

平成 21 年 5 月 7 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19740349
 研究課題名（和文）高精細マルチスペクトル画像計測による不純物ペレットの溶発雲形成機構の研究
 研究課題名（英文）Study of ablation cloud formation mechanism of impurity pellet with a high-resolution multi-spectral imaging diagnostics
 研究代表者
 田村 直樹（TAMURA NAOKI）
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
 研究者番号：80390631

研究成果の概要：本研究により、複眼光学系を用いたマルチスペクトル画像計測システムの最適化が進んだ。これにより、不純物ペレットの溶発雲中の電子温度の2次元分布を世界で初めて実験的に得ることに成功した。これを受けて、不純物ペレットの溶発雲中の電子密度の2次元分布計測を開始し、実験データの取得に成功した。今後、得られた実験データの解析が進展することで、不純物ペレットの溶発雲形成機構の研究の進展が期待される。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	0	1,900,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	240,000	2,940,000

研究分野：プラズマ物理学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：不純物ペレット, ペレット溶発雲, マルチスペクトル画像

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマによる核融合研究では、固体水素や不純物でできたペレット(小粒片)をプラズマ中に入射し、プラズマ中への燃料補給や、プラズマ諸特性の測定を行っている。また、核融合プラズマに対する効率的な燃料供給等の観点から、入射されたペレットの溶発過程に関する研究も行われている。P. B. ParksらによるNeutral Gas Shieldingモデルといった物理モデルを用いたこれまでの研究により、ペレット溶発雲(プラズマからの熱によりペレット表面が溶発することで、ペレット周囲に形成される中性ガス雲のこと)に関する理解が深まってきているが、残念ながらペレット(特に、不純物ペレット)の溶

発過程を支配している物理機構についてはまだ完全に理解できていない状況にある。したがって、ペレット溶発雲に関する実験的研究をさらに推し進める必要がある。また、磁場閉じ込めプラズマにおける高エネルギー粒子計測法として、近年、不純物ペレット入射と高速中性粒子計測を組み合わせた能動的高速中性粒子計測法であるペレット荷電交換(Pellet Charge eXchange: PCX)計測法が考案されたが、当計測では局所的な高速荷電粒子の絶対数量を評価するために、ペレット溶発雲中の局所電子密度に関する情報が必要である。ペレット溶発雲中の電子密度は、そこから放射される線スペクトルのシュタルク拡がりによって推定できるが、従来の計測手

法では通常、空間的に積分された溶発光を分光しているため、局所電子密度の評価は困難であり、その評価が可能な新しい計測手法が求められていた。これに対して研究代表者は、科学研究費若手研究(B)(2005年度～2006年度)研究課題名「複眼光学系を用いたペレット溶発雲における局所電子密度の2次元分布計測法の開発」を受け、ペレット溶発雲中の厳密な局所電子密度の評価を可能とするシュタルク拡がりの2次元分布を取得できるマルチスペクトル画像計測システムを開発した。これまでに、同システムによるペレット溶発雲の撮影に成功し、マルチスペクトル画像を簡便に取得するための手法として、複眼光学系を用いることの有用性を示した。しかしながら、実験スケジュールの都合や初期の実験結果をフィードバックさせた仕様変更(遮光フィルターの追加等)に予想以上に時間を要したため、2006年度末の時点で、ペレット溶発雲中の局所電子密度の評価にまで至らなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、複眼光学系を用いたマルチスペクトル画像計測システムの最適化をさらに推し進め、不純物ペレットの溶発雲における電子密度及び温度の2次元分布を計測し、得られた実験データから不純物ペレットの溶発雲の形成機構について、より深い理解を得ることである。また、これにより不純物ペレットの溶発過程を支配している物理機構の解明に寄与することも目的としている。

3. 研究の方法

(1)複眼光学系を用いたマルチスペクトル画像計測システム(図1に、その概略図を示す。)の改良及び高性能化を進める。改良の方針は、以下の通り。

複眼光学系の対物レンズ系等に変更を加えて、溶発雲画像の高精細化を図る。これにより、撮影される溶発雲の空間分解能を向上させる。

複眼光学系の前に液晶可変アッテネーターを取り付ける。これにより、適当な信号強度を安定して確保できるようにする。これまで、高速シャ

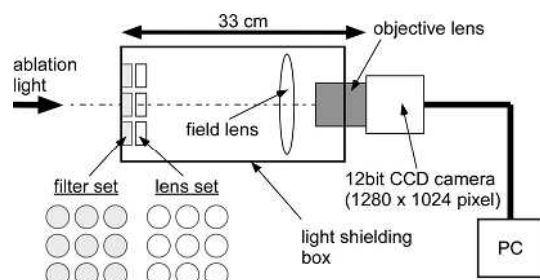


図1. 複眼光学系を用いたマルチスペクトル画像計測システムの概略図。

ッターCCDカメラで撮影された不純物ペレットの溶発雲のごく中心部の信号強度が、取り付けられた干渉フィルターの種類によっては設定可能な最小露光時間(10 μs)にしても飽和していた。現在、遮光フィルターの追加によりこれに対応しているが、液晶可変アッテネーターの場合、任意の遮光度を遠隔で設定できることから、より適切な信号強度を迅速に確保できる点で優れている。

