

SACLA 加速器構成機器の高度化状況

IMPROVEMENTS OF THE ACCELERATOR COMPONENTS AT SACLA

前坂比呂和[#], ほか SACLA 加速器研究開発グループメンバー
Hirokazu Maesaka[#], on behalf of the members of SACLA Accelerator Group
RIKEN SPring-8 Center

Abstract

Since the beginning of XFEL operation in SACLA, various improvements have been demanded in order to increase XFEL intensity and stability. Some of improvement tasks were: (1) Upgrade of the precise temperature regulation system in the injector section to reduce the rf phase drift of cavities and beam orbit fluctuation. (2) Increase of repetition rate and decrease of a trip rate. (3) Extension of an undulator line and tuning of the magnetic field of existing undulators. For the precise temperature regulation system, we replaced a PWM AC heater with a continuously-controllable DC heater. In addition, the precise temperature regulation system was applied to an enclosure for low-level rf electronics. After these upgrades, rf phase drift of acceleration fields in the injector cavities was reduced and the orbit fluctuation due to a leak magnetic field from the AC heater was also eliminated. For decrease of the trip rate, we modified an interlocking logic for the thyatron discharge of the high-voltage pulse modulators and we performed high-voltage conditioning of accelerating structures in parallel with user operation. As a result, the repetition rate was increased from 10 pps to 20 pps without significant growth of the trip rate. For the undulator part, magnetic field errors on some of the undulators were measured and corrected in summer, 2012 and an additional undulator was installed in winter, 2012. In consequence of these improvements mentioned above, the accelerator was considerably stabilized and the average XFEL intensity was increased from 250 μJ (July 2012) to 400 μJ (July 2013) at an X-ray energy of 10 keV.

1. はじめに

SACLA にて X 線自由電子レーザー (XFEL) を各種の実験で有効に利用するためには、XFEL 強度の増強と安定化、および、加速器の高繰り返し化やトリップ頻度の低減などの性能向上が不可欠である。実際、2011 年にビームコミッショニングが開始されてから現在まで、XFEL の安定度を向上し出力を増強するため、さまざまな高度化をおこなってきた^[1]。その結果、2012 年 7 月までに 10 keV の XFEL がパルスあたり平均 250 μJ が安定に出せるようになった。それでもなお短期の強度変動や長期ドリフトがあり、精密なマシン調整の妨げとなったり、供用運転中の出力低下が起こったりしていた。そこで、さらなる安定度向上をめざして各種の高度化をおこなってきた。また、加速器の繰り返しについては、設計性能の 60 pps に対し、10 pps におさえてなるべく加速器のトリップ頻度が少なく、かつ、故障を防ぎながら運転をしてきた。しかし、効率的な利用実験をおこなうためには少しでも繰り返しを上げて XFEL の供給パルス数を増やす必要がある。

本稿では、まだ十分な安定度が達成できていなかった部分の課題をまとめ、それらに対する高度化とその結果についてまとめる。

2. 性能向上への課題

SACLA では、低エミッタンス熱電子銃から出た 500 keV, 1 A の電子ビームをパルスチョップで 1 ns に切り出し、速度変調バンチングと 3 段のシケイン

[#]maesaka@spring8.or.jp

型バンチ圧縮器 (BC1-BC3) でバンチ長を 30 fs まで圧縮する。それにより、XFEL に必要なピーク電流 3 kA と規格化エミッタンス 1 mm mrad の電子ビームを生成する。このような高品質の電子ビームを安定に生成するには、入射部、および、それに続くバンチ圧縮過程での RF 位相などの変動が十分に抑制されていなければならない。そのためにはまず、電子ビームの初期条件を決める入射部の安定化が欠かせない。前回の報告では、入射部の RF 位相が時間換算で数 ps という大きな変動をおこしていた^[2]。また、精密温度調整装置の PWM 周期に同期した変動が見られていた^[2]。そこで、これらの変動を極力抑えることが重要である。

