

超高磁場高温超伝導マグネットの開発と応用
**Development and Application of High-Field High-Temperature
Superconducting Magnets**

野口 聡
So NOGUCHI

北海道大学 情報科学研究院
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

1. はじめに

第二世代高温超伝導 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, RE = Rare Earth; REBCO) の線材化技術が進歩し、安定的なREBCO線供給が可能になってきた。REBCO線は、優れた高電流密度特性を有し、基板に Hastelloy などの強高度材を用いることで、高強度化にも成功している。これらの特性は、20 T を超えるような超高磁場発生や、大空間での高磁場発生に非常に適している。このような背景から、世界中でREBCO線を用いた超高磁場マグネットの開発が進められている[1]。

REBCOマグネットは前述した特徴から、高磁場発生に適している一方で、幾つかの問題がある。中でも、クエンチ保護が大きな課題となっている。REBCOマグネットの常伝導伝播速度は非常に遅い上に、常伝導伝移の初期検知が難しい。さらに、高磁場運転下では磁気エネルギーが大きく、クエンチ時に直ちに消磁することが難しく、焼損事故が起きやすい。

2011年にHahn氏(当時、マサチューセッツ工科大学)が無絶縁巻線技術を提案した[2]。この技術は、これまで施されていたターン間絶縁を取り除くことで、常伝導転移時初期に電流が径方向へ迂回することで、焼損を防ぐことに成功した。さらに、絶縁体を取り除くことで、更なる高強度化と高電流密度化に成功した。そして、2017年にHahn氏(当時、米国国立高磁場研究所)は同技術を用いて、45.5 Tの世界最高DC磁場の発生に成功した[3]。ただし実際には、31.1 Tの銅コイルの中で、REBCOマグネットが14.4 Tを発生している。

この世界最高DC磁場マグネット以外にも、無絶縁巻線技術を用いた20 T超発生マグネットは世界中で開発中であり、さらには無絶縁巻線技術とは異なるマグネット保護技術を用いた高磁場REBCOマグネットの開発も試みられている[4]。ただし、超高磁場発生のための基礎的

な実験が大半であり、応用事例は少ない。

2. 超高磁場マグネットの開発課題

前述した通り、クエンチ保護技術の開発は超高磁場マグネット開発の核心をなす研究である。そのような中、無絶縁巻線技術が登場した[2]。無絶縁巻線技術は、図1に示すように、巻線のターン間絶縁を取り除くことで、常伝導転移部の電流が迂回する技術である。これにより、常伝導転移部の発熱が劇的に減少し、マグネットの焼損を防ぐことを可能にした。

しかし、高磁場マグネットに蓄積されている磁気エネルギーは膨大であり、迂回路を持つ無絶縁REBCOマグネットのジュール発熱だけでは簡単には消費しきれない。常伝導転移時に、蓄積磁気エネルギーを完全に散逸させる前に、大きな応力がコイルに働き、コイルを機械的に破壊することが起こる(図2参照)[5]。また、それらの機械的破壊は、回転力や軸方向力など

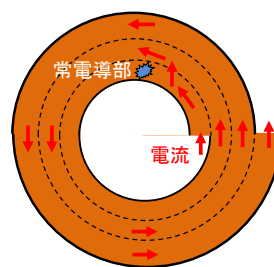


図1 無絶縁巻線技術を施したREBCOマグネット

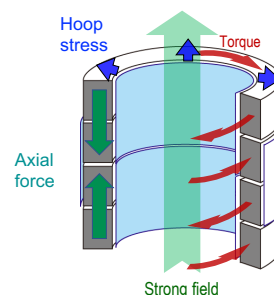


図2 無絶縁巻線技術を施したREBCOマグネットに働く様々な電磁力

のマクロ的な破壊[6]を伴うこともあれば、微小なクラックによる臨界電流密度の低下を引き起こす場合[3]もある。現時点では、そのメカニズムは完全に明らかになっていない。

超高磁場マグネットのクエンチ保護法としては、無絶縁巻線技術以外にもヒータによる加熱方法なども存在するが[4]、やはり最終的に機械的破損が起き、堅固なクエンチ保護手法の確立には至っていない。超高磁場マグネットの開発課題は、依然として、常伝導転移時の熱的な安定化と機械的な堅固化に焦点が当てられている。

