

J-PARC リニアック RF チョッパ用の高周波源システムの改造 UPGRADE OF POWER SUPPLY SYSTEM FOR RF-CHOPPER AT J-PARC LINAC

二ツ川健太 *^{A)}, 池上 雅紀 ^{A)}, 伊藤 雄一 ^{B)}, 菊澤 信宏 ^{B)}, 佐藤 文明 ^{B)}, 篠崎 信一 ^{B)},
鈴木 隆洋 ^{C)}, 千代 悦司 ^{B)}, 平野 耕一郎 ^{B)}, 方 志高 ^{A)}, 福井 佑治 ^{A)}, 堀 利彦 ^{B)},
丸田 朋史 ^{A)}, 三浦 昭彦 ^{B)}, 宮尾 智章 ^{A)}, 劉 勇 ^{A)}

K. Futatsukawa*^{A)}, E. Chishiro^{B)}, Z. Fang^{A)}, Y. Fukui^{A)}, K. Hirano^{B)}, T. Hori^{B)}, M. Ikegami^{A)}, Y. Ito^{B)},
N. Kikuzawa^{B)}, Y. Liu^{A)}, T. Maruta^{A)}, A. Miura^{B)}, T. Miyao^{A)}, F. Sato^{B)}, S. Shinozaki^{B)}, T. Suzuki^{C)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{C)}Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

Abstract

In the J-PARC Linac, the radio frequency deflector was adopted as a chopper to capture the particles into the RF-bucket in the next synchrotron. The chopper, consists of two deflectors, was installed on the medium-energy beam-transport line. In the operation of the RF-chopper, the fast rise/fall time of the pulse is a fundamental requirement to minimize the beam loss. In the previous system, the two series coupled chopper deflectors were driven by one solid-state amplifier due to the cost. However, the fall time indicated a poor result to effect the ringing into each cavity. Therefore, the additional solid-state amplifier and low level RF system were installed in the summer 2012 and the connection changed to the parallel system from the series using two amplifiers. The rise/fall time of the chopped beam was about 20 nsec in the beam current of 15 mA and the effect of the ringing was decreased.

1. はじめに

J-PARC は、茨城県東海村にある世界トップクラスの大電力を誇る陽子加速器施設である。その中にある加速器施設は、リニアック、3-GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron: RCS), 50-GeV シンクロトロン (Main Ring Synchrotron: MR) で構成されている^[1]。現在のリニアックは、ピーク電流 15 mA、マクロパルス幅 500 μ sec、繰り返し周波数 25Hz で負水素イオン (H^-) を 181 MeV まで加速し、RCS へと入射している。マクロパルスは、図 1 に示されているように RCS の高周波 (RF) に同期した約 1 μ sec の楕円構造の中間パルスで形成されている。この中間パルスは、RF チョッパを用いて不要なビームを RF で蹴り出しスクレーパに当てることにより生成されている (図 2)。即ち、RF チョッパは RF のオンとオフを約 500 nsec 毎に繰り返すような運転条件で、運用されている。この RF 立上り・立下り時の過渡状態ではビームは半端な強度の電界により蹴り出されることにより蛇行し、下流でのロス原因になる^[2]。そのため、RF チョッパシステムには早い応答速度が要求され、これを満たすために、(1) Q_L 値が低い空洞と (2) 帯域の広い RF 源が必要となる。

RF チョッパ空洞 (以下、RFD) は、周波数 324 MHz¹⁾ の 2 式の空洞で構成され、RFQ・DTL 間の 3 MeV MEBT ビームラインに設置されている。本論文では便宜上、上流側に設置された空洞を RFD_U, 下流に設置された空洞を RFD_D と記述する。ネットワークアナライザを用いた低電力の測定では、(1) RFD の Q_L 値は共に約 11 という結果が得られた。2012 年の夏季シャットダウン以前は、コスト節約のため、RFD_U の出力ポートが U 字同軸管で RFD_D の入力ポートに直列に接続され、1 台の RF システムで運転されていた (以下、2 空洞直列結合シ

ステム)^[3,4]。図 3 に、このシステムの概念図を示す。このシステムでは大電力の RF 源として、NEC 製の半導体アンプ (HA-1241) が採用されている。この半導体アンプの仕様は、最大ピーク電力で 36 kW, (2) 立上り (10%-90%)・立下り (90%-10%) 時間が共に約 14.5 nsec となっている。

