

## NanoTerasu 加速器コミッショニング

### COMMISSIONING OF NANOTERASU ACCELERATOR SYSTEM

西森信行<sup>#,A)</sup>, 安積隆夫<sup>A)</sup>, 上島考太<sup>A)</sup>, 小原脩平<sup>A)</sup>, 菅晃一<sup>A)</sup>, 保坂勇志<sup>A)</sup>, 青木駿堯<sup>A,B)</sup>, 浅野博之<sup>A,B)</sup>, 伊藤優仁<sup>A,B)</sup>, 伊原彰<sup>A,B)</sup>, 岩下大器<sup>A,B)</sup>, 及川治彦<sup>A,B)</sup>, 門脇聖弥<sup>A,B)</sup>, 小林創<sup>A,B)</sup>, 小林秀樹<sup>A,B)</sup>, 齋田涼太<sup>A,B)</sup>, 櫻庭慶佑<sup>A,B)</sup>, 杉本兼人<sup>A,B)</sup>, 高橋隼也<sup>A,B)</sup>, 土山翼<sup>A,B)</sup>, 西川雅章<sup>A,B)</sup>, 芳賀浩一<sup>A,B)</sup>, 渡部貴宏<sup>C,D,A)</sup>, 石井美保<sup>C,D,A)</sup>, 糸賀俊郎<sup>C,D,A)</sup>, 岩井瑛人<sup>C,D,A)</sup>, 大石真也<sup>C,D,A)</sup>, 大島隆<sup>C,D,A)</sup>, 近藤力<sup>C,D,A)</sup>, 櫻井辰幸<sup>C,D,A)</sup>, 小路正純<sup>C,D,A)</sup>, 杉本崇<sup>C,D,A)</sup>, 高野史郎<sup>C,D,A)</sup>, 田村和宏<sup>C,D,A)</sup>, 深見健司<sup>C,D,A)</sup>, 細田直康<sup>C,D,A)</sup>, 馬込保<sup>C,D,A)</sup>, 青木毅<sup>C,A)</sup>, 安積則義<sup>C,A)</sup>, 上田庸資<sup>C,A)</sup>, 岡田謙介<sup>C,A)</sup>, 川瀬守弘<sup>C,A)</sup>, 清道明男<sup>C,A)</sup>, 佐治超爾<sup>C,A)</sup>, 谷内努<sup>C,A)</sup>, 谷内友希子<sup>C,A)</sup>, 出羽英紀<sup>C,A)</sup>, 濱野崇<sup>C,A)</sup>, 藤田貴弘<sup>C,A)</sup>, 正木満博<sup>C,A)</sup>, 増田剛正<sup>C,A)</sup>, 松原伸一<sup>C,A)</sup>, 柳田謙一<sup>C,A)</sup>, 山口博史<sup>C,A)</sup>, 斗米貴人<sup>C)</sup>, 稲垣隆宏<sup>D,C)</sup>, 早乙女光一<sup>D,C)</sup>, 高橋直<sup>D,C)</sup>, 田中隆次<sup>D,C)</sup>, 前坂比呂和<sup>D,C)</sup>, 田中均<sup>D)</sup>, 原徹<sup>D)</sup>, 平岩聡彦<sup>D)</sup>, 福井達<sup>D)</sup>, 松井佐久夫<sup>D)</sup>, 井上忍<sup>E)</sup>, 熊澤寛介<sup>E)</sup>, 酒井康平<sup>E)</sup>, 住友博史<sup>E)</sup>, 勢納敏雄<sup>E)</sup>, 竹迫涼一<sup>E)</sup>, 田中信一郎<sup>E)</sup>, 森谷佳津貴<sup>E)</sup>, 山本龍<sup>E)</sup>, 横町和俊<sup>E)</sup>, 吉岡正倫<sup>E)</sup>, 恵郷博文<sup>F,A)</sup>

