

ニュースバル 1.0 GeV 新入射器の建設とコミッショニング運転

COMMISSIONING OF THE NEW 1.0 GeV ELECTRON LINAC FOR NewSUBARU STORAGE RING

稲垣隆宏^{A)}, 平岩聡彦^{A)}, 前坂比呂和^{A)}, 原徹^{A)}, 田中均^{A)}, 安積隆夫^{B)}, 出羽英紀^{B)}, 細田直康^{B)}, 岩井瑛人^{B)}, 近藤力^{B)}, 馬込保^{B)}, 大島隆^{B)}, 櫻井辰幸^{B)}, 柳田謙一^{B)}, 濱田洋輔^{B)}, 杉本崇^{B)}, 糸賀俊朗^{B)}, 安積則義^{B)}, 橋本智^{#,C)}, 藤井将^{C)}, 井上忍^{D)}, 鍛冶本和幸^{D)}, 皆川康幸^{D)}, 中田翔太郎^{D)}, 住友博史^{D)}, 田中信一郎^{D)}, 山本龍^{D)}, 吉岡正倫^{D)}, 西森信行^{E)}, 上島考太^{E)}, 保坂勇志^{E)}, 岩下大器^{E)}

Takahiro Inagaki^{A)}, Toshihiko Hiraiwa^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Toru Hara^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Takao Asaka^{B)}, Hideki Dewa^{B)}, Naoyasu Hosoda^{B)}, Eito Iwai^{B)}, Chikara Kondo^{B)}, Tamotsu Magome^{B)}, Takashi Ohshima^{B)}, Tatsuyuki Sakurai^{B)}, Kenichi Yanagida^{B)}, Yousuke Hamada^{B)}, Takashi Sugimoto^{B)}, Toshiro Itoga^{B)}, Noriyoshi Adumi^{B)}, Satoshi Hashimoto^{#,C)}, Hitoshi Fujii^{C)}, Shinobu Inoue^{D)}, Kazuyuki Kajimoto^{D)}, Yasuyuki Minagawa^{D)}, Shotaro Nakata^{D)}, Hiroshi Sumitomo^{D)}, Shinichiro Tanaka^{D)}, Ryo Yamamoto^{D)}, Masamichi Yoshioka^{D)}, Nobuyuki Nishimori^{E)}, Kota Ueshima^{E)}, Yuji Hosaka^{E)}, Taiki Iwashita^{E)}

^{A)}RIKEN SPring-8 center

^{B)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{C)}Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo

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

^{E)}National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

A new 1.0 GeV electron linac for the NewSUBARU storage ring was constructed at the end of 2020. After the beam commissioning, we succeed in accelerating the stable beam with a good performance in March 2021. The linac consists of a grid-controlled thermionic cathode RF gun, a 476 MHz buncher cavity, an S-band accelerating tube, and the C-band accelerating tubes, featuring a compact size and low cost. We were able to resume user operation with the new injector four weeks earlier than the planned date.

1. はじめに

SPring-8 サイト内にあり兵庫県立大学が運用するニュースバル放射光施設(図 1)は国内大学では最大となる 1.5 GeV 電子蓄積リングを有し、軟X線放射光の産業利用に向けた研究開発を行っている[1, 2]。

長年にわたり電子ビームを供給していた SPring-8 の 1.0 GeV 線型加速器の運用停止に伴い(図 2)、ニュースバル電子蓄積リング専用の新たな入射器を建設し、設計値通りのビーム出射に成功した[3]。本入射器は C バンド加速管を用いた全長が約 70 m のコンパクトかつ低コストの線型加速器であるのが特徴で、現在建設中の東北 3 GeV 光源用入射器のプロトタイプでもある。

令和 2 年 8~12 月に行った既存のビーム輸送系トンネル内に新入射器を設置する工事はコロナ禍の中、無事予定通り完了した。今年 1 月から RF コンディショニング運転、2 月中旬から入射器ビームコミッショニング運転、3 月にはほぼ設計通りの 1.0 GeV ビーム出射とリングへのビーム蓄積に成功し、当初予定よりも 4 週間ほど前倒して 4 月下旬より蓄積電流 350 mA での供用利用を再開した。

高性能な専用入射器の稼働により、リング加速器

運転の柔軟性や調整も大きく改善された。本報告では新入射器の概要、建設、コミッショニング運転および現在までの運転状況について報告する。



Figure 1: NewSUBARU synchrotron light facility.

