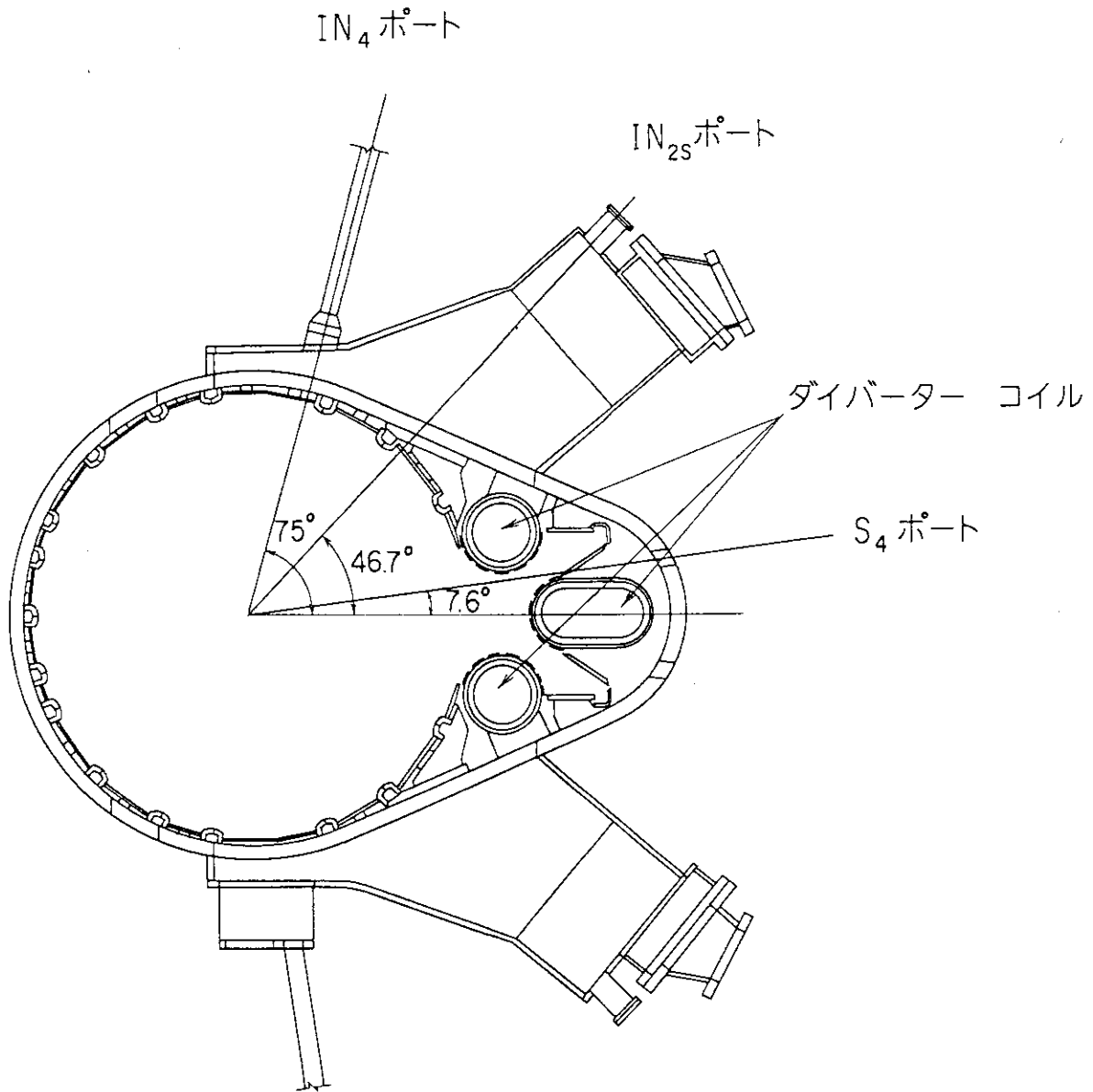
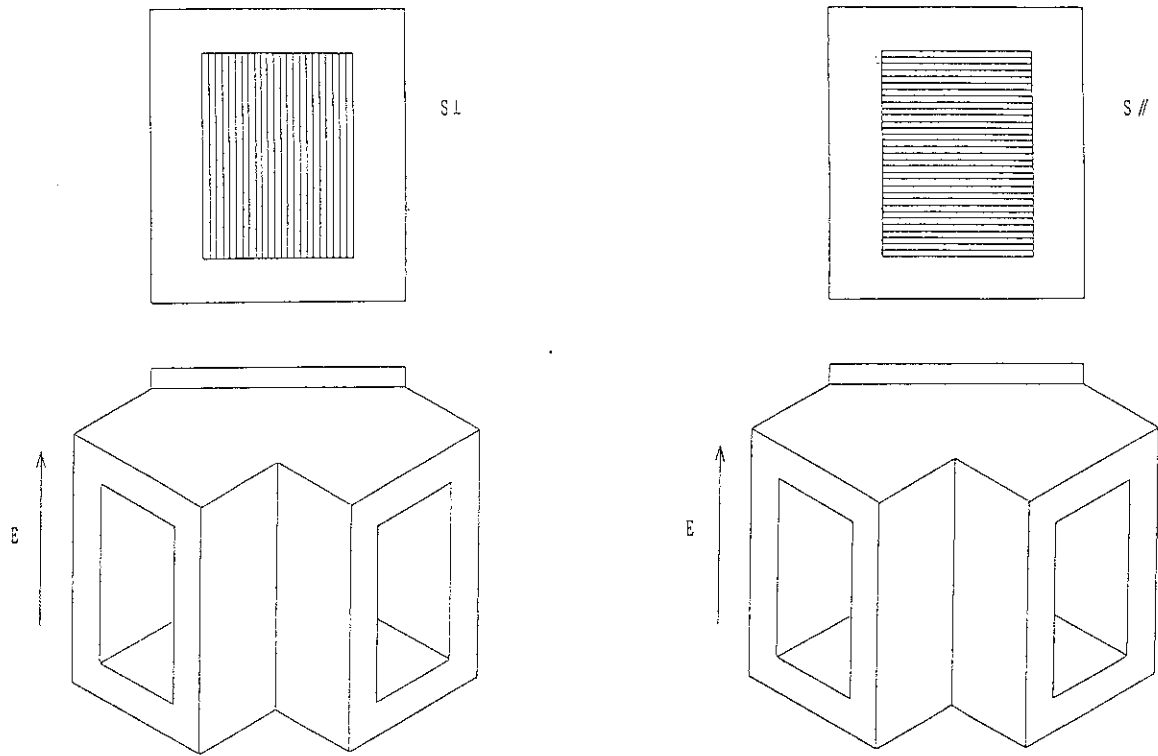


