

SuperKEKB 電磁石用冷却水の現状(2)

STATUS OF THE SuperKEKB MAGNET COOLING WATER SYSTEM (2)

大澤康伸[#], 植木竜一, 古澤将司, 増澤美佳

Yasunobu Ohsawa[#], Ryuichi Ueki, Masashi Furusawa, Mika Masuzawa

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The SuperKEKB Main Ring magnet system is a large system, which consists of about 1750 water-cooled resistive magnets and about 900 air-cooled correction magnets. Each water-cooled magnet is equipped with a flow switch and a proper interlock level is adjusted using ultrasonic flow meters. Stable operation of the magnet system is one of the keys for successful machine tuning and luminosity improvement. The interlock history since 2016 is summarized. Some problems caused by aging of the rubber parts of the flow switches and deposition of copper compound inside the rubber hoses are also described along with the countermeasures against them.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、2010 年まで運転を続けた KEKB を改造しアップグレードさせたものである。2019 年 3 月 11 日から BelleII 検出器がフル装備され本格的な物理実験が開始された。2022 年 6 月には KEKB で記録されたピークルミノシティの 2 倍を超えた。現在約 15 ヶ月間に及ぶ Long Shutdown (LS1) に入り、幾つかの改造と保守作業が行われている。安定した衝突実験を行い、加速器の性能を上げていくには、電磁石の安定した運用が必要不可欠である。そのためには約 1750 台の水冷式電磁石への安定な冷却水供給が重要となる。運転初期にはストレナーやバルブに酸化銅由来の不純物の付着などが多く見られ、流量低下によるビームアポートを引き起こした。また KEKB 加速器から再利用した電磁石のフロースイッチからの水漏れによりビーム運転を停止する事態も起きた。その都度不純物や老朽化への対応を検討して策を講じたことで 2019 年 10 月のトラブル以降、3 年近く電磁石冷却水由来のビームアポートがない状態が続いている。本論文では、SuperKEKB で発生した電磁石冷却水関連のトラブルとその対策について報告する。

2. 運転中のインタロック発生状況

SuperKEKB 運転中に発生した主リング (MR) 電磁石冷却水インタロック件数を Table 1 にまとめる。

Phase 1 中には 3 件のインタロック事案が発生している。2 件はインタロック動作点の設定不良で、1 件は汚れによる流量低下によるものであった。以降電磁石のストレナーメッシュの粗さを #150 から #60 に変更し、そのかわりに機械棟の三方弁前ストレナーを #60 から #100 に変更して、地上で一気に汚れを集める方式に変更した。

Table 1: Interlock Occurrence History

年月日	インタロック発生電磁石	備考
*Phase-1	2016.2/1-6/28	
2016.4.17	QW2NRP (NR057)	F.S 再調整
2016.4.26	QW4NRP (NR075)	F.S 再調整
2016.5.21	BC3RE (FR138)	汚れによる流量低下
*Phase-2	2018.3/19-7/17	
2018.4.15	B2E.55	F.S より水が噴き出し
2018.4.17	QFWOP.4 (OL019)	バルブ半開
*Phase-3	2019.3/12-7/1	
2019.5.16	QLC2LE (TL007)	接触不良
2019.5.21	BLC1LP2 (TL009)	接触不良
2019.5.24	BS2FLP.2 (FL111)	F.S 再調整
2019.5.24	QV1P.2 (FL011)	F.S 再調整
2019.5.25	QLC7RE (TR026)	F.S 再調整
2019.5.25	BLX2LE_2 (TL091)	F.S 再調整
2019.5.27	QD3P.20 (FR163)	F.S 再調整
	2019.10/15-12/12	
2019.10.17	QW3OLP (OL066)	バルブ半開
	2020.2/25-7/1	
	2020.10/19-12/18	
	2021.2/16-2022.6.22	

Phase 2 の 2018 年 3 月 19 日から 7 月 17 日の約 4 ヶ月間ではインタロックは 2 回発生した。1 回は、フロースイッチ (F.S) からの水漏れである。フロースイッチ内部にあるゴム製ダイアフラムの老朽化が原因で、大量の水が漏れて流量低下を引き起こしてしまった。もう 1 回は保守期間中に行ったインタロックレベル調整中にバルブを通常運転の全開に戻さなかったという作業ミスによるものであった。

Phase 3 の 2019 年 3 月 12 日から 7 月 1 日までの約 3.5 ヶ月では 7 回のインタロック事案が発生している。インタロック配線の接触不良と思われるものが 2 件ある。発生した場所が衝突点付近で作業中にケーブルや端子に無理な力がかけられてしまったことが原因だと推測している。その他にインタロック動作点の設定が不適切であったことが原因と思われるものが 5 件あった。

[#]ohsaway@post.kek.jp

2019年10月15日から12月12日までの約2ヶ月の運転で発生したインターロックは1回であった。これも保守作業でインターロックレベルを調整した後に通常運転時のバルブ全開に戻し忘れたことが原因であった。

