

SuperKEKB 真空系冷却水システム

UPGRADE OF COOLING WATER SYSTEM FOR SUPERKEKB VACUUM SYSTEM

照井真司^{#,A)}, 石橋拓弥^{A)}, 柴田恭^{A)}, 末次祐介^{A)}, 白井満^{A)}, 金澤健一^{A)}, 久松広美^{A)}, 芳藤直樹^{B)},
Shinji Terui^{#,A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Kyo Shibata^{A)}, Yusuke Suetsugu^{A)},
Mitsuru Shirai^{A)}, Ken-ichi Kanazawa^{A)}, Hiromi Hisamatsu^{A)}, Naoki Yoshifuji^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} East Japan Institute of Technology Co., Ltd.

Abstract

The cooling water system for the SuperKEKB vacuum chambers was upgraded to manage the high-power synchrotron radiation coming from high stored beam currents. The power of cooling pumps and piping routes were increased or rearranged all over the rings. The cooling systems for the interaction region and for the wiggler sections were newly constructed. In order to monitor the flow rates at over 600 points, the F3RP61 CPU of FA-M3 Programmable Logic Controller (PLC) and the CompactRIO were used as an Input Output Controller (IOC) and a data logger, respectively. The cooling systems for the interaction region and for the wiggler sections were newly constructed. The interlock system was also upgraded to adapt the high-intensity machine. We report here the configuration of the cooling water system and its operational status during the beam commissioning.

1. はじめに

SuperKEKB は KEKB B ファクトリー (KEKB) の後継機となる高ルミノシティの電子・陽電子衝突型加速器である。主リング(Main Ring, MR)は 7 GeV 電子リング (How Energy Ring, HER)と 4 GeV 陽電子リング (Low Energy Ring, LER)から成る。SuperKEKB プロジェクトの目的は、ルミノシティを KEKB での達成値の約 40 倍 ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) に上げ、標準理論を越えた新しい物理を探索することである。この目標値を達成するため SuperKEKB では蓄積電流を 2.6 A(HER)、3.6 A(LER)、衝突点における垂直方向ベータ関数を 0.30 mm(HER)、0.27 mm(LER)にすることを目指している。2018 年 3 月から 7 月にかけて衝突調整を伴う運転(Phase-2 運転)が行われた[1,2]。

ここでは、高いビーム電流を実現するために KEKB か

ら改造した SuperKEKB の真空系冷却水システムの構成[3]と、運用状況等を報告する。

2. 真空系冷却水システムの概要

MR の設計パラメータを Table 1 に示す。KEKB からの大きな変更点は、大穂直線部と日光直線部で増強されたウイグラー部である。Figure 1 に LER と HER の放射光強度分布を示す。大穂直線部と日光直線部のウイグラー部の下流で、特に強度が強いことがわかる。大穂直線部と日光直線部で大量の冷却水が必要となるため、冷却施設を増強した。Figure 2 では SuperKEKB 時の冷却ポンプの構成と各区域の放射光パワーを示す。赤い線が新設冷却ポンプの配管である。この増強により、真空冷却水システムの最大流量は 6000 l/min となった。Figure 3 に、SuperKEKB のために改造した大穂直線部の配管の写真を示す。現在はヘッダーをつけて大量に冷却水を流せるようにしている。

冷却水の流量は、KEKB 時の約 2 倍の 600 点近くで常時モニターしている。採用している羽根車式流量計を Fig. 4 に示す。流量計は、冷却水で磁石付羽根車が回され、その結果発生する起電力を流量に換算している。各点の流量はデータロガーに入力されている。この流量計のメリットは、回路などの放射線に弱いものが無いことと、価格が低いことである。一方デメリットは、個々のばらつきが大きく、校正係数を個々に用意しなくてはならないことと、回転軸と羽根車の隙間に酸化銅などがはさまり羽根車が回転しなくなるという症状があることである。Figure 5 に、冷却水制御システムの構成を示す。データロガーとして、NI 社の CompactRIO を採用した[4]。チャネル密度が多いので、費用が抑えられるのが利点である。CompactRIO に入った流量計の値を、ネットワークに流す。それを IOC が受け取り、計算した値をもとにラダー CPU でインターロックシステムを構築している。Figure 6 に以前と今回のインターロックシステム構成を示す。

