

ESRF アップグレードラティスの解析 THE ANALYSIS OF THE ESRF II LATTICE

原田健太郎[#], 小林幸則, 中村典雄, 生出勝宣
Kentaro Harada[#], Yukinori Kobayashi, Norio Nakamura, Katsunobu Oide
Accelerator Laboratory, KEK

Abstract

In order to catch up with the most advanced design technology for the HMBA (hybrid multi bend achromat) storage rings, the new test storage ring was designed from the lattice of the phase II upgrade project of the ESRF (ESRF II). Although the original 3GeV test lattice from Dr. Pantaleo Raimondi of ESRF has no problem about the optical and magnetic parameters including the dynamic aperture, we inserted the short straight sections for the in-vacuum short-gap undulators. After the optimization of the linear and non-linear optics as the original design principle of ESRF II, the altered lattice has the circumference of about 600m, the emittance about 300pm·rad with the intra-beam scattering effect at the beam current of 500mA, and the large dynamic aperture of about 1cm even with the usual magnetic errors. In this proceedings, we show the selection of the design parameters, the analysis of the ESRF II lattice, and finally the parameters of the altered test lattice with short straight sections.

1. はじめに

蓄積リング型光源の水平エミッタンスは、第3世代光源で一般的な DBA や TBA 構造のラティスを採用すると、現実的には周長 500m 程度で数 nm·rad になる。一方、現在、世界各所で設計、建設が進められている新しいタイプの蓄積リング型放射光源では、HMBA (Hybrid Multi Bend Achromat) 式のラティス構造が採用され、水平エミッタンスは同程度の周長で約 1/10、数百 pm·rad にすることが可能となっている。新しい構造のラティスと最新の設計方法を学ぶ目的で、光源ラティスを比較検討し、その中で最も優れていると思われた ESRF upgrade phase II のラティスをベースに、短直線部を入れる改造の検討を行った。ここでは、その結果について述べる。

2. 最新の光源ラティスと設計目標

まずは大まかな設計目標を定める為、世界各地の最先端光源のラティスのパラメータをあたってみた。

現在建設中の MAX IV^[1]は、3GeV で周長 528m、7BA 構造 20 セルで IBS (Intra Beam Scattering) の効果無しでのエミッタンスは 328pm·rad である。5m の色消し長直線部が 20 本と、1.3m の直線部が 40 本確保されている。電磁石の磁場は非常に強く、ダクトを細くして強い磁場を実現する方式である。ダイナミックアパーチャの確保には、強い非線形オプティクスの最適化が必要である。

ESRF upgrade phase II (以後、ESRF II) 計画^[2]は、予算が通って実施されることになっているが、現在の ESRF リングを置き換える計画で、ユーザービームラインは動かさないことになっている。エネルギー 6GeV、周長 844m、7BA 構造 32 セルで IBS 無しのエミッタンス 160pm·rad、5m 直線部が 32 本ある。オプティクス設計においては、色収差補正の為

の 6 極電磁石を弱く抑える為に、分散関数を大きくする部分 (dispersion bump) を作っている。ただし、エミッタンスの増大を防ぐため、分散バンプの偏向電磁石には、曲率半径が大きい長い電磁石を採用し、さらに、分散の大きい側に向かって磁場が弱くなる様に、ビーム進行方向に曲げ角が 5 段階で変わるような設計になっている。一方、セル中央の偏向電磁石は水平発散力有りの機能結合型電磁石で、低エミッタンスの為に分散とベータ関数が小さく絞られている。また、ダイナミックアパーチャを広げる工夫として、ノーマルセル内の 6 極間のチューンの進みを半整数とし、非線形力を打ち消す構造になっている。これらの設計により、6 極電磁石の値は PF 並の強さで済んでおり、線形ラティスの工夫で広いダイナミックアパーチャが確保されるという方式になっている。

