

SuperKEKB ビーム衝突点用超伝導電磁石システムの建設 CONSTRUCTION OF THE SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM AT THE SUPERKEKB IR

大内徳人^{#,A)}, 有本靖^{A)}, 土屋清澄^{A)}, 山岡広^{A)}, 川井正徳^{A)}, 近藤良也^{A)}, 宗占国^{A)}, 王旭東^{A)},
金太炫^{B)}, 河村郁夫^{C)}

Norihito Ohuchi^{#,A)}, Yasushi Arimoto^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Hiroshi Yamaoka^{A)}, Masanori Kawai^{A)}, Yoshinari
Kondo^{A)}, Zhanguo Zong^{A)}, Xudong Wang^{A)}, Tae-hyun Kim^{B)}, Ikuo Kawamura^{C)}

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

^{B)} Mitsubishi Electric Corporation

^{C)} Hitachi Plant Mechanics Co., Ltd

Abstract

SuperKEKB with 7 GeV electron (High Energy Ring: HER) and 4 GeV positron beams (Low Energy Ring: LER) is the upgraded accelerator of KEKB, and the machine target is the extremely high luminosity, $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, which is 40 times higher luminosity than that of KEKB. SuperKEKB without the final focus system was commissioned as the Phase-I from February 2016 to June 2016, and the operation was successfully completed. After this operation, the final focus system with 55 superconducting (SC) magnets was constructed in the interaction point (IP). The construction of the SC magnets in the left system to IP (QCS-L) started from July 2012, and the QCS-L magnet cryostat was installed into the IP in August 2016. The QCS-R magnet cryostat was installed into the IP in February 2017. Both systems are now connected to the cryogenic systems, and they are cooled down to 4 K and the excitation tests and the field measurements of all magnets are being performed. We will report the construction of the SC magnets and the final focus system in this paper.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、KEKB 加速器・Belle 素粒子検出器を用いて、1999 年から電子・陽電子ビームの衝突実験を 10 年間行い、2001 年には粒子・反粒子の対称性の破れを発見し、また「小林・益川理論」の検証を行うなどの成果をあげてきた。2010 年からは加速器の衝突性能を 40 倍向上させる SuperKEKB 加速器へのアップグレードを行っている。2016 年 2 月から 6 月には、電子 (8GeV)・陽電子 (4GeV) ビームを衝突点で最終形状 (~50nm) まで収束する超伝導電磁石システムを除いた加速器の調整運転 (Phase-I) を完了した。超伝導電磁石システムは、衝突点左側のシステム (QCS-L) が 2016 年 10 月に完成し、2 か月の冷却・励磁試験で超伝導電磁石の性能を確認した。衝突点右側のシステム (QCS-R) は、今年 3 月に完成した。5 月からは、Belle-II 超伝導ソレノイドも含めた QCS-L/R システムの冷却運転を行い、Belle-II ソレノイド励磁下での超伝導電磁石の励磁試験・磁場測定を行っている。本発表では、SuperKEKB ビーム最終集束超伝導電磁石システムの構成、超伝導電磁石の製作、システムの建設状況と今後の運転スケジュールについて報告する。

2. ビーム衝突点用超伝導電磁石システム

SuperKEKB ビーム最終収束システムは、55 台の超伝導電磁石から構成され[1]、2 台のクライオスタット (QCS-L/R) に分割して組込まれる。Figure 1 には、ビーム衝突

点に設置された 2 台のクライオスタットと Belle-II の断面図を示した。電子・陽電子ビームは、ビーム衝突点 (IP) で 83 mrad の交差角度で衝突するが、図中青で示した部分に超伝導 4 極電磁石が配置されている。Figure 2 には、ビーム最終集束システムとして製作された 55 台の超伝導電磁石の構成を示した。IP へのビーム形状の集束、メインリングへの発散は、各ビームラインの IP を挟んだ 4 台の超伝導 4 極電磁石により行われる。

