

# ソレノイドコイル形状の Nb3Al 極細素線超伝導ケーブルの臨界電流値の測定 CRITICAL CURRENT MEASUREMENT OF ULTRA-FINE STRANDS Nb3Al CABLES IN SOLENOID COIL SHAPE

植木竜一<sup>#,A)</sup>, 大内徳人<sup>A)</sup>, 菊池章弘<sup>B)</sup>, 山本優<sup>C)</sup>, 有本靖<sup>A)</sup>, 青木和之<sup>A)</sup>

Ryuichi Ueki<sup>#,A)</sup>, Norihito Ohuchi<sup>A)</sup>, Akihiro Kikuchi<sup>B)</sup>, Masaru Yamamoto<sup>C)</sup>, Yasushi Arimoto<sup>A)</sup>, Kazuyuki Aoki<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK (High Energy Accelerator Research Organization)

<sup>B)</sup> NIMS (National Institute for Materials Science)

<sup>C)</sup> JSA (Japan Superconductivity Application Development Inc)

## Abstract

To improve the beam collision performance of SuperKEKB, installation of superconducting sextupole magnet in being considered. The main superconducting sextupole coils and three types of superconducting correction coils will be incorporated in this magnet. We are developing the correction coils using ultra-fine strand Nb3Al superconducting cables with strand diameters less than 50  $\mu\text{m}$  fabricated by the React & Wind method. In this paper, we report the measurement results of the superconducting performance of Nb3Al cables of 0.6 to 0.8 m in length in the solenoid coils with radius of curvature from 15 mm to 25 mm.

## 1. はじめに

SuperKEKB [1]は 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を用いた円形衝突型加速器であり、目標輝度は  $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  である。この目標を達成するためには、Chromatic x-y coupling の精密な補正が必要であり、ビーム衝突点を含む直線区間に 3 種類の補正コイル (A3、B2、A2) を備えた 16 個の超伝導六極磁石の設置を検討している[2]。KEK では、超細素線 Nb3Al スtrand線を用いた React & Wind 法による補正コイルの研究を進めてきた。A15 超伝導体の臨界電流値は、曲げ応力により劣化することが知られている[3]、我々はこれまでジェリーロール法で製造した  $\phi 50 \mu\text{m}$  スtrand線を用いた 49 本総撚り Nb3Al ケーブル及び 7×7 本撚り Nb3Al ケーブルの機械的曲げが臨界電流値に与える影響を調べた[4, 5]。7×7 本撚り Nb3Al ケーブルの曲率半径が 15 mm 以上の場合、臨界電流の顕著な低下は観察されなかった。しかし、曲率半径 12.5 mm および 10 mm では明らかな臨界電流の低下が確認された。CT スキャン結果から、臨界電流が低下した Nb3Al ケーブルの一部スtrand線が断線していたことが判明した。一般的に、ワイヤにかかる曲げひずみはワイヤの直径に反比例する。そこで、菊池ら[6, 7]が開発したより細い直径 33  $\mu\text{m}$  の Nb3Al スtrand線を用いて 111 本総撚り Nb3Al ケーブルを製作し、機械的曲げ試験と臨界電流値の測定を行った。実際のコイル製作時には超伝導ケーブルに連続的な曲げひずみ加わる。そこで、600 mm~800 mm 長の Nb3Al ケーブルを用いて数ターンのソレノイド形状コイルを製作し、連続的な曲げひずみが臨界電流値に与える影響を調査した。本論文では、 $\phi 33 \mu\text{m}$  スtrand線を用いた 111 本総撚り Nb3Al ケーブルの臨界電流値測定の結果、および 3 種類の異なる Nb3Al ケーブルで製作したソレノイド形状コイルの臨界電流値測定の結果について報告する。

