

各々8 か月間利用運転は中断されたが、年平均で約5,000 時間の実績を有する。現在の総運転時間は約36,000 時間で、運転開始時から継続して運転中の324MHz クライストロンは 15 本 (DTL#1, DTL#3～SDTL#12, #14) である。RFQ, DTL#2, SDTL #13, #15 の 4 本のクライストロンを交換した時期を図 2 内に示したが、以下に交換原因を列挙する。

- RFQ 用：高压電源#1 号機の交換に伴うシステム変更のため。
- DTL#2：アノード短絡現象が多発し、その原因が変調器側かクライストロン側かを調査するため。
- SDTL#13：高压 OFF が多発。耐压劣化によって設定電圧まで高压を印可できないため。

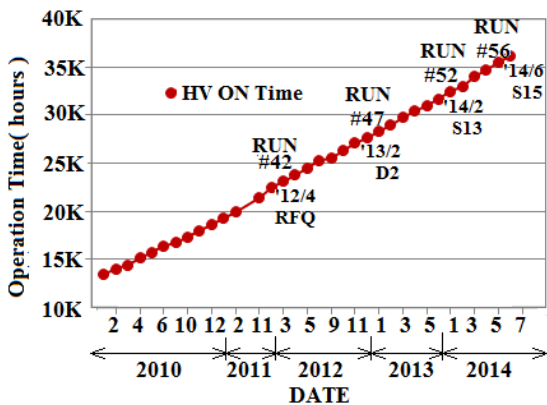


Figure 2: Average operation hours of 324MHz klystrons.

4. M-アノード短絡状況

我々は 2012 年 4 月の RUN#42 より現在まで約 2 年半、クライストロン毎の短絡回数や短絡時波形などのデータを継続的にモニタしている。

4.1 短絡データの測定方法

短絡データはステーション毎に設置された DPO2014 型オシロスコープ(Tektronix)で測定される。オシロスコープへの入力信号はクライストロンビーム電流(Ib)、M-アノード電圧 (Va)、M-アノード電流 (Ia)、カソード電圧 (Vk) の 4 つであり、放電発生時のビーム電流立上りエッジでトリガーをかけ各部の波形変化を保存している。図 3 に M-アノード短絡時の代表的な上記 4 波形を示す。図中央のスパイク状波形が短絡時波形である。M-アノード電位は短絡後 0.4ms で短絡前の電圧にリカバリーしており、カソード電圧には変化が見られない。図からはピークビーム電流が 25pps パルスの約 1.3 倍流れていることも読み取れる。これは 25pps パルスのビーム電流がカソードから分圧された M-アノード電圧で制御されているのに対して、短絡時電流はカソード全電圧で引き出されるからである。324MHz クライストロンのビームパービアンスは 1.37 μ perveance(平均)であり、この数値から 25pps パルスのビーム電流値：Ib(25pps)を求めると

$$Ib(25pps) = 1.37\mu Vk^{(3/2)} \quad (1)$$

である。一方、短絡時のピークビーム電流値：

Ib(discharge)は電子銃パービアンス：1.73 μ perveance (平均) を使って記述でき

$$Ib(discharge) = 1.73\mu Vk^{(3/2)} \quad (2)$$

と書ける。ここで例えば Vk=100kV を(1),と(2)に代入すると Ib(25pps)=43A、Ib(discharge)=55A であり、

$$Ratio = Ib(discharge)/Ib(25pps) = 1.28$$

が得られる。従って、オシロスコープのトリガーレベルを 25pps ビーム電流値の 1.2 倍に設定すれば、M-アノード短絡事象を正確に捉えていると言える。なお、本来は M-アノード電圧の「0V 立下りエッジ」で検出すべきであるが、この方式では「HV-OFF」時もカウントするため、電流波形で検出するほうがより正確である。

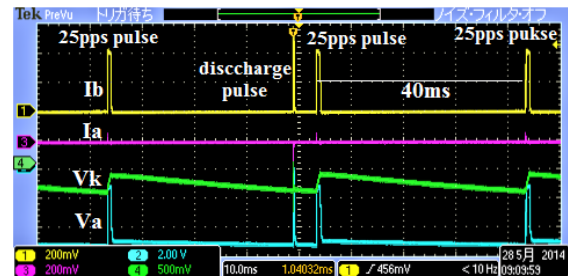


Figure 3: Typical voltage waveforms of klystron beam current (yellow), m-anode voltage (sky blue), m-anode current (purple), and cathode voltage (green).