Nobuyuki Nishimori<sup>#,A)</sup>, Takao Asaka<sup>A)</sup>, Kota Ueshima<sup>A)</sup>, Shuhei Obara<sup>A)</sup>, Koichi Kan<sup>A)</sup>, Yuji Hosaka<sup>A)</sup>, Toshitaka Aoki<sup>A,B)</sup>, Hiroyuki Asano<sup>A,B)</sup>, Katsumasa Ito<sup>A,B)</sup>, Akira Ihara<sup>A,B)</sup>, Taiki Iwashita<sup>A,B)</sup>, Haruhiko Oikawa<sup>A,B)</sup>, Masaya Kadowaki<sup>A,B)</sup>, Hajime Kobayashi<sup>A,B)</sup>, Hideki Kobayashi<sup>A,B)</sup>, Ryota Saida<sup>A,B)</sup>, Keisuke Sakuraba<sup>A,B)</sup>, Kento Sugimoto<sup>A,B)</sup>, Shunya Takahashi<sup>A,B)</sup>, Tsubasa Tsuchiyama<sup>A,B)</sup>, Masaaki Nishikawa<sup>A,B)</sup>, Koichi Haga<sup>A,B)</sup>, Takahiro Watanabe<sup>C,D,A)</sup>, Miho Ishii<sup>C,D,A)</sup>, Toshiro Itoga<sup>C,D,A)</sup>, Eito Iwai<sup>C,D,A)</sup>, Masaya Oishi<sup>C,D,A)</sup>, Takashi Oshima<sup>C,D,A)</sup>, Chikara Kondo<sup>C,D,A)</sup>, Tatsuyuki Sakurai<sup>C,D,A)</sup>, Masazumi Shoji<sup>C,D,A)</sup>, Takashi Sugimoto<sup>C,D,A)</sup>, Shiro Takano<sup>C,D,A)</sup>, Kazuhiro Tamura<sup>C,D,A)</sup>, Kenji Fukami<sup>C,D,A)</sup>, Naoyasu Hosoda<sup>C,D,A)</sup>, Tamotsu Magome<sup>C,D,A)</sup>, Tsuyoshi Aoki<sup>C,A)</sup>, Noriyoshi Adumi<sup>C,A)</sup>, Yosuke Ueda<sup>C,A)</sup>, Kensuke Okada<sup>C,A)</sup>, Morihiro Kawase<sup>C,A)</sup>, Akio Kiyomichi<sup>C,A)</sup>, Choji Saji<sup>C,A)</sup>, Tsutomu Taniuchi<sup>C,A)</sup>, Yukiko Taniuchi<sup>C,A)</sup>, Hideki Dewa<sup>C,A)</sup>, Takashi Hamano<sup>C,A)</sup>, Takahiro Fujita<sup>C,A)</sup>, Mitsuhiro Masaki<sup>C,A)</sup>, Takemasa Masuda<sup>C,A)</sup>, Shinichi Matsubara<sup>C,A)</sup>, Kenichi Yanagida<sup>C,A)</sup>, Hiroshi Yamaguchi<sup>C,A)</sup>, Takato Tomai<sup>C)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>D,C)</sup>, Koichi Soutome<sup>D,C)</sup>, Sunao Takahashi<sup>D,C)</sup>, Takashi Tanaka<sup>D,C)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>D,C)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>D)</sup>, Toru Hara<sup>D)</sup>, Toshihiko Hiraiwa<sup>D)</sup>, Toru Fukui<sup>D)</sup>, Sakuo Matsui<sup>D)</sup>, Shinobu Inoue<sup>E)</sup>, Hirosuke Kumazawa<sup>E)</sup>, Kohei Sakai<sup>E)</sup>, Hiroshi Sumitomo<sup>E)</sup>, Toshio Seno<sup>E)</sup>, Ryoichi Takesako<sup>E)</sup>, Shinichiro Tanaka<sup>E)</sup>, Katsuki Moriya<sup>E)</sup>, Ryu Yamamoto<sup>E)</sup>, Kazutoshi Yokomachi<sup>E)</sup>, Masamichi Yoshioka<sup>E)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>F,A)</sup>

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

<sup>B)</sup> NAT Corporation (NAT)

<sup>C)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

<sup>D)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>E)</sup> SPring-8 Service Co, Ltd (SES)

<sup>F)</sup> KEK

#### Abstract

NanoTerasu is a highly brilliant synchrotron light source mainly focusing on soft to tender X-ray region. The NanoTerasu accelerator system consists of a 3 GeV storage ring based on four bends achromat lattice with a circumference of 349 m and a 3 GeV linear injector accelerator with length of 110 m. The installation of the accelerator system started in Dec. 2021 and successfully finished by the end of May 2023. The commissioning of linear accelerator started on Apr. 17<sup>th</sup> and a 3 GeV electron beam was successfully delivered to a beam dump in 10 days. The commissioning of storage ring started on June 8<sup>th</sup> and a 3 GeV electron beam was soon circulated in the storage ring roughly 300 times with storage ring cavity off. The first stored beam was observed on June 18<sup>th</sup> with storage ring cavity on and the first light from a 3 pole wiggler was observed as well. The present stored electron beam current exceeds 100 mA after 10 Ah total dose and preliminary horizontal beam emittance of 1.1 nm rad is measured with synchrotron radiation from a 3 pole wiggler.

