

イットリウム系線材で超電導磁石をつくる

小方 正文

浮上式鉄道技術研究部(低温システム研究室 主任研究員)



おがた まさふみ

はじめに

超電導は物質の電気抵抗が突然ゼロになる大変興味深い現象です。これは今から100年ほど前、オランダの物理学者オネスによって極低温の4.2K (Kは絶対温度を示す単位でケルビンと呼びます)、つまりマイナス269℃の液体ヘリウムで冷却された水銀の電気抵抗の測定中に発見されました。ちなみに、彼は超電導を発見する数年前、当時誰も成し得なかったヘリウムガスの液化にも史上初めて成功しています。こうして発見の当初から、超電導現象と液体ヘリウムは文字通り切っても切れない関係が長く続きました。

しかし、1986年の高温超電導の発見でこの関係は過去のものとなりました。つまり、ある実用的な高温超電導材料は、液体ヘリウムではなく、ずっと高温の液体窒素(77K)で冷却するだけで良くなったのです。高価で取り扱いの難しい液体ヘリウムの代わりに、安価で取り扱いの容易な液体窒素や簡便な方式の冷凍機を用いることができるので、超電導材料の冷却に伴うコストや手間が大幅に改善されることになりました。それまではどちらかと言えば特殊な技

術であった超電導が、一気に身近な存在となったのです。

本報告では、このような背景の中で開発された高温超電導材料のひとつであるイットリウム系線材について概要を述べた後、この線材を超電導磁石へ適用するまでの過程を実際開発例を用いて述べていきます。

いろいろな超電導材料

はじめに、超電導材料開発の歴史に簡単に触れておきたいと思います。超電導状態を決定する最も基本的な指標は材料が超電導状態になる時の温度で、これを臨界温度と呼んでいます。図1にこれまでの超電導臨界温度の推移を示しました。現在は超電導材料にもいくつかの種類がありますが、当初はNb(ニオブ)を主な成分とした金属系材料に限られ、臨界温度も液体ヘリウム冷却が必要な20K程度までの状況が半世紀以上にわたって続きました。この金属系の材料は線材に加工することが比較的容易であったため、Nb-Ti(ニオブ-チタン)などの金属系線材で超電導コイルを巻き、液体ヘリウム冷却と組み合わせることで、超電導リニアや医療用MRI(磁気共鳴断層撮影)装置などの応用が徐々に進みました。