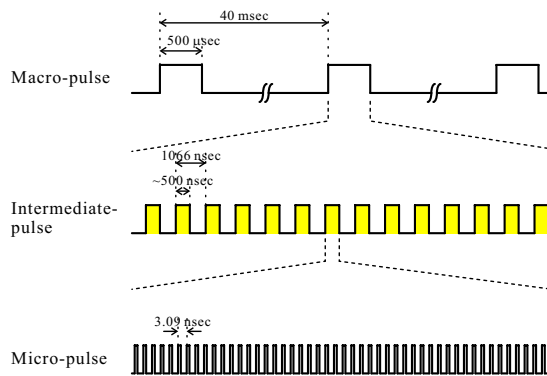


Figure 1: Pulse structure in J-PARC linac.

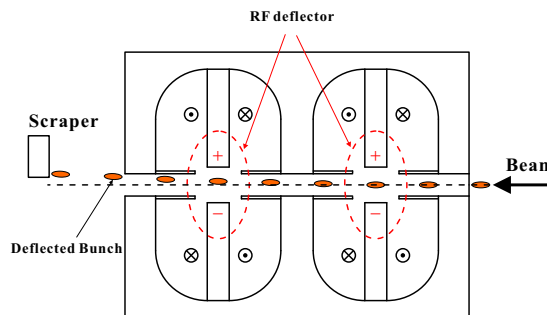


Figure 2: Schematic view of RFD.

*kenta.futatsukawa@kek.jp

¹⁾ビームのマイクロバンチと同じ周波数

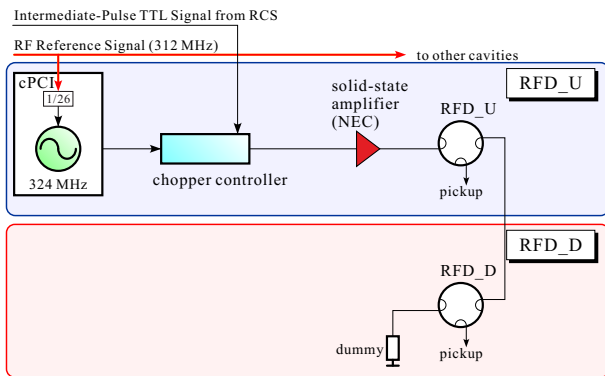


Figure 3: Schematic view of the series-connected system. Two RFDs were coupled to each other by a U-shaped coaxial waveguide and were driven by one RF source.

2. 2空洞直列結合システムのリングング問題

図4に、2空洞直列接続システムの際の(a) RFD_Uと(b) RFD_Dの空洞ピックアップ信号を示す。RFの立ち下りの際に、大きなリングングが生じていることが分かる。このリングングはRFD_Uの立ち下り時で特に顕著であり、時間的には100 nsec以上の長さがあり、振幅はリングングが最大のところ(横軸13.33 μ sec近傍)で定格運転パワー時に対して約25%の大きさにも及んでいる。HFSS(高周波三次元電界シミュレータ)のTransient Solverを用いて過渡期の電磁場数値解析を行うと、測定結果のRF立ち下り時のリングングをほぼ再現することができた。これは、RF伝送経路の下流にあるRFD_Dからの反射が影響しているものと考えている。RFD_UのRF立ち上り時は、定格電界(横軸13.0 μ sec以降)まで達するまでに200 nsec程度の時間を要している。また、シミュレーション結果より、RFD_DはRFD_Uに対して6周期遅れて立ち上っていることが分かった², [5]。

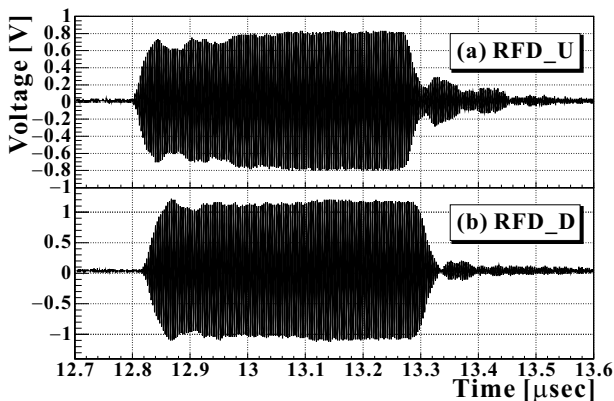


Figure 4: FR pickup signals of (a) RFD_U and (b) RFD_D in the series-connected system. The large and long ringing on the RF falling of RFDs, especially RFD_U, was observed.

