

## NanoTerasu における線型加速器のビーム安定性の評価

### BEAM STABILITY EVALUATION OF 3GeV-LINEAR ACCELERATOR IN NanoTerasu

菅晃一<sup>#, A)</sup>, 安積隆夫<sup>A)</sup>, 上島考太<sup>A)</sup>, 小原脩平<sup>A)</sup>, 保坂勇志<sup>A)</sup>, 西森信行<sup>A)</sup>  
青木駿堯<sup>B)</sup>

Koichi Kan<sup>#, A)</sup>, Takao Asaka<sup>A)</sup>, Kota Ueshima<sup>A)</sup>, Shuhei Obara<sup>A)</sup>, Yuji Hosaka<sup>A)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>A)</sup>  
Toshitaka Aoki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

<sup>B)</sup> NAT Corporation

#### Abstract

Construction of a 3-GeV linear accelerator at NanoTerasu was completed in January 2023 and beam performance reached to its goal in May 2023. After a beam commissioning, user operation started in April 2024. For the 3-GeV linear accelerator, electron beam with properties of stabilities and low emittance is required due to user operations and narrow acceptance for low emittance ring based on multi-bend achromat lattice. In this report, we present stabilities and performances of the 3-GeV linear accelerator.

#### 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狭い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安定性の評価について報告する。線型加速器の機器構成を説明するとともに、加速器性能 (RF 空洞・電荷量・エネルギーの安定性、エミッタンス) について報告する。

#### 2. 3GeV 線型加速器の構成

入射器である 3 GeV 線型加速器には安定したビーム入射に加えて、機器トラブル、またトラブル発生時の影響

の最小化が求められる。Top-up 運転を前提とした 3 GeV 線型加速器は高安定かつ高品質なビームの生成・加速だけではなく、高信頼性・高堅牢性・高保守性を目指した設計・構築がなされた [1]。

低エミッタンス蓄積リングの狭いダイナミックアパーチャに対して、高効率でビーム入射をおこなうには、入射ビームの低エミッタンス化はもちろん、高水準の安定性を持つことが不可欠である。要求されるエミッタンスは 2 nm·rad であり、これは規格化エミッタンスで 10 mm·mrad 以下に相当する。エネルギー安定性は <0.2% が求められている。

Figure 1 に、NanoTerasu の入射器として、40 MeV 入射部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、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, 476 MHz)、初段 S バンド加速管から構成されており、数 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

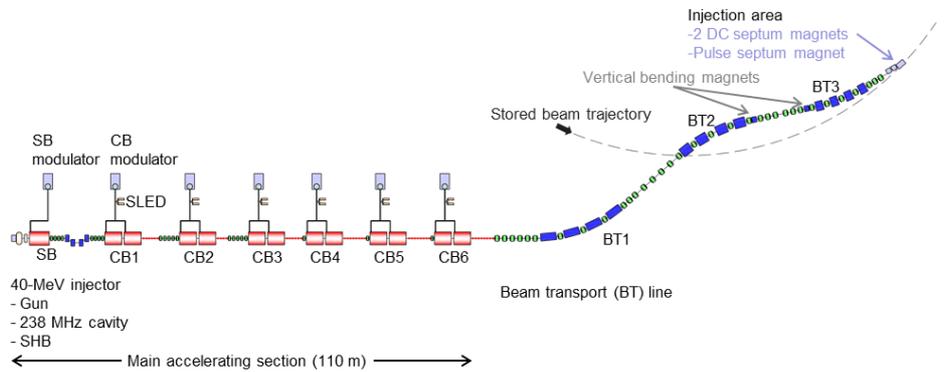


Figure 1: 3-GeV injector of NanoTerasu. First units of each C-band accelerating sections are shown. Reprinted and modified from a reference [3].

