

# J-PARC リニアックにおける中間パルス形状に対応したビーム負荷補償試験 STUDY OF BEAM LOADING COMPENSATION WITH COMB-LIKE STRUCTURE AT J-PARC LINAC

二ツ川 健太<sup>\*A)</sup>, 小林 鉄也<sup>A)</sup>, 佐藤福克<sup>B)</sup>, 篠崎 信一<sup>B)</sup>, 方 志高<sup>A)</sup>, 福井 佑治<sup>A)</sup>, 溝端 仁志<sup>B)</sup>, 道園 真一郎<sup>A)</sup>

Kenta Futatsukawa<sup>\*A)</sup>, Tetsuya Kobayashi<sup>A)</sup>, Yoshikatsu Sato<sup>B)</sup>, Shinichi Shinozaki<sup>B)</sup>,

Zhigao Fang<sup>A)</sup>, Yuji Fukui<sup>A)</sup>, Shinichi Mizobata<sup>B)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>,

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup>Japan Atomic Energy Agency

## Abstract

In the J-PARC linac, an intermediate-pulse with the comb-like structure is shaped by kicking an unwanted beam by the RF-chopper cavity installed in MEBT1. Therefore, the cavities lying downstream of the RF-chopper have the beam loading with this beam shape. The present feedforward (FF) system which assumes the averaged beam current and not the comb-like beam was operated in the present LLRF system, because the beam current in the linac was lower than the design value. However, it has been difficult that the required precision for the RF system is satisfied with increasing beam current. Thus, we performed the beam study of the beam loading compensation with the same shapes as the intermediate-pulses. The positive results for the cavities of SDDL and DTL with high Q values were obtained compared to the present system. On the other hand, when this compensation system was used in the case of ACS cavities, the neighbor modes were excited by the input RF. We have to improve the FF system for the operation against the real beam.

## 1. はじめに

J-PARC リニアックでは、平成 25 年度に 25 式の環状結合型リニアック (ACS) 空洞の設置、平成 26 年度に RF 駆動イオン源と大電流対応 RFQ の設置及び中間エネルギービーム輸送系 (MEBT1) の改修を実施した。これにより、設計値 [1] である 50 mA の負水素イオンを 400 MeV までの加速して、大電力ビーム試験のために次段シンクロトロン加速器である 3-GeV RCS に供給することに成功している [2, 3]。

リニアックの RF システムには、RCS 入射時の運動量アクセプタンスから、振幅 1% (pp) かつ位相 1 deg. (pp) の精度が要求されている [1]。リニアックのビームは中間パルスと呼ばれる櫛型のビーム構造をもち、RCS で通常の 2 バンチ運転を行う場合はその周期は 815 nsec、デューティは 56% である (図 1(a))[4]。近年の加速器運転では、ビーム試験や実験施設からの要求により、1 バンチ運転や間引き運転などの多岐にわたる運転パターンを中間パルスに持たせるようになった。これにより、RF システムでは振幅・位相の要求精度を満たすことが困難になってきた。また、当然ではあるが、ビーム電流の増強でビーム負荷が増加したことも、RF 安定度の悪化に拍車をかける結果になっている。

そこで、多様な中間パルス構造をもつビーム負荷があるときの RF 精度の向上のため、ビーム試験を実施した。LLRF のフィードバック (FB)・ループは約 1  $\mu$ sec であるため、周期 815 nsec の中間パルスに対して FB は機能しないことは明白である。FB ループはケーブル長による信号の遅延が主原因であるため、これを短縮して FB で RF 精度上は現実的には不可能である。そこで、ビーム負荷を見越して運転パワーに加算した RF を投入するフォードフォワード (FF) を強化して、

