

SuperKEKB 電磁石の運転と冷却水 pH の変化の関係

CORRELATION BETWEEN THE pH OF THE SUPERKEKB MR MAGNET WATER SYSTEM AND THE MAGNET OPERATION STATUS

大澤康伸[#], 植木竜, 増澤美佳

Yasunobu Ohsawa[#], Ryuichi Ueki, Mika Masuzawa

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

SuperKEKB is an electron-positron collider that aims for a very high peak luminosity of $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, which is 40 times higher than that of KEKB. The SuperKEKB Main Ring (MR) system is a large system, which consists of about 1750 water-cooled resistive magnets. Each magnet is equipped with a flow switch and a proper interlock level is adjusted using ultrasonic flow meters. A few water stop incidents occurred during the early stage of the SuperKEKB operation. One water stop was caused by the wrong setting of the interlock level of the flow switch. Actually, a drift in the interlock level is suspected. During the investigation of the drift issues, we found out that the pH of the cooling water is not constant. Some correlation is seen between the pH and the magnet operation status and reported in this paper.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、周長 3 km の電子 (7GeV) ・陽電子 (4GeV) 衝突型加速器で、前身の KEKB 加速器をグレードアップさせたものである。SuperKEKB では衝突点における垂直方向のビームサイズを KEKB の 1/20 にまで絞り込み、かつ蓄積電流を KEKB の 2 倍に上げることで KEKB の 40 倍のピーク luminositiy を目指す。SuperKEKB ではまず 2016 年 2 月から Phase I と呼ばれる運転を行い、2018 年 2 月からの Phase II 運転では初衝突を達成し、2019 年 3 月 11 日から 7 月 1 日まで BELLE II 検出器がフル装備され、検出器のバックグラウンドノイズを軽減するためのコリメーター調整を中心とする Phase III 運転が行われた。安定した加速器の運転、調整のためには主リング電磁石システムが安定に運用されることが必要不可欠である。

Phase 1 運転終了後の 2017 年の夏のメンテナンスで冷却水フロースイッチの動作点の設定を行った際、陽電子用偏向電磁石においてのみ動作点が下がる方向にドリフトする現象が発生した。この原因調査の一環として対象電磁石の冷却水を担うポンプエリアの水質調査を行なった。本論文では冷却水純水システムの pH と電磁石電源稼働状況との関連性を中心に報告する。

2. 冷却水システム

SuperKEKB 主リング電磁石冷却水システムを Fig. 1 に示す。筑波・大穂・富士・日光にある旧機械棟のポンプと、3M・6M・9M・12M に建設された機械棟に新規設置したポンプにより計 8 系統の互いに独立した冷却水システムが完成した。KEKB に比べて約 2 倍量の冷却水供給が可能になったことから、SuperKEKB では水冷式電磁石が~1500 台から ~1750

台に増えてはいるが、各電磁石についているバルブを全開にして運用することが可能になった。

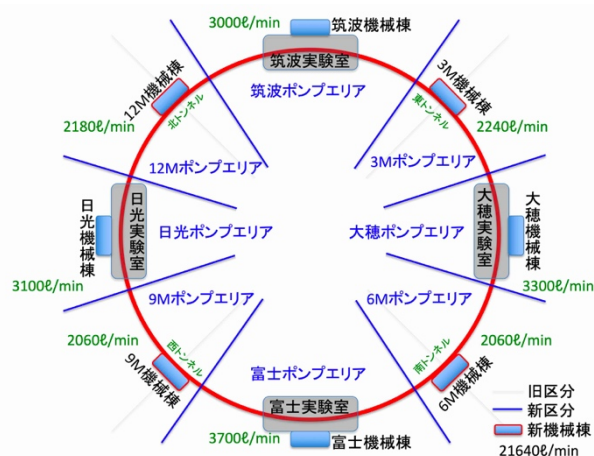


Figure 1: SuperKEKB Main Ring cooling water utility buildings and the pumping systems.

