

## J-PARC リニアック制御信号分配システムの改修 UPGRADE OF CONTROL SIGNAL DISTRIBUTION SYSTEM AT J-PARC LINAC

二ツ川 健太<sup>\*A)</sup>, 伊藤 雄一<sup>B)</sup>, 菊澤 信宏<sup>B)</sup>, 小林 鉄也<sup>A)</sup>, 佐藤 文明<sup>B)</sup>, 篠崎 信一<sup>B)</sup>,  
鈴木 隆洋<sup>C)</sup>, 方 志高<sup>A)</sup>, 福井 佑治<sup>A)</sup>, 道園 真一郎<sup>A)</sup>,

K. Futatsukawa<sup>\*A)</sup>, Z. Fang<sup>A)</sup>, Y. Fukui<sup>A)</sup>, Y. Ito<sup>B)</sup>, N. Kikuzawa<sup>B)</sup>,  
T. Kobayashi<sup>A)</sup>, S. Michizono<sup>A)</sup>, F. Sato<sup>B)</sup>, S. Shinozaki<sup>B)</sup>, T. Suzuki<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup>Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

<sup>C)</sup>Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

### Abstract

Three kinds of timing signals, 12-MHz clock, 25-Hz trigger, and type code (control word), are used in the timing system of J-PARC. The timing signals are generated in the central control room (CCR) and are delivered to each facilities. In the klystron gallery of the linac, these signals are received, divided, and distributed to each station. However, in this distribution system, an optical signal from CCR is transformed to an electrical one by a O/E module and divided by a FANOUT module, and then re-transformed to an optical by E/O module. This system is a source of troubles such as the module failure, the timing trouble of LLRF for temperature drift and so on. Therefore, we would like to update the timing signal distribution system for use of the optical amplifiers and the optical couplers.

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC の加速器は、400-MeV リニアック (現在 181 MeV), 3-MeV Rapid Cycle Synchrotron (RCS), 50-GeV Main Ring Synchrotron (MR, 現在 30 GeV) で構成されている。各加速器で世界最高クラスの大強度で陽子を加速し、物質・生命科学実験施設 (MLF), ハドロン実験施設, ニュートリノ実験施設にビームを供給している。各実験施設に設置された水銀, 炭素などの標的に陽子ビームを衝突させて発生した中性子, ミュオン,  $K$  中間子,  $\pi$  中間子, ニュートリノなどの二次粒子を最先端の実験に利用している [1]。

J-PARC タイミング制御信号には、予めプログラムされた運転動作としてのスケジュールドタイミングと周回ビームに同期したシンクロナイゼーションタイミングの 2 種類がある。タイミング制御信号は、12 MHz のマスタークロック, マスターを分周した 25 MHz の基準トリガクロック<sup>1</sup>, プログラムを選択するタイプコード信号 (シリアルデータ) の 3 種類がある。これらの制御信号は、中央制御室 (CCR) で生成されて、各施設に分配される [2, 3, 4]。リニアックでは、クライストロンギャラリの上流部で、これらのタイミング制御信号を受け取り、分岐して、各ステーションに分配している [5]。

リニアックでは、972 MHz の ACS 空洞を新たに 25 式導入して、RCS への入射エネルギーを 400 MeV に増強することを計画している [6]。これに伴い、低電力高周波 (LLRF) システムとして、既存の 324 MHz システムだけでなく、運転条件の厳しい 972 MHz システムを安定に動作させる必要がある。972 MHz LLRF システムを運転する上で問題になり得るタイミング制御信号分配システムを、本年度に改修することを予定しているため、本稿ではこの改修計画案について報告する。

### 2. タイミング・RF 基準信号分配システム

図 1 に、既存のタイミング制御信号分配システムの概念図を示す。3 種類のタイミング制御信号は、リニアックのクライストロンギャラリの上流に光信号として CCR から伝送される。この信号は、タイミング送受信モジュール (RPN-471) を使用して、光信号から電気信号に変換される。各信号は、FANOUT モジュールに入力されて、電氣的に散開される。分岐された電気信号は、RPN-471 で再び電気信号から光信号へ変換され、恒温ダクトを通過して分配される。それらの光信号は、伝送経路中の恒温ダクト内にある光カプラで 4 分岐され、各ステーションに設置された RPN-471 へ伝送される。

