

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

イットリウム系高温超電導コイルの浮上式鉄道への応用を目指す

近年、イットリウム系と呼ばれる高温超電導線材の開発が進んでおり、従来の線材よりも高い温度で使える特徴があります。このことは、超電導磁石を簡素な冷却システムで運用できることを意味します。ここでは、浮上式鉄道にイットリウム系高温超電導コイルを用いることで車載超電導磁石がどう変わるかについて紹介し、実機大のイットリウム系高温超電導コイル製作および走行状態を想定した加振試験についても紹介します。



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
【専門分野】低温工学



田中 実
Minoru Tanaka
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
主任研究員
【専門分野】低温工学、
リニア用地上コイル、
RFID

はじめに

超電導磁石は通常の電磁石では実現できないような強力な磁場を発生させることができ、浮上式鉄道には不可欠な技術です。電磁石のコイルには銅線などの導体を用いられますが、導体の電気抵抗のため通電時に発熱するので大電流を流すことが困難であり、冷却設備も大掛かりになってしまいます。その一方で、超電導体はある温度以下になると超電導転移して電気抵抗がゼロになるので、超電導線材には発熱なしに大電流を流すことができます。

しかしながら、超電導磁石はきわめて低い温度を保持する必要がある(☞参照)、そのための断熱・冷却構造の複雑さが機器応用を難しくしてきました。

近年では、これまでの超電導体よりも高い温度で超電導転移する高温超電導線材の開発が進んでおり、機器応用が期待されています。高温超電導線材

にも種類がいくつかあり、とくにイットリウム系高温超電導線材は磁場中での通電特性に優れているため、超電導磁石など強磁場を発生する機器への応用に適しています。

浮上式鉄道用車載超電導磁石

浮上式鉄道においては、超電導磁石は車両に搭載されるので、軽量かつ低消費電力であることが求められます。☒1に超電導磁石の構造を模式的に示しますが、これまでの車載超電導磁石(低温超電導磁石)は超電導コイルの冷却に液体ヘリウムを用いており、蒸発したヘリウムを再液化するための冷凍機も搭載しています。また、4K(-269℃)ときわめて低い温度まで冷却するため、真空容器(外槽容器)と超電導コイルの間には断熱のためのふく射シールドがあり、このふく射シールドは液体窒素で冷却されています。

☞ 超電導磁石の冷却温度

最も機器応用が進んでいるニオブチタン(Nb-Ti)線材は、液体ヘリウム温度(4K=-269℃)程度まで冷却するのが一般的です。高温超電導線材は液体窒素(77K=-196℃)で超電導転移するものもありますが、この温度では大きな電流は流せず、冷却するほど大電流と高磁場が得られます。

一方、イットリウム系高温超電導線材を用いて車載超電導磁石を製作すれば、コイルは30～40K程度まで冷却すればよいので、これらの寒剤を用いることなく冷凍機で直接冷却できます。そのため、超電導磁石の冷却作業が容易になり運用コストの低減が期待されます。また、冷凍機の消費電力も大幅に低減でき、車上の電源装置の小型軽量化にも貢献できます。

さらに、運用温度の上昇にともない、ふく射シールドを取り除いた構造も可能になります。また、これにより単段冷凍機と呼ばれる冷凍機(☞参照)を用いることができます。また、ふく射シールドがなくなった分だけ磁石をコンパクトにすることもできます。超電導コイルを外槽容器に近付けることができるので、地上コイルに到達する磁場(鎖交磁束)が大きくなります。

イットリウム系コイルの開発課題

このように非常に優れた特性が期待されるイットリウム系高温超電導磁石ですが、実現にはいくつかの課題がありました。まず、イットリウム系高温超電導線材は比較的近年開発されたものであり、機器応用が進んでおらず、

