

# 超伝導空洞用 HOM ダンパーの開発

## DEVELOPMENT OF HOM DAMPERS FOR SUPERCONDUCTING CAVITIES

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>, 加古永治<sup>B)</sup>, 阪井寛志<sup>B)</sup>, 沢村勝<sup>C)</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>, Eiji Kako<sup>B)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>B)</sup>, Masaru Sawamura<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> TOSHIBA Corporation

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

<sup>C)</sup> National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

### Abstract

TOSHIBA has been developing Higher Order Mode (HOM) dampers for superconducting cavities in collaboration with High Energy Accelerator Research Organization (KEK) since 2015. We measured permittivity and permeability of glassy carbon AlN ceramic at room temperature and 80K. To fabricate the prototype of HOM damper for 1.3GHz 9-cell superconducting cavity, we brazed an AlN cylinder to a copper cylinder and cooled it by nitrogen gas as R&D. Development status of HOM dampers for superconducting cavities at TOSHIBA will be presented in this conference.

### 1. はじめに

超伝導空洞を用いた加速器として、国際リニアコライダー (International Linear Collider : ILC) やエネルギー回収型ライナック (Energy Recovery Linac : ERL) などが計画されている。ILC 用の超伝導空洞は、31.5MV/m の高加速電界でパルス運転 (1ms, 5Hz) する。一方、ERL 用の超伝導空洞は、加速電界 15~20MV/m で ILC より低いものの、100mA の電子ビームを連続加速するため、加速ビームによって空洞内に励起される高次モード (Higher Order Modes : HOM) のパワーも大きくなる。HOM は後続のビーム品質を劣化させるため、積極的に減衰させる必要がある。特に、超伝導空洞では Q 値が非常に高く、HOM が長く空洞内に留まるため、HOM の減衰は常伝導空洞よりも一層重要な問題となる。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、大電流ビーム用超伝導空洞にとって重要な R&D の一つである。

### 2. 大電流ビーム用超伝導空洞の HOM ダンパーの検討

HOM ダンパーは、HOM と結合して最終的に HOM を熱に変換して減衰させるが、加速モードには影響を与えないことが必要である。

現在、超伝導空洞に使用されている HOM ダンパーの種類として、導波管型、ビームパイプ型、バンドパスフィルター型の 3 タイプが知られている。このうち、ビームパイプ型は、ビーム軸に対称な構造であるため、ダイポールモードなど極性を持つ HOM 全てを減衰可能であり、吸収特性の良い素材を用いれば、広い周波数帯域での減衰が可能になる。また、大電力にも対応可能であるため、大電流ビーム用超伝導空洞の HOM ダンパーに適していると考えられる。しかし、現状はビームパ

イプと高周波吸収体を接合する時や接合したものを冷却する時に、高周波吸収体にクラックが発生する問題があり[1]、モデルの試作や冷却試験の実施などの R&D が必要である。

大電流ビーム用超伝導空洞の HOM ダンパーとして、クライオモジュール内に組み込み、80K に冷却して運転するモデルの試作に向けて、高周波吸収体の特性測定と、高周波吸収体と銅のろう付の R&D を実施した。

### 3. 高周波吸収体の特性測定

広い周波数帯域で優れた吸収特性を有する高周波吸収体を選定するにあたり、文献を調査した。ヨーロッパで製作中の Euro-XFEL 用超伝導空洞の HOM ダンパーは、高周波吸収体として窒化アルミ系セラミックス (AlN) を用いており、100W の熱負荷試験に成功している[2]。

