

J-PARC RFQ の 3 次元 RF シミュレーション用いた高周波設計とチューニング RF DESIGN AND TUNING OF THE J-PARC RFQ USING THREE-DIMENSIONAL MODELING

森下卓俊^{#, A)}, 近藤恭弘^{A)}, 小栗英知^{A)}, 長谷川和男^{A)}, 大谷将士^{B)}

Takatoshi Morishita^{#, A)}, Yasuhiro Kondo^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}, Kazuo Hasegawa^{A)}, Masashi Otani^{B)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The radio-frequency quadrupole (RFQ) is operating in the frontend of the J-PARC linac to accelerates 50 mA negative hydrogen ion beams from 0.05 MeV to 3 MeV. As a backup, the spare RFQ has been fabricated in 2018. The vane-voltage ramping is adopted to improve the acceleration efficiency so that the cross-sectional shape is adjusted longitudinally to produce the designed voltage distribution. Then, the three-dimensional cavity models including modulations and end cuts were created in the RF simulation. The vane-base widths and end-cut depths were optimized to produce the desired vane-voltage distribution. In the final tuning, the heights of the stub turners were also determined based on the tuner responses obtained from the full 3D models.

1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex: 大強度陽子加速器施設)は大強度陽子ビーム加速器とそのビームを使用する実験施設からなる複合研究施設である。リニアック初段部は負水素イオン源と出力エネルギー3 MeV の RFQ で構成され、続く 3 台の DTL で 50 MeV, 32 台の SDTL (Separated-type DTL) で 191 MeV, 21 モジュールで構成される環結合型リニアック(ACS)で 400 MeV まで加速している [1]。J-PARC では 2008 年 12 月よりビーム利用運転を開始した。ビーム電流の増強のため、2014 年夏季に初号機から大電流(ピーク電流 50 mA) 加速に対応した RFQ に交換し、同年秋からは 30 mA、2016 年 1 月からは 40 mA にピーク電流を上げて利用運転を行っている [2]。以後大きなトラブルなく運転を継続しているが、不測のトラブル発生時の早期復旧のため、2017 年度には予備機として新たに RFQ を製作した。本発表では、新たに製作した RFQ の RF 設計の詳細と低電力調整結果について報告する。

2. 空洞断面形状設計

本 RFQ の主なパラメータを Table 1 に示す。現行機では、ベイン電圧を長手方向に同様とした設計であったが、本機では空洞下流側でベイン電圧を上げ、ビームの加速効率を上げる設計とした。それに伴って、平均ボア半径は下流に向かって滑らかに大きくなる。ビーム力学設計によって決定されたベイン電圧に合わせて長手方向

Table 1: Major Parameters

Frequency [MHz]	324
Cavity type	Four vanes
Vane length [m]	3.1
Inter-vane voltage[kV]	61.3 ~ 143
Max. surface field [MV/m]	29.8(1.67 Kilpatrick)
Average bore radius [mm]	2.6 ~ 6.2
Vane-tip curvature [mm]	$0.75r_0$

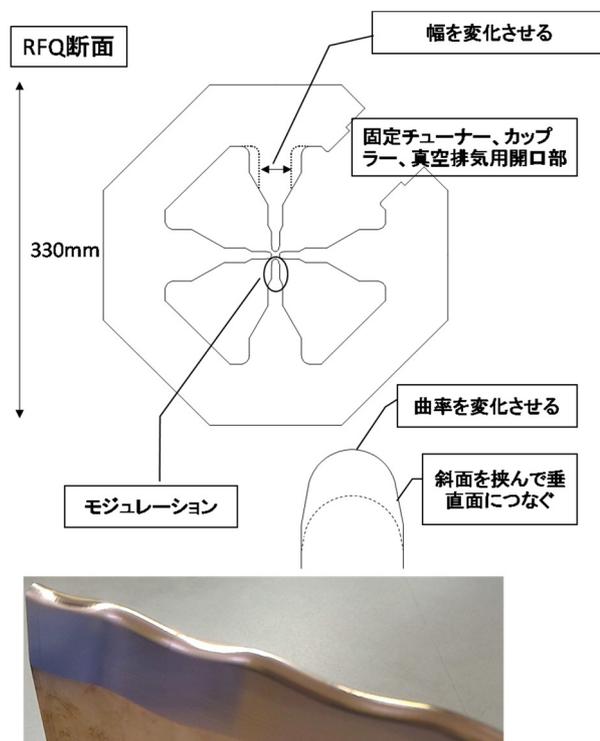


Figure 1: Cross-sectional shape of the RFQ cavity and the modulation.

