

## SACLA における RF 異常波形データの捕捉 CAPTURE OF ABNORMAL RF WAVEFORM AT SACLA

大島隆<sup>#, A)</sup>, 前坂比呂和<sup>A)</sup>, 稲垣隆宏<sup>A)</sup>, 原徹<sup>A)</sup>, 長谷川太一<sup>B)</sup>, 吉岡 正倫<sup>B)</sup>, 丸山俊之<sup>C)</sup>, 大竹雄次<sup>A)</sup>  
Takashi Ohshima<sup>#, A)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Toru Hara<sup>A)</sup>, Taichi Hasegawa<sup>B)</sup>, Masamichi  
Yoshioka<sup>B)</sup>, Toshiyuki Maruyama<sup>C)</sup> and Yuji Otake<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center, XFEL Division

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

<sup>C)</sup> Nippon Gijutsu Center Co., Ltd.

### Abstract

To maintain high availability as a user machine, such as the XFEL facility SACLA, quick recovery from troubles is important. To diagnose the source of the trouble we should collect information related to it as much as possible. For example, when we find an intensity fluctuation of XFEL, we search data which correlate with the intensity fluctuation. The point data of pulsed signals, such as a beam position, a beam current, an rf phase and amplitude detected with a cavity pickup, are saved for every shot. But a time interval to save the waveforms of the cavity phase and amplitude is 10 minutes, because of the limited data transfer speed of the VME bus, and we may lose the waveforms at the abnormal event. So we made a system to capture the abnormal waveforms to diagnose the trouble source. The system utilizes a function of an ADC, for which makes an interrupt signal when the acquired waveform has deviation from the reference waveform. The system was operated and successfully caught the abnormal rf phase waveform of the C-band correction cavity. At that time the waveform deviation was not observed in a klystron cathode voltage waveform, nor the klystron drive rf waveform but in a klystron output rf phase. So we could deduce that the trouble was in the klystron itself and after the replacement of the klystron, the X-ray intensity was stabilized. This example demonstrates that this system is helpful for a machine troubleshooting. This surveillance system will be applied to other units to catch unusual operation status.

### 1. はじめに

Spring-8 Angstrom Compact LAsER (SACLA)は X 線領域での SASE 発振を実現し、高輝度短パルス X 線を用いて原子の 2 光子吸収など非線形過程の観測、非結晶タンパク質の構造解析など様々な実験を行うための施設である<sup>[1]</sup>。長期にわたって安定にレーザーを供給するためには、さまざまな構成要素の安定度を高く保つ必要がある。特に高周波加速空洞の位相、振幅は電子ビームのバンチ圧縮やビームエネルギーに強く影響するため、監視を怠ることはできない。環境温度や湿度、受電電圧などゆっくりした変動が予想されるデータについては 2 秒間隔などソフトウェアで決めた一定の周期でデータベースに保存される<sup>[2]</sup>。しかし、電子ビームの電荷量やビーム位置、加速空洞の位相、振幅などショットごとに変化する可能性を持つデータについては、全ショットを記録することが望ましい。そのため、ビームショットごとにタグ番号(trigger count)を割り当てて保存している。この時に保存されるデータは、マスターとなるトリガ信号(master trigger)を規定時間だけ遅延させた信号で ADC をトリガし、得られた ADC の波形データのうち、あらかじめ指定したタイミングでのサンプル値または波形内のピーク値(ポイントデータ)である。このデータを収集するためのプロセス(SYNC DAQ-EMA)はコミッションニング時

から動作している<sup>[3]</sup>。

ポイントデータに何らかの変動がみられた場合に、波形全体がシフトしているのか、それとも波形の一部だけが変動しているのかによって、変動の要因が異なる場合がある。そのため、異常が発生した際の波形データを確認できるようにしておくことは重要である。しかし、既存のデータ収集システムでは、保存するデータ容量の問題や VME バスの通信速度による制限などから、波形データの保存は 10 分毎に設定されており、異常発生時の波形が保存できていない場合が多い。そこで、我々は、ADC ボード内に基準とする波形を設定し、その波形からのずれが許容値を超えた場合に、その異常波形およびその前後のショットの波形データを保存する機能を持つ ADC を開発した<sup>[4,5]</sup>。この機能を用いて異常が発生した際に、関連する信号の波形も含めて異常波形を保存するシステムを構築した。本論文では、異常波形捕捉のためのシステムの概要を説明し、異常波形捕捉の実施例について紹介する。

