

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03838

研究課題名（和文）次世代重粒子線治療加速器のための無限寿命・氷結気体標的レーザーイオン源

研究課題名（英文）A Long-life Cryogenic Laser Ion Source for Next Generation Heavy Ion Therapy Accelerators

研究代表者

長谷川 純（Hasegawa, Jun）

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：90302984

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,790,000 円

研究成果の概要（和文）：小型で低コストな次世代の重粒子線がん治療装置を実現するために、繰り返し使用可能なクライオ標的を採用した新方式のレーザーイオン源を開発した。液体窒素で冷却された円筒金属の表面にブタンの固体層を薄く形成し、そこに高強度レーザーを照射することで、高価数の炭素イオンを安定に治療用加速器に供給できることを実証した。また、開発したレーザーイオン源が長時間安定に動作する性能をもつことを示した。次世代の重粒子線がん治療装置の実用化には、開発したレーザーイオン源のさらなる性能向上が必要なため、様々な動作条件のもとで運転試験を行い、重要な基礎データを収集した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザーイオン源は単純な装置構成で高電離のイオンを比較的容易に生成できる高い能力を持つが、長時間動作安定性の改善が課題であった。我々は、再生可能な円筒クライオ標的をレーザーイオン源に新たに適用することで、この課題の解決を目指し、高電離炭素イオンの十分な供給能力を持つこと、長時間安定動作にはクライオ標的上の再生固化層の形成条件の最適化が重要であることを見出した。重粒子線がん治療加速器施設においてこれまで用いられてきたイオン源を、本課題で開発したクライオ標的レーザーイオン源で置き換えることで、加速器施設の小型化や低コスト化が可能となり、重粒子線がん治療の普及促進が期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to realize a small, low-cost next-generation heavy ion beam cancer therapy device, we developed a new type of laser ion source that uses a reusable cryo-target. We demonstrated that by forming a thin solid layer of butane on the surface of a liquid nitrogen-cooled metal cylinder and irradiating it with a high-intensity laser, highly charged carbon ions can be stably supplied to the therapy device. We also demonstrated that the developed laser ion source is capable of stable operation for long periods of time. To commercialize the therapy device, it is necessary to further improve the performance of the laser ion source, and we conducted tests under various operating conditions to collect important basic data.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：レーザーイオン源 レーザーアブレーション クライオ標的 誘導加速シンクロトロン 重粒子線がん治療

## 1. 研究開始当初の背景

重粒子線がん治療は他の放射線治療に比べて線量集中性に優れており、体深部のがん細胞を選択的に治療できる。我が国では重粒子線がん治療の一部が保険適用になったこともあり、現在までに国内7箇所に重粒子線がん治療施設が建設され運用されている。一方、X線やγ線を用いた他の放射線治療に比べ、重粒子線がん治療施設の建設費は高額である。発展途上国をはじめ諸外国における重粒子線がん治療の普及には、重粒子加速器の小型化と低コスト化が必須である。既存の重粒子線がん治療施設では、電子サイクロトロン共鳴 ( ECR ) イオン源などの従来型プラズマイオン源により  $C^{4+}$  イオンを生成し、これを線形加速器 ( 入射器 ) で数 MeV/u まで加速してから荷電ストリッパで  $C^{6+}$  に変換し、高周波加速シンクロトロンに入射する。高山らは最近、誘導加速シンクロトロン技術に基づく重粒子線がん治療用加速器を提案した[1,2]。誘導加速シンクロトロンは、高周波加速シンクロトロンよりも幅広い周回周波数に対応できるため、低速のイオン ( ~100 keV/u ) をイオン源から直接シンクロトロンに入射して加速できる。この特徴により、入射器や荷電ストリッパが不要になり、加速器施設の小型化と建設費の削減が可能になる。この加速器システムでは、レーザーイオン源を用いて約  $10^8$  個の高価数炭素イオン (  $C^{5+}$  および  $C^{6+}$  ) を 10 Hz の繰り返し率で誘導加速シンクロトロンに入射する。他のイオン源に比べて機器構成が単純なレーザーイオン源を採用することで、イオン源導入費の大幅な低減を図っている。従来の研究において、高強度レーザーによるグラファイト標的のアブレーションにより、 $C^{5+}$  や  $C^{6+}$  を含む高電離炭素プラズマを生成できることが示された[3,4]。一方、グラファイト標的のレーザーアブレーションでは、プラズマ生成に伴う標的表面の局所的な融解・蒸発に加え、衝撃波による機械的破壊による損傷が生じることから、他の金属標的に比べて標的の損耗が激しいことが知られている。このことが、レーザーイオン源においてグラファイト標的を長時間連続して使用することを困難にし、イオン源の連続動作時間を大幅に制限していた。

