

# 次世代高温超電導線材の浮上式鉄道用超電導磁石への適用検討

浮上式鉄道技術研究部 低温システム  
主任研究員 小方 正文

## 1. はじめに

次世代高温超電導線材（次世代線材）は、これまでの高温超電導線材と比較して、電気的特性の他に機械的特性にも優れた材料であり、現在盛んに性能向上に向けた開発が進められている。この次世代線材の適用により、従来よりも簡素な構造で信頼性の高い浮上式鉄道用超電導磁石の構成が可能となる。そこで、次世代線材の通電特性試験ならびに次世代線材を用いた小型レーストラックコイルの製作と通電特性試験を実施し、基礎的な特性を把握したので報告する。

## 2. 高温超電導線材

図 1 に超電導線材の臨界温度  $T_c$  のイメージを示す。一般的な金属材料の電気抵抗は、温度を下げるに従って次第にゼロに近づくが、超電導線材は、ある温度において電気抵抗が突然消失して常電導状態から超電導状態へ移行する。このときの温度が臨界温度  $T_c$  で、超電導材料の性質を示す代表的な指標である。また同様な指標として、臨界磁場  $B_c$ 、臨界電流密度  $J_c$  が存在する(図 2)。超電導は、この三つの臨界条件を満たす限られた領域でのみ発生する現象であるため、実際の応用検討においては、使用する超電導材料の各臨界特性を十分に把握することが重要である。

現在、実用レベルにある高温超電導線材には、Bi 系線材と RE 系線材の二種類がある。Bi 系線材は Bi(ビスマス)、RE 系線材は Y(イットリウム)等の希土類(Rare Earth)元素を含んだ銅酸化物高温超電導線材である。 $T_c$ はそれぞれ 110 K(-163 °C)と 93 K(-180 °C)で、従来の超電導線材である NbTi 線材の  $T_c$ (9 K(-264 °C))と比較して飛躍的な高温化が達成された。また両者とも  $T_c$ が液体窒素温度(77 K(-196 °C))以上であるため、安価に製造できる液体窒素による冷却が可能となった点でも大変注目されている。

表 1 に、Bi 系線材と RE 系線材の仕様例を示す。RE 系線材は、機械的特性(許容引張り強度、許容曲げ直径)が良好で、また銀シース構造が不要なため一層の低コスト化が可能である特長

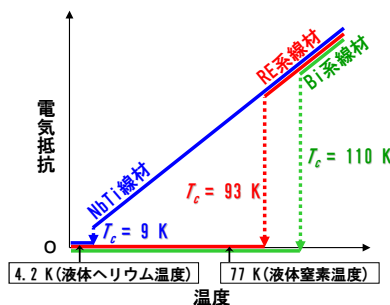


図 1 臨界温度  $T_c$

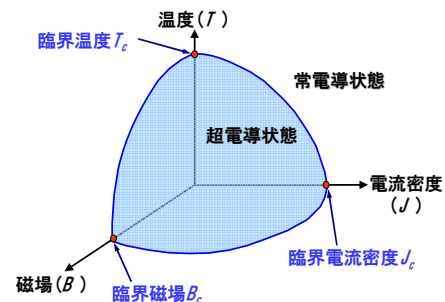


図 2 三つの臨界条件

表 1 高温超電導線材の仕様例

	Bi 系線材 <sup>(※)</sup>	RE 系線材 <sup>(※※)</sup>
幅 [mm]	4.3	4.4
厚さ [mm]	0.23	0.20
長さ [m]	< 1500	
臨界電流(77K) [A]	< 180	< 90
許容引張り強度 [MPa]	130	200
許容曲げ直径 [mm]	70	25