RF の振幅・位相の精度を改善することを検討した。現在まではビーム電流が小さかったこともあり、図 1(b) のように平均的なビーム電流を仮定した矩形の FF でビーム負荷補償を行ってきた (以下、マクロパルスビーム負荷補償)。今回、多様化する中間パルス形状に対応するため、図 1(c) で示すように FF にも中間パルスと同様な櫛型形状を持たせることで、より高精度なビーム負荷補償を目指した。以下、本稿ではこのビーム負荷の補償方法を中間パルスビーム負荷補償と呼称する。

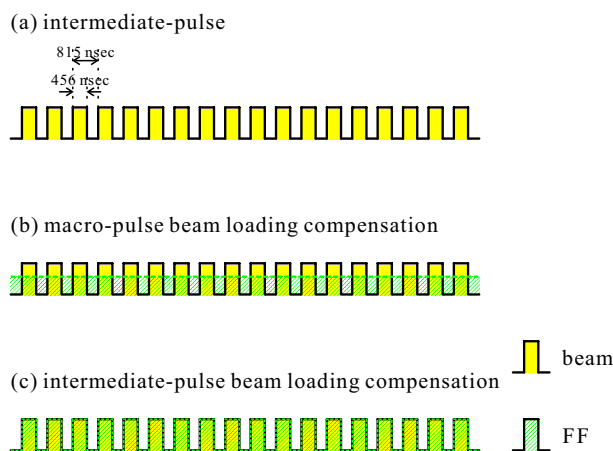


Figure 1: Typical structure of (a) an intermediate-pulse with 1.227MHz, explanation drawings of (b) a macro-pulse beam loading compensation, and (c) an intermediate-pulse beam loading compensation in the J-PARC linac. The yellow filled regions and the green hatching regions show the beam structures and the FF outputs, respectively.

\*kenta.futatsukawa@kek.jp

## 2. 信号分配システムの改修

他の制御信号とは異なり、中間パルス構造の指令信号(以下、RCS CHOP 信号)は、RCS からリニアッククライストロンギャラリ上流部に光信号で伝送されて、電気信号に変換される。そこで、チョッパ空洞(CHOP)のRFを櫛型形状に整形するために使用され、中間パルス構造を生成している<sup>1</sup>[5, 6]。また、RCS CHOP 信号は再び光信号(E/O)に変換されて、光アンプ・光カプラで分岐されて各ステーションに分配される。図2に各ステーションに設置されている光/電気変換モジュール(O/E)の出力信号を示す。全ての図で中間パルス幅は456 nsecで、それぞれ(a)通常の2バンチ運転時、(b)1バンチ運転時、(c,d)間引きをした場合の結果である。このシステムは、通常の2バンチ運転時には動作していたが、間引き運転や中間パルス幅が狭いなどによりデューティが小さい場合には、パルス幅の再現性が低くなる、2重パルスになるなどの問題が生じることが明らかになった。また、再現性が入力光パワーに大きな依存をもち、光パワーが強い場合は再現性が低いことが分かった。これは、E/OやO/Eモジュールが使用している光素子の仕様に対して中間パルスの周波数が低過ぎることや、内部回路が高速対応していないことが原因であると考えられた。

そこで、RCS CHOP 信号の分配システムで使用されているモジュールの仕様を見直し、換装することにした。この分配システムで使用するE/Oモジュールとして、RCSからの伝送の際にも使用されているE/Oモジュール(林栄精器株式会社製RPN-1031)を採用した。また、新規に各ステーションで分配された光信号を受信するO/Eモジュールを開発した(RPN-891)。このO/Eモジュールは入力光パワーを最適化した場合、現実的な中間パルスのデューティ条件でパルス幅の再現性1 nsec以下を達成している。これは各ステーションでこのRCS CHOP 信号を受け取るLLRFシステムのFPGAが48MHzで動作していることを考慮すると、要求性能を満たしている。

RPN-891は2015年末までに60台製作され、既に各ステーションに実装されている。平行して、高いパルス幅の再現性を実現するために、各ステーションでのRCS CHOP 信号の光パワーの調整も実施した。調整後の光パワーを $\pm 1$  dBの範囲に収めている。

