

# SuperKEKB ビーム輸送路における電磁石用冷却水の維持管理 MAINTENANCE OF MAGNET COOLING WATER FOR SuperKEKB BEAM TRANSPORT LINE

小玉恒太<sup>#</sup>, 植田猛

Kota Kodama<sup>#</sup>, Takeshi Ueda

High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

Proper maintenance of cooling water for electromagnets, which are the main components of accelerators, have an important role for the stable operation of accelerators. In the early stages of SuperKEKB operation, beam transport line was frequently stopped due to a decrease in flow rate caused by copper oxide clogging. Recently, stable operation of the accelerator has been achieved through various countermeasures. In this paper, we will report on those countermeasures.

## 1. 背景

SuperKEKB ビーム輸送路(Beam Transport Line : BT)では電子ビーム(e-)ラインに 68 台のベンド電磁石、15 台の四極電磁石、陽電子ビーム(e+)ラインに 64 台のベンド電磁石で純水による冷却を採用している。一部の電磁石を除き、1系統の純水供給施設から冷却水が供給されている。これらの電磁石はホローコンダクタと呼ばれる中空に成型された銅管が使用されており、コイルを冷却するために冷却水を通せる構造となっている。一般的に銅配管中に冷却水が流れることにより冷却水中の酸素イオンと銅が反応し、酸化銅(CuO または CuO<sub>2</sub>)を発生する。これらの電磁石は SuperKEKB の前身である KEKB 時代 1998 年から使用されており、冷却水配管や冷却水中には酸化銅が蓄積している。これが配管を構成する様々な要素、ホローコンダクタ、ストレーナ、バルブ等に詰まりを生じさせ、冷却水流量の低下の原因となっている[1, 2]。

BT では 2018 年までは冷却水系における主に酸化銅による汚染は、個々の電磁石の冷却水配管途中に設けられた 100 メッシュのストレーナで除去するという思想で管理が行われてきた。BT の冷却水系では酸化銅の発生量が非常に多く、ストレーナの詰まりが頻繁に生じ、その結果として 2016 年の 3 月から 6 月の運転では 23 回、2018 年 3 月から 7 月の運転では 31 回冷却水流量の低下によるインターロック(I/L)が生じ、そのたびに冷却水流

量調整のため加速器運転が中断された。Figure 1 に(a)新品、(b)酸化銅詰まりが生じたストレーナの写真を示す。なおストレーナに固着した物体は X 線回析(XRD)から酸化銅(CuO または CuO<sub>2</sub>)であることを確認している。

電磁石冷却水の流量低下は加速器運転上における問題であり、改善が求められていた。そこで我々は改善のために電磁石コイルや冷却水配管内に蓄積された酸化銅の除去、発生の抑制を目的として新たな対策を 2018 年 7 月から実施してきた。その結果として 2024 年 2 月から 7 月では冷却水流量低下による I/L 発生なしでの加速器運転を実現した。

本報告では BT ラインの電磁石冷却水系における酸化銅除去、及び発生抑制の対策について述べる。

## 2. 酸化銅の除去

これまでの運転経験から電磁石冷却水の流量低下を引き起こす原因である酸化銅の詰まりがストレーナ、流量調整バルブ、電磁石のホローコンダクタ、それと冷却水配管をつなぐゴムホースで生じていることがわかった。そのため年に1度、酸化銅の詰まりを防止するためストレーナとゴムホースの清掃を実施している。さらに 2023 年はホローコンダクタ内部のフラッシングを実施した。

ストレーナの清掃はブラシと超音波洗浄の実施、または汚れがひどい場合は交換対応している。ゴムホース清掃はある程度の長さがあるナイロン製のブラシを用いる。またこれらの作業と同時に水を一端から排出することに

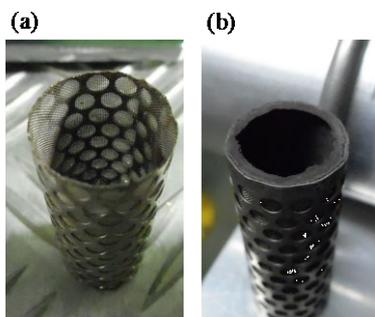


Figure 1: Pictures of (a)New strainer and (b)strainer clogged with copper oxide.