そして、臨界温度は高温超電導材料の発見で一気に上昇

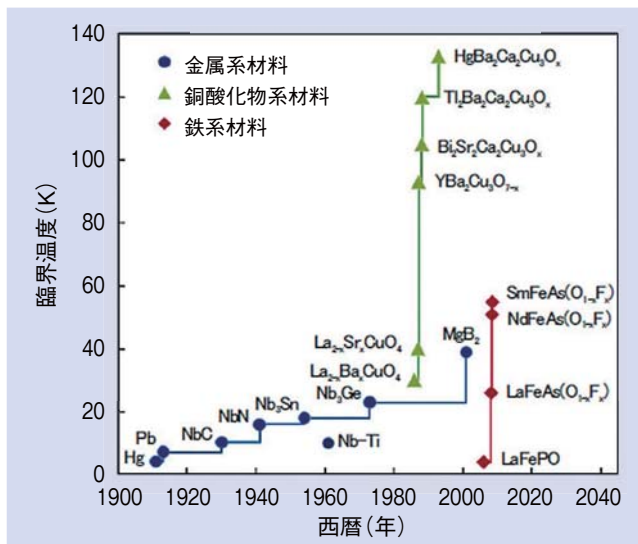


図1 超電導臨界温度の推移

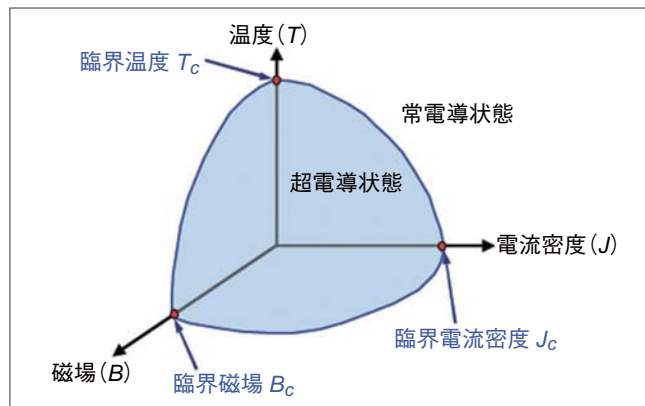


図2 超電導状態を決定する3つの臨界条件

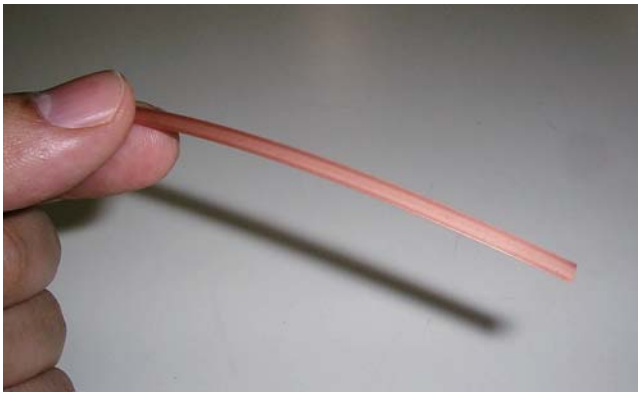


図3 イットリウム系線材(幅4.1mm, 厚さ0.1mm)

します。図1に示す銅酸化物系材料がそれで、1986年の発見からわずか数年のうちに、臨界温度が30K程度から130K程度まで100K近くも上昇しました。この超電導史上例のない成果の中で、現在につながる2種類の重要な銅酸化物系材料が発見されています。Y(イットリウム)が主成分の $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ に代表されるイットリウム系材料(臨界温度93K)と、Bi(ビスマス)が主成分の $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ に代表されるビスマス系材料(臨界温度105K)です。

簡単のため、これまで超電導材料を臨界温度の視点から述べてきましたが、超電導状態を決定する指標には、この他に図2に示す臨界磁場と臨界電流密度があり、臨界温度以下であっても、実際にその温度で材料に与える磁場や流す電流密度の大きさには、材料固有の限界値が存在します。イットリウム系材料とビスマス系材料は、材料を線材に加工するプロセスにおいて磁場や臨界電流密度に対する限界を大きく向上させることに成功したため、それぞれイットリウム系線材、ビスマス系線材として、今日の代表的な実用高温超電導線材へと発展しました。なお超電導磁石は磁場を発生する装置なので、超電導磁石用途には磁場中における臨界電流密度の大きい線材の方が有利です。以後、ここではこの点に優れるイットリウム系線材を扱います。

また、2001年に発見された MgB_2 (二ホウ化マグネシウム)は、金属系材料としては最も高い39Kの臨界温度が特長で、低コストな高温超電導材料として注目されています。さらに、2006年に発見された鉄系材料は、すでに MgB_2 を上回る臨界温度が確認されており今後の応用展開が期待されています。

イットリウム系線材

イットリウム系線材の外観例を図3に示します。一般的な丸形断面や角形断面の線材と異なり、幅に対して厚さが極端に小さい非常に扁平な断面形状をしています。この特徴からテープ線材と呼ばれることもあります。このような形状は線材の製造プロセスに起因しています。図4はイッ

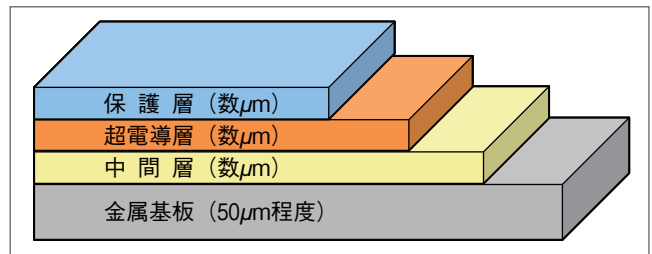


図4 イットリウム系線材の基本構造(模式図)

トリウム系線材の基本構造を模式的に示したものです。まず線材の機械的強度を受け持つ金属基板(50 μ m程度)上に、超電導層と金属基板を隔てるための中間層(数 μ m)を成膜します。予めこの中間層に高精度な結晶構造を持たせておくことで、イットリウム系材料からなる超電導層(数 μ m)の成膜時にも結晶構造が引き継がれ、良好な通電特性が得られます。そして最後に銀を主成分とする保護層を被せて線材が完成します。通常は更に20 μ m程度の銅で全体を覆って安定化層を形成して使用するのので、最終的に厚さが0.1mm程度の扁平な断面形状となります。

