

希土類系高温超電導線材を用いた起磁力 700 kA 実機大コイルの開発

水野 克俊* 杉野 元彦* 田中 実* 小方 正文*

Development of a Real-scale REBCO Coil for the Demonstration of Magnetomotive Force of 700 kA

Katsutoshi MIZUNO Motohiko SUGINO Minoru TANAKA Masafumi OGATA

REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) is one of the of high temperature superconducting materials and enables us to raise the operating temperature of on-board superconducting magnets of the maglev. Because of high operating temperature, the magnet can be cooled without liquid helium, and the energy consumption of the magnet will decrease by nearly half. The basic technologies about the magnet fabrication with the REBCO coated conductor are still under development. Therefore, we have manufactured a real-scale REBCO coil aimed at its application to the maglev. The real-scale coil was excited at 35 K and demonstrated magnetomotive force of 700 kA, which is the same as that of the existing on-board magnet. This paper describes the fabrication process of the coil and also the detail of the excitation test.

キーワード：REBCO，希土類系高温超電導線材，磁気浮上式鉄道，車載超電導磁石，コイル製作

1. はじめに

鉄道総研では希土類系高温超電導線材 (Rare-Earth Barium Copper Oxide: 以下 REBCO 線材) の優れた通電特性に着目し、浮上式鉄道用車載超電導磁石をはじめとした様々な機器応用を検討している。現在、超電導機器には低温超電導材料であるニオブチタン (Nb-Ti) が主に用いられている。ニオブチタンは臨界温度が 9 K であるため、冷却には液体ヘリウムや同等の温度まで冷却可能な極低温冷凍機が用いられている。その一方で、REBCO 線材は臨界温度が高いだけでなく、高磁場環境下での電流密度にも優れているため、ニオブチタンと同等の電流密度を 40 K 前後で実現できる¹⁾。運用温度の向上は超電導機器にとって多くの利点がある。

第一に、冷凍機による伝導冷却でも安定した冷却が可能のため、液体ヘリウムなどの寒剤が不要になる。磁石の冷却構造は簡素化され、冷却作業は冷凍機を起動するだけでよくなるため、運用コストが低減される。

また、冷凍機の効率は冷却温度に依存するため、冷凍機の消費電力が低減される。浮上式鉄道応用においては、磁石の軽量化はきわめて重要であり、磁石自体が冷却系の簡素化から小型・軽量化されることに加えて、冷凍機消費電力の低減によって車上電源設備の小型化にもつながる。

この様に、REBCO 線材は浮上式鉄道車両の軽量化と超電導磁石の運用コスト低減を可能にする優れた超電導線材であるものの、同時に技術的な課題も残されている。浮上式鉄道応用に限らず、NMR や MRI の研究開発においても REBCO 線材を用いた磁石製作は世界的にも始まったばかりであり、コイル化技術の確立や安定運用手法の実現が実用化には不可欠である。

著者らは、REBCO 線材を用いた磁石製作を進めており、通電特性を劣化させることなく、熱的に安定なコイルを実現できる製作手法をすでに開発した²⁾。この新規に開発したコイル製作手法によって、浮上式鉄道用車載磁石のコイルと同形状の REBCO パンケーキコイル (テープ線材を渦状に巻いたもの) の製作にも成功している³⁾。今回、パンケーキコイルを複数製作して積層することにより、実機級の磁場 (起磁力) 発生の実証試験を行ったので、本論文ではコイル製作工程および励磁試験結果について報告する。

2. 実機大 RE コイル製作

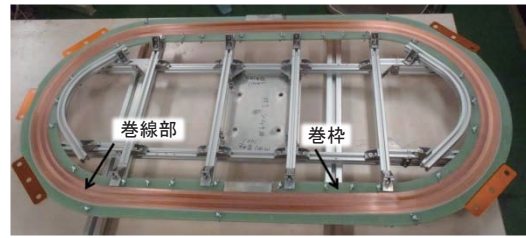
本研究において、REBCO 線材を用いた実機大コイル (以下実機大 RE コイル) 製作は励磁性能の実証を目的としており、コイル形状と起磁力に関しては従来の車載低温超電導磁石と同一の仕様が求められる。その一方で、冷却方法やコイル内部構造はそのような制約がないが、重量や運用性、熱的安定性等を考慮して設計する必要がある。

