

超電導材料のき電ケーブルへの応用

材料技術研究部 超電導応用研究室
室長 富田 優

1. はじめに

鉄道総研では、超電導材料の製作から各種応用へ向けた一貫した研究開発に取り組んでおり、各種機器に適応した形状や性能に合わせ、超電導材料の製作や改良を行うことにより、超電導応用機器の高性能化を目指している。本発表では高温超電導材料の応用開発として、超電導バルクを用いた磁石応用や、在来方式鉄道に向けた超電導ケーブルなどの研究開発の取り組みを紹介する。

2. 超電導材料の製作

超電導とは、ある温度以下に冷却することで電気抵抗がゼロになる性質のことを言い、その温度が、液体窒素温度 (-196℃) を超える物質を高温超電導材料と呼ぶ場合がある。一般的には、超電導材料をバルク材や線材などの形態に加工して、応用機器に用いる。鉄道総研では、バルク材や線材などの研究開発を進めており、ここではその製作技術を紹介する。超電導材料は、セラミックスであるため、無機粉末を混合、成型、焼成して作られる。バルク材と線材の違いは、一部、成型過程が異なるだけであり、製作における基本工程は同じである。バルク材では、成型機に粉末を詰め、一軸プレスで円盤状に成型し、一方線材では、銀パイプに粉末を詰め、圧延機で線状に引き伸ばして製作する(図1)。製作する際に、粉末の混合する割合や、電気炉で焼成する際の温度条件を制御するなどし、超電導特性の向上を図っている。

超電導バルク材は、材料内に磁束線を閉じ込めることができる特徴をもつため、永久磁石よりも非常に高い磁場を発生させることができる。近年の材料研究で超電導バルク材の発生磁場値はより大きくなっているが、それに伴って超電導材料が受ける電磁力も増大し、材料強度の負担が大きくなる。機械強度が不十分であると、磁場をかけたときの電磁力で、バルク体が破壊されるが、その対策として、含浸処理法を開発した。エポキシ系樹脂を真空中でバルク体に含浸するこ

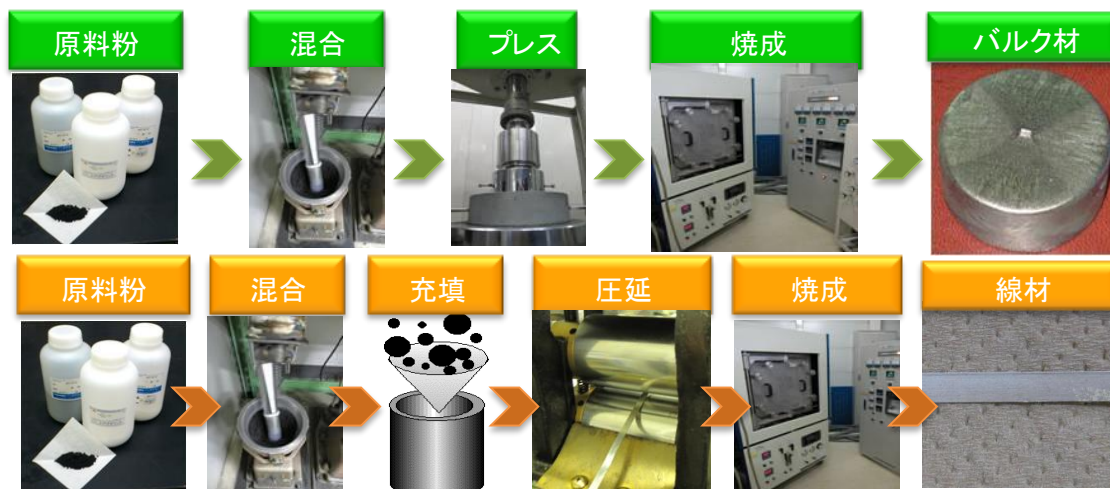


図1 超電導材料の製作方法

とで、バルク全面にわたり完全に樹脂で覆うことができ、機械強度の向上が望め、さらに樹脂含浸強化との相乗効果によって、超電導バルク材は、非常に大きな磁場をかけても破壊されず、温度 29 K において、17.24 T (テスラ) の極めて高い磁場捕捉を実現している。超電導バルク材の樹脂含浸と金属含浸技術は、発生磁場の向上を図る上で、合理的な強化・低温安定化法として注目を受けている。また、従来は希土類元素 (レアアース) を用いた磁石材料が一般的であったが、近年では新しい材料として軽元素で形成される二ホウ化マグネシウム磁石の開発を行い、磁場特性の向上と材料の軽量化に成功している。

