

J-PARC リニアック大電力高周波源機器のトラブル事例

TROUBLE CASE REPORT OF HIGH POWER RF SOURCE EQUIPMENT AT J-PARC LINAC

溝端仁志^{*A)}, 不破康裕^{B)}, Ersin Cicek^{A)}, 方志高^{A)}, 福井佑治^{A)}, ニツ川健太^{A)},
浅野博之^{B)}, 篠崎信一^{B)}, 中野秀仁^{B)}, 岩間悠平^{C)}, 佐藤福克^{C)}

Satoshi Mizobata^{*A)}, Yasuhiro Fuwa^{B)}, Ersin Cicek^{A)}, Zhigao Fang^{A)}, Yuji Fukui^{A)}, Kenta Futatsukawa^{A)},
Hiroyuki Asano^{B)}, Shinichi Shinozaki^{B)}, Hideto Nakano^{B)}, Yuhei Iwama^{C)}, Yoshikatsu Sato^{C)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

^{B)}Japan Atomic Energy Agency ^{C)}NAT Co.,Ltd.

Abstract

The J-PARC linac has been in operation for about 20 years. Various components including klystrons have been replaced due to troubles caused by aging deterioration. In this presentation, we report a case of trouble of high power RF source components in the last 5 years.

1. はじめに

J-PARC リニアックは運転開始から 20 年ほど経過している。経年劣化によるトラブルにより、クライストロンを含め様々な機器の交換作業を行っている。本発表では最近 5 年ほどの大電力高周波源機器のトラブル事例を報告する。

2. 機器構成

J-PARC リニアックでは 45 台のクライストロンとそれを駆動させる 12 台の高圧電源を使用している [?]. また、クライストロンの内訳は 324 MHz と 972 MHz の周波数のものがそれぞれ 20 台と 25 台である。大電力高周波源機器のブロック図は Fig. ?? のとおりである。Figure ?? では高圧電源 1 台に対しクライストロンが 1 台となっているが、実際には高圧電源 1 台に対しクライストロンは 4 台接続されている。

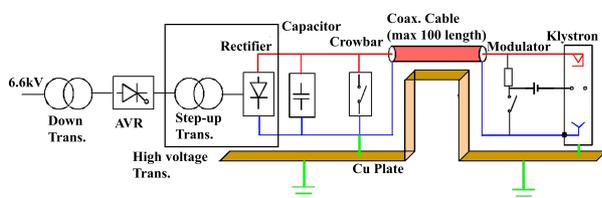


Figure 1: Block diagram about the high power RF systems.

3. バイアス電源故障

リニアックのクライストロンはアノード変調方式で駆動している。クライストロン内のビーム電流を確実に遮断するためにバイアス電源が設けられている。半導体スイッチおよびバイアス電源の外形を Fig. ?? に示す。バイアス電源はアノード変調器に装填されている半導体スイッチ下部にある油密構造のケース内に設置されている。過去 5 年間ほどでバイアス電源の故障が 7 件発生している。他の物品に比べ小さいため、復旧作

業は 2 時間ほどで完了する。油密構造のケース内で使用しているため、バイアス電源が加熱されることにより故障すると考えているが、故障原因は不明である。

現在、油密構造ケースを廃止かつ構成を単純化して信頼性を向上させたバイアス電源を検討している。



(a) Semiconductor switch (b) Bias power source
Figure 2: Device inside a modulator filled with insulating oil.

4. 変圧整流器出力部損傷

2024 年 11 月末に高圧電源 5 号機で交流過電流/直流過電流の異常が発生した。出力電圧設定を 0 kV にしたところ特に異常は発生しなかった。変圧整流器内のダイオードの健全性をテスターと 125 V メガーで確認したが、特に異常は見られなかった。降圧トランスの上流側にある VCB を引き出した状態 (6.6 kV を遮断) で AVR のゲート基板の波形を確認したが、こちらも異常は見られなかった。VCB を装填し、出力電圧設定を 5 kV にしたところ激しい放電音と光を確認できた。再度調査したところ変圧整流器出力コネクタ付近 (油中ケーブルヘッド) のケーブルのテープが溶けたような状態であった。Figure ?? が変圧整流器出力コネクタ付近を撮影したものであり、Fig. ?? が油中ケーブルヘッド部分である。高圧ケーブルを変圧整流器側で外した状

