

## 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>, 山本尚人<sup>A,B)</sup>, 高野 琢<sup>A,B)</sup>, 真野篤志<sup>A,B)</sup>, 高見 清<sup>C)</sup>,  
加藤政博<sup>D,A)</sup>, 堀洋一郎<sup>E,A)</sup>, 佐々木茂樹<sup>F,A)</sup>, 江田茂<sup>G,A)</sup>, 竹田美和<sup>B)</sup>  
Yoshifumi Takashima<sup>#, A,B)</sup>, Masahito Hosaka<sup>A,B)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A,B)</sup>, Kiyoshi Takami<sup>C)</sup>, Takumi Takano<sup>A,B)</sup>,  
Atsushi Mano<sup>A,B)</sup>, Hiroyuki Morimoto<sup>A,B)</sup>, Masahiro Katoh<sup>D,A)</sup>, Yoichir, Hori<sup>E,A)</sup>, Shigeki Sasaki<sup>F,A)</sup>,  
Shigeru Koda<sup>G,A)</sup>, Yoshikazu Takeda<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

<sup>B)</sup> Aichi Synchrotron Radiation Center, ASTF, Minamiyamaguchi-cho, Seto, Aichi, 489-0965

<sup>C)</sup> Nippon Advanced Technology, 3129-45 Hibara Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112

<sup>D)</sup> Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences, Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585

<sup>E)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

<sup>F)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8), Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

<sup>G)</sup> Saga Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005

#### 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. In the 2013 fiscal year, 82 companies and 20 universities and research institutes used the facility. 6 beam lines are in operation and 2 beam lines are under construction.

#### 1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター（あいち SR）<sup>[1]</sup>は、愛知県の科学技術政策である「知の拠点あいち」計画<sup>[2]</sup>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。運営は公益財団法人科学技術交流財団が行い、加速器やシンクロトロン光ビームラインなどに対する技術的な支援を、名古屋大学シンクロトロン光センターを中心とする大学連合が行っている。

あいち SR の建設から現在に至る経過を Table 1 に示す。建屋の建設は平成 22 年 8 月から始まり、ほぼ 1 年で完成した。その後、測量を行い、加速器、シンクロトロン光ビームラインの搬入、据え付けを行った。加速器の調整運転を平成 24 年 3 月から行い、平成 24 年 9 月には蓄積リングにおいて 300 mA の蓄積に成功した<sup>[3]</sup>。シンクロトロン光ビームラインの調整を経て、平成 25 年 3 月 26 日に供用を開始した。供用開始の当初より、300 mA でのトップアップ運転を行っている。現在 6 本のシンクロトロン光ビームラインが供用されており、さらに 2 本が整備中である。

供用を開始した初年度である平成 25 年度は、企業 82 社、大学や研究機関等 20 機関から延べ 1156 名の利用があった。平成 25 年度において、マシンスタディを除いたユーザー利用のための運転予定時間

は 1634 h (174 日) であり、これに対して光源の稼働時間は 1539 h であった。また、平成 26 年度 (4/1 ~ 7/18) では、ユーザー利用のための運転予定時間 519 h に対して、光源の稼働時間は 511 h であった。上記の運転予定時間に対する光源の稼働時間を光源の平均稼働率とすると、平成 26 年度は 94.2 %、平成 26 年度 (4/1 ~ 7/18) は 98.5 % である。

Table 1: Progress of the Construction and Commissioning of Aichi SR

平成 22 年 8 月	建屋建設開始
平成 23 年夏~秋	建屋完成、光源搬入・据付開始
平成 24 年 3 月	調整運転開始
平成 24 年 3 月 25 日	直線加速器 50 MeV 加速
平成 24 年 4 月 28 日	ブースターで 1.2 GeV 加速
平成 24 年 7 月 18 日	蓄積リングでのビーム蓄積成功
平成 24 年 9 月 7 日	蓄積リングでの 300 mA 蓄積
平成 24 年 12 月	超伝導電磁石冷凍機メンテナンス
平成 25 年 3 月 26 日	供用開始
平成 26 年 1 月	定期メンテナンス
平成 26 年 7 月~8 月	定期メンテナンス

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

## 2. 光源加速器およびビームライン

あいち SR の加速器は、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 電子蓄積リングで構成されている。電子蓄積リングの周長は 72 m であり、その内側にブースターシンクロトロンを配置し、さらにその内側に直線加速器を配置している。これらの加速器は、コンクリートによる遮蔽壁に納められ、実験ホール中央部に配置されている。Figure 1 および Figure 2 は、それぞれ加速器のレイアウトおよび 1 セルの光学関数である。Table 2、Table 3 は加速器のパラメータである。

