

ナノテラスにおける蓄積ビームモニターシステムのコミッショニング

COMMISSIONING OF THE STORED BEAM MONITOR SYSTEM IN NanoTerasu

上島考太^{#, A)}, 小原脩平^{A)}, 西森信行^{A)}, 安積隆夫^{A)}, 菅晃一^{A)}, 保坂勇志^{A)}, 青木駿堯^{B)},
芳賀浩一^{B)}, 伊原彰^{B)}, 伊藤優仁^{B)}, 岩下大器^{B)}, 門脇聖弥^{B)}, 小林創^{B)}, 及川治彦^{B)},
齋田涼太^{B)}, 櫻庭慶佑^{B)}, 高橋隼也^{B)}, 土山翼^{B)}, 井場祐人^{B)}, 金浜蓮人^{B)}, 高橋滉希^{B)},
田中達輝^{B)}, 西原秀雄^{B)}, 森谷佳津貴^{B)}, 吉岡里紗^{B)}, 高野史郎^{C), D)}, 正木満博^{C)},
藤田貴弘^{C)}, 出羽英紀^{C)}, 清道明男^{C)}, 阿部利徳^{C)}, 前坂比呂和^{D)}

Kota Ueshima^{#, A)}, Shuhei Obara^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Takao Asaka^{A)}, Koichi Kan^{A)}, Yuji Hosaka^{A)},
Toshitaka Aoki^{B)}, Koichi Haga^{B)}, Akira Ihara^{B)}, Katsumasa Ito^{B)}, Taiki Iwashita^{B)}, Masaya Kadowaki^{B)},
Hajime Kobayashi^{B)}, Haruhiko Oikawa^{B)}, Ryota Saida^{B)}, Keisuke Sakuraba^{B)}, Shunya Takahashi^{B)},
Tsubasa Tsuchiyama^{B)}, Yuto Iba^{B)}, Rento Kanahama^{B)}, Kouki Takahashi^{B)}, Tatsuki Tanaka^{B)}, Hideo Nishihara^{B)},
Katsuki Moriya^{B)}, Risa Yoshioka^{B)}, Shiro Takano^{C), D)}, Mitsuhiro Masaki^{C)}, Takahiro Fujita^{C)}, Hideki Dewa^{C)},
Akio Kiyomichi^{C)}, Toshinori Abe^{C)}, Hirokazu Maesaka^{D)}

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

^{B)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) / NAT

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

^{D)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

The beam commissioning of the NanoTerasu storage ring was started in June 2023. In the storage ring, 112 BPMs to monitor the stored beam position and a bunch-by-bunch feedback system to suppress the transverse instability were installed. The beam-based alignment of all BPMs was performed with 10 μm accuracy to adjust the beam optics parameters precisely. The damping time of the bunch-by-bunch feedback system reached 10 μsec as a result of the system adjustment. The first user operation was started on April 9th, 2024. The stored beam current was set to 160 mA with top-up beam injection. The operation availability was 99.43 % for 1288 hours of user operation period by July 19th.

1. はじめに

国内初となる Multi-Bend Achromat (MBA) ラティスを採用したコンパクトな第4世代 3 GeV 光源 NanoTerasu は 2023 年 6 月から蓄積リングのコミッショニングを開始した [1-3]。

NanoTerasu の蓄積リングは周長 349 m で 16 の基本ユニットセルから構成され、長直線部 16 本と短直線部 16 本が設置されている。蓄積電子ビームエネルギー 3 GeV、設計蓄積電流 400 mA、設計水平エミッタンスは 1.14 nm.rad である。軟 X 線からテnder X 線領域で SPring-8 の 100 倍程度に相当する輝度を有し、コヒーレント比は 10 % 程度を達成することができる。

長直線部 2 本は、蓄積電子ビームを加速する高周波空洞、線型加速器から電子ビームを蓄積リングへ入射するリング入射部システムに使用し、短直線部 2 本は蓄積電子ビームモニターシステムの機器を設置するために使用した。残りの 28 本の直線部に挿入光源(ID)を設置でき、最大 28 本のビームラインを建設できる。初期段階では 10 本のビームラインが建設された。

