

PERFORMANCE OF TIMING AND LLRF SYSTEM OF XFEL/SPring-8 “SACLA”

Takashi Ohshima^{#A, B)}, Hirokazu Maesaka^{A, B)}, Naoyasu Hosoda^{B)}, Shin-ichi Matsubara^{B)}, Yuji Otake^{A, B)},

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Koto, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Institute

1-1-1 Koto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

For the stable operation of XFEL facility "SACLA" at SPring-8, it is needed to keep the stability of the amplitude and phase of the accelerating cavities less than 1×10^{-4} and 100 fs, respectively. To satisfy the requirements we developed a low noise master oscillator, optical transmission system of the reference RF signals, an IQ modulator / demodulator, and so on. In the design stage, we gave priority on reduction of noise and stabilization of temperature of the modules. The low level RF (LLRF) modules are installed in a water-cooled rack to keep the temperature stable, and a low noise power supplies are used to feed DC power to LLRF modules. The achieved stability of the amplitude and the phase of the 238 MHz accelerating cavity were 1×10^{-4} and 0.007 degree (80 fs) in std value at 12 hours measurement of 10 shots average. The performance of LLRF system was also confirmed by measuring the beam arrival time using an RF BPM located at the middle of the accelerator. The jitter of the arrival time was 55 fs in std value at 10 minutes measurement. The performance of the LLRF system cleared the requirement of the first stage operation. Further improvements of the system will be continued.

XFEL/SPring-8 “SACLA” におけるタイミング・LLRF システムの性能

1. はじめに

SPring-8 で建設の進められてきた XFEL 施設 SACLA (Spring-8 Angstrom Compact free electron Laser) では、X 線領域での SASE 発振を実現し、基礎・基盤研究から、産業や応用研究開発まで、革新的な実験が行われる予定されている。SACLA のビーム運転は 2011 年 2 月から開始され、6 月には 7GeV のビームからの波長 0.12nm の SASE 増幅が確認された。現在、SASE 光の強度増強、安定度の向上に向けてのコミッショニングが継続されている [1,2]。

SACLA では、熱電子銃から引き出された 500keV 1A のビームに対し、エネルギー増加に合わせてエミッタンス悪化を避けつつバンチ圧縮を行い、数 kA にまでピーク電流が高められる。このために、

低エネルギー部では主加速器の周波数 5712MHz の分周周波数である 238MHz, 476MHz, 1428MHz, 2856MHz の周波数で駆動される加速空洞が使用されている。安定なレーザー発振を実現するためにはこの高いピーク電流を維持することが重要であり、この電流値の変動を 10%以下に抑えるためには、速度・磁気バンチ圧縮過程での加速空洞の位相を 100fs 以下の精度で安定化させる必要がある。すべての加速空洞を同期して駆動するために、400m の加速器に沿って分散して設置された LLRF ユニットに対し、基準高周波信号およびマスタートリガ信号を、マスターオシレータ室から伝送する。これには長距離伝送損失の小さい波長多重方式での光伝送システムを採用した。各ユニットで空洞を励振する高周波の位相/振幅の測定・制御には、SCSS 試験加速器で実績のある IQ 変調器・IQ 検出器を採用した [3,4]。

