

SuperKEKB 超伝導 6 極電磁石用超細線ストランド Nb₃Al ケーブル開発(1)

DEVELOPMENT OF SUPER FINE STRAND Nb₃Al CABLE FOR SuperKEKB SUPERCONDUCTING SEXTUPOLE MAGNET (1)

大内徳人^{#,A)}, 菊池章弘^{B)}, 山本優^{C)}, 王旭東^{A)}, 青木和之^{A)}, 有本靖^{A)}, 宗占國^{A)}, 大木俊征^{A)}, 土屋清澄^{A)}, 河野雅俊^{C)}

Norihito Ohuchi^{#,A)}, Akihiro Kikuchi^{B)}, Masaru Yamamoto^{C)}, Xudong Wang^{A)}, Kazuyuki Aoki^{A)}, Yasushi Arimoto^{A)}, Zhanguo Zong^{A)}, Toshiyuki Oki^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Masatoshi Kawano^{C)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} NIMS, National Institute for Materials Science

^{C)} Meiko Futaba

Abstract

Along the SuperKEKB beam lines, 362 conventional sextupole magnets are installed, and they are used for tuning the chromaticity of the accelerator rings. Especially, 16 sextupole magnets in the Tsukuba area are absolutely essential for the Crab Waist beam colliding. To make this tuning process more precise, we are developing the superconducting sextupole magnet with three types of the corrector magnets. The Nb₃Al ultra-fine strands superconducting cable for the corrector magnets is now being developed. In this paper, the critical current characteristics of the cable are reported.

1. はじめに

SuperKEKB は 2018 年 4 月 26 日の電子・陽電子ビーム衝突成功から 2022 年 6 月 22 日までの運転に於いて、そのルミノシティー (L) を $4.650 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} / 4.707 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Belle-II 検出器測定有/無) [1] まで増加している。前加速器である KEKB の記録した $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (当時世界記録) [2] の 2 倍を超えている。SuperKEKB のビーム調整に於いて重要な役割を担っているのが、加速器リングに配置されている常伝導 6 極電磁石である。特に衝突点ビーム直線部に設置された 16 台の常伝導 6 極電磁石 (Fig.1: 陽電子ビームライン 8 台、電子ビームライン 8 台) は、ビーム衝突時の Crab Waist 調整 [3] に使用されている。16 台の常伝導 6 極電磁石の設計パラメータを Table 1 に示した。特に、陽電子ビームラインに設置された常伝導 6 極電磁石は、機械的に磁場面を回転することが可能で、この機能により更なるルミノシティー向上が期待される。

KEK では、16 台の 6 極電磁石を用いたビーム調整の精密化を目標に 6 極電磁石の超伝導化を検討している [4,5]。超伝導電磁石の場合、電磁石磁場設計は主に超

伝導コイルを構成する超伝導線の配置調整により行われることから、6 極磁場面の回転補正、6 極磁場中心の補正は 6 極磁石ボア内に組込まれた超伝導補正電磁石により行うことができる。超伝導補正電磁石は 6 極電磁石の限られた空間に取付けられることから、SuperKEKB ビーム衝突用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。超伝導補正コイルの超伝導材料は、冷却システムも含めた検討で NbTi よりも高い臨界温度をもつ超伝導線材の使用を検討している。本報告では、超伝導補正コイル用として開発を進めている Nb₃Al 超細線ストランド超伝導ケーブルの臨界電流値の温度特性について報告する。

Table 1: Design Parameters of the Sextupole Magnets in the SuperKEKB Tsukuba Beam Lines

	LER	HER	
B'' (T/m ²)		480	
L_{yoke} (m)	0.3	0.6	0.5
Cur. (A) × turns/pole	600 A × 22		
Num. of magnets	8	4	4

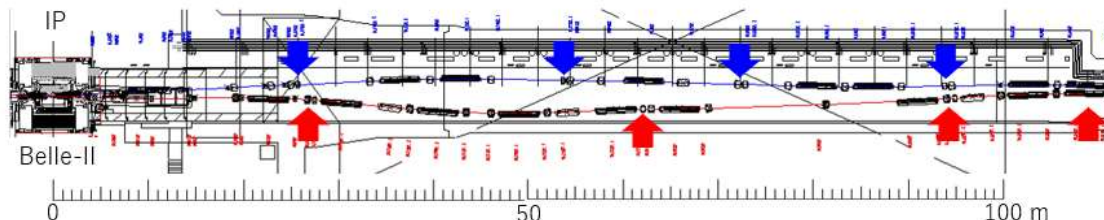


Figure 1: SuperKEKB beam lines from the interaction point (IP) to the accelerator arc section in the Tsukuba experimental area. The conventional sextupole magnets are shown with the arrows. The blue arrow and line are the sextupole magnet and beam line for electron (HER), and the red ones are those for positron (LER).

