

NanoTerasu 加速器の現状

PRESENT STATUS OF NanoTerasu

安積隆夫^{#, A)}, 安居院あかね^{A)}, 稲葉健斗^{A)}, 上島孝太^{A)}, 小原脩平^{A)},
菅晃一^{A)}, 佐治超爾^{A)}, 保坂勇志^{A)}, 西森信行^{A)}
Takao Asaka^{#, A)}, Akane Agui^{A)}, Kento Inaba^{A)}, Kota Ueshima^{A)}, Shuhei Obara^{A)},
Koichi Kan^{A)}, Choji Saji^{A)}, Yuji Hosaka^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}
^{A)} NanoTerasu Center / QST

Abstract

The user operation of the 3-GeV synchrotron radiation facility, NanoTerasu, started in April 2024, and has achieved the annual operation plan of 3500 hours as scheduled. In the user experiment, the storage beam current of 200 mA with the top-up mode. The variation of the storage beam current is maintained less than 0.05% by injecting a beam every few minutes from the 3-GeV linear accelerator. The machine study time for accelerators and beamlines in 2024 was 1950 hours. The operational availability is 99.6%, the mean time between failures (MTBF) is over 320 hours, and the mean time to return to normal operation (MTTR) is less than 1.2 hours. In this report, we show the operation status of the linear accelerator and storage ring in the last fiscal year. We also report on our efforts to increase the stored beam current to 400 mA.

1. はじめに

特定先端大型施設 NanoTerasu は、国内初の Multi-Bend Achromat (MBA) ラティスを採用した低エミッタンス 3 GeV 蓄積リングであり、軟 X 線領域において世界最高水準の放射光を提供する。NanoTerasu は、1 年半の加速器設置と機器調整を経て、2023 年 4 月よりビームコミッションを開始した[1-3]。ビームコミッションは計画通りに進められ、開始から 2 ヶ月後には最初のビーム蓄積を確認した。それ以降、蓄積ビーム電流の増加を目指した精密調整、パラメータサーベイがおこなわれるとともに、真空チャンバ、アブソーバなど、放射光照射による真空焼き出しにも十分な時間が充てられた[4, 5]。

本施設のマスタープランでは、初年度の利用運転における蓄積ビーム電流は 100 mA であったが、真空焼き出しが進んだため、利用開始時点で 160 mA に引き上げられた(2024 年 6 月からは 200 mA)。また、放射光強度を一定に保つための Top-up 運転が適用され、3 GeV 線型加速器からは数分に一度の頻度でビーム入射がおこなわれている。

利用実験では、光科学イノベーションセンター (PhoSIC) が 7 本のコアリションビームラインを運営・管理し、これらはコアリション会員が使用する。3 本の共用ビームラインについては、量子科学技術研究開発機構 (QST) が整備し、QST と高輝度光科学研究センター (JASRI) の両者で共用業務を担当する。とくに超高分解能共鳴非弾性散乱 (2D-RIXS) ビームライン (BL02U) では、軟 X 線領域 (250~2000 eV) でエネルギー分解能が世界最高となる 10 meV に到達し、この性能を用いた固体物理・物性分野における精密測定に使用されている[6]。共用ビームラインは 2025 年 3 月から本格稼働し、国内外の大学や研究機関の実験課題に対応している。

本稿では 2024 年度の加速器運転状況を示すとともに、

400 mA の蓄積ビーム電流を目指す上で課題となっている縦方向ビーム不安定性への対策について述べる。また、利用施設として長期間にわたる安定運用と加速器高度化のための各種テストスタンドの準備状況についても報告する。

2. 運転状況

NanoTerasu 加速器の主要パラメータを Table 1 に示す。Table 2 には稼働中のビームラインの主要性能を示す。2024 年度の加速器総運転時間は 5450 時間であり、放射光利用者には 3500 時間が割り当てられた。また、加速器・ビームライン調整、マシンスタディには 1950 時間が当てられた。年間の加速器運転は約 10 日間で 1 サイクルとする全 15 サイクルで区切られ、サイクルの間は 24 時間運転がおこなわれる。利用実験中は、Top-up 入射により 200 mA の蓄積ビーム電流が維持される。Figure 1 には蓄積リングにおける蓄積ビーム電流、ならびに線型加速器から生成されるビーム電荷量の推移を示す。

