

Nb rod 法 CuNb 補強 Nb₃Sn 超伝導線材の機械特性と超伝導特性

Mechanical and superconducting properties of Nb-rod-processed CuNb reinforced Nb₃Sn superconducting wires

小黒英俊¹, 淡路 智¹, 渡辺 和雄¹, 杉本昌弘², 坪内宏和²
¹東北大・金研, ²古河電工.

H. Oguro¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹, M. Sugimoto² and H. Tsubouchi²
¹Institute for Materials Research, Tohoku University
²Furukawa Electric Co. Ltd.

1. はじめに

日本の強磁場マグネットグループでは、次世代の強磁場マグネット開発を協力して行う計画を進めている。この計画の中で、超伝導マグネットとして 50 T ハイブリッドマグネット用大口径 20 T 超伝導マグネット、30 T 超伝導マグネット、そして、2 年後の完成を予定している 25 T 無冷媒超伝導マグネットの開発を行う。[1]これらのマグネットでは、低温超伝導線材である Nb₃Sn 線材をケーブル化して使用することが考えられており、我々は Nb₃Sn ラザフォードケーブルの開発を行っている。

このケーブル用素線としては、これまでに開発してきた CuNb 補強 Nb₃Sn 線材の利用を考えている。[2]これは、Nb₃Sn の超伝導特性がひずみによって大きく変化してしまう問題[3]を克服するためである。CuNb 補強 Nb₃Sn 線材(CuNb/Nb₃Sn)は、従来線に比べて 2 倍以上の応力でも劣化すること無く使用することができる。さらに、CuNb 合金は電気抵抗率、熱伝導率が良いことから、超伝導層を最内層とし、その外側に配置することができる。ただし、CuNb/Nb₃Sn 線材はコストが高いことや、残留抵抗比 RRR が 20 程度[4]と低いことが問題となっている。

特に計画中の大型マグネットでは、蓄積エネルギーが非常に大きくなるため、クエンチ時のマグネット保護の観点から、冷却安定性の問題をクリアする必要がある。このことから、補強材に使用する CuNb には、高い電気導電率が必要となる。

そこで本研究では、CuNb 合金の強度は保持したまま、高い RRR を持つ CuNb 合金の新しい作製法を検討した。そして、この CuNb 合金をこれまでの In-situ 法から Nb rod 法に変更して作製し[5]、これを用いた CuNb 補強 Nb₃Sn 線材を試作した。CuNb 合金及び CuNb/Nb₃Sn 線材の電気的特性、機械特性、超伝導特性を調べ、従来材と比較した。

2. 実験方法

CuNb 合金を Nb rod 法により作製し、CuNb 線材及びブロンズ法 CuNb 補強 Nb₃Sn 線材を作製した。CuNb 合金は、Cu 母材の中に Nb ロッドを多数本埋め込み作製されている[6, 7]。このとき、Nb は Cu に対して 17.4wt% とした。線材は 0.8 mm 径で、670°C × 96h の Nb₃Sn 生成熱処理を施した。条件を合わせるため、CuNb 線材も同様の熱処理を行っている。

CuNb 合金及び CuNb/Nb₃Sn 線材の残留抵抗比 RRR を調べるため、電気抵抗測定を行った。電気抵抗測定は、4 端子法で行い、線材長 10 mm、電圧端子間距離 4mm、通電電流 100 mA で測定した。これをガスヘリウムにより冷却し、室温から 4 K までの温度範囲で電気抵抗を測定した。これを、Nb 若しくは Nb₃Sn の超伝導転移が見える 9 K 及び 18 K 付近での電気抵抗と室温の電気抵抗を比較して残留抵抗比を求めた。

低温強磁場中引張り試験装置を用いて、線材の機械特性及び I_c の引張りひずみ、応力依存性を測定した[8]。40 mm の線材両端をはんだで固定し、これを液体ヘリウム中で引張り荷重を印加し、機械特性の測定及び、Nb₃Sn 線材に関しては I_c の測定も行った。ひずみはひずみゲージを用いて測定し、このときたわみを除去するために線材両側にゲージを貼った。I_c 測定時には、電圧端子間距離は 10 mm とし、磁場中測定では 18T-SM を用いて、16 T までの磁場で 200 A までの電流範囲で測定を行った。

3. 実験結果と考察

図 1 に Nb rod 法 CuNb 合金の電気抵抗の温度依存性を示した。この結果より、RRR を計算すると、64 となった。これは、従来線である In-situ 法で報告されている 20 より大きな値となり[4]、Nb₃Sn 線材には適した安定化材となりうることを示している。図 2

