

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01054

研究課題名（和文）シュタルク・ゼーマン効果の高感度計測を利用した磁場閉じ込めプラズマ診断法の開発

研究課題名（英文）Development of spectroscopic diagnostic methods for magnetically confined plasmas using high sensitivity measurements of Stark and Zeeman effects

研究代表者

四竈 泰一（Shikama, Taiichi）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80456152

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：近赤外の水素・ヘリウム原子輝線スペクトルを用いてシュタルク・ゼーマン効果を高感度計測することで、2種類のプラズマ診断法：課題1：ゼーマン効果の高感度計測による原子輝線スペクトル空間分解法，課題2：ACシュタルク効果の高感度計測によるマイクロ波電場ベクトル診断法，を実現するための研究を行った。高波長分解・高スループットの近赤外分光システムを構築し，課題1では，ヘリウム原子輝線を対象として実験を行い，1視線の受動分光のみによる空間分解法を実現した。課題2では，重水素原子輝線を対象として実験を行い，ACシュタルク効果の可能性のあるスペクトル形状変化を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

課題1では，可視輝線を用いて行われた先行研究と比較して空間分解能が向上し，磁場が弱い装置でも計測を行うことが可能となった。今後，計測対象を水素原子や不純物原子・イオン（希ガス，酸素，タングステン等）の輝線に広げることができれば，原型炉や商用炉への実装につながることを期待される。課題2では，大電力マイクロ波を用いたドレスト原子生成はこれまでほとんど研究例がなく，新たな試みである。今後，検出を確定できれば，新たなドレスト原子応用分野を開拓できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Using high-sensitivity measurements of the Stark and Zeeman effects on near-infrared hydrogen and helium atomic emission line spectra, we conducted research to achieve two plasma diagnostic methods. Task 1 focused on spatial resolution of atomic emission line spectra through high-sensitivity measurements of the Zeeman effect. Task 2 aimed to diagnose microwave electric field vectors through high-sensitivity measurements of the AC Stark effect. A high-wavelength-resolution, high-throughput near-infrared spectroscopic system was constructed for this purpose. In Task 1, we conducted experiments targeting helium atomic emission lines and achieved spatial resolution using passive spectroscopy along a single line of sight. In Task 2, we conducted experiments targeting deuterium atomic emission lines and observed spectral shape changes that may indicate the presence of the AC Stark effect.

研究分野：プラズマ光学

キーワード：近赤外分光 周辺プラズマ 逆変換 マイクロ波 ECH

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉の開発では、今後、ITER や DEMO をはじめとする強磁場・大電力加熱の実験が中心となり、電磁場を利用したプラズマ診断の重要性が高まると考えられる。電磁場を利用した診断は、分光ではシュタルク・ゼーマン効果による輝線の波長分裂を用いて行われるが、可視分光の場合、これらの分裂は線幅(ドップラー広がり)と分光器装置幅)に隠されてしまい精密計測が難しい。そこで本研究では、シュタルク・ゼーマン効果、ドップラー効果、装置幅の波長依存性の違いに着目し、近赤外分光を使ってシュタルク・ゼーマン効果を高感度で計測することを目指した。また、この結果得られる精密な電磁場情報を利用することで、2種類の革新的なプラズマ診断法を実現することを具体的な目的とした。

2. 研究の目的

核融合プラズマの分光計測にはミリ秒以下の時間分解が必要となるため、可視分光に比べて光強度が小さく検出器のノイズが大きい近赤外分光では、十分なS/Nを得ることが課題となる。波長分解能と光量はトレードオフの関係にあるため、高い波長分解を得るには、分光システムのスループット向上が重要となる。

本研究では、近赤外の水素・ヘリウム原子輝線スペクトルを高波長・高時間分解で観測可能な分光システムを構築し、また、構築したシステムを用いてスペクトルのシュタルク・ゼーマン効果を高感度計測し、2種類のプラズマ診断法(課題1,2)を実現することを目的とした。

(1) 課題1: ゼーマン効果の高感度計測による原子輝線スペクトル空間分解法

プラズマから放射される原子輝線の分光では、視線に沿った線積分スペクトルしか計測できない。このため、空間分解するには、多視線CTやレーザー誘起蛍光等の追加手法が必要となる。しかし、視線やビーム配置が制限される核融合炉の周辺部では、これらの手法は適用が難しく、また、空間対称性が少ないプラズマでは、広範囲の計測が必要だが、その実施は容易でないという課題がある。

