

超伝導加速器用C形導波管型HOMカップラーの高周波特性

RF PROPERTY OF C-SHAPE WAVEGUIDE TYPE HOM COUPLERS FOR SUPERCONDUCTING ACCELERATOR

沢村 勝^{#,A)}, 梅森健成^{B)}, 阪井寛志^{B)}, 篠江憲治^{B)}, 古屋貴章^{B)}, 江並和宏^{B)}, 江木昌人^{B)}
Masaru Sawamura^{#,A)}, Kensei Umemori^{B)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Kenji Shinoe^{B)},
Takaaki Furuya^{B)}, Kazuhiro Enami^{B)}, Masato Egi^{B)}
^{A)} Japan Atomic Energy Agency
^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

It is important to damp higher-order modes (HOMs) of superconducting accelerators especially for energy-recovery linacs (ERLs) of high current operation. Though various types of antenna/loop HOM couplers, beam-line HOM dampers, and waveguide HOM couplers have been developed, there are some problems such as inner conductor heating of an output connector for HOM couplers and low packing factor for beam-line HOM dampers. We propose a new design of HOM coupler. These HOM couplers consist of a coaxial line coupled with a cavity or a beam pipe, and a rounded waveguide which cuts off the accelerating mode. The rounded waveguide is similar to a coaxial line and the inner conductor and outer conductor are connected with a plate which corresponds to waveguide side wall. This enables the inner connector cooled down efficiently through the outer conductor. The RF property was measured with this HOM coupler model. The results of measurement will be presented.

1. はじめに

エネルギー回収リニアック (ERL) のような大電流で CW 運転する超伝導加速器においては、高調波モード (Higher Order Mode : HOM) の減衰は、特に重要になってくる。HOM の Q 値を低くすることで冷凍機システムへの負荷を減らしたり、ビーム不安定性による加速電流のしきい値を大きくしたりすることができる。

楕円空洞においてはアンテナ/ループ型 HOM カップラーや、ビームライン型 HOM ダンパー、導波管型 HOM カップラーなど様々なタイプの HOM 減衰器が開発されている。

ビームライン型 HOM ダンパーは大電力を取り扱えることや、軸対称のためビームに対するキック力が働かないなどの利点がある。しかし、加速モードを排除するフィルター構造がないため、加速モードに影響を及ぼさないように空洞から遠く離す必要があり、その結果パッキングファクターの低下や実効的な加速電界の低下をもたらす。

アンテナ/ループ型 HOM カップラーは空洞近くのビームパイプに取り付けられるため、余分な長さのビームパイプを必要としない。しかし、空洞近くに取り付けるためには加速モードを排除するフィルター構造が必要であるが、冷却後はフィルターの調整をすることはできない。さらに HOM 電力はコネクタを通して HOM カップラーの外部に取り出されるが、コネクタ内軸と外軸との間の熱伝導が悪く、コネクタ発熱の問題が起こる[1-3]。コネクタ内軸と外軸との間にサファイヤなどを用いて熱伝導を良くすることができるが、大電流 ERL で要求

される大電力 HOM を取り出せるかは不確定である。

導波管型 HOM カップラーは原理的に遮断周波数をもつハイパスフィルタであるが、アンテナ/ループ型 HOM カップラーに比べてサイズが大きくなってしまふ。

アンテナ/ループ型 HOM カップラーの内軸の発熱の問題を解決し、導波管型 HOM カップラーのように遮断周波数を持つ新しいタイプの導波管を提案する。

この導波管は同軸導波管変換器の導波管部分を丸めたような構造をしており、断面は同軸管の内軸と外軸の一部を板で連結した形をしている。断面の形がアルファベットの「C」のような形をしているので、C 形導波管 (C-shape waveguide: CWG) と命名した[4-5]。

この CWG モデルを製作し、高周波特性の測定を行ったので、その結果について報告する。

2. CWGの遮断周波数

CWGの連結板が平行の場合は、遮断周波数を解析的に求めることはできないが、連結板が Figure 1 のように放射状の場合は、解析的に求めることができる。

円柱座標での TE モードの一般解は

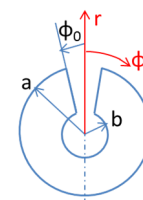


Figure 1: Analytical model of CWG.

