



Cu-Nb強化型Nb₃Sn線材の開発

Development of Cu-Nb Reinforced Nb₃Sn Wires

杉本昌弘*
Masahiro Sugimoto

谷口 諒*
Ryo Taniguchi

海老沢宏一*
Koichi Ebisawa

マン カケイ*
Ka Kei Mun

福島弘之*
Hiroyuki Fukushima

中尾健吾*
Kengo Nakao

原 英和*
Hidekazu Hara

廣瀬清慈*
Kiyoshige Hirose

坪内宏和*
Hirokazu Tsubouchi

〈概要〉

機械的応力下での超電導特性が従来のNb₃Sn線材に対し飛躍的に改善されたNb-rod法Cu-Nb強化型Nb₃Sn線材(Cu-Nb/Nb₃Sn線材)を開発した。Cu-Nb/Nb₃Sn線材は、従来のワインド・アンド・リアクト(W&R)法だけでなく、リアクト・アンド・ワインド(R&W)法でのコイル製作が可能であり、プリベンディング処理による歪制御により超電導性能と機械的特性の両方が向上する。更に、高強度化、高臨界電流密度化、平角化、エナメル被覆、小半径曲げ用細線化、撚り線化などの要素技術開発により、製造性に優れた実用的な線材となった。今後、Cu-Nb/Nb₃Sn線材は、高磁場NMR・MRI、粒子加速器、大型核融合炉などの先進的な超電導機器への応用が期待できる。

1. はじめに

合金系NbTi線材とA15系金属間化合物Nb₃Sn線材は、多くの超電導機器で実用化されており、特に、Nb₃Sn線材は、NbTi線材の臨界磁場を超える10 T以上の高磁界を発生する超電導マグネットに用いられる。しかしながら、Nb₃Sn線材は、NbフィラメントをCu-Sn合金と複合化するなどした線材(未反応Nb₃Sn線材)に加工した後、構造設計に応じたNb₃Sn生成熱処理を施す必要があるなど、Nb-Ti超電導線材とは異なる要素技術が必要である。更に、Nb₃Sn生成熱処理後の線材(反応済Nb₃Sn線材)は、機械的に脆いだけでなく、外部歪に対して超電導特性が変化するので¹⁾、通常、未反応Nb₃Sn線材をコイル形状に巻線後、Nb₃Sn生成熱処理を施すワインド・アンド・リアクト法(W&R法)が使用される。更に、強磁場化や大型化によるマグネットの高性能化のため、強大な電磁応力下での通電特性の向上が要求されるため、Nb₃Sn素線自体の高強度化やNb₃Sn素線を撚り合わせた導体の開発が必要となる。

古河電気工業株式会社は、東北大学殿との共同研究により、従来のIn-situ法Cu-Nb合金とは異なる新しい手法(Nb-rod法)で製造するCu-Nb複合材²⁾で強化したNb₃Sn線材(Cu-Nb/Nb₃Sn線材)を開発した^{3)~5)}。Cu-Nb/Nb₃Sn線材は、これまで実用化が困難だとされてきた反応済Nb₃Sn線材をコイル巻線するリアクト・アンド・ワインド法(R&W法)において、後述する事前曲げ歪印加処理(プリベンド処理:Pre-bending

treatment)^{6)~8)}を施すことにより、高応力下での超電導特性の向上を実現した。我々は、R&W法に限らずW&R法が使用される多様なNb₃Sn超電導コイルにおける要求特性を実現するために、Cu-Nb/Nb₃Sn線材の高臨界電流密度化、高強度化、平角化、エナメル絶縁、小径曲げ、導体化における要素技術開発を実施した^{9)~18)}。本稿では、これまでのCu-Nb/Nb₃Sn線材の開発成果と、今後の展望について述べる。

2. Cu-Nb強化Nb₃Sn線材の特徴

2.1 Cu-Nb強化Nb₃Sn線材の構造^{5), 10)}

Nb-rod法Cu-Nb/Nb₃Sn素線(直径0.80 mm)の構造を、図1(a)に示す。Cu被覆Nb単芯線を複数本Cu母材に埋設された構造を有するCu-Nb複合材が、Nb₃Snフィラメント群の周囲に配置されている。Cu-Nb複合材中のサブミクロンサイズ以下のNbフィラメントは繊維強化機能を有し、Cu母材は安定化材として機能する。Cu-Nb/Nb₃Sn素線中のCu-Nb強化材部が、外部応力(引張応力、圧縮応力、曲げ応力)を分担するので、Nb₃Snフィラメントが受ける歪が小さくなり、その損傷発生を抑制する。このNb-rod法Cu-Nb強化材は、機械特性、残留抵抗特性、製造性において、従来のIn-situ法Cu-Nb合金よりも優れている²⁾。図1(b)は、東北大25 T-無冷媒超電導マグネット(25 T-CSM)に使用されたR&W型Cu-Nb/Nb₃Snラザフォードケーブル(幅6.45 mm×厚み1.53 mm)であり、Nb₃Sn生成熱処理後に、後述する事前曲げ歪印加処理を施すことにより、引張および圧縮応力下での超電導特性を向上させた^{4), 5)}。

* 研究開発本部 超電導製品部

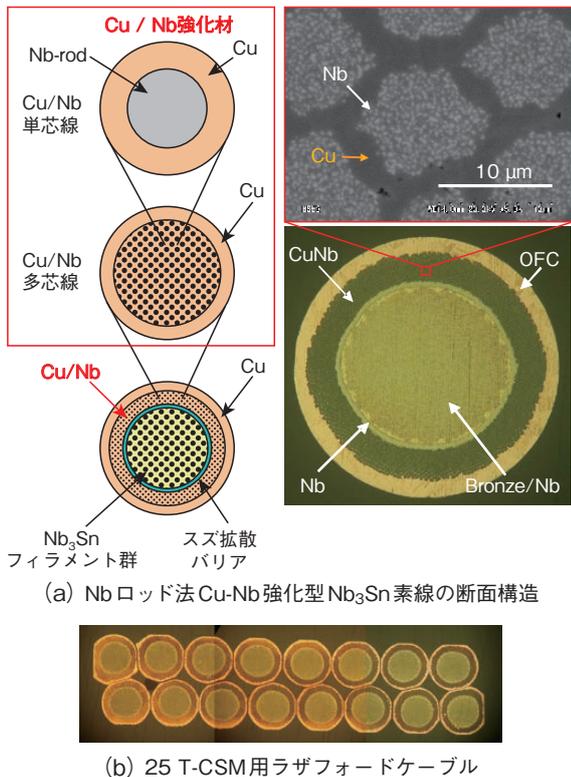


図1 Nb-rod法Cu-Nb/Nb₃Sn素線の構造及び25 T-CSM用ラザフォードケーブル
Structure of the Nb₃Sn wire reinforced with Cu-Nb manufactured by the Nb-rod method and the Rutherford cables for the 25 T-CSM.

