

# 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

水野 克俊\* 小方 正文\* 長嶋 賢\*

## A Novel Superconducting Coil Fabrication Method with YBCO Coated Conductor

Katsutoshi MIZUNO Masafumi OGATA Ken NAGASHIMA

YBCO coated conductor has attracted attention because of its high critical current in high magnetic field condition. However, the magnet fabrication technique with YBCO coated conductor has not been developed as of yet. Especially, the impregnation method of YBCO coils is one of the biggest problems. The epoxy resin is usually used for the impregnation of low temperature superconducting coils. However, the bonding strength of the epoxy is stronger than the breaking strength of YBCO conductor in a certain direction. Therefore, an epoxy impregnated YBCO coil has a risk to be damaged by thermal stress or external forces. We have investigated new impregnation materials and focused on the cyanoacrylate resin. The bonding strength of cyanoacrylate is weaker than that of epoxy and doesn't cause the damage against YBCO coils.

キーワード：RE, YBCO, 希土類系高温超電導線材, 樹脂含浸, シアノアクリレート

### 1. はじめに

YBCO線材に代表される希土類系高温超電導線材(以下RE線材)は磁場中での優れた通電特性から超電導磁気浮上式鉄道などへの機器応用が期待されている。従来の金属系低温超電導線材からRE線材に置き換わると、運用温度の上昇に伴い液体ヘリウムが不要になり取り扱いが簡易になるだけでなく、超電導磁石の冷却コストの大幅な低減が可能になる。磁気浮上式鉄道用の車上超電導磁石に適用されれば、車上電源の小型化に伴う車体重量の軽量化にもつながる。

しかしながら、RE線材は実用レベルの線材が開発されてから日が浅く、応用研究は十分に行われているとは言えない。RE線材を用いた応用機器の実用化には多くの課題があるのが現状である。著者らはRE線材の磁気浮上式鉄道用超電導磁石への応用を念頭に研究を行っており、RE線材のコイル化技術を検証している。加えて、小型ながらも磁気浮上式鉄道用超電導磁石と同様の5Tの強磁場発生可能な希土類系高温超電導磁石の開発を進めているので、その経過を本論文にて報告する。

### 2. 希土類系高温超電導線材

希土類系高温超電導体は臨界温度が約90Kと高いだけでなく、他の高温超電導体と比較して磁場中での通電特

性に優れている。構造としては図1に示すようにテープ状の Hastelloy 合金基板の上に中間層、超電導層および安定化層が積層されている。磁場中での通電特性に加え、Hastelloy合金の高い強度のため、強磁場中など高い応力が超電導線材に働く環境でも使用可能とされている。そのため、加速器やNMR、磁気浮上式鉄道用超電導磁石など強磁場が求められる機器への応用が考えられている。

しかしながら、RE線材はその積層構造のため、引張や曲げ応力には強いものの、層間の剥離方向に対しては非常に小さな応力でも超電導層の破壊に至ることが報告されている<sup>1)</sup>。また、このような剥離によるRE線材の劣化は樹脂含浸を行った際に発生することが知られている<sup>2)</sup>。一般に低温超電導コイルに対しては、エポキシ含浸が広く行われているものの、エポキシ樹脂は超電導線材などの金属系材料に比べて熱収縮率が大きく、数MPaにもなる熱応力がコイルにかかってしまう。RE線材にお

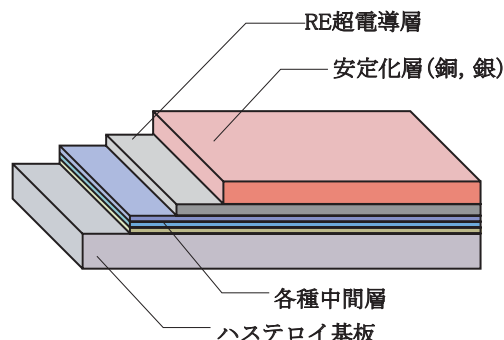


図1 一般的なRE線材構造

\* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

いてはエポキシ樹脂の接着強度よりも線材自身の剥離強度が低いため、低温超電導コイル同様に樹脂含浸を行うとRE線材の剥離により性能が低下する。図2にエポキシ含浸REコイルの線材剥離の概念図を示す。