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

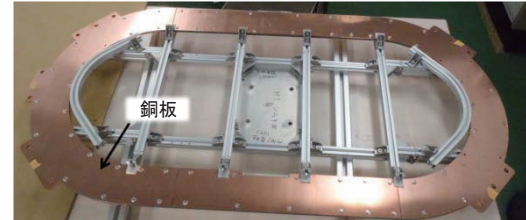
特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

表1 実機大 RE コイル基本仕様 (1 極あたり) ³⁾

線材	SuperPower 社製 SCS6050-AP
線材形状	幅 6 mm, 厚さ 0.1 mm
ターン間絶縁	ポリイミドテープ
定格電流	250 A (常時通電)
パンケーキコイル積層数	8
ターン数	2800 (1 パンケーキコイルあたり 350)
使用線材長	7600 m (1 パンケーキコイルあたり 950 m)
線材重量 (巻枠含まず)	43 kg
インダクタンス	12 H
運用温度	30~40 K (将来的には 40~50 K)



a. 銅板施工前



b. 銅板施工後 (熱可塑性樹脂による融着)

2.1 実機大 RE コイル基本仕様

実機大 RE コイルの基本仕様は、運用温度や熱侵入、コイル製作性等を考慮して表1のように設定した³⁾。定格電流は従来⁴⁾の半分の 250A とし、熱侵入の低減を図っている。ただし、起磁力を同じにするためターン数は倍になっている。また、REBCO 線材はテープ形状をしているため、扁平なパンケーキコイルの方がソレノイドコイルよりも巻線が容易である。そのため、パンケーキコイルを複数積層することによって一つの実機大 RE コイルとなる構成とした。

線材評価試験および磁場解析をもとに励磁上限温度を算出すると、現行の REBCO 線材では 30 K 後半から 40 K 程度になる見込みである。ただし、線材性能は年々向上しており、近い将来には 50 K 程度まで上昇すると考えられる⁵⁾。

励磁方式は外部電源による常時通電とした。これは、REBCO 線材の超電導接続技術は発展途上であり、かつ REBCO 線材は現状数 100 m 単位でしか流通しておらず、接続抵抗の低減が難しいためである。ただし、線材の長尺化は複数の線材メーカーによって進められ⁶⁾、超電導接続技術の開発も各研究グループで進められており⁷⁾、将来的には永久電流モードも視野に入れている。

2.2 パンケーキコイル製作

表1に示した様に、実機大 RE コイルは8個のパンケーキコイルから構成される。巻枠の基本材質は GFRP であり、1 パンケーキコイルあたり 950 m の線材が巻かれている。コイル製作に用意した線材は単長 100 m、もしくは 200 m のものであり、各パンケーキコイルあたり 5~9 か所のはんだ接続がある。はんだ接続には低融点のはんだを用いており、接続長は 100 mm とした。

寒剤を使用しない冷凍機伝導冷却のため、パンケーキコイルには高い熱的安定性が求められる。そのため、巻線後のパンケーキコイル側面には無酸素銅板が熱可塑性

図1 パンケーキコイル外観

表2 77 Kにおけるパンケーキコイル臨界電流

ID (積層順)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
I_c (A)	68	74	66	57	54	63	71	73

樹脂によって接着されている (図1)。熱可塑性樹脂にはニウクレル[®]を用いており、検証の結果低温でも高い接着性を有していることが明らかになっている²⁾。従来のエポキシ含浸と比べて、コイルの通電性能劣化のリスクがなく、作業工程も容易である。

