

極細素線を用いた Nb<sub>3</sub>Sn ケーブルの超伝導特性王 旭東<sup>\*1, †</sup>, 土屋 清澄<sup>\*1</sup>, 寺島 昭男<sup>\*1</sup>, 飯嶋 安男<sup>\*2</sup>, 菊池 章弘<sup>\*2</sup>Superconducting Characteristics of Nb<sub>3</sub>Sn Cables Stranded with Ultra-fine WiresXudong WANG<sup>\*1, †</sup>, Kiyosumi TSUCHIYA<sup>\*1</sup>, Akio TERASHIMA<sup>\*1</sup>, Yasuo IIJIMA<sup>\*2</sup> and Akihiro KIKUCHI<sup>\*2</sup>

**Synopsis:** We are developing A15 cables made of ultra-fine wires for react-and-wind (R&W) magnet technology. Recently, we fabricated a bronze processed multifilament Nb<sub>3</sub>Sn wire with a diameter of 50 μm. We also made a prototype Nb<sub>3</sub>Sn cable by stranding 19 wires for testing. In this study, the transport critical current ( $I_c$ ) of the cable was measured at 4.2 K and under an external field up to 18 T. The Non-Cu critical current density ( $J_c$ ) was also calculated from the  $I_c$  results. For the  $I_c$  measurements, the cable was wound on glass fiber reinforced plastic (GFRP) cylinder bobbins after the heat treatment in straight geometry to replicate the R&W process. Four GFRP bobbins with different diameters were prepared to investigate the bending limit of the cable. The critical temperature ( $T_c$ ) and magnetization properties of the cable were also measured by a magnetic property measurement system of Quantum Design.

**Keywords:** Ultra-fine wire, react-and-wind, critical current, critical temperature, magnetization

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

## 1. はじめに

加速器や核融合などの分野において、A15 超伝導線材を用いた高磁場磁石の開発が活発に行われてきた<sup>1-9)</sup>。A15 超伝導線材に代表される Nb<sub>3</sub>Sn 線材は、煩雑な熱処理と機械応力によって壊れやすいことから磁石製作が非常に複雑である<sup>10-13)</sup>。特にその機械特性による制限から、熱処理後に巻線を行う react-and-wind (R&W) の製作手法が適用困難である。そのため、現在製作されている Nb<sub>3</sub>Sn 磁石はほとんどが巻線してから熱処理を行う wind-and-react (W&R) 法が採用されている。しかし、W&R で製作したコイルは、サイズの変化や多数のトレーニングクエンチが報告されている<sup>2,5,14-16)</sup>。一方で、極細の Nb<sub>3</sub>Sn 素線を撚り合せたケーブルは R&W に対する機械特性の制限を緩和できる可能性が高いと考えられる。そこで、我々は極細の Nb<sub>3</sub>Sn 素線とそれを用いたケーブルを開発し、R&W による Nb<sub>3</sub>Sn 磁石製作に向けた基礎研究を行ってきた<sup>17-20)</sup>。最近の成果として、最小直径 0.03 mm

のブロンズ法による Nb<sub>3</sub>Sn 素線と、直径 0.05 mm 素線を用いたケーブルを製作した<sup>20)</sup>。本解説では、直径 0.05 mm 素線を用いて製作したケーブルの臨界電流 ( $I_c$ ) と臨界温度 ( $T_c$ ) および磁化の測定結果について紹介する。

2. Nb<sub>3</sub>Sn 素線とケーブル

Nb<sub>3</sub>Sn 素線とケーブルの諸元を Table 1 に、熱処理前後の断面写真を Fig. 1 に示す。Nb<sub>3</sub>Sn 素線はブロンズ法で製作され、直径 45.2 mm のピレットから直径 0.05 mm まで押出しと伸線を行った<sup>20)</sup>。素線内は直径約 0.003 mm の Nb<sub>3</sub>Sn フィラメントが 19 本配置されており、銅比は 0.89 である。ケーブルは絶縁なしの素線を 19 本用いて、ピッチ 4 mm の集合撚りによって製作した。ケーブル外径は約 0.25 mm である。各試験前にケーブルを直状で 650 °C と 48 時間の条件で熱処理を行った<sup>20)</sup>。

