

# 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

水野 克俊\* 杉野 元彦\* 小方 正文\*

## Experimental Production and Evaluation of Racetrack Coils for On-board REBCO Magnet

Katsutoshi MIZUNO Motohiko SUGINO Masafumi OGATA

We have been developing REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) magnets for Maglev. REBCO is one of high temperature superconducting materials and it has a high current density in high temperature and high magnetic field environments. The REBCO coated conductor will make it possible to raise the operating temperature of the on-board magnets without increasing the coil weight. Since liquid helium is unnecessary for the cooling of the REBCO coils, the operation of the magnet becomes easier than that of the low temperature superconducting magnet. The target of this research is the development of a full-size REBCO coil and the demonstration of the actual magnetomotive force of Maglev. This paper explains the conceptual design of the on-board REBCO magnet and the experimental production of pancake coils which constitute the full-size REBCO coil.

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

鉄道総研では浮上式鉄道への応用を目的として希土類系高温超電導磁石（以下 RE 磁石）の研究開発を行っている。高温超電導体の中でも、希土類系高温超電導線材 (Rare-Earth Barium Copper Oxide: 以下 REBCO 線材) は高温かつ磁場中での電流密度に優れているため、超電導コイル重量を増やすことなく磁石運用温度を大幅に上げることができる。これにより液体ヘリウムを用いない冷凍機直接冷却が実現され、磁石運転の容易化や運用コストの低減が可能になる。加えて、冷凍機の消費電力が低減されるため、車上電源設備の小型軽量化にもつながる。

しかしながら、RE 磁石は製作事例が少なく、そのうちの多くは基礎検証用であった。浮上式鉄道用車載超電導磁石のような大型の RE 磁石開発は、世界的にみても始まったばかりである。REBCO 線材を用いた磁石製作では、従来の低温超電導磁石の技術がそのまま使えるわけではなく、コイル巻線・製作手法も新たに開発する必要がある。さらに、運用温度の上昇に伴い、磁石の冷却・断熱システムについても根本的に見直さなければならない。

著者らはこれまでも検証用の RE 磁石を製作してきており<sup>1) 2)</sup>、コイル製作手法をはじめとする基礎技術を蓄積してきた。現在、次期 RE 磁石製作として実機大・実起磁力の実証機を計画している。本論文では実機級

RE 磁石の製作に向けた基本仕様検討、REBCO コイル製作手法および要素コイル（パンケーキコイル）の加振試験について報告する。

### 2. RE 車載磁石基本設計

浮上式鉄道用車載超電導磁石においては、小型軽量かつ高い信頼性が求められ、製作個数の観点からも低コストな構造であることが望ましい。RE 磁石の高い運用温度を活かして、これらの特徴を兼ね備えた磁石を設計する必要がある。

#### 2.1 RE 車載磁石のコンセプト

RE 車載磁石の開発にあたって、REBCO 線材の特性を考慮しつつ以下のようなコンセプトを設定した。(図 1)

- (1) ふく射シールドを持たない断熱構造
- (2) 2 パルス管冷凍機 -1 圧縮機による冷却システム
- (3) 常時通電方式 (2 極 -1 電源)

ふく射シールドとは真空断熱容器と超電導コイルの間にある断熱構造であり、通常は液体窒素あるいはそれ以下の温度に冷却されている。RE 磁石においてはコイル本体の冷却温度が 40 K を超えることが期待され、ふく射シールドと近い温度域となる。そのため、ふく射シールドを省略して磁石断熱構造を簡素化できる。RE 磁石においては液体ヘリウムだけでなく、液体窒素も用いない寒剤フリーな冷却が可能となる。ただし、これらの寒剤は熱伝達に優れているという利点もあるため、寒材を

\* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

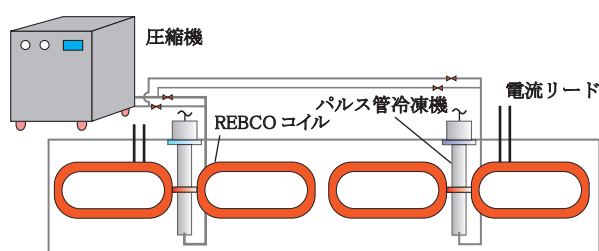


図1 RE 車載磁石模式図

省略する RE 磁石では高純度アルミなど熱伝導率の高い材料をコイル近傍に配置して、各コイルを冷凍機と熱的に接続する必要がある。1 車載磁石あたり 4 極の構成を想定しており、図 1 に示すように 2 台の冷凍機で冷却することとした。ただし、消費電力の低減やメンテナンスの労力を減らすため、1 台の圧縮機で 2 台の冷凍機を運転するものとする。これまでの研究で、2 パルス管冷凍機-1 圧縮機の冷却システムを実際に製作して評価しており、高い冷凍能力が実証されている<sup>3)</sup>。これは、各冷凍機のパルスタイミングの位相を 180° ずらすことにより、圧縮機の負荷が冷凍機のパルス動作によらず均一になるためである。

REBCO 線材においては、超電導接続（超電導体どうしを接続抵抗ゼロで接続する技術）は一部報告されているものの<sup>4)</sup>、検証段階であり RE 磁石での永久電流モードの実現は当面困難であると考えられる。また、市販線材長も数百メートル程度のため、はんだ接続箇所が多く、既存の車載超電導磁石と同等な電流減衰率を RE 磁石で実現できる見込みは小さい。さらに、高い運用温度のため超電導体を用いた永久電流スイッチの製作も困難である。その一方で、近年のスイッチング電源は小型化・高効率化が進んでいるため、重量・消費電力の面での問題は小さいと考えられる。また、励磁電源を搭載することにより、運転状況に合わせた起磁力の調整が可能になる利点もある。

## 2.2 RE 磁石仕様

超電導線材は低温になるほど通電特性が高くなる特徴がある。低温超電導においては臨界温度自体が低いいため、液体ヘリウムによる 4.2 K 冷却が基本であった。REBCO 線材は臨界温度が 90 K 程度であるため、磁石設計に幅がある。例えば、20 T を超えるような超強磁場用途であれば、ヘリウム温度まで冷却するのが一般的であるが、本研究の車載磁石は最大磁場が 5 T 程度であるため、コイル重量と冷凍機重量が最小になるよう運転温度を設定しなければならない。また、通電電流によってコイルインダクタンス（ターン数）や熱侵入も異なってくる。これらの関係を概念的に示したのが図 2 である。この中でも重要になるのが常時通電に伴う熱侵入

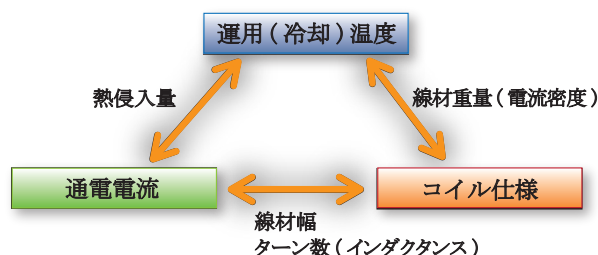


図2 RE 磁石設計における相関関係

(ジュール発熱と温度勾配による熱伝導) であり、電流リードの最適化設計を行うとおおよそ 1 A あたり 0.1 W の熱侵入量となる<sup>5)</sup>。従来の車載磁石の定格 500 A<sup>6)</sup> では電流リードからの熱侵入量だけで 100 W (1 磁石あたり 2 電源の構成の場合) となり、熱侵入の大半を占めてしまう。

その一方で、定格電流を小さく設定するとコイルターン数を増やす必要があり、コイル製作の工数が極端に増えてしまう。特に RE 磁石ではパンケーキコイルと呼ばれる扁平なコイルを複数積層する構造をとることが多く、定格電流に合わせて線材幅が狭くなりすぎるとパンケーキコイルの巻線作業自体が極めて困難になる。