健全性の確認のために、液体窒素冷却下で、製作した各パンケーキコイルの臨界電流 (I_c) を測定した。各パンケーキコイルの臨界電流の一覧を表2に示す。 I_c は 54 A ~ 74 A と幅があるものの、これは線材自体の特性のばらつきを考慮してパンケーキコイルを製作したため、妥当な結果である。8 積層した際には、コイル断面における磁場分布の違いから、パンケーキコイル毎に負荷率 (臨界電流に対する通電電流の割合) が大きく異なる。基本的に、負荷率は外側のパンケーキコイルほど高くなる傾向にあるので (詳細な負荷率計算は第4章参照)、外側のパンケーキコイルには特性の優れた線材を用いるようにしている。そのため、得られた I_c 分布は想定通りであり、線材は巻線や熱可塑性樹脂による接着などの過程で劣化することがなく、コイル製作工程の妥当性を示す結果でもある。

3. コイルケース設計・製作

3.1 コイルケース設計

単にパンケーキコイルを積層しただけでは、励磁時の磁界による強力な電磁力を受けて、コイルが変形・破損してしまう。そのため、積層されたパンケーキコイルは補強のためのコイルケースに収める必要がある。この

コイルケースは、従来の低温超電導磁石では、内槽容器と呼ばれており、単なる補強だけでなく液体ヘリウム槽としての役割があった。そのため、内槽容器には気密構造がとりやすいステンレスが用いられていた⁸⁾が、REBCO コイルにおいては気密性が不要になるため、他の材料を用いることも可能になる。浮上式鉄道応用では軽量化が求められるため、比強度が高い材料が適している。また、加工性やコストも重要な要素であり、今回のコイル開発ではこれらのバランスに優れたジュラルミン系の材料 (A7075P-T651) を用いて製作することとした。

コイルが経験する応力の中ではフープ応力 (レーストラック外周方向に働く電磁力) が特に大きく、フープ応力を考慮して構造解析と並行して設計を進めた。コイルケースの荷重支持点は従来の形状を参考に 8 か所とし、そのうち 4 点はレーストラックの外側に張り出している。そのため、コイルケースは直方体を基本とする外形となっており、曲線部の強度は十分に高い構造となっている。その一方で、レーストラック直線部においては超電導線材に働くフープ応力によって外側に変形しようとする (図 2)。コイル直線部における、レーストラック平面直交方向の経験磁場を平均すると約 0.55 T であり、直線部に働く電磁力は約 220 kN となる。これをコイルケースのみで支えると仮定し、安全率 3 以上を設計条件とした。

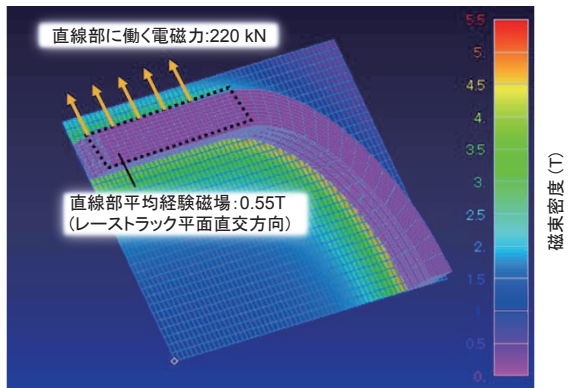


図 2 レーストラックコイルに働く磁場分布と電磁力 (1/4 分割モデル)

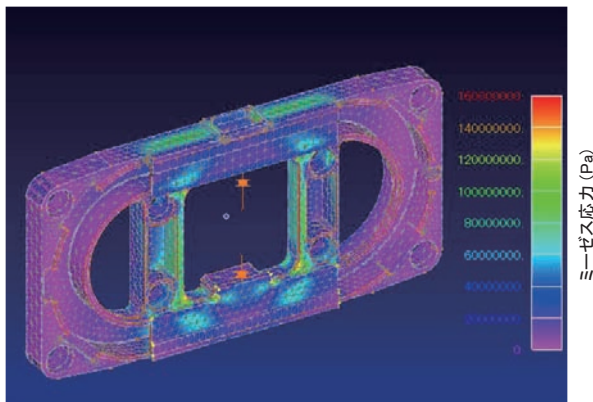


図 3 コイルケース応力分布 (最大ミーゼス応力 134 MPa)

