

鉄道一般

車両

施設

電気

運転・輸送

防災

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 超電導磁石の故障を未然に防ぐ

浮上式鉄道には超電導磁石が用いられていますが、超電導磁石を運用するにはきわめて低い温度を保つ必要があります。近年開発が進んでいる高温超電導磁石は、従来の超電導磁石よりも高めの温度で運用できるので、冷却のための機器が大幅に軽量化されます。浮上式鉄道では、超電導磁石は車両に搭載されるため軽量化は大きな利点となりますが、実用化に向けては信頼性の向上が欠かせません。異常、もしくはその前兆現象があれば早期に検知し、超電導磁石の故障を未然に防ぐことが求められます。



水野 克俊  
Katsutoshi Mizuno  
浮上式鉄道技術研究部  
低温システム研究室  
副主任研究員

## はじめに

超電導磁石は浮上式鉄道やMRI（磁気共鳴画像法）に使われており、超電導体は電気抵抗がなく発熱の問題がないので、通常の電磁石では実現不可能な強磁場を作り出すことができます。ただし、超電導体の電気抵抗がなくなるのはきわめて低い温度であり、低温を保つための機構が欠かせません。そのため、超電導磁石は超電導コイル（超電導線材を巻き取ったもの）とともに、冷却システムや断熱構造も必要です。

超電導体にも種類があり、大きく分けて低温超電導体と高温超電導体があります（☞参照）。浮上式鉄道やMRIでは基本的に低温超電導体を用いた超電導磁石（以下、低温超電導磁石）が用いられてきましたが、近年は高温超

電導体の開発が進んでおり、冷却の簡易さから機器応用が期待されています。鉄道総研では、高温超電導磁石の簡素化された冷却システム、およびそれともなう磁石軽量化は浮上式鉄道応用において大きな利点になると考えて、イットリウム系高温超電導線材（☞参照）を用いた超電導磁石の開発を行っています。これを実現するには安定した冷却システムに加え、万が一冷却システムに異常があっても安全に超電導磁石の通電を停止できる監視・保護システムが不可欠です。ここでは、超電導磁石に異常があったときにどのような現象が起きるのか、異常にはどのような原因があるかについて解説します。さらに、現在検証しているイットリウム系高温超電導コイルの電圧監視によ

### ☞ 超電導体の種類と運用温度

低温超電導体を用いた磁石なら絶対温度4ケルビン(K) (-269℃)程度が一般的です。一方で、高温超電導体を用いた磁石では30～40ケルビン (-243～-233℃)程度でも低温超電導磁石と同等の磁場を発生させることができます。

### ☞ イットリウム系高温超電導線材

高温超電導線材にはいくつか種類がありますが、イットリウム系はとくに強磁場環境での通電特性に優れています。そのため、浮上式鉄道応用以外にもMRIや超電導モーター／発電機などへの応用が期待されています。

る保護手法についても紹介します。

## クエンチと熱暴走

超電導磁石の運用中に、超電導コイルの温度が局部的にでも上がってしまうえばその場所の電気抵抗はゼロでなくなり（常電導転移）、電気抵抗がある区間を電流が流れることで発熱します（ジュール発熱）。そして、そのジュール発熱によって周りの線材も常電導転位してさらに発熱します。この連鎖は低温超電導体を用いて巻かれたコイル（以下、低温超電導コイル）ではクエンチとよばれます。ただし、高温超電導コイルでは、この現象の振る舞いがだいぶ違っており、クエンチではなく熱暴走とよばれています。

図1に低温超電導コイルのクエンチと高温超電導コイルの熱暴走のイメージを示します。超電導コイルで局所的な発熱があったとき、低温超電導コイルでは即座に常電導転移が伝搬します。そのため、コイル全体が常電導体になり発熱します。さらに、低温超電導コイルは液体ヘリウムで冷却されていることが多く、その場合クエンチによって液体ヘリウムが急激に気化・膨張して安全弁から放出されます。