図3 JT-60とECE測定用ポート

Eバンド



Hバンド

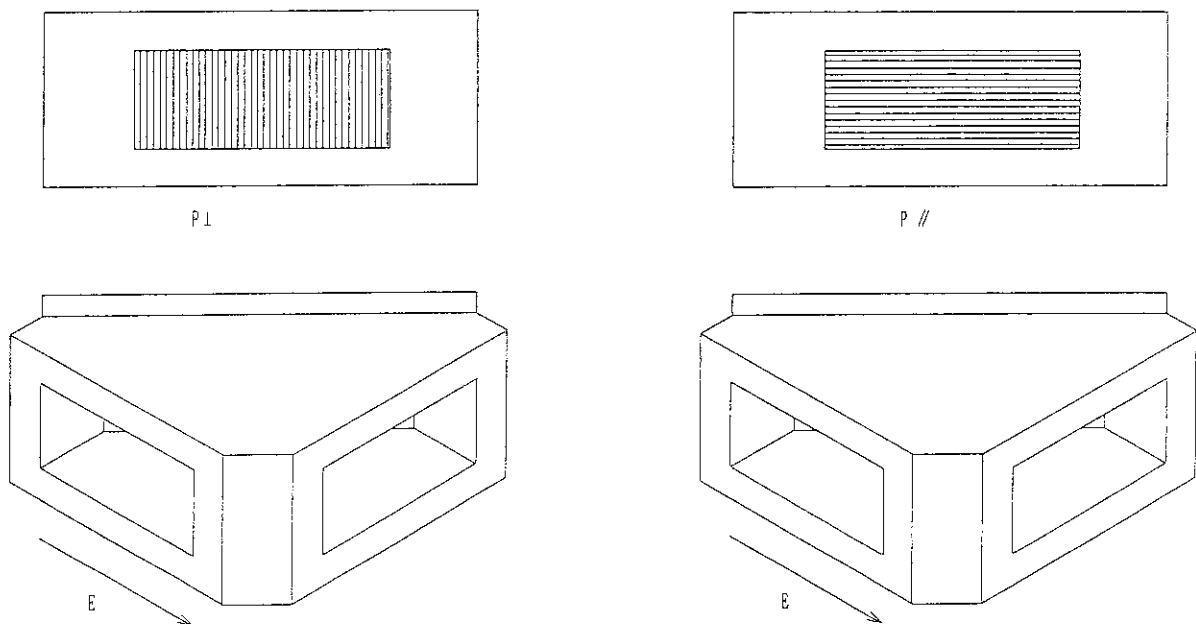
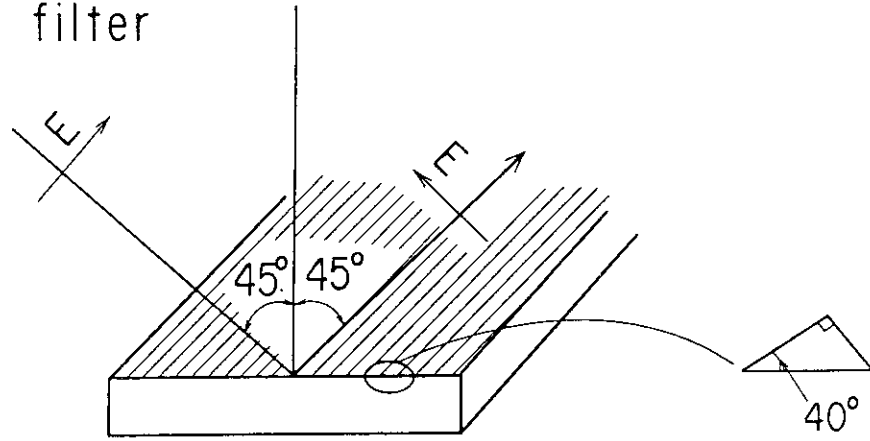


