

# SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム —超伝導ソレノイドのクエンチ保護とソレノイド磁場評価—

## SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR THE INTERACTION REGION OF SUPERKEKB

### - QUENCH PROTECTION AND SOLENOID FIELD OF SUPERCONDUCTING SOLENOID -

王 旭東<sup>\*,A)</sup>, 山岡 広<sup>A)</sup>, 有本 靖<sup>A)</sup>, 川井 正徳<sup>A)</sup>, 近藤 良也<sup>A)</sup>, 宗 占国<sup>A)</sup>, 土屋 清澄<sup>A)</sup>, 大内 徳人<sup>A)</sup>  
Xudong Wang<sup>\*,A)</sup>, Hiroshi Yamaoka<sup>A)</sup>, Yasushi Arimoto<sup>A)</sup>, Masanori Kawai<sup>A)</sup>, Yoshinari Kondou<sup>A)</sup>, Zhanguo Zong<sup>A)</sup>,  
Kiyosumi Tsuchiya<sup>A)</sup>, Norihito Ohuchi<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

A superconducting magnet system of the SuperKEKB in the interaction region consists of eight quadrupole magnets, four compensation solenoids and 43 corrector magnets. They are installed inside of the particle detector, Belle II, which has a superconducting solenoid generating 1.5 T in the magnet center. The four superconducting compensation solenoids produce the magnetic field with the opposite direction to the Belle II solenoid field to reduce the X-Y coupling of the collision beams and achieve the high luminosity of  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . The superconducting compensation solenoids are wound with a 1.5-mm-thick and 1-mm-wide NbTi wire, which has a critical current of 1.8 kA at 4.2 K and 4 T. The construction and performance test of compensation superconducting solenoids have been completed. In this paper, the quench protection and solenoid field on the beam line of the four superconducting compensation solenoids are presented.

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、電子・陽電子ビーム衝突型加速器 KEKB のアップグレード (SuperKEKB) を 2010 年から行っている。SuperKEKB の特徴は、KEKB 加速器が到達した世界最高の衝突効率を更に 40 倍高め物理実験の精度を高めようとするものである[1]。衝突領域 (IR) の Belle II 測定器とビーム最終集束用超伝導電磁石 (QCS) システムの概略図を Fig. 1 に示す[2-9]。SuperKEKB 加速器のビーム衝突領域に設置される Belle II 測定器のソレノイド磁石は、ビームライン上に 1.5 T を発生させ、83 mrad の交差角を持つビームの衝突性能を著しく劣化させる。このため、ビームライン上のソレノイド磁場の積分値をゼロとするように、Belle II のソレノイド磁場と逆方向の磁場を発生するために、ビーム最終集束用超伝導電磁石システムに 4 台の超伝導補償ソレノイドが組み込まれている。ビーム最終集束用超伝導電磁石システムの磁石配置を Fig. 2 に示す。8 台の超伝導 4 極電磁石 (QC1, QC2) は、ビーム最終収束用に構成され、ビーム運転調整用には 43 台の超伝導補正多極磁石が使用される。4 台の超伝導補償ソレノイド (ESL, ESR1-3) は、ビームライン上のソレノイド磁場の積分値をゼロとするように用いられる。これらの超伝導電磁石は、ビーム衝突点 (IP) の左右に置かれる 2 台のクライオスタット (QCS-L, QCS-R) に組込まれる。本発表は、超伝導補償ソレノイドのクエンチ保護設計と実機を用いた試験結果と、ホールプローブによるソレノイド磁場の測定結果と解析評価について報告する。

