

# DESIGN STUDY OF A LOW EMITTANCE INJECTOR SYNCHROTRON WITH MULTI-BEND ACHROMAT LATTICES FOR AN ULTRA-LOW EMITTANCE STORAGE RING

Koji Tsumaki

JASRI/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

## Abstract

Since dynamic aperture of an ultra-low emittance storage ring is generally very small, a low emittance injector synchrotron is required to maintain the high injection efficiency. Most of the synchrotrons consist of FODO cell lattice for its simple lattice structure. But the theoretical minimum emittance (TME) lattice can reach lower emittance than FODO cell lattice considering a single cell. Thus we studied a synchrotron consisting of multi-bend achromat lattice that is close to the TME lattice. We applied the multi-bend achromat lattice to the SPring-8 synchrotron. Two synchrotrons with different cell length were designed. The emittance reaches to 1.9 nm for a shorter cell length synchrotron with +6.0mm/-6.6 mm dynamic aperture. Achieved emittance is 1/120 of the present SPring-8 synchrotron.

## 超低エミッタンス蓄積リングのための入射用 低エミッタンスシンクロトロン設計研究

### 1. はじめに

現在世界各地で次世代の超低エミッタンス蓄積リングの検討さかんに行われている<sup>[1]</sup>。一般的にエミッタンスが小さくなればなるほど、ダイナミックアパーチャが小さくなるため、エミッタンスの小さな次世代蓄積リングで高い入射効率を保つためには、エミッタンスの小さな入射ビームが必要不可欠となる。入射器としてシンクロトロンを考えた場合、エミッタンスの大きな現在のシンクロトロンではこの要求を満足させることは非常に難しい。そのため、現在の第3世代の蓄積リング程度のエミッタンスを持つ、低エミッタンスシンクロトロンが必要となる。

以前、SPring-8シンクロトロンをFODOセルラティスにより低エミッタンス化する可能性について検討し、その結果について報告した<sup>[2]</sup>。一方エミッタンスを最小にできるのは、Theoretical Minimum Emittance (TME) ラティスであるが、FODOではTMEにすることができない。そこで今回、SPring-8シンクロトロンをTMEラティスに近い(MEラティス) Multi-Bend-Achromat (MBA) ラティスで設計し、極限までエミッタンス低減を追求したので、その結果について報告する。

### 2. エミッタンス

電子蓄積リングのエミッタンスは、式(1)のように表される。

$$\varepsilon = F \frac{C_q \gamma^2 \theta^3}{J_x} \quad (1)$$

表1: SPring-8 シンクロトロンの主なパラメータ<sup>[3]</sup>

エネルギー (最大)	8 GeV
周長	396.12 m
チューン $\nu_x / \nu_y$	11.73/8.78
FODOセルの長さ	9.903 m
エミッタンス	230 nm
偏向電磁石 数	64
長さ	2.9 m
強さ	0.90338 T

ここで、 $C_q = 3.83 \times 10^{-13}$  m、 $\gamma = 1/(1-\beta^2)^{1/2}$ 、 $\theta$  は偏向電磁石の偏向角、 $J_x$  はダンピングパーティション数、 $F$  はラティスによって決まるパラメータである。エネルギーが決まっていれば、 $J_x$  もいじらないとするとエミッタンスを小さくするには、 $F$  を小さくして、 $\theta$  を小さくすれば良い。ここではラティスをTMEに近いMBAにして $F$  を小さくし、単位セルの長さを短くして偏向電磁石の数を増やし $\theta$  を小さくすることにより、エミッタンスを下げるものとする。

上記の方針のもと、シンクロトロンを設計した。表1に現在のシンクロトロンの主なパラメータを示す。偏向電磁石の数を増やすために、FODOラティスのときと同じように<sup>[2]</sup>現在のシンクロトロンをもとに、単位セルの長さをFODOセルの1/2、1/2.5、1/3とした。この時、偏向電磁石の数はそれぞれ、66、

82、98となる。それぞれの場合について、MBAラティスのエミッタンスが、単位セルの位相とともにどのように変化し、どの程度のエミッタンスが得られるか計算した。図1に結果を示す。ただし偏向電磁石の強さはセル長が半分のとき1T、1/2.5のとき1.3T、1/3のとき1.5Tを仮定した。計算結果よりセル長を1/2にすると3.4 nm、1/2.5で1.7 nm、1/3にすると0.96 nmまで小さくなる可能性があることがわかる。

