

機械的曲げを持つ Nb₃Al 極細素線超伝導ケーブルの超伝導特性の研究

STUDIES OF BENT ULTRA-FINE STRAND Nb₃Al CABLES ON THE SUPERCONDUCTING PERFORMANCE

植木竜一^{#, A)}, 大内徳人^{A)}, 有本靖^{A)}, 青木和之^{A)}, 菊池章弘^{B)}, 山本優^{C)}

Ryuichi Ueki^{#, A)}, Norihito Ohuchi^{A)}, Yasushi Arimoto^{A)}, Kazuyuki Aoki^{A)}, Akihiro Kikuchi^{B)}, Masaru Yamamoto^{C)}

^{A)} KEK, ^{B)} NIMS, ^{C)} JSA

Abstract

In the straight beam lines of the SuperKEKB Tsukuba area, 16 conventional sextupole magnets installed at intervals of 20 m~35 m. To achieve high luminosity, higher precision beam tuning with sextupole magnets is required. In KEK, the study on a superconducting sextupole magnet system with three type of the corrector magnets is underway. Considering the operating temperature of the system, an A15 compound superconductor, Nb₃Al, is being studied as the cable material, and the development of the reaction and winding coil production with Nb₃Al cable has been tried. The Nb₃Al ultra-fine strand superconducting cable with a strand of 50 μm diameter was developed for corrector magnets, and the critical currents of the cable were measured as the functions of the bending radius, the temperature, and the external magnetic field. In this paper, we will report the temperature and magnetic field dependence of the critical currents of the bent Nb₃Al cables after heat treatment.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、7 GeV の電子ビームと 4 GeV の陽電子ビームを使った衝突型円形加速器である。2022 年 6 月までのビーム運転で 4.65×10^{34} のルミノシティを達成した[1]。これは、前身の KEKB 加速器[2]で達成されたルミノシティの 2 倍以上にあたる。さらに高いルミノシティを達成するためには、クロマティックカップリングの精密な補正が必要となる。特に衝突点の両サイドの Local Chromaticity Correction エリアに配置されている六極電磁石[3]の磁場精度は、衝突点のビームに大きな影響を与えるため、より精密な磁場調整が必要となる。

KEK では、これらの六極磁場をより精密に制御するため六極電磁石の超伝導化を検討している[4, 5]。超伝導磁石の磁場設計は、超電導コイルを形成する超伝導線の配置によって調整されるため、磁場回転や磁場中心の補正は、六極電磁石のボア内に組み込まれた超伝導補正電磁石により行うことが可能である。しかし、補正電磁石は、六極電磁石内の限られた空間に取り付ける必要があるため、SuperKEKB の最終収束超伝導電磁石で採用された薄型多層コイル方式を基本設計としている。さらに、冷却システム等の条件を含めると NbTi 線材よりも高い臨界電流値を持つ超伝導線材を使用した超伝導コイルの製作が検討されている。そこで我々は、一つの候補である Nb₃Al 極細線ストランドケーブルを補正電磁石に応用するため、ケーブルの特性評価を行ってきた。前回までに我々は、Φ50 μm の Nb₃Al ストランド線[6]を 49 本撚り合わせた超伝導ケーブルの直線状態における基本特性の評価を行ったところ、4 T、6 K において臨界電流は約 86 A を示し、補正電磁石の仕様値である 50 A を満たす結果となった[7]。しかし、超伝導ケーブルは曲げ歪によっても臨界電流の劣化が生じるため[8]、より現実のコイルに近い状態で超伝導特性を調べることで重

