

ヘリオトロンJ 3次元磁場における
周辺プラズマ輸送および
ダイバータ熱負荷に関する研究
(要約)

的池 遼太

本論文は、磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて、SOL 領域における 3 次元磁場構造が周辺プラズマ輸送およびダイバータ熱負荷に与える影響についての研究を行ったものである。トーラスプラズマのうち、ヘリカル型装置は生来 3 次元構造を持ち、またトカマク型装置は本来軸対称であるが、共鳴擾動磁場による 3 次元構造が導入されている。このようにトーラスプラズマ共通の課題として 3 次元磁場下における SOL 輸送の物理現象の理解が必要とされている。本論文では、磁場構造の制御性に優れた先進ヘリカル装置であるヘリオトロン J において、3 次元周辺輸送コード EMC3-EIRENE を適用し、モデル計算を行うことで、ダイバータレグや磁気島といった周辺磁場構造や電子密度や輸送係数といったパラメータが周辺輸送に与える影響を評価した。

第 1 章では、本研究の背景として、核融合発電がエネルギー問題解決の手段の 1 つであることを述べた。核融合炉の実現に向けた課題にダイバータ機器の受ける熱負荷があり、その設計のためには 3 次元磁場中における熱・粒子輸送の理解が不可欠であることを述べ、その先行研究を示した。また、本研究で利用する 3 次元周辺輸送コード EMC3-EIRENE について、その原理を説明した。

第 2 章では、本研究で対象としたヘリオトロン J 装置について、磁場配位の特徴を述べると共にヘリオトロン J への EMC3-EIRENE 適用の過程およびテスト計算の結果の検証を行った。はじめに、磁力線追跡コードを利用して標準磁場配位における周辺磁場構造を調べ、EMC3-EIRENE で計算するべき領域の見積もりを行った。続いて EMC3-EIRENE に必要な、磁力線に沿った構造と周辺領域における高い空間解像度を有する 3 次元グリッドを開発した。グリッド作成にあたっては、グリッド作成ツール FLARE と併用する形で独自のプログラムを作成した。これにより、磁力線追跡から予測されるプラズマが分布する領域全体を包含しつつ、磁力線に沿った構造を持つ 3 次元グリッドが実現した。作成した 3 次元グリッドを用いて、最初のモデリング計算を行った。計算結果について検証を行い、計算の収束および、作成したグリッドが十分な解像度を持つことを確認した。

第 3 章では、ヘリオトロン J における典型的な 3 種類の磁場配位 (High bumpiness, Medium bumpiness, Low bumpiness) を対象として、周辺プラズマ分布および真空容器上の熱負荷分布について磁力線長分布との比較および電子密度依存性の評価を行った。3 種類の磁場配位に共通して、コアプラズマの電子密度上昇に伴って、ダイバータ熱負荷における「分布の平坦化」および「ピーク位置のシフト」が観測された。このうち、分布の平坦化については、プラズマの高密度化によって磁場を横切る輸送が増加したためと考えられる。分布のシフトについては、熱負荷がピークするダイバータレグの両側で磁場構造が非対称であることが関連していると思われる。

このようなピーク位置や分布形状は、磁力線の角度や真空容器の形状といったローカルな要素に影響を受ける。プラズマ対向壁全体のグローバルな熱の分配を評

価するために、新しく「熱流束分布関数」を定義した。ヘリオトロンJの3配位を対象に解析したところ、3配位に共通して、高密度化により熱流束ピークの減少と低熱流束の増加が観測され、低い熱流束も無視できない量の熱を壁に伝えていることが示唆された。配位間の比較においては、Low bumpiness 配位において熱負荷のピーク値が他の配位より低い一方、 $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ 以下の低熱負荷領域で他の配位より多くの熱量を壁に与えていた。この計算では加熱入力・輸送係数は固定であり、不純物による放射損失を含めていないことから、壁に到達する熱の総量はほぼ一定である。熱流束分布関数の導入により、熱負荷ピーク近傍に限らない熱の分配のようすが明らかとなり、磁場配位制御が高熱流束の低減につながることを示された。

第4章では、SOL中を流れる熱流束や粒子束といった物理量に注目し、フロー構造と磁場構造との関連を議論した。ポロイダル断面における流束や圧力の分布において、小半径方向にSOL領域を内側と外側の2領域(inner region, outer region)に分割するような境界構造が見られた。この構造は、ポロイダル断面においてはすぐ隣りあっているように見える領域でも、磁力線に沿った輸送においては遠く離れた位置に存在することに起因する。この構造は磁力線に沿った熱流束である平行熱流束においても見られた。inner regionにあたるダイバータレグの根本側とouter regionにあたるダイバータレグの先端側に2つのピークが存在し、コアプラズマ密度の変化に応じて位置や強度が変化した。具体的には、低密度条件ではSOLの下流側にあるouter region側ピークの方が強く、高密度条件では上流側のinner region側ピークの方が強かった。また、それぞれの領域内部で熱流束ピークは上流側に移動した。このような分布の変化は壁の受ける熱負荷の密度依存性に対しても矛盾しない結果である。

