

J-PARC RCS におけるシングルエンド金属磁性体空洞の運転経験 OPERATIONAL EXPERIENCE OF SINGLE-ENDED MAGNETIC ALLOY CAVITIES AT J-PARC RCS

田村文彦 ^{*,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)},
杉山泰之 ^{A)}, 野村昌弘 ^{A)}, 島田太平 ^{A)}, 長谷川豪志 ^{A)}, 原圭吾 ^{A)}, 足立恭介 ^{A)}
Fumihiko Tamura ^{*,A)}, Hidefumi Okita ^{A)}, Masanobu Yamamoto ^{A)}, Masahito Yoshii ^{A)}, Chihiro Ohmori ^{A)},
Kiyomi Seiya ^{A)}, Yasuyuki Sugiyama ^{A)}, Masahiro Nomura ^{A)}, Taihei Shimada ^{A)},
Katsushi Hasegawa ^{A)}, Keigo Hara ^{A)}, Kyosuke Adachi ^{A)}
^{A)} J-PARC Center, JAEA & KEK

Abstract

The replacement project for the Magnetic Alloy (MA) cavities of the 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) has been underway for several years. The original cavities are the push-pull (PP) configuration, where rf current is supplied alternately from a pair of tetrode tubes to the electrodes on the upstream and downstream sides of the acceleration gap. All cavities are to be replaced with newly developed single-ended (SE) cavities. In wide-band MA cavities, large amplitude multiharmonic rf signals are required to compensate for beam loading for high intensity beam acceleration. In PP cavities, significant unbalance in the operation of the upstream and downstream tetrodes due to multiharmonic rf occurs. This unbalance has been one of the limiting factor of beam intensity. This unbalance does not occur essentially in SE cavities. It is expected that acceleration exceeding the design beam output of 1 MW will be possible upon completion of the replacement project. Currently, six of the twelve cavities have been replaced. The SE cavity does not have a configuration to cancel even-order higher harmonics, therefore the harmonic components are different from those of the original PP cavity. In this article, we report on the operational experience with the single-ended cavity at the J-PARC RCS.

1. はじめに

J-PARC の 3 GeV シンクロトロン (RCS) は、物質生命科学施設 (MLF) および主リングシンクロトロン (MR) に大強度陽子ビームを供給している。現在までに、MLF 向けに設計ビーム出力 1 MW での供給運転を実現している [1]。RCS および MR では RF システムに金属磁性体 (Magnetic Alloy, MA) 空洞を採用しており、高い加速電圧を発生させることができるのみならず、その広帯域特性によって陽子ビームの速度変化に対応した周波数スイープがチューニングループなしで可能である。RCS および RCS RF システムの主なパラメータを Table 1 に示す。RCS RF 空洞の Q 値は 2 に調整されており、単一の空洞に 2 倍高調波を重畳した電圧を発生するデュアルハーモニク運転が実現されている。デュアルハーモニク運転によるバンチ整形は、大強度ビーム加速において空間電荷効果の緩和のために必須となっている。

広帯域 MA 空洞では、ビームが誘起するウェーク電圧が高調波成分を含む。加えて、加速ギャップ電圧には終段増幅器の四極管の出力電流の歪みによる電圧の高調波成分も含まれる。従って、大強度ビーム加速の際には、ウェーク電圧および歪み成分の補償のためにマルチハーモニク電圧制御が必要となる。RCS では 2019 年の高周波制御システムの更新時にマルチハーモニクベクトル電圧制御フィードバックを導入し、初期システムの RF フィードフォワード法による補償よりも安定な大強度ビーム加速を実現した [2,3]。

