

## NanoTerasu 蓄積リング用大電力高周波加速システムの現状

### STATUS OF RF ACCELERATION SYSTEM FOR NanoTerasu STORAGE RING

高橋隼也<sup>#, A,B)</sup>, 安積隆夫<sup>A)</sup>, 上島考太<sup>A)</sup>, 小原脩平<sup>A)</sup>, 西森信行<sup>A)</sup>, 保坂勇志<sup>A)</sup>, 青木駿堯<sup>A,B)</sup>, 岩下大器<sup>A,B)</sup>, 稲垣隆宏<sup>C,D)</sup>, 前坂比呂和<sup>C,D)</sup>, 岩井瑛人<sup>A,C,D)</sup>, 大島隆<sup>A,C,D)</sup>, 近藤力<sup>A,C,D)</sup>, 細田直康<sup>A,C,D)</sup>, 山口博史<sup>A,D)</sup>, 斗米貴人<sup>D)</sup>, 早賀紀久男<sup>E)</sup>, 吉岡正倫<sup>E)</sup>  
Shunya Takahashi<sup>#,A,B)</sup>, Takao Asaka<sup>A)</sup>, Kota Ueshima<sup>A)</sup>, Shuhei Obara<sup>A)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>A)</sup>, Yuji Hosaka<sup>A)</sup>, Toshitaka Aoki<sup>A,B)</sup>, Taiki Iwashita<sup>A,B)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>C,D)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>C,D)</sup>, Eito Iwai<sup>A,C,D)</sup>, Takashi Ohshima<sup>A,C,D)</sup>, Chikara Kondo<sup>A,C,D)</sup>, Naoyasu Hosoda<sup>A,C,D)</sup>, Hiroshi Yamaguchi<sup>A,D)</sup>, Takato Tomai<sup>D)</sup>, Kikuo Hayaga<sup>E)</sup>, Masamichi Yoshioka<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology

<sup>B)</sup> NAT Corporation

<sup>C)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>D)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute

<sup>E)</sup> SPring-8 Service Co., Ltd.

#### Abstract

At the next-generation synchrotron radiation facility NanoTerasu, we are proceeding with the installation and adjustment of accelerators for user operation from April 2024. The high frequency acceleration system must generate a maximum acceleration voltage of 3.3MV stably to compensate for the radiation loss for the storage beam current of 400 mA and ensure a beam lifetime of more than 5 hours. To suppress beam instability due to higher-order modes (HOM) and to achieve the necessary acceleration voltage in a small space, we adopted a HOM damping acceleration cavity developed at SPring-8. For RF system control, a digital control system based on the Micro TCA.4, which has been commonly used at the SPring-8 storage ring, is adopted. From April 2022, we started the installation work of the 509 MHz, 1.2 MW output CW klystron, its power supply system, the waveguide circuit and the cavities. In this presentation, we will report on the configuration and installation status of RF system, and the RF conditioning status scheduled to be implemented from June.

#### 1. はじめに

次世代放射光施設 NanoTerasu [1]では 2024 年 4 月からのユーザー運転に向けた加速器の設置、調整を進めている。蓄積リングではエネルギー 3 GeV、ビーム電流 400 mA の電子ビームを用いて軟 X 線からテnder-X 線領域の高コヒーレンス・高輝度放射光を提供する。周長 350 m の蓄積リングは 16 セルで構成され、各セルが 5.4 m の長直線部と、1.6 m の短直線部を持つ。

蓄積リングの高周波加速システムは、偏向電磁石や挿入光源での放射光発生によって生じる放射損失を補填する役割を担う。蓄積リング一周あたりの放射損失は、偏向電磁石で 0.62 MeV、挿入光源で最大 0.64 MeV と見積もられる。放射損失の補填のため、400 mA の蓄積ビーム電流に対して 500 kW の高周波電力を供給し続ける必要がある。また 10 時間以上のタウチェック寿命を確保するため、高周波加速システムでは最大 3.3 MV の加速電圧を安定的に生成する必要がある。

