

J-PARC リニアックの RF チョッパの位相反転制御システムの開発 DEVELOPMENT OF PHASE ROTATION SYSTEM FOR RF-CHOPPER J-PARC LINAC

二ツ川 健太 ^{*A)}, 小林 鉄也 ^{A)}, 佐藤 文明 ^{B)}, 篠崎 信一 ^{B)}, 千代 悦司 ^{B)},
平野 耕一郎 ^{B)}, 方 志高 ^{A)}, 福井 佑治 ^{A)}, 堀 利彦 ^{B)}, 道園 真一郎 ^{A)}

KentaFutatsukawa ^{*A)}, TetsuyaKobayashi ^{A)}, FumiakiSato ^{B)}, ShinichiShinozaki ^{B)}, EtsujiChishiro ^{B)},
KoichiroHirano ^{B)}, ZhigaoFang ^{A)}, YujiFukui ^{A)}, ToshihikoHori ^{B)}, ShinichiroMichizono ^{A)},

^{A)}HighEnergyAcceleratorResearchOrganization

^{B)}JapanAtomicEnergyAgency

Abstract

In the J-PARC linac, an RF deflector installed in 3-MeV Medium Energy Beam Transport (MEBT1) is used to kick the unnecessary beam and the intermediate-pulse like a comb is created. The kicked beam leads to a scraper downstream the RF deflector and loses all kinetic energy. When the beam current increases to 50 mA of the design value, the heat load of a scraper to irradiate the kicked beam increases and its surface is predicted to be damaged. Therefore, we are preparing the tandem scraper to reduce the damage. The half of the kicked beam leads to a scraper and the residual is to the other. The chopping operation is achieved by rotating the phase of the RF deflector in the periodic cycles by the LLRF system. We will introduce the phase rotation system and the test results.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、2013 年に 25 式の環状結合型線形加速器空洞 (Annular-ring Coupled Linac: ACS [1]) と 972-MHz の RF システムのインストールを行い、翌 2014 年 1 月 17 日に 400 MeV の加速に成功した [2]。その後、2 月 17 日から 400 MeV の出射エネルギーで利用運転を開始している。また、2014 年の夏季シャットダウン中に、新型の RF 駆動イオン源と 50 mA 用 RFQ 号機・新 RF チョッパ空洞の換装を行い、3 MeV ビーム輸送系 (MEBT1) を改修することにより、リニアック出射部で電流 50 mA の実演を行うことに成功している [3]。現在は、リニアック出口で電流 30 mA、物質・生命科学実験施設 (Materials and Life Science Experimental Facility: MLF) で 600 kW 相当のビームパワーで利用運転を行っている。本年度の夏季シャットダウン後からは、ビームパワーを順次上げていく予定である。

リニアックでは後段シンクロトロン (Rapid-Cycle Synchrotron: RCS) の 2 つの RF バケットに入射させるため、RF チョッパ空洞を用いて中間パルスと呼ばれる楕円型ビーム形状に整形している (Fig.1) [4]。その際に、不要なビームは、RF チョッパ下流に設置されているスクレーパに導かれ、3 MeV の運動エネルギーを損失し止められる。リニアックの電流増強に伴い、C/C コンポジットのスクレーパヘッドの熱負荷が増大して損傷することが懸念されている。実際に、2012 年に取り外したスクレーパヘッドにはビームが照射された中心部で深さ 1 mm の損傷が見られたが、このときの利用運転時のビーム条件は、リニアック出口の電流値で約 17 mA であった [5]。

そこで、水平方向に 2 式のスクレーパを用意して、不要なビームを各スクレーパに交互に導くことによって、1 台のスクレーパヘッドあたりの熱負荷を低減させることを計画している (Fig.2) [6]。2 台のスクレーパへの蹴り分けは、低電力高周波システム (Low-Level RF: LLRF) で RF チョッパ空洞の位相を 180 deg. 回転させることによって実現させる予定である [7]。

