

加速器用高温超伝導六極磁石の開発

土屋 清澄^{*1, †}, 王 旭東^{*1}, 藤田 真司^{*2}, 寺島 昭男^{*1}, 有本 靖^{*1},
大内 徳人^{*1}, 宗 占國^{*1}, 菊池 章弘^{*3}

Development of HTS Sextupole Magnet for Accelerator

Kiyosumi TSUCHIYA^{*1, †}, Xudon WANG^{*1}, Shinji FUJITA^{*2}, Akio TERASHIMA^{*1}, Yasushi ARIMOTO^{*1},
Norihito OHUCHI^{*1}, Zhanguo ZONG^{*1} and Akihiro KIKUCHI^{*3}

Synopsis: A prototype high-temperature superconducting (HTS) sextupole magnet for the SuperKEKB interaction region has been designed, fabricated and tested. The magnet consists of two types of sextupole coils, normal and skew coil, wound with a REBCO coated conductor 4 mm in width. The design field gradients of the normal and skew coil are 200 T/m² and 20 T/m² at 30 K, respectively. The assembled magnet has an aperture of 128 mm, and a length of 332 mm. After fabrication, the test of the magnet was performed in LN₂ and in LHe, and the properties of the magnet including field quality were studied. The design, fabrication and performance of the magnet are presented.

Keywords: high-temperature superconductor (HTS), accelerator magnet, REBCO coil, sextupole magnet
(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子 (7 GeV) - 陽電子 (4 GeV) 衝突型加速器 (SuperKEKB) は 2018 年に運転を開始して以来, ビーム衝突の루미ノシティー向上を目指して色々な調整や改造が行われてきた。最近になり $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ という루미ノシティー世界記録を達成したが¹⁾, 未だ設計루미ノシティーの 1/10 程度であり, さらなる向上を目指した検討が進められている。目標루미ノシティーを達成するためには衝突ビームの精密な色収差補正や衝突ビームサイズの細かなチューニングが必要と考えられる。この為には 6 極磁場の磁場面を精度良く回転・調整することができる特殊六極磁石が必要となる。この磁石の設計に

は色々な案が考えられるが, 高い安定性 (軌道から外れたビームが衝突してもクエンチが起きない) を持ち, 且つ大型の冷却システムを必要としない等の特徴を持つクライオクーラー冷却の高温超伝導 (HTS) 磁石は有力な候補と考えられる。そこで我々は HTS 磁石の製作経験を積むこと, 及びその磁場特性を理解することを目的として試作機の製作・試験を行ってきた²⁻⁴⁾。本稿ではこの試作六極磁石の設計・製作および試験結果について報告する。

2. 磁石設計

2.1 概要

効率良く磁場を発生でき, 且つ均一度の高い磁場分布を得易いことから, 今日の加速器用超伝導磁石では鞍型形状のコイルを採用することが多い。然し乍ら, 今日入手可能な REBCO 線材はテープ形状であり, 鞍型コイルを製作することは容易ではない。そこで, レーストラックコイルなら比較的容易に巻線でき, 且つ REBCO 線材の磁化の影響を小さく抑える事ができるとの考えに基づき, 本設計では矩形のレーストラックコイルを採用した。

SuperKEKB 用の特殊六極磁石ではノーマル 6 極磁場とスキュー 6 極磁場を同時に発生し, 磁場面を精度良く回転・調節できることが求められる。前者の磁場勾配として $\sim 200 \text{ T/m}^2$ 以上, 後者の磁場勾配として $\sim 20 \text{ T/m}^2$ 程度が要求される。また, 加速器リング内に既に設置されている常伝導の二極

Received March 19, 2024

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba,
Ibaraki 305-0801, Japan

^{*2} 株式会社フジクラ
〒285-8550 千葉県佐倉市六崎 1440
Fujikura Ltd., 1440 Mutsuzaki, Sakura, Chiba 285-8550, Japan

^{*3} 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

[†] E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp
DOI: 10.2221/jcsj.59.246

磁石や四極磁石の間に設置されるものであるため、磁石長は 600 mm 以下であることも必要である。さらに、クライオクーラーでの冷却を想定すると、磁石の運転電流は 300 A 程度に抑えることが望まれる。これらの諸条件を考慮して Fig. 1 に示す断面構造を持つ六極磁石（運転温度 30 K）を設計した。図に示すように、矩形のノーマルコイルは最内部に配置されるアルミニウム合金製の厚肉円筒外面に加工された六角面に、スキューコイルは鉄ヨーク内側に挿入されるアルミニウム合金製円筒内面に加工された六角面に取り付けられ六極構造を形成する。ノーマルコイル外面にはアルミニウム合金製のコイル押さえ板が、スキューコイルには真鍮製のコイルカバーが取り付けられる。また、ノーマルコイルに働く電磁力はコイル間に設置された支持機構で、スキューコイルに働く電磁力は個々のコイルに取り付けられたコイルカバーで支持する構造となっている。最外部に配置される鉄ヨークは磁石外部の漏れ磁場を極力抑える役割を担っている。

Table 1 にこの六極磁石の主要設計パラメーターを示す。

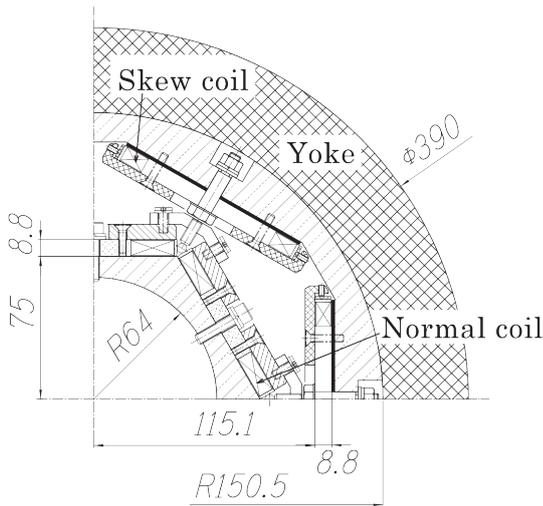


Fig. 1 Quadrant cross section of the sextupole magnet.

Table 1 Design parameters of the sextupole magnet.

