

広島大学放射光科学研究所光源加速器の現状

PRESENT STATUS OF HiSOR

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

^{A)} HiSOR, Hiroshima University

^{B)} UVSOR, Institute for Molecular Science

^{C)} KEK

Abstract

The synchrotron light source, HiSOR, at Hiroshima University has been operating stably for about 30 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. In recent years, the aging of accelerators has progressed, and their reliability has declined. Particularly, in 2024, vacuum leakage took place several times and the users operation has been canceled for several months. We are proposing construction of a new storage ring, HiSOR-2, which would be a high brightness VUV light source.

1. はじめに

広島大学放射光科学研究所は2024年度より放射光科学研究所と改名された。我が国において国立大学に建設された唯一の放射光施設であるが、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、四半世紀を越えて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く、光源の高度化・更新を急ぐ必要に迫られている。大学の施設として適正な規模ながら先端研究を行うことのできる一定の先進性と競争力を有する光源加速器を、適正な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。施設の機器配置をFig. 1に示す。ストレージリング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。

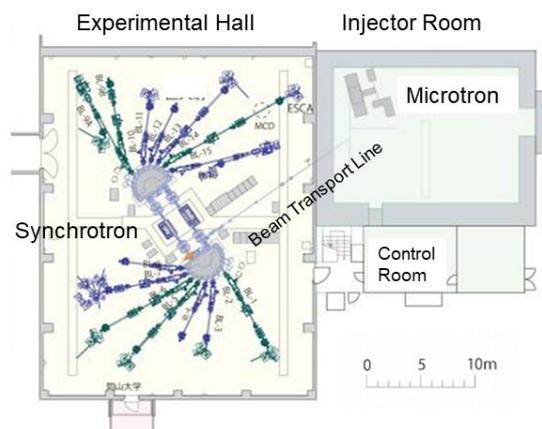


Figure 1: HiSOR accelerators and SR experimental hall.

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、少人数の職員での運転維持管理に基本的な困難はない。ユーザー運転期間中の加速器立ち上げ・停止作業やビーム入射作業には、ビームライン担当職員も参加している。ストレージリングは極めてコンパクトで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、400 nm-radである。現在のラティスではこのエミッタンスは概ね理論限界に近く、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。

mkatoh@hiroshima-u.ac.jp

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。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。通常の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。

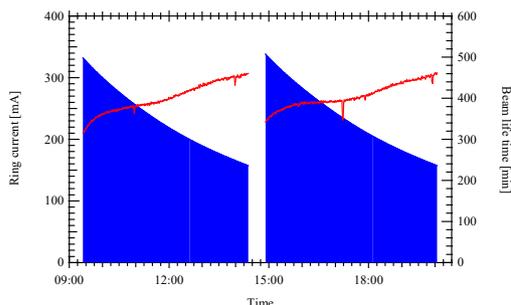


Figure 2: Typical operation pattern in a day.

2023 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。2023 年度前半については、大きな故障などではなく順調に運転されてきたが、2023 年度後半から 2024 年度にかけて重篤な真空事故が続けて発生し、数カ月にとり定期的なユーザー運転が行えない状況となった。

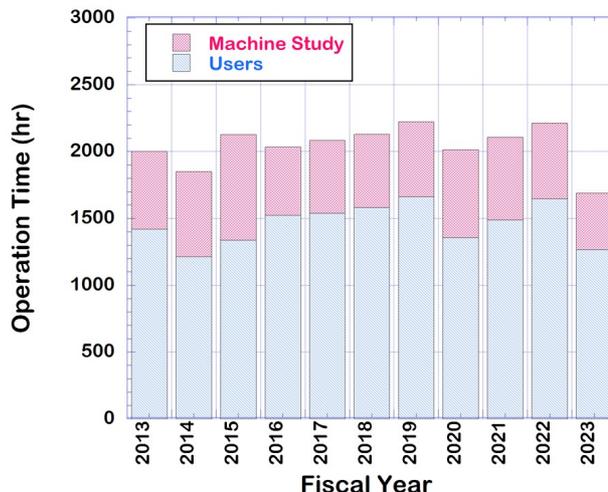


Figure 4: Operation time in the past 11 years.