## 2. 研究の目的

誘導加速シンクロトロンを基盤とする次世代型重粒子線がん治療装置にレーザーイオン源を適用するには、レーザー標的寿命の問題を解決する必要がある。そこで我々は、液体窒素冷却されたクライオ面に炭素化合物ガスの薄い固化層を形成し、これを繰り返し再生可能なレーザー標的として用いることで、標的寿命の問題を解決することを提案した。本課題では、この動作原理を採用した新しい方式のレーザーイオン源を開発し、高価数炭素プラズマの生成特性やレーザー照射がガス固化層に与える影響、長時間安定動作を実現するために解決すべき課題等を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

本課題で開発したクライオ標的生成装置の断面図を図1に示す。クライオヘッドは直径46 mm、高さ50 mmのステンレス円筒容器で、周囲が100 μmの銅板で覆われている。微動回転ステージによって吊り下げられたφ10 mmのステンレス管を通してクライオヘッド内部に液体窒素が供給される。クライオヘッドは、内径70 mm、高さ115 mmの円筒形ガス容器内に設置されている。クライオ標的の原料となるブタンはマスフローコントローラーを通してガス容器に導入され、側壁のφ10 mmの穴から排気される。ガス容器内のクライオヘッドの位置は、直動および回転ステージによって精密に制御される。クライオ標的は以下の手順で生成した。まず、ガス容器内を $10^{-3}$  Pa台まで真空排気し、クライオヘッドの表面を液体窒素で88 K程度まで冷却した。次に、10 sccm程度の流量でブタンを供給し、クライオヘッド表面にブタンの薄い固化層を形成した。固化層の形成中は、クライオヘッドを1 rpmで回転させて固化層の厚さの均一にした。固化層の厚さは、供給したブタンの総量から推定した。

