

Nb₃Sn 超電導燃線導体における事前曲げ歪み効果

The prebending strain effect on Nb₃Sn superconducting cabling conductor

古河電工 坪内 宏和、杉本 昌弘
東北大・金研 西島 元、淡路 智、渡辺 和雄
H. Tsubouchi¹, M. Sugimoto¹, G. Nishijima², S. Awaji², K. Watanabe²
¹ Furukawa Electric Co., Ltd.
² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

大口径、高磁界超電導マグネット製作には大電流、高強度の導体が必要である。反応済みのNb₃Sn超電導線は高磁界超電導マグネットに適用されるが、機械的な強度に欠けるため、通常、マグネット巻線を行ってから反応熱処理を行う。しかし、線材内部にCuNbなどの強化材を内包した強化型Nb₃Sn超電導線は機械特性に優れ、線材段階で熱処理を施した後も巻線作業を行える。これは超電導マグネットの製造において生産性の向上とコストダウンをもたらす。一方、反応熱処理させたNb₃Sn超電導線を常温において、ある一定の曲げ歪みの印加・除去を繰り返すとその超電導特性が大幅に向上し、これを事前曲げ歪み効果と呼んでいる。[1]–[3] 高強度Nb₃Sn線材と事前曲げ歪み効果の組合せは、より大きな高磁界超電導マグネット開発に適している。ここでは、大容量、高強度導体開発を目的に高強度Nb₃Sn線材とステンレス線材を複合させた燃線導体を試作し、その事前曲げ歪み効果を評価した。また、これらの成果を利用して100mの7本燃線導体を試作した。

2. 実験方法

2-1. 超電導線

本研究では2種類のブロンズ法Nb₃Sn超電導線を用意した。ひとつは強化型Nb₃Sn線材(IS)であり、もうひとつは強化材を有しない従来タイプのNb₃Sn線材(NR)である。表1に線材諸元および図1に線材断面図を示す。強化型Nb₃Sn線材(IS)はCu-20wtNbで補強されており、補強材は超電導部の外側に配置されている。従来タイプのNb₃Sn線材(NR)は強化型線材との比較を目的に製作され、強化型線材の強化部に相当する部分は安定化銅となっている。

これらのNb₃Sn線材は直径270mmのステンレスボビンに巻かれ、アルゴン雰囲気中で943K、345.6ksの条件で熱処理された。

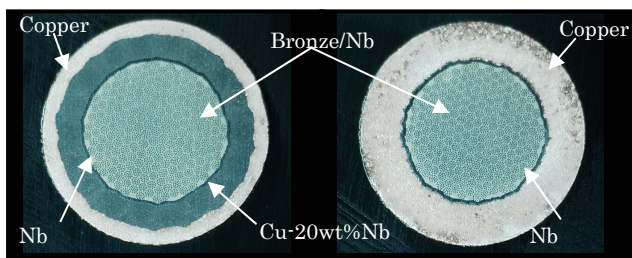


Fig.1 Cross sectional views of the Nb₃Sn superconducting wires

TABLE I PARAMETERS OF Nb₃Sn WIRES

Wire ID	IS	NR
Type	Reinforced type	Conventional type
Bronze	Cu-14wt%Sn-0.2wt%Ti	
Diffusion Barrier	Nb	
Reinforcement	Cu-20wtNb	---
Wire diameter(mm)	0.601	0.598
Filament diameter(μm)	3.3	
Number of filaments	3781	
Volume Fraction		
Copper	0.196	0.535
Reinforcement	0.359	0
Superconductor	0.445	0.465
Heat Treatment	943K for 345.6 ks	

2-2. 事前曲げ歪み処理および燃線導体構造

Nb₃Sn線材の熱処理を実施後、0.8%の事前曲げ歪みを与えるために、直径75mmのプーリーを10回通過させた。また、事前曲げ処理を行わない線材も準備し比較材とした。最終的にこれらの線材は直径300mmのボビンに巻き取られた。

燃線導体は2種類が製作された。ひとつは超電導線だけで構成された3本燃線であり、もうひとつは3本の超電導線と4本のステンレス線で構成された7本燃線である。ステンレス線は超電導線と同じ直径を有している。

燃線導体の断面構成を図2に示す。燃線導体の製作に当たっては、Nb₃Sn超電導線に作用する曲げ歪みが0.45%を越えないような巻線ピッチを選択した。3本燃線は巻きピッチ30mm、7本燃線では巻きピッチ40mmとなっている。

