

# COMMISSIONING OF ACCELERATORS OF THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

N. Yamamoto<sup>\*A, B)</sup>, M. Hosaka<sup>A, B)</sup>, K. Takami<sup>B)</sup>, T. Takano<sup>A, B)</sup>, A. Mano<sup>A, B)</sup>,  
E. Nakamura<sup>A, B)</sup>, H. Morimoto<sup>A, B)</sup>, Y. Takashima<sup>A, B)</sup>, M. Katoh<sup>B, C)</sup>,  
Y. Hori<sup>A, D)</sup>, S. Sasaki<sup>A, E)</sup>, S. Koda<sup>A, F)</sup>, A. Murata<sup>G)</sup>, K. Nakayama<sup>G)</sup>

<sup>A)</sup>Synchrotron radiation Research center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603

<sup>B)</sup>Aichi Science & Technology Foundation (ASTF), 250-3, Minamiyamaguchi-cho, Seto, Aichi 489-0965

<sup>C)</sup>UVSOR, Institute for Molecular Science, 38 Nishigo-Naka, Myodaiji, Okazaki, 444-8585

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

<sup>E)</sup>JASRI/SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

<sup>F)</sup>SAGA-LS, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005

<sup>G)</sup>Toshiba Corp., 8 Shinsugita, Isoko-ku, Yokohama, 235-8523

## Abstract

Central Japan Synchrotron Radiation (SR) Facility Project is making progress for the service from FY2012. Construction of the SR building and installs of accelerators have been completed in the Aichi area of Japan, and the beam commissioning is started in Spring of 2012. The key equipments of the accelerators are a compact electron storage ring with the ability to supply hard X-rays and full energy injectors for the top-up operation. The accelerators consist of an electron storage ring, a booster synchrotron ring, and an injector linac. Up to now, it is confirmed that the 1.2 GeV storage ring works with low current beams around 40 mA. However, some problems remain on the accelerators. In this paper, the present status of the accelerators are reported.

## 中部シンクロトロン光利用施設における光源加速器コミッショニング

### 1. はじめに

愛知県名古屋市の東方約 20km の豊田市、瀬戸市にまたがる「中部シンクロトロン (SR) 光利用施設」では (株) 東芝による光源加速器群の建設が 2012 年 3 月末に終わり、その後引き続きビーム試験が開始された。また、当初開設予定のビームライン 6 本<sup>[1]</sup>についても既に建設が完了しており、現在は各種光学・計測系の調整段階に入っている。

当施設は学術研究はもちろん、産業界をはじめ幅広い分野での利用を目的とし、計画段階から愛知県、地域の産業界、大学連合 (名古屋大学、名古屋工業大学、豊橋技術科学大学、豊田工業大学) らが協力してきた。施設の整備・運営母体は (財) 科学技術交流財団<sup>1</sup>であり、2012 年度内の供用開始が計画されている。

名古屋大学シンクロトロン光研究センター (NUSR) 光源部門は加速器群の設計・立ち上げを主に担当しており、光源加速器群の請負業者の決定した 2009 年 12 月より、その請負業者である (株) 東芝と綿密な打合せを繰り返してきた。<sup>[3][4]</sup>

光源加速器群は東芝の建設グループによる RF 空洞エージング及び線形加速器試験で所定の性能を確認された後、2012 年 3 月末に (財) 科学技術交流財団に引き渡された。以降、中部 SR では NUSR 光源部門が主体となり東芝メンバーと協力しながらビーム試験を行っている。

ビーム試験は現在、入射器に幾つかの問題を残しながらも蓄積リングの調整運転に入っている。中部 SR の詳細については参考文献を参照して頂くものとし、本発表では光源加速器群について簡単に概要を説明し、さらに現在の各加速器の現状を紹介する。

### 2. 光源加速器群の概要

光源加速器群の設計パラメータを表 1 に、各装置の配置図を図 1 に示す。中部 SR では地上 1F 部分に星形の遮蔽壁を設け<sup>[5]</sup>、その内部に光源加速器一式を配置している。光源加速器は蓄積リング、ブースターシンクロトロン (ブースター) 及び線形加速器から成る。

