

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26246042

研究課題名(和文) 4ビーム型RFQ線形加速器による高強度重イオンビームの加速制御の研究

研究課題名(英文) acceleration and control of intense heavy ion beam using four-beam RFQ linac

研究代表者

林崎 規託 (Hayashizaki, Noriyosu)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：50334537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,800,000円

研究成果の概要(和文)：空間電荷効果はビーム電流量に比例し、ビーム速度の2乗に反比例することから、高強度の低エネルギー重イオンビームに最も強く作用する性質をもつ。その解決策として、高強度のビームを複数のビームに分割することで空間電荷効果の影響を緩和させ、1台のRFQ線形加速器で同時加速した後に分割ビームを再び統合するマルチビーム加速という技術がある。本研究では過去に開発に成功した2ビーム型に引き続き、4ビーム型のIH-RFQ線形加速器とレーザーイオン源を開発した。

研究成果の概要(英文)：The space charge effect is inversely proportional to the square of beam velocity and proportional to the beam current. Multi-beam acceleration is an acceleration technique for low-energy, high-intensity heavy ion beams, by accelerating multiple beams with moderate intensity using a radio frequency quadrupole linear accelerator (RFQ linac), and then integrating these beams using a beam funneling system. Although a two-beam design was previously reported, here we describe a four-beam IH-RFQ linac and a four-beam laser ion source which have been developed for high-intensity heavy ion beam acceleration.

研究分野：加速器物理学

キーワード：マルチビーム加速 加速器 大強度イオンビーム RFQリニアック レーザーイオン源

1. 研究開始当初の背景

イオンや電子などの荷電粒子ビームを電氣的に加速して運動エネルギーを与える加速器には、「加速エネルギーの向上」と「加速ビーム強度（電流量）の向上」という根源的な技術的課題があり、その黎明期より現在に至るまで世界中で研究開発が続けられている。本研究が取り組む、後者（加速ビームの高強度化）については、電子ビームではアンペアオーダーのピーク電流量が実現しているのに対し、重イオンビームについては空間電荷効果が大きく影響することから数十 mA のオーダーで長い間伸び悩んできた。

空間電荷効果の作用はビーム電流量に比例し、ビーム速度の 2 乗に反比例する性質があるため、低エネルギー（核子あたり数 keV ~ 数 MeV）かつ大電流（10 mA 以上）の重イオンビーム加速は、加速器として最も厳しい条件となり、ビームロス を最小限に抑えながら効率よく加速することが最大のポイントになる。さらに、低エネルギー重イオンビーム加速に適した、高周波四重極（RFQ）線形加速器でイオンビームを加速するとき、その加速可能なビーム電流量はビーム速度と RFQ 電極間に印加される電圧の積に比例し、また、RFQ 電極への印加電圧は放電限界値によって制限されるため、これまで速度の遅い低エネルギー重イオンを高強度で加速することは非常に困難であった。

その解決策として、高強度のビームを複数のビームに分割することで空間電荷効果の影響を緩和させ、1 台の RFQ 線形加速器で同時加速した後に、分割されたビームを再び統合するマルチビーム加速技術がある。しかし、非常に難しい技術であるため、世界的にみても申請者が率いる研究グループ以外には、Goethe University Frankfurt am Main の A. Schempp が 2 ビーム加速に取り組んでいるだけである。

研究代表者は「マルチビーム型 RFQ リニアックによる大強度イオンビームの加速制御に関する研究」の研究課題名で、2006 年度～2007 年度の科研費若手研究 (A) に採択され、2 ビーム型の IH-RFQ 線形加速器と直接プラズマ入射型レーザーイオン源の原理実証機の開発をおこなった（図 1）。そして、

