

プラズマ測定におけるマイクロ波の応用

Application of Microwave at Plasma Measuring

東 生 造* 小 口 正*
Seizô Azuma Tadashi Oguchi

要 旨

核融合反応など高温プラズマの研究,あるいはプラズマの基礎的な研究においてプラズマの密度測定および温度測定の方法としてマイクロ波,とくにミリ波による遠隔測定が最も適しており,広く使用されるようになってきた。ここでは50 Gc帯の温度測定装置と干渉計をとりあげ,とくに開発した細ビームアンテナを用いてプラズマの局部的観測を可能にし,受信装置に温度較正用比検出回路をとり入れて測定精度を向上した。さらに遅波線路およびフィーダにらせん導波管または大口径導波管をとり入れ細ビームアンテナとの併用により感度の向上を図った。本稿はこれら特長ある方式につき記述したものである。

1. 緒 言

核融合反応の研究をはじめ航空宇宙工学,機械工学その他の分野にプラズマの基礎研究および応用研究が盛んにとり入れられるようになってきた。

プラズマの診断法の一つにマイクロ波による方法がある。プラズマの診断には光学的方法,探針法,その他種々の方法がとられているが,マイクロ波による方法はマイクロ波がプラズマ内を伝播するときに受ける位相変化や吸収からプラズマの電子密度や衝突数を,またプラズマからの雑音放射をマイクロ波受信機で受けプラズマの電子温度を測定するものである。マイクロ波による方法は時間的にかなり速い現象でも観測できること,また精度が高いことが特長である。しかしマイクロ波をプラズマに導くには従来電磁ホーンなどが用いられ,プラズマの大きさに比べかなりの広がりをもった電波によって測定していたため測定値として空間的分布の平均値しか求めることができないのが欠点とされていた。

ここではマイクロ波によるプラズマ診断装置として温度測定用受信装置,密度測定用干渉計およびプラズマ測定用として開発した回転円筒反射鏡形の細ビームアンテナにつき記述する。

2. マイクロ波によるプラズマ温度測定装置

2.1 プラズマからの放射⁽¹⁾

プラズマからのマイクロ波領域の放射は黒体放射,制動放射,サイクロトロン放射が考えられそれぞれある条件のもとで次式で表わされることが示されている。

黒体放射エネルギー

$$\epsilon = \frac{hfB}{\left[\exp \frac{hf}{kT} - 1 \right]} \cong kTB \dots\dots\dots (1)$$

ここで, h : プランクの定数
 f : 中心周波数
 k : ボルツマン定数
 T : 絶対温度
 B : 帯域幅

制動放射エネルギー

$$\epsilon_v = \frac{32\pi^2 Z_e^2 e^6 n_e n_i}{3\sqrt{3} c^3 (2\pi m_e)^{3/2} (kT_e)^{1/2}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, m_e : 電子質量
 Z_e : イオン電荷
 n_e, n_i : 電子密度, イオン密度



図1 50 Gc 帯プラズマ温度測定用受信装置および細ビームアンテナ

c : 光速度

サイクロトロン放射

$$\omega_c = \frac{eH}{m_e c} \dots\dots\dots (3)$$

H : 磁場の強さ

したがってマイクロ波測定装置と上式との関係を示すと,(1)式はNiquistによる抵抗体雑音と同じであり既知の雑音温度をもつマイクロ波受信機でこの領域でのプラズマ放射エネルギーを受けその値の比較からプラズマ温度を求めることができる。(2)式はこの領域での放射エネルギーを受信機で測定するとともに後述する干渉計により電子密度を求めることにより(2)式を用いてプラズマ温度が求められる。(3)式のサイクロトロン放射はプラズマ内電子の磁場によるサイクロトロン運動による振動放射でこの放射はプラズマ内の電子,イオンの衝突により幅をもちかつこの幅は電子密度に関係しているものである。この振動数と幅から電子の衝突数や密度が求められる。

2.2 プラズマ温度測定用受信機

2.1項で述べたプラズマ放射を測定する50 Gc帯の受信装置を図1に,回路構成図を図2に示す。本装置は受信高周波部(局発発振器を含む),主IF増幅部,クライストロン電源からなる標準受信機のほかに特にプラズマ測定用として温度較正用の雑音放電灯付加回路と比検出盤を備え,温度較正の方法として温度比から求めるY

