

COMMISSIONING AND PERFORMANCE OF INSTRUMENTS FOR XFEL/SPring-8 ACCELERATOR “SACLA”

Yuji Otake^{#A)} on behalf of members of RIKEN XFEL division
A) RIKEN, Spring-8 center, XFEL division
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

Abstract

The method of velocity bunching along an injector and magnetic bunching by bunch compressors (BC) with a 3000-times bunch compression factor is employed to make an electron beam of a 3 kA peak with a 30 fs pulse width for the XFEL/SPring-8 “SACLA”. Rf phase and amplitude changes of cavities to obtain energy chirp along the bunch for the BCs reflect on the peak current change, which sensitively affects lasing. Therefore, the rf phase and amplitude fluctuation of the cavities must be low to satisfy a demanded electron beam energy variation of 10^{-4} . We have developed very stable instruments for driving the cavities to ensure the stable peak current. During the construction of SACLA, accelerator elements, such as a klystron high-voltage inverter power supply with a 10 ppm (rms) variation at a 45 kV PFN charging voltage and an ultra low-noise master oscillator with an SSB noise of -140 dBc/Hz at 5712 MHz + 1MHz, have been developed and installed. To reduce temperature variation of air surrounding LLRF instruments, which directly conducts to rf phase and amplitude drifts, a 19” rack and an optical fiber duct with a water cooled temperature stabilization function within 0.1 K were developed. Furthermore a precise temperature control system to ensure the phase stability of a cavity was also developed to maintain its temperature within +/- 0.04 K. By this instruments performance, we finally obtained an electron beam energy drift of 1×10^{-4} (P-P), a beam arrival time jitter of 22.7 fs (rms).

XFEL/SPring-8 “SACLA” の加速器構成機器の試運転と性能

1. はじめに

X線自由電子レーザーである XFEL/SPring-8 “SACLA” は 5 年間の建設期間が過ぎ、0.12nm のレーザー発振に成功した^[1]。SACLA の加速器は、安定なレーザー発振を維持するための高安定な機器で構成されている。この機器は、電子ビームとレーザーを約 70m のアンジュレータ区間において 4 μm 以内の軌道の重なりに保持することや^[2]、入射部やシケインのバンチ圧縮部での圧縮係数を一定にして 3kA、30fs の単バンチビームの強度を 1σ で 10 %以内^[3,4]に保持するために必要である。このような安定な電子ビームを加速器で生成するためには、表 1^[4]に示すように加速空洞の高周波位相と電力変動が、おのおの、時間に換算した最も厳しい値で 50fs(rms)や 10^{-4} (rms)以内でなければならない^[3,4]。この変動抑制は、SCSS 試験加速器での建設・運転経験から、大・中電力高周波源の安定化につきて言える。

この安定化の数秒以下の短期性能を実現するには、計算や経験から、たとえば以下の性能が加速器の機器に必要な。クライストロン用インバータ電源 (50kV) では 100ppm 以下の電圧安定化が必要で、マスターオシレータ (M-OSC) では -120dBc (1kHz SSB)@5712MHz 以下の片側波帯 (SSB) ノイズレベルを達成しなければならない。加えて、M-OSC の後続の低電力高周波機器でもこの性能を劣化させないことが必要である。以上のほかに、

表 1：加速電圧・位相設計許容値

Cavity	DV/V (%rms)	Df (deg. ms)	Dt (ps rms)
238 MHz SHB	0.01	0.01	0.12
476 MHz Booster	0.01	0.02	0.12
L-band Cor. Cavity	0.03	0.06	0.12
L-band APS Cavity	0.01	0.06	0.12
C-band Cor. Cavity	0.1	0.06	0.049
S-band Accelerator	0.01	0.1	0.097
24C-band Accel. (up-stream)	0.01	0.2	0.097
104 C-band Accel. (Down-stream)	0.01	0.5	0.24

低電力高周波機器の位相や電力が、電源の電圧変動により比例して変化することが開発段階で明らかになっていた。そのために高周波機器用電源では、出力電圧も -100dBV@10Hz 以下のノイズレベルを目指した。

電子ビームのエネルギーやエミッタンスの数秒以上の長期安定性は、加速器機器設置環境の温度安定化に大きく依存する。この長期安定性の確保のために SACLA では、加速空洞の $\pm 0.04\text{K}$ の温度安定化^[5]や機器収納用ラックの 0.1K 以下の恒温水冷化、0.1K の温度安定度の水冷位相安定化光ファイバーによる高周波基準信号の伝送などの施策を計画した。本報告では、これらの機器の性能と試運転の詳細について述べる。

