

PF リング弧部改造案

LOW EMITTANCE RECONSTRUCTION OF THE ARC SECTION OF THE PHOTON FACTORY

原田健太郎[#], 小林幸則, 中村典雄, 生出勝宣, 阪井寛志

Kentaro Harada[#], Yukinori Kobayashi, Norio Nakamura, Katsunobu Oide, Hiroshi R Sakai
Accelerator Laboratory, KEK

Abstract

The present horizontal emittance of the Photon Factory (PF) ring is about 35.4nm·rad. By the reconstruction of the normal cells at the arc section, the emittance can be reduced to about 8nm·rad. The double number of the combined function short bending magnets are adopted and one present normal cell become two new normal cells. Although the lattice of the straight sections are not changed, the optics are optimized to reduce the non-linear effects of the sextupoles of the arc sections. By keeping the phase advance of the straight section as 3π for the horizontal direction and 2.5π for the vertical, the dynamic aperture as large as that of the present ring can be achieved with the magnetic errors. The difference of the optics of the straight sections are so little that the beam injection and the operation of the in-vacuum short-gap undulators can be maintained. The hardware design will be began as the next step for the realization of the plan. In this proceedings, the design, optimization and simulation results for the low emittance lattice are shown.

1. はじめに

1982年、PFリングがユーザー運転を開始した当初^{[1],[2]}の水平エミッタンスは約400nm·radであった。その後、1986年の低エミッタンス化^[3]で約130nm·radに、1997年の高輝度化^[4]で約37nm·radに改善された。高輝度化改造では、偏向電磁石2台で1セルだった弧部ノーマルセルを、4極と6極の台数を2倍に増やし、偏向電磁石1台で1セルに改造することで、大幅なエミッタンスの改善がなされた。その後、2005年の直線部改造^[5]ではエミッタンスはほぼ維持ながら、長直線部をさらに長く、また、真空封止短周期挿入光源用に最適化された新しい短直線部が4箇所設置され、現在では全ての直線部が利用されている。挿入光源の台数は12台（うち2番と16番直線部には2台ずつ設置）あり、第3世代光源と引けを取らない数になっている。ここでは、PFリングの弧部を改造し、水平エミッタンスを約8nm·radまで下げる案について概略を述べる。

2. 改造の概略

2.1 改造範囲と新しいノーマルセル

直線部のラティスは維持し、弧部全体と直線部への接続部分のみを改造する。改造範囲及び内容をFigure 1に示す。

現在のPFリングの約1.9mの偏向電磁石は1982年の建設当初から使われているものであるが、それを2台の機能結合型（水平分散力あり）の約65cmの偏向電磁石に置き換える。弧部のみで仮想的なリングを作った場合、水平エミッタンスは現在約41nm·radになるが、新しいセルの場合、4.6nm·radまで小さくなる。リングのパラメータをTable 1に、

[#]kentaro.harada@kek.jp

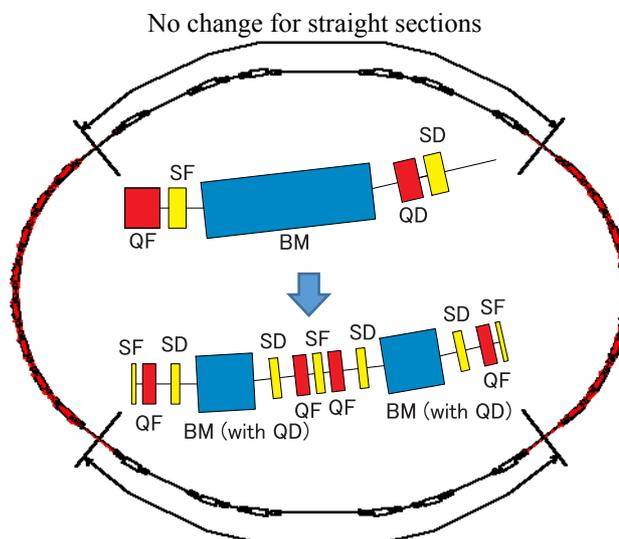


Figure 1: The arc sections for the reconstruction.

