

## Simulation of beam injection by direct plasma injection scheme with beam extraction in an RFQ linac cavity

Hirotsugu Kashiwagi<sup>1,A)</sup>, Masahiro Okamura<sup>B)</sup>, Jun Tamura<sup>C)</sup>, Takeshi Kanetsue<sup>D)</sup>

A) Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency  
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma 370-1292

B) Collider Accelerator Department, Brookhaven National Laboratory  
Upton, NY 11973, USA

C) Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

D) Kyushu University  
744 Motoooka Nishi-ku Fukuoka 819-0395

### Abstract

An ion beam is extracted at the edge of RFQ linac cavity from a laser plasma in direct plasma injection scheme (DPIS). A simulation study has revealed that mismatch between injected beam emittance and RFQ linac acceptance takes place because an extracted beam diverges due to space charge effect from a beam extraction electrode to the RFQ acceleration electrodes of the RFQ linac. In order to avoid this problem we have proposed an improved DPIS, in which a beam is extracted in the cavity.

Beam injection to an RFQ linac was simulated. It was confirmed that the matching between injected beam emittance ellipse and acceptance ellipse was improved using DPIS with beam extraction in an RFQ linac.

## RFQ線形加速器空洞内ビーム引き出し直接プラズマ入射法 における加速器入射の計算

### 1. はじめに

直接プラズマ入射法は、高強度の重イオンビーム生成を目的とし、レーザーイオン源で生成する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飛行させ、RFQ線形加速器入射部直前でビームを引き出してビーム入射を行う方法である。

これまで、炭素4価ビームで最大電流38mA<sup>[1]</sup>、炭素6価ビームで17mA<sup>[2]</sup>の大強度ビーム加速が実証され、大電流重イオンビーム加速におけるDPISの有効性が実証されていたが、シミュレーションより、ビームが引き出された後、加速電極に到達するまでの間にビームが発散することによって、RFQ線形加速器のアクセプタンスと入射ビームとのマッチング低下し、ビーム損失を引き起こしていることがわかった<sup>[3]</sup>。

このビーム損失を低減するため、ビーム引き出しを加速器空洞内の加速電極先端部で行うことにより、ビームをプラズマから引き出した直後にRFQ線形加速器の四重極電場領域に入射する方法について研究を行っている。

加速器中にイオン源の電極を入れても加速器の共振周波数・電場分布の変化が無視できるほど小さく、加速器の性能を低下させないことを確認し、原理実

証実験としてアルミニウムイオンの加速実験を行い、従来型の直接プラズマ入射法に比べ、約20%のビーム電流増加が得られたことで本方法の有効性を確認した<sup>[4]</sup>。

本方法によるマッチングの向上を確認するため、本研究はレーザープラズマからのビーム引き出し・軌道計算を行い、イオン源から出射したビームと加速器のアクセプタンスのマッチングを従来型直接プラズマ入射法と加速器内引き出し法について比較を行った。

### 2. RFQ線形加速器内ビーム引き出し法

図1に本研究の加速器空洞内ビーム引き出しを用いたDPISの構成を示す。

基本的な構成は従来型のDPISと同様であり、RFQ線形加速器に低エネルギービーム輸送ラインを介さず直接レーザーイオン源が接続されている。レーザープラズマはレーザーイオン源のプラズマ電極先端までプラズマのまま輸送され、イオンビームが引き出される。

RFQ線形加速器は高周波四重極レンズに加速のためのモジュレーションをつけたビーム加速電極を持ち、発生する四重極電場によって、この電極間を進行するビームは強力なビーム集束力を受ける。

<sup>1</sup> E-mail: kashiwagi.hirotsugu@jaea.go.jp

従来型ではビームが引き出される場所は加速器端板内つまり、加速空洞の端であり、ビーム集束力が働かない場所である。つまり、引き出されたビームは集束力を受けずに加速電極領域まで進行する。