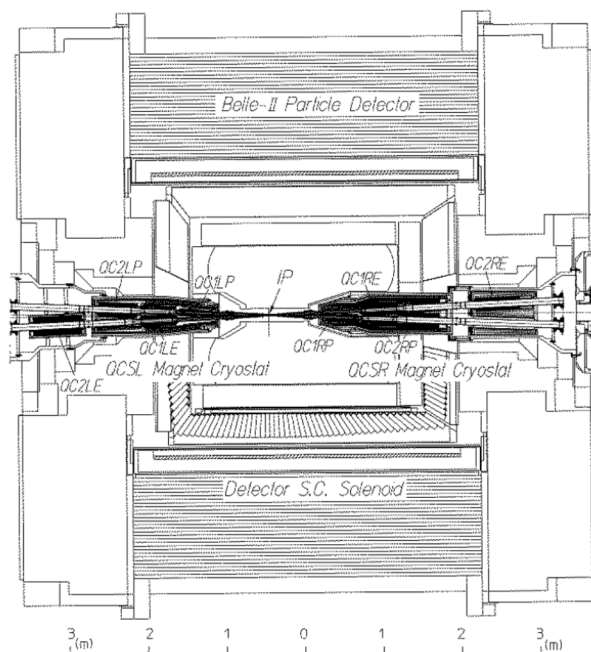


Figure 1: Horizontal cross-section view of the final focusing superconducting magnet system and the Belle II detector.

<sup>#</sup> wanxdon@post.kek.jp

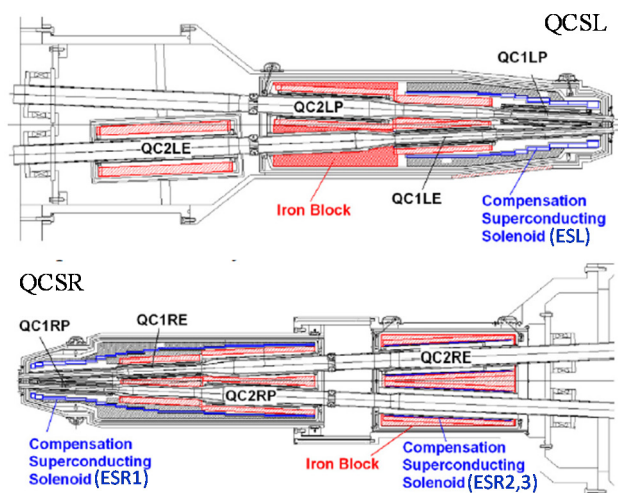


Figure 2: Schematic cross-section view of the QCS-L and QCS-R magnet cryostats.

## 2. 超伝導補償ソレノイドの諸元

超伝導補償ソレノイドに用いた NbTi 超伝導線の諸元を Table 1 に示す。NbTi 超伝導線は、直径  $19\ \mu\text{m}$  のフィラメントを 1500 本束ねた構造である。超伝導補償ソレノイドのクエンチ保護のため、NbTi 超伝導線の銅比は 1.7 とした。絶縁加工した NbTi 超伝導線の幅と厚さはそれぞれ 1.48 mm と 1.03 mm である。NbTi 超伝導線の臨界電流の実測値は、4.2 K、5 T の下で 1.46 kA である。

