

NanoTerasu における 3-GeV 線型加速器のビーム光学系の構築

DEVELOPMENT OF BEAM OPTICS OF 3 GeV-LINEAR ACCELERATOR IN NanoTerasu

菅晃一, 安積隆夫, 上島考太, 小原脩平, 保坂勇志, 西森信行

Koichi Kan, Takao Asaka, Kota Ueshima, Shuhei Obara, Yuji Hosaka, Nobuyuki Nishimori

NanoTerasu Center, The National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

Abstract

The 3-GeV linear accelerator, serving as the injector for NanoTerasu, completed its commissioning in 2023, and user operation of the synchrotron radiation beamlines began in April 2024 as originally planned. The NanoTerasu storage ring adopts a Multi-Bend Achromat lattice to achieve low emittance, and the injector is required to deliver a highly stable and low-emittance electron beam. Goals for the 3-GeV electron beam from the injector are energy stability of $<0.2\%$, emittance of <5 nm-rad, and bunch charge of 0.3 nC. In this presentation, we detail the beam optics system of the linear accelerator by comparing model calculations, which take into account the accelerator's operating parameters (such as magnet settings and RF amplitude/phase of accelerating structures).

1. はじめに

軟X線領域の放射光に強みを持つ NanoTerasu の蓄積リングは、国内初の MBA (Multi-Bend Achromat) ラティスを採用し、建設が進められてきた [1, 2]。本加速器は、長さ 110 m のコンパクトな線型加速器と周長 349 m の 3 GeV 蓄積リングで構成される。蓄積リングの水平方向のエミッタンスは 1.14 nm-rad であり、入射器には蓄積リングのダイナミックアパーチャへ安定したビーム入射が要求される。

本稿では、NanoTerasu における 3 GeV 線型加速器のビーム光学系の構築について報告する。線型加速器の機器構成を説明するとともに、40 MeV から 3 GeV まで加速を行う C バンド加速セクションにおけるビーム光学系とその評価 (エミッタンス、ツイスパラメータ) について報告する。

2. 3GeV 線型加速器の構成

Figure 1 に、NanoTerasu の入射器である 3 GeV 線型加速器から蓄積リング入射点までの機器構成を示す。40-MeV 入射部は、500 keV 低エミッタンス高周波 (238 MHz) 電子銃システム、サブハーモニックバンチャー (SHB, sub-harmonic buncher, 476 MHz)、初段 S バンド加速管から構成されており、10 ps のバンチ長の電子ビームを生成する。電子源は、高堅牢性を鑑みて市販のグリッド付きの熱カソード (EIMAC 社製 Y845) を採用している [3]。電子銃では、カソード・グリッド間的高速電圧制御により、パルス幅が 300 ps のビームを生成する。このとき、グリッドの電場歪みを最小化する条件 (グリッド透明化条件) とすることで、グリッドを通過する電子は余分な

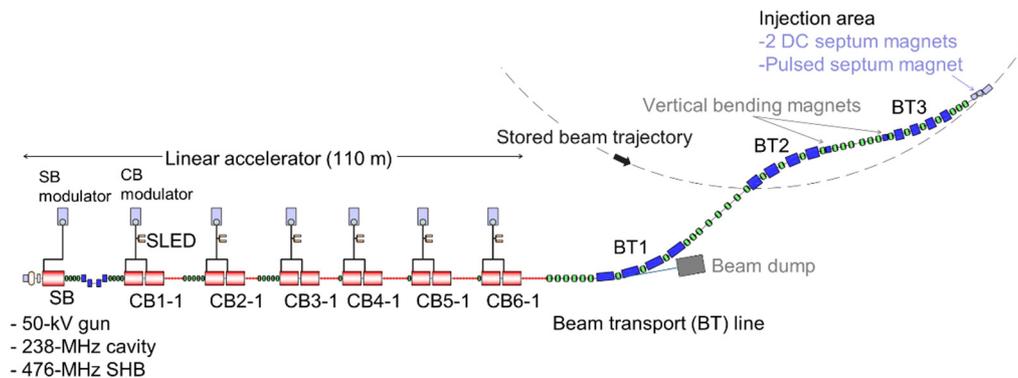


Figure 1: Schematic diagram of the 3-GeV injector of NanoTerasu. First units of each C-band accelerating section (CB) are shown. Blue and green rectangles denote bending and quadrupole magnets, respectively. The 3-GeV electron beam is injected into the storage ring through three beam transport areas of BT1, BT2, and BT3. Reprinted and modified from a reference [1].

kan.koichi@qst.go.jp

横方向キックを受けることなく、均一電子分布を形成した 1.1 mm-mrad の低エミッタンスビームが生成される [3]。その後直ちに非線形な空間電荷効果によるエミッタンス悪化を回避するため、238 MHz 加速空洞により~500 keV まで加速する。

