

ERL 用超伝導加速空洞の HOM ダンパーの開発

DEVELOPMENT OF HOM ABSORBERS FOR CW SUPERCONDUCTING CAVITIES IN ENERGY RECOVERY LINAC

太田智子^{#, A)}, 高崎正浩^{A)}, 仲村晋一郎^{A)}, 宮本篤^{A)}, 佐藤潔和^{A)}
許斐太郎^{B)}, 梅森健成^{B)}, 阪井寛志^{B)}, 加古永治^{B)}

Tomoko Ota^{#, A)}, Masahiro Takasaki^{A)}, Shinichiro Nakamura^{A)}, Atsushi Miyamoto^{A)}, Kiyokazu Sato^{A)},
Taro Konomi^{B)}, Kensei Umemori^{B)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Eiji Kako^{B)}

^{A)} Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Higher Order Modes (HOM) absorbers for superconducting cavities in energy recovery linac (ERL) have been developing at TOSHIBA in collaboration with High Energy Accelerator Research Organization (KEK) since 2015. A prototype HOM absorber for 1.3 GHz 9-cell superconducting cavity was fabricated in 2017. An aluminum nitride based lossy dielectrics (AlN) cylinder was brazed in a copper cylinder which has lattice-like slots on the inner surface. RF performance measurements of this prototype HOM absorber at room temperature and low temperature were carried out at KEK. As the results, it was found that some HOMs were absorbed by the prototype HOM absorber. However, many cracks occurred in the AlN cylinder before these measurements. R&D of brazing between AlN cylinder and copper has started and a new prototype HOM absorber was fabricated based on the R&D results. The heat removal test of the new prototype HOM absorber was carried out. RF measurement results of the previous prototype HOM absorber and fabrication process and the heat removal test results of the new prototype HOM absorber will be presented in this paper.

1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器 (ERL) と組み合わせた自由電子レーザー (FEL) は、10 kW 級の極端紫外線 (EUV) 光源の候補の一つであり、次世代の EUV リソグラフィ用光源として期待されている。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、10 mA 級の ERL-FEL 光源を設計した [1]。ERL-FEL 光源の主加速器は、超伝導 9 セル加速空洞とビームライン型高次モード (HOM) ダンパーから構成される。HOM を抑制することによって 10 mA 以上の高いビーム電流を加速し、12 MV/m 以上の高い加速電界を実現する CW 超伝導空洞の開発は、重要な技術課題である。9 セル空洞は、KEK のコンパクト ERL 用主加速器の実績を基にして設計された [2]。HOM ダンパーは HOM を効率的に減衰させるための装置であり、ERL のような大電流ビーム用超伝導空洞にとって重要な開発要素の一つである。

当社は、大電流用超伝導空洞の HOM ダンパーの開発を目的として、2015 年に KEK との共同研究を開始した。2017 年に、高周波吸収体として窒化アルミ系セラミックス (AlN) を用いた ERL 用 1.3 GHz 超伝導 9 セル空洞の HOM ダンパーを試作し、低温における RF 特性を測定した [3, 4]。

2. プロトタイプ HOM ダンパーの高周波特性の測定

プロトタイプ HOM ダンパーの高周波特性を KEK で測定した。プロトタイプ HOM ダンパーの主な仕様を

Table 1 に示す。このプロトタイプ HOM ダンパーは、熱応力を緩和するため内面に複数の溝を加工した銅シリンダーの内側に AlN シリンダーをろう付し、銅シリンダーの両端に SUS 製のフランジを電子ビーム溶接する構成である。プロトタイプ HOM ダンパーの写真を Fig. 1 に示す。

Table 1: Prototype HOM Absorber Specifications

| Type | Beam line type |
|-----------------------|-----------------------------|
| Inner diameter | 100 mm |
| Heat absorption | 10 W |
| Working temperature | 80 K |
| RF absorbing material | AlN (Sienna tec., STL-150D) |
| Flanges material | Stainless steel (SUS316L) |



Figure 1: Prototype HOM absorber.

