

SACLA 主加速器の運転と保守の状況

OPERATION STATUS OF SACLA MAIN ACCELERATOR

稲垣隆宏^{#,A)}, 近藤力^{A)}, 櫻井辰幸^{A)}, 益田邦和^{B)}, 木村健^{B)}, 中澤伸侯^{B)}, 田中信一郎^{B)}, 大竹雄次^{A)}
Takahiro Inagaki^{#,A)}, Chikara Kondo^{A)}, Tatsuyuki Sakurai^{A)}, Kunikazu Masuda^{B)}, Takeshi Kimura^{B)},
Shingo Nakazawa^{B)}, Shinichiro Tanaka^{B)}, Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} SPring-8 Service Co. Ltd.

Abstract

In the X-ray free electron laser facility SACLA, the C-band accelerator with 64 units has been operated for more than 30,000 hours from 2011, at a high accelerating gradient of 35-38 MV/m to accelerate electron beam of 5-8.5 GeV. In order to continuously generate an intense X-ray laser for user experiments, a low trip rate to interrupt the accelerator operation is necessary. The trip rate of the operation at a 30 pps repetition rate is recently about once per hour, which is low enough to conduct the user experiments, after relaxing the trip criterion for halting the klystron high voltage pulse by an interlock system. The cause of the trip is such as a thyatron pre-firing. During the 4 years operation, troubles of the thyatron and a high voltage charger used in a klystron modulator system were the major reason of the machine failure and the maintenance work. In order to reduce the dead time of the operation, we implemented countermeasures for these troubles. The most serious problem of the thyatron is increase of a surge current value at the trigger grid, which caused by the aged degradation. The huge current often breaks the trigger-circuit components of the thyatron and interrupts its operation. For countermeasures of the surge troubles, inserting a surge blocking circuit and extending the pulse width of the pre-trigger effectively reduced the surge current value of several old thytrons. We plan to introduce these countermeasures for the other old thyatron case. An overheat problem of a high voltage charger was one of the anxiety to hinder its 60 pps operation. To overcome the problem, we reinforce the cooling capacity of several high voltage chargers. It effectively reduced the temperature of the high voltage transformer part. We plan to introduce the same modification for other high voltage chargers for planned 60 pps operation.

1. はじめに

X線自由電子レーザー（XFEL）施設 SACLA^[1]は、8 GeV の線型加速器と 21 台の真空封止型アンジュレータによって、高輝度、極短パルスの X 線レーザーを発生させ、先進的な実験に供する施設である。年間 3,500 時間を超えるユーザー実験をスケジュール通り遂行し、要求される品質の X 線レーザーを常に供給するためには、運転の中断頻度が低く、加速器としての長期的な安定性、信頼性があることが重要である。

SACLA では、2011 年の運転開始以来、調整や改良を重ねながら加速器の信頼性や安定性を向上させ、これまでの 4 年半で約 30,000 時間の運転を行ってきた。SACLA の主加速器である Cバンド加速器では、35~38 MV/m の高電界にて運転が行われており、2012 年のユーザー運転開始当初はトリップ（インターロックによる運転の停止）の頻度が高い事が課題であった。これも現在では、30 pps の繰り返して 1 時間に 1 回程度と、ユーザーの実験や加速器の安定運転に支障のない程度まで低減されている。

しかしながら、高周波源であるクライストロン用高電圧パルスモジュレータにてパルススイッチとして使用するサイラトロンが、経年劣化により様々なトラブルを引き起こすことが、最近問題となってきた

[#] inagaki@spring8.or.jp

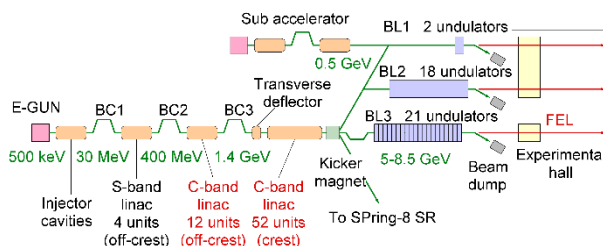


Figure 1: Schematic layout of SACLA.

