

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760694

研究課題名(和文) 高速イメージング分光計測による高密度プラズマ塊の散逸挙動機構の解明

研究課題名(英文) Study of high density plasmoid dynamics by high speed imaging spectroscopy measurement

研究代表者

本島 巖 (MOTOJIMA GEN)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00509507

研究成果の概要(和文)：核融合炉における固体水素を用いた燃料供給法を確立すべく、固体水素の溶発素過程を調べることを目的として、分岐イメージングファイバを用いた高速イメージング分光計測を開発した。この手法により、固体水素の溶発によって形成される高密度プラズマ塊の内部分布計測が可能となり、高密度プラズマ塊内の電子密度、電子温度分布の同定に成功した。本研究では、電子密度分布の時間経過を調べたほか、異なる背景プラズマにおける高密度プラズマ塊内の電子数を比較する等して高密度プラズマ塊の挙動を観測し、溶発の素過程理解に貢献した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the physics of pellet plasmoid dynamics for the establishment of solid hydrogen pellet refuelling towards a nuclear fusion reactor, internal distribution measurements in the plasmoid by high-speed imaging spectroscopy have been successfully developed. In this spectroscopic system, a fiber scope with five-arms is used. The time dependence of electron density distribution in the plasmoid is investigated. The electron density in the plasmoid is compared at different background plasmas. The observations by the internal measurements contribute to the understanding of pellet ablation mechanism.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合、高速イメージング分光、イメージングファイバ、固体水素、高密度プラズマ

1. 研究開始当初の背景

将来の核融合炉では、核融合反応によるプラズマ自身の燃焼により、外部からの加熱入力無しで高温プラズマ状態を維持することができる。一方、燃料は核融合反応によって

減少していくため、定常な炉心プラズマ維持のためには外部からの継続的な燃料粒子供給制御が必要となる。しかしながら、現状では、燃焼条件を満たす高温状態に向けたプラズマ加熱、およびプラズマ性能向上に研究の重きが置かれており、燃料粒子供給に関する

研究は未だ多くは行われていない。よって、将来の核融合炉を見据えた場合、燃料粒子供給の早期確立が必要とされている。

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 程度の固体水素の氷片を 1 億°C 程度の高温プラズマ中に数千 m/s 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水素を供給する。この方法の特徴として、プラズマ中心への燃料を供給できることから、高効率な粒子供給が可能であることが挙げられる。しかしながら、将来の核融合炉における高温プラズマでは、固体水素がプラズマ内部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立てられていない。

一方で、固体水素のプラズマへの供給過程において、固体水素が溶発する際にプラズマ化されて形成される高密度プラズマ塊の動的な散逸挙動が重要な役割を担っていることが分かってきている。すなわち、高密度プラズマ塊は高温プラズマや磁場との相互作用を受けて散逸時に複雑な挙動を示しており、この挙動を理解することは精密な粒子供給制御を行ううえで必須であるといえる。なお、高密度プラズマ塊の密度は約 10^{23} 個/m³ であり、背景プラズマの密度の約 1000 倍にも相当する。これまで行われてきた固体水素の溶発研究は、マクロな観測が主で、溶発の物理機構が明らかにされるほどの詳細な観測は行っていない。例えば、高速カメラを用いた 2 次元イメージング計測では高密度プラズマ塊の分離加速を示す観測結果が得られているが、定性的な動的散逸過程の存在を提示しているのみである。

今後の研究では、溶発挙動を予測しうる物理機構の深い理解が必要とされる。本研究は、画期的な計測手法を用いた新規性のある研究であり、その必要性を満たしている。なお、高密度プラズマ塊の挙動の物理理解は、プラズマフォトリックデバイスとして期待されている固体・プラズマ中間物性の基礎特性研究にも貢献できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、1 億°C 程度の高温プラズマ中に約 1000 m/s で入射された固体水素が溶発する際に形成される高密度プラズマ塊の動的な散逸過程を同定し、その挙動機構を解明することにある。