光源加速器の特徴は蓄積リングの偏向電磁石に超伝導電磁石を採用したこと、トップアップ運転の早期実現のためフルエネルギー入射可能なブースターを備えることである。ビームラインは各偏向電磁石と一つの挿入光源 (Apple-II 型アンジュレータ) からシンクロトロン光を利用し、供用開始時は 6 本、将来的には約 30 本のビームライン増設が可能となっている。

### 3. 線形加速器

線形加速器部の設計は NUSR の仕様要求及び提案をもとに (株) AET によって行われた。<sup>[6]</sup> 線形加速器部は CPI 社 Y-845 を熱電子銃に用いた直流型の 100kV 電子銃、S-band のプリバンチャー、バンチャー、1.5m レギュラー加速管 2 本から成る。電子銃で蓄積リングの基準信号に同期し 1Hz で生成された電子ビームは、プリバ

\* naoto@nagoya-u.jp

<sup>1</sup>http://www.astf.or.jp/index.html

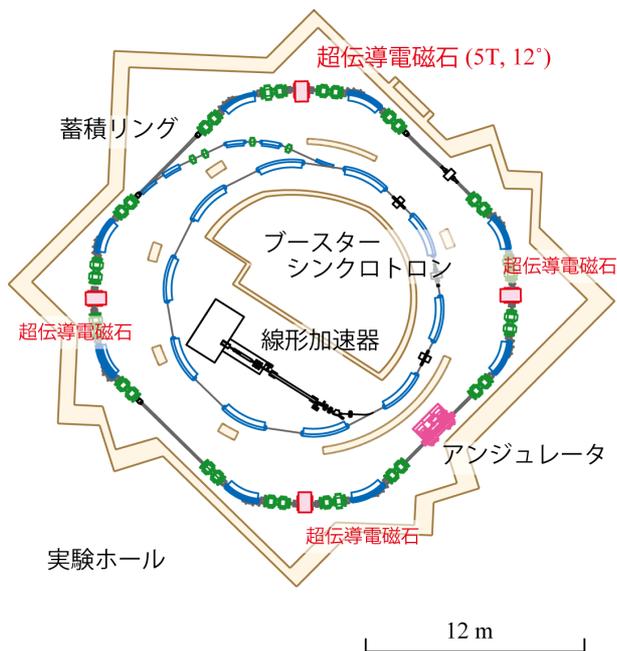


図 1: 光源加速器の概要図。蓄積リング、ブースターシンクロトロン、線形加速器から成る。

ンチャー、バンチャー管を通して約 12 MeV に、進行波管型のレギュラー加速管二本において 50 MeV まで加速され、その後偏向電磁石で 30 度偏向され低エネルギー輸送路に導かれる。ビーム性能は偏向電磁石の 0 度ラインでエミッタンス、30 度偏向後のスクリーンモニタまたはチャージモニタとスリットによってエネルギー拡がりを測定可能である。電子銃で生成されるビームパルス長はガンバルサー (Kentech 社 CPS1/M High voltage pulse generator) のユニット交換により、560 ps, 760 ps, 1.05 ns の 3 段階に切り替えが可能となっている。

現状において、線形加速器から得られる電子ビームの性能は電荷量 0.7 nC パルス幅 560 ps に対しエミッタンス  $\sim 100 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  (RMS), エネルギー拡がり 0.8% (RMS, 10 ショット平均) と未だ当初の設計目標は満たしていない。さらに、ショット毎ではエネルギーが 1% 以上ふらつくこともあり、後述するブースターへの入射にも大きな影響を与えている。この要因は現在調査中であるが、電子銃直下のステアリング電磁石が設計ミスにより十分に動作していないこと、各加速管のエージングが十分ではなく時折小さな放電がみられること、クライストロンモジュレータの充電電圧が不安定であること、が判明しておりこれらのことが起因しているのではないかと考えている。

また、高周波導波管の一部はコストを重視し、SF<sub>6</sub> 充填タイプを採用しているが、未だリークを解決できておらず、数週間に一度の SF<sub>6</sub> の充填が必要となっている。

#### 4. ブースターシンクロトロン

ブースターシンクロトロンは周長 48 m の FODO 型のラティス構造であり、電子ビームを 50 MeV からフルエネルギーである 1.2 GeV まで加速する。線形加速器から低エネルギー輸送路、セプタム電磁石を経由し

