テーマ解説

リアクト・アンド・ワインド型 Nb₃Sn 超電導線材の実用化

—要素技術開発の現状と展望—

杉本 昌弘^{*,†}, 坪内 宏和^{*}, 遠藤 壮^{*}, 高木 亮^{*}, 伊井 秀樹^{*}, 清水 仁司^{*}React-and-Wind Nb₃Sn Superconducting Wires for Practical Use
— Progress and prospects on the development of elemental technologies —Masahiro SUGIMOTO^{*,†}, Hirokazu TSUBOUCHI^{*}, Sakaru ENDOH^{*}, Akira TAKAGI^{*}, Hideki II^{*} and Hitoshi SHIMIZU^{*}

Synopsis: The development of elemental technologies is required for the practical use of React-and-Wind (R&W)-processed Nb₃Sn coil applications. The critical currents (I_c) of a Nb₃Sn strand under several common strains are able to be estimated using both characteristics of the I_c -magnetic field-temperature-axial strain (I_c - B - T - ε) property and considerations of the bending strain effects. However, designing the I_c of a large-scale Nb₃Sn conductor becomes much more difficult because the Nb₃Sn wires are under extremely complicated strains. Recently, Nb-rod-method Cu-Nb reinforced Nb₃Sn wires were successfully developed using the bronze process. The performance of the Cu-Nb/Nb₃Sn Rutherford cables was improved by utilizing the pre-bending process. It is expected that pre-bent Cu-Nb/Nb₃Sn wires will be very useful for R&W-processed Nb₃Sn coil. This paper describes the progress and prospects for developing elemental technologies used in R&W Nb₃Sn wires.

Keywords: Nb₃Sn, React-and-Wind, critical current, pre-bending strain effect, Cu-Nb reinforcement

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version.)

1. はじめに

高磁界での超電導特性が優れている Nb₃Sn 線材は、10 T 以上の高磁界を発生するマグネット機器へ適用が可能である。その Nb₃Sn 超電導体は A15 系金属間化合物であるため、Nb フィラメントを Cu-Sn 合金と複合化するなどして線材（未反応 Nb₃Sn 線材）に加工した後、構造設計に応じた Nb₃Sn 生成熟処理を施す必要がある。Nb₃Sn 生成後の線材（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⁾、合金系超電導実用線材の Nb-Ti 超電導線材とは異なる要素技術が必要とされる。Nb₃Sn コイルの製造方法として、未反応 Nb₃Sn 線材をコイル巻線後に Nb₃Sn 生成熟処理を施すワインド・アンド・リアクト法（W&R 法）と、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）とがあるが、R&W 法の実用化は極めて難しいと考え

られてきた。しかしながら、近年、Nb₃Sn 線材を用いたマグネット応用機器の大型化や高性能化、さらには、製造性と経済性の観点から、R&W 法の実用化が注目されている。古河電気工業株式会社（古河電工）は、1980 年代から、ブロンズ法 Nb₃Sn 超電導線材の特性向上と導体化に関する研究開発を進めており、その中で、R&W 型 Nb₃Sn 超電導コイルに適用可能な線材を開発してきた²⁾。本報告では、R&W 型 Nb₃Sn 超電導線材の実用化における要素技術開発の現状と将来の展望について解説する。

2. Nb₃Sn 線材の歪特性2.1 R&W 型 Nb₃Sn コイルの特長

Nb₃Sn 線材中の Nb₃Sn 超電導体は、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。① Nb₃Sn 生成熟処理温度から常温までと、さら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応力歪、である。

W&R 法と R&W 法の Nb₃Sn コイル製造の工程フロー図

Received January 22, 2015

* 古河電気工業株式会社

〒321-1493 栃木県日光市清滝町 500 番地

Furukawa Electric Co., Ltd., 500 Kiyotaki, Nikko, Tochigi 321-1493, Japan

† E-mail: masahiro@nikko.furukawa.co.jp

DOI : 10.2221/jcsj.50.172

を比較して Fig. 1 に示す。W&R 法では、コイル巻線の構成部材に応じて Nb₃Sn 生成熱処理温度から極低温までに生じる残留歪を制御することは困難である。一方、R&W 法では、Nb₃Sn 生成熱処理後、室温まで冷却し、Nb₃Sn 線材と熱処理時の構造部材（巻枠等）を分離することによって、それらの熱収縮差によって生じる残留歪を無くせる。また、コイル巻線前と巻線時に、室温で印加する応力を制御できるので、運転時の Nb₃Sn 超電導体が受ける歪を適正化し、W&R 法コイル以上の通電性能を引き出せる可能性がある。さらに、R&W 型 Nb₃Sn 線材は、表面絶縁材として、W&R 型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がある。

