

NanoTerasu 加速器の現状

PRESENT STATUS OF NanoTerasu

安積隆夫^{#, A)}, 上島孝太^{A)}, 小原脩平^{A)}, 菅晃一^{A)}, 保坂勇志^{A)}, 西森信行^{A)},
Takao Asaka^{#, A)}, Kota Ueshima^{A)}, Shuhei Obara^{A)}, Koichi Kan^{A)}, Yuji Hosaka^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)},
^{A)} NanoTerasu Center / QST

Abstract

Beam commissioning of the 3-GeV linear accelerator and the storage ring was completed smoothly as planned. The beam performance as a next-generation synchrotron radiation facility was confirmed during the beam commissioning. After the adjustment of 7 beamlines (28 beamlines in total) has been completed, experiments using synchrotron radiation began in April 2024. In this presentation, the beam commissioning status and user operation status are shown.

1. はじめに

NanoTerasu は特定先端大型研究施設として、2024 年 4 月より共用運転を開始した[1]。今年度計画されている利用運転時間は 3500 時間であり、加速器ならびに X 線ビームラインのマシナタディには約 1950 時間割り当てられている。利用運転を開始して以来、4 ヶ月経過した現在では、99.5% の稼働率を実現し、207 時間の平均故障時間 (MTBF) を達成している。

NanoTerasu は、「官民パートナーシップ」が総額 380 億円の建屋建設・施設整備費を担う 5 ヵ年整備計画として、光科学イノベーションセンター (PoSIC) を代表機関とする民地域が 180 億円で建屋建設と 7 本のビームラインの整備、国 (官) の主体である国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (QST) が 200 億円で加速器と 3 本のビームラインを担当し、建設が進められてきた。

国内初の Multi-Bend Achromat (MBA) ラティスを採用した 3 GeV 蓄積リングでは、低エミッタンスビームにより、軟 X 線からテングダー X 線領域 (1~3keV) において、高い空間コヒーレンスを実現し、高輝度放射光 ($>1 \times 10^{21}$ photons/sec/mm²/mrad²/0.1% b.w.) を提供する。NanoTerasu は、硬 X 線領域を得意とする SPring-8 との波長領域での棲み分けにより、国内の光科学プラットフォームの一翼を担う[2]。

本施設の構想段階であった 2016 年から 2017 年までに加速器の主要パラメータと基本構成が決められ、これを踏まえた機器開発・製作が 2018 年 12 月から SPring-8 (RIKEN, JASRI) の協力のもとおこなわれた[3-7]。2021 年 12 月から開始した加速器コンポーネントの現地据付作業は、設置工程期間である 1 年 3 ヶ月間で完了した (Fig. 1 を参照)。

2023 年 4 月からは線型加速器ビームコミッショニングを開始し[8]、同年 6 月には蓄積リングのビームコミッショニング[9]が前倒しされた。そして、同年 9 月から高輝度放射光を用いた X 線ビームラインの機器調整が進められた。

Figure 2 には NanoTerasu 加速器、ならびに X 線ビームラインの配置を示す。NanoTerasu 加速器システムは、周長が 349 m の蓄積リングと全長が 110 m の 3 GeV 線

型加速器で構成される。設置可能な X 線ビームラインは合計 28 本であり、利用運転の初年度は 10 本のビームラインが用意される。

3 GeV 線型加速器は、グリッド付き熱カソード電子源を用いた低エミッタンス 500 keV RF 電子銃システム [10]、476 MHz サブハーモニックバンチャー (SHB)、2 m 長 S バンド加速管から成る 40 MeV 入射部[11]、その後段のエネルギー分析用シケイン部、そして 2 m 長 C バンド加速管を 40 本装備した主加速部から構成される[12]。

年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
加速器	施設調査 加速開発	整備着手	線型加速器製作 蓄積リング製作		設置開始 据付・調整	12月 ファーストビーム コミッショニング	<共用開始>
ビーム ライン (3本)		仕様検討	ビームライン製作・据付・調整		制御・安全装置		
建屋		設計	建設開始	建設			
ビーム ライン (7本)		仕様検討	ビームライン製作・据付・調整				<共用開始>
土地造成							

Figure 1: Beam commissioning timeline.