ANSYS を用いて Belle II ソレノイドと超伝導補償ソレノイドおよび磁気ヨークの 3 次元モデルを構築し、必要な磁場分布から超伝導補償ソレノイドのコイル形状を決定した[2]。Belle II ソレノイド単独の場合と超伝導補償ソレノイドを含めた中心軸上の磁場 ( $B_z$ ) 分布を Fig. 3 に示す。Belle II の超伝導ソレノイドが発生する  $B_z$  は正として、ESL と ESR1-3 はそれをキャンセルするため負方向となる。IP が原点である。IP 付近は Belle II の超伝導ソレノイドが発生する 1.5 T のソレノイド磁場が支配的であり、± 0.5 m 付近から ESL と ESR1 の反対向きの磁場によって急激な磁場変化がある。ソレノイド磁場の積分値は衝突点から ± 4 m の領域でゼロとするように ESL と ESR1-3 は設計された。以上の必要磁場と空間的制約により、ESL は 12 個のコイルブロック (Coil 1-12) に分割し、ESR1 は 15 個のコイルブロック (Coil 1-15) に分割し、ESR2 と ESR3 はそれぞれ 1 つのコイルで設計した。超伝導補償ソレノイド (ESL, ESR1-3) のコイル諸元を Table 2 に示す。各超伝導補償ソレノイドの定格電流は ESL が 390 A、ESR1 が 450 A、ESR2 と ESR3 が 151 A である。ESR2 と ESR3 は定格電流が同じであるので、直列接続して 1 回路で励磁する構成である。蓄積エネルギーは ESL が 110 kJ、ESR1 が 448 kJ、ESR2 と ESR3 が 1.6 kJ である。ソレノイド磁場によって QCS のヨークの飽和状態が変化するため、超伝導補償ソレノイドのインダクタンスは励磁電流とともに変化し、蓄積エネルギーもその影響を受ける。ESL と ESR1 のロードラインを Fig. 4 に示す。超伝導補償ソレノイドの負荷率は、Fig. 4 のロードラインと 4.7 K の NbTi 超伝導線の臨界電流から、ESL と ESR1

Table 1: Parameters of NbTi Wire

Filament diameter	19 $\mu\text{m}$
Number of filaments	1500
Width	1.48 mm (bare 1.38 mm)
Thickness	1.03 mm (bare 0.93 mm)
Cu/S ratio	1.7
RRR of Cu	171
Critical current at 5 T, 4.2 K	1462 A

Table 2: Specifications of Superconducting Solenoids

	ESL	ESR1	ESR2, 3
Number of coil blocks	12	15	1
Magnet length	0.905 m	1.575 m	0.72 m
Operating current	390 A	450 A	151 A
Stored energy	110 kJ	448 kJ	1.6 kJ
Inductance at operating current	2.53 H	8.81 H	0.14 H
Maximum field in the coil	3.4 T	3.2 T	0.48 T
Load line ratio	0.51	0.51	0.11

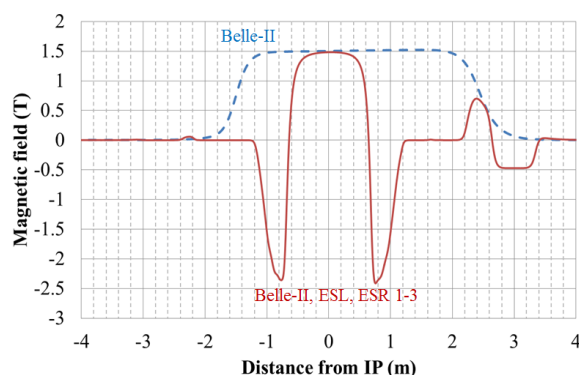


Figure 3:  $B_z$  profile of the Belle II solenoid (dotted line) and all solenoids (solid line) on center axis.

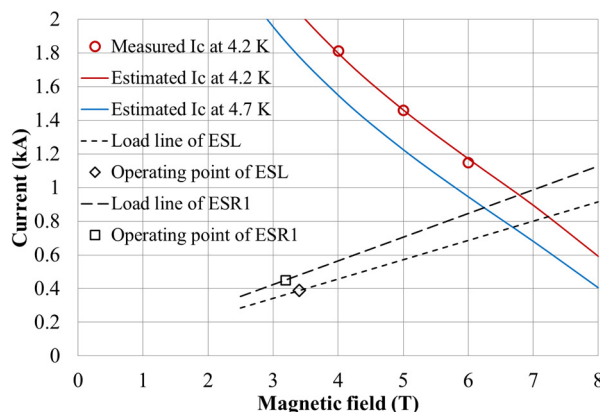


Figure 4: Load lines of ESL and ESR1, measured (plot) and estimated (dotted line) critical current of NbTi wire.

