

SuperKEKB 衝突点色収差補正用超伝導 6 極電磁石システムの開発 DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING-SEXTUPLE MAGNET FOR CHROMATICITY CORRECTION AT INTERACTION POINT ON SUPERKEKB

有本 靖^{A)}, 大内 徳人^{A)}, 川井 正徳^{A)}, 近藤 良也^{A)}, 宗 占国^{A)}, 土屋 清澄^{A)}, 槇田 康博^{A)},
山岡 広^{A)}, 岡村 哲至^{B)}

Yasushi Arimoto^{A)}, Norihito Ohuchi^{A)}, Masanori Kawahi^{A)}, Yoshiya Kondo^{A)}, Zhanguo Zong^{A)},
Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Yasuhiro Makida^{A)}, Hiroshi Yamaoka^{A)}, Tetsuji Okamura^{B)}

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

^{B)}Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology

Abstract

In High Energy Accelerator Research Organization, a construction of SuperKEKB is in progress. In SuperKEKB, 16 sextupole magnets are aligned on 220m-straight-section of an interaction point to correct local chromaticity. These are designed with normal conducting magnets and it is planned to install them into SuperKEKB. On the other hand, superconducting magnet has advantages that it can generate independently many multipoles at same position and generate high gradient field. However, the superconducting magnet has several disadvantages, vibration due to a cryocooler, and time loss due to quench, etc. We are studying the superconducting sextupole magnet which fulfills specifications as practical device for future. Here we will report about scheme of superconducting sextupole magnets system.

1. はじめに

現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において SuperKEKB^[1] の建設が進められている。SuperKEKB ではルミノシティを KEKB の 40 倍まで高めるために、電子陽電子ビームの衝突点 (IR) においてビームは鉛直方向に約 50 ナノメートルのサイズまで収束される。このために IR の近くに強力な収束力を持つ超伝導 4 極電磁石がダブレットの配置で設置される (最終収束系)^[2]。ここで生じる鉛直方向の natural chromaticity はリング全体の 80% を占める。この色収差を補正するために局所的色収差補正 (LCC) がなされる。ここでは 6 極電磁石を IR 付近に設置することで最終収束系での色収差を補正する^[1]。

SuperKEKB では LCC のために常伝導 6 極電磁石が用いられる予定となっている。この電磁石は回転架台の上に設置され、ビーム軸方向に回転させることが出来る。この機構によりノーマル 6 極成分とスキュー 6 極成分の割合を調整出来る。

6 極電磁石は常伝導ではなく超伝導で製作することも可能である。もしこの 6 極電磁石を超伝導に置き換えた場合、以下の利点がある。

ノーマル 6 極成分とスキュー 6 極成分が独立に変えられる。

発生磁場勾配は常伝導電磁石よりも高く出来る。

一方で問題点として以下のものがあげられる。

冷凍機を必要とするのでシステムが複雑となる。
クエンチが起こった場合、加速器運転時間にロスが生じる。

冷凍機による振動が電磁石に伝わりビームに悪影響を及ぼす可能性がある。

我々は超伝導 6 極電磁石の実用化の可能を探るため、これらの問題点について検証を行なっている。ここでは、

SuperKEKB-LCC 超伝導 6 極電磁石の概略について紹介する。

2. 要求性能

LCC-6 極電磁石は SuperKEKB の IR を含む直線部 (筑波直線部) に設置される (図 1)。ここで、図中に示された HER (High Energy Ring)、LER (Low Energy Ring) は、それぞれ電子ビームリング、陽電子ビームリングを表わす。図中の SLY, SLX はそれぞれ最終収束 4 極電磁石で発生した鉛直、水平方向の色収差を補正する 6 極電磁石を表わす。筑波直線部の約 220 m の範囲に渡って各リング当たり 8 台の 6 極電磁石が設置される。

