

3 GeV 次世代放射光施設ナノテラスの 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

CONSTRUCTION STATUS OF THE STORAGE RING AND INJECTION MAGNETS AT THE 3 GeV NEXT-GENERATION SYNCHROTRON RADIATION FACILITY NanoTerasu

小原脩平^{*,A)}, 西森信行^{A)}, 安積 隆夫^{A)}, 上島考太^{A)}, 保坂勇志^{A)},
青木駿亮^{A,B)}, 伊原彰^{A,B)}, 岩下大器^{A,B)}, 小林創^{A,B)}, 小林秀樹^{A,B)},
渡部貴宏^{C,D,A)}, 近藤力^{C,D,A)}, 高野史郎^{C,D,A)}, 深見健司^{C,D,A)}, 田村和宏^{C,D,A)},
大石真也^{C,D,A)}, 小路正純^{C,D,A)}, 青木毅^{C,A)}, 松原伸一^{C,A)}, 柳田謙一^{C,A)},
川瀬守弘^{C,A)}, 谷内努^{C,A)}, 山口博史^{C,A)}, 増田剛正^{C,A)}, 上田庸資^{C,A)},
稲垣隆宏^{D,C)}, 安積則義^{C,D)}, 松井佐久夫^{D)}, 平岩聡彦^{D)},
井上忍^{E)}, 住友博史^{E)}, 森谷佳津貴^{E)}, 横町和俊^{E)}, 山本龍^{E)}, 酒井康平^{E)}, 吉岡正倫^{E)}
Shuhei Obara^{*,A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Takao Asaka^{A)}, Kota Ueshima^{A)}, Yuji Hosaka^{A)},
Toshitaka Aoki^{A,B)}, Akira Ihara^{A,B)}, Taiki Iwashita^{A,B)}, Hajime Kobayashi^{A,B)}, Hideki Kobayashi^{A,B)},
Takahiro Watanabe^{C,D,A)}, Chikara Kondo^{C,D,A)}, Shiro Takano^{C,D,A)}, Kenji Fukami^{C,D,A)}, Kazuhiro Tamura^{C,D,A)},
Masaya Oishi^{C,D,A)}, Masazumi Shoji^{C,D,A)}, Tsuyoshi Aoki^{C,A)}, Shinichi Matsubara^{C,A)}, Kenichi Yamagida^{C,A)},
Morihiro Kawase^{C,A)}, Tsutomu Taniuchi^{C,A)}, Hiroshi Yamaguchi^{C,A)}, Takemasa Masuda^{C,A)}, Yosuke Ueda^{C,A)},
Takahiro Inagaki^{D,C)}, Noriyoshi Adumi^{C,D)}, Sakuo Matsui^{D)}, Toshihiko Hiraiwa^{D)},
Shinobu Inoue^{E)}, Hiroshi Sumitomo^{E)}, Kazuki Moriya^{E)},
Kazutoshi Yokomachi^{E)}, Ryo Yamamoto^{E)}, Kohei Sakai^{E)}, Masamichi Yoshioka^{E)}

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

^{B)} NAT Corporation

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

^{D)} RIKEN SPring-8 Center

^{E)} SPring-8 Service Co., Ltd.

Abstract

A 3 GeV synchrotron radiation facility “NanoTerasu” is now being commissioned at Sendai, Japan. All magnets were successfully installed in the storage ring with a good alignment and are operated well as designed. We optimized the peak current and the timing of the pulse magnets of the ring injection section, based on the beam trajectory change. Fine-tuning of the pulse height and shape will soon be performed with beam response.

1. はじめに

3 GeV 次世代放射光施設 (愛称; ナノテラス (NanoTerasu)) は、宮城県仙台市にある東北大学青葉山新キャンパス内に建設中の軟 X 線を得意とした放射光施設であり、現在ビーム調整が進行中である [1,2]。

本施設では線型加速器で電子ビームを 3 GeV まで加速したのち、ビーム輸送ラインを通り、入射部にて蓄積リングへと入射させ 400 mA まで蓄積する。周長 349 m の蓄積リングは 4-Bend-Acromat のラティスになっており、4 台の偏向電磁石と 10 台ずつの四極電磁石、六極電磁石で構成されたセルが全体で 16 セルある。蓄積リングへの入射部は 4 台のキッカー電磁石、2 台の DC セプタム電磁石及び 1 台のパルスセプタム電磁石にて構成される。詳細についてはデザインレポート [3] を参照されたい。

