

大型放射光施設 SPring-8 の現状とビーム性能改善

STATUS OF THE SPRING-8 ACCELERATORS AND THE IMPROVEMENT OF BEAM PERFORMANCE

高雄 勝、for 加速器部門

Masaru Takao*, for Accelerator Division

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

May 2013 we lowered the emittance of the SPring-8 storage ring from 3.5 nm-rad to 2.4 nm-rad to enhance the brilliance and the flux density. At the optics change the momentum acceptance shrunk from 3.2 % to 2.4 %, which resulted in decreasing beam lifetime, and also the dynamic aperture got smaller, which caused the decrease of the injection efficiency. Then, by carefully tuning the sextupole magnets, we recovered these apertures almost up to those of the previous optics. There are many insertion devices at the SPring-8 storage ring, some of those have severe impact on the beam dynamics, e.g. the injection efficiency, or the emittance coupling ratio. Recently we start to the correction gainst the impacts for the stable operation of the storage ring.

1. はじめに

SPring-8 蓄積リングでは輝度やフラックス密度向上のため、2013年5月よりエミッタンスをそれまでの3.5 nm-rad から 2.4 nm-rad に下げたオプティクスで利用運転を行っている^[1]。当初、このオプティクス変更に伴い、モーメントムアクセプタンスやダイナミックアパーチャーの狭小化によるビーム寿命の減少や入射効率の低下が発生したが、6極電磁石調整などマシン調整を進めた結果、ほぼ従来の3.5 nm-rad オプティクスと同等のビーム性能が回復された。

最近の利用運転中、挿入光源 (ID) の磁石列ギャップ駆動に伴う入射効率の低下が顕著になってきた。これは、ギャップ駆動によるベータトロンチューンのシフトや多極磁場励起の影響で、利用運転中はこれらを補正することで80%以上の高入射効率を維持している。

2013年度の利用運転状況は、計画利用運転時間3432時間に対し、実績3408時間29分と、利用率として99.31%を達成した。これは、過去10ヶ年度で最高のものであった (Fig. 1)。SPring-8 では利用運転中も電子ビーム入射を行うトップアップ運転を行っているが、安定なビーム入射により利用運転時間の99%で蓄積電流値の変動は0.03%以内に保たれている。その他、SPring-8の加速器の最新の状況について報告する。

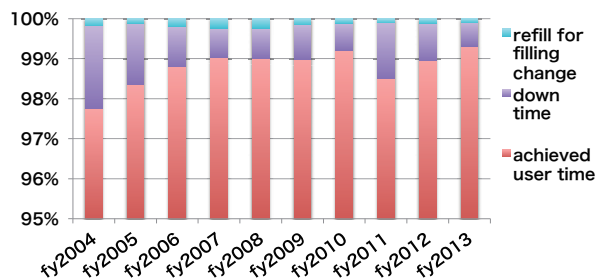


Figure 1: Operation statistics of past 10 fiscal years.

2. 低エミッタンスオプティクスのビーム調整

低エミッタンス化前後の主な蓄積リングパラメータを Table 1 に示す。水平チューンを1上げ、水平方向により収束することにより、高輝度化が図られている。

Table 1: Parameters of the SPring-8 Storage Ring

	~ April 2013	May 2013 ~
Energy	8 GeV	
Betatron Tune (H/V)	40.14 / 19.35	41.14 / 19.35
Chromaticity (H/V)	2 / 2	
Natural Emittance	3.5 nm-rad	2.4 nm-rad
Coupling Ratio	0.2 % - 0.4 %	

現状の SPring-8 蓄積リングのオプティクス関数を Fig. 2 に示す。SPring-8 蓄積リングのラティスは、36個のユニットセルと4ヶ所の長直線部 (両脇のマッチングセルを含む) からなり、その内の1ヶ所の長直線部は2セットの4重極電磁石トリプレットで3分割することにより3連の狭ギャップ (最小ギャップ5.81 mm) アンジュレータが設置されている。

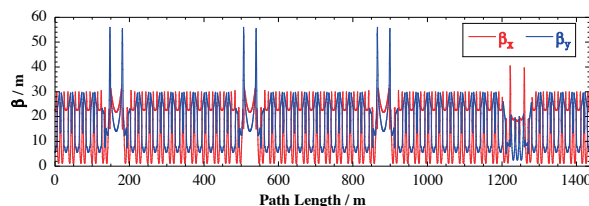


Figure 2: The betatron functions of the LSS-D modified optics.

