

J-PARC リニアック LLRF 制御システムにおける恒湿環境の構築

CONSTRUCTION OF CONSTANT HUMIDITY ENVIRONMENT FOR LOW-LEVEL RF SYSTEM AT J-PARC LINAC

福井佑治^{#, A)}, 方志高^{A)}, ニツ川健太^{A)}, 溝端仁志^{A)}, 篠崎信一^{B)}, 不破康裕^{B)}, 平根達也^{B)},
佐藤福克^{C)}, 岩間悠平^{C)}

Yuji Fukui^{#, A)}, Zhigao Fang^{A)}, Kenta Futatsukawa^{A)}, Satoshi Mizobata^{A)}, Shinichi Shinozaki^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{B)},
Tatsuya Hirane^{B)}, Yoshikatsu Sato^{C)}, Yuhei Iwama^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

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

Abstract

The fluctuation of the beam momentum which injected from Linac to 3GeV synchrotron depends on humidity, which has been recognized since 2017. The RF equipments of the Linac are located in the klystron gallery and it is considered that the change of the gallery humidity influences the fluctuation of beam momentum. The gallery temperature is controlled within $27 \pm 2^\circ\text{C}$. However, the humidity in the gallery is not controlled, so the annual humidity fluctuation in the gallery is between 15% and 65%. Therefore, we have measured the correlation between humidity and LLRF equipments/cables characteristics since 2018. On the other hand, we have built a local constant humidity environment using the precision air conditioner. Until now, we have installed air conditioner and the airtight 19 inch rack at 3 stations: one station is used for Linac reference signal oscillator, and the others are used for LLRF control system for SDTL/ACS cavity. By using the airtight rack, we could reduce humidity fluctuations to 1/20 or less compared to the previous rack. In this paper, we report the humidity stabilization measures implemented in the past 2 years and future plans.

1. はじめに

J-PARC リニアックは、高周波四重極リニアック (Radio-Frequency Quadrupole linac: RFQ)、ドリフトチューブリニアック (Drift-Tube Linac: DTL)、機能分離型ドリフトチューブリニアック (Separate-type DTL: SDTL)、および環結合型結合空洞リニアック (Annular-Coupled Structure linac: ACS) で構成されておりピーク電流 50 mA の負水素イオンをリニアック出射部で 400MeV まで加速している。これらの各空洞に対して低電力高周波制御システム (Low-Level RF: LLRF) が計 49 台設置されており、デジタルフィードバックシステム (Digital Feedback: DFB) によって加速電場の振幅、位相が制御されている。加速空洞内の振幅、位相は DFB によってビーム加速に要求される範囲内で運転されているため、これまで特に問題が無いように思われていたが、最近になってリニアックから出射されるビームの運動量が湿度の変動に伴って変化していることが明らかになった。LLRF 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は、室温が $27 \pm 2^\circ\text{C}$ を満たすように空調システムを設計・運用しているが、湿度に関しては制御していない[1]。その結果、クライストロンギャラリの年間を通じた湿度は Fig. 1 に示すように約 15% から 60% で変動していた。そこで 2018 年から LLRF で使用する高周波機器や高周波ケーブルの湿度特性を測定するとともに、湿度対策が必要な機器に対して精密空調機を使用した局所的な恒温恒湿環境の構築を進め

てきた。現在は、高周波基準信号発生器を設置している 19 インチラックおよび SDTL/ACS の各空洞からそれぞれ 1 箇所、LLRF 機器用ラックを選び、これらに精密空調機および高気密ラックを導入して運用を行っている。本件では、LLRF 高周波機器に対する恒温恒湿環境の構築に関して、これまでの経緯と今後の対応について報告する。

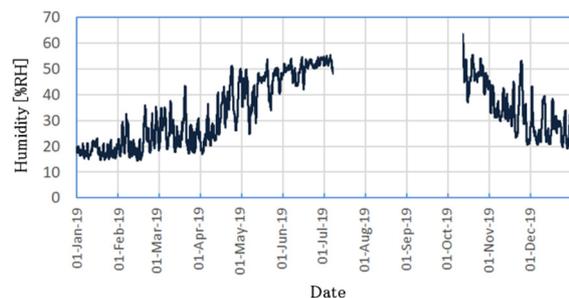


Figure 1: Humidity fluctuation at the klystron gallery in 2019.

