

希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道用磁石への適用性評価

小方 正文* 宮崎 佳樹* 荒井 有気*
 長谷川 均* 笹川 卓** 長嶋 賢*

Study on Applicability of Rare Earth High-temperature Superconducting Wires to Superconducting Magnet for Maglev System

Masafumi OGATA Yoshiki MIYAZAKI Yuuki ARAI
 Hitoshi HASEGAWA Takashi SASAKAWA Ken NAGASHIMA

As for a rare earth high-temperature superconducting wire (RE wire) which is superior in electric properties and mechanical properties to the conventional wires, a performance enhancement is pushed forward strongly now. It was made clear that a superconducting magnet of simpler structure and of higher reliability for maglev system than the conventional one could be achieved by applying RE wire. Then, the characteristic test for RE wire was carried out, and the trial coil of small race truck-shape with RE wire was tested for electric properties. In this way, the electric properties of RE wire from single wire shape to winded coil shape were made clear. These results are useful for application of RE wire to the superconducting magnet for maglev system.

キーワード：希土類，高温超電導，線材，磁石，RE，HTS，SCM

1. はじめに

希土類 (Rare Earth, RE) 系高温超電導線材は、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。この希土類系線材の適用により、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ことがわかった。そこで、希土類系線材単体の通電特性試験を行った後に、この希土類系線材を用いた小型レーストラックコイルの製作および通電特性試験を実施した。このようにして、線材単体の形状からコイル形状までの希土類系線材の通電特性を総合的に調査することにより、これらの基礎的な特性を評価した。この結果は、希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道用磁石への適用に向けて活用することができる。

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。銅をはじめとする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 (図2) するため、この三つの臨界条件を満たす限定された領域内でのみ超電導現象は成立する。従って、実際の応用検討においては、使用する超電導線材の各臨界特性を十分に把握しておくことが重要である。

高温超電導線材とは、従来の金属系超電導線材 (NbTi 線材等) では実現できなかった高温領域において超電導

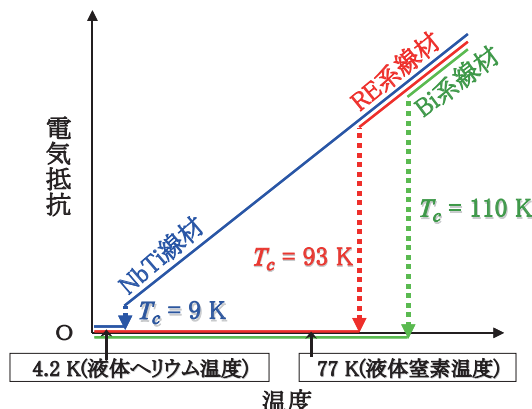


図1 超電導線材の臨界温度 T_c のイメージ

* 浮上式鉄道技術研究部 (低温システム)

** 浮上式鉄道技術研究部 (電磁力応用)

特集：浮上式鉄道技術とその応用

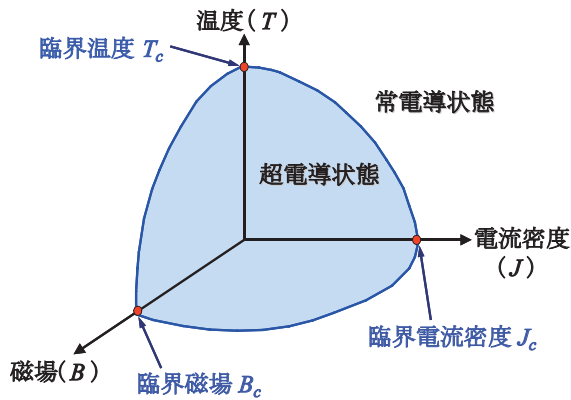


図2 超電導状態を決定する臨界条件

状態を示す線材のことであるが、一般的には T_c が液体窒素温度（77 K（ -196°C ））よりも高い超電導線材のことを指す。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、従来の代表的な超電導線材である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。更に T_c が液体窒素温度以上であるため、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のBi系線材とRE系線材の仕様例に示すように、RE系線材はBi系線材よりも機械的特性（許容引張り強度、許容曲げ直径）に優れており、基本的にコイル等機器への加工応用に適した材料であると考えられる。またRE系線材は、Bi系線材で必須の銀シース構造が不要であるため、線材製造コストの一層の低減化が可能な特長を有している。

