

# 高温超電導電流リードの開発



おがた まさふみ

小方 正文

浮上式鉄道技術研究部(低温システム 主任研究員)

## はじめに

2007年8月8日、山梨リニア実験線の累積走行距離が60万kmに達しました。これはリニア車両が地球を15周した計算になる記録ですが、同時に超電導磁石が長期間安定して性能を発揮し続けてきたことを示す記録でもあると思います。

さてこの超電導磁石ですが、これはもう言うまでもなく超電導リニアを構成するためのキーテクノロジー部品です。リニア車両に搭載された超電導磁石は、その強力な発生磁場により、地上のガイドウェイに設置された地上コイルとの間で三つの重要な磁気的な力を生み出します。すなわち「車両を浮かせるための浮上力」、「車両をカーブで曲がらせるための案内力」、「車両を高速で走らせるための推進力」の組み合わせで、リニア車両の走行が実現しているのです。それでは、この超電導磁石はいったいどのようにして磁場を発生しているのでしょうか？ 答えは簡単です。理科の実験等で、電線を巻いて作ったコイルに電流を流すと磁石になる電磁石がよく知られていますが、超電導磁石も原理はそれと同じなのです。ただ超電導磁石がこれと大きく異なるのが、普通の電線の代わりに超電導線（超電導コイル）を巻いている点です。このようにして巻いたコイルを超電導コイルと呼びますが、大きな電流を電気抵抗ゼロのまま通電することができるので、コンパクトな構成にもかかわらず非常に強力な磁場を発生することが可能となります。リニア車上に搭載可能で、かつ非常に強力な磁場を発生できる装置は、今のところ超電導磁石において他にはないのです。

しかし、このような優れ

た特長を持つ超電導磁石も、通電しなければただの箱に過ぎません。超電導コイルへ電流を供給して初めて超電導磁石はその性能を発揮することができるのです。超電導リニアも、走行試験前は車両基地で超電導コイルへ通電する作業（これを励磁作業と呼びます）を行っています。このための、外部の励磁電源と超電導コイルとを電氣的に接続する導体部品、それが電流リードです（図1）。電流リードは、超電導コイルのように注目を浴びることのないどころかと言えれば地味な存在ですが、超電導磁石を構成する上で必要不可欠な重要部品です。今回はこの電流リードにスポットを当てたいと思います。それでは、まず高温超電導についてご紹介したいと思います。

## 高温超電導とは

はじめに超電導について簡単に振り返っておきたいと思っています。超電導現象の代表的な例として、物質の温度を徐々に下げていくと、ある温度のところで突如にして電気抵抗が消失してゼロになることが知られています（図2）。このような物質を超電導体、この時の温度を臨界温度と呼びますが、ご存知のように超電導リニアで使用する超電導