Coil parameters		Normal coil	Skew coil
Width (inner,outer)	mm	38.6, 83.6	73.2, 102.9
Length	mm	200	200
Thickness	mm	8.8	8.8
Inscribed circle radius	mm	75	115.1
Number of turns/coil		121 × 2	36 × 2
Operating current	A	250	250
Load line ratio @ 30 K	%	55	41
Overall coil Jc @250A	A/mm ²	303	142
Sextupole field	T/m ²	211.7	23.6
Effective length	mm	175	193
Inductance	mH	72	10.1
Max B _⊥ , B _∥ on the coil	T	1.39, 2.45	0.63, 1.09
Yoke parameters			
Radius (inner, outer)	mm	150.5, 195	
Length	mm	200	

2.2 線材

使用した線材は Fujikura 社製の FYSC-SCH04 であり、IBAD-PLD 法により製作されたものである。Hastelloy 基板の厚みは 75 μm 、線材幅は約 4 mm である。安定化銅の厚みはクエンチ時のコイル最高温度や、クエンチ検出条件に大きな影響を与える。そのため磁石設計に先立ち、安定化銅の厚みを変えた線材を用いて小型コイルを製作しクエンチ実験 (30 K, 40 K, 50 K) を行った⁵⁻⁶⁾。そのデータを基に本六極磁石に適した安定化銅の厚みとして 20 $\mu\text{m}/\text{side}$ を選択した。線材の絶縁は 12.5 μm 厚のポリイミドテープを 2 層巻きする構成で、内側のテープ表面にはフッ素コーティングを施した。

Fig. 2 に FYSC-SCH04 線材の臨界電流特性⁷⁾ とノーマル & スキュー 6 極コイルの負荷曲線を示す。

2.3 コイル設計

コイルの設計には磁場計算コード、Opera-2D と -3D を主に用いた。2D 計算でコイル断面寸法の最適化 (高次多極成分を極力小さくする) を行い、3D 計算ではコイル上の磁場やビーム軸に沿った磁場分布を調べた。その他、コイルの端部形状と有効磁場長や高次多極磁場の関係も調べ、レーストラック形状の端部を矩形とした。また、6 極コイルの 6 つのコイルの取り付け位置がずれた場合、どの程度の多極成分磁場が発生するかを ROXIE コード⁸⁾ を使って検討した (Fig. 3 参照)。ずれの影響は低次の磁場成分で大きく、高次ではあまり問題にならないこと、スキューコイルでは $n=1$ 成分はノーマルコイルより ~ 1.5 倍大きい、次数が上がるとともに急激に小さくなること等が分かった。

3. 磁石製作

3.1 ノーマルコイル (N-coil) の製作

線材の項に記した 4 mm 幅 REBCO 線材を用いて 6 個のコイルを製作した。1 つのコイルの製作に要した線材長は

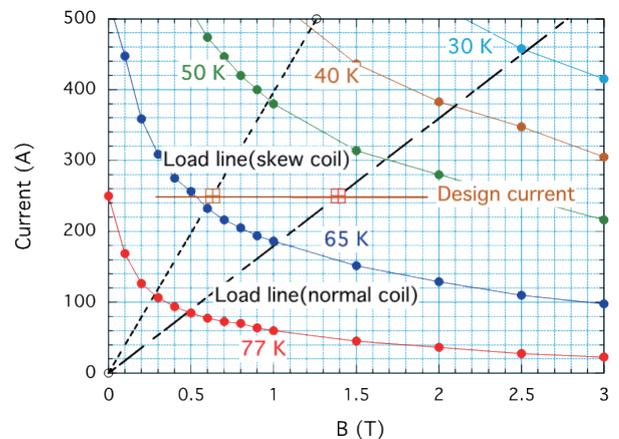


Fig. 2 The critical currents in B_{\perp} at varying temperatures of the FYSC-SCH04 conductors. The load lines of the normal and skew coil are also plotted.

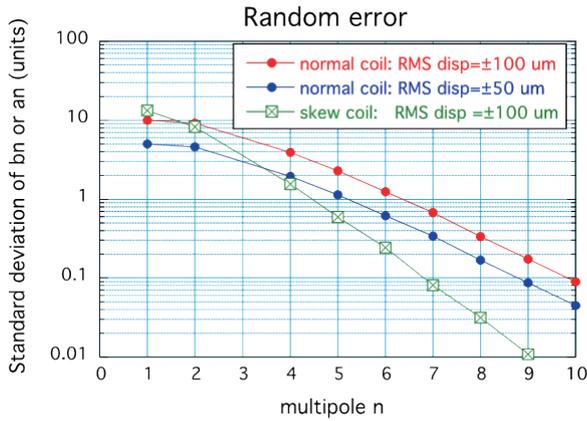


Fig. 3 Standard deviation of the normal and skew multipoles, a_n and b_n , of the normal and skew coils with an RMS displacement of 50 μm and 100 μm .

約 110 m である。巻棒には、加工性が良く、磁気透磁率が小さく、且つ渦電流を抑えられる電気抵抗を持つ真鍮を選んだ。また、巻棒のコーナー半径は線材の曲げ半径と臨界電流の劣化特性のデータ^{9,10}を参考にして出来るだけ小さい半径 (8.5 mm) を採用した。その他、コイル巻線に当たり以下のことを考慮した。1) 巻棒端部のコーナー半径が許容曲げ半径の限界に近いので、線材の超伝導層が Hastelloy 基板の内側に来るように巻き、超伝導層に引張応力がかからないようにする、2) コイル間の接続抵抗を減らすため、接続部では線材の超伝導層が接続金具側に来るようにする、3) ダブルパンケーキコイルの 1 層目と 2 層目は超伝導テープ線材で継ぎ当てる方式で接続する、4) 継ぎ当てる部のギャップにはスペーサーを挿入する、又、巻線の所々に薄いスペーサーを挿入してコイルの仕上がり寸法の調整を図る。

これにより 2 層のダブルパンケーキコイル (121 turns \times 2) 内には REBCO 線材の接続部¹¹が 3ヶ所含まれることとなった。巻線完了後、コイルはエポキシ樹脂で真空含浸された。含浸治具は寸法調節機構を有していたが、樹脂剥離用テフロンシートなどの挿入が必要であり、十分なサイズ調整が出来ず予定した寸法精度を達成することはできなかった。

Fig. 4 及び **Fig. 5** に含浸後の 6 個のコイルの外形寸法 (コイル幅、コイル長) 分布を示す。6 個のコイルの幅の平均値は設計値より 0.7 mm 程大きく、長さの平均値は設計値に非常に近い (誤差は 0.1 mm 以下) 結果となった。