## 2. 超細素線 Nb3Al ケーブルの開発

我々は、 $\phi 50 \mu\text{m}$  の超微細スtrand Nb3Al ケーブル (49 本総撚りおよび 7×7 本撚り Nb3Al ケーブル) の臨界電流値の測定を行ってきた。しかし、曲率半径が 15 mm より小さくなると素線の一部が断線することが分かった[5]。そこで、ワイヤの歪みを低減するため、より小さい直径を持った  $\phi 33 \mu\text{m}$  スtrand線を用いた Nb3Al ケーブルを新たに製作した。図 1 は  $\phi 50 \mu\text{m}$  および  $\phi 33 \mu\text{m}$  の Nb3Al スtrand線の断面を示す。スtrand線は Nb および Al シートをジェリーロール法で巻いて製造した。

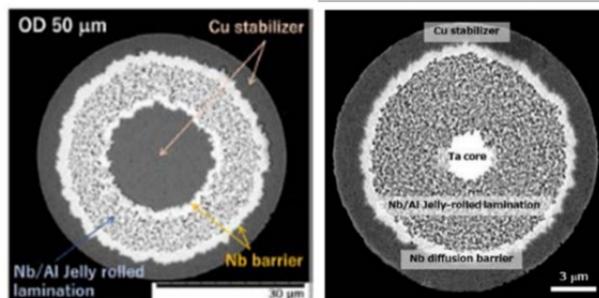


Figure 1: Cross section of  $\phi 50 \mu\text{m}$  (left) and  $\phi 33 \mu\text{m}$  (right) strand.

図 2 は  $\phi 50 \mu\text{m}$ 、49 本総撚りおよび 7×7 本撚り Nb3Al ケーブル、 $\phi 33 \mu\text{m}$ 、111 本撚り Nb3Al ケーブルの断面を示す。49 本、111 本総撚りケーブルはスtrand線を均等に撚り合わせた構造である。7×7 本撚りケーブルは、7 本の同芯撚りケーブル 7 本を同芯撚りし製作された。各ケーブルのパラメータを表 1 に示す。ケーブルの熱処理条件は 800°C、10 時間である。また、銅/SC 比は 1 である。

<sup>#</sup> ryuichi.ueki@kek.jp

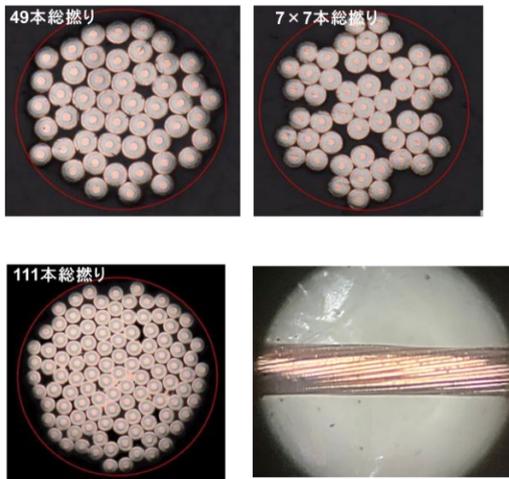


Figure 2: Cross section of Nb3Al cable and external view.

Table 1: Parameter of Ultra-fine Strand Nb3Al Cable

Nb3Al cable	49本総撚り	7×7本撚り	111本総撚り
Number of strands	49	49	111
Equivalent diameter (mm)	0.42/0.47		0.47
Cabling pitch [S] (mm)	8.0	18.5/8.3	7.5
Heat treatment temp. (°C) and time (hours)		800/10	
Requirement of the transport current @4T and 6 K		50	
Strand wire		Jelly-rolled wire	
Strand diameter (μm)	50	50	33
Cu ratio		1.0	

