

## PERFORMACNE OF J-PARC LINAC RF SYSTEM

Tetsuya Kobayashi<sup>1,A)</sup>, Etsuji Chishiro<sup>A)</sup>, Toshihiko Hori<sup>A)</sup>, Hiroyuki Suzuki<sup>A)</sup>, Masayoshi Yamazaki<sup>A)</sup>, Shozo Anami<sup>B)</sup>, Zhigao Fang<sup>B)</sup>, Yuji Fukui<sup>B)</sup>, Masato Kawamura<sup>B)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>B)</sup>, Seiya Yamaguchi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan 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 (英語)

High power operation of all the RF systems of J-PARC linac was started for the cavity conditioning in October 2006. Twenty 324-MHz klystrons have supplied the power to the accelerating cavities successfully. The beam commissioning was started in November 2006 then the acceleration to the design energy of 181 MeV was succeeded. The injection to the 3-GeV synchrotron will be started in September 2007. The RF control systems are performing according to the expectation, and the required field stability is satisfied.

## J-PARC リニアック高周波源システムの性能

### 1. はじめに

J-PARC リニアックは第I期計画として181MeVまで陽子ビームを加速し後段の3GeVリングに入射する<sup>[1]</sup>。このリニアックは20台の加速空洞ユニット (RFQ、3台のDTL、16台のSDTL) があり、それぞれ20台のクライストロンで電力が供給される。181MeV加速において、加速周波数324MHz、RFパルス幅650 $\mu$ s (立ち上がりを含む)、繰り返し25ppsで運転される。

高品質、大電力ビーム加速のために、高周波加速電界には振幅・位相それぞれ $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$  以内の安定性が要求される。主な変動の要因として、クライストロンDC電圧変動 (パルス内電圧サグ、パルス毎の電圧変動)、温度ドリフト、ビームローディングなどである。これらの変動に対して、要求される加速電界の安定性を実現するために低電力高周波 (LLRF) 制御システムの性能が重要となる。

2006年10月から全てのRFシステムの大電力運転が開始された。順調に空洞コンディショニングは順調に進み、2007年1年には181MeV加速に成功した。LLRF制御システムも期待どおりに稼働し要求される安定度を満たしている。

### 2. 高周波源システム

図1に高周波 (RF) 源システムの全体構成を示す。6台の高圧DC電源 (HVDCPS)、20台のクライストロン、4台の半導体アンプがあり、従って24台のLLRF制御システムが必要となる。1台のHVDCPSで4台のクライストロンに高圧をかける<sup>[2]</sup>。高圧DC電源の詳細な運転状況については文献[2]を参照。

クライストロンの性能について前回の本学会で評価試験結果を報告した<sup>[3]</sup>。ここではスペアを含め全23台について主な特性を (入出力特性、ゲイン、効率、パービアンス、帯域特性等) 測定し、要求される性

能を満たすことを確認している。一例として図2に入出力特性を示す。図のように、異なるDC電圧において滑らかな曲線が得られ、このような特性は加速電界の安定なフィードバック制御において重要である。

図3に、2006年10月から始まった空洞エージングの履歴を全空洞について示す。ほぼ1ヶ月で定格出

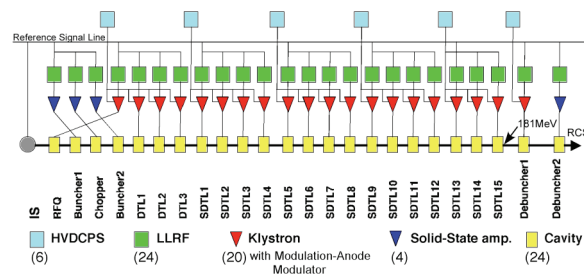


図1: J-PARC リニアック RF 源システム

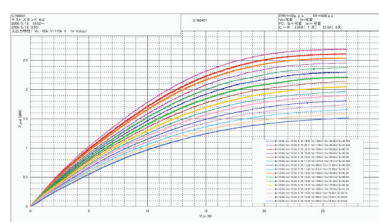


図2: クライストロン入出力特性 (代表例)

