

次世代放射光施設 NanoTerasu の 3 GeV 線型加速器

ビームコミッショニング状況

INSTALLATION AND BEAM COMMISSIONING OF 3 GeV LINAR ACCELERATOR IN NanoTerasu

安積隆夫^{#, A)}, 上島考太^{A)}, 小原脩平^{A)}, 菅晃一^{A)}, 保坂勇志^{A)}, 西森信行^{A)}, 岩井瑛人^{B)}, 糸賀俊朗^{B)}, 大島隆^{B)}, 岡田謙介^{B)}, 清道明男^{B)}, 近藤力^{B)}, 櫻井辰幸^{B)}, 杉本崇^{B)}, 谷内努^{B)}, 出羽英紀^{B)}, 細田直康^{B)}, 馬込保^{B)}, 柳田謙一^{B)}, 安積則義^{C)}, 稲垣隆宏^{C)}, 田中均^{C)}, 原徹^{C)}, 前坂比呂和^{C)}, 松井佐久夫^{C)}, 青木駿堯^{D)}, 浅野博之^{D)}, 伊藤優仁^{D)}, 伊原彰^{D)}, 岩下大器^{D)}, 及川治彦^{D)}, 門脇聖弥^{D)}, 小林創^{D)}, 小林秀樹^{D)}, 齋田涼太^{D)}, 櫻庭慶佑^{D)}, 杉本兼人^{D)}, 高橋隼也^{D)}, 土山翼^{D)}, 西川雅章^{D)}, 芳賀浩一^{D)}, 井上忍^{E)}, 熊澤寛介^{E)}, 酒井康平^{E)}, 住友博史^{E)}, 勢納敏雄^{E)}, 竹迫涼一^{E)}, 田中信一郎^{E)}, 森谷佳津貴^{E)}, 山本龍^{E)}, 横町和俊^{E)}, 吉岡正倫^{E)}

Takao Asaka^{#, A)}, Kota Ueshima^{A)}, Shuhei Obara^{A)}, Koichi Kan^{A)}, Yuji Hosaka^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Eito Iwai^{B)}, Toshiro Itoga^{B)}, Takashi Oshima^{B)}, Kensuke Okada^{B)}, Akio Kiyomichi^{B)}, Chikara Kondo^{B)}, Tatsuyuki Sakurai^{B)}, Takashi Sugimoto^{B)}, Tsutomu Taniuchi^{B)}, Hideki Dewa^{B)}, Naoyasu Hosoda^{B)}, Tamotsu Magome^{B)}, Kenichi Yanagida^{B)}, Noriyoshi Adumi^{C)}, Takahiro Inagaki^{C)}, Hitoshi Tanaka^{C)}, Toru Hara^{C)}, Hirokazu Maesaka^{C)}, Sakuo Matsui^{C)}, Toshitaka Aoki^{D)}, Hiroyuki Asano^{D)}, Katsumasa Ito^{D)}, Akira Ihara^{D)}, Taiki Iwashita^{D)}, Haruhiko Oikawa^{D)}, Masaya Kadowaki^{D)}, Hajime Kobayashi^{D)}, Hideki Kobayashi^{D)}, Ryota Saida^{D)}, Keisuke Sakuraba^{D)}, Kento Sugimoto^{D)}, Shunya Takahashi^{D)}, Tsubasa Tsuchiyama^{D)}, Masaaki Nishikawa^{D)}, Koichi Haga^{D)}, Shinobu Inoue^{E)}, Hiroyuki Kumazawa^{E)}, Kohei Sakai^{E)}, Hiroshi Sumitomo^{E)}, Toshio Seno^{E)}, Ryoichi Takesako^{E)}, Shinichiro Tanaka^{E)}, Kazuki Moriya^{E)}, Ryo Yamamoto^{E)}, Kazutoshi Yokomachi^{E)}, Masamichi Yoshioka^{E)},

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

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

^{C)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

^{D)} NAT Co., Ltd.

