

DESIGN OF THE SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR THE SUPERKEKB INTERACTION REGION

Norihito Ohuchi ^{#A)}, Yasushi Arimoto^{A)}, Kazunori Akai^{A)}, Norio Higashi^{A)}, Masako Iwasaki^{A)}, Haruyo Koiso^{A)},
Akio Morita^{A)}, Yukiyoishi Ohnishi^{A)}, Katsunobu Oide^{A)}, Toshiyuki Oki^{A)}, Masafumi Tawada^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)},
Hiroshi Yamaoka^{A)}, Zong Zhanguo^{A)}, Peter Wanderer^{B)}, Brett Parker^{B)}, Michael D. Anerella^{B)}

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Brookhaven National Laboratory

P.O. Box 5000 Upton, New York, 11973-5000

Abstract

The design of the superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region has been developed. The magnet system consists of 8 main quadrupoles, 40 correctors and 4 compensation solenoids. Focusing beams in the interaction region is designed to be performed by the quadrupole doublets on the beam lines. The compensation solenoids integrally cancel the Belle-II solenoid field. As part of the R&D of the main quadrupoles, the QC1E prototype magnet was constructed and cold tested at 4K. The magnet showed the good superconducting characteristics.

SuperKEKB ビーム衝突点用超伝導電磁石システムの設計

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、*B* フェクトリーマシーンとして稼働してきた KEKB 加速器のアップグレード¹⁾ (SuperKEKB¹⁾) を 2010 年度より開始している。SuperKEKB では、KEKB で記録した世界最高の電子・陽電子衝突頻度 (ルミノシティー) を、ビーム電流を約 2 倍に高め、ビームサイズを約 40 分の 1 に絞り込む (Nano-Beam scheme) ことにより 40 倍高めることを目標としている。この為、電子・陽電子を最終形状に絞り込むビーム衝突領域では、超伝導電磁石^{2,3)}を全て新しく作り変える他、常伝導特殊電磁石も超伝導化し、ビームのサイズを衝突点に於いて 48nm/62nm (陽電子/電子) まで絞り込む計画である。超伝導電磁石システムは 2014 年度に製作を完了し加速器への据付を目指している。本学会では、SuperKEKB ビーム衝突用超伝導電磁石の設計及び現在進行中の R&D 超伝導電磁石の開発状況について報告を行う。

2. ビーム衝突点超伝導電磁石システム

図 1 に設計が進んでいる SuperKEKB 用ビーム衝突領域 (Interaction Region: IR) の超伝導電磁石、クライオスタット、Belle-II 検出器を示した。図中左下部に、参考として KEKB の衝突点用超伝導電磁石及び Belle 検出器の鳥瞰図を示してある。SuperKEKB 用超伝導 4 極電磁石が、KEKB システムと比較して大きく異なるのは、KEKB では電子・陽電子両ビームが共通の超伝導 4 極電磁石ボア内を通過したのに対して、SuperKEKB では各ビームに対して個別の超伝導 4 極電磁石を用意しビーム最終収束システムを設計している点にある。更に超伝

導 4 極電磁石はビームを絞り込むために可能な限り衝突点 (Interaction Point : IP) に近づける必要があり、交差するビームパイプと低温を維持する為のクライオスタット及び素粒子検出器との境界から非常に厳しい空間的な制約を受ける。

1 つのクライオスタットに組み込む主 4 極電磁石は 4 台となり、全体では 8 台の超伝導 4 極電磁石を製作する。KEKB と比べて、台数に於いても 4 倍となる他、衝突点片側 4 台の 4 極電磁石は全て異なる 2 次元断面設計をもつ。この 4 極電磁石 (QC1、QC2) に要求される磁場強度を表 1 に纏めてある。IP の最も近傍には陽電子ビーム (LER:4GeV リング) を収束する為の QC1RP/QC1LP を配置し、その後方に電子ビーム (HER:7GeV リング) 用 QC1RE/QC1LE を配置する。QC1 の後方には QC2 が各ビームラインに配置され、超伝導 4 極電磁石のダブレットを構成しビーム衝突を調整する。表に示す様に QC1RP、LP は鉄ヨークの無い空芯の電磁石であるが、他の超伝導 4 極電磁石は鉄ヨークを持っている。

これら 4 極電磁石には、4 種類の超伝導補正コイルが磁石ボア内に組み込まれる。空芯の QC1RP、QC1LP の漏れ磁場に対しては、対向する電子ビームライン上に漏れ磁場キャンセル用の多極磁場超伝導コイルを取り付ける。システムに組込まれる補正コイルの数は、40 個である。