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

従来の加速空洞は、は加速ギャップの上流側と下流側の電極に一对の四極真空管から交互に RF 電流を供給するプッシュプル (PP) 型である。PP 空洞では、ビームを加速しない状態では上下流の四極管の出力電流に生じる高調波成分をキャンセルすることができる一方で、大強度ビームを加速しマルチハーモニクビーム負荷補償を行う場合には、上下流の四極管の動作に著しいアンバランスを生じることがわかり、これまでに様々な検討が行われてきた。まず、高調波成分を含むマルチハーモニク電流を出力している場合四極管の動作は自明ではないことから、四極管のモデルおよび広帯域空洞を含む RF システムのインピーダンスモデルを構築し、ビーム負荷の下での四極管動作のシミュレーションによる再現に成功した [4]。この手法を用い、加速ギャップの上下流電極に接続する四極管陽極電圧の不均衡の原因がウェーク電

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

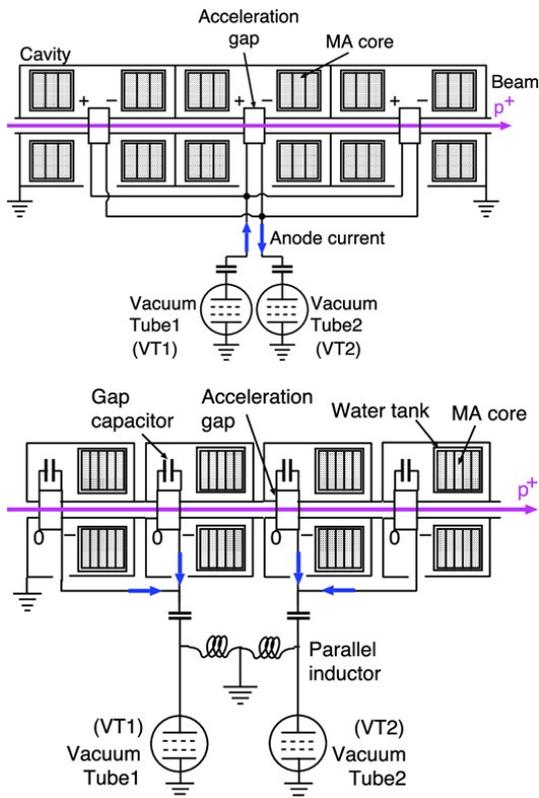


Figure 1: Schematic diagrams of (top) PP cavity and (bottom) SE cavity [5].

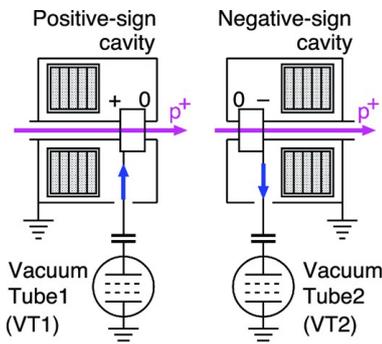


Figure 2: Positive-sign and negative-sign cavities [5].

圧の高調波成分とその補正であることを解明し、負荷が少ない下流側電極のみで空腔に電流を供給するシングルエンド (SE) 空腔を開発した [5]。PP 空腔ではビームの感じる加速ギャップ電圧と陽極電圧は大きく異なるが、SE 空腔ではギャップ電圧と陽極電圧は等しく、本質的に不均衡は生じないものである。

1 台の SE 空腔先行機でのビーム試験が良好であったことから、12 台の空腔を全て SE 空腔に置き換える計画が進行中である。現在 6 台の空腔が SE 空腔となっており、2028 年に完了の予定である。

2. シングルエンド空腔の概要

シングルエンド空腔における四極管動作については参考文献 [5] に詳細がある。ここでは概略を示す。不均衡

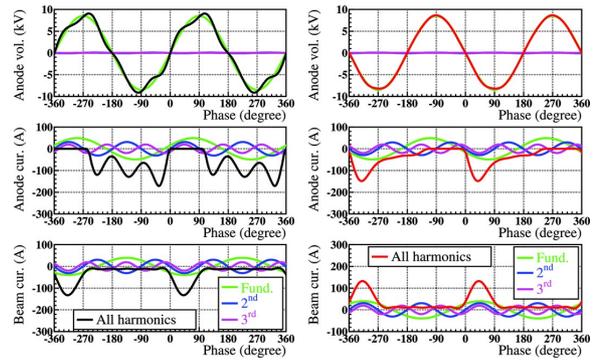


Figure 3: Anode voltage, anode current, and beam current for positive-sign and negative-sign cavities [5].

