

氏 名 田 村 直 樹

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大甲第591号

学位授与の日付 平成14年3月22日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 常温固体型トレーサー内蔵ペレット (TESPEL)

を用いたLHDプラズマにおける不純物輸送に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 松岡 啓介
教授 須藤 滋
教授 加藤 隆子
教授 近藤 克己 (京都大学)
教授 居田 克己 (核融合科学研究所)
主任研究 河西 敏 (日本原子力研究所)
員

博士論文の要旨

核融合炉実現には、核融合プラズマにおける不純物の量及び分布の制御が必要不可欠である。これは炉心プラズマへ混入する不純物量の制御、局在した不純物放射を利用した熱負荷軽減によるダイバータ部の損耗抑制といった操作は、炉の運転効率に密接に関係しているからである。そのためには不純物輸送を支配している物理機構の理解を欠くことができない。これまでの不純物輸送を支配する物理機構解明を目的とした系統的な研究は、主にトカマク型プラズマ閉じ込め装置において行われており、ヘリカル型においては十分とは言い難い状況にある。一方、トロイダルプラズマを支配する物理機構の包括的理解は両者の相補的研究によって進展するという認識が高まりつつある現在、ヘリカルプラズマにおける不純物輸送研究の進展が期待されている。不純物輸送研究を行う場合の一般的な手法にプラズマ中に本来存在しない“不純物”元素を外部より入射し、その挙動を研究する手法がある。その入射方法にはガスパフ、不純物ペレット、レーザブローオフ法等があるが近年、プラズマへの影響の少なさからレーザブローオフ法が主流となっている。ただし、幾つかの点が精度良い輸送解析を行うのに障害となっている。これに対し Sudo が提案した“トレーサ内蔵ペレット”は、それらを飛躍的に改善する特徴を持っている。その特徴とは、(1) プラズマ中に 3 次元的に局在化した不純物粒子源を生成する、(2) プラズマ中に入射される不純物粒子の絶対数を評価する、(3) プラズマ中の任意点において、局所的粒子輸送解析を行う、ことが可能となることである。このトレーサ内蔵ペレットを用いた粒子輸送解析の原理検証実験はコンパクトヘリカル装置 (CHS) にて行われ、粒子輸送係数を求めることに成功している。

以上述べた現状を考慮して、本論文ではトレーサ内蔵ペレットを用いて、大型ヘリカル装置 (LHD) における不純物輸送特性の定量的評価を主な目的として研究を行った。トレーサ内蔵ペレットの大型装置での運用は世界初の試みであることから、まずその不純物輸送計測システムを確立した。また、本論文ではトレーサ内蔵ペレットの特徴を生かした研究として、磁気島に関する不純物輸送特性の初期的研究を行った。

まず、CHS における原理検証実験と同じ水素化リチウム (LiH) をトレーサとした常温固体型トレーサ内蔵ペレット (TESPEL) を用いて、中性粒子ビーム (NB) との荷電交換反応によって生じる荷電交換光の分光計測による実験を行った。実験前に行った検討では LHD に対して設定された NB のエネルギーの高さ (150 keV) による荷電交換反応断面積の大幅な低下により、その測定が相当困難なものになることが分かっていたが、やはり現有の計測機器では有意な結果を得ることができなかった。そこで、LHD での可視域における荷電交換分光計測に対して最適な不純物トレーサ粒子種の検討を行った結果、プラズマパラメータに応じて高い信号強度が期待できる不純物粒子種の範囲を特定できるダイアグラムを得た。例えば、電子密度 $n_e = (2 - 5) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 $T_e = (1 - 2) \text{ keV}$ 、NB 入射パワー $P_{\text{NBI}} =$

