

次世代放射光施設のための 3GeV 線型加速器の基本設計

BASIC DESIGN OF 3-GeV LINEAR ACCELERATOR FOR A NEXT-GENERATION SR SOURCE

安積隆夫^{#, A, B, C)}, 稲垣隆宏^{B, C)}, 西森信行^{A)}, 原徹^{C)}, 前坂比呂和^{C)}, 田中均^{C) A)}
Takao Asaka^{#, A, B, C)}, Takahiro Inagaki^{B, C)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Toru Hara^{C)}, Hirokazu Maesaka^{C)},
Hitoshi Tanaka^{A, C)}

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

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

^{C)}RIKEN SPring-8 Center (RSC)

Abstract

A next-generation SR source project capable of delivering highly brilliant soft X-ray beam was proposed. A low emittance beam of $2e-9$ m rad / 0.3 nC in a 3-GeV linac is required in order to inject into a low emittance storage ring, which has a narrow dynamic aperture. In addition, it is important that the beam from the C-band linac is stabilized in the top-up operation for user experiments. The injector system is designed to be compact, cost-efficient, robust and capable of driving SX-FEL. In this report, we describe the electron beam parameter and the basic design of the 3-GeV injector linac.

1. はじめに

近年、物質構造解析や創薬分野における放射光利用の役割は一層大きくなっている。また、海外では高輝度化は勿論、高度化された X 線検出器の配備など、最新技術を搭載した中型放射光施設が相次いで建設されている。こうした状況を踏まえ、我が国においても国際競争力を強化していく上で、次世代放射光施設の早期整備が求められている。これを受けて、軟 X 線向け高輝度 3 GeV 級放射光源（次世代放射光施設）の建設計画が量子科学技術研究開発機構を中心に進められている[1]。

この次世代放射光施設は、2023 年の利用運転開始を目指しており、現在、3 GeV 低エミッタンス蓄積リングとその入射用 3 GeV 線型加速器、付帯設備、建屋の詳細設計、仕様検討が進められている[2]。蓄積リングと線型加速器は、これまで高められてきた加速器技術を最大限活用することにより、建設期間短縮、ならびにビームコミッショニング早期完了を実現する。本報告では、線型加速器の設計指針とそれに基づく機器構成、粒子トラッキングシミュレーション計算結果について述べる。

2. 3 GeV 線型加速器

2.1 設計指針

効率的な放射光利用実験には、Top-up 運転は不可欠であり、その入射器には狭いダイナミックアパーチャへ適用可能な入射ビームの低エミッタンス性と安定性が要求される。本施設においては入射器とし

て、省エネルギー運用に優れ、将来 SX-FEL への展開可能な 3 GeV 線型加速器を採用する。

線型加速器に要求されるビーム性能を Table 1 に示す。線型加速器の設計は、以下に示す 6 つの指針に基づいて進められる。

- 高稼働率を実現するシステム設計 (Top-up 運転を前提、高安定ビーム供給の実現)
- 高信頼性 (既存技術の採用)
- 高保守性
- 運転経費の効率化 (省エネルギー化)
- 建設コスト削減 (加速器全長の短縮化)
- SX-FEL への拡張性

本放射光施設で想定される年間の運転時間は 5000 時間以上である。1 サイクルを 4 週間とした利用運転の間、線型加速器からのビーム入射は数十秒おきにおこなわれる。この間、加速器の監視は、少人数のスタッフでおこなうことから、加速器の自立的運転の実現は必須である。また、加速器の運転開始時に実施されるビーム調整時間の短縮も重要であり、加速器のビーム再現性を高水準で可能とするシステム構築が求められる。

Table 1: Beam Parameters of 3-GeV Injector Linac

Beam energy	3 GeV
Energy spread	0.16 % (FWHM)
Beam charge	0.3 nC / bunch
Normalized emittance	< 10 mm mrad
Bunch length	< 5 ps (FWHM)
Rep. rate (Normal operation)	1 Hz
Rep. rate (RF conditioning)	25 Hz

