

# RF CONTROL SYSTEM FOR THE RFQ TEST STATION AT J-PARC LINAC

Yuji Fukui <sup>#,A)</sup>, Masato Kawamura<sup>A)</sup>, Tetsuya Kobayashi<sup>A)</sup>, Zhigao Fang<sup>A)</sup>, Kenta Futatsukawa<sup>A)</sup>, Fumiaki Sato<sup>B)</sup>, Shin-ichi Shinozaki<sup>B)</sup>, Hiroyuki Suzuki<sup>B)</sup>, Etsuji Chishiro<sup>B)</sup>, Toshihiko Hori<sup>B)</sup>, Masayoshi Yamazaki<sup>C)</sup>

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

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

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

2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

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

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

## Abstract

The J-PARC RFQ accelerates a beam from the ion source to the DTL. In Sep. 2008, the number of the RF trip of RFQ increased suddenly. To resolve this problem, we carried out the various measures, such as enhancement of vacuum, modification of RF control and so on. We also began to make the new RFQ as a backup machine. In order to examine the new RFQ, We started to construct the RFQ test station from July 2011, and began to put RF into the cavity from April, 2012. In this report, we describe the status of the RFQ test station.

## J-PARC リニアック RFQ テストステーションの RF 制御システム

### 1. はじめに

J-PARC リニアックでは、RFQ（高周波 4 重極ライナック）を使用してイオン源からの負水素イオンビームを 3 MeV まで加速し、DTL へ入射している。この RFQ では過去、ビーム運転中にトリップが頻発し安定性が低下する事象が発生した。この事象は

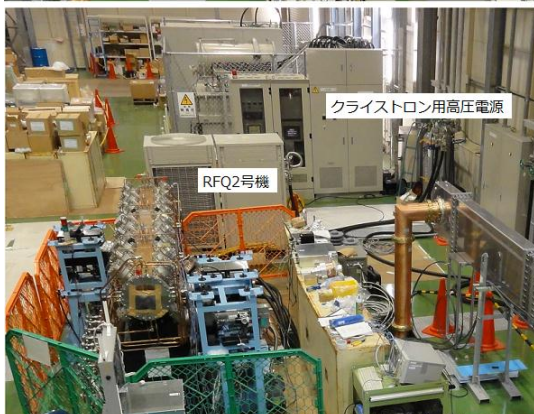
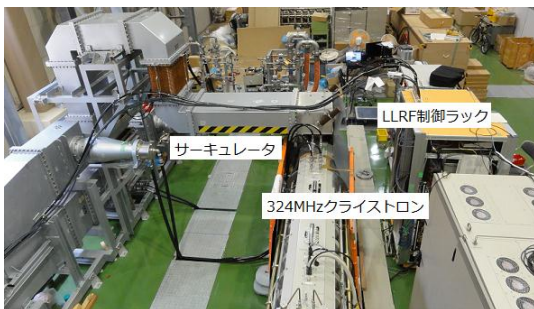


図 1 : RFQ テストステーション

2008 年 9 月に顕著になり、その後、真空排気の強化、定期的なコンディショニングなどの対応<sup>[1]</sup>により沈静化が図られている。将来、この状況が改善されなくなる事態に備えるため、現行の RFQ のバックアップ機として新たに RFQ 2 号機が製作された。RFQ 2 号機のハイパワーテストを行う目的で、2011 年 7 月より RFQ テストステーション制御系の構築が始まり、東日本大震災の影響で約 1 年遅れたものの、2012 年 4 月下旬からは空洞への RF 投入が開始された。

RFQ テストステーションは低電力高周波（LLRF）制御、RF 立体回路、324 MHz クライストロンやこれを駆動する高圧電源、冷却水系などで構成されており(図 1)、これらのうち LLRF 制御やクライストロン電源制御では PLC（Programmable Logic Controller, 横河電機）を使用して RF の制御や運転データの収集などを行っている。本稿では RFQ テストステーションの RF 制御システムについて報告を行う。

