

Discharge Suppression for Anode Modulator in J-PARC Linac

Etsuji Chishiro^{#A)}, Masato Kawamura^{B)}, Toshihiko Hori^{A)}, Fumiaki Sato^{A)}, Shinichi Shinozaki^{A)}

^{A)} JAEA, 2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{B)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In the J-PARC linac, 20 anode modulators have been operated exceeding 24,000 hours. In the meantime, much electric discharge has occurred in the modulator and it has become a cause of the operating ratio reduction of the accelerator. This paper reports the measure against electric discharge in the modulator.

J-PARC リニアックにおけるアノード変調器の放電対策

1. はじめに

J-PARC リニアックには、モジュレーティングアノードを有するクライストロンが採用されており、長パルス運転を行うためにアノード変調器によりクライストロンを変調している。324MHz 高周波源であるクライストロン及びアノード変調器は、クライストロンギャラリーに 20 式設置されており、カソード電圧 95kV から 105kV で 25Hz 運転されている。ビーム供用運転中、変調器内でしばしば放電が発生し、この放電によりクライストロン電源が停止したり、放電によるノイズにより NIM モジュールが誤動作したりし、加速器の稼働率を低下させている。本稿では、アノード変調器の放電事象とその対策について報告する。

2. クライストロン電源のフォルト頻度

リニアックのクライストロンは、6 台のカソード直流高圧電源と 20 台のアノード変調器で稼働しており、1 台のカソード直流高圧電源で 4 台のクライストロンを駆動している。324MHz 高周波源は、2006 年から運転を開始し、現在まで約 24,000 時間運転している。図 1 はクライストロン及びその電源がインターロック等により停止する平均故障間隔 (MTBF) を示す。横軸のランナンバーは、連続運転の回数を示し、初期は 1 ランあたり連続 250 時間程

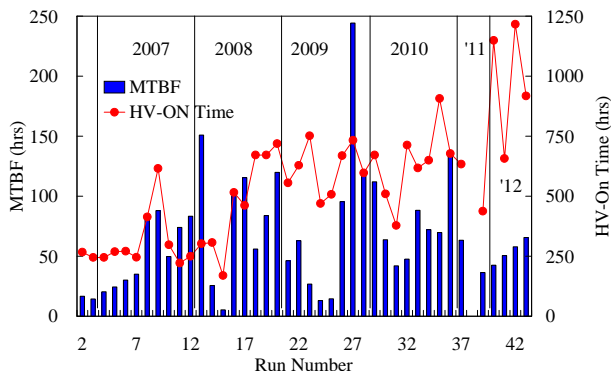


図 1 クライストロン電源の平均故障間隔の推移

度、ビーム供用が始まると連続 700 時間程度運転を行っている。運転当初は、抵抗器等の素子の選定ミスや接続ミス等によりトリップが多く、MTBF は 20 時間程度しかなく、毎日 1 度程度、6 台中のいずれかのカソード電源がダウンしていた。その後、トリップ原因を調査し、不具合箇所を改善することにより、2008 年から 100 時間を超えるランもあったが、中には MTBF が 20 時間を下回るランもあった。MTBF が短いランは、次項で述べるアノード変調器での放電による影響である。震災以降(2011 年 12 月以降)のランでのフォルト原因を分類すると、高圧電源の運転時間 4,380 時間中で全フォルト回数は 83 回であり、その内 38 回が変調器内での放電によるフォルトであった。フォルト原因のほぼ半分は、変調器内での放電によるものであった。

3. アノード変調器

324MHz クライストロンの管長は 4.5m であり、水平方向に管が設置されており、現場で管を交換しにくい構造となっており、集束コイルやオイルタンクと一体となって納入される。このため、クライストロンを変調するための回路はクライストロンオイルタンクから分離したアノード変調器に集約されている。図 2 はアノード変調器の回路図を示す。変調