更に、Belle-II ソレノイド磁場をビームライン上で積分量としてキャンセルするため、超伝導ソレノイドがクライオスタットに組込まれる。

以下、これらの磁石の詳細について説明する。

#norihito.ohuchi@kek.jp

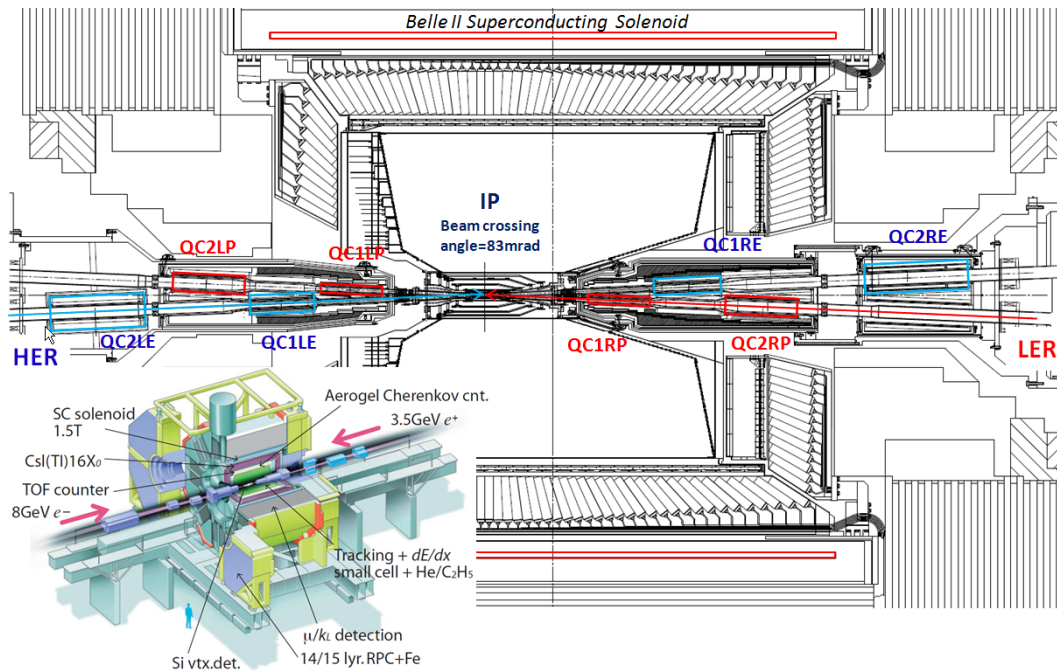


図 1 : SuperKEKB ビーム衝突点超伝導電磁石システム。参考として、図中左下に KEKB での Belle 素粒子検出器及び加速器ビームラインを示した。

表 1: ビーム最終収束超伝導 4 極電磁石

	積分磁場 勾配, T	磁石 タイプ	補正 コイル	漏れ磁場 用コイル
QC2RE	12.91	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC2RP	10.92	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC1RE	26.22	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC1RP	22.43	SC	b_4, a_2, b_1, a_1	b_3, b_4, b_5, b_6
QC1LP	22.91	SC	b_4, a_2, b_1, a_1	b_3, b_4, b_5, b_6
QC1LE	26.03	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC2LP	10.96	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC2LE	14.13	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA

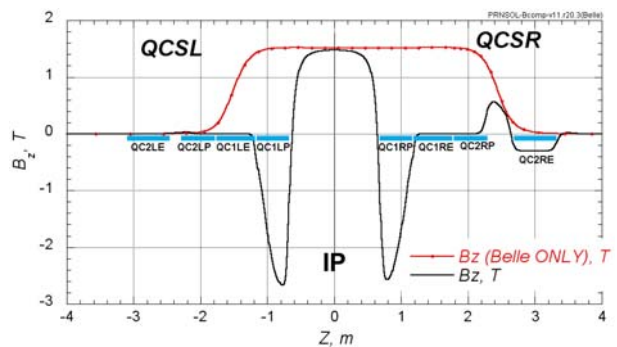


図 2 : ビーム衝突点でのソレノイド磁場分布。図中に超伝導 4 極電磁石の位置を示してある。

3. 超伝導補正ソレノイド (ESR、ESL)

