

## 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>, 真野篤志<sup>A, B)</sup>, 石田孝司<sup>A, B)</sup>, 大熊春夫<sup>C, B)</sup>,  
加藤政博<sup>D, 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, Japan Synchrotron Radiation Research Institute

D) 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 2016 fiscal year, 256 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5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 5T, 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[2]。

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。Figure 1 は 2017 年度当初における光源加速器およびビームラインのレイアウトである。2016 年度末までに 256 の企業・大学等が利用しており、年度毎の新規ユーザーは 2016 年度から 2016 年度にかけて、それぞれ 53, 47, 54 企業・大学となっており、利用の裾野が広がってきている。

2016 年度の光源加速器の運転日数は 216 日、総運転時間は 2,211 時間である。2016 年度において当初計画されたユーザー利用運転時間 1452 時間に対して、光源加速器の運転ができなかった時間は 16 時間 56 分であり、稼働率は約 98.9%であった。

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

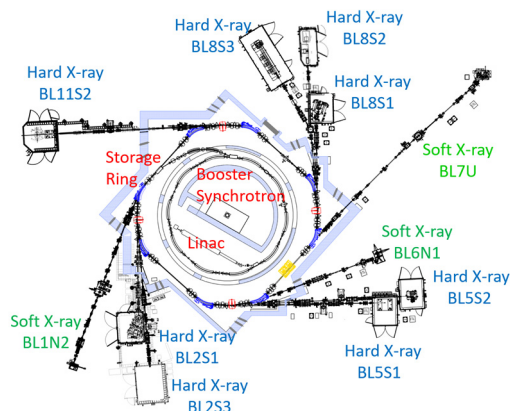


Figure 1: Layout of accelerators and beamlines.

#### 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。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、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。

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

<b>Booster synchrotron</b>	
Beam energy	50 MeV - 1.2 GeV
Circumference	48.0 m
RF frequency	499.69 MHz
Harmonic number	80
Repetition rate	1 Hz
<b>Linac</b>	
Beam energy	50 MeV
Charge per pulse	~1 nC
Repetition rate	1 Hz
RF frequency	2856 MHz

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。超伝導偏向電磁石があいち SR へ搬入されてから約 5 年半経過したが、超伝導電磁石本体及び冷凍機に不具合は生じておらず、毎年 1 回の冷凍機メンテナンスにより順調に稼働している。Table 3 は超伝導偏向電磁石のパラメータである。

あいち SR 電子蓄積リングには挿入光源として APPLE-II 型アンジュレータ 1 台を設置している。Table 4 は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・XAFS (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 (BL11S2) を新設し、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、愛知県の県有ビームライン (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。

年度ごとの利用シフト数は、2013 年度 1061 シフト、2014 年度 1409 シフト、2015 年度 1618 シフト、2016 年度が 1642 シフトと年度毎に増大している。ビームライン全体の平均利用率は 2013 年度 63.8%, 2014 年度 78.4%, 2015 年度 81.2%, 2016 年度が 88.5% であり、BL5S1, BL5S2, BL6N1, BL7U の利用率はほぼ 100% である。

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、2016 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。

2016 年度には、所々に 100% ではない日があるが、ユーザー利用日に 1 日を通して光源加速器が運転を停止したことはなく、おおむね順調に稼働している。最も稼働率が低くなっているのは 2016 年 6 月 28 日であり、ブースターシンクロトロン電磁石電源の励磁パターンの設定不具合によるものであったが、正常な励磁パターンの設定により復帰している。

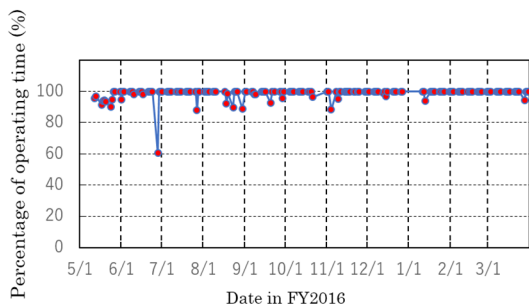


Figure 2: Percentage of operating time in FY2016.

