

# 高磁界ハイブリッドマグネット用超電導導体に関する基礎研究 Study on Superconducting Conductor for High Field Hybrid Magnet

東北大・工 濱島 高太郎, 土門 正和, 谷貝 剛, 津田 理  
東北大・金研 西島 元, 淡路 智, 渡辺 和雄

T. Hamajima<sup>1</sup>, M. Domon<sup>1</sup>, T. Yagai<sup>1</sup>, M. Tsuda<sup>1</sup>, G. Nishijima<sup>2</sup>, S. Awaji<sup>2</sup>, K. Watanabe<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Tohoku University

<sup>2</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

## 1. はじめに

物性研究の進展には、高磁界の実験設備の需要が高まっており、その中で、定常高磁界はパルス磁界で実現できない精密物理測定や物性研究を可能にする。効率よく定常高磁界を発生させる装置に、内側に水冷銅マグネット、外側に超電導マグネットで構成するハイブリッドマグネットがあり、定常高磁界の高性能化には、超電導コイルの高磁界化が要である。マグネットに用いる超電導導体は運転時、巨大な電磁力を受けて、超電導特性が劣化するため、それらに耐える構成をを如何にするかが課題である。これまでの研究では、機械的強度に優れた CuNb / Nb<sub>3</sub>Sn を製造する過程で、巻き線を行う前に繰り返し曲げ歪みを経験させることで超電導特性が向上することがわかった[1]。

今回、この素線を用い、超電導線とステンレス線の撚線構成導体を用いたコイルを製作し、強磁場中で臨界電流を測定したところ、導体の臨界電流は単素線から予想される値よりも大きく低下した値となった。

本研究では、臨界電流低下の原因の解明と、撚線導体をはんだで一体化させた場合の効果について検討した。

## 2. 改良コイルとの比較試験

超電導線 3 本とステンレス線 4 本の撚線導体を用いたコイルを製作した。導体の断面図を図 1 に示す。実験では、補強線であるステンレス線の効果を高めるため、導体全体をはんだ含浸したものと、はんだ含浸しないものの 2 種類を用意した。実験は、ハイブリッドマグネットの外側の超電導コイルを用いて 11 T の高磁界中で通電を行い、臨界電流値を測定した。実験結果を図 2 に示す。

予想される臨界電流値と比較すると、はんだ含浸していないコイルでは大きな臨界電流の低下が確認できたが、導体全体をはんだ含浸したコイルでは、臨界電流の低下はほとんど起きていないことが確認できた。これにより、導体全体をはんだで含浸し、一体化させることで、導体の特性を改善できていることがわかった。

次に、導体における 2 素線の間にはホール素子を設置し、導体の 3 方向の磁界の変化から各素線の電流の変化を測定した。実験結果を図 3 に示す。

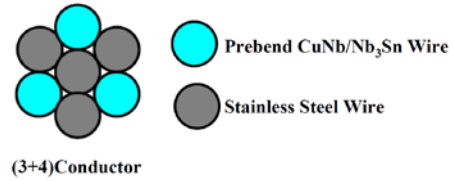


図 1 撚線導体断面

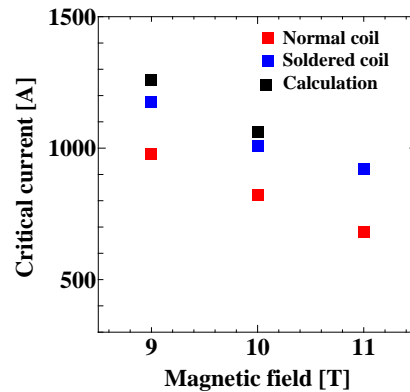


図 2 各コイルの臨界電流値

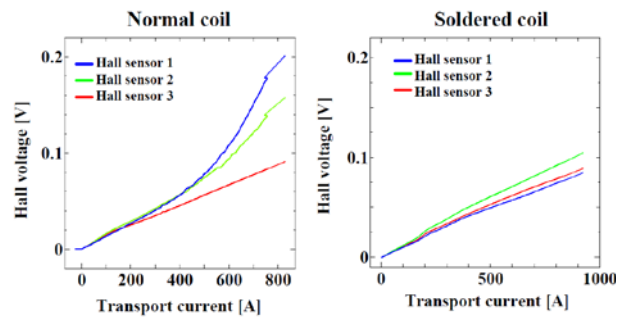


図 3 半田含浸していないコイルと半田含浸したコイルのホール出力

図から、半田含浸コイルでは、どのホール素子も電流に比例した変化となっており、自己磁場による出力のみであることから、導体の電流は均一に流れていることがわかる。一方で、半田含浸していないコイルでは、通電電流が増加するにつれ、電流分布がある電流値以上から変化し、不均一になっていることが確認できる。