これらの状況を踏まえて、本研究では定格電流を 250 A と設定した。250 A 定格電流時のコイル仕様（1 極あたり）を表 1 に示す。なお、線材重量と運用温度については市販の線材（SuperPower 社 SCS 6050-AP）の特性を実測したうえで概算している。ただし、REBCO 線材の開発は多くの線材メーカー、研究機関等で進められており、今後数年で 1.5 倍程度、あるいはそれ以上の通電特性の向上が見込まれる<sup>7)</sup>。現行の線材基準では運用温度が 30 ~ 40 K 程度となるが、線材の性能向上を考慮すると 40 ~ 50 K に到達すると予測される。そのため、通常は 40 K 以下まで冷却しておき、万一冷凍機が停止することがあっても、熱容量だけで 1 時間以上 50 K 以下の冷却を保持するような安全性を高めた設計も可能になる<sup>8)</sup>。

## 2.3 コイルケース設計

車載磁石内にある超電導コイルは浮上・推進力だけでなく、コイル自身から発生する磁場によって強力なフー

表1 RE コイル仕様（1 極あたり）

定格電流	250 A (常時通電)
パンケーキコイル積層数	8
巻き数	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)

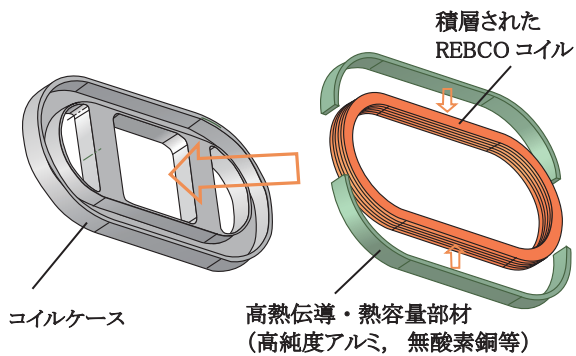


図3 REBCO コイルの構成

プ力も受けている。そのため、REBCOコイルはコイルケースに収めて強度を高めなければならない。また、冷却の観点から、熱伝導率の高い金属を伝熱部材としてコイル周辺に配置することが望ましい（図3）。従来の低温超電導においては、液体ヘリウムを満たした内槽容器がこの役割を果たしていたが、RE磁石では寒剤を用いないため気密構造の必要はなく、設計の自由度が高くなる。

本研究で計画している700kAの実証試験の範囲では走行由来の力は受けないものの、実機同様のフープ力が発生するためコイルケースの設計を進めている。コイル、伝熱部材、コイルケースを含めた重量を1極あたり140kg以下にすることを目標としている。コイルケースには比強度に優れ、機械加工が比較的容易なアルミ合金（ジュラルミン系）の材料を想定している。

従来の内槽容器に使われているステンレス材と比較して、アルミ合金のA7075は同等以上の耐力を有し、密度は1/3程度である。ただし、ヤング率が1/3程度であるため、振動特性に影響が出る可能性もある。そのため、設計と並行してこれらの構造解析を行っている。

### 3. パンケーキコイル製作手法

REBCOコイルに対して通常のエポキシ含浸を行うと、通電特性が著しく低下する問題がある<sup>9)</sup>。一方、含浸を行っていない無垢のコイルは剛性が低いだけでなく、伝熱部材との熱的な接触を保つことができない欠点がある。本研究でのRE車載磁石は寒剤を一切用いないため、信頼性の高いコイル伝熱経路は不可欠な存在である。そのため、コイル冷却と劣化の防止を両立したコイル製作手法が求められる。

#### 3.1 剥離防止と伝熱経路

エポキシ含浸による性能低下は、エポキシ樹脂の熱膨張係数がREBCO線材よりも大きいことに由来する。冷却時にコイルを構成するREBCO線材はエポキシ樹脂の

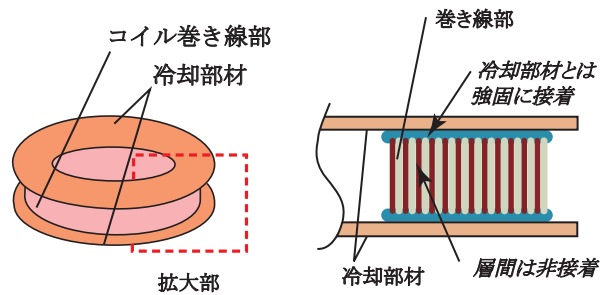


図4 コイル構造概念

熱収縮によって応力を受け、線材が剥離してしまう<sup>9)</sup>。線材剥離を防ぐため含浸をしない、あるいは接着力の弱い樹脂で含浸する方法も上げられるが<sup>2)</sup>、そのような構造は伝熱経路もまた収縮に伴う間隙によって失われるリスクが高い。そこで、本コイル開発においては、パンケーキコイルのターン間のみ非接着とし、コイル端面を強固に伝熱部材と固着させる構造を採用した（図4）。

