

THE FINAL FOCUSING SUPERCONDUCTING MAGNETS FOR SuperKEKB

Masako Iwasaki ^{#A)}, Norihito Ohuchi^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Masafumi Tawada^{A)}, Norio Higashi^{A)}, Zhanguo Zong^{A)}, Masatoshi Oki^{A)}, Hiroshi Yamaoka^{A)}, Katsunobu Oide^{A)}, Haruyo Koiso^{A)}, Yuki Yoshi Ohnishi^{A)}, Akio Morita^{A)}, Hiroshi Sugimoto^{A)}, and Yoshihiro Funakoshi^{A)}

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

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

Abstract

We are developing the Final Focusing superconducting magnet system for SuperKEKB, the next generation B-factory experiment in Japan. The system consists of four quadrupole doublets for incoming and outgoing electron and positron beams. These quadrupoles must be located as close to the beam interaction point as possible so that beams can be squeezed to the nanometer scale to achieve the 40 times higher luminosity of 8×10^{35} /cm²/s than the world record achieved by KEKB. We report the current status of the R&D and design of the SuperKEKB final focusing superconducting magnet system

SuperKEKB 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 フォトリ実験用 KEKB 電子・陽電子ビーム衝突型加速器の高輝度化を目的として SuperKEKB 加速器の設計・建設を開始している^[1]。SuperKEKB は、「ナノ・ビーム方式」を採用することにより、KEKB 加速器で記録した世界最高の電子・陽電子衝突ミノシテーターを約 40 倍高めることを目標としている^[2]。ここで、ナノ・ビーム方式には、衝突点での極度に小さいベータ関数、低エミッタンス、及び大きな有限交差角でのビーム衝突が必要である。この、ナノ・ビーム方式を実現させるため、ビーム衝突実験の心臓部である電子・陽電子ビーム衝突用超伝導電磁石システムを新しく作り変える必要がある。SuperKEKB は 2014 年度に加速器主リングの建設を概ね完了し、ビーム運転を再開する予定である。本学会では、検討が進んでいる SuperKEKB ビーム衝突用超伝導電磁石システムの開発、設計について報告する。

2. ビーム衝突用超伝導電磁石システム

図 1 に設計が進んでいる SuperKEKB 用ビーム衝突点 (Interaction Point: IP) の超伝導電磁石及びクライオスタットを示す。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 の超伝導 4 極電磁石ポアー内を電子・陽電子両ビームが通過したのに対して、SuperKEKB の超伝導 4 極電磁石では 1 ビームのみが通過する様に設計されている点にある。更に磁石を出来るだけ小さくして IP に近づける設計が必要となる。又、1 つのクライオスタットに組み込まれる主 4 極電磁石も 4 台となり、全体では 8 台の超伝導 4 極電磁石

が製作され、台数に於いても 4 倍となる。これら主 4 極電磁石 (QC1, QC2) に要求される磁場強度を表 1 に示す。IP の最も近傍には陽電子ビーム (LER) を収束する為の QC1RP, QC1LP が配置され、その後方に電子ビーム (HER) 用 QC1RE, QC1LE が配置される。QC1 の後方には QC2 が各ビームラインに配置され、8 台の超伝導 4 極電磁石でビーム衝突を調整する。つまり、各ビームラインには超伝導 4 極電磁石のダブレットが構成される。表中に示されるように QC1RP, LP は鉄用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。

これら主 4 極電磁石には、4 種類の超伝導補正コイルが磁石ポアー内に組み込まれる。空芯の QC1RP, QC1LP に対しては対向ビーム上に漏れ磁場キャンセル用の超伝導コイルが取り付けられる。更に、Belle 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の超伝導ソレノイド ESR, ESL が以上述べた 4 極電磁石及び補正コイルを包む状態で組み込まれる。

以下、これらの磁石の詳細について説明する。

表 1 : ビーム衝突用超伝導電磁石

	Integral field gradient, T	Magnet Type	Corrector	L.F. cancel coil
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

