

トカマクプラズマの巨視量測定

御手洗, 修
九州大学大学院工学研究科応用原子核

<https://doi.org/10.15017/1544149>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 48, pp.11-24, 1978-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

トカマクプラズマの巨視量測定

御 手 洗 修



九州大学応用力学研究所
所報 第48号 別刷
昭和53年9月

トカマクプラズマの巨視量測定

御 手 洗 修*

概 要

強磁場中の乱流加熱用トカマクプラズマの巨視量であるプラズマ電流、ワントーン電圧、プラズマ変位そして MHD 不安定性を計測する装置を設計した。さらにこれらの試作テストを行なった結果、本実験に使用できることが明らかになった。

1. 緒 言

九州大学応用力学研究所において強磁場中の乱流加熱用トカマク装置 TRIAM-1 (Tokamak of Research Institute for Applied Mechanics) の建設が進められている。本装置の主半径は 25.4 cm, 小半径は 4 cm である。最大トロイダル磁場は 40 kG, プラズマ電流は (表面の安定係数が 3 のとき) 40 kA が計画されている。従って電子温度は 700 eV, イオン温度 300 eV, 最大電子密度 ($1 \sim 4$) $\times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ が期待される¹⁾²⁾。このトカマクプラズマの電流, ワントーン電圧, 変位, そして MHD 不安定性の挙動の如き基本的なプラズマ巨視量を注意深く測定すればかなりのプラズマの情報を得ることができる。プラズマの巨視量を測定する装置はプラズマ監視装置と呼ばれ, トカマクプラズマの計測に必要な欠くべからざるものとなっている。また, 放電の再現性のチェックにも使用されている。

トカマク装置が異なれば測定される巨視量も異なる故, プラズマ監視装置はトカマク装置固有のものにならざるをえない。従って TRIAM-1 に応じたプラズマ監視装置の設計が必要となる。本論文では TRIAM-1 のプラズマ巨視量を測定するプラズマ監視装置の設計と試作テストの結果について報告する。

以下第2章ではプラズマ監視装置の構成について, 第3章ではプラズマ電流計測装置について, 第4章ではワントーン電圧計測装置について, 第5章ではプラズマ変位計測装置について, 第5章で MHD 不安定性計測装置について述べ, 第6章でまとめを行なう。

2. プラズマ監視装置構成

プラズマ監視装置はプラズマ電流計測回路, ワントーン電圧計測回路, プラズマ変位計測回路, および MHD 不安定性計測回路より構成される。

プラズマ電流, プラズマ変位計測回路はプローブ, 同軸ケーブル, 打消回路, 積分器より成り, ワントーン電圧, MHD 不安定性計測回路はプローブ, 同軸ケーブル, 打消回路より成る。

* 九州大学大学院工学研究科応用原子核 (矢嶋信男紹介)

3. プラズマ電流計測

3.1. 原理

プラズマ電流は、そのつくるポロイダル磁場をプラズマを取り囲んだログスキーコイルによって検出し、さらに積分器を通すことで測定される。本トカマク装置の場合、真空容器はセラミックブレークによってトロイダル方向に電気的に絶縁されているので、トロイダル方向の真空容器電流は流れない。従って真空容器の外側に設置したログスキーコイルはプラズマ電流のみを検出する。しかしその他に、トロイダル磁場の主半径方向の勾配とログスキーコイルの設置の仕方、コイルの巻き方等によってトロイダル磁場を拾う可能性が存在するのでこれを打消す回路を準備しておく。

3.2. 測定範囲

プラズマ電流の運転範囲は安定係数¹⁾で決定される。即ち次の式である。

$$I_p = 2 \pi a^2 B_T / \mu_0 R q_a \quad (1)$$

ただし、 a はプラズマ半径、 R は主半径、 B_T はトロイダル磁場、 q_a はプラズマ表面の安定係数である。

(1) に本装置のパラメータを入れて計算すると $B_T = 1 \text{ T} \sim 4 \text{ T}$ 、 $2 \leq q_a \leq 6$ で運転した場合プラズマ電流範囲は $5 \text{ kA} \sim 60 \text{ kA}$ である。しかし、さらに放電洗浄時のプラズマ電流計測も可能とし、また $q_a > 2$ の運転時の計測も可能とするため、 $1 \text{ kA} \sim 100 \text{ kA}$ を測定範囲とする。

3.3. 測定周波数範囲

巨視的に安定な放電時のプラズマ電流波形計測に必要な周波数範囲を考える。電流波形を図1のような台形²⁾と仮定すると、この波形をフーリエ級数で表わし、振幅で規格化すると

$$\tilde{I}_N(t) = \sum_{n=1}^N \frac{2}{(n\pi)^2} \frac{t_3}{t_1} \left[\sin n\pi \frac{t_1}{t_3} + \sin n\pi \frac{t_2}{t_3} \right] \sin n\pi \frac{t}{t_3} \quad (2)$$

ただし $t_1 + t_2 = t_3$

これを $t_3/t_1 = 16$ の場合について計算した結果を図1に示す。この場合基本周波数 $f_0 = 1/(2t_3)$ の50次の高調波までとるとよく台形を近似できる。また $t_3/t_1 = 6$ の場合は11次までとればよい。立上がり時間 $t_1 = 62.5 \mu\text{sec}$ 、全放電時間 $t_3 = 1 \text{ msec}$ の極端な波形の場合、 $t_3/t_1 = 16$ で $f_0 = 500 \text{ Hz}$ だから $50 f_0 = 25 \text{ kHz}$ まで計測器の周波数特性があればよい。

