

## 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<sup>#, A)</sup>, 高崎正浩<sup>A)</sup>, 山田正博<sup>A)</sup>, 宮本篤<sup>A)</sup>, 佐藤潔和<sup>A)</sup>,  
許斐太郎<sup>B)</sup>, 梅森健成<sup>B)</sup>, 阪井寛志<sup>B)</sup>, 加古永治<sup>B)</sup>

Tomoko Ota<sup>#, A)</sup>, Masahiro Takasaki<sup>A)</sup>, Masahiro Yamada<sup>A)</sup> Atsushi Miyamoto<sup>A)</sup>, Kiyokazu Sato<sup>A)</sup>,  
Taro Konomi<sup>B)</sup>, Kensei Umemori<sup>B)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>B)</sup>, Eiji Kako<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> TOSHIBA Corporation

<sup>B)</sup> 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. An aluminum nitride based lossy dielectrics (AlN) cylinder was brazed in a copper cylinder. Stainless steel flanges were joined on either end of the copper cylinder by electron beam welding to fabricate a whole prototype HOM absorber. Brazing tests and welding tests of Cu/SUS were carried out before fabricating the prototype. RF performance measurement of this prototype HOM absorber at room temperature was started at KEK. Fabrication process of the prototype HOM absorber is 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。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 [1]。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、HOM ダンパー試作に向けた R&D として、高周波吸収体である窒化アルミ系セラミックス (AlN) の誘電率と透磁率の周波数特性を測定した。この結果、AlN は 80 K に冷却しても室温と同程度の高い高周波吸収特性を有することを確認した [2]。この測定データを基にして ERL 用超伝導空洞の HOM ダンパーを設計した [3]。また、AlN と銅のろう付の R&D を開始した。銅シリンダーの内面に AlN シリンダーをろう付した結果、接合強度が十分ではなく、接合界面が剥がれた。

#### 2. AlN/Cu ろう付の R&D

前回の R&D で剥がれた AlN と銅の界面を確認した

結果、ろう付の接合強度はほぼゼロであるとの知見を得た。これより、以下の 2 点を変更して、再度 AlN シリンダーと銅シリンダーのろう付を行った。

- AlN シリンダーの外周面に施したメタライズ層の上に Ni メッキを施す。
- ろう付の際、炉内を水素雰囲気にする。

Table 1 に AlN シリンダーと銅シリンダーの仕様を示す。前回の R&D の時と同様、銅シリンダーの内面には熱応力を緩和するため複数の溝を加工した。インジウム入りの銀ろうを用い、750 °C でろう付を行った。Figure 1 にろう付後の試験片を示す。AlN シリンダーの表面にはクラック等の欠陥が生じていないことを目視で確認した。また、ろう付部分の接合状態を確認するため水浸法 UT を実施した。この結果、AlN シリンダーと銅シリンダーが良好に接合された面積は、全体の半分程度であった。

Table 1: Test Pieces for Brazing

Material	Inner diameter	Thickness	Length
AlN	100 mm	10 mm	20 mm
Copper	120 mm	6.5 mm	69 mm



Figure 1: Test piece of brazing.

ろう付後の試験片を 80 K に冷却した。試験片の AlN 側と銅側にそれぞれ熱電対を貼り、窒素ガスを用いて室温から 80 K まで冷却した。Figure 2 に試験片の温度変化を示す。これより、試験片は約 1 時間で室温から 80 K

<sup>#</sup> tomoko.ota@toshiba.co.jp

に冷却されたことが分かる。冷却後の試験片を目視検査した結果、Figure 3 に示すように、AIN シリンダーにクラックが生じていることを確認した。クラックが生じた原因として、以下の点が考えられる。

- 冷却速度が速過ぎて試験片が均一に冷却されず、温度差が生じた結果、AIN と銅の熱膨張の差によりクラックが生じた。
- 80 K から室温までの昇温時、銅シリンダーの伸びに AIN シリンダーが追随できず、AIN が銅に強く引っ張られた結果、クラックが生じた。