エネルギー ~500 keV、パルス幅 300 ps の電子ビームは、476 MHz SHB にて速度集団によるバンチ圧縮がおこなわれる。そして、S バンド進行波型低勾配加速管の最初の数セルで更なる電子集団と加速を同時におこない、速度変調によるバンチングを完了する。このとき最終的に到達するバンチ長は 10 ps に到達する。S バンド加速管の残りの 50 セルでは、クレスト位相で加速され、ビームエネルギーは 40 MeV に到達する。

電子銃から S バンド加速管の間には、離散的に配置した 6 台の磁気レンズが設置され、横方向ビーム収束をおこなう。この 40 MeV 入射部では、高品質ビームを生成するための複雑なビーム調整を回避するため、RF 機器や磁気レンズの電磁場相互干渉が生じないように機器配置がなされている。各機器は完全独立制御を可能とするいわゆる機能分離型構造を形成する。

40 MeV 入射部で生成されたバンチビームは、シケインを通過後、20 式の C バンド加速ユニットから構成される約 100 m 長の C バンド加速部で 3 GeV まで加速される。C バンド加速ユニットは、1 台の 50 MW クライストロン、RF パルス圧縮空洞 (SLED)、そして 2 本の 2 m 長の C バンド加速管から構成される。1 台の加速ユニットでは最大 170 MeV のエネルギーの加速が可能となる。

3. ビーム光学系の構築

3.1 線型加速器におけるビーム光学系

線型加速器を通過する電子ビームが損失なく加速、輸送するためのビーム光学系は、C バンド加速管等の物理的開口に対して、十分に電子ビームが収まるように設計された。とくに、40 MeV 入射部の下流のシケイン部および C バンド加速部途中 (CB2 前後) には、将来計画である軟 X 線自由電子レーザー (SX-FEL) 用加速器への敷衍をあらかじめ考慮し、磁気バンチ圧縮装置の導入を想定した四極電磁石群を設けている。それ以降は、C バンド加速ユニットの 4 ユニット (20 m) ごとにシングレット四極電磁石による準周期的 [4]FODO ラティスで構築している。

3.2 エミッタンス及びツイスパラメータの評価

エミッタンスの評価は、ビーム品質の評価となるのはもちろん、線型加速器内の機器のビーム品質への影響の評価およびビーム輸送を設計値に近づける観点からも必要である。線型加速器におけるエミッタンスを素早く判断するために、測定ツールを使用している (Fig. 2 (a))。エミッタンスは Q スキャン法により、四極電磁石の励磁量変化に対するビームサイズ応答から得られる。スクリーンは、厚さ<0.1 mm の Ce:YAG を使用している。ビームプロファイルを撮像する CCD カメラは EtherCAT 通信により、シャッター速度設定、ゲイン設定を遠隔可能とし、すべての制御は GUI を介しておこなわれる。撮像したビームプロファイルは画像処理され、正規分布フィッティングによってビームサイズを取得する。ビームサイズの四極

電磁石励磁量依存性から、エミッタンスおよびツイスパラメータを評価する。Figure 2(b)に S バンド加速管出口 (40 MeV 地点) における測定系の配置例を示す。ここで使用する四極電磁石とスクリーンの距離は 0.98 m である。

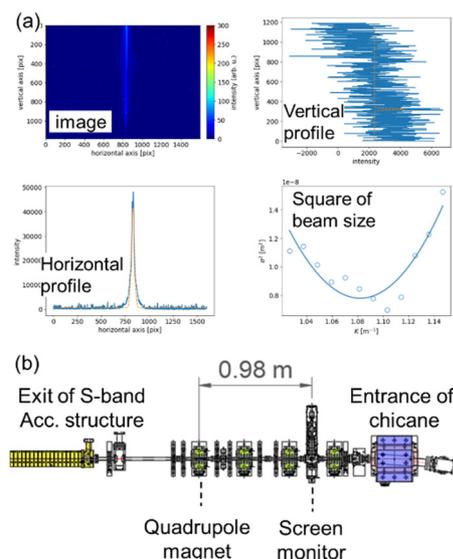


Figure 2: (a) Emittance measurement tool. Images are analyzed using horizontal and vertical profiles with Gaussian fittings. Beam size as a function of quadrupole magnet's current is used to calculate emittance and the Twiss parameters. (b) Example of quadrupole magnet and screen at the exit of S-band accelerating structure for the measurement of 40-MeV electron beam.

3.3 線型加速器のビーム光学系のシミュレーションおよび測定結果

40 MeV 入射部出口から線型加速器終端までの転送行列によるビーム光学系のシミュレーションを行った。C バンド進行波加速管については、入口と出口に存在する RF 入出力カプラにおける電磁場の軸対称性を配慮し、薄肉レンズ効果を考慮したモデル [4, 5]を用いた。加速管外では電場はゼロであるが、加速管端部に半径方向の電場が存在し、加速を行う位相で電子ビームを入射するため、加速管入口に収束レンズ、加速管出口に発散レンズと等価な行列を考慮した。C バンド加速ユニットは、個々のクライストロン印加電圧と RF 出力特性から、加速電場強度を考慮した。併せて、C バンド加速管では、RF クレスト位相における加速、つまり、最大エネルギー利得が得られる条件とした。四極電磁石は実機の設定電流から見積もられる磁場強度 (勾配) を考慮している。

