

PROPERTY OF A RADIO FREQUENCY ELECTROMAGNETIC IN THE 2-BEAM TYPE IH-RFQ LINAC

Takuya Ishibashi, Noriyosu Hayashizaki, Toshiyuki Hattori, Taku Ito, Lu Liang
Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology
N1-25, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo

Abstract

A multibeam Radio Frequency Quadrupole (RFQ) linac with an Interdigital H-mode (IH) structure has been developed for high intensity heavy-ion beam acceleration. The defocusing force of space charge effect is proportional to the beam current and to the inverse square of the beam velocity. Therefore, multibeam acceleration is an attractive scheme to suppress this in the low energy region. The RF properties and the beam dynamics were studied for a 2-beam type IH-RFQ cavity which is a prototype of the multibeam type IH-RFQ cavity. We discuss the configuration of the 2-beam IH-RFQ linac and the results of these simulations.

2ビーム型IH-RFQリニアックの高周波電磁場特性

1. はじめに

大強度イオンビームの有効かつ実用的な加速・制御方法として、空間電荷効果の影響を低減するマルチビーム型線形加速器（リニアック）を提案し、複数本のビームを一つの空洞で加速可能なリニアックの開発を進めている。大強度ビームを生成するリニアックの応用例としてはシンクロトロンへのシングルターン入射、核燃料の増殖・生産や核廃棄物の消滅処理(ADS, Accelerator Driven System)、核融合炉用材料の中性子照射試験に用いる中性子源、重イオン慣性核融合用ドライバーなどが挙げられる。

加速器から安定して大強度のイオンビームを得るためには、空間電荷効果によるビームの発散を極力抑える必要がある。低エネルギー領域における大強度重イオンビーム加速はこの空間電荷効果が強く、困難な加速条件の一つとなっている。

その解決策の一つとして大強度のシングルビームを複数のビームに分割し、これらを独立かつ並列に加速して空間電荷効果を緩和し、エネルギーの増加

とともに、分割したビームをカスケード的に統合していくアイデアがある。特に重イオン慣性核融合用ドライバーへの加速器技術が検討されている^[1]。この時、各エネルギー段では一本のビームにつき一台の加速空洞を割り当てるのが一般的である。このようなカスケード加速において、複数のビームを一つの空洞内で同時に加速できれば、省スペース、運転コストの点で従来方式よりも優れたものとなる。

本研究で開発を進めている加速空洞の構造には、低エネルギー領域のビーム加速において電力効率が高く、電極形状の自由度が高いインターディジタルH (IH) 構造を採用した。また、低エネルギー領域でのビーム加速特性に優れている高周波四重極 (RFQ) 構造を採用し、これらを組み合わせたマルチビーム型加速空洞の原理実証機である2ビーム型IH-RFQリニアックの開発を行っている。シングルビーム型IH-RFQリニアックについてはGSI (ドイツ) において実用機が製作され、ビーム加速に成功している^[2]。しかし、マルチビーム型については本研究が世界初である。