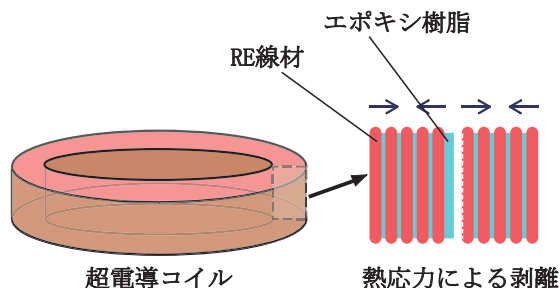


図2 エポキシ含浸REコイルの線材剥離

3. コイル含浸手法

3.1 樹脂含浸の目的

超電導コイルに対して樹脂含浸を行う理由は二つあり、一つは機械的強度の上昇である。レーストラックコイルのような非円形コイルにおいては、含浸が行われていなければ励磁した際に自己磁場によりコイルが変形し、最悪の場合破損することも考えられる。

含浸のもう一つの目的は冷却特性の改善にある。高温超電導応用機器においては、低温超電導線材とは異なり無冷媒の運用が主となる。そのため、超電導コイルと冷却面との接触が悪いと、冷凍機よりも高い温度までしかコイルが冷却されず、その性能を十分に活かしきれない。加えて、コイルに過通電して発熱した際に排熱が悪ければコイル焼損も起こりうる。含浸によりコイルと冷却面、あるいはコイル線材間の隙間を埋めることにより、これらの熱的な問題を低減することができる。

3.2 含浸材の選定

含浸材としてはエポキシ樹脂以外にも、ワックス（パラフィン、蜜蝋等）が従来から用いられている。ワックスは強度が極めて低いため、REコイル含浸に用いても線材にダメージを与えないことがすでに報告されている<sup>2)</sup>。

ただし、ワックス自体は強度が極めて低いのでコイル形状を固定する機能はない。そのため用途は限られており、円形コイルの熱伝導の改善やコイルを剛体のケースに収めた状態での充填剤としてしか使えない。

含浸材に求められる特性を改めて考えてみると、超電導線材にダメージを与えない、すなわち接着強度が線材の剥離強度以下であることが重要である。加えて超電導コイルの線材間のように僅かな隙間にも浸透可能であることも求められる。高い浸透性を得るには含浸材自体の粘性が低く、且つ真空含浸法が可能であることが必要である。

これらの特性を併せ持つ含浸材として著者らはシアノアクリレート樹脂に着目した。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、低粘性のものならば2～5mPa・sであり、エポキシ樹脂の粘性（約500mPa・s）よりも大幅に小さい。硬化するメカニズムも大気中や対象物表面の微小な水分との反応によるので、真空含浸時に硬化してしまう恐れもない。

3.3 液体窒素下でのシアノアクリレート樹脂強度試験

室温におけるシアノアクリレート樹脂の接着強度に関しては、引張せん断強度はエポキシ樹脂と同等であるものの、剥離や衝撃に弱いという特徴がある<sup>3)</sup>。ただし、極低温での接着強度については不明な点が多く十分な文献が得られなかったので、液体窒素下での接着強度試験を行った。

接着強度は接着対象物によっても変化するため、試験片は実際のREコイルと同様に絶縁材であるポリイミドフィルムをRE線材で挟み込むようにした。図3に垂直引張用の試験片模式図を示す。比較のためシアノアクリレート樹脂とエポキシ樹脂について垂直引張試験を実施し、その結果を図4に示す。