図4 導波管のバンドとGFの溝方向

E bend filter



H bend filter

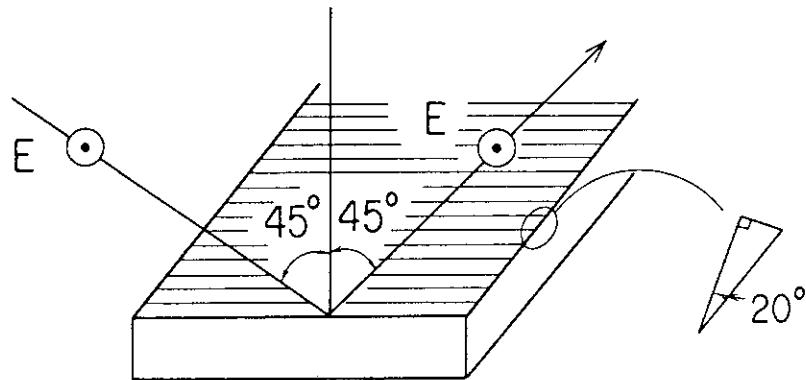


図5 G F の溝形状

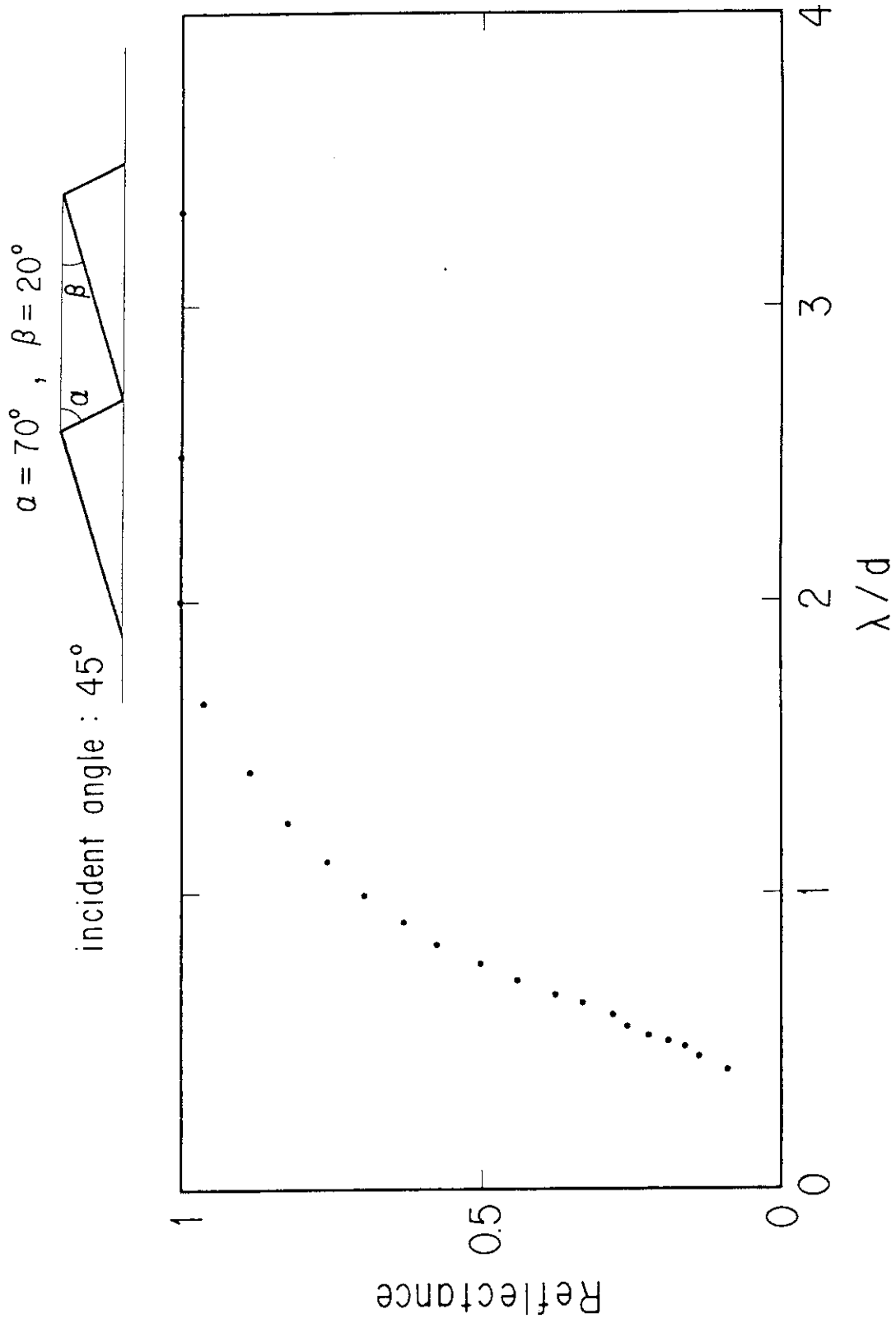


図6 コーダの計算結果