なおRE系線材は、線材長さ、通電特性、製作コスト等の改善に向け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。現状ではBi系線材のモータやケーブル

表1 高温超電導線材の仕様例

	Bi系線材 ^(※)	RE系線材 ^(※※)
幅 [mm]	4.3	4.4
厚さ [mm]	0.23	0.20
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

等への応用が先行しているが、将来的にはRE系線材の適用が主流になるものと考えられる。

図3にRE系線材の外観、図4にRE系線材の典型的な構造を示す。外観は細長いテープ状で、内部は機械強度を担う非磁性基板材料の上に薄膜組織を積層した構造である。



図3 RE系線材外観

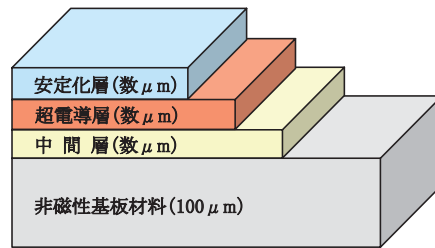


図4 RE系線材構造

3. 浮上式鉄道用超電導磁石への適用メリット

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 K¹⁾）をRE系線材の適用によって高温超電導化する場合のメリットを図5に示す。超電導コイルの運用温度が上がることで、コイルの冷却方式として冷凍機による伝導冷却方式が実用的となるため、冷却用寒剤（液体ヘリウム、液体窒素）、寒剤用タンク、配管類が全て不要となる。そして、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、コイルの運用温度を上げると線材材料の比熱も増大していくので、局所発熱に対する超電導状態の安定性が向上する。さらに、運用温度を50 K程度まで上げることができれば、輻射シールド板の省略が可能となり、外槽の小断面積化や、超電導コイルの外槽近傍へ配置も容易になる²⁾。

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信頼性の高い超電導磁石を実現することができると考えられる。