2. 湿度安定化対策

2.1 精密空調機と密閉型ラックの導入

クライストロンギャラリにおける高周波機器の配置を Fig. 2 に示す。全長約 320m のフロアに 19 インチラックに収められた 49 台 (324MHz: 24 台、972MHz: 25 台) の LLRF 制御機器が設置されている。ギャラリ最上流部にある高

[#] yfukui@post.j-parc.jp

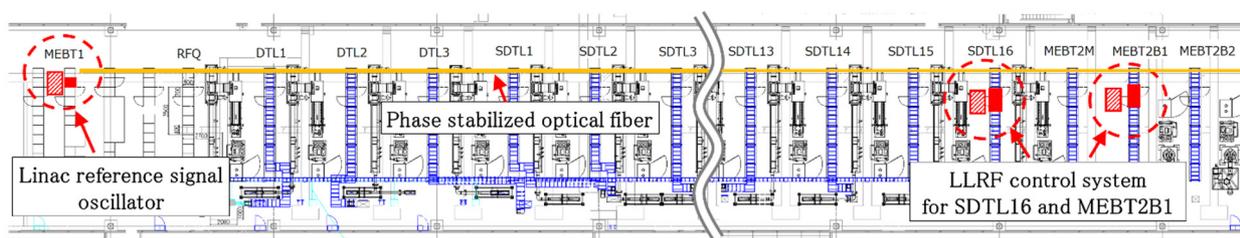


Figure 2: Schematic layout of RF system at klystron gallery. The area enclosed by the dotted line is the place where humidity measures were taken.

周波基準信号分配システム用ラックでは、中央制御棟のマスターオシレータから配信される12MHzのクロックを受信し、リニアック高周波基準信号発生装置で312MHzと960MHzの基準信号を生成し、光信号で各ステーションに分配している[2]。

これまでの湿度対策においてLLRF制御システムで使用している3箇所の19インチラックに対して湿度対策を行っている。最初は2018年10月にMEBT1ステーションに設置されている高周波基準信号分配システムラックに精密空調機(PAU-A1400-S-HC)を設置した。2019年の夏季メンテナンスの際にはSDTL16およびMEBT2B1ステーションのLLRF制御機器用ラックに精密空調機(PAP05A1-K)を設置するとともに従来のラックから密閉型ラックへの交換を行った。Figure 3にMEBT2B1ステーションに導入した精密空調機と密閉型19インチラックの構成を示す。ラックと空調機の間をダクトホースで接続してラック下部と上部から給気と排気を行い、調整空気を循環させている。

密閉型19インチラックは今回の湿度対策のために制作したもので、ラックと台座の間や扉へのパッキンの取り付け、ケーブル取り合いの孔をケーブル断面積に合わせて穿孔するなどして、ラック外との空気の入りを抑えるように設計している。MEBT1では2018年に空調機を導入してから2019年にこの密閉型ラックを導入するまでの間、従来のラックを改造して使用していた。パテやテープを使用して隙間を塞ぐことで空気の入りをある程度抑えることはできたが構造的に限界があった。密閉型ラックに交換することによって湿度の変動幅を半分以下に抑えることが可能になった。

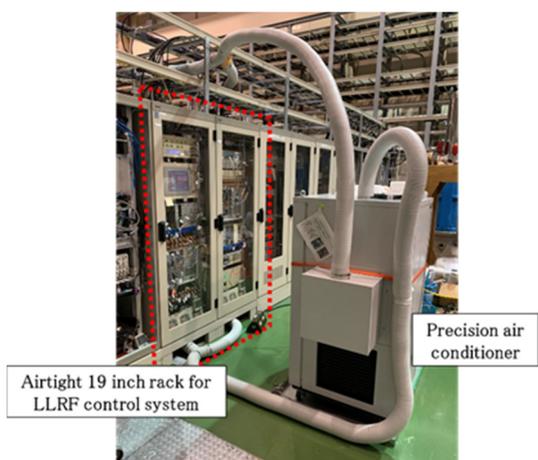


Figure 3: Picture of the precision air conditioner and the airtight 19 inch rack.

