

DQBA 型ラティスによる KEK-LS 計画の加速器の改善

IMPROVEMENT OF KEK-LS ACCELERATOR BY DQBA TYPE LATTICE

原田健太郎^{#A)}, 東直^{A)}, 中村典雄^{A)}, 長橋進也^{A)}, 上田明^{A)}, 島田美帆^{A)}, Simone Liuzzo^{B)}
K. Harada^{#,A)}, N. Higashi^{A)}, N. Nakamura^{A)}, S. Nagahashi^{A)}, A. Ueda^{A)}, M. Shimada^{A)}, S. Liuzzo^{B)}
^{A)} KEK-PF, ^{B)} ESRF-EBS

Abstract

The KEK-LS is 3 GeV storage ring light source with about 140 pmrad emittance and 570 m circumference. It adopts HMBA (Hybrid Multi Bend Achromat) type normal cell developed by ESRF. The many simulations and design works, for example, the effects of the random magnetic errors on the dynamic aperture and the design of the typical magnet with required field strength, are already finished. The project seems to have enough reality and no critical problems for the construction. But the present CDR version design has some shortages; the relatively short Touscheck lifetime about 2 hours due to the smaller momentum dynamic aperture comparing with other similar 4th generation projects including original ESRF lattice and the large emittance growth from the insertion device installed in the straight section with residual dispersion function. In order to compensate these shortages and improve performances, we install the new two quadrupole magnets in the short straight section. We call this improved lattice as DQBA (Double Quadruple Bend Achromat). In this presentation, we show the detail of the DQBA lattice.

1. はじめに

KEK-LS 計画の光源加速器は ESRF で開発された HMBA 型[1]ノーマルセルに短直線部を追加したラティスをベースに検討を進めている。ビームエネルギーは 3 GeV、周長 570 m で水平自然エミッタンスは約 130 pmrad である。電磁石の誤差を含めたダイナミックアパーチャサーベイ、必要な磁場強度をもつ典型的な電磁石設計などを含め、ビームダイナミクスや各要素に対するひとりの概念設計が完了し、結果が CDR[2]にまとめられた。現在、CDR より設計をさらに進める為、真空や電磁石を含めて各要素の具体的な詳細設計、ビームダイナミクスに関するさらに詳細な計算などが進められている。

現在の CDR 版のラティスには、致命的な欠点はないものの、まだ改善の余地が残されている。例えば、オリジナルの ESRF のラティスに短直線部を追加した為、運動量方向のアパーチャが若干減少してしまった。世界的に見て KEK-LS と同等な計画、施設では、タウチェック寿命はおおよそ 6~7 時間確保されていることが一般的である一方、CDR 版ではそれが 2 時間程度と比較的短い。また、直線部が完全な色消しではない為、挿入光源による自然エミッタンス増大の効果も無視できない。特に β の小さな短直線部でこの効果は顕著で、20 箇所全てに全長 60 cm の真空封止アンジュレータを挿入すると、自然エミッタンスが約 2 倍に増大してしまう[3,4]。

現在の CDR 版のラティスの短直線部に 4 極を追加すると[5]、オプティクスの柔軟性が改善され、欠点を解消できることがわかったので、ここで発表を行う。HMBA を改良したラティスは各地で検討が進められており、例えばイギリスの DIAMOND では、DTBA (Double Triple Bend Achromat)[6]として検討が進められている。それに倣い、ここでは、短直線部に 4 極を追加したラティスを DQBA と呼ぶことにする。

2. CDR 版ラティスの問題点

CDR 版のパラメータを Table 1 に、オプティクスを Figure 1(a)に示す。CDR 版では運動量方向のダイナミックアパーチャが約 3%、タウチェック寿命が約 2 時間である。PF のハイブリッド運転中のビーム寿命が約 6 時間であり、その 3 倍のビームロスが見込まれることになる。通常の遮蔽(コンクリート 1m 程度)で対応できる範囲だろうと思われ、致命的ではないが、長くすることが望ましい。