を解析するために、Fig. 1 上図に示したプッシュプル空腔をギャップ中点で分割し、Fig. 2 に示す positive-sign および negative-sign 空腔における 1 MW 相当のビーム加速時の動作シミュレーションを行った。加速サイクル中最大の加速電圧が必要とされる加速中盤のタイミングで、シミュレーションで得られた各空腔の陽極電圧、陽極電流、空腔に流れこむビーム電流、そしてそれぞれのハーモニック成分を Fig. 3 に示す。基本波、2 倍高調波、3 倍高調波 ($h = 2, 4, 6$) までのウェーク電圧は補償されるようコントロールグリッドは励振されている。ここにビーム電流は同一であるが、ギャップとの接続方法により符号が異なっている。陽極電圧および電流において、基本波 ($h = 2$) および 3 倍高調波 ($h = 6$) 成分は positive-sign および negative-sign 空腔で同一であるが、2 倍高調波成分 ($h = 4$) のみ位相が異なっている。これは反対向きに流れ込むビーム電流成分の補償が理由であり、この 2 倍高調波成分の違いにより、positive-sign 空腔ではより大きな陽極 DC 電流が必要であるほか、非線形動作による 4 倍高調波由来の陽極電圧 (加速ギャップ電圧) の歪みが生じていることがわかる。PP 空腔で動作は同様であり、上流側の四極管の陽極振幅が大きくなりスクリーングリッド電圧に近接し、スクリーングリッド過電流のトリップの発生原因となっていた。

このシミュレーション結果をもとに、ビーム負荷に対し動作がより安定な Negative-sign 空腔のみを用いた SE 空腔が製作された。SE 空腔は本質的に不均衡が生じない。一方、PP 空腔では上下流の四極管出力の合成により加速ギャップ電圧を発生させるため各四極管はギャップ電圧の半分の陽極振幅を発生させればよいが、SE 空腔においては加速ギャップと同一の陽極振幅が必要である。このため、Fig. 1 下図に示したように、加速ギャップ数を 4 つに (PP 空腔は 3 つ) 増やし各ギャップの電圧を減らすこととした。ここに、ギャップ数は増えているが、電極数は PP 空腔の 6 (2 電極 \times 3 ギャップ) から 4 に減らすことができている。また MA コアに従来の FT3M よりもシャントインピーダンスの高い FT3L [6] を使用した。

プロトタイプ SE 空腔 1 台は 2021 年に RCS にインストールされ、1 MW 相当の大強度ビームで試験が行われた。3 倍高調波までの補償が行われた条件下での、PP 空腔と SE 空腔システムの陽極電源出力の比較を Fig. 4 に

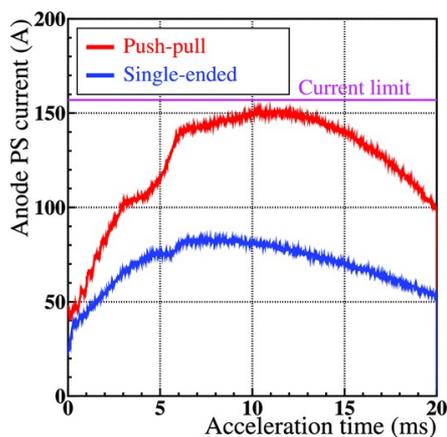


Figure 4: Comparison of anode power supply currents between PP and SE cavities [5].

