

Development of HOM damper for ERL Main Linac

Masaru Sawamura^{1,A)}, Kensei Umenori^{B)},

Takaaki Furuya^{B)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Kenji Shinoe^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{C)} The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo

5-1-5 Kashinoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

Abstract

HOM absorbers are one of the key components to determine the ERL cavity performance to reduce the HOM problem for the high current operation. When a beam line HOM damper is installed inside the cryomodule, the HOM damper is cooled down to liquid nitrogen temperature. The RF absorber used for the HOM damper is required to have good frequency and temperature properties. Some ferrites and ceramics are tested for permittivity and permeability of frequency-dependence and temperature-dependence measured with a GM refrigerator from room temperature to 40 K. The HOM damper is designed by optimizing the parameters such as length, thickness and position with microwave simulation codes. Test models of the HOM damper are being designed and fabricated to test the RF, mechanical, cooling and temperature properties.

ERL用HOMダンパーの開発

1. はじめに

ERL用超伝導主加速器におけるHOM対策として、HOMのQ値の低い空洞を設計・製作してきた。HOMはビームパイプを伝播し、ビームパイプの途中にある高周波吸収体を含むHOMダンパーで減衰される。クライオモジュール内の空洞間に設置されるHOMダンパーは液体窒素温度程度に冷却される。そのため高周波吸収体は、広範囲のHOMに対応した周波数特性と、低温でも十分に吸収可能な温度特性を持つことが要求される。フェライト、セラミックなどの高周波吸収体の誘電率、透磁率の周波数特性の測定を行うとともに、GM冷凍機を用いた低温試験装置による常温から40Kまでの温度特性の測定を行い、HOMダンパーに最適な高周波吸収体を選択した。また電磁波解析コードを用いてHOMダンパーにおける高周波吸収体のサイズや位置を最適化した。これらの結果をもとにHOMダンパーの試作機の製作を進めている。

本報告ではこれまでの試験結果を中心にERL用HOMダンパー開発の現状を報告する。

2. 高周波吸収体の特性試験

様々な高周波吸収体の誘電率・透磁率の周波数特性および温度特性測定を行った。誘電率・透磁率の測定にはNicolson-Ross法[1]を用いた。この方法の測定手順は次のようである。

- ① 測定試料を7mmコネクタタイプの専用サンプルホルダーに入るように同軸状に加工する。
- ② ネットワーク・アナライザを用いて試料の反射係数と透過係数の周波数特性を測定する。
- ③ 反射係数と透過係数から複素誘電率および複素透磁率を求める。

試料の温度特性を測定するためには、試料を冷却する必要がある。我々はGM冷凍機を用いた低温測定装置に試料をセットし、常温から40Kまでの温度範囲にわたって試料の誘電率・透磁率の温度特性を測定した。低温測定装置はFig. 1に示すような各コンポーネントで構成されている。

- ・ GM冷凍機：冷凍機内部の蓄冷剤の入ったピストンを上下駆動させてヘリウムガスを断熱膨張させることで、極低温まで冷却する。
 - ・ コンプレッサー：GM冷凍機に圧縮ヘリウムガスを供給する。
 - ・ 真空槽：GM冷凍機の冷却部分を含み、試料を真空中で低温にする。
 - ・ 真空ポンプ：真空槽を真空にする。
 - ・ 温度コントローラー：試料の温度を一定に保つためのコントローラー
- また真空槽の中をFig. 2に示す。
- ・ 低温ステージ：GM冷凍機に接続して、冷却する試料等を固定する。
 - ・ ヒーター：低温ステージに巻かれていて、ヒーター電力を調整することにより低温ステージの温度を一定に保つ。ヒーター電力の調整は温度コン