[#]asaka@spring8.or.jp

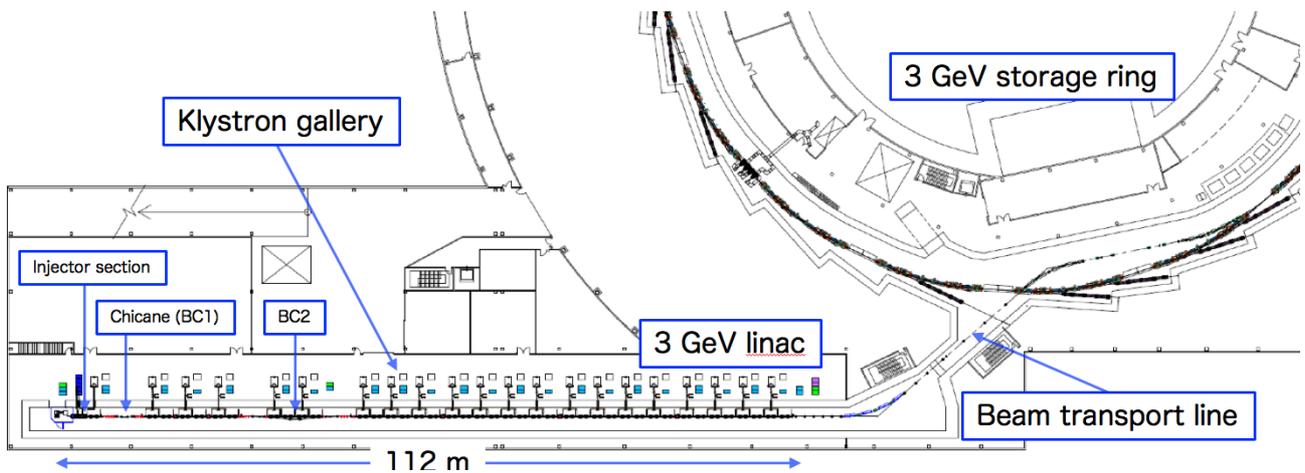


Figure 1: Schematic of the 3-GeV linac and the beam transport line.

2.2 3 GeV 線型加速器の構成

Figure 1 に 3 GeV 線型加速器、およびビーム輸送系の概略図を示す。全長 112 m の 3 GeV 線型加速器は、30 MeV 入射部、入射部直後のビームエネルギー測定のためのシケイン部、20 台の C バンド高電界加速ユニット（バックアップユニット含む）から構成される。線型加速器から生成される低エミッタンスビームは、80 m のビーム輸送部を経て蓄積リングへ入射される。

C バンド高電界加速ユニットは、50 MW クライストロン、RF パルス圧縮器、2 本の 2 m 長 C バンド加速管で構成され、42 MV/m の加速電界を発生する [3]。この C バンド高電界加速ユニットは X 線自由電子レーザー施設 SACLA ですでに使用している機器を採用する [4]。クライストロン用インバータ電源や真空制御装置といった周辺装置についても、SACLA と同様の機器を使用する。

線型加速器の機器配置検討・設計にあたり、将来、SX-FEL への拡張計画を考慮し、磁気バンチ圧縮用シケイン部 (BC2) の設置場所は予め確保しておく。BC2 の設置と C バンド加速ユニットの設置を両立するため、BC2 の第 1 偏向電磁石と第 4 偏向電磁石の間 (12 m) に、C バンド加速ユニットを 2 ユニット配置する。

2.3 高信頼化、高保守性、省エネルギー対策

高稼働率で加速器運転・利用実験をおこなうためには、加速器構成機器の故障頻度を低減することが肝要である。とくに大電力機器に関して、高い信頼性と耐久性をもつ部品を選定し、故障時においても迅速かつ簡易に修理・交換可能であることを配慮した設計をおこなう。

クライストロンやその変調機電源といった大電力装置の重大故障時にも、ビーム入射を継続可能とす

るためのバックアップシステム (2 ユニット) を用意する。

加速器構成機器 (入射部の RF 空洞群、C バンド加速ユニット)、ならびに付帯設備 (冷却水設備、空調設備) は、運転経費を削減 (省エネルギー化) するため、本放射光施設の運転形態に特化した仕様とする。蓄積リングへのビーム入射が最大 1 Hz であることから、クライストロンなど大電力 RF 装置の繰り返し周波数も 1 Hz とする (ただし、RF コンディショニングは 25 Hz 運転)。それに伴い、入射部の RF 空洞、加速管、クライストロンで使用する冷却水流量を 1 Hz 運転に最適化することで、電力消費を抑える。

X 線自由電子レーザー用施設の高性能加速器では、RF 空洞や加速管の温度を 10 mK の精度で維持するため、精密温度調整装置を備えるが、本施設では経費削減、ならびに省エネルギー化のためこうした温度調整システムは使用しない。施設側冷却設備において、0.1°C の精度で温度管理された冷却水を RF 空洞、加速管に直接使用する。その他、外乱要因で引き起こされる RF 振幅・位相変動については、低電力 RF システム (MicroTCA.4 を採用) の RF 振幅・位相帰還制御により高安定化を実現する [5]。