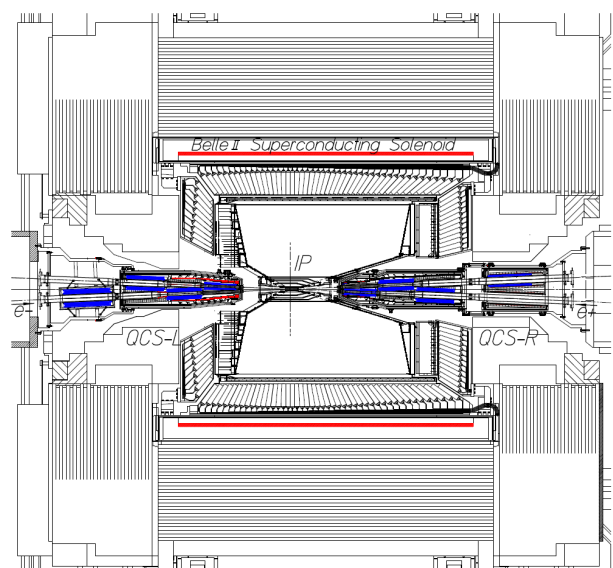


Figure 1: QCS-L and QCS-R cryostats with Belle-II.

[#] norihito.ohuchi@kek.jp

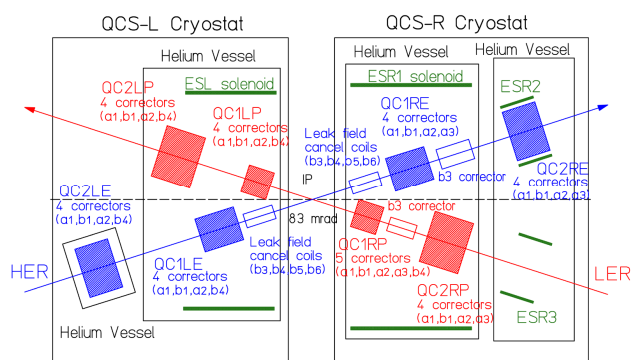


Figure 2: Constitution of the SC magnets at IP.

Table 1: Parameters of the Superconducting Quadrupoles

Magnet	GL, T (T/m × m)	Type	Z, mm	θ , mrad
QC2RE	13.58 (32.41 × 0.419)	Yoke	2925	0
QC2RP	11.56 (26.28 × 0.410)	Yoke	1925	-2.114
QC1RE	26.45 (70.89 × 0.373)	Yoke	1410	0
QC1RP	22.98 (68.89 × 0.334)	No Yoke	935	7.204
QC1LP	23.00 (68.94 × 0.334)	No Yoke	-935	-13.65
QC1LE	26.94 (72.21 × 0.373)	Yoke	-1410	0
QC2LP	11.50 (28.05 × 0.410)	Yoke	-1925	-3.725
QC2LE	15.27 (28.44 × 0.537)	Yoke	-2700	0

Figure 2 には、システムに組込まれている 43 台の超伝導補正磁石と Belle-II ソレノイド磁場を積分的にキャンセルする為の超伝導補正ソレノイドも示されている。また、Table 1 に 8 台の超伝導 4 極電磁石のパラメータを纏めた。表中には、磁石の磁場強度、磁気ヨークの有無、IP からの距離、4 極磁場面の水平面からの角度を示した。QC1LP/RP は、磁気ヨークを持たない 4 極磁石である。

3. 超伝導電磁石の製作

3.1 超伝導 4 極電磁石 (QC1, QC2)

8 台の超伝導 4 極電磁石 [2,3] は、QC1LP/RP の様に IP に対して反対の位置にある磁石は同一の断面形状を持つが、IP に対して同じ側の 4 極電磁石は IP からの距離が異なる為、断面形状は異なる。Figure 3 に 4 種類の 4 極電磁石の断面形状を示した。超伝導 4 極電磁石を構成するコイルは、2 層からなりダブルパンケーキ構造を持つ。超伝導コイルの製作に使用したケーブル (NbTi) は、素線直径 = 0.5 mm、本数 (N_{st}) = 10 本と同じであるが、コイル製作精度を高める為、ケーブルに加工されたキーストン角度 (θ_k) は異なる値を用いている。Table 2 に 4 極磁石と超伝導ケーブルの主要パラメータを示した。