[#] Takatoshi.morishita@j-parc.jp

に電圧を変化させるため、空洞の断面形状は Fig. 1 に示すように、ベインの根元の幅 (vane-base width) を調整することとした。

Vane-base width は SUPERFISH[3] と CST microwave studio[4] を用いて、以下のような手順で決定した。

- Figure 1 のような元となる断面形状を、SUPERFISH を用いて決定する。
- Figure 2 に示す平均半径における Vane-base width を、いくつかの長手方向位置について RFQFISH を用いて計算する。(周波数一定)
- 現時点での Vane-base width と平均半径から 3 次元 CAD モデル化する (Fig. 3)。Vane-base width については、今回は長手方向に 18 分割した断面をつなげた形状にパラメータ化する。
- エンドカットの深さも同様にパラメータ化する。
- シミュレーション結果 (電場分布) からベイン先端の電圧を計算し、Fig. 2 の電圧分布となるように、上記形状パラメータを最適化する。

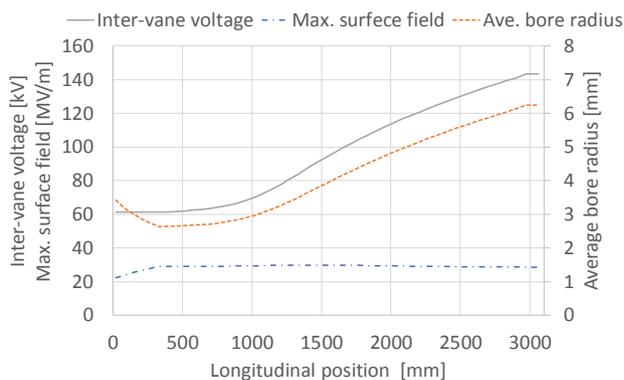


Figure 2: Longitudinal variation of the vane voltage and the average bore radius.

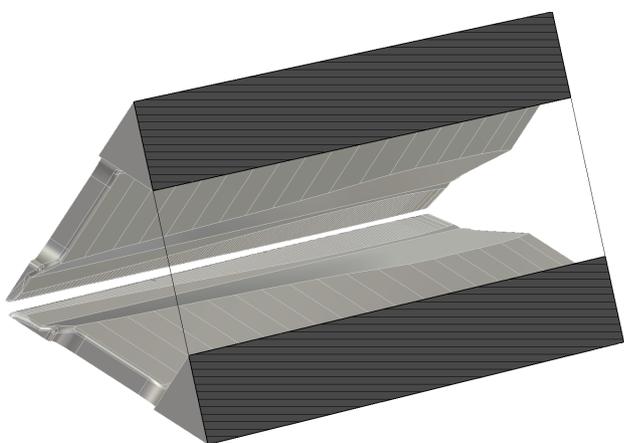


Figure 3: 1/4 model for tuning the vane-base width and the depth for end cut.

RFQFISH の出力形状で空洞を製作し、後でチューナーを用いてベイン電圧分布を調整することも可能であるが、チューナーに必要なストロークが大きくなることを避けるため、今回は vane-base width で電圧分布をあらかじめ

調整しておき、チューナーでは製作誤差の調整のみを行う方針とした。形状パラメータの最適化は以下の手順で行った。

- パラメータ化した Vane-base width の 19 点と上下流のエンドカット 2 点の値をそれぞれ 1 mm 変化させ、ベイン先端電圧の単位長さ当たりの変化量を計算する。
- 20 mm 間隔でベイン電圧をサンプリングし、各形状パラメータに対するベイン電圧の変化量 (平均値で規格化した値を要素とする行列 \mathbf{X}) を作成する。
- 現状のベイン電圧分布と Fig. 2 の設計電圧の差 (列ベクトル \mathbf{B} とする) を求める。
- 各パラメータの調整量を \mathbf{A} として、 $\mathbf{XA} = \mathbf{B}$ となる $\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{B}$ を求める。