これに対して高温超電導コイルでは、常電導転移はコイル全体に伝搬しません。これは超電導コイルの比熱が影響しています。物質の比熱は温度によって異なり、銅を例にとると40ケルビンでは4ケルビンのときの約600倍になります。常電導転移があっても初めは温度上昇がわずかで、熱があまり周りに伝わらないのです。ただし、わずかな温度上昇であってもそれに応じて発熱は少しずつ大きくなり、冷却とのバランスが崩れたところで温度が急上昇します。これが熱暴走とよばれる現象で、最終的には発熱箇所超電導線材が焼損してしまうこともあります（図1）。

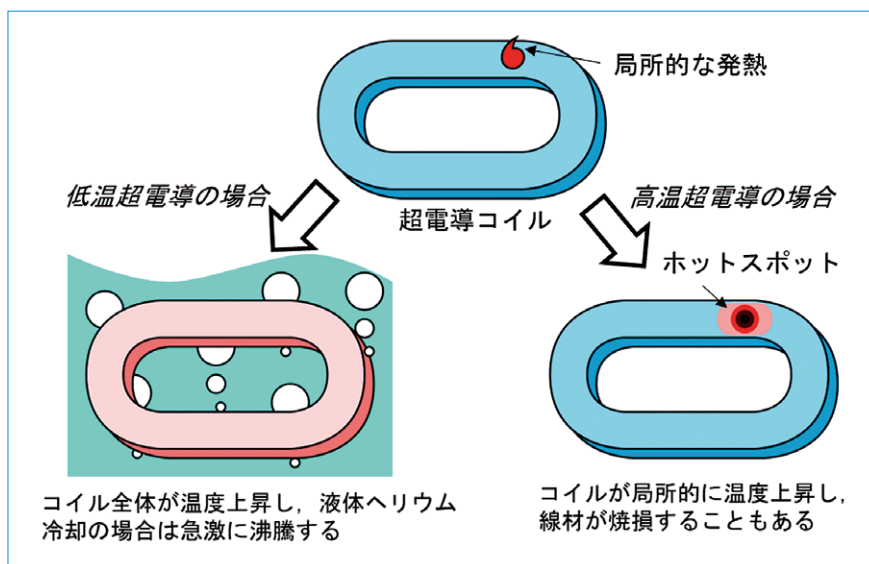


図1 超電導コイルのクエンチと熱暴走のイメージ

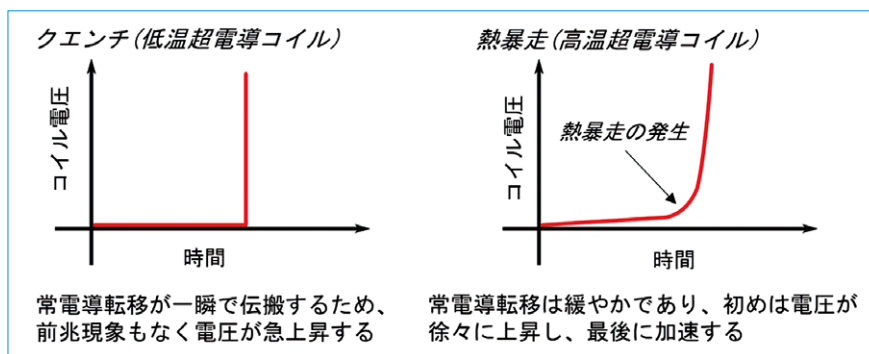


図2 クエンチと熱暴走時の電圧挙動

図2にクエンチと熱暴走時のコイル電圧の一般的な挙動を示します。ジュール発熱にともなって電圧が発生しますので、低温超電導コイルのクエンチにおいては電圧がゼロ（超電導状態）から瞬間的に電圧が跳ね上がります。その一方で、高温超電導コイルでは徐々に電圧が上昇し、熱暴走に至ったところで電圧上昇が加速します。

## 超電導磁石で想定される異常

超電導状態を維持できるかは温度、磁場、電流密度の三つの条件で決定されます。ただし、浮上式鉄道用の超電導磁石は一定電流で運用されるため、磁場および電流密度が変化することはありません。温度条件が変化する原因は複数考えられますが、もっとも