表 1: 光源加速器のパラメータ

<b>Storage ring</b>	
Electron energy	1.2 GeV
Circumference	72 m
Current	>300 mA
Natural emittance	53 nm-rad
Betatron tune	(4.72, 3.23)
RF frequency	499.654 MHz
RF voltage	500 kV
RF bucket height	>0.990 %
Harmonics number	120
Energy spread	$8.41 \times 10^{-4}$
Magnetic lattice	Triple Bend Cell $\times$ 4
Normal bend	1.4 T, 39°
Superbend	5 T, 12°
$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$ @superbend	(1.63, 3.99, 0.179)
$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$ @straight section	(30.0, 3.77, 1.20)
<b>Booster synchrotron</b>	
Electron energy	50 MeV – 1.2 GeV
Circumference	48 m
Current	>5 mA
Natural emittance	200 nm-rad
RF frequency	499.654 MHz
Magnetic lattice	FODO Cell
Harmonics number	80
Injection scheme	On-axis (single turn)
Repetition rate	$\sim$ 1Hz
<b>Injector linac</b>	
Beam energy	50 MeV
Charge per pulse	>1 nC
Pulse length	1 ns
RF frequency	2,856 MHz
Repetition rate	$\sim$ 1Hz

て入射された 50 MeV の電子ビームはセプタム電磁石の次の直線部でファーストキッカーによりオンアキシス入射される。入射された電子ビームは約 600 ms で 1.2 GeV まで加速され、ファーストキッカー及び取り出しセプタムによって出射される。出射時のエミッタンスは設計値で 200 nrad である。

ブースターシンクロトロンは主に (株) 東芝 を中心に設計されており、真空ダクトのアパーチャを水平  $\pm 20$  mm (最小  $\pm 10$  mm), 垂直  $\pm 10$  mm に抑えるなどし、電磁石部をコンパクトに抑え低コスト化の努力が成されている。<sup>[8]</sup> また、高周波源としても 10 kW 出力の半導体アンプを採用しており、立体回路・ダミーロード等高周波系システムの小型化に成功している。

表 2 に現状における入射器の達成パラメータを示す。ただし、ブースターシンクロトロンにおけるエミッタンスはチューンより推定したものである。当初、ブースター用電磁石電源の不安定性に苦しめられたが、その

表 2: 入射器の現状

Booster synchrotron	
Horizontal Tune	2.83
Vertical Tune	2.23
Natural emittance	200 nm-rad (calc)
RF frequency	499.654 MHz
Injection Current	~ 4 mA
Extraction Current	0.4 mA (average)
Injector Linac	
Beam Charge	~ 0.7 nC
Pulse length	0.56 ps (E-gun)
Normalized Emittance	
Horizontal	104 $\pi$ .mm.mrad
Vertical	41 $\pi$ .mm.mrad
Energy Spread	0.8 % (RMS)

後電源回路パラメータ改修により安定化に成功しビーム周回・加速に成功した。現状では設計値とほぼ同じエミッタンスでビームを加速し蹴り出すことには成功しているが、ブースターへの入射・加速効率が低くわずか8%程度に留まっている。図2にブースターシンクロトロンでのビーム周回の様子を示す。図中C4(緑)がDCCTの出力(電流値に比例)であり、入射直後(時間軸100ms/div)にほとんどの電子ビームが失われていることがわかる。今後、入射路の最適化とブースター加速軌道について詳細な調査を行い、将来的には少なくとも30%以上の加速効率を実現させる予定である。

