

# UPGRADE OF THE RF REFERENCE SYSTEM FOR THE J-PARC 400 MeV LINAC

Kenta Futatsukawa\*<sup>A)</sup>, Zhigao Fang<sup>B)</sup>, Tetsu Kobayashi<sup>B)</sup>, Yuji Fukui<sup>B)</sup>, Shinichi Shinozaki<sup>A)</sup>,

<sup>A)</sup> Japna Atomic Energy Agency (JAEA)

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

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

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

## Abstract

A new RF reference signal oscillator, which can provide signals of not only 312 MHz signal but also 960 MHz, was installed at J-PARC LINAC for the 400 MeV upgrade. This module and the RF reference system have to meet the tight tolerance requirement in the stability phase, less than  $\pm 0.3^\circ$ , for the high intensity beam in J-PARC. The jitter value of the output signals from this module was measured and was suppressed within 50 fsec by the improvement of 12 MHz signal. These values became one order smaller than the required phase stability. Moreover, the high-accuracy synchronism of two kinds of frequency, 324 MHz and 972 MHz, was confirmed by the sampling oscilloscope. Therefore the RF reference signal with more stability can be provided by this system after the upgrade.

## J-PARC 400 MeV リニアック増強のための高周波基準信号システム

### 1. はじめに

J-PARC は世界トップクラスの大強度陽子加速器であり、リニアック、3 GeV-シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron, RCS)、50 GeV-シンクロトロン (Main Ring, MR) の3種類の加速器で構成されている<sup>[1]</sup>。J-PARC 全体の各加速器システムは、中央制御棟の計算機室 (CER) で作られる 12 MHz クロックを基準に制御されている。現在 J-PARC のリニアックでは、CER からの 12 MHz の信号に同期した 312 MHz の高周波 (RF) 基準光信号をリニアック最上流部で発生させ、この信号を各制御ステーションに分配している。この 312 MHz の基準光信号をもとに周波数 324 MHz の高周波を共振させ、RFQ、DTL、SDTL 加速空洞を使用して、181 MeV まで加速し、RCS に入射している<sup>[2, 3, 4, 5]</sup>。

リニアックでは、RCS 入射のエネルギーを 400 MeV にするための増強計画が進められている。リニアック増強の際には、共振周波数 324 MHz の現在稼働中の加速空洞に加え、共振周波数 972 MHz の ACS (Annular Coupled Structure) 加速空洞が新しく導入される。そのため、RF 基準信号は既存の加速空洞の制御用に 312 MHz と新しく増設される ACS 加速空洞の制御用に 960 MHz が必要となり、新しくリニアック RF 基準信号発生器を導入した。本稿では、新しいリニアック RF 基準信号発生器の紹介と更新した高周波基準信号システムの性能評価を報告する。

RCS からの入射ビームに対する要求の  $\Delta p/p$  で 0.1% 以下を満たすためには、リニアックの加速電場の位相誤差には  $\pm 1^\circ$  以内、振幅誤差には  $\pm 1\%$  以内が要求される。そのため、本システムにより分配される RF 基準信号は  $\pm 0.3^\circ$  以内の安定性が必要になる。

### 2. RF 基準信号発生器と分配システム

図 1 に更新したリニアック RF 基準信号発生器 (CDX-KEK021, CANDOX Systems 社製) のブロック図を示す。

\* futatsukawa.kenta@jaea.go.jp

リニアック RF 基準信号発生器は、RF 基準信号となる周波数 312 MHz、960 MHz の光信号を出力する。12 MHz 光信号を外部入力すると、312 MHz、960 MHz 光出力信号はその 12 MHz 外部入力信号に同期する。また、監視用に O/E 変換した 12 MHz の電気信号、312 MHz と 960 MHz の電気信号を出力させている。

このモジュールは、高精度の 80 MHz の温度制御型水晶発振器 (CDX-KEK021-PB02AA) を内蔵している。この 80 MHz の高周波をもとに 312 MHz と 960 MHz の信号を生成し、これらの信号を外部入力の 12 MHz の信号に対して位相ロックさせている。この 80 MHz 水晶発振器を使用する手法を採用することにより、外部入力の 12 MHz を単純にクロックアップするよりも位相雑音の低減を図っている。また、ペースチエ素子が配置され、PLL ユニット内の温度制御を行い、高周波信号の温度ドリフトを抑えている。

