

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20599

研究課題名（和文）パルス磁場によるレーザーイオン源のビーム電流波形制御と低エミッタンス化

研究課題名（英文）Control of beam current waveform and reduction of emittance of laser ion source using pulsed magnetic field

研究代表者

高橋 一匡（Takahashi, Kazumasa）

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：10707475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：レーザーイオン源は大電流イオンビームを発生可能であるがパルスレーザーによりパルス的にプラズマを生成するため、その密度が時間的に変動し、それに伴ってプラズマから引き出されるイオンビームの収束性の悪化を招いている。本研究により、プラズマ密度の時間的な変動を外部磁場の印加によって緩和することで、ビームの発散角の変動を抑えられることを明らかにした。これによりレーザーイオン源から供給されるビームの収束性を改善する技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオンビームの応用には物理学実験をはじめイオン注入や表面加工などの産業応用、粒子線治療や加速器駆動中性子源による医療応用などがある。これらには加速器により加速したイオンを用いるが、加速器には粒子の運動量のばらつきが小さく質の良いイオンビームを供給する必要がある。本研究のレーザーイオン源の磁場制御により、利用できるイオンを増加させるだけでなく、質の良いイオンビームを供給する方法を確立したことで、イオンビーム応用のさらなる発展に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：The laser ion source can generate a large current ion beam. However, a plasma density generated by laser ablation varies in the pulse because a pulsed laser is used for the plasma generation. The changes in the plasma density causes the increase of beam emittance extracted from the laser plasma.

In this study, we developed the method to reduce the variation in plasma density of laser ion source using a pulsed magnetic field and it was shown that the beam emittance of laser ion source can be reduced using the method.

研究分野：イオン源

キーワード：レーザーイオン源 重イオンビーム レーザー生成プラズマ エミッタンス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

イオンビーム応用は加速器を用いた高エネルギー物理探求のためのドライバーを始めとして、粒子線治療などの医療応用や核融合プラズマの加熱などのほか、産業応用では成膜やイオンのドーピングなど幅広く用いられており、慣性核融合や加速器駆動原子炉等のドライバーとしても検討されている。いずれの目的でも近年ますますイオンビームの大電流化が求められてきているとともに、収束性の良いビームが必要とされるが、特に重イオンビームを用いた慣性核融合のビームに対する要求は核融合を生じさせるための大きな電流と最終的に数 mm の燃料ターゲットに収束させるための質(低エミッタンス)が要求されている。そのような量(電流)と質(エミッタンス)の両方の要求を満たせるイオンビームの供給源としてレーザーイオン源が注目されている。レーザーイオン源ではレーザーを集光させた1点からプラズマが膨張し、さらにその中心部からイオンビームを切り出して引き出すため、個々のイオンの運動のばらつきによる小さい低エミッタンスのビームが期待できる。一方で、実際には1パルス中のプラズマの密度変動に伴い、プラズマからのビームの引き出し面の形状が変化し、パルス全体としてのエミッタンスは悪化する。エミッタンスを改善して収束性の良いビームを得るためにはビームを引き出す前にプラズマの密度変動を抑えてフラットトップに近いイオンビーム電流波形に整形する技術が必要である。

2. 研究の目的

これまでの研究によりソレノイドコイルで形成した定常の外部磁場にプラズマを入射することでプラズマの中心の密度が高まり、その中心部を切り出して得られたイオンビーム電流が増加することは示されているものの、パルスのフラットトップ化には時間的に変化する電流の量を制御する方法が求められる。これを解決するために本研究ではパルス磁場によりプラズマ密度の時間変化をコントロールし、それにより低エミッタンスビームを実現することを目的とした。

大電流かつ低エミッタンスビームの発生はあらゆるイオンビーム応用の用途に適用可能な普遍的な要求であり、様々な固体ターゲットからイオンビームを供給できるレーザーイオン源の低エミッタンス化による収束性の向上は重イオン慣性核融合のドライバーのみならず、惑星内部等の高温高密度状態を模擬する高エネルギー密度科学実験、高エネルギーに加速した粒子で癌などの腫瘍を除去する炭素ビームによる粒子線治療などにも応用が可能である。

