

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25790075

研究課題名(和文) 直接プラズマ入射法による大強度高電荷重イオンビームの生成と加速に関する研究

研究課題名(英文) Production of high-intensity and high charge-state heavy ion beams using direct plasma injection scheme

研究代表者

田村 潤 (Tamura, Jun)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究員

研究者番号：90647017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高密度のレーザー生成プラズマを高周波四重極線形加速器に直接入射することによって大強度の重イオンビーム加速を行う直接プラズマ入射法を、これまでより重い元素に適用するため、これまで使用してきたものより高出力のレーザーを用いてプラズマ生成実験を行った。これにより、より高電荷の鉄イオン生成に成功した他、スポットサイズが大きいレーザー照射条件ではターゲット面の不純物除去がより重要になることがわかった。

研究成果の概要(英文)：An ion generation experiment was performed using a pulse laser to apply higher charge state ion beams for the Direct Plasma Injection Scheme. To generate higher charge state ions, we irradiated an iron target using a Nd:YAG laser pulse of several hundred picoseconds. We found that higher charge state iron ions (up to Fe²¹⁺) were obtained using a laser pulse of several picoseconds in comparison to those obtained using a laser pulse of several nanoseconds (up to Fe¹⁹⁺). By irradiating the same spot and analyzing the produced plasmas (1st and 2nd), we determined that when the laser irradiation area was relatively large, the laser power was absorbed mainly by the contamination on the target surface. We believe that the removal of the contamination on the target surface is more important for targets outside of the focal point.

研究分野：加速器科学

キーワード：レーザーイオン源 重イオンビーム 直接プラズマ入射法 RFQ線形加速器

1. 研究開始当初の背景

現在、重イオン源で生成されるビームの大強度化の研究が世界中で行われているが、10mA を超える大強度の高電荷重イオン源は実用化されていない。また、重イオン加速で重要となるのが加速イオンの電荷と質量の比 Q/M であり、より高電荷の重イオンを生成できることが、今後の重イオン源に要求されている。

代表的な高電荷重イオン源の一つであるレーザーイオン源は、固体標的に高出力のパルスレーザーを照射して得られる高密度のプラズマからビームを引き出すため、大強度のパルスビーム生成が可能である。しかし、ビーム引き出し後の強力な空間電荷発散力により、初段の加速器までその密度を保ったまま輸送することができず、その大強度加速が困難となっていた。一方、直接プラズマ入射法では、レーザー照射によって得られる高密度プラズマから、RFQ (高周波四重極線形加速器) 入射部でイオンビームを引き出す。この方法では、イオンがプラズマ状態のまま RFQ に入射するため、その入口まで空間電荷効果によるビーム発散が無い。この直接入射法を用いることにより、20mA の炭素イオン (C^{6+}) ビームを核子あたり 0.1MeV まで加速することに成功していた。このとき、炭素のような軽い元素であればフルストリップ ($Q/M=1/2$) のイオンを容易に生成することができたが、標的となる元素が重くなるほど高電荷の重イオン生成が難しく、生成されるイオンの Q/M が小さくなるという問題があった。

2. 研究の目的

レーザーイオン源の高電荷重イオン生成能力は、照射するレーザーのパワーに大きく依存している。そこで本研究では、これまでより高い出力のパルスレーザーを用いることにより、より高電荷のイオンで構成されるアブレーションプラズマを生成する。今まで軽イオンでしか実現していない直接プラズマ入射法による大強度加速を、より重い元素に適用できることを実験的に確認することを目的とする。

3. 研究の方法

2011 年、この直接プラズマ入射法が鉄 (Fe) 元素に適用され、10mA の鉄イオン加速に成功した。このとき、最も多く生成されたのは Fe^{13+} であり、最も高電荷のイオンは Fe^{19+} であった。使用したレーザー (Nd-YAG) の出力は 0.4GW (パルスエネルギー: 2.4J、パルス幅: 6ns) であった。また、このレーザー光を焦点距離 100mm の収束レンズで集光し

て照射したときのパワー密度は $10^{12}W/cm^2$ であった。本研究では、これより一桁出力の大きい、3GW (パルスエネルギー: 500mJ、パルス幅: 170ps) のレーザー (Nd-YAG) をしてより高電荷の鉄イオン生成を目指す。