Figure 2 に冷却水システムの概要を示す。地上にある機械棟のポンプから地下~10 m のトンネル内に送られた純水は、電磁石冷却水往母管によって左右に振り分けられる。その先さらに枝管に分かれて各電磁石に送られたのち復母管よりクーリングタワーを経由して機械棟に戻る。冷却水の一部は、水温調整のため三方弁によりクーリングタワーを回るシステムとなっている。

各電磁石にはフロースイッチが付いていて、流量が下がった場合にはインターロック信号を出して電源を落とす仕組みになっている。フロースイッチの動作点は毎年のシャットダウン期間中に超音波流量計で流量を測定して規定の流量で動作するようにセットする。

[#]ohsaway@post.kek.jp

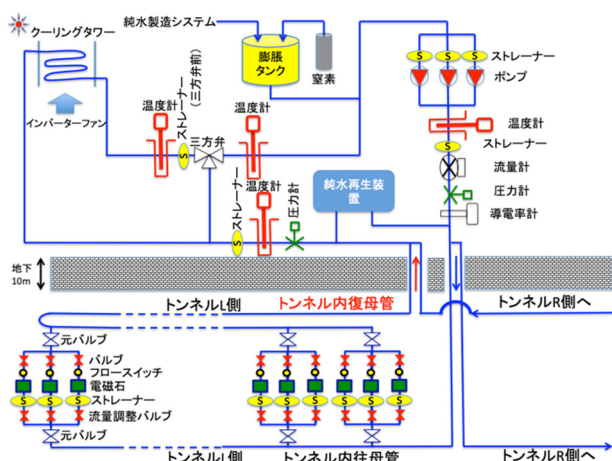


Figure 2: Schematic diagram of the Cooling water system in the utility building and in the tunnel.

3. フロースイッチ付着物

2017年の夏のメンテナンスの際にフロースイッチ動作点が下がる方向へドリフトしてしまう現象が発生した。フロースイッチの動作点が下がってしまった電磁石は、SuperKEKB用に新規製作された陽電子用偏向電磁石で、2015年の据付完了後から冷却水システムに接続されているものである。その中の一台(B2P.8)のフロースイッチを分解したところ、Fig. 3に示す様に、フロースイッチ軸のテーパ部に褐色の付着物が見られた。



Figure 3: Cuprous oxide attached to the shaft of the flow switch.

付着物の化学分析を放射線科学センターに依頼して行ったところ、Fig. 4に示す様に、 Cu_2O 、 Cu 、 CuO のパターンと良い一致が見られた。銅成分については電磁石のホロコンから析出したものだと考える。次にファイバースコープを用いて、3M機械棟ポンプエリアに置かれている偏向電磁石(B2P.87)と筑波ポンプエリアに置かれている偏向電磁石(BLY2LP)のコイル内部を覗いて比較した。コイル内壁の写真をFig. 5に示す。B2P.87内面の色は茶色でホロコンの表面に酸化第一銅(Cu_2O)らしき物が見えるが、BLY2LP内面は黒い酸化第二銅(CuO)に覆われている。両電磁石とも同時期に製作され、同時期に据え付けされ、同時期に冷却水システムに接続されているにもかかわらず、酸化の具合が異なっている。

