

## PF-ARのためのHMBA ラティスの研究 THE STUDY OF A NEW HMBA LATTICE FOR PF-AR

東直\*、原田健太郎、小林幸則、長橋進也、中村典雄、上田明

Nao Higashi\*, Kentaro Harada, Yukinori Kobayashi, Shinya Nagahashi, Norio Nakamura, Akira Ueda  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

The Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) is a storage ring light source of hard X-ray region dedicated to the single bunch operation, and has been operated for users about 30 years from 1987. The lattice and optics are almost not changed from the original one as the TRISTAN booster ring constructed in 1984. The lattice employs FODO structure and the horizontal emittance for the 6.5 GeV user-run is about 300 nrad. In order to acquire the higher brilliance competitive with the state-of-the-art light sources, the full replacement of the accelerator with the ESRF-type HMBA (Hybrid multi bend achromat) lattice is examined. In order to geometrically fit the new lattice to the present PF-AR tunnel, the new ring consists of 12 cells with four long straight sections. The emittance is improved to about 500 pmrad at 3 GeV. With the present user experimental hall at the north of the ring, at least eight undulator beam lines can be constructed. The simulated dynamic aperture is about 1.5 cm at the long straight section with reasonable magnetic errors and COD correction. The conventional injection system with kicker and septum magnets is adoptable and the Touschek lifetime is about 6 hours.

### 1. はじめに

HMBA (hybrid multi bend achromat) ラティスは ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) の EBS (Extremely Brilliant Source) 計画のために考案されたものである [1]。この ESRF 型 HMBA は、進行方向に対して磁場勾配を持つような偏向電磁石を採用することでより大きい曲率半径を実現し、1つのノーマル・セルに対し分散のバンプが2つあるような設計である。六極電磁石は分散関数の大きいところに設置され、効果的に色収差補正がなされる。発散磁場を持つ機能結合型偏向電磁石はノーマル・セルの中心に置かれ、エミッタンスの低減に寄与する。六極電磁石の非線形効果を抑制するために、2つの分散バンプ間におけるチューン増加は半整数になるよう設計されている。原版のラティスでは軌道誤差及び運動量誤差によるチューン変化は非常に小さく、ダイナミック・アパーチャーは大きい。さらに HMBA ラティスは非常に柔軟な設計となっており、KEK-LS はの 20 セルからなる 3 GeV EBS ラティスを原版とし、1.2 m の短直線部を追加している [2,3]。さらに KEK-LS は直線部に四極電磁石を追加することで、ダイナミック・アパーチャーとタウシェック寿命が改善されることがわかっている [4,5]。KEK-LS は全く新たな施設を建設する計画であるが、一方で既存リングを HMBA ラティスに置き換えることも可能である。ここでは PF-AR を HMBA ラティスに置き換えた場合の設計とその性能について議論する。

### 2. PF-AR の現状

PF-AR は 6.5 GeV の放射光施設であり、シングルバンチ運転に特化している。この加速器はそもそも 1984 年に TRISTAN のための蓄積リング (AR: accumulation

ring) として建設された。KEKB が LINAC からフルエネルギー入射を受け入れるようになったため、AR は PF-AR となり、以後放射光施設としてユーザー運転を提供している。周長は 377 m であり、4つの長直線部を持つ。そのうち東側と西側は RF 空洞のために割り当てられている。南北は元々 TRISTAN 時代の検出器開発のために使用されていたが、現在は北側に挿入光源が設置されており、南側は加速器のモニター機器が設置されている。TRISTAN 用 AR として利用されていた頃の入射及び出射システムはリング南側に設置されており、放射光利用ユーザーのための実験ホールは北側にのみ建設されている。

建設当初の PF-AR 入射路は 2003 年に 2.5 GeV から 3.0 GeV 入射に変更され、それ以後 6.5 GeV のフル・エネルギー入射を行うことができなかった。2017 年度冬から始まる SuperKEKB Phase 2 運転では低エミッタンス・高ビーム電流を実現するための代償として、タウシェック寿命が 10 分程度と KEBK 時代に比べ遥かに短く、High Energy Ring (HER)、Low Energy Ring (LER) ともに連続入射が不可欠となる。SuperKEKB と入射路を一部共有する PF-AR への入射が、SuperKEKB への連続入射を妨げないようにするため、PF-AR 専用の直接入射路を建設され、2017 年に完成した [6]。入射点は南東直線部から南西直線部に移動し、これによって旧入射点に新たな挿入光源を設置すれば、既存の南棟実験ホールに新しいビームラインを建設することができる。現在の FODO ラティスにおけるエミッタンスは、6.5 GeV のリング・エネルギーでおよそ 300 nrad であり、これは現在の先端放射光施設で実現されている値の二桁悪い。