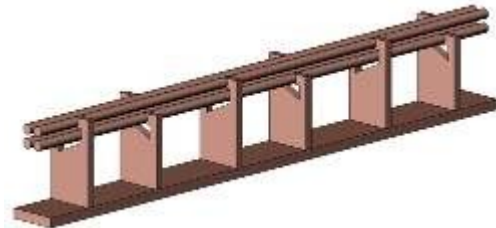


図 1 若手研究 (A) により開発に成功した 2 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器

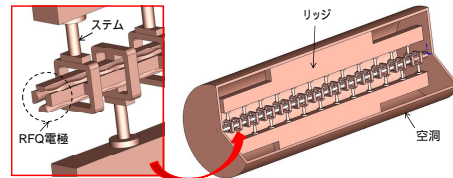
炭素 2 価イオンビームを 5 keV/u から 60 keV/u まで 108 mA（ビーム 1 本あたり 54 mA）のビーム強度で加速することに成功した。

2. 研究の目的

研究代表者が若手研究 (A) において採用した IH-RFQ 線形加速器は、A. Schempp が研究している  $\pi$ -0 mode タイプの RFQ 線形加速器とは、加速空洞の電極構造と高周波電磁場の励振原理が全く異なっている（図 2）。



(A)  $\pi$ -0 mode タイプ



(B) IH-RFQ タイプ

図 2 RFQ 線形加速器の電極構造の比較

IH-RFQ 線形加速器は、電力効率に優れ、電極形状の自由度も高いことから、マルチビーム加速の観点ではビーム数の拡張性が高いメリットをもつ。このため、マルチビーム IH-RFQ 線形加速器の加速空洞 1 台あたりの加速ビーム数としては、最大 9 ビームまで提案されてきているが、前述のように実際にビーム加速が実現しているのは研究代表者らによる 2 ビームまでである。

本研究では、若手研究 (A) で得られた 2 ビーム加速の知見を更に発展させ、世界的にまだおこなわれていない、4 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器による高強度重イオンビーム加速を実現し、加速ビーム特性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

4 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器の原理実証システムは、直接入射式の 4 ビーム型レーザーイオン源、4 ビーム型 IH-RFQ 加速空洞、ビーム収束系、ビーム分析・測定部、高周波増幅器および真空ポンプから構成される（図 3）。直接入射式レーザーイオン源は加速空洞と直結されており、原理的にビーム損失が少ないため高強度ビーム加速に適している。イオン源、加速空洞およびビーム輸送系の内部は真空排気ポンプによって  $10^{-3}$  Pa 以下の圧力が保持され、高周波増幅器から電力が供給されることにより、加速空洞内に高周波電場が励振される。

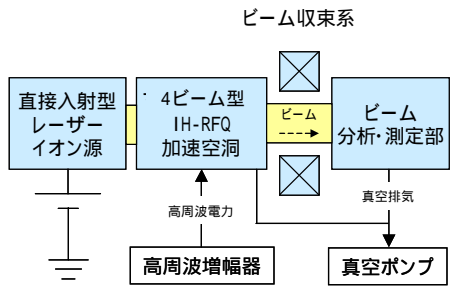


図3 4ビーム IH-RFQ 線形加速器の原理実証システム

本研究において4ビーム加速をおこなう重イオンには、2ビーム加速で実績のある炭素イオンを選び、加速後のピーク電流量の目標値は1ビームあたり50 mA以上とした。レーザーイオン源から取り出された4本の炭素イオンパルスビームは、加速空洞において30~50 keV/u程度まで加速され、ビーム測定部においてビーム電流量や加速エネルギーが測定される。そして、2ビーム加速の実績を4ビーム加速でも再現することにより、全ビーム電流として200 mAを超える性能を得ることを見込んだ。

#### 4. 研究成果

平成26年度は、2ビーム型 IH-RFQ 線形加速器の研究成果と、4ビーム型に関する準備研究の結果をもとに、4ビーム型 IH-RFQ 原理実証機の加速空洞の設計を最重点課題として取り組んだ。具体的には、RFQ 線形加速器のビーム軌道計算プログラムを用いて、空間電荷効果を考慮したビームシミュレーションをおこない、その解析結果と3次元電磁場解析による電場分布の評価結果を互いにフィードバックすることで、安定したビーム加速が得られる RFQ 電極レイアウトと加速空洞の構造を検討した(図4,図5)。また、若手研究(A)において開発した2ビーム型を発展させた4ビーム型 YAG レーザーイオン源の設計に着手し、必要とされるレーザー機器の整備をおこなった。

