

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導磁石システムの開発

DEVELOPMENT OF SuperKEKB BEAM FINAL FOCUS SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM

大内徳人[#]

Norihito Ohuchi[#]

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

SuperKEKB is the most advanced beam colliding accelerator with “Nano-beam scheme”. The luminosity has reached $4.650 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in June 2022. The key device in SuperKEKB is the beam final focus superconducting magnet system for squeezing the beams to the design sizes and the design luminosity. The magnet system consists of 55 superconducting magnets, and each magnet was required to have quite high quality of the magnetic field. In this paper, the overview of the system and the feature of the magnet are described.

1. はじめに

SuperKEKB は、KEKB 加速器のアップグレード器として設計され、7 GeV の電子リング (HER) と 4 GeV の陽電子リング (LER) で構成されたビーム衝突型素粒子加速器である。本加速器では、KEKB より高いビーム衝突性能 (ルミノシティ: L) により標準理論を超える物理を探索し、宇宙の成り立ちに迫ることを目標としている。設計目標の L は $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [1] で、この L に到達するため衝突点のビームサイズは垂直方向に 62 nm/48 nm (HER / LER) まで絞り込む。ビームの集束に最も重要な機器が、衝突点直前に設置されたビーム最終集束用超伝導電磁石システム (QCS) である。Figure 1 に SuperKEKB の全体構成図を示した。電子・陽電子ビームの衝突実験は周長 3 km の加速器主リングの筑波実験室で行われ、Belle II 検出器 [2] と QCS システム [3] が設置されている。

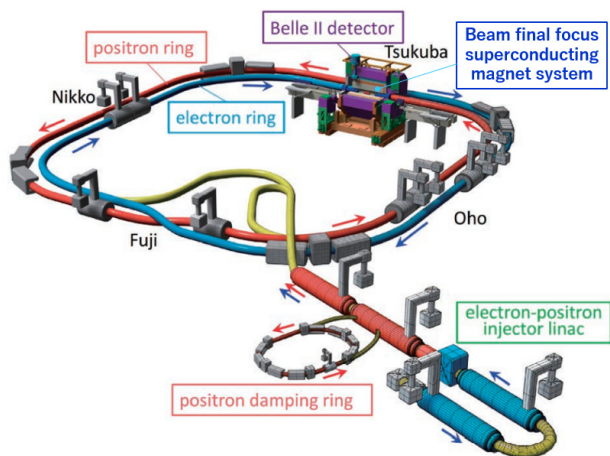


Figure 1: Overall view of SuperKEKB and Belle II [1].

KEKB の性能を超える加速器の検討は 2001 年から始められ、当初ビーム最終集束システムは KEKB の衝突点機器の構成を基に進められた。R&D 用超伝導 4 極電磁石の開発 [4] も行われたが、2009 年にイタリア

[#] norihito.ohuchi@kek.jp

SuperB グループが提案した $L = 1 \times 10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を設計目標とした「Nano-beam colliding scheme」[5] を採用することになり、ビーム衝突点の設計は再スタートとなった。R&D 機開発で得た小型ケーブル超伝導 4 極電磁石の製作技術は、現在の 4 極電磁石に引き継がれている。

QCS 電磁石クライオスタットの製作は 2013 年から始まり、2015 年 12 月に QCS-L が完成した。KEK 内の地上部にある実験棟で冷却・励磁試験・磁場測定を完了後、2016 年 8 月にビームラインに設置された。衝突点右側の QCS-R は 2017 年 2 月に完成し、製作会社から KEK に納入後、ビームラインに設置された。Figure 2 は、2 台の電磁石クライオスタットが筑波実験室ビーム衝突点に据え付けられた時の写真である。Belle II 検出器はビームライン上に移動する前で、加速器リング内側の位置にある。Belle II 検出器も含めたビーム衝突点システムが完成したのは 2017 年 4 月である。

