

京大炉中性子発生装置(電子ライナック)の現状

STATUS OF KURRI-LINAC

阿部尚也^{#,A)}, 高橋俊晴^{A)}, 堀順一^{A)}, 窪田卓見^{A)}, 佐藤紘一^{A)}, 阪本雅昭^{A)}, 高見清^{A)},
Naoya Abe^{#,A)}, Toshiharu Takahashi^{A)}, Jun-ichi Hori^{A)}, Takumi Kubota^{A)},
Koichi Sato^{A)}, Masaaki Sakamoto^{A)}, Kiyoshi Takami^{A)}

^{A)} Research Reactor Institute, Kyoto University

Abstract

The use number including riding-together operation of KURRI-LINAC was 71 cases to be the highest ever in 2013FY. The low energy experiment of less than 30 MeV was 30 cases before long. On the other hand, machine time is 1,609.9 hours, and decreased from the last fiscal year for about 500 hours. KURRI-LINAC had two machine troubles. First, the driver for main thyatron in No.1 modulator was stopped. The cause was vibration after a pulse generation. Second, photocoupler which drives MOSFET which drives the thyatron in the DeQing circuit of No.1 modulator was failed. Although it was working normally for several years, failure and exchange had occurred frequently from October, last year. The cause was presumed to be the loose connection of the positive feedback resistor of a comparator.

1. はじめに

京大炉中性子発生装置(以下ライナック)は1965年に設置されたLバンド帯(1300 MHz)の電子線型加速器である。1968年より全国共同利用設備として稼動を開始した。当初は定常的な中性子源である原子炉と相補的なパルス中性子源としての利用が主で、他に電子線照射や制動X線照射が行われていたが、近年では、1990年開始の放射光実験に加え、2008年には10MeV以下の低エネルギー電子線照射としての利用が開始、2012年にはマイクロ波電界放出を利用した微弱ビーム実験が行われるようになった。また、民間企業との共同研究がここ数年で実施されている他、学生実験も実施されており、産学連携及び人材育成においても活躍の場が多くなっている。50年近く経過した現在も多様なビーム源として活発に利用されている加速器である。

現状のライナックのスペックをTable 1に示す。

Table 1: Electron Beam Specification

Drive Mode	Long Pulse	Short Pulse
Beam Energy	46 MeV (No load), 30 MeV (MAX Power)	
Repetition Rate	1~140 Hz, Single Shot, Partial Driving	1~300 Hz, Single Shot, Partial Driving
Pulse Width	0.1~4 μs	2~100ns, Single Bunch
Peak Current	Max:500 mA(4 μs)	Max:5 A(100ns)
Average Current	Max:280 μA(4 μs)	Max:100 μA(100ns)

[#] abe@rri.kyoto-u.ac.jp

2. 利用状況と運転時間

昨年まで、年間ベースの記録を報告していたが、今年より年度ベースの記録を報告する。2013年度の利用件数は、中性子実験14件、電子線照射22件、X線照射12件、放射光実験14件で、保守等を含む総計では前年度を上回る71件であった(相乗り運転含む)。相乗りを含まない運転でも65件を数え、いずれも過去最高の利用件数であった。また、定格30MeV未満の低エネルギー実験は30件であった。一方、運転時間は前年度を500時間近く下回る1609.9時間であった(Figure 1)。加速器及び実験装置関係のトラブルによる利用中止が主な理由である。

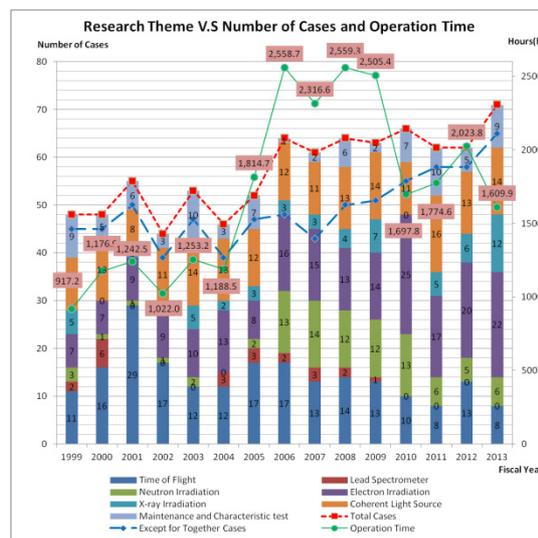


Figure 1: Research theme and operation time of KURRI-LINAC.