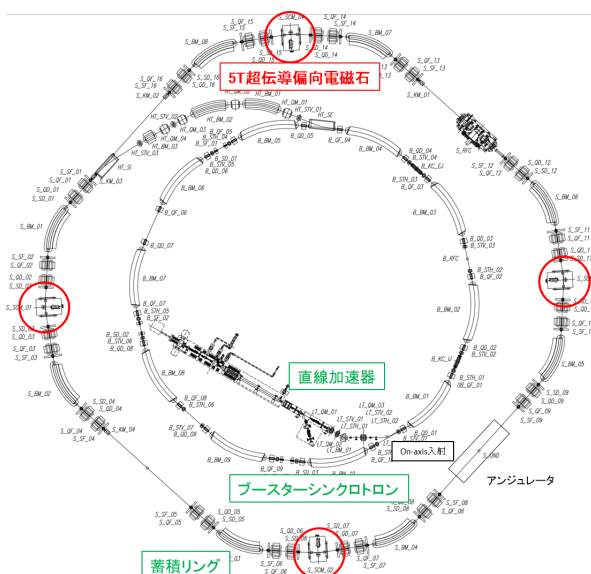


Figure 1: Layout of accelerators.

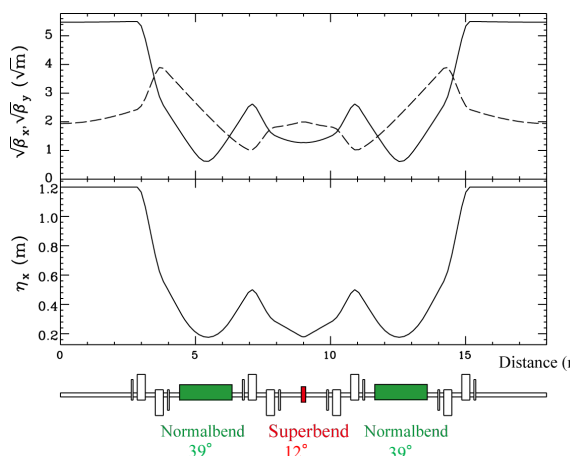


Figure 2: Optical functions of 1 cell of the storage ring.

Table 2: Parameters of Storage Ring

ビームエネルギー	1.2 GeV
周長	72.0 m
ビーム電流	> 300 mA
常伝導偏向電磁石	1.4 T, 39°×8
超伝導偏向電磁石	5 T, 12°×4
ラティス構造	Triple Bendセル4回対称
自然エミッタンス	53 nm-rad
ベータトロンチューン	(4.72, 3.23)
RF周波数	499.654 MHz
RF加速電圧	500 kV
バケットハイト	0.99 %
エネルギー広がり	8.4×10 <sup>-4</sup>
モーメントム	0.019
コンパクションファクター	
(β <sub>x</sub> , β <sub>y</sub> , η <sub>x</sub> )@superbend	(1.63, 3.99, 0.179)
(β <sub>x</sub> , β <sub>y</sub> , η <sub>x</sub> )@直線部	(30.0, 3.77, 1.20)
ハーモニクス	120

Table 3: Parameters of Booster Synchrotron and Linac

ブースターシンクロトロン	
ビームエネルギー	50 MeV - 1.2 GeV
周長	48.0 m
RF周波数	499.654 MHz
ハーモニクス	80
繰り返し	1 Hz
直線加速器	
最大ビームエネルギー	50 MeV
パルス当たりの電荷量	~1 nC
繰り返し	1 Hz
RF周波数	2856 MHz

あいち SR 光源加速器の特徴は、超伝導偏向電磁石を用いることにより、1.2 GeV という比較的低い電子エネルギーでありながら、エネルギーが 10 keV を超えるシンクロトロン光を複数のビームラインに供給している点である。電子蓄積リングは、Triple-bend セルの 4 回対象であり、一つのセルを構成する 3 台の偏向電磁石のうち、中央を超伝導偏向電磁石として、全周で合計 4 台の超伝導偏向電磁石を導入している。超伝導偏向電磁石のピーク磁場は約 5 T であり、電子ビームの偏向角は 12° である。常伝導偏向電磁石の磁場は 1.4 T、偏向角は 39° である。

各超伝導偏向電磁石は、それぞれ 1 台の 4K-GM 小型冷凍機を備えており、液体窒素等の冷媒は使用していない。超伝導偏向電磁石のパラメータを Table 4 に示す。

