

ATF Damping Ring の周長変化

VARIATION OF THE ATF DAMPING RING CIRCUMFERENCE

Takashi Naito[#], Sakae Araki, Junji Urakawa, Toshiyuki Okugi,
Kiyoshi Kubo, Shigeru Kuroda, Nobuhiro Terunuma(KEK),

High Energy Accelerator Research Organization(KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801

Abstract

The circumference change by the thermal expansion of the accelerator hall was observed at the KEK-ATF damping ring(DR) since the commissioning. The previous measurement showed 6mm of the circumference change during a year. After introduced the air cooling of the center area of the ring, the circumference change reduced to 4mm. Recently, the ATF2 project using the extracted beam from the DR is in progress and the precise beam tuning is needed to make the ultimate small beam size at the virtual focus point. The circumference change is a serious problem for the ATF2 beam tuning, which is caused by the energy change, the orbit change and the beta function change for the extracted beam. This paper describes the measurement results and the compensation scheme.

1. はじめに

環境温度の変化などによるストレージリングの周長変化は多くのリングで報告されている[1] [2]が、先端試験加速器ダンピングリング(ATF-DR)でも同様に周長変化が観測されている[3]。1997年の測定では138mの周長に対して6mm以上の周長変化が測定された[3]。ATF-DRは空調設備のない建家に建設されており、ビームラインの高さは地上1.2mであるため温度変動の影響を受け易い。また、偏向電磁石電源などのハイパワー機器がドーナツ状のトンネルの内周部に設置されているため発熱がリングの内部の地面の温度を変化させて内周部の熱膨張が周長変化をもたらしていると考えられた。この周長変化の対策として、3つの提案がなされた[3]。1) トンネル内周部の温度上昇を抑えるために外気を導入して冷却する。2) 軌道を補正するためにシケインを導入する。3) リングの加速周波数を制御することによって軌道を補正する。このうち、1)と3)の対策が行われた。2)に関してはATF-DRは加速器コンポーネントが非常に密に並べられておりシケインを構成する電磁石を設置するスペースがなかったことなどから3)の方法で軌道補正をすることとした。

ATFは2004年よりATF2 project[4]として、ダンピングリングから取り出したLow Emittance Beamを使い37nmの垂直ビームサイズを実現することを目標として実験が進められている。ATF2では、さらに精密なビームパラメータの制御が必要になり、周長変化によるエネルギー、軌道、 β 関数の変化は

極小ビームサイズの実現に大きな影響がある。そのため周長変動の補正も頻繁に行われるようになった。本稿では、最近の計測結果、加速周波数の調整機構、今後の改善点などについて述べる。

2. 加速周波数の調整

ATF-DRの加速周波数は714MHzが使われており、加速周波数の調整はシンセサイザー(Agilent E8663B)の周波数を変えることによって行うことが出来る。ATF-DRではS-bandリニアックの加速周波数と位相同期を取ることによってリングのRFバケットの同一位相に入射出来るように設計されている[5]。そのためDRの加速周波数を変えるためにはS-bandリニアックの加速周波数も同時に変える必要がある。S-bandリニアックは加速効率を上げるためSLEDキャビティを用いている。SLEDキャビティはQ値が $\sim 10^5$ と非常に高いため、数kHzの周波数変更でもSLEDキャビティの共振周波数からずれてしまうという問題が発生する。共振周波数を微調した周波数に合わせるためには冷却水の温度を変える必要がある。