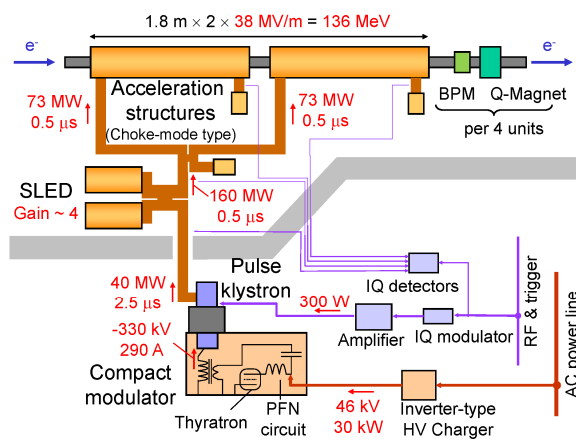


Figure 2: Configuration of the C-band linac system. Typical operation conditions are written in the figure.

た。我々は、72 台のモジュレータで使用されるサイラトロンのうち、この 2 年で半数以上を新品に交換した。交換の主な原因となっているグリッド制御回路での高電圧パルス性サージの増大については、サージ低減回路の設置やトリガパルスの伸長などの対策を進めているところである。また、毎年数台の故障が続いていたモジュレータ充電用高電圧電源についても、故障の原因となっていた回路の改善と冷却の強化を行い、今後予定される 60 pps 運転に向けて故障の低減を図っている。

本発表では、C バンド加速器の現在の運転状況と、主要な機器の保守交換歴、および加速器の安定性や信頼性の向上のためのサイラトロンや高電圧充電電源などの開発・改良について報告する。

2. C バンド加速器の運転状況

2.1 C バンド加速器の構成

SACLA 全体の構成を Figure 1 に示す。400 m の加速器長で最大 8.5 GeV までの加速を実現するため、加速電界が高く効率の良い C バンド (5.7GHz) 加速器^[2]を 64 ユニット使用している。このうち 12 ユニットは最終バンチ圧縮部 BC3 の前に置かれ、電子バンチを -50° のオフクレスト位相に乗せることでエネルギーチャープを与えながら 400 MeV から 1.4 GeV まで加速する。残りの 52 ユニットは、BC3 の後方に置かれ、圧縮後の電子バンチをクレスト位相に乗せ、X 線レーザーの発振波長に合わせたエネルギー (5~8.5 GeV) まで加速する。

C バンド加速器 1 ユニットの構成を Figure 2 に示す。クライストロンの最大定格は 50 MW であるが、通常は 8 割程度の約 40 MW パルス出力にて運転される。SLED にてクライストロンの出力高周波パルスを圧縮し約 4 倍の電力にして 2 本の 1.8 m 進行波型加速管に供給する。加速管では約 38 MV/m の加速電界が得られ、通過する電子バンチを 1 ユニット 4 m の距離で約 140 MeV 加速する。クライストロンに印加するパルス高電圧は、PFN 回路、サイラトロン、パルストランス等を絶縁油タンク内におさめた油密閉型の高電圧パルスモジュレータ^[3]によって発生される。クライストロンは通常、飽和領域にて動作させるため、出力電力の調整は PFN 回路の充電電圧を変えることによって行う。SACLA では、高周波電力・位相の僅かな変化が電子バンチの長さやエネルギーなどに大きく影響し、ひいては X 線レーザーの発振に大きく影響するため、加速電場にも高度な安定性が要求される。そこで 10ppm 以下の安定度を持つインバータ式の高電圧充電器^[4]を使用し、クライストロン出力を安定化している。

