

ナノテラスにおける 3 極ウィグラーを用いた電子ビーム診断システム ELECTRON BEAM DIAGNOSTICS SYSTEM USING 3-POLE WIGGLER IN NanoTerasu

上島考太^{#, A)}, 高野史郎^{B), C), A)}, 前坂比呂和^{C), B)}, 正木満博^{B), A)}, 藤田貴弘^{B), A)}, 出羽英紀^{B), A)},
渡部貴宏^{B), C), A)}, 深見健司^{B), C), A)}, 谷内努^{B), A)}, 清道明男^{B), A)}, 土山翼^{D)}, 及川治彦^{D)}, 伊原彰^{D)},
齋田涼太^{D)}, 西森信行^{A)}

Kota Ueshima^{#, A)}, Shiro Takano^{B), C), A)}, Hirokazu Maesaka^{C), B)}, Mitsuhiro Masaki^{B), A)}, Takahiro Fujita^{B), A)},
Hideki Dewa^{B), A)}, Takahiro Watanabe^{B), C), A)}, Kenji Fukami^{B), C), A)}, Tsutomu Taniuchi^{B), A)}, Akio Kiyomichi^{B), A)},
Tsubasa Tsuchiyama^{D)}, Haruhiko Oikawa^{D)}, Akira Ihara^{D)}, Ryota Saida^{D)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}

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

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{C)} RIKEN SPring-8 Center

^{D)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) / NAT

Abstract

Beam commissioning of the new 3-GeV synchrotron radiation facility, NanoTerasu started in 2023. The key features of the light source storage ring related to the photon performance such as brilliance and coherence are the emittance and its coupling ratio. Beam emittance diagnostics at NanoTerasu utilizes a three-pole wiggler and a hard X-ray pinhole camera. The X-ray pinhole camera measures the beam size at the three-pole wiggler to deduce the beam emittance and its coupling ratio. Visible light from the wiggler is extracted into the atmosphere, which will be employed in bunch length measurement with a streak camera in the future. In this paper, details of the wiggler and the X-ray pinhole camera and the performance of the emittance diagnostics are reported.

1. はじめに

軟 X 線領域で SPring-8 を凌駕する次世代放射光施設ナノテラスが東北大学の新青葉山キャンパスに建設され、加速器のコミッショニングが進行中である [1]。ナノテラスの優れた光源性能（輝度、コヒーレンス等）を達成するためには、光源となる蓄積リングにおいて電子ビームのエミッタンス及びカップリング比を精度良く診断してビーム制御に反映させることが重要である。

第 3 世代放射光源の発展とともに放射光を用いた非破壊的な極低エミッタンス診断技術が飛躍的に進歩した [2]。第 3 世代放射光源の先駆けの一つであり我が国を代表する放射光施設 SPring-8 においては、単色可視光を用いる 2 次元放射光干渉計 [3]、単色 X 線を用いる FZP によるイメージング [4] 及びフレネル回折法 [5] など、新規性のある極低エミッタンス診断技術が開発され、ユーザ運転中のエミッタンス変動を常時監視するモニターとしては白色硬 X 線を用いるピンホールカメラ [6] が実運用されている。

ナノテラスでは、分光素子や結像素子を用いずに高分解能を達成できる X 線ピンホールカメラを採用し、SPring-8 で実運用されている X 線ピンホールカメラ [6] のデザインを踏襲することとした。ナノテラス蓄積リングの短直線部の 1 本に電子ビームのエミッタンス診断のための放射光源として 3 極ウィグラーを設置した。3 極ウィグラーからの放射光は、広帯域の波長スペクトルを特徴とする。蓄積リング

トンネル内に設置された硬 X 線ピンホールカメラを用いてウィグラー光源点の電子ビームプロファイル測定によりエミッタンスを診断する。また、実験ホールに可視光線を取り出して、ストリークカメラを用いた電子ビームのバンチ長測定を行う計画である [7]。ナノテラスの 3 GeV 電子蓄積リングの設計値水平エミッタンスは 1.14 nm rad、カップリング比は 1 % で、3 極ウィグラー光源点での電子ビームサイズは 80 μm (水平方向)、6 μm (鉛直方向) std. となる。ビームサイズ測定の目標分解能は鉛直方向のビームサイズを測定できるように 5 μm 以下と設定し、X 線ピンホールの機器設計と製作を行なった。

