

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 OPERATION STATUS AND HIGH-POWER RF CONDITIONING RESULTS OF C-BAND MAIN ACCELERATOR AT NewSUBARU INJECTOR

稲垣隆宏^{#, A)}, 安積隆夫^{A), B)}, 近藤力^{A), B)}, 大島隆^{A), B)}, 岩井瑛人^{A), B)},
吉岡正倫^{C)}, 住友博史^{C)}, 皆川康幸^{C)}, 鍛冶本和幸^{C)}, 田中 信一郎^{C)}, 橋本智^{D)}
Takahiro Inagaki^{#, A)}, Takao Asaka^{A), B)}, Chikara Kondo^{A), B)}, Takashi Ohshima^{A), B)}, Eito Iwai^{A), B)},
Masamichi Yoshioka^{C)}, Hiroshi Sumitomo^{C)}, Yasuyuki Minagawa^{B), C)}, Kazuyuki Kajimoto^{B), C)}, Shinichiro Tanaka^{C)},
Satoshi Hashimoto^{D)}

^{A)} RIKEN SPring-8 center

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

^{C)} SPring-8 Services Co., Ltd.

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

Abstract

A new 1 GeV linac with a C-band (5.7 GHz) high gradient accelerator was constructed as a compact, reliable, and low-cost beam injector for the NewSUBARU synchrotron radiation facility. In order to reduce the number of klystrons and to utilize RF power effectively, the 50 MW output power from the klystrons was multiplied by a factor of 4 using a pulse compressor and fed to four 2 m traveling wave accelerating tubes to obtain 250 MeV acceleration energy. Four sets of these are used to accelerate the beam to 1 GeV. Since the beam output is at 1 Hz, the change in characteristics due to heat generation is negligible. Therefore, the pulse compressor and waveguide components were designed to be as simple as possible, and the cooling water of 28°C was applied uniformly without individual precision temperature control systems. RF conditioning was started in January 2021, and operation at the rated RF power became possible in about one month. In the middle of February, we started the electron beam conditioning and confirmed that the electron beam was accelerated to 1 GeV as expected. The characteristics of the beam after acceleration were measured; the energy stability was 0.04%, the bunch energy spread was 0.14%, and the time width was 350 fs, all of which were found to be satisfactory. The injector linac has been stably operated for user operation of NewSUBARU.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 のキャンパス内にある放射光施設 NewSUBARU[1]は、1998 年に運転を開始した 1.5 GeV、周長 118m の電子蓄積リングで、兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所(高度研:LASTI)が運営をしている。NewSUBARU はもともと、SPring-8 の入射加速器であるライナックから 1 GeV のビームを供給されて運転を行ってきた。しかし、SPring-8 は、蓄積リングのアップグレード計画(SPring-8-II [2])の一環として、ブースターシンクロトロンで入射 8 GeV ビームを生成する方式から、SACLA の線型加速器で加速した 8 GeV ビームを直接入射する方式に変更をした[3]。そこで、20 年以上使用し老朽化した入射ライナックをシャットダウンし、新たに NewSUBARU 入射専用の 1 GeV ライナック[4]を建設することとした。

新入射器は、全長約 100 m のビーム輸送トンネル内に設置し、RF 源や磁石電源、冷却水設備などは、隣に建設する附属棟に収納することとした。加速器の全長を抑え効率よく加速をするため、SACLA で使用実績のある高電場の C バンド加速器[5]を採用した。ニュースバルは、少人数のスタッフで運転を行うため、加速器の安定性や信頼性はきわめて重要である。そこで新たに開発した熱陰極 RF 電子銃[6]を電子銃として用い、低エミッタ

ンスの電子ビームが安定して供給できるようにした。電子ビームは 476 MHz のバンチャー空洞と 3 m の S バンド加速管で圧縮されつつ加速され、16 本の 2 m 長 C バンド加速管で 1 GeV まで加速されて蓄積リングに入射される。新入射器のレイアウトを Fig. 1 に、ビームのパラメータを Table 1 に示す。全長 60 m のコンパクトでシンプルな加速器にも関わらず、高品質なビームを安定して提供できるこの加速器システムは、仙台に建設中の次世代放射光施設[7]でも使用される。本発表では、このうち C バンド加速器の設計と動作状況について、報告する。