3. 研究の方法

まずはじめにレーザーイオン源のイオン電流波形のフラットトップ化を実現するためのパルス磁場の印加技術を確立し、続いてレーザー生成プラズマに対する磁場の印加の有無でエミッタンスを比較することによりパルス磁場によるプラズマ密度変動緩和によるエミッタンス改善の検討を行った。これらはそれぞれ以下の方法で行った。

1. パルス磁場によるイオン電流波形の整形

レーザーイオン源ではプラズマにソレノイド磁場を印加することでビーム電流を増加させることが可能である。これを利用してビーム電流が低下するタイミングで磁場をパルスのように印加することにより、低下した分の電流を補償してフラットトップのビーム電流波形に近づける方法を提案した。ソレノイドのインダクタンスや充放電するコンデンサのキャパシタンス、充電電圧、パルス磁場印加のタイミングをパラメータとし、フラットトップのビーム電流波形を得るために必要なパルス磁場の条件の検討を行った。

2. プラズマ密度変動の緩和によるイオンビームのエミッタンス制御への有効性の実証

エミッタンスの測定にはレーザー生成プラズマからイオンビームを引き出して、エミッタンス測定器より小さなスポットサイズに収束させる必要があるため、イオンビームの引き出しに関して予めシミュレーションを行い、引き出し電極の構造や測定器までのビームの輸送距離などを決定した。それを元に引き出し電極及びエミッタンス計測系を構築し、パルス磁場によるイオンビーム電流波形制御の有無によるビームのエミッタンスの比較を行うことによりプラズマ密度変動の緩和によるイオンビームのエミッタンス改善への有効性を検討した。

4. 研究成果

パルス磁場によるイオン電流波形の制御に用いた実験装置の概略を図1に示す。プラズマの生成に使用したレーザーはNd:YAGレーザーであり、波長、パルス幅、エネルギーはそれぞれ532 nm, 17 ns, 0.14 Jである。ターゲットには銅(Cu)を用い、ターゲット上でのインテンシティが 4×10^8 W/cm²でレーザーを照射した。プラズマの計測には直径20 mmのアパーチャーに透過率65%のメッシュがはられたファラデーカップを用い、-100 Vを印加することで電子を追い返してイオン電流を計測した。

パルス磁場の印加には幅30 mmでインダクタンスが5.9 mHおよび238 μ Hの2種類のソレノ

イドを用い、ターゲットの表面から370 mmの位置に配置した。パルス磁場が輸送管に発生する渦電流に弱められるのを防ぐため、磁場を印加する部分のプラズマの輸送管は樹脂で構築されている。ソレノイドで形成された磁場の軸方向の磁束密度分布を図2に示す。ここで、5.9 mHのソレノイドは1 Aの電流、238 μ Hのソレノイドは10 Aの電流で形成した磁束密度の分布を示している。

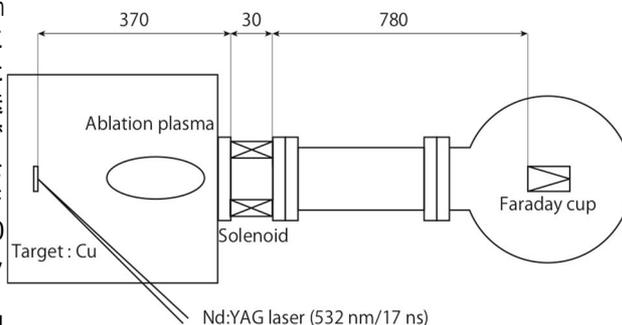


図1 レーザー生成プラズマへのパルス磁場印加装置の概略

また、パルス磁場を生成するために用いた等価回路は図3のようになっている。コンデンサに充電抵抗を介して充電し、レーザーのタイミングと同期をとるためのディレイパルサーからの信号をトリガーにしてIGBTをオンにし、ソレノイドにパルス電流を流した。