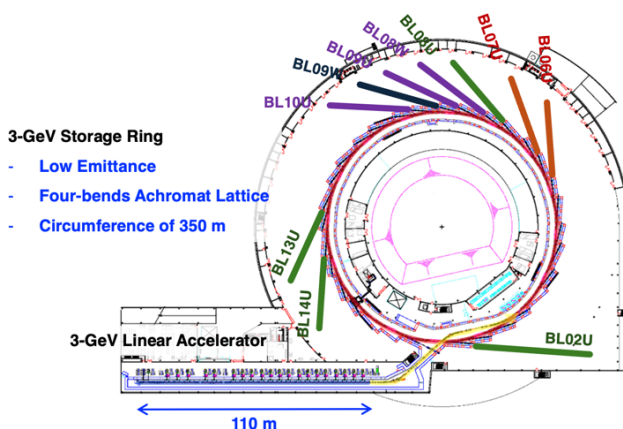


Figure 2: Layout of 3 GeV linear accelerator, storage ring and 10 beamlines.

[#] asaka.takao@qst.go.jp



Figure 3: Photograph of 3-GeV beam transport line and injection point of storage ring.

線型加速器から蓄積リング入射点までは、約 80 m のビーム輸送部で繋げられる。このビーム輸送部には、3ヶ所の水平偏向ラティスがあり、それぞれ 42° 、 -30° 、 19.7° 偏向させる。第 1, 2 偏向ラティス前後ではアクロマットを形成する。また、ビーム輸送部は蓄積リング電子周回軌道の下部を潜り、蓄積リングの内周側で垂直レベルのオフセット分だけ蹴り上げ、周回軌道レベルとした後に水平に off-axis 入射をおこなう (Fig. 3 を参照)。

蓄積リングは、1 セル当たり偏向電磁石 4 台から成る 4BA (4-Bend Achromat) ラティスとし、全 16 セル (偏向電磁石総数で 64 台) で構成される。全ての偏向電磁石は低エミッタンス化のために機能複合型 (発散四極成分) を採用している [13]。偏向電磁石や挿入光源で放射光発生により生じる周回電子のエネルギー損失を補充するため、4 台の RF 加速空洞から成る高周波システムが長直線部 (5.4 m) に設置されている。この RF 空洞は TM_{020} モードで動作し、HOM 吸収体を装備している [14, 15]。

3 GeV 線型加速器、蓄積リングの設計・構築にあたって、高品質電子ビームの生成・加速、蓄積は当然として、高輝度放射光による高精密実験にも十分耐える高い安定性能を追求することが重要項目として位置付けられた。また、利用施設として高稼働率の実現、すなわち高信頼性、高堅牢性、高保守性を念頭に置くとともに、コストパフォーマンスに優れた機器設計がなされた。さらに 3 GeV 線型加速器においては、ビーム調整の簡易化も配慮したミニマルデザイン [16] とし、蓄積リングは、施設建屋・ユーティリティも含めたトータルデザインを念頭に置

いた設計がなされた [17]。例えば、蓄積ビームが、冷却水設備、空調設備といった振動機材の影響を回避するように、振動機材は加速器本体が設置される地面とはエキスパンションジョイントにより完全乖離している。また、電磁石に通水する冷却水による機械振動の抑制のため、架台剛性、磁石サポート・磁石形状についても徹底した振動解析・最適化をおこない振動耐性を有する構造とした [18]。こうした理念は、20 年以上の SPring-8 における利用運転で培われた経験と知見を反映している。

