

■ 研究紹介

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム (QCS) の建設

KEK 加速器研究施設

大内 徳 人

norihito.ohuchi@kek.jp

2018 年(平成 30 年)8 月 9 日

1 はじめに

SuperKEKB[1]はルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を設計値とした加速器で、先代器 KEKB の 40 倍のルミノシティを目指して建設された。SuperKEKB は、2015 年 2 月～6 月に 7 GeV の電子ビームと 4 GeV の陽電子ビームによる Phase-1 運転[2]を行い、ビーム最終集束用超伝導電磁石システム(QCS¹)以外の加速器機器の運転調整を行った。2018 年 3 月からは QCS を組込んだ Phase-2 運転[3]を開始し、ビーム衝突型加速器としての基本的な性能を確認した。QCS は、ビームサイズを衝突点で 50 ナノメートルまで絞り込む超伝導電磁石システムで、設計ルミノシティを実現するためのもっとも重要な装置である。

SuperKEKB の先代器である KEKB は、1999 年 10 月ビーム運転を開始し 2010 年 6 月にシャットダウンするまで加速器としての性能を高める努力を続けた結果、そのルミノシティは世界最高を更新し続けた。この KEKB の性能を超える加速器の検討が始まったのは 2001 年で、ビーム最終集束システムは KEKB の衝突点機器の設計をベースに進められた。超伝導 4 極電磁石の R&D 機[4]も製作されたが、 $1 \times 10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ レベルのルミノシティを達成するために 2009 年にイタリアの SuperB グループが提案する「Nano-beam colliding scheme」[5]を採用することになった。このため、ビーム衝突点の設計は最初からやり直すことになった。本稿では、まず KEKB アップグレード用に検討された QCS について簡単に説明し、その後 SuperKEKB メインリングに Phase-1 運転後に組込まれた QCS システムについて、超伝導電磁石設計と製作、建設時の困難、海外との研究協力について述べる。

2 SuperKEKB 用ビーム衝突点超伝導電磁石

2.1 初期設計

KEKB アップグレードのためのビーム最終集束用超伝導 4 極電磁石の設計は、2002 年から KEKB と同じシステム構成を元に基本的な検討を始めた。当時の検討会での資料を図 1 に示した。このシステムでは、内径の大きな超伝導 4 極電磁石のボアー内を通過する電子・陽電子ビームを集束

し、30mrad の交差角で衝突させる設計であった。このため、磁石ボアー内径は $\phi 180 \text{ mm}$ で、衝突点(Interaction Point; IP)により近い位置に設置し、必要とする積分 4 極磁場も KEKB より 1.65 倍強い設計となっていた。この 4 極磁石は 6 層の超伝導コイルから構成されており、磁石の励磁電流値を下げることでヘリウム(He)冷凍機システムへの熱負荷の影響も KEKB とほぼ同じ条件となるように設計された。システムを構成する超伝導電磁石の総数は 10 台であった。この超伝導 4 極電磁石の R&D 機 (図 2) が製作され、励磁・磁場試験も行われた。

