

# Problem and Improvement of Accelerator Components at SACLA

Yuji Otake<sup>#,A,B)</sup>, on behalf of the members of XFEL division

<sup>A)</sup> XFEL Research and Development Division, RIKEN SPring-8 Center, Harima Institute, RIKEN  
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo JAPAN 679-5148

<sup>B)</sup> XFEL Division, JASRI  
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo JAPAN 679-5198

## Abstract

SACLA is under user operation after the lasing at 0.06 nm in July 2011. The demanded rf temporal stabilities of an injector cavities should be within 50 ~ 100 fs and the trip rate of high-power rf sources should also be less than twice a hour for the stable practical user operation of SACLA, respectively. In the present, since the day and night user operation is already established by smidgen trimming by operators to the phases of the injector's cavities, we can say the demand previously mentioned is almost satisfied. However there are some problems after the end of the construction of SACLA, as follows. 1. Even thorough, an environment temperature around accelerator active components is controlled within 0.1 K, The X-ray laser intensity of SACLA is drifted by the effect of outside air temperature. Such intensity drift is caused by the insufficient rf phase stabilities of the water cooled cavities in the injector. 2. The unignorable trip rate of thyratrons by self-arcing, the trouble of an inverter power supply for a klystron modulator and the arcing of a high-voltage transformer for the klystron exist. 3. Deposition of oxidized copper in cooling waterlines is happen by the effect of dissolve oxygen in the water. Countermeasures to the problems are replacing LLRF components having poor thermal phase dependence, changing deuterium density of the thyratron to reduce the number of the self-arcing, reinforcement of high-voltage insulation ability to the inverter power supply and the high-voltage transformer, and installation of oxygen reduction equipment in to the cooling-water line. We expect the temporal drift of the laser intensity and the rf temporal stabilities are going to reduce within the demanded value after the countermeasures.

## SACLA 加速器構成機器の問題点と改善

### 1. はじめに

SACLA は、2011 年 7 月に 0.06nm の X 線レーザーの増幅に成功してユーザー運転中である<sup>[1,2]</sup>。本装置は、500kV, CeB<sub>6</sub> (6 ホウ化セリウム) 単結晶の熱電子銃から出て高電圧デフレクタで整形された 1πmm・mrad のエミタンスを持つ 1ns (FWHM)・1A の高輝度電子ビームを、238, 476, 1428 MHz のマルチサブハーモニックバンチャーで速度変調によるバンチ圧縮をする。その後、3 段の 4 つの双極曲電磁石で構成された磁気バンチ圧縮器 BC1~3 で 30 fs、3 kA の電子ビームを生成する。次に、C バンド

(5712MHz) 加速器で 8GeV に加速して、有効長 70m におよぶ 18 台のアンジュレータで X 線レーザーを発生する。この装置の概略の構成を図 1 に示す。アンジュレータ内での自己増幅過程 (SASE) での X 線レーザーの強度ふらつきを 10% (rms) 以内に納めるためには、電子ビームのピーク電流変動を 10% (rms) 以内に納めなければならない。この条件を満足するためには、前記のバンチ圧縮過程では空洞内の高周波による電子のオフ Crest 加速行いバンチ内にエネルギーチャープを付けるので、加速高周波の位相安定度が短期・長期とも 50~100fs (標準偏差, STD) に収まる必要がある<sup>[3]</sup>。

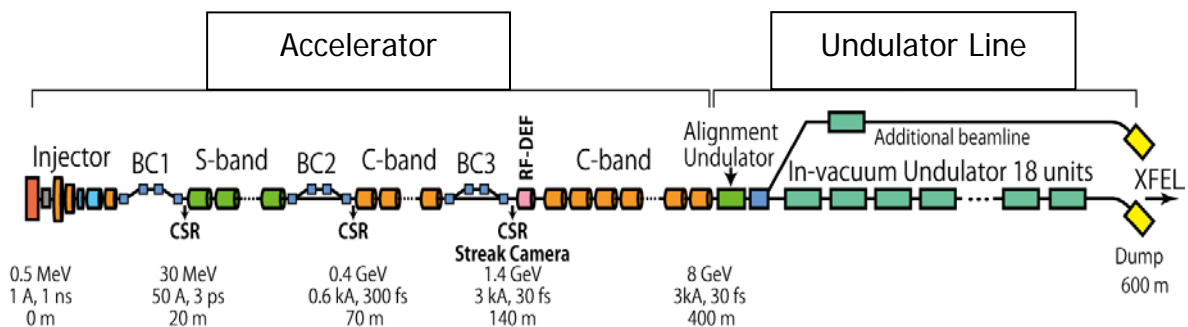


図 1 : SACLA の装置構成。500kV 低エミタンス電子銃、入射部、シケインを使用した 3 段磁気バンチ圧縮器、L・S・C バンド線型加速器、18 台のアンジュレータで構成されたビームラインにより構成されている。

