

J-PARC クライストロン高圧電源の改修

IMPROVEMENT OF J-PARC KLYSTRON HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY

千代悦司^{#, A)}, 川村真人^{A)}, 佐川隆^{B)}, 小川真一^{C)}

Etsuji Chishiro^{#, A)}, Masato Kawamura^{A)}, Ryu Sagawa^{B)}, Shinichi Ogawa^{C)}

A) J-PARC center (JAEA/KEK), 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

B) Universal Engineering, 1318-105 Senba-cho, Mito-shi, Ibaraki, 310-0851

C) Hitachi, Ltd. 5-2-1 Ohmika-Cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-1293

Abstract

In J-PARC linac, six units of high voltage power supplies for 324MHz klystrons have operated since 2006, and those running time exceed 35,000 hours. In addition, six units of power supplies for the 972MHz klystrons have been operation since 2013. In the power supply, various troubles occur under the operation. In some anode modulators, arc discharge in the transformer oil had occurred due to the deterioration of the auxiliary solid insulator. In three modules combining a step-up transformer and a rectifier, the high voltage diode was breakdown because an unexpected overvoltage was applied. And by improving the voltage dividing resistor of the module, high stability cathode voltage was achieved. In this report, we describe the trouble and the improvement that occurred in the equipment.

1. はじめに

J-PARC リニアックのクライストロン直流高圧電源は、2006年より324MHz高周波源用の電源6台が運転を開始し、現在までに35,000時間以上稼働している。また、2013年より972MHz用電源が稼働し、合計12台の高圧電源が稼働している。本電源は、降圧変圧器で6.6kVから600Vに変換した交流電圧を電圧調整盤のサイリスタにて位相制御し、この電圧を直接、変圧整流器にて昇圧・整流し、110kVの直流高電圧を発生している。リニアックで用いられる2種類のクライストロン(型番:E3740A、E3766A)は、それぞれアノード電極を有しており、アノード変調器により直流電圧をパルス状に分圧することにより700 μ s、25Hzのパルス運転を行っている。これまでの運転により本電源には、種々のトラブルが発生した。変調器では、絶縁離隔距離の不足で絶縁体が劣化し、油中放電が発生した。変圧整流器では、高圧ダイオードの破損や直流高電圧が安定しない事象が生じていた。電圧調整盤では、サイリスタの誤点弧により変圧器の鉄心が飽和する偏磁事象が生じた。本報告では、これら変調器や電圧調整盤、変圧整流器で発生したトラブルやその改修について報告する。

2. クライストロン電源のフォルト頻度

図1は、クライストロン電源がインターロック動作によりフォルトし、ビーム供用が停止する平均故障間隔(MTBF)を示す。横軸のRunナンバは、供用のための連続運転のRun番号を示し、1ラン当りの連続運転時間は、初期の頃の250時間程度、その後徐々に長くなり、最近のRunでは1,000時間を超える場合もある。また、Run#50からは、972MHzクライストロン用の高圧電源が稼働している。

324MHz電源の運転初期には、クローバ盤の不要

etsuji.chishiro@j-parc.jp

動作^[1]によりMTBFが高くならなかった。この改修は、クライストロンの短絡検出器であるクローバ盤内のCTの抵抗器の種類を金属皮膜抵抗器からセラミック抵抗器に変更することにより不要動作がなくなりRun#8以降、しばらくの間MTBFは良くなった。

Run#15(2008年)とRun#24,25(2009年)の極端に短いMTBFは、アノード変調器の油中放電に起因している。初期タイプの変調器は絶縁油中で耐電圧を向上させるためテフロンやFRPを用いていたが、運転時間が5,000時間を超える頃から固体絶縁体が放電により炭化し、著しい耐圧劣化が発生した^[2]。また、油中の最小の絶縁離隔距離も機器ごとに異なり、距離確保が徹底していなかった。そこで、放電対策として絶縁油だけで絶縁が保てるよう70mm以上の離隔距離もつ配置となるよう内部フレームを作り直し、また、電界強度の高い電極には緩衝用のリングを取付けて変調器を20式分、2011年までに改修を行った。