2.2 加速電界

電子ビームエネルギー 7.8 GeV にて運転時の、C バンド加速器 64 ユニットの平均加速電界を Figure 3 に示す。この運転時は PFN 回路の充電電圧を一定値 (45.6 kV) に設定したため、各ユニットでの加速電界は個体差があるが、おおむね設計通り 35~38

MV/m の加速電界が得られている。また、Figure 3 に示すように、2012 年の運転時^[5]と比較してほぼ同様の電界が得られており、高周波電力の劣化は、ほとんど見られないことがわかる。

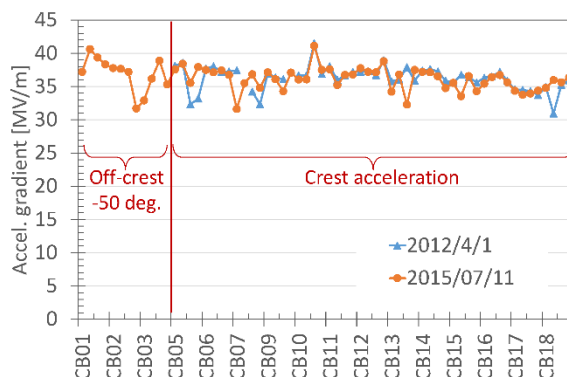


Figure 3: Typical accelerating gradients (orange marker) of 64 units of the C-band accelerator, at a 7.8 GeV beam energy. The typical gradient in 2012 operation (blue marker) are also shown for comparison.

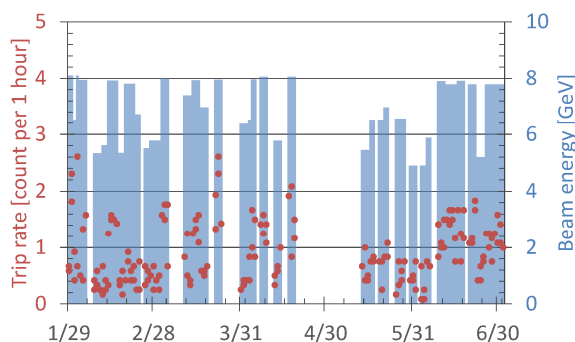


Figure 4: Electron beam energies (blue histogram) of the SACLA accelerator, and high-voltage pulse trip rates (red marker) of the klystron modulator, during the user run from January to June 2015.

2.3 トリップ頻度と、パルス運転の繰り返し

今年 1 月からのユーザー運転期間における、電子ビームエネルギーと、クライストロンモジュレータの出力高電圧パルスのトリップ (停止) を SACLA 全体で合計した頻度を、Figure 4 に示す。現在のパルス繰り返しは 30 pps である。トリップの頻度は運転電圧 (電子ビームのエネルギー) にも依るが、平均して 1 時間に約 1 回で、ユーザー実験には支障ない程度である。

トリップの約半数は、加速管や導波管での高周波放電によるものであり、残りは、サイラトロンの自爆 (トリガ前に導通短絡する) や、クライストロン管内での高電圧放電が主な原因である。2012 年のユーザー供用開始当初は、トリップ頻度は 10 pps でも 1 時間に 2~3 回程度^[5]と多く、パルス繰り返しを上げられないひとつの原因になっていた。そこで、主要原因となっていたサイラトロンの自爆について、自爆を起こしても 1 分間に 3 回以内なら加速器を停

止しないようにインターロックシステムを改造⁶⁾することにより、停止する頻度を 1/5 以下に低減した。また、加速管での放電については、高電界でのコンディショニングを十分に行うことにより、放電の頻度を下げた。こうして、トリップの頻度が下がったため、2013 年 1 月より 20 pps に、同年 11 月より 30pps に、加速高周波のパルス繰り返しを上げた。今後近いうちに、最大定格である 60 pps まで繰り返しを上げる事を計画している。