イットリウム系線材は、機械特性の面でも高い強度を持ち、通電特性の面でも磁場中で高い臨界電流密度を有することから、特に高磁場発生用超電導コイルへの適用が期待されている高温超電導線材です。

線材通電特性を評価することの重要性

イットリウム系線材は、現段階で米国の2社と我が国の1社の線材メーカーから実際に購入することのできる実用超電導線材ですが、一方で臨界電流密度の向上や線材の長大化に向けた研究開発は現在も進行しており、毎年のように改良が図られています。このように性能向上ペースの速い線材を扱う場合は、その線材に関する既知の通電特性がすぐに陳腐化してしまうことも問題になります。

また、線材をコイルに適用する場合は、コイル自体が磁場発生源となるので、そのコイルを構成する線材自身も磁場を受けます。つまり、受ける磁場の大きさに応じてコイルを構成する線材の臨界電流密度が変化することにも注意が必要です。加えてイットリウム系線材には、線材平面を貫く磁場の角度によって臨界電流密度が変化する異方性と呼ばれる性質があるため、磁場の大きさだけでなく磁場が当たる角度によっても臨界電流密度が影響を受けます。

このように、イットリウム系線材を超電導コイルへ適用するときは、コイル巻線に用いる実際の線材からサンプルを採取し、サンプル線材に与える磁場、磁場角度、温度をパラメータとしたときの臨界電流密度特性を実験的に評価した後、得られたデータを用いてコイルの設計、製作を進めることが重要です。

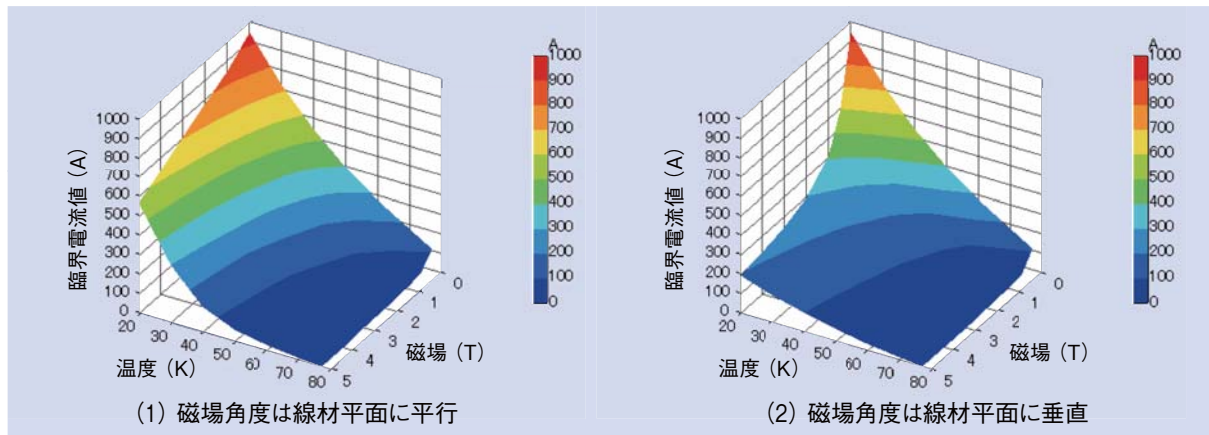


図5 イットリウム系線材の通電特性評価結果

そのため、鉄道総研ではサンプル線材に対して最低温度が10Kまで、任意の角度で最大5.5T (Tは磁場の大きさを示す単位でテスラと呼びます) までの磁場が設定可能で、最大1000Aの通電が可能な評価装置を開発しました¹⁾。

イットリウム系線材の通電特性評価試験結果の例を図5に示します。試験用サンプルには幅4.1mm、厚さ0.1mm、77Kの液体窒素冷却時の臨界電流値が112Aの線材を用いました。図5の縦軸にある臨界電流値を線材の超電導層の断面積で割ると臨界電流密度に換算できますが、ここでは臨界電流値のまま用いることにします。この結果より、臨界電流値は、高温高磁場にするほど小さくなり、低温低磁場にするほど大きくなる特性があり、図2の超電導状態を決定する3つの臨界条件の関係を良く再現していることがわかります。また、図5の(1)と(2)は磁場角度条件だけが異なりますが、磁場の大きさは同じでも線材平面に垂直に磁場を与えると、平行に磁場を与えたときよりも臨界電流値が小さくなる異方性を確認することができました。