これを実現する具体的な方法を二通り考案した。一つはコイルターン間絶縁にPTFEテープを用いてエポキシ含浸するというものである<sup>10)</sup>。PTFEはテフロンの特許商標で知られる絶縁材料であり、エポキシ樹脂をはじめ多くの樹脂に対して難接着である。PTFEテープを巻き線時にREBCO線材と共巻きすることによって、ターン間はエポキシ含浸によって接着されない。ただし、共巻き構造のため、コイル端面はPTFEに覆われておらず、エポキシ含浸時に冷却部材と巻き線は強固に接着される（図5.a）。

もう一つの手法は、含浸を一切行わず、冷却部材と巻き線は熱可塑性樹脂によって融着するものである<sup>11)</sup>。熱可塑性樹脂はエポキシに代表されるような熱硬化性樹脂と比較して粘性が高く、コイルターン間に浸透する恐れがない。本研究ではニュクレルの商標で知られるエチレンとメタクリル酸の共重合体を用いており、低温でも安定

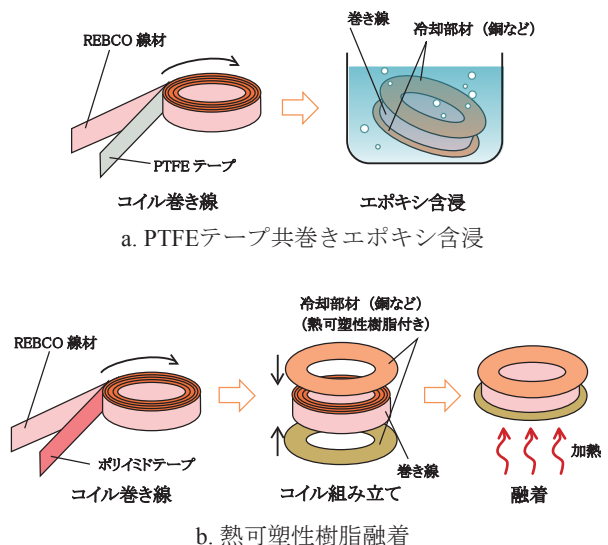


図5 コイル製作手法

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

した接着性を有している<sup>11)</sup>。冷却部材に熱可塑性樹脂を仮施工しておき、巻線と冷却部材を組み立てた状態で全体を加熱して融着させる（図 5. b）。

3.2 パンケーキコイル製作

提案する二つの手法で、それぞれ一個ずつパンケーキコイルを製作した。パンケーキコイルの仕様は表 1 で示したものであり、最終的には積層して 700 kA 実証試験に用いる予定である。

REBCO 線材には SuperPower 社製 SCS6050-AP（6 mm 幅）を使用した。使用線材長は各コイル 950 m であり、長さ 100 m の線材を 10 本はんだ接続して巻線した。また、積層のためコイルは薄肉化されており、冷却板が