建設完了し、コミッショニング中の NSLS II^[3]は、3GeV で周長 780m、DBA 構造の 30 セルで、エミッタンス 2.1nm·rad である。従来の構造のラティスのほぼ限界と思われ、ダンピングウィグラーを入れて 600pm·rad まで低エミッタンス化が行われることになっている。

ブラジルのシリウス計画^[4]も建設を開始しているが、3GeV で周長 518m、5BA 構造の 20 セルで IBS 無しのエミッタンス 280pm·rad である。

これら最先端の光源のパラメータを比較検討した結果、まずは適当な設計目標として、周長 600m 以下、直線部は 5m が 20 本、1m が 20~40 本、運転電流 500mA で IBS 効果有りのエミッタンスで 300pm·rad と定めた。最先端の 3GeV 光源はどれも周長 500m 台 (以上) であり、これらのパラメータはそれほど不自然な値ではないと思われる。ESRF II はラティスとオプティクスは非常に優れているが、既存のトンネルの制約があり、短直線部がない構造

[#]kentaro.harada@kek.jp

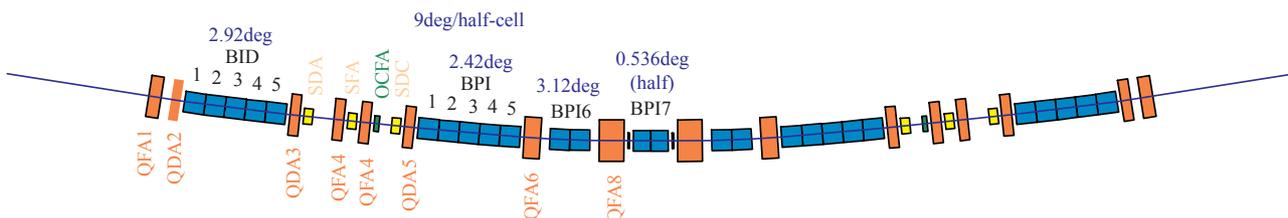


Figure 1: Lattice of the normal cell.

になっている一方、MAX IV ラティスは短直線部が 40 本も確保されている。そこで、両者の長所を合わせ、3GeV 化した ESRF II ラティス^[5]をベースに、短直線部を入れる改造を具体的に行ってみることにした。

3. ESRF II ラティスの構造と特徴

ESRF II のラティスは、7BA、すなわちノーマルセルに 7 台の偏向電磁石がある (Figure 1)。直線部両脇の 2 台ずつ、合計 4 台 (図の BID1~5 と BPI1~5) は、分散関数を大きくし、色収差補正の 6 極電磁石を設置する為のオプティクスに最適化に用いられている。エミッタンス増大を防ぐ為、分散関数が大きくなるにつれて磁場を弱くするという、進行方向に磁場勾配を持つ偏向電磁石 (Bending Magnet with Longitudinal Gradient; LG bend) が採用されている。ESRF の計画では永久磁石を使って 5 段階に磁場を変える案になっているが、電磁石を採用する場合はギャップを軌道長に線形に変化させるテーパ状の磁極を採用することも可能である。

DBA 的な部分だけでリングを構成しようとすると、周長が非常に長くなるため、エミッタンスを小さくしつつ軌道を曲げる部分を追加することが必要である。そこで、セル中央に、分散及びベータを小さく絞った水平発散力を持つ機能結合型偏向電磁石を 3 台配置する (図の BPI6~7)。すなわち、エミッタンスを下げる機能結合型偏向電磁石の採用と、LG ベンドによる、エミッタンス増大を防ぎつつ 6 極の値を小さく保つ DBA 的な分散バンプが、ESRF 型 HMBA オプティクス設計の特徴である。ESRF ではそれに加え、ダイナミックアパーチャを広げる工夫として、6 極間のチューンを半整数とし、非線形力をセル内で打ち消すオプティクスが採用されている。ノーマルセルのオプティクスを Figure 2 に、パラメータを Table 1 に示す。

なお、オリジナルのラティスは 6 極 4 ファミリー、8 極電磁石による振幅依存チューンシフトの最適化がなされていたが、6 極は 2 ファミリーとしてリングを 20 回対称にし、8 極はなくとも十分に広いダイナミックアパーチャが確保できていた。