※:住友電工(株) DI-BSCCO Type H

※※:米国 AMSC 社 Type 344C



図 3 RE 系線材外観

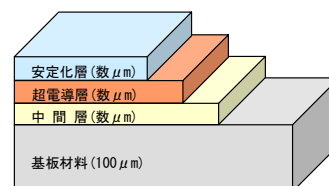


図 4 RE 系線材構造

がある。このため、現状は Bi 系線材のモータやケーブル等への応用が先行しているが、将来は RE 系線材の適用が主流になるものと考えられる。なお RE 系線材は、線材長さ、通電特性、製作コスト等の課題に対して世界的な研究開発競争が展開された結果、近年著しく性能向上が進んでおり、Bi 系線材の次の世代を担う線材という意味で、次世代高温超電導線材とも呼ばれている。図 3 に RE 系線材の外観、図 4 に典型的な RE 系線材の構造を示す。

### 3. 浮上式鉄道用超電導磁石への適用メリット

図 5 に、現在の浮上式鉄道用超電導磁石 (NbTi 線材使用、運用温度 4.2 K)<sup>1)</sup> に次世代高温超電導線材 (RE 系線材) を適用するメリットを挙げる。まず、超電導コイルの運用温度高温化および冷凍機伝導冷却化により冷却用寒剤 (液体ヘリウム、液体窒素) およびタンク、配管類が不要となり、冷凍負荷低減により冷凍機は小型軽量、低消費電力なタイプに置き換えることができる。また、運用温度の高温化は、超電導状態の発熱に対する安定性向上に寄与する。さらに、運用温度を 50 K 程度まで上げることができれば輻射シールド板が省略でき、外槽の小断面積化や超電導コイルを外槽表面に寄せる配置も容易になる<sup>2)</sup>。

これらのメリットにより、小型軽量で構造の簡素化された超電導磁石を実現することができると考えられる。

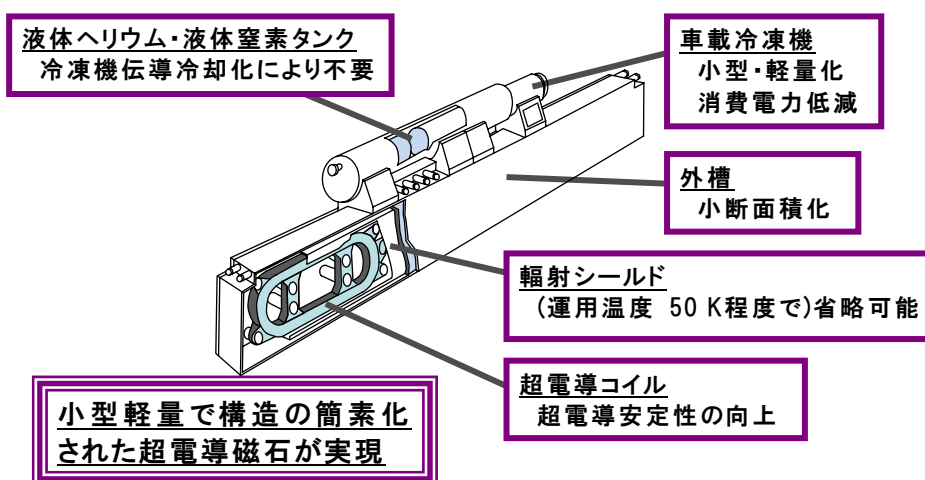


図 5 現在の超電導磁石 (NbTi 線材使用) の高温超電導化がもたらす効果

#### 4. RE 系線材の通電特性結果

RE 系線材の超電導コイルへの適用には、温度や磁場等の諸条件が線材の通電性能に与える影響を定量的に把握してコイル設計へ反映することが重要であるが、これら基礎データの公表例は質、量ともに少ないのが現状である。そこで、実際の RE 系線材の通電特性を、電流  $I$ 、磁場  $B$ 、磁場角度  $\theta$ 、温度  $T$ 、曲げ直径  $\phi$  を条件として評価することのできる通電特性評価試験装置を開発した。本装置は I-B- $\theta$ -T 試験装置 (図 6) と I- $\phi$  試験装置から構成される<sup>2)</sup>。なお RE 系線材には、超電導層の結晶構造に起因した臨界電流  $I_c$  の異方性 (線材を貫く磁場の向きにより  $I_c$  の大きさが変化する性質) が存在することが知られている。よって本装置では、線材平面と磁場  $B$  がなす角度を磁場角度  $\theta$  として定義し、異方性の把握にも対応可能した。