### 3. Nb3Al 超伝導ケーブルの機械的曲げ試験

3種類の Nb3Al ケーブルに対して機械的曲げ試験を実施した。ケーブルを直径 50 mm、45 mm、40 mm、35 mm、30 mm、25 mm の円筒形銅ブロックに巻き付けた。結果を図 3 に示す。曲率半径が 25 mm、22.5 mm、20 mm、15 mm の場合、ケーブルに目立った損傷は認められなかった。しかし、49 本総撚りおよび 111 本総撚りケーブルは半径 12.5 mm で巻き付けを開始した直後にケーブルが完全に断裂した(図 3 の赤矢印)。7×7 本撚りは、曲げ半径 7.5 mm でケーブルの破断が見られた。表 2 は、49 本撚り、7×7 本撚り、111 本撚りの Nb3Al ケーブルの機械的曲げ試験結果をまとめたものである。49 本撚りおよび 111 本撚りケーブルは、15 mm 未満の曲げ半径で破断した。一方、7×7 本撚りケーブルは、12.5 mm および 10 mm の曲げ半径でもケーブルの破断なく曲げることができた。7×7 スtrandケーブルは二段階工程で製造される。まず 7 本のstrandを撚り合わせて 7 strandケーブルを形成し、次に 7 本の 7 strandケーブルを撚り合わせて 7×7 strandケーブルを形成する。図 3 のケーブル断面図に見られるように 7×7 strandケーブルの撚り線間距離は総撚りケーブルよりも広い。均一に撚られたケーブルでは、strandが密に詰め込まれ、strand同士が固定された状態で曲げ応力を受けたことが破損の原因と考えられる。111 strandケーブルでより小さな曲げ半径を実現するには、7×7 strandケーブルのような撚り方法の変更が必要であると考えられる。

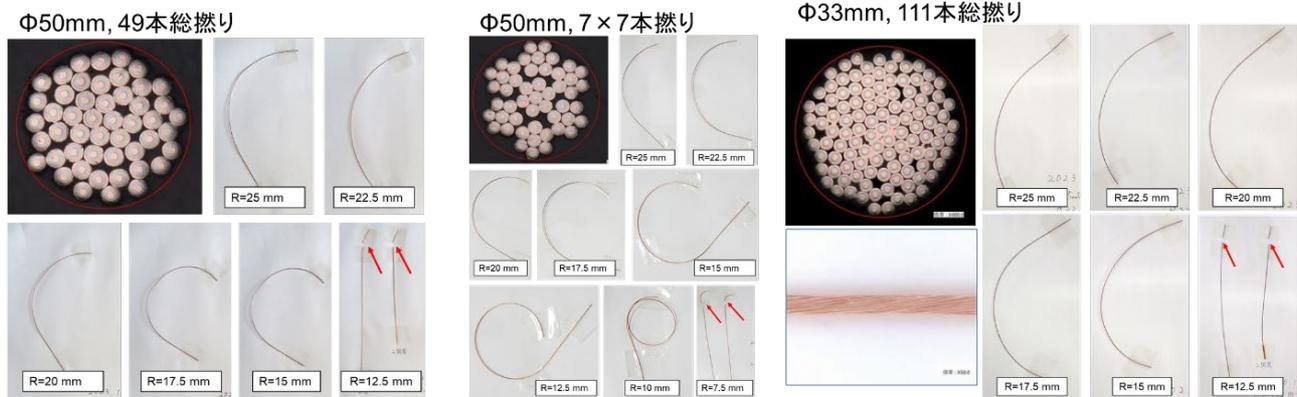


Figure 3: Cross section and result of mechanical bending test for three types of Nb3Al cable.

Table 2: Summary of Mechanical Bending Test

Curvature [mm]	R25	R22.5	R20	R17.5	R15	R12.5	R10	R7.5
Φ50 um, 49 strands, pitch 8.0 mm	○	○	○	○	○	×		
Φ50 mm, 7×7 strands, pitch 18.5 mm	○	○	○	○	○	○	○	×
Φ50 mm, 7×7 strands, pitch 8.0 mm	○	○	○	○	○	○	○	×
Φ33 mm, 111 strands, pitch 7.5 mm	○	○	○	○	○	×		

## 4. Nb3Al 超伝導ケーブルの臨界電流値測定

### 4.1 直線状態の臨界電流値測定

111 本撚り Nb3Al ケーブルの臨界電流値の測定を行った。ケーブルは長さ 80 mm の短尺直線状の試料で、外部磁場は 0 T である。使用したフォルダーを図 4 に示す。ケーブルは 2 mm × 1 mm の銅板に加工した 0.6 mm × 0.6 mm の溝に埋め込み、はんだ付けした。試料電圧測定用の信号線は試料両端に取り付け、ケーブルの常伝導状態への遷移を観察した。ケーブルの温度制御のため、銅板のケーブルと反対側に 40 オームのシートヒーターを設置した。ケーブル温度は Cernox 温度計を用いて測定した。ヒーターに流す電流を調節し、ケーブルの温度を制御し、異なる温度で臨界電流値を測定した。