次にビーム光学シミュレーションより補正 6 極磁石に必要とされる磁場パラメータを表 1 に示す。ここで SL は 2 次の磁場勾配, $\partial^2 B_y / \partial x^2$ をビーム軸に沿って積分したものであり, S は 2 次の磁場勾配, L は有効磁場長を表わしている。また, B_3 , A_3 はそれぞれ参照半径におけるノーマル、スキュー 6 極磁場成分の大きさである。HER の SLY (HER-SLY) および SLX (HER-SLX) の参照半径はそれぞれ 40 mm, 40 mm、LER の SLY (LER-SLY) および SLX (LER-SLX) の参照半径はどちらも 45 mm であり、これらはビームパイプの内半径に相当する。ここで、ノーマル 6 極コイルとともに磁場補正のためにスキュー 6 極コイル、ノーマル及びスキュー 4 極コイルが 1 台の超伝導 6 極電磁石に組込まれる。

6 極磁石に許される加速器ビームラインにおける物理的スペースは HER-SLY, HER-SLX, LER-SLY および LER-SLX において、ビーム軸方向に 0.74 m, 0.64 m, 0.46 m, 0.46 m であるため、クライオスタットはこの領域内に収められなければならない。またビームの品質は磁石の振動に非常に敏感なので、その振動の振幅は 5 m 程度以内に抑えられることが要求される。また、加速器運転時間のロスを少なくするため、クエンチからの復帰時間は 5 時間程度以内であることが要求される。

Table 2: Thermal load with helium liquefaction system.

低温配管部	240 W (1 W/m)
クライオスタット	80 W (5 W/台)
電流リード (全体 4.8kA)	28.1 ℓ/h
総計	320 W+28.1 ℓ/h

Table 3: Thermal load with a cryocooler.

	50 K [W]	4 K [W]
輻射	1.539	0.0327
伝導	0.52	0.031
電流リード	26.7	0.36

3. 概念設計

3.1 冷却システム

まず、液体ヘリウム液化機を用いた冷却システムの熱負荷を見積る。6極電磁石は LER 用、HER 用とも約 220 m の領域に並べられている。熱負荷を見積るために、電磁石の構成は以下の通りとする。

ノーマル 6 極コイル : 150 A, 16 台
 スキュー 6 極コイル : 50 A, 16 台
 4 極コイル : 50 A, 32 台

これらの条件より、システム全体の熱負荷を見積る。配管部では 1 m 当たりの熱負荷を 1 W/m とすると配管全体での熱負荷は 240 W となる。また、クライオスタット、電流リードでの熱負荷を考慮に入れると冷凍機への全体の熱負荷は 320 W+28 ℓ/h となる。ここで運転時のマージンとして 30% を考慮すると 416 W+36.5 ℓ/h となり冷凍能力が約 600 W の大型冷凍機 (ここで 1ℓ/h 液化 = 4.3 W 冷凍とする) が必要となる。これらの結果を表 2 に示す。

小型冷凍機を用いた場合、冷却ステージを温度ごとに 2 段 (300 K から 50 K までと 50 K から 4.2 K) に分ける。まず第 1 ステージ (300 K → 50 K) では電流リードと熱輻射における熱負荷は 28.2 W であり、第 2 ステージ (50 K → 4.2 K) では 0.39 W となる。ここで市販の小型冷凍機の 1 つである Gifford-McMahon 冷凍機では第 1 ステージ 35 W, 第 2 ステージ 1.5 W であり、また、パルスチューブ冷凍機の冷凍能力は第 1 ステージ 40 W, 第 2 ステージ 1 W である (表 4)。したがってこれらの形式の小型冷凍機を用いることが可能である。小型冷凍機を用いることで、大掛かりなヘリウム液化システムや、約 220 m にも及ぶ冷却配管が不要となる。このため我々は小型冷凍機を適用することを考えている。

Table 4: Cooling power of commercial cryocoolers.