* 日立電子株式会社

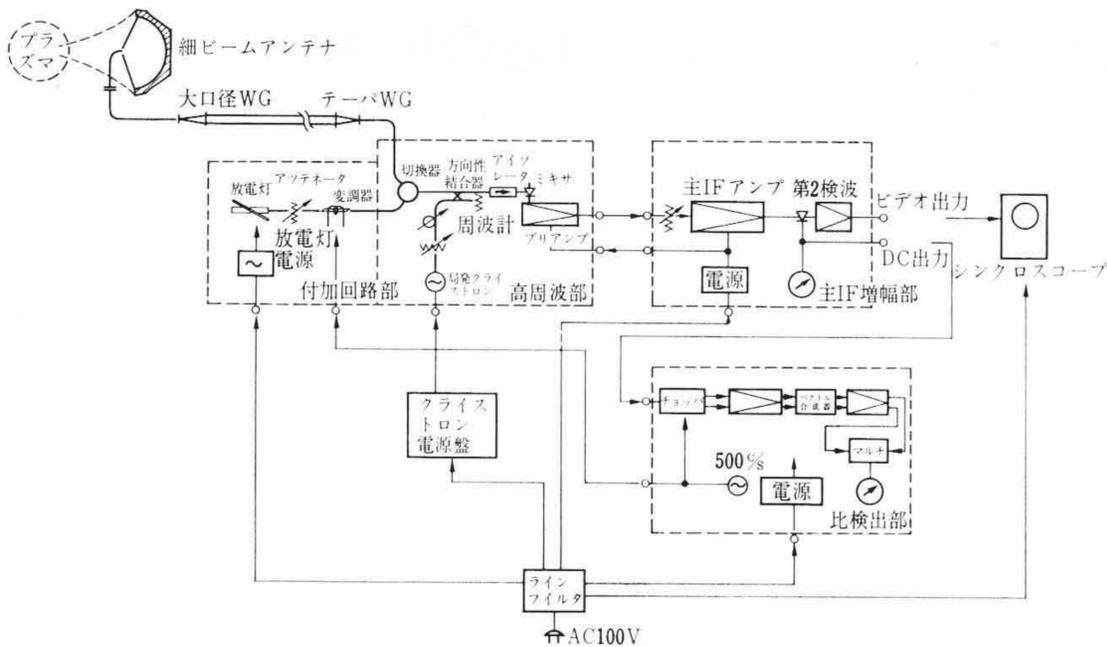


図2 温度測定用受信装置回路構成図

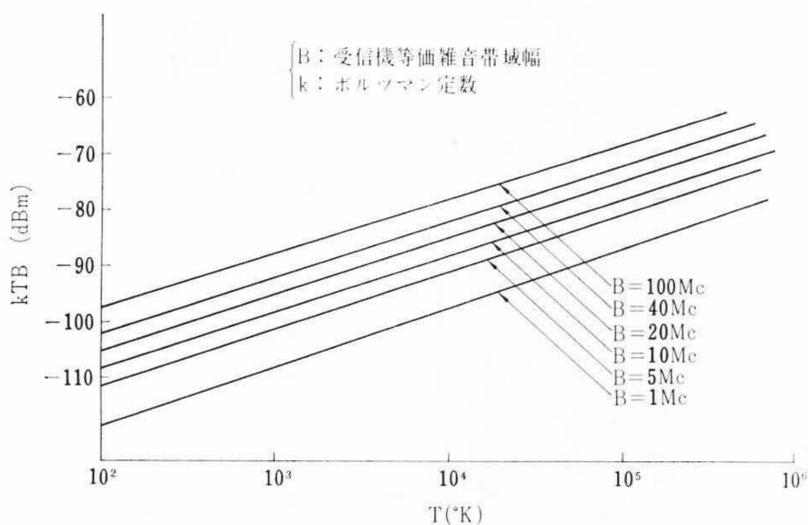


図4 温度対雑音電力

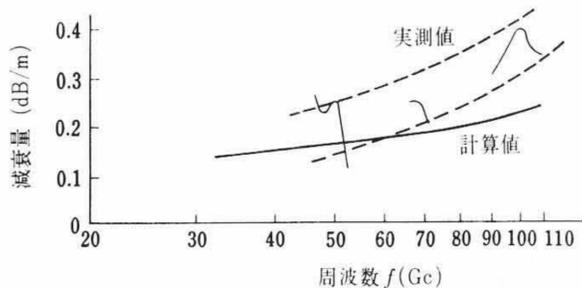


図5 WRJ-10 大口徑導波管減衰特性

factor法を採用した。またアンテナ部には細ビームアンテナを用いて電波の空間的広がりを小さくし、フィーダ部には大口徑導波管を用いて受信感度を改善している。本装置の主要性能を下記に示す。