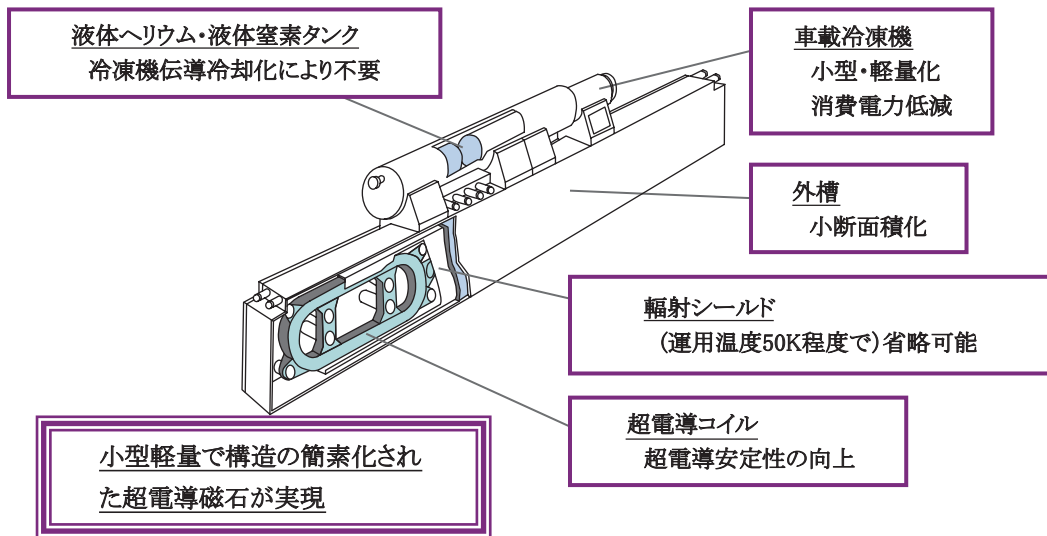


図5 現在の超電導磁石 (NbTi 線材使用) の高温超電導化がもたらす効果

4. RE 系線材の通電特性試験結果

RE 系線材の超電導コイルへの適用検討のためには、実際のコイルの運用温度や磁場等の諸条件が線材の通電性能に及ぼす影響を定量的に把握した上で、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未だ質、量ともに少ないのが現状であり、本検討を進めるにあたっての課題であった。

そこで、RE 系線材の通電特性を、電流 I 、磁場 B 、磁場角度 θ 、温度 T 、曲げ直径 ϕ 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。本装置は最大通電電流 1000 A、最大印加磁場 5.5 T、最低設定温度約 10 K の性能を有する I - B - θ - T 試験装置 (図6) と、77 K の液体窒素中で線材通電特性の曲げ直径依存性を評価することのできる I - ϕ 試験装置 (図7) から構成される。

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 θ として定義し (図8)、異方性の把握にも対応可能とした²⁾。

I - B - θ - 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9に臨界電流 I_c の磁場 B ($\theta = 0 \text{ deg.}$) 依存性の試験結果を示す。 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10には臨界電流 I_c の磁場角度 θ ($B = 1\text{T}$) 依存性の試験結果を示す。 $\theta = 0 \text{ deg.}$ 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、 $\theta = 90 \text{ deg.}$ 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。これは同じ温度、磁場であっても磁場方向の違いだ

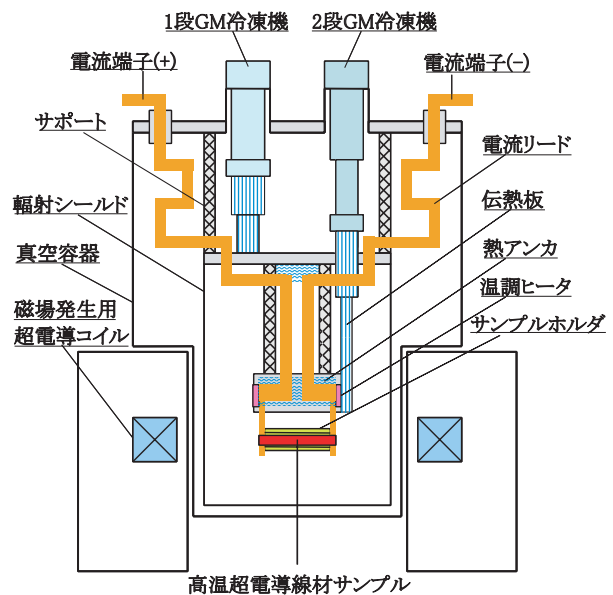


図6 I - B - θ - T 試験装置 (通電特性評価試験装置)

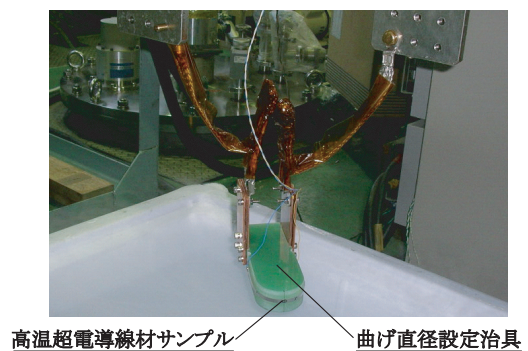


図7 I - ϕ 試験装置 (通電特性評価試験装置)

