

光源蓄積リングにおけるアボートビームの損失評価 SIMULATION STUDY OF ABORT BEAM LOSS AT LIGHT SOURCE STORAGE RINGS

高雄勝 ^{*A)}、早乙女光一 ^{A)}、下崎義人 ^{B)}、田中均 ^{C)}
Masaru Takao ^{*A)}, Kouichi Soutome ^{A)}, Yoshito Shimosaki ^{B)}, Hitoshi Tanaka ^{C)}
^{A)}JASRI, ^{B)}KEK, ^{C)}RIKEN

Abstract

In recent and next-generation light source storage rings, a large current beam of low emittance is accumulated for high luminance, and when discarding it, care should be taken not to damage the equipments. Also, due to the generation of stronger synchrotron radiation, the use of a narrow gap in-vacuum insertion device (ID) has expanded, and in order to prevent demagnetization of ID, ID damage due to abort beam must also be evaluated. In many light source facilities, the beam abort is performed by turning off the acceleration RF. However, the electron beam in which the energy supply is stopped loses energy by synchrotron radiation and collides with the inner wall of the vacuum vessel and is lost. Meanwhile, if there is a coupling, the displacement in the horizontal direction goes around in the vertical direction, and a part of the abort beam may collide with the ID. In order to prevent demagnetization of ID and to protect equipment, it is necessary to evaluate the loss distribution of abort beam in detail. The items to be considered in designing a storage for preventing equipments and IDs from the damage by the abort beam are reviewed.

1. はじめに

最近および次世代の光源蓄積リングでは、高輝度化のため低エミッタンスの大電流ビームが蓄積されており、これを廃棄する際には機器に損傷を与えないよう配慮する必要がある。また、より強い放射光発生のため、狭ギャップ真空封止挿入光源の利用が広がっており、IDの減磁防止のためアボートビームによるIDの損傷も評価しなければならない。多くの電子蓄積リングのビームアボートは加速RFをオフすることによって行われるが、エネルギー供給の途絶えた電子ビームは、シンクロトロン放射によりエネルギーを失っていき、真空容器内壁に衝突して失われる。この間、結合があると水平方向の変位は垂直方向に回り込み、アボートビームの一部はIDに衝突することがある。RFオフによるアボートビームの損失分布を制御して、IDの減磁防止、機器保護するため、蓄積リングの設計、運転に際して配慮すべき項目について説明する。

2. アボートビームによる機器損傷に対して注意すべき項目

2.1 アボートビーム軌道

多くの放射光源リングでは、蓄積ビームを廃棄するためRFをオフすることが行われている。RFオフによるアボートビームは、シンクロトロン放射によりエネルギーを失い、ディスパージョン軌道に沿って断熱的にリング内側にシフトして行く。Figure 1にSPring-8蓄積リングのRFオフ後のアボートビーム軌道(1ターン目)の例を示す。比較のため、エネルギー偏差 -0.11% (1ターンあたりの放射損失)のディスパージョン軌道が表示してある。線形ディスパージョンに基ずく最低次の評価ではアボートビームは、ディスパージョンの最大の所(アーク部)で真空容器内壁に衝突することになる。

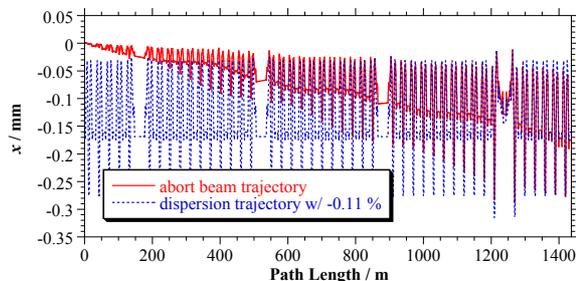


Figure 1: Trajectory of abort beam at 1st turn.

