

SuperKEKB 主リング電磁石システムの運転報告 REPORT OF MAGNET SYSTEM FOR SUPERKEKB

植木 竜一^{#,A)}, 大澤 康伸^{A)}, 増澤 美佳^{A)}

Ryuichi Ueki^{#,A)}, Yasunobu Ohsawa^{A)}, Mika Masuzawa^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We have upgraded magnet system of KEKB Main Ring for SuperKEKB project at KEK. Magnet system requested massive reconstruction due to achieve 40 times high Luminosity than that of KEKB project. Associating these upgrade, we had added on electric power source for supply current to magnets and pipe arrangements of cooling water for water-cooled magnets. Further commissioning (Phase-1) was carry out in June from February at 2016. In this paper, we report summary of magnet system and trouble of cooling water at Phase-1 commissioning.

1. はじめに

KEK で現在進められている SuperKEKB プロジェクト [1,2,3]は、KEKB プロジェクトで達成したルミノシティの約 40 倍にあたる $8 \times 10^{35} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ を目指し建設・運転が行われている。この高いルミノシティを達成するため、陽電子・電子両ビームを垂直方向に数十ナノメートルまで収束させて衝突させるナノビーム方式が採用された。

これに対応するため、電磁石グループは KEKB Main Ring の電磁石システムの大幅なアップグレードを行った。2016 年 2 月までに電磁石の据え付け・アライメントが終了し、電磁石システムの立ち上げおよび試運転(Phase-1)が行われた。Phase-1 は、2016 年 6 月末まで約 5 ヶ月間行われ、その試運転中の電磁石システムに関して発生したトラブルに対する対処も行ってきた。本論文では、SuperKEKB 用電磁石システムと Phase-1 運転中に発生した冷却水に関するトラブルの詳細を報告する。

2. ナノビーム方式

SuperKEKB は、KEKB の 40 倍にあたるピーク・ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ を目標としており、これを達成するためナノビーム方式[4]が採用された。

ルミノシティ(L)は、

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \left(\frac{I_{\pm}\xi_{y\pm}}{\beta_y^*}\right) \left(\frac{R_L}{R_y}\right) \quad (1)$$

で表され、 γ_{\pm} は Lorentz factor、 e は電子の電荷量、 r_e は電子半径、 σ_y^*/σ_x^* は衝突点における垂直方向および水平方向のビームサイズ比、 I はビーム蓄積電流、 $\xi_{y\pm}$ はビームビームパラメータ、 β_y^* は衝突点におけるベータ関数、 R_L/R_y は補正係数である。SuperKEKB では、 I_{\pm} を約 2 倍、 β_y^* を 1/20 に設定することで目標とするルミノシティの達成を目指している。

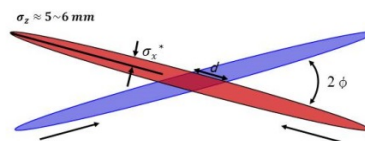


Figure 1: Conceptual Scheme of Nano-beam method.

ナノビーム方式は、水平ビームサイズが小さいバンチ同士を大きな交差角をもって衝突させる方法である。Fig. 1 に示すように、ビーム方向の衝突領域(d)がバンチ長に比べ短くなるため、砂時計効果の影響を受けにくく、 β_y^* を絞ることができる。d は衝突点の水平ビームサイズ(σ_x^*)と交差角(2ϕ)によって決まり、さらに、 σ_x^* は水平エミッタンス(ϵ_x)および衝突点における水平方向ベータ関数(β_x^*)によって決まる(式 2)。したがって d を小さくするためには ϵ_x と β_x^* を小さくする必要がある。SuperKEKB では、 $\epsilon_x = 3.2/4.6 \text{ nm}$ 、 $\beta_x^* = 32/25 \text{ mm}$ (LER/HER)に設定されており、KEKB 設計値に比べてそれぞれ 1/5~1/6、~1/10 の値が必要である。

$$\beta_y^* \approx d = \sigma_x^*/\phi, \quad \sigma_x^* = \sqrt{\epsilon_x \cdot \beta_x^*} \quad (2)$$