加速器内部引き出しでは加速内部でイオンビームを引き出す。加速器空洞内へのレーザープラズマの導入は、円筒チューブ型のプラズマ電極を高電圧のイオン源内部にその片端を固定し、もう片端を加速器内部まで挿入することによってイオン源と同電位の領域を加速器内部まで形成することで行う。つまりイオン源内部で発生したレーザープラズマは電場による力を受けることなく加速器内部の円筒電極先端まで進行する。従って、電極先端位置を加速電極開始部まで挿入した場合には、イオンビームは引き出された直後に加速器の集束力を受け、従来型における問題を回避できると考えられる。

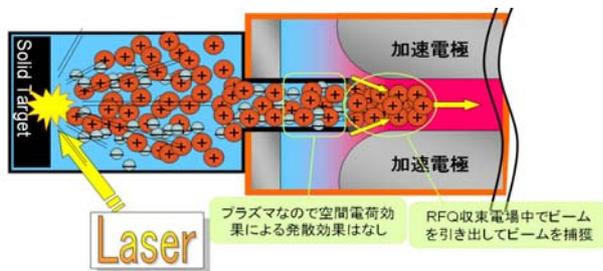


図1 RFQ線形加速器内ビーム引き出し法の概念図

### 3. 炭素プラズマからのビーム引き出しシミュレーション

#### 3.1 ビーム引き出し位置におけるイオン価数・電流量分布

ビーム引き出しシミュレーションに用いるプラズマの条件には、レーザープラズマの価数分布・電流量測定の結果を用いた。この測定ではグラフィート板をプラズマ発生ターゲットに用い、波長1.064 μm、パルス幅15ns、エネルギー400mJのNd:YAGレーザーをこのターゲット上に集光して照射しレーザープラズマを発生させ、電流量測定および価数分析することで、プラズマ発生部より400mmの位置での各荷数の電流量の時間分布を求めた。プラズマはターゲット上で発生した後、自身が持つ速度分布に従って空間内に膨張する。従ってプラズマ中のイオン電流量はプラズマ発生部からの位置によって異なるため、測定結果からビーム引き出し計算を行う位置におけるイオン電流量分布を求める必要がある。

プラズマ中のイオンの衝突・再結合が無いと仮定すると、イオンは初速度で等速直線運動を行う。プラズマ発生ターゲットがz=0のxy平面内にあり、プラズマがこのターゲット上のx=y=0の位置で時間t=0に発生したとする。プラズマ発生部からの距離L (z=L) でz軸上に中心を持つ直径Dの円を通過するイオン電流I(t)はイオンの速度分布をf(v<sub>x</sub>,v<sub>y</sub>,v<sub>z</sub>)とし、電流密度分布がこの直径Dの円内で一様だと仮定す

ると次式で表わされる。

$$I(L,t) = \text{密度} \cdot \text{電荷} \cdot z \text{ 方向速さ} \cdot \text{面積}$$

$$= \frac{f(0,0,\frac{L}{t})dv_x dv_y dv_z}{dv_x dv_y dv_z \cdot t^3} Ze \frac{L}{t} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

あるz方向速さをv<sub>z</sub>とすると、t=L/v<sub>z</sub>従って(0,0,v<sub>z</sub>)の速度のイオンが位置Lで検出される電流I(L)は

$$I(L) = \frac{f(0,0,v_z)}{L^3} Ze v_z^4 \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \propto L^{-3}$$

従ってL=L<sub>0</sub>の位置でのイオン電流密度をj<sub>0</sub>とすると

$$I(L) = j_0 \left(\frac{L_0}{L}\right)^3 \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

加速器内部ビーム引き出し法ではプラズマ発生部から300~310mm(加速器空洞端部~加速電極開始位置)において、φ6mmの円筒電極よりビームが引き出される。上式を用いて各計算位置でのイオンの電流量の時間分布を求めた。図2にL=300mmにおけるイオンの価数・電流量分布を示す。

