

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630470

研究課題名(和文)磁気ノズルによるレーザー生成高密度プラズマ流の動的制御

研究課題名(英文)Dynamic control of a laser-produced dense plasma flow using a magnetic nozzle

研究代表者

長谷川 純 (Hasegawa, Jun)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90302984

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)：将来のエネルギー源として期待される重イオン慣性核融合の基盤技術の確立を目指し、磁気ノズルによるレーザーアブレーションプラズマの品質および安定性の動的制御法について提案し原理実証実験を行った。金属のレーザー標的近くに置いたコイルによりパルス磁場を発生し、ノズル形状の磁場中で発生するレーザーアブレーションプラズマの挙動をプラズマ分光法とイオンフラックス計測により調べた。磁場の印加によりプラズマ中のイオンだけでなく、中性原子の挙動も影響を受けることを明らかにした。一方、プラズマ圧に対して磁気圧が十分でないため、磁気ノズル効果によるプラズマの加速や方向性の改善を確認するには至らなかった。

研究成果の概要(英文)：We proposed and studied the dynamic control of a laser ablation plasma using a magnetic nozzle. This plasma control method can be one of fundamental technologies of heavy ion inertial fusion, which is expected as a future energy resource. A pulsed magnetic field was induced by a coil located near the metallic laser target, and the behavior of a laser ablation plasma, which was generated in the magnetic field having a nozzle-like structure, was examined by plasma spectroscopy and ion flux measurement. We clarified that the behavior not only of plasma ions but also of neutral atoms were affected by the induced magnetic field. Meanwhile, our investigation did not go far enough to confirm the acceleration of plasma particles or the improvement of the directivity of them.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：レーザーアブレーション 磁気ノズル プラズマ分光 価数分析

1. 研究開始当初の背景

慣性核融合の最大の課題は、燃料標的にメガジュールのエネルギーを付与できるエネルギードライバーの開発である。高繰り返し動作やエネルギー変換効率に優れた重イオン加速器は、大型レーザーとともにその有力な候補の1つである。パルスレーザーを固体表面に照射して生成される高密度プラズマは、様々なイオン種を大電流で供給できるため、ドライバー加速器用イオン源としての応用が期待されている。しかし、プラズマ供給量やイオン価数分布の変動が大きく、イオンビームを長パルス(〜10 μs)で安定に引き出すことが難しかった。この欠点を克服するために、我々は高密度のレーザーアブレーションプラズマを磁気ノズルにより動的に制御する手法を考案した。アブレーションプラズマは、膨張に伴い衝突優勢な密度領域から無衝突の密度領域へと急速に移行し、磁気ノズルを通過するプラズマには古典流体的な加速機構とプラズマの反磁性効果による加速機構の両方が作用すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、パルスレーザーにより生成された高密度アブレーションプラズマ流のフラックスとイオン価数分布を磁気ノズルにより動的に制御する手法の原理実証を行うことである。レーザーを照射する固体標的の近傍にパルス磁場により磁気ノズルを形成し、そこを膨張しながら通過するプラズマ流が古典的な流体加速に加え反磁性効果による加速を受けることで、下流でどのようなフラックスやイオン価数分布を持つかを詳細に調べる。この結果をもとに、レーザー生成プラズマ流の磁気ノズルによる動的制御の可能性を検討し、慣性核融合のドライバー加速器用の大電流レーザーイオン源への本手法の適用可能性を検討することを目指した。

3. 研究の方法

平成 26 年度は、レーザーアブレーションプラズマ実験装置の構築、シングルショット価数分析器の開発、磁場印加用のパルス電源の製作を行った。実験装置としてプラズマ生成チャンバーおよびプラズマ輸送チャンバーと真空排気系を設計・構築し、超高真空下で清浄な金属標的にレーザーを照射してレーザーアブレーションプラズマの生成・計測を行う環境を整備した。プラズマ生成用レーザーには、Nd:YAG レーザー(波長 1064 nm)および KrF エキシマレーザー(波長 248 nm)を用い、 10^8 - 10^9 W/cm² 程度の照射強度のもとでレーザー強度の元でプラズマ生成実験を行った。プラズマ生成チャンバー全体を 30 kV 高電圧ターミナル上に設置し、ビーム引き出し電圧の印加を可能とした。図 1 に本研究で構築した実験装置の全景を示す。

