

SuperKEKB ダンピングリング 六極電磁石冷却水配管の洗浄

CLEANING OF SEXTUPOLE MAGNET COOLING WATER PIPE IN SuperKEKB DAMPING RING

植田猛#, 小玉恒太

Takeshi Ueda #, Kota Kodama

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

There are about 90 bending magnets in the beam transport line (BT) connecting the SuperKEKB and the Linac at the KEK Tsukuba campus. These magnets were diverted from those used in the KEKB, and clogging of the copper oxide in the hollow conductor has caused problems due to decreasing flow rate. Furthermore, the magnets in the Damping Ring (DR) attached to the positron line of the BT showed the same clogging problem. Due to the significant occurrence particularly in the sextupole magnet, cleaning was conducted the inside of the hollow conductor and the cooling water piping using a cavitation generation device. In this paper we report on the details of decreasing flow rate and the cleaning work.

1. はじめに

KEK つくばキャンパスにある SuperKEKB 電子陽電子衝突型加速器と入射用加速器(Linac)をつなぐビーム輸送路(BT)には約 90 台の偏向電磁石が設置されている。これらの電磁石は KEKB 時代の物が流用されており、ホローコンダクタ内に酸化銅による詰まりが発生し、流量低下によるトラブルが起きている[1]。また、陽電子ラインに付随する Damping Ring(DR)にある電磁石でも同様に詰まりによる流量低下がみられた。DR には偏向電磁石が 78 台、四極電磁石が 84 台、六極電磁石が 74 台、ステアリング電磁石が 6 台設置されている。ステアリング電磁石以外は水冷である。特に六極電磁石において流量低下が顕著であったためキャビテーションを発生させる洗浄装置によるホローコンダクタ内及び冷却水配管の洗浄を行った。本発表では流量低下の現状と洗浄作業の内容について報告する。

2. 冷却水システム

DR 電磁石系の冷却水システムは地上部にある DR 機械室からトンネル内のアーク部西側から配管されており、リング内側に 150A の母管で敷設されている。冷却水は反時計回りに循環し 1 周して西側に戻る管路となっている。各電磁石には母管から 15A の枝管が分岐し、金属フレキシブルホースで配管が接続されている。これらの枝管には個別に操作可能なバルブが設置されている。六極電磁石への配管は Fig. 1 で示すように四極と同じ系統になっており、調整バルブとストレーナを通過してから六極電磁石に分岐されている。そのため六極電磁石単独での流量調整はできず、四極電磁石の流量に依存して調整が行われる。また、六極電磁石へ送られた配管はヘッダーで上下 2 系統に分岐されている。上側に 20 ターンのコイルが 3 個直列に、下側にも 20 ターンのコイルが直列につながっている。

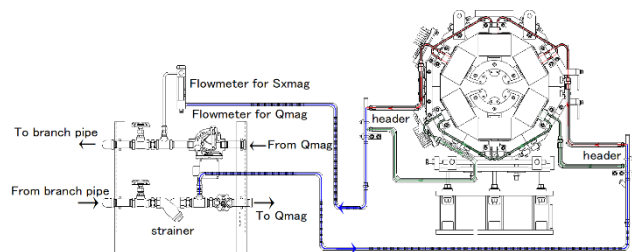


Figure 1: Piping diagram of cooling water for sextupole Magnets.

3. 配管詰まりの状況と対策

六極電磁石の配管詰まりは 2021 年頃からみられた。六極電磁石のホローコンダクタのサイズは 6 mm × 6 mm で ϕ 3 mm の穴が開いており、その中を冷却水が流れている。DR に設置されている B1 電磁石や B2 電磁石のホローコンダクタのサイズは 12.5 mm × 12.5 mm、 ϕ 7.5 mm であり、六極電磁石のホローコンダクタのサイズはかなり小さい。Table 1 に DR_六極電磁石のスペックをまとめる。

