

ATF ダンピングリング軌道安定化のための冷却水温度制御

TEMPERATURE CONTROL OF THE COOLING WATER FOR THE ORBIT STABILIZATION OF KEK-ATF

内藤孝[#]、荒木栄、奥木敏行、久保浄、黒田茂、照沼信浩
Takashi Naito, Araki Sakae, Toshiyuki Okugi, Kiyoshi Kubo, Shigeru Kuroda
KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

This paper describes the temperature stabilization of the accelerator cooling water in KEK accelerator test facility (KEK-ATF). KEK-ATF is operating to produce an extremely small beam having a vertical beam size of 37nm. The beam tuning is very sensitive with the orbit drift. The orbit is also affected the temperature change of the cooling water. Consequently, the temperature of the cooling water has to be stabilized to realize the tuning condition. The cooling water system consists of cooling towers and a three-directional valve. One feature of cooling tower is that it consumes much less electricity compared to an electric chiller system. However, the cooling tower is strongly depended on the environment temperature and humidity. The specification of the cooling water has $\pm 1\text{degC}$ stability, which is not enough for our application. We developed a control method to realize a more stable temperature. The realized stability was $\pm 0.1\text{degC}$ during the hole of the operation period and the orbit drift in the damping ring was disappeared. The detail of the control and the measurement results are described.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構先端試験加速器 ATF/ATF2 では超低エミッタンス電子ビームによる最終収束系の試験が進められている[1][2][3]。ATF ダンピングリング (ATF-DR) の軌道変動は最終収束系のビーム調整に大きく影響するため、安定化の努力が続けられて来た。軌道変動要素の一つとしてマグネット、真空チャンバーなどの冷却水の温度変動が挙げられる。ATF-DR では、アーク部にコンバインドベンドを採用しているため冷却水の温度による熱収縮のためわずかな軌道の変動や Tune の変動が起こる。ビーム制御の精度が上がり、冷却水の制御温度 $\pm 1\text{C}$ に比例してビーム軌道が変動していることが問題となった。このビーム軌道の変動を抑えるために、冷却水の温度をさらに安定化させる必要が生じるようになってきた。

ATF-DR のマグネット、真空チャンバーなどの冷却水はクーリングタワー (冷却塔) によって作られている。冷却水の温度制御は冷却塔の散水ポンプとファンの発停によるオンオフ制御と三方弁の PID 制御の組み合わせによって行われている。冷却塔による冷却は水の気化熱を使っているために外気温や湿度によって冷却能力が大きく変わる。そのため PID 制御のパラメータを調整しても夏期と冬期ではその応答が大きく変わる。特に冬期には冷却塔のオンオフ制御時に急激に変動する水温変化を吸収しきれず 1C 以下の温度制御は難しい。この問題を解決するためにオンオフ制御の特殊な設定を行い、冷却水の温度変動を $\pm 0.1\text{C}$ 程度まで抑えることが出来た。

また、冷却水の温度変動の安定化によってダンピングリングの軌道はポジションモニターの精度以下にすることが出来た。

2. 冷却塔システム

冷却塔は Figure 1a に示すような構造になっており、冷却コイルに散布水を散水し、ファンによって強制的に空気を送り散布水を気化させることによって気化熱により冷却コイルの中を通過する水の温度を下げる。冷媒を使用した冷凍機に比べて使用電力に対する効率は極めてよいが、気化熱を使用するため冷却能力は気温、湿度により大きく変化する。夏場の降雨時は湿度 100%になるため気温以下にすることは出来ない。逆に冬期には冷却能力は十分すぎるため温度が下がり過ぎ、一定温度を保つのが難しくなる。また、冬期に熱負荷が停止した場合、冷却コイルが凍結して破裂する可能性があるため運用には注意を要する。

ATF で使用している冷却塔を Table 1 に示す。電磁石用、高周波用、真空チャンバー用の 3 系統を使

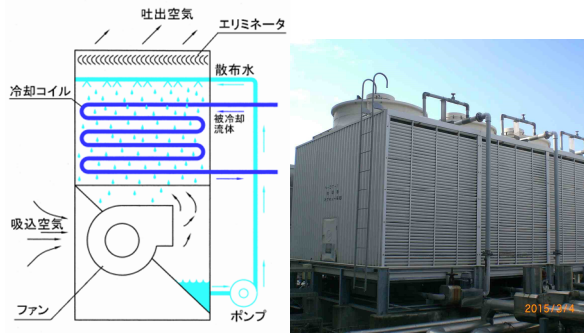


Figure 1a: 冷却塔の構成.

Figure 1b: 冷却塔.