2.2 Nb₃Sn線材の使用方法 (W&R法とR&W法)

Nb₃Sn線材中のNb₃Sn超電導体は、前述のW&R法とR&W法のいずれの使用においても、少なくとも、次の3種類の応力により、複雑な歪が印加された状態となる。①Nb₃Sn生成熱処理温度から常温までと、更に臨界温度以下まで冷却する際に、線材内部のNb₃Sn超電導体と複合部材との熱収縮差によって残留する冷却圧縮残留歪、②線材をコイルに巻線する時の引張応力と曲げ応力による巻線後の残留歪、③コイル運転時の電磁力による、軸引張応力、横圧縮応力、曲げ応力からなる外部歪力歪、である。

W&R法とR&W法のNb₃Snコイル製造の工程フロー図を比較して図2に示す。W&R法では、Nb₃Sn生成熱処理温度(～700℃)から室温を介し極低温(～-269℃)まで冷却される際に生じる温度差(900℃以上)によって、コイル構成部材との熱膨張係数の違いからNb₃Snフィラメントが大きな残留圧縮歪を受ける。一方で、R&W法では、Nb₃Sn生成熱処理後、室温でNb₃Sn線材を熱処理時の巻棒等の構造部材と分離することによって、線材に印加された圧縮歪を解放できる。その後、室温でコイル巻線して極低温(～-269℃)まで冷却するR&W法は、構成部材との熱収縮差によってNb₃Snフィラメントに生じる残留圧縮歪がW&R法よりも劇的に小さくなるため、超電導特性が向上するという利点がある。更に、コイル巻線前と巻線時に、冷却運転時のNb₃Snフィラメントが受ける歪を適正化すべく、後述する事前曲げ歪印加処理^{6)～8)}を施すことによって、W&R法で製作したコイル以上の通電性能を引き出すことが可能となる。一方で、R&W型Nb₃Sn線材は、表面絶縁

材として、W&R型Nb₃Sn線材で一般的に使用される耐熱材料であるガラス編組以外に、ポリイミドテープ、PVF、ポリエステル編組などが使用でき、コイル製作用の部材に金属やセラミック以外の材質も選択できるという利点もある。

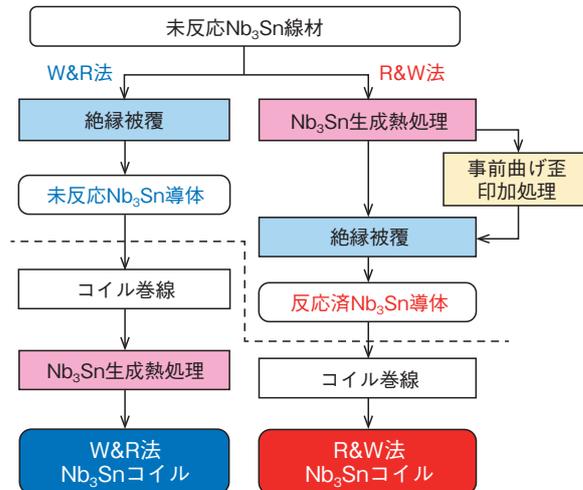


図2 W&R法とR&W法のNb₃Snコイル製作フローの比較
Comparison of the Nb₃Sn coil manufacturing flow between the W&R method and the R&W method.

2.3 事前曲げ歪印加処理

R&W法コイル巻線における事前曲げ歪印加処理^{6), 7)}は、予歪効果(Pre-strain effect)¹⁹⁾による超電導特性の向上を工業的に可能にした^{8)～17)}。R&W法では、線材に印加される曲げ歪が許容値以下となるように、パスラインを構成するプリー径およびコイル巻径と曲げ方向を管理する必要がある。事前曲げ歪印加処理を施すためのパスライン構成の代表的な例を図3に示す⁵⁾。直径D_hのポピンで熱処理を施した後、直径D_bのプリーで曲げた状態では、(1)式で与えられる曲げ歪ε_bが印加される²⁰⁾。

$$\epsilon_b(y) = \pm d(y) \cdot \left(\pm \frac{1}{D_b^\pm} - \frac{1}{D_h} \right) \tag{1}$$

ここで、符号±は、熱処理ポピン巻き付け方向を正方向+として、逆方向を-として示している。すなわち、D_b⁺は正方向曲げプリー直径、D_b⁻は逆方向曲げプリー直径を意味している。d(y)は、素線断面中央を曲げの中立線を基準(y=0)にして、最大が素線外径d(y=d/2)となる(後述の図6(a)参照)。熱処理ポピンと異なる径(D_{rw})のポピンに線材を巻きつけたコイルでは、純粋曲げ歪(純粋に曲げモーメントのみが生じたときの歪)が線材に印加された状態となり、素線中のフィラメント群の直径d_{fb}に位置するNb₃Snフィラメントが最大の曲げ歪を受ける¹²⁾。異なる断面構造の素線の曲げ歪み特性を比較する場合は、Sn拡散バリア部を含めたNon-Cu部の直径d_{non-cu}を用いる場合もある¹⁶⁾。