Run#31からの324MHz用高圧電源のフォルトの主な原因は、クライストロンの電子銃部でのアノードとボディ(A・B)間の放電による制御機器の誤動作である。この部分で放電が発生するとアノード電位が急激に接地電位になり、カソードからdi/dtの高いビーム電流が引き出される。この時のリターン電流のノイズによりNIMモジュール等の制御機器が誤動作を発生し、電源が停止していた。改修方法として、NIMモジュール回路内にフェライトやコンデンサーを挿入するノイズ対策を施すことにより誤動作の発生頻度を低下させた^[3]。

Run#54,55の20時間を下回る短いMTBFは、クライストロンの電子銃部でのA・B間の放電に起因する。上記の制御機器の誤動作を引き起こす放電は、アノード電圧は、放電後、数十 μ sでカソード電位まで復帰するが、このRunでのクライストロンは、アノード電圧が復帰せずA・B間の放電が長時間、持

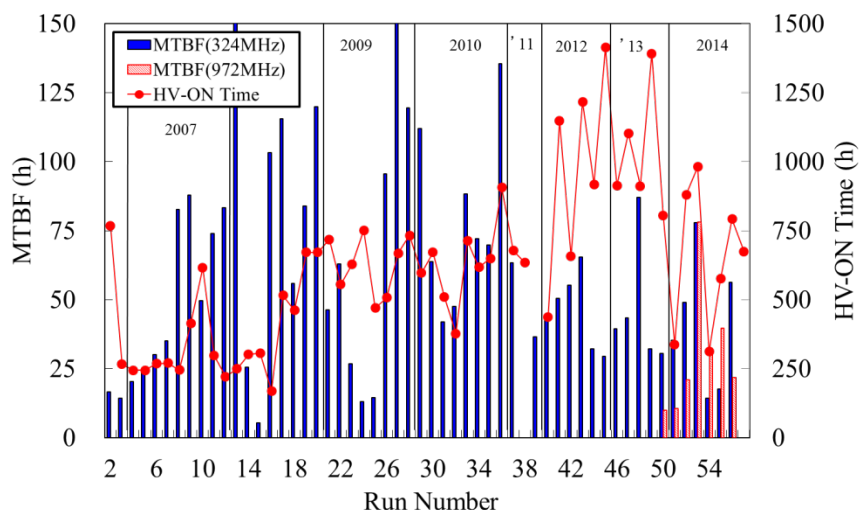


Figure 1: Mean time between failures of klystron power supply.

続するようになった。このため、予備のクライストロンと交換し電源停止回数の提言を図った。

972MHz 用高压電源は Run#50 より稼動しているが、電圧調整盤の放電の影響により VCB が誤動作し、MTBF が 50 時間を下回る RUN が多い。電圧調整盤で放電が発生している個所の電位は固定されておらず浮遊電位となっていたが、これを高抵抗で接地することにより放電が抑制されることが判明した。

3. カソード電圧の安定化

運転当初の高压電源 1,2 号機のカソード電圧は不安定であり、3~4%程度まで緩やかにカソード電圧が低下したり、クローバ動作後、急激に元の電圧に回復するなど、その都度、カソード電圧設定値を調整する必要があった^[4]。原因は、電圧フィードバック回路中に使用していた分圧抵抗器の低圧側の抵抗器の抵抗値が変動していたためであり、高压用の抵抗器を 4V 程度の電圧で使用していたため、抵抗素体と電極キャップとの接続部に絶縁膜が生じ抵抗値が変動したと考えられる。図 2 は、この高压抵抗器に交流電圧を印加した時の抵抗値の変動を示す。公称値 5kΩ の抵抗器に電圧を印加することにより

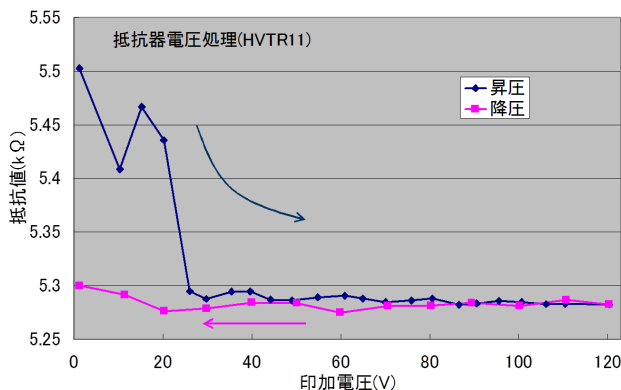


Figure 2: Change in the resistance of the divider.

