

令和元年6月19日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04234

研究課題名(和文) 新型トレーサー内蔵ペレットを利用した不純物輸送特性の空間構造の解明とその応用研究

研究課題名(英文) Understanding the spatial structure of impurity transport characteristics with a new tracer-encapsulated solid pellet and its applied research

研究代表者

田村 直樹 (Tamura, Naoki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：80390631

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、磁場閉じ込め高温プラズマ中の不純物輸送特性の空間構造を特定し、その形成を担う物理機構を解明することを目的として、研究を進めた。大型ヘリカル装置で始まった重水素プラズマ実験で研究を進めることで、不純物輸送特性の空間構造に関する新たな知見を得ることができた。また、プラズマからの受熱装置であるダイバータにおける熱負荷低減のために不純物をあえて導入する方法をその空間構造を利用して高度化させる研究も実施し、そのための基礎データを取得することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

【学術的意義】

本研究で得られた研究成果は、様々なイオンと電子で構成される磁場閉じ込め高温プラズマに関する理解を深めるのに役立つものである。

【社会的意義】本研究で得られた、(1)磁場閉じ込め高温プラズマ中の不純物輸送特性の空間構造に関する新たな知見、(2)ダイバータにおける熱負荷低減のために不純物をあえて導入する方法の高度化に必要な基礎データは、核融合発電炉の早期実現に必要な技術の確立にも貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：One of the goals in this research project is to understand the spatial structure of impurity transport characteristics with a new tracer-encapsulated solid pellet. The experiment with the deuterium plasma in LHD gives us new information on the spatial structure of impurity transport characteristics. Another goal of this research project is to improve the efficiency of reducing a heat load on a divertor plate by introducing the impurity. The necessary basic data has been collected by this research project.

研究分野：プラズマ科学、核融合学

キーワード：プラズマ 核融合 ステラレーター 不純物輸送 不純物トレーサー トレーサー内蔵ペレット TESPE  
L

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 磁場閉じ込め方式の核融合研究は、国際熱核融合実験炉 ITER で行われる核燃焼プラズマ実験へ向けて、準備を進めている段階まで到達した。その準備において、不純物輸送に関する確実性の高い知的基盤の構築が重要であるが、未だ不十分な状況にある。そのため、ITER の真空容器内の表面保護材として使用が決まっているタングステンを含め、核融合炉での使用が予定されている様々な元素の磁場閉じ込め高温プラズマにおける輸送特性の実験データの取得及びその系統的な理解の獲得を目的として、現在世界各国のプラズマ閉じ込め実験装置で精力的に行われている。

(2) 研究代表者らはプラズマ中の不純物輸送を高い精度で計測する手法として、トレーサー内蔵固体ペレット (TESPEL) を用いる手法を開発した。核融合科学研究所の磁場閉じ込めプラズマ実験装置である大型ヘリカル装置 (LHD) における TESPEL を用いた最近の実験において、中性粒子ビームで加熱されたプラズマの密度が高くなると、壁から侵入してくるチタン (Ti) などの不純物がプラズマ中心部で観測されなくなる一方、トレーサーとして規格化プラズマ小半径位置 0.85 の位置に注入された不純物がプラズマ中心部に長時間保持されることを発見した。壁由来不純物について、その発生量が減少したためでないことは、TESPEL とアルゴン (Ar) ガスパフを組み合わせた実験で確認されている。また、同実験より、規格化小半径位置 0.9 程度までは Ar 粒子が存在していることが分かっている。この結果は、規格化小半径位置で 0.85 から 0.9 の間を境に不純物輸送特性が大きく異なっていることを示唆しているが、その理解は未だ実験的観測に留まっている。そこで、この比較的高密度の LHD プラズマにおいて確認された不純物輸送特性の空間構造に関する物理的理解を進展させることが重要と認識するに至った。また、周辺プラズマからの不純物がプラズマコア部に侵入しないという点は、ダイバータ熱負荷低減のために不純物導入を伴う高放射損失運転から見て、非常に魅力的な性質である。このことから、上述の空間構造を利用して、ITER 以後の装置において必須である高放射損失運転シナリオの高度化を図ることを着想するに至った。

### 2. 研究の目的

(1) 磁場閉じ込め高温プラズマにおける不純物粒子の制御に対して重要な役割を果たすと考えられる不純物輸送特性の空間構造を特定し、その形成を担う物理機構を解明することを目的とする。

(2) 上記(1)でその物理的理解が進んだ不純物輸送特性の特異な空間構造を利用して、ダイバータ熱負荷低減のために不純物をあえて導入する高放射損失運転シナリオの高度化を図ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

不純物トレーサーの注入位置をより一層変化させられるように新たな TESPEL を開発する他、既存の TESPEL 入射装置を改造する。不純物トレーサーの注入位置の同定は、異なる 2 方向から高速カメラによって得られた映像をステレオ処理することで、3 次元的に行う。得られた実験データを 1 次元不純物輸送コードの結果と比較する。閉じ込め配位や加熱手法の違いなどが不純物輸送特性の空間構造に及ぼす影響について調べる。本研究でその詳細を明らかにする不純物輸送特性の特異な空間構造と高放射損失運転、それぞれが両立、共存するような運転領域を検討し、実験での実証に取り組む。特に、高放射損失運転シナリオにおいて必須と考えられているデータメントとの共存の可能性を検討し、その実証を試みる。

