

3GeV 次世代放射光施設の加速器システム

ACCELERATOR SYSTEM FOR HIGHLY BRILLIANT 3GeV LIGHT SOURCE PROJECT

西森信行^{#, A)}, 小林創^{A)}, 吉川博^{A)}, 渡部貴宏^{B,A,C)}, 高野史郎^{B,A,C)}, 大石真也^{B,A,C)}, 深見健司^{B,A,C)}, 安積隆夫^{B,A,C)}, 高橋直^{B,A,C)}, 近藤力^{B,A,C)}, 大島隆^{B,A,C)}, 糸賀俊郎^{B,A,C)}, 佐治超爾^{B,A,C)}, 正木満博^{B,A)}, 小路正純^{B,A)}, 早乙女光一^{B,C)}, 木村洋昭^{B,C)}, 馬込保^{B,C)}, 杉本崇^{B,C)}, 安積則義^{B,C)}, 細田直康^{B,C)}, 田村和宏^{B)}, 藤田貴弘^{B)}, 出羽英紀^{B)}, 谷内努^{B)}, 青木毅^{B)}, 高雄勝^{B)}, 張超^{B)}, 柳田謙一^{B)}, 櫻井辰幸^{B)}, 谷内友希子^{B)}, 松原伸一^{B)}, 川瀬守弘^{B)}, 稲垣隆宏^{C)}, 原徹^{C)}, 田中隆次^{C)}, 前坂比呂和^{C)}, 福井達^{C)}, 岩井瑛人^{C)}, 松井佐久夫^{C)}, 惠郷博文^{D,A)}, 田中均^{C,A)}

Nobuyuki Nishimori^{#, A)}, Hajime Kobayashi^{A)}, Hiroshi Yoshikawa^{A)}, Takahiro Watanabe^{B,A,C)}, Shiro Takano^{B,A,C)}, Masaya Oishi^{B,A,C)}, Kenji Fukami^{B,A,C)}, Takao Asaka^{B,A,C)}, Sunao Takahashi^{B,A,C)}, Chikara Kondo^{B,A,C)}, Takashi Ohshima^{B,A,C)}, Toshiro Itoga^{B,A,C)}, Choji Saji^{B,A,C)}, Mitsuhiro Masaki^{B,A)}, Masazumi Shoji^{B,A)}, Kouichi Soutome^{B,C)}, Hiroaki Kimura^{B,C)}, Tamotsu Magome^{B,C)}, Takashi Sugimoto^{B,C)}, Noriyoshi Azumi^{B,C)}, Naoyasu Hosoda^{B,C)}, Kazuhiro Tamura^{B)}, Takahiro Fujita^{B)}, Hideki Dewa^{B)}, Tsutomu Taniuchi^{B)}, Tsuyoshi Aoki^{B)}, Masaru Takao^{B)}, Chao Zhang^{B)}, Kenichi Yanagida^{B)}, Tatsuyuki Sakurai^{B)}, Yukiko Taniuchi^{B)}, Shinichi Matsubara^{B)}, Morihiro Kawase^{B)}, Takahiro Inagaki^{C)}, Toru Hara^{C)}, Takashi Tanaka^{C)}, Hirokazu Maesaka^{C)}, Toru Fukui^{C)}, Eito Iwai^{C)}, Sakuo Matsui^{C)}, Hiroyasu Ego^{D,A)}, Hitoshi Tanaka^{C,A)}

^{A)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{C)} RIKEN SPring-8 Center

^{D)} KEK

Abstract

A compact 3GeV light source project which will deliver the highly brilliant soft X-rays is launched in Japan. The storage ring is designed based on a 4-bend achromat lattice to achieve the low emittance for a small circumference of about 350 m. In total, 26 beamlines are available including 12 multi-pole wiggler beamlines. The natural horizontal emittance is expected to be around 1.1 nm.rad, and the maximum brilliance will exceed 10^{21} photons/sec/mm²/mrad²/0.1% b.w. for the 1 - 3 keV region with a stored current of 400 mA. The accelerator components are designed based on the R&D studies for the SPring-8 upgrade project. A full energy injector linac equipped with a thermionic gun and C-band accelerating structures developed for SACLA is employed for the injection of the low emittance beam to the ring. A future upgrade for the injector linac as an SXFEL driver is also envisioned.

