

氏 名 GONTCHAROV, PAVEL ROMANOVICH

学位（専攻分野） 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第675号

学位授与の日付 平成15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 Experimental Study of Helical Plasma Ion Component
with Passive and Active Neutral Particle
Diagnostic Techniques

論文審査委員 主査 教授 松岡 啓介
教授 須藤 滋
助教授 中島 徳嘉
教授 笹尾 眞実子（東北大学）
助教授 尾崎 哲（核融合科学研究所）
主任研究員 草間 義紀（日本原子力研究所）

論文内容の要旨

The subject of the experimental work presented in this thesis is the application of passive and active corpuscular diagnostic methods to studying the ion component properties of a toroidally non-axis-symmetrical magnetically confined thermonuclear plasma. The diagnostics are based on measurements of spectra of the escaping neutral atoms. The experiments have been made on the Large Helical Device hereinafter abbreviated as LHD. The complexity of the three-dimensional magnetic field geometry of helical systems necessitates the application of appropriate spatially resolved measurement techniques. A significant part of this study has been dedicated to the diagnostic development.

The behaviour of energetic ions is a key issue for a fusion reactor. The single-particle confinement properties of stellarator/heliotron devices are known to be more complex in comparison with tokamaks due to the difference in the magnetic configuration resulting in more complicated drift motions. For tokamaks numerous experimental studies have been made on a wide variety of devices and generally the fast ion behaviour is found to be consistent with the classical slowing down theory. However, for helical devices the fast ion component properties have not been characterized experimentally as well. Thus, the present work is dedicated to contribute to the understanding of fast particle physics in helical systems with the new diagnostics on LHD.

The introductory chapter I of the thesis explains the motivation and scope of measurements. A brief review of the existing methods of diagnosing the quasistationary plasma ion component is given, followed by an outline description of the two diagnostics that have been installed on LHD in the course of the present doctoral study. Physical basis of measurements and approaches to data interpretation for these passive and active diagnostics are summarized in chapters II and V, paragraphs II. 1 and V. 1 respectively. The principles of operation and the development of the diagnostic devices are discussed in detail in paragraphs II.2 and V.2. Chapters II and V also explain the experimental setup, geometry of measurements and technical realization of the two diagnostics.

Both systems are based on neutral particle energy spectrometers employing solid state detectors. This concept has allowed to build a compact passive diagnostic for simultaneous multi-directional measurements of the flux of energetic (above 10 keV) neutral atoms with a possibility of a two-dimensional scan of the plasma column. Time and space resolved measurements of anisotropic distributions of energetic ions created by NBI and minority ICH driven ions are possible with this analyzer as well as measurements of ion temperatures.

The second system is an active diagnostic which uses an impurity pellet cloud as an artificially created localized target for the charge exchange process. Thus, in this

diagnostic a neutral particle energy spectrometer works in a combination with an impurity pellet injector. High-energy particles neutralized at the pellet ablation cloud are detected while the pellet travels across the plasma column. Time-resolved atomic energy spectra translate into local measurements along the pellet trajectory. In such a way the radial scan of the plasma column is performed and local parameters are obtained in the toroidally non-axis-symmetrical LHD configuration.

These new diagnostics have been used to investigate the behaviour of anisotropic distributions of suprathermal energetic particles in LHD plasma. Temporally and spatially resolved measurements have been made for a variety of experimental conditions with pure and combined heating mechanisms for different magnetic configurations with the magnetic axis shifted in and out in major radius. The experimental results obtained with the passive diagnostic, their analysis and physical interpretation are presented in chapter III.

The investigation of the slowing down and pitch angle scattering of energetic ions has been made by comparing the experimental data with calculated theoretical spectra obtained by an analytical solution of Fokker-Planck equation. Tangential observations of the time evolution of the energetic distribution tails from NBI heated plasma demonstrate the spectra approaching the classical shape during the time interval comparable to the slowing down time. A more profound analytical solution, compared to the experimental results obtained for different directions, adequately describes both the slowing down and the pitch-angle scattering. The effect of the plasma ion composition on fast ion distributions has been observed and also found to be adequately described from the classical viewpoint. The shapes of the calculated spectra below and above the injection energy and their behaviour due to the additional ICRF heating are in a reasonable agreement with measurements.

The other effects that have been observed experimentally cannot be described in terms of the classical kinetic approach. Comparisons of the NBI-created fast ion distributions measured in different magnetic configurations clearly show the effect of improved fast ion confinement in case of the inward shifted magnetic axis. This experimental verification of the optimization effect of the magnetic configuration is very important for the prospect of a helical-system-based reactor design. The influence of the radial electric field on the energetic particle confinement has also been studied. The experimental results demonstrate the effect of the helical resonance which may lead to losses of deeply trapped particles and thus the deterioration of confinement. This effect is more pronounced when a large negative electric field exists.