アルミ合金の耐力はその化学成分だけでなく、板厚によっても異なる。今回のコイルケースは厚みが約 100 mm であり、このときの A7075P-T651 の耐力は 360 MPa 以上とされている⁹⁾。さらに温度によっても耐力は異なり、室温と極低温 (77 K) を比較すると、極低温では概ね 20 % 程度高い数値を示している¹⁰⁾。そのため、コイルケースの強度は 430 MPa 以上となる。今回は安全率を 3 と設定しているため、最大ミーゼス応力を 140 MPa 以下にする必要がある。

設計およびモデリングには三次元 CAD を使い、構造解析は NASTRAN で行った。最終的に得られたコイルケース形状および応力分布を図 3 に示す。レーストラック内側の支柱部分および直線部外側の面での応力が高くなっている。これらの箇所でも最大ミーゼス応力は 134 MPa であり、設計要件を満たしている。なお、コイルケース重量は 43 kg となり、パンケーキコイルや伝熱部材などの重量をすべて積算すると 140 kg 前後となる見込みである。

3.2 要素模型による強度試験

構造解析ではコイルケースの蓋の締結ボルトも含め、詳細な評価を行っているものの、実機大 RE コイルは複雑な内部構造をしており、コイルケースと各パンケーキコイルの当たり面が均一にならず想定外の応力が働く可能性もある。そのため、実機大 RE コイルの直線部を模擬した模型 (以下要素模型) を製作し、荷重試験によって設計通りの剛性が得られているかを確認した。

要素模型はコイルケース部と伝熱部材である純アルミ (A1050) の板、さらにパンケーキコイルの剛性を再現した GFRP の板から構成される。要素模型中央には貫通穴を設けており、ケース内部の GFRP 板 (パンケーキコイル模擬) に直接荷重をかけ、ケース両端で支える三点曲げ構造とした (図 4)。

要素模型のコイルケース部外側 4 面にはひずみゲージを取り付け、変形量の測定にはレーザー変位計を用いた。荷重 140 kN のとき、コイルケース部底面でのひずみが 1700 μ ST となり、応力に換算すると 130 MPa であった。コイルケース部は塑性変形しておらず、ボルトについて

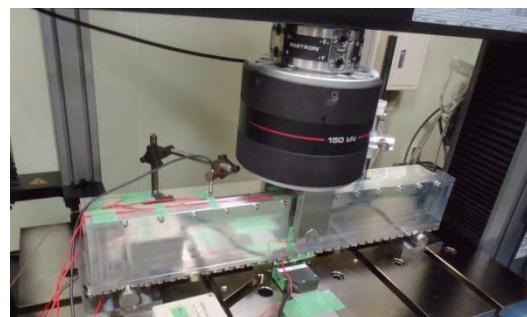


図 4 要素模型を用いた荷重試験

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

も変形や破損などはなかったため、励磁時のフープ応力と同等の応力に耐えることが確認された。

4. 励磁試験

RE コイルは劣化や故障を引き起こす因子が完全には特定されていない。そのため、線材性能からの概算だけではなく、磁石としての実証試験が不可欠である。製作した実機大 RE コイルが実際に 30 K を超える高い運用温度を有することを実証するため、励磁試験を実施した。

4.1 励磁上限温度予測

試験の実施に先立ち、励磁上限温度の予測を行った。手順としては、はじめに実際にコイル製作に用いた線材（2014 年製）を供試体として臨界電流の測定を行った。REBCO 線材の通電特性はメーカー毎に異なるばかりではなく、同一メーカーであってもロット毎に特性が異なるため、精密な励磁上限温度の予測にはその都度線材評価が不可欠である。次に、コイルケース設計時と同様に、磁場解析によってコイル断面における磁場の詳細な分布を求める。円形コイルならばどの断面でも磁場分布は同じであるが、レールトラック形状では曲線部中央に磁場が集中する。すなわち、曲線部中央断面が最も負荷率（臨界電流に対する通電電流の割合）が高くなる。そのため、この断面を評価面として、実測した線材の通電特性を当てはめることによって負荷率を予測することができる。温度条件を変化させて負荷率を算出していくと、36 K において最も上段のパンケーキコイル内周部で最大負荷率が 90 % となった。図 5 にこのときの負荷率分布を示す。なお、対称性から下半分の 4 パンケーキコイル(#5 ~ #8) は省略している。

