

岡山大学超電導応用研究室の研究内容と成果

岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域 金 錫範

1. はじめに

当研究室では、3名のスタッフ（金教授、植田准教授、井上助教）が超電導応用機器の開発研究を行っている。研究に用いる超電導体は、高温超電導バルク体と高温超電導線材および金属系超電導線材であり、3次元アクチュエータ、非接触回転機、小型 NMR/MRI 用マグネット、医療用サイクロトロン、超高磁場 NMR および電気自動車用の超電導大容量非接触給電システムなどを開発している。本誌では、当研究室の研究例として超電導マグネットの高安定化手法として用いられている無絶縁超電導コイルにおける接触抵抗評価方法と高磁場用超電導マグネットおよび非接触給電システムの開発成果について簡単に紹介する。

2. 無絶縁超電導コイルの巻線間接触抵抗評価

REBCO 線材を用いた高温超電導コイルにおいては、無絶縁巻線技術により高い熱的安定性が得られることが明らかになり、高磁場発生用超電導マグネット等に適用されることが検討されている。一方、高温超電導マグネットの電氣的・熱的安定性を向上させるためには、巻線間接触抵抗とコイルのインダクタンスとのバランスが重要であることが明らかになっており、巻線間の電氣的接触抵

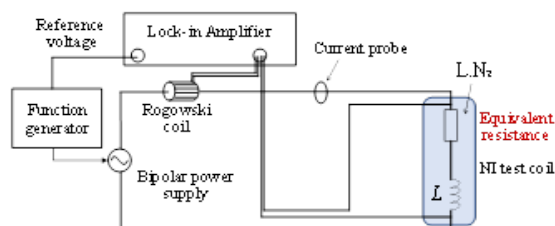


図1 LFAC法によるREBCO無絶縁高温超電導コイルの接触抵抗測定装置の概略図

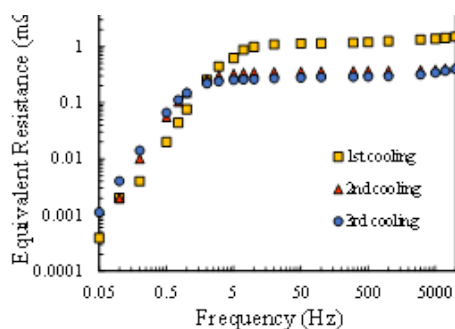


図2 LFAC法によって測定されたREBCO無絶縁高温超電導コイルの接触抵抗（液体窒素の複数冷却による接触抵抗の変化）

抗をより正確に計測する必要がある。そこで、我々は、交流電流（low frequency alternating current : LFAC 法）による高温超電導コイルの巻線間接触抵抗を測定する方法を提案し、その有効性について検討して来た¹⁾。提案した LFAC 法は、通電電流の全てが径方向に流れたときのインピーダンスを評価することで接触抵抗を求める方法であり、図1に測定回路の概念図を示し、測定結果の一例を図2に示す。図2は、巻線張力 0.5 kg で作製した REBCO 無絶縁試験コイルを液体窒素で複数回冷却した際の等価接触抵抗の変化を示しており、試験コイルの下部に設置した8個のピックアップコイルによって接触抵抗の空間的な変化についても評価している。そして、提案した LFAC 法の有効性等について数値解析による検討も行っている²⁾。

3. 高磁場高温超電導マグネットの開発

α 線核医学治療のための α 線放出 RI (211At) 製造用「高温超電導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」の開発を進めている。本装置では、図3のように空芯の REBCO コイルシステムのみで必要となる磁場を発生させることを目指している。鉄芯の磁化特性の非線形性を考慮する必要がないため、出力エネルギーを変化させることができ、PET 用 RI 製造等への応用など多機能化が期待できる³⁾。当研究室では、遮蔽電流による不整磁場解析、無絶縁巻線コイルの電磁力解析、クエンチ時のコイル挙動解析を主に実施している。

JST 未来社会創造事業の一環として、超高磁場

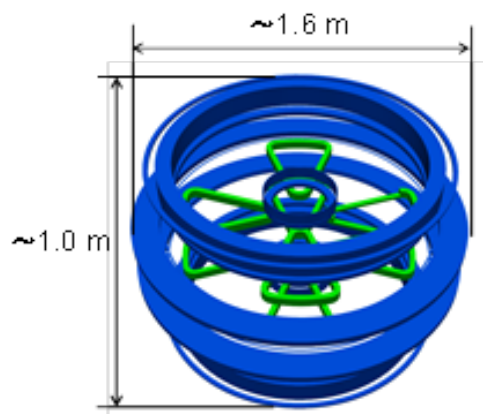


図3 高温超電導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC) の概念図

NMR システムの開発を行っている。当研究室では、特に内層 HTS マグネットの遮蔽電流磁場による不整磁場と付加的電磁応力の解析を行っている。図 4 に、我々が開発した遮蔽電流・応力解析コードで解析した内層 HTS マグネットの遮蔽電流磁場による応力と変形例を示す⁴⁾。解析では、REBCO テープの形状およびレイヤー巻(非含浸)を考慮して、巻線はすべて離散化されている。図を見るとわかるように、遮蔽電流によりテープ幅で不均一な応力が発生し、線材がチルトするよう変形する。このような変形による劣化を防ぐ補強構造やシミング設計のための不整磁場予測を行っている。