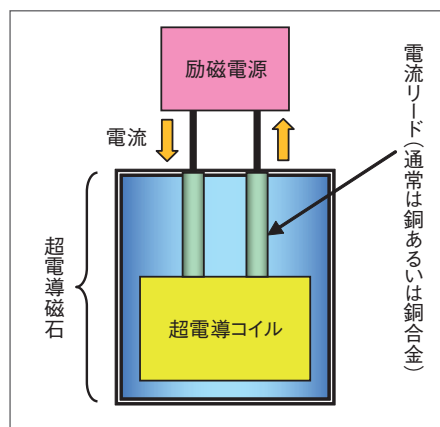


図1 電流リードとは

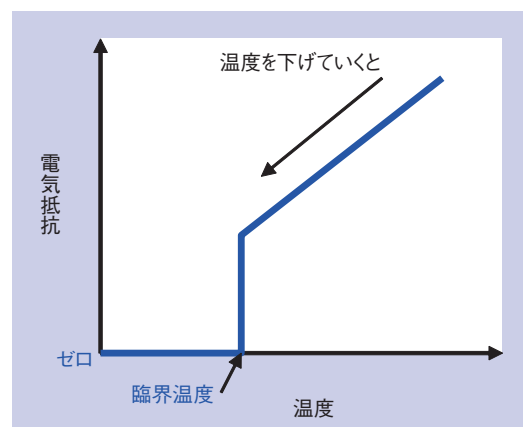


図2 超電導現象の例

磁石もまさにこの現象を利用しています。超電導リニアの場合は、超電導体が金属のニオブとチタンからなる合金(Nb-Ti)を材料とした超電導コイル、臨界温度は絶対温度で10K(-263℃)になります。このため、超電導磁石の性能を発揮させるためには少なくとも超電導コイルを10K以下まで安定して冷却する必要がありますので、超電導リニアでは4K(-269℃)の液体ヘリウムを使用して超電導コイルを冷却しています。このような極めて低い温度の生成技術は、ヘリウム冷凍機技術や断熱構造技術をはじめとする極低温技術分野の開発成果によって確立されましたが、もし臨界温度の高い超電導体が実用化されれば、極低温生成の困難さから解放され、同時に超電導を広く社会一般で利用する道が開けることから、臨界温度の上昇は超電導技術者の間では長い間待望された改良ポイントでした。

1986年に世界中を駆けめぐったいわゆる高温超電導フィーバーをご記憶されている方も多いと思います。この時、超電導体の材料として注目を浴びたのが銅酸化物系材料でした。従来の金属系材料では、たかだか20K程度に停滞していた臨界温度が、この時期、実に100K近くも上昇したのです。これ以降、新たに発見された臨界温度の高い超電導体を高温超電導体と呼ぶようになりましたが、高温超電導体が実用上とりわけ有利な点は、77K(-196℃)の液体窒素で冷却が可能となった点です。液体窒素は液体ヘリウムと比較して取り扱いやコストの面で格段に有利な冷却用材料なので、これにより超電導技術の広範な応用が一層現実的なものとなりました。

その後の技術開発により、高温超電導技術はケーブル等、

様々な分野に適用例がありますが、これからお話しする高温超電導電流リードも、電流リードの使用条件に対して高温超電導体の持つ特長をうまく適用した例のひとつになります。

### 電流リードに求められる性質

これまでに述べたとおり、電流リードは超電導コイルと励磁電源とを電気的に接続する導体部品です。従って、何よりも電流を通しやすいことが電流リード材料に求められる基本的な性質となります。電気抵抗が小さく、加工性やコスト的にも良好な、銅やその合金が電流リードの材料として一般的に使用されています。しかし低抵抗性だけで電流リードの問題はクリアできるのでしょうか？ 実は、超電導磁石に用いる電流リードに求められる性質には、解決すべきもうひとつの重要な要素があります。それは熱の問題です。

繰り返しになりますが、電流リードは超電導コイルと励磁電源とを電気的に接続する導体部品です。しかしこれを熱的な観点から言い換えれば、4Kの極低温の世界にある超電導磁石と、我々の生活する室温(300K程度)の世界にある励磁電源とを接続する導体部品が電流リードであるということになります。つまり、温度差が実に300Kにもなる過酷な環境にありながら何の問題もなく電流経路としての役目を果たさなければならない、これこそ超電導磁石用電流リードに課せられた使命なのです(図3)。