開発したシングルショット価数分析器の模

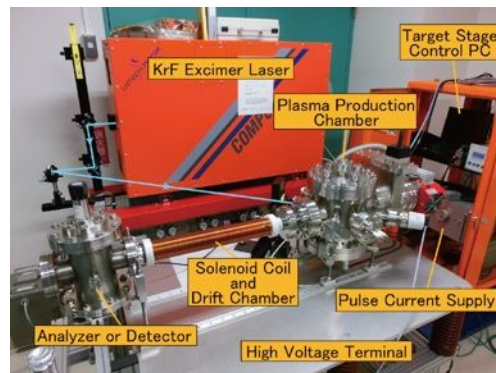


図 1 : 構築した実験装置全景。

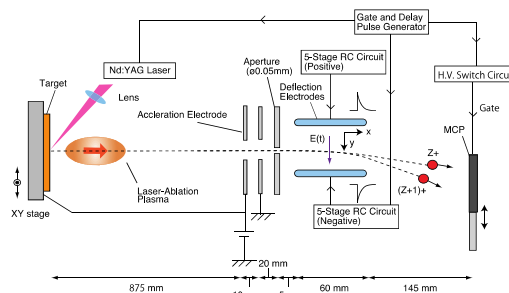


図 2 : シングルショット価数分析器。

式図を図 2 に示す。この分析器では、レーザーアブレーションプラズマ中のイオンを、時間変化する偏向電場により価数ごとに固定された軌道に分離し、イオン種ごとのフラックス波形を同時測定できる。ただし、この分析器において問題となるのが、アパーチャー通過後にイオンビームが空間電荷力により発散し、特に低速で高価数のイオンについての計測が困難になることであった。このイオンビームの発散を抑制するためにプラズマイオンの予備加速の適用を新たに考案し、その原理実証実験を行った。

平成 27 年度は、レーザーアブレーション・プラズマブルームの分光診断、磁気ノズル効果の検証、磁気ノズルによるフラックス及びイオン価数制御の検討、2 次元電磁 PIC コードによる磁気ノズル中でのプラズマの挙動解析を行うことを目指し、研究を推進した。図 3 にプラズマ分光診断のセットアップを示す。観測点をレーザー標的表面から 1-2cm の位置に固定し、そこを通過するプラズマ流の発光をリレーレンズでモノクロメータに導き、特定のスペクトル線の発光強度の時間

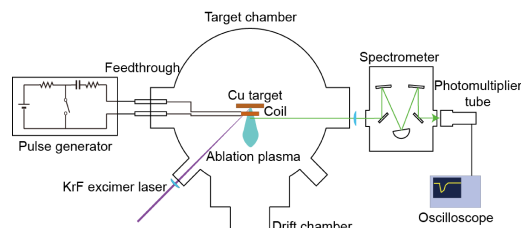


図 3 : プラズマブルームの分光診断。

変化を追跡することで、プルーム内の原子及びイオンの飛行時間(TOF)分布を得た。前年度に製作したパルス電源によりレーザー標的の近傍に置いたシングルターンのコイルに500 A 程度のパルス電流を流し磁場を発生した。実験に先立ち電磁場解析コードにより磁力線の形状の時間変化を計算し、表皮効果によりレーザー標的(銅)から排除された磁場がノズル的な形状を持つことを確認した。実際にプラズマ流に磁場を印加し、その挙動の変化を調べた。