4. 超電導大容量非接触給電システムの開発

近年、地球温暖化対策の一環として、電気自動車(EV)に注目が集まっている。その一方で、EVは充電時間の長さの問題がある。例えば、有線式の急速充電器(50 kW)を用いた場合、乗用車(60 kWh)への充電時間は約1時間かかり、バスやトラック(320 kWh)への充電時間は約6時間かかる。これは、ガソリン車の給油時間(約5分)に比べて非常に長く、EVの導入の妨げとなっている。そのため、革新的な充電技術の開発が必須である。そこで当研究室では、安全に急速充電を実現する600 kW級の超電導非接触給電システムを検討している(図5)。本システムは、地上側に高温超電導(HTS: High Temperature Superconductor, 以下HTSと略す)コイルおよび車両側にリッツ線を用いた銅コイルを設置することで、数kHzの高周波磁界を発生させ、コイル間の電磁誘導によって急速充電を行う仕組みである。その一方で、HTSコイルを使用する場合、交流通電時に電流の大きさや周波数に依存する交流損失の発生、また冷凍機を駆動するための損失が問題となる可能性があ

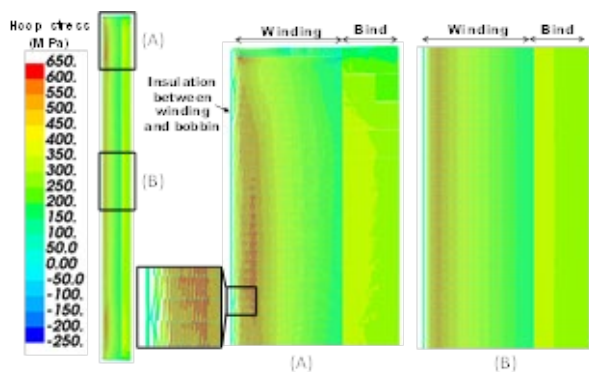


図4 内層 HTS マグネットの遮蔽電流磁場による応力と変形の例⁴⁾

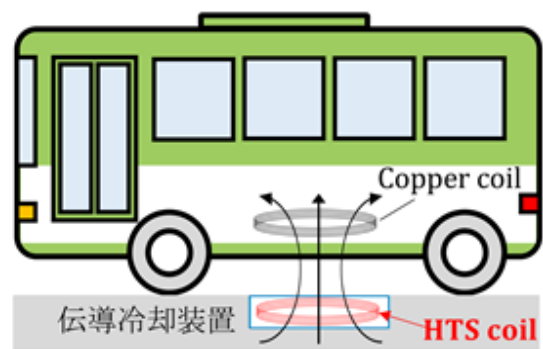


図5 提案する地上側超電導コイルを用いた大容量非接触給電システムの概念図

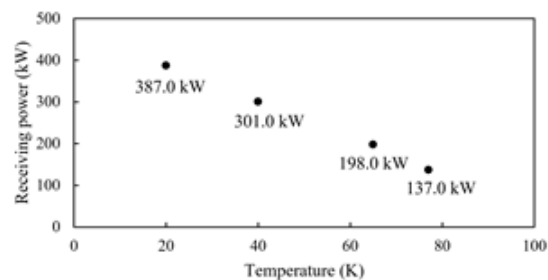


図6 提案する非接触給電システムの運転温度に対する受電電力⁵⁾

る。そのため、提案する超電導コイルを用いた非接触給電システムの有効性および設計指針を明確にする必要がある。そこで本研究では、①地上側 HTS コイルおよび車両側銅コイルに適した导体開発および低損失なコイル形状の検討、②大容量非接触給電システムに適した回路構成の検討、③高周波磁界の影響が少ない HTS コイルの冷却容器の検討を行っている。これまでに、電磁場解析および等価回路解析により、提案する 100 kW 級非接触給電システムの動作周波数帯を 10 kHz 以上とすることで、車両側銅コイルを軽量化できることがわかった。また、地上側 HTS コイルの運転温度を下げることで非接触給電システムの大容量化(387 kW @ 20 K)が可能であることを明らかにした(図6)。

5. 参考文献

- 1) S.B. Kim, et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**(2022) 9001705
- 2) T. Mato, et. al.: Supercond. Sci. Technol. **36**(2023) 014005
- 3) H. Ueda, et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**(2019) 4101105
- 4) K. Naito, et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**(2023) 4300805
- 5) Y. Inoue, et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**(2023) 540060