線型加速器で使用する電磁石は、入射部に備わる 6 台の磁気レンズ (水冷)、主加速部のビーム輸送のための 23 台の四極電磁石 (空冷)、19 台のステアリング電磁石 (空冷)、シケイン部に備わる 4 台の偏向電磁石 (空冷) である。これら電磁石の電源は蓄積リングで使用するデジタル電源と共通仕様とすることで、バックアップ機器の合理化を図る。

ビーム診断系はトランス型ビーム電流モニタ、ストリップライン型ビーム位置モニタといった非破壊型モニタを中心に配備し、全ての取得データは MicroTCA.4 による制御システムにて解析され、データベースシステムにて管理される。

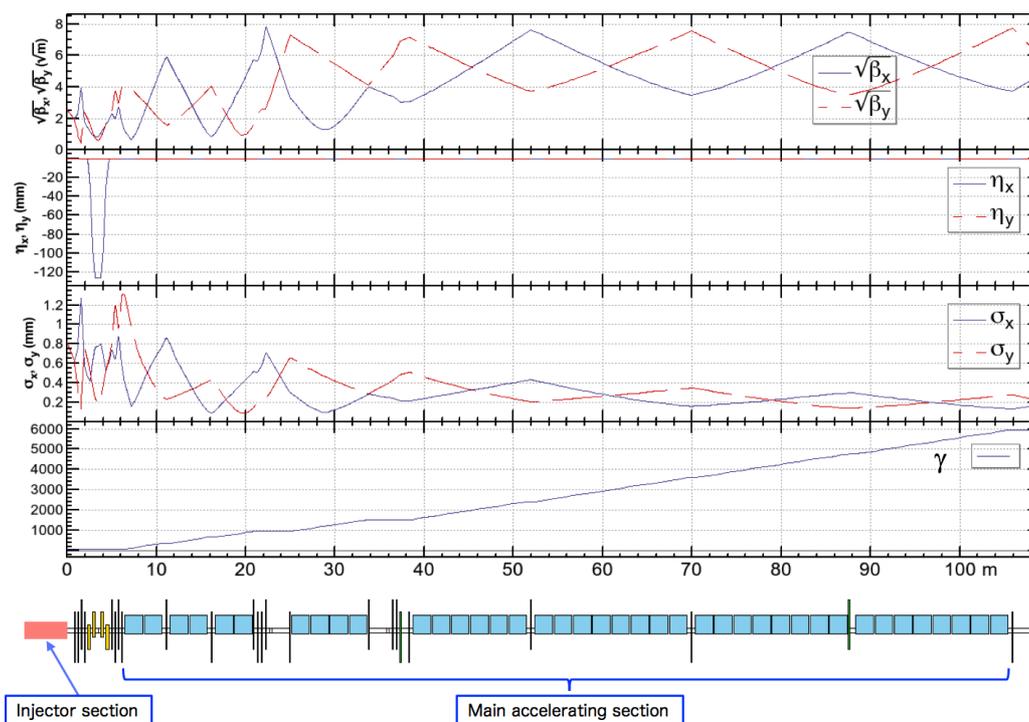


Figure 2: Beta function, energy dispersion, beam size and gamma factor in the 3-GeV linac.

2.4 主加速部のビーム軌道計算

3 GeV 線型加速器における基本的なラティス構造はFODOである。Figure 2に、3 GeV 線型加速器の β 関数、エネルギー分散関数、ビームサイズ、 γ ファクター（エネルギー）を示す。入射部の後方（シケイン部前後）、およびBC2設置を想定した箇所には、オプティクスマッチングのために複数台の四極電磁石を設けている。それ以降は、Cバンド加速ユニットが4ユニット（20 m）ごとに四極電磁石が設置される。

Figure 2に示したラティス構造において、粒子トラッキング計算をおこなった。主加速部におけるビーム加速過程では、ビーム損失のない輸送を可能とし、線型加速器の終端では、エミッタンスが $2e-9$ m rad 以下、電荷量 0.4 nC、そしてエネルギーブレッドが 0.1%の 3 GeV ビームが得られる (Fig.3)。

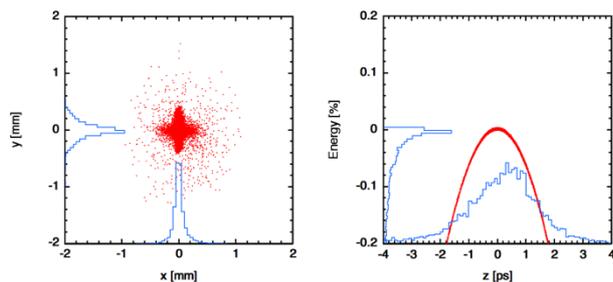


Figure 3: Beam size and energy profile at the end of the 3-GeV linear accelerator.