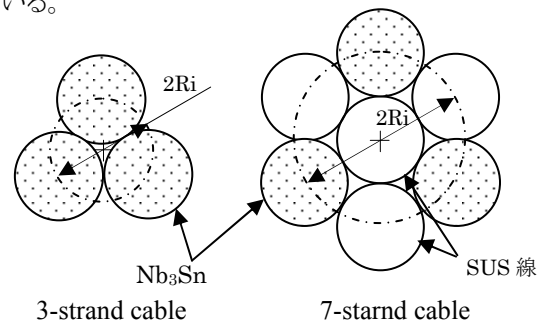


Fig.2 Cross sectional views of Nb₃Sn cabling conductors

2-3.実験方法

各素線を用いて5mの撚線導体を製作し、50mmのサンプルを取り出した。サンプルは撚線形状を維持したまま測定ホルダーにハンダ固定され、液体ヘリウムに浸漬して I_c を測定した。 I_c 測定は4端子法を用い、その定義は $100\mu\text{V/m}$ 、電圧端子間距離は10mmである。

2-4.実験結果

図3、図4に強化型 Nb_3Sn 線材(IS)と従来型 Nb_3Sn 線材(NR)の I_c -B特性を示す。事前曲げ歪み効果はどちらの素線にも発現し、16Tの磁界において、IS線材は事前曲げ歪み効果により I_c が50%増大した。また、NR線材においても37%の I_c 増大が見られた。

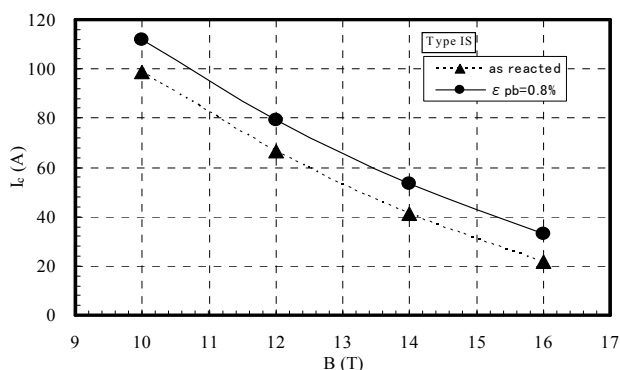


Fig.3 Critical current as a function of magnetic field for high strength Nb_3Sn wire (IS)

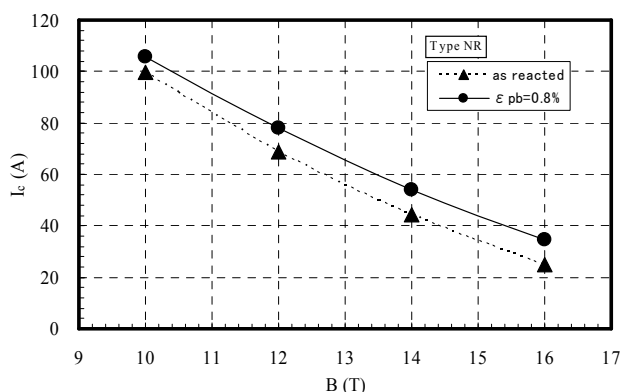


Fig.4 Critical current as a function of magnetic field for $\text{Cu}/\text{Nb}_3\text{Sn}$ wire (NR)

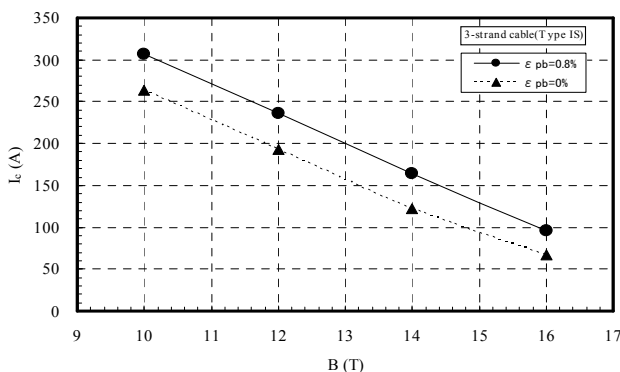


Fig.5 Critical current as a function of magnetic field for 3-strand cable with high strength Nb_3Sn wire (IS)

図5、図6に3本撚線導体の I_c -B特性を示す。強化型 Nb_3Sn 素線(IS)を使用した3本撚線導体においては、測定磁界全体に渡って事前曲げ歪み効果が確認された。特に高磁界での特性向上が顕著であり、16Tの磁界においてその I_c は43%増大し、ほぼ素線単独の特性をトレースしている。一方、従来型 Nb_3Sn 素線(NR)を使用した3本撚線導体においては、事前曲げ歪み効果が現れず、事前曲げ歪みの有無に関係なく、ほぼ同じ特性となった。NR素線単独では事前曲げ歪み効果が確認されており、撚線導体への加工によって発生する素線内部の歪みなどの劣化要因によって、その効果が相殺された推定される。