4. 短直線部の挿入とラティスの改変

4.1 入射と RF の為の直線部の伸長

ラティスは非常に完成度の高いものであったが、オリジナルの ESRF では既存 BL に合わせてトンネル内に入れなければならないという制約条件があるため、電磁石間隔が狭い。オリジナルの電磁石間隔

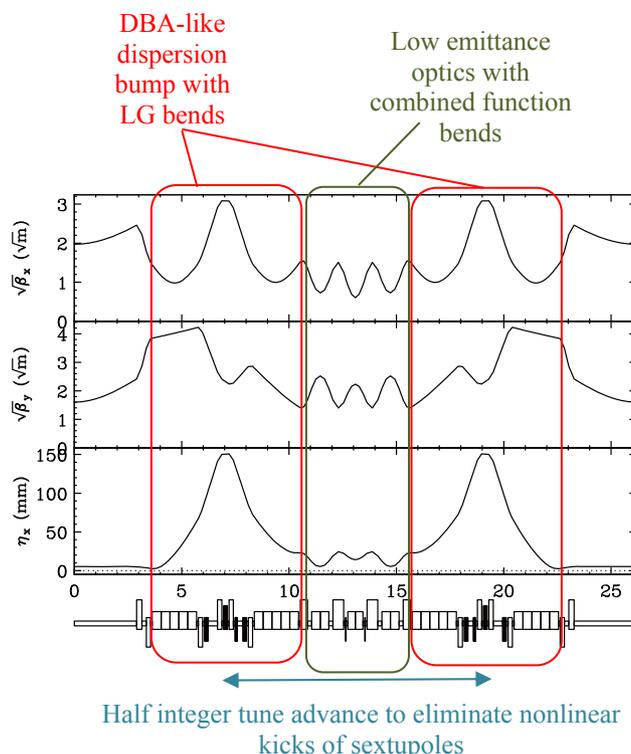


Figure 2: Optics of the normal cell.

Table 1: Parameters of 3GeV Example Lattice^[5]

Beam energy	3GeV		
Circumference	523.52m		
Arcs	20		
Straight sections	5m x 20		
RF frequency	500 MHz		
Bunches	900		
RF voltage	1.3MV		
Betatron tunes x,y,z	47.6, 17.6, 0.00384		
Damping turns x,y,z	14600, 20300, 12600		
Beam current	0	200mA	500mA
Horizontal emittance	145pmrad	236pmrad	301pmrad
Vertical emittance	4pmrad	6.4pmrad	8pmrad
Betatron coupling	2.70%	2.70%	2.70%
Bunch length	3.1mm	3.5mm	3.8mm
Momentum spread	6.6×10^{-4}	7.4×10^{-4}	7.9×10^{-4}
Touschek lifetime	-	11000s	6040s

8cm を 12cm まで伸ばす (周長は長くなる) ことで、オプティクスの柔軟性が向上する。また、ESRF では円形のトンネル内に設置しなければいけない為、入射の為にベータ関数を大きくした特別セルを用意する必要があるが、新しいリングに対しては対称に

2カ所の長直線部を伸長し、入射とRFに用いる方がハードウェアの観点からも容易である為、2箇所直線部を10mに伸ばすことにした(Figure 3)。ただし分散関数や4極の配置、光学関数の形などはまだ最適化の余地が残されている。

4.2 短直線部の確保

分散関数バンプを作りつつ、効果的に6極電磁石

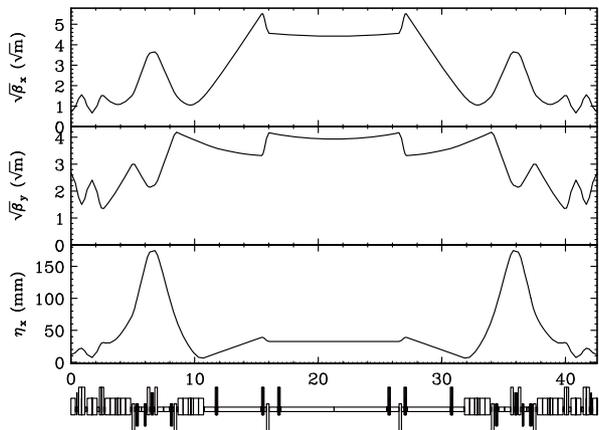


Figure 3: Optics of long straight section for the injection or RF.