本稿では蓄積リング電磁石および入射部電磁石の設置

状況、試運転状況について報告する。

2. 蓄積リング電磁石

2.1 設置作業

蓄積リング電磁石は 1 セルあたり A、B、C、D、E、F の 6 架台上に設置される。各架台の上の電磁石は、NanoTerasu 建屋実験ホールにて Vibrating-Wire-Method (VWM) [4] を用いて磁場中心が揃うよう固定された。その後架台ごと蓄積リングトンネル内に搬入し、レーザートラッカーを用いて、トンネル内壁および床に設置された基準点と比較することで理想的な場所に配置した。Figure 1 にトンネル内設置後の写真を示す。2022 年初春から約 1 年かけて VWM による架台アライメントおよびトンネル内搬入しての架台間アライメントが行われた。すべてのアライメント作業が完了したのち、リング一周分をレーザートラッカーにて再測量することで正しい位置に磁石が配置されているかを確認したところ、Fig. 2 のようになった。変位が最大で $\pm 100 \mu\text{m}$ 程度あるが、一方で各架台は十分滑らかに連続的に接続さ

* obara.shuhei@qst.go.jp

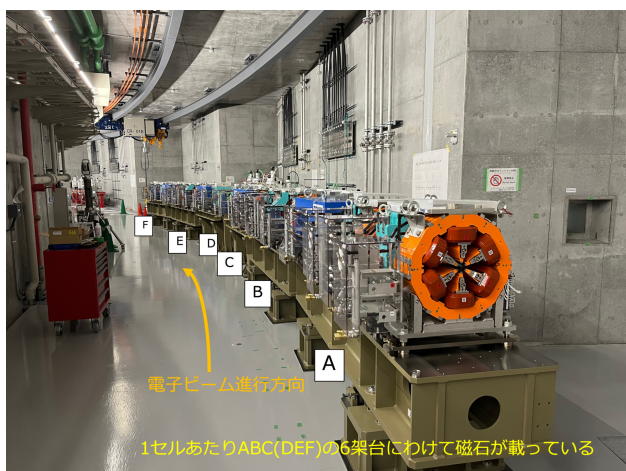


Figure 1: One-cell magnets in storage ring tunnel with 6 girders.

れており、架台間の相対偏差は 1σ で $34\ \mu\text{m}$ (水平方向)、 $26\ \mu\text{m}$ (垂直方向) となっていた。サインカーブのような形状をしているように見えるが、レーザートラッカーによる測量中に建屋の地盤変動を由来とする基準点の変動があったためと考えている。シミュレーションベースでは電子ビームには大きな影響を与えないことがわかっており、また現在進行中のビームコミッショニングにおいても影響を確認できていないことから、十分な精度で設置できたことが言える。ただし上述の通り、建設中において基準点の移動がみられていることから、今後もこのままで大丈夫である保証はない。加速器運転停止期間にてレーザートラッカーによる再測量を今後繰り返し実施し、建屋及び地盤の変形について追跡調査を行う予定である。

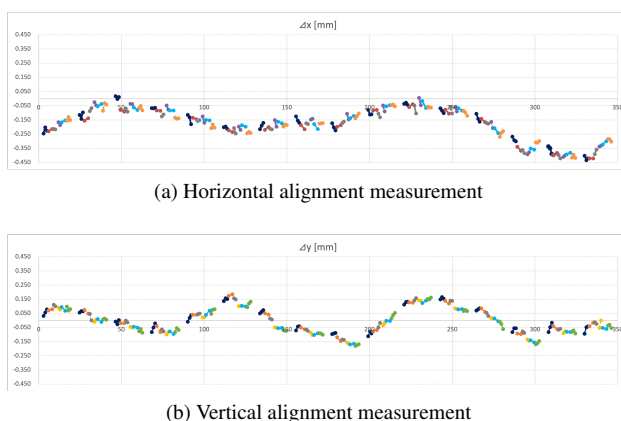


Figure 2: Survey results of the magnet position of the storage ring. The y-axis is a displacement from the ideal positions and the x-axis indicates the circumferential position. Colored points represent groups of the magnet girder.

