

電磁加振試験に用いる希土類系高温超電導磁石の監視・保護手法の検証

水野 克俊* 田中 実* 小方 正文*

Monitoring and Protection Method for a REBCO Magnet Designed for Electromagnetic Vibration Tests

Katsutoshi MIZUNO Minoru TANAKA Masafumi OGATA

We have been developing REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) magnets for the maglev. REBCO is one of the high temperature superconducting materials and is suitable for the on-board magnets of the maglev because of its high current density under the condition of a high magnetic field. A real-scale REBCO coil has been fabricated and its basic performance has been confirmed. As the next research target, electromagnetic vibration tests of ground coils by means of the real-scale REBCO coil is planned. Since the electromagnetic vibration tests usually takes several weeks, a monitoring and protection system is necessary for the REBCO magnet. If a normal conduction transition is undetected, the REBCO coil will burn out due to the Joule heating in the normal conducting region. A high-sensitive coil voltage detection method can be an effective measure against the burn-out.

キーワード：REBCO，希土類系高温超電導線材，電磁加振，保護，熱暴走

1. はじめに

希土類系 (Rare-Earth Barium Copper Oxide : RE-BCO) 高温超電導線材は、他の高温超電導材料と比較して磁場中での電流密度に優れている特徴がある。そのため、超電導磁石など強磁場応用においても運用温度を高く設定でき、様々な機器応用が検討されている。鉄道総研では浮上式鉄道への応用を目指した研究開発を続けており、すでに実機大の希土類系高温超電導コイルを製作し、浮上式鉄道に求められる起磁力 (通電電流とコイルターン数の積) 700 kA を実現している¹⁾。さらに、走行時を想定した機械加振試験も実施しており²⁾、振動環境中での安定励磁を実証した。

実用化に向けては、コイル単体ではなく超電導磁石としての完成度を高めていくとともに、異常時を想定した監視・保護手法の確立も不可欠である。超電導磁石においては、発熱など何らかの外乱で部分的な常電導転移が発生すると、常電導転移箇所でのジュール発熱により常電導範囲が拡大していき、最終的にはコイル全体が大きく発熱して超電導磁石としての機能を喪失してしまうクエンチと呼ばれる現象が存在する。クエンチを発生させない、あるいは発生しても超電導磁石が損傷しないことが機器応用においては必須である。高温超電導磁石では、冷却方法や超電導コイル等を構成する材料の比熱

も低温超電導磁石とは大きく異なるため、クエンチ (高温超電導磁石では熱暴走と言われることが多い: 2.1 節参照) 対策の考え方も変わってくる。さらに、希土類系高温超電導磁石であってもコイルの電流密度や蓄積エネルギー、冷却構造などによって保護の難易度も大きく異なるので、監視・保護手法は高温超電導磁石の仕様に応じて異なるものになると考えられる。

浮上式鉄道への応用を目指した本研究開発では、すでに製作した実機大の希土類系高温超電導コイルを用いた電磁加振試験を計画しており、本論文では同コイルを対象にした監視・保護手法の検証について述べる。

2. 希土類系高温超電導コイルの保護

近年では、コイルターン間に絶縁層を設けない被絶縁コイルに関する研究が多数報告されている³⁾。コイルターン間には接触抵抗が存在するため、定常状態においては電流はすべて超電導線材内部に流れてターン間をバイパスすることはないが、常電導転移が発生した際には、ターン間で電流がバイパスすることでコイルが保護される。ただし、励消磁時にも電流がバイパスしてしまうため励磁に時間がかかることに加え、バイパス電流によるジュール発熱もコイルの仕様や冷却方式によっては問題となりうる。被絶縁方式がコイル保護に有効である可能性はあるものの、適用可能なコイル仕様 (電流密度、冷却方式、蓄積エネルギー等) が不明確である。コイルが

* 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

大型化するほど上記のバイパス電流による問題は顕著になるので、浮上式鉄道用超電導磁石のような大型コイルに安易に用いるべきではないと考えられる。そのため、本研究ではコイルターン間絶縁のあるコイルを対象に保護を考えていく。