2024 年 4 月 9 日より、ユーザー利用運転を開始した。本稿では、蓄積リングビーム位置モニター(BPM)、横方

向ビーム不安定性を抑制するための Bunch-by-Bunch Feedback system (BBF)、蓄積電子ビーム軌道監視、蓄積電子ビームアポート試験を中心に蓄積リングモニターシステムのコミッショニングについて報告する。

2. 蓄積電子ビームモニターシステム

NanoTerasu の蓄積リングには蓄積電子ビームをモニターするため Table 1 に示す電子ビームモニターが設置されている[4]。蓄積電子ビームの軌道、COD をモニターするため SPring-8-II 用に開発されたボタン電極[5, 6]を使用し、1 セルあたり 7 台、リング 1 周で計 112 台の BPM を設置した。BPM の信号は、MTCA.4 ベースの回路で信号処理され、安定に位置データを算出できるように BPM の回路は水冷 19 インチラックに収納した[7, 8]。

蓄積電流をモニターする DCCT は 2 台設置し、24 ビットの ADC で高精度に読み出しを行なっている。

電子ビームサイズをモニターするための X 線ピンホールカメラ(XPC)は、セル 16 短直線部に光源となる 3 極ウィグラーを設置し、光源から 5.2 m 下流にピンホールを設置し、ピンホールからさらに下流側 9.6 m にカメラユニットを設置し、短直線部での電子ビームサイズを常時モニターしている[9]。

NanoTerasu の蓄積リングの真空チェンバは垂直方向 16 mm と狭小なビーム室となっており、蓄積電流が

[#] ueshima.kouta@qst.go.jp

10 mA 程度になると横方向のビーム不安定性が発生し、エミッタンスが悪化し、電子ビームサイズが大きくなる。横方向の不安定性を抑制するためにセル1の短直線部に電子ビーム位置を高精度にモニターするピックアップ1台と、電子ビームの軌道を補正するフィードバックキックを与えるキッカー1台を設置した。またバンチ電流をモニターするためのBPMもセル1の短直線部に設置した。

線型加速器からの入射軌道を調整するためのBPMはリング入射部に3台設置している。蓄積電子ビームを廃棄する際に電子ビームアブソーバーでビーム廃棄されたことを確認するために、1セルあたり2箇所のエネルギー分散のピーク付近にビームロスモニターを設置した。

Table 1: Stored Beam Monitor System

BPM for COD and Single-pass	112
DCCT	2
X-ray pinhole camera (XPC)	1
Bunch-by-Bunch Feedback	1
BPM for bunch current monitor	1
BPM for beam injection monitor	3
Beam loss monitor	32

3. モニターシステムのコミッショニング

3.1 蓄積リング BPM のコミッショニング

BPM の電子ビーム信号は MTCA.4 ベースの回路で信号処理され、回路内の FPGA で水平、垂直の位置情報が計算される。シングルパス、COD 両方のビーム位置情報を算出可能で、COD モードには 859 kHz の turn-by-turn モード (TbT data)、10 kHz の速いデータ収集 (FA data)、10 Hz の遅いデータ (SA data) 収集機能が備わっている。NanoTerasu では、蓄積電子ビームの軌道監視に FA data を用いており、特に挿入光源上下流の BPM で軌道インターロック閾値を超える軌道変動が起こった際に、直ちにビーム廃棄するシステムが構築されている。SA data によるビーム位置情報は、全てデータベースに収集され、30 秒おきに実施している COD 補正に使用している。その他、加速器調整時に線型加速器の入射電子ビームのエネルギー、タイミング調整にシングルパスを使用し、ビーム入射時の蓄積電子ビームの揺れの測定などに TbT data を使用している。

