

浮上式鉄道用の希土類系高温超電導磁石の熱特性評価

水野 克俊* 小方 正文* 長谷川 均*

Thermal Properties of REBCO HTS Magnet for Maglev

Katsutoshi MIZUNO Masafumi OGATA Hitoshi HASEGAWA

The REBCO coated conductor, which is one of high temperature superconductors, can be used even if the operational temperature of superconducting magnets is raised. If the coated conductor is applied on Maglev, the on-board magnets are directly cooled by a cryocooler without liquid helium. The cost of liquid helium has been increasing and the future supply of helium is considered to be unstable. The absence of cryogen, such as liquid helium, means the drastic change of the thermal structure of the magnet. We produced an experimental cryostat which imitates the thermal properties of the on-board magnet made of REBCO coils. The thermal distribution of the REBCO coil and cold storage time in case of cryocooler failure were evaluated.

キーワード：REBCO, 希土類系高温超電導線材, 保冷, 伝導冷却

1. はじめに

希土類系高温超電導線材（以下 REBCO 線材）の性能が近年飛躍的に向上しており、機器応用に向けた研究開発が盛んに行われている。従来の低温超電導線材は液体ヘリウムを用いて冷却され、4K 程度の極めて低い温度で運用されることが一般的であった。一方で、REBCO 線材は臨界温度が高く、30K を超える温度でも低温超電導線材と同等、あるいはそれ以上の通電特性を得ることができる¹⁾。加えて、REBCO 線材を 10 K 程度まで冷却すれば、従来の低温超電導では不可能であった超高磁場を実現できる見込みもある²⁾。

REBCO 線材の応用としては二つの方向性がある。一つは磁石運用温度の向上を目指すものであり、冷却コストの低減や液体ヘリウムが不要になる利点がある。液体ヘリウムは発展途上国への MRI の普及などにより需要が増加しているにもかかわらず、将来的にも供給が改善される見通しが乏しいとされている。この 10 年間で見ても、ヘリウムの価格は約二倍になっている³⁾。一方で、高温超電導を用いても、液体窒素温度で必要な磁場を得るのは困難と考えられ、将来の超電導機器の普及のためにもより高性能な冷却システムの研究開発が急がれている。もう一つは超高磁場を利用した超電導機器の性能向上である。NMR の分解能の向上や⁴⁾、物理実験用の 20T を超える超高磁場磁石の開発が挙げられる²⁾。

著者らは REBCO 線材の浮上式鉄道用車載超電導磁石への適用を念頭に研究を行っており、高温超電導化によって得られる利点や課題を検討し、その中でも特に大きく変わることが予測される磁石の熱特性について実スケールの評価試験を実施したので報告する。

2. 車載超電導磁石の高温超電導化

浮上式鉄道用の車載超電導磁石に求められる起磁力は地上コイルの設計と密接に関係している。現状の地上コイルをそのまま用いることを考えれば、浮上式鉄道用の高温超電導磁石の開発は、低温超電導磁石の置き換えであり、起磁力も既存の値が目標となる。すなわち、高温超電導化によって得られる利点は磁場の向上ではなく、運用温度の上昇にある。

既存の低温超電導磁石はふく射シールドを液体窒素で、超電導コイルを液体ヘリウムで冷却し、気化したガスをそれぞれ冷凍機で再液化する構造となっている。運用温度が向上すれば、寒剤を用いず冷凍機による直接冷却が可能になる。資源として将来的に課題のある液体ヘリウムを用いなくてよく、液体ヘリウムのための地上設備が不要になり、加えて断熱構造の簡素化も利点として挙げられる。また、運用温度と冷凍機効率には相関があり、REBCO 線材を用いた場合は冷凍機消費電力が大きく低減される。浮上式鉄道は車両、すなわち移動体に超電導磁石を搭載しているため、消費電力の低減は車載電源設備の小型軽量化を意味しており、ひいては車両自体

