

## BUNCH LENGTH VARIATION AND TIMING JITTER CAUSED BY RF SYSTEM INSTABILITY IN XFEL/SPring-8

Hitoshi Tanaka<sup>1</sup>, Toru Hara, Kazuaki Togawa

SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

### Abstract

A high density and low emittance electron beam is required for a SASE-based X-ray free electron laser (SASE-XFEL). To generate the above high quality beam, the low density beam with low emittance is thus carefully compressed down to a few hundred femto-second range preserving the low emittance. The SASE-XFEL facility under construction in the SPring-8 campus (XFEL/SPring-8) adopts a 500-kV pulsed electron gun with a single-crystal thermionic cathode because this type of gun can constantly produce a low-emittance beam. On the other hand, this selection imposes the high compression ratio beyond 3000 on the accelerator system for achieving the peak current higher than 3-kA. For such a system with the high compression ratio we estimated the required stability of the RF equipment by using the well-known formula<sup>[1]</sup>. The estimation shows severe stability-requirement that seems difficult to realize. To check the validity of the estimation based on the linear formula, we have made one-dimensional (1D) beam simulator which can treat nonlinear energy chirp exactly and performed the Monte-Carlo simulation. Simulation results show rather relaxed tolerance on the RF equipment stability compared with that obtained by the linear formula. Here, we report on the detail of the simulation results and discuss the mechanism on the relaxation of the tolerance.

## 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

### 1. はじめに

SASE-XFELでは、高密度かつ低エミッタンスの高品質電子ビームが必要になるため、電子ビームはビーム進行方向に数100 fs にまで圧縮される。XFEL/SPring-8では、安定性と低エミッタンスに特に拘った結果、500-kV 低エミッタンスパルス熱電子銃が採用されるに至った。一方で、この選択により、ビームは 1 nsec、1 A の低電流ロングパルスの初期状態から、3 kAの終状態まで圧縮されることになり、その圧縮比は 3000 を上回る。

単純な線形モデル<sup>[1]</sup>を用いて、このような高バンチ圧縮比を実現するシステムに必要なRF機器の安定性を評価した場合、実現困難な安定性が必要との結論が得られる事が知られている。

我々は、この線形近似<sup>[1]</sup>から得られる厳しい最大許容誤差がバンチ圧縮過程の安定性を正しく表していないと考えた。まず、Dohlus等の取扱における前提条件がXFEL/SPring-8の場合に正しく成立するのかわという疑問である(詳細は5章)。また、高いバンチ圧縮を実現するには、エネルギーチャープの非線形性の抑制が重要になる。しかし、XFEL/SPring-8で行っている線形化はエネルギーチャープの2次までの線形化であり、残った3次以上の非線形性もバンチ圧縮の安定性に影響する筈である。

そこで非線形性を正確に取り込んだXFEL/SPring-8の1次元加速器模型を構築し、モンテカルロシミュレーションによりXFEL/SPring-8における各RF機器の必要安定性を評価してみた。その結果、評価され

た最大許容誤差は、線形モデル<sup>[1]</sup>で評価された結果に比べ大幅に緩和されたものとなった。

本報告では、モンテカルロシミュレーションの詳細とそれにより評価されたRF機器の許容誤差の結果について報告すると共に、線形近似で得られる許容誤差が緩和されるメカニズムについても考察を行う。

### 2. 線形近似による位相安定性の見積もり

DESYのDohlus等の線形近似の枠組みによる取扱<sup>[1]</sup>では1段のバンチ圧縮器のバンチ圧縮係数  $C_B$  の位相変動に対する規格化感度  $S_{\delta\phi}$  は (1)式のようにバンチング位相 $\phi_0$ のみで表される。

$$S_{\delta\phi} = \frac{1}{C_B} \cdot \frac{\partial C_B}{\partial \phi} \quad (1)$$
$$= (1 - C_B) \cdot \left( \frac{\sin\phi_0}{\cos\phi_0} + \frac{\cos\phi_0}{\sin\phi_0} \right)$$

