

Multi-bend ラティスを採用したトーラス結び目型 小型超低エミッタンス放射光源リング

TORUS-KNOT TYPE ULTRA-LOW EMITTANCE SR RING WITH MULTI-BEND LATTICE

宮本篤#, 佐々木茂美

Atsushi Miyamoto#, Shigemi Sasaki

HSRC; Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

Abstract

We proposed a ring in which a beam orbit is not closed in one turn but closed after multiple turns around the ring. The idea of this new accumulation ring was inspired based on the torus knot theory. This ring has a very long closed orbit in comparison with a conventional ring which has the one turn orbit. Therefore, it has a long beam orbit before returning to the starting point and has many straight sections which is advantageous to installation of insertion devices.

We are currently designing the light source ring based on the shape a torus knot type accumulator ring for HiSOR-II storage ring. The diameter of this ring is as compact as about 16 m, but its total orbit length is as long as about 150 m. As one of the possible option, we design the storage ring using a multi-bend lattice to realize a diffraction limited ultra-low emittance.

1. トーラス結び目型小型蓄積リング

小型放射光源リングによって、挿入光源を導入可能な直線部を多く確保することは重要な課題であるが、現実には電磁石や RF 系、ビームモニタ等によって占められてしまい、リングの周長に対して挿入光源に利用できる直線部の総延長はそれほど長くない。そこで、Figure 1 のようなトーラス結び目の形状をヒントに複数周回で軌道が閉じる新しいタイプの蓄積リングを考案^[2]し、AMATELAS と命名した。

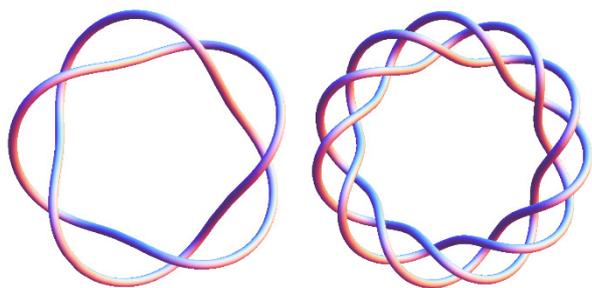


Figure 1: A (5, 2) and (11, 3) torus-knot.

この AMATELAS を広島大学放射光科学研究センターの将来計画 HiSOR-II^{[3][4]}の放射光源リングへの採用を目指して設計を進めている。ビームエネルギー700 MeV の HiSOR-II 光源リングの概略平面図を Figure 2 に示す。この(11, 3)トーラス結び目型リングの外周は約 45 m であるが、3 周回の閉軌道を持ちその総長は約 130 m に達する。また、4 極成分を持つ機能複合型偏向電磁石を採用して、直線部へエネルギー分散を導入することで、約 18 nmrad と

いう低エミッタンスを実現するラティスとなっている。

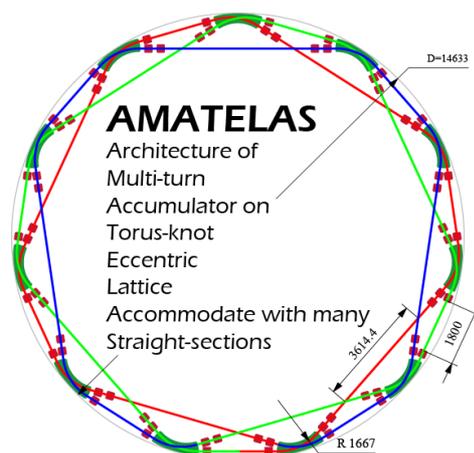


Figure 2: HiSOR-II storage ring with AMATELAS.

2. Multi-bend による超低エミッタンス

近年では、multi-bend ラティスを採用することで低エミッタンスを実現するリングが見られるようになってきた。そこで、HiSOR-II のトーラス結び目型蓄積リングにも multi-bend ラティスを採用することで、VUV 領域における回折限界以下のエミッタンス達成の可能性を検討した^{[5][6]}。

回折限界を目指すには、

$$\varepsilon \leq \frac{\lambda}{4\pi}$$

を満たすようなエミッタンスを実現する必要がある。VUV 領域では放射光の波長も比較的長いことから極端に小さなエミッタンスを要求するほどではない

a-miyamoto@hiroshima-u.ac.jp

が、10 eV の光における回折限界を達成するには約 10 nmrad 以下である必要がある。

また、多くの挿入光源をエネルギー分散のある箇所を導入すると、リング全体に様々な影響が及ぶことが予想されるため、長直線部にはエネルギー分散を持たないラティスを基本とすることとした。

