

Study of the Beam Pulse Shape by DPIS for High Intensity Heavy Ion Beam Acceleration

Hirotsugu Kashiwagi^{1A)}, Masahiro Okamura^{B)}, Toshiyuki Hattori^{C)}, R. A. Jameson^{B)}, Kazuo Yamamoto^{D)}, Tetsuya Fujimoto^{E)}, Tomihiro Kamiya^{A)}

A) Takasaki radiation chemistry research institute, Japan Atomic Energy Agency

1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma 370-1292

B) RIKEN

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

C) Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Ookayama, 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

It was proved experimentally that the DPIS was the successful scheme for the production of high current heavy ion beam [1][2]. However the accelerated beam pulse shape was not studied in detail because the simulation method for DPIS had not been established.

To clarify the relation between the beam pulse shape from the laser ion source and the accelerated beam pulse shape, two kinds of simulation studies were done. One is ion extraction simulation from the measured plasma property, the other is beam acceleration simulation from the ion extraction results.

The extraction simulation revealed the time variation of the beam parameter at the injection region of RFQ linac. The beam acceleration simulation successfully reproduced the shape of the accelerated beam and the relation of the two pulses was made clear. It was found that mismatch occurred between the injected beam and the RFQ linac at the high current region.

大強度重イオンビーム加速のための直接プラズマ入射法における 加速ビーム波形の考察

1. はじめに

直接プラズマ入射法(DPIS :Direct Plasma Injection Scheme)は、レーザーイオン源とRFQ線形加速器を直接接続することによって、大強度の重イオンビームを生成することを目的とした、イオン源から加速器へのビーム入射方法である。

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の有効性が実験的に証明されている[1][2]。

だが一方、DPISによる加速ビーム波形とイオン源から出射するビームの波形が異なる原因は不明である、という問題がある。

これまでDPISのシミュレーション手法が確立されていなかったため、DPISの加速ビーム波形や加速電

流値の予測を行うことができず、この原因を説明することができなかった。

本研究ではDPISのシミュレーション方法を検討し、実際の実験データと比較することで、シミュレーション方法の有効性の証明及び加速ビーム波形の形状の原因解明を行った。

2. DPISのシミュレーション方法

DPISにおいてはレーザーイオン源で生成されるレーザープラズマをプラズマのままRFQ線形加速器まで輸送する。加速器空洞端部でプラズマからイオンビームが引き出され、直ちに加速器内部に入射され、加速が行われる。加速波形を解明する本研究においては、このDPISシステム全体をレーザーイオン源部・ビーム引き出し部・RFQ線形加速器による

¹ kashiwagi.hirotsugu@jaea.go.jp

ビーム加速部の3つの部分に分けて解析を行った。
(図1)

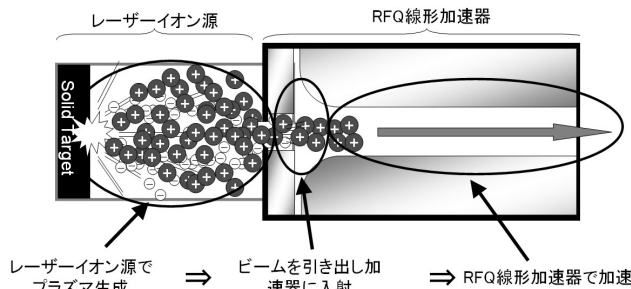


図1 DPIS概念図及びDPISの加速ビーム解析に用いた3つの領域。

レーザーイオン源で生成されるプラズマは実測データを用い、そのプラズマからのビーム引き出しをビーム引き出しシミュレーションコードIGUN[3]で行った。

ビーム加速計算は、DPISに対応して開発されたRFQ線形加速器のビーム加速シミュレーションコードであるpteqHIを用いた。加速器へのビーム入射条件はIGUNによるシミュレーションの結果を用いた。

レーザーイオン源で発生するプラズマは時々刻々変化するため、レーザープラズマパルスを時間的にスライスしてそれぞれを初期条件としてシミュレーションを行い、それらの結果を再構成して最終的な加速ビーム波形を求めた。

本論文ではレーザーエネルギー6.4J、波長10.6μm、パルス幅85 ns (FWHM) のCO₂レーザーをレーザーイオン源のドライバーとして用いた加速実験について考察を行った結果を報告する。

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

ビーム引き出しシミュレーション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る。この測定はプラズマ発生部から距離 3.1m で行われた。加速実験においてはプラズマ発生部からビーム引き出し領域までは 0.3m であるため、スケーリング則 (1) [4]

$$j_s \cong j_0 \left(\frac{L_0}{L_s} \right)^3 \quad (1)$$

(j_s は距離 L_s における電流密度、 j_0 は距離 L_0 における電流密度)

を用いて測定結果を加速実験の時の条件に換算した。図2にその結果を示す。

図2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、極小値また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 RFQ 線形加速器入射部 (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 φ 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。

