

J-PARC リニアック高周波機器の湿度依存性の試験 INVESTIGATION INTO HUMIDITY CHARACTERISTICS OF RF DEVICES AT J-PARC LINAC

二ツ川健太^{*A)}, 方志高^{A)}, 福井佑治^{A)}, 篠崎信一^{B)}, 平根達也^{B)}, 佐藤福克^{C)}

Kenta Futatsukawa^{*A)}, Zhigao Fang^{A)}, Yuji Fukui^{A)},

Shinichi Shinozaki^{B)}, Tatsuya Hirane^{B)}, Yoshikatsu Sato^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

^{C)} Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.

Abstract

In the J-PARC linac, the digital feedback system was implemented to satisfy the requirement of the RF system. However, it was found that the output momentum in the linac was drifted by the effect of the humidity at the klystron gallery. Therefore, we measured the humidity characteristics of the RF devices and these results with a few degrees were one order larger than the requirement ($\pm 0.3\%$ in amplitude, ± 0.3 deg. in phase). Although the moistureproof treatment was performed on the RF devices, the result was a reduction of 20% of the phase drift at maximum. We will plan the improvement of the RF reference distribution system, one 324MHz station and one 972MHz installed in the condition of the constant humidity to estimate the effect of the humidity. In the future, the phase drift will be tuned in the improved system.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、2018年の夏季シャットダウン後の立上げから、ビーム電流を設計値の 50 mA に増強して利用運転を行っている。また、ビーム試験では 60 mA のビームの供給に成功している [1]。リニアックの低電力高周波制御 (Low Level RF: LLRF) システムでは、パルス内の振幅と位相の安定度の要求を満たすためにデジタルフィードバック (Digital FeedBack: DFB) を実装している。その結果、一見すると問題なく動作しているように見えていた。しかし、最近、湿度の変動に依存してリニアック出射の運動量が変動していることが明らかになった。LLRF の高周波機器は、設計段階で湿度特性に対しては対策をとってきたが、湿度特性に対しては全く考慮してこなかった [2]。

LLRF の高周波機器が設置されているリニアック棟のクライストロンギャラリーでは、温度 27 ± 2 °C を満たすように空調システムを設計・運用しているが、湿度に関しては成り行きで管理していない。その結果、ギャラリーの 1 年間の湿度は約 15% から 65% に変動していた (図 1)。この湿度の変動範囲に対して、高周波機器の湿度特性を測定して、その依存性が要求性能 (振幅 $< 0.3\%$, 位相 < 0.3 deg.) に対して大きい場合は対策を考える必要性が生じている。

2. 湿度特性試験

湿度特性試験において、恒温恒湿槽が自由に使用できる環境になかったことや 1 回の試験期間が 10 日程度は必要なこともあり、測定器や測定環境が安定するまでの時間を十分に確保できていない。また、ほとんどの場合で再現性の確認などを行うことができ

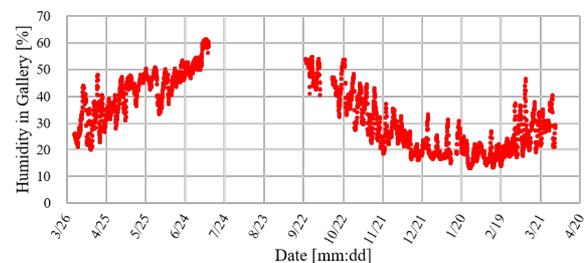


Figure 1: Humidity fluctuation of 2017 fiscal year at the klystron gallery.

ていない。本測定の目的は、各機器の湿度特性をオーダーや有効数字 1 桁程度で理解して、湿度対策の優先順位や方向性を決定することにある。

2.1 高周波基準信号分配システム機器

J-PARC リニアックでは、ギャラリーの上流で 12MHz の J-PARC のクロックに同期した 312MHz と 960MHz の基準信号を生成して、光信号で各ステーションに分配するシステムになっている [3]。今回、基準信号を生成しているリニアック高周波基準信号発生器 (CDX-KEK021) の湿度特性を調査した。試験では、2 台の CDX-KEK021 を用意して、恒温槽に設置して一定環境下の CDX-KEK021 の信号と恒温恒湿槽に設置して湿度のみを変化させた CDX-KEK021 の信号を比較した (図 2¹)。図 3 に CDX-KEK021 の湿度特性の測定結果を示す。温度 27 °C の条件下で湿度を 30% から 65% に変化させたときに、312MHz 信号は -1.4 deg., 960MHz 信号は -3.2 deg. の位相ドリフトが測定された。この結果から、湿度の影響は 27 ± 2 °C