4.2 クライストロン毎の短絡回数

図 4 に RUN#42 から 2013/5 月末の RUN#49 間に計測されたクライストロンステーション毎の M-アノード短絡回数を示す。なお、この期間中の RF 構成は図 1(a)である。縦軸の回数は RUN 毎に運転日数が異なるため、一日平均の値である。図より得られた主な知見を以下にまとめる。

- DTL#2 クライストロンは RUN#46 終了後交換され、その前後で短絡頻度は大きく改善された。これにより短絡原因は変調器側ではなく、クライストロン電子銃部の放電であると結論づけた。
- 19 台中、短絡回数が比較的多いステーションは DTL#3, SDTL#2,#3,#5 の 4 台である。
- 上記 4 台中、SDTL#5 を除く 3 台の短絡回数は RUN 毎に不規則に変動するが、S5-tube の頻度は平均 4.6 回/日と比較的一定である。S5-tube の放電メカニズムは他とは異なると推定される。
- 短絡頻度とカソード電圧との間に正の相関関係は認められない。
- SDTL#4, #6～#11 の 7 台のクライストロンの短絡回数は無視出来る程度少ない。

次に、短絡頻度の高い DTL#3, SDTL#2,#3,#5 の RUN#46～RUN#56 間の一日平均短絡回数を図 5 に示す。なお、RUN#49 と RUN#50 間に図 1(b)に示す RF 機器構成に更新され、RUN#52 の 2014/2/17 以降、MLF へのビーム供給が再開された。図から、RUN の経過と共に 4 台のクライストロンの短絡回数は減少傾向を示していることがわかる。その上、減少傾

向を示しはじめる時期と 400MeV リニアックの運用開始時期との相関も読み取れ、非常に興味深い結果となった。

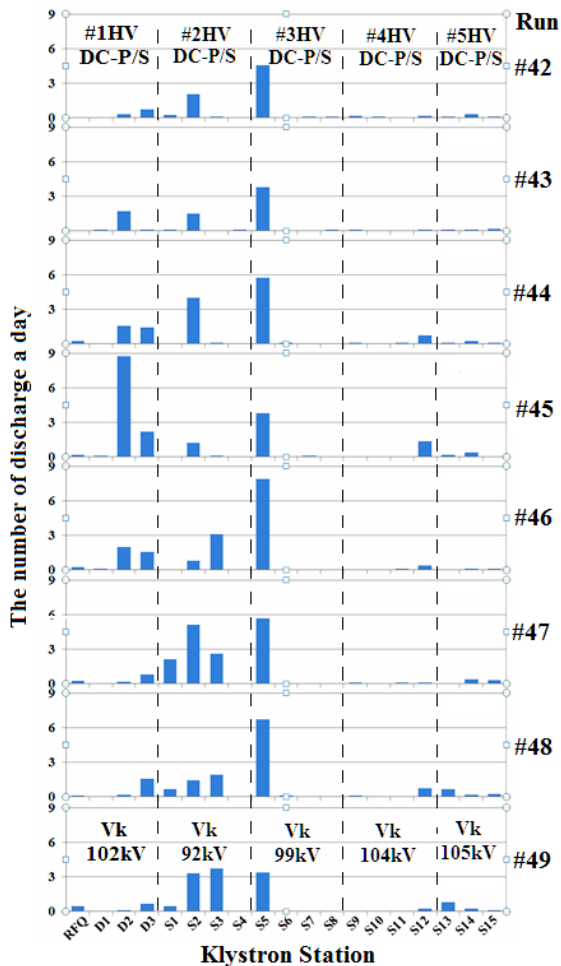


Figure 4: The Number of discharge a day against klystron stations during RUN#42 to RUN#49.

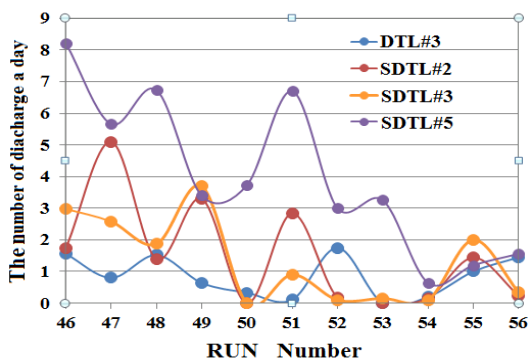


Figure 5: The history of the number of discharge a day as a function of RUN number.