含浸が完了した後、6 個のコイルは 77 K に冷却され、単体で通電特性が調べられた。その結果を **Fig. 6** に示す。コイルにより特性が異なるのは、線材特性のばらつきに由来するものと思われる。また、これら曲線から得られる n 値はほぼ 30 以上であり、コイルの特性としては満足できるものであった。

3.2 スキューコイル (S1-coil & S2-coil) の製作

スキューコイルの製作はノーマルコイルの製法をほぼ踏襲して行なったが、以下の 2 点の変更を行った。1) 発生磁

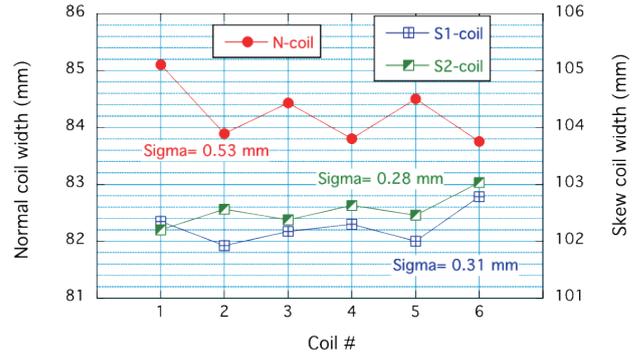


Fig. 4 Width of each coil made for the N-coil, S1-coil and S2-coil.

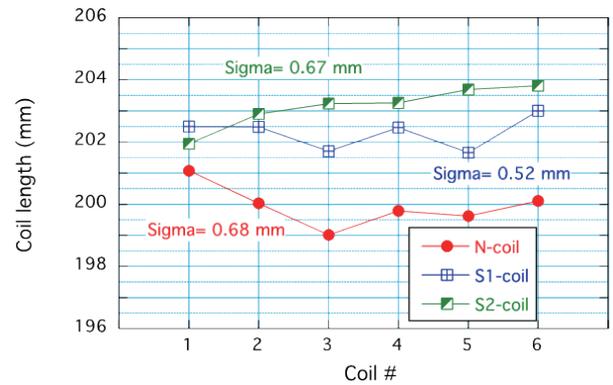


Fig. 5 Length of each coil made for the N-coil, S1-coil and S2-coil.

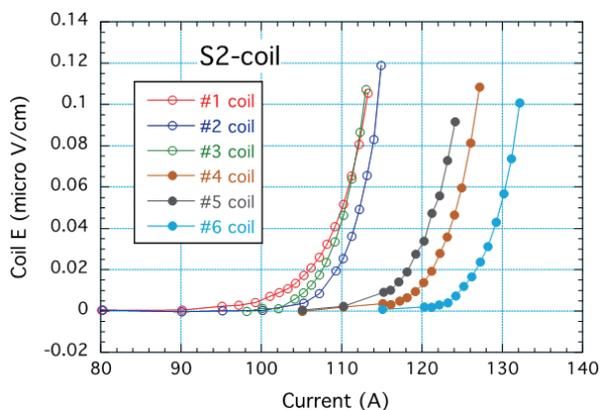
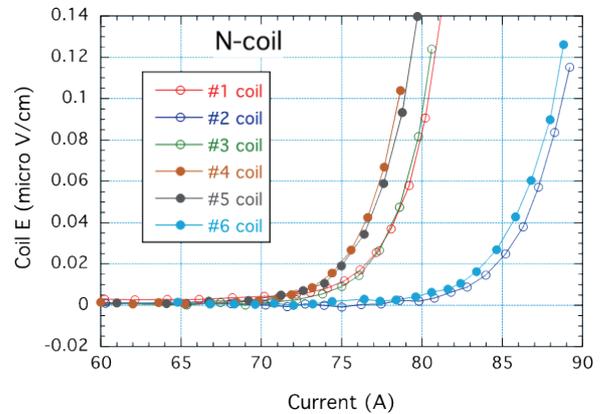


Fig. 6 V-I curve of each six coils measured at 77 K. Upper and lower plots are for the N-coil and S2-coil, respectively.

場はノーマルコイルの約 1/10 と小さいため、コイルサイズを小さくすることはできるが、コイルサイズを大きく変えると多極成分が増大する。そのため、REBCO 線材と銅箔テープを共巻にしてコイル電流密度を下げることで対応する、2) コイルの仕上がり寸法精度の向上と製作作業の簡便化を目指した。ここでは、線材表面の絶縁ポリイミドテープに B ステージのエポキシ樹脂を塗布した線材を用いて巻線した後、コイルを加熱 (~120 °C) ・加圧治具にセットして樹脂を軟化させ、その直線部を加圧して所定の寸法まで押し込む方式を試みた。この方式では加圧によりエポキシ樹脂層の厚さを変えることが出来、コイルの仕上がり寸法の微調整が可能となることが期待された。

このコイル製作には約 12 μm 厚の B ステージエポキシ樹脂を絶縁ポリイミドテープ表面に塗布した線材を用いた。本スキューコイル製作では、線材の超伝導層が Hastelloy 基板の外側に来るように巻線する (超伝導層には引張応力が加わる) S1-coil と、内側に来るように巻く (超伝導層には圧縮応力が加わる) S2-coil を製作した。スキューコイルはノーマルコイルより外側に配置されたためコイル端部の曲げ半径を大きく (15 mm) 取ることができた。そのため、S1-coil では、1) 巻線時に線材に加わる曲げ歪みは小さいと考えたこと、2) コイル内の線材接続箇所数を減らすことができることから、この巻き方を採用した。製作コイルの 77 K 特性確認試験は、巻線後と加圧成形後の 2 回行い、特性劣化がどの工程で生じるかを判別できるようにして進めた。この結果、多数のコイルで加圧工程後の I_c 値や n 値に劣化が見られた。また、劣化箇所の調査では、コイルコーナー部で比較的内側のターンの線材で劣化が生じていることが判明した。このことから、コイルの加圧 (押し込み) 工程において、引張応力がかかっているコーナー部線材に想定外の付加的な応力が加わっていることが推測された。そこで次に、超伝導層が Hastelloy 基板の内側に来るようにして巻く S2-coil を製作した。REBCO 層は引張歪みより圧縮歪みに対する耐性が高い¹²⁾ ことを考えたものである。このコイルでは 77 K 単体通電試験で特性劣化を示すものは殆どなかった。