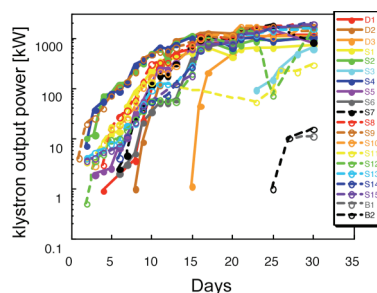


図3: 空洞エージング履歴

<sup>1</sup> E-mail: tetsuya.kobayashi@j-parc.jp

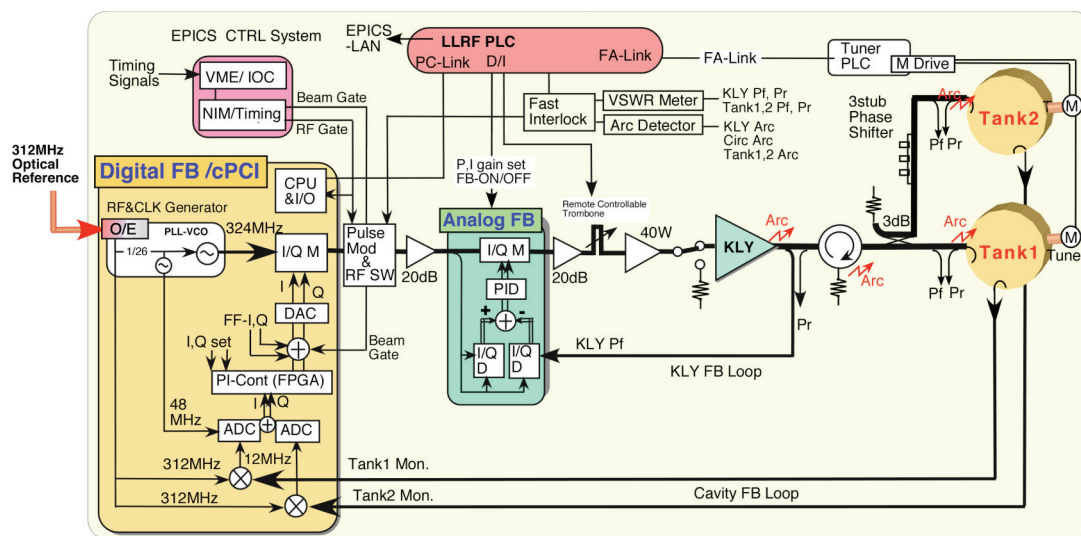


図4：LLRF制御システムのブロック図

力に達した。その後も大きなトラブルがなくDC電源を含め全クライストロンが順調に稼働し大電力を供給している。

### 3. 低電力高周波制御システム

LLRF制御システムの構成図を図4に示す。LLRF制御系1式(クライストロン1台)による加速システムを1ユニットとする。加速電界安定化のため、cPCI規格のモジュールで構成されるデジタルフィードバック(FB)/フィードフォワード(FF)制御システムが開発された<sup>[4]</sup>。324MHzの加速高周波信号はcPCI内のRF&CLK発生器で生成される。位相基準信号312MHzは光信号で伝送されRF&CLK発生器上のO/Eにより受信される。基準信号の安定性は $\pm 0.1^\circ$ 以内である<sup>[5]</sup>。

SDTLセクションでは1の台クライストロンで2台の空洞に電力を供給し(SDTLは2空洞で1ユニット)、2空洞のモニター信号(I, Q成分)のベクトル和に対してFB制御を行なう。立体回路のハイブリッド分配器と3スタブ移相器により2空洞の振幅・位相が一致するよう調整されている。図4のアナログ高速FB系(クライストロン出力のFBループ)はデジタルFB制御の性能向上のためクライストロンが理想的なアンプ(線形性等)として振る舞うように導入したが、現状では使用していない。なぜならデジタルFB系のみで要求される安定度が得られているからである。

空洞の共振周波数についてはデジタルFB系内のDSPによりPLC経由でチューナーを自動制御する<sup>[6]</sup>。自動チューナー制御においては、運転開始当初にはいくつかのバグがあったが、最終的には修正され現在は順調に制御されている。特にトリップからの自動復帰等に必要である。

その他、現場における設定・操作、インターロック停止シーケンス、自動復帰シーケンス、EPICから遠隔制御等、LLRF系全体の運転動作はPLCによ

り統括的に管理制御される<sup>[7]</sup>。

### 4. 加速電界安定化制御

デジタルFB制御の性能については、これまで他の会議でも評価結果を報告してきた<sup>[6]</sup>。文献[4]に報告している通り、実際の加速運転においても十分な安定性(振幅・位相それぞれ $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.1^\circ$ 程度)を確認することができた。振幅・位相スキャンで重要な、振幅の線形性及び位相 $360^\circ$ 回転の真円度も確認された。ビームの位相スキャンの測定結果はシミュレーションをよく再現する<sup>[8]</sup>。

ビームローディングに対してはビームの立ち上がり/立ち下がり部分のリップルはFB制御だけでは十分補正できない。そこでFF制御により補償する。図5にその結果を示す。上の図はFB制御だけでDTL2の振幅・位相波形のビームローディング(ビーム電流26mA、パルス幅50 $\mu$ s)である。下の図がFF制御を加えた結果でほぼ完全にビームローディング補償が

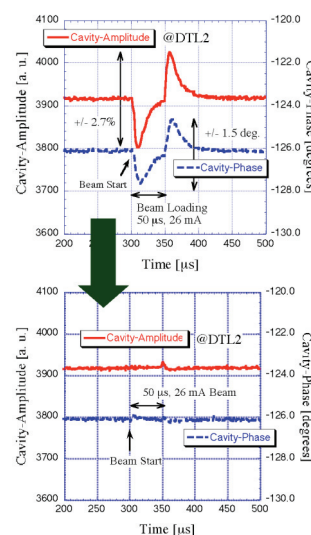


図5：FF制御によるビームローディング補償

きた。ただしビームゲートのタイミングを0.1 $\mu$ sステップで調整する必要がある。

181MeV加速においてFF制御なしでは3%程度のビーム電流の低下が観測されたが、全空洞に対してFF制御を行なうことによりビーム電流の低下はなくなった。またビームパルス内におけるエネルギー拡がりも改善された。

