

冷却系の簡素化が可能な 5 T 級希土類系高温超電導磁石

水野 克俊* 小方 正文* 長嶋 賢**

5 T Class RE Magnet with Simplified Cooling System

Katsutoshi MIZUNO Masafumi OGATA Ken NAGASHIMA

REBCO coated conductor has several superior characteristics to the other superconductors. Its critical temperature is above the boiling point of liquid nitrogen, and its critical current is quite high even in the environment of high magnetic field. Therefore, REBCO coated conductor can raise the operation temperature of superconductor applications. Higher operation temperature means lower energy consumption of the magnet cooling system. In the case of maglev application, it also means downsizing of the on-board power source and leads to saving of the overall weight of the vehicle. We fabricated a trial RE magnet that can generate 5 T. The magnet demonstrates that magnetic flux density of 5 T is achievable at 45 K and the cooling system including the cryocooler and the thermal insulation structure can be simplified because of its high operation temperature.

キーワード：RE, 希土類系高温超電導線材, ふく射シールド, 単段冷凍機

1. はじめに

近年、液体ヘリウムは需要の増加から価格が上昇しており、この10年で約二倍になった¹⁾。価格の問題だけでなく、ヘリウムは埋蔵量にも限りがあり、液体ヘリウムが不要な高温超電導機器の開発が広く行われている。高温超電導体にもいくつか種類があり、その中でも磁気浮上式鉄道のような高磁場磁石への応用が期待されているのが YBCO 線材に代表される希土類系高温超電導線材（以下 RE 線材）である。RE 線材は磁場中での通電特性に優れているため、磁気浮上式鉄道用車上磁石に応用できれば、コイル重量を増加させることなく運用温度を飛躍的に向上できる見込みがある。運用温度が上がれば冷却系の消費電力が低減される利点がある。特に、車上超電導磁石は軽量であることが求められるので、RE 線材の適用は運用温度の上昇に伴う冷凍機本体および電源系の小型・軽量化という利点がある²⁾。しかしながら、機器応用が可能なレベルの RE 線材が入手可能になったのは近年であり、本格的な機器開発は始まったばかりである。

著者らは RE 線材の磁気浮上式鉄道用車上超電導磁石への応用を念頭に研究を行っており、40 K を越える高温域で 5 T の磁場が発生可能な超電導磁石を製作した。

既存の車上超電導磁石と比較すると形状も異なり小型のものであるが、最大発生磁場や電流密度は実機と同等である。すなわち、RE 線材がおかれる状況は実機に適用したときと同じ条件になる。本論文では、5 T 級小型超電導磁石の製作と励磁試験結果を報告する。

2. 希土類系高温超電導線材の特徴

高温超電導としてはビスマス系および RE 線材（図 1）が広く知られている。ビスマス系超電導線材は実用化されたのが RE 線材よりも早く、臨界温度が高い特徴があり、超電導ケーブルなど応用に向けた実証試験が進められている³⁾。一方で RE 線材は開発されて間もないものの、磁場中での通電特性に優れ、高い剛性を持つ Hastelloy 合金を基板とした構造であるので加速器や NMR、磁気浮上式鉄道用車上磁石など高磁場応用が期待されている。

ただし、RE 線材の機器応用に関してはまだ課題があり、特に問題となったのがエポキシ樹脂含浸による性能低下である⁴⁾。従来の低温超電導コイルに対しては一般的に行われてきた手法であるものの、RE 線材をエポキシ含浸すると臨界電流が著しく低下する。エポキシ樹脂は熱収縮率が RE 線材よりも大きいので、冷却時にコイル内部に数 MPa を超える熱応力が発生する。RE 線材は Hastelloy 基板や超電導層などからなる積層構造を有するため、引張や曲げ応力には強いものの、剥離力には