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

Abstract

This next-generation synchrotron radiation facility NanoTerasu consists of a 3-GeV storage ring and the 3-GeV linear accelerator. Installation of the linear accelerator components started in January 2022 and was completed in January 2023. Operation test of all equipment including the RF system, magnets, and interlock system were performed as scheduled in mid-February. Beam commissioning was started after RF conditioning of the high-power RF system, including the accelerating structures and the RF pulse compression cavities (SLED). The planned beam tuning procedure was followed to optimize the equipment parameters sequentially, and the target beam performance of 3 GeV beam energy, 0.3 nC beam charge, and normalized emittance of less than 10 mm mrad were achieved 10 days after the start of beam commissioning. This paper describes the installation, RF conditioning, and beam commissioning status of the 3 GeV linear accelerator, and the beam performances obtained during beam commissioning.

1. はじめに

物質の構造解析や機能材料開発の新展開において、放射光利用の重要性は増しており、その光源性能の高度化は不可欠なものとなっている。近年、国外では高輝度放射光の安定生成は勿論、高機能化された X 線検出器の配備など、最新設備を搭載した中型放射光施設の建設が相次いでおこなわれている。こうした背景のもと、我が国においても国際競争力強化の観点から、軟 X 線

領域に特化した次世代放射光施設の整備が仙台市青葉山にて進められている[1]。この次世代放射光施設 NanoTerasu 加速器は、3 GeV 蓄積リングとその入射器である 3 GeV 線型加速器から構成されている。

線型加速器は、2022 年 1 月から加速器コンポーネントの設置作業が開始され、2023 年 1 月には設置完了、そして、2 月中旬より RF システム、電磁石、インターロックシステムなど全機器の動作試験、調整が予定通りおこなわれた。加速管や RF パルス圧縮空洞 (SLED) など、大電力 RF システムの RF コンディショニングを実施した

[#] asaka.takao@qst.go.jp

後、ビームコミッショニングが開始された。計画された調整手順にしたがって機器パラメータが順次最適化され、ビームコミッショニング開始から10日後には、目標ビーム性能である3 GeVのビームエネルギー、0.3 nCのビーム電荷量、10 mm mrad以下の規格化エミッタンスを達成した。

本稿では、3 GeV 線型加速器の設置作業、RF コンディショニング、そしてビームコミッショニング状況、ビームコミッショニングで得られたビーム性能について述べる。

2. 3 GeV 線型加速器の概要、機器設置

2.1 全体構成

狭いダイナミックアパーチャをもつ蓄積リングに対して高効率のビーム輸送・入射を実現するため、3 GeV 線型加速器には $2e-9$ m rad 以下のエミッタンスが要求されている。この高品質ビームの安定生成に加えて、加速器建設コストの縮小、構成機器の優れた保守性と堅牢性、運用期のランニングコストの縮小や省電力化にも配慮して加速器設計が進められた[2]。

電子銃システムでは、ビーム生成の長期安定性に優れているグリッド付き熱カソードを使用している。この電子銃システムで生成される低エミッタンスビームは、476 MHz サブハーモニックバンチャー (SHB)、S バンド加速管による電子集群・加速がおこなわれ、最終的にバンチ長が 5 ps 以下の高密度電子ビームが生成される。

入射部で生成されるビームエネルギーが 40 MeV、電荷量が 0.3 nC の電子ビームは、40 本の C バンド加速管から成る主加速部で 3 GeV のビームエネルギーに到達する。

線型加速器に配備されたビームモニタは、あらかじめ検討されたビーム調整手順に基づいて種類と配置が決められた。とくに 40 MeV 入射部に配置された2台のビーム電流モニタ (CT) はビーム電荷量の測定だけでなく、エネルギーモニタとしても活用する。CT を通過するビームの到達時間測定 (TOF 測定) により、ビーム速度を算出しビームエネルギーを得る。40 MeV 入射部出口にはシグイン部、そして線型加速器最下流部の偏向電磁石後方には、ビーム位置モニタ、スクリーンモニタを配置し、エネルギーの最適化がおこなわれる。