挿入光源として 1 台の APPLE-II 型アンジュレータを設置している。アンジュレータのパラメータを Table 5 に示す。

供用中の 6 本のビームラインは、硬 X 線 XAFS・蛍光 X 線 (BL5S1)、粉末 X 線回折 (BL5S2)、軟 X 線 XAFS・光電子分光 (BL6N1)、真空紫外分光・超軟 X 線 XAFS・光電子分光 (BL7U)、X 線反

射率・薄膜表面回折 (BL8S1)、広角/小角散乱 (BL8S3) である。さらに、これらのビームラインでは対応が困難であった Na、Mg、Al を含む O から Si に対応した軟 X 線 XAFS ビームライン (BL1N2) および名古屋大学による単結晶構造解析用 X 線回折ビームライン (BL2S1) が整備中であり、この 2 本を含めると 8 本のビームラインが稼働することになる。Figure 3 はシンクロトロン光のスペクトル、Table 6 に各ビームラインの特徴を示す。

平成 25 年度の利用件数の割合は、産業利用が 56%、学術利用 (大学、産学共同、公的研究機関) 44% であった。

Table 4: 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	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 5: 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

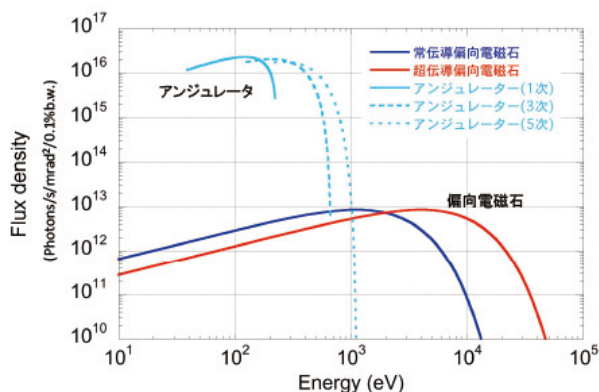


Figure 3: Synchrotron radiation spectrum.

Table 6: Synchrotron Radiation Beamlines

ビームライン (光源)	測定手法	光エネルギー
BL5S1 (Superbend)	硬X線XAFS 蛍光分析	5 – 20 keV
BL5S2 (Superbend)	粉末X線回折	5 – 23 keV
BL6N1 (Normal bend)	軟X線XAFS 光電子分光	1.75 – 6 keV
BL7U (Undulator)	真空紫外分光 超軟X線XAFS 光電子分光	0.03 – 0.85 keV
BL8S1 (Superbend)	X線反射率 薄膜表面回折	9.15 – 14.0 keV
BL8S3 (Superbend)	広角/小角散乱	8.2 keV, 13.5 keV
BL1N2 (整備中) (Normal bend)	軟X線XAFS 超軟X線XAFS 光電子分光	0.45 – 1.75 keV
BL2S1 (整備中) (Superbend)	単結晶X線回折	7 – 17 keV

### 3. 光源加速器の現状

あいち SR では、平成 25 年 3 月 26 日の供用開始時より日常的にトップアップ運転を行っている。Figure 4 は、典型的な 1 週間の運転状況として、平成 26 年 7 月 1 日 (火) から 7 月 4 日 (金) までの蓄積電流値を示している。1 週間のうち、月曜日はマシンスタディであり、火曜日から金曜日の 10:00 から 18:30 がユーザー利用時間である。土曜日、日曜日は運転を行っていない。トップアップ運転中の電流値の変化は、300 mA に対して約 0.2% である<sup>[4]</sup>。

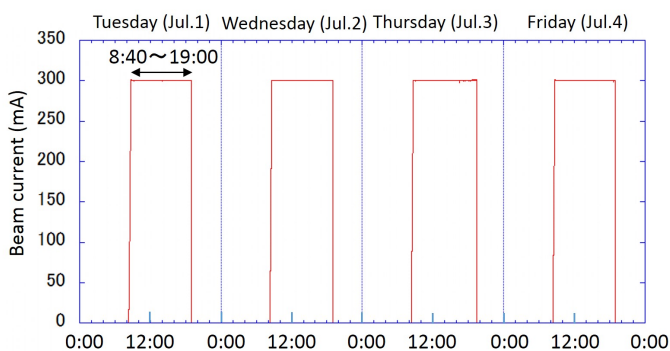


Figure 4: Beam current in one week.