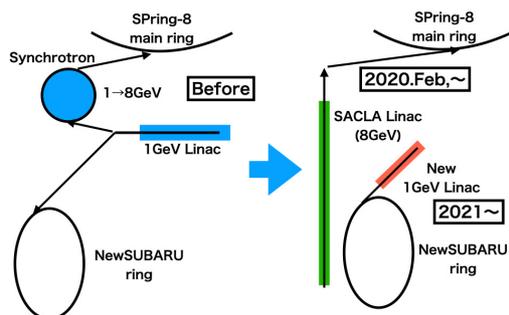


Figure 2: Injector for the NewSUBARU storage ring.

[#]hashi@lasti.u-hyogo.ac.jp

2. 新入射器の概要

2.1 全体構成

本入射器は 238 MHz 空洞に直付されたグリッド制御の熱陰極 RF 電子銃、476 MHz RF 空洞、S バンド加速管、高勾配加速電場を持つ C バンド加速管などから構成される[3-7]。図 3 に入射器の全体配置図を示す。

2.2 グリッド熱陰極 RF 電子銃

高輝度・短パルス電子ビーム生成のために開発された 238 MHz 高周波空洞に直付けされた熱陰極 RF 電子銃 (図 4) を用いている[4,5]。グリッドに印加された 200 ps, 48.8 kV のパルス電圧により陰極から引き出された電子は 238 MHz 空洞電場により約 500 keV に加速される (400 pC, 0.2 ns)。

2.3 S バンド加速管

238 MHz 空洞を出た電子ビームは下流の 476 MHz 空洞および S バンド加速管 (図 5) により 3 ps まで圧縮される (50 MeV)。S バンドのクライストロン、モジュレータ電源、加速管はシャットダウンした SPring-8 線型加速器の機材を再利用している。

2.4 C バンド加速管

C バンド加速管 (2 m) が計 16 本使用され (図 6)、4 本毎に 1 台のクライストロンで駆動される[6]。高い加速勾配 (~31 MV/m) を実現し、1 台のクライストロン (2 m×4 本) あたり、約 250 MeV であり、トータルの最大エネルギーは 1.0 GeV である。

2.5 ビームダンプ

線型加速器の下流に 1.0 GeV ビーム用の垂直偏向電磁石およびビームダンプが設置されている (図 7)。これらの中にはスクリーンモニターおよび BPM があり、出射ビームのエネルギーやエネルギー広がりを計測することができる。

2.6 ビーム輸送系

今回の工事はリング側の変更はないので入射点付近 TWISS パラメータはそのまま入射器出口からのエンベロップ関数をスムーズにつなぐ様に輸送系の設計を行った (図 8)。

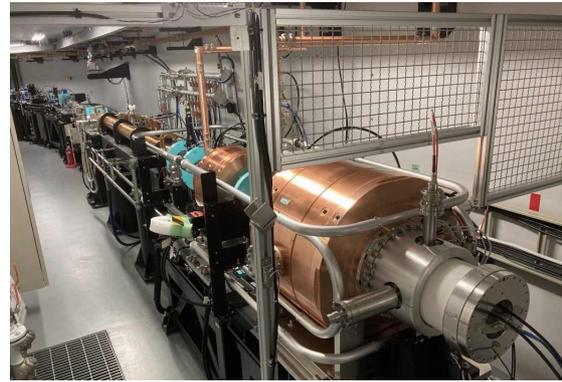


Figure 4: RF electron gun of the new linac.

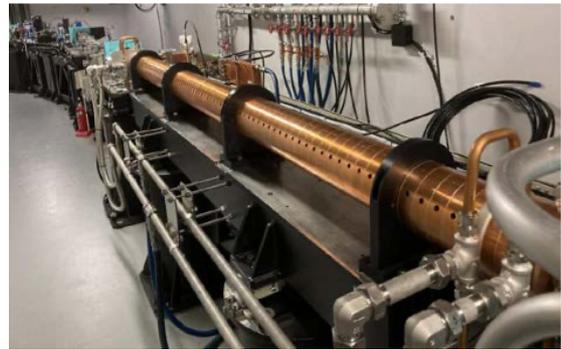


Figure 5: S-band accelerating tube.