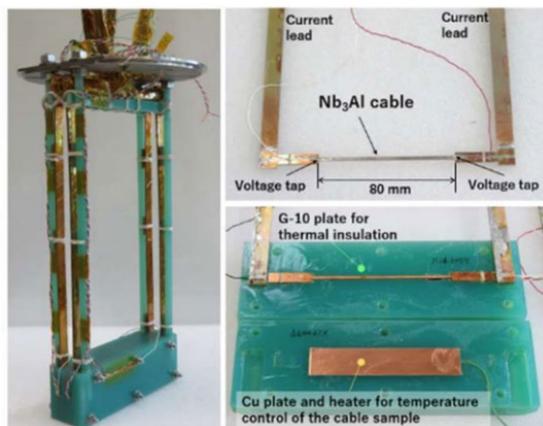


Figure 4: measurement folder of straight short sample of Nb3Al cable.

図 5 は、各温度における印加電流に対する試料電圧を示している。各温度において、超伝導状態から常伝導状態への遷移時の電圧上昇が確認できた。臨界電流は、基準値 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  および  $E_{\text{kin}}$  の式[8]による補正に基づき、試料電圧が 8  $\mu\text{V}$  となる測定電流として定義した。

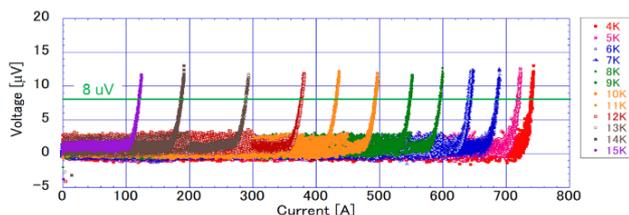


Figure 5: Voltage versus applied current (111-strands cable).

図 6 は、111 本撚り、7 × 7 本撚り、49 本撚りケーブルの臨界電流の温度依存性を示す。111 本撚りケーブルの臨界電流は、4.2 K、0 T において 775 A であり、各温度において他の 2 種類のケーブルよりも高い臨界電流を示した。111 本撚り、7 × 7 本撚り、49 本撚りケーブルの 0 T における 4.2 K 時の Non-Cu  $J_c$  はそれぞれ 16338、15237、14636  $\text{A}/\text{mm}^2$  であり、111 本撚りケーブルが最も高い臨界電流値を示した。また、 $n$  値は、それぞれ 31、102、134 と計算された。この  $n$  値は、安定化銅を含む値である。

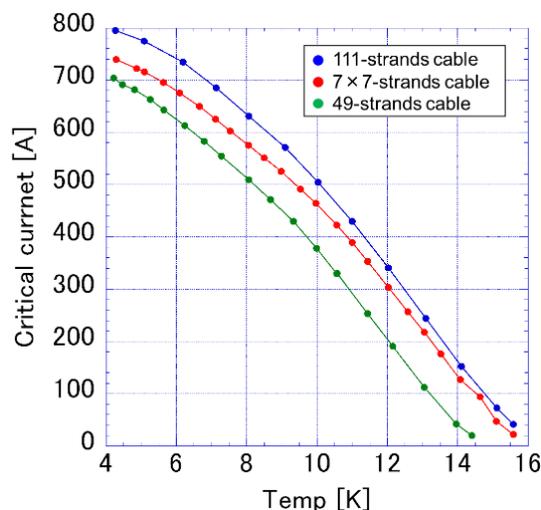


Figure 6: Critical current of straight short sample.