2023 年 6 月に蓄積リングへの電子ビーム入射成功し、すぐにシングルパス data のタイミング調整を実施した。電子ビームの蓄積成功後、Fig. 1 に示すシングルパスの位置情報を収集でき、分散部に設置された BPM でのシンクロトロン振動の様子やシングルパスのフーリエ変換したスペクトル情報を用いてベータトロン振動数、シンクロトロン振動数の情報を引き出すことができた。

2023 年 9 月には BPM のオフセットを近傍4極磁石の磁場中心に合わせる、ビームベースドアライメント (BBA) を実施した。BPM の電気中心は各ボタン電極の機械的

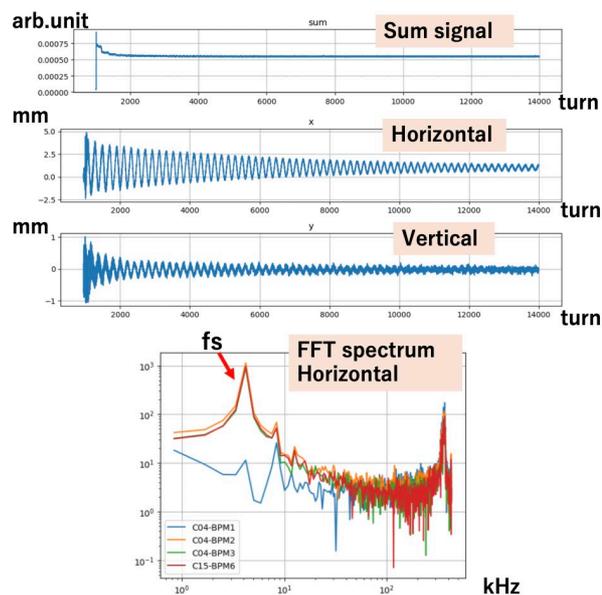


Figure 1: Single-pass BPM data and Fourier transformed spectrum. The BPM 2, 3 and 6 were installed at an energy-dispersive section. The BPM 1 was installed at a non-dispersive section.

設置精度や読み出し回路の各チャンネルの特性の違いによって理想的な電子ビーム軌道からのオフセットが生じる。BPM のオフセットを理想的な電子ビーム軌道である多極電磁石の磁場中心に合わせるため、BBA を行なった。近年報告されている高速 BBA [10] を行うために、1 台のステアリング電磁石で軌道を振り、BBA を行う BPM と他の 47 台の BPM の位置情報の相関を測定した。FA data のデータ転送の関係でコミッショニング時は、1 つの BPM のオフセットを求めるのに、計 48 台の BPM を使用した。Figure 2 は BBA を行うターゲット BPM と他 47 台の BPM のうち 1 つの BPM の軌道変動を 6.2 秒間取得したデータである。

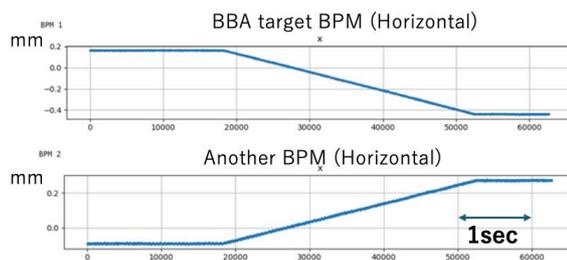


Figure 2: COD variation when stored beam orbit was changed by the steering magnet.

次に BPM オフセットを求める近傍4極電磁石の励磁量を補助電源 (QA) で 1~3 % 変更させて、同様にステアリング電磁石で電子ビーム軌道を振って BPM の位置情報の相関を測定した。

4 極電磁石の磁場中心は磁場が 0 であり、4 極電磁石の中心をビームが通った際は 4 極電磁石の励磁量に変化しても電子ビーム軌道が変化しない。Figure 3 に示すように4極電磁石の励磁量変更前後の位置情報の相関

直線の交点を求め、BPM オフセットを算出した。精度よく交点を求められなかった感度の悪い BPM データの影響を取り除くため、得られた 47 個の平均値と標準偏差を求め、平均値から $\pm 1\sigma$ の範囲内のデータから算出した平均値を BPM オフセットとした。

