

High Power RF Test Station for RFQ II at J-PARC Linac

Toshihiko Hori^{1, A)}, Etsuji Chishiro^{A)}, Shinichi Shinozaki^{A)}, Fumiaki Sato^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Yasuhiro Kondo^{A)}, Kenta Futatsugawa^{B)}, Yuji Fukui^{B)}, Masato Kawamura^{B)}, Takashi Sugimura^{B)}, Masayoshi Yamazaki^{C)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata-shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)} J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co. Ltd., 2-8-2 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

Abstract

The high power RF test for a new RFQ cavity as a backup machine was complied in 15days, 153hours toward the end of May 2012. Before these experiments were performed, a pilot RF station had been constructed and the S/N2013 klystron tube was researched on the characteristics of heater emission and perviance. This paper describes the outline of a pilot RF station, the performance of klystron tube, and the state of high power test for a new RFQ cavity.

J-PARC リニアック RFQ2 号機大電力試験用テストスタンド

1. はじめに

J-PARC の運転開始当初から使用している RFQ は、2008 年に放電が頻発し大出力ビームを長時間安定に加速することが困難な状況となったため、そのバックアップ機として RFQ2 号機を製作するに至った。RFQ2 号機は 2011 年 3 月に製作を終え、早い時期に大電力試験を行う予定であったが、同年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の影響で、試験スケジュールは白紙の状況となった。震災後、J-PARC 全体の方針として機器の復旧とビーム運転の再開を最優先課題とし、9 月よりシステムの再立ち上げを本格的に始め 12 月初旬にはビーム試験がスタートした^[1]。実機の運転が順調に推移するなか、本テストスタンドの構築を 2012 年 1 月より本格的に始め、4 月下旬には大電力 RF が供給できるよう整備した。本報告ではテストスタンド構成機器の概要、クライストロン管の健全性調査並びに、RFQ2 号機大電力試験時の運転状況などについて報告する。

2. テストベンチ構成機器の概略と経緯

J-PARC リニアックで現在使用中の 324 MHz クライストロン(E3740A TOSHIBA)20本を含めた全23本(当時)は2006年2~6月の5カ月間、クライストロンギャラリ下流のRF試験用テストスタンド(5カ月の期間限定)で大電力試験を行い、3 MWまでの特性データを取得した^[2]。今回構築したテストベンチもこの試験スタンドとほぼ同一の機器構成を採用した。その理由の一つに3 MW出力が確認できる立体回路(反射波用ダミーロード2台を全負荷用として使用)を構築することで、将来的にクライストロンの受け入れ/長期保管中の性能確認など高周波機器のチェックも行えるよう意図したものである。

本テストスタンドはJ-PARCリニアック棟最上流のクライストロン準備室(第2種管理区域)内に設置さ

れ、スペースは約40 m(南北)×10 m(東西)である。図1にテストスタンド構成機器の概略図を示す。立体回路はY型サーキュレータ、2電力分配器、約20mの導波管(WR-2300フル/ハーフ管)、反射波用及び全負荷用ダミーロードが4台などで構成されており、RFQ入力カプラーとは同軸管(WX-203D)で取り合った。RFQへパワーを伝送する際には、全負荷用ダミーロードの1台を取り外し、導波管ごと交換する。高圧電源、制御ラックなどの機器は、以前に使用したR&D装置などの再利用及び、実機の予備品を用いることで低コスト化を最優先した。高圧電源は1990年に製造されKEKで使用した実績があり、その主要機器である500 kVA変圧整流器は電気試験に加え油中ガス分析も行われ、絶縁油耐圧に劣化が生じていないことを確認した。断路器、M-アノード変調器は陽子加速器開発棟で使用されていたもので、フォーカスコイル電源とヒータ電源は実機の予備品を流用した。変調器からクライストロンオイルバスへ接続する3本のRG-220U/高圧ケーブル(2.5 m長)の端末処理、フォーカスコイル用低圧ケーブルや熱電対用計装ケーブル、冷却水ホースなどは自前で製作、敷設した。なお、クライストロン励振用低電力RF系(LLRF)並びにデータ収集系を含む制御系については、参考文献(3)に詳しく記述されている。

