

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^{#, A, B)}, 島田美帆^{C, A)}, 宮内洋司^{C, A)}, 後藤公徳^{A)},
Masahiro Katoh^{#, A, B)}, Miho Shimada^{C, A)}, Hiroshi Miyauchi^{C, A)}, Kiminori Goto^{A)}

^{A)} Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

^{B)} UVSOR, Institute for Molecular Science

^{C)} KEK

Abstract

HiSOR, a 700 MeV compact synchrotron light source in Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University has been operated stably in the second half of FY2020 and the first half of FY2021. The operation time for users is usually about 1500 hours, however, in FY2020, it was about 1400 hours because the users' operation was canceled in May, due to the COVID-19 pandemic. Although the machine is stably operational, to meet the growing demands for brighter synchrotron light, an upgrade plan is being considered.

1. はじめに

広島大学放射光科学研究センターは放射光の共同利用・共同研究拠点である。150 MeV の入射用マイクロトロンと 700 MeV の小型電子シンクロトロンからなる HiSOR 加速器は、1996 年の稼働以降、およそ 25 年にわたり安定に稼働を続けてきた。共同利用のための年間のビームタイムは 1500 時間に及び、真空紫外・軟 X 線領域の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研究者に供給している。しかし、最近では、加速器の老朽化や競争力低下が懸念され、一方で、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。

2. 加速器の現状

HiSOR 光源加速器は、入射器である 150 MeV レーストラック型マイクロトロンと光源リングである 700 MeV 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 2.7 T と極めて高いことが大きな特徴であり、ビーム入射時においても磁場強度は 0.6 T 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 2 Hz 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。

放射光源としては低電子エネルギーであるが、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。また、小型のリングであるが 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。

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。週末及び祝日は運転を休止する。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。150 MeV の電子ビームを約 350 mA まで入射したのち、700 MeV 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。加速器の運転には大学教員・技術職員が交代で当たっているが、加速器の専門家でなくてもマニュアルに従って運転でき

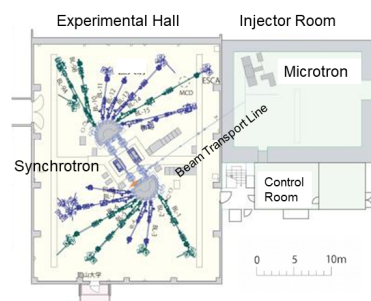


Figure 1: HiSOR accelerators and SR experimental hall.

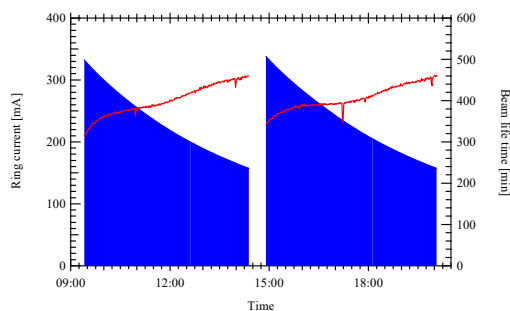


Figure 2: Typical operation pattern in a day.

[#] mkatoh@hiroshima-u.ac.jp

るように制御システムが整備されている。

アンジュレータの更新を除くと、近年は加速器本体の大幅な改造・高度化は行っておらず、老朽化対策を順次進めている。2012年から2014年の間、偏向部の真空リークに悩まされたが、原因となった放射光アブソーバの更新により、その後は特に重篤なトラブルはなく順調に運転できている。

通常の年間運転スケジュールは、8月に運転停止し、保守点検作業を行い、9月に調整運転、10月から運転再開というものであるが、2020年度に限り大学の計画停電が例年の8月末から11月中旬に変更になったことから、11月を運転停止、12月を立ち上げ調整と変更した。例年、長期シャットダウン後に1か月近い立ち上げ調整期間を確保しているが、これは偏向部の真空排気にクライオポンプを用いていることから、保守点検時の昇温の際の真空悪化の影響からの回復のためである。これに加えてCOVID-19の影響により利用者の来学が困難となったことから4月、5月の運転を一時停止した。2020年度の月単位で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。

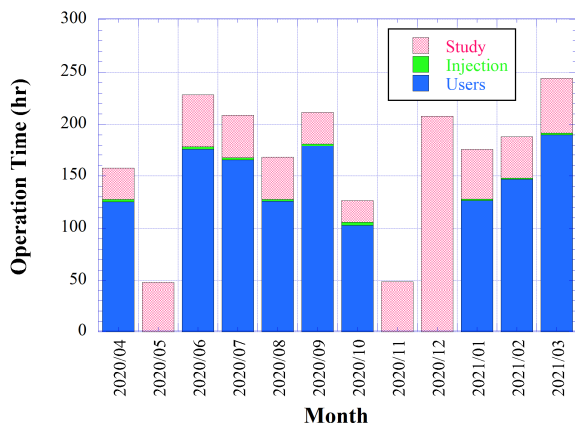


Figure 3: Operation statistics in FY2019.