巨視的に不安定な放電、即ち逃走電子放電⁴⁾やディスラプション⁵⁾の発生時に現われるノコギリ波状のプラズマ電流波形計測に必要な周波数範囲を考える。図2のようなノコギリ波をフーリエ級数で表わし振幅で規格化すると次の式になる。

$$\hat{I}_N(t) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{2t_1}{t_2 - t_1} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \frac{1}{(n\pi)^2} \sin n\pi \frac{t_1}{t_2} \right] \sin n\pi \frac{t}{t_2} \quad (3)$$

これを $t_1/t_2 = 0.91$ の場合について計算した結果を同じ図2に示す。この場合10次までとればよい。また $t_1/t_2 = 0.83$ のとき5次まで、 $t_1/t_2 = 0.98$ のとき20次までとればよくノコギリ波を近似できる。

$t_1=100 \mu\text{sec}$, $t_2-t_1=10 \mu\text{sec}$ のとき $t_1/t_2=0.91$ だから $f_0=5 \text{ kHz}$ で $10f_0=50 \text{ kHz}$ となる。

以上より巨視的に安定, 不安定な場合ともに 50 kHz まであればよいが, 余裕を考慮して 100 kHz まで周波数特性をもつ計測器を設計目標とする。

また積分器を用いるので低周波特性も重要である。プラズマ電流が 5 kA のときのプラズマ電流持続時間 50 msec を周波数の下限とし 10 Hz とする。

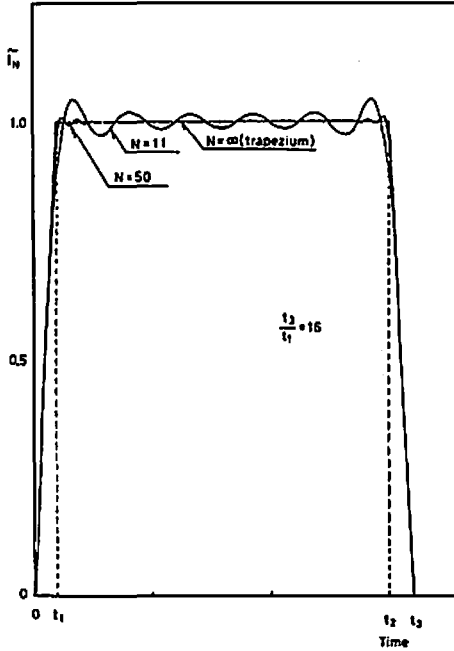


図-1 台形波のフーリエ級数近似

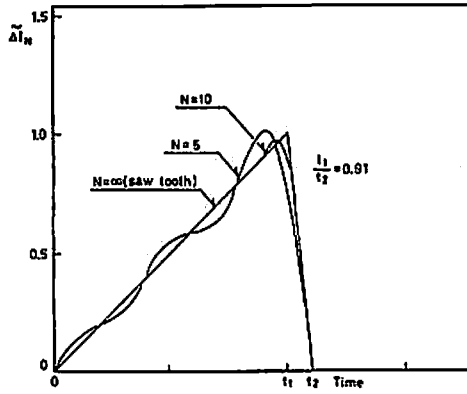


図-2 ノコギリ波のフーリエ級数近似

3.4. プラズマ電流計測回路の設計と試作テスト結果

前述した測定範囲, 測定周波数範囲をカバーすることのできるプラズマ電流計測回路を設計製作し, 試作テストを行なった。

製作したログスキーコイルは, 主半径 75 mm , 小半径 4 mm でテフロン巻枠に直径 0.4 mm のホルマール銅線を 900 回手巻きしたものである。回路定数は実測値で, 抵抗 3.71Ω , インダクタンス $115 \mu\text{H}$ 容量 43.6 pF である。

この計測回路を図 3 に示す。これより出力電圧は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \alpha \frac{R_0}{R_p + R_0} \frac{R_{11}}{R_V + R_{11}} \frac{1}{R_1 C} \int_0^t \left\{ \pi a_p^2 N \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_0 I_p}{2 \pi r} \right) \right\} dt \cdot G \\
 &= \alpha \frac{R_0}{R_p + R_0} \frac{R_{11}}{R_V + R_{11}} \frac{G}{R_1 C} \pi a_p^2 N \frac{\mu_0 I_p}{2 \pi r}
 \end{aligned} \tag{4}$$

ただし α は検定係数, R_0 は共振防止抵抗, R_p はログスキーコイル抵抗, R_{11} は積分器入力抵抗, R_V は打消回路の変可抵抗, R_1 は積分抵抗, G は増幅器ゲイン, C は積分容量, a_p はログスキーコイル

小半径, N は巻数, I_p はプラズマ電流, ρ はコイル主半径である.

今, $a_p = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$, $R_p = 3.71 \Omega$, $R_0 = 300 \Omega$, $R_s = 20 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{11} = R_1 R_s / (R_s + R_1) = 950 \Omega$
 $\rho = 0.075 \text{ m}$, $N = 900$, $C = 0.01 \mu\text{F}$, $G = 1$ とすると α は 1 のオーダーであるから,

$$V_0 = 2.7 \times 10^{-5} I_p \quad (5)$$

従って測定範囲 1 kA~100 kA に対して 27 mV~2.7 V の出力電圧を得, 積分器の後段増幅器なしでも測定しやすい出力電圧を得ることができる. また積分器の最大出力電圧は 10 V と取っているが, 本計測回路の最大出力電圧は 2.7 V であり, これより小さいので問題ない.

プラズマ電流計測回路の周波数特性は, ①積分器入力段までのプローブ回路と②積分器に分けて考えることができる.

