

主論文の要約

論文題目 非接触プラズマにおける熱・粒子輸送に関する研究
(Study on heat and particle transport in detached plasma)

氏名 林 祐貴

論文内容の要約

定常熱核融合炉実現に向けた挑戦的な課題は炉心プラズマより漏れ出る熱の処理である。炉心プラズマからスクレイブオフ層(SOL)に排出されたプラズマは磁力線が鎖交するダイバータ板まで運ばれる。ダイバータ板へのプラズマの熱流束を低下させるために SOL 領域への不純物ガス入射による放射損失増大によって、電子温度 T_e を下げることが計画されている。しかし、国際熱核融合実験炉(ITER)や原型(DEMO)炉のような高イオン粒子束プラズマを想定すると、表面再結合の熱流束への寄与が大きく、 T_e の低下のみでは十分な熱流束の減少を得ることができない。よって、プラズマを電子-イオン再結合(EIR)により消滅させ、イオン粒子束を減少させる必要がある。このときダイバータ板前面に形成されるプラズマが非接触プラズマである。EIR 過程が支配的となる非接触プラズマの研究は大型装置と相補的に直線型装置において精力的に行われてきた。直線型装置の多くは定常プラズマが生成可能で、計測装置への近接性が良く、プラズマの制御性と再現性が高いといった実験的柔軟性を有している。非接触プラズマに関連し、直線型装置の特徴を活かして解明すべき研究課題を以下に示す。

- ・ ITER のダイバータで想定される高イオン粒子束のプラズマに対し、EIR が寄与した熱流束の減衰長、また十分な減少を得るために必要な中性粒子圧力 P_n の関係を定量的に調査することが必要である。オランダ DIFFER 研究所では直線型装置 Pilot-PSI 装置を用いた ITER ダイバータ級の高イオン粒子束プラズマによる実験が行われている。しかし、熱流束やイオン粒子束の減少過程等の非接触プラズマ物理に関する実験と議論は十分に行われていない。Pilot-PSI はトムソン散乱計測システムが上流部と下流部に搭載されており、2 点間での熱流束の減少を評価することが可能である。

- ・ 非接触プラズマではシングルプローブ法によって正確な T_e が計測できないことが指摘されている。これを探針計測の異常性と呼んでいる。異常性は非接触プラズマにおけるプラズマの電位揺動とプラズマ抵抗の増大が原因であると考えられている。異常性に対するこれら 2 つの寄与を

定量的に評価するためには、正確な T_e 計測が可能なトムソン散乱計測とシングルプローブ計測を同時に行い比較する必要がある。

・ダイバータ板へ流入するイオン粒子束を分散させるため、発散磁場を用いて集中したプラズマの局所流入を避ける手法が提案された。しかし、発散磁場では電子密度 n_e が減少することから、非接触プラズマ形成には不利に働く可能性がある。よって、発散磁場が EIR 過程に与える影響を実験的検証により調べる必要がある。

・これまで名古屋大学の直線型装置 NAGDIS-II においてプラズマの流れ計測が行われ、非接触プラズマが生成される高 P_n 条件において、プラズマ周辺部で流れの向きが逆転する傾向が観測された。ダイバータ領域におけるプラズマの逆流は不純物や低温プラズマの排気効率を低下させてしまう。逆流の原因については十分に理解がされておらず、その発生機構や逆流が起こる位置と再結合フロントとの相対位置関係等に注目した詳細な解明が求められる。

・電子のエネルギーはイオンおよび中性粒子との相互作用によって低下する。EIR を効率的に発生させるためには低い T_e が必要であるが、中性粒子温度 T_n が高い条件では T_e の下限値が規定されてしまう。よって、非接触プラズマの T_n に対する依存性を調査する必要がある。

以上の背景を踏まえ、本研究は非接触プラズマの熱・粒子輸送に関して EIR 過程に関わる物理機構を解明することを目的とする。研究は直線型装置を用いた実験を軸に行い、下記 5 つの課題に取り組む。

1. ITER のダイバータで想定される高密度・高イオン粒子束環境下において、EIR が寄与する熱流束の減衰長と十分な減少を得るために必要な P_n の条件を定量的に評価する。
2. シングルプローブとトムソン散乱計測を同時に行い、探針計測の異常性について電位揺動とプラズマ抵抗の寄与を明らかにする。
3. 発散磁場が非接触プラズマにおける EIR 過程に与える影響を明らかにする。
4. 再結合フロント近傍のプラズマ流れ分布を明らかにし、NAGDIS-II で観測されたプラズマ流の逆流現象の発生機構を解明する。
5. 中性粒子の給排気速度を変化させることで T_n を制御し、 T_n の変化が EIR 過程に与える影響を明らかにする。

課題 1 および 2 は世界で最も高いイオン粒子束のプラズマを生成可能でトムソン散乱計測システムが整っている直線型装置 Pilot-PSI で行う。課題 3、4、5 は磁力線方向の磁場強度が制御可能、再結合フロント位置が制御可能、複数の排気ポートを有し給排気速度を制御可能な直線型装置 NAGDIS-II で行う。

本論文は全 7 章で構成される。

第 1 章ではここまで述べた通り、炉心プラズマからの要求性能とダイバータ設計からの許容値のギャップ、非接触プラズマにおける EIR の重要性、EIR が支配的となる低温再結合プラズマの