3. 入射部

Figure 4に3 GeV 線型加速器の入射部を示す。電子銃には5 mm mradの規格化エミッタンスで0.6 nCの電荷量が要求される。本施設において、電子銃は、多くの加速器施設で使用されているグリッド付き熱カソード (EIMAC Y-845, CPI社製)を採用する。低エミッタンス実現のため、50 kV 電子銃のアノード電極直後に238 MHz RF空胴を設置し、500 keVまで直ちに加速する。500 keV ビームは、空胴出口に設置したエミッタンス制限のためのコリメータを通過することにより、2 mm mrad (Normalized) / 0.6 nCの低エミッタンスビーム生成が可能となる。この新しい電子銃システムについては、本学会発表[6]を参照されたい。

次に、476 MHz サブハーモニックバンチャー (SHB) で速度変調されたビームは電子集群され、2 m長Sバンド加速管に入射する。そして、加速管の最初の5セルまでに電子集群が完結し、残りの加速セルでエネルギー増加をおこなう。入射部出口のビーム性能に関する計算結果をFig. 5に示す。バンチ長は2.3 ps (FWHM)まで圧縮され、エネルギーは36 MeVに到達する。

収束系は離散的に分布された6台の磁気レンズによって構成される。エミッタンス制限用コリメータで抽出された横方向に均一な電子ビームのビーム径を一定に保つことで、エミッタンスを悪化させる空間電荷効果の非線形成分を抑制するように磁場強度を調整する。

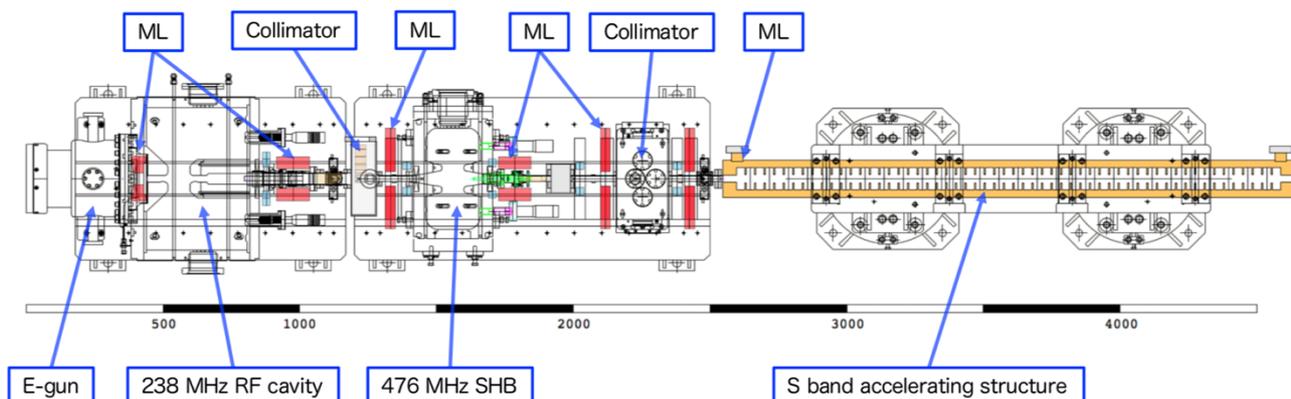


Figure 4: 30-MeV injector section of the 3-GeV linac.

