

速報

直接プラズマ入射法による RFQ 線形加速器で 炭素イオン 50 mA 加速に成功

服部 俊幸*1・岡村 昌宏*2・柏木 啓次*3・岩田 佳之*4

50 mA of Carbon Beam Have Been Accelerated Successfully by RFQ Llinac Using Direct Injection Scheme with Laser Ion Source

T. HATTORI*1, M. OKAMURA*2, H. KASHIWAGI*3 and Y. IWATA*4

理化学研究所（理研），東京工業大学原子炉工学研究所（東工大）及び放射線医学総合研究所（放医研）は直接プラズマ入射法と高周波4重極型線形加速器（RFQ）を組み合わせた大強度ビーム加速の共同研究を行っており，2004年7月に炭素イオン電流量50 mAを核子当たり100 keVに加速することに成功した．その概要について報告する．

1. 直接プラズマ入射法と大強度加速の経緯

直接プラズマ入射法は図1に示す様にレーザーイオン源の直後にRFQを配置し，レーザー照射により発生したアブレーションプラズマをイオン源から引き出しすぐに加速器の高周波により加速する．高密度レーザープラズマから得られる大強度ビームを途中で損なはず加速可能な特長を持つ．イオンでは画期的であるが，電子の光カソードRFガン加速との類似性で考えると分かりやすいだろう．

この方法は2001年に理研のCO₂レーザーイオン源と東工大のRFQ（4ベイン型）を組み合わせることで，原理実証実験が行われ，規格化電圧の2倍の加速電圧を加えると設計電流量1.28 mAの7倍である9.2 mAまで，炭素4価イオンを加速することに成功した．これまで東工大ではヘリウム1価イオンで1.6 mA程度を加速していた．通常のECRイオン源と低エネルギービーム輸送系を通して，2～5 mA入射しても，加速電流量は同じで，これはRFQの軌道計算

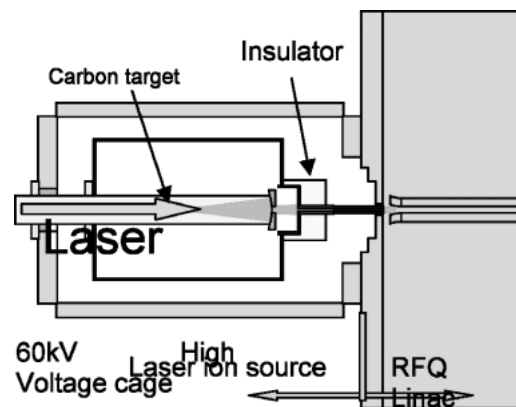


図1 直接プラズマ入射法の模式図

コードPARMTTEQの結果に一致していた．従って，レーザーイオン源の直接プラズマ入射法で生じた加速電流の増加は，まったく新しい現象と予想した．

RFQが普及し始めた1980年代の初めから，世界の研究所はロスアラモス国立研究所（LANL）が開発したPARMTTEQコードを用いて，RFQを設計，製作してきた．ここ20年間にこの様な現象は報告されていない．また，日本のほぼ全てのRFQに関する研究者に尋ねたが，解答はみつからなかった．そのためPARMTTEQプログラム製作者の一人であるLANLのJameson氏に現象の検討を依頼したところ，従来のPARMTTEQコードでは対処出来ないことが分かっ

*1 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology
(E-mail: thattori@nr.titech.ac.jp)

*2 理化学研究所 RIKEN

*3 東京工業大学-理化学研究所，現原子力研究所高崎研究所
Tokyo Institute of Technology-RIKEN now Japan Atomic Energy Research Institute

*4 放射線医学研究機構 National Institute Radiological Science

た. 改良することで, 直接プラズマ入射法による条件でも軌道計算が可能となり, この現象を解明できることが分った.

2. 炭素 100 mA 加速 RFQ 線形加速器

直接プラズマ入射法と高強度加速の発見を国内, 国外の加速器関係の研究会で発表したが殆ど反応が無かった. そこで, 直接プラズマ入射法の有効性を確認するため, 過去にない大強度の重イオンビームを加速実証することを岡村が発想し, 岡村, 服部の科研費で実行に移すことになった.

加速イオンはターゲット材料として扱いの容易な炭素イオンとし, ビーム電流の目標は 100 mA (炭素 4 価イオン) とした. 運転周波数は放医研の 100 MHz 高周波源を使用することで, 100 MHz とした. 入射電圧は各種の実験より炭素 4 価で 60 kV とした. パルス運転で良いこと, 加速ロッドの交換で拡張性の有る 4 ロッド RFQ 型加速器に決定した. このタイプで実績が有り製作費の安いゲート大学の応用物理研究所に製作を依頼した.

直接プラズマ入射法では, CO₂ レーザでは炭素 4 価 50%, 5 価 35%, 3 価 15% のイオン (炭素標的では陽子等はイオン源や東工大 RFQ 加速でも検出されな無かった)^{1,2)} が同時に入射する. そのため, 軌道計算は多種の電荷数のイオンを同時にトラッキングが可能であり, 時間積分をベースにしたコードである Jameson 氏の 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の最大化を目標に行った. RFQ の長さは 2 m としたが, 放射線を抑えるために加速エネルギーを核子当たり 100 keV としたためベインに変調加工は上流から 142 cm までで, その後は無変調となっている. この結果, 取り出されるビームは完全なコースティングビームになる. これは大きな空間電荷効果の影響を小さくする効果がある. RFQ の基本パラメータを表に示す.

イオン発生装置は 100 mA 加速 RFQ では危険性, 小型化もかねて, 図 1 の様な, 真空箱の中に高電圧イオン源部を収納するタイプとした.