主要性能

- 周波数範囲 46~51 Gc
- 使用導波管, フランジ WRJ-500, BRJ-50
- 受信雑音指数 25 dB 以下
- 中間周波数 70 Mc
- 中間周波数帯域幅 ±20 Mc
- 中間周波数増幅利得 80 dB 以上
- 第二検波出力計 0~20 dB 直読
- 直流出力電圧 0~100 mV
- 直流出力電圧インピーダンス 1 kΩ 平衡形
- ビデオ出力電圧 200 mV_{PP} 以上
- ビデオ出力電圧インピーダンス 75Ω 不平衡形
- 比検出器
- 雑音指数測定レンジ 0~30 dB

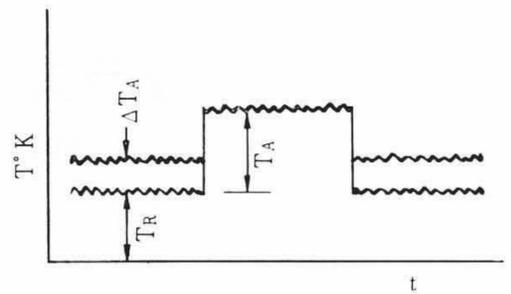


図3 雑音温度付加の説明図

細ビームアンテナ
 反射鏡 300 φ
 第2焦点におけるビーム幅
 (-3 dB) 13 φ

受信機自身の持つ雑音温度を校正する Y factor 法は図2の構成図にて高周波部切替器を付加回路部に接続し放電灯雑音を受信するようにする。このとき放電灯雑音は比検出盤

に内蔵されている 500 c/s の発振器に接続されているマイクロ波の変調器により ON, OFF された信号として受信される。この信号の関係は図3に示すように被測定受信機の温度を T_R , 変調器 OFF のときすなわち放電灯温度 T_A (正しくは変調器などのそう入損失分を考慮する必要がある), 変調器 ON のとき (約 20 dB の減衰を与える状態) の入力雑音温度を ΔT_A とすると

$$Y = \frac{T_R + \Delta T_A}{T_R + T_A}$$

すなわち

$$T_R = \frac{\Delta T_A - Y T_A}{Y - 1} \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで T_A は放電灯の内部気体と圧力により定まる既知のものであり、また ΔT_A も変調器の ON の時の減衰量を測定しておけば計算で求められる値である。したがってこのような信号を受信機出力より比検出盤にとり入れ両者のレベル比すなわち Y factor を指示計上にて求めれば(4)式より受信機雑音温度を求めることができる。本装置による T_R の測定範囲は約 3×10^5 K まで可能である。

このようにして受信機温度すなわちセットの持つ雑音電力 (KTB N_F , N_F : 受信機の雑音指数) レベルがわかっているならば 2.1 項の (1), (2) 式で示されるプラズマ雑音を受けたときそれぞれの雑音レベルの比較よりプラズマ温度を求めることができる。図4は受信機帯域幅をパラメータとした温度対雑音電力の関係である。本装置においては $N_F \leq 25$ dB であるので受信機の雑音電力は -73 dB m であり温度に換算すると 8×10^4 K となる。

アンテナ部は従来用いられていた電磁ホーンのかわりに後述する細ビームアンテナを用い放射特性をビーム状にしぼり伝播損失をほぼ零にするとともにプラズマの局部的観測を可能にした。フィーダ部には測定感度を上げるため 10 Gc 帯の導波管 WRJ-10 (口径 22.9 × 10.20 mm) を用い、50 Gc の基本波姿態 TE_{01}^{\square} を伝送し損失を少なくしている。図5に WRJ-10 大口徑導波管の減衰の周波数特性を示す。50 Gc の導波管 (口径 4.78 × 2.39 mm) 損失 2 dB/m に対し約 1/10 の損失である。また大口徑導波管と 50 Gc 導波管との結合には電鍍加工によるテーパ導波管を用いた。