<sup>#</sup>otake@spring8.or.jp

加えて、安定なレーザー増幅をするためには、70mのアンジュレタ区間を  $4\mu\text{m}$  以内に電子軌道と電子により放射された X 線が重複する必要がある<sup>[4]</sup>。このような時間・空間で高度に安定な電子ビームが達成されないと、要求する安定な X 線レーザーの増幅は望めない。現状では、運転員による 1 時間に 1～2 回の入射部高周波空洞の位相などを微調整することで、24 時間の数ヶ月に渡る連続運転を実現している。このことから、既にレーザーの安定度は、ユーザー運転が可能な程度に許容できるレベルと言え、それは前記した電子ビームの安定性が要求値をある程度満足していることを示すものである。以上に加えて、このような実用的な運転をするには、前記した電子ビームの時間・空間的な安定度と相まって、加速器の大電力高周波源のトリップ頻度が最低限 1 時間に 1 回程度以下に収まる必要がある。この点も現状の運転状況から、繰り返し 10pps で大電力高周波源のトリップ頻度も要求をほぼ満足している。

以上から、SACLA の短期安定度はほぼ十分と言えるが、次節に述べるように長期安定度は不十分と言える。また、建設が終了した昨年 4 月から次節に示す問題があることが判ってきた。本発表では、SACLA の機器の現状と安定度、問題点やその対策の詳細について述べる。

## 2. SACLA の現状および問題点

### 2.1 現状

現状の SACLA の X 線レーザーの強度安定度を、図 2 に示す。この安定度は、長期の強度ドリフトや短期のふらつきが 10 %強存在するが、ユーザー運転には我慢できる範囲となっている。しかしながら、前節でのべた運転員による、定期的な入射部加速空洞の高周波電力および位相の微調により成り立っている。これは、電子の速度バンチング条件の僅かな変更を意味する。この微調から判るように、SACLA の加速器は何らかの外部からの影響を受けていることは明らかで、長期安定度は不十分である。もちろん図 2 のデータは、短期のアンジュレタ区間の安定レーザー増幅のために、要求される加速高周波の電力・位相安定度を満足していることを示唆している。以上のほか、X 線レーザーの増幅を阻害する要因としては、大電力高周波源のトリップがある。もちろんそれは電子の加速エネルギー（高周波源の出力電力）によるが、通常の 10pps の繰り返しの 10keV のレーザーエネルギー（8GeV）で、1 時間に 2 回以下であり、15keV(8.4GeV)の場合は 20 分で 1 回程度となっている。これは少ないとは言えないが、ユーザー運転には許容できる範囲である。

