

SACLA でのサイラントラブルと対策

COUNTERMEASURE OF THYRATRON RELATED TROUBLE AT SACLA

中澤伸侯^{A)}, 益田邦和^{A)}, 稲垣隆宏^{B)}, 近藤力^{B)}, 大竹雄次^{B)}
Shingo Nakazawa^{A)}, Kunikazu Masuda^{A)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Chikara Kondo^{B)}, Yuji Otake^{B)}

^{A)} SPring-8 Service Co., Ltd.

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

In the X-ray free electron laser facility SACLA, 79 modulator power supplies with thyatron tubes as the high voltage pulse switch devices are operated. Since the “aged” thyratrons over 16,000 hours cause many troubles, such as a variation of klystron output due to the timing drift and conduction loss fluctuation, and a damage of trigger circuit due to a huge spike voltage. We consider many of these troubles are caused by the cathode degradation and poor ionization during the conduction. We found the longer pre-trigger pulse improves the ionization and drastically reduces the voltage spike and timing fluctuation. In order to make diagnosis of thyatron degradation, we checked the operation database related with the thyatron performance, such as the high voltage pulse timing and the RF phase of the klystron output. In addition, we regularly measured the trigger grid voltage waveforms and checked the residual conduction voltage and the voltage spike. These diagnoses enable us to estimate the life time of the thyatron, to replace the thyratrons before the fluctuation occurs, and to reduce the risk of the troubles and maintenance cost.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA[1]では79台のモジュレータ電源を使用しており、サイラントロンのスイッチングによりクライストロンへの高電圧パルス供給を行っている。2011年の運転開始から6年が経過し、運転時間は約4万4千時間に達した。この間、我々はサイラントロンの劣化に伴う様々なトラブルを経験しながら、初期より使用していたサイラントロンがほぼ全てが寿命を迎え、交換を行った。我々は、高額なサイラントロンを、加速器の運転に与える影響を最小限におさえつつ、寿命まで使い切るべく、さまざまな対策を行ってきた[2,3]。また、運転中の突然の故障や不安定動作を避けるべく、劣化についての診断を行い、運転に重要な箇所は定期的に交換

をするなどの運用を進めてきた。本発表では、これまでのサイラントロンの使用状況と、トラブルの傾向及びその対策について報告する。

2. SACLA におけるサイラントロンの使用状況

2.1 モジュレータ電源の概要

SACLA では、PFN 回路、サイラントロン、パルストランス等を絶縁油タンク内に収めた油密閉型の高電圧パルスモジュレータによって、クライストロンに印加する高電圧パルスを発生させている。Figure 1 にその概略図を表す。このモジュレータ電源は、PFN 回路のコンデンサに最大で 50kV に充電された電荷をサイラントロンによって放電し、生じた大電力パルスをパルストランスによって昇圧してクライス

