

氏 名 長谷川 靖 洋

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第397号

学位授与の日付 平成11年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 固体表面でのイオン反射を利用したイオンエネルギー分布計測
に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 野田 信明
教 授 本島 修
教 授 森下 一男
教 授 大藪 修義
教 授 日野 友明（北海道大学）

論文内容の要旨

核融合実験装置のダイバータ領域において、壁へのイオン入射が原因となる材料損耗は、材料メンテナンス上大きな問題となっている。材料損耗はイオンのエネルギー、種類等に依存するため、壁へ入射するイオンに関するこれらの情報を得ることはダイバータ板損耗の評価の上で重要となる。入射イオン種の弁別ならびに必要な空間分解能の条件から、メインプラズマ中のイオン温度測定に使われている分光、NPA等の計測手法は適しているとは云えない。本研究では上記の条件を満たすダイバータプラズマ中のイオンエネルギー分布計測手法として「固体表面でのイオン反射を利用したイオンエネルギー分布計測」という新しい手法の提案を行った。本手法では、ダイバータプラズマ中に小さな固体ターゲット ($<10 \times 10 \text{mm}$) を挿入し、その表面から反射してくる中性粒子のエネルギー分布を、飛行時間型エネルギー分析装置 (TOF装置) を用いて測定する。反射粒子エネルギー分布は入射イオン種、入射エネルギー分布等に依存するため、得られた反射粒子エネルギー分布から逆にこれらの情報を得る。本研究では、イオン-固体表面相互作用に関する計算で実績のあるモンテカルロシミュレーションコードTRIM.SP.を用い、この新しい計測手法に関する定量的な評価を行った。さらにTOF装置を製作し、直線型定常プラズマ発生装置TPD-Iにおいて本手法の原理実証実験を行った。

イオン反射に関しては数多くの理論的、実験的な研究が報告されている。しかし、磁化プラズマを対象とした研究は限られている。本研究では、磁化プラズマに対応するよう、TRIM.SP.による計算で、入射粒子のラーマー運動、及びエネルギー分布にイオン温度 T_i で表されるマクスウェル分布とシースポテンシャルの影響を考慮した。ダイバータプラズマの水素イオン入射エネルギー領域 ($<1 \text{keV}$) において、単一エネルギー入射 ($kT_i=0$) の場合、反射粒子エネルギー分布は入射エネルギーよりやや小さいエネルギーでピークを持ち、ターゲット材料元素の質量数が大きいほど、この差は小さい。計算では、タングステンをターゲット材料として選定した。

シミュレーションの結果、以下の事が明らかになった。

1. 反射粒子エネルギー分布は特徴的なピークエネルギー (E_p) を持つ。 E_p は固体前面に形成されるシースポテンシャルの大きさに対応するものであり、 E_p からシースポテンシャルが評価できる。
2. 反射粒子エネルギー分布において、 E_p よりも大きなエネルギー領域における反射粒子エネルギー分布の広がりより、入射イオン温度が評価できる。

以上の計算結果より、反射粒子エネルギー分布から、プラズマ中のイオン温度とターゲット前面に形成されるシースポテンシャルの情報が同時に得られることが示された。

次に、本計測手法の原理実証実験を行うために、TOF装置を製作し、TPD-I装置に設置した。TOF装置は、(i)中性粒子束をチョップするチョッパー部、(ii)粒子のエネルギー分離を行うための約2.1mのフライト部、(iii)粒子をCu-Beに衝突させることによって発生する二次電子を検出する検出部からなる。検出器からの信号は高

速・高利得増幅器を通してデジタルオシロスコープに入力され、ここでアナログ→デジタル変換される。プラズマ中に挿入するターゲット（10×10mm）はタングステン製で、外部電源を接続してバイアス電圧を印加することによりシースポテンシャルを変化することができるようにした。水素とヘリウムの混合プラズマ中にこのターゲットを挿入し、TOF装置による反射粒子エネルギー分布計測を行った。その結果、質量差による飛行時間の違いから水素とヘリウムの反射粒子エネルギー分布が明確に分離できることが確認された。両者の反射粒子エネルギー分布は計算結果と同様にそれぞれピークを持っており、それぞれの E_p よりターゲット前面のシースポテンシャルの評価を行った結果、両者は良く一致し、またシングルプローブ特性から得られたシースポテンシャルともほぼ一致した。また、中性粒子圧力及び放電電流を変化することにより本計測手法で得られるイオン温度の、それぞれへの依存性を調べた。その結果、中性粒子圧力の減少及び放電電流の増大によりイオン温度の上昇が観測された。これはTPD-I装置で過去にイオンセンシティブプローブ及びドップラー広がり計測により測定された結果と定性的に一致する。以上に示した原理実証実験の結果より、本計測手法の有効性が示された。

