PASJ2019 FRPH038

SuperKEKB Phase-2・3ビーム運転での最終集束用超伝導電磁石の クエンチについて

QUENCHES OF THE FINAL FOCUS SUPERCONDUCTING MAGNETS IN THE SuperKEKB PHASE-2 AND PHASE-3 BEAM OPERATIONS

大内徳人^{#, A)}, 王旭東^{A)}, 有本靖^{A)}, 植木竜一^{A)}, 川井正徳^{A)}, 宗占國^{A)}, 山岡広^{A)}, 土屋清澄^{A)}, 中村衆^{A)}, 大木俊征^{A)}, 青木香苗^{A)}

Norihito Ohuchi^{#, A)}, Xudong Wang^{A)}, Yasushi Arimoto^{A)}, Ryuichi Ueki^{A)}, Masanori Kawai^{A)}, Zhanguo Zong^{A)},

Hiroshi Yamaoka^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Shu Nakamura^{A)}, Toshiyuki Oki^{A)}, Kanae Aoki^{A)}

A) KEK

Abstract

The beam final focus system (QCS) was installed in the interaction region of SuperKEKB in March 2017. SuperKEKB with QCS was operated from 19th March, 2018, and the 4-month-operation was performed twice as the Phase-2 and Phase-3 commissioning. During the operations, the superconducting magnets in QCS were quenched 28 times by beams, and 4 times by the power converter troubles. In this paper, these quench events are described.

1. はじめに

SuperKEKB[1]は、ルミノシティー(L) 8×10³⁵ cm⁻²s⁻¹ を 設計値とした電子リング(7 GeV: HER)と陽電子リング(4 GeV: LER)からなる衝突型加速器である。SuperKEKB の設計 L は KEKB の到達最高 L の 40 倍となる。この値 を達成する為に筑波実験室衝突点(IP)での縦方向ビー ムサイズを KEKB の 1/20 である 50 nm まで絞り込み、 ビーム電流値を KEKB の 2 倍となる電子 2.6 A、陽電子 3.6 A まで増加する。IP でのビームサイズは、IP 直近に 設置された超伝導電磁石システム(OCS)[2]により達成さ れる。QCS は、8 台の超伝導 4 極電磁石、43 台の超伝 導補正電磁石、4 台の超伝導ソレノイドから構成され、過 冷却された液体ヘリウム(4.5 K、0.16 MPa)で冷却され ビーム衝突に必要な磁場を発生する。IP に QCS を建設 後、SuperKEKBはPhase-2コミッショニング[3]として2018 年3月19日~7月17日にビーム運転を行い、電子・陽 電子ビームの衝突、OCS によるビームの集束、L 調整運 転を行った。Phase-3 コミッショニング[4]は 2019 年 3 月 11 日~7 月 1 日の期間行われ、衝突点でのビームサイ ズを設計値の7倍(β_v*=2 mm)まで絞り込むことに成功し ている。この間、ビーム電流値の増加、L 調整運転を行 い、到達最高LはKEKB加速器の設計値である1×1034 cm⁻²s⁻¹を超え、1.23×10³⁴ cm⁻²s⁻¹まで到達した。

Phase-2 及び Phase-3 の運転期間に超伝導電磁石システムは、総数で 32 回の超伝導電磁石クエンチを経験した。本報告では、QCS 超伝導電磁石構成の説明を行い、超伝導電磁石クエンチ時の超伝導コイル内常伝導部発生とビーム運転との関連について報告する。

2. ビーム最終集束用超伝導電磁石(QCS)

SuperKEKBビーム最終集束システムは、55 台の超伝 導電磁石から構成されている。IP を挟んで左側のクライ オスタット(QCS-L)には 25 台、右側のクライオスタット (QCS-R)には 30 台の超伝導電磁石が組込まれている。 図1[5]には、各ビームラインに配置された超伝導電磁石 が示されている。図中、QC1 及び QC2 がビームの集束・ 発散の機能を持つ超伝導 4 極電磁石で、磁石名にある L/R は IP 左側/右側に設置された電磁石を示し、P/E は 陽電子/電子ビーム用の電磁石である。また、素粒子検 出器 Belle-II 超伝導ソレノイド[6, 7]が発生する 1.5 T の 磁場を積分的にキャンセルする超伝導補償ソレノイドは ES で示されている。ESL/ESR1 ソレノイドボアー内には 14 台/22 台の超伝導電磁石が組込まれている。

QCS-R クライオスタットの水平・垂直断面を図2に示した。水平断面から、ビームラインに沿って設置された超伝導4極電磁石には、ビーム進行方向の同じ位置に4台~5台の超伝導補正磁石が配置されている。垂直断面は、水平断面図のM位置とJ位置のクライオスタット断面を示している。M位置ではQC1RPボアー内に3台の超伝導補正電磁石(B₁, A₁, A₂)とQC1RP外周部に2台の超伝導補正電磁石(B₃, B₄)が配置されている。また、同じ断面位置でHERビームラインには、QC1RPから漏れてくる磁場をキャンセルする為の超伝導補正磁石(B₃, B₄, B₅, B₆)が配置されている。ESR1補償ソレノイドは、これら加速器用超伝導電磁石をボアー内に固定する状態でクライオスタットに組込まれている。J位置では、



Figure 1: Final focus superconducting magnet system.

