

## 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の開発

### DEVELOPMENT OF FOUR-BEAM IH-RFQ LINEAR ACCELERATOR

林崎規託<sup>#</sup>

Noriyosu Hayashizaki

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

#### Abstract

A multi-beam linear accelerator (linac) that accelerates the multiple beams in an acceleration cavity has advantages for downsizing and cost reduction of the linac system. However, the configuration of electrodes of the multi-beam linac is more complicated than that of single beam type, and so it influences the resonance frequency. A minimum of cavity diameter is restricted by the volume of electrodes, which depends largely on the numbers of beams. The relation between the numbers of beam and the acceleration structure is studied with electromagnetic simulation.

#### 1. はじめに

東京工業大学（東工大）では、低エネルギー重イオンビームの大強度化に向けて、大強度ビームを複数に分割し、並列に同時加速することにより空間電荷効果を緩和する、マルチビーム高周波四重極（RFQ）線形加速器の研究を進めている。そしてこれまでに、2 ビーム IH-RFQ 線形加速器とレーザーイオン源の原理実証機を開発し、最終的に 108 mA（ビーム 1 本あたり 54 mA）の炭素 2 価イオンビームの加速に成功した<sup>[1]</sup>。その発展型として、本研究では 4 ビーム型の可能性について、高周波電磁気特性および機械的構造の面から検討する。

イオンや電子などの荷電粒子ビームを電気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。本研究の主題である加速ビームの高強度化に関して、電子ビーム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。

重イオンビームの大強度化を困難にしているのは空間電荷効果の作用である。その強さ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、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四重極電極間に印加される電圧の積に比例し、また、四重極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。

#### 2. マルチビーム RFQ 線形加速器

RFQ 線形加速器は、ビームの収束と加速をおこなう RFQ 電極の支持形状によって、4 ベイン型、4 ロッド型、分割同軸型および IH-RFQ 型など、複数のタイプがある。

マルチビーム構造の観点からすると、4 ベイン型では電極形状的に実現が困難である。4 ロッド型に関しては 2 ビームタイプが設計・製作されており、ビーム加速試験がおこなわれている<sup>[2]</sup>。また、分割同軸型については、以前にシミュレーションによる検討がおこなわれている<sup>[3]</sup>。

IH-RFQ 型は、シングルビームタイプがドイツの GSI において最初に提案され、ビーム加速実験がおこなわれた。そのマルチビームタイプについては、過去の論文に 9 ビーム型の断面図が掲載されたこともあったが、具体的な検討はおこなわれなかった<sup>[4]</sup>。しかし、2006～2010 年に 2 ビームタイプが東工大で開発され、ビーム加速に成功した<sup>[1]</sup>。その内部構造を Figure 1 に示す。他の RFQ 構造と比較して、IH-RFQ 型はマルチビーム加速に関してビーム数の増加が容易であり、また、加速空洞の Q 値が大きいという特徴がある。

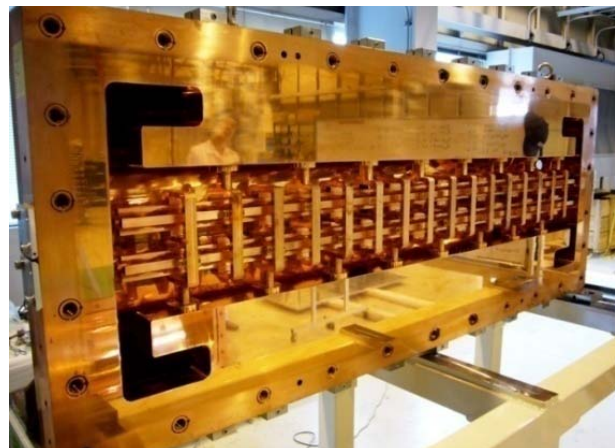


Figure 1: Two-beam IH-RFQ linac.

