

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

リニア用高温超電導磁石を開発する

超電導磁石は臨界温度まで冷却されることにより電気抵抗がゼロの超電導状態になり、大電流を通電できるので高磁場を発生することができます。そのため、超電導磁石と冷却は密接な関係があり、超電導リニアの研究開発においても両方の側面から進めていくことが求められます。従来よりも高い温度で超電導状態になる高温超電導線材を用いた超電導磁石製作と、高効率かつメンテナンスサイクルの長い冷凍機の開発についてご紹介します。



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
研究員
[専門分野] 超電導工学



小方 正文
Masafumi Ogata
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] 超電導工学

はじめに

超電導材料は臨界温度と呼ばれるある一定の温度以下になることによって電気抵抗がゼロになります。臨界温度は超電導材料の種類によって異なりますので、臨界温度の高い超電導材料で磁石を作ることができれば冷却にかかるコストは低減し、断熱構造も簡易なものでよく、磁石自体もシンプルな構造にできます。

ここでは超電導材料の種類や高温超電導線材を用いた磁石製作、および高温超電導磁石に適した冷凍機開発の話題を交えつつ、高温超電導をリニア用超電導磁石に適用するとその構造がどのように変化するかをご紹介します。

低温超電導と高温超電導

超電導は大きく分けて低温超電導と高温超電導の2種類に分類されます。低温超電導はNb-Ti (ニオブ-チタン) やNb₃Sn (ニオブ-スズ) が代表的です。超電導状態になる臨界温度は20ケルビン (K) (☞参照) 程度と低いため、冷却には液体ヘリウム (4.2K) (☞参照) を用いるのが一般的です。これらの材料は歴史も長く医療用MRI (磁気共鳴断層撮影) や超電導リニアに用いられてきました。

一方で高温超電導の代表格にはBi (ビスマス) が主成分のBi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀や、Y (イットリウム) あるいはGd (ガドリニウム) などの希土類元素 (RE: Rare Earth) を主成分

☞ ケルビン (K)

分子の運動が完全に停止する絶対零度 (-273.15 (°C) = 0 (K)) を基準とした温度単位です。摂氏 (°C) の値に 273.15 を足した値がケルビン (K) になります。たとえば、液体窒素の沸点は -196°C ですので、ケルビンに変換すると、

$$-196 (°C) + 273.15 \doteq 77 (K)$$
 となります。

☞ 液体ヘリウム

沸点が 4.2 ケルビン (K) (≒ -269°C) と極めて低い寒剤です。超電導体を液体ヘリウムに浸すことによって安定して極低温まで冷却することができるので、超電導磁石の冷却に広く使われています。しかしながら、日本ではヘリウムは海外からの輸入に依存しており、近年価格が上昇しています。



図1 超電導線材の外観

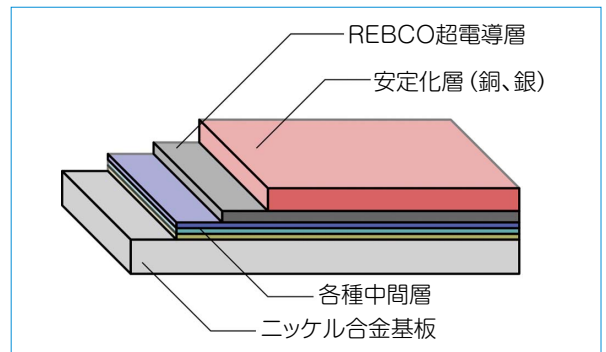


図2 REBCO線材の基本構造

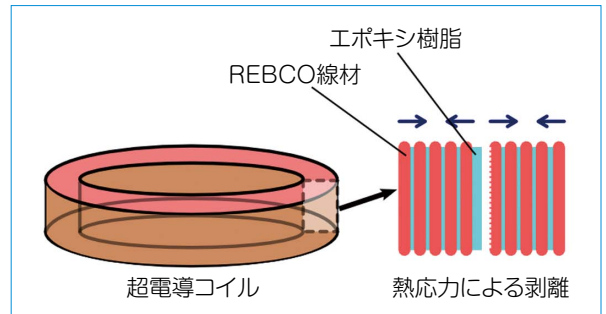


図3 REBCOコイルの劣化

とするRE-Ba₂Cu₃O_y (以下REBCO)があります。高温超電導は1980年代後半に発見され、超電導コイルを作れるような実用的な線材に加工可能になったのはごく最近です。そのため、高温超電導線材を用いた超電導磁石製作は始まったばかりであり、技術的な課題は多数残されています。低温超電導線材と高温超電導線材の外観を図1に示します。