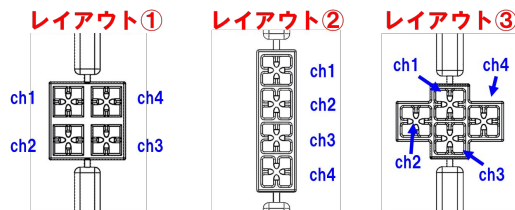


図4 RFQ 電極レイアウトの検討

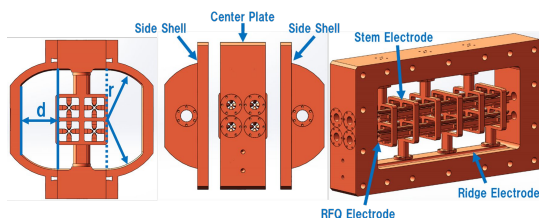
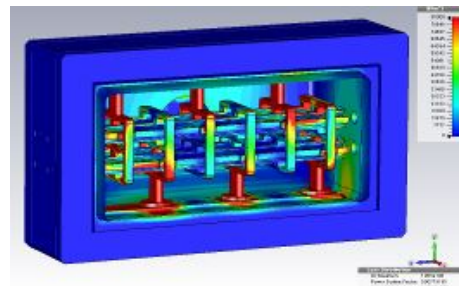
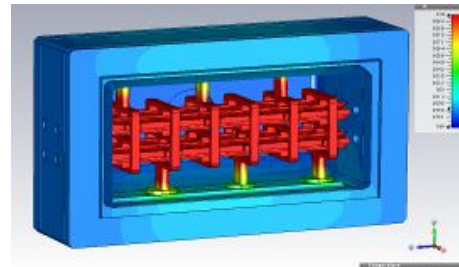


図5 4ビーム型 IH-RFQ 加速空洞の構造

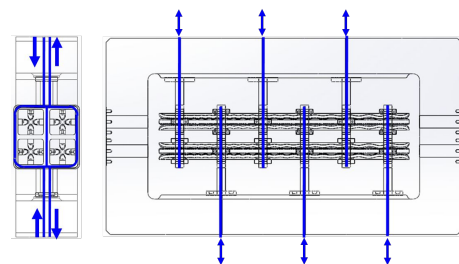
平成27年度は、前年度に実施した4ビーム型 IH-RFQ 加速空洞基本設計の内容を、原理実証機の製作に必要なレベルまで高精度化するために、ビーム軌道計算解析と3次元高周波電磁場解析を組み合わせた設計最適化を重点課題として、4ビーム加速に適した電場分布の適正化と、これともなう加速空洞や電極類の形状・配置の決定、また、高周波発熱に対する効果的な冷却水路形状を検討した(図6)。そして最終的に、世界初の4ビーム型 IH-RFQ 加速空洞の原理実証機として、運転周波数47.8 MHz、入射エネルギー3.6 keV/u、出射エネルギー41.6 keV/u、入射ピーク電流240 mA(1ビームあたり60 mA)、出射ピーク電流160.4 mA(1ビームあたり40.1 mA)の性能仕様を備える詳細設計を完成させた(表1)。



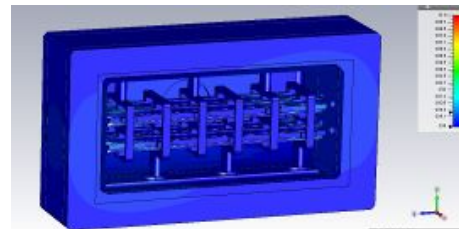
高周波発熱分布解析結果



温度分布解析結果(冷却なしの場合)



冷却水路の検討



温度分布解析結果(冷却ありの場合)

図6 発熱分布解析と冷却水路検討



表 1 4 ビーム型 IH-RFQ 加速空洞の仕様

運転周波数 [MHz]	47.8
電荷対質量比	1/6 (C <sup>2+</sup> )
入射エネルギー [keV/u]	3.6
出射エネルギー [keV/u]	41.6
入射ビーム電流量 [mA/beam]	60.0
出射ビーム電流量 [mA/beam]	40.1
ビーム透過率	67.0
無負荷 Q 値 (計算値)	4250
電極間電圧 (Kilp × 1.8) [kV]	92.2
加速空洞長 [mm]	790
ステム個数	6
加速空洞消費電力 [kW]	55.8