¹ ケーブル等を除き、他の湿度特性も類似のセットアップで測定されている。以降、位相ドリフトは信号の周波数に対する位相の変動として定義している。

* kenta.futatsukawa@kek.jp

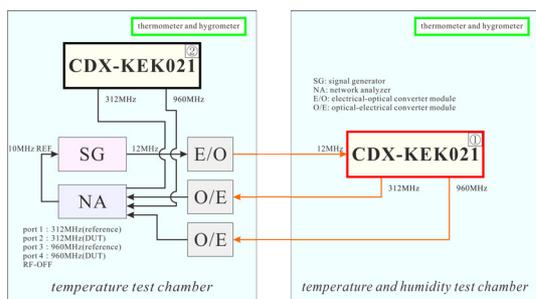


Figure 2: Setup for the humidity characteristics test of the J-PARC linac master OSC (CDX-KEK021).

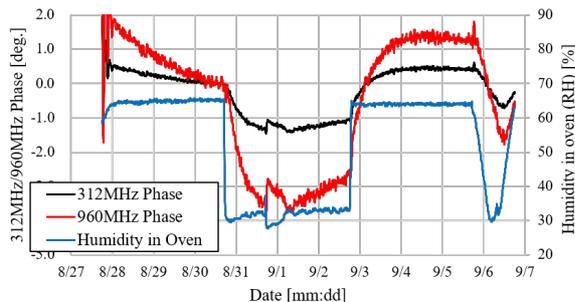


Figure 3: Humidity characteristics of CDX-KEK021. When the relative humidity fluctuated by 30% and 65%, the phase drift at 312MHz and 960MHz were -1.4 deg. and -3.2 deg., respectively.

で制御されたギャラリの環境において、温度の影響よりも遙かに大きい。また、湿度変動は、変動が落ち着くまでの時間が長く、特性試験の1点の測定に数日が必要になることが分かる。

シングルモードの汎用光ファイバ (コア: SiC, 0.125 mm) の湿度特性試験の結果、湿度が 10% から 65% に変動したときに 972MHz で -0.19 deg./10m のドリフトが測定された。盤内配線の 1~2 m の光ファイバにおいてもその影響は無視できない。また、J-PARC リニアックで使用している位相安定化ファイバ (Phase Stabilized Optical Fiber: PSOF) の湿度特性も測定されており、湿度 30% から 50% の変動において 11.150 ps/km となる [4]。これは、960MHz で 3.86 deg./km に相当し、J-PARC リニアックの基準信号分配系に使用している最長で約 300 m の光ファイバに当てはめると、その影響は大きい。この結果より、湿度の影響を受けるとされる誘電率とは一見無関係の光ファイバにおいても、無視できない量の位相ドリフトの原因になり得ることが明らかになった。

2.2 DFB 機器

J-PARC リニアックにおいて、DFB システムに実装されている 324MHz と 972MHz の RF&CLK board (CDX-KEK005, CDX-KEK018) と IQ-modulator/downconverter board (CDX-KEK004, CDX-KEK019) の湿度特性を評価した。

図 4 に加速周波数 324MHz のステーションで使用されている CDX-KEK004 の湿度特性試験の結果

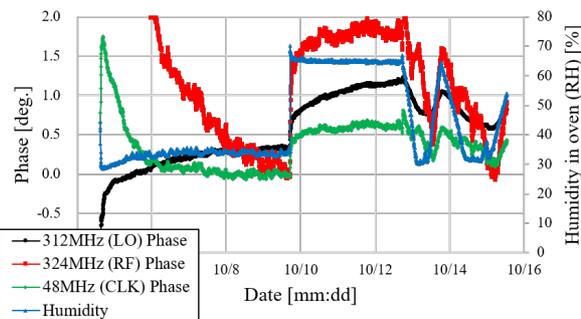


Figure 4: Result of the humidity characteristics test of the 324MHz RF&CLK board (CDX-KEK005). When the relative humidity fluctuated by 30% and 65%, the phase drift at 324MHz, 312MHz and 48MHz were 1.8 deg., 1.0 deg. and 0.8 deg., respectively.

