

あいち SR 光源加速器のコミッショニングと現状

COMMISSIONING AND PRESENT STATUS OF ACCELERATORS OF AICHI SYNCHROTRON RADIATION CENTER

高嶋圭史^{#, A)}, 保坂将人^{A)}, 山本尚人^{A)}, 高見 清^{B)}, 高野 琢^{A)}, 真野篤志^{A)}, 森本浩行^{A)},
加藤政博^{C)}, 堀洋一郎^{D)}, 佐々木茂樹^{E)}, 江田茂^{F)}

Yoshifumi Takashima^{#, A)}, Masahito Hosaka^{A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Kiyoshi Takami^{B)}, Takumi Takano^{A)},
Atsushi Mano^{A)}, Hiroyuki Morimoto^{A)}, Masahiro Katoh^{C)}, Yoichir, Hori^{D)}, Shigeki Sasaki^{E)}, Shigeru Koda^{F)}

^{A)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

^{B)} Osaka Prefecture University, 1-2 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, Osaka 599-8570

^{C)} Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences, Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{E)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8), Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{F)} Saga Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005

Abstract

Beam commissioning of accelerators of "Aichi Synchrotron Radiation Center" started late in March 2012. The first synchrotron radiation from the storage ring was observed on July 18, and the beam current of 300 mA was achieved in September 2012. The opening ceremony was held on March 22, 2013, and the facility has opened for users on March 26. Top-up operation has been carried out from the first.

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、電子エネルギー1.2 GeV, 周長 72 m の電子蓄積リングを備えたシンクロトロン光施設であり、ピーク磁場 5 T, 偏向角 12 度の超伝導偏向電磁石を 4 台備えることによって、比較的小型でありながら複数の硬 X 線ビームラインが建設可能である。施設の計画、建設は公益財団法人科学技術交流財団、愛知県、大学連合（名古屋大学、名古屋工業大学、豊田工業大学、豊橋技術科学大学）、産業界の連携により行われ、運営は科学技術交流財団によって行われている。2013 年 3 月 22 日に開所式が行われ、3 月 26 日からシンクロトロン光のユーザー利用がはじまっている。

あいち SR 計画は、名古屋大学において 1991 年頃から検討が行われてきたシンクロトロン光施設計画が発展したものであり、計画の当初より小型でありながら硬 X 線の利用が可能な施設として検討が続けられてきた^[2,3]。2003 年には、当時の愛知県における科学技術交流センター構想の再構築に際して、シンクロトロン光施設建設の検討がはじまり、現在の愛知県における次世代モノづくり技術の創造・発信の拠点である「知の拠点あいち」における「あいち SR」につながっている。

2. あいち SR 光源加速器の概要

あいち SR の光源加速器の主なパラメータを Table 1 及び Table 2 に示す。

Table 1: 蓄積リングパラメータ

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 ⁻⁴
モーメントム	0.019
コンパクト化ファクター	
(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)
ハーモニクス	120

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

Table 2: ブースターシンクロトロン及び直線加速器のパラメータ

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

最大の特徴は、電子蓄積リングのエネルギーを1.2 GeV という比較的低い値に抑え、偏向電磁石の一部を超伝導 (Superbend) とすることで硬 X 線を発生することである。超伝導電磁石を挿入光源として導入する方法もあるが、取り出せるビームライン数は限られており、複数のビームラインを取り出そうとすると、下流側のダクトや電磁石設計が複雑になる。また、本計画のように周長の短い蓄積リングでは、挿入光源を設置できる直線部の数も限られる。さらに、低エネルギーのリングに高磁場ウィグラーを入れるとビームダイナミクス面での影響も大きくなり、その補正が不可欠となる。偏向電磁石を超伝導とすることにより、小型の蓄積リングでありながら多数の硬 X 線ビームラインの建設が可能となる。

蓄積リングは Triple Bend Cell を基本構造としており、偏向角 39 度の常伝導偏向電磁石 2 台の間に、偏向角 12 度の超伝導偏向電磁石 1 台を配置している。この基本構造を 4 回繰り返すことで蓄積リングを構成している。Figure 1 に蓄積リングの基本構造におけるベータ関数、分散関数を示す。超伝導偏向電磁

