

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01881

研究課題名（和文）複合トレーサー内蔵ペレットを用いた不純物蓄積回避スキームにおけるロバスト性の検証

研究課題名（英文）Verification of the robustness of methods to prevent impurity accumulation using a compound-tracer encapsulated solid pellet

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） 12,700,000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における不純物蓄積を回避するスキームにおいて鍵となる物理パラメータを実験的に明らかにすることを目的として研究を進め、低Z不純物と高Z不純物を共に含む複合トレーサー内蔵ペレットを開発し、同ペレットによる低Z不純物の挙動観測のために必要な荷電交換分光（CXС）計測システムを整備した。不純物蓄積回避スキームとしてECH加熱とICH加熱を選択し、それによる影響を異なる電子密度のプラズマで調べた。その結果、ICH加熱も不純物蓄積回避スキームとして有効であるが、ECH加熱による影響が顕著であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果として、まず、磁場閉じ込め高温プラズマ中の低Z不純物と高Z不純物の挙動を同時に測定することができる複合トレーサー内蔵ペレットの開発に成功したことは、本研究課題のみならず、原子分子物理といった様々な研究課題に活用することが可能であることから、その学術的意義は高いと考えられる。また、磁場閉じ込め高温プラズマにおける不純物蓄積回避スキームに関する知見が本研究により拡充されたことは、今後同スキームの物理機構解明に繋がるため、学術的意義は高い。さらに、そのことは同スキームの最適化、ひいては将来の核融合炉の効率化に繋がるため、社会的意義も高いと言える。

研究成果の概要（英文）：This research project aims to experimentally clarify the critical physical parameters in a scheme that avoids the accumulation of impurities in magnetically confined high-temperature plasmas. We have developed a new tracer-encapsulated solid pellet (TESPEL) containing low-Z and high-Z impurities. We have established a charge exchange spectroscopy (CXС) diagnostic, which is necessary for observing the behavior of low-Z impurities injected by such a TESPEL. As avoidance schemes for impurity accumulation, we selected electron cyclotron heating (ECH) and ion cyclotron heating (ICH) and examined their effects in plasmas with different electron densities. As a result, it was found that ICH is also effective as an avoidance scheme for impurity accumulation. Still, the impact of ECH is found to be particularly significant, rather than the impact of ICH.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ・核融合 炉心プラズマ 不純物輸送 不純物蓄積 トレーサー内蔵固体ペレット TESPEL

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

- (1) 核融合炉の炉心プラズマ内には、燃料となる水素同位体以外に様々な不純物が存在する。核融合炉の命運は、それら不純物を適切な量に制限できるかどうかにあると言っても過言ではなく、特に新古典輸送理論から予期される不純物がプラズマ内部に溜まってしまふ不純物蓄積現象をいかに回避するかは、核融合研究における最重要課題の1つとして、現在も実験と理論の両面から世界各国で精力的に研究が行われている。これまでに明らかになっている不純物蓄積回避スキームの一つとして、電子サイクロロン共鳴加熱(ECH)やイオンサイクロロン共鳴加熱(ICH)といった波動加熱の印加が挙げられる。残念ながら、その効果を生む物理機構については、新古典輸送の低減、乱流輸送の増大及びそれらの混合など幾つかの可能性が示唆されているものの、まだはっきりとは分かっていないのが実状であり、その解明が喫緊の課題となっている。
- (2) ヘリカルプラズマにおいては、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)での実験により、径電場が負電場という不純物蓄積が予想される状況であっても、イオン温度勾配を急峻にすると不純物蓄積が発生しないことが分かった。その原因について、イオン温度勾配(ITG)によって駆動される乱流の影響が指摘されているが、最新のジャイロ運動論・新古典輸送理論に基づくシミュレーションでも、イオン温度勾配による影響の顕著な例として考えられている不純物ホールは再現できていないなど、依然として不明な点も多く、その解明も喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では、不純物蓄積回避スキーム適用時に電子密度、電子・イオン温度及びそれらの勾配などを変化させることで不純物蓄積回避スキームのロバスト性の検証を通して、不純物蓄積回避スキームにおいて鍵となる物理パラメータを明らかにし、不純物蓄積回避スキームを支える物理機構の解明を目指すことを目的とする。
- (2) 本研究を飛躍的に加速させるために、不純物蓄積回避の度合いについては、低原子番号(Z)不純物と高原子番号(Z)不純物の両方について同時に調べることで、そのために必要な実験ツールを開発、整備することも本研究の目的である。