Table 1: Beam Parameter of NanoTerasu Accelerator Complex

Linear accelerator	Design	Measurement
Beam charge	0.3 nC	0.36 nC
Energy, energy spread	3 GeV	3 GeV
Emittance (x / y)	2 nm rad	1.04 / 1.84 nm rad
Storage ring	Design	Measurement
Stored beam current	400 mA	200 mA (400 mA)
Betatron tune (x / y)	28.17 / 9.23	28.17 / 9.23
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
Lifetime	-	7 hr.@200 mA 4 hr.@400 mA

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

Table 2: Characteristics of Beamlines

	Organization	Insertion Device	Photon Energy
BL02U	QST / JASRI	APPLE-II	SX
BL06U	QST / JASRI	APPLE-II	EUV, SX
BL07U	PhoSIC	APPLE-II	EUV, SX
BL08U	PhoSIC	APPLE-II	SX
BL08W	PhoSIC	MPW	Tender
BL09U	PhoSIC	IVU	Tender
BL09W	PhoSIC	MPW	Tender, HX
BL10U	PhoSIC	IVU	Tender
BL13U	QST / JASRI	4 Seg. APPLE-II	SX
BL14U	PhoSIC	Twin helical	SX

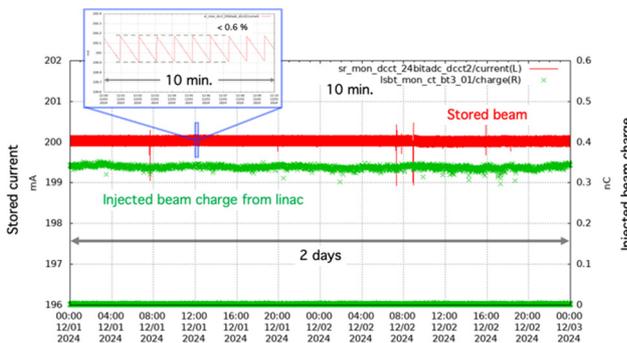


Figure 1: Stored beam current during top-up operation and injected beam current from the linear accelerator.

蓄積リングの低エミッタンスビームにより生成される高輝度放射光を用いたサンプル照射は、高い空間コヒーレンスを生かした高分解能測定を可能とするだけでなく、そのデータ取得に要する時間についても、従来放射光実験と比べて数十倍短縮される。この利用実験の高効率化 (High-through-put) は、運用計画にも反映され、より多くの実験が実施できるように綿密な実験計画が立案される。こうした状況において、加速器機器インターロックの動作による蓄積ビーム廃棄が起きた場合には、個々の利用者に対して大きな損失を与えてしまうことになる。

高輝度放射光施設がもつこうした課題にも対応するため、NanoTerasu 加速器では、構成装置の設計・製作の段階から、高い信頼性と優れた堅牢性を備えることを徹底した。こうした配慮により、初年度の利用運転では、稼働率が 99.6%に到達し、平均故障時間 (MTBF) についても 323 時間を達成した。また、平均修復時間 (MTTR) は 1.2 時間に抑えられており、ほぼ全ての利用実験における実効的利用時間を確保している。

2.1 蓄積ビームアボート要因

蓄積ビーム廃棄を伴うインターロック動作は、真空悪化、RF システム・電磁石システムトラブル、ビーム軌道変位、安全システムからの異常状態発生時に起動する[7]。Figure 2 には、2024 年度の蓄積ビーム廃棄 (利用運転停止) 要因の内訳を示す。2024 年度の利用運転では、12 回のインターロック動作が発生しており、その要因のほとんどが RF システム異常 (RF 空洞からの反射電力増加) であった。

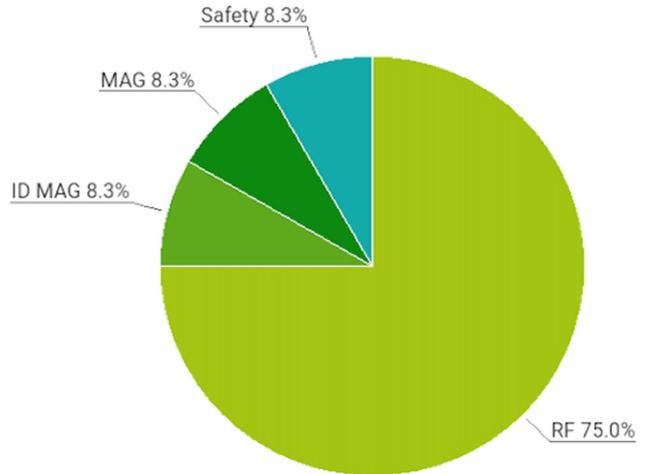


Figure 2: Fault events that caused beam abort in storage ring.

