

HIGH CURRENT HEAVY ION BEAM ACCELERATION USING DPIS

M. Okamura^{1,A)}, K. Yamamoto^{A)}, J. Takano^{A)}, R. A. Jameson^{A)}, H. Kashiwagi^{B)}, T. Hattori^{C)}, N. Hayashizaki^{C)}, Y. Iwata^{D)}, K. Noda^{D)}, T. Fujimoto^{E)}, S. Shibuya^{E)}

^{A)} RIKEN, Wako-shi, Hirosawa, Saitama, 351-0198

^{B)} JAERI, Takasaki-shi, Gunma

^{C)} TIT, NIRS, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

^{D)} NIRS, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba

^{E)} AEC, Inage, Chiba, Japan

Abstract

Laser ion source (LIS) injectors followed by a RadioFrequency Quadrupole (RFQ) accelerator are being developed at several institutes for accelerator or industrial applications. We have demonstrated the feasibility of a direct injection method using an existing, not optimized, RFQ at the Tokyo Institute of Technology (TIT). A new RFQ and LIS chamber were just constructed that were optimized for at least 100 mA total C4+ current. Using this system we obtained more than 40 mA of Carbon beam from the system.

1. はじめに

LHC[1,2]やRHICなどの大型加速器用として高強度多価電子数重イオン発生源の研究が近年活発に行われている。このようなイオン源としてEBIS、LIS、MEVA等があるが我々グループではLISの持つ非常に高いプラズマ密度を有効に利用する方法について研究を行ってきた[3,4,5,6]。

レーザービームを固体表面に照射し、プラズマを発生させると、このプラズマは固体表面と垂直方向に数百eVの速度を持って断熱膨張を行なう。一般的なLISではこのプラズマが100%程度の運動量分布を持っている事を利用し必要とされるパルス幅が得られる程度までドリフトさせた後、引きだし電極を設置しLEBTに接続することになる。このドリフト距離は10 μ 秒程度を得るためには約2m程度が必要となり、引きだし電極開口部を通過する事のできる立体角は非常に小さいものになってしまう。また引き出されたイオンビームは多価荷電子数である事、引きだし電圧に制限がある事、粒子数がECR等と比較して大きくmAクラスである事などからLEBT領域で深刻なビームロスを生じ、これを克服する事は大変困難であった。

このLEBTでのビームロスを防ぎ、レーザープラズマの持つ本来の高密度性を有効に利用する為に開発したのがRFQ型線形加速器へのレーザープラズマ直接入射方(Direct Plasma Injection Scheme, DPIS)である。一般にRFQ線形加速器にビームを入射する際には収束ビームを用いる。これはRFQのビームアクセプタンスにビーム形状を適合させるだけでなく、LEBT内で十分大きなビーム径を保ち空間電荷効果によるビームロスを防ぐ目的もある。これに対して、DPISを利用した場合、非常にブ

ライトネスの高いビームを供給できるため、発散ビームを入射したとしてもRFQアクセプタンスの中心付近だけで十分な粒子数の多価ビームを供給することが可能となり、収束形状のビームを形成する必要がない。また、イオン源部分はRFQに隣接して設置されプラズマのままその膨張速度でRFQ入口まで輸送される。従ってLEBT内での空間電荷効果は無視することができる。しかも、イオン源部分にはマイクロ波や閉じ込め磁場を発生させる必要がないため、非常にコンパクトに設計が可能である。

このような特徴を持つDPISの原理実証を東京工業大学にある4ベイン型RFQによって2001年より行なった。この結果、最大ビーム電流9.2mAの炭素ビームを加速する事ができた。この電流値は東工大RFQで加速可能な電流量の計算上の限界値とほぼ達しており、さらに高電流に対応可能なRFQと組み合わせる事によって従来に無い高強度重イオンビームが得られる。このような高強度重イオン多価ビームは物理実験用大型加速器だけでなく医療、半導体など産業応用に対しても新たな可能性を提示するものである。

2. 高強度重イオン用RFQ

DPISの優位性をさらに確認するためには今までに無い高強度の重イオンビームを加速実証することが有効であると考えられる。そこで、ターゲット材料として取り扱いの簡単なイオン種である炭素を想定し、フランクフルト大学の協力を受けて高電流対応のRFQ線形加速器を開発した。