(2)実験は、自然科学研究機構核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(Large Helical Device: LHD)において行う。同装置で研究代表者が行っている先進的不純物ペレット(トレーサ内蔵固体ペレット(Tracer-Encapsulated Solid Pellet: TESPEL))の入射実験に、改良を施したマルチスペクトル画像計測システムを適用し、TESPELの溶発雲中の電子密度及び温度の2次元分布の測定を試みる。TESPELは不純物ペレットではあるが、その主たる成分がポリスチレン(-CH(C₆H₅)CH₂-)であることから、Hβ線のシュタルク拡がりから電子密度を、Hα線と連続光成分との強度比もしくはHβ線と連続光成分との強度比から電子温度を評価することができる。測定された溶発雲中の電子密度の2次元分布について、高速シャッターCCDカメラと同等の高い時間分解能(数10 μs)で溶発雲全体からのHβ線のシュタルク拡がりを測定することができるので、これによる実験データと系統的な比較を行い、その妥当性を評価する。

4. 研究成果

(1)ペレット溶発雲内において完全局所熱平衡プラズマが生成されていると仮定すると、TESPEL溶発雲中の電子温度は、溶発雲から発せられるHα線と連続光成分との強度比もしくはHβ線と連続光成分との強度比から評価することができる。そこで、以下の表1に示す干渉フィルター群を用いて、TESPEL溶発雲中の電子温度の2次元分布計測を行った。

Target	Hα	Hβ	Continuum
$\lambda_{\text{center}}(\text{nm})$	655.5	486.5	536.6
FWHM(nm)	5	10	5

表1. TESPEL 溶発雲中の電子温度分布計測向け干渉フィルター群の特性。

表1に示した干渉フィルター群により得られた実験データを解析したところ、溶発雲の中心部の電子温度は10～20 eVと評価された。この値は、これまでの他の研究から予想される値から大きくずれており、計測に何かしらの問題があった可能性が指摘された。検討の結果、連続光成分にC I (538.0 nm)が混入していた可能性が高いことが判明した。そこで、連続光成分計測に使用している干渉フィルターの特性を中心透過波長630.5 nm、半値幅5.0 nmに変更して、再度

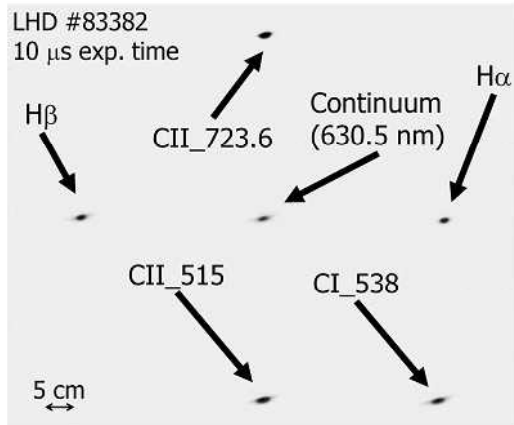


図2. マルチスペクトル画像計測システムによって撮影された TESPEL の溶発雲の一例。露出時間は 10 μ s。ここでは、 $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、連続光成分用干渉フィルター以外に、 $C I(\lambda_{center} = 538.0 \text{ nm}, \text{FWHM} = 5 \text{ nm})$ 、 $C II(\lambda_{center} = 515.0 \text{ nm}, \text{FWHM} = 10 \text{ nm})$ 、 $C II(\lambda_{center} = 723.6 \text{ nm}, \text{FWHM} = 5 \text{ nm})$ を使用している。

実験を行った。図2に、再実験時におけるマルチスペクトル画像計測システムによって撮影された TESPEL の溶発雲像の一例を示す。図より、マトリックス状に配置された各光学系によって捉えられた溶発雲がフィールドレンズを介して1枚の CCD 上にきれいに結像していることが分かる。この時、露出時間は 10 μ s であり、TESPEL の溶発過程の一部(この時はその初期段階)を捉えた像となっている。TESPEL の溶発雲は少し傾いた形状をしているが、この

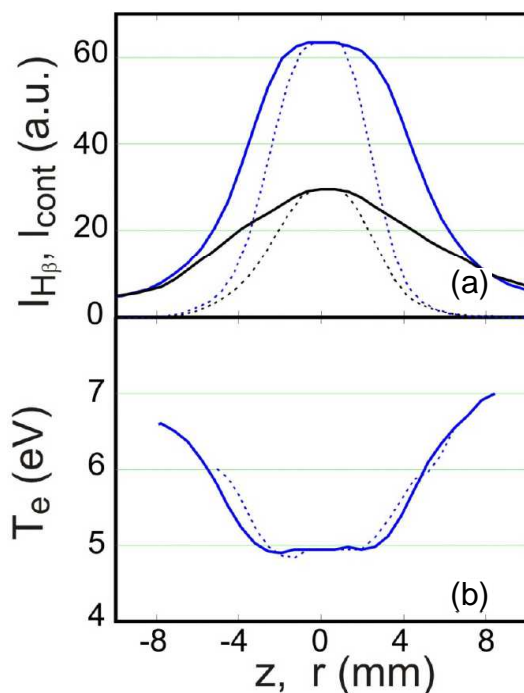


図3. (a) z 軸(磁力線に平行方向, 実線)及び r 軸(磁力線に垂直方向, 破線)における $H\beta$ 線スペクトル及び連続光成分の強度分布, (b) z 及び r 軸における電子温度分布。