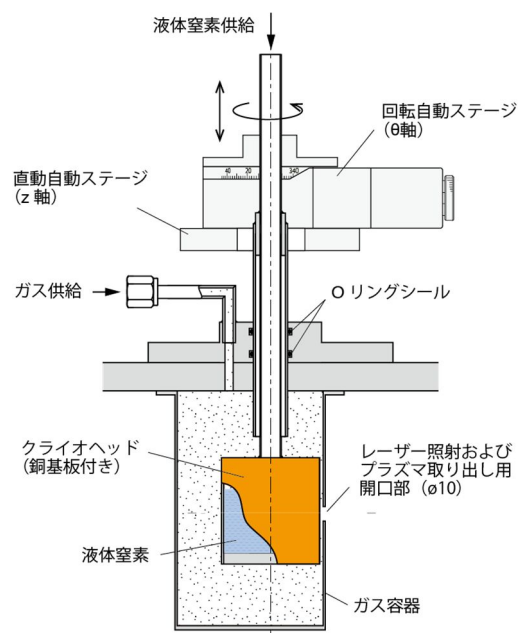


図1：クライオ標的生成装置。

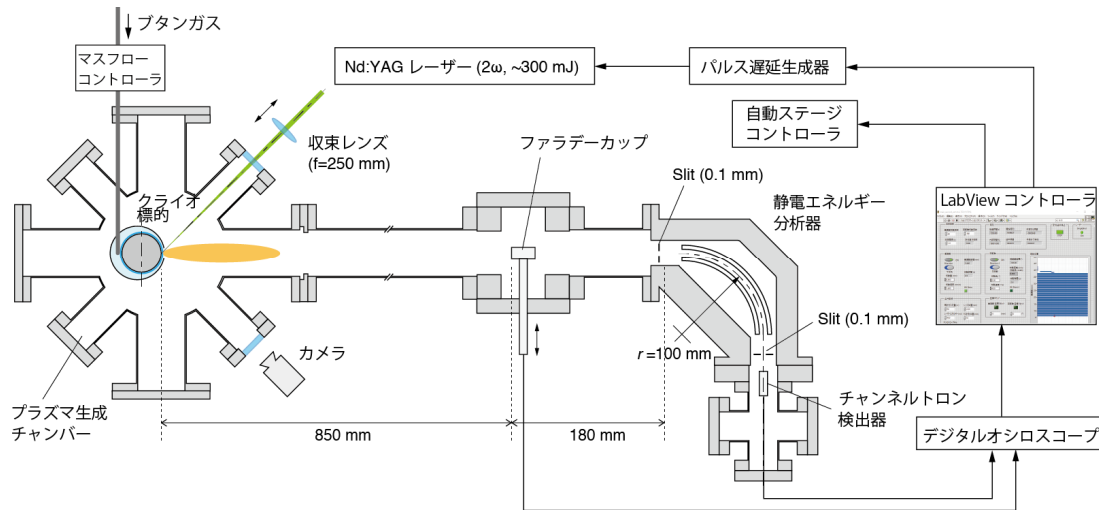


図 2 : クライオ標的レーザーイオン源テストベンチ .

本課題で使用したレーザーイオン源テストベンチを図 2 に示す . プラズマ生成チャンバーと計測チャンバーは , 2 組のターボ分子ポンプで  $10^{-4}$  Pa 以下の真空度に保たれている . Nd:YAG レーザーの 2 倍高調波を , 焦点距離 250 mm の平凸レンズでプラズマ生成チャンバー内のクライオ標的に集光・照射した . レーザーパルスのエネルギーは 300 mJ , 標的上のレーザースポットのサイズは約  $0.3 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$  , レーザーパワー強度  $2 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  のもとで全ての測定を行った . レーザーアブレーションプラズマは , ガス容器の側壁の開開口部 ( $\phi 10 \text{ mm}$ ) から取り出される . ブタンの固化層はレーザーアブレーションによって局所的に破壊され除去されるため , レーザー照射後にクライオヘッドをわずかに回転させることで , 次のレーザー照射は損傷のない固化層に対して行った . プラズマ中のイオン電流は , 標的から 850 mm 離れた位置で ,  $\phi 5 \text{ mm}$  の入口アパーチャーを持つファラデーカップで測定した . イオンだけを検出するために , ファラデーカップには  $-50 \text{ V}$  のバイアス電圧を印加した .

ビームラインの末端には , イオンの荷電状態分析のための静電エネルギー分析器が設置されている . 分析器の入口および出口のスリット幅を 0.1 mm に設定し , 出口スリットを通過したイオンを下流のイオン検出器 (チャンネルトロン) で検出した . エネルギー分析器内部の偏向電圧を 15 V から 1500 V まで変化させながらチャンネルトロンの出力信号を記録し , PC 上での後処理によって各電荷状態のイオン収量の時間変化を調べた .

#### 4 . 研究成果

図 3(a) は , 標的送り距離 ( $d_f$ ) を 0.8 mm としてファラデーカップで測定した典型的なプラズマイオン電流波形 (5 ショット重ね合わせ) である . ここで , 標的送り距離は標的上の連続する 2 つのレーザー照射位置の距離である . 時刻  $t = 0$  にある鋭いピークは , 初期プラズマからの光によって誘起されたファラデーカップからの 2 次電子放出によるものである . したがって , 横軸は標的からファラデーカップまでの距離 (85cm) を移動するイオンの飛行時間 (TOF) 分布である . この測定では , ガス容器に供給したブタンガスの総量は  $50 \text{ cc}$  ( $2.2 \times 10^{-3} \text{ mol}$ ) とした . この時のブタン固化層の厚さは約  $6 \mu\text{m}$  であった . 図 3(a) に示すようにプラズマイオン電流の再現性は良好で , クライオヘッド上の銅基板のアブレーションを示す信号は観測されなかった . 図 3(b) は ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$  のもとで , 連続 30 回レーザー照射を行った結果である . ピーク電流変動は 6% 未満の再現性で , クライオ標的からプラズマが生成されていることがわかる . 図 3(c) は , 数回のレーザー照射後のクライオ標的の表面の損傷痕の様子である . これらは  $d_f = 0.8 \text{ mm}$  で連続 3 回のレー