が 0.51、ESR2 と ESR3 が 0.11 である。なお、QCS は過冷却の単層液体ヘリウムによって上限 4.7 K で冷却される。Figure 4 の実線は近似式より計算した 4.2 K と 4.7 K の臨界電流である。

### 3. クエンチ保護

#### 3.1 保護設計とクエンチ解析

クエンチ保護設計は外部抵抗保護法を用いて行った。対地電圧が±200 V 以内となるように、ESL の保護抵抗は 0.929 Ω、ESR1 は 0.828 Ω、ESR2-3 は 2.381 Ωと決定した。保護回路の構成は、クエンチ時の最大温度が 200 K 以内となるように設計した。ESL と ESR1 の保護回路を Fig. 5 に示す。ESR2-3 は蓄積エネルギーが小さく、単純な保護回路であるため本報告では省略する。ESL と ESR1 は、一部コイル (IP 側先端部分) の電流を微調整できるようにするため、磁石全体を 2 分割して主電源と補助電源で通電する回路となっている。それらの保護抵抗 R1 と R2 は、対応するコイルグループのインダクタンスの比率で決定し、接地抵抗 Re の中点で接地することで対地電圧を抑えるようにした。ESL のクエンチ最大温度は、保護抵抗のみで 200 K 以内に抑えることができたが、ESR1 の場合は保護抵抗のみでは不十分のため、各コイルブロックの蓄積エネルギーの大きさに応じて磁石全体を 6 分割し、保護ダイオード (D1-D6) と並列接続して、クエンチ後に電流が保護ダイオードへ迂回できるように設計した。なお、保護ダイオードの順方向動作電圧は約 10 V であり、動作後定常状態で約 2 V となる。

クエンチ解析は、回路解析と熱解析を交互に計算するように逐次連成した[7]。ESL と ESR1 の各コイルブロックのクエンチ時最大温度を Fig. 6 に示す。回路解析において、クエンチ検出器の検出電圧 (1 V) と検出時間 (10 ms)、電源の遮断遅れ時間 (30 ms)、鉄ヨークの飽和によるインダクタンスの変化、ESR1 の保護ダイオードの電気特性を考慮した。熱解析においては、各コイル単体が一樣にクエンチすると仮定し、断熱境界としてコイル間に熱伝播は無く、コイル単体のエンタルピーから温度上昇を計算した。また、クエンチ解析の初期温度は 4.2 K として、各物性値の温度依存性を考慮した。

#### 3.2 励磁試験

励磁試験は、実機の超伝導補償ソレノイドをそれぞれ空心の状態で縦型クライオスタット内に設置して、4.2 K 液体ヘリウム浸漬冷却の下で行った。各超伝導補償ソレノイドを定格電流まで通電し、異常なく定格まで励磁できることを確認した。また、クエンチ検出器より強制遮断信号を電源へ送り、遮断時の磁石電圧に異常がないことや、その後の再励磁で定格電流まで通電できることを確認した。

設計とほぼ同じ保護抵抗 (0.9 Ω) を用いた ESL の遮断試験の結果を Fig. 7 に示す。磁石両端電圧は計算通りに遮断直後で -364 V となった。中点接地より対地電圧はその半分となるので、設計条件の ±200 V 以内となる。遮断開始から電流が 36.8% となった時間は約 0.91 s であり、遮断後の常伝導抵抗発生によって保護抵抗のみで計算した時定数 1.32 s に対して 0.41 s 短くなっている。磁石両端電圧から推定した磁石平均温度は最大 72 K