ゲート大で製作された 100 mA 加速 RFQ は 2004 年 3 月に理研で各種の性能検査後, 放医研内の実験室に設置された. その写真を図 2 に示す. そして予備加速実験で測定された 50 mA 加速の電流波形を図 3 に示す. 炭素以外は東工大での原理実証では加速されていない²⁾.

表 Basic design parameters of the RFQ

Frequency	100 MHz
Total length	2.0 m
Modulated vane length	1.42 m
Limit of intervane voltage	120 kV
I _{out} at 100 mA C ⁴⁺ in	76 mA
Saturated I _{out} , C ⁴⁺ only	155 mA
I _{in} for saturated I _{out}	~300 mA
Acceptance	0.14 cm.rad
Aperture	0.655 cm

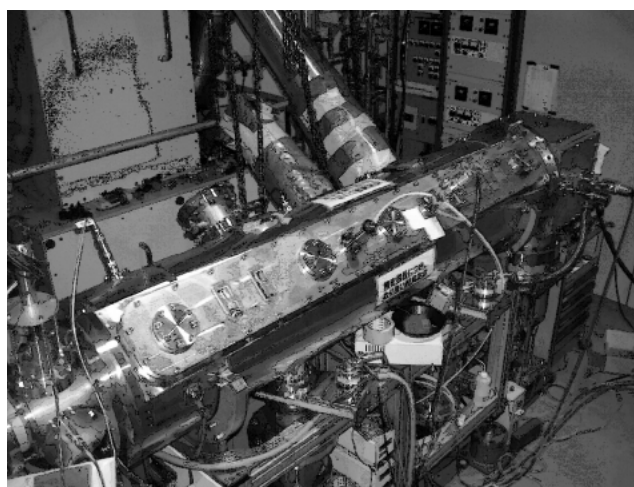


図 2 放医研に設置した直接プラズマ入射型 RFQ 右後方に見える箱形の部分がレーザ重イオン源上方に有るのが 100 MHz 高周波電源

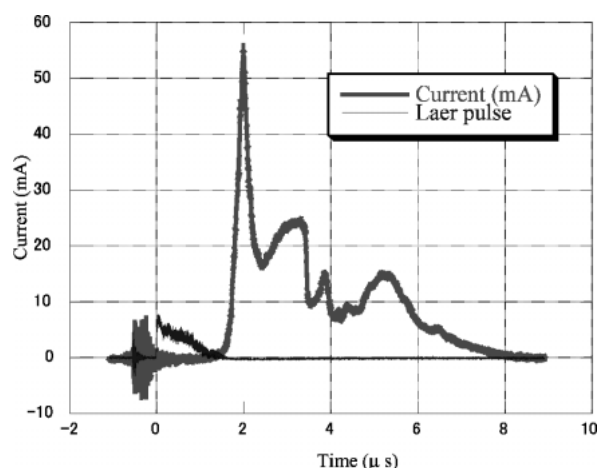


図 3 加速ビームのファラデーカップ電流

3. 今後の予定と将来性

CO₂ レーザイオン源の性能向上と入射系収束アイソツェルレンズの挿入によりビームのマッチングを良くし, 設計値の 100 mA 入射で, 76 mA 加速及び, ~300 mA 大強度入射による 155 mA 加速テストを計画しており, また出射粒子の種類, 価数とエネルギー測定を磁気分析器を使用して行う予定している. CO₂ レーザでなく YAG レーザを使用したイオン源で 10 ns 幅で 400 mJ 以上のパワーを投入すると炭素 6 価を 46.8% 発生する¹⁾ことを実験的に確認した. そこで, 炭素 6 価イオンを 50 mA 加速する実験を準備している.

現在 CERN の LHC 計画や BNL の RHIC 計画のイオン源と入射器システムは LHC が ECR イオン源で RHIC が EBIS 型イオン源を想定して, 研究が進められているが, 直接プラズマ入射法は必要としているイオン数が入射シンクロトロン of 1 ターン入射で蓄積できるため理想的入射システムと言えよう. また将来レーザイオン源直接プラズマ入射法が医療分野で認められれば, 炭素 6 価イオンを加速する 2 MeV/u の小型の入射器が考えられ, 荷電変換, 多重入射システムが必要なく, ガン治療装置の小型化が期待される.

そして, 重イオン慣性核融合 (HIF) の 100 万 kW

発電所に必要な高周波線形加速器の加速ビームは 400 mA であることから, 直接プラズマ入射法による 4 チャンネル RFQ の各チャンネルから 100 mA ビームを加速すると, 十分に対応出来ると考えられる. これは今まで夢物語と思われた HIF のドライバー加速器研究に大きなブレークスルーを作り出したことになり, 新たな研究展開が期待され, 研究支援を必要としている. しかし取り組みが遅れた場合, 外国勢に先を越され, 後に日本に逆輸入されることが懸念される. 蛇足であるが, ドイツで 8 月開催され LINAC2004 において本結果が岡村により発表され, 反響があったことを付け加える.

この研究に当たっては多くの人々の協力が有って成功することが出来ました. 東工大の林崎規託さん, 東工大一理研の山本和男さん, 高野淳平さん, LANL の R. A. Jameson さん, 放医研の野田耕司さん, 加速器サービスエンジニアリングの藤本さん, 渋谷さんに感謝いたします.

参考文献

- 1) H. Kashiwagi, T. Hattori, et al., Rev. of Sci. Instrum. 75 (2004) pp. 1569-1571
- 2) M. Okamura, et al., Nuclear Instr. And Methods, **B188** (2002) pp. 216-220