### 2.2 問題点

以下に現状の SACLA の機器の X 線レーザーの安定度に影響する問題点を列挙する。

a. 前節の定期的な入射部空洞の高周波電力・位相の微調の原因を探るために、我々は以下のことをした。加速管ほかの高周波位相やアンジュレタ区

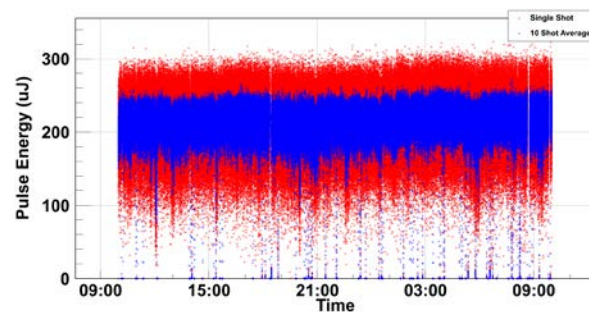


図 2： 24 時間の X 線レーザーの強度安定性、10keV photon、7.8 GeV、0.2 nC 電子ビーム。

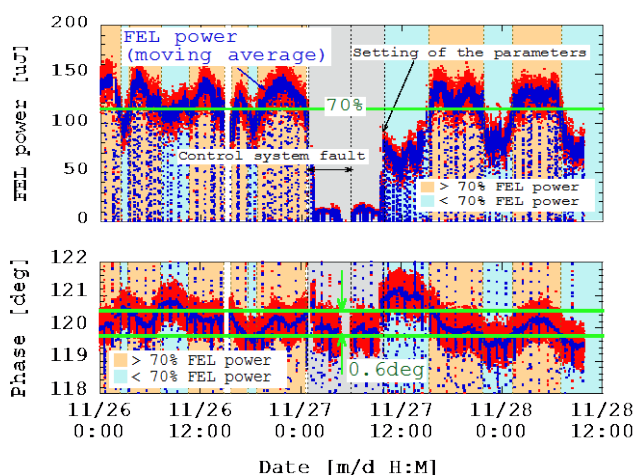


図 3： X 線レーザーの強度ドリフトと BC1 直前のビーム到達時間（BPM-4760MHz 基準空洞のビーム誘起波位相）。

間の入り口の電子ビーム軌道の一定化の最低限の帰還制御を残し、SACLA の装置を 3 日程度自走させて、レーザー強度と BC1 端の電子ビーム到達時間を測定した。その結果を図 3 に示す<sup>[5]</sup>。この図 3 のデータから言えることは、レーザー強度が、ビームの BC1 端へ到達する最適時間から 300fs (P-P、0.6 度 @ 4760MHz) 以上変化すると 70 %以下に落ちる傾向にあることである。この事実は、“はじめに”で述べた要求される入射部空洞の高周波の時間（位相）安定度の 50fs (STD) を考えると、ガウス分布を仮定した時の全幅を  $6 \times \text{STD}$  とした値と調和的である。また、電子ビームの到達時間やエネルギーのドリフトに大きく影響を与える 238MHz の SHB 用高周波源では、その機器が収納されているラックが 0.1K 程度に温調されているにもかかわらず、SHB の位相変化が屋外の気温の変動とある程度相関があることである。

b. 他のレーザーの変動要素として同定されているものは、クライストロンのヒーター電源電圧 AC200V の変動である<sup>[6]</sup>。これは、クライストロンのヒーター電源がスライダックを使用した単純な交流電源なので、商用電源の変動が直接影響していたものである。このヒーターの電圧変動でクライストロンのビーム電流が変化して、クライストロンの高

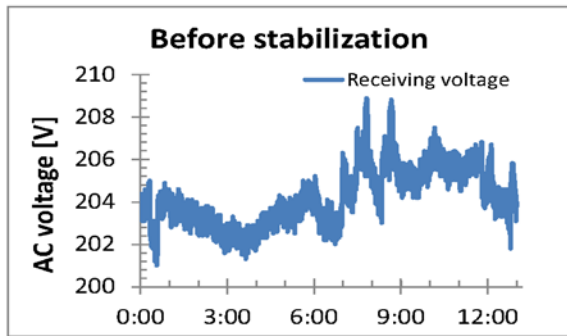


図 4：AVR による安定化前のクライストロン・ヒーター用 AC200V の電圧安定度

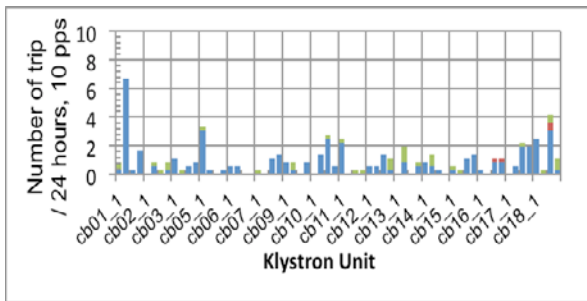


図 5：C バンド大電力高周波源の 24 時間のトリップ頻度。青がサイラトロン、赤がクライストロン、緑が空洞の放電によるもの。加速器の運転繰り返しが 10pps、平均加速電界が ~37MeV/m。3 回/時のトリップレート。