2. ビーム最終集束用超伝導電磁石システム

ビーム最終集束超伝導電磁石システムを構成する主要機器のパラメータを Table 1 に纏めた。2 台のクライオスタットがビーム衝突点を挟んでビームライン上に設置され、55 台の超伝導電磁石が組み込まれている。ビームの集束は、電子・陽電子ビームラインに配置された 4 極電磁石ダブレットで行う。また、Belle II 検出器のソレノイド磁場をビームライン上で積分的に打消す補正ソレノイドが 4 台組込まれている。Table 1 に、4 極電磁石と補正ソレノイドの各ビームライン上での積分磁場を示した。2 台のクライオスタットは、冷却の為に各々専用のヘリウム冷却システムが接続されている。1 台のヘリウム冷凍機は、4.5 K の電磁石運転温度に対して 250 W の冷却能力を持っている。

Figure 3 にヘリウム冷凍機も含めたビーム衝突点近傍の装置全体を示した。図に示すように、ビーム運転時、2 台の電磁石クライオスタットは Belle II 検出器内部に完全に組み込まれる。各クライオスタットの反 IP 側には、電子・陽電子ビームライン用真空パイプ、常伝導電磁石が配置されている様子も示されている。ヘリウム冷凍機システムと電磁石クライオスタットの接続は、サービスクライオスタットで行われる。