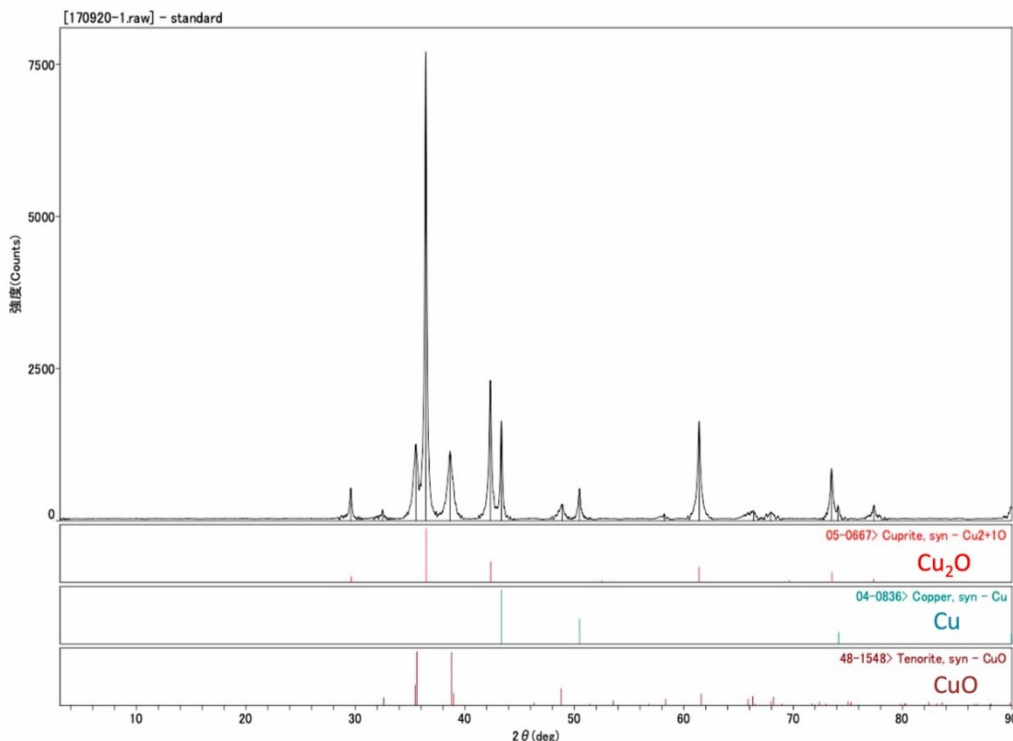


Figure 4: X-ray diffraction pattern of the sample.

B2P.87(OL244) アーク部 BLY2LP(TL064) 直線部

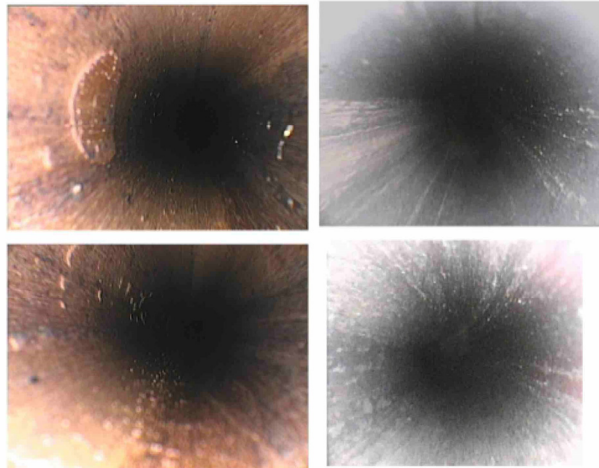


Figure 5: Inside of the hollow conductors of the LER dipole magnets.

液体中の金属の酸化は、液体の導電率、温度、pH などの条件によって変化する。そこで、まず新機械棟の冷却水を採取し、導電率、pH を化学分析センターで調べた。その結果を Table 1 に示す。

Table 1: pH and Conductivity of the Sample Water

(2017.10.26)	pH	電導率 [μ S/cm]
3M	9.9	0.64
6M	9.3	0.68
9M	8.9	0.75
12M	9.1	0.92

どの新機械棟の冷却水も導電率は $1 \mu\text{S/cm}$ 以下であり、またどの種類のイオンも定量下限以下という結果であった。しかし、冷却水の pH は、この日に採取された全てのサンプルでアルカリよりの結果を示した。基本的に純水は中性であると考えられているにも関わらずこれほどまで高い pH を示すには何か理由があると考えられる。ただし、純水の pH 測定、特に導電率が低い場合に正確に pH を測定することは難しいと言われており、測定方法に問題があった可能性は否定できない。

とりあえず、月に 1 回すべての機械棟の冷却水を採取し pH の変化を追うことにした。

4. 冷却水の pH 測定

4.1 システム循環水の採取方法

各ポンプエリアの循環水サンプルは、地上部の機械棟内の三方弁のストレーナー水抜き用バルブから採取した (Fig. 6 参照)。この場所からの採取は、加速器運転に影響を与えることなく出来るというメリットがある。



Figure 6: Strainer drain near the three-way valve.