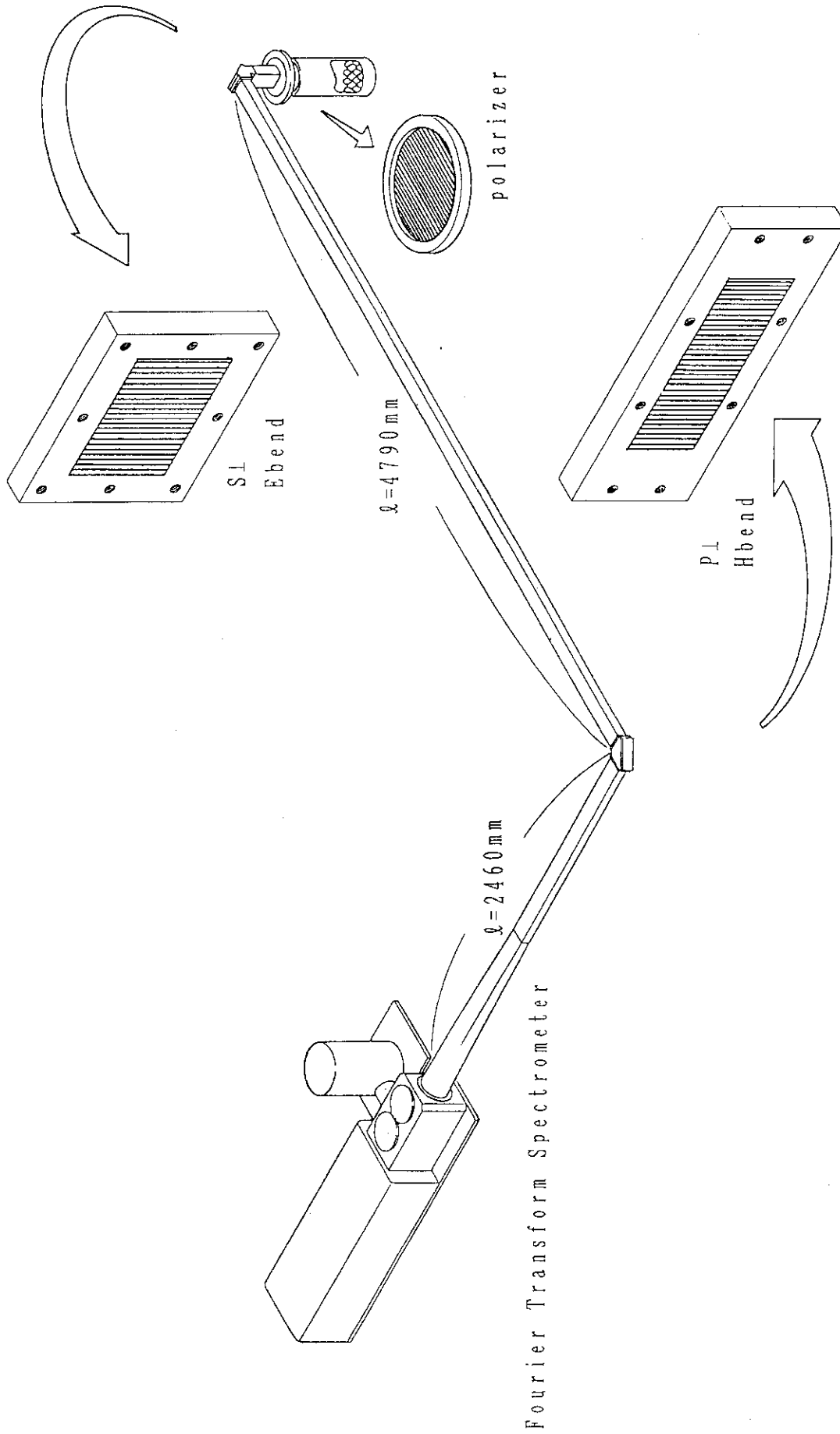


図7 G F の 反 射 率 測 定 の 概 念 図

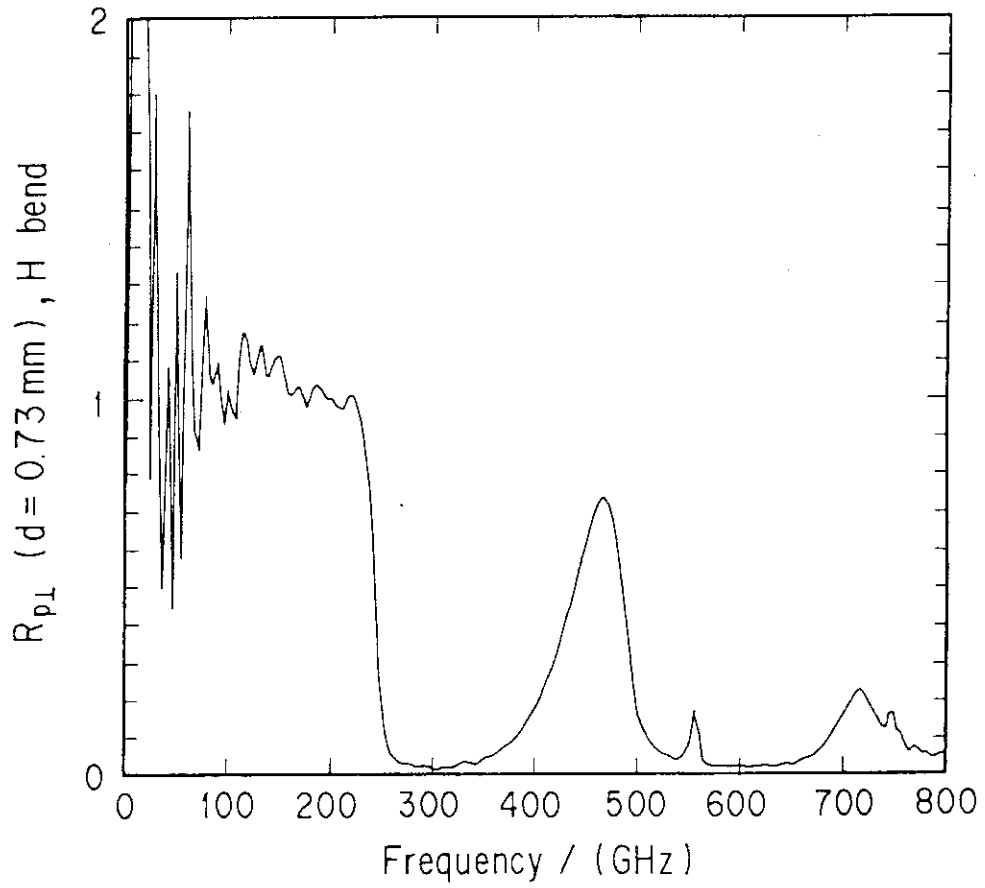


図8 $p\perp$ 型GF ($d = 0.73\text{ mm}$) の反射率 ($R^{p\perp}$)

