

ERL 用超伝導空洞の 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)}, 山田正博^{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)}, Masahiro Yamada^{A)}, Atsushi Miyamoto^{A)}, Kiyokazu Sato^{A)},
Taro Konomi^{B)}, Kensei Umemori^{B)}, Hiroshi Sakai^{B)} and 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 Energy Systems & Solutions Corporation 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 2016. The prototype HOM absorber was cooled with liquid nitrogen, and the RF measurements were carried out. The brazed joints of the prototype HOM absorber was carefully observed by a CCD camera after the cooling test. As a result, many cracks were confirmed in AlN. R&D of brazing between AlN and copper has been started to establish a new brazing method in order to avoid crack after cooling. RF properties at low temperature of the prototype HOM absorber and a new brazing method between AlN and copper are 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、10kW 級の極端紫外線 (EUV) 光源の候補の一つであり、次世代の EUV リン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、10mA 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。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 を抑制することによって 10mA 以上の高いビーム電流を加速し、12MV/m 以上の高い加速電界を実現する CW 超伝導空洞の開発が重要な技術課題である。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。これまでに、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 1.3GHz 超伝導 9 セル空洞の HOM ダンパーを設計し、AlN と銅のろう付 R&D の結果を基にして、プロトタイプ HOM ダンパーを試作した[3, 4]。

2. プロトタイプ HOM ダンパーの冷却試験

2.1 プロトタイプ HOM ダンパー

試作したプロトタイプ HOM ダンパーの主な仕様を table 1 に示す。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で溶接する構成とした。高周波吸収体として用いた AlN は、極低温においても室温の高周波特性を維持できる特徴を有する[3]。プロトタイプ HOM ダンパーの写真を Fig. 1 に示す。

Table 1: Specifications of a Prototype HOM Absorber

Frequency	1.3 GHz
Type	Beam line type
Inner diameter	100 mm
Working temperature	80 K
RF absorbing material	AlN (Sienna tec., STL-150D)
Flanges material	Stainless steel (SUS316L)



Figure 1: A completed prototype HOM absorber.

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

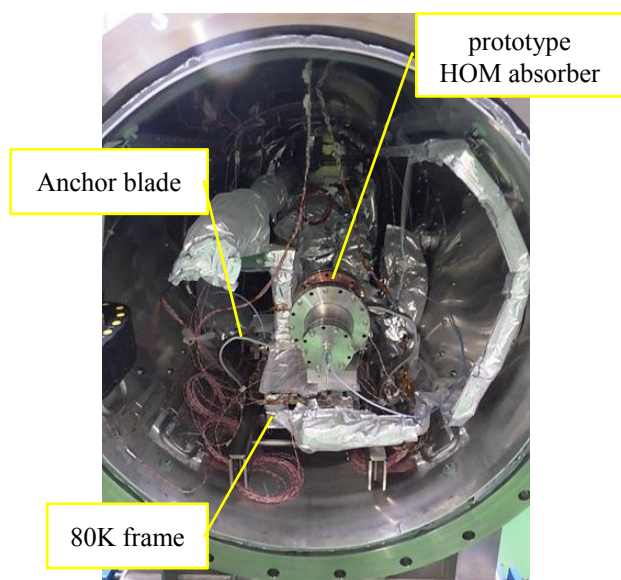


Figure 2: Prototype HOM absorber installed in the horizontal cryostat for cooling down tests.

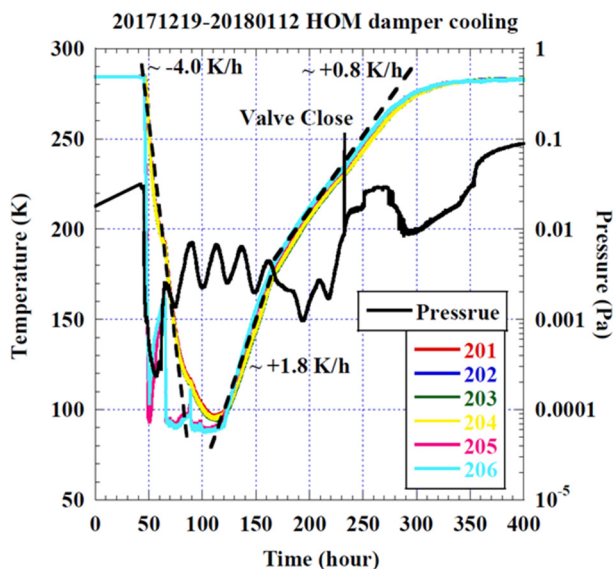


Figure 3: Results of temperature measurements in the cooling test. Temperatures at the prototype HOM absorber are shown in 201 (red) and 202 (blue). Temperatures at the copper anchor are shown in 203 (green) and 204 (yellow). Temperatures at the aluminum blade are shown in 205 (pink) and 206 (light blue).

