

Characteristics of Low Level RF System for DTL1 Beam Commissioning of J-PARC Linac

T. Kobayashi^{1, A)}, H. Suzuki^{A)}, S. Anami^{B)}, S. Yamaguchi^{B)}, M. Kawamura^{B)}, Y. Fukui^{B)}, E. Kadokura^{B)}, N. kamikubota^{B)}, M. Takagi^{C)}, S. Yoshida^{C)} and M. Kawase^{D)}

^{A)} Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

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

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

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

^{C)} Kanto Information Service Co.,LTD.

8-21, Bunkyo, Tsuchiura, Ibaraki, 300-0045

^{D)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,LTD.

2-8-8, Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

Abstract

The beam study of the low-energy front of J-PARC linac has been in progress in the KEK site. Last year, DTL1 (the first tank of three DTL's) was installed in addition to RFQ and the Medium Energy Beam Transport line, and the beam commissioning up to 20MeV has been performed successfully. In this paper, the low level RF (LLRF) System for this beam test is summarized and the performance of the RF feed back control system and monitor system of the phase and amplitude of the accelerating fields (324 MHz) is presented. It was found that the feed back system for Bunchers is also necessary to stabilize and to compensate for the beam induced fields.

J-PARC リニアック DTL1 ビームコミッショニングにおける 低電力高周波源システムの特性

1. はじめに

原研東海研究所においてJ-PARC加速器^[1]の建設が進む中、それに先立ってKEKのテスト施設ではリニアック上流部のビーム試験が行われている。ここでは、負水素イオン源、RFQおよびMEBTラインに加え、昨年DTL1（3つ並ぶDTL空洞のうちの1台目）が、インストールされ、現在は20MeV陽子リニアックとなっている。DTL1を含めたビーム加速試験で設計どおりのエネルギー19.7MeVが得られピーク電流30mAで100%の透過率を達成した^[2]。また現在もビームコミッショニングが行われている^[3]。

本稿では、KEKでのDTL1ビームコミッショニング（20MeV陽子リニアック）における低電力高周波（LLRF: Low Level RF）システムについて述べる。J-PARCリニアックのLLRFシステムとして、デジタルフィードバック（FB）／フィードフォワード（FF）制御システムの開発が進められているが^[4]、本ビーム試験での運用に至っていないため、従来のアナログFBシステム（PI制御）を用いて要求仕様を満たすシステムを組み上げ、ビーム試験を行っている。アナログかデジタルかでフィードバック制御における本質的な違いはない。

J-PARCリニアックの高周波源では、幅650 μ s、繰り返し50Hzのパルス化された大電力高周波を空洞に

供給する。加速周波数は324MHz（下流半分は972MHz）である。加速電場の位相変動・振幅変動はそれぞれ $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1\%$ 以下であることが要求されている。そこで、LLRFシステムでは、(a) パルス内変化（サグ）、(b) Pulse to Pulse でのふらつき、(c) 長期的ドリフト、(d) ビームローディング、など、全ての変動を含めて位相・振幅の両方の安定性（ $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1\%$ 以内）を同時に満たさなければならない。(a)、(b)は主にクライストロン高圧電源の電圧変動に由来する。

2. LLRFシステム

システム全体の構成を簡単に示すと図1のようになる。地下トンネルのビームラインには、RFQ、Buncher1、Chopper、Buncher2、そしてDTL1と空洞が並ぶ。地上部のクライストロンギャラリーに、上流から10kW半導体アンプ2台（Buncher1, 2用）、30kW半導体アンプ（Chopper用）、RFQ用クライストロン、DTL用クライストロンの順に高周波増幅器（324MHz）及びその制御用19インチラック筐体が並び、図のように各空洞へ電力が供給される。基準信号は、マスターオシレータ（324MHz）の信号を40Wに増幅した後、同軸RFケーブルで各LLRF制御機器へ分配される。空洞位相調整は、RFQの空洞位相を固