[#] norihito.ohuchi@kek.jp

Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan

PASJ2019 FRPH038



Figure 2: Cross sections of the QCS-R cryostat.

QC2RE とそのボアー内に補正磁石4台が HER ビームラ インに配置してあり、この外周部に補償ソレノイド ESR2 が取付けられている。LER ビームライン用補償ソレノイド ESR3 は単独でビームライン上に設置されている。

3. 超伝導電磁石のクエンチ

3.1 SuperKEKBビーム運転と超伝導電磁石クエンチ

図1と2に示すように超伝導4極電磁石と補正電磁 石はビームラインのほぼ同じ位置に多層配置されている ため、ビームによるクエンチの場合、ほぼ同じタイミング で複数台の電磁石のコイル内で常伝導部分の発生が観 測されている。この様なクエンチの事例を1回とした場合、 QCS 超伝導電磁石システムは Phase-2 と Phase-3 コミッ ショニング運転時に各々27 回と6回のクエンチを経験し ている。

図 3 には、2018 年 3 月 19 日の Phase-2 運転開始か ら 2019 年 Phase-3 運転終了までの1週間単位のクエン チの発生件数を示している。2018 年 4 月 第 2 週には 11 回のクエンチが発生した。このクエンチは、殆どがビーム 入射中に発生している。図 4 には、クエンチした電磁石 のタイプと台数を示した。4月第2週には、超伝導から常 伝導への転移が観測された電磁石は 15 台であった。ま た、クエンチした電磁石は超伝導 4 極電磁石内部に配 置した補正磁石が多く13台となっている。これに対し、 2018 年 4 月 23 日から SuperKEKB 主リングに設置のコ リメータ調整を行うことにより、クエンチの発生件数を大き く低減することができた。図5にPhase-2の運転開始から の LER/HER のビーム電流、ビームパイプ内真空状態、 ルミノシティー等を示した。コリメータの調整を開始するま では、QCS システムを SuperKEKB に導入後の初めての 運転であることから、ビーム入射調整、蓄積ビーム調整 の試験的な運転時期でもあった。また、Belle-II 検出器 への放射線ノイズを検知するダイヤモンドセンサーの信 号をビームアボートシステムのトリガー信号として導入し たほか、加速器リングに設置のロスモニターによるビー



Figure 3: Number of quenches in Phase-2 and -3.



Figure 4: Types of quenched magnets in Phase-2 and -3.



Figure 5: SuperKEKB beam operation in Phase-2 and -3.



Figure 6: Position of number of the quenched magnets in Phase-2 and -3.

ムアボート発報の閾値を厳しくすることにより、ビーム異常時にビームが超伝導電磁石をクエンチさせる前にビームアボートすることが可能となり、5月第5週から6月第4週までクエンチの発生を抑えることが出来た。

2018 年 6 月 25 日に LER のビーム衝突点上流に設置された垂直方向コリメータが損傷[8]を受けた。この時、

PASJ2019 FRPH038

QC1RP 及び QC1RP 内の B₁ 補正電磁石がクエンチした 他、IP を抜けたビームにより QC1LP がクエンチした。こ のコリメータ損傷後、QCS-L 側のクライオスタット先端側 に配置されている QC1LP からの漏れ磁場を消去する補 正電磁石(B₃, B₄, B₅, B₆)がクエンチする事例が 3 件発 生し、その結果、図4に示すようにクエンチした電磁石台 数を増やす結果になった。

以上報告してきたクエンチは、ビームによるクエンチで あるが、7月に入ってからの気温の上昇に伴い超伝導電 磁石電源には厳しい運転状態となった。ビーム運転最 終日の7月16日には、QCS-L補償ソレノイドESL電源 異常により通電電流遮断を行った。この電源異常は、 ESL電源制御基板とPLCモジュール間の通信が不通と なったことが原因している。ESLの電源遮断に伴い、 QCS-L側の全ての超伝導電磁石電源が遮断となり、冷 却システムの復旧及び超伝導電磁石の再励磁が完了す るまでに4時間10分要した。これを機に、QCS電源に は専用の空調が完備され、Phase-3から運用された。

