

BEAM TEST OF CHOPPED BEAM LOADING COMPENSATION FOR THE J-PARC LINAC 400-MeV UPGRADE

Tetsuya Kobayashi^{1,A)}, Masanori Ikegami^{B)}

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

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)} High Energy Acceleration Research Organization (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The function of the chopped beam loading compensation was implemented into the digital feedback/feed-forward control system of the J-PARC Linac LLRF system to stabilize the ACS cavity fields for the 400-MeV upgrade.

The beam test of the chopped beam loading compensation was performed with the present 324-MHz cavity system. As the result, the chopped beam loading was successfully compensated and that this system is valid.

J-PARCリニアック400MeV増強に向けた チョップドビーム負荷補償のビーム試験

1. はじめに

J-PARCは世界最大級を目指す大強度陽子加速器であり^[1]、大きく分けて400MeVリニアック、3GeVシンクロトロン (RCS: Rapid Cycling Synchrotron) 及び50GeVシンクロトロン (MR: Main Ring) の3種類の加速器で構成される。ただし現在においてリニアックでは、324MHzの加速空洞により、181MeVまで加速しRCSへ入射している。それに合わせてRCSおよびMRの加速運転が行われ、また、RCSからは3GeVビームを物質生命科学実験施設 (MLF: Material and Life Science Facility) へ供給し、共用運転が行われている。

更に現在、リニアックの400MeVへのエネルギー増強計画が進められている。加速周波数972MHzのACS (Annular Coupled Structure) 空洞を21台追加することで400MeVまで加速する。ACS用の低電力高周波 (LLRF) 制御システムにおいてこれまでの324MHzのシステムとは大きく異なる点として、周波数以外にチョップドビーム負荷補償がある。チョップドビームとは、マクロパルスビーム (幅500 μ s) を、RCS入射の同期のため、更に上流のRFチョッパーにより約0.5MHz又は1MHzでチョップ (楕形に形成) されたビームであり、中間パルスとも呼ばれる (図1参照)。324MHzの空洞と比べACS空洞ではQ値が小さいため、計算上このチョップドパルス構造がビーム負荷として加速電界の変動に大きく現れると予想される。そこで、その振幅・位相に対する要求安定性を十分に満たすためには、チョップドパルスに対するビーム負荷補償機能が

LLRF制御に必要となる。このための機能はすでに追加され模擬試験による評価を以前に報告した^[2]。今回は初めて実際にビームによるチョップドパルス負荷試験を行ったので本稿ではその結果を報告する。

高品質な大強度ビーム加速においてリニアックの加速電界の安定性は最も重要な性能の1つであり、それはLLRF制御システムの特性にかかっている。振幅・位相振幅変動それぞれ $\pm 1\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 ± 1 度以内が要求される。

2. リニアックのビーム構造

図1にJ-PARCリニアックのビーム構造を示す。最大ピーク50mA、幅500 μ sのマクロパルスビームを25Hzの繰り返しで加速し (図1上段)、マクロパルスはリニアック上流 (MEBT) のRFチョッパーによって、RCS周回周期 (RFバケット、約1MHz) に合わせた中間パルスへとチョップされる (図1中段)^[3]。RCSのharmonic numberは2 ($h=2$) であり、図1 (中段) はRCSで2バンチ加速をする場合であ

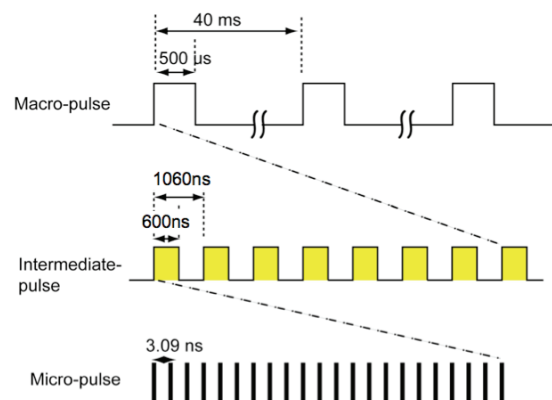


図1 : J-PARCリニアックビーム構造

¹ E-mail: tetsuya.kobayashi@j-parc.jp

る。RCSが1バンチ加速の場合は図1の中間パルスが2パルス毎の隔パルス（歯抜け、すわち約0.5MHz周期）となり、間引き運転と呼ばれる（図2）。現在の運転ではRCSがMLFに入射する場合は2バンチ加速で、MRに入射する場合は1バンチ加速（間引き運転）である。

RFチョッパーはRFQの下流側に設置され、3MeVに加速されたマクロパルスビームを横方向へとチョップする。チョッパー用LLRF制御システムにおいて、RCSから送られた中間パルス信号（RCS入射用ゲート信号）に同期してチョッピングRFパルスを生成し、チョッパー空洞に投入する（図7）。

