

ナノテラスにおける蓄積リングビーム光学のコミッショニング COMMISSIONING OF THE BEAM OPTICS IN THE STORAGE RING AT NANOTERASU

小原脩平^{*,A)}, 上島考太^{A)}, 保坂勇志^{A)}, 安積隆夫^{A)}, 菅晃一^{A)}, 西森信行^{A)}, 青木駿亮^{A,B)}, 芳賀浩一^{A,B)},
伊原彰^{A,B)}, 伊藤優仁^{A,B)}, 岩下大器^{A,B)}, 門脇聖弥^{A,B)}, 小林創^{A,B)}, 及川治彦^{A,B)}, 齋田涼太^{A,B)}, 櫻庭慶佑^{A,B)},
高橋隼也^{A,B)}, 土山翼^{A,B)}, 井場祐人^{A,B)}, 金浜蓮人^{A,B)}, 高橋滉希^{A,B)}, 田中達輝^{A,B)}, 西原秀雄^{A,B)},
森谷佳津貴^{A,B)}, 吉岡里紗^{A,B)}, 住友博史^{C)}, 山本龍^{C)}
Shuhei Obara^{*,A)}, Kota Ueshima^{A)}, Yuji Hosaka^{A)}, Takao Asaka^{A)}, Koichi Kan^{A)} Nobuyuki Nishimori^{A)},
Toshitaka Aoki^{A,B)}, Koichi Haga^{A,B)}, Akira Ihara^{A,B)}, Katsumasa Ito^{A,B)}, Taiki Iwashita^{A,B)},
Masaya Kadowaki^{A,B)}, Hajime Kobayashi^{A,B)}, Haruhiko Oikawa^{A,B)}, Ryota Saida^{A,B)}, Keisuke Sakuraba^{A,B)},
Shunya Takahashi^{A,B)}, Tsubasa Tsuchiyama^{A,B)}, Yuto Iba^{A,B)}, Rento Kanahama^{A,B)}, Koki Takahashi^{A,B)},
Tatsuki Tanaka^{A,B)}, Hideo Nishihara^{A,B)}, Kazuki Moriya^{A,B)}, Risa Yoshioka^{A,B)}, Hiroshi Sumitomo^{C)},
Ryo Yamamoto^{C)}

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

^{B)} NAT Corporation

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd.

Abstract

NanoTerasu, a new 3-GeV synchrotron facility in Japan, started user operation in 2024. We provide a 99% user time ratio at the first operation. The accelerator complex has a 4-bend-achromat lattice and is the 4th fourth-generation light source. Storage ring commissioning was started at the end of May 2023. We performed cod correction, betatron tune correction, chromaticity correction, dispersion correction, and beta function correction. Emittance and energy spreads are evaluated as $\epsilon_x = 1.14$ nm rad and $\sigma_E/E = 0.00972\%$ by an image from an X-ray pinhole camera and a 3-pole wiggler. We succeeded in achieving the designed model's consistent optics.

1. はじめに

3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu は宮城県仙台市に建設された世界で 4 番目に稼働した第 4 世代放射光施設である。2023 年 2 月 13 日に線型加速器トンネルが管理区域となり、RF のコンディショニングが始まった。5 月 29 日に蓄積リングトンネルが管理区域化され、蓄積リングの加速器調整が開始した。6 月 8 日には SRRF 加速空洞なしで電子ビームが約 300 周する様子が確認され、1 週間後の同月 16 日には加速空洞のタイミング調整を行い 0.1 mA の初蓄積を達成した。6 月末には 2.5 mA、7 月末には 10 mA、夏季停止期間直前の 8 月中旬には 100 mA に到達、さらに 9 月 11 日に 200 mA までの蓄積を達成した。10 月には蓄積リングの光学はほぼ設計値を再現し、ユーザー運転へ向けた加速器の準備が整った。約 1 ヶ月の夏季休暇を挟んでいるが、線型加速器での試運転開始から数えて 6 ヶ月、蓄積リングの試運転開始から数えると 4 ヶ月での達成となる。2024 年 4 月から開始したユーザー運転では、安定運転可能な蓄積電流値として 8 割の 160 mA とした。線型加速器および蓄積リングのコミッショニングに関する概要は 2023 年の加速器学会および IPAC'24 での報告を参照されたい [1-3]。また NanoTerasu 加速器についての詳細はデザインレポートに譲る [4]。