3. 研究の方法

- (1) LHDにおいて、トレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)を用いて導入した不純物がプラズマ中心部に蓄積するようなプラズマを生成する。同プラズマの電子密度などを若干変化させて、不純物蓄積回避スキームを適用する実験を行い、不純物蓄積回避スキームのロバスト性の評価として、不純物蓄積回避の度合いがどの程度影響を受けるかを調べる。
- (2) プラズマコア部における低Z不純物の蓄積状況を調べるために、TESPELによって入射される低Z不純物に特化した荷電交換分光(CXS)計測を新たに整備する。
- (3) 不純物蓄積回避の度合いを低Z不純物と高Z不純物の両方について同時に調べるために、低Z不純物と高Z不純物を両方含むことが可能な複合トレーサー内蔵固体ペレット(Compound-TESPEL)を新たに開発する。

4. 研究成果

- (1) プラズマコア部における低Z不純物の蓄積状況を調べるために、低Z不純物の密度分布を計測するための、専用のCXS計測システムを新たに整備した。
- (2) 不純物蓄積回避の度合いを低Z不純物と高Z不純物の両方について同時に調べるために、低Z不純物と高Z不純物を両方含むことが可能なCompound-TESPELを新たに開発した。異なる不純物種の微粒子を複数含むTESPELは既に開発済みであったが、この方式では既存のプラスチック中空球の中に低Z不純物の微粒子を計測可能なレベルまで封入しつつ、高Z不純物の微粒子も同時に封入するのが困難であった。そこで本研究では、プラスチック中空球の中に封入する不純物粒子として、低Z不純物と高Z不純物で構成される化合物に着目し、本研究の目的に相当、かつ封入可能な化合物を調査した。その結果、メタチタン酸リチウム(Li₂TiO₃)、六ホウ化ケイ素(SiB₆)、アルミン酸カルシウム(CaAl₂O₄)、塩化ナトリウム(NaCl)などが、適切な化合物不純物であることが分かった。次に、最適な化合物不純物量を調査するために、既存のプラスチック中空球に化合物不純物トレーサーを封入し、それを複数個プラズマに同時入射する手法を新たに開発した。同手法により、Li₂TiO₃を用いた予備実験を実施した結果、CXS計測に十分な量の低Z不純物を、現有の技術で開発可能

な Compound-TESPEL として入射できる見通しを得ることができた①。この結果を基に、これまでより大型となる直径 900 μm 、厚み 120 μm のプラスチック中空球を開発し、上記化合物粉末を封入させることで、Compound-TESPEL を完成させた。

- (3) LHD で生成される電子密度の大きく異なる、中性粒子ビーム入射装置 (NBI) により加熱されたプラズマへ開発した Compound-TESPEL を入射し、入射された不純物の基本的挙動を調べた。その結果、これまでよりも広い範囲における不純物の挙動の Z 依存性を明らかにした。図1は、Compound-TESPEL を線平均電子密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 及び $4\text{--}5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の LHD プラズマに入射した時、各不純物イオンからの発光線の空間積分値の減衰時定数の原子番号依存性を示す。図1に示すように、低密度では原子番号が増加するに従い、単調に減衰時定数が増加していることが明らかとなった。このことは、低密度プラズマであったものの、プラズマ中の径電場の極性が負であったことを示唆している。一方、この場合、高密度では低密度と比較して、大幅に減衰時定数が増加していることが分かるものの、その原子番号依存性については、単純に評価できるものではないことが分かった②。

