

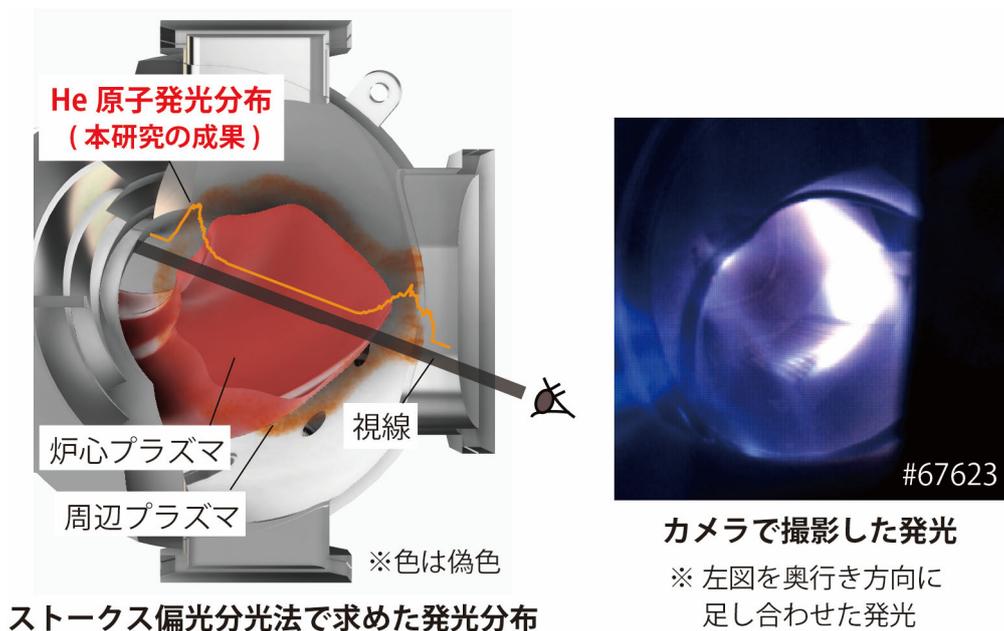
1 視線の観測のみで 核融合プラズマ中のヘリウム近赤外輝線の発光分布を推定

概要

核融合発電では、磁場で閉じ込めた重水素と三重水素の混合プラズマを1億度に加熱し、イオン同士が衝突して核融合する際に放出されるエネルギーを利用します。この時、プラズマの温度や密度は、炉心部と周辺部で大きく変化します。この温度や密度を調べるためにプラズマからの発光の分布は有用な情報ですが、通常の観測方法では視線に沿った奥行き方向の発光が全て足し合わされてしまうため、分布の情報が得られません。プラズマを色々な方向から観測できれば分布を再構成できますが、核融合炉の保全や経済性の観点からは、観測窓の数をできるだけ少なくすることが望まれます。

京都大学大学院工学研究科の茶谷智樹 修士課程学生、上野陽平 同修士課程学生（研究当時）、四竈泰一 同准教授、蓮尾昌裕 同教授、同エネルギー理工学研究所 門信一郎 准教授らの研究グループは、ストークス偏光分光法^{*1}と呼ばれる手法を近赤外のヘリウム原子輝線（波長 1083 nm）に適用し、1 視線のみで視線に沿った発光分布を求める方法を開発しました。従来、可視輝線での計測が行われていましたが、近赤外輝線を利用することで、空間分解能が向上し、また、磁場が弱い装置でも計測を行うことが可能となりました。

本成果は 2022 年 9 月 23 日（現地時刻）に英国の国際学術誌「Scientific Reports」にオンライン掲載されました。



1. 背景

磁場で閉じ込めた重水素と三重水素の混合プラズマを1億度に加熱し、イオン同士が衝突して核融合する際に放出されるエネルギーを利用する核融合発電では、プラズマの温度や密度が、炉心部と周辺部で大きく変化します。温度や密度、また、不純物、壁に入射する熱量等を調べるためにプラズマからの発光は有用な情報ですが、通常の観測方法では視線に沿った奥行き方向の発光が全て足し合わされてしまうため、分布の情報が得られません。プラズマを色々な方向から観測できれば分布を再構成できますが、核融合炉の保全や経済性の観点からは、観測窓の数をできるだけ少なくすることが望まれます。本研究では、ストークス偏光分光法と呼ばれる手法を近赤外のヘリウム原子輝線（波長 1083 nm）に適用し、1 視線のみで視線に沿った発光分布を求める方法を開発しました。

2. 研究手法・成果

ストークス偏光分光法は、磁場中に置かれた原子やイオンの輝線スペクトルに生じるゼーマン効果^{※2}の計測に用いられます。核融合炉内では、磁場の強さと向きが場所ごとに変化し、視線に沿った奥行き方向の場所ごとに輝線スペクトルのゼーマン効果が変わります。この特性を利用することで、視線に沿った輝線スペクトルの分布を推定できます。ストークス偏光分光法を核融合プラズマに適用するには、輝線スペクトルのゼーマン効果と原子運動によるドップラー効果、電子・イオン衝突によるシュタルク効果^{※3}を区別する必要があります。本研究では、シュタルク効果に対する感受性が小さい輝線を選択し、また、ドップラー効果に対してゼーマン効果が波長とともに大きくなる性質を利用して、近赤外輝線を用いてゼーマン効果を高感度で計測しました。この結果、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、また、磁場が弱い装置でも計測を行うことが可能となりました。