3. 大電力高周波源の保守と改良

3.1 機器故障時の運転の切り替え

SACLA では、機器の故障による加速器の長期停止を避けるため、加速ユニットの数に少し余裕を持たせている。通常の運転で我々は、BC3 より上流の C バンド加速器 12 ユニットのうち 1 ユニットの、下流 52 ユニットのうち 2 ユニット以上を電子バンチの加速には使わず、タイミングをビームタイミングから 10 μ s 遅延して運転し待機させている。運転中の加速ユニットに故障が起こった場合は、待機していたユニットと切り替え、10 分程度の調整ののちにユーザー運転を継続できるようにしている。従って、更なる故障が連続して運転可能なユニットが足りなくなる限りは、運転への影響は比較的少ない。

しかし、運転開始から 2 年を経過した 2013 年頃より、サイラトロンやそのトリガ回路の故障頻度が急増し、交換作業のできない夜間や休日の運転に支障をきたす場合が生じてきた。これらの機器について故障の原因を探り対策を打つことは、加速器を安定に運転するうえで重要な事である。本章では、SACLA の大電力高周波源における故障や障害の状況と推定される原因、そして現在取っている対策について報告する。

Table 1: Number of the currently used and replaced RF components of the SACLA accelerator, summarized in the individual fiscal years. The numbers in () mean the recycling secondhand thyratrons instead of new ones.

	Used	Replaced			
		2011	2012	2013	2014
RF cavity	71			1	
Waveguide	71			1	
Klystron	71	1	1	2	1
Thyratron	72	5	5	23	40
				(6)	(17)
TVS diode	72		27	146	52
HV charger	72	3	3	4	2

3.2 主要機器の故障と交換の状況

これまでの運転において、故障や保守のため交換した大電力高周波機器の数を年度ごとに集計し、Table 1 に示す。なお、この章での集計では、C バンド加速器のほかに、ほぼ同様の高周波システムである S バンド加速器や、入射部の加速空洞 (L バンド加速器、C バンド補正加速管)、垂直デフレクタ空洞、および電子銃用のパルス電源によるものも含まれている。

まず、加速管や導波管については、放電の頻発による交換がそれぞれ 1 回ずつあった以外は、大きな問題は起きていない。

クライストロンについては、毎年 1~2 本を交換している。交換理由は、出力高周波パルスの波形欠け (3 事象)、電子銃部セラミック損傷による真空リーク (1 事象)、原因不明の管内真空の悪化 (1 事象) である。波形欠けとは、2.5 μ s の矩形パルスの前半の一部が欠けたように出力が低下する現象である。これ以外のクライストロンについては、高周波出力も安定しており、パービアンスも低下していないなど、今のところ経年劣化の兆候は見られない。

これらの機器に比べて、モジュレータに使用するサイラトロンと、そのトリガ回路に使用する TVS (Transient Voltage Suppressor) ダイオードの交換件数が突出し、しかもこの 2 年で急増しているのがわかる。また、高電圧充電器についても、毎年一定数の故障が続いている。これらの機器で起きている問題と対策については、次節以降で詳細を述べる。

3.3 サイラトロンの経年劣化に伴う障害と対策

SACLA の油密閉型モジュレータでは、最大 50 kV に充電された PFN 回路の一端を短絡し、約 5 kA、4.5 μ s の矩形パルス電流を生成するためのスイッチ素子として、サイラトロンを使用している。SACLA で主に使用するサイラトロン e2v CX-1836⁷⁾は、3 つの制御グリッド (G1、G2、G3) を持ち、G1 にプレトリガを掛けてカソード周辺の重水素ガスをプラズマ化した後、G2 と G3 にメイントリガを印加することにより導通動作する。プレトリガとメイントリガは、制御ラック内に収納されたトリガユニット e2v MA2709A⁷⁾によって生成され、モジュレータとは 2 本の高電圧同軸ケーブルで接続されている。同軸ケーブルの途中には、Transient Voltage Suppressor (TVS) と呼ばれるダイオードが取り付けられ、サイラトロン動作時のサージやノイズからトリガ回路を保護するようになっている。

