

小特集

核融合炉のための高温超伝導体開発の現状

Status of Research and Development of High Temperature Superconductors for Fusion Reactors

1. はじめに

1. Introduction

柳 長門^{1, 2)}, 中村 誠³⁾

YANAGI Nagato and NAKAMURA Makoto

¹⁾核融合科学研究所, ²⁾総合研究大学院大学, ³⁾Helical Fusion

(原稿受付: 2024年7月3日)

磁場閉じ込め核融合炉のマグネットに適用することをターゲットとして、高温超伝導 (High-Temperature Superconductor; HTS) 線材を用いた大電流導体の開発が世界で行われている。本小特集では、HTS マグネット設計と導体開発の経緯と現状、今後の展望についてまとめる。また、HTS 線材開発、冷却技術、接続技術についても最前線を報告するとともに、HTS 線材の民生機器応用についても紹介する。

Keywords:

fusion reactor magnet, high-temperature superconductor (HTS), REBCO

1.1 核融合マグネットへの高温超伝導適用

国際熱核融合実験炉ITERやJT-60SAトカマク装置、大型ヘリカル装置 (LHD) をはじめとする従来および現在建設中の磁場閉じ込め方式核融合装置では、低温超伝導 (Low-Temperature Superconductor; LTS) 線材を用いた大電流導体がマグネットに適用されてきた。これに対して、現在の核融合炉設計のうち、特に、民間スタートアップ企業を中心とする設計では、高温超伝導 (High-Temperature Superconductor; HTS) 線材を用いた導体をマグネットに適用することが検討されている。銅酸化物系のHTS材料は1986年にミュラーとベドノルツによって発見され、液体窒素温度においても超伝導性を示すことが確認された[1]。以来30年以上をかけた努力のもと、線材化技術が進化した。本章では、核融合炉設計に対するHTS適用の経緯を紹介し、併せて本小特集の全容を説明する。

1.2 高温超伝導マグネットオプションの歴史的経緯

核融合炉用マグネットに用いるHTS線材としては、希土類系銅酸化物 (Rare Earth Barium Copper Oxide, REBCO) 線材とビスマス系銅酸化物 (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide, BSCCO) が候補である。National Institute for Fusion Science, Toki, GIFU 509-5292, Japan

るが、このうちREBCO系線材は高温 (マグネット使用では絶対温度20 K付近の設計が一般的) において高磁場 (コイル直下の最大経験磁場として20 T付近) でも臨界電流特性に優れること、ハステロイ等を基板に用いているために機械的剛性が高いこと、放射化しやすい銀の使用量が少ないこと、将来的にコスト低減が期待されること、等の理由によって、核融合炉マグネットへの適用に優れていると評価される[2]。現在、世界ではREBCO系線材が年間合計数千kmという量で製造・販売されるに至っている。線材開発の現状と将来の展望については、第2章を参照されたい。また、この線材は核融合炉のR&Dだけでなく民生応用としても多くのアプリケーションがターゲットとなっている。その例について第5章で紹介する。

REBCO系線材は上記のようにメリットが多いが、テープ形状であるため、集合して大電流導体を構成するには難しさが残る。一方、BSCCO系線材については、2種類のうちBi-2223線材はREBCO系線材と同様にテープ形状であるが、もう一方のBi-2212線材については丸線の製造が可能であるため、LTSマグネットの標準となったケーブルインコンジット (Cable-In-Conduit; CIC) 導体の基本構造 (図1) はそのままに、LTSのNb₃Sn線材やNbTi線材をBi-2212線材に置き換える設計が可能である。ただし、Bi-2212の生成のためには母材に銀が用いられるため、特

Corresponding author's e-mail: yanagi.nagato@nifs.ac.jp

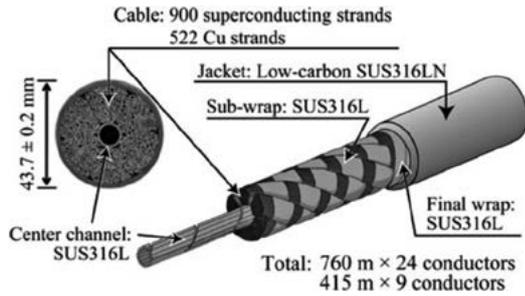


図1 LTS線材を用いたケーブルインコンジット (CIC) 導体の例: ITERのトロイダル磁場 (TF) コイル用導体[3].

に核融合炉に適用するには中性子照射による放射化が問題となり、十分な遮蔽ができる場合の使用に限られる。

現在、磁場閉じ込め核融合炉マグネットへのHTS適用について多くの検討が行われ、大電流導体の開発が本格化してきた[4-6]。核融合炉へのHTSマグネットの適用に関する提案は、2000年代の初めから行われた。代表的なものうちトカマク炉を対象として日本のVECTOR[7]と米国のARIES-AT[8]があった。VECTORは最初Bi-2212線材を用いた設計であったが、その後、REBCO系線材を用いた設計となった。トカマク炉に対する初期の提案と同時期(2001~2002年)に、ヘリカル型核融合炉設計に対してもHTS導体を用いる提案が行われた[9]。こちらは複雑な3次元形状のヘリカルコイルを製作するために着脱可能(ディマウント可能)方式の採用を想定した。

一方、2000年代にはプラズマ核融合研究へのHTS応用の世界で最初の例として磁気浮上コイルを用いるダイポール閉じ込め装置Mini-RT[10]、および、RT-1[11]が東京大学で製作され、HTS線材が適用された。これらにはBi-2223線材が用いられ、真空中で数時間の磁気浮上をさせることにより高圧力プラズマの実験が可能となった。このうちMini-RTについては、後にBi-2223線材をREBCO系GdBCO線材に代えた磁気浮上コイルにリプレースされた[12]。これは、最初のコイルにおいて巻線に若干の不具合があり浮上時間が初期計画より短ったため、より強度が高く、高温まで動作可能な線材として選択されたものである。

HTS応用に関するこうした動きも受け、2000年代の後半には核融合炉への適用を視野に入れた大電流HTS導体の設計や開発が世界の研究機関で始まり、2010年代以降に本格化した。これらには、EU Demo炉[13]、ヘリカル型核融合炉FFHR-d1[14]、FNSF ST炉[15]などがある。そして、2010年後半からは民間の核融合スタートアップ企業が多数出現し、磁場閉じ込め核融合ではその全てにおいてHTSマグネットが採用され、各仕様に応じて大電流HTS導体の開発が急ピッチで行われる状況となった。スタートアップにおけるHTSマグネットを用いた炉設計の例を図2に示す。

1.3 高温超伝導マグネットを採用するメリット

核融合炉用マグネットにHTSを適用する目的や用途については、現状は大きく分けて、(1)高磁場化・コンパクト

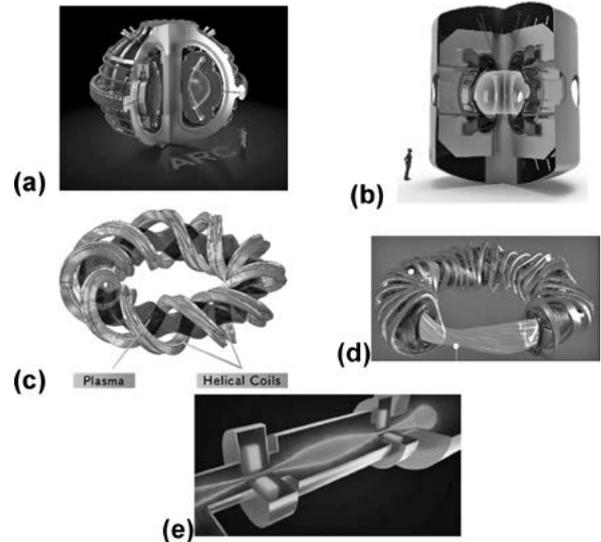


図2 スタートアップ企業におけるHTSマグネットを用いた炉設計の例: (a)ARC(CFS/MIT)[16], (b)STX(Tokamak Energy)[17], (c)HESTIA(Helical Fusion)[18], (d)Type-One Energy[19], (e)REALTA Fusion[20].

ト化、(2)高安定化・高電流密度化、(3)高温運転、(4)導体接続の4点にまとめることができる。以下にそれぞれのメリットについて概説する。

(1) 高磁場化

従来のLTS線材を用いたマグネットでは、コイル直下の磁場強度としては15-16 Tぐらいが限界であった。これに対して、HTS線材を用いると20 T以上の経験磁場でも使用できる。ここで、核融合出力は装置サイズの3乗と磁場強度の4乗に比例する(ベータ値がサイズや磁場強度に依らない仮定)。このため、磁場強度を上げることで装置サイズを抑えることが原理的には可能であり、この方向で小型炉がいくつか設計されている。例えば、米国のスタートアップ企業Commonwealth Fusion Systems(CFS)とマサチューセッツ工科大学(MIT)の進める強磁場トカマク炉ARCの設計では、トロイダル中心磁場強度9.2 T、コイル経験磁場は23 Tの設計である[21]。これにより、最近まで稼働してきた世界最大のトカマク装置JETと同サイズ(大半径3.3 m)において、ITER(大半径6.2 m)と同じ500 MW級の核融合出力を得ることが可能と想定され、電気出力100 MW(10万kW)級の核融合発電の早期実証が期待される。CFS/MITでは、ARC核融合炉の実現を最終ターゲットとしつつ、その前段階となる実験炉としてSPARC装置を建設する計画を立ち上げ、核融合利得Q値として2~10の達成と実証を2020年代後半に行うとして、装置建設が進んでいる。また、トロイダル磁場モデルコイル(TFMC)を製作して試験が行われ、温度20 Kにおいて最大経験磁場20 Tを達成した。この試験の詳細については、第3章をお読みいただきたい。

ARCに類似する発想として、英国スタートアップ企業のTokamak Energy社では球状トカマク炉STXが設計されており、こちらもコイルの最大経験磁場は23 Tと高く、同様に小型化して核融合発電の早期実現をめざしている

[22]. いずれも、小型化することで装置製作におけるハンドリング性の向上があることが、最大のメリットである。英国ではさらに国家プロジェクトとしてSTEP炉を2040年頃に稼働する計画も進行しており、同じくHTSマグネットが採用されている。

一方、中国で設計されているトカマク炉CFETR (China Fusion Engineering Test Reactor) では、中心ソレノイド (CS) コイルの最内層部分をHTSとするオプションが検討されている[23]. CSコイルはプラズマ電流を立ち上げ一定時間保持するためにできるだけ大きな磁束を得る必要があり、現状の原型炉設計では大型で、これに応じてトカマク装置全体も大型化しコスト増大につながる。そこで磁場強度を上げて同じ磁束変化を得ることで装置の全体サイズを小さくし、コスト低減をすることが可能である。CFETRのCSコイルではその最内層にBi-2212線材を用いたCIC導体を採用し、最大経験磁場を23 Tまで上げる設計である。CSコイルの外層には Nb_3Sn 線材のCIC導体の巻線部があり、両者は共通するパスを用いて超臨界ヘリウムで冷却される。上述のようにBi-2212線材には銀の放射化の問題があるが、トラス内側のブランケットに十分な厚みがあることに加え、CS外層コイル自体も放射線遮蔽体として働くため、中性子フルエンスを十分に下げられる試算となっている。

REBCO系線材の臨界電流の磁場依存性の観点からは、コイル経験磁場はもっとはるかに高いところまで使用可能ではあるが、実際には、コイルにかかる電磁応力が構造材の許容応力を超えることが律速となる。線材や導体と並行して、耐力の高い構造材の開発が進められており、今後の進展に期待される。

(2) 高安定化・高電流密度化

核融合炉の巨大マグネットにおいて安定性は最優先課題であり、クエンチ (マグネットの一部が超伝導状態から常伝導状態に転移しジュール発熱が全体に広がる、あるいは、局所的に暴走する現象) の発生は許容できない。超伝導工学では、常伝導転移が発生せず、導体が超伝導状態を維持できる状態を「安定」と呼ぶ。HTS導体を用いるとたとえ間接冷却であってもLTS導体で線材を冷媒で直接冷やしたときと同等以上の安定性を得られる。ここで、安定性に影響を及ぼす擾乱についてはいくつか考えられるが、そのうち電磁力による機械的な動きは重要な因子である。電磁力によって線材が動くと、その運動エネルギーは最終的に熱エネルギーとなって消費され線材の温度上昇につながる。常伝導転移を起こすために必要とされるエネルギー (安定性マージン) はLTS線材では $1 J/m^3$ 程度と評価される。CIC導体の場合は各素線が超臨界ヘリウムで直接冷却されるため、この安定性マージンを保証できるが、無冷媒の場合は線材の持つ比熱のみでサポートしなければいけない。LTS線材に対して温度4 Kのもと、例えば磁場10 T、電流密度 $25 A/mm^2$ 、温度マージン1 Kの条件で評価すると、線材の動きとして高々 $6 \mu m$ でこのマージンを消費してしまう。これに対してHTS線材の場合に運転温度を20 K、温度マージンを10 Kとすると、千倍の

6 mm程度まで動きを許容できる。このため、クエンチリスクを大幅に低減し、安定なコイルを作ることが可能となる[24]. さらに、このことをもとにコイルの電流密度を高く取れることも極めて大きなメリットとなる。電流密度を高くすることは、中性子遮蔽体を厚くし、コイルにおける核発熱を低減するとともに線材の寿命を延ばすことにつながる。特に球状トカマク (ST) 炉ではトラス中心の空間設計が大変厳しく、トロイダル磁場 (TF) コイルを高電流密度にして細くできれば、空間的な余裕ができる。ヘリカル炉においても一般にトラス内側の空間制約が厳しく、コイルを高電流密度化できればブランケットの厚みを増大させ中性子遮蔽性能を向上させるうえで有効である。この様子を図3に示す。

なお、上記のようにHTSマグネットではクエンチリスクを低減できるが、万一のクエンチの発生に備えてクエンチ検出と保護のシステムは確立しておかなければならないことは重要である。

(3) 高温運転

HTSマグネットの利点のひとつは「高温」運転ができることである。運転温度を従来の液体ヘリウム温度4 Kから20 Kまで上げることでマグネットの冷凍電力を約5分の1に下げることができ、核融合炉の経済性が向上する。また、4 K以上の運転では液体ヘリウムの製造が不要となるため、ヘリウム資源の節約に貢献する利点も極めて大きい。ヘリウムの供給は将来に渡っても大きな変動を伴う切実な問題であり、できるだけインベントリーを減らす必要があることは言うまでもない。併せて、高温運転がクリティカルに必要な仕様もある。上述のとおり、球状トカマク (ST) 炉やヘリカル炉のようにブランケット空間が狭く、放射線遮蔽が十分でない設計に対しては、電流密度を高くして遮蔽を増大するとともに、核発熱を許容すべく、より高温で運転できることは大きなメリットである。20 K運転において冷媒としてはヘリウムガス、あるいは、超臨界ヘリウムが第一の選択肢となるが、液体水素を用い

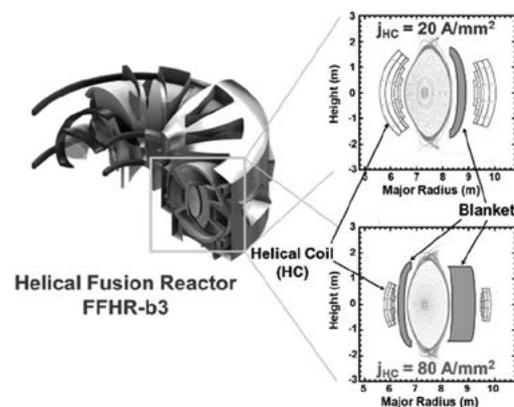


図3 ヘリカル型核融合炉設計におけるヘリカルコイルの電流密度 (j_{HC}) とブランケットスペースの関係を示す一例。電流密度が $20 A/mm^2$ (ITER仕様) では、薄いブランケットがトラス外側のみに入るが、これでは、トリチウム増殖と放射線遮蔽の両方の観点から成立しない。電流密度を $80 A/mm^2$ まで上げると、内側にもブランケットを入れることが可能となる。

ることや液体ネオン（沸点27 K）を使うことも想定できる。ただし、これ以上温度を上げると、HTS線材の臨界電流が低下する問題に加え、電磁力支持構造物の機械強度が下がる問題が生じる。冷却に関する詳細については、第6章をお読み頂きたい。

(4) 導体接続に関する利点

HTS導体は高温で運転できるため、多数の接続部を含む特殊なコイル構造を採用することも考えられる。上記CFS/MITのARC炉では、HTSを用いる理由として高磁場化とともに炉内機器の交換作業を簡便に行うことを目的としてTFコイルを着脱可能とすることが提案されている[20]。メンテナンスを行う際はTFコイルを赤道面で分割して取り外し、真空容器内部に簡単にアクセスする発想である。HTS導体を接続して作るもうひとつの設計例はヘリカル型核融合炉であり、一体構造の3次元ヘリカルコイルを分割して製作する発想である。これは1980年代に当時唯一の実用超伝導線材であったNbTi導体に対して考案され、R&Dも行われた[25]。2000年代に入りHTS線材を用いて類似の提案が（独立に）行われ、運転温度を20 K以上とすることで多数の接続部におけるジュール発熱を許容できる設計となった[9]。これは製作工程を早めるだけでなく、万一コイルの一部に不具合が生じたときに補修できるように着脱可能とする発想でもある[26]。接続に関する詳細については、第4章をお読みいただきたい。

参考文献

- [1] J.G. Bednorz and K.A. Müller, Z. Phys. B-Condensed Matter **64**, 189 (1986).
- [2] 和泉輝郎, 柳 長門: プラズマ・核融合学会誌 **93**, 222 (2017).
- [3] 名原啓博 他: プラズマ・核融合学会誌 **92**, 396 (2016).
- [4] W.H. Fietz *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 4800705 (2016).
- [5] P. Bruzzone *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 103001 (2018).
- [6] N. Mitchell *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **34**, 103001 (2021).
- [7] T. Ando *et al.*, Fusion Technol. **1**, 791 (1998).
- [8] F. Dahlgren *et al.*, Fusion Eng. Des. **167**, 139 (2006).
- [9] H. Hashizume *et al.*, Fusion Eng. Des. **63**, 449 (2002).
- [10] Y. Ogawa *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **79**, 643 (2003).
- [11] Z. Yoshida *et al.*, Plasma Fusion Res. **1**, 8 (2006).
- [12] Y. Ogawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **9**, 1405014 (2014).
- [13] V. Corato *et al.*, Fusion Eng. Des. **136**, 1597 (2018).
- [14] A. Sagara *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 2114 (2014).
- [15] Y. Zhai *et al.*, Fusion Eng. Des. **135**, 324 (2018).
- [16] <https://www.psfc.mit.edu/sparc>
- [17] <https://tokamakenergy.com/>
- [18] <https://www.helicalfusion.com/en/technology>
- [19] <https://typeoneenergy.com/>
- [20] <https://realtafusion.com/>
- [21] B.N. Sorbom *et al.*, Fusion Eng. Des. **100**, 378 (2015).
- [22] A. Sykes *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 016039 (2018).
- [23] Y. Song *et al.*, Fusion Eng. Des. **183**, 113247 (2022).
- [24] N. Yanagi *et al.*, Plasma Fusion Res. **9**, 1405013 (2014).
- [25] K. Uo, *et al.*, Proc. 14th Symp. Fusion Technology, 1727 (1986).
- [26] 伊藤 悟 他: プラズマ・核融合学会誌 **92**, 623 (2016).

小特集 核融合炉のための高温超伝導体開発の現状

2. 高温超伝導テープ線材の開発の現状

2. Status of Research and Development of High Temperature Superconducting Tapes

山田 穰^{1,2)}

YAMADA Yutaka

¹⁾中部大学 薄膜研究センター, ²⁾上海超导科技股份有限公司

(原稿受付: 2024年6月13日)

高温超伝導の発見から38年経った今, 小型核融合応用で REBCO ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) 高温超伝導線の大規模な量産化が進みつつある. この高温超伝導核融合装置には20 Tにもなる高磁場の大型超伝導コイルが必要で, 1台当たりの線材必要量は2万 kmである. この装置を世界に1万台作ろうという勢いである. 現在, 線材各社は総力を挙げて量産化に取り組んでいる. 本章では, 現在主流となっている IBAD-PLD 法 REBCO 線を中心に, 線材の形状がテープ状である理由, その技術, 現在の開発進展状況, 今後の開発課題を述べる.

Keywords:

high temperature superconductor, REBaCuO, superconducting tape, ion beam assisted deposition, pulsed laser deposition, critical current

2.1 はじめに

1986年の高温超伝導の発見[1]から38年, REBCO 高温超伝導線の大量生産が世界的に始まった. 図1はその端緒となった MIT-CFS 社のトカマク型小型核融合装置の未来完成図である[2]. 小型にするために, 従来にない高磁場20 T (導体最大経験磁場) の超伝導コイルが必須であり, そのため多量の高温超伝導線を使用する. 図1の装置の次の商用炉 (ARC) では2万 kmもの線が必要となる. 将来はこれを世界中に1万台作ろうかとの発表もあった. 図2は図1のモデル試験高温超伝導コイルであり, 世界中のメーカーの REBCO 線, 270 kmが使われ, 2021年に20 K, 20 Tの高磁場, 高温での励磁試験に成功した[3]. 本章では, 現在主流の IBAD-PLD 法 REBCO 線について基本技

術と量産化の現状, 今後の課題を述べる.

2.2 高温超伝導線材の技術

2.2.1 基本構造と特性

2000年初期の REBCO 線開発から, 現在世界で数社において量産化が進んでいる (詳細は後述の第3節). その代表例として, 図3に Shanghai Superconductor Technology 社 (SST, 上海超伝導株) の IBAD-PLD 法 REBCO 線 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (RE: Rare Earth, Y, Gd, Eu など)) の構造を示す[4]. IBAD は, Ion Beam Assisted Deposition, PLD は Pulsed Laser Deposition の略でそれぞれ, 特殊なスパッタ蒸着, エキシマレーザーによる蒸着法である. ハステロイテープ金属基板上に各種酸化物

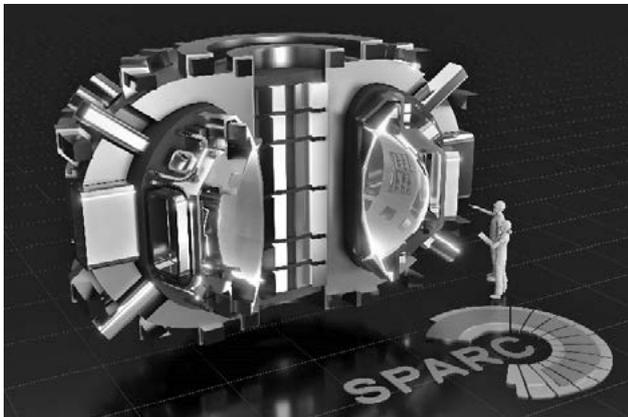


図1 MIT-CFS 社の小型核融合装置 SPARC の構想図. (著作権許可 Credit: T. Henderson, CFS/MIT-PSFC, 2020).