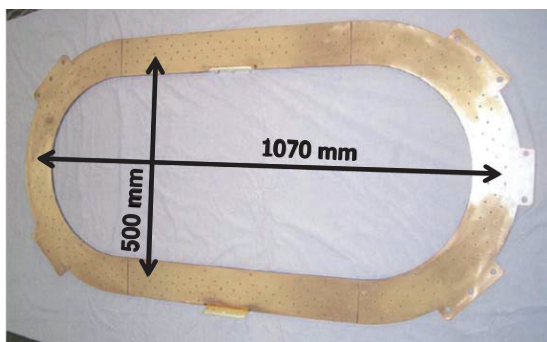


図 6 パンケーキコイル外観

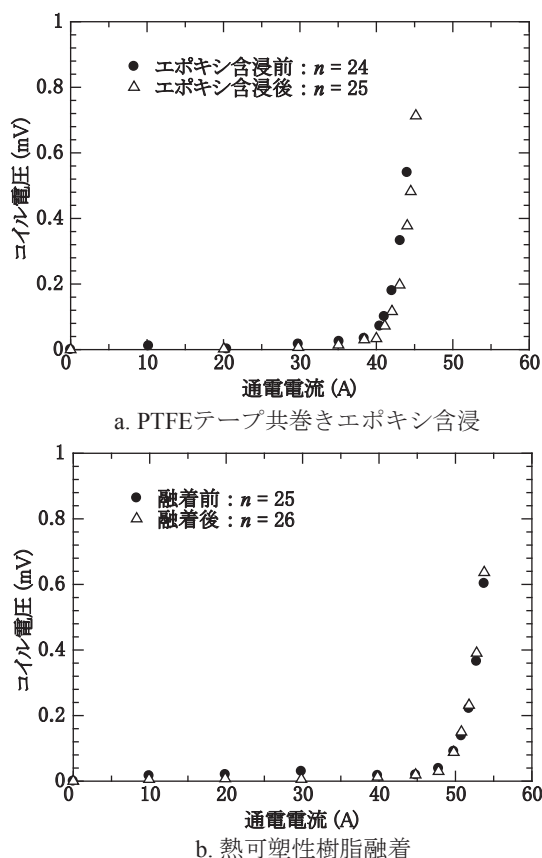


図 7 液体窒素中での電流 - 電圧特性

巻線両面に接着されていながら厚みは約 8.5 mm となっている。外観写真を図 6 に示す。製作したパンケーキコイルの健全性を確認するため、エポキシ含浸および熱可塑性樹脂融着前後で液体窒素中において通電試験を行った。各パンケーキコイルの液体窒素中での電流 - 電圧特性を図 7 に示す。

いずれのコイルでも含浸（融着）前後で電流 - 電圧特性に有意な差は現れず、 $n$  値 ( $V \propto I^n$  と、コイル電圧と通電電流を近似したときの指数  $n$ ) もすべて 23 以上あり健全であることが確認できた。なお、PTFE 共巻きコイルの方が臨界電流が 10 A ほど低い、これは巻線に用いた REBCO 線材の通電特性のばらつきに起因している。

4. パンケーキコイル加振試験

実際の車載超電導磁石は車両走行による振動環境中で使用されるため、剛性や耐振性等の浮上式鉄道車両に求められる機械的特性を満たす必要がある。実走行と等価な加振試験を行うには、パンケーキコイルを積層してコイルケースに収めた状態で行う必要があるものの、事前評価としてパンケーキコイル単体での加振試験を実施した。

4.1 パンケーキコイル加振試験装置

本試験にあたり、液体窒素による冷却状態でパンケーキコイルを加振できる試験装置を製作した。基本は開放型の液体窒素容器であり、容器上部に設けた梁にバネでパンケーキコイルを吊るす構造となっている。液体窒素槽の下部には加振機が固定されており、窒素槽とはベローズを介してつながっている。コイルを加振機のロッ

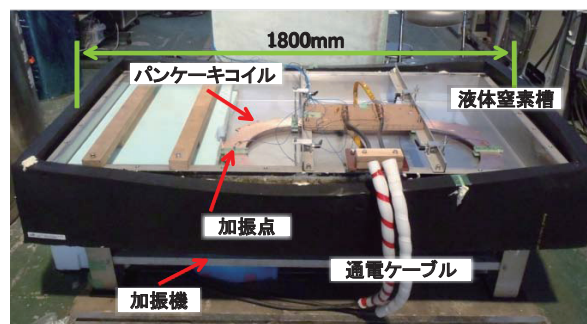


図 8 パンケーキコイル加振装置外観

表 2 加振装置仕様

窒素槽形状	1800 mm × 920 mm × 145 mm
加振機型番	EMIC 9514-AN/AS
最大変位	16.5 mm
最大加振力	300 N
加振周波数	5 Hz ~ 3 kHz