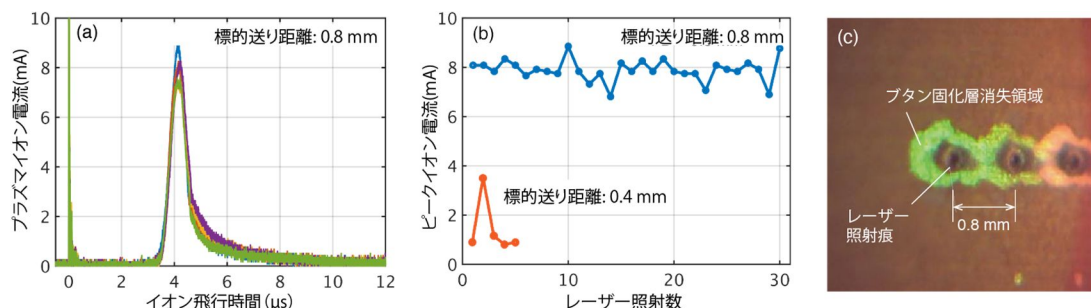


図 3 : (a) ブタン固化層のレーザーアブレーションで得られたプラズマイオン電流波形 (5 ショット) . (b) ピークイオン電流のレーザー照射数依存性 . (c) レーザー照射後のクライオ標的の表面の様子 .



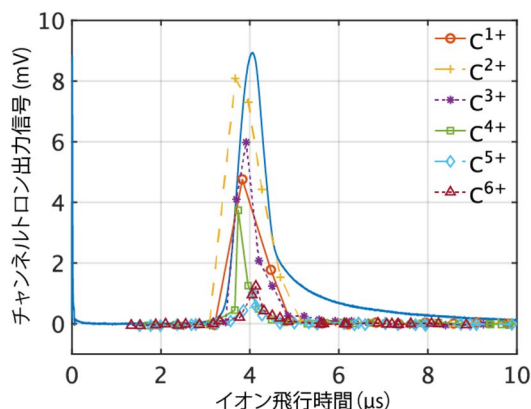


図4：価数ごとのイオン信号強度の時間変化．

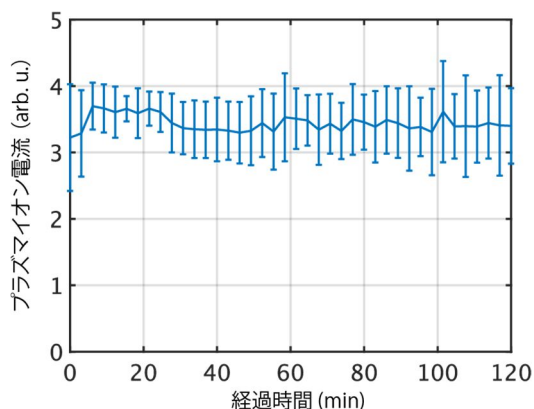


図5：長時間運転時のピークイオン電流変動．

ザー照射によって形成されたものである．各照射痕は，銅基板表面がわずかに凹んだ中央の領域（レーザー照射痕）と，その周囲のレーザー照射に伴う衝撃波により固化層消失領域から構成されている．この結果から，標的の水平送り距離は照射痕の水平方向の大きさ（ $\sim 0.8$  mm）と同じか，それ以上でなければならないことがわかる．この条件が満たされないと，図3(b)の  $d_f = 0.4$  mm の場合のように，クライオ標的上の固化層消失領域にレーザーが照射されてしまうためプラズマ生成が大きく阻害され，十分なプラズマイオン電流が得られない．

図4は，1価から6価までの異なる電荷状態を持つ炭素イオンの電流波形を再構成したものである．各イオン種の信号強度を決定するために，チャンネルトロン検出器からの出力信号波形のピークをガウス関数でフィッティングすることによって互いに分離した．図に示すように，ブタン固化層のレーザーアブレーションにより，5価および6価の高電離炭素イオンの生成に成功した．しかし， $C^{6+}$ と $C^{5+}$ の割合は， $C^{2+}$ や $C^{3+}$ のような低電離の炭素イオンに比べて非常に小さいままであった．高電離イオンの収量を増加させるためには，Nd:YAGレーザーの基本波の使用が望ましいことがわかった．