リニア应用到に適した超電導材料

リニア用超電導磁石は最大で5テスラ(T)という大きな磁場を発生させます。超電導線材に流せる電流は臨界温度だけでなく、磁場にも影響されます。たとえ臨界温度が高くても磁場中での通電特性が悪ければ大量の超電導線材が必要になってしまい、リニア車両に乗せるには重くなりすぎてしまいます。

高温超電導の中でも磁場中での通電特性に優れた超電導材料として、私たちはREBCO線材に着目しています。REBCO線材は市販されるようになって

間もないこともあり、磁石に応用された実績もまだ少ない材料です。そのため、リニア应用に向けた開発の始めのステップとしてREBCO線材のコイル化技術の検証を行い、実機と同じ5Tの高磁場が発生可能なREBCO磁石の製作と評価を実施しました。

REBCO線材のコイル化技術

REBCO磁石の製作において最も課題となったのはREBCO線材のコイル化技術です。超電導磁石も通常の電磁石同様に導体(超電導線材)からなるコイルに通電することによって磁場を得ます。単にコイルを巻いただけでは電磁力や振動によってコイルが変形してしまうので、通常、樹脂などを用いてコイルを固めて使われます。このプロセスを含浸と言い、このとき用いられる樹脂としてはエポキシ樹脂が一般的です。エポキシ樹脂は極低温においても接着強度が高いので低温超電導コイルの含浸によく用いられています。しかしながら、REBCOコイルにエ

ポキシ樹脂含浸を行ってしまうと、超電導線材を劣化させてしまう問題があります。物質は基本的に冷却されると縮む性質があり、超電導線材やエポキシ樹脂も例外ではありません。熱収縮の度合いは材料によって異なり、樹脂材料は特にその度合いが大きい特徴があります。そのため、樹脂含浸された超電導コイル内部には熱収縮の差によって大きな力(熱応力)が発生します。加えて、REBCO線材は図2に示すような積層構造をしているので、引張応力には強いものの層間を剥離させるような力には極端に弱い欠点があります。熱応力によって樹脂が部分的にクラックを発生させるだけならコイルの通電特性は変わりませんが、REBCO線材では層間剥離が発生して劣化してしまいます(図3)。

そこで、新たな含浸用の樹脂としてシアノアクリレート樹脂に着目しました。シアノアクリレート樹脂は瞬間接着剤として広く知られており、室温では衝撃や剥離力に弱い特徴があります。



図4 製作したREBCOコイル

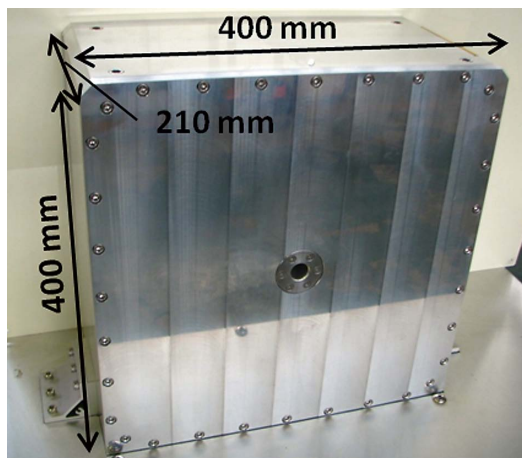


図5 REBCO超電導磁石

極低温での特性を調べたところ、エポキシよりも接着力が弱くREBCO線材を劣化させない樹脂であることが判明しました。¹⁾

高温高磁場磁石の製作

REBCO線材にリニア用超電導磁石へ応用できるだけの性能があることを実証するために、REBCOコイルからなる超電導磁石を製作して特性を評価しました。

まず、図4に示すようなコイルケースに収められたREBCOコイルを複数製作しました。含浸には今回検証したシアノアクリレート樹脂を用い、含浸を行う前後で通電特性が劣化しないことを確認しています。リニア用超電導磁石の最大発生磁場に合わせて、製作したREBCO磁石のコイル中心での最大発生磁場も5Tを目標としました。製作したREBCO磁石の外観を図5に