3. トラブル

3.1 モデュータ主サイラトロンドライバーの不具合

3.1.1 故障発生～一時対応

2013年6月の加速器利用運転中 (Long・5Hz (モデュータは 10Hz)) に、インターロックが働いていないにもかかわらず、突如電子ビームが出射されなくなった。原因調査の結果、初段モデュータ内の主サイラトロンドライバー (以下ドライバー) 高圧部のヒューズが切断、整流ダイオードの耐圧低下、及び、高圧パルス生成用の 6 組並列 PowerMOSFET(2SK2613) と FET ドライバー IC (TC4429) のセットの内 1 組の故障により、パルスが出力されないことが判明した (Figure 2)。故障部品の交換によりドライバー単独では正常なパルス出力を確認できたため、主サイラトロン (L-4888B) と接続したところ、アノード高圧がかかっているにもかかわらず、即時に同様の故障が発生した。L-4888B の使用時間は 5 千時間余りであったが、サイラトロンの不具合を疑い、3 年前まで使用していた

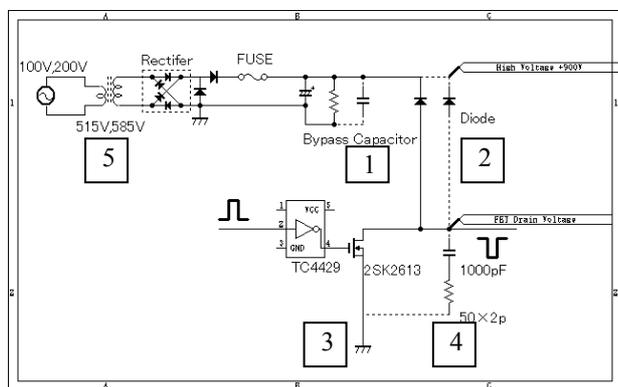


Figure 2: Simple circuit diagram of Thyatron Driver (Brake line: Insert at 3.1.3, Number: Change to 3.1.3).

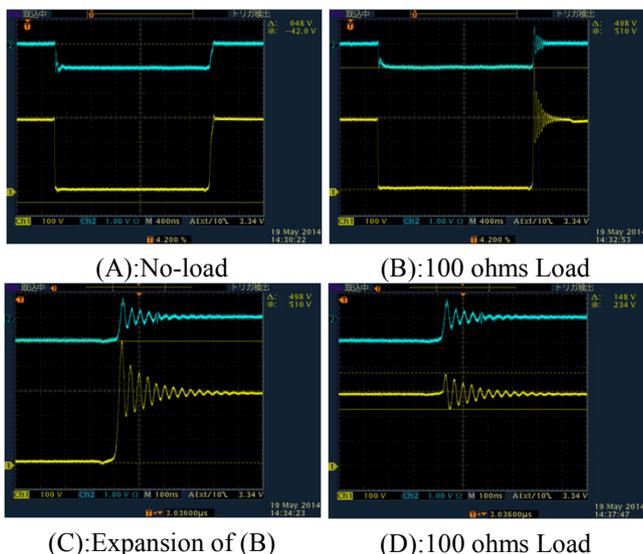


Figure 3: Yellow (A,B,C):FET Drain Voltage, (D):High Voltage, Blue: Monitor Output of the Driver.

旧機種 (F-241) と交換すると一時は正常動作を示したが、一か月後に再発した。故障部品交換に加えてパルス充電のコンデンサを交換した後は正常動作が続いた。L-4888B をメーカーの L3-Communications に返送し調査を依頼したが正常との回答であった。このため、ドライバーに原因があると推定し、本格的な調査を行った。

