

テーマ 3 「新たな研究開発の動き」



利用が開始された最先端放射光施設 NanoTerasu

量子科学技術研究開発機構 NanoTerasu センター
高輝度放射光研究開発部
次長 西森 信行

放射光施設 NanoTerasu は国内既存施設の 100 倍の高輝度軟 X 線供給を目指し、特にリチウム・炭素・硫黄など軽元素の挙動解明への貢献が期待される。2024 年 4 月からユーザー運転を開始し、8 月までに予定通り約 1550 時間の光供給を稼働率 99.5%の高安定度で実施した。高コヒーレント性能を実証するデータが実験ホール装置で得られ始め、今後の本格的な成果が期待される。本講演では NanoTerasu 放射光施設の概要、光性能、利用研究の状況と展望などについて述べる。

利用が開始された最先端放射光施設 NanoTerasu

量子科学技術研究開発機構 NanoTerasu センター 高輝度放射光研究開発部
西森 信行

1. はじめに

軟 X 線領域で国内既存放射光施設の 100 倍となる 10^{21} photons/sec/mm²/mrad²/0.1%b. w. の高輝度放射光を供給する NanoTerasu は、ナノの世界を鮮明に照らし可視化することを目指す。硬 X 線領域をカバーする SPring-8 との協奏による、日本の光科学プラットフォーム形成という目標に向け、2024 年 4 月から 10 本のビームライン (BL) への高輝度光供給を計画通り開始し、特定先端大型研究施設としての利用を開始した。

NanoTerasu が主にカバーする軟 X 線エネルギー領域 0.04~5 keV (キロ電子ボルト) はリチウム、炭素、酸素、硫黄等の軽元素の吸収端エネルギーに相当し、生命・材料分野において高分解能な物質観察を可能とする。また磁性・高温超伝導体・触媒などの機能をもたらす鉄、コバルト、ニッケル、銅などを含む物質の高分解能計測にも適している。NanoTerasu は生命・材料・エネルギー分野でブレークスルーをもたらし、人類社会に貢献することを目指す[1]。

NanoTerasu は「官民地域パートナーシップ」という枠組みで整備・運営が行われる、国内初の大型研究基盤施設で 2019 年度から整備が進められた (図 1) [2]。土地・建屋・初期 BL7 本の整備・運営を「民地域」の代表である「一般財団法人 光科学イノベーションセンター」(PhoSIC) が行い、加速器・初期 BL3 本の整備・運営を「官」として指名された「国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構」(QST) が行う。2024 年 4 月からは「高輝度光科学研究センター」(JASRI) が NanoTerasu の登録施設利用促進機関に登録され、QST の BL3 本の共用業務 (利用者選定・支援) 行う。3 機関で協力しながら、2024 年 4 月からのコアリション BL7 本と、2025 年 3 月からの共用 BL3 本の本格利用を進めている。



図 1： NanoTerasu 航空写真。東北大学青葉山新キャンパスに建設され、最寄りの青葉山駅までは仙台駅から地下鉄で 9 分の利便性に優れた都市型の放射光施設である。

NanoTerasu の最先端加速器整備は、世界屈指の大型放射光施設 SPring-8 で豊富な知識と経験を有する加速器メンバーと共に進めることで、QST 加速器として実現できたものである。理化学研究所とは協力協定、JASRI とは QST のクロスアポイントメントとして整備に参加頂き、放射光科学研究センター田中均副センター長と JASRI 加速器部門渡部貴宏部門長の指揮下、数十名が SPring-8 から整備に参加した。2019 年度開始の整備期間を通じて QST 加速器メンバーが SPring-8 の知識と経験を共有する第一段階、整備最終の 2023 年度から QST が単独で加速器コミッショニングを開始する第二段階、2024 年度の運用期から完全に独立という三段階で、NanoTerasu への SPring-8 加速器の技術の継承が行われた。最先端放射光施設 NanoTerasu のスムーズな立ち上げの背景には、「官民地域パートナーシップ」とは異なる枠組みでの加速器整備協力体制があり、それは日本の光科学プラットフォーム形成を目指したものである。