Chubu University, Kasugai, AICHI 487-0027, Japan

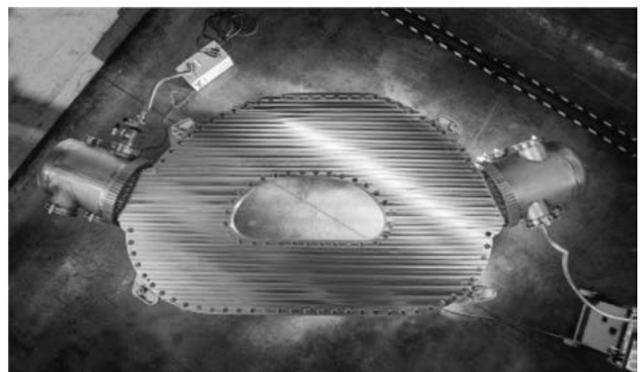


図2 MIT-CFS 社の20 T REBCO 線 TF (Toroidal Field) モデルコイル. 長直径3 m. (著作権許可 Gretchen Ertl, CFS/MIT-PSFC, 2021).

author's e-mail: yutakayamada@isc.chubu.ac.jp

のバッファ層 ($\text{Al}_2\text{O}_3\sim\text{CeO}_2$) をスパッタ、PLD 法などで蒸着する。MgO 層は、後述の IBAD 法により作製され、結晶が配向した組織になる。その上に他の酸化層と厚さ $1\sim 2\ \mu\text{m}$ の超伝導 REBCO 層をエピタキシャル成長させる。超伝導臨界電流 J_c は液体窒素温度 77 K で $100\sim 200\ \text{A}$ (幅 4 mm), $500\sim 600\ \text{A}$ (幅 12 mm) である。全体厚みは $40\sim 100\ \mu\text{m}$ 程度である。

小型核融合には高磁場が必須である。そのために、線材はより高い超伝導電流密度 J_c が得られる $4\sim 20\ \text{K}$ で使う。CFS 社の装置は 20 T の高磁場を必要とする。図 4 は超伝導層のみの $4.2\ \text{K}$ の J_c 特性である [5]。REBCO 線 (図では YBCO) は、他の線材より 1 桁高い J_c を 20 T 以上でも示す。これが、小型核融合などの高磁場応用で REBCO 線が使われる理由である。この高い J_c のため、コンパクトで高磁場を発生できるコイルが可能となる。

2.2.2 材料科学技術：何故幅広テープ形状か？

弱結合と 2 軸配向：液体窒素温度を超える T_c を持つ YBCO が発見 [6] されるとすぐ、線材化のために Ag などの金属シース粉末法により最初の YBCO の丸線が作製された [7]。金属管に YBCO の超伝導粉末を入れて金属引き延ばし加工をし、熱処理する。しかし、その J_c (77 K,

0 T) は僅か $700\ \text{A}/\text{cm}^2$ 程度と今の薄膜テープ線より 4 桁小さかった。金属シース粉末法の YBCO は固相焼結法であり、内部に多数の大傾角の結晶粒界がある。超伝導電流は YBCO 結晶構造中の CuO_2 面 (ab 面方向) を 2 次元的に流れるが、コヒーレンス長が短く、結晶粒界の角度に J_c は敏感である (弱結合¹)。高い J_c を得るには、ab 面を揃え、結晶配向のずれを $3\sim 4^\circ$ 以内にしなければならない [8] (2 軸配向¹組織)。

ただし、Ag シース粉末法は弱結合性の弱い Bi 系線材に受け継がれ活用されている。また、REBCO 線でも図 2 のように、Ag 層として酸化超伝導層への酸素富化処理や熱的、電気的安定化のために必須である。

IBAD 法：上述の弱結合の問題を解決し、高い J_c を得るため結晶組織の方位を揃える方法が IBAD 法 [9] である。ジルコニア系酸化物 (YSZ, GZO) や MgO をスパッタ蒸着する際、別のイオンビームを同時に基板法線に対し特別な角度から照射する (図 5 [10, 11]) と、蒸着膜は高い 2 軸配向性を示す。特に、MgO [12, 13] は厚さが数 nm で数百 m/hr の高速製造が可能である。

この IBAD-MgO 層上に CeO_2 層 (図 6 [12]) や LaMnO_3 層を蒸着すると、より安定して高配向度が得られる [14]。

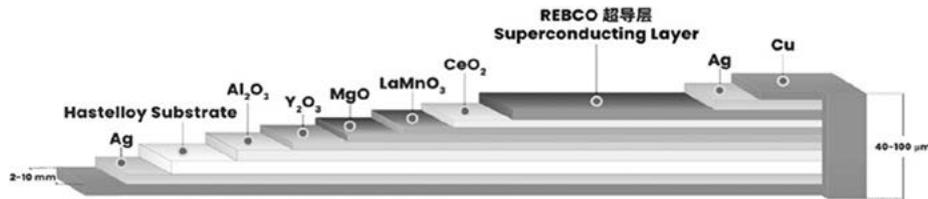


図 3 量産 REBCO 線の構造 (幅 $4\sim 12\ \text{mm}$, 厚さ $0.1\ \text{mm}$ 程度)。REBCO 層は $1\sim 2\ \mu\text{m}$ (SST 社 [4] より転載許可)。

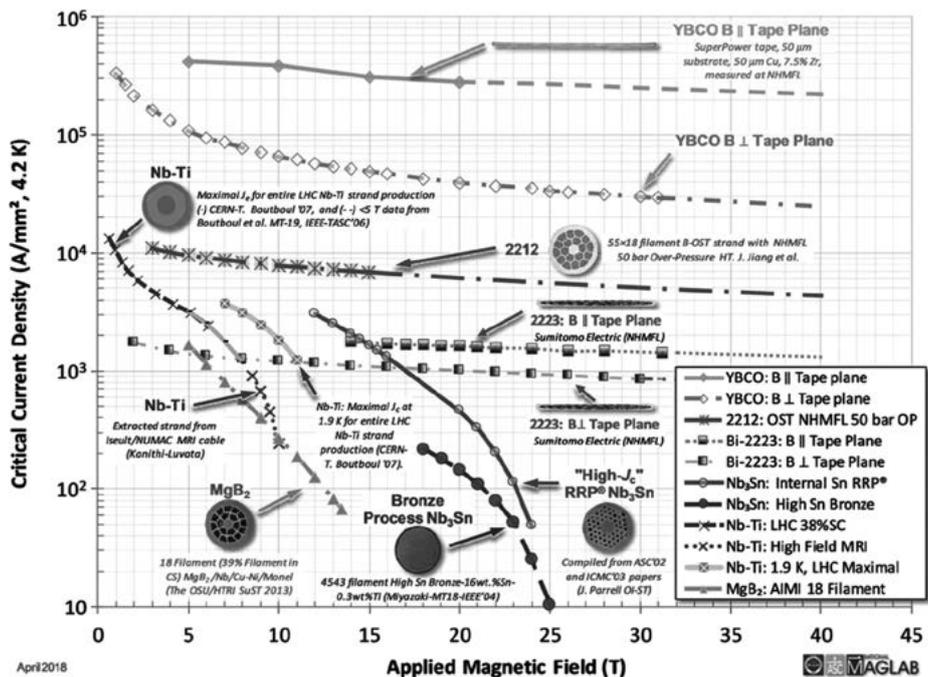


図 4 非銅あるいは超伝導層のみの臨界電流密度 J_c (文献 [5] の図。転載許可)。

1 弱結合と 2 軸配向：2 軸配向とは図 6 の緑色部分で超伝導層の REBCO 結晶の a 軸 [100] 方向, b 軸 [010] 方向を揃えることである。この際、隣り合う結晶の粒界の角度が大きくなると、超伝導電流が流れなくなる。これを弱結合と言う。本線材ではまず MgO 層で 2 軸配向組織をつくり、その上に超伝導層をエピタキシャル成長させて大きな超伝導電流が流れる 2 軸配向組織を実現している。

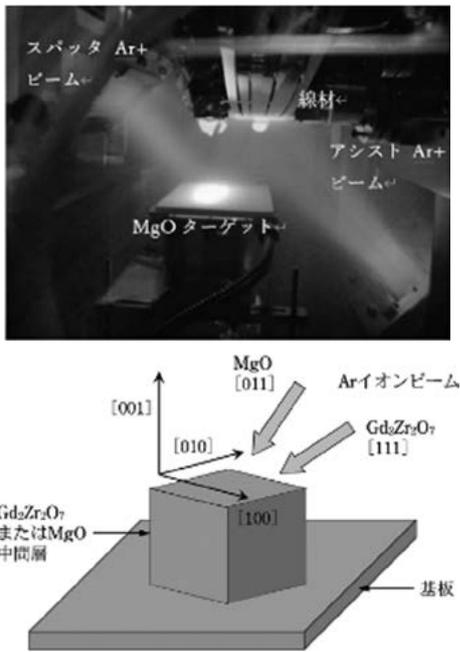


図5 IBAD 蒸着装置 (上) (文献[10]の図6. 転載許可) との原理図 (下) (文献[11]転載許可). Ar⁺アシストビームを蒸着面に照射し, 2軸配向組織を得る. 材料によりその照射角度は異なる.

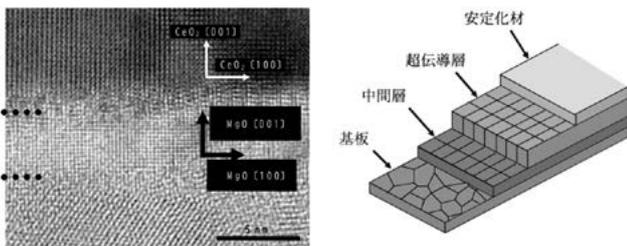


図6 IBAD-MgO上CeO₂層のエピタキシャル成長の様子(左) (文献[13]の図5. 転載許可). とIBAD法による幅広テープ超伝導線材の結晶構造模式図(右) (文献[11]の図5. 転載許可5).

最後にPLD法などによりREBCO超伝導層をエピタキシャル成長させ, 結晶粒界のずれが少ない高J_cのREBCO膜を作製する. 基板が Hastelloyテープなどの多結晶体でもIBAD法を用いれば, 膜を2軸配向させ超伝導材として実用に十分な電流が流せる.

すなわち, 幅広テープ形状になる理由は, 高いJ_cを得るために2軸配向膜が必要であり, その後結晶方位を受け継ぐエピタキシャル成長の薄膜形成が必要なためである.

MPMT (マルチプルーム, マルチターン) 法: PLD法線材の高速製造, 量産化のため, MPMT法[15]と呼ばれる方法が開発された. 図7のようにレーザー光を光路上の反射ミラーで高速に反復運動させ, レーザービームをターゲット上で動かし, 複数のプルーム (ターゲット材料がガス, イオン化したもの) を発生させる.

これによりIBAD基板上に大面積で高速にREBCO層を蒸着できるようになった. 当初は超伝導相としてYBCOが使われていたが, 長尺検討が進むにつれGdBCOが高速製造に有利であることも分かった[16]. 今は, 77 K, 低磁場応用ではGdBCOが, 高磁場応用では次節の

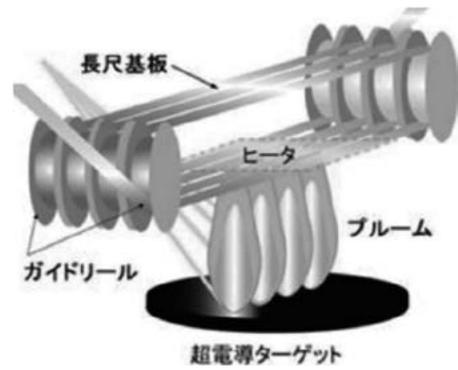


図7 MPMT (マルチプルーム, マルチターン) 法による線材作製 (文献[10]の図. 転載許可).

EuBCO+BaHfO₃の線材が多用されている.

以上のIBAD, MPMT-PLD法を組み合わせた製造一貫工程を図8に示す. ①から④の工程全て真空中の蒸着で幅広線材をReelで巻き取る方式である. なお, REBCO膜の作製法は, 他にCVD法, 真空蒸着法, MOD法があるが, 詳細は文献[17, 18]を参考願いたい.

人工ピン: 磁場中のI_c向上ため, 人工ピンと呼ばれる特異な製法がPLD法で開発された[19]. 超伝導体に抵抗ゼロの電流を流すためには, ピンニングセンター (ピン) と呼ばれる常伝導欠陥が必要である. これが量子化された磁束の動きを止め (ピン止め), 磁場中でのI_cを高める.

当初, 液体窒素中77 Kでは, 磁場を印加するとI_cは大きく減少した. しかし, PLD法で, 図7のターゲットにREBCO相と適量のBaZrO₃を混合して成膜すると, その組織は特異なコラムナー状 (柱状晶) の微細なBaZrO₃析出物となって (図9) 有効なピンとなり, 磁場中のI_cが大幅に向上した[20]. 現在, 最も特性が優れ, 多用されているのはEuBCOとBaHfO₃人工ピンの組み合わせである[21]. 詳しくは, 松本による解説[22]を参考願いたい.

2.3 線材量産化の現状: IBAD-PLD法

小型核融合開発の活発化を受け, REBCO線の量産化が盛んである. 高磁場J_c特性と長尺実績に優れるIBAD-PLD法 (SST社, FFJ (Faraday Factory Japan) 社, フジクラ他) やCVD法 (Superpower/古河社) で年産100 km以上を公表している[23]. 図10は, その代表的な例で



図8 IBAD-PLD法REBCO線材の一貫作製工程 (ISTEC資料から) (ISTEC転載許可. <http://www.istec.or.jp/istec/map&contact.html>).

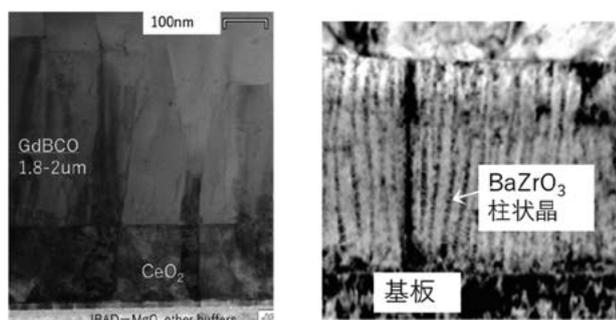


図9 REBCO線材断面の透過電子顕微鏡による組織（文献[10]の図、転載許可）。



図10 (a) SST社(上)と(b)FFJ社(下)の新しい量産新工場(2024年)(SST, FFJ社より転載許可)。

SST社とFFJ社の最近できた大型量産工場である。規模は、年産1000 km以上になる。図11はSST社の典型的な長尺線の特徴の一例である[4]。幅12 mmで500–600 Aの I_c (77 K, 自己磁場下)を持つ。

2.4 課題

REBCO線は上述のように順調に量産化が進んでいるが、大型マグネット応用の検討はまだ始まったばかりであり、特に、高磁場、大電磁力環境下の商用応用では、さらに以下の課題がある[24]。

セラミックスの強度：REBCO線はハステロイとREBCO相の複合体であり、全体としては他の超伝導線以上の高引張強度を持つ。そのため、すでに20–40 Tの高磁場小型

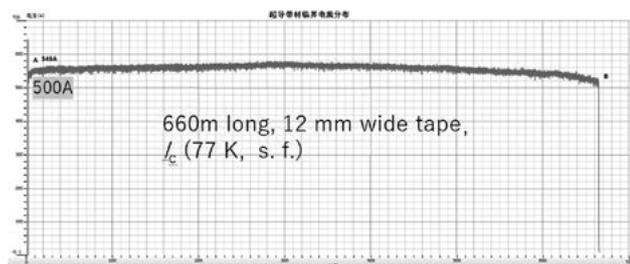


図11 図12 SSTの長尺線の I_c 特性例(SST社[4]より転載許可)。

コイル、超高磁場NMRなどに多数作製されている。

しかしながら、商用核融合用大型マグネットなどでは、より複雑なねじり、ツイストなどの力もかかき、また、その膨大な励磁回数から今後、疲労破壊などの検討も必要になる。

REBCO層は脆いセラミックスであり、長時間運転で信頼性を保つには、本質的強度、靱性改善が必要であるが、そうした研究はまだ少ない。線形破壊力学によれば、脆性材料の破壊に必要な応力(σ_f)は臨界応力拡大係数または破壊靱性値と呼ばれる K_{Ic} に比例し、 K_{Ic} が大きいほど材料中のクラックの進展は進まず壊れにくい。強化の例として、YSZや分散強化型ガラスは良く知られており、後者の例ではマグネシアの添加で K_{Ic} が2–3倍になる[25]。また、最近では第3元素添加型のジルコニアで金属に近い K_{Ic} が得られている[26]。

REBCO層中にこうした“クラックや転位の動きを止める機械的ピン”と I_c を高める“超伝導の人工ピン”(図9)が導入できれば、一石二鳥である。

低温、高磁場での J_c の向上： J_c 向上に有効なピンは、使用する温度、磁場により異なる。従来の研究では77 K、低磁場での J_c 向上が主体であった。今後は、小型核融合が使われる低温、高磁場での再検討が必要である。さらに、最近、低温酸素アニールでREBCO層のキャリア濃度を上げ、4–20 Kの J_c を大幅に向上できるとの報告がある[27]。 J_c を高くできれば超伝導層の膜厚は薄くて済み製造速度は上がり、線材の低コスト化に大きく寄与する。

低コスト化：Hiwatariらによる将来の商用核融合炉(ITER, DEMO炉のあと)のコスト内訳[28]によると、超伝導部分は総額の19%で、そのうち、線材は5%である。他方、CFS社は40万kWの小型核融合機にはREBCO線2万kmが必要という[29]。そこから、 CO_2 の出ない原子力発電を小型核融合発電の競合として、線材値段を割り出した[24]。その計算では、REBCO線のコストは現在の Nb_3Sn 線並み[30]、すなわち、現在の数分の1から1桁の低コスト化が必要である。

2.5 まとめ

REBCO線の製造は量産化が数社で始まったばかりである。まだ、改良の余地は大きい。さらに需要が高まれば、将来は、鉄鋼業、自動車産業のようなより進んだ量産、自動化ラインになり、低コスト化も大幅に進む。

これまでの単発的な需要でなく、小型核融合やMRI、マグレブなど定常的需要のあるマーケットを作るため、有益な技術が途絶えないよう需要創出、材料から機器への産業循環システムを育てなくてはならない。

さらに、政策的補助も重要である。Li電池、EVなどの CO_2 削減、気候変動抑制による世論、政策援助、今は、九州などでの半導体への投資がその例である。そのおかげもあり、いずれの技術も急速な発展を見ている。

今回の小型核融合の世界的投資と政策的補助により高温超伝導機器の産業化が進展するのは確実である。

謝 辞

本章の執筆では、上海超電導(株)、中部大学の各関係者の協力に感謝いたします。また、筆者の関わった技術の多くは当時のISTEC（財国際超電導産業技術研究センター2016年に閉所）と（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、経済産業省の関係者のおかげであり、各位にこの場で深く感謝いたします。

参考文献

- [1] J.G. Bednorz and K.A. Muller, *Z. Phys. B* **64**, 189 (1986).
- [2] <https://news.mit.edu/2021/MIT-CFS-major-advance-toward-fusion-energy-0908>
- [3] D.G. White *et al.*, *IEE Trans. Appl. Supercond.* **34**, 0600218(2024).
- [4] <http://shsctec.com/index.php?m=list&a=index&classid=51>
- [5] <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots/>
- [6] M.K. Wu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 908 (1987).
- [7] Y. Yamada *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **26**, L865 (1987).
- [8] D. Dimos *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 219 (1988).
- [9] Y. Iijima *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 769(1992).
- [10] <http://www.istec.or.jp/tape-wire/labo-tape-wire.html>. IBADのイオンビームは2005年当時のISTEC名古屋研の装置で撮影したもの。
- [11] 熊倉浩明：応用物理 **8**, 392 (2011).
- [12] C.P. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2955 (1997).
- [13] 羽生 智 他：フジクラ技法 **116**, 38 (2009).
- [14] T. Muroga *et al.*, *Physica C* **392-396**, 796 (2003).
- [15] 渡部智則 他：低温工学 **39**, 553 (2004).
- [16] 衣斐顕他：低温工学 **42**, 42 (2007).
- [17] A.P. Malozemoff and Y. Yamada:100 Years of Superconductivity, Chapter 11 “Second Generation HTS Wire”, p689 (CRC press, 2011). 及び和泉輝郎, 柳 長門：プラズマ・核融合学会誌 **93**, 222 (2017). RABiTS法基板, MOD法（化学溶液法）, 真空蒸着法など多数の製法.
- [18] <http://www.istec.or.jp/tape-wire/labo-tape-wire.html> 特に, PLD法, MOD法（化学溶液法）線材の高特性化.
- [19] T. Haugan *et al.*, *Nature* **430**, 867 (2004).
- [20] Y. Yamada *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 132502 (2005).
- [21] H. Tobita *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 062002 (2012).
- [22] 松本 要：応用物理 **77**, 19 (2008).
- [23] 山田 穰：応用物理 **93**, 206 (2024).
- [24] Y. Yamada, The 36th International Symposium on Superconductivity (ISS2023), Takina, Wellington, New Zealand, Nov 28-30, 2023.
- [25] 宮田 昇：材料 **37**, 361 (1988).
- [26] <https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-06-28-001>
- [27] A. Stangl *et al.*, *Sci. Rep.* **11**, 8176 (2021).
- [28] R. Hiwatari *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **14**, 1305047 (2019).
- [29] Brandon Sorbom Presentation at International Coated Conductor for Applications 2023, Houston University, US, (2023).
- [30] D. Uglietti, *Supercond. Sci. Technol.* **32**, 053001 (2019).