一つの放射光施設で 8 本のビームラインという少なさとインフラの老朽化が PF-AR の欠点ではあるが、187 m の周長を持つ楕円形の PF に比べ PF-AR のラティス改良はより容易で可能性に満ちた提案である。

\* nao.higashi@kek.jp

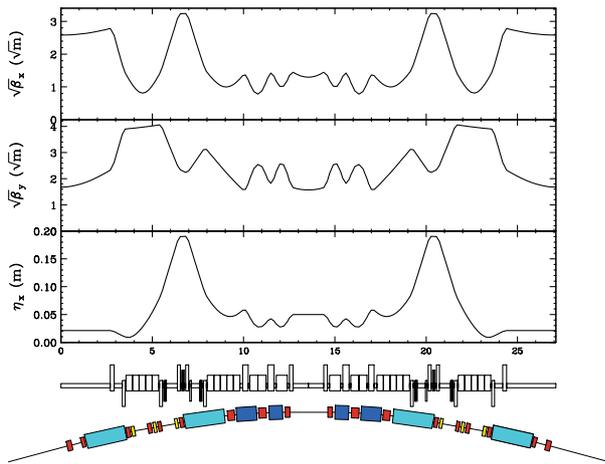


Figure 1: Lattice and optics of the normal cell of 12 cells symmetrical HMBA ring as a starting point of the design. Light blue show the bending magnet with longitudinal gradient, deep blue the combined function bending magnet, red the quadrupole magnets, and yellow the sextupole magnets. The short straight section middle in the figure is 1.6 m and the long one both sides 5.4 m.

### 3. ラティスの代替案

KEK-LS のラティス案を PF-AR の形に一致させるためセル数を 12 とした。12 個のノーマル・セルからなる円形リングは周長およそ 330 m、リング・エネルギー 3 GeV でエミッタンスおよそ 0.5 nmrad となる。エネルギーを 6.0 GeV とすると、エミッタンスは 2 nmrad となる。ノーマル・セルのラティス及び光学関数を Figure 1 に示す。挿入光源の数を 2 倍にするため、短直線部を追加した。

この円形リングを既存の PF-AR トンネルに合わせるため、ノーマル・セルの直線部長さを調節した。その結果を Figure 2 に示す。リングは 3 種の直線部を持ち、最も長い LLH 部は 23 m でリング中に 4 本現れる。この調整の結果、水平方向のチューン増加は円形リングのノーマル・セルから変化する。ダイナミック・アパーチャーが最良となるようにチューンを掃引した結果、ダイナミック・アパーチャーの広さは元の円形リングの場合と変わらず、チューンに関しては円形リングのノーマル・セルになるべく近い方が良かった。長直線部を 5.4 m から 23 m まで延長する場合、水平方向チューンは 0.175 増加する (Table 1)。リング一周におけるチューンを変化させないように、円弧部の水平方向チューンは  $(28.6000 - 2.5583 \times 4) / 8 = 2.2958$  とした。PF-AR に合わせた HMBA ラティスの対称な 1/8 周分の光学関数を Figure 3 に示す。各性能指数については Table 2 に列挙する。IBS を考慮しないエミッタンスは、リング・エネルギー 2.5 GeV でおよそ 350 pmrad、3.0 GeV でおよそ 500 pmrad となり、6.0 GeV で 2 nmrad である。

電磁石について現在の PF リングと同様の誤差、50  $\mu\text{m}$  のアライメント誤差、0.05 % の磁場強度誤差、0.1 mrad の回転誤差を正規分布で想定すると、COD 補正を行った後のダイナミック・アパーチャーは Figure 4 のようになり、運動量アパーチャーがおよそ 3.5 % で水平方

