

# J-PARC 主リングにおける陽極電流の計算と加速空洞の駆動高周波位相角の最適化

## ANODE CURRENT CALCULATION AND OPTIMIZATION FOR RF CAVITY DETUNING ANGLE AT J-PARC MAIN RING

清矢紀世美 <sup>\*A)</sup>, 足立恭介 <sup>A)</sup>, 原圭吾 <sup>A)</sup>, 長谷川豪志 <sup>A)</sup>, 野村昌弘 <sup>A)</sup>, 大森千広 <sup>A)</sup>,  
沖田英史 <sup>A)</sup>, 島田太平 <sup>A)</sup>, 杉山泰之 <sup>A)</sup>, 田村文彦 <sup>A)</sup>, 山本昌亘 <sup>A)</sup>, 吉井正人 <sup>A)</sup>

Kiyomi Seiya <sup>\*A)</sup>, Kyosuke Adachi <sup>A)</sup>, Keigo Hara <sup>A)</sup>, Katsushi Hasegawa <sup>A)</sup>, Masahiro Nomura <sup>A)</sup>,  
Chihiro Ohmori <sup>A)</sup>, Hidefumi Okita <sup>A)</sup>, Taihei Shimada <sup>A)</sup>, Yasuyuki Sugiyama <sup>A)</sup>,  
Fumihiko Tamura <sup>A)</sup>, Masanobu Yamamoto <sup>A)</sup>, Masahito Yoshii <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center

### Abstract

The J-PARC Main Ring (MR) accelerates protons from 3 GeV to 30 GeV and delivers beams to the T2K long-baseline neutrino experiment. As of November 2023, the operational beam power reached 750 kW, achieving the original design goal for J-PARC. This was further increased to 830 kW in March 2025. Our long-term goal is to reach 1.3 MW by 2028 [1]. To support this upgrade, the number of RF cavities and their associated power supplies has been expanded over the past a few years. Further improvements will continue in the coming year, with the total RF voltage planned to increase from 450 kV to 550 kV by adding two more cavities. The anode power supply will also be upgraded to increase the anode current, despite constraints on available physical space [2]. The required anode current was estimated using a phasor diagram. Based on the available anode current, a method was studied to reduce the current requirement by adjusting the cavity resonant frequency. This paper discusses the estimation of the required anode current and the optimization of the cavity detuning angle to minimize anode current consumption.

### 1. はじめに

J-PARC 主リング (MR) では、2028 年に開始予定の Hyper-K ニュートリノ実験に向けたビーム強度の増強が進められている。MR は、3 GeV の陽子ビームを 30 GeV まで加速し、各実験施設へ供給するシンクロトロン加速器である。現在、速い取り出しモード (fast extraction) においては、1.36 s サイクルで  $2.4 \times 10^{14}$  protons per pulse (ppp)、ビーム強度 830 kW のビームを T2K ニュートリノ実験へ供給している。

MR では、2028 年までにビーム強度を現在の 830 kW から 1.3 MW へと増強する計画であり、これに向けて粒子数を  $2.4 \times 10^{14}$  ppp から  $3.2 \times 10^{14}$  ppp に増加させるとともに、加速サイクルを 1.36 s から 1.16 s へと短縮することが求められている。

このビーム強度増強を実現するためには、RF システムの強化が不可欠であり、大きく 2 つの技術的課題が存在する。1 つ目は、空間電荷効果を考慮した上で、十分な縦方向アパーチャー (RF バケツ) を確保することである。このため、RF 空洞を 2 台増設し、加速電圧を 450 kV から 550 kV へと引き上げる予定である。

2 つ目の課題は、粒子数の増加にともないビームローディング効果が増大し、これを補償するために真空管終段増幅器へ供給する陽極電流を増加させる必要がある点である。ビームローディング補償に必要な陽極電流は空洞のインピーダンスと周回ビームの縦方向分布に強く依存する。陽極電流の増加には、各陽極電源に設置されているインバーター出力ユニットの追加が必

要であるが、設置スペースの制約から増設可能な数には限りがある。

本報告では、ビーム強度増強にともない必要となる陽極電流の見積もりと、その低減を目的とした空洞共振周波数の最適化手法について述べる。

### 2. RF 運転パラメーターと陽極電源

速い取り出しモードの大強度運転では、基本波加速用の空洞 9 台と、2 倍高調波用の空洞 2 台が使用されており、最大加速電圧はそれぞれ 450 kV および 110 kV である。上流の 3 GeV シンクロトロン RCS (Rapid Cycling Synchrotron) からは 40 ms 毎に計 4 回、2 バンチずつが MR に入射される。

