

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05399・20K20404

研究課題名（和文）リチウムビームを用いたBNCT用中性子源の開拓

研究課題名（英文）Development of Neutron Source using Lithium Driver Beam

研究代表者

岡村 昌宏（Okamura, Masahiro）

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・客員研究員

研究者番号：80332245

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：BNCTへの応用を目指して、不要な放射線発生を限りなく抑制できる中性子発生ドライバーとして使用できる、高強度リチウムビーム加速に関する研究を行った。発生する中性子は前方に集中的に供給されるため、閾値付近での反応を利用できる。本研究予算はコロナウイルスの影響で2020年度で終了予定であったが最終的に3年間の繰越を行うこととなった。2022年度後半から実験を再開し、最高強度のリチウムイオンビーム加速ビームが観測された。加速ビームを分析した結果、ピーク電流は35mAに及び、同位体を含む不純物は合計で2%以下であることが示された。これによって中性子発生装置が実現可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

BNCT用の複数の施設が世界に先駆けて国内で治験を開始している。このような状況下で更に高度な加速器駆動中性子源が実現可能であることが示された意義は大きい。BNCTにはエピサーマル中性子の高強度フラックスが供給される。本研究で開発された技術が応用されれば、比較的エネルギー幅の少ない、高い指向性を持った中性子束が得られることになり、大掛かりな放射線シールドを持ちなくても、病院への導入が可能となる可能性が生まれた。さらに、BNCTだけでなく、他の産業応用への転用も期待される。

研究成果の概要（英文）：The study on high-intensity lithium beam acceleration, which can be used as a neutron generation driver that can suppress unwanted radiation generation for application to BNCT, was carried out. Because the generated neutrons are supplied intensively in the forward direction, reactions near the threshold can be utilized. The budget for this research was scheduled to end in FY2020, however, due to the COVID pandemic, it was finally carried over for three years. Analysis of the accelerated beam showed that the peak current was 35 mA and that the total amount of impurities including isotopes was less than 2%. The feasibility of the system was experimentally verified.

研究分野：加速器科学

キーワード：中性子 リチウム 加速器 レーザー RFQ DPIS リチウムイオン BNCT

1. 研究開始当初の背景

研究の学術的背景

福島原発事故以降、原子炉を使用しない中性子源が切望されており、現在でもその状況に変わりはない。中でも加速器駆動中性子源は BNCT 用として脚光を浴びており、陽子の 30 MeV (サイクロトロン) と、7 MeV 程度 (高周波線形加速器) の加速器が治療用として間もなく稼働を開始すると言う状況にあった。現在ではこれらに加えて、2.5 MeV 程度の加速器を使ったシステムも治験を開始している。加速器駆動で中性子を発生するために用いられる核反応の内、吸熱反応はリチウムとベリリウムに比較的低速の陽子ビームを照射するもので、先にあげた例も全てこのタイプである。これは閾値以下のビームエネルギーで核反応を起こさないため不要な放射線を抑えることができるからである。ドライバーとしての陽子ビームのエネルギーとしては、リチウムターゲットで 1.64 MeV、ベリリウムターゲットで 1.85 MeV 付近を使うのが不要な X 線を減少させるためには有利であるが、反面、発生する中性子は標的原子核の方が重い為、ほぼ空間に等方的に発生することになる。必要とされる患者への照射位置での中性子量を確保するためには、ドライバー陽子数とそのエネルギーを大幅に大きくし、全体の中性子発生量を上げることになる。すなわち、更に不要な放射線が大量に不要方向へ飛散する。この現象は BNCT においてはさらなる患者の放射線曝露を強いるものとなる。

本研究では、従来からターゲットとして使われているリチウムを加速し、水素セルターゲットに照射する事によって、ビーム進行方向に集中した中性子を発生する方法が BNCT に使用できると実証することになった。具体的には、リチウムをレーザーによってイオン化し、10E11 個 (レーザー 1 パルス当たり) 以上のリチウム 3 価イオン (完全電離状態) を高周波線形加速器で加速可能であることを示す必要があった。ベリリウムをドライバービームとして使用することも考えられるが、それを含有する塵は人体へと吸入されることによって毒性を示すため、医療要装置としての実用化は難しいため、本研究ではリチウムをドライバービームとして採用した。

これまで提案されてきた加速器駆動中性子源で、本来ターゲットとなるリチウムを反対に加速して中性子を発生させる方式を医療用として採用したものは無く、本研究における提案が世界初の試みであった。

