

PULSE-BY-PULSE SWITCHING OF BEAM LOADING COMPENSATION IN J-PARC LINAC LLRF

Tetsuya Kobayashi^{1,A)}, Shozo Anami^{B)}, Michizono Shinichiro^{B)}, Zhigao Fang^{B)}, Hiroyuki Suzuki^{A)}, Seiya Yamaguchi^{B)}, Etsuji Chishiro^{A)}

^{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 (英語)

For the J-PARC linac low level RF system, in order to compensate beam-loading change by pulses in the operation of 25-Hz repetition, a function that switches the feed-forward control parameters in every pulse were installed into the digital accelerating-field control system.

The linac provides a 50-mA peak current proton beam to a 3-GeV rapid-cycling synchrotron (RCS). Then the RCS distributes the 3-GeV beam into a following 50-GeV synchrotron (main ring, MR) and the Materials and Life Science Facility (MLF), which is one of the experimental facilities in the J-PARC. The 500-us long macro pulses from the ion source of the linac should be chopped into medium pulses for injection into the RCS. The duty (width or repetition) of the medium pulse depends on which facility the RCS provides the beam to the MR or MLF. Therefore the beam loading compensation needs to be corrected for the change of the medium pulse duty in the 25-Hz operation.

J-PARCリニアックLLRFにおけるビーム負荷補償のパルス間切換

1. はじめに

J-PARC¹⁾は、世界最大規模の大強度を目指す大型陽子加速器であり、(1)リニアック、(2) 3GeV-シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron, RCS)、(3) 50GeVシンクロトロン (Main Ring, MR) の3種類の加速器で構成される。また、物質生命科学実験施設 (MLF)、ニュートリノ実験施設など複数の利用実験施設がある (図1)。MLFでは、水銀ターゲットに3GeV陽子ビームを入射することで生成された大強度の中性子ビームを物質科学や生命科学等の最先端の研究に利用する。

2006年10月からリニアックのビーム加速を開始して以来、順調にコミッショニングが進み、リニアックの181MeV達成、RCSの3GeV達成、MRのビーム周回、MLFへの入射および中性子ビーム発生が実現された。今後は更にMRでの30GeV加速、MLFにおける詳細なスタディなど進めなければならない。

RCSでは3GeVに加速したビームをMR行とMLF行に振り分け、それぞれの行き先でビーム強度を替える必要がある。これは前段入射器であるリニアックにも影響し、ビームの振り分け先によりリニアックのビーム強度が変わることになる。そのため加速電界を安定化するLLRF制御では、ビーム負荷補償の制御パラメータをそれぞれにおいて最適に切り替えなければならない。ビームの振り分けは25Hzでパルス運転している途中で切り換えるため、パルス間で切り替え可能なシステムが必要となる。そのための新

機能をリニアックLLRF制御システムに追加したので、それについて報告する。

高品質な大強度ビーム加速のため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的にかかっている。位相、振幅変動それぞれ ± 1 度、 $\pm 1\%$ 以内が要求され、それを実現するためデジタル・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²⁾。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、実際の運転において位相、振幅それぞれ ± 0.2 度、 $\pm 0.2\%$ 程度を達成している³⁾。その結果、極めて再現性の高いビームを常にRCSに入射することができ、J-PARCの順調なコミッショニング進行に繋がっている。

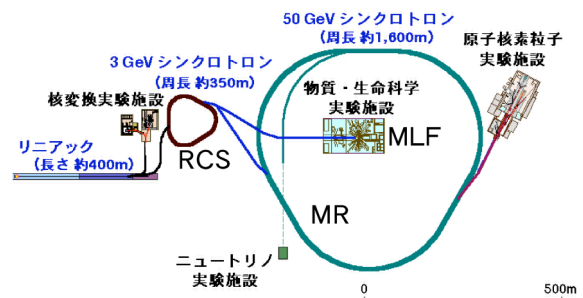


図1 : J-PARC加速器施設

¹⁾ E-mail: kasokuki@tree.odn.ne.jp

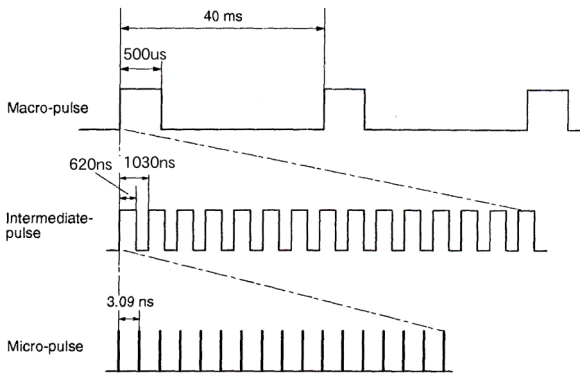


図2：J-PARCリニアックビーム構造

2. リニアックのビーム構造とRFシステム

図2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2上段)、マクロパルスはリニアック上流のRFチョッパーによって、RCS周回周期(RFバケット)に合わせた中間パルスへとチョップされる(図2中段)。これまでのコミッションでは、最大ピーク電流約30mAで、マクロパルスの幅は50 μ sでスタディを行ってきた。

