

## 放射線利用紹介

### 3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu の紹介

量子科学技術研究開発機構 NanoTerasu センター 高橋 正光\*

#### 1 はじめに

仙台で 2024 年 4 月から運用を開始した 3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu は、国内で初めて、世界的にもまだ 4 例目でしかないマルチベンドアクロマートラティス (MBA) を実装した第四世代の放射光光源である。国内の放射光施設としては、ちょうど 10 番目の施設となる。軽元素を感度良く観察できる高輝度な軟 X 線に特長を持つこの施設は、物質の構造解析ばかりでなく、物質の機能に影響を与える電子状態の可視化が可能で、触媒化学や生命科学、磁性・スピントロニクス材料、高分子材料など、学術研究から産業利用まで、広範な分野での利用が可能である。東北大学青葉山新キャンパスの一角に位置し、仙台駅から地下鉄で 9 分という便利な立地であるとともに、産官学の研究施設が集積するリサーチコンプレックスの中核となることが期待されている。

NanoTerasu の建設は、それぞれの役割・財源分担があらかじめ決められた「官民地域パートナーシップ」という新しい枠組みのもとで、2019 年から 5 年かけて進められた。加速器の整備は国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (QST) が担い、基本建屋、用地整備は、光科学イノベーションセンター (PhoSIC) を代表機関とし、宮城県、仙台市、東北大、東経連からなる民地域パートナーが担当した。ビームラインについては、第一期として整備された 10 本のうち、国が 3 本、パートナーが 7 本を分担した。2023 年 5 月には、特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律（共用法）が一部改正されることにより、SPring-8 や J-PARC 等と同様の特定大型研究施設として NanoTerasu が位

置づけられるとともに、2024 年 4 月、高輝度光科学研究センター (JASRI) が登録施設利用促進機関に選定され、NanoTerasu の利用促進業務を実施することになった。これらを受け、NanoTerasu は、施設設置者であり国の主体である QST に、JASRI, PhoSIC を加えた 3 機関の共同で運営されている。さらに、施設運営の計画、安全施設管理、情報セキュリティ・データマネジメント、広報といった施設としての一元的な対応が求められる事項を処理するため、共通事項を審議する NanoTerasu 運営会議と、共通事項の調整や共通的な事務の執行を行う NanoTerasu 総括事務局が設置されている。

#### 2 NanoTerasu の加速器

NanoTerasu の加速器は、Fig. 1 に示すように、電子ビームの入射器である線型加速器と、電子ビームを一定エネルギーで周回させる蓄積リングから構成される。線型加速器は全長 110m、蓄積リングは周長 349m で、これらを納める建屋全体としても東西 250m、南北 170m 程度のコンパクトな設計になっている。

線型加速器の電子源には、Fig. 2(a) に示す新開発の 50 kV 透明グリッド熱カソード電子源<sup>1)</sup> が用いられている。これにより生成した高品質な電子ビームは、後段の主加速部に供給され、3 GeV まで加速される。主加速部には、Fig. 2(b) に示すような SACL A で開発された 5.7 GHz の C バンド加速管を採用することで 37.5 MV/m という大きな電場勾配を実現し、S バンド加速管が用いられている海外の同種の施設に比べて入射器の全長を 3 分の 1 近くまでコンパクト化することに成功している。線型加速器は、将来、軟 X 線 FELへの拡張が可能な設計となっている。

蓄積リングの主要パラメータを Table 1 に示す。第四世代の 4 ベンドアクロマートラティスを採用することにより、光子エネルギー 1 keV の軟 X 線領域において、コヒーレント率約 0.1 に相当する水平電子ビーム

Overview of NanoTerasu synchrotron light source  
Masamitsu TAKAHASI\* (NanoTerasu Center, National Institutes for Quantum Science and Technology),  
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-901  
TEL: 022-785-9453, E-mail: takahashi.masamitsu@qst.go.jp