2.1 保護の考え方

超電導磁石にクエンチが確認された場合、電源（あるいは永久電流スイッチ）を遮断してコイルに蓄積されたエネルギーを保護抵抗で消費させるのがコイル保護の基本的な考え方である（図1）。ただし、高温超電導磁石においては、低温超電導磁石におけるクエンチとは現象が大きく異なるため、保護は難しいとされている。物質の比熱は温度が高くなるほど大きくなるため、高温超電導磁石においては常電導転移が短時間でコイル全体に伝搬することはない。すなわち、常電導転移に伴うジュール発熱は局所的であり、冷却とのバランスが崩れてしまえば、わずかな熱量でも超電導線材が焼損する場合もある。これは熱暴走と呼ばれる現象であり、高温超電導磁石の保護を困難にしている要因である。

また、熱暴走が始まってしまえば、電源を遮断したとしてもコイルに蓄積されたエネルギーの幾分かは保護抵抗ではなくコイル内部の常電導区間で消費されることになる。そのため、蓄積エネルギーの大きい大型コイルほど熱暴走に伴う焼損のリスクが高いと言える。保護抵抗の抵抗値が高ければ短時間でエネルギーを消費できるので、コイル内部での発熱を抑制することができるものの、遮断時のコイル両端電圧は保護抵抗値に比例して上昇するため、絶縁設計の面で過度に大きな抵抗値をとることはできない。

そのため、高温超電導磁石の保護においては、熱暴走前の電源遮断や電流降下が最も確実であり、

1. 常電導転移の要因となる現象の検知
2. 冷却バランスが崩れる前の常電導転移検知

をいかに実現していくかが重要である。超電導線材が超

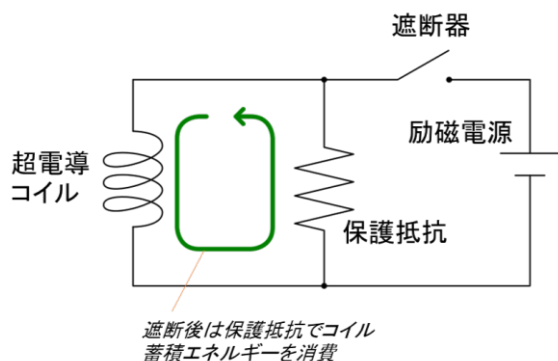


図1 超電導磁石保護回路の例

電導状態を維持できるかどうかは温度、通電電流、磁場によって決定される。本研究が対象としている浮上式鉄道用の超電導磁石においては、地上コイルからの磁場の定常成分は自己磁場と比較して十分に小さいので、外部磁場による常電導転移が発生する可能性は極めて小さい。また、変動磁場も外槽容器ではほぼシールドされてしまうので、誘導電流による常電導転移も考えにくい。温度に関しては、冷凍機の長期運転に伴う冷凍能力低下や異常停止、あるいは真空劣化による熱侵入の増加などが考えられる。そのため、常電導転移前の検知としては、コイル温度や真空度の監視、冷凍機運転状態のモニタリングがあげられる。

二つ目の冷却バランスが崩れる前の常電導転移検知に関しては、コイル電圧から判定することになるものの、大型のコイルでは電源リップルや環境磁場によるノイズが大きくなり、そのような環境中での高精度な電圧測定が求められる。

2.2 電圧差監視の可能性

浮上式鉄道においては多数の超電導磁石を監視する必要がある、低コストかつ信頼性の高い計測手法が求められる。そのため、汎用計測器を用いつつ、できるだけシンプルな構成で高精度な電圧計測を目指す必要がある。ここで、以前に行った実機大コイルの励磁時のコイル電圧挙動¹⁾を検証する。実機大コイルは8個のパンケーキコイルを積層した構造となっており（図2）、励磁試