3. Nb<sub>3</sub>Sn ケーブルの  $I_c$  測定

物質・材料研究機構の低温応用ステーションにある汎用超伝導マグネットを用いて、4.2 K と 18 T までの磁場中で通電法により  $I_c$  測定を行った。R&W のコイル製作手法を模擬するために、直状で熱処理したケーブルを半径の異なる 4 つの GFRP ボビンに巻付けて測定し、ケーブルの曲げ限界について調査した。各ボビンにケーブルを巻付けた写真を Fig. 2 に示す。4 つのボビンの直径はそれぞれ 20 mm, 25 mm, 30 mm と 50 mm である。ケーブルはボビンに掘られた V 型の溝に嵌るように巻付けられており、測定中の動きを抑え

Received February 28, 2023

<sup>\*1</sup> 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
〒305-0801 茨城県つくば市大徳 1-1

Inter-University Research Institute Corporation High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

<sup>\*2</sup> 国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

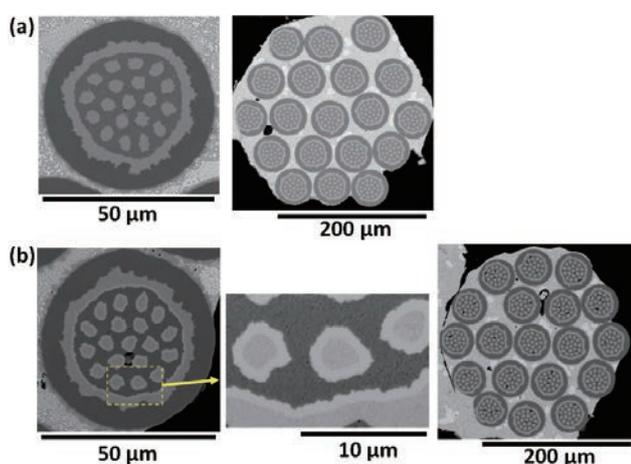
National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan

<sup>†</sup> E-mail: wanxdon@post.kek.jp

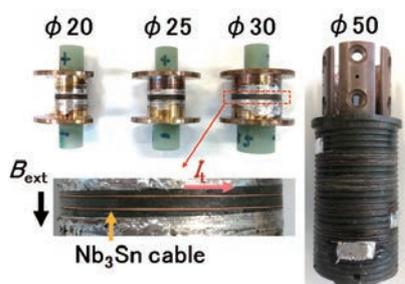
DOI: 10.2221/jcsj.58.196

**Table 1** Specifications of Nb<sub>3</sub>Sn wire and cable.

Nb <sub>3</sub> Sn wire	
Outer diameter	0.05 mm
No. of filaments	19
Filament diameter	0.003 mm
Cu/Non-Cu ratio	0.89
Barrier	Nb
Bronze composition	Cu-14mass%Sn-0.3mass%Ti <sup>20)</sup>
Nb <sub>3</sub> Sn cable	
Minimum outer diameter	0.25 mm
No. of strands	19
Twist pitch	4 mm



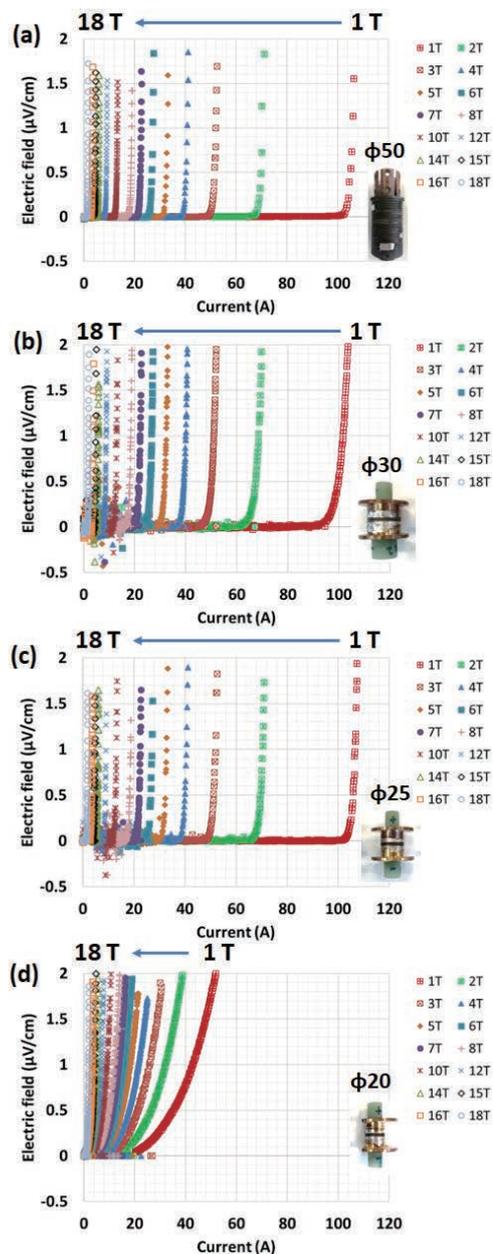
**Fig. 1** Cross-sectional photograph of the Nb<sub>3</sub>Sn wire and cable (a) before and (b) after the heat treatment at 650 °C for 48 hours.