なお、今回線材評価に用いた線材は 2014 年度製であるが、コイル製作は 2 回に分けて行っており、8 パンケーキコイルのうち、6 個は 2015 年度製線材を用いている。2014 年度から 2015 年度にかけて線材性能が大きく向上したため⁵⁾、実際の励磁上限温度は当初の予測よりも数

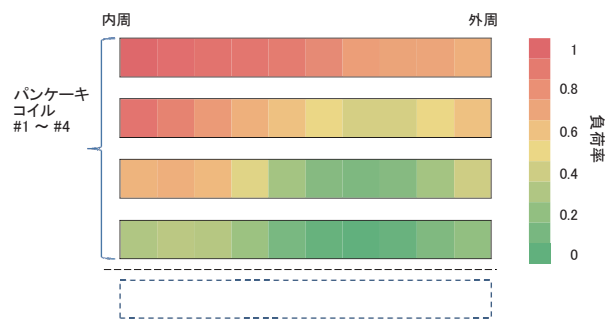


図 5 レールトラック曲線部中央断面における各パンケーキコイルの負荷率分布

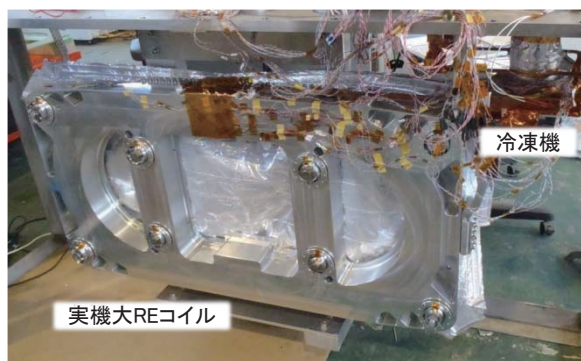


図 6 励磁試験のために組み上げられた実機大 RE コイル

K 高くなっている可能性が高い。そのため、追試として 2015 年度線材の通電試験を今後予定している。

4.2 試験装置構成

励磁試験のため、製作したパンケーキコイルをコイルケースに収めて実機大 RE コイルとして組み上げた後、専用のクライオスタットに取り付けを行った（図 6）。冷却には単段 GM 冷凍機を用いており、ふく射シールドと呼ばれる断熱層を持たない構造となっている。低温超電導磁石においては、ふく射シールドは不可欠であったが、30 K を超える運用温度の RE コイルならば、ふく射シールドなしでも冷却可能であり、超電導磁石をコンパクトにできる。重量の制約が厳しい浮上式鉄道用車載超電導磁石においては大きな利点となる。

実機大 RE コイルは伝導冷却構造のため、伝熱部材が不十分であるとコイル両端で大きな温度差が付くことがあり得る。また、電流リード接続部の接続抵抗が大きければ、コイル電極で局所的な発熱が起きる可能性もある。そのため、温度センサはコイル全体に取り付け、特にコイル電極には重点的に配置した。これに加えて、電流リードや冷凍機温度もモニタすることとした。また、励磁時

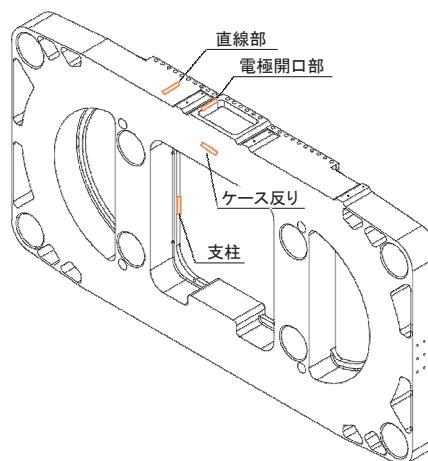


図 7 ひずみゲージ施工位置

にコイルケースに働く応力の確認のため、主要な箇所(図7参照)にはひずみゲージを施工した。また、発生磁場の確認のため、コイル中心位置にはホール素子を配置した。700 kA 励磁時には 1.1 T となる見込みである。

