

J-PARC 用 324 MHz クライストロンの特性評価

PERFORMANCE TEST OF J-PARC 324 MHz KLYSTRONS

不破康裕 *^{A)}、篠崎信一 ^{A)}、千代悦司 ^{A)}、平根達也 ^{A)}、
方志高 ^{B)}、福井佑治 ^{B)}、二ツ川健太 ^{B)}、溝端仁志 ^{B)}、
岩間悠平 ^{C)}、佐藤福克 ^{C)}、堀利彦 ^{C)}、
Yasuhiro Fuwa*^{A)}、Shonozaki Shinichi^{A)}、Etsuji Chishiro^{A)}、Tatsuya Hirane^{A)}、
Zhigao Fang^{B)}、Yuji Fukui^{B)}、Kenta Futatsukawa^{B)}、Satoshi Mizobata^{B)}、
Yuhei Iwama^{C)}、Yoshikatsu Sato^{C)}、Toshihiko Hori ^{C)}、
^{A)}J-PARC Center, JAEA
^{B)}J-PARC Center, KEK
^{C)}Nippon Advanced Technology

Abstract

In the J-PARC linac, accelerator operation is performed using 45 units of 324 MHz and 972 MHz klystrons. For the stabilization and advancement of J-PARC, it is important to accurately obtain the klystron output characteristics. In order to understand this characteristic, it is essential to measure the characteristics of the klystron replaced for some reason such as discharge as well as the klystron before use. We set up a klystron test stand in the linac building and measured the beam characteristics and RF input / output characteristics of the klystron under various operating parameters. Acquisition of this data is performed new and used klystrons, and from that result, we aim to establish operating conditions that achieve both high output and stability.

1. J-PARC におけるクライストロン使用の現状

J-PARC リニアックでは、総計 45 台のアノード変調式クライストロンを用いて加速器を運転している [1]。これらのクライストロンは周波数帯域が 2 種類あり、324 MHz が 20 台、972 MHz が 25 台であり、いずれも最大出力は 3 MW である。運転に使用しているクライストロンは、電子銃部での放電の頻発・内部真空度の悪化・RF 出力の低下・水漏れなどの理由で、1 年あたり数本を新品に交換している。特に、324 MHz クライストロンは J-PARC 運転開始当初より使用されているものもあり、その積算運転時間は 70,000 時間に到達しようとしている (Fig. 1)。今後、これらのクライストロンのカソード電子放出特性の劣化や管内放電頻度の増大により、頻繁なクライストロン交換が必要になる時期が来ると予測される。

クライストロンの交換に際して、J-PARC では加速器運転との時間的制約や試験に使用できる設備が整っていなかったために、導入前段階でのクライストロンの性能試験を実施してこなかった。そのため、クライストロン交換後に出力不足が発覚する事例やヒーターや RF 印加初期段階でクライストロン管内の真空度が悪化した場合にコンディショニング作業が必要になるなど、再運転までに要する復帰時間の増大や、復帰後の調整作業の増大を引き起こすリスクがあった。

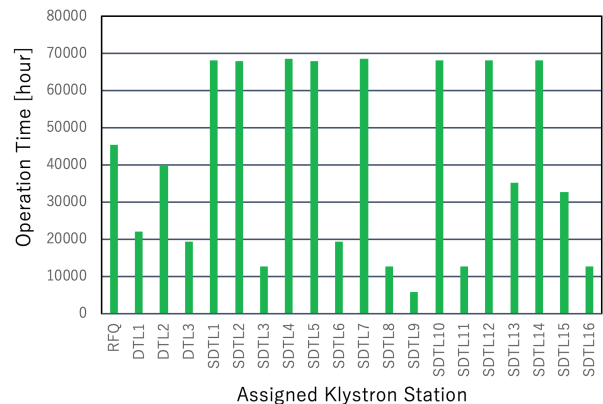


Figure 1: Integrated operation (HV-ON) time of 324 MHz klystrons in J-PARC LINAC.