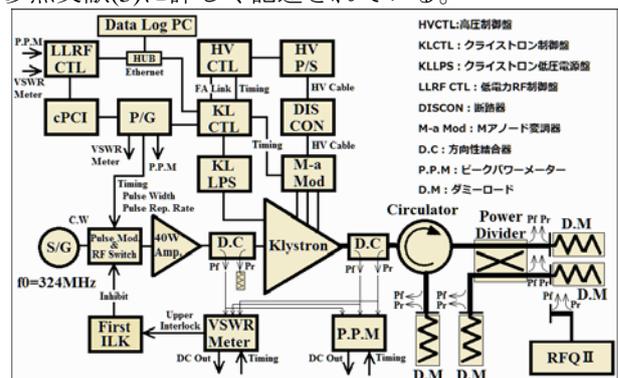


図1.大電力試験用テストスタンド構成機器の概略

¹hori.toshihiko@jaea.go.jp

2月最終週には主幹6.6 kV高圧を受電できる準備が整い、高圧電源の無負荷試験、最終的なインターロック試験を経て、今回使用したS/N0213クライストロン(予備品)の健全性調査へと進んだ。

3. エミッション減とパービアンスの確認

約8年間保管中のS/N0213クライストロンは2006年の大電力試験以降一度も高圧を印加しておらず、震災後の一時期はイオンポンプさえ動作出来ない状況であった。ヒータのエミッション減並びに静特性の経年変化を調査するために行った陰極の効率特性測定及び、印加電圧とビーム電流値から求めたクライストロンパービアンスを図2に示す。図2の赤表示曲線は別名“エミッションの肩特性”と呼ばれるもので、ヒータ電流を変えた時にビーム電流(図2の縦軸左)が急激に減少する点を求めるものである。運用値は肩特性の右側直近値に設定すると寿命の点で有利なため、22 A(一次側換算で3.8 A)で使用した。熱的飽和点でのパービアンス値(図2の縦軸右)は1.3 $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ となり、これらの数値は2006年に取得したデータと良く合致した。以上のデータから、保存期間中の経年変化は生じていないことがわかった。

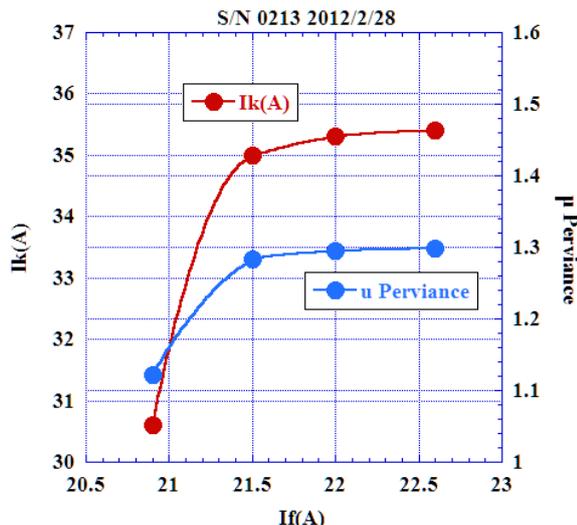


図2. 陰極効率特性とクライストロンパービアンス
(条件：印加電圧90 kV、フォーカスコイル14.5 A)

4. 全負荷ダミーロードでの RF 出力試験

震災の影響は大きく、現在でもクライストロン準備室の5 tクレーンは使用出来ないため、クライストロンにX線シールド用鉛遮蔽(VT-69093 TOSHIBA)を設置出来ない。従って、クライストロンからRFパワーを出す際には、境界表面線量(25 μSv 以下)に十分注意する必要があった。

RFQ2号機から要求されているパワーは、幸いにも比較的低い400 kW(MAX)であり、クライストロン出口に換算すると800 kWである。ただし、パルス繰り返し数とRFパルス幅の最大は50 pps,600 μs である。2006年のデータより800 kWを得られる電圧は80 kV