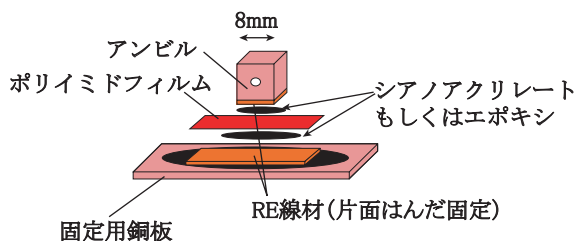


図3 垂直引張用試験片

シアノアクリレート樹脂とエポキシ樹脂ごとに複数試験を行ったところ結果に大きなバラつきが出ているものの、シアノアクリレート樹脂はエポキシ樹脂の三分の一、あるいはそれ以下の垂直引張強度であることがわかる。

剥離強度についてもL字状のアンビルを持つ試験片（接着面積：4mm×25mm）を製作し試験したところ、図5に示すような結果が得られた。

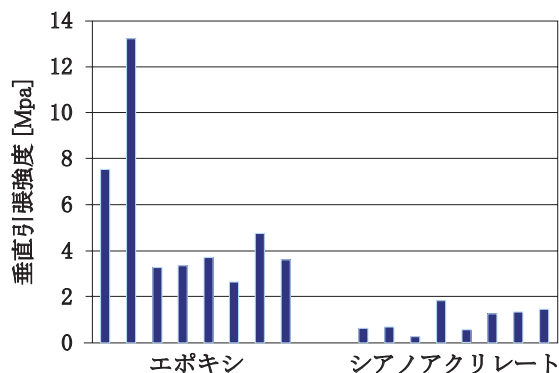


図4 含浸材垂直引張強度試験結果

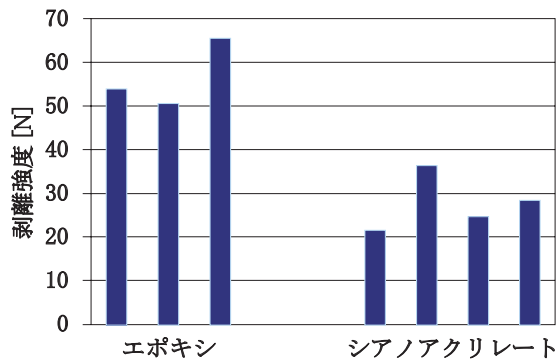


図5 含浸材剥離強度試験結果



図6 含浸サンプルコイル外観

垂直引張のときほどのバラつきはなく、シアノアクリレート樹脂はエポキシ樹脂のほぼ半分の剥離強度であった。

これらの試験からシアノアクリレート樹脂は極低温でも接着力を持つものの、エポキシ樹脂と比較すると半分、もしくはそれ以下の低い強度であることがわかる。そのため、ワックスとは異なり非円形コイルの含新材料としてもシアノアクリレート樹脂が利用可能であることが期待される。

#### 4. 含浸サンプルコイル製作

##### 4.1 サンプルコイル仕様および含浸手法

極低温においてシアノアクリレート樹脂はエポキシ樹脂よりも強度が低いことは明らかになったものの、実際にREコイルを含浸した際にコイルの性能低下を引き起こすかの評価は3章の試験結果からは十分に判断できない。エポキシ含浸REコイルの線材剥離はメカニズムが完全に解明されているわけではなく、含浸材ごとに剥離が起こりうるかの判定には実際にコイル含浸試験を通じて調べるしかない。

そこで表1に示す仕様のコイルを二個製作し（サンプルA、サンプルB）、液体窒素中における含浸前後のI-V特性を評価した。コイル外観を図6に示す。

表1 含浸サンプルコイル仕様

超電導線	YBCO (MOCVD) /Hastelloy
幅/厚み	4 mm / 0.1 mm
臨界電流 (77 K, 自己磁場)	90 A
コイル形状	シングルパンケーキ
外径/内径	60 mm / 50 mm
使用線長	7 m
ターン数	40
ポビン材質	アルミニウム
絶縁材	ポリイミド

