T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	低エネルギー大強度重イオンビーム加速のための4ビームIH-RFQ線形加速器の開発
Title(English)	
著者(和文)	池田翔太
Author(English)	Shota Ikeda
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11100号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:林﨑 規託,小栗 慶之,赤塚 洋,筒井 広明,長谷川 純
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11100号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	原子核工学　専攻	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of　（　工学　）
学生氏名： Student's Name	池田　翔太	指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	林崎　規託
		指導教員（副）： Academic Supervisor (sub)	塚原　剛彦

要旨（和文 2000 字程度）
Thesis Summary（approx.2000 Japanese Characters ）

本論文研究は、「低エネルギー大強度重イオンビーム加速のための 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の開発」と題し、1 台の加速器で 4 ビームを並列に加速する「4 ビーム IH-RFQ 線形加速器」の開発や原理実証を通じて、2 ビームより多チャンネル化した場合におけるマルチビーム RFQ 線形加速器の設計方法や加速器特性の解明に関するものである。

高周波四重極（Radio Frequency Quadrupole: RFQ）線形加速器は、1960 年代末に旧ソ連の Kapchinskii と Teplyakov によって考案されたイオン線形加速器であり、小型中性子源や大型加速器の前段加速器として用いられている。電子や陽子に比べると重イオン加速技術の研究開発は少なく、そのビーム利用技術についても、国際核融合材料照射施設 （IFMIF）や重イオン慣性核融合など、100～200 mA 以上の大強度重イオンビーム加速技術が必要とされている。しかし、イオンビームの空間電荷効果によるビーム発散や、高周波電場の放電限界による四重極電場強度の上限があることから、100 mA 級の重イオンビーム加速は従来の RFQ 線形加速器では困難であった。その解決策として、複数のビームに分割した重イオンビームを 1 台の加速空洞で加速するマルチビーム RFQ 線形加速器のアイディアがあり、2009 年に東京工業大学において 2 ビーム IH-RFQ 線形加速器の原理実証機が開発された。そして、2 ビームタイプのレーザーイオン源を用いることにより、108 mA（54 mA/channel）の炭素イオンの加速に成功し、その有効性を示した。マルチビーム RFQ 線形加速器は加速空洞内に複数のビームチャンネルを持ち、電極構造が複雑になることから、①多チャンネル化により電極構造が複雑で静電容量が増加することより、空洞径に対し共振周波数が低く、また、加速空洞あたりの高周波損失が大きくなる、②マルチビームローディング由来のビーム加速不安定性が存在する、③加速空洞内におけるビームチャンネルの配置や電極極性の影響により、RFQ 電場強度がチャンネル依存でばらつきをもつといった特徴があり、電気的性能及び機械的構造が制約される。①の加速器特性に関する研究は、マルチビーム型 RFQ 線形加速器の検討研究として 4 ビーム型や 9 ビーム型も取り上げられているが、加速ビームを 2 ビームより多チャンネル化した場合における②や③の加速器特性は明らかになっていないのが現状である。そこで、4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の開発と原理実証を通じて、それらの特性を明らかにすることを本論文研究の目的とした。

4 ビーム IH-RFQ 線形加速器では、ビームチャンネルの配置・電極形状に対する RFQ 電場の関係性は今まで明らかになっていないため、有限積分法を用いた 3 次元電磁場シミュレーションソフトウェアと 3 次元粒子軌道シミュレーションソフトウェアを組み合わせて、ビームチャンネル毎の RFQ 電場分布のばらつきを最小に抑えられる電極レイアウトの検討・をおこなった。検討の結果、RFQ 電場に対する二重極電場成分の混在比はビームチャンネルの位置と RFQ 電極の極性の組み合わせが関係している点に着目し、電場分布の対称性がよく、さらに二重極成分が抑えられて、かつ全ビームチャンネルにおける RFQ 電場強度のばらつきが 5.2 %以内となる 2×2 電極デザインを考案した。更に、考案した電極レイアウトを採用した、4 ビーム IH-RFQ 線形加速器原理実証機のデザインを複数のシミュレーションソフトウェアを用いておこない、共振周波数 47.8 MHz、全電力損失 100 kW 以内で 159.2 mA の C^{2+}ビームを加速可能な原理実証機の基本デザインを決定した。

決定した基本デザインをもとに原理実証機を製作し、ネットワークアナライザーを用いた低電力試験により、原理実証機の高周波特性評価をおこなった。その後、必要に応じて追加加工をおこない、最終的に共振周波数 47.95 MHz、無負荷 Q 値 3687(設計値 88 %)、という結果が得られた。その後、摂動法による製作した加速空洞の RFQ 電場強度分布の測定をおこない、全ビームチャンネルの RFQ 電場強度分布の測定値とシミュレーション値のずれは最大で 1.9 %という結果が得られた。

4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の原理実証機用のイオン源として 4 ビーム型レーザーイオン源を開発した。開発したレーザーイオン源の性能評価をするため、テストベンチを用いたイオン源の単体試験をおこない、レーザーエネルギー175 mJ/channle で RFQ 入射部における C^{2+}の電流密度が最大となるレンズ-ターゲット距離の照射条件が得られた。

開発した原理実証機にイオン源、高周波電源、真空系、ビーム測定系を組み合わせてビーム加速実証のためのテストベンチを構築し、4 ビーム加速試験をおこなった結果、炭素イオンビームを設計エネルギーまで加速することに成功し、高周波線形加速器における 4 ビーム同時加速を実証した。

結論として、本研究で得られた結果を総括するとともに、4 ビーム IH-RFQ 線形加速器において更なる重イオンビーム加速の大強度化のために取り組むべき課題について述べた。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).
注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	原子核工学　専攻	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of　（　工学　）
学生氏名： Student's Name	池田　翔太	指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	林崎　規託
		指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)	塚原　剛彦

要旨（英文 300 語程度）
Thesis Summary（approx.300 English Words ）

The multi-beam acceleration method is an acceleration technique for low-energy high-intensity heavy ion beams, which involves accelerating multiple beams to decrease space charge effects, and then integrating these beams by a beam funneling system. At the Tokyo Institute of Technology, a two beam IH-RFQ linear accelerator was developed using a two-beam laser ion source with direct plasma injection scheme. This system accelerated a carbon ion beam with a current of 108 mA (54 mA/channel × 2) from 5 up to 60 keV/u.

A four-beam IH-RFQ linac for low-energy high-intensity heavy ion beam acceleration is developed to establish its design scheme and verify multi-beam acceleration properties. The four-beam IH-RFQ linear accelerator consists of sixteen RFQ electrodes (4 × 4 set) with stem electrodes installed alternately on upper and lower ridge electrodes.

As part of this development, we have designed a four-beam IH-RFQ linear accelerator using three-dimensional electromagnetic simulation software and beam tracking simulation software. From these simulation results, we have designed the stem electrodes, the center plate and the side shells by evaluating the RF properties such as the resonance frequency, the power loss and the electric strength distribution between the RFQ electrodes.

For designed cavity parameter, we manufactured a four-beam IH-RFQ cavity. The resonance frequency and the Q factor of the linac were found to be 47.95 MHz and 3687, respectively. The maximum variation of the electric field strength measured by means of the bead perturbation method is 1.9 % larger than the simulation result.

As an injection system for the four-beam IH-RFQ linac, we are developing a four-beam type laser ion source using a direct plasma injection scheme (DPIS). Using this ion source, the four-beam IH-RFQ linac and an RF power source, we were able to accelerate the energy of carbon ions to the design beam energy.

備考 ： 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).