3. SuperKEKB 用電磁石システム

SuperKEKB 用電磁石システムは、ナノビーム方式に対応するため大幅なアップグレードが行われた。ここでは、主に KEKB 時から変更された事柄について述べる。 ϵ_x を小さくするために行われた電磁石の変更は以下とおりである。ただし、衝突点付近における電磁石の変更は除く。

LER

- ・偏光電磁石の変更
- ・ウィグラー電磁石のレイアウト変更

HER

- ・ウィグラー電磁石の導入

[#] ryuichi.ueki@kek.jp

リングの ε_x は、式(3)で表される。

$$\varepsilon_x = \frac{c\gamma^2}{J_x} \frac{1}{2\pi\rho_0^2} \oint_{bend} Hds \quad (3)$$

$$\left(c_\gamma = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{h}{mc^2} \right)$$

ここで、 γ は Lorentz factor、 J_x は水平方向の damping partition number、 ρ_0 は偏光電磁石の曲率半径、 $\oint_{bend} Hds$ は偏光電磁石での積分である。式(3)から偏光電磁石の曲率半径を大きくすることでエミッタンスが小さくなるのが分かる。そのため、LER ではリングの Arc 部の偏向電磁石の励起磁場を小さくし、有効長を 0.9 m から 4.2 m に変更した。また、大穂直線部、日光直線部に配置されたウィグラー電磁石のレイアウトの変更を行った。ウィグラーの周期長を短くするため、これまで使用していた複極ウィグラー電磁石の一部を単極、半極ウィグラー電磁石に置き換えた。

HER は、ビームエネルギーが 8 MeV から 7 MeV に変更されたため、エミッタンスは 5 nm 程度となり、設計値に近い値となっている。さらに、エミッタンスを小さくするために新しくウィグラー電磁石の導入を行った。LER の Wiggler 磁石のレイアウト変更に伴い余った磁石を配置しウィグラーエリアの建設を行った。

MR 全数の電磁石の据え付けが終了した後、レーザートラッカーを用いて電磁石の測量及びアライメントを行った。測量データの解析を行い、ずれの大きい電磁石のアライメントを再度行い、目標値に対する最終的な標準偏差は 0.1 mm となり、すべての電磁石が高精度でアライメントされている。2016 年 2 月までに建設作業は終了した。

4. 電磁石冷却システム

電磁石システムの中で重要な要素の一つが冷却システムである。MR 内で使用される電磁石の多くは数百アンペアの電流が印加され、磁場の励起が行われる。このとき発生するジュール熱を取り除くために電磁石の冷却が必要になる。数 nm のエミッタンスが要求される SuperKEKB において、磁石の冷却不足は、励起磁場を不安定にする要因の一つとなり、ビーム運転に支障を恐れがある。そのため、電磁石を一定の温度に保つ冷却システムが重要な役割を果たす。

電磁石の冷却は、多くの場合ホローコンダクターを用いてコイルに直接純水を流す直接冷却方法がとられており、地上部に設置された冷却水循環ポンプを用いてトンネル内の各電磁石に純水を供給する仕組みになっている[5]。KEKB で使用していた冷却水システムは、その前身であるトリスタン時代に建設されたシステムを再利用したものである。KEKB MR に設置された電磁石はトリスタン時に比べ約 2 倍に増加したため、冷却水容量としては余裕のない状態で適時調整して運転を行っていた。前章で述べ

たように SuperKEKB では偏向電磁石やヴィグラー電磁石など約 400 台の水冷式電磁石が追加されたため、これまでの冷却水システムでは能力不足であった。これを解消するため、2013 年から 2014 年にかけて新たに冷却水の循環ポンプを増設する工事が行われた。これまではリング一周を 4 分割し、筑波、大穂、富士、日光の 4 つの実験棟にそれぞれ循環ポンプが備え付けられ、各エリア内の電磁石に冷却水を送っていた。SuperKEKB では、Fig. 2 に示すように 4 つの実験棟の中間に位置する場所に 3M、6M、9M、12M 機械棟を建設し、各機械棟に実験棟と同等の能力を持った循環ポンプを備え付けられ、リング 1 周を 8 つのエリアに分割し冷却水の循環を行っている。これにより、冷却能力は以前の 2 倍となり、余裕を持って電磁石の冷却を行えるようになった。