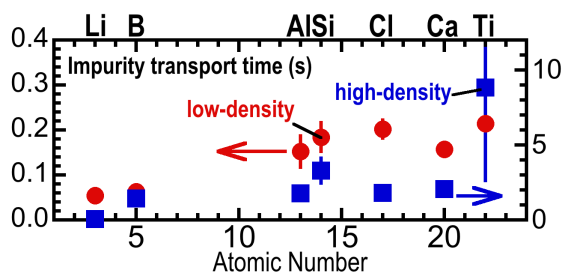


図1. 各不純物イオンからの発光線の空間積分値の減衰時定数の原子番号依存性

- (4) 線平均電子密度として約 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の NBI 加熱 LHD プラズマ中の不純物挙動に対する ICH 追加加熱の効果について調べた。例として図2に、時刻 3.945 秒に Li_2TiO_3 -TESPEL 入射後、時刻 3.995 秒から 5.045 秒まで入射パワー約 3 MW の ICH を印加した場合 (赤) と印加しなかった場合 (青) の Li-like TiXX (25.93 nm) 及び Be-like Ti XIX (16.96 nm) の時間発展を示す。図2に示すように、予備的な結果ではあるが、ICH 追加加熱を行うことで、不純物イオンからの発光線の空間積分値の減衰時定数は、ICH 追加加熱を行わない場合と比較して、小さくなることが分かった③。ただし、NBI 加熱 LHD プラズマ中の不純物挙動に対する ECH 追加加熱の効果④と比較すると、その効果は ECH 追加加熱の方が顕著であることがわかった。

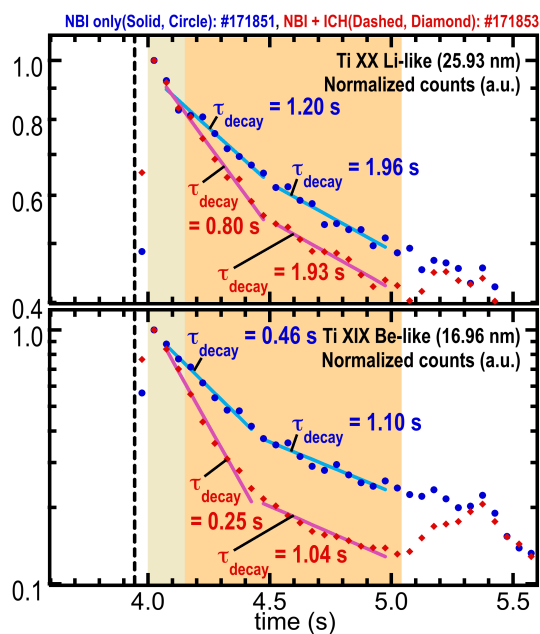


図2. ICH を印加した場合 (赤) と印加しなかった場合 (青) の Li-like TiXX (25.93 nm) 及び Be-like Ti XIX (16.96 nm) の時間発展

