

SuperKEKB 電磁石用冷却水の現状

STATUS OF THE SuperKEKB MAGNET COOLING WATER SYSTEM

大澤康伸[#], 植木竜一, 江川一美, 増澤美佳

Yasunobu Ohsawa[#], Ryuichi Ueki, Kazumi Egawa, Mika Masuzawa

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

SuperKEKB is an electron-positron collider that aims for a very high peak luminosity of $8 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 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 and about 900 air-cooled correction magnets. The MR magnet system ran stably without any serious problems during Phase I and Phase II operation though there were a several magnet trips caused by low water flow due to clogging in the strainer and water leaks from a flow switch. These problems and their countermeasures are 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 6 月まで Phase I と呼ばれる運転を行い、衝突なしの状態でのビーム周回、蓄積をして加速器のコンポーネントのデバックや調整を行った。2018 年 2 月からの Phase II 運転では、衝突点用超伝導電磁石やロールインした BELLE II 測定器を使った衝突実験が始まり、2018 年 4 月 26 日初衝突イベントが観測された。現在 Phase III へ向けて、主に BELLE II 測定器回りを中心とした改造工事が進行中である。

KEKB/SuperKEKB で、Luminosity 調整を行う場合、電磁石システムが安定に動いていることがまず必要不可欠である。例えば、冷却水流量異常が検知されて電磁石電源に停止信号が入ると、ビームアポートされるのはもちろんだが、多くの場合電磁石の初期化が必要となりそれまでのLuminosity調整がリセットされてしまう。我々はこのようなロスを未然に防ぐ為にいろいろな工夫をしてきた。本論文では、主リング電磁石冷却水システムにおける安定運転への努力、数は多くはないが、起こってしまったトラブルへの対処について報告する。

2. 主リング電磁石冷却システム

SuperKEKB には約 1750 台の水冷却式電磁石がある。元々 KEKB では冷却水総量にゆとりがなく、各電磁石のバルブを絞って電磁石間の流量バランスをとりながら運用していた。運転マージンがなかったことから油等の異物混入に対して脆弱なシステムとなっており、実際にポンプ保守時に作業ミスから油が混

入して以来、数多くのトラブルに悩まされて来た[1]。SuperKEKB では電磁石数が更に増えたことから、冷却水を供給する機械棟の純水冷却システムを KEKB 時の 2 倍の 8 ヶ所に増やす改造を行なった。主リングに於いて各機械棟がカバーする領域を Fig. 1 に示す。筑波・大穂・富士・日光の元々ある機械棟に 3M・6M・9M・12M の 4 ヶ所の機械棟を追加した。この追加により、冷却水総量に余裕が出て各電磁石のバルブは全開で使用することが可能となっている。

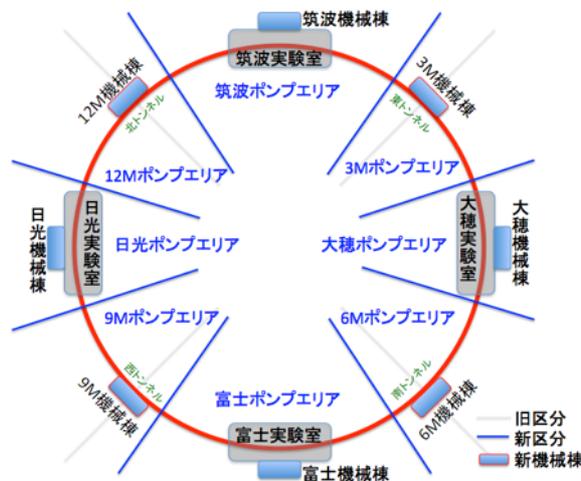


Figure 1: SuperKEKB Main Ring cooling water utility buildings.

Figure 2 は電磁石冷却水システムを、ある一つのポンプシステムについて示したものである。個々の電磁石についてはストレーナーが取り付けられているが、この他に、地上部ポンプの出口、トンネルからの戻り、地上部外回りのクーリングタワーから三方弁へ入る手前に大型の 200 A (一部 150 A) ストレーナーが付いている。これらのストレーナーは長期シャットダウン中などを利用して清掃を行っている。