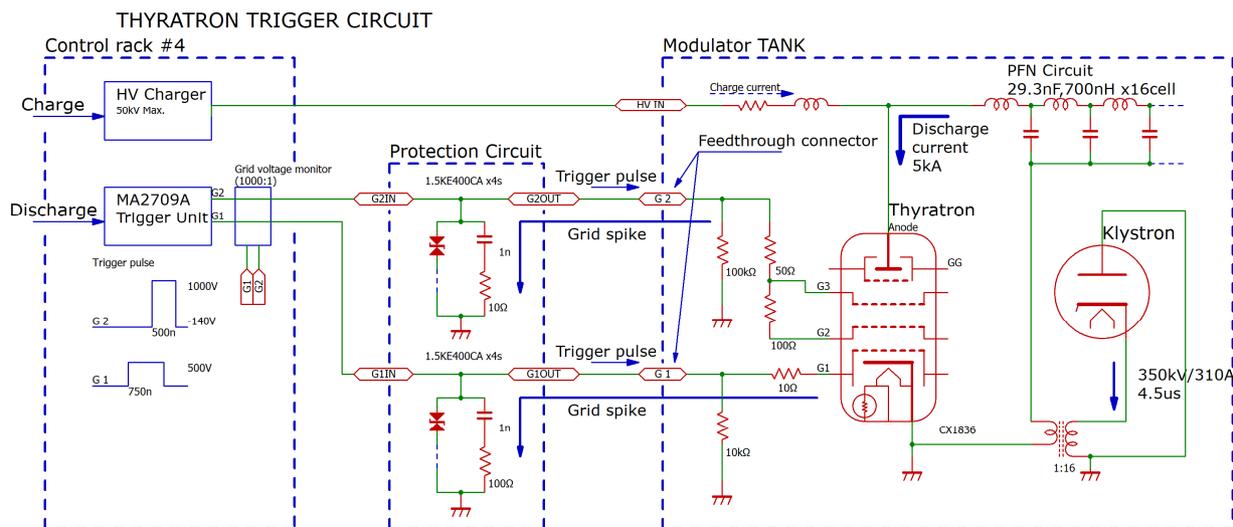


Figure 1: Block diagram of the klystron modulator for SACLA and its thyatron trigger circuit.

トロンへ供給している[4]。この時、サイラトロンを通過するパルス電流は半値幅で約 $4.5 \mu\text{s}$ 、電流は 5kA に達する。主に使用しているサイラトロン e2V CX1836 は、3 段のコントロールグリッド (G1,G2,G3) を持ち、グリッドにトリガパルスを印加することにより導通状態となる[5]。グリッド駆動用トリガパルスは e2V 社製 MA2709A トリガシステムより供給される[6]。トリガシステムは、上位からのタイミング信号を受けると G1 に 500V 750ns のプレトリガを出力する。これにより、プレイオナイズと呼ばれるカソードと G1 グリッド間の重水素ガスのイオン化を行う。プレトリガより 500ns 後、G2 に 1000V 500ns のメイントリガが出力され、サイラトロンの G2,G3 グリッドへ印加される。これによりアノードからカソード間全体がプラズマ化され導通状態となる。また、G2 には誤動作防止のために -140V のバイアス電圧が印加される。油タンクの外には、トリガシステム保護のための金属ケースに収納された保護回路が設置されている。 1.6kV 以上の過大電圧を短絡させるため、クランプ電圧 400V の TVS ダイオードを 4 直列にして使用しており、並列に CR 素子によるスナバ回路を接続している。また、2015 年に本学会で紹介した、高周波サージを吸収するフィルタ回路を順次導入しており、現在 20 台のモジュレータについて実装が済んでいる[7]。

2.2 使用するサイラトロンの種類

2017 年 7 月現在、3 種類のサイラトロンを運用している。Table 1 に、サイラトロンの種類ごとの使用状況を示す。e2V CX1836 は 2010 年の SACLA 運転開始当初から採用しているモデルで、現在 58 本を加速器に使用している。2013 年から試験的に、耐圧に優れた 3Gap サイラトロンである e2V CX1937 を、2014 年から L3 社の L-4888D を使用している。CX1937 および L-4888D に関しては導入年度が新しく、2017 年 7 月現在、故障したものは無い。Figure 2 に、年度毎の現在までの加速器からサイラトロンの取り外し回数およびその理由を示す。6 年間で 157 回の交換作業を行っている。2014 年にピークが見られるが、これは初期に導入したサイラトロンが一斉に寿命に到達したことによるものである。Scheduled には、予防保全および、評価及び移設に伴う交換及び含まれる。加速器より取り外したサイラトロンは、テストスタンドにて性能評価を行い、まだ使用できるものは安定性がそれほど必要でない加速器の下流にて再利用をしている。