**Fig. 2** Photographs of the four GFRP bobbins with diameters of 50 mm, 30 mm, 25 mm, and 20 mm. The Nb<sub>3</sub>Sn cable was wound on the bobbin and soldered to current leads after reacting.

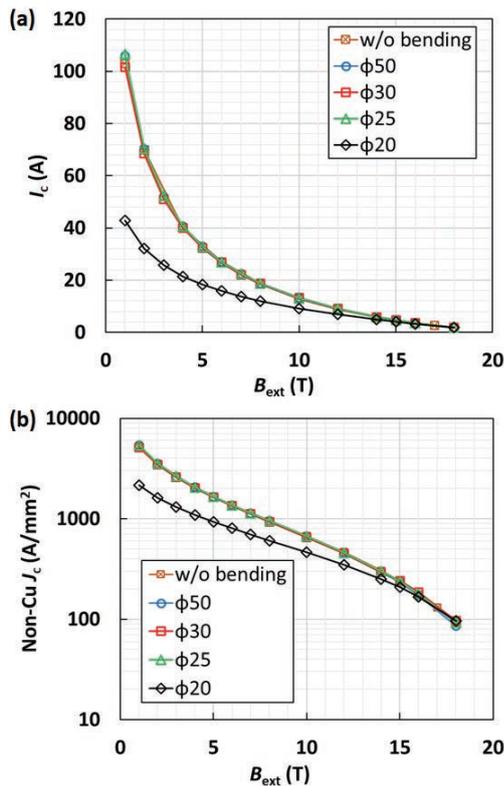
る構造となっている。外部磁場 ( $B_{ext}$ ) は Fig. 2 に示すようにケーブルに垂直に印可し、電磁力がボビン中心へ向くように通電を行った。 $I_c$  測定に用いた電圧タップの区間長は、ボビンの大きさに対応して 70 mm から 140 mm であり、タップから電流リードまでの距離は 30 mm 以上としている。

各ボビンで測定したケーブルの電界と電流の関係を **Fig. 3** に示す。電界は測定電圧を  $I_c$  タップの区間長で割って算出し



**Fig. 3** Electric field and current curves measured on the four bobbins with diameters of (a) 50 mm, (b) 30 mm, (c) 25 mm, and (d) 20 mm at 4.2 K and under the external field from 1 T to 18 T.

た。Fig. 3 の結果を用いて  $I_c$  と安定化銅を除いた臨界電流密度 (Non-Cu  $J_c$ ) の磁場依存性を **Fig. 4** に示す。 $I_c$  は  $1.0 \mu\text{V}/\text{cm}$  の電界基準により算出し、Non-Cu  $J_c$  は  $I_c$  を安定化銅を除いたケーブル断面積 ( $0.01974 \text{ mm}^2$ ) で割ることにより計算した。また、直状で測定した  $I_c$  を Fig. 4 に追加し、R&W の結果と比較した。Fig. 3 と Fig. 4 より、曲げによる劣化は直径 25 mm まで観測されず、直径 20 mm で明確に現れた。劣化なしの  $I_c$  と Non-Cu  $J_c$  は、12 T でそれぞれ約 9.1 A と約  $460 \text{ A}/\text{mm}^2$  である。これは同程度の Sn 濃度の先行研究<sup>21)</sup> より 20% ほど低い数値であるが、ブロンズと Nb フィラメン