	1st stage [W]	2nd stage [W]
Gifford-McMahon	35 W@50 K	1.5 W@4.2 K
パルスチューブ	40 W@65 K	1.0 W@4.2 K

小型冷凍機として 2 段パルスチューブ冷凍機を用いる。パルスチューブ冷凍機は膨張部に可動部を持たないので他の小型冷凍機よりも振動が小さくなることが期待されるためである [3]。冷凍機は室温から 50 K までの冷却ステージと 50 K から 4.4 K までの冷却ステージの 2 段で 6 極電磁石コイルを冷却する。熱負荷を小さくするため、第 1 ステージと第 2 ステージの間の電流リードは高温超伝導体で接続することが検討されている。300 K から 50 K までの熱負荷は電流リードに起因するものが最も大きい。したがって電流リードの設計は重要である。

3.2 クエンチからの復帰時間

クエンチからの復帰時間は 5 時間以内が目安となる。そこで以下の条件の下で復帰時間を見積った。

$$\text{コイル部重量} : M_{\text{Nb}} = 14.21 \text{ kg},$$

$$M_{\text{Ti}} = 7.49 \text{ kg},$$

$$M_{\text{Cu}} = 29.46 \text{ kg},$$

$$\text{電磁石が持つ電磁エネルギー} : U = 9.04 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$$\text{クエンチ時の温度上昇} : T = 49.2 \text{ K}$$

2nd stage の冷凍能力 $P(T)$ を 4 K での GM 冷凍機の冷凍能力 1.5 W と考えると再冷却時間 t は

$$t = U/P(4 \text{ K}) = 9.04 \cdot 10^4 / 1.5 = 6.0 \cdot 10^4 \text{ sec} = 17 \text{ h}$$

となる。実際は温度上昇は 49.2 K なので再冷却までに経過する平均的な温度は 20 K 程度となる。そこで、1st stage 温度:50 K、2nd stage 温度:20 K を想定する。2nd stage での冷凍能力 >20W なので、

$$t = U/P(20 \text{ K}) = 9.04 \cdot 10^4 / 20 = 4500 \text{ sec} = 1.3 \text{ h}$$

となり、復帰時間は 5 時間以内となる。

3.3 電磁石

電磁石はノーマル 6 極、スクュー 6 極、ノーマル 4 極、スクュー 4 極から構成される。4 極コイルは設置誤差を補正する働きを有する。これらの外周には鉄ヨークが取り付けられる。また Allowed multipole は 6 極、18 極、30 極、... であり、メイン成分以外の次数は大きいいためコイル形状については 6 極コイルの対称性を優先的に考える。

HER-SLY 電磁石の 2 次元磁場計算で得られた磁場の強度分布を図 2 に示す。コイルの形状はレーストラックを仮定しており、断面は長方形となっている。この時のターン数、電流値はそれぞれ 925 ターン、130 A である。また電流密度は 258 A/mm² である。図 2 より、最大磁場は約 4.2 T である。

一方、LER-SLY 電磁石についてはターン数、電流値はそれぞれ 444、101.4 A、電流密度は 202 A/mm² となった。

これらの超伝導電磁石については NbTi ケーブルを用いるならば実際に製作可能な値である。

4. まとめ

LCC6 極電磁石の超伝導化を目指して R&D を進めている。熱負荷、復帰時間の見積りを行ない、これらのパ

Table 1: Specification of LCC-sextupole magnets

Magnet name	Normal		Skew		電磁石許容全長 [mm]	ビームパイプ内半径 [mm]
	SL [T/m]	B_3 [T]	SL [T/m]	A_3 [T]		
HER-SLY	234	0.312	2.34	3.1×10^{-3}	740	40
HER-SLX	187	0.299	9.35	15×10^{-3}	640	40
LER-SLY	40	0.121	2.67	8.1×10^{-3}	460	45
LER-SLX	13.3	0.040	2.67	8.1×10^{-3}	460	45