## 3. SDTL07ステーションでのビーム試験

324MHzのRFシステムで励振される空洞として、RFQ、バンチャ(BUN)、CHOP、DTL、SDTLがある。その内、MEBT2 BUN2、DTL1~3、SDTL01~16の20ステーションがCHOPの下流で中間パルス構造をもつビームが通過する。本試験では、16式あるSDTL励振RFシステムからSDTL07を抽出して、ビーム電流40 mAで中間パルスビーム負荷補償の試験を実施した。そのときの試験条件を表1にまとめる。

中間パルスビーム負荷補償のためには、ビーム電流に依存したFFの振幅量・位相量と、中間パルス構造を

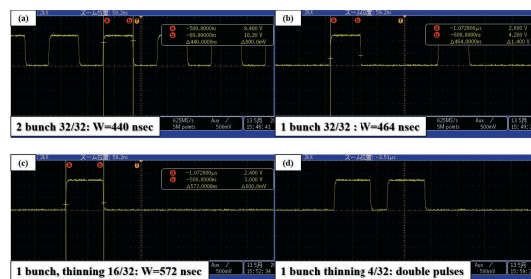


Figure 2: Output signals of an O/E module installed in any stations for four patterns of intermediate-pulses. The pulse width of an original signal is 456 nsec.

Table 1: Conditions of Beam Study for an Intermediate-Pulse Beam Loading Compensation of a 324MHz System

RF Station	SDTL07
Beam Current	40 mA
Thinning Patterns	four types
Width of an intermediate-pulse	489 nsec

もつFF出力と中間パルス構造のビーム負荷との間のタイミング(以下、CHOP DELAY)の3つのパラメータが存在する。しかし、324MHzと972MHzのシステムを合わせて45式のLLRFシステムにおいてパラメータ調整が必要になることもあり、3つのパラメータを総当りでスキャンすることは現実的ではない。そこで、本試験では下記の方法でFF振幅・位相を算出してパラメータ値を決定した後、CHOP DELAYの調整を行った。

1. 位相スキャンが終了して必要なRFパワーが決定した後、ビーム負荷がない状態でのLLRFのDAQ出力を記録する。
2. 特定のビーム電流(本試験では、40 mA)でチョップされていないビームが通過したときのDAQ出力を記録する。このとき、マクロパルス中において、フィードバック(FB)が十分に効いたタイミングを抽出すること。
3. 2.と1.のDAQ出力の比較から、このビーム電流でのビーム負荷の寄与を見積もることができ、必要なFF振幅・位相を逆算する。

図3-6に中間パルスビーム負荷補償のビーム試験結果を示す。緑色の実線がマクロパルスビーム負荷補償を使用した場合の(a)振幅と(b)位相精度を表す。黒及び赤丸が中間パルスビーム負荷補償を使用した場合の振幅と位相精度である。マクロパルスビーム負荷補償の結果と比較して、CHOP DELAYを調整することにより、図4の1バンチ運転のとき、振幅精度0.210%を0.133%に、位相精度0.114 deg.を0.102 deg.に改善させることに成功した。また、図5の間引き運転時には振幅精度0.276%を0.161%に、位相精度0.130 deg.を0.108 deg.になった。図6の間引き運転時には振幅精度0.341%を0.176%に、位相精度0.119 deg.を0.114 deg.になった。唯一、図3にある2バンチ運転の位相精度

<sup>1</sup>チョッパ空洞のRFがある場合はビームが蹴られてスクレーパに止められ、ない場合はビームが通過することで、櫛型の中間パルス構造が生成される。

だけがマクロパルスビーム負荷補償の場合の方が良いという結果になった。しかし、要求精度の1桁下での議論であることから、中間パルスビーム負荷補償を導入する際に問題にならないと考えている。また、運転スケジュールの関係で実現できなかったが、この2バunch運転の結果は再検証する必要があるとも考えている。