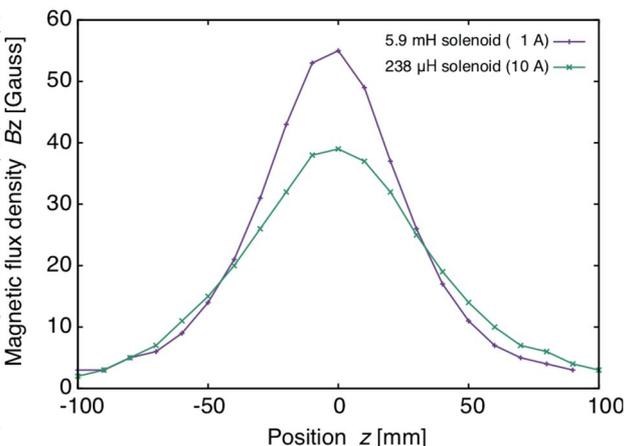


図2 ソレノイドで形成された磁場の軸方向の磁束密度分布

図4(a)に5.9 mHのインダクタンスのソレノイドを用い、電流を0から3 Aまで変化させて定常磁場を印加した際のイオン電流波形、およびパルス磁場を印加した際に得られる典型的なイオン電流波形を示す。また、図4(b)にパルス磁場印加時のソレノイドを流れる電流の変化とソレノイドの中心を通過するプラズマのイオン電流の変化を示している。このイオン電流波形はファラデーカップで検出したイオン電流波形に対して、ターゲットからソレノイド中心までの距離 L_{sol} とファラデーカップまでの距離 L_{FC} の比 L_{sol}/L_{FC} を飛行時間にかけて換算することで求めている。

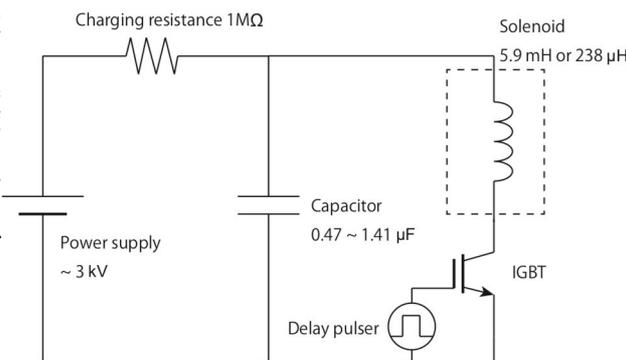


図3 パルス磁場印加のための電気回路

まず、定常的に磁場を印加した際のイオン電流波形の変化に着目するとソレノイド電流が1 A(ソレノイド中央で55 Gauss)程度でプラズマのイオン電流が最大となり、さらに大きくしていくと得られるイオン電流は減少していく傾向が得られた。また、ソレノイド電流が大きいほど、ピークが遅くなる波形が得られた。一方で、パルス磁場を印加すると、定常磁場の印加ではあまり大きな電流の増加が得られなかった飛行時間の遅い領域(60~100 μ s)のプラズマのイオンを増加させることができることがわかった。これらの結果は、定常磁場を印加した際の磁束密度に対するイオン電流の増幅率からフラットトップとなる波形得るためのパルス磁場波形を設計できるわけではないことを示唆している。

また、この時コンデンサのキャパシタンスを0.47~1.41 μ Fの間で変化させたが、図4(a)に示されるようにプラズマのイオン電流波形はほとんど変化しなかった。これは、それらの条件でのパルス磁場の变化とソレノイド中心を通過する際のイオン電流波形のタイミングを比較した結果、図4(b)に示されるようにプラズマがソレノイドを通過する0~50 μ sのタイミングではほとんど同じパルス磁場波形が印加されていることで説明できる。