この入射部における規格化エミッタンスを Fig. 6 に示す。入射部出口の規格化エミッタンスは 8 mm mrad で、電荷量は 0.4 nC となる。

ビーム電荷量の調整は、476 MHz SHB と S バンド加速管の間に配置されるコリメータの物理口径を変化させることで電荷量調整をおこなう。

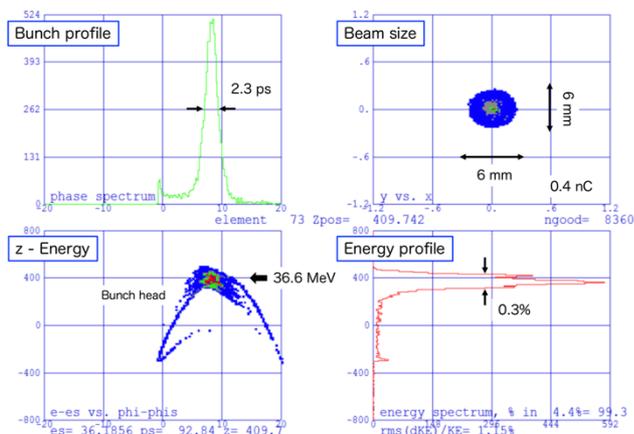


Figure 5: Bunch distribution, beam size and energy profile after the 30-MeV injector in PARMELA simulation. The bunch length at the exit of 30-MeV injector was obtained to be 2.3 ps (FWHM).

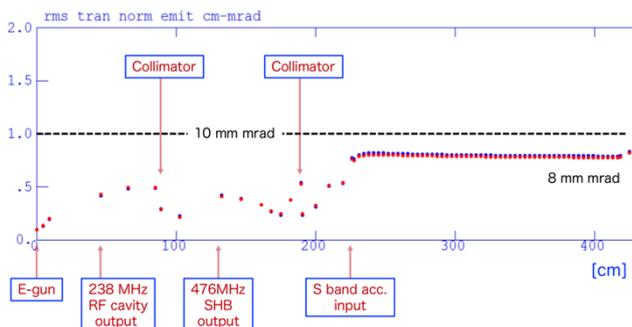


Figure 6: Beam emittance in the 30-MeV injector. The normalized emittance at the exit of 30-MeV injector was obtained to be 8 mm mrad by PARMELA simulation.

4. SX-FEL への拡張

将来計画である SX-FEL は、3 GeV 線型加速器の後方に全長 25 m のアンジュレータ (β 関数は 10 m) の設置を想定している。このとき、要求されるビーム性能を Table 2 にまとめる。高輝度電子ビーム生成のために、3 GeV 線型加速器には下記の機器変更・追加をおこなう。

- 1 mm mrad (Normalized) 以下の低エミッタンスビームを生成可能とする電子銃の導入
- 速度変調によるバンチ圧縮時、オーババンチング回避のためのブースター空洞の設置
- 磁気バンチ圧縮の線形化のため、S バンド加速管後方に、X バンド補正空洞の導入
- 磁気バンチ圧縮器 (BC2) の設置

これらの機器変更・追加を PARMELA に反映し、粒子トラッキング計算をおこなった。入射部 (X バンド補正空洞を含む) 出口のバンチプロファイル、ビームサイズ、エネルギープロファイルを図 7 に示す。エミッタンス増加を防ぐため、入射部での過度な速度変調による電子集群はおこなわない。到達するバンチ長は 10 ps (FWHM) で、ピーク電流は 25 A となる。このとき、ビームコア部分の規格化エミッタンスは 1.5 mm mrad を保持している。

S バンド加速管では、エネルギーチャープを生成する RF 位相に合わせられる。その直後の X バンド補正空洞によりエネルギーチャープ整形のための RF 振幅、位相設定により、Fig. 7 で示したエネルギープロファイルを得る [7]。

適切に整形されたエネルギーチャープをもつビームが、BC1、BC2 により、線形的な磁気バンチ圧縮を実現する。BC1、BC2 通過後の各磁気バンチ圧縮部出口におけるビーム電流、ならびにスライスエミッタンスを図 8、Fig. 9 に示す。BC2 の出口では、1.5 mm mrad (Normalized) 以下のスライスエミッタンスで 2 kA のビーム電流となる高輝度ビームが生成可能となる計算結果を得た。また、BC2 におけるビームエネルギーは 480 MeV であり、その後、15 台の C バンド加速ユニット (42 MV/m) により 3 GeV まで加速可能となる。

Table 2: Beam Parameters of 3-GeV Linac for SX-FEL

Undulator period	18 mm, $K = 2.1$
Wavelength	1.2 nm (1 keV)
Beam energy	> 2.5 GeV
Energy spread	0.01 %
Peak current / Emittance (n)	1.5 kA / 1 mm mrad
Peak current / Emittance (n)	3 kA / 2 mm mrad
Repetition rate	25 Hz