小特集 核融合炉のための高温超伝導体開発の現状

3. 大電流高温超伝導体開発の世界的動向

3. Development of Large-Current High Temperature Superconductors in the World

柳 長門^{1,2)}, 成嶋 吉朗^{1,2)}, 小野寺 優太¹⁾

YANAGI Nagato, NARUSHIMA Yoshiro and ONODERA Yuta

¹⁾核融合科学研究所, ²⁾総合研究大学院大学

(原稿受付: 2024年7月3日)

本章では、磁場閉じ込め核融合炉のマグネットへの適用をめざした大電流高温超伝導 (HTS) 導体の開発について世界での状況を概観し、今後の展望や課題について議論する。

Keywords:

fusion reactor magnet, high-temperature superconductor (HTS), REBCO, large-current conductor

3.1 はじめに

第1章で述べられているように、磁場閉じ込め核融合炉に対して高温超伝導 (High-Temperature Superconductor; HTS) 線材を用いたマグネット設計が世界において進んでおり、これに応じてHTS大電流導体が提案・開発されている。近年は、特に、スタートアップ企業における研究開発が大きな比重を占めるようになってきた。本章では、これらの現状として、各導体の特徴や特性などを概説する。また、HTSマグネットの実現に向けた今後の展望と課題について議論する。

3.2 核融合用高温超伝導体の設計・開発例

2010年代以降、核融合炉マグネットへの適用をめざしたHTS大電流導体が世界において提案されてきた[1-3]。その多くはトカマク炉に用いることを対象としてパルス運転に対応するため、交流損失を低減するとともに導体内の電流分布を均一として速い励磁速度においても導体の冷却安定性を高められるよう、線材を複雑に組み合わせた導体構造が提案されている。いずれも線材間に撚り(ツイスト)と空間転位(トランスポーズ)を入れた構造であり、このことは低温超伝導 (Low-Temperature Superconductor; LTS) 導体と同じである。ただし、REBCO系線材はテープ形状であり、従来のLTS線材の丸線素線と異なり複雑な構造を導入することは難しい。以下に導体の設計・開発例について5種類ほどを紹介する。

(1) Roebel型導体

この導体はドイツのカールスルーエ工科大学 (KIT) において提案された[4]。テープ形状のREBCO系線材をパンチングして切り欠くことでミアンダ形状に加工し、これを順次撚り合わせて大電流導体とする。110年前にLudwig Roebelによって銅テープ線に対して提案された

National Institute for Fusion Science, Toki, GIFU 509-5292, Japan

構造である。テープ線材を幅方向にできるだけ細かく分割してRoebel構造の素線とし、これを多数本組み合わせることでRutherfordケーブルとする試作が行われ、核融合のみならず加速器への応用も検討されている。CERNではFuture Circular Collider (FCC) のダイポールコイルへの適用のため、磁場20 T、電流10 kA級の導体とコイルが開発されている(図1)。

(2) TSTC型導体

TSTC (Twist-Stacked Tape Cable) 導体は、米国のマサチューセッツ工科大学(MIT)において提唱された。テープ形状のREBCO系線材を積層した後にその束全体を捻っていく「積層撚線」構造である[6]。これを1本の素線として多数本を集合することで大容量導体を構成することができる[7, 8]。

TSTC構造を基本とした提案がいくつか出ており、「TSTC導体ファミリー」として分類することができ、図2に代表的な例を示す。米国のスタートアップ企業Commonwealth Fusion Systems (CFS) とMITが共同で進めるARCトカマク炉用のVIPER導体では、温度20 K、外部磁場10.9 Tにおいて定格電流40 kAが安定に通電された[11]。1000回までの励磁試験では若干の性能低下が見られたものの、改良したPIT-VIPER導体で改善されている。



図1 CERNにおいて素粒子加速器のダイポールマグネット用に開発されたRoebel導体[5]。

Corresponding author's e-mail: yanagi.nagato@nifs.ac.jp

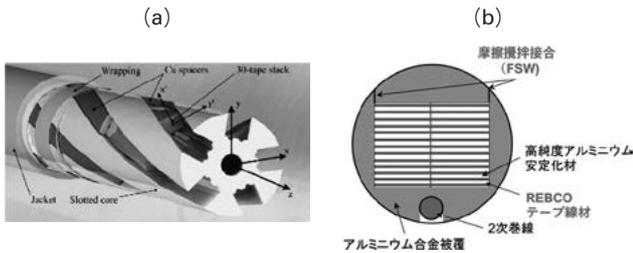


図2 TSTC 導体ファミリーの例。(a) ENEA の Slotted-core 導体 [9], (b) NIFS の FAIR 導体 [10].

(3) CORC型導体

CORC (Conductor on Round Core) 導体は、米国 Advanced Conductor Technologies 社において開発・製品化された [12]。銅フォーマの周りに REBCO 系線材を巻き付けることによって大電流導体を構成し、導体全体として可とう性に優れている。電流量は数 kA 級であり、これを多数本束ねて数十 kA 級のケーブル・イン・コンジット (CIC) 導体を構成することが可能で、加速器の巨大検出器用マグネット等への応用が検討されている [13]。また、CORC と類似の導体もいくつか提案されており、そのひとつとして京都大学で開発されている SCSC 導体がある [14]。この導体では REBCO 系線材の幅広面においてレーザースクライビングを用いた細線化が行われており、パルス励磁で用いる場合、交流損失は 20 分の 1 程度に低減できることが確認されている。図 3 に CORC 型導体の例を示す。

(4) Rutherford 型導体

従来の LTS 導体において、NbTi 線材や Nb₃Sn 線材を用いた Rutherford 型と呼ばれる平角撚線形状の導体は、加速器や核融合実験装置用導体に使われてきた。例えば、大型ヘリカル装置 LHD のヘリカルコイル用アルミニウム安定化導体の NbTi/Cu 線材部に適用された。HTS 導体については、REBCO 系線材を用いた前述の Roebel 型導体 [16] や TSTC 型導体 [17] を「素線」として用いた Rutherford 型導体が開発されている。TSTC を用いた Rutherford 型導体の RSCCCT 導体では、磁場 12 T、温度 4 K において電流値 60 kA を達成した。また、最近、MIT において TSTC 素線を用いた Rutherford 型 FReTC 導体が提案・開発されている [18]。

(5) 単純積層型導体

上記の導体例に見るように大電流 HTS 導体では多数枚

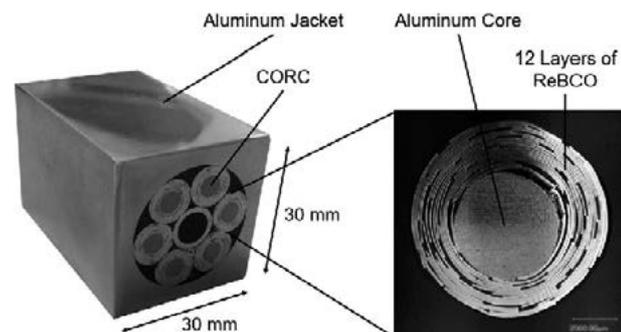


図3 CORC ケーブルを素線として用いた大型 CIC 導体の例 [15].

の REBCO 系テープ線材が用いられ、通常これらにはツイストやトランスポーズが施される。このことは従来の LTS 導体において NbTi 線材や Nb₃Sn 線材の素線 (直径 1 mm 程度の丸線) をツイスト・トランスポーズしてきたのと同じであり、大電流超伝導導体を構成する場合の鉄則である。素線にそのような工夫をせず単に平行線として配置すると、たとえ電流変化率の小さな (直流) 運転においても素線間のインダクタンスの違いによって非一様な電流分布 (偏流) が形成される。LTS 導体の場合、これにより一部の電流密度の高い線材が臨界に達して常伝導転移が生じると、それに伴う発熱による温度上昇のため隣接する線材も次々に常伝導転移するアバランチ現象が生じる。このため、特に電流の掃引速度が速くなるとクエンチ電流が低下する Ramp-Rate Limitation (RRL) という現象が観測される [19]。こうした経緯を受け、大電流 HTS 導体においてもテープ線材間にツイストやトランスポーズを入れることは絶対的に必要と考えられてきた。これに対して、HTS 線材では LTS 線材と比べて格段に高い安定性マージンを有するため、1 本の線材が臨界に達しても隣接する線材へのアバランチは起こらず、スムーズに転流が生じることで導体全体としてクエンチに至らないと期待でき、これをもとに単純積層も可能という発想が成立する。この基本的理解のもと単純積層型導体が核融合科学研究所 (NIFS) において STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure Conductor) 導体として 2000 年代半ばに提案された [20, 21]。REBCO 系線材を単純に積層して銅安定化材に収納し、電磁力に対応するためステンレスジャケットで外周を囲んだ構造である。テープ線材には複雑なツイストやトランスポーズが施されていないため過度なひずみが加わらず、ウィークポイントがないことが大きな特長である。これにより機械強度に優れるとともに他の複雑な導体仕様と比べて製造コストの低減も期待できる。さらに導体間の接続が容易という利点もある。NIFS では他に単純積層導体として、WISE 導体が 2019 年に提唱された [22]。最近の傾向として、世界的にも単純積層導体が見直され、設計開発例が増えてきたことは特筆に値する [23, 24]。これらの導体例を図 4 に示す。

(6) Bi-2212 線材を用いた CIC 導体

REBCO 系線材と異なり、BSCCO 系線材のうち Bi-2212 線材については円断面 (丸) 形状の細線を作ることが可能である。本小特集第 1 章に記述されているように 2000 年代初めに VECTOR の炉設計で採用され、実際に Bi-2212 線材を束ねた CIC 導体サンプルが製作された。導体試験

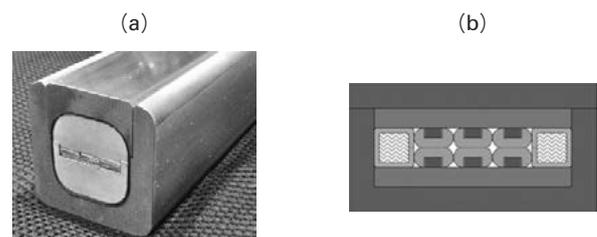


図4 単純積層導体の例。(a) NIFS の STARS 導体 (100 kA 級), (b) スイス SPC の ASTRA-B 導体 [25].

では、温度20 K、磁場12 Tにおいて10 kAの電流を流すことに成功した[26]。2010年代に入り、中国ASIPPのCFETRトカマク炉のR&Dにおいて新たにCIC導体が試験されており、良好な結果が得られている[27]。この導体について最大の問題は銀の放射化であるが、CFETRの設計では中心ソレノイド（CS）コイルの最内層に適用することで中性子束を十分に落とし、Bi-2212線材が適用可能と試算されている（図5）。

3.3 CFS/MITのTFMC試験

核融合炉へのHTSマグネットの適用に関する最近の特筆すべき成果として、CFS/MITの進めるSPARC計画におけるトロイダル磁場モデルコイル（TFMC）の試験について紹介する。TFMCは2021年に製作され、冷却・励磁試験が行われた。モデルコイルと試験装置の外観を図6に示す。具体的な成果としては、以下のようにまとめることができる[30]。TFMCでは、REBCO系線材（4 mm幅、全長270 km）がパンケーキ構成用プレートの溝に単純に積層して巻き込まれ、全体がハンダ含浸された。これによりコイルは無絶縁・撚り無しNINT（Non-Insulation Non-Twisting）となっている。この構造において溝に多数の線材を巻き込んだ各巻線を「導体」とは呼べないが、多数の線材をあらかじめ束ねた「導体」を巻いたものと最終的に構造は等価となっている。冷却・励磁試験は2回行われ、1回目の試験で温度20 K、最大経験磁場20 Tにおいて安定した通電に成功した。巻線の定格電流は40 kAである。励磁には約60時間を要したが、これは無絶縁コイルの特徴を反映した結果である。減磁過程において受電系

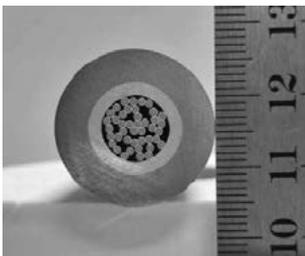


図5 Bi-2212線材を用いたCIC導体（ASIPP）サンプルの断面写真[28]。

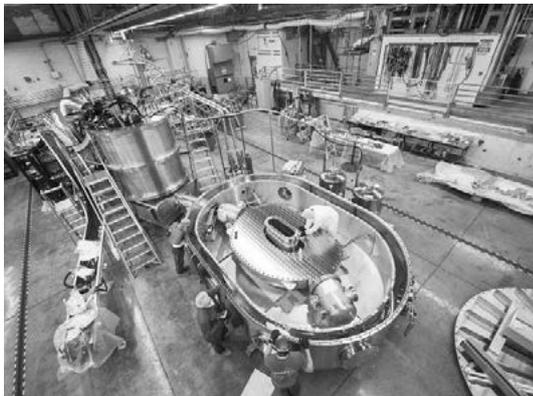


図6 CFS/MITにおけるSPARCプロジェクトのトロイダル磁場モデルコイル（TFMC）が真空容器に収められた様子[29]。

の停電（29分間）が生じたもののコイル電流値13.25 kAにおいて無絶縁コイルの磁束保存動作が生じてクエンチには至らず、復電後は安定に減磁を完了した。2回目の試験ではクエンチ試験として電源回路系のスイッチを強制的にオープンしたところ（電流値31.3 kA）、無絶縁コイルの磁束保存動作が110秒間に渡って安定に生じたものの、最終的にクエンチが発生し、自発的に急速減磁が生じた。その後、励磁はできなくなり、コイルの一部が焼損したと考えられ、解体検査の結果、D型コイルの角部において実際に焼損が生じたことが確認された。クエンチ過程の数値シミュレーションでは、各巻線の電流値は最大100 kAに至り、臨界に達した巻線から順次転流する様子が示された。無絶縁コイルでは各巻線の電流は長手方向に連続にならないため、コイル全体として磁束保存を満たすよう各巻線が臨界電流に達するまで流れ、その分、電流密度が高く発熱が大きくなるとともに、当初設計にない電磁力を経験したことも考えられる。この結果の解釈と大型コイルで無絶縁を採用できるかどうかの議論については現在も進行中であり、一部を後述する。

3.4 NIFSにおける大電流HTS導体開発

NIFSでは3種類の大電流HTS導体開発を行っており、STARS、FAIR、WISE導体である。これらについて詳細を説明する。

3.4.1 STARS導体

上述のとおり、STARS導体は単純積層導体として世界で最初に提唱され、ヘリカル型核融合炉FFHR-d1への適用をめざし、100 kA級導体として開発が進められた[21, 31]。REBCO系テープ線材を中心に単純に積層したものを安定化銅ケーシングに収め、全体をステンレスジャケットで補強した構造である。線材同士は圧縮力をかけて固定するため、膜状の超伝導層が高強度の基材から剥がれる問題も回避できる。NIFSでは、このタイプの導体の開発を2005年より始めた。最初はLTS/HTSハイブリッド導体として出発し、その後、Bi-2223線材を積層した導体で温度20 K、外部磁場8 Tで10 kAの臨界電流を達成した[20]。これに続き、REBCO系線材を用いて同様の条件で15 kAの臨界電流を確認するとともに、ヒータを用いて熱擾乱を与えるクエンチ実験も行い、従来のLTS導体と比較して圧倒的に高い安定性マージンが確かめられた。これらの成果を受け、2012年にはREBCO系GdBCO線材（幅10 mm）20枚を用いて定格電流30 kA級の導体サンプルを製作、続いて2013年には100 kA級導体サンプルとして同じ線材を54枚用い、3列×18層とした。サンプル全体はレーストラック形状として、東北大学量子エネルギー工学専攻チームによって開発されたブリッジ式機械のラップジョイントを入れ、1ターンループを形成し、外部磁場を変化させることで誘導法により電流を流した。温度20 Kの試験においてサンプル電流が103 kAに達したところでクエンチが生じ、このとき外部磁場は5.3 Tであった。クエンチは接続部の不具合によって生じた。温度を4 Kまで下げた場合、サンプル電流は120 kAまで達し、約20分に

至る減衰時定数を確認, 接続抵抗値が評価できた. 併せて, 100 kA を 1 時間に渡って保持することにも成功した[31-34].

2019 年以降, STARS 導体は次世代の核融合実験装置に適用する観点から定格電流を 20 kA 級まで下げ, 長尺導体の製造を視野に入れた実用導体とするべく開発を進めた. 特に, 電流密度として 80 A/mm^2 を目標とした. これは同規模の LTS 導体に対して約 2 倍となる. 12 mm 幅の REBCO 系 EUBCO 線材を 15 枚積層し, ステンレスジャケットにはレーザービーム溶接を施した. 長さ 1-3 m の直線形状サンプルを製作して良好な結果を得た[35]. その後, 全長 6 m の導体サンプルとして直径 600 mm で 3 ターン巻いたソレノイドコイル形状試験体を製作し, 温度 20 K, 外部磁場 8 T において定格電流 18 kA までの安定な通電に成功した[36]. また, 電流の掃引速度として 1 kA/s の高速通電を行い, 合計 200 回以上繰り返しても安定に通電できることが確認され, 20 kA 級 STARS 導体はほぼ完成の領域に入った (図 7).

単純積層導体では線材間でインダクタンスが異なるため, 非一様電流分布が形成され, このことが安定性を下げると懸念される. STARS 導体について数値計算を行ったところ, ソレノイドコイル形状サンプルにおいて導体直上で観測された磁場変化を説明することができ, 実際に非一様な電流分布になっていることが推定された. 特に, 線材の一部が臨界電流に達すると他の線材に転流することで安定に通電できることとして説明できる[37]. これをもとに, 例えば STARS 導体を用いて ITER のトロイダル磁場 (TF) コイルを製作した場合を想定したところ, 同様に非一様電流分布になるものの安定に通電できることが示された[37]. この解析により, STARS 導体が大型コイルに長尺導体として用いることが可能なことを示した. 一方, ヘリカルコイルの場合には導体を順次接続しながら巻線する「接続巻線」方式を想定しているため, 接続部の常伝導抵抗によって線材間の電流分布は均一化する方向となる.

3.4.2 FAIR 導体

FAIR 導体は, 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW), アルミニウム合金被覆 (Aluminum-alloy jacket), 間接冷却 (Indirect cooling), REBCO 系線材の頭文字をとって名付けられた[10]. 幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm の REBCO 系線材を 2 枚並列に並べ, 間に厚さ 0.1 mm の純アルミニウムシートを機械的な緩衝材として挟みながら 30 層積層し, FSW で蓋部を接合する. 積層したテープ線

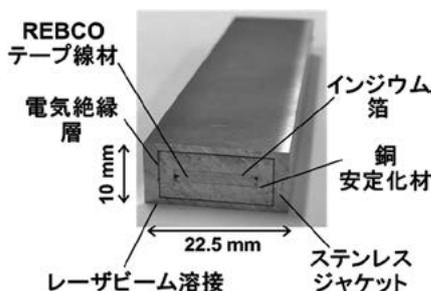


図 7 20 kA 級 STARS 導体のモックアップと各構成部材の説明.

材の電流分布及び機械特性の均一化を図るために全体に捻りを加えて製作する. よって, FAIR 導体は上述の TSTC 導体として分類される. コイルに巻線する際には導体をラジアルプレートにはめ込み, 冷却パネルを挟み込むことを想定する. また, 導体にはクエンチ保護として絶縁した 2 次巻線を入れ込む溝を設けている. クエンチ発生時には超伝導線材に流れていた電流を電磁誘導によって 2 次巻線へと乗り移らせて減衰させるとともに, 2 次巻線自体をヒータとして機能させ, 局所的なクエンチの発生を速やかにコイル全体に広げることでホットスポットを避け, 均温化を図ることができる[38].

プロトタイプ導体の試作では, REBCO 系線材は 6 枚のみを使用し, 残りはステンレスのダミー線を使用した. 液体窒素中 (温度 77 K), 自己磁場下において通電試験を実施して評価を行った. 当初の思惑として導体に捻りを加えた際に FAIR 導体の臨界電流特性が劣化しない条件を明らかにすることを目的としたが, 得られた特性劣化は捻りの影響より製作条件によるものが大きく現れていた. そこで劣化が顕著であった導体を分解し, 内部の REBCO 系線材を観察したところ, 数カ所に亘って局所的に臨界電流が劣化していたことがわかった. また, 劣化が発生した原因は導体長手方向に均質な FSW が行われていないために REBCO 系線材が局所的に強固に固定されている部分とそうでない部分が生じたためと推測された. この場合, 導体製作時の温度 150°C から液体窒素温度 (-196°C) までの冷却においてアルミニウム合金と REBCO 系線材の熱収縮率の違いにより局所的な過度の圧縮ひずみが発生し線材が座屈したと推測された. そこで, 高純度アルミニウムシートの厚み及び幅等の製作精度を向上させるとともに, FSW が影響する範囲を縮小するため FSW のツール形状を改良した. 最終的にソフトな FSW 条件と導体長手方向の均一性を両立させることで, 臨界電流の劣化を 20% 以下に抑え, 長手方向に均一な特性の導体を製作できる目処が得られた[39].

次の段階として, 磁場中・低温下における通電試験へと進んだ. 通電試験にあたり, 各線材に均等に電流を供給する端部構造が必要であることから, 表裏 15 段階ずつ階段状に REBCO 系線材を切断し, 低融点ハンダシートとともに溝を掘った半割の円筒銅で挟むことによって接続する新たな端部製作手法を考案した. 試作において各段の接続抵抗を測定した結果, REBCO 系線材を 30 層入れた FAIR 導体の 1 層あたりの接続抵抗を $150-510 \text{ n}\Omega$ とできることがわかった. 定格電流値は 12.5 kA であり, 端部全体での発熱は $0.8-2.6 \text{ W}$ となり, 本手法による端部のハンダ付け方法が有用であることが確認できた. これを用いた 2 m 長の FAIR 導体を製作し, 磁場中・温度可変環境下での通電データの取得に成功した. 特に, 高温・高磁場中では臨界電流の 8 割以上の通電を達成した. 今後, さらなる実証実験として高磁場中でのコイル形状試験を計画しているが, 試験装置に挿入するためには曲げ半径を小さくする必要があり, 直径を 12 mm から 6 mm に縮小した FAIR 導体を考案した. 縮小版 FAIR 導体は小型であるため, 磁気貯蔵装置

SMESや磁気冷凍機などの幅広いコイル用途での使用が期待できる。従来のFSW技術を踏襲し、15枚のREBCO系線材を使用した1mあたり1.5回転捻りの縮小版FAIR導体を製作し通電試験を実施した結果、臨界電流の保持率は67%であった。断面を観察した結果、FSWの圧力によって内部のREBCO系線材が褶曲しており、縮小版FAIR導体の製作にはFSWのさらなる条件出しが必要であることがわかった[40]。

こうした経験から導体の健全性および製作へのフィードバックのために非破壊非接触な評価法が必要であると考え、回転磁化法を用いた新たな計測手法を提案し、導体中の劣化部分を検出する実証実験も行っている。一般的な磁化法は超伝導線材の膜面に対して垂直に磁場を印加し、電磁誘導によって線材内に流れる誘導電流がつくる磁場を計測する。ところが、REBCO系線材はテープ形状をしているため、外部磁場方向と線材膜面が平行になるにつれて磁場を感じなくなり、着磁できなくなる。そのため、FAIR導体のように捻られた導体では内部の線材位置によっては着磁ができない。そこで、従来の外部磁場の掃引による着磁ではなく、静磁場中で導体を回転させる新たな着磁方法を用いた。回転機構を備えた装置を製作し、原理検証として複数枚積層した線材を静磁場中にて回転させた結果、着磁できることが確認できた。そして、得られた信号強度および波形によって欠損位置の判別が可能であることが確認できた。今後は、超伝導マグネットコイルを用いて強磁場化することで、大型導体での実証を検討している[41]。

3.4.3 WISE 導体

WISE (Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes) 導体は、積層したREBCO系テープ線材を金属スパイラルチューブ等で束ね(図8(a))、それをコイルの所定の形状に巻線した後、低融点金属で巻線全体を浸漬する方式で製作される[22]。REBCO系テープ線材を緩く束ねた状態でフラットワイズ(面外方向; 図9(a))に曲げて巻線する場合、各テープは長手方向に自由に動くことができるため、原理的にひずみは発生しない。さらに、テープ線材をエッジワイズ(面内あるいは幅方向; 図9(b))に

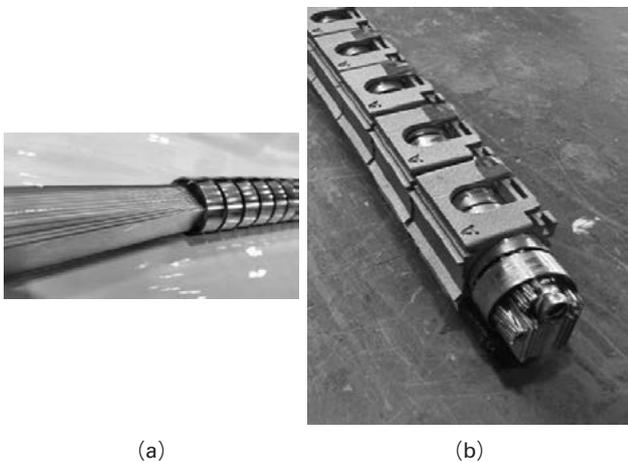


図8 WISE 導体. (a)大電流導体サンプル用にテープ線材を束ねた様子, (b)アーマーを装着したWISE導体のモックアップ(低融点金属による含浸は行っていない状態).