<sup>#</sup> nhayashi@nr.titech.ac.jp

### 3. 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の検討

本研究は 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器を主題とするが、比較のためにシングルビーム、2 ビームおよび 9 ビームの各タイプについても取り扱う。各々の IH-RFQ 線形加速器の電極形状を Figure 2 に示す。各加速空洞の直径は、四重極電極をサポートしているステムサイズに依存する。すなわち、ビームチャンネル数が増えるほど、加速空洞の直径を小さくすることはできなくなり、共振周波数が低くなる。しかし、低エネルギー重イオン加速の場合、RFQ 線形加速器の運転周波数は数十 MHz 程度に設定されるため、この空洞直径の制約についてはあまり心配する必要がない。

Figure 2 に示した IH-RFQ 線形加速器の特性について、MW-Studio<sup>[5]</sup>による 3 次元電磁場解析をおこなった。計算モデルは 3D-CAD ソフトウェアの SolidWorks<sup>[6]</sup>によりデザインした。

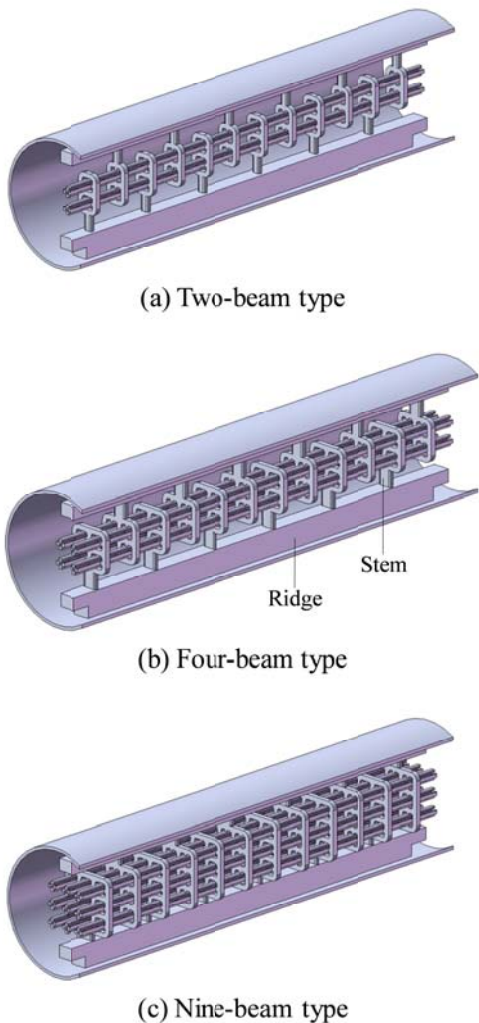


Figure 2: Various multi-beam IH-RFQ linac.

加速空洞の長さは 2000 mm、隣接するビーム軸の配置間隔は 74 mm、電極の取り付けスペースを考慮して格子状のステム幅は 20 mm、そのビーム進行方向の配置は 150 mm 間隔とした。このため、ステムの断面サイズは、4 ビーム型の場合が 168×168 mm、9 ビーム型の場合が 242×242 mm となることから、空洞直径は 400~700 mm の間で検討した。

加速空洞の直径と共振周波数の関係を Figure 3 に示す。空洞直径とビーム本数に比例して共振周波数は低くなる。過去に東工大で開発した 2 ビームタイプ IH-RFQ 線形加速器の運転周波数は 48 MHz であったが、4 ビーム型になると約 10 MHz の低下が生じるため、今回の空洞形状条件の場合、高周波源は新しく準備しなければならない。

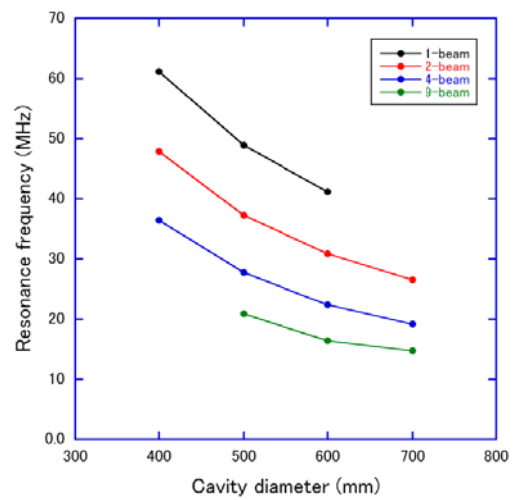


Figure 3: The calculated resonance frequency of multi-beam IH-RFQ linac.