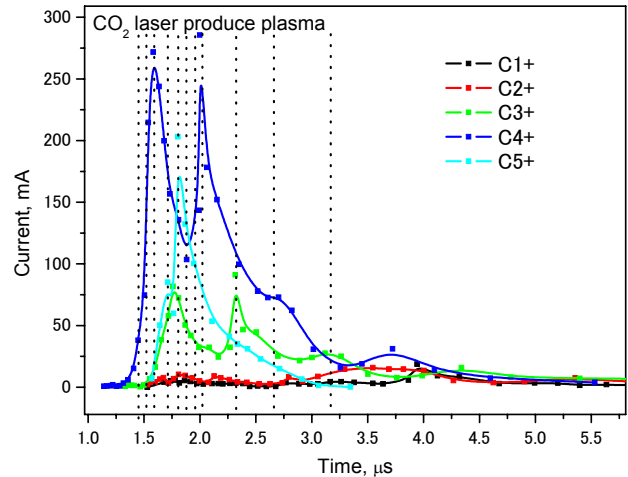


図2 RFQ 線形加速器共振器空洞に入射するレーザープラズマの価数分布の時間変化。空洞入射部でこのプラズマからビームを引き出し、加速電極へ入射する

このプラズマの価数分布・電流量を用いてビーム引き出し計算を行い、RFQ 線形加速器の加速電極開始部におけるビームの twiss パラメーターを求めた。

Time [μs]	α	β [cm]	ϵ_{rms} [cm · rad]
1.44	0.218	3.81	3.75×10^{-3}
1.52	-2.74	7.83	4.54×10^{-3}
1.59	-9.34	15.6	4.79×10^{-3}
1.7	-10.4	17.0	4.69×10^{-3}
1.8	-17.9	26.2	4.24×10^{-3}
1.88	-7.87	13.9	4.86×10^{-3}
1.95	-7.57	13.5	4.84×10^{-3}
2.01	-16.5	24.4	4.35×10^{-3}
2.32	-6.20	11.8	4.89×10^{-3}
2.67	-1.72	6.29	4.66×10^{-3}
3.16	-0.530	5.26	2.99×10^{-3}

表1 IGUN によって求めた RFQ 線形加速器加速電極開始部におけるビームの twiss パラメーター。

その結果、電流量が比較的少ないパルス立ち上がりや立ち下りのすその部分(1.44 μ s, 3.16 μ s)は、電場の収束効果が効果的に働き、ビームがほとんど発散せずに RFQ 線形加速器に入射していることが明らかになった。一方、電流量が多くなるにつれて電場の収束効果よりもビームの空間電荷効果が強力に働き、RFQ 線形加速器へは発散ビームとして入射していることが明らかになった。

4. ビーム加速シミュレーション及び考察

表 1 示した加速電極開始部におけるビームの twiss パラメータを入射ビームの条件としてビーム加速シミュレーションを行った。

図 4 にビーム加速実験結果とシミュレーションで求めた加速ビーム波形を示す。加速されたビーム波形が計算によって再現されており、シミュレーション方法が有効であることがわかる。

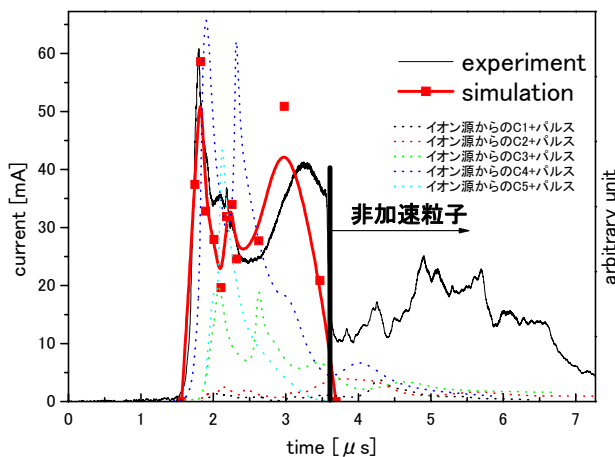


図 4 ビーム加速実験結果とシミュレーションで求めた加速ビーム波形、加速波形及び加速波形に対応した入射ビームの価数分布。

グラフは二重 Y 軸グラフであり、左 Y 軸に対応しているのは、加速計算結果、加速ビーム計測結果、右側 Y 軸に対応しているのは入射ビームの各価数の時間分布のグラフである。入射ビームの時間(横軸)は加速後の時間に対応している。時間の原点は図 2 と同様

2つのグラフ共にイオン源からのビームパルスのピークと加速ビームのピークは一致せず、イオン源のビームパルスがピークの時、加速ビームパルスは谷になっている。この理由を以下に考察する。

第 2 節で明らかになったように、プラズマの電流は時間的に変化するため、加速器へのビームの入射条件が時々刻々変わり、イオン源からのビーム電流が高い領域では、空間電荷効果によりビームの発散

角が大きくなる。RFQ 線形加速器加速器のアクセプタンスは収束ビーム入射に対応しているため、ビーム電流が高い領域においては、加速器へのビーム入射条件と加速器のアクセプタンスとのマッチングが低電流の領域より悪くなり、結果として入射ビーム電流が高くても加速ビーム電流は低くなる。

加速ビーム波形は立ち上がり部の鋭いピーク、立下り部の緩やかなピークとその間の谷の部分にある小さなピークの 3 つのピークが現れている。これはレーザーイオン源からのパルスが 2 つのピークを持っているので、この 2 つのピーク時で加速ビーム電流が減少し、この 2 つのピークが加速波形の 2 つの谷に対応しているためである。

5. まとめと今後の予定

イオン源から出射するビーム波形から加速されたビーム波形が計算によって再現され、DPIS シミュレーション方法が有効であることが証明された。

RFQ 線形加速器のビーム入射部において、イオン源からのビーム電流が高い領域における位相空間上ビームプロファイルと加速器のアクセプタンスとのミスマッチが大きいことがイオン源からのビーム波形との違いの原因であるということが解明された。

従って、本研究により DPIS のビーム加速波形及びビーム加速電流の予測が行うことができ、またビーム波形の形成原因も明らかになった。

今後は入射ビームとアクセプタンスのミスマッチを低減することによって、さらなる大電流ビーム加速を実現する方法を検討する。

- [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] R. Becker, "Numerical simulation of ion-beam formation", Rev. Sci. Instrum. 67 (3), 1996
- [4] B. Yu. Sharkov et al, "Matching of the Intensive Laser Ion Source to the RFQ Accelerators", Proceedings of EPAC 96 (1996), 1550