2022 年 4 月より蓄積リング高周波システムの構築作業が開始され、2023 年 5 月末に各機器の設置作業が完了した。各機器及び制御部の動作確認後、RF コンディショニングを開始し、約 2 カ月で運転定格である各空胴への投入電力 100 kW に到達した。

本発表では、NanoTerasu の蓄積リング用高周波加速システムの概要と、2022 年度より開始された設置作業及び運転状況について報告する。

#### 2. 蓄積リング用高周波加速システム

##### 2.1 構成

Figure 1 に NanoTerasu の蓄積リング用高周波加速システムの構成図を示す。加速システムには、高エネルギー物理学実験用や放射光施設用の加速器で使用実績のある 500 MHz 帯の高周波機器を使用した。蓄積リングトンネル内長直線部に 4 台の加速空胴が設置されており、最大 3.3 MV の加速電圧を生成する。蓄積リング内周側のクライストロン室に 509 MHz、1.2 MW 出力の連続波クライストロンが設置されている。クライストロンから出力された高周波電力を導波管立体回路で伝送し、蓄積リングトンネル上部に設置された 3 台のマジック T により 4 分割した後、各空胴に投入する。空胴の加速位相を合わせるため、事前にトンネル上部の移相器により導波管長を調整した。空胴は導波管締結型のセラミック窓で真空封止した。放射光ビームラインとの干渉を避けるため、加速空胴のカップラポートは空胴上部に配置した。反射電力からクライストロンを保護するため、クライストロン室内に順方向電力 1.2 MW、逆方向電力 650 kW のサーキュレータを設置した。反射電力はサーキュレータの第 3

<sup>#</sup> takahashi.shunya@qst.go.jp

ポートに取り付けた定格電力 300 kW のダミーロード及びトンネル上部の立体回路に取り付けられた 3 台の 50 kW ダミーロードで吸収する。

クライストロン高電圧電源は線型加速器棟に設けられたクライストロン電源室に設置し、カソードおよびアノードの高電圧は約 100 m のケーブルを通してクライストロンに供給した。高周波制御系とインターロック系は、クライストロン室の隣にある高周波制御室内に構築した。

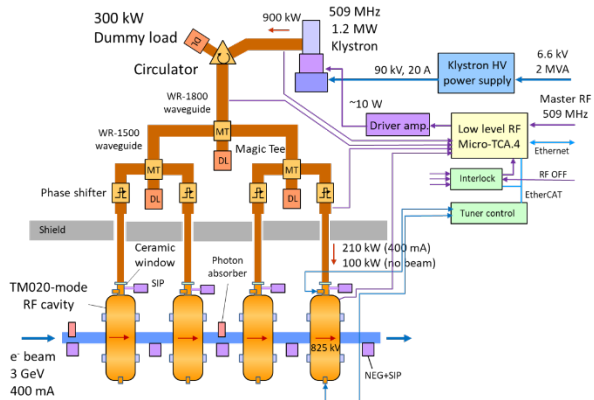


Figure 1: Configuration of the RF system.

## 2.2 高周波源

高周波源である 509 MHz、1.2 MW 出力のクライストロン(キャノン電子管デバイス製 E3732[2])の写真を Fig. 2 に、定格仕様を Table 1 に示す。このクライストロンは、アノード電圧によってビーム電流を制御する三極管構造を有しており、低出力時にも高い電力効率を保つことができる。クライストロン電源は、SPring-8 の高電圧電源を基に設計製作した[3]。クライストロンカソードに印加する直流高電圧は 12 相全波整流方式で生成する。カソード電圧は 70、80、90 kV の 3 段階をタップ切換で設定できる。コンディショニング運転時や蓄積電流値が低い焼きだし運転時には 70 kV タップに設定し運転を行った。高電圧デッキ内には、カソードヒータ回路とともに、コッククロフト式高電圧電源が設けられ、低電力高周波制御システム



Figure 2: Klystron for NanoTerasu storage ring.