要となる。本研究では、Nb₃Al 超伝導ケーブルの機械的曲げ試験、超伝導特性の温度依存性、ソレノイドコイル状態における超伝導特性の測定を行ったので報告する。

2. Nb₃Al 超伝導ケーブルの曲げ試験

前回の報告[7]の直線通電試験において 4 T、6 K で 86.4 A の臨界電流値を示した Φ50 μm、49 本撚り Nb₃Al 超伝導ケーブルの機械的曲げ試験を行った。50、45、40、35、30、25、20、15、10 mm の直径を持った円筒形の銅ブロックにケーブルを巻きつけ、超伝導ケーブルに機械的な曲げ歪を与え、どのくらいの曲率半径までケーブルが破損せずに耐えられるかを確認した。曲率半径が 25 mm から 15 mm までは目に見えるケーブルの損傷はなかったが、曲率半径が 12.5 mm のブロックに巻き付けたときは巻き始めから 2 cm ほどのところでケーブルが完全に折れた。2 回試験を行ったが 2 回とも同様の結果となった(Fig. 1)。SuperKEKB のような加速器用のコイルの設計においては、曲げ半径が小さいほど有利となるため、より小さい曲率半径まで曲げることのできるケーブルの開発を進めた。ストランド 49 本を総撚りにしたケーブルでは、素線が密集しすぎており素線同士が圧迫、固定された状態で曲げ応力を受けたため、破損につながったと考えられる。そこでケーブルの撚り方を工夫することでケーブルの損傷を回避することを試みた。まず 7 本の素線を使って撚り線を製作し、この 7 本撚りのケーブルを 7 本使用し、撚り線を作製した(Φ50 μm、7×7 本撚りと呼ぶことにする)。Figure 2 に製作したケーブルの断面を示す。49 本撚りのケーブルに比べて、素線同士に空間的な余裕が出来ていることがわかる。この 7×7 本撚りケーブルに対しても同様に曲げ試験を行った結果、曲率半径が 10 mm 以上では目に見える損傷はなく、曲率半径が 7.5 mm の時にケーブルが折れる結果となった(Fig. 2)。7×7 本撚りのケーブルは、49 本撚りに比べてより小さい半径まで曲げることが可能であり、コイル製作時のメリットが大きいため、7×7 本撚りのケーブルの臨界電流測定

[#] uekiryu@post.kek.jp

を行った。

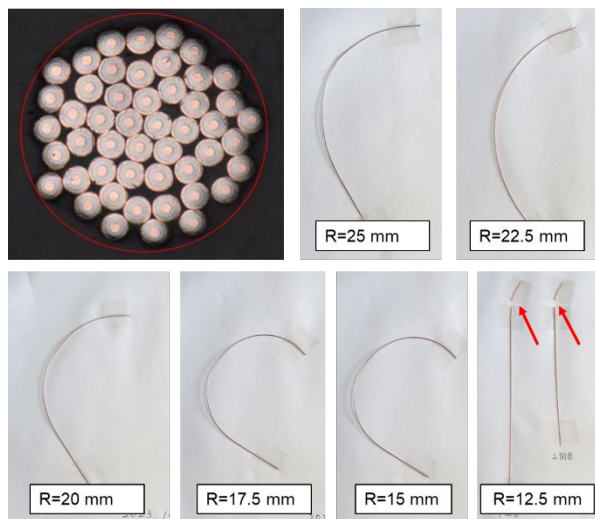


Figure 1: The picture of cross section of 49 strand twist Nb₃Al cable and the result of bending test.

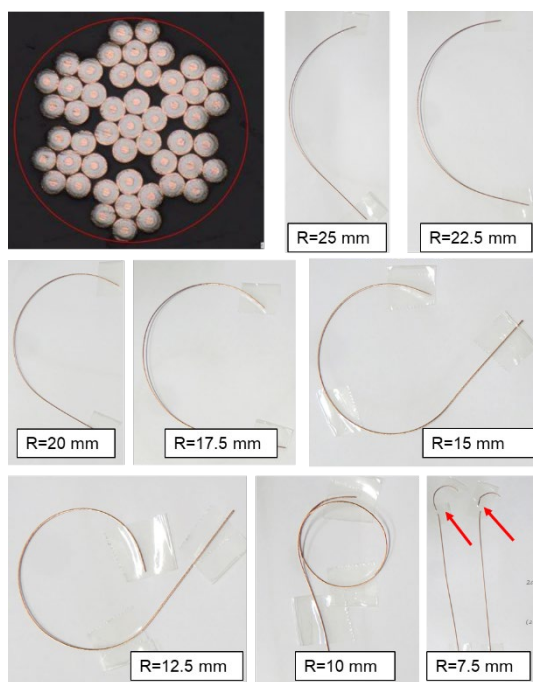


Figure 2: The picture of cross section of 7×7 strand twist Nb₃Al cable and the result of bending test.

