CuNb 補強 Nb₃Sn 線材を用いたラザフォードケーブルの超伝導特性 Superconducting properties for CuNb reinforced Nb₃Sn Rutherford cable

小黒英俊¹, 諏訪友音¹, 淡路 智¹, 渡辺 和雄¹, ¹東北大・金研 H. Oguro¹, T. Suwa¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹ ¹Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

日本の強磁場グループによって、現在の世界にお ける強磁場の標準である、40 T 超となる 50T 級ハイ ブリッドマグネットの開発が進められている[1]。こ の計画の中で、日本の特徴として、大口径超伝導マ グネットを用いて 20 T 発生することを目指してい る。このときに大口径、強磁場という条件から、巨 大な電磁力が超伝導線材に加わることになる。この ため、使用する Nb₃Sn 線材として、CuNb 強化線[2] を用いて機械特性を向上させた素線を用いたラザ フォードケーブルを用いる計画となっている。高強 度 Nb₃Sn 線材を導体化し、機械強度の高いケーブル に大電流通電を行うことで、上記マグネットの実現 を目指している。

大口径 20T 超伝導マグネットに使用する Nb₃Sn 線材は、ひずみによってその超伝導特性が大きく変 化することが知られている[3]。このため、ケーブル 化によって線材が劣化しないかどうかを確認する必 要がある。

そこで本研究では、作製された Nb₃Sn ラザフォー ドケーブルの素線を取り出し、その臨界電流及び機 械特性を調べ、同時に熱処理した素線と比較を行っ た。素線に関しては、状来的に事前曲げ効果[4]乗り 用ができるかどうか調べるため、事前曲げ処理した 線材の特性評価も行った。また、ラザフォードケー ブルを用いてコイルを作製し、磁場中で通電試験を 行い、劣化の有無を調べた。

2. 実験方法

ラザフォードケーブルには 0.8 mm 径の CuNb 補 強ブロンズ法 Nb₃Sn 線材を使用している。Table 1 に素線の諸元を示す。この素線 16 本を束ねて平角状 のケーブルにしてから熱処理を行うことで、ラザ

Table 1. Specification of CuNb/Nb₃Sn wire.

ruble 1. Specification of Curto/1035h whe.	
Bronze	Cu-14wt%Sn-0.2wt%Ti
Wire diameter	0.8 mm
Filament diameter	3.3mm
Number of filaments	6973
Barrier	Nb
Reinforcement material	Cu-20wt%Nb
Reinforcement position	
Cu/Reinforcement/non Cu	20 / 36 / 44
Heat treatment	570-650°C×90 h
	+ 650°C×100 h

フォードケーブルを作製した。熱処理はこれまでの 条件[2]とは異なり、2 段階熱処理を採用しており、 これによって J_cの向上を狙っている。作製したラザ フォードケーブルの外観を Figure 1 に示す。ケーブ ルにすることによって劣化していないことを確認す るため、ケーブルから Nb₃Sn 素線を取り出し、臨界 電流 I_cの測定を行った。ケーブルはφ290 の熱処理ボ ビンで熱処理されるため、曲率を持っていることか ら、この内側と外側、そして折り返しの部分の I_cを 調べて劣化が無いかを確認した。

また、これを引張り応力下でも行い、その機械特 性及び I_cの測定を行った[5]。測定は液体 He 浸漬冷 却で行い、磁場は 18 T 以下の領域で測定を行った。

ラザフォードケーブルの特性をケーブル化した 状態で評価するために、ラザフォードケーブルの通 電試験を行った。ケーブルは1層3ターンのコイル 状に巻き、大きなフープ力を加えるため直径をф268 mm とした。コイルサンプルには、フープ力による 劣化を防ぐため、ステンレスのテープを外側から巻 いて、補強を施した。コイルの写真を Figure 2に示 す。この試験は大口径 8T 無冷媒超伝導マグネット を用いて、4.2 K、8 T において 1500 A までの範囲で 行った。このとき、ステンレステープの表面にひず みゲージを貼付け、電磁力によるひずみの変化を同 時に観測した。



Figure 1. The photograph of the $CuNb/Nb_3Sn$ Rutherford cable.



Figure 2. The photograph of the CuNb/Nb₃Sn Rutherford coil.