次に、C バンド主加速器においてはトリップ頻度が高かったため、供用運転は 10 pps でおこない、なるべくトリップを起こさない状況で運転してきた。それでも、8 GeV 運転にて 30 分に 1 回程度のトリップが起こっていた。これは主に高圧パルスモジュレータのサイラトロンの自爆と加速管の放電による RF 反射や真空悪化が原因である^[3]。そのため、これらのトリップを低減し、運転繰り返しを設計値の 60 pps に少しでも近づけることが必要である。

最後に、アンジュレータを増設することで、とくに高エネルギー側の X 線の強度の増強に貢献することが期待される。また、アンジュレータの磁場精度が十分に保たれていることも重要である。2012 年 7 月の時点で、自発光の測定結果などから 18 台のアンジュレータのうち数台のアンジュレータの磁場に誤差があることが示唆された。そのため、運転停止期間にアンジュレータの測定と調整をおこなうことが必要とされていた。

3. 高度化の内容とその結果

前節の課題をふまえて、入射部の安定化、主加速器のトリップ頻度低減、アンジュレータの調整と増設をおこなってきた。これらの内容と結果について順に述べる。

3.1 入射部の安定化

SACLA の入射部においては、前回の報告^[1]にて加速空洞の精密温度調整装置の温度モジュールのドリフト^[4]や、ヒータの PWM (Pulse Width Modulation) 制御に同期した周期的な RF 変動・ビーム位置変動^[2]があったことを示した。しかしながら、2012 年 7 月の時点では温度モジュールを置き換えることでドリフトはなくなったものの、PWM 制御に同期した変動は依然として残っていた。2012 年 8 月に精密温度調整装置のヒータを DC の連続制御ができるものに改修したため、PWM 制御に同期した変動を除去することができた。その結果、入射部でのビームの軌道変動が抑制され、アンジュレータ内のビーム軌道が安定したことにより、実験棟での XFEL の位置変動が水平・垂直とも大きく減少した。精密温度調整装置の改修前後の XFEL 位置の散布図を Fig. 1 に示す。水平位置の変動が RMS で約 60%減、垂直位置の変動が約 80%減となり、位置の安定度が大きく改善された。

この軌道変動が本当にヒータからきているかどうかを確かめるため、2012 年の年末にダミーの PWM AC ヒータを入射部に設置し、ビーム軌道への影響を調査した。その結果、Fig. 2 に示すように、PWM AC ヒータを ON したときに比べて OFF したときの方が、入射部を出たあとのビーム位置のゆらぎが小さくなっていることがわかった。このときのヒータの制御周期は 2 Hz だったため AC ヒータが ON のときは 2 Hz とその高調波にピークが見られたが、AC ヒータを OFF にするとそのピークが消えている。それに加えて、PWM 制御周期とは直接関係しない 0.1 Hz 以下のドリフトも減少することがわかった。遅いドリフトが抑制されるメカニズムはよくわからないが、PWM AC ヒータが漏れ磁場を出すなどしてビーム軌道に影響を与えていることは間違いなさそうである。

次に、入射部の低電力 RF 機器の温度変動による、振幅・位相の変動を低減することも重要である。これは、前回の報告^[1,2]にもあったように入射部の RF 位相が時間換算で数 ps ものドリフトをしていることが判明していたためである。SACLA の低電力 RF 機器は水冷式 19 インチラックにて $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内に温度安定化されているが、それでもなお温度変動による位相変動が疑われた。そこで、2012 年 11 月に水冷式 19 インチラックに精密温度調整装置を取り付け、ラック内の温度をさらに安定化させることとした。その結果、Fig. 3 に示すように、ラック内の温度を 0.01°C pk-pk に安定化することができた。これにより、ラック内機器の温度ドリフトが 1 桁改善されたと考えられる。

そして、2013 年 6 月には、S バンド加速管の精密

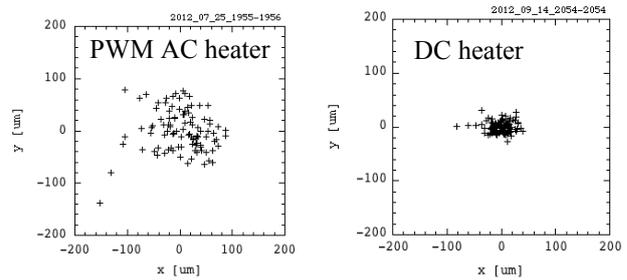


Figure 1: Scatter plots of the XFEL positions at the experimental hall. The left (right) plot shows data before (after) the replacement of the PWM AC heater with the DC heater for the precise temperature regulation system in the injector part.