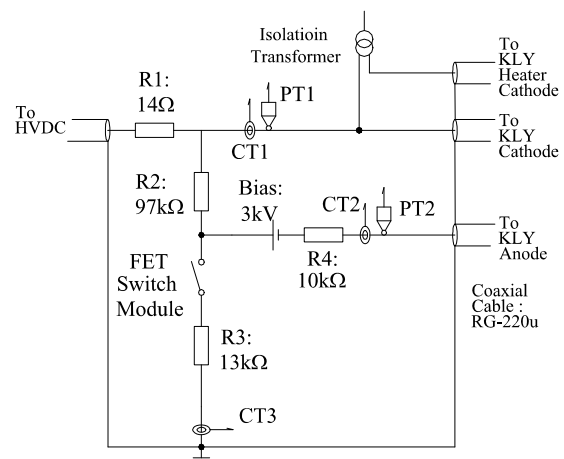


図 2 アノード変調器回路図

器には、クライストロン短絡時の保護用として直列抵抗 R1 とカソード電圧を分圧しアノード電圧を発生するための分圧抵抗 R2、R3、アノードをバイアスするための直流電源及びクライストロンを変調するための半導体スイッチから構成されている。半導体スイッチは直列に接続された 150 段の FET から構成され、絶縁トランスを介して FET ゲート回路に交流電力を供給することによりスイッチングしている^[1]。また、アノードやカソードの電圧・電流を測定するための CT やプローブ(PT)も設置されている。これらの構成機器は、絶縁油で充填されたタンク内に収納されており、狭いギャラリーに設置するため、小型化が図られており、絶縁離隔距離に余裕がない設計となっている。

4. 油中放電に対する対策

アノード変調器を量産する前の試験運転時 (2003 年)、変調器内で放電が多発した^[2]。図 3 は、その放電箇所を示す。カソード及びアノード電流を観測するために CT(Pearson 製 CT3025) が組み込まれているが、内径 3.5 インチの CT を貫通する電極部(銅パイプ、外径 20mm)で放電が多発した。銅パイプには耐圧強化のため厚さ 1.5mm のテフロン管で覆われていたが、テフロンが放電により炭化し、耐圧が劣化した。

対策として貫通部分を同軸ケーブル 20D-2V の芯線を用いて配線した。これは、CT 貫通部の限られた空間で絶縁を強化するためであり、ポリエチレンの絶縁破壊強度が絶縁油より高いことに着目した対策である。20D-2V の内導体の内径が 6mm、ポリエチレンの外径が 20.5mm、CT の内径が 88.9mm、印加電圧が 110kV(電源定格)とすると、銅パイプでの表面電界は、7.4kV/mm であり、同軸ケーブルのポリエチレンの表面電界は 4.0kV/mm となり、絶縁油が接する表面での電界強度を半減させた。一方、内導体の表面電界は 13.6kV/mm であり、銅パイプの表面電界より高くなるが、ポリエチレンの絶縁破壊強度^[3]の 1/10 以下の電界となっている。量産型のアノード変調器には、全てこの対策を施しており、現時点ではポリエチレンの絶縁破壊は観測されていない。



図 3 CT 貫通電極部での放電

変調器の運転時間が 5 千時間を超える頃から、特定の変調器で放電が頻発するようになった(図 1 中、ラン 15 やラン 24~25)。図 4 はその放電箇所を示す。銅パイプを覆うテフロン管が放電により全面的に炭化しており、この部分と筐体のフレーム間で放電が頻発していた。

この事象までは、CT 以外の場所でも電界が高いと考えられる部分にテフロン管や FRP 板などを絶縁油中に設置し、耐電圧の強化を図ってきた。しかしながら、固体絶縁体で耐圧強化を行うと、アーク放電や部分放電で耐圧が劣化しはじめると、加速度的に劣化が進行し、絶縁油のみの場合よりの耐圧が悪くなる傾向があった。そこで、固体絶縁体を用いずに放電対策を行うこととした。

まず、複雑な構造である CT 周辺部の電界計算を行い、電界の高い場所を調べた。また、変調器に直流電圧を印加し、目視による放電箇所の調査を行った。結果、CT の取り付け金具の電界緩和電極の先端が高電界であったり(図 5)、図 6 のように半導体スイッチ取り付け用のガイドピンで放電が発生したりした。これらの結果を反映させるため、5 台の変調器



