

## RF Characteristic of Eccentric-Fluted Beam Pipe

Masaru Sawamura<sup>1,A)</sup>, Kensei Umenori<sup>B)</sup>, Takaaki Furuya<sup>B)</sup>, Shogo Sakanaka<sup>B)</sup>,  
Takeshi Takahashi<sup>B)</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>B)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>C)</sup>, Kenji Shinoe<sup>C)</sup>

A) Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195

B) High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

C) The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo

5-1-5 Kashinoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

### Abstract

An eccentric-fluted beam pipe has been proposed to damp quadrupole modes. The eccentric-flute acts as a mode converter from quadrupole to dipole. Optimized parameters permit to damp both degenerate modes of quadrupole with the eccentric-flute. External Q-values measured with a low power model agree well with those calculated with MAFIA

## 偏心フルートの高周波特性

### 1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (ERL) のような超伝導空洞を用いた大電流のCW加速器においては高調波 (HOM) の減衰が重要である。HOMのQ値を低くすることは、冷凍機システムの負荷を軽減するだけでなく、ビーム不安定性により制限されるしきい値電流の増加を可能にする。HOMを減衰させる方法として、ループ型のHOMカップラーを用いる方法とビームパイプを太くしてビームパイプ途中のHOM吸収体で減衰させる方法がある。前者は大電流のCW運転の場合には発熱の問題が報告されている[1]。後者はビームパイプを太くして遮断周波数を下げることによりHOMのビームパイプ中での伝播を可能にするもので、単極、双極モードに対しては効果的である[2]。しかし四重極モードに対しては伝播できるまでビームパイプを太くすると、ビームパイプ中への基本波の染み出しが大きくなってしまうため、HOM吸収体をセルから遠く離さなければならず、全長に占める加速部分の割合を示すパッキング・ファクターが低下してしまうなどあまり効果的でなくなってしまう。

四重極HOMを減衰させる新たな方法として、非対称のフルート「偏心フルート」付きビームパイプを提案する。偏心フルートはフルート(図1左)をビーム軸からずらしたり(図1中)、V字に折り曲げたり

した(図1右)構造になっている。

本発表では偏心フルートの原理、MAFIAを用いた計算ならびにローパワーモデルでの測定結果について報告する。

### 2. 偏心フルートの原理

フルート付きビームパイプは単極、双極モードの遮断周波数を下げることによって、これらのモードのビームパイプ中での伝播を可能にしている。しかし四重極モードに対してはフルートが対称であるため、フルート付きビームパイプ中のモードパターンは四重極のままである。フルートを中心軸からずらすと、四重極モードはフルート近辺では双極モードのように見え、このフルートの非対称性により四重極モードの一部が双極モードに変換され得る。双極モードの遮断周波数は四重極モードより低いため、周波数はそのまま双極モードに変換されればビームパイプ中を伝播できるようになる。

このことを確かめるために空洞およびビームパイプ断面での電界のフーリエ成分を計算した(図2)。この計算に用いたモデルはTESLA型の1セル空洞で、フルートのサイズは長さ60mm、高さ20mm、深さ31mmで、中心軸から10mmずらしたものである。セルは0~0.113mに位置し、偏心フルートは-0.014~-0.074mに位置している。

図2から偏心フルート付近で双極モードが励起されビームパイプ中を伝播していることが分かる。このことから偏心フルートは四重極から双極モードへのモード変換器のような働きをしていると見なすことが出来る。またビーム中心軸に対して45度回転し

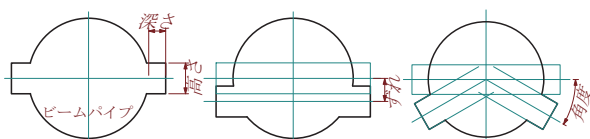


図1 通常フルート(左)と偏心フルート(中、右)

<sup>1</sup> E-mail: Sawamura.masaru@jaea.go.jp

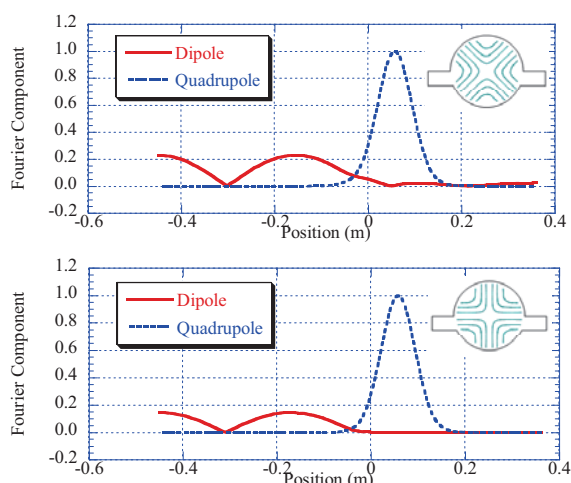


図2 セルおよびビームパイプ断面での電界分布のフーリエ成分。四重極モードのフィールドと偏心フルートの関係は図中に示す。

ている2つの縮退モードに対しても偏心フルートは有効であることが分かる。

### 3. 偏心フルートの外部Q値

#### 3.1 計算方法

偏心フルートの効果を評価するために、偏心フルートが付いたビームパイプの外部Q値を求めた。MAFIAを用いた外部Q値の計算方法は文献[3-5]に詳しくまとめられているが、要約すると、伝送線（この場合はビームパイプ）を電磁波がTEモードで伝わる場合の外部Q値( $Q_{\text{ext}}$ )は次式で表せる。

