

超伝導磁石の世界最高磁場 24T を発生 — 酸化物高温超伝導線材を用いた 小型・強磁場 NMR 装置へ道 —

超伝導関連研究

SATテクノロジー・ショーケース2014

超伝導磁石の世界最高磁場24Tの発生に、酸化物高温超伝導コイルを用いて成功した。超伝導磁石の発生磁場は、すでに、低温超伝導コイルでは限界と考えられる23.5Tに到達していた。強磁場・高電磁力下で機能する高温超伝導コイルを開発し、その限界を超えた。

1. 研究の背景と目的

酸化物高温超伝導 (HTS) 物質は、発見されて30年近くになるが、現在では、セラミックスであるHTS物質を線材として利用できるまで発展した。HTS材料のなかでも、Bi-2223線材は長尺化にも成功し、磁石や送電ケーブルなど様々な応用研究・開発が活発に行われている。高い臨界電流密度と耐電磁力特性を示す、希土類 (RE) 系 HTS 物質であるRE(=Y,Gd)-Ba-Cu-O(REBCO)の線材化も進み、現在ではREBCOコイルを組込んだ超伝導磁石が実用段階になりつつある。実用的な超伝導磁石は、これまで、主にNb₃Sn、Nb-Ti 低温超伝導 (LTS) 線材を用いた開発が行われ、超流動ヘリウムで2.2K以下に超伝導磁石を冷却する技術が実用化されて以降は、20Tを超えるものの開発が急速に進んだ。2009年には、LTS線材による磁石では限界と考えられている23.5Tに到達した。HTSコイルは、この限界を超えることができるものとして期待されてきた。

高い臨界電流特性と耐電磁力特性を併せ持つREBCO線材は、LTS線材のみで製作すると、大型になってしまう強磁場磁石を、従来よりも小型にできると期待されている。特に、タンパク質の立体構造や機能の解析に利用されるNMR磁石は、小型化され、限られた空間により多くの装置を配置できるようになることが望まれている[1]。

2. 研究内容

● REBCO線材のコイル化技術構築

超伝導磁石を小型化するには、同じコイルサイズであってもより強い磁場を発生させる必要があり、コイルを励磁するために通電する電流の密度をより大きくしなければならぬ。また、コイルには励磁中に、コイル軸方向に圧縮力、径方向にはコイルを膨らませる電磁力 (フープ応力 = 磁束密度 × 電流密度 × コイル半径) が生じる (図1)。従来のLTS強磁場磁石においては、フープ応力の制限のためコイルが大型化する傾向にあった。通電する電流の密度を大きくすることで、コイル内に生じる電磁力もより大きくなる。この要求に応えることができると期待されている超伝導

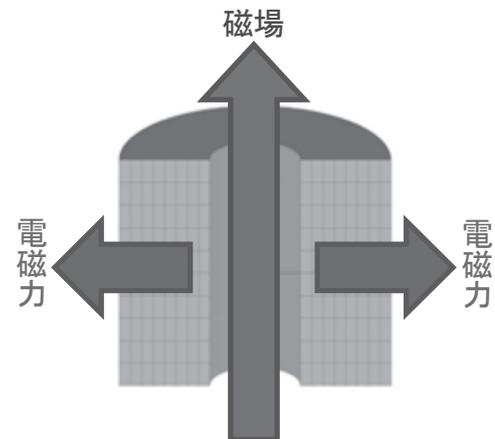


図1 励磁中の超伝導コイルに生じる径方向の電磁力 (フープ応力)

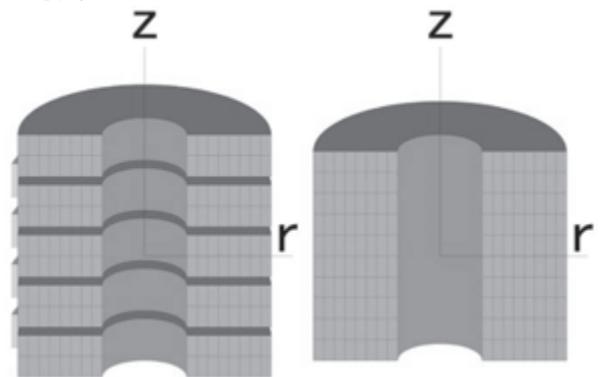


図2 ダブルパンケーキ巻 (左; 一般的な粘着テープを2個重ねた形状) とレイヤー巻 (右; 線材が隙間無く整列)

線材のひとつが、REBCO線材である。

REBCO線材のようなテープ形状線材でのコイル製作は、ダブルパンケーキ巻 (一般的な粘着テープを2個重ねた形状) の方が容易であるが、NMR磁石に求められる製作精度とコイル断面あたりの高い線材密度を満たすためには、レイヤー巻 (線材を隙間なく整列させる) によるコイル製作が必要であると考えた (図2)。レイヤー巻によるREBCO線材のコイル化技術の構築を行ってきた。開発したREBCO試験コイルが、LTSコイルの2倍近い耐電磁力特性を示すことを実証した[2]。