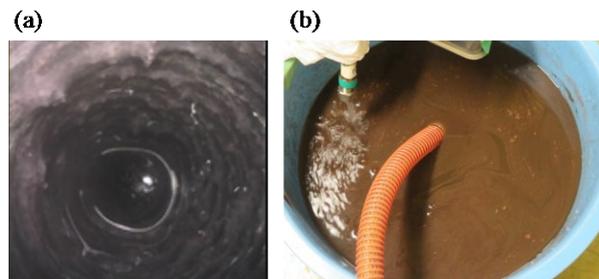


Figure 2: Pictures show (a)inside of hollow conductor and (b)flushing water.

<sup>#</sup> kodamako@post.kek.jp

よって電磁石のホローコンダクタのフラッシングを行う。この作業では酸化銅によって黒く着色された冷却水が透明になるまで行っている。さらに強力に行うにはコンプレッサによって圧空をホローコンダクタに通すことでより効果的に蓄積された酸化銅の排出が行える。Figure 2 はホローコンダクタ内部の酸化銅の蓄積をファイバカメラで観察した様子と、コンプレッサを使ってフラッシングを行い排出された水の様子である。ホローコンダクタ内にかなりの量の酸化銅が蓄積していることが確認される。配管内の様子はファイバカメラが届く範囲しか確認できないが、フラッシングした水から酸化銅を濾したところ 70 g の量が採集されたことから、効果的に酸化銅の除去が行われていることが推察される。BT では過去にゴムホースに付着した比較的電気抵抗の小さい  $\text{CuO}_2$  の付着により電磁石の地絡が生じたことがある。ゴムホース清掃を行うことによりゴムホースの電気抵抗が増加することを確認している。このような地絡防止の観点からもゴムホースの清掃は重要である。

冷却水流量調整にはニードルバルブが使用されている。ニードルバルブのニードルと流路の間に酸化銅が蓄積し、流量を制限することがある。冷却水流量が低下している電磁石においてニードルバルブを叩くことで流量が大きく増加することがあり、定期的にニードルバルブを叩くことで酸化銅の蓄積を抑制できると考えている。前述した通り、この電磁石は 1998 年から使用されており、冷却水配管も同様である。この間に蓄積された酸化銅は固着しており、バルブ外側から叩くことでは剥離されないようである(Fig. 3)。そのため我々はニードル部分を抜き、洗浄することによって機械的に酸化銅の除去を行っている。この作業に関しては一度に行うことは困難なため、順次作業を進めている途中である。流量調整バルブの流路における酸化銅の詰まりはニードルボールバルブ[3]を使用することで抑制でき、BT グループでも SuperKEKB Dumping Ring(DR)にて使用実績がある。ただしボール部にテフロン素材を使用しているため放射線下での使用は検討が必要である。

さらに冷却水配管中に新たに発生した、または現在までに蓄積した酸化銅を除去するために、0.1  $\mu\text{m}$  フィルタを設置している。複数のフィルタを設置し、BT 全体の電磁石冷却水流量、約 1100 L/min. に対して合計約 160 L/min. 程度を処理している。

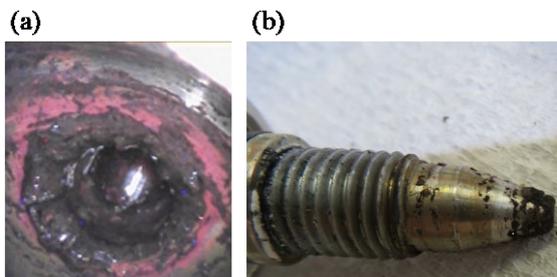


Figure 3: Pictures of (a)path around needle and (b)part of needle.