SPring-8 では、平均輝度の改善や光源強度の安定化のため利用運転中もビーム入射を行うトップアップ運転を実施しているが、beamline main beam shutter (MBS) 開かつ ID 磁石列ギャップ閉であるため、放射線安全や ID の減磁などの点から高い入射効率は必要不可欠である。オプティクス変更当初、蓄積リングへのビーム入射効率

* takao@spring8.or.jp

が低下することが起こった。Figure 3 に、2.4 nm-rad オプティクス の 供 用 を 開 始 し た 2013 年 度 第 2 サ イ ク ル の 利 用 運 転 中 の 入 射 効 率 と 入 射 効 率 の 改 善 の た め 6 極 電 磁 石 調 整 を 行 っ た 第 3 サ イ ク ル の そ れ を 示 す。3.5 nm-rad オプティクスでは、平均約 90%、悪くとも 80%以上を確保していた入射効率が、第 2 サイクルでは ID ギャップの開閉状態によっては 60%を切るまでに悪化していた。6 極電磁石を調整することによって、第 3 サイクルでは悪くとも 70%以上に改善された。

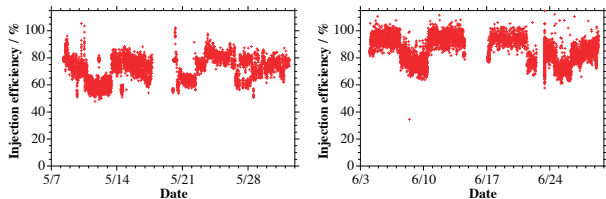


Figure 3: Injection efficiency in the second (left) and the third (right) cycles of 2013.

入射効率の改善のためのスタディの結果、オプティクス変更に伴い振幅依存 tune shift が増大していたことが判明した。Figure 4 に測定した振幅依存 tune shift を示す。3.5 nm-rad オプティクスでは、ほぼフラットであった水平方向振幅依存 tune shift が、オプティクス変更後振幅に応じてシフトする割合が増大している。必然的に大振幅で振動する入射ビームは大きくチューンがシフトすることになり、共鳴に接近し易くなることでビーム損失の増大に至る。入射効率の改善のため 6 極電磁石を調整した結果、振幅依存 tune shift が緩和されている。

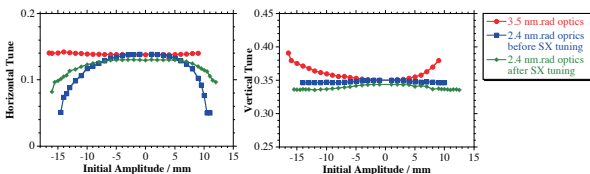


Figure 4: Measured horizontal (left) and vertical (right) amplitude dependent tune shifts.

低エミッタンスオプティクスの導入に向けたスタディの段階では、振幅依存 tune shift はほぼフラットになっており、通常の利用運転時に相当する ID ギャップ状態に対しても 80%以上の入射効率を達成していた。利用運転への適用に向けた調整の段階で、入射時の蓄積ビーム振動を抑制するため 6 極電磁石の調整 [2] を行った結果、入射効率の低下が起こったものと考えられる。

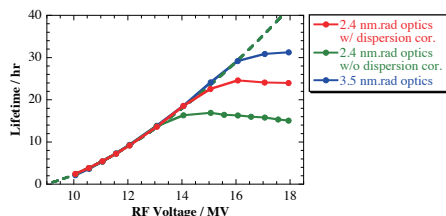


Figure 5: Touschek lifetime.

