

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

BEAM PERFORMANCE OF INJECTOR SYSTEM IN NanoTerasu

安積隆夫^{#, A)}, 上島孝太^{A)}, 菅晃一^{A)}, 西森信行^{A)}, 青木駿堯^{B)}

Takao Asaka^{#, A)}, Kota Ueshima^{A)}, Koichi Kan^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Toshitaka Aoki^{B)}

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

^{B)} NAT Co., Ltd.

Abstract

The 3-GeV linear accelerator at NanoTerasu is equipped with a 40-MeV injector system capable of producing low-emittance beam. The injector system consists of a RF electron gun with a gridded thermionic cathode, a bunching system and a 2 m long S-band accelerating structure to produce a high-quality electron beam with a beam charge of more than 0.3 nC and a normalized emittance of less than 10 mm mrad. The injector system has a continuously variable beam collimator that enables simple and precise adjustment of the beam charge. In this report, we present the details of the configuration of the injector system and the beam performances during the beam commissioning.

1. はじめに

次世代放射光施設 NanoTerasu[1]の 3 GeV 線型加速器では、低エミッタンスビームを生成可能な 40 MeV 入射部を備えている。この入射部は、グリッド付き熱カソードを使用した高周波電子銃、その後段にはバンチングシステム、初段加速器から構成され、ビーム電荷量が 0.3 nC 以上で規格化エミッタンスが 10 mm mrad 以下の高品質ビームを生成する[2]。また、入射部にはビーム電荷量を簡易かつ精密調整可能な連続可変可能なコリメータを備えており、蓄積リングの入射要求に応じたビーム電荷量の調整がおこなわれる。

設計段階から高品質ビーム生成の早期実現を目指したビーム調整手法・手順の検討がなされ、これに基づくビームモニタの種類・配置の最適化をおこなってきた。ビームコミッショニング期間では、このビーム調整計画に沿った機器パラメータの最適化をおこない、開始からわずか 4 日間で所定のビーム性能を達成することができた。

本報告では入射部の構成、機器の調整・最適化手法の詳細を示すとともに、得られたビーム性能についてシミュレーション結果との比較をおこなう。

2. 40 MeV 入射部

年間 5000 時間以上の利用運転を計画している本施設において、安定したビーム入射・蓄積は勿論、加速器運転中の機器トラブルを最小限化することが肝要である。Top-up 運転を前提とした 3 GeV 線型加速器は常時安定した高品質ビームの生成・加速を実現するため、以下に示す 4 つの指針に基づいた設計・構築がなされた[3]。

- ・高稼働率を実現するシステム設計(高安定ビーム供給)
- ・高信頼性、高堅牢性、高保守性(既存技術の利用)
- ・ミニマルデザイン(建設コストの縮小)
- ・運転経費の効率化(省エネルギー化、自立運転)

低エミッタンス蓄積リングの狭いダイナミックアパーチャに対して、高効率ビーム入射をおこなうには、入射ビームの低エミッタンス化は不可欠である。3 GeV 線型加速器には 2e-9 mrad 以下のエミッタンスが要求され、これは電子銃システムを含む 40 MeV 入射部出口で 10 mm mrad 以下の規格化エミッタンスに相当する。

低エミッタンスビームを生成するには、光カソードを用いた RF 電子銃[4]や SACLA で使用している単結晶カソードを用いた 500 kV 電子銃[5]が候補として挙げられる。前者は極紫外領域の短パルスレーザシステムを使用するため、レーザ調整のための専門技術者の常駐が不可欠となる。一方、500 kV 電子銃は、安定したビーム生成が可能であるが、高電圧印加のため大規模装置を用意しなければならない。こうした課題を克服するため、第 3 の低エミッタンス電子銃として、市販のグリッド付きの熱カソード(EIMAC 社製 Y845)を用いた高周波電子銃を開発し、本入射部ではこれを採用している[6]。

Figure 1 に 40 MeV 入射部とシケイン部を示す。この入射部は、低エミッタンス高周波電子銃システム、バンチングシステム、初段加速管から構成されている。電子銃では、カソード・グリッド間の高電圧制御により、パルス幅が 300 ps のビームを生成する。このとき、グリッドの電場歪みを最小化する条件(グリッド透明化条件)により、グリッドを通過する電子は余分な横方向キックを回避できる。その結果、電子銃出口において、均一な電子分布を形成した高品質ビームが生成される。