<sup>#</sup> nishimori.nobuyuki@qst.go.jp

## 1. はじめに

NanoTerasu は、軟 X 線領域において国内既存施設の 100 倍の輝度を目指して仙台市青葉山で整備が進められている放射光施設であり、2024 年 4 月から特定先端大型研究施設としての運用を予定している[1]。SPring-8/SACLA、J-PARC、富岳などと相補的に、民間、大学等の広範な分野における活用促進を使命とする施設であり、心臓部を担う加速器の責務は重大である。

NanoTerasu 加速器は軟 X 線放射光生成に最適なエネルギー 3 GeV に電子ビームを加速する線型加速器と、3 GeV 電子ビームを蓄積し挿入光源から実験ホールへ向けて放射光を生成する 3 GeV 円型加速器からなる。線型加速器はエネルギー加速と共に、円型加速器内の蓄積電流(電子数)を増やす役割があり、残留ガスとの散乱や電子-電子散乱で失われた電子数を継ぎ足す役割も有する。一方、円型加速器は電子ビームを円型理想軌道に沿って閉じ込めると共に、電子が放射光生成で失ったエネルギーを補充する役割を持つ。

NanoTerasu 加速器は 1~3 keV 放射光領域で  $1 \times 10^{21}$  の高輝度光源性能をコンパクトに達成するために、グリーンフィールドから建設した。設計・製作の詳細は参考文献[2-6]を参照されたい。新型電子源や C バンド加速器を採用したミニマルデザインにより、線型加速器の長さは 110 m で、同様の 3 GeV 光源であるスウェーデンの MAX IV に比べると 1/3 である。国内で初めて MBA(Multi Bend Acromat)ラティスを採用し、建屋・ユーティリティも含めたトータルデザインにより、円型加速器の周長は 349 m である。従来の DBA(Double Bend Achromat)ラティスを用いた台湾 TPS の 518 m に比べると周長は 2/3 程度である。施設サイズ縮小は建設コストの大幅削減に繋がる。他方、性能の指標となる水平自然エミッタンスは TPS の 1.6 nrad に対して 1.14 nrad であり上回る。このように、1 本あたりのビームラインのコストパフォーマンスに優れた最新型の放射光施設である。

このような最先端放射光加速器施設の設計・製作・設置において、SPring-8 で培われてきた知識と経験、SPring-8 II 向けの R&D がオブティクス設計、加速管、電磁石、真空、モニタ、制御、ユーティリティなど全システムにおいて積極的に活用された。兵庫県播磨に所属する RIKEN SPring-8 Center と JASRI のメンバーが設計・製作を主担し、現地での設置・コミッショニングを宮城県仙台市の QST/NAT/SES メンバーが主担するというのが、NanoTerasu 加速器建設の大まかな構図である。将来の仙台メンバーによる運転を見据えた加速器技術移転が、異なる組織間でスムーズに行われていることを、後述のコミッショニング結果が具現していると考えている。

NanoTerasu は官民地域パートナーシップという、新しい枠組みで進められているプロジェクトである。2018 年 1 月に QST が国(官)の主体に指名され、7 月に PhoSIC が民地域の代表機関に選定された。加速器システムの整備責任は QST が担い、2018 年 12 月から RIKEN/JASRI のメンバーと共に機器製作を開始した。2019 年 3 月には、東北大学青葉山新キャンパスでの施設敷地造成に PhoSIC が着手し、2020 年 4 月には基本建屋起工式が行われた。建屋設計は加速器設計と密接

な関係があるため、基本設計段階から会議に出席して加速器に必要な要求を反映させた。

新型コロナウイルス感染症の影響などで、基本建屋建設は当初の予定から約 2 ヶ月遅れ、加速器の建屋への設置作業を 2021 年 12 月から開始した。2023 年 5 月の蓄積リング加速空洞の設置まで 1 年半、約 30 社の加速器設置作業を綿密な作業調整と工程管理、作業者の協力により無事故・無災害で乗り切ることができた。

線型加速器の設置を 2022 年末までに完了し、2023 年 2 月 13 日には線型加速器を放射線管理区域に設定し、加速管高電圧コンディショニングを開始した。4 月 17 日には安全インターロック検査を完了して線型加速器のコミッショニングを開始した。線型加速器と円型加速器トンネルは遮蔽壁により、放射線管理区域として分離されており、円型加速器内で作業を継続しながらビーム調整を行った。5 月 29 日に円型加速器を放射線管理区域に設定し、円型加速器へのビーム輸送部のコミッショニング、蓄積リング加速空洞のコンディショニングを開始した。現在までに 3 GeV 電子ビームの 100 mA 蓄積に成功し、水平エミッタンスの暫定測定値は、設計値の 1.1 nrad を満足する値となっている。本報告では、NanoTerasu 加速器のコミッショニング状況を報告する。

