

DESIGN AND MACHINE TUNING OF NEW OPTICS FOR THE SPRING-8 STORAGE RING

Yoshito Shimosaki[#], Kenji Fukami, Kimitaka Kaneki, Kazuo Kobayashi, Mitsuhiro Masaki, Takeshi Nakamura, Haruo Ohkuma, Masaya Oishi, Masazumi Shoji, Kouichi Soutome, Shiro Takano, Masaru Takao
JASRI/SPring-8, Hyogo 679-5198, Japan

Abstract

A design work and the machine tuning of a new optics for the SPring-8 storage ring are in progress to provide photon beams with higher brilliance and flux density than those of the present. The natural emittance is reduced from the nominal emittance of 3.49 nmrad to 2.41 nmrad at 8 GeV. The new optics design and its beam performance are presented.

SPring-8 蓄積リングにおける新オプティクス設計とチューニング

1. はじめに

SPring-8 は、エネルギー 8 GeV、電流値 100 mA の電子ビームを蓄積し、 10^{20} photons / sec / mm² / mrad² / 0.1 % B.W. の硬エックス線をユーザー実験に供給する、第 3 世代型放射光施設である。直線部に分散関数を漏らした double bend ラティスで構成されており (図 1(a))、電子ビームの自然エミッタンスは設計値で 3.49 nmrad、挿入光源発光点での有効エミッタンスは 3.77 nmrad となる (ここではエミッタンスを計算する際、エネルギーの実測値 7.976 GeV を使用しているので注意)。2011 年 9 月に SPring-8 蓄積リング長直線部のオプティクス変更が行われ、自然エミッタンスが改造前の 3.43 nmrad から 3.49 nmrad となった[1]。

SPring-8 蓄積リングにおける高フラックス密度化・高輝度化を目的として、

Phase-1: 磁石位置及び極性は変えず、磁場強度を仕様の範囲内で変更する (シャットダウンが必要ない)

Phase-2: 磁石位置、極性、磁場強度に制限を与えない (ただしシャットダウンは短期とする)

の 2 段階で、低エミッタンスオプティクスの設計検討を行う予定であり、現在は phase-1 について、オプティクスの設計及びビームチューニングを行っている。SPring-8 蓄積リングにおける新オプティクス設計の概要とチューニング進捗について報告する。

2. 線形・非線形オプティクスの設計

設計したオプティクスのラティス関数を図 1(b)に、パラメータを表 1 に与える。今回、

- (1) 現在よりも自然エミッタンス、有効エミッタンスが小さくなるように
- (2) SPring-8 標準アンジュレータ ($\lambda_u = 32$ mm, $L = 4.5$ m, $K_{max} = 2.5$) からの放射光の輝度・フラックス密度が共に大きくなるように
- (3) 標準アンジュレータからの放射に伴う、放

射励起・放射減衰によるエミッタンス変化が小さくなるように

ラティス関数を調整した。新オプティクスでの自然エミッタンスは 2.41 nmrad、有効エミッタンスは 2.79 nmrad となる。

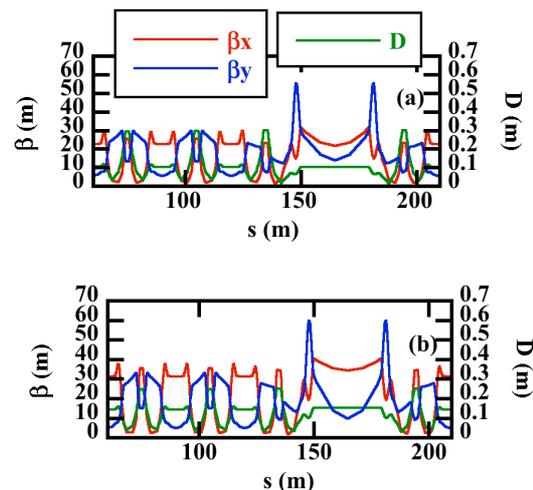


図 1: ラティス関数 (a) present optics (3.49 nmrad) と (b) new optics (2.41 nmrad).