研究に直線型装置が有効であることを述べた。非接触プラズマにおける熱・粒子輸送に関して、EIR過程に関わる研究課題を5つ記述し、本研究の目的における各課題の位置づけを示した。

第2章では実験に用いた直線型装置Pilot-PSI、NAGDIS-II、TPD-SheetIVについて装置の概要、プラズマ生成部、計測装置およびそれらが取り付けられているポート位置などについてまとめた。また、本研究で用いた統計的解析手法やEMC3(Edge Monte Carlo 3D)-EIRENEコードについても説明を行った。

第3章ではITERのダイバータ領域で想定される高密度・高イオン粒子束環境下における非接触プラズマの特性を調べるため、Pilot-PSIにおいて T_e 、 n_e 等のパラメータ計測を行った。シングルプローブ計測による T_e とトムソン散乱計測による T_e は一致し、探針計測の異常性は観測されなかった。これまで異常性の原因の一つと考えられていた電位揺動を評価し、Pilot-PSI、NAGDIS-II、TPD-SheetIVで比較すると、異常性が観測されない装置では電位揺動が小さいという確証を得ることができた。電位揺動が小さく異常性が観測されない装置では、シングルプローブを用いた簡易的な計測が可能であることが示唆された。また、Pilot-PSIにおける高密度ヘリウムプラズマは非接触プラズマの特徴である圧力損失やDOD(Degree of Detachment)の拡大を明確に示した。 P_n の増加に伴ってイオン粒子束は減少し、EIRに伴う発光と高 P_n における密度分布の平坦化が観測されたことから、EIRと径方向への拡散によってイオン粒子束が減少していることが分かった。装置上流と下流の2点間におけるトムソン散乱計測によって、 $10^{24}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の高イオン粒子束かつ $P_n \sim 10\text{ Pa}$ の条件における熱流束の減衰長は0.5 m以下であることが分かった。ITERのダイバータ領域は10 Pa程度の P_n になることが予想されているため、ストライク点直前の0.5 mまでにEIRが支配的なプラズマを生成すれば、急激な熱流束の減少を得られる可能性が示唆された。

第4章では磁場配位の変化が非接触プラズマ形成に与える影響を調べるため、NAGDIS-IIを用いてターゲット板へ向かった発散・収縮磁場を生成し、ターゲット板、分光計測、静電プローブ計測によるプラズマの診断を行った。発散磁場から収縮磁場へ変化させることによって、非接触プラズマにおける全イオン粒子束が大きく減少した。これはEIR過程が磁場配位に依存していることを表している。ターゲット板付近の高速掃引プローブによるイオン粒子束分布計測から、イオン粒子束のピーク値も発散磁場の方が高い値を示すことが分かった。発散磁場ではEIR過程が抑制されたと考えられるが、これは発光分光計測と3箇所静電プローブ計測から、再結合フロント上流における n_e 減少と、 T_e の増加によるものであると分かった。この結果は発散磁場におけるイオン粒子束を分散させる効果と、EIRを抑制させる効果が競合過程にあること意味しており、前者に対して後者が無視できないことが示唆された。

第5章では再結合フロント近傍のプラズマの流れ分布を明らかにするため、また過去にNAGDIS-IIで観測された逆流の原因を明らかにするために、プラズマの流れ計測を行った。再結合フロント上流かつ径方向周辺において、プラズマ流が逆流していることが分かった。逆流の原因は再結合フロントにおける平坦な密度分布であると考えられ、さらにこのような広がった分布は径方向の拡散と間歇的な輸送によって引き起こされたと考えられる。また静電プローブでは間歇的な輸送を示唆する正スパイク波形も観測されており、2つの電極間でそれらが時間差を持つ

ていることから間歇的輸送も逆流方向に伝播していると考えられる。本実験で得られたプラズマの逆流現象が大型装置で発生した場合、ダイバータ領域で生成された不純物および低温のプラズマが排気されず、上流へ戻ることが危惧される。

第6章では非接触プラズマにおける中性粒子の温度変化がEIR過程に与える影響を調査した。そのためのアプローチとしてNAGDIS-IIにおいて中性粒子の給排気速度を変化させる実験を行った。給排気速度を大きくした場合にターゲット板への全イオン粒子束が減少し、EIRの促進が示唆された。これは、給排気による中性粒子の冷却過程が促進し、 T_e が減少したためであると考えられる。 T_e の減少は予測であるが、EMC3-EIRENEコードを用いたモデリングによって T_n が低い条件では T_e も低くなることが示唆された。本実験を通して、 T_e の下限値を規定する T_n が給排気という制御手法によって制御可能であることが示され、 T_n の低下はEIR過程を促進させることを示すことができた。一方で、レーザー吸収分光法によって計測した準安定原子温度は給排気速度が大きくEIRが促進する場合に増加した。本実験で計測した準安定原子の密度は基底原子の密度に比べて小さく、 T_e に与える影響は基底原子より小さいと考えられる。しかし、 T_n が低いと予想できる条件で準安定原子温度が高くなった理由は、基底準位からの励起とEIRによって生成される準安定原子のバランスや中性粒子の輸送を含めた考察によって明らかにする必要がある。

第7章では総括として、まとめと今後の課題を述べた。第1章で挙げた5つの課題に対して得られた成果を記述した。