5.5kΩ から 5.3kΩ に抵抗値が回復している。クローバ動作後の抵抗値の回復も、動作時の接地電位の上昇により抵抗器に電流が流れ、抵抗値が回復されたと推測される。抵抗器の改修は、まず 972MHz 用電源で実施され、低圧側の抵抗器を精密抵抗器(1/2W、温度係数-2.8ppm/°C)に交換した。その結果、6 か月間にわたる運転でのカソード電圧の変動は、設定値の±0.2%となり、安定なカソード電圧での運転を達成した。324MHz 用電源も今年夏季メンテナンス時に改修する予定である。

4. 変圧整流器ダイオードスタックの破壊

2012 年 3 月に変圧整流器 1 号機(運転時間 28,400 時間)、2013 年 12 月に同 2 号機(30,200 時間)、2014 年 6 月に同 5 号機(36,000 時間)のダイオードスタックが破損した。破損個所はダイオード素子と並列に接続されているセラミックコンデンサーである。コンデンサーに耐電圧を超える過電圧が印加されたため沿面部で絶縁破壊(短絡)が発生した^[5]。図 3 は、変圧整流器の回路図を示す。変圧整流器は、サイリスタで位相制御された 6 相の交流を変圧器(600V/54kV、500kVA x 2 台)で昇圧し、2 段の全波整流器を直列に接続することで直流 110kV を発生している。図 3 中に示される 1 個のダイオードの構成は、6 段のダイオードモジュールがスタックされ、1 モジュールあたり 11 個のダイオードとこれと並列に接続された 11 個のコンデンサーから構成される。

図 4 はダイオードスタック中のコンデンサーが短

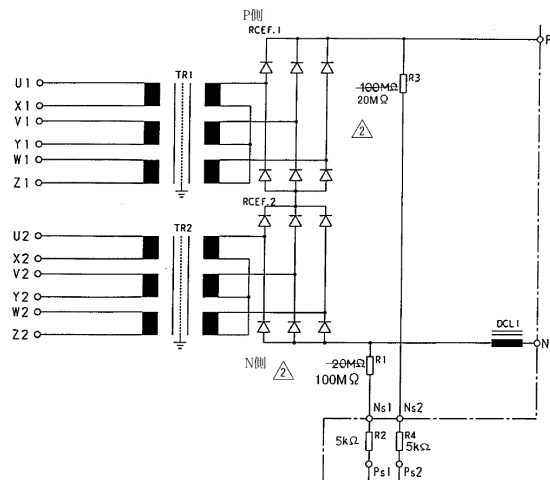


Figure 3: Circuit diagram of the module combining step-up transformer and rectifier.

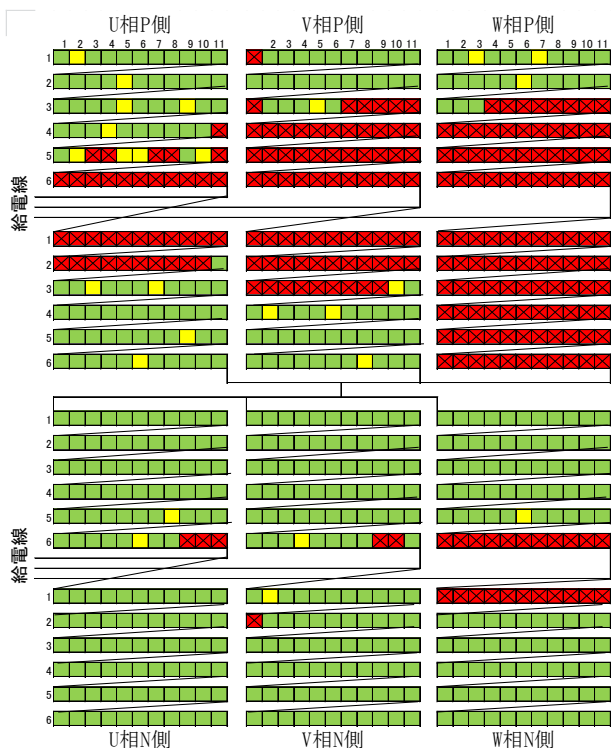


Figure 4: Distribution of the breakdown capacitor in the high voltage diode stack.