3.1.2 ドライバー内部回路調査

ドライバー内部のパルス波形調査実施に当たり、FET 保護のため高圧直流電源電圧を通常の 3 分の 1 の +300 V で行った。結果、FET ドレイン電圧において、出力無負荷時にはほとんどないパルス発生後の振動が、実機で使用の 100 Ω 負荷時には大きく発現した (Figure 3(A,B,C))。振幅は +500 V を超えており、通常時の高圧電圧の場合に換算すると +1500 V に達すると推定される。これは、FET の絶対最大定格 +1000 V を大きく上回っており、この振動が故障の根本的原因であると推定した。また、モニター波形及び高圧直流電源にも上記と同じタイミングに振動が見られた (Figure 3(D))。この振動が FET ドレイン電圧の振動に影響を与えていると推定し、改善を試みた。

3.1.3 振動対策～修理完了

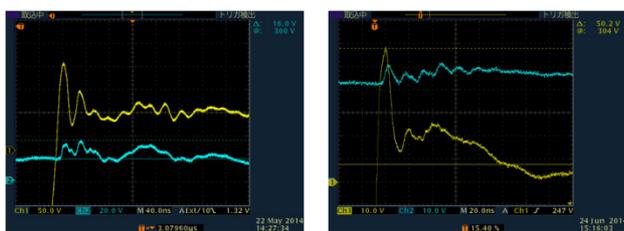
1. 高圧直流電源部に高周波用のバイパスコンデンサが無かったため、表面実装型セラミックコンデンサ 3300 pF・3 kV と円盤型セラミックコンデンサ 2200 pF・2 kV×2p を追加した。加えて全体の容量不足を考え、更にフィルムコンデンサ 0.033 μF・4 kV×2p の追加を行った。結果、FET ドレイン電圧の振動に 10% 程度の軽減は見られたが、十分でない。一方、高圧直流電源部の振動は 20% 程度までに大幅に改善された。

2. 次に、逆電圧保護のダイオードのインダクタンス軽減を図ってダイオードの並列化を行った。結果、FET ドレイン電圧の振動は更に 10% 程度軽減したが、まだ十分でなかった。 (Figure 4(A))

3. ここで、更なるダイオードのインダクタンスの軽減と回路基板のインダクタンスの軽減を図って、グランドラインを拡げて、ダイオードの配線を短縮した。加えて、高圧直流電源部の高周波用のコンデンサに円盤型セラミックコンデンサ 5000 pF・2 kV×2p を追加した。その結果、振動は 40% 程度まで軽減した。

4. 更なる対策として、FET のドレイン-ソース (GND) 間に CR 直列 (1000 pF・50 Ω×2p) を追加した。その結果、+340 V 程度まで振動は軽減した。これは、通常の電源電圧時では +1020 V に相当するが、まだ FET の絶対耐圧を若干上回っている (Figure 4(B))。

5. 最終的には出力パルス波高に余裕があったため、高圧電源トランスのタップを従来の 88% にすることで、FET の絶対最大定格 +1000V を下回らせることで対応した。現在まで正常に稼動している。



(A): Added Capacitors and Diodes (B): Final

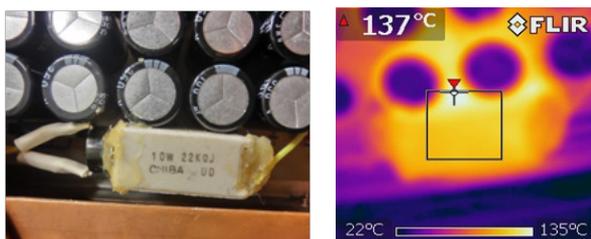
Figure 4: Yellow: FET Drain Voltage, Blue: High Voltage.