3 MW では、フッ素、マグネシウムもしくはアルミニウムが最適なことが分かった。これらを用いた実験は、LHD における影響等が検討された後、実施される予定である。

次に不純物イオンからの線スペクトル放射の時間的、空間的変動から粒子輸送係数を決定できることに着目し、実験を行った。トレーサとして LHD での許容性及び観測、解析の便宜性の観点からチタニウム (Ti) を選択した。適切な実験条件を選択することで、高い S/N 比を持って TESPEL 入射直後の Ti イオンからの線スペクトルの増加を観測した。粒子輸送解析は、この結果に基づき X 線波高分析器によって得られる Ti K α ($E_{\text{He-like}} \sim 4.7$ keV) と真空紫外分光器によって得られる Ti XIX ($\lambda = 169.59$ Å) の挙動を次元不純物輸送コード (MIST) による計算結果と詳細に比較することで行った。解析の結果、ファクター 2 程度という典型的な精度で粒子拡散係数を導出でき、観測された線スペクトルの時間変化を再現性良く、しかも数秒という長時間に渡って再現することができた。また、LHD における不純物粒子輸送特性として、

- 1) 線平均電子密度 (n_{e_bar}) の増加に伴い、粒子拡散係数 (D) が数 1000 cm^2/sec から数 100 cm^2/sec 程度まで低下する傾向を確認した。これは、これまでの粒子輸送実験からの知見と矛盾しないものである。
- 2) balanced NBI 加熱プラズマにおいて、 n_{e_bar} が $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ を越えた領域でそれ以下の場合とは異なり内向きの対流速 (V_{inward}) を必要とすることが分かった。ただし、その大きさは $1\text{m}/\text{sec}$ 以下と非常に小さいことが分かった。 V_{inward} の発生機構としては負の径電場等が考えられるが、その定量的評価については今後の研究課題である。
- 3) ctr NBI 加熱プラズマにおいて低密度 ($n_{e_bar} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) になると、balanced NBI 加熱プラズマの場合と比較して D が小さいことが分かった。この原因については上記 2) と同様の理由が考えられ、その関連性は今後の研究課題である。
- 4) 7 秒弱のロングパルス放電 (ctr NBI 加熱プラズマ) 中に TESPEL によって供給された Ti イオンからの線スペクトルの時間的挙動が単調な減少傾向から放電途中で一定となる変化を観測した。この原因として、ロングパルスによる熱負荷増加による壁からの流入量の変化が考えられる。ただし粒子輸送特性の変化も可能性として残されている。将来の核融合炉において必須と考えられるロングパルス放電において、この原因は解明すべき研究課題である。

ここで求めた粒子輸送係数の導出精度の向上は、今後の計測機器の充実 (観測点の増加、時間分解能及び S/N 比の向上) によって容易に達成できると考えられ、TESPEL による粒子輸送解析において線スペクトル群観測による解析が有効であることを示している。

さらに本論文ではトレーサ内蔵ペレットの特徴を生かした研究として、磁気島に関する粒子輸送研究の検討及び予備実験を行った。MIST を用いた概算的評価の結果、磁気島に関する粒子輸送特性を磁気島周辺に局在する線スペクトルによって評価できる可能性があることが分かった。また、予備実験として局所磁気島ダ

イバータ (LID) コイルによって意図的に拡大された磁気島内部への不純物トレーサ供給を試みた結果、世界で初めてそれに成功した。その影響をわずかではあるが観測できていることを確認した。

本論文では TESPEL を用いて LHD における不純物粒子輸送特性を系統的かつ定量的に調べた。その結果、高密度時において確認された内向きの対流速度が非常に小さい値であることや低密度時の ctr NBI 加熱プラズマにおいて balanced NBI 加熱プラズマと比べて D が低下すること等を明らかにし、TESPEL による粒子輸送解析が有効であることを示した。また、磁気島に関する粒子輸送研究の検討及び予備実験を行い、世界で初めて磁気島内部に限定した不純物供給に成功した。これにより、磁気島に関する粒子輸送研究の基礎を確立した。以上が本論文の主旨である。

