

# MEASUREMENT OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN 2-BEAM TYPE IH-RFQ LINAC

Takuya Ishibashi<sup>1,A)</sup>, Noriyosu Hayashizaki<sup>A)</sup>, Toshiyuki Hattori<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 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 linear accelerator (RFQ linac) with an Interdigital H (IH) structure has been developed for high intense heavy-ion beam acceleration in low energy region. The defocusing force is extremely strong in low energy and high intense beams. Therefore, multibeam acceleration is an attractive scheme to suppress this. The electric field distribution was measured 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 measurements.

## 2ビーム型IH-RFQリニアックの電場分布測定

### 1. はじめに

加速器から安定して大強度のイオンビームを生成するためには、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において、この空間電荷効果は特に強く、最も困難な加速条件の一つとなっている。

空間電荷効果を緩和する一つの解決策として、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する方法が提案されている<sup>[1]</sup>。この時、1本のビームにつき1台の加速空洞を割り当てるのが一般的であり、加速するビームの本数に応じて加速器システムは大規模になってしまう。

そこで本研究では加速器システムを大規模化することなく、大強度イオンビームの加速・輸送を可能とするマルチビーム型RFQ(Radio Frequency Quadrupole)リニアックを研究開発している。このリニアックは1つの空洞で複数本のビームを同時に加速する。

マルチビーム型RFQの構造にはGSI(ドイツ)のグループが提案、原理実証をしたIH(Interdigital H)型構造<sup>[2]</sup>を採用した。この構造は低エネルギー領域のビーム加速において電力効率が特に優れており、この領域における消費電力は従来の4-vaneや4-rod型のRFQ構造に比べて1/2~1/5程度まで小さくすることも可能となる<sup>[3]</sup>。なお、マルチビーム型IH-RFQ線形加速器の開発及びビーム加速試験は過去に行われていない。

### 2. 2ビーム型IH-RFQリニアック

#### 2.1 構造

マルチビーム型IH-RFQ線形加速器の原理実証機

として、2ビーム型プロトタイプ機を製作した。このリニアックの構造を図1に示す。

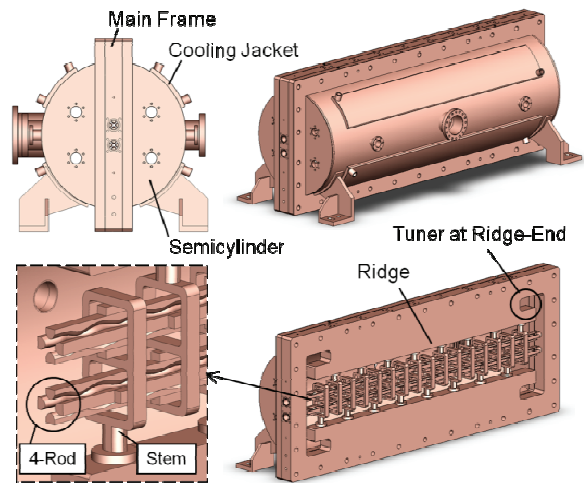


図1: 2ビーム型IH-RFQリニアックの外観図

2ビーム型IH-RFQ加速空洞内で高周波電磁場はTE<sub>111</sub>モードで励振され、ステムを通じて取り付けられた4本のロッドによりRFQ電場が発生する。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、従来のRFQリニアックと比べて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で行う。

加速空洞は1枚のセンターフレームと2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

<sup>1</sup> E-mail: ishishashi.t.aa@m.titech.ac.jp

に冷却ジャケットを据え付けている。またリッジ、ロッドに冷却水を通す。

## 2.2 主要パラメータ

3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により加速空洞の詳細設計を決定した。本リニアックの主要パラメータを表1に示す。

イオン源には構造がシンプルで、大電流重イオンビームの生成特性に優れた、DPIS型レーザーイオン源を採用した。このイオン源により60 mA/channelの $C^{2+}$ ビームを供給すると、RFQは43.6 mA/channelの電流を加速出来る。リニアックは2つのビームチャンネルを有するため、合計したビーム電流は87.2 mAとなる。これは従来のRFQ線形加速器における加速ビーム電流値の約2倍であり、加速ビームの大電流化が可能となる。

表1: 2ビーム型IH-RFQの主要パラメータ

Charge to mass ratio (q/A)	1/6
Input energy (keV/u)	5
Output energy (keV/u)	60
Resonance frequency (measurement value) (MHz)	47
Focusing strength, $B$	8.754
Defocusing strength (at exit of the gentle buncher section), $ A $	0.216
Rod length (cm)	148.12
Total number of cells	104
Cavity length (cm)	150
Cavity diameter (cm)	49.2
Maximum field at inter-rod (Kilpat.)	1.8
Q value (measurement value)	5900
Input current (mA/channel)	60
Output current (mA/channel)	43.6