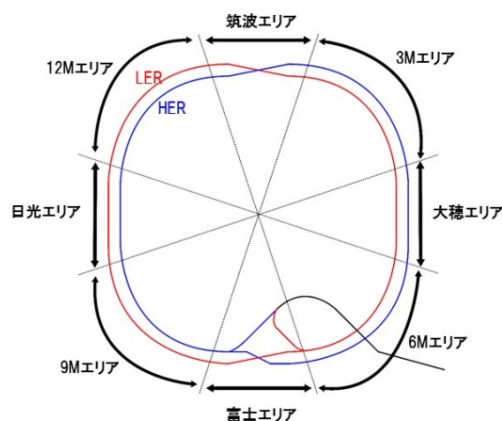


Figure 2: Schematic image of cooling water system.

5. 試運転中のトラブルとその対策

2016 年 2 月までに SuperKEKB 運転に向けたアップグレード(衝突点周りは除く)のための建設は終了した。その後、2016 年 6 月 28 日までの約 5 ヶ月間試運転(Phase-1)が行われた。Phase-1 では個々のハードウェアの動作チェック、運転システムの動作チェック、ビーム調整、真空チャンバーのベーキングなどが主な目的であった。電磁石グループでは、2017 年秋以降予定されている Phase-2 に向けて電磁石電源および冷却水システムの動作チェック、SuperKEKB で新しく導入された電磁石の study 等を行った。ここでは、主に Phase-1 の間に発生した冷却水関連のトラブルとその対策を示す。

電磁石システムでは、ビーム運転中の電磁石の重大な故障を防ぐため、様々なインターロックを仕掛けている。そのうち冷却水関係では、各電磁石に供給している冷却水の流量低下および電磁石の温度上昇に伴ってインターロックが動作するようシステムされている。インターロックが動作するとアラームが発報され、リング周回中のビームがアボートされ

る。一方、電磁石は電源からの電流供給が停止され、磁場の励起が停止される。冷却水の流量低下は、フロースイッチにより感知される。各水冷式電磁石には、出口側の冷却水配管にフロースイッチ(SMC:株式会社)が装備されており、設定流量の3分の2以下に流量が低下するとインターロックが動作する。これにより、磁石の冷却不足による磁石の温度上昇を防ぐ。万が一、フロースイッチのインターロックが動作しなかった時のために、電磁石のコイルに取り付けてあるバイメタル温度スイッチが80度(一部の磁石は60度)を超えるとインターロックが動作する仕組みになっている。この温度は磁石のコイルを覆う絶縁層の材料の耐性に由来する。このように2重のインターロックで電磁石の異常を感知し、故障を防ぐシステムとなっている。

Phase-1中に生じた冷却水トラブルは4件と非常に少なかった。そのうち、ビームアポートを伴うものは3件であった。3件とも流量が低下したというインターロックではあったが、原因は異なり2件はインターロック動作点のドリフト、1件はストレーナーの目詰まりによる流量低下であった。

最初の2件は、日光直線部に設置された四極電磁石(QW2NRP、QW4NRP)のフロースイッチのインターロック動作点のドリフトによるものであった。トラブル発生直後、電磁石のストレーナーを調べたが目詰まりは確認されなかった。念のためストレーナーの洗浄を行った。ストレーナーの目詰まり以外の原因として考えられることはインターロック動作点のドリフトである。この電磁石の全開流量は約10 L/minである。そのため、流量がおよそ6.7 L/minを下回るとインターロックが動作するよう設定してある。しかし、インターロックの動作点を調べたところ、動作流量が設定より大きな値になっており、これが原因でインターロックが働いたと考えられる。安全を期して日光直線部の全ての電磁石においてインターロックの動作流量を小さくなるよう設定しなおした。Phase-1開始前に、すべてのフロースイッチにおいて動作点の流量設定を行ったにも関わらずその値がずれていた。同様のトラブルはKEKB時にも日光直線部で発生しており、今回も含めてはっきりとした原因は分かっておらず、これから調査を行う予定である。

