

# LATEST DESIGN FOR VERY LOW-EMITTANCE STORAGE RING OF THE SPRING-8 II

Yoshito Shimosaki<sup>#</sup>, Kouichi Soutome, Kimitaka Kaneki, Masaru Takao, Takeshi Nakamura, Haruo Ohkuma  
JASRI/SPring-8, Hyogo 679-5198, Japan

## Abstract

A feasibility of a very low-emittance storage ring has been studied for the upgrade project, SPring-8 II. Its ultimate goal is to provide a superior brilliance for 0.5 ~ 100 keV photons. A 6-bend achromat lattice with the natural emittance of 70 pm.rad at 6 GeV has been examined as the first candidate. The nonlinear optics has been optimized to enlarge the dynamic aperture by correcting amplitude dependent tunes and by correcting nonlinear resonances based on an isolated resonance Hamiltonian. In addition, a 5-bend achromat lattice has been studied as the second candidate in order to enhance the feasibility of the SPring-8 II, where the natural emittance is 141 pm.rad @ 6 GeV (80 pm.rad at 4.5 GeV). The latest designs for the coming upgrade of SPring-8 are presented in this paper.

## SPring-8 次期計画 (SPring-8 II) のラティス設計進捗

### 1. SPring-8 II について

SPring-8 蓄積リングの大規模アップグレード計画である、SPring-8 次期計画 (SPring-8 II) の検討が進められている[1]。SPring-8 II では、放射光平均輝度の飛躍的向上を最大の目的としており、このために 10 keV 放射光の回折限界である 10 pm.rad を目標に、ナチュラルエミッタンスを極力低減させる。

現在は SPring-8 II の第一候補として、ユニットセルあたり 6 台の偏向電磁石を有する 6-bend ラティスの設計・検討を行っている [2]。6-bend ラティス

の主要なパラメータを表 1 に示す。ナチュラルエミッタンスは 70 pm.rad で、更にダンピングウィグラーなどで回折限界まで低減させることを検討している [1]。

また、エミッタンス低減には不利だが、機器に対する要求仕様の低減によりフィージビリティが高くなると考えられる、5-bend ラティス (141 pm.rad @ 6 GeV (4.5 GeV では 80 pm.rad)) に関する検討も開始した。これら SPring-8 II ラティス設計の最新の検討結果について報告する。

表 1: Main parameters of SPring-8 and SPring-8 II.

	SPring-8 3.49 nm.rad optics	SPring-8 II 6-bend lattice (lattice design as of Sep.21,2011).	SPring-8 II 5-bend lattice (lattice design as of Jul.31,2012).	
Beam energy	8.0 GeV	6.0 GeV	4.5 GeV	6.0 GeV
Natural emittance (0 current)	3488 pm.rad	67.5 pm.rad	79.3 pm.rad	141 pm.rad
$\sigma_E / E$ (0 current)	0.109 %	0.096 %	0.072 %	0.096 %
Tune ( $Q_x, Q_y$ )	(40.14, 19.35)	(141.865, 36.65)	(123.14, 33.35)	
Natural chromaticity	(-88, -42)	(-475, -191)	(-460, -147)	
Momentum compaction $\alpha_0$	1.68e-4	1.55e-5	2.36e-5	
Max. Q: $B^{(1)}L / B\rho$	0.54 m <sup>-1</sup>	1.49 m <sup>-1</sup>	0.64 m <sup>-1</sup>	
Max. Sx: $B^{(2)}L / B\rho$	6.3 m <sup>-2</sup>	110 m <sup>-2</sup>	59 m <sup>-2</sup>	

### 2. 6-bend ラティス設計進捗

6-bend ラティスのラティス関数を図 1 に示す。単一電子から発生した光の広がり電子ビームのサイズの convolution を考慮し、輝度を最大限に高めるために、直線部のベータ関数について x 方向、y 方向共に  $\beta \sim 1$  m となるようにラティス設計を行った。一方で、ベータ関数が小さい場所でダイナミックアパーチャーを観測すると、 $\beta^{1/2}$  に比例し