リニアックの高周波 (RF) を制御するためには、制御用の 12 MHz 発振器の自励発振の信号では、LLRF システムと位相同期させること (Phase Locked Loop: PLL) ができず、運用できなかった。そこで、より高精度な発振器 (Agilent E8247C) を導入し、この信号を制御用 12 MHz 発振器に PLL させることで、この問題を回避した。この時点では、リニアックの基準信号発生器に入力していた 12 MHz 信号は、制御用 12 MHz 信号をリニアック上流部で光分岐した信号を使用していた [7]。2011 年度に、972 MHz LLRF システム導入を見越して、高周波基準信号発生器 (CDX-KEK021) を新規に導入した。しかし、上記の信号経路でこの高精度の発振器を用いた場合、RF 基準信号の位相雑音の精度は、入力 12 MHz の精度で制限されていた。そこで、RF 基準信号用 12 MHz 信号は経路中に不要なモジュールの通過することを避け、制御用 12 MHz とは異なる経路で CCR からリニアックまで伝送するように伝送経路を見直した<sup>2</sup>。その結果、位相雑音ジッタ (10Hz-1MHz) を、改修前の 240 fsec から 40 fsec に減少させることができた [8]。これらの経緯で、現在は図 1 に示されているような 12 MHz の信号伝送方法となっている。RF 基準信号は、光アンプ・光カプラで、増幅・分岐されて、各ステーションに分配されている。

<sup>2</sup>実際に問題になったモジュールは制御用の発振器であった。

\* kenta.futatsukawa@kek.jp

<sup>1</sup>設計当初、基準トリガクロックは 50 Hz であった。核変換実験施設が第一期から外されたために、現在は 25 Hz が採用されて運転している。

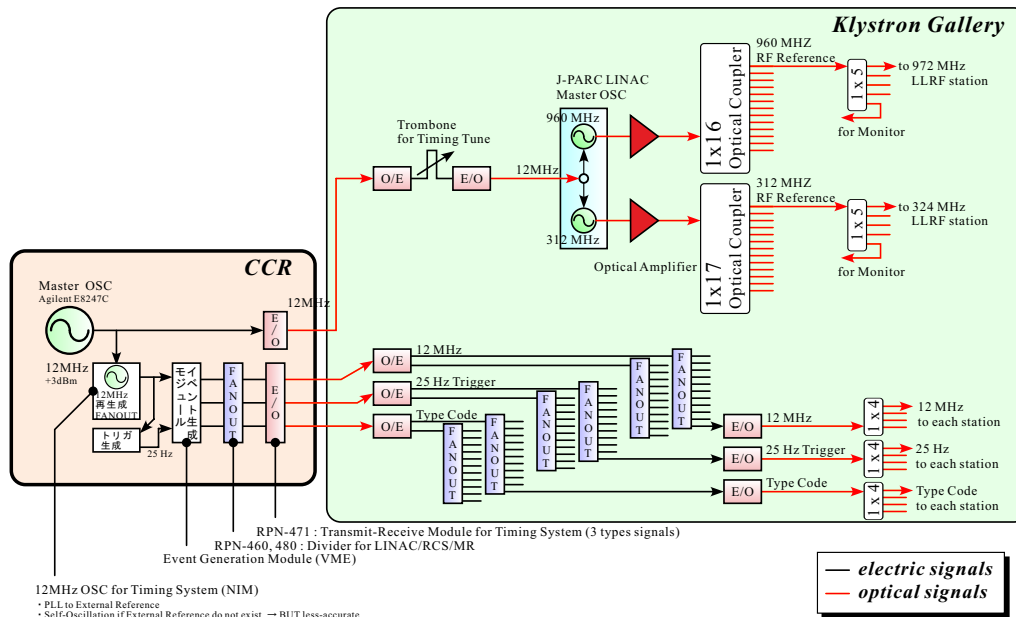


Figure 1: Previous timing control signals distribution system for the J-PARC linac.

### 3. 位相の不安定領域

各ステーションの LLRF システムでは、RF の基準信号 (Local Oscillator: LO) だけでなく、制御側から 12 MHz を受け取っている。現在の J-PARC リニアックのように LO を基準信号とするシステムを採用した場合、基準信号に対して 12 MHz の入力タイミングが変化すると位相が離散的に変動する<sup>3</sup>。従って、離散的に変化する過渡期には、制御するには不安定な領域が存在する。図 2 に 12 MHz 入力タイミングと不安定領域との関係を示し、下記にその説明を記述する。