バンチング位相  $\phi_0 = -30$  度とすれば (1) 式から  $S_{\delta\phi} \sim 2.3 C_B$  となる。ピーク電流変動を10%以下にするには、 $C_B = 3000$  で位相変動は0.00083度以下、速度変調バンチング以降の電磁石シケインによるバンチ圧縮係数  $C_B = 150$  を用いてもピーク電流変動を10%以下に抑えるために必要な位相安定度は0.017度以下と非常に厳しいものになる。

### 3. 1次元シミュレータ

XFEL/SPring-8の3つのバンチ圧縮器で電子ビームの

<sup>1</sup> E-mail: tanaka@spring8.or.jp

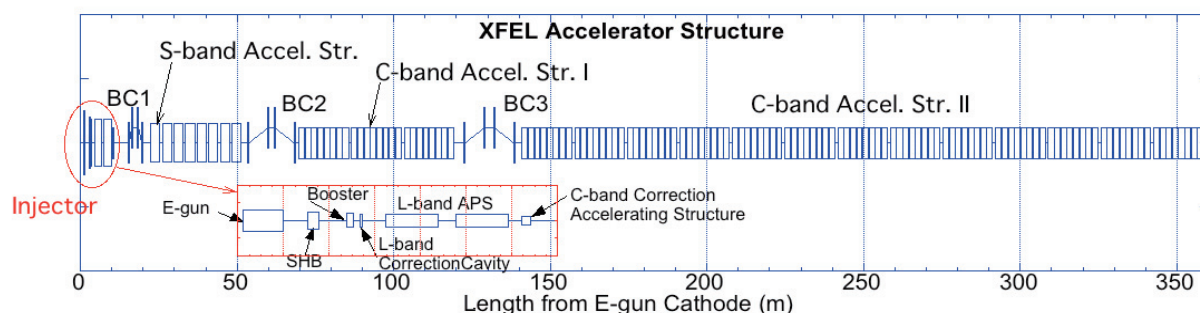


図1：シミュレーションで用いたXFELの機器配置。

横方向の空間広がりには十分小さく、バンチ圧縮特性にビームのベータatron振動は無視できる。このためRF系の最大許容誤差評価は、時間とエネルギーを正確にトレースできる1次元(1D)シミュレータで可能である。シミュレータの性能チェックにはPARMELAを使用した。今回製作した1Dシミュレータの特徴を以下に示す。

- ・ 空間電荷効果、ビーム航跡場は無視
- ・ 非相対論領域の電場は軸上軸対称電場分布を使用
- ・ 相対論領域の進行波管は加速セルを薄肉空洞近似
- ・ 電磁石シケインのエネルギーと飛程との関係はTaylor展開しない厳密な関係式<sup>[2]</sup>を使用
- ・ Cartesian座標系と移動座標系を併用

#### 4. シミュレーションによるRF機器変動の影響評価

図1にXFEL/SPring-8の加速器構成を示す。先ず、電子銃からBC1までの間で、速度変調バンチングにより電子ビームは20倍に圧縮される。さらにBC1で5倍、BC2で10倍、BC3で3倍と全体で3000倍のバンチ圧縮が達成される。作成した1Dシミュレータに図1の機器配置を入力し、個々のRF機器の変動に対する(a)ピーク電流、(b)平均エネルギー、(c)エネルギー広がり、(d)ピーク位置の時間ジッターの感度を調べた。RFの変動は電圧と位相の2つを考慮し、同じRFソースで励振されている空洞(同一システム)はコヒーレントとし、それ以外は無相関とした。シミュレーションでは粒子数は10000個を用い、時間ビン幅はバンチ圧縮終了時点で10 fsecである。XFELで使用されているRF機器の種類と台数を以下にまとめる。

- ・ 238MHz SHB 1台
- ・ 476MHz Booster 1台
- ・ L-band補正空洞 1台
- ・ L-band APS空洞 2台
- ・ C-band補正加速管 1台
- ・ S-band加速系 8台 (4系統)
- ・ C-band加速系 I 24台 (12系統)
- ・ C-band加速系 II 104台 (52系統)

##### 4.1 ピーク電流に及ぼす影響

各RF機器の電圧と位相を変化させピーク電流への

影響を調べた。ピーク電流変動に支配的なRF系の変動因子は、電子銃の電圧変動、C-band補正加速管の位相変動、S-band加速系の位相変動である事が分かった。

図2にピーク電流のS-band加速系系統1の位相変動に対する依存性を示す。0.1度の位相シフトでピーク電流は3%程度変わることが分かる。この値はS-band加速系以降の全バンチ圧縮係数 $C_B=30$ 、S-bandの加速位相 $\phi_0 = -17.3$ 度を(1)式に当てはめて評価される感度に比べ桁程小さい。

