

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 6 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009 年度～2011 年度

課題番号：21560863

研究課題名（和文） 高温プラズマ中における高密度プラズモイドの非拡散的輸送機構

研究課題名（英文） Dynamic behavior of non diffusive transport of high density plasmoid in high temperature plasmas

研究代表者

坂本 隆一 (SAKAMOTO Ryuichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：10290917

研究成果の概要（和文）：ステレオ視高速カメラとバンドルファイバアレイを相補的に用いた長時間・空間分解能観測を用いて、高温プラズマ中へ入射された固体水素ペレットが溶発して形成される溶発プラズモイドの詳細観測を行った。その結果、溶発プラズモイドは最大 100 kHz 程度の周波数で分離し、10 数 μs の寿命の間に ~ 15 cm 程度低磁場側に輸送されることを明らかにした。この結果は、実験的に観測されているペレット溶発位置と実効的な粒子デポジション分布の差異を説明することができる。

研究成果の概要（英文）：A complementary observation of solid hydrogen ablation has been performed by using a stereo fast camera and bundled fiber optics in order to investigate the pellet ablation dynamics. The pellet plasmoid which is formed around the pellet substance by ablating hydrogen pellet, intermittently breaks away from the pellet ablating position and the breakaway plasmoid is transported across a confinement field. The breakaway plasmoid recurrently develops at 100 kHz and it is non-diffusively transported approximately 15 cm during its 10 several μs lifetime in the opposite direction to the pellet motion, namely, toward the low magnetic field side. This observation gives a reasonable explanation for the difference between the pellet ablation position and the effective particle deposition profile.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：磁場核融合

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め方式の核融合炉における自己燃焼プラズマでは、核融合反応によって生成されたアルファ粒子がプラズマを自律的に加熱するようになるため、核融合反応条件を満たす高密度プラズマを維持するための燃

料供給が最も重要な燃焼制御要素となり、核融合炉心プラズマへの高効率な燃料供給手段の確立が必要である。高温プラズマへの高効率な燃料供給手段として、固体水素の高速入射（ペレット入射法）があり、高温プラズマ中における固体水素の溶発特性について

実験的、理論的側面から多くの研究がなされてきている。これらの研究によって、固体水素ペレット入射法の有効性が示されている一方で、将来の核融合炉における大容量・高温プラズマでは固体水素ペレットがプラズマ中心部へ到達する前に溶発してしまうことが予測され、高温プラズマへの燃料供給手段としての検証は未だ不十分である。

固体水素ペレット入射による高温プラズマへの粒子供給特性を理解する上で、2つの重要な素過程がある。まず、高温プラズマ中に入射された固体水素はプラズマからの入熱に曝されて溶発する。次に、溶発した粒子はさらに加熱されることによって、電離して高密度の溶発プラズモイドを形成する。この溶発プラズモイドは閉じ込め磁場や背景プラズマとの相互作用によって力を受け、非拡散的に輸送される。したがって、前者の固体水素の溶発位置からだけでは、必ずしも実効的な粒子デポジション分布を説明できる訳ではなく、溶発後形成される高密度プラズモイドの背景プラズマへの均質化過程も考慮する必要がある。特に、背景プラズマ温度が高くなると、後者の溶発プラズモイドの非拡散的輸送の影響が無視できなくなることが実験的[1]、理論的[2, 3]に示されている。すなわち、溶発プラズモイドの非拡散的輸送機構を理解することによって、核融合炉心プラズマへの燃料供給特性を改善するような固体水素ペレット入射法の最適化の指針が得られる可能性がある。

私がこれまで行ってきた固体水素ペレット溶発観測においても、溶発位置と実効的なプラズマ密度増加位置の差異が観測されており[4]、非拡散的な粒子輸送の存在を示唆している。また、高速カメラを用いた2次元イメージング計測では溶発プラズモイドの分離加速を示唆する観測結果も得られており、非拡散的な粒子輸送の存在を傍証している。さらに、科研費（基盤研究(C)19560831, 平成19-20年度）にて遂行したバンドル光ファイバと高速フォトダイオードを用いた高時間分解能計測によって、サブ μs のタイムスケールでの溶発プラズモイドの輸送の存在を明らかにした。

