

## 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<sup>#, A, B)</sup>, 保坂将人<sup>A, B)</sup>, 持箸 晃<sup>A, B)</sup>, 石田孝司<sup>A, B)</sup>, 真野篤志<sup>A, B)</sup>,  
榎田正己<sup>C)</sup>, 平山英之<sup>C)</sup>, 大熊春夫<sup>D, B)</sup>, 加藤政博<sup>E, B)</sup>, 竹田美和<sup>B)</sup>

Yoshifumi Takashima<sup>#, A, B)</sup>, Masahito Hosaka<sup>A, B)</sup>, Akira Mochihashi<sup>A, B)</sup>, Atsushi Mano<sup>A, B)</sup>, Takashi Ishida<sup>A, B)</sup>,  
Haruo Ohkuma<sup>C, B)</sup>, Masahiro Katoh<sup>D, B)</sup>, Yoshikazu Takeda<sup>B)</sup>

A) Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

B) Aichi Synchrotron Radiation Center

C) SPring-8 Service Co., Ltd.

D) Japan Synchrotron Radiation Research Institute, SPring-8

E) UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences

#### Abstract

Aichi Synchrotron Radiation Center was built by cooperation of universities, research institutes, local government 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. By the end of 2017 fiscal year, 296 companies, universities and research institutes used the facility. Eleven beam lines, including one company-owned beamline and one university-owned beamline, are in operation.

#### 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、行政の協力によって整備が進められてきた。2013年3月26日に供用を開始しており、今年度で6年目となる。

加速器は、入射器として 50 MeV 直線加速器および 1.2 GeV ブースターシンクロトロンを用い、1.2 GeV 蓄積リングにフルエネルギーで入射することによりトップアップ運転を行っている。蓄積リングの周長は 72 m であり、12 台の偏向電磁石のうち、4 台は超伝導電磁石、8 台は常伝導電磁石である。挿入光源として APPLE-II 型アンジュレータ 1 台が設置されている。

供用開始当時のシンクロトロン光ビームラインは 6 本であったが、現在では企業専用、大学および愛知県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。Figure 1 は現在の光源加速器およびビームラインのレイアウトである。

2017 年度の光源加速器の運転日数は 217 日、総運転時間は 2,022 時間である。2017 年度において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 14 時間であり、稼働率は 98.5 %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、偏向電磁石の一部に超伝導電磁石を使用していることである。

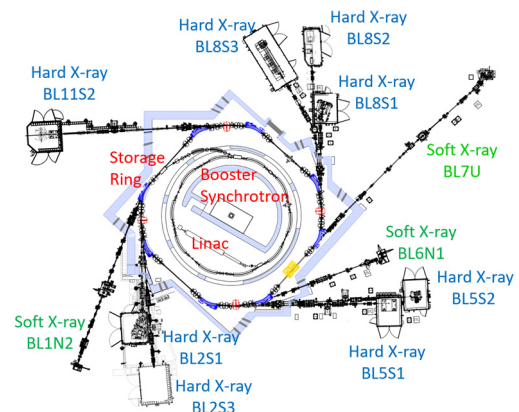


Figure 1: Layout of accelerators and beamlines.

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 を超えるシンクロトロン光を 8 本のビームラインに供給している。

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。

<sup>#</sup> takasima@nusr.nagoya-u.ac.jp

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, 3.18)
RF frequency	499.69 MHz
RF cavity voltage	350 kV
Natural Energy Spread	$8.4 \times 10^{-4}$
( $\beta_x, \beta_y, \eta_x$ )@superbend	(1.63, 3.99, 0.179)
( $\beta_x, \beta_y, \eta_x$ )@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 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。

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

で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。

供用開始後 2017 年度末までに 296 の企業・大学等による利用があった。2017 年度にも 40 の新規ユーザー(企業・大学等)が利用しており、裾野が広がってきている。

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 <sup>2</sup>
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、2017 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 %ではない原因として、2017 年 7 月 13 日、14 日には供給電力の電圧が瞬間的に低下あるいはゼロとなり、機器の再立ち上げに時間を要したためである。また、8 月 22 日は午後には落雷に伴う瞬間的な電圧低下があり、天候の回復の見込みがないため加速器の運転を停止したことによる。

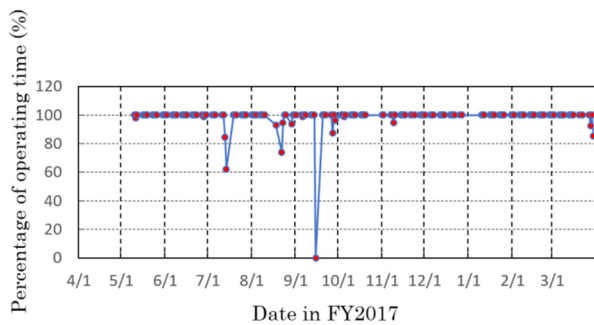


Figure 2: Percentage of operating time in FY2017.