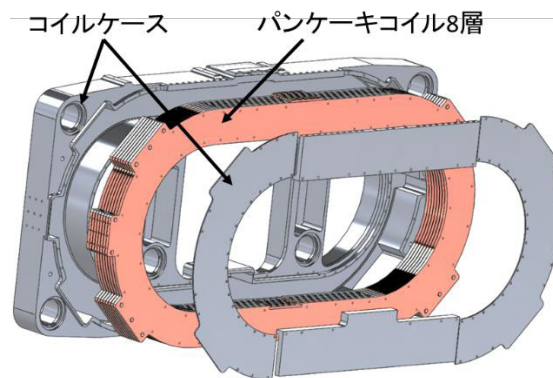


図2 実機大コイル内部構造⁴⁾

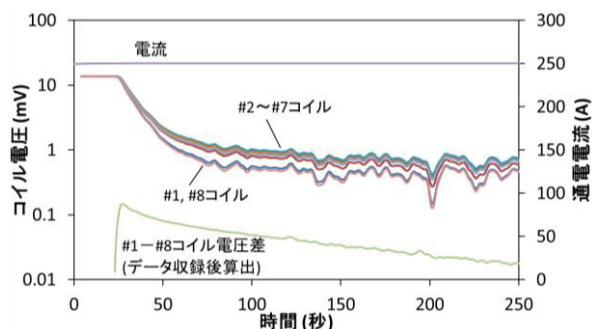


図3 実機大コイル定格通電時の電圧挙動

験時にはコイル全電圧に加えて各パンケーキコイルの電圧も測定している。図3は定格電流250 A（起磁力700 kA）を保持したときのコイル電圧の時間変動を示したものである。電流が一定でもコイル電圧がすぐに安定しないのは、主に遮蔽電流（励消磁時に線材超電導層で発生するループ電流）の影響である。ここで特徴的なのが、各パンケーキコイル電圧のノイズは極めて類似している点である。さらに、対称位置にあるパンケーキコイル（例えば最上段の#1と最下段の#8）は遮蔽電流の分布も類似していると考えられ、電圧の減衰までよく一致している。#1と#8コイルの差分を測定後に算出したものも図3には示しており、ノイズが低減されるだけでなく、遮蔽電流の影響も1/10以下に抑えられている。

すなわち、対称位置のパンケーキコイル電圧の差分をリアルタイムで監視できれば、極めて低い電圧レベルで常電導転移を検知できると考えられる。また、本手法では常電導転移が完全に同じタイミングで発生した場合は検知できないものの、希土類系高温超電導線材の臨界電流には個体差があることや、コイル内部の温度分布の存在を考慮すれば、そのような可能性は極めて低い。ブリッジ回路を用いた手法でも同様にノイズの低減は可能であるが、連続したパンケーキコイルに対してしかブリッジ回路を組むことができず、#1、#8パンケーキコイルのような組み合わせを取ることができない。本手法はハードウェアに手を加える必要がなく、簡単な演算をマイコンやPLC、あるいはパソコンで行うだけでよいことも利点である。

3. 検証用小型コイルによる保護検証

対称位置のパンケーキコイル電圧の差分監視は超電導磁石保護に有効であるが、常電導転移と冷却がバランスする範囲で検知しなければならない。しかしながら、具体的な閾値が不明であり、検証用コイル⁵⁾を用いて熱暴走試験を行い、基礎的なデータを取得した。

3.1 コイル仕様

高温超電導コイルの熱暴走は局所的な現象であるため、コイルサイズが異なっても冷却方法やコイル冷却構造が同じであれば、熱暴走の挙動も同様になると予想される。本試験に用いた検証用小型コイルは小型の円形コイルであるものの、コイル巻線部端面に伝熱部材を熱可塑性樹脂で固着させており、実機大コイルと同じ冷却構造となっている。なお、冷却性の違いの影響も調べるため、伝熱部材にGFRPを用いたものと銅細線を並べて樹脂で固めたもの（以下、低発熱銅メッシュ）の2種類のコイルを用意した。検証用小型コイルの基本仕様を表1に、外観写真（低発熱銅メッシュ）を図4に示す。

表1 検証用小型コイル基本仕様

コイル形状	ダブルパンケーキコイル 内径：60 mm，外形：92 mm
ターン数	124 ターン×2層
超電導線材	SuperPower Inc. SCS6050-AP
使用線材長	60 m
インダクタンス	5 mH

