

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03803

研究課題名（和文）高密度プラズモイドの空間内部測定による固体水素溶発素過程の研究

研究課題名（英文）Research on the ablation process of solid hydrogen via internal measurements of high-density plasmoid

研究代表者

本島 厳 (Motojima, Gen)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00509507

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、二次元ファイバアレイと高速度カメラを組み合わせ、核融合燃料である固体水素が溶発する際に生じる低電離高密度プラズモイド（ペレットが溶発した結果として生じるプラズマ塊）の電子密度の二次元空間分布を京都大学のヘリオトロンJ装置で世界で初めて測定した。固体水素の溶発機構理解のため、高速度カメラや分光機器を用いた実験プラットフォームを構築できたことになる。この結果は、ペレット溶発の基本メカニズムの理解を深めるだけでなく、溶発シミュレーションとの比較において貴重な情報となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合プラズマへの燃料供給法として固体水素入射の確立は重要な課題である。本研究の成果は、固体水素の溶発素過程の理解に大きく貢献するものであり、核融合プラズマの高密度化と燃料供給の最適化に貢献できるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we utilized a combination of a two-dimensional fiber array and a high-speed camera to conduct the world's first measurement of the two-dimensional spatial distribution of electron density inside low-ionization, high-density plasmoid (plasma clumps that form as a result of the sublimation of solid hydrogen, a nuclear fusion fuel) using the Heliotron J device at Kyoto University. These findings not only deepen our understanding of the basic mechanism of pellet ablation but also provide valuable information for comparison with ablation simulations.

研究分野：エネルギー理工学

キーワード：固体水素 溶発 高速分光 ファイバアレイ 高速度カメラ シュタルク拡がり

## 1. 研究開始当初の背景

将来の核融合炉における核燃焼プラズマの最も重要な制御法は、外部からの継続的で安定的な燃料粒子供給である。磁場閉じ込め核融合装置における有力な燃料粒子供給法の一つとして、直径が数 mm 程度の固体水素氷粒（以下、固体水素という）を 1 億程度 の高温プラズマ中に数千 m/s 程度でプラズマ中に入射する方法がある。入射された固体水素はプラズマによって加熱され、溶発しながらプラズマ中を飛翔し、高温プラズマ内部へ燃料水素を供給する。この方法の特長として、プラズマ中心への高効率な粒子供給が可能であることが挙げられ、プラズマ周辺で電離しプラズマ内部へ直接供給できない燃料気体の注入による粒子供給に比べて優れている。とはいうものの、核融合炉における高温プラズマでは、固体水素さえもプラズマ中心に到達する前に溶発してしまう可能性が指摘されており、**溶発の物理理解に基づく確固たる燃料供給制御の方策は未だ見出されていない状況**にある。

これまでの国内外の固体水素の溶発観測の多くはマクロ的なもので、固体水素の溶発の際に生じる**低電離高密度プラズモイド(固体水素が溶発した際にできるプラズマ塊)の内部分布計測を通して溶発過程を議論するには未だ至っていない**。高速度カメラ等を使った溶発イメージング計測はいくつか報告例があるが、高密度プラズモイドのサイズや溶発位置を同定するなどに用いられているだけで、内部分布評価を行うための計測は行われてこなかった。これまで、研究者らは、高速度カメラと狭帯域光学フィルタを組み合わせた高速イメージング分光計測を開発し、高密度プラズモイドの内部分布計測を可能にしてきた。しかしながら、これまでの計測では狭帯域光学フィルタによりスペクトルを推定するものであり、直接分光できるような高精度計測には至らなかった。

## 2. 研究の目的

**新しい高速分光計測手法を構築し、磁場構造、背景プラズマ、プラズマ加熱条件が高密度プラズモイドの内部分布に与える影響について定量的に調べることができるプラットフォームを構築**することが、本研究の目的である。高密度プラズモイドはイオン化されているため、磁場との相互作用を受けて複雑な挙動を示す。また、固体水素は一般的に背景プラズマからの熱流速によって溶発するが、加熱の際に生じる高速イオン、電子によっても溶発は影響を受ける。このため、上記の影響因子が高密度プラズモイドの内部分布および溶発量（溶発過程）にどのように影響を与えるのかを明らかにすることにより、各磁場条件・加熱手法に応じた燃料粒子供給シナリオの構築に貢献できる。