Figure 3: Operation statistics in FY2023 and FY2024.

HiSOR の偏向部の真空ダクトは強磁場中で発生する放射光のうちビームラインに取り出す分以外をダンパー（放射光アブソーバ）と呼ばれる水冷銅製部品で受け止めている[1]。2024 年 1 月にその冷却水路から超高真空側へ冷却水が漏れた。ダンパーを取り外し漏水箇所を補修し、真空の再立ち上げと放射光照射による真空調整運転を進めた。ところが今度は 4 月に、高周波加速空洞において冷却水が超高真空側へ漏れだすという事故が起きた。冷却水用銅パイプからの漏れであった。これも現地に於て補修し、再度加速器の立上げ作業を進めていたところ 6 月になってダンパーから再度水漏れが発生した。1 月の水漏れ箇所から 10 cm 程離れた場所からの漏れであった。超音波検査により一定範囲で冷却水路の肉厚が著しく減少していることが認められたため、広範囲を補修し再度立上げを進めている。このような状況であり、1 月以降およそ半年にわたって定期的なユーザー利用ができない状況が続いている。

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作業をはじめたばかりであり、上記のダンパーも更新機器の一覧には挙がっていたが一足遅れた形となった。このダンパーは約 10 年前にも同様な事故が起き、その際に新品に更新しているが、それから 10 年後に再度冷却水漏れが発生したということになる。今回の補修は応急的なものであり、近い将来、新品に交換する必要がある。その際には、構造や製作法の見直しが必要であると考えている。

3. 将来計画

HiSOR 加速器は、極めてコンパクトな設計であり、運転維持管理や放射線防護が簡便・容易であるなど、大学の研究施設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・高度化の余地がない。このため将来計画としては、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[2, 3]。大学の施設として適正な規模とするために周長は 50 m 以下を目指している。また、電子エネルギーは 500 MeV と低くし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。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も必要と考えている。言うまでもないが、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。今後の我が国における放射光科学を状況に柔軟に対応できるように、様々な代替案・合理化案の検討も進めている。

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を検討している。複合機能型電磁石の積極的な採用によりできるだけストレージリングを小型化しつつ、電子ビームエネルギー 500 MeV、エミッタンスは 15 nm 程度かそれ以下を目指している。これにより真空紫外領域では世界最高水準の高輝度放射光の発生が可能となる。アンジュレータは現在の HiSOR の 2 台から 4 台へと倍増する。

消費電力の低減も今後の加速器施設には強く要求される事項であり、磁石には永久磁石を積極的に採用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。大学の加速器施設であり、今後、加速器分野の人材育成と絡めてこれらの開発研究に取り組んでいきたいと考えている。

4. まとめ

HiSOR は極めて安定に可動を続けてきたが、稼働後四半世紀超が経過し、施設全体の老朽化による重篤な故障も発生しており、特に 2024 年は数カ月にわたり定常的な共同利用が停止しており、早期の復旧を急いでいるところである。一方で、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は一段と深刻となってきた。現在のストレージリングは極めて合理的で完成度の高い設計である。それ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。次期計画としてビームエネルギー 500 MeV、周長 50 m 以下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の有効活用による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さらに進めていきたい。

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] K. Yoshida *et al.*, J. Synchrotron Rad. (1998). 5, 345-347.
- [2] S. Matsuba *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 1350, 012015 (2019).
- [3] M. Katoh *et al.*, Proc. PASJ 2023, TFSP01, p.1064 (2023).
- [4] Y. Lu *et al.*, "Research and development of an electric/permanent hybrid magnet", Proc. PASJ 2024, Yamagata, Japan, Aug. 2024, WEP052, this meeting.