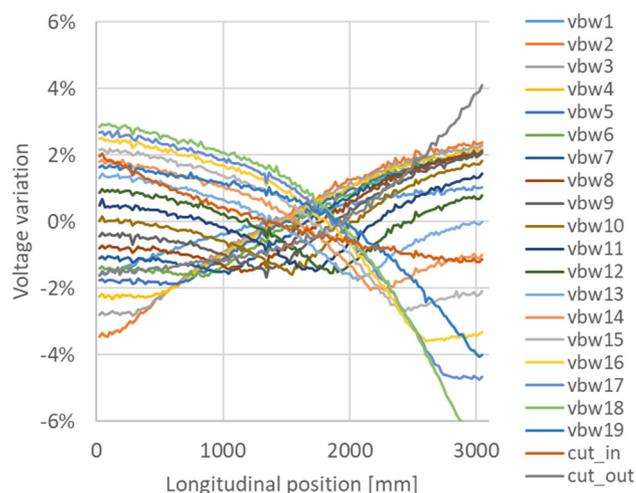


Figure 4: Voltage variations of the vane voltage for each cavity shape parameter.

全ての形状パラメータについてのベイン電圧の変化量を求める計算を実施する際、モデルが複雑だと 1 ケース当たりの計算時間が長くなるため、本要素の作成に用いた CAD モデルにはモジュレーションを入れず、ラジアルマッチングセクションとフリンジフィールドセクションのみ取り入れ、その他は平均半径のベイン形状で行った。各パラメータに対する電圧の変化量 (行列 \mathbf{X} の要素) は Fig. 4 のようになる。この時、ビーズ測定箇所 (空洞中心から 79 mm の位置) の磁場に対する行列も作成しておいた。Figure 4 の曲線が滑らかではないのは計算メッシュの粗さによるものと思われるが、ベイン全域の変化を調整する上では問題の無い程度である。数回の反復調整で変動が収束し、設計の電圧分布が得られた段階で、ビーズ測定箇所の磁場強度を計算しておき、低電力調整時には本計算結果を目標値としてチューナーを調整する。

次に、計算モデルにモジュレーションを組み込み、前述のビーズ測定箇所の磁場強度に対する応答行列と目標磁場を用いて、同様に形状パラメータの最適化を実施した。Fig. 5 はモジュレーションの有無による磁場分布の変化と、前述のパラメータの最適化を行った結果である。

モジュレーションの影響で長手方向にチルトが発生するが、その補正に必要な形状パラメータの調整量は $-0.1\text{ mm} \sim +0.2\text{ mm}$ であった。ここまででベインの主要形状 (RF にかかわる詳細寸法) が決定したことになる。

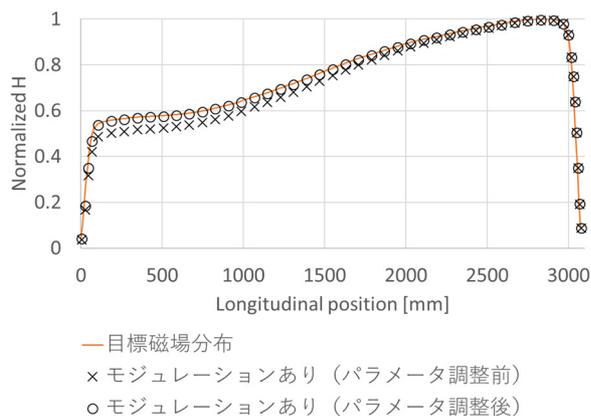


Figure 5: Effect of the modulations and the parameter tuning for the magnetic field distribution.

軸方向に断面形状が均一ではないので、平面図、断面図では加工に取り掛かる段階の全体形状を確認することに手間がかかる。そこで、ここまでの RF 設計に用いたモデルから 3 次元 CAD ファイルにエクスポートし、部品加工にかかわる CAD/CAM に持ち込むこととした。ベイン分割などの詳細設計を進めたのちに再度 CST microwave studio にインポートして RF 電磁場分布を確認することで、製作寸法の確認を実施した。

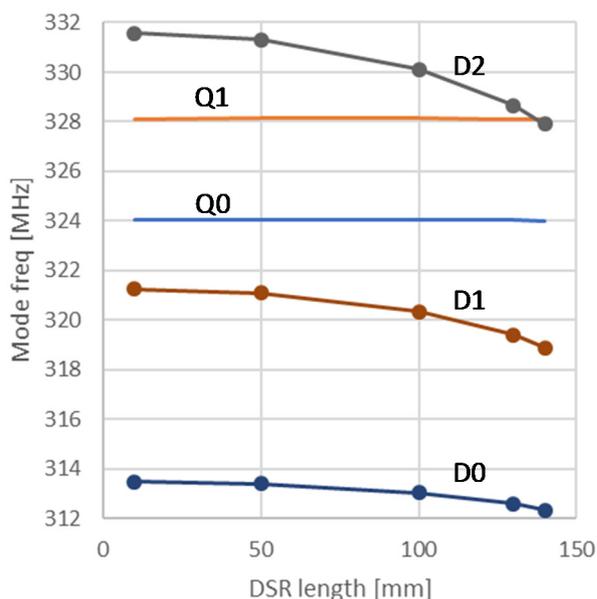


Figure 6: Effect of the dipole rods for the resonant mode frequency. Rod diameter is 14 mm.