I-B- $\theta$ -T 試験装置を用いて、表 1 に示した RE 系線材の通電特性を評価した。図 8 に臨界電流  $I_c$  の磁場  $B$  ( $\theta=0$  deg.) 依存性を示す。  $T$  ならびに  $B$  が高いほど  $I_c$  が減少することを確認した。図 9 には臨界電流  $I_c$  の磁場角度  $\theta$  ( $B=1$  T) 依存性を示す。  $\theta=0$  deg. すなわち線材平面方向に磁場を与えたときに  $I_c$  が最大となり、  $\theta=90$  deg. すなわち線材平面に垂直な方向に磁場の向きを変えていくと  $I_c$  が減少することを確認した。同じ温度、磁場であっても磁場方向の違いだけで  $I_c$  に最大 60 % 程度の差が生じた。この線材の異方性は、RE 系線材の超電導機器応用のための課題のひとつであり、現在改善に向けた線材開発が進められている<sup>3)</sup>。

図 10 に、I- $\phi$  試験装置による臨界電流  $I_c$  の曲げ直径  $\phi$  依存性を示す。仕様値以下となる  $\phi=20$  mm まで  $I_c$  劣化はなく、RE 系線材の高い曲げ変形耐性を確認した。また、線材の超電導層側を外側にして曲げる、すなわち超電導層に引張り力を与える方が、 $I_c$  劣化が進行しやすいことを確認した。

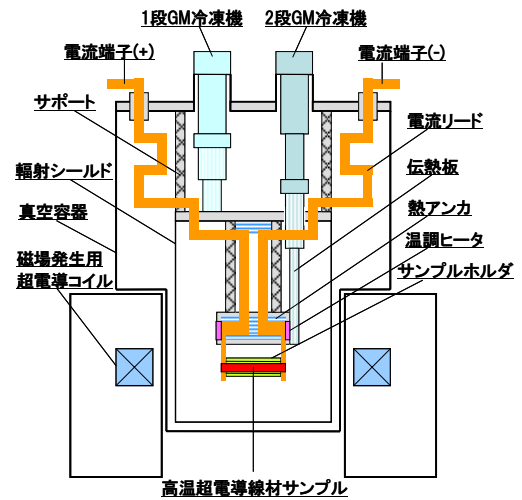


図 6 通電特性評価試験装置 (I-B- $\theta$ -T 試験装置)