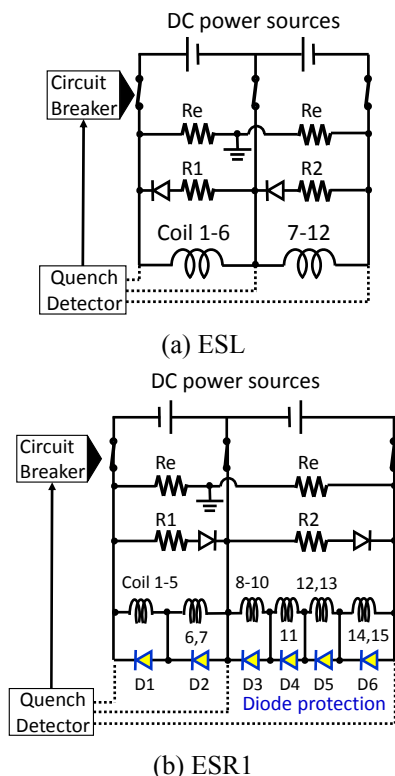


Figure 5: Dump circuit of (a) ESL and (b) ESR1.

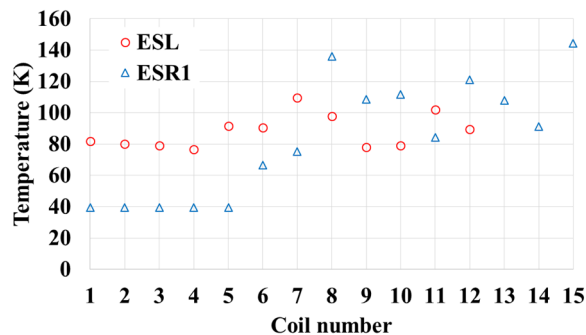


Figure 6: Simulation results of maximum quench temperature of each coil block of ESL and ESR1.

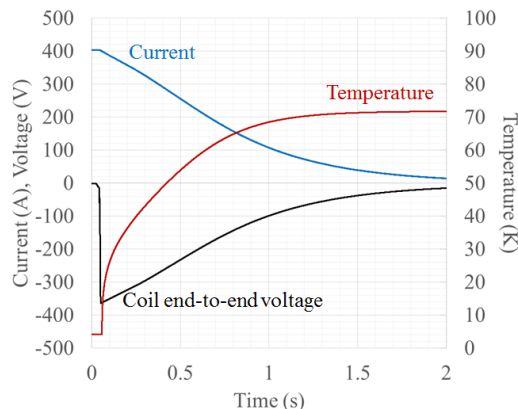


Figure 7: Dump test result of the current, coil voltage, and estimated temperature of ESL.

であり、Fig. 6 の断熱条件の解析結果とほぼ一致する。よって、ESL の保護設計に用いた解析モデルの妥当性を検証できた。実験結果より、ESL の全蓄積エネルギーの内約 35% が磁石で消費されることが明らかとなった。

保護ダイオードを追加した ESR1 の保護設計を検証するため、ヒーター誘導による ESR1 単体のクエンチ実験を行った。6 分割した ESR1 の Coil 4, 7, 8, 11, 12, 14 それぞれにヒーターを取り付けて、各分割でのクエンチ発生を模擬した。各分割の両端電圧、ヒーター取り付け部の温度、保護ダイオード回路の電流を測定して解析との比較を行った。なお、保護抵抗は  $0.9 \Omega$  を用いて実験を行った。Coil 4 のヒーターを動作させたときの Coil 1-5 の両端電圧、遮断電流、Coil 1-5 の電流、D1 への迂回電流、クエンチ温度について実験と解析結果を Fig. 8 に示す。なお、クエンチ検出の検出電圧は 1 V、検出時間は 10 ms と設定しており、Fig. 8 の 0 s はトリガ出力した時間である。ヒーター投入後に、Coil 1-5 間の電圧が上昇して検出電圧を 10 ms 以上継続して超えたため、クエンチ検出器から電源へ遮断信号が送られて、電流減衰が始まった。遮断後に Coil 1-5 間電圧が保護ダイオードの順方向動作電圧約 10 V を少し超えたところで、Coil 1-5 の保護ダイオード D1 への電流迂回が始まり、Coil 1-5 間電圧は約 2 V に抑えられている。実験結果より、D1 への迂回電流は最大で約 165 A となっている。Coil 1-5 の電流が保護抵抗の遮断電流よりも速く減衰して、Coil 4 の発熱を緩和した結果、クエンチ温度は最大で約 50 K に収まっている。クエンチ解析は、実験の回路を模擬して断熱条件で行ったため、液体ヘリウム浸漬冷却の実験結果より温度上昇は高いが、定性的によく一致しており、ESR1 の保護設計に用いた解析モデルの妥当性を検証できた。