4.2 pH 測定結果

Figure 7 に各ポンプエリアから採取した純水の pH を測定日に対してプロットした。主リング電磁石電源が通電されている期間を赤矢印で示してある。また、青矢印で示された期間はライナックで発生した火災の影響で加速器運転が約一ヶ月間に渡って停止した期間を示してある。長期シャットダウンで電源が通電されていない期間には保守作業として冷却水システムのストレーナー清掃等を行なっている。

最初の 2 回の pH 測定では 4 箇所のサンプル全てがアルカリ性を示した。ところが、11 月の測定では中性からやや酸性になっていた。この時期に主リングでは電源の通電試験をしている。電磁石が通電されるとコイル温度が上がり、冷却水温度も上がる。これが pH に関係している可能性がある。因みに大型電源は水冷式であるが、電源用の冷却水システムと電磁石用冷却水システムは全く別系統である。

その後の加速器運転期間は何のサンプルに置いても中性、あるいはやや酸性の範囲で大きな変化なく推移している。

2019 年 9 月末の加速器運転停止期間では一旦アルカリ性に水質が変わった様にも見えるが、初期の測定のような強アルカリ性にはなっていない。

通電と pH の関係を見るために、各測定日に採取したサンプルの平均 pH を通電時 (赤) と非通電時 (青) に分けて Fig. 8 にプロットした。通電中の pH はやや酸性側に偏っていることがわかる。一方で非通電中のデータは酸性の時もアルカリ性の時もあり分布に大きなバラツキがある。

