

C形導波管型 HOM カップラーの開発

DEVELOPMENT OF HOM COUPLER WITH C-SHAPED WAVEGUIDE

沢村 勝^{#,A)}, 羽島良一^{A)}, 阪井寛志^{B)}, 梅森健成^{B)}, 許斐太郎^{B)}, 古屋貴章^{B)}

Masaru Sawamura^{#,A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Kensei Umemori^{B)}, Taro Konomi^{B)}, Takaaki Furuya^{B)}

^{A)} National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization/SOKENDAI

Abstract

A new type of HOM coupler with C-shaped waveguide has been proposed. This HOM coupler uses the cutoff frequency property of the C-shaped waveguide to obtain the weak coupling to the accelerating mode and enables efficient cooling by connecting the inner connector through the connection plate. The HOM RF properties were measured with two types of elliptical cavities. The measured cavity HOM properties well agreed with calculations. The results of measurement will be presented.

1. はじめに

超伝導加速器には高調波モード (Higher Order Mode:HOM)を減衰させる HOM カップラーが必要である。エネルギー回収型リニアック(ERL)のような大電流でCW 運転する超伝導加速器において、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ために、HOM の減衰は重要である。

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、高周波取り出し用のコネクタの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[1,2,3]。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。

C形導波管(C-shaped waveguide: CSWG) [4]は、同軸管のような構造をしているが、接続板により内軸と外軸が接続されているため、内軸を効率よく冷却できる。さらに矩形導波管のように遮断周波数を持っている。そこでアンテナ/ループ型 HOM カップラーの代わりに CSWG 型 HOM カップラーを用いると、内軸を容易に冷却することができるためコネクタ内軸の発熱の問題を解決することができ、大電力の HOM を取り出すことも可能である。さらに冷却後の調整も不要である。

この CSWG 型 HOM カップラーを空洞モデルに取り付けた時の空洞 HOM 特性について報告する。

2. C形導波管型 HOM カップラー

空洞 HOM 特性の測定には、TESLA 型と ERL-model2 型のモデル空洞を用いた。両空洞とも本来は 9

セルであるが、測定では HOM の数を減らすため 3 セルとした。高周波供給のためのアンテナは、それぞれ端のセルに取り付けられている。CSWG 型 HOM カップラーをビームパイプに取り付け、CSWG 終端を高周波取り出し口とした。ERL-model2 空洞[5]ではビームパイプ径がそれぞれ違うので、 $\phi 100$ を SBP、 $\phi 120$ を LBP と称する。TESLA 空洞はビームパイプ径は同じであるが、エンドセルの形状が異なるため、EndCup1 側を EC1、EndCup2 側を EC2 と称する[6]。

CSWG 型 HOM カップラーの先端部分の長さ及び CSWG 長さを変えた時の HOM の外部 Q 値を測定した。CSWG は TESLA 空洞、ERL-model2 空洞ともビームパイプ外径から 27mm の位置から始まり、そこから内側の先端部分は同軸となっている。

3. 測定方法

測定に用いた CSWG のパラメータを Table 1 に、各内径での遮断周波数を Table 2 に示す。最低次の HOM は、TESLA 空洞で 1.63GHz、ERL-model2 空洞で 1.49GHz であるため、内径 25.8 以上の CSWG では HOM 減衰には、十分な遮断周波数である。

Table 1: Parameters of CSWG HOM Coupler Model

Outer Diameter (mm)	42
Inner Diameter (mm)	30, 25.8, 21, 18
Connection Plate Type	Parallel
Connection Plate Thickness (mm)	4
Length (mm)	65 to 560
Tip Length (mm)	0 to 65