Table 1: Specification of the klystron. The values in brackets correspond to the cathode voltage of -90 kV

Frequency	508.759 MHz
Maximum output RF Power	1.2 MW (1.0 MW)
Power efficiency	62 % (63 %)
Saturation gain	60 dB (58 dB)
Cathode Voltage	-94 kV (-90 kV)
Anode Voltage	64 kV (58 kV)
Collector Loss	< 800 kW

からの指令に応じてアノード電圧が制御される。

## 2.3 加速空洞

加速空洞の設置スペースは 5.4 m の長直線部 1 ヶ所に限定されるため、コンパクトな新型加速空洞が開発された[4]。空洞加速モードは TM020 である。軸対象に生じる 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高周波吸収体を設置した。これにより、バンチ結合型ビーム不安定性を引き起こす高次共振モード(HOM)を減衰する。設計パラメータ及び現在の運転パラメータを Table 2 に示す[4, 5]。

空洞赤道部には大電力運転時の空洞本体の膨張等による共振周波数の変化を補正するための周波数チューナを設置した。また高周波入力カプラにはビーム負荷に応じて結合度を変更可能な可変機構を持たせた。

Table 2: RF Parameters of TM020 Cavity

Design Parameters		
RF mode	TM020	
Resonant frequency	508.76 MHz	
Unloaded Q	60,000	
Shunt impedance	6.8 MΩ	
Operation Parameters		
	Rating	Current
Cavity voltage	825 kV	665 kV
Input power w/o beam	100 kW	65 kV
Input power w/ beam	210 kW (400 mA)	92 kW (150 mA)

## 2.4 低電力高周波制御システム

低電力高周波制御システムは、SPring-8 蓄積リングですでに開発・構築された MicroTCA.4(MTCA.4)規格の制御システム[6]を採用した。AMC(Advanced Mezzanine Card)デジタイザと信号処理を行う RTM(Rear Transition Module)の組み合わせによりクライストロン出力や空洞反

射波、空洞ピックアップ信号等の振幅・位相を測定する。空洞高周波ベクトル和の振幅・位相の帰還制御や空洞の共振状態の維持等は AMC 内の FPGA 上で動作するファームウェアや MTCA.4 の CPU 上で動作するプロセスで実現した。本システムには高速通信機能による異常時の波形収集、インターロックの先着判定など有益な機能を持たせた。

本システムでは、高周波出力電力に次の2種類の帰還制御を加えられるようにしている。一つは、クライストロン電源の高電圧部リップルなどの出力変動を安定化するもので、もう一つは、冷却水温度変化やビーム負荷による緩やかな変動を抑制し空洞電圧を安定化するものである。コンディショニング運転時には、前者の帰還制御のみを使用した。これによりクライストロン出力電力を目標値に設定できた。ビーム蓄積運転時には、両方の帰還制御を同時に使用する。これにより、ビーム負荷が変化しても空洞の加速電圧を目的の値に設定できる。

空洞の共振状態の維持は、周波数チューナを帰還制御することで実現した。MTCA.4 の CPU 上で動作するプロセスは、空洞に入力される高周波信号とピックアップ信号の位相差を監視し、一定に保つよう動作する。

クライストロンのアノード電圧制御は、MTCA.4 の CPU 上で動作するプロセスで行なった。このプロセスはクライストロン出力を監視し、出力電力に応じて電力効率が最良となるようアノード電圧を設定する。

### 3. 立ち上げ

#### 3.1 高周波源・空洞

2022 年 4 月から約 7 ヶ月間にわたって、クライストロン高電圧電源、クライストロン本体及び冷却水配管等の設置を行い、クライストロンへの高電圧出力試験、RF 出力試験を実施した。

4 台の新型空洞の製造は 2021 年より開始し、完成した空洞から順次 RF 電力投入試験を実施した。RF 電力投入試験は SPring-8 大電力 RF テストスタンドにて行った。RF コンディショニングでは、真空度を見ながら徐々に RF 電力を増やしてゆき、最終的には定格の 100 kW での連続運転を行った。このプロセスに、空洞一台につ