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

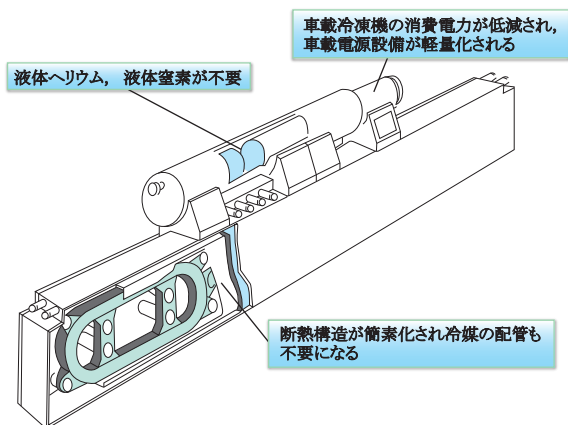


図1 車載超電導磁石の高温超電導化による利点

の軽量化にも貢献する(図1)。

一方で、寒剤がないことによる課題も存在し、一つはコイルの均一な冷却が困難になることである。コイルが温度分布を持つと、もっとも温度の高い箇所ではコイルの性能は規定されてしまう。液体ヘリウム漬浸冷却ならば、対流により極めて均一に冷却されコイル内に温度分布を持つことはなかったものの、伝導冷却では伝熱経路をすべて固体熱伝導で構成する必要がある。

これに加えて、冷凍機異常停止時の保冷の課題もある。既存のシステムでは、冷凍機が停止しても寒剤が蒸発するまでは磁石としての機能を維持することができる。寒剤を持たない高温超電導磁石では、冷凍機が停止すると同時にコイル温度は上昇することになる。そのため、通常運転時のコイルの運用温度を若干低めにしておき、且つコイル熱容量を大きくとるよう設計し、一定時間は磁石としての機能を維持する仕組みを持たせる必要がある。

3. 高温超電導磁石概念設計

浮上式鉄道用の超電導磁石は軽量であることおよび、冷凍機異常停止まで視野に入れた信頼性が求められる。そのため、設計における制約条件が他の超電導磁石よりも多く、高温超電導で車載磁石が成立するか設計検証を行った。

3.1 磁石諸元および熱特性目標値

運用温度が高いほど高温超電導化の利点が顕著になるだけでなく、材料の比熱も高くなるので、冷凍機異常時の保冷にも有利になる。そのため、コイルの設計としては50Kまで励磁状態を維持可能とし、40Kでの定常運転を仮定した。浮上式鉄道に求められる700kAの起磁力を実現した時のコイル最大経験磁場は約5Tであり、温度50K且つ経験磁場5Tにおける臨界電流が磁石としての定格電流となる。REBCO線材は現在も性能向上に向けた開発が盛んであり、この先数年の性能向上も加味してコイル設計を行うこととした。REBCO線材にはSuper-

表1 高温超電導磁石設計諸元

| | |
|-----------|----------------------------|
| 定格電流 | 250 A |
| 最大励磁可能温度 | 50 K |
| 定格運用温度 | 40 K |
| コイル最大経験磁場 | 5 T |
| REBCO線材 | SuperPower Inc.: SCS6050AP |
| 巻数 | 2800 ターン ^{**} |
| 使用線材長 | 約8 km ^{**} |
| コイル巻線質量 | 50 kg ^{**} |

※1コイルあたり

Power社SCS6050APを想定し、将来の性能向上⁵⁾を考慮すれば、50K、5Tにおける臨界電流は250Aに到達すると予測される。高温超電導磁石諸元を表1にまとめる。

浮上式鉄道用の高温超電導磁石の質量及び熱特性については、下記のように目標値を設定した。

- 一コイルあたりの質量(コイルケース含む)140 kg以下
- 定常時(40K)コイル温度分布1K以下
- 冷凍機異常停止時の保冷1時間(40K~50K)