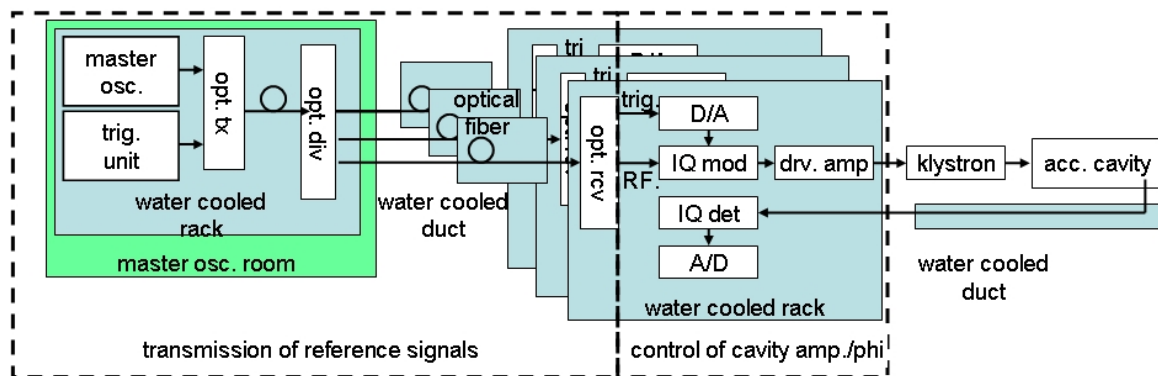


図 1 : SACLA のタイミング・LLRF システムの構成概要図。

ohshima@spring8.or.jp

本発表では LLRF システム構成の概要、LLRF 機器の性能、ビーム信号から確認された LLRF システムの性能などについて報告する。

2. LLRF システムの構成

LLRF システムは、大きく基準信号伝送系、加速電圧制御系の2つに分けられる。その構成概要図を図1に示す。ここで使用する LLRF 機器の開発においては、要求される安定度が高いことから、温度の安定化、低雑音化の2点に特に重点を置いた。LLRF モジュールは、水冷ラックに納められている。このラックは密閉型であり、内部を循環する空気は、温調冷却水が通水された熱交換器を通ることにより温度の安定化が図られている。LLRF モジュールに対する電源供給は低雑音電源から行われる。電源方式としてはドロップ型のもを採用し、スイッチング電源を排除することにより高い周波数ノイズの発生を抑制した。LLRF モジュールについて、アナログ信号は 100Ω の差動伝送とし、インピーダンスを下げることでシールド付ツイストペアケーブルの使用により外来ノイズに対する耐性を高めた。また、基板内パターン、モジュール内ケーブルルートなどについてもロジック部とアナログ部の分離、RF ケーブルの振動抑制などの注意を払った。

2.1 基準信号伝送系

基準信号伝送系は、低雑音の基準信号を発生するマスターオシレータ、電気信号を光信号に変換し分配する光送信器、光送信器からの信号を伝送する光ファイバケーブル、および各加速電圧制御ユニットに設置された光受信機から成る。マスターオシレータからの基準信号は2台の光送信器（低エネルギー部用とCバンド用）によって光信号に変換され、分岐される。それぞれの光ファイバは6芯の光ケーブルを通して各受信ユニットまで伝送される。ここで使用される光ファイバケーブルは 2ppm/K の位相安定型のもを採用した。また、この光ケーブルは、隙間に断熱材を充填した2重の金属箱の内部に布設され、内箱には温度調整のされた冷却水を通水した銅パイプと接触させることにより恒温化を図った^[3]。

2.2 加速電圧制御系

光受信機からの基準信号は IQ 変調器によって所定のパルス幅、振幅、位相を持った信号に変調され、クライストロンや大電力半導体増幅器で増幅されたのちに加速空胴に供給される。IQ 変調器の制御には 238Ms/s の 14bit DAC を使用した。振幅、位相の設定精度は約 1×10^{-4} 、 0.007 度である。入射部で使用される加速空胴の励振には矩形波が使用される。パルスコンプレッサを有する S バンド、C バンドにおいては、 $2.5\mu\text{s}$ パルス幅の中で位相反転が行われる。加速空胴の励振信号の位相、振幅の測定には IQ 検出器を使用した。IQ 検出器の読み取りには C バンド部では 12bit の ADC を、高い安定度が要求される入射部では新たに開発した 16bit の ADC を使用している。空胴ピックアップから IQ 検出器までを

