内部補強 Nb₃Sn 超伝導線材およびコイルの臨界電流に及ぼす応力/ひずみ効果Effect of stress/strain on the critical current of internally reinforced Nb₃Sn superconducting wires and coils.

○ 新谷忠泰(岩手大院)、正 片桐一宗(岩手大)、正 笠場孝一(岩手大)、正 正路良孝(岩手大)
高谷竜也(岩手大院)、西島元(東北大金研)、渡辺和雄(東北大金研)

Tadahiro ARAYA, Kazumune KATAGIRI, Koichi KASABA, Yoshitaka SHOJI,
Ryuya TAKAYA (Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka)
Gen NISHIJIMA, Kazuo WATANABE (Tohoku University)

Key Words : Nb₃Sn, Wire, Coil, Compressive stress, Reinforcement, Critical current

1. 緒言

超伝導線材をマグネットコイルに応用するにあたり、線材には運転時に軸方向引張りそして横方向圧縮力によりひずみが生じ、線材の超伝導特性とくに工学的に重要な臨界電流 I_c に大きな影響を及ぼす。この I_c に及ぼす応力/ひずみ効果は高磁場になるにつれて大きくなり、重要な問題となる。

本研究では、このローレンツ力により生じるコイル軸方向、つまり線材横方向の圧縮力に注目した。これまで、一般に引張に比べ圧縮は軽視されているが、マグネットの発生磁場を 30T とすると 20~40MPa と無視できない大きさの軸方向圧縮応力に加わる。そこで、最近開発された高強度の Cu-NbTi 補強 Nb₃Sn⁽¹⁾ 線材を用いてコイルを作製し、機械的に加えられた軸圧縮荷重下での臨界電流とコイルのひずみに及ぼす補強の効果について調べた。また、線材の臨界電流特性も調べ、両者を比較した。

2. 実験方法

2.1 試料

超伝導線材として Cu-NbTi 補強 Nb₃Sn 線材および比較のための Cu 安定化 Nb₃Sn 線材を用いた。その仕様を Table 1 に示す。

コイルは巻内径 16.1mm、巻外径 28.5mm、巻高さ 5.0mm、フランジ外径 29.9mm、ターン数 21、層数 6 とし、反応熱処理後エポキシ樹脂で含浸した。SUS316L 製のボビンの胴部を削り出して除去し、コイル上下にはフランジがついたまま試験した。

Table 1 Specification of sample

Superconductor	Cu-NbTi/Nb ₃ Sn	Cu/Nb ₃ Sn
Diameter (mm)	1.00±0.01	1.00±0.01
Matrix ratio	Cu/reinforcement/Nb ₃ Sn 26/24/50	Cu/Nb ₃ Sn 50/50
Number of filaments	9816±294	7596
Diameter of filaments (μm)	3.5 (nominal)	3.5 (nominal)

2.2 実験装置および実験方法

2.2.1 線材の極低温横圧縮試験

線材の圧縮荷重と変位の関係およびその際に同時に行う I_c の荷重依存性の測定は既報⁽²⁾の装置を用いて、東北大金研の 15T 超伝導マグネットボア中で 4.2K, 14T で行った。圧縮試

験の電流端子間距離は 26mm である。圧子幅は 3mm で、圧縮応力は圧子幅と線材直径から投影横断面を用いて計算した。 I_c は 4 端子法により 5mm の電圧端子間における 1μV/cm の電圧発生により定義した。

2.2.2 コイルの極低温軸圧縮試験

既報⁽³⁾のコイル軸圧縮試験装置を用いて、応力とひずみおよび I_c との関係を 15T 無冷媒型超伝導マグネットボア中で 4.2K, 14T で測定した。コイル高さ中央の外周に沿って 90 度ずつ 4 箇所それぞれ縦、横方向に 1 枚ずつ計 8 枚のひずみゲージを貼った。圧縮応力はエポキシ樹脂を含むコイル断面を用いて計算した。 I_c は 4 端子法により測定し、0.1μV/cm の電圧発生により定義した。