積分器入力段までのプローブ回路のゲイン特性を図 4 に示した回路で測定した結果を図 5 に示す. さらに実験したログスケールコイルの回路定数を用いて付録 (A-9) 式で計算した結果も合わせて示す. 共振周波数はプローブのインダクタンスとプローブ迷容量とケーブルの分布容量との和によって決定される. さらに同図より R_0 を 300 Ω に選ぶと 300 kHz 程度までゲイン特性を平坦化することができる. これは実験的にも確認された. また図 6 に位相特性を示す. $R_0 = 300 \Omega$ のとき 100 kHz で 14° おくれるが, 時間に直すと 0.4 μsec であり, ほとんど問題にならない.

以上よりプローブ回路は $R_0 = 300 \Omega$ に選ぶと 300 kHz まで使用可能である.

次に積分器の周波数特性の測定結果を図 7 に示す. この積分器では積分容量を小さくすることで高周

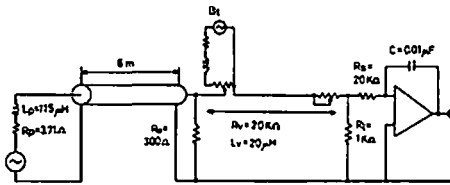


図-3 プラズマ電流計測回路

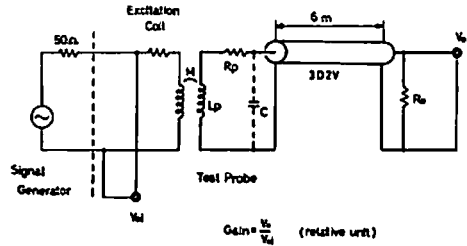


図-4 プローブ周波数特性測定回路図

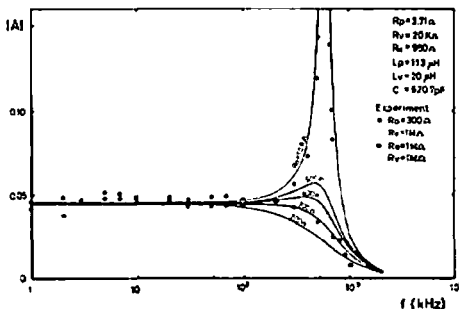


図-5 プラズマ電流計測回路のゲイン特性

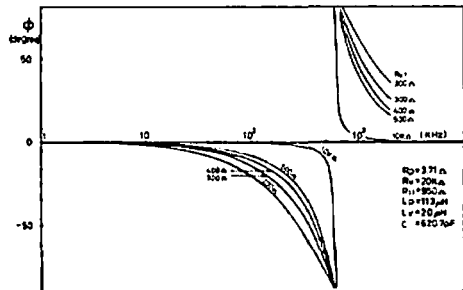


図-6 プラズマ電流計測回路の位相特性

波特性を良くした。 $R_s=20\text{ k}\Omega$ 、 $C=0.01\text{ }\mu\text{F}$ 、 時定数 $\tau=R_sCG=20\text{ sec}$ ($G=10^9$) に選ぶと 100 kHz まで積分器として作用することがわかる。 また積分器のパルス特性を図8に示す。

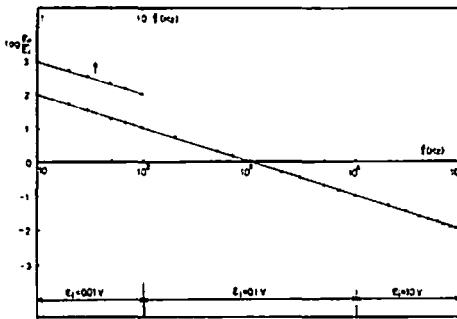


図-7 積分器の周波数特性
($R_s=20\text{ k}\Omega$ 、 $C=0.01\text{ }\mu\text{F}$)

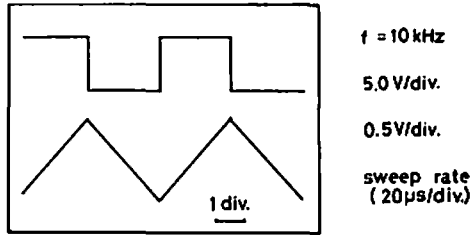
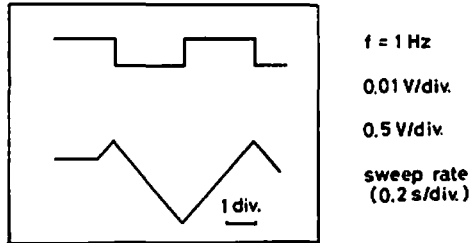


図-8 積分器のパルス特性
($R_s=20\text{ k}\Omega$ 、 $C=0.01\text{ }\mu\text{F}$)

以上よりプローブ回路、積分器ともに 100 kHz まで使用できることが明らかで、測定周波数範囲をカバーできることが示された。

4. ワンターン電圧計測

4.1. 原理

プラズマに印加されているトロイダル方向の電圧とプラズマ電流からプラズマ抵抗を求め、電子温度をレーザー散乱の結果を用いてスピッツァー⁹⁾の式により、プラズマの清浄度のためやすである Z_{eff} を求めることができる¹⁾。またこの計測は本トカマク装置で特徴的な低密度放電時のストリーミングパラメーター $\tilde{\epsilon} = v_d/v_{the}$ (ただし v_d は電子のドリフト速度、 v_{the} は電子の熱速度)⁵⁾ が大きくなる場合のプラズマ抵抗の挙動を調べる上で重要である。

ワンターン電圧計測は真空容器近傍に設置したワンターンループによって行なわれ、プラズマのインダクタンスの項を差し引くことによってプラズマ抵抗を求めることができる。なお、ワンターンループには垂直磁場成分が入るので、これを打消す回路を挿入しておく。

4.2. 測定範囲

ワンターン電圧は、放電開始に必要な電圧が 60 V 程度、電流が平坦になったとき $1\sim 3\text{ V}$ 程度である。しかしプラズマが不安定でディスラプションが発生する場合には数 100 V の負のスパイク電圧が誘起される⁹⁾。従って測定範囲は $0.1\sim 500\text{ V}$ とする。

