

EMITTANCE REDUCTION OF ELECTRON STORAGE RING BY LONGITUDINALLY AND RADially VARYING DIPOLE FIELD

Koji Tsumaki

JASRI/SPring-8

1-1-1 kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

It is important to improve the emittance of existing storage ring at lower cost and with smaller change. We studied the emittance reduction by longitudinally and radially varying dipole field, which has the possibility of satisfying these condition. We found that the emittance reduces to about 1/5 by this method. We applied it to the SPring-8 storage ring. The emittance was 1.68 nm without dispersion function at straight section and 0.63 nm with 0.06 m dispersion function. This shows this method is effective for improving the emittance of existing storage ring.

長手方向と半径方向に磁場が変化した偏向電磁石による電子蓄積リングのエミッタンス低減

1. はじめに

放射光リングにとって、輝度は最も重要なパラメータであり、高いほど良い。輝度は電子ビームのエミッタンスに逆比例するため、エミッタンスが小さいほど良いことになる。放射光リングの歴史はエミッタンス低減の歴史と言っても過言ではない。

電子蓄積リング内の電子ビームのエミッタンスは、放射光の放出による励起と、RF加速によるダンピングの釣り合いによって決まる^[1]。そのためエミッタンスを小さくするためには、励起を小さくするか、ダンピングを速くしてやれば良い。励起を小さくするためには、放射光を発生させる偏向電磁石内でエネルギー分散関数を小さくすれば良い。最も簡単な方法は偏向電磁石の偏向角を小さくして分散関数を抑える方法である^[2]。偏向角が決まっている場合には、長手方向に磁場強度を変化させて励起を小さくする方法がある^{[3][4][5]}。またダンピングを速くするための方法として偏向電磁石の半径方向に磁場勾配をつける方法がある^[1]。

新たに蓄積リングを建設する場合は、偏向角を小さくしてエミッタンスを追求する方法があるが、既存のリングの一部を改良してエミッタンスを小さくしなければならない場合や、経済的な理由などで偏向角が決まっている場合にはこの方法が適用できない。そこで偏向角が決まっている場合のエミッタンス低減法として、偏向電磁石の磁場を長手方向と半径方向に変える方法を検討した。その結果をSPring-8蓄積リングに適用し、偏向電磁石のみ取り替えてエミッタンスがどの程度まで小さくできるか検討した。

2. 蓄積リングのエミッタンス

偏向電磁石の磁場が一定の場合放射光のエネルギースペクトルは磁石内で同じである。しかし、分散関数の大きなところで磁場強度を弱くしてエネルギー

の低い放射光を、分散関数の小さなところで磁場を強くしてエネルギーの高い放射光を出すようにすれば、全体として励起を小さくできる。

電子ビームのエミッタンスは次のように表せる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{x0} &= \frac{C_q \gamma_0^2}{J_x} \frac{\oint H / \rho^3 ds}{\oint 1 / \rho^2 ds} \\ C_q &= \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{\hbar}{mc} \\ J_x &= 1 - \frac{\oint \eta / \rho (1 / \rho^2 + 2B' / B\rho) ds}{\oint 1 / \rho^2 ds} \quad (1) \\ H &= \gamma \eta^2 + 2\alpha \eta \eta' + \beta \eta'^2. \end{aligned}$$

式(1)より、実際は分散関数だけでなく、ベータatron関数を含む所謂H関数と極率半径および J_x でエミッタンスが決まることを示している。 J_x は磁場勾配がない場合ほとんど1で、負の磁場勾配がある場合1より大きくなりエミッタンスは小さくなる。

3. 長手方向と半径方向に変化する磁場によるエミッタンス

図1にSPring-8蓄積リングの偏向電磁石に対するH関数を、最小エミッタンス (Minimum Emittance; ME) の場合と直線部が無分散 (Minimum Emittance Achromat; MEA) の場合について示す。