本研究では、これらの制限を緩和できる1視線の受動分光のみでの空間分解法を実現することを目的とした。磁場強度が大きく(> ~0.1 T オーダー)かつ磁場の空間勾配が存在する場合には、輝線スペクトルの磁場効果(ゼーマン効果)および、空間位置と磁場の対応を利用することによって、追加手法無しで空間分解が可能となる[1]。この原理は、高温プラズマのECE計測、天体のストークス偏光分光、生体のMRI診断などで実用化されているが、放電プラズマの受動分光ではほとんど使われていない。これは、一般に観測されている可視の輝線スペクトルでは、ゼーマン効果の大きさがドップラー幅や装置幅以下になってしまい、精密計測が難しいためである。そこで、ゼーマン効果の高感度計測により、受動分光でもこの原理を利用できるようにすることを目指した。

(2) 課題2: ACシュタルク効果の高感度計測によるマイクロ波電場ベクトル診断法

マイクロ波を利用したプラズマ生成と加熱は、プラズマの工学応用に不可欠な要素技術であり、利用分野は、CVD、イオンエンジン、イオン源、核融合など幅広い。しかし、装置内におけるマイクロ波の強度・吸収の空間分布を計測することは容易でないため、分布が明確には分かっていない場合も多い。強度・吸収分布の解明によるプラズマ加熱の最適化のため、マイクロ波電場計測の研究が行われており、電気光学素子を用いたプローブ法や、非協同トムソン散乱法などが提案・実施されている。これらの方法は有効性が示されているものの、プラズマへの擾乱や大掛かりな装置が必要といった課題もある。本研究では、これらの手法と相補的に利用可能な、受動分光のみによるマイクロ波電場計測法を開発することを目的とした。

計測には、原子のシュタルク効果を利用する。レーザー光のように電場に時間的コヒーレンスがある場合、原子のエネルギー準位の上下に電場の振動エネルギーの整数倍の間隔を持つ準位が形成される(ACシュタルク効果[2], 図1)。この状態の原子はドレスト原子とも呼ばれる。本課題では、プラズマ加熱用ジャイロトロンから放射されるマイクロ波で作られるドレスト重水素原子の輝線スペクトル(図1下)を観測対象とした。実験に用いた70 GHzマイクロ波の場合、可視の輝線ではACシュタルク効果で生じるサブピークと中心ピークの波長差が、ドップラー幅・装置幅と同程度となり観測が難しい。そこで高感度計

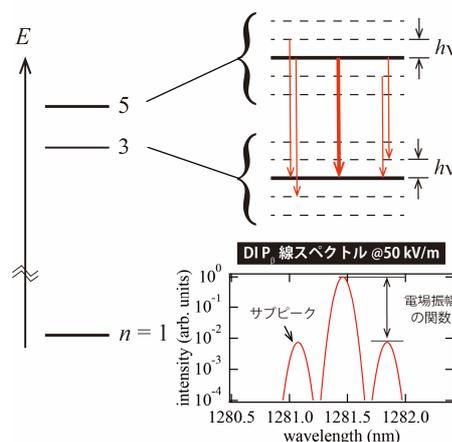


図1. 重水素原子パッシェンβ線の ACシュタルク効果。

測を利用し、近赤外のパッシュェンβ線（波長 1281 nm）を観測することでサブピークを中心ピークから分離できるようにした。

### 3. 研究の方法

課題 1, 2 とともに、京都大学の磁場閉じ込めプラズマ装置ヘリオトロン J を用いて実験を行った。

#### (1) 課題 1

高波長分解と高スループットを両立した近赤外分光システムを構築した(図 2)。プラズマからの発光を、偏光ビームスプリッタと 2 個の反射型コリメータを用いて、磁場に平行・垂直に近い直交 2 方向の直線偏光成分に分離して集光した。偏光分離した光は、各々 7 本バンドルの光ファイバを用いて伝送し、分光器（焦点距離 1 m、回折格子 720 本/mm）にダブルスリットを通して入射した。分光器出口では、スリット方向に光ファイバ 7 本に対応するスペクトルが並び、さらに 2 つの偏光成分のスペクトルが波長方向にずれて重なる。この像を 2 枚の円筒レンズを用いて波長方向 2.2 倍、スリット方向 1/7 倍に整形し、InGaAs リニアイメージセンサ（512 画素、画素サイズ 25 μm×250 μm）上に結像してスペクトルを得た。

実験は、#10.5 ポロイダル断面で図 3 に示す視線を用いて行った。240 kW の ECH 放電で約 200 ms 間生成した重水素プラズマ中にヘリウムを注入し、ヘリウム原子 2<sup>3</sup>S-2<sup>3</sup>P 輝線スペクトル（波長 1083 nm）を計測した。分光器は 2 次回折光を使用し、波長分解能は 45 pm であった。