Table 2: Cutoff Frequency to the Inner Diameter of CSWG

Inner Diameter (mm)	Cutoff Frequency (MHz)
30	1381
25.8	1485
21	1631
18	1732

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

HOM カップラーの外部Q値は、各ポートでの反射波、透過波をスミスチャート上の軌跡としてネットワークアナライザで測定することで求めることができる[7]。ただしQ値が大きくなると信号が弱くなったり、ノイズと重なるようになったりするため正確に測定することが難しくなる。そこで外部Q値が小さくなるようなセットアップでスミスチャート軌跡から外部Q値を測定し、その時の取り出しパワーと比較することで外部Q値を求める方法を取った。ある外部Q値 $Q_{ext}(0)$ のときの透過係数を $S_{21}(0)$ とすると、透過係数が S_{21} のときの外部Q値 Q_{ext} は

$$Q_{ext} = Q_{ext}(0) \frac{S_{21}(0)}{S_{21}} \quad (1)$$

となる。

ERL-model2 空洞では HOM カップラーの取り付け位置は加速モードに影響を与えないようセルから離れた所になっている。そのため外部Q値は最初から大きいので、その位置では外部Q値を正確に測定することが難しい。そこで HOM カップラーの取り付け位置をセルに近い場所へ移動し、そこでの外部Q値と透過係数を求め、HOM カップラーを本来の場所に戻した時の透過係数との比較から外部Q値を求めた。

遮断周波数以下での減衰係数 α と外部Q値との関係は CSWG の長さを L としたとき、

$$Q_{ext} \propto e^{2\alpha L} \quad (2)$$

となる。減衰定数は、波数 k と遮断周波数 f_c 、周波数 f を用いて次式で表わせる。

$$\alpha = \sqrt{k_c^2 - k^2} = \frac{2\pi}{c} \sqrt{f_c^2 - f^2} \quad (3)$$

ここで、 c は光速である。

4. 測定結果

TESLA 空洞に内軸径 30mm の CSWG 型 HOM カップラーを EC2 側に取り付け、CSWG 長さを変えたときの加速モードの外部Q値の変化を Figure 1 に示す。CSWG の長さが長くなるにつれて外部Q値が大きくなっていく。これは加速モードが遮断周波数以下であるため、CSWG が長くなるにつれて CSWG を透過できなくなっていくためである。Figure 2 と Figure3 には TE111 $\pi/3$ モードと TM110 π モードの外部Q値の変化を示す。加速モードと違ってCSWG長さの変化による差はほとんどない。これはこれらのモードの周波数が遮断周波数より高いため減衰することなくCSWG中を伝搬できるためである。

Figure 1 の CSWG 長さ と外部Q値を、Eq. (2) を使ってフィッティングすると減衰係数を求めることができる。それぞれの内軸径に対して同様の測定をし、減衰係数を求めたものを Figure 4 に示す。測定値は解析値と一致している。

CSWG 型 HOM カップラーの CSWG 長さを 445mm、先端長さを 35mm にし、内軸径を変えて遮断周波数を変えたときの各 HOM の外部Q値の変化を Figure 5 に示す。遮断周波数が高くなるにしたがって加速モードの外部Q値は大きくなる。これは遮断周波数が高くなるにつれて減衰係数が大きくなるため、同じ長さでも透過量が減少するためである。2GHz 以上の HOM に関しては遮断周波数の違いによる差はほとんどない。これは遮断主波数より高いため減衰なく透過するためである。1.6GHz か

ら 1.9GHz 近辺の HOM に関しては、周波数が遮断周波数より低くなると減衰し外部Q値が大きくなっていく。加速モードの外部Q値を 10^{11} とするには、遮断周波数が 1381MHz のときは、720mm が必要なのに対して、遮断周波数が 1485MHz、1631MHz のときはそれぞれ 505mm、395mm と短くなる。遮断周波数近辺の HOM の外部Q値を少し高めにする事ができれば、全長を短くすることができる。

TESLA 空洞に CSWG 型 HOM カップラーを EC1 側、EC2 側に取り付け、CSWG 長さを 445mm、先端長さを 35mm にしたときの各モードの外部Q値を Figure 6 に示す。TESLA 空洞はエンドセルの形状をそれぞれ変え、HOM のフィールド分布を偏らせている。そのためビームパイプにより HOM の取り出し易さに差があるため、同じ HOM に対しても外部Q値のばらつきはあるが、HOM の外部Q値は概ね 10^5 以下程度になっている。