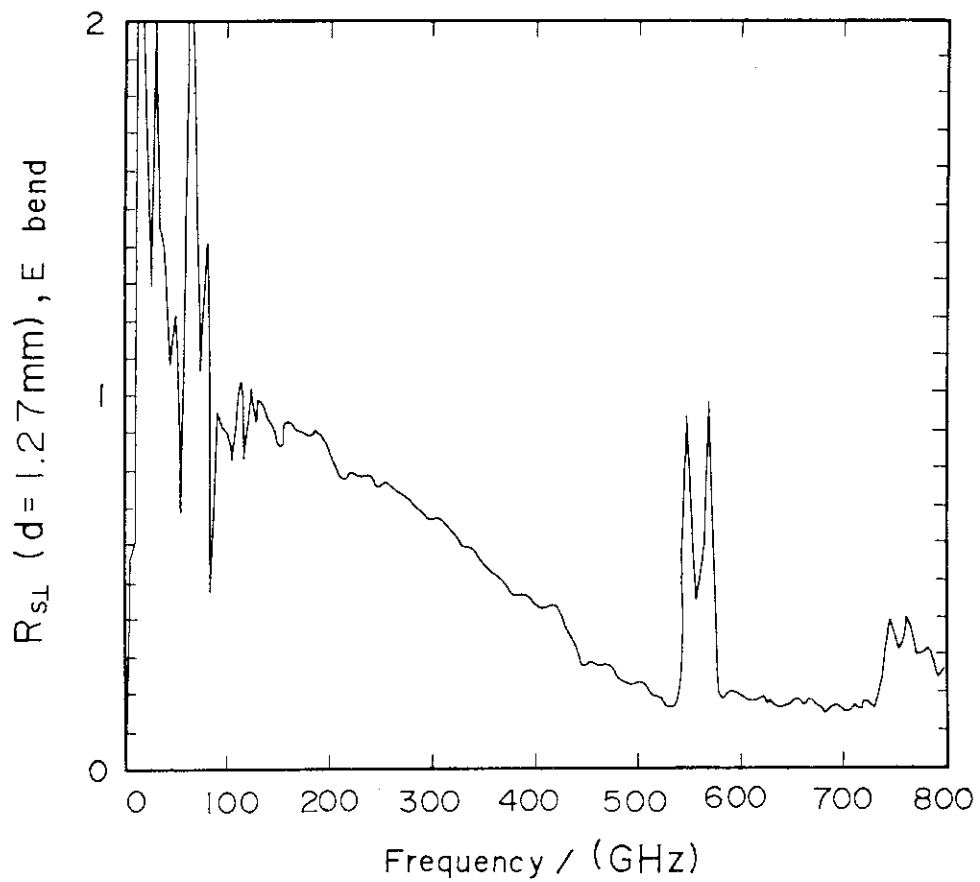


図9 $s\perp$ 型GF ($d = 1.27\text{ mm}$) の反射率 ($R^{s\perp}$)

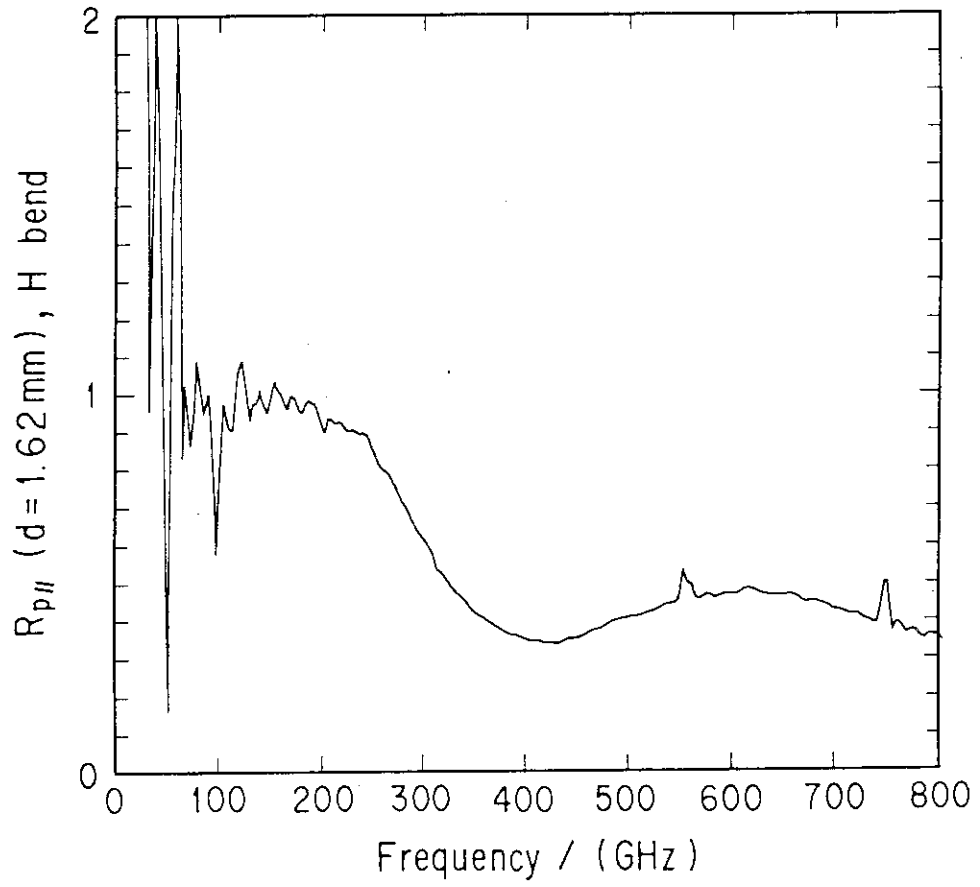


図10 p//型GF (d = 1.62 mm) の反射率 ($R^{p//}$)