1. はじめに

3GeV 次世代放射光施設を仙台に建設する計画が進められている[1]。この施設では軟X線からテnder X 線領域で高コヒーレンス・高輝度光を提供し、かつ EUV から硬 X 線まで広い波長領域をカバーし、硬 X 線領域を得意とする SPring-8 と相補的な役割を果たす。目標とする軟 X 線領域の輝度 $>10^{21}$ photons/sec/mm²/mrad²/0.1% b.w. であり、1 keV 付近において coherent ratio $R=10\%$ 程度を目指す。ここで、

$$R[\%] = 100 \left(\frac{\epsilon_{ph}}{\epsilon_x + \epsilon_{ph}} \right) \left(\frac{\epsilon_{ph}}{\epsilon_y + \epsilon_{ph}} \right),$$

$\epsilon_{x,y}$ は電子ビームの水平、垂直エミッタンスで、 $\epsilon_{ph} = \frac{\lambda}{4\pi}$ は光の回折限界エミッタンスである。長さ L のアンジュレータ内でベータ関数は光ビームに整合を仮定する[2]。輝度と coherent ratio の条件を満足するため、ビーム電

流 400 mA、エミッタンス 1 nm.rad を 3GeV 次世代放射光施設の目標とする。Top-up 運転を行うが、信頼性の高い運転を行うため、ビーム寿命は 5 時間以上を目指す。

加速器システムは SPring-8/SACLA で培われた加速器デザイン・技術に基づく。その理由は、SPring-8 で Top-up 運転により蓄積ビーム電流変動 0.06%以下を実現し、加速器が故障なく連続的に平均 200 時間の運転を実現できる信頼性を有していること、XFEL 施設 SACLA で、高加速電界を有する C バンド加速管など最先端の技術実績があるためである。3GeV 光源は SPring-8/SACLA の知識・技術を利用すると共に、軟 X 線 FEL への拡張性、限られたスタッフによる高信頼性運転、タイトなスケジュールと限られた予算の中で最先端性能の実現を目指す。

2. 加速器システム

3GeV 加速器システムは Fig.1 に示すように周長 350 m のコンパクトな蓄積リングと長さ 110 m の線型加速器

[#] nishimori.nobuyuki@qst.go.jp

で構成される。最新の加速器設計である MBA(Multi-Bend Achromat)ラティスを取り入れて低エミッタンス化し、軟 X 線高輝度光の提供を目指す。16 セル、4BA で構成される蓄積リングは各セルが 5.4 m のアンジュレーター用長直線部と、1.6 m の多極ウィグラー用の短直線部を持つ。RF 加速空洞を設置する長直線部と線型加速器からのビームを蓄積リングに入射する入射部用の直線部を除いた 14 本の長直線部と、電子ビームモニタ用の 4 本を除く 12 本の短直線部が放射光ビームラインに用いられる。合わせて 26 本のビームラインを提供できる。3GeV 蓄積リングの主要パラメータは Table 1 に示されている。

設計したラティスにおいて自然水平エミッタンスは 1.1 nm.rad で 1~3 keV の X 線で最大輝度は 10^{21} photons/sec/mm²/mrad²/0.1% b.w を越える。真空容器、磁石、ビームモニタなどの加速器コンポーネントは SPring-8 II 計画のために開発されたものを利用する[3-7]。シンクロトロン加速器は用いずに線型加速器のみで 3 GeV まで加速する。熱電子銃を採用し、SACLA と同じ C バンド加速器を用いて蓄積リングの入射器として十分な性能を持つ低エミッタンスビームを生成する。将来の軟 X 線 FEL への拡張が可能ないように設計されている。

