

超電導コイル向け自己融着 NbTi 超電導線

Self-bonding NbTi Wires for Superconducting Coils

1. はじめに

超電導コイルは、製造工程において絶縁された超電導線をコイル状に巻き、硬化性エポキシ樹脂で含浸して超電導線を固定することで、コイルの通電中における電磁力による線材の動きを抑え、超電導状態から常電導状態へ切り替わるクエンチの発生を防止しています。しかし、エポキシ樹脂含浸工程は、樹脂内のボイドを極力少なくし、必要な接着力を確保するために特殊な真空含浸を含む多くの工程を必要とし、更に製造過程で発生するエポキシ樹脂廃棄物も課題となっています。そこで、当社では、エポキシ含浸工程を省略できる、あらかじめ自己融着樹脂を被覆した NbTi 超電導線を開発しました。この開発により、超電導コイル製造工程を大幅に簡略化することが可能と考えています。更に、自己融着線材の融着機能性を活用することで、コイル設計の自由度や巻き線作業の利便性も向上が期待されます。

2. 自己融着 NbTi 超電導線の特長

自己融着 NbTi 超電導線は、図1に示すように絶縁層の上に融着性の樹脂からなる最外層を設けることで、コイル巻き後に熱処理を行うだけで線同士が固まる特殊な機能を有しています。そのため、超電導コイルの製造工程を大幅に簡略化でき、樹脂廃棄物も出ないという大きなメリットがあります。開発した自己融着 NbTi 超電導線の被覆材の種類と寸法を表1に示します。絶縁被覆材として一般的に超電導線に使われる PVF を使用し、一方、融着性樹脂に対しては、200℃以下の低温で融着処理が可能な材料を選び、更に良好な融着力発現と関連する高い機械特性を実現させるため、材料の改質検討を行い、要求特性を満たすフェノキシ樹脂組成物を開発することができま

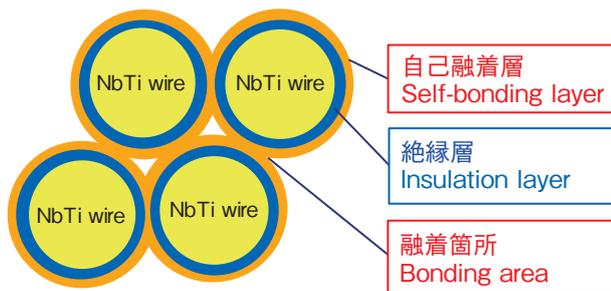


図1 自己融着 NbTi 超電導線の模式図
Schematic diagram of a self-bonding NbTi superconducting wire.

した。絶縁層と自己融着層の厚さは、表1に示す通り、それぞれ0.03 mmと0.04 mmになります。

表1 自己融着 NbTi 超電導線の被覆材と寸法
Coating materials and dimensional data for self-bonding wire products.

項目	単位	開発品(自己融着線)
絶縁被覆材	—	PVF (ポリビニルフォルマール)
自己融着材	—	フェノキシ系
導体径	mm	0.9 ~ 1.4
絶縁層の厚さ	mm	0.03
自己融着層の厚さ	mm	0.04
仕上がり外径	mm	1.0 ~ 1.5

3. 融着力特性

自己融着 NbTi 超電導線を使用し、JIS 3216-3のヘリカルコイル法により試料を製作しました。その後、強制送風方式オープンで温度と放置時間を変化させて融着条件の異なる試料を作りました。評価は引張試験機を使用し、ヘリカルコイルの垂直引張試験によって行いました。図2に熱処理温度の融着力への影響を示します。一定の熱処理時間において融着力は、熱処理温度上昇によって増加傾向を示し、例えば、2時間処理品の場合、130℃では、6.2 Nとなり、195℃では、9.4 Nまで値の増加が確認できました。熱処理温度上昇による融着力増加の原因と

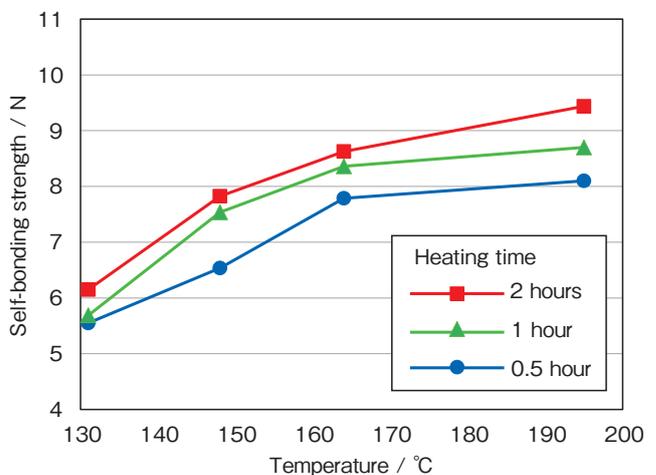


図2 熱処理温度の融着力に対する影響
Effect of the heating temperature change on the self-bonding strength.