Table 1: Required and Measured Beam Parameters

Parameter	Required	Measured
Beam energy	1 GeV	1 GeV
Bunch charge	100 pC	100 pC
Energy spread	< ±0.5%	0.14% (FWHM)
Energy stability		0.04% (std.)
Bunch length	< 5 ps	< 1 ps (FWHM)
Pulse repetition	1 Hz	1 Hz (beam) ~20 Hz (RF)

inagaki@spring8.or.jp

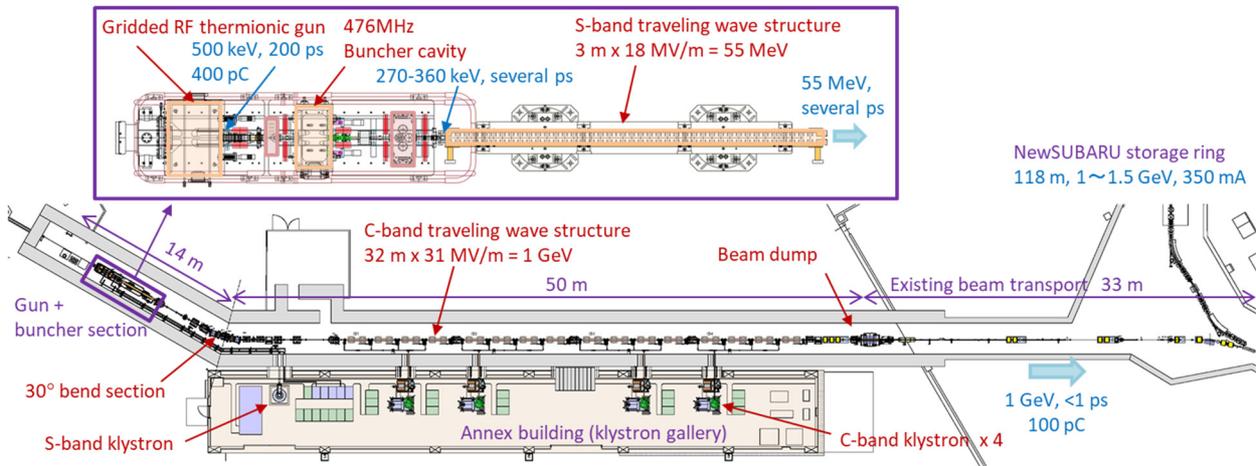


Figure 1: Layout of NewSUBARU new injector linac.