本稿では、ビームコミッショニング状況について触れるとともに、今年 4 月から開始した利用運転状況について報告する。

2. ビームコミッショニング

2023 年 4 月中旬から開始したビームコミッショニングでは、最初に 3 GeV 線型加速器の最上流部にある 40 MeV 入射部の最適化がなされ [11]、その後 C バンド主加速部によるビーム加速調整 (ビーム誘起電圧位相測定による位相調整) がおこなわれた。ビームコミッショニング開始から 10 日後には 3 GeV ビームが確認された。

線型加速器から蓄積リングまでの 80 m の区間であるビーム輸送部の調整を経て、蓄積リングへのビーム入射・調整が 6 月 8 日より開始された。Figure 4 に 3 GeV 線型加速器におけるビームコミッショニング工程を示す。

蓄積リングのビームコミッショニングでは、ビーム入射点における入射位置・角度調整が開始されると直ちに 300 周のビーム周回を確認できた。当時、蓄積リングの RF 空洞は RF コンディショニングの途中ではあったが、6 月 16 日には RF 空洞の加速位相調整による蓄積試験を実施し、ビーム蓄積を確認するに至った [19]。

蓄積ビームを使用した Beam Based Alignment (BBA) による BPM の校正 [20]、COD 補正、チューン補正といったオプティクス調整、そして Golden orbit の確立 [21] をおこなった後、挿入光源の使用を配慮したビーム調整に移行した [22]。

蓄積ビーム電流増強を目的とした真空焼き出しが、8 月より 24 時間体制でおこなわれた。8 月 9 日には 100 mA の蓄積ビーム電流に到達し、8 月 17 日には 170 mA に達した。蓄積ビーム電流の増加 (>10 mA) に伴い横方向ビーム不安定性が発生したが、BBF (Bunch by Bunch Feedback system) を動作することで不安定性を抑制することができた [19]。Figure 5 には、蓄積リングにおけるビームコミッショニング工程を示す。



Figure 4: Timeline of beam commissioning 3-GeV linear accelerator.

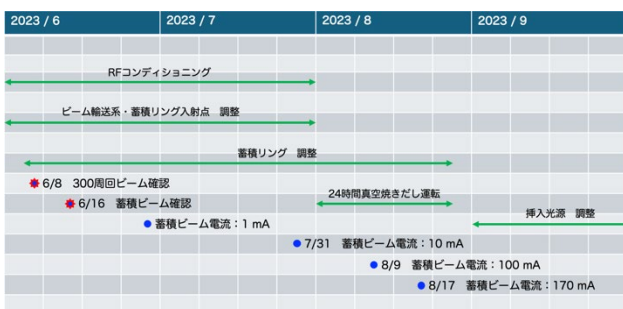


Figure 5: Timeline of beam commissioning storage ring.

3. 利用運転状況

3.1 3 GeV 線型加速器

利用運転における 3 GeV 線型加速器のビームパラメータを Table 1 に示す。蓄積リングへのビーム積み上げは 1 Hz でビーム電荷量 0.3 nC (蓄積ビーム電流で 0.3 mA 相当)の入射がおこなわれる。設定蓄積ビーム電流に到達した後は Top-up 運転(十数分ごとのビーム入射)により蓄積ビーム電流が維持される。

数週間におよぶ連続した利用運転の間、線型加速器の調整は一切おこなうことなく、ビーム品質、ビーム軌道、入射効率といった所謂、蓄積リングへの入射に必要なビーム性能は長期間にわたって維持できている。また、利用運転再開時においても、機器パラメータを設定するのみで、入射条件を満足するビームが再現している。利用運転を開始して以来、線型加速器は無調整で6ヶ月間、安定したビーム入射継続している[23]。

2023 年 4 月からのビームコミッショニング開始から 2024 年 7 月現在までに生じた 3 GeV 線型加速器の機器故障事象を Table 2 にまとめる。電子銃電源故障といったビームコミッショニングに影響するトラブルも発生したが、迅速な原因究明と臨機応変な対応により、長期間のビーム供給停止を回避している。