なお質量目標に関しては、従来の車載低温超電導磁石の値を参考に概算している^{6) 7)}。

3.2 コイルケース検討

レーストラック状のコイルは、通電時にコイル自身が発生する磁場によって円形に膨らもうとするフープ力と呼ばれる電磁力が発生する。そのため、超電導コイルは剛性を持ったコイルケースに収められる必要がある。従来の低温超電導では、コイルケースは液体ヘリウムを蓄える内槽容器としての機能もあり、気密性の観点からステンレス材料で製作されていた。高温超電導では液体ヘリウムが不要で、気密性を考慮する必要がないためステンレス以外の材料でもコイルケースの製作が可能になる。そこで、高剛性且つ軽量であるジュラルミンに着目した。ステンレスに対するジュラルミンの利点は以下のとおりである。

- ・比強度が高く、コイルケースの軽量化が可能になる。
- ・熱伝導率が高く、コイル温度差がつきにくくなる。
- ・加工性が高いため、製作コストの低減が期待される。

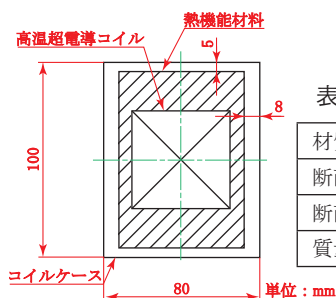


図2 コイル断面形状

表2 コイルケース仕様

| | |
|------|--------|
| 材質 | A2017 |
| 断面高さ | 100 mm |
| 断面幅 | 80 mm |
| 質量目標 | 36 kg |

ただし、コイルケースとコイル巻線のみで前述の熱特性を実現することは困難であると予想され、熱機能材料を追加する必要がある。そのため、熱機能材料のための空間を追加し、従来のステンレス製内槽容器⁸⁾と同等の曲げ剛性を持つことが求められることを考慮しつつ、コイルケースの断面形状は80mm×100mmとして仕様を検討した(図2,表2)。

3.3 コイル構成部材熱特性

REBCO 線材はニッケル合金基板の上に各種中間層、超電導層および銅安定化層が積層された構造となっている。中間層及び超電導層は数 μm と極めて薄く、熱特性としてはニッケル合金と銅安定化層が支配的である。今回の検証で想定した SuperPower 社の線材では、これらの材料の構成比率はほぼ 1:1 であり、基板には Hastelloy が用いられている⁵⁾。銅安定化層については、純度の指針である RRR(残留抵抗比)が 50 であると仮定した。コイルとしては線材に加えて、ターン間の絶縁材料が加わる。絶縁材料はポリイミドとし、コイル全体の 20% の体積を占めるとしてコイルの熱特性を見積もった。コイル熱特性を表 3 に示す。

表 3 REBCO コイル熱特性

| | |
|-----------------|------------------------|
| 比重 | 7380 kg/m ³ |
| 線材方向熱伝導率 (40K) | 約 400 W/mK |
| 積層方向熱伝導率 (40K) | 約 0.4 W/mK |
| 熱容量 (40K ~ 50K) | 750 J/kg [*] |

* Hastelloy の比熱はインコネルの値で代用

設定した高温超電導磁石としての熱特性目標を実現するためには、REBCO コイルのみでは熱容量および熱伝導率が不足しており、図 2 に示すように熱機能材料をコイル周りに追加する必要がある。コイル温度分布を均一にするためには熱伝導率の高い材料が求められ、異常時の保冷時間の延長には熱容量の高い材料が求められる。熱伝導率に優れた材料としては、無酸素銅や高純度アルミが挙げられる。体積当たりの熱量に関しては無酸素銅が優れているものの、比重が大きく質量の面では不利になる。無酸素銅と高純度アルミの基本物性を表 4 に示す。

表 4 熱機能材料物性比較^{9) 10)}

| | 無酸素銅 (C1020) | 高純度アルミ (99.999%) |
|-----------------|------------------------|------------------------|
| 比重 | 8940 kg/m ³ | 2700 kg/m ³ |
| 熱伝導率 (40K) | 約 1000 W/mK | 約 2000 W/mK |
| 熱容量 (40K ~ 50K) | 750 J/kg | 1110 J/kg |