ERL-model2 空洞についても同様の測定を行った。LBP 側および SBP 側に HOM カップラーを取り付け、CSWG 長さを 165mm、先端長さを 45mm とした時の各 HOM の外部Q値を Figure 7 に示す。LBP 側と SBP 側とで差はあるが、いずれかの HOM カップラーによって 10^4 程度以下にすることができる。また加速モードはビームパイプで十分減衰しているため CSWG 長が短くても加速モードに関しては十分大きな外部Q値になっている。

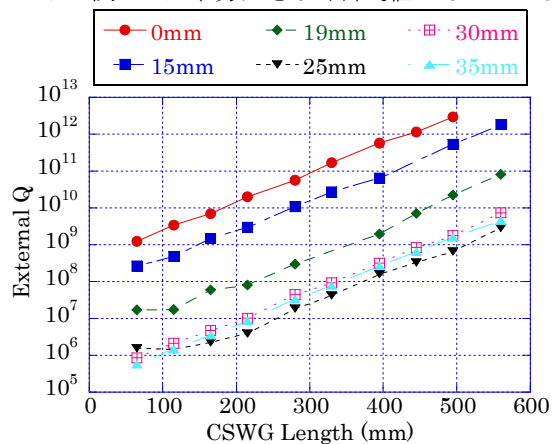


Figure 1: External Q-values as a function of CSWG length for the accelerating mode of TESLA model cavity.

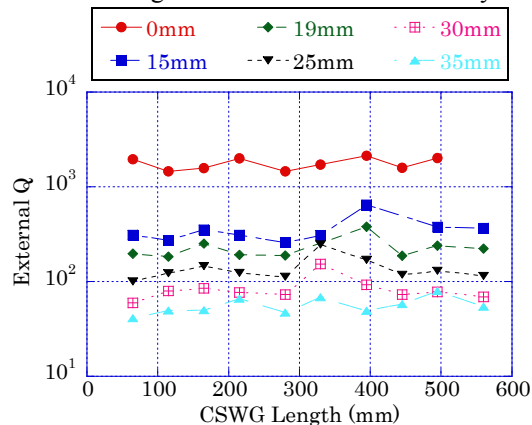


Figure 2: External Q-values as a function of CSWG length for TE111 mode of TESLA model cavity.

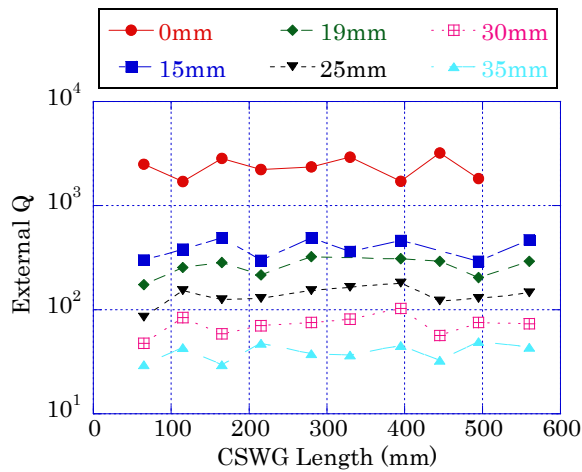


Figure 3: External Q-values as a function of CSWG length for TM110 mode of TESLA model cavity.

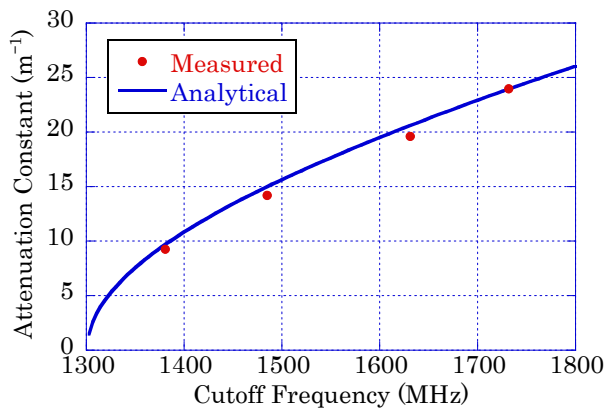


Figure 4: Measured and analytical attenuation constants as a function of cutoff frequency.