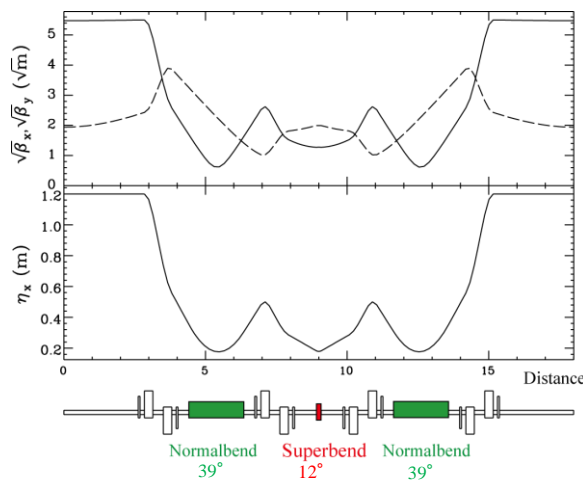


Figure 1: 電子蓄積リング 1 セルの光学関数

石の部分でビームの広がりを抑えるため、ベータ関数、分散関数になるべく小さくなるようにしている。また、エミッタンスを抑えるため直線部分に 1.2 m の分散を持たせている。

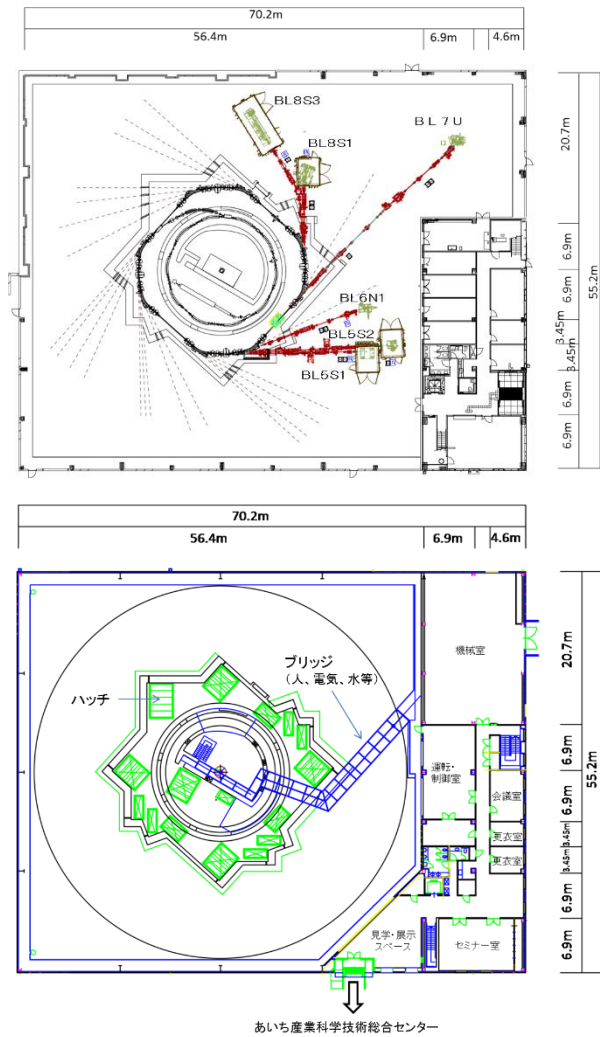


Figure 2: あいち SR の 1 階 (上図) 及び 2 階 (下図) の平面図

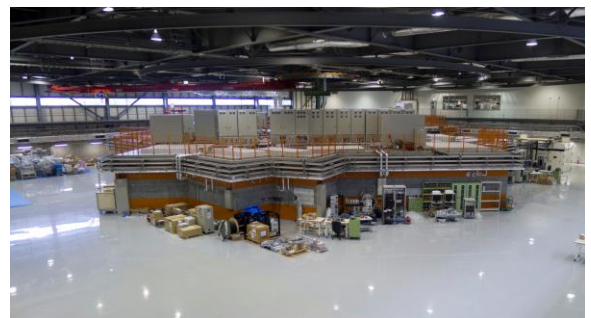


Figure 3: あいち SR 実験ホールの写真。

ブースターシンクロトロンは、FODO Cell を基本構造としており、周長は 48 m である。加速エネルギーは 1.2 GeV であり、蓄積リングへフルエネルギー入射を行う。直線加速器からの入射は、1 つのキッカー電磁石を用いたシングルターンでの On-Axis 入射である。また、蓄積リングへの出射においても、立ち上がり時間 130 ns 程度のキッカー電

磁石によるシングルターンでの取り出しを行っている。

Figure 2 に施設の 1 階および 2 階の平面図, Figure3 は実験ホール内部の写真である。蓄積リング及び実験ホールはおよそ 70 m × 55 m の建物内に配置する。実験ホールは吹き抜けとし, 実験ホールの中央部に加速器室を設け, 蓄積リング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。加速器室内へのアクセスは, 建屋 2 階の加速器制御室からブリッジを渡って行く。加速器に必要な電気, 冷却水, 圧縮空気等もこのブリッジを通して供給している。実験ホール天井には, 2.8 t 旋回クレーンが設置されている。このクレーンは, 実験ホール中央部にある柱を中心に旋回する。実験ホール内に存在する柱はこの 1 本であり, ビームライン等の配置が比較的自由に行える。