#### (2) 課題 2

70 GHz マイクロ波ビームが入射される #9.5 ポロイダル断面で実験を行った。図 4 に示す、下部ポートからの視線を用いてプラズマ発光を観測した。マイクロ波光路上に存在する重水素原子は、マイクロ波電場によるドレスト状態となり、そのうち LCFS 付近の原子が、電子衝突励起で輝線を放射すると考えられる。この輝線を検出するために、視線はマイクロ波光軸と外側 LCFS の交点付近を通るように設置した。交点付近には、強度が 1.07 T で方向が既知の磁場が存在し、輝線スペクトルはゼーマン効果と AC シュタルク効果を同時に受ける。集光は、磁場に平行・垂直に近い直交 2 方向の直線偏光成分に分離して行い、課題 1 の分光システムを用いてスペクトルを計測した。本研究では分光器後段の円筒レンズを使用せず、光検出器を InGaAs カメラ（640×512 画素、画素サイズ 20 μm×20 μm）に置き換えて実験を行った。

標準磁場配位の重水素放電において計測を行った。3 種類の条件

- マイクロ波電力 287 kW, 規格化波数の磁場に平行成分  $N_{||} = 0.380$
- 電力 192 kW,  $N_{||} = 0.380$
- 電力 287 kW,  $N_{||} = 0.361$

でスペクトルを計測し、比較した。電力 287, 192 kW のとき、マイクロ波光軸におけるピーク

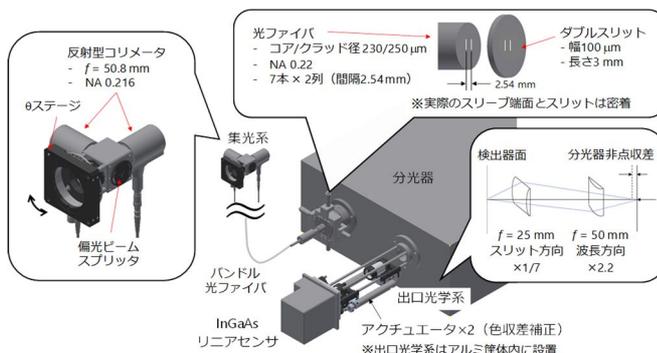


図 2. 近赤外分光システム。

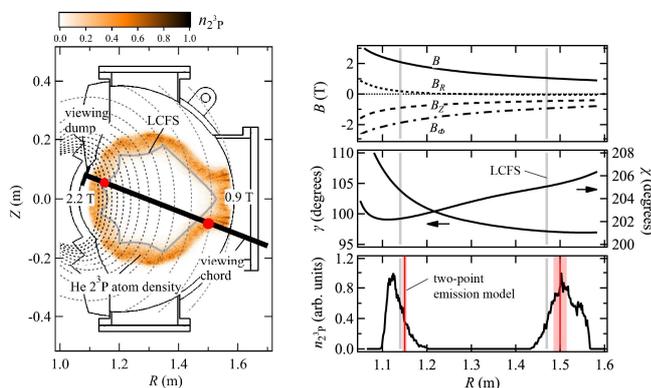


図 3. (左) #10.5 ポロイダル断面内の視線位置（黒実線）、磁場強度分布の等高線（破線）、最外殻磁気面（LCFS）（灰色実線）。スペクトルとシミュレーションから求めた原子発光分布（カラーマップ）。(右) 視線上の磁場及び発光強度分布。

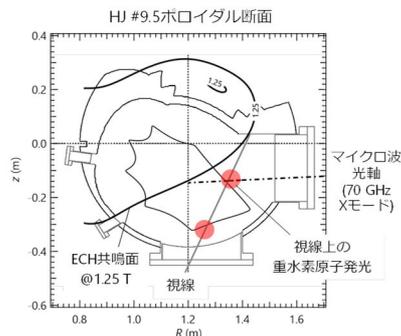


図 4. #9.5 ポロイダル断面上の視線位置（黒実線）、LCFS（黒実線）、マイクロ波ビーム光軸（一点鎖線）、ECH2 次共鳴面（太い黒実線）。

電場振幅がそれぞれ約 390, 320 kV/m となる (ビームウエスト 30 mm のガウス分布を仮定)。また,  $N_{||} = 0.380, 0.361$  のとき, 外側 LCFS におけるマイクロ波光軸が, それぞれ, #9.5 ポロイダル断面内, 断面から紙面垂直方向に約 4-5 mm ずれた位置となる。後者の場合, マイクロ波と視線の光軸がずれるため, AC シュタルク効果が減少すると考えられる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 課題 1