示す。PP 空胴では加速中盤において電源のリミットに近い 150 A 程度が必要であるのに対し、SE 空胴では最大 80 A 程度と十分に余裕があることがわかる。また、電流を積分することによって計算されるシステムの消費電力は、PP 空胴で 820 kW であったものが SE 空胴システムでは 487 kW であり、実に 40% の消費電力削減が達成された。

前述のように、この結果に基づいて全空胴の SE 空胴に置き換える計画が進行しており、現在までに 12 台中 6 台の SE 空胴インストールが完了した。SE 空胴では陽極電源に余裕が生まれるため、全空胴の置き換えが完了すれば、設計ビームパワー 1 MW を超える運転が可能になるものと期待されている。

3. 空胴形式による高調波成分の違い

現在の運転では、消費電力の観点から、PP 空胴は 2 倍高調波まで、電力消費の少ない SE 空胴は 3 倍高調波までのビーム負荷補償の条件でビーム運転が行われている。PP 空胴ではその構成から四極管の非線形性由来の偶数次の高調波はキャンセルされ抑制されるが、SE 空胴はこの仕組みを持たない。また、PP 空胴と SE 空胴の共振周波数はそれぞれ 2.1 MHz と 1.7 MHz に設定されている。これらの理由により、PP 空胴と SE 空胴ではギャップ電圧の高調波成分には違いがある。

1 MW 相当ビーム加速時の、PP 空胴と SE 空胴のギャップ電圧のハーモニック成分を Fig. 5 の上段、中段に、全空胴のベクトル合成電圧を下段に示した。消費電力の削減のために現在空胴 1 号機 (SE 空胴) をオフにして運転しているため、合成電圧は 12 台運転時の 11/12 となっており、最大合成電圧は約 400 kV である。また、細いビームを MLF に供給するために、取り出し直前に電圧を急上げてバンチ回転を行う電圧パターンが使用されている。

前述のように PP 空胴は 2 倍高調波までの制御が行われており、2 倍高調波はプログラム電圧が 0 となる 6 ms 以降では非常に小さい振幅に抑制されている一方で、制御が行われていない 3 倍高調波成分は最大 2 kV と比較的大きな振幅程度を持つことがわかる。4 倍高調波も加速後半に 3 倍高調波の 1/3 程度の振幅で発生している。

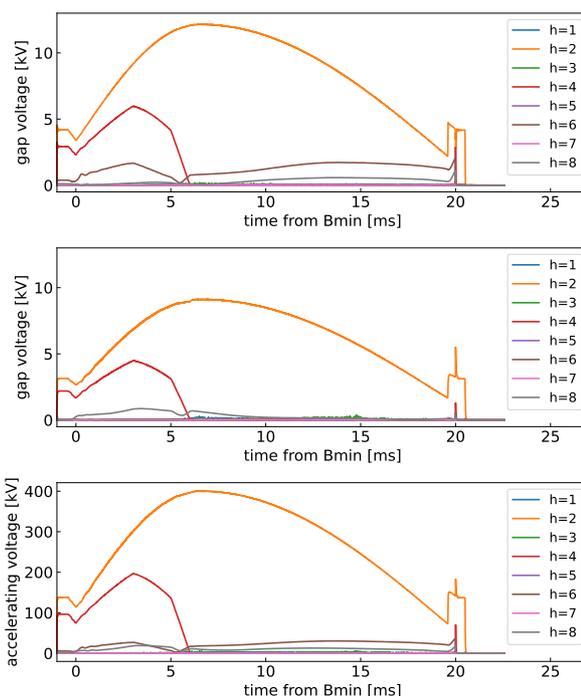


Figure 5: Typical harmonic amplitudes of gap voltages of (top) PP and (middle) SE cavities, and (bottom) vector sum of 12 cavities.