3.4 高温超電導磁石熱特性予測

低温超電導磁石への熱侵入源としては、ふく射熱と荷重支持材からの伝導熱が大きな割合を占めている。高温超電導磁石では永久電流モードが実現できておらず、外部電源による常時通電となり熱侵入が増加する。車載超

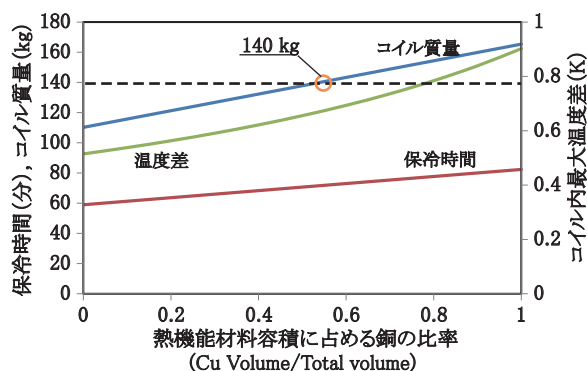


図 3 高温超電導磁石熱特性予測

電導磁石 1 個につき 4 つのコイルを有しており、ここでは 1 外部電源あたり 2 コイル直列通電と仮定した。

また、本研究では冷凍機異常停止時も検討にふくまれており、そのような場合は停止した冷凍機も熱侵入源となる。冷凍機には単段パルス管冷凍機を用いると仮定して熱侵入量を予測した。

今回の検討では図 2 に示すようなコイル断面形状を想定しており、熱機能材料の設置空間は限定されている。そのため、熱機能材料としての無酸素銅と高純度アルミの比率を変化させて目標値が実現可能か概算した。計算結果を図 3 に示す。保冷時間とコイル内温度差については銅・アルミの比率によらず目標値に収まっていることが分かる。コイル質量に関しては、銅の比率が増えるにつれて増加しており、アルミとの体積比で 1:1 程度かそれ以下ならば質量についても 1 コイルあたり 140 kg 以下を実現できる見込みとなった。

4. 熱シミュレータ試験

前章で行った検討ではコイルの各構成部材間の接触熱抵抗のようなモデル化が困難な要素は含まれておらず、実験による検証が不可欠である。そのため、実機大高温超電導磁石の熱特性試験が実施可能な熱シミュレータ試験装置を用いてコイル温度分布および、冷凍機停止時の保冷時間評価試験を実施した。

4.1 試験装置

熱シミュレータ試験装置の特徴としては、超電導コイルの熱物性を再現した模擬コイルを有しており、スケールは 1/1 かつ実機大磁石の冷却が可能な冷凍能力のパルス管冷凍機も搭載されている。通電機構も有するため、将来的には実機大 REBCO コイルを搭載することも予定している。熱シミュレータ試験装置写真を図 4 に示す。

模擬コイルを収めるコイルケースは前章での検討に基づき、ジュラルミン (A2017) で製作した。電流リードはコイルケース上部で短絡させており、コイル通電時のジュー

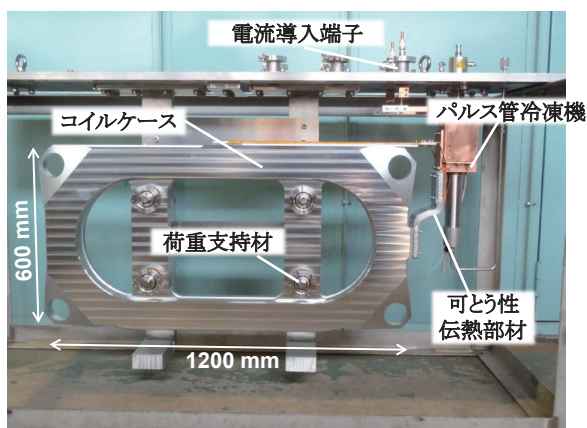


図4 熱シミュレータ試験装置（多層断熱材施工前）

ル発熱を模擬することができる。コイルケース荷重支持材にはヒータが取り付けられており、室温からの熱伝導による熱侵入も再現している。また、模擬コイル周りに設置する熱機能材料は取り換え可能な構造となっており、高純度アルミと無酸素銅の比率変更が可能である。ここで報告する試験では、コイルケース内部に配置する熱機能材料の割合を高純度アルミ 90%、無酸素銅 10%としている。そのため、ケースを含むコイル質量も 120kg を切る構成となった。

