

ナノテラスにおける縦方向ビーム不安定性抑制の状況

STATUS OF LONGITUDINAL INSTABILITY SUPPRESSION AT NanoTerasu

上島考太^{#, A)}, 齋田涼太^{B)}, 高橋隼也^{B)}, 土山翼^{B)}, 森谷佳津貴^{B)}, 吉岡里紗^{B)}, 安居院あかね^{A)},
安積隆夫^{A)}, 保坂勇志^{A)}, 稲葉健斗^{A)}, 菅晃一^{A)}, 西森信行^{A)}, 小原脩平^{A)}, 佐治超爾^{A)}

Kota Ueshima^{#, A)}, Ryota Saida^{B)}, Shunya Takahashi^{B)}, Tsubasa Tsuchiyama^{B)}, Kazuki Moriya^{B)},
Risa Yoshioka^{B)}, Akane Agui^{A)}, Takao Asaka^{A)}, Yuji Hosaka^{A)}, Kento Inaba^{A)}, Koichi Kan^{A)},
Nobuyuki Nishimori^{A)}, Shuhei Obara^{A)}, Choji Saji^{A)}

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

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

Abstract

The stored beam current at NanoTerasu was limited by the longitudinal instability. To suppress the instability, we developed longitudinal bunch-by-bunch feedback (BBF) kicker and the BBF system. The commissioning of longitudinal BBF system was started in July 2025. We achieved the longitudinal instability suppression. The stored beam current reached to 400 mA with stable top-up beam injection. The performance of the developed longitudinal BBF system will be reported.

1. はじめに

国内初となる Multi-Bend Achromat (MBA) ラティスを採用したコンパクトな 3 GeV 光源ナノテラスは 2023 年 6 月から蓄積リングのコミショニングを開始した[1]。2023 年 8 月蓄積電流が 150 mA を超えると縦方向のビーム不安定性が発生し、蓄積電流を制限した。蓄積リング加速空胴の温度調整等を行い、2024 年 7 月より蓄積電流 200 mA でのユーザー利用運転を行っている。

蓄積電流を増強するために、2024 年 1 月から縦方向ビーム不安定性を抑制するためのピルボックス型キッカー空胴の検討、設計を開始した。2024 年 11 月に最終設計が完了し、2025 年 5 月にナノテラス蓄積リングに導入した。バンチ毎にフィードバックキックを与えて、縦方向の不安定性抑制を抑制するシステムを構築し、コミショニングを行った。

本稿では、ナノテラス蓄積リングにおける縦方向不安定性抑制の状況について報告する。

2. 縦方向のビーム不安定性

ナノテラスの蓄積リングの加速空胴は、TM020 モードで蓄積電子ビームを加速するコンパクトな新型加速空胴を採用している[2]。軸対称の TM020 モードの磁場の節にスロットを設け、そのスロット内にフェライト製の高周波吸収体を設置し、バンチ結合型ビーム不安定性を引き起こす高次高調波(HOM : Higher Order Mode)成分を減衰させる構造となっている。

蓄積リングのコミショニングが進み、蓄積電流が 150 mA を超えると 1.9 GHz 成分の HOM が成長し、縦方向のビーム不安定性が発生した。不安定性によるスペクトル強度の時間推移と放射減衰を考慮して、1.9 GHz 不安定性の growth rate は 5.8 msec 程度であった。図1に縦方向の不安定性が発生した際の空胴のピックアップ

から観測された 1.9 GHz の HOM のスペクトルとビーム位置モニタ(BPM)の周波数スペクトルを示す。縦方向の不安定性が発生した際に、BPM 信号のスペクトルでは 509 MHz から約 134 MHz ずれたサイドバンドの周波数成分が出現し、不安定性の結合モードは 156 であることが判明した。



Figure 1: Spectrum of the RF cavity (top) and the BPM signal (bottom) at the time of longitudinal instability.