強度試験と同様に比較のため、含浸にはシアノアクリレート樹脂とエポキシ樹脂両方を用いた。サンプルAに関してはエポキシ含浸のみを行い、Bについてはシアノアクリレート含浸を行った後、再度エポキシ含浸を実施した。サンプルBを二重に含浸した目的は、コイル線材間にシアノアクリレート樹脂が浸透しているかの確認であり、隙間なく浸透していれば再度エポキシ含浸しても線材間エポキシ樹脂は侵入できず、性能低下は起きないと予想される。また、この二重含浸はRE線材間のような繊細な箇所はシアノアクリレート樹脂で含浸し、コイルケースとREコイルの隙間は高強度なエポキシ樹脂で充填するような施工が可能であるかの評価も兼ねている。

##### 4.2 サンプルコイル通電試験結果

通電試験では含浸前後の臨界電流（以下Ic）とn値でサンプルコイルの健全性を確認した。n値とは超電導線材の電圧立ち上がり特性の指標であり、n値が大きいほど立ち上がりが急峻で健全な超電導特性である。n値は線材ごとに異なるものの、10を切るような値であれば線材に何らかの欠陥があると考えて問題ない。なお、Icは発生電圧0.7mV（1 μV/cm基準）の時の通電電流と設定した。サンプルAのエポキシ含浸コイルの含浸前後でのI-V特性を図7に示す。

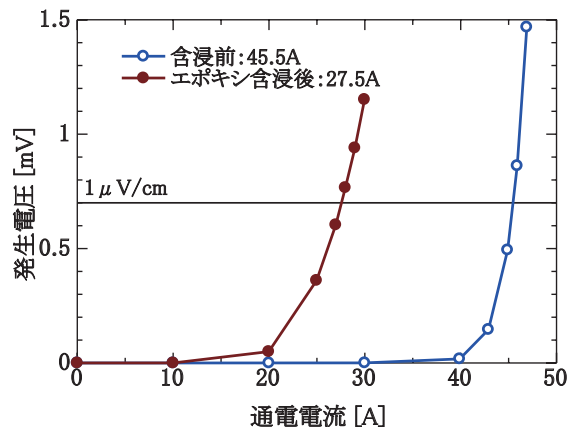


図7 エポキシ含浸REコイル通電結果

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

図7からも明らかなように、含浸前後でIcが大幅に低下している(45.5A→27.5A)。n値についても27から6になっており、剥離が発生していると考えられる。

一方で、図8に示すサンプルBのシアノアクリレート-エポキシ二重含浸では、含浸前後でもIcは47A前後を維持している。n値もほぼ28で安定しており、性能低下は確認されなかった。

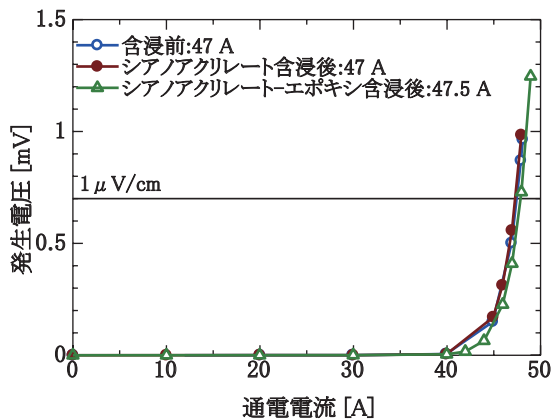


図8 シアノアクリレート含浸 RE コイル通電結果

形状の異なるコイルについてもシアノアクリレート含浸を複数回実施したものの、結果は同様であり、シアノアクリレート樹脂は RE コイルの含浸材として使用しても剥離はおこさないと判断される。シアノアクリレート-エポキシ二重含浸についても、サンプル数が十分ではないものの、剥離の起きない含浸技術である可能性が高い。

5. 5T 級希土類系高温超電導磁石概要

超電導磁石開発においては、超電導コイル含浸手法だけでなく、運用温度および通電電流に応じた冷却・断熱設計や磁場解析に基づくコイル形状の最適化など様々な検討事項がある。そこで、著者らは希土類系高温超電導磁石の開発にあたって以下のようなコンセプトを定めた。