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

** 浮上式鉄道技術研究部

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

極端に弱いことが性能低下の原因である。また、含浸だけでなく遮蔽電流や熱暴走時の保護方法などの課題も存在するため、機器応用が十分に進んでいないのが現状である。

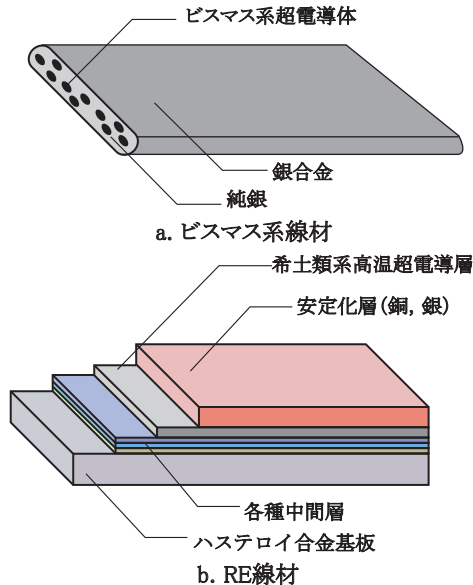


図1 高温超電導線材の一般的な構造

3. 希土類系高温超電導線材を用いた磁石製作

RE線材の磁気浮上式鉄道用車上磁石への応用に向けて、小型ながらも5 Tの磁場が発生可能なRE系高温超電導磁石を製作した。磁石に用いるRE線材のおかれる状況は、実機に適用したときと同等の経験磁場となる。すなわち、本RE高温超電導磁石において、高い運用温度で5 Tの磁場が実現できれば、実機においても同様の運用温度で車上磁石システムが成立することになる。

3.1 希土類系高温超電導線材評価試験

現在市販されているRE線材は個体差が大きく、線材ごとに臨界電流の経験磁場に対する依存性を評価する必要がある。そのため、REコイル製作用に準備した線材からサンプルを切り出し評価を実施した。50 Kにおける臨界電流磁場角度依存性を図2に示す。

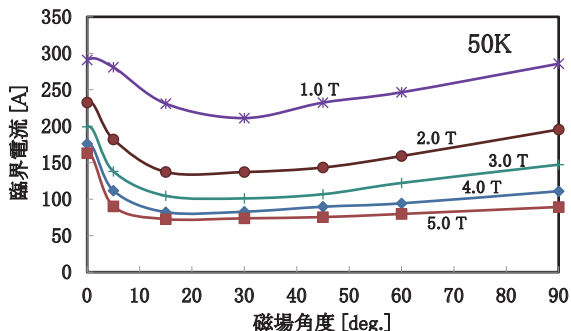


図2 50 Kにおける臨界電流磁場角度依存性

RE線材はテープ状の形状をしているため、経験磁場の絶対値だけでなく角度も臨界電流に影響する。特徴としては、線材に対して平行な経験磁場(0°)に対しては臨界電流が高くなる。コイル化した際には経験磁場の強度や角度は場所により異なるので、厳密な設計には磁場解析が不可欠である。ただし、50 Kかつ目標とする5 Tの条件では、角度によらず80 A程度の通電電流が見込まれることが図2よりわかる。

3.2 コイル形状設計

次に80 Aの通電電流で5 Tの磁場が発生可能なコイル形状を検証した。市販のRE線材は販売長が数百メートル程度であり、コイル化技術も十分に成熟していないため、製作が比較的容易でトラブルが発生した際にも修繕が容易な構造とする必要がある。そのため、コイルの構造としてダブルパンケーキコイルと呼ばれる扁平なコイルを複数製作し、それらを積層する構造とした(図3)。

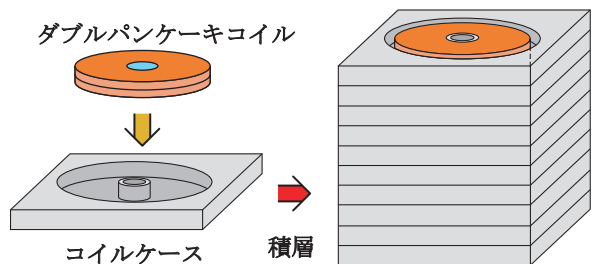
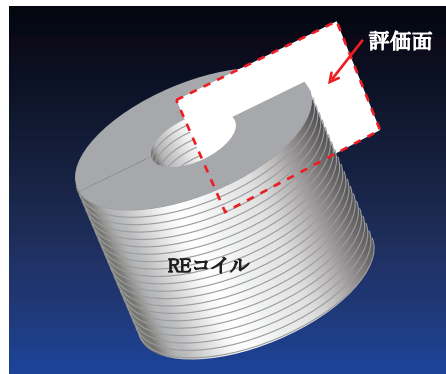
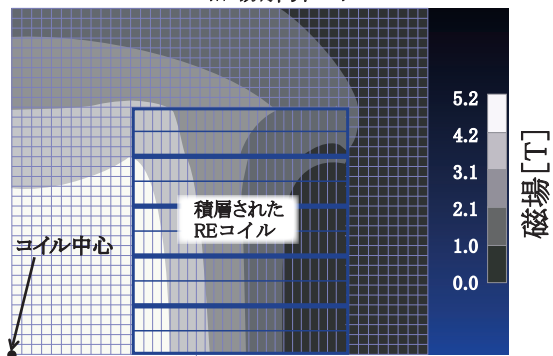