周波出力(電力・位相)が変化していた。そのため加速電子ビームのエネルギーが変動して、レーザー出力変化につながっていた。図 4 に安定化前の AC-200V の電圧安定度を示す。

c. 以上のレーザー強度の変動要素の他に、ユーザー運転に大きな影響を与える項目として、大電力高周波源のインターロックによるトリップがある。トリップが起これば加速電子ビームの大きなエネルギー変動が起こる。それは、SACLA の場合は C バンド 1 ユニットのトリップで約 130 MeV の変動で、高周波源の場所にもよるがビームの軌道などが変動してレーザー増幅がほぼ停止する。この大電力高周波源のトリップの内容は以下である。1 つは、C バンド加速空洞の 37MV/m の高電界運転によるコンディショニング不足で、このことで起こる放電に付随したクライストロンへの高周波反射や真空悪化である<sup>[7]</sup>。2 つめは、サイラトロンの自爆やインバータ高電圧充電器の故障、クライストロン用高電圧トランスの放電などがある。特にサイラトロンの自爆は、多いときには 1 時間に 2 回くらいあり、その状況を図 5 に示す<sup>[7]</sup>。インバータ電源の故障などは、頻度は多くないが発生すると機器の予備品への交換が必要となり、頻度が少なくとも軽視できないものである。この故障頻度は、SACLA の高周波源の 60Hz 運転で、1 ヶ月に数度の時もあった。現状では、加速

器の運転繰り返しを節電など諸般事情で 10pps にしているため、前記の故障頻度は問題にならない程度である。

d. 純水冷却水系では、溶存酸素の増加で酸化銅が析出し、機器の圧力損失が増加する問題も出ている。この酸化銅の析出と圧力損失の増加は、一部は酸化銅によるフィルターの目詰まりなどにより因果関係は明確であるが、不明な部分もある。この問題は、直ちにレーザーの安定度には影響しないが、長期的には加速管や電源などの水冷部分の配管やジャケットの目詰まりにつながり、詰まった段階では故障として当該部分の交換を余儀なくされる。

### 3. 問題点の原因および対策

#### 3.1 原因

A. レーザー強度のドリフトは、現状で明確になっている範囲では以下の原因による。

\* 水冷による入射部高周波空洞の温度調節精度不足(現状 0.1K)による空洞の高周波位相の変動<sup>[5]</sup>。

\* 入射部加速空洞の温度制御は、商用 60Hz-AC ヒーターのパルス幅変調 (PWM) 制御法による。そのため、ヒーター電流による断続的な ON/OFF の磁場変動で加速電子ビームがキックを受けふらついている<sup>[5]</sup>。

\* SACLA では、位相安定化型光ファイバー (2ppm/K の光路長温度依存性) による基準高周波伝送を行っている。この伝送された 238MHz、5712MHz などの高周波信号で加速器のクライストロンなどの大電力高周波源が駆動されている。このシステムの入射部の低電力高周波機器には、238MHz のサブハーモニックバンチャャー (SHB) を駆動するための光信号を電気の高周波信号に変換する機器がある。その中に 238MHz の空洞型バンドパスフィルターがあり、この温度位相特性が 10ps/K で不十分である。この低電力高周波機器は、水冷の温度調節 19 インチキャビネットに納められ、0.1K 以内に安定化されている。しかし先に述べた 10ps/K の温度係数では、0.1K で 1ps の時間ドリフトが 238MHz 基準高周波に生じる。

\* 以上に加えて、光基準高周波伝送系には、本年度中に設置予定のファイバー長制御装置用の部品が諸般の事情で事前に設置してある。この機器の一部の温度特性が良くなく SACLA の変動要素になっている。この当該の要素は、ファイバーの長さを電気信号で変更できるファイバーストレッチャーで、これに使用できるファイバーの種類 (偏波面保存ファイバー) の制限で、現状に使用している位相安定化型光ファイバーの 10 倍程度の温度依存性がある。

B. クライストロンのヒータ電源電圧の変動は、既に述べたように、商用ラインの電源変動を直接反映している。

C. 大電力高周波源のトリップは、一つは内部の放電による加速空洞からの高周波電力の反射と真空

悪化である。もう一方のサイラトロン自爆は、球の個体差や出来具合、球内部の重水素濃度の調整の不完全などが考えられる。我々のサイラトロンは、現状は e2V 社製の CX-1836 であるが、自動でヒーターにより重水素濃度を調整する機能があり自爆頻度は少ないものとされている<sup>[7]</sup>。