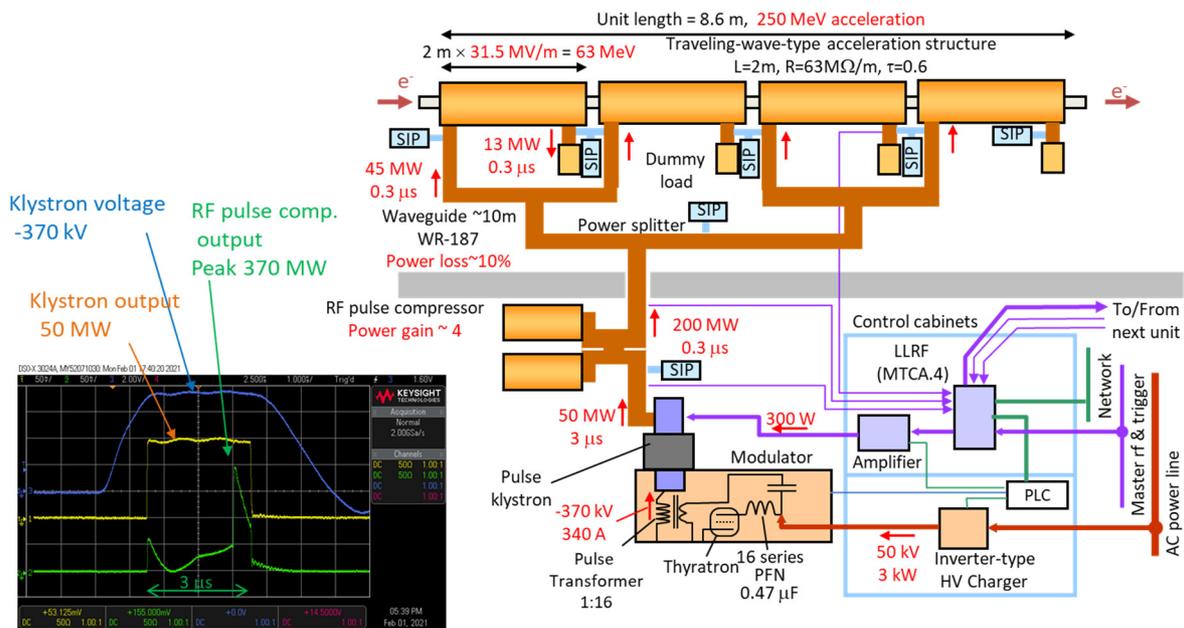


Figure 2: Configuration of C-band accelerator system. Typical pulse waveform is also shown.

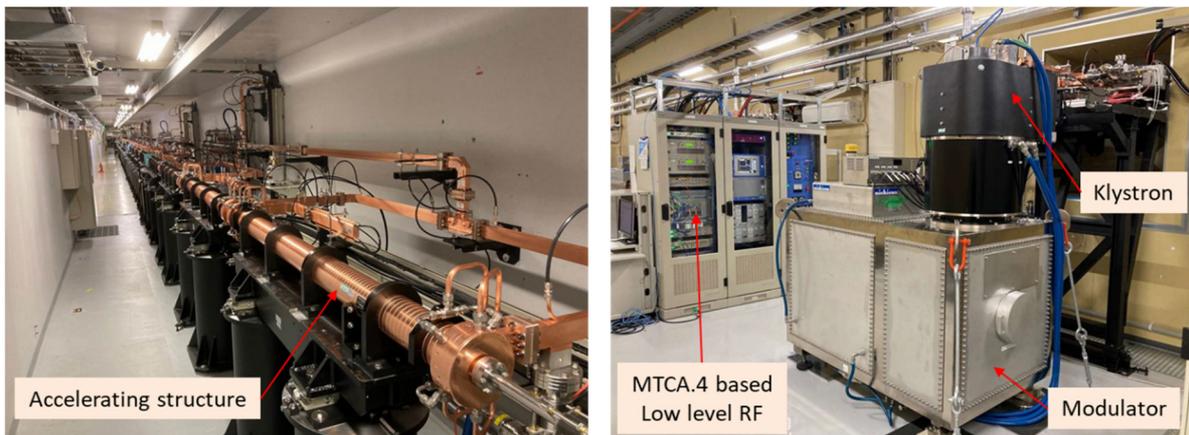


Figure 3: Photograph of the accelerating structures in tunnel (left) and the klystron and the modulator (right).

2. Cバンド加速器の構成とコストダウン

NewSUBARUの新入射器で使用するCバンド加速器の構成図を Fig. 2 に、機器の写真を Fig. 3 に示す。Cバンド加速器の構成機器の多くは、SACLA で使用しているもの[5]と同様であるが、コストダウンを目的に簡素化や改良を加えている。違いについて、以下にまとめる。

- (1) SACLA では、クライストロンの出力をパルス圧縮器で4倍に増倍した後、2本の加速管にRF電力を供給している。一方、NewSUBARUでは、設置スペースに余裕があるので、4本の加速管に供給することとした。加速管の本数が倍になるとRF電力は半減し、加速電場も $1/\sqrt{2}$ 倍になる。しかし加速管の数は2倍に増えるので、1本のクライストロンで加速できるエネルギーは $\sqrt{2}$ 倍になる。従って、クライストロンや制御機器の台数を減らし、加速器の建設コストを下げる事ができる。NewSUBARUでは、2mの準定電場型進行波加速管4本に、それぞれ45MWのRF電力を供給し、合計で250MeVの加速エネルギーを得る設計となっている。これを4台(CB1、CB2、CB3、CB4と呼ぶ)用い、1GeVまで加速する。
- (2) コストの高い機器は設計を再考し、可能な限りの簡素化を進めた。加速管は、チョークモード型ではなく単純なディスクロード型[8]とし、RFパルス圧縮器も、TE_{0,1,20}空洞2台とハイブリッド結合器を組み合わせた単純な構造のものとした[9]。導波管の分岐部は、ダミーロードが不要な3ポートの電力分配器を使用した。RFモニタ用の方向性結合器は、加工費用のかかるH面結合型から、ベアテホールE面結合型とした。これらの機器は、初号機の製作後にテストスタンドにて大電力試験を行い、問題無いことを