このビーム試験の結果のCHOP DELAYは各パターンの周期毎に、精度が最も良くなる最適値があることを確認できた。これは、CHOP DELAYの調整を行った後は、中間パルスの運転パターンを変更したとしてもリニアックRFのFF調整は不要であるということを示唆している。また、試験前に検討した調整の手順で良い成果が得られるも確認できた。

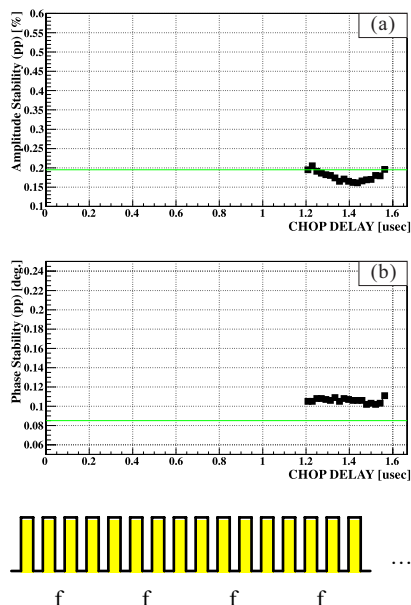


Figure 3: Results of (a) amplitude and (b) phase stabilities using an intermediate-pulse loading compensation for a 2-bunch operation in SDTL07. The green solid lines indicate the stabilities using a macro-pulse beam loading compensation.

本試験の結果で、324MHzステーションでは中間パルスビーム負荷補償の導入により振幅・位相精度の改善を望めることが明らかになった。現在、調整スキプトの準備中であり、本年度の夏季シャットダウン明けの運転からの導入を目指している。

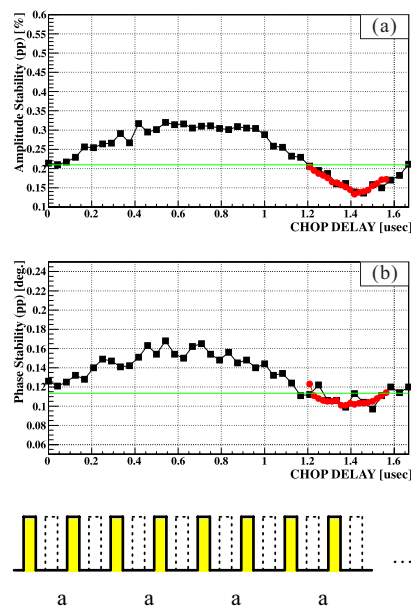


Figure 4: Results of (a) amplitude and (b) phase stabilities using an intermediate-pulse loading compensation for a 1-bunch operation in SDTL07. The green solid lines indicate the stabilities using a macro-pulse beam loading compensation.

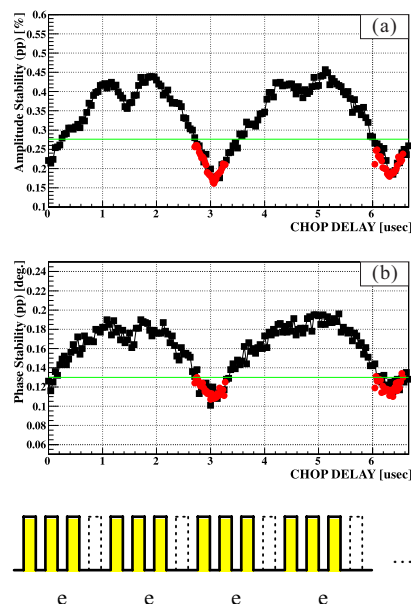


Figure 5: Results of (a) amplitude and (b) phase stabilities using an intermediate-pulse loading compensation for a certain thinning operation in SDTL07. The green solid lines indicate the stabilities using a macro-pulse beam loading compensation.