50 kV のカソード・アノード間電圧で引き出された 0.5 nC の電子ビームは、アノードから 20 cm を経て 238 MHz 加速空洞で 480 keV まで加速される。その後、476 MHz サブハーモニックバンチャー(SHB)と S バンド加速管で電子集群、そして 40 MeV の加速がおこなわれる。電子銃から生成したビームが S バンド加速管に到達する間、離散的に配置した 6 台の磁気レンズによってブリアンフローにしたがう横方向ビーム収束をおこなう。

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

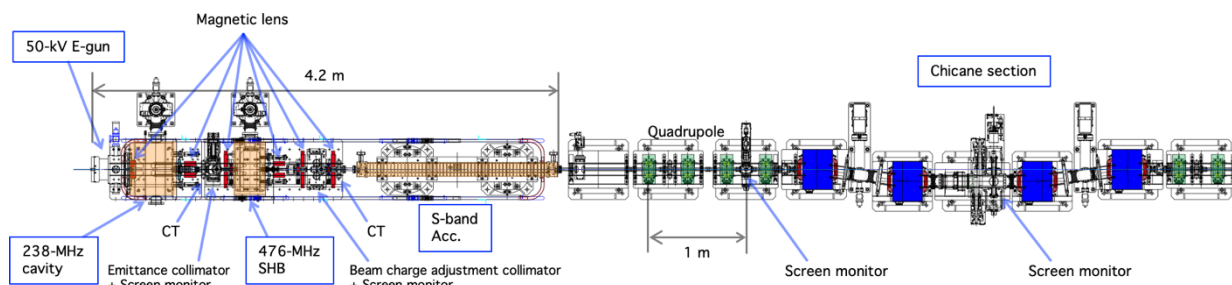


Figure 1: Layout of 40-MeV injector system and chicane section.

磁気レンズは局所的な収束磁場を発生するので、238 MHz 加速空洞および 476 MHz SHB のギャップ電場と干渉のない機器配置が実現できる。これにより、機器パラメータ毎に独立したビーム応答特性(ビームサイズ、エネルギー)を取得できるので、シミュレーションで得られるビーム挙動との比較が容易となる。

Figure 2 に 40 MeV 入射部出口の PARMELA 計算結果(縦方向粒子分布、エネルギー分布、ビームサイズ、水平・垂直方向位相空間の粒子分布)を示す。Figure 3 には、40 MeV 入射部全域にわたる規格化エミッタンスの変化を示す。シミュレーション計算では、入射部に備わるエミッタンス制限コリメータとビーム電荷量調整用コリメータも仮定している。シミュレーションの結果、40 MeV 電子ビームは、バンチ長が 5 ps 以下、ビーム電荷量が 0.4 nC で 5 mm mrad の規格化エミッタンスが得られる。

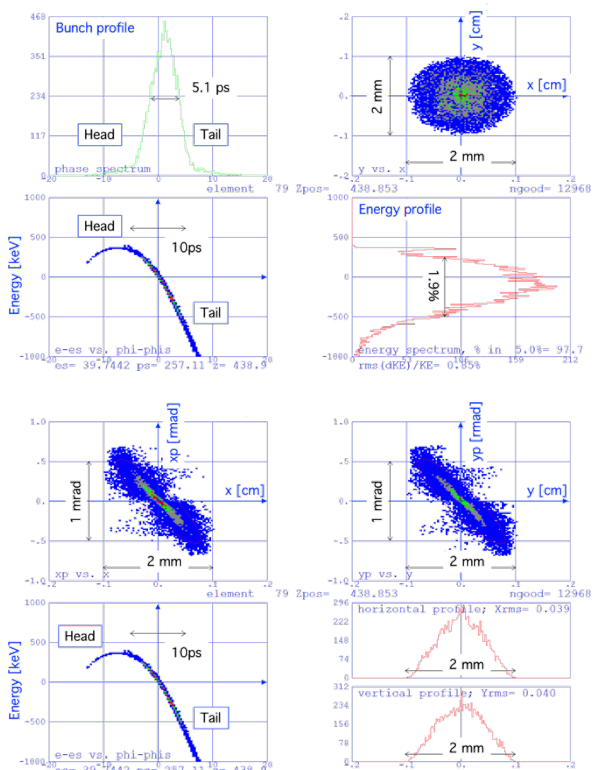


Figure 2: Simulation results of bunch profile, energy profile, beam size and distribution in phase space by PARMELA.