<引用文献>

- ① N. Tamura et al., Rev. Sci. Instrum. **92** (2021) 063516.
- ② N. Tamura et al., 47th EPS Conference on Plasma Physics, "Study of the Z-dependence of core impurity transport in LHD plasmas by means of a new type of TESPEL", Virtual, June 21-25, 2021.
- ③ N. Tamura et al., 10th Asia-Pacific Transport Working Group Meeting, "Effect of ICRH on core impurity behaviour and its Z-dependence in NBI-heated LHD plasmas", Korea, June 13-16, 2023.
- ④ N. Tamura et al., Phys. Plasmas. **24** (2017) 056118.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 7件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Mukai K., Kawamura G., Masuzaki S., Hayashi Y., Tanaka H., Peterson B.J., Oishi T., Suzuki C., Kobayashi M., Munechika K. | 4. 巻 33 |
| 2. 論文標題 Three-dimensional structure of radiative cooling in impurity seeded plasmas in the Large Helical Device | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy | 6. 最初と最後の頁 101294 ~ 101294 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2022.101294 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Suzuki Chihiro, Koike Fumihiro, Murakami Izumi, Kato Daiji, Tamura Naoki, Oishi Tetsutarou, Nakamura Nobuyuki | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Detailed Analysis of Spectra from Ga-like Ions of Heavy Elements Observed in High-Temperature Plasmas | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Atoms | 6. 最初と最後の頁 33 ~ 33 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms11020033 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Tamura N., Yoshinuma M., Yin X., Ida K., Suzuki C., Shoji M., Mukai K., Funaba H. | 4. 巻 92 |
| 2. 論文標題 A new multi-tracer pellet injection for a simultaneous study of low- and mid/high-Z impurities in high-temperature plasmas | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments | 6. 最初と最後の頁 063516 ~ 063516 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043495 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Tamura N., Hayashi H., Uejima N., Maeno H., Itoh Y., Yokota M., Ogawa H. | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Development of a double-barreled Tracer Encapsulated Solid Pellet (TESPEL) injection system for LHD | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Instrumentation | 6. 最初と最後の頁 C08003 ~ C08003 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/08/C08003 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------------|
| 1. 著者名 TAMURA Naoki, YOSHINUMA Mikiro, IDA Katsumi, SUZUKI Chihiro, GOTO Motoshi, OISHI Tetsutarou, SHOJI Mamoru, MUKAI Kiyofumi, FUNABA Hisamichi | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Simultaneous Observation of Silicon and Boron Impurity Behaviors in the Core Region of a Mid-Density LHD Plasma | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research | 6. 最初と最後の頁 1202094 ~ 1202094 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1202094 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Yoshinuma M., Ida K., Yamasaki K., Chen J., Murakami I. | 4. 巻 92 |
| 2. 論文標題 Measurements of radial profile of isotope density ratio using bulk charge exchange spectroscopy | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments | 6. 最初と最後の頁 063509 ~ 063509 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043607 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Suzuki Chihiro, Koike Fumihito, Murakami Izumi, Oishi Tetsutarou, Tamura Naoki | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Spectra of Ga-Like to Cu-Like Praseodymium and Neodymium Ions Observed in the Large Helical Device | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Atoms | 6. 最初と最後の頁 46 ~ 46 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms9030046 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Koike Fumihito, Suzuki Chihiro, Murakami Izumi, Kato Daiji, Tamura Naoki, Nakamura Nobuyuki | 4. 巻 105 |
| 2. 論文標題 Z-dependent crossing of excited-state energy levels in highly charged galliumlike lanthanide atomic ions | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 032802 ~ 032802 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.105.032802 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Mukai Kiyofumi, Masuzaki Suguru, Hayashi Yuki, Oishi Tetsutarou, Suzuki Chihiro, Kobayashi Masahiro, Tokuzawa Tokihiko, Tanaka Hirohiko, Tanaka Kenji, Kinoshita Toshiki, Sakai Hikona, Peterson Byron Jay | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Steady-state sustainment of divertor detachment with multi-species impurity seeding in LHD | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Fusion | 6. 最初と最後の頁 126018 ~ 126018 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac2bbc | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Mukai K., Peterson B. J., Ezumi N., Shigematsu N., Ohshima S., Miyashita A., Matoike R. | 4. 巻 92 |
| 2. 論文標題 Sensitivity improvement of infrared imaging video bolometer for divertor plasma measurement | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments | 6. 最初と最後の頁 063521 ~ 063521 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043664 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Sharov I A, Sergeev V Yu, Miroshnikov I V, Tamura N, Sudo S | 4. 巻 63 |
| 2. 論文標題 Spatial characteristics of luminous hydrocarbon pellet clouds in the large helical device | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion | 6. 最初と最後の頁 065002 ~ 065002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/abf314 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kato Daiji, Sakaue Hiroyuki A., Murakami Izumi, Goto Motoshi, Oishi Tetsutarou, Tamura Naoki, Funaba Hisamichi, Morita Shigeru | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Assessment of W density in LHD core plasmas using visible forbidden lines of highly charged W ions | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Fusion | 6. 最初と最後の頁 116008 ~ 116008 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac22d1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Suzuki Chihiro, Murakami Izumi, Koike Fumihiro, Higashiguchi Takeshi, Sakaue Hiroyuki A., Tamura Naoki, Sudo Shigeru, O'Sullivan Gerry | 4. 巻 49 |
| 2. 論文標題 Development of an experimental database of EUV spectra from highly charged ions of medium to high Z elements in the Large Helical Device plasmas | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 X-Ray Spectrometry | 6. 最初と最後の頁 78 ~ 84 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/xrs.3058 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Suzuki Chihiro, Koike Fumihiro, Murakami Izumi, Tamura Naoki, Sudo Shigeru, O'Sullivan Gerry | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Soft X-Ray Spectroscopy of Rare-Earth Elements in LHD Plasmas | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Atoms | 6. 最初と最後の頁 66 ~ 66 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms7030066 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