BBA の適用前後の COD の結果を Fig. 4 に示す。BBA を適用後、特に垂直方向の COD が改善され、 $\pm 50 \mu\text{m}$ 程度に改善し、水平方向は $\pm 300 \mu\text{m}$ 以内になった。また BPM の電気中心精度の影響による全 BPM オフセットのばらつきは、標準偏差で $147 \mu\text{m}$ (水平)、 $138 \mu\text{m}$ (垂直) であり、要求仕様精度と同程度であることを確認した。

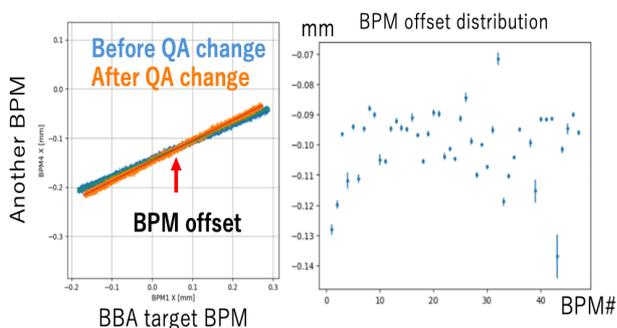


Figure 3: COD correlation plot of 2 BPMs before and after QA change (left). BPM offset distribution obtained from the intersection points with the other 47 BPMs (right).

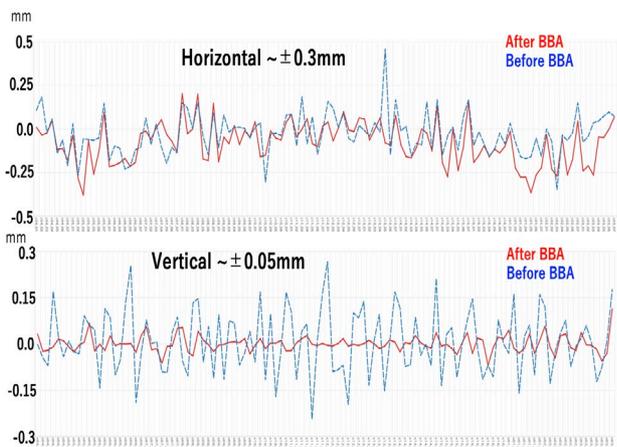


Figure 4: Horizontal and Vertical COD distribution before and after BBA correction.

3.2 BBF システムのコミッションング

横方向のビーム不安定性を抑制するための BBF システムは、各バンチ、1ターン毎のビーム位置情報をピックアップで検出し、1 周 ($1.1 \mu\text{sec}$) 以内にフィードバックキック量を計算し、バンチ毎に毎ターン、フィードバックキックを与えて横方向の不安定性を抑制するシステムである。NanoTerasu では1台のキッカー (4電極) で水平方向、垂

直方向の不安定性を抑制している。

電子ビームの軌道が決定し、基準軌道からのズレを精度良く測定するために、ピックアップの4電極の差分信号 $\Delta X (= V_1 + V_4 - V_2 - V_3)$ 、 $\Delta Y (= V_1 + V_2 - V_3 - V_4)$ が小さくなるように各電極の減衰器、移相器を調整した。調整の結果、 $\Delta X, \Delta Y$ とも 30 mV pp 程度に低減でき、電子ビームをキッカーで励振し、最も揺れの大きい点を 20 psec 程度の精度で求め、ピックアップのサンプリングタイミングに決定した (Fig. 5)。

次にキッカーのタイミング調整を行い、DAC の delay 時間を調整し、前後 2 nsec 離れた隣のバンチをキックしないように 50 psec 程度の精度でキッカーのタイミングを調整した。

最後に BBF のフィードバックゲイン、位相の調整を行った。Grow/damp という手法で、キッカーで無理やり、電子ビームを励振し、励振を停止すると同時に BBF を ON にし、BBF の gain と減衰時間の依存性測定を実施した (Fig. 6)。

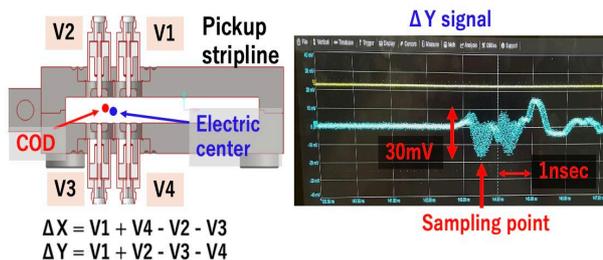


Figure 5: Schematic view of the stripline pickup (left). Beam excitation ΔY signal (right).