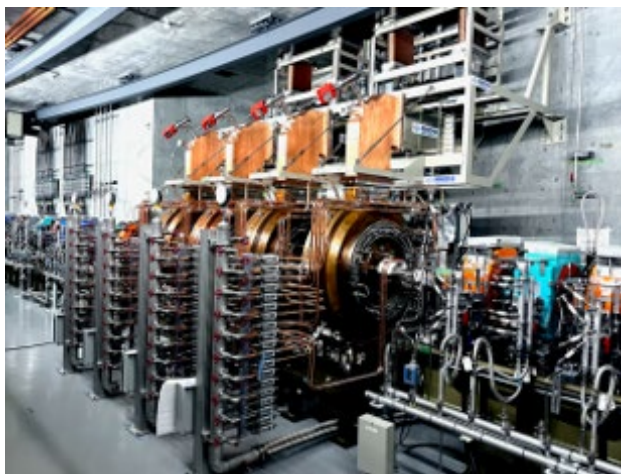


Figure 3: RF cavities installed in NanoTerasu storage ring tunnel.

き 1.5 ヶ月程度を要した。最初の空洞の試験時、空洞の熱変形による共振周波数変化が生じ、問題となった。この問題解決のために、メーカーにて再度空洞の修正加工を実施し、大電力試験を行った[5]。当初予定では、先行して 2 台の空洞が 2022 年 6 月から NanoTerasu へ搬入予定であったが、共振周波数変化に対応する改修作業等を実施したため、残りの 2 台と合わせて 2023 年 3 月初旬に SPring-8 から NanoTerasu に搬入された。搬入後に低電力高周波測定、HOM 吸収体の取り付け及びチューナ設置が行われた。低電力高周波測定で共振周波数と Q 値の測定を行い、輸送による空洞への影響がないことを確認した。その後真空引きを開始し、4 日間のベーキングを実施した。温度依存性はすべての空洞に置いてほぼ一致しており、 $-8.6 \text{ kHz/K}$  であった。ベーキング後、約 1 ヶ月間で冷却水ヘッダ、配管の設置作業及び RF ケーブル等の配線作業を実施した。Figure 3 に据え付けが完了した加速空洞を示す。

#### 3.2 周波数チューナの調整

Figure 4 に 4 台の空洞の周波数チューナ位置と共振周波数の関係を示す。各空洞の番号は、上流側が空洞 1、下流側が空洞 4 である。空洞 1 以外の周波数チューナの可動範囲は  $-10 \text{ mm}$  から  $+60 \text{ mm}$  である。空洞 1 は他 3 台の空洞に比べ共振周波数が高いため、 $20 \text{ mm}$  のスペーサを取り付けることで引き抜き方向(マイナス方向)への移動範囲を広く取っている。周波数チューナ動作時の共振周波数の変化は各空洞と同様であり、チューナ位置が  $10 \text{ mm}$  以上の時、 $0.08 \text{ MHz/mm}$  であった。先に述べた共振周波数変化に対応する改修作業後も、すべての空洞共振周波数を周波数チューナだけで基準 RF 周波数  $508.759 \text{ MHz}$  に合わせる事ができない。そこで次節で述べる周波数変調システムを導入した[7]。4 台の共振周波数が運転開始時の励振周波数に一致するよう、運転開始時の周波数チューナの位置を決定した。

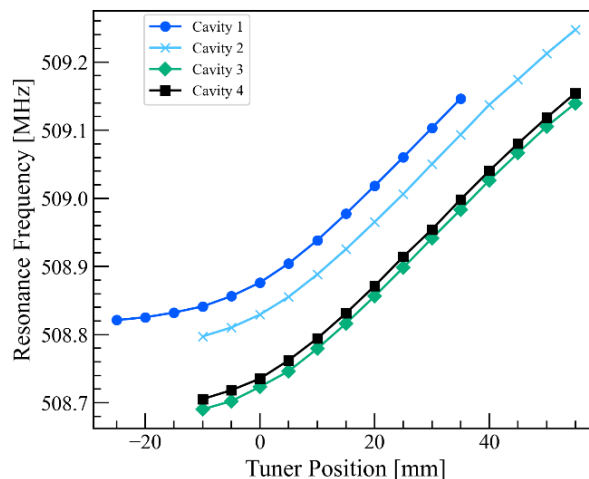


Figure 4: Correlation between frequency tuner position and resonant frequency of the four cavities.