[#] takashi.naito@kek.jp

用しているが、電磁石用は追加でもう1系統の冷却塔を使用している。電磁石の系統は発熱量が最も大きく温度の安定度も要求される。電磁石用の一番大きな冷却塔は、Figure1b に示す様に内部は3ユニットで構成されており、大きな冷却能力を実現している。ここで言う冷却能力は前述のように気温や湿度で変わるため湿球温度 27°C の時、入口温度 46.3°C、出口 32°C で定義されている。冬場に湿球温度が下がると冷却能力も増すことになる。この冷却塔で使用する電力は散水ポンプとファンの電力だけであり、10~20kW 程度である。

Table 1: 冷却塔の仕様

	型番	流量	冷却能力
電磁石用	KCMB-77.3T/HR	1300L/min	1258kW
電磁石 2	MXC-Z70AS	300L/min	300kW
高周波用	KCMC-60T/HR	1000L/min	488kW
真空用	KCMB-7.2T/HR	120L/min	32.7kW

3. 冷却塔の温度制御

冷却塔の温度制御は Figure2 に示す様に、1) 空冷ファン、散水ポンプのオンオフ制御、2) 三方弁による PID 制御からなる。熱負荷で暖められた水（温水）は分岐され、一方の水は冷却塔で冷やされた水（冷水）になる。もう一方の温水は三方弁によって冷水と混合されることによって一定の水温（一定温水）となり、熱負荷に供給される。空冷ファン、散水ポンプのオンオフ制御が一度オンになると冷水の温度は急激に下がり、オフになると上昇する。オンになる温度とオフになる温度は別々に設定出来るが通常 1、2°C の範囲で設定する。

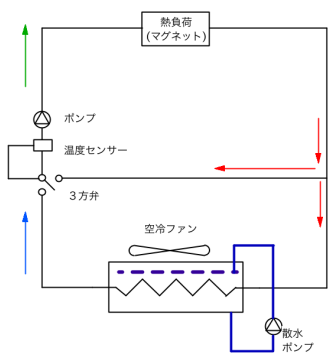


Figure 2: 冷却塔の温度制御.

温度制御の例を Figure 3 に示す。この例では空冷ファン、散水ポンプが同時にオンオフ制御されているが、オンオフ制御の度に冷水の水温は大きく変わり、三方弁の制御が間に合わないため一定温水は 1°C 程度目標値からのずれが生じる。これを押さえようとして PID 制御の時定数を変えても振動解となってしまう水温は安定しない。また、一度オンになると冷水の水温が下がり、水温が下がると三方弁

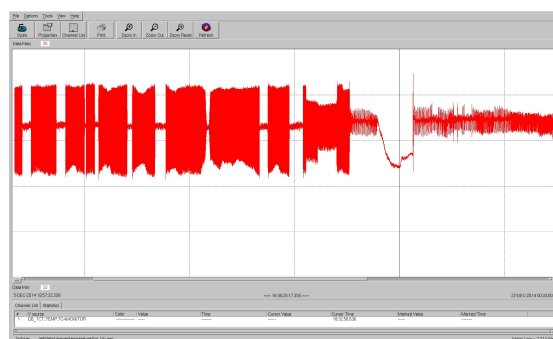


Figure 3: 冷却水の温度制御.

は冷水の流量を減らすので冷却塔内での滞在時間が長くなり冷水の温度はさらに下がり、オフの設定温度まで下がることになる。オフになると逆に冷水の温度が上昇するため三方弁は冷水の流量を増やすので冷却塔内での滞在時間が短くなり冷水の温度はさらに上がる。結果的に冷水の温度は上下を繰り返し、その度に三方弁が追いつかなくなり一定温水の温度変化をもたらすことになる。

4. 冷却水のビーム軌道への影響

ATF-DR では Figure 4a, 4b に示すような電磁石冷却水温に比例するビーム位置の変動が測定された。三方弁の PID 制御を調整し、冷却水温の変動幅を小さくするとビーム位置変動も小さくなった。しかし、冷却水システムの仕様では +/-1°C であり、仕様範囲でもビーム位置変動が観測され、冷却水温のさらなる安定化が必要とされた。

5. 冷却水の温度安定化

三方弁の PID 制御のパラメータを調整しても約 1°C の偏差が残ってしまう。この原因は 3. で述べたように空冷ファン、散水ポンプがオンオフした時に冷水の温度が急激に変化するためであり、オンオフの回数を減らす、オンオフによる温度変動を出来るだけ小さくする、を実行すれば一定温水の温度は安定すると考えられる。外気温の変化による冷水温の

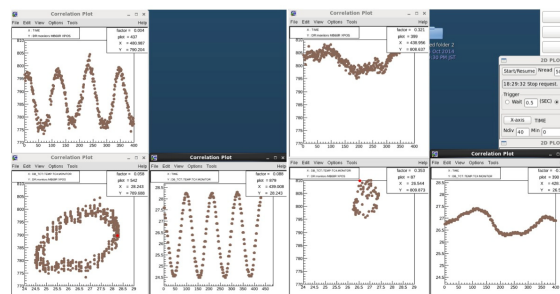


Figure 4a: (左) Figure 4b: (右) 冷却水温とダンピングリングアーク部の水平方向ビーム位置の相関 (三方弁制御パラメータの調整前と調整後) .

