

## 広島大学放射光科学研究センター光源加速器の現状

### PRESENT STATUS OF HiSOR

加藤政博<sup>#,A,B)</sup>, 島田美帆<sup>C,A)</sup>, 宮内洋司<sup>C,A)</sup>, Yao Lu<sup>A)</sup>, 後藤公德<sup>A)</sup>

Masahiro Katoh<sup>#,A,B)</sup>, Miho Shimada<sup>C,A)</sup>, Hiroshi Miyauchi<sup>C,A)</sup>, Yao Lu<sup>A)</sup>, Kiminori Goto<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

<sup>B)</sup> UVSOR, Institute for Molecular Science

<sup>C)</sup> KEK

#### Abstract

The synchrotron light source, HiSOR, at Hiroshima University's Synchrotron Radiation Research Center has been operating stably for about 25 years since it began operation in 1996. The annual beam time opened for users reaches 1,500 hours, and synchrotron radiation in the vacuum ultraviolet and soft X-ray regions is supplied to domestic and foreign researchers mainly in the materials and life sciences. The HiSOR accelerator consists of a 150 MeV injection microtron and a 700 MeV compact electron synchrotron. Although the electron synchrotron has a circumference of only 22 m, it has two straight sections where two undulators are operational. They generate vacuum ultraviolet light of high brightness. In addition, synchrotron radiation from normal conducting high field bending magnet of 2.7 T covers a wide spectral range up to tender X-rays. In recent years, the aging of accelerators has progressed, and their reliability has declined. On the other hand, compared to the latest synchrotron radiation sources, there is a significant decline in competitiveness in terms of performance. We are designing a new electron storage ring with moderately small size, much lower emittance and more straight sections for undulators. Also, we are examining utilization of the present accelerators as the injector for the new ring.

#### 1. はじめに

広島大学放射光科学研究センターは我が国において国立大学に建設された唯一の放射光源であるが、現在は共同利用・共同研究拠点として低エネルギー放射光を国内外の物質・生命科学を中心とする利用者に供給している。その中核である電子エネルギー700MeV 周長22mの小型ストレージリング HiSOR は、1996年の稼働以降、およそ四半世紀を越えて安定に稼働を続けている。共同利用のための年間のビームタイムは1500時間に及ぶ。しかし、最近では、加速器の老朽化による装置の信頼性の低下が進んでいる。その一方で、回折限界放射光源を目指して世界各地で建設が進められている最新の放射光源に比べて、光源性能面での競争力低下は著しい。利用者からのより高輝度な放射光への要望も高まっており、将来計画の検討を急いでいる。大学の施設として適正な規模ながら先端研究が行える一定の先進性と競争力を有する光源加速器を、適性の予算規模で実現することを目指している。

#### 2. 加速器の現状

HiSOR 光源加速器は、入射器である150MeV レーストラック型マイクロトロンと光源リングである700MeV 小型電子シンクロトロン(ストレージリング)からなる。加速器及び挿入光源の主要パラメータをTable 1に、また、施設の機器配置をFig. 1に示す。シンクロトロンはレーストラック形状であり、偏向部には180度偏向磁石が用いられている。この偏向磁石は常伝導磁石にもかかわらずビーム蓄積時の磁場強度が2.7Tと極めて高いことが大きな特徴で

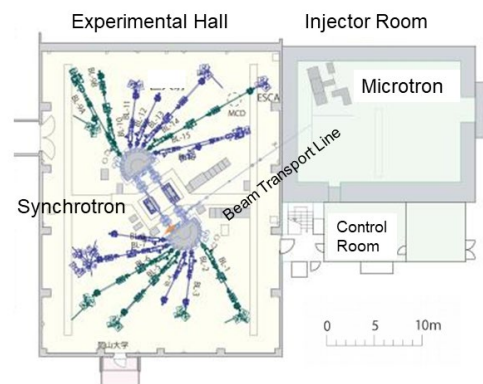


Figure 1: HiSOR accelerators and SR experimental hall.