2.2 体制・工程

2018年に次世代放射光施設の整備機関として QST 次世代放射光施設加速器グループが発足、その後、RIKEN、JASRI を加えた3組織体制で加速器設計、機器製作が進められた。3 GeV 線型加速器は、2019年4月までに加速器の構成機器の詳細設計、ならびに仕様を決定し、40社以上の国内メーカーで構成機器の製作がおこなわれた。製作が完了した機器は動作試験・検査後、施設建屋の建設が完了するまで、各メーカー内で保管することとした。

施設建屋が完成した後の機器搬入と設置作業を円滑に進めるために、搬入時期、施設内の機器保管場所、

作業内容とインストール順序を見極めた作業工程計画が策定された。当初の計画では、2021年10月から機器設置作業が開始されるはずであったが、全世界で猛威を振るった新型コロナウイルスの影響により、建屋建設が3ヶ月遅延し、これに伴い機器搬入・設置作業は2022年1月から開始することとなった。

搬入・組立作業期間中も、コロナ禍での作業を余儀なくされることから、一般安全対策に加え、徹底した感染拡大防止策が講じられた。こうした中で進められた機器設置、それに付随する配線、冷却水配管といった作業は、3ヶ月の作業期間の短縮があったにもかかわらず、予定期間内で完了することができた。Figure 1には収納部トンネルに設置された3 GeV 線型加速器を示す。

加速器の構築作業と同時進行で加速器制御のためのプログラム開発、GUI 作成がおこなわれた。GUI 操作による機器パラメータ設定、そして遠隔制御試験と健全性の確認後、RF コンディショニングが2023年2月下旬から約1ヶ月間おこなわれた。そして4月中旬には線型加速器の安全システムの検査の実施、その後、ビームコミッショニングが開始された。

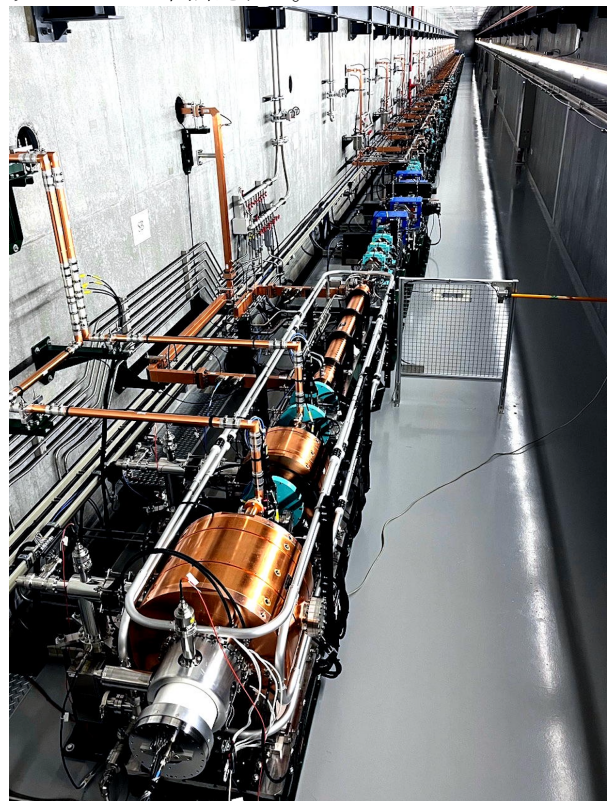


Figure 1: 3-GeV linear accelerator.

