

## 次世代ヘリカル装置をターゲットとした高温超伝導マグネット開発 Development of HTS Magnet Technology for the Next-Generation Helical Device

柳 長門  
Nagato Yanagi

核融合研  
NIFS

### 1. はじめに

核融合科学研究所ではヘリカル型核融合炉 FFHR の設計研究を進めてきた。2017年時点でまとめた100万キロワット級発電炉となる FFHR-d1 の設計においてマグネットに高温超伝導を採用することが基本方針となった。FFHR-d1 は大きさが大型ヘリカル装置 LHD の4倍となる大半径  $R = 15.6$  m に設定し、磁場強度をヘリカルコイル中心で  $B_0 = 4.7$  T とした。その後、サイズを小型化、強磁場化した FFHR-c1 の設計に移行し、 $R = 10.92$  m,  $B_0 = 7.3$  T の設計を進め、ヘリカルコイル巻線則のわずかな変更によりエネルギー増倍率  $Q = 15\text{-}20$  に達する解があることがわかった。現在、新たなターゲットとして送電端出力を10万キロワットとして、LHD の2倍サイズの  $R = 7.8$  m,  $B_0 = 6.6$  T の FFHR-b3 の設計を進めている。また、その前段階として、LHD と同程度あるいは小型の FFHR-a1 の設計を進めている。

### 2. 3種類の HTS 導体開発

次世代のヘリカル型核融合装置 FFHR-a1 のマグネットに高温超伝導 (HTS) 導体を適用するにあたり、現在、内部構造の異なる3種類の大電流導体を並行して開発しており、STARS、FAIR、WISE と名付けている。いずれも、 $80$  A/mm<sup>2</sup> という高い電流密度の実現が要求される。

STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 導体は、多数枚の REBCO 線材を単純に積層して安定化銅ジャケットに収納し、外側をステンレスジャケットで補強した構造である [1]。ヘリカル型核融合炉 FFHR への適用をめざして開発を行ってきたものであり、以前に100 kA 級予備試験体を製作し、温度20 K、磁場5.3 Tにおいて、電流値100 kA を達成した。現在は断面を縮小して20 kA 級で実用となる導体の開発を進めている。断面図を Fig. 1 に示す。ステンレスジャケットにレーザビーム溶接を施した長さ約3 m のサンプルを製作し、液体窒素冷却 (温度77 K)、自己磁場における試験を行ってきた。臨界電流として約4 kA を確認し (Fig. 2(a))、繰り返し冷却による劣化も1%程度であることを確認した (Fig. 2(b))。STARS 導体については、接続巻線の適用を検討しており、ヘリカル1ピッチ長ずつの加工を行ったものを現場において産業用ロボットを用い

て順次繋ぎ合わせていくことで連続ヘリカルコイルを高速に製作することが可能である [1, 2]。

FAIR (Friction Stir Welding, Aluminum alloy jacket, Indirect cooling, REBCO) 導体は、積層した REBCO 線材をアルミニウム合金に入れて導体全体を緩く撚った構造としている。断面図を Fig. 1(b) に示す。多数本の導体サンプルを製作し、液体窒素冷却で試験を行ってきた。当初、臨界電流の低下が見られたが、アルミニウム合金に施す摩擦撹拌接合 (FSW) について最適化を行ったところ、臨界電流の低下が生じなくなった。その様子を Fig. 3 に示す。

WISE (Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes) 導体はステンレス製のスパイラルチューブに REBCO 線材を積層、挿入して導体とし、その柔軟性のもと、まずコイル巻線してから低融点金属で固める仕様である。構造図を Fig. 1(c) に示す。小型コイルサンプルを製作し原理検証を進めるとともに、長さ1 m の短尺導体サンプルを製作して、2 kA の電流値においてもクエンチしないことを確認した。 (Fig. 4)。

いずれの導体についても、今後、ヘリウムガスを用いた冷却 (4-50 K) を行い、大型導体試験装置で最大9 T の外部磁場を印加した条件で通電試験を行う計画である。電磁力の繰り返し印加 (千回以上) を行うことが重要な試験項目となる。この試験を行った後は、長さ数メートルのコイル形状サンプルを製作し、大口径高磁場導体試験装置に装着して、最大13 T の磁場を印加した試験を行うことになる。

### 3. クエンチ保護

いずれの導体についても、万一のクエンチ時にいかに安全にコイルを保護するかは極めて重要な課題である。高温超伝導導体の場合は常伝導転移が生じた場合にそれが伝播せず、局所的にホットスポット温度が上昇する危険性がある。STARS 導体では、従来の抵抗遮断による保護を基本に検討しており、早期クエンチ検出が必要である。FAIR 導体では導体内に共巻きした二次巻線に電流を誘導し、これによる発熱によって導体全体に常伝導伝播を促進し、ホットスポット温度を低減することを検討している。WISE 導体は全体を無絶縁巻線とし、常伝導転移した部分の電流を別の導体に転流させることでクエンチ回避を図ることを検討している。

