

## C 形導波管を用いた HOM カップラーの高周波特性 RF PROPERTY OF HOM COUPLER WITH C-SHAPE WAVEGUIDE

沢村 勝<sup>#A)</sup>, 阪井寛志<sup>B)</sup>, 梅森健成<sup>B)</sup>, 許斐太郎<sup>B)</sup>, 古屋貴章<sup>B)</sup>  
Masaru Sawamura<sup>#A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>B)</sup>, Kensei Umemori<sup>B)</sup>, Taro Konomi<sup>B)</sup>, Takaaki Furuya<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization/SOKENDAI

### Abstract

A new type of waveguide, which is named C-shaped waveguide, enables efficient cooling by connecting the inner connector through the connecting plate. This waveguide has cut-off frequency. These properties have advantage for an HOM coupler. The HOM Q-values for two types of elliptical cavities were measured with CSWG HOM coupler. The results of measurement will be presented.

### 1. はじめに

C 形導波管 (C-shaped waveguide: CSWG) は、同軸管のような構造をしているが、接続板により内軸を効率よく冷却できる。さらに導波管のように遮断周波数を持っている[1, 2]。

CSWG の応用として、高調波モード (Higher Order Mode: HOM) を減衰させる HOM カップラーがある。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、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[3,4,5]。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。

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 HOM の変化を測定したので、その結果について報告する。

### 2. C 形導波管型 HOM カップラー

CSWG の遮断周波数は、内軸径、外軸径および接続板の寸法で決まる。HOM 特性の測定に用いた空洞は、TESLA 空洞[6]と ERL-model2 空洞[7]であり、加速モー

ドの周波数はともに 1.3GHz である。CSWG の高周波特性の測定に用いた CSWG モデルの外筒の内径は  $\phi 42\text{mm}$  であるが、この外筒をそのまま利用し、内軸として規格品の  $\phi 30\text{mm}$  の丸棒を、接続板として厚さ 4mm の平板を用いると、遮断周波数は 1.38MHz となる。加速モードのすぐ上の HOM は、TESLA 空洞で 1.63GHz、ERL-model2 空洞で 1.49GHz であるため、HOM 減衰には、十分な遮断周波数である。

測定に用いた空洞モデルは HOM の数を減らすため 3 セルとした。高周波の供給、取り出しのためのアンテナは、それぞれ両端のセルに取り付けられ、円周上の同じ位置に取り付けられている。CSWG 型 HOM カップラーの位置はアンテナに対する角度で表わすものとする。ERL-model2 空洞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。

CSWG 型 HOM カップラーを取り付け、先端部分の長さを変えた時の HOM の Q 値の変化を測定した。先端位置はビームパイプ内面からの距離とし、ビームパイプ内側に入っていく方向をプラスとする。

HOM カップラーを付けた時の外部 Q 値  $Q_{\text{ext}}$  は次式により求めた。

$$\frac{1}{Q_{\text{ext}}} = \frac{1}{Q_{\text{load}}} - \frac{1}{Q_0} \quad (1)$$

ここで  $Q_0$  は HOM カップラーを外し、ポートに蓋をした空洞の Q 値、 $Q_{\text{load}}$  は HOM カップラーを取り付けた空洞の Q 値である。 $Q_0$  および  $Q_{\text{load}}$  の測定はネットワークアナライザを用いた。

### 3. ERL-model2 空洞 HOM 特性

ERL-model2 空洞は大電流 ERL の超伝導主加速器用の空洞として開発された楕円型の 9 セル空洞である。HOM 取り出しを容易にするため、アイリス径を 80mm と大きくするとともに、空洞からの HOM をビームパイプ中を伝搬させるため、ビームパイプ径が 100mm と 123mm になっている。ビームパイプを伝搬した HOM はセル端

<sup>#</sup> sawamura.masaru@qst.go.jp

面から 130mm 以上離れたところに設置するビームライン型 HOM ダンパーで減衰させることとなっている。加速モードはビームパイプを伝搬できないので、HOM ダンパーのある位置では加速モードは十分に減衰している。そのため、加速モードを排除するためのフィルターは不要である。しかし大電流加速を想定すると、HOM パワーも大きくなるため冷却が容易な CSWG 型 HOM カップラーの利点が活かされるものと考えられる。