オプティクス変更に伴い、入射効率の低下だけでなく、ビーム寿命に直結する momentum acceptance (MA) も狭くなる影響もあった [3]。Figure 5 に Touschek ビーム寿命の RF 加速電圧依存性の測定結果を示す。Touschek 効果とは、バンチ内電子電子衝突によりエネルギー変化を起こした電子が RF バケツから溢れて失われる減少を言う。SPring-8 蓄積リングでは、ビーム損失に対して Touschek 効果が支配的となる 1 mA/bunch でビーム寿命測定することにより、Touschek ビーム寿命を測定することができる。RF 電圧を上げるに従い縦方向 MA は広がっていくので、Touschek ビーム寿命は延びていくが、横方向のビーム力学で決まる MA まで達すると頭打ちとなる。これは、dispersion があるところで衝突した電子は、エネルギー偏差と dispersion に比例した振幅で横方向に振動を始め、横方向の aperture に達したところでビーム損失に至るためである。ビーム寿命が頭打ちとなったところで有効 MA を求めると、3.2 nm-rad オプティクスでは 3.2%あった MA が、オプティクス変更により 2.4%にまで減少していた。利用運転中、トップアップ入射を行っている SPring-8 蓄積リングにおいては、ビーム寿命より入射効率を優先して低エミッタンスオプティクス導入の調整を行ってきたためと考えられる。

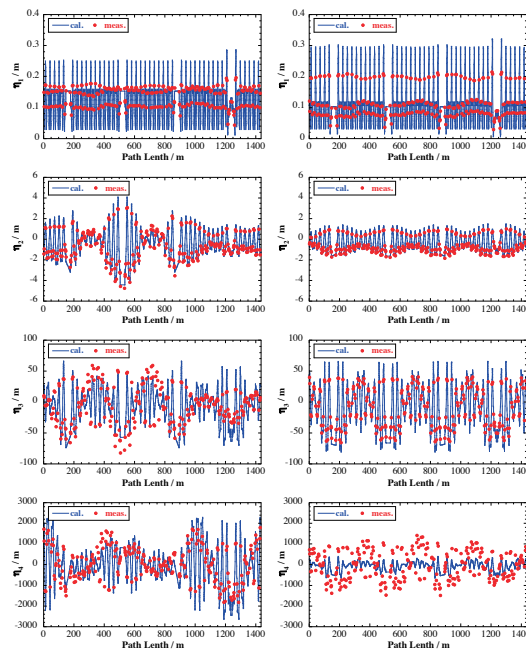


Figure 6: Linear and nonlinear dispersions of 2.4 nm-rad (left) and 3.5 nm-rad optics (right). From top to bottom the first, the second, the third and the fourth dispersion.

通常、dispersion は水平方向であるため、水平方向に大振幅で振動を始めるが、この振動が betatron 結合により垂直方向に回り込んだ結果、より狭い垂直方向の aperture で制限を受けることになる。即ち横方向 MA は、水平 dispersion の大きさ、betatron 結合の強度、垂直 aperture で規定されることとなる。低エミッタンス化は dispersion を低減することにより達成されており、一義的にはオプティクス変更により MA は広がっても

おかしくない筈で、実際 achromat optics から直線部に dispersion を漏らすことで行った前回 (2005 年 9 月) の低エミッタンス化では MA が拡大していたが^[4]、今回のオプティクス変更ではかなり狭まっていた。

Figure 6 に、dispersion の測定の結果を示す。ここで、赤色丸印は測定点、青色実線はシミュレーション計算^[5]である。1 次 dispersion は確かに 2.4 nm-rad オプティクスの方が小さいが、2 次 dispersion は大きな歪みのためピークでは 3.5 nm-rad オプティクスの 3 倍にも達している。このため、3 % 以上のエネルギー偏差に対しては dispersion の大小が逆転することになる。この大きな 2 次 dispersion の歪みは、4ヶ所ある長直線部の 1ヶ所を改造していることに由来しており、マッチング部 6 極電磁石を調整することで改善した (Fig. 7)。この結果、MA を 2.8 % まで拡大することができた。