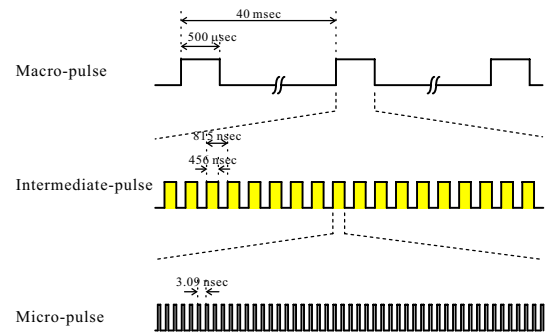


Figure 1: Pulse Structure at the J-PARC linac.

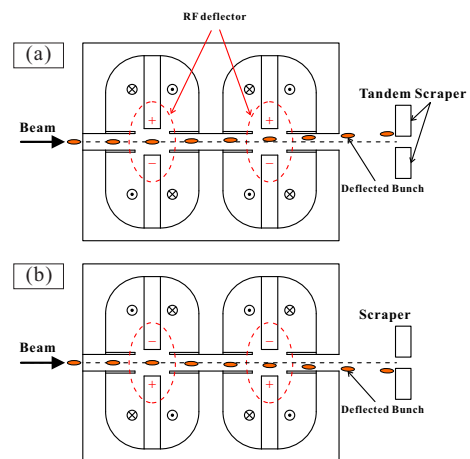


Figure 2: Tandem scrapers system to suppress the heat loading per scraper. The phase of the RF deflector is quickly rotated by 180 degree to guide the wasted beam to each scraper.

2. 位相反転の方法の検討

RF チョッパ空洞用の半導体アンプをドライブしている RF 位相を LLRF システムで 180 deg. 回すことで、RF

*kenta.futatsukawa@kek.jp

チョッパ空洞の位相の反転を実現させる予定である。その方法として、Fig.1 の 25Hz のマクロパルス毎に反転させる方法と 1.227MHz の中間パルス毎に回転させる方法を準備して、試験を行った。

マクロパルス毎の位相反転を LLRF システムで実現させるために、cPCI 中の IQ モジュレータを用いることにした。実際にはマクロパルスの半周期 $25/2=12.5\text{Hz}$ の信号 (以下、反転指令信号) を用意して RF パルスの直前に cPCI の IQ モジュールに入力して、この信号を受信したときには DAC 出力の I と Q の符号を反転させるロジックをソフトウェアに組み込んだ。反転のために 12.5Hz の反転指令信号を用意したのは、この信号を使用することで RF 源が複数台になった場合でも同期を確保することを目的としている¹。このマクロパルス位相反転の方法は、ソフトウェアの改修で済むため容易であり、詳細な調整なども必要とせず、今後のトラブル要因にもなる可能性も低いと考えられる。一方で、後述する中間パルス毎に位相を回す方法と比較すると、1 発のマクロパルスによる過渡的な温度上昇を抑える効果は期待できない。

中間パルス毎に位相反転を実施するために Fig.3(a) と (b) に示されている 2 つの方法を検討した。一つは、チョッパコントローラと呼ばれるハードウェアのモジュールを改修して、このモジュールに中間パルス毎に位相を反転させる機能を追加することである (Fig.3(a))。この場合は、チョッパコントローラにはごく一般的な RF パルスが入力され、中間パルスを生成するための楕型の RF パルスを整形すること、及び中間パルス毎に位相を反転させることの大きな 2 つの機能を有することになる。これを実現させるためには、新機能を有したチョッパコントローラの開発が必須になるほか、一度製作した後に機能追加が難しいという面で利便性に欠けることは否定できない。一方で、後述のソフトウェアの改修と比較すると、同じ 1 つのハードウェア内で楕型の RF パルスの整形と位相反転を実現させているため、一度モジュールを製作した後は、タイミングなどで問題が生じ難いというメリットはあると考えられた。