このようなサンプル線材に関する異方性も含んだ通電特性評価データを用いることで、この線材で超電導コイルを製作した場合の、コイル冷却温度に対する臨界電流値を計算することができます。つまり、コイル性能で最も重要な最大発生磁場の設計が可能となるのです。最大発生磁場はコイルの性能限界なので、これは一定の安全率を見込んだ上で超電導コイルの安定運用が可能であることを意味します。これこそ線材特性評価がもたらす実用上最大の利点です。

超電導磁石を高温超電導化するメリット

なぜ、高温超電導技術を用いて超電導磁石の高温超電導化を目指すのでしょうか？ ここで、超電導磁石を高温超電導化するメリットについて述べたいと思います。

図6はNb-Ti線材を用いた従来タイプの超電導磁石例です。高温超電導化で冷凍機による直接冷却方式を採用でき

るので冷却用タンクが不要となり、冷凍機自体も小型軽量、低消費電力なものに置き換え可能になります。また、運用温度の上昇に伴いコイルの超電導安定性は向上し、磁石の構造も簡単になります。このように高温超電導化には、冷却の面からも超電導安定性の面からも効果があり、小型軽量で構造の簡素化された信頼性の高い超電導磁石の実現につながる多くのメリットがあります。

超電導磁石の開発例～モバイルマグネット～

最後に、イットリウム系線材を用いた超電導磁石の開発例をご紹介します。高温超電導磁石のメリットを突きつめると究極の姿として冷凍機無しの構成も可能となります。これは最初にコイルを十分に冷却しておくことで、その後は外部からの熱侵入と保冷性能とのバランスでコイル温度が徐々に上昇していきますが、ある限界温度に達するまでの間は超電導状態が保持されることを利用するものです。

そこで、従来よりも大幅に高い温度まで運用可能な高温超電導の特長を最大限活用した保冷式超電導磁石を開発しました。この超電導磁石は冷凍機を無くしただけでなく、電流回路に内蔵したスイッチで超電導コイルへ閉ループ電流を保持できる構造としたので、一度励磁すれば励磁電源

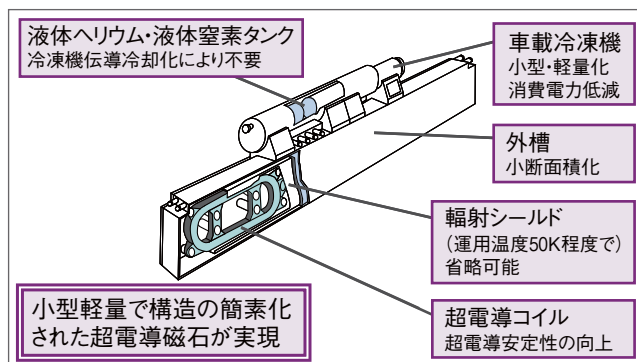


図6 超電導磁石の高温超電導化がもたらすメリット

表1 モバイルマグネットの主な仕様

線材	イットリウム系高温超電導線材, 幅4.1mm, 厚さ0.1mm, 臨界電流112A(77K)
コイル形状	レーストラック形(要素コイルを4個積層)
コイル寸法	巻線内径100mm, 巻線外径150mm, 直線部長さ150mm, 積層後厚さ21mm
ターン数	562ターン
線材長さ	400m
含浸材料	エポキシ樹脂
インダクタンス	97mH
定格電流	86A
冷却方法	低温ヘリウムガスによる初期冷却方式
初期冷却温度	20K以下
保冷時間	20Kから50Kまで9時間
励磁方法	内蔵スイッチによる閉ループ電流方式
定格磁場	コイル最大経験磁場1T
外寸法	幅600mm, 高さ400mm, 厚さ200mm
質量	52kg

も外して運用できます。重くて大きい冷凍システムや励磁電源を切り離すことが可能で、従来の超電導磁石では実現困難だった“どこにでも持ち運ぶことのできる小型の超電導磁石”という特長から、この超電導磁石を“モバイルマグネット”と呼んでいます(表1, 図7)。モバイルマグネットの磁場性能は、コイル温度50Kで1Tの発生磁場を目標にしました²⁾。

