

氏 名 南 貴 司

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大乙第124号

学位授与の日付 平成15年9月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 Study of Neoclassical Internal Transport Barrier
with YAG Thomson Scattering measurement on Compact
Helical System

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 松岡 啓介
教授 岡本 正雄
教授 須藤 滋
助教授 洲鎌 英雄
教授 関子 秀樹 (九州大学)
主任研究 藤田 隆明 (日本原子力研究所)
員

論文内容の要旨

コンパクトヘリカルシステム (CHS) において電子温度の空間分布を詳細に測定するために、空間 24ch.同時計測可能な YAG レーザートムソン散乱計測装置を開発し、それを用いた電子温度分布の測定結果に基づき、新古典内部輸送障壁(N-ITB)をもつプラズマの熱輸送機構を解明する研究を行った。

この内部輸送障壁は、従来観測されて来たトカマク型装置の内部輸送障壁と同様に、プラズマの閉じ込めに重要な役割を果たしている。ヘリカル型装置の内部輸送障壁は新古典拡散による非両極性拡散で決定される電場によるリップル輸送の改善と同時に形成される電場のシアによって異常輸送が抑制されることの二つの改善の効果が存在するところに特徴があるので、トカマク型装置とことなり新古典輸送が、その生成原因であるので新古典内部輸送障壁と名付けられた。

本トムソン散乱計測システムは、ヘリカル型システムのポートアクセシビリティの困難さを解決するために、後方散乱光を利用している。受光散乱光量を増加させるために大型ミラー (有効径 50cm) を用いて集光し、この散乱光を結合効率が優れた大口径 (2mm) 光ファイバーによって 24 台の 3ch.干渉ポリクロメーターに導き分光する。検出器は YAG の波長(1064nm)において量子化効率の優れたアバランシェフォトダイオードを使っている。本装置の空間分解能は 1-3cm である。高繰り返し発振可能な YAG レーザーを用いることによって 10 ms の短い時間間隔で、電子温度及び電子密度分布の時間発展を計測することが可能である。ショット後に、CAMAC データ収集システムで取り込み、エラーによって重みをつけられた多重データ参照テーブル法を使って電子温度密度を瞬時に導出し、プラズマの分布の様子をショット後ただちに確認することができる。

このツールを利用しヘリカル型装置では初めて観測された内部輸送障壁の研究を行った。磁場強度 $B_T=0.88T$ の条件で 53GHz のジャイロトロンを使い 200kW のパワーで第 2 高調波加熱により ECH プラズマを生成する実験を行い、中心密度が $4 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ になるようにガスパフを調節するとプラズマをと中心温度が 2.2keV に達する。この時、電子温度分布の $\rho = 0.3$ の付近に急峻な温度勾配(-0.6keV/cm)が形成さる。このプラズマに対して輸送解析を行った結果、温度勾配が形成されている位置での電子熱輸送拡散係数の値が新古典拡散レベル($\sim 5 \text{m}^2/\text{s}$)まで減少しており N-ITB が形成されていることがわかった。重イオンビームプローブ (HIBP) を用いた計測によると、この時プラズマの中心部に大きな電場($\sim 5 \text{kV}/\text{m}$)が形成され、また N-ITB の位置で電場のシア($\sim -100 \text{kV}/\text{m}^2$)が増大していることが分かった。したがって、この輸送改善の原因が電場および電場のシアによるものであると考えられる。また、HIBP で輸送障壁付近の電子密度揺動を観測すると約 40%減少していた。これは電場のシアが存在することにより、プラズマの異常輸送が抑制されていることを示している。N-ITB の生成条件は電子密度に依存している。入射 ECH パワーが 120kW の場合、中心電子密度が $(3-4) \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ に輸送障壁生成の閾値が存在し、密度が閾値を超えて減少すると中心電子温度が急激に増加し $2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ の密度では中心電子温度が約 4keV になる。この密度の閾値は閉じ込め磁場の大きさに依存し、 $B_T=1.76T$ の磁場において、53GHz の基本波加熱や、106GHz ジャイロトロンを使って加熱することにより $\sim 1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ の電子密度のプラズマにおいても N-ITB が形成される

ことを確かめた。

また、低密度 ($3-4 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$) の NBI プラズマを 130kW の ECH によって加熱した場合も中心の電子温度が $\sim 3 \text{keV}$ に達した。この時、ECH プラズマの場合と同じように電子の温度分布に急峻な勾配が形成され N-ITB が形成されているが、このプラズマに対して荷電交換分光及び中性粒子分析器の計測によってイオン温度を調べたところ、温度が $\sim 500 \text{eV}$ に達し、 $\rho = 0.6$ の位置でイオン温度分布に急峻な勾配 ($dT_i/dr \sim 15 \text{keV/m}$) が形成されていることがわかった。内部輸送障壁の生成条件は ECH プラズマの場合と同様に密度に依存し、僅かに密度が大きいプラズマ ($4-5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$) を ECH 加熱した場合は N-ITB が形成されない。この時、電子、イオン温度分布とも急峻な勾配が存在せず、中心電子温度が約 900eV でイオン温度も N-ITB 形成が形成されているプラズマと比較して半分に減少する。この N-ITB プラズマに輸送解析を行って、イオンの熱輸送係数が N-ITB の形成されている場所で大きく減少 ($\sim 1 \times 10 \text{m}^2/\text{s}$) していることを確かめた。HIBP 計測によって ECH の実験と同様にプラズマの中心部に大きな電場 ($\sim 10 \text{kV/m}$) と $\rho = 0.6$ の付近に電場のシアが形成されていることが確認された。輸送障壁が形成されている $\rho = 0.6$ の付近で $E \times B$ シアリングレイトの値が増大し ($3 \times 10^5 \text{1/s}$)、大きさはトカマクの内部輸送障壁形成時のシアリングレイトの大きさと同程度である。