### 2. 制御システムの構成

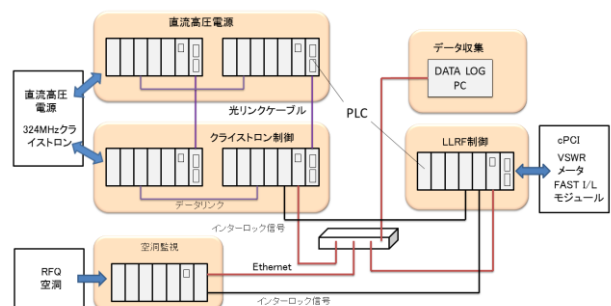


図 2 : 各機器間のネットワーク構成

<sup>#</sup> yfukui@post.kek.jp

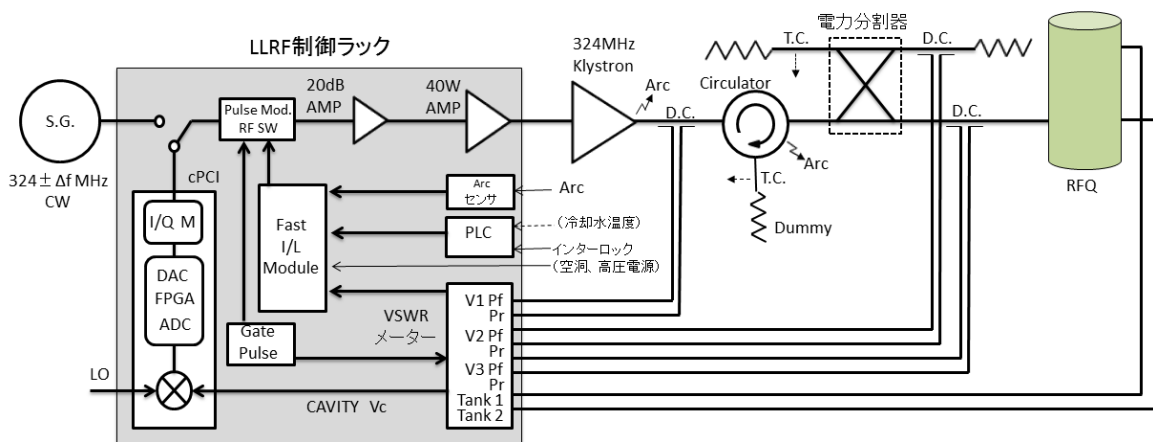


図3：LLRF 制御システム構成

## 2.1 全体構成

図2にRFQテストステーションを構成する各機器間のネットワーク図を示す。テストステーションの機器は、主にPLCを使用してデータの取込みや制御が行われる。各機器のPLC間はデータリンク用の光ケーブル、インターロック用電気信号線、データ収集用イーサネット配線で接続されている。以下に各システムの概要を記す。

## 2.2 LLRF 制御システム

LLRF制御系はVSWRメータ、PLC、cPCI、Fast Interlockモジュール、アンプなどから構成される(図3、図4)。Master Oscillatorの312MHzの基準信号を基にcPCIにて生成された324MHzの高周波信号は、Pulse Mod. & RF SWモジュールを通過した後、20dBアンプ、40Wアンプで増幅されて324MHzクライストロンに送られる。クライストロン出口/空洞直前に取り付けられた方向性結合器からの高周波信号、RFQ空洞のピックアップ信号はVSWRメータでモニタされており、異常な入射波(上限1MWに設定)、反射波を検出した場合には、Pulse Mod. & RF SWモジュールで高周波信号を遮断

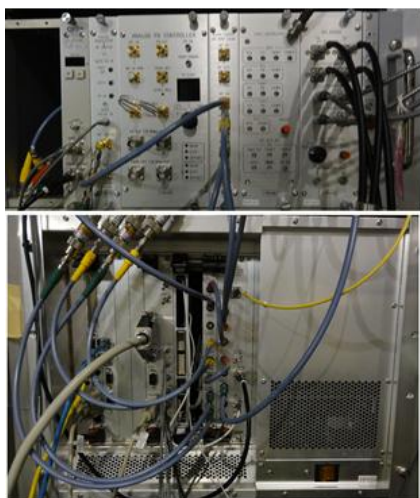


図4：Fast Interlockモジュール(上)とcPCI(下)

する。今回構築したRFQ2号機テストステーションでは空洞のエイジングや特性測定を行うことが主な目的であるので、実機のRFQで行っているような精密なFB/FF制御による電場の安定性は求められていない。不必要なRFによって空洞にダメージを与えることが無いように、異常を検出した際にはRFを即座に停止させ、発生したインターロックの種類によりRFを入れても問題ないと判断した場合は速やかにRF投入を再開させるなどの制御が必要となる。このようなLLRFの制御はPLCで行われている。

実験が進み空洞への入力RF電力が増加していくと空洞の共振周波数の変動が大きくなり(最大で $\Delta f=150$ kHz)チューニングが必要になった。その手段として入力RF源にcPCIの代わりに、より性能の良いSG(Signal Generator、8662A)で代用する案が検討された。結果、PLC、Fast Interlockモジュールの働きにより空洞の安全性は保たれると判断し、図3に示すようにSGを用いて実験を継続した。

## 2.3 324MHzクライストロンおよび直流高圧電源

LLRF系より送られた高周波信号はクライストロンで増幅され、サーキュレータ、2電力分割器を通過してRFQ空洞に印可される。クライストロンに印可するカソード電圧の調整や、電圧、温度などのモニタはクライストロン制御PLCと直流高圧電源制御PLCにて行われる。二つのPLCは光リンクケーブルで接続され、クライストロン制御ラックにあるCPUモジュールにて制御を行っている。機器に異常が発生した場合には、PLCの働きによりクライストロンへの電圧印可を停止し、同時に電源異常インターロック信号をデジタルIOモジュールからLLRF PLCに出力し、RF信号の遮断を行っている。本テストステーションの主にハイパワーRFに関しては参考文献[2]に詳しく記述されている。