Fig. 4 及び Fig. 5 に 2 種類のコイル (S1-coil と S2-coil) の寸法分布を示す。どちらのコイルにおいても 6 個のコイルの平均幅は設計値より大きく (S1-coil では 0.25 mm, S2-coil では 0.54 mm), 平均長さも長く (S1-coil では 2.3 mm, S2-coil では 3.1 mm) だったが、N-coil に比べ僅かではあるがコイルサイズのバラつきは小さくなった。

Fig. 6 には S2-coil の 77 K 単体通電試験の結果を示す。N-coil の場合と同様にコイルにより通電特性は異なっているが、これは使用した線材の特性のバラつきによるものと思われる。また、この S2-coil の n 値は 1 つのコイルを除いて全て 30 以上で、コイルの加圧成形の影響は殆ど見られなかった。

これら一連のコイル製作から、B ステージ樹脂を使った

加圧成形法はコイル寸法精度や製作性の改善に有用であることが分かったが、より細かな製作条件の最適化が必要であることも明らかとなった。また、線材をどの向きに巻くか (超伝導層を Hastelloy 基板の内側にして巻くか外側にして巻くか) はコイル特性に大きな影響を与える因子であることも明らかとなった。

3.3 六極磁石の組立て

単体試験が済んだ 6 個の N-coil の外面にコイル押さえ板を取り付け、Fig. 1 に示すアルミニウム合金製の六角ボビン外面に組み付けて 6 極コイル構造を形成した。この六角ボビン表面、及びコイル押さえ板には約 50 μm 厚のポリイミド樹脂をコーティングしてコイルの対地絶縁性能の向上を図った。

コイル間の接続は、Fig. 7 に示すような銅製の接続金具をコイルにハンダ付けする方法で行った。また、接続金具の表面には 3 mm 幅の REBCO 線材を貼り付け、コイル間接続抵抗の低減を図った。

6 極形状への組立てが完了した後、77 K での通電試験を行い、組立て後のコイルの健全性を確認した。この時に得られた N-coil の V-I 曲線を Fig. 8 に示す。単体コイルの V-I 曲線に比べ僅かに電流値が下がっているのは 6 極構造に組んだことによりコイルの経験磁場が上がったためと思われる。この図から推測される N-coil のおおよその臨界電流値は Fig. 2 に示した Normal coil の通電限界値 (@ 77 K) と良く一致している。



Fig. 7 Photo of splice joints made of copper plate. (These are for the normal sextupole.)

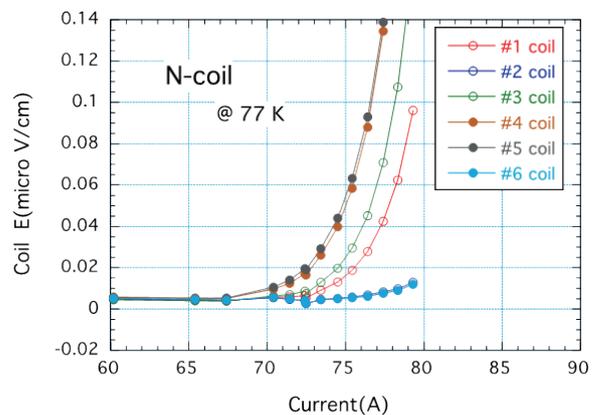


Fig. 8 V-I curve of each six coils assembled to the N-coil.

スキューコイルは、鉄ヨーク内側の円筒枠内面に加工された六角面に取り付けられ (Fig.1 参照), 6 極構造を形成した。スキューコイルの運転磁場は低く, 低負荷率であるため, 伝導冷却経路の熱抵抗の多少の増大を許して, スキューコイルと円筒枠の絶縁には 1.5 mm 厚の G10 板を使用した。コイル間の接続はノーマルコイルの場合と同様の方法で行った。6 極形状への組立てが完了後, ノーマルコイルと同様 77 K でのコイルの健全性確認試験を行なった。

Fig. 9 に S2-coil の V-I 曲線を示す。このコイルの V-I 曲線は単体励磁のものとはほとんど同じであった。また, この図から推測される S2-coil のおおよその臨界電流値は Fig. 2 に示した Skew coil の通電限界値 (@ 77 K) と良く一致している。

健全性確認が終了した後, 相互の位置・角度に注意してノーマルコイルとスキューコイルを鉄ヨーク内側に挿入し, 六極磁石を組立てた。完成した特殊六極磁石を Fig. 10 に示す。

4. 六極磁石の試験結果

4.1 試験方法

特殊六極磁石の冷却励磁試験は縦型クライオスタットにて行った。LN₂ による浸漬冷却下と LHe による浸漬冷却下

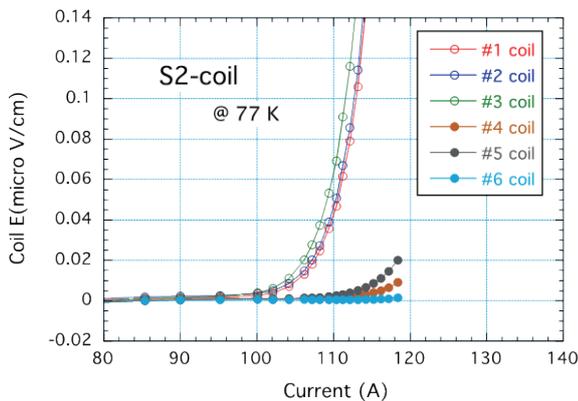


Fig. 9 V-I curve of each six coils assembled to the S2-coil.

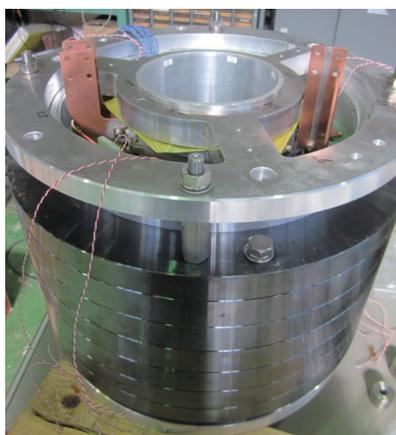


Fig. 10 Photo of the assembled special sextupole magnet.