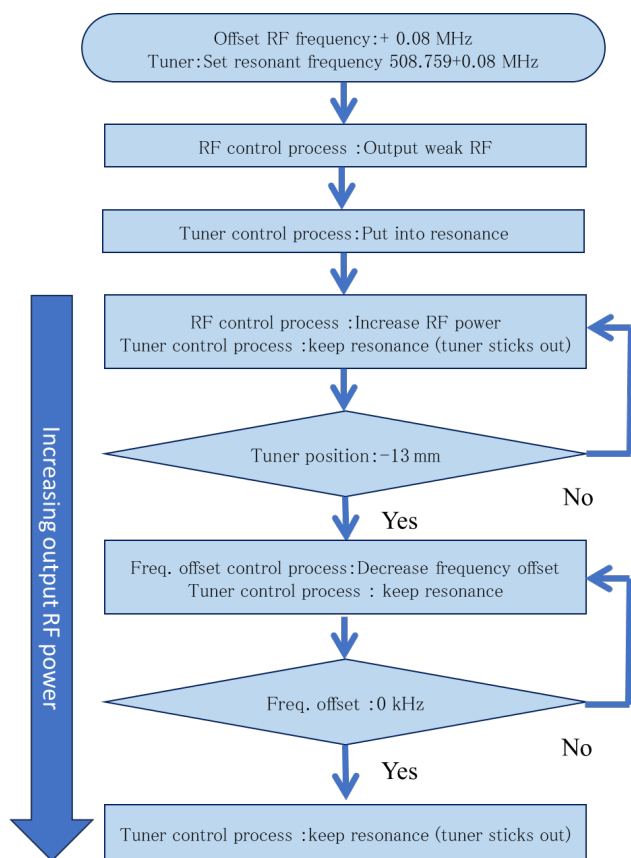


Figure 5: Procedure at the start of RF operation.

### 3.3 制御部

空洞の共振周波数の違いから、空洞が冷えた状態では周波数チューナにより共振周波数を基準周波数 508.759 MHz に調整することが空洞 1、2 に対しては困難となった。そこで励振周波数に基準周波数から +80 kHz のオフセットを与えることにより、冷間時の空洞の共振を実現した。この状態であれば高周波電力の投入が可能となる。高周波電力を投入すると、空洞の壁損失によって空洞温度が上昇し、共振周波数の低下が発生する。この共振周波数変化を補正するように周波数チューナの制御プロセスはチューナを突き出す。一方、周波数変調システムは空洞 1 のチューナ位置を監視しており、チューナ位置が設定値に達すると、共振周波数を下げる動きをする。空洞への電力が十分高くなり、周波数オフセットを 0 Hz に設定できた時点で、周波数変調システムはその動きを停止する。Figure 5 に RF 出力開始時の MTCA.4 の CPU 上で動作する周波数変調プロセスのフローチャートを示す。この制御システムはまず原理検証のため SPring-8 の大電力 RF テストスタンドにて RF 電力投入試験を行い、想定通りの動作が行われることを確認した[7]。この周波数制御システムのパラメータ設定や制御シーケンスの開始・停止を含め、高周波システム全体の遠隔制御を行うための GUI 開発を進めた。

周波数チューナの動作確認、GUI で各機器の遠隔制御が健全に行えることを確認した後、空洞への微小 RF

電力投入を開始した。微小 RF 電力にて低電力高周波制御システムによる高周波出力制御及び周波数チューナの帰還制御、インターロック動作の健全性を確認し、加速空洞のコンディショニングを開始した。