[#] ohuchi@post.kek.jp

2. 超伝導 6 極電磁石と補正磁石用 Nb₃Al 超細線ストランドケーブル

目標とする超伝導 6 極電磁石は、800 T/m² 以上の磁場を発生し、ビームラインへの 6 極電磁石クライオスタット設置も見据えて、実効磁場長を 0.3 m 以下とした。この 6 極電磁石は、コイル内側に 3 種類の超伝導補正コイル (A_3 , B_2 , A_2) を持つ。設計パラメータを Table 2 に示した。

超伝導補正電磁石用として開発を進めているケーブルは、直径が ϕ 50 μ m の Nb₃Al 超細線ストランド線[6] 49 本で構成された相当径 0.4 mm の撚線ケーブルである。超伝導補正電磁石と Nb₃Al ケーブルのパラメータを Table 3 に示した。

Table 2: Design Parameters of the R&D Superconducting Sextupole Magnet

B'' (T/m ²)	> 800
L_{eff} (m)	< 0.3
Current (A)	< 250
Superconducting material	NbTi or Nb ₃ Sn
Superconducting corrector	A_3 , B_2 , A_2

Table 3: Parameters of the Superconducting Corrector Magnets and Nb₃Al Cable

A_3 corrector	
B'' (T/m ²)	125.7
A_2 , B_2 corrector	
B' (T/m)	0.4
Nb ₃ Al cable	
Strand diameter (μ m)	50
Number of strands	49
Cu ratio	1.0
Cabling pitch [S] (mm)	8.0
Required transport current @ 4T & 6K, (A)	50

Figure 2 に Nb₃Al ストランド線の断面形状を示した。左図は、伸線加工中のワイヤー径 ϕ 0.6 mm の断面形状を示し、右図は加工終了時 ϕ 50 μ m の断面を示している。加工は明興双葉(株)により行われた。Nb₃Al 部は、Nb と Al のシートを用いたジェリーロール法で製作されている。

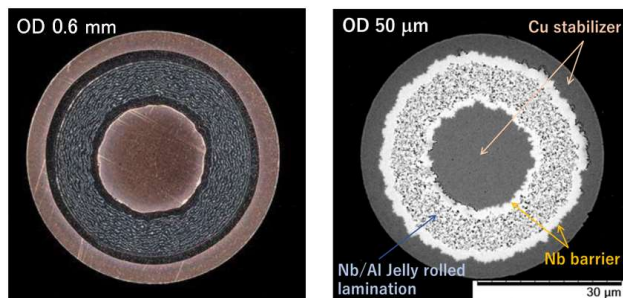


Figure 2: Cross sections of the Nb₃Al wire. The left is the ϕ 0.6 mm wire during drawing process, and the right is the ϕ 50 μ m wire.

ϕ 50 μ m ストランド線 49 本を撚線したケーブルの外観図と断面図を Fig. 3 に示した。撚線加工後、ケーブルは 800 度、10 時間(昇温 4 時間)の熱処理が行われた。

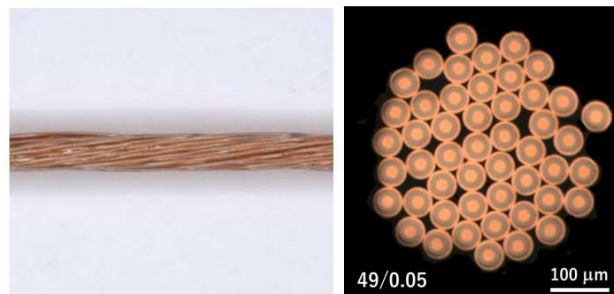


Figure 3: 49 Nb₃Al strand cable external view and the cross section.