まず、シミュレーションにおけるツイスパラメータの初期値を設定するために、S バンド加速管出口における Q スキャン法を行った。ここで得られた結果を初期値として、Fig. 3 上段に転送行列によるベータ関数のシミュレーションを行った (実線および点線)。さらに、線型加速器における複数地点のベータ関数について、Q スキャン法による測定を行った (プロット)。この結果、Q スキャン法

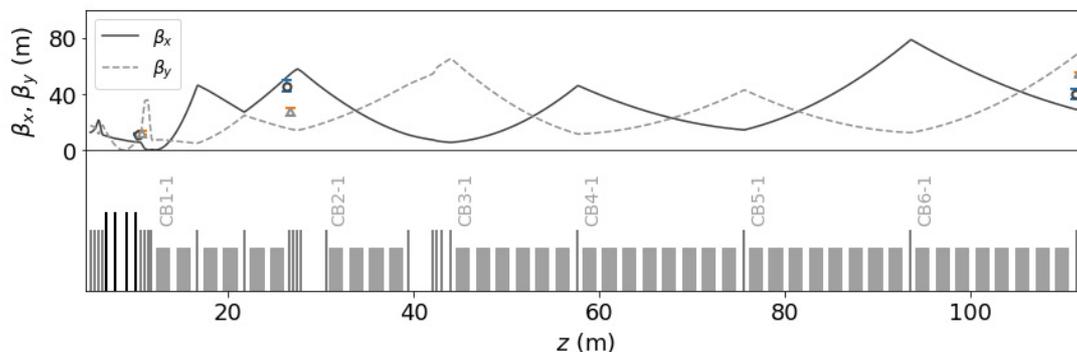


Figure 3: Beam optics in the 3-GeV linear accelerator from the chicane at the exit of the 40-MeV injector to the end of the linear accelerator. In the top panel, solid and dashed curves denote simulation results of beta functions in horizontal and vertical directions, respectively, using initial Twiss parameters at the exit of the 40-MeV injector. Markers are experimental results of the Q-scan method for horizontal (circle) and vertical (triangle) directions at three measurement points. In the bottom panel, regions of bending magnets (tallest rectangles), quadrupole magnets (middle-height rectangles), and C-band accelerating structures (shortest rectangles) are shown. The cathode is located at $z = 0$ m.

で得られたベータ関数は、複数地点のシミュレーションにおける水平 x および垂直 y 方向の大小と、定性的に一致しており、FODO ラティス構造で輸送できていることを明らかにした。効率よく電子ビームを輸送するためには、物理的開口に対してベータ関数を抑える必要があるが、70 m 程度を超えないように輸送できていることも分かり、線型加速器におけるビーム光学系を構築した。また、現在の 3 GeV ビームにおける水平および垂直方向の規格化エミッタンスは ~ 15 mm·mrad であり、入射におけるエミッタンスの目標を満たしている。

4. まとめ

MBA ラティスを採用した高輝度放射光源 NanoTerasu の入射器として、3 GeV 低エミッタンス線型加速器の運転が継続している。線型加速器の C バンド加速セクションにおけるビーム光学系の構築を行った。転送行列によるビーム輸送のシミュレーションおよび複数地点のツイスパラメータ測定結果の比較から、FODO ラティスによるビーム光学系の構築を行った。今後、本線型加速器を基に、低エミッタンス化および高ピーク電流化の改良を行い、3 GeV 線型加速器ベースの SX-FEL の実現を目指す。

謝辞

SPring-8 の関係者、理化学研究所(RIKEN)、高輝度光科学研究センター(JASRI)、スプリングエイトサービス

(株)(SES)の加速器の方々より多大なご助力を頂きました。光科学イノベーションセンター(PhoSIC)、QST ナノテラスセンターの皆様には、NanoTerasu の運営のご助力を頂きました。NAT(株)のスタッフ皆様には、加速器の調整・計測・運転支援に関して、サポートして頂きました。皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Obara *et al.*, “Commissioning of a compact multibend achromat lattice NanoTerasu: A new 3 GeV synchrotron radiation facility,” *Phys. Rev. Accel. Beams* 28, pp. 020701, 2025.
- [2] N. Nishimori *et al.*, “Commissioning and user operation of NanoTerasu accelerator system,” *J. Phys.: Conf. Ser.* 3010, pp. 012011, 2025.
- [3] T. Asaka *et al.*, “Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode,” *Phys. Rev. Accel. Beams* 23, pp. 063401, 2020.
- [4] T. Hara *et al.*, “Transverse envelope analysis for accelerating relativistic electron beams in a linear accelerator as a photon source,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 624, pp. 65, 2010.
- [5] J. Rosenzweig *et al.*, “Transverse particle motion in radio-frequency linear accelerators,” *Phys. Rev. E* 49, pp. 1599, 1994.