高周波吸収体の候補の一つとしてこの AlN を入手し、Nicolson-Ross 法[3]によって AlN の誘電率と透磁率の周波数特性を測定した。AlN は、APC7 同軸サンプルホルダーに取り付けられるよう  $\phi 7-\phi 3.04, t 2.5$  に加工した。HOM ダンパーは 80K に冷却されて運転するため、低温でも高い高周波吸収特性が必要である。このため、室温と 80K において AlN の誘電率と透磁率を測定した。80K における測定では、窒素ガスを用いてサンプルホルダー全体を 80K 近傍まで冷却した。Figure 1 に AlN の誘電率の周波数特性を示す。80K で測定した  $\epsilon'_r$  と  $\epsilon''_r$  は低い周波数帯域では室温の測定値より高く、高い周波数帯域では室温の測定値よりやや低くなるが、AlN は測定範囲内 (50kHz~6.5GHz) で高い高周波吸収特性を有することを確認した。また、Figure 2 に AlN の透磁率の周波数特性を示す。これより、AlN の  $\mu'_r$  は 1 であることを確認した。80K の測定値は、サンプルホルダーの校正も難しく測定誤差が大きいと考えられる。

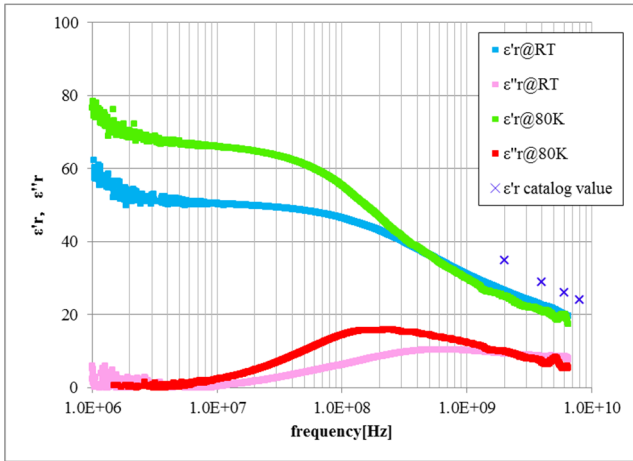


Figure 1: Permittivities of AlN measured at room temperature and 80K.

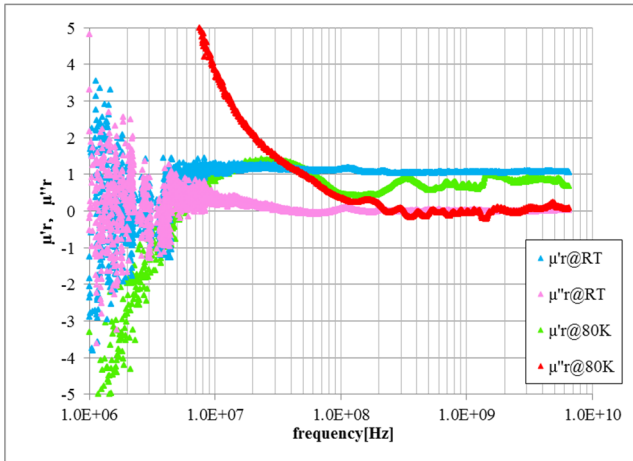


Figure 2: Permeabilities of AlN measured at room temperature and 80K.

## 4. ろう付の R&D

### 4.1 ろう付

銅シリンダーの内面に AlN シリンダーを接合する HOM ダンパーのモデル機の試作を計画している。銅と AlN の接合はろう付の採用を検討しているが、ろう付温度が 700°C 以上の高温であり、さらに HOM ダンパーの使用環境が 80K であることから、熱膨張係数の差が大きい銅と AlN のろう付は難しいと考えられる。

AlN シリンダーと銅シリンダーの仕様を Table 1 に示す。熱応力を緩和し、さらに HOM 吸収熱を伝達するために、銅シリンダーの内面には複数の溝を加工した。また、AlN シリンダーの外周面にはメタライズ処理を施した。インジウム入りの銀ろうを用い、750°C でろう付を実施した。Figure 3 にろう付後の AlN/Cu シリンダーを示す。目視では、AlN の表面にクラック等は見られなかった。

Table 1: Specification of AlN Cylinder and Copper Cylinder

AlN Cylinder	φ120—φ 100, L20, Mo-Mn metalized on the outer peripheral surface
Copper Cylinder	φ133—φ 120, L54, machined slots into the inner surface

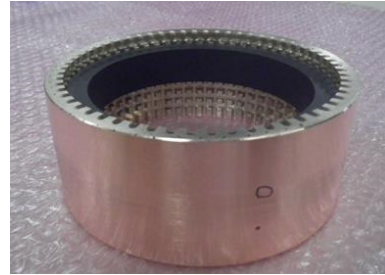


Figure 3: An AlN cylinder brazed to a copper cylinder.

