

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03588

研究課題名（和文）イメージング分光計測に基づく水素ペレット溶発雲内部構造と粒子供給空間分布の研究

研究課題名（英文）Study of internal structure of hydrogen pellet ablation cloud and spatial distribution of particle deposition based on imaging spectroscopy

研究代表者

後藤 基志（Goto, Motoshi）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00290916

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：磁場閉じ込め核融合プラズマでは燃料供給のため固体水素ペレットを注入する。ペレットの周囲には溶発雲と呼ばれる高密度プラズマが生成され、今回、大型ヘリカル装置において、分光学的手法を駆使し、高精度な溶発雲内の電子温度及び電子密度計測を行なった。この結果はプラズマ中での燃料供給空間分布を調べるシミュレーションのための重要な情報の入手に貢献する。特に、スペクトルを理解するためのモデル計算において、これまで説明が困難であった離散的発光線から連続光へと遷移する波長領域の取り扱いを改善することで、計測結果の信頼性向上を果たすことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場閉じ込め核融合プラズマでは、効率的な燃料供給手法の確立は重要な課題である。固体水素ペレット入射は有望であるが、まだ溶発および粒子供給機構は完全には理解されていない。本研究で得られた結果は、ペレット溶発のシミュレーションにおいて重要なパラメータを決定することに貢献し、ペレットによる燃料供給効率を最適化するために重要な役割を果たすものである。また、占有確率法の正当性を実験的に検証することにより、占有確率法の基礎となっている原子物理学理論の正当性を示すことにも貢献した。

研究成果の概要（英文）：In magnetic confinement fusion plasmas, solid hydrogen pellets are injected for fueling. A high-density plasma called an ablation cloud is generated around the pellet. In this study, the electron temperature and electron density measurements in the ablation cloud were performed with high precision using spectroscopic techniques in Large Helical Device. The results contribute simulations by giving important information to investigate the spatial distribution of particle fueling in the plasma. In particular, we have succeeded in improving the reliability of the measurement results by improving the treatment of the wavelength region where the discrete emission lines are changed to continuum radiation in the model calculations for understanding the spectra.

研究分野：プラズマ分光学

キーワード：固体水素ペレット 完全局所熱平衡 シュタルク広がり 占有確率法

### 1. 研究開始当初の背景

固体水素ペレット入射は、磁場閉じ込め核融合プラズマの効率的な燃料供給手法と考えられている。効率的な粒子供給を行うためには、ペレットの溶発機構を理解する必要があり、シミュレーション研究がなされている。現状では、シミュレーション結果と実験結果との間に乖離があり、溶発機構が完全に理解できているとは言えない。溶発機構シミュレーションにおいては、ペレットの周囲に形成される溶発雲と呼ばれる局所的な高密度プラズマの電子温度および電子密度が重要なパラメータである。これらパラメータを求めるためには、分光学的手法が有効である。

ペレット溶発雲は図1に示すように局所的な強い発光を呈し、分光計測を行うと、シュタルク広がりを伴ういくつかのバルマー $\alpha$ 線と特徴的な連続光スペクトルが認められる(図2)。主に発光線のシュタルク広がりから電子密度が、さらに、連続光スペクトルから電子温度が見積もられることが確かめられている。また、スペクトルの解析から得られるイオン密度と原子密度の比は、プラズマが完全局所熱平衡に近い状態にあることを示している。

しかしながら、このような計測および解析の方法は溶発雲内の空間構造を無視しており、溶発雲内で強い発光を呈する領域についての代表的な情報を求めているとみなすことができる。

空間構造について情報を得るため、複数の干渉フィルターを用いてスペクトルの特徴を抽出するイメージング計測を行ったが、電子温度の分布が溶発雲中心で高く周辺で低いという、予想とは異なる結果となった。この問題の原因として考えられるのは、溶発雲全体で完全局所熱平衡が成立しているとした仮定である。溶発雲周辺では電子密度が中心部よりも低いと予想され、その結果、完全局所熱平衡が成立していない可能性がある。