### 2. 異常波形収集システムの概要

RF 機器を制御する VME の CPU 上では、ショット毎のポイントデータを収集するためのプロセス(SYNC DAQ-EMA)、加速空洞の位相および振幅を安定化させるプロセス(PID-EMA)が動作している(Figure 1 参照)。これに加えて、異常波形収集のプロセスを新たに制作した。

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

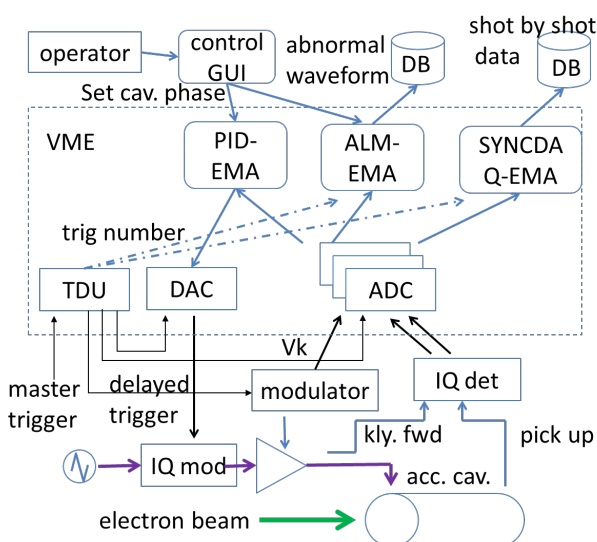


Figure 1: Configuration of LLRF and data acquisition system for each RF unit.

異常波形収集は次の手順で行われる。加速空洞のピックアップ信号、クライストロンの出力信号、クライストロン modulator 電圧信号などの計測には 238MHz のクロックで動作する VME 規格の ADC を用いている。ADC で保存されるデータは 1 波形あたり 2048 ポイントで約 8 $\mu$ s の時間に対応する値を記録できる。ADC ボード内には 512 個の波形を記録できるメモリバンクが 4 つある。あらかじめ空洞ピックアップ信号に対応する ADC ボードに正常動作時の波形を基準波形として設定する。ADC ボードはビームショット毎に取得した波形データと基準波形データを比較し、閾値から外れた場合にインタラプト信号を発生すると同時に、データ更新による異常波形データの消失を防ぐために波形データを保存するバンクを切り替える (Figure 2 参照)。VME の CPU 上で動作する異常波形データ収集プロセス (ALM-EMA) は、ADC ボードからのインタラプト信号を監視するスレッドとデータを収集するスレッドで構成されている<sup>[6]</sup>。インタラプト監視スレッドでは、インタラプト信号を受け取るとビームショット毎に割り振られているタグ番号を取得し、また、同時に関連する信号波形を収集している他の ADC ボードに対してもバンク切り替えを行う。データ収集スレッドでは、該当する異常波形データとその前後の波形データを収集し、タグ番号と波形データをデータベースに保存する<sup>[7]</sup>。RF 機器の起動直後や停止時に波形が異常と判定されることを防ぐために、異常波形監視プロセスに対する正常波形の設定および監視の開始コマンドの発行は、RF 機器が定常の運転状態であることを確認したうえで行う。

各 RF ユニットでは、加速器の調整で加速空洞の目標位相の変更を行う際には、位相振幅安定化プロセス PID-EMA に対して位相の目標値を設定する。異常波形監視において、オペレータの意図した位相変更による波形の変化は異常波形ではないため、PID-EMA に対して設定値の変更を与える場合には、

まず ALM-EMA に対して異常波形監視の停止を行い、PID-EMA に設定値を送る。PID-EMA によって空洞位相が目標値に対して許容誤差内に収まったことを確認した後に ALM-EMA の異常波形監視を再開する。クライストロン電源のフォールトなどでユニットの運転が停止した際には、ALM-EMA は異常波形を記録する。異常波形監視の再開は先ほどと同じように、PID-EMA によって制御値が目標値に対して許容誤差内に収まったことを確認した後に ALM-EMA の異常波形監視を再開する。

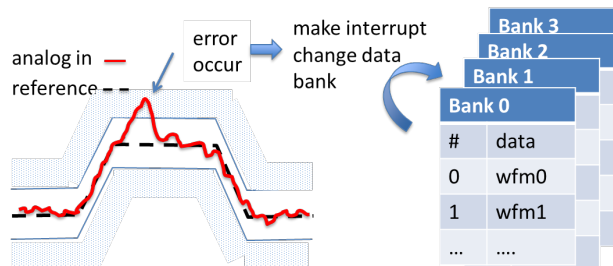


Figure 2: Error detection at the ADC board.

