

広帯域マイクロ波反射計の性能試験

中野, 治彦
九州大学大学院総合理工学研究科先端エネルギー理工学専攻

岡澤, 智
新川電機(株) | 九州大学大学院総合理工学研究科先端エネルギー理工学専攻

長谷川, 真
九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センター

花田, 和明
九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センター

他

<https://doi.org/10.15017/16603>

出版情報: 九州大学大学院総合理工学報告. 22 (3), pp.297-300, 2000-12. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

バージョン:

権利関係:

広帯域マイクロ波反射計の性能試験

中野 治彦*・岡澤 智**・長谷川 真***
花田 和明***・上瀧 恵里子***・坂本 端樹***
関子 秀樹***・中村 一男***・伊藤 智之***

(平成12年8月31日 受理)

Test of Wide-Band Reflectometer

Haruhiko NAKANO, Tomo OKAZAWA, Makoto HASEGAWA,
Kazuaki HANADA, Eriko JOTAKI, Mizuki SAKAMOTO,
Hideki ZUSHI, Kazuo NAKAMURA, and Satoshi ITOH

The reflectometry is one of useful tools for the measurement of electron density profile and density fluctuation in high temperature plasmas. The single channel wide-band reflectometer in the range of 8GHz and 15GHz was manufactured to measure the density profile of the tokamak plasma on TRIAM-1M and some tests were executed. A synthesizer in the range of 10MHz and 50GHz was adopted as the source of microwave. The effective bandwidth of reflectometer is limited by isolators, which are installed for the exclusion of standing waves in the reflectometer. Instead of high temperature plasma, a metal plate was used as the reflector of microwave. The accuracy in the phase difference between the injected wave and the wave reflected by the metal plate is less than 0.16 rad in the range of 8GHz and 15GHz. This is comparable with the error of components themselves.

1. はじめに

近年、高温プラズマにおいて種々の輸送障壁が観測されている。ASDEX で発見された H モードではプラズマの周辺部にエネルギー及び粒子の輸送が改善され、結果としてプラズマ周辺部に温度及び密度が急勾配となる輸送障壁が形成される¹⁾。また、この輸送障壁がプラズマ周辺部ではなくプラズマ中心部で発現する現象も数多く報告され、内部輸送障壁と呼ばれている²⁾⁻⁵⁾。これらの輸送障壁は高温プラズマの閉じ込め性能を改善するため、プラズマ物理の研究課題としてだけでなく、高温プラズマの応用である核融合炉開発研究においても重要である。

輸送障壁について調べるためには、温度及び密度の勾配を測定することが重要であり、また輸送を決定している可能性のある物理量の揺動を測定することも必要である。これらの目的のためには、電子・イオン温度や電子密度を高い空間分解能及び時間分解能で計測することが必要である。これまでトカマクプラズマの電子密度は主にマイクロ波干渉計やトムソン散乱計などで計測されてきたが、マイクロ波干渉計は、時間

分解能に優れるが空間分解能を上げることが困難であり、反対にトムソン散乱計では空間分解能に優れるが時間分解能を上げることが困難である。多チャンネルのマイクロ波干渉計や繰り返し発振のできる YAG レーザーを用いたトムソン散乱計測等が開発・実用化されているが未だ十分な時間・空間分解能を得るにはいたっていない。

マイクロ波反射計はプラズマ中に入射したマイクロ波がプラズマ中の遮断層で反射されて戻る性質を利用して、入射波と反射波の位相差から遮断層までの距離を測定する。従ってマイクロ波反射計から密度分布を得るためには入射マイクロ波の周波数を変えていくつかの遮断層の位置を知る必要がある。DIII-D では多周波数、多チャンネルの反射計を使って L モードから H モードへの遷移時の密度分布の時間発展を測定することに成功している⁶⁾⁻⁸⁾。また H モードプラズマ中の輸送障壁近傍では電子密度揺動が減少していること⁹⁾⁻¹⁰⁾や内部輸送障壁形成時にも揺動が減少していること¹¹⁾なども多チャンネルの反射計によって観測されている。しかしながら多チャンネルの反射計では空間分解能がチャンネル数で制限されることや多チャンネルの検出器を常時メンテナンスしなければならないなどのデメリットも存在する。