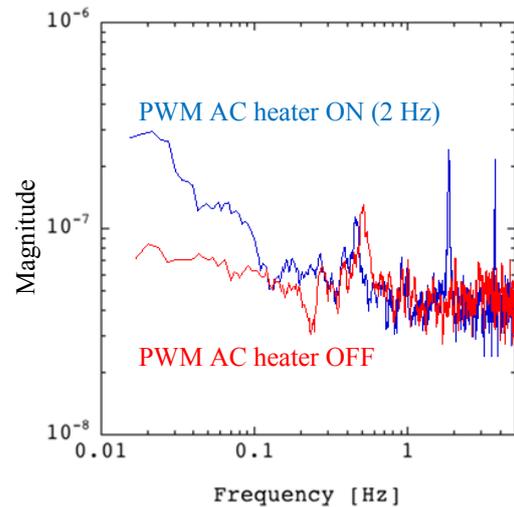


Figure 2: FFT spectra of the beam positions after BC1 with (blue) and without (red) the PWM AC heater (2Hz).

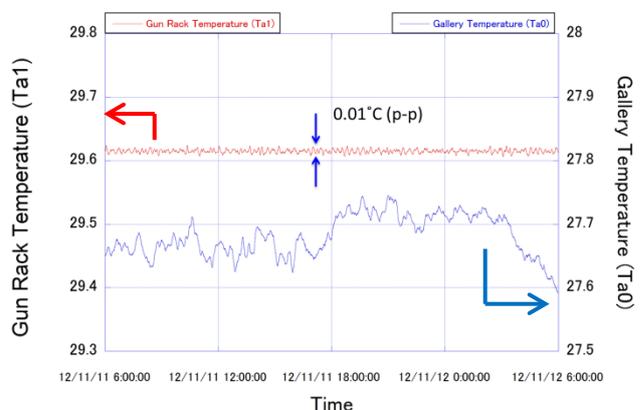


Figure 3: Temperature stability of the 19-inch rack with the precise temperature regulation system (red curve, left axis). The blue curve shows the room temperature of the klystron gallery (right axis).

温度調整装置の温度モジュールを交換し、精度向上をおこなった。これは、前回の報告^[1,4]にもあったように、精密温度調整装置の温度測定モジュールに大きなドリフトがあったためである。これまではそれより上流の入射部にも変動があったため、Sバンド加速器の変動なのか入射部の変動なのかの切り分けが難しかったが、入射部の安定化の結果、Sバンド加速器の変動が顕著に現れるようになったのである。この精度向上の結果、Sバンド加速器の変動が抑えられて、その直後のBC2でのパンチ圧縮率やビームエネルギーが安定し、より安定なXFEL出力が得られるようになった。

3.2 主加速器のトリップ頻度低減

主加速器のトリップ原因の内訳としては、加速管でのRF放電にとまらうRF反射や真空悪化によるもの、および、サイラトロンの自爆によるものが大半を占める^[3]。供用運転時のトリップ頻度とその内訳について、運転エネルギー5.8 GeVのときと7.8 GeVのときをそれぞれFig. 4, Fig. 5に示す。通常ではトリップ頻度は単位時間あたりで表示することが多いが、2013年5月より運転繰り返し10 ppsから20 ppsに上がったので、比較しやすいよう、縦軸の単位は100万ショットあたりのトリップ回数としている。なお、5.8 GeVにくらべて7.8 GeVの方がトリップ頻度が多いのは、加速電界が後者のほうが高いことによる。

