

RF Characteristics of Waveguide Coupler for Traveling Wave Structures

T.Taniuchi¹, T.Asaka, T.Kobayashi, S.Suzuki, H.Dewa, H.Tomizawa, H.Hanaki, A.Mizuno, K.Yanagida
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

1-1-1 Kouto, Mikazuki, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

To avoid rf breakdown in the high gradient accelerating structures, a simpler waveguide coupler has been studied, in which the rf power is fed into the accelerating cell through the electric field coupling. The fundamental rf characteristics of the coupler such as matching shape, field distribution, axial field asymmetry and so on, was investigated using a 3D time-domain module of MAFIA code. It was found that the matching shape is reasonable for fabrication and the field symmetry is good though the accelerating field is small in the waveguide and coupling cell.

進行波管における導波管電界結合型カップラーのRF特性

1. はじめに

近年、電子線形加速器において高電界型加速管の開発や利用研究が進められているが、高電界発生時に起こるRFブレイクダウンの発生頻度を下げることが、実用化への重要なテーマとなっている。RFブレイクダウンの発生場所は加速管の構造により多少異なるが、その多くは入出力カップラーセルであることが知られている。カップラーセルにおけるRFブレイクダウンの発生要因として考えられているのが、従来の加速管に広く採用されている磁界結合型カップラーのアイリスエッジに流れる表面電流の高密度化に伴うパルスヒーティングで、エッジの曲率を大きくしたアイリス形状とすることでこれを緩和することはできるが、その反面、実際の加速管製造においてはカップラーの加工、調整が難しくなってしまう。

一方、全く新しいカップラー構造の試みが成功している。SLACのNantistaら^[1]はモード変換カップラーと呼ばれる構造を提案し、Xバンド加速管において安定な高電界発生を実現している。これは、RF伝送モードを矩形導波管のTE₀₁モードからビーム軸方向に伝搬する円形導波管のTM₀₁モードに変換し、マッチングセルを介してRFパワーをレギュラーセルにフィードするというもので、マッチングをとるために矩形導波管内にアイリスを設ける必要はあるが、表面電流密度を従来のカップラーよりも大幅に下げることができる。また、矩形導波管のE面をビーム軸上に配置した導波管電界結合型カップラーも提案され、この構造においては導波管内のマッチングアイリスをも不要としている。

本研究では、高電界型加速管用として高電界発生時のボトルネックとならないようなカップラーの開発を目指し、モード変換カップラーよりも単純な構造で、製作、調整がしやすいと考えられるシングルフィードの電界結合型カップラーについて、マッチング形状、電磁場非軸対称性、製造時に要求される寸法精度等を調べるため電磁場解析コードMAFIA ver.4.1^[2]によ

るシミュレーションを行った。

2. 導波管電界結合型カップラー

導波管電界結合型カップラーと磁界結合型カップラーの基本構造を図1に示す。導波管電界結合型カップラーの基本構造は、一端が短絡された矩形導波管のTE₀₁モードの電界中心軸が加速セルのビーム軸(TM₀₁モードの電界中心軸)と一致するように、加速管の両端に導波管を配置したものである。また、導波管の隣の加速セルは、導波管とレギュラーセルのマッチングをとるためのマッチングセルで、導波管側のアイリス径がレギュラーセルのそれよりも大きくなる。

