



HiSOR 次期光源計画

佐々木茂美 広島大学放射光科学研究センター 〒739-0046 東広島市鏡山 2-313
 宮本 篤 広島大学放射光科学研究センター 〒739-0046 東広島市鏡山 2-313

要旨 広島大学放射光科学研究センターでは、固体物理を中心とした物質科学の研究をさらに推進するため、コミュニティの意向を踏まえ光源リングの高輝度化・高度化を目指した次期計画を持っている。本稿では、これまでに検討してきた光源リングの概要と更なる高度化の可能性について述べる。

1. はじめに

広島大学放射光科学研究センター HiSOR の光源リングは1996年から現在に至るまで放射光利用研究に供されている。現在のリングは住友重機械工業製の AURORA に挿入光源を設置可能な 2ヶ所の直線部を設けたレーストラック型のリングで、2個の180°偏向常伝導電磁石からは、2.7 T という強力な磁場で、電子ビームエネルギー700 MeV ながら、臨界波長1.42 nm (臨界光子エネルギー873 eV) の放射光を多くのビームラインに供給している。2ヶ所の直線部には直線偏光アンジュレータと円偏光アンジュレータがそれぞれ挿入されており、概略25 eV から250 eV の直線偏光した光と、5 eV から35 eV までの円偏光した光をユーザーに供給している。Fig. 1に実験ホールのレイアウトを、Fig. 2に放射光スペクトルを示す。

HiSOR の全ビームタイムは、ここ数年では年間2000時間を超えており、このうちユーザータイムも約1500時間/年とほぼ一定値を保っている。一方で、高輝度光を利用出来るアンジュレータビームラインを利用する国内外からの研究課題申請は増加の一途をたどり、各研究課題当りの利用時間を減らすことなくこれ以上の課題申請を受け付けることはほぼ不可能な状況にある。また、現在の HiSOR リングは、世界最大の第3世代高輝度光源である SPring-8 とほぼ同じ時期に稼働を始めたが、挿入光源を擁するリングとしては世界最小であり、周長22 m という小型リングであるがゆえにエミッタンスは400 nm-rad と非常に大きく、現状のリングサイズを保ったままで低エミッタンス化などの高度化やアンジュレータを挿入出来る直線部を増やすことは不可能である。

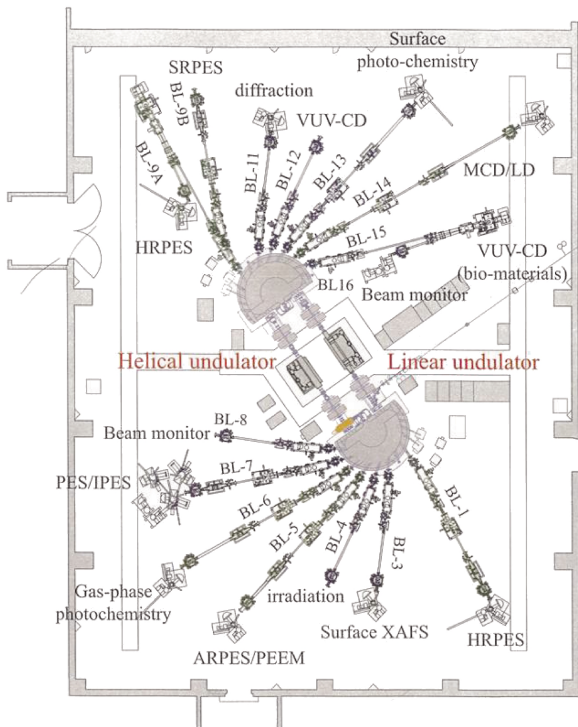


Fig. 1 Layout of experimental hall.

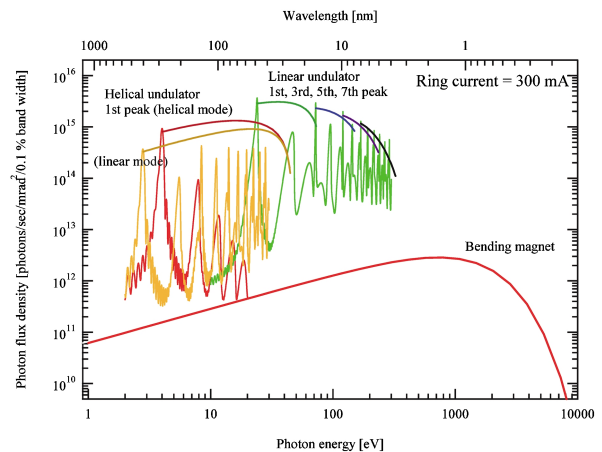


Fig. 2 Flux density spectra of bending magnet and undulator radiations.