新しいオプティクスをFigure 2に示す。色収差自体は劇的に増加しないが、小さい分散関数など、6極電磁石設置部分のオプティクスの変化で、現在の10倍以上の強さの6極電磁石が必要となる。電磁石のパラメータをTable 2に示す。

2.2 オプティクスの最適化

6極電磁石に対する対称性を重視してオプティクス設計を行う。直線部端の偏向電磁石1台分を含むセルのみを、直線部への接続に使用し、そこに6極電磁石は設置しないことにする。弧部は完全に同一な14セル（片側）で構成する(Figure 3)。接続部分を含む直線部全体のチューンの進みを、水平方向を3、垂直方向を2.5という、整数または半整数とすることで、広いダイナミックアパーチャが確保できる。

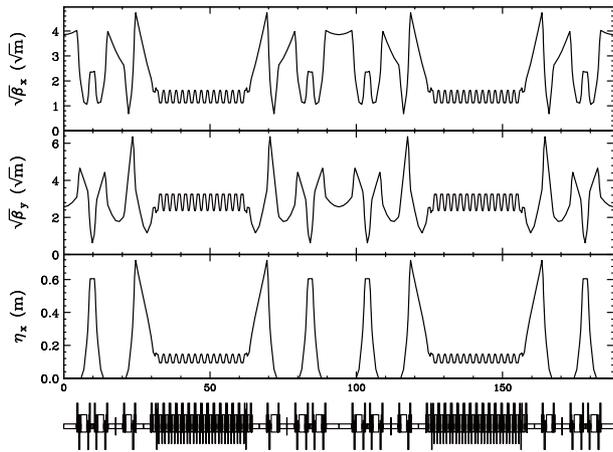


Figure 2: The new optics of the ring.

Table 1: Parameters of the PF Ring

		present	new
Energy	E [GeV]	2.5	
Circumference	C [m]	187.0	
Emittance	ϵ_0 [nm-rad]	35.370	8.073
Normal cell emittance	ϵ_{nc} [nm-rad]	40.722	4.561
Energy spread	σ_E/E	7.29E-04	1.64E-03
Momentum compaction	α	6.56E-03	4.39E-03
Betatron tune			
Horizontal	ν_x	9.60	12.1
Vertical	ν_y	5.28	6.2
Chromaticity			
Horizontal	ξ_x	-13.432	-17.573
Vertical	ξ_y	-17.314	-25.117
Energy loss	U_0 [MeV/rev.]	0.399	0.513
Damping time			
Horizontal	τ_x [msec]	7.777	3.040
Vertical	τ_y [msec]	7.815	6.109
Longitudinal	τ_z [msec]	3.918	6.171
Revolution freq.	f_{rev} [MHz]	1.60253	
RF frequency	f_{RF} [MHz]	500.100	
Harmonic number	h	312	
RF voltage	V_{RF} [MV]	1.70	
Synchrotron tune	ν_s	-0.015	-0.009
Bunch length	σ_z [mm]	9.700	10.475
Bucket height	$(\Delta E/E)_{RF}$	0.012	0.017

6極電磁石の強さは、直線部のDBAセルに6極を追加すると非常に小さくできるが、ダイナミックアパーチャは劇的に減少する。チューンの進み自体はある程度の範囲で変化しても問題ないが、ダイナミックアパーチャを確保する為には、直線部に6極成分があってはならない。

ラティス要素が電磁石とRF空洞だけである場合について、電磁石の誤差を考慮したダイナミックアパーチャを計算すると、既存のPFリングと同程度

Table 2: Parameters of the Magnets

	Present			After reconstruction		
		L[m]	B'[T/m]		L[m]	B'[T/m]
Q	Q1	0.4	14.544	Q1	0.4	14.150
	Q2	0.4	-14.434	Q2	0.4	-13.277
	Q3	0.3	-21.062	Q3	0.3	-22.334
	Q4	0.3	23.572	Q4	0.3	24.025
	Q5A	0.4	-15.695	Q5	0.3	-21.010
	Q5B	0.4	-15.578			
	Q6A	0.4	17.773	Q6	0.4	16.496
	Q6B	0.4	17.111			
	Q7A	0.3	9.978	Q7	0.3	14.857
	Q7B	0.3	10.325			
	Q8A	0.4	-19.184	Q8	0.4	-20.256
	Q8B	0.4	-17.656			
	Q9A	0.4	18.499	Q9	0.4	20.493
	Q9B	0.4	18.195			
	QAA	0.4	8.390	(BMA)		
	QAB	0.3	7.646			
	QDA	0.25	-19.926			
	QDB	0.25	-17.216			
QFA	0.4	15.142	QFA1	0.15	-10.448	
QFB	0.4	16.077	QFA2	0.2	29.679	
QD	0.25	-15.973	BMA	0.647	-12.085	
QF	0.4	15.590	QF	0.15	36.788	
		L[m]	B''[T/m ²]		L[m]	B''[T/m ²]
S	SF	0.2	327.017	SF	0.1	4124.309
	SD	0.2	-325.444	SD	0.1	-2246.525
		L[m]	B[T]		L[m]	B[T]
B	BM	1.944	0.962	BMS	1.944	0.962
				BMA	0.647	1.445