計測したヘリウム原子  $2^3S-2^3P$  輝線スペクトルの磁場に平行 ( $I_0$ )・垂直 ( $I_{90}$ ) に近い直線偏光成分を図 5 に示す。ヘリオトロン J 装置の中心磁場強度は 1.5 T であり, ITER や DEMO と比べて約 1/3 以下であるが, 近赤外輝線を用いることでゼーマン効果を高感度に観測できることを確認した。

これらのスペクトルを再現するような, 視線上のヘリウム原子  $2^3S-2^3P$  輝線の発光分布をシミュレーションを用いて求めた。シミュレーションはプラズマに対するガス入射の影響が小さいと近似し, 2 種類のコードを用いた独立な計算を行った: EMC3-

EIRENE コードによる重水素プラズマの  $T_e, n_e$  計算, モンテカルロ原子輸送コードによるヘリウム  $2^3P$  励起原子の密度, 速度分布計算。

は, 先行研究でヘリオトロン J 用に構築されたコードを使用し, 入力パラメータのうち計算結果への影響が大きい熱拡散係数とコア-周辺境界の電子密度を実験条件と合うように最適化した。

は, 先行研究で開発された DEGAS2 と同様のアルゴリズムを実装したコードを改造して使用した。で求めた  $T_e, n_e$  を入力として使用し, 全てのヘリウム原子が第一壁からのリサイクリングにより  $2^1S$  基底準位で生成すると仮定した。

リサイクリング時の原子温度およびトーラス内側・外側第一壁から放出される全リサイクリング束の比をパラメータとし, 計算スペクトルを計測スペクトルにフィッティングした (図 5 の実線)。その結果, 原子温度は 0.15 eV, リサイクリング束の比は内側と外側の比が 0.9 と求めた。計算結果から, 原子速度分布は SOL の外側では等方に近くなり, LCFS に近い位置では, 径方向内向きに大きな速度を持つ原子のみが電離されずに残った形になることが分かった (図 6)。

計算から求めたヘリウム原子  $2^3S-2^3P$  輝線のポロイダル断面内の発光強度分布を図 3 左に, また, 視線に沿った発光強度分布を図 3 右に示す。これらの結果から, 1 視線の受動分光のみによる空間分解法を実現し [3], 成果を京都大学からプレスリリースした [4]。本研究の発展として, ITER や DEMO への適用に向けた JT-60SA 装置での計測性能検証, スペクトルの全偏光成分 (4 つのストークスパラメータ) を計測することによる精度向上を進めている。

##### (2) 課題 2

3 種類の条件で計測したスペクトルを図 7 に示す。上段は電力 287, 192 kW, 下段は  $N_{||} = 0.380, 0.361$  の結果の比較であり, 左右の図は磁場に平行 ( $I_0$ )・垂直 ( $I_{90}$ ) に近い直線偏光成分である。AC シュタルク効果によるサブピークが現れる波長を示すため, スペクトルの計算値 (磁場強度 1.07 T, マイクロ波電場振幅 200 kV/m, 原子温度 0.1 eV, 磁場・マイクロ波電場・視線の方向が垂直, 磁場方向を量子化軸とした場合) を重ねてプロットした。AC シュタルク効果が減少すると考えられる条件 (電力 192 kW 及び  $N_{||} = 0.361$ ) において, サブピークが現れる波長付近のスペクトル強度の減少が観測された。この結果から AC シュタルク効果を観測した可能性があると考えられる。ただし, 他の可能性として, 温度 60 eV 程度の高温原子が生成された場合にも同様のスペクトル変化を生じるため (図中の黄色線), 今後, ダイナミックレンジを向上させた実験の実施及び計算とのより詳細な比較を行い, 確定的な結論を出す必要がある。