[#] sawamura.masaru@jaea.go.jp

$$E_r = C \frac{j\omega\mu\nu}{k_c^2} \frac{1}{r} [A_1 J_\nu(k_c r) + A_2 Y_\nu(k_c r)] \sin(\nu\phi - \phi_c) \quad (1)$$

$$E_\phi = C \frac{j\omega\mu}{k_c} [A_1 J'_\nu(k_c r) + A_2 Y'_\nu(k_c r)] \cos(\nu\phi - \phi_c) \quad (2)$$

である。ここで、 J_ν 、 Y_ν は ν 次の第1種、第2種ベッセル関数、 ω は角周波数、 μ は透磁率、 k_c は波数、 C 、 A_1 、 A_2 、 ϕ_c は定数である。

境界条件

$$(1) \phi = \phi_0, \phi = 2\pi - \phi_0 \text{ のとき } E_r = 0$$

$$(2) r = a, r = b \text{ のとき } E_\phi = 0$$

を満たす最低次の解は、

$$\nu = \frac{\pi}{2(\pi - \phi_0)} \quad (3)$$

$$J'_\nu(k_c a) Y'_\nu(k_c b) - J'_\nu(k_c b) Y'_\nu(k_c a) = 0 \quad (4)$$

でなければならない。この式の近似解は、

$$k_c \approx \frac{2\nu}{a+b} \quad (5)$$

であり、遮断波長は

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{k_c} \approx \frac{\pi(a+b)}{\nu} = 2 \times \frac{\pi - \phi_0}{\pi} \times \pi(a+b) \quad (6)$$

となる。 $(\pi - \phi_0)/\pi \times \pi(a+b)$ は同軸の平均半径における自由空間の周長であり、この長さが遮断波長の半波長になる。

連結板の角度を変えた時の遮断周波数の解析解と MW-STUDIO でのシミュレーション結果を Figure 2 に示す。解析解とシミュレーション結果は一致しているが、平均周長から求めた遮断周波数は解析値より3%程度小さくなっている。

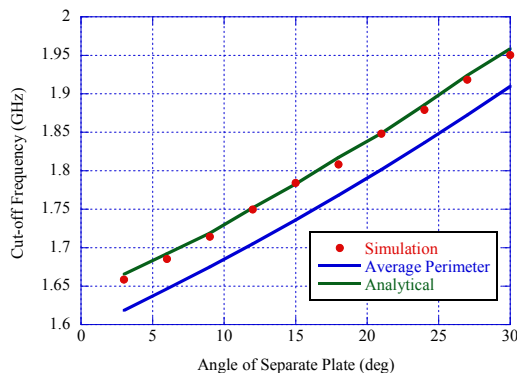


Figure 2: Cut-off frequency of analytical values, simulation results and calculated values from average perimeter of coaxial line.

3. CWG 高周波特性

3.1 同軸管測定装置による測定

超伝導空洞の HOM カップラーの高周波特性試験に用いられていた同軸管測定装置を使って CWG の高周波特性の測定を行った。Figure 3 のように CWG を取り付け、3ポートのうち2ポートをネットワークアナライザーに接続し、残り1ポートはターミネータに接続する。同軸管測定装置の1つのポートから CWG の場合と CWG の連結板取り除き通常の場合と同軸管にした場合での透過係数を測定した結果を Figure 4 に示す。同軸導波管では低い周波数まで透過しているのに対し、CWG では遮断周波数以下では透過係数が低下しているのが分かる。この時の CWG の内径は 18mm、外径は 42mm であるので、遮断周波数は 1.71GHz となり、測定結果と一致している。

0.76GHz 付近にピークが見られる。これは同軸管測定装置から CWG 先端の同軸部分を伝送した高周波が遮断周波数以下であるため CWG で反射されて戻される。この伝送波と反射波が干渉して、CWG の先端部で $\lambda/4$ 共振器のようになることで現れるピークである。CWG 先端の同軸部分の長さが変われば、このピークの位置も変化する。