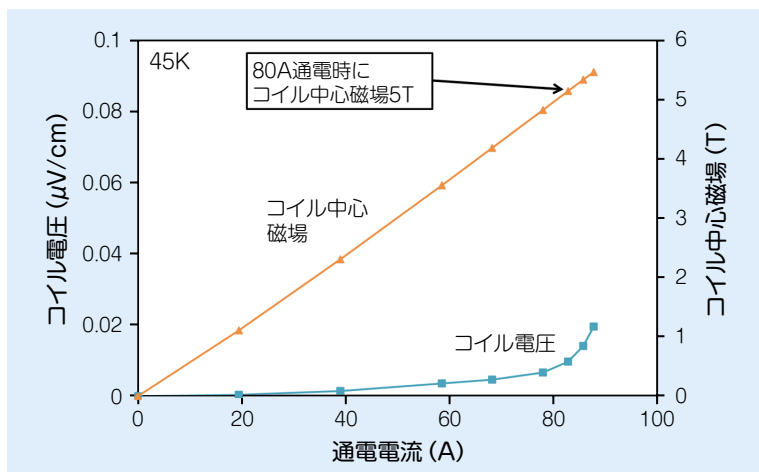


図6 REBCO磁石の通電電流と発生磁場

示します。この中には図4

にあるREBCOコイルが10個積層されています。磁石の評価としては、磁石の温度をパラメーターに励磁試験を行い、最大発生磁場と運用温度の関係を求めました。高温超電導といえども、より低い温度に冷却したほ

うが通電特性はよくなり大きな磁場が得られます。今回製作したREBCO磁石では、目標とする5Tは45Kで実現することができました(図6)。リニア用超電導磁石と形状や大きさは違うものの、最大発生磁場やコイルを流れる電流の密度は同じレベルになっています。そのため、コイルを形成しているREBCO線材の置かれる状況はリニア用超電導磁石に応用した時に近く、将来のREBCO線材の性能向上まで考慮すれば、運用温度を50 K程度まで引

き上げられることを意味します。²⁾

磁石運用温度と冷却の関係

磁石の運用温度は非常に重要な意味を持っており、冷凍機の消費電力に直結します。冷却する温度が低くなるほど冷却効率は低下しますので消費電力も上がってしまいます(参照)。当然、消費電力の大きい冷凍機ほど重量も重くなります。

従来のリニア用超電導磁石は液体ヘリウム温度(4.2K)まで冷却されているので、REBCO線材を用いれば50K程度と十倍以上高い温度で運用できるようになります。そのため、磁石の断熱構造を簡素化してもなお、冷凍機の消費電力および重量は半分程度になります。

高温超電導に向けた冷凍機開発

リニア規模の高温超電導磁石に適した冷凍機として私たちはパルス管冷凍

冷凍機の効率

エアコンや冷凍庫をはじめとする冷凍機の効率には上限があります。冷却効率の理論限界は外気温と冷却温度から求めることができます。

$$\text{冷却効果} = \frac{\text{冷却温度}}{\text{外気温} - \text{冷却温度}}$$

室温(300K)から液体ヘリウム温度(4.2K)まで冷却を行おうとすると、効率は0.014となります。これは、消費電力が1000Wの冷凍機でも4.2Kで得られる冷凍能力は14Wにしかならないことを意味します。現実の冷凍機の効率は理論値よりも低いので、実際の冷凍能力はさらに小さくなります。

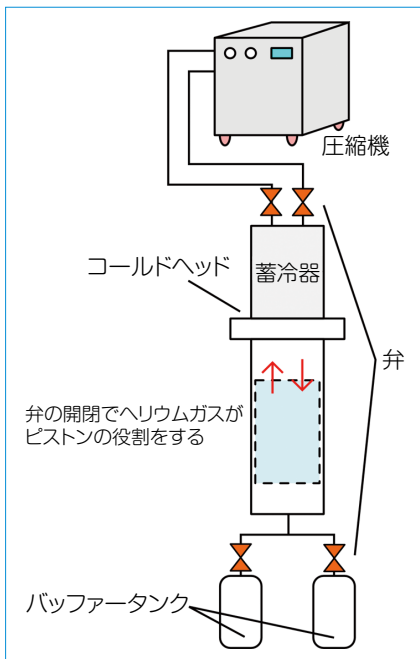


図7 パルス管冷凍機基本構造

機に着目しています。ヘリウムガスを冷媒とした冷凍機で、圧縮機とコールドヘッドからなります。ちょうどエアコンの室外機と室内機の間隔を考えると、圧縮機から送られた高圧のヘリウムガスをコールドヘッドで膨張させることにより冷凍能力を得る仕組みです。パルス管冷凍機のユニークな点はコールドヘッドでヘリウムガスを膨張させるにも関わらず、ピストンを持っていない点です。ピストンのような可動部が存在するとどうしても摩擦が発生してしまい、定期的にメンテナンスを行う必要があります。そのため、パルス管冷凍機は超電導リニアのように、長期間安定運用が望まれる用途に適した冷凍機といえます。