図 1 に示す Belle-II 超伝導ソレノイドは、1.5 T の磁場をビームライン上に発生する。図 2 に Belle-II 軸上のソレノイド磁場分布 (図中赤線) を示した。この磁場は交差角を持つビームの衝突性能を著しく劣化させるため、ビームライン上のソレノイド磁場は積分値としてゼロとする必要がある。ESR と ESL は Belle-II ソレノイド磁場に対して逆向きの磁場を発生し、ビーム軸上のソレノイド磁場を IP からの積分値として $0 \text{ T}\cdot\text{m}$ に調整する。Belle-II ソレノイド磁場と ESR 及び ESL が作る逆向きのソレノイド磁場の合成磁場を図 2 黒線で示した。図中には超伝導 4 極電磁石の位置も示している。QC1RP、QC1LP には夫々最大で -2.56 T と -2.67 T の合成ソレノイド磁場が印加される。又、Belle-II ソレノイド磁場と ESR と ESL は、お互いに反発するため、ESR と ESL は検出器から押し出される方向に 3.8 トンと 4.8 トンの電磁力を受ける。

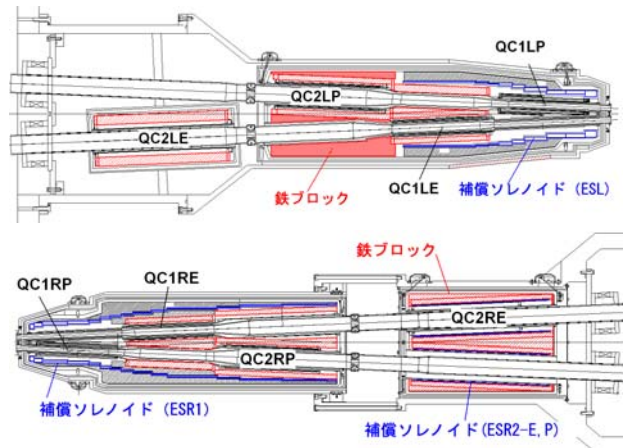


図 3 : 超伝導電磁石クライオスタット断面図。上図: 衝突点左側超伝導電磁石クライオスタット、下図: 衝突点右側クライオスタット。

図3に IP 左側（上図）と右側（下図）のクライオスタット断面を示した。ESL と ESR は太い青線で示しているが、ビーム光学から必要とされる磁場分布を作るためにソレノイドは小さく分割されている。ESR は先頭部のヘリウム容器に設置される ESR1 と後部ヘリウム容器の電子・陽電子ビームラインに設置される ESR2-E、ESR2-P からなる。超伝導 4 極磁石及び補正コイルは ESR と ESL ボアー内に組込まれる。

4. 超伝導 4 極電磁石 (QC1、QC2)

8 台の超伝導電磁石のうち、最も IP に近い QC1RP 超伝導 4 極電磁石の断面形状を図 4 に示した。図 2 に示した様に QC1RP/LP に印加されるソレノイド磁場が 2T を超える為、この磁石は鉄ヨークの無い空芯磁石として設計されている。QC1RE/LE と QC2RP/LP ではソレノイド磁場を ESR と ESL により殆ど 0 T までキャンセルする為、鉄ヨーク付き超伝導 4 極電磁石としている。超伝導 4 極電磁石は 2 層コイルで、ボアー内にはビーム軌道補正用の 4 種類の超伝導補正コイル（8 極、skew4 極、2 極、skew2 極： b_4, a_2, b_1, a_1 ）が巻かれる。QC1RP/LP は鉄ヨークが無い為、超伝導 4 極電磁石から電子ビームラインへの漏れ磁場を消去する為、超伝導キャンセルコイルが対向ビームパイプに取り付けられる。キャンセルコイルは、6 極、8 極、10 極、12 極から構成されている。他の 4 極磁石には鉄ヨークが付けられるため、このキャンセルコイルは必要ない。表 2 に QC1RP/LP の磁石パラメータを纏めた。磁石の内半径は 25 mm と非常に小さく、設計磁場勾配は 66~68 T/m で、実効磁場長は 0.3372 m である。4 極磁場に対するエラー磁場が 10^4 レベルであることがビーム光学から要求されている。この、磁場精度を達成するために磁石の製作精度は $20 \mu\text{m}$ 以下を目指している。