[#] tomoko.ota@toshiba.co.jp

昨年は、プロトタイプ HOM ダンパー単体について入射 RF 電力と RF 損失の比 ($P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$) を求めることによって HOM 減衰の確認を試みた。室温では HOM の減衰を確認できたが、低温では測定誤差が大きく HOM の減衰を明確にできなかった。そこで、今回は Fig. 2 に示すようにプロトタイプ HOM ダンパーと 1.3GHz 超伝導単セル空洞を接続し、各 HOM の Q 値を測定することによって HOM の減衰を確認することにした。Figure 2 において、室温で測定した HOM の Q 値を Fig. 3 の ■ に示す。また、プロトタイプ HOM ダンパーに代えて、これと同形状・同サイズで内面に AlN シリンダーを有しない銅シリンダーを単セル空洞に接続し、室温で測定した HOM の Q 値を Fig. 3 の △ に示す。プロトタイプ HOM ダンパーを接続した方の HOM の Q 値は、銅シリンダーを接続した方の値より一桁以上低く、プロトタイプ HOM ダンパーによって HOM が減衰していることを確認した。



Figure 2: Prototype HOM absorber was connected with the single-cell cavity for RF measurement at room temperature.

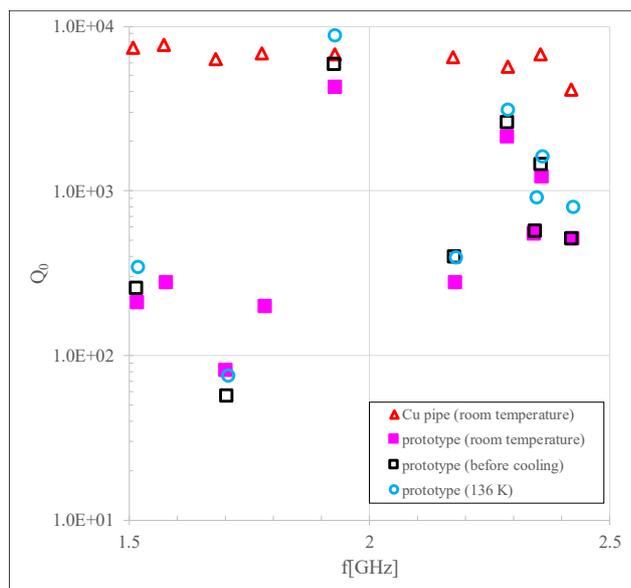


Figure 3: Measurement results of HOMs Q values.

次に、KEK-AR 東棟の超伝導空洞 R&D 用横型クライオスタット内に単セル空洞と組合わせたプロトタイプ HOM ダンパーを設置した。Figure 4 にクライオスタット内

に設置したプロトタイプ HOM ダンパーを示す。プロトタイプ HOM ダンパーの外周に銅製のアンカーを取り付け、アンカーとクライオスタットの 80K フレームを高純度アルミ製のアンカーブレードで接続した。80K フレームに液体窒素を流すことにより、プロトタイプ HOM ダンパーを伝導冷却した。冷却前に測定した HOM の Q 値を Fig. 3 の □ に示す。また、到達温度 (136K) で測定した HOM の Q 値を Fig. 3 の ○ に示す。これらの値は室温で測定した HOM の Q 値 ■ とほぼ同等であることから、低温においてもプロトタイプ HOM ダンパーによって HOM が減衰していることを確認した。



Figure 4: The prototype HOM absorber with the single-cell cavity was installed in the horizontal cryostat.

3. 新しいプロトタイプ HOM ダンパーの試作

80K 程度に冷却しても AlN にクラックが生じないように AlN と銅のろう付を実現するため、AlN と銅のろう付の R&D を開始した。AlN シリンダーの外周に短冊状の薄い銅板を巻きつけてろう付した試験片 2 個 (短冊の幅は 3mm と 10mm) を作成した。Table 2 にろう付の条件を示す。また、Fig. 5 に幅 3mm の短冊のろう付試験片、Fig. 5 に示す試験片の側面を Fig. 6 に示す。これより、AlN シリンダーと銅がしっかりと接合されていることが分かる。

Table 2: Brazing Conditions

| | |
|---------------------|--------|
| Brazing material | Silver |
| Process temperature | 750 °C |
| Furnace atmosphere | Vacuum |



Figure 5: Test piece which brazed an AlN cylinder and thin copper strips. The width of a copper strip is 3 mm.