あり、ビーム入射時においても磁場強度は0.6Tと比較的高く、これにより低エネルギー入射にもかかわらず放射減衰時間が短く2Hz程度の繰り返しでのビーム入射が可能となっている。強磁場を生成するための大型の偏向磁石は放射線の遮蔽の機能も有しており、きわめて合理的な設計となっている。低エネルギー放射光源であるが、強磁場偏向磁石からは真空紫外からX線に至る広い波長領域において十分な強度で放射光を供給できる。2つの直線部には直線偏光型と可変偏光型の2台のアンジュレータが設置されており、真空紫外線領域の高輝度放射光を供給している。放射光は偏向磁石ヨークに設けられた16個の穴を通して実験装置に導かれる。

建設当初から加速器の基本構成は変わっておらず、日常的な運転調整手法はほぼ確立されており、少人数

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

の職員での運転維持管理に難しい点はない。きわめて合理的な設計である一方、新しい技術を導入するための余地がほとんどない。また、180 度偏向電磁石 2 台で構成されるラティス構造では必然的に電子ビームエミッタンスが非常に大きく、400nm-rad である。現在のラティスではこのエミッタンスは概ね限界に近く、オプティクスの変更による低エミッタンス化の余地はない。

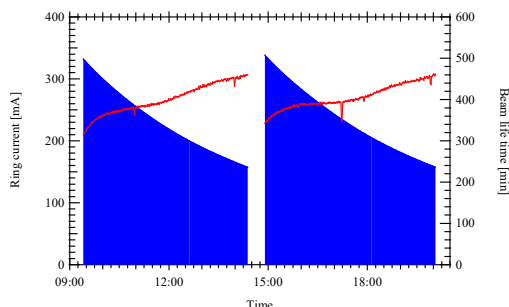


Figure 2: Typical operation pattern in a day.

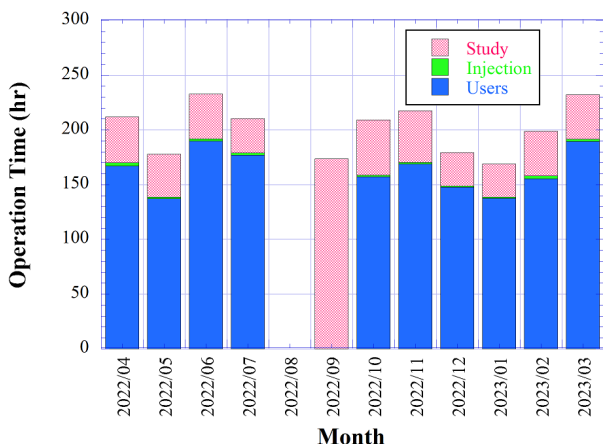


Figure 3: Operation statistics in FY2022.

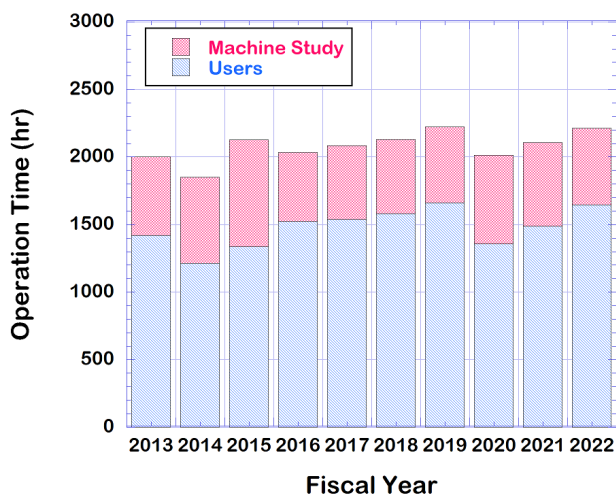


Figure 4: Operation time in the past 10 years.