スクレーパ下流のFast Current Transformer (FCT)で測定した中間パルスの波形を、図5に示す。このとき、リ

²RFDのギャップ間の距離は3 MeV H⁻で3 β λになっているため、原理的には3周期であることが望ましい

ニャック出口のビーム電流で15 mAの運転であった。中間パルスの立ち上がりから50 nsecに渡って、不自然なくぼみが観測された。中間パルスの立ち上がり期はRF立ち下り期に相当しているため、この中間パルス先頭部のくぼみは、RFD_Uのリングングの影響が大きいと考えられた。また、PARMILAシミュレーションは、RFD_Uのリングング規模の空洞内電界(~0.5 MV/m)によりビームの一部はスクレーパに衝突して止まることを示唆し[3]、くぼみはリングングの影響に起因するという仮説を後押しする結果が得られた。

従って、リニアックのビーム電流の大強度化に向けて、ビーム品質を上げるため、このRFDのリングングやRFD_Dの立ち上り遅延の問題を解決するためにRFシステムの改修を行うことにした。

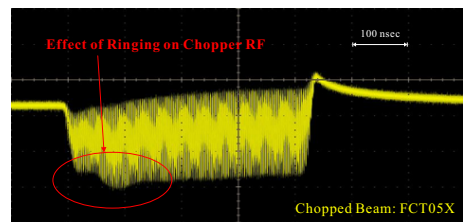


Figure 5: Chopped beam (FCT05) in the series-connected system. The dent on the beam rising was observed. It was thought as the cause of the ringing on the period of the RF falling as shown in Fig.4.

3. 2空洞並列接続システムの構成

前述の通り、タイムドメインのシミュレーションの結果は本件に関して測定結果をほぼ再現していた。それによると、諸問題の根本原因は、2つの空洞を直列に結合させて1式のRF源で運転しているシステム構成にあった。

そこで、2012年の夏季シャットダウン中に、RF源を1式追加して、図6に示されるような2式のRF源による2空洞並列接続システムに改修した。このために伴い、324 MHzの低電力高周波(LLRF)システム(THAMWAY co., ltd), チョッパコントローラ(CANDOX Systems Inc.), ピーク電力30 kWの半導体アンプ(TOMCO Technologies)を追加導入した。

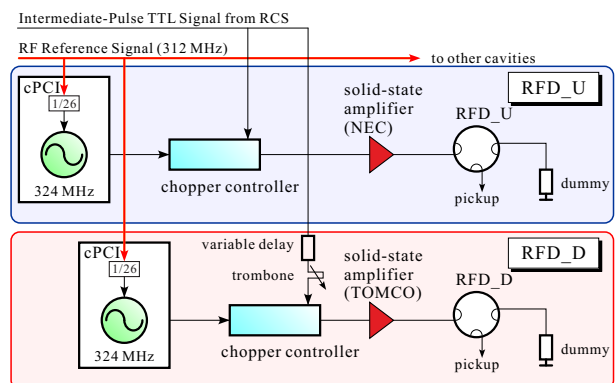


Figure 6: Schematic diagram of the parallel-connected system. It has two RF sources to drive two RFD cavities.

本システムでは、2 式の LLRF システムを採用することにより、各空洞の位相を独立に調整できる。また、NIM モジュールの variable delay (KN330, Kaizu Works Corp.) で nsec 単位、トロンポーンで 1 nsec 以下の、RFD_U と RFD_D の相対タイミングの調整を行うことができる。これらの相対タイミング調整用ノブを RCS から伝送されるチョップ命令信号³の伝送経路中に設けることにより、タイミングの調整と位相の調整が互いに干渉せずに、独立に成り立つようにしている。

新規導入の半導体アンプにおいて、RF 出力をダミーロードに直接接続した性能試験では、立上り時間 (10%-90%) 12.5 nsec, 立下り時間 (90%-10%) 7.9 nsec という結果が得られた。また、既存の半導体アンプでは RF 出力パワーに依存して位相が大きく変動していたが、この変動幅も小さいという良好な結果が得られた。ビーム運転中、当該半導体アンプは定格最大パワーの 30 kW で運転されていた。