以上の様な状況を踏まえ、当センターでは光源の高度化・高輝度化のための検討を行ってきた。その一環として手始めに、今年度は、保守点検のための夏季長期シャットダウン中に、現在の円偏光アンジュレータに替えてより周期長の短い APPLE-II 型可変偏光アンジュレータを挿入する。これにより、当該ビームラインでの利用可能光子ビームフラックスを2倍以上に増やし、さらに磁石構造の準周期化により、モノクロメータを通した後の光の高次光成分の含有量を少なくし、単色性を格段に向上させ、今年度後半の利用研究に供することを計画している。この今年度中の高度化についての詳細な説明は別の機会に譲ることとし、本稿では光源リングの更新計画と小型放射光源リングの新たな可能性について説明する。

2. HiSOR-II 計画の概要

次期光源リング HiSOR-II は、現放射光センターの敷地内に建設を予定しているため、設置できるリングの大きさには制限があり、せいぜい直径15 m 程度、すなわち周長50 m 以下である必要がある。この制約のため、これまで6年間に渡り検討を重ねてきた HiSOR-II は、スウェーデンの Lund 大学に併設されている加速器研究施設 MAX-lab の小型第3世代光源リング MAX-III のラティス¹⁾を参考にして、目標とするエミッタンスを15 nm-rad 程度として概念設計が行われた²⁾。Table 1 に主要パラメータ、Fig. 3 に HiSOR-II リングの鳥瞰図を示す。

このような小型リングで Table 1 に示したような低エミッタンスを達成するのは容易なことではない。低エミッタンス化は、原理的にはリングの大小に関わらず、偏向電磁石の数を増やし与えられた周長の中で出来るだけ偏向半径を大きくすること、偏向電磁石の中での電子ビームのベータatron関数 β_x および分散 η を小さくすることによ

り可能となる。小型リングで挿入光源を設置可能な直線部をある程度以上確保した上で、このような条件を満たすためには、偏向電磁石を機能複合型とし、収束（発散）力を持たせることが必要不可欠と言える。HiSOR-II の電磁石は、Fig. 4 に示すように偏向電磁石とその両端の4極電磁石がヨークを共有した一体型で、偏向電磁石は磁極に傾きを持たせ4極成分を発生し、磁極両端で6極成分を発生できる構造とし、4極電磁石は6極成分も発生できる構造となっている³⁾。このような一体型とする理由は、機能複合型偏向電磁石が作る磁場が非線形となり磁石の設置誤差が蓄積電子ビーム軌道の安定性に大きな影響を与えるので、これによるダイナミックアパチャーの減少を最小限に抑えるためである。Fig. 5 に HiSOR-II のラティスユニット当りの光学関数を示す。

Fig. 6 には HiSOR-II からの放射光輝度スペクトルを示す。この図には比較のために現在の HiSOR のスペクトルを細い線で描いている。HiSOR-II の偏向電磁石からの放射光の臨界エネルギーは457 eV である。これは、偏向電磁石の磁場強度を1.4 T としたためである。一方、ヘリカ



Fig. 3 Birdseye view of HiSOR-II accelerator complex.

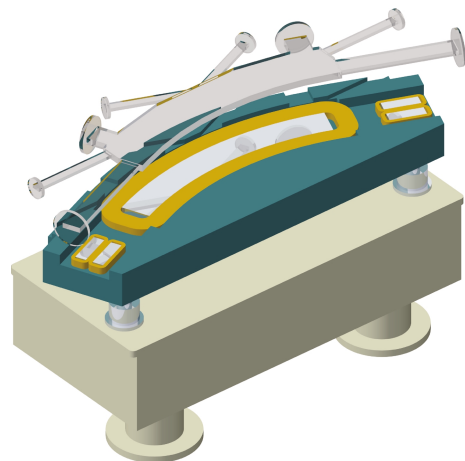


Fig. 4 Main magnet unit of HiSOR-II ring.