3. サイラトロンの故障の症状と原因

Figure 3 に、使用不能となったサイラトロンの総運転時間の分布を、使用不能となった理由ごとに色分けして示す。運転時間の平均値は $24,877$ 時間で、もっとも長いものは $42,694$ 時間であった。サイラトロンの故障は、以下の 5 種類に分類している。

Table 1: Number of Operating Thyratrons

| Modulator | CX1836 | CX1937 | L-4888D | |
|-----------|--------|--------|---------|----|
| SACLA | 72 | 51 | 10 | 11 |
| SCSS+ | 7 | 7 | 0 | 0 |
| Total | 79 | 58 | 10 | 11 |

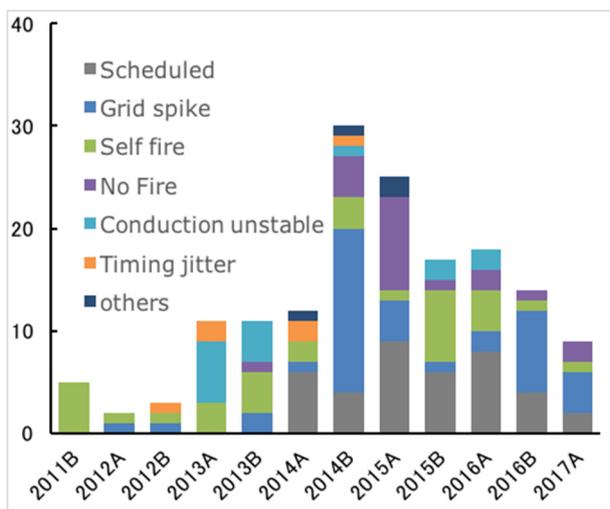


Figure 2: Number of replaced thyratrons in every half year.

グリッドスパイク(Grid spike)

導通開始時にコントロールグリッドに大きなスパイク電圧が発生する現象である[8]。新品では 1kV 以下だが、運転時間とともに増加し、およそ 1.6 万時間で保護回路のクランプ電圧である 1.6kV 以上となり、さらに劣化が進むと 3kV を超える場合がある。また、スパイクを短絡する保護回路には、数 100A ものサージが流れる。このサージはトリガシステム保護のために設けている TVS ダイオードの劣化や、

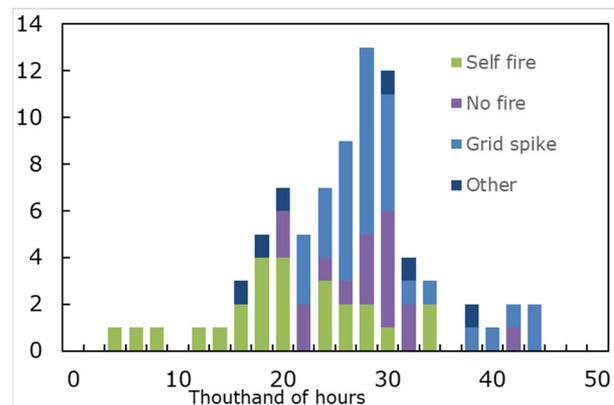


Figure 3: Lifetime distribution of the thyratrons, categorized by the failure reason.

SHV ケーブル及びコネクタさらにはグリッド抵抗の破損を招く。今回、その発生機序が明らかになったため、次章にて説明する。

自爆(Self-fire)

トリガパルス印加前にサイラトロンが導通し、正規のタイミングでパルス出力ができなくなる現象である。リザーバ調整による回復を試みているが、復旧しない事が多い。この故障は2万時間を中心に幅広く分布しており、早い段階では多数を占める。サイラトロン絶縁体の汚損や、グリッドおよびアノード電極へのカソード物質付着等が原因として考えられるが、明確には同定されておらず、根本的な対策も取れていない。

着火不良(No fire)

2万時間以上使用したサイラトロンで発生する。高圧運転中に突然サイラトロンが導通しなくなる。カソードのエミッション減少、もしくはリザーバ枯渇によるガス濃度低下が原因と考えられる。

