

間接冷却型アルミニウム合金被覆超伝導導体の開発

田村 仁

超伝導コイルの冷却方法にはいろいろな方法があります。大型ヘリカル装置LHDのヘリカルコイルは図1(a)のようにコイルの中に隙間を作って冷媒となる液体ヘリウムを貯めて冷やしています。このようにコイルが直接冷媒に漬かっている方式を浸漬冷却しんしき冷却といいます。また、ポロイダルコイルは図1(b)のように超伝導素線をステンレス製の管に通し、管の中に高い圧力で液体ヘリウムに近い温度のガスを流すことによって冷やしています。強制的なガスの流れで冷やすのでこれを強制冷却

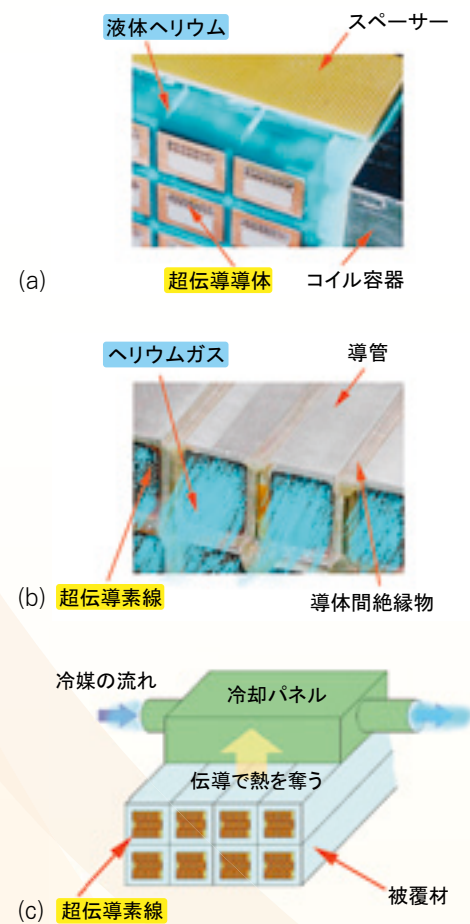


図1 超伝導コイルのいろいろな冷却方法：(a)浸漬冷却方式、(b)強制冷却方式、(c)間接冷却方式

方式といいます。それぞれの方式には特徴があり、超伝導コイルを使う条件によって方式を決めます。このうち強制冷却方式は、機械的に壊れにくく(強度が高い)、高い電圧にも耐えられることから、多くの核融合実験装置の超伝導コイルに採用されています。ただ、コイルがさらに大型化してくると冷却ガスの圧力を高い状態に維持することが難しくなるという問題があります。これは冷媒と超伝導線の通り道が共通なのが原因です。では、図1(c)のようにこれらを別々にしたらどうでしょう。この方式は、超伝導導体が直接冷媒に接触していないので間接冷却方式と呼ばれます。間接冷却では、熱を伝えやすい材料を選択することが重要となります。核融合炉用超伝導コイルへの適用を考えると、コイル内部には強大な電磁力が作用するため、高い強度も求められます。これらを満たす材料としてアルミニウム合金があります。アルミニウム合金はステンレスに比べて40倍熱を伝えやすく、かつ強度も高い、間接冷却に望ましい材料と考えられます。このアルミニウム合金と強磁場中で大電流を流すことのできるニオブスズ(正確にはニオブ3スズ、化学式では Nb_3Sn と書く金属間化合物)という超伝導線を組み合わせた超伝導導体の開発を行っています。

ニオブスズ超伝導線は原料となるニオブとスズを合わせ、最終的に熱処理をすることによって作られます。この超伝導線を用いた超伝導コイルは、熱処理前にコイル形状に巻いて、その後コイル全体を炉に入れて完成させる方法がよく用いられます。しかし、この方法はアルミニウム合金を使用した導体には適用できません。ニオブスズの熱処理温度が $650^{\circ}C$ から $750^{\circ}C$ なのに対して、アルミニウム合金が溶け始める温度は $650^{\circ}C$ 以下です。つまりアルミニウム合金でできた入れ物にニオブと