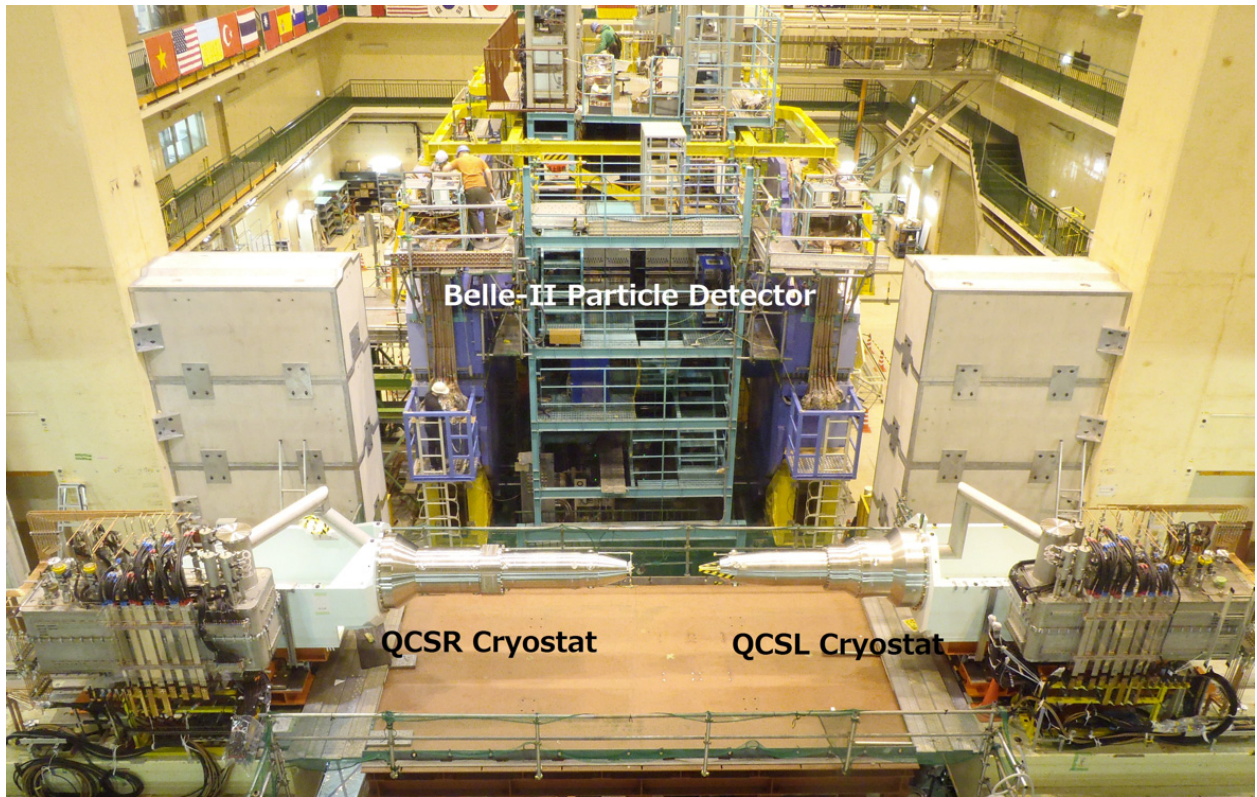


Figure 2: QCS-R and QCS-L cryostats and Belle-II particle detector at the SuperKEKB interaction region (IR). The picture was taken after setting two cryostats in the IR and before setting the Belle-II detector along the beam lines.

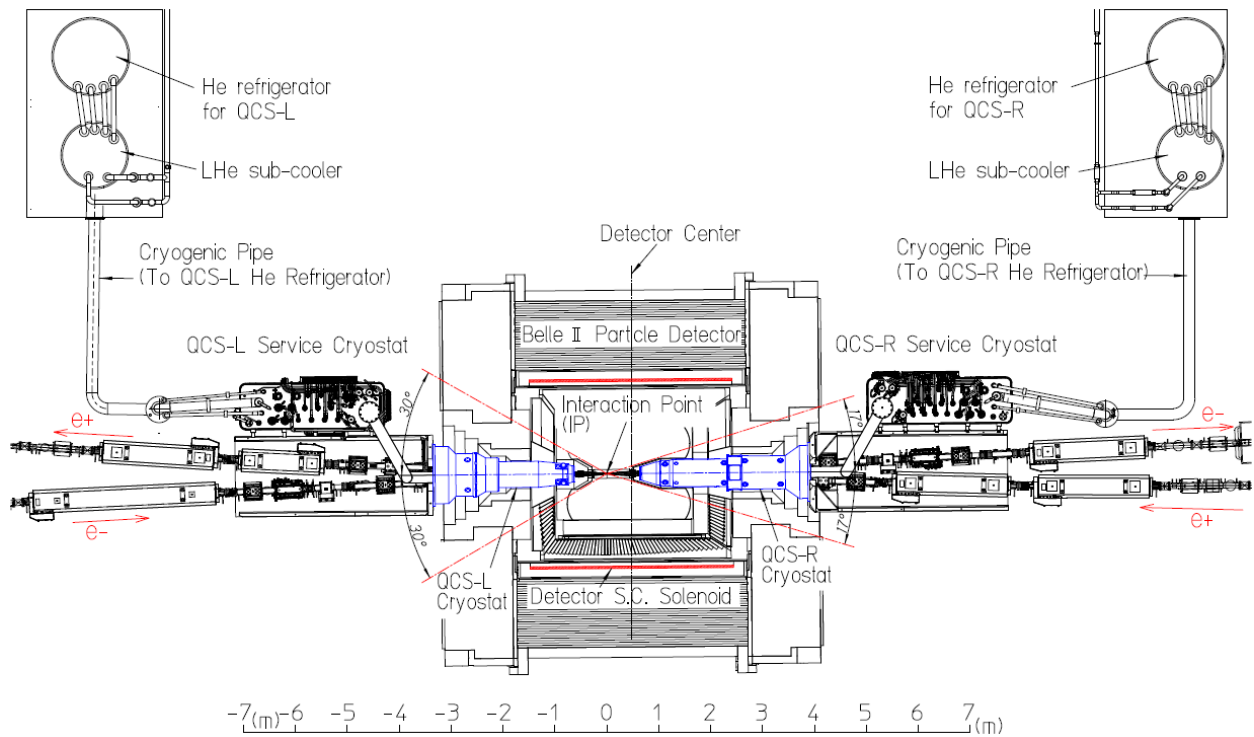


Figure 3: Top view of the SC magnet cryostats with the cryogenic system, accelerator components in the SuperKEKB IR and the horizontal cut view of the Belle II detector. In the figure, the position of zero on the scale is the beam interaction point.