しかしながら、運転開始後 2 年を経過した頃から、TVS の抵抗値低下や短絡故障が発生しはじめ、昨年には TVS の破損に加えて、回路に付随する同軸ケーブルやコネクタ、終端抵抗などの部品も破損するようになっている^{6,8)}。トリガ回路の故障は運転の停止につながるため、部品の破損が連続して起きた場合には、サイラトロンを交換することになる。

Figure 5 に、新しいサイラトロンと古いサイラトロンにおける G1 と G3 の電圧を測定した例を示す。

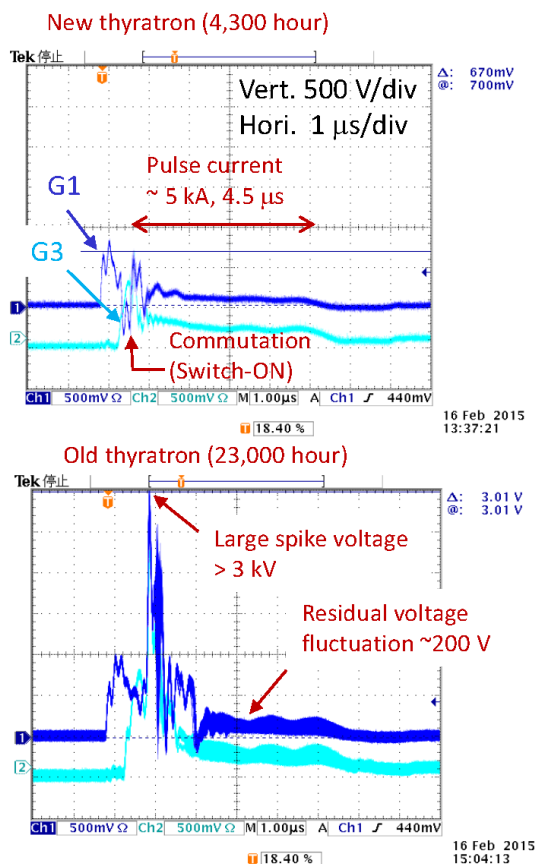


Figure 5: Typical waveforms of G1 and G3 grid voltage for a new thyatron (upper) and an old thyatron (lower), operated in 40 kV, 30 pps. In order to show the shot-by-shot fluctuation, about 100 shots of the waveforms are overwritten on the screen.

古いサイラトロンでは、導通開始時に 3 kV を超える大きなスパイク電圧が生じている。また、TVS のクランプ電圧は 4 直列素子の合計で約 1.6 kV なので、TVS に数 10 A から数 100 A ものサージ電流が流れていることがわかった。この過大なサージ電流や過大な電圧によって、回路部品を破損したと考えられる。

また、古いサイラトロンでは、Figure 5 に見られるように、パルス電流が流れる 4.5 μs の間、G1 とカソード間に最大 200 V 程度の残留電圧が残り、それがショット毎に変動する現象が見られる。この変動により、パルス電流の出力先であるクライストロンにて、電圧の変動が生じる。例えば残留電圧が 200 V (PFN 出力電圧 25 kV の 0.8%) 変動すると、クライストロンのビーム電圧も 0.8% 変動し、高周波出力の振幅や位相がそれぞれ 1.2%、4° ほど変動することになる。特に SACLA の上流側加速器では、このような高周波の変動は電子バンチの加速エネルギーを変え、X 線レーザーの発振を阻害するので、我々は影響が見られたサイラトロンから順に交換を行っている。この他にも、古くなったサイラトロンは、導通タイミングの変動やトリガの不発、あるいは自爆の頻発などの障害が現れる場合もある。