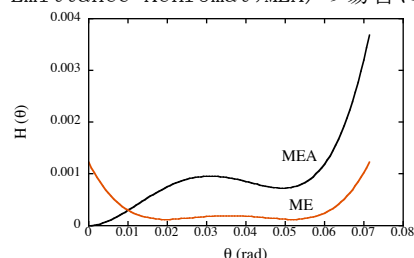
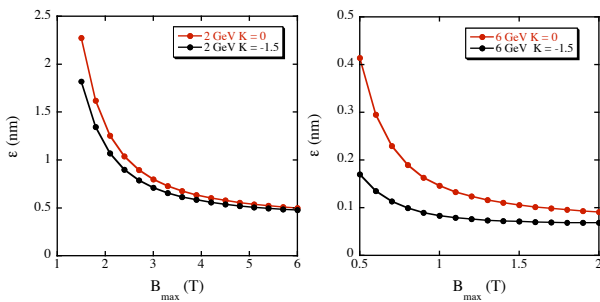


図1 : SPring-8蓄積リング偏向電磁石のH関数。

これより最小エミッタンスの場合は、偏向電磁石の両側で極率半径を大きく（磁場強度を弱く）、中央で小さく（磁場強度を強く）すればよいことがわかる。直線部が無分散の場合は、無分散の入り口側で極率半径を小さく（磁場強度を強く）、出口側で大きく（磁場強度を弱く）すればよいことがわかる。このことから、極率半径として次式で表される多項式を採用した。

$$\rho = \rho_a |s - s_0|^m + \rho_0 \quad (2)$$

ただし、無分散の場合 $S_0 = 0$ 、最小エミッタンスの場合、 $S_0 = L_m/2$ (L_m は磁石の長さ)。エミッタンスの計算は、数値計算で行った。数値計算を行うには具体的なパラメータが必要である。そこで、大型マシンを代表して、エネルギー6 GeV、偏向電磁石数88、平均磁場強度0.5 Tのもの、中小型マシンを代表して、エネルギー2 GeV、偏向電磁石数24、平均磁場強度1.5 Tのものを取り上げた。両者はなるべくパラメータが離れるようにした。また半径方向の磁場の傾きKは、0と-1.5 m⁻²とした。以上の条件でエミッタンスと最大磁場の関係を求めた。MEの条件で、nが2の場合について計算した結果を図2に示す。



(a) 2 GeV

(b) 6 GeV

図2：最大磁場強度を変化させた時のエミッタンスの変化。

K=0のときエミッタンスは指数関数的に減少し、2 GeVマシンも6 GeVマシンも長手方向の磁場が一定の場合 ($B_{\max}=B_0$) の1/5に近づく。K=-1.5の場合、 $B_{\max}=B_0$ のときのエミッタンスは、K=0に比べ小さいが、最大磁場を大きくして行った場合、エミッタンスの減少の割合はK=0より少なく、最大磁場が大きくなるほどK=0のエミッタンスに近づく。図3に半径方向の磁場勾配がある場合の、ない場合に対するエミッタンスの減少率を示す。2 GeV、6 GeVいずれも $B_{\max}=B_0$ の時の減少率が最大で、最大磁場が増加するにつれ減少率は小さくなる。このことから最大磁場が大きくなるにつれ、半径方向の磁場の有効性は低下することがわかる。

次に、エミッタンスを $B_{\max}=B_0$ のときのエミッタンスで規格化し、最大磁場強度 B_{\max} を平均磁場強度 B_0 で規格化したものを図4に示す。半径方向の磁場勾配がない場合、2 GeVの場合と6 GeVの場合でエミッタンスは完全に一致し、マシンによらず、 B_{\max}/B_0 でス

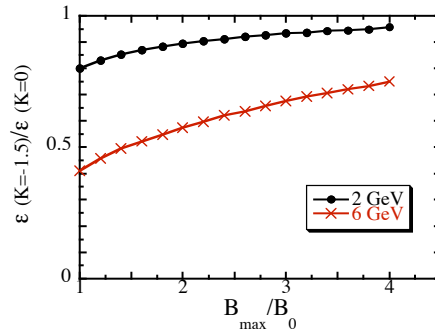


図3：半径方向の磁場がある場合のエミッタンス減少率の最大磁場依存性。

ケーリングできることがわかる。ところが半径方向の磁場勾配がある場合は、2 GeVの場合より6 GeVのエミッタンスの減少の程度が少なく、最大磁場が大きくなるにつれ差は顕著になる。これらは、 $B_{\max}=B_0$ の時のエミッタンスの減少が、6 GeVで大きく、2 GeVで小さいためである。このように半径方向に磁場勾配がある場合は、 B_{\max}/B_0 でスケールできない。