蓄積リングへの電子の入射は, ブースターシンクロトロンを用いて 1.2 GeV のフルエネルギーで行う。これにより, いわゆるトップアップ運転が可能である。また, 超伝導偏向電磁石の励磁電流が一定に保てることは, 立ち上げ期間の短縮に繋がったと考えている。

3. コミッショニングおよび現状

建屋の建設は 2010 年 8 月にはじまり, 2011 年 8 月にほぼ完成した。その後, 加速器やビームラインを設置するための精密測定の後に据え付け作業を行い, 2012 年 3 月には直線加速器のビーム調整を開始し, 3 月 25 日に 50 MeV の加速に成功した^[4]。

2012 年 4 月中旬からブースターシンクロトロンの調整を行い, 4 月 19 日に 50 MeV での周回に成功, 4 月 28 日には 1.2 GeV の加速に成功した。この時期のブースターシンクロトロンにおける加速電流値は約 30 μ A (約 5 pC) であった。ブースターシンクロトロンの加速電流値が低い状態は 11 月頃まで続いたが, 加速途中のチューンや入射軌道の調整や入射キッカーのジッターを抑えることによって, 現在では 1 mA 程度が実現できており, 15 分程度で蓄積リングに 300 mA 蓄積できている。Figure 4 にブースターシンクロトロンにおける入射から出射までの電流値変化を示す。

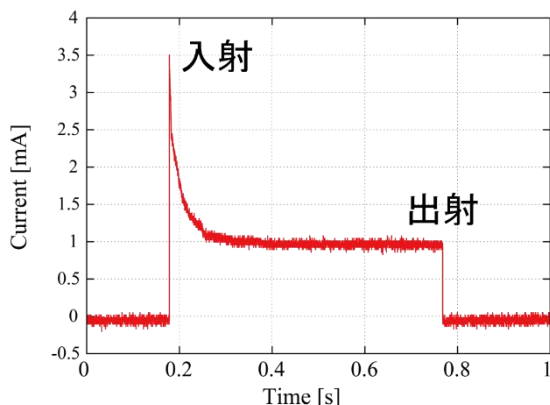


Figure 4 ブースターシンクロトロンの電流値

蓄積リングの調整は 6 月下旬からはじめた。当初はブースターシンクロトロンの加速電流値が低かったため, ボタン電極からの信号をオシロスコープによって測定し, ビーム位置を推定していたのであるが, ビーム位置モニタ処理回路に不具合があったことにより, この方法を長期間にわたって使うことになった。

蓄積リングにおいてビームの蓄積に成功したのは 7 月 18 日であった。その後, 真空焼き出しを続け, 9 月 7 日に 300 mA の蓄積電流値を達成した。Figure 5 は蓄積電流値の積分と $I \cdot \tau$ 積のグラフである。2013 年 8 月現在の $I \cdot \tau$ 値はほぼ 2400 mA \cdot h である。

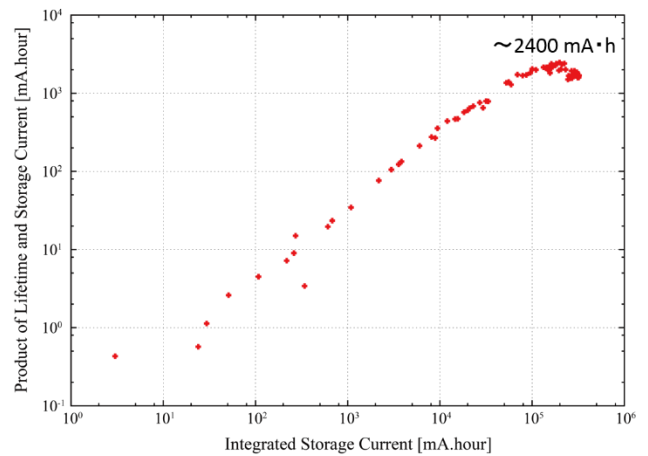


Figure 5 $I \cdot \tau$ 積

Figure 6 に 2013 年 8 月 1 日の運転における蓄積電流値を示す。トップアップ運転での電流値の変化は, 約 0.2% である^[5]。

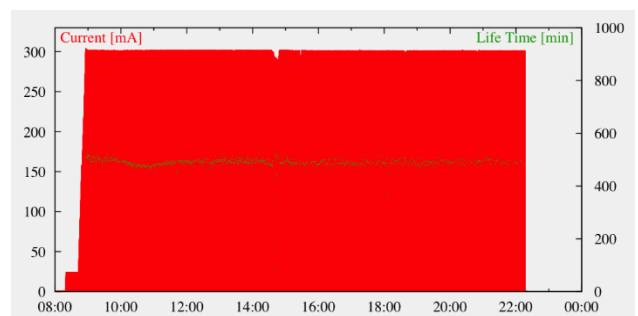


Figure 6 1 日の蓄積電流値の例 (2013 年 8 月 1 日)