蓄積リングへの電子ビーム初周回を達成した際にはまだ電磁石の極性確認が全て完了しておらず、またステア

リング磁石も未設定であった(偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石の主電源の電流のみを設定しただけで周回を達成した)。6 月中には Closed Orbit Distortion(COD)を補正するため、ステアリング磁石の極性確認と実際の応答を確認しながら進めていった。電子ビーム蓄積が予定よりも 1 ヶ月前倒しで進んでおり、BBF 等のモニタ機器のチューニングと並行して行われたため、当初は BBF によるチューン常時測定がない状況下で COD 補正を行わなければいけなかった。電子ビームの光学は理想的な軌道からの摂動的微小変位を仮定して解くため、一番初めの大きくズレた状態では応答が理想とは遠く、想定外の挙動を示すことがある。また当然 BBF のタイミング調整や、ビーム位置モニタ (BPM) の Beam-Based-Alignment(BBA) を行うためには、ビーム応答がある程度期待通りになっている必要がある。そこで、まず軌道がある程度中心に近づけ、チューンやディスページョンなどを測定および補正し、また軌道を直す、といった具合で iteration を行っていた。この時ベータ関数についてのケアはしていなかったが、理想的にはこれらを合わせていく仮定で、四極電磁石の磁場強度誤差が大きい限りはデザイン値に近づいていくはずである。幸いなことに、初電子周回達成時にステアリング磁石無しで回ったことは、四極電磁石を含む全ての磁石が設置時に高精度でアライメントされたことの裏付けになっており [5]、本稿で述べる補正時も四極電磁石の補助電源で補正することで model-consistent な光学補正をすることができた。

本稿では上記の半年間で行った光学調整について報告する。

* obara.shuhei@qst.go.jp

2. ラティスと電磁石

周長約 348 m の NanoTerasu 蓄積リングは、16 回対称となる 4-bend-achromat ラティスで設計されており (Fig. 1)、1 セル内に偏向電磁石が 4 台 (B01-B04)、四極および六極電磁石がそれぞれ 10 台ずつ (Q01-Q10、S01-S10) 設置されている。これら電磁石は主電源にそれぞれの系列毎に接続されており、偏向電磁石については 4 台すべて 1 台の電源に、四極および六極電磁石についてはそれぞれ Q01/Q10(S01/S10)、Q02/Q09(S02/S09)、...、Q05/Q06(S05/S06) が同じ電源に接続されている。チューンを補正する際には四極磁石の収束 (Q01/Q10 シリーズ) と発散 (Q02/Q09 シリーズ) を用いる。ベータ関数やディスページョンを補正する際には、Q01、Q03、Q06、Q08、Q10 に接続されている補助電源を用いて個別に強度を変えて調整する。六極電磁石の収束 (S04/S07 シリーズ) と発散 (S03/S08 シリーズ) はクロマチシティを補正する目的で使用。短直線部両端 (Q05 と Q06 の間) には 2 つの単独ステアリング磁石が設置されており、これらは COD 補正に利用される。さらに S01、S03、S05、S06、S08、S10 の六極電磁石にはメインコイルとは別途補助コイルが巻かれており、これを利用してステアリング磁石として COD 補正に参加する。長直線部にはアンジュレータが設置されることとなるが、その両端に設置するステアリング磁石については COD 補正には用いず、アンジュレータのギャップまたは位相駆動時の Feedforward による軌道補正専用としている。

3. COD 補正

COD 補正では 1 セルあたり 7 台の BPM (合計 112 台) でビーム位置を観測し、1 セルあたり 2 台の MPW 脇ステアリング磁石および 6 台の六極磁石補助ステアリング磁石 (合計 128 台) で補正する。MPW 脇ステアリング磁石は最大で ± 0.2 mrad、六極磁石補助ステアリング磁石は最大で ± 0.4 mrad のキック角で補正が可能である。ここで n 番目の磁石でキックした際に m 番目の BPM で観測される時の応答関数は

$$R_{m,n} = \frac{\sqrt{\beta_m \beta_n}}{2 \sin(\pi\nu)} \cos(|\psi_m - \psi_n| - \pi\nu) \quad (1)$$