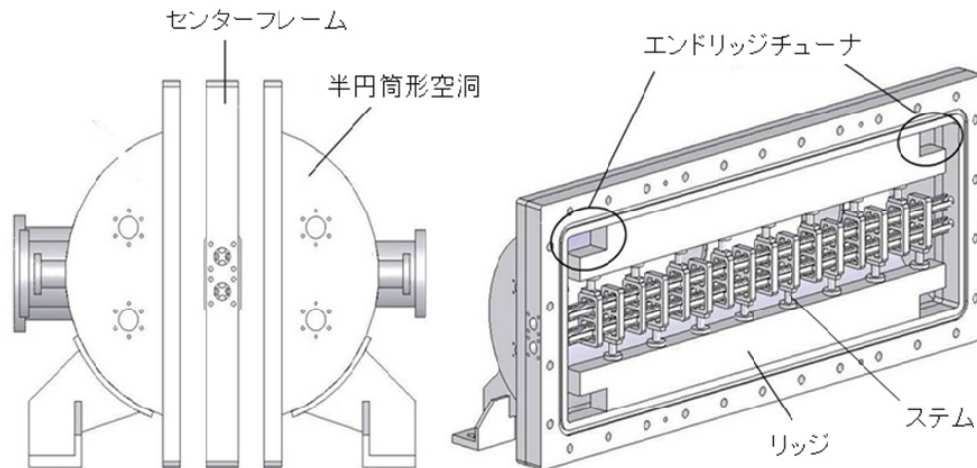


図1. 2ビーム型IH-RFQ加速空洞の概略図

2. 2ビーム型IH-RFQの特徴

2ビーム型IH-RFQ加速空洞内(図1)で高周波電磁場は、IH構造と同じTE₁₁₁モードで励振され、極性を考慮しながら各システムを通じて取り付けられた四本のロッドによりRFQ電場を発生させる。これらロッド上にはモジュレーションが付けられ、これによりビーム進行方向に加速電場を発生させる。

空洞共振器はLCR回路と等価的に扱える。マルチビーム加速空洞の場合、電極数の増加により静電容量が大きくなり、比較的小さな直径で低い共振周波数を実現できる。また、共振周波数の基本的な調整はリッジ端部の切り欠き(エンドリッジチューナ)で行う。

これまで三次元高周波電磁場解析、伝熱解析、構造解析及び粒子軌道計算を用いて加速空洞の詳細設計を決定し、現在実機の製作を行っている^{[3][4]}。加速空洞は一枚のセンターフレームと二つの半円筒形空洞から構成されており、電極等据え付けの容易性を確保している。半円筒形空洞の側面を覆うように冷却ジャケットを据え付けている。またリッジ、ロッドに水路を通すことにより、電極類の冷却を行う。

3. ビーム加速特性

2ビーム型IH-RFQ加速空洞による重イオンビームの加速特性を評価するため、シングルビーム型空洞についても粒子軌道計算、三次元高周波電磁場解析を行った^[4]。ここで三次元高周波電磁場解析ソフトウェアにはMW Studioを使用した。また数十mAを超えるような大電流RFQの設計に適したデザインコード、RFQUICKを用いて四重極電極を設計した。

計算機シミュレーションにより得られたシングル、2ビーム型IH-RFQリニアックの加速特性を表1に示す。2ビーム型と比較して、シングルビーム型は内部構造が単純で静電容量が小さいため、運転周波数を48MHzにするには空洞径をより大きく採らなければならない。また、ビームあたりの電流量が大きくなるため、RFQUICKでは四重極電極を長くすることが必要になる。しかし、それでもビームの発散を十分に抑えることができず、入射電流120mAに対して出射電流は30.5mAしか得られない。

2ビーム型IH-RFQは内部構造が複雑なため、シングルビーム型に比べ消費電力が約24.4kW増加している。しかしながら透過効率、省スペースの点で、2ビーム型IH-RFQ加速空洞を用いた低エネルギー領域大電流の重イオンビーム加速は効率的かつ実用的加速方法と言える。