Super-KEKB QCS Position and Field Gradient

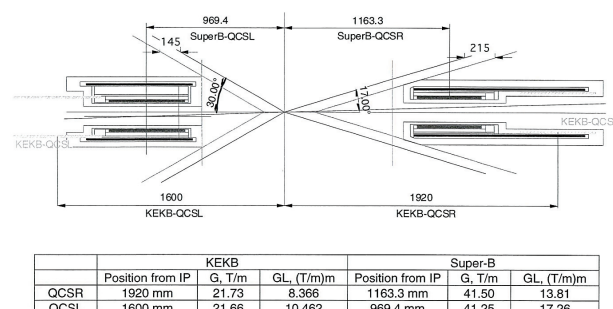


図 1 KEKB アップグレード用超伝導電磁石システム



図 2 KEKB アップグレード用に開発された R&D 超伝導 4 極電磁石

2.2 最終集束用超伝導電磁石システム

「Nano-beam colliding scheme」に対応可能な超伝導 4 極電磁石の設計を開始したのは 2009 年 4 月からである。この 4

¹ Quadrupole magnet for Collision in Superconductivity

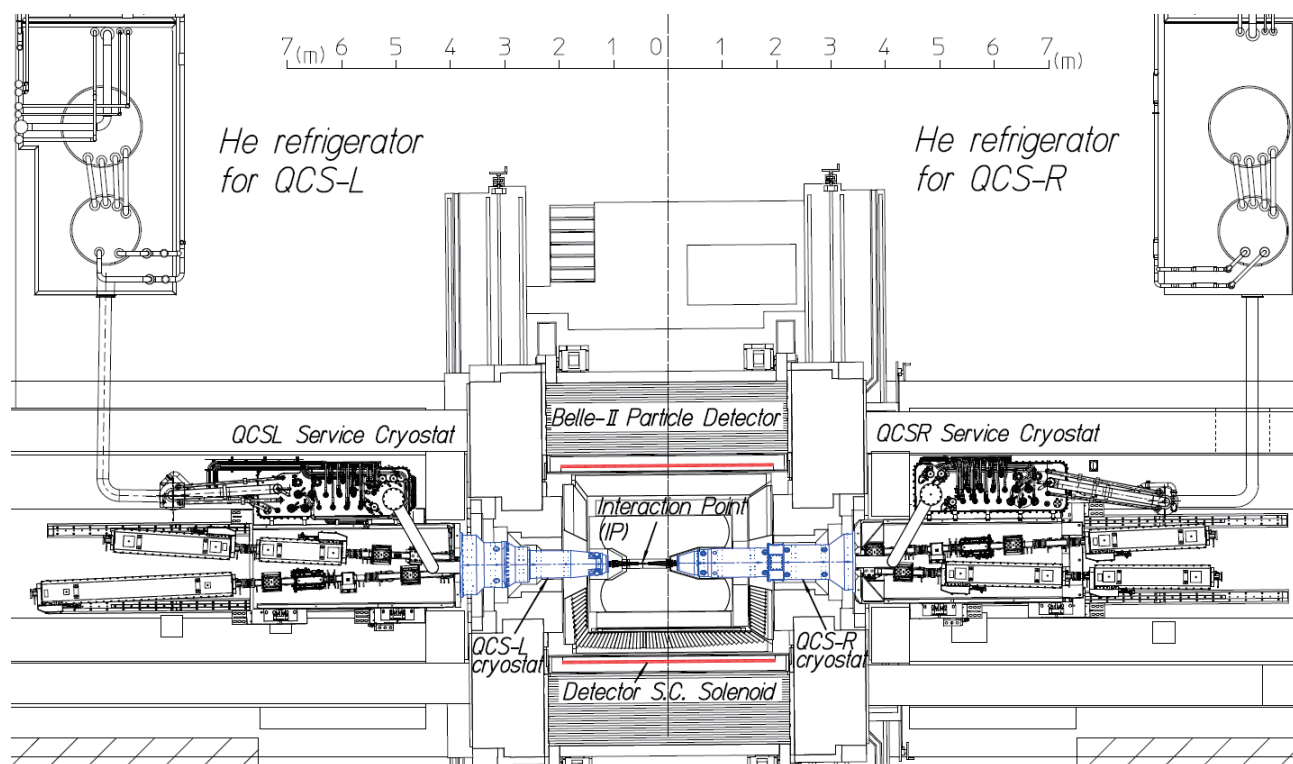


図3 SuperKEKB ビーム衝突点概略図

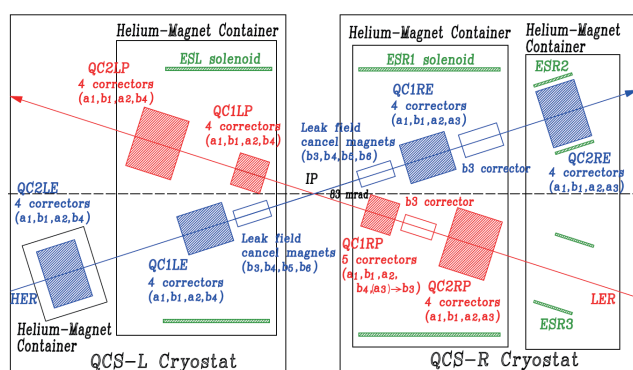


図4 ビーム最終集束用超伝導電磁石システム

極電磁石の設計には、厳しい2つの設計条件が課せられていた。これらは、

1) Belle-II 検出器[6]の建設を進めるため、検出器と加速器の境界条件はKEKBと全く同じとする、

2) 超伝導4極電磁石は可能な限りIPに近づける、であった。この条件は、素粒子検出器との空間的な境界条件はKEKBと同じで、当時世界最高のルミノシティを記録していたKEKBより40倍高い性能をもつ加速器を設計することを意味していた[7,8]。この条件で設計されたSuperKEKBビーム衝突点の加速器機器とBelle-II検出器(水平断面図)の概略図を図3に示す。ビーム最終集束用超伝導電磁石は、IPを挟んで2台のクライオスタットに組込まれている[9]。この2台のクライオスタットは、Belle-II検出器内に設置されることから、検出器用超伝導ソレノイド(Belle-IIソレノイ

ド)の発生する1.5 Tの磁場中でQCSは励磁される。クライオスタットには室温のビームパイプが組込まれ、このパイプのIP側は、SVD/PIXEL検出器が取付けられたIPチェンバーと接続され、反IP側は加速器ビームパイプと接続されている。図3に示すように、クライオスタット後方の加速器ビームパイプには常伝導電磁石が配置され、一部の常伝導電磁石はクライオスタットを反IP側で支持する移動架台上に精密に設置されている。クライオスタット内の超伝導電磁石の構成を図4に示した。陽電子ビームと電子ビームは、IPで83mradの大きな交差角を持つ。QCSシステムは総数55台の磁石から構成され、2台のクライオスタットに分割・収納されている。超伝導電磁石の内訳は、ビーム最終集束用超伝導4極電磁石8台、ビーム運転調整用超伝導補正電磁石43台、Belle-IIソレノイド磁場キャンセル用超伝導ソレノイド電磁石4台である。IP右側のクライオスタット(QCS-R)には、超伝導4極電磁石4台、超伝導補正電磁石23台、超伝導ソレノイド3台が組込まれ、IP左側のクライオスタット(QCS-L)には、超伝導4極電磁石4台、超伝導補正電磁石20台、超伝導ソレノイド1台が組込まれた。1台のクライオスタット内には電子と陽電子のビームライン(High Energy Ring(HER)/ Low Energy Ring(LER))がそれぞれ配置されているが、超伝導電磁石の設計上、LER用超伝導4極電磁石QC1LPとQC1RPをIPの最も近い位置に配置し、その後方にHER用QC1LEとQC1REを配置する構成とした。QC2LP及びQC2RPは、上記QC1超伝導電磁石と同じHe容器に組込まれ、QC2LEとQC2REはその後方のHe容器