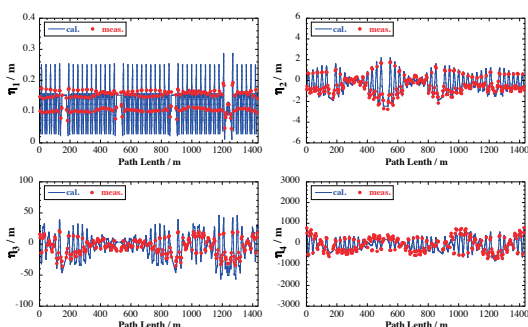


Figure 7: Linear and nonlinear dispersions of 2.4 nm-rad optics after dispersion correction.

3. 挿入光源の影響とその対策

SPring-8 蓄積リングの入射効率は、Fig. 5 に示されている通り ID 磁石列ギャップの開閉により大きく変動している。これは、主に ID 磁場による tune shift が原因である。特に、B ゾーン長直線部に設置された長尺 (25 m) 真空封止 undulator である ID19 の影響は大きく、Fig. 8 にある通り ID ギャップ全開 (50 mm) から最小ギャップ (12 mm) まで閉じられると、垂直 tune が 0.007 ほどシフトする。

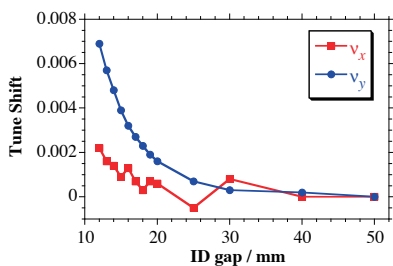


Figure 8: Tune shift of ID19 gap closing.

利用運転中、他の ID のギャップの状況によっては ID19 ギャップが最小ギャップ近くまで閉じられた時に、入射効率が 20 % 程低下することがある。そのような例を Fig. 9 に示す。ユニットセルの 4 極電磁石は共通電源で通電されているが、長直線部マッチングセルの 4 極電磁石は

独立電源で給電されている。このため、長直線部に設置されている ID については直上流下流の 4 極電磁石を用いて ID による tune shift を補償することができる。最近の利用運転中、ID19 ギャップ閉により入射効率が低下した場合、適宜 tune shift の補償を行い、入射効率の低下を回復している。

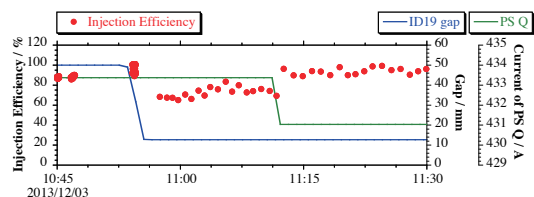


Figure 9: Injection efficiency vs. ID19 gap and current of quadrupole magnet power supply.

ID の影響は、tune shift だけではなく、スキュー多極磁場による結合共鳴を励起することが観測されている。特に、A ゾーン長直線部に設置された 8 連の Figure-8 undulator である ID07 は、その複雑な磁場構成からスキュー 8 極磁場結合共鳴を強く励起することが観測されている。利用運転中に ID07 ギャップが閉じられた時、この結合共鳴の影響で入射効率が低下することが発生している。Figure 10、参照。ID07 のエラー磁場により励起されるスキュー 8 極磁場結合共鳴を補正するため、2 台のスキュー 8 極電磁石 (Sk8) が ID07 の undulator の間隙に設置されており、利用運転中これを用いて入射効率の改善が図られている。

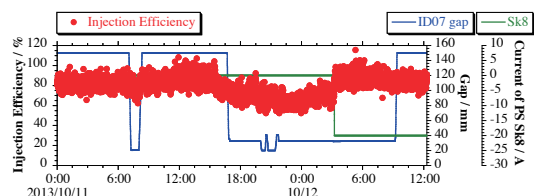


Figure 10: Injection efficiency vs. ID07 gap and current of skew octupole magnet power supply.

