講座

マイクロ波反射計を作ってみよう

江 尻 晶

(東京大学大学院新領域創成科学研究科)

How to Make a Microwave Reflectometer

EJIRI Akira

Graduate School of Frontier Sciences, Univ. Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

(Received 28 July 2003)

Abstract

Microwave reflectometry is a plasma diagnostic that launches microwaves to a plasma and measures the wave reflected at a cutoff layer in the plasma. It is used mainly for density profile and density fluctuation measurements. This lecture note is written for those who want to make a reflectometer and apply it to a target plasma. Various types of microwave reflectometers and a simple numerical tool useful for designing a system and for analyzing data are described. Details of a virtual system are also explained.

Keywords:

microwave reflectometry, density profile, density fluctuations, O-mode, X-mode, Kirchhoff integral

1. 反射計を作りたくなるとき

本学会誌の解説では、専門外の人がマイクロ波反射計に興味をもってもらうことを目標とした[1]。本講座では、マイクロ波計測の経験がなく、これから反射計を製作しようとする人を対象としている。それでは、どのような場面で反射計を製作し適用しようとするのだろうか？先の解説で取り上げた実験と同種の測定・研究を行うという動機もあるし、次のような理由もあるだろう。(1)密度分布を測りたいが、十分な数の干渉計の光路が確保できない。(2)手持ちの発振器では、カットオフになり、干渉計としては使えないので、反射計として使いたい。(3)簡便な手法でコア部の揺動を計りたい。反射計の魅力は時間的費用的コストが小さいことであり、多数の光路が必要な干渉計、重イオンビームプローブ法、ビーム発光分光法の代替手段としての期待もある。様々な制限と需要の中で反射計を適用すべきかを十分吟味する必要があるが

author's e-mail: ejiri@k.u-tokyo.a

あるが、ここでは、主として技術的な側面から、反射計を製作するために必要な知識を解説していく。なお、反射計については文献[2]が詳しい。また、2年に一度開かれる高温プラズマ診断会議の論文が、Rev. Sci. Instrum.に掲載され、多くの反射計の文献が見られる。

2. 反射計の原理とタイプ

ここでは、代表的な反射計の手法を紹介する。FM反射計、AM反射計、パルスレーダー反射計、超短パルスレーダー反射計は主として分布計測に用いられる。一方、ホモダイン反射計、ヘテロダイン反射計は主として密度揺動の測定に用いられる。なお、これらの反射計を複数配置して相関を求める相関反射計は、揺動研究で威力を発揮するが、ここでは解説しない。

2.1 FM 反射計

分布計測では、測定したい範囲に対応したマイクロ波

の周波数範囲で測定する必要があるが、一つの発振器の周波数を時間的に掃引して測定する方法をFM反射計という。この手法は分布計測として古くから知られ、多くの装置で用いられており、ノウハウも豊富である[3]。プラズマ中で反射されたマイクロ波とプラズマを通らないマイクロ波をミキシングして測定するので、周波数を掃引する点を除けば、後述するホモダイン反射計と同じ構成のシステムである (Fig. 1)。2つの経路を伝搬する時間が $\tau_0 + \tau_{\text{plasma}}$ だけ異なるので、ある時刻にミキサーに到達する2つの経路の周波数が異なり、それらのビート周波数は、

$$f_{\text{beat}} = \frac{df_{\text{PR}}}{dt} \tau_{\text{delay}} = \frac{df_{\text{PR}}}{dt} (\tau_0 + \tau_{\text{plasma}}) \quad (1)$$

となる。ただし、 $f_{\text{PR}}(t)$ はマイクロ波の周波数である。ビート周波数は、掃引する速さに比例するので τ_0 を変えて、ビート周波数を実験上都合のよい帯域に設定することができる。周波数 f_{PR} が微小変化したときの位相変化は $\Delta\phi = 2\pi f_{\text{beat}} dt$ と(1)式より

$$\begin{aligned} 2\pi f_{\text{beat}} dt &= \Delta\phi = 2\pi \Delta f_{\text{PR}} (\tau_0 + \tau_{\text{plasma}}) \\ \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df_{\text{PR}}} &= \tau_0 + \tau_{\text{plasma}} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。したがって、FM反射計で得られる中間情報は遅れ時間ということができる。後述するAM反射計、パルスレーダー反射計もこの中間情報が得られる。実際に得られた信号から(2)式の位相変化を数値的に求めるためには、信号が0を切る時刻から周期を求めて、半周期(π)単位で位相を求める方法とComplex Demodulation法により連続的に位相を求める方法がある[4]。密度を求めるには、屈折率 n_{OX} と位相 ϕ の関係式

$$\phi(f_{\text{PR}}) = 2 \frac{2\pi f_{\text{PR}}}{c} \int_r^{r_0} n_{\text{OX}} dx \quad (3)$$