### 2. 研究の目的

溶発雲に対して発光スペクトルの空間分解計測を実施することで、完全局所熱平衡を必要としない解析を可能とし、より信頼性の高い電子温度および電子密度の空間分布を導出する。また、自動的に、溶発雲周辺部での完全局所熱平衡が成立しているかどうかを確認でき、干渉フィルターによる計測手法の是非が明らかとなる。完全局所熱平衡が仮定できない領域の存在が確認できた場合、使用する干渉フィルターの数を増やすなどして、より高自由度なイメージング計測の手法を検討する。

溶発雲は一般に磁力線方向に長く伸長しており、磁力線方向の電子温度および電子密度の分布を求めることを目標とする。電子およびイオンの圧力分布は磁力線方向に勾配を持ち、その勾配に基づく拡散によりプラズマへ同化することが粒子供給機構であると考えられる。磁力線方向への粒子拡散は自由空間での粒子拡散とみなすことができ、電子温度および電子密度の磁力線方向分布から、自由空間における拡散係数を導出し、粒子束を評価することができる。そのような観点からも、溶発雲内の電子温度および電子密度の分布を実験において求めることは重要である。

### 3. 研究の方法

溶発雲周辺部での完全局所熱平衡の成立性を調べるためには、分光器を用いたスペクトル計測が必要である。溶発雲の発光時間は全体で $400\mu\text{s}$ 程度であり、スペクトル計測と空間分解計測との両立は時間分解能の制約のため一般に難しい。プラズマ中で溶発雲は磁力線方向に伸長

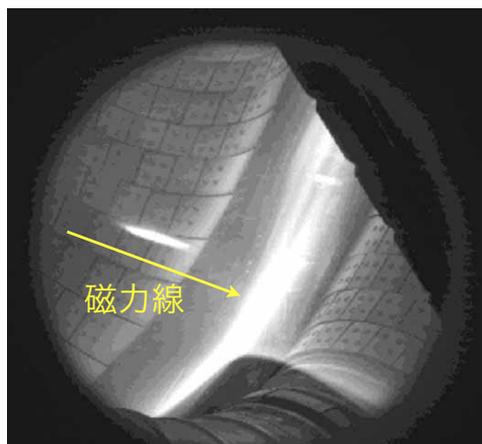


図1: プラズマ中を飛行する水素ペレット溶発雲の画像。溶発雲が磁力線方向に広がっていることが確かめられる。

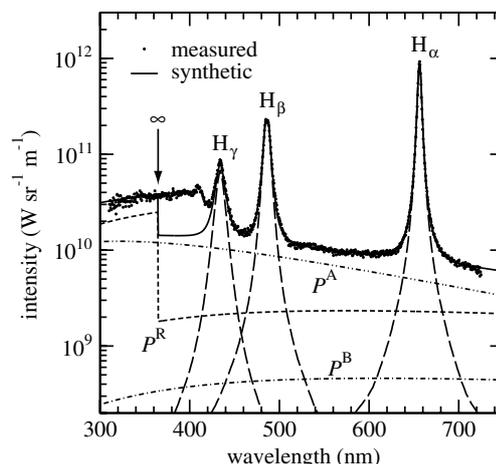


図2: 観測されたスペクトルの例。顕著なシュタルク広がりや明確な連続光スペクトルが認められる。実線はフィッティングにより得られた結果。

しており、固定された狭い視野を溶発雲が横切るような観測を行えば、伸長方向の1次元空間分布を計測できる可能性がある。

シリンジカルレンズにより水平方向のみ集光することで、鉛直方向に伸びる幅1cm程度の狭い視野を持つシステムを構築した(図3)。これによりペレットの軌道が上下方向に少々ずれても視野から外れないという利点がある。水素原子のバルマー系列全体を含む300nm-800nm程度波長領域が同時に計測できる低波長分散の分光器を用いた。検出器として、ラインカメラと呼ばれる1次元のCCDを用いた。最小のサンプリング時間は14 $\mu$ sである。ペレットが視野を通過するのは約200 $\mu$ sであるので、15点程度での空間分解計測が可能となる。