3件目は、筑波直線部に配置されている二極電磁石(BC3RE)に取り付けてあるストレーナーの目詰まりによって流量が低下し、インターロックが動作したものである。ビームアポートの後トンネルに入域し流量を測定すると2 L/minと非常に小さい値であった。ストレーナーを確認するとメッシュ部分に黒い物質が堆積していることが分かった。Fig. 3に新品のストレーナーと取り外したストレーナーの写真を示す。写真からもわかるように黒い物質はメッシュの大部分に堆積しており、これによりフロー

スイッチに流れる冷却水の流量が低下したと考えられる。ストレーナーの清掃を行った後は14.4 L/minまで流量が回復した。念のため近傍の同タイプの電磁石3台の流量を測定したところ、二極電磁石(BC2RE)の流量が低かったため同様にストレーナーの清掃を行った。

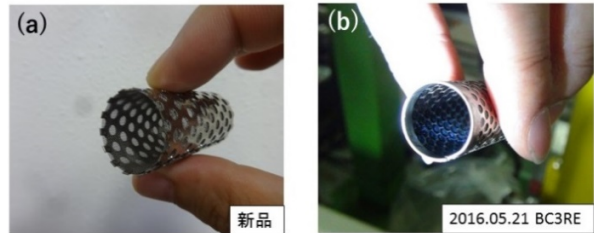


Figure 3: Images of (a) newly strainer and (b) contaminated strainer just before each magnet.

ストレーナーに堆積した物質をSEM/EDXを用いて分析を行った。結果をFig. 4に示す。メッシュの主成分である鉄はメッシュの形を再現している(b)。しかし、それ以外の元素はランダムに分布しており、堆積物の多くは酸素と銅から構成されていることが分かる((c), (d))。電磁石のホローコンダクターの材料である銅が冷却水中に溶け出し、ストレーナー上で再結晶化することで堆積したと考えられる。

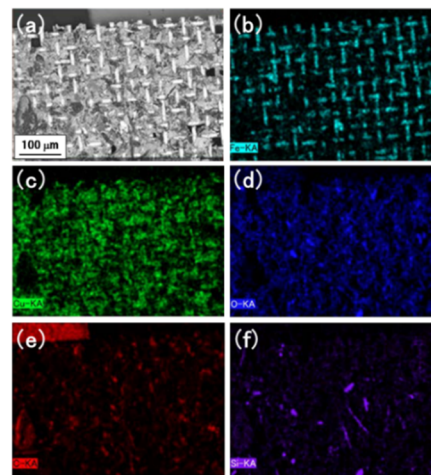


Figure 4: SEM/EDX Images of fouling. (a) SEM image of impurities on strainer. (b) ~ (f) Mapping images of each element.

しかし、酸化銅の粒子をSEMで観察したところ、その大きさは数 μm ほどでありストレーナーのメッシュ開口部(約100 μm)に比べ非常に小さい。そのため、通常であればメッシュを通り抜け堆積しないはずである。酸化銅粒子が堆積する理由として、以前冷却水循環用のポンプのメンテナンスを行った際に混入したオイルが原因と考えられる[5]。混入したオイルはシリコン系のグリースおよび鉱物油で、EDXの結果からも割合は少ないがSiやCが見られた((e),

(f)。2003年に混入したオイルが冷却水配管内に残っており、これが原因で現在もストレーナーの目詰まりを引き起こしている可能性がある。今後、FT-IR分析等を行い詳細な原因を明らかにする予定である。しかし、オイルが混入して以降ストレーナーおよび1 μ m フィルターを用いて冷却水に混入した不純物の除去に努めてきた。不純物が出始めた当初に比べるとメッシュに付着する不純物の量も少なくなっており、その成果は確実に表れている。