4.3. 測定周波数範囲

ワンターン電圧の周波数の上限は、スパイク電圧波形の周波数によってきまる。即ち、数 10 μsec 程度で変動するので 100 kHz を上限とする。

4.4. ワンターン電圧計測回路の設計と試作テスト結果

ワンターンループは外径 2 mm のテフロン絶縁同軸ケーブルを用いる。取付部はトロイダルコイルの内側巻戻しコイル部で、半径 340 mm である。試作ループも本実験に予定されている RG 196 A/U を用いた。回路定数は抵抗 1.47 Ω 、インダクタンス 3.2 μH 、容量 42.9 pF である。

この計測回路を図 9 に示す。これより出力電圧は次の式で与えられる。

$$V_o = \frac{R_o}{R_p + R_o} \frac{R_1}{R_v + R_1} V_{100p} \tag{6}$$

ただし R_o は共振防止抵抗、 R_p はワンターンループ抵抗、 R_1 は測定用負荷抵抗、 R_v は打消回路用抵抗、 V_{100p} はワンターン電圧である。

今、 $R_o = 50 \Omega$ 、 $R_p = 1.47 \Omega$ 、 $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ 、 $R_v = 20 \text{ k}\Omega$ とすると

$$V_o = 9.52 \times 10^{-2} V_{100p}$$

従って測定範囲 0.1 V ~ 500 V に対して、 $V_o = 9.52 \text{ mV} \sim 47.6 \text{ V}$ の出力電圧を得る。これはオシロスコープ出力として適当な電圧である。

次に、ワンターン電圧計測回路の周波数特性を図 4 の回路で調べた。実験結果を図 10 に示す。なお、同図には (A-9) 式で計算した結果も合わせ示した。また位相特性の計算結果を図 11 に示した。

以上よりワンターン電圧計測回路は R_o を 50 Ω に選ぶと 1 MHz 程度まで使用できることが示さ

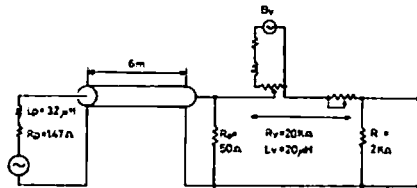


図-9 ワンターン電圧計測回路

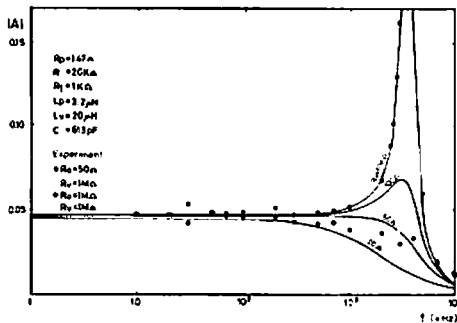


図-10 ワンターン電圧ゲイン特性

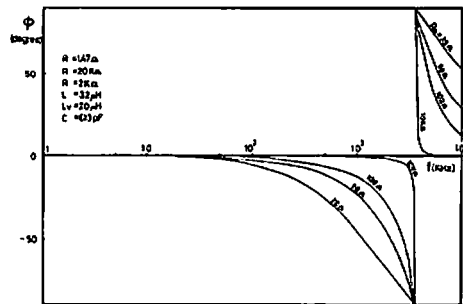


図-11 ワンターン電圧位相特性

れた。

4. プラズマ変位計測

4.1. 原理

プラズマの容器中心からの変位を測定することは、プラズマの巨視的ふるまいや、平衡を知る上で重要である。プラズマ変位を計測する方法は、マイクロ波やレーザー散乱による密度計測による方法⁹⁾、SIN-COS コイルを用いる方法⁹⁾、対になった磁気プローブを用いる方法¹⁰⁾ などがある。ここでは対になった磁気プローブを用いてプラズマ変位を計測する方法を検討する。

TRIAM-1 はシェルのないトカマクであるから、従来のようなシェルのある場合の Shafranov の変位解析法¹⁰⁾ は使えない。従ってここでは一方法として一巻き円環の作るポロイダル磁場を計算することによってプラズマの位置を決定する方法を考える。なおこのとき磁気プローブに入るポロイダル磁場成分以外の磁場は全て打消しておかねばならない。このときの磁場の差信号と和信号からプラズマの変位量を求めることができる。なお、変位プローブには、トロイダル磁場、垂直磁場、水平磁場成分が入るので、これを打消す回路を挿入しておく。

4.2. 測定範囲

リミター径は 4 cm であるから、プラズマが -4 cm から +4 cm まで動くと考えて、測定範囲は -4 cm から +4 cm とする。

4.3. 測定周波数範囲

プラズマがディスラプションによってノコギリ波状に変位する場合は周波数の上限である。これはプラズマ電流の不安定放電時の周波数上限と同じと考えてよい。従って、下限も同様に考えて 10 Hz から 100 kHz を測定周波数範囲とする。

4.4. 変位プローブ計測回路の設計と試作テスト

変位計測用に試作した磁気プローブは 4 個である。

(1) ボビン巻

層間紙を入れてない巻きコイルで、内径 6.15 mm、外径 8.5 mm、長さ 12 mm、720 巻、抵抗は 38.2 Ω 、インダクタンスは 0.9 mH、迷容量は 210 pF で、6 m のケーブル (3 D 2 V) に接続したときの共振周波数は 190 kHz である。

(2) レア巻

一層ごとに層間紙を入れるボビン巻コイルで、内径 6.25 mm、外径 12.3 mm、長さ 12 mm、720 巻、抵抗は 47.8 Ω 、インダクタンスは 1.08 mH、迷容量は 406 pF で、6 m のケーブル (3 D 2 V) を接続したときの共振周波数は 155 kHz である。