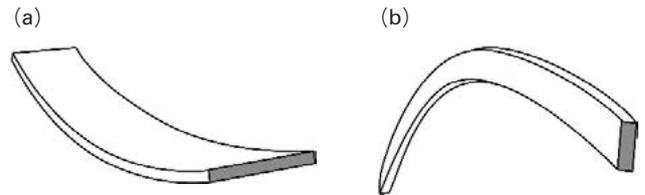


図9 テープ線材の(a)フラットワイズ(面外)曲げ, および, (b)エッジワイズ(面内)曲げを表す模式図.

曲げようとするとき自発的にねじりが発生することでエッジワイズひずみを回避できることが最適化計算の結果として示された[42]。最初のWISE導体の通電試験は、松永らによって製作された小型ソレノイドコイルによって行われた[22]。液体窒素冷却、自己磁場環境下において800 Aの電流を流し、コイル中心で0.16 Tの磁場を得た。電流850 Aではクエンチが生じたものの無絶縁による自発的電流分配により焼損回避ができたことが示された。これによりWISE導体およびそれを用いた無絶縁コイルが原理的に成立することが示された。次に大電流WISE導体を開発するための第一段階として直線形状サンプルの通電試験が行われた。延べ9本が試験され、多くの失敗によって経験、知見、教訓が得られた[43]。

次に、2 m長さの導体サンプルを製作して大型導体試験装置を用いて試験を行った。このサンプルはヘアピン形状をしている。従来の導体ではLTS, HTSによらず、この構造のサンプルを製作する際は二本の直線形状導体を用意しそれぞれをサンプルの下端で接続することでヘアピン形状としてきた。WISE導体では、接続部を入れずにU字形を形成でき、その後、サンプル導体全体を低融点金属で含浸する。このU字型WISE導体はNIFSの大型導体試験装置に設置され、温度可変低温設備から温度制御した温度4–65 Kのヘリウムガスを供給し、最大磁場9 Tの環境で通電試験に供された。最初と2番目のサンプルでは、電流導入部から焼損が生じた[44]。これを教訓に、電流導入部についてはSTARS導体やWISE導体のサンプルと同様に、階段形状を採用し、テープ線材と銅ブロックの接触抵抗を均一にすることで電流分布ができるだけ均一になるような工夫を導入した。一方、冷却としてはSTARSやFAIRと異なり、WISE導体内部のREBCO系線材の直近に冷却配管を配置する構造を採用した。現在までの試験結果として、最大電流値40 kA@6 K, 8 Tを確認した。このときの導体平均電流密度は31 A/mm²に相当する。また20 K, 8 Tの条件下で97回の繰り返し通電を実施した。温度を65 Kまで上げて臨界電流の磁場依存性を調べた結果、磁場5 Tで9.0 kA, 8 Tで7.0 kAとなり、テープ線材単体の臨界電流値から換算して見積もった値に比べて約7割であったが、自己磁場の影響を考慮した解析が進行中である。これらの通電試験を通じて、クエンチは顕著に生じなかったが、導体内部におけるREBCO系線材の動きに相当すると考えられる電圧発生が観測された。今後導体内部構造の改良を行い、線材が動かないような工夫を行う。これにより、巻線時のフレキシビリティと耐電磁力特性とのさらなる両立を図る計画である。

WISE 導体は、現在、民間スタートアップ企業 Helical Fusion 社において採用が検討されており、さらなる改良のもと開発が行われている (図 8 (b)) [45]。今後は、ダブルパンケーキコイル形状の大型サンプル (導体全長 10 m) を製作して、大口径高磁場導体試験装置に装着した試験を実施する計画である。

3.5 大電流 HTS 導体開発の今後の課題

以上見てきたように、核融合炉用マグネットへの適用をめざして大電流 HTS 導体の開発が進んでいる。今後のさらなる開発にあたり、現状で残っている課題をまとめる。

(1) 線材特性の向上とコスト低減

REBCO 系線材はさらなる特性向上や長尺化が進展している。特に、臨界電流の磁場印加方向に対する異方性の低減が人工ピンを入れた線材で進んでいる。線材単価の低減も極めて重要な課題である。これらに関する詳細については、第 2 章を参照いただきたい。

(2) 導体と線材の機械的強度向上

マグネットに REBCO 系線材を使うことのメリットはその高い機械強度を活用することにある。特に、高磁場マグネットでは REBCO 系線材が単線で使われるのがその例である。核融合炉用マグネットでは大電流が必要なため線材を多数集合して用いる必要があるが、TSTC 導体で見られるようにエッジワイズ方向の曲げ加工が作用すると特性劣化が懸念される。また、Roebel 導体ではミアング構造のテープ線材を撚り合わせる際に隙間が空き、繰り返し励磁で劣化が生じる懸念が残る。よって、導体設計では内部構造を考慮して機械的強度の確保に十分な工夫を行う必要がある。この意味で単純積層導体には大きな利点がある。一方、機械強度のさらに高い線材自体を開発していくことも肝要である。REBCO 系線材の単線を用いた小型コイルでは、巻線をエポキシ含浸した際に REBCO 層薄膜の剥がれが生じる問題がある。線材を多数枚束ねた大型導体では環境が異なり、線材単体としてエポキシ含浸等は行わないため、こうした問題は生じにくい。線材間を密着させ十分な圧縮力を加えておくことは重要である。

(3) 安定性・クエンチ保護

HTS 導体は冷却安定性が高いため、クエンチのリスクは LTS 導体と比べて格段に低い。しかしながら、万一、線材の一部が常伝導転移した場合には、安定性が高いゆえに伝播速度が遅く、ホットスポットが一か所に留まる問題がある。実際、線材単線を用いた電流密度の高い小型 HTS コイルでは巻線が焼損した事例は多く存在する。これは線材単線のみならず、多数の線材を集合した大電流導体でも共通する [35]。そこで、こうした事象を防止するためにはできるだけ早い段階で常伝導転移を検出しないといけないが、電圧法では難しいことが指摘されている。従来のクエンチ判定の電圧しきい値として LTS 導体では 100–200 mV が採用されてきたが、これを 10 mV 程度まで下げてやることができれば遮断のタイミングが早くなり、ホットスポット温度を下げて安全にマグネットを減磁することが可能となる。このために、常伝導転移を早期に見つけて

やるが必要であり、光ファイバーを用いたクエンチ検出法 [46] や、LTS 線材を HTS 導体に沿わせることで低い温度で先に LTS 線材を常伝導転移させて早期に温度上昇を検出すること [47] などが検討されている。あるいは、従来からのバランス電圧の測定においてローパスフィルタを用いて微小電圧の検出を高度化することも有益と考えられる。一方、高い電流密度においてより安定に励磁するために無絶縁コイルとするオプションも想定できる。これは常伝導転移があっても導体間の電流転流によって電流を迂回させる発想であり [48]、近年、小型の HTS コイルで多数の実験が行われ、その有効性が確認されている。これを大型コイルに適用すると原理的には小型コイルと同様にクエンチ回避に有効で高電流密度のコイル設計が可能になると考えられ、実際、上述のとおり、CFS/MIT の SPARC TFMC ではその動作が確認された。無絶縁コイルのひとつの問題は、励磁と減磁に要する時間である。コイルのインダクタンスと横断抵抗の比率はコイルサイズの自乗に比例して大きくなるため、全ての巻線が無絶縁で繋がっていると仮定して励磁時間を概算すると核融合マグネットでは数週間から数年のオーダーとなり、さすがに許容できない。実際には SPARC TFMC のようにパンケーキ間では絶縁を入れるなどの工夫を行い、励磁時間をどこまで短くできるかは重要な検討課題である。前述のように、TFMC では外部回路を遮断したクエンチ試験において焼損が生じた。クエンチ試験で外部電源回路系を完全に切り離すというのは通常想定されるものではないため、これは unnecessary 過酷試験だったと言えるかも知れない。通常、絶縁コイルでは遮断抵抗を並列に接続してから主回路系を切り離して磁気エネルギーを保護抵抗で消費することで緊急減磁を行うわけであり、並列回路がないまま主回路を切り離す事象は考えられない。コイル単体でない実際のマグネットにおいて万一このようなことが生じると、例えば多数のトロイダル磁場コイル間では電磁力バランスが崩れ全体構造として大きな問題になることも懸念される [49]。併せて、大きなコイルになるほどコイル自身の熱容量より磁気エネルギーの方が大きくなり、許容される温度内でエネルギーを吸収できなくなる問題もある [50]。

(4) 電気絶縁

無絶縁オプションではない通常の巻線では、導体の電気絶縁も重要な技術課題として挙げられる。ITER ではマグネット系の遮断時に発生する最大電圧は 10 kV となり、その 2 倍を超える試験電圧が求められ、耐放射線に優れたシアネートエステルを含むガラス・カプトン+エポキシ系の絶縁材が用いられる。この絶縁材ではガンマ線照射量として 400 MGy 程度まで用いることができ、従来のものと比べて格段に高いが、相当する中性子フルエンスとしては 10^{22} n/m² 程度であり、超伝導線材に対する耐中性子照射限界と同程度あるいは低く [51]、さらなる開発が必要である。また、真空含浸工程が必須であり、硬化のために巻線後にコイル全体を 150℃ 程度まで昇温することが要求され、大型コイルの製作では大きなりスクとなる。ここで、上記の STARS 導体では「内部絶縁方式」を採用しており、

導体外層のステンレスジャケットと線材を収納した銅安定化ケーシングの間に電気絶縁が存在する。これにより巻線後の真空含浸工程が不要になるとともに、ステンレスジャケット間で導体同士の溶接を行うことも可能となる。巻線後の断面としてはITERのTFコイルで採用されたラジアルプレートを用いた場合と同等となる。これは従来にない発想であるが、実際に大型マグネットに適用するには、今後、さらに具体的な検討とR&Dが必須である。

(5) 導体接続

核融合炉用コイルの巻線長は数kmから数十kmに及ぶ。これに対して導体の単長は通常1kmぐらいが最大である。そこで、コイルには必ず導体間の接続が必要である。接続はITER TFコイルのように、巻線領域の外部に取り出して（パンケーキ間で）行う場合もあれば、LHDのヘリカルコイルのように内部（レイヤー間）で行う場合もある。併せて、コイルを分割してダイヤモンドにすることや、高速製作のための「接続巻線」も考えられる。HTS導体では、テープ線材間で接続を行うが、導体種類にも応じて様々な接続法が考案・開発され、その特性の理解が進んでいる。詳細については、第4章を参照いただきたい。

(6) 交流損失

トカマク炉では、プラズマ電流の立ち上げのためにCSコイルのパルス運転が必要である。このため、導体の交流損失を十分に下げることが重要な設計指針となる。HTS大電流導体の交流損失については、SPCのRSCCCT導体に対して測定例があり、ITERのTFコイル用CIC導体と比べて3~10倍程度に留まる結果である[23]。一方、線材の履歴損失を低減するためレーザー加工を用いた細線化技術が進展しており、上述のSCSCケーブルがその例である[14]。

(7) 中性子照射に対する影響

REBCO系線材に対する中性子照射影響については、大枠としてNb₃Sn線材と同等で中性子フルエンスとして $2-3 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ を超えたあたりから臨界電流が下がり始めることが報告されている[51-53]。中性子照射によって一度臨界電流が上昇したり、磁場方向に対する異方性が緩和されたりする現象なども出ているが、これは中性子照射によって結晶粒界にピン留め点が導入される効果によるものと理解されている。中性子照射試験では、当初、GdBCO線材においてYBCO線材と比べて大幅な臨界電流の低下が観測された。これは、Gdが中性子吸収材であるため、この線材は核融合炉用マグネットには使えないと懸念された。しかしながら、実際に核融合炉用マグネットに想定される0.1 MeV以上の中性子のエネルギーではGdによる吸収断面積は小さく熱中性子を軽減した照射を行うことで、GdBCO線材とYBCO線材で遜色のないことが確認された。一方、REBCO系線材ではいずれも若干の銀を使用しており、銀の放射化の問題はBSCCO系線材と比べると圧倒的に低いもののゼロではない。銀も同様に吸収断面積が高いのは熱中性子領域ではあるが、今後、銀をさらに減らす努力が必要かどうか、検討と議論の継続が必要である。

(8) 導体の製造コスト

線材を集合した大電流導体について、そのコスト評価はコイルの巻線方法や製作方法にも依存する。実際、Nb₃Sn線材CIC導体を用いたITERのTFコイルの場合には、各ダブルパンケーキコイルの巻線後にNb₃Sn生成のための熱処理工程（650℃、200時間）があり、電気絶縁処理後には真空含浸工程があるなど、複雑な工程をいくつも経る必要があり、導体単体のコストとしての評価は難しい。HTS導体の場合、REBCO系線材を含む初期コストが高いことが懸念されるが、熱処理工程や真空含浸工程を省略することができれば、コイル全体としては製作コストを抑えることができる。

(9) 冷却

HTSコイルの冷却についても極めて重要な課題であり、その具体的な説明は、第6章を参照いただきたい。

3.6 まとめ

磁場閉じ込め核融合炉のマグネットへの適用をめざした大電流HTS導体の開発の現状と今後の課題について紹介した。現材は、多くの導体種類が存在し、それぞれ一長一短がある。LTS大電流導体については、1990年代までは多くの種類があった。実際、大型ヘリカル装置LHDでは、ヘリカルコイルには液体ヘリウム浸漬冷却方式のラザフォード撚線・純アルミニウム安定化・銅ジャケット導体を用いられた一方、ポロイダル（垂直磁場）コイルには超臨界ヘリウム強制冷却方式のCIC導体が世界で初めて適用された。その後、2000年代以降に製作された核融合装置では全て（EAST, KSTAR, SST-1, W7-X, JT-60SA, ITER）にCIC導体が適用され、現在、設計されている装置や原型炉（DTT, JA-DEMO, EU-DEMO, K-DEMO, CFETR）も全てそうである。これは、CIC導体の持つ優れた冷却安定性と低交流損失特性が高い評価を得たため、これに収斂したと理解できる。HTS導体についても、今後1種類に収斂していくのか、それとも将来も数種類が存在するのか、現在はまだその答えは出ておらず、今後の進展に期待される。

参考文献

- [1] W.H. Fietz *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 4800705 (2016).
- [2] P. Bruzzone *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 103001 (2018).
- [3] N. Mitchell *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **34**, 103001 (2021).
- [4] W. Goldacker *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **27**, 093001 (2014).
- [5] <https://cds.cern.ch/record/1744900>
- [6] M. Takayasu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25**, 014011 (2012).
- [7] M.J. Wolf *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 4802605 (2017).
- [8] C. Kan *et al.*, Physica C **546**, 28 (2018).
- [9] https://www.researchgate.net/figure/Artistic-view-of-the-assembled-HTS-2G-wire-based-conductors-3_fig1_273170837

- [10] T. Mito *et al.*, *J. Phys. Commun.* **4**, 035009 (2020).
- [11] Z.S. Hartwig *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **33**, 11LT01 (2020).
- [12] D.C. van der Laan, *Supercond. Sci. Technol.* **22**, 065013 (2009).
- [13] Tim Mulder *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26**, 4803605 (2016).
- [14] N. Amemiya *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35**, 025003 (2022).
- [15] <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-Manufacturing-of-a-45-kA-at-10-T-for-Mulder-Dudarev/bbe4e4b887facd3bb97c3fd06f306cefb-c975c3/figure/0>
- [16] S.I. Schlachter *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**, 3021 (2011).
- [17] D. Uglietti *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 124005 (2015).
- [18] M. Takayasu, *Supercond. Sci. Technol.* **34**, 125020 (2021).
- [19] K. Seo *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17**, 2434 (2007).
- [20] G. Bansal *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **3**, S1049 (2008).
- [21] N. Yanagi *et al.*, *J. Fusion Energy* **38**, 147 (2019).
- [22] S. Matsunaga *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30**, 4601405 (2020).
- [23] D. Uglietti *et al.*, *Cryogenics* **110**, 103118 (2020).
- [24] S. Oh *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33**, 4801505 (2023).
- [25] V. Corato, “HTS conductor developments for fusion”, https://indico.cern.ch/event/1175973/contributions/4938756/attachments/2487114/4270561/Corato_HTS%20conductor%20developments%20for%20fusion_v2.pdf
- [26] T. Isono *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13**, 1512 (2003).
- [27] J.G. Qin *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27**, 4801205 (2017).
- [28] https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-Bi2212-conductor_fig2_312402955
- [29] <https://www.psf.mit.edu/sparc>
- [30] D.G. Whyte *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **34**, 0600218 (2024).
- [31] N. Yanagi *et al.*, *Nucl. Fusion* **55**, 053021 (2015).
- [32] Y. Terazaki *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24**, 4801305 (2014).
- [33] Y. Terazaki *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25**, 4602905 (2015).
- [34] S. Ito *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **9**, 3405086 (2014).
- [35] N. Yanagi *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **17**, 2405076 (2022).
- [36] N. Yanagi *et al.*, *J. Phys.: Conf. Series* **2545**, 012008 (2023).
- [37] D. Garfias-Davalos, “Applicability of High-Temperature Superconducting Stacked-Tape Large-Current Conductors to Fusion Magnets. Ph.D. thesis. <https://ir.soken.ac.jp/records/2000138>
- [38] Y. Onodera *et al.*, *J. Phys.: Conf. Series* **1559**, 012118 (2020).
- [39] T. Mito *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **31**, 4202505 (2021).
- [40] Y. Onodera *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33**, 4801004 (2023).
- [41] Y. Onodera *et al.*, *J. Phys.: Conf. Series* **1857**, (2021) 012012.
- [42] Y. Narushima *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **15**, 1405076 (2020).
- [43] Y. Narushima *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **17**, 2405006 (2022).
- [44] Y. Narushima *et al.*, *J. Phys.: Conf. Series* **2545**, 012009 (2023).
- [45] 田村 仁 他：第106回2023年度秋季低温工学・超電導学会，2A-a04 (2023).
- [46] E.E. Salazar *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **34**, 035027 (2021).
- [47] S. Hasegawa *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28**, 4700605 (2018).
- [48] S. Hahn *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**, 1592 (2011).
- [49] A. Ishiyama, *private communication*.
- [50] 松永信之介：「低融点金属含浸した無絶縁高温超伝導コイルとそのクエンチ保護に関する研究」博士論文 (2023).
- [51] X. Fischer *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **31**, 044006 (2018).
- [52] A. Nishimura *et al.*, *AIP Conference Proceedings* **1435**, 217 (2012).
- [53] A. Nishimura and Y. Hishinuma, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **1241**, 012018 (2022).