まず、2012年9月以降トリップ頻度が大きく下がっている。これは、サイラトロンの自爆によるトリップを防ぐため、単発の自爆を無視するように制御ロジックを改修したことによる^[3]。2012年6月の時点では全70台のサイラトロンのうち25台までしかロジック改修が進んでいなかったが、8月に残りすべてのロジック改修を済ませた。その結果、9月以降の運転ではサイラトロン自爆によるトリップ頻度が約半分となった。

次に、RF放電によるトリップは、2013年3月ごろを境に大きく減少した。それは、低エネルギー供用運転時には加速に使用しなくてもよいユニットがいくつかあるので、それらの高電界コンディショニングを並行しておこなうようにしたことによる。コンディショニング対象のユニットはRFのタイミングをずらしてビームに影響を与えないようにすることで、供用運転中でもコンディショニングができるようにした。それにより、RF放電が徐々に減少し、2013年7月現在、5.8 GeVの運転 (Fig. 4) ではRF放電によるトリップ頻度が約半分となり、7.8 GeVの運転 (Fig. 5) では約5分の1にまで減少している。それにより、運転繰り返しを上げてトリップ頻度が供用運転に耐えうるものとなり、2013年5月以降、繰り返しを20 ppsにあげて運転している。

最後に、平均トリップ間隔 (MTBF) の推移をFig. 6に示す。2012年8月のサイラトロン自爆制御ロジック改修により、2012年9月以降MTBFが5.8 GeVではおよそ2倍に、7.8 GeVでは若干ではあるが長くなっている。その後、供用運転と並行して高電界コンディショニングを進めることでRF放電

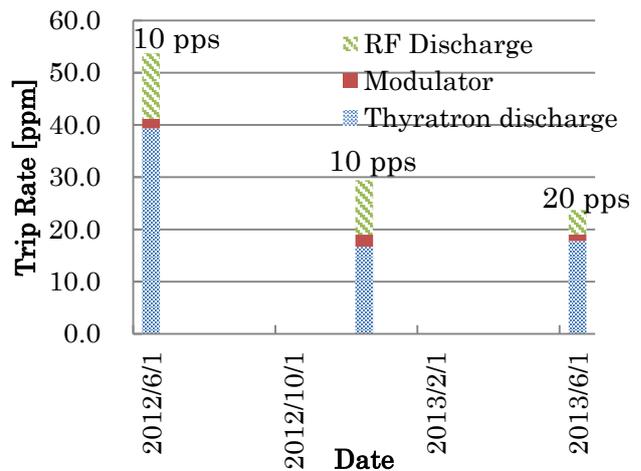


Figure 4: Trip rate during 5.8 GeV operation. The vertical axis shows the number of trips per million shots.

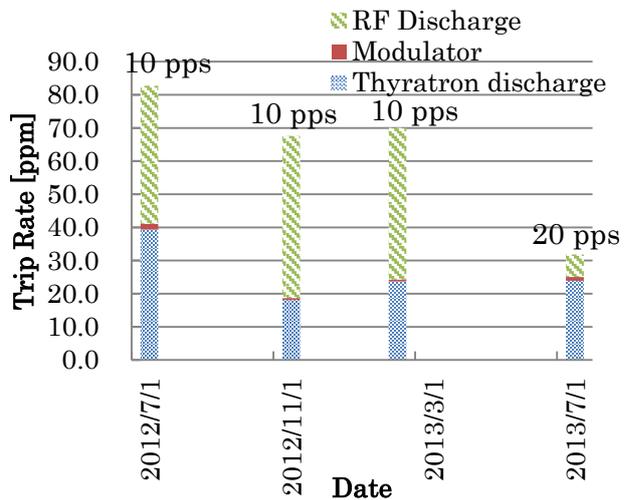


Figure 5: Trip rate during 7.8 GeV operation. The vertical axis shows the number of trips per million shots.