ドと締結することにより、任意の加振力をコイルに与えることができる。装置外観を図8に、仕様を表2に示す。

### 4.2 加振試験条件

実走行並の振動加速度をパンケーキコイル単体を与えると、剛性が低いため現実にはありえない大きな変形量となってしまう。そのため、本試験はコイル変形量を基準として行うこととした。加振ロッドはコイル曲線部中央部に固定され、コイル全周に沿って加速度センサを取り付けている。加振条件を最大変位1mm、加振回数18万回、加振周波数は1次曲げモード（約11Hz、FEMで事前に予測）とし、加振の前後で通電特性や固有モードに変化が現れるかを評価した（図9）。なお、1mmの変位は想定される実際の変形量よりも大きな値であり、過負荷条件での試験となる。

### 4.3 加振試験結果

加振前後での通電特性を表3にまとめる。臨界電流( $I_c$ )に変化は見られず、 $n$ 値についても変化は確認されなかった。すなわち、コイルの通電特性が劣化することはないと言えらる。

次に振動特性の一例として、PTFE共巻きタイプのパンケーキコイル加振後のウォーターフォール図を図10に示す。同図は加振周波数に対する、コイル振動加速度と振動周波数の分布を示したものである。加振機周波数が11Hz前後のときに、コイル振動加速度も同様の周波数のピークを示し、予想していた1次曲げモードに対応する結果となった。仮に、構造部材の破損等が起きれば剛性が大きく低下し、加速度のピーク位置に変化がみられることとなる。また、構造部材の破損に至らなくても部分的な接着面の剥離等が発生すれば、いわゆるびり

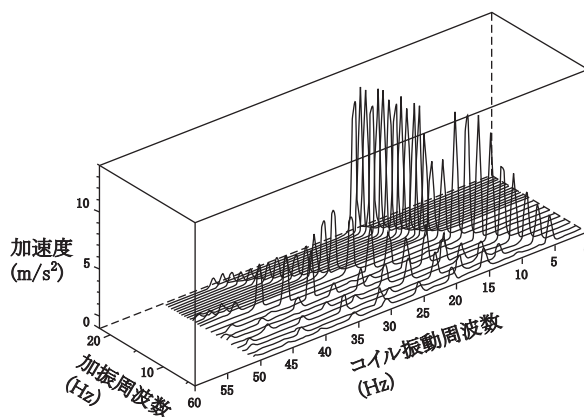


図10 PTFE共巻きタイプのパンケーキコイルの振動特性（18万回加振後）

振動が発生し、コイル高調波成分が増加することが予測される。しかしながらPTFE共巻きタイプ、熱可塑性樹脂タイプいずれのパンケーキコイルでも、18万回の加振によって固有振動数や高調波成分の変化は確認できなかった。

これらの試験結果から、両コイルとも振動によって電氣的、機械的な劣化や何らかの変化を起こしていないことが確認された。

今回の試験はコイル変形量を基準とした試験であり、実走行における加速度に対する評価はできていない。ただし、この加振試験の位置づけは製作したパンケーキコイルの機械的特性の確認であり、700kA実証試験や、その後に計画しているフルコイルでの加振試験を行うためには不可欠な工程である。

## 5. まとめ

RE車載磁石が実現できれば、液体ヘリウムを用いない磁石運用が可能になり、磁石運用コストが低減される。また、REBCO線材の高い温度域での優れた通電特性のため、コイル重量を増やすことなく運用温度を上げられる見込みがある。運用温度の上昇に伴い冷凍機の消費電力も低減されるため、車上電源設備の小型軽量化にもつながる。

実機大・実起磁力のRE磁石の開発のため、磁石の基本仕様の検討や検証試験を行い、以下のような設計指針および試験結果を得た。

(1) RE磁石においては、永久電流モードは実現に向けた課題が複数存在しており、現状では外部電源による常時通電が最も確実であると考えられる。常時通電では電流リードからの熱侵入が課題となるため、定格電流を250Aに設定した。250A設計ならば、コイル製作性に問題はなく、熱侵入量も市販機レベルの冷凍能力で十分に対応できる程度である。