4. 研究成果

図4に400 Vの電圧で予備加速を行った銅イオンビームに対してシングルショット価数分析を行った結果を示す。イオンビームの検出には蛍光面付MCPアセンブリを用いた。予備加速を行うことで分析後のビームスポットの拡がりを抑えることができること、予備加速なしの場合に比べて、より低速度・高価数のイオンについても分析が可能なことを確認した。一方、予備加速用電場の歪みにより蛍光面上ビームスポットの形状が変形してしていることが分かる。また、偏向電圧波形が理想波形からずれていること起因するビームスポット位置のドリフトも見られる。より精度の高い価数分析を行うには、ビーム軸の精密なアライメントと偏向電圧波形の正確な制御が必要であることが分かった。図5にレーザー標的の表面近傍に配置したシングルターンコイルによって発生する磁場について数値計算を行った結果を示す。励磁電流の立ち上がりは10 μs 程度であり、磁場発生直後は表皮効果により磁力線はレーザー標的(銅板)にほとんどしみ込むことができず排除されている。この効果によりレーザー標的の表面には、図中の下に向かってノズル形状の磁場が発生していることが分かる。

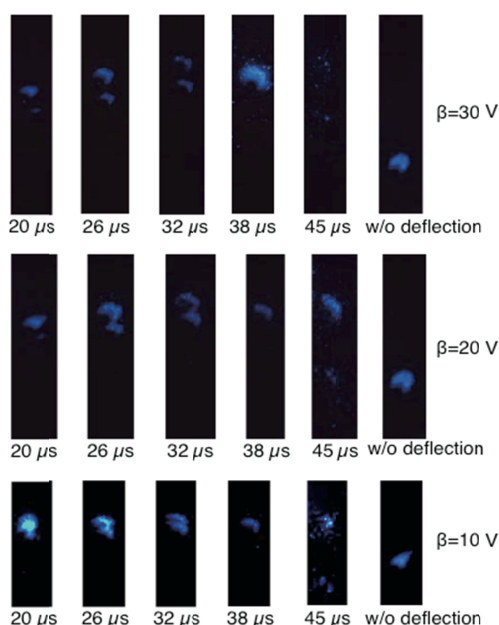


図4：分離された銅イオンのスポット像。

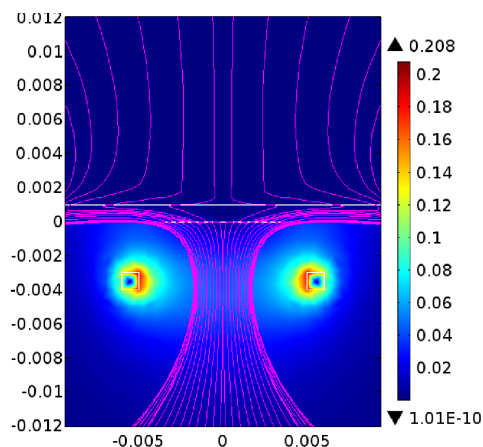


図5：レーザー標的の近傍に生成した磁場の様子。

次にパルス磁場を印加した後にレーザーを標的に照射してアブレーションプラズマ流を発生し、その発光の時間変化を分光計測により追跡した。図6に、レーザー標的から20 mmの地点を通過するプラズマ中の銅原子(CuI)の輝線(521 nm)の時間変化を示す。図中の線の色は磁場印加からレーザー照射開始までの遅れ時間を表している。磁場印加に対するレーザー照射のタイミングが最も早いとき(緑：10 μs)とそれ以外で輝線強度の時間変化に違いが見られた。これは磁気ノズル効果によりプラズマ流が変調を受けてい