現時点では、加速器の運転に大きな影響を与えるユニットや注意を要するユニットに対して個別に監視プロセス ALM-EMA の立ち上げを行っているが、2014 年秋の運転からは監視対象に含めるユニットの数を増やす予定である。これらのユニットで動作する ALM-EMA を制御する Graphical User Interface (GUI) については現在準備を進めている。Figure 3 には試作した GUI の画面を示す。パネルには PID-EMA の起動、目標値の設定、ALM-EMA の起動、許容値の設定を行うボタンや入力窓が用意されている。SACLA では 74 の加速ユニットがあり、個別に窓を設けることは煩雑で見通しが悪い。そこで、加速空洞の位相設定など PID-EMA の制御を行っている GUI に修正を行い、ユニットごとの異常波形の発生頻度の監視、表示を行い、頻度が高いユニットについては詳細な調査を行うために運転員に警告を発する機能を持たせることを検討している。

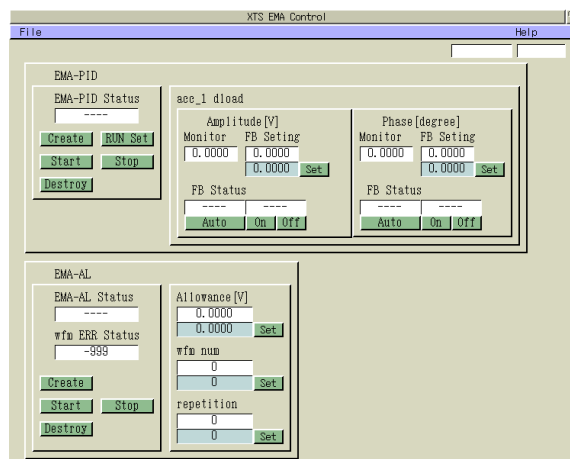


Figure 3: Sample of Graphical User Interface for abnormal waveform surveillance.

### 3. 異常波形捕捉の実施例

異常波形捕捉の実施例として、2013年10月2日にC補正空洞において見られた位相変動の様子を示す。ポイントデータでは位相変動が捉えられているが、その発生頻度はFigure 4に示すように20分間に5回程度であり、その異常を捉えるには発生頻度が低かった。この例のうち13:00頃に発生した異常波形の例をFigure 5に示す。異常波形を検知した際には、a)空洞位相・振幅波形だけでなく、b)クライストロン出力高周波の位相・振幅波形、c)クライストロン modulator 出力電圧波形も同時に取得した。空洞波形、およびクライストロンの出力波形には0.6 $\mu$ sのタイミングで通常では見られない25度近い位相の変化が見られた。このタイミングに対応するクライストロンのカソード電圧は、異常・正常時ともに変化が見られなかった。また、RFの振幅については、放電時のような大きな変化は見られなかった。このことから、この空洞位相変動の要因としてはクライストロン modulator での異常や加速空洞内の放電ではなく、クライストロン自身の出力異常と同定された。原因としては、クライストロン内の空洞でのマルチパクタや、寄生発振の寄与などが考えられた。C補正空洞では定格50MWのクライストロンを半分以下の出力で運転していることから、クライストロンのロットによる特性の違いの影響を受けやすいことが考えられた。対策として、クライストロン励振RF電力の調整などを試みたが改善が見られなかったため、クライストロンの交換作業を加速器調整期間に実施した。その結果、Figure 4のような異常波形が見られなくなり、クライストロン本体に異常があったことが確かめられた。このように、異常波形データの収集システムは、加速器の運転上での異常状態の原因の調査に役立つことがわかった。

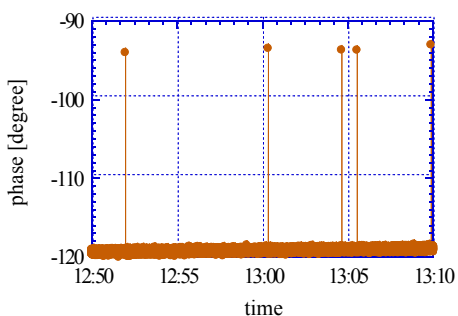


Figure 4: Trend of point data of the C-band correction cavity phase.

