

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、突如電子ビームが射出されなくなった。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

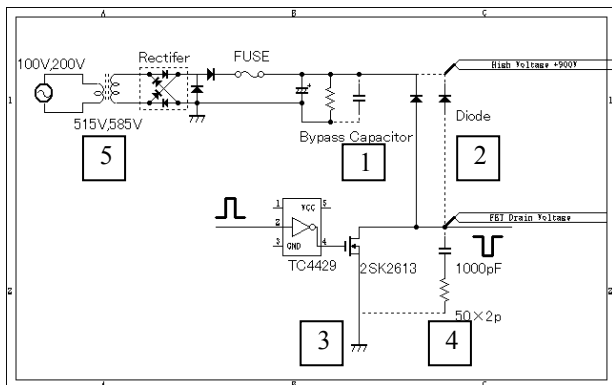


Figure 2: Simple circuit diagram of Thyatron Driver (Brake line: Insert at 3.1.3, Number: Change to 3.1.3).

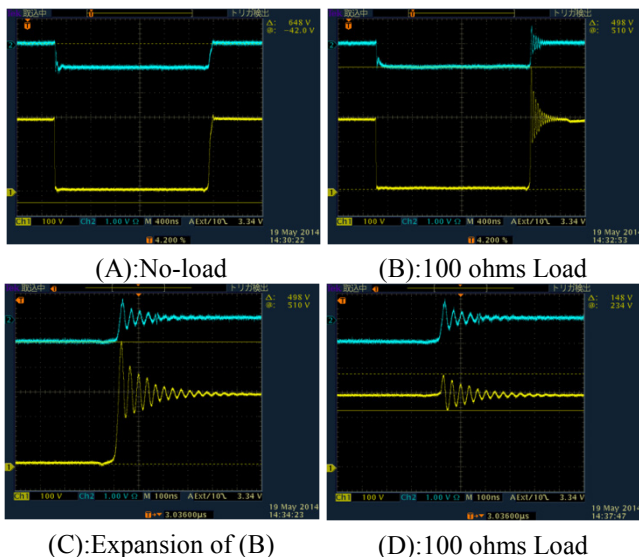


Figure 3: Yellow (A,B,C):FET Drain Voltage, (D):High Voltage, Blue: Monitor Output of the Driver.

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+300V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100Ω負荷時には大きく発現した(Figure 3(A,B,C))。振幅は+500Vを超えており、通常時の高圧電圧の場合に換算すると+1500Vに達すると推定される。これは、FETの絶対最大定格+1000V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、+340V程度まで振動は軽減した。これは、通常時の電源電圧時では+1020V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。

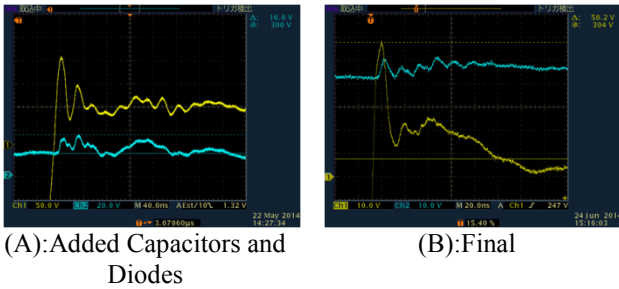


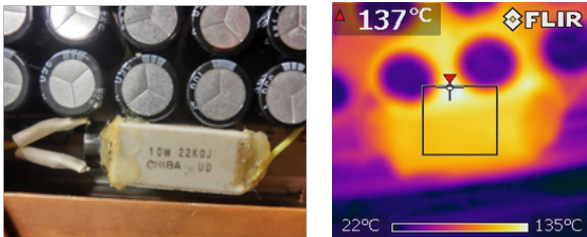
Figure 4: Yellow: FET Drain Voltage, Blue: High Voltage.

3.2 DeQing の不具合

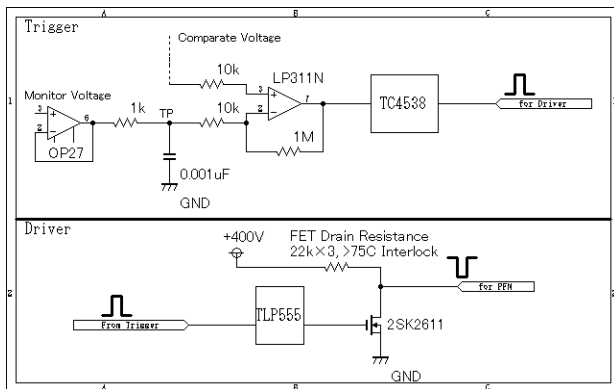
3.2.1 故障発生～一時対応

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



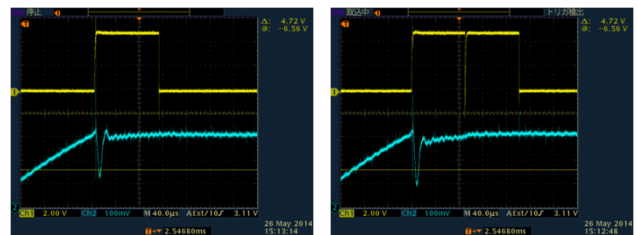
(C): Simple circuit diagram of Thyatron Driver

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

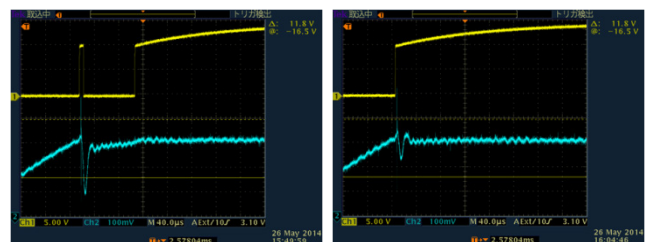
FET ドレイン抵抗の過熱は FET が連続して動作しない限り発生しないが、フォトカプラの故障は、FET をオンにしない故障であったため、FET ドレイン抵抗の過熱が説明できない。このため、トリガー波形の調査を行った結果、フォトカプラを動作させるトリガーがダブルパルスになることがあることが判明した (Figure 6)。このトリガーは、制御室に置かれている DeQing コントローラ内の比較器 (LP311N) によって制御されており、DeQing 設定電圧を電圧モニターの測定電圧が上回ったときにトリガーパルスが発生する。この測定電圧がノイズの影響を受けていると考えられたため、比較器や単安定マルチバイブレータ (TC4538) の電源部にパスコン (1 μF + 0.1 μF) 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 MΩ) が接触不良などの理由で外れると 100 μs 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て (240 kΩ) 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らないようにして改修完了とした。現在まで正常に稼動している。



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

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