空洞直径と Q 値の関係を Figure 4 に示す。Q 値は加速空洞内の蓄積エネルギー量に比例するため、空洞直径の増加による空洞体積の増加にともない、その数値は増加していく。

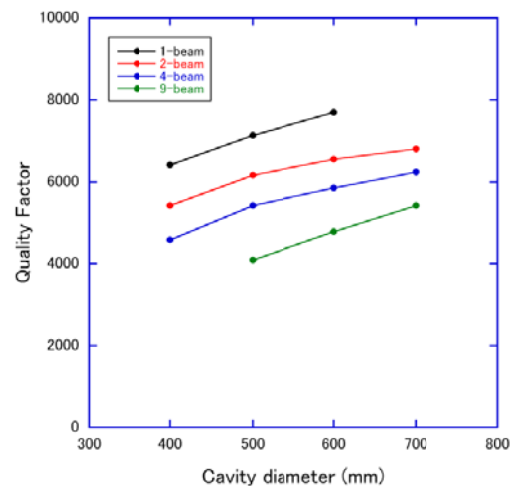


Figure 4: The calculated quality factor of multi-beam IH-RFQ linac.

空洞直径と電力損失の関係を Figure 5 に示す。電力損失は、ベイン間電圧をキルパトリック電圧の 1.8 倍で規格化したときの数値であり、ビームローディングは含まない。空洞直径が 700 mm の場合に、2 ビームタイプと 4 ビームタイプの電力損失は同程度となる。また、ビーム 1 本あたりの電力損失は、ビーム本数が多い方が小さくなり、電力効率的には優れていることになる。

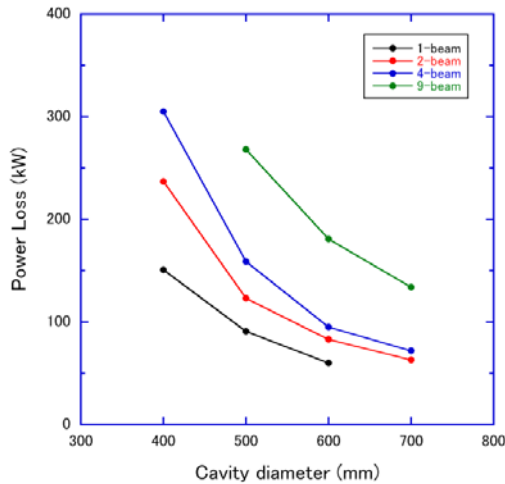


Figure 5: The calculated power loss of multi-beam IH-RFQ linac.

#### 4. まとめ

マルチビーム IH-RFQ 線形加速器は、低エネルギー領域における大強度重イオンビーム加速の現実的なソリューションとなりうるものであり、シングルビーム加速の装置を複数並べるよりも、小型化や低コスト化に貢献する。

しかし、ビームチャンネル数の増加に比例して、ビーム輸送やビームファネリングのスキームは複雑になってしまうという問題がある。また、加速空洞の十分な冷却は不可欠であるため、ビームチャンネル数が増加すると、とくにステムとロッド電極の冷却が難しくなってくる。このようなことを考慮すると、ビームチャンネル数を単純に増加できない。さらに、9 ビームタイプの場合、ベイン間電圧がビームチャンネルの位置によって変化するため、この補正も必要になってくる。

また、マルチビーム RFQ 線形加速器の後段部にドリフトチューブ線形加速器を配置する場合、同じくマルチビーム化は可能であるが、通常のビーム収束装置ではビーム輸送が難しい。とくに、ステムサイズを考えると、ビームチャンネルの配置間隔は小さい方が適切であるが、ビーム収束装置をセットするためには、配置間隔が大きい方がよい。これは、ファネリングの場合においても同様である。

ビーム 1 本あたりの加速効率や省スペース化の点ではビームチャンネル数が多い方が優れているが、こ

れらの課題を考えると、4 ビームタイプが実用限度になると思われる。

今後の展開として、4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の原理実証機の開発を計画している。しかし、高周波源も含むシステム全てを新たに製作すると開発費が大きくなるため、2 ビームタイプのリソースを活用可能な方法を検討中である。

#### 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] A. Firjahn-Andersch, A. Schempp, J. Madlung, C. Staschok, "A two-beam radio-frequency quadrupole (RFQ) for funnelling of ion beams at low energies", *Fusion Eng. Des.* 32-33 (1996) 225-228.
- [3] V. Kapin, A. Noda, Y. Iwashita, M. Inoue, Multiple-beam RFQ structure with a matrix-array of beamlets, *Proc. of International Linear Accelerator Conference 1996, Geneva, Switzerland, (1996) 722-724.*
- [4] U. Ratzinger, K. Kasper, E. Malwitz, S. Minaev and R. Tiede, "The GSI 36 MHz high-current IH-type RFQ and HIF-relevant extensions", *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A* 415 (1998) 281.
- [5] <http://www.cst.com/>
- [6] <http://www.solidworks.com/>