

J-PARC RCS での大強度ビーム取り出し時の空洞電圧跳ね上がりの抑制 MITIGATION OF CAVITY VOLTAGE JUMP DUE TO HIGH INTENSITY BEAM EXTRACTION IN J-PARC RCS

田村文彦 ^{*,A)}, 杉山泰之 ^{A)}, 沖田英史 ^{A)}, 山本昌亘 ^{A)}, 吉井正人 ^{A)}, 大森千広 ^{A)}, 清矢紀世美 ^{A)},
野村昌弘 ^{A)}, 島田太平 ^{A)}, 長谷川豪志 ^{A)}, 原圭吾 ^{A)}, 宮越亮輔 ^{A)}, 足立恭介 ^{A)}
Fumihiko Tamura ^{*,A)}, Yasuyuki Sugiyama ^{A)}, Hidefumi Okita ^{A)}, Masanobu Yamamoto ^{A)}, Masahito Yoshii ^{A)},
Chihiro Ohmori ^{A)}, Kiyomi Seiya ^{A)}, Masahiro Nomura ^{A)}, Taihei Shimada ^{A)}, Katsushi Hasegawa ^{A)},
Keigo Hara ^{A)}, Ryosuke Miyakoshi ^{A)}, Kyosuke Adachi ^{A)}
^{A)} J-PARC Center, JAEA & KEK

Abstract

The 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) accelerates proton beams with a maximum beam intensity of 8×10^{13} protons per pulse, utilizing the features of magnetic alloy (MA) cavities. The beam is extracted in a single turn by kicker magnets, and immediately after the beam is extracted, a short voltage jump occurs in the cavity. This is due to a delay in the voltage control feedback, which takes a certain amount of time to respond to the step-like decrease of beam current upon single-turn extraction. In a wideband ($Q=2$) MA cavity, this response delay is observed as a voltage jump. This voltage jump can cause damage to the cavity system if the voltage at the time of extraction is high. If a gain pattern is applied to inhibit the output at the same time as the extraction, this jump can be suppressed, however, in the case of a multiharmonic system in the RCS, the pattern setting is cumbersome. Therefore, we prepared a logic to suppress the output synchronously with the beam extraction as a function of the LLRF control system. The details of the function and test results are reported.

1. はじめに

J-PARC の 3 GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron, RCS) は、金属磁性体 (Magnetic Alloy, MA) 空洞の特長を生かし大強度陽子ビームの加速を行っている。RCS および RF システムの主なパラメータを Table 1 に示す。現在は設計ビーム出力 1 MW での陽子ビーム供給運転を行っている [1]。広帯域 ($Q = 2$) の MA 空洞の採用により、陽子ビームの速度変化に対応した周波数スイープをチューニンググループなしに実現できるのみならず、単一の空洞に加速高周波と 2 倍高調波を重畳した電圧を発生させるデュアルハーモニック運転によるバンチ整形も可能となっている。反面、広帯域空洞には高調波を含んだウェーク電圧が発生することから、マルチハーモニックビームローディング補償が必要となる。2019 年の LLRF (Low Level RF) 制御システムの更新の際に導入されたマルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバックにより、初期システムの RF フィードフォワード法に比べてビームローディング補償の性能が向上したため、出力パワー 1 MW での安定なビーム供給が可能となっている [2,3]。

1 MW 相当の大強度ビームを加速した時の空洞ギャップ電圧波形を Fig. 1 に示す。加速前半、6 ms まではバンチ整形のために 2 倍高調波を発生させており、その結果電圧波形は正負に非対称なエンベロップになっている。取り出し直前では、バンチ回転により時間方向に短いビームを形成するためにステップ状に電圧を変化させている。RCS ではビームはキッカー電磁石により 1 ターンで取り出されるが、このような大強度ビームの場合、

Table 1: Parameters of J-PARC RCS and its RF system

parameter	
circumference	348.333 m
energy	0.400–3 GeV
beam intensity	(achieved) 8.33×10^{13} ppp
output beam power	(achieved) 1 MW
harmonic number	2
accelerating frequency	1.227–1.671 MHz
maximum RF voltage	440 kV
repetition rate	25 Hz
No. of cavities	12
Q-value of RF cavity	2