(3) ボビン巻

(1) のボビン巻より長さを短かく 6 mm にしたもので、内径は 6.0 mm、外径は 9.3 mm、720 巻、抵抗は 43.8 Ω 、インダクタンスは 1.35 mH、迷容量は 387 pF で、6 m のケーブル (3 D 2 V) を接続したときの共振周波数は 140 kHz である。

(4) ハネカム巻

ポビン巻と異なりハネカム巻にしたもので、内径は 6 mm、外径 10.5 mm、長さ 15 mm、1000 巻、抵抗は 60Ω 、インダクタンスは 1.66 mH、迷容量は 108 pF で、6 m のケーブル (3 D 2 V) を接続したときの共振周波数は 150 kHz である。

以上の 4 個のプロープの周波数特性測定結果を図 12 と図 13 に示す。これよりポビン巻、ハネカム巻の共振周波数はあまり大差がない。これはハネカム巻にしてコイルの迷容量を減らしても、ケーブルの分布容量が存在するために、共振周波数を高くすることができないからである。図 14 の共振周波数のパラメーター依存性からも明らかである。従って磁気プロープ製作にあたって、共振周波数を高くするという観点からは必ずしもハネカム巻にしなければならないという理由はない。むしろインダクタンスを減らすべきであることが明らかである。しかしハネカム巻の利点は、ポビン巻の表面が凹凸になるのに対し、一様に巻ける点にある。従ってハネカム巻の方が同じ特性のコイルができやすいと考えられる。

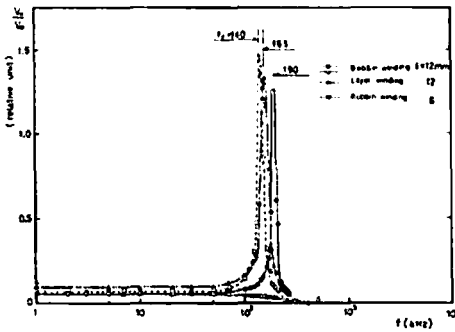


図-12 ポビン巻コイルのゲイン特性

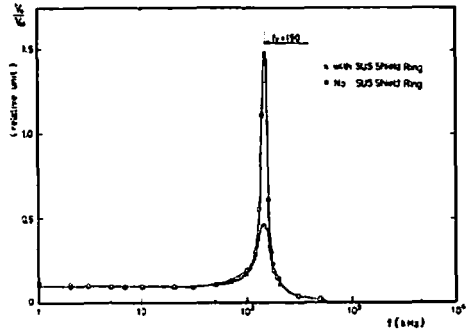


図-13 ハネカム巻コイルのゲイン特性

(3)のポビン巻コイルを使用する場合のプラズマ変位計測回路を図 15 に示す。これより出力電圧は次のようになる。即ち、プラズマがトーラス内側のリミターに接して存在する極端な場合、内側のプロープが最大の出力を与え、外側のプロープが最小の出力を与える。

$$V_0 = \frac{R_0}{R_p + R_0} \cdot \frac{R_{11}}{R_V + R_{11}} \cdot \frac{1}{R_1 C} \pi a_p^2 N B_0 \quad (7)$$

$$B_{0\max} = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \left[\frac{K(k_i)}{2R + d - \rho} + \frac{E(k_i)}{d + \rho} \right] \quad (8)$$

ただし $k_i = \frac{\sqrt{4(R+d)(R-\rho)}}{2R+d-\rho}$. (8)

$$B_{0\min} = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi} \left[\frac{K(k_0)}{2R+d+\rho} + \frac{E(k_0)}{d-\rho} \right] \quad (9)$$

ただし $k_0 = \frac{\sqrt{4(R+d)(R+\rho)}}{2R+d+\rho}$.

このとき R_0 は共振防止抵抗、 R_p は磁気プロープの抵抗、 R_{11} は積分器の入力抵抗、 R_V は打消回

路の可変抵抗, R , は積分抵抗, C は積分容量, a_p は磁気プローブの有効半径, N は巻数, B_0 はポロイダル磁場, I_p はプラズマ電流, R は主半径, d は水平方向変位, ρ はプローブの取付半径である。今, $a_p=3.83 \times 10^{-3}$ m, $R_p=43.8 \Omega$, $R_s=20k\Omega$, $R_{11}=950\Omega$, $C=0.01 \mu\text{F}$, $\rho=0.075$ m, $N=720$, $d=-0.04$ m, $R_0=1k\Omega$ とすると

$$V_{0\text{max}} = 5.52 \times 10^{-5} I_p \tag{10}$$

$$V_{0\text{min}} = 5.37 \times 10^{-6} I_p \tag{11}$$

プラズマ電流の運転範囲は 5 kA~60 kA だから $V_{0\text{max}}=3.31$ V, $V_{0\text{min}}=26.7$ mV となりオシロスコープ出力として適当である。また積分器出力も 10 V 以下なので問題ない。