高密度かつ高電荷の重イオンを生成するため、短パルスレーザーを用いてプラズマ生成実験を行った。この実験は、レーザーや測定器などの主要装置が揃っている米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にて、専用のレーザープラズマ分析装置を組み立てて行った。本実験装置の概略を図 1 に示す。パルスレーザー光をターゲット面に対して 70 度の角度で集光して照射した。ターゲット面上のレーザースポットサイズは、ターゲット手前の集光レンズ (焦点距離: 100mm) の位置を光路軸上でシフトすることにより調整した。レーザー照射によって生成された鉄プラズマは、ターゲット面から垂直な方向に飛行する。そのイオン電流量をファラデーカップで計測し、価数分布を静電アナライザー (偏向半径: 100mm) で 90 度偏向して分析することにより測定した。静電アナライザーを通過したイオンは、静電アナライザー直後に設置した二次電子増倍間でその信号を増幅して検出した (図 2)。

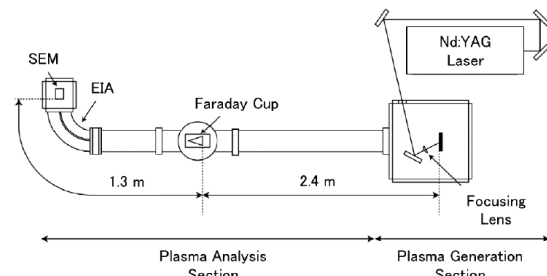


図 1. レーザー生成プラズマの価数分析装置

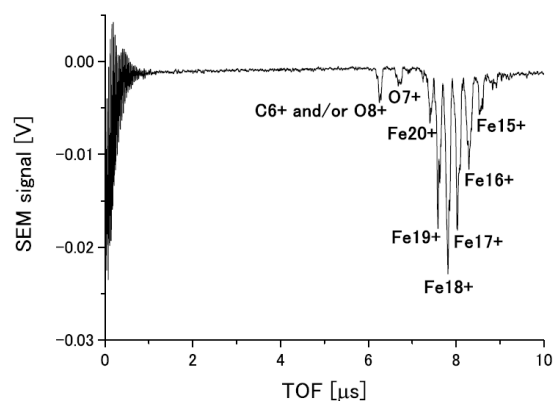


図 2. 典型的な分析イオン波形

4. 研究成果

高電荷の重イオンを生成するため、生成されるレーザープラズマのイオン電流波形をファラデーカップで計測したときの、パルス立ち上がり時間に着目した。これは、高電荷

のイオンほど高い運動エネルギーを持ってターゲット面から飛行することが実験により得られていたからである。もっともパルスの立ち上がりが早くなるような集光レンズ位置でプラズマ生成実験を行ったところ、 Fe^{2+} を得ることができた。また最も多く生成されたのは、 Fe^{17+} であった。静電アナライザを用いて得られたこのレーザー生成鉄プラズマの価数分布を図3に示す。このときのレーザー照射パワー密度は $10^{13}W/cm^2$ であり、最高 Fe^{19+} 生成時より一桁大きい。

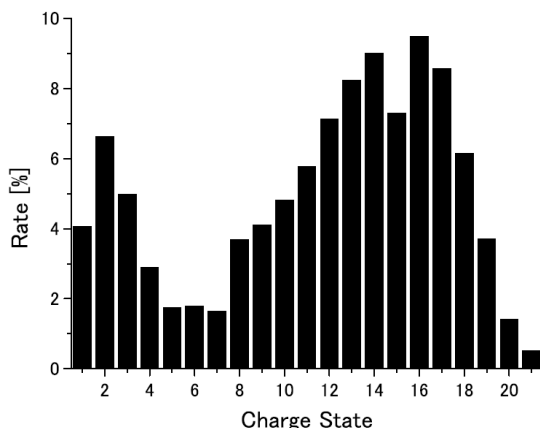


図3. レーザー生成鉄プラズマの価数分布

静電アナライザの電圧をスキャンすることによって得られる各価数のパルス波形を、すべてのイオン種、価数について足し合わせることで、全体のプラズマパルス波形をつくることことができる。図4より、分析イオン波形を重ね合わせて得られたプラズマパルス波形（赤線）と、ファラデーカップで得られたイオン電流波形（黒線）がよく一致しているのが分かる。