の 2 つの温度で, N-coil と S1-coil を組み合わせた場合と N-coil と S2-coil を組み合わせた場合について行った。

試験項目は, 定格電流までの通電確認, インダクタンス測定, コイル間接続抵抗の測定, 遮断試験, 磁場測定などである。

通電は Fig. 11 に示す回路構成で行い, コイルの保護抵抗は 0.75 Ω とした。また, クエンチ検出は 2 分割コイルの電圧バランスの崩れにより行い, 検出閾値は 80 mV, 11 ms (電源の遮断遅れ込みで 14 ms 弱) とした。この値は先行して行った単体矩形レーストラックコイルのクエンチ試験結果¹³⁾に基づいて決められた。

4.2 通電試験

N-coil は, LN₂ 温度では 60 A まで, LHe 温度では 250 A まで通電し, S1-coil と S2-coil は LN₂ 温度では 80 A, LHe 温度では 250 A まで通電した。電流掃引速度は S1-coil と S2-coil では 20 A/s, N-coil では 10 A/s まで上げてもクエンチは発生しなかった。20 A/s では N-coil のクエンチ検出器が作動したが, これはコイル電圧のバランス調整が十分でなかった (N-coil のインダクタンスが大きく僅かなバランス調整のずれでも増幅して検出される) ためであった。

コイルのインダクタンスは, 励磁電流を一定掃引速度で増加させた時に各コイルに発生する誘導電圧から求めた。3 つの 6 極コイル (N-coil, S1-coil, S2-coil) の各コイルのインダクタンスを Fig. 12 に示す。どの 6 極コイルにおいても, ほとんどのコイルのインダクタンスは ~1 % のバラつき幅内 (インダクタンスの測定エラー ± 1 % を図中に示す) に納まっているが, S1-coil の #2 コイルと S2-coil の #1 コイルのインダクタンスは, エラー幅を超えて大きく外れている。

この外れがコイルの巻き数によると仮定すると, S1-coil の #2 コイルでは 2 ターン, S2-coil の #1 coil では 1 ターン設計値より少ないこととなった。

磁石のインダクタンスとしては N-coil は 71.2 mH, S1-coil と S2-coil は 10.0 mH となり, Opera 3D による計算値との差は ~1 % 以下であった。

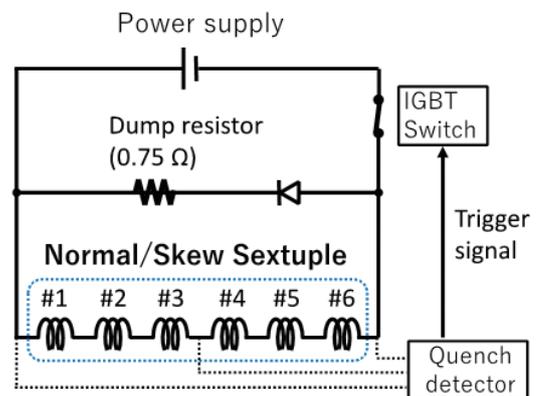


Fig. 11 Schematic drawing of the excitation circuit used for the test.

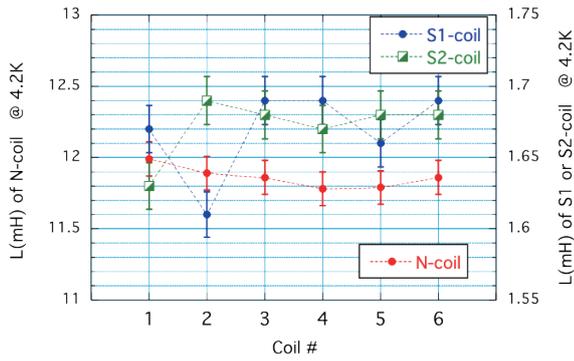


Fig. 12 Inductance of each coil measured in N-coil, S1-coil and S2-coil.

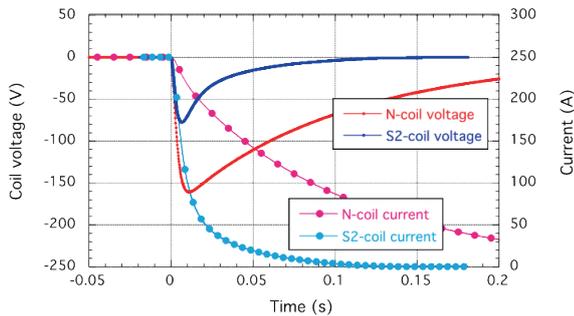


Fig. 13 Voltage and current behavior measured at current interruption at 250 A. The data for N-coil and S2-coil are plotted in the figure.

4.3 電流遮断試験

N-coil と S2-coil の 250 A における電流遮断の様子を Fig. 13 に示す。これから得られる電流減衰の時定数は N-coil では 0.095 s, S2-coil では 0.013 s となり, 計算値である 0.096 s, 0.014 s と非常に良く一致している。一方, 遮断電圧の観測値は, N-coil で 161 V, S2-coil で 77.5 V であり, 両者で大きく異なった。然し乍ら, 遮断後~10 ms での電圧は指数関数的減衰式による推定値と良く一致している。また, 観測電圧からコイルの誘導電圧を差し引いた値と電流値の積の時間積分からコイル内での消費エネルギーを推定すると, N-coil では 384 J (コイル蓄積エネルギーの 17%), S2-coil では 174 J (コイル蓄積エネルギーの 55%) となった。

4.4 コイル間接続抵抗

通電試験ではコイル間の接続抵抗の測定も行った。電流をステップ状に増加させ, 接続部の電圧をナノボルトメーターで測定した。その電流-電圧プロットは 250 A まで直線状で, その勾配から抵抗値を求めた。結果を Fig. 14 に示す。77 K における接続抵抗値は 1.4~7 $\mu\Omega$, 4.2 K では 0.13~0.9 $\mu\Omega$ であった。また, S1-coil と S2-coil の抵抗値は N-coil の値より大きいこと, 同じサイズの接続金具を使って同じように組み立てたにも拘らず S1-coil と S2-coil では違いがあることなどが分かった。各コイル間の接続抵抗値のバラつきは, はんだ付け作業に関係しているのではない

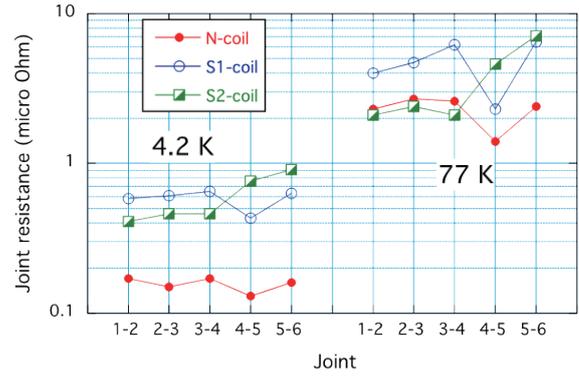


Fig. 14 Joint resistances of N-coil, S1-coil and S2-coil.

