

# 高温超電導材料の研究開発

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、高温超電導材料の製作技術、および応用機器に向けた評価などの研究開発の取り組みを紹介する。

## 2. 超電導材料の開発

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、超電導転移温度が 25 K 以上の超電導体を高温超電導体と呼び、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。図 1 に示すように、超電導の応用機器は多岐の分野にわたっており、鉄道総研では、応用機器に向けた超電導材料の高特性化を図っている。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。バルク材は、成型機に粉末を詰め、一軸プレスで円盤状に成型した後、電気炉で焼結することで製作する (図 2)。

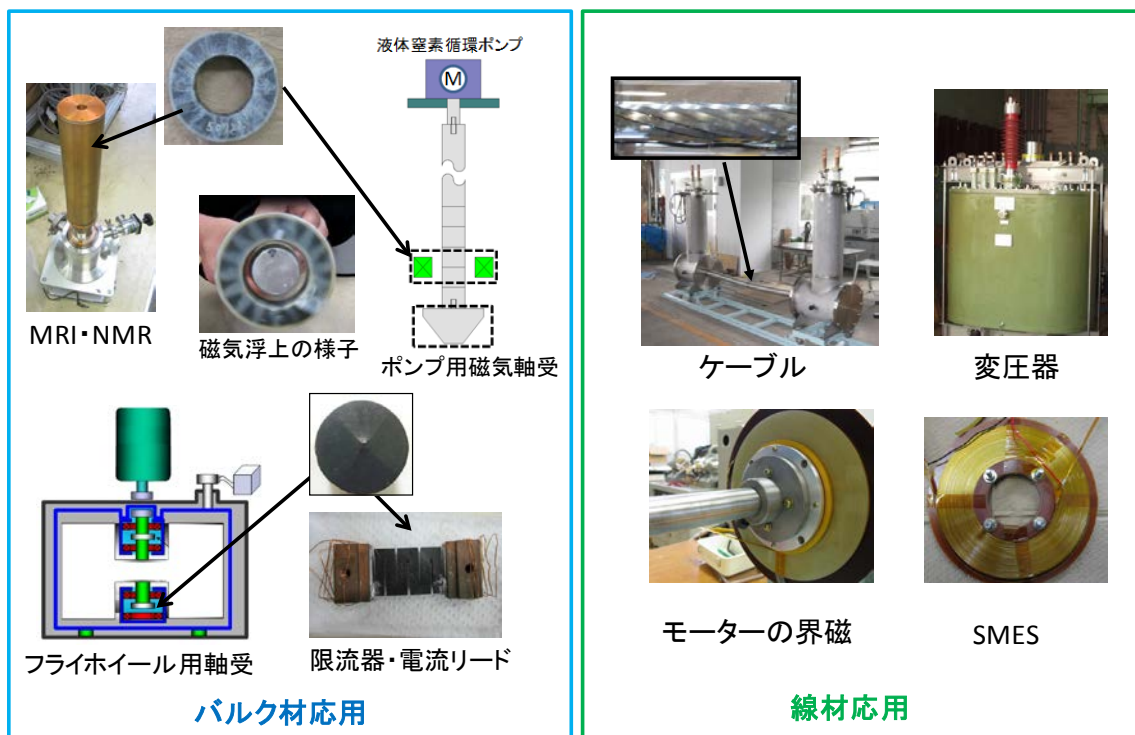


図 1 超電導材料を用いた応用機器

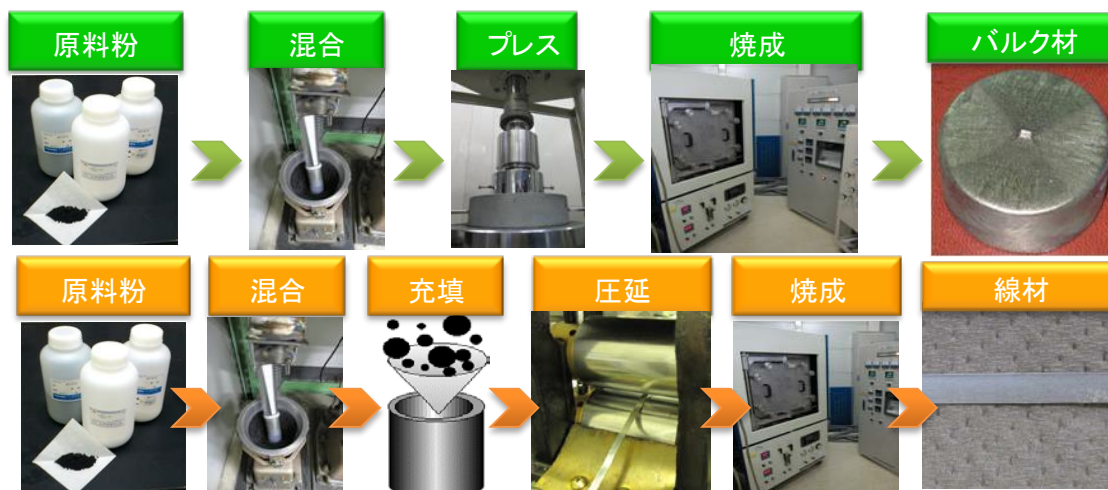


図2 超電導材料の製作方法

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、焼結し製作する。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の制御などにより、超電導特性の向上を図っている。

### 3. 超電導バルク材の開発

超電導バルク材は、材料内に磁束線を閉じ込める特徴を有し、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ため、図1に示したように、主に強力磁石として応用に用いられる。超電導バルク材を利用して、持ち運び可能な小型の超電導マグネットや、磁気軸受、電流リードなど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、送液用の循環ポンプが必要になり、冷媒循環用のポンプとしては主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軸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、高速回転が困難となり、揚程が稼げなくなる。そのため、羽根車付近に軸受の設置が必要となるが、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磁気軸受について検討した。リング状に加工したバルク材と、磁石を埋め込んだ軸を組み合わせて軸受を構成し、その支持力について評価を進めている。