てダイナミックアパーチャーが小さくなるので、入射に対して不利になる。そこでリングに 4 箇所ある長直線部に high-beta section ( $\beta_x, \beta_y, D$ ) = (24.2 m, 7.8 m, 0 m) を設け、ここを入射点とすることを検討している。更に長直線部に damping wiggler を設置することにより、エミッタンス低減することを検討している。

SPring-8 II では off-axis 入射スキームを用いる予定である [1]。この off-axis 入射スキームで要請される値 ( $x = \pm 2$  mm) までダイナミックアパーチャーを拡張する必要がある [1]。一般に、極低エ

<sup>#</sup> shimosaki@spring8.or.jp

ミッタンスラティスではビームを強く収束させるために、強い四極磁場が必要となる。強い四極磁場は、線形分散関数の低下およびナチュラルクロマティシティの増大を招く。低線形分散関数の環境下で高ナチュラルクロマティシティを補正するため、強い六極磁場が必要となる。これは非線形共鳴や非線形クロマティシティなどの非線形現象を誘起し、ダイナミックアパーチャーやモーメントムアクセプタンスなどの安定領域を狭める。

そこで今回、六極磁石の最大磁場係数を緩和するために、6-bend ラティスの再配置を行った。四極磁石および六極磁石の有効長および磁場係数について再検討を行い、極低エミッタンス 70 pm.rad を維持しつつ、最大六極磁場を参考文献[3]のラティス設計における  $B'' / B\rho = 834 \text{ m}^{-3}$  から  $650 \text{ m}^{-3}$  まで低減した。

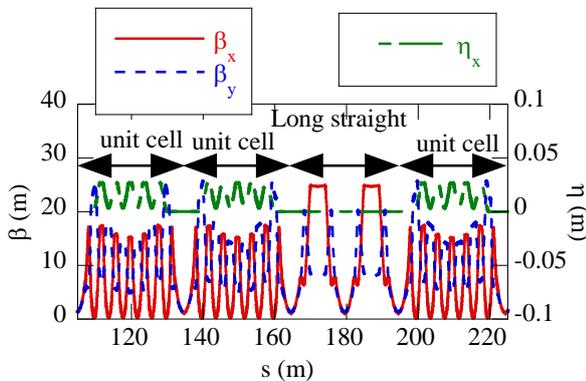


図 1: 6-bend ラティスのラティス関数.

非線形オプティクスの最適化について。SPRING-8 II では

- (1) (non-)interleaved sextupole 法
- (2) 孤立共鳴ハミルトニアンに基づくハーモニクス補正 (オンモーメントム粒子/オフモーメントム粒子)

を組み合わせた非線形共鳴補正を行っている[2]。線形クロマティシティ補正と非線形共鳴補正を連立的に解くことにより、非線形オプティクスの最適化を行っている。

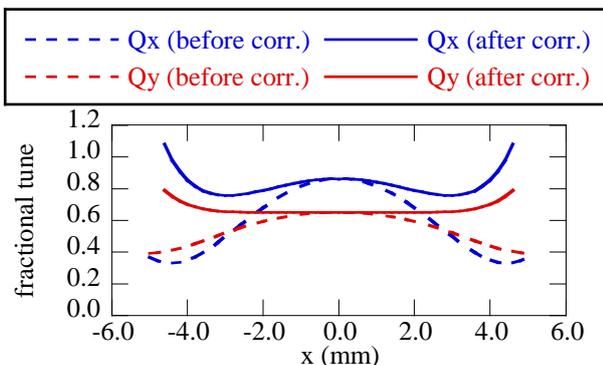


図 2: 6-bend ラティスの x 方向振幅依存チューンシフトの補正例.