また、挿入光源を直線部に設置した場合の自然エミッタンスの増大も問題になる。自然エミッタンスはシンクロtron放射積分で決まり、

$$\varepsilon \propto I_5 / (I_2 - I_4)$$

が成り立つ。挿入光源のエミッタンス増大はおもにこの分子、軌道に曲率がある部分での分散関数の寄与が大きい。リング偏向電磁石からの寄与を i_5 、直線部に分散が残っている場合の元々ある分散の寄与を i_{50} 、挿入光源自身が作り出す分散の寄与を i_{51} とすると、それぞれ

$$I_5 = i_5 + \sum(i_{50} + i_{51})$$

$$i_5 \sim 10^{-6}$$

$$i_{50} = 4L\langle H \rangle / 3\pi\rho_w^3 \sim 10^{-6\sim7}$$

$$i_{51} = 4L\langle \beta_x \rangle / 15\pi\rho_w^5 k_w^2 + 12L\langle \gamma_x \rangle / 5\pi\rho_w^5 k_w^4 \sim 10^{-10}$$

となり、結局、

$$i_5 \geq i_{50} \gg i_{51}$$

が成り立つことになる。想定される典型的な挿入光源のパラメータを Table 2 に、それぞれに対応する各項の計算結果を Table 3 に示す。CDR 版では直線部に分散関数が残っているために、挿入光源 1 台あたりの i_{50} がリング偏向電磁石からの i_5 とほぼ等しくなってしまう場合があることが分かる。それぞれの挿入光源を設置した場合のエミッタンス増大の効果

[#] kentaro.harada@kek.jp

を Figure 2 に示す。

長直線部の分散関数を消すと水平エミッタンスは約 180 pmrad となり、もともとの実効エミッタンス 157 pmrad から約 15% の悪化で済む一方、短直線部の分散を消すと、自然エミッタンスは約 500 pmrad まで増大してしまう。性能を保ったままで色消しにすることが困難な短直線部に周期長 2 cm、磁極長 60 cm の挿入光源を 20 台設置した場合、分散関数が 2.5 cm 残っており、さらに β_x が 0.66 m と小さい為、自然エミッタンスが約 2 倍以上に増大してしまう。

3. DQBA ラティス

DQBA ラティスはもともとの CDR 版ラティスの短直線部に 4 極電磁石を 2 台追加したラティスである。短直線部に 4 極電磁石を追加することで、オプティクスの柔軟性が向上し、例えば短直線部の β_x を大きくして放射減衰 (積分でいえば i_2) の効果を大きくし、色消しでなくともエミッタンス増大の効果を抑制することができる。Table 1 にパラメータを、Figure 1(b), (c) にオプティクスを示す。長直線部は色消しとし、短直線部については色消しとそうでないものの 2 通りを示す。短直線部を色消しにしなくても、挿入光源のエミッタンス増大はウィグラーを除いてかなり抑制されており、また、色消しにした場合でもエミッタンスは劇的に大きくはならない。運動量方向のアーチャーに

Table 1: Parameters of the Ring

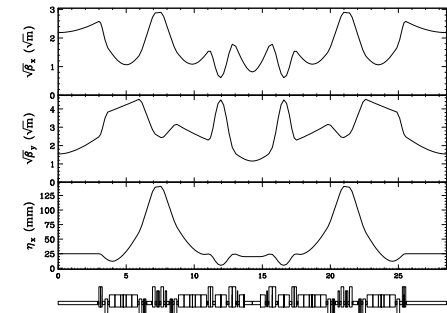
| | | (a) CDR | (b) DQBA | (c) |
|--------------------------|-------------------------------|------------|-------------|------|
| Residual dispersion (5m) | [cm] | 2.5 | 0.0 | 0.0 |
| (short straight) | [cm] | 2.0 | 3.0 | 0.0 |
| RF voltage | V_{RF} [MV] | 2.5 | | |
| Bucket height | % | 4.5 | 4.5 | 4.0 |
| Energy loss | MeV/rev | 0.30 | 0.26 | 0.26 |
| Momentum compaction | α [$\times 10^{-4}$] | 2.2 | 2.4 | 3.1 |
| Betatron tune (hor.) | ν_x | 48.58 | 47.10 | |
| (vertical) | ν_y | 17.62 | 17.15 | |
| Damping time (hor.) | [ms] | 29.3 | 21.5 | 23.4 |
| (ver.) | [ms] | 38.3 | 43.1 | 43.1 |
| (longitudinal) | [ms] | 22.6 | 43.4 | 37.2 |
| Beam current | [mA] | 500 | 500 | 500 |
| Hor. emit. (no IBS) | [pm-rad] | 133 | 121 | 253 |
| (effective, 5m sec.) | [pm-rad] | 160 | | |
| (effective, short st.) | [pm-rad] | 225 | 204 | |
| (500mA with IBS) | [pm-rad] | 315 | 228 | 366 |
| Coupling (500mA) | [%] | 2.6 | 3.5 | 2.2 |
| Vertical emittance | [pm-rad] | 8.2 | 8.0 | 8.1 |
| Momentum aperture | [%] | 2.8 | 4.0 | 4.0 |
| Horizontal aperture | [σ] | 150 | 200 | 200 |
| Touschek lifetime | [h] | 2.4 | 17.0 | 27.0 |
| Energy spread (0mA) | $\times 10^{-4}$ | 6.4 | 7.2 | 6.7 |
| (500mA) | $\times 10^{-4}$ | 7.9 | 9.7 | 8.5 |
| Bunch length (0mA) | mm | 2.7 | 2.8 | 2.9 |
| (500mA) | mm | 3.3 | 3.8 | 3.8 |