ナノテラス蓄積リングの電子ビームプロファイルモニターは X 線ピンホールカメラ[3]を採用しており、エネルギー分散部に設置している。縦方向の不安定性によりエネルギー広がりが増大すると電子ビームプロファイルの水平方向のビームサイズが増大し、縦方向の不安定性を常時モニターしている(図2)。またバンチ電流を測定している高速デジタル ADQ7 を用いて、バンチ位相もモニターしており、縦方向不安定性の蓄積電流に応じてバンチ位相が大きく広がり、バンチ位相の広がりについても常時モニターしている。

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

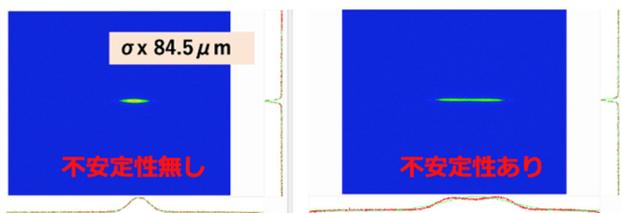


Figure 2: The stored beam profile without longitudinal instability (left) and the beam profile at the time of longitudinal instability (right).

1.9 GHz の HOM の成長を抑えるため、加速空洞の冷却水調整を行い、現在は 200 mA でのユーザー利用運転を行っているが、200 mA 以上での長期間安定に運転できるパラメータは、まだ見つかっていないが、不安定性の growth rate は 6 msec 以上と放射減衰時間に近く 2023 年時と比べて随分遅くなっている。

縦方向ビーム不安定性を抑制するため、縦方向の Bunch-by-Bunch Feedback system (BBF) の導入検討を開始し、設計を進めた。

3. 縦方向ビーム不安定性抑制システム

縦方向 BBF システムは、各バンチ、1 ターン毎にビームの到達時間を検出し、バンチ毎に毎ターン、フィードバックキックを与えて縦方向の不安定性を抑制するシステムである。

3.1 全体像

図 3 に縦方向 BBF システムの全体像を示す。

BPM でビーム進行方向の不安定性を検出し、フロントエンド回路 (Dimtel 社製 FBE-509LT) を通して iGp12 に入力し、フィードバックキック量を高速計算し、ビーム進行方向の不安定性を抑える DAC 出力をバックエンド回路に入力し、バックエンド回路出力を R&K 社製の半導体 AMP (500 W) でキック RF 信号を増幅させ、4 分配器を通して縦 BBF キッカー空洞に入力する。RF 入力側にはサーキュレータを設けて空洞からの反射 RF は減衰器を通して減衰させ終端する。縦 BBF キッカー空洞の出力側は減衰器を通してオシロスコープでモニターする。初期段階では、半導体 AMP1 台を使用しているが、さらに 3 台の半導体 AMP (500 W) を導入できるシステムを構築した。

3.2 縦方向不安定性抑制キッカー空洞の開発

ビーム進行方向にフィードバックキックを与えるキッカーとして、縦方向 BBF で広く使用されている [4-8] ウェーブガイド付きピルボックス型空洞 (縦 BBF キッカー空洞) をベースに設計を行った。駆動周波数は $(3+1/4)f_{RF}$ で 1.65 GHz とし、1 dB バンド幅は 255 MHz 以上、設置スペースの制限からフランジ面間 400 mm 以内、バンチ毎にキックを与えるため $Q_L \sim 10$ 以下という条件で設計を行った。ナノテラス蓄積リングの f_{RF} は、508.76 MHz である。

4 入力、4 出力のポートを設け、バックキャビティ間の面間 133 mm と非常にコンパクトで、かつ十分なキックを与えるため各入力ポートに 500 W、合計 2 kW のパワー

を導入できる空洞を設計した (図 4)。BBF 空洞溶接組み上げ後の S パラメータは、ほぼ設計値と近い値となっており、S11 から求めた Q_L 値は 3 程度で十分要求仕様を満たす縦 BBF キッカー空洞の製作に成功した (表 1)。製作後、ビーズ測定を実施し、シャントインピーダンスは 700 Ω 程度と見積もれた。