3. Nb₃Al ケーブル臨界電流値測定

Nb₃Al 超細線ストランドケーブルの基本的な特性を得るために、ケーブルに曲げの無い直線状態での臨界電流値 (I_c) を温度と磁場を変数として測定した。

3.1 試験用試料ホルダーと試験スタンド

試験用試料ホルダーを Fig. 4 に示した。このホルダーは 5T のソレノイド磁石の内部に組込まれ、液体ヘリウムで冷却される。右上の写真は試験試料通電部を示しており、Nb₃Al ケーブルは図中水平部の銅板(断面 2 mm \times 1 mm)に加工された 0.6 mm \times 0.6 mm の溝に埋め込まれ半田付けされている。通電時のケーブルの常伝導転移は、試験部(長さ 80 mm)の電圧を測定することにより観測する。右下の写真に示すように、電圧を測定する試料は G10 の板で挟み込まれ、外部の液体ヘリウムから熱絶縁される。電圧測定部は、アピエゾングリースで銅板に接着されたフィルムヒーターで温度制御される。温度測定用に、試料銅板のヒーター接触面と反対面に Cernox 温度計[7]が組み込まれている。

Figure 5 に試験ホルダーの構成を示した。本ホルダーには 2 個の試料を装填することができる。温度計、温度

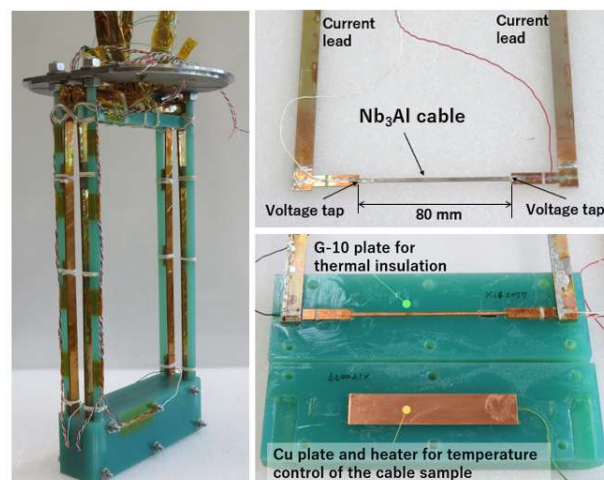


Figure 4: Nb₃Al cable sample test holder.

制御用ヒーターも試料毎に取付けられている。Figure 4 と 5 に示した試験ホルダーは、ボビン内径 ϕ 170mm のソレノイド電磁石内部に組込まれる。使用されたソレノイド電磁石写真と試料ホルダーの組図を Fig. 6 に示す。ソレノイド磁場は、Nb₃Al ケーブル軸に対して垂直方向に印加される。

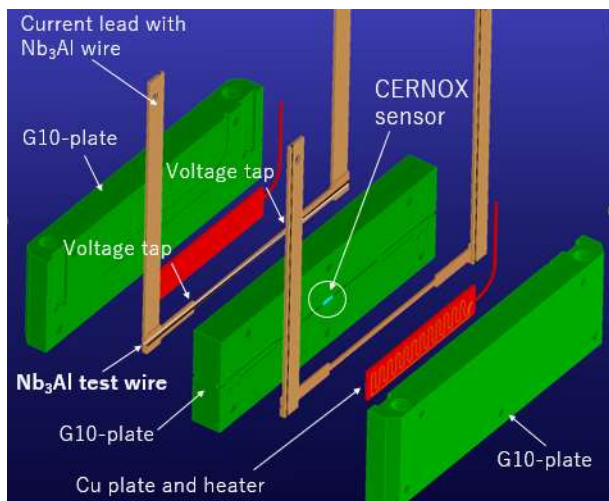


Figure 5: Assembly of Nb₃Al cable sample test holder.

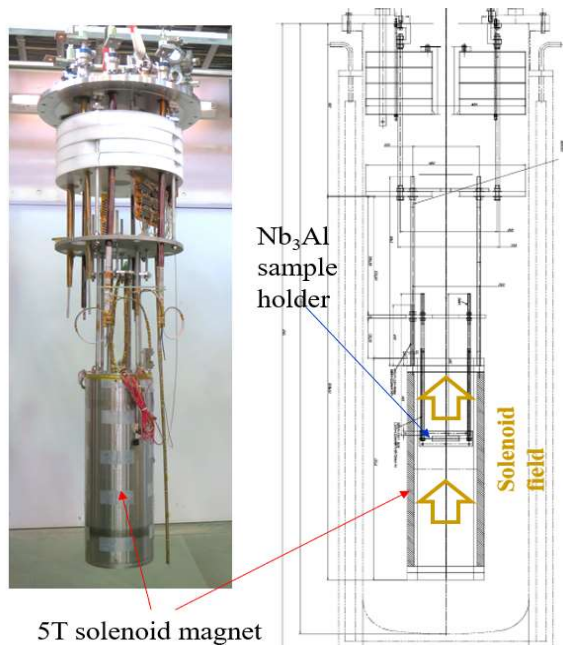


Figure 6: Setting the Nb₃Al cable sample test holder in the 5T solenoid magnet.