から、逆変換により、密度分布を得る。ただし、 r_0 は τ_0 に対応する位置である。正常波の場合には、下記に示すようにアーベル変換でカットオフの位置 r を求めることができる。

$$\begin{aligned} \phi(f_{\text{PR}}) &= 2 \frac{2\pi f_{\text{PR}}}{c} \int_r^{r_0} \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f_{\text{PR}}^2}} dx \\ r(f_{\text{PR}}) &= r_0 - \frac{c}{\pi} \int_0^{f_{\text{PR}}} \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df_{\text{PR}}} \frac{1}{\sqrt{f_{\text{PR}}^2 - f^2}} df \end{aligned} \quad (4)$$

Fig. 1 Schematic drawing of an FM reflectometer and time evolution of the microwave frequency.

Fig. 2 Schematic drawing of a heterodyne reflectometer.

2.2 ホモダイン反射計, ヘテロダイン反射計

揺動を測定する手法には位相を測定しないホモダイン法と位相を測定するヘテロダイン法などに分類できる。前者のシステムはFM反射計の周波数を固定したものである。測定される信号は $A \sin \phi$ となり、振幅 A の揺らぎと位相 ϕ の揺らぎが信号の揺らぎに寄与するので結果の解釈には注意を要する[5]。ヘテロダイン法では、周波数のわずかに(1 MHz–1 GHz程度)異なるマイクロ波発振器をもう一台用意して、差周波数(中間周波数)信号が、プラズマを通る経路(プローブ信号)とプラズマを通らない経路(参照信号)でどれだけ位相差をもつかを測定する (Fig. 2)。この測定では、中間周波数で狭帯域のバンドパスフィルターを用いることにより、雑音の小さい高精度測定が可能である。しかしながら、制御しない発振器を用いると、周波数がドリフトし帯域の外に出てし

まう。この問題は中間周波数での処理を工夫することにより改善できる[6]。位相を求める別の方法として Quadrature 検出法がある。これは、ホモダイン法の検出器をもう一台用意し最初の1台と反射波の位相が $\pi/2$ ずれるようにしておく。このようにすれば、新たに $A\cos\phi$ の信号が得られて、位相と振幅を分離することができる。ただし、この手法は一般に調整が難しい。

2.3 AM 反射計, 2 周波数反射計

分布測定では、大きな位相変化を精度よく測定する必要があるが、揺動の影響により位相が 2π の整数倍急激に変化する場合がある。このような現象をフリンジジャンプと呼び、測定上の誤差となる（フリンジジャンプの主な要因は回折効果であり、3 節でその評価方法について述べる）。AM 反射計、2 周波数反射計は、2つのマイクロ波周波数を入射しその間の位相差を計る手法であり、測定する位相差が 2π 程度以下になるように周波数を選ぶことにより、フリンジジャンプが見かけ上起こらなくなる。また、2つの周波数の反射位置は近接しているの、揺動の影響がほぼ同じように起きると期待でき、差をとることにより揺動の影響を低減できると期待される。2つの周波数を生成する方法として、PIN ダイオードスイッチを用いてマイクロ波に振幅変調をかける方法[7] (Fig. 3) と2つの周波数の異なる発振器を用いる方法[8]がある。通常 100 MHz 程度の変調周波数、差周波数が用いられるが、後者の場合には、差周波数を一定に保つ工夫が必要である。