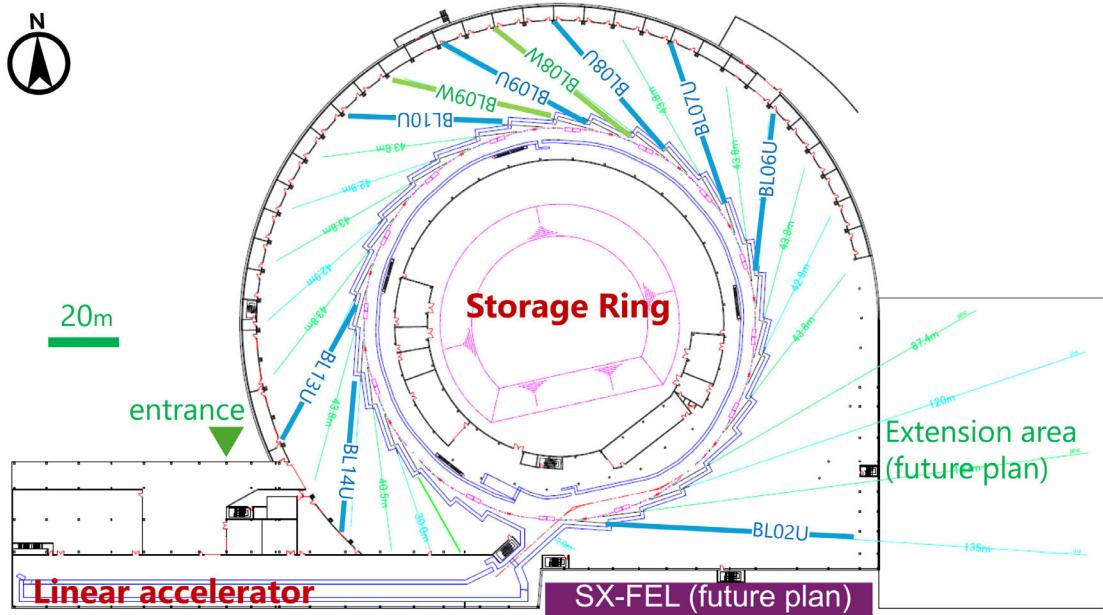


Figure 1. Plan view of NanoTerasu. The facility is as large as a baseball park, being approximately  $250 \times 170 \text{ m}^2$ .

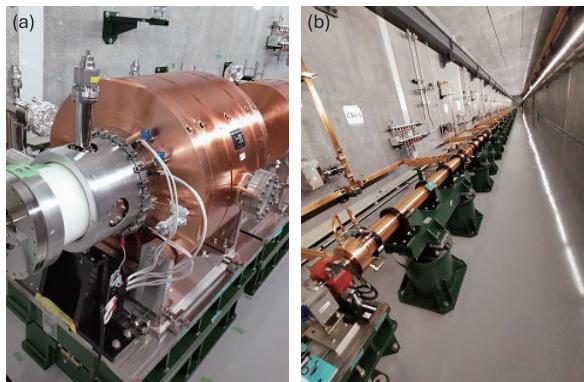


Figure 2. Linear accelerator of NanoTerasu.  
(a) Transparent-grid thermal-cathode electron gun. (b) C-band acceleration tubes.

エミッタанс  $1.14 \text{ nm rad}$  を実現している。

NanoTerasu の蓄積リングのラティスは、16 個の同一のセルから構成される。Figure 3 に示した単一のセルには、4 台の偏向電磁石、10 台の四極電磁石、10 台の六極電磁石が  $50 \mu\text{m}$  以下の精度で設置されている。周長  $349 \text{ m}$  という限られたスペースに多数のコンポーネントを配置する必要があるため、偏向電磁石は、収束

Table 1. Designed and measured beam parameters for the storage ring.

Parameter	Designed	Measured
Horizontal emittance	$1.14 \text{ nm rad}$	$1.14 \text{ nm rad}^*$
Vertical emittance	$0.01 \text{ nm rad}$	$0.02 \text{ nm rad}$
Coupling constant	1 %	2.1 %
Energy spread	0.084 %	0.097 %

\* ) Designed value

機能を組み込んだ B-Q 複合型電磁石が使われている。

各セルには、長さ  $1.6 \text{ m}$  の短直線部と、 $5.4 \text{ m}$  の長直線部が設けられており、それぞれ多極ウィグラー、アンジュレーターが設置される。NanoTerasu の多極ウィグラーはおおよそ  $2 \text{ keV}$ – $30 \text{ keV}$  の光子エネルギーの幅広いスペクトル分布を持つ光源で、同じく白色光源である SPring-8 の偏向磁石光源と比べて、 $2 \text{ keV}$ – $10 \text{ keV}$  程度の領域で 10 倍程度の光子フランクス密度を発生させる。一方、アンジュレーター光源は、軟 X 線–テンダー X 線領域の高輝度コヒーレント光を供給する。短直線部、長直線部は 16 箇所ずつ存在するが、短直