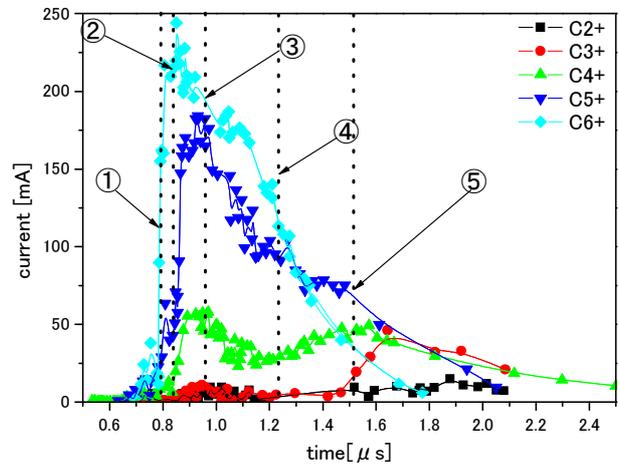


図2 プラズマ発生位置より300mmの位置でのφ6mmの領域における炭素プラズマのイオン価数・電流量の時間変化

図の点線はシミュレーションを行った箇所を示している。これは時間的に変動するビーム引き出し条件の代表的な時間として各価数の価数分布のグラフの極大値および極小値とその中間の点を主に選択したものである。横軸はレーザーが炭素ターゲットに照射した時を0sとした時にビーム引き出し部にレーザープラズマが到着した時間、縦軸は内径6mmのビーム引き出し電極におけるビーム電流量を表している。番号は図3と対応している。

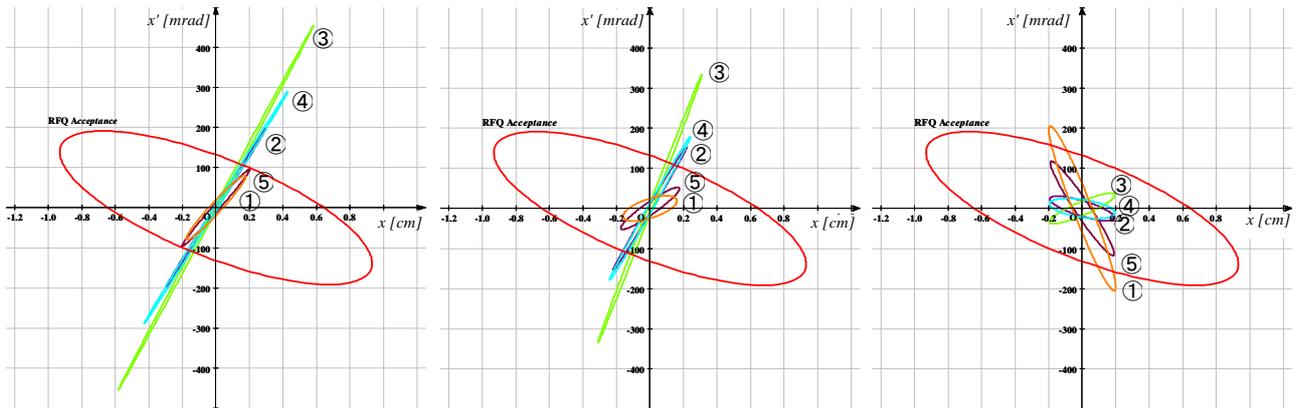


図3 RFQ加速電極 $z=310$ の位置における入射ビームエミッタンス楕円とRFQ線形加速器のアクセプタンスレーザープラズマを導くためのイオン源と同電位の円筒電極の先端位置がa)加速器空洞端( $z=300$ )mm b)加速器空洞内部に5mm挿入( $z=305$ )mm c)加速電極開始位置( $z=310$ )mm。番号は図2の番号と対応している。