図 2 に 400 MeV のリニアック増強のための新しい高周波基準信号分配システムを示す。CER にある 12 MHz のマスタークロックは光信号に変換され、リニアックライストロンギャラリ上流部に伝送される。そこで、この光信号は位相調整され、その後 CDX-KEK021 の 12 MHz 光入力に入れられる。CDX-KEK021 からの 312 MHz と 960 MHz の信号は光アンプで増幅されたあと、光カプラで分岐され、各制御ステーションに分配されている。17 分岐・18 分岐光カプラは恒温槽の中に置かれ、温度依存性を抑制するようになっている。また、RF 基準信号の光伝送には、位相安定化光ファイバ (PSOF: Phase Stabilized Optical Fiber) を使用する。さらに、この光ケーブルを  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  に制御された冷却水配管とともに断熱ダクトに通し、恒温化を実現している<sup>[2]</sup>。光信号を受け取った各制御ステーションでは、RF&CLK ボードを用いてこの基準信号に対して位相ロックをかけ、純度の高い加速周波数 324 MHz と 972 MHz を発生させている<sup>[6]</sup>。

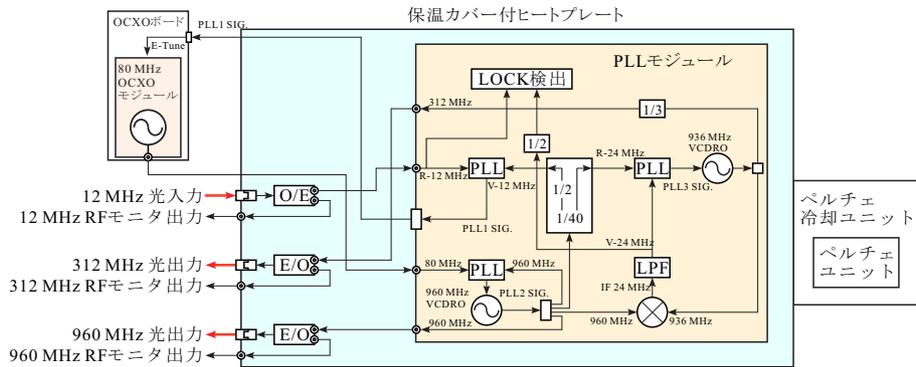


図 1: 更新したリニアック RF 基準信号発生器のブロック図。12 MHz の光信号を外入すると、その信号に同期した 312 MHz、960 MHz の光信号と監視用の電気信号を出力する。