表 1: Main parameters of present optics and new optics

	Present Optics	New Optics
Beam energy	8 GeV	
Natural emittance	3.49 nmrad	2.41 nmrad
Energy spread σ_p	0.11 %	
Tune	(40.14, 19.35)	(41.14, 19.35)
Natural chromaticity	(-88, -42)	(-117, -47)
Effective emittance @ ID center	3.77 nmrad	2.79 nmrad
Lattice function @ ID center (β_x, β_y, D)	(22.5 m, 5.6 m, 0.11m)	(31.2 m, 5.0 m, 0.15m)

[#] shimosaki@spring8.or.jp

SPECTRA[2]で予測される輝度とフラックス密度を図2に与える。ここでは coupling factor として 0.2% を仮定した。低エミッタンス化及びラティス関数の調整により、標準アンジュレータでの硬エックス線の輝度及びフラックス密度が、現在に比べ 30 ~ 45% 増大するとの予測を得た (図2 (a), (b))。偏向電磁石については輝度の増大は期待できるが、フラックス密度は変化していない (図2 (c), (d))。

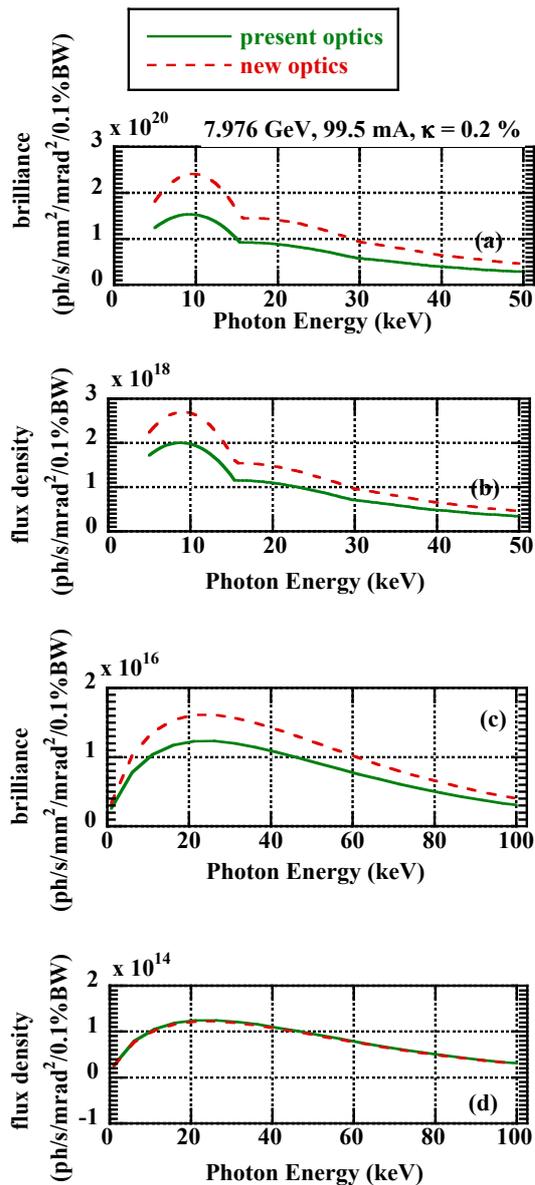


図 2: SPring-8 標準アンジュレータの放射光の(a) 輝度と(b) フラックス密度、及び偏向電磁石の放射光の(c) 輝度と(d) フラックス密度 (横軸のスケールに注意)。SPECTRA [2]を使用。

非線形オプティクス設計について、今回、2ステップで六極磁石の調整を行った。まず計算コード CETRA[3]に遺伝的アルゴリズムを導入し、ダイナ

ミックアパーチャーが大きくなるように、かつ振幅依存チューンシフトが小さくなるように、六極パラメータのサーベを行った。次に後述の応答関数で求めたラティスの最新エラーを CETRA に移植し、「遺伝的アルゴリズムで求めた六極パラメータ」周りで積上入射効率が改善するようサーベを行った。最終的な六極パラメータによるダイナミックアパーチャーの結果を図3に、モーメントムアクセプタンスの結果を図4に与える。ここでは共にシンクロトン振動 (RF 電圧振幅 16 MV、偏向電磁石からの放射光は期待値を使用) を考慮し、2000 ターンの計算を行った。また、後述の応答関数で求めたラティスエラーを考慮し、真空チェンバー等、物理的口径制限を与えて計算を行った。