絡した個所を示す。短絡はP側のスタックのW相下段で発生した。コンデンサーに過電圧が印加されるメカニズムはまだ解明されていないがまた、コンデンサーは、変圧器からの給電線側から故障しているため、変圧器側からのサージや図5に示す歪んだ入力波形に含まれる高周波成分による共振が過電圧発生の原因であると推測している。変圧整流器の改修として、変圧器の1次側にサージアブソーバを本夏

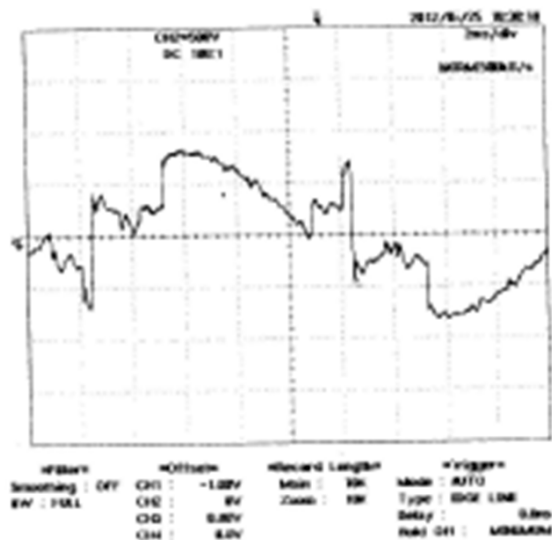


Figure 5: Primary voltage waveform of step-up transformer.

季メンテナンス時に取り付ける予定である。

5. クライストロンの耐電圧劣化

324MHz クライストロンにおいて、運転時間が20,000 時間を超える頃から A・B 間の放電が頻発になり 30,000 時間を超えると、アノードからボディへの放電電流がミリ秒オーダーで持続するようになった。このような放電を継続する管は、一度放電が発生すると数時間間隔で放電を頻発するため予備のクライストロンとの交換を行った。これまでにこの放電のため交換したクライストロンは、3 管であり、それぞれの運転時間は、30,000 時間、33,000 時間、35,000 時間であった。現在、36,000 時間を超えて運転している管が15本あり、これらの管もいずれ耐圧劣化により交換を行う必要がある。現在、これら耐圧劣化したクライストロンを再生するため電子銃の交換などを行うことを計画している。

6. まとめ

324MHz 用高圧電源は、運転当初において、電気素子の選定ミスや接続ミスなどでフォルトが多発していたが、バグフィックスすることにより次第にフォルト頻度が低下した。2008~2009 年は、アノード変調器内の放電により MTBF が低下する RUN があったが、改修以降、変調器に起因するフォルトは大幅に低下した。2012 以降はクライストロン電子銃内の A・B 間の放電に起因するフォルトが MTBF 低下の主因になっており、最近では A・B 間の耐電圧が劣化したクライストロンも現れ、予備管と交換するようになった。972MHz 用高圧電源は、電圧調整盤の盤内放電による VCB の誤動作により MTBF が低下しており、夏季メンテナンス時に放電防止対策を施す計画である。両電源の MTBF は、まだ低く J-PARC 稼働率低下の主な要因となっているため更なる改修が必要である。

参考文献

- [1] 川村 他、Proc. of 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (2007) pp501-503. [http://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32%20\(D\)/contents/PDF/TP/TP26.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32%20(D)/contents/PDF/TP/TP26.pdf)
- [2] 千代 他、Proc. of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012) pp1224-1226. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS105.pdf
- [3] 堀 他、Proc. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2013) pp1001-1003. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SUP0/SUP053.pdf
- [4] 川村 他、Proc. of 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2009) pp1001-1003. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/papers/fpaca46.pdf
- [5] 川村 他、Proc. of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012) pp1001-1003. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS110.pdf