

奨励金No.1509

BNCT 用加速器駆動中性子源のためのマルチカusp磁場印加レーザーイオン源の開発

高橋 一匡

長岡技術科学大学 電気電子情報系 助教

Development of laser ion source applying multicusp magnetic field for BNCT by accelerator driven neutron source

Kazumasa Takahashi,

Department of Electrical, Electronics and Information Engineering, Nagaoka University of Technology, Assistant Professor



加速器駆動中性子源のための大電流レーザーイオン源を開発するため、マルチカusp磁場をアブレーションプラズマに印加し、レーザーターゲットからイオンビーム引出し電極まで輸送を行った。また、プラズマから大面積かつ収束イオンビームを引き出せる電極構造を採用した。その結果、提案法のレーザーイオン源ではプラズマの膨張を制限して加速器まで導き、従来より大電流のイオンビームを供給できることを実証した。

In order to develop a high current laser ion source for an accelerator driven neutron source, we proposed a method in which an ablation plasma is confined by using a multicusp magnetic field during the transportation from the laser target to the ion beam extraction electrode. In addition, an electrode that can extract a converging ion beam with a large aperture compared to the conventional one is used for ion beam extraction from a plasma. As the result, it was demonstrated that an ion beam with a larger current can be supplied from the laser ion source by the suggested method.

1. 研究内容

1.1 はじめに

近年、中性子応用に向けた加速器駆動中性子源の研究開発が活発化している。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採用したものは無い。これは、水素、重水素などの気体をイオン化するのが容易である事、ヘリウムより重い元素を陽子ビームと同等の電流量で加速する技術が確立していなかった事が大きい。例えば、汎用の従来型イオン源では、陽子ビームは数 10 mA の出力を持つものが多数存在するが、リチウム以上の核種を同等の出力で提供で

きるイオン発生方法は実用化されていなかった。

リチウムイオンの供給には通常は ECR (Electron Cyclotron Resonance) イオン源が用いられる。ここでは、蒸発させたりチウム蒸気に対して高周波により電力を供給することで電子を衝突させてイオン化を行う。このときの供給できるビーム電流は蒸気のに量に依存するが、加速器内に粒子が存在すると衝突によって失われるため、そのバランスで実際に供給可能は決まる。従来法に基づいたりチウムビーム電流は数 10 ~ 100 μ A 程度であり、従来法で中性子応用に必要な、現行の陽子ビーム供給量と同等程度となる 10 mA のオーダーのビームを発生させることは極めて困難である。

本研究では従来法の代わりにレーザーで生成したプラズマからイオンを引き出すレーザーイオン源を用いる。本手法は固体密度のプラズマを発生させることができ、レーザー光は局所的にエネルギーを付与できることから、通常では難しい高い価数のイオンを大量に発生させることが可能である。このため、提案法では蒸気からプラズマを生成する従来法と比較して十分大きな電流のイオンビーム供給が可能である。一方で、実用的な中性子源を構築するためには現行の水素を用いるイオン源にとっても大強度である10 mAの発生には不足している。プラズマをソレノイドコイルによって発生させた磁場によりプラズマを閉じ込める方法も検討しているが、磁場が強くなると磁力線の影響によりイオン引き出し部で放電が起きやすくなるなど技術的な課題がある。そこで、本研究では、管の中心部に磁場が存在しないため上記のような問題が発生せず、磁場発生時の発熱などの問題もないなどのメリットもあるマルチカスプ磁場によるプラズマガイディングと大面積のイオンビーム引出し電極の組み合わせによる大電流のイオンビーム形成方法を検討した。

1.2 実験装置

本研究では本手法の原理実証のため、反応性の高いLiではなく、常温で固体でありLiに原子量が比較的近いCと、提案法のイオン種による影響の違いを調べるため、Cuの2種類のターゲットを用いた。図1に本研究で用いた装置の概略図を示す。用いたレーザーはNd:YAGレーザーの基本波1064 nm、パルス幅5 ns、エネルギー100 mJである。マルチカスプ磁場は、大きさが4 mm×4 mm×106 mmで4 mm方向に磁化した表面磁束375 mTのネオジウム磁石を内接円の直径34 mm上に8極で配置した。プラズマは107 mmのドリフトによる膨張後、106 mmの磁石を長手方向に6個並べた636 mmのマルチカスプ磁場中で輸送される。また、イオンビーム引出し電極には内径が