3.1 詰まりの状況

詰まりは上下 2 系統同時に起こることは少なく、どちらか片一方が詰まる。詰まった状態で通電すると上下で温度差が出る。運転電流で通電し、詰まりが発生した状態でのサーモカメラ画像を Fig. 2 に示す。六極電磁石の運転電流値は高くても 55 A 程度(SD タイプ)で、電磁石のスペックの 150 A からすると余裕があり、詰まっている状態での温度は約 36 °C である。電磁石系の冷却水温度は 30 °C で送られているので温度上昇は 6 °C である。運転電流値であれば問題ない。またこの温度差による磁場の影響は確認されていない。

uedata@post.kek.jp

Table 1: DR_SxMagnet Parameters

Ampere turn per pole	3000 At
Number of turns per pole	20
Bore diameter	70 mm
Number of cooling circuits per magnet	2
Maximum current - I _{max}	150 A
Operating Current (SD)	55.36 A
Water pressure drop	0.5 MPa max
Dimensions of hollow copper conductor	6*6 mm hole 3mm
Magnet total water flow limit	0.23 L/min
Coil temperature rise at nominal current I _{nom}	4.6 °C
Thermoswitches model	60 °C



Figure 2: Temperature rise due to reduced cooling flow.

3.2 洗浄方法

洗浄にはキャビテーションを利用して洗浄するNR0050(ブルーエンジニアリング製)を使用した。プラスチック形成などの金型を洗浄する装置であるが冷却水配管洗浄に流用した。洗浄効果については検討済みである[2]。洗浄機と冷却水配管は作業性を考えてφ12 mm シンプレックスチューブでヘッダー近くまで配管し、接続口付近はヘッダー径サイズの関係上、6 mm のポリウレタンチューブで接続した。洗浄当初、6 mm のポリウレタンチューブを長めに配管していたが、流量 1.5 L/min の条件で圧損が 4.5 kPa/m もありφ12 mm シンプレックスチューブの 0.08 kPa/m と比べてかなり大きいため、なるべくφ12 mm シンプレックスチューブで配管することとした。洗浄機の特徴は通水方向の切り替えが自動で行えること、エアーを好みのタイミングで数秒送ることができることである。これはコンプレッサーでエアーを送るフラッシュ

グ洗浄作業より、洗浄機をトンネル内に持ち込んでしまえば配管切り替え作業を行わなくてよいため、かなりの時間短縮となる。また、背面に 70 L のタンクがあり閉回路で洗浄が行えるため、洗浄に使用した水を他の系統に流すことがない。5 μm のフィルタで異物を除去できる事も有意である。洗浄時間は 15 分とし、通水方向の正転逆転を 5 分に 1 回、エアー注入を 30 秒、また数分おきに内蔵の水圧シリンダで圧力変化させた。

3.3 洗浄状況

洗浄前、通電時の温度をサーモカメラで測定し詰まりを確認した。その結果、詰まりが発生していた電磁石は全数でなく 15 台だったが、予防保全として洗浄は DR の六極電磁石 74 台全数行った。最も流量が下がっていたのは SD14 電磁石で 0.6 L/min である。洗浄後は全て 1.6 L/min 程度まで流量が回復した。洗浄前の洗浄機に取り付けたフィルタと数台洗浄した後のフィルタを Fig. 3 に示す。見てわかる通りフィルタで異物がとれ、かなり汚れている。

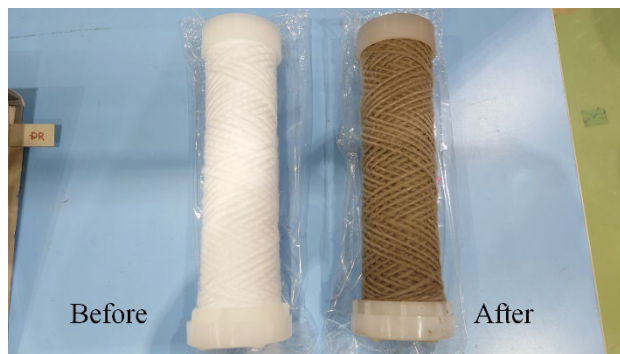


Figure 3: Filters for washing machines.

