

あいち SR 光源加速器の現状

PRESENT STATUS OF ACCELERATORS OF AICHI SYNCHROTRON RADIATION CENTER

藤本将輝^{#, A, B)}, 石田孝司^{A, B)}, 岡島康雄^{A, B)}, 郭 磊^{A, B)}, 高嶋圭史^{A, B)},
金木公孝^{C)}, 森里邦彦^{C)}, 鈴木遥太^{C)}, 大熊春夫^{D, B)}, 堀米利夫^{B)}, 加藤政博^{E, F, A)}, 國枝秀世^{B)}
Masaki Fujimoto^{#, A, B)}, Takashi Ishida^{A, B)}, Yasuo Okajima^{A, B)}, Lei Guo^{A, B)}, Yoshifumi Takashima^{A, B)},
Kimitaka Kaneki^{C)}, Kunihiko Morisato^{C)}, Youta Suzuki^{C)}, Haruo Ohkuma^{D, B)}, Toshio Horigome^{B)},
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)} RCNP, Osaka University

^{E)} HiSOR, Hiroshima University

^{F)} UVSOR, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences

Abstract

Aichi Synchrotron Radiation Center (AichiSR) was established by cooperation of universities, research institutes, the local government of Aichi Prefecture, and industries. The facility is managed mainly by Aichi Science & Technology Foundation, and is also supported by industry, universities, and Aichi Prefecture. AichiSR, a 1.2 GeV storage ring passes the first decade this year of 2023, since the start of its public use on March 26, 2013. Twelve beam lines, including two company-owned beamlines and one university-owned beamline, are operational. The total operating time of the accelerators in FY2022 was 2063 hours, and the time for user operation was 1385 hours. The time when the accelerators could not operate was about 11 hours for the planned user operation time, and the percentage of the operation rate was about 99.2%.

1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター(あいち SR)は、愛知県の科学技術政策である「知の拠点あいち」計画における中核施設として、中部地区を中心とする大学、研究機関、産業界、愛知県の協力によって建設され、あいち SR が運営してきた。2013年3月26日の供用開始から今年で10周年を迎えた[1-6]。

供用開始当時のビームラインは6本であったが、現在では2本の企業専用および1本の大学によるビームラインを含む、計12本のビームラインが稼働している。2022年度における加速器の総運転時間は2063時間であり、放射光ユーザーの利用時間は1385時間であった。計画されたユーザー利用運転時間に対して光源が運転できなかった時間は約11時間であり、稼働率は約99.2%であった。

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台の偏向電磁石の内、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

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

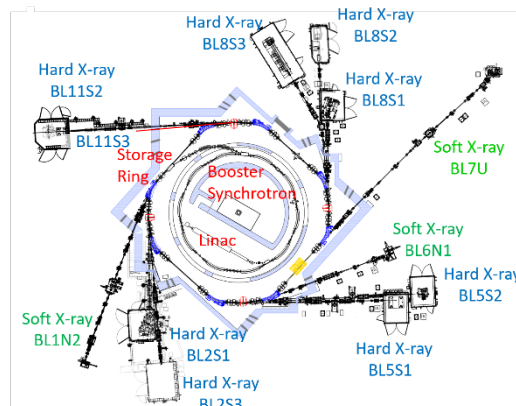


Figure 1: Layout of accelerators and beamlines.

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。Figure 1は加速器及びビームラインの配置図であり、Table 1 および Table 2 は電子蓄積リング、ブースターシンクロトロン、線形加速器のパラメータである。

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 年度には利用申し込みが多い硬 X 線 XAFS の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 線トポグラフィ用のビームライン (BL8S2) も供用を開始した。また、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ビームライン (BL11S3) が稼働を開始した。

Table 1: Parameters of 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

Table 2: Parameters of Booster Synchrotron and Linac

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

利用申し込みの募集は 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。

2022 年度における全ビームライン 12 本の利用時間は、10,490.5 時間であり開所以来最多となった。2022 年度も、2021 年度に引続き新型コロナウイルス感染への対策に取り組みつつ、年度を通じて通所利用を制限することなく運営した。一方、測定代行の利用時間は 590.5 時間と、コロナ禍の影響で急増した直近 2 年度より減少したが、影響前よりも高い水準となっている。