結ぶ高周波ケーブルには 4ppm/K の位相安定 15D 同軸ケーブルを使用した。また、このケーブルに対しても断熱処理を施したうえで温調した冷却水を通水した銅パイプを併走させ温度の安定化を図った。IQ 検出器のチャンネル1には、電気長の差を 0 に近く調整した遠隔切り替え可能な 40dB のアッテネータを組み込んだ。このアッテネータを用いることにより、ビームが空胴に誘起する信号の位相を迅速に測定することが可能である。

加速空胴に励振される信号の位相/振幅は加速空胴の冷却水温度の変動、受電電圧の変化によるハイパワーアンプの変動などの影響を受ける。そこで加速空胴ピックアップ信号のモニタ値を元にフィードバックを行い、空胴位相、振幅のドリフトの抑制を行うこととし、VME の CPU 上で動作するプロセス (EMA) の開発を行った。

3. LLRF システムの性能

基準信号伝送系、加速電圧制御系ともに LLRF モジュールは水冷ラックに収められている。このラックの温度安定度について図2に一例を示す。クライストロンギャラリの温度が 0.5 度変化してもラック内の温度はほぼ 0.1 度以内で安定している。

LLRF モジュールに電源を供給する低雑音電源については、DC 出力の 400Hz 以下のノイズは AC 周波数の高調波を除いて -140dBV/Hz 程度、高調波の強度も -100dBV 以下、10 秒の短期変動 2ppm p-p 、24 時間の長期変動 10ppm p-p と高い性能を達成している。

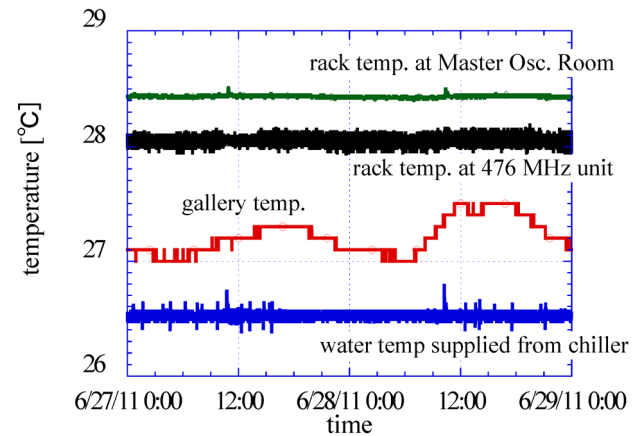


図 2 : 水冷ラックで使用している冷却水温度、ラック内の温度変動とギャラリの温度の時間変化。

3.1 基準信号伝送系の性能

マスターオシレータの基準信号は、光送信器によって光信号に変換され、恒温ダクトに納められた光ファイバを通して各ユニットに送られる。この恒温ダクトの温度変動の一例を図3に示す。クライストロンギャラリ温度は約 1 度変化しているが、内ダクトおよびケーブルの温度は 0.15 度 p-p の変化であり、温度変化を $1/5$ 以下に抑えることができた。

各加速空胴制御ユニットに伝送された基準信号の

信号純度の測定例として、加速器下流に位置する C バンドユニット 18-1 の加速空洞制御部における 5712 MHz 信号に対する位相ノイズを図 4 に示す。位相ノイズは 1 kHz のオフセット周波数において -120 dBc/Hz であり、マスターオシレータの信号純度が保持されていることがわかった。また、光伝送、IQ 変調に起因するノイズの増加は 500 kHz 以上の領域に限られており、そのレベルは -145 dBc/Hz 以下であった。このノイズ増加による寄与は例えば 500 kHz から 10 MHz までの積分値でも 5 fs 程度であり、問題のない量である。