[学会発表] 計33件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 21件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Tamura, M. Kobayashi, G. Motojima, H. Kasahara, K. Hanada, O. Schmitz, A. Dinklage, K. Nagaoka, K. Ida, S. Serada, M. Yoshinuma, Y. Kawamoto, Y. Fujiwara, S. Kamio, H. Funaba, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Tokuzawa, I. Yamada, and R. Yasuhara |
| 2. 発表標題 Initial Results of He-beam experiments on LHD |
| 3. 学会等名 23rd International Stellarator-Heliotron Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 D. Moseev, H. Kasahara, N. Tamura, K. Tanaka, H. Igami, H. Funaba, T. Seki, I. Yamada, M. Yoshinuma, K. Ida, T. Kinoshita, H. Sakai, H.M. Smith, H.P. Laqua, R. Ouchoukov, V. Bobkov, S.A. Lazerson, F. Reimold, D. Hartmann, B. Alers, P. Xanthopoulos, Ye. O. Kazakov, and M. Salewski |
| 2. 発表標題 Accelerated impurity exhaust by means of ICRF heating at LHD |
| 3. 学会等名 23rd International Stellarator-Heliotron Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Tamura, R. Bussiahn, Th. Wegner, K.J. McCarthy, B. Buttenschoen, A. Dinklage, H. Funaba, I. Garcia-Cortes, M. Goto, K. Ida, M. Kubkowska, A. Langenberg, D. Medina-Roque, K. Mukai, T. Oishi, N. Pablant, C. Suzuki, M. Yoshinuma, D. Zhang, the TJ-II team, the W7-X team, and the LHD experiment group |
| 2. 発表標題 Study based on perturbations of plasma by TESPEL injections into magnetically confined high-temperature plasmas |
| 3. 学会等名 International Conference on Research and Applications of Plasmas 2023 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, D. Kato, N. Tamura, T. Oishi, N. Nakamura |
| 2. 発表標題 Detailed analysis of spectra from Ga-like ions of heavy elements observed in high temperature plasmas |
| 3. 学会等名 20th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 C. Suzuki, F. Koike, I. Murakami, N. Tamura, T. Oishi, N. Nakamura |
| 2. 発表標題 Soft X-ray spectroscopy and atomic physics of highly charged lanthanide ions in plasmas |
| 3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鈴木千尋、小池文博、村上泉、加藤太治、田村直樹、大石鉄太郎、中村信行 |
| 2. 発表標題 高温プラズマ中におけるガリウム様重元素イオンからの発光スペクトルの詳細解析 |
| 3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 K. Mukai, G. Kawamura, S. Masuzaki, Y. Hayashi, H. Tanaka, B.J. Peterson, T. Oishi, C. Suzuki, M. Kobayashi, K. Munechika |
| 2 . 発表標題 Three-dimensional structure of radiative cooling in impurity seeded plasmas in the Large Helical Device |
| 3 . 学会等名 25th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices (国際学会) |
| 4 . 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 K. Mukai, G. Kawamura, S. Masuzaki, Y. Hayashi, H. Tanaka, B.J. Peterson, T. Oishi, C. Suzuki, M. Kobayashi, K. Munechika |
| 2 . 発表標題 Relation between toroidally asymmetric behavior of divertor heat load and radiation structure in impurity seeded plasmas on LHD |
| 3 . 学会等名 31st International Toki Conference (国際学会) |
| 4 . 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 N. Tamura, H. Hayashi, N. Uejima, H. Maeno, Y. Ito, M. Yokota, H. Ogawa |
| 2 . 発表標題 Development of a Double-barreled Tracer-Encapsulated Solid Pellet (TESPEL) injection system for LHD |
| 3 . 学会等名 4th European Conference on Plasma Diagnostics (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 N. Tamura, M. Yoshinuma, K. Ida, C. Suzuki, M. Goto, T. Oishi, M. Shoji, K. Mukai, H. Funaba, and LHD experiment group |