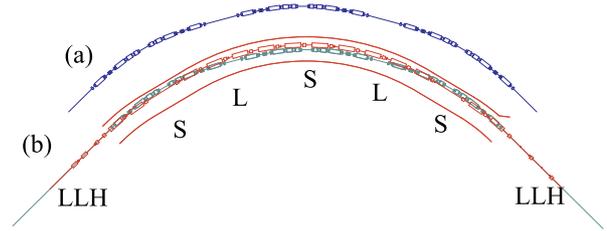


Figure 2: Geometrical adjustment of the long straight section to fit the existing tunnel arc. Figures show the quarter of the ring. The blue figure (a) is the symmetrical ring with twelve identical normal cells for the starting point of the design. The red figure in (b) shows the existing PF-AR lattice of FODO structure and the tunnel wall of the arc section. The green figure shows the new lattice for the replacement. S is the short straight section of 1.68 m, L the arc long straight of 2.7 m. LLH is the very-long straight section that has about 23 m length between two bending magnets at the both sides.

Table 1: Distribution of the Betatron Tune for Geometrical Matching

		Num.	Hor.	Ver.
Symmetrical ring	Arc cell	12	2.3833	0.8417
	Total	-	28.6000	10.1000
AR fit	LL cell	4	2.5583	0.8417
	Arc cell	8	2.2958	0.8417
	Total	-	28.6000	10.1000

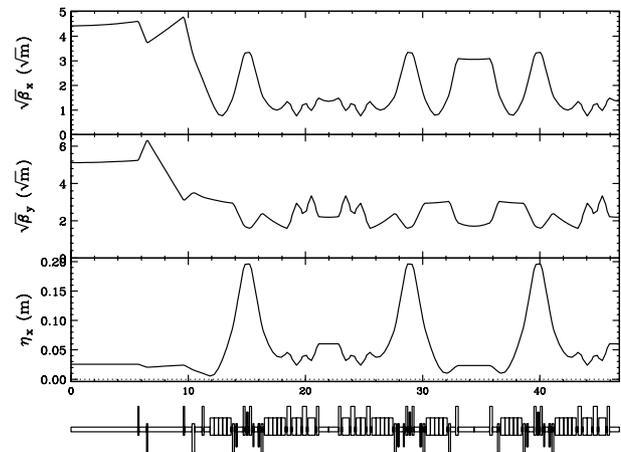


Figure 3: Optics of the 1/8 part of the ring.

向の振幅が  $150 \sigma_x$  となる。ここで  $\sigma_x$  は水平方向ビームサイズである。ダイナミック・アパーチャーは十分に広く、キッカー電磁石及びセプタム電磁石を用いた従来型入射システムを採用することができる。またタウシェック寿命もおよそ 5.6 時間と十分に長い。

### 4. ビームライン構成

PF-AR 南側には SuperKEKB 入射路トンネルがあるため、ユーザーのための実験ホールとビームラインはリング北側に集約されている。既存の北ホールで利用可能

Table 2: Parameters of the Ring

	Symbol [Unit]	SuperAR 3.0	
Energy	$E$ [GeV]	3	
Cell number	$N_s$	12	
Circumference	$C$ [m]	374.28	
RF freq.	$f_{RF}$ [MHz]	500	
Harmonic Number	$h$	544	
Energy loss	[MeV/rev]	0.4259744	
Momentum compaction	$\alpha$	$5.6715 \times 10^{-4}$	
Damping time ( $x, y, z$ )	[ms]	8.365, 17.58, 19.59	
RF voltage	$V_{RF}$ [MV]	2.5	
Bucket height	[%]	3.58	
Betatron tune ( $x, y$ )	$\nu$	28.7, 10.2	
Beam current	[mA]	0	500
Horizontal emittance	[pmrad]	481.15	520.23
Vertical emittance	[pmrad]	-	7.8
$y/x$ coupling	[%]	-	1.5
Touschek lifetime	[hour]	-	5.6
(3.5 % $\sigma_{\Delta p}$ , 150 $\sigma_x$ )			
Energy spread	-	$9.79 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-3}$
Bunch length	[mm]	5.21	5.37