これ以降、現在まで冷却水関係のインターロックは発生していない。

3. 冷却水トラブルに対する主な対策

KEKB時代に引き続き SuperKEKB に於いても冷却水中にある銅粉末を起因とする汚れが問題になっていた。汚れ除去については、地上部機械棟の三方弁入口にあるストレーナーメッシュをより細かいものに変え、汚れをキャッチしやすい状況にしてまとめて清掃をすることで効率よく汚れを除去するようにした。作業場所の順番についても流量変化を常時モニターし流量低下が見られる箇所を優先的に清掃することで作業の効率化をはかった。また電磁石8台について見えるストレーナーを付けた事で、その電磁石を含む冷却水システムの汚れ具合の判断がしやすくなった事は大きい。これらについては2018年加速器学会[1]及び2016年加速器学会[2] 2004年技術研究会[3]で報告を行っている。

3.1 フロースイッチ動作流量の変更

電磁石冷却水システムは、トンネル内の各電磁石を純水で冷やし、温まった水は地上の空冷式のクーリングタワーに送り外気で冷される循環方式を採用している。送り側の温度が30度の一定になるように三方弁でクーリングタワーに送る量をコントロールしている。

電磁石のフロースイッチの動作点は定格流量の2/3になったら動作する設定にしていた。しかしながら、この設定値だと三方弁動作時の流量変化によってインターロックがかかってしまう可能性があることがわかった。Figure 1に、三方弁によって冷却水温度の調整が行われている際の9M機械棟の総流量と9Mエリアにある電磁石の個別の流量の変化を示した。三方弁の調整によって総流量が一定間隔で変動しており、このときの変動幅は約5%程度であった。一方、磁石個別の流量を見るとその変動幅は20%近くであることが分かった。これまで、三方弁の開閉によって引き起こされる各磁石の流量変動は総流量の変動と同程度だと考えていたが、この結果からわかるように、磁石によっては総流量の変動幅よりもはるかに大きく変化するため、場合によっては全開流量の2/3に設定したILの閾値を下回る可能性があると考えられる。電磁石の流量低下については流量スイッチだけでなく温度スイッチも各コイルに設置して常時監視していること、また冷却水供給量についても余裕があることから、インターロック動作点を1/2にしても問題はないと判断し、2019年夏の保守作業以降フロースイッチの動作点を定格流量の1/2にする事にした。

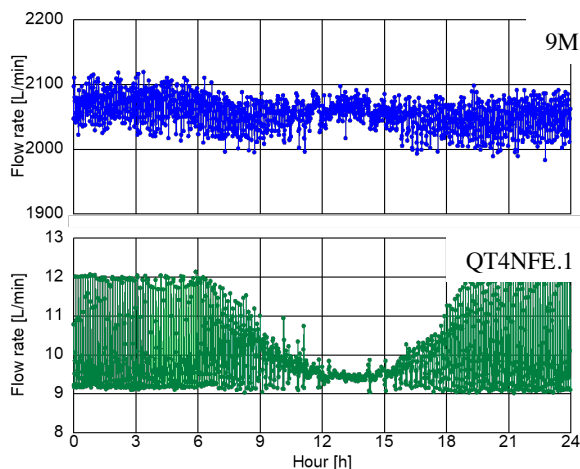


Figure 1: Flow rate change over time is plotted for the “9M” pump are (top) and a quadrupole magnet “QT4NFE.1” (bottom).

3.2 フロースイッチ交換

2018年にフロースイッチのダイヤフラムが破損し、水が吹き出すというトラブルが発生した(Fig. 2)。



Figure 2: Water leakage from a flow switch.

このフロースイッチは20年近く使用しているものでフロースイッチに使われているゴム類の老朽化が原因である。一般的にゴム製品の使用年数は10年程度であることも考えると、使用年数が多い電磁石のフロースイッチは全数交換するべきである。しかし、コストの関係から優先度をつけて順次交換していくことにした。具体的には流量が大きいもの、インターロックでビーム運転が止まってしまった場合に実験への影響がより大きいと思われるものを優先した。

電子リングの偏向電磁石 (HER-B タイプ) の 113 台から交換作業を開始し、現在まで 447 台についての交換が終了している。電磁石が設置してある現場での作業のため、細いインターロック配線の取り扱い等の苦勞をしたが、その甲斐あってか、以降フロースイッチからの水の吹き出しトラブルは今のところ発生していない。

3.3 超音波流量計の変更

流量調整する際はその都度超音波流量計を配管に取り付けて流量を測定しながら行っている。各電磁石に備え付けの流量計があればこのような必要はないが、コストの関係で前身の KEKB 加速器からこのやり方を踏襲している。KEKB 時代よりパナメトリクス社の PT868 を使用し、2019 年までその後継機の PT878(Fig. 3:右)で流量調整を行っていた。何度もセンサーの脱着をしていると細いセンサーのケーブルの損傷は止むを得ず年間2~3セットの交換が必要であった。去年からキーエンス社のクランプオン式流量センサーFD-Q(Fig. 3:左)を試したところ、

- (1) 流量の表示が見やすい
 - (2) 表示の値が速く安定する
 - (3) センサーと配管を密着させる為にグリスを塗る必要がない
 - (4) 約 1/10 のコストであること
- 等からこの流量計へ変更することにした。



Figure 3: FD-Q flowmeter (left) and PT878 flowmeter (right) are shown.