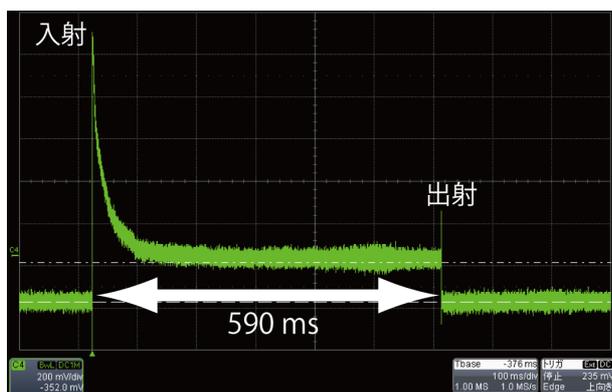


図 2: ブースターシンクロトロンでのビーム周回の様子

## 5. 蓄積リング

蓄積リングはエネルギー 1.2 GeV, 周長 72 m で蓄積電流 300 mA, エミッタンス 53 nmrad を目指している。ラティス構造は 5T の超伝導偏向電磁石 4 台、常伝導電磁石 8 台、を用いた 4 回対称の Triple Bend Cell を採用しており、超伝導偏向電磁石から得られるシンクロトロン光の臨界エネルギーは 4.8 keV である。また、挿入光源としてアンジュレータ 1 台がインストールされている。本蓄積リングの特徴である超伝導偏向電磁石は液体 He などを用いず、各電磁石毎に一台の 2 ステージ

の 4K-GM 冷凍機 (住友重機械工業 SRDK-415D-W71C) を用いて冷却しており、現在までクエンチ等を起こすことなく問題なく稼働している。

蓄積リングへのビーム入射は従来から実績のあるパンク入射を採用しており、4 台のパルス電磁石を用い入射器の繰り返し周波数である 1Hz でシングルパンク入射を行う。

蓄積リングへの一秒以上のビーム周回は 2012 年 7 月 18 日に成功し同日に、1.5 mA までの蓄積にも成功した。中部 SR では偏向電磁石が電源 5 つ (偏向電磁石 1 つと超伝導偏向電磁石 4 つ) に別れているうえに超伝導偏向電磁石は磁場測定結果の誤差が相対的に大きく、入射ビームと各偏向電磁石のエネルギー調整に時間が要した。調整当初ビームが一定時間周回するまではアクロマートなラティスを用いることで実質的なエネルギーアパーチャを広げビーム調整を行い、初のビーム蓄積を実現した。図 3 に蓄積リング、初蓄積時の真空度変化を示す。蓄積の成功した 2012/07/18 18 時 19 分に真空度が突然上昇する様子、その約一時間後には積み増しに成功し真空度が徐々に上がっていく様子がわかる。

ビームが一旦蓄積された後は、蓄積リングと周回する電子ビームのダイナミクスを調べることが可能となり、現在は設計とほぼ同じチューンで蓄積リングを運転している。蓄積リングのコミッショニングは入射器の不調により入射電荷量も安定性も十分とは言い難い状況であるが、トップアップモードで真空焼だしとビーム調整が続けられている。8 月初旬の状態では、蓄積電流値 38 mA, 電流  $I \cdot$  寿命  $\tau$  積 で 9.0 mA.hour を記録している。

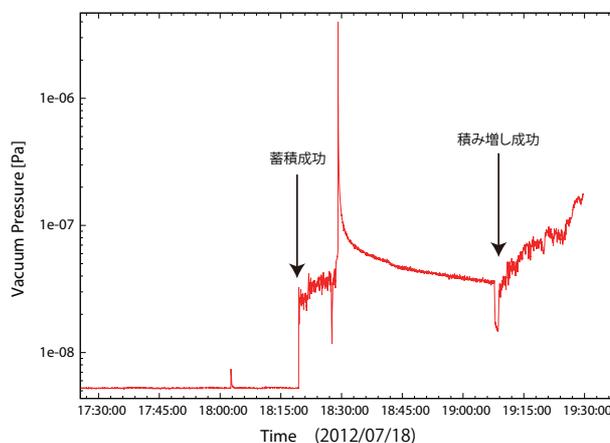


図 3: 蓄積リング、初蓄積時の真空度変化

## 6. マスターオシレータ及びタイミング系

ビーム調整中の問題の内、各加速器に共通な問題としてマスターオシレータの不具合があり、各タイミング系や高周波系に影響が生じている。マスターオシレータはリング系の 499.654 MHz と線形加速器系の 2856 MHz の同期をとるため、共通の基準クロックから作成する設計であった。<sup>[9]</sup> これは全てのタイミング系を同期させるのに有効な手段として採用されたが、当初の運転状況では上記基準クロックが安定せず結果的に各タイミング間に大きなジッターを与えることとなった。現在、この状況は完全には修復できておらず、マスターオシレータ