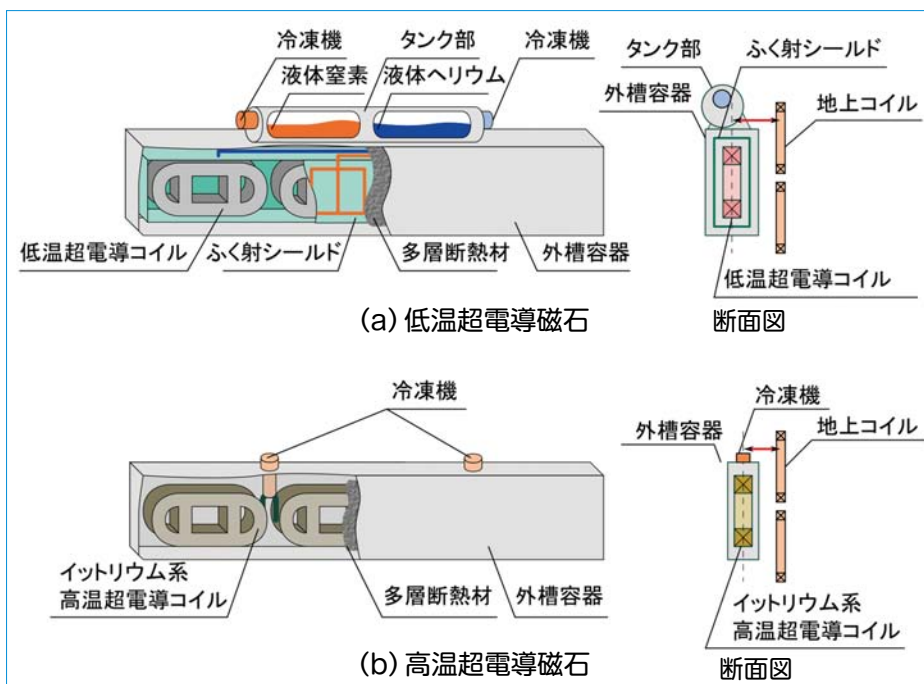


図1 車載超電導磁石の構造

コイル製作手法などの基礎技術が確立されていませんでした。

イットリウム系線材はこれまでの超電導線材とは異なりテープ形状をしているため、巻線方法も変えなければなりません。さらに、従来の超電導コイルでは、巻線後にコイルを樹脂に浸して形状を安定させる含浸と呼ばれるプロセスを取ることが多かったのですが、イットリウム系コイルに対して含浸すると通電特性が著しく低下する問題がありました¹⁾(☞参照)。

また、液体ヘリウムを用いず、アルミや銅などの高熱伝導材料だけでコイルを均一に冷却できるよう設計しなければなりません。冷却に関しては接触

熱抵抗も非常に大きな問題になります。銅板などの冷却板にコイルが“乗っている”だけでは熱的にきわめて不安定であり、発熱により常電導転移してしまうこともあり得ます。

ほかにも浮上式鉄道応用特有の課題として走行振動があげられます。超電導磁石を振動環境下で運用すること自体が少なく、イットリウム系コイルはそのような実績がないため耐振動性の検証が不可欠です。

コイル化技術の確立

イットリウム系車載超電導磁石の実現に向けて、私たちはコイル化技術から検討を始めました。イットリウム系磁石においては、パンケーキコイルと呼ばれる扁平なコイルを複数積層して1極のコイルを構成する 경우가多く、各パンケーキコイルの構造と積層方法が非常に重要になります。冷却の観点からは、各パンケーキコイルと冷却部材をエポキシ樹脂などで強固に接着することが望ましいのですが、樹脂含浸にともなう劣化の問題もあるため、単純にコイルを樹脂に浸すことはできません。

☞ 冷凍機について

超電導磁石の冷却には GM 冷凍機と呼ばれるものが使われることが多く、GM 冷凍機にも 2 段式と単段式があります。2 段冷凍機は 10K を下回る極めて低い温度まで冷却できる半面、冷凍能力(ワット数)は大きくありません。単段冷凍機は到達温度が高いものの、高い冷凍能力を有しています。