2.4 パルスレーダー反射計

PIN ダイオードスイッチを用いてマイクロ波を 1 ns 程度のパルスにすることができる。このパルスの伝搬時間は、(2)式で示した遅れ時間となり反射計計測が可能である[9]。いくつかのマイクロ波発振器を用意して、各パルスの遅れ時間を測定することにより密度分布が得られる (Fig. 4)。0.1–1 MHz の繰り返し周波数でパルスを生成し測定することにより、比較的よい時間分解能で密度分布が得られる。遅れ時間の測定には、パルス計測の技術が用いられる。例えば、1 cm 程度の反射面の分解能を得るためには、0.1 ns 程度以下の時間分解能で遅れ時間を求める必要があり、アナログの時間波高変換器が用いられることが多い。その中でも、マイクロ波パルスの振幅の変化に依存しない時間測定を行うために、Constant Fractional Discriminatorが利用される。この回路では、パルス波形が変わらない限り、振幅に依存しない測定が可能である。パルス波形に雑音が重畳されるので、遅れ時間の精度を上げるためには、パルス幅が短い方が

Fig. 3 Schematic drawing of an AM reflectometer.

Fig. 4 Schematic drawing of a pulse radar reflectometer.

よい。一方、パルス幅が短いことは、周波数広がりが多いことであり、周波数の違いによる影響を受けてパルスの波形が歪む。したがって、パルスの幅には最適な範囲が存在する。Fig. 4 のミキシング後のバンドパスフィルタは雑音を減らす効果とパルスの波形をゆがめる効果があるので、パルス幅と同様に最適な範囲が存在する。さらに実装上は、PIN スwitch の性能が問題になる。PIN スwitch が OFF の状態での透過率は 0 でない有限の値をもち、プラズマ中での揺動の影響により、このパワーが変動するとパルスの波形が歪み、誤差の原因となる。パルス反射計では、異なる反射位置は、異なる遅れ時間に現れるので、窓などのプラズマ以外での不要な反射は容易に区別することができる。一方 FM 反射計、AM 反射計では、不要反射は位相誤差を引き起こす。

2.5 超短パルスレーダー反射計

パルス幅と周波数幅はフーリエ変換の関係にあり、パルス幅が 0.1 ns 程度以下に短くなると数 10 GHz の帯域の成分が含まれることになる。そこで、0.1 ns 以下の幅のインパルス（電圧スパイク）を広帯域のマイクロ波源として用いることができる。これをパルスレーダー反射計の発振源として用いるのが超短パルスレーダー反射計である[10]。広帯域であるため、2.4 節で説明したパルスレーダー反射計数台から数十台分の情報量を 1 つのシステム (Fig. 5) で得ることが可能である。インパルス生成器の信号は周波数あたりで換算すると微弱であるため、増幅

Fig. 5 Schematic drawing of a ultra short pulse radar reflectometer.

して用いられる。しかしながら、増幅器の飽和レベルが決まっているので、入力されるマイクロ波の振幅を制限する必要がある。そこで、インパルス生成器と増幅器の間に導波管を配置してパルス幅を長くする。導波管の分散により、インパルスのうち、高周波数成分は、速く伝搬し、低周波数成分はゆっくり伝搬する。その結果、インパルスは、周波数が時間とともに下がっていくチャープ波形に変化する。これをプラズマに入射すると周波数に応じた遅れ時間で戻ってくる。このマイクロ波を複数のバンドパスフィルタによって周波数ごとに分離し、パルスレーダー反射計と同様の手法で、遅れ時間を計測する。反射波波形の各周波数成分（複素振幅）は、入射波の成分から密度に依存した位相変化を受けたものになる。そこで、反射波波形のフーリエ成分の位相を用いて、密度分布を再構成する手法があり、より精度の高い分布が得られている[11]。

3. 反射計の簡易シミュレーション

マイクロ波は目に見えない光であるが、これをあたかも水面の波紋を見るように、反射波のイメージを頭に描くことは、大切である。特に送信、受信アンテナの指向性、揺動による回折効果の程度は、それぞれ、設計段階、実験結果の解析時に考慮する必要がある、ある程度定量的な評価も必要である。ここでは、このためのツールとして、ホイヘンスの原理とそれを一般化した Kirchhoff 積分を用いた手法による回折効果（フリッジジャンプの主因）の評価、アンテナに対する条件、位相の振る舞いの分類などについて紹介する[12]。この手法は近似法であり、より厳密には、波動方程式を数値的に解く必要がある。しかしながら、3次元の波動方程式は計算機の能力の限界を超えており、Kirchhoff 積分のみが有効な場合もある。