次に図5に238 μ Hのソレノイドを使用し、パルス磁場を印加するタイミングをレーザー照射から14~20 μ sまで2 μ sずつ変化させ、ピークの高さを一定に保つようにパルス磁場を印加した場合の波形を示す。この結果に示されるように、パルス磁場を印加するタイミングを早くするほど、ピーク電流がやや高くなり、フラットに近い波形が得られるが平坦となっている時間は短く、逆にタイミングを遅くするとフラットトップが維持できずに最初のピークのあとで一度電流が減少し、その再びピークが現れるような波形が得られた。この2つのピークの間隔はパルス磁場印加のタイミングを早くしたものよりも長くなっているため、2つのピーク間の電流の低下を補償できるような波形を有するパルス磁場を印加できればさらにフラットトッ

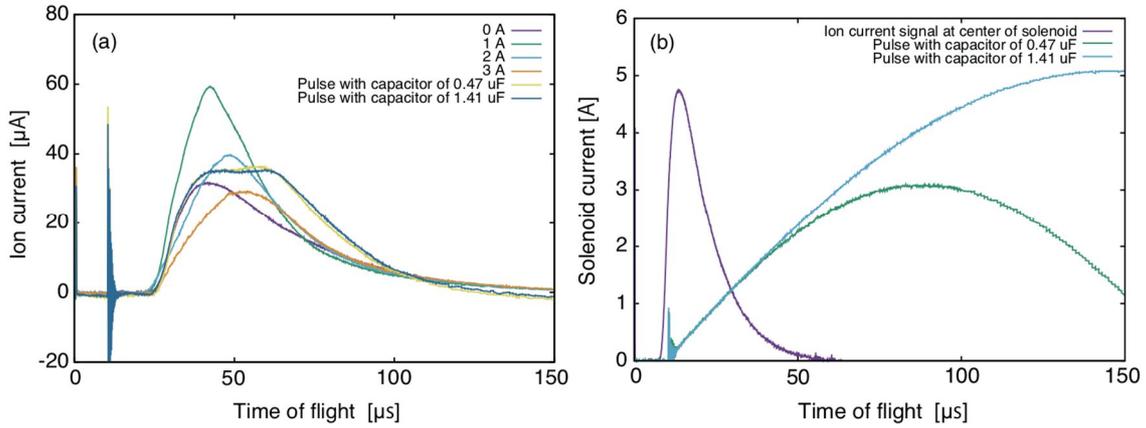


図4 (a)定常およびパルス磁場を印加した際のプラズマのイオン電流波形 (b)パルス磁場印加時のソレノイド電流の変化とソレノイドの中心を通過するプラズマのイオン電流

を維持できる時間の長いイオン電流波形が得られると考えられる。

次に 238 μH と 5.9 mH の異なるインダクタンスのソレノイドを用いた場合にフラットトップのピーム電流を得るための回路のパラメータの比較を行った結果を図6に示す。この結果から 5.9 mH のソレノイドの方が僅かだがフラットトップ部を長く保っている。これはインダクタンスの大きいソレノイドの方が磁場の上昇率が保たれる時間を長くすることができたことが要因と考えられる。

これらの結果から、パルス磁場を印加すると定常磁場の印加では大きな電流の増加が得られなかった飛行時間の長い領域のプラズマのイオンを増加させることができ、電流波形のフラットトップ化が実現できることが示された。また、フラットトップを維持するためにはプラズマがソレノイドを通過する間は磁束密度が上昇し続けるようなパルス波形を印加することが有効であることが示された。

さらに、パルス磁場を印加するタイミングを変化させてフラットトップの波形の時間を検討した結果より、パルス磁場を印加するタイミングを早くするほど、ピーク電流がやや高くなり、フラットに近い波形が得られるが平坦となっている時間は短くなることがわかった。

