

# SACLA でのサイラトロンのトラブルと対策

## COUNTERMEASURE OF THYRATRON RELATED TROUBLES AT SACLA

益田邦和<sup>#, A)</sup>, 稲垣隆宏<sup>B)</sup>, 近藤力<sup>B)</sup>, 櫻井辰幸<sup>B)</sup>, 大竹雄次<sup>B)</sup>  
木村健<sup>A)</sup>, 中澤伸候<sup>A)</sup>

Kunikazu Masuda<sup>A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>B)</sup>, Chikara Kondo<sup>B)</sup>, Sakurai Tatsuyuki<sup>B)</sup>, Otake Yuji<sup>B)</sup>  
Kimura Takeshi<sup>A)</sup>, Nakazawa Shingo<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> SPring-8 Service Co., Ltd.

<sup>B)</sup> RIKEN SPring-8 Center

### Abstract

In the XFEL facility SACLA, more than 70 thyratrons are used as a high voltage switch device for an oil-filled line-type modulator. Since the thyatron is a deuterium-filled electron tube, which conducts several kA pulse through a plasma between narrow high voltage gaps, it sometimes makes abnormal pre-fires during the charging cycle, or fluctuation of the conduction loss which leads the fluctuation of the RF output from the klystron. Moreover, high surge voltage due to the connection in the plasma causes a damage on the TVS diode. We have investigated these troubles and applied several countermeasures for these problems. In order to check the performance of the thyatron, we performed 24-hours pre-install test in the test stand.

### 1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA では、2012 年 3 月供用運転の開始以降、多くのユーザーに安定なレーザーを供給するため、加速器の停止時間を極力減らすよう改善が進められてきた。SACLA では 70 台以上のモジュレーター電源が稼働中であり、モジュレーター電源に内蔵するサイラトロンの不調による XFEL 不安定性や、サイラトン交換作業による運転時間の減少が問題となっている。このような要請から、ユーザー運転中に発生するトラブル対応に掛かる時間短縮への取り組みと併せ、サイラトロンのトラブルを予見するため、球を SACLA に実装する前にテストスタンド室で高電圧運転を行い、性能確認を行っている。

本報告では、新品サイラトロンの受け入れ試験や中古サイラトロンの再利用可否判定を目的とした性能評価試験、サイラトロンの劣化による自爆頻度の増大や時間ジッターの増大など、スイッチング素子としての性能が悪化した場合の対応やトリガ回路保護用の TVS ダイオード破損対策について現状を報告する。

### 2. サイラトロンの使用状況

SACLA ではクライストロン駆動用モジュレーター電源に、e2v 社製 2 ギャップ型重水素封入サイ

ラトロン CX1836 型を採用している。カソードは一般に高信頼で長寿命と言われる含浸型カソードを用いている。また、この球は、内部の重水素濃度が出荷時に調整されており、リザーバーヒーター電圧は、新品時から定格の 6.3V に固定して使用している。従って、スライダックによる積極的なリザーバーヒーター電圧調整は、原則行わない運転形態となっている。

2010 年 10 月から 2014 年 7 月までの延べ 23,000 時間の運転にて、サイラトン交換作業回数とその内訳を、Table 1 に示す。表中、Others に分類されるものは、サイラトロンの異常を疑い交換したが、結果的に他の故障によることが後に判明したケースである。Table 1 が示すように、サイラトロンの交換理由の内、自爆が全体の 47% を占めている。従って、自爆対策が、加速器停止時間短縮に対する重要な鍵となることが解る。また、時間ジッターの増大やグリッド電圧の変動は RF の位相変動の原因となるが、下流の C バンド加速器部ではクレスト位相で加速するため実害が少ない。従って、加速器の上流部で取り外した球の 23% は性能評価の上、下流の主加速器部で再利用している。次章以降で、サイラトロンのトラブル対策や、球の性能評価について報告する。

Table 1: Number of Replaced Thyratrons and its Breakdown Categorized by the Reasons

Number of Replaced (Re-used)	Reason for Replacement				
	Self triggering	TVS Diode	Timing Jitter	Grid Voltage	Others
38 (9)	18	4	4	9	3

### 3. サイラトロン周辺のトラブルと対策

#### 3.1 自爆判定基準の見直し（制御系の改良）

サイラトロンの自爆により高電圧(HV)のトリップが発生すると、加速器の運転は停止し、自動復旧シーケンスにより充電電圧が元に戻るまで 40 秒程度かかる。70 台を超えるモジュレーター電源が散発的に HV トリップを起こすと、加速器の停止時間が無視できないものとなる。サイラトロンの自爆を、負荷短絡等の重故障と区別するため、単発自爆の場合は、HV を停止させず、複数回連続して自爆した場合、HV を停止するよう、制御

