

ATF ダンピングリングの周長アライメント及び周長変動の安定化 ALIGNMENT OF THE ATF DAMPING RING AND THE REDUCTION OF THE CIRCUMFERENCE CHANGE

荒木 栄^{#,A)}, 内藤 孝^{A)}, 奥木 敏行^{A)}, 久保 浄^{A)}, 黒田 茂^{A)}, 田内 利明^{A)},
照沼 信浩^{A)}, 福田 将史^{A)}, 森川 祐^{A)}, 清水 健一^{B)}

Sakae Araki^{#,A)}, Takashi Naito^{A)}, Toshiyuki Okugi^{A)}, Kiyoshi Kubo^{A)}, Shigeru Kuroda^{A)}, Toshiaki Tauchi^{A)},
Nobuhiro Terunuma^{A)}, Masafumi Fukuda^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Shimizu Kenichi^{B)}

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

^{B)} SK-service INC.

Abstract

This paper describes the alignment of the ATF-DR and ATF2 beam line in KEK accelerator test facility (KEK-ATF). The realization of the low emittance beam in ATF-DR and the final focus beam of the ATF2 beam line are strongly depended on the accuracy of the alignment. The measurement and the re-align effort were often repeated. The measurement result sometimes was drifted due to the temperature change. The accelerator hole doesn't have the temperature stabilization. The thermal expansion of the accelerator was measured by using the alignment tools. The measurement results could explain the energy drift of the ATF-DR. The cure method of the energy drift was also discussed.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の先端試験加速器 ATF/ATF2[1]では、2009 年から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[2,3,4,5]。ATF ダンピングリングのアライメントは最終収束系のビーム調整に大きく影響するため、設計値に近づくよう頻繁に努力が続けられて来た。しかし、ATF-DRは加速器建屋ホール(Figure 1)に空調がないため運転時に電磁石電源の発熱等によるゆっくりとした周長の変動が観測されている。ATF ダンピングリングではアーク部にコンバインドバンドを採用しているため、周長の変化や軌道変動は Tune の変化やエミッタンスの増加を引き起こし、最終収束系のビーム調整に大きく影響する。また、軌道変動要素の一つとして電磁石、真空チャンバーなどの冷却水の温度変動が挙げられ安定化も進めている[6]。この周長変動をおさえるため行った対策や測定について報告する。

2. ダンピングリングアライメント

電磁石の位置測定には、主に 3 次元測量器レーザートラッカー[FARO-VANTEGE](LT) [7]を使用している。2011 年東北・関東大震災後に再精密アライメントを終え、引き続き測量調査をしている[8]。寒暖による季節変動と元に戻らない経年変動でアライメントエラーが増加している。

2016 年 7 月と
2017 年 2 月の DR

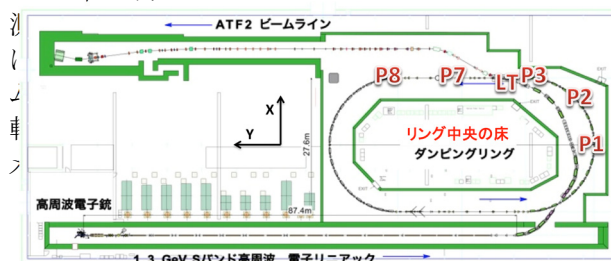


Figure 1: Layout of the ATF Accelerator complex.

104 μm (2016/7月)

dU (rms) = 148 μm (2017/2月)

高さ(縦)方向:

dZ (rms) = 106 μm (2016/7月)

dZ (rms) = 92 μm (2017/2月)

ビームラインの形状に変化が現れていることがよく分かる。徐々に残差が増加しているが、ランダムに変化するわけではなく、局所的に数値の大きいエリアが存在する。逸脱している箇所は、次回のビーム運転に備えて、メンテナンス期間に再アライメントの必要性がある。

