

SuperKEKB ビーム調整用超伝導 6 極電磁石の開発(1)

DEVELOPMENT OF THE SUPERCONDUCTING SEXTUPOLE MAGNET FOR BEAM TUNING IN SuperKEKB (1)

大内徳人[#], 有本靖, 青木和之, 保住弥紹, 高富俊和

Norihito Ohuchi[#], Yasushi Arimoto, Kazuyuki Aoki, Mitsugu Hosumi, Toshikazu Takatomi

KEK, 高エネルギー加速器研究機構

Abstract

SuperKEKB started to be operated from March 19, 2018, and the peak luminosity of 3.12×10^{34} was reached at June 22, 2021. While the luminosity is the world record, the effort for increasing the luminosity is being continued. As a study for this subject, the superconducting sextupole magnet with the corrector magnets cooled with cryocooler is being developed. In this paper, the basic parameter and the development status of the R&D sextupole magnet are reported.

1. はじめに

SuperKEKB は 2018 年から電子・陽電子ビーム衝突実験を開始し、2021 年現在までの運転の成果としてビーム衝突点での $\beta_y^* = 0.8$ mm、到達最高ルミノシティ $L_p = 3.12 \times 10^{34}$ cm⁻²s⁻¹ を達成している。今後、更に SuperKEKB の設計ルミノシティに近づく為には、ビーム調整に必要な機器の開発が必要となる。

SuperKEKB 超伝導電磁石グループでは、ビーム調整のキーコンポーネントとなると考えられる超伝導 6 極電磁石の検討を行ってきた。この超伝導 6 極電磁石は内部に Skew6 極、Normal4 極、Skew4 極補正電磁石を組み込んだもので、ビームラインに点在して設置するため小型冷凍機で冷却する。本報告会では、超伝導 6 極電磁石の開発状況について発表する。

2. SuperKEKB 用超伝導 6 極電磁石

2.1 衝突点近傍の 6 極電磁石

SuperKEKB ビーム衝突点がある筑波実験室の加速器トンネルには、直線ビームラインが建設されておりビーム調整用に常伝導 6 極電磁石が組み込まれている。電子・陽電子ビームライン(HER・LER)に各々 8 台の 6 極電磁石が設置されている。6 極電磁石は、ローカルクロマティシティー補正或いはクラブウエスト用として使用されビーム調整用としては極めて重要な電磁石である[1]。

この常伝導 6 極電磁石を超伝導 6 極電磁石で構成した場合の電磁石システムの検討を行っている。図 1 には、KEK 筑波実験室にある SuperKEKB ビーム衝突点から大穂実験室側への約 100 m 長のビームラインが示され、HER・LER ビームラインに設置された常伝導 6 極電磁石の配置を示している。6 極電磁石は、衝突点(IP)を挟んで ±110m の範囲に各ビームラインに 8 台設置されている。現在ビームラインに設置されている 6 極電磁石のパラメータを表 1 にまとめた[2]。表中、 B'' =磁場勾配、 L_{eff} =実効磁場長、 $Cur.$ =設計電流、 $turn$ =コイル巻数を示す。

Table 1: Sextupole Magnets in the SuperKEKB Tsukuba Beam Lines

	LER	HER	
B'' (T/m ²)	98.83	353	322
L_{eff} (m)	0.3	0.6	0.5
$Cur.$ (A) × turns/pole	425 × 21	600 × 22	600 × 22
Num. of magnets	8	4	4

2.2 超伝導 6 極電磁石の基本パラメータ

表 1 で示した常伝導 6 極電磁石に対して、超伝導化した場合の目標とする R&D 電磁石のパラメータを表 2 に示す。6 極磁場勾配 (B'') は 800 T/m²、実効磁場長 (L_{eff}) は 0.3 m 以下としている。6 極電磁石は、IP から約

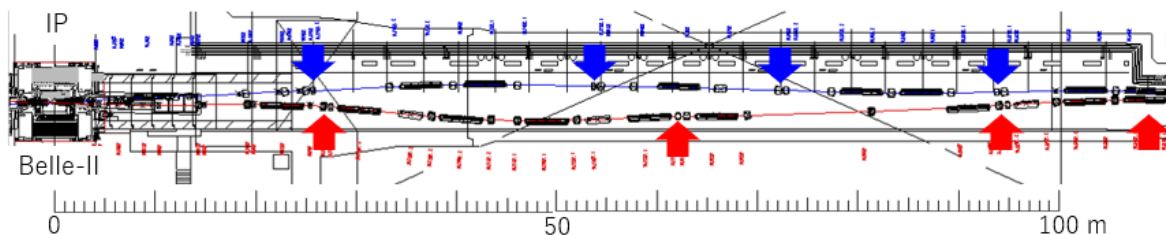


Figure 1: SuperKEKB beam lines from the IP to the accelerator arc section in the Tsukuba experimental area. The normal conducting sextupole magnets are shown with the arrows. The blue arrow and line are the sextupole magnet and beam line for electron (HER), and the red ones are those for positron (LER).