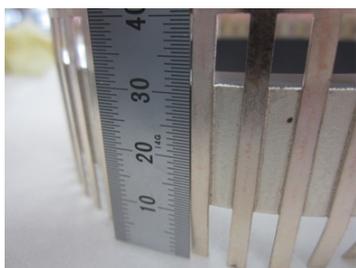


Figure 6: Outer surface of brazed test piece.

2 個の試験片のろう付部を光学顕微鏡で観察した結果、両方の試験片において AlN シリンダーにクラックが確認された。幅 10mm の短冊の試験片を切断し、断面を観察した結果、クラックの深さは約 4.4 mm であった。

Figure 5 に示す試験片を用いて新しいプロトタイプ HOM ダンパーを試作した。HOM ダンパーの仕様は Table 1 と同様とした。銅シリンダーの内部に Fig. 5 の試験片を電子ビーム溶接した後、銅シリンダーの両端に SUS 製のフランジを電子ビーム溶接した。Figure 7 に新しく試作したプロトタイプ HOM ダンパーを示す。



Figure 7: New prototype HOM absorber.

4. 新しいプロトタイプ HOM ダンパーの性能測定

4.1 除熱試験

新しく試作したプロトタイプ HOM ダンパーについて、除熱試験を実施した。AlN シリンダーにセラミックヒーター4 個を貼り付け、10 W の発熱を模擬できるようにした。また、AlN シリンダーと銅シリンダーに複数の熱電対を貼り付けた。熱電対を貼り付けた位置を Fig. 9 中の略図に示す。プロトタイプ HOM ダンパーを冷却した状態で除熱を確認するため、KEK-AR 東棟の超伝導空洞 R&D 用横型クライオスタット内にプロトタイプ HOM ダンパーを設置した。Figure 8 にクライオスタット内に設置したプロトタイプ HOM ダンパーを示す。プロトタイプ HOM ダンパー中央の突起部分とクライオスタットの 80K フレームを高純度アルミ製のアンカーブレードで接続し、80K フレームに液体窒素を流すことによって、プロトタイプ HOM ダンパーを伝導冷却した。プロトタイプ HOM ダンパーの温度が 100 K に到達した後、セラミックヒーターを 10 W 出力して、AlN シリンダーと銅シリンダーの温度を測定した。

銅シリンダーの各測定点の温度と AlN シリンダーの温度との差をプロットした。結果を Fig. 9 に示す。これより、銅シリンダーの各測定点の温度は AlN シリンダーの温度より 4 K 程度低いことが分かる。銅の熱伝導率を用いて銅シリンダーと AlN シリンダーの温度差を概算した結果は約 3 K であり、実測値とほぼ一致した。以上より、このプロトタイプ HOM ダンパーは液体窒素温度において 10 W を除熱できることを確認した。

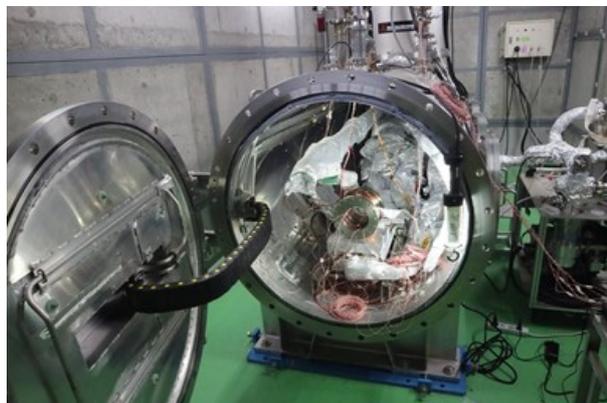


Figure 8: New prototype HOM absorber was installed in the horizontal cryostat.