また、異物を集めて採取し X 線回析装置で検査を行った。異物は酸化銅(I) Cu₂O、酸化銅(II) CuO、と類似の X 線回析パターンが得られ、主成分は CuO であった。これは 2022 年に DR の六極電磁石の冷却水から採取したものとほぼ同じ成分である[3]。よって DR の冷却水は 2022 年から状態が変化していないと推測される。

3.4 洗浄後の流量変化

洗浄機で洗浄後、流量が 1.6 L/min まで回復した SD14 電磁石で冷却水流量の変化を確認した。測定には流量に影響しないように配管の外側に取り付ける超音波流量計(FD-Q20C KEYENCE)を、実管を延長して取付けデジタルマルチメータ(34972A KEYSIGHT)でデータ取得をした。結果を Fig. 4 に示す。冷却水流量は 15 日もしないうちに低下がはじまり、1 か月後には 1.0 L/min、2 か月後には 0.8 L/min まで低下し、さらに 3 か月後には 0.6 L/min と片方が詰まっている状態に戻ってしまった。これは詰まりの原因となるホローコンダクタ起因の酸化銅を取り除いてもすぐに再生してしまっているか、または取りきれないためと思われる。ストレーナは各電磁石冷却水配管入口と冷却水母管に設置されているが取り切れていない可能性もあるため、同一系統に接続されている、偏向電磁石、四極電磁石、セブタム電磁

石で同様に発生した酸化銅も流れてきている可能性がある。それを裏付けるように他電磁石のストレーナや調整バルブを開けて確認すると酸化銅による汚れがあった。所々で 0 L/min まで冷却水流量が下がっているのは冷却水ポンプのメンテナンスで冷却水が停まったためである。

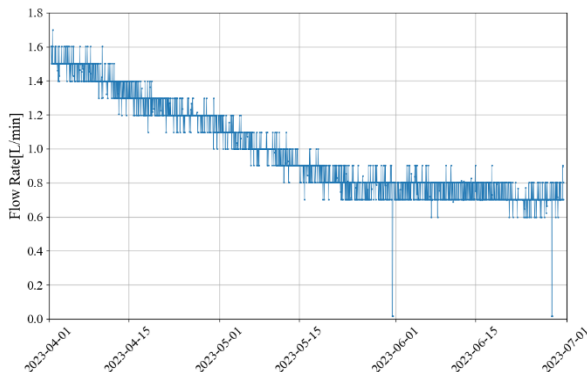


Figure 4: Magnet cooling water flow rate.

4. まとめと今後の課題

SuperKEKB の DR では六極電磁石冷却水配管で流量低下が発生していた。原因はホローコンダクタ起因の酸化銅による詰まりである。対策としてキャビテーションを発生させる洗浄機による洗浄を行い冷却水流量の回復を試みた。冷却水流量を回復することはできたが 15 日もしないうちに低下がはじまり、1 か月後には 1.0 L/min、2 か月後には 0.8 L/min まで低下し、さらに 3 か月後には 0.6 L/min にまで低下した。加速器運転時には定期メンテナンスが 1 か月に 1 回 3 時間程度行われ、また 2 週

間おきにショートメンテナンスも行なわれる。流量低下が起きる六極電磁石は全数ではなく数台であるため、月 1 回のメンテナンスで洗浄することができれば配管詰まりによる流量インターロックが発報する前に対応できる。但し、キャビテーション洗浄機で行うにはメンテナンス時間が足りないため、エアーコンプレッサによるフラッシングのみで対応している。当面は夏期のシャットダウン中にキャビテーション洗浄機で洗浄し、リフレッシュさせ、詰まりやすい電磁石については月 1 回の定期メンテナンスでエアーによるフラッシングを行って対応していく予定である。

根本的な対応策を検討するため、冷却水の温度や溶存酸素の記録化を行っている。また、脱酸素装置の正常稼働を行いたいのが配管詰まりや溶存酸素計のトラブルでうまく稼働できていない。まずは脱酸素装置を正常稼働させ、冷却水を安定させたい。様々なデータを集めて対策を練っていきたいと考えている。

謝辞

洗浄作業にご協力いただいた三菱電機システムサービスの皆様、水質を解析していただいた放射線科学センターの皆様へ深く感謝いたします。

参考文献

- [1] K.Kodama, “BT 電磁石用冷却水の管理”, 第 10 回 KEK 加速器研究施設技術交流会.
- [2] T. Ueda *et al.*, “電磁石ホローコンダクタ洗浄の検討”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9 - 12, 2021, pp. 256-258.
- [3] M. Ishida *et al.*, “加速器冷却水系で発見された異物の化学的評価”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, pp 624 - 628.