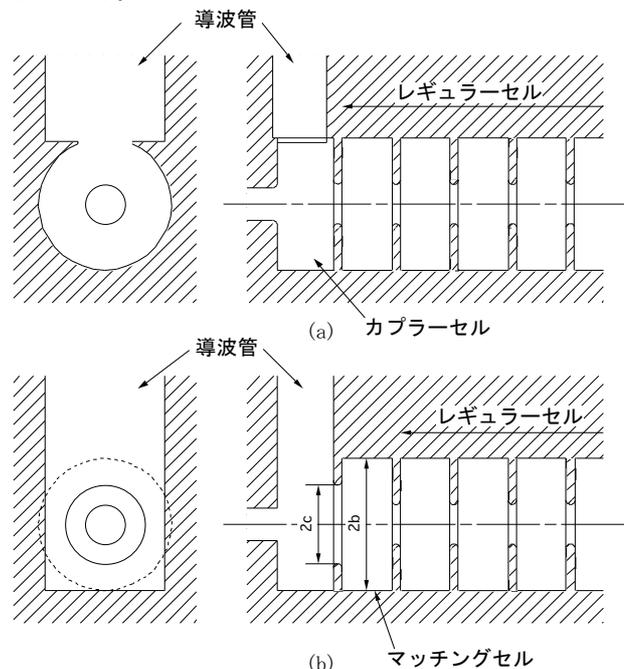


図1：磁界結合型カップラー(a)と導波管電界結合型カップラー(b)の基本構造

¹ E-mail: ihcuinat@spring8.or.jp

3. MAFIAによるシミュレーション

3.1 計算形状及び境界条件

MAFIAでの計算形状を図2に示す。空洞はSバンド(2.856GHz)、導波管はWRJ-3規格の寸法で計算を行った。今回は加速管実機的设计ではなく本カップラーの基本特性の評価を目的としているので、加速セルは1セルのみで、アイリス径 $2a$ は24mm、アイリス厚は5mm、セル長は35mm(2 π /3モード加速管と同じ)に固定した。また、アイリス先端に表面電界を下げるための大きな曲率は与えず、直角エッジとしている。メッシュサイズは概ね1.7mmである。

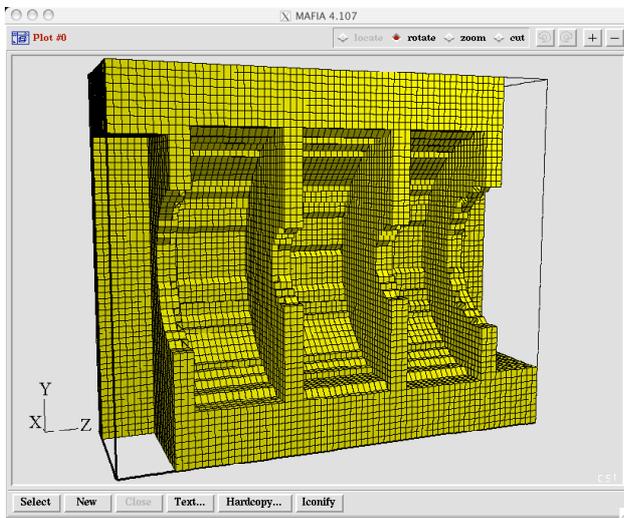


図2：MAFIA計算形状

X軸及びZ軸の境界条件は、加速管の TM_{01} モードまたは導波管の TE_{01} モードが境界面に対して鏡像対称となるよう設定した。また、Y軸は導波管境界を設定し、下限境界からシグナルを入力する時間領域シミュレーションを行った。

3.2 カップリングアイリス径の最適化

本モデルではマッチングセルのセル長は加速セルと同じとし、カップリングアイリス径(図1の $2c$)およびマッチングセルの内径($2b$)をパラメータとしてMAFIAのT3モジュール(Advanced S-Parameter Wizard)を用いて $2c$ の最適値サーベイを行った。サーベイの手順は、 $2c$ を2mm変える毎に、 $2b$ を調節して入力ポートへの反射係数(S_{11})が最小となる点を求めた。それぞれの $2c$ に対して最小となった S_{11} をプロットしたものが図3である。今回仮定したアイリス厚及びセル長においては、カップリングアイリス径43mm付近でマッチングがとれることが分かった。また、 $2c$ 寸法に対して比較的広い範囲でマッチングがとれるので、加工、調整についての許容誤差を大きくとることができる。