MR のハーモニクナンバーは 9 であり、8 バンチが同時に蓄積・加速される。加速は、3 GeV から 30 GeV まで 0.65 s の間に行われ、この間に RF 周波数は 1.67 MHz から 1.72 MHz へと変化する。MR の運転サイクルは、1.36 s である。

加速空洞には金属磁性体カットコアを採用し、カットコア間の隙間調整により空洞の Q 値を 21 に、加速ギャップに設置された周波数調整用コンデンサーにより、共振周波数は約 1.73 MHz に調整している。加速空洞は、陽極電源の定格出力に応じて、3 ギャップと 4 ギャップの加速空洞があり、4 ギャップ空洞の場合、RF 源から見たシャントインピーダンスは約 390  $\Omega$  である。

MR では、建設当初からの目標であったビーム強度 750 kW を 2024 年 11 月に達成し、さらに 2025 年 3 月までに 830 kW へと増強した。現在の運転における粒子数は  $2.4 \times 10^{14}$  ppp である。ビーム強度の増加にともない、ビームローディング効果も顕著となり、その補償

\* kiyomis@post.kek.jp

のためにはより多くの陽極電流が必要となる。

陽極電流とは、空胴に高周波電力を供給する終段増幅器の真空管のアノード（陽極）に供給される直流電流を指す。各空胴の終段増幅器用陽極電源は、半導体素子によるインバーター出力ユニットを並列接続する構成となっている。出力電流を増やすにはインバーター出力ユニットの台数を増設することで可能になるが、出力ユニットの設置スペースの制約からすべての陽極電源の出力電流を増やせるわけではない。

MRRF はこれまで、出力ユニットを増設できない3台の陽極電源はインバーター出力ユニットを15台のままとし、加速空胴のギャップ数を4ギャップから3ギャップに改造した。そして、残りの空胴は4ギャップとし、陽極電源の出力ユニットを最大19台まで搭載する計画を立て、陽極電流の上限を127 Aまで可能にした。

Figure 1 は、ビーム強度を0 kW から950 kW まで段階的に増加させた際の陽極電流の測定結果を示している。粒子数が  $2.7 \times 10^{14}$  ppp（ビーム強度950 kW）の時点で、既に陽極電流は120 Aに達しており、出力増強した陽極電源の最大定格に近づいている。

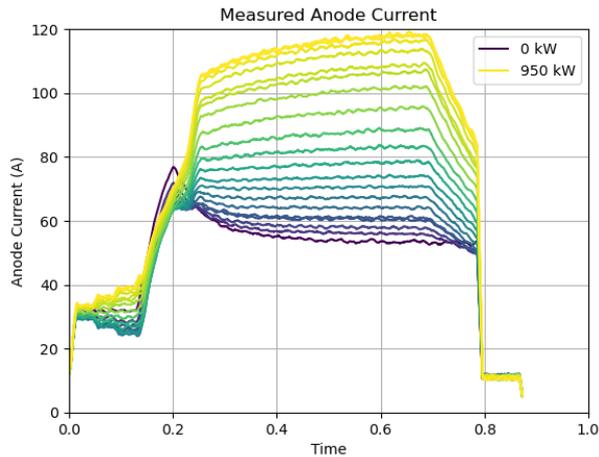


Figure 1: Measured anode current as the number of protons was increased from 0 to  $2.7 \times 10^{14}$  ppp.

### 3. PHASOR DIAGRAM を用いた陽極電流の計算

空胴に流れる全電流  $I_T$  は、真空管から供給される出力電流  $I_G$  と、ビームによって誘起される電流  $I_B$  のベクトル和として表される。これらの関係は、Fig. 2 に示すように Phasor diagram を用いて表現できる。この図に基づき、ビーム強度に対する陽極電流の計算を行った [3–6]。

陽極電流  $I_P$  と粒子数  $N$  には、Equation 1, 2 の関係が成り立つ。ここで、 $\varphi_z$  は空胴の detuning angle,  $\varphi_B$  はビーム位相であり、本解析ではビーム位相は synchronous 位相等しいと仮定した。 $I_0$  は加速電圧とシャントインピーダンスから導出した。

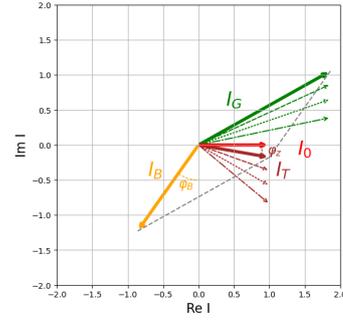


Figure 2: Phasor diagram showing the detuning angle  $\varphi_z$  and beam phase  $\varphi_B$ . The total cavity current  $I_T$  is the sum of the beam current  $I_B$  and the generator current  $I_G$ .