これまでに実施された R&W コイルの開発事例をいくつか紹介する。古くは、加速器用 Nb₃Sn マグネットの開発がある³⁾。このコイルは、耐熱材料で絶縁された未反応 Nb₃Sn ラザフォードケーブルを、マグネットと同形状の熱処理治具に巻線してから Nb₃Sn 生成熱処理を施し、その後、マグネット用の巻枠へ挿げ替える手法で製作された。一方、In-situ 法 Cu-Nb 強化材で内部補強安定化されたブロンズ法 Nb₃Sn 線（Cu-Nb/Nb₃Sn 線）を用いて、熱処理ボビンとは異なるボビンに、線材に張力を印加しながら密巻した R&W コイルがある⁴⁾。この Cu-Nb/Nb₃Sn 線材は、後述するように、R&W 型 Nb₃Sn 線材として実用化に向けた開発が着実に継続されている。さらには、内部すず法 Nb₃Sn 線を用いた例として、巻線時の曲げ歪と引張歪を厳密に制御した R&W コイルが試作されたが⁵⁾、未だ実用化には至っていない。

Fig. 1 Comparison of Nb₃Sn magnet manufacturing flow between W&R-process and R&W-process.

2.2 Nb₃Sn 素線の引張歪特性

Nb₃Sn 線材を用いた導体およびコイル設計においては、使用する素線の歪特性を実測し、解析式を用いたパラメータ化が有効である⁶⁻⁸⁾。L. Bottura らのフィッティング式 (1)⁸⁾を用いて、Table 1 に示す ITER-TF 用 Nb₃Sn 素線（IT1 および BR1）⁹⁾の臨界電流の軸方向歪依存性を計算した例を Fig. 2 に示す。構造設計や製造方法などが異なる線材の臨界電流特性は、磁場や温度が大きくなるほど、歪の影響を受けることが分かる。

$$J_c = CB^{-1}s(\varepsilon)(1-t^{1.52})(1-t^2)b^p(1-b)^q,$$

$$B_{C2}^*(T, \varepsilon) = B_{C20m}^*s(\varepsilon)(1-t^{1.52}),$$

$$T_c^*(T, \varepsilon) = T_{C0m}^*s(\varepsilon)^{1/3} \left(1 - B/B_{C2}^*(0, \varepsilon)\right)^{1/1.52},$$

$$s(\varepsilon) = 1 + \left(\left(C_{a1} \sqrt{\varepsilon_{sh}^2 + \varepsilon_{0a}^2} - \sqrt{(\varepsilon - \varepsilon_{sh})^2 + \varepsilon_{0a}^2} \right) - C_{a2} \varepsilon \right) \times (1 - C_{a1} \varepsilon_{0a})^{-1},$$

$$\varepsilon_{sh} = C_{a2} \varepsilon_{0a} / \sqrt{C_{a1}^2 - C_{a2}^2}, \quad \varepsilon = \varepsilon_{applied} + \varepsilon_m \quad (1)$$

Table 1 Strain scaling parameters for ITER-TF strands

Parameter		IT1	BR1
C_{a1}	Strain fitting constant	47.52	45.46
C_{a2}	Strain fitting constant	0.00	6.52
ε_{0a}	Residual strain component	0.218%	0.244%
ε_m	Tensile strain at the maximum properties	-0.067%	-0.017%
B_{c2m0}	Upper critical field at zero temperature and strain	34.22	30.23
T_{cm0}	Upper critical temperature at zero field and strain	16.26	16.73
C	Scaling constant	20.823	17.036
p	Low field exponent of the pinning force	0.578	0.559
q	High field exponent of the pinning force	2.211	1.754

Fig. 2 Characteristics of critical current of ITER strands as a function of intrinsic axial strain ε (%).

ソレノイドコイル形状の場合、巻半径 R (m) の線材軸方向にかかるフープ応力 σ (Pa) は、外部磁場 B (T)、マグネットの平均電流密度 j (A/m²) とすると、 $\sigma = BjR$ で与えられる。その線材の応力と軸方向歪特性 (S-S 曲線) から応力 σ によって線材軸方向に生じる歪量を求めれば、その応力下での臨界電流値特性 (I_c) を予想することができる。さらに、実用的なコイル設計においては、Nb₃Sn フィラメント断線によって I_c 低下が発生する不可逆歪 (ϵ_{ir}) に対して、十分なマージンを確保する必要がある。