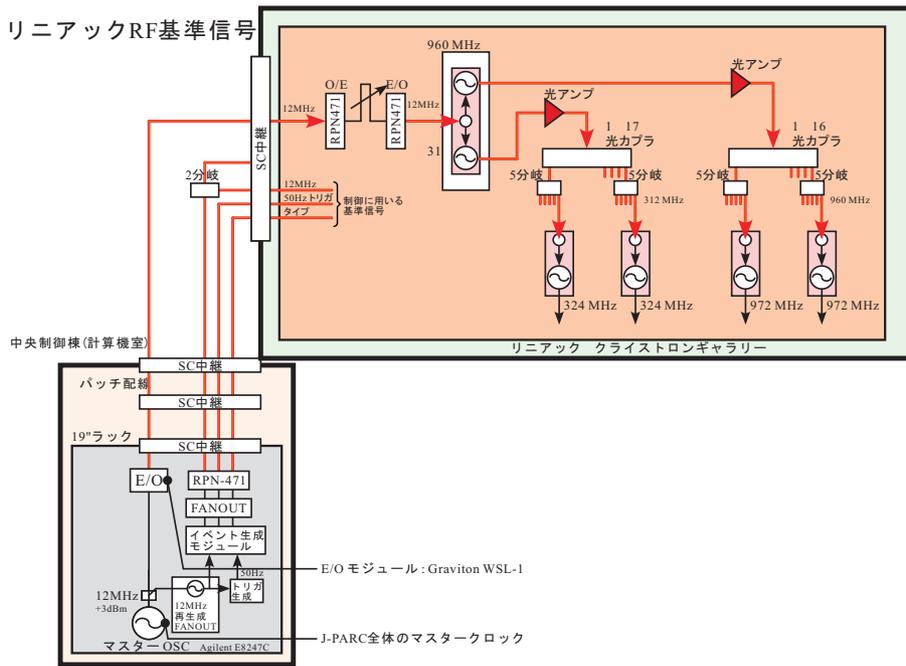


図 2: 更新した高周波基準信号分配システム。

### 3. 各制御ステーションでの光信号のレベル

各制御ステーションで、RF&CLK ボード<sup>[6]</sup>に入る直前の周波数 312 MHz と 960 MHz のリニアック高周波基準光信号のレベルを光パワーメータ (ML9002A, Anritsu 社製) を用いて測定した。図 3 に各制御ステーションでの光信号のレベルを示す。図中の黒三角は既存の基準信号分配システムを使用していたとき (2011 年 6 月) の 312 MHz 基準信号の光信号のレベル、赤丸は 400 MeV 増強用に更新された基準信号分配システムを使用したときの (a) 312 MHz と (b) 960 MHz の光信号のレベルを表す。周波数 312 MHz の分岐先では  $-3.1 \pm 0.5(\sigma)$  dBm、周波数 960 MHz の分岐先では  $-3.1 \pm 0.4(\sigma)$  dBm になり、非常に良い当分配性を実現できている。RF&CLK ボードの受信レベルは  $-3 \pm 1$  dBm であるので、正常な範囲に収まっていることが確認できた。

### 4. 位相雑音測定

シグナルソースアナライザ (E5052B, Agilent Technologies 社製) を用いて、リニアック RF 基準信号発生器の出力の位相雑音を測定した。RF 基準信号発生器の出力は、外部入力 12 MHz を位相ロックさせない状態では位相雑音ジッタ (積分領域 10 Hz-10 MHz) が 78 fsec (312 MHz) と 41 fsec (960 MHz) であるのに対して、位相ロックさせた状態では 265 fsec(312 MHz) と 261 fsec(960 MHz) と 3 倍以上大きな値を示した。これは、外部入力の CER からの 12 MHz 基準信号の精度が低いことが影響していると考えられた。

そこで、CER のマスタークロックからリニアック RF 基準信号発生器までの 12 MHz の信号の経路と使用しているモジュールの最適化を行った。既存のリニアックのシステムは、CER からの 12 MHz 光信号はリニアックの上流部で加速器を制御している信号と RF 基準信号

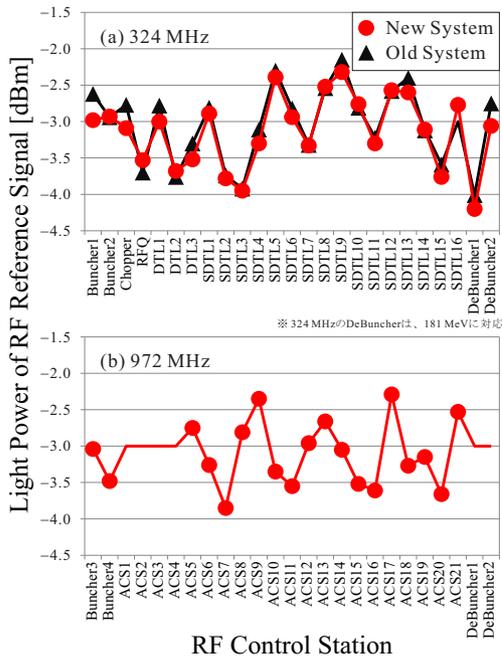


図 3: 各制御ステーションでの光信号レベル。黒三角は既存の RF 基準信号分配システムの際の光信号レベル、赤丸は更新された分配システムの際の光信号レベルを示す。