これら高調波成分は主にウェーク電圧由来であると考えられている。

3 ギャップである PP 空胴に対し、4 ギャップである SE 空胴ではギャップ電圧は PP 空胴の 3/4 となるように設定されている。3 倍高調波までの制御が行われているので、加速全域にわたり非常に小さい振幅に保たれているが、制御が行われていない 4 倍高調波は 10 ms までの間、最大 1 kV の振幅を持つ。ビーム加速を行わない時にも同程度の振幅が観測されることから、この 4 倍高調波は四極管が 2 倍高調波電流を発生させる際の高調波であると考えられる。前述のようにこの原因での 4 倍高調波成分は PP 空胴ではキャンセルされ抑制されるものである。

11 台 (PP 空胴 6 台、SE 空胴 5 台) のベクトル合成電圧から縦方向ビームシミュレーションを行った結果 [7] によれば、SE 空胴による 4 倍高調波成分の増加はバンチングファクターに 5% 程度の違いを生じるものの、モーメントフィリングファクターの変化は小さく、ビームの安定な加速に大きな影響をおよぼすものではないことが確認されている。

4. フィードバックによる 4 倍高調波抑制

RCS の LLRF 制御システムのマルチハーモニック電圧制御は 4 倍高調波 ($h = 8$) までの制御を行うことができるが、参考文献 [3] で報告したように、現在のところ PI 制御を行う場合は大電力機器の制約により 3 倍高調波までしか制御することができない。I (積分) 制御はベースバンドでの DC において無限大のゲインを持つことが大電力機器のリミットに到達してしまう理由と考えられ

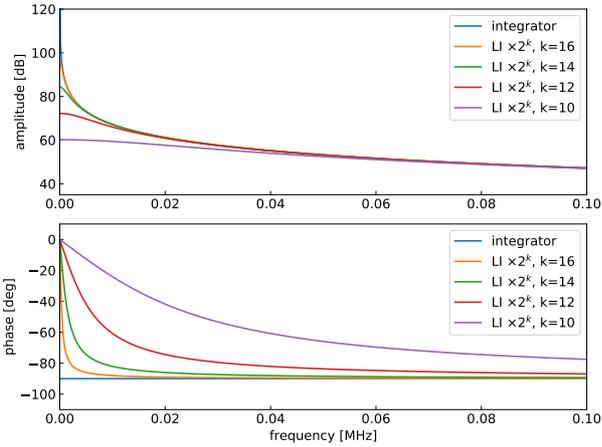


Figure 6: Amplitude and phase responses of the integrator and leaky integrator with various k . To aid visualization, $2^k \times H_{LI}$ is plotted [3].

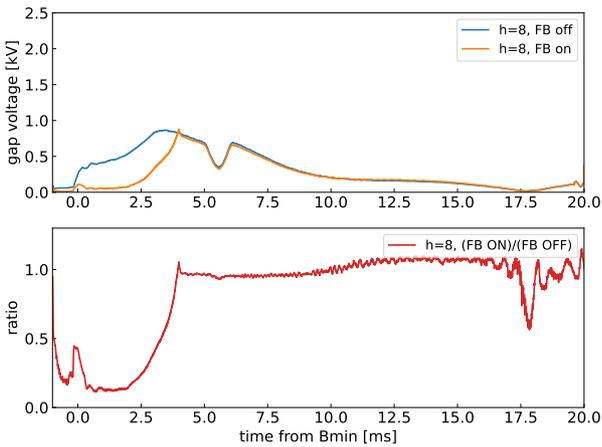


Figure 7: (Top) amplitudes of the ($h = 8$) harmonic in the cases of the feedback off and on with the P+LI controller, (bottom) ratio between the amplitudes.

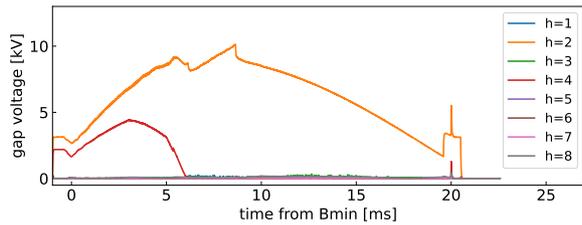


Figure 8: Harmonic amplitudes of gap voltages with the longer gain pattern.