こうした障害の原因としては、まず、カソードからのエミッションの減少によりカソード周辺のプラズマ形成が不十分になっていることが推測される。また、グリッド電極の汚染による想定外の電子放出、セラミック部分の汚染による沿面放電などの可能性も考えられる。

経年劣化に起因する障害や変動は、2012 年の後半より徐々に見られはじめ、2013 年になって急増した。Table 1 の表に示すように、この 4 年間でほぼすべてのサイラトロンを交換したことになる。但し、新品のサイラトロンが不足しているため、上流の加速器で取り外した変動が見られるサイラトロンを、比較的変動に寛容な下流の加速器で再使用するような運用も行っており、Table 1 にて()付きで示している。

昨年の学会でも報告^[6]したように、我々は、サイラトロンの劣化や障害に対し様々な対策を行ってきた。ここでは最近に導入された 2 つの有効な対策について紹介する。

1) フィルタ回路によるサージの遮断

サージからトリガ回路を保護するため、周波数の低い (~数 MHz) トリガパルスは通過させつつ、周波数成分が高く (~数 10 MHz) トリガパルスとは反対方向に伝搬するサージを短絡吸収するフィルタ回路^[8]を設計し製作した。サージの大きなサイラトロンに導入し、4 kV 以上のサージが 1.4 kV まで低減されたことを確認した。また、SACLA で運転中のモジュレータにも試験的に実装され、問題なく現在まで 1500 時間の運転が行われている。

2) G1 プレトリガパルスの伸長

最近になって、G1 プレトリガのパルス幅を広げることで、サージが大幅に抑制され、また導通タイミングの変動も抑えられることが判明した。理由としては、G1 プレトリガの時間を長くすることによりカソード~G1 グリッド間のプラズマ化が十分に行なわれ、その後のメイントリガによる導通がスムーズに進んだためであると推測している。我々は、サージの大きな 3 台について試験的にパルス幅を広げて運転し、長期的な安定性や、新たな障害が生じないか等の調査を行っている。

こうした対策を行うことで、サイラトロンに関するトラブルを低減できるよう、サイラトロンをなるべく長く使用できるよう努めている。しかしながら、サイラトロンの経年劣化は、カソードを有する放電管である限り原理的に避けがたい。そこで長期的には、半導体素子への置き換えも検討し、基礎開発を行っている^[9]。

3.4 高電圧充電器の障害と改良

SACLA で使用するインバータ式の高電圧充電器^[4]は、高速かつ高精度の充電を実現するため、急速充電を行う主充電部と高精度の電圧整定を行う補充電部の並列構成になっている。SACLA にて起こった

充電器の故障は、下記の 3 種類の事例があった。対策や改良と共に記す。

- 1) 補充電部の FET 充電電圧制御回路にて、トランジスタ素子が過熱し短絡故障を起こす事例があった。Table 1 に示す故障品の約半数は、これが原因であった。対策として制御回路の定数を変更し、トランジスタには空冷のフィンを取り付けた。
- 2) 高電圧部の絶縁油を冷却するため、銅製の熱交換器を用いているが、熱交換器のロウ付け不良箇所が腐食し水漏れを起こして高電圧トランスが焼損した事例が複数回あった。ロウ付け不良は初期不良に類するものであるが、なるべく腐食を進行させないように、後述の改造に合わせて冷却水の流速を 2 m/s 以下に下げる予定である。
- 3) SACLA にて、60 pps 運転時に高電圧トランスが焼損する事例があった。温度測定を行ったところ、トランス部分の油温が 70°C を超えており、整流ダイオードが熱暴走した可能性が高いことがわかった。対策として絶縁油の冷却を強化し高電圧トランス部の温度を下げる改造を行い、絶縁油の温度が約 5°C 低下することを確認した。Figure 6 に、改造を施した高電圧充電器の写真を示す。この改造を施した 1 台を SACLA の加速器に実装し、昨年 10 月より 60 pps、48 kV にて連続運転を行っているが、故障等の問題は起こっていない。今年度、更に 5 台の連続運転試験を行い問題が無いことが確認できれば、来年度以降に全数を改造し、SACLA 全体の 60 pps 運転を実現する計画をしている。

