

氏 名	金場 貴宏
学位（専攻分野）	博士（学術）
学位記番号	総研大甲第 839 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 24 日
学位授与の要件	物理科学研究科 核融合科学専攻 学位規則第 6 条第 1 項該当
学位論文題目	LHD における超短パルスマイクロ波反射計に関する開 発研究
論文審査員	主 査 教授 松岡 啓介 教授 川端 一男 助教授 井口 春和 教授 間瀬 淳（九州大学） 助教授 北條 仁士（筑波大学）

プラズマ中の粒子輸送・拡散は密度勾配や揺動と密接な関係がある。大型ヘリカル装置 (LHD) においては新古典拡散により予測される値よりも一桁以上大きな異常輸送が支配的であると考えられている。この異常輸送はプラズマ中の微視的な波の不安定性により起きる。このため、核融合プラズマの電子密度分布及び揺動を計測することは、閉じ込め装置の閉じ込め性能を評価する上で非常に重要なことである。特に、揺動計測によって粒子損失を評価するには計測と同じ位置での密度分布の情報が得られることが望ましい。

LHD において主に電子密度分布計測を行っている計測器は空間 13 チャンネルの遠赤外線レーザー干渉計である。この計測器は LHD のプラズマ半径 (約 600 mm) に対してチャンネル間隔が 90 mm と空間分解能が低い。このため、プラズマの周辺部における計測が困難であることや大きな密度勾配のある分布計測が難しいという問題点がある。これにより、局所的に詳細な密度分布を得ることが難しい。また、干渉計は局所的な位置の密度及び揺動を直接計測することはできない。本研究では、上記の問題点を解決すべく局所的な密度分布及び密度揺動が得られる新しい計測器である超短パルスマイクロ波反射計の開発を行った。

反射法はプラズマ中の波の反射条件を利用して、その反射位置に関する情報を得る手法である。従来、密度分布計測で用いられる反射計としては 1 つの発振器の周波数を時間的に掃引して密度分布を測定する FM 反射計が多かった。しかし、この反射計はこの周波数掃引時にプラズマが大きな密度分布変化を起こすと正確な密度分布を計測することが難しい。また、このシステムではプラズマ以外からの反射が大きいと位相誤差を引き起こしてしまう。

超短パルスマイクロ波反射計の大きな特徴は、超短パルスには核融合プラズマの計測に必要な周波数成分を連続的に広帯域にわたり含んでいるため、超短パルスに含まれるすべての周波数に対応するカットオフ層の計測が可能であることである。これにより 1 つの発振源で密度分布計測を行うことができる。これは周波数固定の多チャンネルパルス反射計によって得られる情報を 1 つの発振源で得ることができることを意味する。さらに、全ての周波数成分を時間的に同時に入射する。さらに、走査波がパルス形状であるため、プラズマからの放射によるノイズの影響が低減でき、また、プラズマ以外からの反射があったとしてもその遅れ時間はプラズマからの反射波の遅れ時間とは異なるため、容易に区別することができるという特長を挙げることができる。この超短パルス反射計を開発する上で問題点は、超短パルスから計測に適した周波数を持つマイクロ波を得なければならないこと、プラズマからの微弱な反射波を精度良く検波できること、多チャンネルである受信システムを構築すること、走査パルスの遅れ時間を高精度で計測するシステムを構築することであった。超短パルスは、フーリエ空間において広帯域の周波数成分を含んでいるが、その高周波数成分の振幅は小さい。このため、一度超短パルスをマイクロ波に変換しマイクロ波増幅器で増幅する必要がある。このマイクロ波への効率よい変換方法として、使用する走査周波数の帯域に合った導波管の大きさを選択することが考えられる。本システムでは、Rバンドの矩形導波管を使用した。これによって 26 ~ 40 GHz のマイクロ波を効率良く取得することができた。受信システムは高感度なフィルタバンク方式で、6 チャン

ネルのシステムを構築した。このシステムは Constant Fraction Discriminator と Time to Amplitude Converter を用いてパルスの遅れ時間を高分解能で精度良く計測できるように構築された。

構築した反射計システムの性能を調べるため、平面金属板を用いた較正実験を行った。その結果、計測する遅れ時間が反射位置からの反射距離と線形性の関係にあることを確認し、またこの反射計の計測位置精度は 6 mm と高精度であることが示された。次に、単純な円柱型のプラズマを発生する HYPER-I 装置に超短パルスマイクロ波反射計を導入し、カットオフ層がある場合には反射計として、カットオフ層がない場合には Delayometry として機能することを確認した。その後、反射計を LHD 装置に導入した。

LHD 装置に導入する上で問題となったのは、LHD 装置自体の複雑な構造と磁場構造であった。それは、LHD 装置に設置されているポートからプラズマまでの距離が長いこと、LHD における磁気面は楕円型であり、横長断面方向の両端には分厚いエルゴディック層が存在することである。これらの問題点を解決するため、伝送損失の低いコルゲート導波管を用いてヘリカルコイル直下まで伝送し、磁気軸に向けて入射するアンテナ開口構造を取り付けた伝送系を構築した。途中、Divertor Legs の熱流束からこの導波管を保護するため、カーボンシースを特定の部分で取り付けている。プラズマへの入射には O モードを用いた。プラズマ実験で密度分布の情報を得るには、いくつかの周波数の走査波を使用することで、それら反射波の遅れ時間あるいは位相変化を計測しなければならない。つぎに、得られた各走査波の遅れ時間の情報からアーベル変換を用いて密度分布を再構成する。LHD プラズマ実験では 6 チャンネルの計測を行い、各チャンネルの走査波の遅れ時間を計測し、密度分布の再構成に成功した。これにより、遠赤外レーザー干渉計では困難であったプラズマ周辺部の詳細な密度分布計測が可能であることを示した。ガスパフを用いた密度変調実験においては、電子密度の変動に対して非常に高感度な計測を行うことができることを実証し、その密度変調の位相変化の様子を観測し、粒子輸送の研究に新たな知見を得られる見通しを得た。

