

## 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の設計研究

### DESIGN STUDY OF FOUR-BEAM IH-RFQ LINEAR ACCELERATOR

池田翔太<sup>#,A)</sup>, 林崎規託<sup>B)</sup>

Shota Ikeda<sup>A)</sup>, Noriyosu Hayashizaki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

<sup>B)</sup> Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

#### Abstract

Tokyo Institute of Technology developed a two-beam Interdigital-H type Radio Frequency Quadrupole (IH-RFQ) linac for high intensity heavy ion acceleration in the low energy region and succeeded to accelerate carbon ions from 5 keV/amu to 60 keV/amu with an output beam current of about 108 mA (2×54 mA/channel) in 2009. We have developed a four-beam IH-RFQ linac as extended study of the two-beam IH-RFQ linac. This linac has four sets of RFQ electrodes within an IH cavity structure that is a power efficient structure for low energy beam acceleration. Four beams are accelerated in parallel in one cavity with a reduction in the space charge effect between the accelerated particles compared with single beam acceleration. The expected operating frequency is 48 MHz. We studied the design properties of the four-beam IH-RFQ linac by RF electromagnetic analysis and RFQ beam trajectory simulation.

#### 1. はじめに

加速器の根源的な技術的課題のひとつである「加速ビームの高強度化」に関して、電子ビームがアンペアオーダーの電流量を実現しているのに対し、重イオンビーム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最も厳しい条件となり、これは低エネルギー重イオンビームの加速に適した高周波四重極（RFQ）線形加速器に当てはまる。

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、マルチビーム型 RFQ 線形加速器のアイデアがあり、実際に東工大原子炉研において 2 ビーム型の Interdigital-H (IH) 構造をもつ 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が開発され、炭素 2 価イオンビームを 5 keV/amu から 60 keV/amu 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ている<sup>[1]</sup>。

本研究は、これまでの 2 ビーム加速で得られた知見をもとに、4 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器の原理実証機を開発し、高強度重イオンビーム加速の実現と、その特性を明らかにすることを目的とする。そして本稿では、4 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器の高周波特性を CST MICROWAVE STUDIO<sup>[2]</sup>を用いて解析した結果と、RFQUICK と PARMTEQ によるビーム軌道計算の結果について報告する。

#### 2. 4 ビーム型 IH-RFQ の基本構造

4 ビーム IH-RFQ 線形加速器では、高周波電磁場として、IH-DTL と同じ TE<sub>111</sub> モードが使用される。そして、Figure 1 に示す①ロッド電極と②ステム電極の組み合わせによって、前者の電極間に RFQ 電場が発生し、イオンビームが集束・加速される。また、IH 構造は低エネルギー領域（ $\beta < 0.1$ ）において高いシャントインピーダンスを持つ特徴がある。

マルチビーム型の IH-RFQ 線形加速器では、ロッド電極とステム電極が狭い空間内に密集するため、シングルビーム型の IH-RFQ 線形加速器に比べてキャパシタンス成分が大きくなり、加速空洞径が比較的小さくても共振周波数が低下する傾向をもつ。本研究で開発する 4 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器のデザインパラメータを Table 1 に示す。

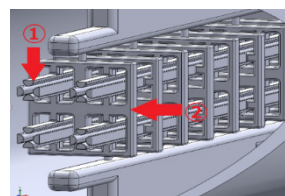


Figure 1: Four-beam IH-RFQ linac.

Table 1: Design Parameters of the Four-beam IH-RFQ Linac

Operation frequency (MHz)	48
Charge to mass ratio (q/A)	> 1/6
Input energy (keV/amu)	5
Output energy (keV/amu)	25
Input beam current (mA/channel)	60
Output beam current (mA/channel)	> 40
RF power loss (kW)	< 100
Max. field at inter-rod gap (Kilpat.)	1.8

<sup>#</sup> ikeda.s.aj@m.titech.ac.jp

### 3. 高周波特性解析

4 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器の高周波特性を明らかにするため、CST MICROWAVE STUDIO を用いて加速空洞形状に対する共振周波数や空洞損失を解析した。

空洞長 950 mm, 空洞径 250 mm ~ 400 mm の条件における, 共振周波数とキルパトリック値の 1.8 倍で規格化した空洞損失の変化を Figure 2 に示す。共振周波数と空洞損失は, 空洞径が大きくなるにつれて減少する傾向がある。なお, 空洞径が 350 mm 以下では空洞損失が 100 kW 以上になってしまう。次に空洞径 300 mm, 空洞長 800 mm~1350 mm の条件における, 共振周波数とキルパトリック値の 1.8 倍で規格化した空洞損失を Figure 3 に示す。空洞が長くなるにつれて共振周波数は低下し, 空洞損失が増加する。最後に共振周波数のエンドリッジチューナー長 (ERT) に対する依存性を Figure 4 に示す。共振周波数は ERT が長くなるにつれて低くなるが, 電場分布は大きく変化しないことから, 共振周波数の微調整には ERT を用いる予定である。