と求めたが、X線強度を抑えるには低い電圧のほうが有利である。以上の考察を元に78, 80, 82 kVと印加電圧を変化した時に得られた入出力特性を図3に示す。図3の横軸は、LLRF最終段の半導体増幅器(定格40 W)とクライストロン入力栓間に挿入した778D同軸双方向性カップラ(Agilent)からのRF信号、縦軸はクライストロン直後に取り付けた-60dBベータホール型方向性結合器からのRF信号である。これらの信号は80350Aピークパワーセンサー(Giga-Tronics)に入力され、校正済みの8542Cコントローラ(Giga-Tronics)で電力値に換算される。データ収集系については中核にPLC(YOKOGAWA)を用い、上記の入出力信号(コントローラからのDC電圧)はここでAD変換され、InTouch(SCADA/HMIツール、Wonderware)でグラフ化した[4]。

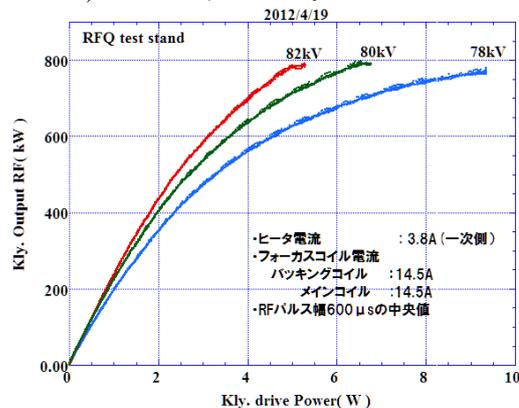


図3. 印加電圧別の入出力特性曲線

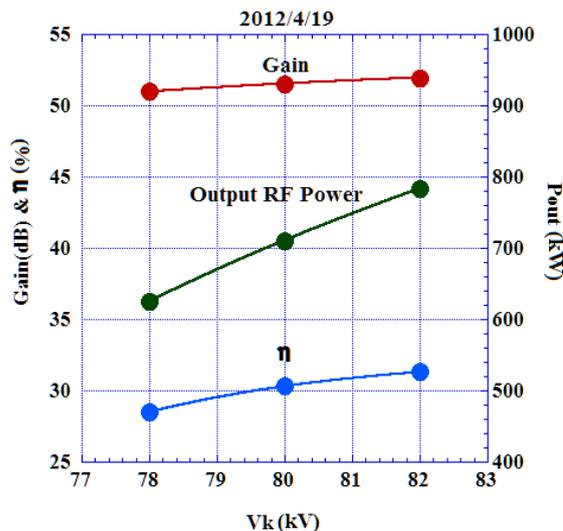


図4. 印加電圧値別のクライストロン出力特性

この測定と並行して、手持ちの鉛板と定尺寸法の5 mm厚アルミ板をクライストロンの両側面に取付ける部分遮蔽を施し、ここを管理上の境界と定め線量をチェックした。結果、いずれの電圧でも許容線量以下であったため今回の試験では80 kVを運転値とすると共に、空洞への過大入力を避けるために、1 MW上限インターロックを新たに設定した。

図3の入力電力が5 W時の電力変換効率(η)、クライストロン利得(Gain)を計算し、出力電力値(Pout)と共に印加電圧との相関をプロットしたものが図4である。印加電圧の上昇と共に各パラメータは増加する傾向を示すと共に、電力効率が30%、利得が約51dBの測定データ(80 kV印加時)を得た。これらの傾向と数値は、2006年に我々が取得したデータと測定誤差範囲内で再現しており、この動作点領域では保存期間中のRF性能に劣化は生じていないことが確認できた。