に光カプラで分岐していた。しかし、このシステムでは RF 基準信号発生器側には不要なモジュールを通過するため、不要な位相雑音の増加を招いていると考えられた。そこで、CER において早い段階で 12 MHz の信号を加速器を制御している信号と RF 基準信号に分岐し、RF 基準信号に用いる信号は通過モジュールを必要最低限に減らす工夫をした。また、O/E 変換や E/O 変換などの必要なモジュールに関しては、同機能を持つモジュールの中から位相雑音の小さいを選別した。

経路とモジュールの最適化前後の位相雑音分布を図 4 に示す。図中の黒線は最適化前の位相雑音を、赤破線は最適化後の位相雑音を示している。経路とモジュールの最適化により、周波数 (a) 312 MHz と (b) 960 MHz 共にオフセット周波数が小さい領域での位相雑音を抑制することができた。また、比較のために現行までの 312 MHz の RF 基準信号の位相雑音を図 4(a) に緑点線で示す。更新した分配システムの方が、オフセット周波数 10 kHz 以下の広域に渡って位相雑音を抑制できていることが分かる。この抑制は経路とモジュールの最適化の影響だけではなく、内部に水晶発振器を有する新しいリニアック RF 基準信号発生器の性能の高さに由来する。

位相雑音を 10 Hz から 1 MHz までの領域を積分した値を表 1 に示す。最終的に、位相雑音ジッタは周波数 312 MHz と 960 MHz でそれぞれ 41 fsec と 41 fsec になった。これは位相で表すと、周波数 312 MHz で 0.005°、周波数 960 MHz で 0.012° になる。要求されている位相安定性 ±0.3° と比較して 1 桁以上小さい値となり、本分配システムが十分な性能を持っていることが確認できた。また、経路とモジュールの最適化が位相雑音ジッタを 5 分の 1 以下に抑制していることが定量的にこの表

に示されている。また、既存の分配システムの 312 MHz の基準信号を同領域にわたって積分すると、位相雑音ジッタは 1.7 psec になる。400 MeV 増強用に更新した基準信号分配システムが、2 桁以上改善していることが分かる。

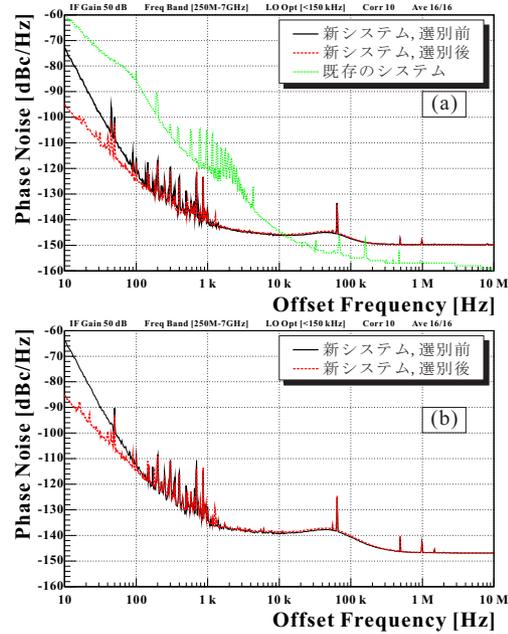


図 4: 高周波位相基準信号の位相雑音。黒線は経路とモジュールの最適化前の赤破線は最適化後の位相雑音を示している。(a) は 312 MHz の基準信号、(b) は 960 MHz の基準信号を表す。

表 1: RF 基準信号発生器の位相雑音ジッタ

信号	位相雑音ジッタ (積分領域 10 Hz-1 MHz)	
	最適化前	最適化後
312 MHz	243 fsec	41 fsec
960 MHz	237 fsec	41 fsec

### 5. 324 MHz と 972 MHz の同期

RF&CLK ボードの出力をサンプリングオシロスコープ (86100B, Agilent Technologies 社製) で測定し、周波数 324 MHz と 972 MHz の同期を確認した。この際に、光アンプと光カプラは使用せず、リニアック RF 基準信号発生器の光信号のレベルを調整した上で RF&CLK ボードに直接入力した。