図4は、25 T-CSM用Cu-Nb/Nb₃Sn素線における臨界電流(I_c)の軸方向引張歪依存性に対する事前曲げ歪印加処理の効果を示している⁵⁾。本報告では、Nb₃Sn生成熱処理直後の線材をAs-reacted線(-AR)、事前曲げ歪印加処理を施した線材をPrebent線(-PB)と表記する。事前曲げ歪印加処理により、I_cが最大となる軸方向歪(ε_m)が、約0.3%から約0.1%に低歪側にシフ

トし、 I_c 値自体が増大している。これは、Nb₃Snフィラメントに印加された圧縮残留歪が3次的に緩和されて発現する超電導特性の向上効果である²¹⁾。

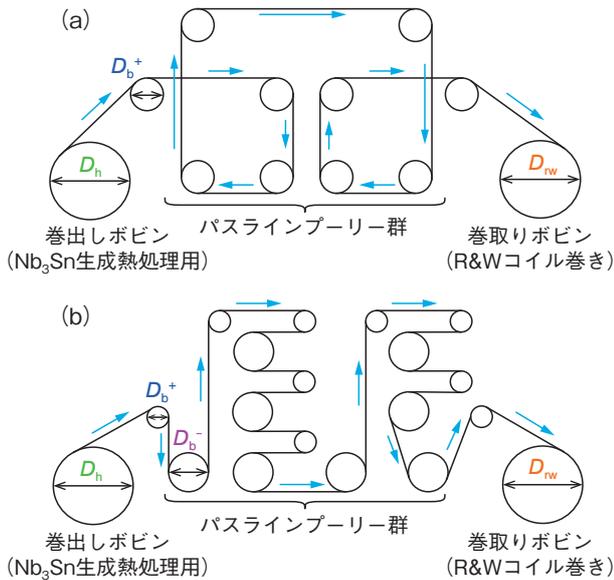


図3 事前曲げ歪印加用パスラインの模式図：
(a) 正方向曲げ、(b) 両方向曲げ(正方向・逆方向)⁵⁾
Schematic diagram of the pass line for applying pre-bending strain; (a) forward bending, (b) bidirectional bending (forward and backward directions)⁵⁾.

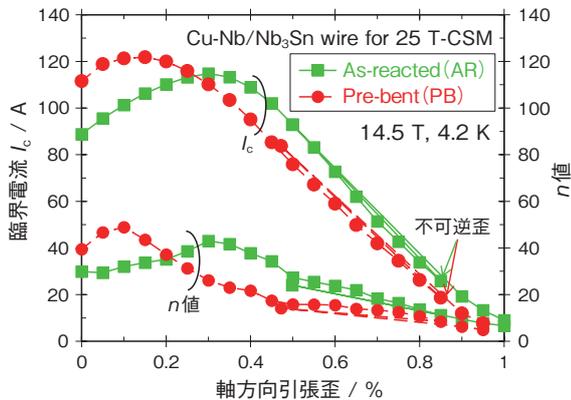


図4 25 T-CSMのCu-Nb/Nb₃Snの I_c と n 値の14.5 T, 4.2 Kでの横圧縮応力依存性⁵⁾
Transverse compressive stress dependence of the I_c and the n -values of the Cu-Nb/Nb₃Sn in the 25 T-CSM at 14.5 T and 4.2 K⁵⁾.

強化材無しの通常のCu/Nb₃Sn線でも同様な効果が得られるが、Cu/Nb₃Sn線は、室温での機械的強度がCu-Nb/Nb₃Sn線よりかなり低く¹³⁾、取扱い時にNb₃Snフィラメントの損傷が発生するリスクが大きいため積極的に事前曲げ歪印加処理を施すことは困難である。また、Cu-Nb/Nb₃Sn素線を用いたラザフォードケーブル(図1(b))に事前曲げ歪印加処理を施す場合⁵⁾、熱処理時に発生した素線表面間の粘着部が剥離し個々の素線が個別に動くことができるので、撚線の許容曲げ歪は素線単体と同等となり、小径に曲げることができる。

2.4 純粋曲げ歪下での通電特性

25 T-CSM用Cu-Nb/Nb₃Sn素線に純粋曲げ歪が印加された

場合の臨界電流とNb₃Snフィラメント群の最外層に配置されたフィラメントに発生する曲げ歪(peak pure-bending strain)の関係を図5(a)に示す¹²⁾。±0.5%の純粋曲げ歪の範囲において、Pre-bent (-PB)線はAs-reacted (-AR)線の無歪状態よりも高い I_c を有している。

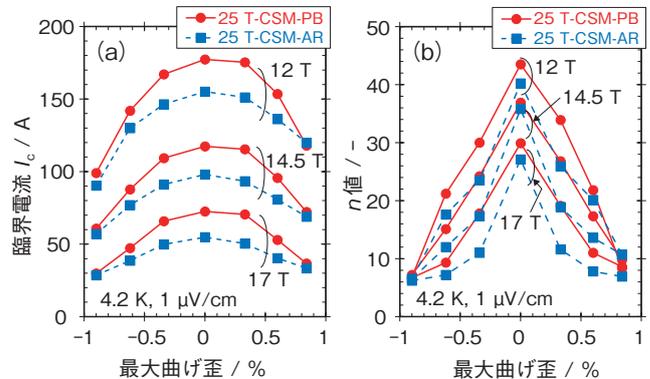


図5 25 T-CSM用Cu-Nb/Nb₃Sn素線の最大純粋曲げ歪に対する I_c 特性¹²⁾
 I_c characteristics of the Cu-Nb/Nb₃Sn wire for the 25 T-CSM against the peak pure-bending strain¹²⁾.