### 3.2 ビーム引き出し計算によって求めた加速器への入射条件

図2に示した通りイオン電流量は時々刻々変化するるので、前節で求めたイオン電流量価数分布を時間的にスライスしてビーム引き出し計算を行い、RFQ線形加速器へ入射するエミッタンス楕円を求めた。

プラズマからのビーム引き出しの計算はイオン源からのビーム引き出しに広く用いられている計算プログラムであるIGUNを用いた。IGUNは、電子銃における電子軌道計算プログラムEGUNをベースにし、プラズマからの陽イオンビームの引き出し及び引き出されたビーム軌道を計算するプログラムである。

ビーム引き出し口でプラズマはRFQ線形加速器とイオン源間の電位差に起因する電場から力を受け、電子はRFQ線形加速器側には流出できず、イオンだけがプラズマの外側に引き出される。

プラズマ境界面におけるプラズマ密度制限イオン電流密度と空間電荷制限電流密度が等しいことからプラズマ境界面の位置を決定され、Ray Tracingによって空間電荷効果を含んだ引き出されたビームの軌道が決定される。

計算においては加速粒子を $C^{6+}$ とした。RFQ線形加速器の設計入射エネルギー $20\text{keV/u}$ に合わせるため、イオン源のターミナル電圧は $40\text{kV}$ である。プラズマ発生部から $300\text{mm}$ (従来型直接プラズマ入射法の電極先端位置)～ $310\text{mm}$ (電極先端位置が加速電極端部)の位置で $\phi 6\text{mm}$ の円筒電極より引き出されたビームのイオンがRFQ加速電極に入射するビームエミッタンス楕円を求めた。円筒電極先端位置が $300\text{mm}$ 、 $305\text{mm}$ 、 $310\text{mm}$ での計算結果を図3に示す。

従来型の直接プラズマ入射法である円筒電極先端位置が $z=300\text{mm}$ の場合は、イオンが引き出された後加速電極に到達するまでに拡散し、特に電流量が大きい場合は加速器のアクセプタンスから大きく外れた入射ビームエミッタンス楕円となっている。加速電極内に $5\text{mm}$ 挿入した電極先端位置 $z=305\text{mm}$ の場合においてはイオンが引き出されてから加速電極まで

の距離が短くなったため、ビームの広がりが抑制され、アクセプタンスとのマッチングが向上している。電極先端位置を加速電極開始位置に一致させた $z=310$ の場合にはビームが引き出された直後に加速電極に到達するためビームが広がる前に入射し、加速器のアクセプタンスとのマッチングがさらに向上している。

ビームが引き出されるプラズマとイオンの境界面の形状は凹面状であるが、その後イオンは空間電荷効果によって発散力を受け、発散ビームつまり、位置と角度が同符号の位相平面上の第1・第3象限に長軸を持つ楕円として広がる。しかしRFQ線形加速器のアクセプタンスは第2・第4象限に長軸を持つ楕円であり、引き出されてから加速電極入射するまでの距離が長いほど、空間電荷効果の広がりが顕著に表れ、アクセプタンスとのマッチングが低下する。一方引き出された直後に加速電極に入射する場合は、空間電荷効果によるビームの広がりが表れる前に入射するため、プラズマ-イオンの境界面の形状を反映した分布になり、アクセプタンスとのマッチングが向上したと考えられる。

### 参考文献

- [1] H. Kashiwagi et al. "Acceleration of high current fully stripped carbon ion beam by direct injection scheme" Rev. Sci. Instrum. 77, 03B305, 2006
- [2] M. Okamura et al "High current carbon beam production with direct plasma injection scheme" Rev. Sci. Instrum 77, 03B303, 2006
- [3] H. Kashiwagi et al., "Study of the Beam Pulse Shape by DPIS for High Intensity Heavy Ion Beam Acceleration" Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 570 (2006).
- [4] H. Kashiwagi et al., "Direct plasma injection scheme with beam extraction in a radio frequency quadrupole linac cavity" Rev. Sci. Instrum, 79, 02C716(2008).