Table 1: LBBF Kicker Cavity RF Characteristics

	設計値	測定値
中心周波数	1.652 GHz	1.609 GHz
1dB バンド幅	317 MHz	271 MHz
負荷 Q 値	3.4	3.0

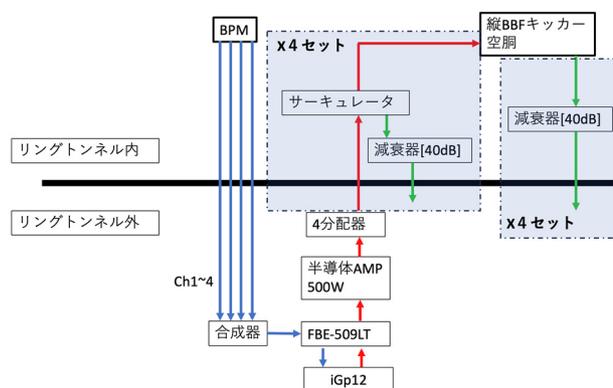


Figure 3: Layout of the longitudinal BBF system.

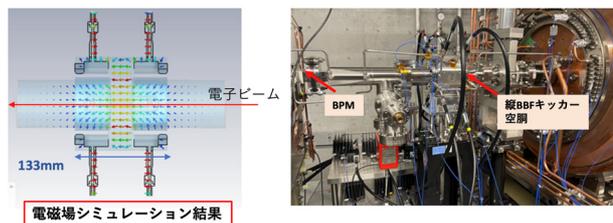


Figure 4: The RF simulation of the BBF kicker cavity (left). The installed BBF kicker cavity and the BPM to monitor the longitudinal instability (right).

3.3 縦 BBF システムのコミッショニング

2025 年 5 月に開発した縦 BBF キッカー空洞を蓄積リングに導入設置した。設置場所は SR 加速空洞の下流部のスペースに、縦方向の不安定性を検出する BPM、手動のゲートバルブと一緒に設置した (図 4)。

2025 年 7 月のマシンスタディーでコミッショニングを開始し、シングルバンチ 1 mA で減衰時間の評価を行った。電子ビームをシンクロトロン振動数 5.19 kHz で励振し、BBF に切替、フィードバックゲインと減衰時間の測定を行った (図 5)。BBF-OFF の場合、減衰時間 7 msec 程度であるのに対して、BBF のゲインを上げることで減衰時間が 2.5 msec 程度 (BBF Gain 4) まで早くなり、放射減衰

を考慮して縦 BBF によるフィードバック減衰時間は、3.9 msec と見積もれ、2023 年当時の 1.9 GHz の不安定性の growth rate 5.8 msec よりも早く、十分な性能をもっていることを確認した。

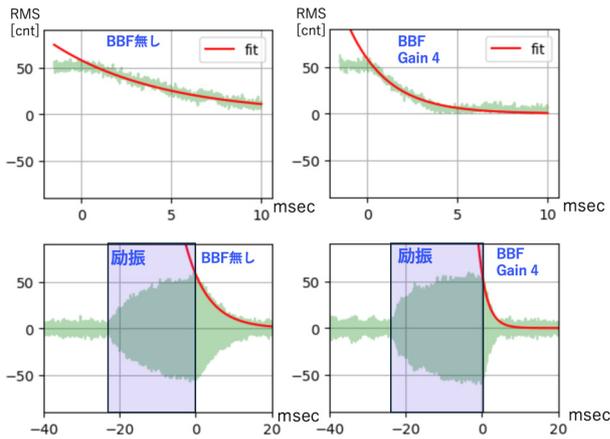


Figure 5: The grow damp measurement without BBF (left) and with BBF (right).