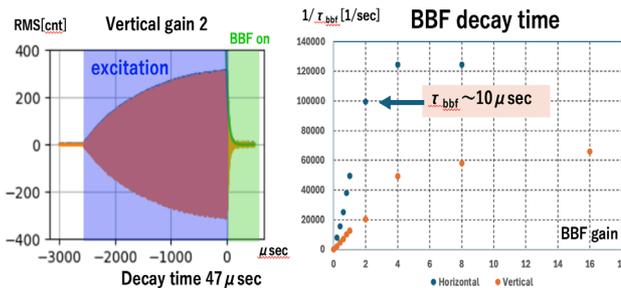


Figure 6: BBF grow damp plot (left). BBF decay time distribution depending on the BBF gain (right).

BBF システムのピックアップ位置分解能、ダイナミックレンジの評価を行うため、 $\pm 50 \mu\text{m}$ のローカルバンチを作り、Table 2 に示す結果を得た。

BBF 調整を行なった結果、横方向の電子ビーム不安定性を十分抑制でき、設計エミッタンスで蓄積電流 200 mA を達成できた。また BBF を用いることで、電子ビーム入射時の蓄積ビームの水平方向の揺れを低減でき、電子ビーム入射後 20 ターン後には水平の揺れは電子ビームサイズ程度に治まり、40 ターン後には電子ビームの揺れは $50 \mu\text{m}$ 以下と十分低減していることを確認した。

Table 2: Pickup Position Resolution and Dynamic Range

Position resolution	14 cnt/mA/ μm (Hor.)
	12 cnt/mA/ μm (Ver.)
Dynamic range (1 mA/bunch)	$\pm 146 \mu\text{m}$ (Hor.)
	$\pm 170 \mu\text{m}$ (Ver.)

NanoTerasu では、1バンチのみ BBF を OFF にし、チューンの測定を行なっている。水平方向、垂直方向ともベータatron振動数を中心周波数としスパン 20 kHz でビームを非常に弱い強度で励振し、チューンを常時測定し、30 秒おきに補正を実施している。コミッショニング開始当初はベータatron振動スペクトルを見つけるのに苦労し、電子ビーム寿命数分、入射効率数%という状態で、10~430 kHz を数 10 kHz スパンでひたすらスキャンした。BBF キッカーを用いた測定ではチューンの小数部のみ測定可能で半整数 0.5 の折り返し対称のどちら側にいるか判別不能であるため、非分散部の4極電磁石の励磁量を変更し、想定通りに水平、垂直のチューンが変化することを確認し、チューンを求めた。チューンの整数部についてはリング 1 周の BPM の位置データの振動回数から求めた。

3.3 蓄積ビーム軌道監視、蓄積ビームアボート試験

低エミッタンス蓄積電子ビームが1箇所であぼートした場合、厚さ 2 mm の真空チェンバにダメージを与える可能性が高い。NanoTerasu ではビーム廃棄の際に BBF キッカーを用いて垂直方向にビームサイズを広げて廃棄している。BBF の Front・Backend 回路内にスイッチを設け、リング RF が OFF になった際にフィードバックからベータatron振動数でビームを垂直方向に励振する機能に切り替えを行なっている[11]。

また突発的な電子ビーム軌道変動が起こった際にフロントエンド機器、ビームライン機器を保護するため BPM の FA data (10 kHz) で得られた位置データを常時監視している。各ビームラインの要望に従い、各 ID 上下流の BPM に軌道インターロック閾値を設定し、異常時には 1 msec 以内に直ちにビーム廃棄する。蓄積電流 3 mA 以上で常に軌道インターロックを有効にし、軌道監視を行なっている。

