

# STUDY OF A LOW EMITTANCE SYNCHROTRON AT SPring-8

Koji Tsumaki

JASRI/SPring-8

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

## Abstract

Upgrade of the SPring-8 storage ring is planned to obtain the higher brightness synchrotron radiation. Since the dynamic aperture of the upgrade storage ring is expected to be small, a small emittance injector is required. We studied a low emittance injector synchrotron supposing to replace the existing synchrotron to the new one. Three cases were studied: First is the case of doubling the number of bending magnet of the existing synchrotron, the second is the case of having smaller bending magnet number and longer cell length than the first one, and the third is the case of trebling the number of bending magnet. The emittance is 25 nm for the first case, 30 nm for the second case and 11 nm for the third case. These are enough small as an emittance of injector synchrotron of the upgrade low emittance storage ring.

## SPring-8シンクロトロンの低エミッタンス化の検討

### 1. はじめに

現在SPring-8では、将来計画として蓄積リングの高輝度化が検討されている<sup>[1]</sup>。高輝度化のためには、蓄積リングを今まで以上に低エミッタンスにしなければならない。低エミッタンス化すると色収差補正のための六極電磁石が強くなり、ダイナミックアパーチャーが小さくなる。例えば、エミッタンス83pmの蓄積リングは200mAで現在のSPring-8の輝度の200倍以上の輝度を得ることができるが、ダイナミックアパーチャーはわずか7~9mmである<sup>[2]</sup>。放射光リングは高い入射効率が要求されるが、このように小さなアパーチャーのリングで高い入射効率を得るのは、エミッタンスの大きな現在のシンクロトロンでは非常に難しい。そのため、現在、将来の低エミッタンス蓄積リングへの入射器としてXFELのライナックが考えられている。しかし、既存のシンクロトロンを低エミッタンス化して入射器として使用できればさらに選択肢が広がる。また蓄積リングとして用いれば、SPring-8蓄積リングの改修中も連続してユーザーは実験できる<sup>[3]</sup>。そこでシンクロトロンの低エミッタンス化の可能性について検討した。具体的に偏向電磁石の数が異なる3ケースについて設計検討したのでその結果について報告する。

クロトロンが9.903 mであるため、2分割の場合は1/2の4.9515m、3分割の場合は1/3の3.301mとした。ただし、偏向電磁石の強さを0.9 Tよりは、若干強くして長さを短くし、他の磁石を配置するスペースを確保した。この3ケースについて、4極電磁石の強さとエミッタンスの関係を調べた。

表1 : SPring-8シンクロトロンの主なパラメータ<sup>[4]</sup>

エネルギー (最大)	8	GeV	
周長	396.12	m	
短半径/長半径	50.9/70.2	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
四極電磁石	数	80	
	長さ	0.6	m
	ボア径	80	mm
六極電磁石	強さ	14.6	T/m (B <sup>1</sup> /B <sub>0</sub> =0.33)
	数	60	
	長さ	0.15	m
	ボア径	100	mm
	強さ	162.5	T/m (B <sup>1</sup> /B <sub>0</sub> =0.91)

### 2. エミッタンス

エミッタンスは偏向電磁石の数が増すほど小さくできる。そこで現在のシンクロトロンをもとに、さらに偏向電磁石の数を増やして行ったとき、どこまでエミッタンスを小さくできるか検討した。

表1に現在のシンクロトロンの主なパラメータを、図1に検討したFODOセルの磁石配置を示す。現在のシンクロトロンの場合、現在の偏向電磁石を2分割して数を2倍にした場合、3分割して3倍した場合について、四極電磁石の強さに制限を設けずにエミッタンスを検討した。セルの長さは、現在のシン

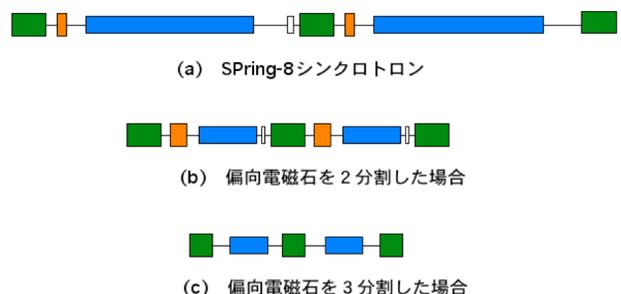


図1 : FODOセルの磁石配置

ただし、シンクロトロンエネルギーは6 GeVを仮定した。結果を図2に示す。これより現在のシンクロトロンへの到達可能エミッタンスは100 nm程度であるが、偏向電磁石を2分割すると17 nm、3分割すると5 nmまで小さくなる可能性があることがわかる。