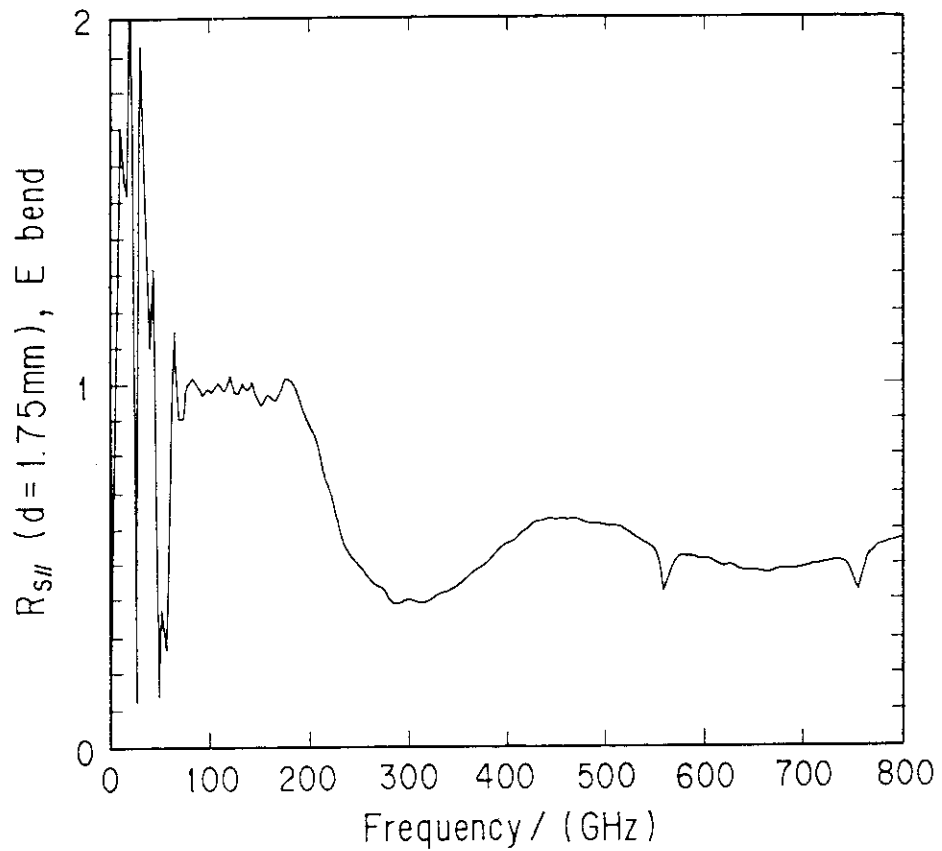
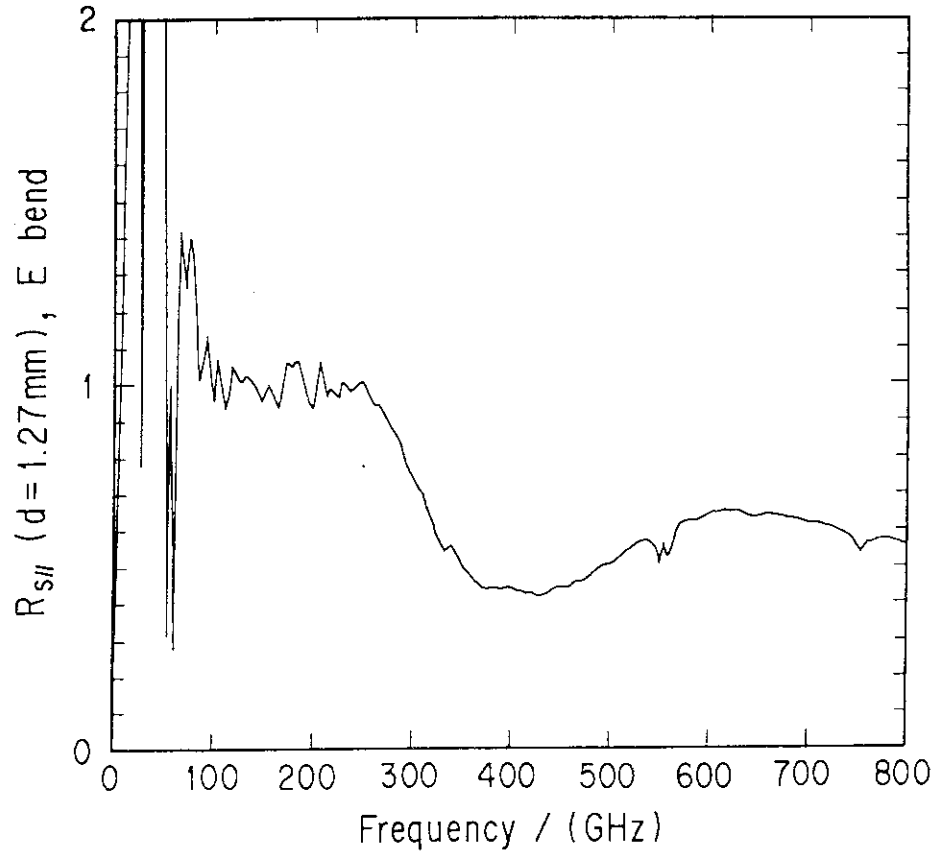


図11 $s//$ 型GFの反射率 ($R^{s//}$), (a) ($d = 1.27$ mm), (b) ($d = 1.75$ mm)

付録 エシェレット格子の理論¹⁷⁾の抄録

エシェレット格子の理論¹⁷⁾によれば、入射光の電場方向と回折格子の溝の方向により、回折格子フィルターを次の4つに分類される。記号は文献17に従い、文献17の図2を図A1に示す。

(a) p偏光、VO型回折格子(p⊥)

溝は入射面に直角で、かつ、入射電磁波の電場は入射面（入射方向と回折格子の面の法線とで定まる平面）に平行である。よって、入射電磁波の電場は溝に対して直角である。

(b) p偏光、HO型回折格子(p//)

溝は入射面に平行で、かつ、入射電磁波の電場は入射面に平行である。よって、入射電磁波の電場は溝に対して平行である。

(c) s偏光、VO型回折格子(s⊥)

溝は入射面に直角で、かつ、入射電磁波の電場は入射面に直角である。よって、入射電磁波の電場は溝に対して平行である。

(d) s偏光、HO型回折格子(s//)

溝は入射面に平行で、かつ、入射電磁波の電場は入射面に直角である。よって、入射電磁波の電場は溝に対して直角である。

GFのカットオフ周波数、飽和周波数の模式的な図¹⁷⁾を図A2に示す。 $f_c(\lambda_c)$: カットオフ周波数（波長）、 $f_s(\lambda_s)$: 飽和周波数（飽和波長）、 $\Delta f_c(\Delta \lambda_c)$: カットオフ、Rs: saturation reflectivity、 $R^{XX}(\lambda)$ 、 $R^{XX}(f)$: XX(p⊥、p//、s⊥、s//)型GFの波長 λ 又は周波数 f でのattenuated reflectivity (reflectivity)。それぞれの回折格子の反射率を図A3¹⁷⁾に示し、夫々の特徴を以下に記す。

$R^{p\perp}$: (1) λ_c は $\lambda/d > 1$ の領域にあり、入射角が大きくなると、長波長側へシフトする。

(2) カットオフ $\Delta \lambda_c$ は他のどの方向よりも狭く、入射角が大きくなると、カットオフは狭くなる。

(3) λ_c 以下の減衰領域のreflectivityはかなり低い。

$R^{S\perp}$: (1) 減衰領域のreflectivityは大変高く、 λ_c を決定することは難しい。

(2) λ_s は $R^{P\perp}$ の λ_s と一致し、入射角が大きくなると、長波長側へシフトする。

$R^{P//}$: (1) $R^{P\perp}$ と $R^{S\perp}$ の場合とは逆に、 λ_c は $\lambda/d < 1$ の領域にあり、入射角が大きくなると、短波長側へシフトする。

