

Optimization of coaxial coupler for the crab cavity at KEKB

Yoshiyuki Morita, Kazunori Akai, Takaaki Furuya, Tatsuya Kageyama, Yasunao Takeuchi,
Kenji Hosoyama, Kota Nakanishi, Yasuchika Yamamoto

High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The superconducting Crab cavity, which is to be installed in the KEKB ring, has a coaxial coupler beam pipe structure. Purpose of this coupler is to extract the lowest order mode as well as higher order modes, and to damp these modes using a RF absorber. The coaxial coupler is consisted of a stub support, a notch filter, and a HOM damper. An optimization of structure design is in need to sufficiently damp these parasitic modes. A coaxial coupler design, which can be used in the high current accelerator machine, KEKB, is presented in this paper.

KEKBクラブ空洞同軸カプラーの最適化設計

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の電子陽電子衝突型加速器 (KEKB) は、有限角衝突を採用している。電子と陽電子のビームバンチは 11×2 mradの交差角をもって衝突する。交差角をもつと、加速リング内のビームバンチ数を増やして輝度を上げることが出来る反面、ビームバンチに非線形の力が加わり、ビーム不安定性をもたらすことにもなる。このような問題を解決するため、衝突点手前でビームバンチを偏向させ、電子と陽電子のバンチを正面衝突させることが提案されている (Crab Crossing^[1,2])。KEKではビーム偏向用の超伝導クラブ空洞の開発研究を行っており^[3]、2005年度の冬季シャットダウンに2台のクラブ空洞がKEKBリングに設置される予定である。この空洞に要求される性能は、十分な偏向電圧 (クラブモード) を安定して出すことのみならず、その他の寄生モードは充分減衰しておかなければならない。このためクラブ空洞には同軸ビームパイプが採用され、終端のRF吸収体によって寄生モードを減衰させる構造となっている。実機では、同軸部を支持する stub support、万々クラブモードが同軸部を伝播した場合に空洞に押し戻す notch filter が同軸部に付いており複雑な構造をしている。寄生モードが充分減衰できるよう最適な設計が必要である。

2. 寄生モードの減衰機構

クラブ空洞はビームバンチを水平方向に偏向させるため、空洞の断面はレーストラック型 (squash cell) をしており、方形空洞で言うTM₂₁₀モード、509MHzで励振される^[4]。このモードは基底モードではないため、基底モード (TM₁₁₀, 410MHz) を減衰させる機構が必要である。クラブ空洞には同軸ビームパイプが取り付けられ、基底モード及び monopole HOMは同軸部を減衰せずに伝播する。一方、同軸部のTE₁₁モード遮断周波数はクラブモード周波数以上、最低次の dipole HOM周波数

(TE₁₀₁, 650MHz) 以下である600MHzに設定され、dipole HOMも同軸部を伝播する。同軸部の終端にはフェライト製のRF吸収体 (HOM damper) があり、これらの寄生モードを吸収する。反対側のビームパイプ (LBP) は口径240mmあり、モノポールHOM (>950MHz)、dipole HOM (>730MHz) がそれぞれ伝播し、HOM damperにて吸収される。図1に同軸カプラーの概念図を示す。

クラブモード (509MHz) に対して同軸部の遮断周波数 (600MHz) が近いので、クラブモードの漏れ出しを抑えるため、同軸部は1m以上の長さが必要である (減衰率60dB)。同軸先端部はNb製の超伝導カプラーとなっている。同軸カプラーが偏心した場合、クラブモードは同軸内をTEMモードで無減衰に伝播し、大きなRFパワーが吸収体に到達し、HOM damperを破壊してしまう。これを防ぐため常温部にクラブモード反射フィルター (notch filter) を設置している。また、長い内導体を支持し、偏心を抑えるために stub support が取り付けられている。