タイミングジッタ(Timing jitter)

1万6千時間以上使用したサイラトロンで発生する。数秒～数分の単位で、通常、1ns以下のところ、100ns以上の導通タイミング変動を起こす。この変動は高周波出力の位相や振幅変動をもたらす、特にバンチ圧縮を行っている上流部ではレーザー強度に大きな影響を及ぼす。この事象もグリッドスパイクと同じく、発生機序とその対策が判明したため、次章にて説明する。

導通抵抗変動(Conduction unstable)

グリッド-カソード間の残留電圧が、ショットごとに変動する。使用開始から1万時間半ばから、ほぼ全数に発生する。クライストロン電圧(Vk)波高が変動し、高周波位相及び振幅変動の原因となる。位相変動に敏感な加速器の上流部では1万時間を目安に定期的にサイラトロンを交換している。交換した球は変動によって影響を受けにくい下流部にて再使用している。

4. カソード劣化の診断と対策

サイラトロンの劣化による前出のトラブルの多くは、カソードのエミッション減少により、イオン化が不十分になっていることが原因であると推測した。SACLAのサイラトロンは、キープアライブ方式ではなく、高電圧大電流のプレトリガパルスをG1グリッドに印加することによりイオン化を行っているため、キープアライブ電流からの劣化診断は困難であった。そこで、パルス信号によるイオン化の状態を測定するために、高速高耐圧のCTおよび、パルス幅を可変できるトリガーユニットを用意した。こ

れらの機器を用い、アノードに高圧をかけない状態でG1に時間幅2μsのトリガパルスを印加し、その電圧、電流の波形を測定した。

Figure 4に、代表的な波形を示す。新品のサイラトロンは400ns程度でプレトリガ電流が15A以上に立ち上がるのに対して、運転時間が1.5万時間を超えた球の場合では、新品に比べてイオン化が遅れ、800ns程度経過しないと15Aまで電流が立ち上がらないことが確認された。

Figure 5はSACLAにて運転に使用しているサイラトロン全数に対して、これまでの総運転時間とイオン化にかかる時間(遅延時間)とを比較したデータである。遅延時間と総運転時間には正の相関がある。

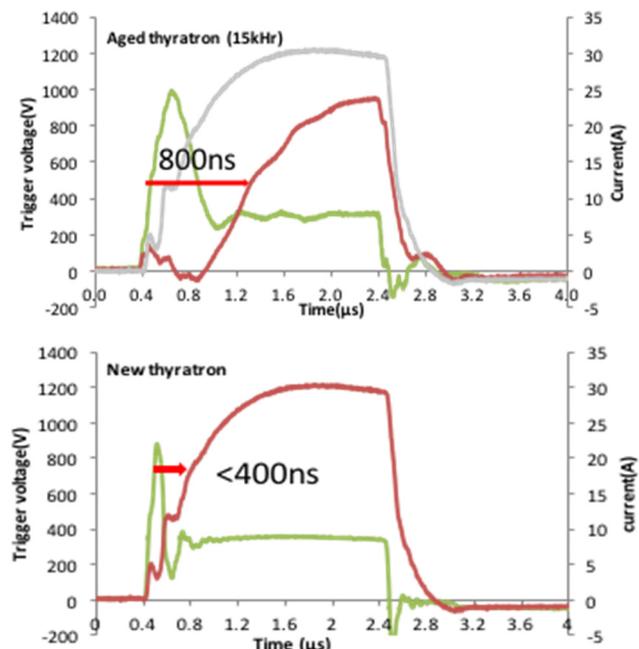


Figure 4: Waveform of the G1 grid voltage (green, left axis) and the ionization current (red, right axis). A new thyatron (lower) and a aged thyatron (upper) also shown.