ID の影響は入射効率だけでなく、特定の ID はスキュー 4 極磁場による結合共鳴も励起し、垂直ビームサイズの拡大、即ちカップリングの増大を招来している。そのような例として、ID10 ギャップ閉による垂直ビームサイズの変化を Fig. 11 に示す。ギャップ全開では 18 μm 程度であった垂直ビームサイズは、閉じるに従って指数関数的に増大している。

ID10 の両隣の架台には、この ID の発生するカップリングを補正するため、スキュー 4 極電磁石 (Sk4) が配置されている。最近の利用運転中には、これを用いて垂直ビームサイズの変動を抑制することを行っている。Figure 11 に示されている Sk4 電源電流値は、各ギャップで垂直ビームサイズの変化分を補正するよう求めたものである。

4. 運転の状況

最後に、2013 年度の SPring-8 加速器の運転状況をまとめる。運転統計は、Table 2 に示す通りであった。例

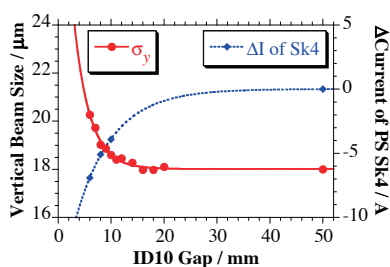


Figure 11: Vertical beam size vs. ID10 gap and correction current of skew quadrupole magnet power supply.

年、総運転時間は 5,000 時間を越えていたが、2013 年度は冷却設備熱源更新工事のため、2014 年年初より 3 月末まで運転を停止していたことにより、大きく割り込む結果となった。

Table 2: Operation Statistics 2013fy

Total operation time	4329:59
Machine tuning and study	897:59
User time	3408:29
Downtime	20:02
Refill for filling change	3:29

ダウンタイムは、総運転時間が短かったことを考慮しても、利用率が過去最高を記録するほど少ないものであった。過去 10 年度のダウンタイム内訳を Fig. 12 に示す。

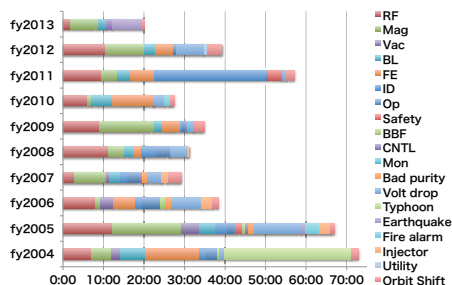


Figure 12: Details of causes of downtime for past 10 fiscal years.

2013 年度のダウンタイムの特徴は、地震によるアボートが 3 回発生したことである。内 1 回 (2013/04/13 5:33) は、緊急地震速報 (震度 4 以上の予想される) が発報されたため、マシン全停止ボタンが押された。安全確認、マシンの健全性を確認後に利用を再開したため、復旧に 6 時間 4 分を要した。残り 2 回 (2013/11/20 10:17, 10:58) は、1 時間の内に発生したもので、2005 年以来途絶えていた地震によるビームアボートが多発した。

また、2013 年度のダウンタイムでは電磁石関係が目立つ (5 回、計 6 時間 56 分) が、どれもステアリング電磁石 (ST) 電源の故障に因るものである。ST 電源の電流変動によりビーム軌道がシフトして、ID ビームラインフロントエンド機器を ID 放射光照射から保護する

ため設定されている BPM のインターロックウィンドウを逸脱するため、ビームがアボートされたものである。完全に電源がダウンしてしまえばアボート原因を究明することは容易であるが、ある場合 (3 回) は数 10 ms 幅のスパイク状の出力電流変動を起こしていたもので、原因を特定することが困難であった。

2008 年に COD 測定装置はデジタル化され^[7]、測定の高速度が図られていたが、それでも 1 台の DSP で 12 台の BPM を処理するためスイッチングして信号処理をする間に 15 ms を要していた。早い軌道変動を測定するため、スイッチング時間を 1 ms にし、リングバッファに記録するように DSP での信号処理を改造した^[8]。Figure 13 に、ST 電源の出力変動によりビームがアボートされた際の測定された COD のドリフトを示す。アボート前の COD を解析し、エラーソースを求めることで故障した ST 電源を同定することができるようになった。