外部の熱が電流リードを伝わって超電導コイルに侵入する現象を伝導熱侵入と呼びますが、これだけ温度差が大き

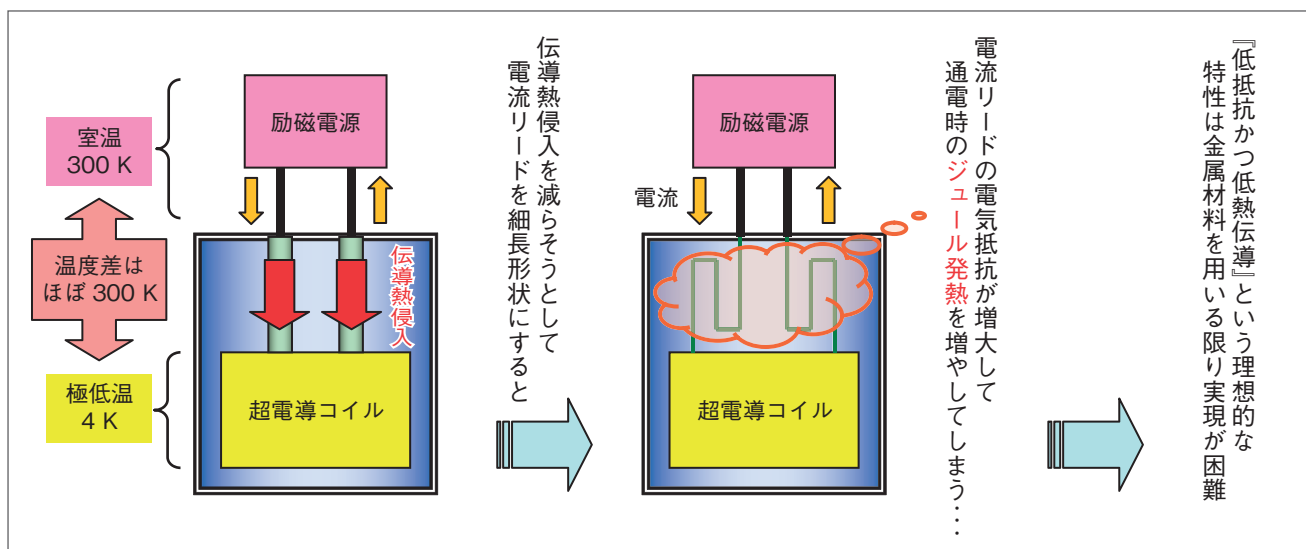


図3 超電導磁石用電流リードの課題

いと、それに比例して増大する伝導熱侵入も非常に大きなものとなって、極端な場合は超電導コイルの極低温状態が保持できなくなることも想定されます。このため、通常、電流リードには伝導熱侵入を抑制するための対策が取り入れられています。例えば、伝導熱侵入はリード導体の断面積に比例し長さには反比例する性質がありますので、リード導体の形状を細く長くすることも対策のひとつです。しかしあまり細長くすると、たとえ材料が銅のように電気抵抗の小さいものであったとしてもリード導体の電気抵抗が無視できない大きさになり、通電時のジュール発熱（ニクロム線ヒータのように、電気抵抗のある物体に電流を流すと熱が発生する現象）が過大になる可能性があります。これでは、伝導熱侵入は防ぐことができて、逆に通電時の性能を悪化させることとなりますので、両者を適度にバランスさせることが電流リード設計のポイントとなります。ちなみに、現在の超電導リニア用超電導磁石では、細長形状の銅合金製リード導体を使用していますが、通電時のリード導体のジュール発熱に対しては、超電導コイル冷却用の液体ヘリウムが蒸発して発生するヘリウムガスを利用してリード導体を強制的に冷却するシステムを採用し、この問題をクリアしています（図4）。

以上、電流リードに求められる性質をまとめると、『電流は抵抗なく伝え、かつ、熱はできるだけ伝えない』ということに集約されます。もうお気づきかと思いますが、従来の延長で金属材料を念頭に置いて検討する限り、金属自身が持つ特性上、自ずとこの問題の解決には限界があります。しかし、この状況を解決できる可能性を持つ画期的な材料が出現しました。それが高温超電導体です。

### 高温超電導バルク体を電流リードに適用するメリット

これまで特に区別することなく高温超電導体という言葉を用いてきましたが、高温超電導の発見以降、実に多様な種類の高温超電導体が開発され、それらは様々な技術分野において応用が進められてきました。このような中、我々が着目したのが、高温超電導バルク体です（バルクとは小間切れではなく塊のままの形状であることを意味します）（図5）。高温超電導バルク体は素材的には陶器などと同じセラミックスの仲間であり、セラミックスに特有の、熱を伝えるにくい長所と、脆くて割れやすい短所とを合わせ持った材料です。熱の伝えやすさを示す指標に熱伝導率がありますが、高温超電導バルク体の熱伝導率は銅に較べて実に二桁