Chapters IV and V of the thesis are dedicated to the important issue of the localization of measurements. In chapter IV a mathematical approach is suggested

that can provide locality of passive measurements of charge-exchange neutrals. A numerical method has been formulated to restore the radial distributions from line-integrated passive measurements. The problem has been reduced to a generalized Abel inversion and the numerical solution of the integral equation by standard techniques for incorrectly posed problems. However, such an approach is reliable and valid, but very complex for a practical diagnostic application. Therefore, in chapter V the physical approach based on the active diagnostic is studied that provides the essential locality of measurements. Chapter V also includes preliminary results obtained with the active diagnostic. These preliminary results show a possibility to make local measurements of LHD plasma ion parameters by a compact solid state detector-based pellet charge exchange analyzer.

Bibliography includes the list of cited or used works for every chapter. The references are explicitly given in the text where it is possible. Gaussian system of units is used throughout the thesis unless it is stated otherwise.

論文の審査結果の要旨

本研究は、プラズマ中の高速イオンと中性粒子との間の電荷交換の結果生じる高速中性粒子を受動的及び能動的に計測することにより、LHD プラズマの高速イオンの振る舞いを調べたものである。高速イオンは、中性粒子入射加熱 (NBI) により入射されプラズマ中でイオン化された後減速過程にあるプロトン、及びイオンサイクロトロン共鳴周波数帯加熱 (ICRF) により加速されたプロトンである。受動的な方法として用いられた多チャンネル・シリコン検出器 (SDNPA : silicon detector-based neutral particle analyzer) は従来の測定法である FNA (fast neutral particle analyzer) に比べ、検出器そのものがコンパクトであるため多チャンネル化が容易に行えることに特長がある。また、波高分析を行うことによって高いエネルギー分解能が得られることも大きな特長である。更に、検出器及び前段増幅器入力段を液体窒素により冷却することで、エネルギー分解能の向上に工夫が加えられた。検出器は、水平方向に6チャンネルの視線を持つよう、即ち、磁力線とのピッチ角をスキャンできるように配置されている。また、検出器全体が上下方向にもスキャンできる構造になっている。シリコン検出器は通常 X 線に感度があるが、今回の測定領域では無視できることが確認された。これらの特長、即ち、空間多チャンネルの同時計測及び高いエネルギー分解能、を生かして以下のような成果が得られた。実験結果 (測定された各チャンネルのスペクトル及びその時間変化) は、Fokker-Planck 方程式から導かれる理論的予測によってほぼ説明でき、高速イオンの振る舞いについての重要な知見 (ピッチ角散乱、摩擦による減速、エネルギー拡散、磁場配位の効果、など) を与えている。

1) プラズマのガス種 (水素、ヘリウム、ヘリウム/アルゴン) を変えることにより、プラズマの実効電荷数を変化させた結果、実効電荷数が大きいほど、ピッチ角散乱に対する効果が大きいことが確認された。

2) NBI 入射粒子のエネルギースペクトルの時間変化について詳細な測定が行われ、高速粒子に対する古典的取り扱いが適用できることが示された。

3) NBI 入射ビームのエネルギーよりも高いエネルギーの粒子が速度拡散によって生成されることが実験と理論から示された。

4) 接線入射 NBI と ICRF 加熱による高速粒子のエネルギースペクトルのピッチ角依存性の測定結果は、加熱機構の違いをよく説明することが分かった。

5) 電子密度が上昇し、径電場が負に転じると、高エネルギー粒子のエネルギースペクトルに凹みが観測される。これは、ヘリカルリップルによるポロイダル回転が、負電場の $E \times B$ ドリフト (ポロイダル方向) により打ち消されたためである (ヘルカル共鳴による高速粒子損失) と考えられる。ヘリカル共鳴に関して、従来にない詳細な情報が得られた。

6) 磁気軸の内側シフトにより高速粒子の閉じ込めが改善されることが計算で示されていたが、粒子束の増加及びエネルギースペクトルの相違により実験的に実証された。

また、能動的な方法としての PCX (pellet charge exchange) では、不純物ペレット入射装置 TESPEL とダイヤモンド検出器が用いられた。PCX は、TESPEL によりプラズマ中の任意の位置に電荷交換の標的を生成できることを特長としている。予備的な実験が行われ、局所計測の可能性が示された。これと平行して、線平均された受動的測定結果が

ら局所的なスペクトルを再構築する数学的手法が提示された。PCX からの結果との比較は今後の課題である。

本論文は、従来多チャンネル化及び高エネルギー分解能が困難であった高速粒子計測において、シリコン検出器を用いることによって、LHD の高速粒子に関する情報を実験的に詳細に得ることに成功した。この手法は、ヘリカル型磁場閉じ込め装置で重要な高速粒子に関する研究分野に新たな展望を開くものである。以上により、本論文は学位論文としてふさわしい学術内容を持っていると認められる。