測定周波数範囲は 図 16 と 図 17 に示すように $R_0=1k\Omega$ に選べば 100 kHz まで測定可能である。

また積分器はプラズマ電流計測に用いるのと同じものであるから 100 kHz まで使用可能である。

以上よりプラズマ変位計測回路は 100 kHz まで使用できることが明らかである。

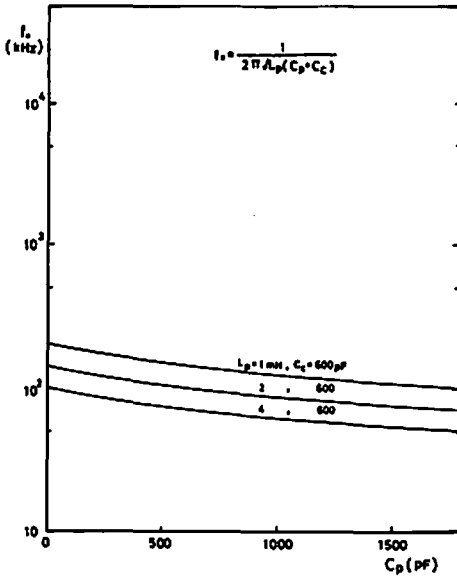


図-14 プローブ回路の共振周波数

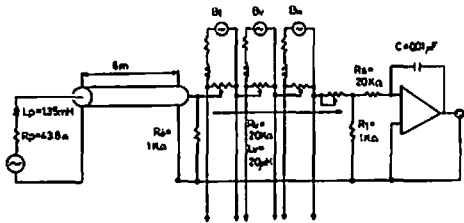


図-15 プラズマ変位計測回路

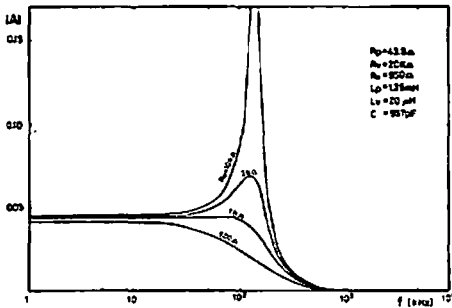


図-16 プラズマ変位計測回路のゲイン特性

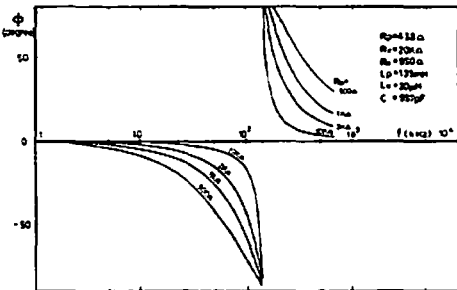


図-17 プラズマ変位計測回路の位相特性

5. MHD 不安定性計測

5.1. 原 理

トカマクプラズマの閉じ込め研究で、MHD 不安定性の研究は最近とくに重要になってきている¹¹⁾。それはプラズマの高密度化あるいは低安定係数運転時に発生するディスラプションに関係しているからである。MHD 不安定性は $m=0$, $n=0$ あるいは $m=1$, $n=1$ のプラズマの内部に発生する内部モードと $m=2, 3, 4$, $n=1$ のプラズマの表面近傍に発生する外部モードに分類される¹²⁾。前者のモードは主に軟X線放射によって計測されるが¹³⁾、後者のモードはポロイダル磁場の空間的相関をとることで識別される⁹⁾。この測定原理は磁場の摂動成分の時間的変動によって磁気プローブに誘起される電圧を計測するものである。

5.2. 測定範囲

磁気プローブによる MHD 不安定性計測は、上述の外部モードを対象にするので、 $m=2, 3, 4$, $n=1$ のモードを考えておけばよい。従って磁気プローブはポロイダル方向に16個、トロイダル方向に4個設置する。ポロイダル磁場の摂動成分の大きさは TFR の場合の $\delta \tilde{B}_\theta / B_\theta \sim 0.01\%$ をプローブ出力下限のめやすとする。

5.3. 測定周波数範囲

MHD 不安定性のポロイダル方向の回転周波数は、ほぼ電子の反磁性周波数に等しいことが ST⁹⁾、TFR¹²⁾ 等の実験で示されている。 m モードの磁場の摂動の振動数を f_m とすると、 f_m は次の式で与えられる。

$$\frac{f_m}{m} = \omega_{*e}^* = \frac{T_e}{2\pi a B_T} \frac{\Delta n_e}{n_e} \sim \frac{T_e}{\pi a^2 B_T} \quad (12)$$

ただし a は小半径 [m]、 B_T はトロイダル磁場 [T]、 T_e は電子温度 [eV] である。

この式より周波数の下限は、 $B_T = 1$ T、 $T_e = 50$ eV のとき $\frac{f_m}{m} = 10$ kHz。周波数の上限は、 $B_T = 4$

T、 $T_e = 700$ eV のとき $\frac{f_m}{m} = 35$ kHz。

$m=2$ モードに対して； $20 \text{ kHz} < f_2 < 70 \text{ kHz}$ 、

$m=3$ モードに対して； $30 \text{ kHz} < f_3 < 105 \text{ kHz}$ 、

$m=4$ モードに対して； $40 \text{ kHz} < f_4 < 140 \text{ kHz}$ 。

従って測定周波数範囲を 20 kHz～140 kHz とする。

5.4. MHD 不安定性計測回路の設計と試作テスト

前述した範囲をカバーできる MHD 不安定性計測回路を設計して試作テストを行なった。内径 6 mm、外径 8 mm、長さ 6 mm、360 巻のポビン巻コイルで、回路定数は抵抗 19.8 Ω 、インダクタンス 504 μH 、迷容量 71 pF である。

MHD 不安定性計測回路を図 18 に示す。それより出力電圧は次の式で与えられる。

$$V_o = \frac{R_o}{R_p + R_o} N \pi a_p^2 2\pi f_m \delta \tilde{B}_o \quad (13)$$

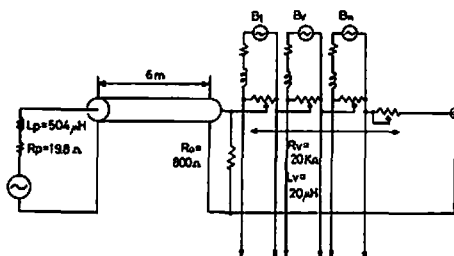
ただし R_o は共振防止用抵抗, R_p は磁気プローブ抵抗, N は巻数, a_p は磁気プローブ有効半径, f_m は不安定性の振動数, $\delta \tilde{B}_o$ はポロイダル磁場摂動分である.