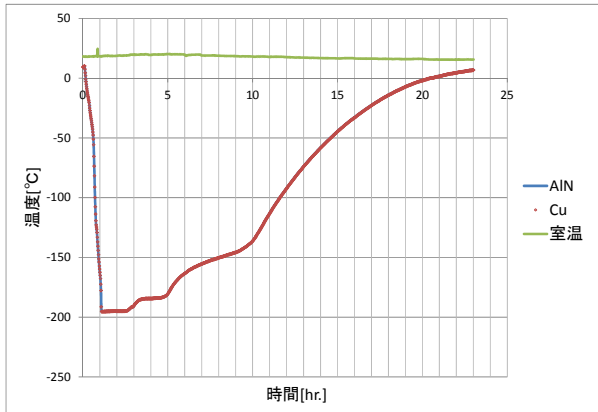


Figure 2: Temperature of the AIN/Cu cylinder in the cooling test.

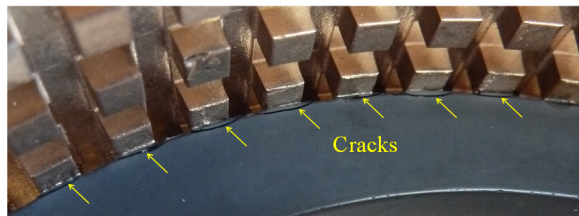


Figure 3: Cracks occurred in AIN cylinder.

### 3. Cu/SUS 電子ビーム溶接の R&D

銅シリンダーと SUS フランジを用いて、Cu/SUS の電子ビーム溶接 (EBW) の条件出しを行った。Table 2 に銅シリンダーと SUS フランジの仕様、Table 3 に EBW の条件を示す。溶接した試験片を Figure 4 に示す。フランジの表面から EBW すると共に、補強のためフランジ裏面から断続溶接を行った。Figure 5 に EBW 部分の断面写真を示す。

銅シリンダーの両端に SUS フランジを EBW で接合する際、AIN シリンダーと銅シリンダーのろう付部分がろう付温度より高温になると、ろう付部分が剥がれる恐れがある。このような事象が生じないことを確認するため、EBW 中の銅シリンダーの温度を測定した。この結果、銅シリンダーの中央部 (AIN シリンダーとろう付する部分) の温度上昇は 100°C 未満であった。

溶接した試験片に熱サイクル (室温と 80 K, 5 回) をかけた後、リーク試験を行った。この結果、リーク量は許容リーク量以下であった。

Table 2: Test Pieces for Welding

Part	Material	Size		
		Diameter	Thickness	Length
Cylinder	Copper	120 mm	6.5 mm	126 mm
Flange	Stainless steel	215 mm	22 mm	-

Table 3: EBW Conditions

Acceleration voltage	125 kV
Beam current	30 mA
Welding speed	750 mm/min

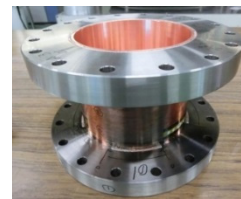


Figure 4: Test piece of welding.



Figure 5: Micro structure of the welding cross-section.

## 4. プロトタイプを試作

### 4.1 仕様

プロトタイプ的主要仕様を Table 4、外形図を Figure 6 に示す。

Table 4: Prototype HOM Absorber Specifications

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

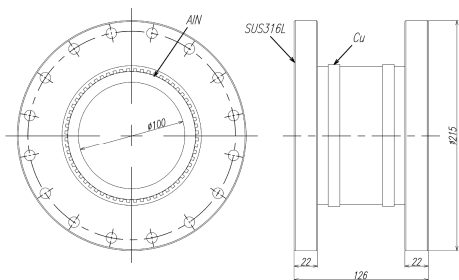


Figure 6: Drawings of the prototype HOM absorber.



Figure 8: Prototype HOM absorber.