2. 最先端放射光施設 NanoTerasu の整備

放射光 X 線は、ほぼ光速で進む相対論的エネルギー電子を磁石の力で曲げて発生させる。NanoTerasu では、軟 X 線発生に適した 3GeV (ギガ電子ボルト) エネルギーを持つ電子ビームが周長 349m を周回する度に、最大 28 本の BL に対し放射光を提供する。周回ビームの電子数を示す最大蓄積電流 400mA と、ビームサイズ (断面積) に関連するエミッタンス 1.14nmrad により高輝度性能が決まり、高電流・低エミッタンスほど高輝度になる。施設最大の特徴は、国内初の MBA (マルチベンダクロマート) ラティス型蓄積リングである。低エミッタンスによる高輝度化には長い周長ほど有利であるが、SPring-8 の 1/4 の周長で、その半分のエミッタンスを実現した。MBA では、磁石の数を増やして電子ビームを狭い空間に閉じ込め、低エミッタンスにより高輝度化する。長さ 110m の線型加速器を含め、施設全体がコンパクトになり、性能面だけでなく建設・運用コストや安定性の面でも優れた施設である (図 2)。NanoTerasu は世界で 4 番目の MBA リングであるが、世界初の MBA3GeV 放射光施設スウェーデン MAX IV に比べて半分程度の大きさのコンパクトな施設である。

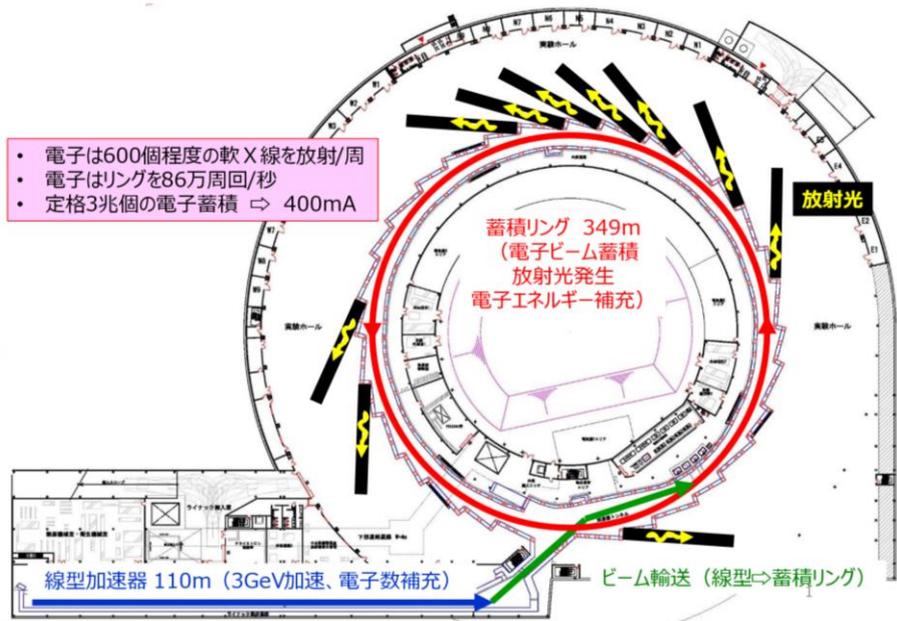


図2： NanoTerasu 構成図。線型加速器（青）からの3GeVエネルギー電子を蓄積リング（赤）に最大3兆個程度蓄積し、軌道接線上に毎周回生成する軟X線放射光でナノの世界を観測。

2021年12月から建屋への加速器設置を開始し、コロナ禍のため感染防止に注意しながら、2023年3月までに、ほぼ予定通りの設置工程を無事故無災害で進めた。そして、線型加速器からの電子ビーム生成を2023年4月17日に開始し、10日後には3GeV電子ビーム生成に成功した。6月8日には蓄積リングへ電子ビーム入射を開始し、8日後には蓄積に成功し、最初の放射光を観測した。今回の大規模な加速器機器の設計・製作・設置においては、QSTのNanoTerasu加速器グループが100社以上の業者に詳細な指示を与え、製作・設置工程を管理した。この方式は、X線自由電子レーザー施設「SACLA」の方式[3]を参考にしたものである。既述の通り、理研放射光科学研究センターとJASRIの加速器メンバーと共に実施することで初めて実現した膨大な業務であったが、全てを詳細に理解し監視することで、電子ビームの調整に影響を与えるような隠れたミスを最小限に抑えることが出来たと考えている。2023年4月からは、NanoTerasu加速器グループが、ほぼ単独で予定を上回るペースでコミッショニングを進めた。最先端大型施設の機器製作・設置をどこかに丸投げするようなやり方では、仮に工期通り出来たととしても、NanoTerasuのようなスムーズなコミッショニングは困難と思われる。

