

# トーラス結び目型小型蓄積リングを採用した超低エミッタンス光源

## ULTRA-LOW EMITTANCE LIGHT SOURCE WITH A TORUS-KNOT ACCUMULATOR RING

宮本篤<sup>#</sup>, 佐々木茂美

Atsushi Miyamoto<sup>#</sup>, 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 15 m, but its total orbit length is as long as 130 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<sup>[1]</sup>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<sup>[2]</sup>し、AMATELAS と命名した。

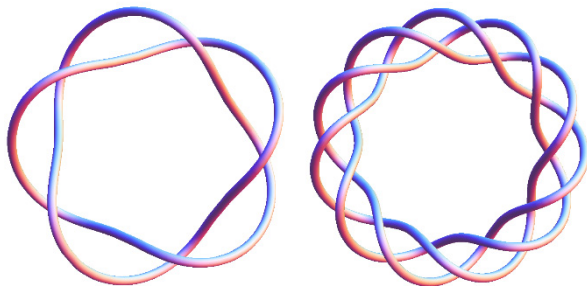


Figure 1: A (5, 2) and (11, 3) torus-knot.

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<sup>[3][4]</sup>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、計画全体の鳥瞰図を Figure 3 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 nmrاد 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。

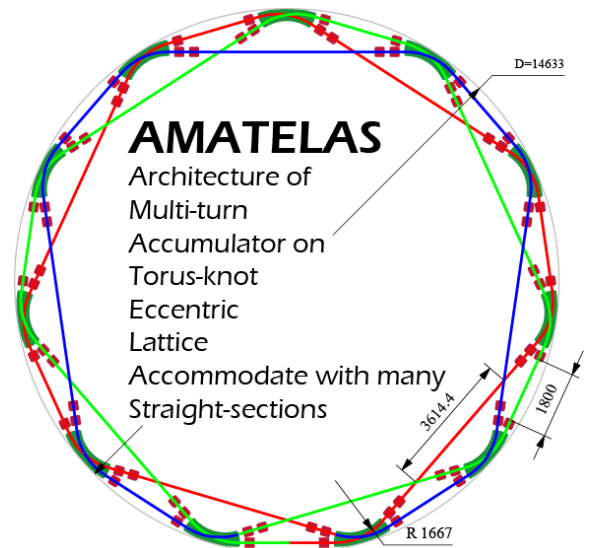


Figure 2: HiSOR-II storage ring with AMATELAS.

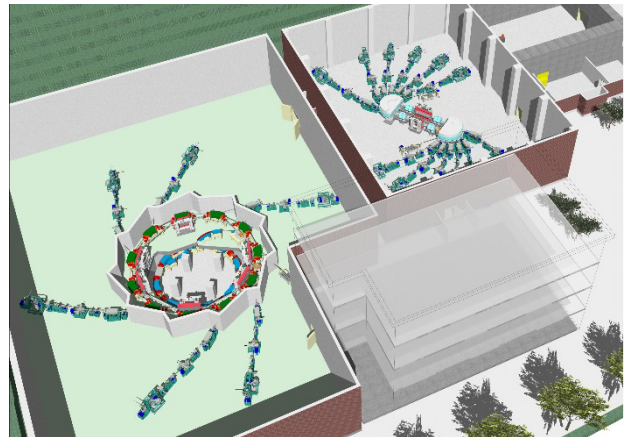


Figure 3: A bird's-eye view of HiSOR-II and HiSOR.

<sup>#</sup> a-miyamoto@hiroshima-u.ac.jp

## 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。

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

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 幾何学的形状からの条件

Figure 2 にも示した(11, 3)トーラス結び目を採用した HiSOR-II 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て、複数の偏向電磁石を配置することで multi-bend ラティスとすることができる。しかしながら、小型リングであるが故に偏向部はそれほどの長さがなく、4 ないし 5 つの偏向電磁石を配置できる程度である。