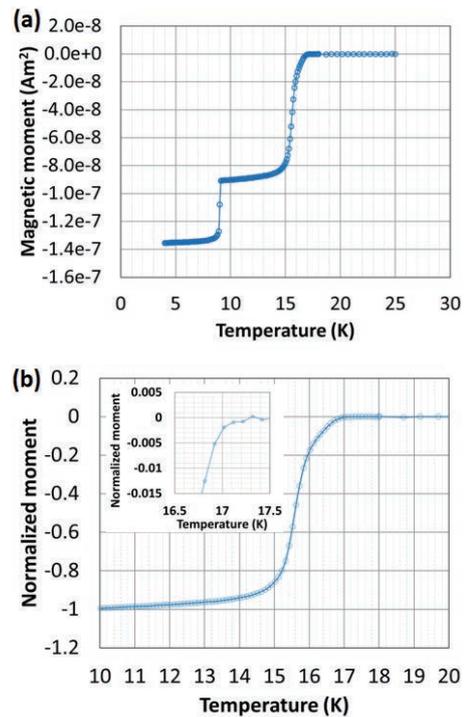


**Fig. 4** Field dependence on  $I_c$  and Non-Cu  $J_c$  defined by  $1.0 \mu\text{V}$ /cm. A data without bending and the four bobbin measurements with diameters of 20 mm, 25 mm, 30 mm, and 50 mm are summarized in these results.

トの最適化ができていないためと考えられる。劣化なしの直径 25 mm ボビンでの曲げひずみは、素線径で計算すると 0.2% であるのに対して、ケーブル径では 1% となる。先行研究<sup>10-13</sup>から 1% のひずみで劣化しないことは考えにくい。このケーブルの曲げ特性はケーブル径に影響されにくいと考えられる。先行研究では、同じ直径 0.05 mm 素線を 49 本 (1 次 7 本集合撚り  $\times$  2 次 7 本集合撚り) 撚線した直径約 0.45 mm のケーブル (直径が本サンプル 0.25 mm の 2 倍以上) においても、曲げ直径 23 mm で明確な劣化が観測された<sup>20</sup>。これらの結果から、極細素線を用いた Nb<sub>3</sub>Sn ケーブルの曲げ特性はケーブルサイズや撚線方法にほとんど依存せず、素線径によってほぼ決まると考えられる。直径 0.05 mm 素線の曲げ限界は、直径 20 mm と 25 mm の間にあることが明らかとなった。

#### 4. Nb<sub>3</sub>Sn ケーブルの $T_c$ 測定

$T_c$  測定は Quantum Design 社製の Magnetic Property Measurement System (MPMS) を用いて行った。長さ 5 mm の Nb<sub>3</sub>Sn ケーブルを MPMS に設置し、4.2 K まで冷却してからケーブルに対して垂直に 1 mT の磁場を印可しながら 25 K まで昇温して磁気モーメントを測定した。ケーブルの磁気モーメントと温度の関係を Fig. 5 (a) に示す。測定結



**Fig. 5** Temperature dependant (a) magnetic moment and (b) normalized moment of the Nb<sub>3</sub>Sn cable under an external field of 1.0 mT. The inset of the normalized moment shows a zoomed view around the onset  $T_c$  of Nb<sub>3</sub>Sn.

果から、9 K 付近で Nb の転移と 17 K 付近で Nb<sub>3</sub>Sn の転移が観測された。バリア層とフィラメント内の未反応部の Nb が 9 K 付近の転移となっている。Fig. 5 (a) の結果を用いて、10 K の磁気モーメントを -1 に、20 K 以上の平均値を 0 として規格化したものを Fig. 5 (b) に示す。規格化した磁気モーメントが -0.001 となる温度を Onset  $T_c$  と定義すると、Nb<sub>3</sub>Sn ケーブルの Onset  $T_c$  は約 17.1 K である。これは、先行研究の通電法で行った素線の結果とよく一致している<sup>20</sup>。