であるので、チューンが半整数だけずれていると応答が正反対になってしまう。2023 年 6 月に電子ビームが初蓄積したときにはまだ BBF によるチューンの常時測定が開始しておらず、チューンの値が分からない中で軌道が中心に近づくように手でキック方向や強度を微調整して合わせこんだ。Figure 2(a) は初蓄積時の COD である。長直線部の真空チェンバーは高さ約 4.5 mm しか開口がなかったが、運良く 2 mm 程度に収まってくれた。COD を補正するには

$$\vec{x} = \mathbf{M} \cdot \vec{\theta}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M} \equiv \begin{pmatrix} R_{1,1} & \cdots & R_{1,n} & \cdots & R_{1,128} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ R_{m,1} & \cdots & R_{m,n} & \cdots & R_{m,128} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{112,1} & \cdots & R_{112,n} & \cdots & R_{112,128} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

を解いて $\vec{\theta}$ を求めるが、ステアリング磁石数 (128) と BPM 数 (112) が異なる非正方形のため単純に逆行列計算をして解を求めることはできなかった。ここでは特異値分解 (singular value decomposition: SVD)¹ を用いた。

また蓄積リングは潮汐力や気温などの外的要因によって地盤が変化し、周長 (C) が変わりうる。これは SRRF 空洞の周波数 (f) を

$$\frac{\Delta C}{C} = \alpha_C \left(\frac{\Delta p}{p} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta f}{f} = - \left(\alpha_C - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{\Delta p}{p} \quad (5)$$

を用いて調整することで補正できる。

次項以降で続くチューンやディスページョン、ベータ関数などを補正し、最終的に応答がよく合うようになって COD 補正を行った結果が Fig. 2(b) である。また BBA の結果も反映されている。元々 ± 3 mm 程度の軌道のズレがあったものが、1/10 の ± 0.3 mm 程度に抑え込まれている [7]。ユーザー運転開始後は、挿入光源の駆動など微少に COD が変化し続けるため、COD と周長は定周期で自動補正を施し安定軌道を実現している。

4. チューン補正

式 1 にあるようにチューンが半整数ずれているとキックによる応答が正反対になるため、確認することが重要である。そこで任意のステアリング磁石をわざと蹴って COD を歪ませ、どういうチューン ν を仮定したときに実応答を再現できるか評価した。評価関数として

$$\chi^2 = \sum_m (\Delta x_m^{\text{COD}} - \Delta x_m^{\text{Model}}(\nu))^2 \quad (6)$$

をとり、 χ^2 を見ると Fig. 3 のようになり、半整数のズレがないことが確認できた。

チューンは BBF によって常時測定されており、収束と発散の四極電磁石シリーズの主電源 ($K_{F(D)}$) を微調整して次式に沿って設計値 $(\nu_x, \nu_y) = (28.17, 9.23)$ に合わせた。

$$\begin{pmatrix} \Delta\nu_x \\ \Delta\nu_y \end{pmatrix} = \frac{e}{4\pi p} \begin{pmatrix} \beta_{x,F} & \beta_{x,D} \\ -\beta_{y,F} & -\beta_{y,D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_F \\ K_D \end{pmatrix} \quad (7)$$

なおユーザー運転では Apple 型アンジュレータの駆動によって四極成分が発生しチューンが変化する。カレントストリップ [8] によって補正はされるものの、多少漏れてしまうチューン変化分は定周期で自動補正を施している。

¹ python であれば行列計算も簡単に記述でき SVD を解くモジュールも存在するが、NanoTerasu では C++ ベースのプログラムで運転しているため、C++ で行列計算を実装している。例えば EIGEN [6] を用いることで比較的簡単に SVD を実現できる。