図 5 にサンプリングオシロスコープの結果を示す。このとき、トリガには 324 MHz の信号を入れ、972 MHz の信号を測定している。図中の (a) から 324 MHz と 972 MHz の 2 種類の周波数の信号が同期している様子が確認できる。

図 5(b) はゼロクロス法によりトリガの 324 MHz と 972 MHz の信号の位相差を時間差分布として表している。理想的にはこのヒストグラムは 324 MHz と 972 MHz

のジッタによる不定性しか持たないはずであるが、2本のピークが確認できる。図中の中央の大きい方の主ピークの幅は約 1.3 psec ( $\sigma$ ) である。このサンプリングオシロスコープによる測定の分解能が 1.2~1.3 psec 程度であることを考慮すると、位相差の分解能は 1 psec 以下になる。これは、RF 基準信号分配システムの要求性能 (972 MHz で 1 psec 以内) を満たしている。問題は主ピークの右隣 (時間的に遅延) にある小さなピークである。積分量としては主ピークの 20 分の 1 程度と多くはないが、中心値で主ピークと約 5 psec 離れている。これは、324 MHz 用の RF&CLK ボードの出力側に原因があることまでは判明しているが、解決策は今後の課題となる。

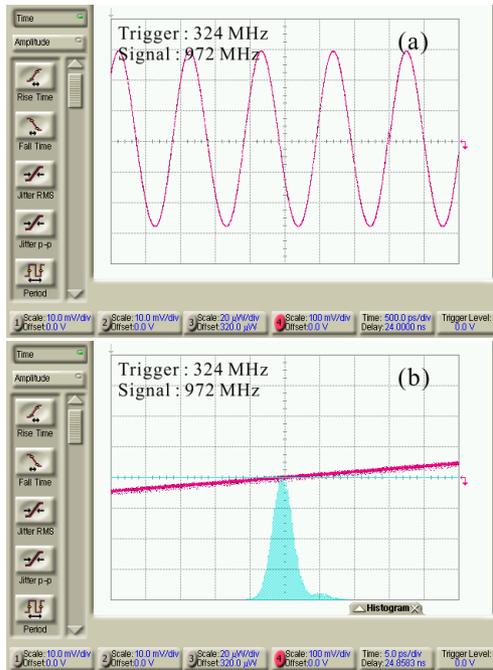


図 5: オシロスコープによる測定結果。トリガは 324 MHz の信号を入れ、972 MHz の信号を測定した。(a) から 324 MHz と 972 MHz の信号が同期しているのが確認できる。(b) はゼロクロス法による位相差のヒストグラムを表す。

## 6. まとめ

リニアックの 400 MeV 増強に向けて、高周波基準信号システムについて性能評価を行った。新しいリニアック高周波基準信号発生器と J-PARC 全体の基準信号 12 MHz から RF 基準信号発生器までの経路とモジュールを最適化することにより、位相雑音ジッタを RF 基準信号発生器の出力で 50 fsec 以下に抑えることができた。これは要求される位相安定性の精度より、1 桁以上小さい値である。また、RF&CLK ボードの出力で周波数 324 MHz と周波数 972 MHz の高精度の同期を確認した。高周波基準信号システムが要求される位相安定性を満たしていることが確認できた。

但し、周波数 324 MHz の RF&CLK ボードの出力信号が約 5 psec シフトする現象が確認された。今後も、原

因究明と改善を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] <http://www.j-parc.jp>
- [2] T. Kobayashi, et al., “RF Reference Distribution System for J-PARC”, Proc. of the Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 366-368, 2003
- [3] T. Kobayashi, et al., “RF and Timing Reference Distribution System for J-PARC Linac”, Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, pp. 320-322
- [4] T. Kobayashi, et al., “PERFORMANCE OF RF REFERENCE DISTRIBUTION SYSTEM FOR THE J-PARC LINAC”, Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, pp. 394-396
- [5] T. Kobayashi, et al., “Performance of RF Reference Distribution System for the J-PARC Linac”, Proc. of LINAC 2006, pp. 583-585, 2006
- [6] S. Michizono, et al., “J-PARC Linac Low Level RF Control”, Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, pp. 296-298