

## 非熱的核反応を利用した核燃焼プラズマの診断法に関する研究

川本, 靖子

<https://doi.org/10.15017/1931895>

---

出版情報 : Kyushu University, 2017, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

(様式2)

氏名 : 川本靖子

論文名 : 非熱的核反応を利用した核燃焼プラズマの診断法に関する研究

区分 : 甲

## 論文内容の要旨

核融合炉の運転では、中性粒子ビーム入射(NBI)などの外部加熱や核反応によって生成される”高エネルギー粒子”が重要な役割を果たす。高エネルギー粒子は、速度分布関数に Maxwell 分布からの歪みをもたらす。これに伴い、核反応生成物の放出スペクトルが Gauss 分布から歪み、同時に核反応率も変化する。放出スペクトルの Gauss 分布からの歪みはプラズマ状態を反映し、核反応率の増加は、核融合炉の成立性に重要なプラズマ加熱を促進する。速度分布関数が Maxwell 分布から歪む現象は、プラズマ中の高エネルギー粒子の散乱によっても引き起こされる。特に核力が支配的となる散乱は核弾性散乱と呼ばれ、大角度散乱であることから一回の散乱における輸送エネルギーが大きく、散乱の結果としてバルクイオンを高エネルギー領域に反跳させる。このようにして速度分布関数上に形成される非 Maxwell 成分はノックオンテイルと呼ばれる。高エネルギー粒子が核燃焼に及ぼす影響を明らかにすることは、炉心プラズマの成立に必要であり、その影響を実験で計測する手法を開発することは、核融合炉実現にとって極めて重要である。また、高エネルギー粒子が引き起こす現象を積極的に利用することは、計測性能の向上、新たな計測法の開発に繋がる可能性がある。

本研究では、核燃焼プラズマの計測法として、NBI 加熱により燃料イオン速度分布関数上に形成される非 Maxwell 成分を利用した、(1)重陽子密度  $n_D$  とトリトン密度  $n_T$  の燃料イオン比( $n_T/n_D$ )計測の改善法、及び (2)核弾性散乱によって生じるノックオンテイルの観測法、について検討し、その有効性を示すことを目的とする。

従来、重水素-トリチウム(DT)プラズマ内の DD 及び DT 反応で発生する 2.45、14.1 MeV 中性子発生率の比を観測することで燃料イオン比を計測する方法が提案されている。しかし、トリトン密度が大きい場合、14.1 MeV 中性子の発生率が増加し、DD 反応で発生する 2.45 MeV 中性子の計測が困難となるため、改善が求められていた。そこで、本研究では、DT プラズマに重水素ビームを入射し、14.1 MeV 中性子に対する 2.45 MeV 中性子の発生率を増加させると同時に、計測に有利な高エネルギー側中性子スペクトルの割合を高めることを提案した。

次に、少量の  ${}^6\text{Li}$  を添加した重水素プラズマに軽水素ビームを入射し、陽子の核弾性散乱によって形成される重陽子速度分布関数上のノックオンテイルを、 $\gamma$ 線や中性子を計測して捉える方法が提案されている。同手法では、軽水素ビーム入射によるプラズマ温度変化が測定を妨げることが懸念されている。本研究では、重水素プラズマで顕著になるトリトン速度分布関数上の非 Maxwell 成分の性質を利用することで、ノックオンテイル形成による  $\gamma$ 線・中性子発生率の変化とプラズマ温度上昇による同発生率の変化を識別する方法を提案した。さらに、ノックオンテイル形成によって生じる  $\gamma$ 線スペクトルの歪みを捉え、ノックオンテイルを含めた重陽子速度分布関数の形状を評価する方法を新たに提案し、有用性を示した。

第一章では、核融合炉開発研究の進展状況と核燃焼プラズマ中で高エネルギー粒子が引き起こす

現象、これに関連する計測法について説明し、本研究の背景と目的を述べた。

第二章では、本研究で用いる基礎方程式や、核燃焼プラズマ中のイオン速度分布関数、核反応率、生成粒子の放出スペクトル、 $\gamma$ 線のドップラー拡がりを解析する手法について述べた。また、代表的なプラズマパラメータに対して、それぞれの物理量に対する数値解析例を示し、それらの特徴を説明した。

第三章では、DT プラズマにおける中性子発生率から燃料イオン比を診断する方法に対し、診断可能領域の改善法を検討した。重水素ビームを用いることで DT 反応率に対する DD 反応率の比率を増加させ、さらに中性子放出スペクトルの歪みを利用することで、DD 反応によって発生する中性子を計測できるプラズマ条件の範囲を拡げることが可能であることを示した。特に電子(イオン)密度が小さい場合に改善度が高まる。例えば、電子密度  $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、燃料イオン比  $n_T/n_D=1$  の場合、エネルギーが 1 MeV、出力が 33 MW の重水素ビームを入射することで、計測するエネルギー領域の“DT 反応によって発生し減速した中性子”と“DD 反応によって発生する中性子”の比を約 90% 上昇させることが可能であることが示された。

第四章では、ノックオンテイル観測実験において懸念されるプラズマ温度の変化を診断する方法を検討した。ノックオンテイル観測法として  ${}^6\text{Li}$  添加重水素プラズマに軽水素ビームを入射した際に  ${}^6\text{Li}+D$  反応によって発生する  $\gamma$ 線や DD 反応によって発生する中性子の発生率変化を捉える方法が提案され、その実験が計画されている。ただし、発生率変化がノックオンテイル形成によるものか、温度上昇によるものかを識別する必要がある。本研究では  ${}^6\text{Li}$  添加重水素プラズマで生じる  ${}^6\text{Li}+T$  反応や DT 反応を利用することで、両者を識別する方法を提案し、その評価を行った。例えば、バルク温度を 2 keV から 3 keV に上昇させると、DD 反応率に対する DT 反応率の比は 1.6 倍と敏感に変化する。一方、ノックオンテイルはバルクに比べて十分小さいため、ノックオンテイルの形成のみではこの比は変化しない。 ${}^6\text{Li}+T$  反応や DT 反応はノックオンテイル形成に影響を受けず、プラズマ温度に敏感に反応する核反応であることを示した。発生する 0.981 MeV  $\gamma$ 線や 14.1 MeV 中性子を捉えることで、プラズマ温度変化を診断し、 ${}^6\text{Li}+D$  反応によって発生する  $\gamma$ 線や DD 中性子発生率の変化がノックオンテイル形成によるものかプラズマ温度によるものかを識別する方法を提案した。

第五章では、 $\gamma$ 線放出スペクトルのドップラー拡がりを利用して、重陽子速度分布関数上のノックオンテイル形状を評価する方法を新たに提案した。核弾性散乱によって形成されるノックオンテイルの形状はプラズマ状態を反映するため、ノックオンテイル形状から核弾性散乱の特性を解明することが期待できる。また、ノックオンテイル形状から、反応率上昇等の炉心の状態を診断できる可能性もある。本研究では二温度 Maxwell 分布モデルを採用し、 $\gamma$ 線のドップラー拡がりや反応率を計測することによって重陽子速度分布関数上のノックオンテイル形状を特定する方法を示した。400~500 keV 程度の  $\gamma$ 線に対して、エネルギー分解能(応答関数が Gauss 分布の場合の半値幅)が 100~200 eV 程度の検出器を利用した場合、エネルギー 1 MeV の重水素ビームを入射した電子温度 3 keV、重陽子密度  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  の重水素プラズマにおいて、15%以下の誤差で重陽子速度分布関数上のノックオンテイルの形状を特定できることを示した。

第六章は、本研究で示した結果を総括し、今後の展望を述べた。