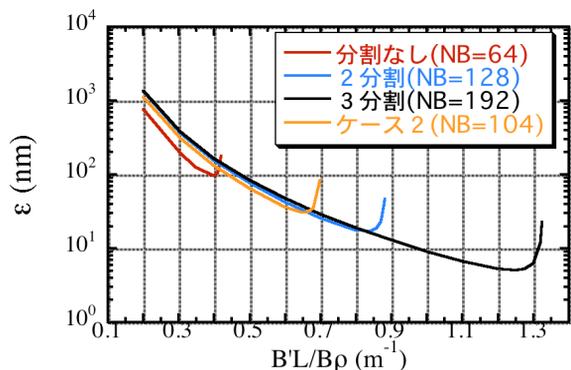


図2：四極電磁石の強さとエミッタンスの関係

### 3. シンクロトロンの設計

偏向電磁石の数を3倍にすれば10 pm以下のエミッタンスとすることも可能であることがわかった。しかし実際にはスペースの問題、ダイナミックアパーチャの問題などがあるため、実際に設計してみる必要がある。そこで偏向電磁石を2分割した場合と3分割した場合を中心に設計検討した。

#### 3.1 制限条件

現在のシンクロトロンは、短半径50.9 m、長半径70.2 mのレーストラック形状をしており、トンネルの幅は3.8 mである。従って新たに製作するシンクロトロンも現在のシンクロトロンと同一のビームライン上にすることが望ましい。少なくともトンネルの中に収まらなければならない。今、偏向電磁石間の距離を $L_1$ 、直線部に入る前の2個の偏向電磁石間の距離を $L_2$ 、直線部の長さの半分を $L$ 、曲線部の半径を $R$ 、偏向電磁石の数を $N_B$ とすると、レーストラックの短半径 $R_s$ 、長半径 $R_L$ と磁石間の距離 $L_1$ は次のようになる。

$$R_s = R \sin\{(N_B - 6)\pi / 2N_B\} + L_2 \sin(2\pi / N_B) \quad (1)$$

$$R_L = R[1 - \cos\{(N_B - 6)\pi / 2N_B\}] + L_2 \cos(2\pi / N_B) + L \quad (2)$$

$$L_1 = 2R \sin(\pi / N_B) \quad (3)$$

また周長 $C_0$ が同じになるためには、

$$C_0 = 4L + 4L_2 + L_1(N_B - 6) \quad (4)$$

新シンクロトロンは、 $R_s \approx 50.9$  m、 $R_L \approx 70.2$  m、 $C_0 \approx 396.12$  mを満足するようにしなければならない。

#### 3.2 偏向電磁石2倍（2分割）案

実際に蓄積リング、シンクロトロンを改修した場合、

大量の電磁石が使われなくなる。これらの電磁石をできるかぎり再使用すれば、安価にシンクロトロンを製作することができる。そこでこれらの電磁石を再活用するという制限を設けた。

四極電磁石は現在のシンクロトロン電磁石80台と蓄積リングの四極電磁石を使用し、製作する台数は必要最小限とすることにした。六極電磁石は、シンクロトロンのもは弱すぎるため、蓄積リングのものを使用する。偏向電磁石は現在のものを2分割して使用することができるならば、鉄心を再利用することとする。

1セルの長さは4.9515m、四極電磁石の長さは0.6m、六極電磁石の長さは0.3mである。そのためスペースに余裕がなく、偏向電磁石の長さを短くしないと加速器が成立しない。そこで可能な限り偏向電磁石の長さを短くすることにした。ただし、有効エミッタンスおよび輝度の観点からは低い磁場のほうが良いため、1Tを超えない範囲とし、磁石の長さを1mとした。また、偏向電磁石中心の位置は四極電磁石間の中央の位置ではなく六極電磁石を配置する側を長くし、ステアリングを配置する側を短くした。周長は現在のものと同一とした。このとき短半径は50.7m、長半径は70.2mになった。

