

## 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 6月7日現在

機関番号：63902

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010年度～2011年度

課題番号：22860075

研究課題名（和文） 固体水素ペレット入射法による粒子供給過程の理論モデルの開発と検証

研究課題名（英文） Modeling of particle fueling process by hydrogen pellet injection and its experimental validation

研究代表者

松山 顕之 (MATSUYAMA AKINOBU)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・COE 研究員

研究者番号：90581075

研究成果の概要（和文）：固体水素ペレット入射法は磁場閉じ込め核融合炉に対する粒子供給に最も有効な手法と考えられている。本研究では、ヘリカル型装置を対象として水素ペレットの溶発と密度均質化の物理機構を調べ、実験的な密度デポジションを定量的に評価するための理論モデルの定式化を行い、固体水素ペレットの溶発、高密度のプラズマ塊の形成、密度均質化過程におけるドリフト現象までを取り扱うことのできるシミュレーションコードを開発した。シミュレーション結果は、大型ヘリカル装置(LHD)において実験的に観測されるペレット溶発分布および密度増加分布とよく一致しており、開発された理論モデルの有効性が確かめられた。

研究成果の概要（英文）：Pellet injection is the most promising technique for fueling magnetic fusion reactors. In this study, the pellet ablation and density homogenization processes have been investigated and modeled for evaluating mass deposition profiles of hydrogen pellets injected into the Large Helical Device (LHD). A simulation code that takes into account ablation of solid hydrogen, formation of dense plasma cloud, and drift motion of a deposited cloud was developed. A progress has been made in validating the developed model against the experimental results. It was shown that simulation results well reproduce main characteristics of the measured ablation and deposition profiles in the LHD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	970,000	291,000	1,261,000
2011年度	690,000	207,000	897,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,660,000	498,000	2,158,000

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：プラズマ・核融合、プラズマ理論、ペレット入射、プラズマ加熱、MHD

## 1. 研究開始当初の背景

固体水素ペレット入射法はガスパフ入射法などと比較して、プラズマ周辺部のリサイ

クリングを増加させることなく、重水素や三重水素を炉心に直接供給できるため、磁場閉じ込め核融合炉における最も有望な燃料供

給手法と考えられている。

従来、ペレット入射法の課題は、高温の炉心プラズマで十分な侵入長を確保するため、5-10km 毎秒の高速でペレットを定期的に入射できるような射出装置を開発することにあった。これに対し、近年、トカマク型装置においてペレットを強磁場側（トーラスの内側）から入射した場合に、ペレット溶発に伴って形成される高密度のプラズマ塊（プラズモイド）がプラズマ中心に向けて自発的にドリフトする現象が発見され、低速入射でも高い粒子供給効率が得られることが分かってきた。この結果は、核融合炉心プラズマに対するペレット入射法の確立には、入射装置の工学開発に加え、粒子供給過程の物理的な理解が本質的に重要であることを示唆している。高速でプラズマ中に入射された固体水素が溶発して背景プラズマに粒子を分配する過程は、中性水素ガスと背景プラズマの相互作用、プラズマ加熱に伴い生成される高エネルギー粒子とペレットの相互作用、溶発雲と背景磁場の電磁流体力学（MHD）的相互作用など多様な物理機構が関与しており、学術的にも興味深い。

## 2. 研究の目的

本研究では、ペレット入射による粒子供給分布の決定について、支配的な物理機構をモデル化し、実験で観測される供給分布の定量的な予測手法を開発することを目標とした。このために、(1) 高温プラズマ中へのペレットの侵入長と(2) 高圧力の溶発雲の磁力線を横切るドリフト変位、という二つの物理量に着目した。前者については、数 10 マイクロ秒オーダーのペレット周囲の溶発雲の形成、後者については数ミリ秒オーダーにわたる溶発雲と背景プラズマの緩和にかかわる物理機構を調べる必要がある。これらの現象のモデル化によってペレット侵入長および供給分布を評価するためのシミュレーションコードを開発し、大型ヘリカル装置(LHD)の実験結果との比較による検証をすすめた。