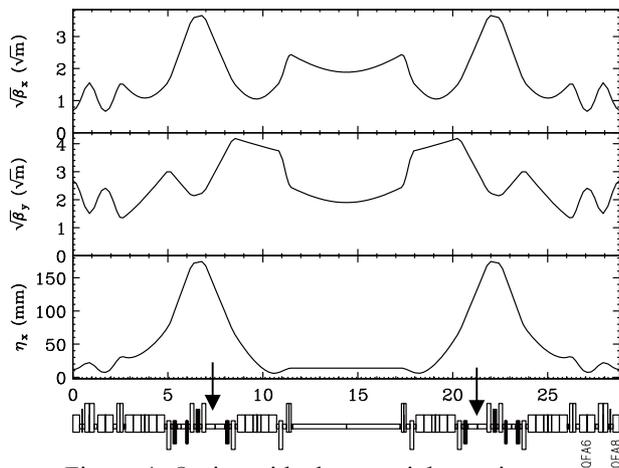


Figure 4: Optics with short straight sections at sextupole-side.

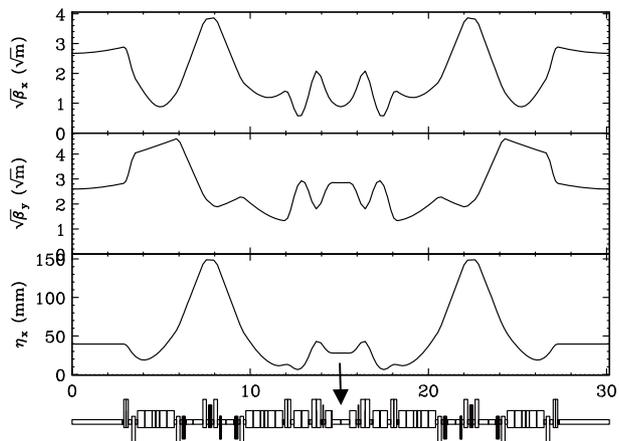


Figure 5: Optics with short straight sections at the center of the cell.

を配置する為、もともとノーマルセルの6極電磁石間には約50cmの間隔が存在する。真空封止短周期挿入光源の設置の為には最短でも約1m以上の直線部が必要であるが、最も簡単には、元々存在する短直線部を50cm伸ばすのがよい。分散関数形状の対称性を考慮し、セル内の短直線部4カ所を対称に50cmずつ伸ばすことにしたが、特に性能低下は見られなかった。なお、MAX IVでも、長直線部からみて最初の偏向電磁石の次に短直線部があるので、短直線部の配置としてはほぼ同じ位置ということになる。短直線部有りのオプティクスをFigure 4に示す。

ビームライン配置の観点からは、長直線部と6極脇の直線部はLGベンド1台、約2.9度しか離れておらず、セル中央に短直線部を入れる方が基幹チャンネルやビームラインコンポーネントの配置が容易