2. 研究の目的

核不拡散に関する世界的なコンセンサスにより、研究用の小型原子炉の建設は難しくなってきた。このような流れを受けて、加速器駆動型中性子源に対する需要が高まっている。原子炉の代替として、すでにいくつかの大型加速器駆動核破砕中性子源施設が稼働している。しかし、中性子ビームの特性をより効果的に利用するためには、産業界や大学規模の研究施設が所有できるコンパクトな加速器駆動型線源の普及が不可欠である。加速器駆動型中性子源は、原子炉の代替としての役割に加え、新たな機能や特徴を付加するものである。例えば、線形加速器駆動型では、ドライバービームを操作することで容易に中性子束をパルス化することができる。中性子は一度放出されると制御が難しく、バックグラウンドの中性子によるノイズのために放射線計測の解析が困難である。加速器駆動のパルス中性子であれば、この問題を回避できる。陽子加速器技術に基づくいくつかのプロジェクトが BNCT 用を含めて世界中で提案されている。陽子駆動コンパクト中性子発生装置で最もよく使われる反応は、 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ と ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ で、これらは吸熱反応であることが理由である。駆動陽子ビームのエネルギーを閾値ぎりぎりを選択すれば、過剰な放射線や放射性廃棄物を最小限に抑えることができる。しかし、標的原子核の質量は陽子よりはるかに重いため、発生した中性子は四方八方に散乱される。このように中性子束がほぼ等方的に放出されるため、中性子を効率よく研究対象物に運ぶことができない。さらに、対象物の位置に必要な中性子線量を発生させるためには、駆動陽子の数とそのエネルギーの両方を大幅に増加させる必要がある。その結果、高線量の γ 線と中性子が大きな角度で分布し、吸熱反応の利点が損なわれることになる。一般的な陽子ビーム駆動小型加速器駆動中性子発生装置では、放射線防護のために重い遮蔽物があり、システムの中で最も巨大な部分である。陽子ビームのエネルギーを増加させるには、通常、加速器施設のサイズをさらに増加させることを必要とする。

従来の加速器駆動型コンパクト中性子源の共通の欠点を克服するために、逆運動学的反応スキームが提案されている。この方式では、陽子ビームの代わりに、より重いリチウムイオンビームを駆動ビームとして使用し、ターゲットは炭化水素プラスチック、水素化物、水素ガス、水素プラズマなどの水素に富む物質を使用する。リチウム原子核の運動量は陽子より大きいため、核衝突の質量中心は前方に移動し続け、中性子も前方に放出される。この特徴により、大角度での不要な γ 線や中性子の放出が大幅に排除される。従来の陽子ドライバーのケースと逆キネマティックシナリオの比較を図 1 に示す。

しかし、陽子と比較して高電荷状態の重イオンの必要なフラックスを生成することが難しいため、逆キネマティックセットアップを備えた中性子発生装置は世界に数台しか存在しなかった。これらの施設はすべて、タンデム静電加速器と組み合わせた負スパッタリングイオン源を利用している。利用可能なリチウムイオンのビーム電流はわずか $100\mu\text{A}$ に制限されている。 1mA の Li^{3+} を使用する提案もあるが、この方法によるイオンビーム電流はまだ確認されていない。リチウムビーム駆動型加速器は、強度的に、ピーク陽子電流が 10mA を超える陽子ビーム駆動型加速器に対抗できていない状況であった。

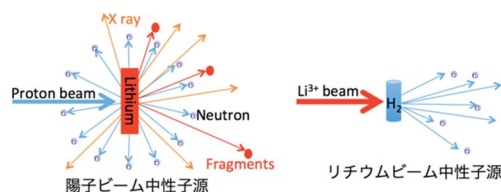


図1 ドライバービームの違い

リチウムビームを用いた実用的な小型中性子発生装置を実現するためには、高強度のフルストリップイオンを生成することが必要である。イオンは電磁力によって加速・誘導されるが、電荷状態が高いほど、より効率的な加速に寄与する。BNCT利用を前提とすれば、リチウムイオンビームドライバーは、 10mA 以上の Li^{3+} ピーク電流を必要である。