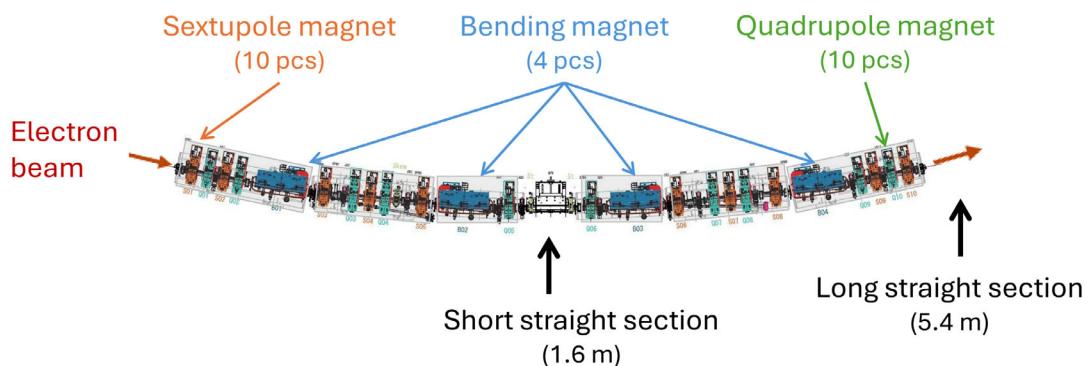


Figure 3. Single unit cell of the four-bend achromat lattice of NanoTerasu. The storage ring consists of 16 cells.

線部、長直線部各2箇所は、電子入射部や電子ビームのモニター、波加速空洞用のスペースとして使われており、ビームラインの建設に用いることはできない。したがって、NanoTerasu のビームラインの最大本数は 28 本である。

### 3 NanoTerasu のビームライン

NanoTerasu のビームラインには、利用制度の異なる 2 種類のビームラインがある。10 本のビームラインのうち 7 本は、PhoSIC によって整備・運用されるコアリションビームラインで、施設の組織的利用を予定する産業界や学術機関等が建設資金を出資し、申請から利用まで短期間で、機動的に成果専有利用できるしくみのビームラインである。他の 3 本は、QST によって整備され、共用法に基づき JASRI によって運用される共用ビームラインで、課題申請と成果公開を原則に誰もが利用可能である。これら二つの利用制度のもとで、シーズの発掘とその応用展開のサイクルを回し、NanoTerasu を中核とするイノベーションエコシステムを形成することが企図されている。

#### 3.1 コアリションビームライン

コアリションビームラインの特徴を Table 2 に示す。軟 X 線 3 本、硬 X 線 4 本からなるコアリションビームラインのラインナップは、下は 50 eV から上は 30 keV まで広いエネルギー範囲をカバーする、これにより、NanoTerasu の強みであるテンダー X 線領域を使った硫黄の情報の可視化すでに成果を上げるとともに、Fe, Co, Ni, Pd などの産業的に重要な元素を軟 X 線、テンダー X 線の双方で分析することがきるようになっている。また、二次電池の研究開発に欠かすことのできない Li の吸収端も利用できる。

NanoTerasu の最大の特長である機能の可視化のためには、BL10U, BL14U が利用可能である。BL10U における 3.5 keV のテンダー X 線を用いたタイコグラフィー計測では、当該光子エネルギー領域における 40 倍の輝度により、テストチャートを用いた評価で従来の 2.5 倍に相当する 20 nm の空間分解能を得られることが確認されるとともに、硫黄を含む高分子粒子を含む実試料を用いた分析においても、50 nm を下回る空間分解能での観察が可能になっている<sup>2)</sup>。BL07U

Table 2. Lineup of coalition beamlines.

