

Measurement of RF properties for beam extraction in an RFQ linac

Hirotsugu Kashiwagi^{1,A)}, Masahiro Okamura^{B)}, Jun Tamura^{C)}, Junpei Takano^{D)}

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) Accelerator division 1, Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Direct Plasma Injection Scheme (DPIS) is a beam delivering arrangement into an RFQ linac to produce a high current heavy ion beam. In DPIS an ion beam is extracted from a laser plasma at an edge of an RFQ linac cavity.

The simulation study has revealed that a mismatch between the injected beam emittance and the RFQ linac acceptance takes place because the extracted beam diverges due to space charge effect from the beam extraction electrode to the acceleration electrodes of the RFQ linac. This causes a lot of beam loss especially at high beam current.

In order to avoid this problem we have proposed a new scheme, in which the beam feels the radio frequency (rf) focusing field just after extracted at the entrance of the acceleration electrode in the RFQ linac cavity.

It is required to avoid serious effect on the rf characteristics because the positively-biased beam extraction electrode is inserted in the accelerator resonant cavity in this scheme.

The rf property was measured using a network analyzer to verify the effect. It was found that the insertion of the extraction electrode had very little effect on the resonant frequency and the Q value.

RFQ線形加速器空洞内ビーム引き出しのための高周波特性測定

1. はじめに

レーザーイオン源はあらゆる固体物質をイオン化でき、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長がある。

高価数のイオンは低価数のイオンに比べ、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、空間電荷効果が非常に強いために、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 Beam Transport : 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。

我々はこの問題を解決するために、レーザープラズマをプラズマのまま加速器まで輸送して加速器に入射する、直接プラズマ入射法 (Direct Plasma Injection Scheme (DPIS)) 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^[1-5]。

これまで、炭素4価ビームで最大電流38mA、炭素6価ビームで17mAの大強度ビーム加速を実証し、大電流重イオンビーム加速におけるDPISの有効性を実験的に証明した^{[6][7]}。

しかし、ビーム加速実験の解析により、ビームを引き出す位置である空洞端部から加速器の集束力が

働く電極部までの空間をビームが進行する間にビームが広がることによって、線形加速器のアクセプタンスとビームのエミッタンスのマッチングが悪化し、ビーム損失を引き起こすことを明らかになった^[8]。

本研究では、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に捕獲させ、ビーム損失を低減することを目的としている。

加速器内部でプラズマからのビーム引き出しを行うためには、加速器内部までプラズマを導くために、通常加速器外部にあるイオン源のプラズマ電極 (イオン源本体と同電位の電極) を加速器内部に設置する必要がある。しかし、共振空洞内に導体であるプラズマ電極が存在すると電磁場に影響を与え、空洞の高周波特性を変化させ、加速器の加速特性に影響を与えることが懸念される。

本研究ではこのプラズマ電極が加速器の高周波特性に及ぼす影響を測定し、加速器空洞内にプラズマ電極を設置することが可能かを検証した。

¹ E-mail: kashiwagi.hirotsugu@jaea.go.jp

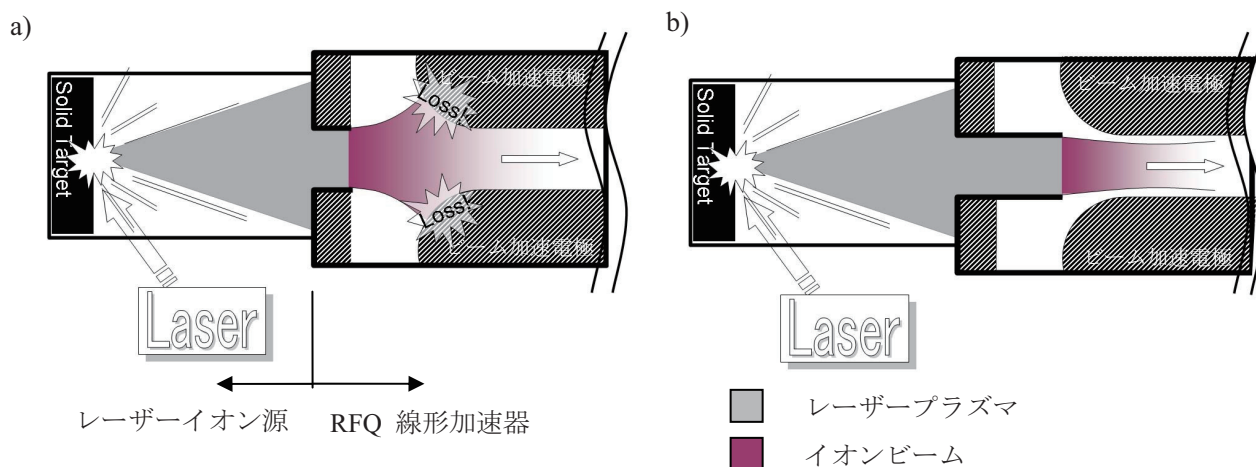


図1 従来型DPIS(a)と加速器内部引き出しDPIS(b)の概念図

2. RFQ線形加速器内ビーム引き出し法

図1に従来型のDPISの構成と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。

a, b 共に基本的な構成は同様であり、RFQ線形加速器にLEBT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もち、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。