Table 1: Main Parameter of 3-GeV Linear Accelerator

Beam parameter	Design	Measurement
Beam charge	> 0.3 nC	0.36 nC
Energy	3 GeV	3 GeV
Energy spread	0.16 % (FWHM)	0.043 % (FWHM)
Horizontal emittance	2 nm rad	1.04 ± 0.03 nm rad
Vertical emittance	-	1.84 ± 0.19 nm rad
Beam charge stability	-	0.52 % (σ)
Energy stability	< 0.2 % (σ)	0.06 % (σ)
Pointing stability @injection point	-	Hor. 22 μ m (σ) Ver. 24 μ m (σ)
Repetition rate	1 Hz	1 Hz
RF Repetition rate	40-MeV injector RF system: 25Hz C-band acceleration unit: 10 Hz	-

Table 2: Fault Events of 3-GeV Linear Accelerator

年月日	故障事象
2023/7/24	電子銃高電圧電源の故障 → 代替用 DC 電源で対応(2023/7/31) → 現在、DC 電源による 40 kV 運転
2024/3/1	低電力 RF システムの基準タイミング・RF 励振用光ファイバの断線(CB5-3) → 修理対応(2024/3/5)
2024/3/25	50 MW クライストロン管内放電(CB5-1) → 待機加速ユニット対応(2024/3/25) → 予備クライストロンと交換対応(2024/4/22)
2024/7/12	電磁石電源制御用サーバー故障 → 予備サーバー交換対応(2024/7/12)

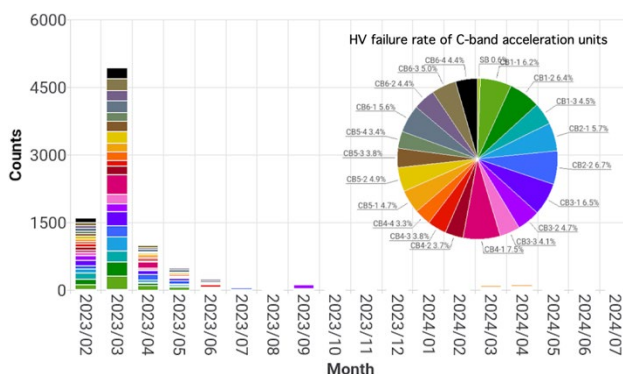


Figure 6: HV fault rate of C-band accelerating units.

Figure 6 には、RF コンディショニングを開始した 2023 年 2 月から 2024 年 7 月現在までに発生した大電力 RF システムの停止頻度を示す。RF コンディショニング期間であった 2023 年 2、3 月は加速ユニット各部の真空悪化によるクライストロン印加電圧の停止が頻発しているが、RF コンディショニングが進むにつれて減少している。また、ビームコミッショニング期間中もしばらくの間は C バンド加速ユニットにおける RF 窓や加速管内の真空悪化が発生したが、2024 年 4 月の利用運転が開始されてからは、1 日に一度程度の停止頻度まで減少している。

3.2 蓄積リング

利用運転における蓄積リングのビームパラメータを Table 3 に示す。蓄積リングでは、周回ビーム軌道を安定維持するために、約 30 秒周期で COD、チューンを自動補正されており、常時その軌道は蓄積リング一周にわたって±0.3 mm 以内に抑えられている[19]。

蓄積リングには、ビーム診断系として 1 セルあたり 7 台の BPM が設置されている。このほか 3 極ウイグラーが装備されており、生成される放射光を観測し、ビームサイズ(エミッタンス)を取得している [24]。Figure 7 には、3 極ウイグラーからの放射光の撮像画像を示す。Figure 8 には、この放射光モニターで得られたビーム重心変動(3 分間)、Fig. 9 にはビームサイズの安定度(1 時間)を示す。ビーム重心位置の変動量は、水平/垂直方向に対してそれぞれ 0.8 μ m (σ) / 0.5 μ m (σ)に抑えられている。また、1 時間以上の長期安定性も 1 μ m (σ)を達成している。