CWG の長さに対する透過係数の変化を Figure 5 に示す。CWG の長さが長くなるにしたがって、遮断周波数以下での透過係数が急激に低下するのに対して、遮断周波数以上ではほとんど違いがみられない。

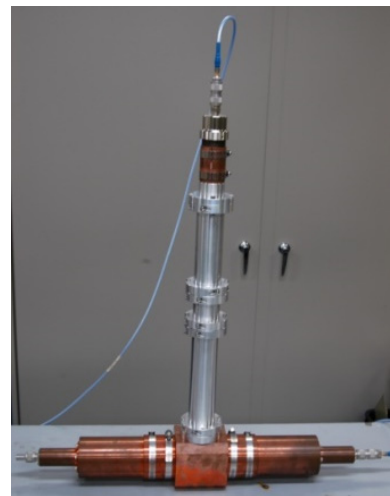


Figure 3: Setup of the CWG connected to the coaxial transmission line.

CWG の先端の同軸部分の長さを変えた時の透過係数の変化を Figure 6 に示す。CWG の先端位置は同軸管測定装置の外軸からの距離で表わされており、同軸管内部の方向がプラスとなっている。CWG の先端を長くすると同軸管測定装置との結合が大きくなり、透過係数全体が大きくなっていくのが分かる。また遮断周波数以下に現れているピークの周波数も、先端の長さが長くなるにしたがって、低い周波数側にシフトしていったのが分かる。

CWG の連結板の取り付け角度の違いを比較した

ものを Figure 7 に示す。同軸の進行方向に対して 0° 、 45° 、 90° に取り付けているが、どれも差がなく、連結板の取り付け角度は考慮する必要がないことが分かる。

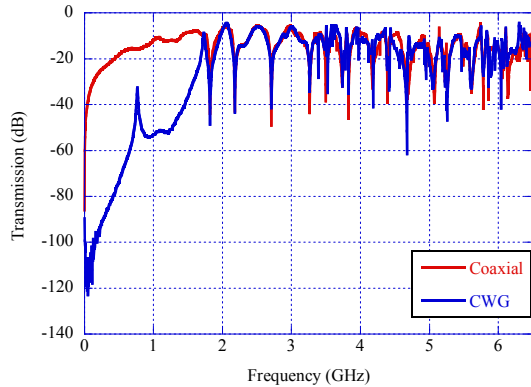


Figure 4: Transmission compared with coaxial line and CWG.

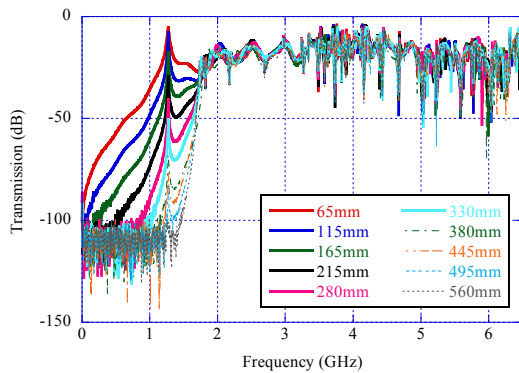


Figure 5: Transmission of CWG with different length of CWG.

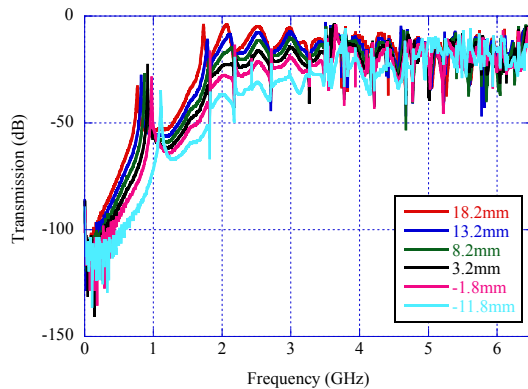


Figure 6: Transmission of CWG with different top position.