[#]ohsaway@post.kek.jp

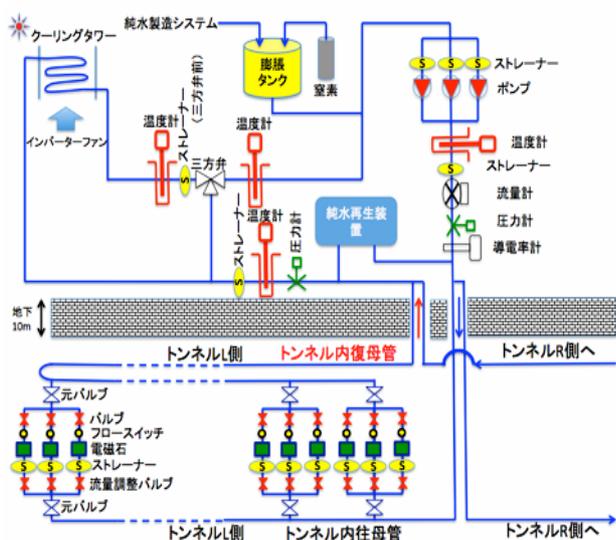


Figure 2: Cooling water system.

3. Phase I から Phase II へ

Phase I では、流量低下インターロックでビームアポートした事案が 3 件あった[2]。これは冷却水システムに、ある時点で混入した銅粉末がおそらく以前に混入して除去しきれていない油成分と一緒にストレーナーメッシュなどを詰まらせたのが原因だと考えられる。

3.1 汚れ除去への工夫

Phase I 運転中、冷却水流量低下によるインターロック発生確率を減らすために、電磁石に取り付けてあるストレーナーのメッシュを#150 メッシュから目の粗い#60 メッシュに交換した。その代わりに、地上部の三方弁前のメッシュを#60 から#150 (一部#100) のより細かいメッシュに交換した。清掃しやすい地上部の三方弁前ストレーナーで汚れを集める方式に変更した。

これに加えて、Phase II 運転開始までに汚れを取り除く方法がないか検討を行なった。冷却水システムの水を抜いて入れ替えることも以前やってみたが、運転停止後は電磁石通電中より水温が低いためか、汚れが排出されなかった。そこで、電磁石を通電しないで水温を上げる方法がないか検討した結果、クーリングタワーを利用することを思いついた。夏は外気温が高く、また直射日光が強いのを逆に利用し、クーリングではなくウォーミングする訳である。運転中は電磁石冷却水の入り口の温度は 30°C になるように三方弁の開閉度と冷却ファンの回転数を調節することで水温を制御している。夏場は、強制的にクーリングタワーを回る量を増やし、冷却ファンを停止させることで水温を上げることが可能となる。そうしておいてメッシュサイズを細かくした三方弁入り口のストレーナーメッシュで一気に汚れを回収するという方式を考えた (“一網打尽方式”と

呼んでいる)。この方式だと一箇所を清掃するだけで済むので、一つ一つの電磁石のストレーナーの清掃より遥かに効率がよく作業時間も短縮される。Phase I 後の 2017 年は猛暑であったこともあり、この方法で水温が 38 度位まで上がり、三方弁入り口のストレーナーメッシュに相当量の汚れが集積され効率よく冷却水の汚れを除去することができた。

特に汚れのひどい大穂ポンプ地区の三方弁入り口ストレーナーメッシュを Fig. 3 示す。



Figure 3: Oho area strainer (9/5).

このメッシュは、2017 年 7 月 28 日に一度洗浄して戻し、約 1 ヶ月間“一網打尽方式”用に運用したものである。この写真が撮られた 9 月 5 日にはすでにメッシュ内に多くの黒い酸化銅の汚れが付着してメッシュが詰まっているのがわかる。

9 月 26 日の同様の検査では Fig. 4 の写真にあるように汚れ具合は減っていることがわかった。水温を



Figure 4: Oho area strainer (9/26).

上げて汚れが移動しやすい状況にし、他よりも目の細かいストレーナーメッシュで汚れを一気取る方式が効果的であることがわかった。

Phase II では、汚れで電磁石のストレーナーが詰まり流量低下によるインターロックでビームを落としてしまう事例は一つもなかった。この“一網打尽方式”は非常に有効なので今後も夏のシャットダウン中に続けたいと考えている。

3.2 汚れをモニターする工夫

汚れをモニターすることはできないかということで、試験的に 4 台の電磁石について“見えるストレーナー”（ワシノ機器株式会社 YG13S）#60 メッシュを取り付けた。“見えるストレーナー”の窓部を Fig. 5 に示す。



Figure 5: Viewable strainer (3/28).

これは、2018 年 3 月 28 日に 3M ポンプエリアにある電磁石に取り付けた直後の写真である。Figure 6 の写真は、3 ヶ月後の同じストレーナーである。ストレーナーメッシュに汚れの付着は確認できるが流量を低下させるほどの量ではない。前述の汚れ除去の効果がここでも確認できた。



Figure 6: Viewable strainer (After 3 months).

