

HiSOR の現状

PRESENT STATUS OF HiSOR

John Christian^{A)}, 島田美帆^{C, A)}, 宮内洋司^{C, A)}, 後藤公德^{A)}, 加藤政博^{#, A, B)}

Christian John^{A)}, Miho Shimada^{C, A)}, Hiroshi Miyauchi^{C, A)}, Kiminori Goto^{A)}, Masahiro Katoh^{#, A, B)}

^{A)} HiSOR, Hiroshima University

^{B)} UVSOR, Institute for Molecular Science

^{C)} KEK

Abstract

We report on the status and upgrade plans for HiSOR, the synchrotron radiation facility at Hiroshima University. Operational since 1996, HiSOR is a compact source of soft X-ray and EUV light, having supported 155 external users in FY2024, 27 % of whom were international researchers. However, the system is increasingly challenged by its aging infrastructure. Since January 2024, three water leaks have been recorded within just 6 months. Each incident occurred in the ultra-high vacuum section, resulting in extended operational downtimes. In late 2024, damage to the tuner of the RF cavity led to a three-month stop of user's time. Further minor issues disrupted routine beam injections in spring 2025. Ongoing malfunctions are expected, posing a threat to the facility's competitiveness and accessibility. To address these challenges, we are considering a major upgrade focused on redesigning the storage ring. Current plans include compact and low emittance magnetic lattice with combined-function magnets, double RF system and a full energy injector.

1. はじめに

広島大学放射光科学研究センターは 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 700 MeV 周長 22 m 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 150 MeV レーストラック型マイクロtronと光源リングである 700 MeV 小型電子シンクロtron(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tron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するなど、きわめて合理的な設計となっている。HiSOR は低エネルギー放射光源であるが、この強磁場の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。

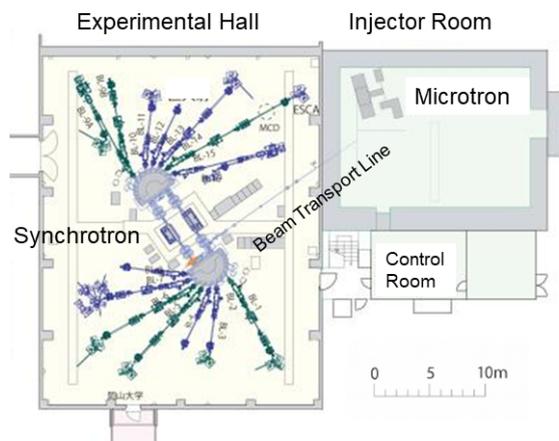


Figure 1: HiSOR accelerators and SR experimental hall.

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、ビームラン担当職員も参加している。極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

mkatoh@hiroshima-u.ac.jp

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。

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 2 時半の 2 回入射が行われ、夜 8 時に運転を終了する。現在は、150 MeV の電子ビームを約 275 mA (最大: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

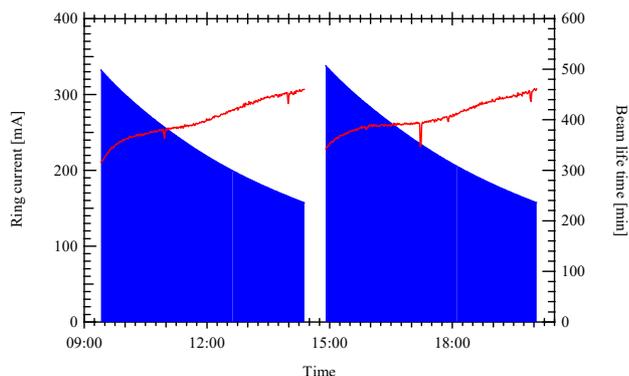


Figure 2: Typical operation pattern in a day.

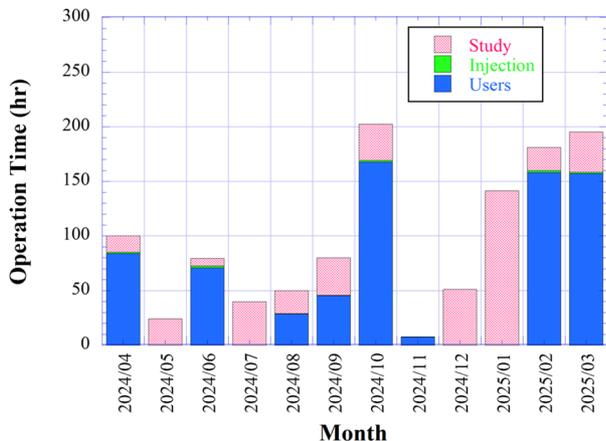
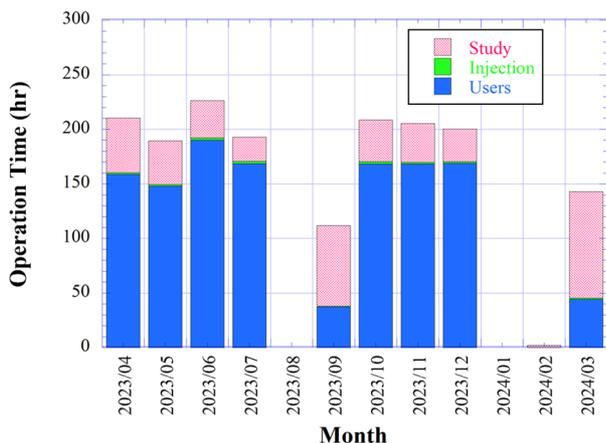