## 2. 線型加速器コミッショニング

### 2.1 線型加速器からの 3 GeV 電子ビーム生成

線型加速器は新型の透明グリッド熱カソード電子源を採用したコンパクトな入射器と長さ 2 m の C バンド加速管 40 本で構成される。全長 110 m で高密度電子ビームを 3 GeV 加速出来る[7,8]。従来のグリッド熱カソード電子源では、グリッドは出射電子ビームのタイミング、パルス幅、電荷量の制御に使われ、低エミッタンス実現は困難であったが、カソード・アノード間の高電圧が作る電場とカソード・グリッド間の作る電場を釣り合わせることで、グリッドの存在を透明化し、軟 X 線自由電子レーザーにも適用できる高密度電子ビーム生成も企図して設計製作した[9,10]。この電子源からビーム生成を開始したのは 2023 年 4 月 17 日であった。グリッド熱カソード 50 kV 電子源の直後に配置した 238 MHz 空洞で 500 keV まで加速し、空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制する。238 MHz 空洞後に配置された YAG スクリーンの電子ビームプロファイルは、ソレノイドレンズの磁場強度を変化させても重心位置は変化せずに、ビームサイズのみが変化する。アライメント精度、機器の製作精度が極めて高いことを示している。さらに、進行方向のバンチ圧縮に用いる 476 MHz 空洞、40 MeV 程度まで加速する S バンド加速管の振幅と位相を調整し、電子ビームを C バンド加速器の入口まで輸送した。

4 月 24 日からは C バンド加速器のビーム調整を開始した。C バンド加速器を上流から 6 セクションに分け、各セクションの加速管本数は 6、4、6、8、8、8 本である。電子ビームモニタが潤沢に配置されていないため、電子ビームが C バンド加速管を通過する際に、空洞との相互作用により空洞に誘起する電磁波信号をモニタしながらビーム輸送を行った。加速管への入力パワーをオフにして該当加速管にビームを通し、各加速管のダミーロード手前のカプラーを用いて誘起信号を測定した。誘起信

号は電子ビームが加速管に与える電磁波のエネルギーであり、電子ビーム減速を意味する。従って、測定誘起信号の位相と 180 度反対に位相を設定すれば、加速位相に乗るはずである。このように上流から C バンド加速管の位相を決定後、加速管への入力パワーをオンした。

全 C バンド加速管の位相調整後、直線加速器最下流部の最初の偏向電磁石 1 台に磁場を印加し、その下流のビームプロファイルモニタ、CT、BPM でビーム観測を行った。その後、ビーム位置を観測しながら、各加速管で最大加速が得られるように位相の微調整を行い、各加速管の振幅も調整し、2023 年 4 月 27 日に 3 GeV 加速に成功した。線型加速器の施設検査(漏洩線量測定)を 2023 年 6 月 19 日に行い、ビームダンプまで 3 GeV-0.2 nC のビームを打ち込み、無事合格した。現在までの達成パラメータは電荷 0.4 nC、規格化エミッタンス 6.7 mm-mrad、エネルギー広がり 0.02%(FWHM)である[7]。

## 2.2 円型加速器までのビーム輸送調整

円型加速器の放射線管理区域設定日の 2023 年 5 月 29 日から電子ビーム輸送試験を開始した。線型加速器出口から円型加速器の入射部まで約 80 m の間に 3 箇所の水平偏向ラティスがあり、それぞれ 42、-30、31.7 度偏向させる。第 1,2 ラティス前後ではアクロマットになるように、主に中心の四極電磁石の強さを調整する。

ビームラインの本数を出来るだけ多く確保するため、円型加速器の内側から水平に off-axis 入射を行う設計である。線型加速器は円型加速器の外側に配置されているため、円型加速器真空容器の高さ 1.2 m に対し、ビーム輸送路の高さを 0.6 m として、下を潜って内側から円型加速器に合流する。垂直偏向磁石ペアにより 0.6 m の段差を構成した。

ビーム輸送路では、モニタの数を極力減らし、典型的な真空容器のダクト直径が 25.4 mm と小さいことなどから、ビーム輸送に手間取ることも想定されたが、かなり順調に輸送できた。電磁石の配線誤りが第 2,3 水平偏向ラティスの中央の四極電磁石、パルスセパタム電磁石にあったが、不具合のたびに、直ちに原因を特定し修正できたので、実質的なコミッショニングの遅延に繋がらなかった。