現在のシンクロトロンは、一周すべてFODOセルで構成されている。直線部は、偏向電磁石を一個抜くことによりディスパージョンを0にしている。一周すべてFODOセルにすればダイナミックアパーチャが大きくなり、電源の数が少なく済むなどの利点があるが、低エミッタンスにした場合この手法が使えない。そこで電源の数は増えるが、独立に調整できる複数の四極電磁石でディスパージョンを押さえることにした。このようにして設計したシンクロトロン主要パラメータを表2に、オプティカル関数を図3に示す。エミッタンスは25 nmとなった。

表2：偏向電磁石数2倍案の主なパラメータ

エネルギー（最大）	6	GeV
周長	396.12	m
短半径／長半径	50.7/70.2	m
チューン $\nu_x/\nu_y$	20.15/20.08	
エミッタンス	25	nm
クロマティシティ $\xi_x/\xi_y$	28.4/28.7	
偏向電磁石 数	128	
長さ	1.0	m
強さ	0.9824	T

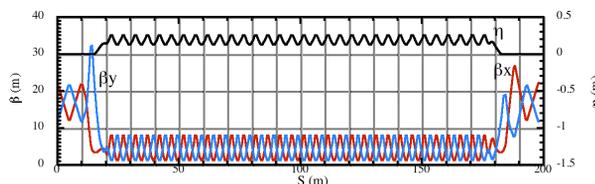


図3：偏向電磁石数2倍（128）の時のオプティカル関数

直線部の位相は、ダイナミックアパーチャ拡大を意図してFODOセルが連続してつながるように  $2\pi$  に調整したものと、そうでないものの2種類設計した。それぞれの入射部でのダイナミックアパーチャを図4に示す。結果は図4に見られるように  $2\pi$  のものがわずかではあるがアパーチャが大きい。図5にFODOだけでリングを構成した場合、直線部の位相が  $2\pi$  の場合、そうでない場合のそれぞれの規格化されたダイナミックアパーチャを示す。

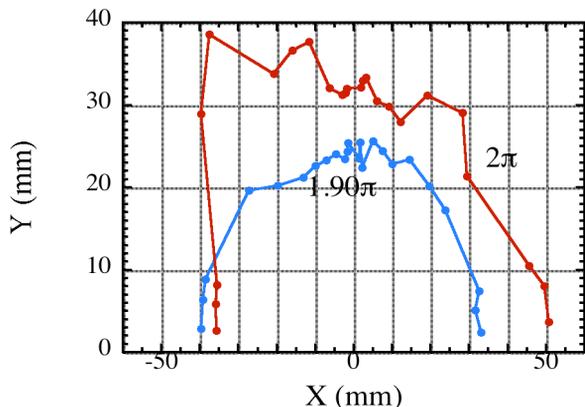


図4：偏向電磁石数2倍（128）の時のダイナミックアパーチャ

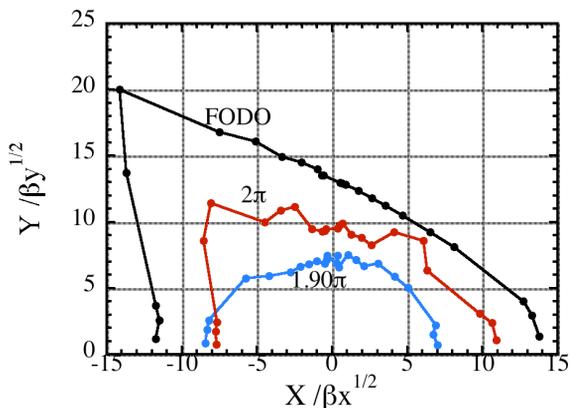


図5：規格化されたダイナミックアパーチャ

### 3.3 セル長を長くした案

偏向電磁石を2分割し、セルの長さを半分にした案では、セル長に余裕がないため、偏向電磁石中心は四極電磁石間の中心と一致せず非対称であった。完全に対象にすれば、スペースに余裕が生まれ、オプティックスもきれいになるため、偏向電磁石が中心にくる案を検討した。ただしこの案はエミッタンスが若干大きくなること予想される。