図3 5 T発生用REコイル構造



a. 磁場解析モデル



b. 磁場分布(対称性を考慮した1/4モデル)

図4 REコイル磁場解析

現在入手性の高い RE 線材長は 100 m であったため、シングルパンケーキコイルあたり 100 m、すなわちダブルパンケーキコイル一つで 200 m の RE 線材を用いると仮定した。このとき、5 T 発生に必要な積層数を磁場解析によって求めたところ、ダブルパンケーキコイルを 10 積層時にコイル中心磁場 5 T が達成できることが明らかになった (図 4)。

3.3 ユニットコイル製作

図 3 にあるように各ダブルパンケーキコイルはコイルケースに収められた構造になっており、本論文ではこれらをユニットコイルと呼ぶことにする。冷却時の熱伝導と機械的強度の向上のため、ケースの材質は無酸素銅とした。RE 線材にはエポキシ樹脂を含浸材として用いることができないので、従来から実績のあるパラフィン⁴⁾と、独自に検証を進めているシアノアクリレート樹脂⁵⁾をそれぞれ用いた。図 5 および表 1 にユニットコイルの外観と仕様を示す。

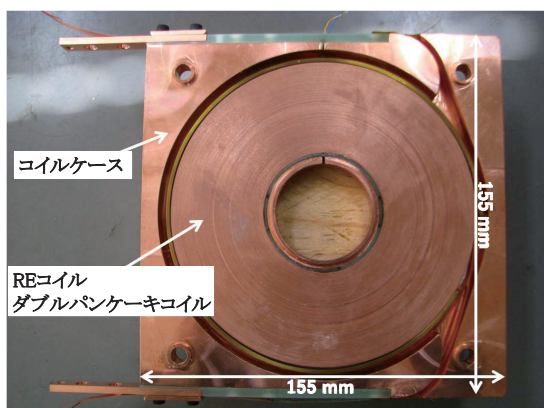


図5 ユニットコイル外観

表1 ユニットコイル仕様

RE 線材	SuperPower Inc.: SCS4050AP
線材幅 / 厚さ	4.1 mm / 0.1 mm
内径 / 外径	50 mm / 129 mm から 135 mm
巻数	672 ターン (336 ターン × 2 層)
使用線材長	196 m
コイルケース寸法	155 mm × 155 mm × 10 mm

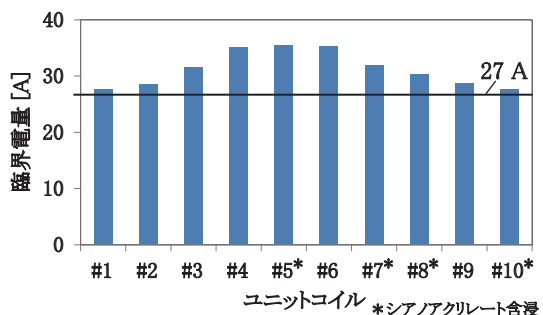


図6 77 K におけるユニットコイル臨界電流

個別のユニットコイルの臨界電流を液体窒素中で評価し、その結果を図 6 に示す。

線材通電特性から予測される臨界電流は 27 A 程度であり、含浸手法によらず全てのユニットコイルでこれを越えていた。そのため、これらのユニットコイルは積層しての通電には問題ないと判断した。

臨界電流にバラつきがあるのは、線材自体の通電特性の個体差に起因する。すなわち、線材の特性を完全に把握しないとコイル化した時の厳密な臨界電流の予測はできないことを意味している。コイルに用いるすべての線材の通電特性評価を実施するのは費用や時間の観点から現実的ではなく、簡易かつ高精度なコイル設計手法の確立は今後課題になると考えられる。