超伝導 4 極電磁石用コイルの製作は、2012 年 12 月より開始した。製作に当たり、IP 左側に据付けられる QCSL を先行した。Figure 4, 5 には、QC1LP 用コイル巻線作業と完成した 4 個の超伝導コイルを示した。8 台の超伝導 4 極電磁石のコイル (全数 = 32 個) の製作は、2014 年 1 月に完了した。4 個の超伝導コイルは、1 台の

超伝導 4 極電磁石に組み上げられ、外周部から SUS のカラーにより固定される。Figure 6 には完成した QC1LP 超伝導 4 極電磁石を示した。この 4 極電磁石内筒には、4 種類の超伝導補正磁石が組込まれている。

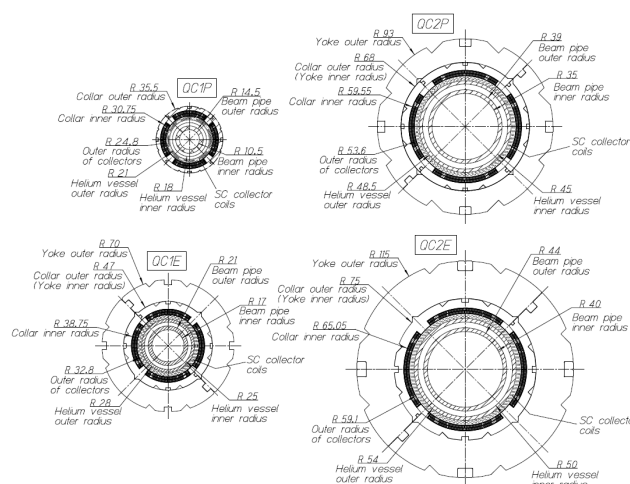


Figure 3: Cross section designs of quadrupole magnets.

Table 2: Design Parameters for Main Quadrupoles

Parameters	QC1P	QC1E	QC2P	QC2LE
G_D , T/m	76.37	91.57	31.97	36.39
I_D , A	1,800	2,000	1,000	1,250
B_p , T	4.56	3.5	2.43	2.63
LR, %	72.3	73.4	44	39
R_{ci}/R_{co} , mm	25.0/30.4	33.0/38.4	53.8/59.2	59.3/64.7
R_{yo} , mm	NA	70.0	93.0	115.0
L_{PM} , mm	409.3	455.4	495.5	618.9
L_{EM} , mm	333.6	373.1	409.9	537.0
Cable	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi
N_{st}	10	10	10	10
θ_k , deg.	2.1	1.6	1.0	0.94

表中: G_D = 設計磁場勾配、 I_D = 設計電流値、 B_p = コイル内最大磁場、LR = 負荷率、 R_{ci}/R_{co} = コイル内/外半径、 R_{yo} = ヨーク外半径、 L_{PM} = 磁石長、 L_{EM} = 実効磁場長

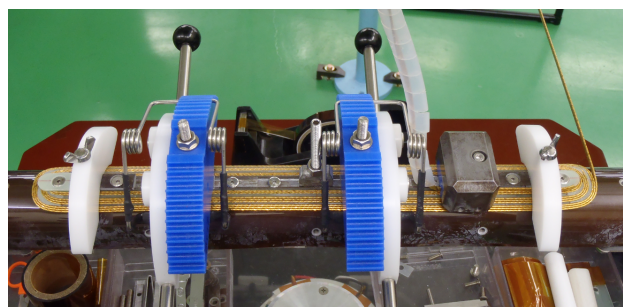


Figure 4: Winding process of QC1LP magnet.



Figure 5: 4 SC coils for QC1LP magnet.