3. Nb₃Al 超伝導ケーブルの臨界電流測定

3.1 直線通電試験

Φ50 μm、7×7 本撚りの Nb₃Al ケーブルの臨界電流の温度依存性の測定を行った。まず初めに基本的な特性を調べるため、直線状態における臨界電流の測定を行った。測定に使用したフォルダを Fig. 3 に示す。超伝導ケーブルは、2 mm×1 mm の銅版に加工された 0.6 mm×0.6 mm の溝に埋め込まれ半田づけされており、

その両端に試料電圧を測定するための信号線が 80 mm の間隔で取り付けられている。この電圧を測定することで試料の常伝導状態への転移を観測している。試料の温度を制御するために超伝導ケーブルの隣に配置した銅板に 40 W のシートヒーターを取り付けた。試料の温度は、Cernox 温度計もしくは Cernox 温度計[9]を用いて校正されたカーボン抵抗温度計を使用して測定を行った。ヒーターで試料温度を 1 K ずつ制御しながら、その時の臨界電流を測定した。

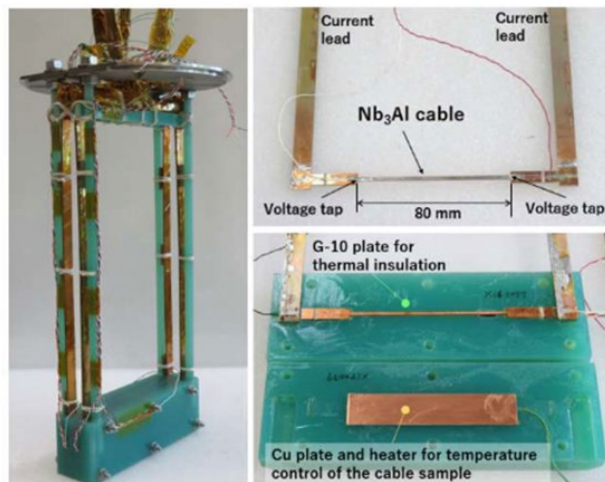


Figure 3: The folder of straight current test.

Figure 4 に各温度における印加電流に対する試料両端の電圧のグラフを示す。臨界電流は Jack W. Ekin の著書[10]に示されているプロセスに従って、1 μV/cm の基準をもとに電圧が 8 μV に達した時の電流を臨界電流値として評価した。

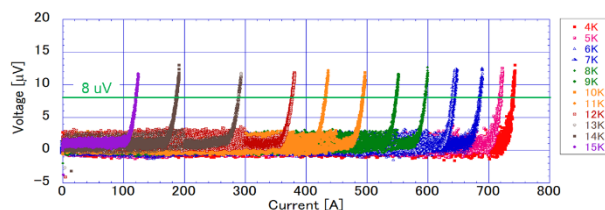


Figure 4: Variation of the voltage on both side of sample with respect to the applied current at various temperature.

臨界電流の温度依存性を Fig. 5 に示す。4.2 K では、740 A の臨界電流を得ることが出来た。これは、49 本撚りの 700 A に比べて高い値となった。3 回の測定を行った結果、7 K 以下の温度領域では臨界電流の値はほとんど同じであったが、温度の高い領域では、値にばらつきが見られた。これは、温度計の測定にばらつきがあるためと考えられる。試料をセットした後、液体ヘリウムがフォルダ内に侵入しないようにアピエゾングリースを塗って隙間を埋めているが、温度計のわずかな取り付け方の違いで熱の伝わり方が変わってくるため、図のようなばらつきが見られると考えられる。そのばらつきは、14 K 付近

の同じ臨界電流値に対して ± 0.8 K であった。正確な温度測定方法を確立することが高い温度領域における臨界電流値の測定において今後課題となる。しかし、仕様の条件である 6 K の領域では温度測定のばらつきは小さいため、臨界電流値の決定には問題ないと判断した。

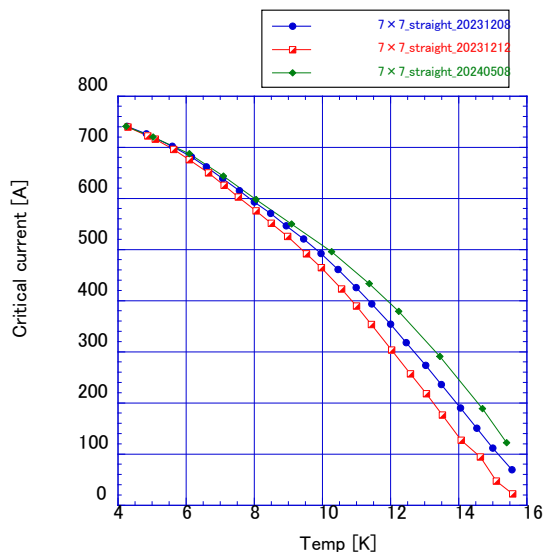


Figure 5: The critical current as a function of sample temperature in the linear current test.