HOM ダンパーの位置に CSWG 型 HOM カップラーを取り付け (Figure 1 top)、先端部分の長さを変えた時の HOM の Q 値の変化を測定した。

Figure 2 に TE<sub>111</sub> モードの Q<sub>ext</sub> の変化を示す。

ERL-model2 空洞の TE<sub>111</sub> モードの電磁界分布は LBP 側に強くなっているため、HOM カップラーを LBP 側に取り付けた方が、より強く減衰できる。 $\pi/3$ 、 $2\pi/3$ 、 $\pi$ モードとも Q<sub>ext</sub> が小さくなっており、充分減衰できていることが分かる。

Figure 3 に TM<sub>110</sub> モードの Q<sub>ext</sub> の変化を示す。

TM<sub>110</sub> モードは LBP、SBP 両方にモードが伝搬しているので、どちらのビームパイプに取り付けてもあまり大きな差はない。

Figure 4 に TE<sub>211</sub> モードの Q<sub>ext</sub> の変化を示す。

TE<sub>211</sub> モードは LBP、SBP を伝搬できないので、HOM カップラーを取り付けても減衰することはできない。四重極モードに関しては偏心フルート[8]を付けることにより、四重極を双極に変換して減衰させることができる。

Figure 5 に加速モードである TM<sub>010</sub> モードの Q<sub>ext</sub> の変化を示す。TM<sub>010</sub> モードも LBP、SBP を伝搬できないので、HOM カップラーによる減衰はない。



Figure 1: Setup for Q-value measurement of ERL-model2 cavity (top) and TESLA cavity (bottom) with CSWG HOM coupler.

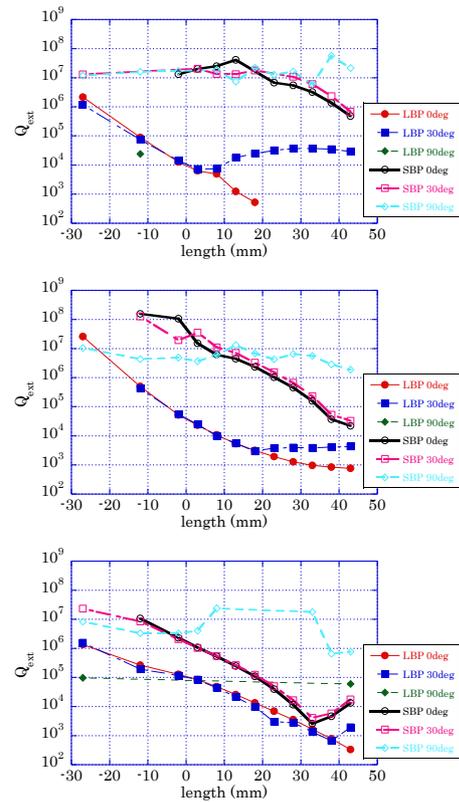


Figure 2: External Q values of ERL-model2 cavity as a function of tip position of CSWG for TE<sub>111</sub>  $\pi/3$  (top),  $2\pi/3$  (middle) and  $\pi$  (bottom) modes.

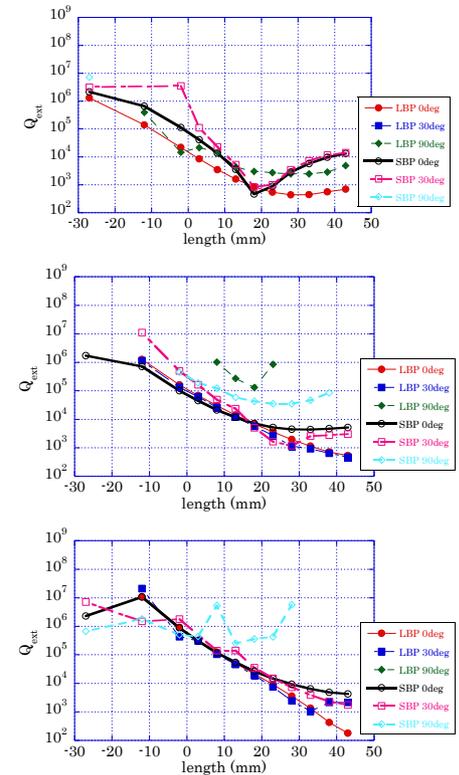


Figure 3: External Q values of ERL-model2 cavity as a function of tip position of CSWG for TM<sub>110</sub>  $\pi$  (top),  $2\pi/3$  (middle) and  $\pi/3$  (bottom) modes.