実験ホールでの最初の放射光観測であるファーストビームを2023年12月に実現後、2024年2月からは全10本のBLへの放射光供給が可能となり、実験ホールでの光軸・機器調整が開始された。同時期から、加速器運転員による1日3交代シフト制に本格的に移行し、トラブル時の対応マニュアルの整備、連絡体制の確立などの準備を進めた。更に、4月運転開始時の蓄積電流値である160mAで夜間焼き出し運転を開始した。

https://nanoterasu.jp/users/operation_status/

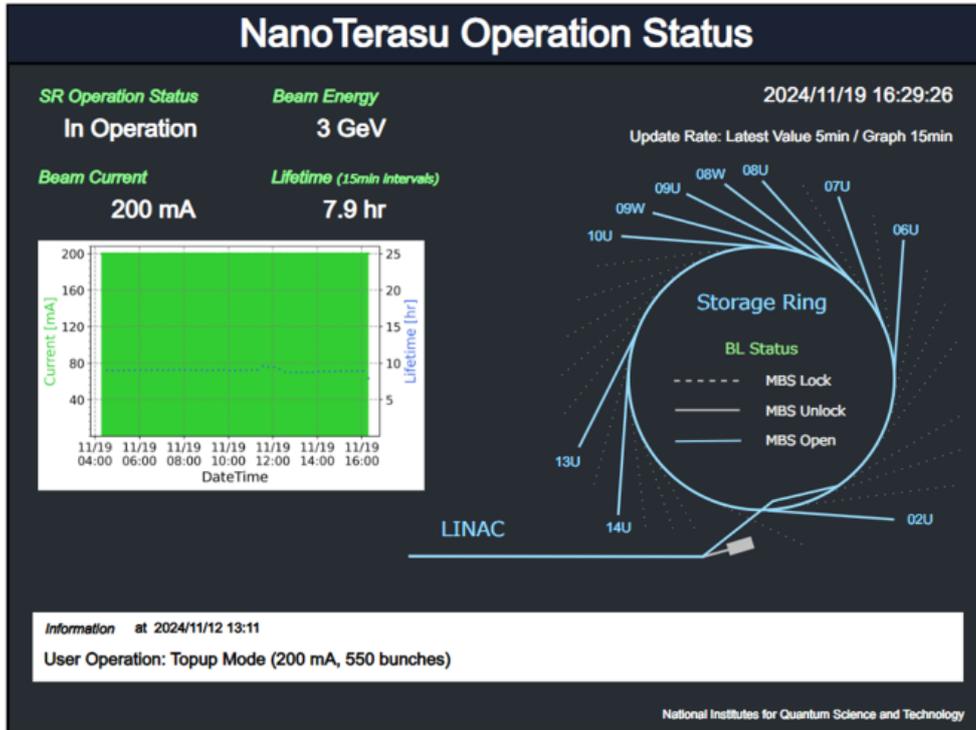


図 3： NanoTerasu 運転状況[4]。現在の蓄積電流値、電子ビームエネルギーと寿命を表示し 12 時間の電流値トレンドを左図に緑で表示。稼働中のビームライン等を右図の青線で表示。

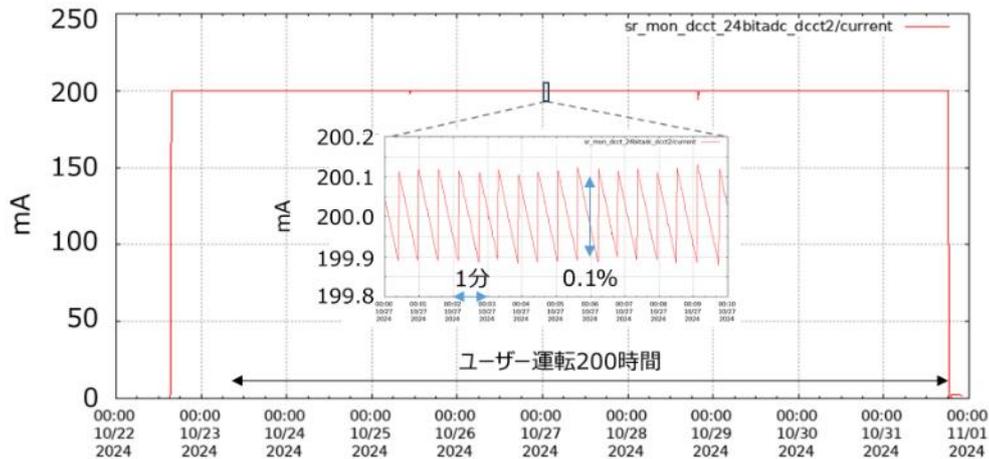


図 4： ユーザー運転中の蓄積電流（2024/10/23～10/31）。寿命で減る電流を補うため、定期的に線型加速器から電子ビームを入射するトップアップ運転で 200mA を高精度で維持。