5. RFQ2 号機大電力試験時の運転状況並びに不具合対策の概要

RFQ2号機へのRF投入は4月21日から実施され、5月29日までの実運転日数で15日間、高圧印加時間で約150時間の大電力試験が行われた。空洞のRFコンディショニングは20 μ s, 25 ppsからスタートし、25 pps, 600 μ s, 350 kw(定格)まで約50時間で到達した。5月8日からは50 ppsの運転も始まり、空洞の電界分布測定などが行われた。5月21~22日にかけて24時間連続運転が行われ、この時間内のRFトリップ回数は数回程度と良好な結果であった。この連続運転中、クライストロン出力パワーが20分間周期で規則的に変化した上に、変動幅が時間の経過と共に大きくなる(24時間連続運転時点で $\pm 1\%$)現象がモニタされた。ロギングデータを解析したところ、出力パワー変動とクライストロンボディの冷却水温度変動との間に12 kw/°Cの相関関係があり、水温変動がパワー変動の主原因であることがわかった。そこで、比較的熱容量の大きい500 kVA変圧整流器の冷却水供給元をボディ冷却水の供給元とは別の租温調系統(27 \pm 7 °C)に接続変更し、試験最終日に再度変動調査を行った。結果、冷却水温度は27 \pm 0.15°C以内、水温の変動幅は運転時間の長短とは無関係であるデータが得られ、出力パワーの長時間安定度も改善された。

試験中の不具合については、まずM-アノードバイアス電圧低下インターロックが5月10日に発生しRF



図5. M-アノード変調器のスイッチングユニット交換作業風景

の供給を一時中断したことがあげられる。このインターロックはRF供給前の2月下旬、クライストロンビームエージング中に多発した過去があり、原因の光信号(E/O変換器)用電源を修理したにも関わらず約90時間使用した時点で再度同じ故障が発生した。対策として、スイッチングユニット全体を実機予備品と交換する作業を行い、半日の停止期間で空洞へのRF供給を再開した。図5はスイッチングユニット交換作業中の写真である。鉄柱で櫓を組み、上部に取り付けたチェーンブロックでM-アノード変調器絶縁油内のスイッチングユニットを釣り上げている時の様子で、クレーンが使えないと極端に作業能率が低下することを痛感した。その他、偏磁検出用NIMモジュールの改修やマスタートリガーパルス発生器(575型 BNC)のリブート対応など細かな不具合はあったが、大きなトラブルはなく順調にスケジュールを消化した。

6. まとめと今後

最大3 MWまでのクライストロン出力をチェック可能なRFテストベンチを構築し、今回使用するクライストロンの経年劣化が生じていないことをまず調査した。次に、今回の試験に適したクライストロンの動作点を入出力特性から求め、テストスタンドの運転パラメータを実験的に決定した。RFQ2号機大電力試験中、M-アノードの不具合で半日間RFの供給を中断したが、トータル15日間、高圧印加時間で約150時間の運転を順調に行った。

今年の後半にはRFQ3号機が納入される予定で、このRFコンディショニングが来年初旬にも予定されている。又、RFQ上流のイオン源・LEBTも本テストスタンドエリアに設置され、RFQ出口までのビーム加速試験が行われる予定である。

謝 辞

本テストスタンドの冷却水供給に際して加速器第4セクション/冷却水グループの涌井拓治氏、宇佐美力氏にご協力頂きました。高圧電源の試運転や無負荷試験並びに、NIMモジュールの改修など日立製作所(株)の雪竹光輝氏、佐川隆氏にご努力、ご協力頂きました。上記の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] K.Hasegawa, et al., "Status of J-PARC Accelerators", In these Proceedings
- [2] M.Yamazaki, et al., "Status of 324MHz RF Test Stand at the J-PARC Linac", Proceedings of 3rd Annual Meetings of Particle Accelerator of Japan, August2-4, 2006, Sendai, Japan
- [3] Y.Fukui, et al., "RF Control System for the RFQ Test Station at J-PARC Linac", In these Proceedings
- [4] Y.Fukui, et al., "Study of Measurement Method of the Klystron Characteristics at the J-PARC Linac", Proceedings of 5th Annual Meetings of Particle Accelerator of Japan, August6-8, 2008, Higashihiroshima, Japan