ビームの取り出し直後に空洞に短時間電圧の跳ね上がりが発生する。理由は以下の通りである。

定常状態のフェーザーダイアグラムを Fig. 2a に示す。空洞に流れ込む全電流 I_T は、ジェネレータ電流 I_g とビーム電流 I_b のベクトル和であり、それぞれ位相角 ϕ_b and ϕ_L を持つ。ここに、 ϕ_L はローディング角と呼ばれるパラメータである。 $I_0 = I_T \cos \phi_z$ (ϕ_z は空洞の離調角) により、空洞電圧は I_T と I_0 に比例する。ギャップ電圧がプログラム通りになるように、 I_g はフィードバック制御されている。それぞれの角の関係は、 $Y = I_b/I_0$ を用いて

$$\tan \phi_L = \frac{\tan \phi_z - Y \cos \phi_b}{1 + Y \sin \phi_b} \quad (1)$$

と表される。RCS では取り出し付近で Y は 6 以上と大きく、 $|I_g| \gg |I_T|$ となる。ここに、取り出し直前のジェネレータ電流を I_{g0} とした場合のビーム取り出し

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

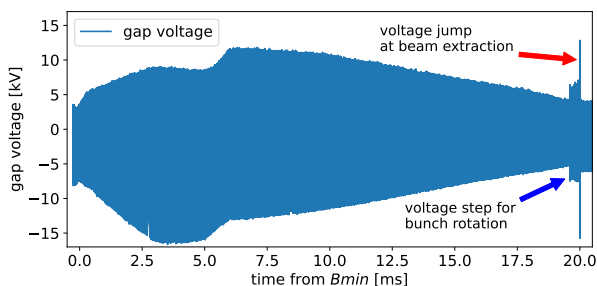


Figure 1: Typical gap voltage waveform with accelerating 1 MW beams. The voltage jump at the extraction is observed. Note that the voltage step before extraction is programmed for bunch rotation.

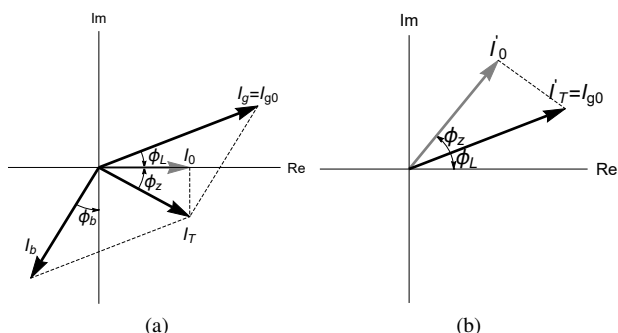


Figure 2: (a) Steady state phasor diagram under beam loading, and (b) phasor diagram just after the beam extraction.

直後のフェーザーダイアグラムを Fig. 2b に示す。ビーム電流が急にゼロとなり取り出し後の全電流は $I_T = I_{g0}$ 、フィードバックの遅れにより、取り出し直後のジェネレータ電流は I_{g0} のままとなる。先に述べたように $I_T = I_{g0} \gg |I_T|$ である。RCS の空胴の Q 値は 2 と低くギャップ電圧は全電流の変化に素早く追従するため、電圧の跳ね上がりが生じるのである。この跳ね上がりは電圧制御フィードバックによりプログラムされた電圧まで戻されるが、フィードバックのステップ応答時間は $10 \mu\text{s}$ 程度であり、電圧ジャンプの時間幅も同程度である。

この電圧の跳ね上がりは現在のところ空胴機器の損傷を招く程ではないが、今後初期設計以上のビーム強度を目指していくにあたっては問題になりうる。この跳ね上がりの抑制のためには、ビーム取り出しタイミングに合わせてジェネレータ電流をゼロにすればよく、空胴電圧フィードバックの出力ゲインパターンを取り出しに合わせてゼロとして LLRF からの出力を抑止すればよいことは我々の以前の論文に示した [2]。

RCS では 12 台の空胴に対してそれぞれ 8 つの高調波について制御を行っており、ゲインパターンの設定はやや煩雑である。このため、LLRF 制御システムの機能としてビーム取り出しに同期し LLRF 出力を抑止する仕組みを実装した。

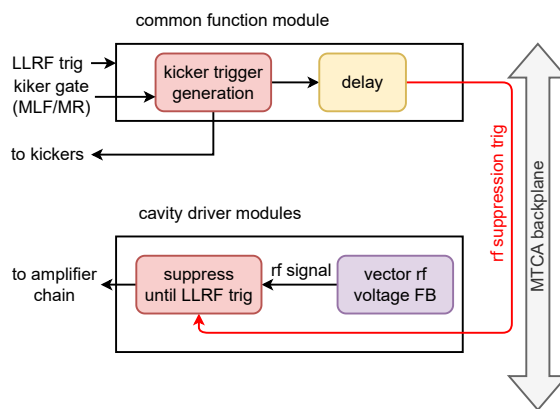


Figure 3: Functional block diagram of the RF output suppression function.