### 3. 電磁力による電流分布の変化

図3に示す非線形な変化が起こる電流値と、外部磁界の積から、電流分布が変化しはじめる電磁力を求めることができる。この電磁力は外部磁界を変化させても、ほぼ一定値となっていることが確認できた。そのため、素線に加わる電磁力がある値に達すると、素線は変形しはじめ、変形による影響で電流分布が変化していると考えられる。素線変形によって引き起こされる現象は、高磁界中で素線が移動することで発生する誘導電流、変形時に素線に加わる曲げ歪みによる超電導特性の変化が挙げられる。素線変形による影響は、長さが撚りピッチの半分の両端固定梁を用いて推定できる。素線が全て均一に変形したとし、外部磁場 10T の場合を想定すると、1050A と予想される導体の臨界電流は 900A 程度まで低下する。

### 4. シミュレーション

素線変形による誘導電流と曲げ歪みによる影響を踏まえ、電流分布の変化をシミュレーションした。このときの等価回路を図4に示す。 $R_c$ は転流経路となる電流導入部のはんだ抵抗、超電導線による電圧降下はn値モデルを用いた。各素線の臨界電流は、図3の変化から予想される素線の電流比から、素線の臨界電流は不均一に低下していることが予想されるため、臨界電流値をそれぞれ 252A, 258A, 312A とした。このときのホール出力のシミュレーション結果と、実験結果を比較したものを図5に示す。ただし、実験結果においては、自己磁場による通電電流に比例した部分は取り除いており、電流分布の変化を示す非線形部分のみを示してある。

途中の緩やかなホール出力の変化は誘導電流により、臨界電流付近での変化は不均一な臨界電流低下によってそれぞれ説明できる。臨界電流の不均一な低下は、実際に電磁力の影響を受ける梁の長さが不均一になることにより起こる。梁の長さの不均一性は導体をコイル状にした際に、撚りピッチが不均一になったからであると考えられる。

### 5. まとめ

本研究では、撚線導体を用いたコイルを高磁界中で通電した際に起こる臨界電流低下の原因を解明す

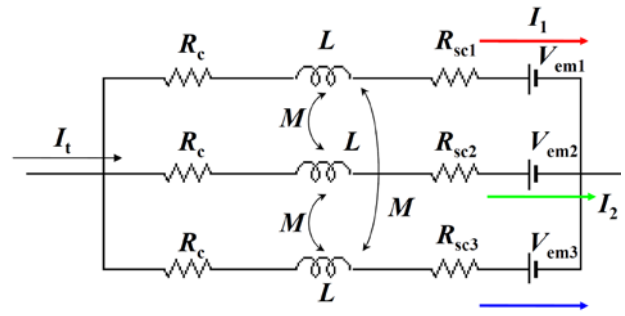


図4 等価回路

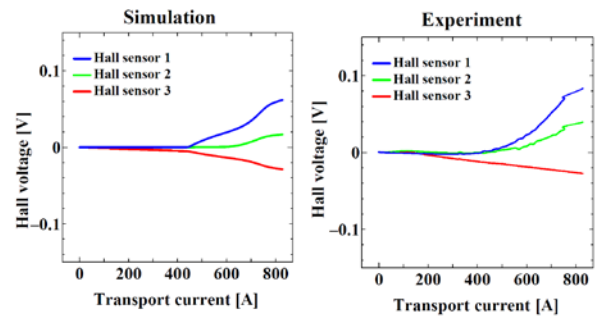


図5 シミュレーションと実験結果によるホール出力の比較

るため、ホール素子を用いて導体内の電流分布測定を行った。実験結果から、電流分布の不均一性と臨界電流低下が確認でき、素線変形による誘導電流と、曲げ歪みによる素線の超電導特性の低下が原因であることが確認できた。また、導体を半田などで一体化させることは、導体の劣化を防ぐのに効果的であることが確認できた。

### 参考文献

[1]K. Watanabe, S. Awaji, G. Nishijima, T. Hamajima, T. Kiyoshi, H. Kumakura, S. Hanai and M. Ono, "Case Study of a 20T-φ400mm Room Temperature Bore Superconducting Outsert for a 45T Hybrid Magnet", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.18, No.2, 2008, pp.552-555