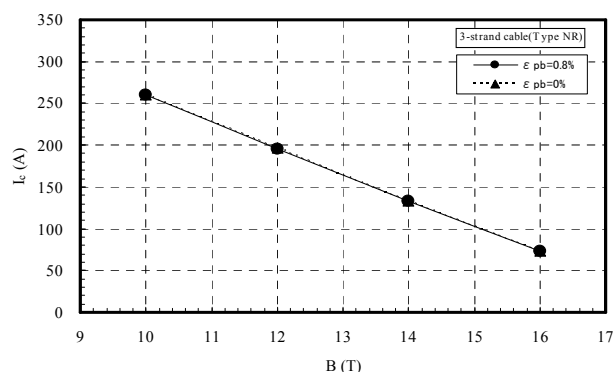


Fig.6 Critical current as a function of magnetic field for 3-strand cable with $\text{Cu}/\text{Nb}_3\text{Sn}$ wire (NR)

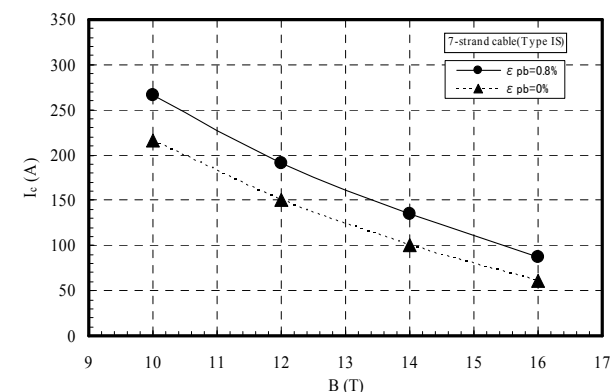


Fig.7 Critical current as a function of magnetic field for 7-strand cable with high strength Nb_3Sn wire (IS)

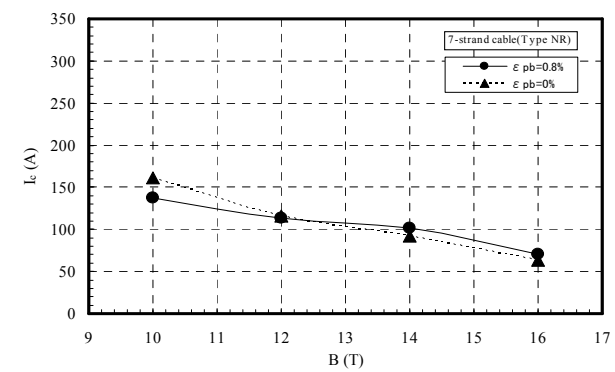


Fig.8 Critical current as a function of magnetic field for 7-strand cable with $\text{Cu}/\text{Nb}_3\text{Sn}$ wire (NR)

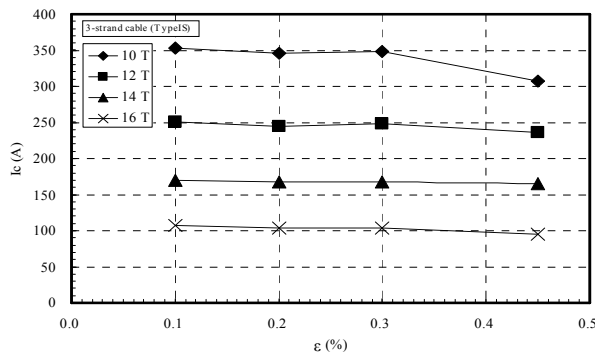


Fig.9 Critical current as a function of the bending strains for 3-strand cable with high strength Nb₃Sn wire (IS)

図 7、図 8 に 7 本撚線導体の I_c -B 特性を示す。強化型 Nb₃Sn 素線 (IS) を使用した 7 本撚線導体は 3 本撚線導体と同様に事前曲げ歪み効果が現れた。16T の磁界において、事前曲げ処理を実施していないサンプルに比較して I_c は 33% 増大した。しかし、従来型 Nb₃Sn 素線 (NR) を使用した 7 本撚線導体においては、事前曲げ歪み効果は現れず、2 種類のサンプル共に I_c が大きく低下している。特に低磁界領域での低下が顕著である。