コイル用線材には、線材評価試験で図5の通電特性があることを確認済みのイットリウム系線材を使用し、図8に示すレーストラック形状の超電導コイルを製作しました。長さ100mのイットリウム系線材をFRP製巻枠の周囲に140ターン程度巻き重ねたものを要素コイルとし、この要素コイルを4個積み重ねて直列接続しました。そして、線材通電特性データを用いたコイルの設計計算で、コイル温度50Kにて86Aの通電が可能で、このときに1Tの発生磁場が得られることを事前に確認しています。

図9にモバイルマグネット用コイルの臨界電流特性を示します。線材通電特性から計算した値に対する実際の試験結果は、低温側では少し低めになることがわかりました。この原因は線材をコイル化する過程で線材通電特性に何らかの劣化が生じたものと想定していますが、コイル化工程の改良により将来的には改善可能と考えています。また、コイル温度50Kにおける発生磁場目標値の1Tについては、実験結果が1.3T(臨界電流113A)であったので、限界に対して24%の安全率をもって達成することができました。

おわりに

イットリウム系線材の概要と、同線材で超電導磁石をつくるまでの過程を実際の開発例を用いて紹介しました。

現在のところ、イットリウム系線材の製造技術やそれを

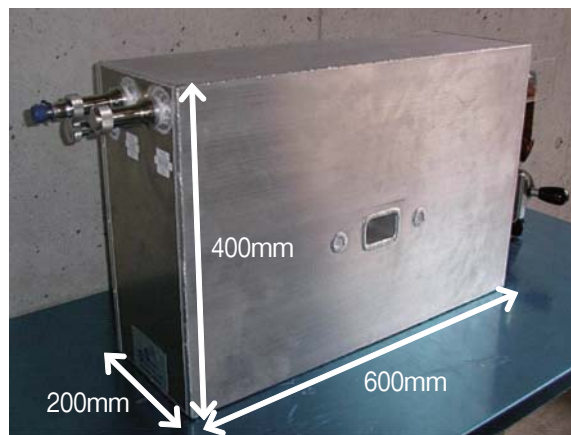


図7 イットリウム系線材でつくったモバイルマグネット

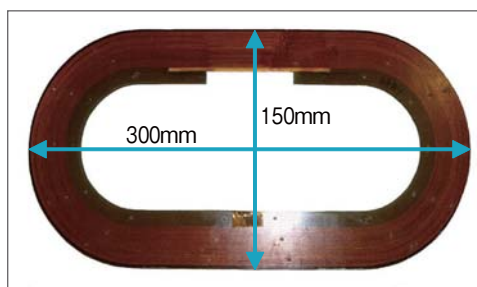


図8 モバイルマグネット用高温超電導コイル

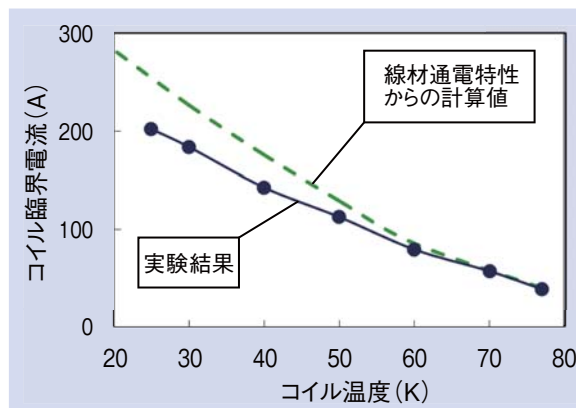


図9 モバイルマグネット用コイルの臨界電流特性

用いた超電導コイルの製作技術も、まだ発展途上の段階にあります。今後も高温超電導磁石の実機応用に向け、線材通電特性の把握、コイル化工程の改良、冷却方法の最適化、耐久性の確認などをはじめとした開発を進めていく計画です。

本研究は国土交通省の補助金を受けて実施しました。

RRR

文献

- 1) 小方正文, ほか: 高温超電導線材通電特性試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, 2008
- 2) 小方正文, ほか: 冷凍機無しで超電導を長時間維持する希土類系高温超電導磁石, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, 2011