4.2 熱侵入量評価試験

仮に、コイルへの熱侵入量が予測と異なっていれば、コイルを通過する熱流束も異なり、温度分布にも影響が出る。そのため、コイル温度分布の測定に先立ち、熱侵入量の妥当性を評価した。熱侵入量の評価としては、冷凍機の到達温度を用いた。

熱シミュレータに用いたパルス管冷凍機は我々のグループで独自に開発したものであり¹¹⁾、到達温度と冷凍能力の関係は評価済みである。そのため、本試験での冷凍機最低到達温度から、その時の熱侵入量を概算することができる。図5に冷凍機冷凍能力曲線を示す。定格電流の 250 A 通電時の定常状態で、冷凍機温度は 34.1K となり、このときの熱侵入量は 43W と概算される。一方で、設計形状から熱侵入量を概算すると 35W となり、コイルへの熱侵入、すなわち荷重支持材からの伝導熱とふく射熱による熱侵入が想定以上であった可能性がある。

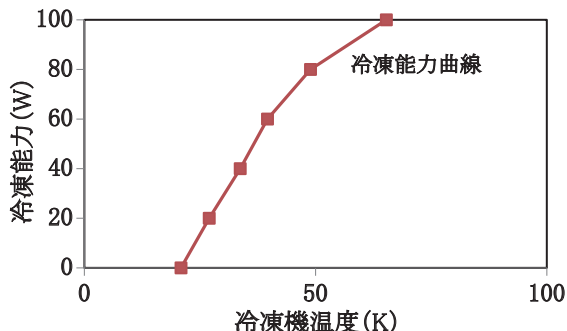


図5 パルス管冷凍機冷凍能力曲線

4.3 コイル温度分布評価試験

製作した熱シミュレータ試験装置は模擬コイルと熱機能材料をコイルケースに収めた構造となっており、これらは可とう性伝熱部材を介して冷凍機と熱的に接続されている。伝熱経路での熱抵抗と、冷凍機 - コイル間の温度差は比例するので、熱抵抗が小さいほど効率よくコイルを冷却することができる。また、コイルは長辺方向で 1メートル以上の長さがあり、コイル自身が温度分布を持つと、部分的に通電特性が低下する恐れもある。

熱シミュレータ試験装置を用いて、模擬コイル温度（冷凍機接続箇所）が 40K になるよう冷却を行ったところ、図6に示すような温度分布となった。コイル温度分布測定箇所は模擬コイルとコイルケースそれぞれに対して曲線部 2点、直線部 1点である。模擬コイルの温度は冷凍機からの距離によらずほぼ 40K に均質に冷却されており、これは目標の 1K 以内よりも大幅に小さい。しかしながら、コイルケースにおいては温度が不均一であり、且つ模擬コイルとの温度差は最大 7K に達した。外部からの熱侵入はすべてコイルケースを介して模擬コイルに伝わる構造となっているので、この結果はコイルケースと模擬コイル間の熱抵抗が大きく、模擬コイルや熱機能材料には侵入熱がほとんど到達していないことを示唆する。

また、冷凍機と模擬コイルの温度差は 8K と高い値であり、改善の余地がある結果となった。可とう性伝熱部材は極低温における熱伝導率がきわめて高い高純度アルミでできているにもかかわらず、この部分だけでも 3K 近く温度差がある。同部材は高純度アルミの薄板を多数重ねて溶接した構造であり、溶接面積が不十分であったか、溶接によってアルミの純度が部分的に低下した可能性も視野に入れて再検証する必要がある。