2.3 曲げ歪下での超電導特性

R&W 法コイル製造において、コイル形状で Nb₃Sn 生成熟処理をした後、異なる形状の巻棒に巻き返す場合、残留する曲げ歪によって特性が変化することを考慮する必要がある。曲げ歪が印加された時の臨界電流の計算式は、1980 年に J.W. Ekin によって示されており⁹⁾、近年、M. Takayasu らによって整理された¹⁰⁾。最外層に銅のシースが配置された Nb₃Sn 素線に曲げ歪が印加された時の断面模式図を Fig. 3(a) に示す。曲げに対する中立軸を境に外側では引張応力、内側では圧縮応力となる。径方向に電流転移 (Perfect current transfer) が生じるとする長ツイストピッチモデルでは、フィラメント群内の曲げ歪 ϵ_y によって臨界電流密度 j_c が決まるため、(2)式を用いて $j_c(\epsilon_y)$ 値を曲げ径 R_b 方向に積分することによって、素線の I_c を計算できる¹⁰⁾。ここで、 R_{nc} はフィラメント群 (非銅部) 部位の半径、 ϵ_0 は曲げ歪印加前の圧縮歪である。このモデルは、フィラメント間の電流転移はフィラメント間が低抵抗な場合に可能であることから、低抵抗モデルとも呼ばれる。

Fig. 3 Schematic cross section of Nb₃Sn strand under bending strain; (a) normal condition and (b) condition having neutral axis shift and broken filaments.

Fig. 4 Characteristics of critical current normalized by I_c of $\epsilon_b=0\%$ as a function of applied bending strain ϵ_b (%).

$$I_c = 2 \int_{-R_{nc}}^{R_{nc}} j_c(\epsilon_y) \sqrt{R_{nc}^2 - y^2} dy ,$$

$$\epsilon_y = \epsilon_0 + \epsilon_{by} , \quad \epsilon_{by} = y/R_b \quad (2)$$

一方、径方向に電流転移が生じない (No current transfer) とする短ツイストピッチモデル (高抵抗モデル) では、個々のフィラメントの長手方向の $j_c(\epsilon_y)$ 値が最も低くなる歪が印加される位置 y の j_c 値で決定されるので、(3)式を用いて計算する¹⁰⁾。フィラメントに印加される歪は、圧縮側でも拡張側でも $j_c(\epsilon_y)$ 値が最少になり得ることに注意する必要がある。

$$I_c = 2\pi \int_0^{R_{nc}} \left\{ \min \left[j_c(\epsilon_y) \right]_{\epsilon_y = \epsilon_0 + \epsilon_{by}}^{\epsilon_y = \epsilon_0 - \epsilon_{by}} \right\} y dy ,$$

$$\epsilon_{by} = -y/R_b \quad \text{for } j_c(\epsilon_0 - y/R_b) < j_c(\epsilon_0 + y/R_b) ,$$

$$\epsilon_{by} = +y/R_b \quad \text{for } j_c(\epsilon_0 - y/R_b) > j_c(\epsilon_0 + y/R_b) \quad (3)$$

これらの2つの計算モデルを用いて、Table 1 の素線 BR1 の I_c を計算した例を Fig. 4 に示す。縦軸は、 ϵ_0 が 0%、-0.2%、-0.5% のそれぞれの場合に曲げ歪を変化させた時の臨界電流値 (12 T, 4.2 K) を計算し、 $\epsilon_0=0\%$ の I_c で規格化している。計算モデルによって大きく傾向が異なるが、実測値は、これら2つの計算値の間にあることが多い。このため、詳細な解析においては、フィラメント間の電流転移や、Fig. 3(b)の概略図で示したように、曲げ歪の中立軸のずれ (Neutral-Axis shift)、極端に大きい引張歪を受けた外周部フィラメントの断線 (Filament breakage)¹¹⁾等を考慮して解析する必要がある。

2.4 事前曲げ歪効果

生成熟処理済の Nb₃Sn 線材に室温で繰り返して歪を印加すると超電導特性が向上するという予歪効果が、1992

年に京都大学グループによって詳細に研究された¹²⁾。その約 10 年後に、Cu-Nb で強化された Nb₃Sn 線材 (Cu-Nb/Nb₃Sn 線材) に繰り返して曲げ戻し歪を与えることによって、超電導特性が向上すること (事前曲げ歪効果) が、東北大らのグループによって確認された¹³⁻¹⁶⁾。この事前曲げ歪効果は、熱処理直後の素線に残留する圧縮歪が、繰り返して曲げ歪により 3 次元的に緩和し、冷却状態での Nb₃Sn フィラメントの圧縮歪が小さくなることによって発現する¹⁷⁾。R&W 法コイルに適用する Nb₃Sn 線材 (R&W 型 Nb₃Sn 線材) の開発においては、この事前曲げ歪効果の活用が検討されている。