代表発表者 **松本 真治(まつもと しんじ)**
 所属 **(独)物質・材料研究機構**
超伝導線材ユニットマグネット開発グループ
 問合せ先 〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13
 TEL:029-863-5524 FAX:029-863-5599
 MATSUMOTO.Shinji@nims.go.jp

■キーワード: (1) 酸化物高温超伝導コイル
 (2) 強磁場発生技術
 (3) 超伝導磁石世界最高磁場

● **超伝導磁石の世界最高磁場24Tを発生**

得られたコイル製作技術をもとに、実機レベルの内外径をもつGdBCOコイルを製作した(図3)。GdBCOコイルを、Nb₃Sn、Nb-Ti LTSコイルと組み合わせ、液体ヘリウム温度(4.2K)で磁場発生を試みた。LTSコイルが発生させる17.2Tの磁場中で、GdBCOコイルは6.8Tの磁場を発生させ、超伝導磁石の世界最高となる24Tの磁場発生に成功した[3]。HTSコイルを用いて、LTSコイルの限界と考えられる23.5Tを4.2Kにおいて超えることができた(図4)。また、GdBCOコイルは、LTSコイルの2倍近い耐電磁力特性を示した。GdBCOコイルが強磁場中で高い臨界電流特性と耐電磁力特性を示したことは、磁石の小型化へとつながると考えている。

3. **研究成果・技術開発の要点**

- ① REBCO線材のコイル化技術開発
- ② 超伝導磁石の世界最高磁場24T発生

4. **今後の展開**

本研究成果は、おもに、科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)研究課題名「高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発」におけるものである。HTS材料を超伝導磁石およびNMRプローブに応用した、次世代HTS NMR装置の開発を行っている。HTSコイルのみでNMR用磁石を製作することにより、従来のLTS NMR磁石に比べて、磁石のサイズを低減させることを目指している。さらに、HTS材料を用いたNMR検出コイルを組み込んだ低温プローブを開発し、測定感度を向上させることを目指している。HTS磁石とHTS検出コイルを組み合わせたHTS NMR装置を開発し、磁石の小型化と測定感度の両立を図り、研究・開発現場での、強磁場NMR装置の活用を容易にすることができると期待している。

HTS NMR磁石開発は、物質・材料研究機構、ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社、理化学研究所、千葉大学、株式会社 JEOL RESONANCEの研究・開発チームが行っている。巻線作業等を含むREBCOコイル製作は、ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社が担当している。

これまで蓄積したREBCO線材のコイル化技術をもとに、400MHz(9.4T) LTS/REBCO NMRシステム用REBCO内挿コイルを製作した。REBCOコイルを用いたNMR用磁石

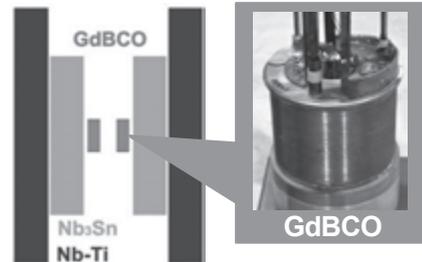


図3 24T 超伝導磁石の構成

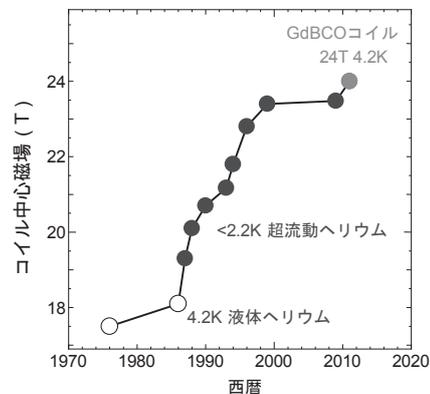


図4 超伝導磁石の最高磁場の推移

を用いた、タンパク質の多次元NMRスペクトルが理化学研究所において世界で初めて観測された[4]。

今後、強磁場NMR用HTS磁石の開発をすすめて、HTS NMR低温プローブと組み合わせることで、磁石の小型化と高感度化を実現することができれば、同じ測定スペースであっても、より高い性能を発揮できるNMR装置が、研究・開発現場に導入されるようになっていくと考えている。

5. **参考文献**

- [1] H. Suematsu et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82, p.185 (2010).
- [2] S. Matsumoto et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond. 22, 3, 950164 (2012).
- [3] S. Matsumoto et al., Supercond. Sci. & Technol., 25, 2, 025017 (2012).
- [4] Y. Yanagisawa et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87, p.3 (2013).