ている。この状況は SE 空洞においても同様である。そこで、同文献 [3] に示した P+LI (Leaky Integrator) 制御を活用することを検討した。

積分器および leaky integrator の伝達関数 H_I および H_{LI} は

$$H_I(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}, \quad (1)$$

および

$$H_{LI}(z) = \frac{z^{-1}}{2^k + (1 - 2^k)z^{-1}}, \quad (2)$$

である。LI は I 制御と同様のローパス特性を持ちながら、DC で有限のゲインを持つ特徴がある。式から、大きな係数 2^k に対し $2^k \times H_{LI} \sim H_I$ となることは容易に理解できるだろう。Figure 6 に積分器および様々な k に対する LI の伝達関数 (2^k を掛けたもの) を示した。無限の DC ゲインを持つ積分器にゲインパターンを適用しても、DC ゲインはやはり無限大となるためフィードバック帯域を変化させるだけであり出力を制限することはできないが、有限のゲインを持つ LI に対してはゲインパターンによりその出力を制限することができ、従って大電力機器の負荷を制限することが可能である。

試験には 1 MW 相当、 8.3×10^{13} ppp の陽子ビームを用いた。LI の設定は $k = 16$ 、ゲインパターンとして、2 ms まで最大、2 ms から 4 ms まで線形にゼロに落とすパターンを使用した。フィードバックなしの場合と上記設定で P+LI 制御によるフィードバックを行った時の 4 倍高調波 ($h = 8$) 振幅の比較を Fig. 7 に示す。ゲインパターンが最大である 2 ms までは、おおむね 15% 未満に振幅が減少している。0 ms 付近で抑制が悪いのは、500 μ s の蓄積時のビーム電流増加にフィードバックが追従できていないことと考えられる。また、2 ms から 4 ms にかけてゲインパターンの変化は線形であるが、閉ループゲインの変化は一般に $\frac{x}{1+x}$ 的な応答を示すから補償は線形変化とはならないことは当然である。

より長期間の抑制を目的としてゲインパターンを 6 ms から 10 ms にかけてゼロに減少させた時のギャップ電圧のハーモニック成分を Fig. 8 に示す。4 倍高調波は抑制されているが、6 ms から 8 ms にかけて基本波 ($h = 2$) の振幅が大きく乱れており、このゲインパターンは使用することはできない。4 倍高調波に対する制御が基本波に影響を与えるという現象はシステム全体のフィードバックゲインが不足している可能性を示唆しており、増幅器系のサチュレーションなどの調査が必要であろう。

5. まとめと今後

J-PARC RCS で新たに開発された SE 空洞は、PP 空洞で問題となる四極管動作の不均衡が本質的に生じない、必要とする陽極電源電流が少ないなどの利点を持つ。全空洞の SE 空洞への置き換えが完了すれば 1.5 MW とした設計ビーム出力 1 MW を超えた運転が可能になると期待されている。

大電流ビーム加速時の PP 空洞と SE 空洞のギャップ電圧の高調波成分には違いがあり、SE 空洞では特に 4 倍高調波 ($h = 8$) 振幅が PP 空洞に比べ大きい。4 倍高調波成分のビームに与える影響は軽微であると考えられている。P+LI 制御とゲインパターンを用いたフィードバックにより抑制を行うことができたが、非常に限定的な抑制にとどまる。加速中盤でフィードバックゲインが不足している可能性が示唆されており、今後は電流測定やシミュレーション等で増幅器系の調査を行っていく必要があると考える。

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] M. Yamamoto *et al.*, “Vacuum tube operation analysis under multi-harmonic driving and heavy beam loading effect in J-PARC RCS”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 835, pp. 119–135, 2016.
- [5] M. Yamamoto *et al.*, “Development of a single-ended magnetic alloy loaded cavity in the Japan Proton Accelerator Research Complex rapid cycling synchrotron”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 7, p.073G01, 2023.
- [6] C. Ohmori *et al.*, “Development of a high gradient rf system using a nanocrystalline soft magnetic alloy”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 16, 112002, 2013.
- [7] H. Okita *et al.*, “J-PARC RCS の縦方向ビーム操作の現状”, to be published in *Proc. PASJ2025*, FRP031, 2025.