本研究は、局所的な電子密度・電子温度分布を直接計測して固体水素から形成された高密度プラズモイドの溶発過程を理解するものである。従来の単なる水素バルマー線の発光強度から評価する方法、またはプラズマ全体の密度の変化から評価する手法とは異なる直接的な手法を提案している。固体水素の溶発挙動を二次元イメージングとして可視化できることが独創的な点として挙げられる。また、**二次元ファイバアレイと高速度カメラと組み合わせることで高速分光計測を可能にしており、時間分解能と空間分解能が同時に得られる**点が挙げられる。これまでの分光器を用いた計測では、平均化された高密度プラズモイドの情報は得られるものの、空間分解能が得られなかったほか、イメージング計測についても研究報告はなされているが、時間分解能がないものであった。理論モデルとの検証を行えるだけの高密度プラズモイドの電子密度、電子温度分布を提供する実験結果は本研究以外では得られない。本研究による高密度プラズモイドの定量化は、これまでの理論モデルの検証を可能にするほか、高密度プラズモイドの複雑な挙動を予測し得る先進的な理論モデルの構築に貢献できる。

## 3. 研究の方法

高密度プラズモイドの観測として、京都大学・ヘリオトロン J(HJ)装置をプラットフォームに用いることにした。HJ は中型のプラズマ実験装置であり、観測ポートから高密度プラズモイドまでの距離が短く、高密度プラズモイドを観測しやすい利点があるほか、固体水素入射装置も設置されており、固体水素の溶発計測に適したプラットフォームを構築できていることが理由として挙げられる。

高密度プラズモイドの内部分布を測定する手法の構築には、以下の手順を踏むこととした。高密度プラズモイドの内部分布を測定する手法の構築にあたって、まず、**二次元ファイバアレイの仕様を策定**した。その後、二次元ファイバアレイを製作し、高速度カメラと組み合わせることで光学系を調整することとした。システムが構築できた後に、**HJ の観測ポートに設置して固体水素溶発の観測を行う**こととした。

また、**相補的な固体水素溶発の計測**として、高速度カメラによる溶発現象の観測や、近赤外域の Pa 線による分光計測も行った。

## 4. 研究成果

### (1) 二次元ファイバアレイの製作

まず、計測システムの根幹となるファイバアレイの仕様を策定するとともに、その製作を行った。高密度プラズモイドの溶発光の取り込みに使用するファイバアレイは空間分解能を確保するために、5.5 mm 四方に 12 本 × 12 本のファイバが並ぶ構造とした。他方、2 次元配列として取り込まれた光は 1 列に並び替えられ 1 次元配列としてスリットへ送られる仕様とした。このとき、配列に対する位置を特定しやすくするためにダミーベットと呼ばれる入力に無関係な情報としてファイバ 7 本を加え、スリットへはファイバ 151 本分の情報が縦一列に約 35 mm 幅で送る仕様とした。上記の仕様を満たすファイバアレイを製作した。次に、ファイバアレイによって高密度プラズモイドの発光を取り込んだ後の仕様を決定した。具体的には、高さ 35 mm のスリットを撮影素子のサイズが  $17.6 \times 13.2 \text{ mm}^2$  の高速度カメラでスペクトル分解できるようにシステムを構築した。その結果、高速度カメラを用いてスリット高さ 35 mm を測定する際は、焦点距離 135 mm の集光レンズを用いた分光システムではレンズ間距離が 21 cm 以内であればスリット全体を測定可能であることがわかった。また、焦点距離 180 mm の集光レンズを用いた分光システムではスリット高さ全体を測定することはできないが、より高分散での測定が可能となる。その場合、レンズ間距離は 21 cm 以上離せば良いことがわかった。図 1 に計測システムの概要を示す [1]。