3.2 Nb₃Al ケーブル臨界電流値測定

測定結果の一例として、電流、試料両端電圧、試料温度の時間変化を Fig. 7 に示した。この測定では、試料の初期温度は 5.91 K に設定され、電流は 550 A までは 3 A/s で増加し、それ以上は 1 A/s で上昇している。図に示された結果は、ソレノイドによる磁場が無い状態での測定である。試料両端には、625 A で Nb₃Al ケーブルの常伝導転移による電圧が発生し、ジュール発熱による試料温度の上昇も観測されている。

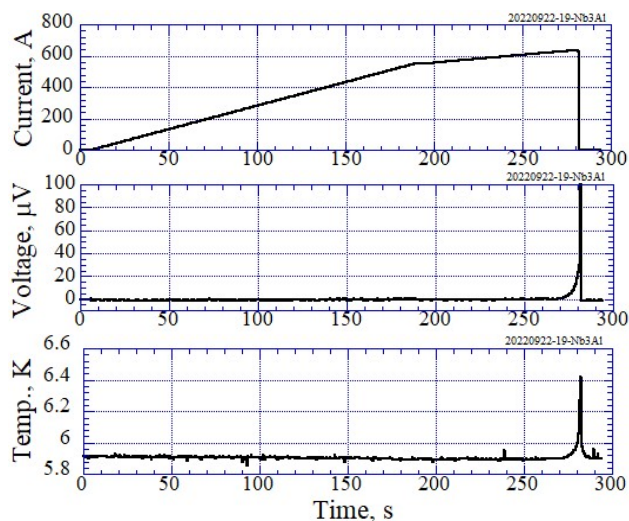


Figure 7: Measured sample voltage, temperature, and the sample current. Solenoid field=0 T.

Figure 8 と 9 には、5 T のソレノイド磁場を印加し、試料初期温度を変化した場合の試料両端電圧及びそれに伴う温度変化の様子を示した。印加磁場のある状態で、電流上昇率の大きい(2A/s 以上)の電流値の電圧測定値では電圧ノイズが大きい、常伝導転移測定時には上昇率は 1A/s に下げている。試料温度も、電圧が発生するまでは非常に安定である。

3.3 臨界電流値の評価

試料の臨界電流値 (I_{cs}) は、Jack W. Ekin の著書[8]で示されているプロセスを測定データに処理し評価した。

Ekin の評価方法によると、一般的な超伝導体の V - I 特性は以下の式で近似することができる。

$$V = cI^n$$

c は定数、 n は非線形の指標値。Ekin の著書では、臨界電流値を評価する電圧閾値で決まる電流値 $I_c^{el\ field}$ と閾値のオフセット分を補正した I_c^{offset} を以下の処理を行い区別している。本論文で示した I_{cs} は I_c^{offset} である。

データ処理のための試料両端電圧の閾値は 8 μ V である。評価電圧値としては 1 μ V/cm に相当する。

測定結果の V - I 特性から n 値を評価できる。 $I_c^{el\ field}$ は、閾値電圧 8 μ V となった電流値に相当する。

$$dV/dI = ncI^{n-1} = nV/I$$

$$I_c^{offset} = I_c^{el\ field}(1 - n^{-1})$$

I_{cs} に対する試料温度をケーブルの臨界温度として T_{cs} と定義した。Fig. 8 と Fig. 9 に示された T_{cs} は、各測定条件での臨界温度に相当する。

Figure 10 に、今回の測定で得られた Nb₃Al ϕ 50 μ m ストランドケーブルの臨界電流値 I_{cs} の温度・磁場の依存性をまとめた。このデータから、Table 3 に示したケーブルの必要な電流容量 50 A @ (4T, 6K) を十分に超えていることが分かる。温度 6 K での I_{cs} =86.4 A である。

また、49 本のストランド線を撚り合わせたケーブル化

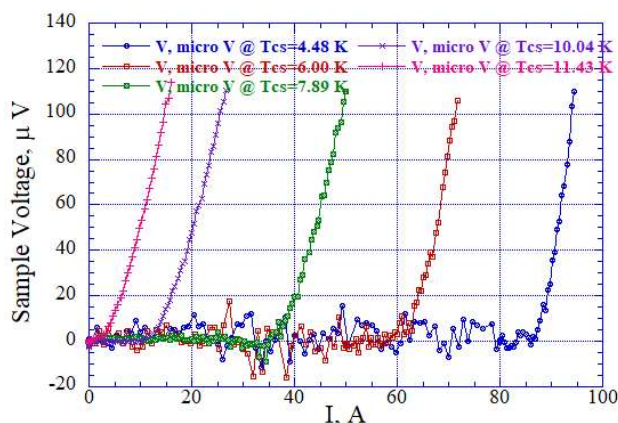


Figure 8: Measured sample voltage as a function of the current. Solenoid field=5 T.