については約 4% まで広くなり、タウシエック寿命も約 6~7 時間と他の第 4 世代計画並みに改善される。誤差の効果を含めたダイナミックアーチャーを Figure 3 に示す。ここでは、ガウス分布のランダム誤差として、電磁石据え付けに 50 μ m、磁場強さに 0.05%、回転に 0.1 mrad の誤差を仮定し、グラフは 100 通りの平均である。

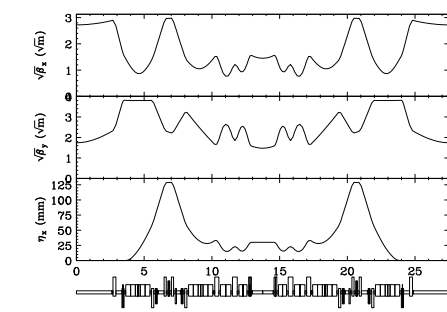
Table 2: Parameters of Typical Insertion Devices

| | Periodic length | Period | ID length | Peak magnetic field |
|---------------------------|-----------------|--------|-----------|---------------------|
| | l_w [mm] | N_w | L [m] | B_w [T] |
| For long straight (5m) | | | | |
| UL20N250 | 20 | 250 | 5 | 1.13 |
| UL48N104 | 48 | 104 | 5 | 0.9 |
| UL160N31 | 160 | 31 | 5 | 0.5 |
| UL12N416 | 12 | 416 | 5 | 0.8 |
| MPW | 120 | 42 | 5 | 1.8 |
| For short straight (60cm) | | | | |
| UL20N30 | 20 | 30 | 0.6 | 1.13 |
| IV MPW | 60 | 10 | 0.6 | 2.2 |

(a) Present CDR version



(b) 5m section achromat for DQBA



(c) Complete achromat for DQBA

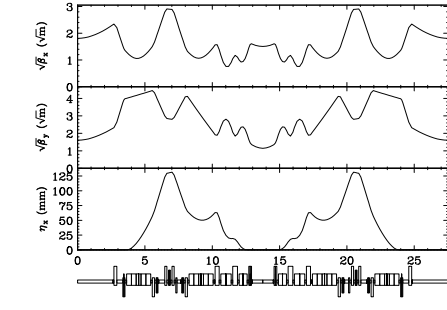


Figure 1: Optics of the normal cell.

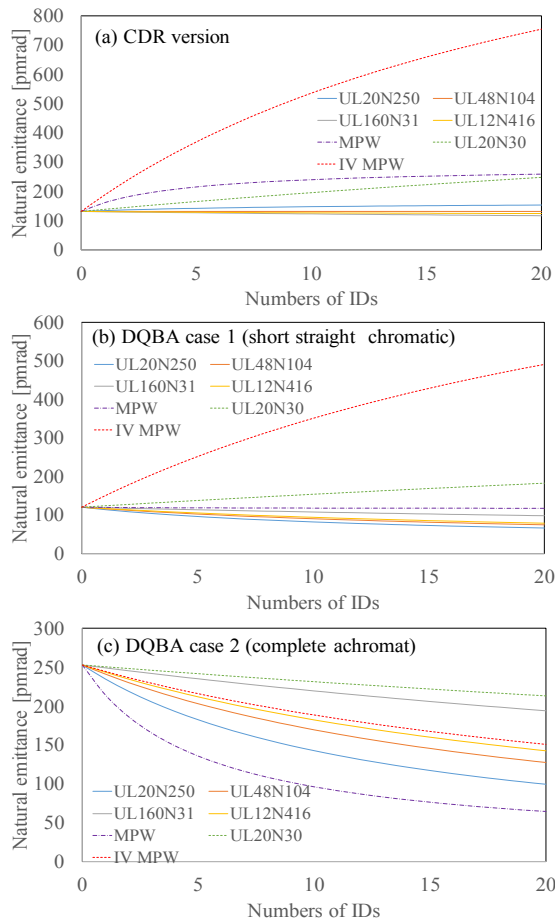


Figure 2: Emittance growth.