短径、長径の長さが決まっていることから偏向電磁石の数  $N_B$  と磁石の強さ  $B$  と偏向電磁石間の距離のうち偏向電磁石を除く部分の長さを  $L_0$  とすると、 $N_B$  と  $B$  の関係は次のようになる。

$$N_B = (101\pi - 2\pi E / 0.3B) / 2L_0 \quad (5)$$

ただし、 $E$  は電子エネルギーで  $6 \text{ GeV}$ 、 $L_0$  は  $3.6 \text{ m}$  と

した。また偏向電磁石の数は、FODOセルであること、リングが2回対象であることから4の倍数でなければならないこと、および、偏向電磁石の強度を  $1 \text{ T}$  以下にすると仮定すると、 $N_B \leq 104$  となる。 $N_B = 104$  とすると四極電磁石の強さと得られるエミッタンスは図1のケース2のようになり、電磁石の強さが  $0.65$  近辺で最小になることがわかる。四極電磁石の強さは余裕があるので、最小エミッタンスを目指すことにした。また長直線部の位相の進みは  $2\pi$  とした。このときのシンクロトロンを主なパラメータを表3に、オプティカル関数を図6に、ダイナミックアパーチャを図7に示す。ダイナミックアパーチャは、最小エミッタンスにしたため、小さな値になっているが、入射、加速は、十分行える大きさである。

表3：セル長を長くし、偏向電磁石数が104にしたシンクロトロンの主なパラメータ

エネルギー（最大）	6	GeV
周長	396.12	m
短半径／長半径	51.0/70.2	m
チューン $\nu_x/\nu_y$	21.40/22.08	
エミッタンス	30	nm
クロマチシティー $\xi_x/\xi_y$	47.5/46.8	
偏向電磁石 数	104	
長さ	1.27	m
強さ	0.9514	T

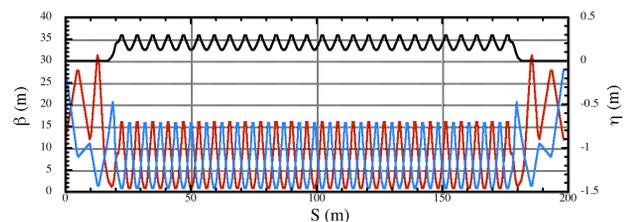


図6：偏向電磁石数104の時のオプティカル関数

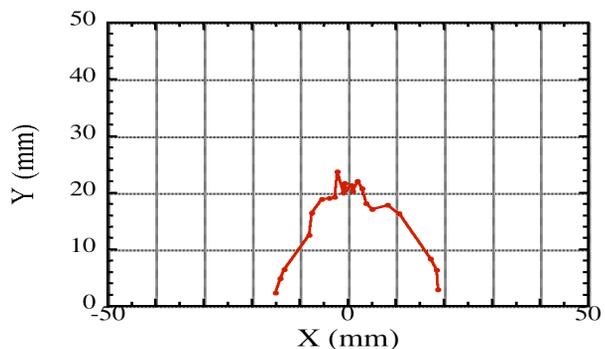


図7：偏向電磁石数が104の時のダイナミックアパーチャ

### 3.4 偏向電磁石数3倍（3分割）案

偏向電磁石を3分割した場合、セルの長さは  $3.301 \text{ m}$  となりスペースが短くて、既存の電磁石は長過ぎて再使用できない。そのため電磁石をすべて新しく

製作する必要がある。新たに作る電磁石はできる限り長さを短くするため、ボア径を40mmとし、四極電磁石の最大磁場勾配を50 T/m、六極電磁石は3000 T/m<sup>2</sup>を仮定して電磁石の長さを決定した<sup>[5]</sup>。また偏向電磁石は残りのスペースを考えて長さが0.5705 m、磁場の強さは1.148 Tとした。また四極電磁石はK値が1.2 m<sup>-1</sup>近くになるとエミッタンスは6 nm近くになるが、同時に六極電磁石の強さが強くなりすぎる。K値が1 m<sup>-1</sup>近くでも10 nm程度のエミッタンスが得られるためK値は1 m<sup>-1</sup>近傍にとることにした。

表4に主なパラメータを、図8にオブティカル関数を、図9に入射部でのダイナミックアパーチャを示す。直線部の位相が2πとそうでないときの差はほとんどなかった。図10にFODOセルだけで計算した時のものも含めて、ベータatron関数で規格化したダイナミックアパーチャを示す。FODOセルだけの時に比べ直線部が存在するとアパーチャが半分近くになることが分かる。しかしながらシンクロトロンとしては十分なアパーチャを有している。