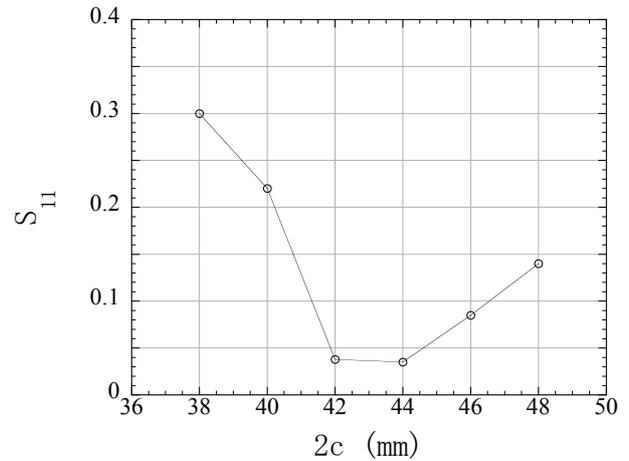


図3：カップリングアイリス径の最適化

3.3 電磁場分布

S-Parameter Wizardによりカップリングアイリス径を決定した後、 S_{11} 最小点の単一周波数にて空洞を励振して共振時の電磁場を調べた。図4に加速セルにおいて最大電界強度に達した時のY-Z平面における電界分布を示す。

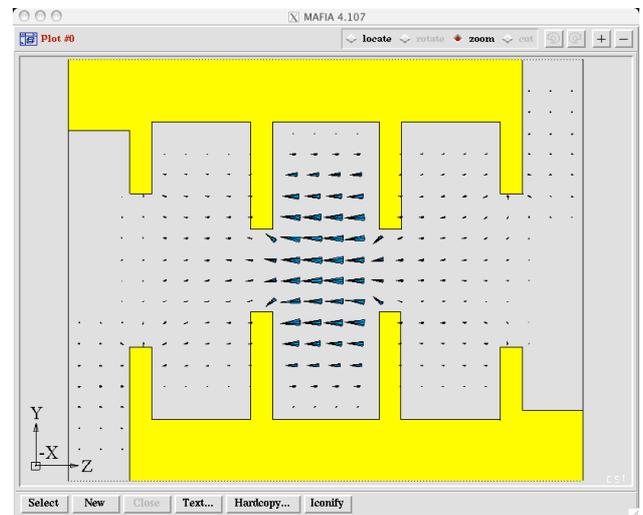


図4：加速セル最大電界強度時の電界分布

加速セル内の電界強度と導波管内における電界強度を比較するため、図5にそれぞれが最大強度に達した時のビーム中心軸における電界(Z成分)強度分布を示す。導波管内の最大電界強度は加速セル内のその13%程度であり、カップリングセル内の電界も同程度であることから、ビーム加速へのカップラーの寄与は小さい。また、加速セルと導波管の電界強度最大時の位相差は109度であった。さらにセル長及び導波管形状を最適化することでカップラーでのビーム加速効率を上げることが可能と考えられる。

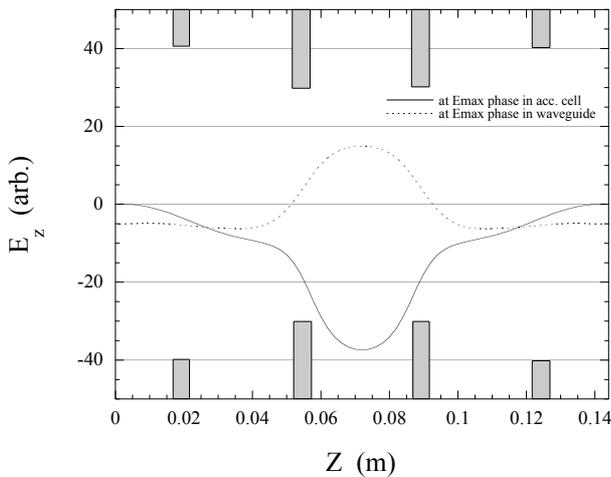


図5：ビーム軸上の電界強度分布

導波管端面の位置はカップリングアイリス径に応じて導波管内の電場中心がビーム軸に一致するように調整すべきであるが、今回はビーム軸から40mmに固定したため、図6に示すようにマッチングがとれた状態で約4mmの軸ずれが見られた。