次に電流波形の平滑化のためのレーザー生成プラズマへのパルス磁場印加がイオンビームの発散角、エミッタンスに与える影響を調べた。この実験に用いた装置の概略図を図7に示す。ここではパルス幅 6 ns、エネルギー 350 mJ の Nd:YAG レーザーを用いた。ターゲットは鉄(Fe)とし、ターゲット上でインテンシティがおよそ 10^9 W/cm^2 となるようにレンズを設置してプラズマを生成した。プラズマはパルスソレノイドを通過後 3 m 輸送され、直径 15mm の引き出し電極によりイオンビームが引き出される。その後グリッドレンズでエミッタンス測定器内にビームが収まるように収束させている。電流波形の平滑化はターゲットへのレーザー照射が

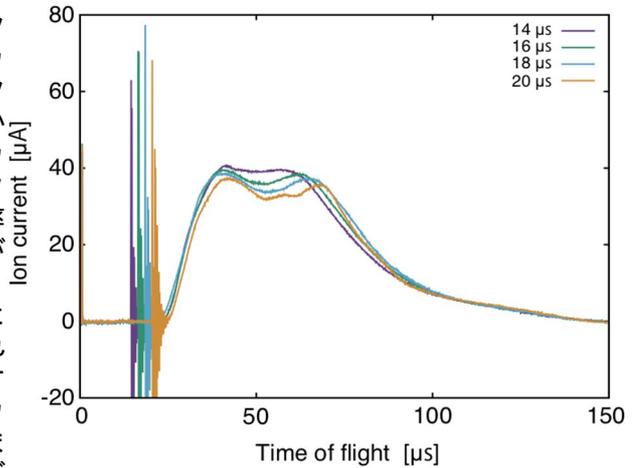


図5 パルス磁場を印加するタイミングに対するプラズマのイオン電流波形の変化

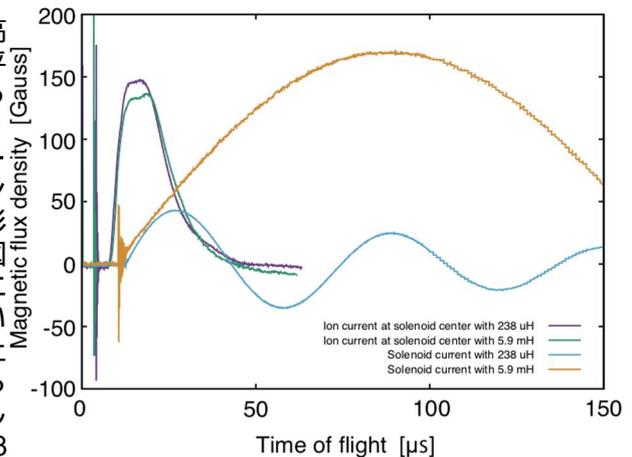


図6 パルス磁場印加時のソレノイド電流とプラズマのイオン電流波形の変化。

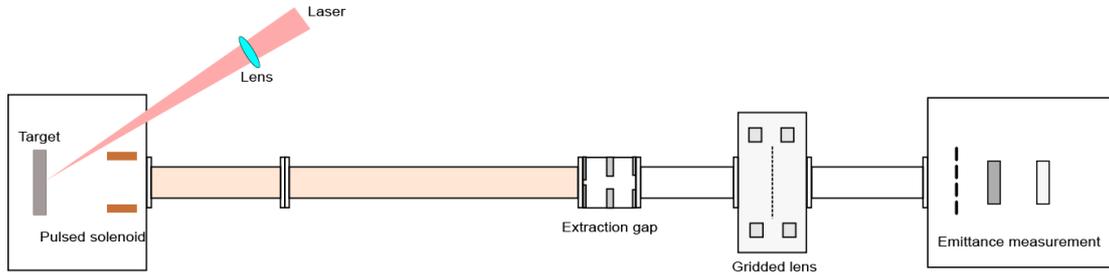


図7 エミッタンス計測のための実験セットアップ

ら 12 μs 遅れてパルス磁場を印加することで行った。

ビーム電流波形はエミッタンス測定器前面の平板のイオンコレクター、エミッタンスはペッパーポット法により測定した。図8はパルスソレノイド磁場印加の有無におけるイオン電流波形、および 20 μs 毎に取得した Twiss Parameter の変化を示している。はビームの発散・収束の程度を表しており、この値が同程度の場合、同程度の発散角でプラズマからイオンビームが引き出されていることが示される。の時間発展を調べた結果、パルス磁場により平滑化された電流波形の変動に対応して変化することが明らかとなった。