今後の研究の展開としては、溶発プラズモイドの非拡散的輸送特性を実験的に示すとともに、その輸送機構を明らかにし、固体水素ペレット入射を用いた粒子供給法の最適化につなげることである。

2. 研究の目的

本科研費研究では、ステレオ視高速カメラによる3次元観測と、バンドルファイバアレイを用いた高時間分解能計測を相補的に用いて、高温プラズマ中へ入射された固体水素ペレットが溶発して形成される溶発プラズ

モイドの非拡散的輸送の詳細観測を行い、固体水素ペレットによって供給された粒子がプラズマ中へ均質化してゆく素過程を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は核融合科学研究所で稼働中の大型ヘリカル装置（LHD）と付属設備であるペレット入射装置を用いた研究である。当初の予定では、これまでの科研費研究で整備したバンドルファイバアレイと同じものを追加し、2地点からの観測による高速3次元計測を行う予定であったが、本研究費内で達成可能な空間分解能を考慮すると、むしろ1地点のバンドルファイバアレイを增強し、2次元イメージングの分解能を上げた方が有用な情報が得られると判断した。従って、3次元計測は従来通り高速カメラによって行い、バンドルファイバアレイによる高時間分解能計測の空間分解能を改善し、これらの2つ観測装置を用いた相補的観測によって、ペレット溶発動態の高時間・高空間分解能計測を可能とした。実験観測によって得られたペレット溶発位置とその後の溶発プラズモイド挙動といった局所的な現象と、背景プラズマの密度計測による大域的な粒子供給分布を比較することによって、ペレット溶発素過程が実効的な粒子供給特性に及ぼす影響を調べる。

さらに、ペレットの溶発とその後の背景プラズマへの均質化過程を記述した理論モデルによるシミュレーションと観測結果を比べることによって、ペレット溶発動態の機構を推定するとともに、理論モデルの外挿性を検証する。

4. 研究成果

(1) 溶発プラズモイド観測装置

溶発プラズモイドの高空間分解能3次元計測には、ステレオ視高速カメラ[5]を用いた。高時間分解能2次元計測には、 10×10 マトリックスのバンドルファイバアレイ（図1）を用い、高速カメラと同じ視野を観測できる様な対物レンズを選択した（図2）。各ファイバへの入射光は高速 Si-PIN フォトダイオードを用いて電気信号に変換し、高速 A/D 変換器によってデジタイズ処理してデータを収集した。典型的な観測周波数は1~2.5 MHzとした。

(2) ペレット溶発位置

高温プラズマに入射したペレットの溶発過程の模式図を図3に示す。ペレットは背景プラズマ（主に電子）による熱流束によって溶発し、音速で等方的に広がる中性ガス雲を形成する。中性ガス雲はさらに加熱されて電離し、高密度の溶発プラズモイドになる。溶発プラズモイドは強く発光するため、高速イ