確認してから残りの製作を行っている。

- (3) NewSUBARU蓄積リングへのビーム入射は最大で1Hzであり、入射器も1Hz運転となる。パルス電力による発熱は問題にならないため、運転条件によって空洞の動作温度を変える必要はない。従って、冷却水の精密温度調節システムは使わず、28±0.02°Cの装置冷却水を加速管やRFパルス圧縮器に直接通水する。最も温度に敏感なRFパルス圧縮器は、

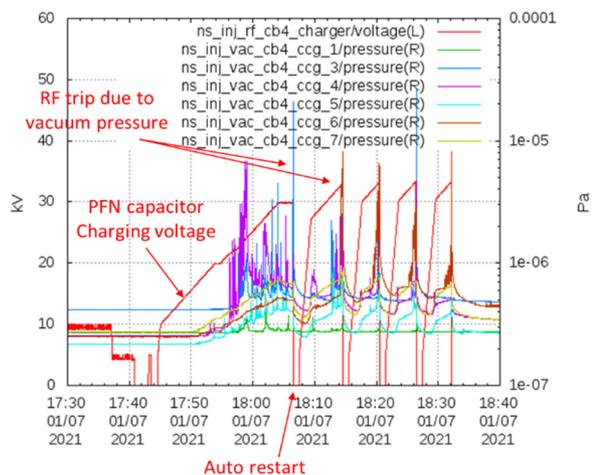


Figure 4: Trend graph of the RF conditioning of CB4 section in the first day. The charging voltage (red line) and the vacuum pressure of each part are shown. The “ccg_1” (green line) is the vacuum pressure around the klystron, and others (ccg_2 to ccg_7) are the pressure around the accelerating structures.

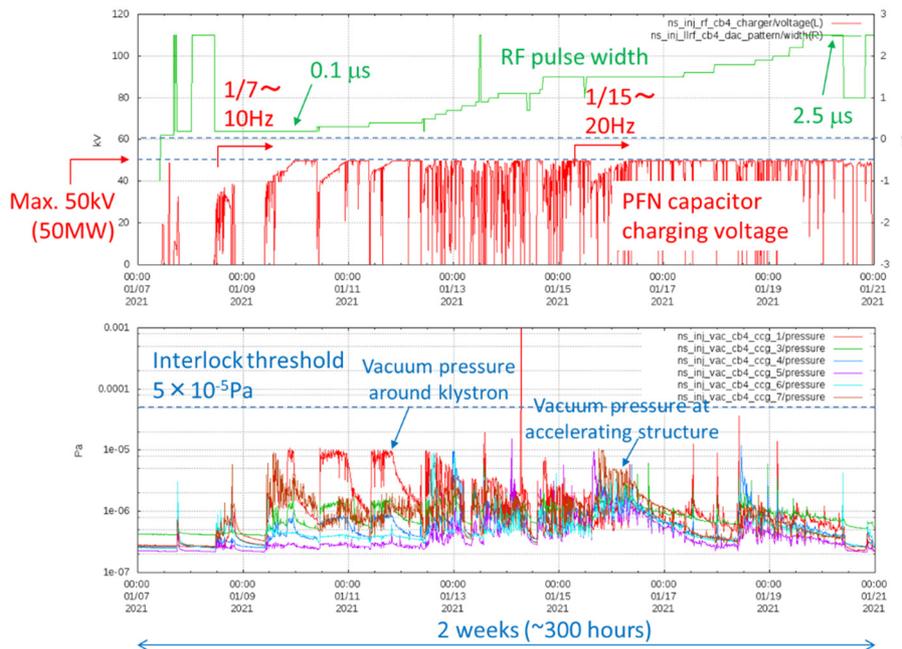


Figure 5: Trend graph of the charging voltage and the vacuum pressure, during the 2 weeks of RF conditioning at CB4. The green line in upper figure means the RF pulse width.