ラック内の空気の流れを制御するために、給排気口の位置、空気を流すためのフードや空気循環用ファンの設置、機器の間に仕切りを設けるなどいくつかの組み合わせを試した。これらのうちフードやファンの設置には除熱の効果があつたが、仕切りはあまり効果がみられなかった。各機器の給気口付近に空気を送るだけでなく機器の周囲にも空気の流れがあつたほうが冷却の効果が高いと思われる。

空調機の処理風量は当初3.7m³/分で運転しており、この時のラック出口の空気の温度は32℃を超えていた。その後、空調機のファンの回転数を40Hzから50Hzに上げることやダクトホースの形状を変えて(T字管からY字管へ変更)風圧を下げることで風量を4.2m³/分程度まで増やし、排気口のところで30℃以下になるように調整を行った。

2.2 高周波基準信号発生装置の湿度対策

今回の湿度対策を行うにあたって、基準信号分配システムで使用している高周波基準信号発生器(CDX-KEK021)の湿度特性を調査したところ、温度27.0℃条件下で湿度を30%から65%に変化させた時に、312MHz信号では-1.4deg、960MHz信号では-3.2degの位相ドリフトが起きることが分かった[3]。リニアックのLLRF制御機器はこの機器の基準信号を使用しておりMEBT1ラックの湿度安定化は必須であるため最初に対策を行った。

Figure 4に対策後のラック内の湿度の変動を示す。ここでいう湿度は相対湿度(relative humidity, [%RH])ではなく容積絶対湿度(volumetric humidity, [g/m³])で表している。2020年3月20日から1カ月間のラック内湿度の変動は0.60g/m³で、これはギャラリ湿度の変化量8.42g/m³と比較すると1/10以下まで抑えることができて

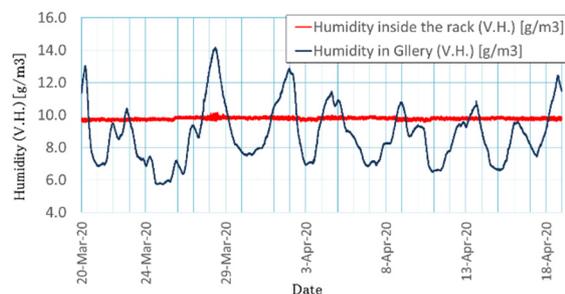


Figure 4: Humidity trend of the airtight rack at MEBT1 station. Humidity fluctuation inside the airtight rack inside and in the gallery are 0.60[g/m³] and 8.42[g/m³] respectively.

いる。空調機を使うことで長期的な湿度変動を抑えることができるようになった一方で、短期的な湿度の変動がみられるようになった。空調機はいったん露点温度まで空気を冷却したあと目標値まで加熱/加湿制御を行っているため、その過程で温度/湿度の変動が起きる。今回は周期が約1分で、幅は 0.1g/m^3 程度の変動がみられるが、この値はRF機器の湿度特性に影響を与える時定数、変動幅に比べて十分小さいので問題は無いと考えている。精密空調機の調整空気の設定値は現在、 21.0°C 、 50.0% で運転しており、ラック内の温度/湿度は $30.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $31.3 \pm 0.96\%$ で推移している。湿度の設定値に関しては当初35%に設定していた。これは加湿に使用する純水を少なくしたかったことが理由だが、その後、給水配管を整備したことや、高い値に設定したほうが外気の湿度の変化に対して安定することが分かったので現在は50%で運用している。

ラック内の機器を入れ替えるなどして発熱量が変化すると短期的な温度や湿度の変動幅が増加する傾向があり、これまでの経験では2倍以上、増加することがあった。したがってラック内の機器を変更した場合は、その都度オートチューニングを行い、空調機のPID制御パラメータを最適化する必要がある。また年間を通じて湿度が高い時期(4月~11月)と低い時期(12月~3月)で同じパラメータで運用すると精度が悪くなる傾向があるため、適宜チューニングが必要になると考えている。

2.3 LLRF 制御機器の湿度対策

2019年の夏季シャットダウン中にSDTL16とMEBT2B1のLLRF制御機器が設置されている19インチラックを高気密ラックに変更し、精密空調機を導入した。SDTL16とMEBT2B1を対象に選んだ理由は、励振周波数の違う2つのステーションを比較する際に、場所が近接して周囲の環境が似ていると都合が良く、また他のステーションの位相変化量を求める時に、このステーションを基準にして変動量を求めることができるからである[3]。