| 2 . 発表標題 Study of the Z-dependence of core impurity transport in LHD plasmas by means of a new type of TESPEL |
| 3 . 学会等名 47th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田村 直樹, 吉沼幹朗, 居田克巳, 鈴木千尋, 後藤基志, 大石鉄太郎, 庄司主, 向井清史, 舟場久芳 |
| 2. 発表標題 新型TESPELを用いたLHDプラズマにおける不純物輸送特性のZ依存性研究 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Tamura, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Nagaoka, Y. Fujiwara, T. Oishi, M. Kobayashi, T. Kobayashi, M. Goto, C. Suzuki, Y. Hayashi, H. Funaba, S. Masuzaki, K. Mukai, G. Motojima, M. Nakata, H. Yamaguchi, R. Sakamoto, M. Shoji, O. Schmitz, R. Seki, K. Tanaka, T. Tokuzawa, I. Yamada and R. Yasuhara |
| 2. 発表標題 Experimental Study Towards Taming Mixed Ion Species Plasmas in 3D Magnetic Field |
| 3. 学会等名 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田村直樹, 小林政弘, 本島巖, 笠原寛史, 花田和明, Oliver Schmitz, Andreas Dinklage, 居田克巳 |
| 2. 発表標題 磁場閉じ込め高温プラズマにおける多元プラズマ研究の進展 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田村 直樹, 吉沼幹朗, 居田克巳, 大石鉄太郎, 後藤基志, 田中謙治, 徳沢季彦, 舟場久芳, 山田一博, 小林政弘, 本島巖, 笠原寛史 |
| 2. 発表標題 LHDプラズマにおける不純物混入時の水素同位体イオン分布の応答 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鈴木千尋 |
| 2. 発表標題 定常大型プラズマを活用した多価イオンの分光計測と原子過程研究 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Suzuki C., Koike F., Murakami I., Tamura N., Oishi T., Nakamura N. |
| 2. 発表標題 Analysis of EUV spectra of lanthanum and europium ions observed in the Large Helical Device |
| 3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鈴木千尋、小池文博、村上泉、田村直樹、大石鉄太郎、中村信行 |
| 2. 発表標題 大型ヘリカル装置におけるランタノイド元素多価イオンの極端紫外スペクトル解析の進展 |
| 3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Mukai, B. J. Peterson, G. Kawamura, K. Munechika |
| 2. 発表標題 Feature extraction from two-dimensional radiation images of impurity seeded plasmas on Large Helical Device |
| 3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田村直樹, 吉沼幹朗, 尹相輝, 居田克巳, 鈴木千尋, 庄司主, 向井清史, 舟場久芳, LHD実験グループ |
| 2. 発表標題 複合トレーサーによる高温プラズマ中の低Z/中間Z不純物の挙動の同時計測の試み |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kiyofumi MUKAI, Gakushi KAWAMURA, Suguru MASUZAKI, Yuki HAYASHI, Tetsutaro OISHI, Chihiro SUZUKI, Masahiro KOBAYASHI, Hirohiko TANAKA, Byron J. PETERSON, the LHD Experiment Group |
| 2. 発表標題 Toroidal asymmetry of divertor heat load reduction in N2 or Ne seeded plasmas on LHD |
| 3. 学会等名 29th International Toki Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 N. Tamura, M. Yoshinuma, X. Yin, K. Ida, C. Suzuki, M. Shoji, K. Mukai, H. Funaba |
| 2. 発表標題 A new double-tracer technique in the TESPEL scheme for a simultaneous study on behaviors of Low- and Mid/High-Z impurities in high-temperature plasmas |
| 3. 学会等名 23rd Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kiyofumi Mukai, Byron J. Peterson, Naomichi Ezumi, Yasuto Ando, Shinsuke Oshima, Akira Miyashita, Ryota Matoike |
| 2. 発表標題 Sensitivity Improvement of Infrared Imaging Video Bolometer for Divertor Plasma Measurement |
| 3. 学会等名 23rd Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M.Yoshinuma, K.Ida, K.Yamasaki, J.Chen, I.Murakami |
| 2. 発表標題 Measurements of radial profile of isotope density ratio using bulk charge exchange spectroscopy |
| 3. 学会等名 23rd Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kiyofumi Mukai, Byron J. Peterson, Naomichi Ezumi, Naoki Shigematsu, Shinsuke Ohshima, Akira Miyashita, Ryota Matoike |