論文の審査結果の要旨

金場貴宏君の論文は、大型ヘリカル装置（LHD）プラズマの電子密度・揺動の空間分布を測定するための超短パルスマイクロ波反射計の開発と、それを用いて測定した LHD プラズマの粒子輸送についての実験結果に関するものである。

電子密度分布の代表的な計測法として、現在、レーザーのトムソン散乱や遠赤外レーザー干渉計がよく用いられている。しかしながら、これらは装置として大掛かりになる上に、前者は、時間分解能が数ミリ秒から数十ミリ秒であり変化の速い現象には十分に対応出来なく、後者は、視線に沿った線積分値が得られる上にレーザー光の広がりによる空間分解能が LHD の場合原理的に約 10cm となるため、周辺の急峻な密度勾配の測定には対処出来ない。高時間分解能で電子密度の局所値が得られるマイクロ波反射計の原理は次のようである。例えば、マイクロ波が正常波として入射される場合、その周波数に等しいプラズマ周波数に対応する電子密度の空間位置において反射されるため、入射時刻からプラズマ中で反射されて受信される時刻までの時間間隔を測定することにより、その周波数に対応する電子密度の空間位置を得るものである。電子密度の空間分布を得るために、周波数の異なる複数のマイクロ波発振器を用いることが考えられるが、計測システム構成上、発振器や伝送系の数に限度があり現実的ではない。これに対し、超短パルスは広い範囲の周波数のマイクロ波にフーリエ分解されることから、一つの発振器で多チャンネル計測が可能となるため、計測システムはコンパクトになり現実的である。近年、超短パルスマイクロ波反射計による計測がプラズマ実験において試みられているが、世界的に見ても数は多くない。

金場君によって開発された超短パルスマイクロ波反射計において、次のような特筆すべき点を挙げる事ができる。LHD プラズマにおいて勾配を持つ電子密度領域は代表的に 10^{19}m^{-3} 台であるため、電子密度分布を得るには 20-40GHz の周波数を必要とする。これに応えるべく、世界でも例を見ないパルス幅 23 ピコ秒という超短インパルス（振幅 2.2V）を長さ 50cm の Rバンドの導波管に通すことにより、電子密度分布に対応する広帯域の周波数を持つマイクロ波に効率よく変換することに成功した。

受信システムには、プラズマからの反射波は通常微弱であるため、ヘテロダイン方式を用い、反射波を中間周波数帯(2-18GHz)の信号に変換することにより、信号を安定して増幅させた。この後、計測システムとして完成させるために、先ず 1 チャンネルであるが、大気中でアルミニウムの反射板を用いて、反射板までの距離（50cm から 190cm まで変化）と反射波が受信されるまでの時間間隔を調べ、両者の間に線形の関係があること及び位置の精度が $\pm 3\text{mm}$ であることを確認した。次に、プラズマの形状が単純な直線型プラズマ実験装置 HYPER-I において、ガラス窓からの反射を調べ、アンテナ開口部と窓との距離を最適化し 5mm とした結果、窓からの反射を無視出来るレベルに抑えることが出来た。プラズマの電子密度を変化させ、密度がカットオフ以下の場合には delayometry と

して、カットオフ以上の場合には反射計として機能することを確認した。さらに、多チャンネル化を行い、HYPER-I プラズマの電子密度を時間的に減少させることにより、6チャンネルの内、35, 33, 31, 29GHzのチャンネルが順次、反射計から delayometry に移行することを確認し、計測システムとしての機能を確認した。

LHD への設置にあたっては、LHD プラズマの形状と複雑な磁場構造を考慮する必要がある。プラズマ周辺のエルゴディック層を避けるために高磁場側からの入射とし、同時にサイクロトロン共鳴層も避ける配置とした。このため、伝送系がダイバータ構造を横切らざるをえなくなり、プラズマからの熱流束に耐えようよう対策を施した。真空容器内の送受信伝送系は、幾何学的な理由により水平面から 3-4 度の勾配を持っている。このため、真空窓を通して真空容器外の伝送系との間で生じる電力損失を最小限に抑えるべく模擬実験を行い、伝送系の配置を最適化した。送信系には、マイクロ波を正常波として入射すべく、偏波面が最外殻磁気面での磁力線方向に沿うよう調整機能を持たせた。

段階を踏んだ予備実験を進めたことと LHD 実機でのこれらのハードウェア上の対策により、核融合プラズマ実験に用いられている超短パルスマイクロ波反射計の中でも、周波数帯域の広さと実験におけるシステムの安定性において世界的に類を見ないシステムを構築した。LHD プラズマを測定した結果、遠赤外レーザー干渉計では得られなかったプラズマ周辺の急峻な電子密度分布を得ることに成功した。また、ガスパフによる電子密度変調実験では、カットオフ層の時間変化の位相が空間的に変化する様子が観測され、粒子輸送の研究にこれまでにない新しい知見を与える見通しを得た。サンプリング時間は2マイクロ秒であり、粒子の異常輸送の要因となりうる微視的不安定性（密度揺動）の測定にも見通しを与えた。

このように、従来にない広い周波数領域を持つ超短パルスマイクロ波反射計を開発し、これを用いて粒子輸送解析に新しい知見を与える見通しを得ることに成功した。よって、審査委員会は、本論文は博士論文として十分価値があると判断した。