Table 2 Comparison of measured and calculated B_3^*L or A_3^*L .

Coil	Measured	Opera-3D
N-coil $B_3^*L(Tm)$ @ 60A	0.008058	
$B_3^*L(Tm)$ @ 250A	0.03363	0.0335
S1-coil $A_3^*L(Tm)$ @ 80A	0.001320	
$A_3^*L(Tm)$ @ 250A	0.004160	0.00410
S2-coil $A_3^*L(Tm)$ @ 80A	0.001328	
$A_3^*L(Tm)$ @ 250A	0.004184	0.00411

かと思われる。N-coil の接続抵抗値が S1-coil や S2-coil の接続抵抗値とはかなり異なることについては後述する。

4.5 磁場測定

磁場測定には回転コイルを用いた。このコイル半径 R は 30 mm, 長さは 200 mm で, 縦型クライオスタット内に吊るした特殊六極磁石の口径内に挿入した断熱パイプの中で 0.267 Hz で回転させて磁場を測定した。コイルの通電電流は 0~250 A の範囲で, 増加過程と減少過程で測定し, 磁場のヒステリシスも調べた。また, 回転コイルの長さが六極磁石の全磁場 (端部漏れ磁場を含む) をカバーするには十分ではなかったので, 各電流値での測定ではコイルを上下して, 上半分と下半分に分けて磁場を測定した。

磁石軸に沿った $R=30$ mm における 6 極磁場の積分値 (B_3^*L or A_3^*L) とその計算値を Table 2 に示す。測定値と計算値の差は N-coil では 0.4%, S1-coil や S2-coil では 1.5~1.8% であり, 計算はかなり良く測定値を再現している。

Fig. 15 には積分 6 極磁場の $R=30$ mm におけるトランスファー・ファンクション ($TF = B_3L/R^2/I$) の電流依存性を示す。N-coil では 50 A 以下で TF の急激な増大が見られるが, S2-coil では比較的平坦である。N-coil の振る舞いはコイルの磁化 (線材の磁化 M (B) をコイル体積で積分したものの) によるものと理解されるが, S2-coil の振る舞いについては未だ十分な理解には至っていない。また, 電流を上げる時と下げる時の TF にはヒステリシスが見られる。これは線材の磁化のヒステリシスによるものであるがどちらの磁石においてもその幅はかなり小さく ($\Delta \sim 0.1\% @ I > 100$ A), 磁石の実用上では問題とならないと思われる。

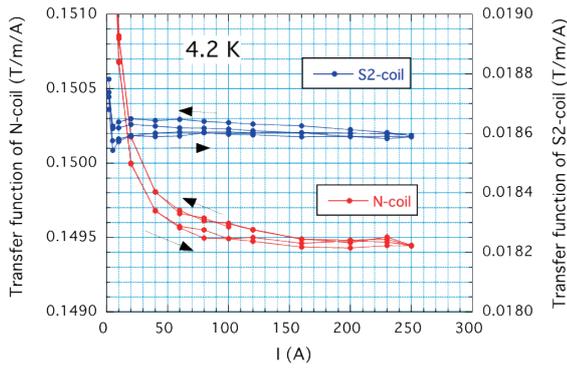


Fig. 15 Integrated transfer functions vs. current of N-coil and S2-coil obtained from field measurement.

Table 3 Measured multipole components C_n of normal and skew sextupoles at 250 A. The values are expressed by units (1×10^4).

Multipole n	N-coil	S1-coil	S2-coil
1	71	648	266
3	10000	10000	10000
4	7.2	11.1	5.8
5	2.8	4.3	0.7
6	1.9	0.6	1.4
7	0.4	0.3	0.4
8	0.3	0	0.8
9	0.2	4.9	7.6

磁場測定では、磁石口径内の磁場に含まれる多極成分磁場の測定も行った。**Table 3** に測定で得られた多極磁場の6極磁場 ($n=3$) に対する割合を示す。2極成分 ($n=1$) はどのコイルにおいても予想より大きい。S1-coilとS2-coilの値は特に大きい。この成分はコイル設計の項のFig. 3に見られるように、コイル寸法や取付け位置のずれに非常に敏感であるためであると考えられるが、寸法精度の重要性を示している。次に目立つ成分としては8極磁場 ($n=4$)、10極磁場 ($n=5$)、S1-coil, S2-coilでは18極磁場 ($n=9$)があるが、それ以外の多極成分は測定誤差と同程度でありその存在は明確ではない。

測定では、N-coilとS1-coilまたはS2-coilを同時に励磁してノーマル磁場とスキュー磁場を重ね合わせる試験も行った。準備できた電源が1000 A電源と100 Aバイポーラー電源の2台のみであったので、N-coilに250 Aを通電した状態で、S1-coilまたはS2-coilの電流を0 → 100 A → 0 → -100 A → 0 Aと変化させて測定を行った。測定された多極磁場は両コイルの単独励磁で得られたものを重畳したものと良く一致し、REBCO線材の磁化による影響は見られなかった。

5. 解析

高温超伝導磁石の開発・製作で重要な項目として、コイル間の接続抵抗と、磁場の均一性が挙げられる。そこで、この2つについてOpera-3Dコードによる解析を行い、測定

値との比較を行なった。

5.1 接続抵抗

コイル間接続抵抗の解析にはOpera-3Dコードのcurrent flow solverを用いた。**Fig. 16**にN-coilとS-coil (S1 & S2)の接続部モデルの例を示す。接続金具はFig. 7に見られるように左右対称性を有しているため、1/2モデルで計算した。図に示すモデルにおいて、銅接続金具(緑色)の手前肉厚部の下側にコイルを接続すると想定し、コイルと銅金具の間にハンダ層(50~200 μm t)、その上に銅接続金具(緑色、2~5 mm t)、その上にREBCOテープを貼り付けるハンダ層(50~100 μm t)、次いでREBCO超伝導層(青色)を配置した。計算に用いた比抵抗の値は実測値と文献値¹⁴⁾の比較検討から、銅には $1.95 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$ @ 77 Kと $1.53 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ @ 4.2 Kを、ハンダには $2.73 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ @ 77 Kと $2 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$ @ 4.2 Kを使用した。ハンダは4.2 Kでは超伝導となるが、実際の使用環境下では超伝導ではないと考え超伝導転移直前の値とした。

