

平成21年 6月12日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760661
 研究課題名（和文） RFQ 収束電場中でのイオン引き出し法による大電流重イオンビーム加速に関する研究
 研究課題名（英文） High current heavy ion beam acceleration with beam extraction in an RFQ linac
 研究代表者
 柏木 啓次 （KASHIWAGI HIROTSUGU）
 日本原子力研究開発機構 放射線高度利用施設部 研究職
 研究者番号：30391303

研究成果の概要：大電流重イオンビーム加速を実現するため、レーザープラズマからの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方法について研究を行った。加速器空洞内にイオン源のプラズマ電極を設置することによる加速器空洞特性に与える影響は無視できるほど小さいことを明らかにした。ビーム引き出し計算により従来方式に比べて加速器へのビーム入射が高効率となることを明らかにした。ビーム加速実験を行い、従来方式よりも高強度のビーム加速を実証することで本方法の有効性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	300,000	0	300,000
2007年度	2,400,000	0	2,400,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	180,000	3,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：イオン源、加速器、イオンビーム、ビーム引き出し、重イオン、直接プラズマ入射法

1. 研究開始当初の背景

(1) 重イオン癌治療装置や物理実験用大型シンクロトロンにおいては、従来用いられてきたイオン源では生成イオン電流量が圧倒的に不足しているため、原理的に新しい重イオン発生装置が必要と考えられており、レーザーイオン源等の高強度イオン源を用いたビーム加速の研究が世界中で行われている。

(2) 高強度イオンビームは、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においてビームが発散し、ビームロスが著しい。

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によって高価数・大電流の輸送と加速を実現する研究がおこなわれ、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された。これにより大電流重イオンビーム加速における直接プラズマ入射法の有効性が実験的に証明された。

しかし、ビームを引き出す位置である空洞先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、ビーム損失を引き起こされたことが明らかになり、このビーム損失を低減することがさらなる大強度重イオンビーム加速に向けて求められていた。

2. 研究の目的

従来型の直接プラズマ入射法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、空間電荷効果によってビームが拡散し、大量のビーム損失を引き起こす原因となっている。

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。

3. 研究の方法

(1) イオン源のプラズマ電極を加速器空洞内に設置した際の加速器空洞に及ぼす影響を明らかにするため、加速器内に電極を設置し、ネットワークアナライザを用いて空洞特性を表す共振周波数及びQ値の測定を行った。

(2) 本方法によって加速器へのビーム入射が高効率でなされること検証をプラズマからのビーム引き出し計算によって行った。

(3) 本方法の有効性を検証のためビーム加速実験を行った。

4. 研究成果

(1) イオン源のプラズマ電極を加速器空洞内に設置した際の加速器空洞に及ぼす影響を明らかにするため、プラズマ電極先端位置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値を計測した結果を図1に示す。

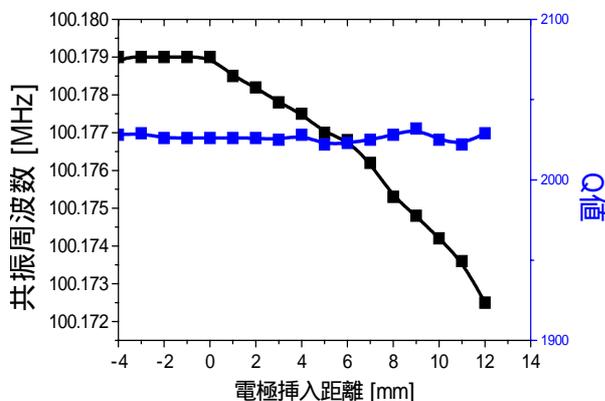


図1 加速器内部への電極挿入距離と高周波特

性の関係

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。

加速器空洞外の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につれて徐々に減少した。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。

(2) プラズマからのビーム引き出し計算を行い、加速器へのビーム入射について従来方法と本方法で比較した。

従来型の直接プラズマ入射法であるプラズマ電極先端位置が加速器空洞端の場合は、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た。加速電極内に5mm挿入した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、ビームの広がり抑制され、アクセプタンスとのマッチングが向上していた。電極先端位置を加速器空洞内の加速電極開始位置に一致させた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た。