Table 1: Main Parameters of the Final Focus System

Number of SC magnets	55
Main quadrupole	Integral field
QC1RP, QC1LP	22.96 T, 22.96 T
QC2RP, QC2LP	11.54 T, 11.48 T
QC1RE, QC1LE	25.39 T, 26.94 T
QC2RE, QC2LE	13.04 T, 15.27 T
Compensation solenoid	Integral field
ESR1 + ESR2 or ESR3	3.86 T·m
ESL	2.31 T·m
Magnet-cryostat	2 units
Cold mass of QCS-R, QCS-L@ 4.5 K	3,139 kg, 1,786 kg
He refrigerator cryogenic system	2 units
Cooling power of one unit @ 4.5 K	250 W

Figure 4 にクライオスタット内の超伝導電磁石の構成を示し、Table 2 に QCS システムに組み込まれた超伝導電磁石の種類をまとめた。LER と HER ビームライン上の赤いまたは青のブロックが 4 極電磁石である。各 4 極電磁石は、4 極磁場中心、磁場面角を調整するための補正電磁石 (スキュー 2 極磁石: a_1 、ノーマル 2 極磁石: b_1 、スキュー 4 極磁石: a_2) が組み込まれている。この他、ビーム調整用に 6 極、8 極補正電磁石を持つ。補正電磁石の総数は 35 台である。また、磁気ヨークを持たない QC1P から HER ビームラインに侵入してくる磁場を打消すための特殊な 6 極、8 極、10 極、12 極電磁石が HER ビームライン上に取付けられている。

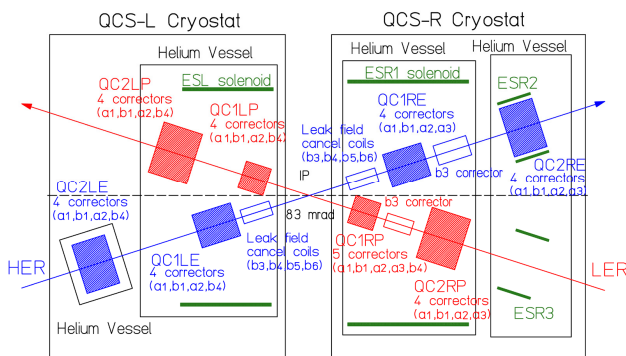


Figure 4: Conceptual magnet layout in two cryostats.

Table 2: The SC Magnets for the Final Focus System

	Quadrupole magnet	Corrector magnet	QC1P L.F.	Solenoid magnet
QCS-L	QC1LP	a_1, b_1, a_2, b_4	b_3, b_4 b_3, b_6	ESL
	QC2LP	a_1, b_1, a_2, b_4		
	QC1LE	a_1, b_1, a_2, b_4		
	QC2LE	a_1, b_1, a_2, b_4		
QCS-R	QC1RP	$a_1, b_1, a_2, a_3(b_3), b_4$	b_3, b_4 b_5, b_6	ESR1 ESR2 ESR3
	QC2RP	a_1, b_1, a_2, a_3		
	QC1RE	a_1, b_1, a_2, a_3		
	QC2RE	a_1, b_1, a_2, a_3		
	B/w QC1RP-2RP	b_3		
B/w QC1RE-2RE	b_3			
Num.	8	35	8	4
Num.	55			

QC1LP L.F.: QC1LP leak field cancel magnet.

補正ソレノイドは、Belle II 超伝導ソレノイドが検出器内部に作る 1.5 T の磁場を IP からの積分値として打消す。Figure 5 に Belle II ソレノイド単体でのビームラインに沿った磁場分布 (赤) と補正ソレノイド磁場を合成した分布 (黒) を示した。補正ソレノイドは、Belle II ソレノイドと反対向きの磁場を発生する。図中には、超伝導 4 極電磁石の位置も示した。

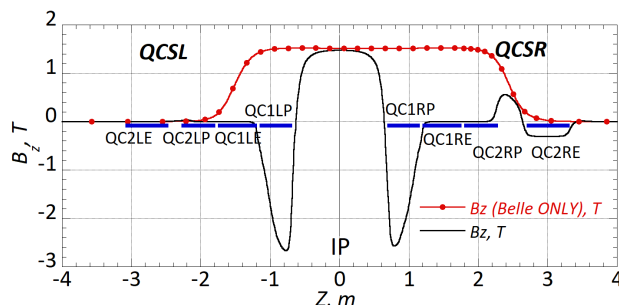


Figure 5: Solenoid field profiles along the beam lines.