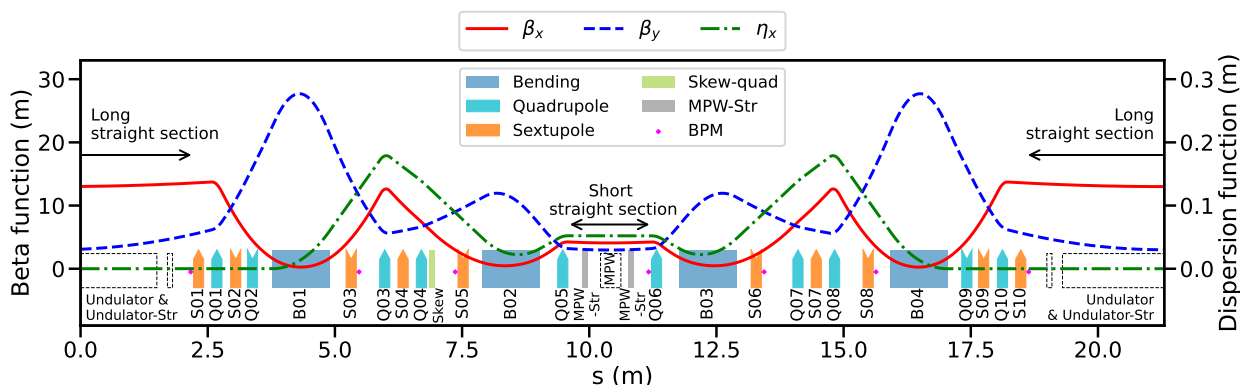


Figure 1: Optics and magnets in one cell [7].

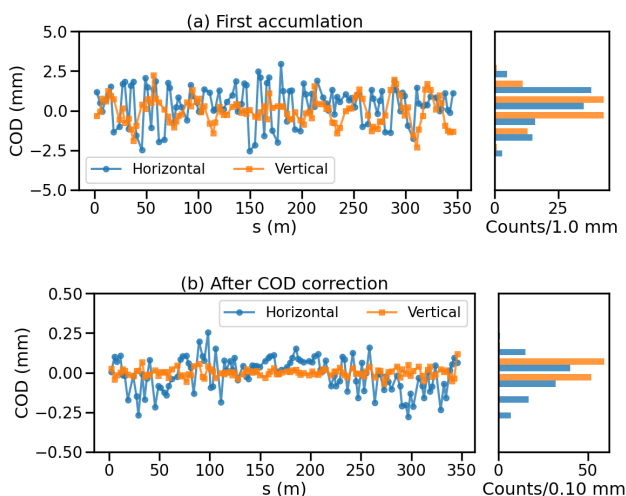


Figure 2: Closed orbit at the first electron beam accumulation in the storage ring (top panel), and after COD and other optics corrections (bottom panel), monitored by the 112 BPMs in the storage ring [7].

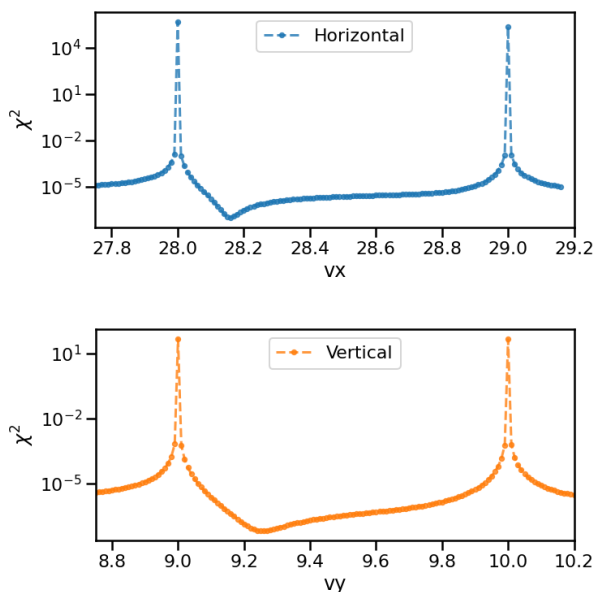


Figure 3: Tune estimation using kicked COD changes for horizontal (upper panel) and vertical (lower panel) tune [7].