RCSのharmonic numberは2(h=2)であり、図2(中段)はRCSで2バンチ加速をする場合である。RCSが1バンチ加速の場合は図2の中間パルスが2パルス毎の隔パルス(歯抜け)となる。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バンチ加速となる場合がある。

次に、リニアックの加速空洞の並びとRFシステムを図3に示す。RFQ, DTL, SDTLなど24式の空洞ユニットがあり、それぞれのLLRF制御システムにより空洞電界の安定化制御を行なう。加速周波数324MHz、パルス幅650 μ s(立ち上がり含む)のRFを25Hzで空洞に供給する。クライストロンは20台使用し1台の高圧電源で4台のクライストロンを駆動する。RFQで3MeVに加速されたマクロパルスビームは、直後にバンチされ、更にRFチョッパーによりチョッ

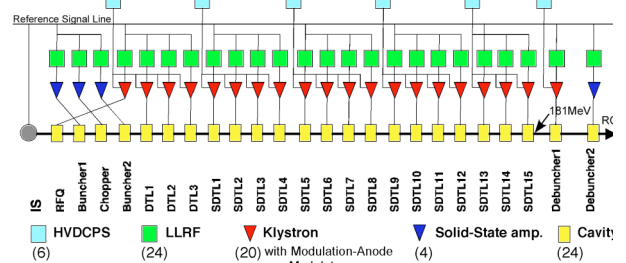


図3：リニアックRFシステム(181MeV加速)

プドパルスとなる^[4]。チョッパー用LLRFでは、RCSから送られた中間パルス信号(RCS入射用ゲート信号)に同期してチョップドRFパルスを生成し、チョッパー空洞に投入しビームをチョップする。この中間パルスがRCSビームの行き先によって、毎パルス又は隔パルスとなる。すなわち、MLF行かMR行かでビーム負荷が2倍変わることになる(コミッション方法によっては2倍以上差がでる場合もありうる)。

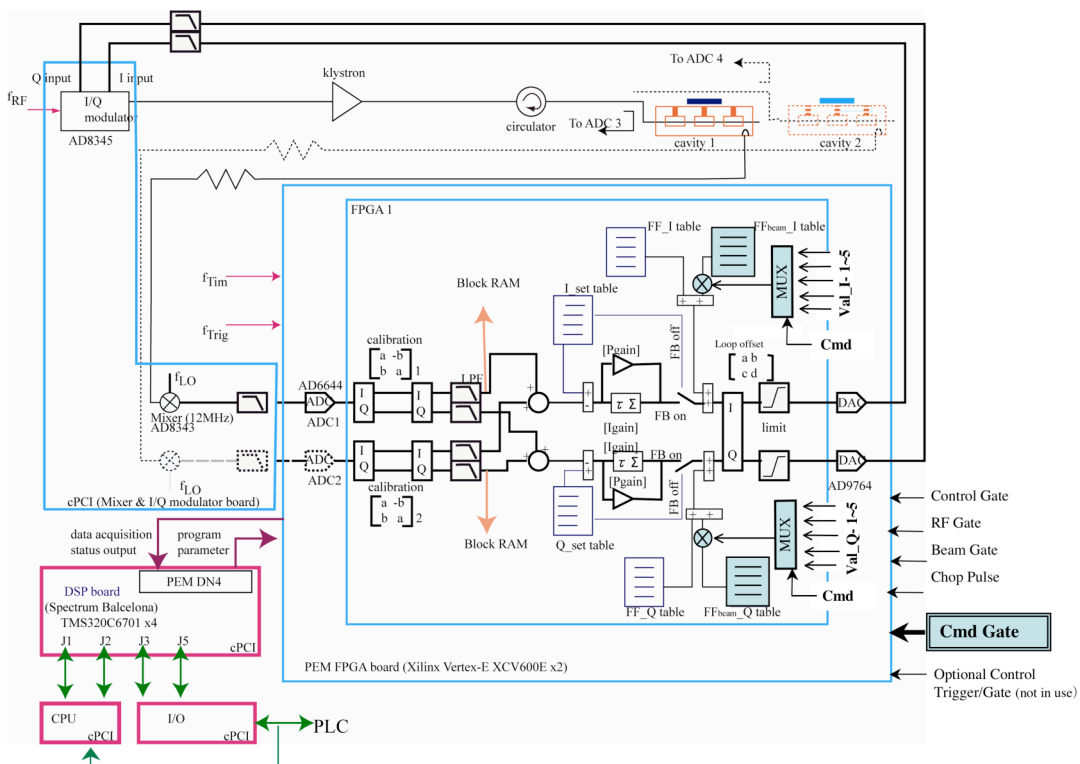


図4：デジタルフィードバック制御FPGA動作ブロック図

3. FB制御システムとビーム負荷補償

これまでも何度か報告している通り、リニアックの各空洞（クライストロン）ユニットでは、図4に示すようにFPGAを用いたデジタルFB制御により加速電界の安定化を行なう。空洞のピックアップモニター信号（324MHz）はLO（312MHz基準信号）により12MHzの中間周波数（IF）にダウンコンバートされ、それをIFの4倍の周波数（48MHz）でサンプル（14bit-AD変換）することで、I成分とQ成分を得る。得られたI,Q成分に対し、予めセットされた波形データテーブルで比例・積分（IP）制御を行ないI/Q変調器で出力を制御する。