3.4 磁石構成

今回の磁石製作においては、RE 磁石の利点を実証することも目的としており、RE コイルを収めるクライオスタットも専用に製作した。

RE 磁石の最大の利点は高い運用温度であり、超電導磁石の用途によっては冷却温度が 40 K 程度でも十分な磁場が得られる見込みがある。超電導機器の冷却には極低温冷凍機が用いられることが多く、冷却温度と冷凍機に必要なエネルギーには相関がある。冷却温度が 4.2 K (液体ヘリウム温度) と 40 K の場合、逆カルノー効率 (ヒートポンプ効率の理論限界) で比較すれば、その差は 10 倍以上になる。そのため、運用温度の向上は消費電力の低減を意味し、磁気浮上式鉄道のような重量の制約がある環境での使用では電源系の小型軽量化という利点も挙げられる。

これに加え、冷凍機の効率が向上すれば断熱構造を簡素化することができる。通常の超電導磁石は、超電導コイルと真空槽の間にふく射シールドと呼ばれる薄肉の金属容器でできた断熱構造がある。その名のとおり、ふく射による伝熱を低減する効果があるものの、超電導コイルに対して真空槽の大きさが肥大する原因でもある。磁石の使用者からすれば真空槽はデッドスペースに他ならず、有効に使える磁場空間が限られてしまう。磁気浮上式鉄道においては地上コイルに対する鎖交磁束によって浮上・推進・案内力を得ている。そのため、車上磁石のふく射シールドが不要になり超電導コイルを真空槽に接近させることができれば、鎖交磁束は増加する。すなわち、車上磁石を高温超電導化すれば、従来より起磁力の小さい超電導コイルであっても同等の浮上・推進・案内力が得られることになる。

製作した RE 磁石もふく射シールドを持たない構造であり、RE コイルと真空槽の隙間は 5 mm しかなく、真空槽外側表面でも 20 mm となっている。磁石構造の模式図および概観を図 7, 8 に示す。

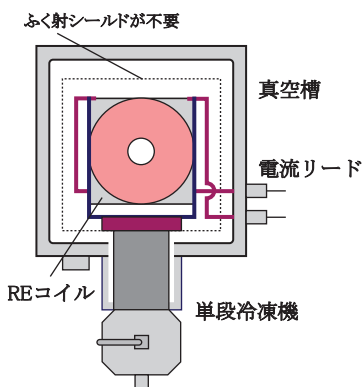


図7 RE磁石構造



図8 RE磁石外観

RE磁石のコイル部はユニットコイルが10積層された構造となっており、3.2節で述べた通り80A通電時にコイル中心磁場5Tとなる設計である。電流密度が低ければ、必要な超電導線材長も増え、重量の増加を招いてしまう。各ダブルパンケーキコイルの絶縁層は最低限の厚みにし、コイルケースについても肉厚を最適化したことにより、定格通電時のコイル電流密度は130 A/mm²と高い値を実現している。なお、電流リードは若干の余裕を持たせてあり、最大100Aまで通電可能であり、このときの発生磁場は6Tを越える見込みである。その他の磁石仕様を表2に示す。

表2 RE磁石仕様

REコイル部寸法	155 mm × 155 mm × 101 mm
使用RE系線材長	約2 km
定格電流	80 A
電流密度(定格運転時)	130 A/mm ²
クライオスタット寸法	400 mm × 400 mm × 210 mm (冷凍機ユニットを除く)
クライオスタット材質	アルミニウム
冷凍機	1段GM冷凍機
電流リード容量	100 A

4. 5T級希土類系高温超電導磁石励磁試験

強磁場発生可能なRE磁石は製作された前例が極めて少なく、本磁石のように40Kを越える運用温度となると世界的に見ても前例がない。そのため、励磁時の挙動だけでなく、耐久性など不明な点が多い。そこで、コイル温度を変化させての励磁試験と繰り返し励消磁による耐久性試験を実施した。