従来型(図1-a)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。その結果、ビーム加速電極領域に到達する前に、空間電荷効果とイオンビーム引き出し境界形状の効果によってビームが拡散し、入射するビームのエミッタンス形状と加速器のアクセプタンス形状とのミスマッチを引き起こし、大量のビーム損失を引き起こす原因となっている[8]。

加速器内部引き出し(図1-b)ではプラズマ電極を加速器内部に設置することによって、加速電極端でイオンビームを引き出す。従って、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。

2. 高周波特性測定

2.1 測定方法

次に示すRFQ線形加速器と可動式プラズマ電極を備えたレーザーイオン源を用い、加速器の電力

入力カップラー及びピックアップにネットワークアナライザーを接続し、プラズマ電極を加速器内で移動させながら、高周波特性の変化を測定した。

・RFQ線形加速器

DPIS用に開発された炭素4価を100mA加速することができる4ロッド型大電流重イオンRFQ線形加速器を用いた。表1にこの加速器のパラメーターを示す。空洞端から加速電極開始部までの距離は10mmである。

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
Acceptance	0.14 cm.rad
Aperture	0.655 cm

表1 4rod RFQ線形加速器のパラメーター

・レーザーイオン源

レーザーイオン源で発生したプラズマをRFQ線形加速器内に輸送するには、高電圧ステージから加速電極先端まで伸びた外径8mm、内径6mmの円筒型のプラズマ電極を用いた。その内部はイオン源と同電位の電場がない領域であり、プラズマからイオンが引き出されることなく輸送される。

この電極は可動式であり、電極の空洞内への挿入距離を変化させることができる。

2.2 結果と考察

高周波特性の計測結果を表2に示す。

プラズマ電極を加速器端板内部から加速電極先

端まで変化させて共振周波数・及びQ値を計測した。電極挿入距離は加速器空洞共振器の端を0mmとし、加速電極側へ正方向をとった。加速電極入射側端と共振器端との距離は10mmである。

電極挿入距離[mm]	共振周波数 [MHz]	Q 値
-4	100.179	2028
-3	100.179	2029
-2	100.179	2026
-1	100.179	2026
0	100.179	2026
1	100.1785	2026
2	100.1782	2026
3	100.1778	2025
4	100.1775	2028
5	100.177	2022
6	100.1768	2023
7	100.1762	2025
8	100.1753	2028
9	100.1748	2032
10	100.1742	2025

表 2 電極挿入距離と高周波特性の関係

端板内では電磁場がほとんど存在しないため、プラズマ電極を移動させても共振周波数は変化しなかったが、電磁場が存在する共振器内部に入ると徐々に減少した。共振周波数 f は $(LC)^{-1/2}$ (L :インダクタンス、 C :キャパシタンス)に比例するが、プラズマ電極を加速電極に近づけることによって C が増加し、 f が減少したと考えられる。Q値については特に規則性は見られなかった。

共振周波数の変化は約5kHz、 $\Delta f/f_0 \approx 0.005\%$ であり、Q値についても変化率は0.5%未満であった。従って、挿入電極の加速器の高周波特性への影響は無視できる程小さく、プラズマ電極を加速空洞内に設置することが可能であることが確かめられた。

参考文献

- [1] M.Okamura et al., "Design Study of RFQ Linac for Laser Ion Source", Proceedings of EPAC2000 (7th European Particle Accelerator Conference A Europhysics Conference), p.848.
- [2] M. Okamura et al., "Simulation of Direct Injection Scheme for RFQ Linac", Review of Scientific Instruments, 73-2 (2002)761-763
- [3] T. Takeuchi et al., "Acceleration of Heavy Ion Beams by means of Direct Injection into RFQ Linac", Review of Scientific Instruments, 73-2 (2002)761-763
- [4] T. Takeuchi et al., "Measurement of Laser Plasma Property for Direct Plasma Injection Method to RFQ Linac on RIKEN Laser Ion Source", Review of Scientific Instruments, 73-2 (2002) 767-769
- [5] H. Kashiwagi et al, "Nd-YAG laser ion source for direct injection scheme", Review of Scientific Instruments, 75-5 (2004) 1569-1571
- [6] H. Kashiwagi et al. "Acceleration of high current fully stripped carbon ion beam by direct injection scheme" Rev. Sci. Instrum. 77, 03B305, 2006
- [7] M. Okamura et al "High current carbon beam production with direct plasma injection scheme" Rev. Sci. Instrm 77, 03B303, 2006
- [8] H. Kashiwagi et al., Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 570 (2006).