ナノテラスでは 2023 年 4 月から線型加速器のコミッショニングを開始し、所定のエネルギー 3 GeV まで電子ビームを加速することを確認した。6 月から蓄積リングのコミッショニングを開始し、電子ビーム蓄積後の最初の放射光観測に成功し、また X 線ピンホールカメラによる蓄積電子ビームを撮像する事にも成功した。

本稿では、ナノテラスのビーム診断で用いる 3 極ウィグラー及び X 線ピンホールカメラの概要と、単体での性能試験並びにコミッショニングで確認された性能について報告する。

[#] ueshima.kouta@qst.go.jp

Table 1: X-ray pinhole Camera Installation

3-Pole Wiggler – pinhole (d)	5.225 m
Pinhole - Camera (D)	9.557 m
Distance magnification (D/d)	1.83
Lens magnification	2.0
Total magnification	3.66

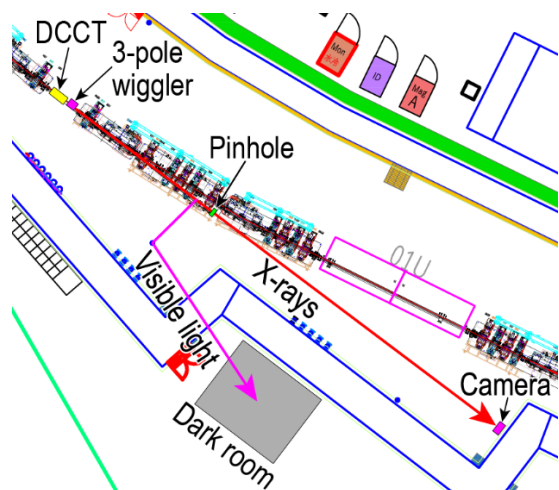


Figure 1: Layout of the beam size monitor line.

2. 電子ビーム診断システム

3 極ウィグラー、ピンホール、X 線を可視光に変えて撮像する X 線像検出部を Fig. 1 に示すように設置した。設置後、レーザートラッカーを用いて 3 極ウィグラー、ピンホール、シンチレータの設置位置間の距離を測量し、Table 1 に示す位置関係となり、距離による倍率 1.83 倍、レンズの倍率 2 倍で計 3.66 倍の倍率で蓄積電子ビームの撮像を行なった。

可視光を実験ホールに取り出すミラー、バンチ長測定するための暗室等は、まだ設置しておらず、今後設置する予定である。

3. 3 極ウィグラーの開発、設置

3.1 基本仕様

3 極ウィグラーの設計を下記の条件で行なった[8]。

- 4 章で述べる高分解能 X 線ピンホールカメラ用に、50 keV 程度の硬 X 線領域までカバーする必要があるため、ピーク磁場は 1.2 T 以上とした。
- 3 極ウィグラー両端のステアリング電磁石で軌道補正できるように積分磁場(ByL)は 1 T mm 以下 (目標 0.1 T mm 以下) とした。
- 空間制限により全長 180 mm 以内のコンパクトな設計とした。
- 磁極ギャップは 22 mm 以上とした。

- DCCT センサーヘッドへの漏れ磁場対策を行い、漏れ磁場を地磁気レベルに抑えた。

3.2 開発と設置

3 極ウィグラーは、永久磁石と電磁軟鉄製の磁極を有するハイブリッド型を採用した。永久磁石は、放射線による減磁の少ない Sm_2Co_{17} を用いて作製した。3 極ウィグラーからの漏れ磁場を低減するため、3 極ウィグラーの両端に磁気シールドを設計し、設置した。

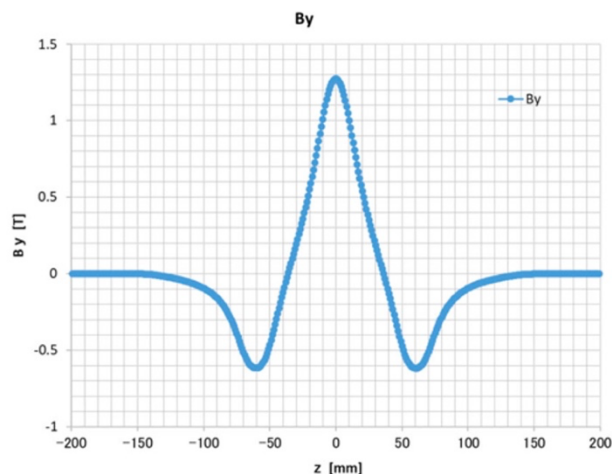


Figure 2: By distribution.