4.1 最低到達温度における通電時温度上昇

温度制御を行わず最低到達温度で通電を行うことにより、電流リードの健全性と磁場発生の確認をまず行った。通電は階段状に行っており、掃引速度0.1 A/sで所定の電流値まで通電し、その後20分間保持して温度と磁場の安定が確認された時点で次の設定電流に移行した。電流リード設計値の100Aまで通電を行い、このときの温度は約25Kであり通電前と比較して1Kの温度上昇であった(図9)。通電時は電流リードにおけるジュール発熱があるためであり、冷凍機能力を考慮すれば1K程度の温度上昇は妥当であるといえる。コイル中心磁場については、試験結果から5T発生に必要な電流は83Aであることがわかり、磁場解析による予想値80Aよりは若干大きくなっている。これは図10に示すように、RE線材中に磁場を打ち消す方向の渦電流(遮蔽電流)が発生するためである。遮蔽電流はいわば局所的な永久電流であるので、通電を終了した後もコイル中心磁場0.2

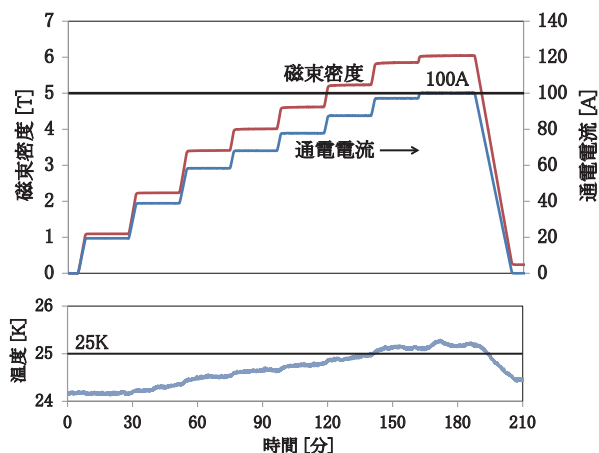


図9 温度制御なしでの通電電流とコイル中心磁場

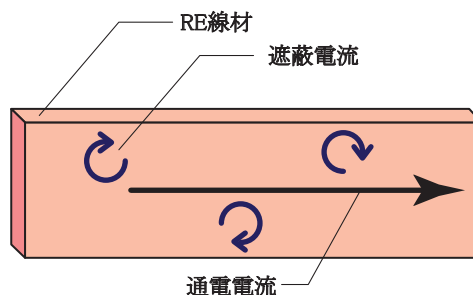


図10 RE線材中の遮蔽電流

Tが発生している。

RE 線材における遮蔽電流は他の超電導線材と比べても格段に大きく、コイル設計を難しくしている要素である⁶⁾。MRI や NMR などの極めて高い磁場均一性が求められる用途では重大な問題になりうる。

4.2 高温域での励磁試験

次に RE コイル温度を制御しての励磁試験を実施した。40 K、45K、50K の設定温度で励磁した時の通電電流に対するコイル中心磁場およびコイル電圧の関係を図 11～13 に示す。