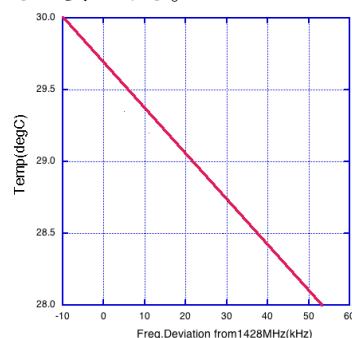


Figure1: Cooling water temperature as a function of the Frequency

[#] takashi.naito@kek.jp

図1はシンセサイザーの周波数 1428MHz (714MHz の2倍を発信周波数として用いている)を微調した時に SLED が共振する水温である。加速周波数 714MHz を 20kHz 微調した時に、SLED キャビティの冷却水温度は 1.5°C程度変更する必要がある。そのため、シンセサイザーの周波数を変えること自体は簡単なことであるが、SLED キャビティの冷却水温度も同時に変える必要がある。ATF ではソフトウェアにより2台のシンセサイザーの周波数を変えると同時に冷却水温度を変えるシステムを構築した。冷却水温度は設定を変えても SLED キャビティの温度が安定するまで 10~15 分程度待つ必要がある。

3. 周長測定

周長測定はレーザートラッカーを使い加速器運転の合間に行っている。図2は1997~1999年に測定された周長変化[3]で HEX はレーストラック形のリングの両端の頂点と2つの直線部の両端の6点の測定から求めた周長、B-B はリングの36点の測定から求めた周長を示す。年間に約6mmの変動が観測された。

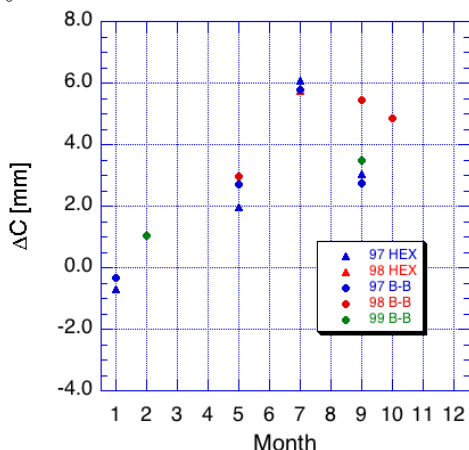


Figure 2: Change of DR Circumference during 1997 ~ 1999, from reference[3]

この変動を抑えるために、図3に示すようなリング内周の温度上昇を抑える外気導入システムを設置した。このシステムによりリング内周部の温度上昇はある程度緩和された。



Figure 3: Ventilation ducts for cooling the floor of the DR

しかし、外気の導入は冬期には非常に効果があるが春以降は温度が上昇しあまり効果がない。また、後述するが昼夜の温度変動が観測されている。最近の36点の測定を図4に示す。やはり季節変動により3~4mm程度が観測された。図2の周長測定に対して、ゼロ点がずれているが、これは東日本大震災のために加速器コンポーネントの位置が大幅にずれアライメントをやり直したためである。

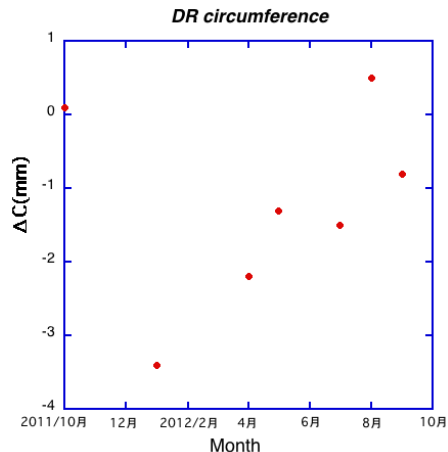


Figure 4: Change of DR Circumference during 2011~2012

4. 加速周波数から求めた周長変動

周長の変動は、C を周長、E をエネルギー、 f_{RF} を加速周波数とすると、

$$\frac{\Delta C}{C} = -\alpha_c \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta f_{RF}}{f_{RF0}} \quad (1)$$

よりエネルギーの変動として表され、加速周波数を変えることによって補正出来る。

エネルギー変動は、

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta x}{\eta} \quad (2)$$

より、アーク部のビーム軌道の変動から求めることが出来る。ATF の場合モーメントムコンパクションファクター α_c は 0.00214 であり、138m の周長に対して 30 μ m の周長変動がある場合、 1×10^{-4} のエネルギー変動に相当する。