Figure 3: Operation statistics in FY2023 and FY2024.

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。

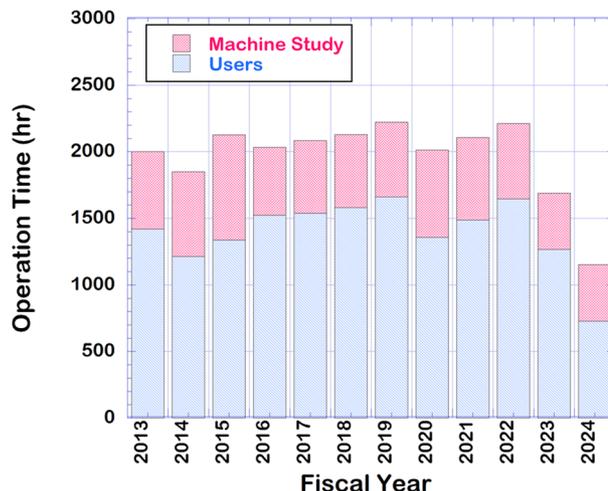


Figure 4: Operation time in the past 12 years.

2023 年度と 2024 年度の月単位の運転時間の推移を Fig. 3 に示す。また最近約 10 年間の年間運転統計を Fig. 4 に示す。2023 年度前半までは、大きな故障など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、数カ月にとり定常的なユーザー運転が行えない状況となった。

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。これも現地で補修し、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常的なユーザー利用ができない状況が続いた。

2024 年 11 月に RF 空洞のチューナーが故障した。チューナー可動部に取り付けられたコンタクトフィンガーが経年劣化により破損し、これが放電を引き起こした。2024 年 12 月に RF チューナーを交換し、2025 年 1 月には立上調整作業を実施した。その後、同年 2 月中旬以上、定常運転を再開した。

これらの重大な故障に加えて、通常のビーム入射中にも軽微なトラブルが散発的に発生し、短時間の遅延を引き起こした。また、蓄積ビーム電流値やビーム寿命が以前に比べて低下しているという問題も生じている。これらの積み重ねにより、装置の稼働率はおよそ 1 年近く極

端に低下した。その様子は Fig. 3, Fig. 4 にされている。

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作業を始めていたところであり、上記のダンパーも更新機器の一覧には挙がっていたが、対応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、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。なお、放射光源加速器では放射光を吸収するためのアブソーバ (HiSOR ではダンパーと呼んでいる) は一般的に用いられているものであり、それらは水冷されていることから、冷却水の超高真空側へのリークというも歴史の長い施設ではときどき起きる事故である。HiSOR では偏向部の真空系がベーキングに対応した設計になっていないこと、クライオポンプというシクロトロンでは一般的なでない排気装置を採用していることで事故発生後の真空の立上げに時間がかかり、これが長期の施設利用停止に繋がってしまったという面があり、今後の検討課題として浮かび上がった。

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。電子エネルギーは 500 MeV 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ったが、偏向磁石からの放射の軟 X 線領域での利用も考慮し、最新の案では 600 MeV としている。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。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 600 MeV、周長 44 m、エミッタンスは 15 nm-rad 程度かそれ以下を目指している[4]。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。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[5]。さらには加速器からの放射線の効率的な遮蔽による建設コストの低減などの検討も進めている[6]。大学の加速器施設であり、次期計画へ向けた開発研究は卒業研究や大学院生の研究テーマとして取り上げているものも多い。加速器分野の人材育成を図りつつ、次期計画の実現を目指したいと考えている。

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。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 600 MeV、周長 44 m の新しい光源リングと専用入射器の建設を提案しているが、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、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る、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所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] T. Narai *et al.*, “小型放射光源のための複合機能型電磁石の開発”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug., 2025, THP058.
- [5] K. Sawada *et al.*, “オートエンコーダー法によるビーム位置検出器データの分析の試み”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug., 2025, THP068.
- [6] R. Murayama *et al.*, “小型放射光源における放射線発生の研究”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug., 2025, WEP029.