

## 4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の電場分布評価

### EVALUATION OF THE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN FOUR-BEAM IH-RFQ LINEAR ACCELERATOR

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

Shota Ikeda<sup>A)</sup>, Tatsunori Shibuya<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

As acceleration techniques of low-energy high-intensity heavy ion beam, there is a multi-beam acceleration method. In order to decrease space charge effect, multiple moderate-intensity beams are accelerated simultaneously and in parallel in one accelerator and integrated by beam funneling after acceleration. As the practical research, the prototype of a four-beam IH-RFQ linear accelerator has been developed in Tokyo Institute of Technology. The electromagnetic field distributions were simulated to evaluate the variation of quadrupole field in each beam channel and the influence of the results on beam transmission was checked.

#### 1. はじめに

低エネルギー大強度重イオンビームの加速技術として、空間電荷効果が許容範囲の強度のビームを複数並列に加速後、ビームファネリングにより統合する、マルチビーム加速法がある。その実用化に向けて、東京工業大学原子炉工学研究所では4ビーム IH-RFQ 線形加速器の原理実証機の開発を進めてきているが、電極レイアウトによって各ビームチャンネルの四重極電場分布にばらつきが生じることから、ビーム加速に対して影響が懸念される。そこで、3次元電磁場シミュレーションにより4ビーム IH-RFQ 線形加速器の高周波解析をおこない、各ビームチャンネルの電場分布のばらつきを評価した。また、そのビーム加速に対する影響についても検証した。

#### 2. 4ビーム型 IH-RFQ の基本構造

SolidWorks<sup>[1]</sup>でデザインした4ビーム IH-RFQ 線形加速空洞の解析モデルと基本パラメータを Figure 1 及び Table 1 に示す。空洞内部には、ロッド状の RFQ 電極が 16 本 (4 本×4 セット) あり、それらを支えるステム電極が上下のリッジ電極に対し交互に組み込まれている、Interdigital な構造となっている。ビームチャンネルは左上から反時計回りに Channel 1 から Channel 4 とする。IH-RFQ 加速空洞は高周波電磁場が TE<sub>111</sub> モードで励振される空洞であり、リッジ電極とステム電極に誘導電流が流れることにより、RFQ 電極間に四重極電場が生じる。今回のモデルでは、ビームチャンネル1と3、ビームチャンネル2と4が同じ極性配置となるような、ステム電極の形状を採用した。また、各ビームチャンネル内の RFQ 電極で仕切られた空間を、それぞれ第1象限から第4象限とする。

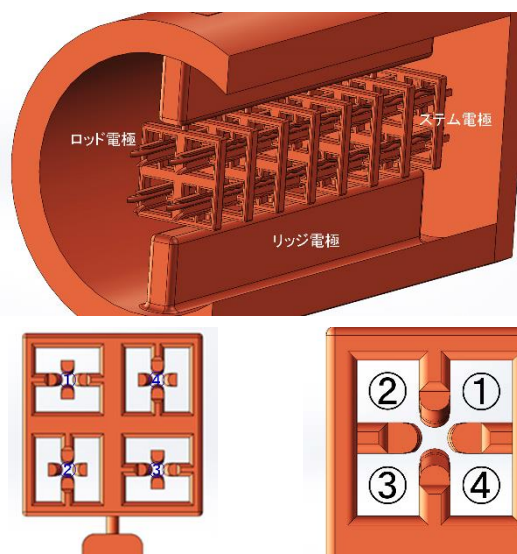


Figure 1: Configuration of the 4-beam IH-RFQ linac.

Table 1: Design Parameters of the 4-beam IH-RFQ Linac

Operation frequency [MHz]	48.1
Cavity diameter [mm]	410
Cavity length [mm]	800
Ridge width [mm]	47
Stem number	8
Stem-ridge distance [mm]	15
Rod length [mm]	741
Max. field at inter-rod gap [Kilpatrick]	1.8

#### 3. 四重極電場分布解析

4ビーム IH-RFQ 線形加速器の各ビームチャンネルの四重極電場強度のばらつきを確認するため、CST MICROWAVE STUDIO<sup>[2]</sup>を用いて高周波電磁場解析をおこなった。具体的には、Eigenmode Solver により加速空洞全体の電磁場分布を解析後、各ビーム

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

チャンネルの象限ごとの四重極電場強度を、ロッド電極全長にわたって評価した (Figure 2 の赤色部分)。なお、電場強度分布のばらつきを評価しやすくなるため、RFQ 電極のモジュレーションを無変調とした。

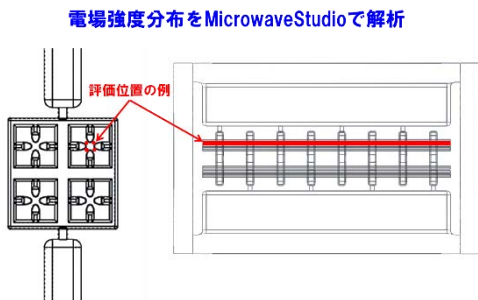


Figure 2: Evaluation points of quadrupole electric field.

