

# SuperKEKB ビーム衝突点用超伝導 4 極電磁石システムの開発状況

## DEVELOPMENT STATUS OF SUPERCONDUCTING QUADRUPOLE MAGNETS FOR FINAL FOCUS OF SUPERKEKB

有本 靖<sup>A)</sup>, 大内 徳人<sup>A)</sup>, 川井 正徳<sup>A)</sup>, 近藤 良也<sup>A)</sup>, 宗 占国<sup>A)</sup>, 土屋 清澄<sup>A)</sup>, 東憲男<sup>A)</sup>, 榎田 康博<sup>A)</sup>,  
山岡 弘<sup>A)</sup>, 王 旭東<sup>A)</sup>, 村井 隆<sup>B)</sup>, 高木 繁行<sup>B)</sup>, 河野 裕史<sup>C)</sup>

Yasushi Arimoto<sup>\*A)</sup>, Norihito Ohuchi<sup>A)</sup>, Masanori Kawai<sup>A)</sup>, Yoshiya Kondou<sup>A)</sup>, Zhanguo Zong<sup>A)</sup>, Kiyosumi Tsuchiya<sup>A)</sup>,  
Norio Higashi<sup>A)</sup>, Hiroshi Yamaoka<sup>A)</sup>, Xudong Wang<sup>A)</sup>, Takashi Murai<sup>B)</sup>, Shigeyuki Takagi<sup>B)</sup>, Hiroshi Kono<sup>C)</sup>,

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI),

<sup>B)</sup>Mitsubishi Electric Corporation,

<sup>C)</sup>Mitsubishi Electric Engineering Corporation

### Abstract

In KEK, an upgrade accelerator of KEKB, SuperKEKB is under construction. A target luminosity is  $8 \times 10^{35} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  which is 40 times as large as KEKB. To achieve the luminosity, two beams of  $e^-$  and  $e^+$  are vertically squeezed to  $\sim 50 \text{ nm}$  at a colliding point. A focusing element at the colliding point is a final-focus-superconducting-quadrupole-magnet system; this consists of eight superconducting-quadrupole magnets and 43 superconducting corrector/cancel coils and four superconducting compensation solenoids. We started a production of the system at June 2013. The all quadrupole magnets have been collared. For the all magnets, measured sextupole components of magnetic fields was smaller than required upper limits. Four of these magnets have been completed.

### 1. はじめに

現在 KEK では 2010 年まで稼動した KEKB のアップグレード加速器として SuperKEKB の建設が進められている<sup>[1]</sup>。SuperKEKB では KEKB の 40 倍のルミノシティ ( $8 \times 10^{35} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) を達成するために、ナノビームスキームを採用する。ナノビームスキームでは衝突点 (IP) におけるビーム交差角を 83 mrad と大きくし、電子・陽電子ビームを鉛直方向に 50 nm 程度まで絞ることによって高いルミノシティを得る<sup>[2]</sup>。IP でのビーム収束要素がビーム衝突点用超伝導 4 極電磁石システム (QCS) である<sup>[3]</sup>。KEKB より大幅な IP における Optics の変更により、SuperKEKB の QCS は新規に設計・製作される。