2.2 冷却試験

KEK-AR 東棟内に設置されている超伝導空洞 R&D 用横型クライオスタット内にプロトタイプ HOM ダンパーを設置して冷却し、低温における高周波特性を測定した。横型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 Fig. 2 に示す。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。Figure 3 に冷却時のプロトタイプ HOM ダンパー本体、銅製アンカー及びアルミ製アンカーブレードの温度測定結果を示す。冷却を開始して約 71 時間後にプロトタイプ HOM ダンパーは 96K で安定した。昇温時は、80K フレームへの液体窒素の供給を止めて、プロトタイプ HOM ダンパーを自然昇温させた。

Figure 4 にプロトタイプ HOM ダンパーの高周波特性の測定系を示す。ネットワークアナライザを用い、300kHz ~6.5GHz の S パラメータを測定し、プロトタイプ HOM ダンパーの入射 RF 電力と RF 損失の比である P_{loss}/P_{in} を求めた。冷却前(284K)と低温時(96K)におけるプロトタイプ HOM ダンパーの P_{loss}/P_{in} の測定結果を Fig. 5 に示す。

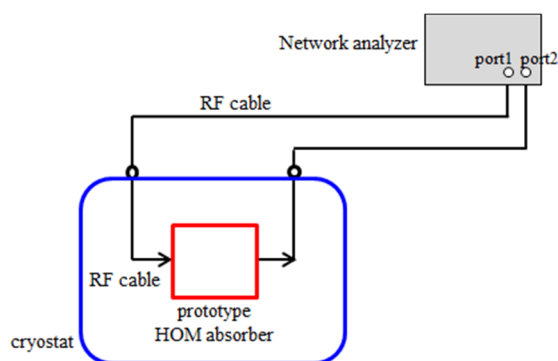


Figure 4: RF measurement system for the prototype HOM absorber in the horizontal cryostat.

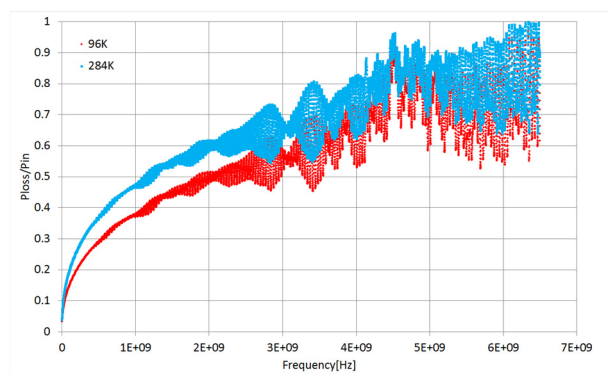


Figure 5: RF measurement results of prototype HOM absorber at room temperature and 96 K.

この測定結果について、RF ケーブル損失の影響と冷却時にクライオスタット内の RF ケーブルをキャリブレーションできなかったことによる測定誤差の影響を求めため、室温において以下を測定した。

- クライオスタット内 RF ケーブル単体の P_{loss}/P_{in} : A)
- プロトタイプ HOM ダンパー単体の P_{loss}/P_{in} : B)

これらの測定結果を Fig. 6 に示す。これより、クライオスタット内の RF ケーブル損失が大きいことが分かる。また、Fig. 5 の RF ケーブル損失を含む 284K の測定データ

C) から上記 A) の測定データを差し引いた計算値 D) と上記 B) の測定データを比較した。両者が一致すれば、クライオスタット内の RF ケーブルをキャリブレーションしなくても、低温時の RF ケーブル単体の P_{loss}/P_{in} 測定データからプロトタイプ HOM ダンパー単体の P_{loss}/P_{in} を計算で求めることができると考えたが、両者は一致しなかった。

RF ケーブル損失がプロトタイプ HOM ダンパーでの損失に比べてかなり大きいことが分かり、この方法では十分な測定精度が得られないため、測定精度の向上を考慮した方法で再度プロトタイプ HOM ダンパーの冷却試験を予定している。