### 4.2 ソレノイド形状コイルの臨界電流値測定

実際の補正コイルを製作する際には、ショートサンプルよりも長いケーブルを用いて複数ターン巻き付けるため、ケーブルに連続的な曲げ応力が加わる。そこで、3種類の Nb3Al ケーブルを用いたソレノイド形状コイルを製作し、臨界電流の測定を行い、連続的な曲げ応力が臨界電流に及ぼす影響を調査した。図 7 は、臨界電流測定用の G10 ソレノイドボビンとソレノイド形状コイルのセットアップを示す。G10 パイプに、コイル内径 50 mm、45 mm、40 mm、30 mm (曲率半径 25 mm、22.5 mm、20 mm、15 mm) の螺旋状の溝を形成し、3種類の Nb3Al ケーブルを溝に沿って巻いた。巻線後、溝にアラルダイトエポキシを充填し、Nb3Al ケーブルがローレンツ力によって移動しないように固定した。半径 25 mm、22.5 mm、20 mm、15 mm のコイルのケーブル長は、それぞれ 830 mm、755 mm、670 mm、630 mm であり、巻数は 5、5、5、6 ターンである。保護抵抗として、 $\phi$  1 m の銅線を Nb3Al ケーブルに沿って巻き、このフォルダーを液体ヘリウムに浸漬し、4.2 K における臨界電流値を測定した。

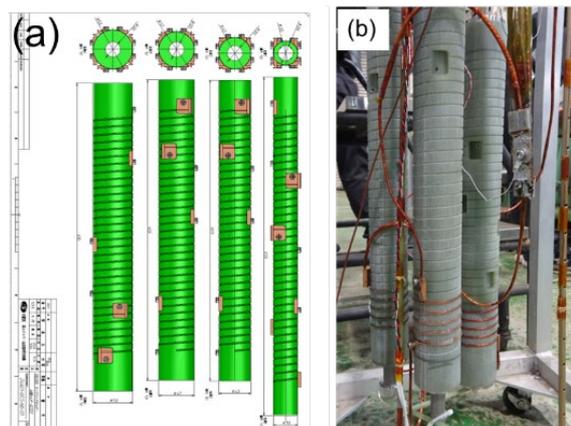


Figure 7: (a) G10 bobbin for winding solenoid-shaped coil and (b) set-up folders for critical current measurement of solenoid-shaped coils.

図 8 は、曲率半径 25 mm のコイル両端間の電圧を印加電流に対して示したものである。超伝導状態から常伝導状態への相転移に伴う電圧上昇が見られる。臨界電流はコイル電圧 0.1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  と定義した。同様の測定を半径 22.5 mm、20 mm、15 mm のコイルに対しても行い、臨界電流を求めた。

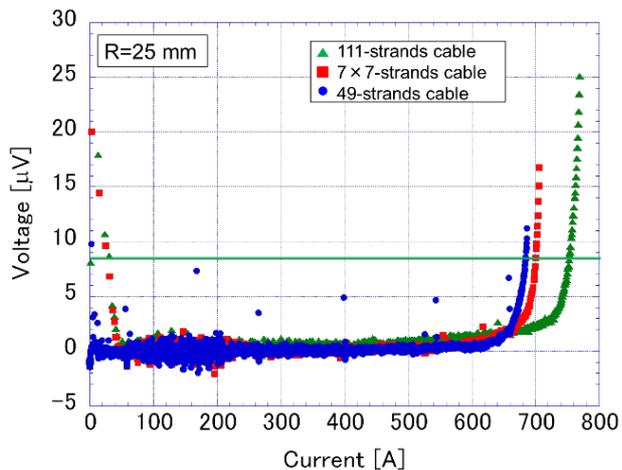


Figure 8: Pick-up voltage vs applied current at R=25 mm. 49-strands (blue), 7x7-strands (red), 111-strands (green) cable.