D. 機器の冷却水に酸化銅が析出した事案であるが、これは主に予算都合上で冷却水システムに脱酸素装置が設置されていなかったことによる。もちろんこの装置を設置せずとも問題が生じないことを期待したが、それは現実に反したことであった。

### 3.2 対策

以下に前節で述べた問題点の改善策を示す。一部は既に改善され成果をおさめているものもあり、現在計画中で設計・作業中のものもある。ほとんどの改善策を今年度中に終了したいと考えている。

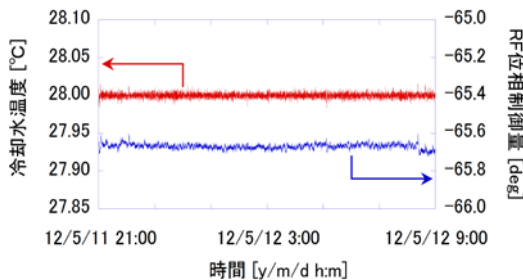


図 6：開発した温度調節装置による 0.01K の 238MHz 空洞の温度安定化と、それに付随した空洞の位相ドリフト。

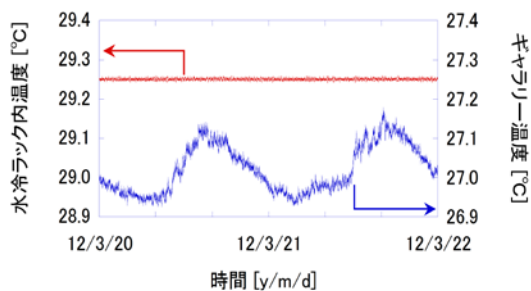


図 7：温調装置による C バンド補正空洞用低電力高周波システム用のラックの温調性能。0.01K の温度安定化が達成されている。

A1. レーザーの強度ドリフトに関しては、以下の対策を検討または対策が終了している。

\* 空洞の温度制御性能の改善は、この夏期の SACAL の運転停止期間に以降に、0.01K の温度制御装置を設置することで行われる。この制御装置は、高分解能温度調節装置（理科工業社製 F9000）を使用したもので、我々は、装置の予備的な試験で数日にわたって 238MHz-SHB の温度を 0.01K 以下の変動に出来ることを確認した。その温度制御の特性を図 6 に示す<sup>[8]</sup>。

\* PWM の ON/OFF 制御された AC ヒーター電流によるビーム軌道への外乱であるが、ヒーターの電源を直流化することで入射部空洞の周辺の磁場の断続性を無くし変動を最小限にして、ビームの軌道変動を最小化する予定である。このシステムは、既に述べた夏期停止期間から設置を徐々に始める予定である<sup>[8]</sup>。

\* 基準高周波光伝送システムの部品である変動要素の 238MHz バンドパスフィルターの改善のためには、現状の 1/5 程度の移相温度係数の市販品を候補あげ、現在試験中である。その温度係数は 2ps/K 程度であり、0.1 度に制御された水冷ラック内で使用することを仮定すると 200fs 程度に移相が少なくなることが期待でき、SACLA の変動抑制には効果的である。この既存フィルターから低温度係数の新規のものへの変更は、本夏の加速器の停止期間に行う予定である。

以上の基準高周波系の改善をより強固なものにするための方策は、既に述べた SACLA の安定性の胆である、入射部の低電力高周波機器が設置されている恒温水冷ラックの温度安定化がある。それには、0.01K 程度の安定性が得られる前節で述べた空洞の温調装置と同等（PWM 方式）なものの導入を進めている<sup>[8]</sup>。予備的なラックの温度調節試験では、ほぼ 0.01K の安定性が確認できている。その結果を図 7 に示す。この改善により、たとえば前記 238MHz フィルターによる変動が 20fs 程度に押さえられることを期待している。この改善も既に進めており、本年度中には成果を出したいと考えている。

\* 基準高周波光伝送システムのもう一つの変動要素であるファイバーストレッチャー影響は、本年度中にファイバー長制御装置が SACLA の基準信号システムに付加されるので、取り除くことが可能となる。この制御装置の開発は既に数年前に終了しているが<sup>[9]</sup>、現在は SACLA に設置する実機を製作している。ファイバーストレッチャー影響は、それが制御装置のファイバー長を変更する駆動装置と使用して制御ループ内に置かれるので、SACAL の変動に影響しないようになる。我々は、現在製作しているファイバー長制御装置の予備的な試験で、前記ストレッチャーを使用した装置が光路長安定化性能を有していることを確認した。その値は、1km のファイバー長で 10 $\mu$ m（ $\sim$ 100fs）以下である。