特集：浮上式鉄道技術とその応用

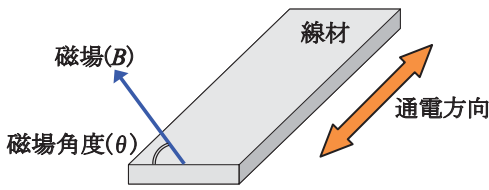


図8 磁場角度の定義

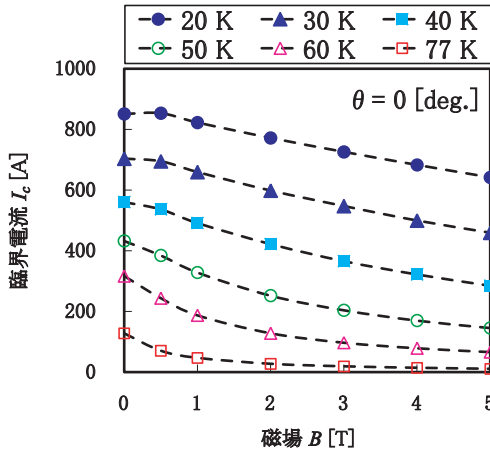


図9 線材臨界電流の磁場依存性

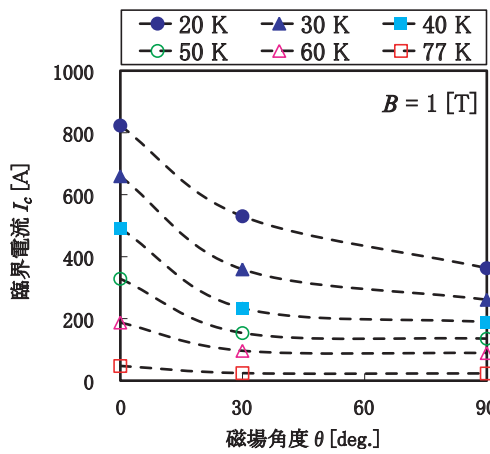


図10 線材臨界電流の磁場角度依存性

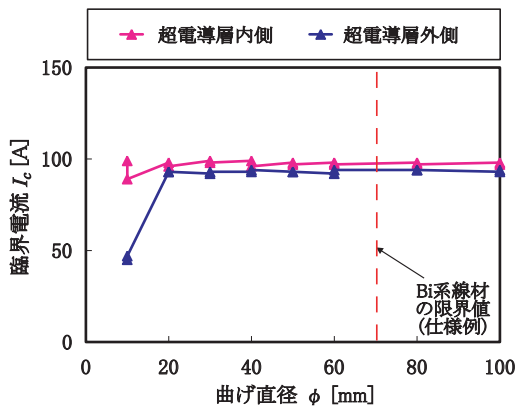


図11 線材臨界電流の曲げ直径依存性

けで I_c に最大 60 % 程度の差が生じたことになる。この線材の異方性は、RE 系線材を超電導機器へ応用するための課題のひとつであり、人工的な磁束ピンニングセンターの導入等、特性改善に向けた RE 系線材の製造技術開発が進められている⁴⁾。

同じく表1のRE系線材に対して、I-φ試験装置を使用して液体窒素温度の77 Kにおける臨界電流 I_c の曲げ直径φ依存性を評価した。試験結果を図11に示す。表1のBi系線材の仕様値70 mmよりも大幅に小さく、かつRE系線材の仕様値以下のφ=20 mmまで I_c 劣化は認められず、RE系線材の高い曲げ変形耐性を確認した。これは、RE系線材の使用を前提とした場合のコイル設計自由度の向上や、コイル製作時の線材の取り扱い易さの点で非常に有効な特性である。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。

5. RE系コイルの通電特性試験結果

表1に示したRE系線材を用いて、内径100 mm、直線長さ150 mm、使用線材長さ100 mの小型レーストラックコイルを製作した。本コイルには、テープ状の線材の上に線材を巻き重ねていくパンケーキ巻き方式を採用し、電流供給のための電極をコイルの最内周と最外周にそれぞれ設けた。RE系小型レーストラックコイルの主要仕様を表2に、外観を図12に示す。

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
曲線部内径	[mm]	100
曲線部外径	[mm]	175
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

