

ヘリカル型核融合炉用超伝導コイルの革新的製作方法 — 高温超伝導導体とその接続部の開発 —

柳 長門、伊藤 悟、橋爪 秀利

大型ヘリカル装置(LHD)で得られた優れたプラズマ閉じ込め実験の成果を受けて、「核融合工学研究プロジェクト」では、将来のヘリカル型核融合炉FFHR-d1の設計とそれに向けた要素技術研究を行っています。その中から今回は、巨大な超伝導コイル(電磁石)に用いる先進的な大電流導体とそれを使った従来の常識では考えられないコイルの製作方法についてご紹介します。

FFHR-d1は大きさがLHDの4倍となり、高温プラズマを閉じ込めるためにねじれた磁場を発生するヘリカルコイルは、ドーナツの直径が30mにおよびます。その巻線には最大磁場13テスラ(1テスラは地磁気の約2万倍)がかかる状態において、10万アンペアの電流を流す「超伝導導体」が必要となります。「超伝導」はある特殊な物質を低温に冷やすと電気抵抗がゼロになる現象です。電気抵抗がないことで大きな電流を流せるため、超伝導物

質で作った「線材」や、線材をたくさん束ねた「導体」をコイルの巻線に用いると強力な磁場を発生させることができます。(ちなみに、もし普通の銅線でコイルを巻いて10万アンペアの電流を流すと、凄まじい発熱のため、短時間しか通電できないこととなります。)

さて、巨大で複雑なヘリカルコイルを製作するのはとても難しい技術です。さらに、核融合炉全体の建設工程を考えると、いかにこれを速く作るかも重要です。大きさ4分の1のLHDでは、ドーナツの周りに導体を900回ぐるぐると巻くのに1年半かかりました。したがって、FFHR-d1ではもっと速い方法を模索することが有益です。そこで、らせんの半周ごとに導体を接続しながら製作する方法を提案しています(図1)。これは従来にない革新的な発想ですが、これを可能とするのが「高温超伝導」導体です。

