

あいち SR 光源加速器の現状 2025

PRESENT STATUS OF ACCELERATORS OF AICHI SYNCHROTRON RADIATION CENTER IN 2025

藤本将輝^{#, A, B)}, 岡島康雄^{A, B)}, 金木公孝^{A, B)}, 高嶋圭史^{A, B)},
堀米利夫^{B)}, 岸田 守^{C)}, 廣瀬敏也^{C)}, 森里邦彦^{C)}, 郭磊^{D)}, 加藤政博^{E, F, A)}, 國枝秀世^{B)}
Masaki Fujimoto^{#, A, B)}, Yasuo Okajima^{A, B)}, Kimitaka Kaneki^{A, B)}, Yoshifumi Takashima^{A, B)}, Toshio Horigome^{B)},
Mamoru Kishida^{C)}, Toshinari Hirose^{C)}, Kunihiko Morisato^{C)}, Lei Guo^{D)}, Masahiro Katoh^{E, F, A)}, Hideyo Kunieda^{B)}

^{A)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

^{B)} Aichi Synchrotron Radiation Center

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd.

^{D)} ADSE, Hiroshima University

^{E)} HiSOR, Hiroshima University

^{F)} UVSOR, Institute for Molecular Science

Abstract

Aichi Synchrotron Radiation Center (AichiSR) was established by cooperation of universities, research institutes, industries, and the local government of Aichi Prefecture. Since the start of its public use on March 26, 2013, the facility has been providing synchrotron radiation primarily for industrial applications. AichiSR consists of a 50 MeV linac, a 1.2 GeV booster synchrotron, and a 72 m circumference 1.2 GeV storage ring operating in 300 mA top-up mode. Currently, twelve beamlines are in operation, including two company-owned beamlines and one university-owned beamline. The total operating time of the accelerators in FY2024 was 1,808 hours, with 1,141 hours for user operation. Several serious troubles attributed to aging of the facility after more than ten years of operation caused week-long shutdowns, and the operation rate was reduced to 90.8%. We report on the operational status, major troubles, and recent progress in accelerator development at AichiSR.

1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター(以下、あいち SR)は、愛知県の科学技術政策「知の拠点あいち」計画における中核施設として、中部地方を拠点とする大学、研究機関、産業界および愛知県の協力により建設され、(公財)科学技術交流財団の運営によって2013年3月より産業利用を主軸とした放射光の提供を行っている[1-7]。

あいち SR は開所以来、産業利用を中心としつつ、大学や公的研究機関による基礎・応用研究にも広く活用されてきた。供用開始当初のビームラインは6本であったが、現在では2本の企業用および1本の大学専用を含む計12本のビームラインが稼働している。2024年度における加速器の総運転時間は1,808時間であり、放射光ユーザーの利用時間は1,141時間であった。2024年夏期よりブースターシンクロトロン(RF)導波管焼損事故をはじめとした老朽化に起因するトラブルで週単位の運転停止が相次いだため、計画されたユーザー利用時間に対して約121時間の運転ロスが生じ、稼働率は90.8%まで低下した。地域産業界における先進的な開発支援を行う施設として、安定した運転の維持が求められている。

本報ではあいち SR 光源加速器の現状として、2024年度の運転状況、主要な加速器トラブル対応および最近の光源開発への取り組みについて報告する。

2. 光源加速器およびビームライン

あいち SR 光源加速器は、50 MeV 直線加速器、1.2 GeV ブースターシンクロトロン、1.2 GeV 蓄積リングから構成される。蓄積リングは周長 72 m、ラティス構成は Triple-bend の 4 回対称であり、ユニットセルの 3 台の偏向電磁石のうち両端の 2 台は磁場強度 1.4 T、偏向角 39° の常伝導電磁石であるが、中央の 1 台はピーク磁場 5 T、偏向角 12° の超伝導電磁石であり、比較的小型な蓄積リングながら 25 keV 程度までの実用強度を持つ放射光の供給を可能としている。直線部の 1 カ所には APPLE-II 型アンジュレータ 1 台が設置されている。

あいち SR では、開所当初の供用ビームラインは硬 X 線 XAFS I(BL5S1)、粉末 X 線回折(BL5S2)、軟 X 線 XAFS・光電子分光 I(BL6N1)、真空紫外分光(BL7U)、薄膜 X 線回折(BL8S1)、広角・小角 X 線散乱(BL8S3)の 6 本であった。2015 年度より、軟 X 線 XAFS・光電子分光 II(BL1N2)および名古屋大学による単結晶 X 線回折(BL2S1)の 2 本のビームラインが加わっている。さらに、2016 年度には利用申込みの多い硬 X 線 XAFS 用ビームラインを新設(BL11S2)し、2017 年 1 月より供用を開始した。また、企業専用ビームライン(BL2S3)も稼働を開始している。2017 年 6 月には、愛知県の「知の拠点あいち重点研究プロジェクト」のために建設した X 線トポグラフィ用ビームライン(BL8S2)も供用を開始した。さらに 2021 年 10 月には、新たに超伝導偏向電磁石を光源とした企業専用の硬 X 線ビームライン(BL11S3)が稼働を開

[#] m.fujimoto@nusr.nagoya-u.ac.jp



Figure 1: Overview of AichiSR.

