

ACCELERATION OF HIGH CURRENT AND HIGHLY CHARGED CARBON BEAM USING DIRECT INJECTION SCHEME

Hirotsugu Kashiwagi^{1,A)}, Masahiro Okamura^{B)}, R.A.Jameson^{B)}, Toshiyuki Hattori^{C)}, Noriyosu Hayashizaki^{C)}
Kazuhiko Sakakibara^{C)}, Junpei Takano^{C)}, Kazuo Yamamoto^{D)}, Yoshiyuki Iwata^{D)}, Tetsuya Fujimoto^{D)}

^{A)} Japan Atomic Energy Research Institute
1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma 370-1292

^{B)} RIKEN

2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

^{C)} Tokyo Institute of Technology

2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

^{D)} National Institute of Radiological Sciences

4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555

^{E)} Accelerator Engineering Corporation

4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555

Abstract

The carbon beam from Nd-YAG laser ion source was accelerated successfully by RFQ linac using Direct injection scheme. "Direct injection scheme" is the way to inject ion beam to RFQ linac without low energy beam transport line to avoid space charge effect due to high intensity beam from laser ion source. About 30mA of carbon beam was detected by faraday cup just behind RFQ linac.

Direct injection schemeによる高価数炭素ビームの大電流加速

1. はじめに

レーザーイオン源はどんな固体物質のイオンでもイオン化でき、小型・構造が単純でかつ高強度・高価数のパルスイオンビームが得られるという特徴がある。

高価数のイオンは低価数のイオンに比べ、ビーム加速に使われる電力が少なく済む長所があるが、高価数・大電流ビームは、特に重イオンビームにおいては、空間電荷効果が非常に強力で、イオン源から初段加速器までの低エネルギービーム輸送ライン (Low Energy Transport Line: LEBT) においてビームが発散してしまい、ビームロスが著しい。

我々はこの問題に対しレーザープラズマをプラズマのまま加速器まで飛行させて加速器に入射する、“Direct injection scheme”によって高価数・大電流の輸送と加速を実現する研究を行っている^{[1][2][3][4][5]}。本論文では重粒子線がん治療等で使用されている炭素ビームについて、最高価数のC⁶⁺のビーム加速を目的とした実験を行ったので報告する。

2. Direct injection scheme

ECRイオン源やPIGイオン源等ではプラズマをプラズマチャンバーの中で発生させ、そのチャンバー内に貯まっているプラズマの端から電場によってイオンビームを引き出している。一方、レーザーイオ

ン源からのレーザープラズマはイオン化するターゲット上で発生するが、イオン源真空チャンバー内に留まらず、初速度もってプラズマがイオン源チャンバーから出射する。

この特長に着目し、Direct injection schemeではレーザーアブレーションプラズマからイオンを引き出すことなくそのプラズマが持っている初速のままRFQ線形加速器入射部直前まで飛行させる。そのため、RFQ線形加速器入射部に到着するまでイオンビームの輸送時に問題となる空間電荷効果は働かない。そして、その加速器入射部で初めてプラズマからイオンを引き出し、その引き出されたイオンを直ちにRFQ線形加速器の強い収束力によって捕獲することにより、高輝度・大電流のビーム入射ができ、大電流のビーム加速が可能になる。