$$I_P = aI_0 \left( \frac{1 + Y \sin \varphi_B}{\cos \left( \arctan \left( \frac{\tan \varphi_z - Y \cos \varphi_B}{1 + Y \sin \varphi_B} \right) \right)} \right) + I_{neighbor} \quad (1)$$

$$Y = \frac{I_B}{I_0} \quad (2)$$

ここで  $Y$  は  $I_B$  と  $I_0$  の比、 $a$  は基本波成分のみを考慮した場合の、真空管出力電流と陽極電流の間の比例係数である。また、 $I_{neighbor}$  は基本波以外の隣接ハーモニック成分による寄与を表すが、本研究ではこの成分を陽極電流から分離して評価した。さらに、 $Y$  および  $I_{neighbor}$  が粒子数  $N$  に比例すると仮定し（すなわち  $Y = \alpha N$ ,  $I_{neighbor} = \beta N$ ）、陽極電流  $I_P$  を粒子数  $N$  の関数として表現可能である。この関係式をもとに、 $a, \alpha, \beta$  をフィッティングパラメータとして、測定データに基づく最適化を行った。

フィッティングは、8 バンチの入射完了後で加速が開始される時刻 0.14 s から、10 ms ごとに行い、各時点で  $a, \alpha, \beta$  の値を決定した。得られたフィッティング結果を用いて、粒子数  $N$  を 0 ppp から  $2.5 \times 10^{14}$  ppp まで、 $0.25 \times 10^{14}$  ppp ごとに変化させた場合の陽極電流  $I_P$  を計算した結果を Fig.3 (left) に示す。Figure 3 (right) は、粒子数を変化させた際に実測された陽極電流である。両者は良好に一致しており、本フィッティングモデルが陽極電流の粒子数依存性を適切に再現していることが確認できる。

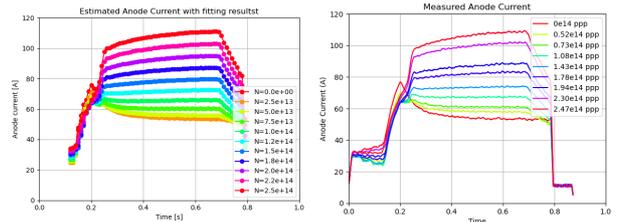


Figure 3: Comparison of reconstructed anode current using the fitting model (left) and measured data (right) as the beam intensity was varied from 0 to  $2.5 \times 10^{14}$  ppp.

## 4. 空洞の共振点を変えることによる陽極電流低減の検討

### 4.1 共振点を変えたことによる陽極電流の変化

Figure 2 の点線ベクトルが示すように、空洞の detuning angle を大きくすると、ビームがある場合、必要な陽極電流を低減できる。この点に着目し、空洞の共振周波数（共振点）を変更することによる陽極電流低減効果の検討を行った。

MR で使用される空洞は、加速にともなう周波数変化に対して共振周波数を追従させない非同調型空洞であり、常に共振周波数よりも低い加速周波数で運転されている。Figure 4 は、空洞を並列共振回路としてモデル化した場合のインピーダンスおよび detuning angle の周波数依存性を示したものである。

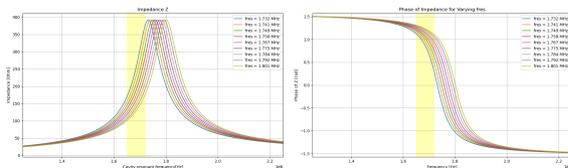


Figure 4: Cavity impedance (left) and detuning angle (right) as functions of frequency, when the resonant frequency was scanned from 1.73 MHz to 1.80 MHz.

図中の青線は、現在の運転条件における共振周波数が 1.73 MHz であり、加速周波数範囲が 1.67 MHz から 1.72 MHz であることを示している。また、Fig. 4 より、共振周波数を 1.73 MHz から 1.80 MHz に上昇させることで、対応する周波数範囲における空洞の detuning angle が大きくなるのが分かる。これにより、陽極電

流の低減が可能となることが示唆される。

共振周波数を変化させた際の陽極電流について、前章で求めたフィッティング結果に基づき計算を行った。ここでは、以下の 4 時点に着目し、それぞれのタイミングに対応する周波数における detuning angle およびインピーダンスを用いて、粒子数に対する陽極電流を算出した。