3.2 曲げ通電試験

次に、曲げ歪による超伝導特性の変化を調べるため、機械的な曲げ歪を与えた状態に置ける臨界電流値の温度依存性の測定を行った。Figure 6 に曲率半径 25 mm の曲げ通電試験測定用フォルダの写真を示す。2 枚の G10 の板を使って曲率半径 25 mm に相当する溝を作り、その溝に $\Phi 1$ mm の銅ワイヤを取り付け、その銅ワイヤに沿わせるように超伝導ケーブルを取り付けた。銅ワイヤは、超伝導ケーブルが常伝導状態に転移した際、電流を銅ワイヤに分流させ、超伝導ワイヤの熔断を防ぐためである。試料両端の電圧を測定するための信号線は、ケーブルの曲がりのはじめの位置に取り付けた。試料温度は銅板に取り付けた 40 W のシートヒーターによって制御され、Cernox 温度計もしくはカーボン抵抗温度計 (Cernox 温度計で校正済み) を使って測定された。

Figure 7 に印加電流に対する試料両端の電圧を示す。直線通電試験の時と違い、電圧が立ち上がって数 μ V に達した時点でクエンチ検出器によって電源が遮断された。高速マルチレコーダー (GR-7500:KEYENCE) を使って電圧を測定すると、数十マイクロ秒の間に一気に電圧が上昇し、閾値を超える様子が見られ、これはクエンチによる電圧上昇であると考えられる (Fig. 7 (down))。1 mV/cm の基準に電圧が達していないため、今回はクエンチの起こった電流値を臨界電流値とした。Figure 8 に各温度における直線および曲線状態で測定した臨界電流値を示す。この結果から、ケーブルの曲率半径が 15 mm までは直線通電試験の結果とほとんど変わらない臨界電流値を示すことが分かった。しかし、12.5 mm と 10 mm においては、8 K 以下の温度において直線通電試験の時の臨

界電流に比べ低い値を示し、4.2 K では 1 割ほどの臨界電流値の低下が見られた。この原因が、曲げ歪によるものであるか、素線へのダメージによるものであるかは現在調査中である。

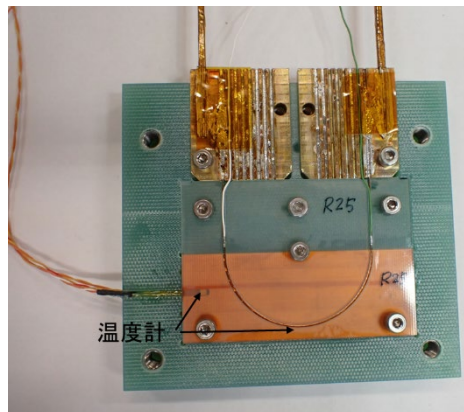


Figure 6: The measurement folder of bending current test.

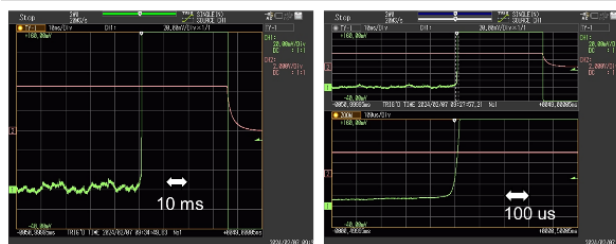
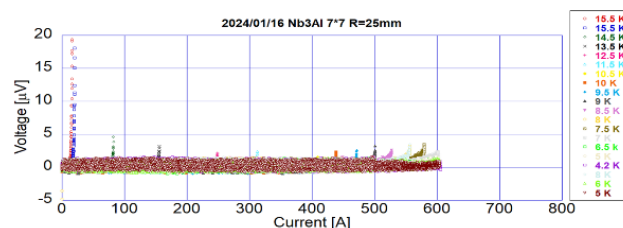


Figure 7: Variation of the voltage on a both side sample. (Upper) Change in voltage with respect to applied current. (Bottom) Change in the voltage at the quench.