5. ディスパージョン補正

ディスパージョン (η) は SRRF 空洞の周波数をわざと変化させ、次式のようにその差分から測定することができる

$$\eta = \frac{x^{-300 \text{ Hz}} - x^{+300 \text{ Hz}}}{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^{-300 \text{ Hz}} - \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^{+300 \text{ Hz}}} \quad (8)$$

NanoTerasu のモーメンタムコンパクションファクターを考慮すると、 $\pm 300 \text{ Hz}$ 変えた時の運動量変化 (式 8 の分母) は -0.0027 に対応する。ディスパージョン補正を行う際には章 3 の COD 補正の式について $x \rightarrow \eta$ とすればよい。ただし補正にもちいるのは 128 個のステアリング磁石ではなく、1 セルあたり 5 台、合計 80 台の四極電磁石用補助電源である。主電源に対しておおよそ 20% 程度の電流を流すことができる。実際には Q01 および Q10 の箇所ではディスパージョンが小さく、ここの補助

電源を変えてもディスパージョンにはほとんど影響しないため、実質 3 台/セル=48 台で補正している。

ここまで補正が進むと、COD 補正を行っても計算予想通りの軌道に一気に収束するようになり、チューン補正そしてまたディスパージョン補正と繰り返して補正を進めた。ディスパージョン補正をする前までは特定箇所ではビームロスが大きかったものの、Achromat であるべき長直線部でディスパージョンが漏れていたことが原因であった。

6. クロマティシティ補正

クロマチシティ (ξ) はディスパージョンを測定するために周波数を動かした際にチューンシフトを観測して

おき、そこから

$$\Delta\nu = \xi \frac{\Delta p}{p} \quad (9)$$

のようにして算出できる。当初設計電流値を六極電磁石に流した状態では垂直方向のクロマチシティが $\xi_y \sim 0$ であった。チューン補正と同様に、収束発散の六極電磁石シリーズの主電源を

$$\begin{pmatrix} \Delta\xi_x \\ \Delta\xi_y \end{pmatrix} = \frac{e}{2\pi p} \begin{pmatrix} \eta_{x,F}\beta_{x,F} & \eta_{x,D}\beta_{x,D} \\ -\eta_{x,F}\beta_{y,F} & -\eta_{x,D}\beta_{y,D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_F \\ \lambda_D \end{pmatrix} \quad (10)$$

を解いて調整したところ、ビーム寿命が延びた。クロマチシティがゼロ近く、垂直方向が多少不安定になっていたせいだと考えている。ユーザー運転開始時での設定値は $(\xi_x, \xi_y) = (1.98, 1.98)$ とした。また SRRF 加速空洞は設計 3.2 MV よりも低い加速電圧 2.9 MV で運転しており [9]、クロマチシティと加速電圧を設計値から変更して運転していることで、ビーム寿命などの悪化が懸念された。この設定下でモーメントムアクセプタンスをトラッキングシミュレーションによって評価すると、最も狭いところで $\pm 4\%$ 程度 [7] で設計値と大差なく、ビーム寿命への悪影響は十分小さいことが分かっている。さらにダイナミックアパーチャの観点でも影響は問題なく、ビーム入射効率は 90% 以上を維持している [7]。

7. ベータ関数補正

ベータ関数を測定するには四極電磁石の補助電源を少しだけ動かしてチューンの変化を測定すれば

$$\beta = 4\pi\Delta\nu/\Delta K \quad (11)$$

から四極電磁石位置での値が求まる。Q03、Q06、Q08 の補助電源はディスパージョン補正で使っており、これらを変更するとせっかく調整したディスパージョンも動いてしまう。したがって Q01 と Q10(セルの両端) の補助電源のみが自由度として残っているが MPW の挿入される短直線部も含めた補正を行うには不足している。そこで LOCO [10] の手法を用いた。

まず単純に全ての電磁石に誤差がないと仮定すると、 j 番目のステアリング磁石で電子ビームを水平 (h)/垂直 (v) に蹴った時に i 番目の BPM が観測する水平 (h)/垂直 (v) に動いた時の応答関数 $R_{ij}^{hh(vv)}$ を用いて

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} R_{ij}^{hh} & 0 \\ 0 & R_{ij}^{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \end{pmatrix}_j = \mathbf{M} \begin{pmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \end{pmatrix}_j, \quad (12)$$

のように表される。左辺は観測値であり右辺の $\Delta\theta$ はステアリング磁石に設定した値からキック角は分かっているので、応答関数が求まる。これを全てのステアリング磁石に対して水平垂直キックを 1 つずつ与え、COD を取得して応答関数を求めていく。ここで応答が計算モデルとあっていれば式 1 にあるベータ関数が合っているということだけで特に補正は不要であるが、現実はその簡単ではなかった。