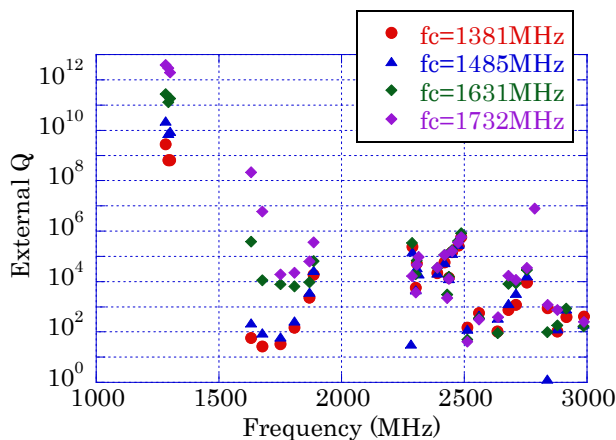


Figure 5: External Q-values for accelerating mode and HOMs with different cutoff frequencies of CSWG HOM couplers.

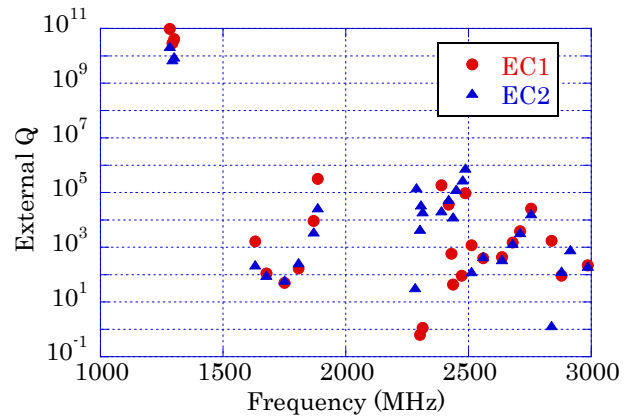


Figure 6: External Q-values for TESLA cavity when the CSWG HOM coupler was installed at EC1 side or EC2 side.

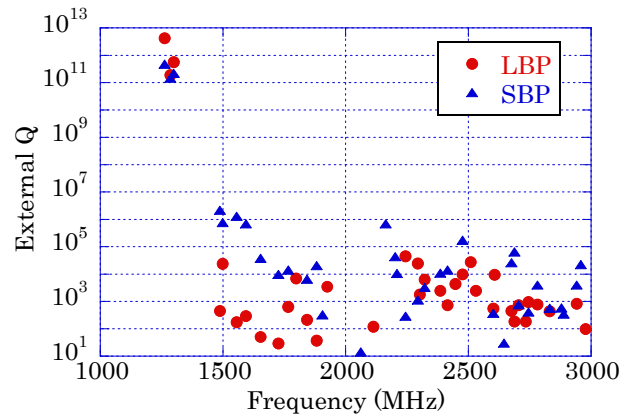


Figure 7: External Q-values for ERL-model2 cavity when the CSWG HOM coupler was installed at LBP side or SBP side.

5. HOM カップラーの曲げ特性

CSWG 型 HOM カップラーを空洞に取り付けるとき、真っ直ぐなまま取り付けると半径方向に大きく広がった形状になってしまうので、90 度曲げる必要がある。HOM カップラーを同軸管に取り付け、曲げ部分を含め内軸長を同じにしなが、曲げ回数(1 回の曲げ角度)を変えたときの計算結果を Figure 8 に示す。曲げ回数が多く、1 回当たりの曲げ角度が小さくなるに従った透過係数は減っていくが、曲げ角度 45 度以下では大きな差はなくなる。接続板は曲げの外側につけた方が透過係数は小さくなる。

そこで 45 度曲げモデルを製作し(Figure 9)、透過係数を測定した結果を Figure 10 に示す。CSWG の内軸径を変えて遮断周波数を変えたときの透過係数である。遮断周波数が高くなると計算と測定結果に差が出てくるように見えるが、ネットワークアナライザの信号が小さくなり誤差が大きくなったためと考えられる。

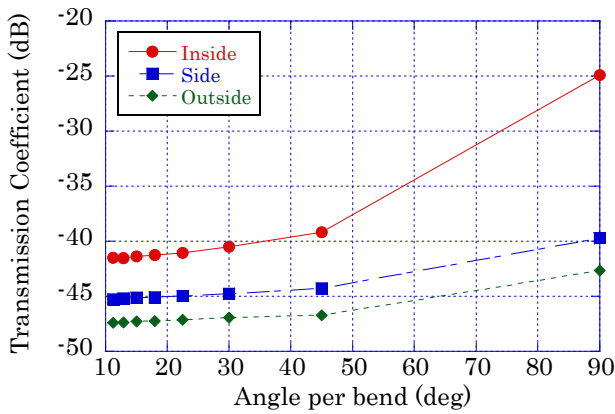


Figure 8: Calculated transmission coefficients as a function of angle per bend for three types of connection plate direction.