### 4. 研究成果

(1) 不純物トレーサーの配置位置制御性を高めることを目的として、新しいトレーサー内蔵固体ペレット (TESPEL) を開発した。具体的には、従来、一重殻構造であった TESPEL に対して、新たに二重殻構造の TESPEL を開発した。これにより、二重殻の内、どちらかに不純物トレーサーを含めることで、不純物輸送特性が大きく変化すると考えられるプラズマ周辺部、すなわち、規格化小半径位置で 0.85 から 0.9 の間の近くに、もしくは外側に、非常に限定的に不純物トレーサーを配置することができるようになった。今回開発した二重殻 TESPEL では、殻の材料としてジクロロポリスチレンを用いており、そこに含まれる「塩素」が不純物トレーサーとなる。

ジクロロポリスチレン殻を二重殻 TESPEL の内殻にしたもの、外殻にしたもの、それぞれを用いて試験的に実験を行ったところ、同殻を内殻とした場合は問題なく入射できたものの、同殻を外殻とした場合はプラズマに侵入する前に、TESPEL 入射装置で壊れている可能性が高いことが分かった。TESPEL 入射装置不具合等の理由により、本研究の目的は完全には達成できなかったが、目的達成を確実なものとするためには、不純物トレーサー含有殻を外殻とする二重殻 TESPEL は必要不可欠である。現在、ジクロロポリスチレン殻を外殻とする二重殻 TESPEL の強度を高める改良を進めているところである。また、不純物輸送の原子番号依存性の観点から、「塩素」以外の元素による二重殻 TESPEL の作成についても検討を進めているところである。

(2) 不純物輸送特性の特異な空間構造を利用した高放射損失放電の高度化に関して、これまでに高放射損失放電のために用いられた元素の原子番号に近く、より最適な元素の選定を進めた。その選定結果の検証として、これまでに入射したことのない高原子番号の不純物トレーサーを封入した TESPEL 入射実験を行い、高度化のために必要な重要な基礎データを取得した。その基礎データを基にした実験を最終年度に予定していたが、残念ながら、TESPEL 入射装置不具合のために実施することができなかった。今後、他の研究費の支援により、実験を実施する予定である。

(3) 既存の真空紫外分光器の中性子及びガンマ線対策を重点的に実施したことで、LHD で現在実施されている重水素プラズマ実験においても、軽水素プラズマ実験時と同様に、実験データを取得できるようになった。これを受け、当初の計画には含まれていなかったが、不純物輸送における背景イオンの質量依存性についても研究を進めた。その結果、同依存性に関する初期的結果を得ることができた。具体的には、実験で得られたプラズマの密度の範囲(線平均電子密度で約  $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  まで)において、電子サイクロトロン共鳴波で加熱された軽水素プラズマでは、不純物がプラズマ中心部に溜まる現象(これを「不純物蓄積」という)が発生しない一方、重水素プラズマでは不純物蓄積が発生することが分かった。これらの傾向は、TESPEL によって注入された不純物トレーサー、Ar ガスパフによって導入された不純物それぞれで確認されている。このことは、電子サイクロトロン共鳴波で加熱された重水素プラズマには、「研究開始当初の背景」で述べたような、中性粒子ビームで加熱された軽水素プラズマの周辺部においてその存在が示唆されている、不純物輸送特性が大きく変化する領域が存在しないことを示唆している。この違いが、背景イオン種の違いによるものか、加熱手法によるものかについて、今後詳しく調べていく予定である。

#### <引用文献>

C. Angioni, P. Mantica, T. Putterich, M. Valisa, M. Baruzzo, E.A. Belli, P. Belo, F.J. Casson, C. Challis, P. Drewelow, C. Giroud, N. Hawkes, T.C. Hender, J. Hobirk, T. Koskela, L. Lauro Taroni, C.F. Maggi, J. Mlynar, T. Odstrcil, M.L. Reinke, M. Romanelli and JET EFDA Contributors, Nuclear Fusion, Vol.47, 2014, pp.083028-1 - 083028-26

S. Sudo, N. Tamura, S. Muto, H. Funaba, C. Suzuki, A. Murakami, I. Murakami, Y. Yoshimura and the LHD Experiment Group, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 55, 2013, pp. 095014-1 - 095014-16

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計 18 件)

Tamura N., Suzuki C., Satake S., Nakamura Y., Nunami M., Funaba H., Tanaka K., Yoshinuma M., Ida K., Sudo S., LHD Experiment Group, Observation of the ECH effect on the impurity accumulation in the LHD, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.24, pp.056118-1 - 056118-9  
DOI: 10.1063/1.4983626

