

## 972-MHz RF DIGITAL FEEDBACK CONTROL SYSTEM FOR J-PARC LINAC

Tetsuya Kobayashi<sup>1,A)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>B)</sup>, Zhigao Fang<sup>B)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>B)</sup>, Hiroyuki Suzuki<sup>A)</sup>,  
Seiya Yamaguchi<sup>B)</sup>, Yoshihito Okada<sup>C)</sup>

A) Japan Atomic Energy Agency (JAEA), J-PARC Center  
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

C) NEC Network and Sensor Systems, Ltd.  
1-10 Nisshin-cho, Fuchu, Tokyo, 183-8501

### Abstract

A 972-MHz RF system is being developed for 400-MeV upgrade of the J-PARC linac. The accelerating field stabilities should be less than  $\pm 1\%$  in amplitude and  $\pm 1^\circ$  in phase. The basic digital LLRF (Low-Level RF) concept is the same as that of the present 324-MHz system with a compact-PCI crate. The main alterations are RF and clock generator (RF&CLK), mixer and I/Q modulator (IQ&Mixer) and digital LLRF algorithm. Since the typical decay time of the new system is faster (because its operational frequency is higher than that of the present 324-MHz cavity), chopped beam compensation is essential. The performance study of the digital feedback system with a cavity simulator is summarized.

## J-PARCリニアック 972MHz高周波デジタルフィードバック制御システム

### 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<sup>1)</sup>、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までのビーム加速でRCS入射を行っている。それに合わせてRCSおよびMRの加速運転が行われ、順調に目標エネルギーに達成した。また、RCSにおける3GeVビームを物質生命科学実験施設 (MLF: Material and Life Science Facility) へ供給する共用運転が行われている。

現在リニアックでは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まで加速する計画になっている。そこで、本稿では、972MHzの加速電界制御システムの開発を行ったので、それについて報告する。

周波数以外に、これまでの324MHzのシステムとは大きく異なる点は、中間パルスビーム負荷補償である。中間パルスとは、500 $\mu$ s幅のマクロビームを、RCS入射の同期のため、更に上流のRFチョッパーにより約1MHzでチョップ (楕形に形成) されたビームである (図1参照)。324MHzの空洞と比べACS

空洞ではQ値が小さいため、計算上この中間パルスの構造がビーム負荷として大きく現れると予想されている。そのため、1MHzのビーム負荷補償機能を新たに組み込んだシステムの開発を行った。これらの特性について評価結果をまとめる。

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、位相、振幅変動それぞれ $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1\%$ 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<sup>2)</sup>。現在の181MeV加速では324MHzの加速空洞が24式並び、実際の運転において加速電界の安定性は位相、振幅それぞれ $\pm 0.2^\circ$ 、 $\pm 0.2\%$ 程度を達成している<sup>3)</sup>。その結果、極めて再現性の高いビームを常にRCSに

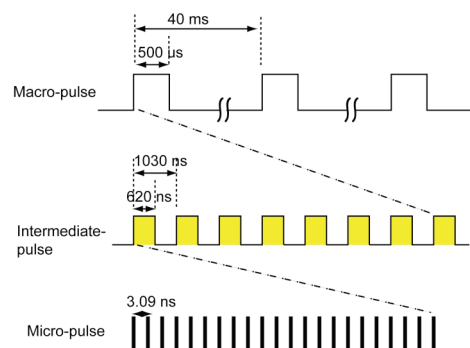


図1 : J-PARC リニアックビーム構造

<sup>1</sup> E-mail: tetsuya.kobayashi@j-parc.jp

入射することができ、J-PARCの順調なコミッション進行に繋がっている。

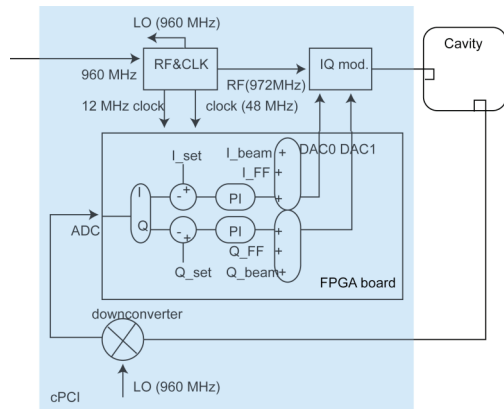


図2：972MHzデジタルFB制御の基本構成

## 2. デジタルFBシステム

972MHzのRFシステムの開発において、基本アーキテクチャは、できるだけ324MHzのシステムを踏襲し（周波数を3倍にし）、ソフトエアのほとんどをそのまま利用できるようにする。デジタルフィードバックシステムにおいても、従来システム同様、cPCI筐体規格のモジュールで構成し、デジタル制御部分はまったく同じハードウェアにし、アナログ信号モジュールのみを972MHzの周波数に対応したものを新たに開発した。また、中間パルスビーム負荷補償をFPGAのソフトウェアに追加した。