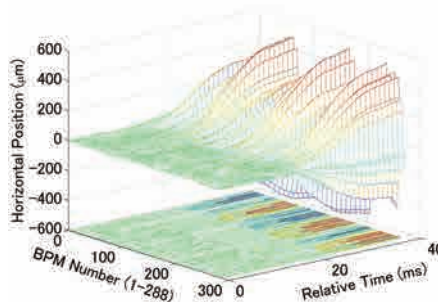


Figure 13: Growth of COD due to failure of steering magnet power supply.

SPring-8 利用運転のトップアップ運転統計では、目標電流値 99.5 mA のところ、これを 0.1 mA 下回るとトップアップを中断したものと定義している。2013 年度は、118 回、計 33 時間 39 分のトップアップ中断があった。実績利用運転時間の 99.0 % でトップアップ運転が継続していたことになる。

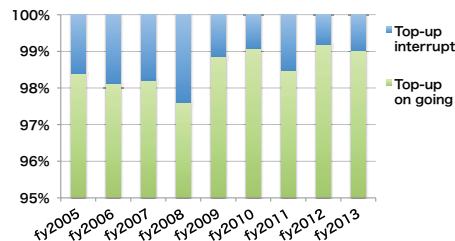


Figure 14: Duration rate of top-up operation of last 9 fiscal years..

2013 年度のトップアップ中断の内訳を Fig. 15 に示す。Sy RF ダウン (cavity 反射) によるトップアップ中断が大半を占めている。2012 年度に可動チューナー冷却部からの漏水があることが判明し、交換修理したため一旦 Sy RF ダウンの頻度が減ったことにより、このトラブルは解消したと思われていたが、依然収束していなかった。2014 年度になってさらに事態は悪化し、Sy RF ダウンが頻発するようになったが、2014/6/12 に蓄積り

PASJ2014-FSP020

ングRF ダウンによりビームアポートが発生した際、Sy RF も同時にダウンするという現象が発生した。原因は、基準RF 周波数を生成するオシレーターに位相ジャンプが起こっていたものであった。これを予備品と交換した結果、Sy RF ダウンは解消されており、基準信号の位相ジャンプが原因であったものと思われる。現在では、極めて安定にトップアップ運転が継続されており、月に数度 Sy RF ダウン以外のトラブルでトップアップ中断が発生する程度である。

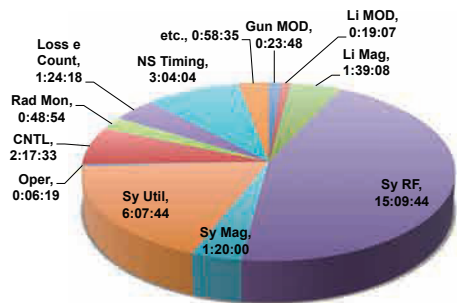


Figure 15: Details of causes of top-up interruption in 2013 fiscal year.

参考文献

- [1] Y. Shimosaki, et al., Proc. of IPAC'13, Shanghai, China, May 2013, 133 (MOPEA027).
- [2] H. Tanaka, et al., Nucl. Instrum. Method A **539** (2005), 547.
- [3] M. Takao, et al., Proc. of IPAC'14, Dresden, Germany, June 2014, 3029 (THPRO066).
- [4] M. Takao, et al., Proc. of the 3rd Annual Meeting of PASJ and the 31th LAM in Japan, Sendai, Japan, Aug 2006, 898 (fp53).
- [5] H. Tanaka, et al., Nucl. Instrum. Method A **431** (1999), 396.
- [6] T. Tanaka, et al., J. Synchrotron Radiat. **5** (1998), 412.
- [7] T. Fujita, et al., Proc. of EPAC'06, Edinburg, Scotland, June 2006, 1130 (TUPCH054).
- [8] T. Fujita, et al., Proc. of IPAC'14, Dresden, Germany, June 2014, 274 (MOPRO080).