各計測点におけるスペクトルを解析し、電子温度および電子密度を導出する。ただし、完全局所熱平衡は仮定せず、衝突輻射モデルを用いて励起準位密度分布を計算し、フィッティングに利用する。その結果により、電子温度および電子密度が求められるだけでなく、実際のプラズマで完全局所熱平衡が成立しているかどうかを判断することができる。

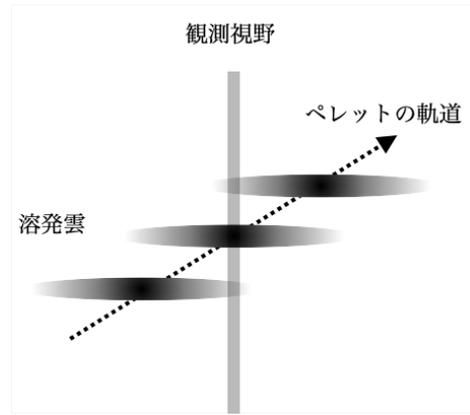


図3:シリンジカルレンズを用いた鉛直方向に伸びた観測視野と磁力線方向に伸長した溶発雲が視野を横切って移動する様子の模式図。

#### 4. 研究成果

溶発雲周辺部のように電子密度が比較的低い場合には、完全局所熱平衡を仮定したモデルでは満足できるフィッティングの結果が得られず、衝突輻射モデルを用いた解析でもフィッティ

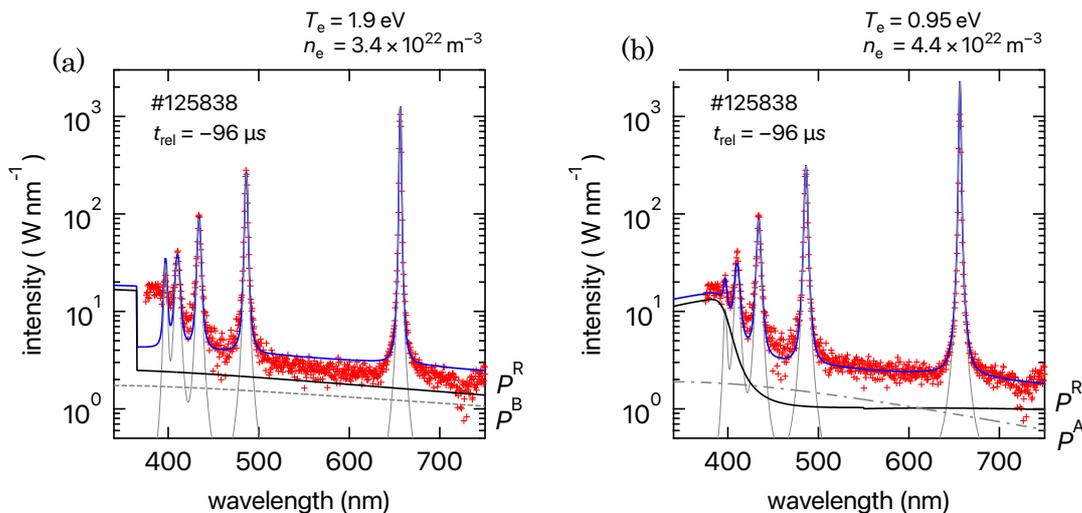


図4:観測されたスペクトルとフィッティングの結果:(a)占有確率法を用いなかった場合、および、(b)占有確率法を用いた場合。

ング結果と観測データとの間に無視できない程度の違いが見られた。これまでは、取り扱いの難しさから、離散的な発光線から連続光へとスペクトルの性質が変化する領域は、フィッティング領域から除外しており、電子温度および密度を求めることが目的であればその影響はほとんどなかった。しかしながら、低電子密度の場合、そのような領域を除外してフィッティングを行うと、評価関数が複数の極小値を持ち、初期値によって大きく異なる解が得られる問題があることがわかった。その原因は、連続光スペクトルの形状を再現するために、比較的高温の制動放射が用いられる場合と、比較的低温の輻射付着に伴う放射が用いられる場合があるからである。しかしながら、どちらの場合も離散的な発光線の強度と連続光強度との比について、実験結果との間に見過ごせないほどのずれを生じる。