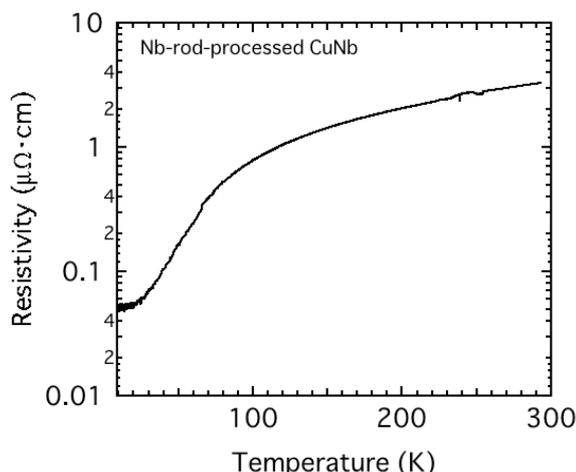


Figure 1 The resistivity of Nb-rod-processed CuNb wire as a function of temperature.

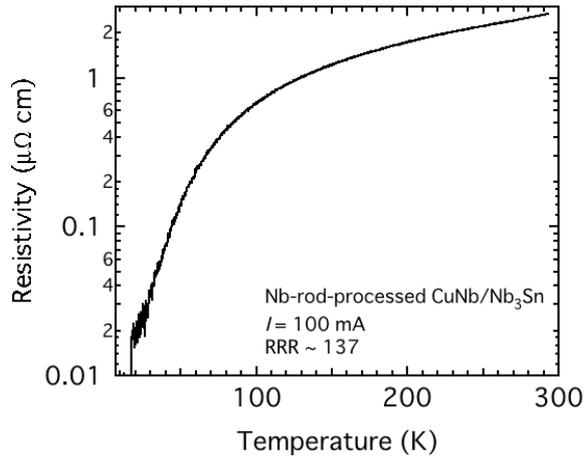


Figure 2 The temperature dependence of the resistivity of the Nb-rod-processed CuNb/Nb₃Sn wire. The residual resistance ratio (RRR) is 137.

には、Nb rod 法 CuNb/Nb₃Sn 線材の電気抵抗の温度依存性を示した。この結果から、RRR を計算すると 137 となった。CuNb 合金が持つ高い RRR があるために、これを複合化した Nb rod 法 CuNb/Nb₃Sn 線材も従来の In-situ 法 CuNb/Nb₃Sn 線材の RRR = 77 より高い値を示した[2]。これより電気抵抗の観点から、Nb rod 法 CuNb/Nb₃Sn 線材は大きな蓄積エネルギーを持つ大型超伝導マグネットに適した線材であると言える。

図 3 に CuNb 合金の応力ひずみ曲線を示した。この結果より、0.2%耐力が 250 MPa となり、In-situ 法の 220 MPa より大きな値を示すことが分かった。これは、Nb rod 法により作製された CuNb 合金の、機械特性が向上している事を示している。図 4 には、Nb rod 法 CuNb/Nb₃Sn 線材の応力ひずみ曲線を示した。このグラフより、ヤング率が 150 GPa、0.2%耐力が 280 MPa であることが分かった。これらの値は In-situ 法 CuNb/Nb₃Sn 線材のヤング率 70 GPa、0.2%

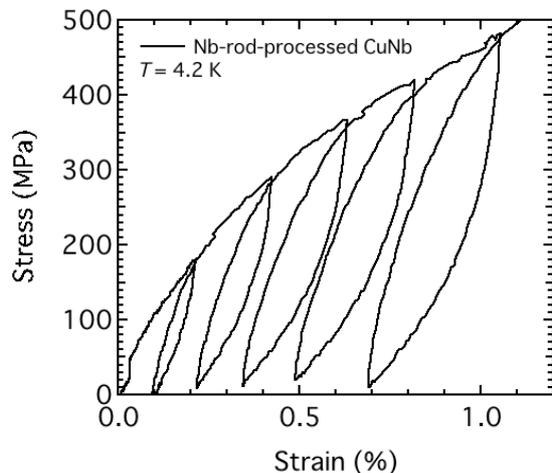


Figure 3 Mechanical properties at 4.2 K for Nb-rod-processed CuNb heat-treated at the reaction temperature of 670°C.

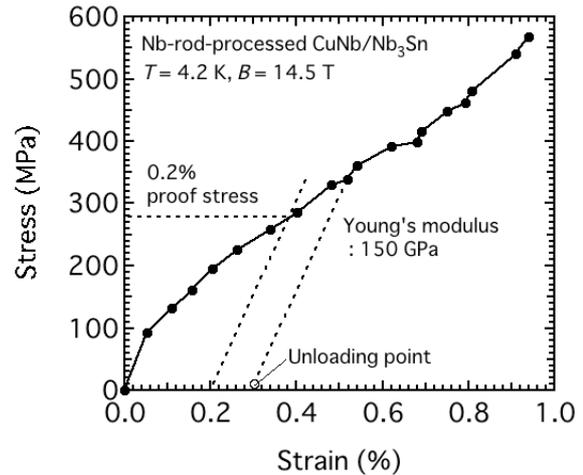


Figure 4 The stress-strain curve of CuNb/Nb₃Sn wires.