今回、TRIAM-1M でイオン温度に輸送障壁が形成される HIT モードプラズマ¹²⁾⁻¹³⁾の電子密度分布を測

*先端エネルギー理工学専攻 修士課程

**先端エネルギー理工学専攻 修士課程 (現在 新川電機株)

***応用力学研究所 炉心理工学研究センター

定するためにマイクロ波源として 10MHz から 50GHz までのシンセサイザーを用いた広帯域 (8GHz ~ 15GHz) シングルチャンネルマイクロ波反射計を用いて性能試験を実施した. このような広帯域の反射計を用いることで空間分解能可変の密度分布測定を行うことができる. また, シンセサイザーを使用しているため周波数の変更が容易であり, 周波数を階段関数状に変化させることで電子密度揺動も任意の空間分解能で測定できるようになる.

本論文では, 第 2 章でマイクロ波反射計の測定原理について簡単に説明した後, 第 3 章で広帯域マイクロ波反射計の性能試験の結果について記述し, 第 4 章で全体のまとめを行う.

2. マイクロ波反射計の動作原理

プラズマ中を伝播するマイクロ波は, 波動電場の振動方向が磁場の平行方向である O モードと垂直な X モードに分けることができる. O モードの場合には伝播するマイクロ波の周波数とプラズマ振動の周波数が一致すると遮断が起きてマイクロ波は反射される. 遮断の起きる場所を遮断層と呼び, O モードの場合, 遮断層の位置は電子密度とマイクロ波の周波数のみで決まる. プラズマ中にマイクロ波を入射し, 遮断層で反射されたマイクロ波との位相差 ϕ を測定するのがマイクロ波反射計であり, 遮断層の位置 $R_{cut-off}$ は測定された位相差を用いて,

$$R_{cut-off} = \frac{c}{\pi} \int_0^{f_{inj}} \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df} \frac{df}{\sqrt{f_{inj}^2 - f^2}} \quad (1)$$

から求めることができる. ここで f_{inj} は入射波の周波数である. この式から分かるように遮断層の位置を求めるには種々の周波数での入射波と反射波の位相差を測定することが必要である.

また, 電子密度揺動 \tilde{n}_e については,

$$\frac{\tilde{n}_e}{n_e} = \frac{c}{4\pi\tilde{\mu}L_n} \Delta\phi \quad (2)$$

から求めることができる. ここで $\tilde{\mu}$ はマイクロ波の伝播経路における平均的な屈折率であり, $L_n^{-1} = 1/n_e dn_e/dl$ である. また l はマイクロ波の伝播経路に沿って測定した距離である. $\tilde{\mu}$ は様々な密度分布を仮定して計算しても良い精度で 0.6 となる¹⁰⁾. この式より位相差の揺らぎ $\Delta\phi$ と L_n を測定すれば密度揺動を評価することができる.

今回, 性能試験を行った反射計のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す. シンセサイザーで励起されたマイクロ波のパワーをアンプで増幅し, 方向性結合器によりプラズマ真空容器に入る入射波と参照波に分け

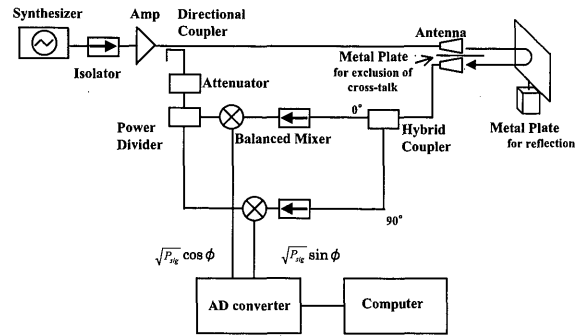


Fig. 1 Block diagram of the wide-band reflectometer system. Mixer outputs are proportional to $\sqrt{P_{sig}} \cos\phi$ and $\sqrt{P_{sig}} \sin\phi$, where P_{sig} and ϕ mean power of the reflected wave and the phase difference between the reference wave and detected wave, respectively.