注意すべきは冷凍機に関連するものです。停電や冷凍機故障があれば瞬時に冷凍能力が失われますし、長期間の運用で冷凍能力が徐々に低下することもあります。また、超電導コイルは真空断熱容器に収められていますが、時間が経てば真空度が悪化して外部からの熱侵入が増加することも考えられます。さらに、浮上式鉄道特有の要因として、走行振動と地上コイルの磁場の影響も考慮しなければなりません。振動対策が不十分だと、超電導コイルが微小に動いてしまい摩擦発熱が起こります。また、地上コイルが発生する磁場は均一ではなく変動しますので、超電導コイルやその周辺部品に電磁誘導による電流が発生し、ジュール熱が発生します。実際の高温超電導コイルの



図3 組み立て途中の高温超電導磁石

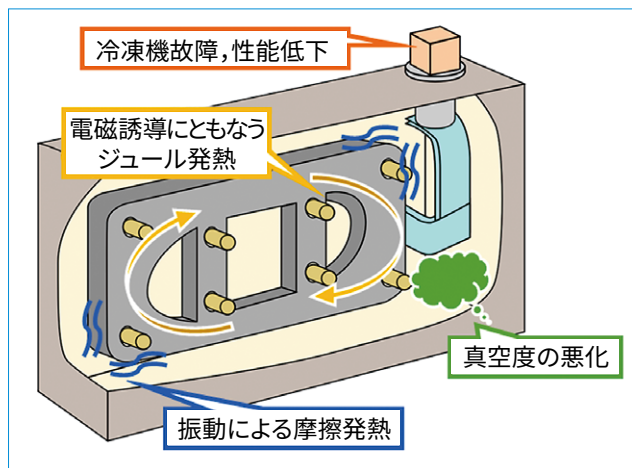


図4 高温超電導コイル発熱(熱侵入)のイメージ

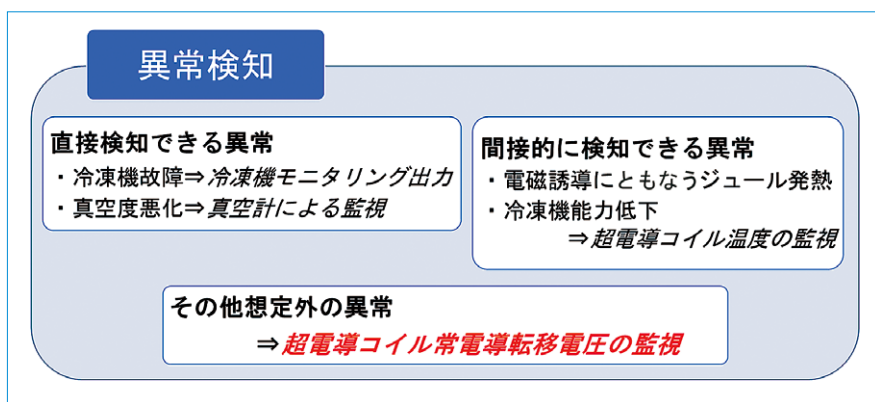


図5 高温超電導磁石の異常検知の基本的な考え

写真とこれらの発熱のイメージを図3、図4に示します。超電導磁石の運用の観点からは、上にあげたような異常が発生しないことが第一です。そのためには、冷凍機は能力に余裕があるものを選定し、電源も多重化する、運用時の発熱を正確に見積もって熱設計をすることなどが重要です。

しかしながら、これらの対策を十分に行っていないと、異常発熱が起きてしまう可能性があります。異常を検知した際にはコイルに流す電流を減らす、あるいは電源を遮断することで、高温超電導コイルを熱暴走による焼損から保護する必要があります。異常検知の基本的な考え方は図5に示すようになっており、異常の種類に応じて検知手法は複数あります。まず一つ目