今, $R_p = 19.8 \Omega$, $R_o = 800 \Omega$, $N = 360$ 巻, $a_p = 7 \times 10^{-3}$ m とすると

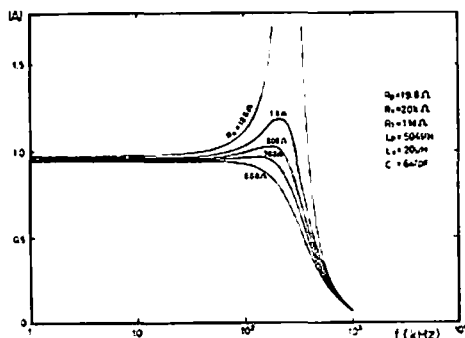
$$V_o = 0.348 f_m \delta \tilde{B}_o \quad (14)$$

最低出力電圧は $f_2 = 20$ kHz, $\delta \tilde{B}_o / B_o = 0.01$ % のときで, $I_p = 10$ kA のとき $B_o = 2.667 \times 10^{-2}$ T であるから, $\delta \tilde{B}_o = 2.667 \times 10^{-6}$ T. 故に $V_{o \min} = 18.5$ mV でこれはオシロスコープで読みとることが可能である.

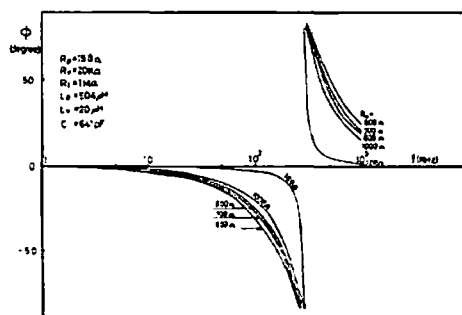
MHD 不安定性計測回路の周波数特性を図4の回路で調べた. その結果を用いて (A-9) 式で計算した結果を図19に示した. また位相特性の計算結果を図20に示した. これより R_o を 800Ω に選べば 200 kHz 程度まで計測でき, 周波数上限 140 kHz の振動も測定できることが明らかである.



図—18 MHD 不安定性計測回路



図—19 MHD 不安定性計測回路のゲイン特性



図—20 MHD 不安定性計測回路の位相特性

6. ま と め

プラズマ電流計測, プラズマ変位計測用の積分器の出力は直接オシロスコープで観測できる程度の大きさなので後段増幅器は使用しなくてもよい. しかし, さらに大きな出力を得たい時, 例えば出力を計算機で処理したいという時は後段増幅器を使用するか, あるいは打消回路部の可変抵抗によって分圧比

をかえて入力電圧を大きくしてやればよい。

ワンターンループはプラズマの主半径上に設置した方がよいが、TRIAM-1の場合、ポートとのかね合いのためトロイダルコイルの巻戻しコイル近くに設置せざるを得ない。従ってこのときの誤差の評価が今後の問題となろう。

MHDプローブは、 $\delta \tilde{B}_0 / B_0$ の値の装置依存性が明確でないために出力電圧の評価が困難である。従って測定周波数とも関連して、いくつかのプローブを製作しておいて実地に検討することが必要になるだろうと考えられる。また、リミター近傍に発生する磁気島構造を調べるために、プローブをセラミックブレイク部に設置することも必要となろう。

最後に今まで述べた測定範囲、測定周波数範囲、試作プローブ類の特性、回路の周波数特性、出力電圧をまとめておく。その一覧表が表1である。以上より、プラズマ監視装置の試作テストの結果、TRIAM-1のプラズマ巨視量測定が可能であることが明らかになった。

表1 プラズマ監視装置一覧表

	Parameter Range	Frequency Range	Name and Dimensions of Test Probe	Measurable Frequency Range	Output Voltage Range
Plasma Current	1 KA ~ 100KA	10 Hz ~ 100KHz	Rogovsky Coil	fr=600KHz	27.5mV ~ 2.75 V
			Major radius 75mm Manor radius 4 mm 900 turns $\phi 0.4$ copper wire Rp=3.71 Ω Lp=113 μ H Cp=50.7 pF	≤ 300 KHz at Ro=300 Ω	
One Turn Voltage	0.1V ~ 500 V	~ 100KHz	One Turn Loop	fr=36 MHz	9.52mV ~ 47.6 V
			Major radius 340 mm Manor radius 0.1 mm 1 turn Rp=147 Ω Lp=32 μ H Cp=42.9 pF	≤ 1 MHz at Ro=50 Ω	
Plasma Displacement	~4 cm ~ 4 cm	10 Hz ~ 100KHz	Magnetic Probe	fr=140 KHz	26.5mV ~ 3.31 V
			Inner diameter 6.0 mm Outer diameter 9.3 mm Axial length 6.0 mm 720 turns $\phi 0.1$ copper wire Rp=43.8 Ω Lp=1.35 mH Cp=367 pF	≤ 100 KHz at Ro=1K Ω	
MHD Instability	m=2,3,4 n=1 mode $\delta \tilde{B}_0 / B_0$ $\geq 0.01\%$	20 KHz ~ 140KHz	Magnetic Probe	fr=280 KHz	$\delta \tilde{B}_0 / B_0 \sim 0.01\%$ f = 20 KHz Ip=10 KA ≥ 18.5 mV
			Inner diameter 6.0 mm Outer diameter 8.0 mm Axial length 6.0 mm 360 turns $\phi 0.1$ copper wire Rp=19.8 Ω Lp=504 μ H Cp=71 pF	≤ 200 KHz at Ro= 800 Ω	