3. R&W 型 Nb₃Sn 線材開発

3.1 Nb ロッド法 CuNb 強化型 Nb₃Sn 線材

素線内部に配置する強化材は、In-situ 法 Cu-Nb 合金以外に、Ta 単体、Cu-Ti 等の金属間化合物体、アルミナ分散銅などが知られている。その中でも、Nb₃Sn フィラメント群コアの周囲に Cu-Nb 強化材を配置した Cu-Nb/Nb₃Sn 線材の事前曲げ歪効果は、強化材の無い素線や、コアに Cu-NbTi 強化材を配置した素線と比較して顕著である¹³⁾。In-situ 法 Cu-Nb 強化材は、溶解後急冷凝固させた Cu-Nb 合金のインゴット (溶解後急冷凝固により Cu 中に Nb 晶出相が微細に分散したもの) を加工することによって、Nb フィラメントを極細化する。しかしながら、この In-situ 法 Cu-Nb 合金は、工業的な製造性が低く実用化への障害になっていた。そのため、Cu 母材の中に Nb ロッドを多数本埋め込む新しい手法 (Nb-rod 法)¹⁸⁻²⁰⁾ で作製した Cu-Nb 強化材を用いて、Nb₃Sn 線を内部強化した新しい Cu-Nb/Nb₃Sn 線材が開発された^{21, 22)}。Nb-rod 法 Cu-Nb/Nb₃Sn 線材の製造方法の模式図を In-situ 法と比較して Fig. 5 に示す。ダブルスタック法によって製造される Nb-rod 法 Cu-Nb 強化材は、超電導素線の最終ビレットに組み込まれて伸線加工を施される。最終

Fig. 5 Fabrication process of Cu-Nb/Nb₃Sn strand; (a) Nb-rod method and (b) in-situ method.

線径において、その強化材内部の Nb フィラメントが、サブミクロン以下のサイズになるように設計して強度を増大させている。その Nb フィラメントは、Nb₃Sn 生成熱処理後に In-situ 法の Nb フィラメントと同様に球状化するが、同等以上の性能を有する強化材および安定化材として機能する。Nb-rod 法 Cu-Nb/Nb₃Sn 線材の Nb₃Sn 超電導体に残留する圧縮歪は、強化材が無い線材よりも大きくなるが、適正な事前曲げ歪印加処理により、使用条件下での超電導性能を向上させることができる。

3.2 無冷媒型 25 T マグネット用ラザフォードケーブル

我々は、次期定常強磁場施設計画²³⁾の一環として、R&W 法で製造する 25 T 無冷媒超伝導マグネット (25T-CSM)²⁴⁾に適用可能な Nb₃Sn ラザフォードケーブルを開発した²⁵⁾。その素線およびラザフォードケーブルの諸元を Table 2 に、断面写真を Fig. 6 に示す。Prototype 素線とそれを用いたラザフォードケーブルの基礎特性が評価された後、交流損失を低減するために Ta バリアを用いた 25T-CSM 用素線が開発された。

Table 2 Parameters of the Nb-rod-method Cu-Nb/Nb₃Sn strands and Rutherford Cables

Strand	Unit	Prototype	25T-CSM
Superconductor	-	Bronze-processed Nb ₃ Sn	
Reinforcement	-	Nb-rod-method Cu-20vol%Nb	
Bronze	-	Cu-14wt%Sn-0.2wt%Ti	
Sn diffusion barrier	-	Nb	Ta
Filament diameter	μm	3.3 (nominal)	
Diameter	mm	0.80 ^{±0.01}	
Cu/Cu-Nb/non-Cu	%	20 ^{±5} /35 ^{±5} /45 ^{±5}	
Twist pitch /direction	mm	24 ^{±4} / Left hand helix	
Rutherford Cable			
Number of strands	-	16	
Dimensions	mm	6.45 ^{+0.015/-0.05} w × 1.53 ^{±0.05} t	
Cabling pitch/direction	mm	65 ^{±10} / Right hand helix	
Heat treatment	-	670°C × 96 hr	
Insulation	-	E-glass tape

Fig. 6 Nb-rod-method Cu-Nb/Nb₃Sn strands and Rutherford cables; (a) prototype and (b) 25T-CSM.

Fig. 7 Schematic images of pre-bending treatment; (a) Positive direction and (b) Positive and negative direction.