¹ E-mail: tetsuya.kobayashi@j-parc.jp

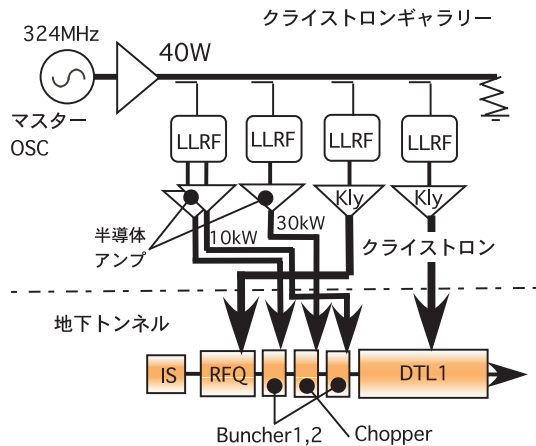


図1：全体構成

定とし、Buncher、DTLの位相をRFQに合わせている。トリガー（RFゲート）信号は12MHzクロックを基準としたタイミングシステムから与えられる^[5]。

図2にLLRF制御システムの基本的な構成を示す。位相・振幅の制御/モニターにはIQ変調器/復調器を用いる。その理由として主に次の点が挙げられる。(1) 位相という特殊なパラメータを扱う必要がなく、2つの同等な電圧（振幅）制御となる（安定化制御において位相という情報を知る必要はない）。(2) 通常、位相・振幅それぞれ個別の機器に分けて扱う必要があるが、IQ変調器/復調器では同時に2成分を扱うことができる。(3) $\pm 180^\circ$ の不連続点が問題にならず、調整の移相器を必要としない（演算上の処理になる）。(4) 遠隔制御が容易になる。

しかしながら通常IQ変調器/復調器は (r, ϕ) - (I, Q) の変換が 360° 理想的とはならないので、精度が求められる場合は校正を行っている。

空洞モニターとしてIQ復調器の出力波形を横河のWE7000シリーズにより取得し、位相・振幅に換算されEPICS経由でアーカイブに保存される。

システムの制御やパラメータの設定などはPLCにより行う。また、それらはEPICSからリモート操作が可能となっている^[6]。

フィードバックモジュールの構成を図3に示す。入力自身が基準となる入力追従方式である。基準に対する空洞位相は図2のように、それより前段のIQ変調器によって変えられる。ただし、J-PARCリニアック実機用のデジタルフィードバックシステムでは、外部から絶対的な設定値を与える方式である。

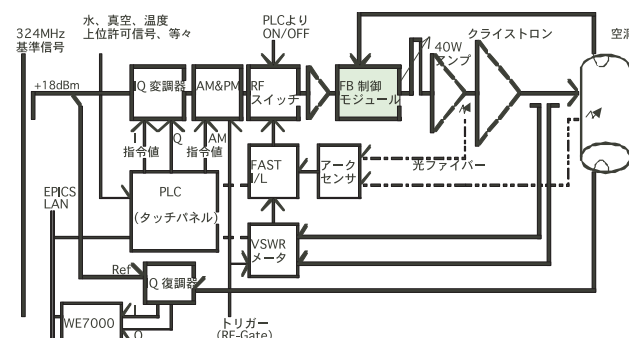


図2：LLRFシステムの基本構成

本来、実機では、空洞電界の制御を行うフィードバックに加え、クライストロン出力のみフィードバック制御を行う内側のループが更に必要となる^[7]。本ビーム試験では機器の数が足りないためそれを省いている。