また、図9に (a)1パルス全体のエミッタンスと(b)時間分解されたエミッタンスを比較した結果を示している。結果より、時間分解されたエミッタンスの方が小さいことが明らかになった。これらの結果より、パルスソレノイドを用いて電流波形がフラットトップになるように制御することで、時間分解されたエミッタンス程度までエミッタンスを改善できることが示された。

以上の成果により、パルスの印加した外部磁場によってプラズマ密度の時間的な変動を緩和することでビーム電流波形をフラットトップ化できることを明らかにし、これによりレーザーイオン源から供給されるビームの発散角の変動を抑えて収束性を改善する技術を確認した。

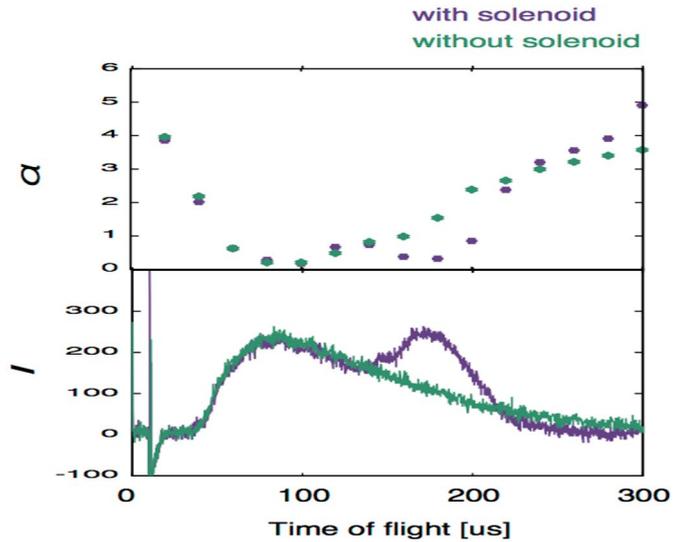


図8 パルスソレノイド磁場の印加の有無によるイオン電流波形および Twiss Parameter の変化

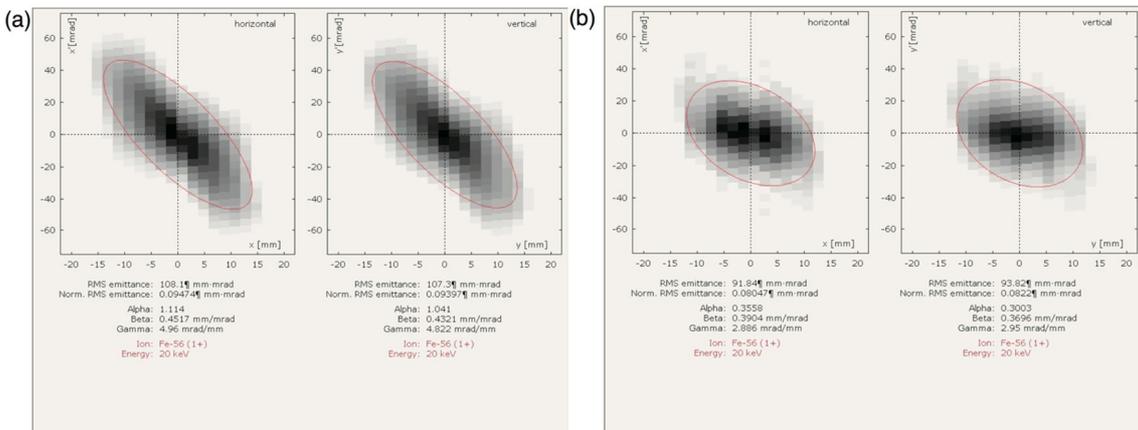


図9 (a)パルス全体のエミッタンス像と(b)電流のピーク付近(90-110 μs)で得られたエミッタンス像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahashi Kazumasa, Karino Takahiro, Ikeda Shunsuke, Kanesue Takeshi, Okamura Masahiro, Sasaki Toru, Kikuchi Takashi	4. 巻 36
2. 論文標題 Effect of solenoidal magnetic field on charge-state purity in laser ion source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100812
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.hedp.2020.100812	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahashi Kazumasa, Kuzumoto Masayuki, Matsumoto Yuki, Sasaki Toru, Kikuchi Takashi	4. 巻 91
2. 論文標題 Control of current waveform of laser ion source using pulsed magnetic field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033310-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5128633	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazumasa Takahashi, Yuki Matsumoto, Masayuki Kuzumoto, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi	4. 巻 90
2. 論文標題 Proton generation from hydrocarbon polymer targets for laser ion source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 123311-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5128632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 高橋 一匡, 松本 友樹, 片根 弘登, 宮崎 翔, 佐々木 徹, 菊池 崇志
2. 発表標題 真空ポンプ用炭化水素油を用いた液体ターゲットレーザーイオン源の検討
3. 学会等名 令和3年度電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋一匡, 松本友樹, 片根弘登, 宮崎翔, 佐々木徹, 菊池崇志
