

# A design of beam duct cross-section for damping dipole modes in rf cavities

Tatsuya KAGEYAMA

KEK, National Laboratory for High Energy Physics

Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305, Japan

## ABSTRACT

A circular beam duct with longitudinal slit-channels is proposed for damping  $HEM_{11}$  modes in rf cavities. According to numerical calculations using MAFIA, the Q value of the  $TM_{110}$  mode in a pillbox cavity ( $f_{TM_{010}} = 500$  MHz) can be reduced to a value of  $\sim 30$ . Furthermore, the reduction in the shunt impedance of the accelerating mode due to the longitudinal slit-channels is found to be negligibly small (less than 1%).

### Damped Cavity 用 ビーム・ダクト形状のデザイン

#### はじめに

高周波加速空洞の性能の一つの指標は加速効率、即ち、シャント・インピーダンスである。しかし、電子（陽電子）蓄積リングに対する要求が、単にビームのエネルギーだけでなく、良質でかつ大電流のビームを供給すべし、というように高級指向化してくると、加速空洞に要求される性能も変わってくる。それは、ビームによって加速空洞中に励起される高次モードに起因するビーム不安定性が極力ないこと、というものである。この要求を実現する一つの方法は、高次モード・アンテナを加速空洞に取付けることである。しかし、この方法では、ビーム不安定を引き起こす最大の敵、即ち  $HEM_{11}$  モードを退治するのは、かなり難しい。それは、加速モードには結合しないで、 $HEM_{11}$  モードに結合するようなアンテナ（ループ型も含む）を設計することが難しいためである。もう一つの方法は、T. Weiland によって考案された single mode cavity [1] と呼ばれるものである。これは、加速空洞両端のビーム・ダクトの径を大きくして、ビーム・ダクト（円形導波管）の  $TM_{01}$ 、 $TE_{11}$  モードの遮断周波数を下げることによって、加速空洞中の高次モードのエネルギーを外部に引きだそうというものである。この場合、 $HEM_{11}$  モードはビーム・ダクトの  $TE_{11}$  モードに結合するが、その遮断周波数を  $HEM_{11}$  モードより低くするためには、ビーム・ダクトの直径を加速空洞内径の半分程

度の大きさにしなければならない。そのために加速モードのシャント・インピーダンスはかなり低下する。さらに他の方法として、最近、R. Palmer [2] によって、加速空洞の側面にスロットを開け、そこに矩形導波管をとりつけて高次モードのエネルギーを引きだす方法が考案されている。

本報告では、ビーム・ダクトの断面形状を工夫することによって  $HEM_{11}$  モードに結合する  $TE_{11}$  モードの遮断周波数を選択的に下げ、加速モードのシャント・インピーダンスを犠牲にすることなく、 $HEM_{11}$  モードを退治する方法について述べる。その断面形状の工夫とは、円形のビーム・ダクトの内面に図1に示されているような溝を付けるというものである。水平方向、及び垂直方向にそれぞれ偏極し

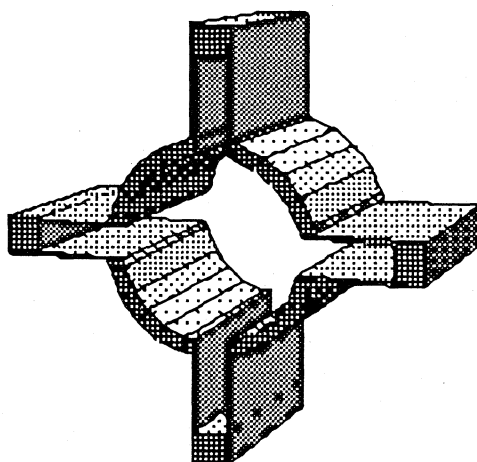


図1 溝付き円形ビーム・ダクト

ているふたつの $HEM_{11}$ モードを退治するには、4本の溝が必要である。以下、三次元電磁界解析コードMAFIAによる解析結果について報告する。

### MAFIAによる解析

溝付きビーム・ダクトによって、 $HEM_{11}$ モードがどの程度退治できるかを調べるには、空洞中の $HEM_{11}$ モードの溝付きビーム・ダクトへの結合度、即ち external Q の値 (以下  $Q_{ext}$ ) を調べればよい。MAFIAの周波数領域の固有値 solver 機能を使って  $Q_{ext}$  を計算するにあたっては、Slater の教科書 'Microwave Electronics' [3] の第5章 The Resonant Cavity with One Output に記載されている方法、即ち、空洞と可動ショート板で蓋をされた導波管から成る coupled resonator 系に於て、ショート板を動かした場合の周波数変化 (チューニング曲線) を調べる方法を応用した[4] [5]。