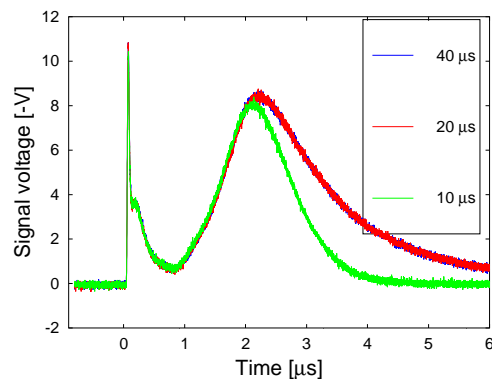


図6：磁気ノズル中を流れるプラズマ中の銅原子からの発光の時間変化。

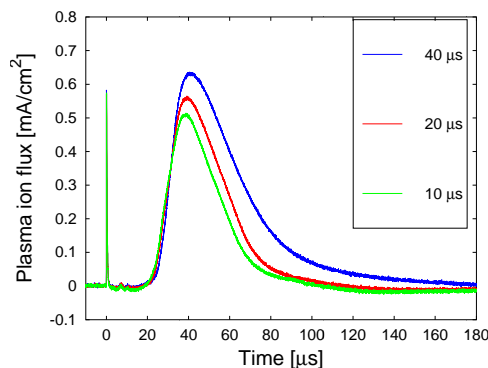


図7：磁気ノズルによるプラズマフラックスの変化。

ることを示唆している。中性原子は磁場により直接力を受けないので、この効果はプラズマ中のイオンや電子などの荷電粒子の挙動が磁場により影響を受け、荷電粒子と中性原子の衝突過程を介して、中性原子の振る舞いが影響を受けたためと考えられる。分光計測と同時に、ファラデーカップにより下流で測定したプラズマイオン電流波形を図7に示す。磁場の印加のタイミングを変えることによりイオン電流波形のピークが変動することから、アブレーションプラズマ流の挙動に磁気ノズルが影響を与えていることは明らかである。一方、図6, 7のどちらにおいても波形の立ち上がりに対する磁気ノズルの影響は見られなかった。つまり、原子やイオンの十分な加速効果を確認するには至らなかった。これはプラズマ圧に対して磁場強度(磁気圧)が小さいことが原因と考えられる。したがって、本研究の当初の目的であった磁気ノズルによるアブレーションプラズマ流の制御法を検討するまでは至っていない。現在、磁場増強のため kA 級の励磁電流を駆動可能なパルス電源の製作を進めており、より高い磁気圧のもとで実験を行う準備が整いつつある。また、それと並行して2次元ハイブリッド電磁 PIC コードの開発も進めている。本研究期間内に実験装置および計測装置の基本的なインフラについては整備を完了することができた。引き続き、磁気ノズル効果の検証と、高フラックスイオン供給のためのプラズマ制御法の確立に向けて研究を継続する予定である。

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)

[学会発表](計5件)

J. Hasegawa, S. Kanamaru, K. Hiraide, K. Takahashi, F. Isono, M. Nakajima, K. Horioka, "Active Control of Laser-Produced Dense Plasma Flow with Magnetic/Electric Fields", 20th International Symposium on Heavy-Ion Inertial Fusion, Lanzhou, China, 11-15 August 2014.

S. Kanamaru, J. Hasegawa, K. Hiraide, M. Nakajima, K. Horioka, "Production of Laser-Ablation Plasma with High Charge Purity and Low Flux Fluctuation", 20th International Symposium on Heavy-Ion Inertial Fusion, Lanzhou, China, 11-15 August 2014.

S. Kanamaru, J. Hasegawa, K. Hiraide, M. Nakajima, K. Horioka, "Charge and Flux Control of Laser-Ablation Plasma for Stable Ion Beam Extraction", 5th Euro-Asian Pulsed Power Conference,

Kumamoto, Japan, 8-12 September 2014.

平出紘也, 若林祐人, 長谷川純, 堀岡一彦, "レーザーアブレーションプラズマからの高輝度マルチビームレット引き出し", プラズマ・核融合学会第32回年会, 2015.11.24-27, 名古屋大学.

若林裕人, 平出紘也, 長谷川純, 堀岡一彦 "レーザー生成高密度プラズマ流の磁気ノズル制御", プラズマ・核融合学会第32回年会 2015.11.24-27, 名古屋大学.

[その他](計2件)

平出紘也, 金丸悟, 長谷川純, 中島充夫, 堀岡一彦, "レーザー生成プラズマからのマルチビームレット引き出し", 平成26年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワーとその周辺技術の展開」, 2015.1.8-9, 核融合科学研究所.

若林裕人, 平出紘也, 長谷川純, 河村徹, 堀岡一彦, "レーザープラズマ流の磁気ノズルによる制御", 平成27年度平成27年度核融合科学研究所共同研究「パルスパワー技術の動向と高エネルギー密度プラズマへの応用」, 2016.1.7-8, 核融合科学研究所.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 純 (HASEGAWA JUN)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：90302984