図2に972MHzデジタルフィードバックシステムの基本構成を示す。空洞ピックアップ信号（972MHz）はLO（Local Oscillator, 960MHz）で12MHzの中間周波数（IF: Intermediate Frequency）にダウンコンバートされ、これを4倍の周波数（48MHz）で直接AD変換することでI（In-phase）、Q（Quadrature）成分が得られる。このI,Q成分に対してFPGAでPI制御を行う。FPGAボードには4つの14ビットADCおよび4つの14ビットDACがあり、市販のDSPボード（"Barcelona"）に乗っている。DPSでは、空洞チューナー制御など処理スピードを必要としない複雑な制御を行い、速い高周波のFB制御はFPGAが集中して行う。

960MHzの基準信号を外部から入力し、972MHzのRF信号、960MHzのLO信号及び48MHzのクロック信号をRF&CLKボードで生成する。IQ&Mixerボードに

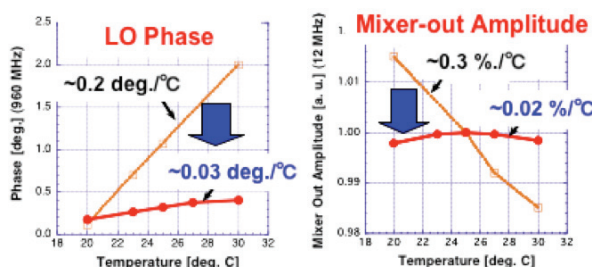


図3：LO信号（左）とIF信号（右）の温度特性

2つのIQ変調器と4つのダウンコンバータがある。これら2つのボードを972MHzで新たに開発した。温度特性の安定性について最適化を行った。

## 3. 特性評価

### 3.1 温度依存性

RF&CLKボードにおけるLO信号およびIQ&MixerボードにおけるIF信号（ダウンコンバータ）の温度依存性（基準信号に対する振幅・位相変化）がFBの安定性に直接影響するため、これらの特性を抑える必要がある。当初324MHzのボードを周波数だけ972MHzにしたものについて評価したところ、LO信号の位相で0.2度/°C、またIF信号の振幅については0.3%/°Cの温度係数があり、全体の目標（位相、振幅変動それぞれ±1度、±1%以内）に対して無視できない変動量であることが分かった（図3）。そこで、回路部品を見直し、それぞれ温度補正用キャパシタおよび温度補正用抵抗により変動をキャンセルすることで、ほぼ一桁改善し（空調±2°Cにおいて）十分な安定性を得ることができた（図3）。

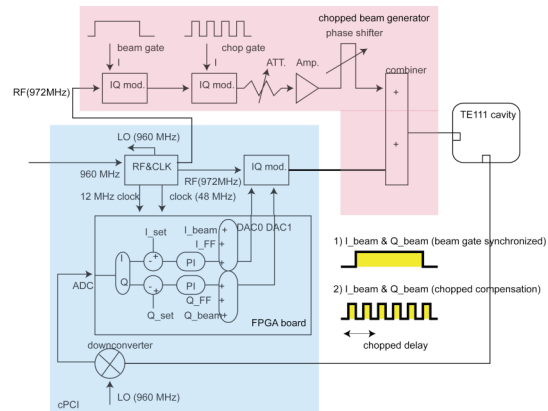


図4：模擬空洞によるビーム負荷補償の試験

### 3.2 FB制御特性

ACS空洞のパラメータに合わせた模擬空洞により低電力のFB制御試験（ビーム負荷なし）を行なった。結果、位相、振幅安定性はそれぞれ±0.12度、±0.2%で、現在の324MHzのシステムと同程度の性能が得られた。これより新たに製作した972MHzのRF&CLKボードおよびIQ&Mixerボードにおいて（ノイズ特性などに）問題ないと判断した。

### 3.3 ビーム負荷補償

ACS空洞の代表的な運転パラメータを以下に示す。

- 空洞入力電力：1.5 MW
- ビーム負荷電力：最大 0.28 MW
- ビーム加速位相：-30°
- Q値：17,000
- 負荷Q値(最適結合度)：7,800 (減衰時間:~2.5μs)
- ビーム負荷：最大 ~8%