もう一つの間パルス毎の位相反転の方法は、マクロパルス毎に位相反転させたときと同じように、ソフトウェア上で IQ モジュレータを使用して位相を反転させる方法であった (Fig.3(b))。これにより、チョッパコントローラには位相が中間パルスの周期で変調している RF パルスが入力され、位相反転時の過渡的なタイミングに中間パルスのための RF-OFF のタイミングを合わせる調整が必要になる。この方法は、ソフトウェアの改修だけで実現できるように比較的簡単に実現できると考えられたが、別のハードウェアが楕型の RF パルスの整形と位相反転を実現していることが、調整や制御を複雑化して後々の禍根となる可能性を秘めていることを危惧している。

3. オフライン試験の結果

3.1 マクロパルス毎の位相反転システム

Figure4 にマクロパルス毎に位相反転させたときの試験結果を示す。ch3(マゼンタ) はマクロパルスの半周

¹現在、RF チョッパは 2 空洞を U 字管で接続して 1 台の RF 源で励振しているが、RF 源を 2 台に増強して過渡的な RF による蹴り残しビームを低減させる計画を進めている [8,9]。

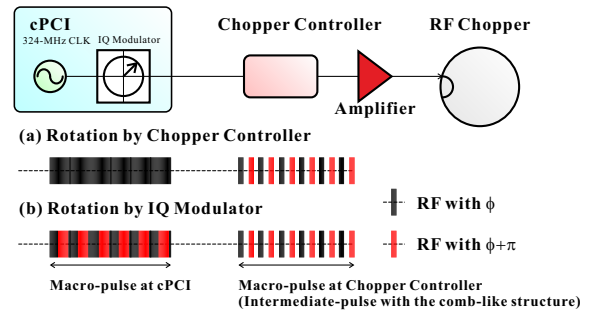


Figure3: Principle of the phase rotation in the period of intermediate-pulses (a) using the chopper controller and (b) using the IQ modulator of cPCI.

期 12.5Hz の反転指令信号で、ch1 (シアン) は cPCI の出力 (位相検出器により電圧に変換された位相: 10mV/deg.) を示している。反転指令信号の有無で、cPCI 出力の位相が 180deg. 変化して、当該システムが正常に動作していることが用意に確認できる。また、反転指令信号を使用することで、複数台の cPCI で位相の反転の同期ができることも確認した。

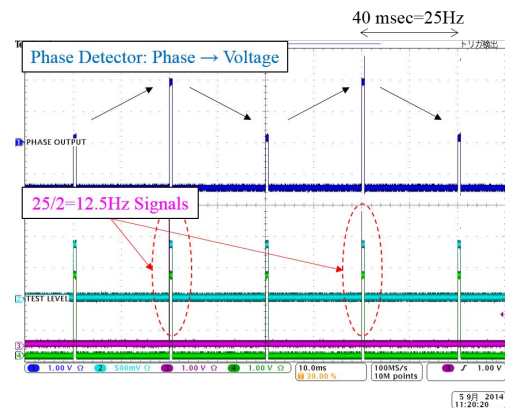


Figure4: Results of the phase rotation system by a macro-pulse using the IQ modulator.

3.2 中間パルス毎の位相反転システム

中間パルス毎の位相反転システムを実現するためには、RF-OFF の時間内 (典型的な値: 456nsec) に位相の反転を行う必要がある。ソフトウェアの改修だけで実現できると考えていた cPCI の IQ モジュレータを使用した位相反転システムも詳細に検討すると、DAC 出力と IQ モジュレータの間にあるローパスフィルタ (LPF) の時定数が問題になることが分かった。既設の LPF の時定数は 2.2MHz であるため IQ の符号を変化させるには原理的にも約 500nsec の時間が必要になり、RF-OFF の時間内での位相の反転を実現できない。そこで、当該 LPF の時定数を 2.2MHz から 20MHz に変更して、IQ の符号の反転に対する応答速度を早めた。