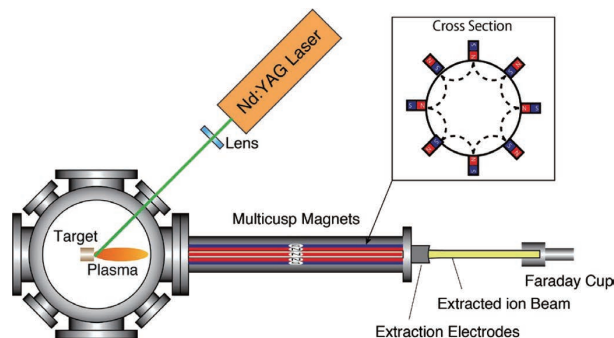


図1. 実験装置概略図

3 mmのもの、12 mmで収束ビームが引き出せる形状のものを用いて比較を行った。

1.3 実験結果

図2は各電極および磁場の有無の条件で得られたイオン電流を示している。0 s付近の信号はレーザーの散乱光によるイオン検出器からの電子の放出であり、Cuで15 μ s、Cで7 μ s付近にピークを持つ信号がアブレーションプラズマのイオンの検出を示している。まず、イオン引出し電極の面積を直径3 mmから12 mm(メッシュ付)へと大きくした結果、概ね開口面積比程度に電流が増加することが分かった。次に同じ電極を用いてマルチカスプ磁場を印加した結果、イオン電流が増加する結果が示された。これによりマルチカスプ磁場がソレノイド磁場と同様に磁場内のプラズマの膨張を抑制し、イオン引出しの位置でのプラズマ密度を増加させる効果があることが示唆された。さらに電極に至るまでのプラズマ輸送管の内径を12 mmから18 mmへと大きくした結果、Cで5倍、Cuでは8倍程度の電流の増加が示された。これらの結果はプラズマ中イオンの運動量分布が磁場でガイドされたことにより点源から発散する分布から変化したことを示唆している。これらの結果により、プラズマに対して磁場を印加する際には引出し電極の面積のみならず、そこに至るまでの輸送管の径も大きくすることが引出せるイオンの増加に有効であることが明らかになった。

また、図2の結果により、プラズマに磁場を印

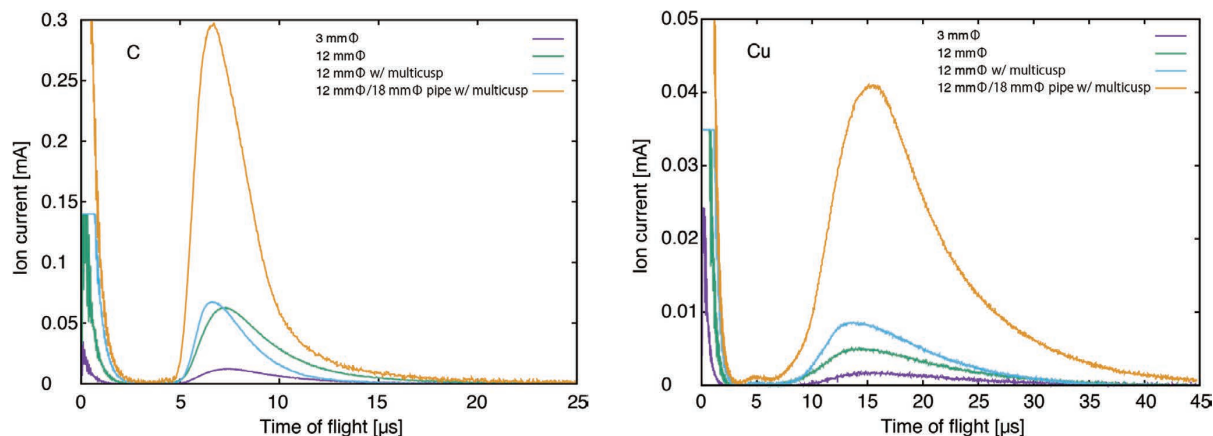


図2. 磁場なしでのイオン引出し電極（直径3 mm）、大面積電極（直径12 mm、プラズマ輸送管内径12 mm）、およびマルチカusp磁場印加時の大面積電極（直径12 mm、プラズマ輸送管内径12 mmと18 mm）でのイオン電流

加するとピークに達する時刻が早くなる傾向にあることが示された。これはプラズマの速い成分に含まれている高価数のイオンが低価数イオンと比較してより増加していることを示唆していると考えられる。また、イオンラマ半径と磁束密度の関係から軽い元素であるCの方がCuよりもプラズマを閉じ込めやすいと考えられるが、得られた結果はCuの方が磁場を印加した際の増倍率がやや大きい。これはCuプラズマの方が多価イオンをより多く含んでいた可能性を示している。今後、価数分析を行うことでアブレーションプラズマに対するカusp磁場印加の効果をより詳細に調べる予定である。

1.4 まとめ

本研究ではマルチカusp磁場によるプラズマガイディングと大面積のイオンビーム引出し電極を組み合わせ、従来のレーザーイオン源よりも大電流のイオンビーム形成方法を検討した。その結果、大面積イオン引出し電極の採用により、プラズマに磁場を印加しない状態では開口面積比程度のイオン電流増加が得られることがわかった。また、マルチカusp磁場の印加によってプラズマのドリフトと垂直方向の膨張を抑えて輸送後の電流密度を増加できることが示された。さらに、磁場印加時には引出し電極の径よりも大きな管によりプラ

ズマを輸送することがより大きなイオン電流を得るために有効であることが明らかになった。これらの結果からマルチカusp磁場によるプラズマガイディングと大面積のイオンビーム引出し電極を組み合わせにより従来のレーザーイオン源より大電流のイオンビーム形成が可能であることが分かった。

2. 発表（研究成果の発表）

学会発表

1. Kazumasa Takahashi, Naoto Harukawa, Kaoru Ishikuro, Shinya Ishikawa, Kakeru Miyazaki, Toru Sasaki, Takahashi Kikuchi, “Study on Behavior of Ablation Plasma from Liquid Metal Target for Laser Ion Source”, International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (Tokyo, 2023)
2. 宮崎翔、菊池崇志、佐々木徹、高橋一匡、「レーザー照射型フラーレンイオン源の単離に向けた四重極マスフィルターの検討」、NGT-22-008、電気学会新潟支所大会（新潟、2022）
3. 岩佐百華、五十嵐一輝、佐々木徹、高橋一匡、菊池崇志、「高繰り返しレーザー推進機の推進剤ターゲット表面の光学特性の計測」、EPP-22-061、電気学会放電・プラズマ・パルスパワー研究会（長岡、2022）

4. 高橋 一匡、宮崎 翔、春川 直都、石黒 薫子、
石川 慎也、佐々木 徹、菊池 崇志、「液体金属
をターゲットとしたレーザーイオン源の基礎的
検討」、FRP055、加速器学会（オンライン、
2022）