## 3. 円型加速器コミッショニング

### 3.1 最初の周回

円型加速器への off-axis 入射パルス電磁石部は 5.4 m の長直線部 1 本に収められている。中心のパルスセパタム電磁石を挟んだ蓄積軌道前後それぞれに、2 台のパルスキッカー電磁石があり、蓄積軌道を 7.5 mm 入射軌道側に寄せる台形のバンプ軌道を入射時に形成する。入射電子軌道はバンプ軌道に対してさらに内側に 7.5 mm (蓄積軌道に対して 15 mm) オフセットする設計である。入射軌道が蓄積軌道に平行になるようにパルスセパタム出口の入射軌道を調整した。パルスセパタム出口とその直下流のキッカー後には BPM があり、お互いに 1 m 程度離れている。キッカーオフ状態で、この 2 カ所の BPM で入射水平・垂直軌道が蓄積軌道に対して平行、かつ水平と垂直オフセットが 13 mm と 0 mm 程度であることを確認した[11]。次に、キッカーオンで入射し、キッ

カー後の BPM の位置が設計通り 4 mm 程度動くことを確認した。パルスセパタムの磁極間距離は垂直に 2 mm しかなく、全長 500 mm の距離をロス無しでビーム輸送することは、困難が予想されたが、問題なく輸送することが出来た。

蓄積リング空胴入力パワーをオフにして、2023 年 6 月 8 日に周回試験を開始した。BBF(bunch-by-bunch feedback)用の BPM の SUM 信号を Fig. 1 左上に示す[12]。電子ビームを示す信号が 300  $\mu$ s 程度まで継続し消失した。周長が 349 m の蓄積リングであるため、約 300 周回に相当することは、以下の考察と矛盾しない。電子ビームが 1 周回で発生する偏向磁石からの放射光エネルギーは 0.62 MeV と評価されている。3 GeV 電子で約 0.02% のエネルギー損失である。空胴によるエネルギー追加なしに 300 周回すると 6% のエネルギー損失となる。エネルギー分散関数の最大値は 0.18 m で、300 周回で電子ビームは約 11 mm 内側に寄る。入射電子ビーム軌道は蓄積軌道に対して 5 mm 程度内側にオフセットした状態で入射しているため、ベータatron 振動の振幅はオフセットと同様の振幅である。従って、分散関数最大の位置で、蓄積軌道の内側 16 mm の位置を電子ビームが通過する。後述する電子ビームアブソーバと衝突後、消失したと考えられる。また、周回試験開始後直ぐに、ステアリング電磁石を使わずに 300 周回を確認出来た技術的な理由として、蓄積リング電磁石の据付アライメントが 30  $\mu$ m 以内の高精度であり、電磁石そのものが高精度で製作されていたことが挙げられる。

電子ビーム診断装置として 3 極ウィグラー(3PW)が短直線部に設置されている[12]。電子ビーム周回時に、3PW からの可視放射光(ファーストライト)をビーム入射の繰り返し周波数である 1 Hz で観測することが出来た。

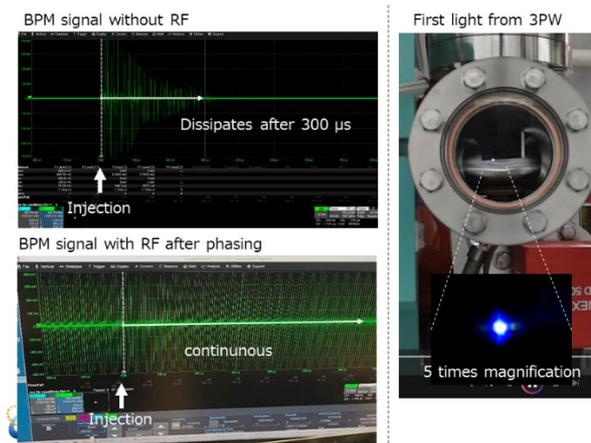


Figure 1: BPM signal without RF (upper left), with RF after phasing (lower left) and first light from 3 pole wiggler (right).