3. 超電導材料の応用

超電導バルク材を活用した応用機器としては、NMR (核磁気共鳴) 分析器、モーター、電流リード、磁気分離装置、フライホイール、永久電流スイッチ素子などがある。鉄道総研では、超電導バルク材の応用として、小型の超電導マグネット (図 2) や磁気軸受の開発を行っている。超電導ケーブルでは冷媒として液体窒素を循環させるためのポンプが必要になり、液体循環用のポンプとしては一般的に遠心ポンプが使われている。遠心ポンプでは、熱侵入低減のため回転棒であるシャフトを長くすると、回転時の軸ブレが大きくなるため、羽根車付近に軸受を設置する必要がある。この軸受として玉軸受が使用されているが、極低温中であるため潤滑油が使用できず、メンテナンス周期が短くなる。そこで、超電導材の超電導転移温度以下である極低温中に配置されるという特徴を生かし、超電導バルク材を用いた非接触の磁気軸受について検討を進めている。

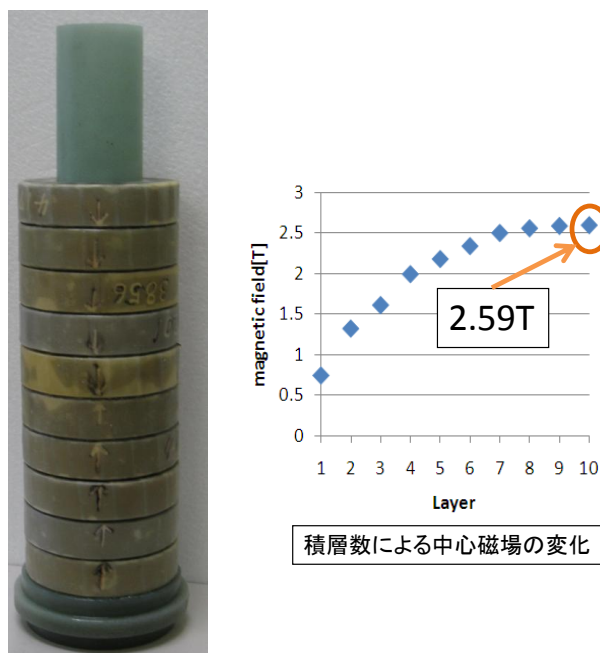


図 2 小型超電導マグネット

そこで、超電導材の超電導転移温度以下である極低温中に配置されるという特徴を生かし、超電導バルク材を用いた非接触の磁気軸受について検討を進めている。

超電導線材を活用した応用機器には、ケーブル、変圧器、電力貯蔵、磁気浮上式鉄道、MR I などがある。超電導き電ケーブルの開発においては、超電導線材の特性を把握する必要があり、特に機械特性は、超電導ケーブル製作時の強度設計を行う上で重要なため、超電導線材の曲げ特性について評価を行った。

試験はケーブル巻線時における曲げを想定し、超電導線材を円筒治具に螺旋状に巻いて行った。様々な直径をもつ円筒治具に、超電導線材のピッチ長を変えて巻くことで (図 3)、歪曲度を変化させ、各歪曲度において臨界電流値 (I_c) を測定した。円筒治具の直径は、 $\phi 10$ mm, $\phi 16$ mm, $\phi 30$ mm のものを使用し、超電導線材は銅線と端子をはんだで固定し、絶縁のためにカプトンテープで覆った。各直径における試験結果を図 3 に示す。縦軸は I_c を曲げなしの臨界電流値 I_{c0} で規格化した値であり、臨界電流値の低下の割合を示す。どの径においてもあるピッチ長を境に I_c の低下が認められるが、低下の割合は径が小さいほど顕著である。