最初に、ホイヘンスの原理を用いて、回折の効果を考

える。 $x = 0$ に位相揺動 $\Delta\phi(y_0)$ が存在するとき (x, y) における電場 $E(x, y)$ は

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[ik\sqrt{x^2 + (y-y_0)^2} + i\phi(y_0)]}{\sqrt{x^2 + (y-y_0)^2}} dy_0 \quad (5)$$

となる。ここでは、反射面 ($x = 0$) 上から円柱対称を持って2次波が発生するとしたが、球面波で考えても結果はあまり変わらない。(5)式で $y_0 - y = as$ と変数変換をする。ここで、反射面が平面ではなく Fig. 6 のような曲率を持っているとすると、 s が増えたときの距離 $\sqrt{x^2 + s^2}$ の増え方は、Fig. 6 のような曲率を持っているときの方が平面である場合よりも急である。そこで、その効果を α で表すことにする。 α は s の関数であり、 $\alpha \geq 1$ である。積分中の位相項は、 $k\sqrt{x^2 + (as)^2} \sim kx + ka^2s^2/2x$ より、 $|s| > \sqrt{2\pi x/ka^2}$ では、 s に対して激しく振動するので、積分への寄与は小さい。この s の範囲はフレネル帯に対応し、揺動の波長がこれよりも短いと位相が平均化されて正しい測定ができない。したがって、これをさけるためには、

$$x < ka^2/k_f^2 \quad (6)$$

でなければならない。この条件が満たされているとき、位相揺動はフレネル帯の中ではテイラー展開でき、

$$\phi(y_0) = \phi(y+s) \approx \phi(y) + \phi's \sim \phi(y) + k_f s \phi \quad (7)$$

と近似できる。ただし、 ϕ は位相揺動の振幅である。この時、電場は、

$$E(x, y) \approx \frac{\exp[ikx + i\phi(y)]}{\sqrt{x}} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Exp} \left[i \frac{ka^2}{2x} \left(s + \frac{k_f \phi x}{ka^2} \right)^2 - i \frac{k_f^2 \phi^2 x}{2ka^2} \right] ds \quad (8)$$

Fig. 6 Configuration of a reflectometer and a plasma for numerical calculation.

となる。積分の外は、回折の影響がない場合の理想的な反射計の電場である。指数関数内の第一項は一定の位相をあたえる。第二項は、位相誤差となる。これが測定したい位相よりも小さいための条件は、

$$\frac{k_f^2 \phi^2 x}{2ka^2} < \phi, \quad x < \frac{2ka^2}{k_f^2 \phi} \quad (9)$$

となる。回折の影響を避けるためには、(6)式と(9)式を満たす必要がある。従って、振幅が大きく短い波長をもつ揺動の測定は難しい。逆にこれらが与えられた時、(1)波長の短いマイクロ波(大きな k)、(2)プラズマに近接したアンテナ(小さい x)、(3)指向性の悪いアンテナ(大きな a)が良いことになる。実際には、アンテナが近接していると、アンテナ・カットオフ間で定在波がたち、位相誤差を引き起こす、指向性が悪いと反射パワーが小さくなる、といった問題があるので、単純ではない。また、逆に、カットオフ面で集光するようなビームを用いる方法もある。この場合には、入射マイクロ波の振幅が局在していることが大きな a を生み出す。

ホイヘンスの原理を一般化したKirchhoff積分を用いることで同様の計算が可能である。これは、ある面での電場と電場の微分が与えられたときに波の伝搬方向にある別の面での電場(電場の微分)を求める方法である。これを利用して、送信アンテナの開口面での電場、反射面での入射・反射電場、受信アンテナの開口面での電場を求めることができる。この手法の利点は(1)単純なコードであること、(2)開口面での電場分布を与えることで、送信受信アンテナの指向性を表現でき、最終的に受信される(検出器での)振幅と位相を計算できること、(3)反射面の2次元的な揺動を考慮できる、である。したがって、実際の反射計配位に基づいた計算を行うことが可能であり、設計、解析を進めていく上での強力なツールとなる。一方、欠点は、(1)途中の伝搬は真空であるので、プラズマを完全に模擬することはできない、(2)スカラー波を扱うので、偏波方向を考慮できない、である。

