

## 着脱式先進高温超伝導マグネット技術 Technique of remountable high-temperature superconducting magnet

伊藤 悟  
Satoshi Ito

東北大学  
Tohoku University

### 1. はじめに

核融合マグネットを高温超伝導化する利点は、一般的には、1) 強磁場化による核融合プラズマの閉じ込めの効率化、2) 核融合プラズマの高エネルギー化にともなう核発熱に対するマグネットの温度裕度（熱的安定性）の確保、にある。これとは別に、高温超伝導体を用いた場合の核融合マグネットの先進設計オプションとして分割型高温超伝導マグネットがある。本オプションは高温超伝導マグネットの高い熱的安定性と、比較的高い運転温度（20 K程度）による冷却電力の低減により、ある程度の抵抗を許容できることに基づくものである。本講演では、これまで提案されている分割型マグネットのコンセプトや、主要技術となる高温超伝導導体の接合技術を中心に紹介する。

### 2. 分割型高温超伝導マグネット

低温超伝導体を用いた着脱可能コイルの構想は1970年代後半から1980年代後半にかけて既に提案されており、米国では $Nb_3Sn$ を用いた着脱可能トロイダル磁場コイル[1]、我が国では $Nb-Ti$ を用いた着脱可能ヘリカルコイル（Heliotron F）[2]の検討がなされている。この後、しばらく後継研究は途絶えたが、2000年に入って、高温超伝導体を用いての着脱可能コイルの構想が、両国において提案され[3,4]、その後、20年近くにわたって、本構想実現に向けた設計・技術開発が行われている。現状では、米国における小型トカマクへの適用[5,6]、我が国におけるヘリカル炉への適用[7,8]を中心に研究開発が行われている。ヘリカル炉の分割型高温超伝導マグネットの設計概念を図1に示す。核融合科学研究所（NIFS）が設計しているヘリカル型核融合炉FFHRシリーズの高温超伝導コイルオプションとして、ヘリカルコイル半ピッチ、あるいは1ピッチの導体セグメントを接続しながらコイル巻き線を行う「導体接続巻き線方式：Joint-winding」と従来構想の半ピッチのコイ

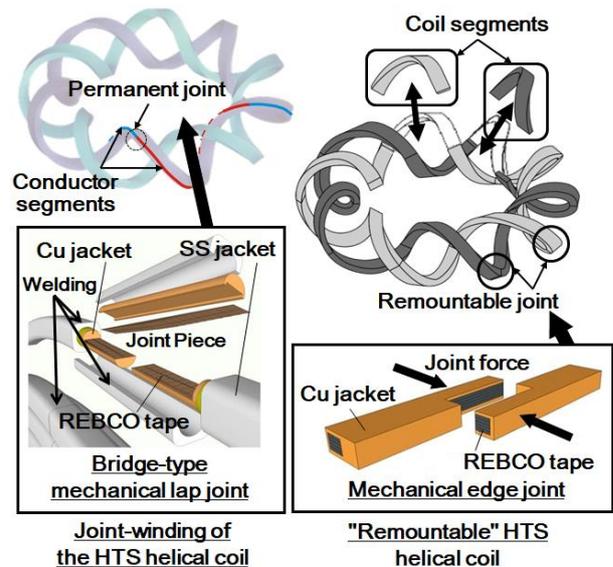


図1 分割型高温超伝導マグネット

ルセグメントを着脱可能とする「コイルセグメント着脱可能方式：Remountable magnet」が検討されている。これらをまとめて「分割型高温超伝導マグネット」と呼んでいる。

### 3. 高温超伝導導体の接合技術の開発

ヘリカル炉の超伝導マグネット用に提案されている高温超伝導導体の一例としてSTARS導体[7]（REBCO高温超伝導テープ線材を金属ジャケット内に単純積層した導体）があり、講演者らを中心にSTARS導体の接合方法の研究開発が行われている。図1に示すように導体接続巻き線方式に対しては、REBCO線材を階段状に配置し、ジョイントピースを用いて、線材の幅広面同士をインジウム箔を介して接合するブリッジ式機械的ラップジョイント、コイルセグメント着脱方式に対しては、REBCO線材の積層体の側面同士をインジウムを介して接合する機械的エッジジョイントが提案されている。図2にこの10年のSTARS導体の機械的接合の接合抵抗率（＝接合抵抗×接合面積）達成値を示す。ブリッジ式ラップジョイントについては、東北大学とNIFSの共同研究で、2013年にFFHR-