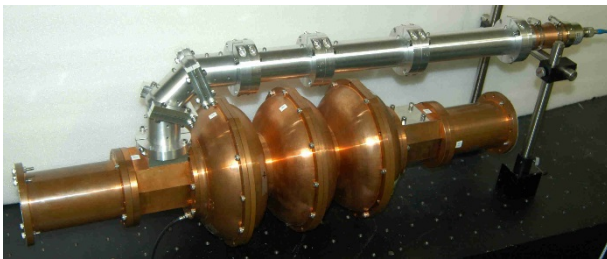


Figure 9: Bended CSWG HOM coupler.

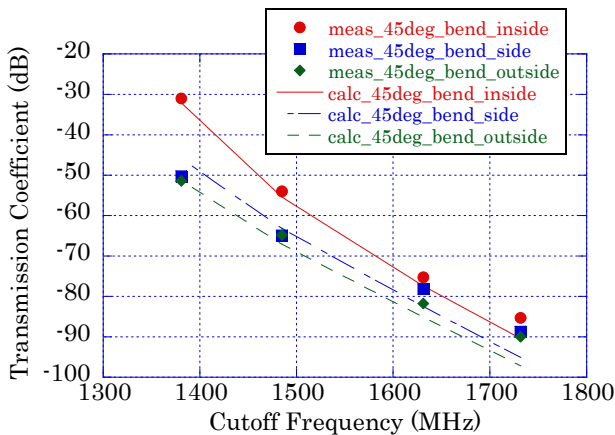


Figure 10: Measured and calculated transmission coefficients for 45deg bended CSWG HOM coupler.

6. まとめ

CSWG型HOMカップラーをTESLA空洞およびERL-model2空洞に取り付け、空洞HOM特性を調べた。両空洞とも加速モードに対しては充分高い外部Q値が得られ、HOMに関しては充分低い外部Q値が得られた。遮断周波数近辺のHOMの外部Q値を高め設定できれば、遮断周波数を高めにして加速モードの減衰定数を大きくすることができるので、全長を短くすることができる。また実際に空洞に実装する場合はCSWGを90度曲げることが必要になってくるが、1回当たりの曲げ角度を45度以下にすれば、大きな差はなくなる。また接続板は曲げの外側に設置した方が有利である。

参考文献

- [1] P. Kneisel *et al.*, “Testing of HOM Coupler Designs on a Single Cell Niobium Cavity”, Proc. of PAC2005, Knoxville, USA, May 16-20, 2005, pp.4012-4014.
- [2] G. Wu *et al.*, “Electromagnetic Simulations of Coaxial Type HOM Coupler”, Proc. of 12th SRF (SRF2005), Ithaca, USA, July 10-15, 2005, pp.600-603.
- [3] J. Sekutowicz, “Improved Heat Conduction Feedthroughs for HOM Couplers at DESY”, Proc. of ERL2011, Tsukuba, Japan, Oct. 16-21, 2011, pp.102-104.
- [4] M. Sawamura *et al.*, “Properties of the RF transmission line of a C-shaped waveguide”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 882 (2018) 30–40.
- [5] K. Umemori *et al.*, “Design of L-band Superconducting Cavity for the Energy Recovery Linacs”, Proc. of APAC2007, Indore, India, (2017), pp.570-572.
- [6] B. Aune *et al.*, “Superconducting TESLA cavities”, Phys. Rev. Accel. Beams, 3, 092001 (2000).
- [7] E. L. Ginzton, “Microwave Measurements”, McGraw-Hill Book Co. Inc., (1957).