Figure 5 に対策後のラック内の湿度の変動を示す。2020年3月1日から1カ月間のラック内湿度の変動は 0.39g/m^3 で、これはギャリ湿度の変化量 8.83g/m^3 と比較すると $1/20$ 以下まで抑えることができています。精密空調機の調整空気の設定値は現在、 21.0°C 、 55.0% で運転しており、ラック内の温度、湿度は $29.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $33.9 \pm 0.96\%$ で推移している。

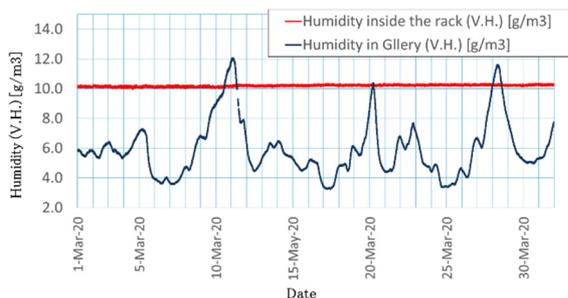


Figure 5: Humidity trend of the airtight rack at SDTL16 station. Humidity fluctuation inside the airtight rack and in the gallery is 0.39g/m^3 and 8.83g/m^3 respectively.

3. その他の対策

3.1 ラック内の温度の安定化

今回導入した密閉型ラックは湿度の安定化に焦点を絞って対策を行っており、温度に関しては特に対策をしていない。これはギャリの室温はある程度安定に制御されていることと、ラック内の空気は短時間ですべてが入れ替わる(今回の場合、ラックの容積が 2m^3 に対し処理風量が $4.2\text{m}^3/\text{分}$)ため影響は限定的だと考えたからである。実際に運用を始めると一日のうちで温度が高い時間帯(昼間)と低い時間帯(夜間)がみられ、ギャリ温度の変化がラック壁を通してある程度、影響を与えていることが分かった。そこで空調機の通信機能を使用してラック内の温度の変動を抑制できるか試験を行った。ラック内のプローブで測定した直近の平均温度 29.6°C (空調機の温度設定値: 21.0°C)を基準にして、現在の温度との偏差を用いてPLCで比例積分(PID)計算を行い空調機の温度の設定値を制御した。空調機の設定値 T_{set} は Eq. (1)により求めた。

$$T_{\text{set}} = 21.0 - \{K_P e(t) + K_I \frac{1}{T_I} \int e(\tau) d\tau\} \quad (1)$$

この式で $e(t)$ は基準温度 (29.6°C) からの偏差を単純移動平均 (60 秒間) したものを使用した。積分区間 T_I と比例、積分ゲイン K_P 、 K_I は今回 60 秒、1、 $1/3$ とした。Figure 6 はギャリ温度とラック内温度の相関を表していて、左が温度制御なし、右がPI制御を行った結果を示している。同じ状況ではないので単純に比較はできないが、温度制御をする前(a)は日中と夜間でギャリ温度が 0.4°C 変動する中でラック内温度は 0.3°C 程度の変動が見られたが、温度制御を行った時(b)は相関が弱くなっており、ギャリ温度が一時的に 28.0°C まで上昇していてもラック内温度の上昇は抑えられている。通常、1日で動くギャリ温度の幅は 0.4°C 程度であり、この値はRF機器の温度特性と比較してすぐに対応が必要な状況ではないと思われる。しかし、ギャリ温度は年間を通して 1°C 程度変動しており、また今回のように気温が一時的に急な変化をすることもあるので、積極的に温度を制御することは有

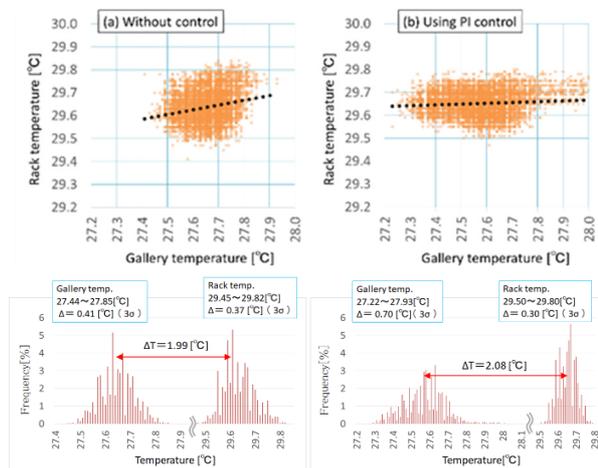


Figure 6: Correlation between gallery temperature and the temperature inside the rack: (a) without control and (b) with using PI control.