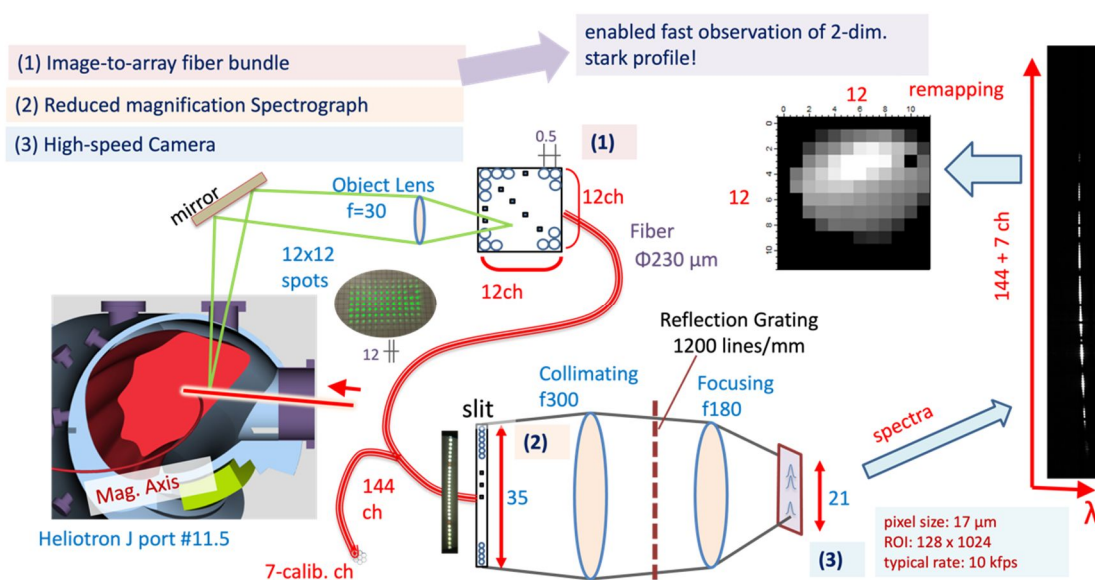


図 1 計測システムの概要

### (2) 二次元ファイバアレイによる計測

次に、固体水素の溶発によって形成される高密度プラズモイドの 2 次元内部分布を測定可能な高速分光計測を構築することとし、自作した分光器と高速度カメラを組み合わせ、水素原子 H 線のシュタルク広がりを高速に測定する計測システムを構築した。電子密度・電子温度を評価した文献 (C. Stehle+, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1999) の計算コードを参照し、H 線の半値全幅計測値から電子密度を評価する検量線を定式化した。この結果、高密度プラズモイドの電子密度の測定下限値として想定した  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  に対応する半値全幅 0.03 nm を設計使用の目安に策定した。開発した分光器の装置関数は、あるスリット幅で水素光源を測定したときの H 線の半値全幅として評価した。装置仕様から計算される逆線分散が 4.666 nm/mm であるのに対し、実測された計測システムの逆線分散は 4.653 nm/mm であり、その誤差は -0.28% であった。入口スリットが広い場合の装置幅はこの逆線分散で決まり、入口スリットの幅を 100  $\mu\text{m}$  に設定することにより、入射光量の確保と必要な分解能を最適化できることを示した。

ペレット入射軌跡に沿ったアライメント調整を実施し、初めてペレット溶発雲の詳細な内部分布測定が可能となった。図 2 では、ペレット溶発雲の水素バルマーベータ線の発光強度分布、および水素バルマーベータ線のシュタルク幅から評価した電子密度分布を示されている。**電子密度の範囲は、 $2.5 \times 10^{19}$  -  $1.1 \times 10^{21} [\text{m}^{-3}]$  であることがわかった。**本計測はペレット溶発のシミュレーション結果との実験、理論比較に有用であり、今後スペイン CIEMAT