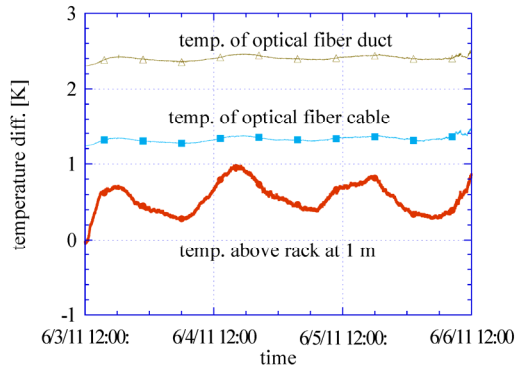


図 3 : 光ファイバ用恒温ダクト内の温度変動とギャラリの温度。

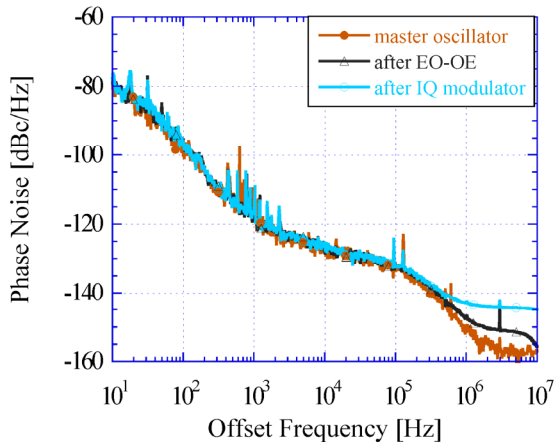


図 4 : CB18-1 において測定した 5712MHz 基準信号の位相ノイズ。

3.2 加速電圧制御系

加速電圧制御系では IQ 変調器による基準信号のパルス変調、IQ 検出器を使った空洞ピックアップ信号の検出などが行われる。この節では、IQ 検出器で取得した波形データの例、空洞位相安定化プロセスの動作例、これらを用いて達成できた空洞振幅、位相の安定度について述べる。

3.2.1 空洞ピックアップ信号

IQ 検出器を使って測定した加速空洞ピックアップ信号の波形を図 5 に示す。図 5 a)は入射部の

238 MHz から C バンド補正空洞までのピックアップ信号波形、b)は S バンドと C バンドの波形である。ADC のサンプリングは 238Ms/s であるが、238MHz と 476MHz のピックアップに対しては 1/4 にデシメーションが行われている。ビームが空洞に到達するタイミングは入射部についてはおよそ 6000 クロック、S バンドと C バンドについては 1000 クロックとなるように設定している。波形内指定クロック位置における空洞の位相/振幅ポイントデータは全ショット分、波形データは 10 分ごとにデータベースに保存されている。