3.3 事前曲げ歪印加装置

事前曲げ歪印加装置の例を **Fig. 7** に示す。これらは、直径 d の未反応 Nb_3Sn 素線を胴径 D_0 のボビンに巻き取り、 Nb_3Sn 生成熟処理を施し、そのボビンから線材を巻き出しながら、繰り返し曲げ歪を印加する装置である。装置(a)は直径 $2R^+$ の正方向曲げ用のプーリーのみで構成されており、装置(b)は直径 $2R^+$ の正方向曲げと直径 $2R^-$ の逆方向曲げの2種類のプーリーで構成されている。素線表面の正方向曲げ歪 ε_{pb}^+ と逆方向曲げ歪 ε_{pb}^- は、 d が D_0 と $2R^+$ よりも十分に小さいとき、(4)式で算出できる²⁶⁾。ここで、+符号は正方向曲げ、-符号は逆方向曲げを意味する。Prototype 線材には装置(a)を、25T-CSM 線材には装置(b)を適用した。一方、直径 D_0 のボビンで熟処理された直径 d の素線を直径 D_1 のボビンに巻き取った場合、曲げ歪 ε_b は(5)式で与えられる。

$$\varepsilon_{pb}^{\pm} = \frac{d}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{D_0}{2R^{\pm}}\right)}{\left(\frac{D_0}{2} - \frac{d}{2}\right)} \approx d \cdot \left(\pm \frac{1}{2R^{\pm}} - \frac{1}{D_0}\right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_b \approx d \cdot \left(\pm \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_0}\right) \quad (5)$$

Nb_3Sn フィラメント自身が受ける最大歪は、(4)式と(5)式中の素線径 (d) をフィラメント群直径 ($2R_{nc}$) に置き換えることで算出できる。最外層に銅のシースが配置された銅比 0.5、1、1.5 の Nb_3Sn 素線の場合、外周部のフィラメントが受ける曲げ歪は、それぞれ、素線径を用いて計算した場合の 0.84、0.71、0.63 倍程度となり、銅比が大きいほど曲げ歪の影響が小さくなる。

Fig. 8 I_c - B characteristics of prototype-strands and 25T-CSM strands.

Fig. 9 I_c dependence of prototype strand and the extracted strand from the Rutherford cable on positive pre-bending strain. I_c values were normalized by the I_c of a single prototype strand with $\varepsilon_{pb}=0\%$ at 12 T.

Fig. 10 Axial tensile strain dependence of critical current and n -values of 25T-CSM strands.

3.4 事前曲げ歪印加による臨界電流の向上

二種類の $\text{Cu-Nb/Nb}_3\text{Sn}$ 素線 (Table 2 参照) の臨界電流の磁場依存性を **Fig. 8** に示す²⁵⁾。0.3%から 0.9%程度の事前曲げ歪を印加することにより、臨界電流が高磁界側ほど顕著に増大していることが分かる。Prototype 素線とラザフォードケーブルの素線 I_c の正方向事前曲げ歪 ε_{pb}^+ 依存性を **Fig. 9** に示す²⁵⁾。それぞれの I_c は事前曲げ歪無しの素線の 12 T での I_c で規格化している。12 T と 14 T の規格化 I_c は、それぞれ、 $\varepsilon_{pb}^+=0.9\%$ と $\varepsilon_{pb}^+=1.3\%$ で最大となり、事

前曲げ歪を施さない素線の 1.3 倍~1.5 倍に増大した。 ϵ_{pb}^+ が 1.5%以上になると、外周部フィラメントの断線が発生し I_c が低下した。これらの結果から、25T-CSM 用ラザフォードケーブルの事前曲げ歪の印加条件として、 $\pm 0.5\%$ が選定された。Fig. 10 に、25T-CSM 用素線と、そのラザフォードケーブルから取り出した素線の I_c と n 値の引張歪依存性を示す²⁵⁾。事前曲げ歪加工を施した素線の I_c の歪特性は、いずれも 0.15%程度、圧縮歪側にシフトしていることが分かる。これは、ラザフォードケーブルから取り出した素線も単体の素線と同様な事前曲げ歪が印加されていることを示唆している。事前曲げ歪を印加したラザフォードケーブルの内側を観察したところ、ケーブル中の上下の素線同士の粘着はなかった。従って、ラザフォードケーブル中の素線に印加される曲げ歪の中立軸は、ケーブルの厚み中央位置（上下素線の接触部位）では無く、単体の素線を曲げた時と同様な位置になっていると考えられる。一方、単体素線の不可逆歪 ϵ_{irr} は、事前曲げ歪の有無に関わらず 0.85%であったが、ラザフォードケーブルから取り出した素線の ϵ_{irr} は、やや低い 0.65%であった。Fig. 11 に、 I_c および n 値の引張応力依存性を示す²⁵⁾。 $\pm 0.5\%$ の事前曲げ歪の印加は、少なくとも 260 MPa までの引張応力下

Fig. 11 Dependence of I_c and n -value of 25T-CSM strands on axial tensile stress at 14.5 T and 4.2 K.

Fig. 12 Dependence of I_c and n -value of 25T-CSM strands on transverse compression stress at 14.5 T and 4.2 K.