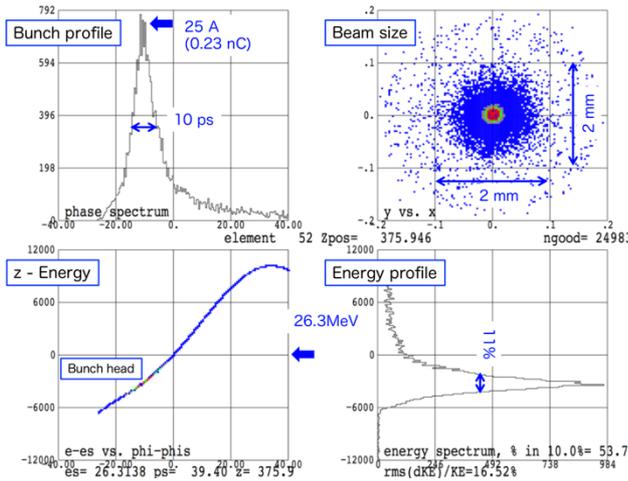


Figure 7: Bunch distribution, beam size and energy profile at the end of the 30-MeV injector for SX-FEL in PARMELA simulation.

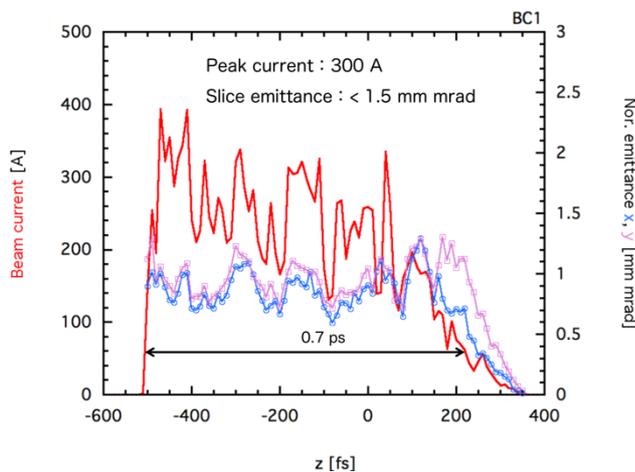


Figure 8: Beam current and slice-emittance after BC1 in particle tracking simulation.

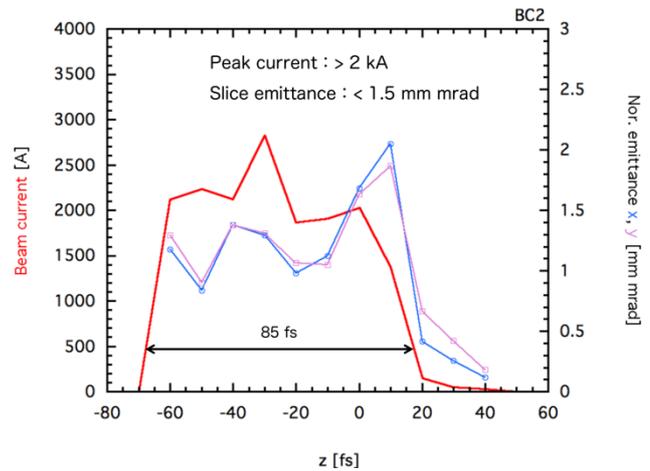


Figure 9: Beam current and slice-emittance after BC2 in particle tracking simulation.

5. まとめ

次世代放射光施設の 3 GeV 線型加速器の設計指針を示し、これに基づく加速器システム構成、ならびにビームシミュレーション計算結果について示した。現在、電子銃システム、入射部、C バンド加速ユニットの試験装置を構築し、性能評価試験を実施している。

謝辞

本研究は、一昨年度まで理化学研究所・基盤光源チームリーダーであった大竹雄次氏が主導されてきました。心より感謝いたします。

参考文献

- [1] W. Utsumi *et al.*, “Present status of the next generation 3GeV synchrotron radiation project”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.
- [2] N. Nishimori *et al.*, “Accelerator system of high brilliant 3GeV light source project”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.
- [3] T. Inagaki *et al.*, “Design and development status of a C-band accelerator system used as an injector for next generation SR source”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.
- [4] T. Inagaki *et al.*, “High-gradient C-band linac for a compact x-ray free-electron laser facility”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 080702 (2014).
- [5] E. Iwai *et al.*, “Evaluation of digital LLRF system using MTCA.4 framework for the injection linac for the next generation synchrotron light source”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.
- [6] T. Asaka *et al.*, “Development of low-emittance gridded thermionic electron gun embedded in a single cavity with voltage-optimized electrodes”, in proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, Kyoto, Japan.
- [7] K. Togawa *et al.*, “Electron-bunch compression using a dynamical nonlinearity correction for a compact x-ray free-electron laser”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 080706 (2009).