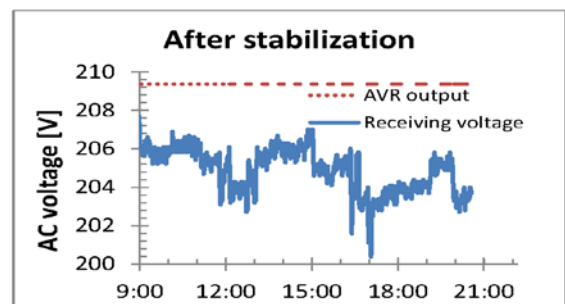


図 8：AVR によるサイラトロンヒーター用 200V-AC の電圧安定化。

B1. クライストロンのヒーター電源電圧の変動への対策は、以下である。電源安定化のために電研精機の AVR を、既に BC3 までのバンチ圧縮のためのオフクレスト加速を行う大電力高周波部に導入している。この部分は、SACLA のレーザー強度安定性に大きく影響する。このシステムによる商用 AC200V の安定度は、図 8 に示すように 1%以内に十分収まっており、それによるクライストロン出力の C バンド高周波の位相安定度は、改善以前はヒーターの電圧変動に比例した位相変化が見られたが、改善後は周囲温度ほかの影響のみが明確に見られるようになった。<sup>[6]</sup>

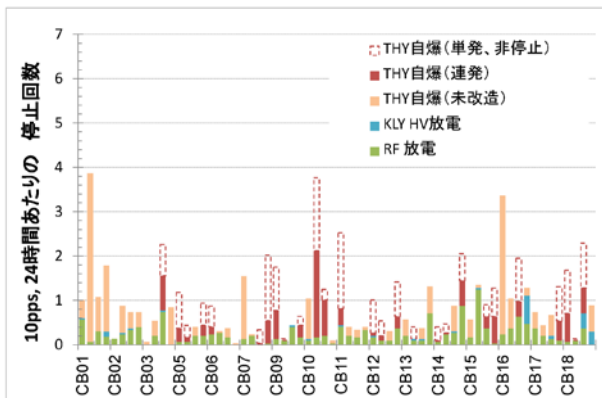


図 9： ソフトウェア改造後のサイラトロンの自爆頻度。この改造を全クライストロンに施すと、平均加速電界が  $\sim 37\text{MeV/m}$  で、2 回/時弱のトリップレートになる予定。

C1. 大電力高周波源のトリップ頻度の低減は、空洞からの高周波の反射や真空悪化による部分は、今後に時間をかけてコンディショニングを進めるしかない。サイラトロンの自爆頻度の低減は、根本的には他の低自爆頻度のサイラトロンへの変更やスイッチの半導体化が考えられる。このような開発要素の多い物は、現状で検討を進めているが簡単に進む物ではない。当面の対策としては、我々のサイラトロンのリザーバー回路にスライダックを付加して、重水素濃度の調整を自動から半自動にする。これにより、自爆が多くなった場合は、管内の重水素濃度を調整して自爆の頻度を低減する方策をとりつつある。この方法は、試験的であるが一定の成果を上げつつある。以上に加えて、サイラトロンの自爆が単一の事象で短期間に繰り返さない場合は、電源をトリップさせず運転員に警告のみを出すモジュレータの制御プログラムに変更した<sup>[7]</sup>。これ以前は、1 回でも自爆した場合はインバータ電源のアブノーマルチャージでトリップするようにしていた。このプログラムの改造により、対策したモジュレータのトリップ頻度は現状の数分の 1 以下となっている。図 9 にはこの状況を示す。これにより、時よりレーザーは歯抜けになるが、それをユーザーが認識できる機能を既存の同期データ収集系で構築しようとしている。