3. マイクロ波によるプラズマ密度測定

3.1 プラズマ内の伝播定数⁽¹⁾

プラズマ中に平面電磁波が伝播する場合プラズマの比誘電率 ϵ は

$$\epsilon = 1 - \frac{\eta}{1 - j\beta} \dots \dots \dots (5)$$

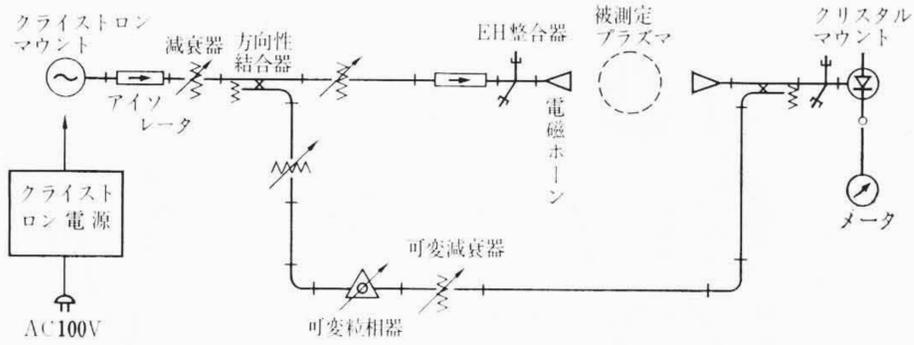


図6 干渉計回路図

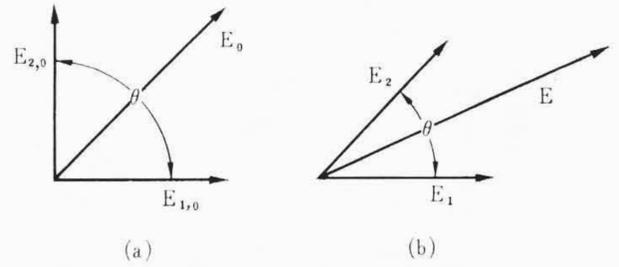


図7 電圧ベクトル図

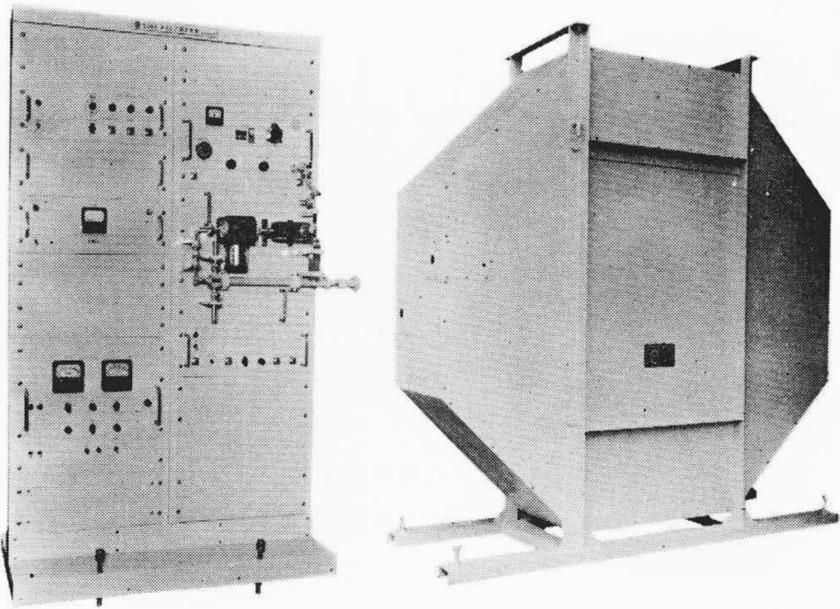


図8 50 Gc フリンジシフト干渉計

3.2 干渉計⁽²⁾

ジェットプラズマのように定常状態にあるプラズマの密度観測には図6に示す干渉計が最も簡単でよく用いられる。 P_1, P_2, P をそれぞれのアームの電力(P_2 がプラズマ入回路の電力)とし、方向性結合器とクリスタルマウントにて合成して検波後、 P_1, P_2, P の変化を測定して電子密度を求めるものであるが、プラズマがないときの電力と移相をそれぞれ $P_{1,0}, P_{2,0}, \theta_0, P_0$ とすれば(図7(a)参照)

$$\frac{P_0}{P_{1,0}} = \frac{E_0^2}{E_{1,0}^2} = \left(1 + 2\sqrt{\frac{P_{2,0}}{P_{1,0}}} \cos \theta_0 + \frac{P_{2,0}}{P_{1,0}}\right) \dots \dots \dots (8)$$

$$\cos \theta_0 = \frac{\frac{P_0}{P_{1,0}} - \left(1 + \frac{P_{2,0}}{P_{1,0}}\right)}{2\sqrt{\frac{P_{2,0}}{P_{1,0}}}} \dots \dots \dots (9)$$