### 3.2 蓄積リング空胴のコンディショニングと蓄積

4 台の蓄積リング空胴を 1 本の長直線部に設置し、1 台のクライストロンでパワーを分割供給して使用する[13]。蓄積リングトンネルが管理区域に設定された 5 月 29 日から空胴コンディショニングを開始した。各空胴は製作後、SPRing-8 で事前コンディショニングを実施済みである。コ

ンディショニング中に発生した熱変形の影響を取り除くために空胴の内面を再加工した影響などで、4 台の空胴の共振周波数は必ずしも一致していない。そのため、空胴パワー投入時は RF 周波数を定格である 508.759 MHz から 80 kHz 増に設定し、パワーを上昇させながら周波数を下げる運転を行っている[13,14]。空胴の冷却水温度 25°C では、空胴投入パワー 260 kW 時に周波数が定格の 508.759 MHz に到達する。この条件が整った 2023 年 6 月 18 日に蓄積試験を行った。オシロスコープの信号を見ながら、周回数が延びる方向にリング空胴の位相調整を行い、やがて Fig. 1 左下の蓄積を達成できた。

その後、電子ビームの調整を行いながら、蓄積リング加速空胴のコンディショニングを進め、当面の目標であった 4 空胴に加速電場用の合計 400 kW パワーを投入することに成功した。将来、蓄積電流が増え、タウシェック効果が顕著になれば、加速電場用のパワーを 260 kW から増加させる予定である。

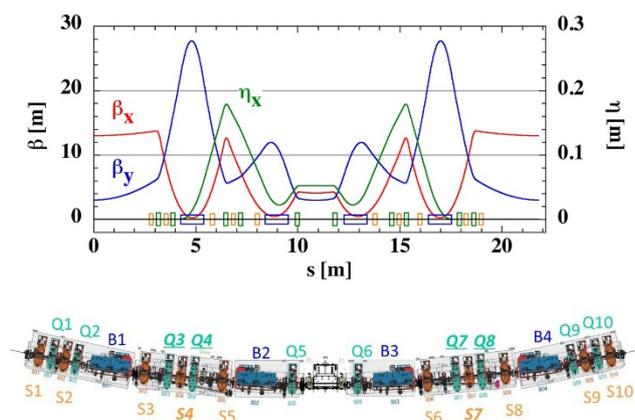


Figure 2: Lattice (top) and magnet system (bottom).

### 3.3 COD、チューン、周波数補正

電子ビーム蓄積後の調整として、まず COD 補正を行った。セルあたり 7 カ所の BPM で位置を測定し[15]、セルあたり 8 台のステアリング電磁石で補正し、± 0.5 mm 以内に軌道調整した。BPM のビームベースアライメント(BBA)は未実施でもあり、現時点の精度として十分である。チューンについては、BBF システムのキッカーでビームに摂動を与え、共鳴する値から求める。チューン補正は、非分散部の四極電磁石 Q1, Q10 で水平方向、Q2, Q9 で垂直方向のチューン補正を行った (Fig. 2 参照)。COD 補正後の軌道が、中心軌道を通るように、1 kHz (周長換算で約 0.7 mm) 程度周波数を調整した。

### 3.4 電子ビーム廃棄システム

低エミッタンスリング NanoTerasu 長直線部中心のビームサイズは横幅 120 μm (σ)、縦幅 6 μm (σ) である。400 mA 蓄積時は、トータルで約 400 nC の電荷がこの小さな断面積内に閉じ込められてリングを周回する。何らかの理由でビーム軌道が変動して放射光軸がずれると、光学素子等を損傷する恐れがあるため、軌道閾値から外れた場合には、蓄積電子ビームを直ちに廃棄する。その手順は、BPM 閾値を軌道が外れた場合、ARIS (ビーム廃棄インターロックシステム) が蓄積リング空胴に高周波

出力停止を指令すると共に、BBF システムをビームシェーカーとして起動し、ビームを垂直方向に 300 倍拡大し、ビーム損失箇所でのエネルギー密度を低減させる。リング分散関数最大の付近にグラファイト製電子ビームアブソーバを蓄積軌道中心から 14 mm 内側に設置し、エネルギーを失った電子が、最初にアブソーバと衝突し、ビームが拡大するようにした[16,17]。本電子ビームアブソーバを各セルに 1 台配置した。この電子ビーム廃棄システムの動作確認後、3 mA 以上の運転を開始した。

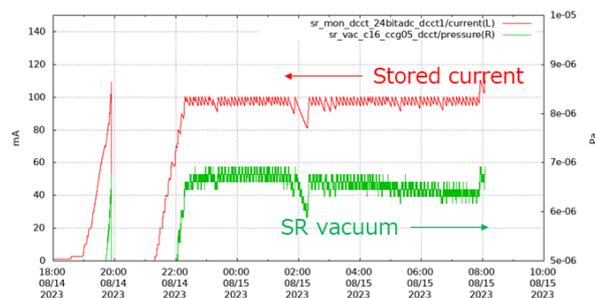


Figure 3: Stored beam current (red) and ring vacuum (green).