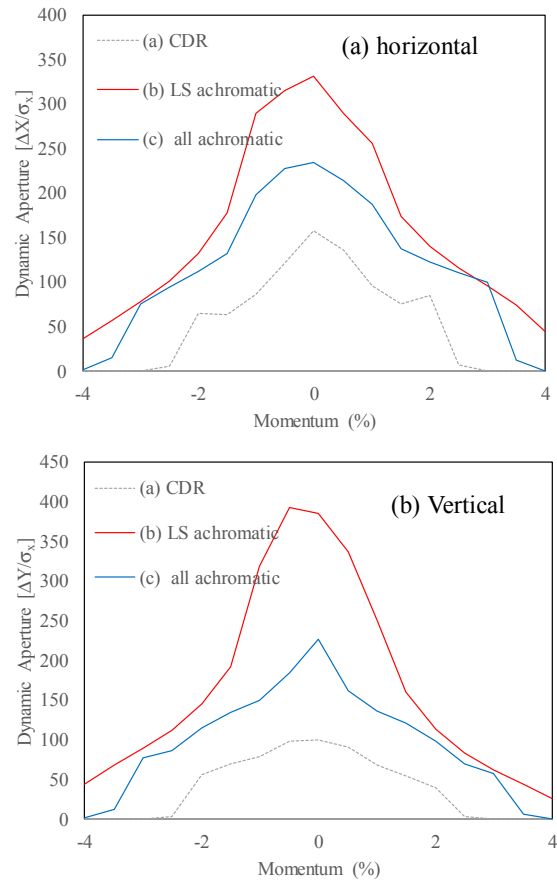


Figure 3: Dynamic aperture.

Table 3: Analytic Estimation of the Synchrotron Radiation Integrals

| | | Ring | UL20N250 5m | UL48N104 5m | UL160N31 5m | UL12N416 5m | MPW 5m | UL20N30 60cm | IV MPW 60cm |
|-------------|------------------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|
| CDR (a) | I_2 [m^{-1}] | 2.62E-01 | 3.19E-02 | 2.03E-02 | 6.25E-03 | 1.60E-02 | 8.10E-02 | 3.83E-03 | 1.45E-02 |
| | I_4 [m^{-1}] | -8.08E-02 | -3.10E-09 | -7.18E-09 | -7.60E-09 | -2.80E-10 | -7.18E-07 | -3.72E-10 | -4.81E-08 |
| | I_5 [m^{-1}] | 3.44E-06 | 4.00E-07 | 2.02E-07 | 3.50E-08 | 1.42E-07 | 1.76E-06 | 2.21E-07 | 1.63E-06 |
| | i_{50} [m^{-1}] | | 3.99E-07 | 2.02E-07 | 3.46E-08 | 1.42E-07 | 1.61E-06 | 2.21E-07 | 1.63E-06 |
| | i_{51} [m^{-1}] | | 3.88E-10 | 7.17E-10 | 4.22E-10 | 2.49E-11 | 1.43E-07 | 1.38E-11 | 3.47E-09 |
| DQBA (b) | I_2 [m^{-1}] | 2.24E-01 | 3.19E-02 | 2.03E-02 | 6.25E-03 | 1.60E-02 | 8.10E-02 | 3.83E-03 | 1.45E-02 |
| | I_4 [m^{-1}] | -2.26E-01 | -3.10E-09 | -7.18E-09 | -7.60E-09 | -2.80E-10 | -7.18E-07 | -3.72E-10 | -4.81E-08 |
| | I_5 [m^{-1}] | 4.13E-06 | 7.04E-08 | 3.64E-08 | 6.69E-09 | 2.48E-08 | 5.01E-07 | 1.57E-07 | 1.17E-06 |
| | i_{50} [m^{-1}] | | 6.98E-08 | 3.53E-08 | 6.05E-09 | 2.48E-08 | 2.82E-07 | 1.57E-07 | 1.16E-06 |
| | i_{51} [m^{-1}] | | 5.93E-10 | 1.09E-09 | 6.44E-10 | 3.80E-11 | 2.19E-07 | 2.24E-11 | 5.63E-09 |
| DQBA (c) | I_2 [m^{-1}] | 2.24E-01 | 3.19E-02 | 2.03E-02 | 6.25E-03 | 1.60E-02 | 8.10E-02 | 3.83E-03 | 1.45E-02 |
| | I_4 [m^{-1}] | -1.89E-01 | -3.10E-09 | -7.18E-09 | -7.60E-09 | -2.80E-10 | -7.18E-07 | -3.72E-10 | -4.81E-08 |
| | I_5 [m^{-1}] | 7.91E-06 | 2.84E-10 | 5.24E-10 | 3.08E-10 | 1.82E-11 | 1.05E-07 | 2.57E-11 | 6.47E-09 |
| | i_{50} [m^{-1}] | | 2.90E-22 | 1.47E-22 | 2.51E-23 | 1.03E-22 | 1.17E-21 | 4.51E-20 | 3.33E-19 |
| | i_{51} [m^{-1}] | | 2.84E-10 | 5.24E-10 | 3.08E-10 | 1.82E-11 | 1.05E-07 | 2.57E-11 | 6.47E-09 |