以上に加えて、まれではあるが、インバータ電源

が内部の整流ダイオードや共振充電コンデンサの放電による絶縁不良で故障する。このような傾向は、ほぼ加速器の繰り返し周波数に依存して発生している。10pps では故障はほぼ無く、最大繰り返し周波数の 60pps 運転では、数ヶ月に 1 度以上の頻度で故障が起こっている。この事からこの故障の原因は、ほぼ熱的な問題による内部の部品の破壊であると予想している。この対策としては、インバータ電源の冷却効率を上げるべく、内部の高電圧トランスほかの部品が浸けられている絶縁油の対流シミュレーションや実験を行い、改良するように努力している。

トランスの故障は、放電がクライストロンに接続された高電圧側の巻き線の数巻に発生していることが突き止められている。これは、クライストロンが何某かの原因で放電した時に、それからの反射波で定在波が立つような描像で高い電圧が高電圧側の数巻きに起こっていることが、回路シミュレーションや実験で明らかになっている。この事から、クライストロンが放電することは故障時には避けられないので、当該トランスの高電圧側の数巻きの巻き線の耐電圧強化を行っていい。この強化は、高電圧側の数回の巻き線の絶縁用不織布を 1 枚から 2 枚にするなどの絶縁体力向上で実現しようとしている。この対策で絶縁体力は上がっており、対策の施したトランスで試験的にモジュレータの運転を行っている。しかしクライストロンの放電などの事象がまれで、この対策が有効かどうかの検証には至っていない。

D1. 冷却水系配管内への酸化銅の析出であるが、析出量が多い一部の冷却系統には既にフィルターの強化を行い酸化銅の析出量を押しさえつつある。であるが、今後の冷却系の安定な運転を考えると多くの他の施設で行っているように脱酸素装置の設置が必須と考える。このため、直近の SACLA の夏期運転停止期間に、特に析出量が多い加速器の 1 系統に当該機器の設置を始める予定である。既に書いたように、酸化銅が析出した系統も含めた一部の冷却系に圧力損失の増加が現れているが、この析出で圧力損失の増加が全て説明できる現状ではない。今後原因を更に追求する必要がある。

#### 4. まとめ

SACLA が本格的なユーザー運転を開始してほぼ 4 ヶ月が経過した。その間、多少の故障はあったもののほぼ問題無く運転を続けている。X 線レーザーの強度も、“はじめに”の節で述べたように、多少の運転員による定期的な調整は必要であるものの 10KeV で 250 $\mu\text{J}$  弱は定常的に出力できる状態である。この事は、加速器で 30 fs、3 kA の電子ビームをほぼ安定的に作り出すことが出来ている証である。しかしながら、環境温度の日変化のレーザー出力への影響や大電力高周波源のトリップなど、改善しなければならないことがまだ多く残っている。それらの原因は順次同定されて、改善策が取られつつあり、一部は成果が得られている。今後は、既に述べた改善とその後の既に準備を進めている BC 部のコヒーレントシンクロトン放射 (CSR) モニターを使った

ビームのバンチ幅フィードバックなどにより、我々は、運転員の定期的な入射部高周波空洞の位相などの微調が劇的に減ることを期待している。現状では、改善がほぼ全て終了して期待した長期(たとえば 1 日に 1 回の微調)に渡る X 線レーザーの 10%(rms)以内の安定度が確かめられるのは、年明けになる予定である。

## 参考文献

- [1] 大竹雄次ほか、“加速器のハードウェア”、特集“動き始めた XFEL 施設 SACAL”、放射光学会誌 Vol. 25 No. 2、57-64、2012。
- [2] 田中 均ほか、“ビームコミッショニング・光源特性、特集“動き始めた XFEL 施設 SACAL” “、放射光学会誌 Vol. 25 No. 2、89-96、2012。
- [3] H. Tanaka et al, “XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能に及ぼす RF 機器変動の影響評価”, Proc. of the 4<sup>th</sup> annual meeting of PASJ, 613-615, 2007.
- [4] T. Tanaka, H. Kitamura, T. Shintake., *Nucl. Instrum. Meth. A* **528**, 172, 2004.
- [5] T. Asaka et al., “SACLA 加速器のビーム変動解析”, in these proceedings.
- [6] 稲垣隆宏、私信および XFEL 部門内部報告、2012。
- [7] 稲垣隆宏、“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”、in these proceedings.
- [8] T. Hasegawa, et al., “SACLA 入射部の精密温度調整装置高度化”, in these proceedings.
- [9] Y. Otake et al., “Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femto-second Stability”, proc. of ICALEPCS07, 706-710, 2007.