アクティブバッファと呼ばれるタイプのパルス管冷凍機の模式図を図7に示します。圧縮機とバッファータンクの弁の開閉タイミングを調整することでコールドヘッドのヘリウムガスがあたかもピストンのように圧縮膨張を行います。

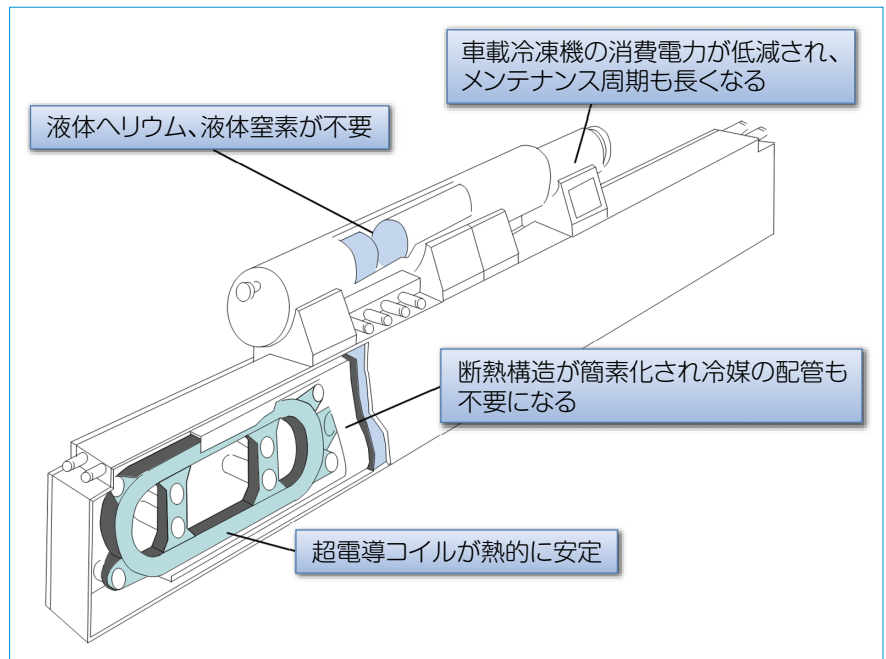


図8 リニア用超電導磁石の高温超電導化のもたらすメリット

リニア応用を念頭にパルス管冷凍機の最適化を行ったところ、50Kの冷却温度において170Wと優れた冷凍能力を実現しました。³⁾

リニア用高温高磁場磁石の実現に向けて

REBCO線材をリニア用超電導磁石へ応用すれば、冷凍機消費電力の低減以外にもメリットがあります(図8)。

現在のシステムでは液体窒素や液体ヘリウムで磁石内部の構造部材や超電導コイルを冷却し、気化した冷媒を冷凍機で再液化する構造になっています。これはヘリウム温度域では物質の比熱が小さく、冷媒を用いないとわずかな熱的外乱でコイル温度が急激に上昇してしまいます。一方で、40Kを超える温度だと比熱は非常に大きくなるので熱的に安定であり、冷凍機での直接冷却が可能になります。そのため、重量面で冷媒とそのためのタンクの分だけ有利になるだけでなく、磁石内部の冷媒循環の配管類も不要になり信頼性の向上にもつながります。

このようにリニア用超電導磁石の高温超電導化は磁石の構造に大きな変化をもたらします。今後はこれまでに培ったREBCO超電導コイルやパルス管冷凍機の技術を統合して、運用面まで考慮した実機大の高温超電導磁石の開発を進めていく計画です。

なお、本研究の一部は国土交通省からの補助金を受けて実施しました。

RRR

文献

- 1) 水野克俊, ほか: 冷却系の簡素化が可能な5T級希土類系高温超電導磁石, 鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.5-10, 2013
- 2) 水野克俊, ほか: 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
- 3) 宮崎佳樹, ほか: 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, Vol.48, No.7, pp.377-381, 2013