[#] sakae.araki@kek.jp

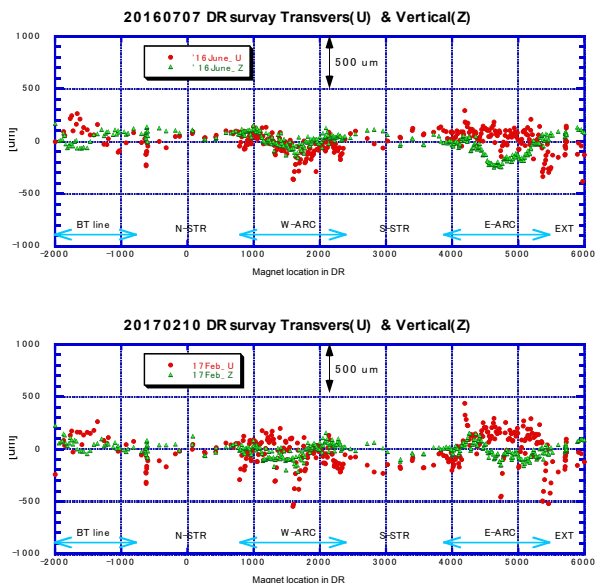


Figure 2: Survey of the ATF-DR beam line in July 2017 and Feb. 2017.

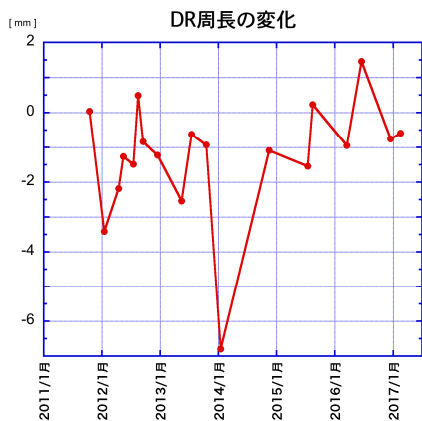


Figure 3: History of the circumference of ATF-DR.

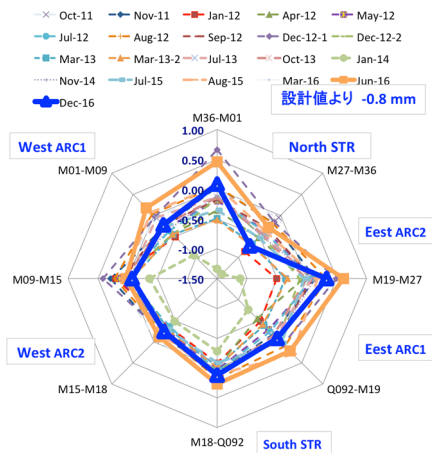


Figure 4: 8 distance measurement of ATF-DR.

3. ダンピングリングの周長測定

これまでの LT 測量結果から電磁石間隔の総和により周長に準じた長さを算出することができる。ダンピングリングの周長は約 138m である。その変化(測定値-設計値)を Figure 3 に示す。季節変動で冬は縮み、春から秋にかけて伸びている。2014 年 1 月は、年末年始の建屋全体の使用電力を最小限にしていた直後の測定で過去一番縮みきった数値を観測した。2017 年 2 月測定時の周長は、 -0.8mm であった。また、リングを 8 区間に分けて簡易的に 8 角形の辺の距離を算出した(Figure 4)。季節でリングの周長が変化しており、西より東側、南より北側の変動が大きい事が分かっている。

4. 周長変動と温度安定化

ATF は加速器ホールに空調設備がないため、温度変動によって周長が変動することが運転開始直後から認識されていた[9]。ATF ダンピングリングはコンパインドバンドを採用しているため、周長が変動すると tune も変動し、加速器のチューニングに大きな影響を与える。

- 周長変動は、大きく分けると、
- 1)年間の温度変動に由来する季節変動、
 - 2)運転中の加速器ホールの温度変動に由来する運転期間変動がある。

運転期間変動は後述するように加速器の床の温度変動が 3、4 日の時定数でゆっくり変動することに由来する。日周期の温度変動も運転期間変動に含まれるが、時定数が大きいことからそれほど深刻な大きさではない。

周長変動によるエネルギードリフトは

$$\Delta E/E = -\alpha^{-1} \Delta C/C$$

より、momentum compaction factor α に設計値 0.0022 を用いると 0.01% が $30\mu\text{m}$ に相当する。ATF ではダンピングリングのアーチ部の BPM の測定からエネルギーを測定し、設計値からの差が大きい場合はダンピングリングの RF 周波数を変えて補正を行っている。