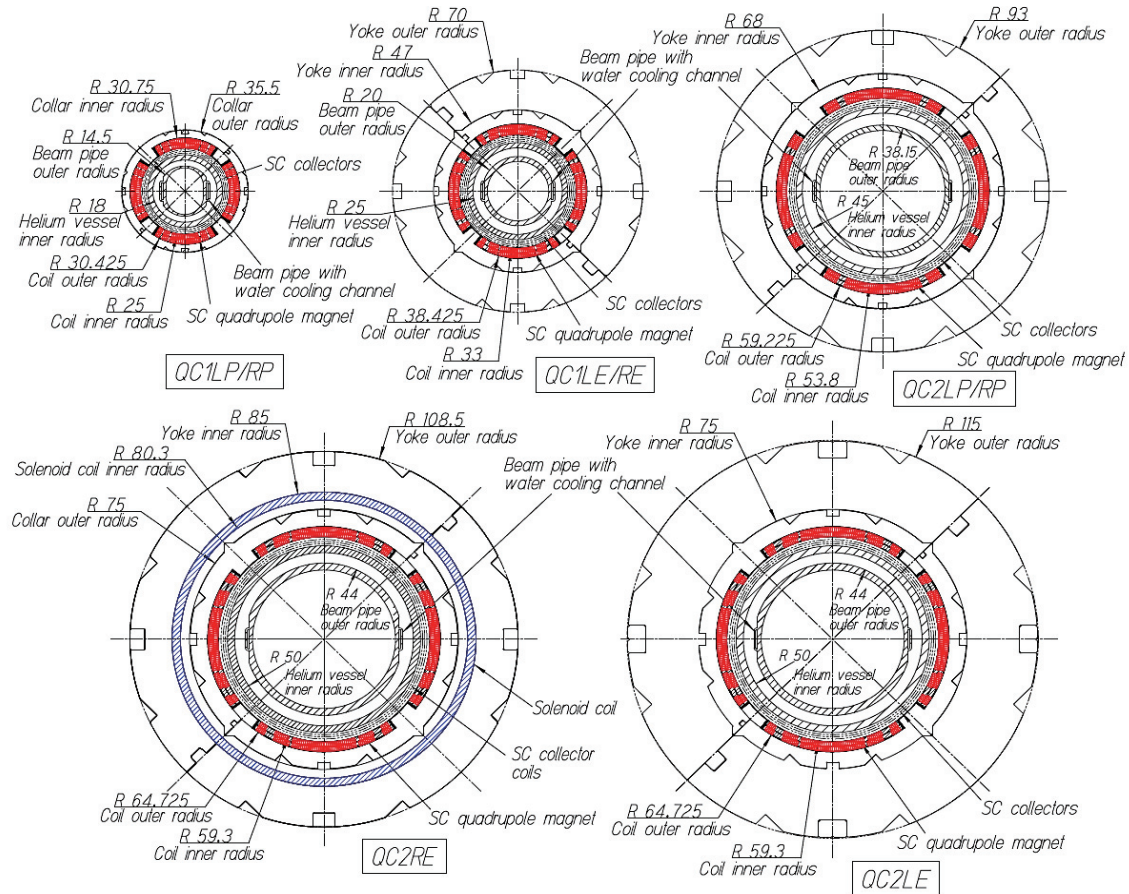


図 5 超伝導 4 極電磁石断面形状

に収納されている。各 4 極電磁石は、4～5 台の補正磁石を磁石内筒あるいは外周部に持っている。

2.3 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表 1 と図 5 に示した。超伝導 4 極電磁石は、NbTi (ニオブチタン) 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 と QC1LE/RE[10]は、実効磁場長が 400 mm 以下の小型磁石であるが、KEKB の 3 倍以上の強さの磁場勾配を発生する磁石として設計された。QC1LP/RP は磁気ヨークを持たない。この磁石の区間において補償ソレノイド (ESL, ESR1) が Belle-II ソレノイド磁場を積分的にキャンセルする。その結果、QC1LP/RP には磁石本体が発生する磁場に、Belle-II ソレノイド磁場と補償ソレノイド磁場の合成磁場が印加されることになる。QC1LP/RP 超伝導コイル上での最高磁場は、4.1 T に達する。QC1LE/RE には磁気ヨーク(パーメンジュール²)がステンレス(SUS)カラー外周部に取付けられている。SUS カラーは 4 極磁石内で発生する電磁応力に対する支持構造である。この領域は、Belle-II ソレノイド磁

場と補償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。またヨークの材質について、計算パラメータと実機との製作誤差を検討し、鉄よりも飽和磁場(Ms)の高いパーメンジュールとした。この材料の選択により、ソレノイド磁場に重畳される QC1LE/RE の磁場による磁気ヨークの飽和状態を軽減し、LER ビームラインへの漏れ磁場をビーム運転に影響のないレベルまで低減している。図 6 には QC1LP と QC1RP 用に製作された超伝導コイルを、図 7 には QC1LE を示した。QC1LE の内筒には、超伝導補正磁石 4 台が既に組込まれている。

QC2P 及び QC2E[11]は、QC1P と QC1E に比べると磁石ボア径が大きく、要求される 4 極磁場強度も小さい。超伝導コイル上での最高磁場は QC2LP/RP が 2.14 T, QC2LE/RE は 2.25

表 1 超伝導 4 極電磁石の設計パラメータ

Magnet	G T/m	L_{eff} m	Int. G T	Yoke	Position mm
QC2RE	32.41	0.419	13.6	Iron	2925
QC2RP	26.28	0.410	11.6	Perm.	1925
QC1RE	70.89	0.373	26.4	Perm.	1410
QC1RP	68.89	0.334	23.0	None	935
QC1LP	68.94	0.334	23.0	None	-935
QC1LE	72.21	0.373	26.9	Perm.	-1410
QC2LP	28.44	0.410	11.5	Perm.	-1925
QC2LE	28.44	0.537	15.3	Iron	-2700

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

² 鉄中のコバルト含有率(重量組成) = $49 \pm 0.5\%$, $M_s = 2.30$ T

T である。QC2LE/RE は共に磁気ヨークを持つが、この磁石への Belle-II ソレノイド磁場の影響が小さいことからヨークの材質は鉄を使用している。図 5 に示すように QC2LE と QC2RE の超伝導 4 極コイルの形状は同じだが、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。

2.4 超伝導補正磁石

超伝導補正磁石[12,13]は、KEKB の QCS と同様、超伝導 4 極電磁石内筒に取付けることを基本設計とした。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 [14]を用いて製作した。この技術は、接着剤を表面に塗布し

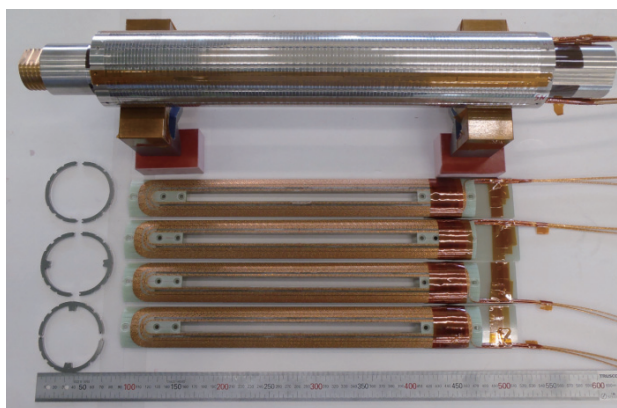


図 6 QC1LP 超伝導 4 極電磁石と QC1RP 用超伝導コイル。超伝導コイル左にあるのはコイルを固定する SUS カラーである。



図 7 QC1LE 超伝導 4 極電磁石。4 極磁石はクライオスタット内筒に固定され、内筒表面には 4 台の超伝導補正磁石が取付けられている。

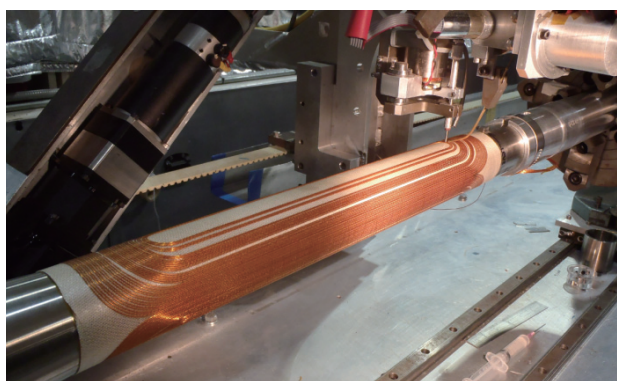


図 8 QC1RP 用補正磁石 Skew Dipole (a_1)の巻線工程(BNL にて)

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 以下の超伝導コイルを製作することが可能となり、超伝導 4 極電磁石内部に 3 台から 4 台の超伝導電磁石を層状に製作することが可能となった。図 8 には、BNL で製作中の QC1RP 用補正磁石 Skew Dipole (a_1)が示されている。パイプ表面は電気絶縁用のノーマックスシートでカバーされ、その表面に超伝導線が接着される。パイプは、He 容器内筒を兼ねており、KEK から支給されたものである。写真右上部に超伝導線の引出口と超音波による加熱部が示されている。