Phase-3 では、運転開始からコリメータの位置調整が十 分行われビームが原因のクエンチは 3 件であった。この 期間のクエンチの件数は総数 6 件であるが、他の 3 件は QC2LE 電源の IPM 回路異常が原因で電源本体が電流 遮断を行った。2019 年 6 月 9 日に発生したコリメータ損 傷を伴うクエンチでは、QC1RP、QC1LP、ESR1、QC1RP 漏れ磁場キャンセル電磁石 (B₃, B₄, B₅, B₆)に常伝導部 分が発生し、これらの電源の電流遮断となった。ESR1 の クエンチにより QCS-R 側の全超伝導電磁石の電源が遮 断となり、冷却システムの不具合も併発し、再励磁までに 60 時間を要した。

図6にはビームが原因でクエンチした電磁石の位置と 回数を示している。クエンチした電磁石は、IP に近い QC1 とその補正電磁石に集中した。また、IP への入射 ビームラインの超伝導電磁石のクエンチの比率が高い。

3.2 QCS 超伝導電磁石のクエンチ対策

Phase-2 での Belle-II ノイズ・QCS クエンチの経験か ら、Phase-3 ではコリメータの増強(LER4 台、HER1 台)を 行った。その内、LER に組込んだ1台は QCS のクエン チ対策として組込まれた[9]。ダイヤモンドセンサー信号 によるアボートトリガー調整も最適化がなされた。また、ク エンチ時の超伝導コイル内の常伝導部発生及びクエン チに至る詳細な観測を行う為、超伝導コイルの電圧測定 ロガーを更新し、サンプリング速度を10 µ 秒から1 µ 秒と した。更にリング全体に設置のビームロスモニター、ビー ム位置モニター信号との関連を付ける為にアボートキッ カーのトリガー信号をロガー信号として取り込んだ。図7 に、2019年6月9日に発生した QCS クエンチ時の超伝 導コイル電圧波形を示した。図の横軸は経過時間、縦軸 はコイル電圧と電流値(QC1RP)が示されている。各電磁 石信号の同期をとる為に、アボートキッカーのトリガー信 号が示されている。アボートキッカーのトリガー信号は、 ロスモニター信号が閾値を越え発報された。QC1RP に はアボートトリガーの前に前駆的な電圧信号が観測され、 その結果、QC1RP 電源は電流値を下げる動作に入って いる。また、アボートトリガー後に4極電磁石を構成する 4 つの超伝導コイルに電圧が発生し、更に電流減衰によ る逆方向の電圧がその電圧に重畳していることが分かる。 ESR1 と QC1LP の 2 個のコイルには常伝導部による抵抗電圧が発生し、これらの電磁石は電流遮断処置を行った。今後、Phase-3 で測定されたビームによるクエンチの詳細な解析を進め、これからのビーム運転でのクエンチの対策を検討する予定である。



Figure 7: Coil voltages of QC1RP, ESR1 and QC1LP at June 9th, 2019.

4. まとめ

SuperKEKBは、ビーム最終集束用超伝導電磁石シス テムを組込み、2018年3月~2019年7月の期間、Phase-2/3 コミッショニングを行った。その結果、ルミノシティーを 1.23×10³⁴cm⁻²s⁻¹まで上げることに成功した。この間、超 伝導電磁石は32回のクエンチ(28回:ビーム)を経験し た。Phase-3では、Phase-2の運転からクエンチの対策、 測定器システムの改善がなされた。クエンチの詳細な解 析は、これから進められるが、その結果は今後の運転に 活用されることになる。

参考文献

- [1] K. Akai and H. Koiso, Proc. of the 8th Annual Meeting of PASJ, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2011, pp. 5-9.
- [2] N. Ohuchi *et al.*, Proc. of IPAC'18 Vancouver, BC, Canada, May 2018, pp. 1215-1219.
- [3] Y. Ohnishi, Proc. of the 15th Annual Meeting of PASJ, Nagaoka, Japan, Aug. 7-9, 2018, pp. 1-6.
- [4] Y. Ohnishi, FSPH008, presented at the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019.
- [5] N. Ohuchi, 加速器 15, pp. 253-262 (2019).
- [6] Belle II Technical Design Report; https://arxiv.org /abs/1011.0352.
- [7] Y. Makida *et al.*, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 43A, 1998, pp. 221-228.
- [8] T. Ishibashi et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of PASJ, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp.1167-1171.
- [9] S. Terui *et al.*, FRPH016 presented at the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019.