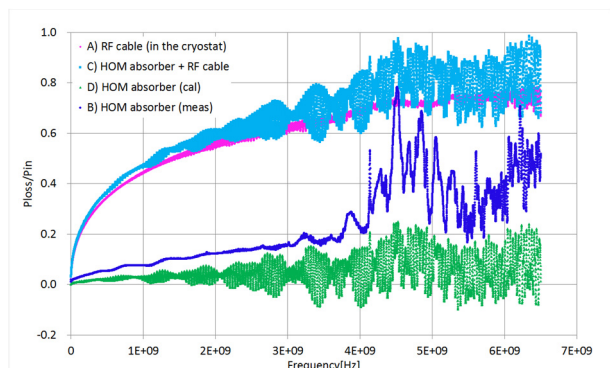


Figure 6: Effect of RF cable losses and calibration in RF measurements at room temperature.

2.3 冷却後のプロトタイプ HOM ダンパーの観察

冷却後のプロトタイプ HOM ダンパーのろう付部を CCD カメラで観察した。この結果、AIN と銅の接触箇所 (全周で 60 箇所) のうち、46 箇所の AIN にクラックが見られた。代表的な写真を Fig. 7 に示す。(a) に示すようなクラックが多数見られた。このうち、(b) のように AIN が欠けている箇所もあった。また、AIN に施したメタライズが剥がれている箇所 (c) や、メタライズの界面にクラックが生じている箇所 (d) も見られた。

Figure 3 に示すように、プロトタイプ HOM ダンパーの冷却及び昇温には十分な時間をかけたので、ろう付部には有意な温度差は生じなかったと考えるが、AIN は銅の熱応力に耐え切れずクラックが生じた。これより、内面に溝を設けた銅シリンダーの内側に AIN シリンダーをろう付する構造は、低温で運転する HOM ダンパーには適さないと考えられる。

3. AIN と銅のろう付 R&D

3.1 ろう付試験片の作成

80K 程度に冷却しても AIN にクラックが生じないように AIN と銅のろう付を実現するため、新たな構造のろう付 R&D を開始した。AIN シリンダーの外周に短冊状の薄い銅板を巻きつける構造とし、インジウム入りのろう材を用いて 750°C でろう付した試験片を 2 種類作成した。Figure 8 にろう付試験片を示す。試験片(A)は銅の短冊の幅を 3mm、試験片 (B) は銅の短冊の幅を 10mm とし

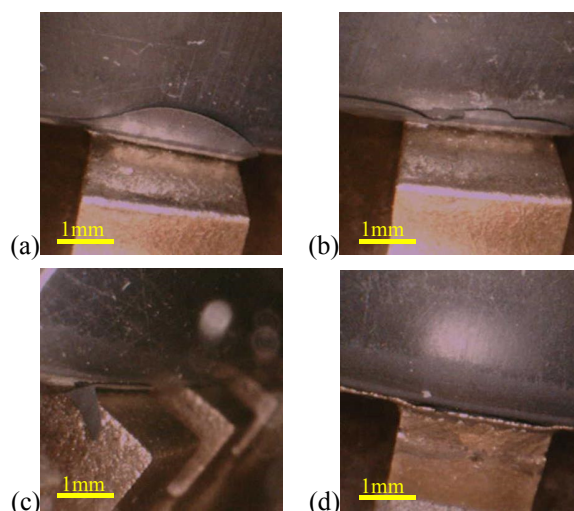


Figure 7: Results of observation of the prototype HOM absorber after cooling tests.

た。これらの試験片のろう付部を CCD カメラで観察した結果を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。試験片 (A) については、Fig. 9 (a) に示すように、AIN の数箇所欠損が見られた。ただし、ろう付部ではない AIN リングの内側の C 面にも同様の欠損が見られた (Fig. 9 (b)) ことから、これらの欠損はろう付によって生じたものではないと考えられる。試験片 (B) については、Fig. 9 (a) と同じような AIN の欠損の他に、Fig. 10 (a) と Fig. 10 (b) に示すようなクラックと思われる傷が見られた。

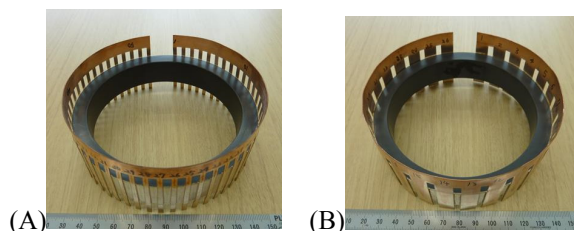


Figure 8: Test pieces of a new brazing method.