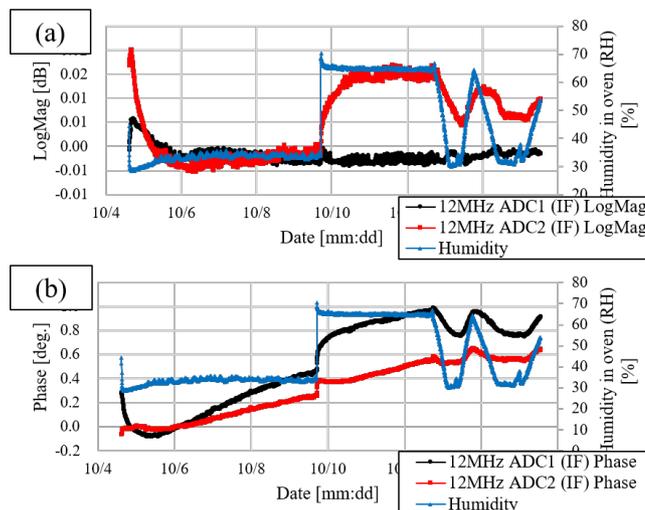


Figure 5: Correlation between the humidity and phase drift of the downconverter of 324MHz in CDX-KEK004. When the relative humidity fluctuated by 30% and 65%, the amplitude variation (a) of 0.02dB and the phase drift (b) of 0.2 deg. were obtained, respectively.

を示す。温度 27 °C に一定して湿度 30% から 65% に変動させたときに、324MHz RF, 312MHz LO (Local Oscillator) において 1.8 deg., 1.0 deg. の位相ドリフトが測定された。48MHz CLK (CLock) は、同条件で 0.6 deg. 変動している。また、CDX-KEK004 に内蔵された downconverter の湿度特性の測定結果を図 5 に示す。定量的な評価が難しいが、同条件で 12MHz IF の振幅で 0.02dB 程度の変動、位相で 0.2 deg. 程度のドリフトが測定された。ADC1 と ADC2 は基板上の配線の長さなどは異なるが、基本的には同じ回路構成をしている。しかし、ADC1 と ADC2 でチャンネル依存性があることという結果になった。

図 6 に加速周波数 972MHz のステーションに実装されている CDX-KEK018 の湿度特性試験の結果を示す。温度を 27 °C に固定して湿度 30% から 65% に変化させたときに、972MHz RF, 960MHz LO 及び 48MHz CLK 出力において 2.3 deg., 1.8 deg. 及び

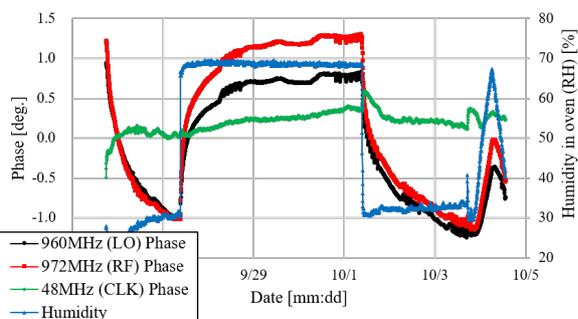


Figure 6: Result of the humidity characteristics test of the 972MHz RF&CLK board (CDX-KEK018). When the relative humidity fluctuated by 30% and 65%, the phase drift at 972MHz, 960MHz and 48MHz were 2.4 deg., 2.0 deg. and 0.2 deg., respectively.