本研究では、先進的な陽子加速器に匹敵するピーク電流で、 Li^{3+} ビーム加速を実証することを目的とする。このような高強度ビームが高周波加速器で加速できれば、後段の加速器の設計建設は既存の技術を用いて容易に達成可能である。したがって、リチウムビーム加速の実証が直接不要放射線の発生を伴わない次世代のBNCT用中性子発生装置の実現性を証明することになる。図2に本研究計画で実証した範囲を示す。

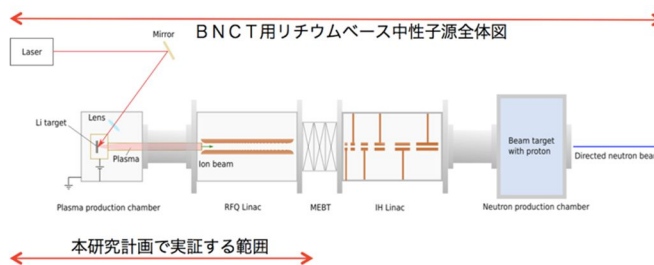


図2 BNCT用中性子源

3. 研究の方法

(1) オフライン飛行時間型 (TOF) レーザープラズマ解析

加速実験に先立ってイオン生成方法についての最適化を行った。イオンビームはレーザーイオン源を使って生成した。レーザーは卓上型ナノ秒 Nd:YAG を用い、基本波長 1064nm 、スポットエネルギー 800mJ 、パルス幅 6ns でレーザーパワー密度 $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ を実現した。ターゲット上のスポットサイズは、直径 $100\mu\text{m}$ と推定される。複数の化合物を含む材料がレーザーターゲットとして調査されたが、最終的にリチウムの金属箔をターゲットとすることとなった。金属リチウム (Alfa Aesar 社製、純度 99.9%) は十分に柔らかいので、精密に切断した材料を金型に押し込んだ。箔の寸法は $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 、厚さは 0.6mm であった。レーザーを照射すると、ターゲット表面にクレーター状の損傷が生じるため、モーター駆動のステージでターゲットを移動させ、レーザーを照射するたびにターゲット表面の新鮮な部分を提供した。残留ガスによる再結合を避けるため、チャンパー内の圧力は $10\text{-}4\text{Pa}$ の範囲以下に保たれた。

レーザースポット径は $100\mu\text{m}$ で、生成から 6ns 以内であるため、初期のレーザープラズマは小さな体積を持つ。その体積はピンポイントで、その後拡大すると考えることができる。ターゲット表面からある距離 $x\text{m}$ のところに検出器を置くと、得られる信号は、イオン電流 I 、イオンの到着時間 t 、パルス幅 α について、以下の関係に従う。

$$I \propto 1/x^3 \quad (1), \quad t \propto x \quad (2), \quad \alpha \propto x \quad (3)$$

発生したプラズマは、レーザーターゲットから 2.4m と 3.85m の距離にあるファラデーカップ (FC) とエネルギーイオンアナライザー (EIA) を通して TOF で測定された。図3にレーザー照射条件での分析されたイオンの電荷状態分布を示す。EIA で分析したイオン電流密度の時間プロファイルで、式(1)、(2)を用いてリチウム箔から 1m 離れた位置でスケールしている。

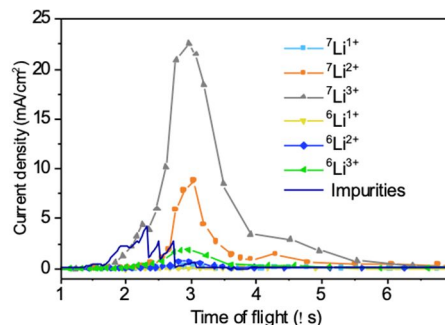


図3 TOFによって得られたプラズマ中のイオン価数分布

(2) イオン源

レーザーイオン源は、数ミリアンペア級の高電荷イオンビームを供給することができる。しかし、空間電荷反発力によりビーム輸送が非常に困難であったため、一般的には使用されてこなかった。従来の方式では、プラズマから取り出したイオンビームをビームラインという加速器の受入口に合わせてイオンビームを整形するための集束電磁石を持つ装置を通して初段の加速器に輸送していた。ビームラインでは、空間電荷力により、特に低速度領域でビームが非線形に発散され、深刻なビーム損失が発生する。医療用炭素加速器の設計においてこの問題を克服するために、新しいビームデリバリースキーム、すなわち DPIS が本研究グループによって開発されてい