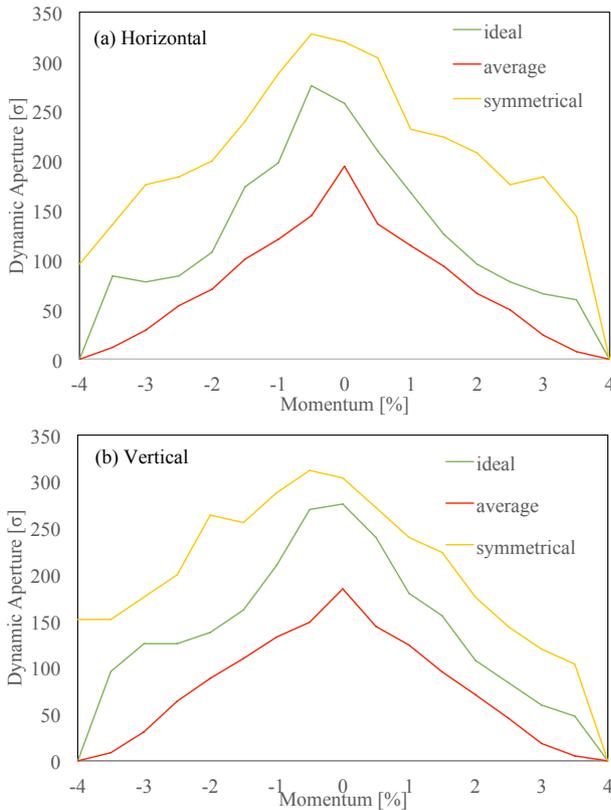


Figure 4: Dynamic aperture with reasonable magnetic errors after COD correction. The line “average” shows the averaged dynamic aperture for 100 random error seeds. The line “ideal” shows the aperture without errors and “symmetrical” for the symmetrical 12 cells case without errors.

と推測されるビームラインの数は8本である (Figure 5)。新入射路建設によって空間的余裕の生まれた旧入射点に挿入光源を追加することで、それに伴って既存の南実験ホールにビームラインを建設することができる。も

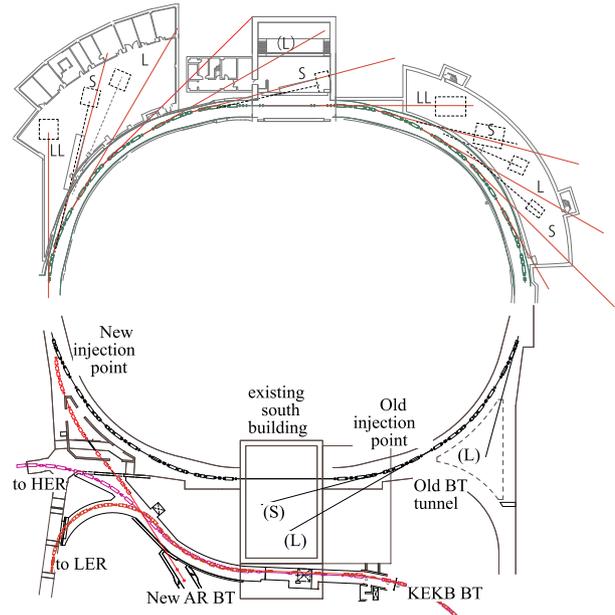


Figure 5: Beamline configuration for the existing experimental hall. The upper part indicates the north hall and the lower is the south hall. “LL” shows the straight line from the about 20 m (B-B) straight section at the symmetrical point of the ring, “L” 2.7 m straight section at the arc and “S” 1.68 m. (a) shows the north side of the ring and (b) south.

しも旧入射路トンネルを新たな実験ホールとして転用することができればさらに何本かビームラインを追加することも可能である。

## 5. まとめ

PF-AR は周長 374 m の、おおよそ円形の光源加速器である。今回の考察の結果、PF-AR のラティスを最新の HMBA に置き換えた場合、それがもたらす効果は計り知れない。老朽化したインフラや窮屈な実験ホールが欠点ではあるが、南東の旧入射路及び旧入射点があった場所を有効活用することにより、ビームライン数を増やすことも可能である (Figure 5 (b))。

## 参考文献

- [1] ESRF Orange Book 2014; [http://www.esrf.eu/Apache\\_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf](http://www.esrf.eu/Apache_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf)
- [2] Pantaleo Raimondi 2013 private communications.
- [3] KEK-LS CDR 2016; <http://kek1s.kek.jp/>
- [4] Simone Liuzzo 2016 private communications.
- [5] K. Harada, N Higashi, S. Nagahashi, N. Nakamura, S. Sakanaka, A. Ueda and S. M. Liuzzo 2017 *Proc. of IPAC2017* (Copenhagen) WEPAB043.
- [6] Nao Higashi *et al.*, 2017 *Proc. of IPAC2017* (Copenhagen) WEPAB044.