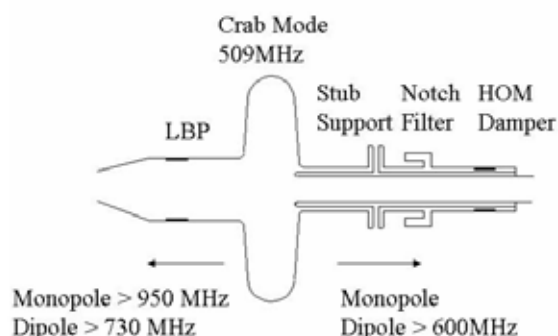


図1：同軸カプラーの概念図

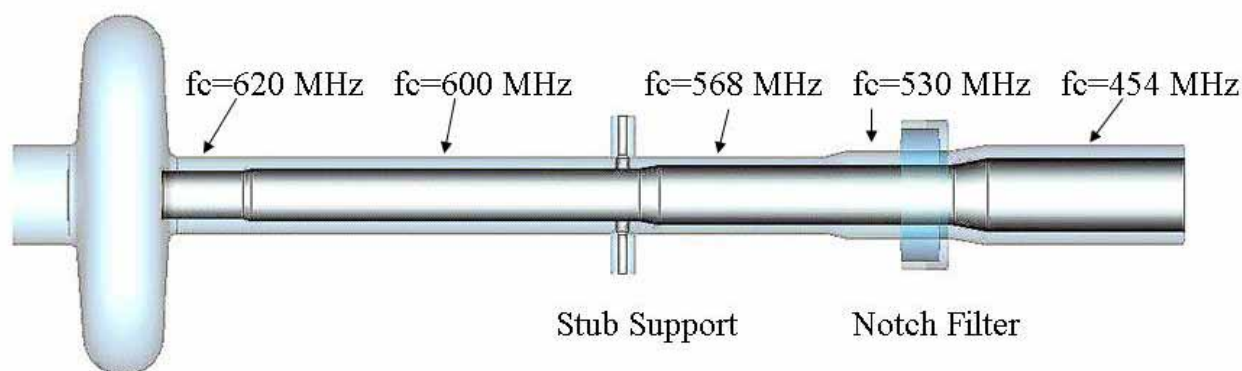


図2：テーパ構造の同軸カプラーと遮断周波数

3. 同軸部の寄生モード

空洞と同じように同軸部にも寄生モードが存在する。特に問題となるモードは水平偏極したTE11モードがstub supportやnotch filterを短絡面とする1/4 modeである。同軸部の遮断周波数は600MHzであるが空洞側に開口面があるためこのモードの周波数は600MHzより少し低い。そのため同軸部を伝播しにくくなり、同軸部末端のHOM damperで効率よく吸収できない。またこのモードのビームに対するインピーダンス (R/Q) は高く、放置すると大電流運転に対応できなくなる。この問題を解決するため、

1) 同軸部の口径をテーパで徐々に大きくして、遮断周波数を下げる、

2) 同軸部内導体先端は口径を小さくして遮断周波数を上げる、

という対策をとった。対策2) は同軸部内導体先端部の口径を長さ200mm にわたって10mmほど小さくし、遮断周波数を620MHzに上げるもので、1/4波長モードの周波数を600MHzより高くすることが出来る。更にR/Qを5.3Ωから2.6Ωと半分出来るため非常に有効である。図2にテーパ構造の同軸カプラーと遮断周波数を示す。

4. 同軸部の最適化設計

空洞の寄生モードを効率よく減衰させるには、

1) Stub supportの最適化

2) Notch filterの最適化

3) HOM damperの最適化

が必要である。以下にその詳細を述べる。

4.1 Stub Support

stub supportの長さを基底モード (TM110) が最も良く透過する長さにとると、1GHz付近に禁止帯ができる。LBPの遮断周波数950MHzと近いため、TM510 (960MHz) の減衰が悪くなる。長さを10mm縮めて禁止帯を1.05GHzにとった。このことによるTM110の透過率への影響はごく僅かである。

4.2 Notch Filter

Notch filterはTEMモードで509MHzに禁止帯 (crab mode rejection) を持つが、TE11モードにも禁止帯があり、これがクラブ空洞のdipole HOMや同軸部寄生モード (~600MHz) に当たらないようにしなければならない。TE11モードの禁止帯を600MHz以下にとればよいが、そのためには同軸部の口径を大きくとり、TE11モードの遮断周波数を充分下げる必要がある。この選択は同軸部の構造が大きくなりすぎて現実的ではない。そこでNotch filterの水平面に金属遮蔽板を挿入し、TE11モードの水平偏極と垂直偏極の禁止帯が異なる値を持つようにした。TEMモードは509MHzに禁止帯を持ちながら、垂直偏極は580MHz、水平偏極についてはTE011 (700MHz) と1/4 mode (600MHz) の中間、650MHzとなるようNotch filterの長さ、金属遮蔽板の長さを調整した。図3に金属遮蔽板を持ったNotch filterの図を示す。