高密度プラズマ塊のパラメータ観測には、これまで主に大域的な分光的手法を用いておこなわれてきたが、この手法を単独でおこなうだけでは、解析に必要な空間分解能およ

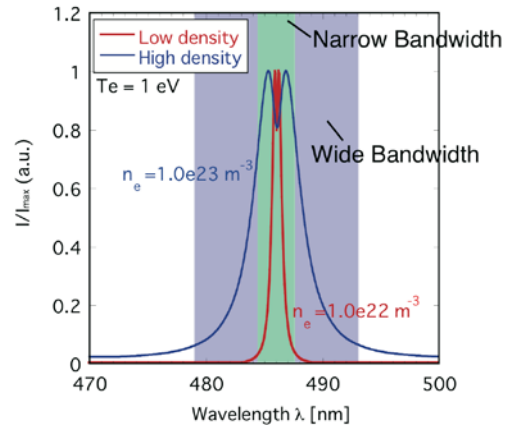


図 1 バルマーβ線のスペクトル。青線が高密度、赤線が低密度のスペクトルを表している。

び時間分解能を同時に得ることができず、散逸過程の詳細を把握することが困難であった。

本研究では、同一事象を同じ場所から複数の狭帯域光学フィルタを介して観測する高速イメージング分光計測(時間分解能 10^{-5} s)により、高空間分解能かつ高時間分解能で高密度プラズマ塊の密度・温度分布を測定して散逸量を定量的に評価し、散逸過程が粒子供給分布に与える影響を明らかにすることを試みた。

3. 研究の方法

(1) 狭帯域光学フィルタの仕様を決定

高密度プラズマ塊からの水素発光スペクトルはその密度・温度に大きく依存する。例えば、水素原子の周りの電子がもたらすシュタルク効果は、電子密度・温度に応じたスペクトルの広がり(シュタルク広がり)を見せる。故に、スペクトルを解析することで高密度プラズマ塊の温度・密度を一意に得ることができる。例えば、図1に同じ温度条件で、密度の異なる場合のバルマーβ線のスペクトルを示す。低密度では、線スペクトルがピークしている一方で、高密度では、線スペクトルが広がっていることがわかる。本研究では、このようなスペクトルの電子密度・温度の依存性を用いてプラズマ塊の内部分布を同定した。

(2) 計測システムの構築

本計測システムの特徴は、高密度プラズマ塊からの発光を5つに分岐された異なる狭帯域光学フィルタが取り付けられているイメージングファイバを用いて分光することにあ

る。それらを一台の高速カメラに焦点を合わせるにより高空間分解能かつ同時計測による分光を可能にしている。なお、5分岐のイメージングファイバはすでに準備されており、本研究ではそれを支えるためのホルダーの設計およびファイバの見込む視線の検討を行った。

(3) 高密度プラズマ塊の観測および高密度プラズマ塊の密度・温度分布測定

上記の計測システムを構築し、健全性を確認した後、以下の手順で実験を進めた。

- ① 各狭帯域光学フィルタで得られた高密度プラズマ塊の挙動を観測。
- ② 高密度プラズマ塊の密度・温度分布の同定。
- ③ 高密度プラズマ塊が散逸していく過程の観測。具体的には、高密度プラズマ塊の挙動の時間経過を観察し、散逸量の定量的評価を行った。
- ④ 固体水素の入射条件に対する高密度プラズマ塊の挙動特性を調べた。
固体水素の溶発は背景プラズマや磁場に依存する。背景プラズマの温度条件を変えて挙動を観測した。

4. 研究成果

本研究は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)と固体水素入射装置を用いて行った。上記で述べた研究の方法に従い、研究成果を報告する。

(1) 狭帯域光学フィルタの仕様を決定

プラズマ塊の電子温度・密度の正確な評価を行えるようにプラズマ塊の発光スペクトルを理論データから推定し、狭帯域光学フィルタの組み合わせを決定した。この理論計算では、スペクトルの強度は局所熱平衡が成立していると仮定して求められ、線スペクトルのシュタルク拡がり文献(C. Stehle and R. Hutcheon, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 140, 93 (1999))を基に計算されている。さまざまに推定されたプラズマ塊の密度(10^{22} – 10^{24} m⁻³)、温度(0.7–1.3 eV)におけるスペクトルを計算し、最適な狭帯域光学フィルタの組み合わせを理論データから決定した。なお、密度と温度の範囲はLHDで過去に大域的分光計測によって得られた結果を基にしている。

