

# 高温超電導 Bi 線材とその応用の開発動向

住友電気工業株式会社 超電導製品開発部 増田 孝人

## 1. はじめに

低温工学協会関西支部 50 周年おめでとうございます。貴支部のますますのご発展を祈念致します。弊社が開発を進めている高温超電導 Bi 線材はその発見から 35 年が過ぎ、ようやく線材としてお客様の要望にお応えできるようになってきました。本稿では、Bi 線材の最近の開発動向とその応用に関して紹介いたします。

## 2. ビスマス系高温超電導線材

### 2-1 DI-BSCCO<sup>®</sup>線材製品

住友電工の DI-BSCCO<sup>®</sup>線材は、Ag シースを用いた Powder-in-Tube 法で製造されており、Ag マトリックス中に多数の Bi2223 フィラメントが細線化された多芯構造となっている。標準線である Type H 線の横断面を図 1 に示す。幅 4mm、厚み 0.2~0.3mm のテープ形状をしている。加圧焼結法の適用により、密度がほぼ 100%の超電導フィラメントが実現できるようになり、フィラメントの高密度化により、強度の向上、欠陥の発生抑制等が可能となった。



図 1 DI-BSCCO<sup>®</sup>線材 (Type H) の断面写真

### 2-2 高強度線材 (Type HT)

大口径マグネットや高磁場マグネットのように電磁力が大きい場合には、線材に機械的な強度が必要となる。Type H 線材の両面に補強材を半田で集合する技術を開発した。補強材に、銅合金、ステンレス鋼、Ni 合金を用いた各線材 (Type HT-CA, Type HT-SS, Type HT-NX) の対引張応力特性を図 2 に示す。

Type HT-SS は主にマグネット応用に、Type HT-CA は低電気抵抗を生かして主として電力ケーブル用に広く用いられている。20T を超えるような高磁場マグネット応用では、特殊な Ni 合金を用いた Type HT-NX を開発し、400MPa までの引張応力に耐えられるようになっている。

### 2-3 低熱伝導率線材 (Type G)

シース材料である Ag に Au を添加すると、熱伝導を抑制することができる。シースに Ag-Au 合

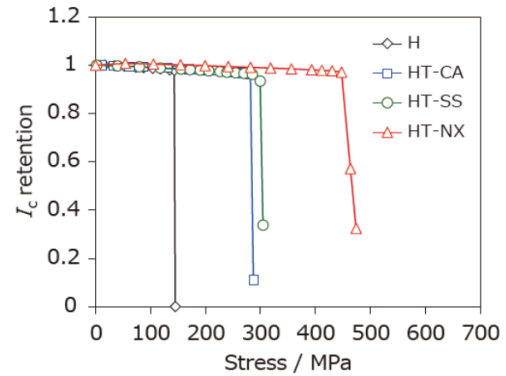


図 2 引張応力と臨界電流値 (Ic) との関係

金を用いた Type G 線は、液体ヘリウム温度等で使用される超電導マグネットの電流リードへ適用できる。Type G 線と Type H 線の熱伝導度の温度依存性を図 3 に示す。10~20K の温度領域では 2 桁近く熱伝導率が低下していることがわかる。

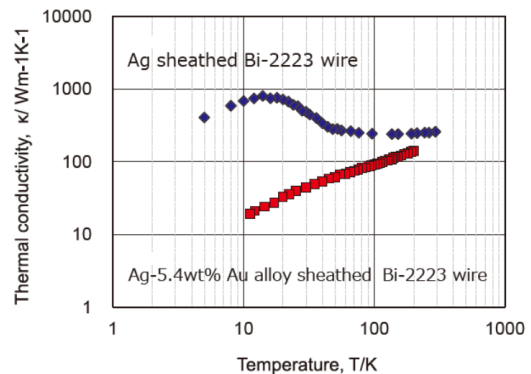


図 3 Type G 線と Type H 線の熱伝導度

### 2-4 接続技術

線材の単長の長さには限界があり、大型のマグネットや送電ケーブルへの応用を考えた場合、線材の接続は必須になってくる。

Type H 線材は、マトリックスが低濃度の Ag 合金であり、半田付けによって低抵抗の接続が可能である。表面が補強材になっている Type HT 系の材では、補強材の電気抵抗や接続面積が接続抵抗に大きな影響を及ぼす。図 4 に線材表面 (補強材表面) 同士を半田で接続した場合の接続抵抗のラップ長依存性を示す。ラップ長が長いほど低接続抵抗となるが、曲げ特性が悪化するので、用途によって最適なラップ長を選択する必要がある。

Type HT-NX 線材は、高磁場マグネット用に有効

であるが、通常の半田接続では高抵抗となってしまう。補強材を剥いで Ag シース同士の接続とすれば低抵抗となるので、その開発が行われている<sup>1)</sup>。さらに、MRI や NMR など、単位時間あたり ppm～ppb オーダーの高安定な磁場が要求されるマグネット向けに、超電導接続の開発も行われている<sup>2)</sup>。