次に、計算モデルと実応答の差分が n 番目の四極電磁石の磁場強度 (Δk) および回転 ($\Delta\hat{k}$) に誤差 (個体差) が

あると仮定して、 M を次のように拡張した。

$\mathbf{M} \rightarrow$

$$\hat{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} R_{ij}^{hh} + \sum_n \frac{\partial R_{ij}^{hh}}{\partial k_n} \Delta k_n & \sum_n R_{in}^h R_{nj}^v \Delta\hat{k}_n \\ \sum_n R_{in}^v R_{nj}^h \Delta\hat{k}_n & R_{ij}^{vv} + \sum_n \frac{\partial R_{ij}^{vv}}{\partial k_n} \Delta k_n \end{pmatrix}. \quad (13)$$

観測された実応答がよく合うような四極電磁石の磁場強度誤差を推定した。ここで得られた四極電磁石の磁場強度の誤差分を補助電源によって補正してあげることで、現実の蓄積リングは計算モデルと合うような応答を示す。したがってベータ関数とディスパージョンを同時に計算モデルへ近づけることができる。コミショニング時には、はじめに COD やチューン、ディスパージョンを、個別にはあるがおおよそ合わせていたおかげで上記議論が成り立つ範囲までオプティクスが十分収束しており、四極電磁石の誤差を求めることができた。実際の計算ではここにステアリング磁石のキック強度の誤差、回転誤差などの項をさらに加えて計算を行ったが、2023 年のコミショニング完了時点ではこれらの誤差要因についての補正は入れていない。

補正前後でベータ関数においては $\pm 10\%$ 程度の差異があったものが 1-2% 以内になった。ディスパージョンは長直線部で水平に -0.05 m 程度漏れていたものがほとんど $\eta_x \sim 0$ とすることができた。

8. エミッタンスとエネルギー分散

最後に短直線部に設置されている 3 極ウィグラーと X 線ピンホールカメラ [11] を用いてビームサイズ (σ^{XPC}) を確認した。ここでエネルギー分散 (σ_E/E) とエミッタンス (ϵ) は

$$\sigma^{\text{XPC}} = \sqrt{\left(\eta \cdot \frac{\sigma_E}{E}\right)^2 + \beta \cdot \epsilon} \quad (14)$$

で表され、 $\eta_x \neq 0$ の短直線部ではどちらか一方だけを求めることができない。Figure 4 に実際に得られた画像を示す。水平ビームサイズはおおよそ $84\ \mu\text{m}$ であり、エミッタンスを設計値 $1.14\ \text{nm rad}$ として仮定したときエネルギー分散は $(0.00972 \pm 0.0161)\%$ と求められる [7]。これは設計値 0.00843% と 2σ の範囲で無矛盾であり、約半年間で行った加速器コミショニングでは十分な成果を得た。

9. まとめとユーザー運転

2023 年 2 月に線型加速器でのコミショニングが開始してから約半年後の 10 月には、ほぼ設計値通りの蓄積リングオプティクスを達成した。その後は挿入光源の駆動時の Feedforward となるステアリング磁石の設定や、ビームラインのコミショニングが進み、2024 年 4 月 9 日から初のユーザー利用が開始された。4 月 21 日までの 12.3 日間で、SRRF 空洞が反射によってビームアポートしたのみで、99% のユーザータイムを提供した (Fig. 5)。

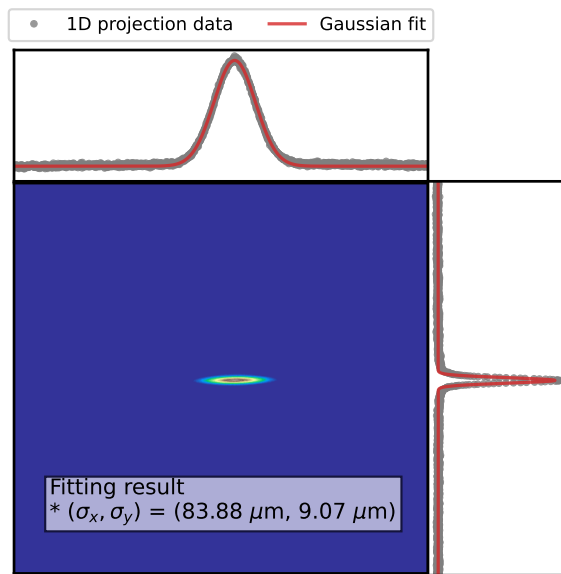


Figure 4: Stored electron beam profile obtained from the XPC [7].