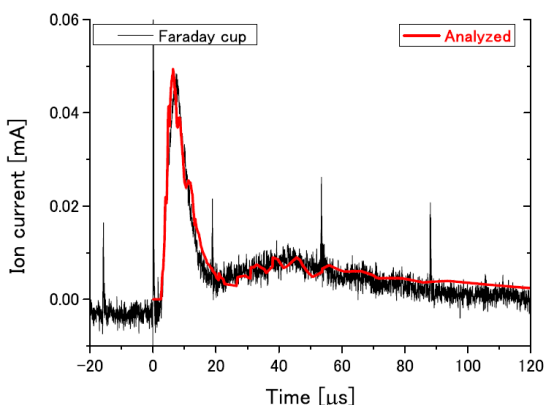


図4. レーザー生成鉄プラズマのイオン電流

ターゲット手前の収束レンズ位置を大きく変化させたところ、レンズ位置がターゲットからの焦点距離から外れたところで、ピークイオン電流量が大きくなる現象が見られた。このようなスポットサイズが大きい条件では、同じ場所を続けて2回レーザー照射しても、得られるプラズマ波形に大きな変化はないと思われたが、2回目照射のプラズマ波形は1回目に比べて、そのピークは1/3以下

の強度になり、パルス後半の強度に増大が見られた。この原因を調査するため、レンズ位置を焦点距離から外した状態で、1回照射と2回照射について、価数分布測定を行った。その結果、1回照射時のプラズマパルスの主成分が、水素、炭素、酸素などの不純物であった（図5）のに対し、2回照射時のプラズマパルスの主成分は鉄であった（図6）。価数についても、2回照射時の方が高電荷の鉄イオンが生成されていた。これらの結果から、1回目照射でレーザーのエネルギーがターゲット表面の不純物に吸収されて表面から多くが取り除かれ、2回目照射でレーザーのエネルギーが鉄ターゲットに吸収されていると考えられる。焦点距離にレンズを設置したときのレーザー生成プラズマに含まれる不純物の割合が非常に小さいことから、スポットサイズを大きくしたときにはターゲット表面の不純物除去がより重要になり、これをレーザー照射によって行うことが可能であることがわかった。

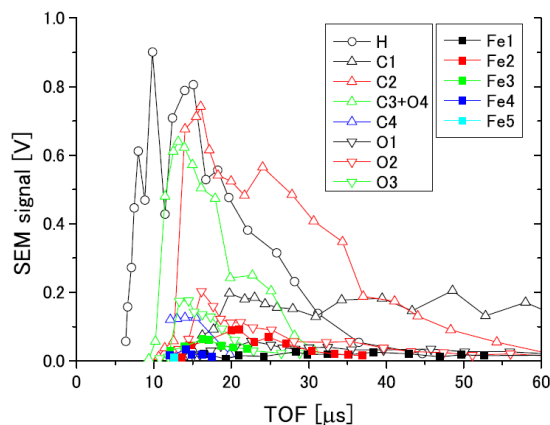


図5. 1回レーザー照射で得られるイオン

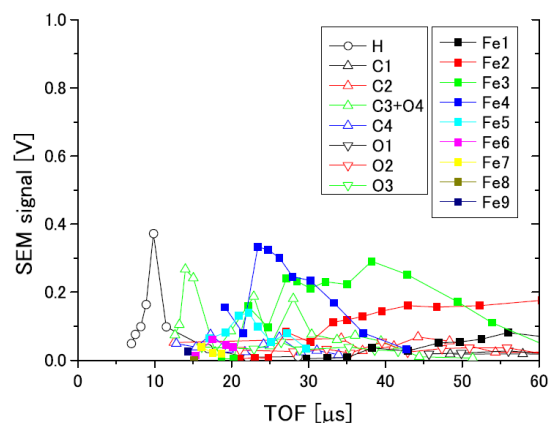


図6. 2回レーザー照射で得られるイオン

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)

Jun Tamura, Masafumi Kumaki, Kotaro Kondo, Takeshi Kanetsue, and Masahiro

Okamura, "Iron plasma generation using a Nd:YAG laser pulse of several hundred picoseconds", Rev. Sci. Instrum. **87**, 02A919(2016), 査読有.
DOI:10.1063/1.4938258

〔学会発表〕(計 2 件)

J. Tamura, Y. Fuwa, T. Kanesue, and M. Okamura, "Charge State Selective Ion Beam Acceleration with RFQ Linac", 2015 年 9 月 7 日 ~ 2015 年 9 月 11 日, 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, Workpia Yokohama(Yokohama,Kanagawa), Japan.

Jun Tamura, Masafumi Kumaki, Kotaro Kondo, Takeshi Kanesue, and Masahiro Okamura, "Iron plasma generation using a Nd:YAG laser pulse of several hundred picoseconds", 2015 年 8 月 23 日 ~ 2015 年 8 月 28 日, 16th International Conference on Ion Sources, New York, USA.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

田村 潤 (Tamura, Jun)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門 J-PARC センター
・ 研究員

研究者番号 : 90647017