冷却システムの汚れ具合をストレーナーを分解せずに直接モニターできることはとても便利である。今後は他の各ポンプ領域にもこのストレーナーを導入し、汚れの状況把握に活用する予定である。

4. Phase II で発生したトラブル：フロースイッチの破損

半年間の Phase II 運転中に冷却水絡みのインターロックが 2 件発生してしまった。1 件は、インターロックの作動点を調整し、流量バルブを全開にしないでそのままにしてしまうという人的ミスであった。もう 1 件は、電子リング偏向電磁石のフロースイッチからの漏水である。流量低下のインターロックが発砲したためトンネルに入域してみたところ電磁石のマニホールド付近から勢いよく水が噴出していた (Fig. 7)。

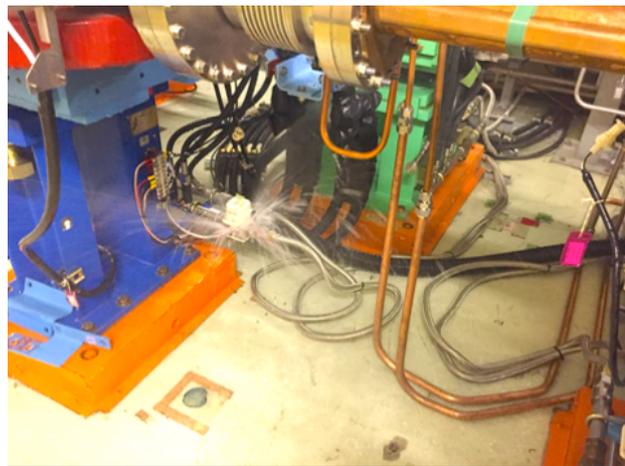


Figure 7: Water leakage from a flow switch.

SuperKEKB の主リング電磁石システムで採用しているフロースイッチは、SMC 株式会社のダイヤフラム式 IFW510 で、(1) 耐圧 1 MPa での使用に対応、(2) ロッドは腐食に強いステンレス製に変更 [3]、(3) ダイヤフラムのゴムは放射線にも強い EPDM を使用、という条件を付けた特注品である。

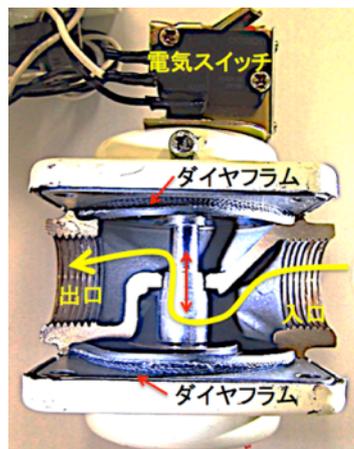


Figure 8: Cut model of a flow switch.

フロースイッチの概略を Fig. 8 のカットモデルに示す。水が流れると、フロースイッチの入口と出口の中心にあるポート部のオリフィス前後に差圧が生じ、上下に付いているダイヤフラムで、流れる量によってロッドが上下する。流量が多くなれば、ロッドは下がり、流量が少なくなれば、ロッドが上がり、上部に取り付けてある電気スイッチを動作させる構造である。

4.1 フロースイッチの分解

水漏れの原因を調査するためにフロースイッチの分解を行った。上部の出口側のダイヤフラムには水漏れらしい跡など異常が見受けられなかった。しかし、下部の入口側のダイヤフラムを分解してみると Fig. 9 の赤丸に示すようにダイヤフラムを挟んでいるフランジ部分からダイヤフラムが抜け出てしまっていた。この部分から、冷却水が勢いよく噴き出したものと思われる。鉄製の部品に錆びや汚れが無い事から、何日も前から水が滲み出していた物では無く、突然漏れだしたものだということが推定される。

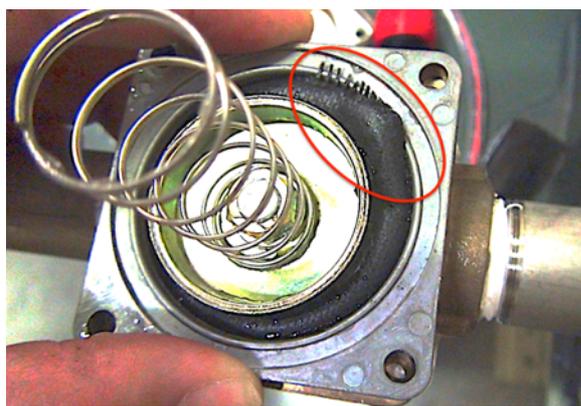


Figure 9: Damaged diaphragm.