### 4. まとめ

XFELを安定に運転するためには異常発生時に故障診断のための情報を得ることが重要である。パルス運転を行っている加速器では、ショットごとに状況が変化する可能性があり、異常時の波形を保存することは故障原因診断の有力な道具となりうる。われわれは、異常波形検出機能を持つADCを開発し、

加速空洞ピックアップ信号などの波形異常を検出した際に、異常波形およびその前後の波形を記録するシステムを構築した。C補正空洞の位相に変動が見られた時、このシステムで得た結果から、位相変動の原因はクライストロン用 modulator ではなくクライストロン本体にあることを突き止めることができた。今後はこの異常監視システムをほかの号機の監視にも広め、加速器の安定運転への助けとする予定である。

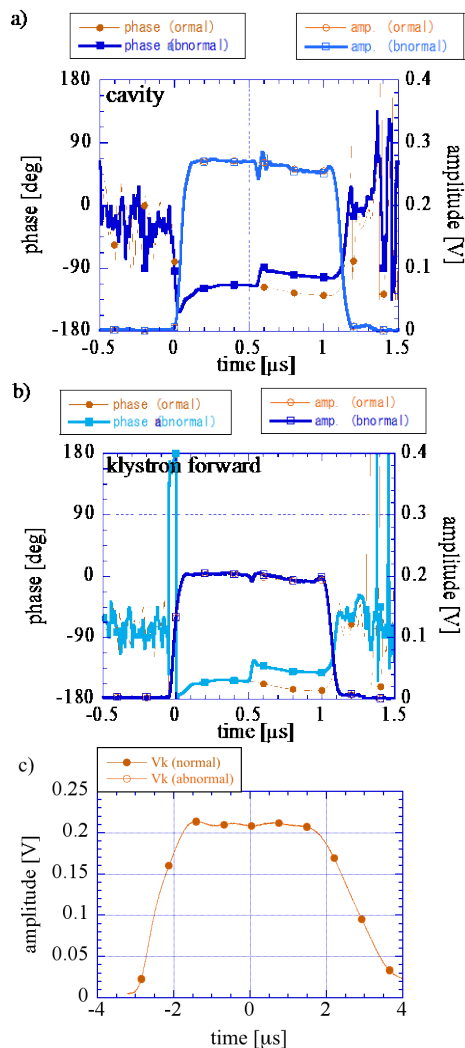


Figure 5: Normal and abnormal waveforms of a) the cavity pickup RF signal, b) the waveforms of the klystron output RF signal and c) the klystron cathode voltage.

### 謝辞

異常波形監視プログラムの構築には制御グループの福井達氏、石井美保氏、籠正裕氏、山鹿光裕氏、細田直康氏ほか多数の方々にご協力いただいた。運転上の動作確認においては田中信一郎氏をはじめとする運転員の方々や基盤光源チームの方々にご協力いただいた。これらの方々への感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] H. Tanaka, “The SPing-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA)”, Proc. of IPAC2012, pp.2106-2110
- [2] R. Tanaka et al, “Inauguration of the XFEL Facility, SACLA, in Spring-8”, Proc. of ICALEPCS2011, pp.585-588
- [3] M. Yamaga, et. al., “Event-Synchronized Data-Acquisition System for SPring-8 XFEL”, Proc. of ICALEPCS2009, pp.69-71
- [4] Y. Otake, et al, “SCSS RF Control toward 5712 MHz Phase Accuracy of One Degree”, Proc. of APAC2007, pp.634-636
- [5] T. Fukui, et al, “A Development of High-Speed A/D and D/A VME Boards for a Low Level RF System of SCSS”, Proc. of ICALEPCS2005, pO2.050-4
- [6] M. Yoshioka, et. al., “SACLA の RF 異常波形データ収集フレームワーク”, 第 11 回加速器学会年会 2014
- [7] Maruyama, et. al., “分散データベースのための Web サービスフレームワークの開発”, 第 11 回加速器学会年会 2014