平成 28 年度は、前年度に実施した詳細設計に基づいて世界初の 4 ビーム型 IH-RFQ 加速空洞の原理実証機を完成させた。加速電極には無酸素銅を使用し、加速空洞については切削加工されたアルミニウムに銅メッキを施した (図 7)。ネットワークアナライザによる低電力試験の結果、その共振周波数は運転周波数どおりの 47.8 MHz、無負荷 Q 値は 3690 (計算値比 86.8%) を確認した。また、既存の高周波電源 (最大出力 100kW) の出力試験をおこない、ビーム加速実証試験に向けた準備を整えた。4 ビームレーザーイオン源 (図 8) についてもビーム引き出し試験をおこない、現在は原理実証機全体のビームコミッショニングを進めている。



加速空洞内部 (銅メッキ前)



低電力試験 (銅メッキ後)

図 7 4 ビーム型 IH-RFQ 加速空洞  
原理実証機



図 8 4 ビーム型レーザーイオン源

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Shota Ikeda, Aki Murata, Noriyosu Hayashizaki, Design of four-beam IH-RFQ linear accelerator, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 査読有, (2017) In Press.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.10.027>

Shota Ikeda, Tatsunori Shibuya, Noriyosu Hayashizaki, Study of electrode configuration of the four beam IH-RFQ Linac, Proceedings of HIAT2015, 査読無, (2015) 209-211.

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/HIAT2015/papers/wepb08.pdf>

Shota Ikeda, Tatsunori Shibuya, Noriyosu Hayashizaki, Evaluation of the electric field distribution in four-beam IH-RFQ linear accelerator, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 査読無, (2015) 444-446.

[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP017.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP017.pdf)

Shota Ikeda, Noriyosu Hayashizaki, Design study of four-beam IH-RFQ linear accelerator, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 査読無, (2014) 1042-1043.

[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP0/SUP034.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP0/SUP034.pdf)

〔学会発表〕(計 8 件)

池田 翔太, 村田 亜希, 林崎 規託, 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の空洞設計, 日本原子力学会「2016 年秋の大会」, 2016 年 9 月 9 日, 久留米シティプラザ (福岡県久留米市)

池田 翔太, 村田 亜希, 林崎 規託, 4 ビーム IH - RFQ 線形加速器の設計, 第 13

回日本加速器学会年会 2016年8月9日，  
幕張メッセ国際会議場（千葉県千葉市）

Shota Ikeda, Aki Murata, Noriyosu Hayashizaki, Design of four-beam IH-RFQ linear accelerator, The 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, 2016年7月5日, ユバスキュラ(フィンランド)

池田 翔太, 林崎 規託, 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の電極レイアウト検討, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 2016年3月27日, 東北大学川内キャンパス(宮城県仙台市)

Shota Ikeda, Tatsunori Shibuya, Noriyosu Hayashizaki, Study of electrode configuration of the four beam IH-RFQ Linac, 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, 2015年9月9日, ワークピア横浜(神奈川県横浜市)

池田 翔太, 澁谷 達則, 林崎 規託, 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の電場分布評価, 第12回日本加速器学会年会, 2015年8月5日, プラザ萬象・あいあいプラザ(福井県敦賀市)

池田 翔太, 林崎 規託, 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の検討, 日本原子力学会「2014年秋の大会」, 2014年9月9日, 京都大学吉田キャンパス(京都府京都市)

池田 翔太, 林崎 規託, 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の設計研究, 第11回日本加速器学会年会, 2014年8月10日, 青森市文化会館(青森県青森市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~nhayashi>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

林崎 規託 (HAYASHIZAKI, Noriyosu)  
東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：50334537

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし

### (4)研究協力者

池田 翔太 (IKEDA Shota)  
東京工業大学大学院理工学研究科

澁谷 達則 (SHIBUYA Tatsunori)  
東京工業大学大学院理工学研究科

村田 亜希 (MURATA, Aki)  
東京工業大学大学院理工学研究科