

高温超電導の応用技術

富田 優

材料技術研究部(超電導応用 研究室長)



とみた まさる

はじめに

鉄道は将来にわたって人・ものの輸送の根幹として利用され、高度な文明社会を支える公共性の高いシステム技術を有しています。また、信頼性(安全性, 安定性), 利便性(速達性, 利便性, 快適性), 経済性, 環境調和性をあわせもつ鉄道は、エネルギー消費の徹底的な合理化・効率化が必要とされる今世紀に、ますます重要性を増していきます。

一方、超電導の持つ低損失、高密度電流、高磁場といった特性が、鉄道分野の電力・電気技術に果たす役割は大きく、新しい機器やシステムに活用されることが期待されています。これまで、鉄道総研では高い磁場を発生できる高温超電導磁石の開発等、高温超電導の研究を進めてきました。今後は、これらの超電導研究の成果を集約し最大限に活用し発展させ、鉄道分野で実用化する長期的視点のもとで実用機器・システムにつながる要素技術を確認し、それらが未来の鉄道システムの大きな役割となることを目指しています。ここでは、具体的な鉄道分野での応用へ導くために取り組んでいる高温超電導の基盤技術を中心に現状を紹介いたします。



図1 直流き電用超電導ケーブル装置

高温超電導線材の応用

現状、電気鉄道のき電線でのエネルギー損失は5%以下ですが、日本全国の鉄道網では18,000kmを超える電化区間があるため、エネルギーの損失量は大きなものとなります。これを高温超電導線材によるき電に置き換えることによって、将来的には損失が1/40に低減でき、同じ割合のCO₂排出量の削減が可能になると言われています。そこで、これまで、き電用ケーブルのプロトタイプとして、1500V、1.5kA級の直流用の超電導ケーブル装置の試作を行いました(図1)。超電導材料は物性上、直流で高い定格電流値を示す特徴があるため、大都市部の通勤路線のき電システムに超電導ケーブルの敷設を想定した場合、き電電圧の降下の低減と同時に変電所数の削減が期待できます。

一方、超電導ケーブルに流す電流が大きくなるとケーブルから発生する磁場の沿線への影響も考慮しなければなりません。そこで、芯材の周りに高温超電導線材を2層巻きした構造の双方向の送電ができる超電導ケーブルを試作し、超電導ケーブル装置に組み込んで、超電導ケーブルへの送電に伴う周辺への磁場の影響を計測しました。その結果、ケーブル管路方向と垂直に磁場が発生しますが、同軸上に高温超電導線材を2層巻き、それぞれの電流が反対方向に流せることになるため、周辺には磁場が発生しないことがわかりました。現在は、実際の鉄道のき電システムに対応するため、さらに電流容量の大きな1500V、5kAを超える超電導ケーブルの実用化を目指し、基盤となる要素技術から研究開発を進めています。

高温超電導線材の現状

高温超電導線材には金属元素であるビスマス(Bi)系超電導線材と、イットリウム(Y)系線材に代表される希土類(RE: Rare Earth)系超電導線材の2種類があります。ここでは、それぞれの線材について簡単に説明します。



図2 Bi系超電導線材の外観



図3 Bi系超電導線材製作用の一次圧延装置(上)と圧延後の線材(下)

Bi系超電導線材

第1世代と呼ばれるBi系超電導線材(図2)は、銀パイプに粉末をつめ、一次圧延装置(図3)で圧延加工することによって線材として製造されます。Bi系材料は線材化することが容易なため、銅酸化物高温超電導体の発見当初より線材としての開発が盛んに進められてきました。昨今では、二次圧延として加圧焼成法の導入などにより、線材の通電特性の指標である臨界電流値が、大幅に向上しています(図4)。一方で、Bi系超電導線材は銀をそのシース材料として用いていることから一層の低価格化が難しい点があります。ただし、現状の製造コストは、製造工程での歩留りに依存し、その割合も小さくありません。現在、一度に製造可能な1本のBi系超電導線材は長さが約1km程ですが、1本1本を接合することにより長い線材とすることができます。

