

研究種目：基盤研究 (B)  
研究期間：2007 ~ 2010  
課題番号：19340179  
研究課題名 (和文) トレーサー内蔵ペレットによる粒子輸送・高速粒子・元素スペクトル同時計測  
研究課題名 (英文) Simultaneous measurements of impurity transport, fast particle and line spectra by means of tracer-encapsulated pellet  
研究代表者  
須藤 滋 (SUDO SHIGERU)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：50142302

研究代表者の専門分野:プラズマ物理学

科研費の分科・細目:プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード:計測用トレーサー、ペレット、粒子輸送、高速粒子、元素スペクトル

### 1. 研究計画の概要

(1)【研究の背景】磁場閉じ込め核融合研究では、燃焼プラズマの実現とその制御へ向けて、熱、粒子、そして高速粒子の輸送を理解することの重要性がますます高まってきている。これらが効率的な磁場核融合炉の設計に決定的な役割を果たす重要な要因となるからである。しかし、これらは未だもって十分に解明されたとは言えず、解明を目指した実験及び理論研究は世界的にも最も重要な課題の一つとなっている。

(2)【研究の目的】核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(Large Helical Device: LHD)において、トレーサー内蔵ペレット入射を利用した粒子輸送、高速粒子及び元素スペクトルなどの同時計測によって、プラズマの振る舞いや関連する物理量を従来と比べて格段に高い精度で計測する手法を確立することが本研究の目的である。

(3)【研究の内容】本研究において重要な要素であるトレーサー内蔵ペレットは、以下の特色を有する。i) プラズマ中のほぼ任意の位置に不純物トレーサーを局所的に注入することができる。ii) 不純物トレーサー中の総原子数をトレーサー内蔵ペレット製作時に決めることができる。iii) 不純物トレーサーとなる粒子種の選定はほぼ任意である。その常温型の外殻は、ポリスチレン(-CH(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)CH<sub>2</sub>-)であり、トレーサー内蔵固体ペレット(Tracer-Encapsulated Solid PELlet: TESPEL)と呼んでいる。

高温プラズマ中に入射された TESPEL は、まずその外殻が昇華し、溶発する。溶発した粒子により、ペレットの周囲に低温・高密度の中性粒子からなる溶発雲が形成される。この時、プラズ

マ中の高エネルギーイオンが溶発雲中の中性粒子と荷電交換し、高速粒子としてプラズマ外に出てくる。この高速粒子を中性粒子分析器(Neutral Particle Analyzer: NPA)により測定することで、プラズマ中の高エネルギー粒子のエネルギースペクトルの空間分布を得ることができる。この計測手法を、ペレット荷電交換(Pellet Charge eXchange: PCX)計測という。ここで、TESPEL 外殻中を起源とする溶発雲中の水素イオンの線スペクトルを測定することで、そのシュタルク拡がりから溶発雲中の電子密度が得られる。これを用いて、高エネルギー粒子の絶対量についての情報を得ることができる。

TESPEL の外殻が溶発し終わると、次に不純物トレーサーが昇華、溶発する。さらに電離した不純物トレーサーイオンからの線スペクトルを高空間分解能の分光システムで測定することで、不純物トレーサーの振舞いを観測できる。

このように、トレーサー内蔵ペレットを用いることで、様々な物理量をほぼ同時に観測することができる。本研究では、不純物及び高速粒子などをトレーサー内蔵ペレット入射を用いた同時計測により高い精度で測定する手法を確立することを目指す。

### 2. 研究の進捗状況

(1)まず、同時計測を構成する個々の計測器の基本性能の確認を行い、それに基づく整備を進めた。高エネルギー粒子の振る舞いを調べるための PCX 計測については、ペレットからのトリガー系を改良して TESPEL 入射毎に確実にデータ取得ができることを確認した。また、同計測の測定範囲拡大のために、従来(約 0.9 mm 以下)よりも大きなサイズ(約 1.5 mm 以下)の TESPEL を装填可能な TESPEL 保持ディスクを製作し、

実験に使用できるようにした。溶発雲中の電子密度の2次元分布を得ることにより、PCX 計測による高エネルギー粒子の絶対量評価の精度が高まる。そのために、溶発雲中の水素イオンの線スペクトル  $H_{\beta}$  線の拡がり測定を2次的に行える分光システムの整備を進めた。不純物トレーサーの振る舞いを調べるための負イオン中性粒子ビームを用いた荷電交換分光システムについては、同システム内の多層膜反射鏡型軟 X 線分光器にクライオポンプを用いた差動排気システムを取り付けた。これにより、同分光器を恒常的に運用できるようにした。