2. J-PARC リニアック棟クライストロンテストスタンド

J-PARC では、リニアック棟へのクライストロンテストスタンドの設置・運用を進めている。2018 年度までに 324 MHz クライストロンの試験体系の整備を終え、本年度より 324 MHz クライストロンの性能評価試験を開始している。また、972 MHz クライストロン用の試験体系の設置も進行しており、本年度中を目標に整備が進められている。同テストスタンドの使用により、加速器実機への導入前にクライストロンの初期コンディショニングと出力特性の把握が可能となる。これにより、交換後の管内のコンディショ

* fuwa.yasuhiro@jaea.go.jp

ニング時間短縮や、高い出力が要求される空洞に電力を供給するステーションに高出力のクライストロンを優先的に配備したり、最適な LLRF パラメータをあらかじめ導出しておくことが可能となる。

何らかの理由で加速器実機のクライストロンの交換が必要となった場合に、クライストロン交換後に迅速に RF の印加・調整が可能となることや、クライストロン交換後に出力が不足していることが発覚するリスクが回避できる。

3. 導入前のクライストロンの特性試験

加速器実機へ導入予定のキャノン電子管デバイス製 324 MHz クライストロン E3740A [2] (シリアルナンバー K1501, K1503) に対して性能試験を実施した。J-PARC リニアックでは今季の夏季メンテナンスで最低 2 台の 324 MHz クライストロンの交換を予定しており、それらのインストール前に導入予定のクライストロンの特性を把握しておく必要があった。

特性試験では、クライストロンの特性項目として、カソードからのビーム放出特性試験や RF 入出力特性の測定を実施した。以下に、それらの試験の結果を示す。

3.1 カソード特性試験

導入前のクライストロンの試験においては、クライストロンの初期コンディショニングを兼ねて、まずカソードからのビーム放出特性の測定を実施した。この測定では、カソードのヒーター電流を十分に高く設定し、一定の間隔でヒーター電流を低下させながら放出ビーム電流を測定する方法で実施した。各ヒーター電流値に対しては、設定後にカソード温度を安定させる時間として 10 分間放置して、ビーム電流 I_B が安定したことを確認したのちに各カソード電圧 V_C に対して I_B の測定を実施した。K1503 クライストロンに対して測定を実施した結果を、Fig. 2, Fig. 3 にまとめる。Figure 2 と Fig. 3 はそれぞれ同一の結果を縦軸をビーム電流 I_B とビームパービアン K で表示したものである。

これらの結果より、ヒーター電流 23.5 A 以上の領域が空間電荷制限領域、22.5 A 以下の領域でカソード温度制限領域の特性を示していることがわかる。空間電荷制限領域での特性指標についてパービアン K を求めると、

$$K = \frac{I_B}{V_C^{3/2}} = 1.36 \times 10^{-6} \text{ [A/V}^{3/2}\text{]}$$

また、カソード温度制限領域の特性として Fig. 2 の各曲線を左に延長して電流が 0 となるヒーター電流 I_0 を求めると

$$I_0 = 19.3 \text{ A}$$

という値が得られる。

3.2 RF 入出力特性試験

カソード電流放出特性の測定とビームコンディショニングが終了したのちに、クライストロンに RF を印加し入出力測定を実施した。

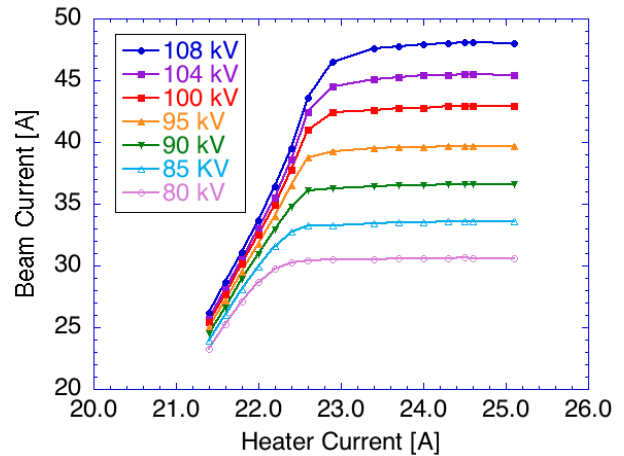


Figure 2: Relations between extracted beam current from cathode and current of cathode heater of the K1503 klystron. Each line corresponds to measured result with different cathode voltage.