- (a) 324 MHz LLRF システムの 12 MHz 入力タイミングと不安定領域の関係を示す。フィードバック (FB) をオフの状態測定している。不安定領域では、測定位相が不連続になる。LO (312 MHz) の逆数の約 3 nsec 毎に不安定領域が出現する。安定領域の平坦部は、約 2.3 nsec 程度となっている。
- (b) 972 MHz LLRF システムの 12 MHz 入力タイミングと不安定領域の関係を示す。FB をオンの状態で測定している。324 MHz システムでは測定位相が不連続であったのに対して、972 MHz システムでは測定位相が不安定になり標準偏差が増加する。960 MHz の LO の逆数の約 1 nsec 毎に不安定領域があり、安定領域の平坦部は約 800 psec 程度と非常に狭くなっている。

従って、972 MHz LLRF システムを安定に動作させるためには、12 MHz 入力タイミングを安定領域の中央に調整できたと仮定しても、入力タイミングの経年変化を  $800 \text{ psec}/2=400 \text{ psec}$  以下に抑える必要がある。そこで、2011 年度から温度変動の小さい 12 MHz の遅延モジュール<sup>4</sup>を各ステーションに用意して、5 psec 単位で 12 MHz 入力タイミングを調整できるようにしている。

<sup>3</sup>本稿では詳細説明を割愛するが、図 2(a) で隣の安定領域では測定位相は同じように見えるが、実際には位相は離散的に変化する。

<sup>4</sup>27 °C 近傍で 6.6 psec/°C となっている。

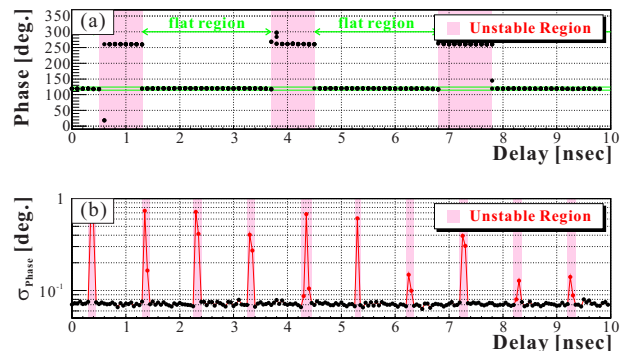


Figure 2: Correlation between the hatched unstable regions and the 12 MHz input timings. In the case of (a) 324 MHz LLRF system, the unstable region appears as a discrete phase every 3 nsecs. On the other hand, the standard deviation of the phase increases every 1 nsec for the unstable region of (b) 972 MHz LLRF system.

一方で、2011 年度に RF 基準信号用 12 MHz を制御用と別系統から伝送した改修を行ったこと、入力タイミングの変動は大きくなる方向に働いたと考えられる。現在のシステムで、RF 基準信号用 12 MHz と制御用 12 MHz の信号間の相対タイミングの経年変化を図 3 に示す。ここでは、RF 基準信号用 12 MHz 信号は高周波基準信号発生器の入力モニタ信号<sup>5</sup>、制御用 12 MHz 信号はタイミング制御信号分配システム内の E/O モジュールの出力信号である。既に、この時点で、300 psec 程度の相対タイミングの経年変化が観測されている。即ち、972 MHz システムが動作していた場合は、すでに安定動作範囲の限界に非常に近く、今回考慮外のシステム構成要素の経年変化と合わせると限界を超えていた可能性もある。

<sup>5</sup>当該モジュールには、入力 12 MHz の O/E 信号がモニタ出力として用意されている。

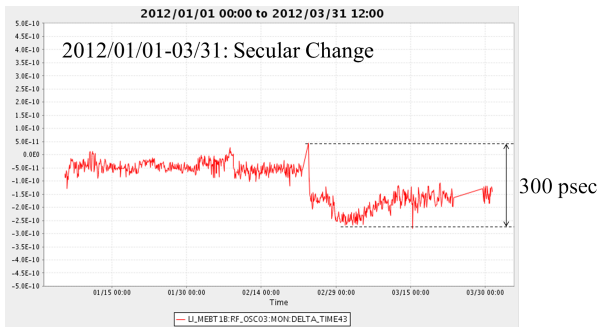


Figure 3: Secular change of the timing of 12 MHz.