の基準信号としてルビジウムの外部クロックを用いて運転している。

## 7. 制御システム

制御については根幹に EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)<sup>[10]</sup> を採用し、GUI 及びシーケンサはそれぞれ EPICS ツールの一つである EDM と SNL を用いたシステムを用いている。EPICS はネットワークを用いて加速器一式の運転・監視を制御室のみならず任意の場所や端末で行えるため非常に強力なツールである。しかしその一方、シーケンサの機能を備えるワークステーションやネットワークの負荷が一時的に高まると運転に影響を与える。

中部 SR ではコストダウンのため主要なシーケンサはワークステーション一台、また一つのスイッチングハブに数台のプログラマブルコントローラ (PLC) がぶら下がる構造となっているため、長期連続運転状態では負荷が大きくなり運転に支障が生じる事態が幾度か起こっている。今後ネットワークの増強やワークステーションの負荷分散など対策が必要である。

## 8. 加速器データベース

EPICS と MySQL<sup>[11]</sup> を利用し加速器運転状況のデータベースを構築した。真空度・温度、蓄積電流値など常時監視すべき項目は最短周期 1 Hz で、各設定値やインターロックなどは値の変化に応じてデータベースに記録している。データベース化しているレコード数は約 6000 項目であり、データ量は圧縮後で一日辺り 2GB 弱となっている。

本データベースは安価な市販の計算機 (Mac Mini) に外付けの RAID ハードディスク (6 TB) を接続し構築したが、本年 3 月から現在まで大きなトラブルはなく運転状況の把握や加速器トラブルの調査に役立っている。

## 9. まとめと今後の予定

中部 SR は線形加速器部・ブースターシンクロトロン・蓄積リングから成るシンクロトロン光施設であり、2012 年 3 月末より光源加速器群のビーム試験を開始した。現在までに蓄積リングは、設計チューン付近で最大蓄積電流 38 mA、電流・寿命積で 9.0 mA・hour を達成。入射器については未だ目標の性能は達成してはいないが、ブースター入射・加速効率 8% (目標 30% 以上)、蓄積リング入射効率 15% (目標 70% 以上) を得ている。今後、2012 年度中の供用開始へむけ、蓄積リングへの入射率 1 mA/shot、蓄積電流 300 mA を目標に調整を続ける予定である。

## 10. 謝辞

本研究において大熊 春夫 (JASRI/SPring-8)、小林幸則 (KEK) 両氏には光源加速器群の設計において貴重なご意見を頂き大変感謝しております。

KEK の原田健太郎氏にはブースターシンクロトロン四極・六極電磁石磁場測定において多大な協力を頂き感謝しております。

最後に本計画の実現に向け、共に活動してきて下さった名古屋大学シンクロトロン光研究センタースタッフ及

び学内の協力教員、科学技術交流財団および愛知県産業労働部の皆様方に感謝致します。

## 参考文献

- [1] M. Hosaka, et.al., "中部シンクロトロン光利用施設の現状", *Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aug. 2011
- [2] Y. Takashima, et.al., "Present Status of Accelerators of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility", *These Proceedings*, THPS012
- [3] Y. Takashima, T. Yamane, Y. Takeda, K. Soda, S. Yagi, T. Takeuchi, et.al., *AIP Conference Proceedings*, **879**, 75-78 (2007)
- [4] N. Yamamoto, Y. Takashima, M. Hosaka, H. Morimoto, K. Takami, et.al., "中部シンクロトロン光利用施設 (仮称) 計画のための光源加速器の検討" *Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aug. 5-7, 2009
- [5] Y. Takashima, et.al., "Radiation Shielding of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility", *These Proceedings*, THPS062
- [6] M. Yamamoto, et.al., "DESIGN OF THE 50MEV LINAC OF THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY", *These Proceedings*, THPS027
- [7] S. Matsuda, et.al., "Vacuum system for the Central Japan Synchrotron Radiation Facility", *These Proceedings*,
- [8] K. Nakayama, et.al., "BOOSTER SYNCHROTRON FOR CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY", *These Proceedings*, THPS046
- [9] A. Murata, et.al., "ACCELERATOR SYSTEM FOR THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY", *These Proceedings*, THPS047
- [10] URL:<http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [11] URL:<http://www.mysql.com/>