Fig. 7は、Fig. 6の配位で、送受信アンテナの指向性を考慮して円柱プラズマを測定した時の反射波の位相変化を計算した様子である。プラズマの密度揺動を正弦的な反射面変形で置き換え、その振幅 a と円周方向の波長 λ_f をパラメータとして位相の振る舞いを分類した。変形が剛体回転していると、位相は正弦的に変化すると期待されるが、回折効果がきいてくると位相の振る舞いは不規則になる。図中の規則的な(理想的な)振る舞いの領域(●印)は式(6)、式(9)に対応した境界で囲まれる。

Fig. 7 Two dimensional ($\lambda_f - a$) map of the phase behavior.

4. 反射計の設計・製作

4.1 モード・周波数の選択

周波数・入射モードは、対象とするプラズマに依存する。比較的磁場が高い、すなわち、プラズマ周波数が電子サイクロトロン周波数よりも低い場合を考える。Fig. 8はJIPP TII-Uトカマクでの周波数の大半径方向分布を示したもので、Oモードのカットオフは0-50 GHz、XモードのLeft-handカットオフは0-30 GHz、Right-handカットオフは60-110 GHzである[13]。すなわち、同じ場所を見るのに3つの選択がある。Xモードの場合、カットオフの場所は、磁場強度に依存するので、磁場強度が時間的に大きく変化するプラズマでは、密度分布測定には適さない。逆に磁場強度が強くなりあまり変化しない場合、Right-handカットオフの位置は、密度が変わっても位置の変化が小さいので、ある特定の場所の揺動を測定するには有利である。一方、回折効果をさけるためには、式(6)、(9)からわかるように波長が短い方が有利である。ただし、50 GHz以下に比べ、100 GHz以上は技術的・価格的に難しく、初心者には勧められない。

Fig. 8 Density and frequency profiles of JIPP TII-U plasma [13].

4.2 不要な反射，不要な経路

マイクロ波システムを構成する上で気をつけなければならない点は、不要な反射，不要な経路である。例えば， $A \cos \phi$ の電場を検出器で測定する場合を考える。測定したい量は $P_1/A^2/2$ (ただし，比例係数は省略した) であったり，位相 ϕ であったりする。ここでもし，測定したい波にたいして，10%のパワーを持つマイクロ波が混入したと仮定する。このマイクロ波の振幅は $\sqrt{0.1}A$ であるので，このマイクロ波によって生じる位相誤差は最大で $\Delta\phi \approx \sqrt{0.1} = 0.3$ [rad.] となる。したがって，位相測定を行う場合には，たとえ小さなパワーでも不要なマイクロ波の混入を防ぐ必要がある。マイクロ波の混入は，不要な反射と予想しない不要な経路で生じる。混入を防ぐには，マイクロ波を一方方向にしか通さないアイソレーター (Isolator) が有用である。反射の影響を理解するために Fig. 9 のマイクロ波の経路を考える。経路上に2つの部品 X, Y があり，それぞれ β, α の反射率を持つとする。Y での反射の影響を評価するために，反射がない時に Y に入射する前後のパワーを P_0, P_1 とすると，Y の透過率は $1-\alpha$ であるので， $P_1 = (1-\alpha)P_0$ となる。Y で反射し，さらに X で反射，Y を透過するパワーは $\Delta P_1 = (1-\alpha)\beta\alpha P_0$ となる。この ΔP_1 の位相は P_1 とは独立なので，位相誤差を引き起こす。ここで，Fig. 9(b) のようにアイソレーターを挿入すると ΔP_1 をなくすることができる。アイソレーターの代わりに減衰器 (Attenuator: Att.) を用いることも可能である (Fig. 9(c))。減衰率を

Fig. 9 Transmission line with reflecting components (a), that with an isolator (b) and that with an attenuator (c).