4. 挿入光源の影響

CDR 版、DQBA、短直線部も色消しにした DQBA の 3 通りにおいて、Table 2 に示した典型的な挿入光源のパラメータに対して各放射積分の値を解析的な近似で計算した結果を Table 3 に示す。それぞれの値は、挿入光源 1 台あたりの積分への寄与である。

同じ挿入光源を複数台入れた場合のエミッタンス増大を Figure 2 に示す。もちろん、1 種類の挿入光源を全直線部に設置するのは現実的ではないが、例えば CDR 版の場合、短直線部に真空封止多極ウイグラーを 20 台設置するとエミッタンスが 700 pmrad になり、通常の真空封止アンジュレータでも約 2 倍に増大する。また、直線部に分散が残っている為、挿入光源の減衰効果が有効に働かず、ダンピングウイグラーを設置することも困難である。

一方、DQBA の場合、色消しの長直線部に挿入光源の放射減衰の効果が現れ、エミッタンス増大と減少が釣り合って変化が緩やかになることが分かる。また、短直線部を色消しにせずとも、真空封止アンジュレータのエミッタンス増大は、20 台設置の場合で 190 pmrad であり、CDR 版よりもかなり抑制されている。

短直線部を含めて完全に色消しにした場合、全ての挿入光源でエミッタンスが減少傾向となる。自然エミッタンスは増大するが、ダンピングウイグラーを積極的に導入することで、不安定性の抑制や IBS の効果の抑制も期待できる可能性もある。

5. 今後の展開

ここで示した DQBA 案は、4 極電磁石の磁場勾配が 60 T/m と大きく、また、機能結合型偏向電磁石については 4 極電磁石的に製作する場合に磁場勾配がもう少し大きい方が有利である。また、短直線部両脇の 4 極-機能結合型偏向電磁石間の間隔が約 10 cm とせまく、ハードウェア的に若干難しいことが想定される。そこで、パラメータが余り変わらない範囲で、それらを最適化した案を作り、それをベースにハードウェアの詳細設計を進めることにしている。

タウチェック寿命の計算においては、ここでは SAD の近似計算のみを示したが、最近では LMA (Local Momentum Acceptance) 法による計算が一般的であり、それによる計算も行う必要がある。また、電磁石の口径が小さいことが想定される為、ランダム誤差だけではなく、系統的な高次の磁場の効果も考慮する必要があると思われる。電磁石の詳細設計がある程度進んだ段階でシミュレーションを行う予定である。挿入光源の影響についても、解析的にエミッタンス増大を推定するだけではなく、ビームダイナミクスの影響とその補正を検討する必要があり、今後の課題である。

参考文献

- [1] ESRF Orange Book;
http://www.esrf.eu/Apache_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf
- [2] KEK-LS CDR; <http://kekls.kek.jp/> in Japanese
- [3] 坂中章悟, “挿入光源のビームパラメータへの影響”, KEK-LS 検討会, 2017 年 1 月 27 日.

- [4] M. Katoh and Y. Kamiya, “Effect of Insertion Devices on Beam Parameters”, Proc. of PAC 1987, pp. 437-439.
- [5] Simone Liuzzo, KEK visit for 6/25-7/10, 2016.
- [6] R. Bartolini *et al.*, “CONCEPTS FOR A LOW EMITTANCE-HIGH CAPACITY STORAGE RING FOR THE DIAMOND LIGHT SOURCE”, Proceedings of IPAC2016, Busan, pp.2943-2946.