補正磁石の機能は、ビームに対する超伝導 4 極電磁石の磁場中心位置と 4 極磁場面との角度の調整を行う他、6 極磁場及び 8 極磁場によりビームライフ時間を長くするための補正を行う。また、QC1LP/RP から HER ビームラインへ漏れてくる磁場成分のうち、6 極～12 極磁場成分については補正磁石により磁場分布そのものを消去する。

2.5 超伝導補償ソレノイド

図 3 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 の超伝導ソレノイドが組込まれ、1.5 T のソレノイド磁場を発生させる。QCS システムは、この磁場中で励磁される。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 ソレノイド磁場の向きと反対の向きを持つソレノイド磁場を発生させる超伝導補償ソレノイド(ESL, ESR1, ESR2, ESR3) [15,16]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。これらの超伝導ソレノイドが発生するソレノイド磁場分布を図 9 に示した。図中、Belle-II ソレノイド磁石単体が発生する磁場分布を点と実線で示し、全てのソレノイド磁石が励磁された場合の磁場分布を実線のみで示した。グラフ横軸の $Z=0$ は、ビーム衝突点位置である。 $Z=0$ から ± 4 m の区間の積分ソレノイド磁場が各々ゼロになるように補償ソレノイドは設計されている。図 10、図 11 には製作が完了した ESR1 と ESL を示した。ESR1 と ESL は、写真で示すようにビーム光学上必要とする磁場分布を発生させるために、長手方向に短い複数のソレノイド磁石から構成されている。また、電子・陽電子のビームラインが 83 mrad の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。4 台のソレノイド電磁石のパラメータを表 2 にまとめた。ESR1 は、インダクタンスが運転中 8 H となり蓄積エネルギー(810 kJ)が大きく、クエンチ時の耐電圧対策として液体 He 中に低温ダイオードを 6 個使用している。ESR1 を構成する 15 個のソレノイドは 6 つのグループに分けられ、グループ毎に低温ダイオードが並列に接続されている。クエンチ時には、動

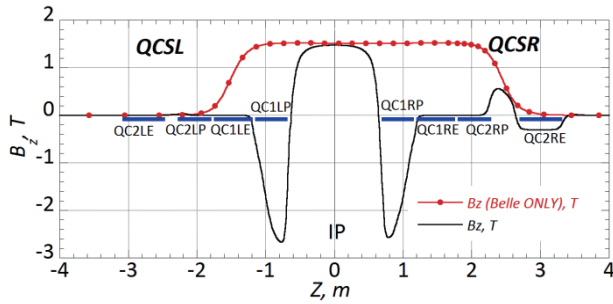


図9 ビーム衝突点でのソレノイド磁場分布。図中に超伝導4極電磁石の位置が示してある。

表2 超伝導補償ソレノイドのパラメータ

Magnet	ESL	ESR1	ESR2/3
Integral field, Tm	2.31	3.69	0.17
Operation current, A	390	450	151
Inductance, H	2.5	8.0	0.14
Max. field, T	3.4	3.2	0.48
Magnet length, mm	905	1575	720
No. of component coils	12	15	1
Total turns	4610.1	6237.1	1356
LR, %	52	51	11

LR=load line ratio at 4.7 K

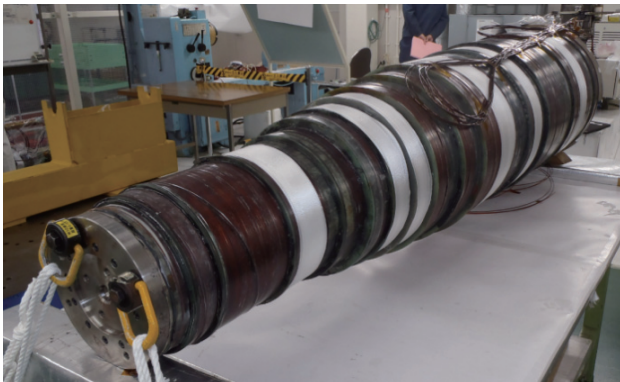


図10 ESR1 補償超伝導ソレノイド電磁石

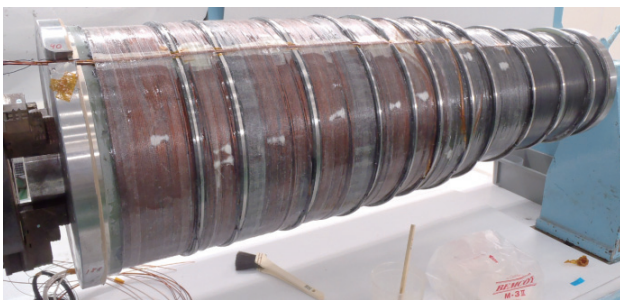


図11 ESL 補償超伝導ソレノイド電磁石

作電圧 10 V で超伝導コイルに流れている電流をダイオードに分流させ、超伝導から常伝導へ転移した部分のジュール熱による温度上昇を低減させる。

3 クライオスタットの組立と試験

3.1 クライオスタットの構成と組立

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ているが、この状態を図 12 のクライオスタット断面図で示した。図 12 に示された主な構成部品は、超伝導電磁石、磁気シールド (パーメンジュールあるいは鉄)、タングステン (W) 放射線シールド、ビームパイプ、He 容器、真空容器である。各クライオスタットの IP 側からビームパイプに QC1LP/RP, QC1LE/RE, QC2LP/RP が 1 つの He 容器内に組込まれ、その後方の He 容器に QC2LE/RE が組込まれている。

QCSL の IP 側 He 容器に組込まれる超伝導電磁石の組立途中の状態を図 13 に示した。図 13 で示された部分には、QC1LP, QC1LE, QC2LP と 16 台の超伝導補正磁石が組込まれている。これらの超伝導電磁石は、相対的に正確な位置に配置できるように SUS 或いは鉄のブロック内にはめ込まれる。製作時の各部品の組立精度は $\pm 20 \mu\text{m}$ 以内に収まるように調整されている。図 14 には上部ブロックを取付け、更に QC1RP と QC1RE が配置されている部分に W 放射線シールドを取付けた状態の QCS-R クライオスタット IP 側超伝導電磁石を示した。