- 0.14 s : 8 バンチの入射が完了し、加速開始直前のタイミング
- 0.20 s : 加速途中で、加速電圧が入射時の 120 kV から最大の 450 kV に到達した時点
- 0.69 s : 加速終了直前で、synchronous 位相を段階的に低下させる直前のタイミング
- 0.79 s : 加速終了時

Figure 5 は、共振周波数を 1.73 MHz から 1.8 MHz まで 8.6 kHz 刻みで増加させた際の、粒子数に対する陽極電流の計算結果を示している。共振周波数を上昇させると、粒子数が多い領域では陽極電流が減少する傾向が見られる。一方で、粒子数が少ない領域においては、陽極電流がむしろ増加する場合が確認された。特に Fig. 5 (Top right) では、共振周波数を上げることでビームが存在しない条件下において陽極電流が最大となり、1.78 MHz の時点で既に 120 A を超えている。この結果を踏まえ、以降の解析では共振周波数の上限を 1.78 MHz と設定した。

### 4.2 共振点を変えたことにより到達できる陽極電流とビーム強度の計算

次に、陽極電流が最大となる 0.69 s に着目し、ビーム強度の増強にともなって必要となる陽極電流を算出した。前述のとおり、MR におけるビーム強度の増加

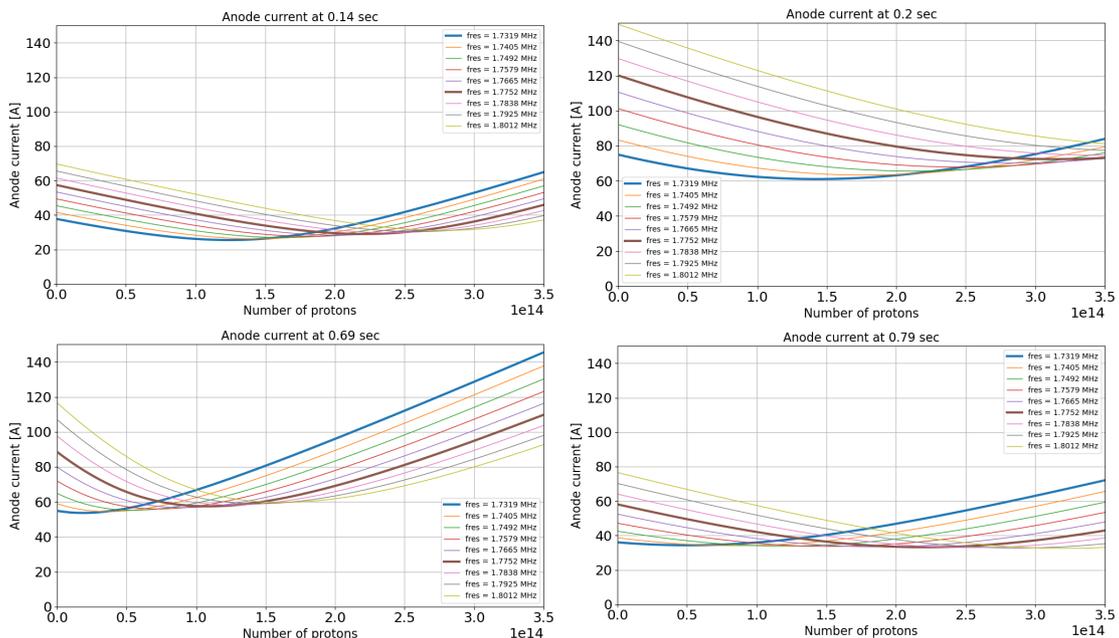


Figure 5: Anode current estimated using the fitting model at various times in the MR cycle. Each line shows the result for a cavity resonant frequency scanned from 1.73 MHz to 1.80 MHz.

は、単に粒子数を増やすだけでなく、運転サイクルの短縮によっても実現される。また、RF システムの強化にともない、加速電圧が上昇するため、これに応じて synchronous 位相も変化する。

これらの要素を考慮して、共振周波数を 1.73 MHz とした場合のビーム強度に対する陽極電流の計算結果を Fig. 6 に示す。青線はこの条件で得られた結果であり、実線は運転サイクル 1.36 s・加速電圧 450 kV、破線は 1.28 s・510 kV、点線は 1.16 s・550 kV の場合を表す。図中には、陽極電源の最大出力電流である 127 A および、ビーム増強目標である 1.3 MW も併せて示している。