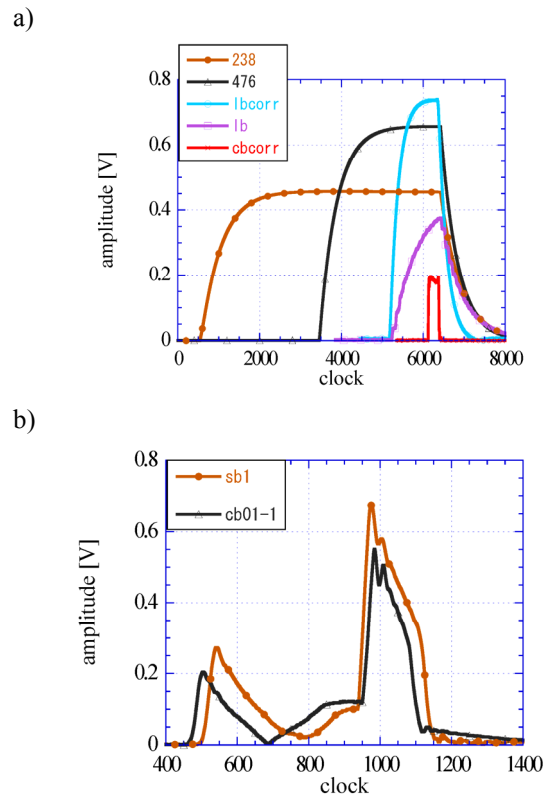


図 5 : IQ 検出器を用いて測定した空洞ピックアップ波形の一例。a)入射部の加速空洞の振幅波形、b)S、C バンドの加速空洞の振幅波形。

3.2.2 RF 位相・振幅のフィードバック

位相安定化のフィードバック EMA 動作の例として、CB01-1 における加速空洞ピックアップ信号の位相測定値および IQ 変調器の位相設定値の時間波形を図 6 a) に示す。位相測定値(黒線)を 0 度に保つために、位相設定値(赤線)が ± 0.5 度の範囲で調整されている。この設定値の変化と、クライストロンヒーター電源で使用されている AC200V 受電電圧の変動には相関がある。これはヒータ電力の変化によりパービアンズとビーム電圧が変化し、クライストロン管内のドリフト時間が変化するためである。図 6 b)には位相測定値と設定値の FFT 波形を示す。0.1Hz より低い周波数成分において 20dB 以上の抑制効果があることが確認できた。

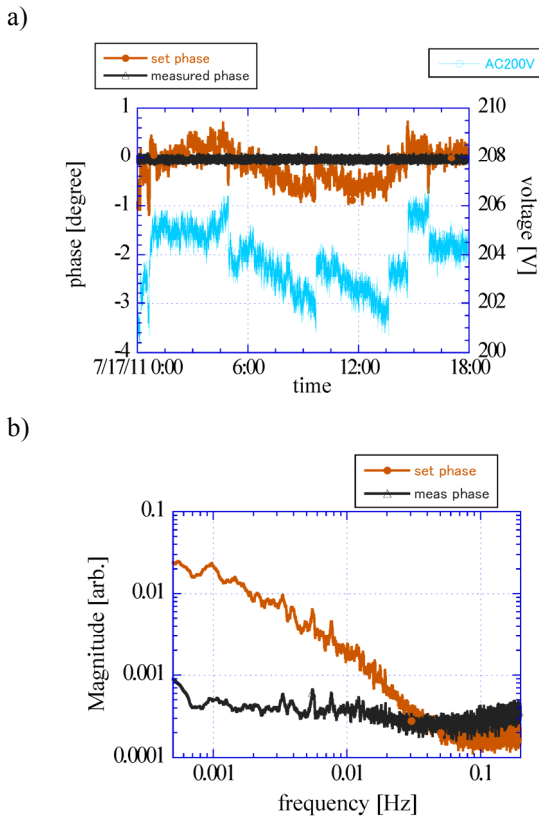


図 6 : CB01-1 加速空胴のピックアップ位相測定値 (黒線) と変調器位相設定値 (赤線)、およびクライストロン用ヒータ電源で使用している AC200V の受電電圧 (青線) の a) 時間波形と、b) 位相変化の FFT 波形。

表 1 : 空胴の RF 電圧、位相安定度の許容値 (σ)、および測定結果 (std.) (測定時間 : 10 分間)

	Tolerance		Measurement	
	Voltage	Phase	Voltage	Phase
238 M SHB	0.01 %	0.01°	0.010 %	0.006°
476 M Booster	0.01 %	0.02°	0.004 %	0.009°
LB Correction	0.03 %	0.06°	0.02 %	0.02°
L-B APS acc. 1	0.01 %	0.06°	0.06 %	0.03°
L-B APS acc. 2	0.01 %	0.06°	0.03 %	0.05°
C-B Correction	0.2 %	0.06°	0.06 %	0.05°
SB 1 acc. 1	0.01 %	0.1°	0.04 %	0.03°
CB01-1 acc.1	0.01 %	0.2°	0.05 %	0.03°

3.2.3 空胴ピックアップ信号の振幅/位相安定度

ビーム運転時での各加速空胴の振幅、位相変動の 10 ショット平均について 10 分間の測定における std 値を、それぞれの許容値と合わせて表 1 に示す。これらの値は許容値をほぼ満足している。測定時間を 12 時間とした場合の 238MHz 空胴の位相、振幅のトレンドを図 7 に示す。10 ショット平均の 12 時間の std 値は 10 分間の変動値とほぼ同じで位相 0.007 度、振幅 1×10^{-4} であった。CB01-1 についても 12