IP 領域 (IR) における QCS の配置を図 1 に示す。ビームの最終収束は 4 組のダブレット超伝導 4 極電磁石によって行なう。陽電子リング (LER) 上に  $x$  及び  $y$  方向収束用にそれぞれ QC2LP/RP 及び QC1LP/RP が、電子リング (HER) 上に  $x$ ,  $y$  方向収束用にそれぞれ QC2LE/RE 及び QC1LE/RE が設置される。これらの 4 極電磁石で発生したエラー磁場は超伝導補正コイル 35 台で補正する。6 極 ( $b_3$ ) 補正コイルを除くすべての補正コイルは超伝導 4 極電磁石に組み込まれる。また、QC1Ps は衝突点に接近して設置されるため、これらの電磁石と HER 軸との距離は近い (電磁石中心と HER 軸の距離は 78 mm)。さらに QC1Ps はヨークが無いので、これらの磁石からの漏れ磁場は HER ビームに大きな影響を与える。この漏れ磁場を打ち消すために超伝導キャンセルコイルを設置する。また QCS は BelleII 検出器用ソレノイド磁場 (1.5 T) 中に設置される。ソレノイド磁場によるビームの  $x$ - $y$  結合を抑制するために、超伝導補償ソレノイド 4 台を用いてビーム軸に沿って積分したソレノイド磁場をゼロにする<sup>[4]</sup>。QCS の超伝導電磁石は加速器リング中心から IP を見て、IP の左側 (L 側)、右側 (R 側) に 1 台ずつ設置されるクライオスタット内に収められる<sup>[5]</sup>。

KEK において 2012 年度に QC1P と QC1E のプロトタイプを製作し、低温試験を行なった。ここでビーム光学シミュレーションによる許容値を越える 6 極磁場成分が発生していた<sup>[6,7]</sup>。この結果を受けて、コイル断面形状、コイル端部の巻線形状を見直し、ウェッジ、スペーサーの再設計を行なった<sup>[3]</sup>。またノーマル 6 極補正コイルを QC1RP と QC2RP、QC1RE と QC2RE の間に 1 台ずつ追加することで、4 極電磁石で発生する 6 極磁場成分の許容値を緩めるようにした<sup>[8]</sup>。

実機の超伝導 4 極電磁石の製作は 2013 年 6 月に三菱電機株式会社において開始した。

### 2. 超伝導 4 極電磁石の製作

#### 2.1 製作工程

我々は超伝導 4 極電磁石の製作を以下の工程で進めた。

1. 巻線
2. キュアー
3. カラーリング
4. 補正コイルの組込み
5. ヨーキング
6. スプライス処理

これらの項目について以下で説明する。

**巻線、キュアー** 超伝導ケーブルを 2 軸ターンテーブルに取り付けられた鞍型マンドレルにダブルパンケーキで巻線する (図 2)。中心 (磁極側) より張力 120 N で巻始め、最後は 60 N になるよう 10 N ずつ張力を下げながら巻線を行なった。巻線完了後、マンドレルを成形ブロックに組み込み、130 °C、 $\sim 20 \text{ MPa}$  にて加温成形を行なう (キュアー)。図 3 にキュアー後のコイル寸法を示す。左側のプロットは、各電磁石の 4 極分のコイル長  $L$  の平均値の、設計値からのずれであり、エラーバーはコイル 4 極の標準偏差である。ここで QC1LP/RP、QC1LE/RE、