となる。プラズマがあるときプラズマ内の波長は長くなるので、 P_0 は図7(b)に示すように大きくなり、この値は移相角 θ の変化 $\Delta\theta$ に対応する。すなわち

$$\frac{P}{P_1} = 1 + 2\sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \cos \theta + \frac{P_2}{P_1} \dots \dots \dots (10)$$

$$\cos \theta = \cos(\theta_0 + \Delta\theta) = \cos\left[\theta_0 + d\left(\frac{2\pi}{\lambda_p} - \frac{2\pi}{\lambda_0}\right)\right] \dots \dots \dots (11)$$

この式と ω_p との関係から電子密度は、 $\omega_c \ll \omega$ の場合

$$n_e = 2.07 \times 10^9 f \text{ Gc} \left(\frac{\Delta\theta_{\text{deg}}}{d_{\text{cm}}}\right) \dots \dots \dots (12)$$

で求められる。

3.3 フリンジシフト干渉計

この方法はプラズマの電子密度の時間的変化をブラウン管上で直視測定するもので大電流プラズマの測定に適している。図8に50 Gcのフリンジシフト干渉計の外観を、図9に回路構成図を示す。

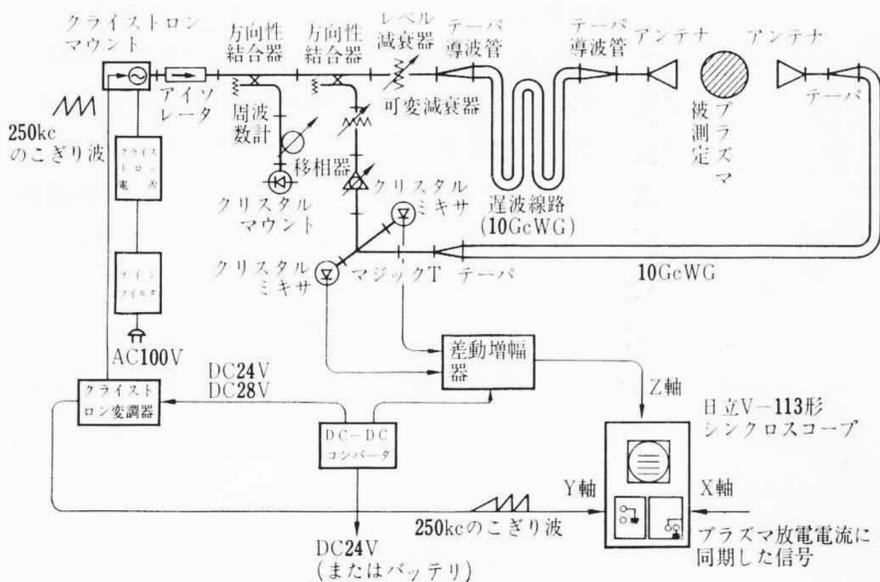


図9 50 Gc フリンジシフト干渉計構成図

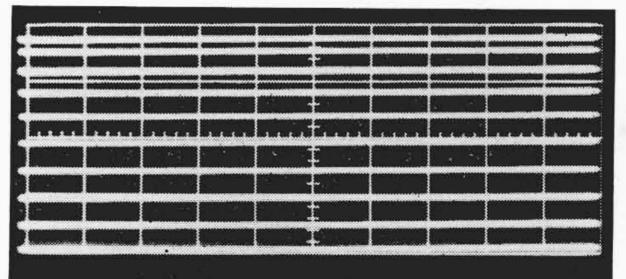


図10 フリンジ干渉しま

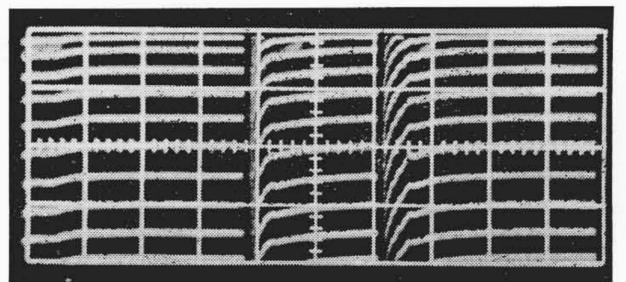


図11 フリンジシフト波形

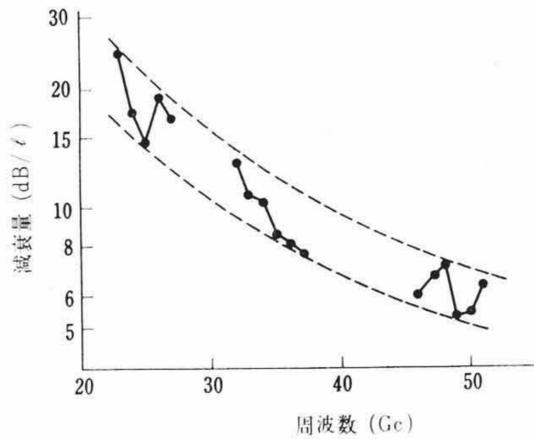


図 12 遅波線路特性