¹ E-mail: sawamura.masaru@jaea.go.jp

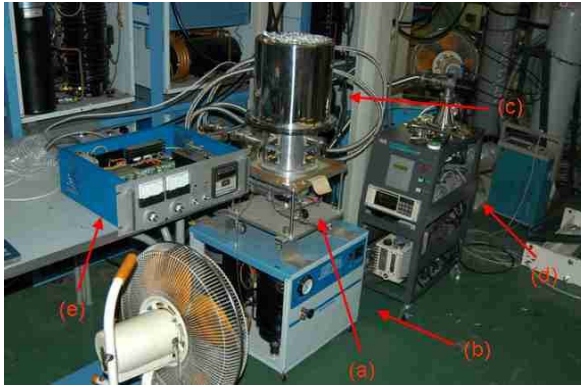


Fig.1 GM冷凍機を用いた低温測定装置;
(a)冷凍機、(b)コンプレッサー、(c)真空槽、
(d)真空ポンプ、(e)温度コントローラー

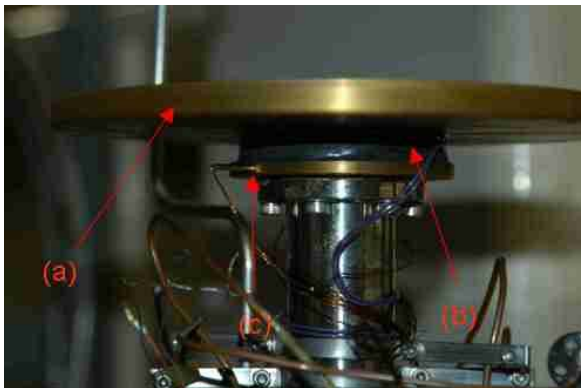


Fig.2 真空槽内部の低温ステージ
(a) 低温ステージ、(b)ヒーター
(c)測温抵抗体

トローラーにより行っている。

- ・測温抵抗体：低温ステージの温度を測定し、ヒーター制御に用いる。

低温ステージは常温の真空槽からの輻射熱を防ぐために、スーパーインシュレータを巻いた円筒形の蓋で覆われている。

温度特性の測定を行う場合、各温度でネットワーク・アナライザの各ポートの校正を行う必要がある。試料の温度特性の測定手順は以下の通りである。

- ① 各ポートに校正用キットを取り付ける。
- ② 各温度でのSパラメータをネットワーク・アナライザで測定する。
- ③ オープン、ショート、ロード、スルーの各負荷を順番に取り付けて同様の測定を行う。
- ④ 測定Sパラメータを用いて、各温度でのネットワーク・アナライザの校正データを計算する[2]。
- ⑤ 試料をセットし、各温度でのSパラメータを求める。
- ⑥ ネットワーク・アナライザの校正データを基に試料のSパラメータを校正する。
- ⑦ 校正後のSパラメータを用いて、試料の誘電率・透磁率を計算する。

フェライトとセラミックの測定結果をFig.3とFig.4に示す。フェライトはTDK製のIB004でKEKBのHOMダンパーに使われているものとほぼ同じ成分であるが、RoHS対応で鉛成分を除去し、特性がほぼ同じになるように調整したものである。セラミックはSiCである。

IB004は温度が室温から150K程度まではほぼ一定であるが、温度が更に下がると透磁率が減少する傾向にある。

またSiCは常温では周波数が高くなるに従って比誘電率が小さくなっていくが、80Kにおいては低い周波数においても誘電率が減少してしまい、高周波による誘電損失がなくなってしまい、高周波吸収体としては使えない。

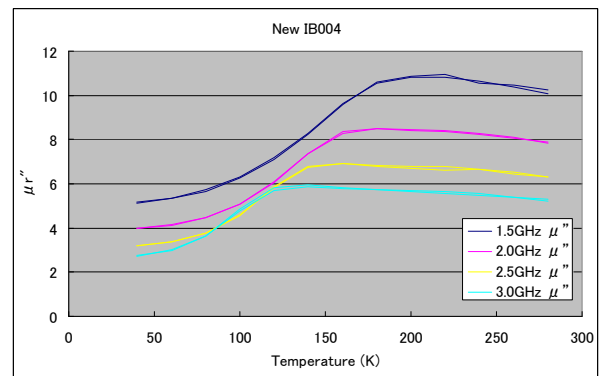


Fig.3 IB004比透磁率 μ_r の温度依存性

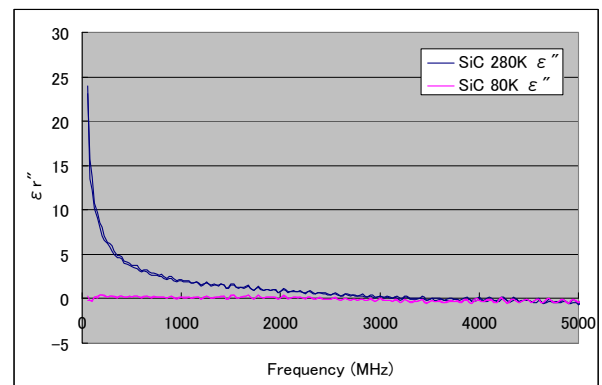


Fig.4 SiCの比誘電率 ϵ_r の周波数依存性

3. HOMダンパー形状の最適化

HOMダンパーでの高周波吸収をできるだけ多くするようにHOMダンパーの形状を最適化する。HOMダンパーのフェライト部分の損失を評価するために空洞壁での損失の割合を示す空洞Q値と同様にフェライト損失によるフェライトQ値を以下のように定義する。

$$Q_{cavity} = \frac{\omega \times (\text{Stored Energy})}{\text{Cavity Wall Loss}}$$

$$Q_{ferrite} = \frac{\omega \times (\text{Stored Energy})}{\text{Ferrite Loss}}$$