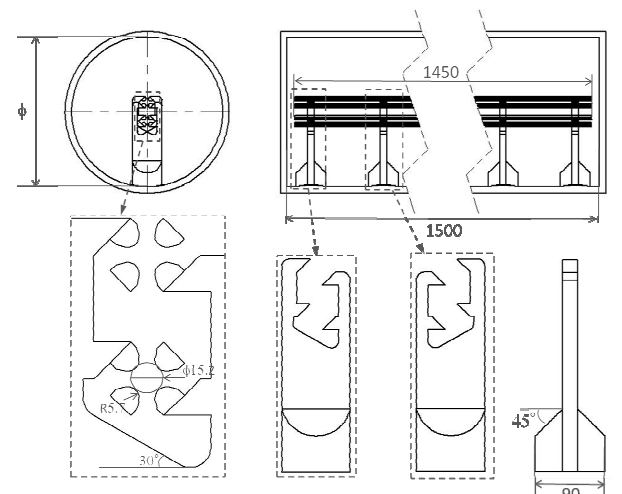
4. 高周波電磁場特性

4.1 高周波電磁場シミュレーション

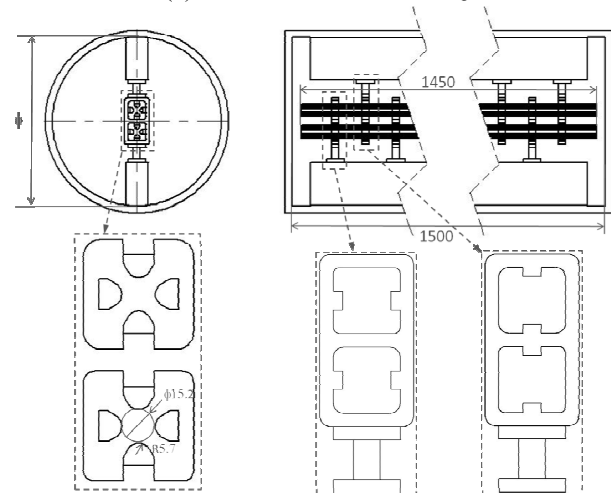
2ビーム型IH-RFQ加速空洞のRF特性を4ヴェイン、4ロッド、シングルビーム型IH、2ビーム型4ロッドの各RFQ構造と比較した。共振周波数、消費電力等

表1. シングル及び2ビーム型IH-RFQリニアックのC⁺ビーム加速特性

	2ビーム型	シングルビーム型
運転周波数(MHz)	48	48
空洞径(mm)	470	600
空洞長(mm)	1500	2140
ビームボア半径(mm)	6.2	8.8
四重極電極長さ(mm)	1483.5	2120
無負荷Q値	7160	9580
消費電力(kW)	86.4	62
入射エネルギー(keV/u)	3	3
出射エネルギー(keV/u)	42	42
電極間電圧(Kilpat.)	2.8	2.8
入射電流(mA)	120(602)	120
出射電流(mA)	71(35.4×2)	31



(a) 2ビーム型4ロッドRFQ



(b) 2ビーム型IH-RFQ

図2. 高周波電磁場シミュレーションモデル

表2. MW Studioを用いた各RFQ構造における高周波電磁場解析結果

加速空洞	4ヴェイン	4ロッド	IH	2ビーム型4ロッド	2ビーム型IH
共振周波数 (MHz)	48.5	47.6	48.3	47.9	48.38
空洞直径 (mm)	1500	800	680	470	470
Q ₀	6517	6516	9277	5308	7051
消費電力 (kW, 80%Q ₀)	71	60	31	194	57

の算出にはMW StudioのEigen Mode Solverを用いた。ここでは計算誤差が 10^{-10} 以下になるメッシュサイズを用いてそれぞれ計算した。

今回解析を行ったシミュレーションモデルの内、2ビーム型4ロッドRFQ及び2ビーム型IH-RFQについてのみ図2に示す。4ロッド型加速空洞についてはフランクフルト大学の同構造を参考にした^[5]。いずれの構造においても四重極電極の長さ、空洞長はそれぞれ1450mm, 1500mmで、ビームボア径は15.2mmとしている。

4.2 各構造のRF特性

シミュレーション結果を表2に示す。最初にシングルビーム型加速空洞を二台用い、それぞれの空洞で並列に二本のビームを加速する場合を考える。2ビーム型構造と比べると、どのシングルビーム型構造においても静電容量が小さいために48MHz程度の共振周波数を得るには空洞直径をより大きく採らなければならない。最も普及しているRFQである4ヴェイン型を例にとると、共振周波数48.5MHzを達成するために空洞直径を1500mmまで大きく採らなければならない。