小特集 核融合炉のための高温超伝導体開発の現状

4. 高温超伝導テープ線材および大電流導体の接合技術

4. Joint Technology of High-Temperature Superconducting Tapes and High-Current Conductors

伊藤 悟

ITO Satoshi

東北大学

(原稿受付: 2024年6月30日)

磁場閉じ込め核融合炉の超伝導コイルは、多数の線材で構成された大電流導体を巻線して製作される。この際、長尺の導体が必要となる。ここで工業的に提供できる高温超伝導テープ線材の一般的な長さは数百 m 程度であるため、接続しての線材長尺化が不可欠である。また、コイルの構造上、大電流導体の接続も要求される。本章では高温超伝導テープ線材と大電流導体、それぞれの接合技術への要求の違いや、接合技術に関する最近の知見を紹介する。

Keywords:

magnetic confinement fusion reactor, superconducting magnet, high-temperature superconductor, high-temperature superconducting tape, REBCO coated conductor, large-current high-temperature superconducting conductor, joint

4.1 はじめに

磁場閉じ込め核融合炉のコイル（以後、「核融合コイル」と表記することにする）を高温超伝導化する場合、20 K 以下で高磁場下での臨界電流密度が高い希土類系高温超伝導体（略称REBCO、化学式 $REBa_2Cu_3O_7$ 、RE: 希土類系元素）を用いたREBCOテープ線材を用いることが多い。現在製造されているREBCOテープ線材の多くは数百 m 程度[1]のものであり、高温超伝導応用のためには、接続しての線材長尺化が必要となる。本章では、始めに超伝導コイルを製作するにあたっての接合技術の位置づけを核融合コイルを事例に概説し、続いて、REBCOテープ線材の接合技術、および磁場閉じ込め核融合炉用の大電流REBCO導体の接合技術にフォーカスし、それぞれの接合技術で考慮すべきことや、接合技術に関する最近の知見を紹介する。なお、本章では「接合」と「接続」の2つの単語を、線材・導体の各要素の「接合」あるいは「接合技術」によって、線材・導体を「接続する」あるいは線材・導体の「接続部」を形成する、という意味で用いる。

4.2 超伝導コイル製作における接合技術

核融合コイルは、応用超伝導分野で扱う他の超伝導コイルに比べて大型であり、蓄積磁気エネルギーが著しく大きいコイルである。このような超伝導コイルでは、熱暴走（クエンチ）時のコイル保護（電流を減衰させて焼損を回避する）のために、コイルのインダクタンスを小さくし、電流減衰時定数を短くする、すなわち、多数の線材を束ね

て大電流導体を作り、巻き数を減らしたコイル構成にする[2]。巻き数を減らす、と言っても長尺導体は必要であり、例えば、ITERのトロイダル磁場（TF）コイルのケーブルインコンジット導体（CICC）の全長は約4.6 km[3]である。ただし、1本のCICCを4.6 kmの長さで作ってTFコイルとして巻いているわけではない。ITERのTFコイルでは「ダブルパンケーキ（DP）」構造[3]を採用しており（7層のDPから構成される）、各DP間でCICCを接続して直列回路を形成している。各DPのCICCの長さとしては760 mと415 mのものがあり、CICCに使われる Nb_3Sn 線材は、これに対して十分長ければよい。実際、10 km以上の長さの Nb_3Sn 線材が提供でき[1]、問題にはならない。核融合コイル以外の超伝導コイルでは、さらに長い線材が必要となることも多いが、 $NbTi$ 線材、 Nb_3Sn 線材（実績のある低温超伝導線材）については、十分に長い線材が提供できる。一方、高温超伝導コイルの場合は、核融合コイルの大電流導体を作るレベルにおいても、接続してのREBCO線材の長尺化が必要となる可能性がある。また、超長尺の超伝導線材が製造できたとしても、TFコイルの事例のように、超伝導コイルの構造上、大電流導体の接続は必要である。ここでTFコイルDP間のCICCの接続部[4]では、導体内の超伝導線材を個別接合しているのではなく、その集合体であるケーブルを銅スリーブを介して接合している。すなわち超伝導線材の接合技術の延長に、大電流導体の接合技術があるとは限らない。さらにREBCOテープ線材を用いた場合、先進設計として図1に示すよう

Tohoku University, Sendai, MIYAGI 980-8579, Japan

Corresponding author's e-mail: satoshi.ito.e3@tohoku.ac.jp

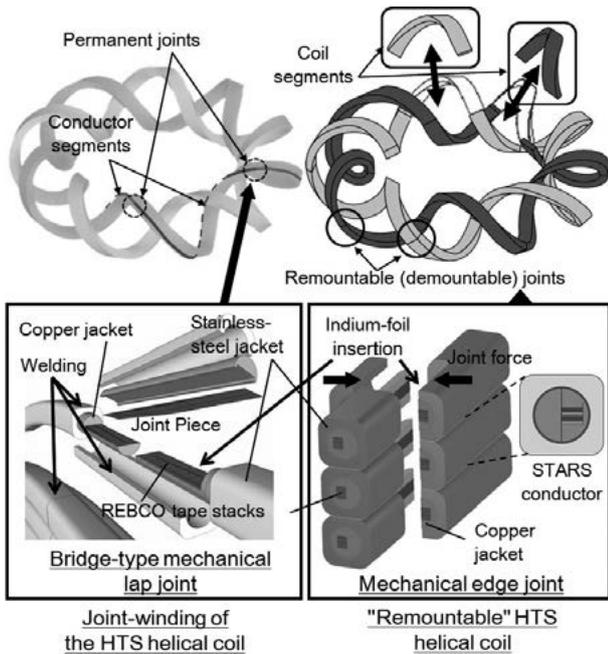


図1 ヘリカル型核融合炉の分割型高温超伝導マグネット [5].

な分割型高温超伝導マグネット [5-10] も提案されており、当該設計では、短尺 (数 m から 30 m 程度) の導体セグメントやコイルセグメントを多数接続する必要がある。この場合、接続しての線材長尺化は不要となるが、大電流導体の接合技術が特に重要となる。

超伝導コイル全体としての要求抵抗値は機器に依存する。永久電流モードで運転する核磁気共鳴装置 (NMR/MRI) 用超伝導コイルでは、DP 間の接続に「超伝導接合」が必要であるが、磁場閉じ込め核融合炉用超伝導コイルでは、発電所の成立要件 (出力電力 ≫ 入力電力) を満たせる「低抵抗接合」を使えばよい。抵抗値以外にも導体の大きさや構造、作業に使えるスペース、経験磁場、電磁力など、接合技術として考慮すべきことは機器によって大きく異なる。

4.3 REBCO テープ線材の接合技術

4.3.1 REBCO テープ線材の構造と接続部の抵抗要素

REBCO テープ線材は、図2に示すように、基板、中間層、REBCO 層、銀保護層、銅安定化層の層状構造となっており、超伝導状態では電流はREBCO層を流れる (臨界電流を超える場合やクエンチ時には電流は銀保護層や銅安定化層を流れる)。REBCO テープ線材の一般的な接合構造は

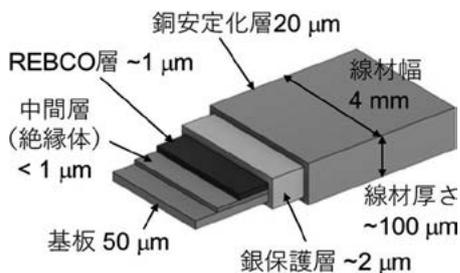


図2 REBCO テープ線材の構造.

図3に示すようなラップジョイントである。ここで、中間層は絶縁体であるため、テープ線材の幅広面 (表面) 同士をREBCO層同士が向かい合うように接合する。接続部における電流経路には常伝導金属 (銀保護層、銅安定化層、ハンダ等の接合材料) が存在するため、これが接合抵抗の原因となる。さらに、REBCO/Ag、Ag/Cu、Cu/接合材料の各界面に抵抗が存在し、接合抵抗は、これらの金属抵抗と界面抵抗の和として表される。ラップジョイント構造では、接合抵抗や抵抗要素 (金属抵抗や界面抵抗) は、接合面積に反比例するため、抵抗 (Ω) と接合面積 (m^2) の積 ($\Omega \cdot m^2$) で表される「 $\circ\circ$ 抵抗率」を用いて接合性能を表記することが多い (接合抵抗率、界面抵抗率、層間抵抗率のように表記される)。ここで単位としては、 $n\Omega \cdot cm^2$ が使われることも多く、 $10 n\Omega \cdot cm^2 = 10^{-12} \Omega \cdot m^2 = 1 p\Omega \cdot m^2$ である (文献によってどの単位を使っているかは異なる)。

4.3.2 REBCO テープ線材内の抵抗

線材の表面材料と接合材料の界面抵抗 (接合界面抵抗) は接合法に依存する。一方、線材内部に存在する界面抵抗 (接合界面抵抗と区別して層間抵抗と呼ぶことにする) は、REBCO テープ線材の製法に依存する。層間抵抗率は転流距離 (CTL) 法 [5, 11-14] で評価できる (特に Contact-probing CTL 法 [5, 12-14] は、層間抵抗率の非破壊評価が可能である) が、線材メーカーや製造番号によって $5 \sim 100 n\Omega \cdot cm^2$ 程度の範囲でばらつき [5, 11]、温度・磁場依存性もある [12-14]。REBCO/Ag 界面の層間抵抗は、界面付近のREBCOの材料特性に起因すると考えられるが、線材作製の際に、REBCO 原材料に銀を添加しておくことで、低減可能である [15] ことが報告されている。また、REBCO テープ線材は、 $200^\circ C$ 以上の温度に長時間さらされると臨界電流が低下することが知られている。これは、銀が酸素を透過し、銅が酸素を吸着する [16] ため、REBCO 内の酸素が銀保護層を通して銅安定化層側に拡散していくことで、REBCO 内に酸素欠損ができ、REBCO/Ag 界面付近のREBCOが常伝導体化するためであると考えられる。また、これがREBCO/Ag 界面の層間抵抗上昇を引き起こすため、加熱による臨界電流低下と層間抵抗上昇には相関関係がある [14, 16]。加熱によって臨界電流が低下した場合、その低下した臨界電流以下の電流で運用することもできるが、一方で接続部での抵抗上昇は無視できない。加熱による酸素脱離で常伝導体化したREBCOは、銅安定化層を除去し、適切な温度環境での酸素導入によって再超伝導化が可能である。後述の超伝導接合や銀拡散接合では、この酸素導入プロセスが必要となる。

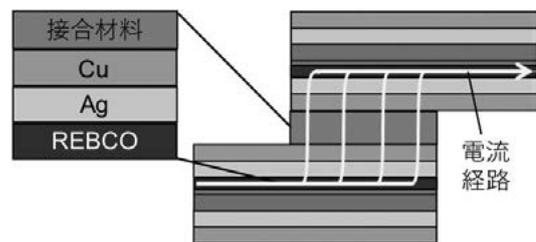


図3 REBCO テープ線材のラップジョイントと電流経路.

4.3.3 接合技術の事例

1) REBCO層同士の接合：超伝導接合

超伝導接合は永久電流モードを必要とするNMR/MRI用超伝導コイルの製作に必要な接合技術である。安定化材となる銀や銅は接合抵抗の原因となるため、これらを除去して超伝導体を露出させ、超伝導体同士を接合するのが基本である。NbTi線材では、ハンダ接合（超伝導を示すハンダを使う）、圧着、固相接合で、Nb₃Sn線材では未反応のNb₃Snの原料を介して熱処理することで超伝導接続が得られる[17]。また、NbTi線材とNb₃Sn線材の超伝導接続もハンダ接合で達成できる[17]。このとき、ハンダの臨界温度、上部臨界磁場、臨界電流密度以下での運用が必要であり、接続部は超伝導コイル外部の1T以下の領域に設置する。

REBCOテープ線材の超伝導接続については、ハンダ接合で成功した事例はなく、REBCO層同士を直接、またはREBCOの原料（前駆体）を介して、熱処理して接合することで達成している。2014年にParkら[18]が世界で初めて超伝導接続に成功し、国内では古河電機工業、住友電気工業が、それぞれ独自の手法で超伝導接続に成功している[19]。中でも大木ら（住友電気工業）が開発したiGS jointは、10⁻¹¹ Ω以下の接合抵抗を達成し、世界で初めて高温超伝導線材を用いた永久電流モードNMRを実現した[19]。

REBCOテープ線材の超伝導接合では、接合箇所の銅安定化層、銀保護層を除去し、さらに接合部付近において銅安定化層を除去したうえで、接合時に酸素高温熱処理し、その後に酸素導入して酸素脱離によって非超伝導化したREBCOを超伝導化する。例えば、iGS jointでは、800℃20分の高温熱処理後に500℃から200℃の冷却過程で6時間程度の酸素導入を行う[19]。また、iGS jointによる接続部の臨界電流は、77 K、自己磁場で、REBCOテープ線材のその45～70%であり、上述のNMRへの適用例でも、コイルから離れた低磁場領域に接続部を設置している[19]。

2) 銀保護層同士の接合：銀拡散接合

銀拡散接合は、2006年にKatoら[20]が提案し、上述の超伝導接合よりも前からREBCOテープ線材の超低抵抗接合として研究開発がされてきた接合技術である。本手法では、銅安定化層を除去した2つのREBCOテープ線材の銀保護層同士を重ね合わせ、酸素雰囲気において400～600℃の熱処理で銀保護層同士を拡散接合し、その後の冷却過程で1～2時間程度をかけて酸素導入して接合プロセスを完了する。達成された最小接合抵抗率は3.7 nΩ・cm²（77 K、自己磁場）であり[21]、後述の銅安定化層同士の接合に比べて1桁低い接合抵抗率が得られている。最近では、Huangら[22]が800℃の熱処理で銀保護層同士の界面抵抗を低減させる試みを行った（4.9 nΩ・cm²を達成）が、酸素導入に50時間以上を要し、接合技術の改善までには至っていない。

3) 銅安定化層同士の接合：ハンダ接合、インジウム固相拡散接合（機械的接合）、超音波接合など

永久電流モードが不要な場合、熱的安定性を考えて銅安定化層が有る状態でREBCOテープ線材を接続する。接続後の酸素導入ができない（銅安定化層に阻まれてREBCO層に酸素が供給できない）ため、接合プロセス中に200℃以上の温度に長時間さらさない（文献[16]によれば、270℃で1分以内、220℃で10分以内が目安）必要がある。

最も汎用的に使われる手法はハンダ接合である。良好なハンダ接合のためには、洗浄・還元処理したハンダとREBCOテープ線材を、ハンダの融点以上に加熱してハンダ濡れ性を確保し、Cuとハンダの間に金属間化合物を形成させる必要がある。合金系ハンダで抵抗率が最も低いのはPbSn共晶合金（融点186℃）であるが、臨界電流低下、層間抵抗上昇を防止するための温度管理が厳しく、性能のばらつきが大きい（いくつかの文献[23-27]を総合すると、接合抵抗率が30～1300 nΩ・cm²でばらついている）。PbSn共晶合金よりも融点の低い鉛フリーハンダもあるが、ハンダ自体の抵抗率がPbSn共晶合金のそれよりも1桁以上高い[28]ことが課題である。

インジウム（In）固相拡散接合[5]は、Inを接合材料とする圧着技術であり、Itoらを中心に研究開発されてきた。分割型高温超伝導マグネット用に研究されてきた経緯があり、当初は接合材料なしに着脱可能とする直接接合（機械的接合）[29,30]の構想であったが、真実接触面積増加のためにIn箔を挿入した機械的接合に変更された。Inの抵抗率は、PbSn共晶合金のその半分弱であり、低抵抗なハンダ材料である[28]。本接合手法では、常温あるいはInの融点（156℃）よりも低い90～120℃程度の低温熱処理[31]によって、InとCuを固相拡散接合する。また、接合前処理として酸洗い[32]を適用することで、常温・指圧でも接合できる。図4に接合界面のSEM-EDX分析結果を示す。酸洗い処理を施すことで、接合界面にはCuIn₂が均一に形成され、これによって接合抵抗率～20 nΩ・cm²

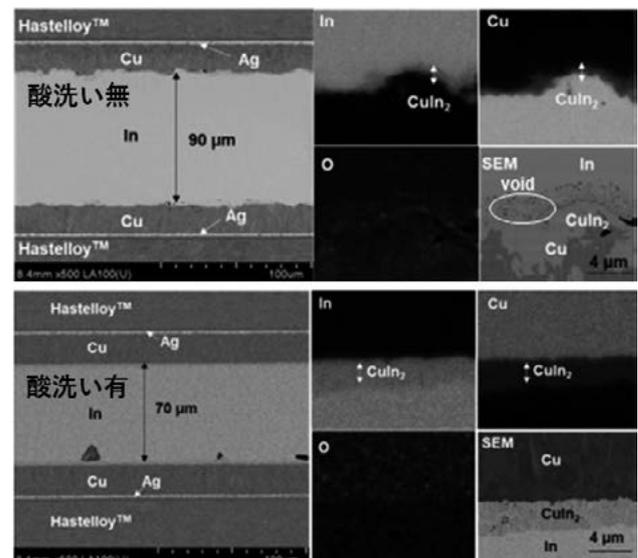


図4 REBCOテープ線材のIn固相拡散接合の断面SEM-EDX分析結果[32]。

(77 K, 自己磁場)が達成されている。In固相拡散接合は、熱処理が不要、あるいは簡便であり、形状的な自由度も高いため、大電流REBCO導体の接合技術としても適用できる。

超音波接合(UW)は、金属の固相拡散接合の技術で、自動車産業でアルミニウム、銅、ステンレス鋼の接合に使われる。超音波接合機のホーンとアンビルで被接合物を挟み、超音波振動によって発生する摺動運動によって被接合物の接触面の表層の酸化層を破壊して、内部の新生面を露出させて、固相拡散接合を実現する。UWのREBCOテープ線材への適用は、Shinら[33]によって2015年頃より始められ、銅安定化層同士を直接固相拡散接合させることに成功した。また、UWで一部接合できていない領域に、後処理として溶融したInSn共晶合金(融点118℃)を導入するハイブリッド接合[34]も提案しており、接合抵抗率 $\sim 40 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$ (77 K, 自己磁場)[35]を達成している。さらにItoらは、In箔を接合部に挿入してREBCOテープ線材をUWし、 $\sim 30 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$ (77 K, 自己磁場)[36]を達成した。図5にItoらが適用したUWの体系[37]を示す。UWの難しい点は、超音波接合機が必要である点や、ホーン・アンビル形状、超音波の条件など、最適化のためのパラメータが多い(被接合物の材質・形状によっても変わる)ことであるが、接合が1秒以内で完了するなど、他の接合技術に比べて圧倒的に短い接合時間にできることは特筆すべき点である。

この他にも、ナノメタルペーストを用いた焼結接合[38]、銅拡散接合[39]など、さまざまな接合技術が研究されており、いくつかの事例を除いて、銅安定化層を除去したREBCOテープ線材や別の高温超伝導線材であるBi-2223テープ線材の接続にも適用することができる。

4.4 大電流REBCO導体の接合技術

大電流REBCO導体の場合、超伝導接合や銀拡散接合のような酸素導入を行う必要がある接合プロセスの適用は構造上、困難である。特に分割型高温超伝導マグネットの構想のように接続部がコイル内の強磁場領域にある場合、臨界電流の制約から現行の超伝導接合は適用できない。

大電流REBCO導体の接合は、一般的には電流ターミナルとの接続およびDP間の接続のために行われる。なお、高温超伝導テープ線材を用いた電流リードについてはITERの超伝導コイル[40]やSPARCのTFモデルコイル[41]など多くの事例があるが、これらの接続の話は本章では取り扱わない。まず、大電流REBCO導体の電流ターミナルとの接合技術の例として、Twisted Stacked-

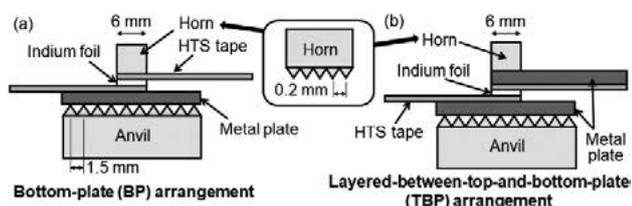


図5 高温超伝導テープ線材のIn挿入超音波接合の体系[37]。

Tape Cable (TSTC)[42, 43], Conductor on Round Core (CORC) cable[44], Roebel cable[45]用に開発されたものを紹介する。TSTCの事例では、文献[42]のFigs. 3, 4, 7, 8や文献[43]のFig. 10に示されているように、銅チューブや銅板にREBCOテープ線材やBSCCO (Bi-2223) テープ線材をハンダ接合したターミナル部分と、ケーブルを構成する線材1枚1枚を直接接合(機械的接合)する着脱可能方式のものが提案されている。CORC cableと電流ターミナルの接続の事例では、文献[44]のFig. 6に示されているように、銅ケース内にCORC cableを挿入してハンダ接合する方法が用いられている。Roebel cableと電流ターミナルとの接続の事例では、文献[45]のFig. 3に示されているように、Roebel cableを構成する各線材を、溝を切った銅板にハンダ接合し、それらを重ねて電流ターミナルとする方法が採用されている。DP間の接続に用いることができる導体間接合技術としては、溝を切った銅ブロックにケーブルをハンダ接合し、その銅ブロックを介して接続する形のものHTS CroCo conductor (文献[46]のFig. 6), CORC Cable (文献[47]のFigs. 4, 5)で報告されており、それぞれ38 nΩ (3 kA, 77 K, 自己磁場), 8 nΩ (12 kA, 4.2 K, 自己磁場)を達成している。大電流REBCO導体としては様々なものが提案されており(詳細な説明は3章に譲る)、紹介した事例以外にも、各導体形状に適した接合技術が考案されている。多くの場合、ハンダ接合が用いられるが、4.3で述べた通り、ハンダ濡れ性の確保、REBCOテープ線材の臨界電流・層間抵抗の維持、を同時達成するための温度管理が重要である。

一方、ハンダ接合を用いない方法として、NIFSと東北大では、ヘリカル炉の分割型高温超伝導マグネットのために、Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure (STARS) 導体のIn固相拡散接合(機械的接合)の開発を行っている。2014年には、図1左に示す導体接続巻線方式(Joint-winding)に適したブリッジ式機械的ラップジョイントで100 kA級STARS導体を接続し、1.8 nΩ (100 kA, 4.2 K, 自己磁場)[48]を達成した。この接合構造は線材接合の技術の延長上にあり、また、接合部サイズが導体サイズと同じInvisible joint (導体と接合部の区別がつかない接合)であることが特徴である。なお、100 kA級STARS導体の接合部製作には半日以上を要したが、図6に示すIntegrated joint piece[5, 49]を導入することで、製作時間が3時間以内となる可能性を見い出せた。導

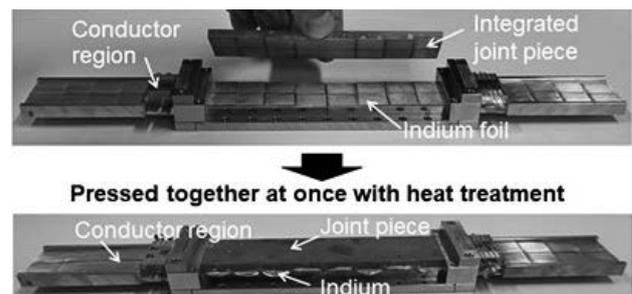


図6 Integrated joint pieceを導入したブリッジ式機械的ラップジョイント構造[5]。

体接続巻線方式の高温超伝導マグネットにおいては、接合後の検査技術も重要であり、例えばX線CTによる接合面検査[5, 50-52]の開発も行っている。これらの実績を元に、現在、高速接合作業と接合後検査を行う産業ロボットの開発も行っている。なお、4.3.3で述べた通り、接合前処理として酸洗いが有効であるが、酸洗い時の残留物が接合状態へ与える影響の長期評価、産業ロボットに適用できる残留物除去技術の開発が必要となる。また、酸洗いよりも施工が簡便となる代替前処理法の開発も重要であり、この検討を並行して行っているところである。図1右に示す着脱可能方式 (Remountable coil: 一般的には着脱可能コイルを demountable coil と表現するが、複数回の着脱を可能とするという意味で、remountable coil と呼んでいる。) に適用する接合方法の候補として機械的エッジジョイント (STARS 導体内の REBCO テープ線材の側面同士を接合する構造) [5, 53-55] も提案しており、現状では図7に示すような 1 kA 級 STARS 導体の接合試験が完了した段階である。図8に REBCO テープ線材と STARS 導体の In 固相拡散接合の過去10年の達成接合抵抗率[5]を示す。

4.5 おわりに

超伝導コイル製作における接合の位置づけ、REBCO テープ線材の接合における抵抗要素と接合技術研究の事

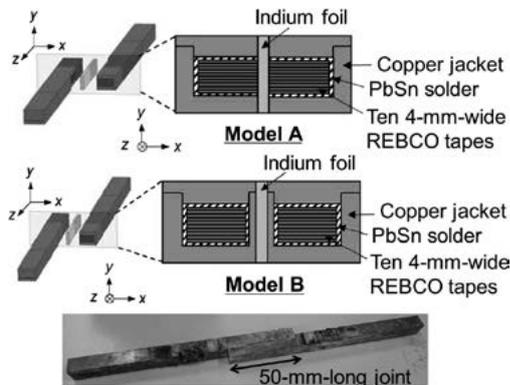


図7 1 kA 級 STARS 導体の機械的エッジジョイント [5].