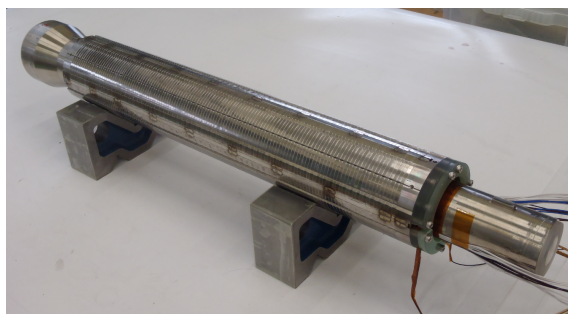


Figure 6: QC1LP magnet with corrector magnets.

3.2 超伝導補正磁石

超伝導補正磁石[4]は、2011年から米国BNL国立研究所と共同開発し、2015年2月には全磁石(43台)の製作を完了した。超伝導コイルの巻線は、計算機制御された巻線ロボットにより行われ、外径0.35mmの超伝導線(NbTi)を直接サポートピン(ヘリウム容器内筒)に接着して行った。磁石の製作後、BNLに於いて室温で磁場測定を行った。また、KEKに輸送後、全ての磁石を液体ヘリウムで冷却し、励磁試験と磁場測定を行った。Figure 7にBNLでの超伝導コイル巻線時の様子を示した。

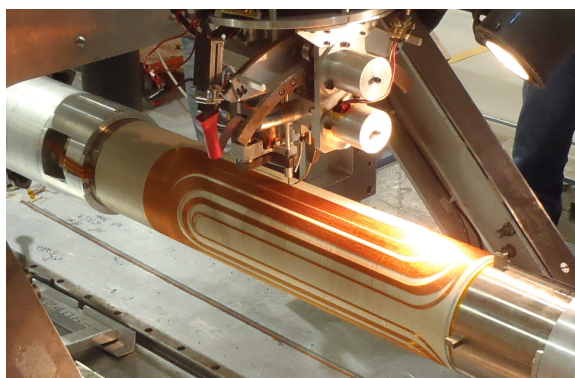


Figure 7: Coil winding in BNL.

3.3 超伝導補正ソレノイド(ESL,ESR1,ESR23)

電子・陽電子ビームは、1.5TのBelle-IIソレノイド磁場中をIPに於いて83 mradの交差角度で衝突する。この結果、ビームは進行方向に対して回転の力を受ける。この影響をキャンセルする為に、Belle-IIソレノイド磁場と反対方向の向きを持ち、ビームライン上に於いてIPからの

積分磁場が大きさとして同じソレノイド磁場を発生する超伝導補正ソレノイド(ESL, ESR1, ESR23)を設計・製作した。ESLとESR1は、ビームライン上で光学的に必要とされる磁場分布を形成する為に複数の小型ソレノイドから構成されている。また、ソレノイド内部にはQC1P/E及びQC2RP超伝導4極電磁石が組込まれる設計となっている。Figure 8に製作されたESR1超伝導補正ソレノイドを示した。ESR1は、15個の小型ソレノイドで構成されている。

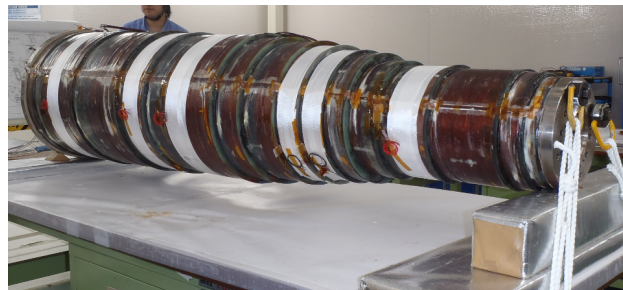


Figure 8: ESR1 superconducting compensation solenoid.