\* yasushi.arimoto@kek.jp

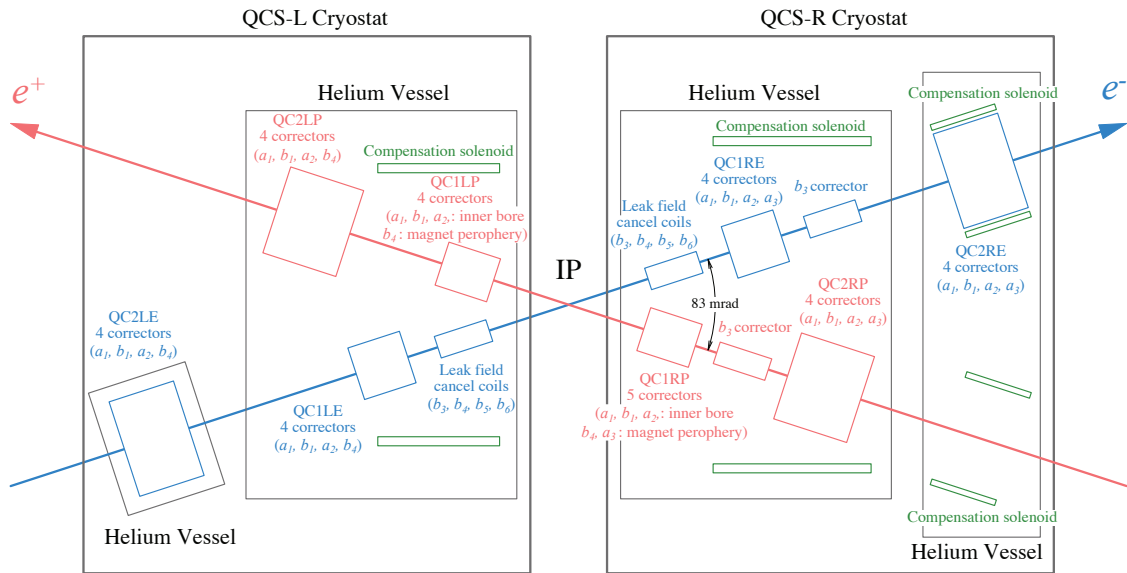


Figure 1: SuperKEKB IR magnet layout schematic (top view). Upper side is out side of the accelerator ring.

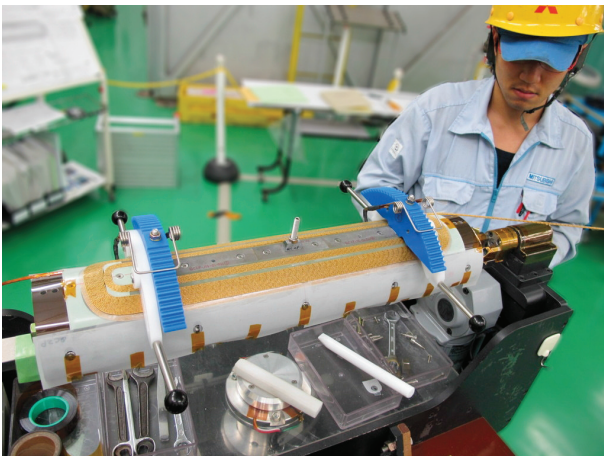


Figure 2: The winding work

QC2LP/RP、QC2LE、QC2RE の長さ  $L$  の設計値はそれぞれ、384、430、470、593、535 mm である。ずれはほぼ  $\pm 0.1$  mm 以下に抑えられている。また、図3の右側のプロットはコイルの動径方向の厚み  $t$  の設計値 (5.425 mm) からのずれであり、許容値 ( $\pm 0.025$  mm) 以下であった。 $L$  と  $t$  の定義は図3の上段の図に示す。

**カラーリング** カラーリングでは、鉛直に立てられた円筒形のカラーリングマンドレルに4つのコイルを取り付ける。その外側からカラーと呼ばれる、軸方向の厚さが3 mm のリングを外側から組み込んで円筒形状の4極電磁石に組み立てる (図4, 5)。カラーは半分に分割されており、分割面を1段ごとに90°ずらして積層していく。その後4方向から油圧ジャッキでプレストレスをかける。この時、カラーがはずれないよう、カラー外側の溝 (キー溝) にキーを差し込むが、最初はマンドレルを引き抜くために、溝幅より0.2 mm 細いキー (仮キー) を差し込む。すべての仮キーが差し込まれた後に、マン

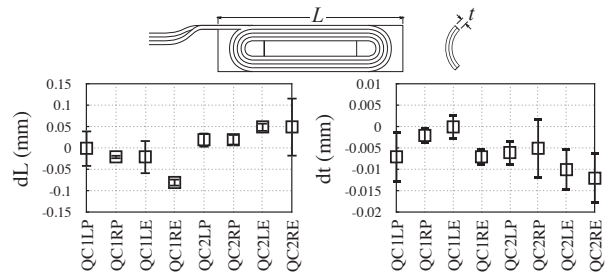


Figure 3: Differences from design value for coil length,  $L$  (left plot) and thickness,  $t$  (right plot) after cure processes. Definitions of  $L$  and  $t$  are shown in the upper figure.