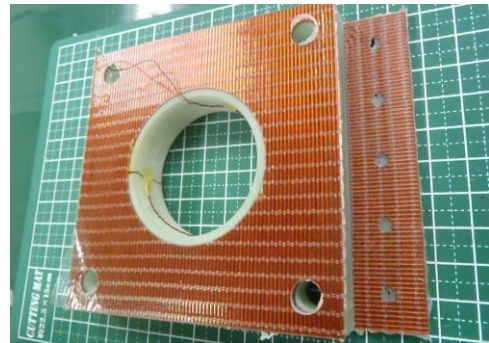


図4 検証用小型コイル（低発熱銅メッシュ）外観写真

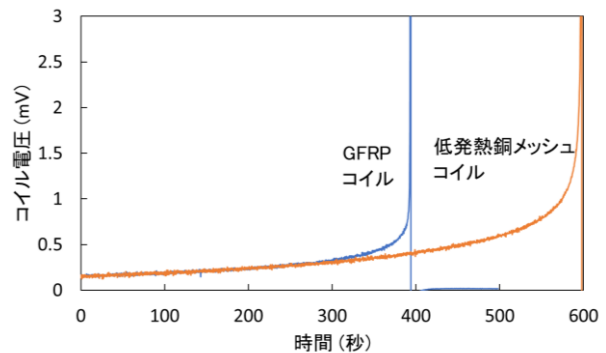


図5 検証用小型コイル熱暴走挙動

3.2 熱暴走時コイル電圧挙動

冷凍機でコイルを冷却した状態で160 Aの通電を行い、電流を保持したまま冷凍機を停止して徐々に温度を上げることによって熱暴走時のコイル電圧挙動を評価することとした。コイルが約65 Kに到達したところで電圧が発生し、電圧が大きく跳ね上がる（テイクオフ）まで通電を継続した。テイクオフ直前の電圧挙動を図5に示す。図5ではコイル電圧が0.15 mVの時を時刻ゼロとしており、冷凍機停止に伴う温度上昇によっていずれの検証用小型コイルも緩やかに電圧が増加している。ただし、コイル電圧が0.3 mVを超えたあたりからGFRP伝熱部材を用いたコイルのみ電圧上昇が加速しており、約0.7 mVに到達した直後にテイクオフしている。その一方で、低発熱銅メッシュのコイルでは、テイクオフは1 mVを超えてからであった。銅メッシュの方がGFRPよりも熱伝導率が高いため、常電導転移に伴う局所的な発熱が周囲に逃げやすく、熱暴走が起きにくかったと考えられる。

これらの試験結果で特徴的なのは、電圧がテイクオフ、

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

すなわち熱暴走が起きる前には緩やかに電圧が上昇していることであり、このことはコイル保護には必ずしも高速で検知・遮断する必要がないことを示唆している。例えば 0.5 mV で検知する場合、GFRP 伝熱部材のコイルでもテイクオフまでには 20 秒以上あり、電源遮断には十分な時間である。

3.3 保護システム検証

次に、検証用小型コイルを対象に簡易保護システムを構築してパンケーキコイル電圧の差分監視の有効性を確認した。また、今回紹介するのは電圧監視の結果だけであるが、温度監視も保護システムには組み込んでいる。基本構成を図 6 に示す。汎用機器から構成されており、電圧監視にはグラフテック社製の多チャンネルデータロガー、温度計測には Lake Shore 社製の温度モニター、励磁電源には高砂製作所製のスイッチング電源を用いている。データ収録・演算・監視には LabVIEW™ を用いており、シリアル通信または USB で接続されている。3.2 節で述べた通り、高速での検知・遮断は不要であり、シ

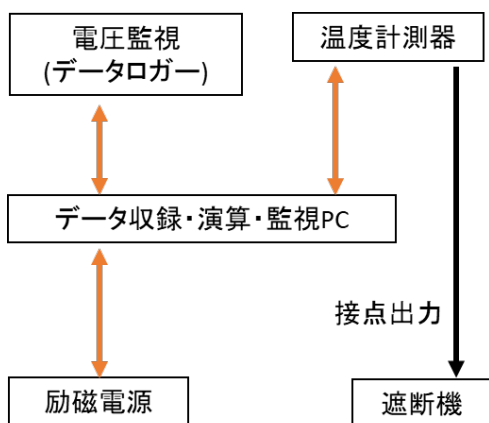


図 6 保護システム基本構成

リアル通信でも通信速度に問題はない。また、遮断には温度計測器の接点出力を利用している。

検証試験においては、3.2 節同様に意図的に熱暴走させ、その時の検証用小型コイルを構成している上下パンケーキコイルの電圧差を評価した。図 7 に励磁開始から遮断までのコイル電圧挙動を示す。電流掃引中はインダクタンスのため上下コイルともに高い電圧が発生しており、電流が一定 (160 A) に到達したところで電圧が低下している。上コイルについては、電圧がゼロになっておらず、すでに局所的には常電導転移が発生しているとみられる。なお、上下パンケーキコイルはターン数、形状共に同一であり、インダクタンスもほぼ等しい。そのため、電圧差監視ならば電流掃引中の電圧もキャンセルでき、定常状態にならなくとも常電導転移が検知できている。