<sup>#</sup> kan.koichi@qst.go.jp

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 [4]。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 式の加速ユニットから構成される主加速部で 3 GeV まで加速される。加速ユニットは、1 式につき 1 台のクライストロンと 2 本の 2 m 長の C バンド加速管が設置されている。50 MW クライストロンから出力される RF 電力は、RF パルス圧縮空洞 (SLED [5]) で約 4 倍に増幅された後、2 本の加速管に供給される。1 台の加速ユニットで最大 170 MeV のエネルギーの加速を行う。

### 3. ビーム性能および安定性

#### 3.1 要求されるビーム性能・安定性

3 GeV 線型加速器に要求されるビーム性能とビームコミッションングで取得されたビームパラメータを Table 1 に示す。ビームの主要パラメータは、要求を達成している [6,7]。ここで示したビーム性能は 2024 年 4 月からの利用運転に適用されている。

Table 1: Required and Measured Beam Performance of 3-GeV Linear Accelerator

Items	Requirement	Measurement
Beam energy	3 GeV	3 GeV
Energy spread	0.16%	0.04%
Energy stability	<0.2%	0.02%
Bunch charge	0.3 nC/bunch	0.36 nC/bunch
Bunch charge stability	-	0.72%
Injection efficiency	-	88% [3]
Normalized emittance	10 mm·mrad	6.1 mm·mrad (H) 13.9 mm·mrad (V)
Pulse repetition rate	1 Hz	1 Hz

#### 3.2 RF 空洞および C バンド加速ユニットの安定性

RF 空洞および主加速部の安定性の評価を行った。40 MeV 入射部の RF 空洞の振幅および加速位相の安定性は、ビームのエネルギー利得に敏感に影響する。さらに、S バンド加速管出口のシケイン軌道における経路差を生み、C バンド加速管に到達するタイミング変動となる。その結果、3 GeV ビームのエネルギー変動が引き起こされる。安定な入射器運転のためには、RF 空洞の振幅および位相の安定化が不可欠である。具体的には、エネルギー安定度を<0.2%とするために、C バンド加速管へのビームの到達時刻の変動は、 $\pm 1.25$  ps 以内に抑える必要がある。

Figure 2 に 238 MHz 空洞および 476 MHz SHB の電力および位相変化による 40 MeV 入射部のシケイン出口への到達時刻、つまり、最初の C バンド加速管への到達時刻変化、のシミュレーション結果の例を示す。同様に、電子銃の電圧やタイミングについてもシミュレーションを行っているが、238 MHz 空洞の振幅および SHB の位相

の変動が到達時刻へ大きな変動を与える。

現在達成されている、5 分間の安定度を Table 2 に示す。振幅および位相は空洞のピックアップ信号もしくはダミーロードの信号を、MTCA.4 により検出した。上記のシミュレーションから RF 機器に要求される振幅および位相の安定性 [8]をあわせて示す。現状の RF 機器の振幅および位相の安定度は要求を満たしている。

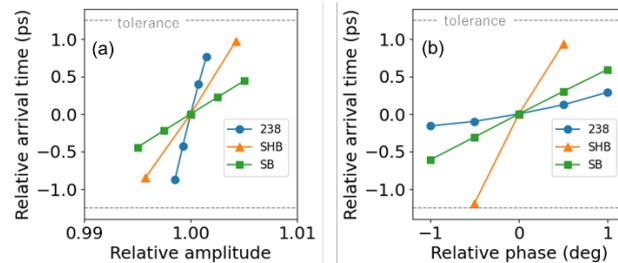


Figure 2: Simulation study on arrival time at the exit of a chicane as functions of (a) relative RF amplitude and (b) phase. Effects of 238 MHz cavity, 476 MHz SHB, and S-band accelerating structure are shown. Dashed line denote tolerance corresponding to  $\pm 1.25$  ps.

Table 2: Measured stabilities of amplitude and phase in accelerating structures. Values for requirement in peak-to-peak and measurement in rms.

Structures	Requirement		Measurement	
	Amp. (%)	Phase (degree)	Amp. (%)	Phase (degree)
238 MHz cavity	$\pm 0.08$	$\pm 0.5$	0.033	0.034
SHB	$\pm 0.15$	$\pm 0.2$	0.022	0.065
S-band	$\pm 0.3$	$\pm 0.5$	0.029	0.060
C-band	$\pm 0.1$	$\pm 2.5$	0.037	0.058

#### 3.3 3-GeV ビーム電荷量・エネルギーの安定性

線型加速器終端および蓄積リングへ入射時の 3 GeV ビーム電荷量について、約半年間の推移を Fig. 3 に示す。2023 年 6 月以降に、線型加速器からの生成および輸送電荷量の増大の調整を行ってきた。2024 年 4 月の利用運転開始後も安定に入射を継続している。