Table 3: Main Parameter of Storage Ring

Beam parameter	Design	Measurement
Beam current	400 mA	200 mA
Energy	3 GeV	3 GeV
Betatron tune (x / y)	28.17 / 9.23	28.17±0.01 / 9.23±0.01
Chromaticity (x / y)	1.38 / 1.53	1.98 / 1.98
Horizontal emittance	1.14 nm rad	1.14 nm rad
Bunch length	9.74 ps	10.9 ps
Filling pattern	-	< 550 / 592 buckets
Electron lifetime	-	~ 10 hr

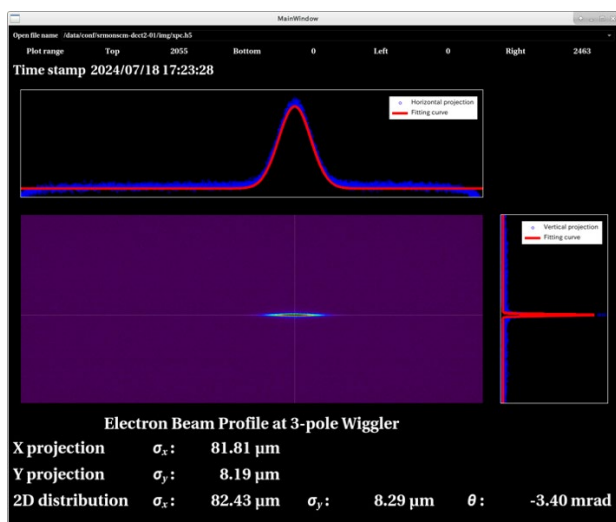


Figure 7: Stored beam profile of synchrotron radiation from 3-pole wiggler imaged by X-ray pinhole camera.

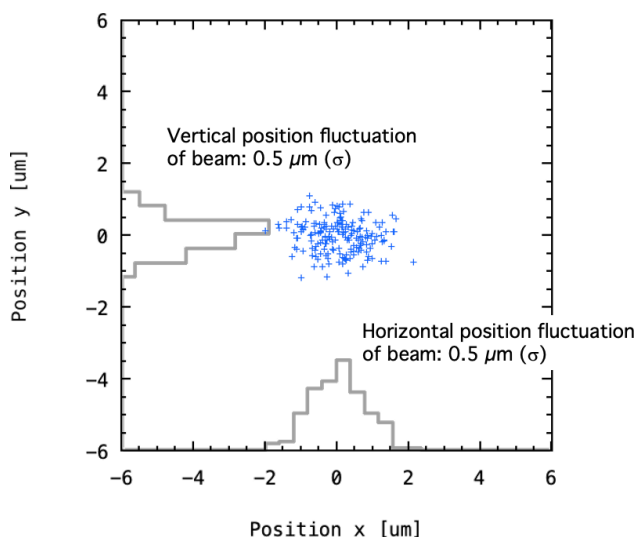


Figure 8: Variation of the center position of the stored beam profile imaged by X-ray pinhole camera during 3 minute.

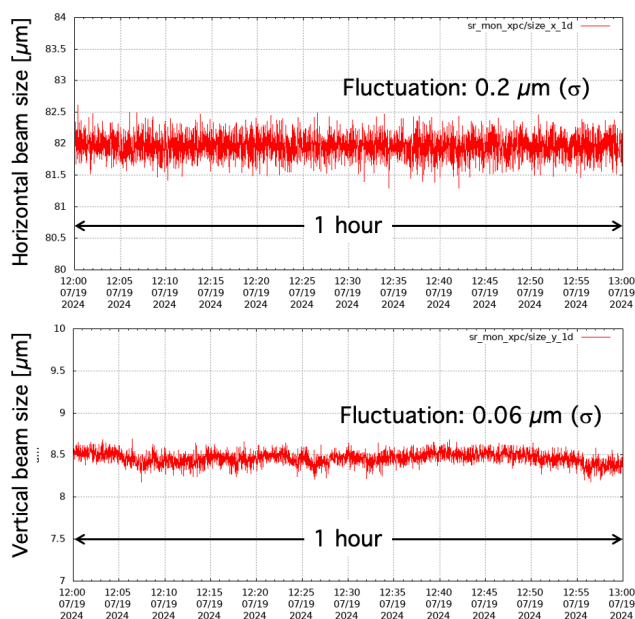


Figure 9: Beam size variation of the stored beam profile imaged by X-ray pinhole camera during 1 hour.