開発したクライオ標的レーザーイオン源のイオン供給安定性を確認するため，1 Hz で2時間連続動作させたときのプラズマイオン電流を測定した．図5は，連続した180ショット分（3分間）のイオン電流波形を平均し，そのピークイオン電流の時間変化を示したものである．エラーバーは標準偏差である．なお，この測定において，レーザーエネルギーが時間とともに徐々に減少する様子が見られた．これは，長時間運転時の温度変化などによるレーザー発振条件の変化が原因である．ここでは，プラズマイオン電流はレーザーエネルギーに比例すると仮定して，図5の垂直方向の値を測定したレーザーエネルギーで規格化している．このデータは，クライオヘッドを回転させながら垂直方向に移動させ，常にブタン固化層の新鮮な表面にレーザーが照射されるようにして得られたものである．クライオ標的表面のどの位置からでも安定に炭素プラズマを生成できることを確認した．

図6に，クライオ標的上に固体ブタン層を繰り返し生成しながらレーザーイオン源を動作させたときのプラズマイオン電流の変化を示す．この測定では，クライオ標的を垂直位置に維持したまま回転させ続け，レーザー照射によるプラズマ生成とブタン固化層の再生を同時に行なった．この条件では，クライオヘッドは5分間で360度回転する．一方，ブタンガスは10 sccmの流量でガス容器に連続的に供給し，標的が360度回転するたびに厚さ約6  $\mu\text{m}$ のブタン固化層が新たに形成されるようにした．レーザー照射は30秒に1回とし，クライオヘッドが1周する間に36°ごとにブタン固化層がアブレーションされるようにした．図6(a)では，標的が360度回転す

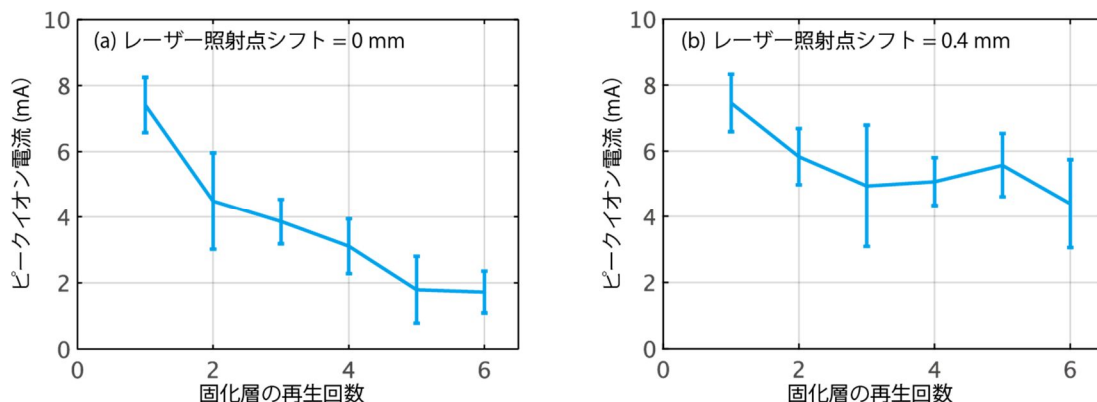


図6：固化層再生回数に対するプラズマイオン電流量の依存性．レーザー照射点のシフト量：(a) 0 mm，(b) 0.4 mm.

るたびに、再生固化層の全く位置にレーザーを照射しプラズマを生成した場合である。図からわかるように、プラズマ発生量は標的の再生回数の増加に伴い大きく減少する結果となった。これは、図 3(c)に示すように、クライオヘッド上の銅基板がレーザー照射により変形し、その上に再生される固体ボタン層の平滑性が徐々に悪化したためと考えられる。この傾向は、再生固化層の全く同じ位置ではなく、水平方向に 0.4 mm だけずらした位置にレーザーを照射することで改善された(図 6(b))。この条件では、固化層を最初に再生した後はプラズマ発生量が減少したものの、その後の再生固化層へのレーザー照射では、ショット間変動の範囲内でほぼ一定のプラズマ供給量が得られた。クライオヘッドを 360 度回転させるごとにレーザー照射位置を 0.4 mm ずつずらしたことにより、銅基板の変形領域(レーザー照射痕の中心から半径約 0.2 mm の範囲)の上に再生された固化層はプラズマ生成に利用されなかった。したがって、比較的均一で平滑な固化層からプラズマをより安定に生成できたと考えられる。