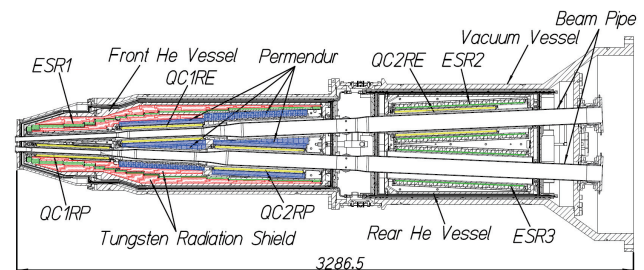
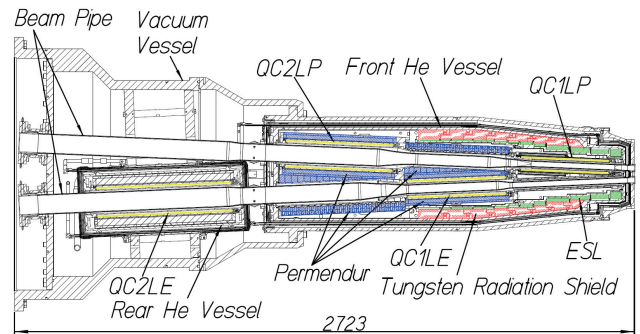


図12 QCS-L(上)とQCS-R(下)クライオスタットの水平断面図

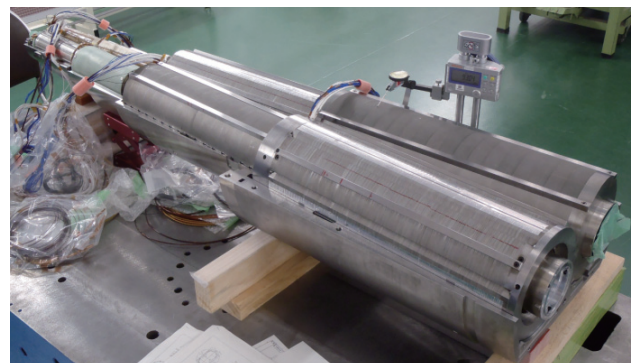


図13 QCS-L IP 側ヘリウム容器用超伝導電磁石組立

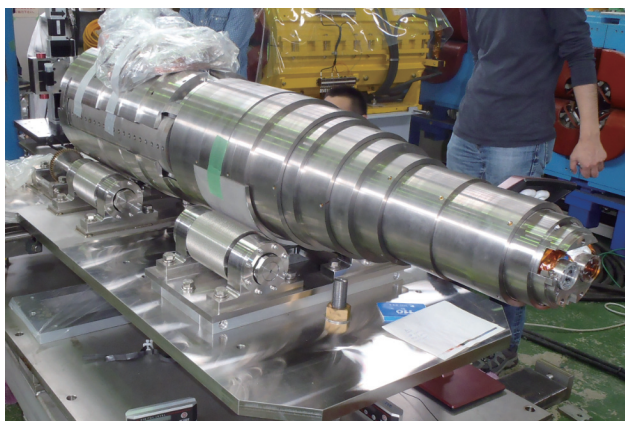


図 14 QCS-R IP 側超伝導電磁石(磁石固定用金属カバーと内層 W 放射線シールド取付け後)



図 15 QCS-R IP 側超伝導電磁石と ESR1 の組合せ(左図)と ESR1 外周部に W 放射線シールドを取付けた状態(右図)

図 14 に示された電磁石は、磁場測定により 4 極磁場中心位置を測定後、製作会社に戻して ESR1 ソレノイド内筒に挿入・固定し、更にその外周部に W 放射線シールドを組付けた。この様子を図 15 に示した。W 放射線シールドを液体 He 温度で使用するのには KEK でも初めての試みで、ノイズ発生源の直近にシールドを取付けることにより Belle-II 検出器へのバックグラウンドノイズの低減に大いに寄与している。

超伝導電磁石と W 放射線シールドは組立完了後、He 容器内に密閉され、冷却配管を溶接した後、8 本のチタン合金のロッドでクライオスタット真空槽内に保持される。He 容器外周部には、アライメント用のターゲットが加工されており、このターゲットを用いてクライオスタット外周部のアライメントターゲットとの相対位置を測定し、磁石を設計位置に固定する。図 16 にクライオスタット側の全ての組立が完了し、支持架台に取付けられた QCS-R を示した。



図 16 QCS-R クライオスタット(製作会社工場内での組立風景)

3.2 磁石製作時からクライオスタット組立までの試験

超伝導電磁石の製作・クライオスタットの組立において最も注意を払ったのは、磁石の磁場性能と耐電圧性能である。以下にこれらの性能試験について述べる。

3.2.1 磁場測定

QCS 超伝導電磁石のビームラインで作る磁場分布がビーム光学から要求される分布を正確に再現できるように、超伝導電磁石の磁場は、工場内でのコイル製作時から測定し、その性能評価が行われた。

以下に超伝導 4 極電磁石の磁場測定プロセスを示す。

- ① 4 個の超伝導コイルを SUS カラーで 4 極磁石に組立後、製作工場内でハーモニックコイルによる磁場測定(室温) [17]。
- ② 超伝導補正磁石と超伝導 4 極磁石を組合せ後、各磁場面の相対角度位置測定のためにハーモニックコイルによる磁場測定(室温)。
- ③ 磁気ヨーク取付け後、KEK の縦型クライオスタットで 4 K に冷却・励磁性能を確認後、運転電流でハーモニックコイルによる磁場測定[17,18]。
- ④ クライオスタット内での磁石位置のアライメントのために、4 極磁石の磁場中心・磁場面角度測定(図 14)。
- ⑤ 超伝導ソレノイドを組合せ(図 15)、KEK にて縦型クライオスタットに設置、液体 He 冷却後、ハーモニックコイルで磁場測定。
- ⑥ クライオスタット完成後、QCS-L については地上部実験室にてビームライン磁場測定用に製作したハーモニックコイル、Single Stretched Wire (SSW)装置[19]を用いて磁場測定。SSW 装置は米国フェルミ国立加速器研究所(FNAL)と共同開発したもので、製作に約 3 年間に要した。試験⑥では、ビームラインで使用する測定器の性能確認、QCS-R クライオスタット組立作業へのフィードバック項目の最終確認も行った。

磁石製作時に注目した高次のエラー磁場は 6 極成分である。QC1P と QC1E のプロトタイプ機の製作時に、4 極磁石の製作誤差から 6 極磁場成分が 4 極磁場の 0.1% 程度含まれることが判明した[20]。6 極磁場はビームライフ時間を急激に減少させる。プロトタイプ機の開発結果をもとに全ての

4 極磁石の断面形状を再設計した上で、当初は QCS システムへの導入を検討していなかった超伝導補正 6 極磁石を QCS-R クライオスタット側に 6 台組んでいる。

磁場測定①は磁石製作中の測定となることから、室温で行われた。測定時の通電電流値が 2 A 程度と設計値の 0.1 % であるため、測定磁場が非常に小さく、また周辺磁場の影響を受けやすいことから、プリアンプ+積分器+バックイングコイル磁場測定+正負の通電電流値測定による外部磁場の除去の処理を行った。測定結果として、製作誤差により発生する 6 極磁場成分が QC2LE 以外の 7 台の磁石において 2×10^{-4} 以下、QC2LE も 5×10^{-4} 以下であることが確認でき、次の製作工程に進むことができた。