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\Lambda}{\lambda} R_E + \frac{\lambda}{\Lambda} R_H \right), \quad (1)$$

$$R_E = \frac{\iiint |E|^2 dv}{\iint |E|^2 ds}, \quad (2)$$

$$R_H = \frac{\iiint |H|^2 dv}{\iint |H|^2 ds}, \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$ と $\Lambda$ はそれぞれ自由空間および導波管内での波長である。(2)式および(3)式の体積積分は空洞全体に対して行う。また面積積分はビームパイプ断面に対して行うが、この断面における境界条件が(2)式の場合は電界が腹に、(3)式は磁界が腹になるように計算した結果を用いる。

#### 3.2 測定方法

計算の妥当性を確かめるために、図3のようなアルミニウム製のローパワーモデルを製作した。この偏心フルートモデルは円周方向に7分割された円筒片で構成されており、この円筒片を並べ変えること



図3 ローパワーモデル(左)と円周方向に分割された偏心フルート付きビームパイプ

により、フルート角度を0~45度まで5度間隔で変えることが出来る。またフルート長さ、およびフルート深さの変更も可能になっている。

偏心フルートをTESLA型の単セルおよび3セル空洞の片側に取り付けた。高周波のドライブ用アンテナは一方のエンドセルに、ピックアップ用アンテナは反対側のエンドセルの対称位置に取り付けた。2つの縮退モードを分離するためビーム軸に対してドライブアンテナから22.5度回転した位置に摂動アンテナを挿入した。HOM吸収体としてフェライトシートを丸めたものをビームパイプ内部にセットし、フェライトシート的位置を変えながら空洞の負荷Q値を

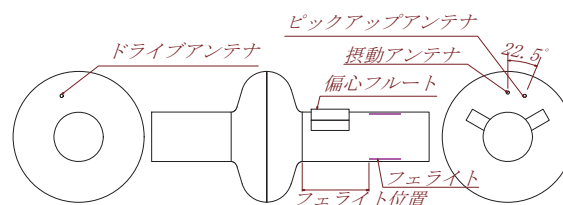


図4 偏心フルートの測定セットアップ

ネットワークアナライザで測定した(図4)。

単セル空洞において偏心フルートの有無に関してフェライトシート位置による負荷Q値の変化を図5に示す。図中のTE211EとTE211Mはビーム軸に沿った偏心フルートの対称面に関して、それぞれ電界および磁界の接線成分がゼロになるような境界条件である。偏心フルートがない場合はセル内の高周波が染み出して来ているセル付近を除けば、フェライト位置に関係なく負荷Q値は一定であり、ビームパイプ中での高周波の伝播がないことを示している。一方、偏心フルートがある場合はフェライトシートがセルから遠く離れた位置でも負荷Q値の変化が見られる。これはビームパイプ中を高周波が伝播していることを示している。

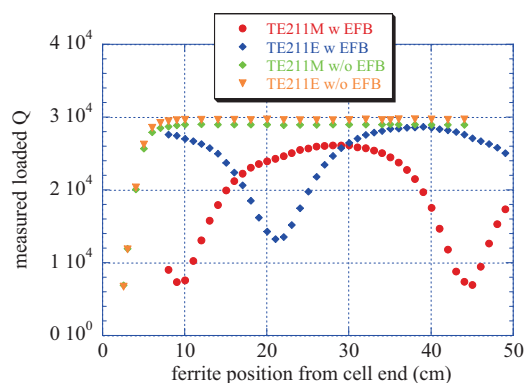


図5 偏心フルートの有無による単セル空洞における負荷Q値の変化

もしHOM吸収体に反射がなく、HOMをすべて吸収する理想的な材質で出来ているならば、HOM吸収体の位置に関係なく、負荷Q値は無負荷Q値と外部Q値で決まる一定の値となる。しかし実際のHOM吸収体には多少の反射があり、HOM吸収体の位置で負荷Q値が変わってしまう。これは伝送線（この場合はビームパイプ）のコンダクタンスがHOM吸収体の位置で変わるためである。この規格化コンダクタンス (g) と外部Q値、無負荷Q値 ( $Q_0$ ) を用いて負荷Q値 ( $Q_L$ ) は次式で表せる。