3. 超伝導 4 極電磁石

超伝導 4 極電磁石の設計パラメータと磁石断面図を Table 3 と Fig. 6 に示した。超伝導 4 極電磁石は、NbTi Rutherford 型超伝導ケーブルで作られた 2 層コイルで構成されている。4 タイプの超伝導電磁石は、通過するビーム形状の違いから異なる断面設計となっている。QC1LP/RP (以降 QC1P) と QC1LE/RE (QC1E) の 4 台の超伝導 4 極電磁石は、実効磁場長が 400 mm 以下の小型電磁石であるが、KEKB QCS の 3 倍以上の 4 極磁場勾配を発生する。QC1P の区間において補正ソレノイド (ESL, ESR1) が Belle II ソレノイド磁場を積分的に打消すことができるように、QC1P は磁性体ヨークを持たない。その結果、QC1P には電磁石本体が発生する磁場と、Belle II ソレノイド磁場と補正ソレノイド磁場の合成磁場が印加される。QC1P 超伝導コイル上での最高磁場は 4.1 T に達する。Figure 7 に QC1LP4 極電磁石と QC1RP 用に製作された超伝導コイルを示した。

QC1E には磁性体ヨークが取付けられている。QC1E が設置されているビームライン上では、ヨークが磁気飽和しないように Belle II ソレノイド磁場と補正ソレノイドの合成磁場が概ねゼロとなるように磁場設計されている。

QC2P 及び QC2E は、QC1P と QC1E に比べると磁石ボア半径が大きく、要求される 4 極磁場勾配も小

Table 3: Design Parameters of SC Quadrupole Magnets

Magnet	G T/m	L_{eff} m	Int. G T	Yoke	Position mm
QC2RE	32.4	0.419	13.6	Iron	2925
QC2RP	26.3	0.410	11.6	Per.	1925
QC1RE	70.9	0.373	26.4	Per.	1410
QC1RP	68.9	0.334	23.0	None	935
QC1LP	68.9	0.334	23.0	None	-935
QC1LE	72.2	0.373	26.9	Per.	-1410
QC2LP	28.4	0.410	11.5	Per.	-1925
QC2LE	28.4	0.537	15.3	Iron	-2700

G = Field gradient, L_{eff} = Effective magnetic length, Int. G = Integral field gradient, Per. = Permendur, Position = Position from IP.