#### 5. Nb<sub>3</sub>Sn ケーブルの磁化測定

磁化測定は  $T_c$  測定と同じく MPMS を用いて行った。長さ 5 mm の Nb<sub>3</sub>Sn ケーブルに垂直に磁場を -5 T から 5 T を印可しながら磁気モーメントを測定した。測定温度を 4.2 K, 6 K, 8 K と 10 K に設定し、各温度の測定結果を Fig. 6 に示す。各温度の測定結果において、Nb による磁化が 0.5 T 以下で現れ<sup>22</sup>、フラックスジャンプは観測されなかった。フィラメントモデルの式 (1) を用いて磁化より推定したケーブルの Non-Cu  $J_c$  を Fig. 7 に示す。ただし、Non-Cu 領域の正確な寸法が不明なため、4.2 K と 4 T の磁化から推定した Non-Cu  $J_c$  を直径 50 mm ボビンの  $I_c$  測定から得られたものにフィッティングして、Nb<sub>3</sub>Sn 素線の Non-Cu 領域の相当直径 ( $d_{\text{Non-Cu}}$ ) を補正した。この補正值を用いて各温度の磁化から Non-Cu  $J_c$  を推定した。また、Nb の磁化を除外するため、Non-Cu  $J_c$  の推定は 0.5 T 以上で行った。

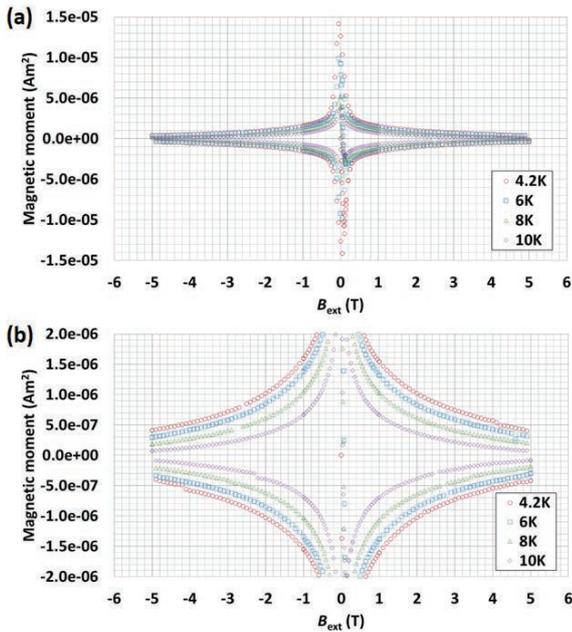


Fig. 6 (a) A full-scale result and (b) a zoomed view of the magnetization measurements on the Nb<sub>3</sub>Sn cable at 4.2 K, 6 K, 8 K, and 10 K.

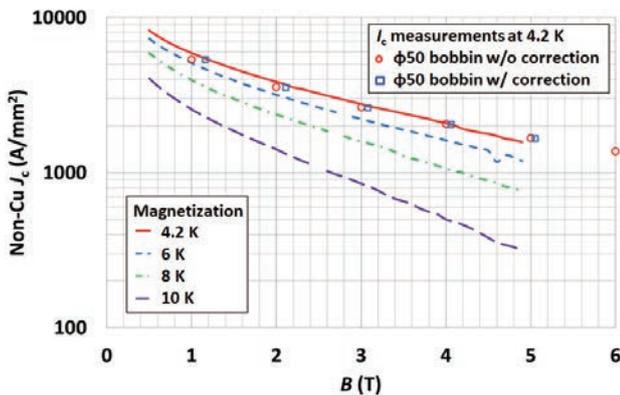


Fig. 7 Field dependent Non-Cu  $J_c$  estimated from the magnetizations of the Nb<sub>3</sub>Sn cable at 4.2 K, 6 K, 8 K, and 10 K. Plots are the Non-Cu  $J_c$  calculated from the  $I_c$  measurement at 4.2 K of the 50 mm diameter bobbin with and without the self-field correction.

$$\text{Non-Cu } J_c = \frac{3\pi}{4} \frac{2}{d_{\text{Non-Cu}}} \frac{4m}{\pi d_{\text{Non-Cu}}^2 L} \quad (1)$$

ここで、 $d_{\text{Non-Cu}}$  は Nb<sub>3</sub>Sn 素線の Non-Cu 領域の相当直径、 $m$  は Nb<sub>3</sub>Sn 素線あたりの磁気モーメント、 $L$  はサンプル長で 5 mm である。

4.2 K の  $I_c$  測定から計算した Non-Cu  $J_c$  が磁化から推定したものより低い値を示すのは、通電による自己磁場 (15 G/A) の影響と考えられる。自己磁場を補正した Non-Cu  $J_c$  (Fig. 7 の □) は低磁場でも磁化の推定値とよく一致している。 $I_c$  増大に伴う自己磁場の上昇によって、Non-Cu  $J_c$  の誤差は 1 T で約 16% であったが、4 T 以上だと 1.5% 未満となり、測