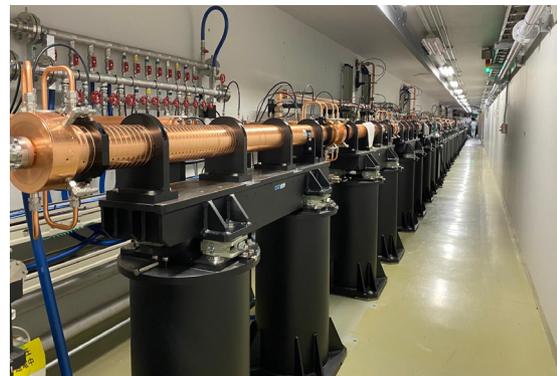


Figure 6: C-band accelerating tubes.

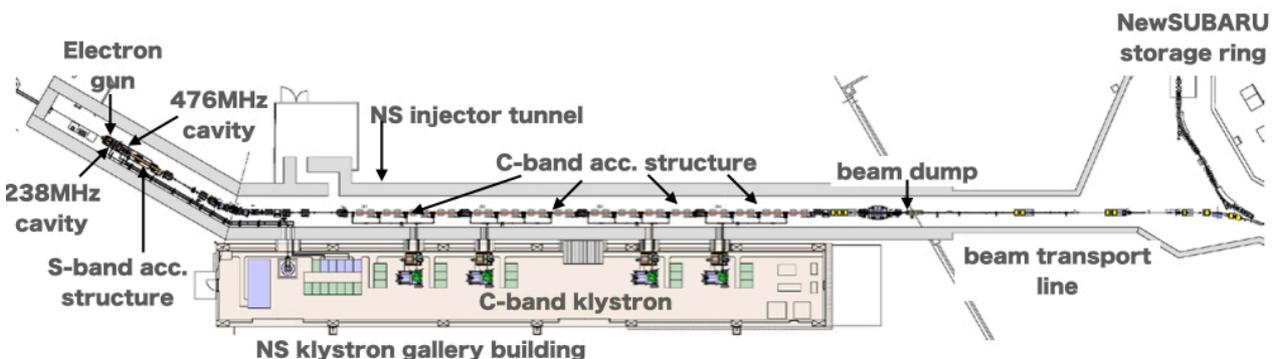


Figure 3: General layout of the new 1.0 GeV electron linac for the NewSUBARU storage ring.



Figure 7: Beam dump and vertical bend.

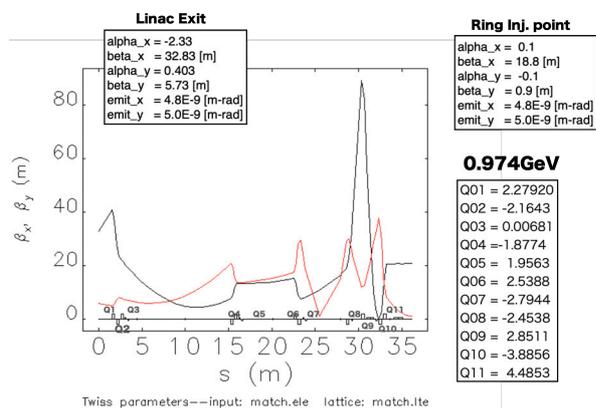


Figure 8: Envelope function of beam transport line.

4 極電磁石、ステアリング電磁石、スクリーンモニタなどは撤去されたビーム輸送系機器を再利用した。以前のビーム輸送系下流側にはなかった BPM を数台新たに設置した。リング入射点直前の偏向電磁石下流に設置した BPM によりビーム位置変動からエネルギー変動の評価が可能になった。

2.7 加速器制御系

入射器機器制御のために MTCA.4 の高速デジタイザと RF フロントエンドで構成された RF 制御システムを構築した[7]。入射器の制御フレームワークには SPring-8/SACLA と同じ M&M を採用し、GUI グラフィックライブラリとして Qt が用いられている。リング加速器の制御系は MADCOA2 および X-mate で構築されていたので今回の工事に合わせてリング側も同じシステムに更新した。また専用の計算機サーバーや制御端末を増設するためサーバー室や制御室の大幅なレイアウト変更を行った。