度分布は最大で約±9.7%平均値から外れる事が分かった。

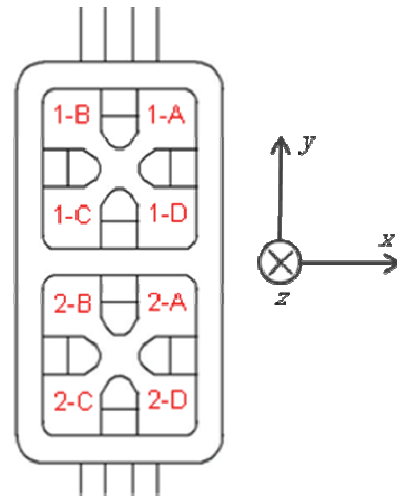


図2: 4重極電極で区切られた象限の名称

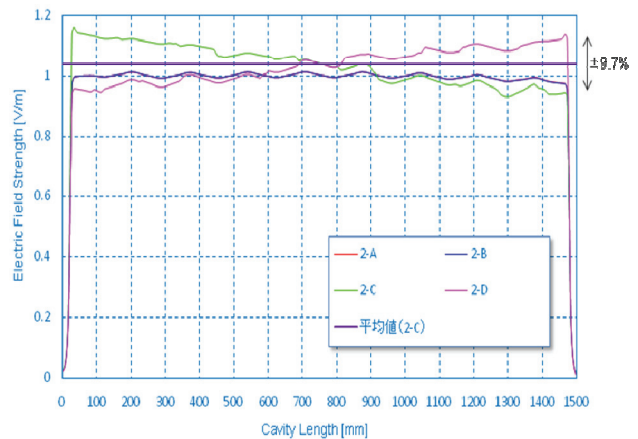


図3: ロッドアライメントエラー時（左右方向±1 mm）の電場強度。2-Aの平均値を1として規格化。

## 3. 電極間電場分布

### 3.1 3次元電磁場解析によるアライメント誤差評価

ロッド据え付けにおける許容誤差を見積もるため、MW-Studioによりロッド1本にアライメントエラーがある場合の電場強度分布をシミュレーションした。以下、図2に示すように、z軸正方向をビーム加速方向とし、4重極電極で仕切られた象限をそれぞれ1-Aから2-Dまでの名称で呼ぶ。

2-C、2-Dの間に位置しているロッドが入射側先端で-x方向に1 mm、出射側先端で+x方向に1 mm加速軸からオフセットしている（y方向のオフセットはない）場合の電場強度分布を図3に示す。ロッド間距離が短くなっている2-Cの入射側、2-Dの出射側で電場強度が強くなり、装置全長に渡って様な電場強度分布が得られていない。2-C、2-Dそれぞれの電場強

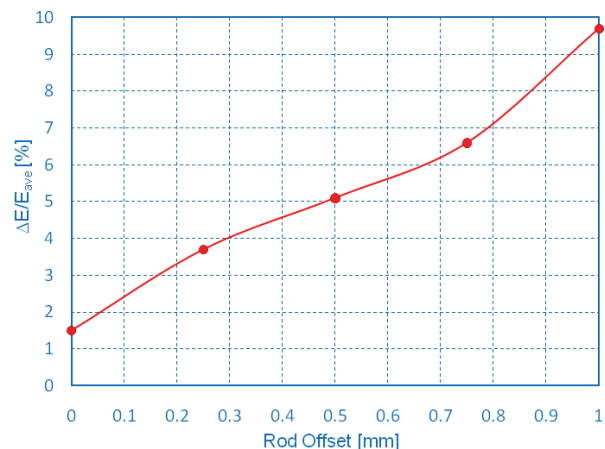


図4: 平均値に対する電場強度の最大誤差

アライメントエラーによる電場強度の平均値に対する最大誤差を図4に示す。ロッドが加速軸に対し

て±500 μmオフセットすると、加速軸方向の電場強度は最大約5%平均値から外れる。これまでに製作されたRFQリニアックでは電場強度の誤差が±5%以内に抑えられて運転されている事から、ロッドの据え付けは±500 μmの範囲で行う。

### 3.2 実機における電場分布測定

加速空洞内の電場強度分布は摂動法によって求めた。測定系の構成を図5に示す。SG (Signal Generator) より出たRF出力は方向性結合器で加速空洞に入る入射波と、ベクトルボルトメーターに入る参照波に分けられる。一方、加速空洞からの透過波もベクトルボルトメーターに入れ、これと参照波との位相差を測定した。摂動体は加速空洞のビーム軸に沿って張ったナイロン糸に取り付け、この糸をステッピングモーターで軸に沿って動かした。