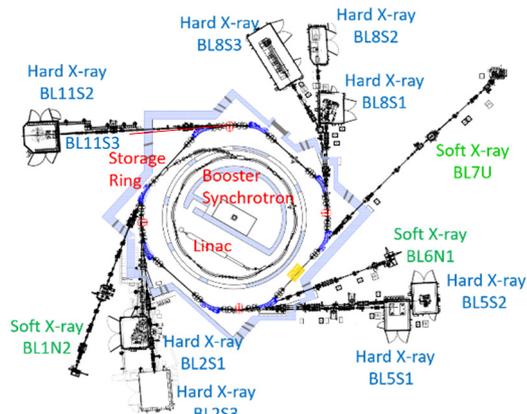


Figure 2: Layout of accelerators and beamlines.

Table 1: Parameters of Accelerators

Storage ring	
Beam energy	1.2 GeV
Circumference	72.0 m
Beam current	300 mA
Normal bends	1.4 T, 39°×8
Super bends	5 T, 12°×4
Lattice	Triple-bend cell
Natural emittance	53 nm-rad
Betatron tunes	(4.73, 3.19)
RF frequency	499.69 MHz
RF cavity voltage	350 kV
Natural Energy Spread	8.4×10^{-4}
(β_x, β_y, η_x) @ Superbend	(1.63, 3.99, 0.179)
(β_x, β_y, η_x) @ Long straight	(30.0, 3.77, 1.20)
Harmonic number	120
Booster synchrotron	
Beam energy	50 MeV - 1.2 GeV
Circumference	48.0 m
RF frequency	499.69 MHz
Harmonic number	80
Repetition rate	1 Hz
Linac	
Beam energy	50 MeV
Charge per pulse	~1 nC
Repetition rate	1 Hz
RF frequency	2856 MHz

始した。

Figure 1 に実験ホールに設置された加速器およびビームラインの外観、Fig. 2 に加速器およびビームラインの配置図、また Table 1 に電子蓄積リング、ブースターシンクロトロンおよび線形加速器のパラメータを示す。

利用申込みの募集は2ヶ月ごとに行っている。1週間のうち、月曜日はマシンスタディ、火曜日から金曜日までがユーザー利用日であり、1日の利用は10:00-14:00、14:30-18:30の2シフト(1シフト4時間)で行われている。

2024年度における全ビームライン12本の総利用時間は9,016時間であり、前年の10,407時間から減少した。利用構成は大企業60.7%、大学25.7%、公共等6.1%、中小企業4.7%、産学共同2.8%であった。分野別では輸送用機器関連が54.9%と大半を占め、特に近年では自動車用電池開発の追い風もあって需要が徐々に増加している。そのほか、調査・分析サービス(12.2%)、電気・電子部品(12.1%)、化学(7.6%)の産業分野による利用が続いた。測定代行利用はコロナ禍にあった2022年度をピークに減少傾向にある。

3. 光源加速器の運転および開発状況

3.1 光源加速器の稼働状況とトラブル対応

Figure 3 に、2024年7月30日から2025年8月1日までの、当初計画されたユーザー利用運転時間に対する光源加速器の運転時間の割合(稼働率)を1日毎に示す。あいちSRでは、例年4月に1ヶ月ほど加速器のメンテナンス期間を設けており、5月の連休明けからユーザー利用を開始している。また、10月下旬にも1週間程度のメンテナンス期間を設け、年末年始は休暇および調整運転のため約2週間の利用停止期間を設けている。

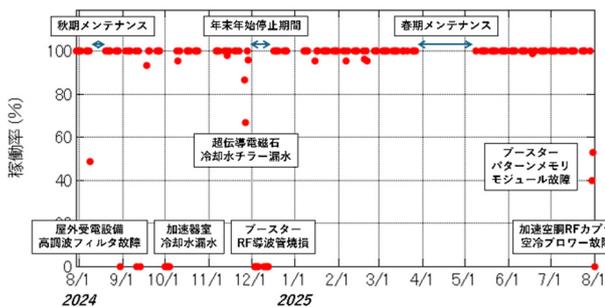


Figure 3: Percentage of operating time from July 30, 2024 to August 1, 2025.

