

# J-PARC MRにおける縦方向エミッタンス増大の為の高周波数空洞の計算 CALCULATIONS OF THE HIGH FREQUENCY CAVITY USED TO MAKE A CONTROLLED BLOW-UP OF THE LONGITUDINAL EMITTANCE IN J-PARC MR

長谷川 豪志<sup>A)</sup>、大森 千広<sup>A)</sup>、戸田 信<sup>A)</sup>、原 圭吾<sup>A)</sup>、吉井 正人<sup>A)</sup>  
野村 昌弘<sup>B)</sup>、山本 昌亘<sup>B)</sup>、島田 太平<sup>B)</sup>、田村 文彦<sup>B)</sup>

Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>, Chihiro Omori<sup>A)</sup>, Makoto Toda<sup>A)</sup>, Keigo Hara<sup>A)</sup>, Masahito Yoshii<sup>A)</sup>  
Masahiro Nomura<sup>B)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>B)</sup>, Taihei Shimada<sup>B)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Reserch Organization, KEK

<sup>B)</sup>Japan Atomic Energy Agency, JAEA

## Abstract

RF cavities in J-PARC Main Ring (MR) has realized the high field gradient by using Magnetic Alloy (MA) cores. The fundamental frequency of RF cavity is 1.67 - 1.72 MHz, but one of the longitudinal beam emittance blow-up technique under consideration assumes use of a high frequency cavity of about 90 MHz. This frequency is very high for MA loaded RF cavities. In this frequency band, there was a VHF cavity used by AGS of Brookhaven National Laboratory and the frequency of VHF cavity was about 93 MHz. Therefore, we are examining the RF cavity suitable for J-PARC MR by using this VHF cavity as a reference. In this paper, we describe the outline of our cavity.

## 1. はじめに

J-PARC MR の RF 空洞は、金属磁性体コアを使用し高い加速勾配を実現している。MR に現在インストールされている空洞は、1.67-1.72MHz の周波数帯で使用する基本波用空洞 8 台とその 2 倍の周波数帯 3.34-3.44MHz で使用する 2 倍高調波用空洞 1 台である。

MR でのビームロスを低減するため、現在 RCS から入射されているビームの縦方向エミッタンスを増大させることは有効である。しかし、RCS と MR のキッカーシステムが長いバンチ長に対応できない事から MR 入射後に増大させる事を検討している。検討している方法の一つでは、ビームが MR に入射された後、加速に使う基本波よりも高い周波数 (約 97MHz) の加速空洞で位相変調することによりエミッタンスを増大させる [1]。

金属磁性体もしくはフェライトを使用した加速空洞では、この想定周波数は非常に高い。この周波数帯の空洞では、米国ブルックヘブン国立研究所の AGS で使用された VHF 空洞 (約 93MHz、20kV) があった [2]。そこで、この VHF 空洞を参考に HFSS で計算を行い、J-PARC に適した空洞について検討している。本報告では、検討している空洞の計算結果について述べる。

## 2. 空洞の基本構造

計算から空洞側に求められている性能は、以下である。

1. 共振周波数  $f_0$  : 96.86MHz
2.  $Q_L$  値 : 4000 以下
3. 加速電圧  $V_p$  : 30kV

ここで、 $Q_L$  値は入力、出力ポートを含んだ空洞の負荷 Q 値、 $V_p$  はピーク電圧である。

この周波数帯では、金属磁性体もしくはフェライトを用いた空洞では周波数が高すぎるため、内部が真空の

共振空洞が候補となる。ピルボックス型で大きさを簡単に見積ると直径約 2.36m、長さ約 1.36m とかなり大きな空洞となるが、1/4 波長で共振する同軸構造では長さは約 0.77m と小さくなる。AGS の VHF 空洞は、共振周波数が約 93MHz、空洞電圧は 20kV の同軸構造である。よって、VHF 空洞の構造を参考に電磁場計算コード (HFSS) で計算し J-PARC での使用に適した空洞を決定していく。

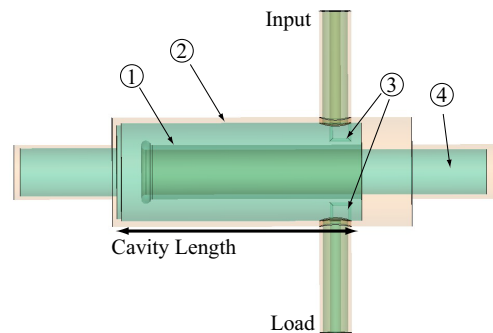


Figure 1: The schematic view of a cavity : (1)inner conductor, (2)outer conductor, (3)magnetic coupling loop,(4)beam pipe.