BL No.	Purpose	Light source	Energy [keV]
07U	Soft X-ray electronic structure analysis	APPLE-II	0.05–1.0
08U	Soft X-ray <i>operando</i> spectroscopy	APPLE-II	0.18–2.0
14U	Soft X-ray imaging	twin helical	0.2–1.4
08W	Integrated analysis of chemical state and nano/local structure	Multipole wiggler	2.1–13
09U	X-ray <i>operando</i> spectroscopy	In-vacuum plane undulator	5–15
09W	X-ray multiscale structure analysis	Multipole wiggler	4–30
10U	X-ray coherent imaging	In-vacuum plane undulator	2.1–15

では、軟X線による発光分光が可能で、水の価電子を観測することによって水素結合の実体を観測し、水の構造の問題に直接的な答えを与えることができる。BL08Uでは、雰囲気X線光電子分光法によるオペランド計測が可能である。触媒の化学状態やその表面に存在する反応中間体を特定し、工業的に重要なメタノール合成反応などの反応機構を解明することが期待されている。

### 3.2 共用ビームライン

NanoTerasu が強みとする軟X線の主要な利用分野は、物質の電子状態を調べるための分光学的研究である。軟X線を励起光とする分光の手法には、測定の対象とする物質の応答により、代表的な3種類がある。NanoTerasu 共用ビームラインのラインナップは、これら3つの代表的な分光手法に対応し、物質の電子状態の包括的な研究をカバーするものとなっている。

Table 3 に共用ビームラインの一覧を示す。BL02U<sup>3)</sup>で提供される共鳴X線非弾性散乱（Resonant Inelastic X-Ray Spectroscopy, RIXS）は、軟X線を共鳴条件で物質に照射した際、散乱前後でのエネルギー変化を観測することによって、固体中の磁気励起やフォノン、分

子系の振動励起などを含む物質中の低エネルギー励起を直接的に観測する手法である。励起・プローブともに光を利用するため、試料の状態や外場の存在下による影響を受けにくく、測定の対象が幅広い特長を有する。このような強力な分光手法であることを反映して、近年、RIXS のビームラインは、世界中でエネルギー分解能競争が繰り広げられている。イギリスの DLS における  $E/\Delta E = 35000$ 、アメリカ合衆国の NSLS-II における  $E/\Delta E = 42000$  などが現時点で世界の高分解能データである。これに対し、NanoTerasu の BL02U では、立ち上げ調整中ではあるが、 $E/\Delta E = 58000$  の世界最高値を実測しており、 $E/\Delta E > 1 \times 10^5$  を目指している状況である。

BL06U は、ナノ集光角度分解光電子分光（Angle-Resolved Photo-Electron Spectroscopy, ARPES）を目的とする軟X線光電子分光ビームラインである<sup>4)</sup>。本ビームラインでは、集光軟X線ビームを用い、スピノン分解された固体のバンド構造をエネルギー分解能 1 meV (50 eV) で計測することをねらいとしている。微小ビームスポットを生かすことと、微小な試料等の測定対象物質範囲の大規模な拡大が見込まれるとともに、空間的に不均一な電子状態を持つ物質群や微小デ

Table 3. Lineup of public beamlines.

BL No.	Purpose	Light source	Energy [keV]
02U	Resonant inelastic X-ray scattering	APPLE-II	0.2–2.0
06U	Angle-resolved photoemission spectroscopy	APPLE-II	0.05–1.0
13U	Soft X-ray magnetic circular dichroism	four-segmented APPLE-II	0.18–3.0

バイスの動作時の局所的な電子状態の情報を得ることが可能となる。本ビームラインでは、30 nm 以下のナノ集光ビームと 1 μm サイズの集光ビームを利用する 2 つのブランチが整備されるが、2025 年 3 月の共用開始時点では、後者が先行して利用に供される予定である。

BL13U 軟 X 線ナノ吸収分光ビームライン<sup>5)</sup>は、X 線磁気円二色性 (XMCD)，X 線磁気線二色性 (XMLD) 等によるダイナミクス計測およびイメージング計測を目的とする。ダイナミクス計測では、高輝度光源の活用による微小領域の吸収測定を行うほか、X 線強磁性共鳴法 (XFMR) によって GHz 領域のダイナミクス測定を実現する。また、イメージング計測では、走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) による 10 nm–20 nm の空間分解能を達成する。本ビームラインの最大の特徴である分割型 APPLE-II アンジュレータの採用により、偏光制御の自由度が高く、広いエネルギー領域で円偏光が利用できる。