表 2: QC1RP、QC1LP 磁石パラメータ

	QC1RP	QC1LP
コイル内半径、mm	25.00	
コイル外半径、mm	30.485	
1 極当たりのターン数	25	
積分磁場、T	22.43	22.91
磁場勾配、T/m	66.52	67.94
磁場長、m	0.3372	
設計電流、A	1575.58	1609.30
合成ソレノイド磁場、T	2.56	2.67
コイル内最大磁場、T	3.79	3.93
臨界電流に対する比(4.7 K)	76 %	79 %
磁石長、mm	416	
誤差磁場 r=1 cm (2D 断面)	$b_6 = 2.55 \times 10^{-5}$	$b_{10} = -2.04 \times 10^{-6}$
誤差磁場 r=1 cm (3D)	$b_6 = 1.96 \times 10^{-6}$	$b_{10} = 3.93 \times 10^{-6}$

加速器運転時の QC1RP/LP コイル内最大磁場は、夫々 3.79 T と 3.93 T まで達する。QC1RP/LP の設計電流は、磁石運転温度 4.7 K のロードライン上の臨界電流に対して 76% と 79% に相当する。両磁石とも 20% 程度の運転マージンをもって設計されている。

表 2 に、計算上 QC1RP/LP 4 極磁石に残っている多極成分を示した。磁石ボアー内半径 10mm 以下で多極成分は 4 極成分に対して 3×10^{-5} 以下に抑えている。

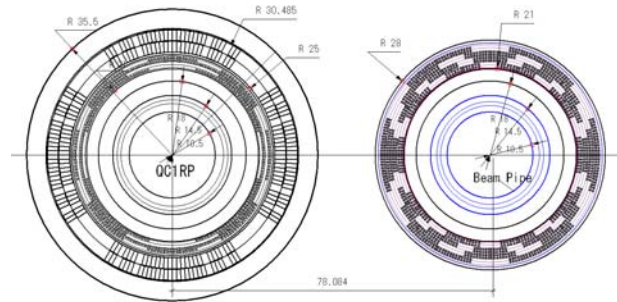


図 4 : QC1P 超伝導 4 極電磁石断面形状 (左) 及び漏れ磁場キャンセル用超伝導コイル (右)

表 3~5 に他の 4 極磁石の主要パラメータを示した。

表 3: QC1RE、QC1LE 磁石パラメータ

	QC1RE	QC1LE
コイル内半径、mm	33.00	
ヨーク外半径、mm	70.00	
1 極当たりのターン数	34	
磁場勾配、T/m	69.48	68.97
磁場長、m	0.3774	
設計電流、A	1517.3	1506.2
誤差磁場 r=1.5 cm (2D 断面)	$b_6 = -6.34 \times 10^{-6}$	$b_{10} = -3.37 \times 10^{-5}$

表 4: QC2RP、QC2LP 磁石パラメータ

	QC2RP	QC2LP
コイル内半径、mm	53.80	
ヨーク外半径、mm	93.00	
1 極当たりのターン数	53	
磁場勾配、T/m	27.76	27.86
磁場長、m	0.4135	
設計電流、A	868.4	871.6
誤差磁場 r=3.0 cm (2D 断面)	$b_6 = 4.73 \times 10^{-7}$	$b_{10} = -1.53 \times 10^{-5}$

表 5: QC2RE、QC2LE 磁石パラメータ

	QC2RE	QC2LE
コイル内半径、mm	59.30	
ヨーク外半径、mm	115.0	
1 極当たりのターン数	58	
磁場勾配、T/m	30.59	26.13
磁場長、m	0.4221	0.5407
設計電流、A	1094.8	935.3
誤差磁場 r=3.5 cm (2D 断面)	$b_6 = -2.42 \times 10^{-5}$	$b_{10} = -1.37 \times 10^{-5}$

5. 超伝導 4 極電磁石プロトタイプの開発

KEK では、4 種類の断面形状の超伝導電磁石に対してコイル内半径の小さな QC1P と QC1E のプロトタイプを製作し、励磁試験及び磁場性能を測定する。QC2P と QC2E についてはコイル内半径が大きい為、製作上の問題は小さいと考えている。

QC1E プロトタイプ製作は、KEK 内の製作装置・治具を用いて今年 5 月 28 日から開始した。図 5 に製作した超伝導コイル（ダブルパンケーキ鞍型コイル）を示した。このコイルの製作は、2 週間で完了した。4 個の超伝導コイルは 4 極コイルに組まれた後、SUS316LN のカラー（電磁力サポート）により固定され、鉄ヨークが取り付けられる。図 6 に完成した QC1E プロトタイプを示した。磁石の製作には、全体で 4 週間必要であった。