今回更に、x 方向振幅依存チューンシフト補正プロセスを非線形オプティクス最適化手法に加えた。線形クロマティシティ補正・非線形共鳴補正と x 方向振幅依存チューンシフト補正を連立的に解くことで、安定領域の更なる拡張が期待できる。X 方向振幅依存チューンシフトの補正結果例を図 2 に示す。ここでは、参考文献[3]で検討時の極低エミッタンスラティスにおける x 方向振幅依存チューン結果と比較した。上述したダイナミックアパーチャーに対する要請領域 ( $|x| < 2 \text{ mm}$ ) で、x 方向振幅依存チューンシフトを x、y 方向共に大幅に抑制することができた。

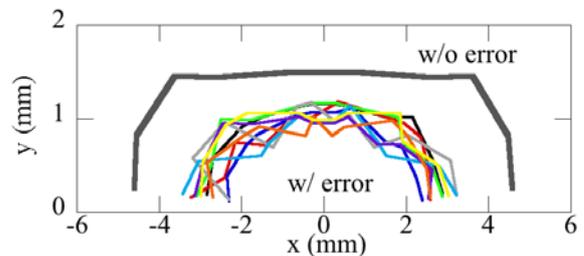


図 3: (6-bend ラティス) 入射点におけるダイナミックアパーチャー.

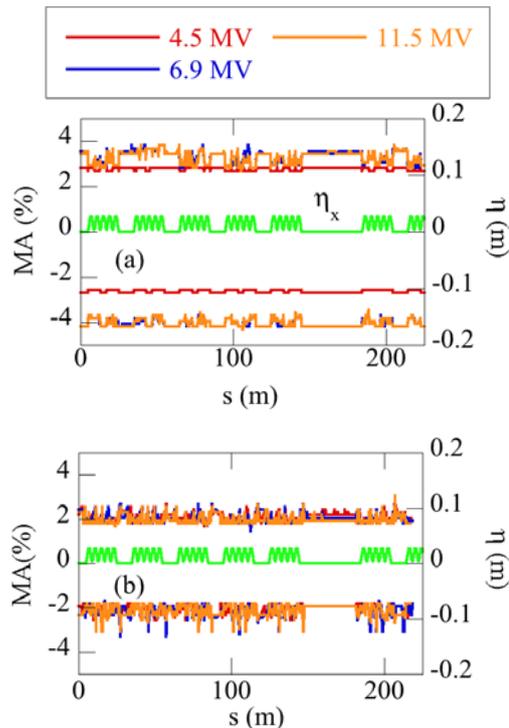


図 4: (6-bend ラティス) モーメントムアクセプタンス. (a)エラーが無い場合と(b)  $\sigma = 10 \mu\text{m}$  の六極アライメントエラーがある場合.

High-beta section で観測した、オンモーメントム粒子に関するダイナミックアパーチャーを図 3 に示す。ここではコード CETRA を使用した[4]。ダイナミックアパーチャー計算の際に、六極磁石に関するアライメントエラーをリング全周に渡り乱

数で与えた（ガウス分布、 $\sigma = 10 \mu\text{m}$ 、 $2\sigma \text{ cut}$ ）。図 3 では、 $\sigma = 10 \mu\text{m}$  の六極アライメントエラーがある状態で、ビーム入射からの要請値 ( $|x| < 2 \text{ mm}$ ) を超えるダイナミックアパーチャーが得られる結果となった。これは参考文献[3]において得られた、 $\sigma = 5 \mu\text{m}$  の六極アライメントエラーがある状態のダイナミックアパーチャーに相当する。すなわち六極アライメントエラーに対する感度を半分まで下げることができた。ラティス再配置及び x 方向振幅依存チューンシフト補正による効果と思われる。