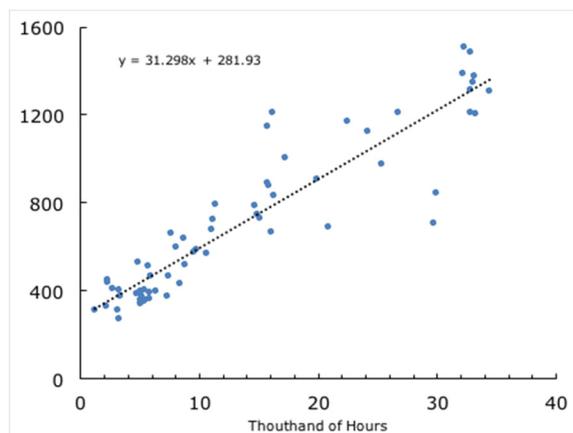


Figure 5: Pre-ionizing delay (ns) vs thyatron lifetime (kilo hour).

り、劣化の診断に有効な情報である事がわかる。また、1万6千時間~3万時間の間でデータのばらつきが大きい、前項での故障サイラトロンの分布でもこの期間でばらつきが見られ、劣化の個体差はこの程度あると考えられる。

これらの結果から、経年劣化が進んだサイラトロンは、標準で供給される750nsのパルス幅ではプレトリガ電流が十分に立ち上がらず、G1グリッドとカソード間のイオン化を十分に行うことができなくなることが予想される。この状態でサイラトロンが導通を開始した場合、一時的にカソードとG1グリッド間のインピーダンスが高い状態が発生し、G1グリッド電位が上昇し、またサージがトリガライン側に流入する可能性がある。これが、「ディレイ及びジッタの増加」と「グリッドスパイク」の発生原因であったと推測している。

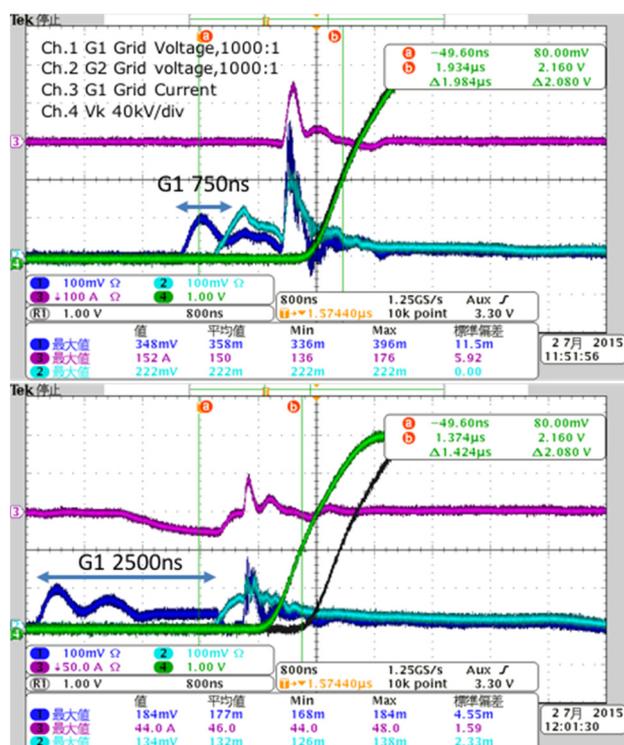


Figure 6: Waveform of the G1, G2 trigger grid voltage, the grid current, and the klystron voltage (Vk). The operation condition is 30kV and 30pps. Upper waveform is the standard G1 pulse width (750 ns), and the lower is the long G1 pulse (2500 ns).