4.3 励磁試験結果

実機大 RE コイルを 35 K に冷却し、励磁試験を行った。励磁は段階的に行い、各電流値でホールドした後、コイルが超電導状態を維持していることを確認しながら次の設定電流に移行していった。はじめの 0 A から 200 A までは 10 A 刻みで行い、200 A 以降は 5 A 刻みである。定格電流 250 A (起磁力 700 kA) に到達した後、コイル電圧および温度が安定するまでホールドした。励磁試験時の通電電流とコイル電圧を図 8 に示す。

インダクタンスが 12 H と大型のコイルであるため、電流掃引時にはコイル電圧がレンジオーバーしているものの、電流ホールド時には数 mV 程度であり、250 A 到達から 40 分後では 4 mV 以下で安定している。この電圧は超電導線材のはんだ接続抵抗や電流リード接続部抵抗によるものであり、電圧の減衰特性からコイルは超電導状態を維持していると言える。電流をホールドした際にコイル電圧が緩やかに減衰するのは速へい電流の影響であり、コイル臨界電流近傍では速へい電流の影響は小さくなり、短時間で電圧も定常に達する。

250 A 到達時のコイル中心磁場は 1.1 T であり、磁場からも所定の起磁力 700 kA が達成されていることを確認できた。また、このときの主要個所の温度を図 9 に示

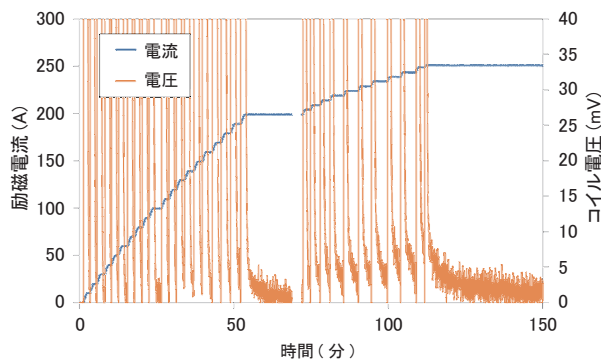


図 8 35 K における励磁試験時の通電電流とコイル電圧

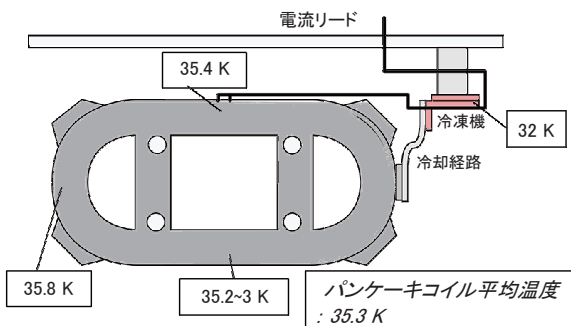


図 9 起磁力 700 kA 時におけるコイル温度

表 3 起磁力 700 kA 励磁時におけるコイルケースひずみ

	電極開口部	直線部	支柱	ケース反り
予測 (μ ST)	1600	1300	1000	600
実測 (μ ST)	765	612	817	466

す。励磁による発熱もなく、コイル内温度差も 1 K 以内に収まっていた。しかしながら、冷凍機—コイル間で 3 K 程度の温度差が付いており、冷却経路の熱伝導には改善の余地がある。改良点として、低温における熱伝導率の高い高純度アルミを冷却経路に用いつつ、ボルト締結など熱抵抗となる箇所を減らして温度差の低減を図る予定である。