RF 基準信号を分配システムを配備してきた経験から、E/O・O/E モジュールが温度特性が悪いことが予想された<sup>6</sup>。そこで、このタイミング制御信号の分配システム付属の RPN-471 (受信と送信 2 台分) と FANOUT モジュールを合わせた通過時間の温度依存性を約 5 日間にわたり測定した (図 4)。温度は、RPN-471 の送信モジュールの表面に熱電対温度計を設置して測定している。この分配システム全体で、約 40 psec/°C の温度特性があり、日常の運転中でも 100 psec 以上の変動があることが測定された。また、モジュール表面の温度は、50 °C 近くまでなっていることも分かった。タイミング制御信号分配システムの全モジュールの総発熱量は約 400 W あり、19”ラック内に蓄熱されていると推測される。以前はタイミング制御信号分配システムのモジュールが設置されている 19”ラックの開閉により、LLRF システムが落ちる事象が度々生じたが、それは扉の開閉により温度が急激に変化したことが原因と考えられる。

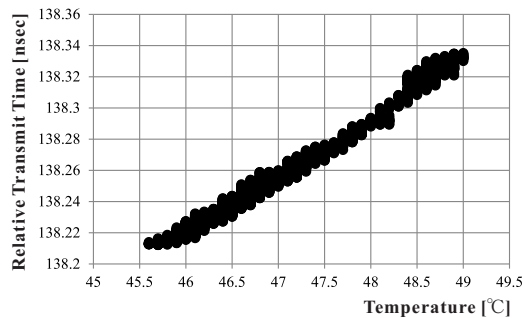


Figure 4: Correlation between the temperature at the surface of the module and the relative transmit time.

#### 4. 新規導入予定のタイミング制御信号分配システム

上記の結果を踏まえて、タイミング制御信号の分岐部に、光アンプ・光カプラを用いたシステムに改修予定である。本システムでは、O バンド光アンプ<sup>7</sup>に AMP-FL5600-OB-16 (ファイバラボ株式会社)、光カプラに HCOPA32DU (日本アンテナ) を用いる。各タイミング制御信号は、光信号のまま、光アンプで増幅・光カプラで

<sup>6</sup>RF に用いられる O/E モジュールはペルチェ素子を使用して温度管理を行っている。

<sup>7</sup>タイミング制御信号の波長は、1310 nm である。

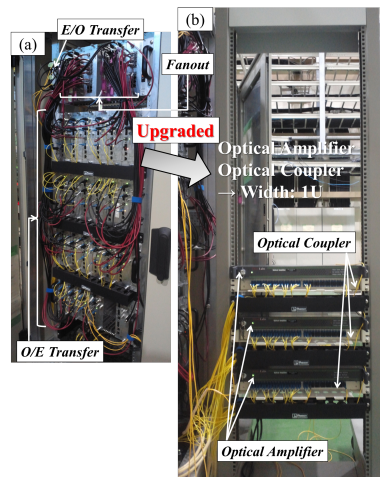


Figure 5: Photos of the timing control signals distribution system. (a) and (b) represent the previous one and the upgraded, respectively.

32 分岐され、各ステーションに分配される。現在は、仮設の 19”ラックを用意して、実機の伝送経路を使用して試験運転を行っている (図 5)。

光アンプ・光カプラを用いた当該システムは、元来 2011 年から運用するように準備してきた。しかし、各ステーションでの光レベルが想定外に足りず、実機への導入を断念してきた。当初、光アンプを 1 台購入して利得試験を行い問題がないことを確認してシステムへの採用を決定した。しかし、試験機から実機購入までの間にメーカー内で若干の仕様変更があったことを知らず、使用領域で利得が一桁落ちたことが、2011 年度に導入断念した原因である。また、CCR からリニアックまでの伝送経路内で、光レベルが -4 dB 以上落ちていこともシステムの投入が遅れた原因に上げられる。

そこで、現在想定しているシステムでは、クライストロンギャラリで、光信号から電気信号に戻す構成になっている (図 6)。これは、本来は望ましくはないが、伝送経路内での -4 dB があると各ステーションでの光レベルが閾値の近傍になってしまう。そこで、実機運転に影響することを避けるため、上記の構成を採用した。その結果、長期試験を行っているタイミング制御信号分配システム (図 6) の各ステーションの光レベルは、既存のシステム (図 1) と同程度になっている。また、図 6 のように制御用 12 MHz 信号として RF 基準信号用に送られている信号を分岐して使用することで、CCR とリニアック伝送経路内での経年変動の寄与を除ける構成を考えている。

制御用の光カプラからの出力信号、高周波基準信号発生器の 12 MHz 入力モニタ信号、RF 基準信号 (312 MHz, 960 MHz) については運転中に常にモニタできる体制を考えている。また、RF 基準信号用 12 MHz 信号経路にはトロンボーンを用意あり、制御用 12 MHz との全体的な相対タイミングの調整を行うことができる。各ステーション毎のタイミングの調整ノブは、前述の 12 MHz の遅延モジュールが担っている。