が、冷凍機故障や真空度の悪化など異常現象自体を検知することです。一般的に冷凍機は運転状態(正常運転/停止)のモニタリング出力を有しているので、停止した場合は容易にわかりますし、真空度も真空計で測定することができます。そして、電磁誘導にともなうジュール発熱、モニタリング出力からはわからない冷凍機能低下などは、超電導コイル温度を監視することで間接的に検知が可能です。これらの方法で想定しているすべての異常に対応できているはずですが、想定外の事象で常電導転移が起きてしまう可能性はゼロではありません。そこで、監視・保護システムの信頼性をより高めるため、熱暴走前の常電導転移電圧の検知にも取り組んでいます。

### 超電導コイル電圧監視

図2に示したように、高温超電導コイルにおいては、常電導転移は緩やかにすすむので、熱暴走前の電圧を検知できればコイルを保護することができます。そこで、実際に小型の高温超電導コイルを熱暴走させたところ<sup>1)</sup>、熱暴走前の電圧は1mV程度と非常に小さく、高精度な電圧測定が求められることがわかりました。さらに、私たちが研究対象としている浮上式鉄道用の超電導コイルは大型であるため、外部の磁場変化に敏感に反応し、電圧ノイズが発生する問題があります。

そこで、電圧ノイズをキャンセルして、常電導転移にともなう電圧だけを測定する手法<sup>1)</sup>を開発しました。まず、高温超電導コイル(図3)の内部構造を図6に示します。パンケーキコイル(☞参照)とよばれる扁平なコイル

#### ☞ パンケーキコイル

本研究で用いているイットリウム系高温超電導線材は厚さ0.1mm程度のテープ形状をしています。そのため、円形断面の銅線と同じようなコイル巻線をする線材が歪んでしまいます。そこで、渦巻状に単層に巻くことで線材が歪むことを防ぎます(図7)。このようにして製作したコイルは扁平な形状となるのでパンケーキコイルとよばれます。

が8個重ねられ、直列に接続されています。そのため、この高温超電導コイルの電圧はパンケーキコイルごとに分割して計測可能です。試験を行っていく中で、コイル断面から見て左右対称位置にある（たとえば1番目と8番目）のパンケーキコイルに発生するノイズはほぼ同じになるということが明らかになりました。すなわち、対称位置のパンケーキコイル電圧の差を取ることによって電圧ノイズをキャンセルできるので（図8）。この方法の優れているところは、特別な計測装置や回路が不要であり、パンケーキコイル電圧の差を演算するだけでよいところです。

常電導転移電圧までキャンセルされてしまうのではないかと疑問に思われるかもしれませんが、そのようなことが起きる可能性はきわめて低いといえます。本研究で用いているイットリウム系高温超電導線材は、連続した線材の中でも場所によって数パーセント程度の性能のばらつきがあります。そのため、パンケーキコイルごとの性能、すなわち常電導転移が発生する温度が完全に一致することはまずありません。

### おわりに

高温超電導磁石が多数実用化されるようになれば、対称位置のパンケーキコイルの常電導転移のタイミングがそろっている個体が現れるかもしれません。しかしながら、単独の異常検知手法に頼っていると想定外の事象に弱いシステムになってしまうので、際限なく高い検知率を目指すのではなく、図5に示したように異常検知方法を多重化していった方がより実用的な監視・保護システムになると考えられます。[RRR]