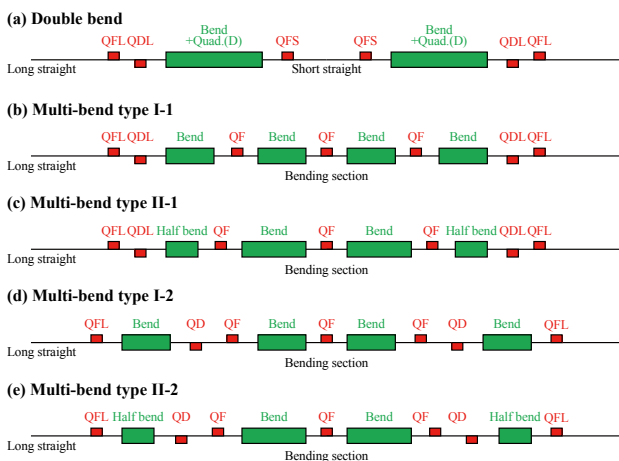


Figure 4: Schematic draws of multi-bend lattice.

Figure 3 の(a)は元の double-bend ラティスの概略図で、発散成分を持つ偏向電磁石と収束 4 極から成る、長直線部の分散を消さないラティスを基本としている。これに対し(b)~(e)は、4 つの偏向電磁石とその間のドリフトスペースの中央に配置した 4 極電磁石によって構成した multi-bend ラティスの例を示している。(b)はすべての同じ長さの偏向電磁石 4 つに分割しており (type-I)、(c)では端の 2 つの偏向

電磁石の長さが bending section のその半分となっている (type-II)。

Multi-bend ラティスでは偏向部が double-bend よりも長くなるため、軌道の交差部は最端の偏向電磁石の内側に設けざるを得ない。しかし、それでは軌道が交差するドリフトスペースが短すぎることから、(d)および(e)のように端部の 4 極を 1 つ偏向電磁石の内側に配置している。これは、長直線部のエネルギー分散をゼロとした場合にクロマチシティ補正を容易に行うことができる効果もある。Figure 5 に (a), (d), (e)の各ラティスにおけるユニットセルあたりの偏向電磁石と 4 極電磁石の配置を示す。

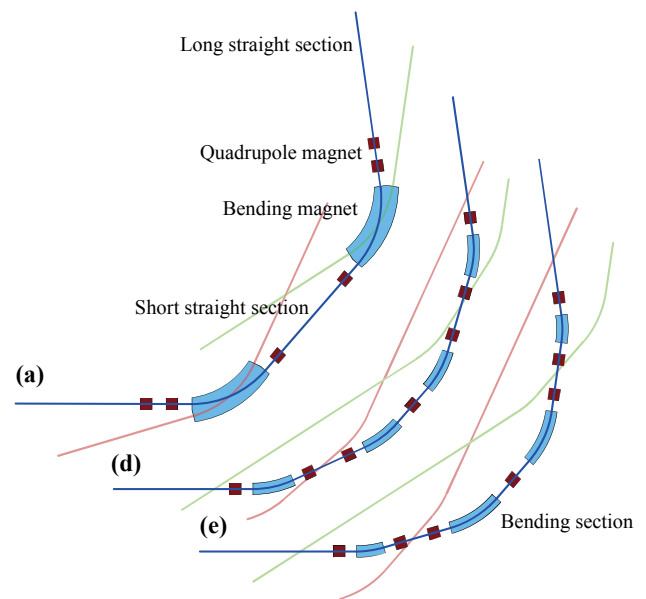


Figure 5: Placement of magnets of a unit cell in each lattice.

### 2.2 ビーム光学関数

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、クロマチ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。それを回避するために、偏向部の端では各光学関数を大きくすることとした。これにより必要とされる 6 極磁場を弱くすることができる。

Figure 6 はラティス(d)の光学関数を示し、図の上はアクロマティックなラティス、下は直線部にエネルギー分散を導入してより低エミッタンスを目指したラティスである。低エミッタンス化には偏向電磁石に負の K 値を導入することが有効であるため、全ての偏向電磁石には QD の 4 極成分を与えた機能複合型としている。ただし、各セル端部の 2 つの偏向電磁石は中央 2 つのその約半分の強度としている。

Figure 7 はラティス(e)の光学関数を示し、図の上はアクロマティックラティス、下は低エミッタンスモードである。ラティス(d)の場合と同じように、全ての偏向電磁石は QD を含む機能複合型とし、K 値も同じとした。