現実の蓄積リングには誤差磁場があり、ディスパージョン関数は歪むことがあるので、アボートビームは局所的に集中して失われる可能性がある。また、非線形ディスパージョンやリングの非対称性によっても局所化する可能性がある(後述)注意する必要がある。

2.2 アボートビームのエミッタンス

アボートビームは、RFオフ後失われるまでに数100ターンの周回を重ねるが、この間も放射プロセスでは放射減衰があるので、励起された共鳴を跨がなければビームは広がることはない。このため先に述べたように、アボートビームは収束したまま真空容器などに衝突することになるので注意を要する。

2.3 真空容器の材質

真空容器の材質としては、アルミニウムやSUSが用いられるが、SUSのように原子数が大きく熱伝導の悪い材質を使用した場合に、大電流のアボートビームが集中的に衝突すると、アボートビームのenergy depositにより、真空容器がダメージを受けることになる。これを避けるため、当該箇所には散乱体を装着するなどの対策を取る必要がある。或いは、積極的にアボートビームを落とすため、リングの1(数)ヶ所に水平口径の狭いビームダンパーを設けることなどが考えられる。

* takao@spring8.or.jp

2.4 非線形ディスパージョン

アポートビームが真空容器内壁に到達するまでに失うエネルギー偏差は約 -10% にも達する。SPring-8 蓄積リングの場合、ディスパージョン最大値は 0.3 m 、真空容器水平口径は 35 mm なので、真空容器内壁に到達するエネルギー偏差は -12% となる。これ程のエネルギー偏差になると、アポートビームの振る舞いについては線形理論では間に合わなくなる。このため、ディスパージョンにしても、高次非線形性の影響でアーク部で最大となるとは限らない [1]。実際、現在の SPring-8 蓄積リングでは、Fig. 2 に示すように、線形ディスパージョンのみではアーク部より直線部の方が小さくなっているが、4 次まで含めたディスパージョンは $4\text{--}6\%$ の範囲では逆に直線部の方が大きくなっている。ディスパージョンの周期性が崩れているのは、リングの非対称性によるものである。真空容器を有効に保護するためには、アポートビームのリング全周にわたる損失分布を詳細に調べる必要がある。

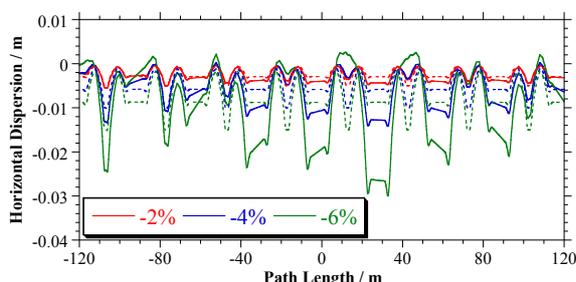


Figure 2: Linear (dashed line) and non-linear (solid line) dispersion trajectories over 8 cells of the SPring-8 storage ring with momentum deviations of -2% , -4% and -6% .

特に、入射部のように他の部分に比べて狭くなっている箇所がある場合に注意を要する。SPring-8 蓄積リングの真空容器の内径(半幅)は水平 35 mm 、垂直 20 mm であるが、入射部では水平方向 -18.6 mm の位置に真空容器内壁がある。入射部のある直線部でのアポートビームの軌道変位はアーク部より大きくなるので、アポートビームの大半は入射部で失われることになる。SPring-8 蓄積リングではこれを避けるため、入射部の手前および 1 セル上流の直線部にビームダンパー(口径制限: -20.0 mm)を設けている。

2.5 真空封止挿入光源ギャップ

ここまでは、アポートビームがエネルギーを失うことによる水平方向軌道変位を議論してきたが、実際のリングではスキュー 4 極誤差磁場の影響により垂直方向にも変位するので、垂直方向の運動について検討する必要がある。特に最近の光源リングではより強い放射光を得るため、狭いギャップの in-vacuum undulator (IVU) の採用が主流となっているので、アポートビームの垂直方向拡がりを知ることは挿入光源の永久磁石の減磁対策の観点から大変重要になる。

また、回折限界に近い高輝度放射光光源リングにおいては、低エミッタンス化により短くなる Touschek ビー

ム寿命を改善するため、カップリングを増やして垂直方向にビーム拡げようとする向きもあるが、IVU の減磁対策という観点からアポートビームの損失分布に注意を要する。

2.6 垂直ディスパージョン

スキュー 4 極誤差磁場により垂直ディスパージョンが励起されるので、水平方向と同様にアポートビーム軌道は垂直ディスパージョンに沿ってシフトして行く。通常、垂直ディスパージョンは小さいので問題にならないが、カップリングを増やすため垂直ディスパージョンを増幅する場合には注意を要する。