Table 1 Major parameters of HiSOR-II storage ring

| | |
|----------------------------------|------------------------|
| Beam energy [MeV] | 700 [MeV] |
| Circumference [m] | 40.079 |
| Bending radius [m] | 1.667 |
| Magnetic field of bending [T] | 1.400 |
| Betatron tune (ν_x, ν_y) | (3.761, 2.846) |
| Natural emittance [nmrad] | 13.6 |
| Chromaticity (ξ_x, ξ_y) | (+1.0, +1.0) |
| Momentum spread | 5.77e-04 |
| Momentum compaction factor | 0.032 |
| Bunch length [mm] | 19.5 |
| Harmonic number | 27 |
| RF frequency [MHz] | 201.962 |
| RF voltage [kV] | 200 |
| Touschek lifetime [min] | 40.7 |
| Straight sections | 3.4 m × 4 2.0 m × 4 |
| Injector | 700 MeV booster ring |

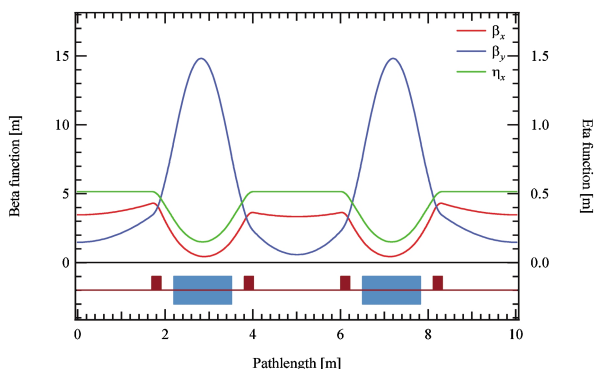


Fig. 5 Betatron and dispersion functions of storage ring.

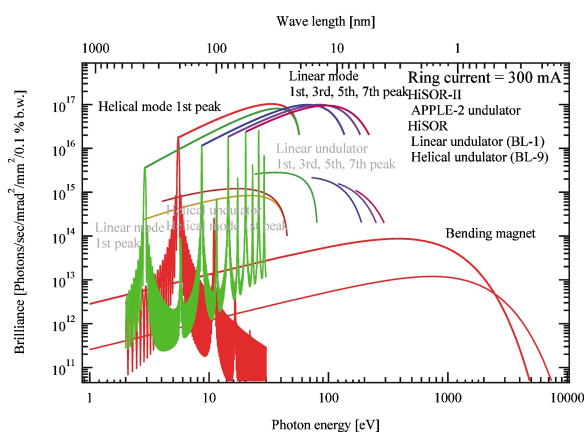


Fig. 6 Radiation spectra from HiSOR-II and HiSOR, both with 300 mA beam current. Bold lines and fine lines represent spectra from HiSOR-II and HiSOR, respectively.

ルアンジュレータのピーク輝度の包絡線がわずかに高エネルギー側にシフトしているのは、現在 HiSOR に挿入されている100-m 長のアンジュレータに替えて、同じ場所に周期長78-mm の APPLE 型可変偏光アンジュレータを挿入したと仮定したためである。

HiSOR-II の14 nm-rad というエミッタンスは1 GeV 以下の電子ビームエネルギーを持つ小型リングとしては非常に小さく、アンジュレータから放射される10 eV 以下の光子エネルギーの光に対しては、回折限界以下のエミッタンスである。このように小さな電子ビームバンチサイズでは、電子ビームの Touschek 寿命はカップリングを1% と仮定すると40分程度しかない。これは、Table 1 にある全てのバケットにバンチを置くマルチバンチ運転でトップアップ運転をしたとしても、3 Hz の周期でブースターシンクロトロンから入射を行う場合、全バンチを満たすためには9秒かかることを意味し、この間には入射効率が100% としても最初に入射したバンチの電荷量は0.37% も減ってしまう。

このような、利用研究にとって好ましくないのこぎりの歯状のビーム電流をより変動の少ない方向に変えるためには、カップリングを大きくしてビームの体積を増やし寿命

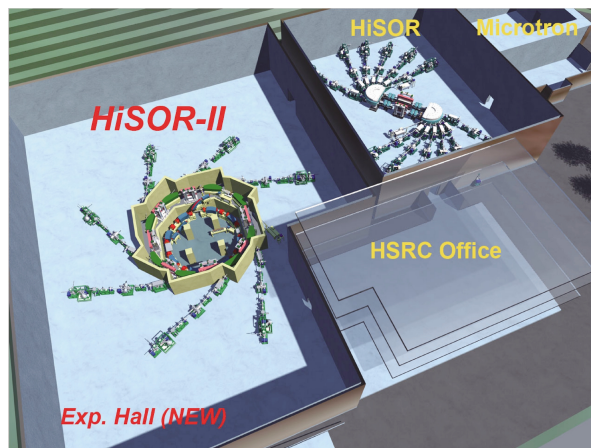


Fig. 7 A layout plan for accelerator complex at HSRC.