との共同研究で進めている理論シミュレーション結果と詳細に比較する予定である。

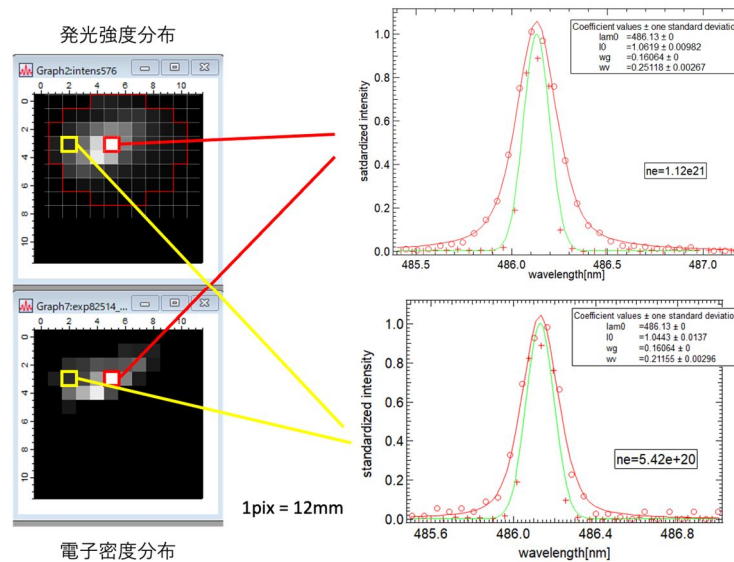


図 2 ペレット溶発雲の電子密度内部分布[2]

### (3) 相補的な観測

相補的な観測として、高速度カメラでペレット溶発雲のフィラメント構造を有する揺動成分が観測された(図 3)。この揺動成分は磁力線に沿って広がっており、画像処理解析により、規格化揺動強度は 15%程度であり、揺動によるペレット粒子の散逸は無視できない可能性があることが示唆された[2]。この結果は、磁場構造と揺動の理解に重要な知見を与え、

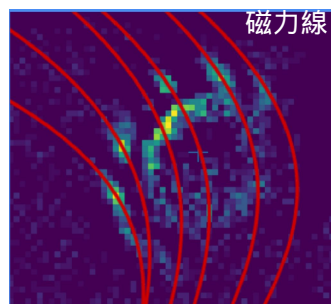


図 3 溶発画像から抽出されたペレット溶発雲周辺の揺動成分 [2]

今後のペレット粒子供給の最適化につながると考えられる。

また、Pa を用いたペレット溶発雲の電子密度測定について報告する。ペレット入射法の開発は将来の核融合プラズマへの燃料供給方法のひとつとして重要な課題であり、ペレット溶発過程解明は核融合プラズマの高密度化の物理過程の理解、燃料供給の最適化にとって重要である。ヘリオトロン J では、本研究により、小サイズの固体水素ペレット入射が整備され、ペレット溶発雲の物理解理解を目指したさまざまな分光計測が可能となった。本研究では近赤外域の Pa (1875.13 nm) 線を適用する原理検証を行った。シュタルク幅はおおよそ波長の 2 乗に比例するため、Pa は通常用いられる同じ上準位を持つ可視領域の H (486.13 nm) 輝線に比べ、3 倍程度広い。従って、要求される分光器の波長分解能を低くで

きる、あるいは測定密度下限を下げられる利点がある。本研究では、シュタルク広がりから電子密度を決定するため、溶発雲プラズマは低温・高密度の局所熱平衡状態で温度を 1 eV と仮定し、電子密度  $10^{17}$ - $10^{23} \text{ m}^{-3}$  の範囲でスペクトルプロファイルを計算し、シュタルク幅を求め、その対応関係の定式化を行った。実験には、512 チャンネル InGaAs 検出器、有効感度 800-2150 nm、逆線分散 96.6 nm/mm、スリット幅 100  $\mu\text{m}$  の低分散簡易分光器で計測を行った。装置幅 14.86 nm の 10 分の 1 程度をシュタルク広がり分解能とみなすと測定密度下限が  $3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  程度と評価できた[3]。この結果は、**本研究で開発された二次元ファイバアレイを用いた分光計測と同定であり、相補的な計測により、高密度プラズモイドの電子密度が同定されたことになる。**

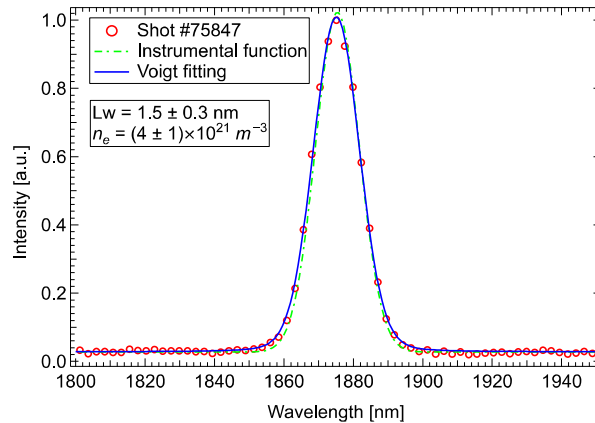


図 4: ペレット入射時の Pa スペクトル (#75847)