今回、MAFIA を使って解析したのは、円筒型空洞 (加速モードの周波数 500MHz) の両端に溝付き円形ビーム・ダクト (溝の数は4本) を取付けたモデルである。図2に、MAFIA への入力形状を示す。

(形状の対称性から、全体の8分の1の形状を入力すれば充分である。) 円筒空洞の内径は46cm、長さ24cmであり、ビーム・ダクトの内径は10cm、溝の幅と深さは、それぞれ2cm、及び11cmである。また、空洞とビーム・ダクトの間には誘導性 (inductive) のシャッターが取付けられ、開口部の間口は20cm

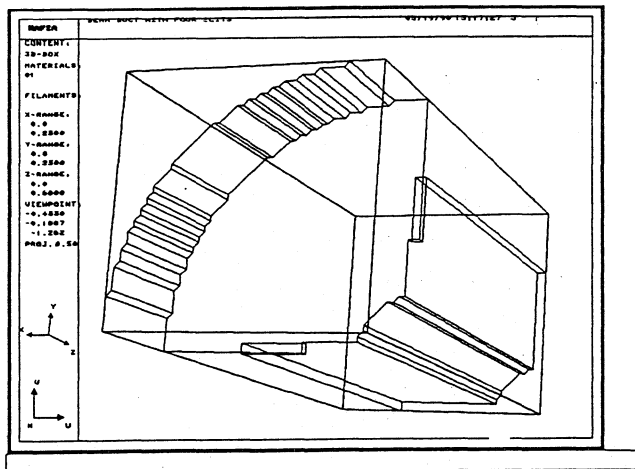


図2 円筒空洞と溝付きビーム・ダクト  
MAFIA への入力形状

である。図2中のビーム・ダクトの長さを変える毎に、空洞とビーム・ダクトの系の共鳴周波数を計算して $TM_{110}$ モードの周波数変化を追跡した。このようにして得られた $TM_{110}$ モードのチューニング曲線を図3に示す。縦軸はビーム・ダクト終端のショート板と円筒空洞中央部の対称面との間の距離  $d$  を、横軸は周波数をビーム・ダクトの管内波長に換算した値  $\lambda g$  を表している。図3において、垂直な直線と3本の斜めの直線は、円筒空洞とビーム・ダクトの間に電磁氣的結合がないときの円筒空洞中の $TM_{110}$ モード、ビーム・ダクト中の $TE_{111}$ 、 $TE_{112}$ 、 $TE_{113}$ モードをそれぞれ表している。垂直と斜めの直線の交点において、チューニング曲線が互いに反発するような振る舞いを見せているのは、 $TM_{110}$ モードがビーム・ダクトの $TE_{11}$ モードに強く結合していることを表している。また、チューニング曲線において、その傾き  $dd/d\lambda g$  が極大になるところは、円筒空洞中の $TM_{110}$ モードに対するビーム・ダクト共鳴器の離調点を示している。離調点におけるチューニング曲線の傾きから、以下の式を使って  $TM_{110}$ モードの  $Q_{ext}$  を求めることができる。

$$\frac{dd}{d\lambda g} = \frac{2n+1}{4} + \frac{Q_{ext} v_g}{\pi v} \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

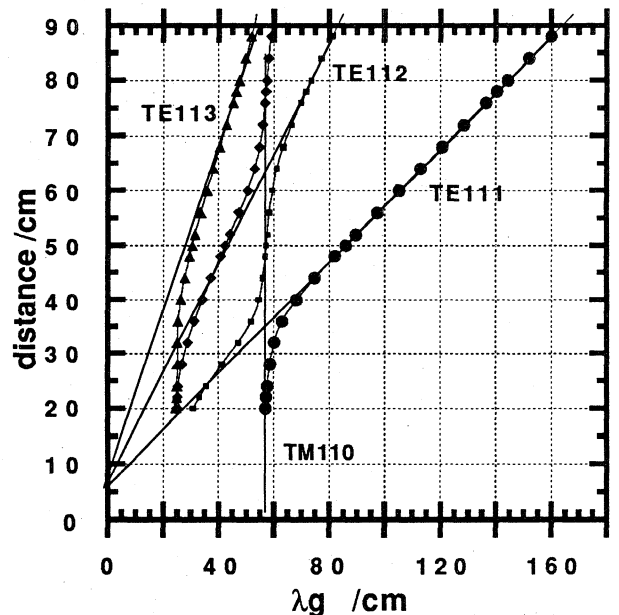


図3

円筒空洞と溝付きビーム・ダクトから構成される coupled resonator 系のチューニング曲線 (MAFIA計算結果)