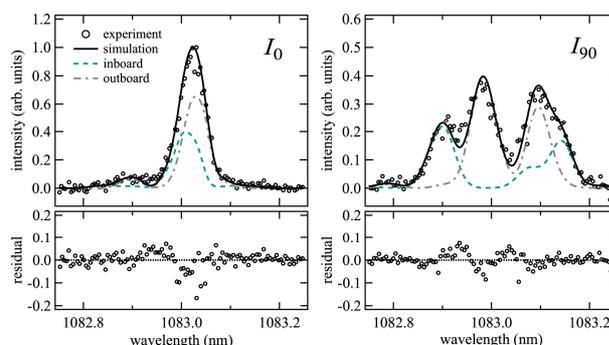


図 5. 計測したヘリウム原子  $2^3S-2^3P$  輝線の磁場に平行・垂直に近い直交 2 方向の直線偏光スペクトルとフィッティング結果。

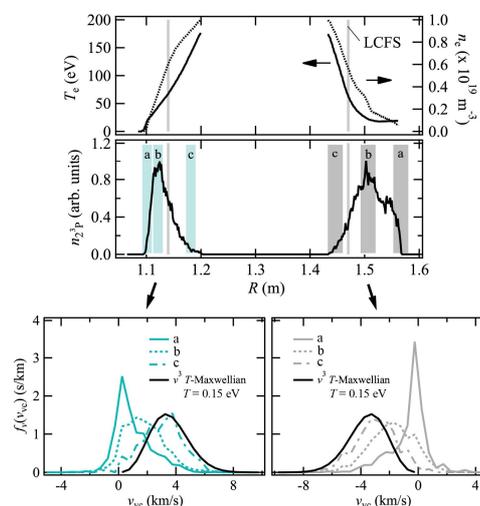


図 6. 計算から求めた視線上の各位置における原子速度分布の変化。

(3) その他

課題 1 の関連研究として、実機ダイバータ領域の高密度プラズマ中でシュタルク広がりにより線幅が増加した場合にゼーマン効果を観測できるか調べた。ダイバータ領域と同程度の高密度プラズマを模擬するために、ヘリオトロン J 装置の水素ペレット溶発プラズマを利用した。ペレットが入射される #11.5 ポートに視線を設置し、溶発プラズマから生じる水素原子パシェン  $\alpha$  線スペクトル ( $n=3-4$ , 波長 1875 nm) を、上記の分光システムを用いて偏光分離せずに計測した。得られたスペクトルを図 8 に示す。スペクトルは時間積分計測し、溶発プラズマ発光強度が最大となる瞬間のスペクトルを主に反映していると考えられる。ペレット溶発プラズマの発光が点光源だと仮定し、発光位置の磁場強度・方向、電子密度、原子温度・速度を未知数としてスペクトルをフィッティングした結果を図中を実線で示す。ゼーマン効果はスペクトル肩部、シュタルク広がりには裾部に主に影響を与えるため、両者を独立に評価できることが分かった。スペクトルを偏光分離、時間分解計測すれば、さらに大きな電子密度でもゼーマン効果を観測できる可能性がある。

< 引用文献 >

- [1] T. Shikama, *Rev. Mod. Plasma Phys.* **6**, 39 (2022).
- [2] M. Baranger and B. Mozer, *Phys. Rev.* **123**, 25 (1961).
- [3] T. Chatani, T. Shikama, Y. Ueno, *et al.*, *Sci. Rep.* **12**, 15567 (2022).
- [4] 京都大学プレスリリース「1 視線の観測のみで核融合プラズマ中のヘリウム近赤外輝線の発光分布を推定」2022 年 9 月 <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/k611jw>.