加速器の運転は毎週月曜日の調整運転、マシンスタディに始まり、火曜日から金曜日は放射光利用にあてられる。放射光利用では午前 9 時と午後 2 時半の 2 回入射が行われ、夜 8 時に運転を終了する。150MeV の電子ビームを約 350mA まで入射したのち、700MeV まで加速する。入射・加速に関わる作業は通常 30 分程度で終了する。入射中、放射光利用者は実験ホールから退出する必要がある。一日の典型的な運転パターンを Fig. 2 に示す。年間運転スケジュールは、8 月に 1 か月間運転を停止し、保守点検作業を行う。9 月に調整運転、10 月から運転再開というものである。

2022 年度の月単位の運転時間の推移を Fig. 3 に示す。また最近数年間の年間運転統計を Fig. 4 に示す。2022 年度交換から 2023 年度前半については、大きな故障などはなく順調に運転されている。昨年度より中期的な老朽化対策について、メーカーを交えた検討を行っており、故障発生時に復旧に時間を要する装置の洗い出しを行い、優先順位を付けて更新を進めていくこととなった。

Table 1: Main Parameters of HiSOR Accelerator

Circumference	21.95 m (Racetrack)
Bending radius	0.87 m
Beam energy (Inj.,Str.)	(150, 700) MeV
Magnetic field(Inj.,Str.)	(0.6, 2.7) T
Injector (Microtron)	150MeV, 2Hz, 2mA, 2μsec
Betatron tune (H,V)	(1.72, 1.84)
RF frequency	191.244 MHz
Harmonic number	14
RF voltage	200 kV
Stored current	300 mA
Natural emittance	400 nmrad
Beam life time	~10 hours@200 mA
Critical wavelength	1.42 nm
Undulators	(length, period, max. B)
Linear undulator	2.35m, 57mm, 0.41T
APPLE-II undulator	1.85m, 78mm, (H)0.86, (V)0.59, (C)0.50 T

### 3. 将来計画

HiSOR 加速器は、極めてコンパクトであること、また、運転維持管理の容易さ、放射線防護の容易さなど、大学の放射光センターの限られたマンパワーで長期にわたり安定な運用を継続するための数多くの優れた特徴を持っている。一方、コンパクトさや無駄のない合理的な設計であるが故に、既存装置の改良・高度化の余地はない。このため将来計画として、全く新しい光源加速器を建設する方向で検討が行われてきた。比較的最近の案では、周長約 50m、電子エネルギーは 500MeV で真空紫外領域の高輝度アンジュレータ光の利用で施設としての特長を出す方向である[1]。現在の HiSOR では不可能なトップアップ運転を実現するためにフルエネルギー入射器の新規建設も含まれている。しかし、このような完全

な新規施設の建設が容易に認められる状況ではない。今後の状況に柔軟に対応できるよう、代替案の検討も進めている。

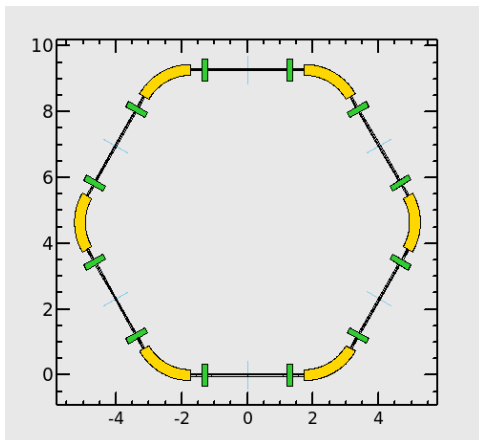


Figure 5: An example of the design of HiSOR-2.

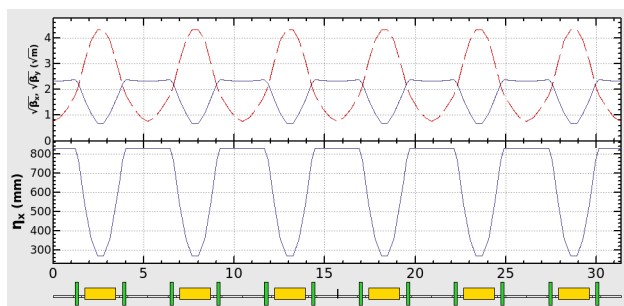


Figure 6: An example of the optics of new HiSOR-2.