## 4. 運転状況

初めに RF コンディショニングのための運転を開始した。加速空洞 4 台で 3.3 MV の加速電圧を生成するためには、空洞 1 台あたり 100 kW、ビーム無負荷でクライストロン出力電力 400 kW の高周波電力を投入する必要がある。クライストロンの出力は空洞の真空度を監視しながら上昇させた。Figure 6 は真空度とクライストロン出力のトレンドの例を示す。この時、電力上昇のための真空度のしきい値は  $3 \times 10^{-5}$  Pa であった。運転開始(2023 年 5 月末)から 2 カ月間コンディショニング運転を行った。この間の運転状況を Fig. 7 に示す。Figure 7 の赤点は一日の運転で到達したクライストロン最大出力電力、青点は累計の運転時間である。

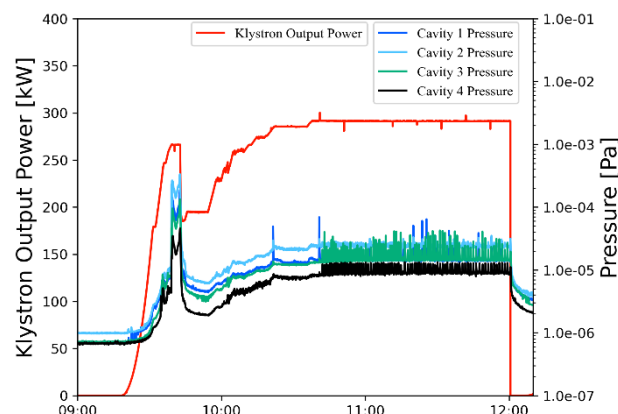


Figure 6: Trend graph of the klystron power (red line) and the cavity vacuum (other lines).

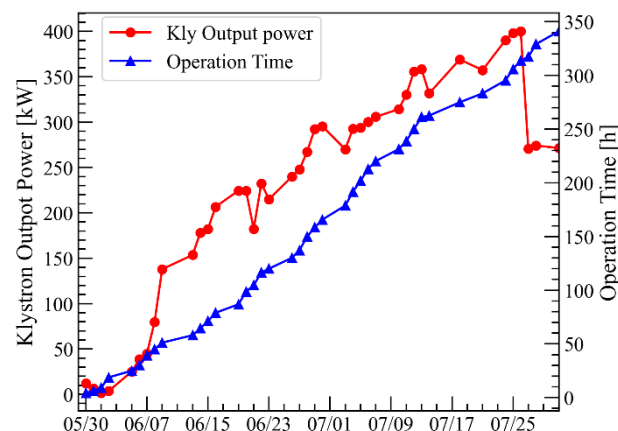


Figure 7: Progress of maximum power of the klystron output (red line) and total operating time (blue line).

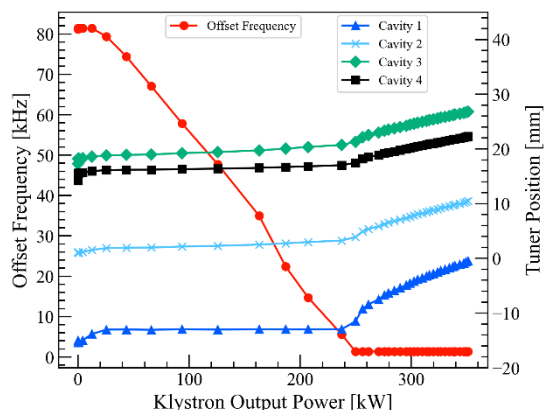


Figure 8: Relation between the klystron output power and the offset frequency (red line), and position of the frequency tuner for each cavity (other lines).

運転開始後の 1 ヶ月程度は、蓄積リングトンネル内の他の建設・調整作業と並行して RF コンディショニングを進めるため午後のみ運転を行った。ビーム入射蓄積試験後は、午前中に RF コンディショニング、午後にビーム調整のための運転を行った。運転開始から約 2 ヶ月で累計 340 時間の運転を行い、目標のクライストロン出力電力 400 kW に到達した。

Figure 8 にクライストロン出力電力に応じたオフセット周波数の変化と周波数チューナ位置の変化を示す。周波数オフセットが 0 Hz となるのはクライストロンの出力が 250 kW 程度となった時点であった。その後は周波数チューナが突き出し方向へ動作し共振状態が維持される。反射電力等によるインターロック動作後の再立ち上げ時には、再度オフセット周波数を設定した後 RF 電力の投入を開始した。