Table 4: Operation Status of NanoTerasu

Operation cycle	Operation time	MTBF	MTTR
#1 (4/9 ~ 4/21)	296 hr	147 hr	0.93 hr
#2 (5/19 ~ 5/24)	144 hr	146 hr	0.93 hr
#3 (5/26 ~ 5/31)	104 hr	107 hr	1.06 hr
#4 (6/4 ~ 6/14)	248 hr	157 hr	1.06 hr
#5 (6/19 ~ 6/28)	224 hr	206 hr	1.06 hr
#6 (7/9 ~ 7/19)	248 hr	207hr	1.03 hr

3.3 利用運転の状況

蓄積ビーム電流の設計値は 400 mA であるが、現在、縦方向ビーム不安定性により、300 mA で制限されている。RF 空洞で生じる縦方向ビーム不安定性は、RF 空洞の僅かな形状変化、すなわち RF 空洞本体の温度変化に依存性をもつことが判明しており、現在、調査を続けている。他方、このビーム不安定性を抑制するための縦方向フィードバックシステムの導入も計画している。

こうした状況を踏まえ、4 月からの利用運転における蓄積ビーム電流は 160 mA に設定した。その後実施された蓄積ビーム電流の増加に関するマシINSTADYの結果を反映し、#6 利用運転は 180 mA 運転、#7 利用運転は、200 mA の蓄積ビーム電流で放射光を提供している。

現在 (8/5) まで利用運転として提供した時間は、1284 時間である。この間の稼働率は 99.5 %、MTBF は 207 時間、MTTR は 1 時間を達成している (Table 4 を参照)。機器インターロックによる蓄積ビーム電流が廃棄される事象は、すべて RF システム起因であり、とくに RF 空洞からの RF 電力反射レベル増加が主な要因である。

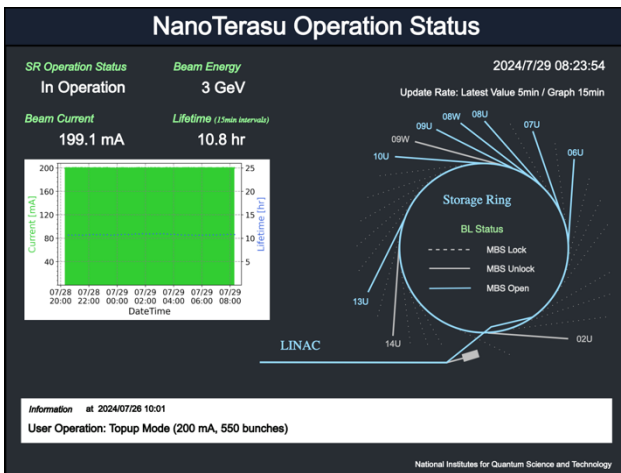


Figure 10: NanoTerasu operation status on web page.