縦 BBF のフィードバック位相の調整を行い、400 mA までの積み上げ試験を実施した。不安定性を検出する tap 数は 32 (iGp12 の最大タップ数) とし、シンクロトロン振動 (5.19 kHz) に起因する不安定性を効率よく検知するため、down sampling 数は 5 として縦 BBF システムを稼働させた。

1.9 GHz の HOM による不安定性を抑制し、400 mA の安定蓄積に初めて成功した。キッカー電磁石の発熱の問題があり長時間キープすることは困難であったが、300 mA での長時間、試験的な放射光利用運転を行う事ができた(図 6)。

縦方向不安定性が発生すると蓄積電子ビームの電流値に応じて、各バンチのビーム進行方向の広がり具合はどんどん大きくなる。縦 BBF システムを用いることで、各

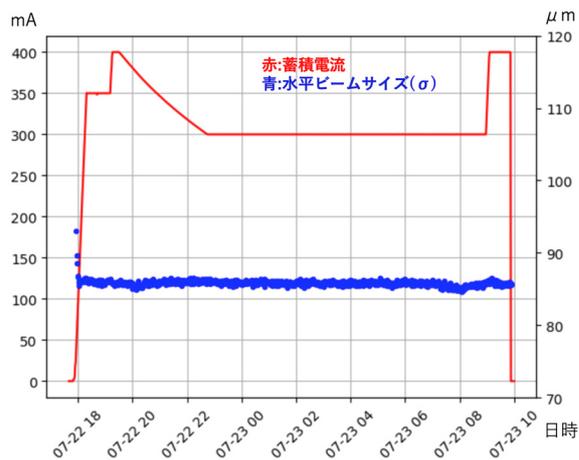


Figure 6: The stored beam current and horizontal beam size distribution with the suppression of longitudinal instability.

バンチ位相の広がりが大きく改善され、蓄積電流 400 mA でも全 550 バンチのバンチ位相の広がりを 0.5 psec (std) に抑え込むことができた(図 7)。

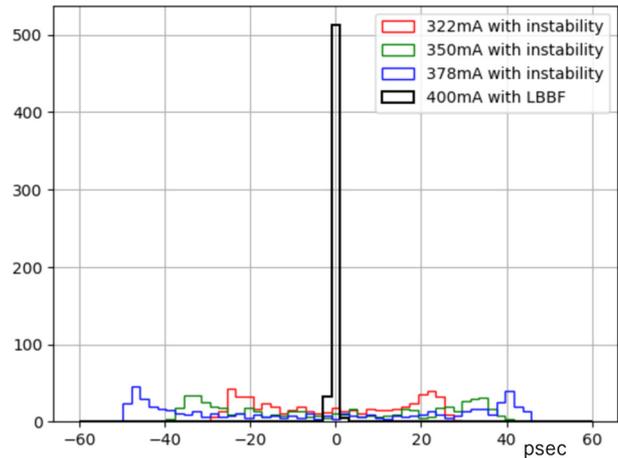


Figure 7: The bunch phase distribution of all 550 bunches. The longitudinal instability leads to a large bunch phase spread as the stored beam current increases.

また現在、加速空洞の冷却水流量が安定せず、2週間にもわたるユーザー利用運転期間に加速空洞温度が大きく上昇し、縦方向ビーム不安定性が発生する問題が生じている。不安定性が発生すると、蓄積電流を下げざるをえない。

不安定性閾値 160 mA の加速空洞冷却水流量に設定し、縦 BBF システムを用いて加速空洞の状態がベストな状態でなくても 400 mA 安定蓄積が可能か試験を行なった。図 8 に示すように空洞温度が変化しても 400 mA の安定蓄積、350 mA の長時間、試験的な放射光利用運転を達成し、加速空洞温度が変化しても縦方向の不安定性を十分抑制できることが確認できた。