ダイナミックアパーチャーについて、SPring-8 蓄積リングの入射点はバンブ軌道を基準にして $(x, y) = (-10 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ であり、入射点をカバーする形のダイナミックアパーチャーが必要となる。新オプティクスについて、現在と同程度のダイナミックアパーチャーを得た。入射を行うに十分であると思われる。

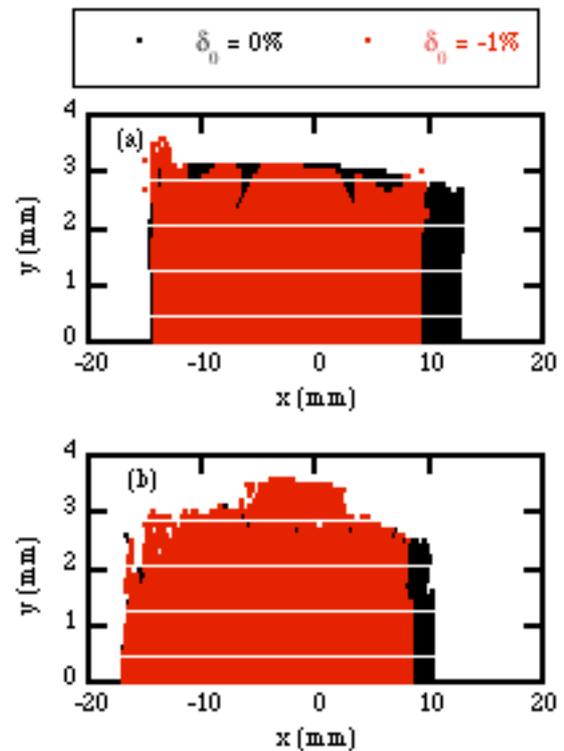


図 3:(a) 新オプティクス及び(b)現在のオプティクスのダイナミックアパーチャー。

モーメントムアクセプタンスに関しては、現在のオプティクスで平均 $\Delta p / p = 2.89\%$ であるのに対し、新オプティクスで 2.76% と、ほぼ変わらない結果となった。

計算したモーメントムアクセプタンスから、参考文献[4]の式を用いてタウシェック寿命を計算した。Single bunch 1 mA、coupling factor が 0.2% のとき、現在のオプティクスでは 21 時間、新オプティクスでは 12.5 時間となる計算結果を得た。エミッタンス

比で寿命が短くなっているものと思われる。

3. マシンチューニング

新オプティクスについて、輝度・フラックス密度の向上が期待できること、及び現在と同程度のダイナミックアパーチャー及びモーメンタムアパーチャーを期待できることから、四極及び六極パラメータを実機に設定し、マシンチューニングを行った。この際、まず以下の調査を行った：

- (1) SPring-8 蓄積リングでは、y 方向にローカルバンプを作り、ビームを真空チェンバーで削ることによりビームを廃棄する。ラティス関数が変わりローカルバンプが崩れると、ビーム廃棄できない可能性がある。そこで低カレントでビームを蓄積し、ビーム廃棄の試験を行った。結果、ローカルバンプにてビームが全量、廃棄できることを確認した。
- (2) 真空度等を監視しながら 160 bunch-train x 12 のバンチフィリングで 100 mA 蓄積し、蓄積時の放射線レベルに関して、実験ホール側にて放射線サーベアーを実施し、問題無いことを確認した。