超伝導 4 極磁石と超伝導補正磁石を組合せた後、KEK にて液体 He で冷却し磁場測定③を行った。この測定結果からも設計電流値で 6 極磁場成分は補正 6 極磁石で対応できることを確認した。

超伝導 4 極電磁石は、クライオスタットに組込まれる前に 4 極磁場中心位置と磁場面角度が測定され、磁石の外周部に加工された基準マークとの相対位置を確定する。このマークを基に、磁石をクライオスタットに組込む。この磁場測定④は、QCS-L では 4 極磁石に AC 1.1 A (97.7Hz) を通電し、静止したタンジェンシャル 4 極コイルにより行った。この測定によって、回転したハーモニックコイルより高い精度で磁場中心位置・磁場面角度データを得ることができた。QCS-R では、SSW 測定器を用いて磁場中心位置、磁場面角度測定を行った。

3.2.2 耐電圧試験

超伝導電磁石がクエンチした場合、瞬時に磁石と電源を遮断し、磁石の持つ電磁エネルギーを磁石自身の発熱と保護回路抵抗の発熱により消費する。このため、磁石には瞬間的に高い電圧が印加される。このクエンチ時の耐電圧性能を検証するために、超伝導ケーブル製作時から耐電圧試験が計画された。QCS システムでも、各磁石について耐電圧試験は行われたが、超伝導補償ソレノイドについては非常に苦労したため、今後の参考事例として説明する。補償ソレノイド ESL の耐電圧試験は以下の手順で行われた。

- ① 超伝導ケーブル製作時に空気中で DC 500 V 絶縁抵抗測定、絶縁破壊電圧 AC 10 kV 以上を確認。
- ② ソレノイドコイル巻線終了時、空気中にて DC 500 V で電気絶縁抵抗測定(2000 MΩ 以上を確認)、AC 2 kV 耐電圧試験にてコイル-巻枠間で放電が無いことを確認。
- ③ 液体 He 冷却での ESL 単体励磁試験 (@ KEK) 時の冷却前後で空気中にて DC 500 V で電気絶縁抵抗測定、空気を He ガスで置換後、室温で DC 125 V の電気絶縁抵抗測定、AC 510 V で耐電圧試験実施。励磁試験完了後、ESL を試験装置から切り離し空気中 DC 500 V で電気絶縁抵抗測定、AC 2 kV 耐電圧性能確認。

- ④ He 容器に組立後、空気中にて DC 500 V で電気絶縁抵抗測定、AC 2 kV 耐電圧試験。空気中での試験合格後、空気を He ガスで置換し DC 125 V で電気絶縁抵抗測定、AC 510 V で耐電圧試験実施。
- ⑤ クライオスタットとサービスクライオスタット接続後、空気中にて DC 500 V で電気絶縁抵抗測定、AC 1.8 kV で耐電圧試験実施。
- ⑥ クライオスタット完成後、製作工場での最終電気試験として、He 容器内及び冷却流路内の空気を He ガスで置換後、DC 125 V で電気絶縁抵抗測定、AC 500 V 耐電圧試験実施。

⑦ KEK へ搬入(2015 年 12 月 25 日)

ESL の一連の耐電圧試験の中で、②と④の試験で電気絶縁性能の劣化が見つかった。②の試験では、ソレノイドコイルを分割している巻枠フランジのエッジにより超伝導ケーブル電気絶縁が損傷を受けているのが見つかった。絶縁材が損傷した超伝導ケーブルはコイルから取外し、絶縁材の補修を行った。④の試験は、全ての超伝導電磁石、W 放射線シールドが He 容器に組込まれ、容器の溶接が完了した後に行われた。結果は、残念ながら空気中・He ガス中で放電が確認されたことから、He 容器を切断して超伝導電磁石を容器から引出し、絶縁劣化部の調査を行うことになった。絶縁劣化の原因は、W 放射線シールドを ESL ソレノイド外周部に取付けた時にエポキシで固定した超伝導ケーブルと W 部材が干渉し、電気絶縁に穴が開いたことによるものであった。このトラブルの復旧に約 2 ヶ月を要した。W 放射線シールドを ESL に取付け時に空気中での耐電圧試験を行っていれば、これほどスケジュールに影響を与えることは無かった。

電気絶縁不良の問題は ESR1 でも別の形で発生し、不良場所の特定のために He 容器の解体を行った。この場合も復旧に約 1 ヶ月要している。

4 ビームラインでの QCS システムの建設

4.1 QCS クライオスタットのビームラインへの据付

2 台のクライオスタットの内、IP 左側に設置される QCS-L は 2015 年 12 月 25 日に KEK に納品され、超伝導低温真空実験棟で 2016 年 2 月から 6 月まで冷却・励磁試験、ビームラインで使用する磁場測定装置の性能試験を兼ねた 20 台の超伝導電磁石の磁場測定を行った。その後、2016 年 8 月に筑波実験室ビームラインに据付けられた。QCS-L クライオスタットは、地下 4 階の He 冷凍機と地上部に配置された電源に接続され、2016 年 11 月～12 月に He 冷凍機による冷却試験、超伝導電磁石の通電試験及び電源調整を行った。QCS-R クライオスタットは、2017 年 2 月 13 日に KEK に納品され、当日ビームラインに据付けられた。クライオスタットと He 冷凍機との接続工事は 2017 年 3 月末までに完了した。図