☞ 樹脂含浸による劣化

イットリウム系線材は多層構造をしたテープ状の線材であり、基材には高強度な金属を使用しています。そのため、引張り方向には高い強度を持っていますが、層間の剥離方向の強度が極端に弱い特徴があります。エポキシ樹脂で固められた(含浸された)コイルはターン間に樹脂が浸透しており、冷却時に樹脂が収縮して熱応力が発生します。この熱応力によって線材が層間剥離し、通電特性が著しく低下してしまいます。

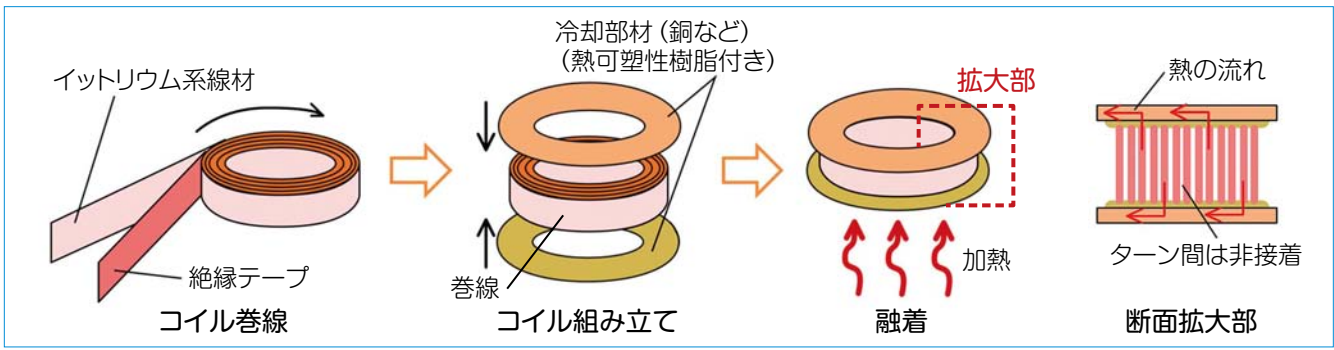


図2 熱可塑性樹脂を用いたコイル製作手法

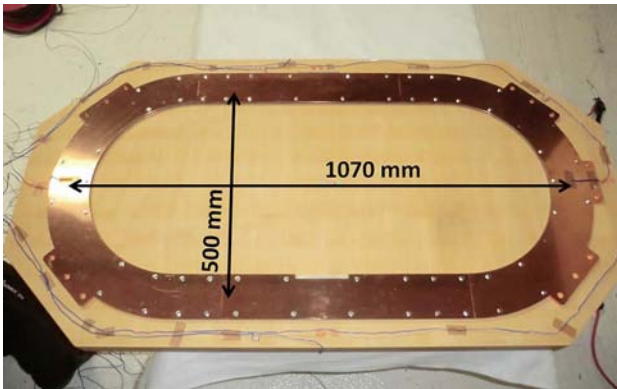


図3 パンケーキコイル外観 (実機大)



図4 コイルケース外観 (パンケーキコイルを8枚収納)

そのため、冷却と劣化防止を両立するため、熱可塑性樹脂(☞参照)を用いたパンケーキコイルの製作手法を開発しました。巻線自体は通常どおり行い、巻線後に熱可塑性樹脂を施工した冷却部材(銅板など)を組み合わせます。(図2)。組み立てたコイルを加熱することにより、冷却部材表面の熱可塑性樹脂が溶け、巻回された線材と冷却部材が強固に接着されます。熱可塑性樹脂は粘性が高く、エポキシ含浸された場合とは異なりターン間が固着されていないため、線材に過度な応力が働くことはなく、線材が劣化することはありません²⁾。

☞ 熱可塑性樹脂

加熱することによって軟化し、冷却すると硬化する樹脂の総称です。ポリエチレンなど身近なプラスチックも熱可塑性樹脂に分類されます。接着用途の利用では、ホットメルト接着剤(グルーガン)が有名です。