その結果、バルマーβ線(中心波長 486.1 nm)とγ線(中心波長 435.8 nm)および連続光領域(中心波長 576.8 nm)に着目して密度・温度分布を求めることとした。狭帯域光学フィルタの仕様を決定した後、実際に標準光源

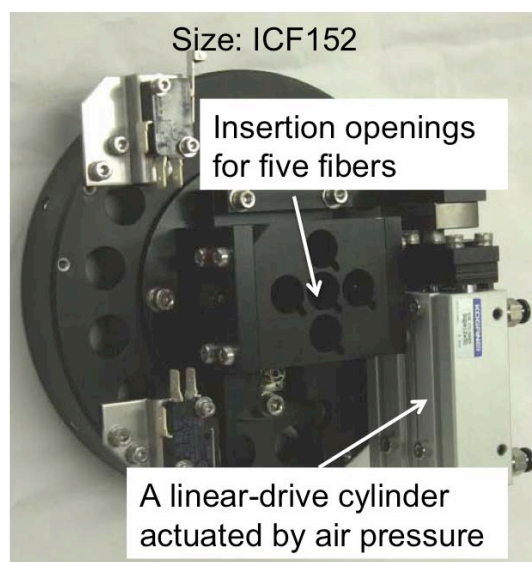


図 2 ファイバホルダー。圧空式直線駆動型シリンドラを用いて狭帯域光学フィルタの取り外しを可能にしている。

と分光器を用いて透過率を測定して較正を行い、仕様通りの透過率が得られていることを確認した。

(2) 計測システムの構築

5分岐ファイバのホルダーの設計を行った。設計の際には、ファイバ間の距離をできるだけ近くして、同位置からの観測を行えるようにした。また、観測ポートから固体水素の溶発位置への視線を図面から正確に計算し、ファイバ端面が視線に沿うように、最適なファイバ保持角度を求めた。さらに、観測視線の同定を容易にするために、フィルタは固定式にせず、取り外し可能な圧空式の機構を採用し、遠隔操作を行える計測システムを構築した(図2)。ホルダーの設計後、作成したファイバホルダーを観測ポートに取り付けて、高速カメラの較正を行った。その結果、各ファイバの健全性を確認したほか、ファイバの見込む視野がプラズマ塊の飛翔範囲内にあることを確認した。

LHDでは高温のプラズマが生成されており、固体水素をLHDプラズマに入射して、その溶発を観測している。標準サイズの固体水素の大きさは3.8 mmφ×3.8 mm、標準の固体水素の速度は1000 m/sである。このとき、固体水素入射速度に関するドップラーシフトの影響について、波長のシフト量は486.1 nmのときに高々 10^{-3} nmであるので考慮していない。図3に5分岐ファイバを示す。高速カメラと5分岐ファイバは撮像リレーレンズによってつながっている。ファイバスコープは長さ15 m、ステンレスフレキシブルチューブで覆わ