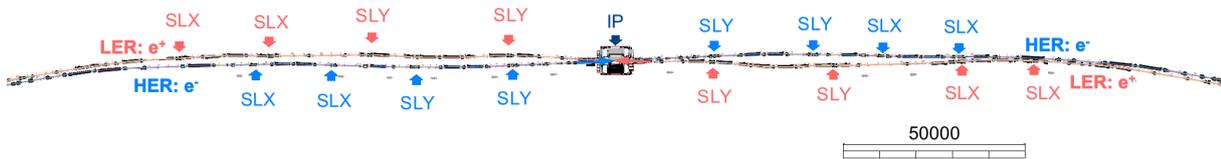


Figure 1: Entire layout of the sextupole magnets for the local chromaticity correction on the straight section at the interaction region (plan view).

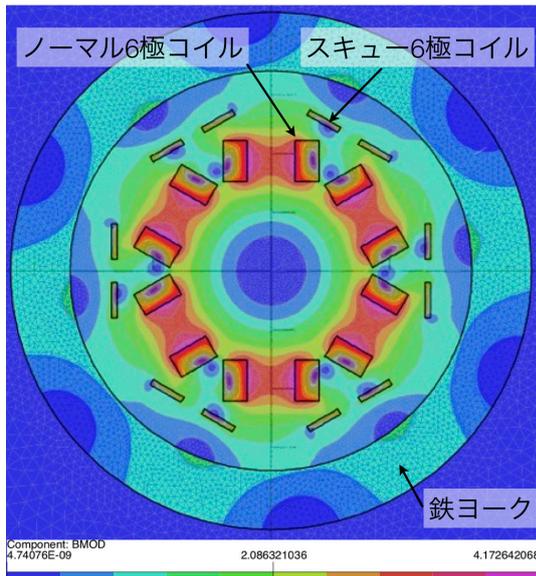


Figure 2: Color contour plot of B-field obtained by 2D magnetic field analysis for HER-SLY magnet. Normal and skew sextupole magnets are excited.

ラメーターに関しては小型冷凍機でも問題ないことが分かった。ただし振動の大きさについてはまだよくわかっていないので、今後、小型冷凍機を用いたR&D用のクライオスタット(図3)を製作して振動の解析を行なっていく予定である。また電流リードの熱負荷はリードの形状、物性値により変わる。電流リードの最適化のための測定をこのR&D機を用いて行なう。

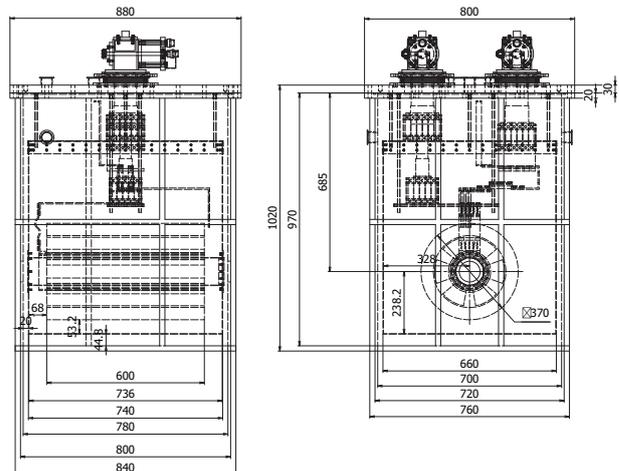


Figure 3: Schematic drawing of the R&D cryostat.

参考文献

- [1] Y. Ohnishi, *et. al.*, Accelerator design at SuperKEKB, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2013 (3), doi:10.1093/ptep/pts083.
- [2] N. Ohuchi, *et. al.*, Design of the superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region, in: Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, p. 21.
- [3] T. Tomaru, T. Suzuki, T. Haruyama, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Koyama, R. Li, Y. Matsubara, Vibration analysis of cryocoolers, TEION KOGAKU 38 (12) (2003) 693-702.