

氏 名 Yakovlev, Mykhaylo

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 897 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 Transient Electron Heat Transport in LHD

論文審査委員 主 査 助教授 川端 一男
教授 小森 彰夫
教授 居田 克巳
教授 間瀬 淳（九州大学）
教授 Milos M. Skoric（核融合科学
研究所）

論文内容の要旨

A decrease in global energy confinement with increase in the heating power is observed in the Large Helical Device (LHD) even in the inward shifted ($R_{ax} = 3.5\text{m}$) magnetic configuration where the heat transport predicted by the neoclassical theory is small. Moreover, the flattening of temperature profile inside the low order rational surface and saturation of core T_e are observed with respect to increase of the heating power. These observations suggest that the turbulence and rational surfaces play an important role on heat transport in the LHD. The turbulence is usually driven by plasma free energy and thus it restricts the gradients of the local thermodynamic variables in a plasma. When the turbulence-driven-transport is dominant, the heat flux is not proportional to electron temperature gradient ∇T_e but is a non-linear function of electron temperature T_e and ∇T_e . The effect of magnetic configuration on transport is also important because it influences the turbulence in many aspects. In addition, the magnetic field structure (e.g. magnetic island) directly affects the overall plasma confinement. In this thesis, the non-linearity in the heat transport and effect of the rational surfaces are studied by using the transient transport analysis in the LHD.

The perturbative analysis is recognized as a powerful tool to study an effect of turbulence on transport and its unique feature makes possible to study the transport in the almost flat electron temperature region, where the usual analysis based on the calculated power deposition and measured gradients is not applicable. To study the transport features of the confined plasmas, the heat pulse propagation experiments are performed by on-axis electron cyclotron heating (ECH) power modulation on the LHD plasmas with neutral beam injection (NBI). The heat pulse propagation can not be explained by transport features obtained from the steady state analysis. Requirement of larger (3-5 times) heat diffusivity to reproduce the heat pulse propagation in Co- and balanced NBI plasmas indicates the non-linearity of the heat transport. The analysis method for the heat pulse propagation based on the non-linear dependence of heat diffusivity χ_e on T_e and ∇T_e is established. One of the first principle turbulence transport model, the critical temperature gradient scale length model, is tested for quantitative understanding of non-linearity of heat transport in the LHD. The critical temperature gradient scale length model with optimized parameters, which is obtained from the heat pulse propagation, can also explain the results of the cold pulse propagation experiment.

The effect of the rational surface on the heat transport is found to be more important in the counter dominant NBI heated plasmas. A unique feature of heat pulse propagation is observed near the $m/n = 2/1$ rational surface (m, n are the poloidal and toroidal mode numbers, respectively). A simultaneous response of the temperature perturbation on radially separated flux surfaces is observed. This non-

monotonic heat pulse propagation can not be explained even if the heat transport is strongly non-linear. The change in the magnetic field topology due to enlargement of a magnetic island structure is used to explain this non-monotonic heat pulse propagation phenomenon. The estimated O-point position of the island is located near the $m/n = 2/1$ rational surface. The $m/n = 2/1$ island healing with decrease in electron collisionality is also observed as was predicted by theories. The magnetic island enlargement is considered to be related to a direction and profile of plasma current mainly driven by NBI. The simple equation of heat pulse propagation in slab geometry with time-dependent boundary conditions is used to evaluate the heat diffusivity inside the magnetic island. The estimated electron heat diffusivity inside an $m/n = 2/1$ magnetic island has same order as χ_e obtained from the power balance analysis in the Co- NBI plasmas.

The core T_e flattening region in the presence of the $m/n = 2/1$ island is found to be a stiff structure. No increase in ∇T_e is observed with respect to the change in the power of on-axis ECH. High power ECH above a critical value injection can break this stiff structure, and steep T_e profile is formed just inside the rational surface. The role of the $m/n = 2/1$ rational surface and presence of an island in the formation of internal transport barrier (ITB) is discussed in Ctr- NBI plasmas, where the enlargement of the $m/n = 2/1$ island is indicated.