以上から、問題なく新オプティクスについてチューニングできるものと判断し、以下の試験を行った。

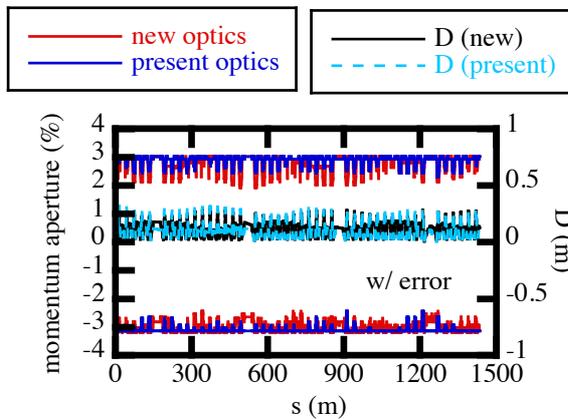


図 4: モーメンタムアクセプタンス。

応答関数を取得し、ラティス関数の補正を行った。結果、 $\Delta\beta / \beta$ については x 方向について RMS 値で 4.2 % から 2.8 % まで、y 方向については 3.2% から 1.5% まで改善した。また x 方向分散関数の歪み ΔD_x について、RMS 値で 12.8 mm から 7.7 mm まで改善した。(参考：現在のオプティクスの応答関数結果について、2012 年 1 月 19 日の時点では、 $\Delta\beta / \beta$ について x 方向は 2.3 %、y 方向は 2.4%、 ΔD_x については 4.9 mm であった)。

ラティス関数を補正した後に、線形結合共鳴補正、及び y 方向分散関数補正による、y 方向ビームサイズの低減を行った。その後、低エミッタンス化の効果を調べる為に、加速器診断用ビームライン I (BL38B2) 及び II (BL05SS) を用いてビームサイズの測定、及びフラックス密度の測定を行った。

ビームサイズ測定について、BL38B2 のエックス

線プロファイルモニターを用いて偏向電磁石発光点でのビームサイズ測定を行った。プロファイル例を図 5 に示す。ビームプロファイルから RMS ビームサイズを求め、応答関数等によって得られたラティス関数を用いてエミッタンスを求めた。結果を表 2 に示す。自然エミッタンスに関して、現在のオプティクスでは設計値に対して 2.3 % 程、新オプティクスでは 6.6 % 程、大きい値を示した。Coupling factor に関しては、現在のオプティクス及び新オプティクスについて、約 0.55 % となる計算結果を得た。後述のビーム寿命測定結果から予想される coupling factor は 0.2 % 程度であり、不整合の原因について調査中である。

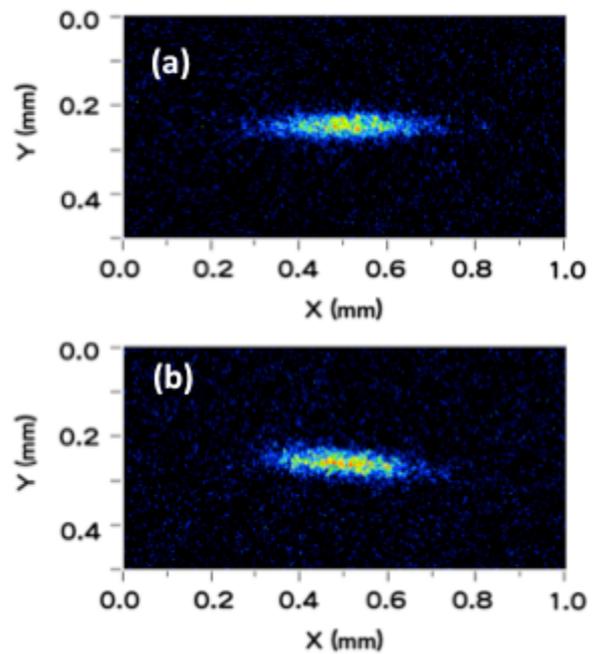


図 5: (a) 現在及び(b) 新オプティクスのビームプロファイル。

表 2: ビームサイズ測定結果、及び応答関数結果等から求めたエミッタンス。

	Present Optics	New Optics
X emittance (nm.rad)	3.55	2.55
Y emittance (pm.rad)	20.14	13.82
Coupling factor (%)	0.54	0.57
Natural emittance(nm.rad)	3.57 / 3.49	2.57 / 2.41
Meas. / Design		

次にフラックス密度測定について。BL05SS においてその光源である ID05 ($\lambda_u = 76$ mm, $N = 51$) の K 値を 1.666 にセットし、3 次光 10 keV の分光フラックス密度を測定した。4 μ rad x 4 μ rad に開口制限したスリットを光軸上にセットし、スペクトルを測定