2.2 通電試験

磁石および電源の設置、ケーブルの敷設後に通電試験を行った。電磁石のファミリー電源は工藤電機(株)が、

ステアリング電源および補助電源は、それぞれニチコン(株)と工藤電機(株)が当初はそれぞれ別個に通電試験を行い、特定周波数ノイズが残らないようフィードバック制御パラメータの調整を行った。しかしながらファミリー電源と補助電源間でのカップルにより発振が生じたため、最終的には同時に全て通電した状態で調整を行った。

詳細は別紙 [5] に譲るが、NanoTerasu の磁石メイン電源は種類ごとに直列になっており、例えば偏向磁石 64 台 (4 台/1 セル \times 16 セル) の電流は U650 電源 1 台が供給する。工場試験ではこれを再現できる負荷がなく条件を限定しての試験を行っていたため、現地にて初めて長時間の通電試験を行った。トランスコアの温度上昇が大きすぎると発煙発火の心配があったが、通電開始後約 24 時間で温度が 96 度で安定することがわかった。また参考までに偏向磁石電源 U650 の出力電流について外部 DCCT にてモニタした値を Fig. 3 に表す。生データのばらつきには読み出し系の測定不定性を含んでいる。移動平均を取ったオレンジ色のプロットを見ると電流値は 12.5 ppm 程度で安定となっており、電子ビームへの影響は十分小さい。

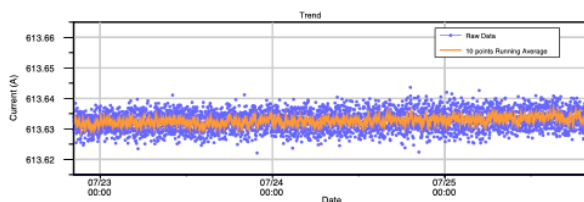


Figure 3: Trend of output current from U650 power supply. Blue dots are raw read data. Orange dots represent the moving average of blue ones.

3. 入射部磁石

3.1 設置作業

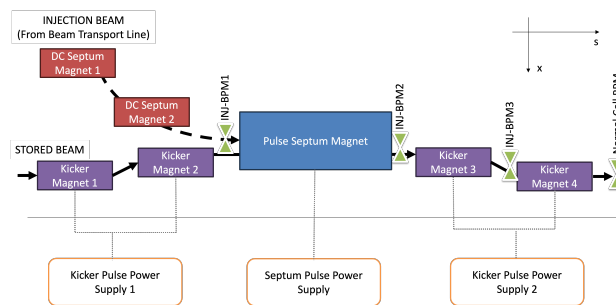


Figure 4: A schematic view of the ring injection area. The Frenet - Serret frame is shown as the s- and x-axes; the stored electron beam goes from the left side to the right side (s-direction); the injection beam comes from the upper left; the inner side and outside of the ring are the upper and lower of the figure, respectively.

リング入射部機器配置を Fig. 4 に表す。機器構成の詳細についてはデザインレポート [3] を参照されたい。入射部には鋼板とカプトンの重ね合わせにより作成された

キッカー磁石 [6] が 4 台配置されている。重ね合わせた部分は左右からボルトで押さえ込んでいるだけであり、設置作業時に鋼板部分に触れると性能が変化してしまう。さらに DC セプトラム [7]、真空封止型パルスセプトラム磁石、キッカー磁石、BPM の密集する箇所ではクリアランスがほとんどなく、取り付けの順番を間違えると取り外しが不可能になるため、設置は非常に慎重に行われた。

3.2 通電試験

NanoTerasu 入射部では、4 台のキッカー磁石を用いてリング内周方向に 7.5 mm のバンパ軌道をつくり、電子ビームを入射する。上流側 2 台のキッカー磁石、下流側 2 台のキッカー磁石をそれぞれ 1 台ずつ (2 出力ずつ) のパルス電源 [8] が担い、2 台のパルス電源の出力波形を合わせることで、蓄積ビームを揺らさない透明入射ができる。事前の試験 [6, 8] では 1% 程度まで出力波形を合わせることができているものの、現地試験を行うと数 % 程度の違いが確認された。試験時からパルス電源が量産化されたことと、現地でのケーブル配線による影響と考えている。パルス電源にはインダクタンスを調整する機構が付随しているため、今後電子ビームの様子を確認しながら出力波形を微調整していく予定である。