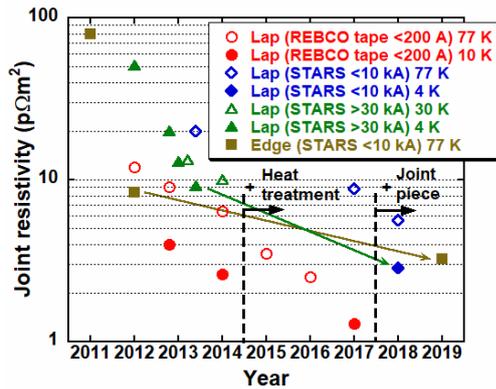


図2 最近10年の接合抵抗率達成値

d1の定格電流の100 kA以上の通電，許容抵抗値を満たす $1.8 \text{ n}\Omega$ （接合抵抗率 $\sim 10 \text{ p}\Omega\text{m}^2$ ）の接合抵抗を達成しており[7,9]，さらに熱処理[8]や一体化ジョイントピース[10]を用いてのさらなる抵抗低減化にも成功している。機械的エッジジョイントについても10 kA級導体でブリッジ式機械的ラップジョイントと同等の接合抵抗を達成しており[11]，今後，大型導体・コイルへの適用研究が期待される。

ヘリカル炉FFHR-d1においては，電磁力によって接合部に最大32–35 MPaの面内せん断応力が発生することが構造解析によって示されており[8]，接合部の機械特性と併せて，議論が必要となる。図3にREBCO線材の機械的ラップジョイントにおける接触抵抗率（インジウムと線材の界面抵抗率）とせん断強度の関係性（77 Kで評価）を示す。インジウムを介した接合の場合，破壊モードは凝集破壊（インジウム内でのせん断破壊）であり，金属ジャケットを溶接接続する導体接続巻き線方式では，変形が抑制され，抵抗増加はわずかである[8]と考えられる。

#### 4. 接合部の品質保証

分割型高温超伝導マグネットの実現に向けて，数千にも及ぶ導体接続部の品質保証（許容できる電気・機械・熱特性の達成）のために，適切な非破壊検査技術を開発することが求められる。まずREBCO線材は，REBCO超伝導体と安定化材金属との間に層間抵抗が存在し，これがメーカーや製造番号によってばらつくことが報告されている。講演者らは，線材選定のための層間抵抗の非破壊検査法として，コンタクトプローブ転流距離法[12]を開発し，線材ごとに異なる層間抵抗の評価を行っている。線材選定の後は，真実接触面積の確保による接触抵抗の低減が必要となるが，X線CTを用いた真実接

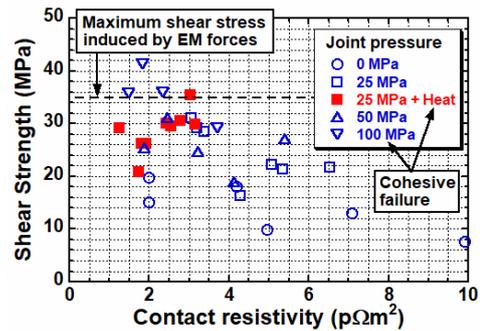


図3 機械的ラップジョイントのせん断強度評価

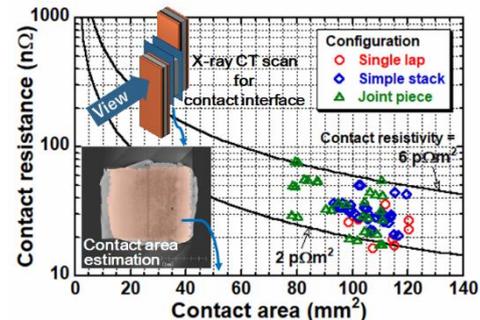


図4 X線CTによる接触面積評価と接触抵抗の関係

触面積の評価[13]にも取り組んでいる。X線CTで評価した接触面積と機械的ラップジョイントの接触抵抗率の関係性を図4に示す。接触抵抗率は $2\text{--}4 \text{ p}\Omega\text{m}^2$ の範囲であり，実際の大型導体接合部の製作現場において接触面積が評価できれば接合抵抗が予測できると考えられる。

#### 参考文献

- [1] J. Powel, et al., *Cryogenics*, **26** (1980) 59–74.
- [2] K. Uo, et al., *Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Plasma Confinement and Heating in Stellarators*, (1985) 687–697.
- [3] L. Bromberg, et al., *Fusion Eng. Des.*, **54** (2001) 167–180.
- [4] H. Hashizume, et al., *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, **5** (2002) 532–536.
- [5] Z.S. Hartwig, et al., *Fusion Eng. Des.*, **87** (2012) 201–224.
- [6] B.N. Sorbom, et al., *Fusion Eng. Des.*, **100** (2015) 378–405.
- [7] N. Yanagi, et al., *Nucl. Fusion*, **55** (2014) 053021.
- [8] S. Ito, et al., *Fusion Eng. Des.*, **136** (2018) 239–246.
- [9] S. Ito, et al., *Plasma Fusion Res.*, **9** (2014) 3405086.
- [10] S. Ito, et al., *Fusion Eng. Des.*, **146** (2019) 590–593.
- [11] S. Sato, et al., *J. Phys.: Conf. Series*, **1559** (2020), 012110.
- [12] R. Hayasaka, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29** (2019) 9000805.
- [13] W. Chen, et al., *Fusion Eng. Des.*, **148** (2019) 111284.