

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

QC2RE とそのボア内に補正磁石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. 超伝導磁石のクエンチ

3.1 SuperKEKB ビーム運転と超伝導磁石クエンチ

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 コミッシュン運転時に各々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ポ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

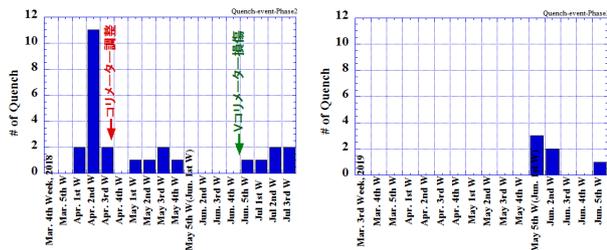


Figure 3: Number of quenches in Phase-2 and -3.

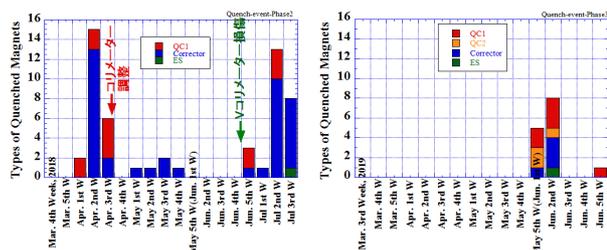


Figure 4: Types of quenched magnets in Phase-2 and -3.

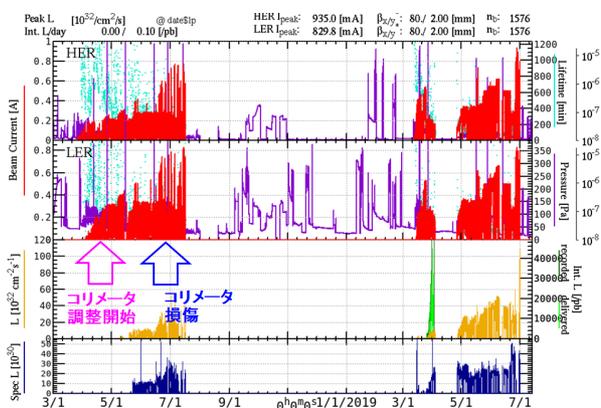


Figure 5: SuperKEKB beam operation in Phase-2 and -3.

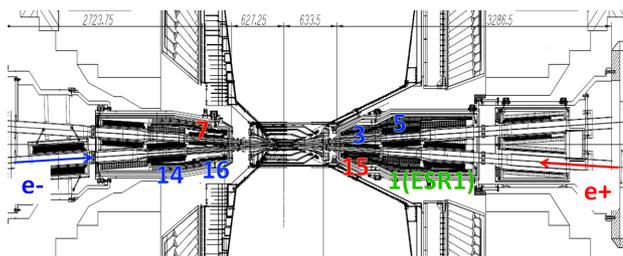


Figure 6: Position of number of the quenched magnets in Phase-2 and -3.

ムアポ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ポ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、

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ポ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ポ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、アポートキッカーのトリガー信号が示されている。アポ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 にはアポ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、アポートトリガー後に 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。

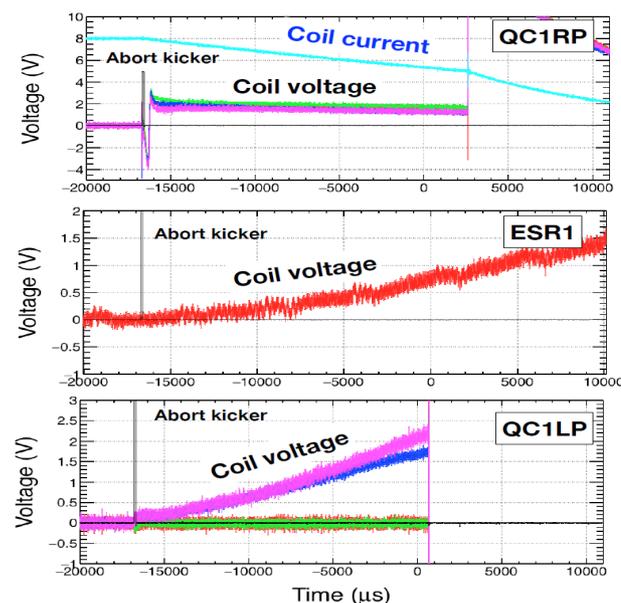


Figure 7: Coil voltages of QC1RP, ESR1 and QC1LP at June 9th, 2019.

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み込み、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、ルミノシティを $1.23 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 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.