(2) カットオフ $\Delta\lambda_c$ は、入射角に独立であり、 $R^{P\perp}$ の $\Delta\lambda_c$ より幾らか広く、 $R^{S\perp}$ との $\Delta\lambda_c$ より狭い。

(3) 減衰領域のreflectivityはRのそれより高く、oscillation structureを示す。

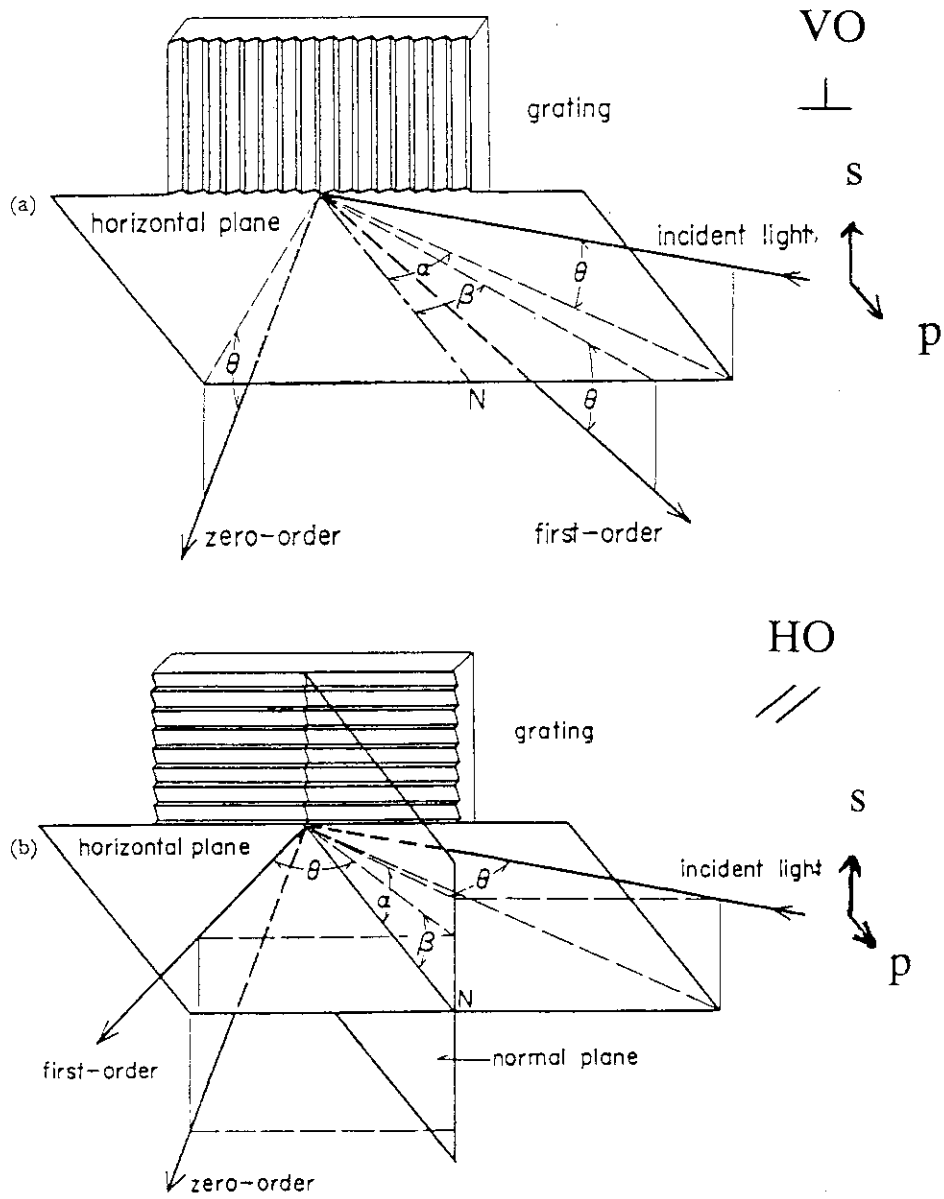
$R^{S//}$: (1) カットオフ $\Delta\lambda_c$ は、 $R^{P//}$ の $\Delta\lambda_c$ より幾らか狭い。

(2) λ_s は近似的に $R^{P//}$ の λ_s と一致する。

(3) 入射角が大きくなると、カットオフ $\Delta\lambda_c$ は広くなる。

(4) 減衰領域のreflectivityは $R^{P//}$ のそれより低く、oscillation structureを示し、位相は π だけ $R^{P//}$ と違う。

回折格子の溝が偏光の電場の方向と直角のGF ($p\perp$ と $s//$) では、 $R^{P\perp}$ と $R^{S//}$ の曲線から得られる λ_c 、 λ_o 、 λ_s はこの理論の予想値と完全に一致する。回折格子の溝が偏光の電場の方向と平行のGF ($s\perp$ と $p//$) では、 $R^{S\perp}$ と $R^{P//}$ の曲線から得られる λ_c 、 λ_o はこの理論の予想値と一致しないが、 λ_s はこの理論の予想値とほぼ一致する。



図A1 エシェレット格子のGFの種類 (文献17より転載)