Figure5 に cPCI の IQ モジュレータを使用して、中間パルス毎に位相反転させたときの試験結果を示す。Figure5(a) は IQ モジュレータを使用して位相反転を実施したときの IQ モジュレータの出力を表している。位相

反転時の過渡的な時間が 150nsec 程度であり、この間に RF の振幅が乱れていることが確認できた。更に、そのときの中間パルス幅を 200nsec として調整したときのチョッパコントローラの出力を Fig.5(b) に示す。位相反転の過渡的な時間に RF-OFF にするようにタイミングを調整することができ、中間パルス幅を 200nsec 以上という条件下では cPCI の IQ モジュレータを使用して位相の反転が実現できていることが分かる。しかし、悲観的に考えると、このシステムを使用する限りは中間パルスの最小幅は 200nsec と制限されてしまう。利用運転のときには Fig.1 に示すように中間パルス幅は 456nsec 前後であるが、過去に下流の加速器 RCS や MR(Main Ring) のビームコミッシングのときには様々な幅の中間パルスを使用してきた。その中には、中間パルス幅 50nsec のビームもあり、その場合はこの IQ モジュレータを使用する位相反転システムでは対応ができないことも明確になった。

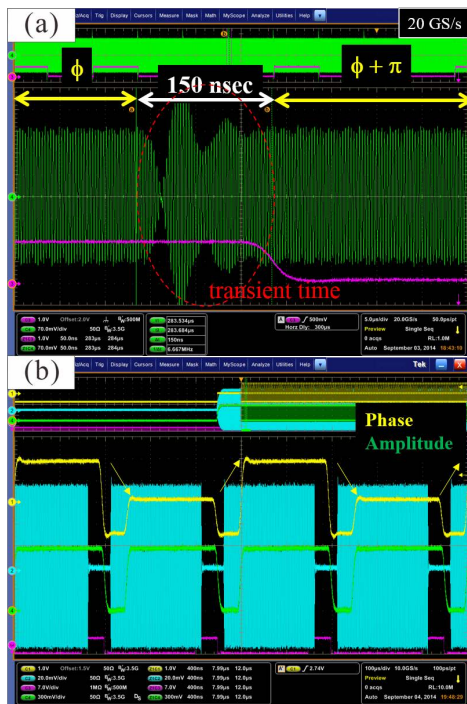


Figure5:Resultsofthephaserotationsystembya intermediate-pulseusingtheIQmodulator.(a)istheout-putsignaloftheIQmodulatorand(b)isthatofthechopper controllerwiththecombstructure.

そこで、チョッパコントローラを使用した位相反転を行うために、中間パルス毎に位相反転を行う機能を追加したチョッパコントローラを開発した。当初は、既設チョッパコントローラに機能を追加することで実現させることを試みたが、180deg. 位相反転の精度が 17.5deg.、正位相と逆位相の振幅の精度が 3.8%であり、芳しい結果が得られなかった。これは位相・振幅精度の許容範囲が緩い箇所に当該機能を追加せざるを得なかったことと、精度を意識せずに改修を実行してしまったことに原因がある。また、最小の中間パルス幅に関して十分に考慮せずに改修されていたため、位相反転には約 200nsec の時間を要した。

そこで、最初の改修の反省を活かして、既設に機能追加の改修ではなく、位相反転機能付きのチョッパコントローラを新規に製作することにした。Figure6 に当該チョッパコントローラの試験結果を示す。この製作時には正位相と逆位相の精度を要求を厳しくして設計を行うことで、Fig.6(a) 位相反転の精度は 0.34deg.、(b) 正位相/逆位相の振幅の精度は 0.5%を実現できた。また、他の機能の使用条件にも依存するが、(c) 最短の中間パルス幅 25nsec が達成できることは確認している。これはコミッシングで使用されてきた中間パルス幅の実績から言うに十分であると考えている。現在は、複数台のチョッパコントローラの同期を確保するための仕様を詰めている段階である。また、このチョッパコントローラには正位相と逆位相の状態信号を出力する機能があり、将来的にはこれを同期確保のインターロックシステムを構築する計画である。