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{g}{Q_{ext}}, \quad (4)$$

コンダクタンスはHOM吸収体の位置の関数として伝播定数とアドミタンスを用いて表すことができ、測定した負荷Q値をこの関数でフィッティングすることにより外部Q値を求めることができる[6]。

## 4. 計算および測定結果

### 4.1 偏心フルート角度依存

TESLA型3セル空洞においてフルート角度を変えた場合の外部Q値の計算値と測定値を図6に示す。測定値は計算値とほぼ一致している。

TESLA型空洞はエンドセルの形状を非対称にすることによって、特定のHOMをエンドセルの一方側に偏らせることによりHOMカップラーで効率よく減衰できるように設計されている[7]。今回のセットアップでは0モードは偏心フルートを取り付けたビームパイプと反対側のセルに分布が偏っている。このため偏心フルートとの結合がほとんどなく、外部Q値は大きいままである。このためこのモードは測ることが出来なかった。

外部Q値が小さいところで計算と測定の違いが大きくなる傾向がある。これは外部Q値が小さいところでは負荷Q値も低くなるため、分離した2つの縮退モードの共振曲線がオーバーラップしてしまう。そのため求めた負荷Q値に誤差が多く含まれるようになり、これらのデータを元に求めた外部Q値の誤差も大きくなるためと考えられる。

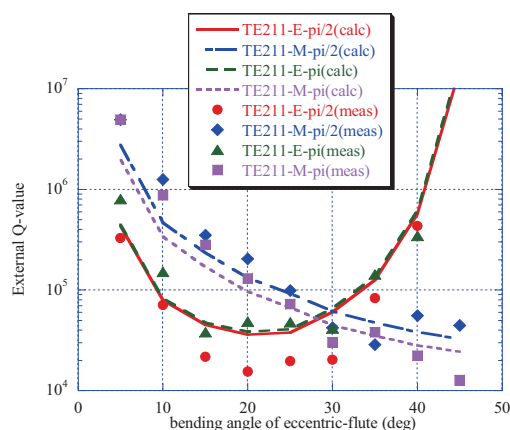


図6 3セル空洞における外部Q値のフルート角度依存性

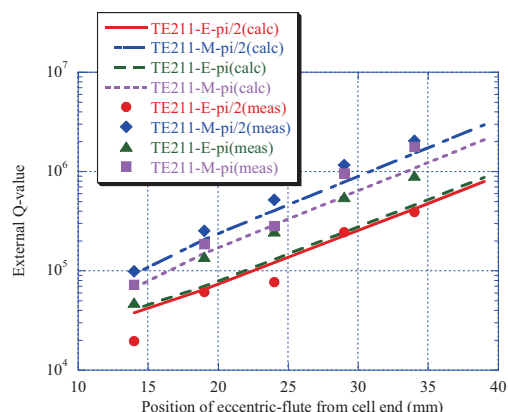


図7 3セル空洞における外部Q値のフルート位置依存性

### 4.2 偏心フルートの位置依存

ビームパイプとセルの間にスペーサーを挟むことによって、偏心フルートの位置を変えることが出来る。このときの外部Q値の変化を図7に示す。計算と測定値はほぼ一致しており、偏心フルートの位置に対して指数関数的に増加している。偏心フルートと結合する四重極モードはビームパイプ中を伝播できないため、セルから離れるにしたがって指数関数的に減少していく。そのため偏心フルートでモード変換された双極モードも偏心フルートが離れるに従って指数関数的に減少していくためと考えられる。

## 5. まとめ

MAFIAを用いた計算結果とローパワーモデルを用いた測定結果はほぼ一致しており、偏心フルートは四重極HOMの減衰に効果的であることが分かった。四重極HOMの2つの縮退モードともに効果的に減衰させるためには、偏心フルートのパラメータを最適化する必要がある。またHOM吸収体の特性により実際の負荷Q値が決まるため、出来るだけ反射の少ないHOM吸収体を製作する必要がある。

## 参考文献

- [1] P.Kneisel et al., Proc. of PAC'05, Tennessee, USA, May 2005, p.4012
- [2] R. Rimmer et al., "Strongly HOM-Damped Multi-Cell RF Cavities for High-Current Applications", SRF2003, Lübeck-Travemünde, Sep. 2003
- [3] P. Balleyguier, "A Straightforward Method for Cavity External Q computation", Particle Accelerators, 1997, vol.57, p.113
- [4] P. Balleyguier, "External Q Studies for APT SC-Cavity Couplers", LINAC'98, Chicago, Aug. 1998
- [5] V. Shemelín and S. Belomestnykh, "Calculation of the B-cell cavity external Q with MAFIA and Microwave Studio", SRF020620-03
- [6] M. Sawamura et al., Proc. of PAC07, Albuquerque, USA, June 2007, to be published
- [7] B. Aune et al., "Superconducting TESLA Cavities", Phys. Rev. Special Topics-Acc. and Beams, Vol.3 092001 (2000)