Tamura Naoki, Sudo Shigeru, Suzuki Chihiro, Funaba Hisamichi, Takagi Masaru, Satoh Nakahiro, Hayashi Hiromi, Maeno Hiroya, Yokota Mitsuhiro, Ogawa Hideki, Improvements in a Tracer-Encapsulated Solid Pellet and Its Injector for More Advanced Plasma Diagnostics, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.823, pp. 012003-1 - 012003-5  
DOI: 10.1088/1742-6596/823/1/012003

N. Tamura, S. Sudo, C. Suzuki, H. Funaba, Y. Nakamura, K. Tanaka, M. Yoshinuma, K. Ida and the LHD Experiment Group, Mitigation of the tracer impurity accumulation by EC heating in the LHD, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, Vol.58, pp.114003-1 - 114003-10  
DOI: 10.1088/0741-3335/58/11/114003

N. Tamura, M. Shoji, C. Suzuki, H. Funaba, H. Hayashi, H. Maeno, M. Yokota, H. Ogawa and S. Sudo, Development of a new tracer-encapsulated solid pellet injection system for more precise control of tracer-impurity-deposit location in LHD, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol.87, pp. 11D615-1 - 11D615-3  
DOI: 10.1063/1.4962041

Naoki Tamura, Shigeru Sudo, Chihiro Suzuki and Hisamichi Funaba, Creation of Impurity Source Inside Plasmas with Various Types of Tracer-Encapsulated Solid Pellet, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.10, pp.1402056-1 - 1402056-8  
DOI: 10.1585/pfr.10.1402056

##### [学会発表](計 51 件)

N. Tamura, C. Suzuki, H. Funaba, K. Mukai, Y. Yoshinuma, K. Ida, T. Fornal, A.

Czarnecka, M. Kubkowska, and LHD Experiment Group、Initial Results on Impact of Background Hydrogen Isotope on Impurity Behavior in the EC-heated LHD plasmas、45th European Conference on Plasma Physics、2018年

N. Tamura, C. Suzuki, K. Mukai, H. Funaba, Y. Yoshinuma, K. Ida, T. Fornal, A. Czarnecka, M. Kubkowska, and LHD Experiment Group、Characteristics of impurity transport in the EC-heated LHD plasmas、Joint meeting of the 26th International Toki Conference and the 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference、2017年

N. Tamura、Particle and impurity transport in enhanced confinement modes (招待講演)、16th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers、2017年

N. Tamura、Observation and Calculation of the ECRH Effect on the Tracer Impurity Accumulation in LHD (招待講演)、58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics、2016年

N. Tamura, M. Shoji, C. Suzuki, H. Funaba, H. Hayashi, H. Maeno, M. Yokota, H. Ogawa and S. Sudo、Development of a new tracer-encapsulated solid pellet injection system for more precise control of tracer-impurity-deposit location in LHD、21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics、2016年

N. Tamura, S. Sudo, C. Suzuki, H. Funaba, M. Takagi, N. Satoh, H. Hayashi, H. Maeno, M. Yokota and H. Ogawa、Improvements in a Tracer-Encapsulated Solid Pellet and Its Injector for More Advanced Plasma Diagnostics、10th Asia Plasma and Fusion Association Conference、2015年

N. Tamura, S. Sudo, C. Suzuki, H. Funaba, K. Tanaka, Y. Nakamura and LHD Experiment Group、Mitigation of Core Impurity Accumulation by EC Heating in LHD、20th International Stellarator/Heliotron Workshop、2015年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：鈴木 千尋

ローマ字氏名：(SUZUKI, chihiro)

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：助教

研究者番号(8桁)：30321615

研究分担者氏名：庄司 主

ローマ字氏名：(SHOHJI, mamoru)

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：00280602

研究分担者氏名：村上 泉

ローマ字氏名：(MURAKAMI, Izumi)

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：教授  
研究者番号（8桁）：30290919

研究分担者氏名：向井 清史  
ローマ字氏名：(MUKAI, kiyofumi)  
所属研究機関名：核融合科学研究所  
部局名：ヘリカル研究部

職名：助教  
研究者番号（8桁）：90632266

研究分担者氏名：舟場 久芳  
ローマ字氏名：(FUNABA, hisamichi)  
所属研究機関名：核融合科学研究所  
部局名：ヘリカル研究部

職名：助教  
研究者番号（8桁）：40300727

## (2)研究協力者

研究協力者氏名：須藤 滋  
ローマ字氏名：(SUDO, shigeru)

研究協力者氏名：Sergeev vladimir  
ローマ字氏名：(SERGEEV, vladimir)

研究協力者氏名：McCarthy kieran  
ローマ字氏名：(MCCARTHY, kieran)

研究協力者氏名：Kubkowska monika  
ローマ字氏名：(KUBKOWSKA, monika)

研究協力者氏名：Czarnecka agata  
ローマ字氏名：(CZARNECKA, agata)

研究協力者氏名：Fornal tomasz  
ローマ字氏名：(FORNAL, tomasz)

研究協力者氏名：佐藤 仲弘  
ローマ字氏名：(SATO, nakahiro)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。