の電磁石の誤差、すなわち据付誤差 50 μ m、強さの誤差 0.05%、回転誤差 100 μ rad (最大値はそれぞれの値の2倍まで)があっても、現状以上のダイナミックアパーチャを確保することが可能であることが分かった (Figure 4)。入射点の β_x は10.25mなので、エミッタンス 8.07 nm-rad、アパーチャ 80 σ とすると入射点の実寸アパーチャは 23mm、60 σ で 17mm となる。(現在のラティスでは、誤差無しの場合に約 24mm である。)

入射点や真空封止短周期挿入光源の場所のオプティクスはほとんど変化しない為、入射及び挿入光源の最小ギャップには大きな問題は生じない。リング全体のエミッタンスは約 8nm-rad、エミッタンス減少の効果を計算すると、挿入光源からの光の輝度^[6]は約 7~8 倍に向上する (Figure 5) 見込みである。

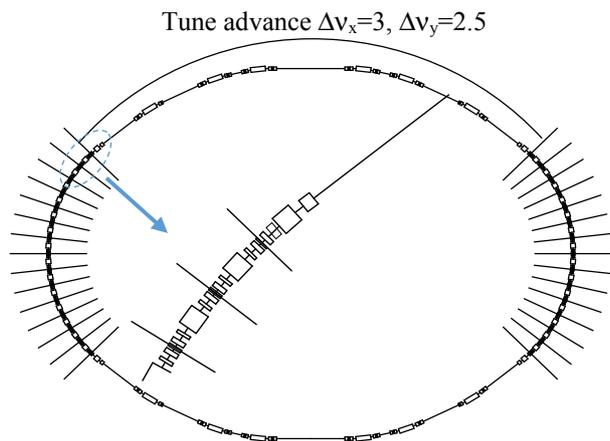


Figure 3: The new lattice of the ring.

2.3 ビームラインの位置

直線部は改造しないので、挿入光源の光源点は変化しない。一方で、弧部の偏向電磁石ラインについては、2.5 度ラインの場合、新しいラティスの 1 台目の偏向電磁石内が光源点となるが、現在のラティスと比較すると光源点が上流側に約 55cm ずれ、光軸がリング内側に約 2cm 平行移動してしまう(Figure 6)。光軸の移動を防ぐ為には、弧部入口の偏向電磁石を約 9cm 下流に(出口側は上流に)ずらし、弧部全体の電子軌道を約 2cm 外側にずらせば(Figure 7)、既存の BL に向けて光を発生させることが可能である。なお、新しい弧部は現在の偏向電磁石の円弧軌道を弦で結ぶようなイメージになり、弧部全体を約 2cm 外側にしても、周長は約 3cm (RF 約+100kHz) 短くなる。

3. 予算と改造期間の非常に粗い推定

必要な予算は、加速器要素だけしか更新できない場合、偏向電磁石も交換するので高くはなるものの、恐らく高輝度化や直線部改造と同程度の規模と思われる。ただし、当時とは PF の老朽化の度合いが大

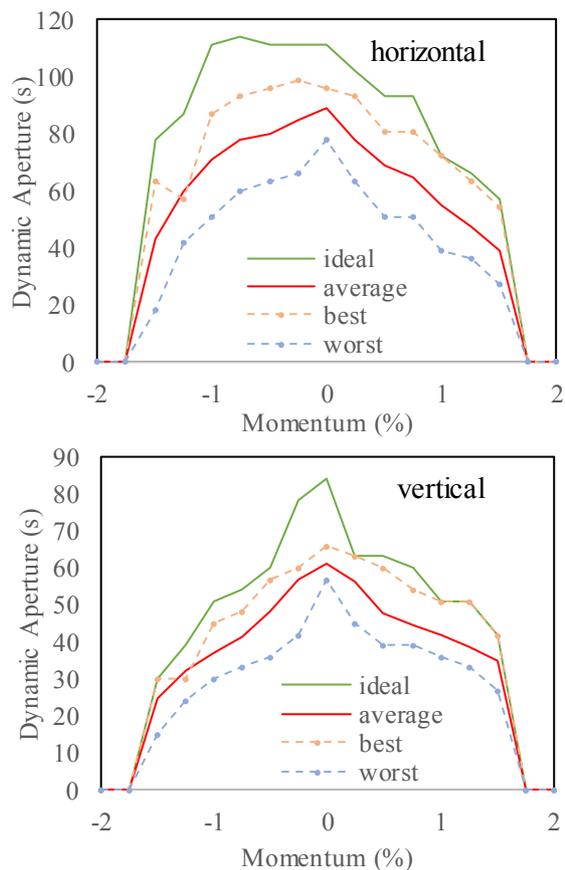


Figure 4: The dynamic aperture of the ring. The average, the worst and the best cases are calculated from 50 samples of random magnetic errors.