クライストロンの出力は方向性結合器により 2 分され、一方は数 100 波長の遅波線路とプラズマ測定部を経由したうえ、直接波とマジック T で合成されている。クライストロンには約 100 Mc にわたり 250 kc ののこぎり波による周波数掃引がかけられているので、両アームを経て合成されたマイクロ波はバランスとアンバランスの状態をくり返しビート周波数を作る。このビート周波数をミキサを通して差動増幅し適当なレベルにてクリップし波形整形を行ないシンクロスコープの輝度変調に加えられる。一方クライストロンを掃引しているのこぎり波をシンクロスコープの縦軸に加え横軸を適当な時間で掃引するとシンクロスコープ面上には輝点の列すなわち図 10 に示すようなフリンジ干渉しまが数本現われる。この列の間隔は 2π の移相に相当するものである。もしプラズマの密度が変化するとマイクロ波の位相は (5), (7) 式で示される変化を生じ、したがってブラウン管上の輝点の位置が変化を受け図 11 に示すようなフリンジのシフトが見られる。この位相変化量をブラウン管面上から求めれば電子密度 n_e は (7) 式から求められる。

本装置ではとくにプラズマ発生装置の誘導を避けるため変調器、差動増幅器などをトランジスタ化してバッテリーで動作させ、電源からの障害を避けている。また差動増幅器は図 10 にみられるように輝線の幅を細くして移相測定の読取精度を上げている。

本装置の主要性能は下記のとおりである。

主要性能

周波数範囲	46~50 Gc (導波管素子は 40~60 Gc 使用可)
使用導波管, フランジ	WRJ-500, BRJ-50
使用導波管クライストロン	47V10(または 50V10 ほか)
送信出力	+10 dBm (10 mW) 以上
変調器	
変調周波数	250 kc のこぎり波 (干渉計用変調波) 120 c/s のこぎり波 0.5~5 kc 方形波
変調出力	0~25V P-P 以上
差動増幅器	
利得	80 dB 以上
周波数帯域	500 kc~8 Mc, 3 dB 以内
出力(極正)	30V P-P 以上(負パルス)
入力換算雑音レベル	100 μ V P-P 以下
入力変化範囲	20 dB 以上
観測フリンジ数	10 本 (20 π) 以上
観測フリンジ幅	スペースに対して 1/5 以下
電源入力	A. C 100V 50~60 c/s 約 400 VA D. C 24V 約 3A