あいち SR 光源加速器は、平成 26 年 1 月および平成 26 年の 7 月から 8 月にかけて、それぞれ約 1 ヶ月のメンテナンス期間を設け、超伝導偏向電磁石の冷凍機メンテナンスや大型の予備品交換などを行った。超伝導偏向電磁石のコイルは、4K-GM 冷凍機に

よって冷却しており、冷凍機は1万時間（約1年）稼働するとメンテナンスを行う必要がある。Figure 5は、平成26年7月22日、23日に2台の冷凍機交換を行った際のコイルの温度変化である。1台目の冷凍機を交換して約1日後に2台目の交換を行った。冷凍機交換直後は60 K程度まで温度が上昇しているが、どちらも24時間で3.6 K以下に達している。

冷凍機のメンテナンスは、平成24年12月、平成26年1月および平成26年7月～8月の3回行っているが、いずれの場合もメンテナンス後にコイル温度は3.6 K以下に復帰しており、超伝導偏向電磁石はこれまで問題なく稼働している。

あいちSRでは、直線加速器のクライストロン用サイラトロンにE2V社CX1836Aを使用している。平成25年秋にはミスファイアが発生する問題が生じたが、リザーバ電圧を下げて運用を行い、H26年1月のメンテナンスにおいてサイラトロンの交換を行った。また、ダストトラップと考えられるビーム損失も起きているが、バンチ数を80から110に変更したことでビーム損失の頻度は減少している。

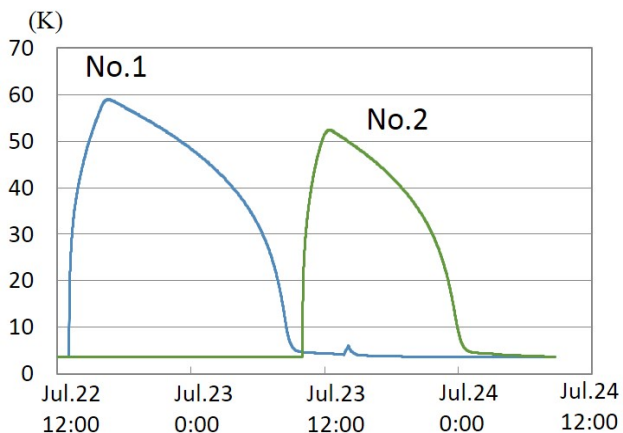


Figure 5: Temperature of superconducting coils of the superbends after the replacement of the refrigerators.

Figure 6は積分電流値に対する $I \cdot \tau$ 積の変化である。H25年12月には、ビームラインBL1N2の基幹部接続のため、蓄積リングの一部の真空を開放・復帰する作業を行った。青丸はH25年12月までの変化であり、赤丸は真空作業後のH26年2月以降の変化を示している。現在の $I \cdot \tau$ 積は約3300 mAhである。

あいちSRでは供用開始時よりトップアップ運転を行っているが、整備中のビームラインがバンプ軌道の範囲にあり、ビーム軌道の変化の影響を受けることが予想されている。このためパルス多極電磁石を用いた入射方法の導入を検討している<sup>[5]</sup>。また、フィードバック用の新たな電極を導入も検討している。

#### 4. まとめ

あいちシンクロトロン光センターは平成25年3月26日に供用を開始した。当初より、300 mAのトップアップ運転を行っている。6本のシンクロトロン光ビームラインが供用されており、さらに2本が整備中である。平成25年度は、82の企業、20の大学や研究機関等からの利用があった。平成25年度における光源の平均稼働率は94.2%であり、平成26年度(4/1～7/18)は98.5%である。

#### 参考文献

- [1] <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
- [2] <http://www.astf-kha.jp/>
- [3] N. Yamamoto, et al., Beam commissioning of central japan synchrotron radiation facility. 加速器, 9(4):223-228, 2012.
- [4] N. Yamamoto, et al., "Present Status of Top-up operation at Aichi SR Storage ring", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013, SAP023
- [5] N. Yamamoto, et al., "Design study of pulsed multipole injection for AichiSR storage ring", These Proceedings, SUP021

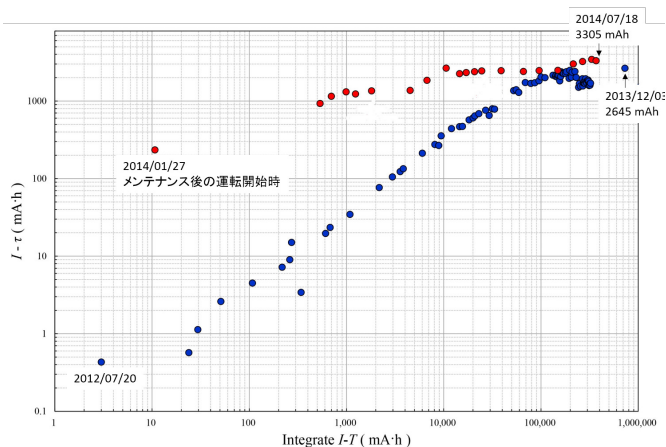


Figure 6: Product of the beam lifetime and storage current.