る。この技術を新中性子源用の大強度リチウムイオンビームの加速に適用した。

プラズマが発生・拡大する空間は、金属容器で囲まれている。その空間は、ソレノイドコイル内の容積を含めて RFQ 共振器の入り口に及ぶ。容器には 52kV の電圧が印加された。RFQ 共振器では、RFQ が接地されているため、イオンは直径 6mm の開口部からその電位によって引き出される。この構造によって、プラズマ状態でイオンが供給され、ビームラインでの非線形な反発力を排除することができる。さらに、前述のように DPIS と組み合わせたソレノイド磁場を印加することで、引き出しオリフィスでのイオン密度を制御・向上させることができた。

(3) RFQ 線形加速器の設計

RFQ リニアックの主な設計パラメータは、ロッド電圧、共振周波数、ビームボア半径、電極の変調度である。ロッド電圧は、電気絶縁破壊の閾値よりも十分に低い電界を持つように $\pm 29\text{kV}$ を選択した。共振周波数が低いと、横方向の集束力が大きくなり、平均加速度場は小さくなる傾向となる。ボア半径が大きいと、空間電荷反発力が小さくなるため、より大きなビームサイズ、ひいては大きなビーム電流を受け入れることができる。一方、ボア半径が大きいと、RFQ リニアックへの通電に必要な RF パワーが大きくなる。また、磁場品質の要求から制限を受ける。これらのバランスから、大電流ビーム加速のための共振周波数 (100MHz) とボア半径 (4.5mm) を選択した。電極形状は、損失の小さいビームバンチを作り、加速効率を最大化するために最適化された。その結果、40mA の ${}^7\text{Li}^{3+}$ イオンを 2m で 22keV/n から 204keV/n まで加速する RFQ リニアック設計が完成した。RF パワーは実験中の測定値で、77kW である。

(4) ビームアナライザー

RFQ リニアックは、ある範囲の電荷数対質量数 Q/A を持つイオンを加速することができる。そのため、リニアックの末端まで輸送されたビームを分析するためには、同位体などを考慮する必要がある。また、部分的に加速されても加速器の途中で加速状態から脱落した所望のイオンは、横方向の閉じ込めを満たすことができ、末端まで輸送することが可能である。 ${}^7\text{Li}^{3+}$ の設計粒子以外の不要なビームは不純物と呼ばこととする。実験では、リチウム金属箔が空気中の酸素や窒素と反応することがあるため、不純物として懸念されるのは ${}^{14}\text{N}^{6+}$ と ${}^{16}\text{O}^{7+}$ が主なイオンである。これらのイオンは、 ${}^7\text{Li}^{3+}$ と一緒に加速できる Q/A を持っている。RFQ リニアック後のビームを分析するために、ダイポール磁石を使って Q/A の異なるビームを分離した。

4. 研究成果

高フラックスイオンの加速は、すでに確立された技術である。効率的な新型コンパクト中性子発生装置の実現に向けて残された課題は、完全に電離した大量のリチウムイオンの生成と、加速器内の RF 周期に同期したイオンパルスの列からなるバンチ構造の形成である。この目標を達成するために設計された実験結果について、以下の3つのサブセクションで説明する：(1) 完全電離型リチウムイオンビームの生成、(2) RFQ リニアックによるビームの加速、(3) その内容を確認するための加速ビームの解析。装置の全体図を図4に示す。