- クライストロンギャラリに設置し、大電力運転時にチューナーの調整を行って共振周波数を合わせた。
- (4) クライストロンの前段アンプは、従来の GaAs-FET 素子からの出力を多数合成する代わりに、大出力の GaN-HEMT を用いたものを製作し使用した。また、機器の水冷をやめ空冷とした。構成部品数が減り、大幅なコストダウンを果たした。
- (5) 低電力 RF (LLRF) システムとして、高集積の Micro-TCA.4 規格のデジタイザ、RF フロントエンドを用いたデジタル制御システム[10]を構築した。1 枚のデジタイザで 8 系統の RF 信号を測定することができ、これを複数枚使用することで、C バンド加速器 2 組を 1 台の Micro-TCA.4 で取り扱うことが可能となった。タイミング系は、SPRING-8 で開発したトリガモジュールを用い 238MHz の基準高周波やトリガパルスを光ファイバーを通じて送受信することとした。[10]

3. 運転状況

3.1 RF コンディショニング

昨年度のニュースバル施設の利用運転は 2020 年 7 月末に終了し、ビーム輸送ビームラインを撤去した後、10 月よ 12 月にかけて加速器機器の設置を行った。機器の設置は順調に終了し、2021 年 1 月 7 日より、トンネル内を閉鎖して RF コンディショニング運転を行った。

RF コンディショニングは、加速管や空洞を大電力 RF にて使用するための手法で、最初は微小な RF を入れ、ガス放出や放電を繰り返しながら真空度を改善し、徐々に RF 電力を増やしてゆく慣らし運転である。我々の手法は、まずは RF のパルス幅を狭くして徐々に RF 電力を増やしてゆき、最大の電力に達したらパルス幅を広げて RF 電力を増やしてゆくことを繰り返すものである。PLC に組み込まれた自動シーケンスを用い、RF 電力はモジュレータの充電電圧によって制御する。加速管やクライストロン近傍の真空度が全てしきい値 (1×10^{-5} Pa) 以下なら充電電圧を上げ、真空度がしきい値を越えたら充電電圧を下げる運転を繰り返す。こうすることで効率的に空洞や導波管の表面からガスを出し、「枯らす」ことができる。

Figure 4 に、CB4 セクションのコンディショニング初日の充電電圧と真空度の推移の例を示す。RF のパルス幅は、最小の $0.1 \mu\text{s}$ としている。充電電圧が 20 kV を越えたあたりで加速管付近の真空度が悪化し、インターロック閾値を越えて運転を停止する(トリップする)ことが何度か続いている。しかし、このような運転を続けるうちに真空度の悪化も少なくなり、トリップをする電圧も上がってゆく。

Figure 5 には、同じく CB4 セクションの、2 週間の運転の推移を示す。上段には、RF のパルス幅(緑線)と充電電圧(赤線)を、下段には各部の真空度を示している。最初は 10 Hz で昼夜連続運転をし、途中から繰り返しを 20 Hz に上げて運転をした。最初の数日はクライストロンや RF パルス圧縮器付近からのガス放出が多かったが、それも次第に治まり、その後は順調に RF パルス幅を広げてゆくことができた。パルス幅を広げると加速管付近での放電と思われる真空悪化が起こり、たびたびインターロックで停止した。それでも RF コンディショニングを継続すると、放電の頻度も減り、ベース真空度も次第に下がった。そして 1 月 22 日には、RF パルス幅を最終の

$3 \mu\text{s}$ に広げて運転を行えるようになった。C バンド加速器の他のセクション(CB1~CB3)も、同様の経過を辿り、1 月末までには、全数とも $3 \mu\text{s}$ のパルス幅で運転ができるようになった。それ以降もコンディショニング運転を続け、2 月中旬には、50 kV、 $3 \mu\text{s}$ の最大運転条件で 20 Hz で 1 日数回の停止頻度まで下がった。通常のビーム運転時は 1 Hz の繰り返しで運転をするので、このくらい停止頻度が下がってれば、問題は無い。