このときのモーメントムアクセプタンスを図 4 に与える。図 4 (a) がエラー無しの場合、(b) が  $\sigma = 10 \mu\text{m}$  の六極アライメントエラーがある場合である。ここでは RF 電圧を 4.5 MV、6.9 MV、11.5 MV と変えながらモーメントムアクセプタンスの計算を行った。エラーがない場合、RF 電圧が 6.9 MV 以上でモーメントムアクセプタンスが飽和した。これは RF 電圧が 6.9 MV 未満のときはシンクロトン振動によりモーメントムアクセプタンスが決まり、6.9 MV 以上のときはオフモーメントム粒子のダイナミックアパーチャーがモーメントムアクセプタンスを支配することを示す。 $\sigma = 10 \mu\text{m}$  の六極アライメントエラーがある場合、RF 電圧 4.5 MV でモーメントムアクセプタンスが飽和した。このときのモーメントムアクセプタンスは約  $\pm 2 \%$  となった。

### 3. 5-bend ラティス設計進捗

6-bend ラティスの主な課題として

- (1) 非常に強い六極磁場係数が必要 ( $13000 \text{ T} / \text{m}^2$ )
- (2) SPring-8 と SPring8 II ではユニットセル長を同じにしないとイケないので（トンネルを再利用する予定）6-bend で磁石が増えた分、磁石間のドリフトスペースが非常に狭くなる（最短 5 cm）

などがあげられる。更なるフィージビリティ確保のために、5-bend ラティスによる検討を開始した。

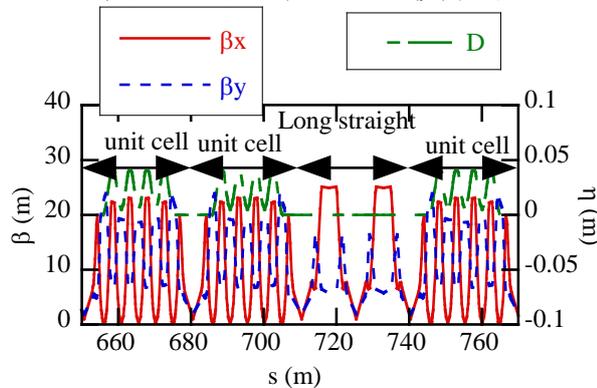


図 5: 5-bend ラティスのラティス関数。

5-bend ラティスのラティス関数を図 5 に、主要なパラメータを表 1 に示す。上述の六極磁場係数等の制約を緩和させ、ダンピングウィグラーの効

果をより大きなものとする目的で、ビームエネルギーを 4.5 GeV に下げる場合も検討している（ビームエネルギーについては加速器の問題だけでなく、放射光利用や挿入光源技術の進展なども十分に勘案して決める必要がある）。結果、ナチュラルエミッタンスは  $141 \text{ pm}\cdot\text{rad}$  @ 6 GeV (4.5 GeV では  $80 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ ) となった。6-bend ラティスと同様に、輝度を最大限に高めるために直線部のベータ関数を  $(\beta_x, \beta_y) = (1.0 \text{ m}, 1.9 \text{ m})$  に低減し、また入射等のために長直線部に high-beta section  $(\beta_x, \beta_y) = (25.0 \text{ m}, 5.8 \text{ m})$  を設けた。最大四極磁場は  $B^{(1)}L / B\rho$  で  $0.64 \text{ m}^{-1}$ 、最大六極磁場は  $B^{(2)}L / B\rho$  で  $59 \text{ m}^{-2}$  と、6-bend ラティスの約半分の強さまで抑制された。磁石間のドリフトスペースについては最短が 10 cm となり、6-bend ラティスの 2 倍となった。四極磁石に関しては磁場係数にまだ余裕が有るので、四極磁石の有効長を短くすることで、「ドリフトスペース長を更に長く」、「六極磁場係数を更に弱く」することができないか検討する予定。