## 5. 空洞間位相の監視

ビーム加速にとっては空洞ユニット間の相対的な位相安定性が本質的である。1ユニットにおけるFB制御が正常であっても例えば基準信号系（光伝送系）に異常が起きた場合や、故障で制御機器の交換をした場合、空洞間の相対位相が変わってしまい正常なビーム加速はできない。そのためFB制御系とは独立に各ユニット間の相対的な空洞位相の監視が必要である。そこで図6に示すように各LLRF系では隣（上流側）の空洞ユニットの位相を測定している。この測定にはオシロスコープ（1GHz帯域、4ch同時2Gサンプル/s）を用いることとした。サンプリング間隔の不十分さやトリガージッター等により測定精度は $\pm 1^\circ$ 程度である。長期的ドリフトであれば0.2°程度の分解能で測定可能である（アベレーシングが必要）。これによりFB系の機器を交換して位相が変わってしまう場合でも容易に加速位相を戻すことができる。実際にそういったケースがあり有用であることが確認できた（最終的な調整は再び位相スキャンを行なう）。必ずしも測定精度が十分であるとは言えないが、オシロスコープで直接波形を見ることは様々な調整が容易であり、また異常を発見しやすく、多くの有益性がある。ただし将来的な定常運転では、より精度の良い空洞間位相監視システムを用意し、位相スキャンをしなくとも完全に加速位相を再現できるようにする必要があると考える。

このオシロスコープによる位相監視では正弦波フィッティングにより位相・振幅を求める<sup>9)</sup>。この測定値はEPICS経由で常時記録（アーカイブ）され長期的安定性の確認ができる。その結果の一例を図7に示す。あるビーム試験中におけるDTL2とDTL3の相対位相の12時間プロットである。それぞれのユニットではFB制御を行なっている。2空洞間におい

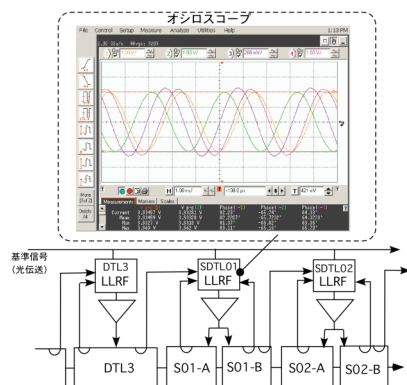


図6：オシロスコープによる空洞ユニット間の位相監視系。

てほとんど位相ドリフトがないことが分る。0.6°程度の幅の細かい変動はオシロスコープ測定によるもの（計測ジッタ等）であり、実際の位相変動ではない。

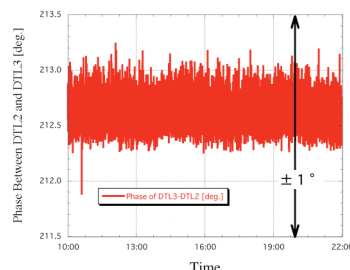


図7：DTL2とDTL3の2空洞間の相対位相。

## 6. まとめ

昨年10月からRFシステム全ての大電力運転が開始され、致命的なトラブルがなく順調に稼働し、今年1月には目標の181MeV加速に成功した。LLRF制御において要求される安定性を十分満たすことができ、ビームローディング補償については、FB制御だけでは補償できないビーム立ち上がりのリップルをFF制御により完全に補償することができた。空洞間の相対位相の監視システムを構築し、その有効性と実際の位相安定性を確認できた。

## 7. 謝辞

大規模な装置が数多くあり、当然多くの人の手があって正常な運転が可能となります。当然のことながら大電力運転、トラブルの対処は空洞グループとの共同作業の下で行ないます。またビーム加速の成功はJ-PARCリニアック全体の努力によるものであり、ビーム試験を通じてRFシステムもより良い形へと改善がなされました。それは今後も続けられます。これら関係者の皆様には深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] URL: <http://www.j-parc.jp/>
- [2] M. Kawamura, et al., "Present Status of Klystron Power Supply Systems for J-PARC Linac", in this meeting, TP26
- [3] M. Yamazaki, et al., "Status of 324MHz RF Test Stand at the J-PARC Linac", Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 392-394, 2006.
- [4] Z. Fang, et al., "RF Feedback Control Systems of the J-PARC Linac", Proc. of PAC07, WEPMN024, 2007.
- [5] T. Kobayashi, et al., "Performance of RF Reference Distribution System for the J-PARC Linac", Proc. of LINAC2006, pp. 583-585, 2006
- [6] S. Michizono, et al., "Performance of a Digital LLRF Field Control System for the J-PARC Linac", Proc. of LINAC2006, pp. 574-576, 2006
- [7] H. Suzuki, et al., "PLC control of Low Level RF System", in this meeting, TP30
- [8] G. Shen, et al., "RF Amplitude and Phase Tuning of J-PARC SDTL and DTL", in this meeting, TP33
- [9] G. Shen, et al., "Monitor System of RF Waveform Stability for J-PARC Linac", in this meeting, TP34