加速イオンは炭素4価と6価ビームを想定しており加速目標電流量は100mA(炭素4価)である。運動周波数は放射線総合医学研究所にある高周波電

¹ E-mail: mokamura@riken.jp

源を使用するため100MHzとした。RFQ内でのトランスバース方向の収束力は周波数が低い程有利である。共振構造はフランクフルト大学で長年に渡って熟成されてきた4ロッドタイプである。4ベインタイプに比べてこの共振構造は100MHz領域においても空洞直径が扱いやすいサイズとなる。また、加速電極の交換も容易であり、周波数分布の調整も比較的行ないやすいと言う特徴を持つ。加速ビームエネルギーは放射線管理の問題から核子あたり100KeVとした。入射エネルギーの設定は非常に重要である。DPISではRFQ入口付近にストロー状のプラズマ輸送パイプを設置する必要がある。この直径1cm以下のパイプは入射電圧にバイアスされているため、非常に放電が起きやすい。特に、加速電極との間の放電については予測する事が困難である。そこでプラズマ取出部分のみのテストを行いこの結果から60kVをバイアス電圧とした。これにより、炭素4価ビームの場合入射トータルエネルギーは240keVとなった。加速電極との放電を避けるためにプラズマ輸送パイプは簡単に位置調整が可能な構造となっている。図1に100MHz 4ロッド型RFQの全体図を示す。基本的な設計パラメータについては表1に示す。

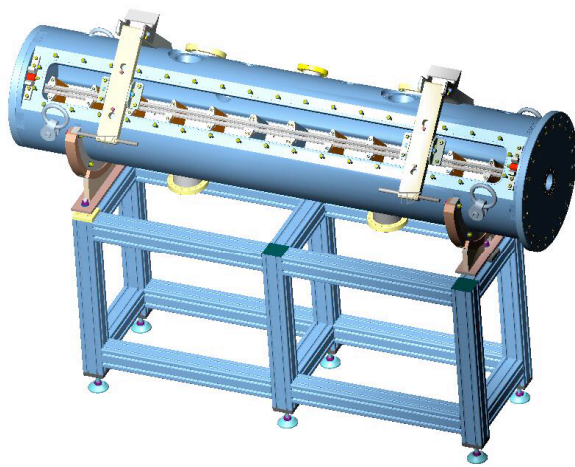


図1 4ロッドRFQ全体図

The RFQ was constructed by Prof. Dr. Alwin Schempp, Institute for Applied Physics, Goethe Universit Frankfurt, Frankfurt-am-Main, Germany

表1 RFQ基本パラメータ

Total Length	2.0 m
Vane Length of Modulated Area	1.42m
Frequency	100MHz
I_{out} at 100 mA C4+ in	76 mA
Acceptance	0.14 cm.rad
Aperture	0.655 cm ($\beta\lambda/3$)
Maximum voltage	120 kV
RF power	200 kW

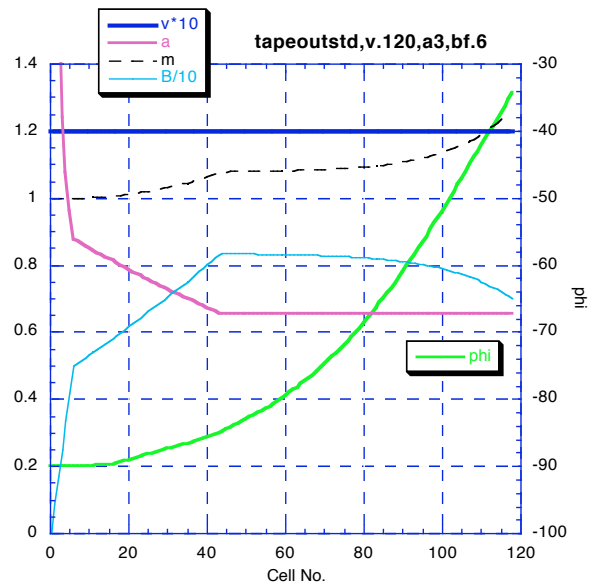


図2 ベインパラメータ

軌道計算は多種の電荷数のイオンを含むビームを同時にトラックすることが可能であり、時間積分をベースにしたコードであるPteq-HIを使用した。ベインパラメータの設計は主にアクセプタンスを最大化することを目標に行なった。RFQベインの長さは2mとしたが、前述の通り出射エネルギーを核子当り100keVとしたためベインに変調加工が行われている領域はベイン先端部分から142cmのところまででありその後の部分は無変調となっている。この結果、取り出されるビームはほぼ完全にコースティングビームとなる。これは非常に大きな空間電荷効果の影響を小さくする効果も狙ったものである。