熱抵抗としては、可とう性伝熱部材に挙げられるような材料自体の熱伝導率によるものと、材料間の接続部における接触熱抵抗がある。熱シミュレータ試験装置の冷凍機からコイルに至る経路における熱抵抗は、可とう性伝熱部材をはじめとする部品の熱伝導率によるところが大きいと考えられる。接続部では、極低温でもやわらかい金属であるインジウムを挟むことにより熱抵抗を低減している。ただし、インジウムを用いても面積が不十分

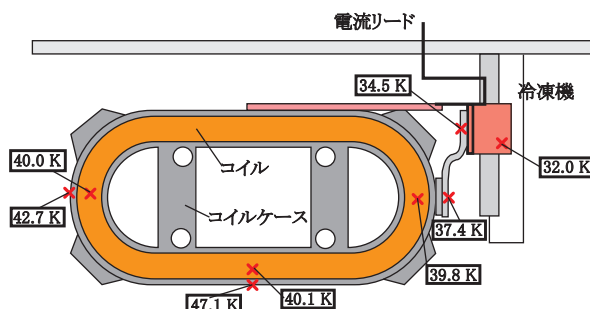


図6 コイル温度分布測定結果

であったり、締結力が不足すれば温度差は発生するので、設計上注意が必要である。また、コイルケースと模擬コイルにおいては、インジウムを用いておらず両者はマイクロにみれば点接触をしているだけで非常に熱抵抗が大きかったと考えられる。

4.4 保冷試験

冷凍機異常停止を想定して、コイル温度 40K で 250 A 定格通電を保持した状態で冷凍機を停止し、コイル上限温度である 50K に到達するまでの保冷時間を評価した。熱機能材料の割合を高純度アルミ 90%、無酸素銅 10% としているため、図 3 の検証結果からも、コイル内温度差は付きにくくなるものの、保冷時間は短くなる構成といえる。また、図 3 では 1 外部電源あたり 2 コイル直列通電を想定しているが、熱シミュレータは 1 コイル-1 電源であるため、コイルあたりの電流リードからの熱侵入が多く保冷時間はより短くなる。今回の試験条件を当てはめると、保冷時間は 40 分と予測される。実験で得られた熱シミュレータ保冷試験時の模擬コイル（代表点）、コイルケース（代表点）、可とう性伝熱部材および冷凍機の昇温曲線を図 7 に示す。冷凍機停止から、模擬コイル温度が 50K に到達する時間は 55 分であり、4.2 節で述べたように熱侵入が増加していると考えられるにも関わらず、予測よりも長い保冷時間である。これには冷凍機 - コイルケース - 模擬コイル間の熱抵抗が関係しており、熱の流れは以下のように説明される。

まず、冷凍機停止直後に冷凍機および伝熱部材は急激に温度上昇している。熱シミュレータに限らず、超電導磁石における電流リードは冷凍機を経由して冷却された後、コイルへ接続される構造が一般的である。そのため、冷凍機が停止した際には、電流リードからの熱侵入によって冷凍機の温度が初めに上昇する。ふく射や荷重支持材から直接コイルケースに到達する熱侵入も存在するものの、コイルケースの方が冷凍機よりも熱容量が大きいいため初めの温度上昇は緩やかである。その後、冷凍機とコイルケースの温度差がある程度広がると、冷凍機からコイルケースへ熱が流れ出し、両者の温度上昇は似