した。測定結果及び SPECTRA の計算結果を図 6 に示す。SPECTRA の計算では表 2 のパラメータ及び応答関数等から得られた発光点でのラティス関数を使用した。測定値と SPECTRA による予測値は良く一致し、ID05 の 3 次光 10 keV に関しては、新オプティクスで現状より約 25 % フラックス密度が向上する結果となった。

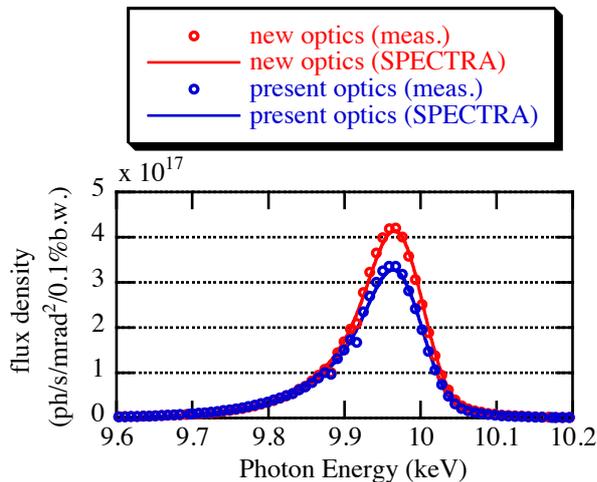


図 6: ID05 ($\lambda_u = 76$ mm, $N = 51$) のフラックス密度。

入射効率について。SPring-8 蓄積リングでは積上入射と top-up 入射の 2 種類が使用される。積上入射はビームを 0 mA から 99.5 mA まで蓄積する際に使用される入射方式で、入射器（シンクロトロン）からのビームを蓄積リングに直接入射する。ユーザー実験中は top-up 入射方式が使用される。入射器から出射されたビームのビームサイズを、ビーム輸送系に設置されたスリットを用いて、x 方向に $\pm 1\sigma$ までカットする [5]。更に x 方向のビーム軸をセプタム壁に寄せることで入射効率の向上を図っている。

まず積上入射効率について。チューニング開始時、積上入射効率は 8 % と非常に低かったため、以下のプロセスにより入射効率の改善を行った：

- (1) 振幅依存チューン補正：34 % まで改善
- (2) ハーモニック六極補正：57 %
- (3) バンプ・セプタム磁石調整：74 %
- (4) 全六極磁石再調整：85 %
- (5) 入射軌道調整：89 %

現在のオプティクスでの積上入射効率は 92 % であり、ほぼ同程度まで入射効率が改善された。

積上入射効率を現在のオプティクス程度まで改善した後に、top-up 入射効率の測定を行った。まず全ての挿入光源のギャップが全開の状態での top-up 入射効率の測定を行った（5 回入射を行い、入射効率の平均値を測定した）。結果、

- ・ 新オプティクスでの top-up 入射効率：96.1 %
- ・ 現在のオプティクスの場合：100 %

となった。次に、垂直方向の物理的口径を $\beta_y^{-1/2}$ で規格化したときに SPring-8 蓄積リングで最小となる ID19（最小ギャップ 12 mm のとき）をスクレーパーの代用として選択し、ギャップを最小値まで閉めて top-up 入射効率を測定した。結果

- ・ 新オプティクスでの top-up 入射効率：94.0 %
 - ・ 現在のオプティクスの場合：91.4 %
- となった。現在のオプティクスと比べ、新オプティクスで top-up 入射効率の顕著な悪化は見られなかった。今後、ギャップを閉める ID の数を増やしなから、top-up 入射効率の測定を行う予定。

ビーム寿命について。Single bunch 1 mA の状態で、ビーム寿命の測定を行った。現在のオプティクスでは約 20 時間だったのに対し、新オプティクスでは約 13 時間と減少した。これは上述した図 4 のモーメントアクセプタンス及び coupling factor 0.2 % で計算したビーム寿命と良く一致する。ビームプロファイルから求めた coupling factor 0.55 % でビーム寿命を計算すると現在のオプティクスで 35 時間、新オプティクスで 21 時間となりビーム寿命測定値と一致しない。ビーム寿命から予測される coupling factor とビームプロファイルから求めた coupling factor との不整合について原因を調査中。今後、モーメントアクセプタンス測定も行い詳細な評価を行う予定である。