時間の変動は位相 0.03 度、振幅 6×10^{-4} であった。ここで示した値は測定系の誤差も含めた値となっており、実際の空胴の振幅/位相安定度はさらに良い可能性がある。

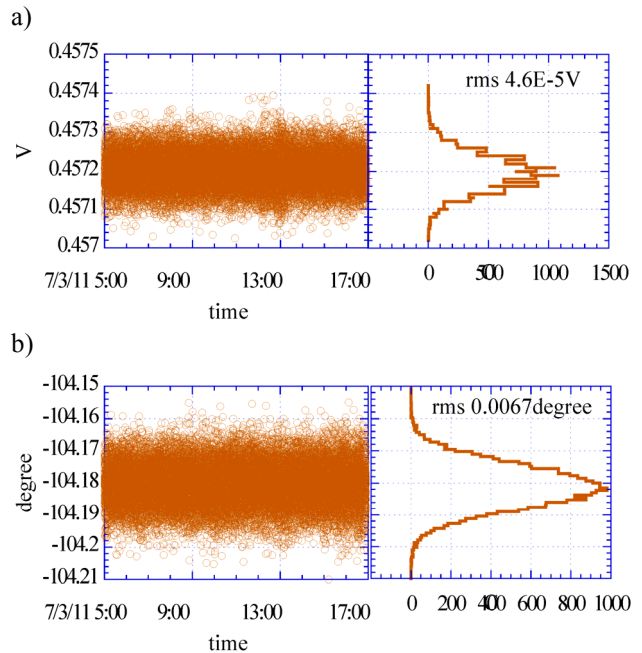


図 7 : 238MHz 加速空想ピックアップ信号の a) 振幅と b) 位相の 12 時間の変化。

3.3 到達時間のモニタ

LLRF システムの性能を表す指標としてビームの到達時間の変動があげられる。SACLA では RF BPM^[5]が使用されており、この BPM の基準空胴からビームが誘起した 4760MHz の信号と、伝送された基準信号から作られた 4760MHz 信号との位相差を測定することにより、ビームの到達時間の変動を測定できる。図 8 に加速器のほぼ中間地点である CB07 において測定したビームの到達時間の変動を示す。その変動幅は全幅で 300fs、std 値で 55fs と十分に小さい値であった。

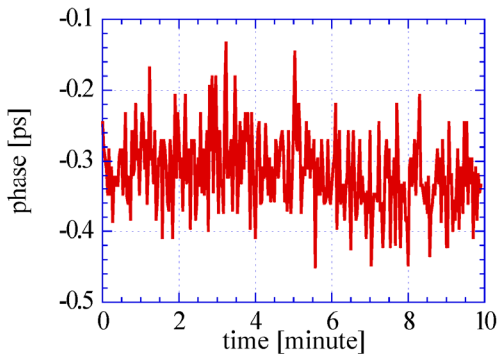
一方で、到達時間には日変動があることが分かった。そこで、CB07 とマスターオシレータ室を結ぶ 200 m のファイバを往復した光信号の 5712MHz 信号と送り出しの信号との間の位相を測定したところ、500 fs p-p の変動が見られ、その変動にはギャラリ温度と強い相関がみられた。このことから、恒温ダクト構造で温度の安定化を図ったが、ギャラリのゆっくりとした温度変化によって光ケーブルの温度が変化して、伝送された基準信号の位相がわずかに変化している可能性が考えられる。この変動は、光受信機部分に伝送した一部の光を送信側に送り返し、もとの光との位相差を測定してファイバの長さを調整することによって光路長を安定化するシステムを導入することにより抑制することが可能である^[6]。予算の面から建設時には導入が見送られたこの光路長安定化システムを導入することを検討している。