ドレルの円筒面にコイル内面が密着するように、溝幅と同じ幅のキー (本キー) の差し込める圧力でプレスする。マンドレルを引き抜いた後、カラーにプレストレスを印加し、本キーを打ち込む。

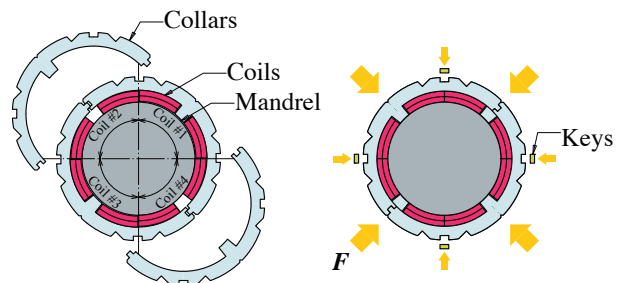


Figure 4: A schematic view of the collaring process

カラーリングで電磁石断面形状に歪みが生じていないか確認するために、仮キー打込み後と本キー打込み後にハーモニックコイルによる室温での磁場測定を行ない、誤差磁場である6極磁場成分を測定する。許容値

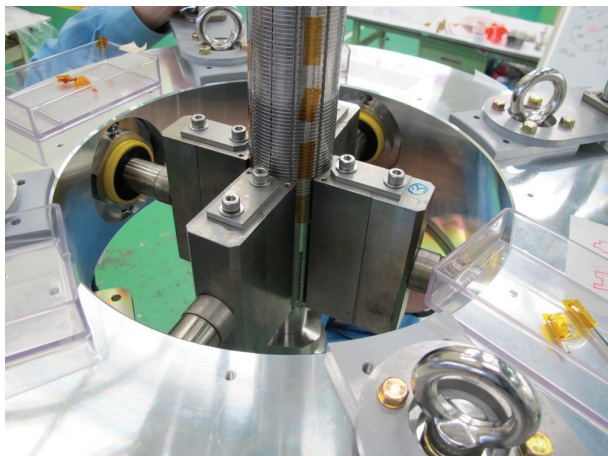


Figure 5: The pressing device for collaring

(10 unit) 以上ならばカラーリングを再度行なう。

図6にカラーリング後のQC1LP電磁石、キュア後の(QC1LPと同じ寸法の)QC1RPのコイル及びQC1Pのカラーの写真を示す。

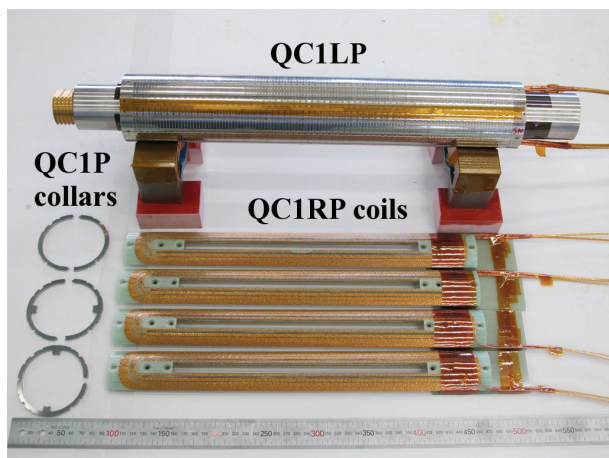


Figure 6: The collared QC1LP-quadrupole magnet, the coils for the QC1RP-quadrupole magnet and collars. A dimension of QC1LP-quadrupole magnet is as same as QC1RP.