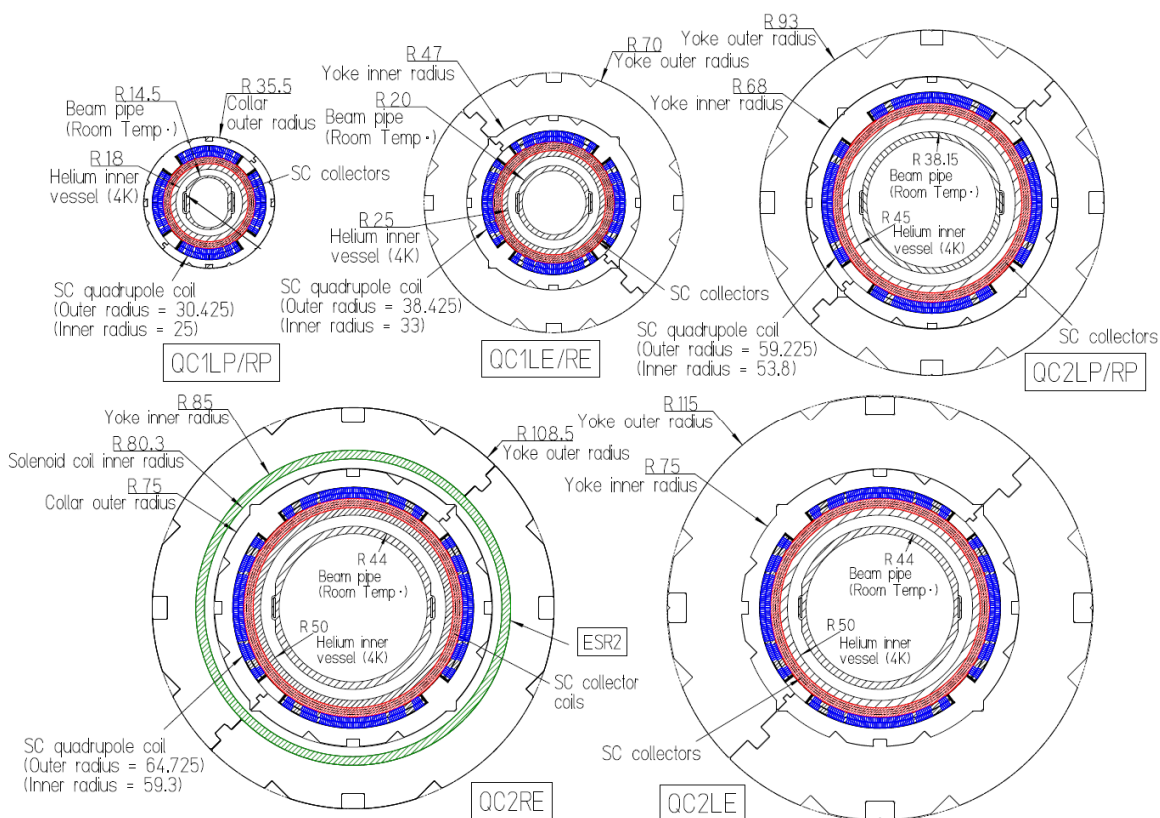


Figure 6: Cross section designs of quadrupole magnets.

さい。超伝導コイル上での最高磁場は QC2P が 2.14 T、QC2E は 2.25 T である。Figure 6 に示すように QC2LE と QC2RE の超伝導 4 極コイルの断面形状は同じだが、QC2RE にはカラーとヨークの間に超伝導補償ソレノイド ESR2 が組込まれている。

伝導コイルを製作することが可能となる。Figure 8 には、BNL で製作中の QC1RP 用補正磁石 Skew Dipole (a_1) を示した。完成した QC1LP (Fig. 9) により、1 台の超伝導 4 極電磁石に組込まれた超伝導補正電磁石を Fig.10 で示す。QC1LP には、4 種類の超伝導補正電磁石が組込まれている。QC1P は非常に厳しい空間的な制約を持っている。この為、8 極補正電磁石 (b_4) は QC1LP カラー外周部に設置されている。Figure 9 の QC1LP 外周部後方に取付けられた部品が b_4 補正電磁石である。3 種類の補正電磁石 (a_1, b_1, a_2) は 4 極電磁石コイルボア内部に多層構造で組込まれている。Figure 10 には QC1LP 4 極電磁石コイルと 4 台の補正電磁石コイルを示した。超伝導補正電磁石を多層化することにより、ビーム運転に対して極めて高い性能を持つ 4 極電磁石システムを実現している。超伝導補正電磁石システムは、超伝導の特性を最大限利用した装置である。

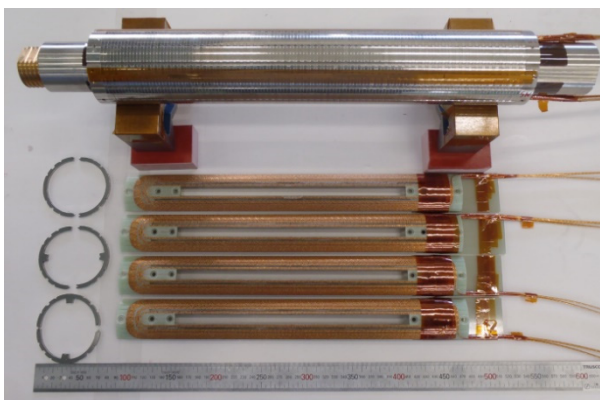


Figure 7: QC1LP and QC1RP four superconducting coils.