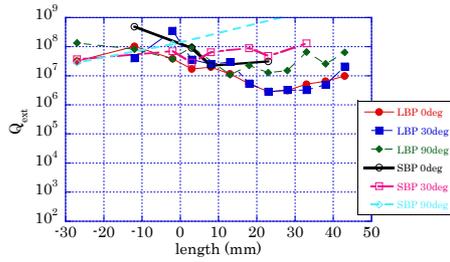


Figure 4: External Q values of ERL-model2 cavity as a function of tip position of CSWG for TE<sub>211</sub>  $\pi/3$  modes.

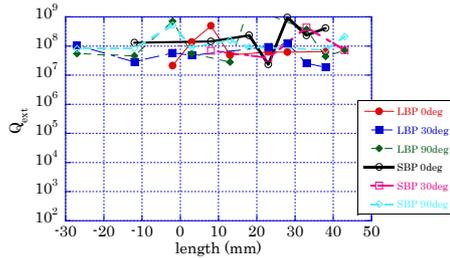


Figure 5: External Q values of ERL-model2 cavity as a function of tip position of CSWG for TM<sub>010</sub>  $\pi$  modes.

#### 4. TESLA 空洞 HOM 特性

TESLA 空洞では HOM カップラーの取り付け位置は空洞セル端面から 48mm と空洞に近く、加速モードが十分に減衰している位置ではないため、HOM 減衰には、加速モードを遮断するノッチフィルター構造を持つアン

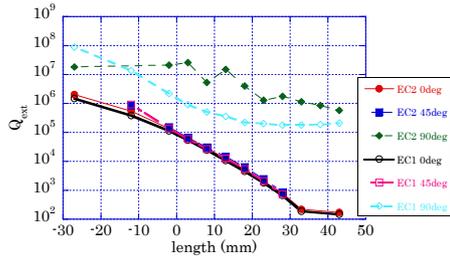
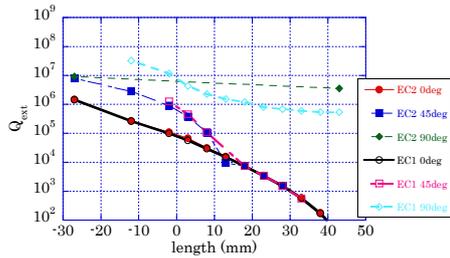
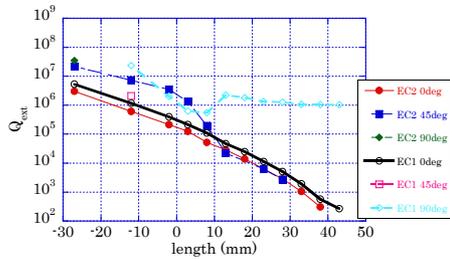


Figure 6: External Q values of TESLA cavity as a function of tip position of CSWG for TE<sub>111</sub>  $\pi/3$  (top),  $2\pi/3$  (middle) and  $\pi$  (bottom) modes.

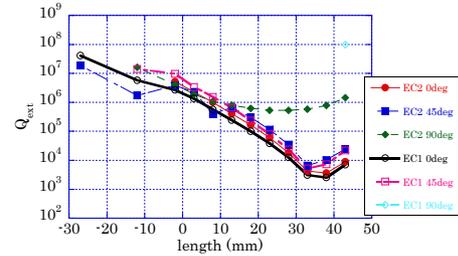
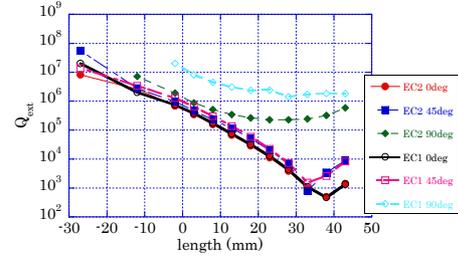
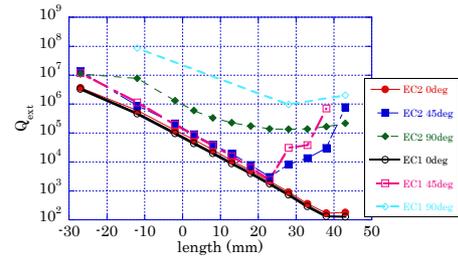


Figure 7: External Q values of TESLA cavity as a function of tip position of CSWG for TM<sub>110</sub>  $\pi$  (top),  $2\pi/3$  (middle) and  $\pi/3$  (bottom) modes.