- (1) 超電導磁気浮上式鉄道用の超電導磁石同様に最大発生磁場は5Tとする。
- (2) RE線材の利点を活かすため運用温度は高温域(50K前後)とし、冷却・断熱系の簡素化を図る。

運用温度をこのように設定したのは、運用温度に対する磁石重量、すなわちコイル重量と冷凍機重量の和を最小にするのが40K~50Kであるという過去の検証結論に基づいている<sup>4)</sup>。

5.1 RE コイル設計

RE 線材はテープ形状であり、コイルの巻き方も大きく分けて二種類ある。一つはソレノイド巻きであり、円筒状の巻き枠に対して線材を螺旋状に巻き付けていく方法である。長尺の線材が入手できれば接続箇所は少なく

でき、線材密度も高くできる利点があるものの、テープ状の線材を用いる限りコイル端部の線材が変形による応力を受けてしまう。また、コイルに不具合が生じても部分的に修繕することが不可能である。

もう一つはダブルパンケーキ巻である。この方法では初めに、巻き枠に対してテープ線材を水平に巻きつけたシングルパンケーキを製作する。次に、接続部をコイル外側に出すためにシングルパンケーキコイルを二つ重ねて接続したダブルパンケーキを基本単位とし、これらを積層していく。この方法ならば、不具合のあるダブルパンケーキコイルのみを交換すればよいので、コイル製作におけるリスクを低減できる。

線材コストや長尺線材の入手性を考慮し、今回の希土類系高温超電導磁石にはダブルパンケーキコイルの積層構造を採用した。超電導コイルにおいては臨界条件に達する線材は一部でしかないので、コイル完成後に部分的に高性能線材を用いたダブルパンケーキコイルに交換することにより、コイル全体の Ic の底上げも期待できる。

ダブルパンケーキコイル積層時の作業性や冷却特性の観点から、各ダブルパンケーキコイルはケースに収める必要があると考えられる。ただし、高磁場を得るには高い電流密度が必要であり、すなわちダブルパンケーキコイルの積層密度を上げていくことが重要である。そのため、コイルケースは図9に示すような半開放型とすることにより高い積層密度を実現できるようにした。

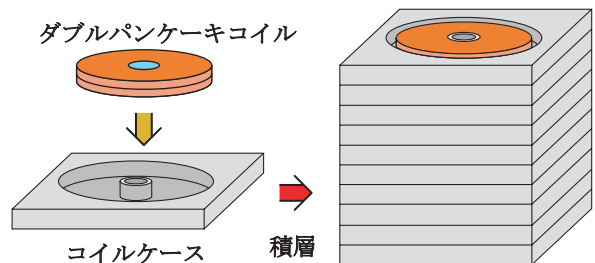


図9 RE コイル製作概念図

ダブルパンケーキコイルの仕様としては、使用線材長100m×2、内径50mm、外径約130mm、ターン数336×2、厚み10mm(コイルケース含む)とした。

目標である5Tを実現するには、超電導線材性能および運用温度に基づいてダブルパンケーキコイル積層数を決定する必要がある。5T発生するということはREコイルの経験磁場も同等、あるいは局所的にはそれ以上になる。また、運用温度については、開発コンセプトに基づいて仮に50Kと想定する。経験磁場5T、運用温度50Kという条件での現行のRE線材のIcは、過去の実験から80A程度と予測される<sup>5)</sup>。