2. 構成

Figure 3 にビーム取り出し同期 LLRF 出力抑止機能のブロック図を示す。RCS では、取り出しキッカー (及び MR 入射キッカー) のトリガ信号は LLRF 制御システムの共通機能モジュール [4] で生成される。LLRF 内部で生成される周回 ($h = 1$) 位相信号のゼロクロスと外部から入力されるキッカートリガ生成ゲートの AND を取ることで、空胴 RF 電圧および周回ビームに同期したキッカートリガが生成される仕組みである。キッカー電源付近でビームが適切に取り出されるように調整された約 $100 \mu\text{s}$ の遅延が加えられ、キッカーは励磁される。共通機能モジュール内部では、キッカートリガ信号から調整可能な遅延を加え RF 抑止トリガ信号が生成され、12 台の空胴に対応した 6 台の空胴ドライバモジュールに MicroTCA バックプレーン [5] を通じて分配される。

空胴ドライバモジュールでは、RF 抑止トリガ信号が入力されてから次のサイクル開始となる LLRF トリガが入力されるまでの間、空胴電圧を制御するベクトル RF 電圧フィードバックからの出力を抑止する。

共通機能モジュール内で設定される遅延量は、ビーム信号と空胴電圧波形を見ながら調整が行われる。次節に調整結果を示す。

3. 調整結果

ビーム取り出し同期 LLRF 出力抑止機能の調整は、空胴 5 号機を用い、1 MW 相当の大強度ビームを用いて行われた。電圧波形とビーム波形を確認しながら、遅延量をスキャンすることで最適な遅延量を探した。Figure 4 に抑止機能なし、設定ありの場合について、取り出し付近のギャップ電圧波形をプロットした。

(a) の抑止機能なしの場合、ビーム取り出し直後からギャップ電圧は急激に上昇する。電圧制御フィードバックによりこれは速やかに所望の電圧となるよう制御されるが、先述のように、ステップ応答と同程度、約 $10 \mu\text{s}$ 程度の時間がかかる。

