

# イットリウム系超電導線材用銅配向基板の開発

## 低コスト超電導線材への挑戦

### Development of a Textured Cu Substrate for YBCO Superconducting Wire

#### Challenges for Lower Cost Superconductors

(電力技術研究所 超電導プロジェクト)

電気抵抗ゼロの夢の電線、イットリウム(以下Y)系超電導線材。セラミックスの1種であるこの線材は、これまで長い線を作るのが難しかったが、現在では、km級の線材も製作可能となってきた。しかし、コストに関しては、実用化の目標値の10倍以上であり、更なる低コスト化への取り組みが求められている。当社では、このY系線材用の基板に関して、従来の高価なレアメタル合金に代え、安価な銅を用いた基板の開発を行い、世界で初めて高い超電導特性を実現することに成功した。

(Superconductivity Group, Electric Power Research and Development Center)

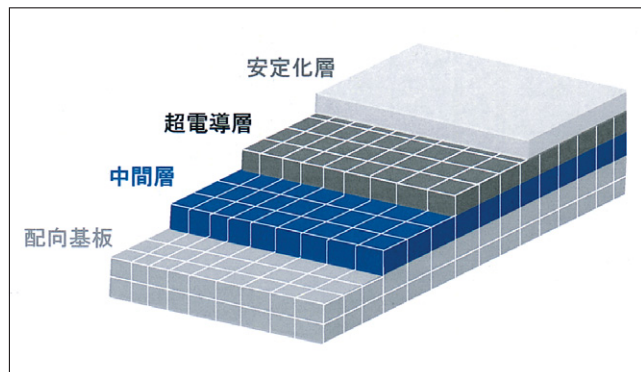
Yttrium barium copper oxide (YBCO) wires – dream electric wires, with no electrical resistance. These wires are made from a type of ceramic, and although it was once difficult to form long YBCO wires, it has now become possible to form YBCO wires of km-class length. However, the production cost of these wires is more than 10 times that of the target value for practical application, and efforts toward further cost reduction are required. For the first time anywhere in the world, Chubu Electric has succeeded in realizing a substrate for YBCO wires with a high superconductivity, by developing a substrate using inexpensive copper instead of expensive rare metal alloys, which have been used in conventional substrates.

## 1 研究背景

超電導電線(線材)は、電気抵抗がゼロであることから、大電流を低損失で取り扱うことが出来、電力流通設備で発生する損失を大幅に低減することが出来る。また、コイルにし、電流を流すことで、銅線では実現不可能な強力な磁場が得られ、様々な用途への利用が可能となるとともに、コイルの両端を短絡し、閉回路とすれば、磁気エネルギーとして電気を貯蔵することも可能となる。

数ある超電導線材の中でもY系超電導線材は、液体窒素温度(-196℃)で超電導状態(抵抗ゼロ)となり、曲げ、引っ張りにも強く、磁場中でも特性が劣化しないなど、現在、最も高性能な超電導線材である。しかし、このY系超電導線材は、結晶のつながりが悪く、超電導の結晶を単結晶のようにきれいに並べてやらないと特性を発揮することが出来ない。また、超電導の結晶は、自分自身できれいに並ぶことは出来ないため、予め、結晶の並びが揃った下地層(基板)を用意する必要がある。

第1図にY系超電導線材の構造例を示す。配向基板と呼ばれる金属の結晶の並びを揃えた(配向させた)ものを基板とし、その上に中間層・超電導層を下地の結晶方位を継承させながら、結晶成長させ、積層していく構造



第1図 Y系超電導線材の構造例

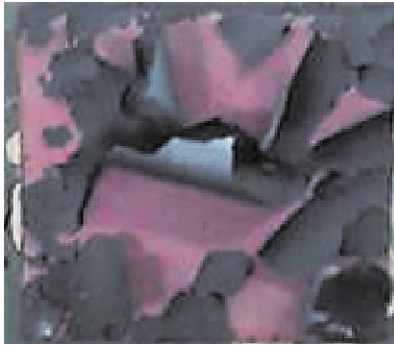
となっている。なお、中間層は、下地の金属元素が超電導層まで到達し、超電導結晶を壊すのを防止する役割がある。現在、この基板に用いられる金属は、耐酸化性と機械強度の観点から、Ni(ニッケル)にW(タングステン)を添加した合金が用いられている。しかしこれらは、レアメタルであるとともに、高価である。そこで我々は、この基板を安価な銅で実現することを試みた。以下、その概要について紹介する。

## 2 研究概要

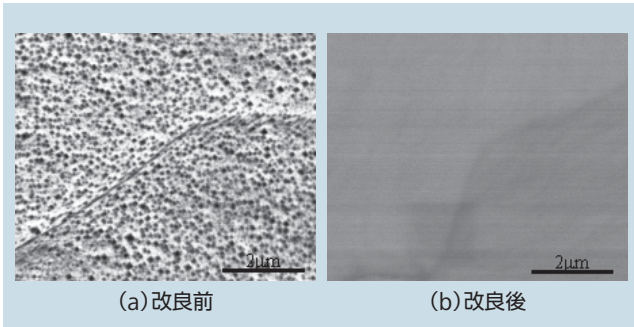
銅を基板として利用するメリットは、①原材料費が安い、②非レアメタルであり資源問題がない、③純金属であるため配向性が良い、と考えられる。一方で、その課題は、①銅の酸化による剥離の抑制、②機械強度の向上、である。