運転中は常にエネルギーを測定しているのでリアルタイムに RF 周波数を変えることも可能であるが、ATF ではリニアックと完全同期入射を行っているため、決められたバケットに入射するためにはリニアックの加速周波数も変えなければならない。リニアックの加速周波数を変えると加速ビームに対して位相が変わるためリニアックを再調整する必要がある。また、SLED を用いているため周波数の変化に対して冷却水温度を調整してチューニングがずれないようにしなければならない。

この様な理由でダンピングリングの RF 周波数の調整には時間がかかるため、加速器立ち上げの時やエネルギードリフトが大きくなった時にだけ行うようにしている。ATF ではダンピングリングの蓄積電流の変動や ATF2 の測定実験から経験的にエネルギードリフトは 0.1% を超えないように RF 周波数を調整している。

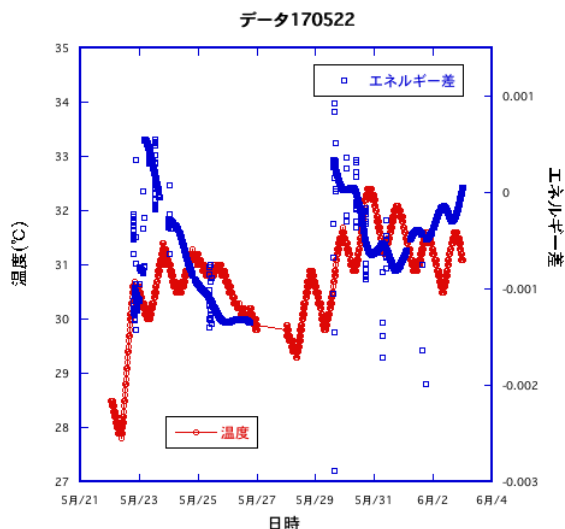


Figure 5: Two weeks history of the energy drift and the accelerator floor temperature (5/21~6/4), Blue: energy deviation, Red: ATF-DR center area.

Figure 5 にエネルギー変動の測定例を示す。ATF は2週間モードで運転され、週末は運転を停止しているが電磁石には通電したままにしている。リング中央部の床の温度は、コンクリートの表面の温度であり、加速器を支えている深部の温度ではない。5/22 に電磁石に通電を開始すると電磁石電源の発熱によって床の温度は3℃程度上昇している。その後は外気温に比例して1~2℃変動している。加速器は電磁石に通電してから、8時間後に運転を開始し 5/23 の運転開始時にエネルギーを+0.001程度に設定したが、3日間の間に-0.001 を超える程度まで変動した。5/29 から運転は再開されたが、この週は周長変動が少なくなっている。

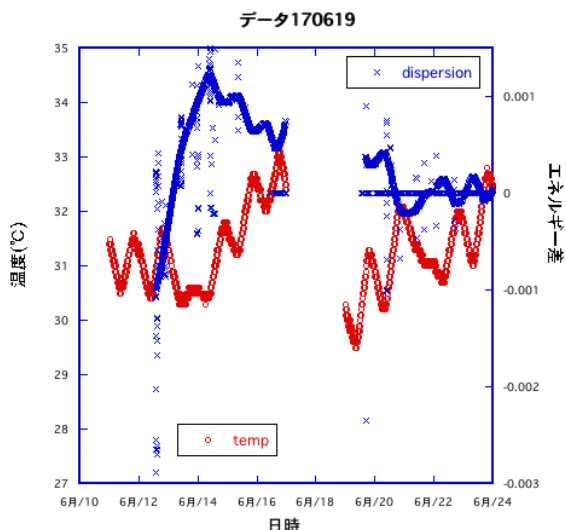


Figure 6: Two weeks history of the energy drift and the accelerator floor temperature (6/10~6/24), Blue: energy deviation, Red: ATF-DR center area.