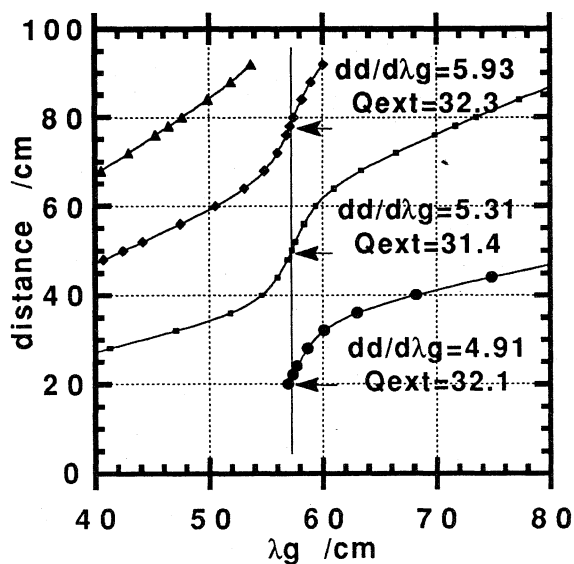


図4 チューニング曲線(図3中)のS字部分を拡大したもの

式中、 $v_g$ 、 $v$ はそれぞれビーム・ダクト中の $TE_{11}$ モードの群速度、及び位相速度である。図3において曲線がS字になっている部分の拡大図を図4に示す。図4中において、3箇所の離調点の各点での曲線の傾き $dd/d\lambda g$ と、それから求めた $Q_{ext}$ の値を示した。それによると、円筒空洞の $TM_{110}$ モードのQ値は30近くまで落ちていることがわかる。また、この溝付きビーム・ダクトを取付けた場合、加速空洞としての性能、即ち加速モードのシャント・インピーダンスが、通常の円形ビーム・ダクト(内径は10cmで同じ)の場合に比べて、どの程度劣化するかについても調べてみた。表1に、それぞれの場合の加速モードの周波数、Q値、シャント・インピーダンス、 $R/Q$ の値を示した。それによると、シャン

	溝なし	溝付き
周波数	502.75 MHz	503.17 MHz
Q値	$4.258 \times 10^4$	$4.278 \times 10^4$
R	7.97 M $\Omega$	7.95 M $\Omega$
R/Q	$1.87 \times 10^2$	$1.86 \times 10^2$

表1 通常の円形ビーム・ダクトの場合と溝付きビーム・ダクトの場合の加速モードの種々のパラメータの比較

ト・インピーダンスの低下は0.3%程度で、ほとんど無視できるほど小さい。これは以下の二つの理由によると考えられる。

- 1) 円筒空洞に溝付きビーム・ダクトを付ける場合、空洞内面のビーム孔周辺部だけに $TM_{010}$ モードの壁面電流方向と平行にスリットを切るだけでよい。
- 2) 加速モードとビーム・ダクト中の $TE_{11}$ モードは、それぞれの電磁場の対称性が異なるために基本的には結合しない。

#### まとめ

以上、MAFIAによる解析結果をまとめると、溝付きビーム・ダクトは、加速空洞のシャント・インピーダンスを犠牲にすることなく、 $TM_{110}$ ( $HEM_{11}$ )モードのQ値を数十の値まで減少させることができる非常に有望な方法である。

今後の予定としては以下の項目が挙げられる。

- 1) コールド・モデルの製作と測定。
  - 2) rf吸収体を溝付きビーム・ダクトの溝に埋め込んだ無反射負荷の開発。
- 現在、項目2)の無反射負荷の開発に必要な矩形溝付き円形導波管変換器の設計をMAFIAを使って進めている。

#### REFERENCES

- [1] T. Weiland, DESY 83-073, 1983
- [2] R. B. Palmer, SLAC-PUB-4542, 1988
- [3] J. C. Slater, Microwave Electronics, Van Nostrand, 1950
- [4] T. Kageyama, KEK-report 89-4, 1989
- [5] N. M. Kroll and D. U. L. Yu, SLAC-PUB-5171, 1990