Table 2: Parameters of the Magnets

Bends	L[m]	angle [rad]	angle [deg]	K ₁ [m ⁻¹]
BID	BID5	0.413	0.01990	1.140
	BID4	0.413	0.01094	0.627
	BID3	0.413	0.00827	0.474
	BID2	0.413	0.00654	0.375
	BID1	0.413	0.00533	0.305
BPI	BPI1	0.413	0.00524	0.300
	BPI2	0.413	0.00632	0.362
	BPI3	0.413	0.00758	0.434
	BPI4	0.413	0.00958	0.549
	BPI5	0.413	0.01350	0.774
BPI6	0.806	0.05453	3.125	-1.709
BPI7	0.704	0.01872	1.073	-1.614
BPI6	0.806	0.05453	3.125	-1.709
BPI	2.065	0.04222	2.419	
BID	2.065	0.05097	2.920	
total		0.31416	18.000	
Quads	L[m]	K ₁ [m ⁻¹]	B'/B _p [m ⁻²]	B' [T/m]
QFA1	0.250	1.006	4.022	40.223
QDA2	0.200	-0.766	-3.829	-38.292
QDA3	0.200	-0.359	-1.794	-17.938
QFA4A	0.200	0.429	2.145	21.453
QFA4B	0.200	0.429	2.146	21.461
QDA5	0.200	-0.541	-2.704	-27.041
QFA6	0.335	1.656	4.943	49.428
QFA8	0.500	2.318	4.635	46.353
QS1	0.200	0.010	0.049	0.491
QS2	0.200	0.641	3.203	32.031
QS3	0.200	-0.549	-2.746	-27.465
QS4	0.200	0.004	0.019	0.191
Sextupoles	L[m]	K ₂ [m ⁻²]	B''/B _p [m ⁻³]	B'' [T/m ²]
SDA	0.180	-12.307	-68.370	-683.701
SFA	0.180	12.950	71.945	719.452
SDC	0.180	-12.307	-68.370	-683.701

Table 3: Parameters of the Altered Lattice

Beam energy	3GeV		
Circumference	603.36m		
Arcs	20		
Straight sections	5m x 20, 1m x 40		
RF frequency	508.8MHz		
Bunches	1024		
RF voltage	1.4MV		
Betatron tunes x,y	47.58, 17.62		
Damping tums x,y,z	14152, 20266, 12929		
Beam current	0	200mA	500mA
Horizontal emittance	145pmrad	233pmrad	296pmrad
Vertical emittance	4pmrad	6.4pmrad	8pmrad
Betatron coupling	2.70%	2.70%	2.70%
Bunch length	3.4mm	3.8mm	4.1mm
Momentum spread	6.6×10^{-4}	7.5×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Touschek lifetime	-	3.8h	1.9h

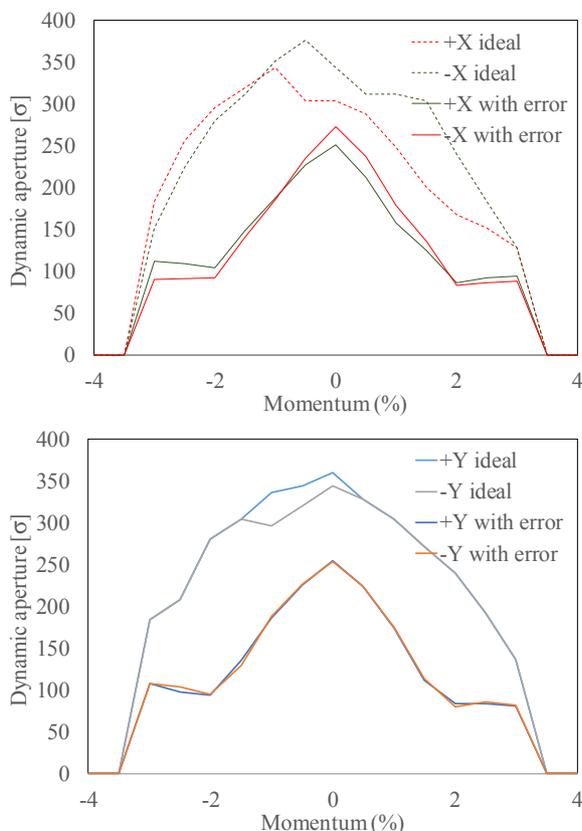


Figure 6: Dynamic aperture with the magnetic errors after the COD correction.

