

氏 名 小川 博紀

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第1087号

学位授与の日付 平成19年9月28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 LHD周辺プラズマにおける熱及び粒子輸送に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 金子 修  
教授 大藪 修義  
准教授 増崎 貴  
教授 利根川 昭（東海大学）  
准教授 大野 哲靖（名古屋大学）

核融合によるエネルギー供給の実現のためには、プラズマのさらなる高温・高密度化が必要である。そのために、燃料粒子、及び He 灰を含む不純物のダイバータによる制御が最重要課題のひとつになっている。ヘリオトロン型磁場配位では、閉じ込め磁場形成にプラズマ電流を必要としないためにプラズマ電流の関与する不安定性がなく原理的に定常放電に有利であることに加え、ダイバータ磁力線構造（ヘリカルダイバータ）が自然に備わっているという特長がある。ヘリオトロン型装置である大型ヘリカル装置（LHD）では、ヘリカルダイバータによる粒子制御の実証実験が進められている。ヘリカルダイバータ配位における最外殻磁気面からダイバータへ至る周辺磁場構造は、統計的磁気面領域・残留磁気島・ヒゲ構造が存在し、トカマク型装置のポロイダルダイバータ配位のスクレイプオフ層に比べて複雑である。ヘリカルダイバータによる粒子制御及びダイバータ板への熱負荷軽減を行うためには、この複雑な磁場構造中における熱・粒子輸送を明らかにする必要がある。本研究では、LHD ヘリカルダイバータ配位における周辺磁場構造と熱・粒子輸送の関係に関する研究を行った。周辺熱・粒子輸送の最下流であるダイバータ板上での熱・粒子負荷分布を、ダイバータ板に埋め込んだ熱電対及びダイバータ板上に設置した静電プローブアレイによって計測した。磁力線追跡計算により周辺磁場構造及びダイバータ板に接続する磁力線構造を明らかにし、計測した熱・粒子負荷分布との関係を詳しく調べた。

主プラズマの状態によりダイバータ熱・粒子負荷分布は変化する。例えば、プラズマ圧力が高くなり、 $\beta$  値が 1% を超えるとシャフラノフシフトによる磁気面の変形が起き、そのためダイバータ熱・粒子負荷分布が変化することが分かっている。本研究では、 $\beta$  値が 1% よりも低い場合において、NBI によるプラズマ電流の変化に伴い、ダイバータ板上の粒子負荷分布が変化する現象を観測し、その機構を明らかにした。 $R_{ax}=3.75m$  の配位ではトーラス内側のダイバータ板に接続する磁力線の接続長分布は、最外殻磁気面近傍を周回する長い磁力線群が数 mm 程度の領域に集中している。ダイバータ板上の粒子負荷分布のピーク位置変化を静電プローブアレイにより計測した。その変化量は、プラズマ電流の変化に対して線形変化を示し、磁場強度に依存しなかった。磁気軸位置にプラズマ電流を模擬した線電流を置いたモデルでの磁場計算及び磁力線追跡計算を行った結果、ダイバータトレース位置はプラズマ電流値により変化し、その変化は実験で観測された粒子負荷分布のピーク位置の変化と定性的に一致した。プラズマ電流が流れることによって、回転変換分布が変化し、そのため残留 X 点位置及びダイバータレグ位置が真空磁場の場合に対して移動し、粒子負荷分布を変化させることによると考えられる。上記計算からは、残留 X 点の移動とともに最外殻磁気面位置の変化も予測された。トムソン散乱により得られた電子温度分布の裾野位置のプラズマ電流による変化は予測と定性的に一致した。

LHD ヘリカルダイバータでは、磁気軸位置に依って熱・粒子負荷分布がヘリカル方向に変化することが観測されていた。そこで、長時間放電中に磁気軸位置を周期的に変化させ、ダイバータ板への熱負荷を分散・軽減させ、ダイバータ板の温度上昇を抑えることを試みた。磁気軸位置を連続的に変化させたときのヘリカルダイバータ全体の熱負荷分布、また、特定のダイバータ板上の熱・粒子負荷分布の計測を行った。磁力線追跡計算と計測データの比較から、最外殻磁気面近傍を周回した後ダイバータ板に到達する、接続長数百 m 以上

の長い磁力線群の分布が熱・粒子負荷分布に大きく影響することが観測された。3cm程度、すなわち装置大半径の1%程度の小さな磁気軸位置の変化により熱・粒子負荷分布を大きく変化させることができる磁気軸掃引範囲が  $R_{ax}=3.66-3.69m$  であることを明らかにし、効率良く熱・粒子負荷を分散するための磁気軸掃引運転の最適化を行った。LHD では2分以上の長時間放電実験を、ICRF加熱を用いて行っているが、これまではダイバータ板の温度上昇に伴うアウトガスのためと考えられる制御不能な密度上昇が発生し、放電が終了していた。本研究成果を反映した磁気軸掃引運転を行うことによりダイバータ板上の熱負荷を低減し、1時間に及ぶ長時間放電実験を成功させた。