2.1 電磁石の配置

Figure 2 に示したリングでは、偏向電磁石内で軌道が交差する double bend ラティスを採用している。このうち、短直線部を廃して偏向部として用い、複数の偏向電磁石を配置することで multi-bend ラティスが可能である。しかし、小型リングでは偏向部にそれほどの長さがなく、このリングの場合は 4 ないし 5 つの偏向電磁石を配置できる程度である。

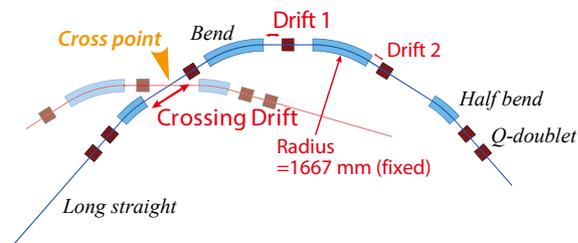


Figure 3: Schematic draw of beam orbits and magnets in a unit cell.

それに加え、アーク部の電磁石をすべて直線部の



Figure 4: Lattice in a unit cell including sextupole magnets.

2.3 ベータ関数の決定

先に述べたように、このラティスのベータ関数に関する自由度はラティス両端にある 4 極ダブルレットによってのみ得られる。そこで、リングのベータ関数や動作点は、そのダブルレット 4 極の強度をある範囲内でサーベイすることで決定することとした。

同時に、線形ラティスから求められるナチュラルエミッタンスと、クロマティシティを $(\xi_x, \xi_y) = (+1, +1)$ まで補正する 6 極を与えた場合のダイナミックアパーチャを計算した。Figure 5 にこのサーベイによって求められたナチュラルエミッタンスと長直線部中央におけるダイナミックアパーチャを示す。

目標とするエミッタンスが 10 nmrad 以下であることから、Figure 5 の左図から各 4 極電磁石強度の該当範囲を絞り、右図から比較的アパーチャの広い箇所を動作点とする候補を選び出し、その中で光学関数を考慮して適当な動作点を選択した。図中の番号 1 で示した動作点におけるエミッタンスは 8.763 nmrad となり、その際の 3 セルにわたる光学関数を Figure 6 に示し、長直線部中央におけるダイナミックアパーチャを Figure 7 に示す。

交差位置より外側へ配置することも難しいため、アーク部途中で軌道が交差する箇所をもうける必要がある。Figure 3 に交差する軌道と 1 セル内の電磁石配置の概略図を示す。

2.2 6 極電磁石の配置

直線部は無分散としたために、電磁石の少ないこのラティスにおいてはアーク部の分散関数の自由度はほとんどない。最端部の偏向電磁石が発生するエネルギー分散と中間部を滑らかにつなぐように、偏向電磁石とその間の 4 極の強さを設定する。一方、ベータ関数の自由度はアーク部の外側に 4 極ダブルレットを接続することで確保することとした。

一般的に multi-bend ラティスでは各光学関数は強力な収束力によって小さく抑えられ、クロマティシティを補正するために強力な 6 極磁場を必要とし、その結果ダイナミックアパーチャが小さくなる傾向がある。6 極磁石の配置についてはその間の位相進みをもとに決定するのが一般的であるが、磁石数を最小限に抑えつつ位相進みへの依存があまり強くないように、同程度の強さを持つ SXF および SXD を可能な限り近づける配置とした。さらに、SXF 磁石については 6 極電磁石だけでなく 4 極電磁石を機能複合型にしたものに加え、SXD は偏向電磁石の両端を放物面形状にカットすることで発生する 6 極成分を利用することとした。Figure 4 に 6 極電磁石を含むユニットセルのラティスを示す。

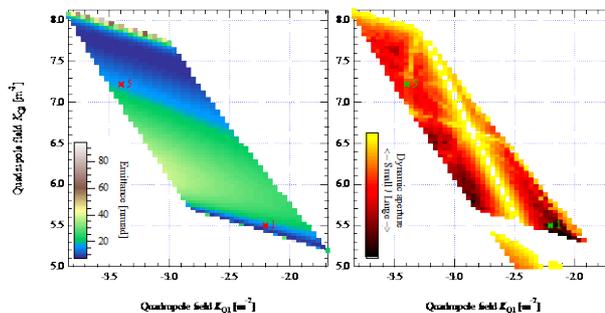


Figure 5: Natural emittance and dynamic aperture at center of long straight section.

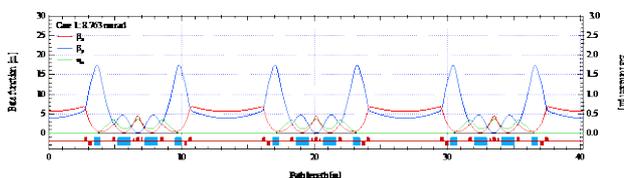


Figure 6: Optical functions in 3 cells.