研究の実施に当たっては、大学院工学研究科 光工学研究室で開発した近赤外偏光分光システムを利用し、エネルギー理工学研究所 ヘリオトロンJ装置^{※4}を用いて実験を行いました。トーラス型の重水素プラズマ中にヘリウムを入射し、ヘリウム原子の近赤外輝線（ 2^3S-2^3P 遷移、波長 1083 nm）を発光分光しました。視線に沿った輝線スペクトル分布の推定には、京都大学エネルギー理工学研究所 プラズマエネルギー研究室、香川高等専門学校情報工学科 光工学研究室で共同開発した原子輸送シミュレーションを利用しました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、核融合炉で視線に沿った発光分布を得るために近赤外ストークス偏光分光法が有効であることを示しました。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ます。また、ストークス偏光分光法は、太陽やその他の恒星、オーロラ等の天体プラズマの観測にも利用されていますが、天体プラズマと核融合プラズマでは温度や密度の分布、観測条件が異なるため、両者の実験結果を比べることで、実験技術の進歩にもつながる可能性があります。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、自然科学研究機構 核融合科学研究所 LHD 計画共同研究「近赤外ゼーマン分光法を用いた SOL 電子温度密度の空間分布計測」（NIFS19KOAP034）、日本学術振興会 科研費助成事業 基盤研究(B)「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」（21H01054）、公益財団法人光科学技術振興記念財団 研究助成、京都大学エネルギー理工学研究所 ゼロエミッション共同研究、日本学術

振興会 先端究拠点形成事業「磁場の多様性が拓く超高温プラズマダイナミクスと構造形成の国際研究拠点形成 (PLADyS)」の助成を受けて実施しました。

<研究者のコメント>

近赤外輝線は、可視輝線と比べて強度が小さく、また、分光計測の際に光検出器が熱ノイズの影響を受けやすいという特徴があります。このため、これまで核融合プラズマの発光観測ではあまり利用されていませんでした。輝線スペクトルを利用して観測できるゼーマン、ドップラー、シュタルク効果などの現象には光の波長依存性があるため、近赤外輝線に対するこれらの現象を調べることで、可視輝線ではできなかった新しい計測を実現していける可能性があると考えています。(四竈 泰一)

<用語解説>

※1 **ストークス偏光分光法**：光を波長に分け、波長ごとに偏光状態を表すストークスパラメータ (0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向の直線偏光および左右円偏光の強度差で定義される) を計測する方法。磁場、電場中の輝線スペクトルのゼーマン効果、シュタルク効果の計測等に利用される。

※2 **ゼーマン効果**：磁場中の原子やイオンのエネルギーが、原子やイオンの持つ磁気双極子モーメントと磁場のなす角に応じて変化する現象。エネルギー変化により、輝線スペクトルの波長、強度、偏光等の変化も起こる。磁場閉じ込め核融合炉では、プラズマ閉じ込めに用いる数テスラの磁場によるゼーマン効果が観測される。

※3 **シュタルク効果**：本研究ではシュタルク広がり。プラズマ中の原子やイオンに周囲の電子やイオンが衝突することで、輝線スペクトルの幅が広がり、中心波長がシフトする現象。磁場閉じ込め核融合炉では、プラズマの一部で密度が最大 10^{21} m^{-3} 程度となり、一部の輝線でシュタルク効果が観測される。

※4 **ヘリオトロンJ**：京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターで稼動している中型の磁場閉じ込め核融合実験装置 (主半径 1.2 m、平均小半径 0.1–0.2 m、中心磁場 $< 1.5 \text{ T}$)。ヘリカル型と呼ばれる磁場閉じ込め方式の装置。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Spatially resolved measurement of helium atom emission line spectrum in scrape-off layer of Heliotron J by near-infrared Stokes spectropolarimetry (近赤外ストークス偏光分光法を用いたヘリオトロンJスクレイプオフ層におけるヘリウム原子輝線スペクトルの空間分解計測)

著者：Tomoki Chatani, Taiichi Shikama, Yohei Ueno, Shinichiro Kado, Hayato Kawazome, Takashi Minami, Ryota Matoike, Minato Murakumo, Shinji Kobayashi, Shinsuke Ohshima, Akihiro Iwata, Tetsutaro Oishi, Akihiro Ishizawa, Yuji Nakamura, Hiroyuki Okada, Shigeru Konoshima, Tohru Mizuuchi, Kazunobu Nagasaki, and Masahiro Hasuo

掲載誌：Scientific Reports DOI：10.1038/s41598-022-19747-8