図 7 に、2 空洞並列接続システムの際の (a) RFD_U と (b) RFD_D の空洞ピックアップ信号の波形を示す。RF 立下り波形を直列結合システムの場合 (図 4) と比較すると、RFD_U の波形に見えていたリングングが明らかに小さくなっている。改修後に、RFD_D の RF 立下り時に振幅は小さいが長いテールを確認できる。これは立体回路下流のダミーロードとのミスマッチが原因と考えている。この RFD_D の RF 立下りを除き、RF 立下り・立上り時間は 22-35 nsec を達成することができた。表 1 に半導体アンプの出力、空洞ピックアップの立上り (10%-90%)・立下り (90%-10%) 時間をまとめる。半導体アンプの出力は 15 nsec 以下であり、過渡期の性能は RFD の Q_L 値が決めていることが分かった⁴。ただし、原理的に半導体アンプ性能の実測値と RFD の Q_L 値から算出される応答速度より実機の性能は悪く、原因と考えられるミスマッチング問題は今後のチョップ改修の課題である。

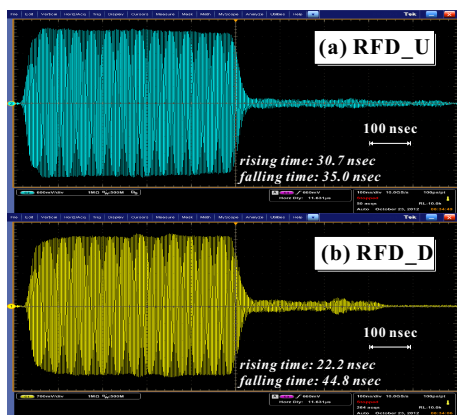


Figure 7: RF pickup signals of (a) RFD_U and (b) RFD_D in the parallel connected system. The ringing on the RF falling was decreased in comparison with that of the series (Fig. 4).

³チョップされた RF は、チョップ命令信号を元にチョップコントローラにより作られる。

⁴ $Q_L=10$ は、等価回路計算では矩形入力の場合、立上り・立下り時間で 22 nsec に相当する。

Table 1: RF performance of the parallel-connection system

	Rise Time	Fall Time
Amplifier (NEC)	14.6 nsec	14.5 nsec
Amplifier (TOMCO)	12.5 nsec	7.9 nsec
Pick-up (RFD_U)	30.7 nsec	35.0 nsec
Pick-up (RFD_D)	22.2 nsec	44.8 nsec

4. 2 空洞並列接続システムのビーム試験

4.1 位相調整

2 空洞並列接続システムでは、RFD_U と RFD_D は該当する LLRF システムにより、独立に位相を調整することができる。各空洞の位相は、Beam Profile Monitor (BPM) を用いて、蹴り角の最も大きな位相となるように調整した。2012 年の夏季シャットダウン後の立上げ時に行った位相調整の手順を下記に示す。

1. RFD_D の振幅をゼロに設定し、RFD_U の振幅設定を運転時の半分にする⁵。
2. BPM05 を用いて水平方向のビーム位置を⁶、RFD_U の位相を変えながら、測定する。
3. RFD_U の設定位相とビーム位置との相関を 2 次関数でフィットする (図 8(a))。これにより、ビームの蹴り角が最大になる RFD_U の設定位相が得られる。
4. RFD_U と RFD_D の役割を入れ替えて手順 1~3 を行い、ビームの蹴り角が最大になる RFD_D の設定位相を求める (図 8(b))。
5. スクレーパー下流の Wire Scanner Monitor (WSM) のワイヤーを、チョップで蹴っていない場合のビームの中心位置に移動する。その後、RFD_U と RFD_D を上記の手順で得られた位相と通常運転時の振幅に設定し、ビームの蹴り残しが WSM の測定限界以下であることを確認する。

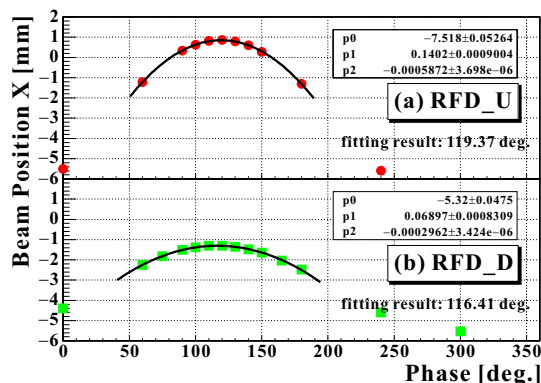


Figure 8: Results of the phase tuning for (a) RFD_U and (b) RFD_D. Each phase was adjusted to be the largest deflecting angle using BPM.