4. まとめ

SACLA で使用される LLRF システムには加速電圧の std 値で位相安定度 100fs、振幅安定度 1×10^{-4} という厳しい値が要求されている。現在運転中の 238MHz 加速空洞の安定度は 10 ショット平均の std 値として 12 時間の測定においてそれぞれ 80fs、 1×10^{-4} という値が得られている。同様に CB01-1 においては 20fs、 6×10^{-4} という値が得られており、XFEL の第 1 段階での要求を満足している。LLRF システムの全体の安定度を評価する指標の 1 つとしてビームの到達時間安定度があげられる。加速器中央部において RFBPM の信号を用いて測定した到達時間の変動は 10 分間の std 値で 55fs と高い安定度が示された。このように、LLRF システムは XFEL に十分な精度と安定度を持っていることが確かめられ、実際 XFEL の発振を達成することができた。

一方で到達時間には 500 fs p-p の日変動がみられている。これは基準信号の伝送に用いている光ファイバケーブルが恒温ダクト内でクライストロンギャラリの気温変化の影響をわずかに受けている為である。来年度にはこの影響を抑制するために光ファイバの光路長安定化システムの導入を検討している。

a)



b)

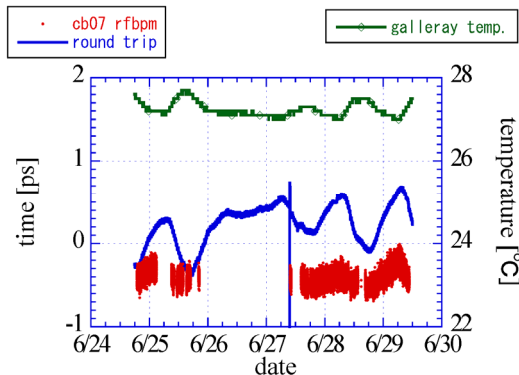


図 8 : CB07-4 に設置された RF BPM 基準空洞のビーム誘起信号と RF 基準信号との位相差の a) 10 分間の変動、および b) 5 日間の変動。b)にはマスターオシレータ室と CB07-1 の間を往復した光信号の 5712MHz 信号の位相変化、クライストロンギャラリの温度変化も合わせて示す。

謝辞

LLRF システムの構築は多くの方々の協力を得て作り上げられた。光送受信機、IQ 変調器・検出器などの製作を担当していただいた三菱電機特機(株)の玉祖氏、池田氏をはじめとする方々、光ファイバダクトの製作据付を担当していただいた(株)きんでんの准田氏、部谷氏、ほかの方々、低雑音電源の制御や精密温度調整装置などの製作を担当いただいた日立造船(株)の岡田氏、西岡氏、他の方々に感謝の意を表す。様々な面で協力を頂いた XFEL 制御チームの福井氏、山鹿氏、広野氏、石井氏、主加速器チームの稲垣氏、櫻井氏、建設チームの大島氏、板倉氏、大塚氏、運転チームの長谷川氏、事務の辻氏、家氏氏、その他、尽力をいただいた多くの方々に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] H.Tanaka, et al., “動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況”, These Proceedings
- [2] Y. Otake, et al, "XFEL/SPring-8 ” SACLA” の加速器構成機器の試運転と性能”, These Proceedings. Naoyasu Hosoda,
- [3] N. Hosoda, et al, "Progress in the Construction of a Timing and Low-Level RF System for XFEL/SPRING-8", Proceedings of the IPAC'10, Kyoto, Mar. 24-28, 2010.
- [4] T. Ohshima, et al, "XFEL/SPring-8 タイミング・低電力 RF システムの建設状況”, Proceedings of the 7th annual meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [5] S. Matsubara, et al, "Development and Construction Status of the Beam Diagnostic System for XFEL/SPring-8", Proceedings of the IPAC'10, Kyoto, Japan, May. 23-28, 2010.
- [6] H. Maesaka, et al, "Development of the Optical Timing and RF Distribution System for XFEL/Spring-8", Proceedings of the FEL'08, Gyeongju, Korea, Aug. 24-29, 2008.