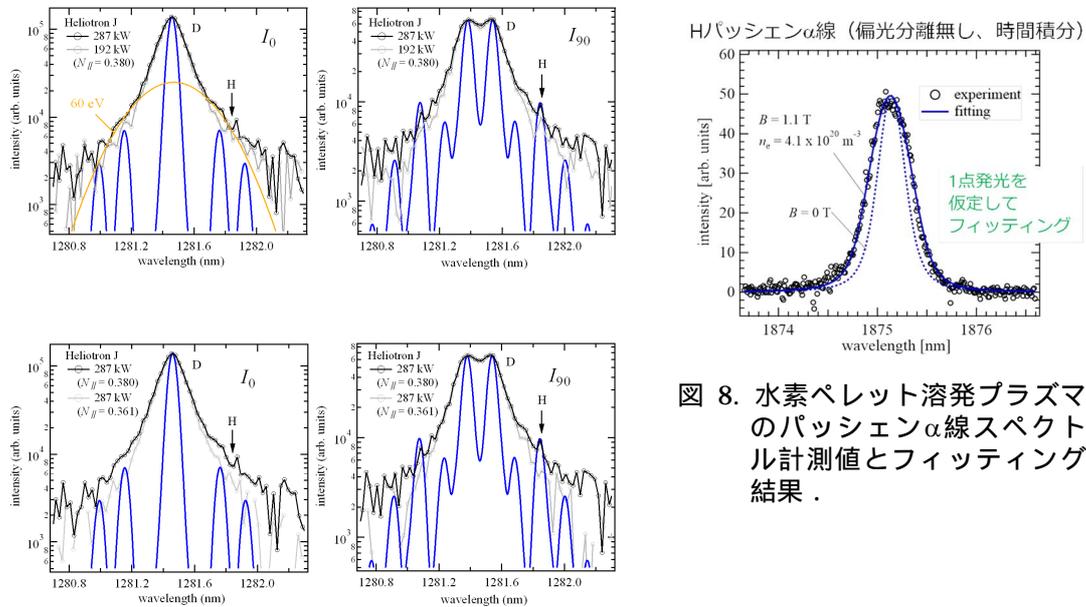


図 8. 水素ペレット溶発プラズマのパシェン  $\alpha$  線スペクトル計測値とフィッティング結果。

図 7. 重水素原子パシェン  $\beta$  線 ( $n=3-5$ , 1281 nm) スペクトルの計測値 (黒・灰色) および計算値 (青). 計算はサブピークが観測される波長を示す目的で載せており、磁場強度 1.07 T, 電場振幅 200 kV/m, 原子温度 0.1 eV の条件を仮定し、ピークを計測値に合わせて規格化している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Komiya Takumi, Shikama Taiichi, Hanada Kazuaki, Ido Takeshi, Onchi Takumi, Kono Kaori, Ejiri Akira, Hasegawa Makoto, Inoue Satoshi, Hasuo Masahiro, Idei Hiroshi, Yue Qilin, Kuroda Kengo, Higashijima Aki, Prapan Pakkapawn	4. 巻 66
2. 論文標題 Comparison of electron temperature and density measured by helium line intensity ratio and Thomson scattering methods in ECH spherical tokamak plasma	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 045018 ~ 045018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ad2c2a	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 IWATA Akihiro, KADO Shinichiro, MOTOJIMA Gen, SHIKAMA Taiichi, MURAKUMO Minato, MORI Atsuki, OKADA Hiroyuki, MINAMI Takashi, OHSHIMA Shinsuke, INAGAKI Shigeru, KIN Fumiyoshi, KOBAYASHI Shinji, ISHIZAWA Akihiro, NAKAMURA Yuji, KONOSHIMA Shigeru, MIZUUCHI Tohru, NAGASAKI Kazunobu	4. 巻 19
2. 論文標題 Evaluation of the Electron Temperature of the Ablation Cloud for the Small-Size Hydrogen Pellet Using Paschen Series in Heliotron J	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1402017 ~ 1402017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.19.1402017	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 Yoneda N., Shikama T., Scotti F., et al.	4. 巻 63
2. 論文標題 Spectroscopic measurement of increases in hydrogen molecular rotational temperature with plasma-facing surface temperature and due to collisional-radiative processes in tokamaks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096004 ~ 096004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/acd4d1	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 Kuzmin A., Miura K., Kobayashi M., Hanada K., Fujii K., Shikama T., Hasuo M., Zushi H.	4. 巻 189
2. 論文標題 Atomic and ionic hydrogen flux probe for quantitative in-situ monitoring of hydrogen recycling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 113462 ~ 113462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2023.113462	査読の有無 無
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 Shikama Taiichi	4. 巻 6
2. 論文標題 Near-infrared Stokes spectropolarimetry of fusion-related toroidal plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41614-022-00098-w	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 Chatani Tomoki, Shikama Taiichi, Ueno Yohei, Kado Shinichiro, Kawazome Hayato, Minami Takashi, Matoike Ryota, Murakumo Minato, Kobayashi Shinji, Ohshima Shinsuke, Iwata Akihiro, Oishi Tetsutaro, Ishizawa Akihiro, Nakamura Yuji, Okada Hiroyuki, Konoshima Shigeru, Mizuuchi Tohru, Nagasaki Kazunobu, Hasuo Masahiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Spatially resolved measurement of helium atom emission line spectrum in scrape-off layer of Heliotron J by near-infrared Stokes spectropolarimetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 15567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-19747-8	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 Iwata A., Kado S., Murakumo M., Shikama T., Motojima G., Mori A., Feng C., Okada H., Minami T., Ohshima S., Kobayashi S., Ishizawa A., Nakamura Y., Konoshima S., Mizuuchi T., Nagasaki K.	4. 巻 93