[#] masako.iwasaki@kek.jp

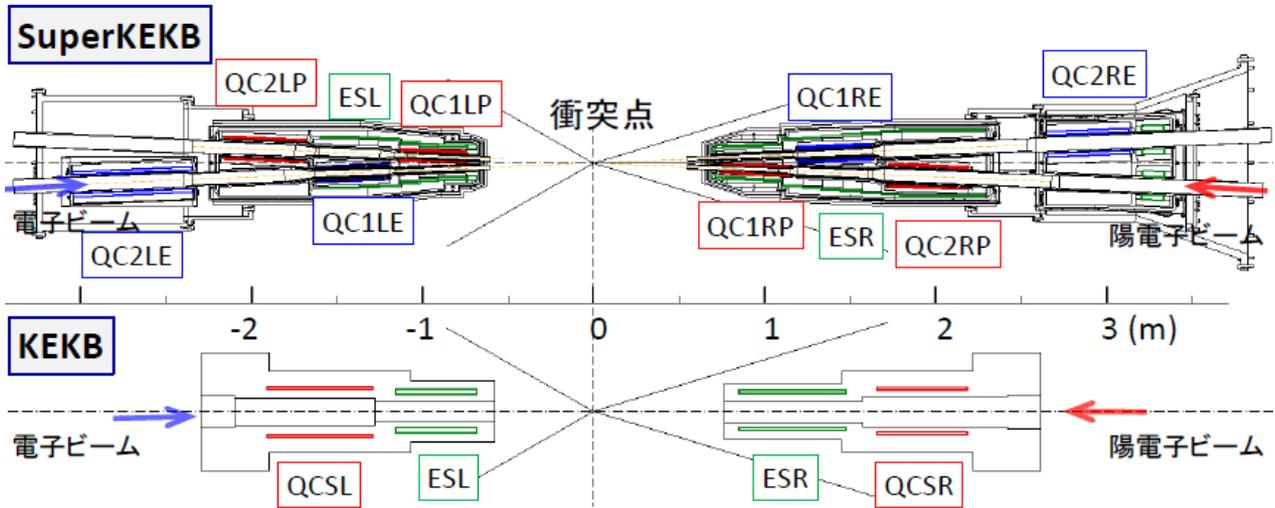


図 1 : SuperKEKB ビーム衝突用超伝導電磁石システム。比較のために、KEKB ビーム衝突用超伝導電磁石システムを同じスケールで示す。

3. 超伝導キャンセルソレノイドの設計

Belle 素粒子検出器ソレノイドは、1.5 T の磁場をビームライン上に形成する。この磁場はビームの衝突性能を著しく劣化させるため、ビームライン上の積分量としてキャンセルする機能を持つ超伝導ソレノイド ESR と ESL が必要となる。ESR と ESL は Belle ソレノイド磁場と逆向きの磁場を発生し、ビーム軸上の積分量として $0 \text{ T} \cdot \text{m}$ に調整する。図 2 に Belle 軸上のソレノイド分布を示した。図中に、Belle 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との合成磁場を青線で示してある。図中には QC1 と QC2 の位置も示されている。QC1RP、QC1LP には、最大で -2.2 T と -2.5 T のソレノイド磁場が印加される。また、R 側は、QC2RP と QC2RE 間で発生している磁場をキャンセルするために、ESR の外側に、ビーム軸に沿ってキャンセルソレノイドを配置している。図中に、このソレノイドによる磁場を赤線で示す。

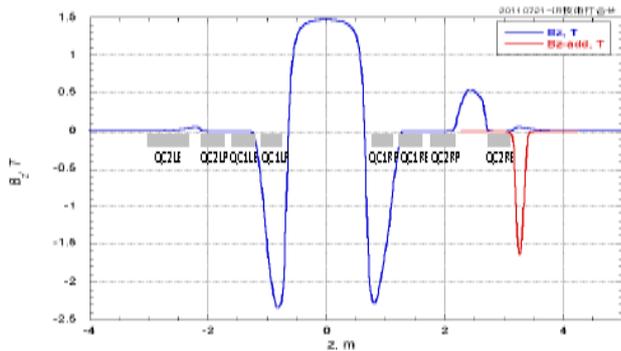


図 2 : Belle 軸上でのソレノイド磁場分布。青線は Belle ソレノイドと ESR,ESL との合成磁場。赤線は ESR の外側に配置されたソレノイドによる磁場。

クライオスタット内に組みこまれた ESR、ESL は、他の磁石と共に図 1 に示してある。ESR と ESL は緑線で示しているが、エミッタンス増大を抑え、さらに ESR、ESL ボアー内に配置された 4 極電磁石の鉄を飽和させないような磁場分布を作るため、長手方向に小さく分割されている。

Belle 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それぞれ 5.2 トンの電磁力を受ける。また、R 側の ESR の外側に配置したソレノイドは、検出器に引き込まれる方向に 1.1 トンの電磁力を受ける。

4. 超伝導 4 極電磁石設計

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 3 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で設計されている。他の 4 極電磁石ではソレノイド磁場が殆ど 0 T まで下げられる為、鉄ヨークをコイルカラー外周部に組み付ける設計としている。