近年の材料研究でRE（レアアース）系超電導バルク材の発生磁場値は向上したが、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、電磁力によりバルク材が破壊される恐れがあるが、その対策として、バルク材の機械強度向上を目的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材に含浸することで、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、さらに金属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。RE系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期待されている。

従来はREを用いたバルク材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 ( $\text{MgB}_2$ ) 磁石に着目し開発を行った。 $\text{MgB}_2$ は金属系超電導体の中で最高の臨界温度(40 K)をもつ物質であり、高い臨界磁場、臨界電流密度をもつ特徴がある。この物質は、製作が容易で、非常に軽量であり様々な形状に設計が可能で、RE を含まない新しい超電導バルク材として期待されている。すなわち、40 K 以下で動作可能な強力磁石として、輸送・医療などへの応用が期待でき、特に、高い磁場均質性が求められる MRI (核磁気共鳴画像法)、NMR (核磁気共鳴) などの計測機器への応用に適すると考えられる。以上のことから、 $\text{MgB}_2$ バルク材の製作方法と、超電導特性の評価を行い、新材料超電導磁石としての素質を検討した。従来の RE 系バルク材では製作時において結晶配向プロセスが必要であるため、大型試料の製作が困難であった。一方、 $\text{MgB}_2$ バルク材は結晶配向プロセスが不要であるため、比較的大型試料の製作に適していると考えられる。本研究では、最大で直径 100mm サイズの  $\text{MgB}_2$ バルク材の製作を試みた。製作した試料の写真を、様々なサイズのバルク材と合わせて図 3 に示すが、表面にクラックなどは存在せず、大型試料を製作することができた。また、 $\text{MgB}_2$ バルク材の試料の均質性を評価するため、微細組織観察、臨界温度測定、臨界電流密度測定を行った。いずれの測定においても、バルク試料内部において差異はなく、試料全体で均質な特性を有しているバルク材を製作できていることが分かった。