定誤差範囲内として無視できるレベルまで減少した。なお、4 T で補正した  $d_{\text{Non-Cu}}$  を用いて磁化から Non-Cu  $J_c$  を推定したのは、この自己磁場による誤差を少なくするためである。今後は、さらに高磁場側の磁化測定を行う予定である。

## 6. まとめ

直径 0.05 mm の Nb<sub>3</sub>Sn 素線を用いたケーブルを製作し、その臨界電流と臨界温度および磁化の測定評価を行った。直径 0.05 mm 素線を 19 本撚線したケーブル  $I_c$  と Non-Cu  $J_c$  は、12 T でそれぞれ約 9.1 A と約 460 A/mm<sup>2</sup> である。極細の Nb<sub>3</sub>Sn 素線を用いたケーブルの曲げ特性は、ケーブルサイズや撚線方法にほとんど依存せず、素線径によってほぼ決まると考えられる。今回測定した直径 0.05 mm 素線の曲げ限界は直径 20 mm と 25 mm の間にあることが明らかとなった。ケーブルの Onset  $T_c$  は約 17.1 K であり、先行研究の通電法で測定した素線の結果とよく一致している。磁化測定は、4.2 K 以外に 6 K、8 K と 10 K でも行い、各温度での磁化から Non-Cu  $J_c$  を推定した。自己磁場を補正することで、4.2 K の低磁場側も  $I_c$  測定による Non-Cu  $J_c$  とよく一致した。今後は、Sn 濃度の増加や Nb フィラメントの最適化を図ることで超伝導特性の向上を目指していくとともに、異なる素線径を用いたケーブルの製作と特性評価を行っていく予定である。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21H04477 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) A. den Ouden, S. Wessel, E. Krooshoop, and H. ten Kate: "Application of Nb<sub>3</sub>Sn Superconductors in High-Field Accelerator Magnets," IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 733-738
- 2) L. Chiesa, S. Caspi, M. Coccoli, et al.: "Performance Comparison of Nb<sub>3</sub>Sn Magnets at LBNL," IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 1254-1257
- 3) A.V. Zlobin, G. Ambrosio, N. Andreev, et al.: "R&D of Nb<sub>3</sub>Sn accelerator magnets at Fermilab," IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 1113-1118
- 4) A. Kikuchi, R. Yamada, E. Barzi, et al.: "Cu stabilized Nb<sub>3</sub>Al strands for the high field accelerator magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (2008) 1026-1030
- 5) A. V. Zlobin, N. Andreev, G. Apollinari, et al.: "Development and test of a single-aperture 11 T Nb<sub>3</sub>Sn demonstrator dipole for LHC upgrades," IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 4000904
- 6) F. Savary, M. Bajko, B. Bordini, et al.: "Progress on the Development of the Nb<sub>3</sub>Sn 11 T Dipole for the High Luminosity Upgrade of LHC," IEEE Trans. Appl. Supercond. **27** (2017) 4003505
- 7) D. Ciazynski: "Review of Nb<sub>3</sub>Sn conductors for ITER," Fusion Eng. Des. **82** (2007) 488-497
- 8) N. Mitchell, D. Bessette, R. Gallix, et al.: "The ITER magnet system," IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (2008) 435-440
- 9) Y. Hishinuma, A. Kikuchi, Y. Iijima, et al.: "Study of RHQT-processed Nb<sub>3</sub>Al multifilamentary rectangular tape strand to be applied to a fusion