Figure 2 には大きく現れていないが、一昨年度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放出され、真空度が悪化する現象が発生しており、イオンポンプのベーキングや、イオンポンプの更新について検討を行っている。

### 3.2 光源加速器に関する開発, 研究

シンクロトロン光利用施設において電子蓄積リングの常伝導偏向電磁石を永久磁石に置き換えるための計画がいくつかの施設で進んでいる [3-5]. あいち SR においても、電子蓄積リングの常伝導偏向電磁石を永久磁石に置き換えるための検討を行っており、1/5 スケールモデルを製作して磁場測定等を行っている[6,7]. Figure 3 は製作した 1/5 スケールモデルである。あいち SR の常伝導偏向電磁石の磁束密度は 1.4 T であり、現状の偏向電磁石と置き換えて利用することを想定した場合、ビーム軌道上において 1.4 T を実現するためには、いくつかの永久磁石材料のうち、Nd-Fe-B 系磁石がもっとも現実的である。しかしながら、Nd-Fe-B 系磁石の温度係数は約 0.1 %/K であり、温度変化に伴う磁束密度の変化が大きく、磁束密度の変化を補う方法として、ヨークにコイルを巻き、電流で調整することを検討している。

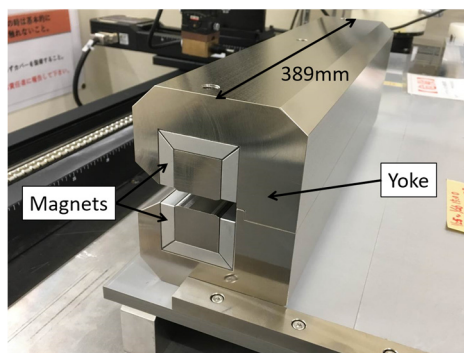


Figure 3: 1/5 model of the bending magnet.

あいち SR ではパルス六極電磁石を用いた入射を実現するための検討を続けている[8-11]. パルス六極電磁石を用いて蓄積電流 300 mA の入射には成功しているが、蓄積電子ビームへの影響のため、ユーザー利用のための運転では使用していない。パルス六極電磁石の蓄積電子ビームへの影響を調査するため、ICCD カメラを用いて毎回毎の電子バンチのプロファイルを測定する

とともに、パルス六極電磁石の磁場測定結果を精密に解析し、電子ビームのシミュレーションとの比較を行うことで、パルス六極電磁石の影響を抑える方法について検討を行っている。

あいち SR 電子蓄積リングでは、稼働当初より縦方向ビーム不安定性が生じている。この不安定性を抑える方法として RF 位相変調法の有効性について検討を行っている[12]. テスト実験では、RF 加速空洞にシンクロトロン振動数の 2 倍の位相変調を加えることで不安定性を抑制できる場合があることが確認できた。今後最適な条件等を詳細に調査する予定である。

光源加速器の制御に対して、機械学習の手法を導入することの有効性についての検討を行っている[13]. あいち SR 電子蓄積リングの COD 補正は、通常では特異値分解法により軌道補正用ステアリング電磁石の電流値を決定しているが、計算機上でランダムに発生させた COD と、その各 COD に対して特異値分解法により求めたステアリング電流値を教師データとしてニューラルネットワークに学習させることにより、実際の COD に対して特異値分解法と同等の精度での軌道補正ができることを確認した。今後は、教師データとして計算値ではなく、実際の測定値を用いる方法や、加速器本体あるいは冷却水等の温度も入力データとして加えることで、より高い精度での制御が期待できる。また、教師データを用いない強化学習等による手法についても検討を行う予定である。

あいち SR は施設全体としてまだ改良の余地があり、光源加速器のさらなる安定化およびビーム性能の高度化を進めると共に、各ビームラインの高機能化・安定化を行っている。

### 参考文献

- [1] <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
- [2] A. Mochihashi *et al.*, Proc. of IPAC2017, WEPAB048(2017).
- [3] T. Taniuchi *et al.*, Proc. of IPAC2015, WEPMA050 (2015).
- [4] T. Watanabe *et al.*, Proc. of IPAC2016, TUOCB03 (2016).
- [5] C. Benabderrahmane *et al.*, Proc. of IPAC2016, TUPMB001 (2016).
- [6] 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).
- [7] R. Hamada *et al.*, "DEVELOPMENT AND PRECISE MEASUREMENT OF PERMANENT DIPOLE MODEL MAGNET FOR AICHI SR STORAGE RING" in this proceedings.
- [8] N. Yamamoto *et al.*, Proc. of IPAC2014, WEPRO011 (2014).
- [9] K. Ito *et al.*, Proc. of IPAC2015, TUPJE005 (2015).
- [10] K. Yamamura *et al.*, “High-speed observation and evaluation of the beam fluctuation at injection timing in Aichi SR”, Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 1122 (2016).
- [11] A. Mochihashi *et al.*, “PERTURBATION TO THE STORED BEAM BY PULSED SEXTUPOLE MAGNET IN AICHI SR” in this proceedings.
- [12] K. Imao *et al.*, “STABILIZATION OF ELECTRON BEAM BY AN RF PHASE MODULATION AT AICHI SR STORAGE RING” in this proceedings.
- [13] T. Ishida *et al.*, “PILOT APPLICATION OF MACHINE LEARNING TO COD CORRECTION FOR THE ELECTRON STORAGE RING AT AICHI SYNCHROTRON RADIATION CENTER” in this proceedings.