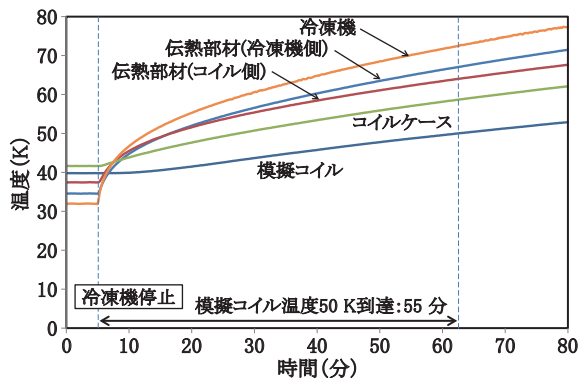


図 7 熱シミュレータによる保冷試験結果

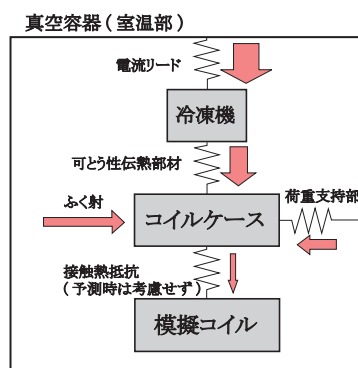


図 8 熱シミュレータ熱流束模式図

たような傾きになる。さらに、コイル温度分布評価試験からもわかるとおり、コイルケースと模擬コイル間には比較的大きな熱抵抗が存在しているため、両者の昇温特性は大きく異なっている。外部からの熱侵入は直接模擬コイルへ到達せずコイルケースを介するので、冷凍機停止直後は模擬コイル温度はほとんど横ばいである。コイルケースの温度上昇によって温度差が広がると、ようやく熱が模擬コイルに到達し、温度が上昇する。熱シミュレータにおける熱の流れを図 8 に示す。なお、予測と実験に顕著な差が表れたのは、保冷時間の予測においては、コイルケースと模擬コイル間に熱抵抗はないものと仮定したためである。

5. 考察

一般的に超電導磁石においては、真空容器と超電導コイル間にふく射シールドと呼ばれる断熱のための温度中間層が存在する（図 9 (a)）。ふく射シールドは冷凍機停止時には熱侵入に対して中間バッファとして機能する

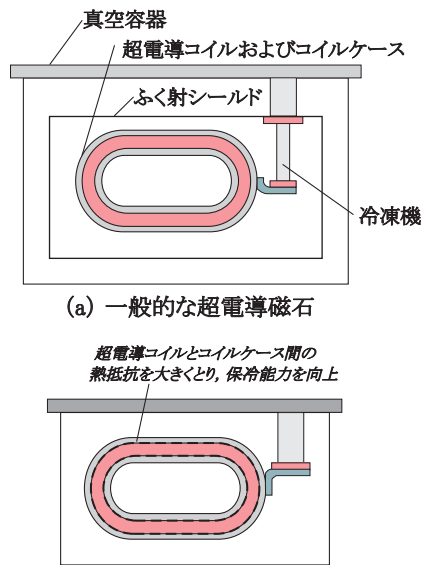


図 9 超電導磁石構造

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

ため、超電導コイルの温度上昇は緩やかになる¹²⁾。ただし、ふく射シールドが存在すれば構造は複雑になり、磁石自体も大型化してしまう。そのため、我々が検討している浮上式鉄道用高温超電導磁石においては、運用温度の向上からふく射シールドのない構造を前提としている。

しかしながら、今回の保冷試験結果からわかるように、コイルケースとコイルの接触熱抵抗が高いことを利用すれば、断熱のためのふく射シールドの役割を、本来機械的剛性の向上を目的としたコイルケースに追加することができることを示唆している(図9(b))。コイルケースに断熱・保冷の効果を持たせるには、超電導コイルとの熱抵抗の設定が極めて重要である¹³⁾。熱抵抗を上げるために両者の接触面を極端に減らしてしまうと、ケース内でコイルが変形してしまい、本来の目的である機械的剛性の向上が果たせなくなってしまう。また、熱機能材料の配置も重要であり、取り付けがコイルケース側か超電導コイル側かで保冷時間や温度分布、コイルの温度安定性などにも影響が出ることが推察される。