Table 1: Design Parameters of MR

| Ring | LER (positron) | HER (electron) | Unit |
|-----------------|---|---|------|
| Beam energy | 4.000 | 7.007 | GeV |
| Bunch number | 2,500 | | mA |
| Circumference | 3,016 | | m |
| Beam current | 3.6 | 2.6 | A |
| Bending radius | 74.68(arc) | 105.98(arc) | m |
| Total SR* power | 1.1(arc:2200m) 6.3(wiggler:300 m) | 5.2(arc:2200m) 1.1(wiggler:100 m) | MW |

*Synchrotron Radiation

[#] sterui@mail.kek.jp

KEKB 運転時、流量計の羽根車が止まる度にビームのポートリクエストが出され、運転の障害になった。

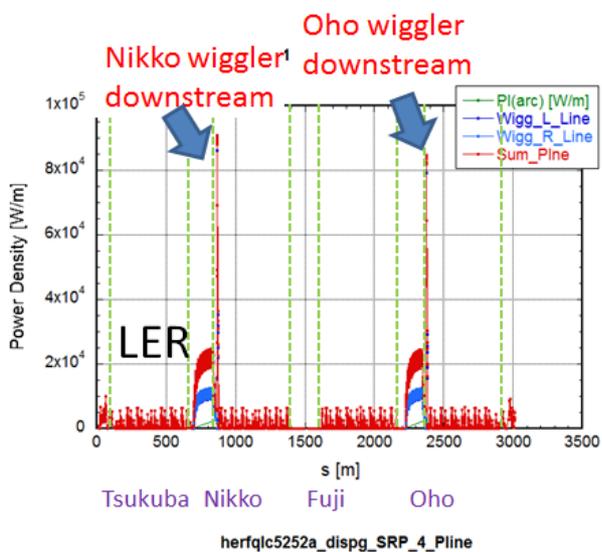


Figure 1: Power density of Synchrotron radiation along the SuperKEKB LER and HER.

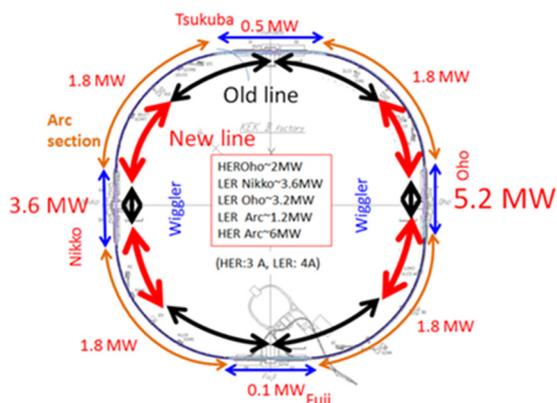


Figure 2: Cooling capacities of each cooling-pump station and the piping paths along the ring for vacuum chambers.



Figure 3: Cooling water system using headers at Oho wiggler section.

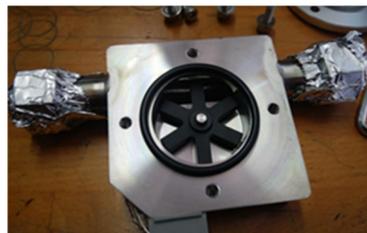


Figure 4: Impeller type flow meter for SuperKEKB.

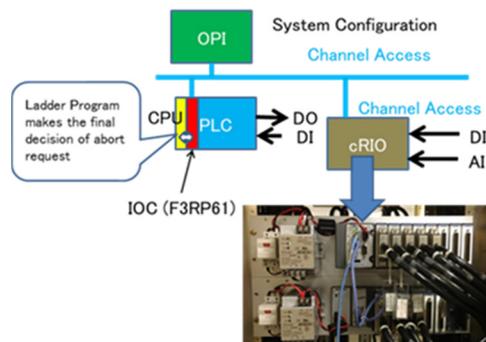


Figure 5: Control diagram of the cooling water system for vacuum chambers.