3.3 ビームの加速と加速エネルギーの測定

加速器の RF コンディショニングが順調に完了したので、2 月 15 日より電子ビームの調整を開始した。C バンド加速器に電子ビームを通し、1 GeV まで加速できることを確認した。その後の調整も順調に進み、3 月には蓄積リングへの入射調整を行い、4 月には予定を前倒してユーザー利用を開始することができた。7 月までの運転において、新入射器および C バンド加速器は、大きな問題も無く、順調に運転を続けている。

C バンド加速器の下流には、Fig 6 に示すように 15° の偏向電磁石とビームダンプが設置されており、途中に設置したビーム位置モニタ(BPM)と YAG スクリーンモニタにて、ビームのエネルギー分布と変動を測定することができる。C バンド・クライストロンの出力電力を下げた時のエネルギー変化を Fig. 7 に示す。CB4 を OFF にした時のエネルギー変化から、CB4 で 247 MeV 加速されていることがわかる。同様にして CB1-CB3 での加速エネルギーも測定した。結果を Table 2 に示す。CB1-CB3 は充電電圧を 50 kV よりも下げ、リングの入射エネルギー(990 MeV)に合うよう、調整をしている。

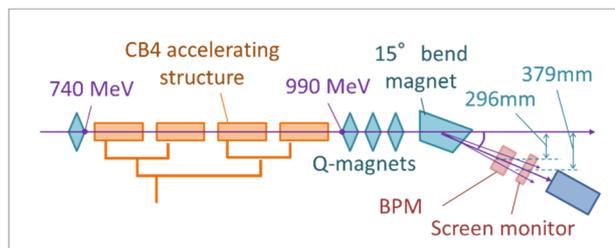


Figure 6: Schematic layout of the beam dump and diagnostic instruments, such as a screen monitor and a beam position monitor (BPM).

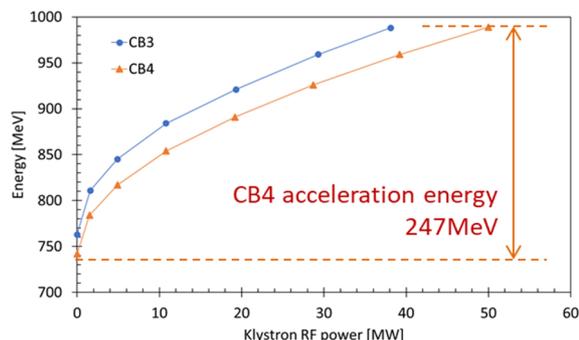


Figure 7: Beam energy measured at the beam dump, as a function of the klystron output power.

Table 2: Nominal Operation Parameters and Measured Acceleration Energy for CB1-CB4

Parameter	CB1	CB2	CB3	CB4
Charging voltage	45 kV	47 kV	44 kV	50 kV
Klystron output	44 MW	47 MW	38 MW	50 MW
Accel. energy	236 MV	236 MV	225 MV	247 MV

3.4 加速後の電子ビームの特性

Cバンド加速器で加速した後の電子ビームのエネルギー分布を、ビームダンプ部のスクリーンモニターにて測定した。Fig. 8に測定した分布を示す。青線の分布は、CB4をOFFにした時のエネルギー分布で、エネルギー広がり $\sim 0.14\%$ (FWHM)と求められた。赤線の分布は、CB4を -90 度にセットし、エネルギー差を与えた時の分布で、このエネルギー広がりから、バンチ長が 350 fs (FWHM)と見積もられた。また、連続運転時のビームの重心位置をBPMにて測定し、垂直位置の変動幅から短時間(6分間)のエネルギー安定性は 0.04% (std.)と見積もられた。NewSUBARU蓄積リングのエネルギーアクセプタンスは $\pm 0.85\%$ 程度なので、これに比べると十分なエネルギー広がりや安定性であり、問題無い。

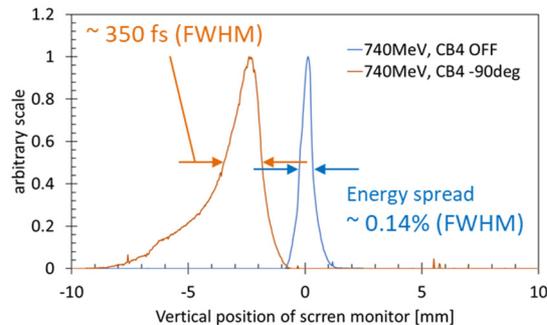


Figure 8: Projected vertical distribution on the screen monitor, which corresponds to the beam energy profile. Blue line shows the energy profile when CB4 was not used. The red line shows the distribution with the phase of CB4 set to -90 degrees, giving the beam an energy chirp.