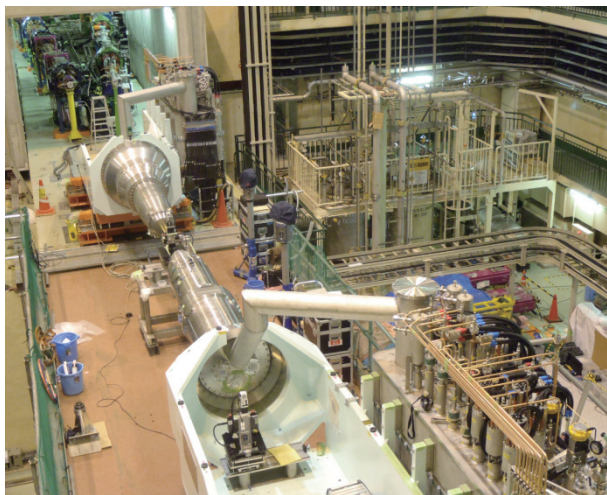


図 17 ビームラインに据付けられた QCS-L/QCS-R クライオスタット。右上に見えるのが QCS-L 用 He 冷凍機である。

17には、ビームラインに据付けられた2台のクライオスタットが示されている。2017年4月11日には Belle-II 検出器がビームラインに移動した。

4.2 ビームラインでの試験

2台のクライオスタットはビームラインへ据付け後、2017年5月～9月に冷却試験、励磁試験、磁場測定を行い、Phase-2 ビーム運転用のデータを取得した。

4.2.1 冷却試験

2台のクライオスタットを冷却するHe冷凍機は、TRISTANのQCS用[21]に1989年に製作したものである[22]。QCS-L用冷凍機はTRISTAN運転終了後、KEKBのQCS用に使用されたものを再利用した。QCS-R用冷凍機は、TRISTANの運転後、20年間保管されていたものである。QCS-Lシステムは、2016年11月～12月にQCS-Rに先行して冷却試験を行った。室温から4 Kまで磁石を冷却するのに45時間、通電可能になるまでに更に7時間を要したが、KEKBのQCS冷却ソフトに大きな変更を加えることなく冷却を完了した。QCS-Rシステムは、2017年5月15日から第1回目の冷却試験を行ったが、磁石は20 Kまでしか冷却できなかった。原因調査のため冷凍機単体冷却試験を行い、冷凍能力が建設時より20W@4.5K少ないこと、冷却タービンの流量測定用ガス回路に誤りがあったこと、冷凍機深冷部自動弁の閉止時にガスリークがあることが判明した。QCS-Rシステムは一部手動操作で冷却を行い、超伝導磁石を4 Kまで冷却し通電試験・磁場測定を完了した。自動弁のリークはPhase-2運転前に修理し、QCS-Lと概ね同じ冷却時間で室温から磁石通電可能状態まで冷却することができた。図18には修理後のQCS-Rシステムの磁石冷却状態を示した。図中TIC102はHe冷凍機出口部のHeガス温度、TI411aとTI412aはIP側容器内磁石温度、TI413aとTI414aは反IP側容器内磁石温度、LIC611は液体He貯液槽内液面高さを示してい

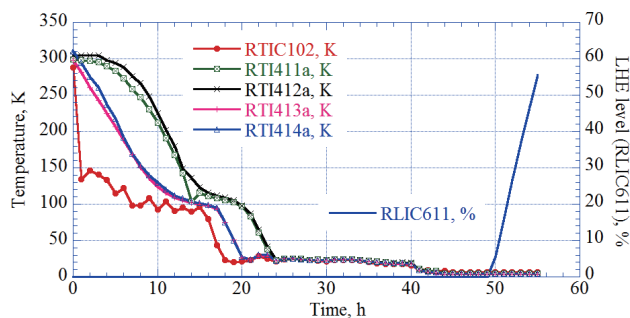


図 18 QCS-R システムの室温からの冷却時温度降下履歴

る。超伝導磁石は48時間で4 Kまで冷却され、55時間後に液体He貯液量が55 %となり安定通電が可能となった。

4.2.2 励磁試験・磁場測定

冷却試験完了後、全ての超伝導磁石の通電試験を行い電源パラメータの調整を行った。また、超伝導磁石のクエンチに対するインターロック動作も確認した。QCS超伝導磁石の励磁試験は、Belle-II超伝導ソレノイドを1.5 Tに励磁して行った。全超伝導磁石が定格電流まで励磁でき、He冷凍機を含めて冷却システムが通電時の発熱に対して安定に運転できることを確認した。

超伝導4極電磁石の最終的な磁場性能は、ビームライン上での磁場測定により評価される。特に、Belle-IIソレノイド磁場の影響は大きく、ESLとESR1にはIPから押出される方向に各々52.6 kNと35.7 kNの電磁応力が作用する。この電磁応力により、超伝導4極電磁石の位置は変位する。また、クライオスタット内部に組込まれた磁石部材への磁気的な影響も考えられる。以上の検討項目をふまえ、ビームラインでの磁場測定として、以下の測定を行った。

- ① クライオスタットをビームラインに設置後、室温でSSWによる4極磁石磁場中心・磁場面角度測定。
- ② Belle-IIをビームラインに移動後、SSWによる4極磁石磁場中心・磁場面角度測定。
- ③ ハーモニックコイルによる4極・補正磁石磁場測定。
- ④ 3軸ホール素子によるビームライン上のソレノイド磁場測定。

まず、ビームラインで行われたSSWによる磁場測定を説明する。図19に示すように、直径0.1 mmのBeCu線をQCS-LとQCS-Rクライオスタット後方で支持し、設計ビームライン上にアライメントする。BeCu線を4極磁場中で移動させ、

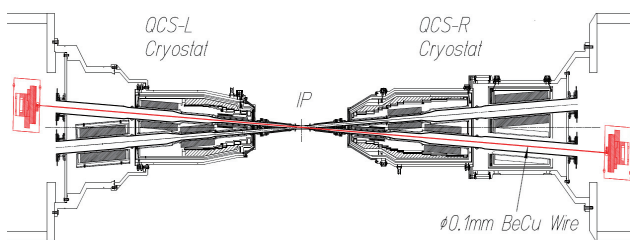


図 19 SSW 装置による磁場測定

表3 SSW 測定による4極電磁石磁場中心位置と磁場面角度

Magnet	QC1LP	QC2LP	QC1RP	QC2RP
X_{CM} , mm	0.014	-0.335	0.684	0.486
Y_{CM} , mm	-0.211	-0.692	-0.296	0.042
θ_D , mrad	-13.65	-3.725	7.204	-2.114
θ_M , mrad	-15.32	-7.77	9.22	-3.84

Magnet	QC1LE	QC2LE	QC1RE	QC2RE
X_{CM} , mm	-0.212	0.129	0.245	0.079
Y_{CM} , mm	-0.286	-0.535	-0.373	-0.581
θ_D , mrad	0.0	0.0	0.0	0.0
θ_M , mrad	-1.6	-1.54	-0.14	-0.73

X_{CM} , Y_{CM} : 4 極磁場中心の設計ビームラインからの水平・垂直方向変位測定値, θ_D , θ_M : 4 極磁場面角度設計値・測定値

BeCu 線に誘導される電圧を解析することにより, 4 極磁石の磁場中心位置と水平面に対する磁場面の角度を測定する。SSW の測定は, Belle-II 測定器がビームラインに移動する前に行われ(磁場測定①), その結果をもとに Belle-II の重量による地面の沈下分のクライオスタットの位置の補正を行った。Belle-II 励磁中で行った磁場測定②の結果を表3に示す。測定値から 4 極磁場中心位置及び磁場面の角度のビーム光学設計値からの誤差は, 超伝導補正磁石により調整することが可能な値であることを確認した。

