

Design Study of HiSOR-II Lightsource Ring with Torus-knot Type Compact Accumulator Ring

Atsushi Miyamoto[#] and Shigemi Sasaki

HSRC; Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University
2-313 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-0046

Abstract

We proposed a ring in which a beam orbit is not closed with one turn and return to starting point 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 orbit of one turn. Therefore this ring has long beam orbit before returning to the starting point and has many straight sections which is advantageous to installation of insertion devices.

We are designing the light source ring based on the shape of a (11, 3) 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. On the other hand, this ring must achieve low emittance to operate as the 3rd generation light source ring. Therefore we designed lattice of this ring and achieved enough low emittance as 3rd generation light source ring by using bending magnets with combined function.

トーラス結び目型小型蓄積リングによる HiSOR-II 光源リングの設計

1. トーラス結び目型蓄積リング

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、トーラス結び目^[1]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。

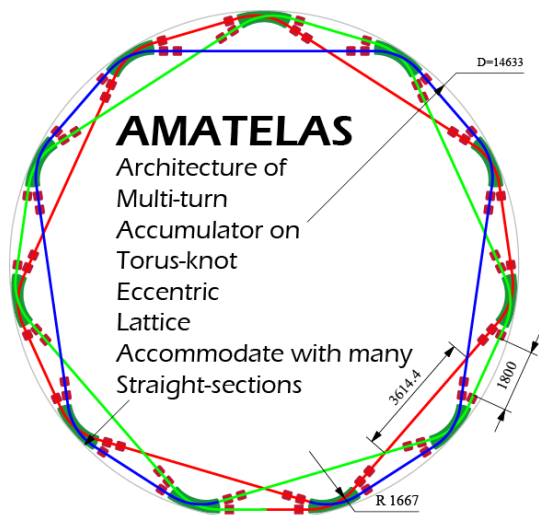


図1: (11, 3) AMATELAS を適用した HiSOR-II

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 の放射光源リングに採用し、現在設計を進めている^[3]。図 1にその概要図を

[#] a-miyamoto@hiroshima-u.ac.jp

示す。(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 である。

2. ラティスの選択

2.1 低エミッタンスラティス

一般的に放射光リングなどに用いられる低エミッタンスラティスとして Double Bend Achromat (DBA) がよく知られているが、近年では直線部へ分散を導入したラティスも多く見られ、DBA より低エミッタンスを実現している。特に MAX-lab の MAX-III^[4] などでは、偏向電磁石を QD との機能複合型としたラティスを採用し、非常に小さなエミッタンスを達成している。そこで、このタイプのラティスを採用することとした。

2.2 偏向電磁石の 4 極成分の決定

AMATELAS の直線部は長短 2 種類があり、それぞれが偏向電磁石をはさんで交互にあることから、double bend 系を採用することができる。偏向電磁石は上に述べた QD 成分を持つ機能複合型とするが、この磁場勾配を決定するためにおおまかな動作点の選択を行った。図 2に単位セルあたりのラティスを示す。偏向電磁石と QFS および QFL の 2 種の 4 極電磁石について、エミッタンスが 20 nmrad 以下になるように収束力のパラメータサーベイを行い、偏向電磁石の 4 極成分を $K = -0.98 \text{ m}^{-2}$ と決定した。

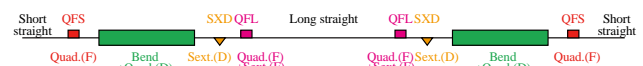


図2: 単位セルあたりのラティス

2.3 磁場勾配を持つ偏向電磁石内での軌道交差

MAX-III 型のラティスには QD 成分を持つ機能複合型の偏向電磁石が必須であるが、AMATELAS の偏向電磁石内部ではビーム軌道が交差している。しかしながら、交差する 2 つの偏向部それぞれに磁場勾配を与えることは不可能である。そこで、交差点を通り且つ 2 つの軌道の間を通る仮想的な中心軌道を設定し、その軌道に沿った磁場勾配を持つ 1 つの大きな偏向電磁石を考える。すると、ビームはこの **gradient magnet** を斜めに通過することになり、偏向磁場を取り除くと 4 極電磁石を斜めに通過する軌道と考えることができる。しかし、磁場勾配があるために電磁石中での軌道半径は一定ではなく、さらに仮想中心軌道との角度も変化することからビームが受ける収束力の変化も考慮する必要がある。