[#]otake@spring8.or.jp

2. レーザー発生を不安定にする要因

SACLAにおいてレーザー発振の不安定性は、主に加速高周波電磁場の変動に起因する。それはA. 電氣的なノイズ、B. 環境温度変化、C. 機械振動などの原因で引き起こされる。それらを定式化して表すと、以下になる^[6,7]。マイクロ波の波頭に乗って加速される電子が感じるエネルギー変動は、

$$E \propto \sqrt{P_{rf}} \varepsilon M \cos(\delta\theta) \quad (1)$$

$$\frac{\delta E}{E} \approx \frac{1}{2} \frac{\delta P_{rf}}{P_{rf}} + \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\delta M}{M} - \frac{1}{2} \delta\theta^2 \quad (2)$$

で表される。ここで E は電子が獲得するエネルギーで P_{rf} はクライストロンの出力電力、 ε は規格化した加速管のエネルギー利得、 M はSLEDの電圧増倍率、 θ は加速高周波に対する電子の位相である。また各々の δ の付いた値は、各変動値である。式中の各々の項を説明すると以下である。

I. 式(2)の第1項の $(1/2)(\delta p_k/p_k)$ は、主に高電圧パルスモジュレータの電圧変動に起因するクライストロンの出力 P_{rf} の変動で、

$$P_{rf} = \eta I_k V_k = \eta k V_k^{2.5} \quad (3)$$

で表される^[8]。ここで η はクライストロンの効率で、 I_k はカソード電流、 k はパービアンス、 V_k はクライストロンの印加電圧である。

II. 式(2)の第2項の $\delta\varepsilon/\varepsilon$ は、加速管への入力高周波の周波数が変わったり、冷却水の温度変化に伴う空洞の共振周波数の変化によるエネルギー利得の変化である。

III. 式(2)の第3項 $\delta M/M$ は、SLED (SLAC energy doubler)高周波パルス圧縮空洞の温度や調整不良による離調と、加速器の運転周波数の変動によるものである。

IV. 最後の項 $(1/2)(\delta\theta)^2$ は、加速器を駆動する基準高周波信号のSSBノイズや信号伝送路の温度収縮による位相変動である。この変動は、たとえばM-OSCやクライストロン駆動用の半導体増幅器に起因する変動に相当する。SSBノイズによる高周波信号の時間ジッタへの寄与 $N(t)$ は、

$$N(t) = \int w(f) N_{SSB}(f) df \quad (4)$$

のノイズの周波数成分の積分で与えられる^[9]。ここで $N_{SSB}(f)$ は、5712MHzなどの連続加速高周波のノイズで、 $w(f)$ は高周波パルス(たとえば2 μ s幅)変調によるノイズ積分の重み関数(パルス高周波の幅に相当する周波数を頂点とした三角形の関数で近似している)である。この重み関数を掛けるのは、高周波空洞に入る実効ノイズが連続高周波信号のSSBノイズ成分とパルス変調の畳み込みになるからである^[10]。以上の変動要因は、数Hzより高速なものが電気ノイズや機械・音響振動によるものと考えられる。また数Hzより低速

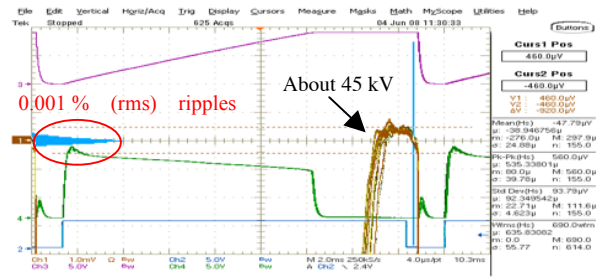


図1: クライストロンモジュレータ用インバータ電源の電圧安定度。45 kVで10 ppm (rms、1300パルスの統計)。

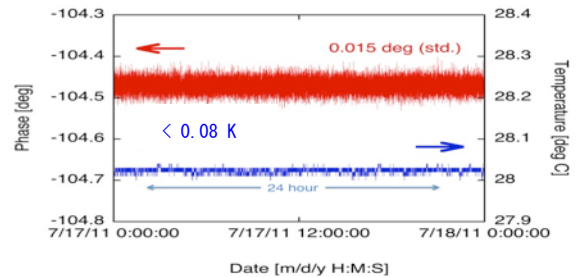


図2: 精密温調制御装置で制御された238MHzSHBの位相変動および温度安定度(24 h)。0.015度(STD)の位相変化(赤、上)および ± 0.04 K以下の温度変化(青、下)。