CFISHを用いてフェライトでの損失を求め、フェ

ライトQ値を計算すると、フェライト位置を固定してもビームパイプ長さによってフェライトQ値が変動する。これは定在波で計算する場合ビームパイプの端が境界条件になるが、フェライトで吸収されずに透過した電磁波はビームパイプ端で反射され再びフェライトに戻ってくる。このときビームパイプ端の位置で入射波と再入射する電磁場の位相が変わり、定在波の腹の位置が変わるためである。

そこでフェライト条件を固定した状態で、ビームパイプ長さを変えてQ値を測定し、そのうち最大値をそのフェライト条件でのフェライトQ値とする。最大値を取ることで、HOMダンパーの接続条件が変わってもこれ以上悪くはならないという値を求めることができる。

計算では、CFISHを用いてTM011モードでのフェライト損失を求める。ビームパイプの長さはフェライト後1cm間隔で20cmまで位置を変えた。フェライト特性は2.2GHzでのIB004の特性値である $\epsilon_r=10.34-0.0046j$ 、 $\mu_r=0.188-5.5j$ の値を用いた。

フェライト長さを変えたときのフェライトQ値の変化をFig.5に示す。フェライト長さが増えるに連れてフェライトQ値が減少していくが、最小値の位置および値はほぼ同じになっている。また長くなるに連れて長さによる変化も減少していく。フェライトが8cm以上であれば差は30%以下となる。

次にフェライト厚さに関しては、厚くなるほど、フェライトQ値の最小値は小さくなるが、最大値と最小値の差は反対に大きくなる。これは条件が合えば大きな吸収特性が得られるが、条件が外れた場合はあまり吸収されなくなることを意味する。フェラ

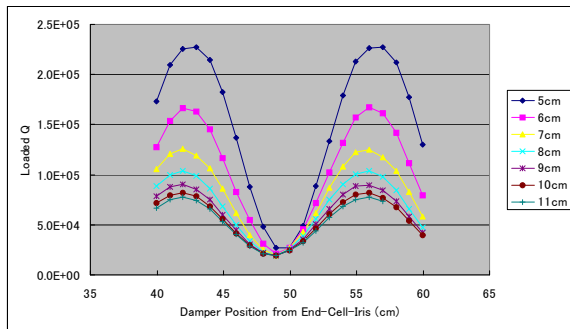


Fig.5 フェライト長さ依存性

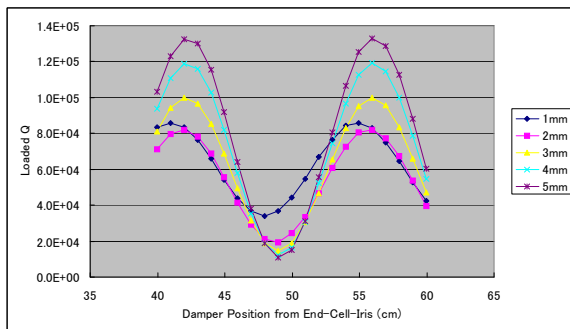


Fig.6 フェライト厚さ依存性

イトが厚くなるとビームパイプを進行するHOMとのマッチングが悪くなって反射が増えるため、逆に損失が減るためと考えられる。

4. HOMダンパーの試作

高周波吸収特性の測定及びフェライト形状の最適化計算を基にHOMダンパーの試作を行っている。

フェライトの脱落を防ぐため、フェライトと下地の金属との接合が強固なHIPによりフェライトを焼結させる方法を用いる。またフランジ接続の自由度や熱収縮の余裕のためにベローズを用いるが、ベローズ前後のビームパイプの接続部分に櫛歯構造のRFブリッジを用いる[3]。この櫛歯構造はフィンガータイプのRF接続に比べてインピーダンスが小さく、熱伝導も小さいという利点がある。設計中のHOMダンパーの概略図をFig.7に示す。

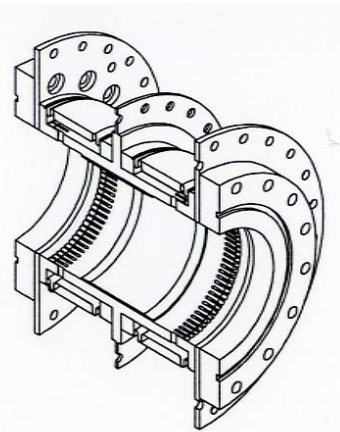


Fig.7 試作HOMダンパーの概略図

4. まとめ

高周波吸収体の周波数特性・温度特性の測定を行い、IB004は低温においても十分な吸収特性を持つことが分かった。またHOMダンパーの最適化計算を行い、フェライトサイズとして長さ80mm、厚さ2mmに決定した。これらの結果を基に現在HOMダンパーの試作機を製作中である。

参考文献

- [1] 橋本修監修、次世代電波吸収体の技術と応用展開、シーエムシー出版、2003
- [2] Agilent AN 1287-3「ネットワーク・アナライザ測定に対する誤差補正の適用」
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7709J.pdf>
- [3] Y.Suetsugu, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, August 6-8, 2008, pp. 200-202