

氏 名 Jyoti Shankar Mishra

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 1451 号

学位授与の日付 平成 23 年 9 月 30 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 A study of pellet-plasma interactions using fast
three-dimensional imaging in Large Helical Device

論文審査委員 主 査 教授 須藤 滋
准教授 坂本 隆一
教授 岡村 昇一
教授 小川 雄一 （東京大学）
教授 坂本 瑞樹 （筑波大学）

論文内容の要旨

This study is focused on to address the pellet fueling issues such as ablation and mass redistribution in the large helical device (LHD). It has been found that the ablation dynamics strongly regulated by the local fast ion density profile generated due to the neutral beam injection (NBI) heating. Owing to the asymmetric ablation in presence of the fast ions, three-dimensionality in the pellet trajectory, and subsequently change in the fueling characteristics has been observed. To explore the improved fueling properties by considering the ∇B structure of the injection location on the pellet ablatant, pellet injection studies are performed for the high field side, and the low field side injection locations. A comparative study of fueling efficiency is presented at different plasma conditions for these locations.

To deliver an intact pellet within the curved guiding path for an injection location other than outboard side, a low speed pellet injector is developed. This injector works on the combined operation of a mechanical punch and He propellant gas. This injector can inject a $3 \text{ mm}\phi \times 3 \text{ mm}l$ intact pellet with speed $\leq 275 \text{ ms}^{-1}$ at a pellet formation temperature of 8.0 K, flexibly. The loss in pellet speed and mass inside the guide tube are less than 6% and 10%, respectively.

Since, pellets are injected into the plasmas of 3D magnetic configuration; a three-dimensional pellet-plasma interaction can be predicted. Therefore, applying the stereoscopic technique, a 3D diagnostics system has been calibrated to image the pellet ablation process inside the plasma. This imaging system uses a fast camera (time resolution of μs scale) and bifurcated coherent imaging fiber. The calibration error of this system is $< \pm 20 \text{ mm}$ in the pellet penetration direction and within $\pm 5 \text{ mm}$ in the transverse direction, and is able to measure the ablation dynamics with good accuracy.

In presence of asymmetric tangential NBI heated plasmas in LHD, an ablating pellet deflects in toroidal and vertical direction rather than continuing its 1D motion along its injection direction. Whereas, a both sided NBI has less significant effect on the pellet deflection. The toroidal deflection is $\leq 20 \text{ cm}$ with acceleration of the order of 10^6 ms^{-2} . The toroidal deflection is successfully explained due to the unilateral ablation by the fast ions on the pellet surface and the formation of the rocket force in passing fast ions direction. At higher n_e , reduction in deflection speed indicates the reduction of fast ion effect. In addition, the role of rotational transform on the pellet ablation dynamics during its lifetime is explained. The three dimensionality of the ablation behavior by associating with the change in pellet speed affects the pellet penetration inside the plasma, and breaks the general assumption of the penetration depth, considering the constant pellet speed.

In case of the LFS injected pellet, similar to that of the tokamak results, an outward redistribution of the pellet mass has been observed in LHD. In tokomaks, owing to the ∇B induced redistribution of the pellet ablatant, a better fueling efficiency has been reported for HFS pellet injection. As the ideal HFS resides under the helical coil in LHD, it is difficult to access this location. Therefore, in an alternative approach, injection of a pellet from the vessel inboard side with an oblique angle to a location closed to the helical coil has been considered. The injection position is optimized by performing a simple calculation for $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift effect on the plasmoid for that location. In alternative injection case, due to the fast ion effect, the pellet deflects three dimensionally to a location having similar characteristic as that of the LFS injection. Therefore, final mass deposition profile seems to be similar as that of the LFS injection case. The difference in pellet penetration and the deposition peak is around 15 - 20 cm. This indicates the outward redistribution of pellet mass. This behavior is also confirmed by analyzing the pellet ablation images, where outward mass drift at a speed of $8\text{-}10 \text{ kms}^{-1}$ or more has been recorded. Considering the $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift effect for the alternative injection, it has been found that there are certain possibilities for enhanced deposition, if the pellet can be able

to approach the calculated HFS location.

This work leads to the conclusion that the fast ions play a significant role in the pellet ablation process. While discussing the fueling process in the fusion reactor, the effect of the energetic ions on the pellet penetration process should be taken into account. Considering the similarity in redistribution phenomenon of the pellet ablatant in LHD and tokomak for LFS injection, it can be said that, the HFS fueling is necessary for reactor grade plasmas.