蓄積リングの RF システムは 1.2 MW クライストロンから出力される大電力 RF を分岐後、4 台の HOM 吸収体内蔵型 RF 空洞に供給される[8, 9]。2023 年度に実施されたビームコミッショニング期間のビーム廃棄要因のほとんどについても RF システムのインターロック動作によるものであったが、その内容は大気型導波管と真空型導波管を隔てるセラミック窓でのアーク放電であった。利用運転開始以降、セラミック窓のアーク放電によるインターロック動作は解消されている。

利用運転中、余儀なく機器交換がおこなわれるようなビーム廃棄は 2 回発生した。交換対象となった機器は、COD 補正のためのステアリング電磁石電源制御ユニットと挿入光源ギャップ部に備わるストリップライン用小型電源であった。これら故障機器については速やかに交換できるように予備品を確保していたため、著しい遅延なく復旧することができた。

2.2 線型加速器の運転状況

Top-up 運転中、3 GeV 線型加速器は継続的な運転がおこなわれる。構成機器の長寿命化と省電力運転に配慮して、20 台の C バンド加速ユニットでは 1 Hz の繰返し周波数で運用している。40 MeV 入射部に備わる 238 MHz 高周波空洞、476 MHz サブハーモニックバンチャー、S バンド加速管については、ビーム性能の安定性を優先し、10 Hz の繰返し周波数で運転し、RF 振幅、位相の帰還制御をおこなっている。

加速器運転中だけでなく停止期間後の加速器運転再開時においても、ビームコミッショニングで得られた最適化パラメータを設定するのみで、安定した Top-up 運転を実現している[10]。

年に 1 度実施される施設電力設備の点検では、すべての機器電源が停止される。MTCA.4 で構築されている低電力 RF システムの通電再開では、線型加速器と蓄積リングの RF 位相の関係性が初期化される。このため、停電復帰後のビーム調整では、再度、線型加速器の RF 機器の位相調整・最適化が不可欠となり、さらに入射ビームに対する蓄積リングの RF 空洞の位相調整も必須とな

る。とくに線型加速器の 40 MeV 入射部では、複数台ある RF 空洞について位相に対するビーム応答を取得して最適パラメータを得なければならない。こうした測定・調整を効率化するため、TOF 自動測定 GUI を整備した。昨年度の実績として、停電後の蓄積リングへのビーム入射・蓄積までに要した時間としては、RF コンディショニングも込みで 6 時間程度となっている。

3. 縦方向ビーム不安定性改善の取り組み

NanoTerasu 蓄積リングの定格蓄積ビーム電流は 400 mA である。現在、周回ビームから RF 空洞への誘起電圧を由来とする不正共振、すなわち縦方向ビーム不安定性により、蓄積ビーム電流が制限されている。こうしたビーム不安定性を抑制するために HOM 減衰型 RF 空洞を採用しているが、RF 空洞のわずかな形状変化(温度変化)により、空洞内に一部の高次モードが残留する。

RF 空洞形状(空洞温度)の維持するために、冷却水設備から供給される(1 台の RF 空洞あたり 240 L/min)冷却水流量を調整し、空洞温度を最適化しているが、長期間の加速器運転においては、最適化条件から外れてしまうことがしばしば発生する。

こうした課題について 2 つの改善対策を進めている。一つは、各 RF 空洞の冷却水系統に 20 kW ヒータを導入し、循環する冷却水温度の精密測定結果を反映した温度フィードバックによる安定維持である。ヒータ本体の設置、温度制御システムの開発、ならびに製作は完了し、今年 9 月より試験運用の予定である。