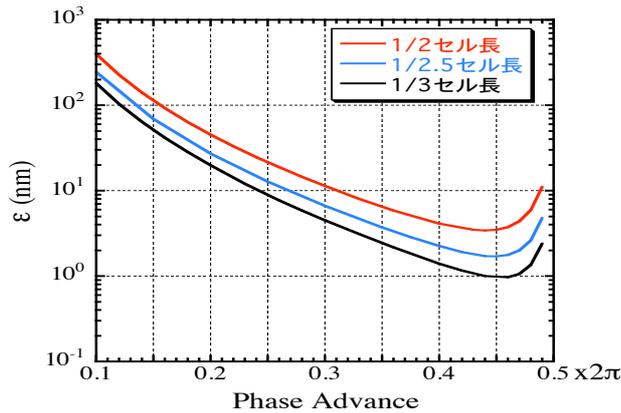


図1：単位セルあたりの位相の進みとエミッタンスの関係

### 3. ラティス設計

#### 3.1 単位セルのエミッタンスと六極電磁石強度

セル長を短くして偏向電磁石の数を増やし、四極電磁石の収束力を増やすことによりエミッタンスを小さくするが、それに伴いクロマチシティが大きく、ディスペーション関数が小さくなる。そのため六極電磁石の強度が強まり、ダイナミックアパーチャが小さくなるとともに、長さの長い磁石が必要になり現実的なスペースが得にくくなる。そこで、セル長をパラメータとして、得られるエミッタンスとそのときの六極電磁石の強さを求めた。結果を図2示す。これよりセル長を短くして、エミッタンスを小さくすると六極電磁石の強さが急速に強くなることわかる。例えば1/2セル長の最小エミッタンス3.4 nmを1/3セル長のラティスで得ようとした場合、六極電磁石の強さは約3倍になる。また1/3セル長で最小エミッタンスを求める場合、六極電磁石の強さは約5倍となり強くなりすぎる。そこで1/3セル長のラティスはあきらめ、1/2セル長と1/2.5セル長の2ケースについて検討することにした。

#### 3.2 電磁石強度

ラティスを設計するためには、磁石の長さを決めなければならない。長さを短くするためにボア径を40 mmとし、四極電磁石の最大磁場勾配を50 T/m、六極電磁石の最大磁場勾配を3000 T/m<sup>2</sup>として磁石長を決定した<sup>14)</sup>。

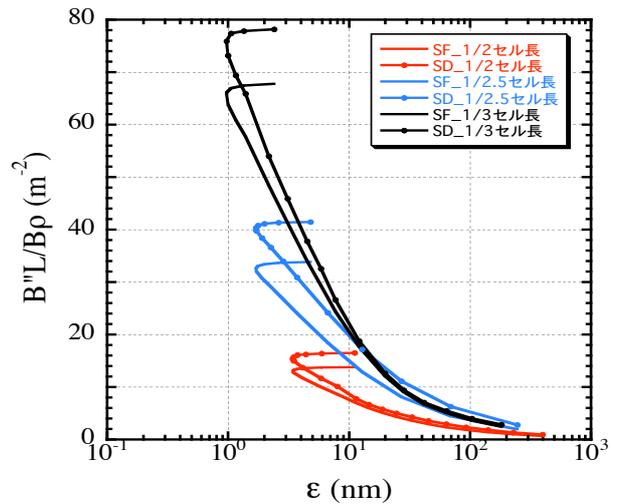


図2：エミッタンスと六極電磁石の関係

#### 3.3 1/2セル長

単位セルのフェーズの進みが $0.44 \times 2\pi$ のとき最小エミッタンスとなるが、多少位相の進みを小さくしてもエミッタンスはあまり変わらないため、少しでも六極電磁石を弱くするため $0.42 \times 2\pi$ 近辺を設計ポイントとした。このとき最小エミッタンスからのエミッタンスの増加は0.2 nmで、ほとんど無視できる。また単位セル以外の長直線セルの位相の進みは $4\pi$ にとり、この部分には六極電磁石を置かないで、非線形ラティスの対称性を保つようにした。表2に主なパラメータを、図3にベータトロン関数とディスペーション関数を示す。このラティスに対して、3種類の六極電磁石を用いて、色収差を補正すると同時にダイナミックアパーチャを改善した。改善前と改善後のダイナミックアパーチャを図4に示す。最終的なエミッタンスは3.7 nmとなった。

表2：1/2セル長ラティスの主なパラメータ

エネルギー (最大)	6 GeV
周長	396.12 m
形状	レーストラック
チューン $v_x / v_y$	30.16/4.10
エミッタンス	3.7 nm
クロマチシティ $\xi_x / \xi_y$	78.7/73.4
偏向電磁石 数	66
長さ	1.9 m
強さ	1 T