**補正/キャンセルコイルの組み込み** 超伝導補正/キャンセルコイル(ブルックヘブン国立研究所で設計・製作)を4極電磁石に挿入する。4極電磁石に対する補正コイルのロール角は、補正コイルが巻線されたボビンのキーと4極電磁石の端板に加工されたキー溝で決められる。組み込み後の室温磁場測定により、ロール角を確認する。この時の磁場測定装置はカラーリング後の磁場測定で用いるものと同じである。

**ヨークキング** QC1LP, QC1RP 以外の4極電磁石はボア内磁場の強化、検出器ソレノイド磁場の遮蔽及び漏れ磁場抑制のためにヨークが取り付けられる。ヨーク形状はカラーと同様の形状で、プレス機は用いずに積層する(ヨークキング)。QC1LE/RE, QC2LP/RP は検出器ソレ

ノイド磁場の高い位置に設置されるので、ヨーク材として飽和磁束密度の高い( $B_s > 2.2$  T)パーメンジュールを用いる。一方、QC2LE/REはソレノイドの外側に設置されるためヨーク材は磁気軟鉄とした。

**スプライス処理** スプライス処理では4極のコイルのリードをはんだづけして直列に繋ぎ合わせる。

すべての電磁石のカラーリングは2014年4月8日に完了した。図7にカラーリングが終了した電磁石の写真を示す。また、L側の電磁石(QC1LP, QC1LE, QC2LP, QC2LE)はすべてスプライス処理まで完了しており、単体として完成されている。

## 2.2 室温磁場測定

SuperKEKBにおいてビームの寿命はQCSで発生する6極成分に大きな影響を受ける<sup>[8]</sup>。QCSの4極電磁石で発生する6極成分は設計上ゼロであるが、磁石断面のダイポール変形により発生する<sup>[9]</sup>。例えばQC1LEの場合、動径方向の変形量 $\Delta r$ が $36\mu\text{m}$ で10 unitの6極磁場成分が発生する。カラーリング後の断面形状の歪みを確認するため室温での磁場測定を行なった。ここで10 unit以上の6極成分が測定された場合はカラーリングを再度行なう。

磁場測定にはハーモニックコイルを用いた。ハーモニックコイルは、Tangentialコイル(T-コイル)、2極コイル(D-コイル)、4極コイル(Q-コイル)から構成されている。これらのパラメーターを表1に示す<sup>[10]</sup>。表1において、T, D, QはそれぞれT-, D-, Q-コイルを表わす。また、 $R, \phi, P, L, N, B.R.$ はそれぞれ、コイル半径(mm)、コイル開き角(Degree)、位相角度(Degree)、コイル長(mm)、コイルターン数、Bucking ratioを表わしている。コイルの回転速度は0.2083 Hzである。ハーモニックコイルからの信号はプリアンプ(Keithley 1801)で1000倍に増幅した後、積分器(MetroLab PDI5025)で測定される。

ハーモニックコイル及び測定される電磁石はそれぞれの円筒軸が鉛直になるように設置される。地磁気を含めた静的なバックグラウンド磁場の影響をキャンセルするため、電流の符号を反転させて測定し、2つの波形の差を用いて磁場を評価した。測定時の励磁電流は $\pm 1.0$  Aに設定した。4極成分の測定にはT-コイルを使用し、6極成分の測定にはD-及びQ-コイルをT-コイルに対し極性を逆に接続(Analog bucking)して測定した。

Table 1: Parameters of the harmonic coil<sup>[10]</sup>

	$R$	$\phi$	$P$	$L$	$N$	$B.R.$
T	14.5	23.186	0.0	998	100	-
D	14.59	180	-0.638	1000	10	65
Q	14.59	90	0.533	1000	10	33

図8にカラーリング後の各電磁石の6極磁場成分を示す。縦軸の6極磁場成分の定義は付録1に示す。すべての電磁石について6極磁場成分は5 unit以下であり、ビーム光学シミュレーションによる許容値10 unit以下となっている。