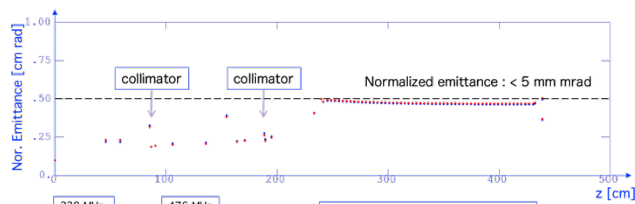


Figure 3: Simulation results for normalized emittance along the beam axis.

3. ビームコミッショニング

3.1 電子銃システム

電子銃システムでは、50 kV 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・グリッド電圧を設定し、低エミッタンスビームを生成する。ビームは 238 MHz 加速空洞にて直ちに 480 keV まで加速する。

加速空洞への入力 RF 電力と位相は、空洞後の 2 台のビーム電流モニタ(CT)を通過するビーム飛行時間測定(TOF 測定)から最適化される。

最初に TOF 測定で最大エネルギーとなる RF 位相を確認し、設定する。クレスト加速位相の条件で入力 RF 電力の増加にしたがう電子ビーム速度を測定した。この測定結果を Fig. 4 に示す。また、238 MHz 加速空洞のシャントインピーダンスから推定されるエネルギー特性も示す。測定で得られたビームエネルギーは空洞のシャントインピーダンスで推定されるエネルギー利得と概ね一致している。

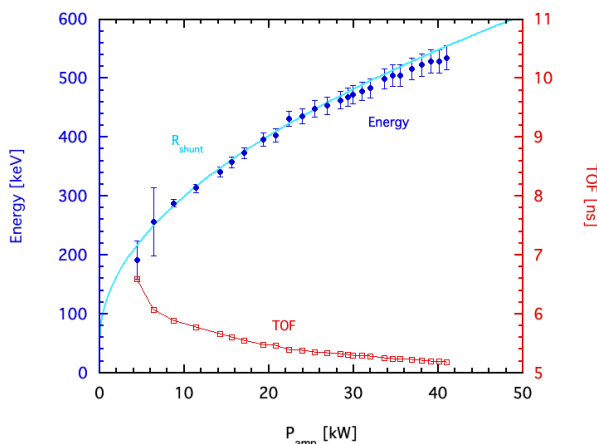


Figure 4: Energy gain by 238-MHz RF cavity of the RF electron gun system.

3.2 476 MHz サブハーモニックバンチャー

電子集群過程において、バンチ内の電子分布に不均一が生じると、非線形空間電化効果によってエミッタンスが悪化する。これを回避するため 476 MHz SHB の速度変調バンチングでは、ビームタイミングを RF 正弦波の第 3 象限位相に合わせる。これにより、電子速度の非線形性を緩和できる。バンチ内の電荷密度が維持されながら電子集群が進むので、エミッタンス悪化を抑えたバンチングが実現できる。

SHB の RF 電力・位相は、Fig. 1 に示した SHB 後方の CT に到達するビームタイミング測定 (TOF 測定) で最適化できる。Figure 5 には SHB の RF 電力、および位相変化にしたがうビーム到達時間変化と最適なギャップ電圧条件下のシミュレーション結果を示す。SHB の入力 RF 電力の増加 (ギャップ電圧の増加) にしたがって最大加速・減速位相ビーム到達の時間差が増大していく。TOF 測定結果とシミュレーション結果を比較することで、最適バンチングとなる RF 電力、位相を見出すことができる。シミュレーション結果から最適バンチング位相は、クレスト位相から -135° である。また、最適な RF 電力は 4.8 kW であることが分かる。

