

J-PARC リニアック大電力高周波源の 50 Hz 運転対応に関する検討

STUDY ON 50 Hz OPERATION OF THE J-PARC LINAC HIGH-POWER RF SYSTEM

不破康裕 ^{*A)}, 溝端仁志 ^{B)}, 中野秀仁 ^{A)}, 篠崎信一 ^{A)}, 高柳智弘 ^{A)}, 浅野博之 ^{A)}, 岩間悠平 ^{A)}

Yasuhiro Fuwa ^{*A)}, Satoshi Mizobata ^{B)}, Hideto Nakano ^{A)}, Shinichi Shinozaki ^{A)},

Tomohiro Takayanagi ^{A)}, Hiroyuki Asano ^{A)}, Yuhei Iwama ^{A)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The J-PARC linac delivers H⁻ ion beams to a 3-GeV synchrotron at a repetition rate of 25 Hz, and one of the future plans for the J-PARC accelerator facility is to operate the linac at a repetition rate of 50 Hz and supply half of the pulses for irradiation applications and basic research on transmutation systems. The high power RF source of the J-PARC linac consists of 45 klystrons, and it is necessary to verify the effects of electrical operation and thermal loading in order to increase the operation repetition rate to 50 Hz. Therefore, a 50 Hz repetition test operation was conducted using parameters that shorten the high-voltage pulse width corresponding to the ON-time of the klystrons so that the power load of the high-power RF source is equivalent to that of the conventional accelerator operation. As a result of the test operation, it was verified that the power supply system operated without any problem at the 50 Hz repetition of the high power RF source and that the power consumption was equivalent to that assumed from the analytical estimation.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の加速器施設は 2025 年現在において、物質生命科学研究のために中性子やミュオンビーム生成、ニュートリノ振動研究のためのニュートリノ施設、素粒子原子核研究のためのハドロン実験施設の 3 つの施設に陽子ビームを供給している。J-PARC の将来計画の 1 つとして、より多様なニーズに対応するための陽子ビーム照射施設の検討が進められている。この計画では、J-PARC 加速器の初段部となるリニアック施設で生成する 400 MeV までのエネルギーを有する陽子ビームを用いて、大強度加速器用の材料照射試験、半導体ソフトエラー試験、医療用 RI 製造などを遂行することが検討されている。

本稿では、この新しい陽子照射施設の運転に対応するための J-PARC リニアックの 50 Hz 繰り返し化におけるリニアックの大電力高周波源の運転可能性について議論する。

2. J-PARC リニアックの運転パラメータ

リニアック施設は現在 Table 1 に示すビームパラメータで運転されている。このパラメータで生成されるビームは後段の 3 GeV 高繰り返しシンクロトロン (RCS) でさらに加速され、RCS 出射部で定格出力 1 MW を達成している。J-PARC 加速器施設の将来計画として MLF 中性子源の第 2 ターゲットステーションの建設やニュートリノ振動実験の統計量を増加させるためにメインリングの加速繰り返し周波数を大きくすることが計画されており、定格出力を順次 1.2 MW, 1.5 MW, また、より高い出力の達成が期待されている。そのため、ここに示すリニアックの運転パラメータとしては、現状より大きな値とすることが要求されており、ピーク電流を 60–80 mA、パルス幅を 600–850 μ s に増大させるなど、

複数のアップグレードプランが検討されている。こうした流れの中で、先述の陽子照射施設を増設するためには、既設の実験施設の運転に影響を与えないことを考慮した上で多様な照射利用ユーザーの要望に対応するため、リニアックの加速繰り返し周波数を 50 Hz に増大させて対応することが検討されている。

Table 1: Beam Parameter of J-PARC LINAC

accelerated particle	negative hydrogen ion (H ⁻)
beam energy	400 MeV
peak beam current	50 mA
beam pulse width	500 μ s
repetition rate	25 Hz

3. J-PARC リニアックの大電力高周波源

3.1 大電力高周波源の構成

J-PARC リニアックの加速部は RFQ (Radio Frequency Quadrupole, 共振周波数 324 MHz) 1 式、DTL (Drift Tube Linac, 共振周波数 324 MHz) 3 式、SDTL (Separated Drift Tube Linac, 共振周波数 324 MHz) 16 式、ACS (Angular Coupled Structure, 共振周波数 972 MHz) 21 式の合計 41 式の加速空洞で構成されている。これらの 41 式の空洞それぞれに対して 1 台のクライストロンを用いて大電力高周波電力を供給している。また、ビームの縦方向分布制御のため、加速周波数を切り替えるビームエネルギー 191 MeV の区間に ACS 型バンチャー空洞 (共振周波数 972 MHz) 2 式、ビーム加速後の 400 MeV ビーム輸送区間に ACS 型デバンチャー空洞 (共振周波数 972 MHz) 2 式を配備しており、それぞれクライストロン 1 台で駆動している。したがって、J-PARC 加速器を構成するクライストロンは 324 MHz クライストロン 20 台と 972 MHz クライストロン 25 台となっている。これ