博士論文の審査結果の要旨

本研究は、高温プラズマへの直接粒子供給法として、核融合炉プラズマへの適用が有望視されている「固体水素ペレット入射」による粒子供給のプロセスを解明することを目的とした実験研究である。高速カメラと2分岐イメージングファイバを組み合わせ、2方向からの2次元画像を撮影する手法により、大型ヘリカル装置（LHD）のプラズマに入射した固体水素ペレットの溶発時の振舞いを10-20 μs の露光時間で20-50 kHzの画像更新速度を有する高速の3次元イメージング観測を行った。プラズマ中でのペレットの溶発雲を高時間分解能で3次元イメージングにより観測するのは世界でも初めてであり、固体水素ペレットのプラズマ中での挙動を詳細に観測した。本研究によって、(1)中性粒子入射加熱(NBI)に起因する非対称なペレット溶発に伴って、ペレット軌道が曲げられること、(2)ペレットが溶発して形成されるプラズモイドは磁場の局所的な構造を反映して低磁場側に非拡散的に輸送されること、を明らかにし、ペレット粒子供給の最適化のために考慮すべき条件を示した。また、(3)これらの実験を遂行する為に、30cmの曲率半径を持つガイドチューブでもペレットが遠心力により壊れないための低速のペレット入射装置の開発及び実機製作・設置も行った。

LHDにおける従来のペレット入射実験において、観測されるペレットのプラズマ内の侵入長は理論モデルから予測される侵入長よりも短く、さらに粒子のデポジション分布はペレット侵入長観測から期待される粒子供給分布よりも浅くなることが観測されている。本研究では、プラズマ中におけるペレット軌道がNBIの加熱条件およびプラズマの条件によって大きく曲げられる場合があることを明らかにし、高速イオンのフラックスによる溶発率の増加と合わせ、観測されるペレット侵入長と偏向を考慮しない理論モデルにより計算した侵入長とに差が生じることを説明した。このペレット軌道の偏向現象は、LHDへ接線入射されるNBIの入射方向によって、プラズマ中の高エネルギー粒子の分布がトロイダル方向について非対称になることに起因している。このような条件下では、ペレット表面へ流入する熱流束が非対称となり、高エネルギー粒子により多く曝される側のペレット溶発率が増加するため、ペレットから放出されるガスの反作用（ロケット効果）によって、ペレット軌道を偏向させる推力が発生することを定量的に結論付けた。この結果は、ペレット溶発に及ぼす高エネルギー粒子の影響が大きいことを示しており、ITERや将来の核融合炉における粒子供給特性を考える上で、加熱に伴い生成される高エネルギー粒子や核融合生成 α 粒子がペレット溶発に及ぼす影響を考慮する必要があることを示した。

トカマク型装置における研究で、ペレット溶発プラズモイドのトーラス外側への非拡散的輸送現象が知られており、これは磁場強度勾配 (∇B) ドリフトに誘起されるものと考えられている。この現象は実効的な粒子供給効率に大きな影響を及ぼすため、そのメカニズムを解明することは重要な課題である。しかしながら、3次元磁場構造を持つヘリカル装置では ∇B 分布が複雑であり、非拡散的輸送については、ほとんど明らかにされていない。本研究では、3次元イメージング計測システムを用いて、トーラスの外側及び内側から入射したペレットの溶発過程を観測し、溶発プラズモイドの非拡散的輸送の実験的検証を行った。その結果、ペレット入射位置によらず、ペレットが溶発して形成される高密度プラズモイドは、ペレットから断続的に噴出して8-12 km/sの速度で低磁場側に非拡散的に輸送されることを観測し、粒子供給分布がペレット侵入長から期待されるものよりも、低磁場側に15-20 cmシフトする現象を説明できることを示した。この結果は、プラズモイドの非拡散的輸送が、ペレット溶発位置における局所的な磁場強度勾配に依存することを示している。

本博士課程研究における成果は、磁場閉じ込め核融合炉における粒子供給シナリオの最適化を進める上で、ペレット軌道の偏向や非拡散的輸送という重要なプロセスを実験的に明らかにしており、今後の粒子供給最適化研究に大いに貢献することが期待される。よって、本審査委員会は本論文が博士学位論文として十分価値があると判定した。

2011年7月26日に開かれた審査委員会では、書類上の資格審査も行い、問題がないことを確認した。その後、出願者による当該研究論文内容の説明を受けながら、適宜質疑応答をする形式にて、2時間にわたり口述試験を実施した。出願者は、高速カメラによる3次元イメージング計測システムを構築して、高温プラズマ中におけるペレット溶発過程を時間的、空間的に高分解能で観測し、その観測データの解析を行うことにより、高温プラズマへの粒子供給特性を最適化するためには、高速イオンによる溶発や磁場構造の影響を考慮する必要があることを的確に示した。また、これらの実験研究を遂行する為に必要となる低速ペレット入射装置の開発及び実機製作も出願者自身が行っており、一連の研究活動を遂行するために必要な能力と意欲を十分に兼ね備えていることを確認した。本研究の結果は、磁場閉じ込め核融合炉における粒子供給シナリオ策定に大いに貢献することが期待される。

博士論文の研究成果は、査読付き英文学術誌に主著論文として、3編が掲載されている。また、国際会議において一連の研究成果の発表を行っており、国内の会議では2010年に優秀ポスター発表賞を受けている。審査会における英語での発表や、提出された英文の博士論文からも、出願者が十分な語学力を持っていることが認められた。

2011年8月30日に行われた公開発表会においても、博士論文の内容を要領良くまとめて説明し、会場からの質問にも的確に答えていた。

以上の結果により、本審査委員会は出願者が試験に合格であると判断した。