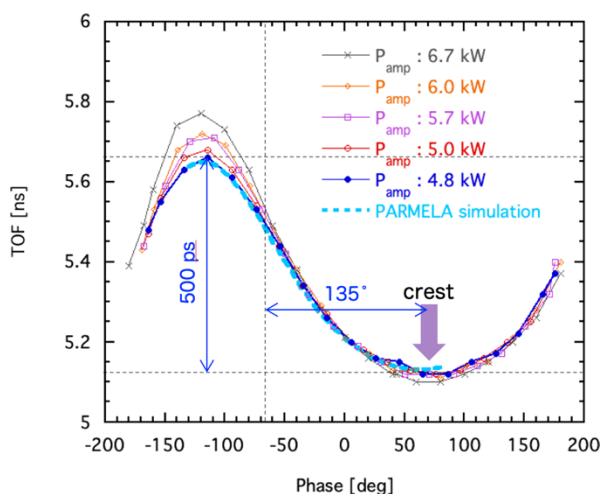


Figure 5: Beam arrival time at 2nd CT by the rf power and phase of 476 MHz SHB.

3.3 S バンド加速管

40 MeV 入射器では 2 m 長 S バンド定勾配進行波型加速管 ($2\pi/3$ モード) を使用する。加速管のセル数は 56 セル (カプラセルを含む) で、20 MV/m の加速勾配で運転する。

加速管入口に到達するバンチビームの重心エネルギーは 320 keV である。加速管内を通過するバンチビームは加速管の 5 セルに到達する間に、最終的な電子集群と加速が同時におこなわれる。このとき、加速管を伝搬する RF の位相速度が光速であるために入射ビームは加速管の位相速度に比べて遅延して進むことになる。

オフクレスト位相にビームが入射されるタイミングの違いは、光速域までの加速過程の差異、すなわち位相スリッププロセスの違いから、バンチのエネルギーチャープに影響する。言い換えれば、ビームがほぼ光速に到達する 6 セル目以降の RF 位相とバンチの位相関係から、加速管出口におけるバンチ内のエネルギー分布は

Fig. 6 に示すような正、あるいは負のエネルギーチャープを与えることになる。

S バンド加速管の RF パラメータの最適化は、40 MeV 入射部後方にあるシケイン部 (エネルギー分散部) でおこなわれる。Figure 7 は S バンド加速管の RF 位相に対するエネルギー依存性について、シミュレーション結果、ならびに測定結果を示す。測定したビームエネルギーは、シミュレーション結果と同様の傾向を示している。また、シミュレーションから各 RF 位相におけるバンチ内エネルギー分布状態が推測できる。最終的に確定した RF 位相は、シケインにおいて若干のバンチ圧縮効果が得られる負のエネルギーチャープとした。

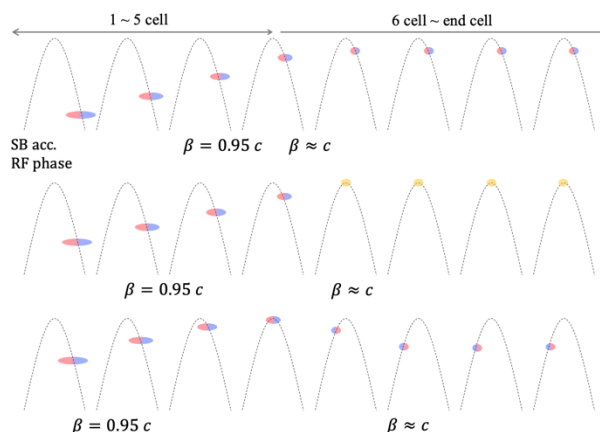


Figure 6: Schematic diagram of energy distribution control by RF phase of S-band accelerating structure.