きく異なり、雨漏りの修理、冷却水系や空調の修理、床面や壁面の亀裂や不安定性(振動や日較差)の改善など、同時に老朽化対策が必要なことが明らかである。また、向上する性能を生かすには、加速器側のモニタや補正系の充実、BL 側の安定性の向上なども必須であろう。加速器のみの改造に必要な期間は、電磁石や真空、モニタ系の準備に約 2 年、実際

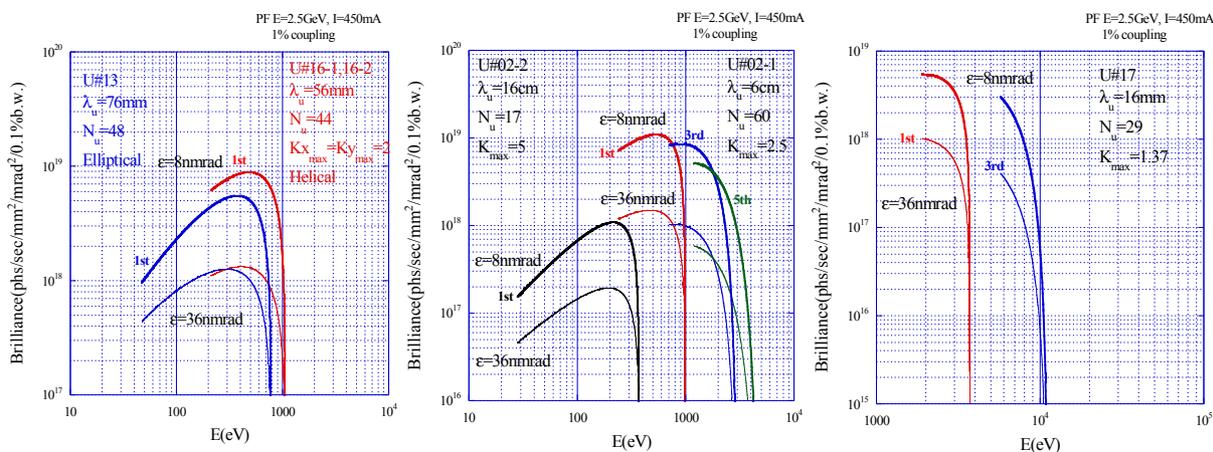


Figure 5: The estimation of the improvement of the brilliance by the emittance improvement.

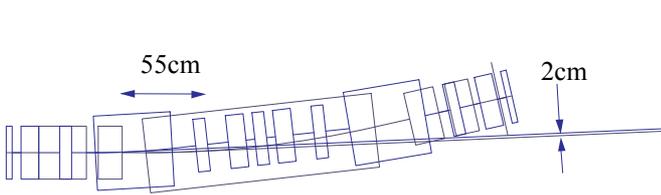


Figure 6: Change of the photon axis without lattice adjustment.

の改造作業は半年程度（直線部増強と同程度）と思われる。ただし、電磁石と真空について、1セル分、先行して試作することが絶対必要不可欠である。

4. 今後の課題

現在、ラティスとオプティクスに対してシミュレーションを行っただけであり、実現に向けては、ハードウェアの詳細設計が大きな課題となる。特に、高精度の機能結合型偏向電磁石の難しさ、現在の10倍以上の強力な6極電磁石が必要となること、電磁石間隔が狭くなって、真空・モニタ系の設置や維持が簡単でないこと等が大きな検討課題である。

例えば、cERLで採用した鉄の材質特性に対して、飽和と磁場の関係をいくつかのボア直径を仮定して2次元計算した図をFigure 8に示す。4極電磁石の場合、約40T/mの磁場勾配が必要で、ボア直径は4cmが最適である。6極電磁石の場合、約4500T/m²が必要で、やはりボア直径は4cm以下にしないと飽和の効果で磁場が出ない。（現在の6極はボア直径9cmである。）ダクトの厚さを2mmとしても、内径は3.5cmとなる。ベータ関数と分散が絞られているので、ダイナミックアパーチャの方が小さいが、現実的な真空やモニタの設計、光のビームラインを考えた電磁石の設計は簡単ではないだろう。