3. 端板、チューナー

空洞のそのほかの構造については、以下の様な方針とした。

- 空洞は長手方向に 3 分割してフランジで連結する。
- チューナーは各象限に 9 個、ほぼ等間隔に配置する。
- いくつかのチューナーの先端をスリット構造として真空排気ポートを兼ねる。
- インプットカップラーは 1 系統とする。
- ダイポールモードの影響を低減するため、端板にはダイポール安定化ロッド (DSR) を装備する。

Figure 3 に示すように、空洞の入口と出口では断面およびエンドカットの形状が異なるので、ロッド長さに対する各ダイポールモードのシフト量は入口側、出口側で異なる。本空洞形状では、D1 モードは入口 DSR 長に感度が高く、D2 は入口と出口で同程度の感度であった。このような場合、入口側のロッドを長くすることでダイポールモード間の幅を大きくすることも可能であるが、ロッドが長くなると構造としての強度が下がるので、入口と出口で同じ長さとするようにした。Figure 6 に示す事前のシミュレーション結果ではおよそ 130 mm が最も運転モードとの分離が大きいと見積られる。ベイン製作後に実施した低電力調整時に、各モードの周波数実測値に基づいて 125 mm に決定した。Figure 7 に端板とチューナーの外観を示す。

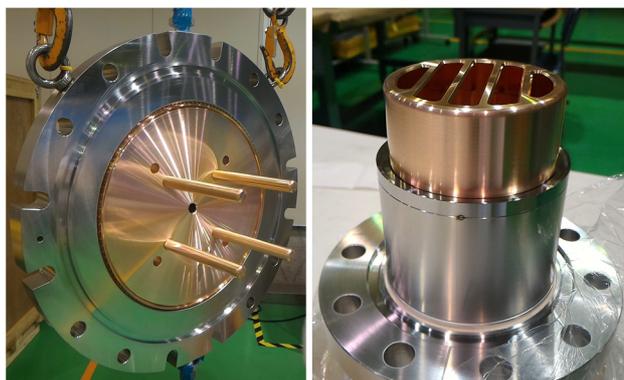


Figure 7: End plate and tuner.

4. 低電力調整

低電力調整では、ビーズ測定法を用いて各象限の磁場分布を測定した (Fig. 8)。ビーズ掃引箇所はダイポールロッドの外側で、磁場が支配的な領域である (Fig. 7 にあるように、DSR の外側の穴からビーズを通した)。ネットワークアナライザーで測定した位相変動から磁場強度分布に換算し、運転周波数と Fig. 5 の目標分布となるようにチューナー挿入量を調整する。

低電力調整時にチューナーの移動量に対する磁場分布の変化を実測して応答行列を作成することもできるが、作業期間の短縮のため、これも前述の最適化と同じ手順でシミュレーションにより応答行列を作成してチューナー移動量を決定した。チューナー 1 本当たりの変動をみるため、その計算には 4 つの象限すべてを含んだフルモ

デルを用いる必要がある。第一象限のチューナーを 1 mm 動かしたときの各象限の磁場の変動量は Fig. 9 のようになった。第一象限のみのチューナーの応答を計算し、4 回対称性を考慮して全行列要素を与えた。



Figure 8: Low level tuning.

チューニング前後のビーズ測定結果を Fig. 10 に示す。逆行列で求めたチューナー移動量に周波数調整分(全チューナーを同一量とした)を加えたもので全チューナーを移動し、合計 2 回の反復調整で、目標に対する分布のエラーは±1.5%以内となった。1 回目、2 回目の測定データに見える曲線の局所的なゆがみはチューナーの影響が見えているものである。初期状態ではチュー