Table 1: Main Parameters of 3GeV Storage Ring

Parameter	Value
Beam energy [GeV]	2.998
Circumference [m]	348.8432
Number of cells	16
Long straight section [m]	5.44 × 16
Short straight section [m]	1.6427 × 16
Betatron tune (x/y)	28.17/9.23
Natural chromaticity (x/y)	-60.50/ -40.99
Natural horizontal emittance [nm.rad]	1.14
Momentum compaction factor	0.000433
Natural energy spread [%]	0.0843
Lattice functions at LSS ($\beta_x/\beta_y/\eta_x$) [m]	13.0/3.0/0.0
Lattice functions at SSS ($\beta_x/\beta_y/\eta_x$) [m]	4.08/2.962/0.052
Damping partition number (J_x/J_s)	1.389/1.611
Damping time ($\tau_x/\tau_y/\tau_s$) [ms]	8.091/11.238/6.976
Radiation loss in bends [MeV/turn]	0.621
RF frequency [MHz]	508.75905
Harmonic number	592

3. 加速器要素開発

3.1 3GeV 蓄積リングテストハーフセル

Figure 2 に示す 3GeV 蓄積リング用テストハーフセルは個々の磁石が設計磁場性能を満足することの確認と、磁石列の精密アライメント方法を確立するために開発した。また、タイトなスケジュールの中で建設地に磁石列を精密にアライメントできるかどうかの確認作業も行う。ハーフセルは 2 台の機能複合型偏向電磁石、5 台の四極電磁石、5 台の六極電磁石で構成されている。

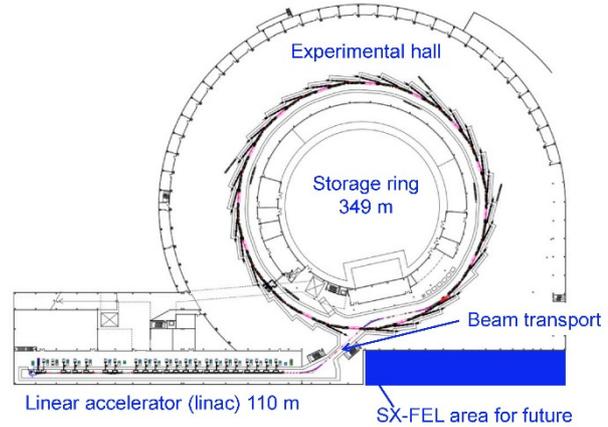


Figure 1: Accelerator complex.

機能複合型偏向電磁石は長さ 1.091m で、デフォーカシング四極成分を持つ。この磁石を用いることで、水平エミッタンスを低減できることに加え、デフォーカシング四極磁石の数を減らすことが出来る。双極磁場と四極磁場勾配の設計値は、それぞれ 0.8688 T と -7.06 T/m である。中心でのギャップ長は 28 mm である。ビーム軌道と水平軸に沿った磁場は、工場で 3 次元ホールプローブ測定を行った。測定した双極磁場と四極磁場の比は 0.1%の精度で計算と一致した。2 台の機能複合型偏向磁石は電磁石であるが、永久磁石タイプも 2018 年度に試作した。SPring-8 II 計画で培われた技術を利用している[8]。2019 年度中に、どちらのタイプの磁石を用いるか決定する。

四極・六極電磁石は積層鋼板で出来ている。ボア径はそれぞれ 34 mm と 40 mm であり、最大の磁場勾配は 50 T/m と 1200 T/m² である。磁場の均一度が 10⁻³ 以下となる有効磁場領域は ±8 mm である。ホール素子を用いて測定された磁場分布は設計値とよく一致する。四極・六極電磁石の積分多極磁場成分はストレッチドワイヤー法を用いて精密測定中である[9]。