各ビームチャンネルの電場強度分布を Figure 3 に示す。また、平均電場強度に対する最大及び最小電場の強度差を Table 2 に示す。その大きさは Channel 1 と Channel 2 では  $\pm 3\%$  を超えており、Channel 3 と Channel 4 は  $\pm 3\%$  程度であった。ビーム進行方向に対して Channel 2 と Channel 3 の電場強度は強くなり、Channel 1 と Channel 4 では弱くなった。これは、最初と最後のステム電極において、リッジ電極と接続する極性が反転しているためと考えられる。また、

Channel 1 及び Channel 2 は第 1・第 2 象限と第 3・第 4 象限の電場強度分布が離れているが、その原因としては Figure 4 に示すように、ステム電極を流れる電流量が各 RFQ 電極に対して均一でないことが一因としてあげられる。

Table 2: Maximum and Minimum Electric Field Intensity of the 4-beam IH-RFQ linac

Beam channel	$E_{\min}$ [%]	$E_{\max}$ [%]
Ch1	-4.47	3.25
Ch2	-4.68	3.43
Ch3	-2.95	2.92
Ch4	-3.02	2.93

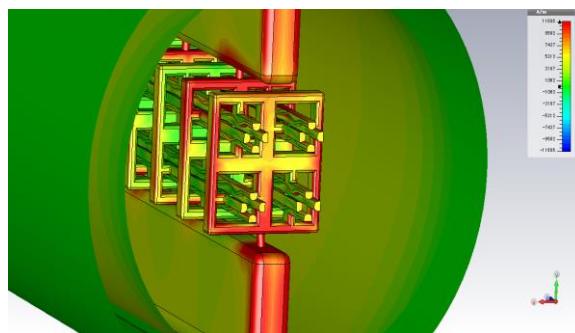
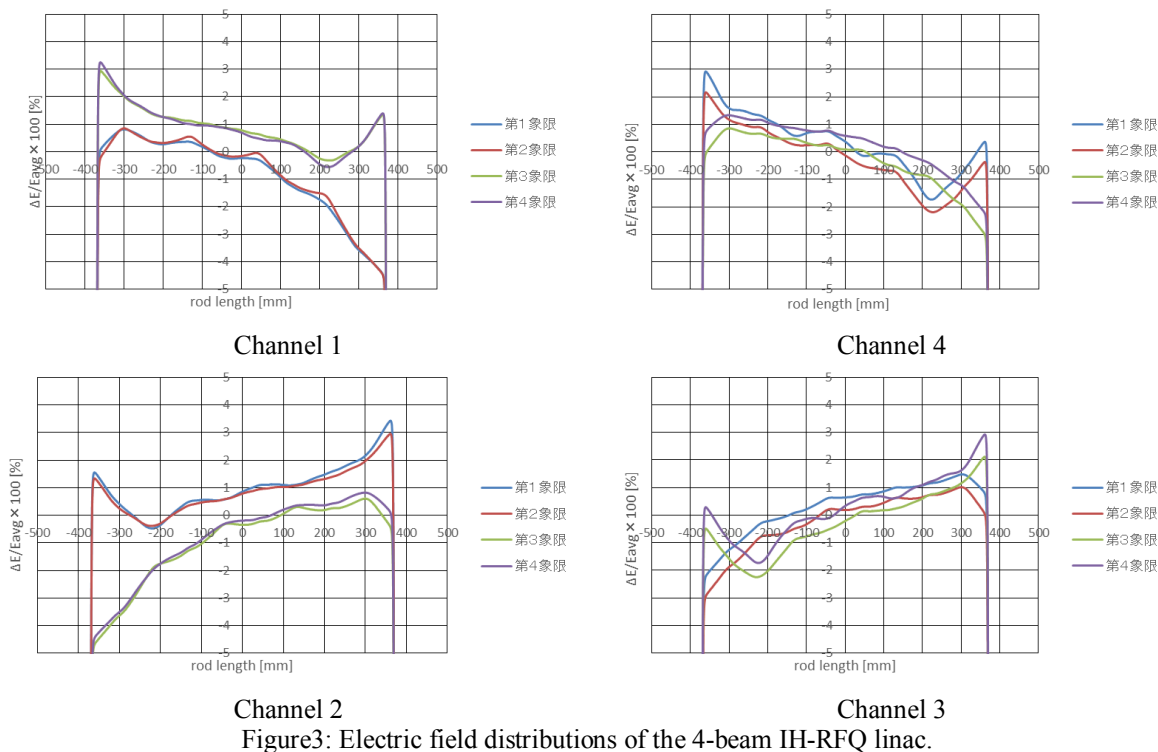


Figure 4: Surface current of the 4-beam IH-RFQ linac.