完成した QC1E プロトタイプは縦型クライオスタットに設置し、液体ヘリウムで冷却し励磁試験と磁場測定を行った。励磁結果を図 7 に示した。本磁石は運転電流を越えた 2157A までクエンチすることなく通電することができた。2157A は電源リミットである。又、この電流値はビームラインに据付後の運転温度 4.7K での臨界電流に対して約 13% のマージンを持っている。



図 5 : QC1E プロトタイプ用超伝導コイル



図 6 : QC1E プロトタイプ超伝導 4 極磁石

図 8 に測定された 4 極成分（磁場勾配= G ）の磁石軸に沿った分布を示した。超伝導コイル直線部での磁場勾配は、通電電流 1560.6A に対して $G=70.07$ T/m、積分磁場/ $\int G dl=26.69$ T であった。4 極磁場成分については加速器の運転を行うのに十分な値を発生することが出来た。誤差磁場多極成分については、ハーモニックコイル半径=9.7mm の位置で 4 極成分に対して 6 極成分が $a_3=1.14 \times 10^{-4}$ 、 $b_3=5.50 \times 10^{-4}$ である以外は高次のエラー成分は 1.0×10^{-4} 以下であった。6 極成分については発生原因を検討する必要がある。

QC1P プロトタイプは、8 月 6 日から製作を始める。この磁石についても液体ヘリウム冷却し励磁試験及び磁場測定を行う予定である。

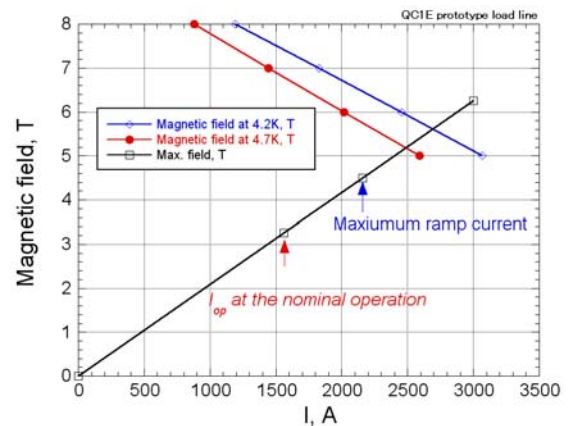


図 7 : QC1E プロトタイプロードライン

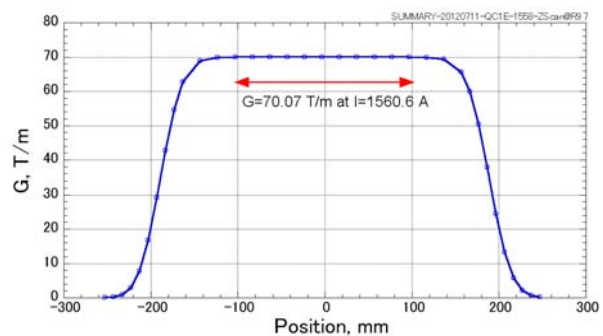


図 8 : QC1E プロトタイプ 4 極磁場分布。0 mm の位置は磁石中心に対応する。

6. まとめ

- SuperKEKB ビーム衝突点領域で使用される超伝導電磁石システムの設計を行った。超伝導 4 極電磁石は、電子・陽電子ビームラインでダブレットを構成し全数で 8 台必要となる。又、超伝導補正コイルは 40 台組込まれる。
- 素粒子検出器 Belle-II のソレノイド磁場をビームライン上でキャンセルする為に 4 台の超伝導ソレノイドが必要である。

- QC1E プロトタイプを製作し、励磁試験・磁場測定を行った。励磁特性・4 極磁場強度ともビーム運転に十分な性能を示した。エラー成分として 6 極成分については発生原因を検討する必要がある。

謝辞

本研究を行うに当たり、励磁試験・磁場測定に於いて三菱電機システムサービス株式会社田中学氏、株式会社日立プラントテクノロジー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いたします。

参考文献

- [1]H.Koiso, “Colliders for B-Factories,” IPAC’11, San Sebastian, September 2011, WEZA02, p.1931 (2011); <http://www.JACoW.org>
- [2]M. Tawada, et al., “Design Study of Final Focusing Superconducting Magnets for the SuperKEKB,” IPAC’11, San Sebastian, September 2011, WEPO027, p.2457 (2011); <http://www.JACoW.org>
- [3]H. Yamaoka, et al., “Solenoid Field Calculation of the SuperKEKB Interaction Region,” IPAC’12, New Orleans, May 2012, THPPD023, p.3548 (2012); <http://www.JACoW.org>