2. 論文標題 Measurement of Pa line from pellet ablation cloud in Heliotron J	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 113537 ~ 113537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0101885	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 Ishikawa Lisa, Shikama Taiichi, Kakuno Takayuki, Watanabe Takato, Jouda Mazin, Hasuo Masahiro	4. 巻 93
2. 論文標題 All-optical thermometry using a single multimode fiber endoscope and diamond nanoparticles containing nitrogen vacancy centers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 083705 ~ 083705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0102531	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 Yoneda N., Shikama T., Hanada K., Mori S., Onchi T., Kuroda K., Hasuo M., Ejiri A., Matsuzaki K., Osawa Y., Peng Y., Kawamata Y., Sakamoto S., Idei H., Ido T., Nakamura K., Nagashima Y., Ikezoe R., Hasegawa M., Higashijima A., Nagata T., Shimabukuro S.	4. 巻 26
2. 論文標題 Toroidal flow measurements of impurity ions in QUEST ECH plasmas using multiple viewing chords emission spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 100905 ~ 100905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2021.100905	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 Kuzmin A., Kobayashi M., Hanada K., Idei H., Onchi T., Mori S., Yoneda N., Shikama T., Hasuo M., Ido T., Nagashima Y., Ikezoe R., Hasegawa M., Kuroda K., Kono K., Matsuo S., Nagata T., Shimabukuro S., Higashijima A., Niiya I., Zushi H.	4. 巻 26
2. 論文標題 Investigation of radial distribution of atomic hydrogen flux to the plasma facing components in steady state discharges in QUEST tokamak	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 100872 ~ 100872
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2020.100872	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 Ishihara Hiroki, Kuzmin Arseniy, Kobayashi Masahiro, Shikama Taiichi, Sawada Keiji, Saito Seiki, Nakamura Hiroaki, Fujii Keisuke, Hasuo Masahiro	4. 巻 267
2. 論文標題 Ro-vibrational population distribution in the ground state of hydrogen isotopologues in LHD peripheral plasmas deduced from emission spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer	6. 最初と最後の頁 107592 ~ 107592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jqsrt.2021.107592	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 Hanada K., Yoshida N., Hasegawa M., Oya M., Oya Y., Takagi I., Hatayama A., Shikama T., Idei H., Nagashima Y., Ikezoe R., Onchi T., Kuroda K., Kawasaki S., Higashijima A., Nagata T., Shimabukuro S., Nakamura K., Murakami S., Takase Y., Gao X., Liu H., Qian J.	4. 巻 27
2. 論文標題 Overview of recent progress on steady state operation of all-metal plasma facing wall device QUEST	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 101013 ~ 101013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2021.101013	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 花田和明, 四竈泰一, 藤井恵介, KUZMIN Arseniy, 米田奈生, 蓮尾昌裕, 後藤基志, 小林政弘	4. 巻 98
2. 論文標題 表面分析と分光計測によって明らかになった 水素原子分子の炉内分布と輸送	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 20-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