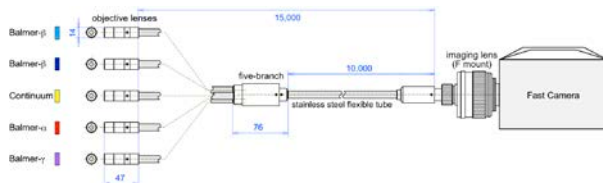


図3 5分岐ファイバ。ファイバは撮像リレーレンズを通して高速カメラに接続されている。

れており、画素数は 15,000、視野角は 15° である。それぞれのファイバには異なる狭帯域フィルタが取り付けられている。すなわち、(1)で仕様を決定した、バルマーβ線付近に透過率がある半値幅の異なるフィルタ2枚、バルマーγ線領域に透過性のあるフィルタ1枚、および連続光領域付近に透過率のあるフィルタ1枚を用いている。残る1つのファイバには、参考のため、バルマーα線領域に透過性のあるフィルタを取り付けている。ここで、フィルタの波長特性に関して本研究では問題ないと考えている。プラズマ塊が観測されている領域は撮像の中心から半径 200 mm の範囲内に位置しており、その領域におけるファイバの画角は約 4° となる。これは、波長が 486.1 nm のときに、1.2 nmブルーシフトするオーダであり、無視できると考えている。フィルタを通して得られた5つの画像は、単一の高速カメラ (Vision Research Inc. Phantom V7) に集光させている。これにより、同時計測による分光を可能にしている。高速カメラは 12bitのSR-CMOSセンサーが備えられている。本研究では、フレームレートが 20000 fps、露光時間が $2 \mu\text{s}$ 、解像度は 512×96 pixelで撮影した。なお、解像度は本計測の要件を満たしていると考えている。本解像度では、1 pixel は約 7 mm に対応しており、ペレットのサイズの倍ほどの大きさであるが、高密度プラズマ塊の空間スケールが数 10 cmであることを考えると高密度プラズマ塊の密度・温度分布を十分測定できるといえる。また、露光時間についても本計測の要求を満たしている。 $2 \mu\text{s}$ の間に 1000 m/sの固体水素は 2 mm動くことになる。この移動距離は 1 pixel以下であるので、固体水素の移動距離は分布計測に影響はないと考えている。

(3) 高密度プラズマ塊の観測および高密度プラズマ塊の密度・温度分布測定

①各狭帯域光学フィルタで得られた高密度プラズマ塊の挙動を観測

図4に各フィルタを通して得られたプラズマ塊の画像を示す。いずれもプラズマ塊が一方向に伸びている様子が分かる。これは、プラ

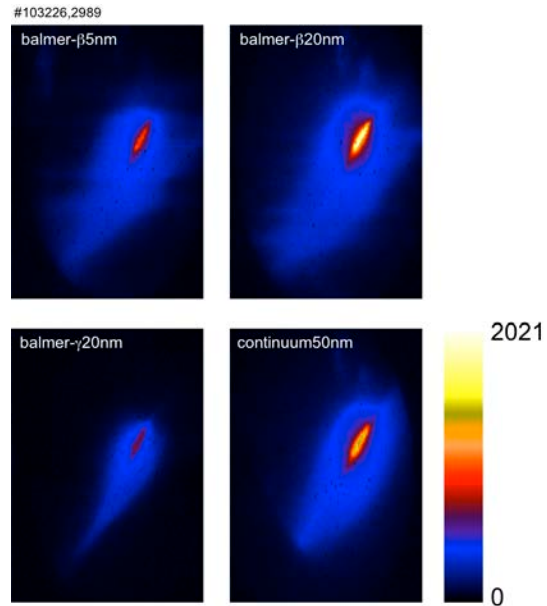


図4 各狭帯域光学フィルタで出られたイメージ。

ズマ塊がイオン化されており、磁力線方向に沿っていることを示唆している。各狭帯域光学フィルタを通して得られた強度を各ピクセルで比較することによりプラズマ塊の温度、密度分布が推定できる。本研究では、バルマーβ線、バルマーγ線の強度比から温度、密度分布を同定した。

②高密度プラズマ塊の密度・温度分布の同定

各狭帯域光学フィルタで得られた強度比より求めた高密度プラズマ塊の電子密度、温度分布イメージングを図5に示す。高密度プラズマ塊内で、電子温度が 0.6-0.9 eV付近、電子密度が 10^{22} - 10^{24} m^{-3} の範囲で分布していることが分かる。LHDでは過去に大域的な分光計測によりプラズマ塊の平均された密度・温度計測が行なわれている。このときの結果でも同様の密度・温度になっていることが報告されており、今回の密度・温度分布の範囲は妥当であるといえる。本計測手法を用いることで、高密度プラズマ塊の密度・温度の定量化が可能であることが示された。

③高密度プラズマ塊が散逸していく過程に着目した解析をおこなった。具体的には、高密度プラズマ塊の挙動の時間経過を観察し、散逸量の定量的評価を行った。図6にプラズマ塊の電子密度分布の時間発展を示す。プラズマ塊が磁力線方向に沿って 10 cmほど拡がり、電子密度分布が変化しつつ拡散している様子が分かる。また、磁力線方向の傾きから

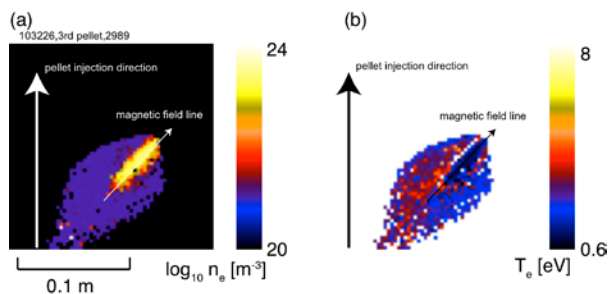


図 5 高密度プラズマ塊の(a)電子密度, (b)温度イメージング.