今回の曲げ通電試験の結果をもとに、外部磁場を印加した際の臨界電流値を見積もった。以前測定した 49 本燃りの超伝導ケーブルの外部依存特性の結果 [7] をもとに、外部磁場に対する臨界電流の劣化の度合いが同じであると仮定し、7x7 本燃りケーブルの臨界電流の計算を行った。49 本燃りのケーブルも 7x7 本燃りのケーブルも素線自体は同じものを使用しているため、外部磁場に対する劣化度合いは同じであると想定される。7x7 本燃りの超伝導ケーブル R=10 mm の 6 K、0 T における臨界電流は、約 600 A である。この値を使って、6 K、4 T の時の臨界電流を見積もると約 81 A と予想され、仕様値の 50 A に対して十分高い値であることが分かった。今後は、実際に外部磁場中をかけた状態で臨界電流の測定を行う予定である。

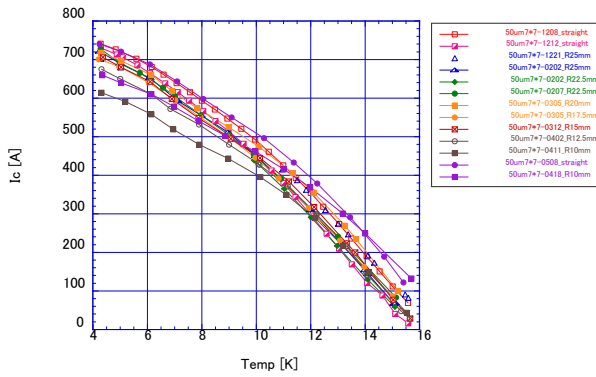


Figure 8: The critical current as a function of sample temperature in bending current test.

4. ソレノイドコイルの臨界電流測定

実際の電磁石コイルは複数ターンケーブルを巻いて製作される。そのため、連続的な曲げ歪に対するケーブルの超伝導特性の変化を調べる事が重要となる。そこで、円筒形の G10 に数ターンケーブルを巻きつけて、臨界電流測定を行った。Figure 9 に測定フォルダの写真を示す。直径 50 mm の円筒形の G10 にスパイラル上に溝を掘り、その溝に超伝導ケーブルを巻きつけた。溝の隙間をアピエゾングリースで埋め、ポリイミドテープで覆った後、上からタコ糸を巻いて電磁力によりケーブルが動かないように固定した。これを液体ヘリウムに浸し 4.2 K における臨界電流の測定を行った。

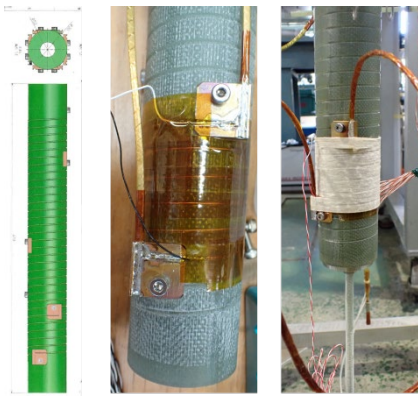


Figure 9: The measurement folder of solenoid coil.

Figure 10 は、同じ試料に対して 6 回の通電試験を行ったときの最大通電電流である。最初の 4 回は、650 A 程電流を印加するとクエンチ検出器が動作し、電流が遮断された。これは、3 章で示した曲げ通電試験 ($R=25$ mm) における値 730 A に比べて低い値であった。電流を印加している最中の電圧端子間の電圧をオシロスコープで測定したところ、印加電流が 600 A を超えたあたりで Fig. 11 のような波形が頻繁に観測された。数ミリ秒という非常に短い時間に電圧が急上昇し、すぐに減衰している。これは、超伝導電磁石によく見られる現象で、電磁力によ

て超伝導ケーブルを構成する素線もしくはケーブル自体が動くことにより摩擦熱が発生し、局所的に常伝導状態に移り電圧が発生し、その後すぐに冷却されるため、このような電圧波形が得られたと考えられる。このような電圧変化のうちクエンチ検出の条件をたまたま満たしたときに、低い電流値で電源が遮断されたと思われる。今回、超伝導ケーブルを這わせた溝はアピエゾングリースで埋めているが、ケーブル(各素線)を完全に固定するには不十分であり、素線もしくはケーブルが動くたびにこのような電圧が生じると考えられる。4 回目までのクエンチ検出器の設定は、 $30 \mu\text{V}$ 、 0 ms であった。そこで、5 回目以降はケーブルの動きで生じる電圧上昇をクエンチ検出器が感知しないように検出器の設定を変えながら測定を行った。その結果、5 回目 ($40 \mu\text{V}$ 、 0 ms) は 689 A、6 回目 ($60 \mu\text{V}$ 、 0 ms) は 715 A まで到達電流が増加した。より正確な臨界電流値を調べるためには、ケーブルが動かないような工夫をしたうえでの測定が必要である。