この中間パルスがビームの行き先によって、毎パルス（2バンチ）又は隔パルス（1バンチ=間引き）となる。

3. チョップドビーム負荷変動

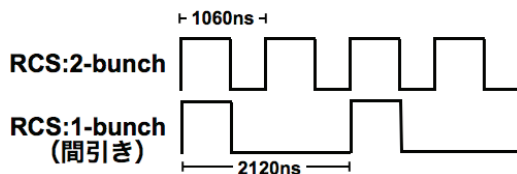


図2：チョップドビーム（中間パルス）波形。それぞれRCSの2バンチ加速（上）と1バンチ加速（下）。

チョップドビームにより図3のように加速電界は変動し、その変動量は、振幅、位相についてそれぞれ以下の式により評価できる（空洞がoptimumチューニングの場合）。

$$\frac{\Delta V_c}{V_c} = (1-\eta) \frac{T_0}{T_{f0}} b, \quad \Delta\phi = (1-\eta) \frac{T_0}{T_{f0}} b \cdot \tan\phi$$

ここで η は中間パルスDuty、 T_0 は中間パルスの周期、 T_{f0} は無負荷の（ Q_0 に対応する）空洞のfilling time、 b はloading factor (P_b/P_c)、 ϕ は加速位相（通常-30度）である。これで求めた変動量（典型的な場合）を表1に示す。ピーク電流54mA、56%チョップの場合（30mA平均相当）の場合である。計算式からも分かるように1バンチ運転（間引き）のほうが平均負荷は小さくなるが、チョップドビームによる変動は非常に大きくなる。また図4に時間領域のシミュレーション結果（振幅・位相波形）を示す。この結果から、位相変動の方向はビームに対する振幅

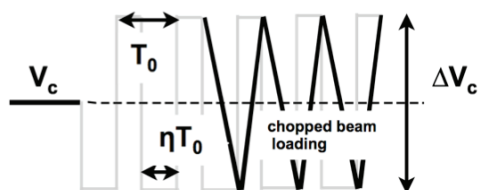


図3：加速電界のチョップドビーム負荷変動。

変動を更に助長させる方向となる（キャンセルしない）ことが分かる（図5）。従って、ビームが感じる加速ゲインの変化は表1の値より大きいと言える。

以上のことから、要求される安定性（振幅・位相変動それぞれ±1%、±1度以内）を補償するためには、これに対する負荷補償機能が必要となる。

表1：チョップドビームによる変動（ピーク電流54mA、56%チョップの場合）

	ACS ($\phi=-30$ 度)		(de) buncher ($\phi=-80$ 度)	
	振幅	位相	振幅	位相
2バンチ運転	±0.8%	±0.3度	±0.2%	±0.5度
1バンチ運転	±2.8%	±0.9度	±0.5%	±1.7度

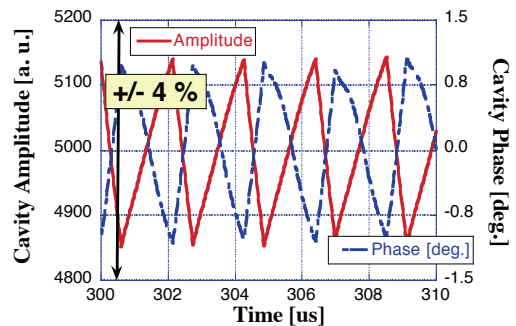


図4：1バンチ（間引き）運転時のシミュレーション結果（振幅・位相波形）。位相変動は振幅変動を助長させる方向。

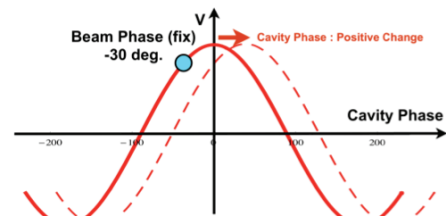


図5：図4における空洞位相の定義。空洞位相の変化が正の場合、ビーム（-30度固定）にとつて振幅は下がる。

4. FB制御システムとビーム負荷補償

加速電界の安定化制御のためデジタル・フィードバック（FB）制御を行ない、更にフィードフォワード（FF）制御を併用することでビーム負荷補償に対応している^[4]。現在のリニアック181MeV加速では324MHzの加速空洞が24式並び、LLRF制御システムによる各加速電界の安定性は、実際のビーム加速運転において位相、振幅それぞれ±0.2度、±0.2%程度を達成している^[5]。

ビーム負荷補償（FB+FF制御）は通常マクロロス（平均負荷）に対して行っているが、チョップドビームに対しては補償できないため、中間パルスに

し同期して負荷補償制御（FF制御出力のON/FF）を行う（図6）。FF制御出力をビームに合わせるための遅延調整がFPGAで可能である。この補償のため、LLRF制御システムではビームと同期した中間パルス信号が必要であり、その中間パルス信号の分配の様子を図7に示す。チョッパー空洞を駆動するチョップドパルス信号をそのまま光信号により下流の各制御システムへ伝送される。