3. 結果と考察

Figure 3 に、ケーブルとともに熱処理した素線の I.と、これに事前曲げ処理を施した線材のI.を示す。 この結果より、従来線では14Tで435 A/mm²であっ た臨界電流密度 J。が 475 A/mm²まで向上しているこ とが分かった。事前曲げ効果について詳しく見るた め、Figure 4 に 14 T における Icの事前曲げひずみ依 存性を示す。この図より、約 1%の事前曲げ処理に よって I。は 30%向上することが分かった。この結果 は、従来線だけでなく、2 段階熱処理を行った本線 材に関しても、大きな事前曲げ効果が現れることを 示している。Figure 5 に I_c の引張りひずみ依存性、 及び、引張り応力依存性を示した。この結果より、 残留ひずみは 0.3%であり、残留応力は 200 MPa であ ることが分かった。これは、200 MPa までの引張り 応力では素線のLは劣化しないことを意味する。以 上の素線の基礎特性が、これから示すラザフォード ケーブルの結果に対する基準となる。

Figure 6 にラザフォードケーブルから取り出した、 素線の I_c と J_c の磁場依存性を示した。この結果より、



Figure 3. Critical current and critical current density as a function of magnetic field for CuNb/Nb₃Sn wires with prebending treatment.



Figure 4. Critical current as a function of prebending strain for the CuNb/Nb₃Sn wires.

ラザフォードケーブルの内側、若しくは外側から取り出した素線は、超伝導特性が同じである、つまり、 劣化していないことが分かった。ケーブルの折り返 し部分から取り出した素線は、*I*cが18T以下の磁場



Figure 5. Critical current as a function of applied tensile strain and stress for the CuNb/Nb₃Sn wire



Figure 6. Critical current and critical current density as a function of magnetic field for strands of the CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable.



Figure 7. Critical current as a function of tensile strain for the strand of the CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable in high magnetic fields.

中で4 A 程度劣化していた。Figure 7 には、ケーブ ル外側から取り出した素線の L の引張りひずみ依存 性及び、引張り応力依存性を示した。この結果より、 残留歪みが 0.35%であることが分かった。このとき 応力は 250 MPa まで加えても劣化しないことが分 かった。同時熱処理した線材の結果(Figure 5)より大 きな応力に耐えられるのは、残留ひずみがラザ フォードケーブルの素線の方が大きいことが理由と して考えられる。残留ひずみの違いは、ケーブル化 した状態で熱処理した際に、素線同士が何らかの影 響を及ぼしていることが考えられるが、詳細はよく 分かっていない。

Figure 8 にコイル状に巻線したラザフォードケー ブルの 8 T 磁場中での通電試験結果を示す。この試 験によって、ラザフォードケーブルが 8 T において 1500 A までの安定通電が可能であることが分かっ た。Figure 9 にステンレステープに貼付けたひずみ ゲージの測定結果を示した。この結果から、1500 A 通電時にステンレステープには 0.2%のひずみが加 わることが分かった。これは、ステンレステープが 電磁力の一部を受けていることを示しているため、



Figure 8. V-I characteristic of the CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable at 8 T, 4.2 K.



Figure 9. Strain as a function of current for the CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable in 8 T, 4.2 K.

補強材として働いていることを示している。このため、計算上はラザフォードケーブルに 400 MPa の引 張り応力が加わるが、この一部をステンレステープ が受け持っているため、Nb₃Sn 素線の劣化が無く、 1500 A の安定通電を可能にしていることが分かっ た。

4. まとめ

CuNb 補強 Nb₃Sn 超伝導線材を用いたラザフォー ドケーブルを製作し、その超伝導特性の健全性を調 べた。製作したラザフォードケーブル外側及び内側 から取り出した素線の *I*_c、機械特性を調べた結果、 ケーブルと同時に熱処理した素線と変わらない特性 を持つことが分かった。ただし、折り返し部分の *I*_c は若干の劣化が見られた。さらに、ラザフォードケー ブルをコイル状に巻き、磁場中での通電試験を行っ た。この結果、8Tにおいて1500 A までの安定通電 が可能であることが分かった。このとき、ラザフォー ドケーブルと共巻きしたステンレステープが、電磁 力の一部を受け持つため、大きな電磁力中でも Nb₃Sn ラザフォードケーブルに安定して通電ができ ていることが分かった。

参考文献

[1] K. Watanabe, S. Awaji, H. Oguro, K. Takahashi, K. Minegishi, T. Suwa, Y. Sasaki, T. Kiyoshi, T. Asano, S. Hanai, H. Tsubouchi, and I. Inoue, IEEE Trans. Appl. Supercond. to be published

[2] H. Sakamoto, S. Endoh, Y. Nagasu, K. Wada, A. Kimura, S. Meguro, S. Awaji, K. Watanabe and M. Motokawa IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 1067–70

[3] J. W. Ekin, Cryogenics 20 (1980) 611-624

[4] S. Awaji, H. Oguro, G. Nishijima, K. Watanabe, S. Harjo, T. Kamiyama, and K. Katagiri, Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) S313-318

[5] G. Nishijima, K. Minegishi, K. Watanabe, K. Ohata, K. Nakagawa and G. Iwaki, IEEE Trans. Appl. Supercond. **20** (2010) 1391-1394