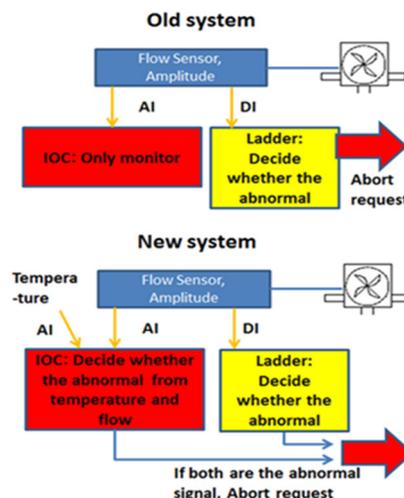


Figure 6: Interlock logics of cooling water system for the KEKB (Old) and the SuperKEKB (New).

SuperKEKB では、この問題を改善するために、流量計の値が異常になり、かつ、その冷却水が流れている区間の温度計の値が通常より高い場合にアボートリクエストするというインターロックシステムを構築した。

ビーム衝突点付近(Interaction Region:IR)に新設された冷却水システムの構成を、Fig. 7 に示す。このシステムでは、上述した冷却施設を使用せずに、別途市販のチラーとポンプを用いた。理由は、配管外径が 6 mm と細く、また、配管長さが 15 m 以上あり圧力損失が大きいためである。計算では、細い配管部分だけで圧力損失は 0.3 MPa (最大流量 1.7 l/min) 近くになる。この区域で注意すべき点は、冷却するビームパイプがビーム最終収束用超伝導磁石(QCS)中にあり、冷却水の流れが止まると数時間以内に中の冷却水が凍ってしまい、膨張により配管を破壊してしまう可能性があることである。この危険を回避するために、チラーに異常があった際や、流量が極端に減った際には、窒素ガスを用いて冷却水を配管から強制的に排出してピットに流すというシステムを作った。このシステムのバルブ構成を、Fig. 8 に示す。通常状態の場合、E1、E2 の電磁バルブがオープンに、E3、E4 の電磁バルブはクローズになっていて、冷却水が往還のヘッダー間を流れている。異常を検知した場合、E1、E2 がクローズに、E3、E4 がオープンになり、冷却水の流れは止まり、E1~E2 間にある冷却水が、E3 方向から来る

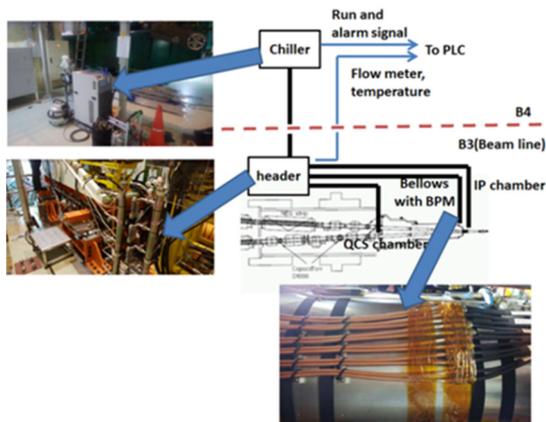


Figure 7: Cooling water system for the vacuum chambers at interaction region (IR).

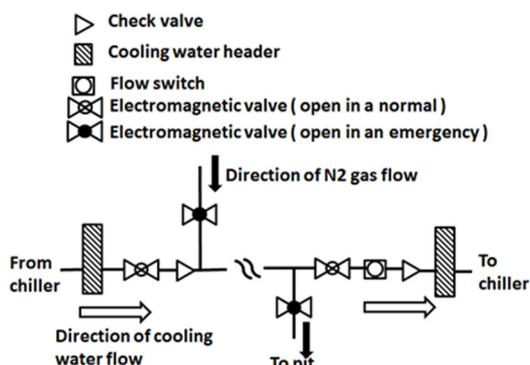


Figure 8: Emergency system incorporated in the IR cooling water system, where the cooling water in the QCS chamber is immediately purged by high-pressure nitrogen in the case of accidental water stop.