実機大イットリウム系コイルの製作

イットリウム系コイルの振動環境での応用は前例がなく、振動による発熱の程度や、繰り返し変形によるコイルや周辺部材の損傷が起こるのかなど不明な点が多数ありました。

そのため、イットリウム系コイルの浮上式鉄道应用においては加振試験が不可欠であり、その供試体として実機大のコイルを製作しました。単に形状だけでなく、起磁力(通電電流とターン数の積)も実際の超電導磁石と同等の700kAとしました。コイルはレストラック形状で、長手方向が1070mm、高さ方向が500mm、ターン数は2800、使用線材長は7600m、定格電流は250Aで、これを8段のパンケーキコイルで構成しました。パンケーキコイルは熱可塑性樹脂を用いた手法で作られており、表面は冷却のための銅板で覆われています(図3)。

また、単に積層しただけでは励磁

した際の電磁力(フープ応力)に耐えられないので、積層したパンケーキコイルはジュラルミン製のコイルケース(図4)に収められています。加振前の励磁性能実証試験では、コイル温度35Kで目標の起磁力700kAを実現し³⁾、32Kまで冷却した状態ではそれを上回る750kAを実証することができました。

機械加振試験

浮上式鉄道においては、地上コイルからの変動磁界によって車載超電導磁石のコイルに加振力が発生します。超電導コイルの振動加速度が最大となるのは加振周波数がコイルの固有振動数と一致するときであり、このときの最大振動加速度は10G(98m/s²)程度といわれています⁴⁾。

本研究ではコイルを直接加振機で振動させており、コイルの共振を利用して、実走行時と同等かそれ以上の振動加速度、あるいは変形量を与えています。加振試験としては、はじめに積層

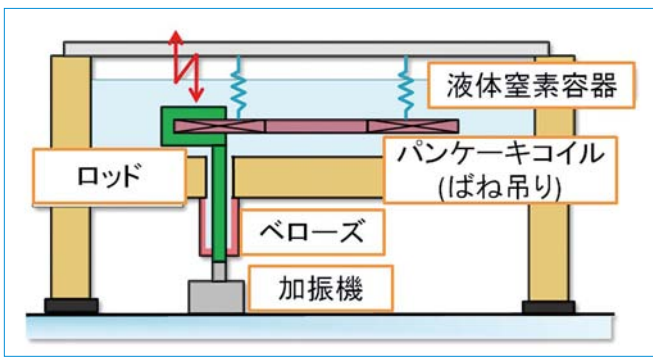


図5 パンケーキコイル加振試験装置断面図

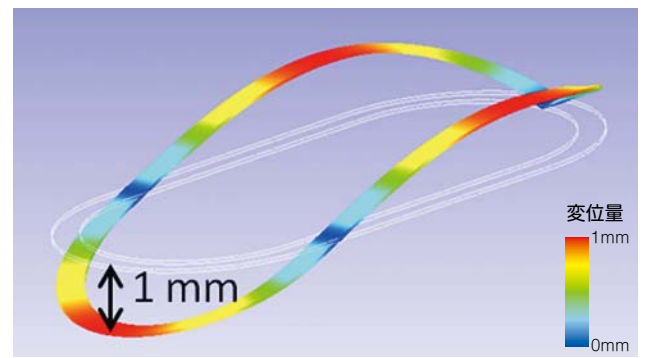


図6 共振時のパンケーキコイル変形イメージ (曲げモード(11Hz))