論文の審査結果の要旨

本博士論文は、外部摂動に対するプラズマの過渡的な応答を利用した、電子熱輸送特性とプラズマを閉じ込める磁場配位の変化に関する実験的研究をまとめたものである。

大型ヘリカル装置（LHD）では、これまでの実験で、プラズマの熱輸送特性が衝突輸送の理論的予測と異なっていることが明らかになっており、その物理機構の解明は核融合炉実現にとって重要な研究課題の一つとなっている。LHDプラズマの熱輸送機構を解明するため、ヤコブレフ氏は、電子サイクロトロン周波数のマイクロ波を用いて加熱の変調実験を行い、熱的なパルスプラズマ中に誘起させることに成功している。この熱パルスの空間的な伝播を調べ、LHDプラズマの熱輸送特性が中性粒子ビームの入射方向に依存することを示し、各々の中性粒子ビーム入射方向に関して、熱輸送に重大な影響を及ぼす物理機構が存在することを明らかにした。

先ず、ヤコブレフ氏は、中性粒子ビームによって駆動される電流が、回転変換を増加させる場合について、プラズマの電子熱伝導係数を調べている。同氏は、定常状態の電子温度、電子密度分布を用いて導出した電子熱伝導係数を使って1次元電子熱輸送方程式の時間発展を解いた場合、熱パルスの伝播特性を説明できないことを示した。この謎を解くため、電子熱伝導係数が電子温度及び電子温度勾配の関数となるいくつかのモデルを導入し、実験結果との比較を行っている。その結果、プラズマの熱輸送は主に短波長の揺動による熱損失によるものであり、揺動は温度勾配がある閾値を超えた時に駆動されるというモデルによって、熱パルスの伝播特性が定量的に説明できることを明らかにした。さらに、熱束と温度勾配が単純な比例関係ではなく、非線形の関係にあることを見いだしている。これは、LHDプラズマの熱輸送を理解する上で重要な知見といえる。

次に、ヤコブレフ氏は、中性粒子ビームによって駆動される電流が、回転変換を減少させる場合について研究を行っている。この場合、磁気軸を内側に寄せると、プラズマ中心部の非常に広い領域で、電子温度分布が平坦化することが明らかになっている。同氏は、このようなプラズマで加熱の変調実験を行い、径方向に離れた異なる磁気面上の電子温度が同時に変化するという現象を初めて観測した。温度摂動は磁力線に沿って非常に速く伝播するため、電子温度応答の同時性から磁力線構造が分かることを利用し、熱パルスの伝播特性から磁力線構造を再構築した。その結果、同氏は、電子温度が平坦化している領域では、回転変換が $1/2$ の有理面を中心に大きな磁気島が形成されていることを見いだした。磁気島の同定は、他の計測手法では困難であり、本実験結果は非常に独創的な研究成果といえる。また、同氏は、回転変換を増加させるように中性粒子ビームを入射させた場合には、中心部の回転変換が $1/2$ を超えるため、磁気島は生成されないことを検証している。

さらに、ヤコブレフ氏は、中心部に閾値以上の電子サイクロトロン周波数のマイクロ波を入射させると、中心部の平坦な電子温度構造が消失し、急峻な温度勾配が形成されることを明らかにしている。同氏は、この場合、磁気島が縮小し、熱輸送の改善が起こっていることを確認した。このことは、LHDプラズマの閉じ込め改善を目指す上で、磁気島が熱輸送の劣化・改善に重要な役割を果たすことを示している。

以上のように、本論文で、電子サイクロトロン周波数のマイクロ波を用いた加熱の変調に基づく熱パルス伝播特性の詳細な解析により、LHDプラズマの電子熱輸送に関する新

しい知見と物理モデルが示された。

よって、本審査委員会はこれらの学術的成果に対して、またこれらの学術的成果が当該分野の発展に大きく寄与したと判断し、本論文が博士学位論文として十分な資格があると認めた。