Figure 6 に冷却水、加速器トンネル内空調の温度を制御した場合のエネルギー変動の測定例を示す。電磁石電源などの発熱がゆっくり周長変動に影響していると推測されるため、加速器運転の前に予め温度を上げておき、運転開始時に温度を下げることで周長変動を抑えることを試みた。加速器運転の一週間前から、電磁石の冷却水の温度を通常の 26℃から 34℃まで上げた。加速器トンネル内の空調温度も 26℃から 32℃まで上げた。また、リング中央部は電磁石電源の発熱を冷やすために冷却水をエレメントに通し冷風を送っているが、この温度設定も上げた。これ等を加速器運転と同時に元の温度に戻し、電磁石電源などの発熱による熱膨張を相殺するようにした。エネルギー変動は加速器運転開始後に通常とは逆の振る舞いをし、-0.001 から+0.001 を超えるほどに周長が縮んだ。その後、加速器トンネル内の空調温度を上げることで徐々に戻ってくる振る舞いをした。この調整はうまくいったとは言えないが、それぞれの温度設定によってエネルギー変動をある程度制御出来ること示している。また、温度設定は冷却設備の能力が十分でないため、注意深く設定する必要があるが、加速器運転中に温度設定を調整することでエネルギー変動をある程度制御できることが解った。

Figure 7 にダンピングリング室内の温湿度およびリング中央の床温度(灰色)のトレンド(5/23~7/24)を示す。加速器運転中でも冷却水温度(黄緑)を下げる(5/30)とそれに伴い DR 室内の温度(P1~P8)が下がり、冷却水温度を上げる(6/2)と室内の温度が上昇している。また、運転を停止して電磁石電源などをオフにする(6/24)と室温が下降する。運転終了作業後(6/26~)はトンネル空調により安定を保っている。

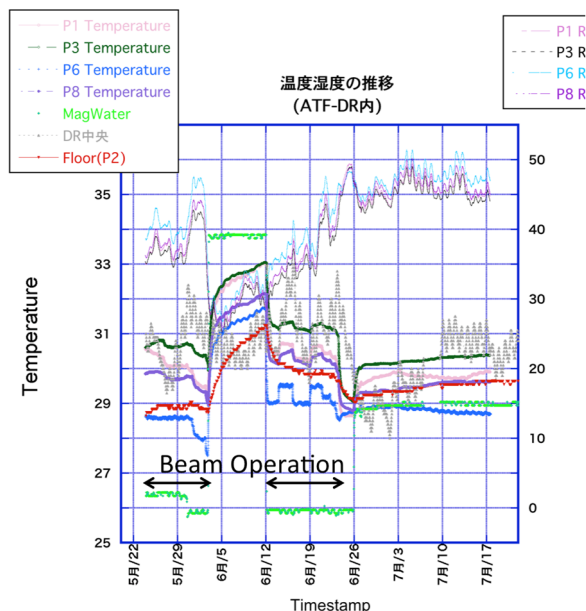


Figure 7: Four weeks history of the temperature-humidity of the ATF-DR tunnel (5/23~7/24), Grey: floor temperature of the ATF-DR central area, Right green: the Magnet cooling water temperature.

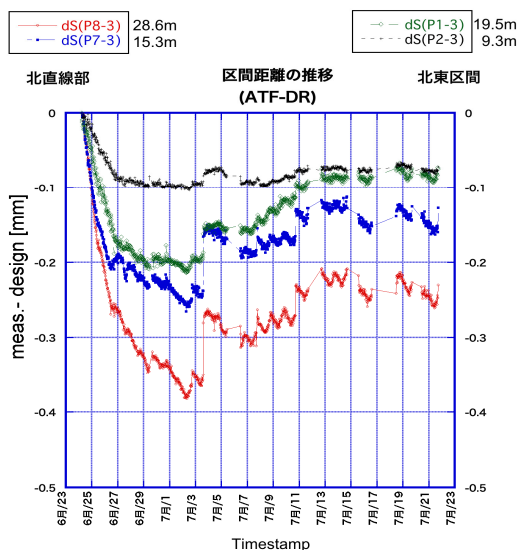


Figure 8: Deviation of the block distance of the DR-East-South area.

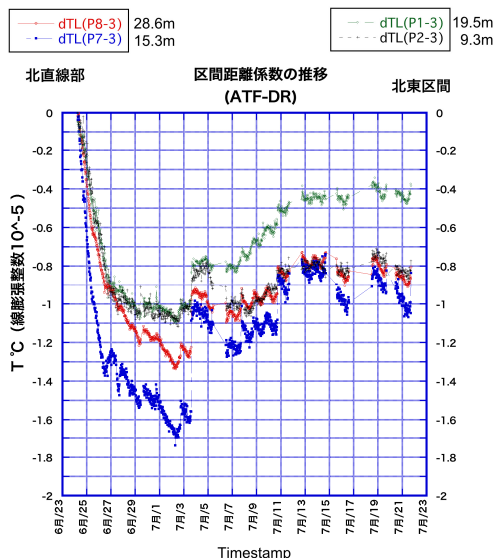


Figure 9: Liner Expansion coefficient change in the block distance of the DR-East-South area.