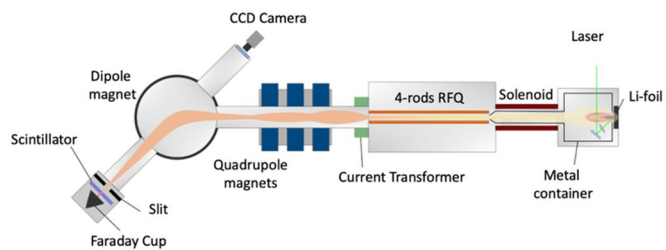


図4 リチウムビーム発生実験における装置配置

(1) 完全電離型リチウムビームの生成

完全に電離したリチウム (Li^{3+}) イオンを生成するためには、そのイオン化エネルギーである 122.4eV 以上の温度を持つプラズマを生成する必要がある。本研究ではレーザーアブレーションによる高温プラズマの発生を試みた。リチウム金属は化学的に活性であり、特別な取り扱いが必要なため、このタイプのレーザーイオン源はリチウムイオンビームの生成にはあまり使用されていなかった。そこで、リチウム箔をレーザー相互作用真空チャンバーに設置する際に、湿度や空気による汚染を最小限に抑えるターゲットローディングシステムを開発した。すべての材料準備は、乾燥アルゴンガスの制御された環境下で行われた。リチウム箔をレーザーターゲットチャンバーに装着した後、1ショット 800mJ のエネルギーを持つ Nd:YAG パルスレーザーを箔に照射した。レーザーの出力密度は、ターゲット上の焦点で約 $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ と見積もられた。真空中でパルスレーザーがターゲットをアブレーションすると、プラズマが発生する。このプラズマは、レーザーパルスの6ナノ秒の間、主に逆ブレイク過程によって加熱され続ける。加熱中は閉じ込める外場がないため、プラズマは3次的に膨張し始める。プラズマがターゲット表面で膨張し始めると、プラズマの質量中心は 600eV/n のエネルギーでターゲット表面に垂直な速度を獲得する。加熱後、プラズマは等方的に膨張しながらターゲットから軸方向に遠ざかり続ける。

図4に示すように、アブレーションプラズマはターゲットと同じ電位を持つ金属容器に囲まれた真空容積に膨張する。そのため、プラズマは電界のない領域を通して RFQ リニアックの方向にドリフトする。レーザー照射室と RFQ リニアックの間には、真空容器の周囲に巻かれたソレノイドコイルによって軸方向の磁場が印加される。ソレノイド磁場は、漂流するプラズマの半径方

向の膨張を抑制し、RFQ アパーチャーへの輸送中も高いプラズマ密度を維持する。一方、プラズマはドリフト中に軸方向に膨張し続け、細長いプラズマが形成される。プラズマを封入した金属容器に、RFQ 入口の取り出し口まで高電圧バイアスを印加する。バイアス電圧は、RFQ リニアックによる適切な加速に必要な ${}^7\text{Li}^{3+}$ の入射速度に設定した。

生成されたアブレーションプラズマは ${}^7\text{Li}^{3+}$ だけでなく、他の電荷状態のリチウムや汚染元素を含み、これらは同時に RFQ リニアックに輸送される。RFQ リニアックでの加速実験に先立ち、プラズマ中のイオンの種とエネルギー分布を調べるために、オフラインの飛行時間 (TOF) 分析を行った。分析の結果、 ${}^7\text{Li}^{3+}$ イオンが優勢であり、全粒子数の約 54% を占めていることがわかった。この解析結果から、イオンビーム取り出し位置での ${}^7\text{Li}^{3+}$ イオン電流は 1.87mA と推定された。加速試験中、膨張するプラズマに 79mT のソレノイド電界を印加した。その結果、プラズマから抽出され、検出器で観測される ${}^7\text{Li}^{3+}$ の電流を 30 倍に増加させることができた。

(2) RFQ リニアックによるビームの加速

リチウムプラズマは、前述のように RFQ リニアックに到達する前に電界のない領域を低速で飛行する。RFQ リニアックの入り口には、金属容器に直径 6 mm のオリフィスがあり、52 kV のバイアスがかけられている。この電圧により、RFQ 加速器の電極の電圧は 100MHz で急速に $\pm 29\text{kV}$ に交互に変化するが、平均してゼロ電位であるため、進行方向に加速される。オリフィスと RFQ 電極の端の間の 10mm の隙間に強い電界が発生するため、オリフィスではプラズマ中の正イオンだけが取り出される。従来のイオン輸送系では、RFQ リニアックのかなり手前で電界によってプラズマからイオンを分離し、ビーム集束素子によって RFQ 開口部に集束させる。しかし、大強度中性子源に必要な大強度の重イオンビームでは、空間電荷効果による非線形反発力によってイオン輸送系でのビーム損失が大きくなり、加速できるピーク電流が制限される。DPIS では、大強度イオンをドリフトプラズマとして RFQ 開口部の取り出し口に直接輸送することで、空間電荷によるイオンビームロスが発生させない。本研究では、この DPIS を初めてリチウムイオンビームに適用した。