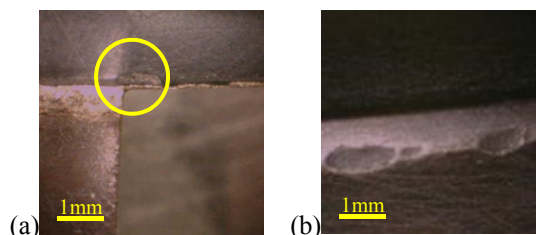


Figure 9: Observation results of the test piece (A).

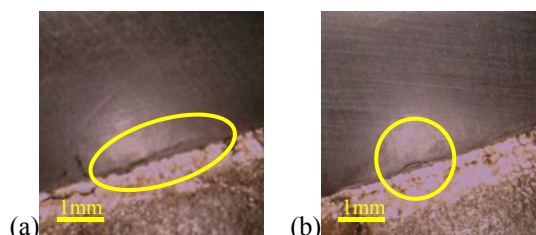


Figure 10: Observation results of the test piece (B).

3.2 ろう付試験片の冷却試験

ろう付試験片を液体窒素で 80K に冷却した後、再度 ろう付部を CCD カメラで観察した。試験片 (A) の観察結果を Fig. 11 に示す。Figure 11 は Fig. 9 と同じ箇所を観察した写真である。冷却前に見られた AIN の欠損は、冷却後も大きさや形状に変化は無いように見える。試験片 (B) の観察結果を Fig. 12 に示す。Figure 12 は、Fig. 10 と同じ箇所を観察した写真である。冷却前に見られたクラックのような傷は、冷却後も変化は無いように見える。これらの傷は Fig. 7 (a)、Fig. 7 (b) に示すクラックに比べて小さく見にくいいため、別の方法でクラックの有無を確認する。

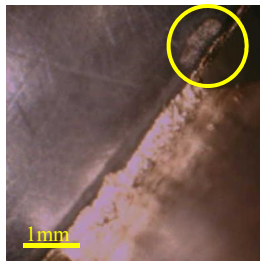


Figure 11: Observation results of the test piece (A) after cooling tests.

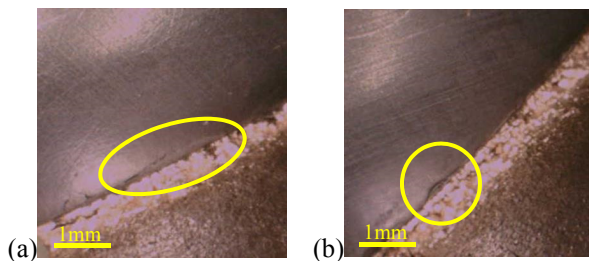


Figure 12: Observation results of the test piece (B) after cooling tests.

4. まとめ

試作した ERL 用超伝導空洞用プロトタイプ HOM ダンパーを冷却し、到達温度 96K で高周波特性を測定した。この結果、クライオスタット内の RF ケーブル損失がプロトタイプ HOM ダンパーでの損失に比べて大きかったこと、低温時に RF ケーブルをキャリブレーションできなかったことによる測定誤差が大きかったことから、プロトタイプ HOM ダンパーが HOM を減衰していることを明確に測定できなかった。RF ケーブル損失や RF ケーブルのキャリブレーションに対して十分な測定精度が得られる方法で、再度プロトタイプ HOM ダンパーの冷却試験を予定している。

冷却試験後のプロトタイプ HOM ダンパーのろう付部を観察した結果、AIN に多数のクラックが確認された。内面に溝を設けた銅シリンダーの内側に AIN シリンダーをろう付する構造は、低温で発生する熱応力が問題となり適切ではないと判断し、新たな構造のろう付 R&D を開始した。AIN シリンダーの外周に短冊状の薄い銅板を巻

きつけてろう付をした試験片を作成した。ろう付後、ろう付部を CCD カメラで観察した結果、幅 3mm の銅短冊ろう付試験片については AIN の数箇所に欠損が見られた。幅 10mm の銅短冊ろう付試験片については、AIN に欠損とクラックと思われる傷が見られた。これらの試験片を 80K に冷却した後、再度ろう付部を CCD カメラで観察した。この結果、AIN の欠損や傷に変化は無かったが、さらに詳細に調査するために別の方法で観察することを計画している。

参考文献

- [1] Nakamura *et al.*, "ERL-FEL based high-power EUV light source for lithography", in this meeting, WEP128.
- [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 dampers for superconducting cavities", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 377-379.
- [4] T. Ota *et al.*, "Development of HOM absorbers for CW superconducting cavities in Energy Recovery Linac", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 411-414.