製作した 3 極ウィグラーの 3 次元ホールプローブを用いて磁場測定を行い、Fig. 2 に示す鉛直方向磁場(By)分布が得られ、ピーク磁場 1.274 T と仕様を満たす 3 極ウィグラーを製作した。また積分磁場は -200 mm から +200 mm まで積分し、目標値である 0.1 T mm 以下になるまで、両端の磁極にシムを取り付け、微調整を行なった。最終的に積分磁場(ByL)は、目標値以下の 0.056 T mm まで追い込むことができた。この残留積分磁場によるキック角は 5.6 μ rad に相当する。

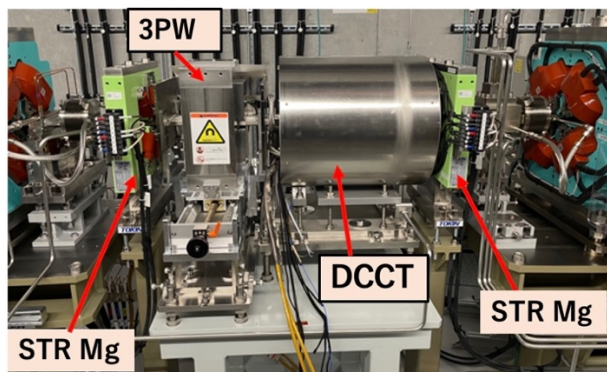


Figure 3: The short straight section for 3-pole wiggler and DCCT.

Table 2: 3-Pole Wiggler Specification

Peak magnetic field	1.274 T
Total length	178.4 mm (z)
Pole gap	22.04 mm
Leakage magnetic field	$< 5 \times 10^{-5}$ T (DCCT)
Integral magnetic field ByL	0.056 T mm

Table 2 に示す性能の 3 極ウィグラーを開発し、3 極ウィグラーを蓄積リングの短直線部に設置した (Fig. 3)。積分磁場を十分小さく抑えられたため、初めから 3 極ウィグラーをビーム軸上に設置固定し、2023 年 6 月より蓄積リングのコミッショニングを開始した。電子ビーム蓄積達成後、COD 補正を行い 3 極ウィグラー上流、下流のステアリング電磁石の補正キック角は、他のステアリング電磁石と同程度で、また最大定格の 3% 程度と小さく、3 極ウィグラーの COD への影響は、ほぼ無視できることを確認できた。

4. X 線ピンホールカメラ

4.1 X 線ピンホールカメラの構成機器

Figure 4 に、製作・設置された X 線ピンホールカメラの構成機器 (X 線取り出し窓、ピンホール、撮像部) の写真を示す。

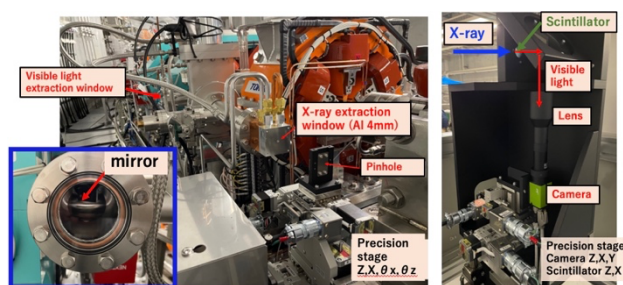


Figure 4: X-ray pinhole camera setup.