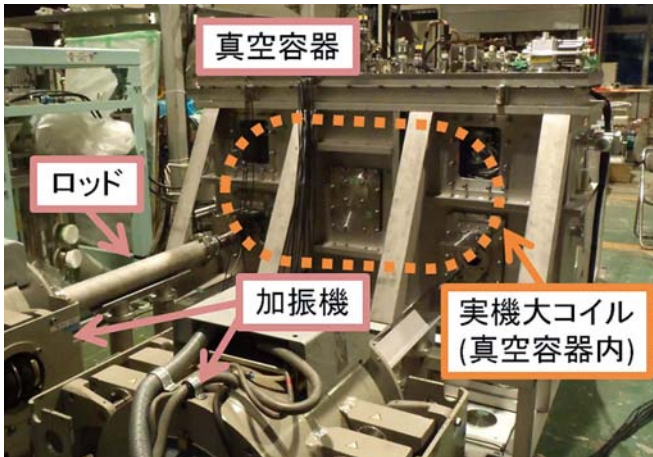


図7 実機大コイル機械加振試験装置

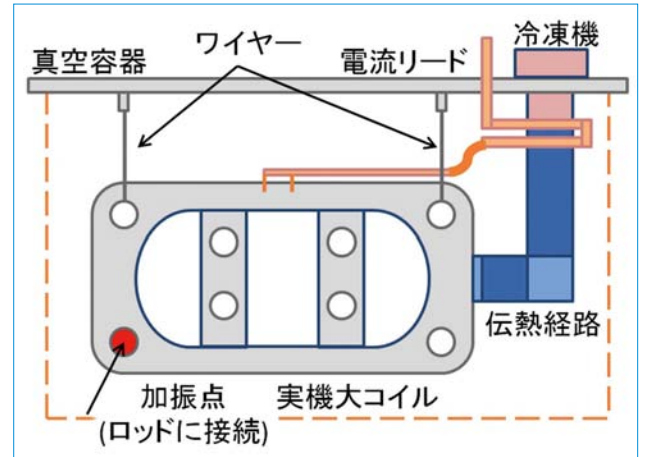


図8 加振試験装置内部構造

前のパンケーキコイル単体での加振を行いました。パンケーキコイルをバネでつるした状態で液体窒素により冷却し、加振機から振動を与えます(図5)。ただし、パンケーキコイル単体では剛性が低いため、大きな振動加速度を与えると過剰な変形をしてしまうので、パンケーキコイルの最大変形量が1mmとなる条件で加振を行いました。

加振周波数11Hz(曲げモード:変形の様子は図6参照)で4時間半の加振(振動回数18万回)を行いました。その前後でのコイル臨界電流に変化はなく、応答関数についても有意な変化はありませんでした。これは、超電導線材が劣化することなく、パンケーキコイルを構成する構造部材にも損傷は発生していないことを意味しています。

パンケーキコイル単体での耐振動性を確認することができたので、現在ではパンケーキコイル8段を積層してコイルケースに収め、1極の実機大コ

イルとしての加振試験を進めています(図7)。冷却方法も液体窒素ではなく、冷凍機を用いてより低温まで冷却します。そのため、コイルを起磁力700kAで励磁した状態での加振試験が可能です。また、単にコイルや構造部材の劣化の有無だけでなく、加振時の冷凍機温度の変化から振動にともなう発熱も測定します(図8)。

おわりに

今回のイットリウム系高温超電導コイルの開発においては、目標とする磁場性能(起磁力)を、30Kを超えるきわめて高い温度で実現することができ、加振試験も順調に進んでいます。ただし、実用化に向けてはコイル単体だけではなく、冷凍機や外槽容器、励磁電源なども含めた超電導磁石としての完成度を高めていくことが不可欠です。また、実用化には信頼性もきわめて重要であり、さまざまな異常を想定した安全対

策も施していくことが求められます。

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ました。

RRR

文献

- 1) T.Takematsu, R.Hu, T.Takao, Y.Yanagisawa, H.Nakagome, D.Uglietti, T.Kiyoshi, M.Takahashi, H.Maeda: Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation, Physica C, Vol.470, Issues17-18, pp.674-677, 2010
- 2) 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
- 3) 水野克俊, 杉野元彦, 田中実, 小方正文: 希土類系高温超電導線材を用いた起磁力700kA実機大コイルの開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.1, pp.5-10, 2017
- 4) 土島秀雄, 鈴木栄司, 寺井元昭: 山梨実験線超電導磁石の開発, 鉄道総研報告, Vol.8, No.10, pp.17-22, 1994