各磁石の機械中心を 3 次元計測器で測定後、磁石上部に設置したリフレクターホルダーとの相対距離を測定する。この測定データをベースに、レーザートラッカー測定から磁石列をアライメントした。次に、数 μm の精度でアライメントできる、振動ワイヤ法を用いて、四極・六極電磁石の磁場中心をアライメントした。各磁石の磁場中心と機械中心の差は ±50 μm であることがわかった。

3.2 真空システム

MBA ラティスを用いる低エミッタンス蓄積リングは、偏向磁石内での分散関数、水平ベータ関数を小さくするため、高磁場勾配を持つ多極電磁石が必要となる。ポア径の小さい電磁石が要求され、真空容器の口径も狭くなり、電磁石や放射光アブソーバを高いパッキングファクターで配置する必要がある。この点が SPring-8 などの第 3 世代放射光源と大きく異なる点で、SPring-8 II 計画のために進められていた真空容器のデザインと R&D を本 3GeV 光源では採用する[4]。狭小口径に対応するため、銅メッキを施した薄肉のステンレス製の真空容器を採用する。各放射光アブソーバの近傍に NEG ポンプとイオンポンプを配置し、アブソーバから生成する脱ガスを排気する。

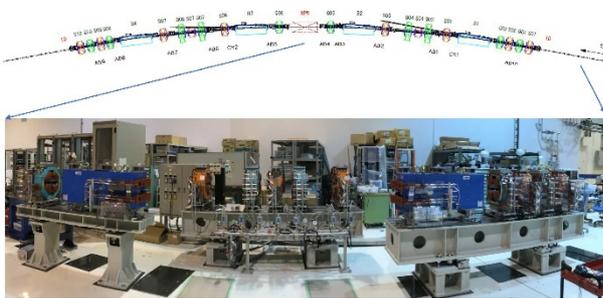


Figure 2: A test half-cell of 3GeV storage ring.

3.3 高周波加速システム

本 3GeV 加速器を電子が 1 周する間にロスするエネルギーは 1.1 MeV である。その内訳は 0.62MeV が偏向磁石内でのロスで、残りが挿入光源のロスである。400 mA の電子ビームを加速すると 440 kW のエネルギーロスが発生する。また、10 時間以上の電子ビーム寿命を達成するモーメントアクセプトランスを確保するため、3.6 MV 加速電圧を印加可能な高周波加速システムが必要となる。その一方で、放射光ビームラインの数を増やすため、高周波加速システムの設置スペースは 5.4 m の長直線部 1 本に限定される。そこで、新型のコンパクト TM020 空胴が開発された[10]。この新しい空胴は、バンチ結合型ビーム不安定性をもたらす高次高調波(HOM: Higher Order Mode)成分を、類例のない方法で抑制する。新型空胴では、電磁波吸収体(フェライトなど)を TM020 モードの節に設置し、TM020 モード以外の HOM を減衰させる。これにより、従来空胴外部のビームパイプに設置していた HOM 吸収体を取り除くことができ、ビーム進行方向の長さの短い空胴を実現できる。本 TM020 空胴 4 台を長直線部 1 本に設置する。TM020 空胴のシャントインピーダンスは 6.8 MΩであり、各空胴に 120 kW の電力を供給すれば、各空胴で 0.9 MV の加速電圧になり、目標の全加速電圧 3.6 MV を達成できる。RF 電力としては、3.6 MV の加速電圧に必要な 480 kW の電力と、放射光生成によるビームエネルギーロスを補償するのに必要な蓄積電流 400 mA 運転時の電力 440 kW を合わ

せて 920 kW の電力が必要となる。

本空胴において技術的に困難な点は、フェライト HOM 吸収体を接合して空胴表面に設けたスリットに設置することであった。これを解決し、TM020 空胴の高出力テストが現在行われている[11]。