なものは、主に環境温度の変化に依存した物と考えられる。上記の不安定性要因を検討して、そのレーザーへの影響が要求値以内に納めるように定めた機器の目標性能例が、前節で述べた値である。

3. 機器の安定化と性能

3.1 クライストロンの高電圧安定化

表1に示すような安定度を達成するためには、第一には、クライストロンの印加電圧の安定化が必要不可欠である。それは、クライストロンへの印加高電圧パルス(4~5マイクロ秒幅)を形成するモジュレータ用PFN(pulse forming network)を充電するための、インバータ電源の安定度で決まると言っても良い。理研のXFEL部門では、(3)式から求めた100 ppm (rms)の目標電圧安定度を達成するために、PFN充電用の主充電器と充電完了後のきめ細かい電圧制御用の補充充電器を組み合わせた、50 kVのインバータ電源を開発した。詳細については、文献[11]に示す白澤ほかの発表を参照していただきたいが、図1に示すような1300パルの統計で10 ppm (rms)の安定度を達成した。

3.2 加速空洞・SLED・クライストロンなどの大電力高周波装置の安定化

SCSS試験加速器における実験結果から、SACLAの入射部では、238MHzのSHB(sub-harmonic buncher)

空洞でその加速位相の変化が0.05度程度でもレーザー発振に影響することが明らかとなっていた^[5]。このことから、既に開発していた加速空洞の温度を安定化するPLC (program logic controller) 制御装置^[12]をより高精度化して使用した。この制御装置は、白金抵抗体で空洞への入力冷却水温度を測定して、ヒーターへのAC 200 V電力をゼロクロス半導体リレーで入り切りするPWM (pulse width modulation)制御により空洞入り口の水温を一定にする方式をとっている。制御方式は、一般的なPID (proportional integral differential)方式を採用している。空洞の熱容量が大きく本体の熱時間応答の遅延量が大きいことから、空洞外壁の温度を測定せず、制御遅延の少ない空洞への入力水温の制御とした^[5]。このことから、図2に示すような238MHzのSHBの±0.04 K以下の温度安定度を得ており、基準高周波信号への帰還制御を行う事で高周波位相の変化は0.015度 (STD) になっている。加速器の運転周波数の変動による加速空洞およびSLED空洞の離調は、後述するマスターオシレータの11桁の周波数安定度により無視できる。空洞本体の温度変化による離調は、先に述べた精密温調装置で0.1度以下に制御されているので、これも問題ない。たとえば、SLEDの温度離調が97 kHz/Kであることを考えると当面の加速器運転には対応でき、加速空洞はそれより遥かに低感度である。ちなみに以上の条件下では、精密温調装置の設定温度を変更することで加速管およびSLED空洞の共振周波数も変更可能で、最終的にSLED空洞では、70台近くある全てで共振周波数が5712 MHz ± 50 kHz程度に調整されている^[13]。

以上に述べた以外のCバンド大電力クライストロンや高電圧パルスモジュレータ、前節のインバータ電源などの大電力高周波機器でも、自身の温度変化に対する特性のドリフトを持つ。この特性変化の例は、クライストロンの出力位相やインバータ電源の充電電圧のドリフトである。このような機器は消費電力が大きいため、必然的に水による冷却が必要である。そのため、この機器の冷却を0.2 K程度に制御された恒温水で行うことで、温度による特性変化を低減している。

3.3 低電力高周波系の安定化

3.3.1 時間ジッタ (SSB ノイズ) の低減

低電力高周波 (LLRF) 系において、マスターオシレータ (M-OSC) で発生した加速用高周波のノイズが大きいと、ランダムなビームの加速エネルギー変動や時間ジッタにつながる。特に数Hzより高速なノイズ成分は、60 ppsなどの繰り返し動作をするSACLAのリニアックでは、サンプリング定理から制御不能な致命的なものになる。加えて半導体や同軸ケーブルでは、環境温度や機械振動の影

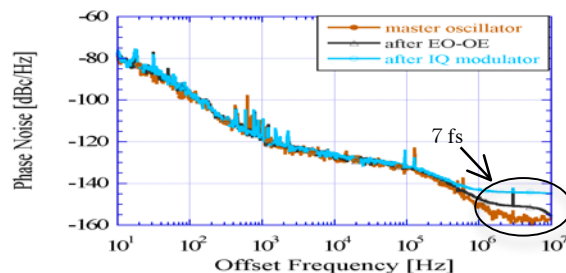


図3: M-OSCのSSBノイズ(5712 MHz,茶,下)、400 m光伝送後のノイズ(黒,中)の増加、伝送後に接続されているIQ変調器の出力ノイズ(水色,上)。ピークは測定のノイズである。