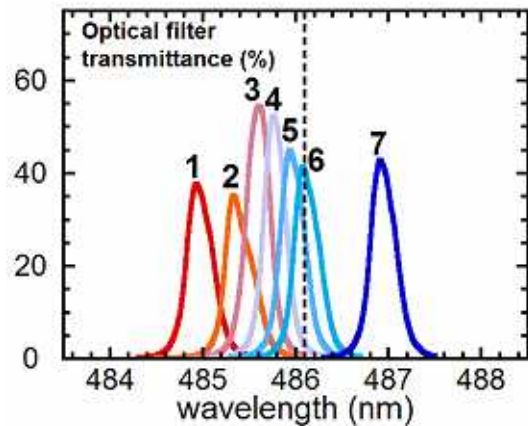


図4. TESPEL 溶発雲中の電子密度分布計測向け干渉フィルター群の透過特性。

傾きは TESPEL の溶発雲が撮影された場所における磁力線の傾きに対応していると考えられる。図3 (a)に、図2の場合における磁力線に対して平行な軸(z 軸)及び垂直な軸(r 軸)それぞれにおける $H\beta$ 線スペクトルと連続光成分の強度分布を示す。この場合、それぞれの強度分布は各軸において若干の非対称性を有していることが分かった。これら $H\beta$ 線スペクトルと連続光成分の強度比から求めた電子温度分布を図3 (b)に示す。この場合、TESPEL 溶発雲中心部の電子温度は約 5 eV であり、周辺に行くに従って約 7 eV 程度まで上昇していることが分かった。この約 5 ~ 7 eV という値は、これまでの研究と比較して妥当な値である。また、 z 及び r 軸に対して電子温度はほぼ等方的に広がっていることも分かった。このようにして、TESPEL 溶発雲中の電子温度の2次元分布を世界で初めて実験的に得ることに成功した。

(2) TESPEL 溶発雲中の電子温度の2次元計測に成功したことを受け、2008 年度から TESPEL の溶発雲中の電子密度の2次元分布計測を開始した。図4に、TESPEL 溶発雲中の電子密度の2次元分布計測に使用した干渉フィルター群の透過特性を示す。シュタルク拡がりにより広がった $H\beta$ 線スペクトルを各フィルターによって分割して測定し、透過率に応じた補正係数を用いることで最終的に $H\beta$ 線のシュタルク拡がりの2次元分布を得ることができる。これらの干渉フィルターを用いて得られた実験データに対する初期解析結果は、本来最も電子密度が高いと予想される溶発雲中心部において電子密度がその周囲と比較して低くなっていることを示した。これが計測の不具合によるものか、実際のものかは今のところ不明であり、現在詳しい解析を進めているところである。いずれにせよ、実験データは取得できていることから、今後、解析が進展することで、不純物ペレットの溶発雲形成機構の研究の進展が期待される。

5 . 主な発表論文等
(研究代表者 , 研究分担者及び連携研究者に
は下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

N. Tamura, V. Yu. Sergeev, D. V. Kalinina, I. V. Miroshnikov, K. Sato, I. A. Sharov, O. A. Bakhareva, D. M. Ivanova, V. M. Timokhin, S. Sudo, and B. V. Kuteev, "Spectroscopic diagnostics for ablation cloud of tracer-encapsulated solid pellet in LHD", Rev. Sci. Instrum., **79**, 10F541-1~10F541-4, (2008), 査読有

[学会発表] (計 2 件)

I. V. Miroshnikov , "Study of Pellet Clouds in LHD via 2-D Spectroscopy Imaging" , 35th EPS Plasma Physics Conference , 2 0 0 8 年 6 月 1 2 日 , ヘルソニソス (ギリシャ)

田村直樹 , "Spectroscopic diagnostics for ablation cloud of tracer-encapsulated solid pellet in LHD" , 17th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics , 2 0 0 8 年 5 月 1 5 日 , アルバカーキ - (アメリカ)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

田村 直樹 (TAMURA NAOKI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号 : 80390631

(2) 研究協力者

セルゲイエフ ウラジミール (Sergeev Vladimir)
ロシア・サンクトペテルブルク工科大学・物理工学部・
教授

ミロシュニコフ イゴール (Miroshnikov Igor)
ロシア・サンクトペテルブルク工科大学・物理工学部・
研究員

様式 C-19 (記入例)

科学研究費補助金研究成果報告書