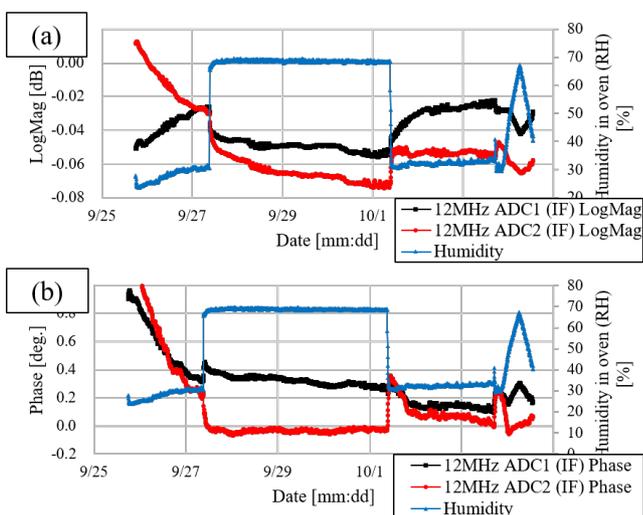


Figure 7: Correlation between the humidity and phase drift of the downconverter of 972MHz (CDX-KEK019). When the relative humidity fluctuated by 30% and 65%, the amplitude variation (a) of -0.03dB and the phase drift (b) of -0.2deg. were obtained, respectively.

0.4 deg. 位相がドリフトするという結果が得られた。CDX-KEK019 に内蔵した downconverter においては、同条件で 12MHz IF の振幅で -0.03dB の変動、位相で -0.3deg. の位相ドリフトが測定された (図 7)。CDX-KEK004 の結果と同じように、ADC1 と ADC2 のチャンネル依存性が小さくないことは明確である。

2.3 その他の高周波機器

その他の高周波機器の湿度特性の測定結果を後述する。ケーブルを除いて、これらの特性はフィードバックに影響することはないが、モニタとしての信頼度を証明する上で重要と考えている。

J-PARC リニアックでは、隣接する空洞との位相差を比較している空洞間位相監視モニタ (324MHz: T074-1099A, 972MHz: T074-10BBA) を導入している [5]。湿度を 35% から 70% に変化させたときに、T074-1099A のチャンネル 1 と 2 において振幅変動が

両方 0.1%, 位相ドリフトが 0.16 deg. と 0.18 deg. という結果が得られた。また、T074-10BBA のチャンネル 1 と 2 において同条件で振幅変動が両方 $<0.1\%$, 位相ドリフトが両方 0.09 deg. という結果となった。両モニタにおいて、各チャンネルの湿度の影響による変動は小さくはないが、チャンネル依存性は小さく、位相差とすることではその影響はキャンセルできそうである。従って、このモニタの位相差はギャラリの環境でのドリフトを $<0.1\text{deg.}$ になり、基準の一つにできる可能性に期待している。

クライストロン出力、空洞の入射・反射パワーや空洞のピックアップを測定する VSWR メータを実装している。このモニタの湿度特性を測定したところ、湿度を 35% から 70% に変化させたときに、324MHz VSWR メータ (A170-3099A) と 972MHz VSWR メータ (KJLC-VSMD4) の振幅変動は、それぞれ 0.13% と 0.25% という結果が得られた。

ビームの位相を測定する FCT (Fast Current Transformer) の信号の位相を電圧変換するために NIM モジュールの位相検出器を使用している。温度 27°C で湿度を 15% から 65% に変化させたときに、324MHz 用の位相検出器 PDU-K324SD または PDU-K32SC の位相ドリフトは $0.03\sim 0.05\text{deg.}$ という良い結果が得られた。しかし、温度変動はモジュール依存性が大きく、 -0.15deg./°C から $+0.01\text{deg./°C}$ という結果になり、基準とすることは難しいと考えている。972MHz 用の位相検出器 PDU-K972SE-2 に関しては、湿度を 40% から 65% に変化させたときに、位相ドリフトは -0.09deg. となった。また、位相検出器の出力 DC 信号をデジタル化する ADC (PLC-F3AD08-5R) の湿度特性は、温度 27°C で湿度を 40% から 80% に変化させたときでも $<1\text{mV}$ となり、上記の位相検出器を使用した場合の位相換算で $<0.1\text{deg.}$ であった。