## 4. ACS01ステーションでのビーム試験

### 4.1 中間パルスビーム負荷補償試験

今回、MEBT2 BUNとL3BTデバンチャを含めて25式あるACS励振用RFシステムの中からACS01を抽出して、ビーム電流40mA、中間パルス幅489nsecの

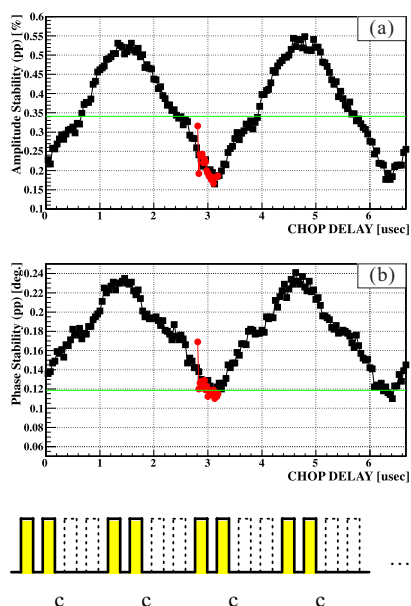


Figure 6: Results of (a) amplitude and (b) phase stabilities using an intermediate-pulse loading compensation for a certain thinning operation in SDTL07. The green solid lines indicate the stabilities using a macro-pulse beam loading compensation.

条件で中間パルスビーム負荷補償の試験を実施した。

最初、324MHz ステーションの SDTL07 と同様の DAC 出力から FF 振幅量・位相量のパラメータ値を決定した後に、CHOP DELAY を調整する方法で検討した。そのときのビーム試験の結果を図 7 に示す。緑色の実線が、マクロパルスビーム負荷補償を使用した場合の (a) 振幅と (b) 位相精度を表す。黒及び赤丸が、中間パルスビーム負荷補償を使用した場合の振幅と位相精度である。マクロパルスビーム負荷補償の結果と比較して、最も精度が良い CHOP DELAY 値の場合でも、振幅精度 0.737% が 1.150% に、位相精度 0.325 deg. が 0.872 deg. と悪化したという結果が得られた。そこで、FF 振幅量・位相量も最初に見積もった値を中心にスキャンを実施したが、マクロパルスビーム負荷補償の安定度より改善するという結果は得られなかった。また、FB の PI ゲインもパラメータとしてスキャンを行ったが、芳しい結果を得ることができなかった。すなわち、現状では、972MHz ステーションでは中間パルスビーム負荷補償を導入しない方が良いという結果になった。

#### 4.2 空洞の RF 振幅・位相

中間パルスビーム負荷補償の試験で芳しい結果が得られなかったことから、ACS01 の RF パルス波形を詳しく分析した。図 8 に 1 バunch 運転でビームがあるとき、図 9 にビームがないときの RF の (a) 振幅 (b) 位相を示す<sup>2</sup>。図 8 から FB の有無に関わらず中間パルスビーム負荷補償を行う FF を取り入れると、余計な振動が生じていることが分かる。また、図 9 も比較

<sup>2</sup>このとき、中間パルスビーム負荷補償は 1 バunch 運転を仮定した楕型 FF を出力している。

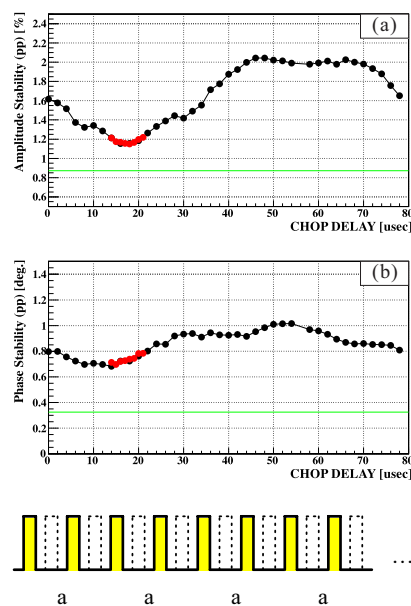


Figure 7: Results of (a) amplitude and (b) phase stabilities using an intermediate-pulse loading compensation for a 1-bunch operation in the ACS01 station. The green solid lines indicate the stabilities using a macro-pulse beam loading compensation.