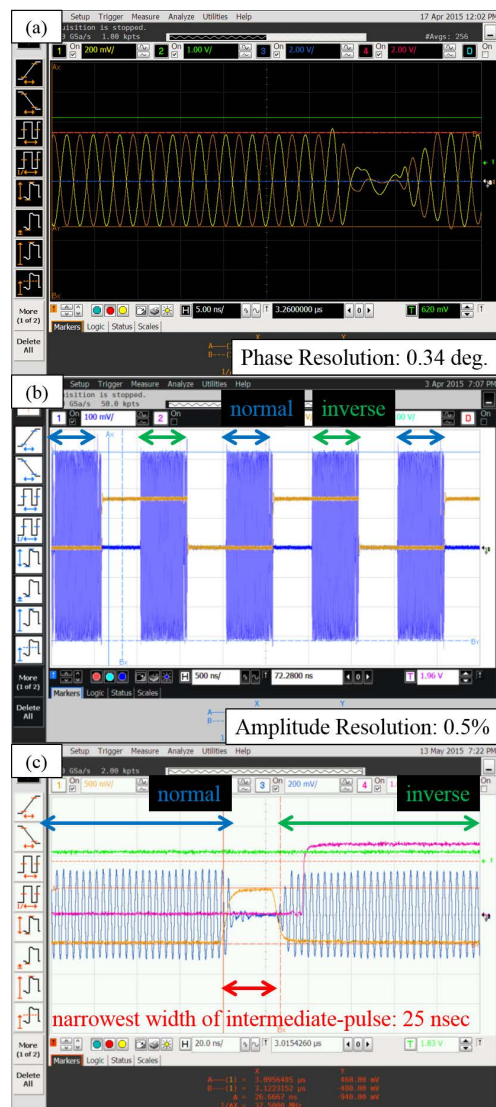


Figure6:Resultsofthephaserotationsystembya intermediate-pulseusingthechoppercontroller.Thephase resolutionandamplitudereresolutionare(a)0.34deg.and (b)0.5%,respectively.Thewidthof25nsecforan intermediate-pulsewasachieved.

4. ビーム試験の結果

2014年のリニアックのコミッショニング時に、中間パルス毎に位相反転の機能を利用して左右に設置されたスクレーパに不要なビームを交互に導くことができることをビームを用いて確認した。このとき、中間パルスの幅は利用運転時に使用される頻度が高い456nsecであり、cPCIのIQモジュレータを使用した位相反転システムを使用している。RFチョッパ下流かつスクレーパ上流に設置されているBPM05のXの信号をfig.7に示す。通常の位相反転機能を使用していない状態では、不要なビームは通路側(+X方向、黄色矢印)に蹴られ、下流まで到達する有用なビームはほぼBPMの中心を通っていることから楕円の波形が測定されている(fig.7(a))。一方で、中間パルス毎の位相反転機能を使用した場合(b)は不要なビームが通路側とユーティリティ側(-X方向、赤色矢印)に交互に蹴られていることが分かる。また、有用なビームに対して位相反転の機能を使用の有無がビームロスに影響していることなどは確認されず、位相反転システムは十分に使用可能であることが示された。