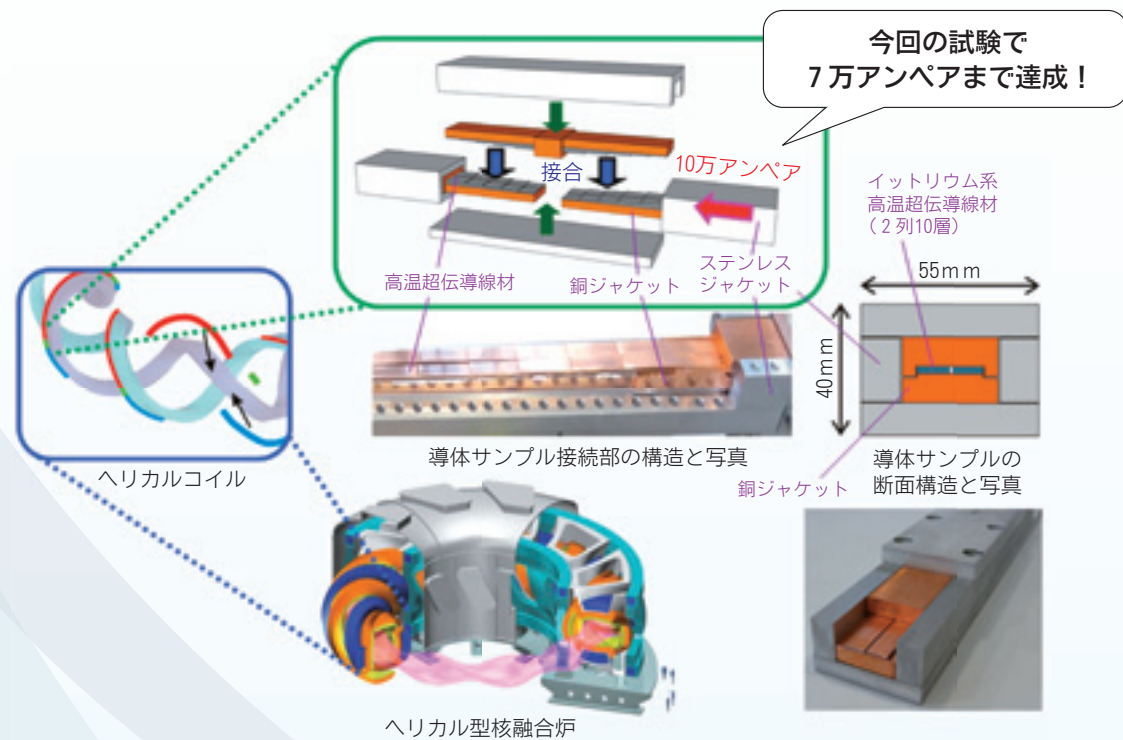


図1 高温超伝導導体を用いたヘリカルコイルの接続方式による巻線方法の概念図。

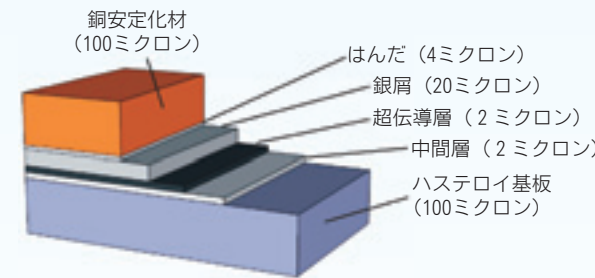


図2 テープ形状をしたイットリウム系高温超伝導線材の構造図。横幅は1センチ。厚み方向にイメージを拡大。1マイクロンは千分の1ミリ。

LHDなど現在稼働している核融合実験装置の巻線導体には、「金属系・低温超伝導線材」が用いられ、液体ヘリウムを注いで絶対温度4度(摂氏マイナス269度)に保っています。これに対して、「銅酸化物系・高温超伝導線材」は、マイナス196度の液体窒素でも超伝導になります。この線材の超伝導層は陶器などと同じセラミックで、1986年に超伝導になることが発見され、世界が驚きました。その後、四半世紀に渡る研究開発により、実用に使える線材技術が進展しました。特に、日本が開発をリードしている「イットリウム系線材」は、高い温度と強い磁場においても大きな電流を安定に流すことができます。また、セラミック自体は薄い膜として強固な金属基板の上に乗っているため(図2)、低温超伝導線材に比べて圧倒的に高い機械的強度を有します。この線材を用いて大電流導体になると、高い温度で使えるため、接続部分で生じる発熱が低温超伝導導体と比べてあまり問題になりません。

今回、この線材20枚を単純に積層して銅とステンレスのジャケットに収め、導体サンプルを製作しました(図1に断面、図3に全体)。ここで、従来の低温超伝導線材で大電流導体を構成する場合、細くて丸い形状をした線材をいろいろなやり方で複雑に撚り合わせてきました。そうしないと電流が線材の間で偏って安定に流れないからです。これは、ロープを作るときに、それぞれの“線材”に均等に力がかかるように撚らないと全体として強くできないことに似ています。このため、高温超伝導線材を用いる場合も、線材同士を撚り合わせるのが基本として一般に考えられています。ただし、高温超伝導線材は図2のようにテープ形状をしているので、撚るためにはいろいろと無理が生じます。一方、この線材は1本ずつが高い温度まで超伝導となるため、もし撚らずに使って電流が多少偏っ

てもスムーズに再配分してくれて大きな問題はないはずと考え、「逆転の発想」として単純積層方式を提案しました。今回のサンプルを試験したところ、絶対温度30度、外部磁場6テスラにおいて3万アンペア以上の電流を長時間安定に流すことに成功したため、この方式が使えると確信しています。また、絶対温度4度、磁場1テスラでは最高7万アンペアに達しました。これは高温超伝導導体として世界に突出した記録であるだけでなく、現在建設が進んでいる国際熱核融合実験炉ITERに用いられる低温超伝導導体(絶対温度4度、磁場12テスラで6万8千アンペア)にも匹敵する性能です。

導体サンプルの一部には、機械的接合部を入れています。これは、東北大学の量子エネルギー工学専攻で研究開発されてきた技術です。これを使うとヘリカルコイルの巻線導体の分割製作(図1)が可能になるだけでなく、最終目標としてはコイル全体が着脱可能となり、今後、他分野への応用も期待できます。今回のサンプルではこの接合技術を用いて電流ループを形成し、変圧器の原理である電磁誘導方式によって大電流を流しました。測定された接続抵抗は核融合炉に適用できる十分に低い値となっています。

工学プロジェクトでは、今後、ヘリカル型核融合炉のコイルに使える10万アンペア級の導体と接合部を試験する計画です。

柳 長門(装置工学・応用物理研究系 准教授)
伊藤 悟(東北大学大学院工学研究科 助教)
橋爪秀利(東北大学大学院工学研究科 教授)



図3 左:大型高温超伝導導体サンプルと総研大生の寺崎義朗君、右:核融合科学研究所超伝導マグネット研究棟の大型導体試験設備へのサンプル装着の様子。