センサーと表示本体が分離していないのでセンサーのケーブルの断線がないのも大きなメリットである。作業効率も上がり、流量計を見ながら行う流量バルブ調整のミスやバルブ操作間違いも減った。

数多くの流量調整では、センサーの脱着に要する時間はできるだけ少なく簡単にしたい。付属の取り付け部品ではネジを使って固定する方法であるので脱着に時間がかかる。そこで簡単に使いやすくワンタッチ式への改造を検討し、いくつかの試作を経て Fig. 3 の様な現在の青色のワンタッチタイプとなった。

3.4 純水のチェック

純水システムについては施設側で伝導率や機器点検を毎日行っている。また月に一回加速器側でも機械棟を見回り、ポンプの異音や振動、モーターや軸の温度などを点検している。実際にポンプ軸の異常が見つかったこともある。また、冷却水サンプルを採取し pH の測定も行っている。2019 年の測定開始当初は通電中と停止中で pH 値に大きな変動が見え加速器学会[4]でも報告したが、Fig. 4 に示すように、2019 年秋ごろから一部ばらつきがあるが pH7 近傍の中性で推移し、大きくアルカリに振れる変化は見られていない。

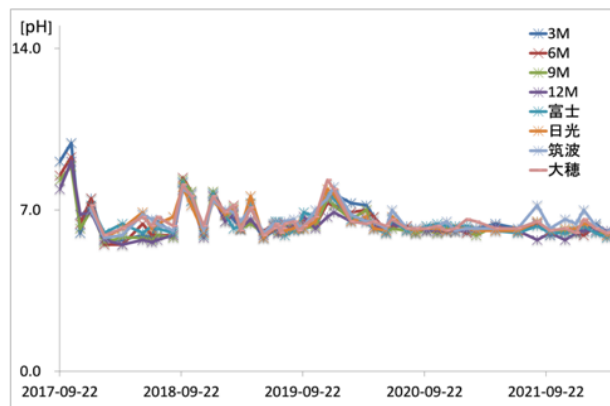


Figure 4: pH trend of the water sampled from each pumping system.

3.5 電磁内部の汚れの堆積

年々僅かずつであるが、ストレーナーで取りきれなかった汚れが、ホース金具などの細くなった部分に付着し流量が下がる傾向が見られている。特に約 40 年前のトリスタンの時代から使われている再利用の HER の四極電磁石にそのような傾向がみられる。

この堆積物を除去するために Fig. 5 にあるような直径 5mm で長さが 2m という特殊なブラシを製作し、ホース内に挿入し洗浄を行なった。この件については、2022 年加速器学会において「SuperKEKB HER-Q マグネットの冷却水配管清掃」[5]で詳しく報告をおこなう。



Figure 5: Cleaning the inside of a hose with a special brush.

参考文献

- [1] Y. Ohsawa *et al.*, “SuperKEKB 電磁石用冷却水の現状”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 1238-1242.
- [2] 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, Aug. 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp. 1200-1203.
- [3] 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.
- [4] Y. Ohsawa *et al.*, “SuperKEKB 電磁石の運転と冷却水 pH の関係”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Jul. 31-Aug.3, 2019, pp. 962-966.
- [5] M. Furusawa *et al.*, “SuperKEKB HER-Q マグネットの冷却水配管清掃”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Oct. 18-21, 2022.

4. まとめ

SuperKEK 主リング電磁石システムでは汚れなどが原因と考えられるインターロック発生、老朽化による水漏れ、作業ミスによるインターロック発生等のトラブルが発生した。

銅粉末による汚れの付着については機械棟で集中して集めてストレーナーを小まめに清掃する事、一部の電磁石に目視確認出来るストレーナーをつける事、機械等ごとの流量、圧力、補給量の監視を強化する事、等の対策をとった。

老朽化によるフロースイッチの水漏れトラブルは、優先度をつけて交換作業を進めている。しかし、まだゴムホースや細部にある O リングなどは、手付かずで、トンネル内のパトロールなどで僅かな漏れでも早めに発見しその都度対処しているというのが実態である。

超音波流量計の機種を変更したインパクトは大きく、保守調整作業の日数が 15%短縮出来た等のコスト減に貢献した。また操作が安易になったことで測定者の負担が減り、測定ミスやバルブ操作ミスが減ったことも大きい。

周囲 3km、1750 台の電磁石を賄う大規模な SuperKEKB 主リング電磁石冷却水システムで約 3 年もの間、ビーム実験を遮断する事なく運転することができた。これは関わっている全員の努力によるもので、今後もさらにノートラブルの記録を更新していける様に努力していく所存である。

謝辞

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皆様、水質を調べていただいている放射線科学センターの皆様、多くの皆様のご協力を感謝いたします。