* mizobata@post.kek.jp

態で定格 (110 kV) まで高電圧を出力しても問題が発生しなかった。また、油中ケーブルヘッド部分で 1000 V メガーで絶縁抵抗を測定したところ絶縁抵抗の劣化が見られた。以上により高圧ケーブルの不具合と断定した。当該油中ケーブルヘッドの予備品がなかったため、テストスタンドから高圧ケーブル、油中ケーブルヘッド、ガラスエポキシ製の碍管までを移植・交換した。当該箇所の故障は初めての経験であり、復旧まで 19.3 時間ほど要した。



Figure 3: High voltage transformer(left) and crowbar(right).



Figure 4: Cable header.

取外した部品を調査したところ、油中ケーブルヘッドに縦方向に亀裂が入っており再利用できない状況であった。Figure ??が故障した油中ケーブルヘッドの写真である。写真右側が変圧整流器に接続される。同時期に製造されていると考えられる油中ケーブルヘッドは他に 5 台ある。部品取りに使用して停止しているテストスタンドの復旧と今後の故障に備えた予備品の製作を検討中である。ただし、部品メーカーの合併に伴い、現用品と同じものを製作していないため予備品を製作するには同等性能を有する新規部品の採用が必要である。



Figure 5: Broken cable header.

5. クライストロン交換履歴

この 5 年の間にクライストロンは 7 台交換した。324 MHz のクライストロン交換の概要を Table ??に示す。324 MHz のクライストロンは 3 台交換しており、原因はいずれもアノード電極からの放電である。Figure ??

にカソード付近のクライストロンの模式図を示す。放電は 324 MHz クライストロンの交換理由のほとんどを占めている。復旧までに必要な時間は約 10 時間である。放電が発生したとき、最初にアノード変調器とクライストロン間を接続している高圧ケーブルの交換をして不良箇所の切り分けをしている。これはクライストロンの交換に対して高圧ケーブルの交換のほうが人手・作業時間が少ないためである。ただし、高圧ケーブルの交換に伴いヒータが冷めてしまうため、高圧を印加してケーブル交換の効果を確認できるまで時間がかかっている。

Table 1: Overview of 324 MHz Klystron Rerplace

Date	2022/03	2024/04	2024/06
Driving time[h]	82 270	92 620	47 720
Cause	discharge	discharge	discharge
Down time in operation[h]	12.8	not operation	9.7

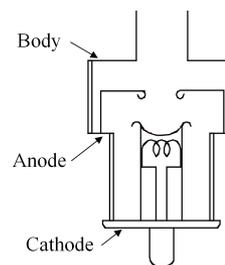


Figure 6: Schematic diagram of a klystron near the cathode.

972 MHz のクライストロン交換の概要を Table ??に示す。972 MHz のクライストロンは 4 台交換しており、原因は放電、冷却水配管からの漏水、真空度の悪化である。冷却水配管からの漏水は 972 MHz クライストロン全体を通して 4 台ぐらい発生している。

Table 2: Overview of 972 MHz Klystron Rerplace

Date	2023/03	2023/10	2024/03	2025/04
Driving time[h]	19 170	58 140	61 450	43 110
Cause	discharge	water leak	vacuum	discharge

リニアックでは運転時間が 99 000 時間を超える 324 MHz のクライストロンが 5 台稼働している。また、972 MHz のクライストロンでは運転時間が 68 000 時間を超えるものが 15 台稼働している。双方ともにメーカーの期待寿命は 50 000 時間である。今後の故障を想定して予備クライストロンの購入を進めている。

6. まとめと今後の展望

過去5年間で大電力高周波源機器でのトラブル事例について主だったものと初めて故障した部分について述べた。今後は予備品の製作を進め、新たなトラブルに備えられるように準備を進めていく。また、クライストロンの放電時に交換する高圧ケーブルの健全性を実機に実装することなく確認できる試験装置を製作して

復旧までにかかる時間がさらに少なくなるようにする。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, “ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR HIGH-INTENSITY PROTON ACCELERATOR FACILITY PROJECT, J-PARC”, JAERI-Tech 2003-044, KEKReport2002-13.