今回、占有確率法と呼ばれる手法を導入して、離散的発光線から連続光へとスペクトルが遷移する波長領域も含めた解析を可能とした。占有確率法では、輻射再結合に伴う発光のスペクトルを電離リミットよりも低いエネルギー領域、つまり離散的エネルギー準位の領域まで拡張し、電離リミットを超えた領域では、占有確率と呼ばれる係数に基づきその強度を減衰させる。一方、離散的発光線の強度は同じ波長領域において連続的のみなされた割合だけ減少させる。ただし、離散的発光線はシュタルク広がりにより大きく広がっており、電離リミットに近づくにつれて隣接する発光線との間隔も狭くなっていくため、これらを重ね合わせたスペクトルは実効的に連続光となっている。このように、各エネルギー準位について離散的性質および連続的性質を持

つ割合をそれぞれ設定し、連続光成分と離散的発光線成分との重ね合わせとしてスペクトル形状を求めることができる。

占有確率はデバイ長内の微小電場分布と、エネルギー準位の電界イオン化に関する臨界電場とから評価される。図5に、電子密度  $10^{23} \text{ m}^{-3}$  の場合の、ホルツマルクによる微小電場強度分布  $P(F)$  と水素原子の主量子数 6 の準位に関する臨界電場  $F_c$  を示す。 $P(F)$  を  $F < F_c$  の領域で積分した値を占有確率と呼び、離散的成分の割合とし、 $F > F_c$  領域での積分値を連続的成分の割合とする。

占有確率法の導入により、すべての波長領域でのフイッティングが可能となり、完全局所熱平衡を仮定しても、実験結果をより良く再現できるようになった(図4(b)参照)。干渉フィルターを用いたイメージング計測で得られたデータを、今回構築したモデルで解析することにより、電子温度分布の問題が解決できる可能性がある。求められる電子温度および電子密度の値は、占有確率法を用いない場合とは大きく異なり、計測結果の信頼性が大きく向上した。同計測および解析を、LHD のさまざまな磁場配位で行った結果、得られたパラメータの磁場配位依存性が明確に見られた。これらの結果はペレット溶発シミュレーションの精度向上のために有益な情報を与えるものである。

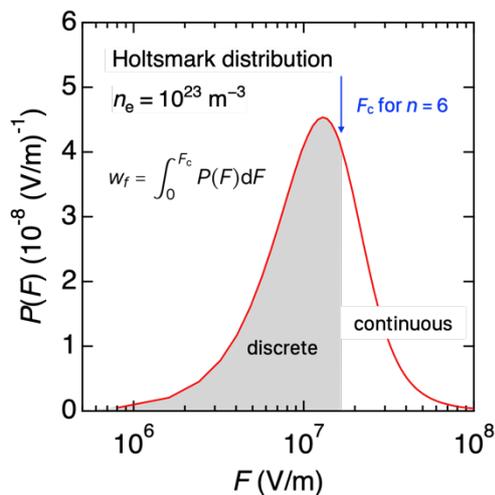


図5: 微小電場分布と臨界電場から占有確率を求める方法の例。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 M. Goto, H. Uyama, T. Ogawa, K. Matra, G. Motojima, T. Oishi, S. Morita	4. 巻 14
2. 論文標題 Dependence of Plasma Parameters in Hydrogen Pellet Ablation Cloud on the Background Plasma Conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3402053-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.14.3402053	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 M. Goto, H. Uyama, T. Ogawa, K. Matra, G. Motojima, T. Oishi, S. Morita
2. 発表標題 Dependence of Plasma Parameters in Hydrogen Pellet Ablation Cloud on the Background Plasma Conditions
3. 学会等名 27th International Toki Conference（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤基志, 鶴山博也, 小川拓也, 本島巖
2. 発表標題 ペレット溶発雲内プラズマパラメータの磁場条件依存性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤基志, 坂本隆一, 本島巖, 松山顕之
2. 発表標題 非局所熱平衡モデルを用いたペレット溶発雲の分光スペクトル解析
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------