窒素ガスの圧力で E4 方向に抜けていく。また、異常を検知した場合、ビームアボートリクエストも出すように設計した。幸い、今までの運転中にはこのシステムを使うような事態は発生していない。

3. 真空系冷却水配管のための試験

大穂直線部と日光直線部のウィグラー部では、KEKB 時の約 6 倍の冷却水を流す必要があり、圧力損失により十分な流量が確保できないという事態が危惧された。そこで、実際にリング内の配管を行う前にチェンバーやベローズ等の冷却水通路に水を流し、各コンポーネントの先端と末端で圧力を測定して、それらの圧力損失を見積もった。この測定結果をもとに、チェンバー冷却水通路入口につながる冷却水配管の口径と配管分割数をどの程度にすればよいのか等を検討した。Figure 9 に圧力損失測定の様子を示す。Table 2 に 22.2 l/min (1 系統の必要最大流量は 20 l/min 程度になるように配管)のときの 1/2 inch 配管と 3/4 inch 配管の長さ当たりの圧力損失の測定値と計算値を示す。既存冷却ポンプ能力の制限から、往還バルブの圧力差は 0.4 MPa 以下にしなければならない。往還バルブからチェンバー冷却水通路入口ま

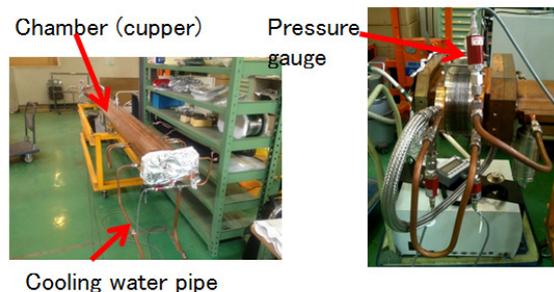


Figure 9: Set up for measuring pressure losses of several vacuum components.

Table 2: Measured and Calculated Pressure Losses of 1/2- and 3/4-inch Pipes per Unit Length (22.2 l/min)

| Pipe size (inch) | Pressure loss from measurement (MPa/m) | Pressure loss/1 m from calculation (MPa/m) |
|------------------|--|--|
| 1/2 | 0.036 | 0.045 |
| 3/4 | 0.009 | 0.008 |

Table 3: Estimated Pressure Losses of Major Vacuum Components (22.2 l/min)

| Component | Pressure loss |
|--|---------------|
| 1/2-inch pipe with an angle of 90° | 0.007 (MPa) |
| 3/4-inch pipe with an angle of 90° | 0.002 (MPa) |
| U-shaped 1/2-inch pipe (0.6 m) | 0.04 (MPa) |
| Cooling water channel of a bellows chamber | 0.05 (MPa) |
| Cooling water channel of a beam pipe | 0.013 (MPa/m) |

での距離は 20 m 近くあり、1/2 inch の配管ではその圧力損失が 0.4 MPa を超えてしまうので、このような長い配管には 3/4 inch 配管を採用した。リング内で数多く使用するコンポーネントの圧力損失を Table 3 に示す。

4. 真空系冷却水システムの運用状況とまとめ

Figure 10 に、流量と温度の監視用パネルの一部を示す。このパネルを見れば、温度と流量の相関関係が一目でわかり、流量が低くなったため温度が上がっているのか、別な原因で温度が上がっているのか等を判別できる。Figure 11 に、Phase-2 運転中に流量計が発報したアラームの日時と場所を示す。縦軸の 1~12 が電源棟の場所を示していて、ウィグラー部は 4、5、10 および、11 に相当する。この区間は流量計が多いので、他の箇所よりアラームの発報件数が多い。アラーム発報時の流量の時間変化の一例を Fig. 12 に示す。この時は、徐々に流量計の値が減っていたのではなく、突然に値がゼロ付近に下がっている。このような現象は、冷却水は流れているのに、小さな金属片などが原因で羽根車の回転が止まってしまふことで起こる。

2016 年 2 月~6 月に行われた Phase-1 運転と今回の Phase-2 運転中、真空系冷却水システムでは大規模なトラブルは起きなかった。運転中の冷却水でのアラーム発報の原因は、100 % の確率で、流量計の羽根車が止まったことであった。これに関しては、定期的なメンテナンスを行いできるだけこの事象の発生頻度を減らすよう努力