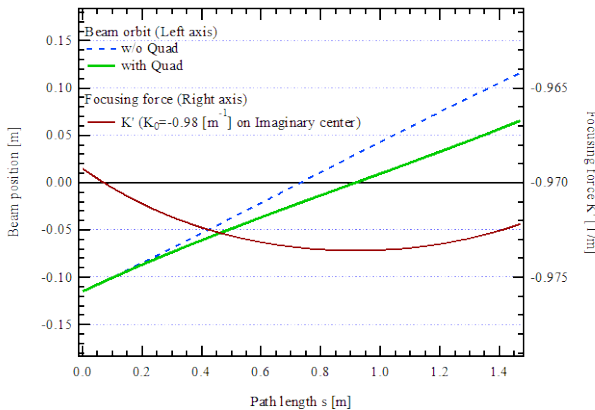


図3: 偏向電磁石中での軌道と収束力の変化

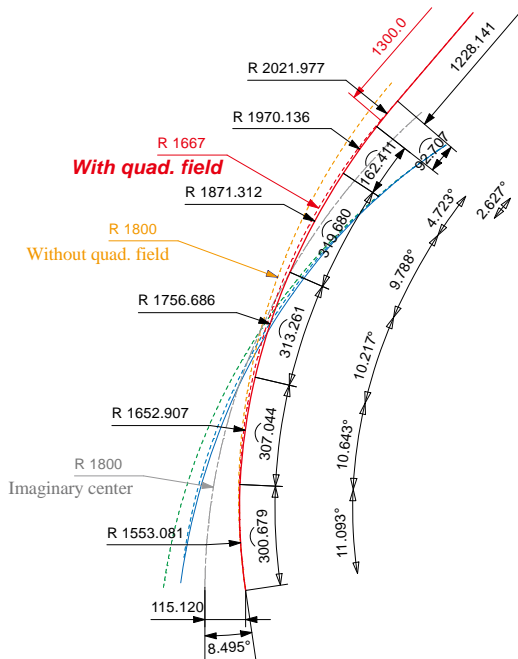


図4: 6 つの区間に分割された偏向電磁石内のビーム軌道。橙色点線は 4 極成分がない場合、赤色点線は 4 極成分がある場合の軌道を表す。赤色実線は線形計算に用いた、区間ごとに異なる軌道半径の円弧を連ねた軌道。

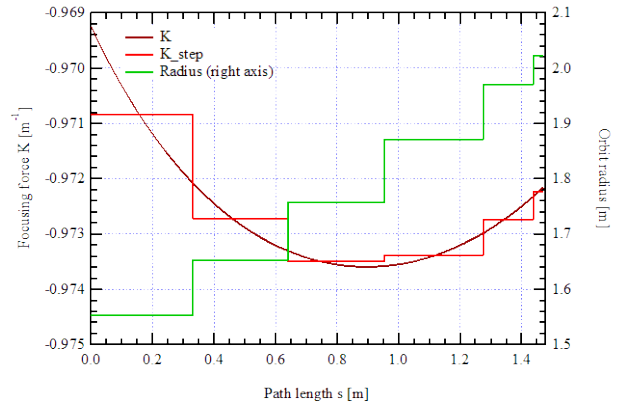


図5: 分割して線形計算に用いた偏向電磁石のパラメータ

図 3 は、仮想中心の軌道半径を $R = 1.800 \text{ m}$ 、4 極成分 $K = -0.98 \text{ m}^{-2}$ とした場合の 4 極磁場の有無によるビーム軌道の違い（青点線および緑実線）と、実際にビームが感じる収束力 K' （茶色実線）である。これから、偏向電磁石中での収束力の変化はそれほど大きくなく、0.5% 程度であることがわかった。