ピンホールは、厚さ 3 mm のタングステン板を組み合わせて、開口 $13.5 \mu\text{m}$ の縦スリット、横スリットを作製し、2つのスリットを重ねて開口 $13.5 \mu\text{m}$ 角のピンホールを作製した。

X 線像検出部は、厚さ 0.5 mm のシンチレーター (CdWO_4) で X 線像を可視光像に変換し、ミラーで下向きに反射させ、倍率 2.0 倍のテレセントリックレンズを取り付けた CCD カメラ (画素サイズ $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$) で撮像した。

X 線取り出し窓は厚さ 4 mm のアルミニウムで作成し、真空中から大気へ X 線を取り出した。可視光を用いて電子ビームのバンチ長測定を将来行うため、真空パイプ内に可視光を反射させるミラーを設置した。電子ビームサイズを測定する X 線に影響がないように、ミラーは光軸から 3 mm 上にずらして設置した。

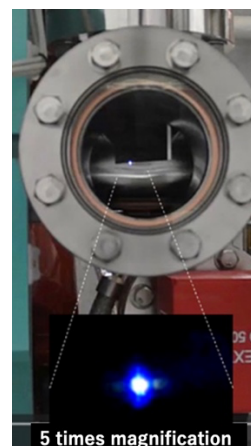


Figure 5: First light of NanoTerasu.

4.2 First Light 観測

2023 年 5 月 29 日から線型加速器で 3 GeV まで加速した電子ビームを蓄積リングまで輸送するライン (BT 部) の調整を開始した。2 週間後、蓄積リングへの入射を達成し、ステアリング電磁石の調整をすることなく、リング空洞へ RF を投入しない状態で約 300 ターンの周回に成功し、3 極ウィグラーからの可視放射光観測にも成功した (Fig. 5)。

4.3 X 線ピンホールカメラの調整

2023 年 7 月には X 線ピンホールカメラで蓄積電子ビームの撮像を達成した。精密ステージを調整して、カメラのピント調整、ピンホールの角度の調整を行った。またピンホールの位置を動かして電子ビーム像の移動量から CCD カメラのピクセルとサイズの換算校正を行い、 $0.96 \mu\text{m}/\text{pixel}$ と換算係数を求めた。

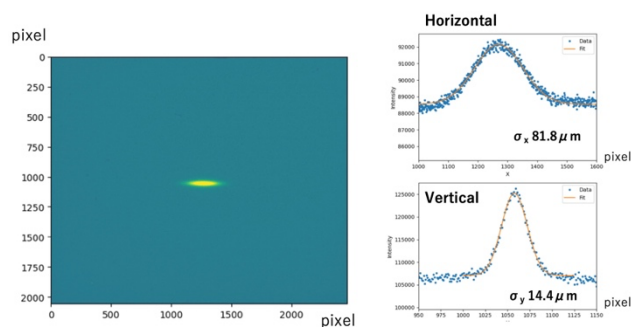


Figure 6: Layout of the beam size monitor line.

調整後、蓄積電流 2.5 mA、露光時間 10 msec で撮像を行なった電子ビーム像を Fig. 6 に示す。水平ビームサイズ $81.8 \mu\text{m}$ 、垂直ビームサイズ $14.4 \mu\text{m}$ となり、水平ビームサイズは概ね設計通りであった。垂直ビームサイズは設計値 $6 \mu\text{m}$ より大きいのが、カップリング比、オプティクス調整等、まだ行っていない影響や、真空焼き出しを行なっている段階で電子ビームの不安定性等の影響により垂直ビームサイズが設計値より大きくなっていることが考えられる。また現状の観測では、撮像の露光時間が 10 msec と

長い場合、電子ビームに数 10 Hz 程度の速い振動がある場合は、それが重畳して実効的なサイズが大きく見えている可能性もある。

4.4 X線ピンホールカメラの性能評価

X線撮像部に設置されているシンチレータの上流側に設置したスリットを用いてX線像検出部の分解能の評価を行なった(ナイフエッジ法)。X線がスリットで遮断され、スリットで切断された電子ビーム像が撮像される。電子ビーム像の切断面の微分プロファイルの1シグマ幅からX線像検出部の分解能を1.6 μm と求めた。

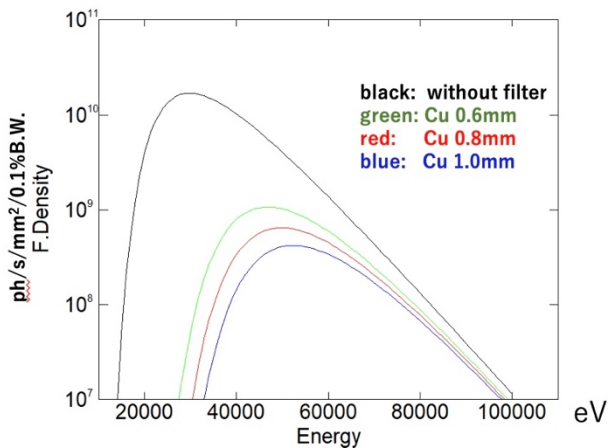


Figure 7: X-ray flux density distribution at scintillator position.