耐力 240 MPa より大きな値であることが分かった[2]。つまり、機械特性が従来線材より高い高強度 Nb₃Sn 線材を開発することに成功した。

図 5 には、Nb rod 法 CuNb/Nb₃Sn 線材の臨界電流 I_c と応力の関係、図 6 には I_c とひずみの関係を示した。図 5 より、 I_c は 260 MPa でピークを取り、これより大きな応力下で劣化していくことが分かった。In-situ 法 CuNb/Nb₃Sn 線材の I_c は 220 MPa でピークとなるため、使用できる応力範囲が広がったことになる[2]。これは、CuNb 合金の機械特性が向上したことに由来すると考えられる。図 6 の結果から、残留ひずみが 0.35%、不可逆ひずみが 0.77%であることが分かった。これらの値は従来線と同等の値であった。

以上の結果より、電気的特性、機械特性、超伝導特性の観点から、Nb rod 法 CuNb/Nb₃Sn 線材は大型超伝導マグネットに適した線材であることが分かった。

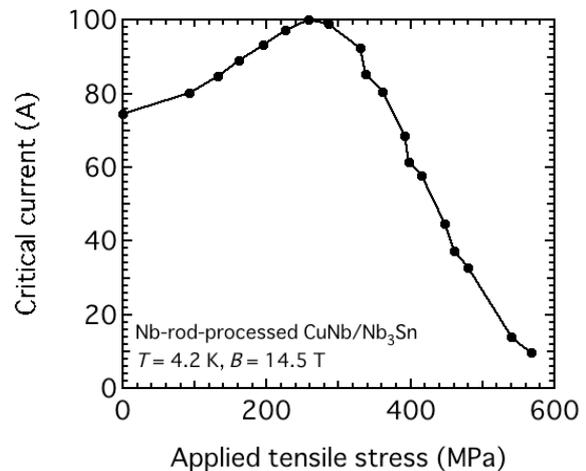


Figure 5 The applied tensile stress dependence of CuNb/Nb₃Sn wires.

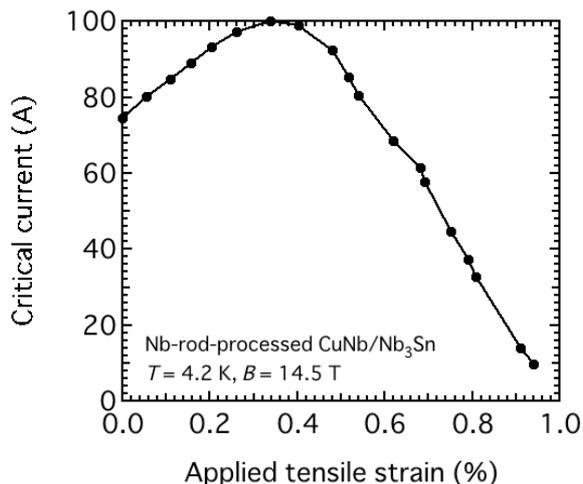


Figure 6 The applied strain dependence of CuNb reinforced Nb₃Sn wires.

4. まとめ

新しい作製法である Nb rod 法を用いて CuNb 合金を作製し、これを用いて Nb rod 法 CuNb 補強ブロンズ法 Nb₃Sn 線材を作製したため、その電気的特性、機械特性、超伝導特性を評価した。電気抵抗測定の結果より、残留抵抗比が大幅に向上したことが分かった。機械特性は CuNb 合金、CuNb/Nb₃Sn 線材ともに向上した。この影響で、臨界電流の応力依存性において、ピークを取る位置が従来線に比べて高応力側へシフトした。これは、より高い応力条件において使用可能であることを示す。I_c のひずみ依存性に関しては、従来線と同程度の特性を示した。以上の結果より、大型超伝導マグネット用線材の開発に成功したと言える。

参考文献

- [1] K. Watanabe et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond.,
- [2] H. Sakamoto et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond.,
- [3] J. W. Ekin, Cryogenics,
- [4] K. Watanabe et. al., Materials Science Forum vol. 308 (1999) 561
- [5] H. Oguro et. al.,
- [6] M. Filgueira, J. N. F. de Holanda, R. Rosenthal and D. G. Pinatti, Materials Research, **4**, 127 (2001)
- [7] M. Liang, Y. Lu, Z. Chen, C. Li, G. Yan, C. Li and P. Zhang, IEEE Trans. Appl. Supercond., **20**, 1619 (2010)