図 5 の写真からも分かるように、光アンプ・光カプラ共に 1U でコンパクトな仕様になっている。光アンプの

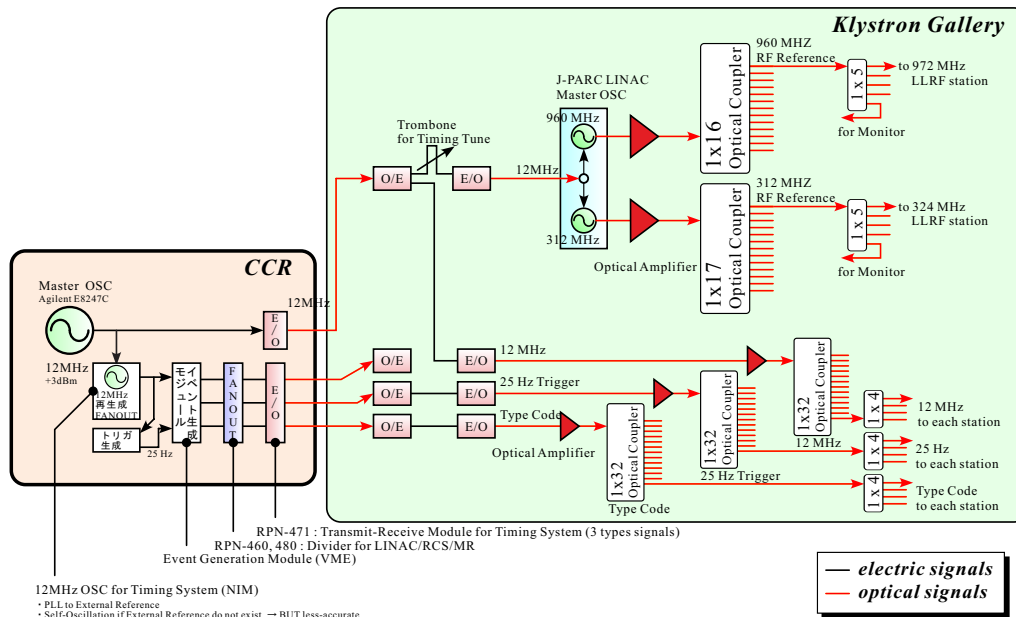


Figure 6: Previous timing control signals distribution system for the J-PARC linac.

消費電力も 1 台あたり 40 W 以下と発熱量も小さい。空いたスペースを活用して、隣の 19”に設置されている RF 基準信号分配システムとタイミング制御信号分配システムを合わせて、温度依存性の大きな装置と、排熱の大きな装置を別けるようにラック内配置を見直すことも予定している。

## 5. まとめ

J-PARC リニアックでは、エネルギー増強に伴い、12 MHz 信号と RF 基準信号との相対タイミング変動に対して、より安定な性能が要求される。既存のリニアックのタイミング制御信号分配システムでは、信号を分岐するためだけに電気信号に変換し、分岐後は再度光信号に変換して、各ステーションに分配する方法が採用されていた。このシステム構成では、新規導入の 972 MHz LLRF システムを安定に動作させることは現実的に厳しいと考えられる。そこで、タイミング制御信号の分配方法として光アンプ・光カプラを使用したシステムを新たに導入したいと考えている。現在、仮設ラックでの実機の信号配線を用いて、最終の長期安定試験を行っている。問題がない場合は、次回のビーム運転から実機への導入を予定している。

## 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] F. Tamura, et al., “J-PARC Timing System”, Proc. of 11st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 677-679, 2004
- [3] F. Tamura, et al., “J-PARC Timing System”, Proc. of ICALEPCS 2003, p. 247-249, 2003
- [4] Y. Ito, et al., “Design study of J-PARC Timing System for Nuclear Transmutation Experimental Facility”, Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, p. 738-740, 2012

- [5] T. Kobayashi, et al., “RF and timing reference distribution system for J-PARC linac”, Proc. of 11st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 320-322, 2004
- [6] H. Oguri, “Present stats of the J-PARC linac”, SSFP05, in these proceedings, 2013
- [7] T. Kobayashi, et al., “Performance of RF Reference Distribution System for the J-PARC Linac”, Proc. of LINAC 2006, p. 583-585, 2006
- [8] K. Futatsukawa, et al., “Upgrade of the RF Reference System for the J-PARC 400 MeV LINAC”, Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, p. 628-631, 2011