3. 光源加速器の状況

3.1 光源加速器の稼働状況

2022 年 10 月から 2023 年 7 月にかけて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 日毎に示した図を Fig. 2 に示す。あいち SR では、毎年 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が行われている。また、10 月下旬にも 1 週間ほどのメンテナンス期間を設けている。年末年始は休暇及び調整運転のため、2 週間ほどユーザー利用の停止期間を設けている。

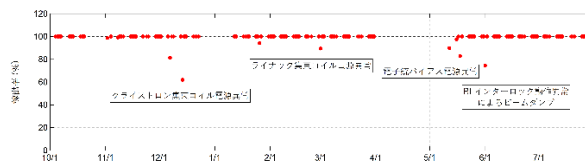


Figure 2: Percentage of operating time during July 1, 2021 to September 30, 2022.

あいち SR では 2022 年度より、電力使用量を抑えるため加速器停止後の 20 時から翌 6 時の間は冷却水通水を停止する運用を開始した。あいち SR は加速器室内床上に冷却水配管が施設されているため、室内気温の変化による朝のビーム連続入射への影響を特に懸念したが、2023 年現在まで一年間を通じて冷却水通水の夜間停止による加速器運転への影響は見られていない。

終日の運転停止をともなう重大故障は発生しておらずおおむね順調に運転を維持しているが、2022 年後半から 2023 年にかけてライナック系統の電源異常によるトラブルが相次いでいる。2022 年 12 月 14 日は、運転中にライナック RF クライストロン集束コイル電源の過電圧エラーが発報した。また、2023 年 3 月 1 日にはライナック低速部の集束コイル電源の過電流エラーが発報した。どちらも加速効率が低下するもののライナックの運転は可能だったため、蓄積ビームを廃棄して現場確認を行った後に運転を再開した。電源の老朽化が原因であり、順次交換を行っている。また、2023 年 6 月 1 日にはビームラインフロントエンドの真空モニターが真空アラートを発報し、インターロック動作によりビームアポートが発生した。蓄積リングの真空に異常が見られなかったため該当のビームラインを封鎖して運転を再開したが、その後真空計コントローラの故障であることがわかった。

3.2 500 MHz RF サーキュレータの新造

2021 年 7 月に、蓄積リング 500 MHz 導波管に設置しているサーキュレータから漏水があり、補修作業のため一週間にわたる運転停止を余儀なくされた。製造元にて分解確認作業を行ったところ、サーキュレータ内部のフェライト冷却用の銅板に埋込まれた冷却水銅パイプのターン部ロウ付け箇所ピンホールが生じ、そこから漏水が発生していることがわかった。その後、応急処置としてピンホール部をはんだで補修し再使用していた[7]。

2022 年度に、冷却パイプの劣化による漏水リスクを避けるために冷却用銅板に水路を直接彫込む改良を施し

たサーキュレータを日本高周波(株)で 2022 年度に新造し、2023 年春期メンテナンス期間に交換作業を行った。交換作業中の様子を Fig. 3 に示す。従来のサーキュレータ使用時から運転パラメータを変えることなく、現在まで動作している。

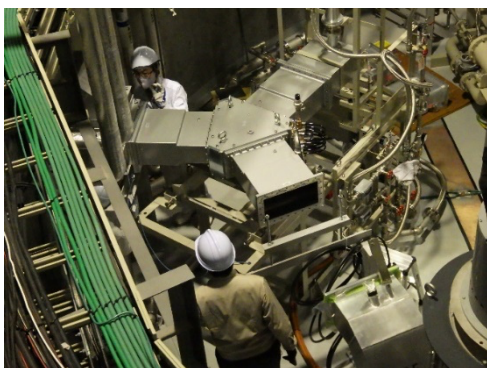


Figure 3: Install of the new 500 MHz RF circulator for storage ring.