160 A 到達後の電圧挙動を比較すると、上コイルのみ電圧が上昇しており、最終的には熱暴走に至っている。電圧が上昇していく過程でも上下コイルのノイズは類似しており、電圧差では明確に電圧測定精度が向上している。本検証用小型コイルに対しては 0.1 mV 以下の検知も容易であると言える (今回の試験では意図的に熱暴走させるため検知電圧を 12.5 mV に設定した)。

パンケーキコイルの電圧差監視は高温超電導磁石の保護に有効である見通しが得られたものの、コイルが大型化すれば相対的にノイズレベルも大きくなるので、実機大コイルを対象にした電圧差測定を行った。

4. 電磁加振用希土類系高温超電導磁石

保護システムの構築と並行して実機大コイルを組み込んだ電磁加振用超電導磁石の製作を行った。磁石基本構成や励磁時のノイズレベルについて紹介する。

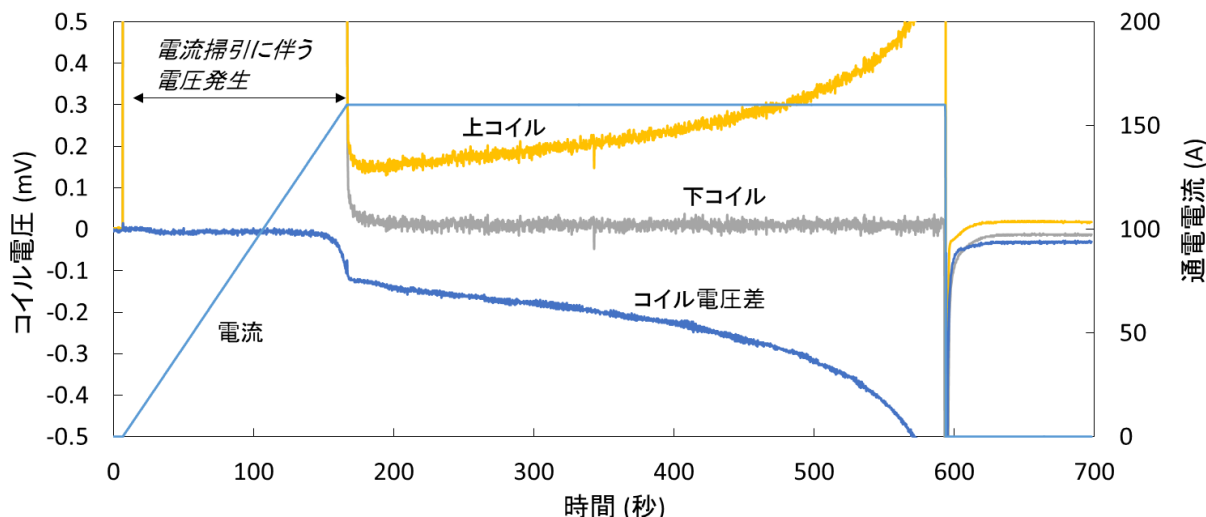


図 7 検証用小型コイル電圧差測定

4.1 電磁加振試験について

電磁加振試験とは、地上コイルに対向して超電導磁石を配置し、超電導磁石の高磁場中で地上コイルに通電することにより、走行時に相当する加振力を地上コイルに発生させるものである（図8）。地上コイルの耐久性試験として従来から行われているが、超電導磁石には低温超電導磁石が用いられてきた。これを高温超電導磁石に置き換えることができれば、液体ヘリウムや液体窒素といった寒剤が不要となるだけでなく磁石冷却も短時間で行うことができ、低コストかつ効率よく電磁加振試験を実施することができる。