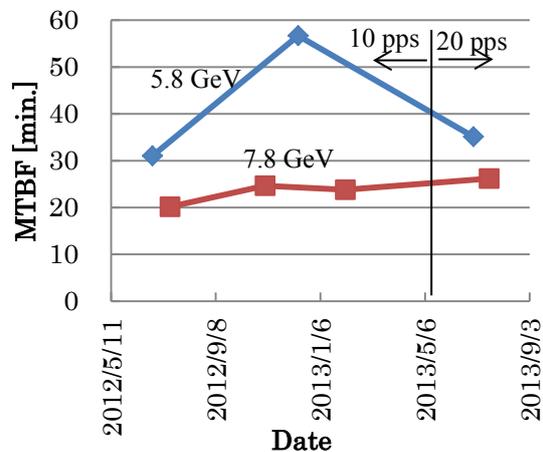


Figure 6: Mean time between failures (MTBF).

によるトリップ頻度が減り、2013年5月に繰り返しを20 ppsに上げたあとも7.8 GeVのMTBFが30分弱のまま維持できている。5.8 GeVではもともとRF放電によるトリップがそれほど多くなかったため、20 ppsに上げることによりMTBFが短くはなっているが、30分以上であるので供用運転に問題はない。

3.3 アンジュレータの調整と増設

アンジュレータの高度化については、まず、誤差磁場の低減が挙げられる。これは2012年7月の時点で、各アンジュレータの自発放射のスペクトルやFELゲインなどの情報からいくつかのアンジュレータの磁場に誤差があることが示唆されていたためである。そこで、2012年8月の停止期間にSAFARI^[5]を用いて現場での磁場測定をおこない、誤差のあったものの調整をおこなった。その一例をFig. 7に示す。製造時はほとんど磁場の位相誤差がなかった(黒線)のに対し、1年程度使用したあとでは最大で100度を超える位相誤差が発生しているものがあった(赤線)。これは、アンジュレータの磁石列がわずかに傾いたり、ギャップにオフセットがのったりしたことによる。実際、SACLAのアンジュレータの磁石列はFig. 7中の破線で分割されていて、1台あたり3組の磁石列を使用しているが、その境目で状況が変わっていることがわかる。そこで、各磁石列の駆動系の調整をおこなったところ、Fig. 7の緑線のように誤差が十分に低減された。この際の駆動系の調整量は数10 μm であった。このような磁石列駆動系の変形がなぜ起こるかはまだ不明であるが、この原因究明は今後の課題である。

次に、2012年8月に18台中9台目のアンジュレータを最下流に移動させた。これは、XFELの強度増強とは直接関係ないが、途中にスペースを設けて磁場シケインを設置し、自己相関測定によるXFELパルス長の測定や、時間差をつけた2色XFEL発振^[6]、セルフシード型XFELの生成^[7]などのために使用する。途中の1台のアンジュレータを移動させてもXFELの強度に影響がほとんどないことは実験的に確かめられている。たとえば、Fig. 8にFELゲインカーブを示しているが、アンジュレータ移動前後(黒○→青□)において最終的なXFEL強度に低下が見られないことがわかる。むしろ、他の機器の安定化やアンジュレータの磁場調整の成果もあり、XFEL強度は増加している。

最後に、2012年冬のアンジュレータ1台増設について述べる。これは、XFELの出力増強のためと、セルフシード型XFELを飽和させるにはシケイン下流に現状よりも長いアンジュレータが必要となるためである。1台増設後のFELゲインカーブをFig. 8赤△にて示しているが、残念ながらこの条件ではアンジュレータ増設の効果がそれほど顕著には見えていない。これより高エネルギーのXFELではゲイン長が長くなるので、アンジュレータ増設による効果がより大きくなると考えられる。また、セルフシード型XFELでもアンジュレータ増設の効果が期待される。

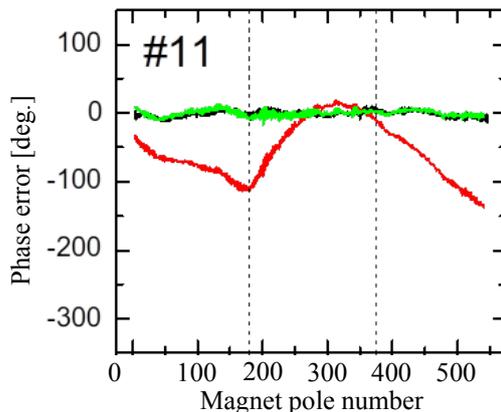


Figure 7: Phase errors of one of the undulators just after the production (black), after the use of one-year (red), and after the field adjustment (green). The gap width of this data is 4 mm.