3. 新入射器の建設

新入射器の建設から利用運転再開までの経過を表 1 に示す。2018 年度末にクライストロンギャラリー建屋である附属棟が完成し、2019 年度には天井クレーン(2t)、クライストロン据付用の高精度平坦樹脂床面、防油堤、冷却水ヘッダーなど附属棟ユーティリティ関連設備の整備を行った。2020 年 1 月からクライストロン、モジュール電源、制御機器等

の附属棟への搬入と設置作業を開始した。絶縁油作業のための少量危険物取り扱い許可申請、クライストロン設置のための高周波利用設備変更許可申請、放射線変更許可申請など諸手続きを行った。7 月には制御機器の試験も兼ねて C バンドクライストロン単体での高圧出力試験(50 MW, 0.25 μ s, 30 Hz)に成功した。

2020 年 7 月末に放射光利用運転が終了し、翌 8 月からビーム輸送系トンネル内の機器撤去作業を開始した。既存のビーム輸送系機器だけでなく、冷却水配管、空調機、ケーブルラックなども全て撤去した後、新入射器に合わせて再設置した。クライストロンからの導波管や各種ケーブルを通線する遮蔽トンネル壁の貫通穴、トンネル天井チェーンブロック用レールなどユーティリティの再整備も 9 月には完了した。10 月から新入射器の設置作業が始まり、また安全インターロック系および入退室管理系の改修なども実施した。狭いトンネル内で多数の作業員が作業を行わざるを得なかったため、消毒やトンネル入室者数の制限などコロナ感染症対策を徹底した。途中、作業員 1 名が濃厚接触者であることが判明し、作業の一時中断と現場の消毒を行うことがあったが PCR 検査の結果は陰性であり工程に大きな影響を与えることはなかった。建設関係者と協力会社の尽力により入射器建設作業は予定通り 12 月末までに完了した。

Table 1: History of the New Linac Construction and Commissioning

| | |
|-----------------------|--|
| Feb, 2017 | Accelerator design |
| Mar. 2019 | Klystron gallery building constructed |
| Jan. 2020 | Install klystron & modulator |
| July. | Storage ring shut down Remove beam transport line |
| Oct. | Install linac in tunnel |
| Jan. 2021 | RF conditioning started |
| 15 th Feb. | Beam commissioning started |
| 17 th Feb. | Succeed in accelerate 1.0 GeV beam to dump |
| 8 th Mar. | Beam inhection to ring started |
| 9 th Mar. | First light at storage ring |
| 14 th Mar. | Stored current 200 mA Injection efficiency > 90 % |
| 20 th Apr. | User run restarted 1.0-1.5 GeV, 350 mA |

4. コミッショニング運転

2021 年 1 月より 238 MHz、476 MHz、S バンドおよび C バンド RF 機器のコンディショニングを土日祝日も含めて 24 時間連続運転で開始した。2 月中旬には 4 台の C バンドクライストロンも 50 kV, 3 μ s, 20 Hz での運転でもフォールト発生回数が十分に低

下したので RF コンディショニングを終了した。また高周波機器からの漏洩電波測定を実施し、許容値以下であることを確認した。

2月15日からダンプ入射モードにて入射器の調整を最上流の電子銃部から開始し、調整3日目にはビーム強度が弱いもののビームダンプへの1.0 GeVビーム入射に成功した。その後、より詳細な調整、設定パラメータの最適化、機器初期不具合の解消を行い、3月8日からビーム輸送系とリング入射の調整を開始した。同日にはビーム輸送系の4極電磁石は設計値のままではほぼ損失なしにリングまでビームが到達していることを確認し、翌日にはリングへの入射蓄積に成功した。その後、入射ビームとリングとのエネルギー調整、入射点での入射ビームの位置・角度調整などにより、3月14日には入射効率90%以上、蓄積電流200 mAを実現した。制御プログラムのデバッグと動作確認を行いつつ、円滑な利用運転の実現に向けて加速器運転員の操作練度向上のため調整運転を継続した。十分な準備が整った4月20日から蓄積電流350 mAでの放射光供用利用を再開した。当初予定では利用再開は5月中旬の予定であったので約4週間の前倒しとなった。