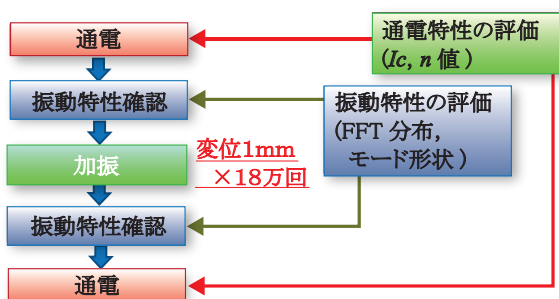


図9 試験フロー

表3 コイル加振前後での通電特性

	PTFE共巻きタイプ		熱可塑性樹脂タイプ	
	加振前	加振後	加振前	加振後
$I_c$ ※	46 A	46 A	53 A	54 A
$n$ 値	22	24	24	26

※  $I_c$  はコイル電圧 0.5 mV で定義

## 特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

(2) RE 車載磁石には REBCO コイルの劣化を防ぎつつ、伝熱に優れたコイル構造が求められる。PTFE テープを用いた手法と熱可塑性樹脂を用いた手法を用いて、RE 磁石用のパンケーキコイルを製作した結果、いずれのパンケーキコイルでも、冷却時熱応力や繰返し曲げ試験によって通電特性および剛性が変化することはなかった。

今後は残りのパンケーキコイルの製作と並行して、コイルケースなど周辺部品の設計製作を行い、700 kA 実証試験を実施する計画である。

## 謝辞

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

## 文献

- 1) 水野克俊, 小方正文, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓, 長嶋賢: モバイル高温超電導磁石の保冷特性および永久電流モード特性, 日本 AEM 学会誌, Vol.19, No.2, pp.249-254, 2011
- 2) Mizuno, K., Ogata, M. and Nagashima, K., "Fabrication of 5 T magnet using 2G wires directed at Maglev application," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.23(3), 3600104, 2013.
- 3) 宮崎佳樹, 池田和也, 水野克俊, 長嶋賢, 高橋貞充, 平井靖夫: 並列パルス管冷凍機を用いた車載超電導磁石冷却システムの開発, 低温工学論文誌, Vol.48, No.7, pp.377-381, 2013
- 4) Jin, X., Yanagisawa, Y., Maeda, H. and Takano, Y., "Development of a superconducting joint between a Gd-Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>-coated conductor and Yba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> bulk: towards a superconducting joint between RE (Rare Earth) Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>-coated conductors," Supercond Sci Technol, Vol.28(7), 075010, 2015.
- 5) 荻原宏康: 低温工学概論 超伝導技術を支えるもの, 東京電機大学出版局, pp.273-279, 1999
- 6) 五十嵐基仁, 根本薫, 奥富健志, 平野智士, 桑野勝之, 草田栄久, 寺井元昭, 栗山透, 戸坂泰造, 田崎賢司, 丸川宏太郎, 花井哲, 山下知久, 柳瀬康人, 山地睦彦, 中尾裕行: 永久電流高温超電導マグネットの開発—磁気浮上式鉄道への適用性検証—, 低温工学論文誌, Vol.39, No.12 pp.651-659, 2004
- 7) Fukushima, T., "Performance and quality improvements in superpower 2G HTS wires," Presented at MT-23 Conference, Boston, USA, 2013.
- 8) 水野克俊, 小方正文, 長谷川均: 浮上式鉄道用の希土類系高温超電導磁石の熱特性評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.9, pp.5-10, 2014
- 9) Takematsu, T., Hu, R., Takao, T., Yanagisawa, Y., Nakagome, H., Uglietti, D., Kiyoshi, T., Takahashi, M. and Maeda, H., "Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation," Physica C, Vol.470, pp.674-677, 2010.
- 10) Mizuno, K., Ogata, M. and Hasegawa, H., "Manufacturing of REBCO coils strongly bonded to cooling members with epoxy resin aimed at its application to Maglev," Physica C, Vol.506, pp.138-142, 2014.
- 11) Mizuno, K., Ogata, M. and Hasegawa, H., "Manufacturing of a REBCO racetrack coil using thermoplastic resin aiming at Maglev application," Physica C, in press.