2. 発表標題 低融点合金を用いた液体ターゲットレーザーイオン源開発に向けたIn-Bi合金のプラズマ特性の検討
3. 学会等名 令和2年度核融合科学研究所共同研究研究会「最先端パルスパワー技術とプラズマ・粒子ビームへの応用の最前線」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋一匡, 佐々木徹, 菊池崇志
2. 発表標題 レーザーイオン源による重イオンビーム発生と応用
3. 学会等名 第30回電気学会東京支部新潟支所研究発表会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本友樹, 片根弘登, 宮崎翔, 高橋一匡, 佐々木徹, 菊池崇志
2. 発表標題 レーザーイオン源用静電イオンアナライザの高分解能化
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋一匡, 延命慧悟, 松本友樹, 片根弘登, 宮崎翔, 佐々木徹, 菊池崇志
2. 発表標題 ソレノイド磁場印加型レーザーイオン源のイオン価数分布の計測
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片根弘登, 延命慧悟, 松本友樹, 佐々木徹, 菊池崇志, 高橋一匡
2. 発表標題 レーザーイオン源のためのダブルスリット法を用いたエミッタンス計測システムの構築
3. 学会等名 電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本友樹, 高橋一匡, 佐々木徹, 菊池崇志
2. 発表標題 Liレーザーイオン源用静電イオンアナライザの構造の検討
3. 学会等名 電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahashi Kazumasa, Karino Takahiro, Ikeda Shunsuke, Kanesue Takeshi, Okamura Masahiro, Sasaki Toru, Kikuchi Takashi
2. 発表標題 Effect of solenoidal magnetic field on charge-state purity in laser ion source
3. 学会等名 Eleventh International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋一匡, 葛本雅之, 松本友樹, 佐々木徹, 菊池崇志
2. 発表標題 レーザーイオン源の波形制御のためのパルス磁場の検討
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumasa Takahashi, Yuki Matsumoto, Masayuki Kuzumoto, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi
2. 発表標題 Proton generation from hydrocarbon polymer targets for laser ion source
3. 学会等名 The 18th International Conference on Ion Sources (ICIS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumasa Takahashi, Masayuki Kuzumoto, Yuki Matsumoto, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi
2. 発表標題 Control of current waveform of laser ion source using pulsed magnetic field
3. 学会等名 The 18th International Conference on Ion Sources (ICIS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Brookhaven National Laboratory		