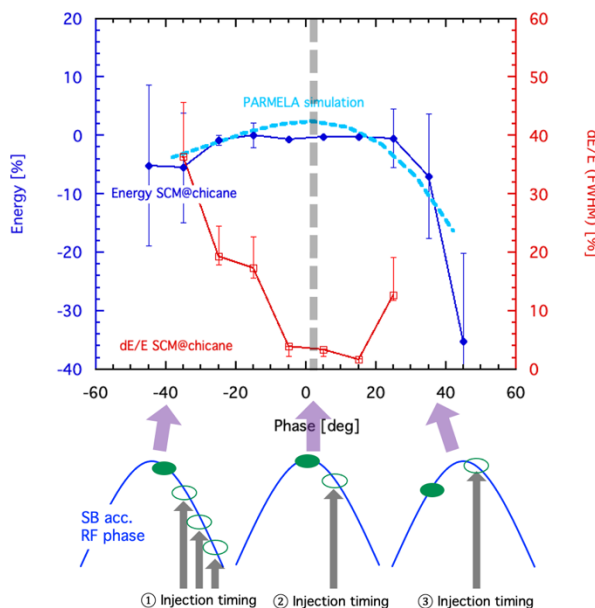


Figure 7: Energy measurement results by RF phase of S-band accelerating structure.

4. ビーム性能

すべての機器パラメータが最適化された後、40 MeV 入射部出口におけるエミッタンス測定をおこなった。エミッタンスは S バンド加速管直後にある四極電磁石の励磁量変化に対するビームサイズ応答から得られる。ビームサイズ測定で用いるスクリーンモニタは四極電磁石か

らは 1 m の距離を隔てた位置に配置されている。

スクリーンは、厚さ 0.1 mm の Yag: Ce を使用している。ビームプロファイルを撮像する CCD カメラは EtherCAT 通信により、シャッター速度設定、ゲイン設定を遠隔可能とし、すべての制御は GUI を介しておこなわれる。

撮像したビームプロファイルは画像処理され、正規分布フィッティングによってビームサイズを取得する。Figure 8 は、四極電磁石励磁量に対する水平・垂直方向ビームサイズ (σ^2) を示す。40 MeV に加速されたビーム電荷量は 0.4 nC で、規格化エミッタンスは水平・垂直方向それぞれ 6.7 mm mrad、8.3 mm mrad であった。これらの結果は目標エミッタンスを満足している。Table 1 には、その他のビーム性能をまとめる。

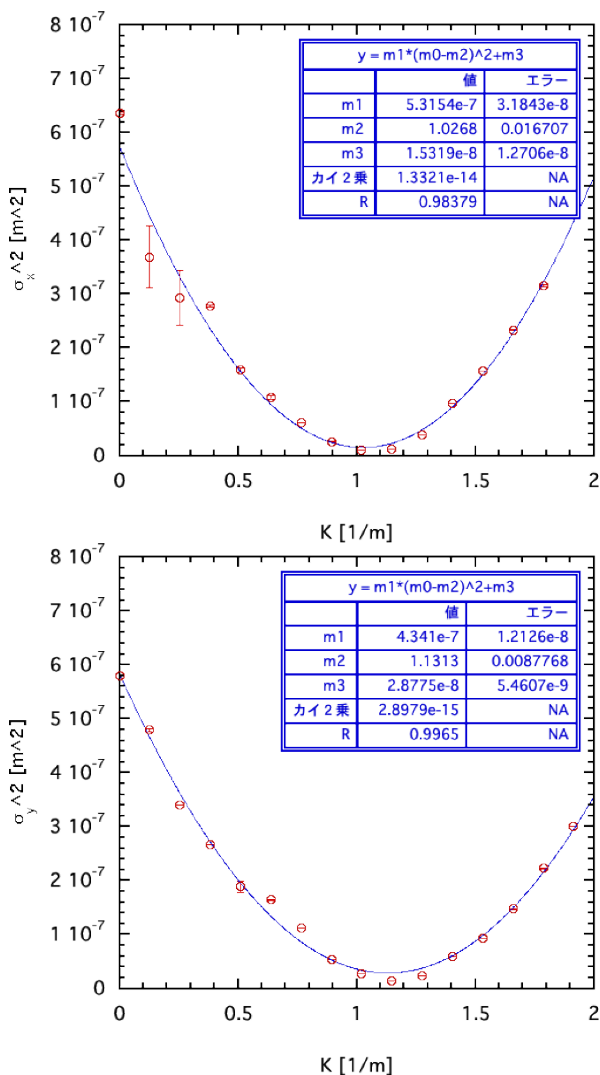


Figure 8: Measurement of beam size by quadrupole scan.