響を直接受けて高周波電力・位相が変動するので、それにより同様の不安定性を加速電子ビームに与える。よってこれらの影響を軽減することは、安定なレーザー発振には必要不可欠である。以上の理由から、我々は非常に低ノイズなM-OSCを開発した^[14]。図3にはその5712 MHz出力高周波のSSBノイズスペクトラムを示す。ノイズレベルは、5712 MHzから測って1 MHz付近で-140 dBc/Hzに達している。加速高周波の位相変動は、10 Hz以下の低速なものはフィードバックで低減されると考え、2節で述べた連続高周波に対するクライストロン用のパルス変調の効果考えた三角形の重み関数を用いて (パルス幅の周波数が頂点で、それは2μsパルス幅で0.5 MHzである。)、図のノイズスペクトラムを周波数軸上で積分して得られる^[15]。その場合、SSBノイズを10 Hzから10 MHzまで積分して得られる時間ジッタは30 fs程度であり、我々の要求に十分に答えられる性能である。このように信号源で十分な低ノイズを実現したとしても、それに接続される光ファイバー基準高周波伝送路や高周波の位相・電力制御機器がノイズを増やしたのでは意味がない。そのためにLLRF機器の全系に渡って、M-OSCのノイズを増加させない機器を開発した。図3には、M-OSCで発生した5712 MHzの高周波を400 mの位相安定化型シングルモード光ファイバー使って伝送後の、SSBノイズスペクトラムを示す。ちなみにこのデータは、SACLAのクライストロンギャラリーにて取得されたものである。図から判ることは、信号の400 mの伝送後においても1 MHz以上の周波数帯で7 fs程度しかノイズを増やしていないことである。加えて、この光ファイバーラインの後続に接続された高周波電力・位相制御機器やクライストロン駆動パルス増幅器でも、M-OSCのノイズレベルを僅かに増加させるのみの特性となっている。図3には、例として5712 MHzのIQ変調器の出力ノイズスペクトルも載せる。この低ノイズ実現の一つの大きな立役者は、高周波・光信号伝送・制御機器用電源の低ノイズ化にある。図4には、開

発したLLRF機器用電源のノイズスペクトラムを載せる。ノイズレベルは、アナログ用の24 V DCの10Hzにおいて-150dBVに達成しており、長期の電圧安定度も10 ppmを下回ったものとなっている。以上以外の加速高周波の時間ジッタの要因としては、同軸や光ファイバケーブルなどの高周波・光信号伝送部品に対する機械・音響振動がある。これは10 Hzから2 KHzの周波数帯で、振動する部分に音や冷却用の風が当たらないようにウレタンや金属箱などで囲うことで、熱絶縁をかねて防振につとめた。また大きな部品や15Dなどの太い同軸ケーブルは、固定を強化する事で振動しないようにした。