#### 4.2 試作

AIN シリンダーについては外周面をメタライズし、その上に Ni メッキを施した。銅シリンダーについては、R&D の試験片と同様に、内面に複数の溝を加工した。インジウム入りの銀ろうを用い、750 °C、水素雰囲気で行った。ろう付後の状態を Figure 7 に示す。目視検査の結果、AIN シリンダーにはクラック等の欠陥が生じていないことを確認した。

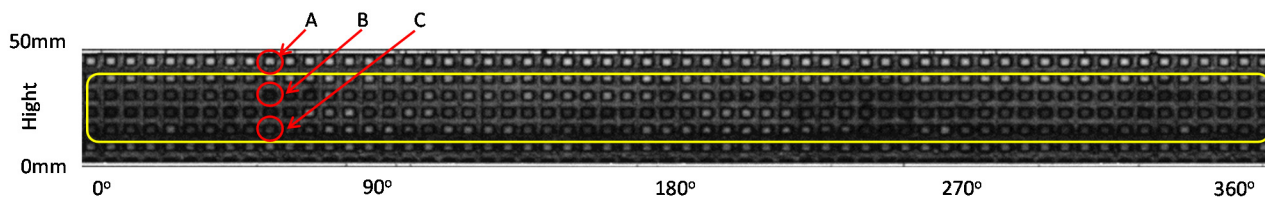
ろう付後、銅シリンダーの外周を機械加工した。これは 80 K 冷却時に AIN にクラックが生じないようにする対策の一つで、銅シリンダーの肉厚を薄くして銅が AIN を引っ張る力を弱くすることを期待するものである。その後、銅シリンダーの両端に SUS フランジを EBW で接合した。EBW の条件は R&D の時と同様である (Table 3)。完成した HOM ダンパーのプロトタイプを Figure 8 に示す。



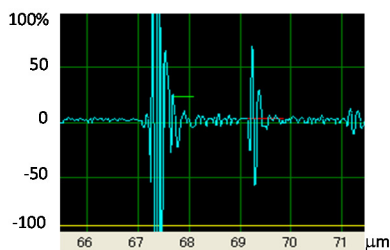
Figure 7: AIN/Cu cylinder after brazing.

#### 4.3 非破壊検査

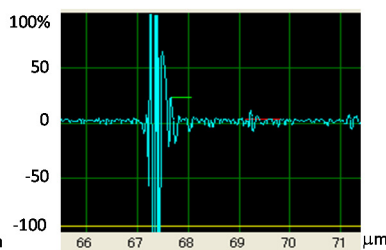
プロトタイプのもう付部分の接合状態を確認するため、水浸法 UT を実施した。検査結果を Figure 9 に示す。Figure 9 (1) はシリンダー全周のスキャン画像で、縦軸はシリンダーの高さ、横軸はシリンダーの周長 (角度) を示す。画像中の黄色い線は AIN シリンダーの位置を示す。Figure 9 (2) は Figure 9 (1) の A 点 (ろう付されていない部分) のエコー波形で、67  $\mu\text{m}$  と 69  $\mu\text{m}$  にピークが見られる。67  $\mu\text{m}$  のピークは水と銅シリンダー外周面の界面が入射波を反射していることを表し、69  $\mu\text{m}$  のピークは銅シリンダー内面と水の界面が入射波を反射していることを表す。Figure 9 (3) は Figure 9 (1) の B 点のエコー波形で、69  $\mu\text{m}$  にピークが見られないことから銅と AIN は接合されていると考えられる。また、Figure 9 (4) は Figure 9 (1) の C 点のエコー波形で、69  $\mu\text{m}$  に小さいピークが見られることから銅と AIN の接合は不完全であると考えられる。Figure 9 (1) のスキャン画像の色の明度は、エコーの高さを表す。ろう付されていない A 点は白く、接合されている B 点は黒く、接合が不完全な C 点は灰色に映る。これより、AIN シリンダーと銅シリンダーが良好に接合された面積は、全体の 6 割程度と考えられる。良好な接合面積を増やす対策の一つとして、ろう付で積極的にフィレットを形成させることが考えられる。フィレットを形成するため、銅シリンダー内面に加工する溝の形状を検討する必要があると思われる。



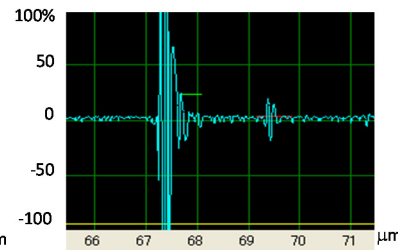
(1) The scanning image of the HOM absorber. It shows the scanning image width 50 mm of the copper cylinder. Yellow lines area shows AIN cylinder.