RE系超電導線材

次世代(第2世代)超電導線材と呼ばれるRE系超電導線材(図5)は、液体窒素温度(77K)での臨界電流密度がBi

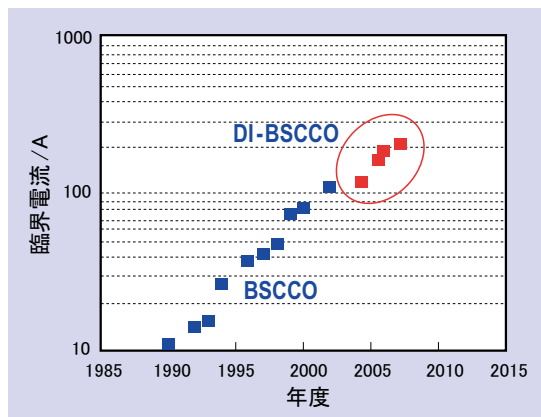


図4 Bi系超電導線材の臨界電流値の推移(DI-BSCCOは加圧焼成法により作製した線材)



図5 銅の安定化相付きRE系超電導線材の外観

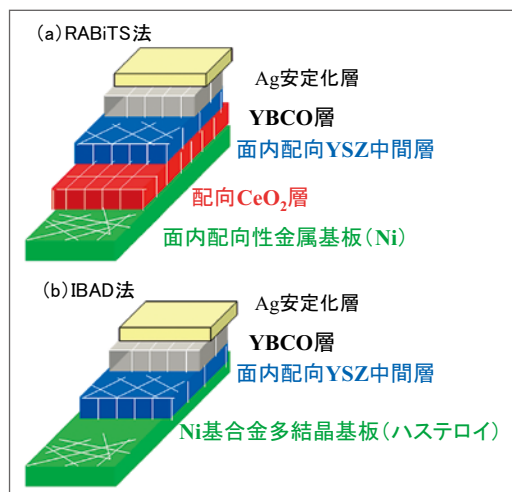


図6 RE超電導線材の構造

系超電導線材に比べて高く、更に磁場中の特性も優れています。また、線材に占める銀などの貴金属の割合がBi系超電導線材と比べると格段に小さく、製品化する場合の線材の低価格化においても期待されています。一般に結晶方位が揃っているほうが高特性を示すことから、主に加熱した基盤物質上に薄膜の成分を含む原料ガスを供給して、基板表面などでの化学反応により膜を堆積する気相法と呼ばれる方法により製作します。この膜を堆積させる方法としては、RABiTS法 (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate) やIBAD法 (Ion Beam Assisted Deposition) などが 있습니다(図6)。いずれの方法も、NiやNi基金金で

できた基板の上に、超電導材料の薄膜を数種類重ねて製作していくもので、積層した膜の結晶方位をそろえるために中間層での結晶の配向や、結晶の成長の方法などで工夫が必要となります。

当初、これらの方法では、膜の生成速度が遅く、線材を長尺化することが困難でしたが、短尺では10mm幅で1000A級の線材が作られました。昨今では中間層の研究開発が進み、現在は10mm幅の線材で、臨界電流値 (I_c) × 線材長 (L) の値では、10万 A・m を超えるものが、開発されはじめました (図7)。

高温超電導線材の応用に向けた取り組み

高温超電導線材をケーブル、電力貯蔵装置、モータ等の鉄道に向けた応用機器に使用しようとする場合、機器に応用するための様々な付加技術を要します。各種機器の用途に応じて、線材には機械的、磁氣的要因による様々な外部負荷が加わります。例えば、ケーブルや電力貯蔵装置、モータ等、これら全ての応用で線材を巻いてコイルを作るための巻線化技術が必要です。線材はどの程度の曲げに耐えるのか、また、曲げた場合超電導特性への影響はどの程度生じるか等、材料的、機械的そして電磁氣的な課題が山積し

ています。また、線材を長期使用した場合の性能劣化の把握も実用化には欠かせない研究の一つです。例えばRE系線材では基板をもとにした積層構造をしているため、各層の間の剥離が起きやすくなります。そこで、鉄道総研ではこの剥離の問題を実験的に評価し、剥離を防ぐ方法の研究を進めています (図8)。その他にも、超電導線材を長くするための超電導線材同士の接合の技術、上に述べたコイル製作のための巻線化技術 (図9) など、応用機器の開発に不可欠な要素技術の研究も進めています。

高温超電導バルク材の応用と現状

高温超電導バルク材は近年その強いピン止め力 (磁場が侵入した時に捉えておく力) を利用し、大きな磁場を捕捉させ、永久磁石型の超強力超電導バルク磁石として活用することが期待されています。応用例としてはフライホイール、磁気分離、磁気共鳴映像装置 (MRI)、材料分析器等