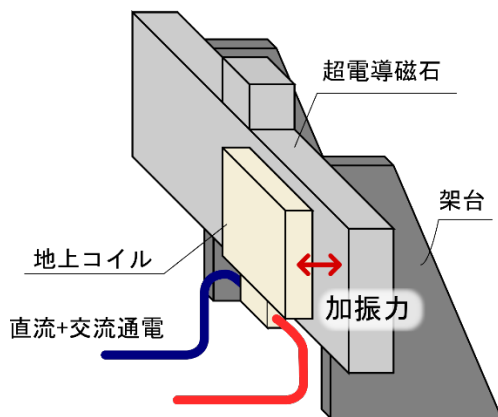


図8 電磁加振試験基本構成

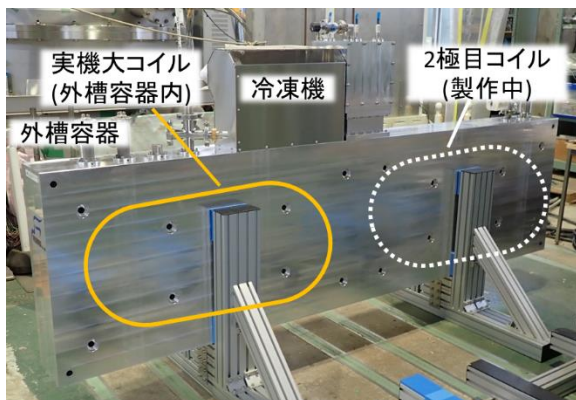


図9 電磁加振用高温超電導磁石外観

高温超電導磁石側にも利点があり、機械加振試験とは異なり超電導コイル単体ではなく磁石全体を対象に加振することができる。振動特性は対称の剛性や形状だけでなく固定方法にも依存する。機械加振試験ではワイヤーで吊るされた超電導コイルを自由振動させるのに対して、電磁加振試験では超電導コイルは外槽容器に実機同様の構造で固定されているため、走行時の振動特性をより正確に評価できる。加えて、これまでの実機大コイルを用いた機械加振試験は短時間のものであったが、電磁加振試験は数ヶ月単位で行うこともあり、長期的な高温超電導磁石の運用実績を得ることもできる。

4.2 磁石構成

電磁加振試験を行うには、実際の超電導磁石とほぼ同形状の外槽容器（真空容器）に実機大コイルを収めて、冷却・励磁する必要がある。外槽容器は冷却方法や断熱構造の変化に合わせて新規に設計・製作した（図9）。実際の超電導磁石は超電導コイル4極構成であるが、電磁加振試験は2極あれば可能なため、製作した外槽容器も2極構成である。なお、2極目のコイルは現在製作中であり、1極でも地上コイルの種類によっては電磁加振試験が可能であるため、当面は1極での運用を計画している。

4.3 励磁確認

実機大コイルを組み込んだ電磁加振用高温超電導磁石での励磁確認を実施した。実機大コイルは約30 Kに冷却され、定格電流である250 A通電（起磁力700 kA）を約1時間保持させた。コイル電圧の測定条件としては、サンプリングレート:250 ms、測定レンジ:100 mV、ローパスフィルタ:1.5 Hzとなっており、全パンケーキコイル（#1～#8）同時サンプリングでデータを収録した。代表的なデータとして、図10に#1、#8パンケーキコイル電圧とその差分の時間変動を示す。なお、図3に示した電圧測定とは異なり、今回は第2章で示した保護システムを用いており、電圧差はリアルタイムで監視してい