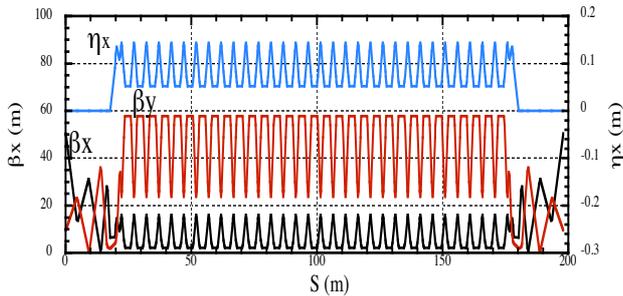


図3：1/2セル長のベータatron関数とディスペーション関数

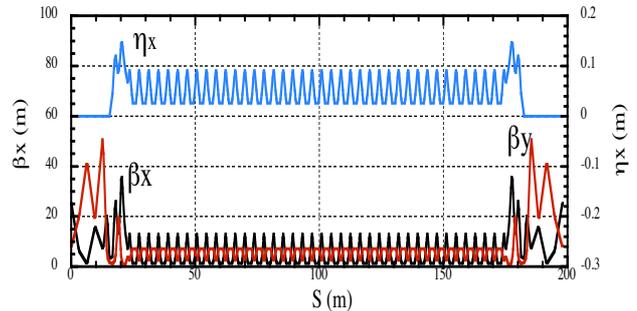


図5：1/2.5セル長のベータatron関数とディスペーション関数

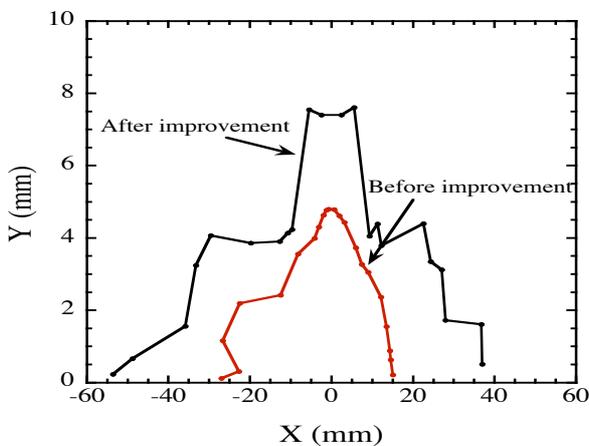


図4：1/2セル長のときのダイナミックアパーチャ

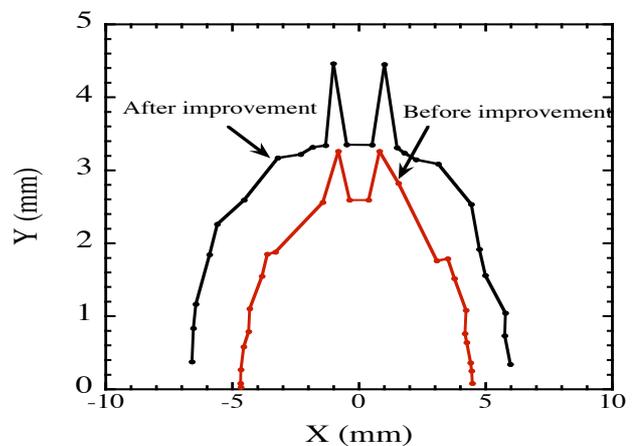


図6：1/2.5セル長のときのダイナミックアパーチャ

### 3.4 1/2.5セル長

単位セルの位相の進みが $0.45 \times 2\pi$ の時、最小エミッタンス $1.7 \text{ nm}$ となるが、 $0.42 \times 2\pi$ でも $1.9 \text{ nm}$ のエミッタンスが得られる。1/2セル長の場合と同じように六極電磁石の強さが少しでも弱くなるように、位相の進みは $0.42 \times 2\pi$ とした。また直線部の位相の進みも1/2セル長の時と同様に $4\pi$ とした。表3に1/2.5セル長ラティスの主なパラメータを、図5にベータatron関数とディスペーション関数を、図6に改善前と改善後のダイナミックアパーチャを示す。

表3：1/2.5セル長ラティスの主なパラメータ

エネルギー (最大)	6 GeV
周長	396.12 m
チューン $\nu_x / \nu_y$	36.76/13.03
エミッタンス	1.9 nm
クロマチシティ $\xi_x / \xi_y$	101.0/32.7
偏向電磁石 数	82
長さ	1.18 m
強さ	1.3 T

### 3.5 縦方向の安定性

低エミッタンスシンクロトロンはモーメントムコンパクションファクター $\alpha$ が小さいので縦方向のアパーチャーも確認しておく必要がある。そこで縦方向の位相空間を計算したものを図7に、計算に用いたパラメータを表4に示す。モーメントムアクセプタンスは小さいが、シンクロトロンのエネルギー広がりはこの $1/10$ なので問題ない。