(2) Echo waveform at point A.



(3) Echo waveform at point B.



(4) Echo waveform at point C.

Figure 9: Ultrasonic testing results.

## 5. プロトタイプ of RF 特性測定

室温におけるHOMダンパープロトタイプ単体のRF特性の測定を開始した。プロトタイプと銅シリンダーの両端にSUSフランジをEBWした試験片(Figure 4)について、1 GHz~6 GHzの共振周波数をネットワークアナライザで測定した。Figure 10 に測定のセットアップを示す。測定結果をFigure 11 に示す。これより、AINの有無によって共振周波数に違いが見られることを確認した。ビームの加速に悪影響を与えるモードのQ値を求めるなど、引き続き室温におけるプロトタイプのRF特性を求める。

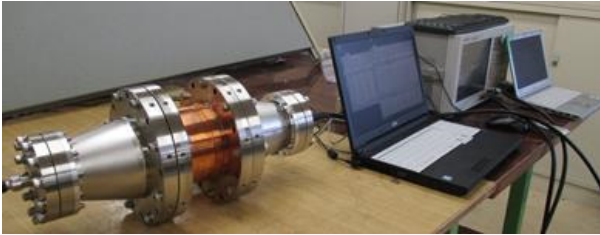


Figure 10: Set up for RF test of the prototype HOM absorber at room temperature.

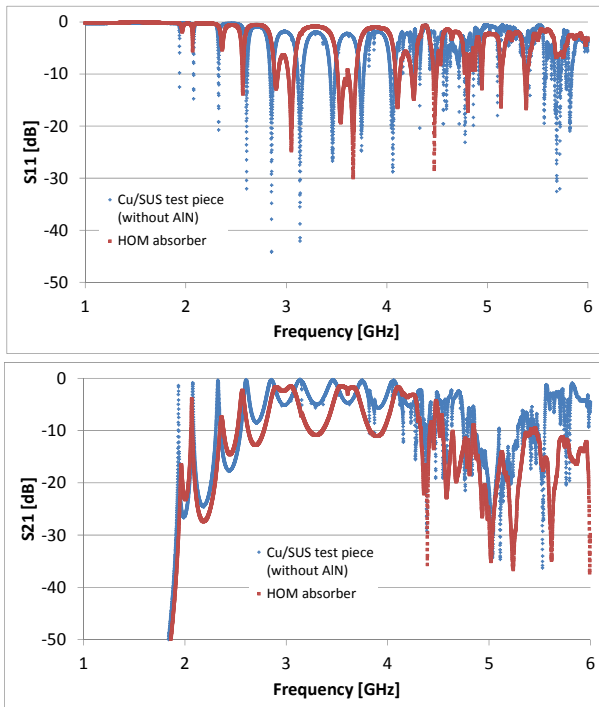


Figure 11: Measurement results of HOM absorber and Cu/SUS test piece at room temperature. S11 (upper) and S21 (lower).

## 6. まとめ

ERL用1.3 GHz超伝導9セル加速空洞のHOMダンパープロトタイプを試作した。プロトタイプについて水浸法UTを実施した結果、AINシリンダーと銅シリンダーが良好に接合された面積は全体の6割程度であった。また、室温におけるプロトタイプ単体のRF特性の測定を開始した。

今後は、KEKにてプロトタイプを80 Kに冷却し、ろう付部分の接合強度を確認する。また、80 KにおけるプロトタイプのRF特性の測定を予定している。

## 参考文献

- [1] H. Sakai *et al.*, “Superconducting Accelerator for ERL based FEL EUV Light Source at KEK”, Proc. of 18<sup>th</sup> International Conference on RF Superconductivity (SRF2017), Lanzhou, China.
- [2] T. Ota *et al.*, “Development of HOM dampers for superconducting cavities”, 第13回日本加速器学会年会, 幕張メッセ国際会議場, 2016年.
- [3] 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>