温度変化はゆっくりであるため三方弁制御のパラメータを最適化することにより一定化出来ると考えられる。冷却水温のさらなる安定化の為に下記のことを行った。

1. 冷却塔の空冷ファン、散水ポンプのオンオフ制御の設定温度を別々にし、冷却塔が複数ある場合は冷却塔ごとにそれぞれの空冷ファン、散水ポンプのオンオフ制御の設定温度を違う温度で作動させるようにした。このような設定にすることによって、3台の冷却塔がある場合は空冷ファン、散水ポンプのオンオフ動作は6段階に分割され、オンオフ時の温度の変化量はそれだけ小さなものになる。
2. 冷却塔の空冷ファン、散水ポンプのオンとオフの設定温度はそれぞれに設定することが出来る。通常、オンとオフの設定温度は1、2℃程度の差に設定されており、冷水の水温は設定温度近くの範囲で上下する。前述のように、このような設定ではオンオフする度に冷水の水温が急激に変わり、三方弁での補償が追いつかないため温度変動を小さく出来ない。そこでオンの設定温度とオフの設定温度の差を大きく設定し、一度オンした空冷ファンまたは散水ポンプは加速器が運転されている期間オン状態を保つようにする。こうすることによって加速器の運転中殆どオンオフ制御がなされないために一定温水の温度は非常に安定になる。反面、冷水の温度は外気温と湿度に比例して変動するが一日の変動はオンオフの設定温度の差を8℃にするとほとんど作動しない。

これらの安定化を行った結果を Figure5 に示す。グラフは4日間の外気温、冷却塔の冷水温度、一定温水の温度を示しており、外気温が8～23℃まで変化したのに対し、冷水温度は8℃の変化で途中外気温が下がった時に空冷ファンがオフになり数時間後に再度オンになっている様子が分かる。一定温水の温度は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ を維持することが出来るようになった。また、冷却水温の安定化に伴い、ダンピングリングの軌道も安定し、Figure6 に示すように冷却水温

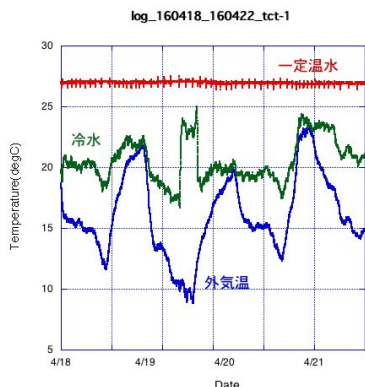


Figure 5: 冷却水の温度制御.

に依存する軌道変化はなくなった。

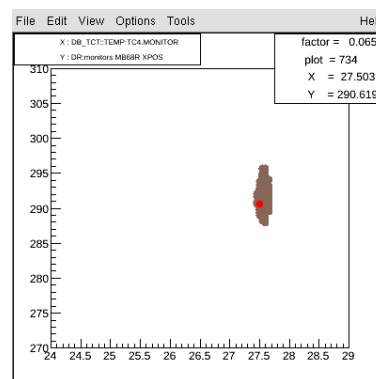


Figure 6: 冷却水の温度制御.

6. 長期運用のための対処

冷却塔を使用した冷却水システムは電力を消費しない代わりに散水用の水の管理や冬期の凍結防止など、運用には注意深いメンテナンスが必要となる[4]。さらに今回の安定化のために、下記に示すような操作を行うようにした。

- A) 空冷ファン、散水ポンプのオンオフ制御の設定温度を変え、いつも同じ空冷ファンや散水ポンプばかりをオンしないように定期的にオンオフの順番を変える。
- B) 冬期には凍結防止ポンプを使用するが、加速器運転中のみオフにする。
- C) 通常、凍結防止のために三方弁制御は最小開度30%までしか制御しておらず、この設定を加速器運転中のみオフにする。

7. まとめ

冷却塔温度制御の設定を変更することにより冷却水温の安定度を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ まで安定化することが出来た。これによりダンピングリングの軌道変動をBPMの測定精度以下まで安定化することが出来た。

謝辞

本研究を支援していただきました山口施設長、道園主幹に感謝致します。また、冷却塔の制御に関して設備課今村誠一氏、清岡翔吾氏に協力いただきましたことを感謝いたします。

参考文献

- [1] ATF Collaboration, "ATF2 proposal", KEK report 2005-2, 2005.
- [2] K. Kubo *et al.*, "ACHIEVEMENT OF SMALL BEAM SIZE IN FINAL FOCUS TEST AT ATF", Proceedings of the 10th Annual meeting of PASJ, SAOTP1, Nagoya, 2013.
- [3] T. Okugi, "ACHIEVEMENT OF SMALL BEAM SIZE AT ATF2 BEAMLINE", Proceedings of the 12th Annual meeting of PASJ, FROL01, Tsuruga, 2015.
- [4] Private communication.