Figure 9 に 5 日間のビーム蓄積運転時のクライストロン電力と蓄積電流の推移を示す。この間最長約 2 日間の連続運転が行われた。また蓄積電流の変化に伴って加速電圧を一定に保つよう、低電力高周波制御システムの帰還制御によるクライストロン出力制御が正常に行われている。

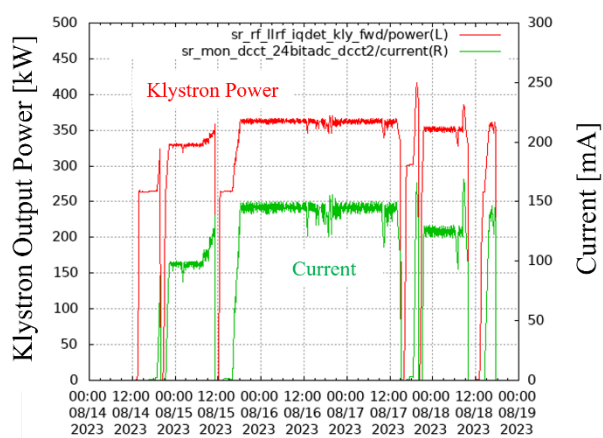


Figure 9: Trend graph of the klystron power (red line) and the storage beam current (green lines).

## 5. まとめ

2022 年度より NanoTerasu の蓄積リング用高周波加速システムの設置作業を進めてきた。加速空洞は搬入後約 3 ヶ月で運転可能な状態までの作業が完了し、当初の予定通りのスケジュールで運転が開始された。2023 年 5 月末よりコンディショニング運転が開始され、約 2 ヶ月間で累計 340 時間の運転により定格出力に到達した。その後は温度変化による空洞の変形を抑えるため、加速電圧 2.9 MV、ビーム無負荷でのクライストロン出力 260 kW で運転を行っている。2023 年 8 月から蓄積電流の増大に向けた運転が進められている[8]。今後、ビーム負荷電力に応じたカップリングチューナーの調整等、蓄積電流増大に向けた調整を実施する予定である。

## 謝辞

運転開始に至るまで多くの方々にご協力を頂きました。クライストロンの製作に関してキヤノン電子管デバイス(株)及び高電圧電源の製作・据え付け、クライストロンの据え付けに当たられたニチコン(株)の方々、タイトなスケジュールの中加速空洞の設置等やベーキング作業を実施頂いた(株)クリハラントの方々及び高周波ケーブルの敷設等を実施いただきました日立造船(株)の方々、制御部に関しましてサポートを頂きましたスプリングエイトサービス(株)の森本氏、コンディショニング運転を実施いただいた(株)NAT の伊藤氏、門脇氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] N. Nishimori, "A New Compact 3 GeV Light Source in Japan", Proc. of the 13th Int. Particle Acc. Conf, 2022, pp. 2402-2406.
- [2] <https://etd.canon/ja/product/category/microwave/klystron.html>
- [3] H. Ego *et al.*, "SPRING-8 蓄積リングクライストロン用 90kV 直流高圧電源の更新", Proc. 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016), Chiba, Japan, Aug. 2016, pp. 914-918.
- [4] H. Ego *et al.*, "SPRING-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞プロトタイプの大電力試験", Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019), Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 17-21.
- [5] T. Inagaki *et al.*, "High-power tests of the compactly HOM-damped TM020-cavities for a next generation light source", Proc. of 14th Int. Particle Acc. Conf, 2023.
- [6] T. Ohshima *et al.*, "MTCA.4 規格低電力高周波システムの Spring-8 蓄積リング A ステーションへの導入", Proc. 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018), Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 55-59.
- [7] T. Ohshima *et al.*, "加速空洞立ち上げ時の周波数変動システム", Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, TUP32, this meeting.
- [8] N. Nishimori *et al.*, "NanoTerasu 加速器コミッショニング", Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, WEOA7, this meeting.