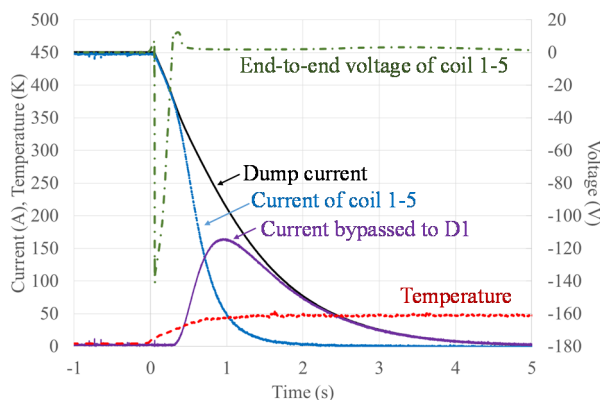
## 4. ビームライン中心軸上のソレノイド磁場

### 4.1 磁場測定

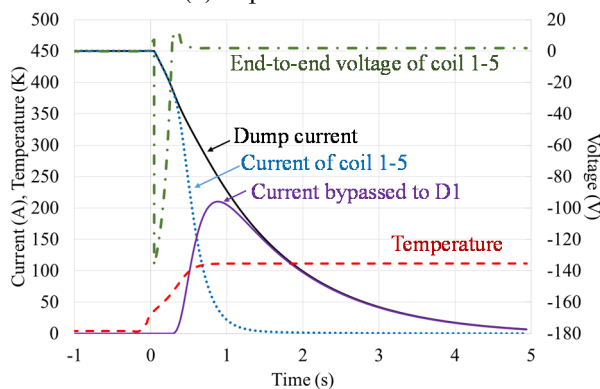
磁場測定装置の写真と測定システムの概略図を Fig. 9 に示す。ドライブモーターで走行するステージ上に、ホールプローブ固定用のアルミニウムロッドを取り付けた台座があり、IP (Fig. 1 参照) に向かってビームライン中心軸上を走査し、ビームライン中心軸に沿ったソレノイド磁場成分 ( $B_z$ ) を測定した。ホールプローブは Lakeshore 社製の MMZ-2502-UH を用いて、ロッドの先端にあるアルミニウムホルダーにより固定した。測定中の台座の位置は磁気センサーにより測定し、測定開始位置と終了位置でのレーザートラッカーの測量結果と合わせることで、IP を原点としてビームライン軸を z 方向とする座標系を構成した。

### 4.2 測定結果と設計値との比較

磁場測定は、Belle II の超伝導ソレノイドを定格電流 4096 A まで励磁した後に、ESL を 404 A (初期設計値、最終値 390 A)、ESR1 を 450 A、ESR2-3 を 151 A までそれぞれの定格電流設計値まで励磁してから行った。ドライブモーターにより 10、20 mm 間隔でホールプローブを移動させ、ホールプローブからの磁場測定値と磁気センサーからの台座位置情報をあわせてビームライン軸上の