以上のように、本研究は複雑な周辺磁力線構造が存在するLHDヘリカルダイバータ配位において、ダイバータ板上の熱・粒子負荷分布の形成機構解明、特に磁力線構造変化と分布形成の関係を明らかにすることを目的として、計測と磁力線追跡計算を主として用い、遂行された。ヘリカルダイバータ上の熱・粒子負荷分布は、最外殻磁気面近傍を周回した後ダイバータ板に接続する数百m以上の長い接続長をもつ磁力線群の分布に強く依存することが明らかになった。従って、長い磁力線群のダイバータ板への接続分布が磁気軸位置やプラズマ電流によって変化すると、ダイバータ熱・粒子負荷分布もそれに応じて変化する。すなわち、適当な手法によりダイバータ熱・粒子負荷分布を制御できることが示された。

## 論文の審査結果の要旨

出願者の論文は、大型ヘリカル装置（LHD）の閉じ込め磁場配位が付随して持つダイバータ構造におけるプラズマの熱粒子輸送を、実験と磁力線構造の数値解析とを対比しながら研究したものである。LHDの周辺磁場は閉じた磁気面の外側をエルゴディック層やひげ状の磁力線群が囲み、さらにその外側にダイバータ磁力線が存在する複雑な形状となっており、同じ環状磁場閉じこめ方式であってもトカマク型装置とは様子が異なる。その中で熱粒子輸送を明らかにすることは、将来のヘリカル型核融合炉におけるダイバータを考える上で重要な課題である。

LHDでは、その磁場断面形状が一对の磁場X点を持ち、そこからダイバータ磁力線が真空容器壁まで達している。断面形状はトロイダル方向に進むとポロイダル方向に回転するのでダイバータ磁力線が真空容器に当たる位置も場所によって変化し、磁力線に沿って来ると思われるプラズマからの熱・粒子束を受けるためのダイバータ板が真空容器内面を縫うように設置されている。出願者は、その内の代表的な2ヶ所のトロイダル角位置に於いて上下・内外のダイバータ板に設置した熱電対やラングミュアプローブアレイを用いて粒子束分布を測定した。そしてそれらがプラズマの磁気軸位置やビーム駆動電流を組み合わせることにより形成できる様々な磁場構造の下でどのように変化するかを詳細に観察した。一方でダイバータ板への熱負荷はプラズマ閉じ込め領域近傍からダイバータ板への長い距離を繋ぐ磁力線群の存在が重要な役割を担うであろうと仮定の下、それらの分布を数値計算により求めることを並行して進めた。

その結果、粒子束分布は磁場配位に依存して大きく変化することが明らかになり、そのピーク位置はどの条件下でも、概ねダイバータ板と最外殻磁気面近傍とを結ぶ磁力線の存在する位置に対応することが示された。このことはダイバータへの熱負荷が、プラズマ近傍から磁力線に沿って流れてくる粒子束に伴うものが主であることを示している。ただし実験的に得られた空間分布の中にはこれらの磁力線群の分布と一致しない例も見られる。これらの磁力線はダイバータ板と最外殻磁気面近傍とを結ぶ距離が数100mから数kmにおよび、途中の拡散過程を無視できない。出願者は磁力線に沿って流れる粒子束をモンテカルロ法で評価するコードを用い、これに粒子間衝突によって生じる磁力線を横切る拡散の効果を確認的に加えて計算することにより、粒子束分布が無衝突の計算である磁力線群分布とは異なりうることを明らかにし、実験結果とのより良い一致を示した。

これらの結果は、ダイバータ板までの磁力線長が長いが故に途中の磁力線を横切る拡散過程を考慮する必要はあるものの、磁力線構造を制御することによりダイバータへの熱負荷制御が可能であることを示すものである。実際、出願者は、わずかな磁気軸位置の変化がダイバータ上の熱負荷分布を大きく変える位置があることを見出した。

この発見はLHDの運転制御改善にも大きく寄与した。LHDではヘリカル方式の特長を活かすべく、長パルス運転を試みてきたが、ダイバータ板の局所的な熱集中によって生じるアウトガスがプラズマ密度の上昇を引き起こし、プラズマ放電を止めてしまうことがしばしば起こった。そこで出願者の研究成果を基に、磁気軸をダイバータ上の熱分布の変化が著しく変化する値の間でプラズマのショット間にスイングすることによりダイバータへの平均熱負荷を押さえることができ、1時間に及ぶ長時間放電を実現した。

審査では提出された論文を基にその内容の正確さや新規性、学術的な価値を吟味した。その結果、上記の内容は博士論文に値する研究成果であると判断し、審査委員全員一致で合格とした。