スズを入れてから熱処理のために温度を上げると、入れ物となっている材料が溶けだしてしまうことになります。これを防ぐには、ニオブスズを先に熱処理してから収めればよいわけですが、間接冷却型の導体とするには蓋をしてお互いが接触した状態で完全に接合しなければなりません。ここに通常の溶接手法を用いると、材料が溶ける温度まで熱を加えるため、中に入っているニオブスズの超伝導性能に影響を与えてしまいます。そこで目をつけたのがFSW(摩擦攪拌接合:英語でFriction Stir Welding)による接合方法です。図2はFSWによる接合イメージを示しており、摩擦によって温度が上がり、柔らかくなった部分の材料をかき混ぜる(攪拌する)ことでくっつけるという新しい接合方法です。この方法はおよそ20年前に英国で発明され、現在航空機や船舶の部品を作るのに用いられており、接合部分の温度があまり高くないことが特徴です。開発はこのFSWが超伝導導体に適用できるのかを確認めることから始まり、試行錯誤を経て、アルミニウム合金にニオブスズ超伝導線を何本か撚り合わせたラザフォードケーブルという状態にして納め、FSWでしっかり蓋ができることが確かめられました。超伝導導体としての性能を確認めるために、図3のような形状の超伝導導体を試作し、製作方法の最適化、電流分布の均一化、導体強度を高めるための改良を進めました。図4は設計通りの通電ができるかを実験で確かめた結果で、外部の磁場の強さに対して超伝導状態で流すことができた電流の大きさ(臨界電流)を示しています。実験結果を示すオレンジ色の丸印が、ほぼこの線に近いところにあり、製作過程で超伝導性能を損なうことなく作ることができたことを示しています。これまでは長さ1メートル程の短い導体試作で性能を高めることに重点をおいてきましたが、この導体を超伝導コイルにするために必要な長尺化と間接冷却による最適な冷却方法の研究を今後進めていきます。

(核融合システム研究系 准教授)

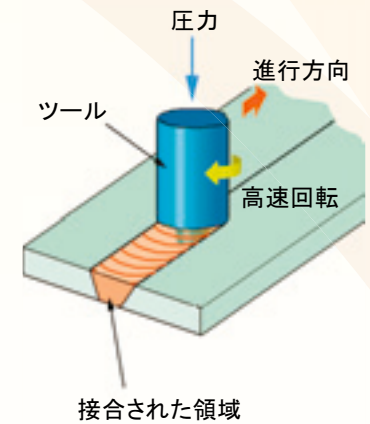


図2 FSWによる接合のイメージです。2枚の板を突き合わせて、先端にドリルのようなものが付いた専用のツールを押しつけて回転させながら移動させます。ツールが当てられている部分は温度が上がり柔らかくなった状態でかき混ぜられ、しっかりと接合されます。

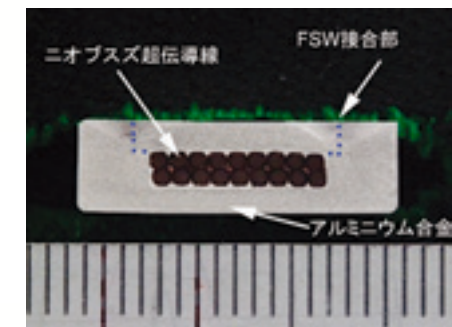


図3 超伝導性能を詳しく調べるために試作した導体です。外形は幅17ミリ×高さ5ミリです。ニオブスズ超伝導線を18本束ねた撚り線ケーブルに時効硬化と呼ばれる処理をすることで硬さを強度を高めたアルミニウム合金が被覆されています。

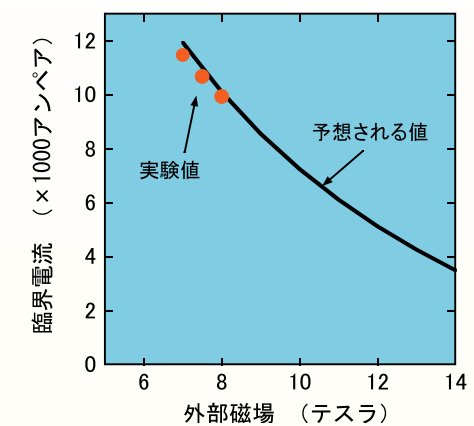


図4 超伝導導体に流すことのできた電流値を表すグラフです。外部の磁場の大きさによって流せる最大値が変化します。12テスラの外部磁場環境では4700アンペアを流すことができると予想されます。