4. チョップドビーム負荷補償ビーム試験

最後に実際のビームでのチョップドビーム負荷補償試験を行った結果を示す。現在の181MeV加速では、RF周波数がすべて324MHzであるが、ビーム負荷補償制御において周波数は関係ない。現在の運転においてチョップドビームによる変動が一番大きく現れるのは最下流のデバンチャ2であるため（ただし位相変動）、ここで試験を行った。現状のビーム電力は15mAピークである。

図8に補償制御しない場合の位相波形を示す。デバンチャグのため振幅はほとんど変動しない。図の左が1バンチ運転、右が2バンチ運転についてである。また実線（赤）が測定結果、波線（青）がシミュレーション結果を示す。±0.5度程度の位相変動が見られる。シミュレーションの変動のほうがやや大きい。これはビーム負荷（loading factor）が

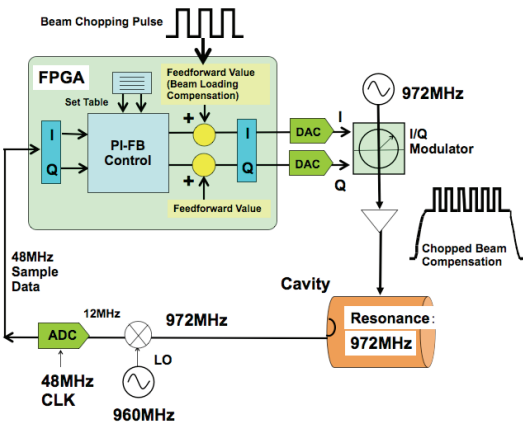


図6：デジタルFB/FF制御の模式図。外部から受信した中間パルスに同期しチョップドビーム負荷補償（FF制御出力のON/FF）を行う。

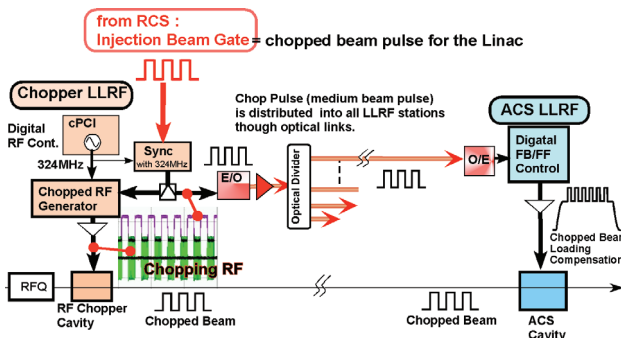


図7：中間パルスの分配とACSのビーム負荷補償。

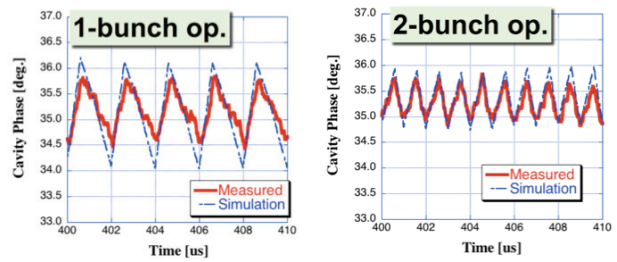


図8：マクロパルス内の位相波形（補償制御なし）。縦軸は単なる測定値であって加速位相ではない。

想定より小さい、すなわち加速電界強度がデザインの0.85MVより小さいか、ビーム電流が15mAより小さいことが考えられる。

図9にチョップドビーム負荷補償結果を示す。制御遅延を最適に合わせることで、変動がほとんどなくなることが確認でき、この補償制御は十分に有効であることが示された。

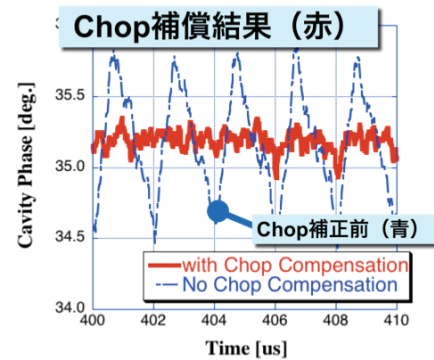


図9：チョップドビーム負荷補償結果。

5. まとめ

J-PARCリニアックの400MeV増強に向けたACS空洞の安定化のため、現在の324MHz加速においてチョップドビーム負荷補償制御のビーム試験を行った。その結果、この補償制御は有効であることが確認でき、要求される加速電界の安定性が補償可能であると期待できる。

参考文献

- [1] URL: <http://www.j-parc.jp/>
- [2] S. Michizono, et al., "Digital Feedback Control for 972-MHz RF System of J-PARC Linac", Proc of PAC09, WE5FP082, 2009
- [3] S. Wang, S. Fu and T. Kato, "The development and beam test of an RF chopper system for J-PARC", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 547, pp. 302-312, 2005.
- [4] S. Michizono, et al., "Performance of a Digital LLRF Field Control system for the J-PARC Linac", Proc. of LINAC2006, pp. 574-576, 2006
- [5] T. Kobayashi, et al., "Performance of J-PARC Linac RF System", Proc of PAC07, pp. 2128-2130, 2007