表2に入射器ビームに要求される性能と測定結果を示す[3, 4]。ビーム最大エネルギーは典型的なリングエネルギーと同じ1.0 GeVであり、リング低エネルギー運転時に合わせた入射も可能になった。ビーム強度は約100 pCであり利用運転時のビーム蓄積やTop-up入射には十分である。正規化エミッタンス10 mm-mrad以下は従来の入射器に比べて一桁小さい値である。エネルギー広がりやショット毎のエネルギー安定度もニュースバルリングには十分であり、長期間に渡るリングへの入射効率90%以上の維持を達成している。

Table 2: Performance of the New Injector Linac

| | Required | Measurement |
|---------------------------|-------------|--------------|
| Beam energy | 1.0 GeV | 1.0 GeV |
| Bunch charge | 100 pC | 100 pC |
| Normalized emittance | <10 mm-mrad | <10 mm-mrad |
| Energy spread | <±0.5 % | 0.1 % (FWHM) |
| Energy stability | - | 0.4% (STD) |
| Bunch length | 5 ps (FWHM) | <1 ps (FWHM) |
| Ring injection efficiency | >90 % | >90 % |

5. 入射器および光源加速器の運転状況

新入射器を用いた光源加速器の利用運転再開から3ヶ月が経過した。この間、比較的大きな瞬停により停止した機器の再立ち上げに約5時間のダウンタイムがあったのみで、その他には大きなマシントラブルもなく非常に安定に運転を続けている。日常の運転(9:00~21:00)は4名の加速器運転員が2シフト体制で行っており、毎朝2名でリング及び入射器の立ち上げ、入射調整、350 mA蓄積までを約1時

間以内に行う必要があるが、入射器ビームの再現性が良好なのでほぼ無調整か、せいぜい数週間に1回程度の微小なパラメータ調整のみで対応できている。

新入射器の稼働によりニュースバルの事業継続が可能になっただけでなく、運用と性能に関して大きなメリットがある。専用の入射器を持てたことにより、ユーザーの要望に合わせて運転スケジュールを柔軟に立てることが可能になった。また何時でもリング側の状態に合わせて入射器を調整しビーム入射することが可能になった。入射ビームパラメータの微調整、ビームアポート後の再入射、リング低エネルギー運転でのTop-up入射などが随時可能になり運転の柔軟性が広がった。さらに低エミッタンスビームの安定な入射によりリングの性能向上が可能になった。4月からの1.0 GeV利用運転時のTop-up電流は従来の300 mAから350 mAに増加した。10月からは1.5 GeV利用時の蓄積電流も従来の350 mAから400 mAに増加する予定である。

謝辞

ニュースバル新入射器の建設、コミッションング運転にはSPring-8加速器関係者の皆様に多大なご協力とご支援をいただきました。改めて厚く御礼申し上げます。施設運用に多大なご協力を頂いています理化学研究所、JASRI およびニュースバル関係者の皆様に深く感謝します。また夜間休日のRFコンディショニング運転を担当した兵庫県立大学高度産業科学技術研究所の皆様に感謝します。

参考文献

- [1] <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS>
- [2] S. Hashimoto *et al.*, “ニュースバル放射光施設の現状”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, THP057, 2021.
- [3] T. Inagaki *et al.*, “Construction of a Compact Electron Injector Using A Gridded Rf Thermionic Gun And A C-Band Accelerator”, IPAC2021, WEPAB039, 2021.
- [4] T. Asaka *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 23, 063401 (2020)
- [5] T. Asaka *et al.*, “高信頼性・高保守性・高輝度ビーム特性を兼ね備えたグリッド熱陰極 RF 電子銃の開発”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, THP033, 2021.
- [6] T. Inagaki *et al.*, “ニュースバル新入射器におけるCバンド主加速器のコンディショニングと運転状況”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, THP033, 2021.
- [7] T. Ohshima *et al.*, “放射光施設ニュースバルの新入射加速器のタイミング・低電力高周波制御システム”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, WEOB05, 2021.