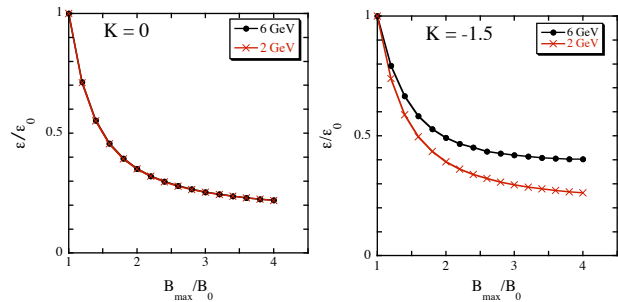


図4：規格化されたエミッタンスの規格化された最大磁場依存性。

4. SPring-8蓄積リングへの応用

SPring-8蓄積リングの偏向電磁石を、長手方向と半径方向に磁場が変わるものに取り替えた場合について検討した。図5に4極成分がなく、長手方向の磁場変化のみの場合のエミッタンスを示す。これより、理想的には最大磁場1.5 Tで0.94 nm、2 Tで0.78 nmになることがわかる。次に、偏向電磁石に4極成分を加えた場合のエミッタンスの4極磁場依存性を、図6に示す。4極成分が10 T/mのとき、最大磁場1.5 Tで0.60 nm、2 Tで0.55 nm、同様に5 T/mのときそれぞれ0.74 nm、0.65 nmになる。

最大磁場が1.5 Tを超えると鉄が飽和しはじめる。特に2 Tになると完全に飽和するため、磁極の形だけで4極成分をつくるのが難しくなる。またエミッタンスも1.5 Tのときと0.16 nmしか変わらないため、2 Tにする意味が特にあるわけではないが、ここでは最大磁場2 Tとした。次に4極成分であるが、磁場の傾きが大きすぎると、磁場の弱いところで磁極の間が開きすぎる。そこで磁場の傾きは5 T/mとした。磁極間の距離は、SPring-8のIDの最小ギャップ6 mm (±3 mm) を参考に、10 mmとした。このと

きの電磁石入り口、中央、出口の磁極形状を図7に示す。出口での磁極開口が大きく、実際に製作するにはさらなる研究が必要と思われるが、実現不可能なものではない。

以上のパラメータを用いてオプティックスを計算した。結果を図9に示す。エミッタンスは1.68 nmであった。理論的最小値が0.65 nmであるから約2.6倍大きいことがわかる。ちなみにSPring-8の理論値は2.21 nm、設計値は6.99 nmで、その比は3.2である。エミッタンスをさらに小さくするため、直線部の分散関数を許容することにした。図8に直線部の分散関数の値とエミッタンスの関係を示す。分散関数が増大すると自然エミッタンスは減少するが、分散関数によるアンジュレータ部のみかけのエミッタンスは増大する。そこで分散関数による効果まで含めた有効エミッタンスも計算した。これより分散関数が0.06mを超えると、有効エミッタンスは飽和しはじめることがわかる。そこで分散関数を0.062 mとしてオプティックスを計算した。結果を図10に示す。自然エミッタンスは0.63 nm、有効エミッタンスは0.83 nmになる。現在のSPring-8蓄積リングのエミッタンスは3.4 nmであるから、1/5.4になることがわかる。