3.2 DeQing の不具合

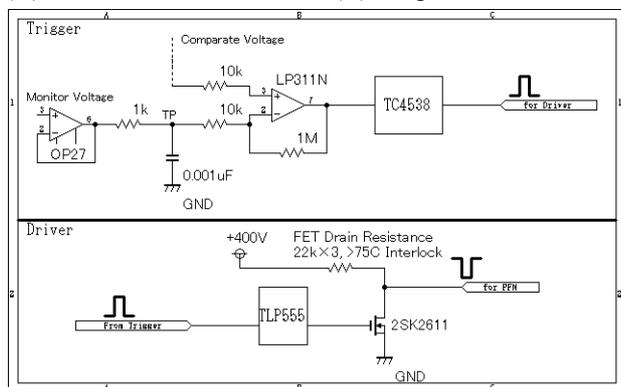
3.2.1 故障発生～一時対応

2013年10月の加速器利用運転中 (Short・300Hz) に、モジュレータのインターロックにより加速器が停止した。原因は No.1DeQing のサイラトロン駆動用の FET (2SK2611) ドレイン抵抗過熱 (温度スイッチ動作点: >75°C、Figure 5(A,B)) による温度インターロックの動作であり、DeQing 自体も動作していないことが判明した。メーカー (IDX) による調査の結果、FET を動作させるフォトカプラ (TLP555) が故障していることが判明した。部品交換で DeQing の正常動作が確認されたが、フォトカプラが故障した原因が不明のため、ノイズの影響を軽減するため、フォトカプラのトリガーラインにフェライトビーズを入れて復旧した。

しかし、2014年1月の加速器運転中 (Short・60Hz) に同様の故障が再発。フォトカプラに加えて FET も交換して復旧したが、2月の運転中 (Short・60Hz)



(A): FET Drain Resistance (B): Degree of Resistance



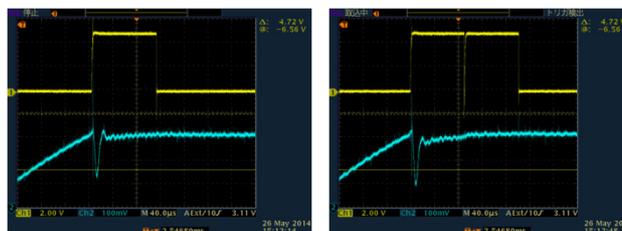
(C): Simple circuit diagram of Thyatron Driver

Figure 5: No.1 DeQing.

に再発。再度フォトカプラのみ交換した後は5月まで故障無く運転した。

3.2.2 根本的対応

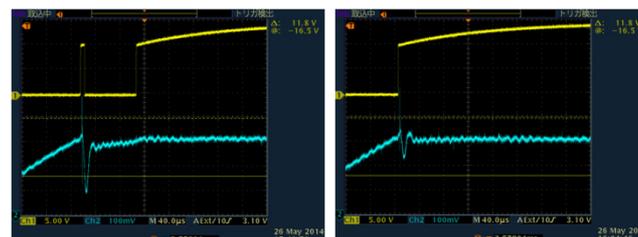
FET ドレイン抵抗の過熱は FET が連続して動作しない限り発生しないが、フォトカプラの故障は、FET をオンにしない故障であったため、FET ドレイン抵抗の過熱が説明できない。このため、トリガー波形の調査を行った結果、フォトカプラを動作させるトリガーがダブルパルスになることがあることが判明した (Figure 6)。このトリガーは、制御室に置かれている DeQing コントローラ内の比較器 (LP311N) によって制御されており、DeQing 設定電圧を電圧モニターの測定電圧が上回ったときにトリガーパルスが発生する。この測定電圧がノイズの影響を受けていると考えられたため、比較器や単安定マルチプレータ (TC4538) の電源部にパソコン (1 μ F + 0.1 μ F) を追加して電源の安定性を強化したが改善しなかった。次に電圧モニターの BNC ケーブルをトロイダルコア (日立金属アドメット、FT3KMF4535G) に4回巻きつけた結果、ダブルパルスは完全に無くなった (Figure 7)。だが、計算上ではダブルパルスだけでは FET ドレイン抵抗の過熱まで至らない。



(A): Normal (B): Double Pulse

Figure 6: Yellow: Trigger Pulse, Blue: Monitor of Modulator High Voltage.

そこで過去に起こった DeQing の故障記録を調べると、2005年10月の故障で、比較器の正帰還抵抗器 (1 M Ω) が接触不良などの理由で外れると 100 μ s 程度の間隔で次のパルスまで継続するマルチパルスを発生することが示されていた。今回の故障も、このマルチパルス発生が原因であれば説明できるため、正帰還抵抗器の抵抗値を下げ (240 k Ω) 動作を安定化させた上で、抵抗器を基板経由なしで比較器に直付けして接触不良が起こらないようにして改修完了とした。現在まで正常に稼働している。



(A): Double Pulse (B): Insert Toroidal Core

Figure 7: Yellow: Trigger Pulse, Blue: Monitor of Modulator High Voltage.