3.4 線型加速器

線型加速器は、コンパクト、低コスト、高堅牢性、軟 X 線 FEL を駆動できるようにデザインした[12]。SACLA/SPring-8 で開発された C バンド加速技術を用いて 3GeV 加速を実現する[13-15]。20 ユニットの C バンド加速システムが線型加速器トンネルにインストールする。1 ユニットの 2 台の C バンド 2m 加速管で構成されている。約 40 MW のクライストロン出力はパルス圧縮器(SLED)で 4 倍程度に圧縮後、出力を 2 つに分配し、ピーク電力 70 MW 程度の出力を各加速管に供給し、40 MV/m 以上の加速勾配を実現する。C バンド加速管本体及び SLED については、コストの効率化や堅牢性の観点からオリジナルデザインに改造を加えた。また、クライストロン故障時の交換作業を考慮して導波管の真空窓の新設を検討している[16]。これら改造品の高出力テストは 2019 年度中に終える予定である。low-level RF 制御系については、MicroTCA.4 技術を用いたコンパクトなシステムで RF の位相と振幅を精密にコントロールする[17]。

電子源としては、グリッド付熱カソードを用いた 50 kV 電子銃の直後に 238 MHz の加速空胴を配置した 500 kV 電子源システムを開発中である[18-20]。SACLA の CeB6 熱カソード 500 kV パルス電子銃[21]よりも、コンパクトで堅牢性に優れるという特徴を持つ。3GeV 蓄積リングの入射器としては、規格化エミッタンス 1 mm.mrad は必要ないので、保守性、安定性を優先して設計した。本電子源の下流には 476 MHz のバンチャー空胴、2 m の S バンド加速管を設置し、0.4 nC でバンチ幅 5 ps FWHM の電子バンチを C バンド加速システムに供給する。本電子源の性能確認のため、テストスタンドを構築し、0.3 nC で規格化エミッタンス 10 mm.mrad 以下という目標性能を満たすことを確認済みである[18]。

3GeV 線型加速器システムの入射部は PARMELA を用いて SACLA と同様の手法で設計した[12]。入射部以降の C バンド加速部分は SAD を用いて計算した。将来の軟 X 線 FEL では、低エミッタンスビームを生成するため、電子源システムについては再設計が必要となる。

3.5 蓄積リングへの入射システム

線型加速器から蓄積リングへの入射部設計は、狭いダイナミックアパーチャを持つ次世代放射光源にとって重要課題の一つである。SPring-8 では、”In-vacuum transparent off-axis beam injection system”を開発して本課題に取り組んでおり、3GeV 光源にも採用される[22]。従来型の”off-axis”入射を採用し、非線形キッカーや”on-axis”入射等の最新技術は用いない方針である。

狭いダイナミックアパーチャに対応するには、線型加速器からのビーム入射時の、入射ビームと蓄積ビームと

の距離を狭め、入射ビームのベータatron振幅を抑制することが重要である。そのため、真空封止(In-vacuum)パルスセプタム電磁石を開発している[22]。蓄積・入射ビーム間に真空容器壁が不要で、セプタム壁のみとなり、入射・蓄積ビーム間距離を最小化する設計が可能である。また、入射ビームが真空窓を通過する際にエミッタンスが劣化する問題も、窓不要のため解決できる。既にプロトタイプ機的设计・製作を終え、所定の真空度 10^{-7} Pa 以下を達成した。現在は動作試験・磁場測定を行っている。

蓄積ビーム振動を抑制した透明(transparent)入射も、放射光ユーザーに信頼性の高い安定ビームを供給するために重要な課題である。ビーム振動をビームサイズの1/10程度の $10\ \mu\text{m}$ 以下に抑制することを目標に、単一電源並列駆動ツインキッカーシステムを開発している[23]。ツイン(2台の)キッカーで蓄積ビーム軌道を入射軌道に近づけ、もう1ペアのツインキッカーで元の軌道に戻し、ビーム入射用のバンブ軌道を生成する。2台のキッカーを同じパルス電源で並列駆動することにより、電源ジッターの影響を減らし、閉じたバンブ軌道を実現させて電子ビーム軌道に変動を与えないというのが、基本的な考え方である。電源の設計・製作を終え、電源の性能評価とキッカーの詳細設計を実施中である。