を延ばすことが考えられる。

Fig. 7 は、HiSOR-II リングを設置した施設全体の配置案のひとつである。

3. 小型放射光リングの新しい可能性

これまで、MAX-III のラティスを手本に詳細な検討を進めてきた HiSOR-II は、長短合わせて8ヶ所の挿入光源を設置可能な直線部を持つ周長約40 m のリングである。この8ヶ所の直線部の内、1ヶ所だけをパルス6極磁石⁴⁾などの最新の技術を取り入れてビーム入射を行えば、残り7ヶ所は挿入光源用に使用することが出来る。しかし、実際には RF 加速キャビティを別の直線部に設置する必要など、利用可能直線部の長さはさらに制限される。また、周長40 m 程度の小型リングでは、単バンチ運転を行ったとしてもバンチ間隔は133 nsec と極めて短く、例えば BESSY-II などの周長100 m を超す中型リングで先行研究が行われている ARTOF 型光電子分光装置⁵⁾を使った実験は不可能である。

以上の様な認識の下、我々は小型光源リングの更なる発展の可能性を検討してきた結果、本セクションに示すような新しい形態のラティスを小型光源リングに適用できることに気付いた⁶⁾。以下、その概要について述べる。

一般にシンクロトロン加速器などの円形加速器や蓄積リングでは、リング1周でビーム軌道が閉じるラティスになっている。つまり、リングの外周長とビーム軌道の周長は同一である。従って、小型リングでは必然的に周長が短くなり、光源リングでは挿入光源を設置可能な直線部の数と長さには制限が生じる。この問題を解決するには、電子ビームの軌道がリング1周で元の軌道に戻らず、リングを2周あるいは3周した後には軌道が閉じるようなラティスを作ればよい。加速器物理の固定観念を離れて、2周、3周して始点に戻る閉じた線分(無限軌道)の有無を考えると、最もポピュラーなものとしてメビウスの帯があるこ

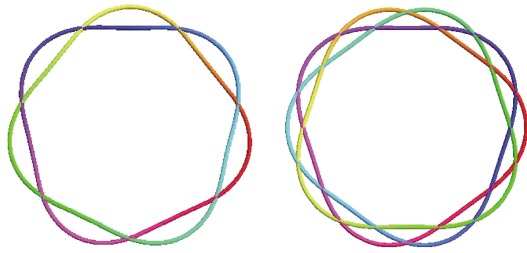


Fig. 8 Examples of (7,2) torus knot (left) and (10,3) torus knot (right).

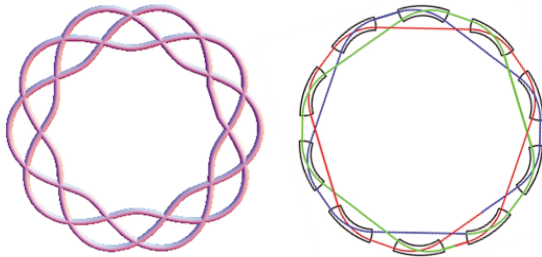


Fig. 9 Example of conversion from a projected torus knot to an accelerator lattice.

とに気付く。この概念を数学的に拡張したものがトーラスの結び目であり、概念上は何周でも多数回廻って元に戻る軌道を作ることが可能である。

Fig. 8 は、2 周および3 周廻って元に戻るトーラスの結び目の例を示す。

これらのトーラスの結び目を加速器ラティスに変換するには、トーラスの結び目を2次元平面に投影し、たとえば、2 周で閉じるトーラスの結び目では線分が交差する場所全てに、3 周で閉じるトーラスの結び目では外周の線分交差点にそれぞれ偏向電磁石を配置し、各電磁石間の軌道を直線で結ばばよい。Fig. 9 に平面に投影した(10,3) トーラスの結び目と、それから作った偏向電磁石配置を示す。

Fig. 10 に、HiSOR-II 用として実現可能性の高いラティスを示す。

このリングの偏向電磁石配置は正11角形の対称性を持ち、偏向電磁石間の11ヶ所の短い直線部とは別に、多角形の内側に挿入光源を設置可能な11ヶ所の長い直線部がある。さらに、このリングの外接円は半径は15 m 弱であり、外周長は約43 m であるが、電子軌道長は3 周廻って元に戻るので130 m の長さがある。