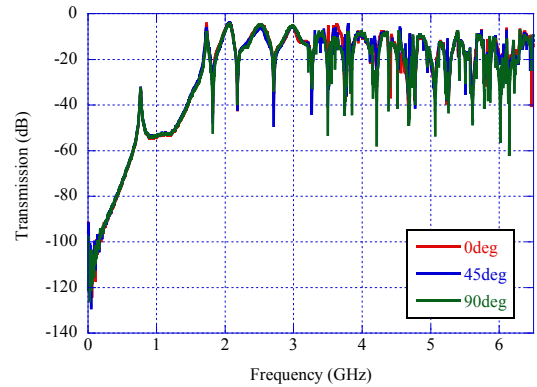


Figure 7: Transmission of CWG with different angles of CWG connecting plate.

3.2 TESLA 空洞モデルによる測定

TESLA 空洞モデルに CWG を取り付け、空洞 HOM の Q 値の変化を測定した。Figure 8 のように 3 セル空洞モデルで HOM カップラーの位置に CWG を取り付けた。TESLA 空洞はエンドセルを違う形状にして HOM 分布を非対称にしているため、HOM の種類によって一方のビームパイプに強く出やすいものがある。そのため、それぞれのビームパイプに CWG を付け替えて測定を行った。また高周波の結合アンテナはエンドセルに取り付けられるが、アンテナ位置が境界条件となり HOM の励起方向が決まってしまうモードがある。そこでアンテナ位置をビーム軸に対して鉛直方向になるようにセットし、CWG を鉛直方向、水平方向、 45° 方向の 3 方向に取り付け、測定を行った。

CWG の外部 Q 値の測定は、CWG がいない場合の Q 値 ($Q_{load(w/o.cwg)}$) と CWG を取り付けた場合の Q 値 ($Q_{load(w.cwg)}$) を用いて、次式より求めた。

$$\frac{1}{Q_{ext}} = \frac{1}{Q_{load(w.cwg)}} - \frac{1}{Q_{load(w/o.cwg)}} \quad (7)$$

CWG の連結板は 165mm のものを使い、CWG 先端の長さを変えた時の外部 Q 値を測定した。Figure 9 に TE111 モードの例を示す。全体の傾向として、先端が長くなりビームパイプにより挿入されるとモードとのカップリングが強まり、外部 Q 値が小さくなる。

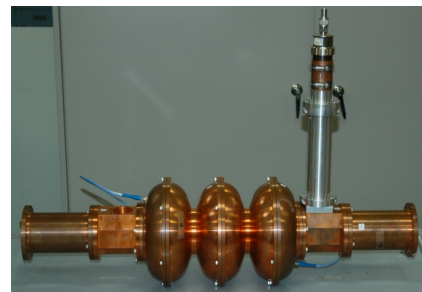


Figure 8: Setup of CWG connected to TESLA 3-cell cavity model.