また、714MHz の加速周波数に対しては 153Hz の変化に相当する。

ATF-DR では加速周波数を調整してビーム軌道をマグネット中心に合わせている。この周波数の調整量から周長変動を (1)式から求めることが出来る。図5は1年間の周波数調整量と相当する周長変化量で、約7mmの変化が観測されている。10月から12月まで間は DR トンネル内の空調が故障しトンネル内の温度上昇があったため例年冬期に周長が縮むはずであるが測定は伸びたものと推測される。その部

分を除くと概ね測量の結果と一致する。



Figure 5: Change of the circumference during 2012~2013, which is estimated from the change of the DR acceleration frequency

5. BPM によるエネルギー測定

(2)式からエネルギー変動が求められ、相当する周長の変化を測定出来る。ATF-DR では最近、常時モニターとして BPM の測定値からエネルギー変動を表示し、この値を指標にエネルギーのずれが大きくなると加速周波数を変え、エネルギーの補正を行うようにしている。2013 年 5 月、6 月の履歴を図 6 a, b に示す。周波数を変えた直後は入射調整のために測定値は散乱しているが、定常状態では日々エネルギーがドリフトしている様子がよく分かる。変動がある程度大きくなった段階で周波数を変えゼロ近傍に近づくように調整している。調整は下流の ATF2 のビームチューニングの都合により必ずしもゼロ近傍ではない値を保つように調整した場合もあったが概ね 0.01% の変動幅に抑えるよう調整している。

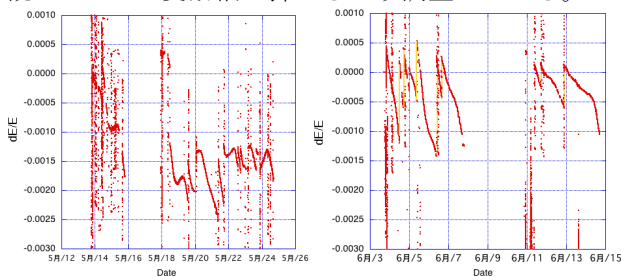


Figure 6a(left): measured dE/E in May/2013,
Figure 6b(right): measured dE/E in Jun/2013

5 月の運転では 1 日の間でも外気温の変化により伸び縮みしている様子が分かる。6 月の運転では外気温が上昇したため周波数を大きく変えても周長が伸び続けている。

この時の加速周波数の変化と相当する周長変化を図 7 に示す。6 月の運転開始時は -4mm であり、これは今までの履歴では冬期の周長に相当する。それ

から 2 週間の運転の間に 3mm 以上、周長が伸びている。6 月の加速器運転が始まる前の 10 日程度は電磁石電源の全てがオフされており、加速器運転が始まる直前に全ての電源がオンされた。通常の運転では、電磁石電源は運転開始より 2、3 日前にオンして、温度が安定化してから運転に入ったが、この時は直前に電磁石電源をオンしたためこれほど大きな周長変動が観測されたものと思われる。

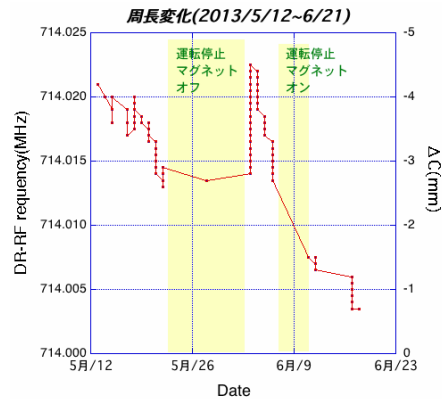


Figure 7: Change of the circumference from 12/May to 23/Jun, which is estimated from the change of the DR acceleration frequency

6. 温度変化

周長変化に最も影響していると思われるのは、加速器が設置されている床面の温度変化である。図 8 は、DR 内周部の床面コンクリートの温度変化である。電磁石電源をオンにしてから 3 日程度で約 4℃ 上昇している。また、外気温の変動で約 1℃ の日変化がある。この部分は前述したように電磁石電源が設置されており、運転時には発熱がありその冷却のために外気が導入されているが、外気温の影響を受ける。