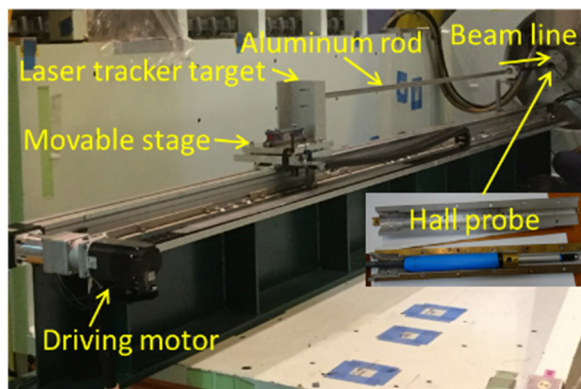


(a) Experimental result

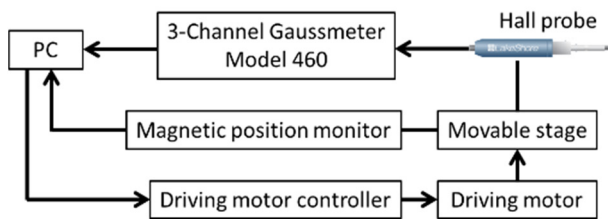


(b) Simulation result

Figure 8: Quench result of coil 4.



(a) Experimental setup

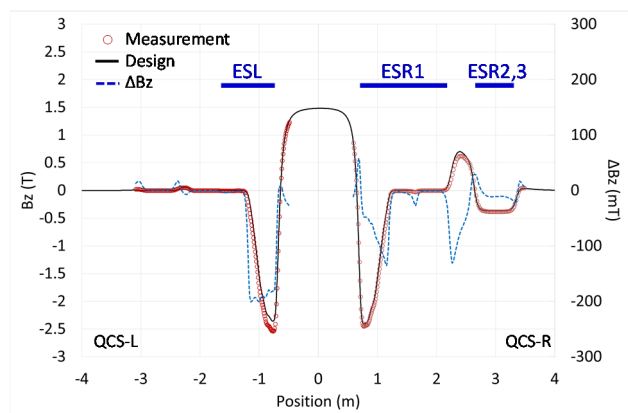


(b) Measurement system

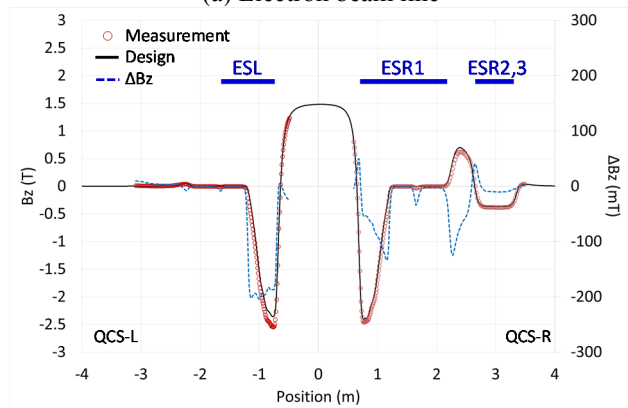
Figure 9: (a) Experimental setup and (b) measurement system of solenoid field measurements.

$B_z$  分布を評価した。磁場解析は、ソレノイド磁場に影響する Belle II の超伝導ソレノイドおよび磁気ヨーク、ESL と ESR1-3 およびその内側にある磁気ヨークの 3 次元モデルを構築して、ANSYS によりビームライン軸上の磁場分布を評価した。

電子と陽電子ビームラインの中心軸上の軸方向磁場分布 ( $B_z$ ) を Fig. 10 に示す。プロットが測定結果、実線が設計値、点線がそれらの差分である。参考として、ESL と ESR1-3 の位置関係を図中に示す。測定と設計磁場の比較から、電子と陽電子ビームラインの ESL 部分の  $B_z$  分布がともに最大 200 mT のずれがある。これは、測定に用いた ESL の励磁電流が設計電流より大きいためである。設計値と照合した結果、ESL の定格電流は 390 A となることがわかり、実運転へフィードバックした。確認のため、ESL の電流値を測定に用いた 404 A で解析した電子と陽電子ビームラインの中心軸上の軸方向磁場分布 ( $B_z$ ) を Fig. 11 に示す。ESL の励磁電流を 404 A として解析したソレノイド磁場分布の測定値と解析値はよく一致しており、測定と解析の積分磁場の差分は電子ビームラインで 97.7 mT·m、陽電子ビームラインで 98.6 mT·m である。今後は、SuperKEKB の Phase-2 試験運転の結果より、光学補正の必要に応じて ESL と ESR1-3 の電流値を微調整する可能性がある。