$1/A$ とすると， $P_1 = (1-\alpha)AP_0$ ， $\Delta P_1 = (1-\alpha)\beta\alpha A^3 P_0$ となり， P_1 と ΔP_1 の比は Fig. 9(a) と比べて A^2 だけ改善される。

4.3 マイクロ波部品

Fig. 10 は，仮想的なヘテロダイン反射計システムの構成を示したもので，Fig. 2 の概念図と比べてかなり複雑になっている。ただし，この構成図は説明用に種々の要素を取り入れたものであり，実際のシステムでは，すべての要素を取り入れる必要はない。反射計用の発振器としては，様々なものが用いられる。帯域，周波数掃引の速さ，パワー，周波数安定性などの観点から発振器を選択する。発振器から出たマイクロ波がシステム内の反射等で発振器に戻ってくると発振が不安定になるので，必ずアイソレーターを発振器直後に配置する。反射の予想される場所 (ミキサの直前，真空窓の直前など) には，アイソレーターまたは減衰器を設置する。アイソレーターは磁性体を使用しているので，磁場の影響を受けて特性が変化する可能性があり，プラズマ発生装置のそばでは，減衰器が用いられる。Fig. 10 のすべての減衰器 (Att.) はアイソレーターの役割をも兼ねている。図中

の方向性結合器 (Directional Coupler: D.C.) は、マイクロ波の一部を分けるのに用いられる。プラズマへ入射する周波数 f_{PR} のマイクロ波の大部分は、プラズマ側へ送られ、ミキサの局発 (Local Oscillator: LO) に必要なパワーのみが、D.C.で分けられる。D.C.の性能では、パワーの分割比だけでなく、不要経路の遮断率が重要である。ミキサでは、同様に RF, LO 端子間の不要経路の遮断率が問題になる。例えば、図中の f_{PR} のマイクロ波は、Att. 1→Mixer 1→Att. 5→10dB D.C.→Att. 4→Mixer 2の経路を通りうる。プラズマを通して来た f_{PR} のマイクロ波は微弱的であり、上記の経路を通った f_{PR} のマイクロ波はわずかな割合でも位相誤差を引き起こすので、これが十分小さいことを確認する必要がある。図中の Delay Line は発振器の周波数が不安定な場合に用いられる。すなわち、プラズマ中を通して Mixer 2 に達する時間とプラズマを通らないで Mixer 1 に達する時間が異なると、この時間での周波数 f_{PR} の変化は、位相誤差を引き起こす。システムの動作確認と位相測定の校正を行うためには、移相器を用いる。条件が許す場合には、真空容器内に可動シャッターを設けておき、位置の校正を行う。またこのときの位相変化がなめらかであるかどうかで、シャッター以外の場所での不要な経路、不要な反射の有無を確認できる。

4.4 伝送, アンテナ

ある波長のマイクロ波にとって、1つのモードの波しか存在できない導波管を基本導波管と呼ぶ。複数のモードが存在しえと、それらの相対位相が変わったときに見かけ上のパワーや位相が変動し、種々の不都合が生じる。そこで、基本導波管、および同じ断面をもつマイクロ波部品を使うのが一般的である。ところが、基本導波管の伝送損失は意外に大きく、長距離伝送しなければならないときには、基本導波管より大きな断面をもつオーバーサイズ導波管を用いる。基本導波管よりも損失が小さいからである。先に述べた複数モードの問題を避けるために、単純な直線伝送路のみで、オーバーサイズ導波管を用いる。オーバーサイズのまま曲がった導波管を通ると、複数モードが生じ、結果的に大きな減衰や、反射などが起きる。そこで、オーバーサイズの伝送路を途中で曲げる必要がある場合は、テーパ型導波管 (断面のサイズが徐々に変わる導波管) で基本導波管まで戻してバンドを使って曲げる方法と、オーバーサイズ導波管用のマイターバンド (導波管内に鏡をおいたような構造) を用いて直角に曲げる方法がある。プラズマ発生装置と送受信部分の電氣的絶縁を確保するために、導波管の途

Fig. 10 A virtual heterodyne reflectometer system.