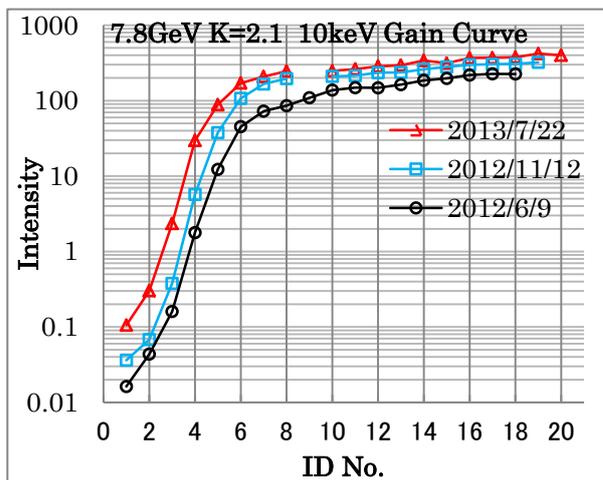


Figure 8: Gain curves of a 10 keV XFEL. The K value of the undulator is 2.1 and the beam energy is 7.8 GeV. The black circle, blue box and red triangle show gain curves before the movement of the 9th undulator, after the movement of the 9th undulator, and after the installation of another undulator, respectively.

4. 高度化後の XFEL 性能と今後の展望

最近のXFEL強度安定度のデータとして、2013年7月22日にとった10 keVのXFEL強度の20時間のトレンドグラフをFig. 9に示す。平均400 μJ のXFEL強度が安定に供給できていることがわかる。また、Fig. 8のFELゲインカーブに示されるように、日を追うごとに電子ビームの質が良くなり、FELゲイン長が短くなるとともに、最終的なXFEL強度も増大していることがわかる。これはとくに入射部の安定化の結果、電子ビームのより精密な調整が可能となったことが挙げられる。SACLAでは多段のバンチ圧縮をおこなっているため、上流に変動があると下流のすべてのバンチ圧縮に影響が及んでしまう。そのため、入射部の安定化により、入射部の精密な

調整が可能になり、後段のバンチ圧縮の最適化ができるようになってきたことも XFEL の性能向上に貢献していると考えられる。

今後、さらなる安定化を目指して、2013 年中に以下の高度化を予定している。

- BC3 より上流の C バンド加速管の精密温度調整装置の精度向上による位相安定化
 - 基準信号伝送用光ファイバの光路長制御の導入による基準 RF 位相の安定化^[8]
 - アンジュレータを 2 台増設して光源性能を向上
- これらの高度化をおこなうことにより、加速器のさらなる安定化とアンジュレータ光源の増強ができるので、XFEL の強度や安定度が今以上に改善されることが期待される。また、加速器の繰り返しについても 2013 年中に 30 pps での試験をおこなう予定である

繰り返しについては、設計性能である 60 pps での供用運転を早期実現することが望まれる。そのための課題としては、トリップ頻度のさらなる低減と、機器の故障頻度の低減が挙げられる。トリップ頻度の低減については、まず、トリップ条件を緩和するなどして短期的な改善を試みる予定である。長期的には、自爆の少ないサイラトロンへの移行や、半導体スイッチの開発などを検討する予定である。また、現状の高圧パルスモジュレータ用充電器は 60 pps 運転時に故障頻度が上がることがわかっている^[9]、60 pps 運転に十分耐えられる充電器への改良を進めている^[10]。

5. まとめ

SACLA の運転開始以来、XFEL 強度の増強と安定化に向けてさまざまな改良をおこなってきた。入射部の RF 位相変動を抑えるため、RF 空洞の精密温度調整装置の高精度化と低電力 RF 機器用 19 インチラックへの精密温度調整装置の導入をおこなった。また、RF 空洞の温度調節用のヒータは PWM 制御の AC ヒータから DC ヒータに置き換えることにより、AC ヒータからの漏れ磁場によると思われるビーム軌道変動を取り除くことができた。また、加速器のトリップ頻度低減のため、主な原因であるサイラトロンの自爆と RF 放電の影響を抑えるべく、インターロックロジックの改良、および、供用運転と並