Table 4にハンダ層厚を50 μm とした時の77 Kと4.2 Kにおける接続抵抗の計算値と測定値を示す。また、30 KにおけるN-coilの計算値も示した。

この表から1) N-coilの測定値はOpera-3Dの計算値にかなり近いこと、2) S1, S2-coilの測定値は計算値より2~3倍大きいことなどが分かる。

S1, S2-coilの測定値と計算値の差が大きい原因を調べるため、ハンダ層厚や銅の比抵抗を変えて計算を行った。その結果、S1, S2-coilの銅とN-coilの銅ではRRRが異なっている可能性が高いことが判明した。また、同じコイル内での測定値のばらつきはハンダ層厚を変えることによりある程度説明できるが、測定値を完全に再現することはできなかった。その他、REBCOテープの貼り付けの効果についても検討を行った。その結果、REBCOテープが無い場合にはどのコイルにおいても接続抵抗値はテープがある場合

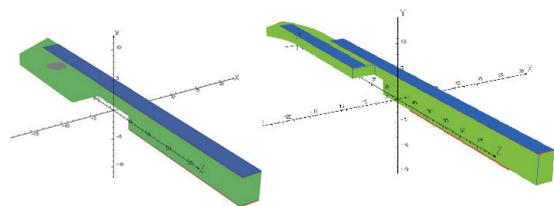


Fig. 16 Joint models used for Opera-3D calculation. The left and right models are for N-coil and S-coil splices, respectively.

Table 4 Comparison of the joint resistances.

Joint	Calculated R($\mu\Omega$)	Measured R($\mu\Omega$)
77 K N-coil	1.45	1.2~2.5
S1 or S2-coil	2.24	2.0~7.0
4.2 K N-coil	0.11	0.11~0.18
S1 or S2-coil	0.17	0.4~0.9
30 K N-coil	0.16	

の約10倍に、又テープの表裏を逆に貼ると約2倍に上がることが分かった。

5.2 多極磁場

測定結果をOpera-3D計算でどこまで再現できるかは興味ある課題である。そこで、製作した個々のコイルの寸法情報を取り入れた計算モデルを作り、磁場計算を行った。

Fig. 17 にノーマルコイルとスキューコイルを組合せた六極磁石のOpera-3D計算モデルを示す。2回の測定(2023年2月と11月)で得られたN-coilの多極成分とOpera-3D計算の結果をFig. 18に示す。2つの測定値を比べると多少のずれが見られる。これは測定装置や磁石の据付誤差など測定系全体からくる誤差ではないかと思われる。計算値は大まかには測定値と合っていると見えるが、 $n=4$ の8極成分や $n=9$ の18極成分ではずれが大きい。この原因としては、計算に用いたコイルサイズが樹脂層の厚みを含んだものであり真のコイルサイズでは無いことや、コイルの非対称性の情報(実際の製作コイルは完全に対称には出来ていない)が考慮されていないことなどが考えられる。また、測定誤差の可能性も考えられる。

Fig. 19 にS1-coilとS2-coilの多極成分を示す。 $n=1$ の2

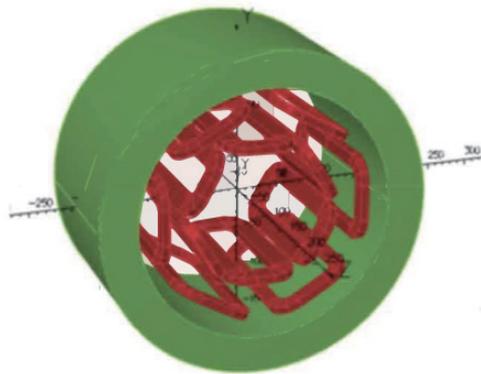


Fig. 17 Opera-3D model of the assembled sextupole magnet.

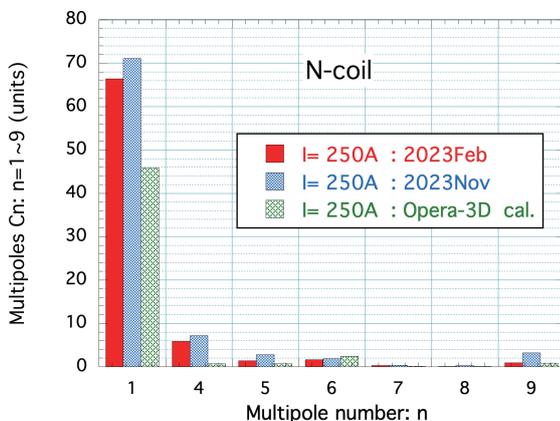


Fig. 18 Measured multipole components C_n of the N-coil and the calculated values by Opera-3D. The reference radius of this measurement is 30 mm.

極成分の測定値はN-coilのものに比べてかなり大きい。Opera-3Dによる計算値も大きく、測定値に近いことから、これはコイル寸法に由来するものと思われる。 $n=9$ 成分を除けば、測定値と計算値はかなり良く合っていると見える。

本解析に取り入れたコイル情報は、幅と長さのみであったが、3つのコイル(N-coil, S1-coil, S2-coil)における測定値と計算値は大まかには一致することが確認された。このことから、組み立て前に製作コイルの寸法情報があれば、最良のコイル配置を計算で求めて六極コイルの組立てを行うことが出来ると言える。また、この一連の解析作業の中で、コイル寸法の設計値からのずれが現在の値の半分になったら多極成分はどのようになるかを調べた。その結果、どの多極成分もおおよそ1/2になることが確認された。従って、コイルサイズの製作精度を上げて、ずれを1/2にすれば、 $n=1$ 以外の多極成分は全て加速器用磁石の許容範囲に入り、残るのは $n=1$ 成分のみとなる。この成分の解消には、コイルサイズの精度を上げて対応することは容易ではなく、補正コイルの導入が望ましいと思われる。今日では2mm幅REBCO線材の入手が可能となっており、この補正コイルの実現可能性は高くなっている。

6. まとめ

SuperKEKBのミノシティー向上を目指してREBCO線材を用いた特殊六極磁石の開発を進めてきた。その中で3個の6極コイル(計18個のコイル)を製作し、冷却励磁試験および磁場測定により磁石特性を調べた。コイル製作では、従来の樹脂含浸法のみでなく、Bステージ樹脂による加温・加圧成形法による製作も試み、加速器磁石用コイルの製作への適用可能性を示した。また、励磁試験ではコイル電圧のバランスの崩れを検出して電流を遮断する所謂電圧バランス法によるクエンチ保護方式を採用し、定格電流値までの通電を行った。N-coilでは10 A/sまで、S1-coilとS2-coilでは20 A/sまで掃引速度を上げて250 Aまでの励磁を行ったが、クエンチが発生することはなかった。磁石の