* yfuwa@post.j-parc.jp

らのクライストロンはいずれもアノード変調型クライストロンであり、直流高圧電源 (HVDC) とアノード変調器から構成されるクライストロン高圧電源によりクライストロン中の電子ビームを生成している。

直流高圧電源は 6600 V の交流を受電し、最大 110 kV の直流高圧を生成するため、以下の機器で構成されている。

- 真空遮断器 (VCB)
- 降圧変圧器 (6600 V → 600 V)
- 電圧調整盤 (AVR, サイリスタ式)
- 変圧整流器 (HVTR)
- コンデンサバンク (CBANK)
- クローバ盤 (CROW)

HVDC 1 台に対しては、アノード変調器が 4 台接続され、その先には各々 1 台のクライストロンが接続されている。したがって、J-PARC リニアックの大電力高周波源はクライストロン高圧電源 12 台とクライストロン 45 台で構成されている。クライストロン高圧電源 12 台のうち、1 号機から 11 号機までに対しては各々 4 台のクライストロンが、12 号機に対しては 1 台のクライストロンが、それぞれアノード変調器を介して接続されている。

3.2 大電力高周波源の運転パラメータ

J-PARC リニアックの大電力高周波源は、利用運転において各空洞が要求するクライストロン出力に対応してクライストロンカソードへの印加電圧を 90 kV から 110 kV に設定している。また、動作タイミングに関しては、アノード変調器の ON パルス (HV pulse)、クライストロンへの高周波電力入力の ON パルス (RF pulse)、陽子ビームを加速する BEAM pulse の 3 種類のパルスを設けて運転している。それぞれの関係を、高圧電源 1 号機 (RFQ 及び DTL が接続されている) を例に Fig. 1 に示す。この 3 種類のパルスのうち、BEAM pulse は空洞間で共通しており、各空洞の RF filling time の時間に合わせて Table 2 のようにそれぞれを設定している。

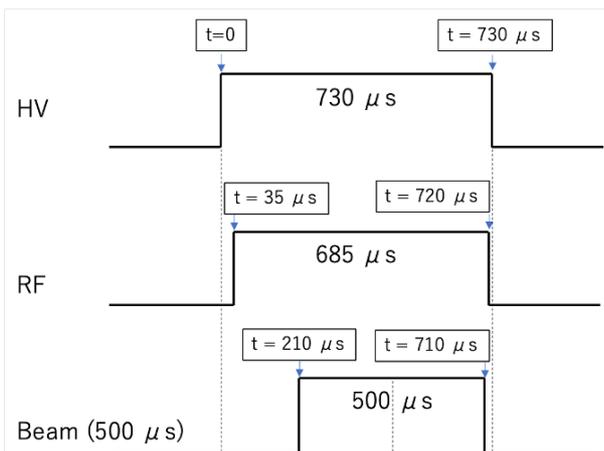


Figure 1: Operation timing pulses of HVDC1 for 500 μs beam operation.

Table 2: Operating Pulse Width for Klystrons and HVDCs in 25 Hz User Operation

	HV pulse	RF pulse	BEAM pulse
RFQ, DTL	730 μs	685 μs	500 μs
SDTL	700 μs	655 μs	500 μs
ACS	650 μs	605 μs	500 μs

4. J-PARC リニアック 50 Hz 運転検証試験

4.1 試験の概要

J-PARC リニアックでは、将来の 50 Hz 利用運転に対応するためのステップの 1 つとして 2025 年 5 月にリニアック構成機器の 50 Hz 運転検証試験を実施した。この試験は、各機器の 50 Hz タイミングにおける動作を検証する目的で、ビーム加速は行わず空洞への RF 電力投入までを行い、各機器間のタイミングの送受信や 50 Hz 繰り返し動作時の予期せぬエラーが発生しないことを検証することを目的としたものである。本試験の J-PARC リニアック全体の対応は参考文献 [1] にまとめられている。

大電力高周波源システムについては、対応する冷却水設備の容量限度の問題や高圧電源構成機器の予期せぬ発熱による不具合の発生を回避するために、本試験においては高圧電源の ON 時間幅 (HV pulse) を短くすることで対応することとした。具体的には、定常的に実施しているユーザー利用運転のタイミングでの運転時と同等の消費電力となるよう、BEAM pulse を 160 μs に設定した。各空洞に対する HV pulse 幅などを Table 3 にまとめる。

Table 3: Operating Pulse Width for Klystrons and HVDCs in 50 Hz Demonstration Test

	HV pulse	RF pulse	BEAM pulse
RFQ, DTL	390 μs	345 μs	160 μs
SDTL	360 μs	315 μs	160 μs
ACS	310 μs	265 μs	160 μs

4.2 試験結果

試験においては、上位制御系の 50 Hz タイミング切り替えの後に 12 台の高圧電源を順次立ち上げ、支障なく全号機を運転させることができた。クライストロンも安定に発信させることができ、空洞への電力投入も問題なく確立することができた。これらの結果により、クライストロン高圧電源の 50 Hz 繰り返しでの (短いパルスでの) 運転自体が可能であることが検証された。今後は 50 Hz 運転時のパルス幅を徐々に増加させた試験などを実施することを計画している。