通電電流80Aで積層数を変化させて磁場解析を行ったところ、10積層のときに中心磁場5T、最大線材経験磁場5.2Tとなった。図10に計算領域を、図11にコイル内

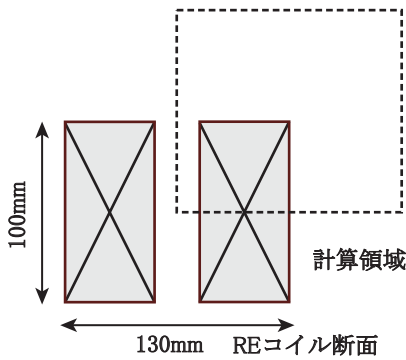


図10 RE コイル磁場計算領域

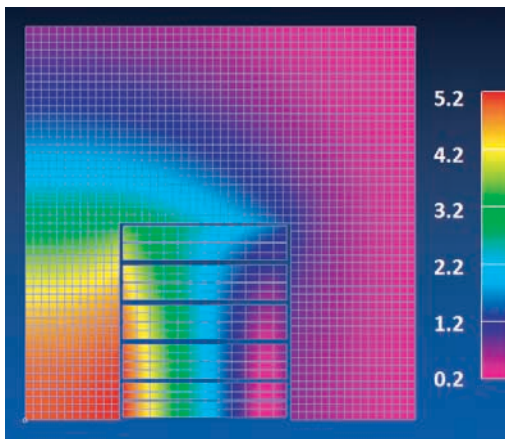


図11 RE コイル磁場分布 (1/4 カットモデル)

部磁場とその周辺磁場分布をそれぞれ示す。

RE 線材の性能は個体差があるので、必ずしも運用温度 50 K で中心磁場 5T が実現できるとは限らないものの、40Kまで冷却すれば線材の個体差を考慮しても5Tの磁場は十分に可能である。

現在入手可能な RE 線材は通電特性が個体ごとに異なっており、厳密なコイル設計をするには使用するすべての RE 線材の性能を事前に評価しなければならない。RE 線材の評価を完全に行おうとすると莫大な時間がかかり、超電導磁石製作コストの面から見てもあまり現実的ではない。そのため、効率のよい RE コイル設計手法の確立も今後の課題である。

## 5.2 超電導磁石熱設計

高温超電導体の応用機器では冷却系を簡素化できる、液体ヘリウム不要の冷凍機伝導冷却が一般的である。特殊なオペレーションは不要で、冷凍機電源を入れるだけで冷却が可能である。冷凍機にも様々な種類があるが、その中でも二段冷凍機が用いられることが多く、名前のおり一段ステージ (100K から 30K 程度の高温域) と二段ステージ (20K 以下の低温域) の二つの冷却ステージを持つ。超電導体は二段ステージによって冷却され、一段ステージはふく射シールドの冷却に使われる。ふく射シールドは超電導体を覆う金属製の薄肉剛体容器であ

り、ふく射を始めとする熱侵入が直接超電導体に到達することを防いでいる。

製作中の超電導磁石の運用温度は50Kから40K程度としており、高温超電導体を用いた超電導磁石としてもかなり高い値である。50K前後ならば、単段冷凍機での冷却が可能になる見込みがあり、ふく射シールドが不要になる。ふく射シールドがなくなると、外槽容器と超電導コイルとの距離を縮められる利点がある。磁気浮上式鉄道においては地上コイルへの鎖交磁束の絶対値が重要であり、超電導磁石自体の発生磁場は元来重要ではない。超電導コイル-外槽容器間距離が短くなれば鎖交磁束は大きくなるので、超電導コイル発生磁場の小さいものでよい。すなわち超電導コイルの巻数を減らして超電導磁石の低コスト化、軽量化も期待できる。図12に希土類系高温超電導磁石の模式図を示す。

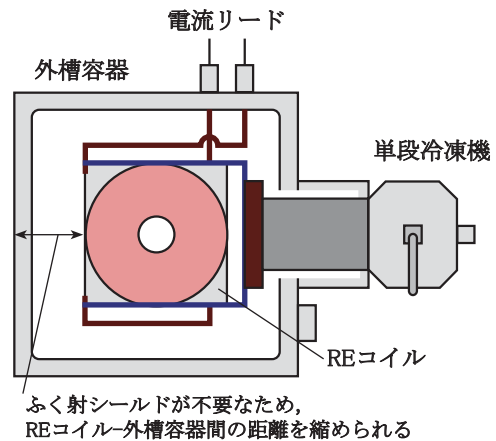


図12 希土類系高温超電導磁石模式図

本希土類系超電導磁石において単段冷凍機での運用が可能であるか検証するため熱侵入の概算を行った。今回の超電導磁石における熱侵入には大きく分けて、外槽容器からのふく射、荷重支持材からの熱伝導および電流リードにおけるジュール発熱と熱伝導の三形態である。