3. ユーザー運転

2024 年 4 月 9 日 10 時から連続 296 時間の最初のユーザー運転を蓄積電流 160mA で開始し、光源稼働率 99.4%、仕様値エミッタンス 1.1nmrad で無事運転を完了した[5, 6]。NanoTerasu 最初の学術雑誌論文となる実験が BL10U で行われ、東北大学高橋幸生教授グループがテナダ

ーX線 (2~5keV) タイコグラフィーを用いて、3.5keVのX線でTaテストチャートを測定し、20nmを切る世界最高分解能を達成した[7]。テンドーX線領域で国内既存施設の約40倍の輝度に相当し、電流値が仕様値の4割であることを考慮すると、想定通りの光源性能が実験ホールでも得られていることを示すものである。

2024年7月26日からは蓄積電流を200mAに増やしてユーザー運転を続けている(図3)[8]。全10本のBL実験中の典型的な電子ビーム寿命は10時間程度である。寿命による蓄積電流減少を補うため、30秒に1回程度線型加速器から蓄積リングへ入射を行い、0.1%程度の電流値安定度を維持するトップアップ運転を行っている(図4)。BLへの放射光X線量も同様の安定度となっていることが期待され、光学素子の熱負荷による変動を抑制し、ユーザー実験に適した放射光供給を実現している。4月9日から11月30日までの計2526.5時間のユーザー運転中の故障時間は8.9時間で光源稼働率は99.6%である(図5)。故障時間(Failure Time)とは、ユーザー実験中の蓄積電子ビームが何らかの理由で廃棄されてから、加速空洞の再立上げとビーム再蓄積を完了し、各BLに実験再開の許可を与えるまでの、ユーザーが実験出来ない時間をさす。11月30日までに故障時間の原因となる事象は8回発生し、内訳は蓄積リング加速空洞内の放電が6回、サーキュレータ内の放電が2回であった。故障無しでの運転継続時間である平均故障間隔(MTBF)は11月30日の時点で315時間である。MTBFが長いほど、実験中の中断がなく光学素子の熱変形の影響を抑制できる、ユーザー実験に適した施設ということになる。ヨーロッパのESRF-EBSは2020年にMBAを導入し、0.2nmradの極低エミッタンス放射光源を実現しているが、2020年のMTBFは約50時間、改善した2023年でも約100時間である。初年度からMTBFが圧倒的に長いNanoTerasuは、ユーザー実験に極めて適した施設としての片鱗を早くも示している。ユーザー運転の合間に、加速器システムの調整・保守を進め、信頼性と安定度を徐々に高めつつあることによる。

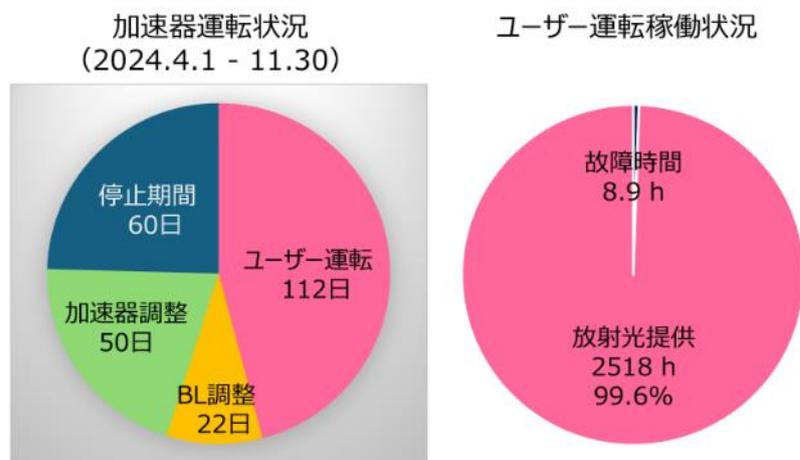


図5： 2024年度4月から11月までの加速器運転状況(左)。約半数がユーザー運転で、1/4が加速器とBL調整、残りの1/4は停止期間。ユーザー運転中の光源稼働状況(右)。高稼働率99.6%を実現。

軟X線を物質に照射し、跳ね返ってくるX線のエネルギー差から、物質の電子状態観測を行う非弾性散乱RIXSは、電場や磁場など外場下での測定が可能であり、スピントロニクス材料など様々な先端物質を計測する手段として、先端放射光源に導入されている。NanoTerasuでは、QST宮脇淳主幹研究員を始めとするメンバーがBL02UにRIXSビームラインを建設し、2024年4月からコミッショニングを開始した。8月までに従来の22meV(ミリ電子ボルト)