RFQのロッド間電場を測定するために、アクリル製摂動体 (長さ10 mm、厚さ8 mm) を隣り合う2本のロッドに常に当たるようにしてビーム軸方向に動かした (図6)。

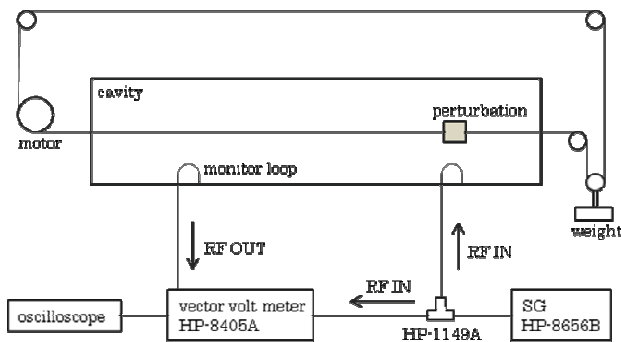


図5: 摂動法の装置構成

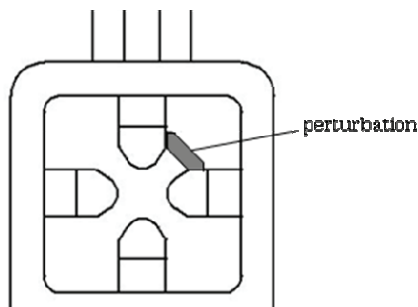
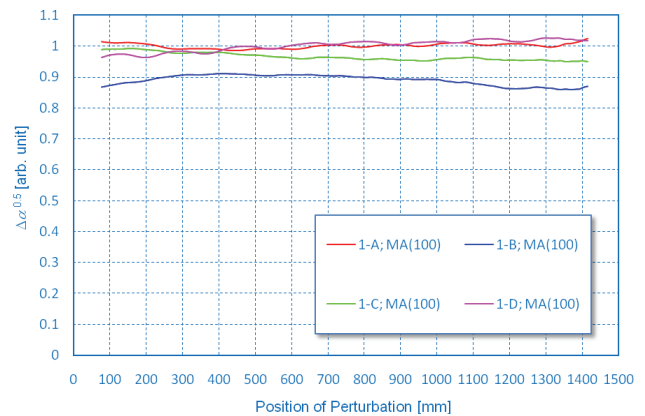


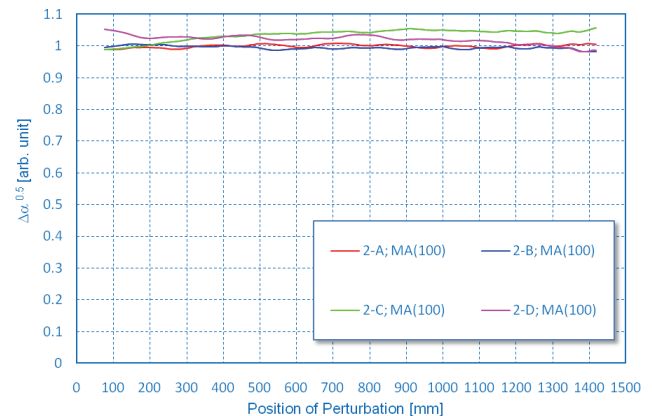
図6: 電場強度測定位置

アライメント前の電場強度測定結果を図7に示す。各象限間における電場強度のばらつきはビームチャンネル1で約8%、チャンネル2で約4%以内に収まっている。MW-Studioの結果から、これはロッドのアライメントエラーがチャンネル1で約800 μm、チャンネル2で約300 μm生じていると考えられる。本研究では電場強度のばらつきを5%の範囲内に収めたいが、チャンネル1はこれを満たしていないた

め、治具による電極のアライメントが必要であることが分かった。



(a) ビームチャンネル1



(b) ビームチャンネル2

図7 アライメント前のロッド間電場強度分布。各ビームチャンネル、象限Aの電場強度平均値が1になるよう規格化。MA(100)は100測定点の移動平均線を表す。

## 4. まとめと今後の予定

実機における電場分布測定の結果、許容誤差を越えるアライメントエラーがあることが分かった。

そのため治具を使用したロッドの据え付けを行い、電場分布のばらつきを許容誤差の範囲に収める。高電力RF試験の後、ビーム加速実験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Y. Fujiie *et al.*, Research Report Institute of Plasma Physics Nagoya University, HIBLIC-heavy ion fusion reactor, Rep. IPPJ-663 (1984).
- [2] U. Ratzinger *et al.*, Nuclear Instruments and Method in Physics Research A, 415 (1998) 281.
- [3] T. Hattori *et al.*, Fusion Engineering and Design, 32, 359 (1996).