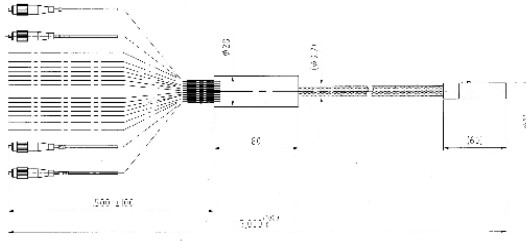


図1 バンドルファイバーアレイ

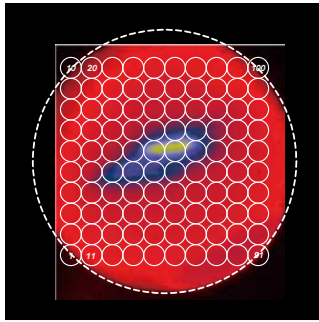


図2 高速カメラの視野（破線）とバンドルファイバーアレイの視野（実線）

メーキング観測の対象となる．一方，ペレット自体は観測することができないが，溶発プラズモイドの内部に位置して粒子源となっているので，溶発プラズモイドの最輝度部に位置すると推定できる．図4は典型的な溶発プラズモイドの高速カメライメージング観測例を示す．溶発プラズモイドの中心位置（すなわち，ペレットの溶発している位置）をステレオ観測した結果を再構築して任意の断面に射影したプロットを図5に示す．(a)はペレット入射軌道を真後ろから見た断面であり，赤線はペレットが溶発している磁気面上における磁力線を示している．(b)はペレット入射軸を含むポロイダル断面であり，赤線は磁気面を示している．青点は3次元再構築されたペレット溶発位置であり，ペレットは入射軸から磁力線方向に逸れつつ，プラズマ内部に侵入していることが分かる．この現象は，高速イオンによる熱流束の非対称性に起因するもので，本研究の範疇から外れるものであるが，この観測結果はペレット溶発挙動を観測する上で，3次元計測が重要であることを示している．

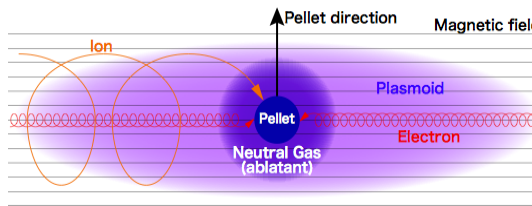


図3 ペレット溶発の模式図

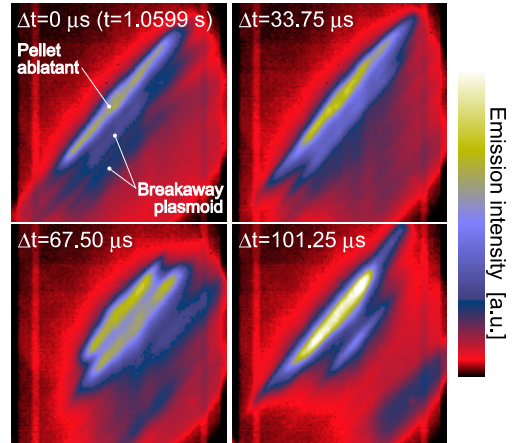


図4 溶発プラズモイド

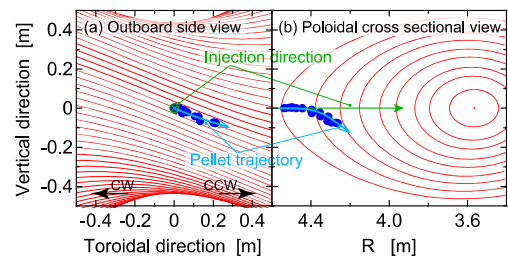


図5 ペレット溶発位置の3次元再構築と任意断面への射影

(3) 分離プラズモイド動態

図4を見ると，強く発光する溶発プラズモイドに加えて，いくつかの筋状の発光が観測できる．この発光は溶発プラズモイドから分離・加速されたプラズモイドを示している．分離プラズモイドの速度は高速カメラの時間分解能よりも十分速いために，高速カメラ画像からは追跡することができないが，観測される3次元位置を調べることによって，溶発位置に対する相対的な存在位置が分かるために，加速方向を示すことが可能である．図6はプラズモイドが観測される大半径方向位置の時間変化を示したものである．青丸は溶発プラズモイド位置であり，ペレット入射