る. 参照波は減衰器によってバランストミキサーに適したパワーに調整される. 入射波はアンテナから空気中に放射され, プラズマ中の遮断層の模擬として置かれた金属板で反射される. この金属板はアンテナまでの距離を自由に変えることができる. 反射された波は, 位相が ϕ ずれて受信用のアンテナから再び反射計内に戻る. 反射されたマイクロ波は, ハイブリッド結合器により位相が 90° 異なる二つの波に分岐される. また, 参照波はパワーディバイダにより位相の等しい二つの波に分岐される. 二つのバランストミキサーでそれぞれの波を検波することにより得られる出力は,

$$\sqrt{P_{sig}} \cos\phi, \sqrt{P_{sig}} \sin\phi \quad (3)$$

に比例する. ここで, P_{sig} は信号波のパワーを表す. それぞれの信号は AD 変換されコンピューターに取り込まれる. 信号から参照波と反射波の位相差 ϕ を算出する.

3. 性能試験の結果

式(3)から明らかなようにバランストミキサーに入力される二つの反射波の位相差の 90° からのずれは測定に影響を与える. そこで, ハイブリッド結合器単体をネットワークアナライザーを用いて試験した. その結果周波数 8GHz ~ 15GHz の範囲で 90° からのずれは約 10° (0.1rad) であることが分かった.

組立後のマイクロ波反射計の性能試験は, プラズマ中の遮断層の模擬として金属板を使用し, 一定周波数のマイクロ波を金属板にて反射させた際の二つのバランストミキサーで得られる正弦, 余弦の信号電圧を測定することで行った.

今回の反射計の動作周波数は, 各素子間に発生する定在波を減衰させるために入れられたアイソレータの動作周波数である 8GHz から 15GHz により決定され

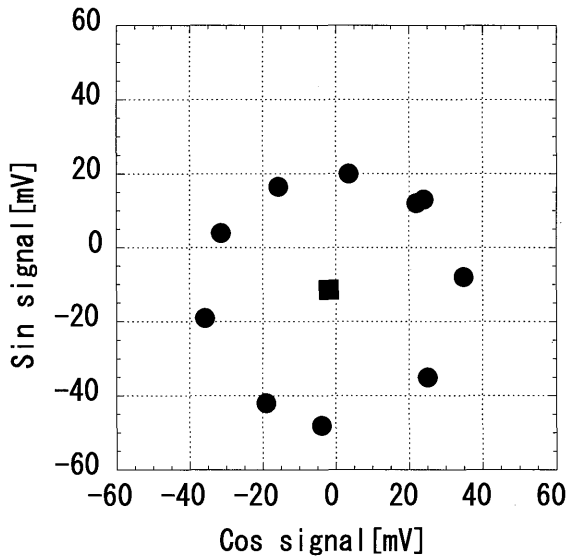


Fig. 2 Typical outputs closed circles in the case of 9GHz are plotted on $\cos\phi$ (x axis) and $\sin\phi$ (y axis) plane. A closed square point shows the original point. When the antenna for the reflected wave is shut by metal plate, the output signals show the original point.