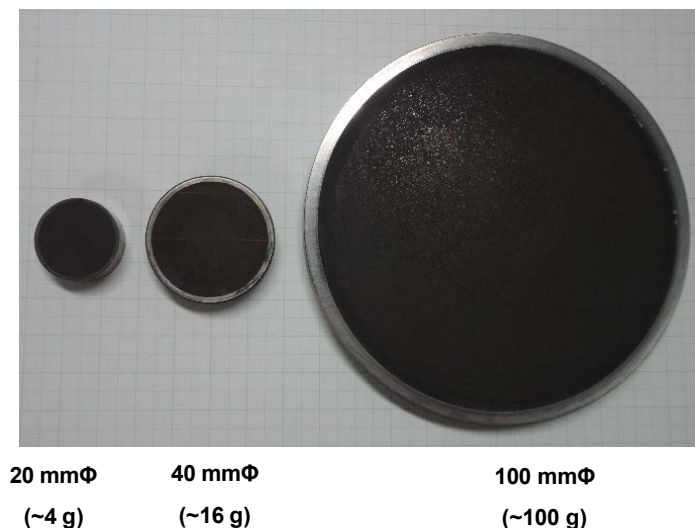


図 3 製作した $\text{MgB}_2$ 超電導バルク材

#### 4. 超電導線材の開発

超電導線材は、電気抵抗がゼロのため、送電ケーブルとして活用すれば送電距離による損失がなくなる。鉄道のみ電線に適用することで、回生効率の上昇、電力損失の低減、変電所の負荷平準化や集約化、レール電位の抑制などが期待される。また、超電導線材の応用として、電力を高効率に貯蔵できる SMES や、モーター、変圧器の開発を行っている。

高温超電導線材には、Bi（ビスマス）系線材とY（イットリウム）、Gd（ガドリニウム）などのRE系線材があり、いずれも超電導状態になる温度である、臨界温度以下で一般の銅線と同じように使用できる。超電導線材は電気抵抗がゼロのため、送電線に活用すれば、送電距離による損失をなくすることができる。Bi系線材は銀をシース材料として製作するのに対し、RE系線材はニッケル系などの基板を用いて製作する薄膜状線材である。一般に超電導線材を応用機器に組み込むにあたっては、コイル状や螺旋状に巻き線するが、超電導線材を曲げると、超電導体に機械的な応力がかかり、内部にひずみが生じ、臨界電流値が低下する。応用を考える上では、この曲げに対する臨界電流の低下量を把握することが重要になるため、曲げ試験を行い機械特性に起因する臨界電流値の評価を行った。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4）、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、各直径における試験結果を図5に示す。縦軸は曲げた後の状態で測定した  $I_c$  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。

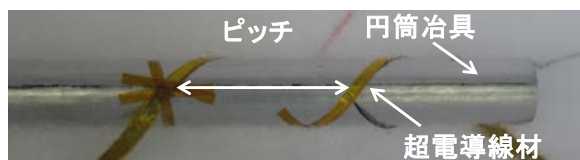


図4 超電導線材の曲げ試験

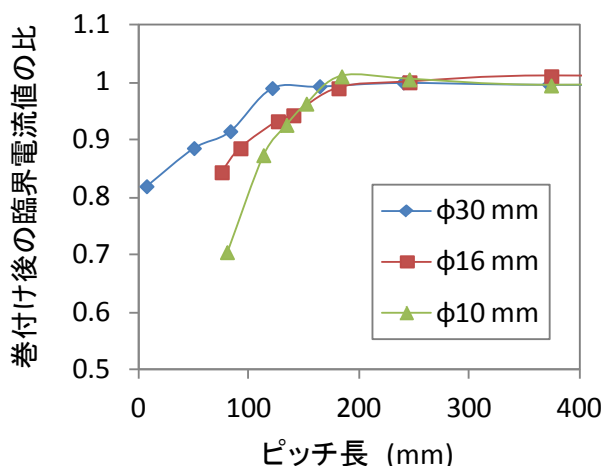


図5 曲げ試験の結果

## 5. まとめ

鉄道の将来に向けた研究開発として、超電導技術に関し、基礎的な材料の製作から応用への多岐にわたる研究を行っている。材料製作では、RE系超電導材料と新材料である  $MgB_2$  材料の高特性化を狙い、製作方法の検討を行っている。超電導ケーブルで用いる超電導線材では、曲げ試験や過電流試験など、応用する上で必要な物性評価を行っている。今後も、各種応用開発を進め、必要となる材料開発に取り組む。