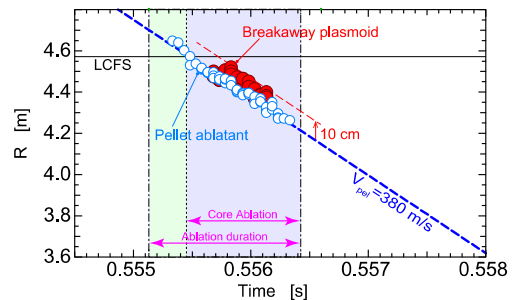


図6 ペレット溶発位置（大半径方向）の時間変化と分離プラズモイドの観測位置

速度から予測される位置（青破線）で溶発していることを示している。一方、分離プラズモイド（赤点）が観測されるのは常に大半半径方向外側であり、その変位は 10 cm 程度である。すなわち、溶発したペレット粒子がプラズマ外側方向へ吐き出されていることを示唆している。このような分離プラズモイドの挙動を明確にするために、より高速計測が可能なバンドルファイバアレイを用いて観測を行った。図 7 は高速カメライメージとバンドルファイバイメージを示す。高速カメラで観測された分離プラズモイドの加速方向に対応するチャンネル列（37 - 40 ch）の発光強度の時間変化を図 8 に示した。発光強度変化には振動が見られるが、各発光のピークは分離プラズモイドが横切ったタイミングを示していると考えられ、振動の周期から分離プラズモイドの分離周波数、チャンネル間のピーク位置の時間遅れから、プラズモイドの速度が推定できる。典型的な分離周波数は 60 kHz 程度であり、最大で 100 kHz にも達することが明らかになった。また、速度に関しては 10 - 20 km/s、寿命は十数 μs と推定され、ペレットの入射速度の 10 倍以上の速度で、低磁場側に移動されていることが示された。また、溶発位置から 2 チャンネル以上離れたファイバでは、ほとんど発光に振動が見られないことから、分離プラズモイドの移動距離は 10 - 20 cm 程度と推定される。高速カメラ観測による移動距離よりも大きく見積もら

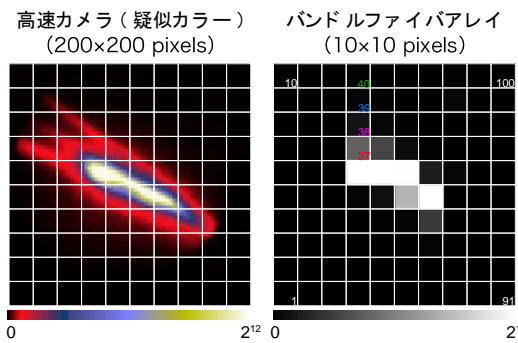


図 7 高速カメライメージとバンドルファイバアレイイメージ。両者は同じ視野を有している

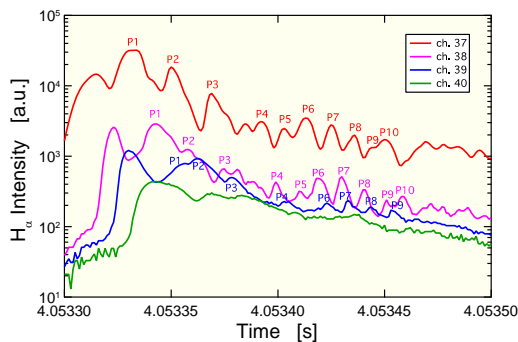


図 8 バンドルファイバ信号の時間変化

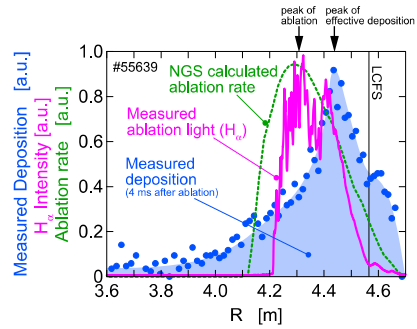


図 9 ペレット溶発位置と実効的粒子デポジション分布

れたが、このことは高速カメラの撮像素子のダイナミックレンジが 10 bit であるのに対して、フォトダイオード計測のそれは 14 bit あるため、移動に伴い密度が薄くなった溶発プラズモイドでも観測できることに起因しており、これらの結果には矛盾が無いと考えている。