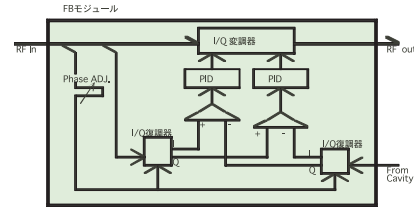


図3：フィードバックモジュールの構成。

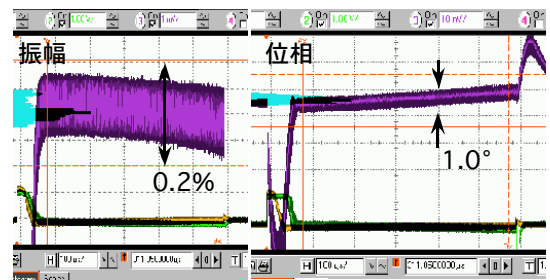


図4：DTL1空洞の振幅（左）・位相（右）のパルス(600us)内変化。パルスtoパルス変動も含む。

3. FB特性評価

図2、3のFBモジュールについては、文献[8]でも帯域特性など詳しく報告されているが、改めて本ビーム試験におけるシステムについて述べる。

図4にDTL1空洞内電場をモニターしているパルス波形を示す。振幅についてはパルス内およびパルス間の安定性は $\pm 0.1\%$ である。位相はパルス内で約 $\pm 0.5^\circ$ の変化で、要求を満たしているが十分とは言えない。これはクライストロンの高圧電源の電圧サグ（ 10° 近い位相変化に相当）によるもので、既知の問題である。これに対しては予定通りクライストロン出力を安定化する内側のFBループを追加することで十分対応可能である^[7] [8]。本ビーム試験ではビーム幅50usであり問題とならない。

長期的な安定性として、図5にあるビーム試験中の位相変動（約12時間のプロット）を示す。これは第5節で説明する方法で、バンチャーとDTL1の2空洞間の相対位相（ビームが見る位相）を測定したものである。実験のため位相を振っているのを除き、変動は $\pm 0.4^\circ$ 程度となっている。FB系では位相 $\pm 0.1^\circ$ の安定性が確認されているので、この変動は測定系もしくは基準信号の変動と思われる。

4. バンチャーのフィードバック制御

当初は、バンチャーにFB制御は必要ないとされビーム試験を行っていたが、試験が進むにつれて、その不安定性が指摘されるようになった。調べると半導体アンプの出力は安定しているが、冷却水の温度変化が要因と思われるバンチャーの位相変動（約 3° ）

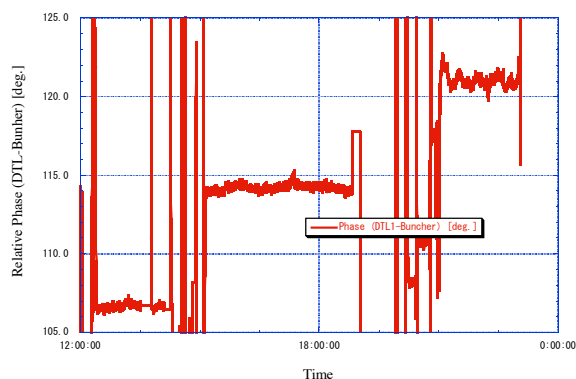


図5：空洞位相長期安定性。ビーム試験中におけるDTL-バンチャー間相対位相のチャート。

幅)があること、また、加速は行なわれないがビーム励振の影響のため位相が 4° 程度(ピーク電流5mAの場合)変化することなどが分かった。これらを補償するため、2台のバンチャー用にもFBシステムを導入した。図6にビームの影響(ビーム幅 $50\mu\text{s}$)に対するFB制御の効果を示す。結果、期待通り補償が行われている。ピーク電流30mAの場合 20° 程度の位相変化になるが、同様に問題なく補償できている。