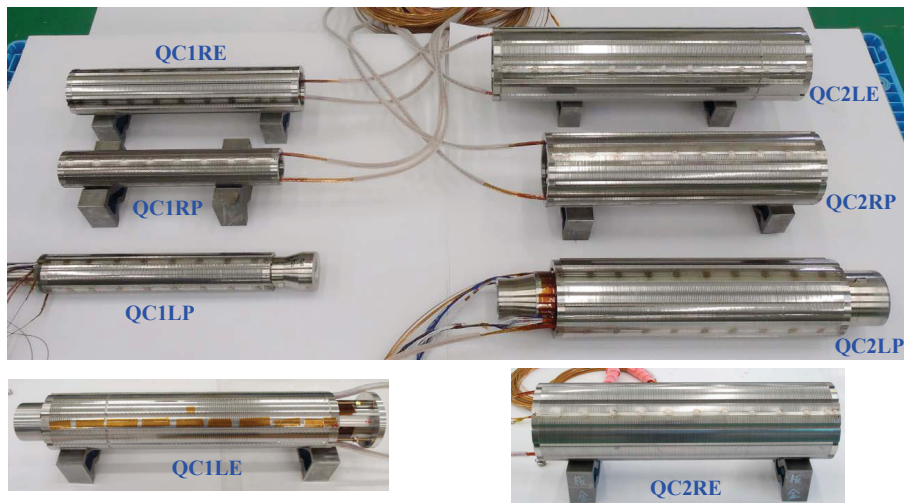


Figure 7: The collared magnets.

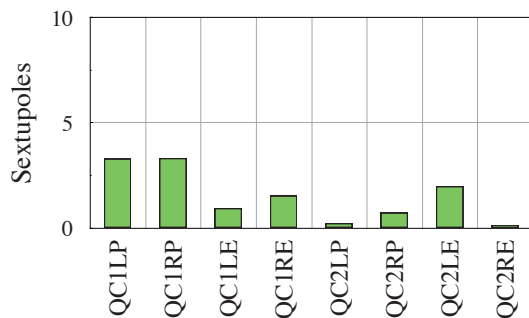


Figure 8: Sextupole components measured after collaring process at room temperature.

### 3. その他の要素の製作状況

超伝導 4 極電磁石以外の要素の製作状況について述べる。

- 1) 超伝導補正コイル、キャンセルコイルは BNL において設計製作されている。L 側の補正コイル/キャンセルコイルは完成し、メイン 4 極電磁石へ組込まれている。現在 R 側のコイルの製作が進められている。
- 2) 超伝導補償ソレノイドは 3 次元解析による磁場設計はほぼ終了した。現在は L 側の製作に向けて工学設計を進めている。
- 3) クライオスタットは熱計算、強度計算、振動解析を行ないこれらの結果に基づいて、構造設計を行なった [5]。現在は L 側の工学設計を進めている。
- 4) 電流リードは室温部の電力ケーブルを低音部の超伝導線/ケーブルへ接続するものであり、QCS の架台に設置されるサービスポートに組み込まれ、クライオスタットに接続される。メイン 4 極電磁石及び補償ソレノイド用の電流リードは 2013 年 11 月に納品された (図 9)。現在受け入れ試験として低温試験を進めている [11]。ま

た補正/キャンセルコイル用の電流リードは KEK において組立を行なっている。



Figure 9: The current leads for the QC1E quadrupole magnets. The maximum current is 1800 A.

これらのすべての要素が収納されて、クライオスタットは完成する。

### 4. 謝辞

本研究を行なうに当たり、磁場測定システムの構築に於いて三菱電機システムサービス株式会社田中学氏及び、株式会社日立プラントテクノロジーの遠藤友成氏の高い技術サポートを受けることができ感謝致します。また 4 極電磁石、製作装置、治具等の設計・図面作成をおこなった三立機械設計株式会社の青木和之氏に感謝致します。

### 付録 1. 多極成分の定義

ここでは本文で表示している多極成分の定義について述べる [12]。

電磁石円筒軸に垂直に横切る平面  $x, y$  上での磁場を

PASJ2014-SUOM04

以下のように定義する。

$$B(z) = B_y(x, y) + iB_x(x, y) \quad (1)$$

$$= B_{\text{ref}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{C(n) \exp(-in\alpha_n)}{B_{\text{ref}}} \right] \left( \frac{z}{R_{\text{ref}}} \right)^{n-1} \quad (2)$$