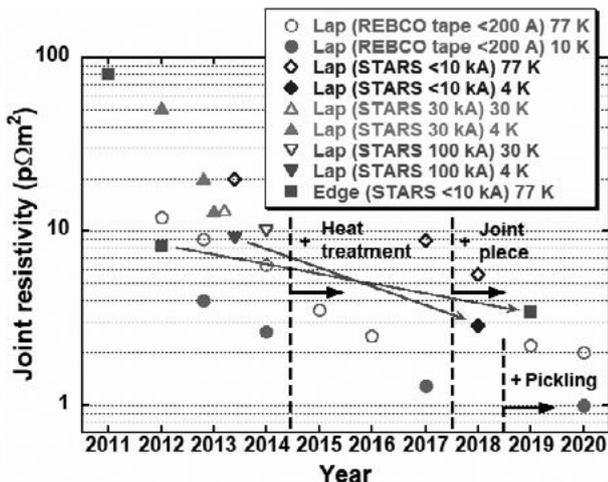


図8 REBCO テープ線材と STARS 導体の In 固相拡散接合の過去10年の達成接合抵抗率 (1 pΩ·m² = 10 nΩ·cm²) [5].

例、大電流 REBCO 導体の接合技術研究の動向について紹介した。超長尺の REBCO 線材が開発されたとしても、各種超伝導コイルの構成上、接合部は必ず存在するものであり、適用機器の性能要件・コスト要件を満足する接合技術の選択および研究開発が必要である。核融合コイルの革新的設計案である分割型高温超伝導マグネットのための大電流導体の接合技術も着実に進んでおり、今後は大型モデルコイルに適用しての実証試験が期待される。

参考文献

- [1] D. Uglietti, Supercond. Sci. Technol. **32**, 053001 (2019).
- [2] 高畑一也: プラズマ・核融合学会誌 **81**, 273 (2005).
- [3] 小泉徳潔, 中平昌隆: 低温工学 **55**, 315 (2020).
- [4] G. Rolando *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **26**, 085004 (2013).
- [5] S. Ito *et al.*, Nucl. Fusion, **61**, 115002 (2021).
- [6] N. Yanagi *et al.*, Nucl. Fusion, **55**, 053021 (2015).
- [7] 橋爪秀利 他: プラズマ・核融合学会誌 **91**, 87 (2015).
- [8] 伊藤 悟 他: プラズマ・核融合学会誌 **92**, 623 (2016).
- [9] Z.S. Hartwig *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 201 (2012).
- [10] B.N. Sorbom *et al.*, Fusion Eng. Des. **100**, 378 (2015).
- [11] N. Bagrets *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**, 6601508 (2021).
- [12] R. Hayasaka *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**, 9000805 (2019).
- [13] Y. Atake *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, 4803205 (2022).
- [14] Y. Atake *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**, 6600604 (2023).
- [15] M. Ohsugi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, 6601804 (2022).
- [16] J. Lu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **34**, 075004 (2021).
- [17] 向山晋一: 低温工学 **55**, 255 (2020).
- [18] Y.J. Park *et al.*, NPG Asia Mater. **6**, e98 (2014).
- [19] 大木康太郎 他: 低温工学 **55**, 262 (2020).
- [20] J. Kato *et al.*, Physica C, **445-448**, 686 (2006).
- [21] J. Kato *et al.*, Physica C, **463-465**, 747 (2007).
- [22] D. Huang *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**, 4600507 (2021).
- [23] J. Lu *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 3009 (2011).
- [24] Y. Kim *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23**, 6800704 (2013).
- [25] C.A. Baldan *et al.*, J. Supercond. Nov. Magn. **26**, 2089 (2013).
- [26] N. Bagrets *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25**, 6602705 (2015).
- [27] L.E. Aparicio *et al.*, Fusion Eng. Des. **136**, 1196 (2018).
- [28] Y. Tsui, Supercond. Sci. Technol. **29**, 075005 (2016).
- [29] S. Ito and H. Hashizume, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22**, 6400104 (2012).
- [30] K. Kawai *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23**, 4801704 (2013).
- [31] T. Nishio *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 4603305 (2017).

- [32] R. Hayasaka *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **1559**, 012034 (2020).
- [33] H-S. Shin *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25**, 6602205 (2015).
- [34] H-S. Shin *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **29**, 015005 (2016).
- [35] H-S. Shin *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **28**, 6600405 (2018).
- [36] S. Ito *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**, 6600405 (2019).
- [37] S. Ito *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **1559**, 012065 (2020).
- [38] T. Nakanishi *et al.*, Phys. Procedia, **81**, 105 (2016).
- [39] S. Kato, N. Chikumoto, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**, 6602305 (2023).
- [40] A. Ballarino *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22**, 4800304 (2012).
- [41] V. Fry *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, 0600518 (2024).
- [42] M. Takayasu *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24**, 6600105 (2014).
- [43] M. Takayasu *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 6400210 (2016).
- [44] T. Mulder *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 4801704 (2016).
- [45] J.S. Murtoimäki *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **28**, 4801406 (2018).
- [46] M.J. Wolf *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 4802605 (2017).
- [47] X. Wang *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **31**, 045007 (2018).
- [48] S. Ito *et al.*, Plasma Fusion Res. **9**, 3405086 (2014).
- [49] S. Ito *et al.*, Fusion Eng. Des. **146**, 590 (2019).
- [50] S. Ito *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 4201510 (2016).
- [51] W. Chen *et al.*, Fusion Eng. Des. **148**, 111284 (2019).
- [52] W. Chen *et al.*, Plasma Fusion Res. **15**, 2405014 (2020).
- [53] S. Ito *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **40**, 1446 (2012).
- [54] S. Ito *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23**, 4802408 (2013).
- [55] S. Sato *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **1559**, 012110 (2020).

小特集 核融合炉のための高温超伝導導体開発の現状

5. 高温超伝導マグネットの多用途アプリケーション

5. Applications of High-Temperature Superconducting Magnets

寺尾 悠

TERAO Yutaka

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻

(原稿受付：2024年6月20日)

本章では、近年様々な分野への応用が期待される高温超伝導マグネットのアプリケーションを紹介する。具体的には、まず高温超伝導マグネットに使用されている超伝導線材を紹介し、その後超伝導マグネットが使用されているアプリケーションとして医療分野のMRI、産業分野のアルミ誘導加熱用超伝導マグネット、電力分野の超伝導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES)、複数分野に適用される超伝導回転機 (モータ/発電機) に関してその概要を紹介する。

Keywords:

generator, induction heating, motor, MRI, superconducting magnet, superconducting magnetic energy storage (SMES)

5.1 はじめに

1911年にオランダのライデン大学において、カメリン・オンネスが超伝導現象を発見してから1世紀が経つ。超伝導体の最も大きな特徴の一つは、「直流抵抗がゼロ」であり、この現象は超伝導線材が通常の銅線等と比較して冷却温度によっては数百倍以上の大電流を通電して強磁界を発生できることを意味する。よって、超伝導体を線材化、導体化すると銅線等よりも「高電流密度」となり、コンパクトかつ軽量のマグネットを実現することが可能となる。この超伝導マグネットの研究開発は超伝導体の発見直後より開始され、半世紀以上にわたる試行錯誤を経て、製作技術が少しずつ確立されていった。そして今日では医療分野におけるMRIが商用化され、交通輸送分野では東海旅客鉄道株式会社によって開発されている超伝導リニアの車両用界磁コイルが商用運転間近、さらに世界各国の研究グループが集まり人類初の核融合実験炉を実現するプロジェクトである「ITER」が現在進行中である。

その一方で、1980年代の「高温超伝導フィーバー」により液体ヘリウム温度 (4.2 K) レベルではなく、液体窒素温度 (77 K) レベルで超伝導状態を維持できる「高温超伝導体」が発見されてからは、超伝導マグネットの応用は上記だけにとどまらず、産業、電力、エネルギー分野など多岐に渡る。さらに近年のカーボンニュートラル社会の実現に向けた動きと相まって液体水素利用とも絡めた応用が提案・研究されている。

本章では、今日において高温超伝導マグネットを用いたアプリケーションがどのように産業に应用されているか、もしくははされるのかの例をいくつか紹介する。まず5.2では高温超伝導マグネットに使用されている3種類の超伝

導線材を簡単に紹介する。そして5.3章では高温超伝導マグネットの適用が期待されている具体的なアプリケーションとしてMRI、アルミ誘導加熱用マグネット、超伝導磁気エネルギー貯蔵システム (SMES)、超伝導回転機の4つを紹介する。

5.2 高温超伝導マグネットに使用する線材

高温超伝導体の定義はいくつか存在するが、本章では超伝導材料が冷却されて超伝導状態となる境界値である臨界温度が20 K以上であることと定義し、その上で現在超伝導マグネットに使用されている線材を図1に示す。すなわち超伝導線材は、その製法や直流/交流応用などの使用目的により様々な形状のものが存在する。図1(a)は1986年末の「高温超伝導フィーバー」の中で発見されたビスマス系線材の一つ ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$: Bi2223) であり、銅酸化物超伝導体の一種である。臨界温度は110 Kとこれまで発見されていた高温超伝導体の中でも非常に高い超伝導材料である。銀の合金の中に複数の超伝導フィラメントが埋め込まれたテープ形状をしている。図1(b)は希土類系銅酸化物 ((RE) BaCuO: REBCO) 超伝導体で、臨界温度は90–95 K程度と高く、線材構造としては金属基板と中間層や保護層等の間に、超伝導の薄膜を挟み込んだ構造をしている。上記2つは液体窒素 (77 K) で冷却が可能な超伝導線材である。図1(c)の二ホウ化マグネシウムこと MgB_2 超伝導体は、2001年にNagamatsuらにより発見された[1]。本超伝導体は金属系超伝導体の1種であり、臨界温度が39 Kであるため、近年注目を集めている液体水素での使用も可能である。また多芯線構造かつフィラメント同士を捻って線材を作成することが可能で、低交流損失

Department of Advanced Energy, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwa, CHIBA 277-8561, Japan

author's e-mail: yterao8934@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

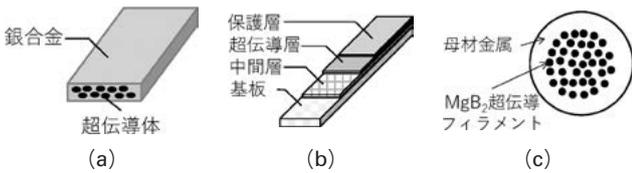


図1 高温超伝導線材の一例。
(a)BSCCO線材, (b)REBCO線材, (c)MgB₂線材。

化を実現するポテンシャルを秘めた材料ということで注目を集めている。

5.3 超伝導マグネットのアプリケーション

5.3.1 MRI

現在、最も商用化が進んだ超伝導マグネット応用の一つが、MRIである。本装置は、人間の体内におけるプロトン（水素原子）の核磁気共鳴（Nuclear Magnetic Resonance: NMR）現象を応用した装置である。下記の式を考える。

$$\omega_0 = \gamma B_0 \tag{1}$$

ここで、 ω_0 [rad/sec], γ [A m²/(J·s)], B_0 [T]をそれぞれラーモア周波数、磁気回転比（原子核それぞれの固有の値）、外部印加磁界である。プロトンの場合、仮に $B_0=1.0$ Tの磁界が外部から印加された場合、共鳴周波数は42.6 MHzとなる。図2にMRI内のコイル構成を示す。MRIはX線を使用するCT（Computed Tomography: コンピュータによる断層撮影）スキャンと違い、放射線の被爆がなく安全かつSN比がよい画質の写真撮影が可能であるという特徴がある。さらに人体や動物をはじめとした被験体の体内画像を撮影するためには、図2に示すような複数のコイルが必要となる。すなわち静磁界を発生させる超伝導線材を使用した磁界印加マグネット、撮影時の位置情報を取得するための傾斜磁界コイル、被験体内のプロトンにNMR現象を起こさせるための高周波発生コイル、信

号を受信するための受信コイルと実に4種類ものコイルがMRIに使用されており、最終的に受信コイルで得られた信号を画像処理装置でフーリエ変換により画像化する（図2(b)）。

現在は液体ヘリウム冷却で使用されているMRIが殆どであるが、近年はREBCO線材やMgB₂線材による高温超伝導マグネットを用いたMRIの研究開発が盛んに行われている。三菱電機を筆頭とした研究グループはこれまでに、REBCO超伝導マグネットを使用したMRIシステムの開発を行ってきた[2-4]。本システムはギフォード-マクマホン（GM）冷凍機によって超伝導マグネットを20 K程度に冷却して使用し、磁気遮蔽用のコイルを含んだ直径1.2 mかつボア直径48 cmの超伝導マグネット中心部では約3 Tの強磁界を発生可能である。また、2021年に日立は、従来1~2時間を要したMRI検査に必要な磁界空間の生成を、冷凍機を用いて急速に行うことができる直径1.1 mのMgB₂超伝導マグネットを開発し、磁界のない状態から10分以内に人体頭部のMRI撮像が可能なることを実証した[5]。MgB₂超伝導磁石は、希少資源の液体ヘリウムを用いずに冷凍機電源の投入のみで冷却可能であり、撮像時以外は磁界を消しておき、撮像時のみ磁界を生成する新たな運用方法が可能となる。

5.3.2 アルミ誘導加熱用マグネット

一般にアルミ製品の加工には casting, die casting, extrusion, forgingなど複数のプロセスがあり、いずれもアルミ材料の加熱工程が含まれている。この加熱方式として燃料を燃やす燃焼方式と高周波による誘導加熱方式などの電力を利用した電気式があり、前者はCO₂の排出が伴うため、後者が多く採用されている。しかし、非磁性かつ低抵抗のアルミは高周波による誘導加熱では加熱効率が悪く、特にアルミ押出用材料のアルミビレット加熱の工程では磁界を発生させる銅コイルのジュール損が多いため加熱効率が50%程度と低い。すなわち加熱のパワーを上げるためには強磁界が必要であるが、銅コイルのアンペアターンを増加するとジュール損が増加するために冷却が困難となる。さらにコイルインダクタンスの増加に伴い、電源投入の際の無効電力分が増加するため、入力皮相電力を増加させる必要がある。一方、周波数を増加させてもアルミビレット表面での表皮効果が顕著となり、望ましい効果は得られないため、近年は常電導技術に代わり高温超伝導マグネットを使用して強磁界を発生させ、その中でアルミビレット側を強制回転させる直流誘導加熱が注目されている。本方式は2000年代から世界中で開発が行われ、この方式により加熱効率として80~90%の向上が見込めるという報告もある[6, 7]。

図3にテラル(株)らの研究グループが開発を行っている高温超伝導マグネットを使用したアルミビレットの400 kW級の直流誘導加熱装置の概念図と概観を示す[8]。主な構成要素としては、磁界発生用高温超伝導マグネット、回転駆動部、把持機構部、投入排出機構部により構成されている。図3(a)に示す様にアルミビレットはGM冷凍機によって伝導冷却された2つの高温超伝導マグネットに挟ま

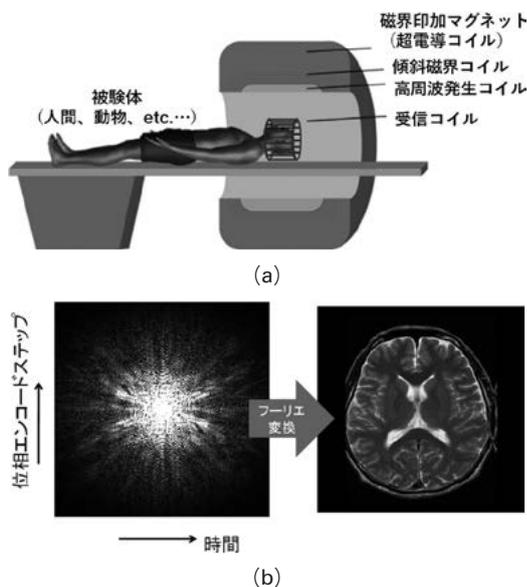


図2 MRIにおけるコイルの構成。
(a)コイル構成, (b)画像化プロセス。

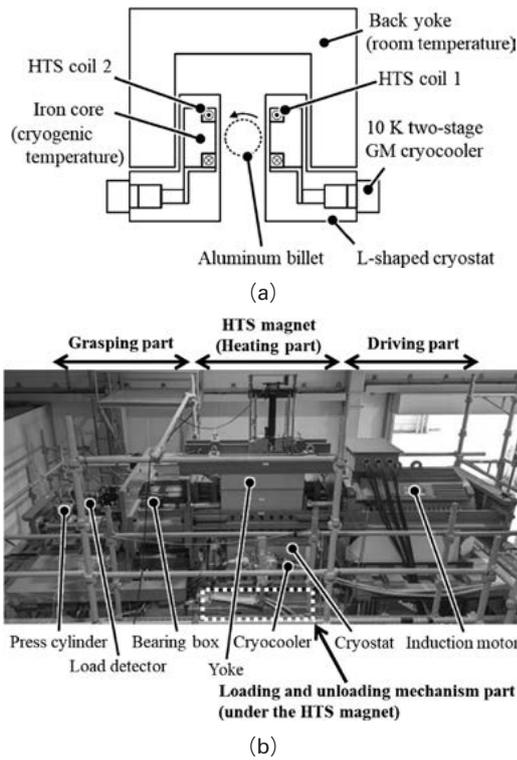


図3 超伝導マグネットを用いた400 kW級アルミビレットの誘導加熱装置。
(a)概念図, (b)装置外観図。

れるように配置された中で、回転しながら加熱される。高温超伝導マグネットはクライオスタット内に格納され、可能な限り近接して配置されている。また、発生磁界の有効利用と周囲への漏れ磁界を抑制するため、室温のバックヨーク（鉄心）が使用されている。

図3(b)に示す実証試験装置により連続加熱試験が行われた。すなわち運転時間2時間かつアルミビレット90本の連続加熱運転を行っても定格出力で適正な加熱が可能であり、かつ高温超伝導マグネット側での応力や温度上昇の挙動を評価しても、同マグネットの健全性が失われなかったとの結果が得られたとしている。

5.3.3 SMES

超伝導磁気エネルギー貯蔵装置（Superconducting Magnetic Energy Storage; SMES）は、超伝導マグネットに直流電流を流して磁気的エネルギーとして貯蔵する装置である。一般的な装置構成としては超伝導マグネット、クライオスタット（低温容器）、SMESに蓄えられた直流電力を交流に変換する電力変換器、コイルの保護装置、永久電流スイッチ（必須ではない）、冷凍機等が使用され全体のシステムが構成されている。

いま、SMESの回路図である図4(a)において電力変換器の直流電圧を E_d 、超伝導マグネットに流れる直流電流を I_d 、超伝導マグネットのインダクタンスを L とすると、電力変換器から超伝導コイルに吸収/放出される電力は、

$$P_d = E_d I_d = L \frac{dI_d}{dt} I_d \quad (2)$$

となり、充放電は電力変換器の電圧極性を切り替えるのみ

であるため、数msオーダーでの応答が可能である。他にも充放電時の変換機損失のみでほぼ無損失で電流を流せるためにエネルギー貯蔵効率が高いことなども特徴として挙げられる。

SMESは1970年代からエネルギー貯蔵装置としての概念設計が行われ、1980年代には電力系統の安定化などを用途とした小容量SMESの開発が行われた。2003年に開発された瞬時電圧低下（以下、瞬低）を保証するための5 MVA級SMESの概観を図4(b)に示す[9]。本装置は超伝導マグネット（図4(b)では超伝導コイル）を液体ヘリウムに浸漬して冷却する。このヘリウム容器とその外側にある真空容器の隙間に輻射シールドを配置し、さらに輻射シールドや外部から超伝導マグネット部分へ電流を通電するための電流リードを60 K程度に冷却するためのGM冷凍機が使用されている。さらにガス化したヘリウムを再凝縮するためのGM/ジュールトムソン（JT）冷凍機を使用することで、冷媒の補充が不要である。このSMESは液晶テレビの工場に設置して現地試験が行われた。そして2007年には出力10 MWを最大1秒で出力可能なSMESの商用運転を開始し、2020年3月まで約11万時間以上の連続運転を行った。

上記の液体ヘリウム冷却のSMESに対して、REBCO線材等による高温超伝導マグネットを用いたSMESでは温度マージンが高く取れるようになり、更にその幅広い温度レンジの中で高い電流密度が得られるため、近年盛んに使用が議論されている液体水素（20 K）等を使用したSMESの設計も可能となる。これらを踏まえて、近年はSMESの利点である高速充放電、高効率充放電、長寿命の利点を生かしつつ、大規模化、電磁力、電力変換器の大型化などの問題を解決するため、高温超伝導線材等による直流超伝導ケーブルにSMESの役割を持たせ、発電シス

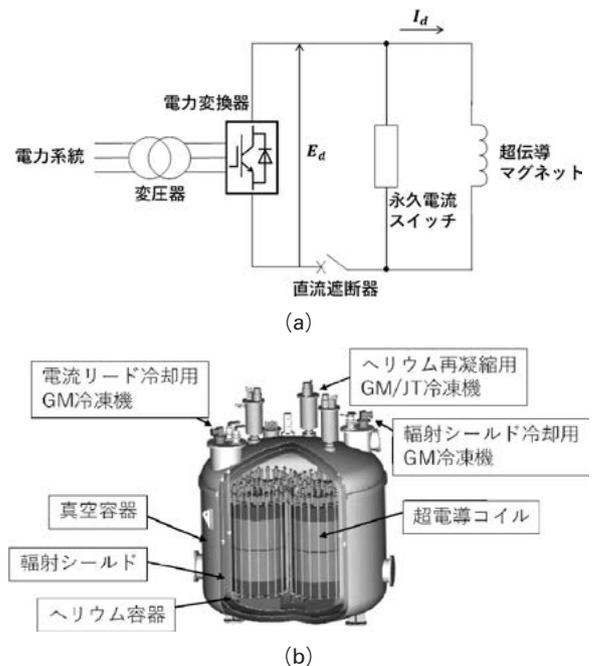


図4 SMESを構成するコンポーネント。
(a)回路構成図, (b)5 MVA級SMES。

テムと組み合わせた電力システムを構築するための検討なども行われている [10, 11]。また近年の液体水素の利用と合わせて、MgB₂線材による導体ケーブルで構成した超伝導マグネットをSMES用に適用しての実証試験等も行われている [12, 13]。