謝 辞

本論文を書き終えるにあたり、御指導いただきました河合良信助教授、村岡克紀助教授、名大プラズマ研究所 伊藤智之助教授、また始終激励いただきました矢嶋信男教授、北島一徳教授、TRIAM-1グループの皆様に関心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Artsimovich, L. A., *Tokamak devices*, Nuc. Fus. 12 (1972) 213.
- 2) Murakami, M., et al., *Some observations on maximum densities in tokamak experiments*, Nuc. Fus. 16 (1976) 347.
- 3) Hosea, J. C., et al., *Stability experiments on the ST tokamak*, in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 4th Int. Conf. Madison, 1971) 2, IAEA (1971) 425.
- 4) Princeton University Plasma Physics Laboratory Annual Report, (1975) PPPL-Q-33
- 5) Mirnov, S. V. and Semenov, I. B., *Investigation of the instabilities of the plasma string in the Tokamak-3 system by means of a correlation method*, Atomnaya Energiya, 30 (1971) 26.
- 6) Spitzer, L. Jr., *Physics of Fully Ionized Gases*, Interscience, New York 1962.
- 7) Bretz, N., *Energy balance in a low-Z high density helium plasma in the ST tokamak*, Nuc. Fus. 15 (1975) 313.
- 8) Boxman, G. J., et al., *Low and high density operation of ALCATOR*, in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 7th Europ. Conf. Lausanne, 1975) 2 (1975) 14.
- 9) King, R. E., et al., *The application of Fourier analysis of the azimuthal field distribution to a study of equilibria and instabilities in a toroidal pinch discharge*, CLM-P 302 (1972).
- 10) Mukhovatov, V. S. and Shafranov, V. D., *Plasma equilibrium in a tokamak*, Nuc. Fus. 11 (1971) 605.
- 11) Karger, F., et al., *On the origin of the disruptive instability in the PULSATOR tokamak*, in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 6th Int. Conf. Berchtesgaden, 1976) 1, IAEA (1977) 267.
- 12) EQUIPE TFR, *Structure of low-frequency oscillations during the disruptive instability in the TFR tokamak*, Nuc. Fus. 17 (1977) 1283.
- 13) Von Goeler, S., et al., *Studies of internal disruptions and $m=1$ oscillations in tokamak discharges with Soft-X-Ray techniques*, Phys. Rev. Lett. 33 (1974) 1201.

(昭和53年6月2日 受理)

付 録

信号周波数が低い場合、例えば 100 kHz のとき、ケーブル中の波長の4分の1の長さは 500 m であり、これは使用する同軸ケーブル (6 m) より長いので、同軸ケーブルは集中定数回路と考えることができる。従って、プローブの回路では、プローブの自己インダクタンスとプローブの迷容量、ケーブルの分布容量によって共振現象が存在する。ここでは図21のような等価回路を考え、伝達関数を求めて、ゲイン特性、位相特性の式を

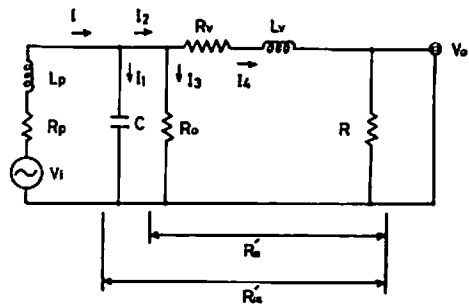


図-21 プローブ回路の等価回路

導出する.

$$R'_{11} = \frac{R_0(R_1 + R_V + i\omega L_V)}{R_0 + R_1 + R_V + i\omega L_V}$$

$$R'_{11} = \frac{R_0(R_1 + R_V + i\omega L_V)}{(R_0 + R_1 + R_V + i\omega L_V) + i\omega C R_0(R_1 + R_V + i\omega L_V)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I = I_1 + I_2 \quad (A-1) \\ I_2 = I_3 + I_4 \quad (A-2) \\ I_4(R_1 + R_V + i\omega L_V) = I_3 R_0 \quad (A-3) \\ I_1 \frac{1}{i\omega C} = I_2 \frac{R_0(R_1 + R_V + i\omega L_V)}{R_0 + R_1 + R_V + i\omega L_V} \quad (A-4) \\ I = \frac{V_c}{R_p + i\omega L_p + R'_{11}} \quad (A-5) \end{array} \right.$$

(A-2), (A-3) より

$$I_4 = \frac{R_0}{R_0 + (R_1 + R_V + i\omega L_V)} I_2 \quad (A-6)$$

(A-1) と (A-3) より

$$I_2 = \frac{R_0 + R_1 + R_V + i\omega L_V}{(R_0 + R_1 + R_V + i\omega L_V) + i\omega C R_0(R_1 + R_V + i\omega L_V)} I \quad (A-7)$$

(A-5), (A-6), (A-7) より

$$\left\{ \begin{array}{l} h = R_0 \{ R_1 + R_V + R_p - \omega^2 C(R_p L_V + R_V L_p + R_1 L_p) \} + R_p(R_1 + R_V) \omega^2 L_p L_V \\ g = \omega \{ R_0 \{ L_V + L_p + C(R_1 + R_V) - \omega^2 C L_p L_V \} + R_p L_V + L_p(R_1 + R_V) \} \end{array} \right.$$

とおくと

$$A = \frac{R_1 R_0}{h + ig}$$

故に

$$\left\{ \begin{array}{l} |A| = \frac{R_1 R_0}{\sqrt{h^2 + g^2}} \quad (A-9) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = -\tan^{-1} \frac{g}{h} \quad (A-10) \end{array} \right.$$

發 行

九州大学応用力学研究所
〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号