Table 2: Comparison of the Grid Spike Voltage and the Anode Delay Time, with Different G1 Pulse Width

| G1 Pulse width[ns] | G1 Surge[kV] | G2 Surge[kV] | Anode Delay[μ s] |
|--------------------|--------------|--------------|-----------------------|
| 750 | 3.58 | 2.22 | 2.0 |
| 1,000 | 3.67 | 2.33 | 1.6 |
| 1,500 | 3.25 | 2.00 | 1.4 |
| 2,000 | 1.84 | 1.31 | 1.4 |
| 2,500 | 1.77 | 1.32 | 1.4 |

運転時間が3万時間を経過しイオン化が1.2 μ sまで遅くなったサイラトロンに対して、G1プレトリガパルスの時間幅を5段階に延長した結果をTable 2及びFigure 6に示す。G1プレトリガの時間幅を伸ばすことにより、グリッドスパイクが大幅に減少している事が確認できる。

これらの事実を元に、劣化によりプレイオナイズが「遅くなった」サイラトロンでも十分なイオン化ができるように、我々はe2V社の協力の元、トリガーユニットより出力されるG1トリガパルス幅を従来の750nsから2.5 μ sへ変更する改造を行った。このトリガーユニットを使用することにより、経年劣化によりイオン化が遅くなったサイラトロンでも、十分にイオン化が行われた状態で導通を開始することができるようになり、タイミングジッタ及びサージ低減に絶大な効果が得られた。このG1トリガパルスの改造は、遅延時間の長いサイラトロンから順に導入しており、現在37台の改造が完了している。

5. サイラトロンの劣化診断と運用について

加速器の安定稼働及びサイラトロンの寿命延長のために、以下のような劣化診断および監視を行っている。

- ・クライストロン電圧 (Vk) 波形に対して、着火タイミング信号から一定時間後の電圧データを収集することにより、導通タイミング変動を常時監視している。一定以上の変動が見られた場合には、トリガ波形測定による診断を行い、プレトリガ幅の延長やサイラトロン交換を実施する。
- ・全てのユニットのサイラトロントリガ回路上にトリガパルス及びサージ波形をモニタできるように分圧回路を設置しており、定期的に波形を採取し、障害が起きる前にG1プレトリガのパルス幅伸長や、サイラトロンの交換を実施している。
- ・加速器の中で、電子銃、バンチ圧縮等に使用している特に位相変動に敏感な19のユニットについて、定期的に残留電圧波形の確認と、クライストロンRF出力の位相変動の観測を行っている。そして変動の兆候が見られたユニットについては計画的にサイラトロンの交換を行っている。取り外したサイラトロンは、フィルタ回路とともに導通抵抗の変動に比較的寛容な下流のユニットに取り付けを行っている。

6. まとめ

フィルタ回路の導入とG1トリガパルス幅の延長等の対策によって、劣化の進んだサイラトロンを延命し、より長期間使用できるようになった。また、グリッド電圧やイオン化電流の測定や高電圧パルス

タイミングの変動、クライストロン出力変動の観測により、サイラトロンの劣化具合が数値化でき、これを基にした寿命や交換時期の事前予測ができるようになった。

ただし、上記のトリガパルスでは解決できない自爆の頻発（耐圧不良）による故障もあり、サイラトロンの故障原因のうち約 1/4 がこの理由によるものである。今後はこの問題についても原因の究明と対策を検討する予定である。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, *nature photonics* 2012.141, (2012).
- [2] 稲垣隆宏 他, “SACLA 主加速器の運転と保守の状況”, 第 12 回加速器学会, (2015).
- [3] 益田邦和 他, “ SACLA でのサイラトロンのトラブルと対策”, 第 11 回日本加速器学会,(2014).
- [4] 近藤力 他, “XFEL/SPring-8 向けクライストロン用パルス電源の開発”, 第 5 回加速器学会,(2008).
- [5] E2V Technologies CX1836 データシート.
- [6] E2V Technologies MA2709A. データシート.
- [7] 中澤伸侯 他, “サイラトロントリガ回路へのフィルタ回路導入”, 第 12 回加速器学会,(2015).
- [8] E2V Technologies “Hydrogen Thyratrons Preamble”; <http://www.e2v.com/products/rf-power/thyratrons/>