表4：縦方向安定性計算時の主なパラメータ

項目	1/2セル長	1/2.5セル長
エネルギー損失(MeV/turn)	5.73	7.45
RF電圧(MV)	10	13
ハーモニック数	672	672
モーメントムコンパクション $\alpha_0$	$5.74 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-4}$
$\alpha_1$	$1.56 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$

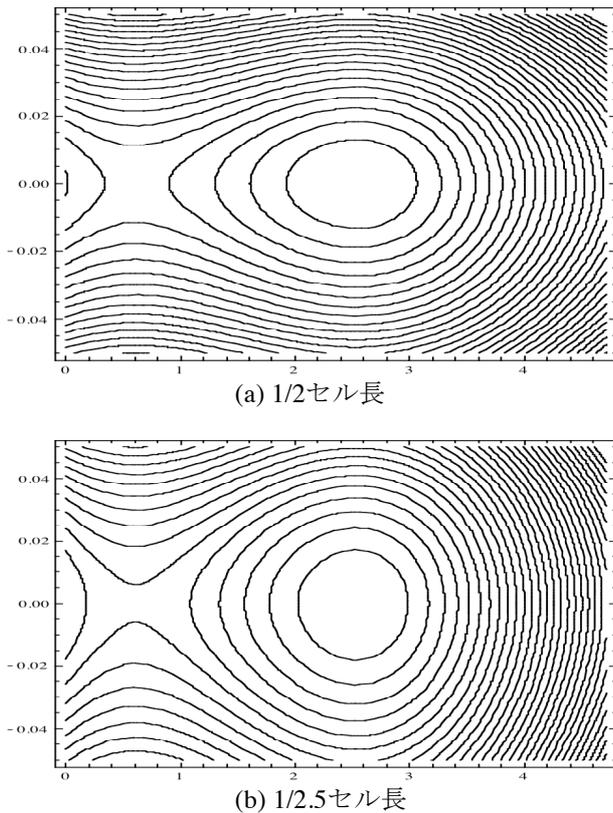


図 7 : 1/2.5セル長のフェーズスペース

#### 4. 比較

今までにラティス設計した低エミッタンスシンクロトロンのエミッタンス $\epsilon_0$ とダイナミックアパーチャDAを表5に示す。FODOラティス<sup>[2]</sup>に比べMEラティスが数倍から数十倍小さなエミッタンスを得ることができ、最小はもとのSPRING-8シンクロトロンの1/120の1.9nmまで小さくできることがわかる。これより低エミッタンスシンクロトロンは、FODOセルラティスよりMEラティスで構成した方が良いと思われる。

表5 : 低エミッタンスシンクロトロンの比較

種類	$\epsilon_0$ (nm)	DA(mm)
1/1.6 cell length FODO <sup>[2]</sup>	30	+30/-28
1/2 cell length FODO <sup>[2]</sup>	25	+51/-36
1/3 cell length FODO <sup>[2]</sup>	11	+34/-30
1/2 cell length ME	3.7	+37/-54
1/2.5 cell length ME	1.9	+6.0/-6.6

#### 5. まとめ

将来のダイナミックアパーチャの小さな超低エミッタンス蓄積リングの入射器として、シンクロトロンを低エミッタンス化することを検討し、SPRING-8シンクロトロンに適用した。低エミッタンス化の方法として、ラティスをTMEに近づけたmulti-bend achromatラティスにすること、および、単位セルの長さを現在のSPRING-8シンクロトロンより短くして偏向電磁石数をできるかぎり増やすこと、の二つの方法でアプローチした。

セル長を1/2にしたラティスではエミッタンスが3.7 nmになり、ダイナミックアパーチャは+37mm/-54mmと十分大きいことがわかった。セル長を1/2.5にしたラティスでは、エミッタンスは1.9 nmになるが、ダイナミックアパーチャは+6.0mm/-6.6mmと小さい。

以上より、ラティスをTMEに近づけたMBAにすること及び単位セル長を短くして偏向電磁石数を増やすことにより、もとのSPRING-8シンクロトロンの1/100程度の数nmのエミッタンスを持つシンクロトロンが可能であることがわかった。

#### 参考文献

- [1] M. Bei et al., Nucl. Instr. Met. A622, 518, (2010).
- [2] K. Tsumaki, Proc. Part. Accel. Society Meeting, Tokai, Japan, 2009, p. 3362.
- [3] JASRI-RIKEN SPRING-8 Project Team, Conceptual Design Report, SPRING-8 Project part I Facility Design 1991.
- [4] K. Tsumaki, N. Kumagai, Nucl. Instr. Met. A565, 394, (2006).