長期的な変動についても図5に示したように安定化されており、バンチャーのFBがない場合は $\pm 2^\circ$ 程度の変動が見られる。

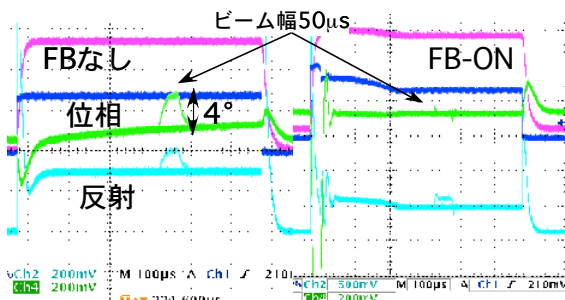


図6：バンチャーのビームの影響に対するFB制御の効果。右:FBなし、左FBあり。

5. オシロスコープ位相モニター

J-PARCリニアックでは、空洞位相・振幅を計測する方法の1つとして、直接デジタルオシロスコープでサンプルした324MHzの正弦波形から求める手法を確立し、試験的に本ビーム試験で実用している。Agilent製54832B(4ch使用時2GS/s)オシロによりサンプルしたデータ(1周期に約6点)を正弦波関数でフィッティングを行い位相・振幅を求めるものである。4chのうち1chを基準とし残り3chとの位相差を出す。外部トリガーとして、324MHz基準信号と同期の取れたトリガー信号を任意のディレイを与えて入力することで、幅 $600\mu\text{s}$ (繰り返し50Hz)のパルス内の任意点の位相・振幅が計測できる。そのためトリガー同期ユニットも製作した。できるだけトリガージッターを小さくするためトリガー信号の立ち上がりを速く(1ns以下に)している。オシロはWindows XPをOSとして動作しているため、位相を求

める(関数フィットする)ソフトウェアを同OS上で動くものを作成した。測定結果はEPICS上で取得できるようにする。

この方式の利点は、オシロ1台で簡単に3信号の振幅・位相が同時に計測できること、直接正弦波形(チャンネル間の同期性等)を視覚的に確認できること、などがある。そのため隣の制御ステーション(空洞)との相対位相を測定するのも容易になる。問題点としては十分な精度がないことである。振幅、位相の分解能は、それぞれ約 0.2° 、 0.5% である(ただしアベレーシングが必要)。しかし図5に示すように多空洞間の位相の長期的安定性を評価するのに非常に簡単で有用である。

6. まとめと課題

本ビーム試験におけるLLRFシステムでは、アナログフィードバック制御により加速電界の安定化を行ない、順調にビームコミッショニングが進められている。しかし完全に変動が抑えられたわけではなく安心はできない。様々な要因で 1° の位相変動など簡単に生じ得るため、常にシステム全体、隅々まで注意を払って過ぎることではない。パルス内サグに対しては、やはり内側にもう1つFBループの追加が必要である。また大電流に対するローディング補償などの課題もある。DTL縦チューニング^[9]に向け、位相・振幅の制御/計測における更なる確度の向上を目指す。可能なら空洞の自動チューナー制御を導入したい。

7. 謝辞

KEKでのビーム試験では、建設中のJ-PARCリニアック立ち上げに向け貴重な経験をさせて頂き、コミッショニンググループ及びビーム試験参加者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] URL: <http://www.j-parc.jp/>
- [2] Y. Yamazaki, "J-PARC Construction and its Linac Commissioning", Proc. of EPAC2004, 2004
- [3] Y. Kondo, et al., "Beam commissioning of the J-PARC linac DTL1 at KEK", in this meeting, 2004
- [4] S. Michizono, et al., "Digital RF Control System for 400-MeV Proton Linac of JAERI/KEK Joint Project", Proc of Linear Accelerator Conference 2002, 2002
- [5] E. Kadokura, et al., "Timing System for JAERI/KEK 60MeV Proton Linac", (in Japanese), 2002
- [6] E. Kadokura, et al., "J-PARK Linac PLC Control System", in this meeting, 2004
- [7] S. Yamaguchi, et al. "Feedback Control for 324MHz KLYSTRON", Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 192-194, 2000.
- [8] S. Yamaguchi, et al., "Response Characteristics of Feedback Control System for 324MHz RF Source", Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 219-221, 2001.
- [9] M. Ikegami, et al., "Longitudinal tuning schemes for J-PARC DTL and SDTL", in this meeting, 2004