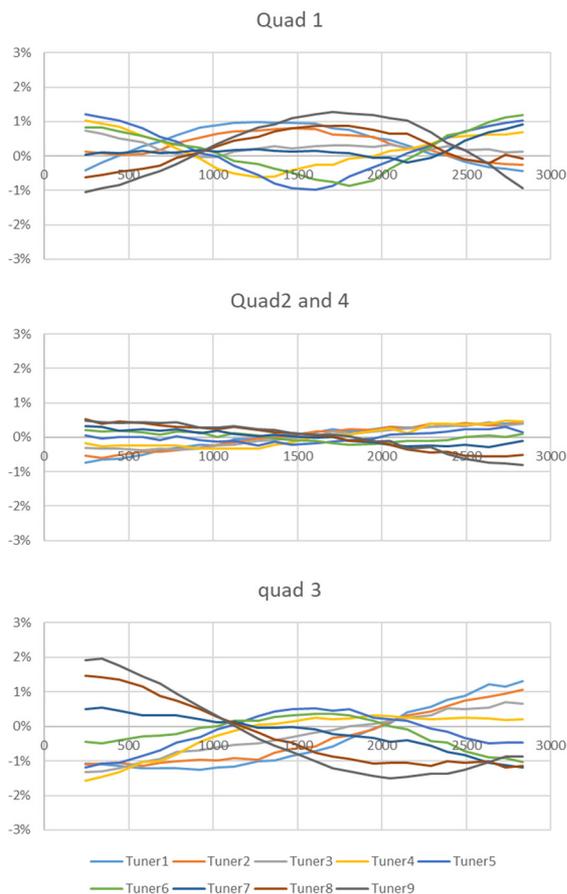


Figure 9: Magnetic field variations with tuner depth.

ナーは壁面位置(ポートとの隙間や先端のコーナーR,またはスリットによって磁場の漏れ出しがあるため、スリットなしでは 0.9 mm、スリット付きでは 1.9 mm 挿入した位置が初期位置となる)である。最終的に、調整に要したチューナーの移動量は-0.7 mm ~ +1.9 mm であった。

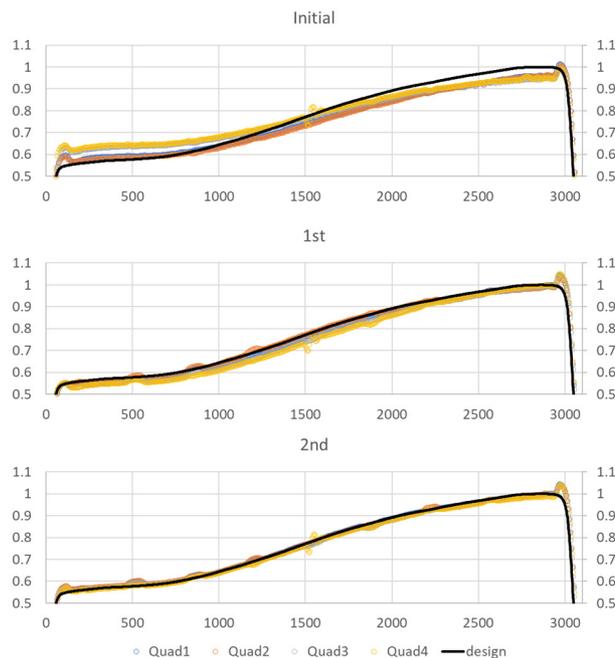


Figure 10: Bead-pull measurement result.

5. まとめ

J-PARC で 2017 年度に製作した RFQ はベイン電圧を長手方向に変化させて加速効率を高める設計となっている。それに伴い、空洞の断面形状やベイン先端の曲率は一様ではない。そこで、3 次元高周波シミュレーションを主体とした RF 設計を実施し、空洞形状を最適化した。さらに、チューナーを組み込みこんだ空洞のフルモデルを作成し、チューナーの挿入量に対する電磁場分布の変化をシミュレーションによって求めた。その結果に基づいて低電力調整を実施し、設計電圧分布への調整を短期間で完了することができた。本 RFQ は 2018 年度後半にオフラインテストスタンド[5]にて大電力 RF 投入試験を開始し、その後ビーム加速試験を実施する予定である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki (eds), "Accelerator Technical Design Report for J-PARC," JAERI-Tech 2003-044; KEK-Report 2002-13.
- [2] 森下、田村、丸田, "J-PARC リニアックのアップグレード", 加速器, 高エネルギーニュース, 33(4), (2015).
- [3] J. H. Billen, L. M. Young, Poisson Superfish, Tech. Rep., LAUR-96-1834 (1996).
- [4] CST Micro Wave Studio; www.cst.com
- [5] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 120101 (2014).