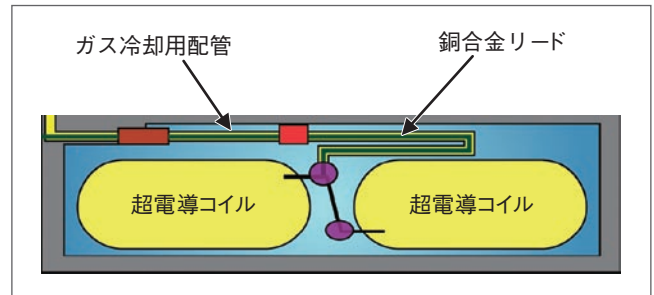


図4 現在の超電導リニア用電流リードの概念図

伝導熱侵入対策…細長い導体形状  
ジュール発熱対策…強制ガス冷却構造

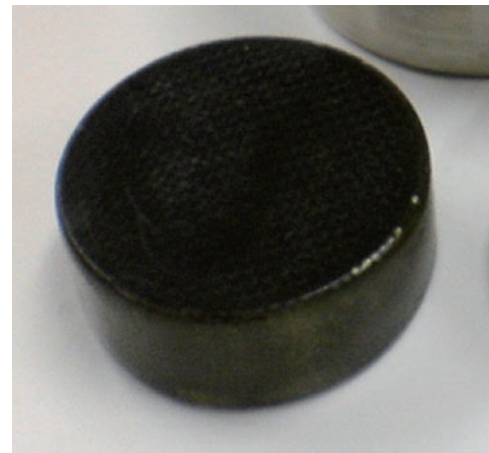
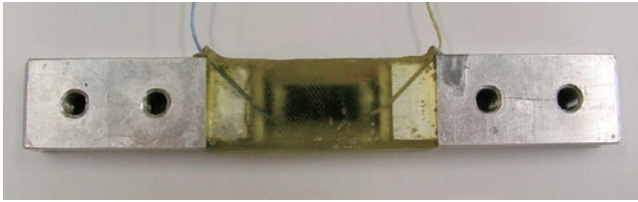


図5 高温超電導バルク体の例  
(直径46 mm・厚さ15 mm)

も小さい値になります。なお、脆さについては後で述べる方法により実用上の問題を解決しています。まさに高温超電導バルク体は、電流リードに要求される『電流は抵抗なく伝え、かつ、熱はできるだけ伝えない』性質を持つ材料なのです。

その高温超電導バルク体にもいくつかの種類がありますが、我々はY（イットリウム）をはじめとする希土類元素を組成成分に含む希土類系高温超電導バルク体と呼ばれる材料を採用しています。この材料は、伝導熱侵入が小さいことはもちろん、他の高温超電導バルク体よりも臨界温度が高い、磁場中の通電特性が良好といった特長を持っています。すなわち、臨界温度が比較的高温な90K（-183℃）であるので、冷却の問題は77K（-196℃）の液体窒素温度で容易に対応することができます。また、磁場中でも比較的大きな電流を流すことができるので、構造上、強磁場を発生する超電導コイルの直近で使用するようになる電流リードの材料として、希土類系高温超電導バルク体は、メリットの多い好適な材料であると言えます。