これに対し、模擬空洞（TE111共振器）を用いて、

低電力によるビーム負荷補償特性の評価を行なった(図4)。ここで模擬空洞のQ値を約8000とした。また、中間パルスビーム負荷を模擬するための1MHzパルス変調信号(振幅、位相可変)を合成して空洞に入力した。図5にビーム負荷(模擬信号)による振幅の減衰(平均)を示す(FB/FF制御なし)。上記パラメータから、図のように約10%(平均)のビーム負荷になるよう調整した。

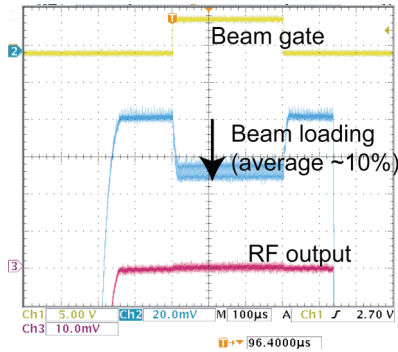


図5: ビーム負荷の模擬

ここに、FB制御および従来の(マクロパルスに対する)FF制御を行なった結果を図6に示す。この結果、位相、振幅それぞれ、 $\pm 0.4$ 度、 $\pm 0.7\%$ の変動が残り、中間パルス(1MHz)の変動に対して補償できていないことが分る。かろうじて目標安定性を満たしているが、ほとんど余裕がないため、やはり、中間パルスビーム変調に合わせた負荷補償機能を用意すべきである。

### 3.4 中間パルスビーム負荷補償

972MHzデジタルFB制御システムでは、中間パルスに同期した約1MHz変調のFF制御を行なう機能を新たに追加した。外部入力の中間パルス信号と乗算したFF制御信号をFB制御に加算する。中間パルスはFPGAの動作クロック(48MHz)とは同期してないため、最大約21nsのジッターが生じる。

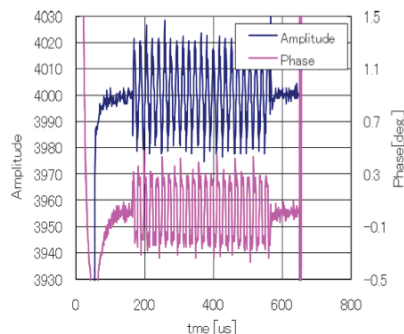


図6: RF信号のFB制御結果(振幅、位相)

図7にFB制御に加えて中間パルス補償FF制御を行なった結果を示す。位相、振幅変動それぞれ、 $\pm 0.2$ 度、 $\pm 0.4\%$ に抑えることができた。しかし、完全にキャンセルすることができなかった。その原因として、ビーム模擬パルス(合成信号)が理想的な矩形

波になっていない(FFによる補償波形と異なる)などが考えられる。

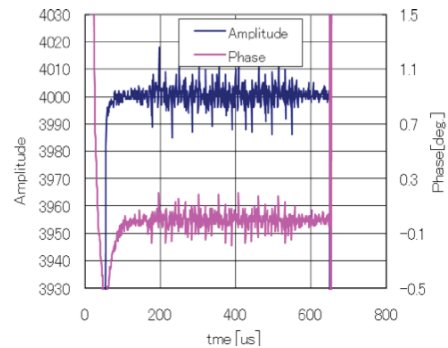


図7: 中間パルスビーム負荷補償FF制御結果

### 3.5 遅延調整スキャン

中間パルス補償FF制御は、FPGAの中で(48MHzクロックで)遅延調整が可能になっている。この遅延をスキャンし、安定性がどう変わるか測定し、どの程度の調整範囲の許容があるか確認した。その結果を図8に示す。これにより最適な調整範囲は3クロック以内である。

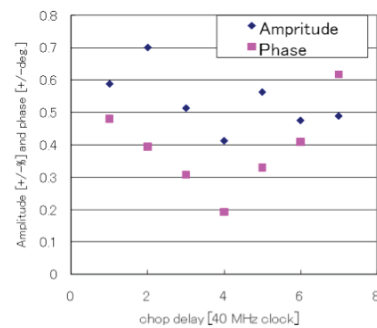


図8: 遅延調整による安定性の変化

## 6. まとめ

400MeV増強に向け972MHz高周波デジタルFB制御システムを開発し、周波数で3倍厳しいにも関わらず、現在の324MHzのシステムと同程度の十分なFB制御特性を得ることができた。またQ値の小さいACS空洞では中間パルスビーム負荷の影響が問題になるため、それを補償する機能を追加した。模擬空洞で評価した結果、正常に動作することを確認した。

### 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