[#] norihito.ohuchi@kek.jp

110 m のビームラインに沿って点在することから、超伝導 6 極電磁石の冷却は小型冷凍機で行う。冷凍能力に制限があり、室温からの熱負荷を極力低減するために設計電流値は 250 A 以下としている。超伝導 6 極電磁石には、磁場中心位置、磁場面回転角度補正を電磁的に行う為の補正磁石を組込む。6 極磁石の磁場中心のビームに対する変位は、Normal4 極磁場 (B_2) と Skew4 極磁場 (A_2) により補正される。補正量は、 ± 0.5 mm としている。磁場面の回転誤差は、Skew6 極磁場 (A_3) により補正され、補正角度量は ± 3 度としている。

Table 2: Basic Parameters of the Superconducting (SC) Sextupole Magnet System

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

3. R&D コイルの設計・製作

3.1 超伝導 6 極 R&D 電磁石の設計

図 2 に超伝導 6 極 R&D 電磁石の断面設計を示した。磁石のパラメータを表 3 に示す。設計に使用した超伝導線は、材質 NbTi ケーブルを使用している。ケーブルパラメータは、サイズ(絶縁含) = 1.48 mm × 1.03 mm、銅比 = 1.8、臨界電流 = 1460A@5T, 4.2K である。

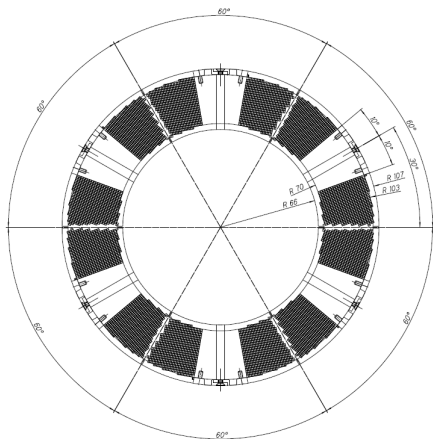


Figure 2: The R&D magnet cross section.

この超伝導 6 極電磁石断面の簡易モデルを用いて磁場計算し、その結果を図 3 に示した。コイル部の電流密度は 165 A/mm² とし、ケーブル断面積から計算される電流値は 251.5 A となる。図中左側は磁束線図を示し、右側は磁束密度の分布を示している。超伝導コイル内の最大磁場は、5.44 T である。計算結果より得られた 6 極磁場勾配は 841 T/m² である。

ケーブル電流値 251.5 A、コイル内最大磁場 5.44 T は、超伝導ケーブルの性能から 4.2 K での臨界値に対する負荷率は 65% である。目標とする 800 T/m² の 6 極磁場を NbTi ケーブルで発生することができる。

Table 3: Design Parameters of the R&D Magnet

Coil inner and outer radius	$R_{ci}=70$ mm, $R_{co}=130$ mm
Yoke inner and outer radius	$R_{yi}=135$ mm, $R_{yo}=250$ mm
Coil angle	30 degrees
Superconducting cable	NbTi monolith cable
Number of turns in one pole	572

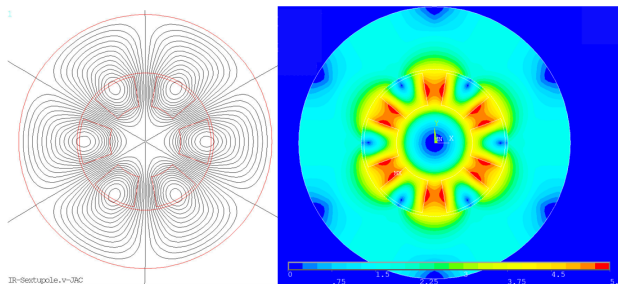


Figure 3: Magnetic flux and field profile in the cross section of the SC sextupole magnet.

3.3 超伝導コイル製作

KEK では超伝導 6 極電磁石コイルの製作を進めている。図 4 に、製作中のコイルの写真を示した。コイル 1 極の設計ターン数は 572 であるが、写真に示したコイルは 230 ターンまで巻き終えた状態である。図 2 に示すようにコイル断面は鞍型となる為、巻線時のケーブル固定用の治具も技術開発の課題となっている。

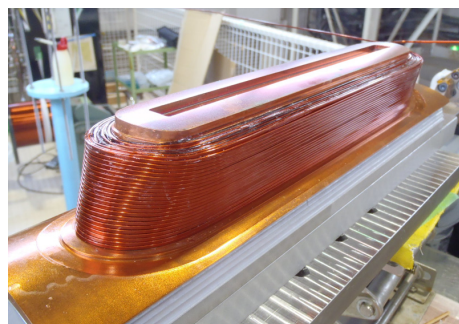


Figure 4: SC sextupole coil winding.

4. まとめ

SuperKEKB 用超伝導 6 極電磁石の開発を行っている。6 極電磁石は 3 種類の補正電磁石を持ち、小型冷凍機により冷却される。NbTi ケーブルを用いて超伝導コイルの製作を進めており、このコイルは液体ヘリウム冷却により、通電試験を行う予定である。

参考文献

- [1] SuperKEKB Design Report, Lattice Design; <https://www-superkekb.kek.jp/documents.html>
- [2] SuperKEKB Design Report, Magnet System; <https://www-superkekb.kek.jp/documents.html>