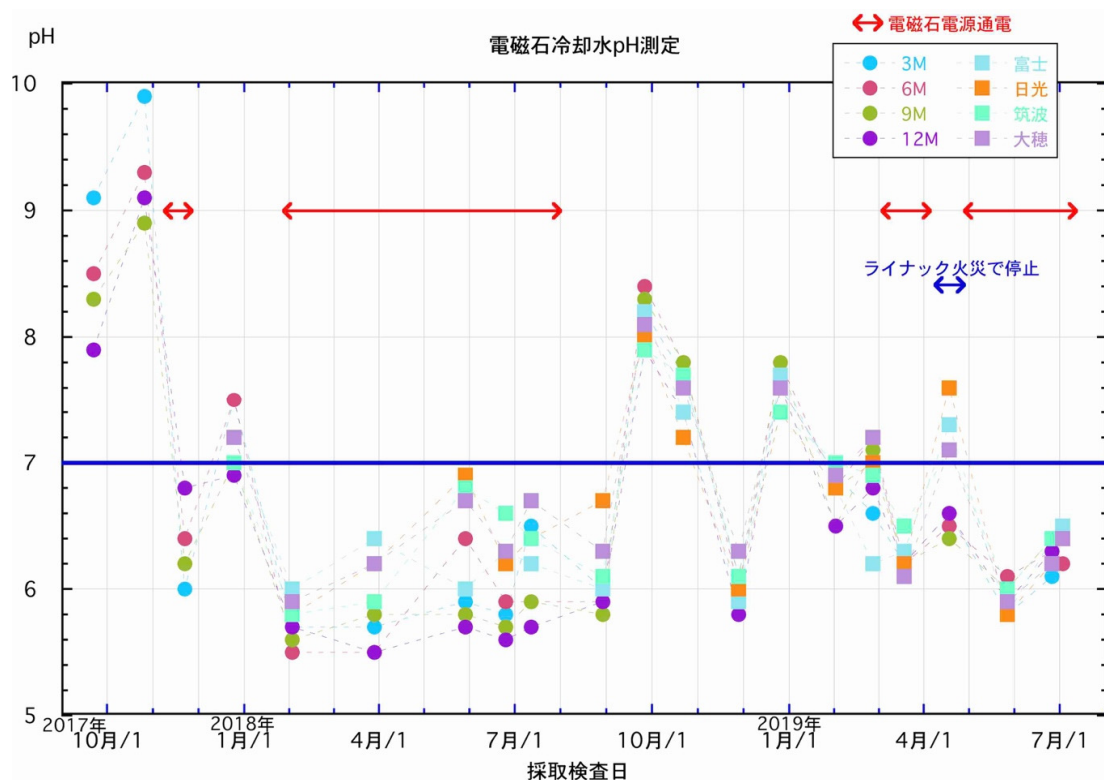


Figure 7: pH trend of the water sampled from various pumping system

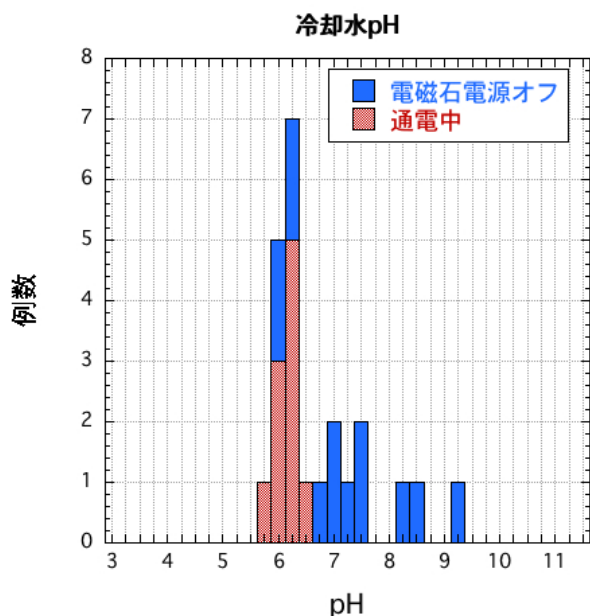


Figure 8: pH distribution.

5. まとめ

8系統の独立した冷却水系統にもかかわらず、全機械棟の冷却水の pH が一斉に同じ方向に変化することがわかった。これには何らかの共通の原因がありそうである。まず、主リング電磁石電源の通電状

況との相関をチェックしたが、通電中には pH が下がる傾向は見えたと、非通電中には pH が上がる場合と下がる場合の両方かのケースがありはっきりとした因果関係まで導くことは出来ていない。

冷却水の pH とホロコン内壁に析出した酸化銅の色との関係については、例えばやアルカリ性の時には赤色銅が析出し、溶存酸素濃度が高い時には黒色銅になる、というデータはあるが[1]、赤色銅が析出した 3M 機械棟の冷却水だけが弱アルカリ性だということでもない、はっきりしない。

現在 6M ポンプエリアで常時 pH を監視測定できるシステムの導入を検討している。随時 pH 値をモニターすることで、pH が変動する原因追求の手がかりが増える。一方で、純水の pH を正しく測定する手順についても見直す必要があると感じている。

また、B2P.8 で見られたようなフロースイッチへの酸化銅付着については KEKB 時代の油混入事故[2-5] が関係していると推測する。

謝辞

化学分析をしていただいた、放射線科学センターの平雅文氏、並びに古宮綾氏。冷却施設を管理している施設部の皆様を始め、機器運転管理を行っている高橋興業の海老澤紀緒氏、及び、多くの皆様のご協力を深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 菅披 和彦、小林 武 “銅(I) 塩の加水分解による亜酸化銅の生成”, 工業化学雑誌 71 卷 (1968) 3 号;
https://doi.org/10.1246/nikkashi1898.71.3_335
- [2] Y. Ohkubo *et al.*, “電磁石冷却水システムにおける不純物問題”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan. August 1-3, 2007, Wako Japan, pp. 841-846.
- [3] Y. Ohsawa *et al.*, “電磁石冷却水の現状”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan. August 1-3, 2007, Wako Japan, pp. 844-843.
- [4] R. Ueki *et al.*, “SuperKEKB 主リング電磁石システムの運転報告”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August. 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp. 1200-1203.
- [5] Y. Ohsawa *et al.*, “電磁石冷却水への油の混入”, 平成 16 年度大阪大学総合技術研究会.