制作された RFQ を用いて ${}^7\text{Li}^{3+}$ イオンを 22keV/n の入射エネルギーから 204keV/n まで加速する実験を行った。RFQ リニアック出口のカレントトランス (CT) と分析電磁石後のファラデーカップ (FC) でビーム検出を行った。CT で測定されたピークイオン電流は 43mA であった。CT の位置では、検出されたビームには、設計したエネルギーまで加速されたイオンだけでなく、十分に加速されていない ${}^7\text{Li}^{3+}$ 以外のイオンも含まれている可能性がある。しかし、CT と FC で検出されたイオン電流波形が類似していることから、イオン電流は主に加速された ${}^7\text{Li}^{3+}$ からなり、FC での電流ピークの減少は CT と FC 間のイオン輸送時のビームロスに起因していることが示唆された。このビームロスは、エンベロープシミュレーションによっても確認された。 ${}^7\text{Li}^{3+}$ のビーム電流を正確に測定するために、次節で説明するように、このビームをダイポール磁石で分析した。

(3) 加速ビームの分析

RFQ リニアック後のイオンビームは、3 台の四極集束磁石で集束された後、ビーム中の不純物を分離するためにダイポール磁石で分析された。0.268T の磁場で ${}^7\text{Li}^{3+}$ ビームに偏向角を与え測定器に導いた。ビームのピーク電流は 35mA に達し、既存の静電加速器で得られた典型的な ${}^7\text{Li}^{3+}$ ビームの 100 倍以上である。ビームのパルス幅は半値全幅で $2.0\mu\text{s}$ であった。ダイポール磁場による ${}^7\text{Li}^{3+}$ ビームの検出は、バンチングとビームの加速が成功したことを示す。双極子磁場を走査しながら FC で検出されたイオンビーム電流を図 5 に示す。きれいな単一ピークが観測され、他のピークとよく分離されている。RFQ リニアックで設計エネルギーまで加速されたイオンはすべて同じ速度であるため、Q/A の近いビームはダイポール磁場で分離することが困難である。そのため、 ${}^7\text{Li}^{3+}$ と N^{6+} や O^{7+} を区別することができない。しかし、隣接する電荷状態から不純物の量を推定することは可能である。例えば、 N^{7+} と N^{5+} は容易に分離でき、不純物の一部と思われる N^{6+} は N^{7+} と N^{5+} とほぼ同量と予測される。不純物量は約 2% と推定された。図 5 に双極子磁場を走査して得られたビーム成分のスペクトルを示す。0.268 T のピークは ${}^7\text{Li}^{3+}$ と N^{6+} に相当する。ピークの幅は、スリットでのビームサイズに依存する。ピーク幅にもかかわらず、 ${}^7\text{Li}^{3+}$ は ${}^6\text{Li}^{3+}$ 、 O^{6+} 、 N^{5+} とよく分離しているが、 O^{7+} と N^{6+} とは分離していない。

この結果、35 mA のパルス ${}^7\text{Li}^{3+}$ ビームが RFQ の設計エネルギーである 204 keV/n (1.4MeV に相当) まで加速され、FC 検出器まで運ばれていることがわかった。

以上の実験結果により、ピーク電流値が 35 mA のリチウム 3 価イオンビームが加速可能であることが示され、逆運動学的スキームに基づく極めてクリーンな BNCT 用中性子発生装置が実現可能であることが証明された。