強化型 Nb₃Sn 線材による 7 本撚線についても同様の傾向は見られ、3 本撚線導体との比較では低磁界領域で I_c の低下が見られる。

I_c 低下の原因調査については今後の課題であるが、強度の小さい従来型 Nb₃Sn 線材に I_c 低下が顕著であることを考慮すると、機械的な作用による過度の歪み印加などが考えられる。強化型 Nb₃Sn 線材はその強度が従来線材に比較して大幅に改善されており、良好な機械特性が I_c 低下を防いだものと推定される。

図 9 は強化型 Nb₃Sn 線材 (IS) を使用した 3 本撚線導体の各磁場における曲げ歪みと I_c の関係を示している。歪みは巻きピッチを変化させて制御し、選択された巻きピッチは 65mm, 45mm, 37mm, 30mm の 4 種類で、それぞれ計算上の曲げ歪みは 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.45% となる。選択された曲げ歪みの範囲において、 I_c の低下は見られなかった。

2-4. 長尺 7 本撚線導体の試作

前記試作結果を基に、直径 0.96mm の CuNb 強化型 Nb₃Sn 線材 (IS) および直径 1mm のステンレス線を用いて 100m の 7 本撚線を試作した。素線の直径以外の違いとしては、Nb₃Sn 線材のフィラメント数であり、合計 11,305 本のフィラメントが埋め込まれている。強化型 Nb₃Sn 線材は 1,000m 製作され、表 1 に示す熱処理が実施された。

熱処理後、Nb₃Sn 線材に 0.8% の曲げ歪みを両振りして 5 回与え、その後、撚線加工した。撚線ピッチは 62mm を採用し、素線に作用する歪みを 0.47% とした。また、マグネット巻線を考慮して、撚線導体の外周にテープ絶縁を施した。

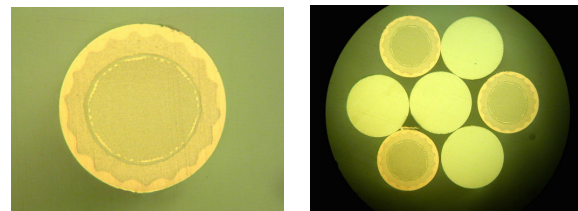


Fig.10 Cross sectional views of the Nb₃Sn superconducting wire and cabling conductor

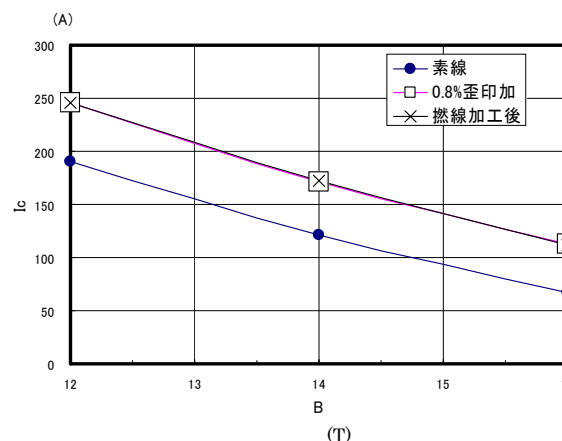


Fig.11 Critical current as a function of magnetic field for 100m 7-strand cable with high strength Nb₃Sn wire

試作した素線および撚線導体の断面写真を図 10、撚線導体の I_c -B 特性を図 11 に示す。 I_c は事前曲げ処理後、撚線加工後にそれぞれ測定された。事前曲げ歪み効果により、Nb₃Sn 線材の I_c は 16T の磁界において 67% の向上となっている。この効果は撚線加工実施後も維持されている。本撚線導体は製造工場の設備を使用して製作されており、この成果により反応熱処理済みの Nb₃Sn 撚線導体の量産を可能にしたと判断できる。

3. まとめ

CuNb 強化型 Nb₃Sn 線材と強化材を有しない従来の Nb₃Sn 線材を用いて 3 本撚線導体及び 7 本撚線導体を試作し、その事前曲げ歪み効果を評価した。その結果、従来の Nb₃Sn 線材を用いた撚線導体では撚り本数が増加すると、事前曲げ歪み効果は見られず、 I_c 低下が見られた。一方、強化型 Nb₃Sn 線材を用いた撚線導体では 3 本撚線導体、7 本撚線導体共に事前曲げ歪み効果が確認された。以上の結果を基に、直径 0.96mm の CuNb 強化型 Nb₃Sn 線材とステンレス線を用いて 100m の絶縁付き 7 本撚線導体を試作し、撚線導体においても事前曲げ歪み効果が維持されている事を確認した。

参考文献

- [1] S. Awaji, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, pp
- [2] S. Awaji, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.43, pp. L709-L711, 2004
- [3] G. Nishijima, et al *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.16, pp. 1220-1223, 2006