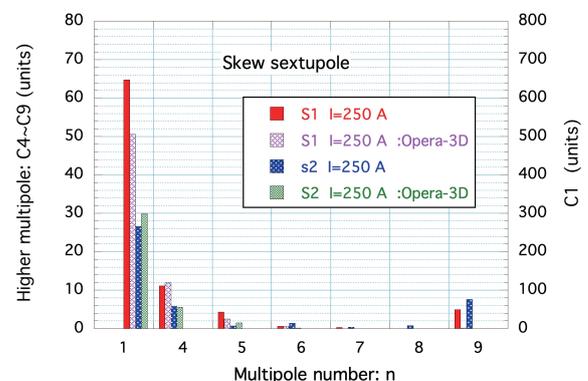


Fig. 19 Measured multipole components C_n of the S1-coil and S2 coil. The calculated values by Opera-3D are also shown. The reference radius of this measurement is 30 mm.

コイル間接続抵抗値はコイルにより多少異なったが、N-coilでは $0.2 \mu\Omega$ @ 4.2 K 以下、温度マージンの大きいS1-coilやS2-coilでは $0.9 \mu\Omega$ @ 4.2 K 以下であった。どのコイルにおいても磁場測定で得られた6極磁場強度は計算値と1.5%以下のずれで一致した。磁石の口径内R=30 mmにおける6極磁場に対する多極成分磁場の割合はn=1とn=4を除くとほぼ2 units (2×10^{-4}) 以下であり、加速器用磁石の許容範囲内であった。n=4についてはコイル製法上の多少の改善が、n=1成分に対しては、2極補正コイルの導入が望ましいことが分かった。また、REBCO線材の磁化が6極磁場に及ぼす影響は非常に小さく、本6極磁石では問題とならないことも明らかとなった。

本研究は科学研究費補助金(15H03667)と(19H01911)の助成により実施したものである。磁石の製作・試験では高エネルギー加速器研究機構機械工学センター、超伝導低温工学センターの方々が大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) D. Zhou, et al.: "Luminosity performance of SuperKEKB," *Journal of Instrumentation* **19** (2024) T02002
- 2) K. Tsuchiya, M. Tawada, et al.: "Development of HTS sextupole magnet for SuperKEKB interaction region," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** (4) (2016) 4100904
- 3) K. Tsuchiya, S. Fujita, et al.: "Prototype HTS sextupole magnet for SuperKEKB interaction region," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** (5) (2019) 4002604
- 4) X. Wang, K. Tsuchiya, et al.: "Excitation and magnetic field performances of a prototype REBCO sextupole coil at 4.2 K," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** (4) (2020) 4600304
- 5) M. Daibo, S. Fujita, et al.: "Study of quench behavior of ReBCO impregnated pancake coil with a 75-mm-thick copper stabilizer under conduction-cooled condition," *Physics Procedia* **67** (2015) 750-755
- 6) X. Wang, K. Tsuchiya, et al.: "Experiment and numerical simulation on quench characteristics of ReBCO-impregnated coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** (4) (2017) 4700105
- 7) https://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/2052502_12679.html (accessed 2024-02-15)
- 8) S. Russenschuck, ROXIE: routine for the optimization of magnet x-sections, inverse field computation and coil end design, CERN 99-01 (1999)
- 9) S. Fujita, M. Daibo, et al.: "Evaluation of rare-earth based coated conductors-mechanical, delamination and in-field critical current properties-," *TEION KOGAKU* **48** (2013) 172-177 (in Japanese)
藤田真司ら:「RE系超伝導線材の特性評価—機械特性・剝離特性・磁場中臨界電流特性—」, *低温工学* **48** (1013) 172-177
- 10) K. Tsuchiya, A. Kikuchi, et al.: "Critical current measurement of commercial REBCO conductors at 4.2 K," *Cryogenics* **85** (2017) 1-7
- 11) X. Wang, M. Uchida, et al.: "Splice resistance measurements of REBCO

tapes for a REBCO sextupole magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** (5) (2019) 8800905

- 12) D. C. van der Laan, J. D. Weiss and D. M. McRae: "Status of CORC cables and wires for use in high-field magnets and power systems a decade after their introduction," *Supercond. Sci. Technol.* **32** (2019) 033001
- 13) X. Wang, K. Tsuchiya, et al.: "Quench study on a REBa₂Cu₃O_y coil for a high temperature superconducting sextupole magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **32** (6) (2022) 4005305
- 14) N. Bagrets, C. Barth and K. -P. Weiss: "Low temperature thermal and thermos-mechanical properties of soft solders for superconducting applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** (3) (2014) 7800203

土屋 清澄 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。超伝導磁石や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。工学博士。

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)。

藤田 真司 2006年信州大学理学部物理科学科卒業。2008年同大学院工学系研究科物質基礎科学専攻修了。同年株式会社フジクラ勤務。RE系超伝導線材および超伝導コイルの開発に従事。低温工学・超電導学会会員。博士(工学)。

寺島 昭男 高エネルギー加速器研究機構ダイヤモンドフェロー。KEK超伝導低温工学センターにて、超伝導磁石の開発、低温技術の研究に従事。

有本 靖 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設准教授。SuperKEKB加速器および超伝導最終集束4極磁石の建設・開発に従事。日本物理学会、日本加速器学会、低温工学・超電導学会会員。博士(理学)。

大内 徳人 1982年大阪大学工学部電気工学科卒業、現在、高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設特別教授。主に、加速器用超伝導磁石と冷却システムの開発に従事。低温工学・超電導学会、日本加速器学会会員。工学博士。

宗 占國 2008年中国科学院大学院博士卒業。2009年5月高エネルギー加速器研究機構勤務。主に低温ヘリウム冷却システム開発・調整・運転に従事。低温工学・超電導学会、日本加速器学会会員。工学博士。

菊池 章弘 物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究センター先進超伝導線材グループリーダー。核融合科学研究所客員教授。岩手大学客員教授。低温工学・超電導学会、日本金属学会、日本銅学会、応用物理学会会員。博士(工学)。