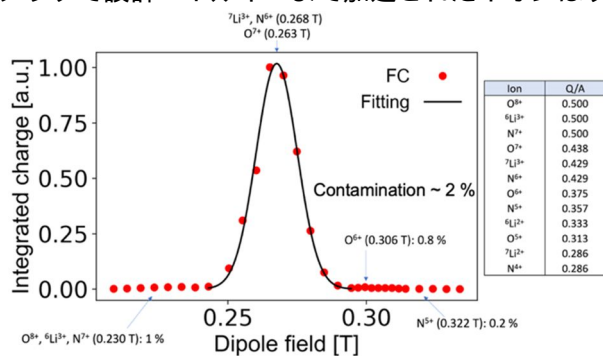


図 5 双極子磁場を走査して得られたビーム成分のスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TAKAHASHI Kazumasa, IKEDA Shunsuke, KANESUE Takeshi, OKAMURA Masahiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Ion Generation Using Frozen Xenon Target for Laser Ion Source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2406019 ~ 2406019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.2406019	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 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 ~ 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 Cannavo A., Takahashi K., Okamura M., Ceccio G., Kanesue T., Ikeda S.	4. 巻 91
2. 論文標題 Optimization of laser-target parameters for the production of stable lithium beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033317 ~ 033317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5128547	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 Ikeda Shunsuke, Whelan Tommy, Tamis Andrew, Chalfin Harry, Cannavo Antonino, Kanesue Takeshi, Okamura Masahiro, Takahashi Kazumasa	4. 巻 91
2. 論文標題 Low charge state lithium beam production from chemical compounds with laser ion source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 013312 ~ 013312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5128431	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 Ikeda Shunsuke, Okamura Masahiro, Kanesue Takeshi, Raparia Deepak, Hershcovitch Ady, Yip Kin, Takahashi Kazumasa, Wu Dong, Cannavo Antonino, Ceccio Giovanni	4. 巻 91
2. 論文標題 Neutron generator based on intense lithium beam driver	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 023304 ~ 023304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5128421	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 Okamura Masahiro, Ikeda Shunsuke, Kanesue Takeshi, Takahashi Kazumasa, Cannavo Antonino, Ceccio Giovanni, Cassisa Anastasia	4. 巻 12
2. 論文標題 Demonstration of an intense lithium beam for forward-directed pulsed neutron generation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 0-999
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-18270-0	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 該当する

[学会発表] 計16件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Antonino Cannavo, Masahiro Okamura, Giovanni Ceccio, Kazumasa Takahashi, Sergey Kondrashev, Shunsuke Ikeda, Takeshi Kanesue
2. 発表標題 Pulsed Intense Lithium Beam Acceleration Test for Neutron Generator
3. 学会等名 International Conference on Ion Sources (国際学会)
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 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 岡村昌宏
2. 発表標題 中性子発生用リチウムビーム加速試験
3. 学会等名 第6回IFMIF研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Antonino Cannavo, Masahiro Okamura, Giovanni Ceccio, Kazumasa Takahashi, Sergey Kondrashev, Shunsuke Ikeda, Takeshi Kanesue
2. 発表標題 Pulsed Intense Lithium Beam Acceleration Test for Neutron Generator
3. 学会等名 International Conference on Ion Sources (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ikeda Shunsuke, Okamura Masahiro, Kanesue Takeshi, Raparia Deepak, Hershcovitch Ady, Yip Kin, Takahashi Kazumasa, Wu Dong, Cannavo Antonino, Ceccio Giovanni
2. 発表標題 Neutron generator based on intense lithium beam driver
3. 学会等名 the 18th International Conference on Ion Sources, Lanzhou, China, September 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ikeda Shunsuke, Whelan Tommy, Tamis Andrew, Chalfin Harry, Cannavo Antonino, Kanesue Takeshi, Okamura Masahiro, Takahashi Kazumasa
2. 発表標題 Low charge state lithium beam production from chemical compounds with laser ion source
3. 学会等名 the 18th International Conference on Ion Sources, Lanzhou, China, September 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Cannavo A., Takahashi K., Okamura M., Ceccio G., Kanesue T., Ikeda S.
2. 発表標題 Optimization of laser-target parameters for the production of stable lithium beam
3. 学会等名 the 18th International Conference on Ion Sources, Lanzhou, China, September 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okamura Masahiro, Ikeda Shunsuke, Kanesue Takeshi, Takahashi Kazumasa, Cannavo Antonino, Ceccio Giovanni, Cassisa Anastasia
2. 発表標題 Present Status on Li-beam driving neutron generator R&Ds at BNL
3. 学会等名 Asian Forum for Accelerators and Detectors (AFAD) in 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Okamura Masahiro、Ikeda Shunsuke、Kanesue Takeshi、Takahashi Kazumasa、Cannavo Antonino、Ceccio Giovanni、Cassisa Anastasia
2. 発表標題 Feasibility study of high intensity lithium beam production for directional pulsed neutron flux generation.
3. 学会等名 International Conference on Ion Sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Okamura Masahiro、Ikeda Shunsuke、Kanesue Takeshi、Takahashi Kazumasa、Cannavo Antonino、Ceccio Giovanni、Cassisa Anastasia
2. 発表標題 Compact RF accelerators for neutron generation
3. 学会等名 Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources (UCANS 10) (招待講演) (国際学会)
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)	

	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 協力者	金末 猛 (Kanesue Takeshi)		
研究 協力者	池田 峻輔 (Ikeda Shunsuke)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	該当なし 該当なし (Ceccio Giovanni)		
研究協力者	該当なし 該当なし (Cannavo Antornino)		
研究協力者	該当なし 該当なし (Cassisa Anastasia)		

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1件

国際研究集会 The 1st International Workshop on Laser Ion Sources	開催年 2022年～2022年
---	--------------------

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			
チェコ	Nuclear Physics Institute of CAS			
中国	Zhejiang University			