| 2. 発表標題 ダイバータプラズマ計測を目的としたイメージングポロメータの高感度化 |
| 3. 学会等名 第37会プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鈴木千尋 |
| 2. 発表標題 重元素プラズマからの複雑な発光スペクトルと統計的解析手法の可能性 |
| 3. 学会等名 第37会プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 N. Tamura, R. Bussiahn, K.J. McCarthy |
| 2. 発表標題 Versatility and Flexibility of the Tracer-Encapsulated Solid Pellet as a Diagnostic Tool in Magnetic Fusion Plasma |
| 3. 学会等名 3rd European Conference on Plasma Diagnostics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Tamura |
| 2. 発表標題 Progress of the Large Helical Device (LHD) Project Toward Understanding Plasma Confinement by 3D External Coils |
| 3. 学会等名 Nature Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Tamura |
| 2. 発表標題 Impurity Transport Studies using TESPEL in stellarators: A comparison between TJ-II, W7-X and LHD |
| 3. 学会等名 22nd International Stellarator & Heliotron Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Mukai, S. Masuzaki, Y. Hayashi, C. Suzuki, T. Oishi, M. Kobayashi, H. Tanaka, B.J. Peterson and LHD Experiment Group |
| 2. 発表標題 Radiative Divertor Using Impurity Seeding on Large Helical Device |
| 3. 学会等名 22nd International Stellarator & Heliotron Workshop (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鈴木千尋、小池文博、村上泉、田村直樹、須藤滋、Gerry O'Sullivan |
| 2. 発表標題 LHDプラズマを用いた希土類元素の軟X線スペクトル研究の進展 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 向井清史 |
| 2. 発表標題 LHDにおける不純物ガス入射によるダイバータ熱負荷軽減 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 舟場久芳、渡邊清政、關良輔、村上定義、鈴木康浩、山田一博、安原亮、田中謙治、徳澤季彦、長壁正樹、山田弘司、榊原悟、LHD実験グループ |
| 2. 発表標題 LHDにおける高ベータ重水素プラズマの熱輸送解析 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Funaba, N. Tamura, C. Suzuki, M. Yoshinuma, K. Ida, K. Tanaka, S. Sakakibara and LHD Experiment Group |
| 2. 発表標題 Impurity Transport of Externally Injected Metal impurities in the LHD Plasma with Impurity Hole |
| 3. 学会等名 28th International Toki Conference（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| <p>プラズマ診断技術であるベレット入射に関する理解が進展 https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/Science/Paper_PPCF63-065002.html 異なる不純物を同時にプラズマ中に入射する新たな手法を開発 https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/Science/Paper_RS192-063516.html LHDにおけるプラセオジウム・ネオジウム多価イオンの発光線同定 https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/Science/Paper_ATOMS9-46.html</p> |
|---|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 吉沼 幹朗 (Yoshinuma Mikiro) (20323058) | 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902) | |
| 研究分担者 | 鈴木 千尋 (Suzuki Chihiro) (30321615) | 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902) | |
| 研究分担者 | 舟場 久芳 (Funaba Hisamichi) (40300727) | 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902) | |
| 研究分担者 | 向井 清史 (Mukai Kiyofumi) (90632266) | 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902) | |

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|-----------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 居田 克巳 (Ida Katsumi) | | |
| 研究協力者 | 後藤 基志 (Goto Motoshi) | | |
| 研究協力者 | 大石 鉄太郎 (Oishi Tetsutaro) | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | | |
|---------|-----------------------|--|--|--|
| ドイツ | マックスプランク・プラズマ物理研究所 | | | |
| スペイン | エネルギー・環境・科学技術研究センター | | | |
| ポーランド | プラズマ物理とレーザーマイクロ核融合研究所 | | | |
| 米国 | ウィスコンシン大学マディソン校 | | | |
| ロシア連邦 | サンクトペテルブルク工科大学 | | | |