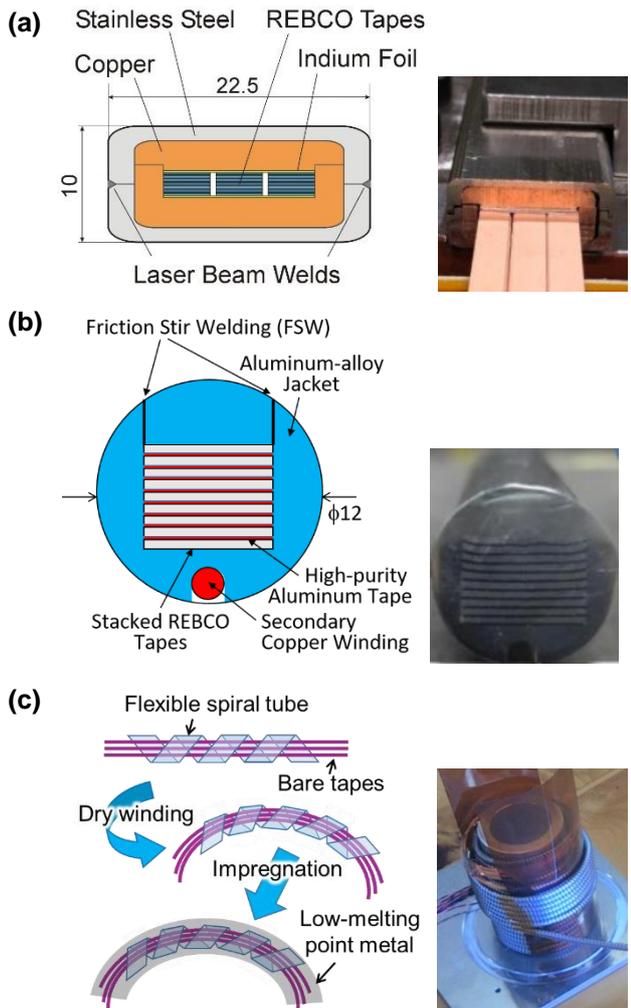


Fig.1 Schematic drawings and photos of three types of HTS conductors: (a) STARS, (b) FAIR, and (c) WISE.

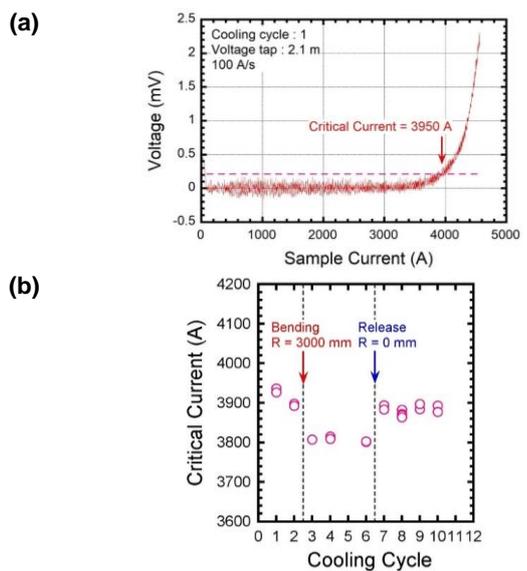


Fig.2 Results of critical current measurement of the STARS conductor sample: (a) Voltage signal obtained over 2.1 m of voltage-tap length as a function of the sample current. (b) Variation of the measured critical current on the cooling cycle.

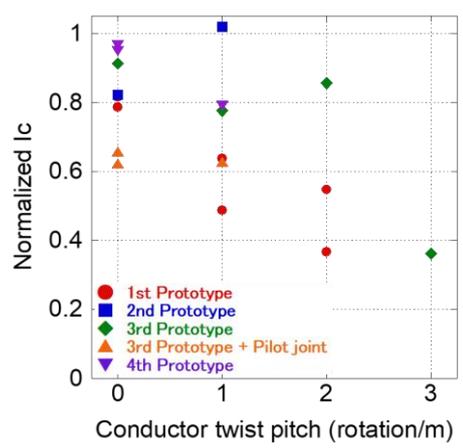


Fig. 3 Results of critical current measurement of the FAIR conductor sample as a function of the conductor twist pitch:

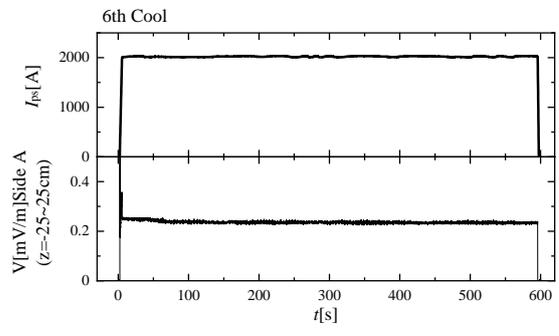


Fig. 4 Waveforms of current and voltage in the test of a short-sample WISE conductor.

参考文献

[1] N. Yanagi et al., J. Fusion Energy **38** (2019) 147–161.  
 [2] S. Ito, et al., Fusion Eng. Des., 146 (2019) 590–593.  
 [3] T. Mito et al., J. Phys. Commun. **4** (2020) 035009.  
 [4] S. Matsunaga et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **30** (2020) 4601405.