図 8 に信号発生器の 972MHz の信号を 4 分岐して、ネットワークアナライザ (NA: Network Analyzer) の E5061B と N9913A の各 2 ポートに入力して、Vector Voltmeter 機能で位相差を測定した結果を示す。ケーブルの影響を抑えるため短い等長ケーブルを使用して、測定器類はギャラリの環境下に設置している。E5061B は大きな湿度依存性があり 0.2 deg. 程度の変動があるのに対して、N9913A では優位な位相ドリフトを観察はできなかった。同シリーズの N9917A の位相変動は、湿度を 15% から 65% に変化させたときでも周波数 972MHz で $<0.01\text{deg.}$ という結果になった。この FieldFox シリーズの NA で位相差を測定した場合は、その測定値は外乱に対して強く高い信頼度があると考えている。

ケーブルの湿度特性試験の結果を表 1 に示す。加速器トンネルとギャラリの中に敷設させている LDF2RK-50 に関しては、湿度依存性は大きくない。また、L3BT の DB2 を除いてケーブル長の差は最大でも 10 m あることを考慮すると、ピックアップの信頼度は悪くはないと思われる。一方で、加速周波数が 324MHz から 972MHz へ変わる箇所、及び DB2 においては注意する必要がある。このケーブルは、湿度を上げたときと下げたときで結果が異なっているため、このケーブルの重要性を考慮すると再現性の確

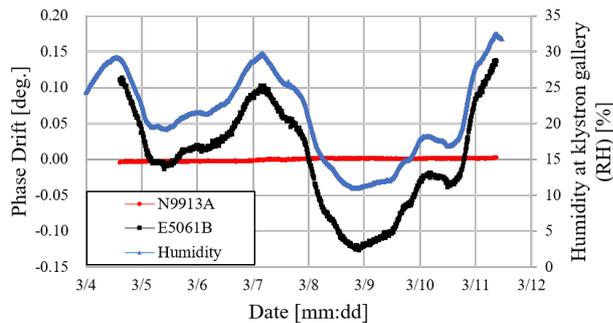


Figure 8: Results of the humidity characteristics test of N9913A and E5061B.

認を行いたいと考えている。リニアックの高周波機器で主に盤内配線に使用している S_04272_B の結果より、盤内のケーブル長さ 2 m と仮定しても 972MHz で 0.1 deg. 程度の位相シフトとなり、決して小さな値ではない。更に追加でケーブルの湿度特性試験を実施して、良い結果が得られた場合は交換も検討している。

Table 1: Humidity Characteristics of Cables

Cable Name	Phase Drift [deg./10m]	
	RH10% → 65%	RH65% → 10%
LDF2RK-50	-0.15 deg.	+0.03 deg.
S_04272_B	-0.55 deg.	+0.30 deg.
5B-322-27-27	-0.34 deg.	+0.74 deg.
Sucoflex106	-0.42 deg.	-
Sucoflex104	+0.45 deg.	-
Optical Fiber	-0.19 deg.	-

3. 現在までの湿度対策

3.1 精密空調器の導入

CDX-KEK021 が設置されている 19 インチラックに温度及び湿度を一定にさせる目的で精密空調器 PAU-A1400S-HC を導入している。この精密空調器の導入により、ラック下部、中部及び上部で湿度の変動は外気の湿度の変動に対して 20%, 7% 及び 10% に抑制された。一方で、これは既設のラックに精密空調器を設置したときの結果であり、2019 年度の夏季シャットダウン中に気密性の高いラックに交換する予定である。

3.2 防湿処理

既存の CDX-KEK021, CDX-KEK018 及び CDX-KEK019 に対して、アクリル樹脂を主成分としたエアゾールタイプの防湿スプレー (HumiSeal 1B66NS) の散布を行い、防湿処理の効果を検証した。

CDX-KEK021 に対して、防湿スプレーの前後で、温度 27 °C で湿度 10% から 90% へ変えたときに、312MHz 信号の位相ドリフトが -1.8 deg. から