また、新規に製作する高電圧充電器については、高圧部の冷却性能を強化し 120 pps 運転にも対応した充電器を新たに開発している^[10,11]。SACLA の BL1 に設置している極紫外線 FEL 用加速器^[12]では、この新型充電器を 5 台使用しており、60 pps の繰り返しで既に 3000 時間以上の運転を行っている。

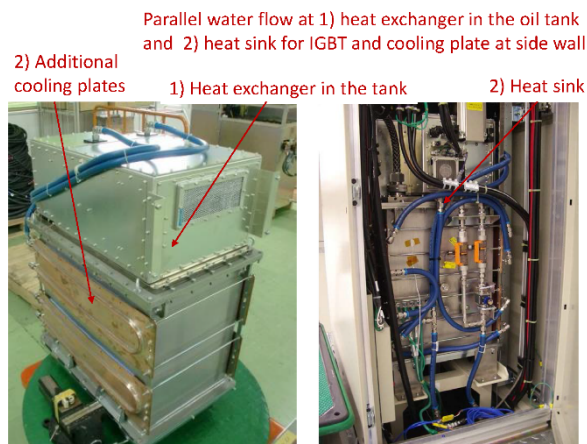


Figure 6: Photograph of the improved high voltage charger.

4. まとめ

SACLA は 2011 年の運転開始以来、大きなトラブルもなく約 4 年半の間に 30,000 時間超の運転を行ってきた。64 台の C バンド加速器は、35~38 MV/m の加速電界で 30pps にて運転され、電子ビームを最大 8.5 GeV まで加速している。サイラトロンが自爆した時も運転を止めないようインターロック機構を変更することにより、加速器のトリップ頻度は 30pps の繰返しにて 1 時間に 1 回程度におさえられている。この 4 年半の SACLA の運転にて、サイラトロンの経年劣化が進み、交換の頻度がこの 2 年で急増している。特に問題となっているのは、サイラトロントリガ G1、G2 回路のサージの増大に伴う付帯回路の破損故障である。この対策として我々は、フィルタ回路の導入や、G1 プレトリガのパルス幅を広げる方法などを試験している。また、高電圧充電器についても、故障の原因となっていた回路素子の過熱やトランスの温度上昇等について対策を行っている。このような対策や改良を重ねながら、SACLA の安定な運転を継続し、また早期の 60 pps フル定格運転を目指している。

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] T. Inagaki, et. al., “High-gradient C-band linac for a compact x-ray free-electron laser facility”, PRST-AB 17, 080702, (2014).
- [3] T. Inagaki, et. al., “Compact 110 MW modulator for C-band high gradient accelerator”, *Proceedings of 2012 International power modulator and high voltage conference*, (2012).
- [4] C. Kondo, et. al., “High precision inverter power supply for klystron modulator of SACLA”, *Proceedings of 4th Euro-Asian pulsed power conference*, (2012).
- [5] 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 回日本加速器学会年会プロシーディングス, (2012).
- [6] 益田邦和, 他, “SACLA でのサイラトロンのトラブルと対策”, 第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス, (2014).
- [7] <http://www.e2v.com/products/rf-power/thyratrons/>
- [8] 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”, 本学会年会, (2015).
- [9] 近藤力, 他, “高電圧用半導体デバイスのスイッチング特性”, 本学会年会, (2015).
- [10] 田中豊, 他, “高精度充電器の開発”, 第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス, (2014).
- [11] 近藤力, 他, “SACLA における大電力 RF 機器の高繰返し化”, 第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス, (2014).
- [12] 櫻井辰幸, 他, “SACLA BL1 極紫外線 FEL 用加速器の建設と RF コンディショニング”, 本学会年会, (2015).