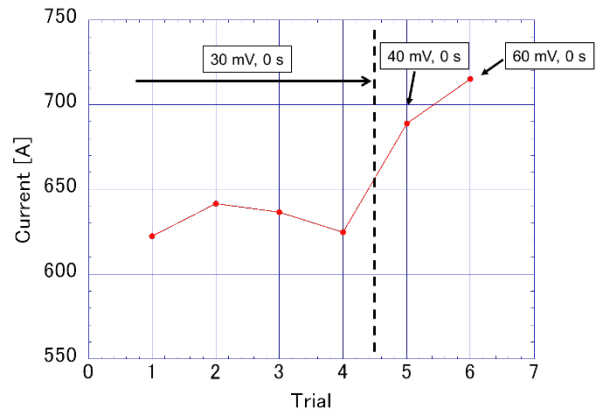


Figure 10: The change in maximum current value with quench detector setting.

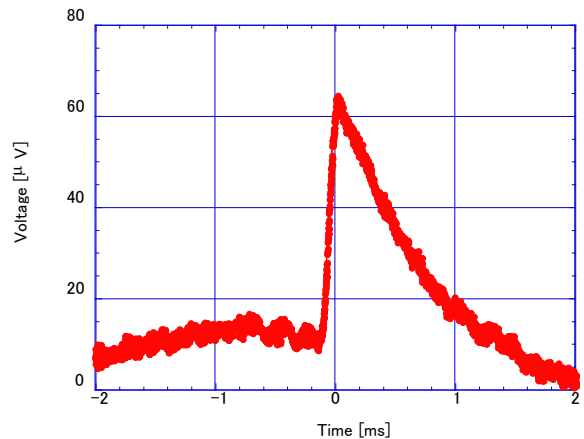


Figure 11: The voltage waveform during cable motion.

5. まとめ

$\Phi 50 \mu\text{m}$ の Nb_3Al 超細線ストランド超伝導ケーブルの曲げ試験と超伝導特性評価を行った。その結果、 7×7 本撚りのケーブルでは、曲率半径 10 mm まで目で確認

できる範囲の損傷なくケーブルを曲げることが可能であることが分かった。また、曲率半径が 15 mm 以上では曲げ歪による超伝導特性への影響はほとんどないことが分かった。しかし、12.5 mm、10 mm においては、10 %ほどの臨界電流値の低下が見られた。今回測定された R=10 mm における臨界電流値から、6 K、4 T における臨界電流値を見積もったところ、65 A 程度になり、目標値として定めた 50 A を超える値となった。次に半径 50 mm および 30 mm の円筒形にソレノイド状にケーブルを巻きつけた状態での臨界電流測定を行った結果、直線通電試験の時と変わらない臨界電流値を得られた。今後は、外部磁場中における曲げ通電試験を行い、より現実に近い状況下での超伝導特性の測定を行う予定である。さらに、実際に補正電磁石用のコイルを製作し、磁場特性の評価を行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Recent status of SuperKEKB operation”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of PASJ, Oct. 18-21, 2022, TFP001.
- [2] Y. Funakoshi *et al.*, “Recent progress of KEKB”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, May. 23-28, 2010, pp. 2372 -2374.
- [3] 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
- [4] X. Wang *et al.*, “Excitation and magnetic field performances of a prototype REBCO sextupole coil at 4.2 K”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 30, No. 4, June 2020, 4600304.
- [5] N. Ohuchi *et al.*, “Development of the superconducting sextupole magnet for beam tuning in SuperKEKB (1)”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of PASJ, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 444-445.
- [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] N. Ohuchi *et al.*, “Development of Super Fine Strand Nb₃Al Cable for SuperKEKB Superconducting Sextupole Magnet System”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 33, no 5 Aug. 2023, Art. no. 6000305.
- [8] J. W. Ekin, “STRAIN EFFECTS IN SUPERCONDUCTING COMPOUNDS”, Advances in Cryogenic Engineering Materials, vol. 30, p. 823 (1984).
- [9] Lake Shore Cryotronics, Inc. CX-1070-SD-HT-4L.
- [10] Jack W. Ekin, “Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements”, Oxford U. Press, New York, 2006, pp. 400-402, ISBN 978-0-19-857054-7.