今後は、チョッパコントローラの位相反転の機能で同様な試験を行い、必要に応じて実際の利用運転でも使用して行く予定である。

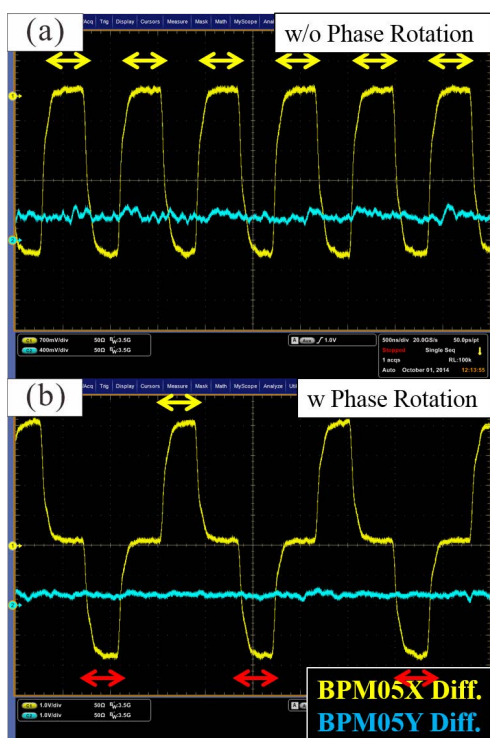


Figure7:SignalsofBPMdownstreamtheRF-chopperintheconditionsof(a)theregularand(b)usingthephase rotationsystem.

5. まとめ

J-PARCリニアックでは電流の増強に伴うスクレーパヘッドの損失を低減させるために、タンデムスクレーパシステムを検討している。2式のスクレーパは、LLRFでRFチョッパの位相を反転させることで実現させる。位

相反転の方法は、マクロパルス毎、中間パルス毎の2通りの方法を準備している。更に、中間パルス毎の位相反転は、IQモジュレータを使用する方式とチョッパコントローラを開発する方式で検討した。チョッパコントローラで中間パルス毎に位相反転させる方法では要求性能を満たしており、必要に応じて実際の利用運転でも使用していく予定である。

参考文献

- [1]H.Ao,etal., “HighPowerConditioningofAnnular-ringCoupledStructurefortheJ-PARCLinac”,ProceedingsofLINAC2014,Switzerland,Geneva,Aug.31-Sep.5,2014.
- [2]T.Maruta,etal., “RecentProgressofBeamCommissioningatJ-PARCLinac”,ProceedingsofLINAC2014,Switzerland,Geneva,Aug.31-Sep.5,2014.
- [3]T.Maruta,etal., “RecentprogressofthebeamcommissioningoftheJ-PARCLinac”,Proceedingsof12thAnnualMeetingofParticleAcceleratorSocietyofJapan,Fukui,Japan,Aug.5-7,2015.
- [4]K.Hirano,etal., “DevelopmentofRFChopperSystematJ-PARCLinac”,Proceedingsof10thAnnualMeetingofParticleAcceleratorSocietyofJapan,Nagoya,Japan,Aug.3-5,2013.
- [5]T.Sugimura,etal., “Developmentof3MeVBeamScrapersfortheJ-PARCLinac”,Proceedingsof10thAnnualMeetingofParticleAcceleratorSocietyofJapan,Nagoya,Japan,Aug.3-5,2013.
- [6]K.Hirano,etal., “DevelopmentofRFChopperSystematJ-PARCLinac”,Proceedingsof12thAnnualMeetingofParticleAcceleratorSocietyofJapan,Fukui,Japan,Aug.5-7,2015.
- [7]K.Futatsukawa,etal., “ChopperOperationfortheTandemScrapersattheJ-PARCLinac”,ProceedingsofLINAC2014,Switzerland,Geneva,Aug.31-Sep.5,2014.
- [8]K.Futatsukawa,etal., “UpgradeofPowerSupplySystemforRF-ChopperatJ-PARCLinac”,ProceedingsofIPAC2013,Shanghai,China,May13-17,2013.
- [9]K.Futatsukawa,etal., “UpgradeofPowerSupplySystemforRF-ChopperatJ-PARCLinac”,Proceedingsof10thAnnualMeetingofParticleAcceleratorSocietyofJapan,Nagoya,Japan,Aug.3-5,2013.