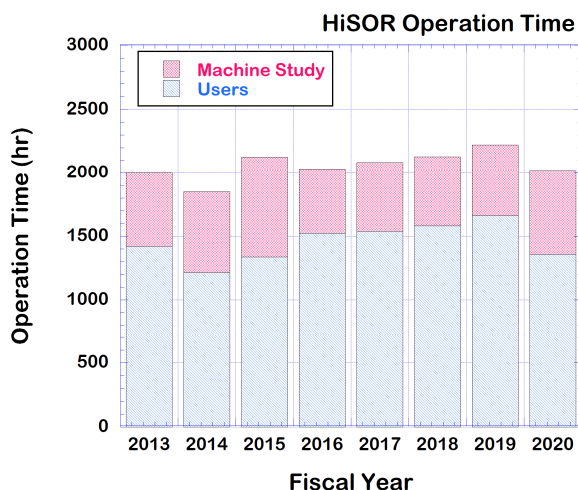


Figure 4: Operation time in the past 7 years.

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、数多くの優れた特徴を持っている。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が実現されてきたことは、この加速器の基本設計に負うところが大きい。一方、学術研究用の装置としてみた場合、コンパクトさや無駄のない設計により、新しい加速器技術や放射光源技術を導入することが極めて困難となっている。一例をあげれば、近年多くの放射光施設ではトップアップ運転、すなわち間欠的なビーム入射による近似的な一定電流運転が行われている。しかし HiSOR は低エネルギー入射に特化されており、トップアップ運転の導入は実際上不可能である。

また放射光の輝度を決める重要な要因である電子ビームのエミッタンスは第2世代光源としてもかなり大きく、第3世代光源との比較でおよそ二桁、近年稼働を始めた第4世代光源との比較では三桁大きい値となっている。国内外でも第2世代光源の多くではラティスの改造などにより低エミッタンス化が行われてきている。一般にシンクロトロンのエミッタンスは偏向磁石の分割数に強く依存するが、HiSOR においては2台の180度偏向磁石という条件下で既にエミッタンスはほぼ最適化されており、ビーム収束系の改良による改善の余地はない。

直線部2本は既にアンジュレータや入射、高周波加速装置などで占められており、また、放射光取り出し口もヨークに設けられた貫通孔の径で制約されているなど、ボトムアップ的な光源開発研究や加速器技術開発研究を進める余地がない。

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) | 150 MeV, 2 Hz, 2 mA, 2 μsec |
| 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 | 2.35 m, 57 mm, 0.41 T |
| APPLE-II undulator | 1.85 m, 78 mm, (H)0.86, (V)0.59, (C)0.50 T |

以上のような理由により、将来計画は既存装置の改良・高度化ではなく、全く新しい光源加速器を建設する方向で計画が練られてきた [1]。現在の施設の方針としては、将来においても、これまで重点的に取り組んできたアンジュレータからの高輝度光の物性研究への展開が研究活動の中心となるとされており、電子ビームの低エミッタンス特性や多数のアンジュレータが設置できることなどが将来計画における優先的な要求事項となっている。このため、周長は 50 m 程度と現状の 2 倍以上と大きく、一方で、電子エネルギーは 500 MeV と現状よりも低い設計となっている。

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針の一方で、現在の HiSOR の放射光の X 線領域まで延びる広帯域特性は、幅広い研究分野への応用展開を可能とするという点で大学の保有する放射光施設が維持すべき重要な光源特性と考えられる。現在の将来計画案の 500 MeV のエネルギーで現状と同等の X 線強度を出すには超伝導磁石の導入が必要となる。

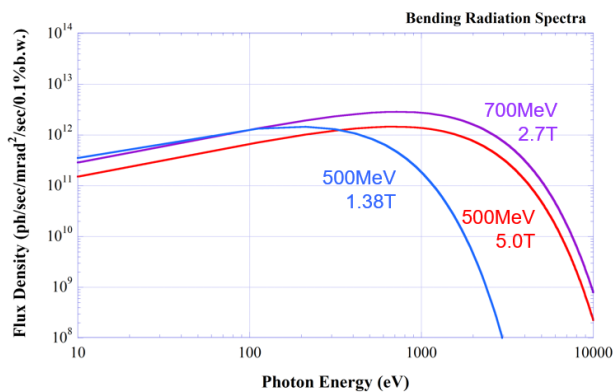


Figure 5: Synchrotron radiation spectra from normal conducting and super conducting magnets.

超伝導磁石は、かつては挿入光源の一種であるウィグラに専ら用いられてきたが、近年では偏向電磁石の一部を超伝導磁石とする例も出てきている [2, 3]。これらの施設では、液体ヘリウムを用いない直接冷却方式の超伝導磁石が用いられており、超伝導磁石の運転維持管理は格段に容易になっている。また、超伝導ウィグラでも直接冷却方式を用いる例も出てきている [4]。これらの磁石では 4 T から 5 T の磁場が安定に実現できている。500 MeV のリングに 5 T の超伝導電磁石を導入することで、現状の HiSOR の偏向磁石と同等の広帯域性を実現できる可能性がある (Fig. 5)。

4. まとめ

HiSOR は数年前の冷却水漏れ事故を乗り越え、現在は、安定に可動を続けている。しかし、稼働後約 25 年が経過し、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。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、改良や新技術導入は極めて困難である。現在のおよそ 2 倍となる周長約 50 m の新しい光源

リングの建設を目指しているが、これを大学の加速器施設として適正な予算規模で実現するためには、既存の加速器や周辺設備も有効活用しながら実現を目指す必要があると考えている。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ると考えている。

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る。

参考文献

- [1] S. Matsuba *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 1350, 012015 (2019).
- [2] D. Robin *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A 538 (2005) 65.
- [3] Y. Takashima *et al.*, Proc. IPAC2016, 2877-2879, (Busan, Korea, 2016).
- [4] S. Koda *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 32.