5. 新たなデータ収集

3.で述べたように 2014 年上半期に約 35,000 時間運転した SDTL#13, #15 の 2 本のクライストロンを交換した。クライストロンは高価な RF コンポーネントではあるが寿命品でもあり、必要性能を満足し

なければ逐次交換される。運転開始から運用している RF 機器データ収集・監視システム⁽⁴⁾や短絡データからは今回の HV-OFF 多発・耐圧劣化の兆候を予知できず、利用運転中の突然の交換作業となった。耐圧劣化の兆候を捕まえ、計画的にクライストロンの交換作業が行えるデータ収集系を構築することは、クライストロン 45 本を管理・運用する高周波源スタッフにとって、今後の重要課題と考える。

取得データからは、他のステーションでは生じていない SDTL#13, #15 ステーション特有の波形 (図 6) がモニタされていた。その波形とは M-アノード短絡後、次の 25pps パルスまで短絡前の電圧にリカバリーせず、結果としてビーム電流も 10ms オーダーで流れ続ける (この波形をロングパルスと呼ぶ) ものである。すなわち、放電が次の正規パルスまで継続する現象である。これらに加えて、クライストロン交換直前の M-アノード電圧波形 (図 7) からは、放電発生時の電圧がアース電位まで低下していないこともわかった。我々は今まで放電=地絡と考え、4.1 に示した測定方法でデータを取得していた。図 7 のような波形変化は取得出来ておらず、これが耐圧劣化を予知できなかった主要原因ではないかと考えている。そこで今回、10ms オーダーのロングパルス波形と瞬時電圧降下波形を検出可能なロング&スパイク波形検出モジュール(NIM)を設計・試作した。

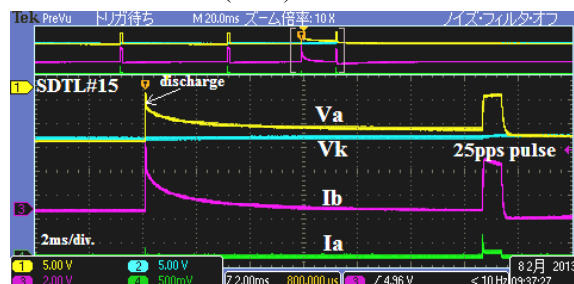


Figure 6: The typical waveform of long-pulse mode when the discharge of m-anode occurred.

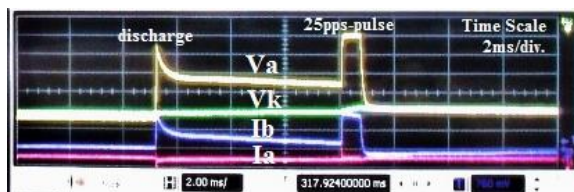


Figure 7: The typical long-pulse waveform obtained SDTL#15 klystron station.

6. ロング&スパイク波形検出モジュール

6.1 ロングパルス波形検出回路と模擬波形での試験

図 8 にロングパルス波形検出回路のブロック図を示す。入力カソード電圧波形と M-アノード電圧波形で、25pps パルスインターバル中にこの 2 入力の差電圧が基準電圧(可変)以上であり、しかもその継続時間が 0.5ms 以上であれば MPS(Machine Protection System) に '異常' 信号を出力するものである。出力には 0.5ms の時間間隔をもつ ON, OFF パ

ルス(50Ω, 10V, 5μs)信号も用意した。この信号で M-アノード変調器内の半導体スイッチを動作させ、1ms 以内にクライストロンビーム電流を制御するものである。クライストロンのコレクターなどロングパルス時の熱的なダメージを少しでも軽減させることを目的としている。

この回路の試験は、10Ch 出力のトリガー分配モジュール(NIM)と DG535 パルス発生器の模擬波形を用いて行った。図 9 に試験時の代表的な各部波形を示す。39ms インターバル中の任意の時刻で模擬カソードパルスと模擬 M-アノードパルスの差電圧が 1V 以上(基準電圧は 1V)生じた時に ON、OFF パルスが正常に出力することを確認した。MPS 取り合い信号(電流駆動で~8mA)に関しては、制御系の MPS 機器が準備出来次第、試験を行う予定である。

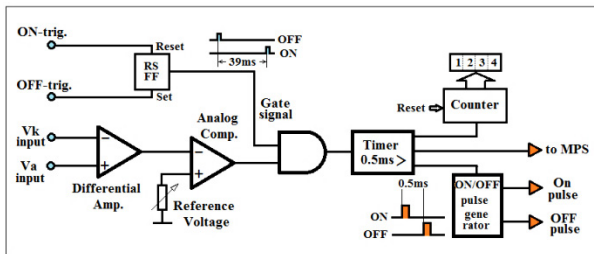


Figure 8: Block diagram of long-pulse detect circuit.