4. 超伝導補正電磁石

超伝導補正磁石は、米国 Brookhaven 国立研究所 (BNL) との共同研究で開発され、BNL が持つ特殊技術である Direct Winding Method[6]を用いて製作した。この技術は、接着剤を表面に塗布した超伝導線を超音波で加熱しパイプ表面に接着するもので、超伝導線の位置を正確に制御することができる。また、直径が 0.35 mm の細い超伝導線を使用することから厚みが 1 mm 以下の超

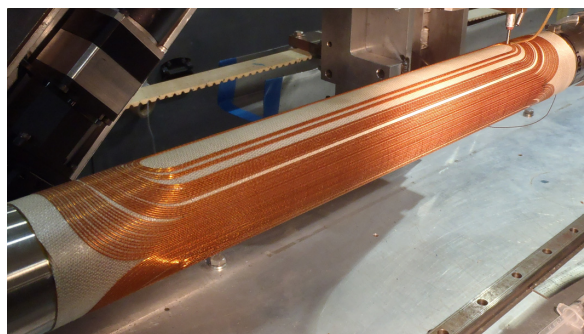


Figure 8: QC1RP a_1 corrector magnet.

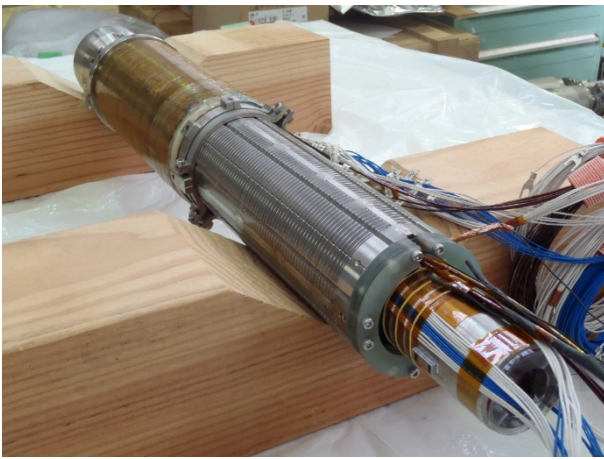


Figure 9: Completed QCILP with 4 corrector magnets.

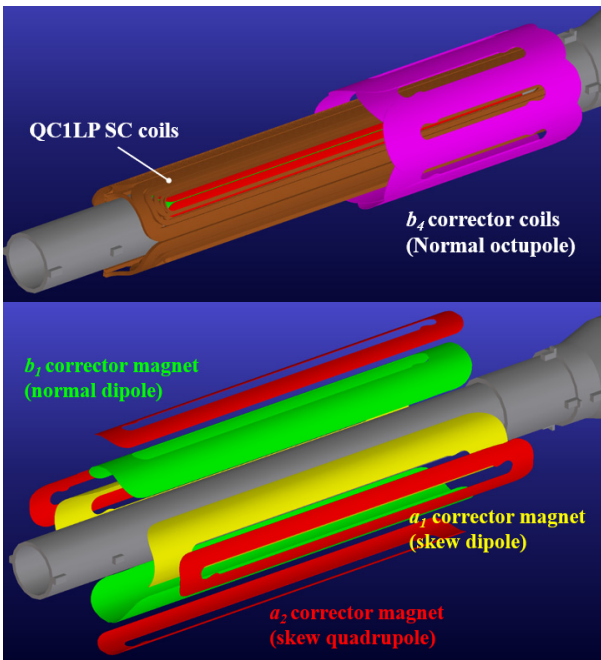


Figure 10: QCILP coils and the corrector magnets.