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。

以上のことにより加速器内ビーム引き出しによって、従来よりも加速器のアクセプタンスと入射ビームエミッタンスとの整合が向上し、加速器へのビーム入射が高効率化することを明らかにした、

(3)本方法の有効性を実証するため、ビーム加速実験を行った。

異なるプラズマ電極位置において、ビーム引き出し電圧を変化させた時の加速ビームピーク電流の変化を図2に示す。

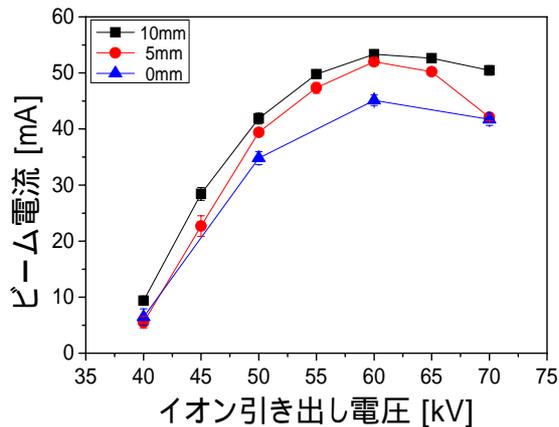


図2 加速器内部へのプラズマ電極挿入距離0mm, 5mm, 10mmにおいてビーム引き出し電圧を変化させた時の加速器直後のビームピーク電流の変化

直接プラズマ入射法により、数十ミリアンペアの大強度重イオンビーム加速がされていることがわかる。

ビーム引き出し電圧を増加させるとビーム電流が増加し、いずれの電極位置においても60kVで最大値となっている。これは加速器の運転条件を $Q/A=1/3$ のイオン加速用にしたため、 $27A19+(Q/A=1/3)$ が60kVで加速器の入射エネルギーの20keV/uとなるためである。

いずれのビーム引き出し電圧においても、電極位置がRFQ電極に近いほどビーム電流が高い。60kVの引き出し条件で10mmでは従来方式に比べ約1.2倍ビーム電流が増加した。

従って、従来方法に比べ入射したイオンビームが高効率で捕獲・加速されることが実証され、本方法の有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

①Hirotsugu Kashiwagi, Masahiro Okamura, Jun Tamura, Takeshi Kanetsue, Simulation of beam injection by direct plasma injection scheme with beam extraction in an RFQ linac cavity, Proceedings of the

5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, 5, 2008, 509-511, 査読無

②Hirotsugu Kashiwagi, Masahiro Okamura, Jun Tamura, Junpei Takano, Direct plasma injection scheme with beam extraction in a radio frequency quadrupole linac cavity, Review of Scientific Instruments, 79, 02C716.1-02C716.4, 2007, 査読有

③Hirotsugu Kashiwagi, Masahiro Okamura, Toshiyuki Hattori, R. A. Jameson, Kazuo Yamamoto, Tetsuya Fujimoto, Tomihiro Kamiya, Study of the Beam Pulse Shape by DPIS for High Intensity Heavy Ion Beam Acceleration, Proceedings of the 3th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, 3, 2006, 570-572, 査読無
[学会発表] (計1件)

Hirotsugu Kashiwagi, Masahiro Okamura, Jun Tamura, Junpei Takano, Measurement of RF properties for beam extraction in an RFQ linac, 第4回加速器学会, 2007

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: イオンビーム引出加速方法及び装置

発明者: 柏木 啓次、岡村 昌宏

権利者: 独立行政法人 日本原子力研究開発機構

種類: 特許

番号: P09A014512

出願年月日: 平成19年7月31日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏木 啓次 (KASHIWAGI HIROTSUGU)

日本原子力研究開発機構 放射線高度利用施設部 研究職

研究者番号: 30391303

(2) 研究分担者

なし

(2) 連携研究者

なし