して融着材料の溶融粘度の温度依存性が関係するものと考えられ、高温では、溶融粘度の低下によって樹脂の流れが発生しやすく、その結果、線同士の融着界面面積がより広がるため、融着力は増加すると推察しました。

実際のコイルでは、超電導線材以外に様々な部材が使われており、部材の耐熱性を考慮すると、より低温側での熱処理が好ましいと判断されます。そのため、低温条件である148℃と高温条件の195℃を選び、16時間まで長時間熱処理を行い、融着力に対する影響を調べました(図3)。その結果、195℃処理品において2時間まで高い融着力を示すことに対し、4時間以降は148℃の処理品がより高い融着力を示すことが確認できました。195℃の条件下において4時間以上の熱処理で融着力が低下する原因として、樹脂層の機械特性変化が関係するものと推察しました。一方、148℃の条件下では4時間以上の熱処理でも高い融着力が得られ、16時間処理品でも11.6 Nの値が得られます。以上の結果から、実機コイルでは低温側で長時間の熱処理が効果的であると考えられます。

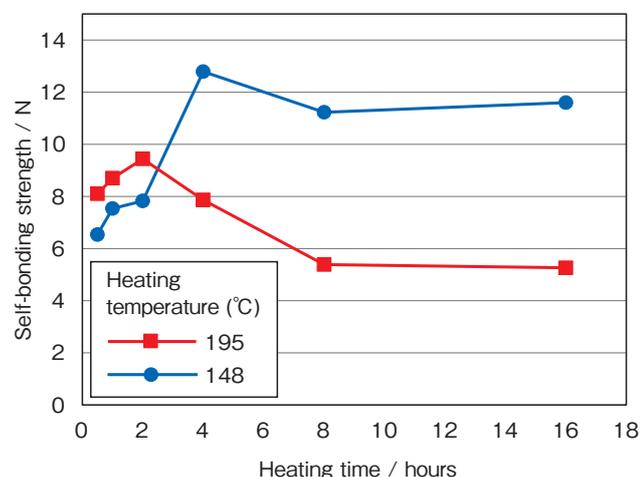


図3 熱処理時間の融着力に対する影響
Effect of heating time change on the self-bonding strength.

4. 自己融着コイル特性

自己融着NbTi超電導線の超電導コイルへの適用性を検証するため、自己融着NbTi超電導線を用いたコイルを製作し、コイル状態での通電特性を調査しました。コイルの諸元と外観写真を表2に示します。コイルの大きさは、内径100.3 mm、外径約139.7 mm、高さ約145.5 mmであり、このコイルにかかる最大電磁力はコイル中心最内層部で114 MPaになります。

コイルの通電試験を行い、以下の結果を確認しました(図4)。

- ① 一回目の通電で380 A(負荷率:96%)にてクエンチし、二回目の通電で線材 I_c である391 Aに到達し、負荷率100%を達成しました。
- ② 常温に戻した後、再冷却して通電を行いました。クエンチはなく、前の試験と同様に391 Aに到達しました。

表2 自己融着コイルの諸元と外観
Specifications and a photo for a self-bonding coil.

自己融着コイル	
コイル形状	ソレノイド
コイル内径 (mm)	100.3
コイル外径 (mm)	139.7
コイル高さ (mm)	145.5
総ターン数	2580
層数	20

外観写真

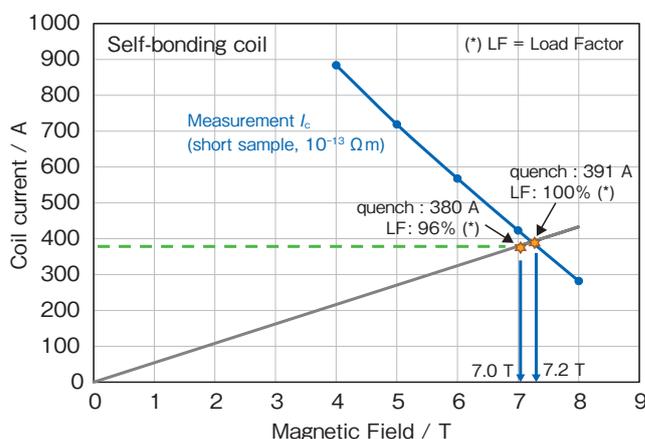
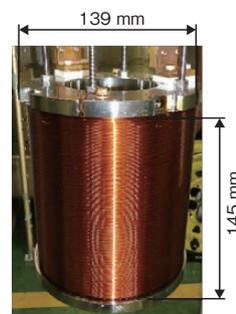


図4 自己融着コイルの通電試験結果
Results of electrical current tests for a self-bonding coil.

作製コイルにおいて高負荷率でのトレーニングクエンチ1回の後、負荷率100%を達成したこと、また昇温を経験しても前回の通電履歴を保存していることから、自己融着NbTi超電導線は、超電導コイルに適用可能と判断しました。

5. おわりに

超電導コイル製造時にコストと時間のかかるエポキシ含浸工程を省略できる自己融着型NbTi超電導線を開発しました。今後、この製品を商用の超電導コイルに適用することで、超電導コイルの製造における生産性を大幅に向上させると同時に、環境に配慮した工程の実現に貢献します。

<製品お問い合わせ先>

超電導製品部 営業技術課

TEL: 0288-54-0504

お問い合わせフォーム:

<https://inquiry-fec-form.spiral-site.com/rd>