### (1) 酸化抑制技術開発

第2図に典型的な剥離現象の写真を示す。銅は酸化物である中間層、超電導層を成膜する際の高温・酸化の雰囲気において、このように容易に酸化し剥離する。これを防ぐために、我々は、めっきによるNi層を検討した。めっきを選んだのは、低コスト化のためである。しかし、通常めっきでは、第3図(a)に示すように表面が穴だらけになってしまい、とても、その上に中間層、超電導層を成膜出来る状態にはならない。これを改善するため、我々は、Niめっきに微量金属を添加した特殊なめっきを考案した。結果を第3図(b)に示す。この特殊めっきの効果により、高い超電導特性を実現するのに必要な、非常に平滑なめっき面を実現した。なお、このNiめっき層は、0.5μmと非常に薄いため、コストへの影響はほとんどない。



第2図 銅基板の酸化による剥離現象

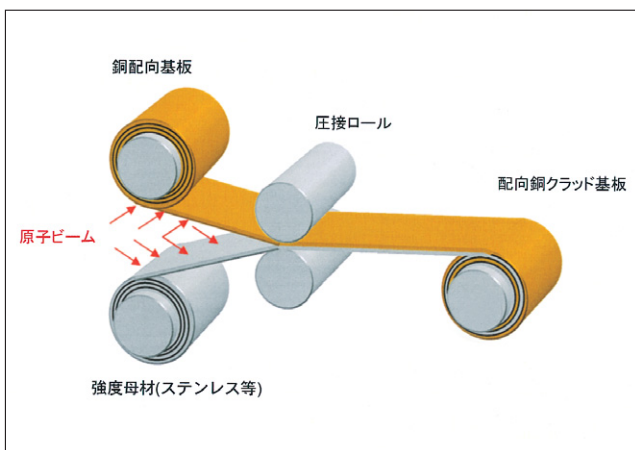


(a)改良前 (b)改良後

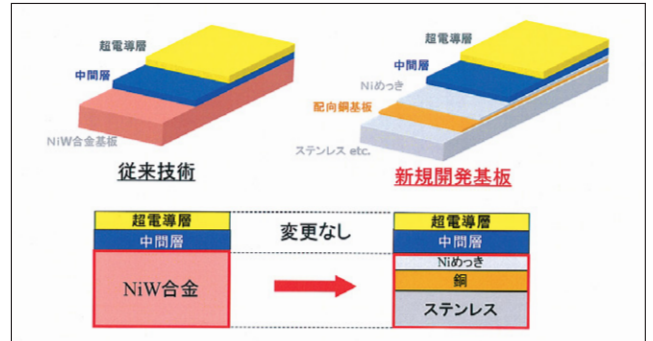
第3図 Niめっき層の表面平滑性の改善(電子顕微鏡写真)

## (2) 高強度化技術開発

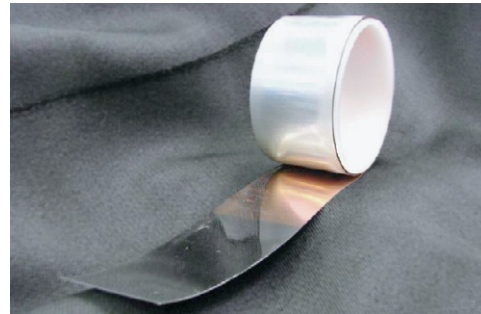
銅基板の機械強度の問題に対して、SAB(Surface Activated Bonding: 表面活性化接合)による強度母材との貼り合わせを検討した。SABは、貼り合わせる2つの母材の接合面を原子ビームで清浄化し、金属表面を活性化させ、その後、圧接ロールにより、力を加え接合させるものである。第4図にSAB法の概念図を示す。しかし、通常のSABでは、圧縮ロールの荷重により基板の配向性が乱れてしまうことから、原子ビームの当て方を工夫し、低荷重で接合可能な条件を探索し、基板の配向性を乱すことなく、強固に強度メンバと貼り合わせることに成功した。本法の最大の利点は、貼り合わせる強度母材を必要に応じて自由に選べることである。高強度の Hastelloy から安価なステンレスまで、機能とコストを勘案した対応が可能となる。第5図に従来のNiW基板と今回開発した銅配向基板の比較を示す。



第4図 SAB法の概念図



第5図 従来のNiW基板と今回開発した銅配向基板の比較



第6図 開発した銅配向基板

## (3) 銅配向基板線材の超電導特性

本基板の有用性を検証するため、本基板上にYBCO超電導層を成膜し、良好な超電導特性が得られることを確認した。これらの結果より、銅配向基板はY系超電導線材用の基板として、非常に高いポテンシャルを有しており、低コスト基板として十分適用可能であることが検証できた。

## 3 まとめ

夢の電線、超電導線材の実用化を目指して、より安価な材料である銅を素材とした銅配向基板の開発に成功した。これにより、これまで超電導応用機器実用化の Achilles 腱と言われていた超電導線材のコストの問題について、技術的見通しが得られ、今後、電力分野に留まらず、広く産業応用へと広がることが期待される。本基板は既に共同研究先よりサンプル販売を開始しているが、特に海外から注目され、多くの引き合いをいただいている。さらには、本基板は、各種機能材料への適応も可能であると考えられる。第6図に今回開発した銅配向基板の写真を示す。一見、ただの金属テープに見えるが、実は表面の結晶が全て同じ方向に揃った特別な基板である。これを用いれば、従来、特殊な製法でしか実現できなかった単結晶化が本基板により容易に可能となり、機能材料の性能が格段に向上する可能性がある。実は超電導以外の用途での問い合わせも多くいただいております。今後の進捗が楽しみです。

なお、本研究は、田中貴金属工業(株)、鹿児島大学との共同研究で実施したものである。



執筆者/鹿島直二