## 3. 研究の方法

モデルの記述のうち、ペレットの溶発に関しては標準的な手法である中性ガス遮蔽(NGS)モデルとともにその拡張版である中性ガス・プラズマ遮蔽(NGPS)モデルに基づく定式化をすすめた。二つのモデルは、水素ペレットの溶発率に関しては同程度の予測を与える一方で、後者はペレット周囲に形成される溶発雲についてペレット近傍の中性ガス領域だけでなくその外側の低温プラズマ領域と背景プラズマとの境界のシースを考慮することで、溶発雲の密度や温度も含めた評価が可能である点に特徴がある。

ペレット入射によって得られる最終的な

密度供給分布については NGPS モデルで得られる溶発雲の初期特性をもとに、溶発雲と背景プラズマの緩和過程を数ミリ秒のオーダーまで追跡することで評価できる。プラズマ小半径方向の分布を評価する上ではプラズモイドの磁場を横切るドリフトが本質的に重要である。その一方で、LHD 装置のような非軸対称の磁場配位におけるプラズモイドのドリフト現象についてはこれまで十分な知見が得られていなかった。本研究ではトカマク型装置で研究されてきた E×B ドリフトモデルと呼ばれる基礎式を出発点とした定式化をすすめ、LHD 装置のような非軸対称の磁場配位にも適用可能な E×B ドリフトモデルを新しく提案した。

モデルを定量的に検証するために、ペレット侵入長および密度供給分布を評価するシミュレーションコードを開発し、LHD で実験的に観測されるペレット溶発分布および密度供給分布との比較を行った。LHD 装置には、ペレット溶発挙動の高時間・高空間分解能の計測や、ペレット入射直後の密度分布計測など先進的な計測機器が整備されており、これらの計測をモデルと直接比較することで精度の高いモデルの検証が可能である。

## 4. 研究成果

本研究によって得られた主要な成果は(1) プラズマ加熱に伴って生成される高速イオンがペレットの溶発および侵入長の決定に果たす役割を定量的に解明したこと、(2) 非軸対称の磁場配位中で生じるプラズモイドのドリフト現象を記述するモデルを提案し、シミュレーションによってはじめて LHD の実験結果を再現したこと、の二点である。これらの成果は、将来の炉心プラズマにおける燃料供給を見通すのに必要とされる、ペレット入射の物理の理解に貢献するもので、特に開発したシミュレーションコードによって、軸対称型、非軸対称型を含め、任意の磁場配位における溶発雲の散逸挙動が議論できるようになった。以下に各成果の概略を述べる。

### (1) 高速イオンとペレットの相互作用

これまで、ペレット溶発の物理機構については、プラズマに入射される加熱パワーが比較的 low、ペレットを溶発させる熱流束を熱電子が担う場合が議論されてきたが、プラズマ加熱によってプラズマ中に無視できない割合の高エネルギー粒子が存在する場合、ペレットと高エネルギー粒子の相互作用によって溶発率が上昇し、ペレット侵入長が浅くなる現象が観測される。特に LHD 実験は高エネルギーの中性粒子ビーム入射加熱に伴う高速イオンの影響が顕著で、この問題を調べるのに適している。ここでは、高速イオンの影響を考慮した NGPS モデルをシミュレーション

オンコードに実装し、計測との比較を行った。シミュレーションは高速イオンの影響によってペレットの溶発率が最大で一桁程度増大すること、その際、熱電子による溶発が支配的なケースに比べて侵入長が1/2程度となることを示す。シミュレーションで評価されたペレットの溶発分布は実験で観測される H $\alpha$  線発光の時間発展をよく再現しており、ペレット溶発に関する高速イオンの重要性が実験とシミュレーションの比較によって明らかにされた。開発されたシミュレーションコードが実験を説明するのに有効な例として、図1にペレット軌道に関する実験と計算結果の比較を示す。ペレット周囲の圧力非等方性に伴うロケット効果を考慮に入れたシミュレーションは実験的に観測されるペレット軌道の加熱ビーム方向への偏向を定量的に再現していることが分かる。

加えて、LHD 個別の成果を一般的な実験装置に適用可能な知見として発展させるために、高速イオンが支配的な状況下におけるペレット溶発率の定量的な依存性を議論した。これにより、加熱ビームのエネルギーと電子温度の比が一定値を超えると高速イオンが支配的になること、その際、ペレットの溶発率は加熱ビームのエネルギーに強い依存性を持つことが明らかにされた。