ビーム運転の観点からすると、頻度は少ないとはいえビームアポートを伴うトラブルは発生しないことが望ましい。電磁石システムのインターロックが動作すると、場合によってはすべての電磁石電源が停止される。電磁石は電流印加に対するヒステリシスが大きいので、一度磁石の電源を停止すると停止前と同様の条件で電流印加を行っても元の励起磁場を再現することが困難である。すなわち再びビームの調整からやり直さなくてはならない。さらに、冷却水関係のトラブルが起こるとトンネル内に入城し作業を行う必要がある。その後、電磁石の初期化、立ち上げを行うと運転再開までに多くの時間を費やす。そのため高いリミシティを迫る場合、電磁石システムのトラブルは運転上大きなロスとなる。実際、KEKBの冷却水にポンプ油を混入させた際はインターロックが多発し、数日間ビーム運転が出来なくなった[6]。以来、油で汚染されたシステムの発生低減および対処時間の短縮に心掛けている。

運転中のビームアポートを避けるためストレーナーのメッシュ番数の変更を行っている。もともと各電磁石の入口側の冷却水配管に設置してあるストレーナーは#150メッシュ、地上部の循環ポンプおよび三方弁に設置してあるストレーナーは#60メッシュを使用していた。しかし、Phase-2以降はビームをアポートすることなく運転を行いたいという理由から、各電磁石に取り付けられたストレーナーを目の粗い#60メッシュに、地上部のストレーナーを目の細かい#150番メッシュに変更を行い、地上部のストレーナーで集中して不純物を除去する方法に変更した。今回インターロックが発生した筑波直線部はメッシュの変更がまだ行われていないエリアであり、目の細かい#150番メッシュが使用されていた。トラブル発生後のメンテナンス日を利用して変更がまだであったエリアをすべて#60メッシュに変更を行った。また、地上部では筑波、大穂、富士、日光エリアではすでに#150メッシュに交換が終わっているが、3M、6M、9M、12M機械棟は#60メッシュのままであるため、随時交換を行う予定である。

さらに、シャットダウン期間中を利用して配管内の純水の交換を行い、不純物の少ない状態でPhase-2に臨む予定である。

6. まとめ

SuperKEKB 運転に向けた主リング電磁石のアップグレードが行われた。両リング合わせて約400台の電磁石が新たに設置された。これに伴い電源および冷却水システムの増強工事も行われた。冷却水システムに関しては、電磁石の増加に伴い新たに4ヶ所に冷却水循環システムを増設し、KEKB時に比べて約2倍の冷却能力で運転が可能になった。また、5ヵ月間のPhase-1の間に起こったビーム運転停止に至る冷却水トラブルは3件と非常に少ない結果であった。しかし、いまだに冷却水配管に混入したオイルの問題は解決しておらず、冷却水の入替えやストレーナーによる除去などを行い対処していく予定である。

さらに、来年から予定されているPhase-2運転に向けて7月から衝突点周りの電磁石システムの建設が行われている。ここでは、新たに最終収束用超伝導4極電磁石据え付け、アライメント、磁場測定等が予定されており、これに伴う電源システム、冷却水システムの構築も並行して行われている。

謝辞

KEK放射線科学センターの化学実験室施設の平雅文氏にSEM/EDX分析を行っていただいた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1] Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1.
- [2] M. Masuzawa, "Next Generation B-factories", Proceeding of IPAC 2010, Kyoto, Japan (2010) FRXBMH01.
- [3] Y. Ohnishi, "Lattice Design of Low Emittance and Low Beta Function at Collision Point for SuperKEKB", Proceeding of IPAC 2011, San Sebastian, Spain (2011) THPZ007.
- [4] C. P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy, Mar. 16-18, 2006.
- [5] Y. Ohsawa *et al.*, "Status of The KEKB Magnet Cooling Water", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan (2007) FP65.
- [6] T. Ohkubo *et al.*, "Contamination Problem with The Magnet Cooling Water System", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan (2007) FP64.