超電導線材の曲げ特性評価結果をもとに、1.5 kA 級の超電導ケーブルを製作した。1.5 kA を

超える電流値を実現するには、超電導線材が 10 本必要であり、密巻構造とするためフォーマ径は $\phi 16$ mm とし、超電導線材の巻ピッチは 250 mm とした。製作した超電導ケーブルの内部構造および外観を図 5 に示す。超電導線材は、絶縁層を挟み、内側の超電導層 (P 層) に 10 本、外側の超電導層 (N 層) に 14 本巻線した。通電試験の結果を図 6 に示す。 I_c は、P 層で 1720 A、N 層で 2430 A となった。超電導線材 1 本あたりでは 170 A 以上となり巻線による超電導線材の劣化は認められなかった。

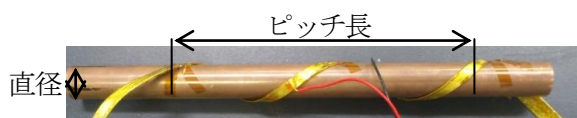


図 3 サンプル外観

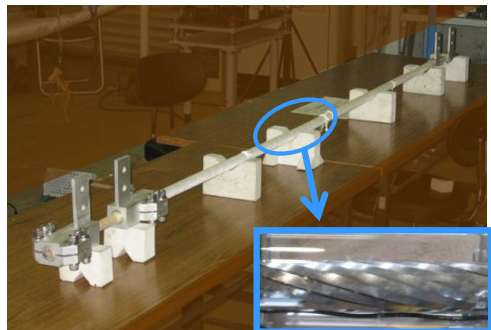
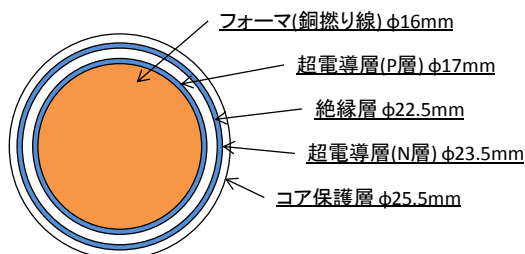