これは、Cu-Nb/Nb₃Sn線材に適正な事前曲げ歪印加処理を施し、許容される曲げ径以下で管理することによって、R&W法コイルはW&R法コイルよりも I_c が向上することを示している。但し、図5(b)に示すように印加磁場や印加曲げ歪によって異なる度合いで低下する n 値に配慮が必要である。

図6に、Ekinらの純粋曲げ歪下での丸線の臨界電流の解析モデル^{22), 23)}を平角線に応用した断面構造図を示す¹⁷⁾。Nb₃Sn線の許容曲げ径は、フィラメント領域の外縁に配置されたNb₃Snフィラメントが経験する最大曲げ歪みによって制限される。従って、小径に曲げるためには、Nb₃Snフィラメント領域部分を小さくすることが有効であるが、素線直径を小さくすると素線1本当たりの臨界電流が小さくなるという問題がある。我々は、直径0.4 mmまで細線化した素線を撚線化¹⁵⁾する方法以外に、Nb₃Snフィラメント群を曲げ方向に対して小さくするために、アスペクト比の大きいCu-Nb/Nb₃Sn平角線(テープ線)形状が小径に曲げた状態での臨界電流値を増大させる手法として有効であることを確認した¹⁷⁾。

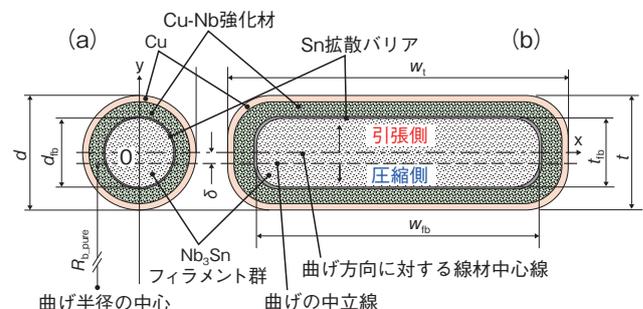
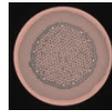
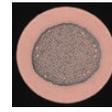
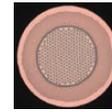


図6 Cu-Nb/Nb₃Sn線材の I_c に及ぼす純粋曲げ歪効果の解析における素線断面構造モデル¹⁷⁾
(a) 丸線、(b) テープ線
Cross-sectional structure model of the wire for the analysis of the pure-bending strain effect on the I_c of the Cu-Nb/Nb₃Sn wire¹⁷⁾. (a) round wire, (b) tape wire

表1 各種断面構造設計のCu-Nb/Nb₃Sn線材^{5), 15), 16)}
Cu-Nb/Nb₃Sn wire rods with various cross-sectional structure designs^{5), 15), 16)}.

素線 ID	25 T-CSM	LK199	LK200	LK201	LK202	LK206	LK224
断面構造							
Cu/Cu-Nb/non-Cu (%)	20/35/45	19/39/42	21/38/41	19/39/42	20/55/25	57/0/43	20/45/35
Cu-Nb強化材中のNb占積率 (vol%)	20	20	25	30	25	—	30
Nb ₃ Snフィラメント部の直径 (mm)	0.52	0.49	0.49	0.49	0.37	0.5	0.45
素線直径 (mm)	0.80				0.80		
Nb ₃ Snフィラメント直径 (mm)	3.3				3.2		
Sn拡散バリア	Ta				Nb		
ブロンズ組成	Cu-14wt%Sn -0.2wt%Ti				Cu-15.7wt%Sn-0.3wt%Ti		
ツイストピッチ (mm), ツイスト方向				24, S方向			

3. Cu-Nb/Nb₃Sn線の高性能化

3.1 機械的特性の向上

巻半径 R (m) の超電導コイルを、外部磁場 B (T)、平均電流密度 J_e (A/m²) で運転するとき、巻線軸方向には、 BJ_eR で与えられる引張応力 σ (Pa) が印加され、更に、コイル構造によって決まる横圧縮応力が線材に印加される。コイル運転時の引張及び横圧縮応力下において要求される I_c と強度を両立可能なCu-Nb/Nb₃Sn素線の構造設計指針を得るために、表1に示す異なる断面構造の素線を試作した^{5), 15), 16)}。

高SnブロンズCu-15.7wt%Sn-0.3wt%Tiの使用⁹⁾によって、Cu-14wt%Sn-0.2wt%Tiを用いた25 T-CSM素線よりも1割程度、臨界電流密度 (non-Cu- J_c) を増大させた。Cu-Nb中のNbフィラメント体積率を20 vol% (LK199), 25 vol% (LK200), 30 vol% (LK201) とした3種類の構造と、素線断面当たりのCu-25 vol%Nb強化材占有率を38% (LK200), 55% (LK202), 0% (LK206) とした3種類の構造とで、外部応力下での通電特性をそれぞれ比較した。LK224は300 MPaを越える引張応力下での通電特性を向上させるため、Cu-Nb中のNb比率を30 vol%に高め、線材中のCu-Nb断面積比率を45%に増大させた¹⁶⁾。

図7(a)に、一軸引張応力に対して、各素線の最大 I_c 値と応力ゼロ時の I_c 値でそれぞれ規格化した I_c 値 (4.2 K, 14.5 T) を示す。事前曲げ歪印加処理の歪値は、non-Cu部当りで定義した。各Cu-Nb/Nb₃Sn素線の I_c が減少する引張応力は、強化材無し Cu/Nb₃Sn素線 (LK206-PB ± 0.3%) の2倍以上であった。LK201-PB ± 0.3% および LK202-PB ± 0.3% は、300 MPaの引張応力以上の領域で、25T-CSM-PB ± 0.3% よりも I_c 低下が小さく、LK201-PB ± 0.5% においては、400 MPa以上での I_c 低下が著しく抑制された。LK224-PB ± 0.38%-D においては、臨界電流密度が増大する多段熱処理 (575°C × 100 hr + 670°C × 50 hr) であっても、670°C × 96 hrの熱処理と同様に高い機械的特性が得られた。

図7(b)に示す各Cu-Nb/Nb₃Sn素線の横圧縮応力下での I_c 特性において、10%以上の I_c 低下が生じる横圧縮応力値が、強化材無し Cu/Nb₃Sn素線 (LK206-PB ± 0.3%) よりも50 MPa以上大きいことから、Cu-Nb強化は横圧縮特性の向上にも有効で

あることが確認された。印加する事前曲げ歪値を変えた LK201-PB ± 0.3% と LK201-PB ± 0.5% の特性比較においては、事前曲げ歪値の増大により、引張応力下での I_c 特性は向上した