を大きく上回る 16.1meV の世界最高エネルギー分解能を銅の L 吸収端に相当する 930eV で実現した[9]。2D-RIXS という新技術を導入し、高効率実験を可能としている。銅酸化物超伝導体の超伝導ギャップや磁性体の低エネルギーマグノンの直接観測が期待され、高温超伝導メカニズムの解明やマグノニクスデバイス実現のための基礎研究への貢献が期待される。

4. おわりに

2024 年 4 月のユーザー運転開始後、計画通りにユーザー実験が進められているだけでなく、各 BL において世界最高ないし世界水準の軟 X 線放射光性能が得られている。今後、性能向上へ向けた整備が更に進むとともに、利用実験サイドからの成果創出が期待される。2025 年 3 月からは BL02U : RIXS、BL06U : 軟 X 線角度分解光電子分光、BL13U : 軟 X 線ナノ吸収分光の 3 本の共用利用が始まる。上半期 228 シフト (1 シフト 8 時間) の公募は 11 月上旬に既にメ切られており、今後課題審査が行われる。半年後には、下半期の課題公募が行われる予定で、興味をお持ちの方には積極的な応募を期待したい。

NanoTerasu の順調な立上りは、QST ナノテラスセンターと PhoSIC を始めとする民地域パートナーに所属するメンバーの不断の努力と共に、SPring-8 を始めとする日本の放射光コミュニティからの多大な御支援に依る所が大きい。NanoTerasu 整備・運転に関わるメンバー、及び御支援頂いた全ての関係者の皆様に深く感謝申し上げたい。NanoTerasu 加速器は仕様値を概ね達成し、国内既存施設の 50 倍程度の高輝度軟 X 線放射光を極めて安定に供給しているものの、蓄積リング加速空洞に起因するインスタビリティにより、現時点では仕様蓄積電流値 400mA を達成できていない。今後、長きに渡って QST NanoTerasu センターが日本の光科学プラットフォーム形成の一翼を担って行くためにも、まずは蓄積電流の仕様値達成へ向けて整備・開発を進めてゆきたい。

参考文献・資料

- [1] NanoTerasu <https://nanoterasu.jp/>
- [2] 内海渉、高田昌樹, 「NanoTerasu の全体状況」, 放射光 **37**, 60 (2024).
- [3] 石川哲也, 「SPring-8 と SACLA (SPring-8 大型放射光施設)」, 第 30 回放射線利用総合シンポジウム (2022).
- [4] NanoTerasu 運転状況 https://nanoterasu.jp/users/operation_status/
- [5] K. Ueshima et al., “Status of beam commissioning at NanoTerasu”, Proc. IPAC2024.
- [6] S. Obara et al., “Commissioning of a compact multibend achromat lattice: A new 3 GeV synchrotron radiation facility”, arXiv:2407.08925.
- [7] N. Ishiguro et al., Appl. Phys. Express **17**, 052006 (2024).
- [8] N. Nishimori et al., “Commissioning and user operation of NanoTerasu accelerator system”, Proc. SRI2024.
- [9] J. Miyawaki et al., “Current Status of NanoTerasu BL02U: beamline for ultrahigh resolution resonant X-ray inelastic scattering”, Proc. SRI2024.

西森 信行 (にしもり のぶゆき)

所 属 量子科学技術研究開発機構 NanoTerasu センター 高輝度放射光研究開発
部 次長 兼 加速器グループリーダー

住 所 〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1

連 絡 先 TEL/FAX : 022-785-9473、E-mail:nishimori.nobuyuki@qst.go.jp

学 職 歴 1991年 京都大学 理学部 卒業
1996年 博士 (理学) (九州大学) 「Precise experiment on polarized
neutron + deuteron scattering at 12 MeV」
1996年 日本原子力研究所 自由電子レーザーGr 研究員
2005年 日本原子力研究開発機構 ERL 光量子源 Gr 研究員
2014年 同上 ガンマ線核種分析研究 Gr 研究主幹
2016年 東北大学 多元物質科学研究所 准教授

講演者略
歴



2018年 量子科学技術研究開発機構 次世代放射光加速器 Gr 研究統括
2022年 同上 次世代放射光加速器 Gr リーダー
2024年 同上 NanoTerasu センター 高輝度放射光研究開発部 次長
現在に至る

研究・活動分野など 放射光加速器の研究開発に従事。ハイパワー2キロワット赤外自由電子レーザー、エネルギー回収リニアック放射光源用高電圧 500kV 光陰極電子銃の研究開発を経て、高輝度放射光源 NanoTerasu で大電流 400mA 蓄積に取り組んでいる。