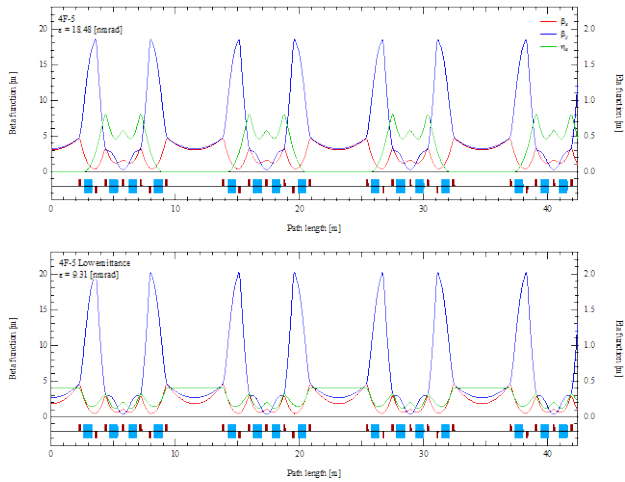


Figure 6: Optical functions of lattice (d).

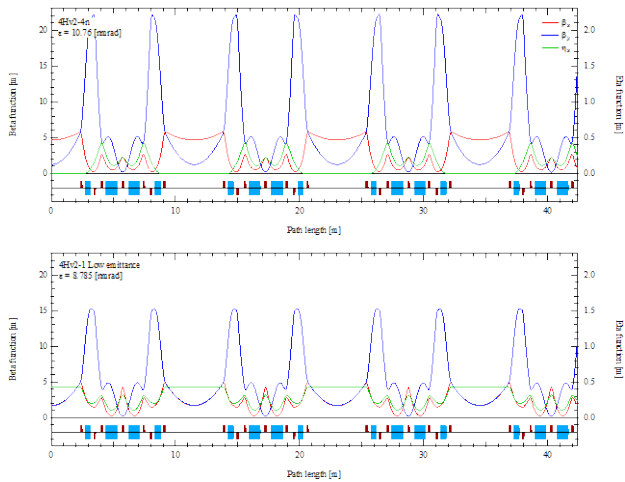


Figure 7: Optical functions of lattice (e).

各ラティスのアクロマティックモードと低エミッタンスモードにおける各種パラメータのまとめを Table 1 に示す。ラティス(d)と(e)では、偏向部全体での偏向角は等しいが、各偏向電磁石や直線部の長さが異なるため、軌道長が若干異なる。表中の Chromaticity はナチュラルクロマチシティであるが、それを  $(\xi_x, \xi_y) = (+1, +1)$  となるように補正する場合に、4 極 doublet Q1 および Q2 の位置に必要な 6 極磁場の強さを SD および SF として記した。

Table 1: Summary of Lattice (d) and (e)

	(d)	(d) LE	(e)	(e) LE
Emittance [nmrad]	24.49	9.31	10.76	8.79
Orbit length [m]	127.188	←	126.583	←
Chromaticity $(\xi_x, \xi_y)$	(-16,-36)	(-16,-36)	(-22,-52)	(-19,-31)
$SD_{Q1}$ and $SF_{Q2}$ [ $m^{-3}$ ]	-31,+22	-53,+61	-83,+69	-72,+100

### 3. まとめと今後の展望

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達成の可能性を検討した。

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ラティスを考え、いくつかのパターンを検討した。その結果、アクロマティックラティスでも 10.76 nmrad、低エミッタンスモードでは 8.79 nmrad 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。しかしながら、クロマチシティを補正するにはかなり強い 6 極磁場が必要である。

今後は、ダイナミックアパーチャを十分に確保するような 6 極の配置や強度を検討し、より具体的なリングの設計を進めていく予定である。

### 参考文献

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Torus\\_knot](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, TUPO010 (2011) pp.1467-1469.
- [3] A. Miyamoto and S. Sasaki, "The Proposal for the Compact Accumulator that has a Long Orbit and Many Straight Sections", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan (2011) pp.212-214.
- [4] A. Miyamoto and S. Sasaki, "Design Study of HiSOR-II Lightsource Ring with Torus-knot Type Compact Accumulator Ring", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan (2012) pp.1022-1025.