系の改良を行った。<sup>[1]</sup>

2014 年の春に、まずは上流 20 台の電源を改造した。HV を停止する基準となる連発回数を変えた時のトリップ頻度の様子を Figure 1 に示す。自爆した場合、電源の制御系で発報する ABNORMAL CHARGE 信号（以下 AB）の回数をカウントし、HV を停止する判定基準を AB1 回～4 回まで変化させている。

自爆しにくい球や、一旦自爆すると連続しやすい球など、球の個体差はあるが、単発自爆を無視した場合、トリップ頻度が減少し、自爆後の起動時間短縮に有効であることが解る。

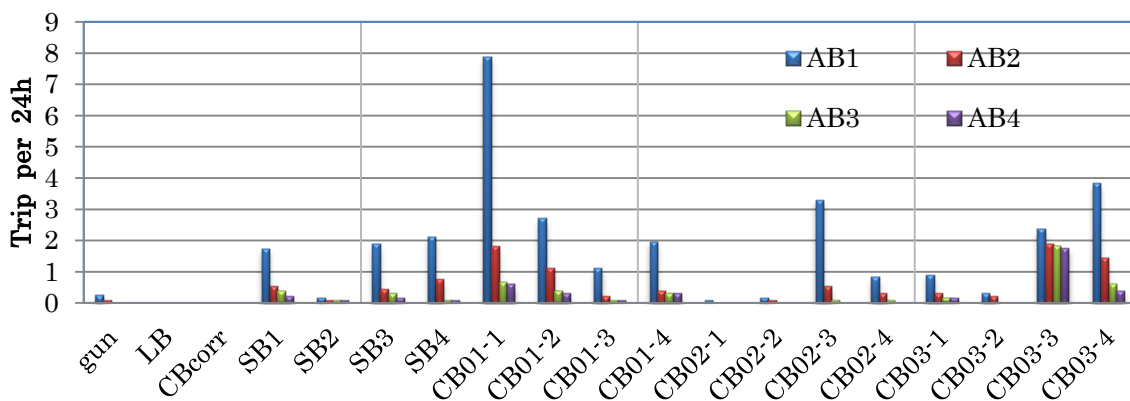


Figure 1: Comparison of the trip rate of 20 units with different interlock criterias. AB1 means the interlock is halted when the first pre-fire occurs. AB2 (AB3 or AB4) means the interlock is halted if two (three or four) pre-fire occurs in 1 minutes.

#### 3.2 3ギャップ型サイラトロン CX1937 の試用

自爆がサイラトロン中の高電圧ギャップ間の放電による場合、ギャップの数を増やして1段当たりの電圧を下げるのが有効である。そこで e2v 社の 3 ギャップ型サイラトロン CX1937 型を購入し、SACLA にて試験運用を開始した。30pps の繰り返して充電電圧 48kV で連続運転をすると、従来の CX-1836 は 1 日に数回の自爆を起こしていたのに対して、CX1937 に交換後は、約 1 か月の連続運転で一度も自爆が発生していない。

#### 3.3 TVS ダイオード回路の外付け化

サイラトロン着火時に発生するサージ電圧から、サイラトロントリガ回路を保護するため、G1（ブレトリガ）、G2（メイントリガ）の 2 本のトリガラインに TVS ダイオードを直列接続したものを使用している。SACLA 供用運転開始以降、このトリガ回路保護用 TVS ダイオードの短絡故障や抵抗値の低下が予想以上に頻繁に発生した。TVS ダイオードの抵抗値が低下すると、トリガパルスの電圧（通常 500～1000V）が低下し、サイラトロンが導通しなくなる。当初 TVS ダイオードはモジュレータータンク内のサイラトロンの近傍に取付けられて

いたので、取替え作業から高電圧運転に至るまで 6 時間以上掛かり切実な問題であった。当面の対策として、ダイオードを容易に交換できるよう、タンク外に取付けとした。Figure 2, Figure 3 に TVS ダイオード回路の写真と回路図を示す。これにより、特に時間の掛かっていた絶縁油の取扱い作業から解放され、デッドタイムをヒータ予熱に必要な 1 時間程度に短縮できた。