2024年夏期以降、加速器運転停止を要する重故障が複数回にわたって発生しており、現在までその対応に追われている。2024年度の稼働率は90.8%であったが、2025年度に入ってもトラブルは継続し、2024年7月30日から2025年8月1日までの1年間の稼働率は89.8%まで低下しており、一割を超えるユーザー運転ロスが生じている。この期間における主なトラブルとその対応を以下に挙げる。

2024年8月9日

超伝導偏向電磁石 He 冷凍機用冷却水チラーの異常警報が発生し、ユーザー運転を停止した。10月18日には同チラー内部の銅管腐食による漏水が判明し、これ

を交換・補修した。

同 8 月 30 日, 9 月 11-13 日

屋外受電設備の高調波フィルターで異常発報が頻発し、インターロックによる停止が相次いだ。ノンヒューズブレーカが機械的な劣化によりトリップしやすくなっていたことがわかり、これを交換した。

同 10 月 1-4 日

BL フロントエンドのコネクタ劣化により冷却水ホースが外れ、冷却水バッファタンク(約 9 m³)の水が加速器室内へ流出し、室内床面全面が約 2 cm 浸水した。加速器室内には排水設備がなく、手作業と汲出しポンプで排水を行った。幸い、配電系統は天井ラダー方式であり、地下ピットも設けられていなかったため、床面に敷設されたアース板の乾燥後、事故発生週の週内に復旧することができた。被害としては床に仮置きされていた補助機器の電源の故障のみにとどまり、加速器本体に大きな影響はなかった。BL 冷却水ホースの同型コネクタについては全数調査を行い、劣化が認められたものは交換を行った。

同 12 月 3-13 日

ブースターシンクロトロン(加速用 RF 同軸導波管)が焼損した。11 月末より RF の反射異常が頻発し、12 月 3 日には運転投入ができなくなった。調査の結果、豪 TOMCO 製半導体アンプ出力部の方向性結合器周辺で過熱が確認され、同軸管を外して点検したところ、方向性結合器との接続部で内導体が焼き切れ、同軸管内部が煤けていることが判明した。Figure 4 に焼損した同軸管接続部を示す。



Figure 4: Burnout of RF coaxial waveguide.



Figure 5: New coaxial directional coupler manufactured by NIKOHA Co., Ltd.

アンプ出力の確認試験のため当該箇所の付け外しを毎年行っており、この繰返しによるインナーコネクタの劣化が原因と考えられる。焼損を免れた同軸管から RF 空洞カプラまでの導波路については、ネットワークアナライザによる時間領域反射率測定で異常が無いことを確認

した。そのうえで、Fig. 5 に示す新しい方向性結合器を(株)日本高周波で製作し、交換を行った。

2025 年 7 月 30 日

ブースターシンクロトロン(六極電磁石電源)で電流ランプアップパターンが出力されずにビームが周回できなくなり、蓄積リングへの入射が停止した。調査の結果、電源内部のパターンメモリモジュールに障害があり、LAN 通信部の故障によりパターン書込みが不能となっていたことが原因であった。予備モジュールに交換し、運転を再開した。

同 7 月 31 日-8 月 1 日

蓄積リング加速空洞 RF カプラ部の空冷用フリクションブロワーが故障し、インターロックにより加速器が停止した。ブロワーファンの回転軸が劣化し回転が鈍くなっていたことがわかり、交換手配を行う。

あいち SR は稼働開始から 10 年をすでに過ぎており、設備の経年劣化を原因とした広範にわたるトラブルが目立ち始めている。今後は計画的な保守と更新が急務となっている。

3.2 逐次軌道補正システムの開発

あいち SR の蓄積リングでは、ユーザー運転中に軌道補正を行わないため、Fig. 6 に示すように電子ビームの軌道が時間経過とともに変動し、1 日の運転で数十マイクロンに達する変化が確認されている。このような軌道変動は放射光の出射方向や位置安定性に直結し、利用実験においては測定精度や再現性を低下させる要因となる。このため、光源安定化を目的とした逐次軌道補正システムの開発が行われてきた[8, 9]。

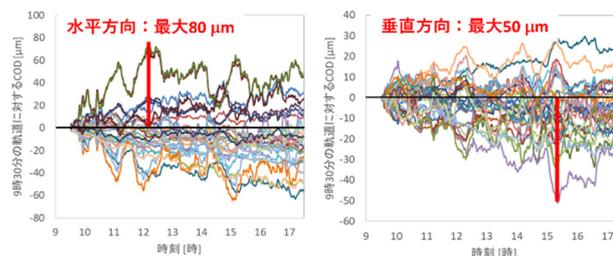


Figure 6: Daily variation of beam positions in the storage ring.