して考察すると、この振動は主にビーム起因ではなく、中間パルス負荷補償を行う FF が起因であることが明確である。

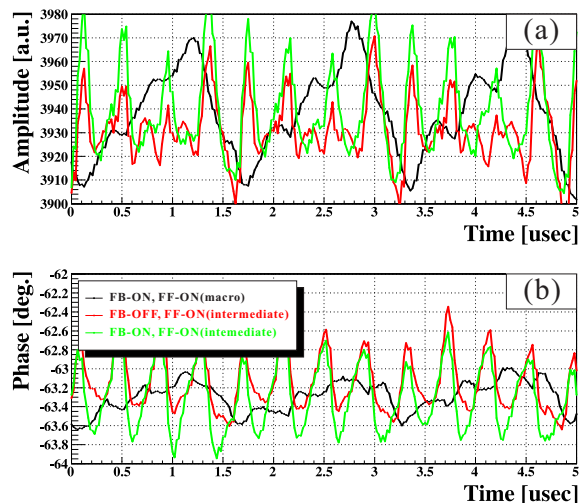


Figure 8: RF (a) amplitude and (a) phase in the beam condition at ACS01. When an intermediate-pulse beam loading compensation was used, some oscillations occurred.

図 8(a) の RF 振幅に対して FFT 解析を行い、その周波数成分を調査した結果を図 10 に示す。1 バunch 運転の中間パルス周波数  $1.227\text{MHz}/2=0.664\text{MHz}$  を緑色の実線、その高調波を破線で示している。また、図 11 に ACS01 空洞で RF-OFF 後の自由振動時の (a) RF 振幅と (b) その周波数成分を示す。図 11(a) から明らかなように、この場合も余計な振動をしながら減衰してい

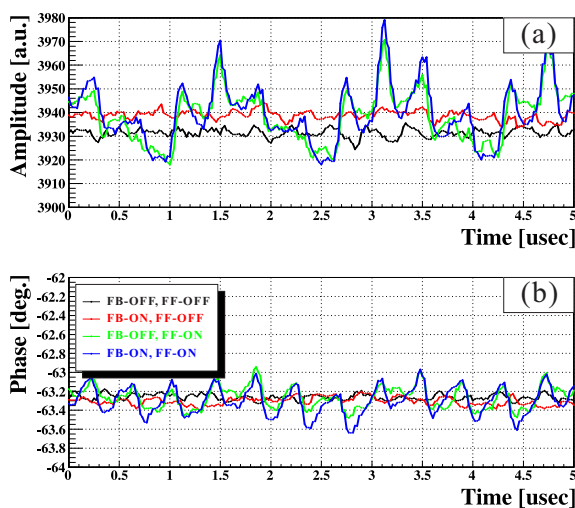


Figure 9: RF (a) amplitude and (a) phase without the beam condition at ACS01. When an intermediate-pulse beam loading compensation was used, some oscillations occurred.

る。この現象は、ACS 空洞の全てのステーションで起こっていて、ビーズ測定で得られている隣接モードの周波数と比較するとその周波数成分が一致することが分かっている。図 10 と図 11(b) の比較から、中間パルスビーム負荷補償を行う FF を使用したときにある余計な振動の周波数成分が隣接モードの励振を起源としていることが類推される。すなわち、楕円形状のある中間パルスビーム負荷補償を行う FF が隣接モードを励振させたために、マクロパルスビーム負荷補償の FF を使用した場合より良い精度を得られなかったと考えられる。

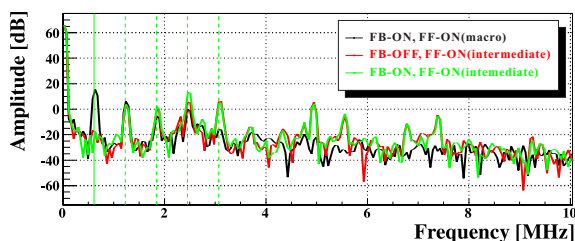


Figure 10: Frequency components from the FFT analysis of Fig. 8(a).