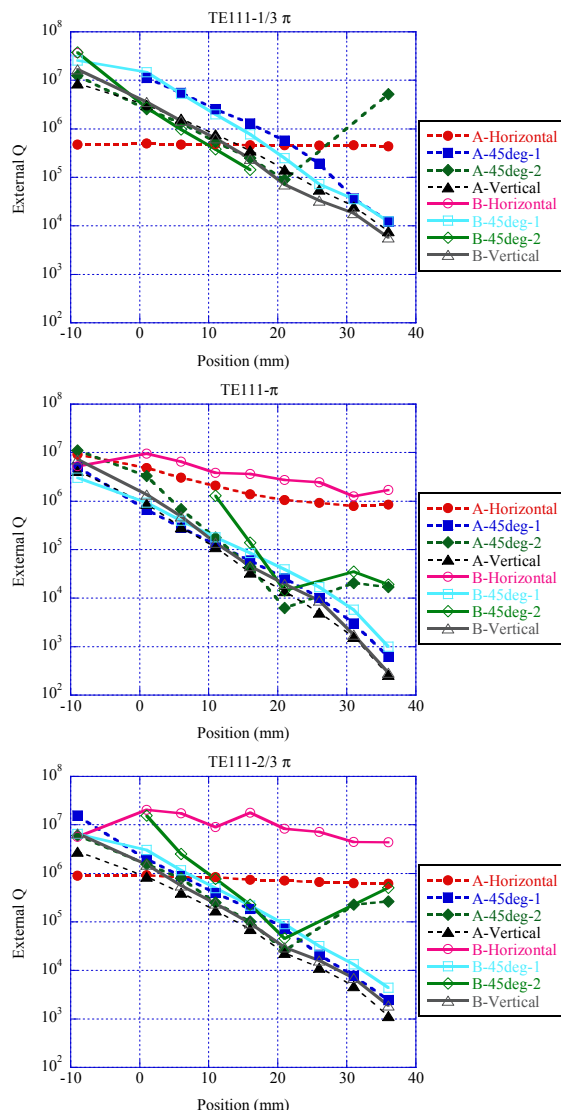


Figure 9: External Q-values of TE111 modes with CWG connected to TESLA 3-cell cavity model.

結合アンテナが鉛直方向に取り付けられているので、鉛直方向の電界が励起されるため、水平方向のCWGにはあまり結合しないため、CWG先端長さが変わっても外部Q値はあまり変わらない。

また45度方向にCWGを取り付けると縮退が解かれモードが分離するが、モードにより結合度に差がある。

CWGの遮断周波数は1.71GHzであり、TE111-1/3πモードとTE111-2/3πモードは遮断周波数以下であるため、外部Q値は、πモード、2/3πモード、1/3πモードの順に大きくなっている。

加速モードであるTM010-πモードにおける外部Q値をFigure 10に示す。全体に右下がりであり、加速モードとも結合しているのが分かる。ただし通常と同軸管を取り付けた場合は、先端長さが16mmの時に外部Q値は 2.8×10^5 程度であるのに対して、CWGでは2桁程度大きい。加速モードは遮断周波数以下

ではあるが、CWGの長さが165mmであるため、この長さでの減衰量は 2.2×10^{-2} であり、この結果と合致している。この位置のCWGで加速モードの外部Q値を 10^{12} にするには、650mm程度の長さが必要になる。

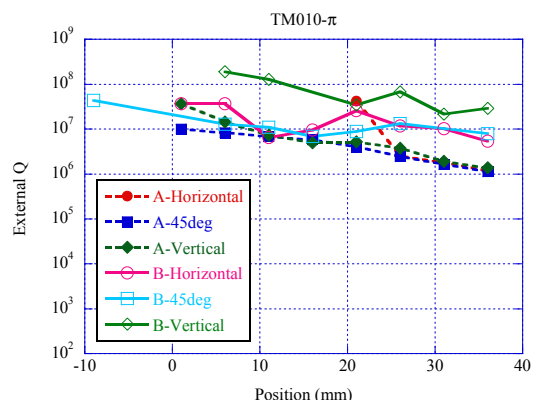


Figure 10: External Q-values of TM010-π mode with CWG connected to TESLA 3-cell cavity model.

4. まとめ

CWGは形状で決まる遮断周波数を持ち、遮断周波数以上の高周波は透過させ、遮断周波数以下の高周波は減衰させることができる。さらにCWGの長さを長くすると高周波をより強く減衰させることができる。空洞のHOMカップラーとして用いる場合にも、HOMを十分に減衰させることができる。ただし、HOMの励起方向によっては結合度が低くなるモードもあるので、複数個所に取り付ける必要がある。またCWGを長くすることで加速モードに対するフィルターとして応用できる可能性もある。

謝辞

本研究はJSPS科研費15K04726の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] P. Kneisel et al., "Testing of HOM Coupler Designs on a Single Cell Niobium Cavity", Proc. of PAC2005, 4012-4014 (2005).
- [2] G. Wu et al., "Electromagnetic Simulations of Coaxial Type HOM Coupler", Proc. of 12th SRF (SRF2005), 600-603 (2005).
- [3] J. Sekutowicz, "Improved Heat Conduction Feedthroughs for HOM Couplers at DESY", Proc. of ERL2011, 102-104 (2011).
- [4] M. Sawamura et al., "NEW DESIGN OF HOM COUPLER USING COAXIAL-LIKE ROUNDED WAVEGUIDE", Proc. Of SRF2013, 1081-1084 (2013).
- [5] M. Sawamura, et al., "ERL超伝導スポーク空洞加速器の開発計画", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.