3.3 タイミング調整

パルスセプトラム電磁石およびキッカー磁石のパルス出力タイミングをビーム応答を見つつ調整を行った。線型加速器で電子銃から電子が放出され、蓄積リング入射部までくる Time-Of-Flight およびパルス電源の充放電時間からおおまかにタイミングを調整したのち、パルスセプトラム磁石電源のパルス波形放電タイミングを数 μs の範囲で変化させた。出力されるパルス波形は半正弦波になっており、電子ビームとタイミングが最も合致した場合に大きく蹴られ、ズレていた場合はその分キック角が小さくなる。すなわちパルスセプトラム直下の BPM(INJ-BPM2) で電子ビームの水平 (X 座標) 位置をみて半正弦波と同等の形を確認し、そのピークとなるタイミングにすれば良い。実際、Fig. 5 の通り半正弦波が得られた。横軸は 6 μs 程度の時間幅に相当する。ここでパルスセプトラム磁石へは約 10 μs 幅の半正弦波を出力しているが、出力波形全てに対応する BPM の値は得られていない。タイミングが大きく外れている部分についてはキック角が不足し、真空チェンバー内壁に電子ビームが衝突するためである。図中の左右の正弦波形状から外れている部分がこれに相当する。タイミングを最適化するため、Fig. 5 の底付近部分を再度細かくスキャンし調整した。

またキッカー磁石についても同様にタイミングをずらしながら BPM(INJ-BPM3) の水平 (X 座標) 位置を確認することで、電子ビームとのタイミングを最適化した。キック方向が異なるため Fig. 6 は上に凸の半正弦波になっていることに注意されたい。横軸は 3 μs 程度の時間幅に相当する。Fitting は簡単のため Gaussian で近似したものであり、半正弦波を再現はしていない。キッカー磁石へは 3 μs 幅の正弦波を出力しているが、その時間幅分全てを取得できている。デザイン上はキッカー磁石 3 と 4 とで成すバンパ軌道は 7.5 mm であるが、測定に用

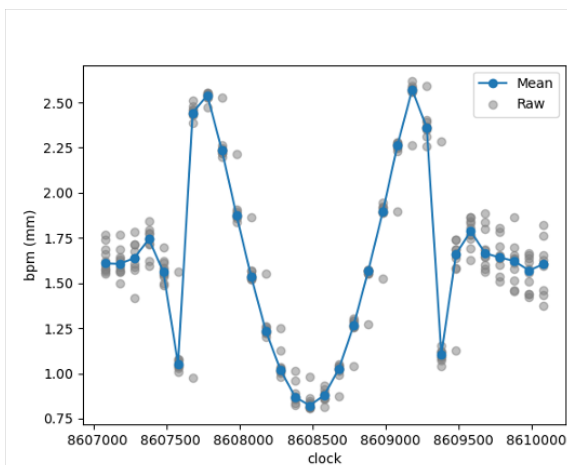


Figure 5: Pulse septum magnet timing optimization. The horizontal axis is a parameter that is proportional to the beam timing. The range corresponds to approximately 6 μs . The vertical axis is the horizontal beam position measured by a BPM downstream of the pulse septum magnet (INJ-BPM2) Gray dots are raw data and blue ones are the mean values of them.

いた BPM(INJ-BPM3) の設置位置がバンパ軌道の途中にあるため、設計キック角から予想される BPM 位置での変位量は約 3.5 mm のため、consistent な測定結果を得られたことが分かる。

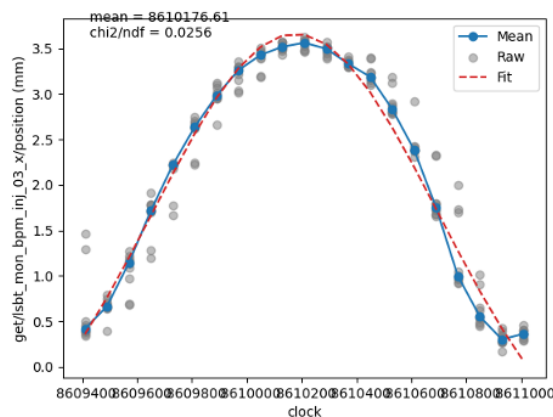


Figure 6: Kicker magnet timing optimization. The horizontal axis is a parameter that is proportional to the beam timing. The range corresponds to approximately 3 μs . The vertical axis is the measurement value of BPM. Gray dots are raw data and blue ones are the mean values of them. Note; the red dashed fitting curve is based on a simple Gaussian, not half sine curve, for easy to find a peak.