磁場センサー位置: ⊙ コイル中心
⊗ コイル曲線部中央最内周

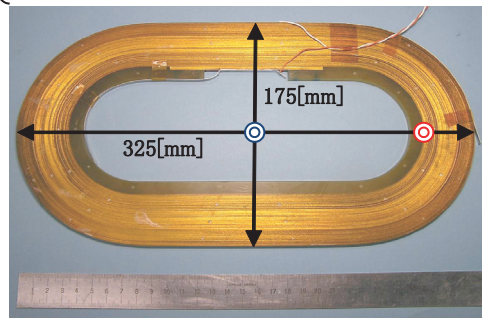


図12 RE系小型レーストラックコイル

本コイルをI-B- θ -T試験装置に組み込んで、外部から磁場を与えない条件として通電特性試験を実施した。コイル温度を30 Kに設定したときのコイル発生磁場の通電電流依存性を図13に示す。磁場測定位置は図12に示した2点であり、コイル曲線部中央最内周において最大約0.85 T、コイル中心において最大約0.3 Tの発生磁場を確認した。

また、30 Kから77 Kまでの範囲でコイル温度を変えながら、コイル臨界電流 I_c の温度 T 依存性を評価した。試験結果を図14に示す。線材臨界電流が温度上昇に伴って減少するのと同様、コイル臨界電流も温度上昇とともに減少していく特性が得られた。本コイルの場合、77 Kにおける I_c は、30 Kにおける I_c の約1/5にまで減少した。

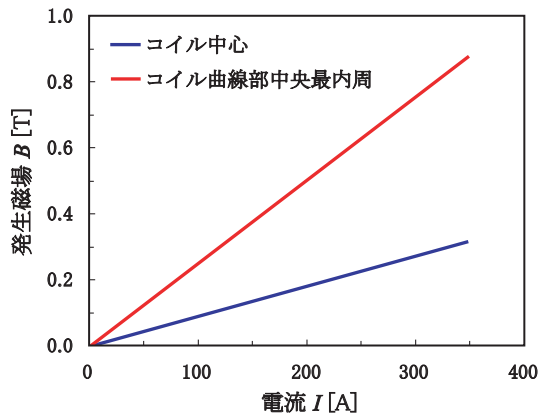


図13 コイル発生磁場の通電電流依存性 (30 K)

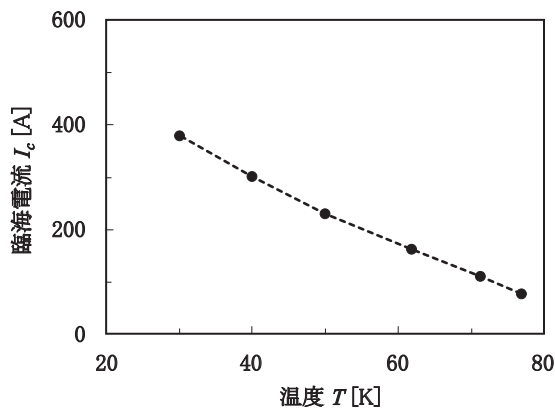


図14 コイル臨界電流の温度依存性

6. RE系線材とRE系コイルの通電特性試験結果の比較検討

前述のように、RE系小型レールトラックコイルの臨界電流 I_c が、図14に示した温度依存性を持つことを試験

により確認したが、 I_c を決めるのは磁場 B および温度 T であり、ここで T はコイルの設定温度として既知でなので、 B が I_c を決定することになる。そして、この B はコイルへの通電に伴ってコイル自身が発生する磁場に他ならず、特にコイルがレールトラック形状であることと、コイルの断面形状に起因し図15に示す2箇所において、線材の通電特性に対する B の影響が大きくなる。

そこで、線材の通電特性試験にて取得した線材 I_c の異方性データを用いて、線材平面に垂直な方向 ($\theta = 90$ deg.) の磁場が最大になる点と、線材平面方向 ($\theta = 0$ deg.) の磁場が最大になる点における線材 I_c をそれぞれ算出し、試験結果と比較した。