- magnet," Fusion Engineering and Design **18** (2022) 113169
- 10) J. W. Ekin: "Strain scaling law for flux pinning in practical superconductors. Part I: Basic relationship and application to Nb<sub>3</sub>Sn conductors," Cryogenics **20** (1980) 611-624
  - 11) C. R. Walters, I. M. Davidson, and G. E. Tuck: "Long sample high sensitivity critical current measurements under strain," Cryogenics **26** (1986) 406-412
  - 12) W. Specking, H. Kiesel, H. Nakajima, et al.: "First Results of Strain Effects on I<sub>c</sub> of Nb<sub>3</sub>Al Cable in Conduit Fusion Superconductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 1342-1345
  - 13) B. ten Haken, A. Godeke, and H. H. J. ten Kate: "The influence of compressive and tensile axial strain on the critical properties of Nb<sub>3</sub>Sn conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 1909-1912
  - 14) M. Durante, L. Garcia Fajardo, P. Manil, et al.: "Geometrical Behavior of Nb<sub>3</sub>Sn Rutherford Cables During Heat Treatment," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4802705
  - 15) M. Michels, F. Lackner, C. Scheuerlein, et al.: "Length Changes of Unconfined Nb<sub>3</sub>Sn Rutherford Cables During Reaction Heat Treatment," IEEE Trans. on Appl. Supercond. **29** (2019) 6000605
  - 16) G. P. Willering, et al.: "Cold powering tests of 11 T Nb<sub>3</sub>Sn dipole models for LHC upgrades at CERN," IEEE Trans. on Appl. Supercond. **26** (2016) 4005604
  - 17) A. Kikuchi, Y. Iijima, A. Ichinose, et al.: "Trial manufactures of jelly-rolled Nb/Al single wire with very small diameter below 50 microns," Proc. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **756** (2020) 012016
  - 18) A. Kikuchi, Y. Iijima, S. Nimori, et al.: "Ultra-fine Nb<sub>3</sub>Al mono-core wires and cables," IEEE Trans. on Appl. Supercond. **31** (2021) 6000105
  - 19) S. Kim, H. Fukuda, R. Kimura, et al.: "Critical Characteristics of Ultrafine Nb<sub>3</sub>Al Superconducting Wires Under Conduction Cooling Conditions," IEEE Trans. on Appl. Supercond. **32** (2022) 6001005
  - 20) A. Kikuchi, Y. Iijima, M. Yamamoto, et al.: "The Bronze Processed Nb<sub>3</sub>Sn Ultra-Thin Superconducting Wires," IEEE Trans. on Appl. Supercond. **32** (2022) 6000104
  - 21) G. Iwaki, et al.: "Development of Bronze-Processed Nb<sub>3</sub>Sn Superconducting Wires for High Field Magnets," IEEE Trans. on Appl. Supercond. **12** (2002) 1045-1048
  - 22) D. K. Finnemore, T. F. Stromberg, and C. A. Swenson: "Superconducting properties of high-purity niobium," Phys. Rev. **149** (1966) 231-243

---

**王 旭 東** 2011年早稲田大学大学院先進理工学研究科博士後期課程修了。2009年同大学先進理工学部助手, 2012年同大学助教, 2014年大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構助教。超伝導磁石やケーブルの開発に従事。低温工学・超電導学会, 加速器学会会員。博士(工学)。

**土 屋 清 澄** 1972年名古屋大学大学院工学研究科修了。1974年高エネルギー物理学研究所勤務。2011年高エネルギー加速器研究機構定年退職。高エネルギー加速器研究機構名誉教授, 総合研究大学院大学名誉教授。超伝導磁石および超伝導線材の開発に従事。低温工学・超電導学会, 加速器学会会員。博士(工学)。

**寺 島 昭 男** KEK 超電導低温工学センターにて, 超電導磁石の開発, 低温技術の研究に従事。

**飯 嶋 安 男** 1978年茨城工業高等専門学校機械工学科卒業。1979年独立研究開発法人物質・材料研究機構入職(旧金属材料技術研究所入所)。2018年独立研究開発法人物質・材料研究機構名誉研究員。超伝導材料の線材化及び特性改善(Ti添加Nb<sub>3</sub>Sn線材, RHQT法Nb<sub>3</sub>Al線材等)。

**菊 池 章 弘** 1995-1998年日本学術振興会特別研究員(DC1)。1996年米国ブルックヘブン国立研究所留学を経て1998年東海大学大学院工学研究科博士課程後期修了。同年科学技術庁金属材料技術研究所(現物質・材料研究機構)入所。2006-2007年米国フェルミ国立加速器研究所訪問研究員。2013年文部科学省研究振興局出向。その他, 高エネルギー加速器研究機構客員教授, 東京工業大学非常勤教員等を併任。現在, 物質・材料研究機構低温超伝導線材グループグループリーダー。低温工学・超電導学会, 日本金属学会, 応用物理学会会員。博士(工学)。