### 3. 酸化銅の抑制

ホローコンダクタや冷却配管内の酸化銅の除去を行っても発生と蓄積がそれを上回れば冷却水流量維持に対する効果はすくない。酸化銅の発生抑制のためにいくつかの酸化銅の発生抑制の方策を示す。酸化銅の発生に関するパラメータは冷却水の溶存酸素量、pH 値、温度、配管内流速の 4 つが挙げられる[4, 5]。これらで我々が制御できる冷却水のパラメータは溶存酸素量と流速の 2 つである。温度に関しては供給施設側の温度制御能力不足や、冷却水供給能力に対して負荷側(電磁石側)で流量を制限してしまっている事情があり実現していない。pH 値に関しては純水が供給されているため中性に近い値であることは推察されるが測定の実現も困難であり実際に測定したことはない。

冷却水中の溶存酸素を減少させるために我々は 2020 年 9 月に脱酸素装置を稼働した。処理能力は約 30 L/min. である。R. Dortwegt の報告[4]によれば冷却水中が pH7 の時、溶存酸素濃度が約 300 ppb では銅の腐食速度が最大になり、それより低い濃度では低いほどに銅の腐食速度が小さくなる。冷却配管中の溶存酸素量は常時モニタされその値は数 ppb で維持している。脱酸素装置を稼働したことによる酸化銅の発生を定量的に観測することは難しい。しかし、前述した酸化銅除去を目的としたフィルタが装置稼働前は 3 ヶ月程度で目詰まりしていたものが 1 年以上運用できるようになった、頻繁に発生していたストレーナの詰まりによる冷却水流量 I/L が発生しなくなったことから酸化銅の発生が脱酸素装置の稼働により抑制されていることがわかる。脱酸素装置の運用に関して一点注意事項を述べる。水中に酸化銅が存在すると脱酸素装置の脱気膜に詰まりが生じる。脱気膜は高価なため、脱酸素装置入り口にフィルタを設置するなど、酸化銅詰まりの対策が必要であろう。

さらに酸化銅発生のパラメータとして知られているのが配管中の冷却水の流速である。これは配管内壁に形成された酸化銅が冷却水の流れによって破壊されるモデルで説明される[6]。破壊によって銅表面が現れ、また冷却水中の酸素と結合することの繰り返しにより酸化銅の発生が繰り返される。そのため我々のグループでは冷却に必要な流量との兼ね合いから流速を 2 m/sec. 以下とする運用を実施している。これはホローコンダクタを保護する観点からも重要である。

最後に冷却水維持管理に関して有効だと思われるもう



Figure 4: Graph shows the trend of temperatures for BT magnets. The flow rate of cooling water is indirectly monitored using this data.

1つの施策を紹介する。BTラインに置かれたベンド電磁石のコイルには温度を測定するために測温抵抗体が貼り付けられている。これらの温度は常時モニタされており、その値は記録されている。その一例を Fig. 4 に示す。Figure 4 における緑線で示された温度が上昇していることがわかる。これは酸化銅の詰まりなどによる冷却水流量の低下が温度に現れたものである。つまり間接的に冷却水流量をモニタできることになる。BT では多くの電磁石があるため、定期的なメンテナンス作業にて全数の流量を確認することは大変であるが、温度モニタであれば温度異常は一目で確認できるため作業を減らす観点で非常に有用である。

## 5. まとめ

SuperKEKB ビーム輸送路における電磁石用冷却水に関して酸化銅の詰まりの観点からその維持管理について報告した。2018 年以降酸化銅の除去と発生抑制を目的として(1)ゴムホース、ホローコンダクタ、流量調整バルブ、ストレーナの清掃、(2)フィルタの設置、(3)脱酸素装置稼働による冷却水中の溶存酸素の制御、(4)電磁石内の冷却水流速の管理を行ってきた。ストレーナやフィルタの交換間隔が長くなったことから、蓄積した酸化銅

の除去や酸化銅発生の抑制が効果的に行われていると考えている。また 2024 年 2 月から 7 月までの加速器運転では冷却水流量低下による I/L が発生することがなかった。過去の運転実績との比較からも同様の結論が言える。

## 参考文献

- [1] T. Ueda *et al.*, “Examination of magnet hollow conductor cleaning”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2021, pp. 256-258.
- [2] M. Ishida *et al.*, “Chemical evaluation of foreign substance found in accelerator coolant systems”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2022, pp. 624-628.
- [3] <https://www.insins.co.jp/needle.html>
- [4] R. Dortwegt, “Low-conductivity water systems for accelerators”, Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, 2003, pp. 630-634.
- [5] 火力原子力発電技術協会, “発電機・送変電機器の腐食と対策”, 火力原子力発電, 1997, Vol.48 No.1, pp. 82-97.
- [6] 宮坂松甫, “腐食防食講座－海水ポンプの腐食と対策技術－”, エバラ時報, 2008, No.221, pp. 32-41.