5 分間のビーム電荷量およびエネルギーの安定性を、Fig. 3 に示す。線型加速器終端のビーム電荷量は、0.72% (rms)の高い安定性を実現している(Fig. 4 (a))。ビームエネルギーの測定は、線型加速器終端の下流の分散部(BT1)に設置したビームポジションモニターで得られたビーム位置からエネルギーを算出する。この測定で得られた安定度は 0.02% (rms)となり(Fig. 4 (b))、要求値を十分満足している。ビームエネルギーに関しては、Table 2 で示したように、現在の RF 機器の振幅および位相の安定度の評価からも妥当な結果である。

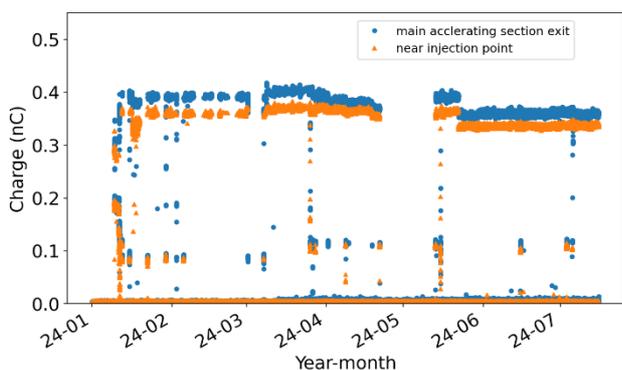


Figure 3: Bunch charge trends at the main accelerating section exit and near injection point in a half year.

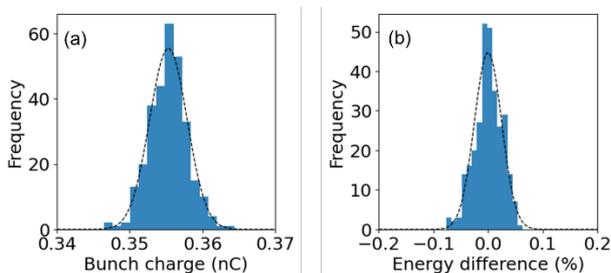


Figure 4: Stabilities of (a) bunch charge and (b) beam energy in 5 minutes.

### 3.4 3 GeV 線型加速器終端および入射点のビーム位置安定性

蓄積リングに安定な入射を行うためには、ビームポジションの安定性は必要である。電子銃から 117 m (線型加速器終端) および 193 m (入射点) の輸送距離にあるビーム位置変動を測定した。約 5 分間のビーム位置安定性を Fig. 5 に示す。線型加速器終端における変動は、標準偏差で、 $31 \mu\text{m}$  (rms, horizontal direction,  $x$ ) および  $11 \mu\text{m}$  (rms, vertical direction,  $y$ ) であった (Fig. 5 (a))。分布が水平方向にひろがっているが、原因を調査中である。入射点における変動は、 $22 \mu\text{m}$  ( $x$ ) および  $24 \mu\text{m}$  ( $y$ ) であった (Fig. 5 (b))。入射点付近における rms ビームサイズは水平方向および垂直方向において、 $330 \mu\text{m}$  および  $150 \mu\text{m}$  である。現在の蓄積リングへの入射効率は 88% 程度 [3]

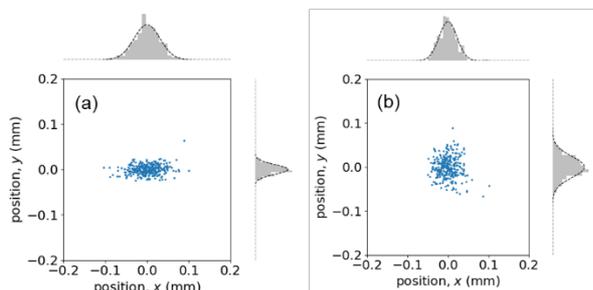


Figure 5: Beam position stability near (a) main accelerating section exit and (b) injection point to the storage ring in 5 minutes.