### 3.5 焼出し運転

NanoTerasu では偏向磁石からの放射光をユーザー向けに取り出さずに全て放射光アブソーバで吸収する。これは、偏向磁石の磁場強度が 0.87 T と低いこと、接線方向に出る光量しか使えないためである。焼出し運転は、放射光アブソーバ内に吸着されているガスを光刺激脱離で叩き出し、徐々に蓄積電流を増やすプロセスである。

NanoTerasu はハーモニクス数が 592 で、約 2 ns 毎にバンチ列を形成する。連続する 400 バンチに電子を積み上げ、残り 192 バンチはイオンクリアリングのため、スペースをあける。1 から 400 バンチ目まで順番に積み上げを行い、また 1 バンチ目からというプロセスを繰り返した。

効率的な焼出しのため、Top-up 運転を導入した (Fig. 3 参照)。蓄積リング真空容器の CCG は 100 台程度あるが、全てが  $10^{-5}$  Pa を越えないように目標電流値の上限を設定し、それより数 mA 低い下限電流を設定した。蓄積電流が上限を上回ると、入射器からの 1 Hz の積み上げ運転を止め、decay 運転に移行し、下限を下回ると積み上げを再開するプロセスを自動化した。線型加速器からの入射電荷は現状、約 0.1 nC である。

夜間も含めた本格的な焼出し運転を 2023 年 8 月 1 日から開始した。土日祝日を除く、月曜朝から金曜夕方までが基本である。8 月 15 日には 100 mA 以上に到達し (Fig. 3 参照)、dose 量も 10 Ah を越えている。電子ビーム電流とビーム寿命の積は 400 mAh を越え、蓄積電流 100 mA で寿命 4 時間以上に相当する[18]。

### 3.6 エミッタンス計測

短直線部に挿入した 3PW からの硬 X 線像をピンホールカメラで短直線部の電子ビームサイズ像として計測し、リアルタイムエミッタンス計測を行う[12]。暫定測定値として、設計値と同様の水平エミッタンス 1.1 nrad が 100 mA で得られている。

## 4. 世界の放射光源開発動向

MBA を用いた低エミッタンス放射光リングのアイデアは 1990 年代に提唱された[19,20]。放射減衰と放射励起の釣り合いで決まる蓄積電子ビームのエミッタンスを下げるため、偏向磁石中の分散関数を抑制して放射励起を小さくする取り組みである。分散関数は距離の 2 乗に比例して大きくなり、放射励起への効果はその積分で 3 乗となる。DBA ラティスの偏向磁石 1 台を 2 台に分割すると、1 台目の分散関数の寄与は 1/8、偏向磁石間に挟む集束四極磁石を用いて 2 台目の偏向磁石中の分散関数を小さくできる。このように MBA でエミッタンスを小さくできるが、磁石他の密度が高くなり実装は困難となる。2000 年頃から MBA デザイン設計が始まったスウェーデンの MAX IV 3 GeV 蓄積リングは、2010 年に建設が始まり 2016 年からユーザー運転を継続している[21]。水平エミッタンス 0.33 nmrad を目指した世界初の MBA リングで、世界の放射光源開発の流れを決定づけたといえる。

SPring-8、米国 APS と並ぶ大型放射光源 ESRF-EBS は、世界 2 番目の MBS リングで、2020 年 8 月からユーザー運転を開始した[22]。水平エミッタンス 0.13 nmrad を誇る。APSU は 2023 年 4 月から加速器を停止し、2024 年 4 月から運転再開予定である[23]。SPring-8-II も現在、検討が活発に進められている[24]。大型放射光源は 0.1 nm 波長に代表される硬 X 線生成に適したエネルギー 6 GeV の施設であり、該当波長での回折限界を目指して、エミッタンス 0.1 nm 程度以下がターゲットである。

NanoTerasu は 1 nm 波長の軟 X 線向けの 3 GeV クラス放射光源であり、主な競争相手は MAX IV や Sirius[25]である。周長が 350 m 程度と短いため、低エミッタンス化には不利であるが、建設・維持管理コストを抑制でき、ビームライン 1 本あたりのコストパフォーマンスに優れている。稼働開始後 7 年の MAX IV のビームライン本数は 9 本、3 年前から稼働中の Sirius が 6 本に対し、NanoTerasu は初年度から 10 本のビームラインを準備する。高いコストパフォーマンス性能で、3 GeV 施設の中で存在感を打ち出したいと考えている。

SPring-8/SACLA は先端放射光リングと自由電子レーザーを同一敷地内に併設した唯一の施設であるが、NanoTerasu も軟 X 線自由電子レーザー (FEL) への将来展開を見据えている。FEL への展開可能な他施設は MAX IV だけである。