5.3.4 超伝導回転機

超伝導マグネットを回転機へ応用するというコンセプトが示されたのは、1976年における国際会議が最初であり、その歴史は長い [14]。図 5 (a) に回転子の直流界磁巻線 (以下、界磁巻線) 部分へ超伝導マグネットを適用した「界磁超伝導構造」の超伝導回転機を示す。回転子としてのクライオスタット内に収められた超伝導界磁巻線を冷却するため、シャフト内から超伝導界磁巻線へ冷媒が供給され、さらに外部からクライオスタット内への熱侵入を押さえるために、機械的強度と低熱伝導性を両立させた材料によるトルクチューブが使用されている。

いまモータへの超伝導マグネットの使用によるメリットに関して考察する。一般に回転機の出力 P [W] は、式 (3) で表される。

$$P = T \times \frac{2\pi N_{rot}}{60} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \times k_w \times B_{max} \times A_s \times D^2 \times L \times \frac{N_{rot}}{60} \quad (3)$$

ここで T [Nm] : トルク, N_{rot} [rpm] : 回転数, k_w : 巻線係数, B_{max} [T] : 磁束密度振幅, A_s [A/m] : 比電気装荷, D [m] : 電機子直径 (図 5 (a) 参照), L [m] : 有効長 (図 5 (a) 参照) である。特に、回転子の界磁巻線が固定子の電機子部分に発生する磁束密度である B_{max} は、通常の常電導機では鉄心の飽和磁束密度や巻線体積等の限界によ

り 1.0 T 程度に制限されているが、超伝導回転機では超伝導マグネットの大電流により鉄心なしで通常の 2 倍以上の高磁界が発生可能かつ直流抵抗ゼロにより銅損が劇的に低減できる。さらに固定子側の鉄心 (主にティース部分) の使用量も低減可能である。また、 A_s は電機子巻線に交流電流を流して回転磁界を発生させるための導体使用量に関連し、常電導技術の場合は水冷の銅線等を使用しても約 120 kA/m 程度であるが、超伝導マグネットを採用した場合には 200 - 500 kA/m が可能となる。この場合、超伝導回転機は「全超伝導構造」と呼称される。しかし、本構造の場合には、超伝導体特有の「交流損失」の低減を考慮した設計が求められる。

以上により同じ出力 P に対して B_{max} と A_s が通常よりも大きく取れるので、結果として D と L すなわち体積部分が相対的に小さくなり、回転機部分の軽量・コンパクト化が実現可能となるのが超伝導化の大きなメリットである。これまでに REBCO 線材や BSSCO 線材, MgB₂ 線材による超伝導マグネットを界磁もしくは電機子巻線に使用した 3 - 36.5 MW 級の船舶用モータ (図 5 (b)) [15-17], トラックなどの大型車両向けの数十 kW 級モータ [18] の研究が行われてきた。さらに近年は航空旅客機の推進システムの電動化に伴い、数 MW 級のモータ/発電機を開発して航空機の推進システムへ応用する研究が活発化している [19, 20]。すなわち図 6 の構成システム例 [21] に示すように、液体水素タンクを推進システムの燃料として使用する一方で、ガスタービンエンジンに接続された超伝導発電機 (SCG) や機体後方の推進用超伝導モータ群 (SCMs) の冷媒として使用する。そして抜熱してガス化した水素はその後に再凝縮されることなくガスタービンエンジンの燃料として使用する。これにより、超伝導機器システムでしばしば議論される「冷却システム重量」及び「冷却コスト」を考慮せずに超伝導推進システムを構築可能となる。現在 Airbus などの研究グループが超伝導モータをはじめとしたデモシステムの製作及び実験的検証 [22] を進めており、今後の進展が期待される。

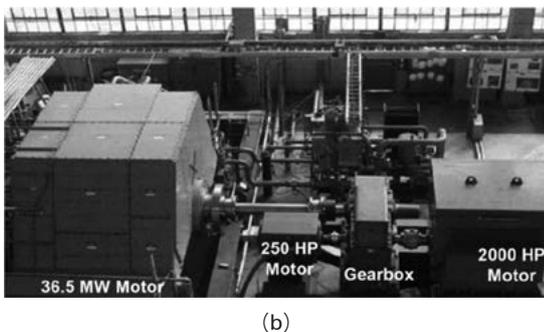
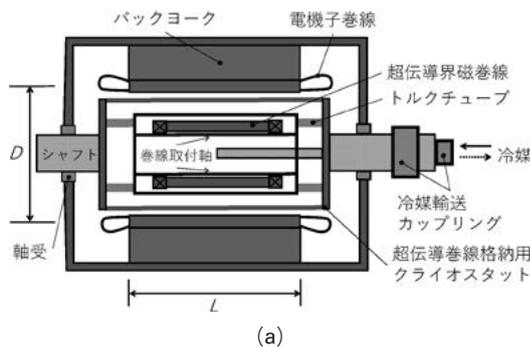


図 5 超伝導回転機概念図と実機例。(a) 界磁超伝導構造, (b) 船舶用 36.5 MW 級超伝導モータ [17]。

5.4 おわりに

高温超伝導線材で製作される超伝導マグネットに関してその応用例を紹介した。MRI や超伝導リニアの様に商用化が既にされたもしくは商用化寸前のアプリケーションの他にも直流抵抗ゼロに伴う大電流、強磁界を発生可能という特徴を生かして複数の分野に跨って様々な機器が提案、研究開発がされている。いずれのアプリケーションも実用

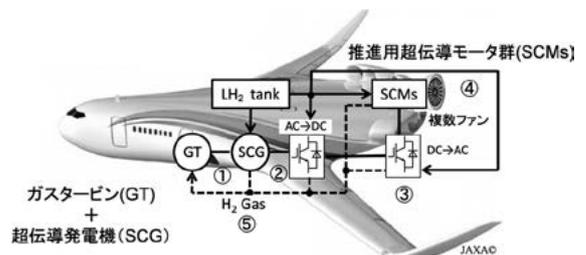


図 6 電動航空旅客機における超伝導推進システムの一例 [20]。

化に向けてまだ解決すべき技術的課題はあるものの、今後のカーボンニュートラル社会の実現に向けて貢献度の大きなアプリケーションであり、それぞれの一日も早い実用化が期待される。

参考文献

- [1] J. Nagamatsu *et al.*, Nature **410**, 63 (2001).
- [2] S. Yokoyama *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 4400604 (2017).
- [3] S. Yokoyama *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **30**, 4400904 (2020).
- [4] T. Nakamura *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, 4400406 (2022).
- [5] 日立, ニュース & イベント研究開発, URL: <https://www.hitachi.co.jp/rd/news/topics/2021/0301.html> (2021)
- [6] M. Runde *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 1379 (2010).
- [7] S. Dai *et al.*, IEEE Access **9**, 3301 (2021).
- [8] T. Ito *et al.*, TEION KOGAKU **58**, 124 (2023).
- [9] N. Hirano *et al.*, TEION KOGAKU **56**, 262 (2021).
- [10] K. Higashikawa *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**, 5400405 (2023).
- [11] K. Higashikawa *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, 5700205 (2024).
- [12] M. Hira *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **1590**, 012058 (2020).
- [13] T. Onji *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**, 5700105 (2023).
- [14] C. Oberly, IEEE Trans. Mag. **13**, 260 (1977).
- [15] T. Yanamoto *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 5204305 (2017).
- [16] B. Gamble and G. Snitchler, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 1083 (2017).
- [17] K. Haran *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **30**, 123002 (2017).
- [18] T. Nakamura *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**, 5200205 (2023).
- [19] J.J. Scheidler *et al.*, Proc. in 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 1 (2019).
- [20] Y. Terao *et al.*, Physica C: Supercond. its Appl. **617**, 1354399 (2024).
- [21] 寺尾 悠, 特別 WEB コラム GC: グリーントランスフォーメーションに挑む応用物理, <https://www.jsap.or.jp/columns/gx/e2-3> (2022).
- [22] Airbus, newsroom, URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-12-ascending-to-new-heights-with-cryogenic-superconductivity> (2023).

小特集 核融合炉のための高温超伝導体開発の現状

6. 高温超伝導体を支える低温工学

6. Cryogenics for High-Temperature Superconductors

平野 直樹^{1,2)}

HIRANO Naoki^{1,2)}

¹⁾核融合科学研究所, ²⁾総合研究大学院大学

(原稿受付: 2024年7月24日)

高温超伝導体は20 Kの液体水素で冷却できる可能性がある。その場合4 Kの液体ヘリウムは不要になると期待される。大型高温超伝導マグネットの冷却技術として、液体水素冷却にスポットを当て、液体水素の物性から冷媒としての魅力、取扱いにおける留意点を解説する。加えて、液体水素の冷熱を利用した超伝導機器の研究開発や液体水素温度域での高効率冷凍技術の研究開発動向について紹介する。

Keywords:

liquid hydrogen, physical property, handling, superconducting magnet, cooling technology, high efficiency

6.1 はじめに

将来の核融合炉用マグネットへの高温超伝導体の適用を考える上で、マグネットが超伝導状態を維持できるように低温を保つための冷却技術を確立することは、極めて重要である。しかも、昨今は低温状態を作り出せばよいという考え方でなく、持続可能社会実現の観点から、高効率で信頼性も高く、クリーンで経済的な冷却技術の確立が求められている。核融合炉を対象とした大型マグネット応用では、超伝導体内部に冷媒を循環させる強制冷却方式、あるいは、巻線間に仕込んだ冷却パネル等に冷媒を循環させて導体はそこからの熱伝導で冷やす間接冷却方式[1, 2]を選択することになる。ここで、核融合科学研究所における大電流高温超伝導体の通電試験[3-5]やCFS社における大型高温超伝導コイルの試験[6]では、高温超伝導の高い磁場中特性が期待できる20 K付近の温度に冷やしたヘリウムガスや超臨界ヘリウムが用いられている。これにより低温超伝導コイルにおいて液体ヘリウムを用いる場合と比べると格段にヘリウムのインベントリを低減できるが、昨今はヘリウムの需要と供給のバランスが世界的に変化してきたことを受け、今後入手が困難となることも考えられることから、ヘリウムによる冷却でなく液体水素による冷却にも注目が集まっている。本章では、大型高温超伝導マグネットの冷却技術として、液体水素冷却にスポットを当て、研究開発動向について紹介する。

6.2 液体水素冷却

究極の省エネルギー技術として期待される超伝導技術の応用では、極低温に維持しなければならないという制約から、これまでは超伝導にしかできないような強力な磁場を生成する応用に限っての社会実装が図られている。また、

エネルギー資源の観点から、今後、安定にヘリウムを我が国が調達することが困難となる恐れもあることから、ヘリウムに頼らない冷却技術を確立することは、エネルギーの経済安全保障の観点からも重要な課題となっている。加えて、高温超伝導線の冷却には液体ヘリウム温度まで下げて運用する制約を外すことができるようになってきている。

これらの状況から、大型の超伝導マグネットを高温超伝導体で製作することを考えた場合、その冷却に液体水素を用いることは荒唐無稽な話ではない。液体水素の研究は、水素キャリアの輸送・貯蔵手法の一つとして主に進められてきている。一方、大容量の発電機の冷却に水素ガス冷却方式が採用されていることからわかるように、水素ガスや液体水素は、高い熱伝導率・比熱、低い粘性などの優れた物性を持つ冷媒でもある。高温超伝導体を用いた大型マグネットの冷媒として注目される液体水素に関し、物性や取り扱い上の留意点、液体水素供給方法について紹介する。

6.2.1 液体水素の物性

1) 物理的性質

水素は、周期律表の左上の原子番号1番の元素であり、通常、水や他の元素との化合物として存在する。水素分子(H₂)は無色無臭の気体で、融点(-259℃)、沸点(-253℃)はヘリウム(He)に次いで低く、密度は気体・液体・固体のいずれにおいても、全物質の中で最も軽いことが知られている。-253℃(20 K)での液体水素の密度は、70.8 g/Lである。

水素分子を構成する二つの水素原子に属する陽子の核スピンの向きが並行なオルソ水素と、互いに逆向きのパラ水素が存在する。常温ではオルソ水素とパラ水素の平衡組成は3:1で、この状態をノーマル水素と呼ぶ。低温でもノーマル水素とパラ水素の組成は3:1で、この状態をノーマル水素と呼ぶ。

National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

author's e-mail: hirano.naoki@nifs.ac.jp

マル水素の比率は維持されることが知られている。液体（沸点）での水素の主な物性を表1に示す。

液体水素の沸点での平衡組成は、98%がパラ水素であるが、液体水素として貯蔵している間にゆっくりとパラ水素からオルソ水素への変換が進み、回転エネルギーの差分で熱が発生し、液体水素が気化する。オルソ水素とパラ水素の変換速度は一般に遅く、ある種の触媒を用いることで変換は促進される。オルソ水素からパラ水素への変換のための触媒が液体水素貯蔵には必要である。

2) 冷媒としての性質

液体水素の蒸発潜熱 (444 J/g) は液体ヘリウムの蒸発潜熱 (20.9 J/g) の約20倍、液体窒素の蒸発潜熱 (199.1 J/g) の2倍以上あり、粘性も液体窒素 (0.158 mPas) の1/10であることから、冷媒として優れた特性を有している。

金属等の固体表面から液体冷媒への熱伝達は、熱流速の大きさに応じて様々なメカニズムによって起こり、伝熱面全体を冷媒に漬けた浸漬冷却を行う場合は核沸騰領域が、また、装置を常温から低温に冷却する際には膜沸騰領域が適用される。液体水素について、沸騰曲線のデータは低温工学ハンドブック[8]に記載されており、関係する実験データは1960年代に論文発表[9, 10]されている。超伝導機器の冷却を想定した液体水素の冷却特性、熱流動特性の実験研究については、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の能代ロケット試験場に整備された液体水素試験装置[11, 12]により、液体水素冷媒の基礎特性の把握や液体水素冷却超電導線材の通電特性の評価が行われている。例えば、強制対流沸騰熱伝達特性として、加熱円管内を液体水素が流れる際のDNB熱流束 (Departure from Nucleate Boiling heat flux) を、圧力、流量 (流速) サブクール度 (入口) などのパラメータに対して把握し、その表示式が得られている。発熱試験体の断面図を図1に、試験結果の一例を図2に引用して示す[13]。サブクール沸騰DNB熱流束の表示式や、DNB熱流束を超えた後の熱伝達特性 (膜沸騰熱伝達) についても研究されている[12]。

6.2.2 取扱いの留意点

液体水素の取扱いについては、詳しい解説が低温工学誌に掲載されている[14]。特に留意すべき点について、以下に抜粋して示す。

液体水素の取扱は、他の高圧ガスと同様に

1. 性質を十分理解する

表1 液体水素の主な物性値 [7].

物性	ノーマル水素	パラ水素
融点 (K)	13.9	13.8
沸点 (K) 常圧下	20.4	20.7
臨界温度 (K)	33.2	33.0
密度 (mol/cm ³)	0.035	0.035
蒸発熱 (J/mol)	899.1	898.3
定圧比熱 (J/mol K)	19.7	19.5
定容比熱 (J/mol K)	11.6	11.6
エントロピー (J/mol K)	34.9	16.1
粘性 (mPa s)	0.0133	0.0133
熱伝導度 (mW/cm K)	1.0	1.0

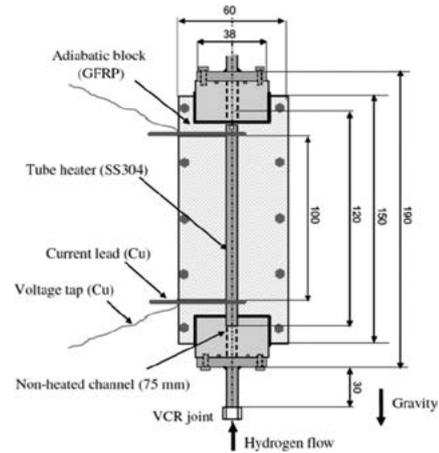


図1 液体水素の強制対流沸騰熱伝達特性試験の発熱試験体の断面図 [13].

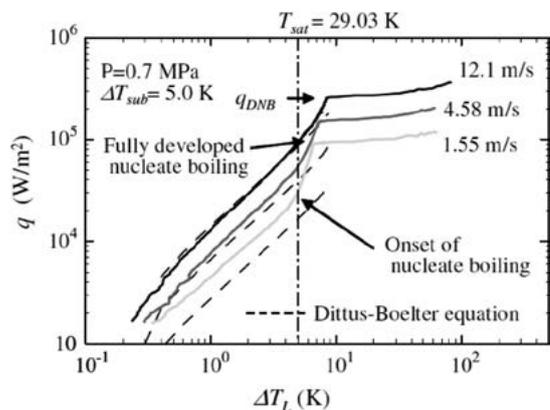


図2 液体水素の強制対流沸騰熱伝達特性試験結果の一例 (0.7 MPa, サブクール温度5.0 K) [13].

- 2. 安全規則、指針を守る
 - 3. 繰り返し訓練する
 - 4. 安全教育を徹底する
- ことが必要である。

特に、液体水素としてその取扱いに留意すべき点としては、非常に温度が低い液体であることに加え、液体水素が気化すると体積が800倍になることが挙げられる。狭い部屋で液体水素がわずかに漏洩した場合、爆発性混合気体の生成や窒息の原因になるため、十分な換気が確保される環境を整備する必要がある。

また、水素は物質の中で最も軽いガスであるが、液体水素が気化したガス水素 (-252.87℃) の密度は、パラ水素として1.3404 g/lであり、0℃の空気密度1.2928 g/lより重いことから、仮に床に液体水素がこぼれ気化したガス水素は、しばらくは床面を漂うことを想定しておかなければならない。例えば、大気圧で30℃の空気密度と-250.48℃のガス水素の密度は同じとなるため、ガス水素はこの温度以下では床面を漂うことになる。

さらに忘れてはならないこととして、超伝導機器の冷媒として使用される液体ヘリウムや液体窒素と違い、液体水素から気化したガス水素は可燃性ガスであるということである。

ガス水素の爆発限界は、空気中で大気圧20℃の時に4~75%、酸素中の同一条件で4~94%と非常に広い範囲であ

る。しかも、水素の最小発火エネルギーは0.02 mJと非常に小さいため、わずかなエネルギーで発火する。このため、操作盤の周辺などには静電気除去用設置板やアース棒などを設置し、液体水素の積み込み設備の周辺などには漏洩検知器を設置する必要がある。

6.2.3 液体水素の供給方法[15]

これまで述べてきたように、液体水素は水素キャリアとして魅力的な形態であるが、日本国内でガス水素を冷凍機によって液化することを考えた場合、現状の冷凍機の効率が高くないことから電力コストの負担が大きいが課題である。一方、海外で液体水素まで製造しタンカーで輸入する取組が国家プロジェクトとして取り組まれている。2016年には、川崎重工業、岩谷産業、電源開発、シェルジャパンの4社でCO₂フリー水素サプライチェーン推進機構(以下、HySTRA)が設立され、「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」が進めている。2030年には、本実証試験を踏まえ、未利用の褐炭から水素を大量に製造・液化し、液化水素運搬船で日本に輸入することが目標とされている。すでに神戸に液体水素受入基地(正式名称:神戸液化水素荷役実証ターミナル)が整備されており、液化水素の貯蔵を行う液化水素タンク(容量:2,500 m³)、基地と船舶で液化水素の荷役を行うためのローディングアームシステム(以下、LAS)、その他設備で構成されている。液体水素受入基地の概略フローを図3に示す。受入基地におけるフローは、LAS接続、気密確認、置換、加圧(またはポンプ駆動)、送液の5段階からなる。液体水素運搬船からの揚荷では、付帯する液体水素用ポンプにより送液し、反対に液化水素運搬船への積荷では、基地タンクのガス相の圧力を上げ、送液する。また、液体水素送液中は大量のボイルオフガス(BOG)が発生するため、BOG圧縮機により圧縮し、BOGホルダーへと貯蔵する。さらにBOGが発生する場合はベントスタックを使用し、大気中に放散する。液体水素スタンドなどのユーザへは、タンクローリー又はコンテナで陸送する。液体水素受入設備での概略フローを図4に示す。ローリーと貯槽、その間の液体水素配管では、外部からの入熱を防ぐために、真空二重の構造となっており、水素ガスを利用する際には、送ガス蒸発器により水素を気化させ、ユーザへと供給する。液体水素の供給手順の大きな流れは、受入基地と同様に主に、フレキシブルホース接続、気密確認、置換、加圧、送

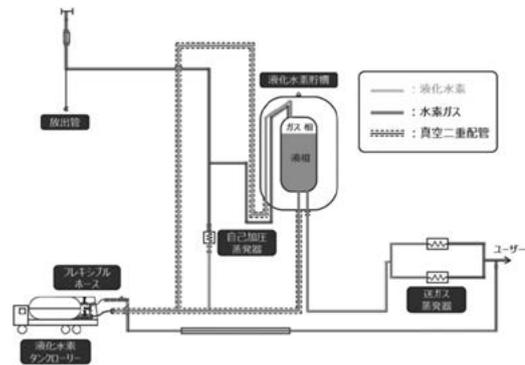


図4 液体水素受入設備での概略フロー。

液の5段階となる。

6.3 液体水素冷却研究

6.3.1 液体水素冷却超伝導機器の研究開発

持続可能社会を実現するための達成目標 Sustainable Development Goals; SDGsのクリーンなエネルギーとして位置付けられる水素に注目が集まっている。この水素を液化すればMgB₂を含む高温超伝導コイルの冷却には最適な冷媒として利用することが可能であり、液体水素でSMES用超伝導コイルを冷却する研究[16-19]などが提案されている。液体水素で冷却する超伝導機器を考えた場合、通電部には十分な防爆構造が必要となり、実験も水素漏洩時の対策が十分取られている環境で実施することが要求される。このため、液体水素の冷熱を利用した超伝導機器に関する実験研究事例は少なく、液体水素冷却超伝導ケーブルのデモ試験[20]や液体水素移送ポンプ用全超電導モータの試験開発[21]などの報告があるだけである。ここで、最近、液体水素を海外からタンカーで国内受入基地に運び、気化した水素ガスをエネルギーとして利用する水素燃焼ガスタービン発電の研究開発が進められている。この発電機の界磁巻線を超伝導化し、液体水素で冷却して高効率でコンパクトな超伝導発電機を開発する取組が行われている[22]。JAXAの能代ロケット場に整備した液体水素試験設備を活用し、液体水素の沸騰熱伝達特性に関する基礎研究[23]や液体水素浸漬冷却下における超伝導線材の通電特性に関する研究[24]を経て、液体水素で冷却した高温超伝導コイルの通電特性を研究するとともに、液体水素に関する安全な試験実績が積み重ねられている。さらに、NEDOの先導研究プログラムにおいて、10 kW級の液体水素冷却超伝導発電デモ機の発電検証に向けた取り組みが進められている。