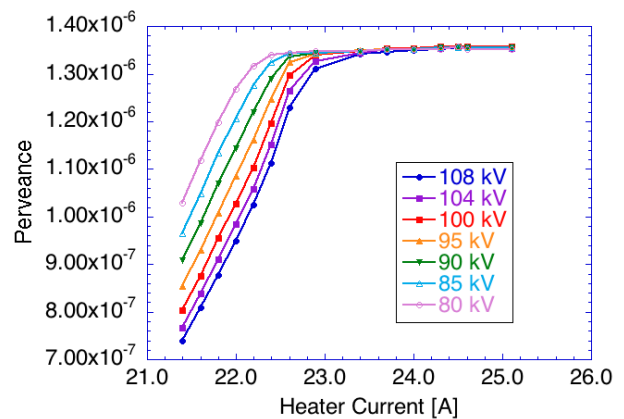


Figure 3: Relations between beam perveance and current of cathode heater of the K1503 klystron. Each line corresponds to measured result with different cathode voltage.

同様の測定を K1501 に対しても実施した結果が Fig. 4 に青で示したものである。K1501 と K1503 両者の結果を比較すると、同じ運転条件を設定した場合、K1501 の出力が K1503 の出力を上回るという結果が得られた。これらの結果をもとに、今夏のクライストロン交換ではより大きな出力が要求される RF ステーションに K1501 クライストロンを配備することを計画している。

今後も、予備クライストロンの特性を継続して実施し、クライストロンの配備計画の策定を行うとともに、最適な LLRF パラメータを予測できるようさらに精度の高い試験を実施する計画である。

4. 使用済みクライストロンの特性試験

前節で述べた導入前のクライストロンの特性試験とともに、使用済みのクライストロンの試験を実施した。これまで、このような測定は実施されなかったが、クライストロンの経年劣化の把握ができれば

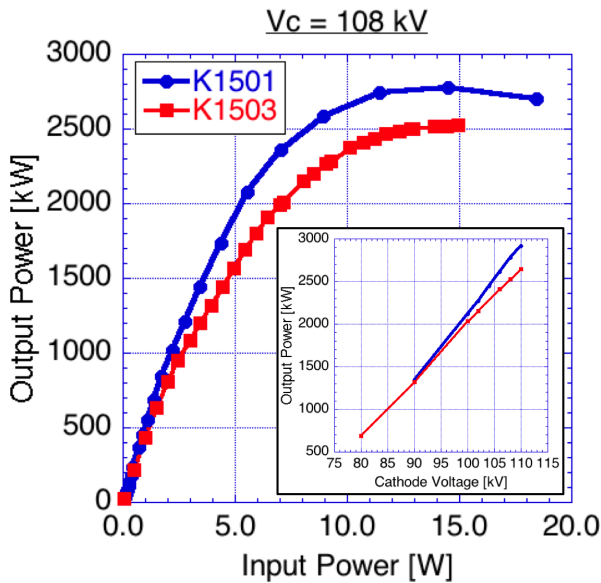


Figure 4: RF Input/Output Characteristics of K1501 (blue) and K1503 (red) with 108 kV of cathode voltage. Inner plot shows the relation between Maximum output power and cathode voltage for K1501 and K1503 klystrons.