図 4 変調器油中放電箇所

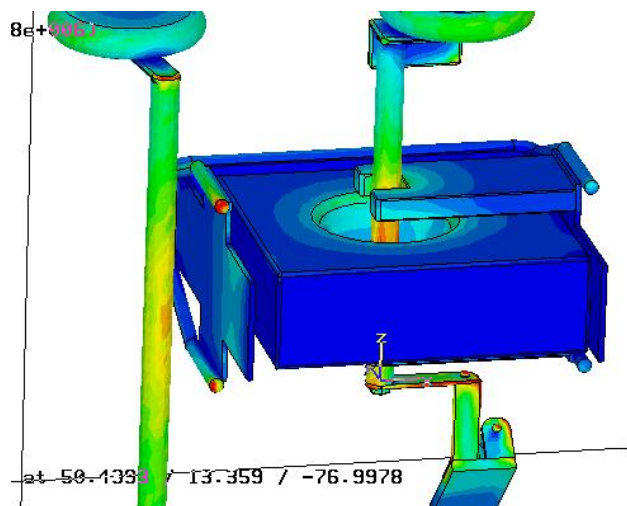


図 5 CT 周辺部の電界強度計算結果

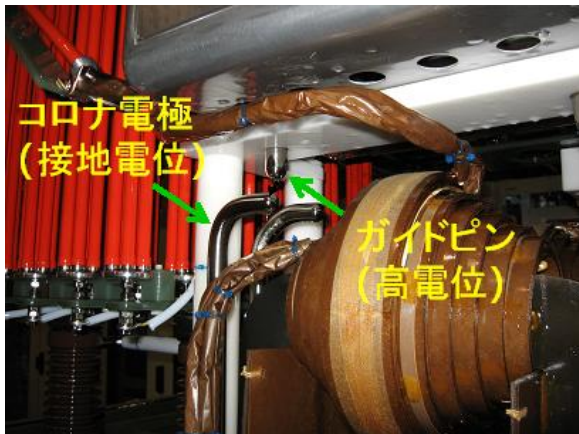


図6 変調器の放電箇所の調査

で、70mm以上の絶縁距離が保てるよう機器の配置を変更する放電対策を行った。

しかしながら、2台の変調器では依然、放電が発生した。これは、耐圧の弱いところに対策を施すと、次の対策を施していない弱い箇所で放電が発生するためだと考えられる。今後も耐圧の弱い場所の調査と放電対策を継続していく。

5. 気中放電に対する対策

変調器内の半導体スイッチは、ビームオフ時、カソード電圧まで電位が上昇する。このため、FETをオンさせるためのゲート回路の電力は、数段の絶縁トランスを介して供給される。図7は、その回路図を示す。気中に設置された絶縁トランスと油中の絶縁トランス間の配線は、同軸ケーブル10D2Vの芯線を用いており、その電位は浮遊電位となっている。このため、気中に設置された絶縁トランスは、トランス間の浮遊容量で決まる分圧比の電圧となる。気中で高電位に晒された絶縁トランス及びその配線では、部分放電が生じ、オゾンや硝酸などの腐食性物質が生成されていた。これらの生成物により金属が腐食しその堆積物が碍子に付着し放電が発生したり(図8参照)、絶縁トランスの結束バンドが破壊したりして、運転時間が1万時間を越える頃から半導体スイッチのドライブユニットが故障しはじめた。

そこで絶縁トランスの部分放電対策として、浮遊電位を接地電位に固定しようと検討したが、油中の絶縁トランスでの10D2V芯線部の電界強度が高くなりこの部分での絶縁破壊のリスクが高くなるので、浮遊電位のまま気中の絶縁トランスを変調器オイルタンク内に移設することとした。昨年度、試作器を製作し、部分放電測定を行ない、AC50kVで部分放電電荷量が10pC以下であることを確認した。

6. まとめ

変調器内の油中放電箇所を調査し、評価用に5台のアノード変調器に対策を施した。3台の変調器に

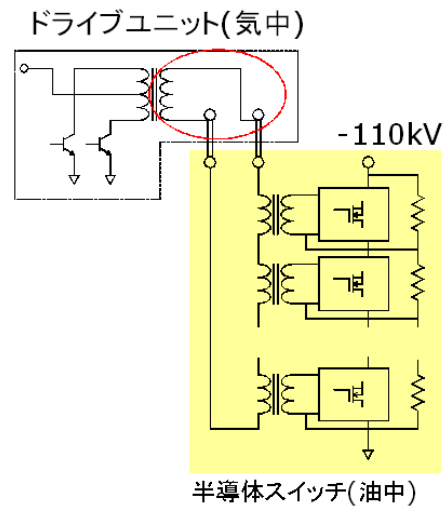


図7 半導体スイッチのゲートドライブ回路



図8 腐食生成物による碍子の沿面放電痕

改善の傾向が見られたが、2台の変調器ではまだ放電が発生している。今年度残りの15台に対策を施すと共に、対策後も放電が発生している変調器の放電箇所を調査する。絶縁トランスでの放電対策は、今年度20台に施す。

謝辞

放電対策を遂行するに当たり放電箇所の調査などに協力していただいた、株式会社日立製と日新パルス電子株式会社に感謝いたします。

参考文献

- [1] 中村 他、Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000), pp.219-221.
- [2] 川村 他、Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society (2004), pp.287-289.
- [3] 電気学会、「電気工学ポケットブック」p287 (1987)