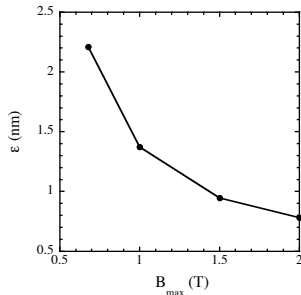


図5：エミッタンスの最大磁場依存性

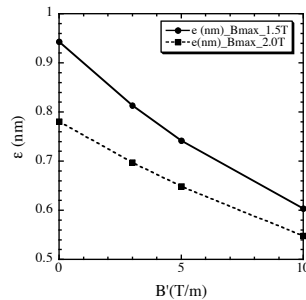


図6：エミッタンスの4極磁場依存性

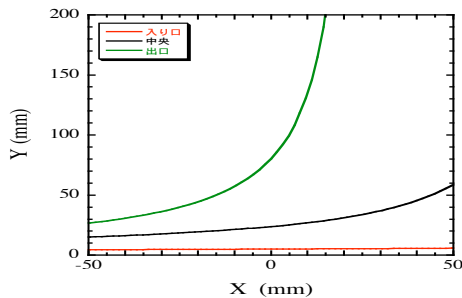


図7：偏向電磁石の入り口、中央、出口の磁極形状

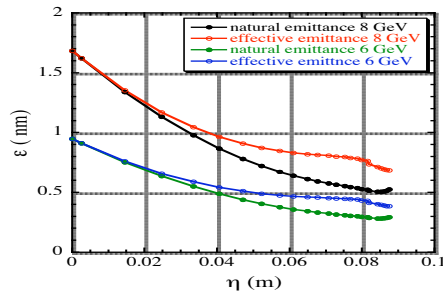


図8：直線部に分散関数がある場合の自然エミッタンスと有効エミッタンス

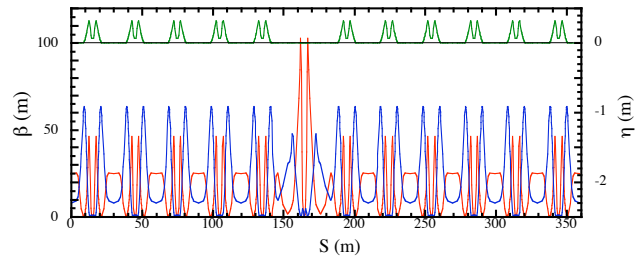


図9：直線部に分散関数のないオプティックス

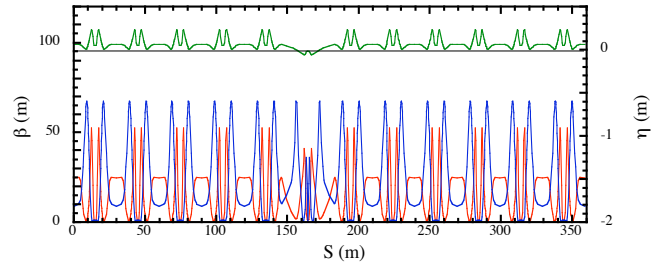


図10：直線部に分散関数のあるオプティックス

6. まとめ

偏向電磁石の長手方向と半径方向に磁場の変化を持たせた場合のエミッタンスを計算した。その結果、長手方向の最大磁場強度が大きくなるにつれエミッタンスは減少し、最大で1/5まで減少することがわかった。半径方向に4極成分を与えると、エミッタンスの減少は長手方向の最大磁場が小さいほど大きく、最大磁場が大きくなるにつれ減少幅は小さくなることがわかった。

最大磁場強度を2 T、4極成分を5 T/mとして、SPring-8蓄積リングに適用した。その結果、直線部の分散関数が0の場合、1.68 nmのエミッタンスを持つオプティックスが得られた。分散関数を許した場合、自然エミッタンスは0.63 nm、有効エミッタンスは0.83 nmになった。自然エミッタンスは、現在のSPring-8蓄積リングの1/5.4である。

以上より既存のリングを改造してエミッタンスを下げる方法の一つとして、偏向電磁石に長手方向と半径方向に磁場の変化を持たせる方法が有効であることがわかった。

参考文献

- [1] M. Sands, "The Physics of Electron Storage Rings", SLAC-121, 1970.
- [2] K. Tsumaki, N. Kumagai, "Very low emittance light source storage ring", Nucl. Instr. and Meth. A 565 (2006) 394.
- [3] J. Guo, T. Raubenheimer, "LOW EMITTANCE E/E⁺ STORAGE RING DESIGN USING BENDING MAGNETS WITH LONGITUDINAL GRADIENT" EPAC'02, Paris, 2002, p. 1136
- [4] R. Nagaoka, A. Wrulich, "Emittance minimization with longitudinal dipole field variation", Nucl. Instr. and Meth. A 575 (2007) 292.
- [5] K. Tsumaki, "EMITTANCE REDUCTION BY LONGITUDINALLY VARYING DIPOLE FIELD" EPAC'08, Genoa, 2008, p. 2118.