- [1] S. Kado et al., to be submitted.
- [2] S. Ohshima et al., Scientific Reports, **12** (2022), pp. 1-9.
- [3] A. Iwata et al., Review of Scientific Instruments **93** (2022), pp. 113537.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>G. Motojima, H. Okada, H. Okazaki, S. Kobayashi, K. Nagasaki, R. Sakamoto, H. Yamada, S. Kado, S. Ohshima, T. Minami, N. Kenmochi, Y. Ohtani, Y. Nozaki, Y. Yonemura, Y. Nakamura, S. Konoshima, S. Yamamoto, T. Mizuuchi and K. Y. Watanabe | 4. 巻<br>61          |
| 2. 論文標題<br>High-density experiments with hydrogen ice pellet injection and analysis of pellet penetration depth in Heliotron J   | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>Plasma Physics and Controlled Fusion   | 6. 最初と最後の頁<br>75014 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6587/ab1d40   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>S. Ohshima, T. Suzuki, R. Matoike, G. Motojima, S. Kado, A. Mori, A. Miyashita, S. Kobayashi, T. Minami, A. Iwata, D. Qiu, C. Wang, M. Luo, P. Zhang, Y. Kondo, N. Nishino, T. Mizuuchi, H. Okada, S. Konoshima, S. Inagaki, K. Nagasaki | 4. 巻<br>12      |
| 2. 論文標題<br>Three-dimensional dynamics of fluctuations appearing during pellet ablation process around a pellet in a fusion plasma experiment   | 5. 発行年<br>2022年 |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports   | 6. 最初と最後の頁<br>1 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-022-18239-z   | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>A. Iwata, S. Kado, M. Murakumo, T. Shikama, G. Motojima, A. Mori, C. Feng, H. Okada, T. Minami, S. Ohshima, S. Kobayashi, A. Ishizawa, Y. Nakamura, S. Konoshima, T. Mizuuchi, K. Nagasaki | 4. 巻<br>93           |
| 2. 論文標題<br>Measurement of Pa line from pellet ablation cloud in Heliotron J  | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Review of Scientific Instruments   | 6. 最初と最後の頁<br>113537 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0101885  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>森敦樹, 門信一郎, 本島巖, 岩田晃拓, 岡野竜成, 馮超, 岡田浩之, 南貴司, 大島慎介, 小林進二, 中村祐司, 石澤明宏, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸 |
| 2. 発表標題<br>ヘリオトロンJにおける2次元高速分光計測器を用いた水素ペレット溶発雲の計測   |
| 3. 学会等名<br>第38回プラズマ・核融合学会  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>鈴木琢土, 大島慎介, 森敦樹, 的池遼太, 宮下顕, 本島巖, 門信一郎, 南貴司, 小林進二, 長崎百伸, 西野信博, 水内亨, 岡田浩之, 木島滋 |
| 2. 発表標題<br>ペレット溶発過程に観測されたフィラメント状揺動の特性   |
| 3. 学会等名<br>第38回プラズマ・核融合学会   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>森敦樹, 門信一郎, 本島巖, 岩田晃拓, 岡野竜成, 馮超, 岡田浩之, 南貴司, 大島慎介, 小林進二, 中村祐司, 石澤明宏, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸 |
| 2. 発表標題<br>ヘリオトロンJにおけるペレット溶発雲の2次元計測のための変倍分光器の開発  |
| 3. 学会等名<br>第37回プラズマ・核融合学会  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>岡野竜成, 門信一郎, 岩田晃拓, 森敦樹, 馮超, 岡田浩之, 南貴司, 大島慎介, 小林進二, 本島巖, 中村祐司, 石澤明宏, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸 |
| 2. 発表標題<br>ヘリオトロンJの固体水素ペレット入射実験における真空紫外スペクトルの時間発展計測  |
| 3. 学会等名<br>第37回プラズマ・核融合学会  |
| 4. 発表年<br>2020年  |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>清水佑馬, 門信一郎, 本島巖, 岡田浩之, 南貴司, 大島慎介, 小林進二, 中村祐司, 石澤明宏, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸, 岩田晃拓, 岡野竜成, 森敦樹 |