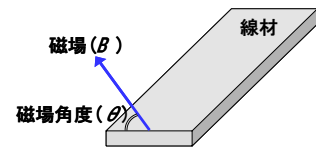


図 7 磁場角度  $\theta$

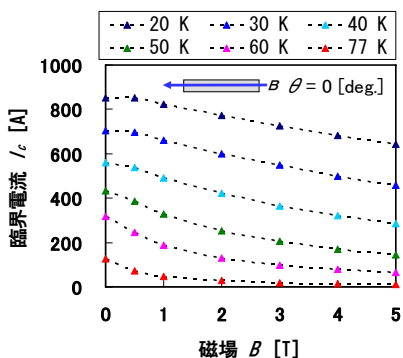


図 8 臨界電流の磁場依存性

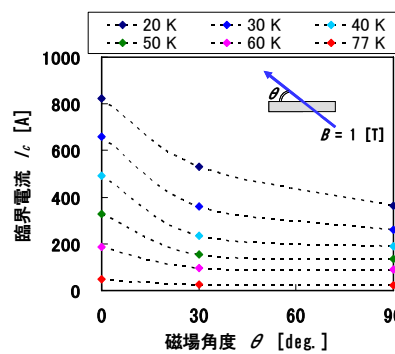


図 9 臨界電流の磁場角度依存性

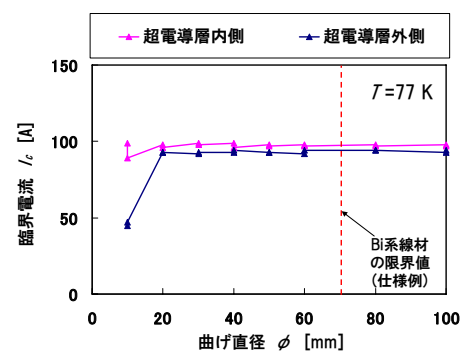


図 10 臨界電流の曲げ直径依存性

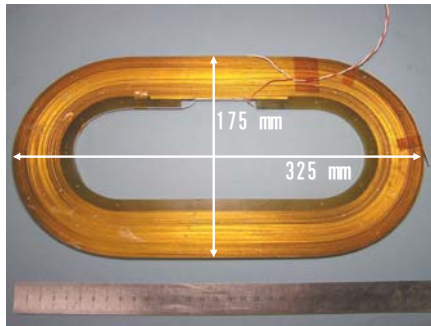


図 11 RE 系小型レーストラックコイル

表 2 RE 系小型レース  
トラックコイル主要仕様

線材長	[m]	100
線材幅	[mm]	4.4
曲線部内半径	[mm]	50.0
曲線部外半径	[mm]	87.7
直線長	[mm]	150
ターン数	[回]	138
パンケーキ層数	[層]	1
インダクタンス	[mH]	6.8

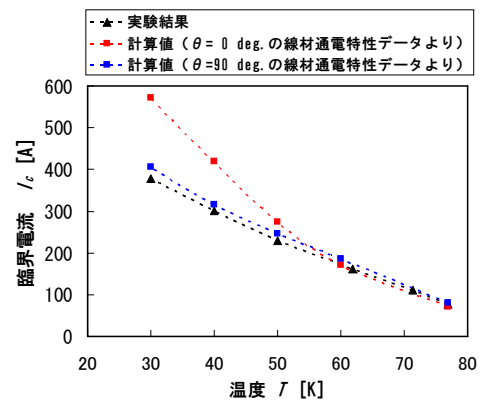


図 12 臨界電流の温度依存性  
(RE 系小型レーストラックコイル)

## 5. RE 系コイルの通電特性結果

表 1 に示した RE 系線材を用いて、パンケーキ巻きコイル一層からなる内半径 50 mm、直線長さ 150 mm、線材長さ 100 m の小型レーストラックコイルを製作した。コイルの外観を図 11 に、主要仕様を表 2 に示す。また、本コイルを I-B- $\theta$ -T 試験装置に組み込み、外部からの磁場  $B$  を与えない条件にて、臨界電流  $I_c$  の温度  $T$  依存性を評価した(図 12)。コイルを構成する線材には、通電時にコイル自身が発生する磁場の影響により、部位毎に異なる臨界電流値が分布することになる。よって、予め取得した線材  $I_c$  の異方性データを使用してコイルの臨界電流値を算出した結果、実験結果と計算値が概ね一致することがわかった。

## 6. まとめ

次世代高温超電導線材(RE 系線材)を浮上式鉄道用超電導磁石へ適用するメリットを検証する基礎検討として、RE 系線材および RE 系線材を用いて製作した小型レーストラックコイルの基礎的な通電特性を確認した。今後も、一層の性能向上が期待される RE 系線材およびコイルの評価を進めるとともに、評価結果は RE 系線材を用いた超電導磁石の検討へフィードバックしていく。

なお、本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：ここまで来た！超電導リニアモーターカー、交通新聞社、pp. 223-225、2006
- 2) 長嶋賢他：RE 系線材の浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用検討(3)、第 79 回低温工学・超電導学会講演概要集、pp. 103、2008
- 3) 小方正文他：高温超電導線材通電特性試験装置の開発、鉄道総研報告、Vol. 22、No. 11、pp. 23-28、2008
- 4) 塩原融：次世代高温超電導線材の特徴と研究開発動向、電気学会誌、Vol. 126、No. 5、pp. 268-271、2006