ここで、 $B_{\text{ref}}$  は任意の半径 (参照半径)  $R_{\text{ref}}$  での磁束密度を表わす。また  $\alpha_n$  は  $2n$  極成分の磁場の  $x$  軸に対する角度である。 $C(n)$  は多極成分の大きさである。本文では 6 極成分として以下の値を用いる。

$$c(n) = \frac{10000 C(n)}{B_{\text{ref}} C(2)} \quad (3)$$

$$n = 3 \quad (4)$$

これは 4 極成分の多極成分の大きさを 10000 とした場合の多極成分の大きさであり、単位は "Unit" と呼ぶ。

## 参考文献

- [1] Y. Ohnishi, *et. al.*, Accelerator design at SuperKEKB, Progr. Theor. Exp. Phys. 2013 (3) (2013) 03A011. doi:10.1093/ptep/pts083.
- [2] P. Raimondi, 2nd SuperB Meeting, Frascati, Italy (2006).
- [3] N. Ohuchi, *et. al.*, Design of the superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region, in: Proceedings of NA-PAC, Pasadena, California, 2013, p. 759. URL <http://jacow.org/pac2013/papers/weoda1.pdf>
- [4] H. Yamaoka, *et. al.*, Solenoid field calculation of the SuperKEKB interaction region, in: Proceedings of IPAC, New Orleans, Louisiana, USA, 2012, pp. 3548–3550. URL <http://jacow.org/ipac2012/papers/thppd023.pdf>
- [5] H. Yamaoka, *et. al.*, The mechanical and vibration studies of the final focus magnet-cryostat for SuperKEKB, in: Proceedings of IPAC, Dresden, Germany, 2014, p. 3770. URL <http://jacow.org/IPAC2014/papers/thpri005.pdf>
- [6] Y. Arimoto, *et. al.*, Construction and cold tests of the prototypes of the superconducting quadrupole magnets for the SuperKEKB IR, in: Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, 2013, p. 1011. URL [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj10/proceedings/PDF/SUP0/SUP056.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SUP0/SUP056.pdf)
- [7] N. Ohuchi, Y. Arimoto, H. Yamaoka, Z. Zong, M. Tawada, K. Tsuchiya, H. Koiso, Y. Ohnishi, A. Morita, H. Sugimoto, K. Oide, Design and construction of the proto-type quadrupole magnets for the SuperKEKB interaction region, in: Proceedings of NA-PAC, Pasadena, CA USA, 2013, p. 1232. URL <http://jacow.org/pac2013/papers/thpba04.pdf>
- [8] H. Sugimoto, Y. Ohnishi, A. Morita, H. Koiso, K. Oide, Design study of the SuperKEKB interaction region optics, in: Proceedings of IPAC, Dresden, Germany, 2014, p. 950. URL <http://jacow.org/IPAC2014/papers/tuoab02.pdf>
- [9] K. Sugita, *et. al.*, Analytical calculation of field error due to radial coil distortions of the lhc low-beta quadrupole magnets, IEEE Trans. Appl. Supercond. 12 (1) (2002) 1693–1696. doi:10.1109/TASC.2002.1018733.
- [10] N. Ohuchi, *et. al.*, Magnetic field measurement system for the SuperKEKB final focus superconducting magnets, in: Proceedings of IPAC, Dresden, Germany, 2014, p. 2693. URL <http://jacow.org/IPAC2014/papers/wepri087.pdf>
- [11] Z. G. Zong, *et. al.*, in: Proceedings of 25th International Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials Conference in 2014, in preparation.
- [12] A. K. Jain, CERN-98-05, CERN, 1988, Ch. "Basic theory of magnets", pp. 1–26. doi:10.5170/CERN-1998-005.