において、 n 値の低下もなく I_c を向上させることができ、25T-CSM 用ラザフォードケーブルの最大引張応力下 251 MPa に対し有効であることが確認された。尚、25T-CSM 用素線の 14.5 T、4.2 K における機械特性は、0.2%耐力が 325~350 MPa (ITER 素線の約 2 倍) であり、ヤング率が約 190 GPa であった。Fig. 12 に、 I_c および n 値の圧縮応力依存性を示す²⁵⁾。単体素線では、事前曲げ歪の印加により、150 MPa までの横圧縮応力に対し、性能向上が見られたが、ラザフォードケーブルから取り出した素線の I_c は、100 MPa 以上の横圧縮応力下で、事前曲げ歪を印加していない単体素線の I_c よりも低下した。このように、単体素線とラザフォードケーブルから取り出した素線において、引張応力および横圧縮応力下での事前曲げ歪印加による I_c 増大効果に差異が観測されたが、その原因の解明には、さらなる調査が必要である。

4. 今後の R&W 型 Nb₃Sn 線材の開発展望

4.1 核融合実証炉への適用

ITER 用導体においては、Nb₃Sn 生成時に SUS などのコンジットや巻枠などに拘束された状態で熱処理が施されるため、それらの構造物と超電導線との熱収縮率差や運転時の電磁力によって、 -0.7% 程度の圧縮歪となり、無歪状態の 3 割程度の I_c 値となる⁴⁾。ITER-CS 用導体開発の初期段階では、繰り返し通電試験において、性能が低下するという問題があったが、低次撚線の短ピッチ化、導体の低ボイド率化によって、目標性能を達成した²⁷⁾。リジッドな導体構造とすることにより、素線そのものの動きによる局所的な応力が抑制され、素線に生じる波状曲げ歪が安定な状態になったと考えられる。この ITER 用導体に R&W 法を適用すると、少なくとも、約 600°C 相当の温度幅から生じる熱収縮差によって印加される冷却歪が無くなり、室温からの冷却歪が支配的になる。残留する圧縮歪は 0.3% 近く緩和され、歪による特性低下は 50% 程度になると推定される。さらに、コンジット化における圧縮工程において、引張り応力を印加した状態でコンジット化することにより、引張応力を保持した導体を製作できるので、Nb₃Sn 超電導体に残留する歪を小さくできる可能性がある。さらに、大型マグネット製作において、その形状に応じた大型かつ特殊な形状の Nb₃Sn 生成熱処理炉が不要となり、一般的なドラム巻形状で熱処理した後、指定のマグネット形状のボビンに巻線することにより、コスト的な問題が大きく改善されるだろう。P. Bruzzone らは、核融合実証炉 (DEMO) 用 TF 導体に R&W 法を適用し、コンジット加工時の反応済 Nb₃Sn 撚線の損傷を防止するために、平角多重撚線の最外周に銅線を配置し、それをコンジット化する導体構造を提案した²⁸⁾。今後、ITER 用導体の製造実績と特性評価結果に基づき、残留圧縮歪を低減させた R&W 型導体の構造検討が必要になるだろう。

4.2 アルミ複合 Nb₃Sn 導体への適用

アルミ複合 Nb₃Sn 導体は、反応済 Nb₃Sn ラザフォードケーブルを、アルミ合金からなる被覆部材の勘合部を摩擦撹拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) により接合した導体である。このコイル用導体の製造法は、リアクト・アンド・ジャACKETING法 (R&J) として、核融合科学研究所、古河電工、UACJ (旧古河スカイ) らによって共同開発された²⁹⁾。ジャACKETING内の空隙をインジウムで充填した 5 mm^t×15 mm^w の縮小導体を用いて製作した小コイルの通電試験においては、残留する曲げ歪の中立軸シフトを考慮することにより、性能低下が無かったことが示された³⁰⁾。さらには、ヘリカル型核融合実証炉 (FTTR) への適用を目指した実規模サイズの 100 kA 級プロトタイプ導体が試作された。この導体は、直径 1.6 mm の超電導線を用いた 1 次撹線 (6SC+1Cu 本撹り) を 36 本撹り合わせたラザフォード撹線を、外寸 25 mm×100 mm のアルミ合金ジャケットと FSW で複合化し、内部の空隙部を Sn-Bi 合金で充填した構造を有する。その導体から取り出した 1 次撹線の臨界電流は、アルミ複合加工前後で劣化が生じないことが確認されている³¹⁾。ねじりを加えながら巻線するヘリカル型の R&W 法 Nb₃Sn コイルの製造においては、今後、事前曲げ歪印加の有効性を検討する必要があるだろう。