4. マグネットクライオスタットと冷却システムの建設

55台の超伝導電磁石は、2台のクライオスタットに組込まれた。QCS-L/Rクライオスタットには、各々25/30台の超伝導電磁石が組込まれている。Figure 9には、QCSL用の前方部ヘリウム容器に組込まれた超伝導電磁石組立の様子を示した。この部分には19台の超伝導電磁石の他、対向ビームへの漏れ磁場をシールドする磁気シールドが組込まれている。前方部ヘリウム容器内の部品の組立精度は、50μm以下である。クライオスタット内では、2台のヘリウム容器に超伝導電磁石は分割され、各容器はクライオスタット真空容器に対して0.2mmの精度で取付けられている。

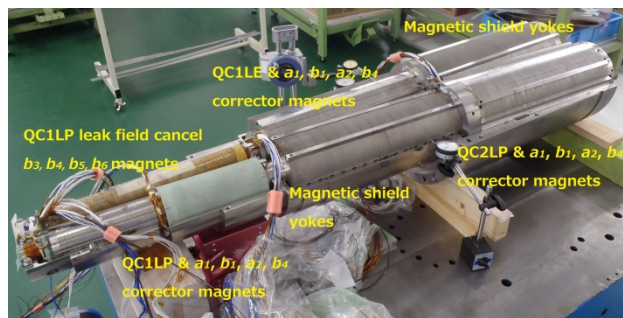


Figure 9: Assembled superconducting magnets in the front helium vessel of QCS-L cryostat.

2012年に製作が開始したQCS-Lクライオスタットは、2015年12月25日にKEKに納品され、地上部実験室にて2016年2月~6月まで冷却・励磁試験、磁場測定を行った。2016年8月にビームラインに据付け・位置調整後、ヘリウム冷却システムと接続し2016年11月~12月に於いて冷却試験・励磁試験を行い、ビームラインでQCS-L用超伝導電磁石が全て問題なく励磁できることを確認した。

QCS-R クライオスタットは、2017年2月13日に SuperKEKB ビーム衝突点に直接納品された。この様子を Figure 10 に示した。図中では左側が QCS-R クライオスタットで右側が QCS-L クライオスタットである。QCS-L クライオスタットは、既に冷却・励磁試験が完了している。後方に見えるのが Belle-II 測定器である。

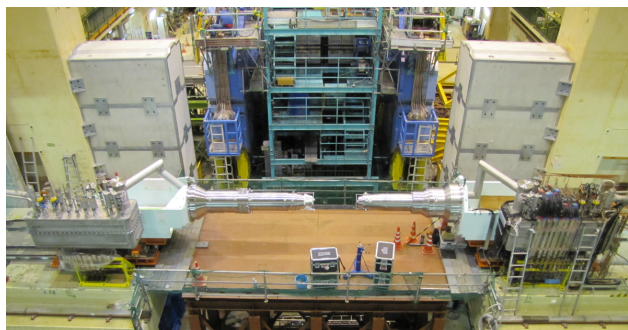


Figure 10: QCS-L/R magnet cryostat and Belle-II detector.

QCS 超伝導電磁石システムは、TRISTAN 加速器 QCS 用に 1990 年に製作された 4 台の He 冷凍機[5](冷凍能力 250W@4.4K、冷凍液化能力 160W@4K+28.4L/h)のうち 2 台を再利用して建設された。2 台の内の 1 台は KEKB 加速器で KEKB-QCS の冷却に使用していたが、他 1 台は 20 年間保管していたものである。TRISTAN/KEKB 加速器では、1 基の He 冷凍機システムで QCS-L/R の 2 台の超伝導電磁石クライオスタットを冷却していた。SuperKEKB では、1 台の QCS クライオスタットの熱負荷(初期設計値)が 76.4W+28.4L/h と計算された。クライオスタット 2 台では 152.8W+56.8L/h となり、1 台の冷凍機の冷凍液化能力を超えた為、2 基の He 冷凍システムを使用し QCSL/R を各々単独の冷却システムで冷却する設計とした。Figure 11 に Belle-II 検出器、QCS クライオスタット、He 冷凍機の配置を示す。SuperKEKB 筑波実験室地下 4 階に 2 台の冷凍機・液体ヘリウム過冷却器が設置され、各クライオスタット間は液体ヘリウム輸送用の低温配管が接続されている。