Table 1: Beam Parameter of 40-MeV Injector System

	Design	Measurement
Charge	> 0.3 nC	0.4 nC
Energy	40 MeV	40 MeV
dE / E	1.9 % (FWHM)	2 % (FWHM)
Norm. ϵ	5 mm mrad	6.7 mm mrad (Hor.)
		8.3 mm mrad (Ver.)

5. ビーム電荷量調整(連続可変式コリメータ)

通常、グリッド付き熱カソードを用いた電子銃が使用される場合、カソード・グリッド電圧制御により、以下に示す 2 つの機能を活用する。

- 電子ビームのパルス生成 (0.3~1 ns 幅)
- ビーム電荷量の調整

本電子銃では、グリッド透明化条件で使用するために、カソード・グリッド電圧は一定値で使用することになる。このため、カソード・グリッド電圧制御によるビーム電荷量の調整ができない。そこで 476 MHz SHB と S バンド加速管の間に、物理口径(アイリス)が円形のままで連続的に変化するビーム電荷量調整用コリメータを用意した。Figure 9 にアイリス口径が連続可変するコリメータの原理・構造、Fig. 10 には外観を示す。この連続可変コリメータは、以下に示す事項を念頭に置き設計、製作した。

- 物理口径の円形状を維持(円形アイリスの連続可変)
- 単純化構造(故障リスクの低減)
- 簡易な操作性(1 台のステップモータによる動作)

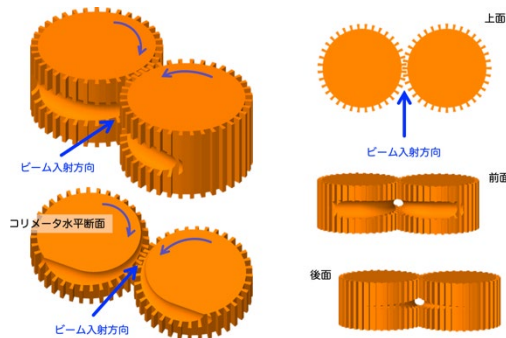


Figure 9: Schematic of beam collimator.

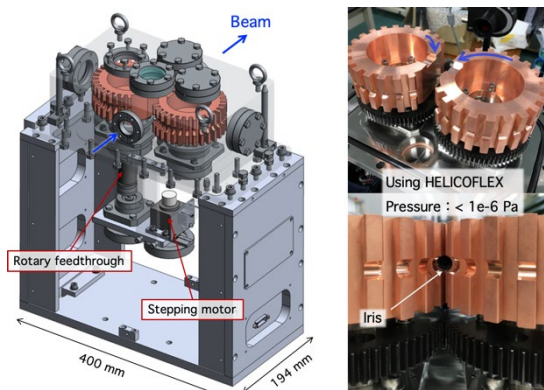


Figure 10: Continuously variable beam collimator.

コリメータ本体は 2 つの歯車形状をもつ銅材を使用する。Figure 9 に示したように、互いに重なり合う歯面(歯先部分)にはテーパ状に変化していく半円形の溝加工が施されている。歯車の回転角度にしたがって、重なり合う歯面部分は円形孔を形成しながらその大きさが変化していく。また、歯厚寸法は、500 keV の電子ビームに対して十分にエネルギー損失を与える厚さとしている。

2 つの歯車形状の銅材は、DLC コーティングが施されたギア付きターンテーブルにそれぞれ固定される。ターンテーブルは機械式回転導入軸を介して 1 台のステップモータで任意の回転角度を与えることができる。

このビームコリメータの直後にはスクリーンモニタを装備し、これらはひとつの真空容器に収納される。実際にビーム電荷量を調整する際、コリメータを開放状態で、ビーム位置をスクリーン中心(コリメータ中心)に合わせる。そして、アイリス口径を変更し、ビームを切り出すことによってビーム電荷量を調整する。Figure 11 には、アイリス口径に対するビーム電荷量依存性を示す。