(2) 各種計測器を用いて、様々な物理量の同時計測を実施した。鉄、スズ及びタングステンそれぞれをトレーサーとした TESPEL を LHD プラズマ中に入射し、TESPEL 溶発雲中の電子密度分布の測定、PCX 計測及び各トレーサーの多価イオンからの線スペクトルの時間発展の測定を同一ショットにおいて行った。さらに、LHD プラズマの電子密度及び電子温度を変化させ、様々なパラメータ下で実験データを取得した。

(3) 当初計画にはなかったが、研究を進める過程で、不純物輸送計測の幅を拡げるアイデアを出し、実験を実施した。具体的には、不純物輸送の粒子種による違いを明確にすることを目的として、2種(これまでに、チタンとスズ、スズと鉄の2通り)混合トレーサーの入射実験を実施し、それぞれのトレーサーからの発光線の時間変化を測定することに成功した。これにより、不純物輸送の原子番号依存性を効率的に調べる手法として、複数種トレーサーを用いる方法が有効であることが分かった。

### 3. 現在までの達成度

- ① 当初の計画以上に進展している。  
(理由)

同時計測に必要な計測機器の整備について、多層膜反射鏡型軟 X 線分光器は仕上げの段階に近付いており、その他は既に観測に使用している。同時計測実験において、既に整備済みの各種計測器を用いて実験を開始しており、実験データの取得も進んでいる。また、当初計画にはなかったが、平成 21 年度に粒子種による違いを明確にする実験を行い、2種それぞれのトレーサーからの発光線を測定することに成功し、不純物輸送計測の幅を拡げることに成功した。このように、予定内の実験に加えて、予想以上の実験データの取得が進んでいることから、本研究は当初の計画以上に進展していると判断できる。

### 4. 今後の研究の推進方策

(1) 多層膜反射鏡型軟 X 線分光器の仕上げを行い、同時計測実験において稼働させる。これにより、同時に測定できる物理量を増やす。

(2) 平成 22 年度の LHD 実験では、イオンサイクロトロン周波数帯加熱実験が再開される予定である。したがって、高エネルギーイオン生成・閉じ込め及びこのプラズマへの効果に関する研究がより重要となるので、同実験において各種物理量の同時計測を実施する。

(3) より広い範囲の原子番号依存性を一度に得られるように、これに適したトレーサー粒子種の選定を進めて、同時計測実験に使用する。

以上の方策をもって、研究目的のより高度な達成を目指す。

### 5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 16 件)

- ① T. Ozaki、2名、N. Tamura(4番目)、S. Sudo(5番目)、2名、Radial profiles of high-energy particle in NBI and ICH plasmas measured by pellet charge exchange technique on Large Helical Device, J. Plasma Fusion Res. SERIES、Vol.8、1089-1094、2009、査読有
- ② N. Tamura、2名、S. Sudo(4番目)、10名、Confinement property of tracer impurity particle inside a static magnetic island O-point of Large Helical Device, J. Plasma Fusion Res. SERIES、Vol.8、975-980、2009、査読有
- ③ N. Tamura、3名、K. Sato(5番目)、4名、S. Sudo(10番目)、1名、Spectroscopic diagnostics for ablation cloud of tracer-encapsulated solid pellet in LHD, Rev. Sci. Instrum. Vol.79、10F541-1-10F541-4、2008、査読有
- ④ S. Sudo、N. Tamura、2名、K. Sato(5番目)、2名、T. Ozaki(8番目)、1名、H. Funaba(10番目)、S. Mutoh(11番目)、5名、Multi-Functional Diagnostic Method with Tracer-Encapsulated Pellet Injection, Plasma Fusion Res.、Vol.2、S1069-1 – S1069-4、2007、査読有

[学会発表](計 39 件)

- ① T. Ozaki、Comparison of neutral particle flux decay times on the NBI plasmas in Large Helical Device、2008年12月9日、土岐市(日本)
- ② S. Sudo、Impurity transport study in the magnetic confinement device based on diagnostic method of tracer-encapsulated pellet injection、2009 International Workshop on Frontiers in Space and Fusion Energy Sciences、2009年12月1日、台南市(台湾)