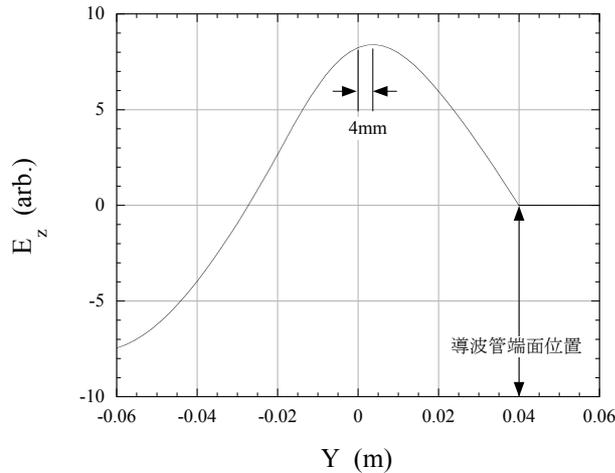


図6：導波管端面位置と電界中心のずれ

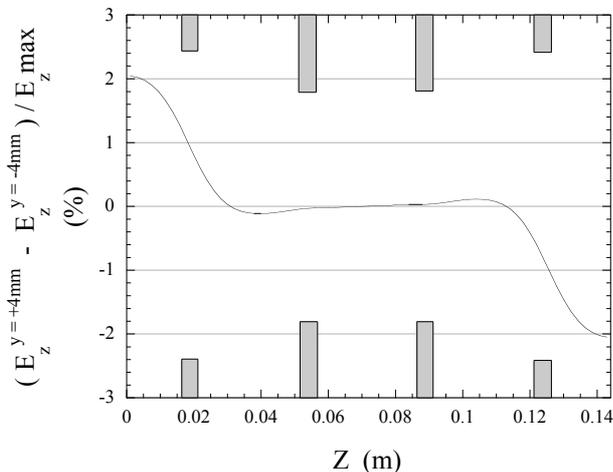


図7：加速セル内電磁場の軸対称性

この状態での加速セルにおける非対称性を見るため、 $y = \pm 4\text{mm}$ の位置における電界強度の差を加速セルの最大電界で規格化したのが図7である。導波管内では加速電界の2%程度の電界強度差が生じているが、加速セル内のそれは0.1%以下になっており、端面位置は加速セル内電磁場分布にほとんど影響を与えないことが分かる。

4. 結論

高電界型加速管のカプラーにおけるRFブレイクダウンを回避するため、表面電流や電界集中の少ない構造である導波管電界結合型カプラーについてシミュレーション・コードによる評価を行った。1セル加速空洞モデルにおいてカプラーの最適寸法を求め、カプラー内電磁場分布と、寸法許容誤差について調べた。その結果、導波管及びマッチングセル内の電界がレギュラーセルと比較して大幅に小さいため、シングルフィードであるにも関わらず電磁場の非軸対称性によるビームへの影響が小さいことが分かった。そのため、本カプラーにおいては非対称性を補償するための三日月カット^[1]やダブルフィード化の必要がなく、寸法許容誤差も比較的大きい。

本構造ではビーム軸上の導波管及びマッチングセルにおいてほとんどビーム加速できないため、単位長さあたりの加速ゲインが建設コストに大きく反映するリニアコライダーのような長尺マシンにそのまま適用することはできない。しかしながら、加速セルよりも放電を起こしにくいことが期待されるので、これまでカプラーで制限されていた加速管の放電限界を加速セル自体が持つ限界まで引き上げることができ、RFブレイクダウンの発生頻度を引き下げることができると考えられる。さらに、本カプラーにおいて導波管以外の部分は同軸構造であるので、加速管製造時の最終調整においても旋盤による精密加工が可能である。表面粗度や段差、エッジといった放電要因を加工時に発生しにくいという点も本カプラーのメリットの一つと考えられる。

今後は実機への適用を視野に入れて、形状の最適化と低電力モデルの製作及び測定を行う予定である。

謝辞

高エネルギー加速器研究機構の大澤哲、山口誠哉、紙谷琢哉、杉村高志、肥後壽泰の各氏には本研究に関し貴重な助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] C.D. Nantista et al., Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, Portland, USA, May 12-15, 2003, p1276.
- [2] <http://www.cst.de/>
- [3] Y. Igarashi et al., Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Osaka, Sep. 6-8, 1995, p194.