

あいち SR 光源加速器の現状

PRESENT STATUS OF ACCELERATORS OF AICHI SYNCHROTRON RADIATION CENTER

高嶋圭史^{#, A, B)}, 保坂将人^{A, B)}, 郭磊^{A, B)}, 石田孝司^{A, B)}, 櫛田正己^{C)},
平山英之^{C)}, 金木公孝^{C)}, 大熊春夫^{D, B)}, 加藤政博^{E, F, B)}, 竹田美和^{B)}

Yoshifumi Takashima^{#, A, B)}, Masahito Hosaka^{A, B)}, Lei Guo^{A, B)}, Takashi Ishida^{A, B)}, Masami Kushida^{C)},
Hideyuki Hirayama^{C)}, Kimitaka Kaneki^{C)}, Haruo Ohkuma^{D, B)}, Masahiro Katoh^{E, F, B)}, Yoshikazu Takeda^{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 was built by cooperation of universities, research institutes, local government (Aichi Prefecture), and industries. The facility is operated mainly by Aichi Science & Technology Foundation, and is also supported by industry, universities, and Aichi Prefecture. Public use of the facility was started on March 26, 2013. Eleven beam lines, including one company-owned beamline and one university-owned beamline, are in operation. The total operating time of the accelerators in 2018 was 2022 hours, and the time for user operation was 1460 hours. The time when the accelerators could not operate was about 6 hours for the planned user operation time, and the percentage of the operation rate was about 99.6%.

1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター(あいち SR) [1]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7年目となる。

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 蓄積リングから成っている。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、12 台の偏向電磁石のうち、4 台はピーク磁場 5 T、偏向角 12° の超伝導電磁石、8 台は磁場強度 1.4 T、偏向角 39° の常伝導電磁石である。直線部には APPLE-II 型アンジュレータ 1 台が設置されている。

供用開始当時の放射光ビームラインは 6 本であったが、現在では企業専用および大学によるビームラインそれぞれ 1 本を含む 11 本のビームラインが稼働している。2018 年度における加速器の総運転時間は 2022 時間であり放射光ユーザーの利用時間は 1460 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 6 時間であり、稼働率は約 99.6% であった。

2. 光源加速器およびビームライン

あいち SR 光源加速器の最も特徴的な点は、偏向電

[#] takasima@nusr.nagoya-u.ac.jp

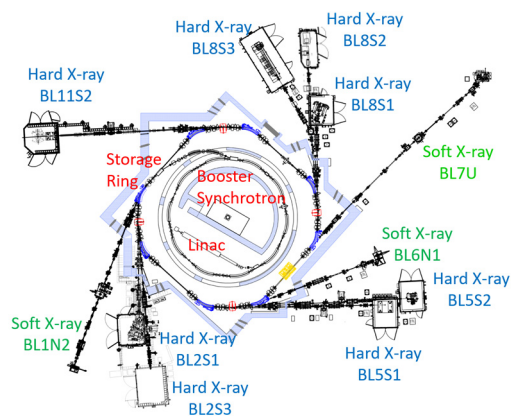


Figure 1: Layout of accelerators and beamlines.

磁石の一部に超伝導電磁石を使用していることである。電子蓄積リングは 1.2 GeV という比較的低い電子エネルギーであるが、ピーク磁場 5 T、偏向角 12° の超伝導偏向電磁石 4 台を備えることにより、光子エネルギーが 20 keV を超える放射光を 8 本のビームラインに供給している。Figure 1 は加速器及びビームラインの配置図である。

電子蓄積リングは Triple-bend セルの 4 回対称であり、1 つのセルを構成する 3 台の偏向電磁石のうち、中央の 1 台が超伝導電磁石、その他の 2 台が偏向角 39° の常

伝導偏向電磁石である。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。

各超伝導偏向電磁石は、それぞれ 1 台の 4K-GM 小型冷凍機によって冷却されており、液体ヘリウムや液体窒素等の冷媒は使用していない。冷凍機は合計 8 台を所有しており、4 台が稼働中、残りの 4 台が予備となっている。毎年 4 月に行う光源加速器の定期メンテナンスの際に交換を行い、取り外した 4 台は次年度の定期メンテナンスでの交換や不具合が生じた場合に備え、メンテナンスを施して保管している。Table 3 は超伝導偏向電磁石のパラメータである。

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)@直線部	(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

Table 4 は挿入光源である APPLE-II 型アンジュレータ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 □ (BL5S1), 粉末 X 線回折 (BL5S2), 軟 X 線 XAFS・光電子分光 □ (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 □ (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。

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。

2018 年度における全ビームライン 11 本の利用シフト数は 1925 シフトであった。これは 2017 年度の 2046 シフトよりもやや少ないが、一方で測定代行は 2017 年度の 213 時間から 2018 年度では 340 時間と大幅に増加している。

Table 3: Parameters of Superbend

Return York	C-Shaped
Conductor type	NbTi-Cu
Critical temperature	5.9 K
Cryo-system	2-stage GM cryocooler
Operating current	100 A
Current density(overall)	112 A/mm ²
Magnetic field	5.1 T (6°), 4.7 T (4°, 8°)
Bending angle	12°
Warm bore gap	44 mm
Pole gap	82 mm
Pole length along beam	80 mm
Pole length transverse to beam	190 mm

Table 4: Parameters of Undulator

Type	Apple-II
Remanent field	1.3 T
Period length	60 mm
Number of period	33
Minimum gap	24 mm
Maximum K	
Linear	3.4
Vertical	2.0
Helical	1.7

3. 光源加速器の状況

3.1 光源加速器の稼働状況

Figure 2 は、2018 年度における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 日毎に示した図である。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行われていない期間がある。