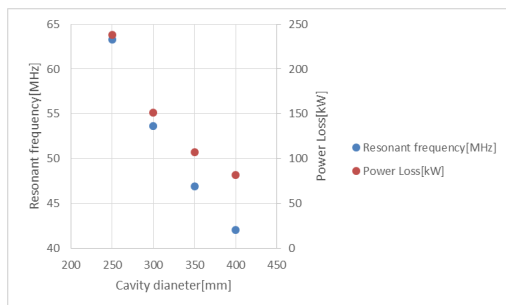


Figure 2: Simulated resonant frequency and power loss for the cavity diameter.

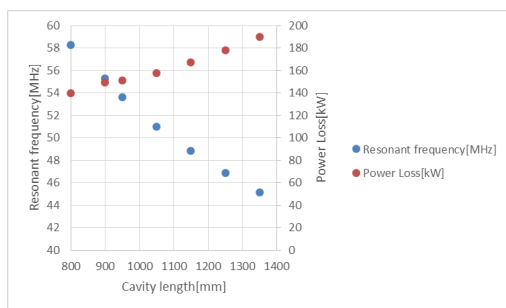


Figure 3: Simulated resonant frequency and power loss for the cavity length.

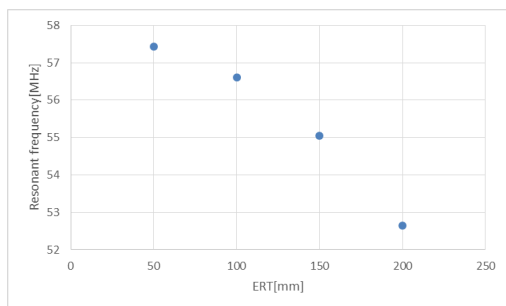


Figure 4: Simulated resonant frequency for the ERT.

### 4. ビーム加速特性解析

RFQ デザインコード RFQUICK と, RFQ 軌道計算コード PARMTEQ を用いて, 4 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器のビーム電流量を計算した。電極長さに対する出射ビーム電流量を Figure 6 に示す。現時点では, ビームアパーチャー半径 5.5 mm, 電極長さ 80.2 cm の条件で, 最大出射ビーム電流量として 36 mA の計算結果が得られている。

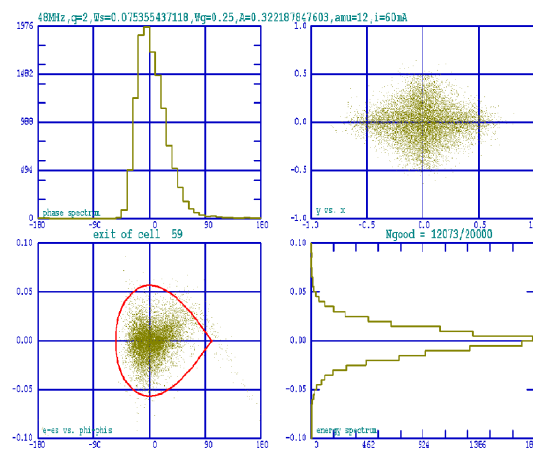


Figure 5: RFQ beam simulation with PARMTEQ.

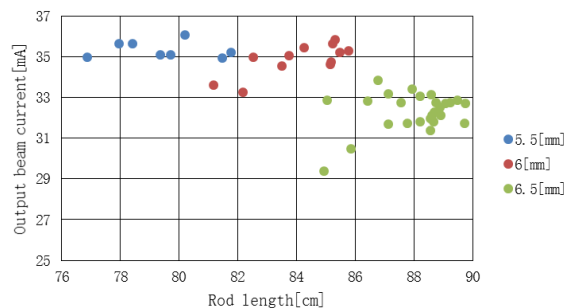


Figure 6: Calculated beam current of RFQ.

### 5. まとめ

4 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器の設計研究として, CST MICROWAVE STUDIO による高周波電磁場特性解析と, RFQUICK および PARMTEQ によるビーム特性解析をおこなった。今後は詳細設計を進め, 原理実証機の製作に取り組む予定である。本研究の成果の一部は JSPS 科研費 26246042 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] T. Ishibashi, N. Hayashizaki, T. Hattori, "Two-beam interdigital-H-type radio frequency quadrupole linac with direct plasma injection for high intensity heavy ion acceleration", PhysRevSTAB, 14 (2011) 060101.
- [2] <http://www.cst.com/>