4. まとめ

昨年 4 月よりおこなわれた加速器ビームコミッショニング、X 線ビームラインの調整は、順調に進められた。利用運転を開始して以降、4ヶ月経過した現在までに、大きなトラブルなく安定した高輝度放射光を利用者に提供している。

ビームコミッショニング期間中は、加速器の調整のみならず、加速器運転員の教育のほか、運転体制(シフト体制)、緊急時対応など、放射光利用施設としての組織、規範設定といった多岐にわたる体制づくりもおこなってきた。また、放射光利用者や施設関係者に対し、蓄積ビーム電流、ビームライン使用状況といった web page 公開による情報共有化も進めてきた(Fig. 10を参照)。

現在、NanoTerasu 加速器の課題は、400 mA ビーム蓄積である。縦方向ビーム不安定性の要因を徹底調査し、その調査結果を踏まえた RF 空洞温度の制御システムの導入、縦方向フィードバックシステムの開発・導入を計画している。また、長期間の運転を見据えた加速器コンポーネント故障についても、迅速に対応できるように予備物品を準備、充実していくことも肝要である。

今後は、X 線ビームラインの追加に伴う挿入光源の製作・設置対応、蓄積リングビーム性能のさらなる高度化、そして将来計画である軟 X 線自由電子レーザーのためマシンスタディを進めていく。

謝辞

NanoTerasu 加速器のビームコミッショニング期間中、SPring-8 加速器(RIKEN, JASRI, SES) 加速器の方々に多くの有益なアドバイスをいただきました。ビームコミッショニングにおけるビーム調整は、加速器の設計段階から綿密な調整シナリオ、手法、手順について検討を重ね、ビーム調整計画が策定されました。NanoTerasu 加速器の設計、機器製作、据付、そしてビームコミッショニングが計画通りに円滑に進められたことは関係者の方々のご協力によるものです。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律の一部を改正する法律案。
- [2] 西森信行、渡部貴宏、田中均；放射光 33, 196 (2020).
- [3] 量研：“3GeV 次世代放射光施設加速器デザインレポート”，2020 年 9 月。
- [4] N. Nishimori *et al.*, “A New Compact 3 GeV Light Source in Japan”, Proc. IPAC22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2402-2406.
- [5] 西森信行:放射光 37, 77 (2023).
- [6] 西森信行、渡部貴宏、田中均：表面と真空 65, 560 (2022).
- [7] N. Nishimori *et al.*, “Calculation of magnetic distribution of multipole electromagnets with laminated cores”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 515-517.
- [8] T. Asaka *et al.*, “Installation and beam commissioning of 3 GeV linear accelerator”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 49-53.
- [9] N. Nishimori *et al.*, “Commissioning of NanoTerasu accelerator system”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 6-11.
- [10] T. Asaka *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 23, 063401 (2020).
- [11] T. Asaka *et al.*, “Beam performance of injector system in NanoTerasu”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 785-789.
- [12] T. Inagaki *et al.*, “Design and development status of a C-band accelerator system used as an injector for a next-generation SR source”, Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 766-770.
- [13] N. Nishimori *et al.*, “Accelerator system for highly brilliant 3 GeV light source project”, Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 153-156.
- [14] H. Ego *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 1064 (2024) 169418.
- [15] S. Takahashi *et al.*, “Status of rf acceleration system for NanoTerasu storage ring”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 200-204.
- [16] 安積隆夫:放射光 37, 69 (2023).
- [17] 西森信行、渡部貴宏、田中均：加速器 18, 28 (2021).
- [18] T. Aoki *et al.*, “Development of prototype common girders for SPring-8 II”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 1248-1251.
- [19] S. Obara *et al.*, arXiv: 2407.08925.
- [20] K. Ueshima *et al.*, “Commissioning of the stored beam monitor system in NanoTerasu”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, WEO03, this meeting.
- [21] S. Obara *et al.*, “Commissioning of the beam optics in the storage ring at NanoTerasu”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, FROA07, this meeting.
- [22] Y. Hosaka *et al.*, “Correction of higher-order magnetic field of APPLE II undulators at NanoTerasu”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, WEOT07, this meeting.
- [23] K. Kan *et al.*, “Beam stability evaluation of 3 GeV linear accelerator in NanoTerasu”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, WEOT07, this meeting.
- [24] K. Ueshima *et al.*, “Electron beam diagnostics system using 3-pole wiggler in NanoTerasu”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug - Sep. 2023, PP. 163-166.