5-bend ラティスの非線形オプティクス最適化について。6-bend ラティスでは六極磁石がユニットセル内に 12 ファミリーあったものが、今回の 5-bend ラティスでは 10 ファミリーと、非線形オプティクス最適化のための自由度が 2 下がった。よってここでは上述した x 方向振幅依存チューンシフトについては積極的な補正は行わず、暫定的に線形クロマティシティ補正と非線形共鳴補正のみを行った。今回の 5-bend ラティスの x 方向振幅依存チューンを図 6 に示す。ダイナミックアパーチャーに対する要請領域 ( $|x| < 2 \text{ mm}$ ) において、y 方向のチューンはほぼフラットとなっているが、x 方向についてはチューンシフトが大きい。今後、長直線部等、効果的な位置に六極磁石を追加し、x 方向振幅依存チューンシフトの補正も行う予定。

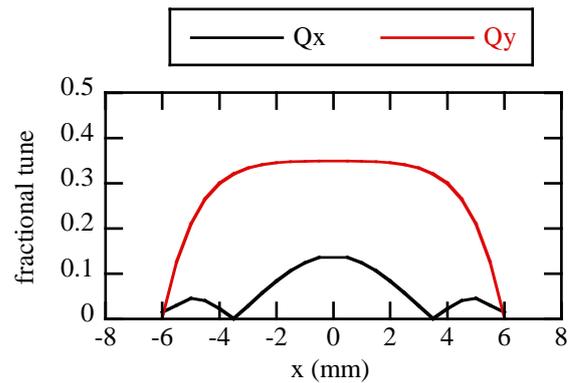


図 6: (5-bend ラティス) x 方向振幅依存チューン。

エラーがない場合の、オンモーメントム・オフモーメントム粒子のダイナミックアパーチャーを図 7 に示す。今回のダイナミックアパーチャー計算では、シンクロトン振動を考慮していない。 $\delta = 0 \%, \pm 1 \%, \pm 2 \%$  の粒子について安定領域があることを確認した。

次に六極磁石アライメントエラー（ガウス分布、 $\sigma = 10 \mu\text{m}$ 、 $2\sigma$  cut）を考慮したときの、オンモーメントム粒子に関するダイナミックアパーチャーを図8に示す。6-bend ラティスの結果（図4）と比べ、概ね同等の大きさのダイナミックアパーチャーとなった。図6でx方向チューンが $\pm 4$  mm 近傍で整数を横切っているため、エラーにより整数共鳴が強く誘起されダイナミックアパーチャーが制限されたものと思われる。X方向振幅依存チューンシフトを補正することにより、エラーが有る時のダイナミックアパーチャーを更に拡張できるものと思われる。また今回、5-bend ラティスのナチュラルクロマティシティが6-bend ラティスのものと同様になっており、ラティスの低クロマティ

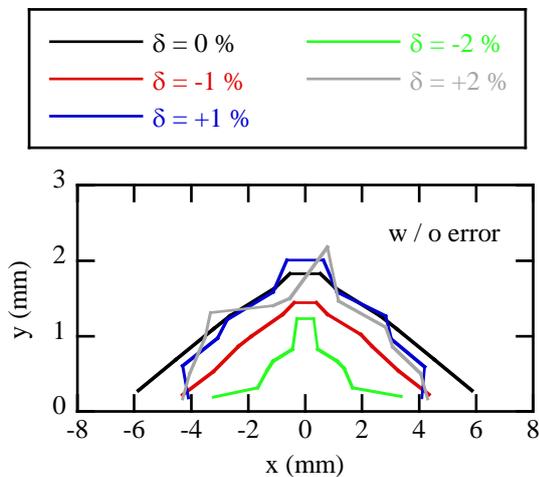


図7: (5-bend ラティス) オンモーメントム・オフモーメントム粒子のダイナミックアパーチャー（エラーがない場合）。High-beta section で観測。