またシングルビーム型RFQの中でIH型は最も電力効率が高い。しかしながらこの空洞二台を用いて2ビーム加速すると、消費電力が $31 \times 2 = 62\text{kW}$ となり、これは2ビーム型IH-RFQ空洞一台の消費電力57kWより大きい。そのため電力効率の観点からも2ビーム型IH-RFQは優位となる。

次に一つの加速空洞内で二本のビームを加速する場合を考える。ここでは四重極電極等の据え付け自由度から、4ロッド型を2ビーム型へ拡張した2ビーム型4ロッドRFQ加速空洞(図2(a))について考える。2ビーム型IH-RFQと2ビーム型4ロッドRFQを比較すると、同程度の空洞直径で共振周波数48MHzが達成できる。しかしながら2ビーム型4ロッドRFQ空洞の消費電力は194kWと非常に大きく、電力効率は2ビーム型IH-RFQが格段に優位であることを示している。

5. まとめと今後の予定

低エネルギー領域における大強度重イオンビームの効率的かつ実用的な加速方法としてマルチビーム型IH-RFQ加速空洞を提案している。本研究ではマルチビーム型IH-RFQの原理実証機として2ビーム型IH-RFQの研究開発を行っている。高周波電磁場解

析及び粒子軌道計算の結果はビームの透過効率、空洞の電力効率、設置スペースの削減において2ビーム型IH-RFQが他の構造と比べて有効である事を示している。

これまで各種シミュレーション(高周波電磁場解析、伝熱解析、構造解析、粒子軌道計算)を実行し、これにより2ビーム型IH-RFQ加速空洞の詳細構造を決定している。現在は加速空洞実機の製作に入っており、これと並行して、二つの出射口を持つイオン源、及び静電アナライザーの設計・製作、試験を行う。

入射システムにはレーザーイオン源を用いた直接プラズマ入射法(DPIS)を採用する予定である。この方式では従来イオン源と加速空洞の間にある低エネルギービーム輸送部(LEBT)を省略し、イオン源と加速空洞を直接接続する。これにより入射システムの簡略化、大電流ビームの加速・輸送が可能となる^[6]。

加速空洞、イオン源等の製作・試験後、原理実証システムを構築し、加速実験を行う。また、2ビーム型IH-RFQリニアックの利点を定量的に評価し、複数ビームを統合するビームファネリング技術の研究開発を行う。

参考文献

- [1] Y. Fujiie, S. Hayakawa, T. Hattori, Y. Hirao, T. Katayama, A. Noda, H. Obayashi, S. Yamada, et al., Research Report Institute of Plasma Physics Nagoya University, HIBLIC-heavy ion fusion reactor, Rep. IPPJ-663 (1984).
- [2] The GSI 36MHz high-current IH-type RFQ and HIF-relevant extensions, U. Ratzinger, et al., Nuclear Instruments and Method in Physics Research A, 415 (1998) 281.
- [3] Takuya Ishibashi, Noriyosu Hayashizaki, Toshiyuki Hattori, Taku Ito, Liang Lu, Jun Tamura, Multibeam cavity for low energy beam acceleration, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 261, 13-16 (2007).
- [4] Takuya Ishibashi, Noriyosu Hayashizaki, Toshiyuki Hattori, Taku Ito, Jun Tamura, Design study of a multibeam type IH-RFQ linac to accelerate high intensity and low energy heavy ion beams, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 266, 2146-2149 (2008).
- [5] Thomas Sieber, Entwicklung von 4-Rod-und IH-Radio-Frequenz-Quadrupol (RFQ)-Beschleunigern für radioaktive Ionenstrahlen bei REX-ISOLDE und MAFF, Dissertation der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München (2001).
- [6] M. Okamura, T. Takeuchi, T. Katayama, K. Sawada, Proceedings of EPAC2000, 848 (2000).