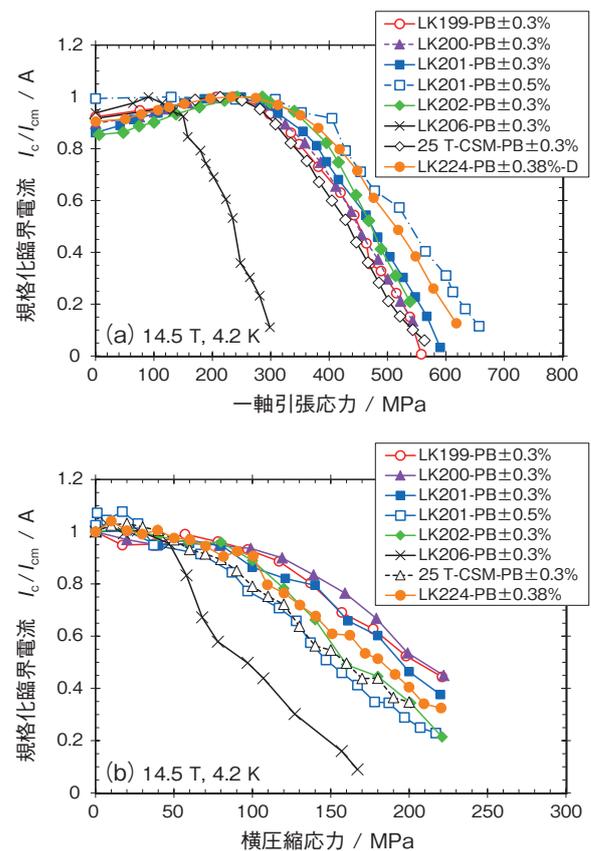


図7 引張応力下、4.2 K, 14.5 TにおけるCu-Nb強化Nb₃Sn素線と強化無しCu/Nb₃Sn素線のそれぞれの最大 I_c 値で規格化した I_c 値。(a) 一軸引張応力下、(b) 横圧縮応力下注: 熱処理条件は670°C × 96時間。但し、LK224の軸方向引張応力下のデータは575°C × 100 hr + 670°C × 50 hr^{5), 15), 16)}

I_c values normalized at the respective peak I_c values of the Cu-Nb reinforced Nb₃Sn wire and the unreinforced Cu/Nb₃Sn wire at 4.2 K and 14.5 T under tensile stress. (a) Under uniaxial tensile stress. (b) Under transverse compressive stress.

Note: Heat treatment condition was 670°C × 96 hours. However, data of the LK224 under axial tensile stress was obtained by heat treatment at 575°C × 100 hours + 670°C × 50 hours^{5), 15), 16)}.

が、横圧縮応力下での J_c 特性は低下した。これは、事前曲げ歪印加処理条件は、Cu-Nb/Nb₃Sn素線の断面構造と実際の超電導マグネット運転時に線材に加わる外部応力の分布を考慮して選定する必要があることを示している。

3.2 導体電流密度の向上

高磁場NMR、加速器、核融合用大容量導体などに用いられるNb₃Sn線材の仕様は様々であり、その高磁場化、大型化に伴い、導体電流密度(線材断面積当たりの電流密度 J_e : engineering J_c)の向上と高強度化の両立が必要となる。表2に示す、LK144(REC)は高磁場NMR用途を鑑みてコイル巻線密度を増大させるために平角断面形状(Rectangular cross-section)とした¹³⁾。LK145とLK288は、加速器や核融合用マグネットへの応用を考慮しており、複数の素線を撚り合わせて、圧縮加工を施すことにより電流密度を向上させる必要があるため、丸線形状とした^{13), 18)}。断面構成比率は、高 J_e のため、Cu-Nb強化材を20~23%に小さくし、non-Cu部を50%としたが、安定化Cu量はCu-Nb強化材中のCuを含めて45~46%を確保した。

表2 高臨界電流密度型Cu-Nb/Nb₃Sn線材^{13), 18)}
High critical current density type Cu-Nb/Nb₃Sn wire^{13), 18)}

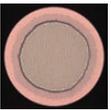
素線ID	LK144(REC)	LK145	LK288
断面構造			
寸法(mm)	1.13 ^t × 1.70 ^w × 0.3 ^R	0.80	0.827
Nb ₃ Sn フィラメント径(μm)	32	3	23
ツイストピッチ(mm)	50	24	15
方向	S方向		Z方向
Sn 拡散バリア	Nb		Ta
Cu/Cu-Nb/non-Cu (%)	30/20/50		27/23/50
ブロンズ組成	Cu-15.7wt%Sn-0.3wt%Ti		
Cu-Nb強化材	Nb-rod法Cu-20vol%Nb		

図8(a)に、575°C × 175 hr + 650°C × 125 hrのNb₃Sn生成熱処理を施した場合のnon-Cu- J_c の磁場(B)依存性を示す。事前曲げ歪印加処理(素線表面基準±0.5%)によりnon-Cu- J_c 値が増大し、LK145-PBは12 Tで1115 A/mm²と17 Tで400 A/mm²であり、25 T-CSM-PBの特性に対し約30%増大した。図8(b)に示す平角線のLK144(REC)においては、事前繰り返し曲げ歪±0.5%の印加方向を変えて評価した。フラットワイズ方向とエッジワイズ方向の両方向から交互に5回ずつ印加したLK144-PBのnon-Cu- J_c は17 Tで355 A/mm²であり、LK144-ARの約1.6倍であった。そして、フラットワイズ方向から10回印加した場合(PB-f)とエッジワイズ方向から10回印加した場合(PB-e)の約1.1倍であった。Kramerモデル²⁴⁾を用いて、18 Tから25 Tまでの J_c 値の外挿から計算した、LK144-ARとLK144-PB-fとLK144-PBの実効的な上部臨界磁場(B_{c2}^*)、24.4 Tと24.8 Tと25.0 Tであった。Cu-Nb/Nb₃Sn平角線と同様に撚線導体にした場合においても、2方向からの事前繰り返し曲げ歪印加は有効であると考えられる。