表4：偏向電磁石3分割案の主なパラメータ

エネルギー (最大)	6	GeV
周長	396.12	m
短半径/長半径	50.5/70.2	m
チューン $\nu_x/\nu_y$	27.19/20.16	
エミッタンス	11	nm
クロマティシティ $\xi_x/\xi_y$	37.4/35.9	
偏向電磁石 数	192	
長さ	0.5705	m
強さ	1.148	T

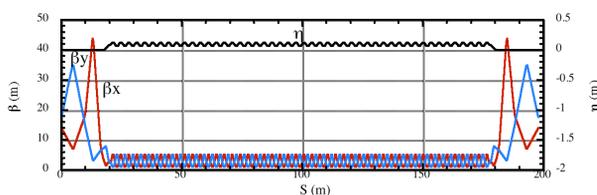


図8：偏向電磁石数3倍（192）の時のオブティカル関数

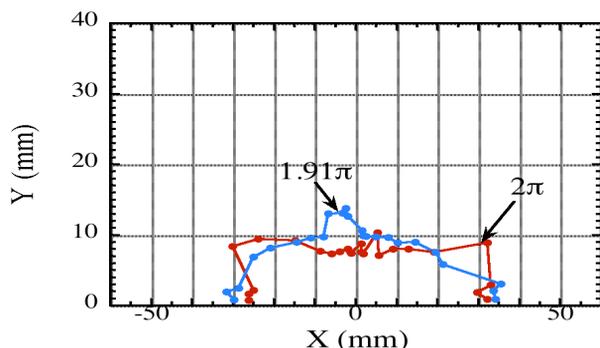


図9：偏向電磁石数3倍（192）の時のダイナミックアパーチャ

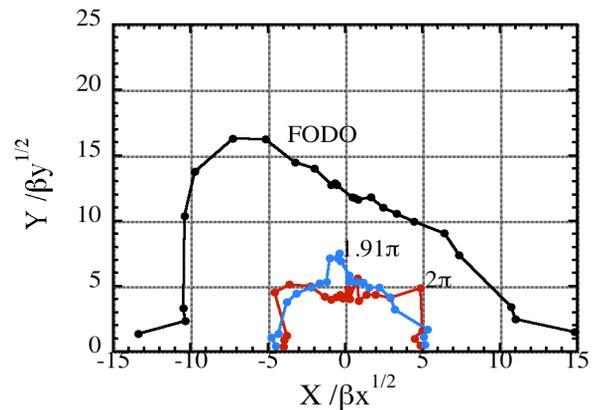


図10：規格化されたダイナミックアパーチャ

#### 4. まとめ

将来のダイナミックアパーチャの小さな低エミッタンス蓄積リングの入射器として、現在のシンクロトロンを改造して低エミッタンス化することを検討した。偏向電磁石を2分割した場合、到達可能な最小エミッタンスは17 nm、3分割した場合は5 nmまで小さくできることがわかった。

実際に次の3ケースについてシンクロトロンを設計検討した。第1はセルの長さが現在の半分で、偏向電磁石数が2倍の128台の場合、第2はセル長が第1の場合より長く、偏向電磁石数が104個の場合、第3はセルの長さが現在の1/3で偏向電磁石数も3倍の192台の場合である。第1の場合と第2の場合は蓄積リングやシンクロトロンで使われなくなった電磁石をできる限り再活用することを仮定したが、第3の場合はスペースの関係から小型の電磁石をすべて新しく製作することにした。

エミッタンスは第1の場合25 nm、第2の場合30 nm、第3の場合11 nmあった。いずれの場合も将来の低エミッタンス蓄積リングの入射器として満足できるエミッタンスである。これにより選択の幅が広がり、全体としての柔軟性が高まったと考える。

#### 参考文献

- [1] SPring-8次期計画2019シンポジウム、東京ステーションコンファレンス、June, 2009.
- [2] K. Tsumaki, N. Kumagai, "NEXT GENERATION LIGHT SOURCE STORAGE RING AT SPring-8", EPAC'06, Edinburgh, 2006, p. 3362.
- [3] N. Kumagai, private communication.
- [4] JASRI-RIKEN SPring-8 Project Team, Conceptual Design Report, SPring-8 Project part I Facility Design 1991.
- [5] K. Tsumaki, N. Kumagai, "Very low emittance light source storage ring", Nucl. Instr. and Meth. A 565 (2006) 394.