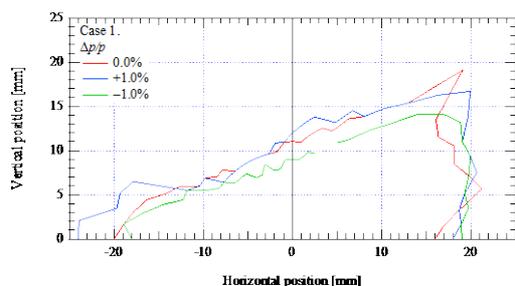


Figure 7: Dynamic aperture at center of long straight.

3. RF系とビーム寿命

低エミッタンスリングではバンチ体積が小さいため、Touschek 寿命が極端に短くなることもあり、その対策としてバンチ長を長くする即ち周波数の低い RF 空洞を用いる場合がある。さらに、入射器からシングルバンチで top-up 入射する場合、バンチ数が少ないことは全バンチへの入射に必要な時間が短くなることから、蓄積電流の平坦化に有利でもある。

HiSOR では現在約 200 MHz の RF 系を使用しているが、HiSOR-II では同一周波数帯の 199 MHz (ハーモニック数 98) に加えて、 $h=50$, $f_{RF}=102$ MHz の空洞の導入を検討している。これらを使用した場合の Touschek 寿命を ZAP を用いて計算したところ、それぞれ 1.8 時間、4.2 時間という結果を得た。

4. まとめ

広島大学放射光科学研究センターでは、将来計画 HiSOR-II の設計が進められており、トーラス結び目型蓄積リング AMATELAS を採用した特徴あるリングを設計中である。このリングに multi-bend ラティスを採用して、VUV 領域における回折限界以下のエミッタンスを達成するリングの設計を進めている。

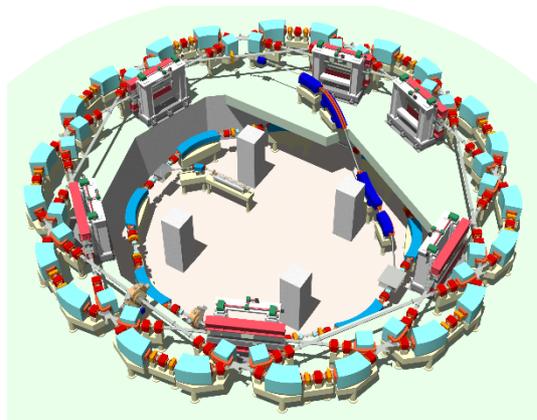


Figure 8: The bird-eye view of (11, 3)-AMATELAS with multi-bend lattice for HiSOR-II.

HiSOR-II は小型リングであるため、4つの偏向電磁石によって偏向部を構成する multi-bend ラティスを採用し、8.76 nrad という超低エミッタンスの達

成が可能であることがわかった。

HiSOR-II 蓄積リングの主なパラメータを Table 1 に示す。また、HiSOR-II の鳥瞰図を Figure 8 に示す。

Table 1: The Main Parameters of (11, 3) AMATELAS with Multi-bend Lattice for HiSOR-II Storage Ring

Orbit shape	(11,3) Torus knot	
Perimeter	50.868 m	
Orbit length	147.517 m	
Beam energy	700 MeV	
Straight sections	4.000 m × 11	
Betatron tune	(16.781, 8.040)	
Chromaticity	(+1.0, +1.0)	
Natural emittance	8.763 nrad	
Ring current	300 mA	
RF voltage	500 kV	
Coupling	10.0 %	
Harmonic number	50	98
RF frequency	101.613	199.161 MHz
Bunch length	23.99	14.94 mm
Bucket height	0.0240	0.0171
Touschek life time	4.2	1.8 hours

参考文献

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Torus_knot
- [2] S. Sasaki and A. Miyamoto, "An Innovative Lattice Design for a Compact Storage Ring", Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, TUPO10, (2011) pp.1467-1469.
- [3] A. Miyamoto and S. Sasaki, Proc. of the 8th Annual Meeting of PASJ, Tsukuba, Japan (2011) pp.212-214.
- [4] A. Miyamoto and S. Sasaki, Proc. of the 9th Annual Meeting of PASJ, Osaka, Japan (2012) pp.1022-1025.
- [5] A. Miyamoto and S. Sasaki, Proc. of the 10th Annual Meeting of PASJ, Nagoya, Japan (2013) pp.882-884.
- [6] A. Miyamoto and S. Sasaki, "Design of Ultra-low Emittance Ring with Multi-bend Lattice on a Torus-knot", Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, MOPRO079, (2014) pp.271-273.