4.3 次世代加速器への適用

次世代加速器においては、LHC のアップグレードである HL-LHC (High Luminosity LHC) 計画など、Nb₃Sn 線材に極めて高い J_c が要求されている。この素線仕様を満足したのは、改良型内部すず法である、Oxford OST の RRP 線材と Bruker-EAS の PIT 線材である³²⁾。特殊なレーストラックコイル形状で熱処理されたラザフォードケーブルを、所定の巻枠に移設してコイルを製作する。熱処理後の導体に加わる歪による臨界電流特性低下の抑制と導体間の絶縁方法が検討されている³³⁾。さらに、2014 年 2 月にキックオフした FCC (Future Circular Colliders) 計画では、周長 100 km となる超巨大加速器建設のために数千トンを超える高性能な Nb₃Sn 線材が使用される³⁴⁾。HL-LHC 用導体よりも遥かに厳しい条件下で使用される FCC 用導体においては、R&W 法 Nb₃Sn コイルに適用可能な高性能 R&W 型 Nb₃Sn 導体の開発が期待されている。

4.4 事前曲げ歪効果の活用

R&W 型 Nb₃Sn 線材を用いた導体においては、モノリス線、ラザフォードケーブル、2 重成形撹線、多重丸撹り線、さらには、Cu-Nb 強化材や SUS 線等の強化線材との共撹り線、それらを、コンジット化する等、様々な導体構造が考えられる。コイル巻線後の内部歪の状態を制御するために、導体構造および用途に応じた最適な事前曲げ歪条件を検討する必要があるだろう。前述の Cu-Nb/Nb₃Sn 線材は、事前曲げ歪印加によって超電導線の歪特性を調整することができることから、R&W 型 Nb₃Sn コイル製作に適して

いると考えられる。

5. まとめ

R&W 法 Nb₃Sn コイルを実用化するために、必要とされる要素技術と線材開発の現状を解説した。特に、最近開発された R&W 型 Nb-rod 法 Cu-Nb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルにおける、事前曲げ歪効果による超電導特性向上については詳細に紹介した。今後、R&W 法 Nb₃Sn コイルの実用化を進展させるためには、各種応用機器に適した R&W 型 Nb₃Sn 導体とコイルの構造設計を行い、その導体の巻線方法を検討する必要がある。さらに、実際に、その R&W 型 Nb₃Sn 導体を製作し、その通電特性を曲げ歪が印加された状態で評価することが不可欠である。

本解説は、東北大学金属材料研究所殿、核融合科学研究所殿、日本原子力研究開発機構殿、物質・材料研究機構殿らと共同で実施した研究成果に基づいています。特に、東北大学の諸先生方からは、多くのご指導をいただきました。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

- 1) 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
- 2) 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)
杉本昌弘:「ブロンズ法 Nb₃Sn 超電導線材の開発動向—素線の高性能化と導体化—」, *低温工学* **47** (2012) 479-485
- 3) A. Asner, et al.: "Development and successful testing of the first Nb₃Sn wound in-situ-reacted, high-field superconducting quadrupole of CERN," *IEEE Trans. Magn.* **19** (1983) 1410-1416
- 4) S. Awaji, et al.: "Strain and superconducting properties for R&W reinforcing and stabilizing Nb₃Sn coil under high electromagnetic force," *TEION KOGAKU* **33** (1998) 390-396 (in Japanese)
淡路 智ら:「高電磁力下における R&W 補強安定化 Nb₃Sn コイルの歪み特性と超伝導特性」, *低温工学* **33** (1998) 390-396
- 5) 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)
久保芳生ら:「PVF 絶縁を施したリアクト&ワインド(R&W)法による Nb₃Sn コイルの開発」, *低温工学* **37** (2002) 61-67
- 6) J.W. Ekin: "Strain scaling law and the prediction of uniaxial and bending strain effects in multifilamentary superconductors," *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
- 7) N. Nunoya, et al.: "Characterization of ITER Nb₃Sn strands under strain-applied conditions," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18** (2008) 1055-1058
- 8) L. Bottura and B. Bordini: " $J_c(B,T,\epsilon)$ parameterization for the ITER Nb₃Sn production," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 1521-1524