効になると考えている。

3.2 ラック内の機器の保護

精密空調機に異常が起きてラック内の温度が上昇すると、高周波機器の誤動作を誘発しビーム運転に支障をきたすことが想定され、最悪の場合、ラック内の機器を壊す可能性がある。そこでラック内の温度が高くなった時にラックに供給する電力を遮断するためのサーモスタット付き電磁開閉器を設置している(Figure 7)。ただし、この方法だと電磁開閉器が動作した場合、ビーム運転が停止してしまうことが避けられない。この問題を回避するために電磁開閉器が動作する前にラックの放熱を行うことができる扉の開発を行っており、2020年度中に導入する予定である。

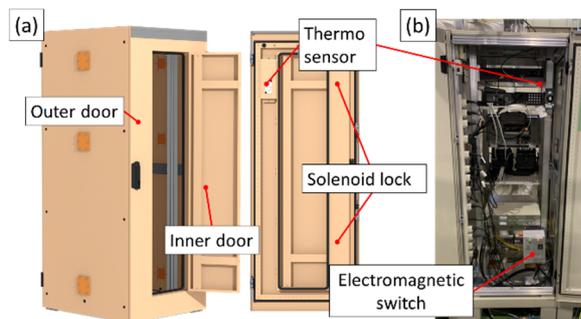


Figure 7: Picture of (a) Heat dissipation door and (b) the MEBT1 rack with using electromagnetic switch with thermostat.

4. 今後の予定

2020年の夏季メンテナンス期間中に高周波基準信号分配システムの改修を予定している。このシステムで使用している、光ファイバ、光カプラ、O/E モジュールは現在、温度が $27^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ に制御された恒温槽に収められているが、これを温度/湿度が制御できる小型環境試験機(SH-642)に移し替えることで湿度の影響も排することができる。Figure 8 に基準信号分配システムの改修案を示す。各ステーションに分配している基準信号(312MHz、960MHz)の位相関係をオシロスコープで測定して、優

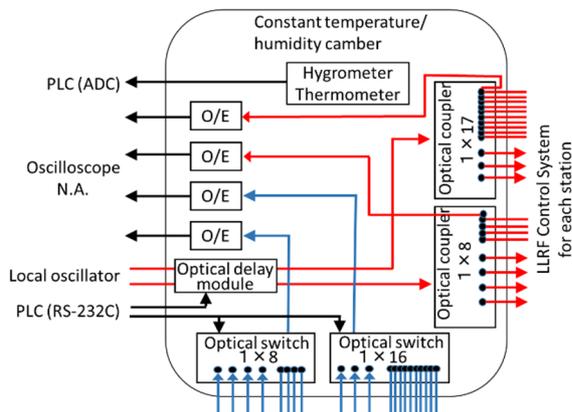


Figure 8: Improvement plan of the RF reference signal distribution system.

位な変動があった場合は光遅延器で調整する。また、PSOFが湿度特性で変動した分は、基準の信号と既設の戻り光ラインの位相差を測定して、各ステーションのDFBで補正を行うことが可能になる[3]。

5. まとめ

クライストロンギャラリの湿度がリニアック出射エネルギーの運動量の変動に影響を与えていることが明らかになった。LLRF機器やケーブルの湿度依存性を測定した結果を基に、これまで3箇所のステーションの湿度安定化対策を実施した。精密空調機と密閉型ラックを導入することで、ラック内の湿度の変動をラック外の1/20以下に抑えることができるようになった。ラック内温度の変動に対しては空調機の設定値を制御することにより外気の影響を抑制できることがわかった。2020年の夏季メンテナンスでは高周波基準信号分配システムの改修を予定している。これが完成するとPSOFや各ステーションの位相変動量を定量的に測定することができ、各ステーションのDFBでダイレクトに補正を行うことが可能になる。

参考文献

- [1] Z. Fang *et al.*, Proceedings of 2nd International Symposium on Science at J-PARC, JPS Conf. Proc. 8, 011001 (2015).
- [2] K. Futatsukawa *et al.*, Proceedings of IPAC 2012, New Orleans, USA, May 20-25, 2012, pp. 2630-2632.
- [3] K. Futatsukawa *et al.*, “J-PARC リニアック高周波機器の湿度依存性の試験”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-August 3, 2019, pp. 614-618.