Fig. 11 に、このラティスの光学関数を示す。図の上部は、アンジュレータ直線部に分散を導入した低エミッタンスモードの光学関数であり、下部は直線部の分散をなくしたDBA モードの光学関数である。

Table 2 に新型ラティスを採用した場合のHiSOR-II リングの主要パラメータを載せる。

表中、直線部の長さは、外周の短いものについては、4 極電磁石間の長さ、内側の長いものについては、内側の軌

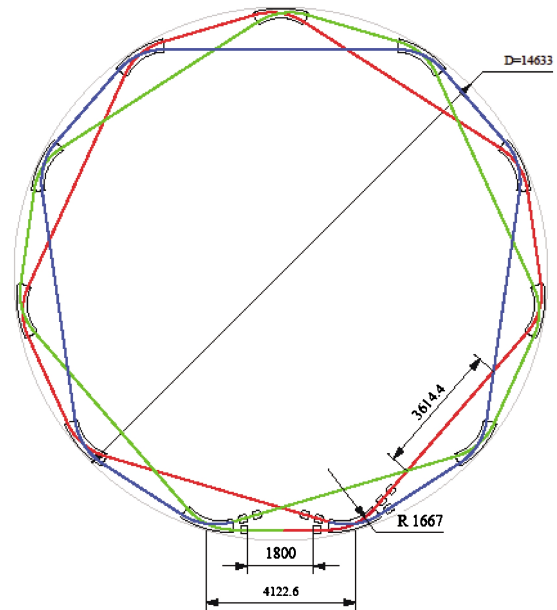


Fig. 10 Schematic drawings of new HiSOR-II lattice.

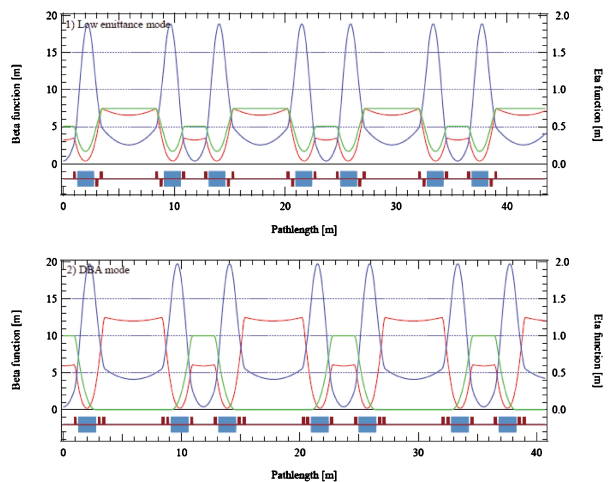


Fig. 11 Optical functions of new lattice.

Table 2 Major parameters of (11,3) Torus-Knot lattice for HiSOR-II

| | |
|----------------------------------|---------------|
| Total orbit length [m] | 130.3 |
| Circumference of one turn [m] | 43.4 |
| Diameter [m] | 14.6 |
| Straight sections | 3.6 m × 11 |
| | 1.8 m × 11 |
| Low emittance mode | |
| Lattice type | MAX-III type |
| Natural emittance [nmrad] | 17.3 |
| Betatron tune | (10.54, 6.76) |
| Double Bend Achromat mode | |
| Lattice type | DBA |
| Natural emittance [nmrad] | 34.5 |
| Betatron tune | (10.78, 6.93) |

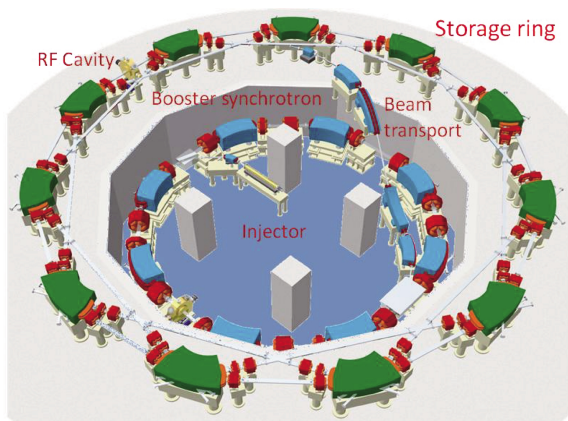


Fig. 12 Birdseye view of T-K lattice HiSOR-II accelerator complex.