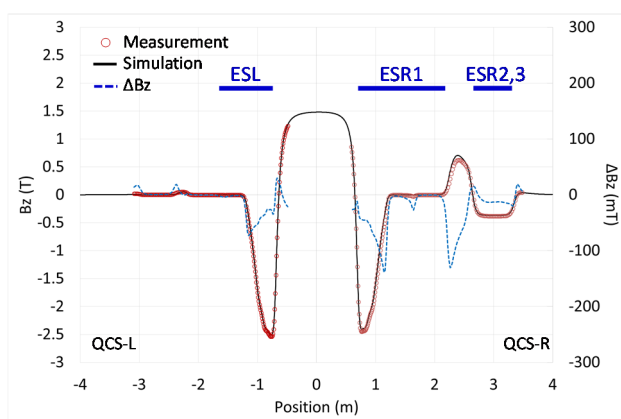


(a) Electron beam line

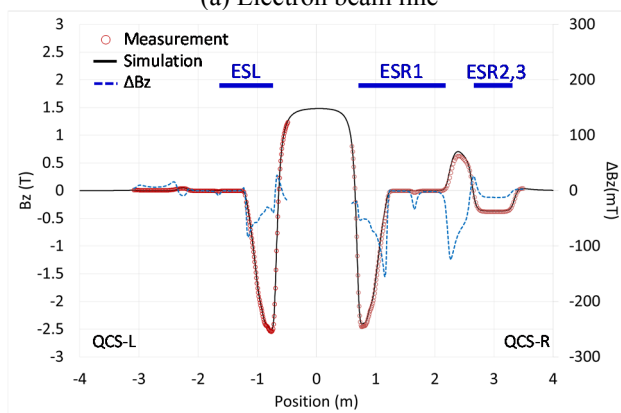


(b) Positron beam line

Figure 10: Solenoid field on the center axis of the (a) electron and (b) positron beam line.



(a) Electron beam line



(b) Positron beam line

Figure 11: Solenoid field on the center axis of the (a) electron and (b) positron beam line when ESL is energized to 404 A.

## 参考文献

- [1] H. Koiso *et al.*, “Collider for B-factories,” in Proc. Int. Part. Accelerator Conf., San Sebastian, Spain, 2011, pp. 1931–1935.
- [2] H. Yamaoka *et al.*, “Solenoid Field Calculation of the SuperKEKB Interaction Region,” Proc. of IPAC2012, New Orleans, May 2012, pp. 3548-3550.
- [4] N. Ohuchi *et al.*, “Design of the Superconducting Magnet System for the SuperKEKB Interaction Region,” Proc. of NA-PAC’13, Pasadena, September 2013, pp. 759-761.
- [5] B. Parker *et al.*, “Superconducting Corrector IR Magnet Production for SuperKEKB,” Proc. of NA-PAC’13, Pasadena, September 2013, pp. 1241-1243.
- [6] N. Ohuchi *et al.*, “Magnetic Field Measurement System for the SuperKEKB Final Focus Superconducting Magnets,” Proc. of IPAC2014, Dresden, June 2014, pp. 2693-2695.
- [7] X. Wang *et al.*, “Design and Performance Test of a Superconducting Compensation Solenoid for SuperKEKB,” IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 26, 2016, Art. no. 7428861.
- [8] N. Ohuchi *et al.*, “Design and construction of the QC2 superconducting magnets in the super KEKB IR,” in Proc. Int. Part. Accelerator Conf., Busan, South Korea, 2016, pp. 1174–1176.
- [9] N. Ohuchi *et al.*, “Design and Construction of the Magnet Cryostats for the SuperKEKB Interaction Region,” IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 28, 2018, Art. no. 8187663.