X線ピンホールカメラの分解能は回折による像の広がり支配的で、シンチレータ設置場所での球面波の回折像を数値計算し、評価した。X線取り出し窓には、下流側にフィルターを追加できる構造となっており、銅のフィルターを取り付けることにより、低エネルギーのX線をカットすることで、回折の影響が低減し、分解能が向上する。製作した3極ウィグラーの磁場分布をSPECTRA[9]にインプットし、シンチレータ設置場所でのX線フラックス計算を行なった(Fig. 7)。フィルターがない場合は、X線のピークエネルギーは30 keVであるが、厚さ0.8 mmの銅フィルターを追加することで、X線のピークエネルギーは50 keVに向上する。回折による1シグマ分解能は、0.8 mm厚の銅フィルターを追加することにより4.1 μm となる。X線撮像部の分解能を加えて、X線ピンホールカメラの分解能は4.4 μm となり、目標の5 μm 以下の分解能となっている。

銅のフィルターを追加することで、X線のフラックスは低減するが、蓄積電流130 mAで問題なく撮像することができ、通常運用において問題ないことを確認した。

5. まとめ

ナノテラス蓄積リングの電子ビームサイズ診断システムの構築を行い、光源である3極ウィグラーの

開発、設置を行なった。3極ウィグラーからの放射光を用いてナノテラス蓄積ビームのFirst Light観測に成功した。またX線ピンホールカメラの設置、調整を行い、蓄積電子ビームの撮像を達成し、X線ピンホールカメラの分解能評価も行なった。厚さ0.8 mmの銅フィルターを取り付けることで、低エネルギーのX線をカットし、回折の影響を低減させることで、分解能5 μm 以下を達成できた。

X線ピンホールカメラにより、蓄積電子ビームを常時モニター可能となった。今後オプティクス調整、Bunch by Bunch Feedback(BBF)の調整等に活用し、蓄積リングの真空焼き出しを進め、設計値のビームサイズになるようにビーム調整を進める。

謝辞

3極ウィグラーの製作、磁場測定、積分磁場調整において、信越化学工業(株)の方々大変お世話になりました。X線ピンホールカメラの設計、製作において、神津精機(株)の方々大変お世話になりました。心より感謝致します。

短直線部真空チェンバー、光取り出しラインの設計、製作、設置にご協力頂きましたSPring-8の真空チームの方々、(株)トヤマの方々、日立造船(株)の方々、設置後のアライメントを行なって頂きましたアライメントチームの方々、ナノテラス加速器の構想、設計、開発、設置、コミショニングに携われた皆様に心より感謝致します。

参考文献

- [1] N. Nishimori *et al.*, “NanoTerasu 加速器コミショニング”, Proc. of the 20th PASJ, Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, this meeting.
- [2] S. Takano, “Beam Diagnostics with synchrotron radiation in light sources”, Proceedings of the IPAC 2010, Kyoto Japan, May 23-28, 2010, pp. 1536-1538.
- [3] M. Masaki and S. Takano, J. Synch. Rad. 10 (2003) p.295.
- [4] S. Takano *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A556 (2006) p.357.
- [5] M. Masaki *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 18 (2015) 042802.
- [6] S. Takano *et al.*, “Recent progress in X-ray emittance diagnostics at SPring-8”, Proceedings of the IBIC 2015, Melbourne, Australia, Sep. 13-17, 2015, pp. 283-287.
- [7] H. Maesaka *et al.*, “Design of the Beam Diagnostic System for the New 3 GeV Light Source in Japan”, Proceedings of the IBIC 2020, Santos, Brazil, Sep. 14-18, 2020, pp. 174-178.
- [8] K. Ueshima *et al.*, “3GeV放射光蓄積リング電子ビームサイズモニター用3極ウィグラーの開発”, Proc. of PASJ2021 pp.30-33 MOOB01 (2021).
- [9] T. Tanaka *et al.*, “SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code”, J. Synchrotron Rad. 8 (2001) pp.1221-1228.