- 9) A. Nijhuis, et al.: "The effect of axial and transverse loading on the transport properties of ITER Nb₃Sn strands," Supercond. Sci. Technol. **26** (2013) 084004
- 10) M. Takayasu, et al.: "Pure bending strains of Nb₃Sn wires," Supercond. Sci. Technol. **24** (2011) 045012.
- 11) M.C. Jewell, et al.: "The influence of Nb₃Sn strand geometry on filament breakage under bend strain revealed by metallography," Supercond. Sci. Technol. **16** (2003) 1005-1011
- 12) 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
- 13) 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
- 14) S. Awaji, et al.: "Prebending effects in bronze route Nb₃Sn wires," Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) S313-318
- 15) K. Watanabe, et al.: "Large T_c , B_{c2} , and I_c enhancement effect due to the prebending treatment for bronze route Nb₃Sn wires," IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 3564-3567
- 16) S. Awaji, et al.: "Application of prebending effect to high strength Nb₃Sn strands," Fusion Eng. Design **81** (2006) 2473-2478
- 17) H. Oguro: "Mechanism of the strain effect for the superconducting properties of Nb₃Sn wires," TEION KOGAKU **47** (2012) 486-494 (in Japanese)
 小黒英俊:「Nb₃Sn 線材の超伝導特性に対するひずみ効果のメカニズム」, 低温工学 **47** (2012) 486-494
- 18) M. Filgueira, et al.: "Mechanical behavior of copper 15% volume Niobium microcomposite wires," Mater. Res. **4** (2001) 127-131
- 19) M. Liang, et al.: "Characteristics of high strength and high conductivity Cu-Nb micro-composites," IEEE Trans. Appl. Supercond. **20** (2010) 1619-1621
- 20) H. Oguro, et al.: "New fabrication process of Cu-Nb composite for the internal reinforcement of Nb₃Sn wires," J. Supercond. Nov. Magn. **26** (2013) 2099-2011
- 21) H. Oguro, et al.: "Mechanical and superconducting properties of Nb₃Sn wires with Nb-rod-processed CuNb reinforcement," Supercond. Sci. Technol. **26** (2013) 094002
- 22) 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
- 23) K. Watanabe, et al.: "Upgrade design to a cryogen-free 20-T superconducting outsert for a 47-T hybrid magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 4300304
- 24) S. Awaji, et al.: "New 25 T cryogen-free superconducting magnet project at Tohoku University," IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4302005
- 25) 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) DOI: 10.1109/TASC.2014.2381459
- 26) 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
- 27) Y. Nabara, et al.: "Impact of cable twist pitch on T_{cs} -degradation and AC loss in Nb₃Sn conductors for ITER central solenoids," IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4200705
- 28) P. Bruzzone, et al.: "Design of large size, force flow superconductors for DEMO TF coils," IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4201504
- 29) M. Sugimoto, et al.: "Novel type of aluminum-alloy jacketed Nb₃Sn superconductors manufactured by friction stir welding technique," IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 4802905
- 30) K. Takahata, et al.: "Effect of bending on critical current of react-and-jacket processed Nb₃Sn conductor," Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012 (2012) 803-806
- 31) K. Takahata, et al.: "Critical current measurements of sub-cables extracted from the 100-kA-class aluminum-alloy-jacketed Nb₃Sn conductor," Abstracts of CSSJ Conference **89** (2014)183
 高畑一也ら:「100 kA 級アルミニウム合金被覆 Nb₃Sn 導体から取り出したサブケーブルの臨界電流測定」, 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2014) 183
- 32) L. Bottura, et al.: "Advanced accelerator magnets for upgrading the LHC," IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 4002008.
- 33) P. Manil, et al.: "Development and coil fabrication test of the Nb₃Sn dipole magnet FRESKA2," IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4001705
- 34) <http://cern.ch/fcc>

杉本 昌弘 1992 年横浜国立大学教育学部大学院物質科学専修(物理)修了。同年、古河電気工業株式会社に入社。現在、同社銅条・高機能材料事業部門 日光伸銅工場 生産改革部超電導グループ主査。金属系超電導線材の開発に従事。低温工学・超電導学会会員。

坪内 宏和 1982 年神戸大学工学部機械工学科卒業。同年、古河電気工業株式会社に入社。現在、同社銅条・高機能材料事業部門 日光伸銅工場長。金属系超電導線材等の品質保証に従事。低温工学・超電導学会会員。

遠藤 壮 1987 年富山大学大学院理学研究科(物理学専攻)修了。同年、古河電気工業株式会社に入社。現在、同社銅条・高機能材料事業部門 日光伸銅工場 品質保証部主査。金属系超電導線材の品質保証に従事。低温工学・超電導学会会員。

高木 亮 1990 年山形大学大学院工学研究科修了。同年、古河電気工業株式会社に入社。現在、同社銅条・高機能材料事業部門 日光伸銅工場 生産改革部超電導グループマネージャー。金属系超電導線材の製造および開発に従事。低温工学・超電導学会会員。

伊井 秀樹 1986 年東京大学工学部金属材料学科卒業。同年、古河電気工業株式会社に入社。現在、同社銅条・高機能材料事業部門技術企画ユニット市場開発グループ主査。超電導線材等の製品開発・事業化等に従事。日本金属学会会員。

清水 仁司 1985 年中央大学理工学部物理学科卒業。同年、古河電気工業株式会社に入社。現在、同社銅条・高機能材料事業部門技術企画ユニット超電導グループマネージャー。製品開発・事業化等に従事。電気学会会員。