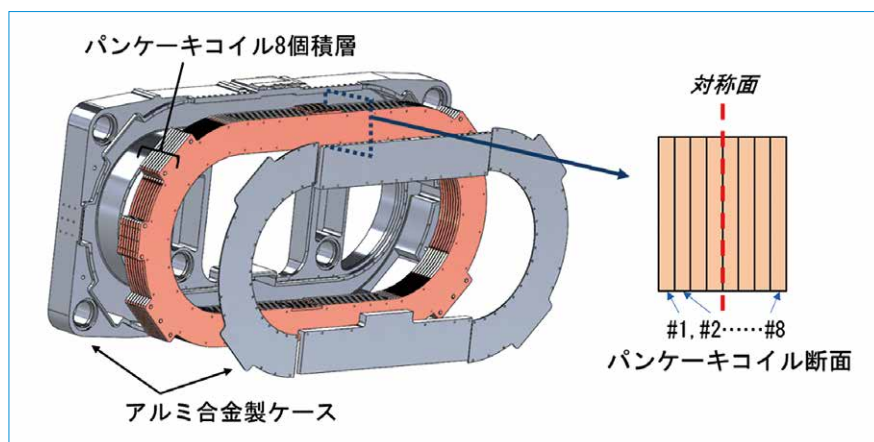
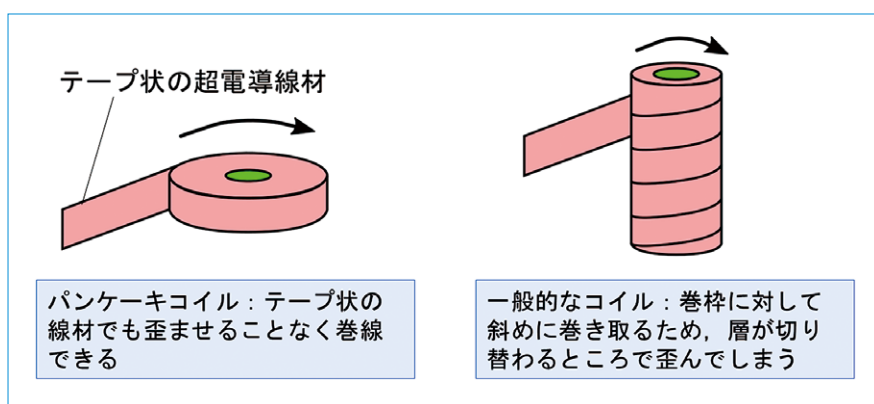


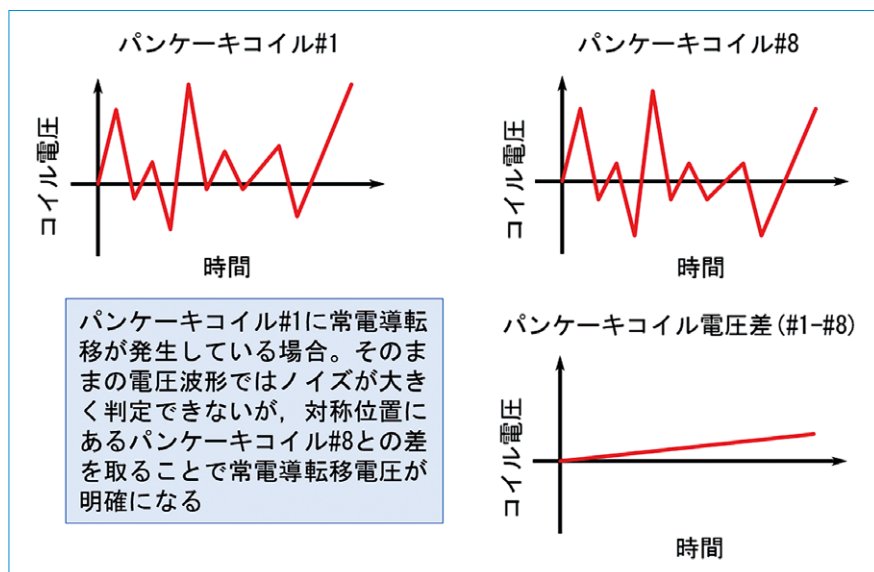
図6 高温超電導コイルの内部構造



パンケーキコイル：テープ状の線材でも歪ませることなく巻線できる

一般的なコイル：巻枠に対して斜めに巻き取るため、層が切り替わるところで歪んでしまう

図7 コイル巻線方法



パンケーキコイル#1に常電導転移が発生している場合。そのままの電圧波形ではノイズが大きく判定できないが、対称位置にあるパンケーキコイル#8との差を取ることによって常電導転移電圧が明確になる

図8 パンケーキコイル電圧差による常電導転移

### 文献

- 1) 水野克俊, 田中実, 小方正文: 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, 鉄道総研報告, Vol.33, No.5, pp.5-11, 2019