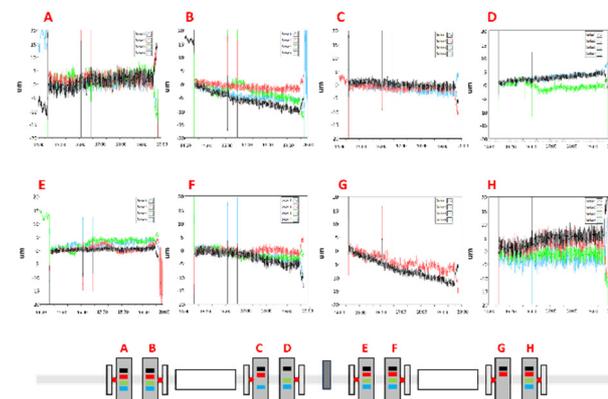


Figure 7: Variations of horizontal beam positions per cell with sequential COD correction.

今回、NI LabVIEW を用いてこの軌道補正システムの再開発を行った。あいち SR は蓄積リング上に 32 台のビーム位置モニタ (BPM) と水平・垂直各 16 台のステアリング電磁石を有している。このため軌道補正制御として、実測したステアリング電磁石の応答行列から固有値分解法を用いて導出した疑似逆応答行列を基に、BPM で計測される基準軌道からの軌道変化を補正するステアリング電磁石の電流値組合せを算出し、EPICS で構築された加速器制御システムへ caput を行う。また、ステアリング電磁石の鉄芯特性から軌道変化が安定するまで約 3 秒を要するため、補正制御の周期を 10 秒とし、水平・垂直方向を交互に補正するプログラムを作成した。実験はユーザー運転と同じ基準軌道および 300 mA トップアップ運転で行った。従来は数十マイクロに及んでいた軌道変化を、逐次軌道補正によりおおよそ 10 μm 以下に抑制することに成功した。実験結果の一例として、Fig. 7 に逐次軌道補正による各セルあたりの水平方向のビーム位置変化を示す。

一方で、緩やかなビームドリフトや場所により異なる位置変動が補正中にも存在しており、現在その要因を探っている。温度変化による BPM チャンバ自体の動きや蓄積リングのオプティクスへの相関など複数の側面から系統的な調査を行い、ユーザー運転での実用化に向けた逐次軌道補正における最適化条件の確立を目指す。

4. まとめ

2024 年から 2025 年にかけて、あいち SR では冷却水系や RF 系をはじめとする老朽化に起因した故障が相次

ぎ、週単位の運転停止を余儀なくされるなどユーザー運転への支障が続いている。放射光供給の信頼性を維持するため、加速器設備全体にわたる計画的な保守・更新を推進するとともに、故障診断アルゴリズムなど新しい技術を積極的に導入していく必要がある。また、加速器スタディを通じて光源性能の向上を進めながら、さらなる加速器運転の安定化を図る。

参考文献

- [1] あいちシンクロtron光センター, <https://www.aichisr.jp/>
- [2] 高嶋圭史 *et al.*, “中部シンクロtron光利用施設 (仮称) 計画”, 放射光, **21** (2008), 10-18.
- [3] 竹田美和 *et al.*, “中部シンクロtron光利用施設の建設がスタート”, 放射光, **23** (2010), 88-95.
- [4] 山本尚人 *et al.*, “中部シンクロtron光利用施設 (仮称) のコミッショニング”, 加速器, **9** (2012), 223-228.
- [5] 保坂将人 *et al.*, “あいちシンクロtron光センターの現状”, 加速器, **13** (2016), 1-7.
- [6] 竹田美和, “あいちシンクロtron光センターの概要と産業利用”, 軽金属, **70** (2020), 483-489.
- [7] 竹田美和, “AichiSR 10 周年記念誌”, https://www.aichisr.jp/topics_bl/10th-kinenshi.html
- [8] 石田孝司 *et al.*, “電子蓄積リングにおける閉軌道補正への機械学習適用の試み -あいち SR での試験例-”, 第 14 回日本加速器学会年会プロシーディングス (2017).
- [9] 中尾海斗 *et al.*, “あいち SR 電子蓄積リングの逐次的な閉軌道歪みの補正に関する研究”, 第 17 回日本加速器学会年会プロシーディングス (2020).