

氏 名 Kalinina,Diana

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 894 号

学位授与の日付 平成 17 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 Studies of Impurity Behavior in NBI and ECR Heated
LHD Plasmas by means of Tracer Encapsulated Solid
Pellet Injection

論文審査委員 主 査 教授 松岡 啓介
教授 須藤 滋
助教授 加藤 隆子
助教授 居田 克巳
教授 近藤 克己（京都大学）

論文内容の要旨

Studies of impurity behavior in high-temperature plasmas are highly important since it determines the feasibility of controlled fusion. Since the fusion research has come to the phase when the burning experiments are being performed extensively, the understanding of the impurity transport properties in the magnetically confined plasma is one of the urgent issues. The major emphasis of this thesis is to explore impurity transport properties depending on plasma parameters, such as electron density, radial electric field, and magnetic configuration of Large Helical Device (LHD). A soft x-ray pulse height analyzer (PHA), a VUV spectrometer (SOXMOS) and a charge-exchange recombination (CXR) diagnostic have been used to observe a temporal behavior of the tracer impurity, injected locally into the plasma by means of a Tracer Encapsulated Solid Pellet (TESPEL). Simulation of the temporal evolution of the soft x-ray and vuv emissions has been performed using the 1-D impurity transport code MIST in the time dependent mode. The long continuing contamination of high-Z impurities at high density has been recently revealed on LHD. From the results of the TESPEL experiments with a titanium (Ti) tracer, it has been found that the decay time of the Ti K_α emissions temporal evolution has a nonlinear ($n_e^{1.7}$) dependence on the electron density in the LHD plasmas heated by neutral beam injection (NBI). The correlation between low impurity confinement in the low electron density regimes and positive radial electric field was observed. Thus, the transport model with the convection velocity driven by the radial electric field was utilized in the simulation. The simulation by MIST indicates that the increasing of the impurity confinement at the high electron densities can be caused by the increase in the inward convection due to the large negative radial electric field. The properties of the impurity transport with different magnetic axis positions ($R_{ax} = 3.5$ m, 3.6 m, 3.75 m) of LHD plasmas were also studied. In the inward shifted configuration with $R_{ax} = 3.5$ m, the low confinement of tracer impurity is clearly observed in the wide density region ($n_e = 1 - 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$). The effect of ECRH (1.1 MW injected power and 0.5 s pulse duration) on the titanium impurity confinement in the wide electron density range was studied in several magnetic configurations. ECR heating causes the faster decay time of the impurity ions emissions at the moderate electron density ($n_e = 2 - 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$). This is the first demonstration of the ECR heating effect on impurity transport in the heliotron plasma. A small outward convection velocity is necessary to describe the change of the impurity behavior due to the ECR heating. The TESPEL method has a possibility of measuring directly the local impurity transport by observing light emissions due to charge exchange recombination of fully ionized tracer with neutral hydrogen atoms originated from NBI. However, under the LHD plasma conditions with high energy neutral beam (150–180 keV), the charge exchange cross section becomes very small. This fact shows the difficulty in the TESPEL CXRS measurements in the visible spectral range. The application of the TESPEL CXRS method on LHD in the VUV and Extreme Ultraviolet (EUV) spectral range would allow us to increase the radiation cross section and thus the CXR signal. From the analysis of the optimal tracer materials in the EUV spectral range, the emission in EUV region is more than one order of magnitude larger than that in the visible range under the same plasma conditions. In order to measure the EUV emission

from the TESPEL tracer, a novel one-channel prototype multilayer mirror (MLM) based monochromator has been developed in collaboration with Johns Hopkins University (JHU) Plasma Spectroscopy Group. In the test experiments with the monochromator, a magnesium (Mg) tracer was used. A clear magnesium contribution after the TESPEL injection was observed. The signal with the Mg tracer shows exponential decay, which may suggest no accumulation of the Mg impurity in the core plasma. Thus the capability of the new monochromator for the TESPEL CXRS diagnostic has been proved experimentally. However, the simulation indicates that the signal obtained from the Mg tracer has other contributions, such as the electron impact excitation. In order to reduce this contribution, a lower Z material like fluorine is preferable, which becomes fully ionized faster. An improved MLM based monochromator has been constructed by our group for the fluorine tracer experiments and calibrated with EUV emissions from a synchrotron light source. The impurity transport properties in a wider range of plasma parameters have been studied with the titanium tracer injected by TESPEL. The comparison between the experimental observations and the simulations MIST indicates that the impurity transport properties are highly correlated with the radial electric field. In addition, the availability of the ECR heating for impurity transport control in heliotron devices is shown. The novel MLM based monochromator for the local impurity transport studies with TESPEL is developed and tested on LHD. From the results of test experiments the capability of TESPEL CXRS diagnostic in the EUV spectral range in the LHD plasmas is shown.