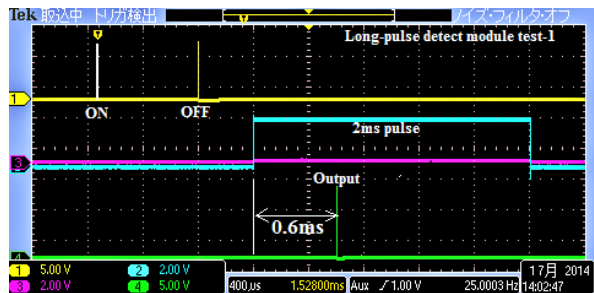


Figure 9: Typical voltage waveforms of long-pulse circuit. Input ON-pulse (white), input OFF-pulse (yellow), substitute cathode pulse (purple), substitute m-anode pulse (sky blue) and output-trigger pulse (green).

6.2 スパイク波形検出回路と実機での試験

図 10 にスパイク波形検出回路のブロック図を示す。入力には M-アノード電流波形(C.T で計測され電圧出力)である。M-アノード電圧に瞬時電圧降下が生じた時、25pps パルス時とは逆向きに M-アノード電流が流れることを利用してこの現象を検知するものである。25pps インターバル中に基準電圧(可変)以上の信号が入力された時、パルス幅: 2μs のパルスを出し、オシロスコープのトリガー信号として使用する。又、電圧低下回数を示す 4 桁のカウンター(現場でのみモニタ可能)表示器をモジュール前面に取り付けた。

この回路の試験は ACS#16 ステーションで行ったが、この時に得られた代表的な各部波形を図 11 に示す。6/24~25 にかけて約 20 時間データ収集した結果で、放電回数: 13 回全てのスパイク状波形をオシロスコープ画面上に表示したものである。環境ノイ

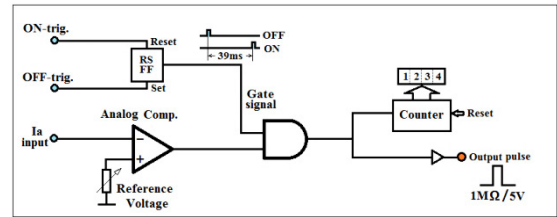


Figure 10: Block diagram of spike-pulse detect circuit.

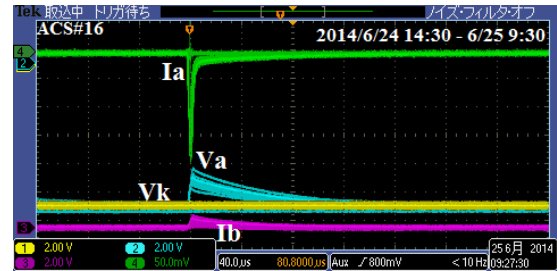


Figure 11: Typical voltage waveforms when the discharge of m-anode occurred. M-anode current (green), klystron beam current (purple), m-anode voltage (sky blue), and cathode voltage (yellow).

ズ等の影響もなく良好なデータを得た。この結果を受け、45 本全数のクライストロンステーションに実機仕様のスパイク波形検出モジュールを取り付けることになった。新規モジュールは NIM 規格: 2 幅サイズで、高圧電源毎に集約されたクライストロン 4 本の M-アノード電流波形が入力信号となる。オシロスコープの操作なく、カウンター表示値でステーション毎の放電回数を簡易に識別可能である。

まとめ

2012 年 4 月より 324MHz クライストロンの M-アノード短絡現象に着目し、短絡回数や短絡時波形などのデータを継続的に収集している。20 本のクライストロンの数台に短絡現象が比較的多く認められており、その頻度は減少傾向を示してはいるが、根本的な原因については未だ検討中である。耐圧劣化で 2 本のクライストロンを交換したが、事前にその兆候を予知出来なかった。リニアックの稼働率向上を目指す一環として、クライストロンの計画的な交換が行えるようデータ収集系を整備中である。

参考文献

- [1] A.Yano, et al., "Development of the klystrons for the High Intensity Proton Accelerator Facility", Proceeding of the Second Asian Particle Accelerator Facility, Beijing, china, 2001, pp783-785.
- [2] T.Hori, et al., "J-PARC リニアック クライストロン高圧電源停止頻度の改善", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 3-5, 2013, Nagoya, Japan, pp1001-1003.
- [3] H.Oguri, et al., "J-PARC リニアックの現状", in these proceedings.
- [4] Y.Fukui, et al., "J-PARC リニアック 324MHz クライストロンのデータ収集システム", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2007, Wako, Japan, pp504-506.