#### 3.4 TVS ダイオード回路の改良

現在使用している TVS ダイオード（1.5KE400CA）は、Breakdown 電圧  $V_{br} \sim 400$  V、許容ピーク電流  $I_{pp} \sim 4$  A を 4 直列にして使用している。サイラトロン導通時のサージ電圧や電流がこの許容値を超え、TVS を破壊していると推測される。ダイオードの電流耐力を上げるため、1.5KE400CA×4 直列で使用しているものを、1.5KE160CA×10 直列に順次交換している。しかしながら現状では、まだ 1～2 週間に 1 回程度の頻度で故障が発生しており、都度交換を行っている。次の対策として、TVS ダイオードとサイラトロン間に、ローパスフィルターを入れてサージ電圧を低減する試みも行っている。

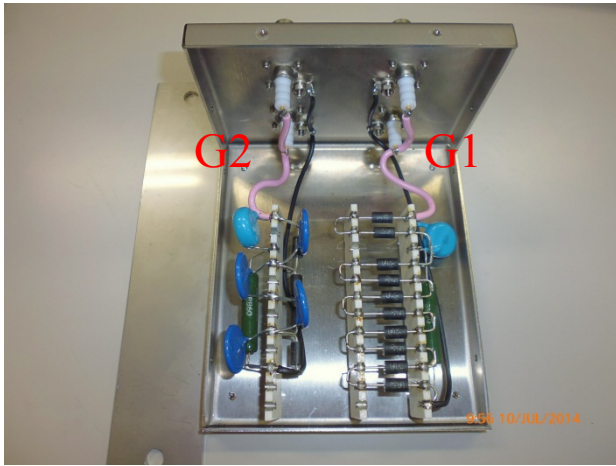


Figure 2: TVS diode circuit for trigger circuit protection.

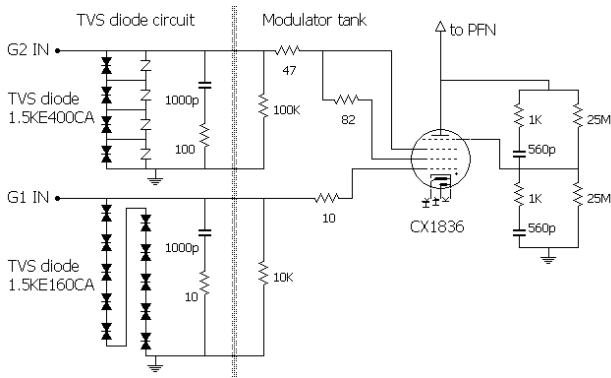


Figure 3: TVS diode circuit and thyratron grid circuit.

### 3.5 グリッド電圧変動の対策

G1、G2 トリガラインに分圧比 1:1000 の分圧器を介し測定したグリッド電圧波形を Figure 4、5 に示す。サイラトロンが劣化してくると、Figure 4 に示すように、導通時のグリッド電圧が変動する個体が現れ始める。グリッド電圧変動は、サイラトロン導通時の損失の変動により発生すると考えられる。この変動はクライストロン印加電圧の変化として現れ、クライストロン出力が変動する原因となる。

グリッド電圧変動によるビーム変動は、昨年度の運転で判明したことであり、変動幅の定量的なデータ蓄積は、まだ不十分であるが、概ね 5V 程度の変動が発生すると、上流部での使用は困難となる。Figure 5 に正常波形の例を示す。

この電圧変動は、サイラトロンの経年劣化のひとつの症状と考えられ、メーカーとともに原因を調査中である。

また、時間ジッターの増大に関しても、サイラトロンの劣化により着火が困難になりつつある傍証と考えられる。現状、変動に敏感な加速器の上流部で使用したサイラトロンでグリッド電圧の変動や時間

ジッターの増大が発生した場合、新品のサイラトロンと交換し、取外したサイラトロンについては、電源試験エリアで性能評価を行い、使用可否を判定した上で、下流のクレスト加速器部で再利用している。

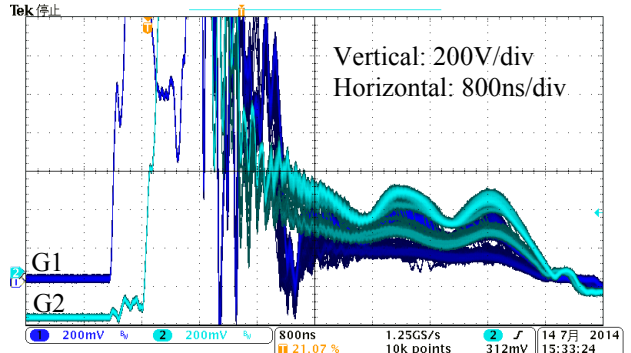


Figure 4: An example of a grid voltage fluctuation of G1(pretrigger, ch1) and G2(main trigger, ch2) for an "aged" thyratron. The waveforms are overlaid in 1 minutes.