図1にdirect injection schemeの概念図を示す。

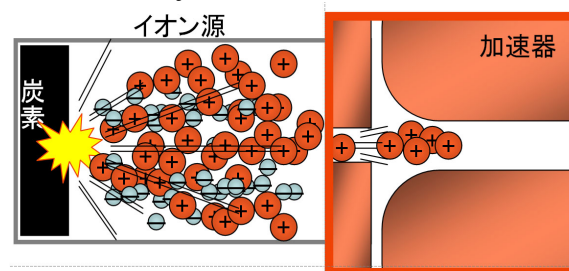


図1 Direct injection scheme概念図

¹ E-mail: kashi@taka.jaeri.go.jp

プラズマのまま加速器まで飛行させるため、ビーム収束、整形のためのLEBTラインは必要ない。従って、加速器をイオン源に直付けでき、非常にコンパクトな装置となる。

3. Direct injection scheme用大電流加速装置

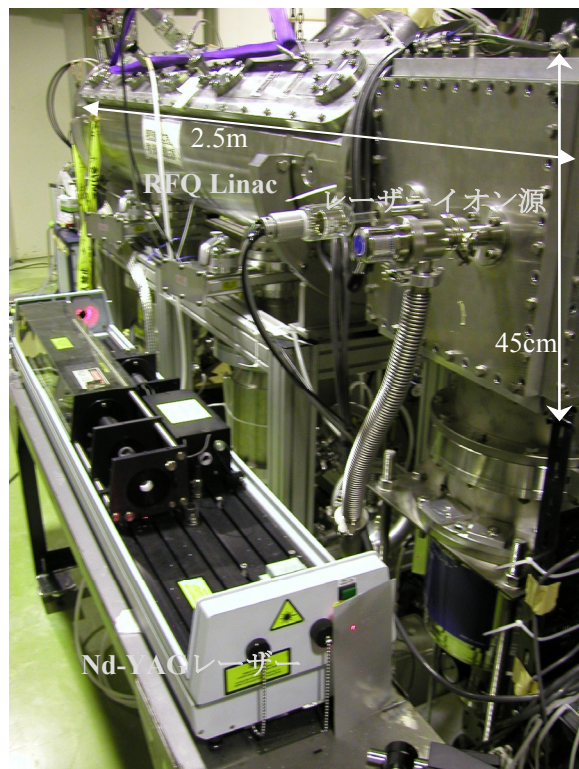


図2 Direct injection scheme実験装置

図2にイオン源と加速器から構成される Direct injection scheme実験装置を示す。前述の通りイオン源はレーザーイオン源、加速器はRFQ線型加速器である。

- ・ レーザーイオン源
イオン源の内部構造を図3に示す

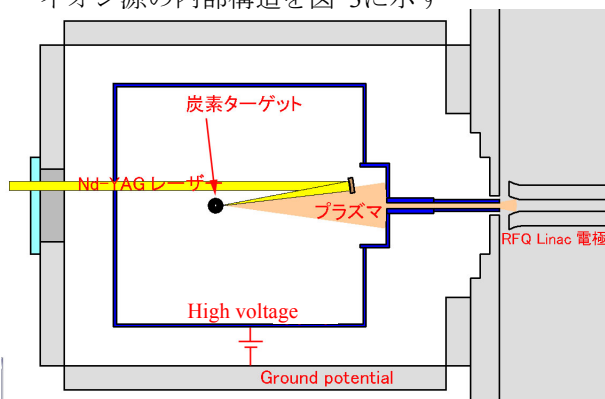


図3 レーザーイオン源

レーザーイオン源のドライバーとして波長1.06 μ m、FWHM 15ns、エネルギー400mJのNd-YAGレー

ザーを使用した。このレーザーは図3の左側の窓から入射しチャンバー内部に設置した集光ミラーで炭素ターゲット上に集光される。その集光点でレーザープラズマが発生し、そのプラズマはRFQ Linacに向かって飛行していく。図で示したように、高電圧の部分をストック状にして伸ばすことによりRFQ入射部まで高電圧部を伸ばしている。ここではじめてビームが引き出される。

図には描かれていないが、炭素ターゲットは3次元マニピュレーターによって動かすことができ、レーザー1ショットごとに常に新しい面が供給されるよう動く。

イオン源には C^{4+} を加速する際は60kV、 C^{6+} では40kVが印加されるが、この高電圧部分の周りをグラウンド電位の板で囲み、碍子と真空中で絶縁することによって高電圧部が外側に現れない構造となっている。これより、高電圧部との放電を避けるための絶縁距離を周囲に要しない真にコンパクトなイオン源を実現した。真空機器等も高電圧部に接続する必要がない。

本実験の予備実験としてイオン源のみのテストベンチのレーザープラズマ特性計測実験を行ったが、その結果からもっとも高価数のイオン分布に最適化した場合、ピーク値で C^{6+} 、 C^{5+} 、 C^{4+} がそれぞれ約47%、39%、14%のとなることがわかっている^[5]。本実験においてもこの最も高価数のイオン分布になるよう最適化した条件で実験を行った。

・ RFQリアック

Direct injection schemeでは10mA超の大電流加速の実現を目標としており、これを実現するには大電流加速可能なRFQ Linacでなければならない。 C^{4+} で100mA加速を目標値とした4 rod型RFQ linacをフランクフルト大学と共同で開発した。

Frequency	100 MHz
Total length	2.0 m
Input energy	0.240 MeV
Output Energy	1.2 MeV
Modulated vane length	1.42m
Limit of intervane voltage	120 kV
I_{out} at 100 mA C^{4+} in	76 mA
Saturated I_{out} , C^{4+} only	155 mA
I_{in} for saturated I_{out}	~300 mA
Acceptance	0.14 cm.rad
Aperture	0.655 cm

表1 4rod RFQ Linacのパラメーター

出射エネルギーを100keV/uとしたため電極のモジュレーションがついているところは全長2mのうち1.42mの部分で、残りはモジュレーションがついていない。このモジュレーションなしのところではRFQリアックでバンチされたビームがデバンチされる。