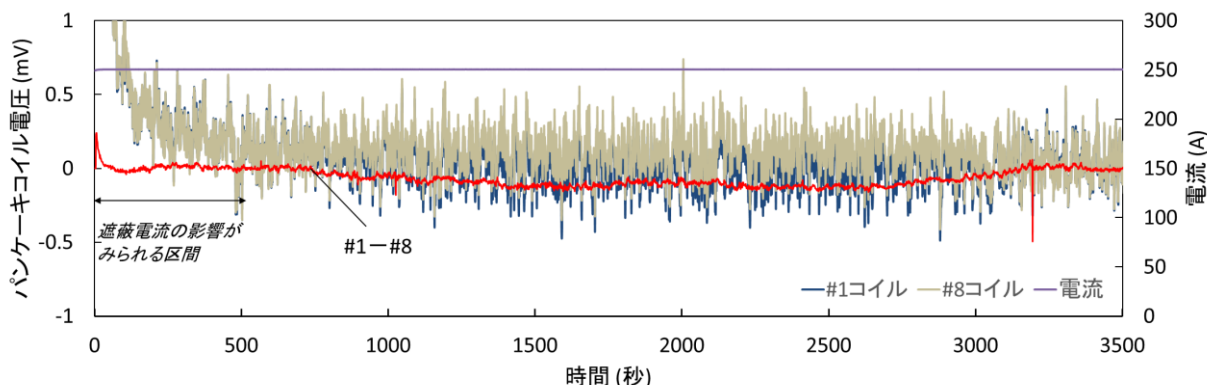


図10 電磁加振用高温超電導磁石定格通電時の電圧挙動

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

る。小型検証用コイルとは異なり、実機大コイルはインダクタンスが 12 H ある大型のコイルであるため、ノイズレベルが大きく、遮蔽電流の影響も顕著である。

#1, #8 パンケーキコイルはノイズだけでなく遮蔽電流に伴う電圧の減衰も極めてよく一致しており、電圧差監視は非常に有効であることが確認できる。パンケーキコイル電圧のノイズは± 0.5 mV 程度で推移しているのに対し、電圧差ならば、長周期の変動を含めても± 0.1 mV 程度まで低減されている。また、遮蔽電流の影響で各パンケーキコイル電圧は定格電流到達から 10 分程度経たないと安定しないものの、電圧差ならば 1 分程度で安定している。なお、第 2 章で述べた通り、常電導転移を高速で検知・遮断する必要がないので、この保護システムでは一定時間閾値を超えた場合のみ遮断するようにしている。そのため、図 10 の 3200 秒あたりで発生しているような突発的な電圧は問題とならない。

検証用小型コイルとは定格電流や励磁上限温度（実機大コイルでは約 39 K）が異なるため、熱暴走に至る電圧の閾値（検証用小型コイルでは 0.5 ～ 1 mV 程度）が不明確ではあるものの、0.1 mV 程度の高精度での電圧検知が可能であるため、実機大コイルに対しても電圧差監視による保護手法は有効である可能性が高い。

5. まとめ

実機大の希土類系高温超電導磁石を用いた地上コイル電磁加振試験を計画しており、安定した磁石運用を可能にするため、磁石監視・保護システムの検証を行った。本研究の高温超電導コイルは複数のパンケーキコイルから構成されており、対称位置のパンケーキコイル電圧差を監視することにより、冷却バランスが崩れる前に常電

導転移を検知できると考えられる。

電磁加振試験のための高温超電導磁石においても、常電導転移に伴う電圧発生を 0.1 mV 程度の高精度で検出できることを実証し、有効な保護手法である見込みが得られた。今後は温度や真空度監視も組み合わせた複合的な信頼性の高い監視・保護システムを構築して、電磁加振試験を実施する予定である。

本研究の一部は、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) Mizuno K., Sugino M., Tanaka M. and Ogata M., “Experimental Production of a Real-Scale REBCO Magnet Aimed at Its Application to Maglev.” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, 3600205, 2017.
- 2) Mizuno K., Tanaka M., Ogata M. and Okamura T., “Mechanical Vibration Test of a REBCO Coil Designed for Application to the Maglev.” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28, Issue 4, 3601107, 2018.
- 3) S. Hahn, D. Keun Park, J. Bascunan, Y. Iwasa, “HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation.” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, Issue 3, 12022677, 2011.
- 4) 水野克俊, 田中実, 小方正文: 実機大希土類系高温超電導コイルの機械加振試験, 鉄道総研報告, Vol. 32, No. 3, pp. 5-10, 2018
- 5) 水野克俊, 山下知久, 宮崎佳樹, 坂本久樹, 中尾健吾, 松井義, 土肥哲也: 大荷重対応高温超電導磁気軸受の開発～冷却と低発熱化が両立可能な新しいコイル構造～, 2017 年度秋季低温工学・超電導学会予稿集, Vol. 95, p. 167, 2017