| 2. 発表標題<br>ヘリオトロンJにおける固体水素ペレット溶発プラズモイド由来のシュタルク広がりを持つスペクトルの測定                                   |
| 3. 学会等名<br>第36回プラズマ・核融合学会  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>門信一郎, 清水佑馬, 本島巖, 岡野竜成, 岩田晃拓, 岡田浩之, 南貴司, 小林進二, 大島慎介, 中村祐司, 石澤明宏, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸 |
| 2. 発表標題<br>ヘリオトロンJペレット入射プラズマの分光診断   |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第75回年次大会  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>G. Motojima, S. Kado, S. Ohshima, A. Mori, T. Suzuki, N. Panadero, K. J. McCarthy, M. Goto, R. Sakamoto, K. Nagasaki |
| 2. 発表標題<br>Spatio-temporal structure of pellet-plasmoid in high-temperature plasmas   |
| 3. 学会等名<br>6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 9-14 Oct, 2022, Remote e-conference (招待講演) (国際学会)                     |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>S. Kado, A. Iwata, T. Shikama, Y. Iida, G. Motojima and Heliotron J team  |
| 2. 発表標題<br>Recent Development of Near-infrared Spectrometry in the Application to Fusion-relevant Magnetic Confinement Plasmas |
| 3. 学会等名<br>20TH INTERNATIONAL CONGRESS ON PLASMA PHYSICS, November 27-December 2, 2022 GYEONGJU, KOREA (招待講演) (国際学会)           |
| 4. 発表年<br>2022年  |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>A. Iwata, S. Kado, M. Murakumo, T. Shikama, G. Motojima, A. Mori, C. Feng, H. Okada, T. Minami;, S. Ohshima, S. Kobayashi, A. Ishizawa, Y. Nakamura, S. Konoshima, T. Mizuuchi, K. Nagasaki |
| 2. 発表標題<br>Measurement of Pa Line from Pellet Ablation Cloud in Heliotron J  |
| 3. 学会等名<br>High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD), New York, on May 15-19, 2022 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>村雲南斗, 四竈泰一, 茶谷智樹, 門信一郎, 大島慎介, 鈴木琢土, 森敦樹, 岩田晃拓, 本島巖, 南貴司, 小林進二, 石澤明宏, 中村祐司, 西野信博, 岡田浩之, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸, 蓮尾昌裕 |
| 2. 発表標題<br>ヘリオトロンJ中水素ペレット溶発プラズマのパッシェン線ゼーマン効果計測   |
| 3. 学会等名<br>物理学会2022秋季大会  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>岩田晃拓, 門信一郎, 本島巖, 四竈泰一, 村雲南斗, 森敦樹, 岡田浩之, 南貴司, 大島慎介, 稲垣滋, 小林進二, 石澤明宏, 中村祐司, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸 |
| 2. 発表標題<br>小型ペレット溶発雲におけるシュタルク広がり計測への装置関数の影響   |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2022秋季大会   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>村雲南斗, 四竈泰一, 門信一郎, 大島慎介, 鈴木琢土, 茶谷智樹, 森敦樹, 岩田晃拓, 本島巖, 南貴司, 小林進二, 石澤明宏, 中村祐司, 西野信博, 岡田浩之, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸, 蓮尾昌裕 |
| 2. 発表標題<br>パッシェン線のゼーマン効果を用いたヘリオトロン J 中水素ペレット溶発雲の位置計測   |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2023春季大会  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>岩田晃拓, 門信一郎, 本島巖, 四籠泰一, 村雲南斗, 森敦樹, 岡田浩之, 南貴司, 大島慎介, 稲垣滋, 金史良, 小林進二, 石澤明宏, 中村祐司, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸 |
| 2. 発表標題<br>ヘリオトロンJにおけるバッシュン系列を用いた小型水素ペレット溶発プラズモイドの電子温度推定   |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2023春季大会  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|                           |                       |    |

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       |  |  |
|---------|---------------|--|--|
| スペイン    | エネルギー環境技術センター |  |  |