RFQリアックを出た直後にファラデーカップ

が設置しており、そこで加速された全電流を計測する。

RFQリニアックを駆動する電源は放射線医学総合研究所の100MHz、1MWのアンプシステムを使用した。

4. ビーム加速実験

C^{6+} の加速条件に合わせるためにイオン源に印加する電圧を40kV(20keV/u)にして加速器に投入する電力と加速ピーク電流の変化を調べた。

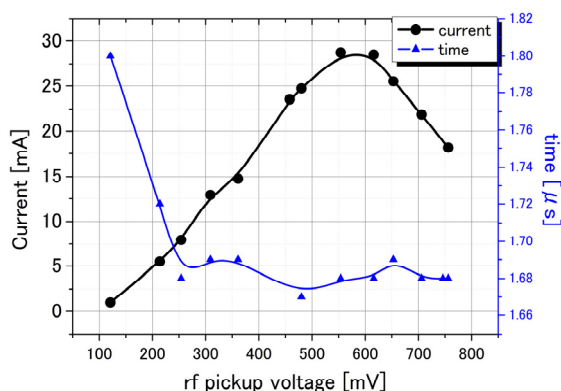


図 4 投入電力を変化させた時のピーク時の加速ビーム電流変化とファラデーカップにおける信号の到着時間

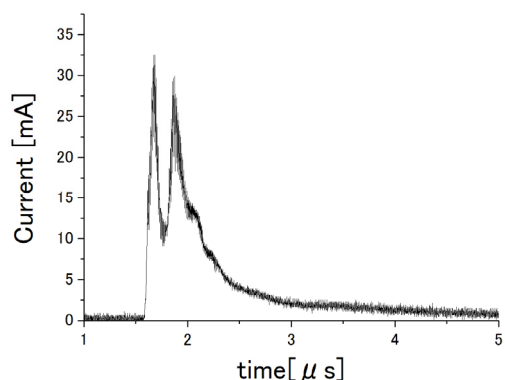


図 5 pickup voltage 554mVの時の加速電流波形

図 4からわかるように投入電力を増加させるにつれて加速電流値が増加し、600mV以降は減少する。

図 5は最も加速電流値が得られた時の加速電流波形である。

入射エネルギーは C^{6+} を加速する条件に合わせた。この条件でも C^{5+} 、 C^{4+} を加速することが可能なため、図 5の波形は C^{6+} 、 C^{5+} 、 C^{4+} が混在している波形となっている。

図 4で信号の到着時間が0~250mVまでは急激に早まり、その後はほぼ一定を示している。すなわち0~250mVまでは加速に要する電圧が足りないためビームが加速が不十分であり、250mVより電圧が強

い時は加速条件に適合した C^{6+} 、 C^{5+} 、 C^{4+} がそれぞれ加速されていると予想できる。

従って本実験では C^{6+} 、 C^{5+} 、 C^{4+} が混在したビームであるが29mV大電流のビーム加速に成功した。

4. まとめと今後の予定

大電流・高価数の炭素ビーム加速を実現するためにNd-YAGレーザーイオン源とRFQ線形加速器を組み合わせてDirect injection schemeによって加速実験を行った。

投入電力を変化させてRFQ直後のファラデーカップで加速電流を計測することにより、29mAのビーム加速に成功したことを確認した。

今後はエネルギー・価数分析により目的である C^{6+} の加速電流値・加速エネルギーを明らかにし、加速条件の最適化を行う。

参考文献

- [1]Design Study of RFQ Linac for Laser Ion Source", M.Okamura, T. Takeuchi, T. Katayama, and K. Sawada, Proceedings of EPAC2000 (7th European Particle Accelerator Conference A Europhysics Conference), p.848.
- [2]Simulation of Direct Injection Scheme for RFQ Linac, M. Okamura, T. Katayama, R. A. Jameson, T. Takeuchi, T. Hattori, Review of Scientific Instruments, 73-2 (2002)761-763
- [3]Acceleration of Heavy Ion Beams by means of Direct Injection into RFQ Linac, T. Takeuchi, T. Katayama, M.Okamura, K. Yano, A. Sakumi, T. Hattori, and R. A.Jameson, Review of Scientific Instruments, 73-2 (2002)761-763
- [4]Measurement of Laser Plasma Property for Direct Plasma Injection Method to RFQ Linac on RIKEN Laser Ion Source, T. Takeuchi, T. Katayama, T. Nakagawa, M. Okamura, K. Yano, A. Sakumi, S. Ozawa, S.Kondrashev, N. Mescheryakov, and B. Sharkov, Review of Scientific Instruments, 73-2 (2002) 767-769
- [5]Nd-YAG laser ion source for direct injection scheme, H. Kashiwagi, T. Hattori, N. Hayashizaki, K. Yamamoto, Y. Takahashi, and T. Hata M. Okamura, R. A. Jameson, and T. Katayama N. Mescheryakov Review of Scientific Instruments, 75-5 (2004) 1569-1571