中にテフロン、マイラーなどのシートを挟む。このとき、この絶縁シートの部分からマイクロ波が外に漏れる。例えば、Fig. 10 で送信側の絶縁部から漏れたマイクロ波が受信側の絶縁部から受信側に混入し、測定誤差を引き起こす。これが問題になる場合は、マイラーで包んだアルミ箔などで絶縁部分を覆う。絶縁部でなくとも、導波管、部品の接続部分は、マイクロ波が漏れ出す可能性があり、注意を要す。真空窓、アンテナには、幾つかの選択がある。アンテナを真空容器内でプラズマに近接して配置する場合、真空窓を導波管部分に置く。ホーンアンテナを用いるか、指向性のよいログホーンアンテナを用いる。マイクロ波のビームの向きを変えるために、鏡を用いることもある。導波管部の窓の材質としては、雲母、マイラー、テフロン、石英などが考えられる。アンテナを大気側に置く場合、窓は大きなものが必要であり、石英が一般的である。この場合は、マイクロ波を集光する

鏡や、テフロンレンズを大気側に配置して、試行錯誤することができる。通常のホーンアンテナでは、 E 方向と H 方向で指向性が異なり、特に E 方向に大きなサイドローブが現れる。内側に溝を切ったスカラーホーンでは、ガウシアンビームが得られる。アンテナの指向性に関しては、対象とするプラズマとの関係もあり、何が最適であるかは、不明確である。

4.5 その他

反射計を最初に組み立てるときは、各部分でのパワーがどの程度で、どこにどれだけ損失があるかを把握しておくことが望ましい。減衰器や移相器も多めに配置しておく、試験が容易になる。例えば、図中の Att. 2, Att. 3, Shutter を用いることにより、望ましくない経路を通ったパワー、プラズマから放射されるマイクロ波の影響などを調べることができる。ミキサや検出器は最も壊れやすい部品であり、しかも高価なので、取り扱いには注意を要する。機械的な衝撃はもちろんのこと、静電気にも弱いので、手で触れるとき、ケーブルをつなぐときは、アースに触れて静電気を流しておく必要がある。

5. まとめ

マイクロ波反射計の魅力は小規模なシステムで大きな成果を期待できる点である。マイクロ波は波長が長く波動の側面が強い。また直接目に見えないこともあり、明確なイメージを抱くのが難しいという点もある。しかしながら、中間周波数は扱いやすい帯域にあり、様々な工夫が可能である。また、めざましいマイクロ波技術の進展を適切に取り入れることができれば、これまでにない計測も可能である。是非、反射計を作ってみてください。

最後に助言をいただいた田中謙治先生、間瀬 淳先生にこの場をかりて感謝いたします。

参考文献

- [1] 江尻 晶:「プラズマ計測のためのマイクロ波反射計」プラズマ・核融合学会誌 **79**, 742 (2003).
- [2] E. Mazzucato, Rev. Sci. Instrum. **69**, 2201 (1998).
- [3] E.J. Doyle, Rev. Sci. Instrum. **61**, 2896 (1990). M.E. Manso *et al.*, 18th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Berlin, **15C** I-393 (1991). F. Clairet, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 340 (2001). T. Tokuzawa, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **68**, 443 (1997).
- [4] K.W. Kim *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 1229 (1995).
- [5] G.J. Kramer, A.C.C. Sips and N.J. Lopes Cardozo, Plasma Phys. Contr. Fusion **35**, 1685 (1993).
- [6] J.L. Done, Rev. Sci. Instrum. **51**, 317 (1980).
- [7] E. de la Luna *et al.*, Plasma Phys. Contr. Fusion **37**, 925 (1995).
- [8] G.R. Hanson *et al.*, Plasma Phys. Contr. Fusion **36**, 2073 (1994).
- [9] A.J.H. Donne *et al.*, Fusion Eng. Des. **34**, **35**, 73 (1997). T. Tokuzawa, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1506 (2003).
- [10] C.W. Domier *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 399 (1995). S. Kubota, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, L300 (1998).
- [11] L.G. Bruskin *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 **40**, L705 (2001).
- [12] G.D. Conway, Rev. Sci. Instrum. **64**, 2782 (1992).
- [13] A. Ejiri, K. Kawahata and S. Okajima, Rev. Sci. Instrum. **69**, 2349 (1998).

え じ り あ き ら
江 尻 晶

1965年生まれ。1992年に東京大学大理学系研究科退学後、核融合科学研究所を経て、1999年より新領域創成科学研究科。最近の研究テーマは、球状トカマクを用いた

MHD 不安定性の研究、揺動計測手法の開発です。最近、共同研究のため九州大学へ出張する機会が多く、趣味の育児と家事から解放されています。