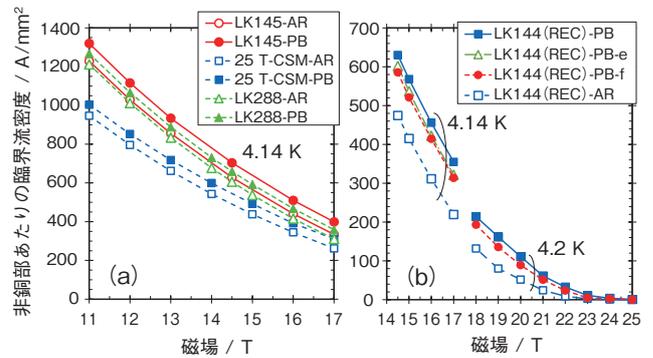


図8 非銅比部の臨界電流密度の磁場依存性^{5), 13), 18)}
(a) 丸線, (b) 平角線
Magnetic field dependence of the critical current density in the non-copper part^{5), 13), 18)}
(a) round wire, (b) rectangular wire

図9に、LK145およびLK288(575°C × 175 hr + 650°C × 125 hrで熱処理)、25 T-CSM素線(670°C × 96 hrで熱処理)の軸方向引張歪および軸方向引張応力に対するnon-Cu- J_c 特性(14.5 T, 4.2 K)を示す。LK145-PBのnon-Cu- J_c は、軸方向歪みが0.3% (応力250 MPa)まで600 A/mm²以上でLK145-ARよりも大きく、約300 MPaまで25 T-CSM-PBよりも高いnon-Cu- J_c 値であった。LK288-PBのnon-Cu- J_c は、約400 MPaまで25 T-CSM-PBよりも高いnon-Cu- J_c 値であった。LK288は、 J_c の優れた耐応力特性により、短ピッチかつ低ボイド率の多重撚線の製造性の改良と高電磁応力下での超電導特性の維持の両立が見込めるため、大型核融合炉マグネット用のケーブル・イン・コンジット導体への応用が期待される¹⁸⁾。

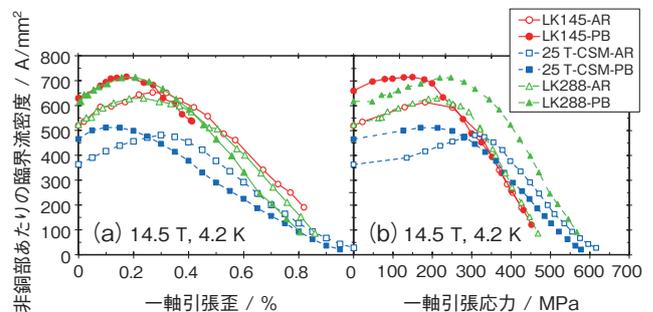


図9 高臨界電流密度丸線(LK145, LK288)と25 T-CSM線との14.5 Tにおける非銅部当たり臨界電流密度特性の軸歪および軸応力下での比較^{5), 13), 18)}
(a) 一軸引張歪, (b) 一軸引張応力
Comparison of the critical current density characteristics in the non-copper part at 14.5 T between the high critical current density round wires (LK145, LK288) and the 25 T-CSM wire under axial strain and axial stress^{5), 13), 18)}
(a) Axial tensile strain, (b) Axial tensile stress

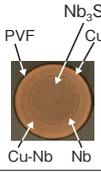
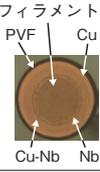
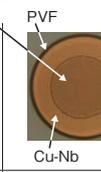
3.3 エナメル被覆絶縁の適用

W&R法Nb₃Snコイルでは、図1に示したように、未反応Nb₃Sn線材にガラス編組絶縁を施し巻線後に熱処理を施すが一般的であるが、①ガラス編組加工に時間と費用がかかる、②ガラス編組中のバインダーの炭化により絶縁耐圧が低下する、③絶縁被覆厚が厚く寸法もバラつくためコイル中の線材占積率が低くなるなどの欠点がある。一方、R&W法の場合は、

Nb₃Sn生成熱処理後の線材の絶縁被覆に、ポリイミドテープ、ポリエステル編組、PVFなどのエナメル被覆など、幅広い材料が使用できる。エナメル被覆Nb₃Sn線材については、厳密に張力と曲げ歪を管理してPVF被覆した内部拡散法Nb₃Sn線を用いたR&W法Nb₃Snコイル開発の事例が報告されている²⁵⁾が、現時点で実用化には至っていない。

我々は、表3に示すCu-Nb/Nb₃Sn素線にPVF被覆を施し、その引張応力下での臨界電流特性を評価した¹⁴⁾。印加した曲げ歪は、Nb₃Snフィラメント群部の外径 d_{fb} (mm)における最大歪で定義し、熱処理時と曲げ方向と同じ正方向の曲げ歪 ϵ_{pb}^+ と逆方向の曲げ歪 ϵ_{pb}^- を前述の(1)式を用いて算出した。LK165には、直径(D_h)500 mmのポビンに巻線した状態で670℃×96 hrのNb₃Sn生成熱処理を施し、その後に、10組の $D_{pb}^+=125$ mmと $D_{pb}^-=250$ mmのプリーを交互に配置して、両方向曲げ歪 $\epsilon_{pb}^{\pm}=\pm 0.31\%$ を繰り返して印加した(図3(b)参照)。一方、LK179は、 $D_h=150$ mmのポビンで熱処理後、 $D_{pb}^+=250$ mmの正方向曲げプリーのみを使用し、直状に戻した時に受ける逆方向歪 -0.34% のみを印加した(図3(a)参照)。また、LK183は、 $D_h=700$ mmのポビンで熱処理後、 $D_{pb}^+=270$ mmの正方向曲げプリーのみを使用し、正方向曲げ歪 $\epsilon_{pb}^+=+0.19\%$ と、直状になる時に付加される反対方向曲げ歪 $\epsilon_{pb}^-=-0.11\%$ を印加した。