40 K においては電流リード容量の 100 A まで安定して通電することができ、その時のコイル中心磁場は 6.2 T であり目標の 5 T を越えることができた。45 K では 80 A 通電時に 5 T を実現できた。最低到達温度で励磁

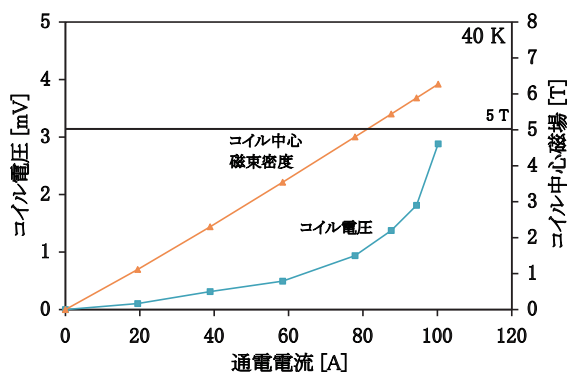


図 11 40 K における励磁試験結果

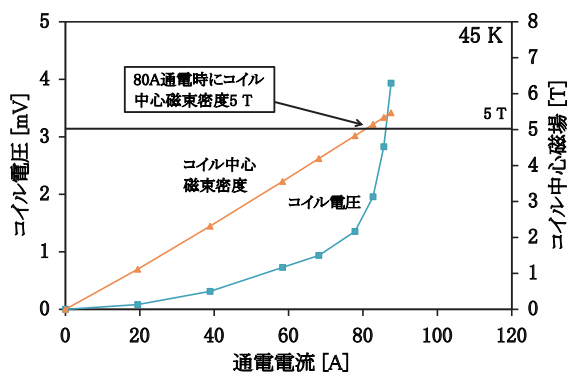


図 12 45 K における励磁試験結果

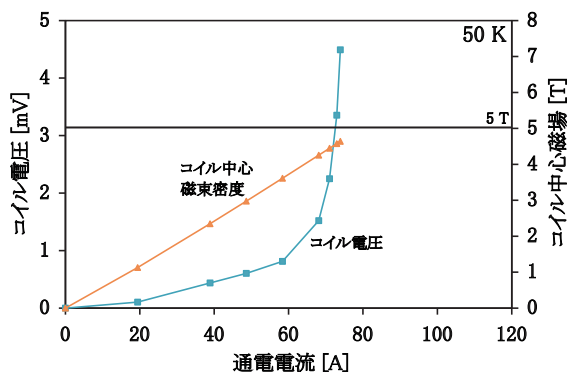


図 13 50 K における励磁試験結果

した際は 5 T 発生に 83 A 必要であったので電流値に明確な差があることがわかる。これは、遮蔽電流は超電導線材の臨界電流に近い条件ではその影響が小さくなるためである。45 K においては、83 A 以上の電流で保持してもコイル電圧は上昇し続けたので通電を中止した。50 K では 70 A 以上で同様にコイル電圧が不安定となった。コイル電圧の発生はジュール発熱を意味し、超電導体は温度が高くなるほど臨界電流が減少して電圧発生が大きくなる。そのため、ある一定のコイル電圧を越えると冷却とのバランスが崩れ、この悪循環によって最悪の場合超電導コイルの焼損に至る。

超電導体に限らず、いかなる物質も絶対零度に近づくほど比熱が小さくなり、発熱時の温度伝搬は早くなる。低温超電導では、発熱があれば温度上昇はコイル全体に即座に伝搬し(クエンチ)、コイル焼損に至る前に電圧上昇を検出して電源の遮断ができる。一方で高温超電導では温度伝搬が極めて遅く、発熱による電圧発生が局所的である。そのため、コイル電圧上昇を検知したときには、すでに線材が部分的に再起不能な損傷を負っている可能性が高い。また、コイルが大型化するほどノイズの影響を受けやすくなってしまい、より電圧上昇の検出は困難になる。磁気浮上式鉄道应用到に限らず、高温超電導コイルの異常検知は極めて重要な技術であり、今後検証を進めていく予定である。

コイル電圧 2 mV で比較した時の各温度での発生磁場を表 3 にまとめた。なお、2 mV で評価したのはいずれの温度でも安定して通電できた条件であるためである。

表 3 コイル全電圧 2 mV で評価した発生磁場

コイル温度	40 K	45 K	50 K
通電電流	96 A	83 A	70 A
コイル中心磁束密度	6.0 T	5.2 T	4.4 T

線材特性からすると、50 K で 5 T の磁場条件では 80 A 程度まで通電できるはずであったが、実際には 70 A 程度であり、5 T に到達できなかった。前章でも述べたとおり、市販の RE 線材には個体差があり今回コイル製作に準備した線材でも通電特性にかなりの差があったことになる。そのため、目標とする 5 T は 45 K で達成された。

RE 線材は発展途上の超電導線材であり、企業、研究機関、大学等により通電特性は日々向上している。今後の技術開発を考慮すれば、50 K の運用温度は達成可能であると考えられる。そのため、50 K での運用を想定した高効率パルス管冷凍機の研究開発も併せて進めている⁷⁾。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

4.3 耐久性試験

目標とする 5 T は達成することができたものの、運用を繰り返して行く中で RE コイルの通電特性が劣化していく可能性も否定できない。長期的な運用で劣化の原因となりうるのは、冷却・昇温時の材料の熱収縮率の違いによる熱応力、励磁した際の自己磁場による電磁力（フープ力）が主に挙げられる。磁気浮上式鉄道においては、走行時の振動や地上コイルによる電磁加振も加わる。

本 RE 磁石は含浸材にワックスとシアノアクリレート樹脂を用いており、冷却時に含浸材に部分的なクラックが発生することにより熱応力を逃がす構造となっている。そのため、初回冷却でクラックが一度発生してしまえば、それ以降は大きな熱応力が発生することはないと考えられる。