フロースイッチは、構造上、入口側である下側のダイヤフラムが上のダイヤフラムより圧力が高い状態になる。劣化して弱くなってきたダイヤフラムがダイヤフラムのへりより内側に引っ張られ、押しえ溝から外れてしまい、漏れが生じ、急激に噴き出したものと考えられる。また、ダイヤフラムのゴムの強度を上げるために使用されている繊維がほつれる様に毛羽立っている。冷却システムはメンテナンスで止める以外は常時一定のインバーター運転であり、送り圧力は一定の圧力を保っている。つまり、フロースイッチに強い衝撃らしい水圧が加わることは考えにくい。このトラブルは、ゴムの劣化が一番の要因だと考えられる。このフロースイッチは約 20 年前の KEKB の建設時に取り付けられたもので、ゴム製品の耐用年数をはるかに超えて使用している。SuperKEKB 建設時に新品のものと交換することも検討はされたがコストの関係で見送られたという背景がある。

4.2 補給水の変化

耐用年数を大幅に超えて使用しているフロースイッチを始めとするゴム製品が主リング電磁石システムには沢山ある事から、このようなゴムの破損事象を事前にキャッチする事ができないか、運転時のデータをチェックしてみた。すると、補給水に変化があった事が後になってわかった。この時の補給水の変化を Fig. 10 に示す。徐々に補給水流量が増えていく事がわかる。実際にインターロックの警報が出た 16 時半ごろから急激に冷却水補給量が増えている。この時に一気にフロースイッチの破損が進んだと思われる。失われた冷却水総量は 3080 リットルで、短時間に大量の冷却水を周囲に撒いてしまった。

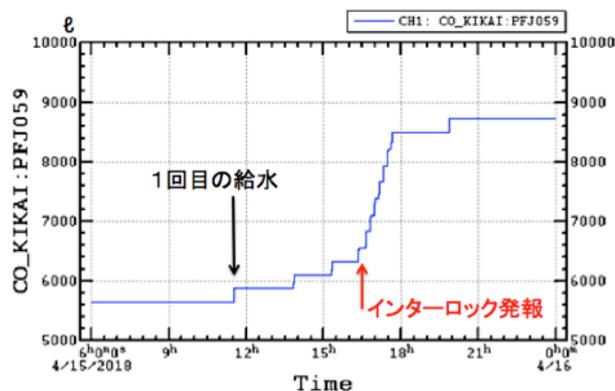


Figure 10: Water supply volume.

このグラフの補給水量の変化から、インターロックが出るまでに、大きく 3 回は供給している事が分かる。例えば、短時間に 2 回も補給する必要があった場合は、水漏れの可能性があるということで加速器運転を止めて現場を確認するなどの対応をとれば周辺加速器機器への被害を最小限にすることができる。今後、短期間に供給が続いた場合は、監視員から加速器運転員と冷却水担当者に連絡するように依頼すると共に、自動監視ソフトウェアの開発などを進める。

5. まとめ

SuperKEKB 主リングでは、二週間に一度設けてあるメンテナンス日を最大限に利用し、機械棟のストレーナー清掃を行っている。8 分割したエリアで、唯一油混入や酸化銅の汚れのない富士ポンプエリアだけは、いまだに汚れが無い状態である。純水冷却系は一旦汚れが混入してしまうとその汚れを除去することは困難である。夏期シャットダウン中の“一網打尽方式”による汚れ除去以外に、ほぼ 1 ヶ月に 1 度の三方弁の清掃を行っているが、これらの地道な努力の甲斐もあり、汚れによる流量低下インターロック発生を Phase II では防ぐ事が出来た。また、直接ストレーナーの汚れ具合をモニター出来る“見

PASJ2018 THP133

えるストレナー”は有用であった。

1750 台もある水冷式電磁石を Phase II 運転中に安定運用できたのは大きな成果である。しかし、一方でゴム製品の老朽化が進んでいることも発覚した。今回破損したフロースイッチだけではなく、ゴム類は全てが老朽化しているので、こちらも早急に交換が必要であり、現在優先度をつけて交換の検討・準備を進めている。

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海老澤紀緒氏、及び、多くの皆様にご協力を感謝いたします。

参考文献

- [1] 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.
- [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, August. 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp.1200-1203.
- [3] Y.Ohsawa *et al.*, “電磁石フロースイッチの腐食”, 平成 13 年度核融合研究所技術研究会.