2.3 機器設置・アライメント

Figure 2に本施設の建屋のレイアウトを示す。全長130mの線型加速器収納部トンネルは、厚さ1mのコンクリートシールドで囲まれており、加速管や電磁石などすべての機器は最上流部の大型扉から搬入される。収納部トンネルの北側に位置するクライストロンギャラリには、クライストロン変調器電源、電磁石電源、各種制御システムが設置される。

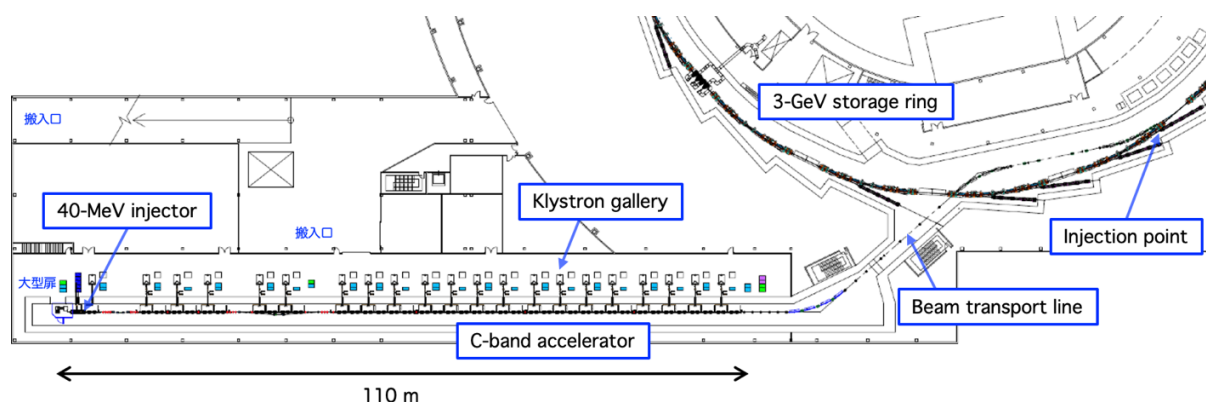


Figure 2: Layout of 3-GeV linear accelerator, beam transport line and klystron gallery.

収納部トンネル内、クライストロンギャラリーへの機器設置に先立ち、建屋内壁と床には複数箇所のアライメント基準点(モニュメント)が定められた。全ての貫通孔(導波管、ビームダクト)を測量し、機器配置と相互のずれが最小となる座標にモニュメントを置いた。モニュメントから加速管・電磁石架台、導波管サポート、クライストロン変調器電源など、すべての機器配置が決められた。収納部トンネル内に備えられる 238 MHz 加速空洞、476 MHz SHB、加速管、電磁石、ビーム位置モニタといった電子ビームに直接作用する機器のアライメント精度は、ビームに対する物理的クリアランス、安定領域確保の観点から、0.1 mm 以下を目指して進められた。垂直方向のアライメントについてはジオイド基準線とした。高周波空洞、加速管、電磁石は、レーザトラッカーにより 3 次元座標を取得しながら位置・姿勢を調整する。この精密アライメント作業は、機器設置時(2022年9月)、ビームコミッショニング前(2023年1月)の2回おこなわれた。

Figure 3 に最終アライメント結果を示す。加速管、電磁石、ビーム位置モニタについて、隣接する機器配置は 0.1 mm 以下で設置されている。また、相対標準偏差は、水平方向が $30 \mu\text{m}(\sigma)$ 、垂直方向が $37 \mu\text{m}(\sigma)$ の極めて高精度の機器設置が実現できた。3 GeV 線型加速器とその後方のビーム輸送系の機器についても精密測量を実施し、全域にわたって屈曲することなく滑らかに接続できていることを確認した。

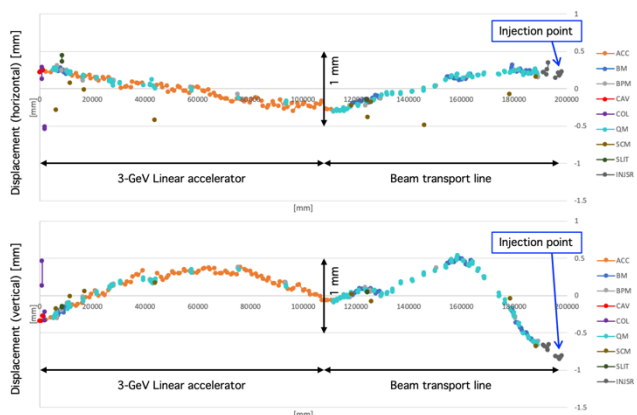


Figure 3: Alignment results of 3 GeV linear accelerator and beam transport line.