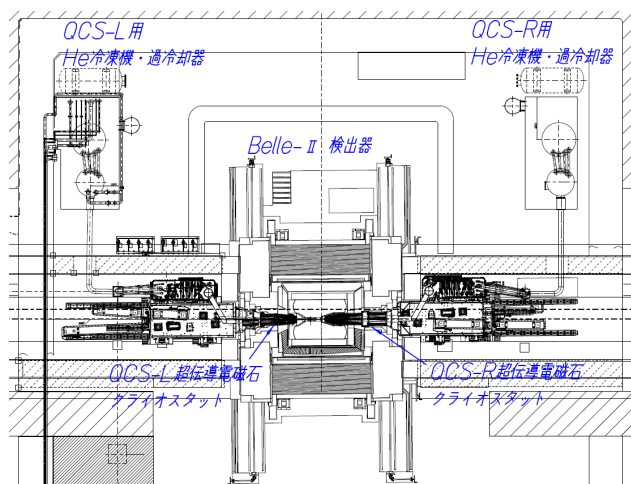


Figure 11: Layout of the QCS-L/R cryogenic systems.

Figure 12 に接続が完了した QCS-L クライオスタットと

冷凍機システムを示した。Figure 13 には、2016 年 11 月に行われた QCSL クライオスタットの冷却曲線を示した。この試験から、超伝導電磁石を室温から液体ヘリウム温度まで冷却するのに約 50 時間(2 日)必要であることが分かった。

この冷却試験後、冷却システムの熱負荷測定・インターロック試験を行い、QCS-L 全超伝導電磁石の励磁試験を行い、運転電流までの励磁に成功した。



Figure 12: QCS-L cryostat and He refrigerator.

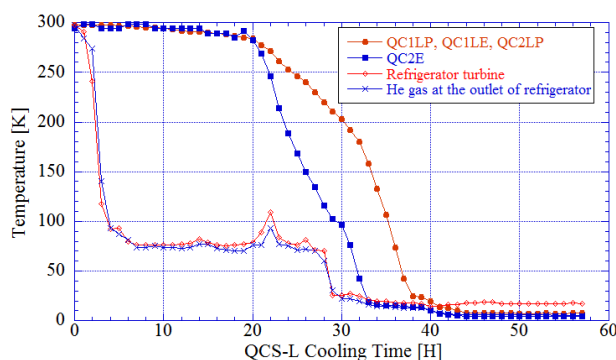


Figure 13: Cooling conditions of QCS-L magnet-cryostat.

5. 今後の試験及び運転予定

QCS-R マグネットクライオスタットの冷却システムへの接続工事は 2017 年 3 月に完了した。2017 年 5 月～8 月にかけて、QCS-L/R の 2 台のクライオスタットを Belle-II 測定器と組合せ、実運転状態で冷却・励磁試験、磁場測定を行っている。これまで、全ての磁石の励磁試験に成功した。磁場測定は進行中の為、結果については今後報告していく。

QCS システムを組み込んだ SuperKEKB Phase-II の運転は 2018 年 2 月開始を予定している。

参考文献

- [1] N. Ohuchi *et al.*, *Proc. of NA-PAC' 13*, Pasadena, Sept. 2013, pp. 759-761; <http://www.JACoW.org>
- [2] N. Ohuchi *et al.*, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 25, No. 3, 4001202, June 2015.
- [3] N. Ohuchi *et al.*, *Proc. of IPAC' 16*, Busan, May 2016, pp. 1174-1176; <http://www.JACoW.org>
- [4] B. Parker *et al.*, *Proc. of NA-PAC' 13*, Pasadena, Sept. 2013, pp. 1241-1243; <http://www.JACoW.org>
- [5] K. Tsuchiya *et al.*, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 37, 1992, pp. 667-674.