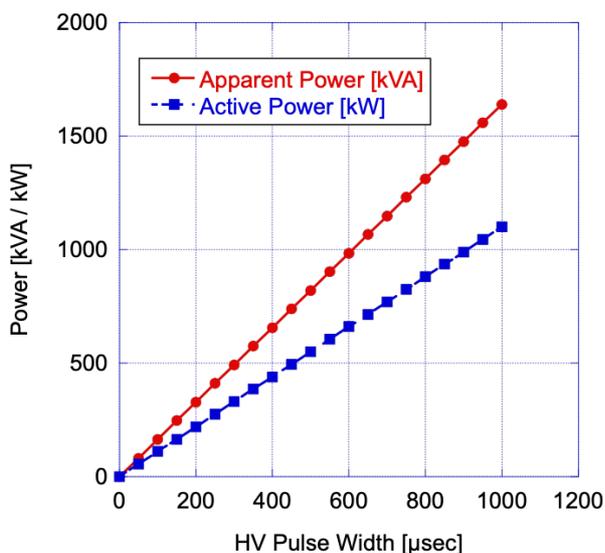


Figure 2: Variation of klystron high voltage power requirements versus HV pulse width (cathode voltage: 110 kV, cathode current: 50 A, repetition rate: 50 Hz).

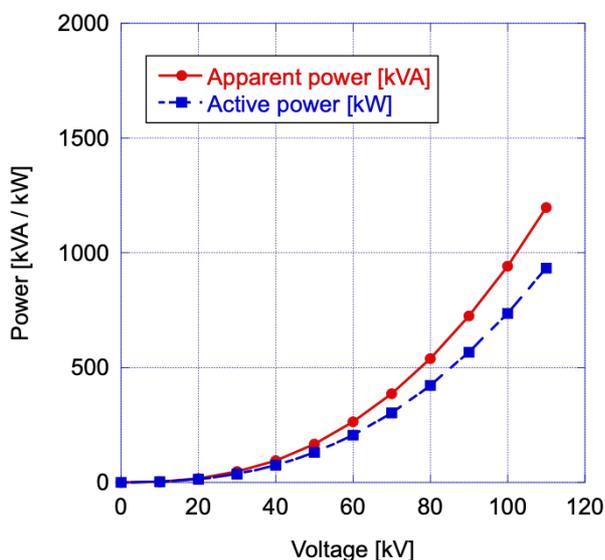


Figure 3: Variation of klystron high voltage power requirements versus klystron cathode voltage (repetition rate: 50 Hz, HV pulse width: 730 μs).

5. 50 Hz 運転における電力負荷

今回の 50 Hz 検証試験において、クライストロン高圧電源における入力電力を測定し、電源システムの負荷率などを検証した。本試験ではクライストロン高圧電源 11 号機において、VCB 盤に電力アナライザを接続し電力を測定した。11 号機には 972 MHz クライストロンが 4 台接続されており、試験時のカソード電圧は 102 kV、クライストロン 1 台あたりのカソード電流が 44.6 A、HV pulse 幅は Table 3 の通り 310 μs であった。この時のクライストロンへの投入電力は 4 台合わせて 282.2 kW となる。VCB 盤における入力端での測定値は有効電力 328.4 kW、皮相電力 420.7 kVA であり、力率は 0.78 であった。

50 Hz 運転を現在の利用運転パラメータと同様のパルス幅で実施する場合には、概ねこの値の 2 倍の電力を消費することとなり有効電力 656.8 kW、皮相電力 841.4 kVA と見積もることができる。この値はクライストロン高圧電源の当初仕様に対応するものであり、問題なく運転できると考えられる。

一方で、先述したように将来計画においては加速陽子のビーム電流を 80 mA まで、ビームパルス幅を 850 μs まで増加させることも検討されている。それに対応する所要電力を見積もるために今回の測定値を基に、HV pulse 幅を 1 ms まで、高圧電源の印加電圧を最大の 110 kV にする (ビーム電流の増加に対応するローディング補償のため、クライストロンの出力を最大化することに対応) 場合の所要電力を計算した。結果を Fig. 2 及び Fig. 3 に示す。

これらの結果は、将来計画に対応するための所要電力の増大を示すものであるが、特にパルス幅の増大が大きく影響することがわかる。ここで、現在のクライストロン高圧電源に使用している変圧整流器の皮相電力容量が 1 MVA であるため、将来計画の実現のためには変圧整流器の大容量化や電源システムの効率向上が重要になると言える。

この要求に対応するために、クライストロンの効率向上やそれに対応する新しい電源システムの検討が別途進められている [2]。

参考文献

- [1] Y. Kondo *et al.*, “J-PARC Linac 50 Hz Operation Verification Study”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, FRO601, this meeting.
- [2] Y. Fuwa *et al.*, “Development of a prototype Marx generator module for a klystron power-supply in J-PARC linear accelerator”, in Proc. 10th Euro-Asian Pulsed Power Conf. (EAPPC), Amsterdam, Netherlands, 2024.