図16に、それぞれの計算値と試験結果の比較を示す。その結果、線材平面垂直方向 ($\theta = 90$ deg.) 磁場が最大となる点における線材 I_c の計算値とコイル I_c の試験結果が良く一致することがわかった。これは、使用する線材の通電特性と、その線材を用いて製作するコイルの寸法、形状がわかれば、コイルの通電特性が予測可能であることを表している。この予測手法は、目標とするコイル性能を達成するためには、どのような通電特性を有する線材が必要となるのかという検討にも応用することができる。

RE系線材の浮上式鉄道用磁石への適用性評価のためには、現在も性能向上が進むRE系線材に対する適時な通電特性確認試験とともに、線材通電特性からコイル通電特性を予測する手法を活用した試験結果に対する評価検討作業が重要である。

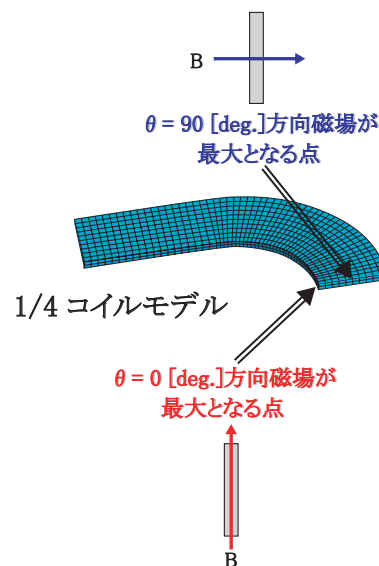


図15 線材の通電特性に対するコイル発生磁場の影響が大きくなる部位

特集：浮上式鉄道技術とその応用

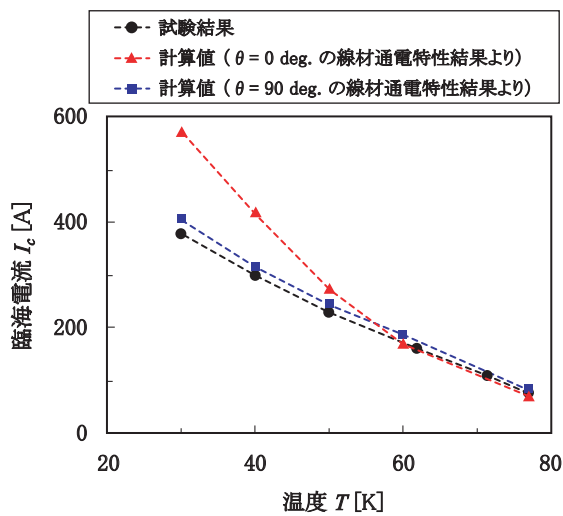


図 16 コイル臨界電流の温度依存性
(線材通電特性結果を用いた計算値との比較)

7. まとめ

希土類系高温超電導線材を適用することにより、従来よりも簡素な構造で信頼性の高い浮上式鉄道用磁石の構成が可能となる。そのためには先ず、想定される超電導コイルの運用環境が線材の通電性能に及ぼす影響を定量的に把握して、試験結果をコイル設計へ反映することが重要である。本研究で実施した内容を次にまとめる。

- (1) 希土類系高温超電導線材に対して通電特性評価試験を実施して、温度、磁場、磁場角度、曲げ直径に依存する臨界電流特性を確認した。

- (2) 通電特性評価試験を行った線材を用いて希土類系小型レーストラックコイルを製作し、本コイルに対して通電特性評価試験を実施して、温度に依存する臨界電流特性を確認した。

- (3) 希土類系高温超電導線材および希土類系小型レーストラックコイルに対する通電特性評価試験結果を比較検討し、コイルの通電特性を線材の通電特性ならびにコイルの寸法、形状から予測することのできる手法を示した。

今後も性能向上が進む希土類系高温超電導線材に対して適時に通電特性評価試験を実施し、評価試験結果を希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道用磁石への適用のために活用していく。

本研究は、国土交通省の補助金を受けて実施した。

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，p.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