であることから、ビームはパルスセプタム (垂直の開口: 4 mm、進行方向長さ: 500 mm) を十分に通過している。

### 3.5 エミッタンス

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、測定ツールの開発を行っている (Fig. 6)。エミッタンスは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 (Q スキャン法)。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測定する。

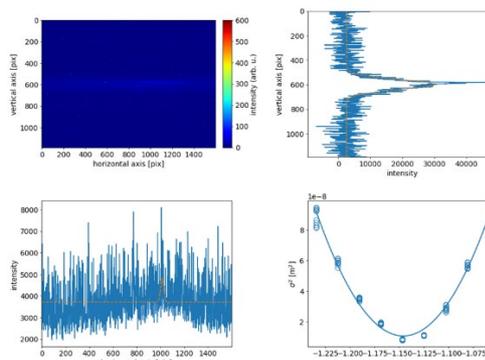


Figure 6: Emittance measurement tool. Images are analyzed using horizontal and vertical profiles with Gaussian fittings. Beam sizes as a function of quadrupole magnet are used to calculate emittance and the Twiss parameters.

Q スキャン法によって得られた、現在の 40 MeV 入射部における水平・垂直方向の規格化エミッタンスおよびツイスパラメータを Table 3 に示す。この結果は、入射に要求されるエミッタンス ( $2 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ ) と同程度であり、要求を満たしている。S バンド加速管出口では水平と垂直のエミッタンスが異なっているが、S バンド加速管入口に設置された磁気レンズの設定電流によってエミッタンスが変化することから、加速管の入力カプラーによる水平・垂直電場分布の非対称性の影響があると考えられる。今後、数種類の依存性を測定するとともに、線型加速器からビーム輸送路のビーム光学系を設計値に近づけることを目指している。

Table 3: Measured normalized emittance and the Twiss parameters at the 40 MeV section. Horizontal ( $x$ ) and vertical ( $y$ ) values.

Items	$x$	$y$
Norm. $\epsilon$	6.1 mm·mrad	13.9 mm·mrad
$\alpha_x$	-0.50	-0.21
$\beta_y$	23.1 m	9.9 m

#### 4. まとめ

3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu の 3 GeV 線型加速器の建設は予定通り完了し、その後実施したビーム調整も計画通りに進めることができた。2023 年度にビームコミッショニングを開始し、当初の予定通り、2024 年 4 月からユーザー運転を開始している。線型加速器において、RF 機器に要求される振幅および位相の安定度について、要求を満たしている。現在得られているビーム電荷量およびエネルギーの安定性は、それぞれ、0.72%および 0.02%であり、安定な蓄積リングへの入射を継続している。入射点におけるビーム位置の変動は、30  $\mu\text{m}$  以下であった。40 MeV 入射部では入射に要求されるエミッタンスと同程度の規格化エミッタンスが得られている。

今後、線型加速器のビームのエミッタンスを複数個所で測定するとともに、線型加速器のビーム光学系を設計値に近づける。

#### 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。NAT(株)の高橋隼也氏、櫻庭慶佑氏、齋田涼太氏、

杉本兼人氏をはじめとするスタッフ皆様には、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] N. Nishimori, T. Watanabe, and H. Tanaka, *Accelerator Design Report for 3-GeV next-Generation Synchrotron Radiation Facility*.  
<https://www.qst.go.jp/site/3gev-eng/>
- [2] N. Nishimori *et al.*, “Commissioning of NanoTerasu accelerator system,” Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 6 (TUOP02) (2023).
- [3] S. Obara *et al.*, “Commissioning of a compact multi-bend achromat lattice in NanoTerasu, a new 3 GeV synchrotron radiation facility,” arXiv:2407.08925 [Physics.Acc-Ph], (2024).
- [4] T. Asaka, T. Inagaki, T. Magome, N. Nishimori, Y. Otake, T. Taniuchi, K. Yanagida, and H. Tanaka, “Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode,” Phys. Rev. Accel. Beams, **23**, 063401 (2020).
- [5] Z. D. Farkas, H. A. Hogg, G. A. Loew, and P. B. Wilson, “SLED: A Method of doubling SLAC’s energy,” Proceedings, 9th International Conference on the High-Energy Accelerators (HEACC 1974), 576 (1974).
- [6] T. Asaka *et al.*, “Installation and beam commissioning of 3 GeV linear accelerator in NanoTerasu,” Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 49 (WEOA7) (2023).
- [7] T. Asaka *et al.*, “Beam performance of injector system in NanoTerasu,” Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 785 (THP49) (2023).
- [8] E. Iwai *et al.*, “Evaluation of the digital LLRF system using MTCA.4 framework for the injection linac for the next generation synchrotron light source,” Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 130 (THOI03) (2019).