超伝導偏向電磁石の調整では, 4 台の超伝導偏向電磁石は電源がそれぞれ独立しているため, 4 台の電流値を個別に制御しながら, 分散関数等のパラメータが目的の値となる最適な電流値を求めた^[6]。

各超伝導偏向電磁石の冷却には 1 台の 4K GM 冷凍機を用いており, 冷媒は使用していない。この冷凍機は 1 年に 1 回のメンテナンスが必要であり, 2013 年 1 月 21 日~25 日, 2 月 4 日~8 日の 2 回にわたって行われた。1 回目で 2 台の超伝導偏向電磁石の冷凍機ヘッドを新品に交換し, 1 回目に取り出した冷凍機ヘッドのオーバーホールを行った後,

2 回目のメンテナンスで残る 2 台の超伝導偏向電磁石の冷凍機ヘッドと交換した。冷凍機の交換は、いわゆるコールドメンテナンスと呼ばれる方法により、低温状態のままで行われた。Figure 7 に冷凍機交換時の超伝導偏向電磁石の温度変化の様子を示す。常温の新しい冷凍機を取り付けたことによりコイルの温度は約 58 K まで上昇したが、ほぼ 1 日で交換前の 3.6 K にもどった。

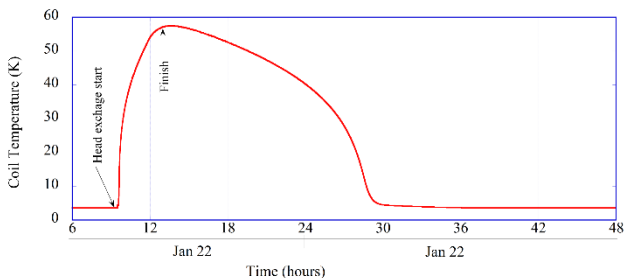


Figure 7 超伝導偏向電磁石コイルの温度変化

現在、直線加速器の出射電荷量はほぼ 1 nC であり当初の目標値に達している。直線加速器からブースターシンクロトロンへの入射効率およびブースターシンクロトロンでの加速効率はそれぞれ約 60 % と約 40 % であり、もう少し改善できる可能性がある。ブースターシンクロトロンから蓄積リングへの入射効率は約 50 % であり、1 Hz 毎に行われる 1 回の入射で、約 0.4 mA づつ蓄積することができており、約 15 分ほどで 300 mA に達している。

3 月 26 日に供用がはじまってから、7 月 31 日までの平均稼働率は約 96 % である。比較的大きなトラブルとしては、蓄積リング偏向電磁石の電流値が突然変化したり、高エネルギービーム輸送路偏向電磁石電源が過電圧異常により運転できないことがあった。これらは電磁石電源に何らかの不具合があると考えられるが、今までのところはっきりとした原因が特定できておらず、基板のハンダ不良箇所の補修を行い様子を見ているところである。

4. まとめ

あいちシンクロトロン光施設は、愛知県の進める次世代モノづくり技術の創造・発信の拠点である「知の拠点あいち」の中核施設として整備が進められてきた。

加速器の調整は 2012 年 3 月から行われ、2012 年 7 月に蓄積リングでのビーム蓄積に成功し、9 月には蓄積電流が当初の予定である 300 mA に達した。2013 年 3 月 22 日に開所式を行い、3 月 26 日よりシンクロトロン光ユーザーへの供用がはじまっている。

参考文献

[1] <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
 [2] 高嶋圭史 他, “中部シンクロトロン光利用施設(仮称)計画”, 日本放射光学会誌, Vol. 21. No. 1, 10 (2008).

[3] 竹田美和 他, “中部シンクロトロン光利用施設の建設がスタート”, 日本放射光学会誌, Vol. 23. No. 2, 88 (2010).
 [4] N. Yamamoto, et al., Beam commissioning of central japan synchrotron radiation facility. 加速器, 9(4):223-228, 2012.
 [5] N. Yamamoto, et al., “Present Status of Top-up operation at Aichi SR Storage ring”, These Proceedings, SAP023
 [6] M. Hosaka, et al., “Present Status of Super-conductive Bending Magnets at Aichi SR”, These Proceedings, SAP022