3. RF コンディショニング

3.1 RF 機器

50 kV 電子銃に直結した 238 MHz 加速空洞により、電子銃から生成された低エミッタンスビームは 480 keV まで加速される。238 MHz 空洞はリエントラント型で、2 つの周波数チューナ、RF 電力供給部カプラ、RF モニタ用ピックアップアンテナを空洞の下流側端板に設けた。これらの構造物は、空洞内ギャップの電場対称性を歪めることのない場所に配置されている。Table 1 には、238 MHz 加速空洞、ならびに 238 MHz 高周波半導体増幅器の主要性能を示す。

476 MHz SHB は、ノーズコーン構造で、200 kV のギャップ電圧によって速度変調バンチングをおこなう。SHB には 2 つの周波数チューナ、RF 電力供給部カプラ、RF モニタ用ピックアップアンテナが用意されている。Table 2 に 476 MHz SHB、476 MHz 高周波半導体増幅器の主要性能を示す。

S バンド定勾配進行波型加速管では、最初の数セルで最終バンチング・光速度域までのビーム加速、そして 40 MeV までエネルギー増強をおこなう。Table 3 に加速管、クライストロンの主要性能を示す。

Table 1: RF Parameter of 238-MHz Accelerating Cavity

Cavity freq.	238 MHz \pm 0.5 MHz (with tuner)
Q_0	23332
R_{shunt}	6.192 M Ω
RF amplifier	Solid state type amplifier
P max	42 kW
Pulse width	100 μs
Rep. rate	25 Hz
$\Delta P / P$	0.02% (std)
$\Delta\theta$	0.01° (std)

Table 2: RF Parameter of 476-MHz Sub-harmonic Buncher

Cavity freq.	476 MHz \pm 0.15 MHz (with tuner)
Q_0	25730
R_{shunt}	7.095 M Ω
RF amplifier	Solid state type amplifier
P max	14 kW
Pulse width	50 μ s
Rep. rate	25 Hz
$\Delta P / P$	0.02% (std)
$\Delta\theta$	0.01° (std)

Table 3: RF Parameter of S-band Accelerating Structure

Frequency	2856 MHz
Length	2 m (56 cell)
Type	Traveling wave type ($2\pi / 3$)
Q_0	13600 (average)
R_{shunt}	62.3 M Ω / m
Gradient	20 MV / m
RF amplifier	Klystron
P max	50 MW
Pulse width	1 μ s
Rep. rate	25 Hz
$\Delta P / P$	0.04% (std)
$\Delta\theta$	0.2° (std)

Table 4: RF Parameter of C-band Accelerating Unit

Frequency	5712 MHz
Length	2 m (114 cell)
Type	Traveling wave type ($2\pi / 3$)
Q_0	9122 (average)
R_{shunt}	64.4 M Ω / m
Gradient	42.5 MV / m
Phase error	$\pm 2.08^\circ$
RF amplifier	Klystron
P max	50 MW (200 MW with SLED)
Pulse width	2.5 μ s
Rep. rate	25 Hz
$\Delta P / P$	0.06% (std)
$\Delta\theta$	0.4° (std)

40 MeV 入射部で生成されるビームは、20 式の C バンド加速ユニットで 3 GeV まで加速する。50 MW クライストロンから出力される RF 電力は、RF パルス圧縮空洞 (SLED) で 4 倍増幅された後、2 本の加速管に供給される。1 台の加速ユニットで最大 170 MeV のエネルギー増幅が可能であり、2 式の C バンド加速ユニットが故障しても 3 GeV のエネルギー増幅が可能である。Table 4 には加速管、クライストロンの主要性能を示す。