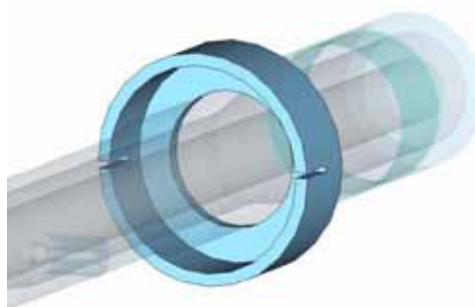


図3：ノッチフィルター

4.3 HOM Damper

HOM DamperはKEKB超伝導加速空洞用に開発されたフェライト吸収体である^[5]。フェライト粉末をHIP (Hot Isostatic Press) により無酸素銅 (OFC) のパイプに接合し、ステンレス製のフランジがEBWによって付けられている。Damperの外周は銅チューブが巻かれておりフェライトを水冷する。製作実績のあるHOM Damperのサイズは、口径220-300mm、フェライト長120-170mm、厚さ4mmである。

同軸部へ取り付けけるHOM DamperはLBP（口径240mm）と同じサイズにしておくほうが製作に都合がよい。また、TM110の吸収特性（VSWR）は、長さ120mmあれば良いので、フェライトのサイズを口径240mm、長さ120mm、厚さ4mmとした。このフェライトのサイズでTM110モードのQ値を計算し、Q値が最も小さくなるようHOM Damperの位置を決めた。

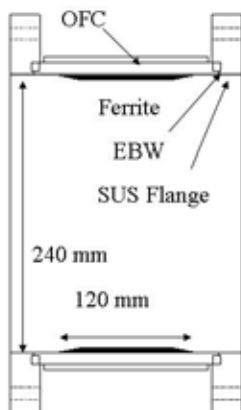


図4：HOM Damper

4．寄生モードのQ値

表1に主要な寄生モードの周波数、インピーダンス（R/Q）、Q値をまとめた。R/Qの計算は電磁場解析コード、MICROWAVE STUDIO、を用いた。またHOM damperを入れたQ値の計算はHFSSを用いた。

Monopole HOMで最もインピーダンスの高い基底モードTM110は、同軸部内導体の先端の口径を小さくすることによって結合が良くなり、充分小さなQ値が得られる。一方、TM510は前述のようにQ値は高いが、R/Qは小さいのでビームに対する影響も小さい。

同軸部の寄生モード、1/4λ modeはR/Q、Q値ともに高いが、大電流運転の場合でもKEKBのfeed-back機構で制御可能である。同軸部内導体先端部の口径を小さくしない場合、水平偏極した1/4λ modeのR/Qは5.3、Q値が11000となる。Feed-back機構でも制御が難しいため、大電流運転に対応出来ない。

表1：主な寄生モードのパラメーター

Mode	Freq. (MHz)	R/Q (Ω)	Q
Monopole			
TM110	413	76	28
TM310	672	20	45
TM111	900	11	72
TM510	983	0.12	3300
Dipole(H)			
1/4λ	604	2.6	3000
TE011	707	2.9	160
TM410	829	5.57	47
TM211	905	2.0	559
Dipole(V)			
1/4λ	602	4.3	1600
TE101	643	8.0	212
TM120	682	4.4	74
TM320	917	4.4	127
TE301	929	0.04	87

Dipole mode のH、及びVはそれぞれ水平偏極、垂直偏極を示す。またDipole modeのR/Qは、 $V_{kick}=V(\Delta r)/(k\Delta r)$ 、 $R/Q=V_{kick}^2/\omega U$ 、（kは波数）で定義される。

5．終わりに

クラブ空洞の同軸カプラーは空洞内の寄生モードを減衰させる目的のほかに、同軸部内導体の挿入量の変化で空洞をチューニングする機構も持っている。内導体先端部はNb製の超伝導カプラーであり、発熱による性能劣化を防ぐため液体ヘリウムによって冷却されている。更に、同軸部はstub support、notch filter、HOM damperがあり、テーパーにより同軸部の口径を除々に大きくする構造となっているなど、非常に複雑である。RF特性、機械的特性、低温特性を充分考慮して設計されなければならない。本稿では同軸部のRF特性についての最適化設計について述べた。空洞、及び同軸部の主な寄生モードは十分に減衰でき、KEKBの大電流運転に対応できる構造となっている。

参考文献

- [1] R. B. Palmer, SLAC-PUB-4707 (1988).
- [2] K. Oide and K. Yokoya, Phys. Rev. A40, 315, (1989).
- [3] K. Hosoyama et al., Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference, 1998, p. 828.
- [4] K. Akai et al., Proceedings of the PAC'93, 1993, p. 769.
- [5] T. Tajima, KEK Report 2000-10, September, 2000, A.