列に加速管の高電圧コンディショニングをおこなってきた。その結果、トリップ頻度が大きく低減され、2013 年 5 月に繰り返しを 10 pps から 20 pps にあげて供用運転ができるようになった。さらに、アンジュレータの磁場調整や、アンジュレータ 9 台目の移設、新しいアンジュレータの 1 台増設をおこない、光源性能を高めた。その結果、2012 年 7 月の時点で 10 keV での平均 XFEL 出力パワーが 250 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ だったのに対し、2013 年 7 月の時点で 400 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ に増強できた。これは、以上に述べた高度化により加速器が安定化され、より精密なビーム調整ができるようになったことによるものが大きい。今後、さらに安定度を上げ、トリップ頻度を下げるべく機器の改良をおこない、XFEL 出力増強や繰り返し増強などの高度化をおこなっていく予定である。

参考文献

- [1] H. Maesaka, et al., “Stability Improvements of the XFEL Intensity at SACLA”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2012).
- [2] T. Asaka, et al., “Variability Analysis of a Beam at SACLA”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2012).
- [3] T. Inagaki, et al., “Improvement of the Accelerating Gradient and Reduction of the Trip Rate of the C-band Accelerator in SACLA”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2012).
- [4] T. Hasegawa, et al., “Upgrade of a Precise Temperature Regulation System for the Injector at SACLA”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2012).
- [5] T. Tanaka, “Development of In-situ Field Measurement Instrument for Undulators”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2012).
- [6] T. Hara, “Upgraded Performance of SACLA Accelerator and FEL”, in these proceedings.
- [7] R. R. Lindberg and Yu. V. Shvyd’ko, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 050706 (2012).
- [8] H. Maesaka, et al., “Development of the Optical Timing and RF Distribution System for XFEL/SPring-8”, proceedings of the 30th International Free Electron Laser Conference (FEL’08), 352 (2008).
- [9] Y. Otake, “Problem and Improvement of Accelerator Components at SACLA”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2012).
- [10] C. Kondo, “Developments of High Voltage Power Supply Using PWM Control”, in these proceedings.

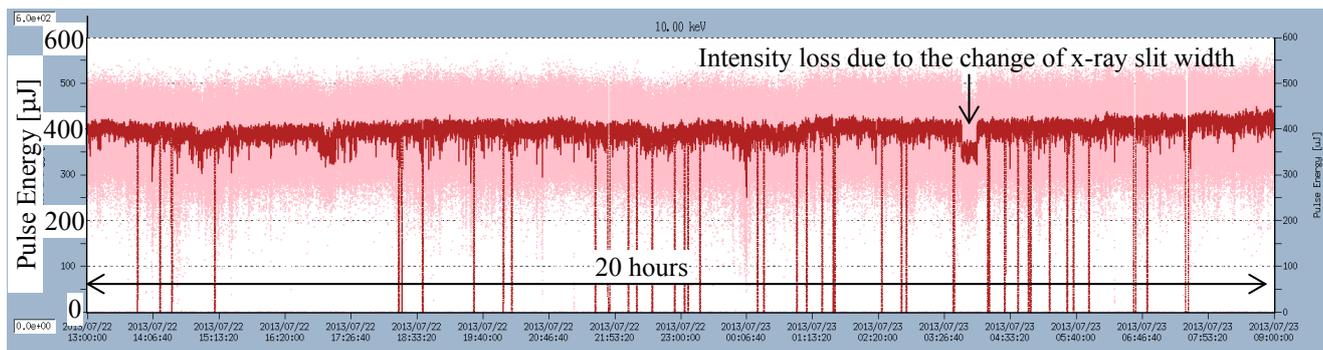


Figure 9: Trend graph of the XFEL intensity for 20 hours on July 22nd, 2013. The photon energy was 10 keV. The pink dots are shot-by-shot XFEL intensities and the red dots are 100-shot averages.