道交差点間の長さであり、これらの長さより短い全長のアンジュレータやその他の加速器要素を挿入出来る。二つの異なったエミッタンスのオペレーションモードについては、リングのコミッションングやユーザー運転などの必要に応じて4極電磁石の動作点を変えることにより容易に変換することが可能である。

最後に、Fig. 12として(11,3) トーラスの結び目ラティスを持つHiSOR-IIの鳥瞰図を示す。

4. おわりに

現在のHiSORリングは、放射光利用研究への供用開始以来15年が経過し、これまでに固体物理学を中心とする物質科学の研究に役立ってきた。近年、高温超伝導体、トポロジカル絶縁体、表面スピンドルを示す物質などVUV領域の光を用いた光電子分光が強力なプローブとなる研究領域が相次ぎ出現し、加えて、自然円偏光2色性を利用した生体高分子の溶液中での振舞の研究などにも低エネルギー放射光源が有効に活用できることが世界的に認識され、

HiSORでも高輝度放射光へのニーズが急速に高まっている。

このような状況をふまえ、当センターの光源グループでは、放射光利用研究者の要望をふまえ次期計画の光源リングの詳細仕様を検討してきた。

本稿では、広島大学放射光科学研究センターの次期計画について二つのオプションの概略を述べた。最初のオプションについては、6年以上に渡り、学外の加速器専門家も含めて多くの研究者が検討を進めてきており詳細なプランが出来上がっている。後者の新しいアイデアを含むオプションについては、検討を始めてまだ1年に満たず、特に内部で電子ビーム軌道が交差する偏向電磁石などの加速器要素技術についてR&Dを進める必要がある。しかし、新型リングについても全ての加速器要素は既存の技術で製作可能であるため、放射光利用研究コミュニティからの強い要望があれば、技術的検討の必要な加速器要素のプロトタイプを製作し性能を確認出来次第、建設を開始することは可能であると考えられる。

いずれにせよ、現在の光源リングの老朽化による不具合が発生して、放射光利用研究に支障が出る前に新しい光源リングに更新することが望まれている。

参考文献

- 1) G. Blanac, et al.: Proceedings of EPAC2000, pp. 643, Vienna (2000).
- 2) HiSOR Activity Report 2010 (unpublished).
- 3) S. Hanada: "HiSOR-II用機能複合型電磁石の設計と補助コイルによる磁場の可変領域の評価", 修士論文, 広島大学理学研究科 (2011) (unpublished).
- 4) Y. Kobayashi, et al.: Proceedings of EPAC2006, pp. 3526, Edinburgh (2006).
- 5) R. Moberg, et al.: Poster presentation in VUVX2010 Conference, Vancouver, July, 2010.
- 6) S. Sasaki and A. Miyamoto: to be published elsewhere, and 第24回日本放射光学会年会, Tsukuba, January, 2011.

● 著者紹介 ●

**佐々木茂美**

広島大学放射光科学研究センター 教授

E-mail: sasakis@hiroshima-u.ac.jp

専門：放射光および自由電子レーザー用挿入光源，ビーム物理，加速器物理

【略歴】

1982年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系物性分野専攻，博士課程修了，工学博士，同年日本原子力研究所研究員（この間 SSRL/Stanford U へ1年間研究留学），1990年副主任研究員，1994年主任研究員（この間 APS/ANL にて客員研究員），1996年より海外の放射光施設 Advance Light Source/LBL (1996/4-1997/6)，Sincrotrone Trieste (1997/7-1998/10)，BESSY-II (1998/11-1999/12) を経て，1999-2008年まで Advanced Photon Source/ANL 研究職員，2008年10月より現職

**宮本 篤**

広島大学放射光科学研究センター 助教

E-mail: a-miyamoto@hiroshima-u.ac.jp

専門：加速器物理，ビーム物理

【略歴】

2005年東北大学大学院理学研究科物理学専攻 博士課程修了，理学博士，同年広島大学放射光科学研究センター助手，2007年より現職

The HiSOR Light Source Upgrade Plan at Hiroshima Synchrotron Radiation Center

Shigemi SASAKI

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

Atsushi MIYAMOTO

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

Abstract Hiroshima Synchrotron Radiation Center has a plan to construct a third-generation high-brightness compact light source ring aiming for further advancement of synchrotron radiation science in VUV and soft x-ray regime. Desired and expected features of new light source as well as the advanced new concept of accelerator lattice design are presented in this article.