ひずみゲージによる測定結果を解析による予測と合わせて表 3 に示す。支柱のひずみは概ね予測値に近い結果となっていることから、想定された電磁力がケースに働いていると考えられる。その一方で、電極開口部と直線部については半分以下となっている。解析においては、パンケーキコイルの剛性は考慮せず、フープ応力は直線部に均一にかかるものとしていた。しかしながら、実際にはパンケーキコイルの剛性のため、応力のかかり方に偏りがあり、変形量の少ない箇所に大きく応力が働いていたのではないかと推測される。少なくとも応力は解析よりも緩和される傾向となっており、設計上の安全率 3 は十分に満たされていると考えられる。

5. まとめ

REBCO 線材は高温・磁場中での通電特性に優れており、浮上式鉄道用車載超電導磁石に応用すれば、運用が容易になるだけでなく、磁石の軽量化も可能になると考えられる。しかしながら、そのような大型 RE 磁石の製作事例は極めて少なく、実証試験が不可欠である。本研究では、浮上式鉄道用車載超電導磁石と同形状かつ実起磁力の実機大 RE コイルを製作して励磁試験を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 線材単体の通電特性より、今回製作した実機大 RE コイルの励磁上限温度は約 40 K になると試算される。
- (2) コイル温度 35 K において、目標とした起磁力 700 kA が得られることを実証した。接続部等の抵抗による発生電圧は 5 mV 以下であり、熱的にも安定した励磁状態を確認した。
- (3) 構造解析に基づき、ジュラルミン系の材料 (A7075P-T651) でコイルケースの設計・製作を行った。要素試験や実際の励磁試験でも所定の強度および安全率を確認した。

今後は走行振動を再現した加振試験を行い、温度上昇

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

などがなく、振動環境中でも安定励磁できることを実証していく予定である。

謝 辞

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) 長嶋賢, 小方正文, 水野克俊, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓: 希土類系高温超電導線材を用いた浮上式鉄道用超電導磁石の構成, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.17-22, 2011
- 2) Mizuno, K., Ogata, M. and Hasegawa, H., "Manufacturing of a REBCO racetrack coil using thermoplastic resin aiming at Maglev application," *Physica C*, Vol.518, pp.101-105, 2015.
- 3) 水野克俊, 杉野元彦, 小方正文: 希土類系高温超電導磁石のための要素コイル製作と評価, 鉄道総研報告, Vol.29, No.11, pp.11-16, 2015
- 4) 土島秀雄, 寺井元昭: 550km/h を達成した山梨リニア実験線車両の超電導磁石システム, 低温工学, Vol. 33, No. 10, pp.656-664, 1998
- 5) Nakasaki, R., Y. Zhang, P. Brownsey, A. Sundaram, D. Hazelton, Sakamoto, H. and Fukushima, T., "Continuous Improvements in Performance and Quality of 2G HTS Wires Produced by IBAD-MOCVD for Coil Applications," Presented at *MT-24 Conference*, Seoul, Korea, 2015.
- 6) Y. Zhang, T.F. Lehner, Fukushima T., Sakamoto H. and D.W. Hazelton, "Progress in Production and Performance of Second Generation (2G) HTS Wire for Practical Applications," Presented at IEEE 2013 International Conference on *Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, October 25-27, 2013, Beijing, China.
- 7) Jin, X., Yanagisawa, Y., Maeda, H. and Takano, Y., "Development of a superconducting joint between a GdBa₂Cu₃O_{7-δ}-coated conductor and Yba₂Cu₃O_{7-δ} bulk: towards a superconducting joint between RE (Rare Earth) Ba₂Cu₃O_{7-δ}-coated conductors," *Supercond Sci Technol*, Vol.28(7), 075010 2015.
- 8) 地藏吉洋, 赤木秀成, 山口孝, 寺井元昭, 忍正壽: 単コイル内蔵型超電導磁石を用いた熱負荷特性の把握と対策試行, 低温工学, Vol. 29, No. 10, pp.516-523, 1994
- 9) JIS H 4000:2014 アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条
- 10) 社団法人 軽金属協会 編: アルミニウムハンドブック (第4版), 社団法人 軽金属協会, pp.42-44, 1990