**図6 高温超電導電流リード**  
 中央部が樹脂含浸加工した高温超電導バルク体  
 両端がスズメッキした銅製電極  
 長さ130 mm・幅20 mm・厚さ10 mm

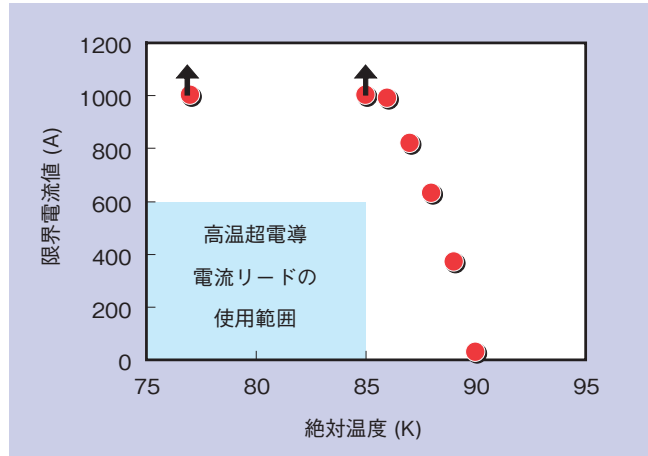
### 高温超電導電流リードの開発

超電導磁石の一層の性能向上を目的として、希土類系高温超電導バルク体を適用した電流リードを開発しました(図6)。リードの中央部分に、大きなバルク体から切出加工した高温超電導バルク体を組み込み、その両端に電極をハンダ接合しています。そして、電極との接続部も含めてバルク体全体をエポキシ樹脂で固めています。樹脂に覆われた部分の機械的強度を飛躍的に向上させるこの方法により、セラミクス特有の脆くて割れやすい特性を克服しました。またエポキシ樹脂は、熱伝導率が高温超電導バルク体よりも更に小さい特長があるので、伝導熱侵入を抑制する意味においても効果的な構造材料なのです。

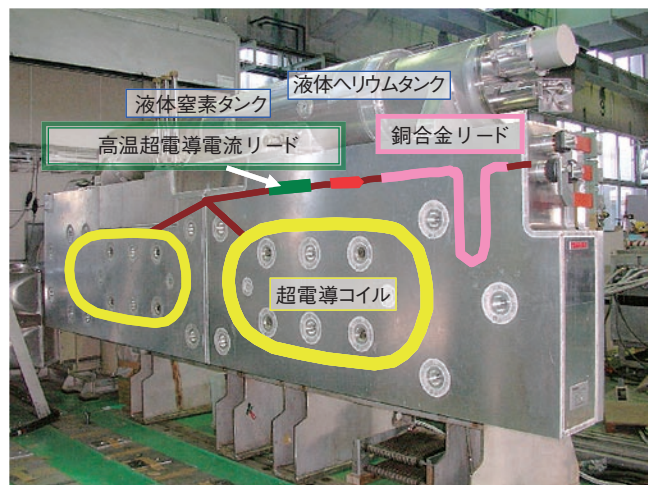
この高温超電導電流リードについて、実際の超電導コイルの発生磁場に相当する磁場を外部から与えた状態で、温度をいろいろと変えながら通電を行い、限界電流性能をチェックしました(図7)。その結果、実際に高温超電導電流リードを使用することになる液体窒素温度(77K)付近では、十分な通電性能を持っていることを確認しました。

さらに、この高温超電導電流リードを定置試験用の超電導磁石(地上コイル電磁加振試験用超電導磁石)に実際に組み込んで、そのメリットを検証しました(図8)。その結果、通電時の強制的なりード冷却が不要となったことで、従来あったガス冷却用配管を省略し、超電導磁石の小型化、軽量化、構造簡素化が実現できました。またガス扱い作業も不要となったので、励磁作業の省力化、時間短縮を実現しました。このように、高温超電導電流リードの超電導磁石への適用は、ハード的にもソフト的にもメリットが大きく、超電導磁石の更なる性能向上、信頼性向上が実現できることを確認しました。

今後も、高温超電導電流リードの信頼性、耐久性の検証を続けるとともに、耐振動性能の向上を図ることによって、実際に走行する超電導リア用超電導磁石にも高温超電導



**図7 高温超電導電流リードの限界電流の温度特性**  
 図6の紙面上下方向に0.5 Tの磁場をかけて実施  
 矢印は限界電流値が励磁電源の上限電流以上



**図8 高温超電導電流リードを組み込んだ超電導磁石**  
 地上コイル電磁加振試験用超電導磁石

電流リードシステムを適用することが可能となると考えています。

### おわりに

電流リードに関する初歩的なところから最新の高温超電導電流リードの開発状況まで概要を述べてきました。超電導コイルのすぐ傍には、電流リードという頼れる相棒が控えていることを今回の報告でご理解いただけたら幸いです。

本研究は国土交通省の補助金を受けて実施しました。

RRR