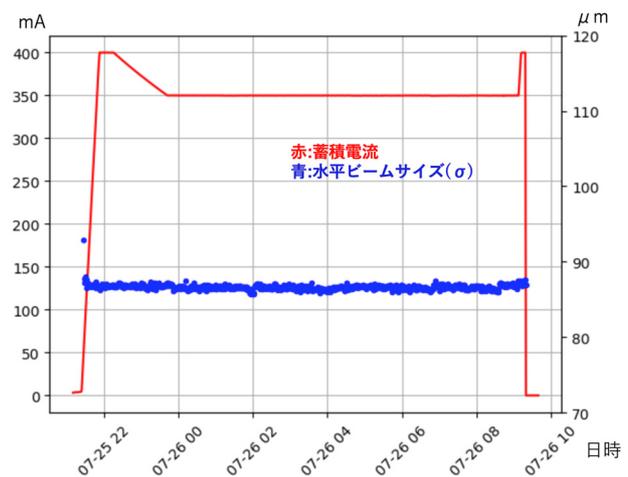


Figure 8: The stored beam current and horizontal beam size distribution under unstable RF cavity conditions.

4. まとめ

開発した縦 BBF システムを稼働させ、縦方向の不安定性を抑制し、設計エミッタンスを保ったまま、ナノテラス蓄積リングの設計電流値 400 mA の安定蓄積を達成した。7 月下旬のユーザー利用運転から縦方向 BBF システムを適用し、秋のナノテラスユーザー利用運転から徐々に蓄積電流値を上げて行く予定である。

謝辞

SPring-8 の藤田貴弘氏、正木満博氏をはじめ、加速器関係者の方々には、不安定性抑制手法に関するコメントを多々頂き、無事縦方向の不安定性抑制システムを稼働させることができ、400 mA の安定蓄積を早期に達成することができました。心より感謝致します。また本縦 BBF キッカー空洞の製作に多大なるご協力を頂きました三菱重工機械システムの皆様、縦 BBF キッカー空洞の設置、ベーキング、真空チェンバの製作を行って頂きましたトヤマの皆様に心より感謝致します。

参考文献

[1] S. Obara *et al.*, “Commissioning of a compact multibend achromat lattice NanoTerasu: A new 3 GeV synchrotron

radiation facility”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 28, p. 020701, 2025. doi:10.1103/physrevaccelbeams.28.020701

- [2] H. Ego, H. Tanaka, T. Inagaki, T. Ohshima, H. Yamaguchi, T. Tomai, T. Asaka, N. Nishimori, “Compact HOM-damping Structure of a beam-accelerating TM020 mode rf cavity”, *Nucl. Instr. and Meth. A*1064 (2024) 169418.
- [3] K. Ueshima *et al.*, “Commissioning of the Beam Diagnostic system for NanoTerasu: A new 3GeV Light Source in Japan”, *Proceedings of the IBIC 2024, Beijing, China, Sep. 9-13, 2024*, pp. 5-10.
- [4] R. Boni *et al.*, “A Waveguide Overloaded Cavity as Longitudinal Kicker for the DaΦNE Bunch-by-bunch Feedback System”, *Particle Accelerator*, vol. 52, 53 (1996).
- [5] Y. Kim *et al.*, “Longitudinal Feedback System Kicker for the PLS Storage Ring”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 47, 452 (2000).
- [6] W. Z. Wu *et al.*, “Development of a bunch-by-bunch longitudinal feedback system with a wide dynamic range for the HIGS facility”, *Nucl. Instr. and Meth. A*632 (2011) 32.
- [7] A. F. D. Morgan, G. Rehm, “Initial work on the design of a longitudinal bunch-by-bunch feedback kicker at Diamond”, in *Proc. IBIC’15, Melbourne, Australia, Sep. 2015*, paper MOPB064, pp.197-201.
- [8] A. F. D. Morgan, G. Rehm, “Design for the Diamond longitudinal bunch-by-bunch feedback cavity”, in *Proc. IBIC’16, Barcelona, Spain, Sep. 2016*, paper TUPG12, pp.340-343.