4. まとめ

3GeV 次世代放射光施設加速器システムは SPring-8/SACLA の知見・技術と SPring-8-II 計画の R&D の成果を利用し、設計開発が進められている。いくつかの加速器コンポーネントについては、2019 年度中の終了を目指して開発が継続中である。

参考文献

- [1] 内海渉, “次世代放射光施設計画の推進状況”, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019 年 7 月 31 日, 京都大学吉田キャンパス.
- [2] H. Widemann *et al.*, *Particle Accelerator Physics I*, Springer, Berlin (1998).
- [3] H. Tanaka *et al.*, “SPring-8 Upgrade Project”, in Proc. of IPAC2016, 2867--2870, Busan, Korea (2016), WEPOW019.
- [4] M. Oishi *et al.*, “Design and R&D for the SPring-8 Upgrade Storage Ring Vacuum System”, in Proc. of IPAC2016, 3651--3653, Busan, Korea (2016), THPMY001.
- [5] H. Ego *et al.*, “RF system of the SPring-8 Upgrade Project”, in Proc. of IPAC2016, 414--416, Busan, Korea (2016), MOPMW009.
- [6] T. Watanabe *et al.*, “Updates on Hardware Developments for SPring-8-II”, in Proc. of IPAC2018, 4209--4211, Vancouver, BC, Canada (2018), THPMF061.
- [7] H. Maesaka *et al.*, “Development of Beam Position Monitor for the SPring-8 Upgrade”, in Proc. of IBIC2018, 204--207, Shanghai, China (2018), TUOC04.
- [8] T. Watanabe *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 072401 (2017).
- [9] K. Fukami *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 90, 054703 (2019).
- [10] 惠郷博文 他, “SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞の開発”, 第 11 回日本加速器学会年会, p.237-241 (2014).
- [11] 惠郷博文 他, “SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞プロトタイプの大電力試験”, 第 16 回日本加速器学会年会.
- [12] 安積隆夫 他, “次世代放射光施設のための 3GeV 線型加速器の基本設計”, 第 16 回日本加速器学会年会.
- [13] T. Inagaki *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 080702 (2014).
- [14] T. Sakurai *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 042003 (2017).
- [15] T. Asaka *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 080702 (2017).
- [16] 稲垣隆宏 他, “次世代放射光リングの入射器として使用する C バンド加速器の機器設計と開発状況”, 第 16 回日本加速器学会年会.
- [17] 岩井瑛人 他, “次世代放射光施設入射器における MTCA.4 規格を用いたデジタル LLRF システムの評価”, 第 16 回日本加速器学会年会.
- [18] 安積隆夫 他, “グリッド付き熱カソードを用いた低エミッタンス電子銃システムの開発”, 第 16 回日本加速器学会年会.
- [19] 比嘉究作 他, “次世代放射光リング入射器加速空洞の製造”, 第 16 回日本加速器学会年会.
- [20] 福岡翔太 他, “238MHz42kW パルス半導体高周波増幅器の開発”, 第 16 回日本加速器学会年会.
- [21] K. Togawa *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 020703 (2007).
- [22] S. Takano *et al.*, “Renovation of off-axis beam injection scheme for next-generation photon sources”, Proc. of IPAC2019, 2019, pp. 2318-2321.
- [23] T. Inagaki *et al.*, “Development of a solid-state pulse generator driving kicker magnets for a novel injection system of a low emittance storage ring”, Proc. of IPAC2018, 2018, pp. 1804-1807.