今回の耐久性試験では電磁力によるものを検証することとし、製作した RE 磁石に対して 5 T の励消磁作業を 100 回繰り返し、その前後で RE コイルの発生電圧に変化がないか評価した。繰り返し励消磁および、その前後のコイル電圧評価試験はいずれもコイル温度 40 K で実施し、コイル電圧評価試験時はコイル電圧が確認しやすいように約 6 T (100 A) まで励磁した。耐久性試験前後での 100 A 通電時のコイル電圧評価試験結果を図 14 に示す。なお、ここではより詳細に評価するため、RE コイル全体の電圧に加え、各ユニットコイル(#1～#10)の電圧も示す。

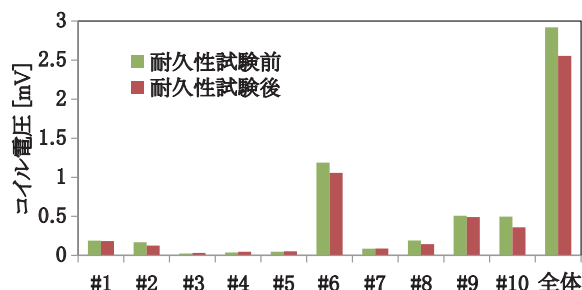


図 14 耐久性試験後の各ユニットコイル電圧

ユニットコイルごとの電圧発生が均一でないのはコイルごとの性能のバラつきに加え、経験磁場もコイルの積層位置によって異なるためである。耐久性試験後の方が全体的に発生電圧は少なくなっているものの、その差は僅かであり、確認された差は通電特性の変化を示すような明確なものではなかった。経験磁場が同じ 5 T であっても超電導磁石の規模によって電磁力は異なり、実機の場合にはこれに加えて電磁加振等に対する耐久性も評価する必要がある。今後、耐久性に関する検証を深めていく予定である。

5. まとめ

RE 線材を磁気浮上式鉄道に適用できれば、運用温度の向上に伴う冷却系の省電力化と車上電源設備の小型軽

量化が期待できる。RE 線材に実機に適用できるだけの通電特性があること、および適用した際の利点を実証するため、小型ながらも実機と同等の 5 T の磁場が発生可能な RE 磁石を製作した。得られた成果を以下に示す。

- (1) 目標とする 5 T の磁場は 45 K の RE コイル温度で実現され、40 K ならば磁場は 6 T に到達した。電流密度についても、5 T 発生時に 130 A/mm² と機器応用が十分現実的な高い値であり、RE 線材の高温、高磁場下での優れた通電特性が実証された。
- (2) 40 K を越える高い運用温度では、冷凍機の効率が 4.2K (液体ヘリウム温度) に比べて格段に高くなる。そのため、ふく射シールドと呼ばれる断熱機構を省略することができる。ふく射シールドがなくなった分、超電導コイルと真空槽の隙間を短くでき、コイルから発生する磁場空間をより有効に活用できる。今回製作した RE 磁石では RE コイル表面と真空槽の隙間は 5 mm まで狭めることができた。
- (3) 100 回におよぶ励消磁による電磁力耐久性試験を行ったものの、耐久性試験前後で通電特性に変化は確認されなかった。

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) 財務省ホームページ，財務省貿易統計資料より：<http://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm>
- 2) 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
- 3) 大屋正義ら：高温超電導ケーブルの実線路実証試験，第 86 回低温工学・超電導学会講演概要集，p.11，2012
- 4) T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi and H. Maeda, "Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation," *Physica C*, Vol.470, pp.674-677, 2010.
- 5) 水野克俊，小方正文，長嶋賢：希土類系高温超電導線材を用いた超電導コイル製作手法の提案，鉄道総研報告，Vol.26，No.5，pp.11-16，2012
- 6) 柳澤吉紀ら：高温超電導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発 (2) -REBCO/LTS NMR 磁石における磁場の時間安定度と空間均一度の評価-，第 86 回低温工学・超電導学会講演概要集，p.211，2012
- 7) 宮崎佳樹，池田和也，水野克俊，長嶋賢：並列パルス管冷凍機による高温超電導磁石冷却システムの開発，鉄道総研報告，Vol.26，No.5，pp.17-22，2012