SPring-8 蓄積リングのバンプ磁石について

- (1) ビームの周回時間が $4.8 \mu\text{s}$ であるのに対し、バンプ磁石のパルス幅が約 $8 \mu\text{s}$ ある
- (2) バンプ軌道の途中で六極磁石が設置されており、六極パラメータが不適切であると、バンプ軌道発生時に非線形のキックを生じてバンプ軌道が閉じなくなる [6]
- (3) バンプ磁石が transverse 方向に傾きを持っていると、水平方向のキックが垂直方向に回り込む [7]
- (4) バンプ磁石の立ち上がり時と立ち下がり時で 4 台のバンプ波形がずれるため、蓄積ビームに余分なキックを与えてしまう [8]

などの事情から、バンプ磁石と六極磁石について調整を行わないと、バンプ軌道がバンプ磁場ピーク値 1 点でのみ閉じ、他の時間領域ではバンプ軌道が漏れる可能性（=蓄積ビームが振動する可能性）がある。SPring-8 蓄積リングではユーザー運転時、top-up 運転を行っているため、入射バンプ軌道が漏れると、top-up 入射時のバンプ磁石励磁により光源が揺れ、ユーザー実験に支障をきたす可能性があるため、これを防ぐ必要がある。x 方向について、バンプ磁石励磁時の蓄積ビームの重心振動を図 7 (a) に示す。

図 7 は (1) single bunch 1 mA を蓄積リングに蓄積、(2) バンプ磁石の励磁タイミングを刻々と変えながらリングの 1 点（セル 2-3 の single pass bpm）で single bunch のビーム重心の時間変化を取得、(3) (2) の結果（重心位置 vs. 時間のデータが、バンプ磁石励磁の回数だけ求まる）を、「『single bunch がバンプ波形のどこに存在していたか』で決まる時間の関数」でソーティングし（重心位置 vs. 「時間の関数」となる）、「蓄積リングに一樣にビームが存在するときに、バンプ磁石を 1 回励磁すると、リングの 1 点（セル 2-3）で見て、どのような振動が観測されるか」に焼き直したものである。チューニング開始時の蓄積ビームの重心振動（1 ~ 20 ターン間）は

RMS 値で 0.32 mm であった。これを

- ・ バンプ磁石 3 :
0.6363 mrad (設計値) → 0.5963 mrad
- ・ 六極磁石 1 (バンプ軌道途中にある)

$B''L / B\rho = 2.0693\text{m}^{-2}$ (設計値) → 2.1894m^{-2} に補正することにより、RMS 値で 0.12 mm まで抑制した (現在のオプティクスの場合、RMS 値で 0.11 mm となった)。Y 方向については、スタディ時間の間に振動を抑制することができなかった (図 7 (b) 参照、現在のオプティクスで RMS 値 0.04 mm なのに対し、新オプティクスでは 0.07 mm となった)。次回チューニングの際に、バンプ磁石の傾き補正を行い、y 方向の蓄積ビーム振動を抑制する予定。