### 4.2 非破壊検査

AlN/Cu シリンダーについて、AlN と銅のろう付部分の接合状態を確認するため、水浸法 UT 検査を実施した。Figure 4 に UT 検査のセットアップと観測点を示す。プローブと AlN/Cu シリンダーを水没させた状態で、AlN/Cu シリンダーの外周面に超音波を入射し、反射音波を測定した。

UT の検査結果を Figure 5 に示す。Figure 5(a)において、左側の図はスキャン画像を示す。画像の縦方向は AlN/Cu シリンダーの高さ、画像の横方向はシリンダーの周長(角度)を表す。画像中の黄色い点線は AlN シリンダーの位置を示す。また、横方向に白く直線状に写っている部分は銅シリンダーの溝の底面を示す。スキャン画像において黄色の丸で囲った A は四角く白色に写っており、銅と水の界面を示す。図の右側はこの部分の波形であり、横軸の 73μs 付近にエコーが見られる。なお、70μs 付近に見られるエコーは銅シリンダーの外周面を示す。Figure 5(b)のスキャン画像において、黄色い丸で囲った B は四角く灰色に写っており、AlN と銅の界面を示す。AlN と銅が接合されているため、右側の波形には 73μs 付近にエコーは見られない。スキャン画像の色については、銅と水の界面(73μs 付近)で観測されるエコーの高さが 100% の場合は白く、エコーが観測されない場合は黒く写る。よって、スキャン画像で灰色に写った部分は、高さの低いエコーが観測されたことを示す。つまり、AlN と銅が十分に接合されていないことを意味する。スキャン画像中の黄色い点線で囲った部分を見ると、AlN と銅の界面のほとんどは黒ではなく灰色に写っていることが分かる。以上より、AlN シリンダーと銅シリンダーは密着しているものの、接合としては不十分な可能性が示唆された。

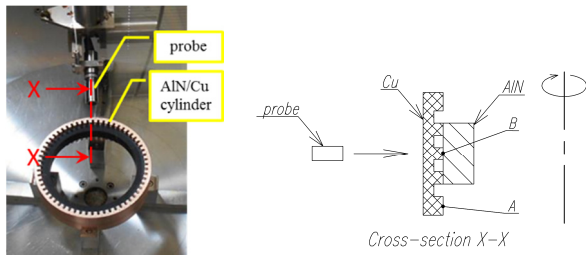
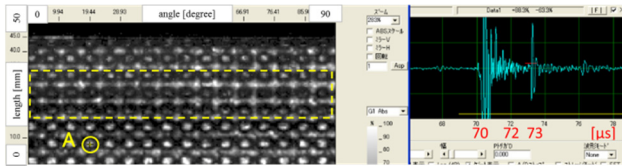
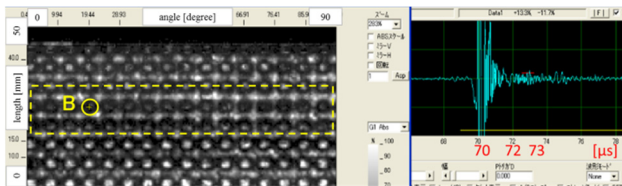


Figure 4: Setup for UT of AlN/Cu cylinder.



(a) Scanning picture and echo waveforms at point A



(b) Scanning picture and echo waveforms at point B

Figure 5: UT results of AlN/Cu cylinder.