Channel 2 Channel 3  
Figure 3: Electric field distributions of the 4-beam IH-RFQ linac.

#### 4. ビーム加速特性解析

各ビームチャンネルの四重極電場強度のばらつきがビーム加速に与える影響を評価するため、粒子軌道解析コード GPT<sup>[3]</sup>を用いてビーム軌道解析をおこなった。ビーム軌道解析用の RFQ 電極にはモジュレーションが必要なため、RFQ デザインコード RFQUICK<sup>[4]</sup>と粒子軌道解析コード PARMTEQM<sup>[5]</sup>によりデザインした。そのセルパラメータを Figure 5 と Figure 6 に示す。そして、高周波電磁場解析後、電磁場分布と RFQ 電極の位置を GPT にインポートし、各ビームチャンネルに C<sup>2+</sup>を Table 3 の条件で入射した場合のビーム軌道解析をおこなった。その一例を Figure 7 に示す。

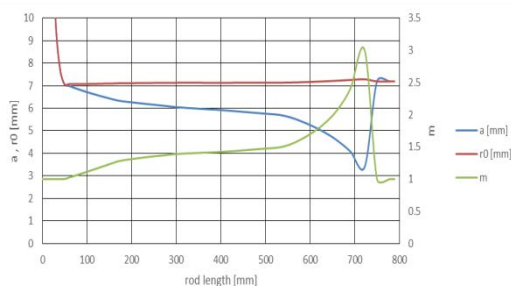


Figure 5: Cell parameters of the 4-beam IH-RFQ linac (1).

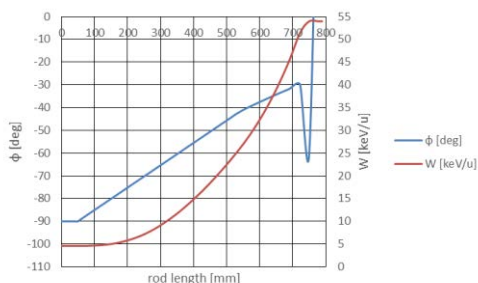


Figure 6: Cell parameters of the 4-beam IH-RFQ linac (2).

Table 3: Input Beam Parameters

Input Beam Energy [keV/u]	4.58
Input Beam Current [mA]	60
Beam Radius [mm]	4
Beam Pulse [μsec]	0.1
Input Beam Emittance [π mm mrad]	0.1
Particle Number	10000

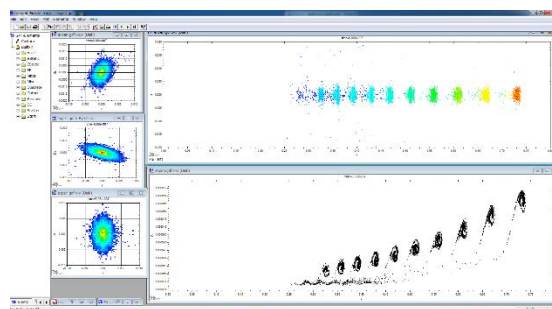


Figure 7: Beam simulation results with GPT.

四重極電場強度のばらつきを取り入れた GPT によるビーム加速特性解析で得られた、入射粒子に対する出射粒子の割合と、加速された粒子の割合を Table 4 に示す。この結果は、四重極電場強度のばらつきがない条件での計算結果とほとんど変わらなかった。但し、他のビームチャンネルと比べて、Channel 1 では通過または加速した粒子の割合が低い結果になった。その原因が計算精度によるものなのか、有意なものなのかは現在検証中である。

Table 4: Transmission and Accelerated Beam in the 4-beam IH-RFQ Linac

	Transmission [%]	Accelerated beam [%]
Ch1	70.43	63.86
Ch2	71.04	65.16
Ch3	71.24	65.12
Ch4	70.93	64.84

#### 5. まとめ

4 ビーム IH-RFQ 線形加速器の原理実証機の開発として、各ビームチャンネルの電場強度分布のばらつきの解析とそのばらつきが加速粒子に与える影響を評価した。今後、RFQ 電極と加速器全体の詳細設計を進め、原理実証機の製作に取り組む予定である。また、直接入射方式の 4 ビームレーザーイオン源の開発も同時におこなっている。

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] <http://www.solidworks.co.jp>
- [2] <http://www.cst.com>
- [3] <http://www.pulsar.nl/index.htm>
- [4] K. R. Crandall RFQ Design Codes, LA-UR-96-1836 [2005]
- [5] K. R. Crandall and T.P. Wangler, Workshop on Linear Accelerator and Beam Optics Codes, La Jolla, CA, USA, 1988, AIP Conference Proceedings No177 [1988].