さらに、直線部のチューンを非線形力に対して調整しているので、直線部に大きな6極成分があるとアパーチャが劇的に減少する可能性がある。現在、既にいくつかの挿入光源に非線形磁場成分があることが分かっており、場合によっては補正を検討する必要があるかも知れない。

参考文献

- [1] S. Kamada, Y. Kamiya, M. Kihara, "Lattice of Photon Factory Storage Ring", Proc. of PAC 1979, p3848.
- [2] "PF Ring Design Handbook", 1979.
- [3] 神谷幸秀、木原元央, "PFにおける低エミッタラティスの検討", KEK Internal 85-10, 1985年12月.
- [4] 加藤政博、堀洋一郎編, "PFリング高輝度化計画デザインレポート", KEK Report 92-20, 1993年2月.
- [5] T. Honda, et. al., "Straight-sections Upgrade Project of the Photon Factory Storage Ring", Proc. Of APAC 2004, p383.
- [6] 土屋 公央, private communications.

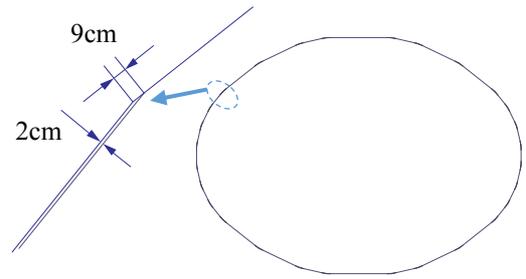


Figure 7: The lattice adjustment to fix the photon axis.

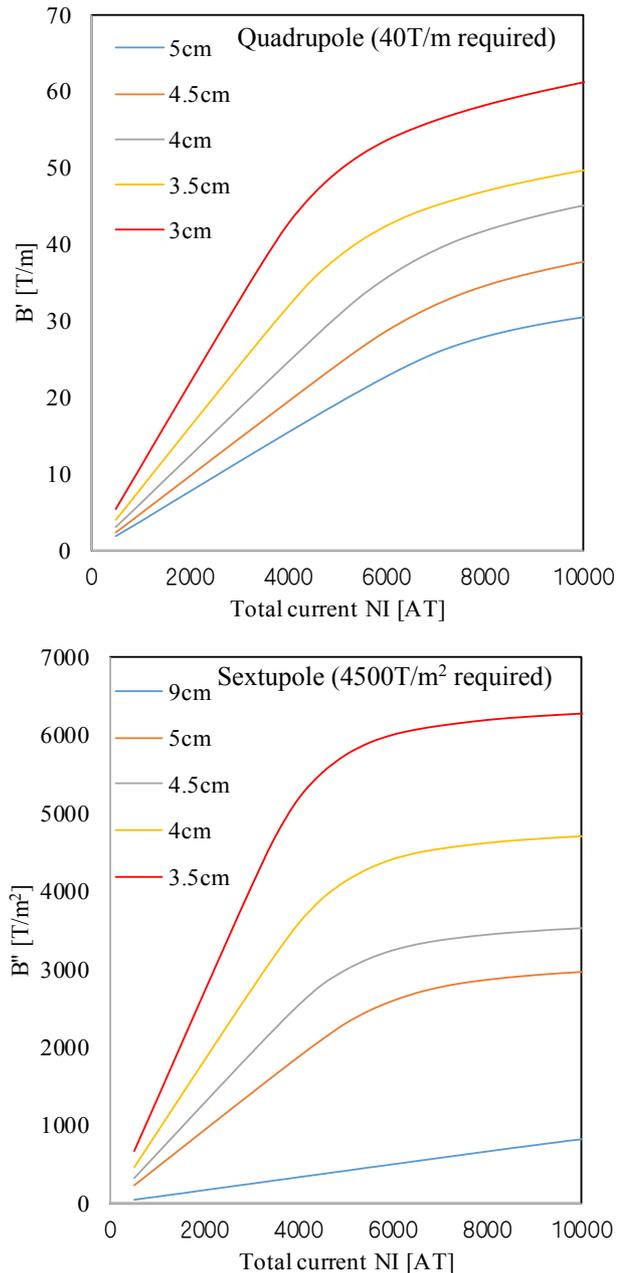


Figure 8: The bore diameter and the saturation.