液体水素冷却超伝導コイルに関する研究としては、液体水素に浸漬冷却したソレノイドコイル[25]やレーストラックコイル[26]の通電試験が報告されており、いずれもJAXAのロケット試験場に整備されている液体水素実験が可能な環境にて実施されている。液体水素を循環させ、超伝導コイルを間接冷却する研究は、JSTの先端的低炭素化技術開発事業(ALCAプロジェクト)で実施された。図5に示すように、液体水素冷却SMESと水素エネルギー貯蔵を組み合わせたAdvanced Superconducting

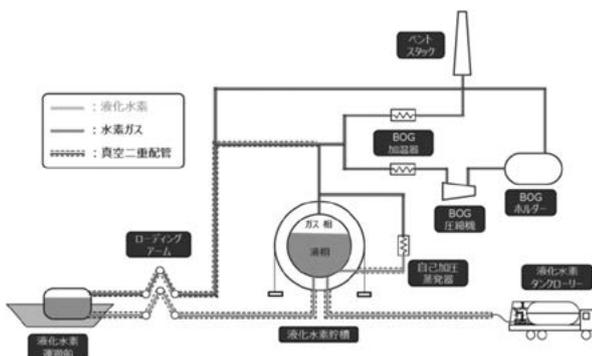


図3 液体水素受入基地の概略フロー。

Power Conditioning System (ASPCS) と呼ばれる新しい電力貯蔵および安定化システムの提案[16]である。このASPCSのモデル検証実験として、10 kJの8個のBi2223ダブルパンケーキコイルが液体水素バッファータンクの下でのサーモサイフォン方式によるラインを通る液体水素の流れによって伝導冷却[27]された。図6にBi2223コイル写真と平面図、図7に試験装置の写真をそれぞれ示す。伝導冷却のために各コイル表面にはスリットを入れた純アルミニウムプレートが貼り付けられている。スリットはACロスの低減が目的であるが施工性を良くするために、磁場の低いコイル外周付近はスリットを入れておらず、1ターンループができないようにスリット入りアルミ板2枚(Two semicircular sheets)でコイルの片面をカバーしている。岩谷産業株式会社の中央研究所において、液体水素による

循環冷却試験が実施され、Bi2223コイルには200 Aまで正常に通電できることが確認された。さらに、MgB₂ラザフォード導体を用いたダブルパンケーキコイルが製作され、液体ヘリウム中での浸漬冷却によるコイル励磁試験[28]を経て、Bi2223コイルと同様なサーモサイフォン方式による液体水素循環による間接冷却で、容量10.5 kJのMgB₂コイルの通電試験が行われ、定格の600 A通電に成功している[29, 30]。

6.3.2 液体水素温度域における高効率冷却

従来の気体冷凍方法とはまったく異なる、ある種の磁性体に磁界の変化を与えると温度が変わる現象(磁気熱量効果)を利用した冷凍・冷却技術(以下、磁気冷凍技術という)がある。気体の圧縮膨張による冷却システム(気体冷凍)と磁気冷凍の冷却動作メカニズムを図8に比較して示す。近年、磁気冷凍に適した冷凍サイクルや磁性材料の新規開発により、室温付近や液体水素温度域(-253℃)で動作する磁気冷凍システムの開発が国内外で進められており、わが国では国家プロジェクトとしても取り上げられ成果が得られている。以下、液体水素温度域における磁気冷凍技術の研究開発[31]について紹介する。

液体水素温度域を対象とした磁気冷凍技術は、水素液化への応用としてNEDOのWE-NETプロジェクトにおいて取り上げられ、さらに水素安全利用基盤技術・革新技術プロジェクトにおいて実施された。水素の液化には水素ガスを20 K付近まで予冷し、さらに凝縮によって潜熱を奪う2つのプロセスが必要となる。排熱温度は室温(300 K)、LNG(120 K)またはLN(液体窒素、77 K)が想定される。液化サイクルを磁気冷凍で実現する場合、AMR(Active Magnetic Refrigeration)サイクルを予冷に、カルノーサイクル(CMR)を水素液化に使用する方法がとられる。CMRでは、予冷された水素ガスを磁性体によって直接凝縮液化する方法が採用される。水素ガスが充填されたヒートサイフォン中に磁性体を設置するシンプルな構造となっており、ガスの相転移を利用するため、きわめて高い伝熱効率が期待できる。AMRとCMRの選択基準は、主として磁性体の格子比熱の大小で決められるが、一般的に20 K領域をはさみ格子比熱が無視できなくなる。図9に水素液化磁気冷凍試験装置の基本構造を示す。定常磁場中に設置されたピストン構造の磁性体を駆動装置によって上下動させることで水素ガスを直接液化し、重力によって下

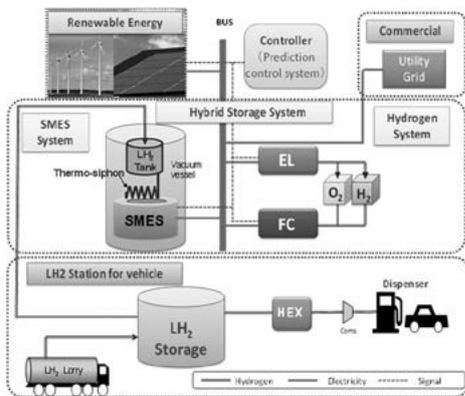


図5 先進超伝導電力調整システム (ASPCS) の概念図。

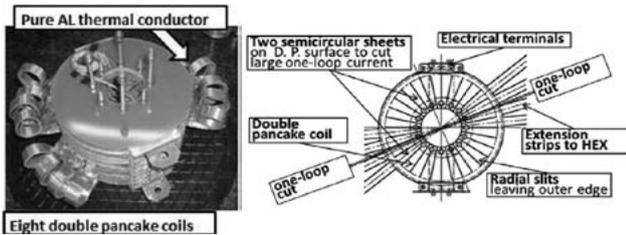


図6 ASPCS用SMESモデルコイル。
a) モデルコイル外観
b) 多層アルミ伝熱板構造

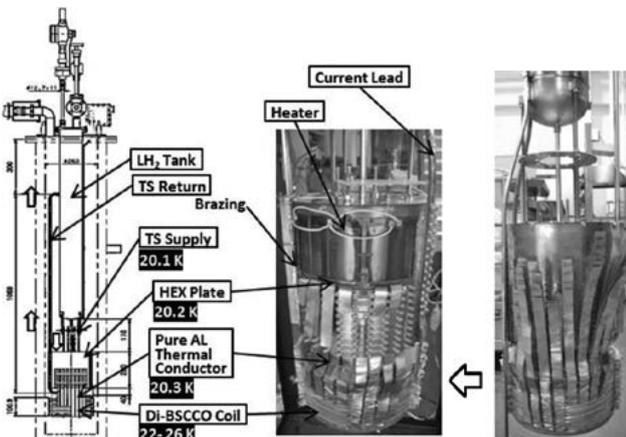


図7 アルミニウム板、クライオスタットなどのアセンブリを備えたASPCS用のSMESモデルコイル。

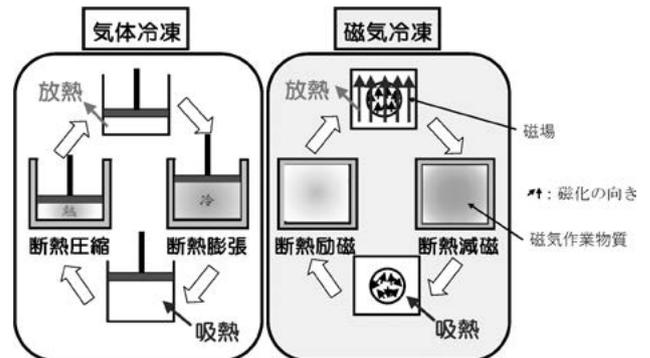


図8 従来技術と磁気冷凍の冷却メカニズム比較。

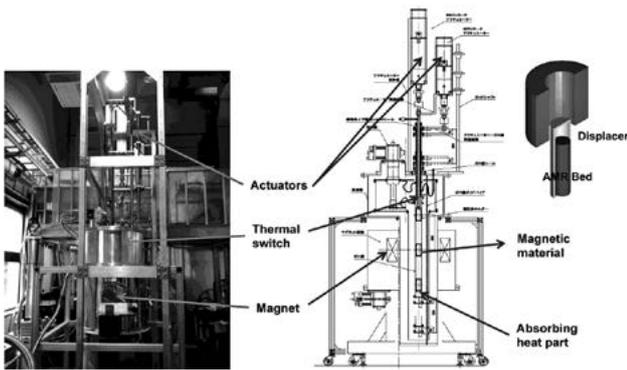


図9 水素液化磁気冷凍試験装置の基本構造。

部の液体水素槽に溜める。上部には機械的な接触による熱伝達機構（熱スイッチ）が設けられており、磁性体からの熱は排熱用熱スイッチを通して4 K機械式GM冷凍機に最終的に排出される。機械式冷凍機と磁気冷凍機を組み合わせることにより、スイッチ一つで水素の液化が可能な構造となっている。使用された磁性体はガーネット構造の $(\text{Gd}_{0.2}\text{Dy}_{0.8})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ である。想定されるカルノーサイクルの冷却温度幅は20 Kを中心に $\pm 2^\circ\text{C}$ であり、6 Tの磁場を用いると20 Kでの吸熱量は0.2 J/gと見積もられる。本装置で使用された磁性体の質量は352 gであったので、設計上は1サイクルあたり最大で約70 Jの冷凍能力（1 Hz作動とすると1日あたりの水素液化量換算で約14 kg）が得られることになる。

2018年度から、JSTの未来社会創造事業・大規模プロジェクトの課題の一つとして、磁気冷凍による革新的水素液化技術が採択され、現在も研究開発が継続中である[32]。この研究開発では、高効率な磁気冷凍技術をコアとして、以下の2つの概念実証（POC: Proof of Concept）研究が設定されている。

POC1：液化効率50%、液化量100 kg/day以上を実現する中。大型高効率水素液化機

POC2：液体水素ゼロボイルオフをめざした小型・省電力な冷凍機

これまでの研究成果としては、磁気作業物質の研究として多数の材料データベースを活用した機械学習により見出された HoB_2 において、従来の HoAl_2 を20 Kで2倍以上大きな磁気熱量効果を得ることに成功している。磁気冷凍システムの研究としては、POC1とPOC2に対応した2種類の磁気冷凍機が開発中であり、 HoAl_2 磁気作業物質をもちいた試験結果で、安定的に20 K以下の生成保持に成功し、AMRサイクルでは初めてとなる水素の液化に成功している[33]。

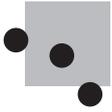
6.4 おわりに

大型高温超伝導マグネットの冷却技術として、液体水素冷却にスポットを当て、液体水素の物性から冷媒としての魅力、取扱いにおける留意点を解説した後、液体水素の冷熱を利用した超伝導機器の研究開発や液体水素温度域での高効率冷凍技術の研究開発動向について紹介した。液体水

素の冷熱を利用した安全で安価な超伝導機器の冷却技術が確立し、核融合炉応用をはじめとした超伝導技術の社会実装が一層進むことを期待している。

参考文献

- [1] T. Mito *et al.*, *J. Phys. Commun.* **4**, 035009 (2020).
- [2] N. Yanagi *et al.*, *Cryogenics* **80**, 243 (2016).
- [3] N. Yanagi *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **17**, 2405076 (2022).
- [4] Y. Narushima *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **17**, 2405006 (2022).
- [5] Y. Onodera *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond* **33**, 4801004 (2023).
- [6] P.C. Michael *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond* **34**, 0600113 (2024).
- [7] 水素エネルギー協会編集：水素エネルギーの事典（朝倉書店，2019）p58.
- [8] 低温工学ハンドブック（内田老鶴圃新社，1982）p216.
- [9] J.M. Astrucet *et al.*, *Cryogenics* 248-250 (1969).
- [10] E.G. Brentari *et al.*, National Bureau of Standards, Technical Note 317 (1965).
- [11] H. Tatsumoto *et al.*, *J. Phys.: Conf. Series* **507**, 022042 (2014).
- [12] 白井康之，塩津正博：低温工学 **55**, 44 (2020).
- [13] Y. Shirai *et al.*, *Cryogenics* **51**, 295 (2011).
- [14] 花田卓爾：低温工学 **15**, 128 (1980).
- [15] 中島康広，前田和真：CDIT **56**, 44 (2021).
- [16] T. Hamajima *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22**, 5701704 (2011).
- [17] T. Shintomi *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22**, 5701604 (2011).
- [18] H. Louie and K. Strunz, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17**, 2361 (2007).
- [19] M. Sander *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**, 1362 (2011).
- [20] V.S. Vysotsky *et al.*, *Phys. Procedia* **65**, 299 (2015).
- [21] 柁川一弘 他：低温工学 **51**, 155 (2016).
- [22] M. Ohya *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **34**, 5201507 (2024).
- [23] Y. Shirai *et al.*, *Cryogenics* **92**, 105 (2018).
- [24] H. Tatsumoto *et al.*, *J. Phys.: Conf. Series* **234**, 032056 (2010).
- [25] T. Matsumoto *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29**, 4600205 (2019).
- [26] Y. Iwami *et al.*, *J. Phys.: Conf. Series* **1559**, 012147 (2020).
- [27] Y. Makida *et al.*, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* **101**, 012028 (2015).
- [28] 駒込敏弘 他：低温工学 **55**, 36 (2020).
- [29] R. Inomata *et al.*, *J. Phys.: Conf. Series* **2545**, 01202 (2023).
- [30] T. Onji *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33**, 5700105 (2023).
- [31] 沼澤健則：日本AEM学会誌 **21**, 34 (2013).
- [32] 沼澤健則，松本宏一：低温工学 **58**, 58 (2023).
- [33] K. Kamiya *et al.*, *Appl. Phys. Express* **15**, 053001 (2022).



小特集 核融合炉のための高温超伝導体開発の現状

7. おわりに

7. Summary

橋爪 秀利

HASHIZUME Hidetoshi

東北大学工学研究科

(原稿受付：2024年7月25日)

高温超伝導体の発見と線材化の技術開発により、絶対温度20 K以上で使用可能な超伝導機器が製作され、冷却の容易さから、将来の発展が大きく期待されている。すなわち、従来の低温超伝導機器の置き換えとして高温超伝導機器を選択した場合のメリットは、(液体ヘリウムに代わる)多様な冷却剤や冷却システムが使用可能となることであり、冷却維持のコストが小さくなるという点が最も大きい。さらに、極低温で高温超伝導体を使用することで、低温超伝導体では不可能な強磁場を発生させるマグネットや、線材断面積の縮小化による軽量でコンパクトなマグネットの製造が可能となる。特に、磁場閉じ込め型核融合炉の設計においては、臨界磁場や電流密度の大きさから高温超伝導体の使用によるプラズマ閉じ込め性能の向上(強磁場化)や、ブランケットスペースの確保(コイル断面積の減少)により設計ウィンドウが格段に広がるというメリットをもたらすことが期待される。このようなことから、現在、革新的な核融合炉の設計においては、高温超伝導体を利用した超伝導マグネットを使用する提案が主流となっている。

高温超伝導体を使用するマグネットの開発においては、低温超伝導体を使用したマグネットの開発で直面した課題が予めわかっていることから、比較的早い段階から対応策の研究・開発が進められてきている。広い領域に強磁場を発生させるためには、当然、大きなアンペア・ターンが必要となり、結果として、非常に大きな電磁力が発生することから、耐電磁力構造材料のさらなる強高度化だけでなく、超伝導線材自身の高強度化が必要となってくる。この意味で、現在、核融合炉用の超伝導マグネットの設計で使用されているREBCO線材は強度に優れ有望である。ただし、低温超伝導線材の形状とは大きくことなることから、交流損失の低減や、柔軟な導体形状への対応など、今後のさらなる技術開発・研究が必要である。

高温超伝導体は動作温度が比較的高くても超伝導性を示すことから、極低温時に大電流を通電した状態で一部の領域で例えば温度上昇が発生し、臨界電流値を超えた状態に至っても、比熱の増加のため温度上昇領域が局所的に留ま

る。そのため、低温超伝導体の場合のように温度上昇領域(常伝導部)が超伝導線材の長手方向に一気に広がらず、異常電圧として検出されにくい。その結果として、局所的な温度上昇により異常電圧が検出されたときには、高温超伝導導体が焼損するような温度に達してしまうことが危惧される。すなわち、強磁場発生のために、極低温で稼働している超伝導マグネットにおいてクエンチ検出に失敗するとマグネットの破壊につながるという一面があり、確実なクエンチ検出とクエンチ保護による信頼性のさらなる向上は、今後の高温超伝導マグネット、特に、核融合炉で使用するような大型マグネットの実用化においては重要な課題である。

DT反応を利用した核融合炉で使用される超伝導マグネットに対しては中性子照射の影響を考慮しなければならず、中性子照射による超伝導体の劣化防止や放射化防止のために超伝導体の材料に対する制限が加わり、厚さの大きな中性子遮蔽領域が必要となれば、当然ながらマグネットの大型化へと繋がり、経済性の低下をまねくことになる。また、高エネルギー中性子は構造材の照射劣化を引き起こすことから、炉内構造物の保全活動が不可欠となる。そのための空間を確保する必要があり、マグネットの形状と配置に対して制限が加わる。この制約条件を緩める新しい核融合炉の設計を可能とさせる方法としてマグネットの分割化が考えられ、実現のためには高温超伝導マグネットが必須である。本小特集でもその開発の現状が示されているが、実用化のためには、接合・冷却・クエンチ保護などさらなる技術的進展が必要である。

このように、核融合炉に高温超伝導体を使用したマグネットの実用化には、まだまだ解決すべき課題が多い。将来、核融合炉マグネットにより適した高温超伝導材料が開発されることも期待したいが、低温超伝導体の発見・開発においても現状で商用に使用されている低温超伝導線材に使用される材料がNbTiとNb₃Snの2種類であることから、画期的な核融合炉用の高温超伝導線材が開発される可能性は未知数であり、多様なアプローチで問題解決を図ることが必要である。

今後、核融合炉の研究開発が進展し、プラズマ閉じ込めの性能も含め、核融合炉の性能が向上されることが核融合炉の実現には不可欠である。そのキーとなる技術が、核融合炉の条件下において、クエンチ発生時にもマグネットを損傷させることなく磁気エネルギーを解放することができるよ

うな信頼性の高い高温超伝導マグネットのシステムの実現である。このように核融合炉の実現をめざした高温超伝導マグネット開発を牽引することが核融合炉開発に携わる超伝導マグネットにかかわる研究者の責務であり、引き続き研究開発を進めることを決意し、本小特集のまとめとする。

小特集執筆者紹介



やなぎ ながと
柳 長門

自然科学研究機構 核融合科学研究所 超伝導・低温工学ユニット教授。1990年代に大型ヘリカル装置LHDの超伝導マグネットの開発研究と建設に従事した後、2000年代よりヘリカル型核融合炉の設計研究と大電流高温超伝導導体の開発を推進。2021年10月、スタートアップ企業「株式会社 Helical Fusion」を共同創業、2023年4月退社。近未来の核融合発電の開始に立ち会うため、毎日1万歩の歩数達成を課したところ、現実にはスマホ（の健康アプリ）に縛られる？日々。



なかむら まこと
中村 誠

株式会社 Helical Fusion, Chief Researcher. 2007年九州大学大学院博士課程修了。博士（工学）。2023年8月より現職。主な研究分野は核融合炉システム設計。特にヘリカル炉設計のうち中性子とトリチウムが関与する様々な設計課題に従事。所属が変わる度に新しい研究分野に参入してきたが、満を持して(?)超伝導工学に新規参入。最近は娘や妻と一緒に「プリキア」と「ちいかわ」にどハマリ中。



やまだ ゆたか
山田 稜

中部大学 薄膜研究センター 特任教授 上海超電導(術)技術顧問。1981年東京大学大学院工学系研究科 金属工学専攻 修士課程修了。博士（工学）。主に超電導材料、線材の開発、研究に従事。現在、東京、名古屋、上海を行き来し、世界の動きを肌身に感じて、高温超電導の一大産業化に日中の若手と奮闘中。最近、大学近くの侍ロード（馬籠-妻籠）を歩き、しばし、宮本武蔵、芭蕉のたどった風景と歴史に思いをはせ、その後、Emmy賞の“将軍 Shogun”を見て感嘆し、日本人の優れた技術と伝統が続くことを祈念する。



なる しま よしろう
成嶋 吉朗

核融合科学研究所 フュージョンエネルギー産学連携研究室 助教。21世紀に入る頃からLHDプラズマのMHDや磁気島物理の研究に従事していたが、2020年頃からは心機一転して高温超伝導マグネットの研究に従事し始めた。子どもの頃からの夢であった核融合炉発電の実現が本当に近いところまで来ていてワクワクにより夜しか眠れない。その実現へ貢献するため、また、その実現をこの目で見るためには健康と体力が必要だと思いたち最近筋トレに励んでいる。その情熱は米国ソルトレイクシティで開催された国際会議(ASC2024)と同時開催されていたパワーリフティング大会(の会場内)に飛び入りするほどである。力はパワーだ!



おの であ ゆうた
小野 寺 優太

自然科学研究機構 核融合科学研究所 超伝導・低温工学ユニット助教。2018年九州大学大学院システム情報科学府電気電子工学専攻博士後期課程修了。博士（工学）。核融合炉に向けた高温超伝導導体の開発および要素研究に従事。暮らしを少し豊かにしてくれる便利グッズやユニークなガジェットが目がなく散財中。



いとう さとし
伊藤 悟

東北大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻・准教授。2005年東北大学大学院工学研究科博士課程後期3年の課程修了。博士（工学）。主に核融合炉の分割型高温超伝導マグネットの接合・冷却技術開発および液体金属ブランケット・ダイバータのMHD熱流動研究に従事。大学2年次に買った400ccのバイクをいまだに所持しており(25年以上!)、たまに乗りたくなりますが、最近、腰が辛くて長距離運転ができません。



てらお ゆたか
寺尾 悠

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻・助教。2013年東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 博士課程修了。博士（工学）。主に超電導モータや超電導磁気軸受などの回転機に関する研究に従事。現在、某映画の舞台にもなった「埼玉県」に在住。家庭内カーストの階級を少しでも上げようと奮闘中も妻、息子(3歳)、愛犬おむすびが発生する無限ポテンシャル障壁に阻まれ苦戦中。現在に至る。



ひらの なおき
平野 直樹

1963年生。1988年3月大阪大学大学院基礎工学研究科卒業。1998年3月総合研究大学院大学博士課程修了。中部電力(株)電力技術研究所において超電導の電力応用や冷凍機開発に従事後、2019年4月より自然科学研究機構核融合科学研究所教授。低温工学・超電導学会、電気学会会員、博士（工学）。名古屋市内で孫の襲撃に備えつつ、妻子と2匹のわんこ暮らししている。



はしづめ ひでとし
橋爪 秀利

東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻教授。高温超伝導マグネット、液体ブランケット、液体ダイバータ、核融合炉による核変換技術の研究に従事。家では孫守りに従事しています。