第5章では、静電プローブ計測を用いて、回転変換の異なる複数の磁場配位を対象として周辺プラズマにおけるフロー構造計測を行った。磁場配位によるプラズマ形状の制御とプローブの駆動機構を併用することにより、逆方向のトロイダルフローの存在が予測されるX-pointの両側を計測した。SOL領域から閉じ込め領域にかけてX-point下側のフロー方向性分布を計測したところ、SOL領域ではトロイダルCW方向のフローを示唆する結果が得られた。閉じ込め領域では強い方向性は現れず、より等方的な分布となった。SOL領域におけるトロイダルフロー方向性計測において、磁場構造から予測される分布が得られたかは配位によって異なった。iota0.48配位におけるX-point上側の計測では、ダイバータレグの外側、内側両方においてCCW方向のトロイダルフローを示唆する方向性分布が得られた。iota0.567配位におけるX-point上側の計測では、予想と異なりCCW方向のトロイダルフローは見られなかった。この原因については、プラズマのドリフトやプラズマ中の粒子ソースといった、真空磁場構造だけでは考慮できない物理現象がフロー構造に影響を与えていることが考えられるため、モデリングと実験計測の両面から、より詳細な解

析が必要となる。

第6章では、ヘリオトロンJのダイバータ構造を大きく変化させる磁場配位の探索を行った。特に、SOLにおける磁気島構造に注目し、垂直磁場を利用して細かな回転変換の制御を行うことで、ダイバータ形状を変化させた。ヘリオトロンJにおける2種類の垂直磁場コイル(AVコイル、IVコイル)を利用し、磁気島を伴う磁場配位($iota=0.48$ 配位)をベースとして磁場配位スキャンを行った。閉じ込め磁場の回転変換分布が有理面を横切ると、磁気島が形成される。磁気軸における回転変換 $iota$ が0.48の配位では、トロイダル/ポロイダルモード数が4/8となる有理面と回転変換が交差することでポロイダル断面中に8つの連なった磁気島が現れる。SOL中には磁気島構造に伴う閉じ込め領域に匹敵する長い磁力線長分布が現れ、壁に接触する。

垂直磁場スキャンによって回転変換を上げることで、SOL中の長い磁力線領域と閉じ込め領域が接触し、磁気島は閉じ込め領域に組みこまれる。このとき、磁気島の外側にも閉じ込め磁気面が発生し、これが真空容器と接触することでリミターのような周辺構造となる。さらに回転変換を上げると閉じ込め磁場の回転変換分布が有理面と交差しなくなり、磁気島構造は見られなくなる。一方、逆方向に垂直磁場をスキャンすることで回転変換を下げていくと、SOL領域の磁気島構造に伴う長い磁力線領域が小さくなり、最終的に消失した。このとき、壁には閉じ込め領域から伸びたダイバータレグが接触していた。ただし、このとき磁気島構造は無くなったのではなく、磁気島構造自体はSOL中に残っており、磁気島が壁にどのように切られるかによって存在しないように見えることがある。磁場のスキャンによって変化するのには回転変換だけではない。磁気軸位置の変化や、体積評価において磁気島が閉じ込め領域に含まれるかがどうかについて、慎重な検討が必要である。

磁気島を伴う磁場配位を対象として、初期的なプラズマ実験およびモデリング計算を行った。プラズマ実験においては、プラズマ電流および蓄積エネルギーがコイル電流値に対して非線形な応答を示した。しかし、磁気島が存在する領域と応答が見られた領域にはずれが存在した。この原因について、プラズマ電流による応答磁場や、コイル電流自身の系統誤差が考えられる。この非線形応答が磁気島によるものかどうかも含めて、今後より詳細な計測が必要である。モデリングにおいては、磁気島が閉じ込め領域と接続した配位と離れた配位を対象としてモデリング計算を行った。磁気島内部の電子温度、密度分布に大きな差異が見られた。磁気島とコア領域の接続や磁気島の外側の閉じ込め領域の有無によって、磁気島外縁部のプラズマが受ける垂直輸送と水平輸送のバランスが大きく変化したためと考えられる。

今後は、本論文で得られた熱負荷分布の磁場配位依存性、密度依存性について実験的な検証を進めると共に、低いダイバータ熱負荷と高いプラズマ性能を両立しうる磁場配位を探索することで、ダイバータの観点からヘリカル軸ヘリオトロン配位

の最適化への貢献が期待される。

また、本論文ではトロイダル1周期のみを計算領域とし、不純物の含まれないプラズマにおいて真空磁場をベースとしたグリッドを用いて計算を行った。真空容器内構造物や不純物、プラズマベータ、プラズマ応答磁場といった要素を含めることで、より実際の放電に近い条件でのモデリング計算が可能となる。一方で、実験計測においても静電プローブの改良や複数のプローブの併用によって詳細な計測を行い、ドリフトや電場、揺動といったEMC3-EIRENEモデルには含まれない要素の定量的な評価を行うことが重要となる。このモデリング計算と実験計測を組みあわせることによって、ダイバータレグや磁気島内に生じる物理現象を切りわけ、輸送機構を解明することが期待される。