本コリメータは S バンド加速管直前に配置されていることから、その後のオプティクス調整をすることなく、ビーム電荷量が調整できる。

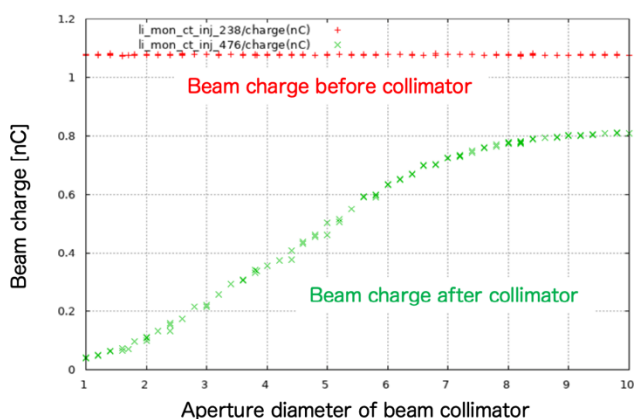


Figure 11: Dependence of beam charge on aperture size of beam collimator.

6. まとめ

次世代放射光施設 NanoTerasu の 40 MeV 入射部は機器設置完了後、予定通り 4 月中旬よりビームコミッションを開始した。ビーム調整は、綿密に練り上げられた手順に沿って構成機器の最適パラメータが見出され、順次、最適化、設定された。電子銃システムのビーム生成・加速パラメータ、476 MHz SHB および S バンド加速管の RF パラメータ探索は、TOF 測定、エネルギー測定結果とシミュレーション計算を比較することにより、適切なパラメータが決められた。40 MeV 入射部出口の Twiss パラメータ測定(エミッタンス測定)で、ビーム性能が確認された後、C バンド加速部におけるビーム輸送と 3 GeV までのビーム加速も数日で達成できた。6 月以降実施している蓄積リングのビームコミッションでも安定した入射を実現している。

この 3 GeV 線型加速器は、蓄積リングの入射器としての役割を果たす一方、将来計画である軟 X 線自由電子レーザー(SX-FEL)のための線型加速器として使用予定である。さらなる低エミッタンス化を目指した入射部改造

計画を進めるにあたり、現状の入射部の機器パラメータによるビームへの影響を調査し、SX-FEL 用線型加速器の設計に反映していく予定である。

謝辞

40 MeV 入射部の設計・開発、機器設置・調整、ビーム試験に至るまでに、多くの方々の協力をいただきました。本入射部の設計・開発にあたり、理研/放射光科学研究センターの田中均副センター長には、本入射部の目指すべきビジョンを示していただくとともに、あらゆる場面で有益なアドバイスをいただきました。同研究所の稲垣隆宏氏、前坂比呂和氏、安積則義氏、高輝度光科学研究センターの岩井瑛人氏、糸賀俊朗氏、大島隆氏、近藤力氏、櫻井辰幸氏、谷内努氏、出羽英紀氏、細田直康氏、馬込保氏、柳田謙一氏には、入射部プロトタイプ機の機器開発から本施設機器設置に至るまで多岐にわたりご協力いただきました。入射部のアライメント作業、制御システム構築・立ち上げ作業は、スプリングエイトサービスの酒井康平氏、住友博史氏、森谷佳津貴氏、山本龍氏、横町和俊氏、吉岡正倫氏により実施されました。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)、ニチコン(株)、日本高周波(株)、日立造船(株)、明昌機工(株)、三菱重工(株)、PPJ(株)、その他、多くの関係メーカーには、入射部の機器製作・設置・機器調整を計画通りに進めていただきました。NAT(株)の運転支援スタッフには、加速器立ち上げに関してサポートしていただきました。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 NanoTerasu の 3 GeV 線型加速器ビームコミッションの状況", presented at 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Aug. 2023, paper WEOA7, this conference.
- [3] 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.
- [4] X. J. Wang *et al.*, "Design and construction a full copper photocathode rf gun", in *Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conference*, Washington, DC, 1993 (JACoW, Washington, DC, 1993), p.3000.
- [5] K. Togawa *et al.*, "CeB₆ electron gun for low-emittance injector", *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10**, 020703 (2007).
- [6] T. Asaka *et al.*, "Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode", *Phys. Rev. Accel. Beams* **23**, 063401 (2020).