図 9 はソレノイド形状コイルの臨界電流と半径の関係を示す。全ての Nb<sub>3</sub>Al ケーブルは 600 A から 750 A の範囲で非常に高い臨界電流を示した。特に半径 25 mm のコイルに巻かれた 111 ストランドケーブルは 738 A という臨界電流値を示した。また臨界電流はコイル半径の減少に伴い低下する。これは自己磁界の影響によるものと考えられる。現在、コイル内で発生する自己磁界は OPERA-3D を用いて計算中である。

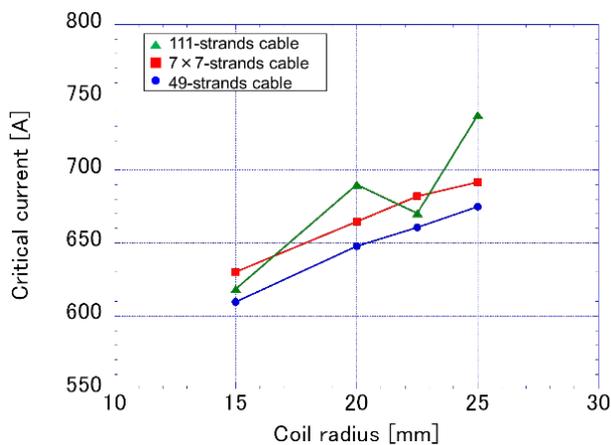


Figure 9: Critical current of solenoid-shaped coil.

## 5. まとめ

直径 33  $\mu\text{m}$  の超細ストランドを用いて 111 本総撚り Nb<sub>3</sub>Al ケーブルを製造し、機械的曲げ試験と臨界電流測定を実施した。その結果、111 本総撚りケーブルは 49 本総撚りおよび 7x7 本ケーブルよりも高い臨界電流を示した。しかし、15 mm 未満の曲げ半径でケーブルが破断することが分かった。7x7 本撚りケーブルのような二段階の撚り線加工により、より小さな曲げ半径の実現が期待できる。

さらに、連続的な曲げひずみの影響を調査するため、3 種類の Nb<sub>3</sub>Al ケーブルを用いた数巻きのソレノイド形状コイルを製作し、臨界電流値を測定した。全ケーブルで 600 A を超える高い臨界電流を示した。特に 111 本総撚りケーブルは 738 A の臨界電流値を示した。今後は外部磁場中での臨界電流測定を行い、 $\phi$  33  $\mu\text{m}$  の Nb<sub>3</sub>Al ストランド線に対する外部磁場の影響を調査する。また、超細素線 Nb<sub>3</sub>Al ケーブルを用いた 1 ターンコイルを使った四極磁石を製作し、その性能評価を行う予定である。

## 謝辞

KEK 機械工学センターには試験装置の製造していただきました。KEK 極低温科学センターには液体窒素と液体ヘリウムを供給していただきました。ここに深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] K. Akai and H. Koiso, "SuperKEKB Accelerator", J. PASJ, Vol. 15, No. 4, 2018, pp. 213-220.
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, "SuperKEKB operation using crab waist collision scheme", The European Physical Journal Plus 136, 1023(2021). doi:10.1140/epjp/s13360-021-01979-8
- [3] J. W. Ekin, "STRAIN EFFECTS IN SUPERCONDUCTING COMPOUND", Advances in Cryogenic Engineering, Materials, vol 30 823 (1984).
- [4] N. Ohuchi *et al.*, "Development of Super Fine Strand Nb<sub>3</sub>Al Cable for SuperKEKB Superconducting Sextupole Magnet System", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.33, no 5 Aug. 2023, Art. no. 6000305.
- [5] R. Ueki *et al.*, "Study on the Superconducting Performance of Ultra-fine Strand Nb<sub>3</sub>Al Cables". IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.35, no5 Aug. 2025, 6001105.
- [6] A. Kikuchi *et al.*, "Trial manufacturing of Jelly-Rolled Nb/Al mono-filamentary wire with very small diameter below 50 microns", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 012016-012016-8.
- [7] A. Kikuchi *et al.*, "Ultra-fine Nb<sub>3</sub>Al mono-core wires and cables" IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31, no. 5, Aug. 2021, Art. no. 6000105.
- [8] Jack W. Ekin, "Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements", Oxford U. Press, New York, 2006, pp. 400-402. ISBN 978-0-19-857054-7.