磁場測定③では, 4 極電磁石の積分磁場測定と磁石軸方向の磁場分布測定を行った。積分磁場測定と磁場分布測定ではコイルの長さが異なり, また各磁石で要求される磁場評価半径 R_{ref} が異なることから全体で 6 個のハーモニックコイルを用いた。QC1P と QC1E は, コイル半径 12 mm の同じコイルで測定を行った。測定結果として, 8 台の 4 極電磁石積分磁場のエラー成分(多極成分)を図 20, 図 21

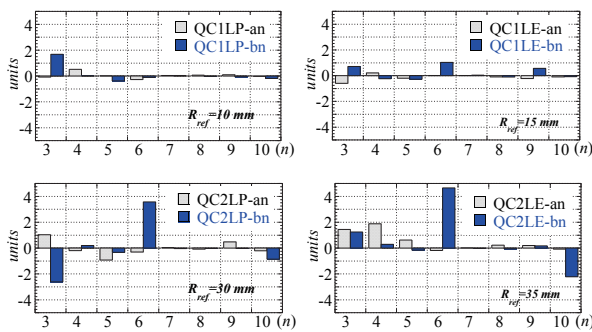


図 20 QCS-L 用超伝導 4 極電磁石磁場エラー成分

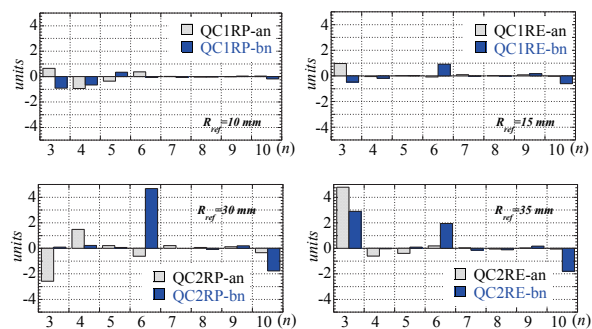


図 21 QCS-R 用超伝導 4 極電磁石磁場エラー成分

に示した。各磁石のプロットの横軸 n は $2 \times n$ 極磁場を示し, $n=3$ は 6 極磁場成分となる。縦軸(units)は図中に示した半径位置(R_{ref})での 4 極磁場成分($b_2=10000$)に対する割合である。また, 図中 a_n , b_n は各磁場成分の skew 成分, normal 成分である。ビーム運転に最も影響がある QC1 については 4 台の磁石とも R_{ref} 位置でエラー磁場成分が 2×10^{-4} 以下であり, 非常に高い精度で磁石が製作されたと評価できる。QC2 の 4 台の磁石では, 12 極成分($n=6$)と 20 極成分($n=10$)が大きい。これらの成分は磁場の 4 極対称から発生するもので, 各コイルのシステムティックな製作誤差から生じたものと考えられる。また, 6 極成分も QC1 程には制御できていない。この 6 極成分のビーム運転への影響は, 超伝導補正 6 極磁石で十分抑え込むことが出来る値であるが, Phase-2 での運転結果, 今後のビーム解析から詳細に評価される。

5 まとめ

2001 年の KEKB アップグレード検討会から始まった KEKB の次期加速器は, 「Nano-beam colliding scheme」を持つ SuperKEKB として完成した。ビーム最終集束超伝導電磁石も, 初期の設計とは全く異なる総数 55 台の超伝導電磁石で構成されるシステムとなった。特に, 超伝導 4 極電磁石は 4 つの断面形状を持ち, 磁石の製作精度, 使用される材料にも細心の注意を払った。磁気ヨーク材として採用したパーメンジュールは高価であるが, QCS のように多くの磁石を組み合せ, その磁気性能を劣化させないためには必要不可欠な材料であった。しかしながら, その脆い性質から磁石部品として要求される高い加工精度を実現するために, 材料供給会社と加工工程まで詳細な検討を行った。

また, クライオスタットまで磁石を組上げていく各工程で実施した磁場測定およびビームラインで実施した磁場測定は, これまでの経験とは異なる周辺環境, 要求される測定精度, ハードウェアの構成であった。その意味では, FNAL と共同開発した SSW は, QCS を運転する環境が非常に厳しいものであることから QCS の 4 極磁場中心位置を測定するには必要不可欠な装置であった。

QCS は非常に複雑な装置で多くの難しさと問題に直面したが, 本稿を書いている現在, Phase-2 運転は終了しビームも衝突することができた。来年 2 月から始まる Phase-3 運転に向け, これまでの測定データのより深い理解に努めたいと考えている。

謝辞

本システムの建設に当たり, 多くの困難, 問題に直面しましたが, システムを完成しビーム運転までたどり着けたことについて, 三菱電機 (株), 日立プラントメカニクス, BNL, FNAL, KEKB グループの関係者, 日米研究協力から

の支援、技術的なサポートを頂いた全ての方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Koiso, *et al.*, *Proc. of IPAC'11*, pp. 1931-1935 (2011).
- [2] Y. Funakoshi, *et al.*, *Proc. of IPAC'16*, pp. 1019-1021 (2016).
- [3] Y. Ohnishi, presented at *IPAC'18*, Vancouver, Canada, May 2018, MOXGB1; <http://www.JACoW.org>.
- [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] Belle II Technical Design Report; <https://arxiv.org/abs/1011.0352>.
- [7] K. Kanazawa *et al.*, NIM PR-A 499, pp.75-99 (2003).
- [8] N. Ohuchi *et al.*, *Proc. of NA-PAC'13*, pp.159-162(2013).
- [9] N. Ohuchi, *et al.*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 3 (2018), 4003204.
- [10] N. Ohuchi, *et al.*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 25, No. 3 (2015), 4001202.
- [11] N. Ohuchi, *et al.*, *Proc. of IPAC'16*, pp. 1174-1176 (2016).
- [12] B. Parker, *et al.*, *Proc. of NA-PAC'13*, pp. 1241-1243 (2013).
- [13] B. Parker, *et al.*, *Proc. of IPAC'16*, pp. 1193-1195 (2016).
- [14] B. Parker, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 22, No. 3 (2012), 4101604.
- [15] X. Wang, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 26, No. 4 (2016), 4102205(2016)
- [16] H. Yamaoka, *et al.*, *Proc. of IPAC'12*, pp. 3548-3550 (2012)
- [17] N. Ohuchi, *et al.*, *Proc. of IPAC'14*, pp. 2693-2695 (2014)
- [18] Y. Arimoto, *et al.*, *Proc. of IPAC'16*, pp. 3771-3773 (2016)
- [19] J. DiMarco, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 10, No. 1 (2000), pp. 127-130.
- [20] N. Ohuchi, *et al.*, *Proc. of NA-PAC'13*, pp. 1232-1234 (2013).
- [21] K. Tsuchiya, *et al.*, *Proc. of EPAC 90*, pp. 1151-1154 (1990).
- [22] M. Kawai, *et al.*, TEION KOGAKU, Vol. 50 No. 12 (2015), pp. 599-607.