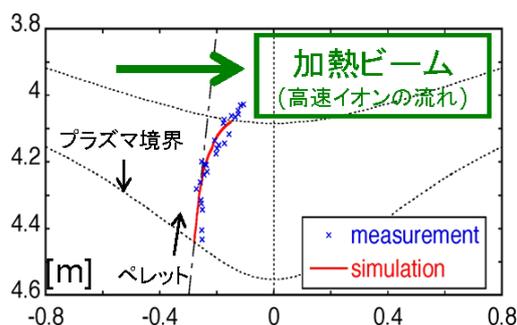


図 1. 非等方なプラズマ加熱ビーム入射時のペレット軌道のシミュレーションと実験の比較。

## (2) 溶発雲のドリフト現象

ペレット溶発理論がペレット入射軌道に沿った初期的な粒子源の評価を与えるのに対し、最終的な密度供給分布は溶発雲が磁力線に沿って膨張し、背景プラズマと圧力緩和した段階で決まる。その際、均質化の比較的初期の段階においては、背景プラズマからプラズモイドへの速い熱輸送が生じることで、溶発雲は背景プラズマに比べて高い圧力を持つ。このような高圧力のプラズモイドは装置中の磁場勾配を感じて分極し、磁場を横切る方向にドリフトすることが知られている。本研究では、ドリフト現象を考慮したプラズ

モイドの密度均質化のシミュレーションコードの開発を行い、LHD の実験結果と比較した。特に(1)で記述したペレット溶発コードを均質化コードの初期条件として用いることで、ペレット溶発から密度均質化までの粒子供給過程全体のシミュレーションを可能とした点に本研究の特色がある。図2はシミュレーションで得られたペレット入射直後の密度分布と実験計測の比較である。実験とシミュレーションの間で良好な一致が得られており、同時にドリフト現象がペレット入射の粒子供給特性に顕著な影響をもたらしていることが明らかにされた。図2のケースではおおよそ入射されたペレット質量のうち 40-50%がドリフトによって損失し、トカマクの低磁場側入射と類似の特性を示している。

シミュレーションコード開発に並行して、溶発雲のドリフト現象に対する磁場配位の影響が議論された。従来の研究は、解析的な軸対称トカマクでの計算に限られていたのに対して、本研究では任意の磁場配位、特に非軸対称の磁場配位を取り扱うことのできるドリフトモデルを提案した。モデル計算は、LHD 装置のようにトーラス周回方向に速い磁場の変動を伴う装置では、プラズモイドが膨張すると内部の電場が打ち消されて、局所的な磁場勾配によるドリフトが抑制されることを明らかにした。このとき、磁場配位の違いは磁力線方向の接続長の違いに要約され、トカマク装置とヘリカル装置ではプラズモイドの膨張に伴って、分極が抑制される効率が異なる。トカマク装置の接続長はヘリカル装置のそれに比べて十分長く、プラズモイド庁が接続長に達するのは均質化の比較的後半の段階に限られるため、プラズモイドの膨張による分極抑制機構が顕著でないことが示された。