Figure 6 より、運転サイクル 1.16 s・加速電圧 550 kV の場合には、最大出力電流 127 A を用いることで、1.3 MW のビーム出力を達成可能であることがわかる。また、共振周波数を 1.78 MHz にまで上昇させた場合の計算結果を茶色の線で示しており、共振点を高めることにより必要な陽極電流が低減され、同条件において 1.8 MW に到達可能であることが示唆される。

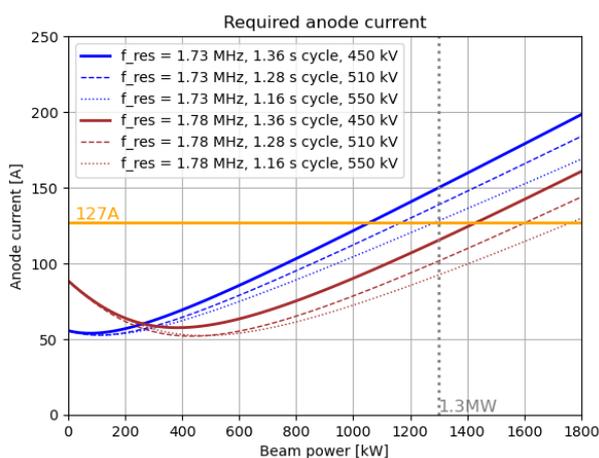


Figure 6: Estimated anode current at 0.69 s for the fundamental 4-gap cavity as a function of beam power, under different RF voltage and cycle length conditions: 450 kV at 1.36 s (solid line), 510 kV at 1.28 s (dashed line), and 550 kV at 1.16 s (dotted line). Results for 1.73 MHz are shown in blue, and those for 1.78 MHz in brown.

共振周波数は加速ギャップに設置された周波数調整用の真空コンデンサーによって調整しており、共振点を変えた際の陽極電流の変化については、今後実験を通じて検証する予定である。

## 5. まとめと今後の予定

J-PARC MR では、2028 年に開始される Hyper-K ニュートリノ実験に向けて、現在のビーム強度 830 kW を

1.3 MW へと増強する計画が進められている。ビーム強度の増加にともない、ビームローディング効果も顕著になり、それを補償するために陽極電流の増加が必要となる。そのため、陽極電源を最大限増強し、4 ギャップ空胴に供給可能な最大陽極電流を 127 A まで上げた。

MR で使用されている加速空胴は、金属磁性体 (MA) コアを用いた低 Q 値で、可変周波数帯域をカバーする非同調型空胴であり、共振周波数の調整によって detuning angle を最適化できるという特徴を持つ。この特性に着目し、共振周波数の変更による陽極電流の最適化について検討を行った。

まず、Phasor diagram を用いたモデルにより、粒子数と陽極電流の関係を記述する式を導出し、実験データとのフィッティングを通じてモデルの妥当性を確認した。このモデルを用いて、加速サイクル中の各タイミングにおける共振周波数変化が陽極電流に与える影響を定量的に評価した。

その結果、現行の共振周波数 1.73 MHz においても、運転サイクル 1.16 s、加速電圧 550 kV という条件下で最大電流 127 A を用いることで、1.3 MW のビーム出力が理論的に可能であることが示された。さらに共振周波数を 1.78 MHz に引き上げることができた場合、必要な陽極電流が低減され、最大で 1.8 MW の出力が実現可能となる可能性が示唆された。

今後は、加速ギャップに設置された周波数調整用の真空コンデンサーを用いて、実際に共振周波数を変更した場合の陽極電流への影響を実験的に検証する予定である。これにより、将来的な大強度ビーム運転に向けた RF システム最適化の可能性をさらに明らかにしていく。

## 参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3 MW beam power operation of the J-PARC Main Ring”, in *PTEP*, (2021) no.3, 033G01.
- [2] K. Seiya *et al.*, “RF system upgrade for 1.3 MW operation of J-PARC main ring”, in *IPAC2024*, Tennessee, USA, June 2024, TUPC10.
- [3] Y. Sugiyama *et al.*, “Estimation of the Anode Power Supply Current of the J-PARC MR RF system for 1.36 s cycle operation”, in *IPAC2023*, Venice, Italy, June 2023, THPL105.
- [4] F. Pedersen, “Beam Loading Effects in the CERN PS Booster”, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 22, no. 3, pp. 1906–1909, Jun. 1975.
- [5] K. Seiya, “RF Anode current estimation for high power operation at J-PARC Main Ring”, in *J-PARC symposium 2024 proceedings*, to be published.
- [6] K. Seiya *et al.*, “Estimation of the required current on the anode power supply for high power operation in the J-PARC Main Ring”, in *IPAC2025*, Taipei, Taiwan, June 2025, WEPS132.