大域的な実効粒子供給特性と溶発位置の関係を図 9 に示した。トムソン散乱計測による背景プラズマの密度変化から求めた実効的な粒子供給分布は青丸、ペレット溶発発光分布は桃色実線で示した。溶発発光のピーク位置は 4.30 m 付近、実効粒子供給ピーク位置は 4.45 m にあり、おおよそ 15 cm の差異がある。この差異は分離プラズモイドの変位量と一致し、実効粒子供給位置が溶発位置と異なることを定性的に説明できる。一方、分離プラズモイドにどの程度の粒子が含まれているかを分光的に求めることを試みたが、分離プラズモイドの寿命が短いために、分光後の光量が確保できず、プラズモイドの密度の評価はできていない。分離プラズモイドの密度評価は、次のステップの研究課題として残った。

溶発プラズモイドの非拡散的輸送は、閉じ込め磁場構造の非一様性に誘起されてプラズモイド内に生じる荷電分離に起因する $E \times B$ ドリフト輸送が原因と考えられており、閉じ込め磁場構造が単純なトカマク装置では理論モデリングがすすんでいる。ヘリカル装置においては、閉じ込め磁場構造の 3 次元性に起因した局所的な差異は予測されるが、トラス平均した傾向はトカマク装置と同様であると考えられる。ここでは、トカマク装置における $E \times B$ ドリフト輸送をモデル化した理論コードを用いて LHD 実験をシミュレーションした。その結果、典型的な溶発プラズモイドの分離周波数は 40 - 60 kHz であり、ドリフト輸送距離は 10 - 15 cm と推定され、実験で観測されたプラズモイドの動態をよく再現することができた。ヘリカル装置特有の磁場構造の 3 次元性がプラズモイド輸送に与

える影響に曖昧さが残るものの、実験で観測された非拡散的輸送は磁場構造の非一様性に起因したプラズモイドの $E \times B$ ドリフト輸送で説明できると考えられる。更に詳細な検証を行い、将来の核融合炉への精度の高い外挿性を確保するためには、理論モデルに磁場構造の3次元性を取り込むことと、幅広い実験条件で理論モデルとの比較を行うことが必要である。

[1] P.T. Lang et al., Physical Review Letters, 79 (1997) 1487-1490.

[2] V. Rozhansky et al., Plasma Phys. Control. Fusion 46 (2004) 575-591.

[3] P.B. Parks et al., Physical Review Letters 94 (2005) 125002.

[4] R. Sakamoto et al., Nuclear Fusion 44 (2004) 624-630.

[5] R. Sakamoto et al., Review of Scientific Instruments 76 (2005) 103502.

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3件)

R. Sakamoto et al., "Observation of Intermittent Breakaway of Pellet Plasmoid in LHD", Europhysics Conference Abstracts 34A (2010) P5.183. (ISBN 2-914771-62-2)

R. Sakamoto and H. Yamada, "Observation of Cross-Field Transport of Pellet Plasmoid in Large Helical Device", Plasma and Fusion Research 6 (2011) 1402085.

J.S. Mishra, R. Sakamoto et al., "Observation of three-dimensional motion of the pellet ablatant in the Large Helical Device", Nuclear Fusion 51 (2011) 083039.

[学会発表] (計3件)

坂本隆一, 「高温プラズマ中における固体水素ペレットの溶発動態」プラズマ・核融合学会第26回年会講演会(京都市), 2009年12月4日.

R. Sakamoto et al., "Observation of Intermittent Breakaway of Pellet Plasmoid in LHD", European Physical Society Conferences on Plasma Physics, (Dublin, Ireland), June 25, 2010.

坂本隆一, 「固体水素ペレット溶発動態の相補的観測」プラズマ・核融合学会第27回年会講演会(北海道大学, 札幌), 2010年12月2日.

[その他]

<http://hdp.nifs.ac.jp/soken/Sakamoto/home.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

坂本 隆一 (SAKAMOTO Ryuichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 10290917