#### 4 NanoTerasu の立ち上げ及び運用状況

NanoTerasu の建設中は、新型コロナウイルスの世界的流行や、半導体等の部品不足など、さまざまな混乱要因があったにもかかわらず、建設および立ち上げ・調整は全体的に遅れが蓄積することなく、むしろ計画を前倒しする形で進んだ。加速器の調整運転は、2023 年 4 月 17 日に始まった。線型加速器の調整はきわめて順調に進み、運転を開始してわずか 10 日後の 4 月 27 日には、3 GeV までの電子ビーム加速に成功した。続いて、蓄積リングに初めて電子を入射した 6 月 8 日には、高周波加速空洞を動作させない状態で、電子が 300 周以上周回したことが確認された。これは、蓄積リングのコンポーネントが高い精度で設置されていたことを反映している。さらに 6 月 16 日には、高周波加速空洞を動作させて電子ビームの蓄積に成功し、モニター用に蓄積リング内に取り付けられた 3 極ウェグラーからの放射光発生が確認された。

このように加速器の調整が迅速に進んだことにより、12 月 7 日にはビームラインに初めて放射光を導入するファーストビームを達成し、予定通り 2024 年 4 月 1 日から運用を開始することができた。4 月 9 日からは 7 本のコアリションビームラインにおけるユーザー利用が始まっている。ユーザー運転時の蓄積電流値は、当初の予定であった 42 mA を 4 倍近く上回

る 160 mA でスタートし、8 月 1 日時点での 200 mA でのビーム提供が行われている。トップアップ運転により、ビーム強度の変動は 0.5 % 以下である。

Table 1 に示すように、電子ビームエミッタスをはじめ、蓄積リングの電子ビームのパラメーターは、ほぼ設計値どおりの値が実測されている。4 月から 6 月末までの 3 か月間で、46 日のユーザー運転が行われ、そのうち加速器トラブルによりビームが提供できなかつた時間を除く稼働率は、99.5 % であった。これは SPring-8 等の既存の放射光施設と比較しても遜色のないきわめて安定した運用実績である。今後も、安定運用を継続すべく、装置の維持管理体制の向上に努めていくことが重要と考えている。

すでに利用が始まっているコアリションビームラインでは、具体的な利用成果もすでに始めている<sup>2)</sup>。一方、共用ビームラインは、2025 年 3 月からの共用開始に向け、試験的共用によるビームラインや実験装置の最終調整中である。課題募集は 9 月末ないし 10 月早々の開始を予定している。課題応募を含めた利用に向けた最新の情報は、NanoTerasu のポータルサイト<sup>6)</sup>で入手可能である。

#### 〈謝 辞〉

本稿の執筆にあたりご助言・ご協力をいただきました、QST・NanoTerasu センターの西森信行・加速器グループリーダー、堀場弘司・ビームライングループリーダー、PhoSIC の高田昌樹理事長、中村哲也ビームライン部長に厚く御礼申し上げます。また、NanoTerasu の設計・製作・整備・調整を通じて、SPring-8/SACLA をはじめとする放射光施設の多くの方々、放射光コミュニティの方々には、多大なご支援、ご協力をいたしておりますことに、深く感謝の念を表します。

#### 〈参考文献〉

- 1) T. Asaka, N. Nishimori, T. Inagaki, Y. Otake, H. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys., 60 (2021) 017001.
- 2) N. Ishiguro, F. Kaneko, M. Abe, Y. Takayama, J. Yoshida, T. Hoshino, S. Takazawa, H. Uematsu, Y. Sasaki, N. Okawa, K. Takahashi, H. Takizawa, H. Kishimoto, Y. Takahashi, Appl. Phys. Exp., 17 (2024) 052006.
- 3) J. Miyawaki, K. Fujii, T. Imazono, K. Horiba, Y. Oht-

- subo, N. Inami, T. Nakatani, K. Inaba, A. Agui, H. Kimura, M. Takahasi, J. Phys.: Conf. Ser., 2380 (2022) 012030.
- 4) K. Horiba, T. Imazono, H. Iwasawa, K. Fujii, J. Miyawaki, Y. Ohtsubo, N. Inami, T. Nakatani, K. Inaba, A. Agui, H. Kimura, M. Takahasi, J. Phys.: Conf. Ser., 2380 (2022) 012034.
- 5) Y. Ohtsubo, T. Ueno, H. Iwasawa, J. Miyawaki, K. Horiba, K. Inaba, A. Agui, N. Inami, T. Nakatani, T. Imazono, K. Fujii, H. Kimura, M. Takahasi, J. Phys.: Conf. Ser., 2380 (2022) 012037.
- 6) <https://nanoterasu.jp/>.