図 1 は、空洞の概略図である。同軸構造の内半径 (a)84.1375mm、外半径 (b)152.4mm、ギャップ間隔 76.2mm、空洞長 756.2mm である。ビームパイプは、現状 MR 空洞が 134mm に対して、139.7mm と 5.7mm 程大きい。1/4 波長の同軸構造より、ギャップ側に電場が集中し、ショート側端板で磁場が強い。よって、同軸構造の RF 入力ポートと出力ポートをショート側に配置し、先端にループを設置して空洞と磁場結合させる。上記の概略図では入力、出力ポート共に位置=679.56mm、空洞内のループ面積 1819mm<sup>2</sup> としている。また、出力ポートの先には RF 用水冷ダミーロードを設置するが、計算では末端境界を純抵抗 50 Ω とした。この空洞形状で材質

を銅として、入力と出力ポートがない空洞単体で固有値計算を行うと、共振周波数  $f_0=98.85\text{MHz}$ 、 $Q_0=8664$  となる。ここで、 $Q_0$  は空洞壁損だけを考慮した内部 Q 値である。また、ポートをつけた状態では  $f_0=99.61\text{MHz}$ 、 $Q_L=1577$  となっている。

### 3. パラメータサーチ

図 1 を基本に空洞長、入力や出力ポートの位置、長さ、ループの面積などを変えて、固有値モード計算や入力ポート側から S パラメータの計算を行い  $f_0$ 、 $Q_L$  値、 $S_{11}$ 、電圧定在波比 (VSWR) の変化を計算する。

#### 3.1 空洞長

1/4 波長の共振空洞より空洞長を変える事で共振周波数を調整することができるが、相対的にポートの位置も変わるため  $Q_L$  値も変化する。空洞長を変えたときの共振周波数  $f_0$  と  $Q_L$  値の計算結果を図 2 に示す。変化量は、共振周波数が  $-124\text{kHz/mm}$ 、 $Q_L$  値が  $+4.3/\text{mm}$  である。目的の周波数には、基本形状から約 22mm 空洞長を伸ばす方向となる。

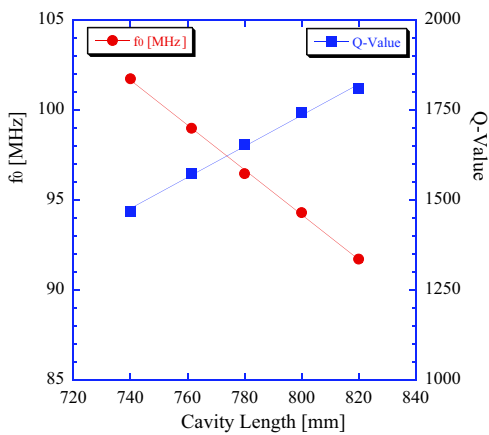


Figure 2: Cavity length v.s.  $f_0$  and  $Q_L$ .

#### 3.2 RF 入力ポート

入力ポートの位置変えたときの共振周波数と  $Q_L$  値の変化を図 3 に示す。取り付け位置の変化に対して共振周波数と  $Q_L$  値は影響を受けない事が分かる。

次に磁場結合用ループの空洞内面積を変えたときの共振周波数と  $Q_L$  値の変化を図 4 に、入力ポート側から計算した  $S_{11}$  と VSWR の変化を図 5 に示す。取り付け位置同様にループ面積を変えても共振周波数や  $Q_L$  値に影響はない。しかし、図 5 からループ面積を  $1819\text{mm}^2$  から  $668\text{mm}^2$  へ小さくすることによって  $(S_{11}, \text{VSWR}) = (0.71, 5.85)$  から  $(0.12, 1.27)$  へ改善されていることが分かる。