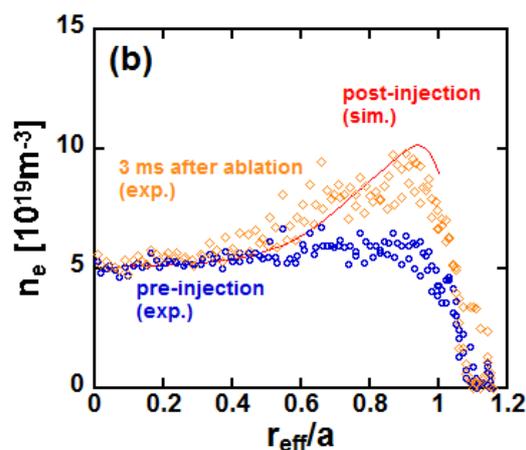


図 2. ペレット入射前後の密度 ( $n_e$ ) の計測値とシミュレーション(実線)の比較

### (3) まとめ

本研究では、ヘリカル型装置における粒子供給過程がはじめて詳細に調べられ、特に、トカマク型装置とヘリカル型装置におけるドリフト現象の包括的な理解が進展した。シミュレーションと実験の比較は、トカマク型装置と同様に、ヘリカル型装置においても粒子供給特性の向上にはドリフト現象の制御が本質的に重要であることを示している。開発されたシミュレーションコードは異なる磁場配位におけるドリフト現象を実験と比較するのに有効で、今後、検証の精度をさらに向上させることでペレット入射の物理的な理解に基づいた、将来の核融合炉におけるペレット入射による粒子供給シナリオの構築に貢献することが期待できる。

### 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 5 件)

- ① A. Matsuyama, B. Pégourié, R. Sakamoto, J. S. Mishra, G. Motojima, and H. Yamada, “Over-ablation and deflection of hydrogen pellets injected into neutral beam heated plasmas in the Large Helical Device,” *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **54** (2012) 905007 (査読有). DOI:10.1088/0741-3335/54/3/035007
- ② A. Matsuyama, F. Koechl, B. Pegourie, R. Sakamoto, G. Motojima, and H. Yamada, “Modeling of drift displacement of the pellet ablated material for outboard side injection in Large Helical Device,” *Plasma and Fusion Research*, **7** (2012) 1303006 (査読有). DOI:10.1585/pfr.7.1303006
- ③ A. Matsuyama, F. Köchl, B. Pégourié, R. Sakamoto, G. Motojima, and H. Yamada, “Modelling of pellet ablation and homogenization for outboard side injection in the Large Helical Device,” in *Proceedings of 38th European Physical Society Conference on Plasma Physics* ISBN 2-914771-68-1, ECA Vol. **35G**, P2.103 1-4 (査読無). <http://ocs.ciemat.es/EPS2011PAP/pdf/P2.103.pdf>
- ④ J. S. Mishra, R. Sakamoto, A. Matsuyama, G. Motojima, H. Yamada, and the LHD experiment Group, “Observation of three-dimensional motion of the pellet ablatant in the Large Helical Device,” *Nuclear Fusion* **51** (2011) 083039 (査読有).

DOI:10.1088/0029-5515/51/8/083039

- ⑤ J. S. Mishra, R. Sakamoto, G. Motojima, A. Matsuyama, and H. Yamada, “Design and performance of a punch mechanism based pellet injector for alternative injection in the large helical device,” *Review of Scientific Instruments* **82** (2011) 023505 (査読有). DOI:10.1063/1.3541807

[学会発表] (計 4 件)

- ① A. Matsuyama, R. Sakamoto, B. Pégourié, G. Motojima, J. S. Mishra, and H. Yamada, 「LHD 実験における水素ペレットの侵入長に対する高速イオンの影響」 *Plasma Conference 2011 (PLASMA2011)*, 2011 年 11 月 23 日, 石川県立音楽堂(金沢市).
- ② A. Matsuyama, F. Köchl, B. Pegourie, R. Sakamoto, G. Motojima, J. S. Mishra, and H. Yamada, “Modelling of pellet ablation and homogenization for outboard side injection in the Large Helical Device,” 38th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2011 年 6 月 28 日, Strasbourg Convention Centre (Strasbourg, France).
- ③ A. Matsuyama, R. Sakamoto, B. Pégourié, G. Motojima, J. S. Mishra, and H. Yamada, “Plasma shielding model for the ablation of hydrogen pellets with fast ions in Large Helical Device” 20th International Toki Conference (ITC-20) on The Next Twenty Years in Plasma and Fusion Science, 2010 年 12 月 7 日-10 日, セラトピア土岐(土岐市).
- ④ 松山 顕之, 坂本隆一, Bernard Pégourié, 本島 徹, Jyoti S. Mishra, 山田弘司「自己無撞着なペレット溶発モデルの LHD 実験への適用と溶発雲計測との比較」第 27 回プラズマ・核融合学会年会, 平成 22 年 12 月 2 日, 北海道大学学術交流会館(札幌市).

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

松山 顕之 (MATSUYAMA AKINOBU)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部  
COE 研究員  
研究者番号: 90581075