図 5 1.5kA 級超電導ケーブル

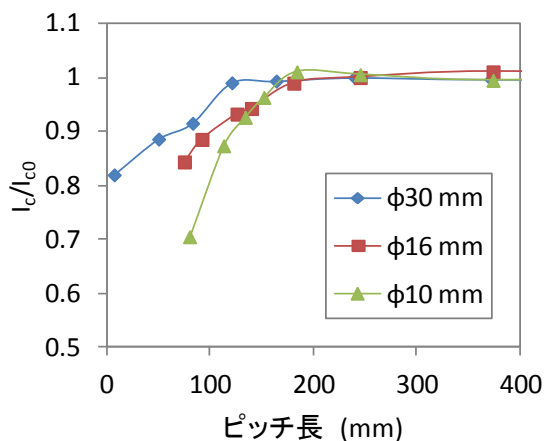


図 4 曲げ試験の結果

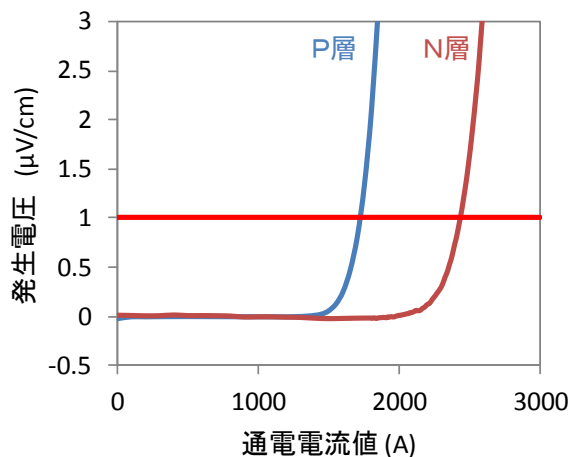


図 6 1.5kA 級超電導ケーブルの通電試験

4. 超電導き電ケーブルによる試験

短尺超電導ケーブルによる各種特性試験を経て、超電導ケーブルによる車両の走行試験を行うため、国立研究所内試験線沿いに 30 m 及び 300 m 級超電導ケーブルを敷設した (図 7)。敷設した 300m 級超電導ケーブルは電流容量を定格 1000 A とし、フォーマを内径 30 mm 程度のステンレスコルゲート管とすることで、見掛け上 1 本で冷媒の往復を可能とした。また、敷設の際には実用化を意識して、線路跨ぎや踏切跨ぎ、冷却による熱収縮緩和手法などを取り入れている。冷却、通電試験などによりシステムの健全性を確認し、電車の走行試験を実施した (図 8)。

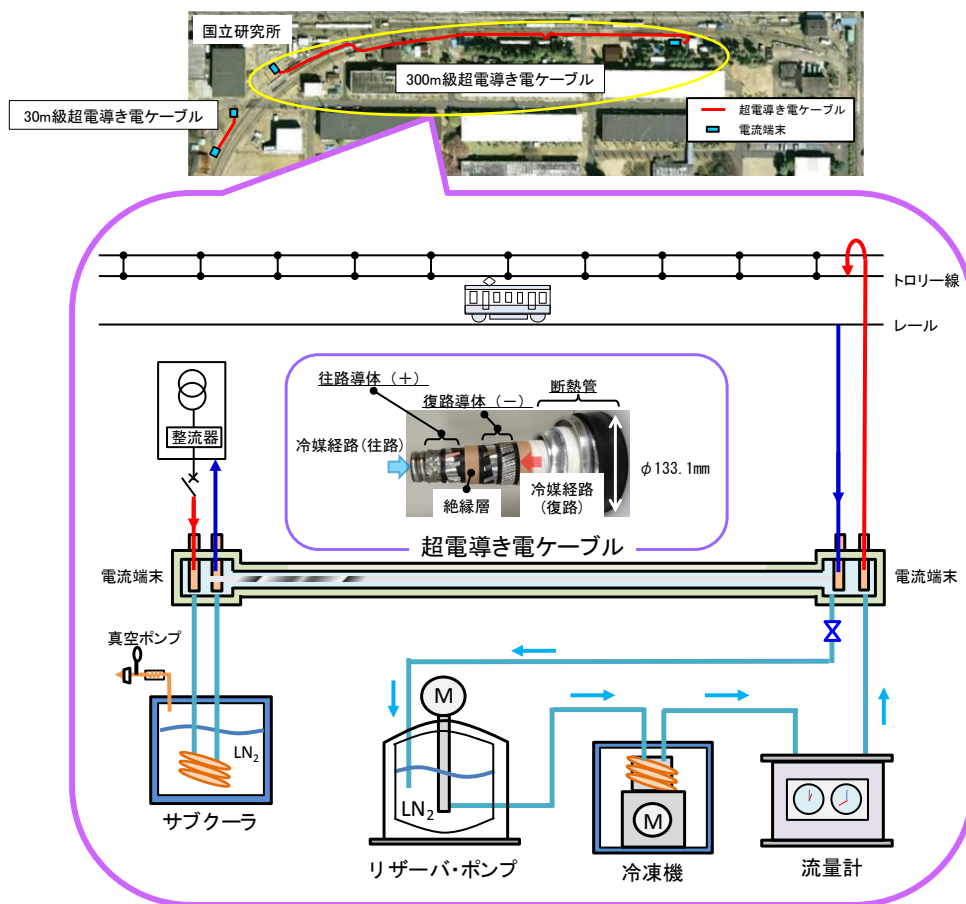


図7 国立研究所内試験線に敷設した超電導き電ケーブル



図8 電車の走行試験

5. まとめ

鉄道の将来に向けた研究開発として、世界に先駆けて超電導材料を使用した超電導き電ケーブルの開発を進めている。現在、超電導材料の高度化から超電導ケーブルおよびシステムの設計製作といった基礎から応用まで一貫した研究開発に取り組んでいる。今後は、実用化を目指した各要素技術の適合試験を行い、高電流容量化の実証や長尺化に向けた超電導き電ケーブルの製作に取り組み、鉄道路線への導入を目指す。