-1.4 deg. に、960MHz 信号において -4.8 deg. から -4.7 deg. になった。これは測定誤差や再現性を考慮すると、防湿処理の効果があったとは言い難い。一方で、ドリフトが落ち着くまでの時間は、処理前は約 20 時間であったが、処理後には約 43 時間にあり、2 倍以上遅延される結果となった。CDX-KEK018 の試験では、同条件で防湿処理前で、972MHz, 960MHz 及び 48MHz の位相ドリフトは -3.90 deg., -3.25 deg. 及び -0.1 deg. になった。処理後には、位相ドリフトは -4.00 deg., -3.20 deg. 及び +0.8 deg. という結果となった。この結果から、位相ドリフトの絶対値及び変動が落ち着くまでの時間も防湿処理の前後で差が見られなかった。CDX-KEK019 において、同条件の防湿処理前で、12MHz IF 信号の振幅の変動が +0.022dB, 位相ドリフトが -1.09 deg. となった。処理後には、振幅の変動が +0.027dB, 位相ドリフトが -0.88 deg. となり、位相の変動を 20% 低減させることができた。また、変動が落ち着くまでの時間は、処理前で 11 時間であったが、処理後には 34 時間に約 3 倍遅延させることができた。

防湿処理の効果が大きく、改善が期待できる場合は 2019 年度の夏季シャットダウン中に DFB に関係するモジュールに対して防湿処理を実施する予定であった。今回の結果から若干の改善しか期待できないことから、既存の全モジュールに対して防湿処理をする作業は見送ることとした。

4. 今後の湿度対策

現在までの湿度特性の測定結果から、各高周波機器及びケーブルの湿度の影響は大きく、無視できないことは明白である。しかし、今からギャラリの全域を恒温恒湿とすることは困難であり、現実的とは言えない。そこで、局所的な恒温恒湿環境にシステム上の重要な高周波機器を設置して、その機器で測定した値からドリフト量を見積もってダイナミックに調整するという方式を検討している。

図 9 に高周波基準信号分配システムの改修案を示す。PSOF 以外は、全ての機器を恒温恒湿槽の中または精密空調器が設置された 19 インチラック内に設置させる。312MHz と 960MHz の位相関係をオシロスコープで測定して、優位な変動があった場合は光遅延器で調整する。現在、オシロスコープで高精度の位相測定が可能かという点と、オシロスコープの湿度特性を調査して機種を選定している。また、PSOF が湿度特性で変動した分は、信頼度の高い N9913A を用いて、基準と既設の戻り光ラインの位相差を測定して算出する。位相の変動量に関しては、各ステーションの DFB で位相を回転させることで補正を行う予定である。また、位相ドリフトはゆっくりした変化であり、光スイッチを用いて O/E モジュールの数を減らして、O/E 依存性を抑えるとともに、コスト削減をしたいと考えている。現在、光スイッチの性能評価を行っており、要求性能を満たすことができるかを検討している。これにより少なくとも基準信号は要求性能を満たす精度で各ステーションに分配できると考えている。2019 年の 10 月には模擬システムを