#### 4.3 今後の検証

励振されている隣接モードにはキャリア周波数に対して 4MHz 以上離れている周波数も含まれていることから、LLRF システムの DAC と IQ モジュレータの間に LPF を入れることで改善できないかを検証したいと考えている。

### 5. まとめ

J-PARC リニアックでは、下流の施設からの要求で多様な中間パルス構造をもつようになり、ビーム電流の増加と相まって RF システムが要求精度を満たすこ

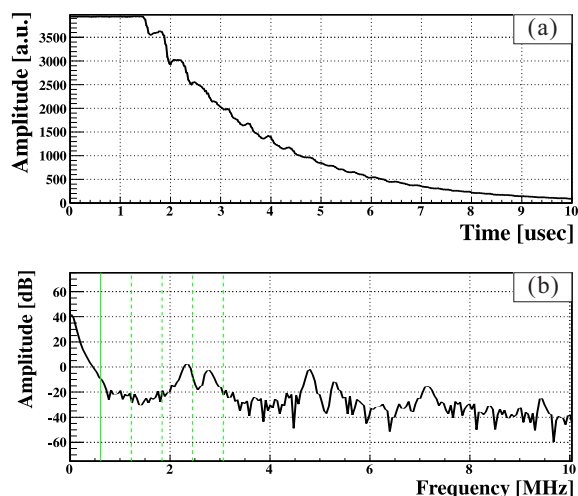


Figure 11: (a) amplitude and (b) frequency components for a tail of a RF pulse in the ACS01 station.

とが困難になってきた。そこで、LLRF システムで中間パルス形状の出力でビーム負荷補償を行う FF に関して、ビーム試験を実施した。

SDTL07 を抽出してビーム試験を行った結果、324MHz ステーションでは中間パルスビーム負荷補償を導入すると RF 振幅・位相精度の改善が期待できるという結果が得られた。本年度の夏季シャットダウン明けの運転以降、運用できるように準備を進めている。

一方で、972MHz ステーションでは、中間パルスビーム負荷補償を実施しない方が良いという結果が得られた。これは、中間パルスビーム負荷補償の FF により、ACS 空洞の隣接モードが励振されたためと考えられ、実機の導入のためには更に検討が必要になった。

### 参考文献

- [1] Y. Yamazaki for J-PARC accelerator design team, "Technical design report of J-PARC", KEK Report 2003-13 and JAERI-Tech 2003-44; <http://www.j-parc.jp>
- [2] T. Maruta *et al.*, "Recent Progress of Beam Commissioning at J-PARC Linac", Proceedings of LINAC2014, Switzerland, Geneva, Aug. 31-Sep. 5, 2014.
- [3] T. Maruta *et al.*, "Recent Progress of the Beam Commissioning of the J-PARC Linac", Proceedings of 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Fukui, Japan, Aug. 5-7, 2015.
- [4] K. Futatsukawa *et al.*, "Cavity Excitation of the Chopped Beam at the J-PARC Linac", Proceedings of LINAC14, Geneva, Switzerland, Aug. 31-Sep. 7, 2014.
- [5] S. Fu and T. Kato, "Design study on a medium-energy beam-transport line for the JHF proton linac", Nucl. Instr. Meth A457, p. 423-437, 2001.
- [6] S. Wang *et al.*, "The development and beam test of an RF chopper system for J-PARC", Nucl. Instr. Meth A547, p. 302-312, 2005.