#### 3.3 RF 出力ポート

出力ポートの位置変えたときの共振周波数と  $Q_L$  値の変化を図 6 に示す。共振周波数に影響はないが、位置が端板よりに変わることによってループを貫く磁束が増え、結合が強くなった結果  $Q_L$  値が小さくなる。変化量としては、 $-3.8/\text{mm}$  である。

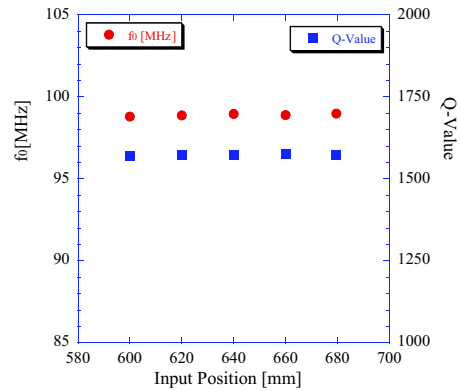


Figure 3: Input port position v.s.  $f_0$  and  $Q_L$ .

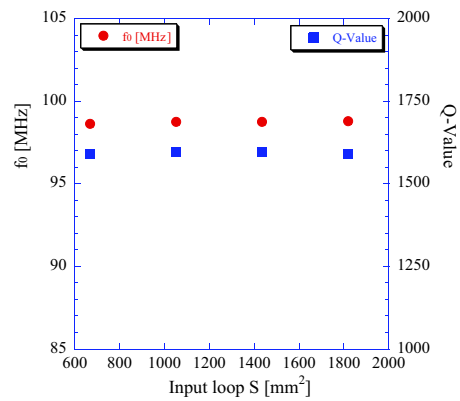


Figure 4: Loop area v.s.  $f_0$  and  $Q_L$ .

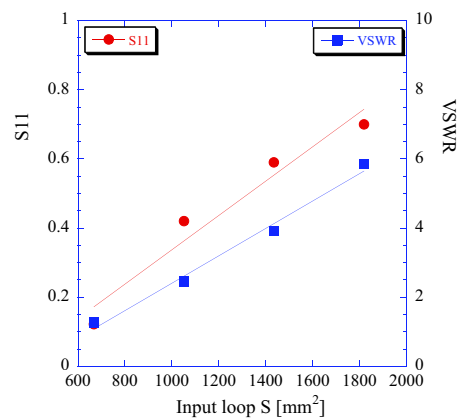


Figure 5: Loop area v.s.  $S_{11}$  and VSWR.

図 7 では位置を固定しループ面積を変えているが、結果は同様に面積が増すほど  $Q_L$  値が小さくなる。またこの場合の変化量は  $-2.0/\text{mm}^2$  であり、変化量が大きいため空洞の  $Q_L$  値を決定する重要なパラメータである。

図 8 では、ループ面積を変えた場合の  $S_{11}$  と VSWR を入力側ループ面積 ( $1819\text{mm}^2$ 、 $668\text{mm}^2$ ) について示している。入力側ループ面積を小さくし、出力側ループ面積を大きくすることで  $S_{11}$  と VSWR は小さくなる。

$Q_L$  値を大きくするために出力側ループ面積を小さくすると反射が大きくなることから、注意が必要である。

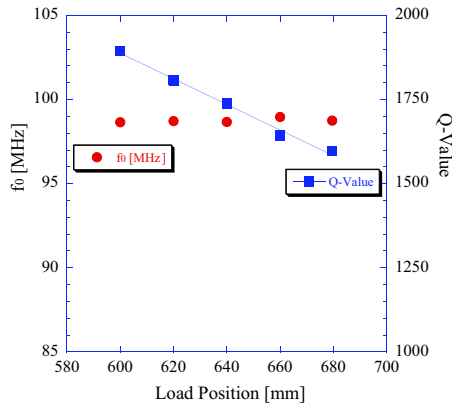


Figure 6: Output port position v.s.  $f_0$  and  $Q_L$ .

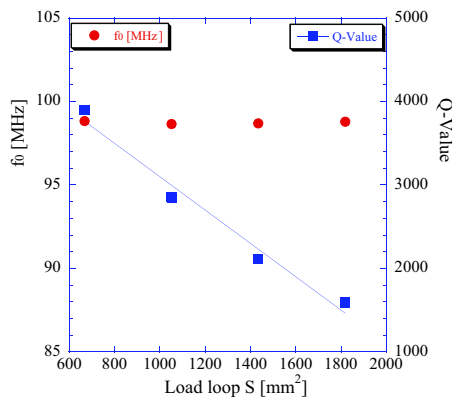


Figure 7: Loop area v.s.  $f_0$  and  $Q_L$ .