## 2.4 空洞監視

図5に空洞モニタ用PLCを示す。空洞PLCでは36点のアナログ信号(冷却水温度30点、真空度6点)および32点の接点信号(流量計28点、真空計4点)を取り込んでいる。空洞制御系からLLRF制御系へは2本のインターロック信号線が配線されて



図 5：空洞モニタ用 P L C

おり、空洞の真空悪化のような即時性が求められるインターロックにはハードワイヤーを直接、LLRF の Fast Interlock モジュールに接続し高速で RF を遮断できるようにし、冷却水流量や温度に関するインターロックでは、PLC を経由した信号にて RF を遮断している。

### 3. 運転データ収集

クライストロン出口や空洞直前の RF 信号、空洞のピックアップ信号は VSWR メータでモニタされるほか、divider で 4 分岐された同様の信号をピークパワーメータ (Gigatronics) でも計測している。VSWR メータでは主に反射の異常や空洞に入る RF のリミットなどの機能のため使用しており、より正確な RF の測定にはピークパワーメータを使用している。

各モジュールで測定されたデータはイーサネットを経由してデータ収集用 PC にアーカイブされる。測定データは常時 1~2 回/秒の頻度で保存されており、1 日あたりおよそ 280 MByte のデータが蓄積されている。クライストロン特性を測定する際には正確なデータを得るためにより高速な収集 (10 回/秒の頻度で CSV ファイルに出力) を行っている。

図 6 はハイパワー試験を行った際の、4 月下旬から 5 月下旬までの空洞電力と真空度のトレンドデータである。真空度を確認しながら空洞への RF 電力を徐々に増加させていき、RF 投入を始めてから 5 日間で定格電力 (空洞入力 350 kW、RF パルス幅 600  $\mu$ s、繰り返し 25 pps) まで到達し、その後は最大で定格電力の 110%程度で空洞の特性測定やコンディショニングを行った。5 月 21 日~22 日にはテストステーションの 24 時間連続運転を行ったが、

この際に高圧電源の油入変圧器の温度上昇に伴ってクライストロン出力電力の変動 (20 分周期) が発生し、振幅が徐々に増大していく現象が確認された。その後の調査で、熱容量の大きい油入変圧器を精密温調系に接続していることが原因と分かり、また同様の冷却水システムを実機クライストロンでも使用しており、ビーム供給への影響も懸念されることから、冷却水システムの接続位置を変更する対策を行った。

今回のハイパワー試験における実運転日数は 15 日間、クライストロン運転時間 (高圧印可時間) および空洞への RF 投入時間は、153 時間、90 時間であった。

### 4. まとめと今後の予定

2011 年 7 月にテストステーション制御系の構築を開始し、2012 年 4 月下旬には大電力 RF を供給できるように RF 制御システムの環境整備を行った。RFQ への RF 投入を始めてからは、M.アノード変調器の不具合<sup>[2]</sup>などがあったが比較的順調に試験を実施することができた。RFQ 2 号機の試験はこれで一時終了となるが、現在リニアックにおいてはビーム電流を 30 mA から 50 mA に増強する計画が進められており、それを実現するためにテストステーションの再構築も必要となる。2012 年 10 月以降には 50 mA 用 RFQ<sup>[3]</sup>、イオン源および低エネルギービーム輸送系 (LEBT) のインストールを開始する予定であり RF 制御システムはより複雑となることが予想される。今後はさらに、上位制御を行うための EPICS 用 PLC ラダーへの改造や、LLRF 制御システムの改造なども進めていく予定である。

### 参考文献

- [1] K.Hasegawa, et al., "STATUS OF THE J-PARC RFQ", Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 5-7, 2009, Tokai, Japan)
- [2] T.Hori, et al., "High Power RF Test Station for RFQ II at J-PARC Linac", In these proceedings
- [3] Y.Kondo, et al., "FABRICATION AND LOW-POWER MEASUREMENT OF THE J-PARC 50mA RFQ PROTOTYPE", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 2-4, 2006, Sendai, Japan)

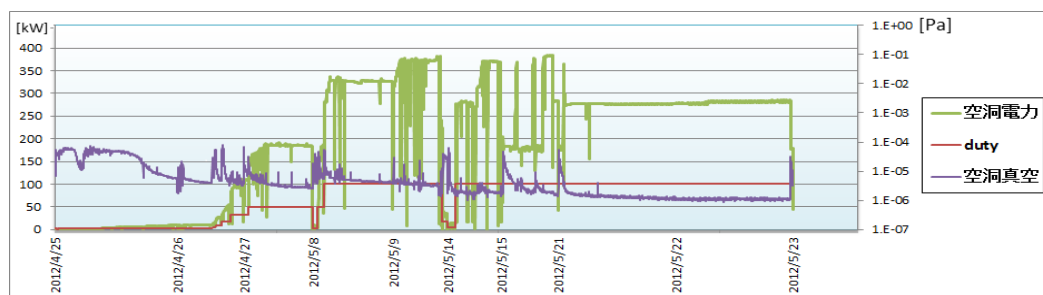


図 6：空洞入力電力と真空度の推移