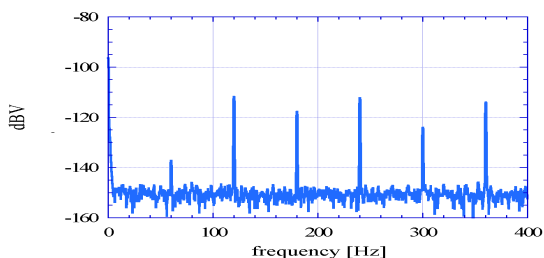


図4：LLRF・ビームモニター用低ノイズ電源のアナログ用24 V-DCのノイズスペクトラム。ノイズレベルは10Hzで-150dBV以下である。

3.3.2 高周波電力・位相ドリフトの低減

LLRF系で加速高周波の電力・位相ドリフトを低減するためには、環境温度の変化を少なくする事が非常に効果的である。加えて、このような温度変化の低減後に、それでも残った電力・位相ドリフトを帰還制御で少なくすることが、制御のダイナミックレンジを狭めて制御性を良くするために意味がある。以上の理由から、我々は、LLRF機器を収納する19インチラックに恒温水による温度安定化を行う機能を開発し付加した。このラックは恒温水でラック内部を循環する空気を熱交換する構造である。また、ラック収納機器の表面の高周波同軸ケーブルを振動させないように、機器の側面から空気を導入して冷却の必要な部分のみを冷やし、機器背面から排気して熱交換器を通り再度機器に戻される構造とした。このラックの温度安定度を図5に示す。このラックにより、内部は0.1 K以下の温度安定度を達成している。ちなみに冷却水の温度変化も同程度である。このラック内の温度変化は、ほぼ冷却水およびクライストロンギャラリーの温度変化に比例しているが、ラックの設置場所であるクライストロンギャラリーの温度変化は1 K程度である。SACLAが約1 kmの長さを持つので、電気的な基準高周波伝送の減衰を除くために光ファイバの基準高周波伝送路を使用している。このため、目標の位相安定度を実現するためには、この場合も環境温度の変化が大きな障害と

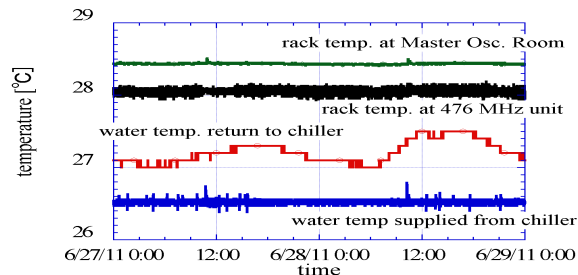


図5：水冷恒温19”ラックの温度安定性、上からM-OSC収納ラックおよび入射部のLLRF機器用ラックの温度である（緑、黒）。3番目（赤）は恒温冷却水の戻りの温度。一番下（青）は恒温冷却水の温度である。

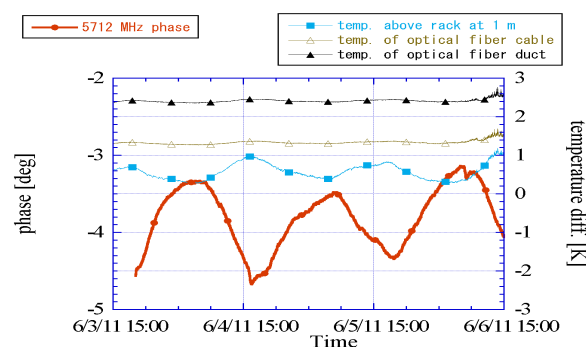


図6：水冷恒温光ファイバダクトの温度安定性(0.1 K以下の変動)と、ファイバによる5712 MHz基準高周波信号の200 m光伝送による位相変動(1.5度、P-P、グラフの一番下、赤)。グラフの上の2つがダクト内の温度変化(黒、茶色)で、3番目(水色)がクライストロンギャラリーの温度変化である。

なる。この影響を軽減するために、我々は温度の変化に対する光路長の変化の係数が2 ppm/Kの位相安定化型光ファイバ^[16]を使用した。加えて、先のラックと同様にこのファイバを外と内の2重金属壁構造の水冷恒温ダクトに納めた^[17]。ファイバは、内ダクト内に断熱材を巻き収納され、内ダクトと外ダクトの間および内ダクト内も断熱材を充填して熱絶縁を良くし、これが防振の役割も担っている。冷却は、内ダクト金属表面のみを恒温冷却水で冷やしている。このような構造によりダクト外部の温度変化は、内ダクト内部で1/5の0.15度程度に低減される。そのダクト内外の温度変化の様子を図6に示す。同じく図6には、クライストロンギャラリー内において、5712 MHzの光高周波信号を恒温ダクトに納められた光ファイバにより200 mに渡って伝送した場合の位相ドリフトの測定結果を示す。位相変動は、0.15 K程度のダクト内の温度変化に対応して1.5度になっている。これは、ファイバの2 ppm/Kの光路長温度係数から計算した値と調和的である。

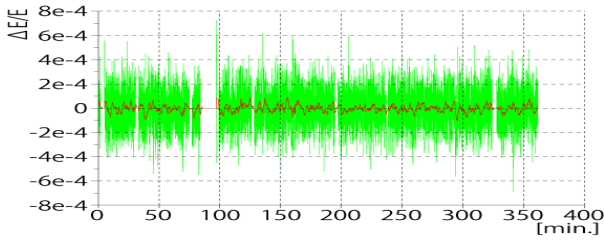


図 7 : 加速器終点部での 7 GeV 加速電子ビームのエネルギー安定性。パルス毎で 1.4×10^{-4} (rms)、グラフ上の 100 ショット平均のエネルギードリフトが 1.0×10^{-4} (p-p) である。