5. 超伝導補正ソレノイド

Figure 2 に示すように、Belle II 検出器内部には衝突で発生した粒子の電荷及び運動量を測定するために内径 1.8 m、長さ 3.91 m の巨大な超伝導ソレノイドが設置され、1.5 T のソレノイド磁場を発生させる。このソレノイド磁場のビームへの影響を取り除くために Belle II ソレノイド磁場と反対の向きを持つソレノイド磁場を作る超伝導補償ソレノイド (ESL, ESR1, ESR2, ESR3) が超伝導 4 極電磁石・補正磁石の外周部に設置されている。補正ソレノイドのパラメータを Table 4 に纏めた。また、Fig. 11 に QCS-R 用補正ソレノイド ESR1 を示した。ビーム光学計算から必要とされるソレノイド磁場分布を発生するために、ESR1 と ESL は長手方向に複数の短いソレノイドコイルで構成されている。写真で示した ESR1 の場合、15 個のコイルで作られている。また、電子・陽電子のビームラインが 83 mrad の交差角度を持つことから各ソレノイド磁石の内径は IP からの距離に従って大きくなっている。全ての超伝導 4 極電磁石と補正電磁石は補正ソレノイドのポ

アー内に組込まれている。

Table 4: Design Parameters of Compensation Solenoids

Magnet	ESL	ESR1	ESR2/3
Integral field, Tm	2.31	3.6	0.17
Opera. cur., A	390	450	151
Inductance, H	2.46	8.04	0.14
Max. field, T	3.56	3.05	0.48
Magnet length, mm	905	1575	720
No. of short coils	12	15	1
Total turns	4610.1	6237.1	1356

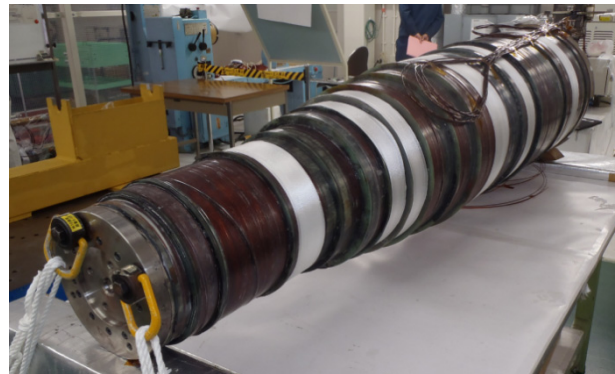


Figure 11: ESR1 compensation solenoid.

6. まとめ

SuperKEKB は 2022 年 6 月までの運転で L は $4.650 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ に到達している。55 台の超伝導電磁石で構成されたビーム最終集束システムは、2018 年からのビーム運転で大きな問題点は見つかっていない。ビーム運転に影響を与えるものとして、4 極磁場の長時間変化が観測されたが、その対応策も見つけてきた[7]。今後、超伝導電磁石システムとして更に安定に運転出来るように冷却システムを含めて改良を進めて行きたいと考えている。

謝辞

QCS システムの建設、運転には至るまでには非常に多くの人の助けが必要でした。QCS グループ、電磁石グループ、光学グループ、KEKB グループ、Belle II 低温グループ、機械工学センター、超伝導低温工学センター、海外の研究協力の皆様、多種多様な装置を製作して頂いた大・中・小企業の関係者の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] K. Akai and H. Koiso, "SuperKEKB Accelerator", J. PASJ, Vol. 15, No. 4, 2018, pp. 213-220.
- [2] Belle II Technical Design Report; <https://arxiv.org/abs/1011.0352>
- [3] N. Ohuchi *et al.*, "SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system", NIM-A, 1021 (2022) 165930.
- [4] N. Ohuchi *et al.*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 18, No. 2 (2008), pp. 159-162.
- [5] P. Raimondi, 2nd SuperB Meeting, Frascati (2006).
- [6] B. Parker *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 22, No. 3 (2012), 4101604.
- [7] Y. Arimoto *et al.*, 19th Annual Meeting of PASJ, Oct., WEP039, 2022.