最も稼働率が低くなっているのは2017年9月15日でありユーザー運転が行われなかった。原因は超伝導偏向電磁石を冷却している4K-GM冷凍機の水冷コンプレッサーの冷却水温度モニターであるサーモスタットの不具合により、コンプレッサーのエラー解除が不可能となり、代替のコンプレッサーへの交換と超伝導偏向電磁石の再冷却に時間を要したためであった。

稼働率には表れていないが、超伝導偏向電磁石に係する不具合として、2018年5月10日頃から1台の超伝導偏向電磁石の温度が緩やかに上昇をはじめたため、冷凍機交換の手配を行いほぼ1ヶ月後の6月23日に冷凍機の交換を行うことで正常な状態に回復した。あいちSRの超伝導電磁石では、冷凍機ヘッドや超伝導コイルは通常4K以下に冷却されているが、冷凍機の交換直前には4.5Kを超えるまで上昇していた。交換した冷凍機はメーカーによって状況を調査中である。あいちSRの超伝導偏向電磁石は2011年に製造され、これまで順調に稼働していたが、冷凍機や冷凍機用コンプレッサーの経年による不具合が徐々に現れてきている可能性がある。

2015年頃よりブースターシンクロトロン(Iオンポンプ)から突発的にガスが発生し、真空悪化により蓄積リングへの電子ビーム入射が困難となる状況が生じていた。原因として、ブースターシンクロトロンから出射した電子ビームを蓄積リングへ入射するためのセプタム電磁石の直下に据え付けられているDiode型500L/sイオンポンプ(Figure 3)が寿命を迎えている可能性が考えられるため、2018年4月のメンテナンスにおいて、新しいイオンポンプへ交換を行った。この結果、交換前は頻繁に発生していた圧力の上昇は改善したと考えられる。また、ブースターシンクロトロンと蓄積リングをつなぐ高エネルギービーム輸送路部分に設置されている20L/sイオンポンプについても状態が不安定になっていると考えており、2018年10月に予定しているメンテナンス期間に新品と交換する予定である。

### 3.2 光源加速器に関する開発, 研究

あいちSRでは蓄積電流値が急落する現象が1ヶ月に数回程度生じている。最近では少なくなったが、電流値がゼロになることもある。この原因の1つとしてダストトラップ[2]を考えており、ビーム急落現象とダストトラップの因果関係についての調査を行っている[3]。

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35mm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。アンジュレータの多極磁場が電子ビームに与える影響を調査し、不安定性との関連や不安定性を抑制する方法について検討を行っている[4]。

偏向電磁石の永久磁石化の検討[5,6]、パルス六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。

あいちSR光源加速器の運転は、調整運転を含めると7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が、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。

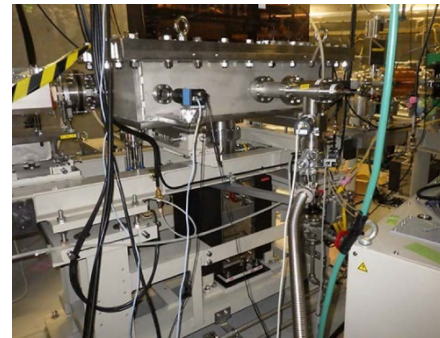


Figure 3: Septum magnet and sputter ion pump.

### 参考文献

- [1] <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
- [2] Y. Tanimoto *et al.*, "Experimental demonstration and visual observation of dust trapping in an electron storage ring", *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 12, 110702 (2009).
- [3] S. Kimura *et al.*, "RADIATION MEASUREMENT AT SUDDEN DECREASE OF BEAM CURRENT IN AICHI SR STORAGE RING" in this proceedings.
- [4] K. Kimura *et al.*, "STUDY OF BEAM INSTABILITY CAUSED BY VERTICAL POLARIZATION MODE OF APPLE-II UNDULATOR IN AICHISR" in this proceedings.
- [5] 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).
- [6] 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).
- [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).