5. ダンピングリング北東エリア測定

加速器運転中は測定機材を持ち込む事が困難なため、電磁石の設置位置を直接測定する事はできない。運転終了直後に測量機材(LT)を運び入れ、北東エリアの定点測量 (Figure 1 の P1, P2, P3, P5, P8 地点) を 6/23~7/24 におこなった。およそ 5 分毎の連続測定結果を 30 分平均にしたものを Figure 8 に示す。北直線部最初の偏向電磁石 P3 を基点として、それぞれの P 点まで区間距離の変化をプロットした。運転終了から急速に各区間が縮み始めている。最初の1週間の変動は大きく、北直線部では 2 週間近く縮み続けることが明らかになった。その後は緩やかに伸びてきている。

更に、各区間の変化を距離で割り、膨張率を算出した。Figure 9 に膨張率を 1×10^{-5} と仮定した場合の温度変化を縦軸として表す。各区間の膨張係数は、概ね同じ傾向で Figure 7 の”DR 中央”床温度の変動に似た変化を示す。これはトンネル室外の環境温度の変化が周長変動の起因の一つであると考えられる。また、P7 区間の変化率が大きいのは、運転時の発熱体が多く、周囲の温度が他よりも高めているためと思われる。その付近は、ビーム入出射部を含む電磁石や配線の密度が高いエリアのため、外部からの熱流入が他区間と少し異なっていると推測している。

6. まとめ

ダンピングリングの形状は季節変動や温度変化により伸縮している。トンネル室外の環境温度の変動も受けるが時定数が大きくゆっくりと変化する。ビーム運転開始から徐々に変化してビーム運転に影響する。外部熱流入の代わりに、冷却水やトンネル空調温度を予め可変させて代用することにより周長変化をアクティブコントロールできる様になり、エネルギー変動を抑える指針ができた。

総合的に温度制御を最適化すればより安定したビーム運転が可能になる。今後は温度設定の最適化や熱流入の安定化を進める予定である。

謝辞

本研究を支援して頂きました山口施設長および道園主幹に感謝いたします。また、各種作業や測定には運転管理の皆様にご協力頂きましたことを感謝いたします。

参考文献

- [1] ATF2 Collaboration, “ATF2 Proposal”, KEK Report 2005-2, 2005.
- [2] P. Bambade *et al.*, “Present status and first results of the final focus beam line at the KEK Accelerator Test Facility”, Phys. Rev. ST-AB 13, 042801 (2010).
- [3] K. Kubo *et al.*, “ACHIEVEMENT OF SMALL BEAM SIZE IN FINAL FOCUS TEST AT ATF”, Proceedings of the 10th Annual meeting of PASJ, Nagoya, 2013.
- [4] T. Okugi *et al.*, “ACHIEVEMENT OF SMALL BEAM SIZE AT ATF2 BEAMLINE”, Proceedings of the 12th Annual meeting of PASJ, Tsuruga, 2015.
- [5] N. Terunuma *et al.*, “STATUS REPORT OF THE ACCELERATOR TEST FACILITY”, these Proceedings.
- [6] T. Naito *et al.*, “TEMPERATURE CONTROL OF THE COOLING WATER FOR THE ORBIT STABILIZATION OF KEK-ATF”, Proceedings of the 13th Annual meeting of PASJ, Chiba, 2016.
- [7] FARO: <http://www.faro.com/products/metrology/faro-laser-tracker/overview>
- [8] S. Araki *et al.*, “PRESENT STATUS OF ALIGNMENT FOR ATF2 BEAM LINE”, Proceedings of the 12th Annual meeting of PASJ, Tsuruga, 2015.
- [9] J. Urakawa *et al.*, “Studies on the Beam Orbit Change in ATF Damping Ring”, KEK preprints 19-122, 1999.