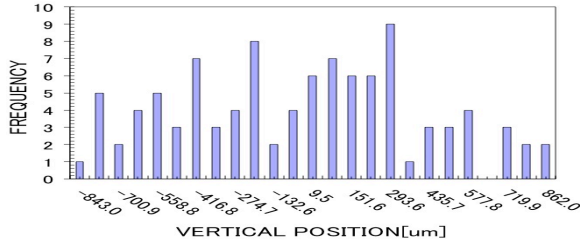


図 8 : 加速器のバンチコンプレッサー下流の 1.45 GeV の場所に設置された、RF デフレクターで測定されたビームジッタ。1pps の繰り返しで 100 ショットのデータ。22.7 fs (STD)のジッタである。

4. 加速電子ビームの安定性

今まで述べてきた安定化の施策と、これによって得られた安定化した基準高周波信号により加速空洞内の高周波電力・位相帰還制御、電子ビームのエネルギー安定化帰還制御、入射部の速度変調終端部における電子ビームの到達時間帰還制御を行っている。これにより図7の加速電子ビームのエネルギー安定度や図8の時間ジッタを得ている。この図から、7 GeVの加速器終端部での電子ビームのエネルギードリフトは6時間 1.0×10^{-4} (p-p) で、パルス毎のエネルギージッタが 1.4×10^{-4} (rms) である。加えて、1.45 GeVでのRFデフレクタによるバンチ構造測定で電子ビームの時間ジッタは、22.7 fs (rms) ある。

5. まとめ

SACLAにおいて、今まで述べてきたような空洞での電子の加速電圧・位相の安定化施策を行った。その施策により、我々はクライストロンの高電圧で10 ppm (rms)におよぶ電圧安定度を達成し、基準高周波発生用信号源においては1 MHz付近のSSBで-140 dBc/Hzの低ノイズレベルを実現した。また、精密温調装置により238MHzSHB空洞の ± 0.04 K以下の温度安定化を達成し、0.015度 (STD) の位相安定性も得た。この結果として、電子ビームにおいて 1.0×10^{-4} (p-p) の加速エネルギーのドリフトや22.7 fs (rms) の時間ジッタが得られ、安定

なX線のレーズングに不可欠な機器の性能を満足した。

参考文献

- [1] 田中 均、動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況、本学会報告集 (2011)。
- [2] T. Tanaka *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A 528**, 172 (2004).
- [3] 田中 均ほか、XFEL/SPring-8 のビームパラメーターの基本特性、第 4 回加速器学会報告集、610-612 (2007)。
- [4] 田中 均ほか、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、第 4 回加速器学会報告集、613-615 (2007)。
- [5] 前坂比呂数ほか、SCSS の試験加速器の RF システムの高精度化、第 5 回加速器学会報告集、530-532 (2008)。
- [6] P. M. Lapostolle and A. L. Septier (Eds), *Linear Accelerators*, North-Holland, 322-329 (1970).
- [7] I. Sato *et al.* (Eds), Design on PF Injector Linac Upgrade for KEKB, KEK Report 95-18, 188 (1996).
- [8] J. S. Oh, Stable RF Phase Insensitive to the Modulator Voltage Fluctuation of the C-Band Main Linac for SCSS XFEL, *proc. of FEL06*, 684-687 (2006).
- [9] S. Goldman, *Frequency Analysis, Modulation and Noise*, DOVER, 211-215 (1967).
- [10] 越川常治、信号解析入門、近代科学社、25-26、69-70 (2001)。
- [11] 白澤克年ほか、SACLA 主加速器の運転状況、本学会報告集 (2011)。
- [12] S. Takahashi *et al.*, Precise Temperature Regulation System for C-band Accelerating Structure, *proc. of APAC04*, 678-680 (2004).
- [13] 稲垣隆宏ほか、C バンド加速器における RF パルス圧縮器の調整、本学会報告集 (2011)。
- [14] Y. Otake *et al.*, Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femto-second Stability, *Proc. of ICALEPCS07*, 706-710 (2007).
- [15] Y. Otake *et al.*, SUB-PICOSECOND TRIGGER SYSTEM FOR THE SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR, *Proc. of FEL06*, 645-648 (2006).
- [16] S. Tanaka, Phase Stabilized Optical Fiber, *Tec. Rep. of Sumitomo Electric Ind. Ltd.*, (1989).
- [17] H. Hosoda *et al.* CONSTRUCTION OF AN TIMING AND LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8, *Proc. of IPAC10*, 2191-2193 (2010).