3.2 低電力 RF システム・制御システム

低電力 RF 制御は、本線型加速器のプロトタイプ (ニュースバル放射光施設 1 GeV 線型加速器) で開発・構築された MTCA.4 を採用している。MTCA.4 は高速デジタルと RF フロントエンドで構成されており、励振アンプ出力、クライストロン入出力、SLED 出力、加速管への入出力部の進行波、反射波の RF 電力・位相の検出・制御がおこなわれる[3]。

C バンド加速管で最初に実施するクレスト加速位相探索は、加速管への誘起電圧と誘起位相測定によりおこなわれる。ビーム誘起信号は、C バンド加速管出口部分の方向性結合器から検出される。通常、この方向性結合器は加速管出口の RF 信号を検出するため減衰器を介して信号取得をおこなっている。ビーム誘起信号のような微弱 RF 信号を検出するには、減衰器を取り除かなければならない。このため、低電力 RF システムには複数の RF 減衰器が遠隔で切替えられる機能を装備している。

3.3 RF コンディショニング

238 MHz 加速空洞、476 MHz SHB、S バンド加速管、20 式の C バンド加速ユニットの RF コンディショニングは約 1 ヶ月間おこなわれた。とくに C バンド加速ユニットは、自動化された RF コンディショニング制御システムにより、加速管を含む大電力 RF 装置内の真空度に応じて RF 供給電力が調整される。

最初、0.5 μ s の RF パルス幅で RF コンディショニングが進められ、クライストロン最大出力電力に到達した後、RF パルス幅を拡大し、この条件でクライストロン最大出力電力に到達するまで RF コンディショニングが進められる。目標 RF パルス幅は 2.5 μ s であり、このとき SLED 出力は 190 MW となる。このとき、加速管への最大供給電力は 85 MW 程度まで到達する。Figure 4 には、C バンド加速ユニットの RF コンディショニング経過の一例を示す。

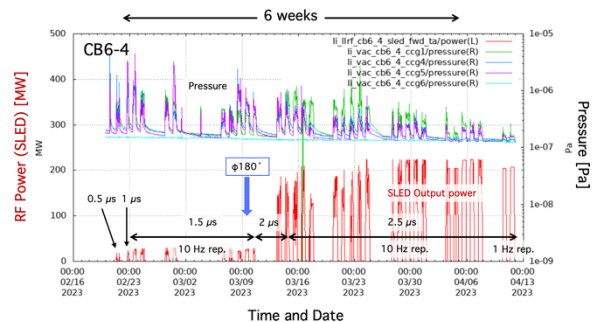


Figure 4: Process of the RF conditioning status of C band accelerating unit.

4. ビームコミッショニング

本線型加速器の電子銃システムはグリッド付き熱カソード(EIMAC 社製 Y845)を使用している。50 kV のカソード・アノード電圧下でグリッド透明化条件となるカソード・グリッド電圧を与えることで低エミッタンスビームを生成し、これを 238 MHz 加速空洞にて 480 keV まで加速する[4]。238 MHz 加速空洞の RF 電力と位相は、空洞の後方に備わる 2 台の CT 間を通過するビームの到達時間測定(TOF 測定)からビームエネルギーを算出し、最適化される。同様に 476 MHz SHB の RF 電力と位相も TOF 測定結果と PARMELA 計算結果比較により、最適値が得られる[5]。S バンド加速管の RF 電力と位相は、S バンド加速管後方のシケインエネルギー分散部でエネルギープロファイル測定により到達エネルギーとエネルギー幅が最適化される。

S バンド加速管の入口までは 6 台の磁気レンズを用いて、空間電荷効果によるビーム発散を抑え(ブリリアンフロー)、ビーム電荷量の損失なくビームを輸送する。機器パラメータ設定後、S バンド加速管出口の四極電磁石とスクリーンモニタによる Twiss パラメータ測定がおこなわれる。得られた Twiss パラメータから、マッチング部の Q 電磁石の励磁量を最適化し、C バンド加速部入口までビームを輸送する。