る。従って、性能試験を 8GHz から 15GHz まで 1GHz 毎に変えてバランスミキサの出力を測定することにした。また、アンテナと金属板間の多重反射やアンテナ間のクロストークを防ぐために二つのアンテナを互いに放し、間に金属板をいれた。アンテナ間に入れたクロストーク防止用の金属板の位置は、受信用のアンテナを金属板でさえぎり、受信用のアンテナに信号が入力されない場合と反射用の金属板を取り去り、入射波が無限遠まで進み受信用のアンテナに信号が入力されない場合の信号が同じになるように設置した。この結果、クロストークを抑制することが出来た。

Fig. 2 は、出力結果の例で余弦、正弦の信号電圧を横軸と縦軸としたものである。原点とデータの点を結ぶ直線と X 軸とのなす角度が位相差であり、データの点までの距離が反射波のパワーに比例している。原点は、試験の前後に受信用のアンテナを金属板でさえぎって信号電圧を測定し平均することで決定した。今回の試験では、この方法により決定した原点を中心に信号が円を描いているので、プラズマを測定する場合にも同様の方法で原点を調べることが出来る。また、原点のずれは、マイクロ波反射計内のオフセットが原因である。

Fig. 3 は、位相差を金属板のアンテナからの距離に対して図示したもので図中の線はアンテナと金属板の距離から計算した位相差を表したものである。位相差の絶対値は測定できないので、金属板をアンテナから 50cm 離れた位置に置き、その時の位相を基準として図示した。金属板の移動距離は 17mm でアンテナに近づけ

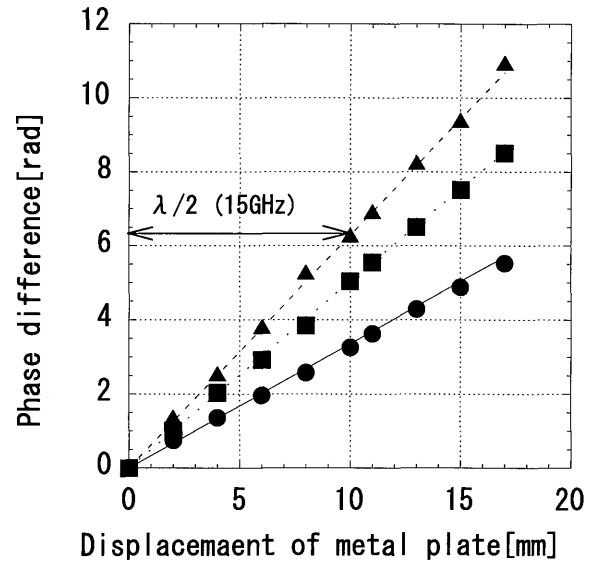


Fig. 3 The phase difference in the cases of 8GHz (closed circles), 12GHz (closed squares) and 15GHz (closed triangles) are plotted as the function of the displacement between metal plate and antenna. The calculated phase difference from the distance and wavelength in the cases of 8GHz (solid line), 12GHz (dotted line) and 15GHz (dashed line) are shown.

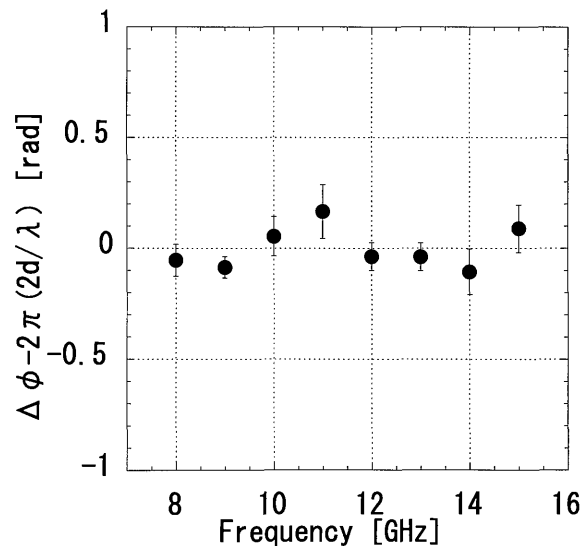


Fig. 4 Differences between phase differences measured by the reflectometer and calculation ones, are plotted as the function of frequency of the injected microwave.