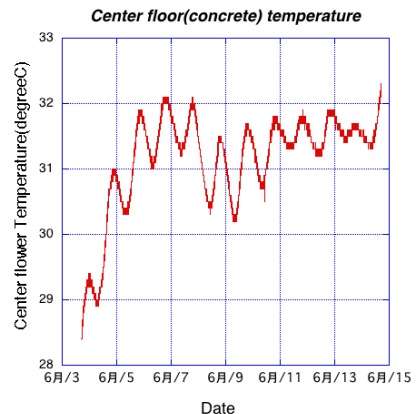


Figure 8: Change of the temperature of the floor concrete at the inside of the DR

空調されている DR トンネル内の温度にも問題があることが解った。図 9 は電磁石電源をオンにしてか

ら1週間のトンネル内の温度変化である。赤：トンネル北直線部、緑：トンネル南直線部である。1週間の間に3~4℃の上昇が見られる。温度変動は非常にゆっくりとしている。他にアーク部のコンクリート床など何点かを測定したが同様の振る舞いしていた。この結果からトンネル内の温度変化が床面の温度変動に影響していることが解った。そもそも空調の温度制御は発熱の有無に関わらず、一定になるよう制御するべきで空調の温度計測の場所に問題があると思われる。

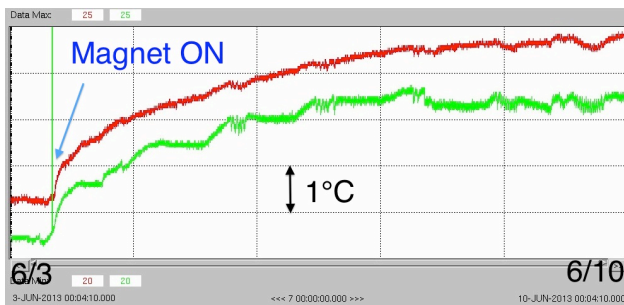


Figure 9: Change of the temperature of the air at the inside of the DR tunnel

7. まとめと今後の方針

測定の結果に見られた周長変化は加速器の運転停止中であり、電磁石電源はオフされているため温度上昇もそれほど大きくはなく、外気温の変動が緩やかに反映されているものと思われる。BPMのエネルギー変動から求められた周長変化は加速器が運転中であり電磁石電源をオンしてからの熱がコンクリートに蓄積される時間により安定するまで3、4日かかっている。さらに外気温の変化に影響されているものと思われる。測定の結果とビーム運転時の加速周波数の微調量から求めた周長変動は概ね一致している。

BPMによるエネルギー測定が常時行えるようになったことによって、取り出しビームのエネルギー変動を一定範囲以下に保つ運転が出来るようになった。

外気導入では特に外気温が上昇した時に温度の安定化が難しいことが解り、チラーを使った冷風により冷却することを検討している。トンネル内の温度はセンサの位置を移動することによって、変動を少なく出来るものと期待される。

8. 謝辞

本研究をサポートしていただきました山本 ILC 推進室長、生田施設長、山口主幹に感謝致します。

参考文献

- [1] R. Sugahara et al., "VARIATION OF THE CIRCUMFERENCE OF THE KEKB RING AFTER THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-11, 2012, Osaka, Japan
- [2] T. Katsura et al., "Variation of the Circumference in a Storage Ring and Expansion of the Building", Proceedings of the 3rd European Particle Accelerator Conference, Germany, 24-28 March, 1992
- [3] J. Urakawa et al., "Study on the Beam Orbit Change in ATF Damping Ring", Proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, 27-29 October, 1999, Riken
- [4] ATF2 Collaboration, "ATF2 proposal", KEK Report 2005-2, Aug 2005
- [5] T. Naito et al., "Timing system of the ATF", Proceedings of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS 97), Beijing, China, 3-27 November, 1997