本計測手法の実機、大型ヘリカル装置（LHD）への応用を考える。LHDの周辺プラズマのプラメータを、 $n_e=n_i=1\times 10^{18}\text{m}^{-3}$, $kT_e=kT_i=20\text{eV}$ とする。TOF装置のフライトチューブの長さを4mとし、プラズマに対してターゲットに-150Vのバイアスをかけて測定を行う。この条件において、プラズマ中に挿入するターゲットは3×3mmの大きさで、本手法によるイオン温度ならびにシースポテンシャルの同時測定が可能であることを示した。

以上、本研究ではプラズマ対向壁損耗に関して重要なパラメータの一つであるダイバータプラズマ中のイオンエネルギー分布及び対向壁前面のシースポテンシャルを、イオン種の弁別と同時に比較的高い空間分解能をもって計測しうる新しい計測手法を提案した。モンテカルロシミュレーションコードTRIM.SP.により定量的な評価を行い、本計測手法が原理的に実現可能であることを示した。さらに、直線型プラズマ発生装置TPD-Iにおいて本計測手法の原理実証実験を行い、実験的にも本計測手法の有効性を示し、大型ヘリカル装置（LHD）への応用の具体案を示した。

論文の審査結果の要旨

本論文は、核融合装置ダイバータ板近傍のイオン温度、イオンエネルギー分布の新しい測定法に関する研究をまとめたものである。

ダイバータ材料の損耗はダイバータターゲット板の寿命を決める主要因であり、かつ炉心プラズマへの不純物混入を引き起こすことによってDT核燃焼に重大な影響を及ぼす可能性がある。損耗はイオン衝撃によるスパッタリング等によって引き起こされることがわかっており、スパッタリング率は表面を衝撃するイオンの種類、エネルギー、入射角度等に依存する。そこでターゲット板前面のイオン成分比とイオンエネルギー分布を知ることが損耗の評価にとって決定的に重要である。こうした理解に基づき、申請者は、固体表面でのイオン反射を利用し、反射粒子の飛行時間分析によってイオン種の弁別とエネルギー分布を同時に決めることができる新しい測定法を提案している。本研究では、計算機コードを用いることにより、この計測法の定量的な検討を行っている。また、直線型プラズマ装置TPD-I装置を用い、計測法の実証実験を行っている。

計算機シミュレーションでは、TRIM-SPという既成のコードを用いているが、入射エネルギー入力部分にシースによるイオン加速と磁場によるジャイロ運動の効果を取り入れるなど、実験との対応を考慮して改良している。単一エネルギーのビーム入射条件と、マクスウェル分布をしたプラズマ条件を比較し、検出される中性粒子のエネルギー分布にシースポテンシャルを反映した極大値が存在すること、極大値より高い部分の分布がイオン温度を反映していることなどの結果を得ている。また、プラズマに挿入する測定用ターゲット板材料として低Z材を代表する炭素と高Z材のタングステンと比較し、タングステンを使用する方が妥当であるとの根拠を得ている。

実験では、反射粒子が電氣的に中性であるため、検出のためには固体表面にあてて2次電子を放出させ、チャンネルプレートで電流を増幅する方法をとっている。ここでも、2次電子放出率が高く、放出率データの信頼性の高いエネルギー領域を活用するため、プラズマ中のターゲットにバイアス電圧をかけて加速するなどの工夫をしている。TPDの水素・ヘリウム混合プラズマを用いた実験の結果、ヘリウムと水素が分離できること、それぞれのイオン温度が約10 eVとなり、2~3 eVの精度でイオン温度を決定できること、シースポテンシャルの測定結果はラングミュアプローブで求めた空間電位の結果と整合性を持つことなどの結果を得ている。

以上に述べたように、本研究では、計測法自体が新しい着想に基づくものであり、シミュレーション計算と模擬実験でその有効性を実証し、LHDを含む今後の核融合装置への適用の展望を与える結果を得ている。従って、本研究は十分に新しく、価値のあるものと評価できる。申請論文では、研究の背景と意義、目的、新計測法の原理を説明するとともに、上記の結果をとりまとめている、この方法がイオンエネルギー分布計測法として有効であることを明解に示している。

以上のことから、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な水準にあるとの結論に達した。

審査委員全員出席のもとで口頭試問を実施し、論文内容、実験の基礎となる知識と技術等について試験を行った。その結果、シミュレーションのモデルと計算機コード、飛行時間計測、中性粒子検出法、測定精度評価など本研究に必要な知識と技術について十分に理解した上で研究を進めているものと認められた。また申請者が筆頭著者となっている論文を3編発表している。語学力については、論文要旨の英語版、添付された英文の参考論文等の審査により、必要な能力を有すると認定した。2月3日に開催された論文公開発表会においては、指定時間内に内容を要領よくまとめ、聴衆からの質問にも明確に答えていた。

以上により、本審査委員会は学力審査合格と判定した。