2.2.3 コイルの縦断面観察

試験後のコイルをエポキシ樹脂で固め、縦に切断し断面を光学顕微鏡で観察した。

3. 結果および考察

3.1 線材の極低温横圧縮試験

Fig.1 に 4.2K, 14T で 2 種類の線材の横圧縮試験により得られた I_c -横圧縮応力曲線を示す。 I_c が負荷前の値 I_{c0} に対し 10%劣化する応力をみると、補強なし線材では 80MPa、補強線材では 150MPa 程度と補強による違いがみられる。また、除荷した点(solid symbol)の I_c を見ても、補強なし線材では 90MPa ですでに不可逆になっているのに対し、補強線材では 200MPa まで可逆的であった。それらのことから考えて、Cu-NbTi による補強は線材の横圧縮に対して I_c 劣化を抑える働きがあることがわかる。

Fig.1 Compressive stress dependence of I_c/I_{c0} in wires

3.2 コイルの極低温軸圧縮試験

Fig.2に4.2K,14Tでの2種類のコイルの軸圧縮試験により得られた I_c -軸圧縮応力曲線および比較のため Fig.1の線材の結果を示す。どちらのコイルも25MPa程度まではほぼ同程度の劣化がみられるが、それ以上の応力では補強線材コイルの方が少しゆるやかな劣化となっている。線材の場合と比較してみると、コイルの方が明らかに劣化が大きい。これは、コイルにおいてはエポキシ含浸による熱拡散の抑制、自己磁場の影響の他に、線材間の交差を含む巻き線の不均一性により局所的に高い応力/ひずみの部分が I_c を支配しているためと考えられる。

Fig.2 Compressive stress dependence of I_c/I_{c0} in coils

Fig.3にCu-NbTi/Nb₃Snコイル、Fig.4にCu/Nb₃Snコイルの軸圧縮応力と軸方向ひずみの関係を示す。それぞれのコイルにおいて、ゲージの位置によりひずみの大きさおよび挙動は大きく異なった。補強線材コイルでは1a,3aが小さく2a,4aが大きく、補強なし線材コイルでは1a,2aが小さく、3a,4aが大きいという傾向があった。ゲージの位置による違いについては、以下で述べる巻き線の不均一性の影響が考えられる。2つのコイル間のひずみ挙動の大きな違いは、コイルそのものの上下面間の平行度、巻線、熱処理、エポキシ含浸時の残留ひずみがボビン胴部の削り出しによって解放された結果生じたなど全体に大きな影響を与える因子とも関係しているのではないかと考えられる。

Fig.3 Stress-strain curves in Cu-NbTi/Nb₃Sn coil

Fig.4 Stress-strain curves in Cu/Nb₃Sn coil

3.3 コイルの縦断面観察

Fig.5にCu/Nb₃Snコイルの縦断面写真を示す。写真左が4a、右が2a部分にあたる。右側には巻き始めの線を外に導き出すための溝があり、全体に巻き乱れが生じている。補強線材コイルの方もほぼ同じ状態であった。本実験結果の範囲では巻き乱れのない方がひずみが大きく出る傾向がみられた。また、巻き乱れの生じている方では、ひずみが小さく出たり、一旦引張ひずみが出たりと不規則な挙動を示していた。

Fig.5 Longitudinal section of Cu/Nb₃Sn coil after test

4. 結言

- 1) 軸方向圧縮試験により発生するコイルのひずみは円周上の位置によって大きく異なる。
- 2) 線材、コイル共にCu-NbTiによる内部補強は線材横方向に圧縮力が加わる場合の I_c 劣化の低減に有効である。
- 3) マグネットの発生磁場が30Tで想定される20~40MPaの圧縮応力では補強あり、なし、いずれの線材においても I_c は可逆的であり、軸圧縮の影響は10%未満である。

参考文献

- 1) K. Miyoshi et al, Proc. MT-18, Morioka, (2003), 1D-p55; to be published in IEEE Trans. Supercond.
- 2) K. Kamata et al, Proc. 11th Int. Conf. Magnet Tech., (1989), 1231
- 3) 高橋弘紀 他, 東北大金研強磁場センター平成12年度年次報告, (2000), 41-44