3.4 入射ビーム軌道調整

NanoTerasu での入射方式は Off-Axis 入射であるが、入射ビームをできるだけ蓄積ビームに近づけて入射を行うため、まずはじめに DC セプトラムの出力を変えながら

パルスセプトラム直上流の BPM(INJ-BPM1) をモニタし、できるだけ入射ビームをパルスセプトラム内壁 (蓄積ビーム側) に近づけた。次にキッカー磁石を OFF した状態でパルスセプトラム磁石への出力電圧を調整し、パルスセプトラム磁石直下流にある 2 つの BPM(INJ-BPM2, 3) の水平方向 (X 方向) 位置を確認した。ここで直線上にある 2 台の BPM の X 方向位置が重なるように調整することで、入射ビームが蓄積ビームに対して並行軌道を描いていることが担保できた。最後にキッカー磁石を駆動し、出力電圧を調整した。RF 空洞のパワーが入っていない状態で通常セル入口の BPM で電子ビームをモニタすることで、入射ビーム軌道がどれだけの高さのバンパ軌道を作れているかが確認できる。または入射タイミングに合わせて BPM の Single-Pass での測定を行うことで、キッカー磁石によるバンパ軌道を確認することができる。上述の一連の流れによって入射ビームの軌道を調整することができた。

4. まとめと今後

次世代放射光施設 NanoTerasu の電磁石の設置が問題なく完了し、試運転も滞りなく進んでいる。今後は電子ビームの応答を確認しながら入射部キッカー電磁石電源の波高調整を行い、蓄積ビームを揺らさない透明入射ができるよう出力波形の一致を目指す。

電磁石の設置は建屋または地盤の変形による影響を強く受けるため、今後もレーザートラッカーによる電磁石および建屋壁面と地面と基準点の測量を継続し、経時変化の様子を注視していきたい。

謝辞

順調な電磁石の試運転までにさまざまな方の多大なご尽力をいただきました。電磁石の製作およびアライメント作業は (株) トーキンの方々、電磁石電源の製作・設置・および現地動作試験については工藤電機 (株) およびニチコン (株) のの方々、蓄積リング入射部の電磁石等設置作業

は日立造船 (株) および (株) クリハラントの方々、パルス電源の製作・設置・および現地動作試験については日本高周波 (株) のの方々にご協力いただきました。また電磁石および電源の設置から試験に至るまで、現地では NAT 浅野博之氏、西川雅章氏に大変お世話になりました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 西森信行 *et al.*, “NanoTerasu 加速器コミッションング”, 第 20 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 船橋, 日本, August–September, 2023, TUOP02, this meeting.
- [2] 安積隆夫 *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ング状況”, 第 20 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 船橋, 日本, August–September, 2023, WEOA7, this meeting.
- [3] 量子科学技術研究開発機構 次世代放射光整備開発センター, “3 GeV 次世代放射光施設 加速器デザインレポート”, September, 2020.
- [4] K. Fukami *et al.*, “Performance verification of a precise vibrating-wire magnet alignment technique for next-generation light sources”, *Rev. Sci. Instrum.* vol. 90, p. 054703, 2019, doi:10.1063/1.5086505
- [5] 近藤力 *et al.*, “デジタル制御による電磁石電源の開発および次世代放射光施設への展開”, 第 20 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 船橋, 日本, August–September, 2023, THOB14, this meeting.
- [6] K. Fukami *et al.*, “Iron lamination and interlaminar insulation for high-frequency pulsed magnets”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 93, p. 023301, 2022. doi:10.1063/5.0074226
- [7] 山口博史 *et al.*, “次世代放射光源のための DC セプトラム電磁石開発”, 第 18 回日本加速器学会年会プロシーディングス, online, August, 2021, p. 34.
- [8] T. Inagaki *et al.*, “Development of a Solid-State Pulse Generator Driving Kicker Magnets for a Novel Injection System of a Low Emittance Storage Ring”, *Proceedings in 9th International Particle Accelerator Conference*, Vancouver, BC, Canada, April–May, 2018, pp. 1804–1807. doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-WEYGBF4