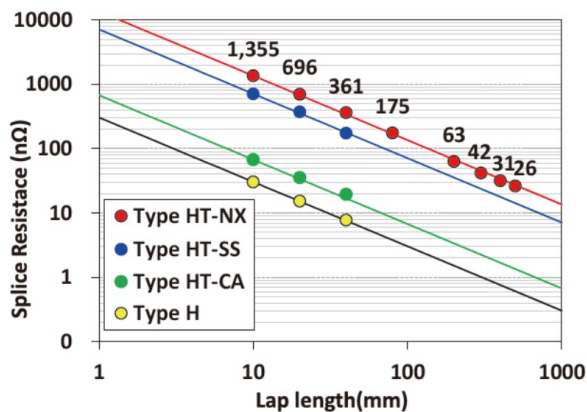


図 4 半田接続抵抗の接続長の依存性

### 3. Bi 線を使用した応用例

#### 3-1 マグネット応用

DI-BSCCO<sup>®</sup>線材を用いたマグネットの特長として、NbTi などの低温超電導マグネットでは運転ができない 20K 前後での運転が可能である。この温度で、小型冷凍機用いて伝導冷却型マグネットが製品化されている。20K 領域では、4.2K に比べると比熱が約 100 倍大きくなるため、熱的な擾乱があっても安定して運転することができる。また、変動磁場下では、超電導体には交流損失が発生するが、温度上昇が小さく、より速い励消磁が可能となる。

その他の 20K 冷却マグネットの例としては、脳用 MRI 3T マグネット<sup>3)</sup>、四肢用 1.5T (27K 液体ネオンの閉ループ循環による伝導冷却)<sup>4)</sup>、新生児用 1.5T<sup>5)</sup> など、汎用タイプではなく特殊な用途に特化した MRI の開発が進んでいる。

Type HT-NX を用いた高磁場マグネットの例としては、東北大学金属材料研究所で共同利用マグネットとして使われている 25T マグネットがある<sup>6)</sup>。高磁場 NMR 用としては、陽電子の共鳴周波数 1.3GHz (30.5T) で、永久電流モードで運転できるマグネットの開発が進んでおり、マグネットの一部に Type HT-NX が用いられ、4.2K で 30T の発生に成功している<sup>7)</sup>。

#### 3-2 電流リード応用

従来の銅製電流リードの熱侵入量が理論上 1W/kA が限界であるのに対して、Type-G 線材を用いた電

流リード応用では 0.2W/kA レベルへの熱侵入量低減が可能である。これまでに商用 MRI マグネットを始め、液体ヘリウム冷却マグネットに広く用いられており、液体ヘリウム蒸発量低減に大きく貢献している。国際熱核融合実験炉 ITER プロジェクトでは、Type G 線材を使った電流容量 68kA の電流リードが中国科学院プラズマ研究所によって開発され、ITER 実機用が使用されている<sup>8)</sup>。

#### 3-3 超電導ケーブル応用

送配電ケーブルの伝送損失低減、コンパクト化による既存管路への増容量リプレース・設置スペース低減等を目的とした超電導ケーブルの開発が世界中で進んでいる。

DI-BSCCO 線材が用いられたケーブルプロジェクトの例としては、米国 Albany プロジェクト、横浜プロジェクト、ドイツ AmpaCity プロジェクト<sup>9)</sup>、ロシア・サンクトペテルブルグの DC ケーブルプロジェクト<sup>10)</sup> などがある。

### 4. おわりに

DI-BSCCO<sup>®</sup>線材及びその線材を用いた各種応用製品の開発状況について紹介した。伝導冷却マグネットや電流リード用などで実用製品に使われ始めた。今後も超電導機器の本格的な実用化に向けて、要求される線材や応用技術の提供を行って行きたい。

### 5. 参考文献

- 1) 長部吾郎等 SEI テクニカルレビュー第 190 号 (2017 年 1 月) P.9
- 2) Y.Takeda, et. al., Appl. Phys. Express 12 (2019) 023003
- 3) Y. Terao, et. al, IEEE Trans. Appl. Supercond.23 (2013) 4400904
- 4) Xu M. Laskaris, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond.20 (2010) 769-772
- 5) <https://neoscan-solutions.com/>
- 6) S. Awaji1, et. al., Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 065001
- 7) Y. Suetomi, et. al., MT26(Sep.27,2019) Fri-Mo-Or27-02
- 8) K. Ding, et. al., Physics Procedia 36 (2012) 931
- 9) M. Stemmler, et. al., SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM (global edition) October 2014
- 10) V. E. Sytnikov, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond.23 (2013) 5401904