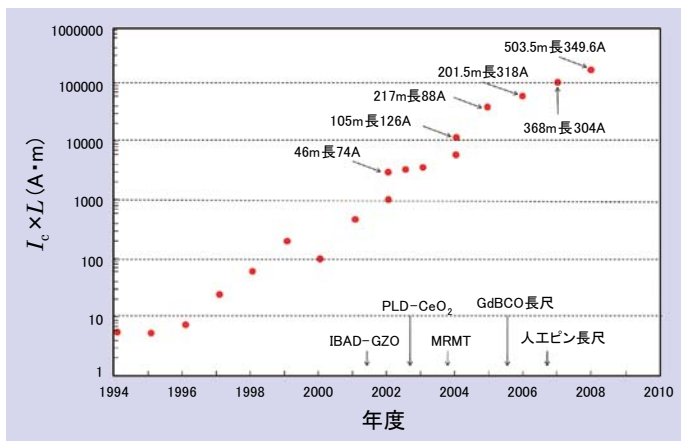


図7 RE系超電導線材の $I_c \times L$ の推移

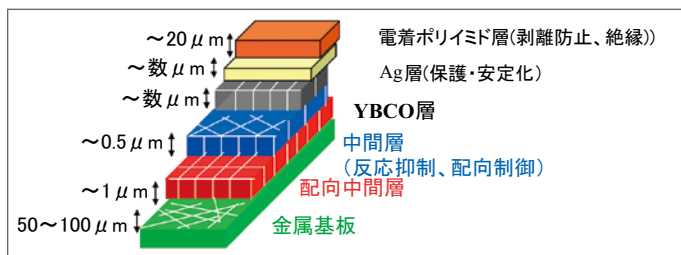


図8 RE系線材の剥離防止技術

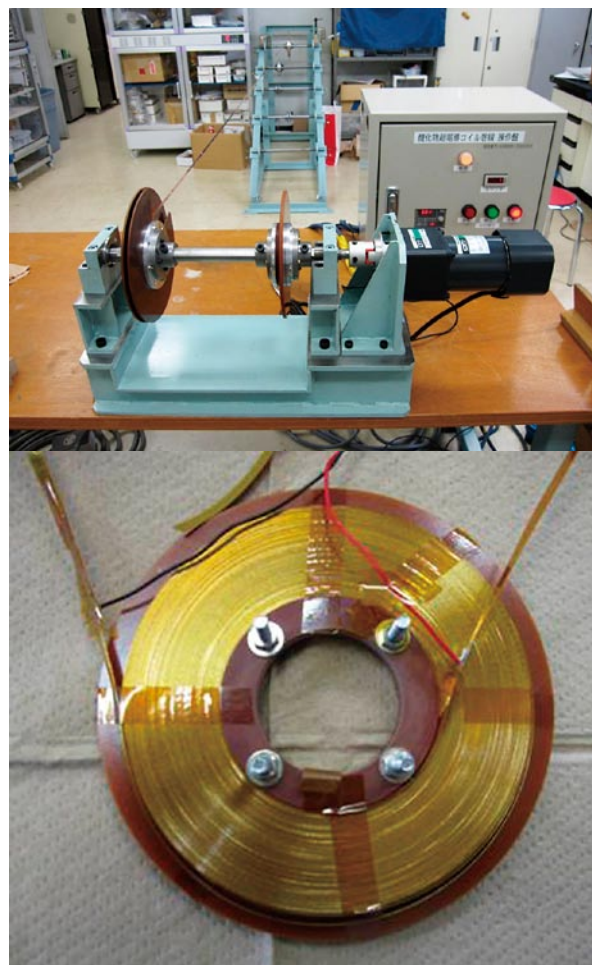


図9 巻線装置(上)と超電導コイル(下)

があります。発生磁場となる捕捉磁場を向上するためには、ビオ・サバルの法則からバルク材に流せる平均電流密度、バルク材の直径および厚さをそれぞれ大きくすればよいことが知られています。

平均電流密度を上げるためにはピンニングセンタ（ピン止め力の起源となるもの）として働く、RE211と呼ばれる非超導物質とRE123と呼ばれる超導物質の界面の大きさを増すことが有効です。また、バルク材の直径や厚さを大きくするにはRE123、RE211などの粉末の混合比やバルク材を製作するときの電気炉内の冷却速度を調整し、最適なものにすることが有効です。図10はフライホイール向けのガドリニウム系高温超導バルク材と簡易型の磁場発生装置向けの樹脂含侵バルク材の試作品です。磁場発生装置用のバルク材は液体窒素による冷却で、リングの中心の空間部分で2T以上の磁場が発生できます。高磁場を生かして材料分析器や磁気共鳴映像装置などに応用することが期待されています。