表3 PVF絶縁被覆Cu-Nb/Nb₃Sn線¹⁴⁾
Cu-Nb/Nb₃Sn wire with PVF insulation coating¹⁴⁾

素線 ID	LK165	LK179	LK183
断面構造			
PVF被覆後線径(mm)	0.84	0.88	1.39
PVF被覆厚さ(μm)	20	40	40
被覆前線径(mm)	0.80		1.31
Nb ₃ Snフィラメント群直径(mm)	0.51		0.79
Nb ₃ Snフィラメント径(μm)	3.3		3.3
ツイストピッチ(mm), 方向	24, S方向		36, S方向
ブロンズ組成	Cu-14wt%Sn -0.2wt%Ti		Cu-15.7wt%Sn -0.3wt%Ti
Sn拡散バリア	Nb		Ta
Cu/Cu-Nb/non-Cu(%)	20/35/45		20/40/40
Cu-Nb強化材	Nb-rod法 Cu-20vol%Nb		

PVF被覆が施されたLK165-PVFとLK179-PVFの引張応力下での臨界電流特性を図10(a)に示す。LK165-PVFの臨界電流値の引張応力依存性は、260 MPa以下の応力領域の臨界電流は熱処理直後の25 T-CSM-ARよりも向上し、25 T-CSM-PBと比較すると、150 MPa以下の引張応力領域で向上する傾向があった。PVF被覆が施されたLK183-PVFの引張応力下での臨界電流特性を図10(b)に示す。LK183-PVFの臨界電流値は、250 MPa以下の引張応力領域で熱処理直後のLK183-ARよりも

向上した。結果として、Cu-Nb/Nb₃Sn線はPVF被覆加工等のエナメル絶縁が可能であり、適正な事前曲げ歪印加処理により、PVF被覆加工後に実用的な引張歪および引張応力下での通電特性が向上することが分かった。

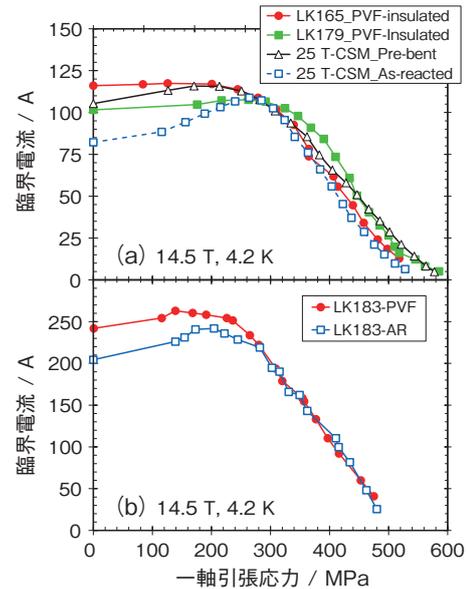


図10 PVF絶縁Cu-Nb/Nb₃Sn素線とPVF被覆前素線の軸方向引張応力下における臨界電流特性の比較¹⁴⁾
(a) PVF被覆素線LK165, LK179と25 T-CSM素線の比較
(b) PVF被覆素線LK183と被覆前素線LK183の比較
Comparison of critical current characteristics under axial tensile stress of the Cu-Nb/Nb₃Sn wire with PVF insulation coating and the wire without PVF coating¹⁴⁾. (a) Comparison of the PVF-coated wire LK165, the LK179 and the 25 T-CSM wire, (b) Comparison of the PVF-coated wire LK183 and the uncoated wire LK183

4. まとめと今後の展望¹¹⁾

Nb-rod法Cu-Nb/Nb₃Sn線材は、東北大25 T-CSM用Cu-Nb/Nb₃Snラザフォードケーブルでその有効性が実証され、その後の様々な要素技術開発によって、R&W法だけでなくW&R法においても、製造性に優れ、幅広い応力領域で高い超電導特性を有することが明らかになった。

核融合用Nb₃Snマグネット用途において、JA-DEMO-TF導体(日本の原型炉用TF導体²⁶⁾では、ITER-CS導体^{27)~29)}の開発実績を応用し、高電磁応力下における優れた超電導特性を維持するために、短ピッチかつ低ボイド率W&R型ケーブル・イン・コンジットNb₃Sn導体構造が候補となっている。そのためには、Nb₃Sn線材の耐応力特性の向上および熱線製作性の改善を行う必要があることから、Cu-Nb/Nb₃Sn線材の応用が有効である¹⁸⁾。また、EU-DEMO-TF導体では、R&W型Nb₃Sn導体オプション³⁰⁾が検討されており、Cu-Nb強化型Nb₃Sn導体に事前曲げ歪印加処理を施した後、コンジット化する手法が考えられる¹⁰⁾。一方で、ヨーロッパ原子核研究機構(CERN)のFCC計画で設計された次世代円形衝突型加速器(Future Circular Collider)³¹⁾においては、所定の磁場を確実に発生する堅牢(Robust)な高電流密度型Nb₃Snマグネットの製造技術開発が必要とされており、基本的なコイルの製作技術の改良だ

けでなくNb₃Sn線材自体の高強度化も検討されている。Nb₃Sn超電導線材の特徴³²⁾を踏まえて、Nb₃Snフィラメント群部分を、ブロンズ法の部材から、高電流密度化を実現する先進的な内部スズ拡散法の部材に置き換えることによって、高J_c化と高強度化の両立が可能になると思われる。更に、高磁場NMRやMRI、医療用加速器等の分野では、NbTi線材と高温超電導線材の間の磁場・温度領域を幅広くカバーするコイルに、適材適所で使用されることが期待される。

今後、Cu-Nb/Nb₃Sn線材が有する合理的なコストで量産製造が可能な実用線材であるという利点を生かし、多様なNb₃Snマグネット応用機器への応用に向けた要素技術開発を着実に進めていく。

謝辞

Cu-Nb/Nb₃Sn線材は、東北大学金属材料研究所殿および東海大学殿との共同研究を通じて開発が促進され、現在は、多くの国内外の研究者および技術者によって、各種超電導機器への応用が検討されています。ご指導とご支援いただいた関係者の皆様に対し感謝いたします。