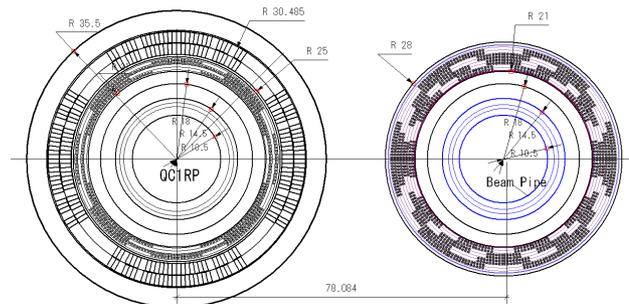


図 3 : QC1RP 超伝導 4 極電磁石 (左側) および対向ビームパイプ (右側) 断面図。対向ビームパイプには、漏れ磁場キャンセル用コイルを配置している。

超伝導 4 極電磁石は 2 層コイルで形成され、ボア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 : b₄,a₂,b₁,a₁) が巻かれる。更に、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に、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 極電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まとめたが、設計磁場勾配は 66~68 T/m で、実効磁場長は 0.3372 m である。磁石の内半径は 25mm と非常に小さく、4 極磁場に対するエラー磁場が 10⁻⁴ 以下にな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機械的な製作精度は 20 μm 以下を目指している。

表 2 : QC1RP/LP の磁石パラメータ

	QC1RP	QC1LP
Coil inner radius, mm	25.00	
Coil outer radius, mm	30.485	
Turns in one pole	12 (1 st L), 13 (2 nd L)	
Spec. of integral field, T	22.43	22.91
Field Gradient, T/m	66.52	67.94
Effective magnetic length, m	0.3372	
Magnet current, A	1575.58	1609.30
Field by Belle and comp. sol., T	3.0	3.2
Max. field in the coil with sol. field, T	3.79	3.93
Operating point w.r.t. B _c at 4.7 K	76 %	79 %
Physical magnet length, mm	416	
Error field at r=1 cm (2D calculation)	b ₆ = 2.55 × 10 ⁻⁵ b ₁₀ = -2.04 × 10 ⁻⁶ b ₁₄ = 6.07 × 10 ⁻⁷	
Error field at r=1 cm (3D calculation)	b ₆ = 1.96 × 10 ⁻⁶ b ₁₀ = 3.93 × 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 まで達し、この運転条件は 4.7 K の最大動作温度下ではロードライン上の臨界点に対して 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 には、計算上 QC1RP/LP 4 極電磁石に残っている Allowed Multipole が示されている。計算上、磁石ボア内半径 10mm 以下で多極成分は 4 極成分に対して 3 × 10⁻⁵ 以下に抑えられている。

5. 開発試験用超伝導電磁石の製作

開発試験用の超伝導 4 極電磁石として、QC2RP 電磁石の試作を行った。開発試験用電磁石は、磁石の巻き枠と下層コイルの上に、超伝導線を直接巻きつける方法で作成した。製作された開発試験用超伝導 4 極電磁石を図 4 に示す。また、開発試験用電磁石の主要なパラメータを表 3 に示す。

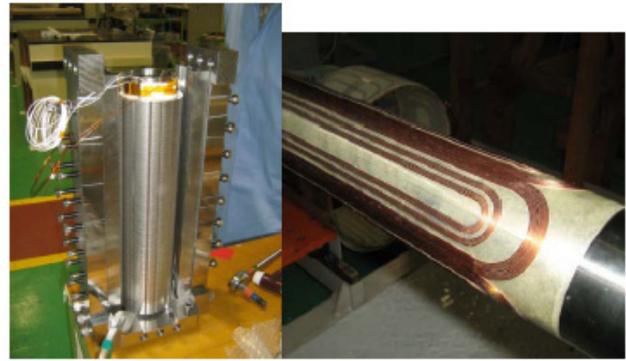


図 4 : QC2RP 開発試験用電磁石。左は、巻き線を終えて、周囲にカラーリング処理を行ったもの。

表 3 : QC2RP 開発試験用電磁石の主要なパラメータ

	R&D magnet	Superconducting wire
Inner radius of cold bore	35mm	Diameter 0.648mm
Inner radius of the magnet	41.6mm	Number of filament 1338
Outer radius of the magnet	46.2mm	Filament diameter 10.6μm
Outer radius of SS316LN collar	55.0mm	Cu/Sc 1.8
Outer radius of iron yoke	85.0mm	I _c (4.2 K, 3 T) 545A
Magnet length	400mm	I _c (4.2 K, 4 T) 452A
Design field gradient	28.26T/m	I _c (4.2 K, 5 T) 375A
Effective magnetic length	328.8mm	
Operation current	368A	
Current density in the bare wire	997A/mm ²	
Peak magnetic field w/o iron yoke	1.19T	
Peak magnetic field with iron yoke	1.59T	