Figure 7 に示すように軌道インターロックが発報すると 30 ターン程度でリング RF が停止し、蓄積電子ビームはエネルギーを失い、エネルギー分散部で水平方向リング内側に電子ビーム軌道が変位し始め、リング RF 停止とほぼ同時に垂直方向にビームが励振されているのをシングルパスのデータで確認した。BPM の4電極 Sum 信号のデータから、20 ターン程度かけて緩やかにビーム廃棄されているのを確認できた。廃棄時間も軌道インターロック発報から 450 μsec 程度で、要求仕様 1 msec 以内を十分満たす結果となった。

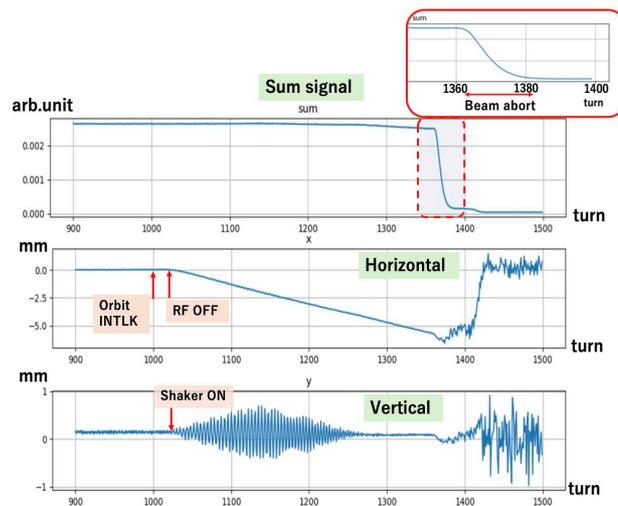


Figure 7: Single pass BPM data when the orbit interlock was triggered.

軌道インターロック閾値は最も厳しい ID で水平方向 $\pm 0.3 \text{ mm}$ 、垂直方向 $\pm 0.14 \text{ mm}$ に設定している。震度 3 程度の地震発生時に何度か軌道インターロックによりビーム廃棄する事象が発生したが、通常のビーム運転時には1度も軌道インターロックにより、ビーム廃棄する事象は発生しておらず、安定に加速器運転を続けられている。

4. ユーザー利用運転状況

4.1 利用運転状況

2024 年 4 月 9 日より蓄積電流 160 mA で NanoTerasu 最初のユーザー利用運転を開始した。7 月 19 日まで延べ 1288 時間のユーザー利用運転を実施し、ダウンタイムは 7.3 時間で 99.43 % の高い安定供給率を達成した。また加速器調整期間に加速器調整を進め、安定運転できることを確認し、蓄積電流を増やし、7 月 9 日からの利用運転では蓄積電流を 180 mA に上げ、さらに 7 月 26 日からは、蓄積電流 200 mA での利用運転を実施している。

引き続き調整を進め来年度には設計値 400 mA のフルスペック運転を目指している。

4.2 電子ビーム安定度

NanoTerasu 最初のユーザー利用運転時の蓄積電子ビーム安定度を Fig. 8 に示す。

12 日間のユーザー利用運転でリング空洞の RF 反射で 2 回停止した。蓄積電流 159~160 mA のトップアップ運転で、XPC で観測したビームサイズは $1 \mu\text{m}$ 以下で安定しており、蓄積電子ビームの位置変化も XPC、BPM とともに $5 \mu\text{m}$ 以下で長期間安定に運転することができた。