そこで、転送行列を用いた線形ラティス計算をするうえで、この偏向電磁石を図 3 のように 6 つの区間に分割して、それぞれの区間内では一定の磁場勾配を持つ偏向電磁石として扱った。各区間の軌道半径および収束力は、図 4 に示すような階段状に変化するが、各区間の軌道半径はその区間での磁場の平均から決定し、4 極成分はその区間での収束力の積分値と等しくなるように設定した。

2.4 サーベイによるラティスの決定

前節で述べたような偏向電磁石の分割をすると、その影響から動作点が若干変化する。そこで、2 種の 4 極電磁石 QFS および QFL、さらに 6 極電磁石 SXD にも 4 極磁場を持たせることとして再びパラメータサーベイを行った。この時、QFS および QFL はフリーパラメータとしたが、SXD の収束力はエミッタンスが最小になるような値を選択することとした。

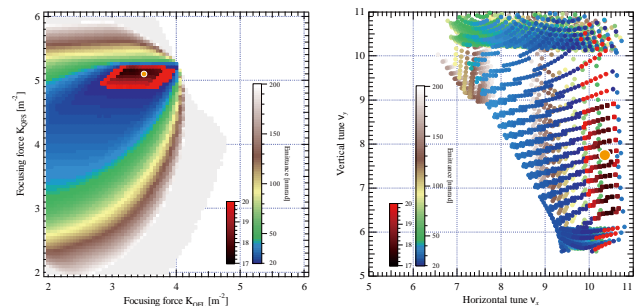


図6: 偏向電磁石を分割したラティスでのサーベイ結果。橙色点は動作点。左:QFS および QFL の収束力とエミッタンスの関係。右:チューンとエミッタンスの関係。

図 6 にサーベイの結果を示す。左は QFS および QFL の収束力とエミッタンスの関係、右はチューン

とエミッタンスの関係を表している。エミッタンスと光学関数、後述のダイナミックアパーチャを考慮して選択した動作点が図中の橙色点であり、この点における K 値、チューンおよびエミッタンスは

$$(K_{QFL}, K_{QFS}, K_{SXD}) = (3.50, 5.10, 0.40) [\text{m}^{-2}]$$

$$(v_x, v_y) = (10.363, 7.807)$$

$$\varepsilon = 17.9 [\text{nmrad}]$$

である。さらに、リング 1/3 周の光学関数を図 7 に示す。

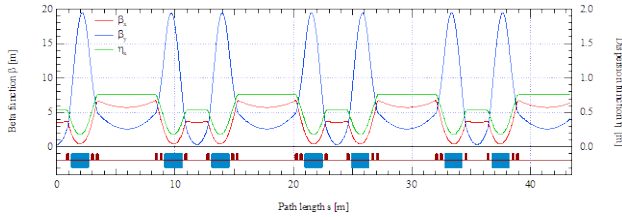


図7: リング 1/3 周の光学関数

2.5 クロマティシティとダイナミックアパーチャ

水平および垂直のクロマティシティを変えるためには最低でも 2 種類の 6 極電磁石が必要となるが、SXD の他に長直線部側の 4 極電磁石 QFL を combined magnet として SXF とすることとした。自然クロマティシティは $(\xi_x, \xi_y) = (-11.8, -32.2)$ であるが、補正後のクロマティシティを $(\xi_x, \xi_y) = (+1.0, +1.0)$ と設定した。