⁵振幅を運転時の半分に設定する理由は、振幅を定格にすると蹴り角が大き過ぎて見難いためである。

⁶チョップは、ビームを水平方向に蹴り出す仕様になっている。

4.2 相対タイミング調整

RFD.U と RFD.D の相対タイミングは, BPM06 を用いて中間パルスの立上り・立下り時間を測定し, 最も過渡期が短いタイミングに調整された。2012 年の夏季シャットダウン後のコミッショニング時に行った相対タイミング調整の手順を下記に示す。

1. 上述の位相調整後, 各 RFD は得られた最大蹴り角の位相に設定する。振幅は定常運転時の半分となるように設定する。
2. 2 空洞間の RF 立上りの相対タイミングの遅延量を variable delay モジュールで 1 nsec 毎変えながら, 中間パルスの生データ (BPM06) をオシロスコープで保存する。
3. 取得データを解析することにより, 立上り時間 (20%-80%) と立下り時間 (80%-20%) を算出し, 相対タイミングの遅延量との相関を求める。
4. 相対タイミング遅延量と立上り・立下り時間の相関について, 2 次関数でフィットする。これにより, 中間パルスの立上り・立下り時間が最も早くなる相対タイミング遅延量が得られる (図 9)。

図 9 から分かるように, 立上り・立下り時間には大きなデータの揺らぎがある。これは, 1 事象分しか BPM データを保存していなかったことに起因していると考えている。しかし, フィッティングで得られた最適な遅延量は, 事前にビームを使わずに調整した値とほぼ一致する結果が得られた。

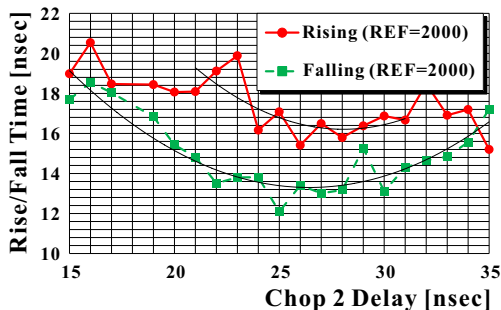


Figure 9: Results of the relative timing tuning. The red circles and the green squares show that for the rising and falling, respectively It was adjusted to be the fastest beam rising and falling times.

4.3 中間パルスの過渡期応答

図 5 に, 2 空洞並列接続システムのとときの中間パルス ((a) BPM, (b) FCT) の測定結果を示す。このときのビーム条件は, ピーク電流で 15 mA であった。2 空洞並列接続システムのととき (図 10 (b)) と以前の直列結合システムのととき (図 5) において, FCT を使って測定された波形を比較すると, 中間パルスの先頭部にあった不自然なくぼみが, システム改修後は消失していることが確認できた。これは, 図 7 の改修後の空洞ピックアップ信号から確認できる通り, RF 立下り時のリングングを小さく抑えることができたからだと考えられる。

図 10 (a) の BPM データから得られた中間パルス立上り (10%-90%)・立下り (90%-10%) 時間は, それぞれ

23.0 nsec と 15 nsec と見積もられた。これは, 以前のシステムと同等の水準である。

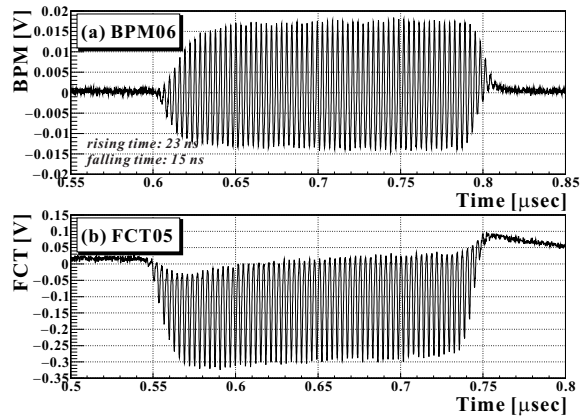


Figure 10: Chopped beam in the system of the parallel-connected system with (a) BPM06 and (b) FCT05. It could be confirmed that the effect of the ringing decreased.