である。電磁石間隔を延ばして全体的にオプティクスを緩めればセル中央に直線部を入れるオプティクスも可能で、ダイナミックアパーチャは若干狭くなるものの、入射等に関しては問題ないレベルであった。セル中央に短直線部を入れたオプティクスを、Figure 5 に示す。

なお、6 極脇、セル中央どちらの場合においても、直線部の長さは 1.5m 程度までは伸ばしてもオプティクスマッチングが可能であった。

4.3 電磁石の強さ

短直線部を 6 極脇に、2 箇所対称点に 10m 直線部を入れた場合の電磁石の強さを Table 2 に示す。

(“QS”は 10m 直線部用の 4 極である。) 現在の PF リングの 6 極電磁石の磁場勾配は、3GeV 運転時の最大値で約 600T/m² だが、6 極の強さがほとんど同じである。MAX IV では約 2000T/m² 必要であることを考えると、ESRF II 型ラティスの優秀さがよく分かる。4 極の強さ約 50T/m はボア直径約 4cm とすれば鉄の飽和が始まるぎりぎりまで到達できる磁場勾配である (コア長の調整も勿論可能である)。

機能結合型偏向電磁石については、大きな 4 極電磁石を用意し、軸を約 1cm (BPI7)、3cm (BPI6) ずらしてビームを通せば代用できる強さである。J-PARC の様に、ボアを広げた矩形の 4 極電磁石を利用することも電磁石精度や磁場測定の容易さからは現実的だろうと考えられる。

4.4 誤差の影響

改造したリングのパラメータを Table 3 に示す。B、Q、SX 電磁石に対して、ガウス分布の乱数誤差を入れた場合のダイナミックアパーチャの計算結果を Figure 6 に示す。ガウス分布の標準偏差σは据え付け誤差 50μm、強さ 0.05%、回転 0.1mrad で、最大誤差は±2σまでとした。計算は 100 通り行い、図は COD 補正後の値である。BPM や補正電磁石系は適当に配置してあり (ESRF 計画に倣っていない)、ハードウェア的に可能かどうかは今後の検討が必要である。リング全体で BPM188 箇所、水平ステアリング 152 箇所 (偏向電磁石のバックレグ)、垂直ステアリング 110 箇所 (4 極、6 極の補正コイルを仮定) とした。計算は固有値法で、逆行列を求める際の固有値はステアリング数の半分とし、計算上、ステアリングの強さを半分だけ設定して 20 回繰り返し補正を行った。なお、BPM の読みの誤差とステアリングの設定誤差は考えていないが、バックレグや補正コイルとしての据え付けや回転誤差は入っている。

誤差有りて補正後のダイナミックアパーチャは平均約 250σ、100 通りの中で最も悪いケースでも 200σを下回ることはなかった。入射点のβ_x=18m とすれば、200σで実寸でのアパーチャは約 1cm となり、設計目標がクリアできる。一応、現状の 10m の長直線部のオプティクスで問題はない。

5. まとめ

ESRF upgrade phase II 計画のラティスを手本とし、短直線部を挿入してオプティクス最適化を行い、誤差の影響や電磁石の強さなど、問題ないラティスが実現できることが分かった。入射、RF の為に適当に長直線部も入れてみたが、円形として周長を 550m 程度まで短くすることも可能である。

もし、この案の完成度を高めていくとするなら、1m 直線部の位置と長さの再検討、真空封止短周期挿入光源に対して光学関数等が本当に問題がないかの検討、エミッタンス条件を緩くした場合のセル数 (周長) 削減の検討などが今後の課題として考えら

れる。もとが 6GeV で成立するラティスである為、3GeV で RF や電磁石、入射に関するハードウェアは問題ないと思われるが、真空やビーム不安定性、バンチ内散乱の効果などは 3GeV の方が厳しい為、それらをきちんと検討する必要もある。

参考文献

- [1] <https://www.maxlab.lu.se/maxiv>
- [2] <http://www.esrf.eu/>
- [3] <http://www0.bnl.gov/ps/>
- [4] <http://lnls.cnpem.br/>
- [5] Pantaleo Raimondi, private communications