所々に 100 % ではない日があるが、おおむね順調に稼働している。稼働率が 100 % ではない原因は、ブースターシンクロトロンや蓄積リング入射セプトラム部の真空悪化、蓄積リングの放射光アブソーバの冷却水流量低下、および何らかの原因による蓄積電流値の急落である。真

空悪化およびアブソーバの冷却水量低下の場合は一旦電子ビームを廃棄し、加速器室内で対処した後、再度入射、蓄積を行っている。

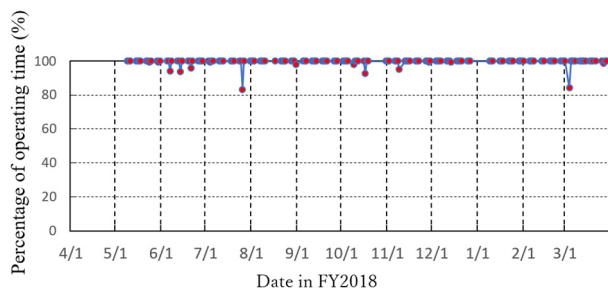


Figure 2: Percentage of operating time in FY2018.

ブースターシンクロtronおよび蓄積リング入射セプタム部の真空悪化は2015年頃から発生しており、蓄積リング入射セプタム電磁石直下に据え付けられているDiode型500 L/sイオンポンプや高エネルギー輸送路部分に設置している20 L/sイオンポンプの能力が低下している可能性を考え、2018年にこれらの交換を行った。

ブースターシンクロtronの入・出射セプタム部や蓄積リング入射セプタム部では、積層鋼板が真空槽内に設置されており、これらからのガス放出が真空悪化の原因として考えられる。そのため、真空能力の増強とイオンポンプの劣化を抑えるため、2019年4月のメンテナンスで蓄積リング入射セプタム部に 10^{-5} ~ 10^{-7} Pa領域で使用できる新しいゲッター材を用いたNEGポンプを増設した。今年度中にはブースターシンクロtronの入射セプタム部および出射セプタム部に同様のNEGポンプを増設する予定である。

3.2 光源加速器に関する開発, 研究

APPLE-II型アンジュレータを縦偏光モードで運転した場合に、アンジュレータギャップが36 mm以下になると水平方向の結合型ビーム不安定性によって電子ビームが失われる現象が生じている。励起されている不安定性の周波数はRF加速空洞のTEM110Hと一致しており、不安定性はアンジュレータによる多極磁場等によって直接励起されているものではないと考えている。ベータatron振動の減衰時間の測定やチューン拡がりに関する解析から、アンジュレータのもつ8極磁場成分がチューン拡がりに影響を与え、蓄積リングのもつ不安定性の減衰効果を弱めることにより、不安定性が表れているのではないかと考えている[2]。

あいちSR蓄積リングの動作点と共鳴線の関係について詳細な調査を行い、現状の動作点はわずかに2次共鳴の影響を受けていること、また現状の運転に用いている軌道は対称性がわずかに崩れており、一部の共鳴が励起されていることが確認できた[3]。

偏向電磁石の永久磁石化の検討を行っており、1/5モデル磁石を製作し、磁場測定や温度による磁場の变化の測定を行ってきた[4-6]。現状の偏向電磁石に置き換えて永久磁石による偏向磁石を据え付ける場合、あいちSRの偏向電磁石磁場である1.4 Tを発生するにはネオ

ジム系の永久磁石が最適であると考えている。しかしながらネオジム系の永久磁石は温度による磁場の变化が大きく、これを補正するフィードバックシステムの検討を行っている[5, 6]。

パルス6極電磁石を用いた入射の実現に向けた検討[7]、加速器制御に対して機械学習を用いた方法の有効性の検討[8]についても引き続き研究を行っている。

4. まとめ

あいちSR光源加速器の運転は、調整運転を含めると8年目に入っており、これまでは長期間の運転停止に至る故障は起きていない。2018年度の加速器の稼働率は約99.6%であった。

運転停止には至っていないが、PLCなど制御系のネットワーク通信異常や、PLCのエラーが発生する状況が2018年度から目立ってきている。これらの原因は明らかではないが、場合によっては加速器の運転が不可能となることも考えられるため、交換用の機器の準備等を行っておく必要がある。その他の機器についても経年劣化と考えられる状況が出てきており、対策を進める必要がある。

参考文献

- [1] <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
- [2] K. Kimura *et al.*, "STUDY OF BEAM INSTABILITY CAUSED BY VERTICAL POLARIZATION MODE OF APPLE-II UNDULATOR IN AICHISR", in this proceedings.
- [3] K. Nakao *et al.*, "OBSERVATION OF RESONANCE LINES IN AICHI-SR ELECTRON STORAGE RING", in this proceedings.
- [4] 福江修平, "あいちSRにおける永久磁石を用いた省電力型偏向磁石の開発", 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修士論文(2017).
- [5] R. Hamada *et al.*, "DEVELOPMENT AND PRECISE MEASUREMENT OF PERMANENT DIPOLE MODEL MAGNET FOR AICHI SR STORAGE RING", Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 512 (2017).
- [6] H. Hori *et al.*, "PRECISE MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF PERMANENT DIPOLE MODEL MAGNET AND DEVELOPMENT OF TEMPERATURE COMPENSATION SYSTEM", in this proceedings.
- [7] A. Mochihashi *et al.*, "PERTURBATION TO THE STORED BEAM BY PULSED SEXTUPOLE MAGNET IN AICHI SR", Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 240 (2017).
- [8] T. Ishida *et al.*, "PILOT APPLICATION OF MACHINE LEARNING TO COD CORRECTION FOR THE ELECTRON STORAGE RING AT AICHI SYNCHROTRON RADIATION CENTER", Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 186 (2017).