ダイアナ・カリーニナ君の学位論文の内容は、大型ヘリカル装置（LHD）における不純物輸送の実験による解明に関するものである。LHD プラズマ中における不純物輸送を明らかにするために、トレーサーとしての不純物を内蔵した TESPEL と称する 2 層ペレット（外皮はポリスチレン）を LHD プラズマ中に入射した。TESPEL は、トレーサーの不純物が中性粒子入射加熱（NBI）及び電子サイクロトロン共鳴加熱（ECH）によって加熱されたプラズマのコア部で溶発するため、不純物からの発光を分光学的に測定することによって、不純物の振舞いを時間的、空間的に調べることが出来る利点を持っている。実験的に測定された不純物の振舞いを、1次元不純物輸送コード MIST による計算結果と比較し、拡散係数、対流速度の評価を行った。超軟 X 線領域の分光器の開発も行った。

不純物としてチタンを用い、溶発したチタンからの軟 X 線領域（主に $Ti K\alpha$ ）の発光強度の時間的な減衰を調べた。同君は、電子密度依存性を従来よりも広範囲に調べた他、磁場配位依存性、ECH 印加による効果については、初めて実験を行った。電子密度依存性については、磁気軸位置 3.6m の磁場配位において詳しく調べた。密度が高くなるにつれて発光強度の減衰時間が長くなり、不純物の閉じ込め時間 τ_{imp} が長くなる。密度を $0.5 \times 10^{19} m^{-3}$ から $5.0 \times 10^{19} m^{-3}$ と広範囲に変化させることにより、 τ_{imp} の密度依存性は密度の 1.7 乗に比例することが実験的に導かれた。

LHD の磁気面は、ダイポール磁場を変化させることによって、その磁気軸を主半径方向に移動させることが出来る。代表的には、磁気軸位置 3.5m, 3.6m を内側シフト、3.75m, 3.9m を外側シフト配位と称している。内側シフトは、外側シフトに比べて粒子軌道は良好であり、高い閉じ込め性能を与える。磁気軸のシフトを通して、閉じ込め性能と不純物輸送との関係を調べた。電子密度が $1.0 \times 10^{19} m^{-3}$ から $4.0 \times 10^{19} m^{-3}$ の範囲で、全ての磁場配位において、 τ_{imp} は密度が高い場合に長くなる結果が得られたが、磁気軸位置 3.5m の場合は、 τ_{imp} が他の配位に比べて約 50% 短いという結果が得られた。プラズマの閉じ込め性能との関連から興味ある結果であるため、同君はその理由をいくつか検討した。ペレットの溶発位置におけるヘリカルリップルの分布形状と大きさ、電場の符号と大きさ、磁気島の可能性、について詳しく考察したが、理由を同定するには至らず、プラズマパラメータの更なる測定が必要であり、今後の検討課題としている。

不純物の蓄積は、核融合反応率を低下させると共に輻射損失を増大させるため、除去方法を開発する必要がある。ECH の印加によって電子温度が上昇し、いわゆる電子ルートと呼ばれる状態になる。そこでは、プラズマからの電子の損失がイオンの損失を上回りプラズマのポテンシャルは正になる。即ち、プラズマ中に正の電場が形成され不純物イオンの掃き出し効果が期待される。NBI プラズマにおいて電子密度が低く電子温度が高い場合に τ_{imp} が短くなる実験結果は、低密度・高電子温度になるにつれて電場が正の方向に向かうことと関連するため、不純物の除去のために、プラズマを電子ルートに移行させる ECH を積極的に印加する実験を行った。周波数は 168GHz（第 2 高調波）と 84GHz（基本波）であり、パワーは合計で約 1MW である。実験を行った磁気軸位置 3.6m の場合に電子密度が $1.5 \times 10^{19} m^{-3}$ から $3.0 \times 10^{19} m^{-3}$ の範囲で、 τ_{imp} が約 50% に減少し、ECH による不純物制御が LHD プラズマにおいて初めて検証された。電場を測定した結果、電場が正の方向に移行し、不

純物輸送と電場の関係が実験的に明らかにされた。

1次元不純物輸送 MIST コードを用いて実験結果を再現する拡散係数、対流速の大きさ・方向を評価した。特に、電場の符号・大きさを対流速に関連づけた点は LHD における不純物輸送解析では初めてである。電子密度の高い場合に τ_{imp} が長いことは、小さい拡散係数、負電場による大きい内向きの対流速による。電子密度が低い場合に τ_{imp} が短いことは、大きい拡散係数、小さい内向き（小さい負電場）或いは外向き（正電場）の対流速による。拡散係数と対流速の代表的な大きさは、各々、 $0.1\text{m}^2/\text{s}$ - $0.4\text{m}^2/\text{s}$, $0\text{m}/\text{s}$ - $0.4\text{m}/\text{s}$ である。

不純物輸送係数のより局所的な値を得るために、NBI による高速中性水素と不純物イオンとの荷電交換反応からの発光の時間・空間依存性を測定するための計測器を開発した。LHD では NBI のビームエネルギーが $150\text{-}180\text{kV}$ と高く、可視領域では反応断面積が小さく十分な発光強度が得られないため、反応断面積の大きい超軟 X 線領域を測定するための測定器(多層膜反射鏡を用いた分光器)をジョンホプキンス大学との国際協力により開発し、較正の後初期実験を行った。最初、トレーサーとしてマグネシウムを用い、発光強度の減衰を観測したが、荷電交換以外に衝突励起のプロセスも考えられるため、最終的にはより速く完全電離になる原子番号の小さいフッ素をトレーサーとして採用した。同時に、ブラッグ角の微調整機能と半径方向測定点からの測定角の調整機能を付け加えるなど、改良を加え、測定器として完成させた。次回の LHD 実験期間における成果が期待される。以上により、ダイアナ・カリーニナ君の研究は、不純物輸送に関して新しい知見を与えており、博士論文として十分な内容を持つと判断される。