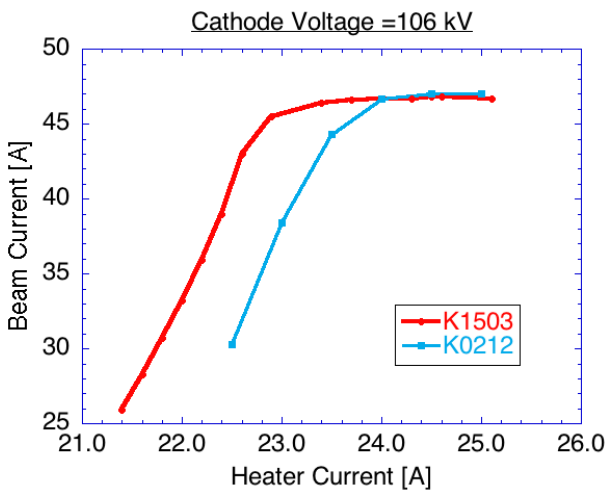


Figure 5: Measured result of extracted beam current as functions of heater current. Red line shows K1503 (new) klystron and blue line shows K0212 (retired) klystron.

クライストロンの交換計画の策定ができるなどのメリットが期待できる。

今回の性能試験には、2018年10月に実機から取り外されて使用が終了した K0212 クライストロンを用いた。本クライストロンは SDTL09 RF ステーションに配備されたもので、運転時間が 60,000 時間を越えた段階で変調アノードとボディ間の放電の頻発が原因で使用を終了したものである。

K0212 クライストロンの、カソードビーム放出特性と 106 kV における RF 入出力特性を Fig. 5, Fig. 6 に示す。比較対象として、図中には新品のクライストロンである K1503 の特性も示している。これらを

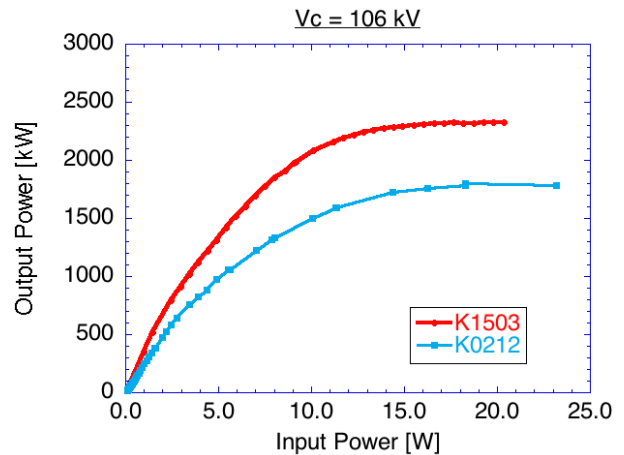


Figure 6: Measured result of output RF power as functions of input RF power. Red line shows K1503 (new) klystron and blue line shows K0212 (retired) klystron.

比較するとビーム放出特性、RF 入出力特性がともに劣化して値が小さくなっていることがわかる。特性劣化の主原因は使用に伴うカソード表面の組成変化と考えられる。Figure 5 から、前節と同様にして電流が 0 となるヒーター電流を外挿により求めると、 $I_0 = 20.3A$ という結果が得られる。今後、使用時間の異なる他の使用済みクライストロンの劣化傾向を測定・比較することで、系統的なクライストロンの劣化傾向の把握と、劣化を補う運転パラメータの策定を目指している。

5. まとめと今後の展望

本研究では、J-PARC クライストロンテストスタンドを使用して、324 MHz クライストロンの性能評価を実施した。試験では、使用前・使用済みのクライストロンをそれぞれ用いて、それらを比較することで最適な交換計画の策定やクライストロンの劣化傾向の把握とそれを補償する運転パラメータに必要な情報が得られた。今後、試験体系の高度化とともに多数のクライストロンの試験を行うことで高精度で系統的なデータ取得と得られた知見を J-PARC 実機運転へ適用することを計画している。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, "ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR HIHG-INTENSITY PROTON ACCELERATOR FACILITY PROJECT, J-PARC", JAERI-Tech 2003-044, KEK-Report2002-13.
- [2] キヤノン電子管デバイス;
<https://etd.canon/ja/product/category/microwave/klystron.html>.