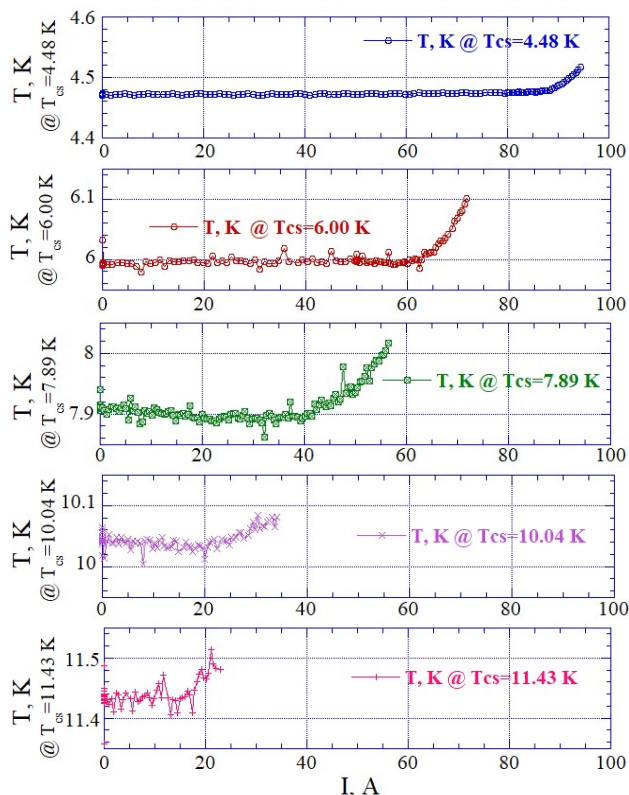


Figure 9: Measured sample temperature as a function of the current. Solenoid field=5 T.

の影響は、ケーブルの安定化銅を除いた面積を用いた超伝導体部での電流密度をストランド線単線での電流密度[6]と比較することにより評価した。菊池等のストランド線単線 (ϕ 50 μ m) の温度 4.2 K、磁場 4 T での臨界電流密度は約 3000 A/mm² である。これに対し、今回測定された温度 4.5 K、磁場 4 T での $I_{cs}=117$ A で、その電流密度は 2430 A/mm² と計算され、単線でのデータと比較して小さい値となっている。単線での性能に対して 80% 程度となっているが、この差はストランド線設計の違いによると考えられケーブル化による大きな劣化は観測されていない。

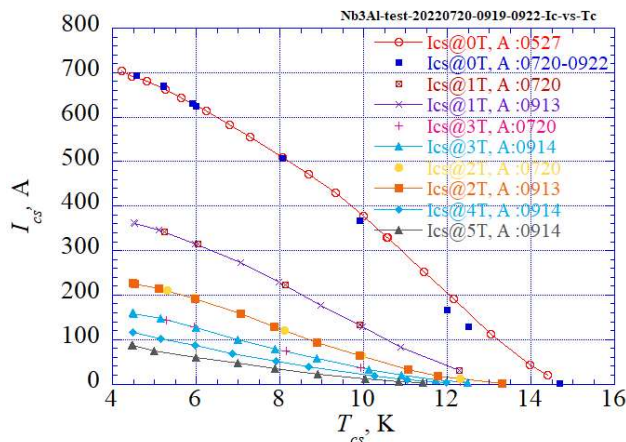


Figure 10: Temperature and magnetic field dependence of Nb₃Al cable I_{cs} .

4. まとめ

SuperKEKB 用超伝導 6 極電磁石開発の一環として進めている超伝導補正電磁石用超細線ストランド Nb₃Al ケーブルの開発状況について報告した。

Nb₃Al は、NbTi よりも高い臨界温度特性を持ち、Nb₃Sn より良好な機械歪特性を持っている。この特性を最大限活用し、熱処理後の A15 化合物系超伝導ケーブルで補正コイル製作の技術開発を進めている。今回の結果は、その基礎となるもので、今後、本ケーブルの曲げによる超伝導特性への影響等を研究し、超伝導補正電磁石の製作まで進める予定である。

謝辞

本研究は、科研費 (21H04477) と (22H03876) の研究費助成事業のサポートを受けている。試験ホルダーは、KEK 機械工学センターの技術協力により製作した。

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] Lake Shore Cryotronics, Inc. CX-1070-SD-HT-4L.
- [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.