[学会発表] 計26件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 S. Kado, A. Mori, G. Motojima, A. Iwata, K. Takeuchi, T. Shikama, et al.
2. 発表標題 2D imaging of small pellet ablation cloud density in Heliotron J based on high-speed spectroscopy for Balmer- Line broadening
3. 学会等名 49th EPS DPP Bordeaux, France (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 門信一郎, 森敦樹, 本島巖, 岩田晃拓, 竹内航希, 四竈泰一, et al.
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおける小型ペレット溶発雲の2次元可視高速分光診断
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田常裕, 四竈泰一, 村雲南斗, 他
2. 発表標題 ヘリオトロンJプラズマ中のヘリウム原子近赤外輝線の直線・円偏光分光
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Xu, 四竈泰一, 村雲南斗, 他
2. 発表標題 プラズマ発光計測用高速・高波長分解空間ヘテロダイン分光器のスループット最適化
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 四竈泰一, 小宮山拓海, 花田和明, 他
2. 発表標題 QUEST ECH放電の温度・密度分布計測におけるヘリウム線強度比法とトムソン散乱法の比較
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村雲南斗, 四竈泰一, 門信一郎, 他
2. 発表標題 核融合プラズマ中水素ベレットプラズモイドのパッシェン線偏光分光
3. 学会等名 2023年度 日本分光学会年次講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守田常裕, 四竈泰一, 仲野友英, 他
2. 発表標題 JT-60SAダイバータの近赤外輝線スペクトル視線積分計算によるプラズマ診断の検討
3. 学会等名 第40回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Xu, 四竈泰一, 村雲南斗, 他
2. 発表標題 高時間・波長分解プラズマ分光に向けた空間ヘテロダイン分光器の性能評価
3. 学会等名 第40回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 四竈泰一
2. 発表標題 磁場閉じ込めプラズマの近赤外分光
3. 学会等名 NIFS 研究会「プラズマの分光診断と原子分子素過程の研究フロンティア」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩田晃拓, 門信一郎, 本島巖, 四竈泰一, 村雲南斗, 竹内航希, et al.
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおけるパッシェン系列を用いた小型水素ペレット溶発雲の電子温度推定法
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 守田常裕, 四竈泰一, 仲野友英, 他
2. 発表標題 JT-60SAの視線積分近赤外D原子輝線スペクトルにおける主プラズマ制動放射の影響計算
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1 . 発表者名 S. Kado, A. Iwata, T. Shikama, G. Motojima and H. J. team
2 . 発表標題 Recent Development of Near-infrared Spectrometry in the Application to Fusion-relevant Magnetic Confinement Plasmas
3 . 学会等名 20th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2022) Hico, Korea (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 A. Iwata, S. Kado, M. Murakumo, T. Shikama, G. Motojima, A. Mori, et al.
2 . 発表標題 Measurement of Pa Line from pellet ablation cloud in Heliotron J
3 . 学会等名 High-Temperature Plasma Diagnostics Conference 2022 Rochester, USA (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Shikama, T. Komiyama, M. Oki and M. Hasuo
2 . 発表標題 Spectroscopic measurement of a compact helium ECR discharge produced in a simple cusp field
3 . 学会等名 75th APS GEC Sendai, Japan (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Xu, T. Shikama, M. Murakumo, S. Kado and M. Hasuo
2 . 発表標題 Development of a polarization-resolved spatial heterodyne spectrometer for high wavelength resolution and high throughput measurement of near-infrared atomic emission lines in magnetically confined toroidal plasmas
3 . 学会等名 75th APS GEC Sendai, Japan (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 村雲南斗, 四竈泰一, 茶谷智樹, 門信一郎, 大島慎介, 鈴木琢土, et al.
2. 発表標題 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 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小宮山拓海, 四竈泰一, 大木幹也, 蓮尾昌裕
2. 発表標題 小型カスタム磁場配位ECR放電装置におけるヘリウムプラズマの多視線分光計測
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小宮山拓海, 四竈泰一, 花田和明, 井戸毅, 恩地拓己, 河野香, et al.
2. 発表標題 QUESTの電子温度・密度分布計測におけるHe I線強度比法とトムソン散乱法の比較
3. 学会等名 核融合科学研究所 「原子分子過程研究の最先端と先進的プラズマ分光計測」 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」 合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩田晃拓, 門信一郎, 本島徹, 四竈泰一, 村雲南斗, 森敦樹, et al.
2. 発表標題 ヘリオトロンJにおけるパッシェ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 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村雲南斗, 四竈泰一, 門信一郎, 大島慎介, 鈴木琢土, 茶谷智樹, et al.
2. 発表標題 ヘリオトロンJ 中水素ベ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 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Xu, 四竈泰一, 村雲南斗, 門信一郎, 蓮尾昌裕
2. 発表標題 磁場閉じ込めプラズマからの近赤外輝線に対する空間ヘテロダイン分光法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Shikama, S. Kado, Y. Ueno, T. Chatani, H. Kawazome, T. Minami, et al.
2. 発表標題 Near-infrared Stokes spectropolarimetry as a novel local measurement method of atomic line emission in SOL and divertor plasmas
3. 学会等名 AAPPS-DPP2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Shikama, S. Kado, Y. Ueno, T. Chatani, H. Kawazome, T. Minami, et al.
2. 発表標題 Development of a near-infrared Stokes spectropolarimetry system for the spatially resolved measurements of atomic emissivity and velocity distribution in the scrape-off-layer of Heliotron J
3. 学会等名 ITC30 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茶谷智樹, 四竈泰一, 上野陽平, 門信一郎, 川染勇人, 南貴司, et al.
2. 発表標題 ヘリウム原子輝線のゼーマン効果高感度計測を利用した分光と輸送計算の局所比較
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋期大会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米田奈生, 四竈泰一, F. Scotti, 花田和明, R. E. Bell, A. Maan, et al.
2. 発表標題 プラズマ対向壁近傍の水素分子d3 準位回転温度に影響を与える素過程の検討
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋期大会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井口拓己, 四竈泰一, 小宮山拓海, 福本正勝, 花田和明, 恩地拓己, et al.
2. 発表標題 QUESTにおけるネオントロイダルECRプラズマの多視線可視分光計測
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会 年会 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学プレスリリース 「水素分子の回転温度を予測し、プラズマ再結合を効果的に起こす」 <a href="https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230728">https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230728</a></p> <p>EurekaAlert! "Fusion model hot off the wall" <a href="https://www.eurekaalert.org/news-releases/996755">https://www.eurekaalert.org/news-releases/996755</a></p> <p>京都大学プレスリリース 「1視線の観測のみで核融合プラズマ中のヘリウム近赤外輝線の発光分布を推定」 <a href="https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/k611jw">https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/k611jw</a></p> <p>京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 光工学研究室 <a href="http://oel.me.kyoto-u.ac.jp/">http://oel.me.kyoto-u.ac.jp/</a></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
研究協力者	蓮尾 昌裕  (Hasuo Masahiro)		
研究協力者	門 信一郎  (Kado Shinichiro)		
研究協力者	長崎 百伸  (Nagasaki Kazunobu)		

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