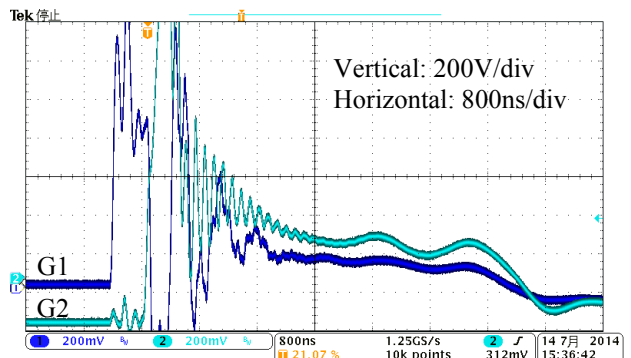


Figure 5: An example of a good thyratron without grid voltage fluctuation.

### 3.6 サイラトロン架台改造

SACLA の油密閉型モジュレーターにてサイラトロンを交換する作業は、絶縁油の抜油/注油作業を伴うので、交換作業だけで 3 時間程度掛かっている。更に、注油後タンク内の気泡が抜けるのを待ため、定格運転まで 6 時間かかる。絶縁油の取り扱い作業を省略できれば、作業時間の大幅な短縮が可能のため、油を抜かずともサイラトロンが交換できるような改造を始めている。サイラトロン交換が頻繁な電源試験用モジュレーター、及び、即座の交換が必須な入射部用モジュレーターについて、Figure 6 に示すようにサイラトロンを取付架台ごとモジュレータータンク頂上より抜き取れるよう改造を行った。特に時間の掛かっていた、絶縁油の抜油/注油作業から解放されると同時に、架台ごと本体を引き抜けるので、広い作業スペースで交換ができるようになった。

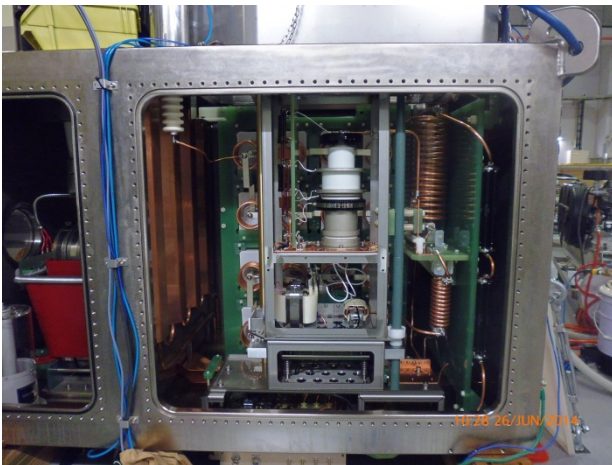


Figure 6: Pluggable thyatron unit for new SACLA modulators.

#### 4. 性能評価試験

SACLAテストスタンド室には、高電圧運転を主体とした、様々な試験運転が可能な電源試験モジュレーターを設置している。この電源試験モジュレーターを用い、性能評価試験を行っている。試験項目と、良否判定基準をTable 2に示す。

SACLA で保有するサイラトロンは、保管中・実装中を合すると 100 台以上になる。保管中の球の中には、長期間保管された球もあり、これらの使用可否の判定も行っている。

Table 2: Test Item and Quality Criteria of Thyatron

Test item	Quality criteria
Self Triggering	< 10 times/24h
Self triggering (continuous)	< 5 times/24h
Timing jitter	< 2 ns std.
Grid voltage variation	< 5 V std.

#### 5. まとめ

自爆などのサイラトロンが原因となる停止は、ある一定の割合で生じるため、避けられない部分がある。しかし、本稿で述べたように、制御系の改良やトラブル対応時の作業時間短縮に向けた取り組みなど、サイラトロン周辺の改善により、加速器ダウンタイム短縮に対し着実に成果をあげている。

今後、トリップの絶対的頻度を下げるべく、自爆頻度が少ないとされる、3ギャップ型サイラトロンの長期運転試験や、TVS ダイオード破損防止の Low-Pass Filter の有効性についても確認して行きたい。

#### 参考文献

- [1] 稲垣隆宏、他，“SACLA C バンド加速器の加速電場の向上とトリップ頻度の低減”，第 9 回日本加速器学会プロシーディングス(2012)