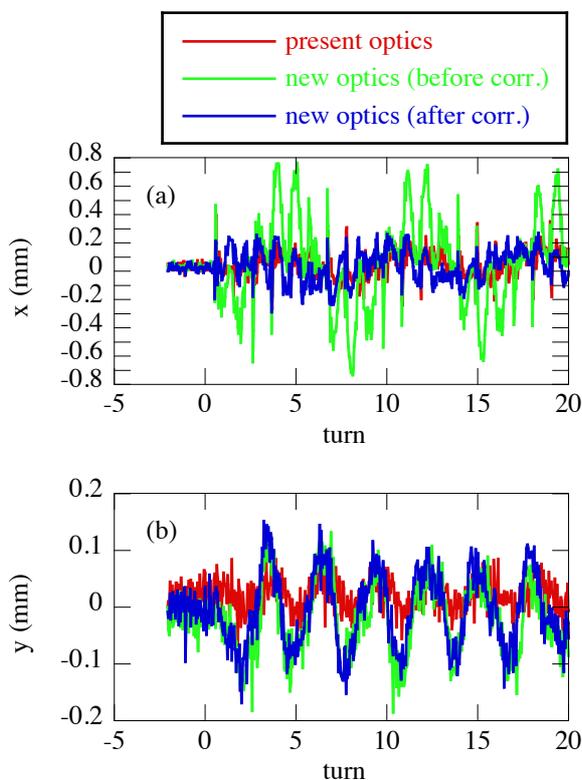


図 7: バンプ磁石励磁時の蓄積ビームの重心振動。(a) x 方向及び (b) y 方向。

4. サマリー

SPring-8 蓄積リングにおける高フラックス密度化・高輝度化を目的として、新オプティクスの設計検討を行った。ここでは phase-1 として、磁石位置及び極性は変えず、磁場強度を仕様の範囲内で変更する (=シャットダウンが必要ない) 条件で設計を行った。エネルギー 8 GeV の状態で、現在のオプティクスでは自然エミッタンスの設計値が 3.49 nm.rad であるのに対し、新オプティクスでは 2.41 nm.rad となった。非線形オプティクス設計に関しては遺伝的アルゴリズムを使用し、現在と同程度のダイナミックアパーチャー及びモーメンタムアパーチャーとなる六極磁石パラメータを求めた。

新オプティクスのユーザー運転への適用を目指し、

チューニングを行っている。応答関数を取得しラティス関数を補正した (補正後、 $\Delta\beta / \beta$ については x 方向に RMS 値で 2.8 %、y 方向については 1.5% となった。また x 方向分散関数の歪み ΔD_x については、RMS 値で 7.7 mm となった)。その後、低エミッタンス化の効果を見る為に、加速器診断用ビームライン I (BL38B2) 及び II (BL05SS) を用いてビームサイズの測定、及びフラックス密度の測定を行った。ビームサイズ測定結果等から計算した自然エミッタンスは、設計値とほぼ一致した。フラックス密度測定結果についても、エミッタンス低下による SPECTRA での予測通りにフラックス密度が増大することを確認した。

ビーム寿命から予測される coupling factor (0.2 %) とビームプロファイルから求めた coupling factor (0.2 %) で不整合を生じた。原因調査中である。

振幅依存チューン補正、入射軌道調整等のプロセスを経て、積上入射効率を現在と同程度の 89 % まで改善した。バンプ磁石励磁時の蓄積ビーム振動については、x 方向について、バンプ磁石及び六極磁石の調整を行うことにより、RMS 値で 0.12 mm まで振動が抑制されることを確認した。

今後、バンプ磁石励磁時の y 方向蓄積ビーム振動について抑制した後に、各ビームラインで試験利用を行い、問題ないことを確認した後に、ユーザー運転への適用を検討する予定。また更なる低エミッタンス化のために、phase-2 (磁場など制限無し、ただし短期シャットダウンの範囲内) におけるラティス設計検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 早乙女光一他、「SPring-8 蓄積リングの局所的な長直線部ラティス改造」、第 9 回日本加速器学会年会、FRUH01.
- [2] T. Tanaka and H. Kitamura, SPECTRA code ver. 9.02 (2012).
- [3] J. Schimizu, et al., "Development of a tracking and analysis code for beam dynamics in SPring-8", Proc. of 13th Symp. on Accel. Sci. and Tech. Osaka, Japan (2001), pp.80-82.
- [4] 中村典雄、「ビーム寿命」、OHO'91.
- [5] K. Fukami et al., "Beam collimation system for the SPring-8 top-up operation", Proc. of APAC2004 (Gyeongju, Korea), pp103-105.
- [6] H. Tanaka, NIMA 539 (2005), pp. 547-557.
- [7] K. Fukami et al., "Beam-based alignment for injection bump magnets of storage ring using tilt controlling system", Proc. of IPAC11 (Sep. 5th-9th, 2011, San Sebastian, Spain), THPC143, pp.3221-3223.
- [8] C. Mitsuda et al., "Suppression of horizontal beam oscillation by fast kicker magnet system in SPring-8 storage ring", Proc. of IPAC'10 (May 23-28, Kyoto, Japan), wepea031, pp.2552-2554.