建設コストの大幅な低減は計画の実現可能性を飛躍的に高めると考えられる。このため、既設加速器の入射器への転用や既存建屋の可能な限りの再利用など、様々な可能性を検討している。小型放射光源における次期計画の進め方では、MAX-II[2]や ASTRID-2[3]など、旧ストレージリングを新リングへの入射器に転用する例がある。このような場合、早い加速繰り返しは困難であるものの、フルエネルギーの入射器を安価に入手できるという点は大きな魅力である。HiSOR-2 のビームエネルギーを 500MeV とすると、現在の HiSOR の最大エネルギー 700MeV よりも低いことから、フルエネルギー入射器として利用できる可能性がある。もともと HiSOR の電磁石は 700MeV では強く飽和した状態であるが、500MeV であれば極端な飽和ではなく、励磁電流値も大幅に下がることから、入射エネルギーの 150MeV からの加速時間も短くなるのが期待される。

ストレージリング本体も、より小型化する方向で設計を進めている。Figure 5、Fig. 6 に設計例を示す。電子ビームエネルギー 500MeV、周長約 30m で直線部 6 本を確保する。リングの直径は現在の HiSOR の長軸と概ね同じである。コンパクトさを実現するために磁石は全て複合機能型とする必要がある。また、ビーム寿命の確保のために高調波空洞の利用、トップアップ運転の導入は必須である。これらは今後の検討課題である。

エミッタンスは 17nm-rad が達成できる見通しであり、これは現在の HiSOR の約 1/20 でありアンジュレータ放射光の輝度は大幅な向上が期待できる。一方、現状の HiSOR の大きな特徴の一つである軟 X 線領域を広くカバーできる広帯域性は失われることになる。この点は、今後の本施設における利用研究の方向性に大きく影響することから、慎重な検討が必要であると認識している。

近年、電力料金の高騰により加速器運転時間が制限される例が出てきている。省エネルギーは次期計画の設計で極めて重要と考えている。また、加速器機器の製作コストも高騰している。Figure 5 に示すラティス案は、複合機能型磁石の採用により電磁石数そのものを少なくする案となっているが、これに加えて、永久磁石の採用により電力消費量を低減することを検討している[4]。遠隔監視や機械学習の導入による運転調整・故障診断の自動化による省力化も持続可能な次世代加速器に必須と考えている。

#### 4. まとめ

HiSOR は極めて安定に可動を続けているが、稼働後四半世紀超が経過し、施設全体の老朽化に加え、世界各地で建設の進む新光源に比較しての競争力の低下が深刻となってきている。ストレージリングが極めて合理的で完成度の高い設計であるがゆえに冗長性がなく、改良や新技術導入が困難であり、既存の加速器に改良を加えることでの高度化の可能性は見出せていない。次期計画として現在のおよそ 2 倍となる周長約 50m の新しい光源リングと専用入射器の建設を提案してきたが、その実現は容易ではない。大学の加速器施設として適正な予算規模で次期計画を実現するためには、既存の加速器や周辺設備も有効活用することで建設費の低減が不可欠と考えている。また、多数の放射光源が稼働している我が国において、大学が保有する放射光源に求められる役割を十分に考慮したうえで設計検討を進める必要があり、国内外の放射光分野の動向を慎重に見極めながら次期計画の検討を進めていきたい。

#### 謝辞

HiSOR の日常運転業務に多大なる貢献をしている広島大学放射光科学研究センターの利用系の教職員に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] S. Matsuba *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 1350, 012015 (2019).
- [2] G. LeBlanc *et al.*, Proc. EPAC'96, 345 (1996).
- [3] S.P. Møller *et al.*, Proc. iPAC2013, 64 (2013).
- [4] Y. Lu *et al.*, "Design of a Combined-Function Quadrupole-Sextupole Magnet for HiSOR-II", PASJ2023, Funabashi, Japan, Sep. 2023, TUP16, this meeting.