高温超導バルクの応用に向けた取り組み

溶融凝固の高温超導バルク材の特性向上を目指した研究以外にも、コスト低減のために、大量生産する手法の研究も行っています。現状では製造用の電気炉1台につきバルク材が1個しか製作できないため、コストが高くなってしまいます。微妙な温度制御が製作上のカギを握るバルク材製作では、電気炉内で複数個を同時に製造することは難しく、国内外でも例がありませんが、現在、生産性を考慮した製造法を検討しています。その他の取り組みとして、バルク材の原材料である希土類系粉末自体（RE123とRE211の粉末）の作製などの材料製造方法の合理化も検討しています。例えば、図11に示すような配置で、数個のペレットを縦方向に温度勾配を付けられるように改良し、電気炉で半溶融状態から温度勾配下で凝固させることで、磁場特性に優れたバルク材が得られます。

また、製造されたバルク材に樹脂含侵を施すことにより、特性劣化を防ぎ、磁場特性を維持することができ、各種応用機器で使う場合において長期にわたり高い信頼性を得ることができます。

おわりに

本稿では2009年4月号の「高温超導材料の研究と鉄道へ向けた応用」に続き、超導材料を具体的な機器に応用するために必要となる様々な基盤技術とそれらの取り組み

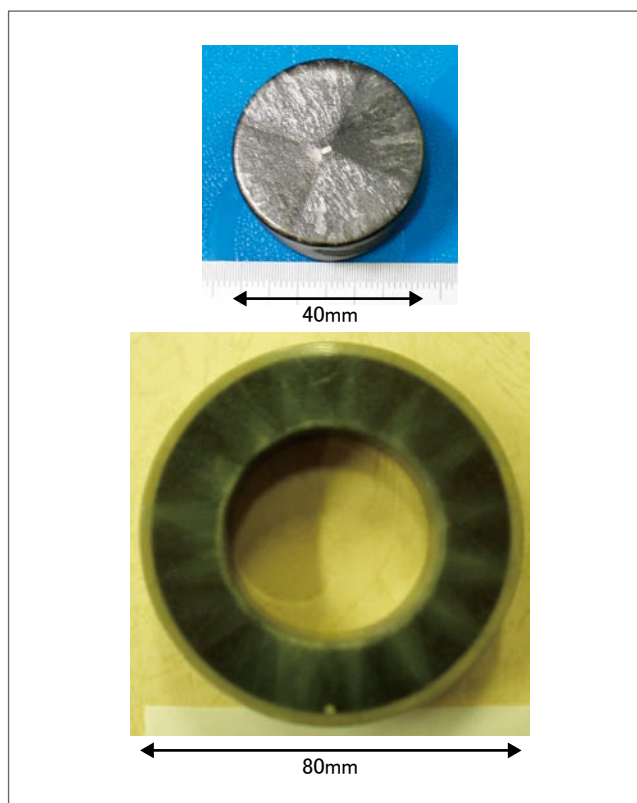


図10 磁気浮上用バルク材(上)と磁場発生装置用リング状の樹脂含侵バルク磁石(下)

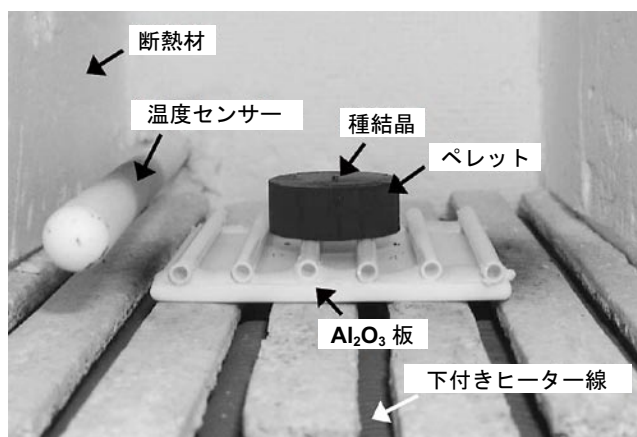


図11 ペレットの配置例

の現状を紹介しました。超導ケーブルへの応用では一本の線材からケーブルを作るための技術が、フライホイールへの応用では超導材料の材料特性がそのまま機器の特性に影響を及ぼすため応用スペックに合った材料特性の向上が必要となるなど、応用先により様々なアプローチが必要となります。今後も引き続き超導の基盤技術の検討を進めながら、応用機器開発を進めていきたいと考えています。

RRR