Ti $K\alpha$ ラインの二次元分布を軟 X 線 CCD カメラのフォトンカウンティングモードで観測することによって N-ITB が形成されているプラズマの粒子輸送を調べた。N-ITB が形成されることによって Ti $K\alpha$ ラインの平均エネルギーは 4.68keV から 4.73keV にシフトする。このラインのシフトは電子温度によって決定される不純物のイオン化レベルと不純物拡散に依存しているので MIST および LINES code を使って N-ITB 形成時の不純物粒子拡散係数を導出することができる。結果は、N-ITB が形成されていない場合拡散係数が $0.1-0.2 \text{m}^2/\text{s}$ であるのに対して NITB が形成されると $0.02 \text{m}^2/\text{s}$ に減少していることが分かった。

このように、ヘリカル型装置における N-TB においてもトカマク型装置の内部輸送障壁と同様に、電子及びイオンのエネルギー及び粒子の閉じ込めが改善されていることが確かめられた。

論文の審査結果の要旨

本論文は、空間多チャンネルの YAG トムソン散乱計測装置を開発し、核融合科学研究所の中型ヘリカル装置 CHS (Compact Helical System) プラズマ中の電子温度分布を詳細に測定することによって、ヘリカルプラズマにおいて世界で初めて発見された内部輸送障壁について、その輸送現象を解明したものである。

ヘリカルプラズマの電子温度及び電子密度分布を詳細に測定し、実験の効率を上げるために、従来の計測装置に比べ以下のような創意工夫が行われた。即ち、

- (1) ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置のポート近接性の困難さを解決するために、後方散乱光を利用した。散乱光を受光する立体角を可能な限り大きくするために大型ミラー（有効径 50cm）を用いた。散乱光は、結合効率に優れた大口径（2mm）光ファイバーによって 3 チャンネルの干渉ポリクロメーターに導かれ分光された。検出器は YAG レーザーの波長(1064nm)領域において量子化効率の優れたアバランシェフォトダイオードを用いた。
- (2) 電子温度及び電子密度分布の時間発展を詳細に計測するために、高繰り返し発振可能な YAG レーザーを用いた。これによって 10ms の時間間隔での計測が可能となった。
- (3) ショット後すぐに電子温度及び電子密度分布を確認し、3~5 分後の次のショットの放電条件を決めるために、エラーによって重みをつけた多重データ参照テーブル法を用いた。これによって CAMAC データ収集システムで取り込まれたデータを瞬時に解析することが可能となった。

この計測装置は、当研究所の大型ヘリカル装置 LHD (Large Helical Device) のトムソン散乱計測の原型となり、LHD 実験の進展に寄与した。

当初、53GHz ジャイロトロンを用いた 2 次高調波による電子加熱プラズマにおいて、電子密度を下げた（約 $4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 以下）或は加熱入力を上げた（170-200kW 以上）場合に、電子温度分布の詳細測定から電子エネルギーに対する内部輸送障壁が発見された。即ち、中心部の電子温度が急激に上昇し、電子温度分布に折れ曲がり（障壁形成点）が観測された。ヘリカルプラズマでは、磁場のヘリカルリップルに起因する電子とイオンの非両極性新古典拡散の両極性条件からプラズマ中に電場 E が生じることが知られている。重イオンビームプローブによるポテンシャル測定から、プラズマ中心部の電子加熱によって、正電場（約 10kV/m）が形成され、周辺部分の電場との間に電場のシア（ $-100 \sim -200 \text{kV/m}^2$ ）が形成されることが分かった。ExB シア（ B ：磁場）とエネルギー輸送係数の関係を調べることにより、ExB シアが異常輸送の改善において本質的であることが確かめられた。輸送障壁形成時の加熱パワーと電子密度との関係などを調べた結果、新古典輸送により電場が形成され、ExB シアによって異常輸送が抑制されるという描像を確立した。低密度 NBI（中性粒子ビーム入射）プラズマに ECH 加熱を重畳することによって、電子温度のみならずイオン温度にも輸送障壁が存在することが分かった。これは、輸送障壁の内部のイオンを NBI によって加熱したためである。電子密度分布は、電子温度分布のようにピーキングせず、平坦な分布であるが、これは急峻な電子温度分布から生じる粒子拡散の寄与が大きいことがその原因であると考えられる。軟 X 線 CCD カメラによる不純物イオンの特性 X 線測定から、不純物イオンの輸送も大幅に抑制されていることが分

かった。

CHS における発見の後、輸送障壁は LHD のみならず W7-AS (ドイツ)、TJ-II (スペイン) の装置においても確認され、ヘリカルプラズマの輸送研究に大きな影響を与えた。以上の成果により、博士論文としての価値は十分であると判断できる。