2.7 結合共鳴

アポートビームのビームエネルギーは失われるまでに -10% 程もシフトするので、クロマチシティのためにベータトロンチューンも大幅にシフトする。このときシフトして行くチューンが、結合共鳴を横切る場合がある。元々、アポートビームが持っているビーム振動は、ビームサイズ程度の小さいものであるが、結合共鳴の励起が強い場合には垂直方向口径制限に達するほど増幅することがある。

以上の注意点を踏まえた、RF オフによるアポートビームの損失分布の評価例を次節で紹介する。

3. アポートビーム損失分布の評価例

3.1 モデルリング

モデルリングとして、16 セルの double double-bend achromat (DDB) 構造の光源用リングを用いる。その主なビームパラメーターを Table 1 に示す。

Table 1: Beam Parameters of Model Ring

Beam Energy	3 GeV
Natural Emittance	1.1 nm-rad
Coupling Ratio	1.0%
Energy Spread	0.0825%
Radiation Loss per Turn without IDs	0.59 MeV

モデルリングのエラー分布は、カップリングが 1% となるよう、全ての 6 極電磁石 (160 台) にスキュー 4 極誤差磁場がランダム分布していると仮定した。また、ベータトロン関数の変形をもたらすノーマル 4 極誤差磁場については、1 セル当たり 12 ケ所、総計 192 ケ所に仮定し、 2% の偏差となるようにした。

モデルリングの物理口径は、真空容器の $30\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ (全幅)、および入射部を除く全ての直線部に設置された IVU (最小) ギャップは 5 mm とした。入射部真空容器内壁は、 -8.5 mm の位置とした。

3.2 シミュレーション条件

アポートビームの損失分布は、初期条件として Table 1 に与えられた分布を持つ 5000 粒子についてトラッキングシミュレーションを行うことで評価した。計算コードは、symplectic integrator によるトラッキングコード “CETRA” [2] を使用した。

3.3 結果

まずはシミュレーションにおいてモデルリングの運転点を (29.17, 9.23) とした。これは、アポートビームのチューンがシフトしていく時にノーマル六極共鳴 ($\nu_x + 2\nu_y = 48$) を横切り、共鳴の影響が見えるためである。この共鳴は、モデルリングの構造共鳴 ($48 = 3 \times 16$) にあたり、強く励起されている。

リング全周にわたるアポートビームの損失分布を Fig. 3 に示す。1 m 毎に損失粒子数を集計したものである。図中、赤色丸印は IVU にあたって垂直方向に失われた粒子を表し、緑色丸印は真空容器内壁にあたって水平方向に失われた粒子を表す。

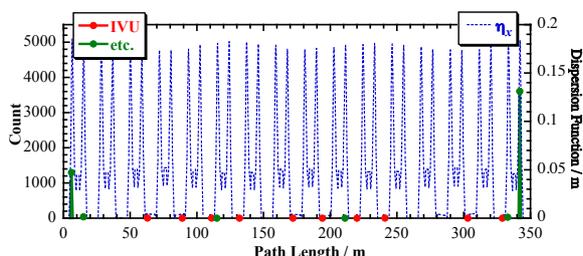


Figure 3: Lost beam distribution and dispersion over circumference.

後者は、全てアーク部で失われており、入射部で失われるものは無かった。これを理解するため、モデルリングの4次までの高次項を含めたディスパージョンを見ると、Fig. 4 にある通り、エネルギー偏差10%でもほぼ線形ディスパージョンに比例しており、入射部のある直線部ではほとんど軌道はシフトしていない。

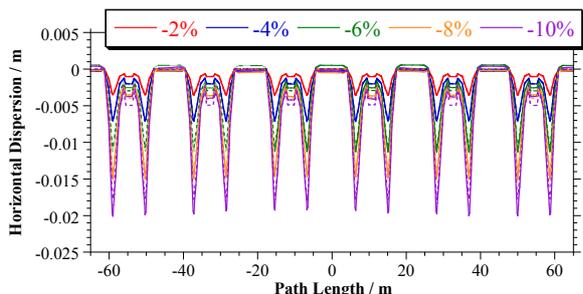


Figure 4: Linear (dashed line) and non-linear (solid line) dispersion trajectories over 6 cells with momentum deviations of -2%, -4%, -6%, -8% and -10%.