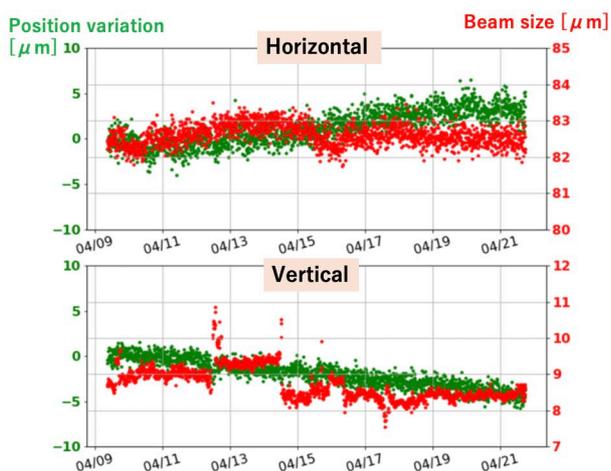


Figure 8: Stability of beam size and position variation measured using XPC in the first user operation period.

5. まとめ

BPM のデータ収集システム、BPM のオフセットを近傍 4 極電磁石磁場中心に合わせる BBA、BBF の調整、ビームアポート試験等のナノテラス蓄積リングの蓄積ビームモニターシステムのコミッショニングを予定より早いペースで実施できた。4 月 9 日より NanoTerasu 最初のユーザー利用運転を開始し、99.43 % と非常に高い安定度で高品質な X 線ビームをユーザーに提供することができた。7 月 26 日からのユーザー利用運転では、蓄積電流値も 200 mA まで増加でき、来年度にはフルスペックの設計電流値 400 mA でのユーザー利用運転を目指す。

謝辞

SPring-8、SACLA の加速器関係者の方々には、加速器システムの構想、設計段階から多大なご協力、ご尽力

を賜りました。無事、高い安定度でユーザー利用運転を予定通り開始できました。心より感謝致します。

また NanoTerasu 加速器の各コンポーネントの設計、製作、設置に関し、多くのメーカーの方々のご尽力を賜りました。

ナノテラス加速器の構想、設計、開発、設置、コミッショニングに携われた皆様に心より感謝致します。

参考文献

- [1] S. Obara *et al.*, arXiv:2407.08925.
- [2] N. Nishimori *et al.*, “NanoTerasu 加速器コミッショニング”, Proc. of PASJ2023, pp. 6-11, TUOP02 (2023).
- [3] K. Ueshima *et al.*, “Status of Beam Commissioning at NanoTerasu”, Proceedings of the IPAC 2024, Nashville, TN, May. 19-24, 2024, TUPG40, pp. 1320-1323.
- [4] H. Maesaka *et al.*, “Design of the Beam Diagnostic System for the New 3 GeV Light Source in Japan”, Proceedings of the IBIC 2020, Santos, Brazil, Sep. 14-18, 2020, pp. 174-178.
- [5] H. Maesaka *et al.*, “SPring-8 アップグレードに向けたビーム位置モニタの開発”, Proc. of PASJ2018, pp. 41-45 WEOL07 (2018).
- [6] H. Maesaka *et al.*, “Design Optimization of the Button-type BPM Electrode for the SPring-8 Upgrade”, Proceedings of the IBIC 2016, Barcelona, Spain, 2016, TUPG18, pp. 360-363.
- [7] H. Maesaka *et al.*, “Development of MTCA.4-based BPM Electronics for SPring-8 Upgrade”, Proceedings of the IBIC 2019, Malmö, Sweden, Sep. 2019, WEBO03, pp. 471-474.
- [8] H. Maesaka *et al.*, “ナノテラス蓄積リング用ビーム位置モニターシステムの構築と立ち上げ”, Proc. of PASJ2023, pp. 167-171, THOA6 (2023).
- [9] K. Ueshima *et al.*, “ナノテラスにおける 3 極ウィグラーを用いた電子ビーム診断システム”, Proc. of PASJ2023, pp. 163-166, THOA5 (2023).
- [10] Z. Marti *et al.*, “Fast beam-based alignment using ac excitations”, Phys. Rev. Accel. Beams 23 012802 (2020).
- [11] T. Hiraiwa *et al.*, “Formulation of electron motion in a storage ring with a betatron tune varying with time and a dipole shaker working at a constant frequency”, Phys. Rev. Accel. Beams 24 114001 (2021).