また、開発試験用に、QC1P 用の補正コイルの試作も、QC2RP 開発試験用電磁石と同様の製作方法で行った。現在これらの磁石の励磁試験、磁場測定等、低温性能試験を進めている。

6. 磁場測定用ハーモニックコイルの製作

製作された超伝導 4 極電磁石、補正コイル、および漏れ磁場キャンセル用コイルに対して、磁場測定を行う必要がある。磁場測定は、超伝導電磁石内にハーモニックコイルを挿入し、コイルを回転させたときに誘起された信号を読み出すことによって行う。SuperKEKB 用超伝導 4 極電磁石はボア径が最小で 20mm と非常に小さいため、ハーモニックコイルの外径も 19mm に設計した。このように小さなコイル径からでも、信号を十分に得て、10⁻⁴ 以下の測定精度を得るために、ハーモニックコイルのデザインを最適化し、そのデザインに基づいて試作を行った (図 5)。現在、試作されたハーモニックコイルの性能試験を進めている。

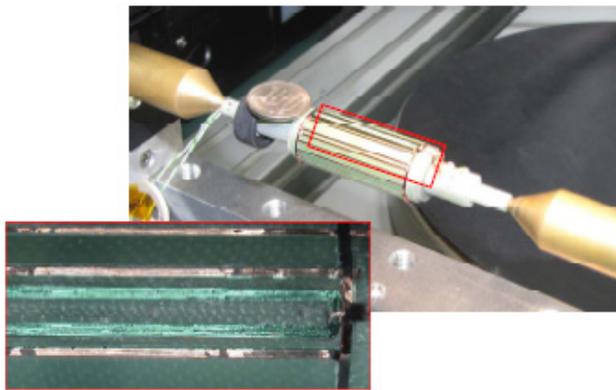


図 5 : SuperKEKB 超伝導電磁石用ハーモニックコイル試作機 (コイル半径 9.5mm)

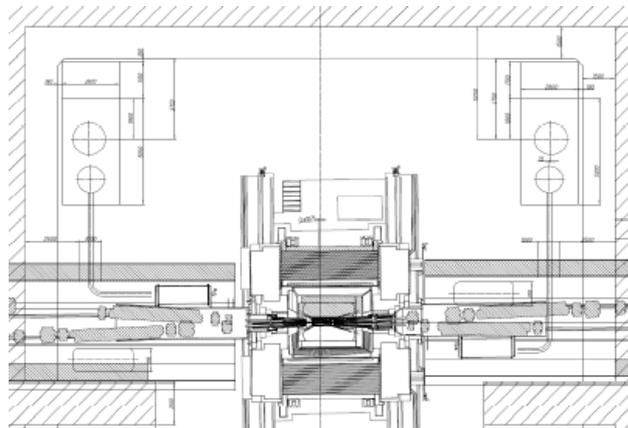


図 6 : 筑波実験室における冷却システムの概図

7. 冷却システム

図 6 にこれまで説明してきた超伝導電磁石クライオスタットを冷却するための冷凍機システムの構成を示した。今回のシステムでは多数の超伝導マグネットを冷却する必要があるため、KEKB のシステムより冷却負荷は増加する。SupreKEKB 衝突点右側の超伝導電磁石クライオスタット 1 台の熱負荷は 37L/h+70W と評価され、これに対して 1 台の冷凍機が持つ冷凍能力は 37L/h+120W である。この為、KEKB で行ってきたように 1 台の冷凍機で 2 台のクライオスタットを冷却することは不可能で、図 6 に示すように左右のクライオスタットを 2 台のヘリウム冷凍機で冷却するシステム設計を行っている。運転時の 1 台の冷凍機の冷却マージンは 60W 程度で、KEKB とほぼ同じであるが、この値は営業運転している同レベルのシステムと比較すると比較的小さい値である。

8. まとめ

現在、SuperKEKB 衝突点用超伝導 4 極電磁石システムとして、超伝導 4 極電磁石・補正コイル・漏れ磁場キャンセルコイルの設計、ESR・ESL キャンセルソレノイドとクライオスタットの設計、および、磁場測定システム、冷却システムの設計を進めると同時に、開発試験電磁石の製作と性能試験を行っている。今後、さらに詳細な設計を行い、SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システムの建設を行う。

参考文献

- [1] SuperKEKB Task Force, Letter of Intent for KEK Super B Factory, KEK-REPROT-2004-4, Jun. 2004. Belle II Collaboration, KEK-REPORT-2010-1, Nov. 2010.
- [2] Y. Ohnishi et al., “SuperKEKB ビーム光学系の設計”, 第 8 回日本加速器学会年会プロシーディング, TUPS020, Aug.1-3, 2011.