3.3 APPLE-II アンジュレータ偏光モード変化にともなうビーム不安定化条件の調査

あいち SR 蓄積リングの直線部には、偏光可変を目的として APPLE-II アンジュレータが一台挿入されている。しかし、現在アンジュレータを円偏光および垂直偏光モードとした際にビーム不安定性が励起されてしまい、蓄積ビームを維持することができないことから、ユーザー運転では水平偏光モードのみが利用されている。このため、APPLE-II 型アンジュレータによる円偏光や垂直偏光の放射光利用をめざして、偏光モードを切替えた際のアンジュレータの磁場変化が電子ビームに与える影響についての研究が行われている[8, 9]。

アンジュレータ動作についての光源スタディを進める中で、偏光モードを変えながらアンジュレータギャップを閉めていく際にビームが不安定となるギャップ条件に系統性が見られることがわかった。このため、偏光モードとギャップの組合せに対するベータトロンチューンの変化(チューンシフト)を網羅的に計測した。加速器の運転パラメータはユーザー運転と同じとし、不安定性発生下でもビーム蓄積を維持可能な 150 mA のビーム電流で実験を行った。偏光モードを水平偏光、楕円偏光、円偏光および垂直偏光で切替えながら、ギャップを現在最大としている 50 mm から最小である 24 mm まで順次閉め、各点でのチューンを計測した。チューン計測は、蓄積ビームに周波数を変えながら摂動を与えて電子バンチの周回信号をスペクトラムアナライザで計測し、共鳴時に発生するベータトロン振動のピーク周波数からチューンを求める手法を用いた。

Figure 4 に、横軸を水平方向のベータトロンチューン、縦軸に垂直方向チューンを取り、偏光モードとギャップの各組合せで計測したチューンをプロットし、その変化の様子を示す。水平および垂直方向チューンの線形和が整数値となると、ビームは共鳴的に振動して不安定となる。円偏光および垂直偏光モードでは、ギャップを閉めた際に共鳴ラインを通過することがわかった。また、実

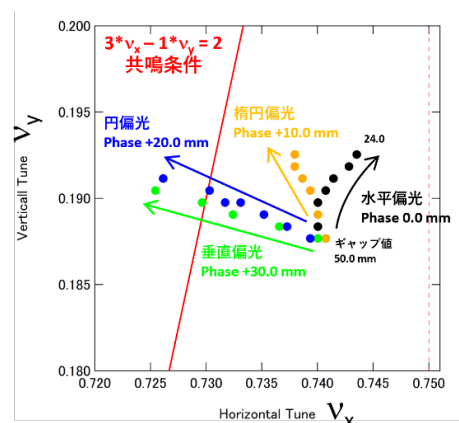


Figure 4: Betatron-tune shift measurement on several polarization modes of the APPLE-II undulator.

際にこの共鳴条件に漸近するにつれて自発的に不安定性が発生する様子をスペクトラムアナライザでも捉えた。

あいち SR ではすべての四極電磁石磁極に補正コイルが設けられており、これを利用したチューン補正の検討を行っている。

4. まとめ

あいち SR は施設利用を開始してからの 10 年間、長期シャットダウンを要する重篤な故障や事故を経験することなく運転を行ってきた。しかしながら RF サーキュレータ漏水をはじめとし、多数ある小規模電源系の故障といった老朽化にともなうトラブルが目立ち始めており、順次対策を進めている。また、APPLE-II アンジュレータの安定動作に向けた調査など光源スタディを重ねながら、ユーザー利用の拡大を目指している。

参考文献

- [1] <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.*, “部シンクロtron光利用施設(仮称)のコミッションング”, 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] 高嶋圭史 *et al.*, “あいち SR 光源加速器の現状”, 第 18 回日本加速器学会年会(2021)プロシーディング, WEP054.
- [8] 保坂将人 *et al.*, “あいち SR における APPLE-II 型アンジュレータ運転中のビーム不安定性とその抑制”, 第 17 回日本加速器学会年会(2020)プロシーディング, FRPP64.
- [9] 木村圭吾 *et al.*, “あいち SR における APPLE-II 型アンジュレータ運転中の不安定性の解析”, 第 16 回日本加速器学会年会(2019)プロシーディング, FRPI017.