アーク部の損失分布は、非常に局在化している。これは、ディスパージョンの対称性の崩れからも分かるように、4極誤差磁場がもたらすリングの非対称性の表れである。このように、アポートビームの損失が偏っているため、真空容器の材質を SUS とする際には、アーク部内側の真空容器の厚みを厚くする、あるいは内側に散乱体を装着するなど対策を取る必要がある。

僅か (26/5000) ではあるが IVU でアポートビームの損失があるが、これは前述の通り結合共鳴の影響で、垂直方向にビームが広がったためである。RF 断後エネ

ギーを失っていく際の50ターン毎のビームプロファイルを Fig. 5 に示す。水平方向のビーム中心は、エネルギーを失っていくに従い内側にシフトしているが、ビーム幅はそれほど広がってはいない。垂直方向は、垂直ディスパージョンによる僅かなビーム中心のシフトに加え、350ターン(エネルギー偏差-6.9%に対応)あたりからビームが広がっている。

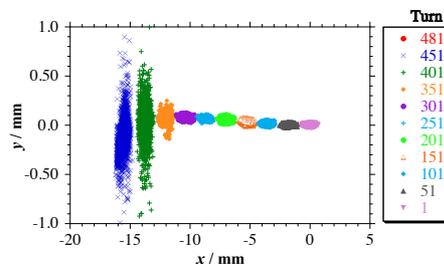


Figure 5: Beam distribution on transverse cross section at every 50 turn after switching off RF acceleration.

これを理解するため、エネルギーを失っていく際のアポートビームのベータトロンチューン足跡を single particle tracking により求めた。結果を Fig. 6 に示す。運動量偏差が-6%を越えたところで、ノーマル6極共鳴 $\nu_x + 2\nu_y = 48$ を横切っており、近傍では垂直方向ビーム振動が発散して、チューンを求めることができなかった。アポートビームのビーム振動は、ビームサイズ程度の小さいものであるが、共鳴によりビーム振動が励起され、ID に衝突するものが現れることになると理解できる。

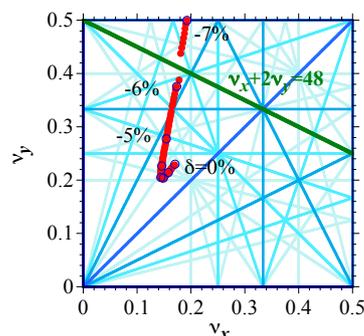


Figure 6: Footprints on tune map of betatron tunes of abort beam with losing energy.

この結果を確認するため、水平ベータトロンチューンを1下げて、アポートビームのベータトロンチューン足跡を構造共鳴から外したオプティクスに対して、同じシミュレーションを行った。そこでは、IVU でのアポートビーム損失は無く、ノーマル6極共鳴 $\nu_x + 2\nu_y = 47$ を通過する際も垂直方向ビーム幅が拡大することは無かった。

4. まとめ

光源リングにおける RF オフによるアポートビームの損失分布の評価に際して、注意すべき項目について報告

した。モデルリングに対して行ったアポートビームの損失分布の評価を通して、その適用例を紹介した。

真空容器の材質として SUS など原子数が大きく熱伝導の悪いものを用いる際には、大電流のアポートビームが局所的に集中して当たらないか注意する必要がある。アポートビームの損失分布の局在化は、非線形ディスパージョンを含めリングの非対称性により引き起こされるため、避けられないが、有効に機器保護対策を取るためには、アポートビームの損失分布について詳細に検討する必要がある。

最近の光源リングでは、狭ギャップの IVU の使用が広まっており、挿入光源の永久磁石の減磁の観点から IVU でのアポートビームの損失についても注意する必要がある。垂直方向のビーム拡がりには結合共鳴などにより励起されるが、アポートビームのエネルギーシフトに伴うチューンシフトが大きいので、共鳴励起条件について注意する必要がある。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “A Perturbative Formulation of Nonlinear Dispersion for Particle Motion in Storage Rings”, Nucl. Instrum. Method **A 431**, 396 (1999).
- [2] J. Schimizu *et al.*, Proc. of the 13th Symp. on Accel. Sci. and Tech., Osaka, Japan (2001), 80.