6. まとめ

希土類系高温超電導線材(REBCO線材)を浮上式鉄道に適用できれば、液体ヘリウムなどの寒剤が不要になり、運用コストの低減が可能になる。しかしながら、液体ヘリウムは超電導コイルの安定した冷却に大きく寄与しており、磁石の高温超電導化は冷却構造が変わることを意味する。その中でも、特に課題になると考えられるコイルの均一な冷却と冷凍機異常停止時の保冷特性について、実スケールの熱特性を有する熱シミュレータ試験装置を用いて評価試験を実施した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 定格条件であるコイル温度40K、250A通電時のコイル温度分布は1K以内であり、液体ヘリウムがなくても均一に冷却できることが実証された。
- (2) 冷凍機 - コイル間の温度差は8K程度となり、改善の余地のある結果となった。コイルと冷凍機をつなぐ可とう性伝熱部材をはじめ、伝熱経路の再評価と改良が必要である。
- (3) 40Kから50Kに至る保冷時間は55分となった。当初の設計よりも熱侵入が多いながらも、予測されていた40分を上回る結果である。これはコイル - コイルケース間の熱抵抗が大きかったことに由来しており、コイルへの熱の到達が遅れたためである。同区間の熱抵抗を意図的に大きくすれば、コイルケースに断熱・保冷の機能を追加可能なことを示唆している。

今後は、熱機能材料の比率を変化させての保冷時間評価試験および、コイルケース - コイル間の熱抵抗の最適化に向けた設計検証を行う予定である。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 長嶋賢, 小方正文, 水野克俊, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓: 希土類系高温超電導線材を用いた浮上式鉄道用超電導磁石の構成, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.17-22, 2011
- 2) 渡辺和雄, 野尻浩之, 佐々木孝彦, 清水禎, 熊倉浩明: 次期定強常磁場施設計画と無冷媒25T超伝導マグネット建設について, 第88回低温工学・超電導学会講演概要集, p.7, 2013
- 3) 財務省ホームページ, 財務省貿易統計資料より: <http://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm>
- 4) 柳澤吉紀ら: REBCOコイルが切り拓く超伝導コイルシステムの新時代へ向けて - 世界初のLTS/REBCO NMRシステムにおける多次元NMR-, 第87回低温工学・超電導学会講演概要集, p.3, 2013
- 5) Fukushima T., "Performance and quality improvements in SuperPower 2G HTS Wires," presented at MT-23 Conference, Boston, USA, 2013.
- 6) 低温工学協会 編: 超伝導・低温工学ハンドブック, オーム社, p.965-975, 1993
- 7) 中尾裕行, 高橋政彦, 真田芳直, 山下知久, 山地睦彦, 寺井元昭, 五十嵐基仁, 山口貢: 浮上式鉄道用超電導磁石の4K/80K両用GM冷凍システムの開発 - 窒素自然循環方式熱シールド板の冷却特性 -, 低温工学, Vol. 34, No. 2, pp65-72, 1999
- 8) 地蔵吉洋, 赤木秀成, 山口孝, 寺井元昭, 忍正壽: 単コイル内蔵型超電導磁石を用いた熱負荷特性の把握と対策試行, 低温工学, Vol. 29, No.10, pp516-523, 1994
- 9) 低温工学協会 - 冷凍部会, 安全委員会 編: 極低温金属材料データ集, p.5-i-1, 1981
- 10) NISTホームページ, Cryogenics Material Propertiesより: <http://www.cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/material%20properties.htm>.
- 11) 宮崎佳樹, 池田和也, 水野克俊, 長嶋賢: 並列パルス管冷凍機による高温超電導磁石冷却システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.5, pp.17-22, 2012
- 12) Mizuno K., Miyazaki Y., Nagashima K., Kawano .A and Okamura .T, " Cold storage characteristics of mobile HTS magnet," *Cryogenics*, Vol.51, pp.321-325, 2011.
- 13) 宮崎寛史, 岩井貞憲, 高橋政彦, 戸坂泰造, 田崎賢司, 石井祐介: ふく射シールドレスY径伝導冷却マグネットの通電特性, 第87回低温工学・超電導学会講演概要集, p.4, 2013