3. 高磁場マグネットの応用

REBCO線を利用した20 T超級の超高磁場マグネットと高磁場大口径マグネットの開発が世界中で進められている。本章ではアメリカ、日本、世界での開発事例について概況する。

(1) マサチューセッツ工科大学 (MIT)

MITでは、SPARC/ARCプロジェクト[7]として、小型核融合炉の開発が進められている。規模としては、メートル級のコイルで20 T近くの発生を目指している。

さらには、1.3 GHz NMRマグネット (30.5 T) を開発中である。このマグネットは無絶縁技術を採用し、18.7 TをREBCOマグネットが発生させ、11.8 Tを低温超伝導マグネットが発生させる予定であった。しかし、2016年の励磁実験でREBCOマグネットが機械的な損傷を受けた[6]。現在は、新しい設計の元、クエンチ保護法としてMetal Insulationを備えたREBCOマグネットの再製作が行われている[7]。

(2) 米国国立高磁場研究所 (MagLab)

MagLabでは、先述した45.5 Tの世界最高DC磁場の発生に成功した[3]。マグネットは非常に小さいので、磁場空間も極めて小さい。実験中にクエンチし、機械的破損を引き起こした。現在も、45 T超級の超高磁場発生を目指しマグネット開発を続けている。

さらに、32 T REBCOマグネットの開発も行われた[4]。REBCOマグネット単体で17 T発生し、低温超伝導マグネットでは15 T発生している。継続的な32 Tの発生に成功している。クエンチ保護として、クエンチヒーターを備えている。

現在は、新たに40 Tマグネットの開発が進められている。Bi系マグネットを2種類、REBCOマグネットとして、無絶縁技術やクエンチヒーターなど異なるクエンチ保護法を有する3種類のマグネットを開発している。

(3) 日本の開発状況

理化学研究所で、1.3 GHz NMRマグネット (30.5 T) の開発が進められている。Intra-layer no-insulationという新しい技術を使用している。

東芝で、9.4 T MRIが開発中である。大口径ながら、9.4 Tの高磁場発生を目指している。同様に、三菱電機もREBCOマグネットによる大口径MRIを開発し、撮像にも成功している。

大阪大学を中心に小型サイクロトロン加速器が開発中である。メートル級の口径で、3 T程度の磁場発生が求められている。Metal Insulationを採用しており、YOROI技術[8]により機械的保護も目指している。

東北大学では、33 T無冷媒マグネットの開発が進めている。

(4) 世界の開発状況

ヨーロッパでは、2019年にBruker社が1.2 GHz (28.2 T) NMRの開発に成功している。また、グルノーブル高磁場研究所ではMetal Insulationを採用した32.5 Tマグネットも開発された。

韓国では、無絶縁技術を用いた初の商用マグネットとして18 T/70 mm REBCOマグネットが作られた。また、300 kWの誘導加熱機も商用として開発された。

中国では、中国科学院で30 Tマグネットの開発に成功しており、30 T超級マグネットの開発を続けている。

- [1] M. Bird, "Recent Advances in Ultra-High Field Magnet Technology," Plenary Talk at 26th International Magnet Technology Conference, Vancouver, Canada, Sep. 2019.
- [2] S. Hahn, D. K. Park, J. Bascuñán, and Y. Iwasa, "HTS pancake coils without turn-to-turn insulation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1592–1595, Jun. 2011.
- [3] S. Hahn, *et al.*, "45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet," *Nature*, vol. 570, pp. 496–499, 2019.
- [4] W. D. Markiewicz, *et al.*, "Design of a Superconducting 32 T Magnet With REBCO High Field Coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, Jun. 2012, Art. no. 4300704.
- [5] S. Noguchi and S. Hahn, "Torque Simulation on NI REBCO Pancake Coils during Quench," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1293, 2019, Art. no. 012061.
- [6] P. C. Michael, *et al.*, "Assembly and Test of a 3-Nested-Coil 800-MHz REBCO Insert (H800) for the MIT 1.3 GHz LTS/HTS NMR Magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 4300706.
- [7] D. Park, *et al.*, "MIT 1.3-GHz LTS/HTS NMR Magnet: Post Quench Analysis and New 800-MHz Insert Design," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 4300804.
- [8] S. Nagaya, *et al.*, "Development of High Strength Pancake Coil with Stress Controlling Structure by REBCO Coated Conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, 2013, Art. no. 4601204.