溶発位置における磁力線の回転変換を推定し, 各フレームにおける溶発位置を推定した. 時間経過につれて, 電子密度が減少して行く様子が分かる.

④固体水素の溶発は背景プラズマや磁場に依存する. そこで, 固体水素の入射条件に対する高密度プラズマ塊の挙動特性を調べるために, 背景プラズマの温度条件を変えて挙動を観測した. 各溶発位置における電子密度分布から, 背景プラズマの違いにおける高密度プラズマ塊内の電子(プロトン)数を比較したところ, 高温プラズマに溶発する方が高密度プラズマ塊に内在する電子数は多いことが分かった. このことは, 高温プラズマに入射する方がペレット溶発率が高いことと理論的に一致する.

今後, 本研究で開発された高速イメージング分光計測を用いて, 内部分布を詳細に解析し, 理論モデルとの比較を行い, 高密度プラズマ塊の挙動の物理的解明を目指す.

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 2 件)

1. Gen MOTOJIMA, Ryuichi SAKAMOTO, Motoshi GOTO, Hiroshi YAMADA and LHD experiment group, Spectroscopic diagnostics for spatial density distribution of plasmoid by pellet injection in the Large Helical Device, Plasma and Fusion Research, 査読有, 5, 2010, S1033.

2. G. Motojima, R. Sakamoto, M. Goto, A.

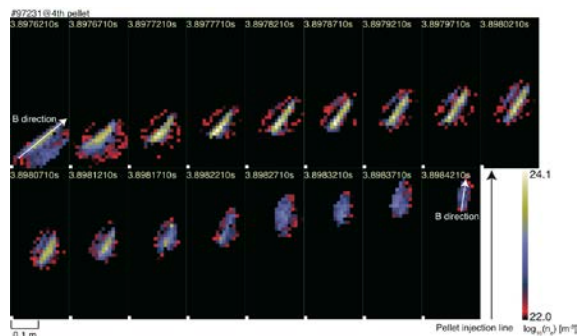


図 6 電子密度イメージングの時間発展.

Matsubara, J.S. Mishra, H. Yamada and LHD experiment group, High-speed imaging spectroscopy for pellet plasmoid observation in LHD, Proceedings of 37th European Physical Society conference on Plasma Physics, 査読無, 2010, P5-173.

[学会発表] (計 6 件)

1. 本島 巖, 高速イメージング分光によるペレットプラズモイドの粒子数評価, プラズマ・核融合学会 第 27 回年会, 2010 年 11 月 30 日, 北海道大学学術交流会館 (北海道)
2. G. Motojima, High-speed imaging spectroscopy for pellet plasmoid observation in LHD, 37th European Physical Society conference on Plasma Physics, 2010 年 6 月 25 日, ダブリン, アイルランド
3. 本島 巖, 高速イメージング分光計測によるペレットプラズモイドの挙動観測, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 2010 年 6 月 11 日, 高山市民文化会館 (岐阜県)
4. 本島 巖, 高速イメージング分光による高密度プラズマ塊の内部分布計測, プラズマ核融合学会第 26 回年会, 2009 年 12 月 1 日, 京都市国際交流会館 (京都府)
5. 後藤基志, 本島 巖, 坂本隆一, 森田繁, 水素ペレット溶発雲の分光学的研究, プラズマ核融合学会第 26 回年会, 2009 年 12 月 1 日, 京都市国際交流会館 (京都府)
6. 本島 巖, 高温プラズマ中のペレット

溶発によるプラズマ魂の高速イメージング計測, 日本物理学会 2009 年秋期大会, 2009 年 9 月 26 日, 熊本大学(熊本県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本島 巖 (MOTOJIMA GEN)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 00509507