参考文献

- J. W. Ekin, "Strain scaling law for flux pinning in practical superconductors. Part I: Basic relationship and application to Nb₃Sn conductors," *Cryogenics* 20 (1980) 611-624.
- H. Oguro et al., "New fabrication process of Cu-Nb composite for the internal reinforcement of Nb₃Sn wires," *J. Supercond. Nov. Magn.*, 26 (2013) 2099-2101.
- H. Oguro et al., "Mechanical and superconducting properties of Nb₃Sn wires with Nb-rod-processed CuNb reinforcement," *Supercond. Sci. Technol.*, 26 (2013) 094002.
- S. Awaji et al., "New 25 T cryogen-free superconducting magnet project at Tohoku University," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014) 4302005.
- M. Sugimoto et al., "Development of Nb-Rod-Method Cu-Nb Reinforced Nb₃Sn Rutherford Cables for React-and-Wind Processed Wide-Bore High Magnetic Field Coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 25 (2015) 6000605.
- S. Awaji et al., "Improvement of mechanical and superconducting properties in CuNb/(Nb,Ti)₃Sn wires by applying bending strain at room temperature," *Supercond. Sci. Technol.* 16 (2003) 733-738.
- S. Awaji et al., "Prebending effects in bronze route Nb₃Sn wires," *Supercond. Sci. Technol.* 18 (2005) S313-S318.
- H. Oguro et al., "Prebending effect for mechanical and superconducting properties of Nb-rod-Processed Cu-Nb internal-reinforced Nb₃Sn wires," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014) 8401004.
- M. Sugimoto et al., "Recent Activity in Development of Bronze-processed Nb₃Sn Wires -Improvements in Strand Performance and Cabling-", *TEION KOGAKU* 47 (2012) 479-485 (in Japanese).
- M. Sugimoto et al., "React-and-wind type Nb₃Sn superconducting wires for practical use- Progress and prospects on developments of the elemental technologies -", *TEION KOGAKU* 50 (2015) 172-179 (in Japanese).
- M. Sugimoto et al., "Development Progress and Future Prospects of Cu-Nb Reinforced Nb₃Sn Wires - Performance Improvement for Various Nb₃Sn Coil Applications -", *TEION KOGAKU* 58 (2023) 116-123 (in Japanese).
- M. Sugimoto et al., "Critical current characterization under pure bending strains of pre-bent Cu-Nb/Nb₃Sn strands for practical React-and-Wind process," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26 (2016) 8402205.
- M. Sugimoto et al., "Nb-rod-method Cu-Nb/Nb₃Sn wires for practical React-and-Wind applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 28 (2018) 6000105.
- M. Sugimoto et al., "Performance of Polyvinyl formal insulated Cu-Nb/Nb₃Sn wires for React-and-Wind process," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 29 (2019) 6001205.
- M. Sugimoto et al., "Evaluation of various Nb-rod-method Cu-Nb/Nb₃Sn wires designed for practical React-and-Wind coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 30 (2020) 6000905.
- M. Sugimoto et al., "Development of high-performance Cu-Nb/Nb₃Sn wires for various high field magnets," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31 (2021) 6000605.
- M. Sugimoto et al., "Performance of thin Cu-Nb/Nb₃Sn round wires and tapes pre-bent for R&W process," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32 (2022) 6000306.
- M. Sugimoto et al., "Development of Cu-Nb Reinforced Nb₃Sn Wires Appropriate for Large Multi-stage Stranded Cables with Short-pitch Twisting and Low-void Ratio," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 33 (2023) 8400805.
- S. Ochiai and K. Osamura, "Influence of cyclic loading at room temperature on the critical current at 4.2 K of Nb₃Sn superconducting composite wire," *Cryogenics* 32 (1992) 584-590.
- G. Ambrosio et al., "Study of the React and Wind Technique for a Nb₃Sn Common Coil Dipole," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 10 (2000) 338-341.
- H. Oguro, "Mechanism of the Strain Effect for the Superconducting Properties of Nb₃Sn Wires," *TEION KOGAKU* 47 (2012) 486-494 (in Japanese).
- J. W. Ekin, "Strain Scaling law and the prediction of uniaxial and bending strain effects in multifilamentary superconductors," in *Filamentary A15 Superconductors, Proceedings of the topical conference on A15 superconductors*, Ed by M. Suenaga and A. Clark, Plenum Press, New York, (1980) 187-203.
- M. Takayasu, "Pure bending strains of Nb₃Sn wires," *Supercond. Sci. Technol.* 24 (2011) 045012.
- E. J. Kramer, *J. Appl. Phys.* 44 (1973) 1360-1370.
- Y. Kubo et al., "Development of Nb₃Sn Coils with PVF Insulated Wire through the React and Wind Technique," *TEION KOGAKU* 37 (2002) 61-67 (in Japanese).
- H. Utoh, "Magnet design for JA DEMO," *Japan-US Work. Fusion React. Des. Crit. Issues Fusion Eng.*, 2022, [Online]. Available: https://vltfusion.org/wp-content/uploads/2022/04/Magnet-design-for-JADEMO_20220328_HU_v3.pdf (accessed March 28th, 2022).
- D. Bessette, "Design of a Nb₃Sn Cable-in-Conduit Conductor to withstand the 60 000 electromagnetic cycles of the ITER central solenoid," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014) 4200505.
- Y. Takahashi et al., "Cabling Technology of Nb₃Sn Conductor for ITER Central Solenoid," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014) 4802404.
- Y. Nabara et al. "Impact of Cable Twist Pitch on Tcs-Degradation and AC Loss in Nb₃Sn Conductors for ITER Central Solenoids," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014) 4200705.
- P. Bruzzone et al. "Design of Large Size, Force Flow Superconductors for DEMO TF Coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (2014) 4201504.
- L. Bottura et al. "Advanced Accelerator Magnets for Upgrading the LHC," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 22 (2012) 4002008.
- K. Tachikawa and A. Kikuchi, "Aspects of Nb₃Sn superconducting wires and trend of their research and development in foreign countries ", *TEION KOGAKU* 50 (2015) 155-165 (in Japanese).