3. プラズマ発生用レーザー

プラズマ発生用ドライバーレーザーとして炭酸ガスレーザーを使用する。このレーザーは最大発生エネルギーが8J程度であるが、実際炭素ターゲットに照射され、プラズマ発生に寄与するエネルギーは時間的分布を考慮した場合1.2JでFWHM85ns程度である。この場合の発生する炭素イオンの電荷数分布は4価が約50%、5価が35%、3価が15%と言う比率である。従ってこの3価から5価までのビームが入射される事になる。

4. イオン源チェンバー

イオン源部分、つまりプラズマ発生用固体ターゲットとそのプラズマが膨張する領域はRFQの入射電圧に応じて高電圧に保持される必要がある。バイアス電圧が60kVであることから大気中で絶縁を取る事は難しい。このため図3に示すように高压部分は完全に真空容器内に設置する構造とした。電

圧の導入も長さ30cmのテフロンスリーブを利用し、高圧部分は完全に外側から遮断された領域にある。プラズマ発生に必要なエネルギーはレーザービームによって全てイオン源に供給されるため、高圧防護のフェンスを設ける必要もなく、圧倒的に小型化された形状となっている。

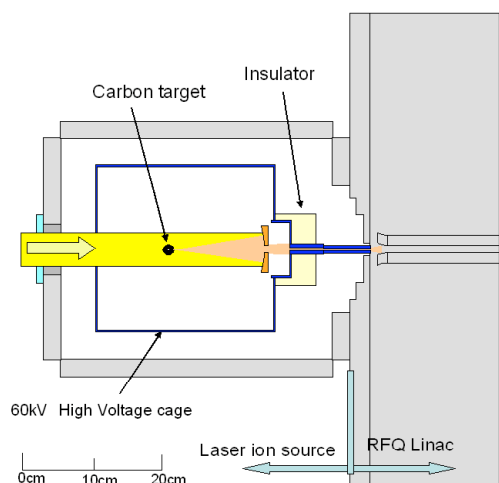


図3 イオン源チャンバー

チャンバー後方よりNaClウィンドウを2枚介してレーザービームが高電圧領域に導入され、凹面鏡でターゲットに集光される。ターゲット表面で発生したプラズマはRFQに向かって膨張し、導入パイプを通過したプラズマがRFQに入射される。

5. 加速試験

2004年6月に最初の加速ビームを観測する事に成功した。図4はRFQ直後のファラデーカップで計測した電流波形である。

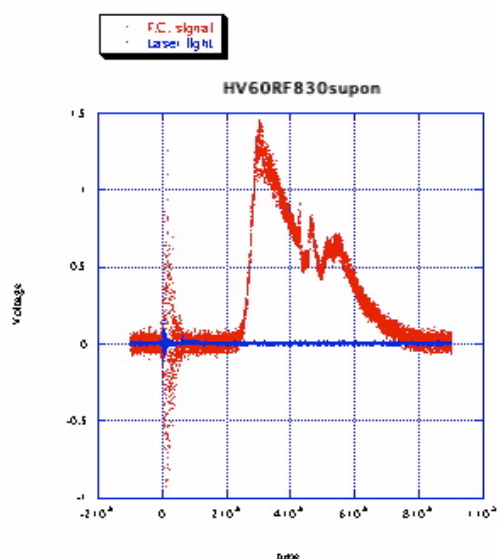


図4 加速電流

赤いプロットが電流値で、青いプロットが半導体検出器によるレーザーの照射波形である。測定された電流値はピークで25mAである。ファラデーカップの直前にステンレス製の金網がRFノイズを現象させる目的で設置されておりこの部分の透過効率は80%である。従ってピーク電流30mAを観測する事ができた。7月初週の時点で最高電流は40mAに達している。この時のプラズマ輸送パイプ内直径は4mmである。

6. 今後の展望について

今後、加速電流量を更に増やすべくイオン源部分の最適化作業を進める予定である。またアインツェルレンズをイオン引きだし直後に配置する構成や炭酸ガスレーザーに代わってNd-YAGレーザーをドライバーとして加速試験を行なう。これらを組み合わせる事によって炭素の6価イオンを高電流で発生することが可能となる予定である。

参考文献

- [1] CERN PS Laser Ion Source Development E, P. Fournier, et. al., Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999
- [2] Laser Source of Highly Charged Ions for ITEP Terawatt Accumulator Facility. S. Kondrashev, et. al., Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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