

# REBCO 線材の Cu-Cu、Ag-Cu 安定層間の音波接合における支配因子と接合材料の影響に関する考察

## Governing Factors and Effect of Bonding Materials in Sonic-Welding between Cu-Cu, Ag-Cu Stabilization Layers of REBCO Coated Conductors

九大院シス情<sup>1</sup>, 鉄道総研<sup>2</sup> ○世良 真也<sup>1</sup>, 鈴木 賢次<sup>2</sup>, 吳 澤宇<sup>1</sup>, 東川 甲平<sup>1</sup>, 木須 隆暢<sup>1</sup>  
Kyushu Univ.<sup>1</sup>, RTRI.<sup>2</sup>, °Shinya Sera<sup>1</sup>, Kenji Suzuki<sup>2</sup>, Zeyu Wu<sup>1</sup>, Kohei Higashikawa<sup>1</sup>, Takanobu Kiss<sup>1</sup>  
E-mail: s.sera@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系 (REBCO) 高温超伝導線材の低抵抗接合技術の確立は、REBCO 線材の応用のための基盤技術として不可欠であり、迅速かつ再現性に優れた手法の確立が求められている。そこで音波接合が注目されている。音波接合はワーク上に重ね合わせた試料に対し Horn で加圧しながら高周波振動を印加し、接合界面に拡散接合を形成する手法であり、1 s 程度で接合界面に金属結合を形成できる。しかし、従来法では低抵抗の接合実現には、半田や In 箔の併用が不可欠であった[1],[2]。これに対し、我々はプロセス条件を精査することで REBCO 線材の金属安定化層同士を半田フリーで低抵抗に接合できることを報告した[3]。本研究では、音波接合の接合抵抗率の支配因子についてプロセスパラメータの影響を調査すると共に、その挙動を記述する解析モデルを提案し、実験結果との比較によりその妥当性について検討した。

### 2. 実験方法

本研究では、20 μm 厚の Cu 安定化層を有する 3 mm 幅の PLD 法による REBCO 線材と、Cu 層を堆積せず最表面に 2 μm 厚の Ag 層のみの 4mm 幅 REBCO 線材の 2 種類を用いて、入力パワー、エネルギーを変化させて Cu-Cu、Ag-Cu 接合試料を作製した。このとき、超伝導層同士を向かい合わせてラップジョイントを形成し、荷重 1750 N 下で 15 kHz の音波振動を印加した。

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に異なるパワーで作製した Cu-Cu 接合の接合抵抗率  $\rho_j$  のエネルギー依存性を示す。接合抵抗率はエネルギーに対して指数関数的に減少し、十分なエネルギーを投入すればある一定値に収束した。また、パワーの増大により、 $\rho_j$  の収束に要するエネルギーが小さくなる傾向を示した。我々は、界面での接合形成確率に関する考察を基に、次式による解析モデルを提案する。

$$\rho_j(E, P) = \frac{\rho_0(1 + \alpha)}{1 + \alpha - \exp\left[-\frac{E}{U(P)}\right]}$$

ここで、 $\rho_0$  は接合抵抗率の飽和値、 $\alpha(1+\alpha) \approx \alpha$  は加圧のみによる接触割合 ( $0 < \alpha \ll 1$ )、 $U(P)$  は界面の金属原子間の結合エネルギーを示す。本モデルでは、接合割合が結合エネルギー  $U(P)$  と投入エネルギー  $E$  の比で記述されるアレニウスの式に従うと考えた。Fig. 1 の実線は本モデルを実験結果に対して、 $\alpha$ 、 $U(P)$  を Fitting パラメータとして Fit した結果であり、よく再現していることが分かる。その際の結合エネルギー  $U$  は図内に示すとおりであった。Ag-Cu 接合も同様の振る舞いを示す一方で、Ag-Cu 接合における接合抵抗率は Cu-Cu 接合に比べ 3 倍程度大きくなった。Fig. 2 に Cu-Cu 接合と Ag-Cu 接合における結合エネルギーの変化を示す。両者の違いは結合エネルギーの差異に起因すると考えられる。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617 ならびに JP24H00320 の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] H. Shin et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26, 6601704 (2016).  
[2] S. Ito et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 29, 6600405 (2019).  
[3] 世良ら, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集(2024 春) 23a-12N-8.

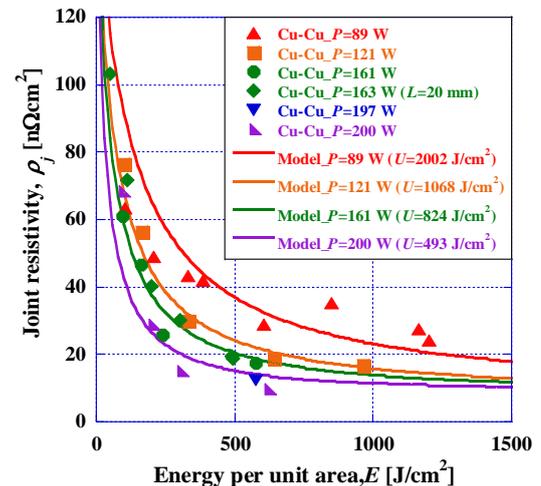


Fig. 1 Comparison between experimental result and fitting curve for Cu-Cu joint. Assuming  $\rho_0=10$ ,  $\alpha=0.0679$  and  $U$  were fitted by the least squares method as fitting parameters.

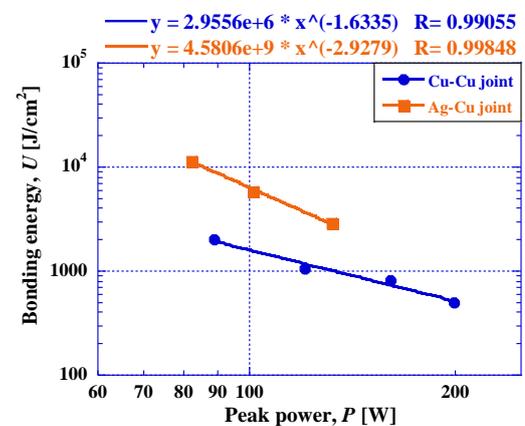


Fig. 2 Comparison of the bonding energy  $U$  in Cu-Cu and Ag-Cu joints as a function of input peak power.