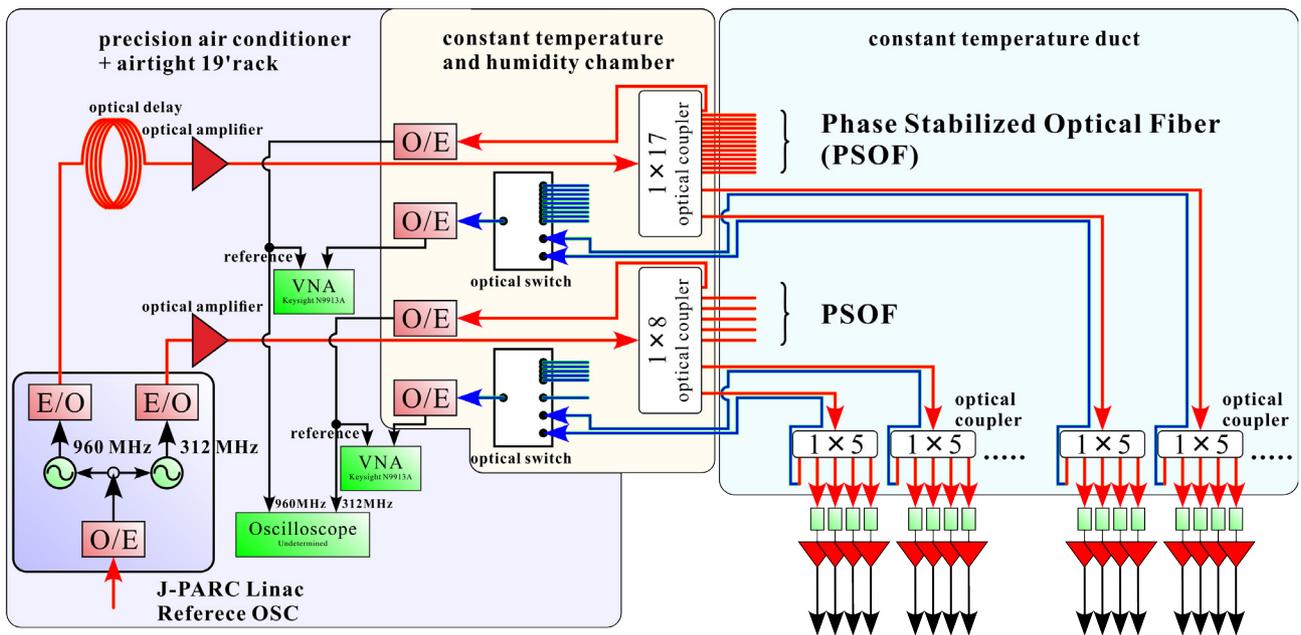


Figure 9: Improvement plan of the RF reference signal distribution system.

組み上げ、試験を実施する予定である。

2019年度の夏季シャットダウン中に324MHz空洞の最下流のSDTL16ステーションと972MHz空洞の最上流のMEBT2B1ステーションを機密性の高い19インチラックに交換して、精密空調器を導入する予定である。これらのステーションに、SDTL14とSDTL15のピックアップのモニタ信号を敷設して、SDTL16と比較することで精密空調器の有無での324MHz系の位相ドリフトの違いを測定して補正する予定である。MEBT2B2とACS1ピックアップのモニタ信号も敷設してMEBT2B1と比較することで精密空調器の有無での972MHz系の位相ドリフトの違いを測定して補正する予定である。また、SDTL16とMEBT2B1の比較をすることで、恒温恒湿の環境での324MHzと972MHzの位相関係を補正できると考えている。

2019年度の夏季シャットダウン中には、基準として期待ができる空洞間位相監視モニタにおいて全ステーション(48台)の湿度特性を測定することを予定している。

今度の高周波機器を製作する上での基本情報として、2019年度に湿度特性・温度特性の高周波用の回路基板の種類や高周波ケーブルの種類による違いを調査することを予定している。今後高周波機器を製作する場合は、この調査結果を反映させて湿度特性・温度特性の良い機器にしたいと考えている。また、上記でも述べたが、ケーブルの試験結果次第では、DFBに参与する盤内ケーブルの交換を検討する。

5. まとめ

J-PARC リニアックでは湿度により運動量変動が問題になっている。そこで、様々な高周波機器の湿度特性を測定した結果、DFBに参与している機器も含

めて要求性能より1桁大きな位相ドリフトや無視できない振幅の変動があった。

現存の高周波機器に防湿処理を行ったが芳しい結果を得られていない。

今後は、局所的な恒温恒湿環境にシステム上の重要な高周波機器を設置して、その機器で測定した値からドリフト量を見積もってダイナミックに調整するという方式を検討している。

参考文献

- [1] H. Oguri, Proceeding of LINAC 2018, Beijing China, Sep. 16-21, 2018, pp. 29-34.
- [2] Z. Fang *et al.*, Proceedings of 2nd International Symposium on Science at J-PARC, JPS Conf. Proc. 8, 011001 (2015).
- [3] K. Futatsukawa *et al.*, Proceedings of IPAC 2012, New Orleans, USA, May 20-25, 2012, pp. 2630-2632.
- [4] N. Liu *et al.*, LINAC 2018, Beijing China, Sep. 16-21, 2018, pp. 230-232.
- [5] K. Futatsukawa *et al.*, Proceedings of IPAC 2013, Shanghai, China, May 12-17, 2013, pp. 2738-2740.