もう一つの対策は、縦方向バンチバイバンチフィードバックシステム(縦方向 BBF)の導入である。本システムは、ビーム位置モニタよりビーム位相を検出し、不安定性起因のビーム信号に対して相殺電場を低 Q の RF 空洞で生成し、縦方向ビーム不安定性の増大を抑制する。検出回路、ならびに RF 空洞とその周辺機器は、蓄積リングにすでに導入され、今年 7 月より動作試験を実施している。詳細については本学会にて報告されている参考文献[11]を参照されたい。

4. 保守、高度化

4.1 各種機器の制御テスト環境整備

NanoTerasu 加速器を安定かつ継続的に運用するためには、構成機器の予備物品の確保が必須である。電磁石電源や真空制御装置、低電力 RF システムの構成モジュールといった機器については故障・トラブル時に速やかな交換、そして交換後の遠隔操作が健全であることが重要である。

製作した予備物品について健全動作を確認するためのテスト環境を整備している。この他にも、電子銃テストスタンド、挿入光源・電磁石の精密磁場測定環境の整備を進めており、2025 年度中の完成を目指している。

4.2 バンチ長モニタの導入

蓄積リングでは、ビーム診断のために 3 極ウィグラーをエネルギー分散部に設置し、放射される X 線をピンホールカメラで撮像してビームサイズを測定している[12]。この 3 極ウィグラーから放射される可視光の一部をストリー

クカメラに入射することで、バンチ長を測定する。今年度中にコンクリートシールドの外まで導かれる光学ダクト、ならびにストリークカメラを設置し、バンチ長の観測を予定している。周回するビームのバンチ長測定のみならず、ビーム入射直後のビーム挙動や蓄積リングの設定パラメータによるバンチ長への影響測定などを計画している。

4.3 入射ビーム電荷量の増強

現在、200 mA の蓄積ビーム電流までビーム積み上げるのに 20 分程度の時間を要している。このとき線型加速器のビーム電荷量は 0.3 nC である。蓄積ビーム電流を 400 mA とした場合でも、20 分程度で完了できるように入射ビーム電荷量の増強を計画している。線型加速器の電子ビーム電荷量について最大規定値を 0.4 nC から 0.6 nC とする原子力規制委員会への変更認可申請は完了している。

5. まとめ

NanoTerasu は高輝度放射光施設として、2024 年 4 月より利用運転を開始して以来、200 mA の蓄積ビーム電流で安定した放射光を提供している。2025 年 3 月からは共用ビームラインも本格稼働し、現在、コアリションビームラインも含めると全 10 本のビームラインが稼働している。

200 mA 以上の蓄積ビーム電流を目指す上で、縦方向ビーム不安定性が課題となっていたが、今年 7 月に実施した縦方向 BBF システムの動作試験の結果、その有用性が検証された。現在、蓄積ビーム電流を 400 mA とした運用の準備を進めている。

参考文献

- [1] S. Obara *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **28**, 020701 (2025).
- [2] 西森信行:放射光 37, 77 (2023).
- [3] 安積隆夫:放射光 37, 69 (2023).
- [4] N. Nishimori *et al.*, “Commissioning of NanoTerasu accelerator system”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 6-11.
- [5] Y. Hosaka *et al.*, “Fabrication and installation of vacuum chamber for NanoTerasu storage ring”, Proc PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 902-906.
- [6] J. Miyawaki *et al.*, Synchrotron Radiation News Vol. 38, No.3 (2025).
- [7] Y. Hosaka *et al.*, “Accelerator interlock system for 3 GeV synchrotron light source”, Proc PASJ2022, Online (Kyushu University), Oct. 2022, pp. 735-739.
- [8] H. Ego *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A 1064 (2024) 169418.
- [9] S. Takahashi *et al.*, “Status of rf acceleration system for NanoTerasu storage ring”, Proc PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 200-204.
- [10] K. Koichi *et al.*, “Beam stability evaluation of 3 GeV-linear accelerator in NanoTerasu”, Proc PASJ2024, Yanagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 57-60.
- [11] K. Ueshima *et al.*, “Status of longitudinal instability suppression at NanoTerasu”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, WEP087, this meeting.
- [12] K. Ueshima *et al.*, “Electron beam diagnostics system using 3-pole wiggler in NanoTerasu”, Proc PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 163-166.