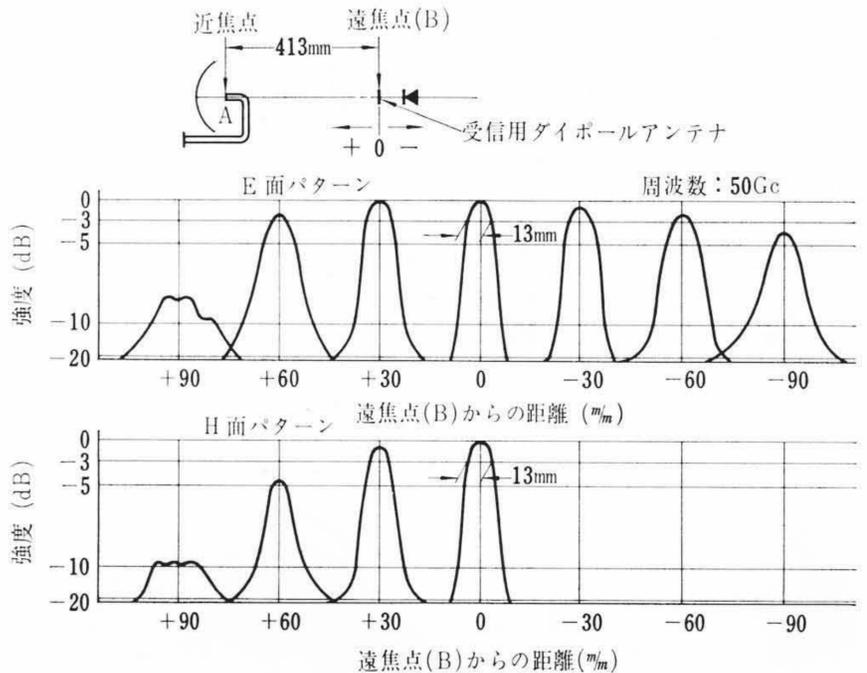


図 13 細ビームアンテナ特性

形 状 約 1,600(H) × 580(W) × 630(L) mm
重 量 約 160 kg

3.4 遅波線路⁽³⁾

フリンジシフト干渉計における遅波線路はマイクロ波の位相を遅らせるのが目的であるため線路による損失は極力少ないことが好ましい。線路の長さ L とフリンジ干渉しまの数 N との関係は次式で示される。

$$\frac{L}{c} \{ \sqrt{(\omega + \Delta\omega)^2 - \omega_c^2} - \sqrt{\omega^2 - \omega_c^2} \} = 2\pi N \dots\dots\dots (13)$$

- ここで、 ω : 角周波数
- $\Delta\omega$: 周波数掃引による角周波数の変化量
- ω_c : 線路の遮断角周波数
- c : 光速

いま周波数 50 Gc, 掃引 100 Mc とすると長さは約 30 m にもなる。この長さでは 50 Gc の方形導波管を用いると線路の損失は 60 dB にもおよび電力損失がはげしく測定が不能になる。図 8 に示す装置では TE_{01}° 姿態を伝送する円形らせん導波管を用いた。らせん導波管はホルマル線をらせん密巻にして外壁をエポキシ樹脂でかためたもので TE_{01}° 以外の不要姿態の発生を防ぎ伝送損失を少なくしている。図 8 は 20 ϕ の直径のらせん導波管をスペースファクタをよくするため約 2 m 直径のコイル状に巻いて金属ケースに収容したものである。90 度エルボ 2 個 2.5 m 直線導波管 1 本とコイル状らせん導波管からなる全長 28 m の線路の減衰特性は図 12 に示すとおりである。50 Gc にて 6 dB 以下の減衰が得られた。なおこの 20 ϕ らせん導波管は直線の場合減衰は 0.04 dB/m で非常に小さくすぐれたものである。 TE_{01}° 円形導波管を用いる遅波線路としてはこれらの導波管のほかに方形導波管との接続部に TE_{01}^{\square} から TE_{01}° 姿態への姿態変換器を必要とする。この姿態変換器は 46~50 Gc にわたり 2 dB/1 本以下の損失であった。したがって遅波線路としての全体の損失は約 10 dB でこれは 50 Gc の方形導波管に比べ約 40 dB 少ないことになる。

このほかに遅波線路として前述(図 5)の大口径導波管が用いられる場合がある。この場合は曲り部における不要姿態の発生に伴って生ずる大きな減衰を避けるようとくに各部の寸法に注意を払う必要がある。

4. 細ビームアンテナ

プラズマ観測部には従来電磁ホーンなどによるアンテナが用いら

れてきたが、アンテナビームがプラズマ直径に対し同等またはそれ以上になり、測定の正確さを欠くとともに空間的分布の平均値しか求めることができなかつた。そこで回転だ円面を用いたアンテナを採用した。アンテナの外観は図1のように回転だ円面の近焦点に導波管一次方射器の放射点をおき遠焦点にて電波を集束させるものである。製作したものは鏡面の直径 300 mmφ、ビーム焦点 500 mmで、その特性は図13に示すように 50 Gcにて焦点におけるビームの太さは 13 mmφ (3 dB 幅) で 20 dB 降下点で約倍に広がる非常にシャープなものが得られた。このビームの太さの広がりか 50% になる進行方向の範囲はおよそ遠焦点から ±80 mm である。さらにこのアンテナを遠焦点に合わせて 2 台対向して伝送損失を求めた結果はアンテナフィーダ (約 0.5 m) の損失を含めて約 0.7 dB でフィーダ損失を考えると空間損失はきわめてわずかである。