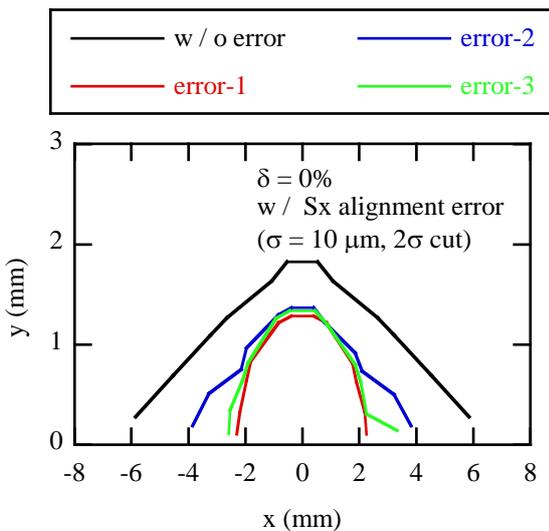


図8: (5-bend ラティス) オンモーメントム粒子のダイナミックアパーチャー（ $\sigma = 10 \mu\text{m}$  の六極アライメントエラーがある場合）。High-beta section で観測。

シティ化[3]が必要とされる六極磁場を低減することにより、ダイナミックアパーチャーのエラーに対する感度を低減できるものと考えている。

#### 4. サマリー

SPring-8 蓄積リングの大規模アップグレード計画である、SPring-8 次期計画（SPring-8 II）は、放射光平均輝度の飛躍的向上を最大の目的としており、このために 10 keV 放射光の回折限界である 10 pm.rad を目標に、ナチュラルエミッタンスを極力低減させる。

現在は SPring-8 II の第一候補として、ユニットセルあたり 6 台の偏向電磁石を有する 6-bend ラティスの設計・検討を行っている。ナチュラルエミッタンスは 70 pm.rad @ 6GeV で、更にダンピングウィグラーなどで回折限界まで低減させることを検討している。

また更なるフィージビリティ確保のために、5-bend ラティスに関する検討を開始した。5-bend ラティスのナチュラルエミッタンスは 141 pm.rad @ 6 GeV（4.5 GeV では 80 pm.rad）で、最大四極磁場は  $B^{(1)}L / B\rho$  で  $0.64 \text{ m}^{-1}$ 、最大六極磁場は  $B^{(2)}L / B\rho$  で  $59 \text{ m}^{-2}$  と、6-bend ラティスの約半分の強さとなった。磁石間のドリフトスペースについては最短が 10 cm となり、6-bend ラティスの 2 倍となった。ダイナミックアパーチャーに関しては 6-bend ラティスと 5-bend ラティスで、概ね同等の大きさとなった。今後ダイナミックアパーチャー拡張を行う予定である。

6-bend ラティスに関して、「ダイナミックアパーチャーの六極アライメントエラーに関する感度」の低下が見られた。磁石再配置による最大六極磁場の抑制、及び x 方向振幅依存チューンシフトの補正を非線形共鳴に組み込んだ効果と思われる。5-bend ラティスについても、六極磁石を追加して非線形オプティクス最適化の自由度を確保してから、「ダイナミックアパーチャーの六極アライメントエラーに関する感度の低下」に効果的と思われる各種プロセスを適用する予定。

今後、放射光利用実験の立場からの要求なども含めた総合的な検討による決定までは、ラティス設計に関して様々な可能性について検討していく必要があると考えている。

#### 参考文献

- [1] SPring-8 Upgrade Plan Preliminary Report: [http://www.spring8.or.jp/ja/about\\_us/whats\\_sp8/spring-8\\_II/publications/](http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/spring-8_II/publications/)
- [2] Y. Shimosaki, K. Soutome, "Lattice Design of a Very Low Emittance Storage Ring for the SPring-8 Upgrade Plan", ICFE beam dynamics newsletter No. 57 (April 2012), pp.35 - 47.
- [3] Y. Shimosaki et al., "Lattice design of a very low-emittance storage ring for SPring-8 II", Proc. of IPAC'11, TUOAB01.
- [4] 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.