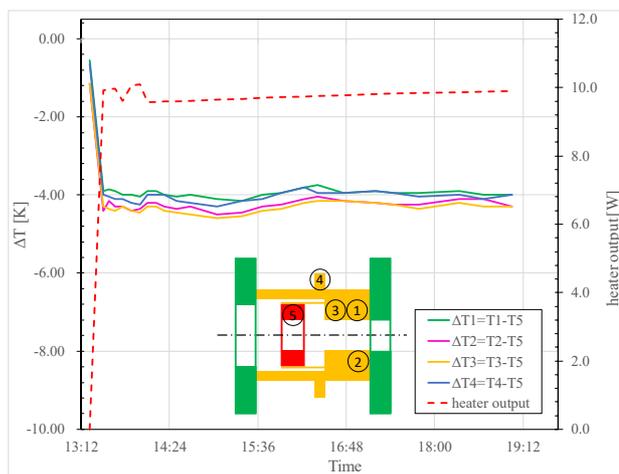


Figure 9: Heat removal test results of the new prototype HOM absorber.

4.2 真空試験

プロトタイプ HOM ダンパーについて、真空試験を実施した。プロトタイプ HOM ダンパーを KEK 所有の pumping system に接続し、真空排気した。この結果、到達真空度は 9.7×10^{-5} Pa であった。その後、プロトタイプ HOM ダンパーについて 120 °C で約 72 時間のベーキングを行った。ベーキング中のプロトタイプ HOM ダンパーの温度と真空度の測定結果を Fig. 10 に示す。図中の赤線はプロトタイプ HOM ダンパーの温度、青線はプロトタイプ HOM ダンパー内の真空度を表す。これより、ベーキング後のプロトタイプ HOM ダンパーの到達真空度は 1.7×10^{-5} Pa に向上した。ベーキング後、AlN シリンダーと銅のろう付部を目視した結果、ベーキング前からの変化は見られなかったことから、ビームラインに設置して使用する

ることが可能と考えられる。今後は、光学顕微鏡を使ってろう付部を詳細に観察する予定である。

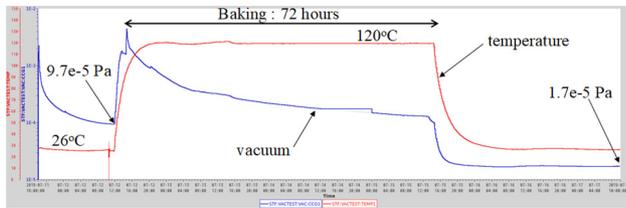


Figure 10: Vacuum test results of the new prototype HOM absorber. The red line shows temperature and the blue line shows vacuum of the new prototype HOM absorber.

5. まとめ

2017年に試作したプロトタイプ HOM ダンパーに超伝導単セル空洞を接続し、室温及び低温において HOM の Q 値を測定した結果、プロトタイプ HOM ダンパーによって HOM が減衰していることを確認した。また、昨年度は AlN シリンダーの外周に銅の短冊を巻いてろう付した試験片を作成し、これを用いて新たにプロトタイプ HOM ダンパーを試作した。この新しいプロトタイプ HOM ダンパーについて、除熱試験を実施した結果、液体窒素温度で 10 W を除熱できることを確認した。また、真空試験を実施した結果、プロトタイプ HOM ダンパーの到達真空度は $120\text{ }^{\circ}\text{C} \times 72\text{ 時間}$ のベーキングによって $9.7 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ から $1.7 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ に向上した。なお、AlN と銅のろう付の R&D については、今後も継続する予定である。

参考文献

- [1] N. Nakamura *et al.*, “ERL-FEL based high-power EUV light source for lithography”, Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 702-706.
- [2] T. Konomi *et al.*, “Design of the 9-cell superconducting cavity for EUV light source accelerator”, ICFA Mini Workshop on High Order Modes in Superconducting Cavities, Rostock, Germany, 2016; <https://indico.cern.ch/event/465683/sessions/205580/#20160822>
- [3] T. Ota *et al.*, “Development of HOM absorbers for CW superconducting cavities in Energy Recovery Linac”, Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 411-414.
- [4] T. Ota *et al.*, “Development of HOM absorbers for CW superconducting cavities in Energy Recovery Linac”, Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 947-950.