またビーム負荷に対しては、FB制御だけではループ遅延などによりビーム立ち上がり／立ち下がりの変動を十分に補償できないため、FF制御を行なう。外部から入力されたビームゲート信号に合わせてFFの値をI,Qそれぞれに加算して出力する（図4）。図5にFB制御にFF制御も加えてビーム負荷補償を行なった結果を示す（DTL空洞にけるピーク30mA、幅50 μ s）。ビーム負荷によりFF制御しない（FB制御のみ）の場合では $\pm 3\%$ 近い振幅変動があるが、FF制御により位相、振幅変動それぞれ ± 0.2 度、 $\pm 0.2\%$ 以内に抑えることができた。RCS入射におけるビームを見るとFF制御することでマクロパルス内のエネルギー分散が十分に小さくなった^[5]。

この時、入力するゲート信号のタイミングが重要で、実際に空洞にビームが入るタイミングと0.1 μ s程度の精度で調整する必要がある。またFF制御する振幅、位相はビーム電流に大きく依存するため、それに合わせて切り替える必要がある。前述したように、25Hzの繰り返しの中でビームの行き先がMRかMLFかで切り換り、それぞれビーム負荷が異なるため、LLRFでは各パルス間でFF制御パラメータを切り替える仕組みが必要となる。その他、ビームが来ない

状態でFF制御（負荷補償）を行なうと空洞に大きな負荷がかかるため、瞬時の異常でビームが止まる場合など次のパルスにはFF制御をOFF（RFパワーは投入したまま）にする必要もある。

4. FF制御パラメータ切替

パルス毎にFF制御の切り替えを行なうためFPGAプログラムを変更した。図4に示すように、外部から入力されるゲート幅（Cmd Gate信号）の長さ（例えば5~50 μ sの10段階）に従ってI,Qに加算するプリセット値が切り替わる。図4のハッチングした枠が今回追加変更したヶ所である。本システムは元からRFトリガーなど6つの入力ポートを持ちその1つをFF切り替え用の制御に使用する（図4）。Cmd Gate幅はタイミングシステムから送られ運転モード（ビーム行き先など）によって変わるようになっている。またCmd Gateの直後のRFパルス（幅650 μ s）に反映され、25Hzの毎パルスで切り替え可能となる。

現在は表1に示すように、FF用に5つのプリセットを用意し、その1つはI,Q=0、すなわちFF制御OFFとなっている。

以上の変更を行ない、動作試験を行なった結果、正常に切り換ることを確認した。この次の運転（9月以降）から実際のビーム加速で利用可能である。

表1：Cmdゲート幅によるプリセット値切替例

Gate幅(us)	整数値
5 (04~06)	Val1_I, Val1_Q I/Qそれぞれ=1024
10 (09~11)	Val2_I, Val2_Q I/Qそれぞれ=0
15 (14~16)	Val3_I, Val3_Q
20 (19~21)	Val4_I, Val4_Q
25 (24~26)	Val5_I, Val5_Q

5. まとめ

J-PARCリニアックではRCSのビーム振り分け先によりビーム強度が変更されるため、FF制御（ビーム負荷補償）をRFパルス毎に切り替わる機能を新たに追加した。また瞬時の異常でビームが停止する場合もFF制御を停止でき、空洞への負荷を軽減できる。これらの機能は9月以降の実際の運転において運用する予定である。

参考文献

- [1] URL: <http://www.j-parc.jp/>
- [2] S. Michizono, et al., "Performance of a Digital LLRF Field Control system for the J-PARC Linac", Proc. of LINAC2006, pp. 574-576, 2006
- [3] T. Kobayashi, et al., "Performance of J-PARC Linac RF System", Proc of PAC07, pp. 2128-2130, 2007
- [4] 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.
- [5] M. Ikegami, "Beam Commissioning of J-PARC Linac", in the presentation of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2007.

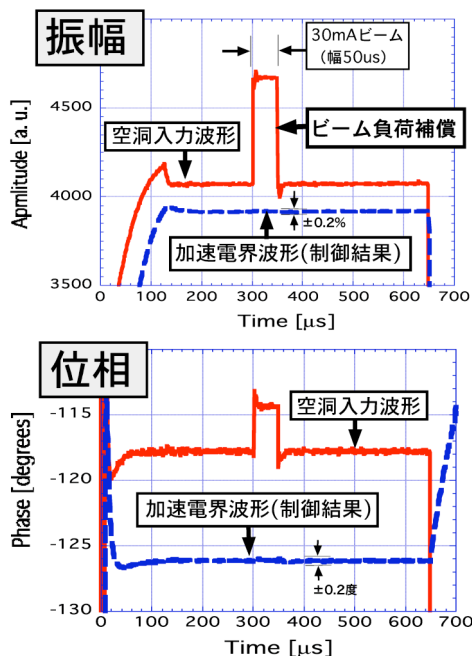


図5：ビーム負荷補償制御の結果