抑止機能を設定し、遅延量をスキャンした結果を Figure 4 の (b) から (d) に示す。(b) の遅延量を $110 \mu\text{s}$ に

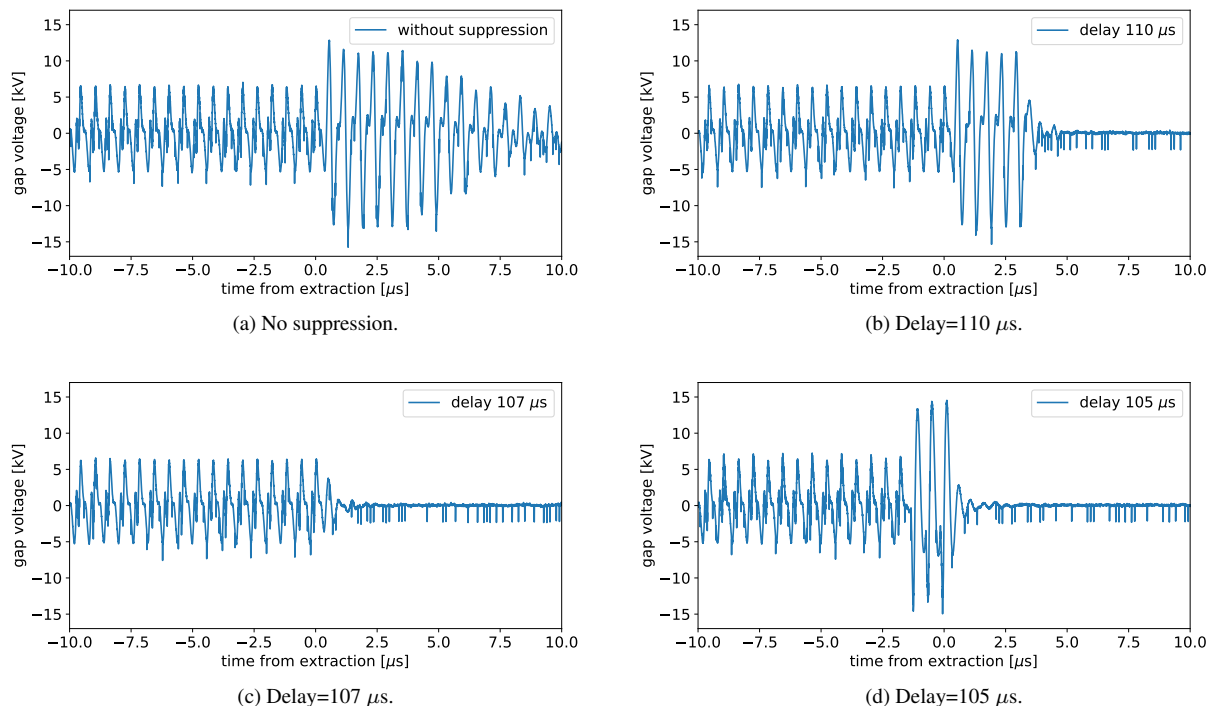


Figure 4: Gap voltage waveforms near extraction of a 1 MW equivalent beam (a) without and with the suppression function. The delay values are (b) 110 μs , (c) 107 μs , (d) 105 μs .

設定した場合には、取り出しから 3 μs 程度でギャップ電圧がほぼゼロとなっている。つまり空胴に流れ込む電流（この場合はジェネレータ電流）がゼロとなっており、ビーム取り出し同期 LLRF 出力抑止機能が期待通りの動作をしていることがわかる。しかしながら、取り出し直後の電圧の跳ね上がりは依然として観測され、遅延量が大きすぎることがわかる。

(c) の遅延量を 107 μs に設定した場合、ビーム取り出し後の電圧の跳ね上がりはない。スキャンの結果、106 から 107 μs の遅延量設定が最適であり、同様の電圧波形が得られた。

(d) の遅延量を 105 μs に設定した場合には、取り出し前に電圧の跳ね上がりが見られる。これは、遅延量が小さすぎたためビームが取り出される前にジェネレータ電流がゼロになることで、空胴に流れ込む電流がビーム電流のみとなり、従ってウェイク電圧そのものがギャップ電圧として現われるためである。ビームの取り出しとともに空胴に流れ込む電流はゼロとなるため、1 μs 以降ギャップ電圧はほぼゼロとなる。

以上のように、ビーム取り出し同期 LLRF 出力抑止機能が期待通りの動作を確認し、また電圧波形を測定することで適切な遅延量が得られることが示された。

4. まとめと今後

RCS で大強度陽子ビームを取り出した際に生じる空胴ギャップ電圧の跳ね上がりについて原因を考察し、ベクトル電圧制御フィードバックのゲインパターンを用いずにこれを抑制する方法としてビーム取り出し同期

LLRF 出力抑止機能を実装した。期待通りの動作を確認し、電圧波形測定により適切な遅延量設定を得た。

1 MW を超える大強度ビームの加速試験では、RF 電源の出力電流の制限からキッカータイミングを早めビームを 6 ms 程度で取り出す必要があるが、通常に取り出しに比べ高いギャップ電圧でビームを取り出すことになるため、電圧の跳ね上がりの抑制は必須である。ゲインパターン設定による場合に比べ簡便であり設定ミスへの恐れが少ないことから、この出力抑止機能が今後有用になると考えられる。

参考文献

- [1] P. K. Saha *et al.*, “1-MW Beam Operation at J-PARC RCS with Minimum Beam Loss”, in *Proc. HB’ 23*, Geneva, Switzerland, Oct. 2023, pp. 147–152.
- [2] F. Tamura *et al.*, “Multiharmonic vector rf voltage control for wideband cavities driven by vacuum tube amplifiers in a rapid cycling synchrotron”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, 22, 092001, 2019.
- [3] F. Tamura *et al.*, “Commissioning of the next-generation LLRF control system for the Rapid Cycling Synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 999, 165211, 2021.
- [4] F. Tamura *et al.*, “Development of Next-Generation LLRF Control System for J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 66, 1242, 2019.
- [5] PICMG, “MicroTCA Overview”, <https://www.picmg.org/openstandards/microtca/>