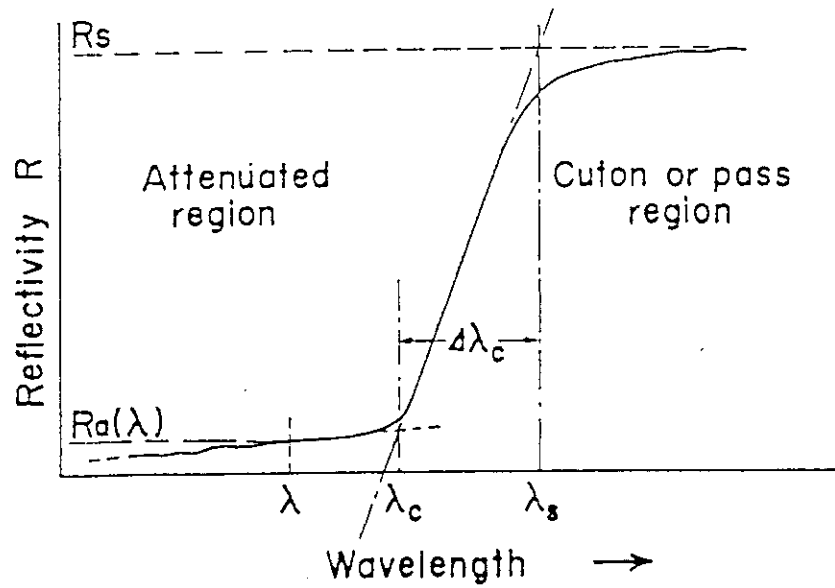
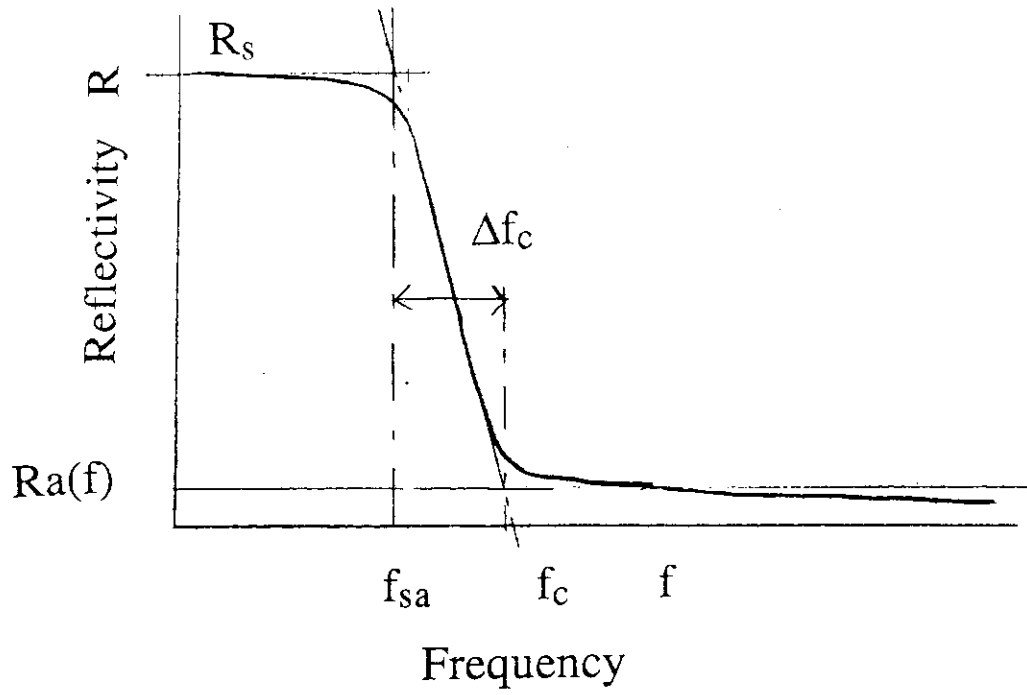


図 A 2 GF の模式図 (文献 17 より転載, 一部加筆)

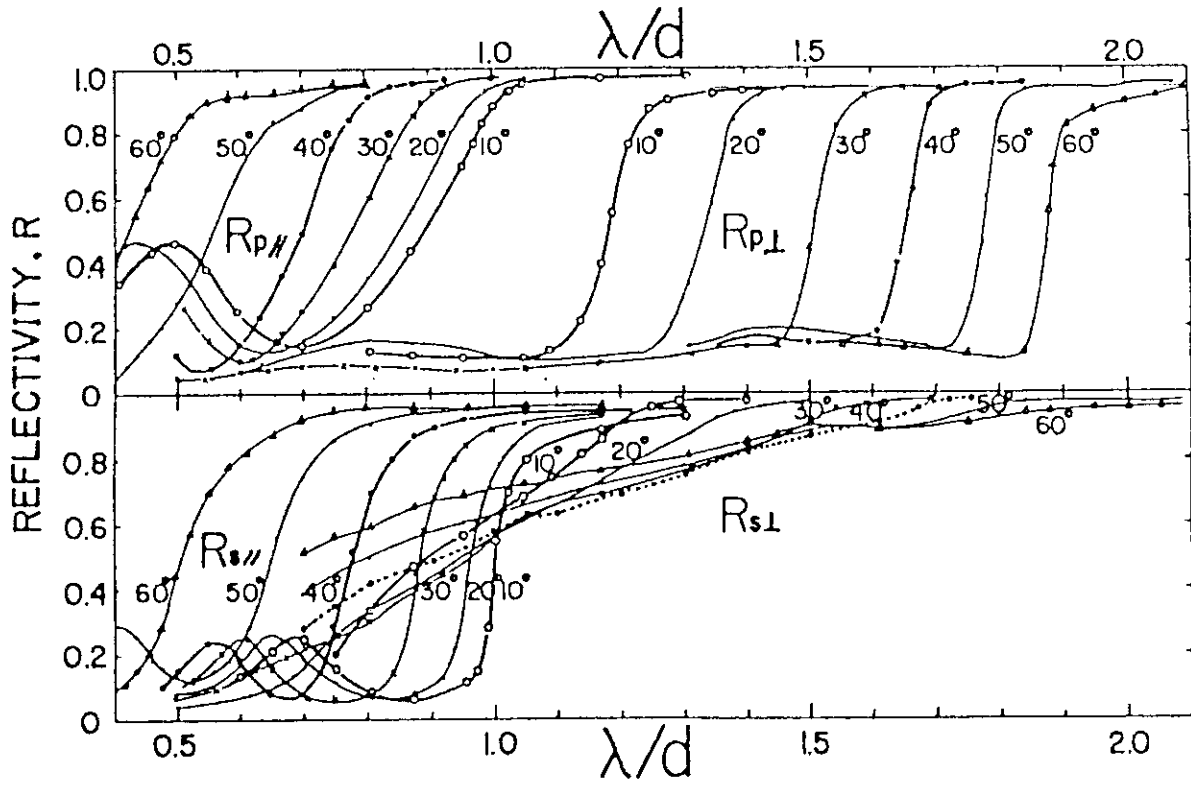


図 A 3 エシェレット格子のGFの反射率 (文献17より転載)