## 5. まとめ

鹿島建設による NanoTerasu 基本建屋建設が進捗している最中の 2021 年 12 月に加速器の据付調整を開始し、1 年半という短期間に無事故で完了した。2023 年 4 月に線型加速器、6 月に円型加速器コミッションを開始して、どちらも順調に推移し、3 GeV 電子ビームを 100 mA 以上蓄積し、水平エミッタンス 1.1 nmrad (暫定値) が得られている。NanoTerasu は中型放射光施設の位置づけではあるが、加速器システムとしては大規模で様々な機器が複雑に絡み合い、何かが故障すると全体に影響を与える。ここまで、大きなトラブルなく進捗したのは、担当者やメーカーによる個別機器の入念な準備、担当者間の緊密なコミュニケーション、トラブル発生時の迅速な対応によるもので、今後も継続したい。

今後は挿入光源の調整、BBA を含めた精密な電子ビーム軌道調整、400 mA を目指した大電流化を着実に進めてゆきたいと考えている。

## 謝辞

NanoTerasu 加速器に関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] 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, [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/houan/an/detail/mext\\_00043.html](https://www.mext.go.jp/b_menu/houan/an/detail/mext_00043.html)
- [2] 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, <https://www.qst.go.jp/site/3gev/41162.html>
- [3] N. Nishimori, “A New Compact 3 GeV Light Source in Japan”, Proc. IPAC2022, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2402-2406.
- [4] 西森信行, 渡部貴宏, 田中均, “3 GeV 高輝度放射光施設 (NanoTerasu)”, 表面と真空, vol. 65, p. 560, 2022.
- [5] 西森信行, 渡部貴宏, 田中均, “3GeV 次世代放射光源加速器のための技術開発と建屋設計”, 加速器, vol. 18, p. 28, 2021.
- [6] 西森信行, 渡部貴宏, 田中均, “3 GeV 次世代放射光施設の加速器システム”, 放射光, vol. 33, p. 196, 2020.
- [7] T. Asaka *et al.*, “次世代放射光施設 NanoTerasu の 3 GeV 線型加速器ビームコミッション状況”, Proc. of the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.
- [8] T. Asaka *et al.*, “次世代放射光施設 NanoTerasu 線型加速器・電子入射部のビーム性能”, Proc. the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.
- [9] T. Asaka *et al.*, “Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode”, Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 23, p. 063401, 2020.
- [10] T. Asaka *et al.*, “Transparent-grid scheme for generating cathode-emittance-dominated beams in a gridded thermionic gun”, Jpn. J. Appl. Phys. vol. 60, p. 017001, 2021.
- [11] S. Obara *et al.*, “3 GeV 次世代放射光施設 NanoTerasu の蓄積リング電磁石及び入射部電磁石の設置と試運転状況”, Proc. the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.
- [12] K. Ueshima *et al.*, “NanoTerasu における 3 極ウイグラーを用いた電子ビーム診断システム”, Proc. the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.
- [13] S. Takahashi *et al.*, “NanoTerasu 蓄積リング用大電力高周波加速システムの現状”, Proc. the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.
- [14] T. Ohshima *et al.*, “加速空洞立ち上げ時の周波数変調システム”, Proc. the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.
- [15] H. Maesaka *et al.*, “NanoTerasu 蓄積リング用ビーム位置モニタシステムの構築と立ち上げ”, Proc. of the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.
- [16] Y. Hosaka *et al.*, “3GeV 次世代放射光施設の加速器インターロックシステム”, Proc. PASJ2022, pp. 735-739, THP012, 2022.
- [17] 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, vol. 24, p. 114001, 2021.
- [18] Y. Hosaka *et al.*, “次世代放射光施設 NanoTerasu 蓄積リング真空チェンバの製作及び設置”, Proc. the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.

- [19] D. Einfeld and M. Plesko, "A modified QBA optics for low emittance storage rings", Nucl. Instr. and Meth. A., vol. 335, p. 402, 1993.
- [20] S.Y. Lee, "Emittance optimization in three- and multiple-bend achromats", Phys. Rev. E, vol. 54, p. 1940, 1996.
- [21] S.C. Leeman *et al.*, "First optics and beam dynamics studies on the MAX IV 3 GeV storage ring", Nucl. Instr. and Meth. A., vol. 883, p. 33, 2018.
- [22] P. Raimondi *et al.*, "Commissioning of the hybrid multibend achromat lattice at the European Synchrotron Radiation Facility", Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 24, p. 110701, 2021.
- [23] <https://www.anl.gov/aps-upgrade>
- [24] SPring-8-II Conceptual Design Report, RIKEN SPring-8 Center, November 2014.
- [25] L. Liu *et al.*, "Status of Sirius Operation", Proc. IPAC2022, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1385-1388.