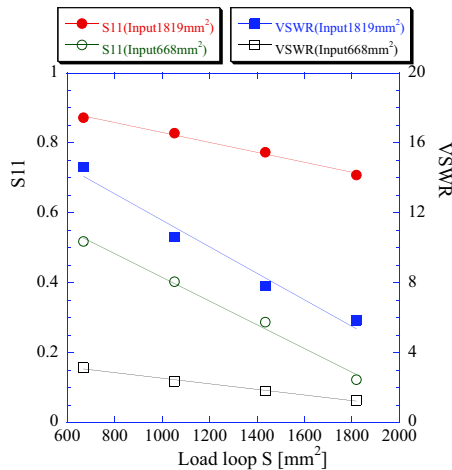


Figure 8: Loop area v.s.  $S_{11}$  and VSWR

## 4. J-PARC 用 VHF 空洞

### 4.1 空洞の諸数値

パラメータサーチの結果から、

1. 共振周波数の調整：空洞長
2.  $Q_L$  値の調整：出力ポートの位置、ループ面積
3. 入力パワー、VSWR の調整：入力ポートのループ面積

Table 1: Cavity Parameter at  $V_p=30\text{kV}$

空洞長	777.125	mm
ギャップ間隔	76.2	mm
内導体半径 a	84.1375	mm
外導体半径 b	152.4	mm
ループ面積 (入力側)	668	mm <sup>2</sup>
ループ面積 (出力側)	1819	mm <sup>2</sup>
ビームパイプ	139.7	mm
共振周波数 $f_0$	96.78	MHz
$Q_L$ 値	1644	
貯蔵エネルギー	0.0162	J
壁損 $P_{loss}$	1.13	kW
$Q_0$ 値	8683	
シャントインピーダンス $R_{sh}$	794.6	k
入力パワー	6.14	kW
$S_{11}$	0.13	
VSWR	1.30	

の手順で何度か調整する事で最適化していく。

表 4.1 に  $V_p=30\text{kV}$  の場合の空洞の諸数値 (計算結果) をまとめる。共振周波数が  $0.08\text{MHz}$  ずれているが、誤差が 1%程度含まれているため許容範囲である。また、シャントインピーダンス ( $R_{sh}$ ) はピーク電圧から計算している。表からも分かるように、 $V_p=30\text{kV}$  の為には約  $10\text{kW}$  程度のアンプが必要である。アンプの検討はこれからであるが、アンプ側として  $80\text{kW}$ 、出力ポート側には  $80\text{kW}$  の水冷 RF 用ダミーロードを想定すると、この場合空洞の最大電圧は約  $108\text{kV}$  である。

### 4.2 高次モード

上記の空洞における固有値モード解析から高次モードが直近の周波数で励起されないかを調べた。基本モード (TEM) が  $96.78\text{MHz}$  であり、高次モードの最低次 ( $TE_{11}$ ) は  $264.92\text{MHz}$  で 2 倍以上離れている。

## 5. まとめと今後の予定

J-PARC MR で使用する縦方向エミッタンス増大用空洞の検討及び形状の最適化を行っている。HFSS の電磁場計算結果から、周波数、Q 値などの最適化指針を得ることができた。現状で要求される性能 ( $f_0=96.7\text{MHz}$ 、 $Q_L < 4000$ 、 $V_p=30\text{kV}$ ) は満たしているが、今後更に詳細を詰め最適化していく予定である。また、電圧モニターの設置や排気系、周波数調整のためのショート側端板移動機構など、空洞制作に必要な部分やアンプ側の検討も進める。

## 参考文献

- [1] M.Yamamoto, et al. "J-PARC MR における縦方向エミッタンス増大操作のシミュレーション", Proceedings of the 10th Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [2] R.K. Reece, et al., "Operational experience and techniques for controlled longitudinal phase space dilution in the AGS using a high harmonic cavity", Proc. 1989 IEEE Part Accel Conf Vol 3, p1934-1936