る方向に移動した。測定は 8GHz から 15GHz まで 1GHz 毎に行い、図には 8GHz, 12GHz, 15GHz, の結果を示した。金属板をマイクロ波の半波長分移動すると光路差が一波長となるため位相差が 2π だけ変化する。位相差が金属板の移動距離に比例し、絶対値もほぼ計算値と一致しているので、位相差を正しく測定できていると考えられる。

Fig. 4 は、各周波数における計算値と実験値の位相

差の差に関して図示したものである。最大で 11GHz のときに 0.16rad の誤差があり、前述したようにハイブリッド結合器単体の特性が、約 0.1rad ずれている事を考慮すれば、この誤差は素子自身の誤差を反映していると考えられる。最も波長の長い 8GHz の場合、0.05rad の誤差は 1mm の誤差に相当し、11GHz の場合では、0.16rad の誤差は 2.3mm の誤差になる。この結果、製作したマイクロ波反射計は、プラズマの半径 10cm に対し真空距離として最大で 2.3mm の誤差の範囲で測定できることが分かった。

この反射計で測定対象としている TRIAM-1M の 2.45GHz 低域混成波電流駆動 (LHCD) プラズマの線平均電子密度はプラズマ中心で $0.25 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 程度であり、今回製作した反射計の帯域 8GHz ($0.81 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$) ~ 15GHz ($2.78 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$) でプラズマ全体の 60% に相当する密度分布を調べることが出来ると考えられる。

4. ま と め

TRIAM-1M でイオン温度に輸送障壁が形成される HIT モードプラズマの電子密度分布を測定するために製作された広帯域 (8GHz ~ 15GHz) のマイクロ波反射計の性能試験を実施した。実際の試験では、アンテナと金属板の間に生じる多重反射を防ぎ、アンテナ同士で起こるクロストークを防ぐために入射波用アンテナと受信用アンテナの間をあげ、金属板を挟み込み、性能試験を行った。その結果、性能試験を行ったマイクロ波反射計は帯域 8GHz ~ 15GHz において 0.16rad 以内の誤差で位相差を測定することが出来、実際のプラズマ計測に使用可能であることを確認した。

5. 謝 辞

本研究の一部は平成 10 年度総合理工学研究科奨励研究費によって行われたものである。ここに特記して感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) F. Wagner et al., Phys. Rev. Lett. **49**, 1408 (1982).
- 2) Y. Koide et al., Phys. Rev. Lett. **72**, 3662 (1994).
- 3) G.L. Jackson et al., Phys. Rev. Lett. **67**, 3098 (1991).
- 4) E. J. Strait et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 4421 (1995).
- 5) F.M. Levinton et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 4417 (1995).
- 6) E. J. Doyle, T. Lehecka, N.C. Luhmann, Jr, W.A. Peebles, and the D III -D Group, X-mode broadband reflectometric density profile measurements on D III -D, in *Proceedings of 17th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys.*, volume 14B, pages 1596-1599, European Physical Society, 1990.
- 7) A.C.C. Sips and G. J. Kramer, Plasma Phys. Controlled Fusion **35**, 743 (1993).
- 8) K.W. Kim et al., Rev. Sci. Instrum. **66**, 1229 (1995).
- 9) E. J. Doyle et al., Rev. Sci. Instrum. **61**, 3016 (1990).
- 10) T.L. Rhodes, R. J. Taylor, E. J. Doyle, N.C. Luhmann, Jr., and W.A. Peebles, Nucl. Fusion **33**, 1787 (1993).
- 11) E. Mazzucato et al., Phys. Rev. Lett. **77**, 3145 (1996).
- 12) S. Itoh et al., Nuclear Fusion **39** 1257 (1999).
- 13) H. Zushi et al., Nuclear Fusion **39** 1955 (1999).
- 14) A.E. Costley, Diagnosis of fusion plasma using reflectometry, in *International School of Plasma Physics "PERO CALDIROLA"* (Proceedings of the Course and Workshop held in Varenna, Italy), pages 379-396, Bologna, 1986, Editrice Compositori.