前節のサーベイにおいて同時に長直線部中央でのダイナミックアパーチャを計算した。図 6 と同じように、4 極電磁石の収束力およびチューンとの関係を図 8 に示す。図中の青点は動作点を示し、左図の青線で囲まれた領域は、エミッタンスが 20 nmrad 以下になる条件の領域を表す。この動作点における 6 極成分は、

$$(S_{QFL}, S_{SXD}) = (+23.60, -36.35) [\text{m}^{-3}]$$

である。

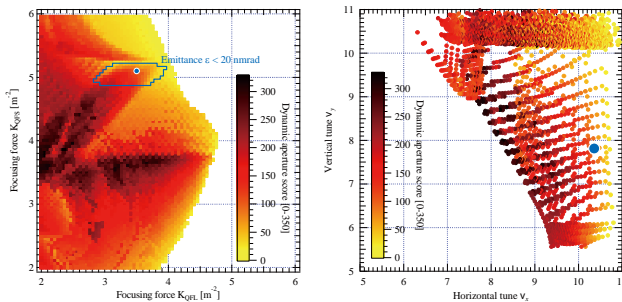


図8: 図 6 と同じサーベイ結果。どちらもダイナミックアパーチャを表す。

長直線部中央でのアパーチャ断面を図 9 に示す。水平方向には十分な広さを持っているが、垂直方向については電磁石の設置誤差等によってさらに狭まると予想され、十分なアパーチャを確保するために他の位置に 6 極電磁石を配置する等の検討の必要と考えている。

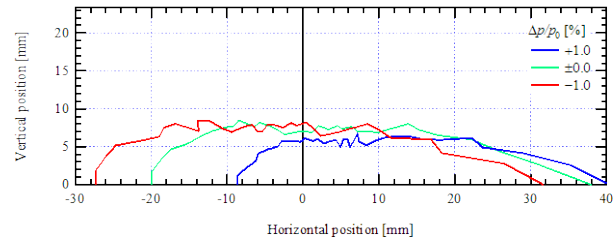


図9: 長直線部中央でのアパーチャ断面

3. まとめ

広大放射光センターの将来計画として、トーラス結び目型小型蓄積リングを採用した HiSOR-II 蓄積リングの主なパラメータを表 1 に示す。

表1: AMATELAS-HiSOR-II の主なパラメータ

リング形状	(11, 3)トーラス結び目型
周囲	45.97 m
ビームエネルギー	700 MeV
閉軌道長	130.187 m
偏向磁場	(1.2963 T)
偏向半径	(1.6667 m)
直線部 長さ・本数	3.614 m × 11 1.728 m × 11
チューン (v_x, v_y)	(10.363, 7.807)
エミッタンス	17.9 nmrad
クロマティシティ (ξ_x, ξ_y)	(-11.8, -32.2) (natural) (+1.0, +1.0) (corrected)
RF 周波数	202.645 MHz
ハーモニック数	88

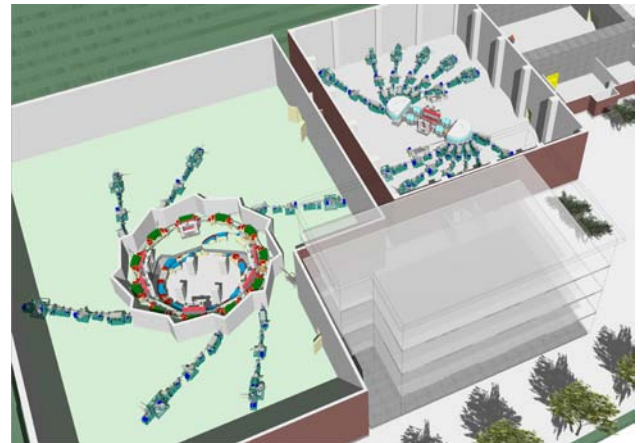


図10: 施設全体の鳥瞰図

HiSOR-II では当初から top-up 運転を行えるように、入射器として 700 MeV ブースターリングまたは線形加速器を建設する予定である。図 10 に

HiSOR-II 完成後の施設全体の鳥瞰図を示す。ブースターリングは放射線遮蔽と蓄積リングとの磁場干渉を避ける狙いで、蓄積リング内側の地下に建設することとしている。線形加速器を建設する場合も、ビームラインとの干渉を極力なくするために地下に建設し、リングの内側からの入射がよいと考えている。