上流の C バンド加速ユニットから順次ビーム誘起電圧・位相測定を実施し、クレスト加速位相を設定する。そして、各部に配置されたビーム位置モニタ、ならびにスクリーンモニタでビーム位置とプロファイルを観測、ステアリングコイルによるビーム軌道を調整し最下流まで輸送する。

3 GeV 偏向電磁石とビームダンプの間にあるスクリーンモニタでエネルギープロファイルを観測し、C バンド加速ユニットの RF 電力・位相の微調整をおこなう。最終的に到達した 3 GeV ビームエネルギーにおいて、ビーム誘起法で得たクレスト加速位相からの位相差は、 $\pm 10^\circ$ 程度であった。

Table 5 にはビームコミッショニングで得られたビーム性能をまとめる。すべてのビームパラメータは設計値(要求性能)を満足している。

Table 5: Design Value and Measurement Results of Beam Parameter of 3 GeV Linear Accelerator

	Design	Measurement
Charge	> 0.3 nC	0.4 nC > 80 % transmission
Energy	3 GeV	3 GeV
dE / E	< 0.2 % (FWHM)	0.12 % (FWHM)
Norm. ϵ @40 MeV	5 mm mrad	6.7 mm mrad (Hor.) 8.3 mm mrad (Ver.)
Abs. ϵ @3 GeV	2e-9 m rad	1.1e-9 m rad (Hor.) 2.2e-9 m rad (Ver.)

5. まとめ

次世代放射光施設 NanoTerasu の 3 GeV 線型加速器の建設は予定通り完了し、その後実施したビーム調整も計画通りに進めることができた。ビームコミッショニングでは開始からわずか 10 日で所定のビーム性能に到達している。これは加速器基本設計の段階において、ビーム性能の追求のみならず、ビーム調整手法とその手順に至るまでの検討と綿密な調整計画を立案、そして、これを忠実に実施した結果と考えている。とくにビーム性能に大きく寄与するバンチング部の RF 振幅・位相の最適化は、TOF 測定によるビームエネルギー(電子速度)測定結果とシミュレーション結果の比較により、精密な設計パラメータ設定を可能とした。

また、日々実施されるビーム調整において、各機器調整の最適化パラメータが適切に積み上げられるには、大電力機器の安定動作と高い再現性をもつことは勿論、ビーム調整の間も極めて高い水準の安定性で機器パラメータを維持することが不可欠である。これは SACLA 加速器で培った安定化技術、ならびにプロトタイプ加速器で開発した低電力 RF システムにおける高精度 RF 電力・位相の検出、帰還制御が大きな役割を果たしている。

謝辞

3 GeV 線型加速器の構成機器の製造、設置・調整は、多くの方々の協力をいただきました。アイデン(株)、工藤電機(株)、クリハラント(株)、多摩川電子(株)、トヤマ(株)、日本高周波(株)、日立造船(株)、明昌機工(株)、三菱重工(株)、ニチコン(株)、PPJ(株)、その他、多くの関係メーカーには、線型加速器の機器製作・設置・機器調整を計画通りに進めていただきました。皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] N. Nishimori, "A new compact 3 GeV light source in Japan", in *Proc. of IPAC2022*, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp.2402-2406.
- [2] T. Asaka *et al.*, "次世代放射光施設のための 3 GeV 線型加速器の基本設計", in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, July 31 - Aug. 3, 1-3, 2019, pp. 771-775.
- [3] T. Ohshima *et al.*, "放射光施設ニュースパルの新入射器のタイミング・低電力高周波制御システム", in *Proc. of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, QST-Takasaki Online, Aug. 9 - 12, 2021, pp. 156-160.
- [4] T. Asaka *et al.*, "Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode", *Phys. Rev. Accel. Beams* **23**, 063401 (2020).
- [5] T. Asaka *et al.*, "次世代放射光施設 NanoTerasu 線型加速器・電子入射部のビーム性能", 本加速器学会, THP49, 2023.