本学位論文は、ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置である大型ヘリカル装置 (LHD) における不純物粒子輸送の実験的解明に関するものである。不純物粒子輸送の研究において重要なことは、不純物粒子をプラズマ中に局所的に注入することである。局所的な注入は、3次元磁場構造を持つヘリカル型閉じ込め装置における輸送解析に特にその威力を発揮する。粒子輸送に関する従来の方法は、1) 水素、重水素などのプラズマ構成粒子の氷状ペレットの入射、2) 構成粒子とは異なる不純物ペレットの入射、3) これら粒子のガスパフや不純物のレーザーブローオフによる入射、によってそれら密度の外乱を与え、その後の時間変化を測定することによって行われてきた。しかしながら、これらいずれの方法においても単一組成のペレットなどを用いることのため、トレーサとなるべき粒子をプラズマ中に局所的に注入することが出来なかった。田村君は、小型ヘリカル装置 CHS において原理実証された常温固体型トレーサ内蔵ペレット (TESPEL) を用い、LHD プラズマ中への不純物の局所的な注入に成功し、拡散係数などの評価を系統的且つ定量的に行った。LHD において用いられた TESPEL はポリスチレンの外皮 (外径 500-800 μm) の中にトレーサとしての不純物粒子 (外径 100-250 μm) を内蔵するペレットであり、250-400m/s の速度でプラズマ中に打ち込まれる。サイズは CHS で用いたものよりも約 1 桁大きい。このような二層ペレットを用いた大型装置での実験は世界で初めてのものである。

田村君は、最初、CHS 実験と同じ LiH をトレーサとして実験を開始した。リチウムのような軽元素不純物は、高温プラズマ中では容易に完全電離され、中性粒子入射加熱 (NBI) の水素ビームとの間の荷電交換反応の後に可視光を発するため光ファイバーを用いた詳細な空間分布計測が容易であるという利点をもつ。CHS に比べ、LiH のサイズは 1 桁ほど大きくなり、発光量が格段に増えたものの、水素ビームのエネルギーが 40keV (CHS) から 150keV に上昇したため荷電交換反応断面積が 2 桁近く小さくなったこと等により、観測光と背景光の間に有意な差が見られなかった。LHD のパラメータ下では、荷電交換反応断面積、ビームの強度などを考慮した結果、トレーサとして最適な核種はフッ素、マグネシウム、アルミニウムであることが分かったが、LHD 実験に使用されたことのない核種であるため、それらを用いた実験は今後の検討を待つことになった。このため、横長断面中心コード 1ch. の真空紫外分光器と横長断面中心コード 1ch. 及び縦長断面 3ch. の軟 X 線波高分析器による測定になるが、トレーサとしてチタンを用いた入射実験を行った。測定されたライン強度の時間変化を、1次元不純物輸送コード MIST と比較することによって、不純物粒子の拡散係数や対流速度を評価した。その結果、

1) 拡散係数は数 100 cm^2/sec ~1000 cm^2/sec であり、ファクター2 の精度で求めることが出来た。密度が高くなると拡散係数が低くなるという依存性が確認された。また、内向きの対流速度は 1m/sec 以下という非常に低い値であることも分かった。

2) NBI 入射の向きを co-, ctr-, balanced-入射とスキャンした結果、ctr-入射の場合に拡散係数が低いことが分かった。この原因として負の径電場の形成などが考えられるが、関連性については今後の研究課題である。

また、局所磁気島ダイバータ (LID) コイルにより生成された磁気島中へのペレット入射に成功した。これは TESPEL においてのみ可能であり、磁気島に関連する輸送障壁の研究

究など今後の粒子輸送研究に大きな寄与が出来るものと考えられる。

本論文では、トレーサ内蔵ペレットを大型装置である LHD に入射することによって不純物粒子輸送を系統的に且つ定量的に調べた。二層ペレットの特長を活かした磁気島内部への入射も成功した。この実験手法は、磁気島に関連する粒子輸送の解明に新たな展望を開くものである。以上により、本論文は学位論文としてふさわしい学術内容を持っていると認められる。