5. 半導体アンプの故障

2012 年 11 月 16 日のビームコミッショニング中に, 並列接続システム改修のために新規導入した半導体アンプ (TOMCO 製) が故障した。そこで, 急遽, 以前の 2 空洞直列結合システムに戻して半導体アンプ 1 台でビーム運転を再開した。

この半導体アンプは 2 ユニットで構成され, 1 ユニット当たり 15 kW 出力を, 合成して 30 kW 出力としている。今回の故障は, ユニット内の DC 電源 (48 V, 21 A) に原因があり, 代理店の技術者に J-PARC に来所していただき, 故障した DC 電源の交換作業を行った。その後, 当該半導体アンプの出力を, ダミーロードに直接接続して 24 時間の長期運転試験を開始した。しかし, 試験開始から一ヶ月程度で, DC 電源が再度故障するトラブルが生じた。現在は, この半導体アンプを TOMCO に持ち帰り, 故障原因の究明を行っている。

6. 今後の改修予定

リニアックでは, ACS 空洞のインストールを行い, RCS への入射エネルギーを 400 MeV へ増強する。その後, 段階を経ながら 設計値 50 mA にビーム電流の増加を計画している。50 mA 運転のときには, 蹴り出されたビームが衝突するスクレーパの熱負荷が増加し, 現在の形態のままでは耐久限界を超えてしまうと考えている [7]。そこで, 2 台のスクレーパを左右に配置し, ビームを交互に左右のスクレーパに蹴り出すことで熱負荷を下げることを検討している [8]。これらを実現するために, チョップパの LLRF システムで位相を反転させる構想やこれらの動作補償を行い意図していないときは運転を停止させる専用モジュールの設計の検討も開始している。

ビーム電流の増加により広がったビームがチョップパの電極に衝突することを回避するために, ギャップサイズを上げたチョップパ空洞の製作を行う予定である [8]。この改修後のチョップパにおいて 現在と同程度の蹴り角の電界を得るためには, より大きな出力の RF 源が必要とあ

る。また、シミュレーションの結果によると、50 mA 増強によりビームは縦方向にも拡がり、現在の蹴り角では不十分である可能性を示唆している。そこで、大電力の RF 源は、120 kW の半導体アンプを 1 台を新規に導入する予定である。

これらの改修は、2014 年度の夏季シャットダウン後から、実機に組み込んで運転をできるように、現在は準備を進めている。予算の都合上、120 kW 半導体アンプ 1 台による 2 空洞直列結合システムを考えている。

7. まとめ

2012 年まで、チョッパ 2 空洞を直列に接続して 1 式の RF 源で運転していたが、RF 立下りのリングングにより半端な電界で蹴られたビームが蛇行し、ロス原因になっていると考えられていた。そこで、2012 年の夏季シャットダウン中に、324 MHz の LLRF システム、チョッパコントローラ、30 kW 半導体アンプを追加して、2 式の RF 源で 2 空洞を独立に印加するシステムに改修した。ビームを用いて、各空洞の位相や相対タイミングを調整する手順を確立することができた。直列結合システムで見られた中間パルスの先頭の不自然なくぼみは、並列接続システムへの改修後に消滅した。現在は、新規導入の半導体アンプが故障し直列結合システムに戻っているが、並列接続システムの改修により、中間パルスのビーム品質を向上させることできたと考えている。

リニアックの設計電流 50 mA へ増強に伴い、RF 源の出力パワーの増加を検討している。また、スクレーパの熱負荷を減らすために、左右のスクレーパに蹴り分けるチョッパ位相制御についての検討も始まっている。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki for J-PARC accelerator design team, "Accelerator technical design report for J-PARC", KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.; <http://www.j-parc.jp>
- [2] M. Ikegami, et al., "A Simulation Study on Chopper Transient Effects in J-PARC Linac", Proc. of LINAC'04, p. 342-344, 2004
- [3] 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
- [4] 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
- [5] K. Hirano, et al., "Study for RF Chopper Cavities at J-PARC Linac", Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1336-1338, 2011
- [6] S. Dillon, et al., "Design of an Ultra High-Speed Pulsed 324 MHz Solid-State Amplifier for Use in a Beam Chopper", Proc. of IPAC'12, p. 2242-2244, 2012
- [7] T. Sugimura, et al., "Development of a 3MeV beam scraper for the J-PARC Linac ", SUP017, in these proceedings
- [8] K. Hirano, et al., "Development of RF chopper system at J-PARC Linac ", SUP016, in these proceedings