このような細ビームアンテナの実現によりプラズマの密度測定および温度測定に微細なプラズマ観測を可能にする。また空間伝播損失が少ないため観測の感度を大幅に改善することができた。アンテナの保持部には図1にみられるようにプラズマの局所的分布の観測を容易にするため上下および左右に微細調整機構を設けている。

5. 結 言

プラズマ物理の研究用として、広範囲の研究機関の要望に答えて 10~150 Gc にわたる種々の測定装置を開発した。本稿ではその中から代表的な装置について記述した。マイクロ波によるプラズマの測定法としては基本的にはこれらの方法でカバーされており、研究目的に応じて周波数および回路方式を選定することになる。

特にプラズマ測定用として開発された細ビームアンテナを使用することによって測定精度の向上が期待できる。

終わりにご指導を賜った東北大学虫明, 上領両教授, 名古屋大学プラズマ研究所長尾教授, 松浦, 田中各助教授, 京都大学, 大阪大学, および理化学研究所の関係各位, ならびに日立製作所中央研究所百々博士に深謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 三谷: “マイクロ波によるプラズマ測定” 日本物理学誌 Vol. 14, No. 5, 1959, p. 245
- (2) Perry Kuhns: Microwave Interferometer Measurements of Electron-Ion Recombination in Nitrogen, Air, and Argon. NASA Technical Note, D-1191
- (3) 御子紫ほか: 日立評論 46, 1707 (昭 39-10)



実用新案 第588138号

新 案 の 紹 介



中田九州男

磁 器 封 止 電 子 管

この考案は磁器封止電子管の構造に関するもので、図1,2に示すように高周波電圧を印加される二電極間に用いられる磁器絶縁物の金属と封止すべき相対向する両面において、金属化を要しない部分は金属化を要する部分よりも低く、かつこの金属化を要する部分の対向面積が小なるように形成し、この突出部分を金属化し、この面において磁器絶縁物と金属とを接着したものである。

この考案によれば、磁器絶縁物の研磨に要する時間を短縮し、かつ磁器絶縁物の所定の面のみ金属化を容易な方法でほどこすことができ、しかも電子管の電極間の絶縁が良好に保たれ、また電極間静電容量を減少させることができ、磁器封止電子管の特長である小形化および高い周波数における動作にきわめて有利である。

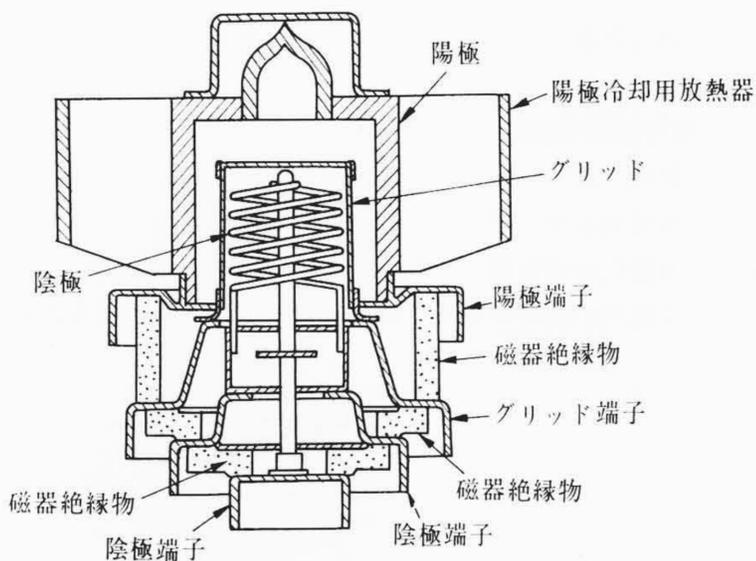


図1

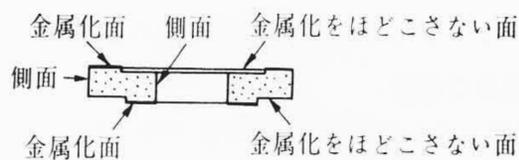


図2

お わ び

本誌4月号(第48巻第4号)64頁掲載の〔サイリスタ式E D93形交流電気機関車〕の執筆者中、平野 但の氏名を、平野 坦と誤って掲載いたしました。

謹んで、おわび申し上げますとともに、ここに訂正申し上げます。