以上の結果から、クライオ標的上の銅基板の変形が再生固体ボタン層のレーザーアブレーションに大きく影響することがわかった。数 10  $\mu\text{m}$  以上の厚さのボタン固化層においても同様の基板の変形が観察されたことから、我々は、この変形はレーザーアブレーションによるものではなく、レーザーピーニング効果によるものと考えている。レーザーアブレーションに伴い発生する強い衝撃波は、固化層の内部に向けて伝播し、基板の表面で反射する。この際に固化層が破碎されるだけでなく、基板表面の変形が生じる。この問題を克服するには、クライオヘッドの基板にタンタルやタングステンなど、より硬い材料を用いることが有効である。

本課題では、次世代重粒子線がん治療システムにおける高電離炭素イオンの長時間供給の要求に応えるため、繰り返し再生可能なクライオ標的を用いた新しいレーザーイオン源を開発した。ボタン固化層のレーザーアブレーションにより高電離炭素プラズマを生成できることを初めて実証し、このイオン源が長時間安定してプラズマを供給する能力を十分に有することを示した。一方、レーザーピーニング効果による基板変形が長時間安定運転を阻害する要因であることを明らかにし、ボタン固化層の厚さとクライオヘッドの基板材料の最適化が重要であることを示した。

#### 参考文献

- [1] K. Takayama, *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **17**, 010101 (2014).
- [2] K. Takayama, T. Kawakubo, T. Adachi, T. Dixit, A. Shaikh, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **24**, 011601 (2021).
- [3] N. Munemoto, K. Takayama, S. Takano, M. Okamura, M. Kumaki, Rev. Sci. Instrum., **85**, 02B922 (2014).
- [4] Y. Fuwa, *et al.*, Rev. Sci. Instrum., **85**, 02B924 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Inoue, J. Hasegawa, T. Jinnai, K. Horioka, K. Takahashi, J. Tamura, K. Takayama	4. 巻 123
2. 論文標題 Research on Laser Ablation of Cryogenic CO2 Targets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 NIFS-PROC	6. 最初と最後の頁 58-62
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 J. Hasegawa, Y. Inoue, N. Matsubara, J. Tamura, K. Takahashi, K. Horioka, K. Takayama	4. 巻 2743
2. 論文標題 A Long-life Laser Ion Source Using a Reproducible Solidified Gas Target	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012018 ~ 012018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2743/1/012018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Inoue, J. Hasegawa, N. Matsubara, K. Takahashi, J. Tamura, K. Horioka, K. Takayama
2. 発表標題 Development of a Long Life Laser Ion Source Using a Cryogenic Solid Target
3. 学会等名 International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上湧次, 長谷川純, 堀岡一彦, 高橋一匡, 田村潤, 高山健
2. 発表標題 クライオ標的を用いた高電離炭素イオン供給のための長寿命レーザーイオン源の開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松原直暉, 長谷川純, 高橋一匡, 田村潤, 堀岡一彦, 高山健
2. 発表標題 クライオ標的のレーザーアブレーションによる基板損傷軽減に関する研究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西下匠摩, 長谷川純, 高橋一匡, 田村潤, 堀岡一彦, 高山健
2. 発表標題 固体標的レーザーイオン源におけるレーザー照射条件の最適化
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上湧次, 神内拓真, 長谷川純, 堀岡一彦, 田村潤, 高橋一匡, 高山健
2. 発表標題 クライオ CO2 標的のレーザーアブレーションに関する研究
3. 学会等名 核融合科学研究所共同研究形式研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Hasegawa, Y. Inoue, N. Matsubara, J. Tamura, K. Takahashi, K. Horioka, K. Takayama
2. 発表標題 A Long-life Laser Ion Source Using a Reproducible Solidified Gas Target
3. 学会等名 @International Conference on Ion Sources 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上湧次, 長谷川純, 高橋一匡, 田村潤, 堀岡一彦, 高山健
2. 発表標題 重粒子線治療のためのクライオ標的を用いた長寿命レーザーイオン源の開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第40回年会
4. 発表年 2023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
研究分担者	高橋 一匡  (Takahashi Kazumasa)  (10707475)	長岡技術科学大学・工学研究科・助教    (13102)	
研究分担者	高山 健  (Takayama Ken)  (20163321)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授    (82118)	
研究分担者	田村 潤  (Tamura Jun)  (90647017)	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・研究職    (82110)	

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
---------	---------