### 4.3 冷却試験

ろう付した AlN/Cu シリンダーの冷却試験を実施した。Figure 6 に示すように、シリンダーの AlN 側に 4 個、Cu 側に 5 個の熱電対（銅-コンスタンタン）を取り付け、窒素ガスを用いて室温から 170K まで冷却した。Figure 7 に AlN/Cu シリンダーの温度変化を示す。シリンダーは 90 分程度で室温から 170K に冷却された。また、9 個の熱電対の温度にはほとんど差がないことから、シリンダーはほぼ均一に冷却されたことが分かる。

冷却試験後、AlN の表面を観察するため、AlN 側に取り付けられた熱電対を除去した。AlN 側の熱電対はグリーンパテを用いて取り付けられたため、ヒートガンでグリーンパテを温めたところ、ろう付の接合界面が剥がれて AlN シリンダーと Cu シリンダーが分離した。その際、AlN にクラックは生じなかった。UT 検査の結果から推測したとおり、AlN シリンダーと銅シリンダーの接合が不十分であったと考えられる。

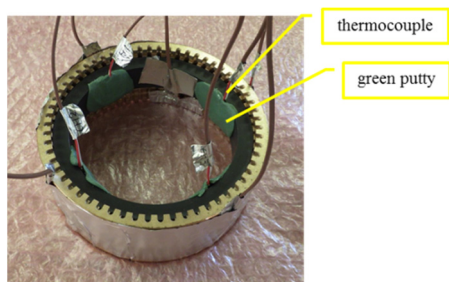


Figure 6: AlN/Cu cylinder stuck some thermocouples.

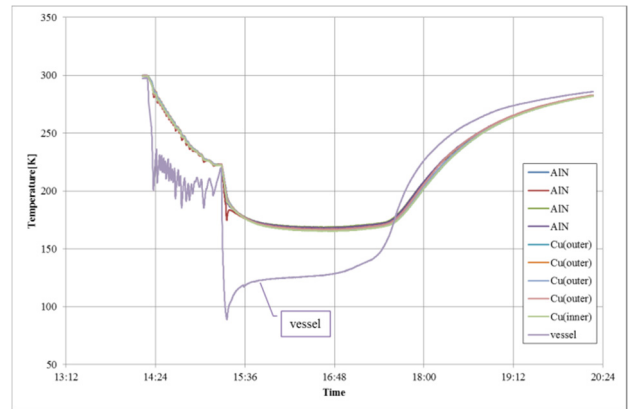


Figure 7: Cooling test result of AlN/Cu cylinder.

### まとめ

大電流ビーム用超伝導空洞の HOM ダンパー試作に向けて、高周波吸収体として窒化アルミ系セラミックスの特性測定と、窒化アルミ系セラミックスと銅のろう付の R&D を実施した。この結果、窒化アルミ系セラミックスは 80K 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。また、銅シリンダーの内面に窒化アルミ系セラミックスの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。

今後は、銅シリンダーの内面に加工する溝の改良や、ろう付の条件出しを継続し、HOM ダンパーのモデル機を試作する。

### 参考文献

- [1] M. Sawamura et al., "Cooling Properties of HOM Absorber Model for cERL in Japan", Proceedings of SRF2011, Chicago, IL USA; <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/SRF2011/papers/tu-po003.pdf>
- [2] N. Mildner et al., "A Beam Line HOM Absorber for the European XFEL Linac", Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity, Cornell University, Ithaca, New York, USA; <http://www.lns.cornell.edu/public/SRF2005/pdfs/ThP55.pdf>
- [3] M. Sawamura et al., "Development of HOM damper for ERL Main Linac", 第 6 回日本加速器学会年会, 原子力科学研究所(東海); [pfwww.kek.jp/ERLOffice/library/publications/pasj09\\_FPA CA03\\_sawamura.pdf](http://www.kek.jp/ERLOffice/library/publications/pasj09_FPA CA03_sawamura.pdf)