テナ/ループ型 HOM カップラーを用いることとなっている[9]。この位置に CSWG 型 HOM カップラーを取り付け (Figure 1 bottom)、各 HOM の Q 値の変化を測定した。

Figure 6 に TE<sub>111</sub> モードの  $Q_{ext}$  の変化を示す。TE<sub>111</sub> モードはアンテナの方向に電界が向いているので、HOM カップラーの取り付け角度によってカップリングが変わる。電界と同じ向きに 0 度が一番強くカップリングし、90 度の時が一番弱くなる。

Figure 7 に TM<sub>110</sub> モードの  $Q_{ext}$  の変化を示す。TM<sub>110</sub> モードも TE<sub>111</sub> と同様に HOM カップラーの取り付け角度によってカップリングが変わる。

Figure 8 に加速モードである TM<sub>010</sub> モードの  $Q_{ext}$  の変化を示す。今回測定に用いた CSWG 型 HOM カップラーの遮断周波数は、1.38GHz である。遮断周波数以下の透過係数  $S_{21}$  は

$$S_{21} = e^{-2\alpha z} \quad (2)$$

で表わせる。 $\alpha$  は減衰定数であり、 $z$  は長さである。減衰定数は、波数  $k$  または周波数  $f$  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。

これは HOM カップラーの先端が長くなり、空洞との結合が大きくなった時、加速モードに関しては十分な減衰量でないと考えられる。そのため加速モードの減衰が見られる。TESLA 空洞の一番低い HOM の周波数は

1.63GHz なので、CSWG の遮断周波数を 1.6GHz にすると、透過係数は-95.0dB となる。この透過係数であれば  $Q_{\text{ext}}$  は現状より 5 桁程度大きくなるので、加速モードへの影響はほとんどないものと考えられる。

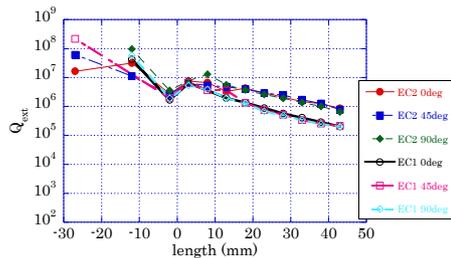


Figure 8: External Q values of TESLA cavity as a function of tip position of CSWG for  $TM_{010}$   $\pi$  modes.

## 5. まとめ

CSWG 型 HOM カップラーを ERL-model2 空洞および TESLA 空洞に取り付け、HOM の減衰を調べた。両方とも HOM に関しては十分な減衰が見られた。ただし、遮断周波数の設定が十分でなかったため、TESLA 空洞においては加速モードへの影響が見られた。しかし、遮断周波数を適切に選ぶことにより加速モードへの影響は回避できるものと考えられる。

## 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] M. Sawamura *et al.*, “NEW DESIGN OF HOM COUPLER USING COAXIAL-LIKE ROUNDED WAVEGUIDE”, Proc. of SRF2013, Paris, France, Sept. 23-27, 2013, pp.1081-1084.
- [2] M. Sawamura, “C 形導波管の高周波特性”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp.885-888.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J. Sekutowicz, “Improved Heat Conduction Feedthroughs for HOM Couplers at DESY”, Proc. of ERL2011, Tsukuba, Japan, Oct. 16-21, 2011, pp.102-104.
- [6] B. Aune *et al.*, “Superconducting TESLA cavities”, Physic. Rev. Special Topics – Acc. and Beams, vol. 3, 092001 (2000)
- [7] 羽島良一他, “コンパクト ERL の設計研究”, KEK Report 2007-7 / JAEA-Research 2008-032 (2008).
- [8] M. Sawamura *et al.*, “Eccentric-fluted beam pipes to damp quadrupole higher-order modes”, Physic. Rev. Special Topics – Acc. and Beams, vol. 13, 022003 (2010)
- [9] K. Watanabe *et al.*, New HOM coupler design for ILC superconducting cavity, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A 595 (2008) p. 299.