図 11 に HiSOR-II および HiSOR の放射光スペクトルを示す。HiSOR-II の挿入光源のスペクトルの計算には、現在 HiSOR に設置されているリニアアン

ジュレータと同型のもの、全長のみを 2.5 m まで延長した APPLE-II 型アンジュレータのパラメータを用いた。

蓄積電流値は現在の HiSOR と同じとしたが、低エミッタンス化によって現在と比較して大幅な輝度の向上が期待できる。偏向磁場が HiSOR の 2.7 T から約 1.4 T へ減少するため、臨界エネルギーは低くなり数 keV 程度の光の供給は難しくなるが、超伝導ウィングラ等の導入によって補えると考えている。

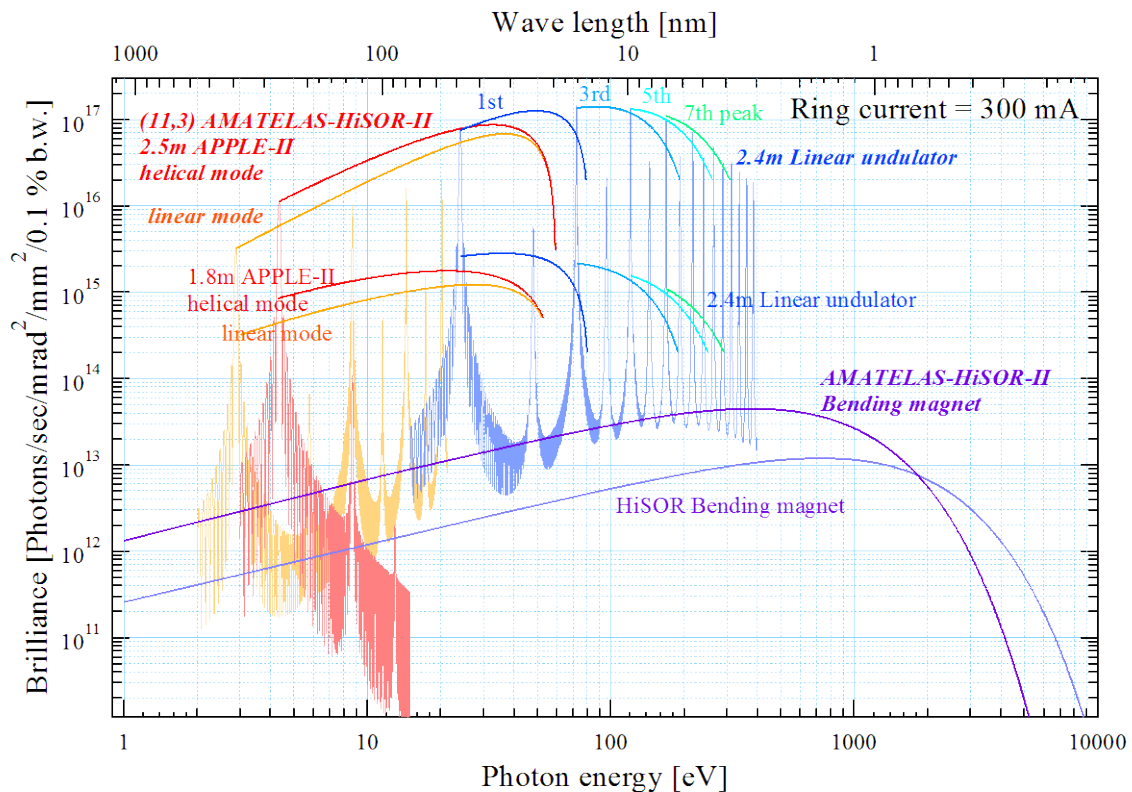


図11: HiSOR と HiSOR-II の放射光スペクトル

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, 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] G. LeBlanc, et al., "MAX-III, a 700 MeV Storage Ring for Synchrotron Radiation", EPAC2000, Vienna (2000).