超電導磁石のような複雑な内部形状を持つ場合、ふく射による熱侵入は理論値と実験値で一致することはまれである。そのため、過去の試験結果等で得られた300Kから77Kの伝熱量を基本として、ふく射による熱侵入  $Q_{\text{radiation}}$  は温度差の4乗に比例するように独自にモデル化した式(1)を用いた。  $T_H$  は高温端温度、  $T_L$  は低温端温度、  $A$  は表面積、  $\alpha$  は300Kから77Kにおける単位面積当たりの伝熱量 (実験値) である。

$$Q_{\text{radiation}} = A\alpha \frac{(T_H^4 - T_L^4)}{(300^4 - 77^4)} \quad (1)$$

式(1)に今回の磁石仕様を代入すると、ふく射による熱侵入は約1.5Wと予測される。

次に荷重支持材からの熱伝導であるが、荷重支持材には高強度、低熱伝導のFRPを用いるのが一般的である。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

そのため、現行の磁気浮上式鉄道用超電導磁石におけるコイル重量と荷重支持材形状の関係を本REコイルに適用しても熱侵入としては2W程度である。

電流リードからの熱侵入はジュール発熱によるものと、電流リード室温部からの熱伝導からなる。電流リード形状が細くなると熱伝導は減少してもジュール発熱が増加する。なお、通電電流と高温端、低温端温度を与えれば電流リード形状を最適化することができる<sup>6)</sup>。最適設計のリード形状であれば、300Kから50Kへの熱侵入は1Aあたり約0.1Wとなる。通電能力に余力を持たせるため、100A通電仕様で設計すると電流リードからの熱侵入は10Wとなる。これらの熱侵入にさらに計測線等からの熱侵入を足しても合計は表2に示すように14W程度となり、これを満たす単段冷凍機は広く市販されている。そのため、本希土類系超電導磁石はふく射シールドを持たない構造で運用可能である。

表2 熱侵入予測値

ふく射による熱侵入	1.5 W
荷重支持材からの熱伝導	2.0 W
電流リードからの熱侵入	10.0 W
その他計測線等からの熱侵入	0.5 W
熱侵入合計	14.0 W

6. 今後の展開

本研究によって、シアノアクリレート樹脂をREコイル含浸材として用いればコイルの性能低下は発生しないことが明らかになった。また、シアノアクリレート樹脂の強度はエポキシ樹脂に劣るものの、ワックスとは異なり低温でも接着強度を有するのでレーストラックコイルのような非円形コイルに対しても含浸材として利用できる見込みがある。

磁気浮上式鉄道用への希土類系超電導体の適用が本研究の最終的な目的であり、小型ながらも現行の磁気浮上式鉄道用超電導磁石と同じ5Tが発生可能な希土類系超電導磁石の開発を進めている。数値解析等により、50K程度の高い運用温度でもREコイルによって5Tの磁場が発生可能であるという検証結果が得られた。また、50Kでの運用ならばふく射シールドは不要であり、超電導磁石の大幅な簡素化、および小型化が可能になる。

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) Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi and H. Maeda “Remarkable weakness against cleavage stress for YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance,” Physica C, Vol.471, pp.480-485, 2011.
- 2) T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi and H. Maeda, “Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation,” Physica C, Vol.470, pp.674-677, 2010.
- 3) 塚田邦夫: 接着技術マニュアル, 株式会社テクノ, p.46-53, 1976
- 4) 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
- 5) M. Ogata, Y. Miyazaki, H. Hasegawa, T. Sasakawa and K. Nagashima, “Basic study of HTS magnet using 2G wires for maglev train,” Physica C, Vol.470, pp.1782-1786, 2010.
- 6) 萩原宏康: 低温工学概論 超伝導技術を支えるもの, 東京電気大学出版局, p.273-277, 1999