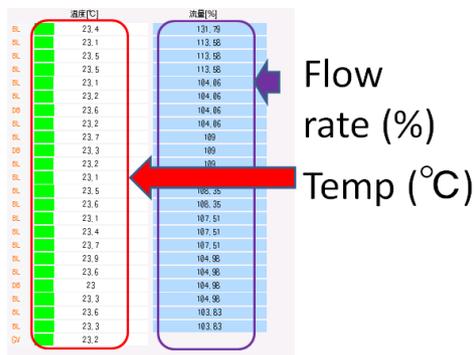


Figure 10: Monitor panel for the temperature and the flow rate.

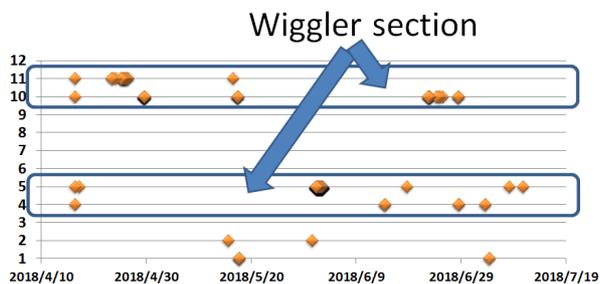


Figure 11: Time and locations of the flow meters that triggered the alarm of low flow rate

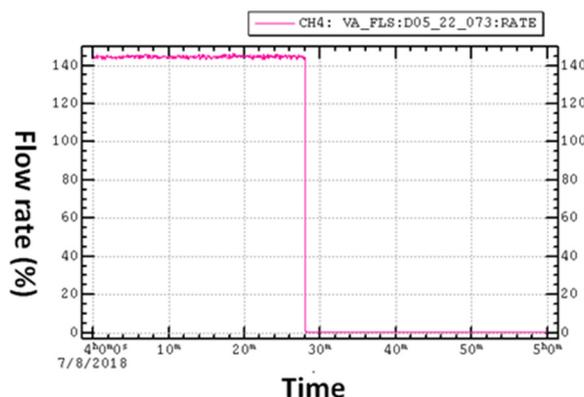


Figure 12: Typical behavior of flow rate when the rotation of impeller stopped due to dust particles attached to the rotary shaft.

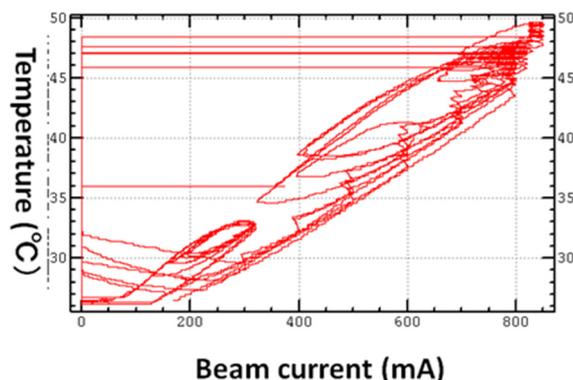


Figure 13: Maximum temperature at LER Nikko wiggler section as a function of beam current.

していき。また、Fig. 13 で表されるような、ビーム電流とともに温度が顕著に上がっていく傾向が見える場所については、冷却水をより多く流すための増圧ポンプの使用や、チェンバーに簡易に取り付け可能な冷却水ブロックの設計・設置などを検討していく。

参考文献

- [1] H. Koiso *et al.*, “COMMISSIONING STATUS OF HIGH LUMINOSITY COLLIDER RINGS FOR SuperKEKB”, Proceedings of IPAC’17, Copenhagen, May 14-19, 2017, pp.1275-1280.
- [2] Y. Ohnishi, “SuperKEKB フェーズ2におけるコミッションングの成果”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, WEOLP01.
- [3] T. Ishibashi *et al.*, “SuperKEKB 真空機器制御システムと立ち上げ試験”, J.V.S.J., 58 (2015) 126.
- [4] N. Yoshifuji *et al.*, “SuperKEKB での真空制御ソフトウェアの現状”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP090, Chiba, Japan, 8-10 Aug, 2016, pp.1137-1141.