4. まとめ

NewSUBARU放射光リングへの入射器として、高電場、高効率のCバンド加速器を用いた 1 GeVのライナックを建設した。SACLAの実績や知見を踏まえ、機器構成の見直しや簡略化を行い、建設コストの削減を果たした。2021年1月からRFコンディショニングを開始し、約1か月で所定の加速電場 31 MV/mで安定運転ができるようになった。加速されたビームの特性を測定し、予定通り 1 GeVまで加速されていること、エネルギー広がり $\sim 0.14\%$ (FWHM)と十分に狭いこと、エネルギー安定性が 0.04% (std.)と十分に安定であることを確認した。入射器はNewSUBARU蓄積リングの利用運転に使われ、今日

まで大きな問題もなく、安定に運転を続けている。

今回建設した入射ライナックは、従来よりも大幅なコストダウンを行いつつ、安定性、保守性に優れ、なおかつ良質の高輝度電子ビームが得られており、今後の中小型ライナックの模範となると考えている。同様の設計をした 3 GeVライナックを、次世代放射光施設[7]にも建設するので、今回のコミッショニング経験が活かされる。また、Cバンド加速器の構成機器についても、多くのものを再設計し簡素化を行ったので、SACLAの高度化や機器置き換えにも、この開発が活用される。

また、NewSUBARUの今後の運転においても、入射ビームのエネルギー、電荷量、バンチ長等の条件を自由に調整できる利点を生かして、任意のエネルギーでのTop-up運転や特殊フィリングパターン運転、短バンチ運転、シングルパス利用などに活用されることを期待する。

謝辞

本ライナックの建設は、理化学研究所・放射光科学センターの石川センター長、田中副センター長、および兵庫県立大・高度研の渡邊所長に主導いただき、多大な支援をいただきました。また、加速器の設計や機器の製作、設置、運転調整は、理化学研究所、JASRI、兵庫県立大、スプリングエイトサービス、および次世代放射光施設を建設するQSTの多くの関係者に参加、協力いただきました。更に、RFコンディショニングの際は、週末も含めた24時間運転を行うため、兵庫県立大・高度研の研究者の方々にも、シフトに参加いただきました。これら多くの方々のご協力に感謝します。

参考文献

- [1] A. Ando *et al.*, “Isochronous storage ring of the New SUBARU project”, *J. Synchrotron Rad.*, 5, 342-344 (1998).
- [2] SPring-8-II CDR; <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [3] H. Maesaka *et al.*, “Full energy on-demand beam injection from SACLA into the SPring-8 storage ring”, *Proceedings of IPAC 21*, May 2021.
- [4] S. Hashimoto *et al.*, “Commissioning of the new 1.0 GeV electron linac for NewSUBARU storage ring”, 本加速器学会, TUOB03, (2021).
- [5] T. Inagaki *et al.*, “High-gradient C-band linac for a compact x-ray free-electron laser facility”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 17, 080702 (2014).
- [6] T. Asaka *et al.*, “Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 23, 063401 (2020).
- [7] Accelerator Design report; <https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/18596.pdf>
- [8] T. Sakurai *et al.*, “C-band disk-loaded-type accelerating structure for a high acceleration gradient and high-repetition rate operation”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 20 042003 (2017).
- [9] T. Inagaki *et al.*, “design and development status of a C-band accelerator system used as an injector for a next-generation SR source”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, July 31-Apr. 3, 2019, pp. 766-770.
- [10] T. Ohshima *et al.*, “Timing and low level RF control system of new injector linac for NewSUBARU”, 本加速器学会, WEOB05, (2021).