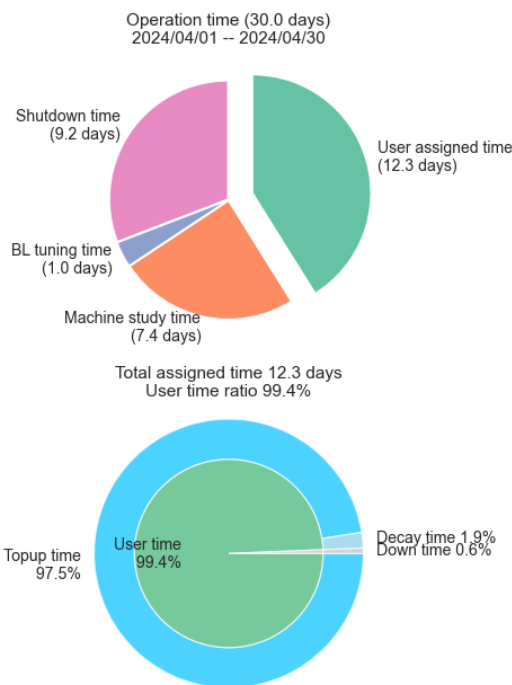


Figure 5: User time ratio from April 1st to 30th.

またユーザー提供当初から 159–160 mA でのトップアップ運転を行い、ユーザー運転期間中の 97% はトップアップ運転にてビームを提供することに成功した。

コミッションングによって得られた結果は、将来建設されていくビームライン設計や、既に利用開始されてい

るビームラインなどでの放射光シミュレーションを行えるよう、SPECTRA [12] の入力パラメータとして使えるようまとめたものが論文 [7] に載っている。

謝辞

NanoTerasu 加速器にかかわられた全ての関係者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] N. Nishimori *et al.*, “Commissioning of NanoTerasu accelerator system”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 6-11, TUOP02, 2023.
- [2] T. Asaka *et al.*, “Installation and beam commissioning of 3 GeV linear accelerator in NanoTerasu”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 49-53, WEOA7, 2023.
- [3] K. Ueshima *et al.*, “Status of beam commissioning at NanoTerasu”, in *Proc. IPAC’24*, Nashville, TN, USA, May 2024. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-TUPG40
- [4] N. Nishimori *et al.*, “Accelerator design report for 3-GeV next-generation synchrotron radiation facility”, 2021. <https://www.qst.go.jp/site/3gev-eng/>
- [5] S. Obara *et al.*, “Construction status of the storage ring and injection magnets at the 3 GeV next-generation synchrotron radiation facility NanoTerasu”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 218-221, THOB11, 2023.
- [6] <http://eigen.tuxfamily.org>
- [7] S. Obara *et al.*, “Commissioning of a compact multibend achromat lattice: A new 3 GeV synchrotron radiation facility”, preprint arXiv:2407.08925, Physics - Accelerator Physics. doi:10.48550/arXiv.2407.08925
- [8] Y. Hosaka *et al.*, “Correction of higher-order magnetic field of APPLE II undulators at NanoTerasu”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, FROA08, this meeting.
- [9] S. Takahashi *et al.*, “Status of RF acceleration system for NanoTerasu storage ring”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 200-204, THOB9, 2023.
- [10] J. Safranek, “Experimental determination of storage ring optics using orbit response measurements”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, vol. 388, pp. 27-36, 1997. doi:10.1016/S0168-9002(97)00309-4
- [11] K. Ueshima *et al.*, “Electron beam diagnostics system using 3-pole wiggler in NanoTerasu”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 163-166, THOA5, 2023.
- [12] T. Tanaka, “Major upgrade of the synchrotron radiation calculation code SPECTRA”, *J. Synchrotron Radiat.* vol. 28, pp. 1267-1272, 2021. doi:10.1107/S1600577521004100