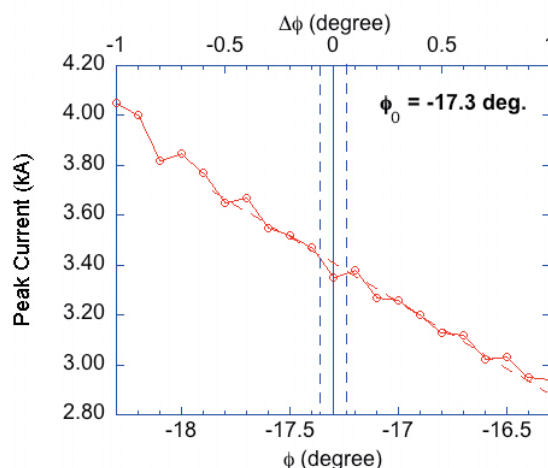


図2：ピーク電流のS-band加速系系統1の位相変動に対する依存性。

##### 4.2 ビームエネルギーに及ぼす影響

ビームエネルギー変動に支配的なRF系の変動因子は、電子銃の電圧変動、238MHz SHBの電圧及び位相変動、L-band APS空洞の電圧及び位相変動、BC3上流のC-band加速系 I の位相変動である事が分かった。電子ビームのエネルギー広がり $\sigma_\delta$ は、10 fsecの時間幅でおおよそ $4\sim 5 \times 10^{-5}$ であり、ショット毎の変動は $10^{-6}$ のオーダーである。

図3にピークエネルギーの238MHz SHB位相変動に対する依存性を示す。0.03度の位相シフトでビームエネルギー(図の左軸)は $5 \times 10^{-4}$ 程度変わることが分かる。エネルギー広がり $\sigma_\delta$ (図の右軸)の変化はそれより一桁小さく、約 $3 \times 10^{-6}$ である。

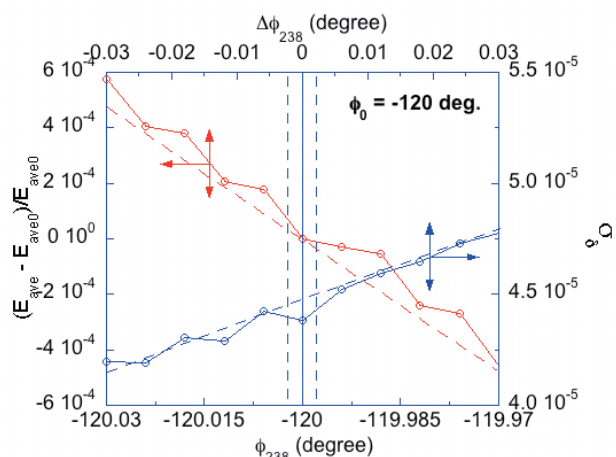


図3：ピークエネルギーの238MHz SHB位相変動に対する依存性。

#### 4.3 RF機器の必要な安定性

バンチ圧縮特性の各RF機器の電圧と位相変動に対する感度解析から、ピーク電流変動を $1\sigma$ で約10%になるよう均等重みで各変動の最大許容誤差を決定した(表1)。表1の最大許容誤差を用いて100イベントの計算を行った結果を図4に示す。ピーク電流の変動( $1\sigma$ )は12%とほぼ予想通りの値が得られた。ピークの時間ジッター( $1\sigma$ )は72 fsec, ピークのエネルギー変動( $1\sigma$ )は0.04%, エネルギー広がりの変動( $1\sigma$ )は $2.1 \times 10^{-6}$ となった。

表1：RF機器の最大許容誤差( $1\sigma$ 換算)。\*は1系統における最大許容誤差を示す。

機器	電圧変動 (%) $\Delta V/V$	位相変動 $\Delta\phi$	
		(度)	(psec)
電子銃	$\pm 0.003$		
238MHz SHB	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$	$\pm 0.12$
476MHz Booster	$\pm 0.01$	$\pm 0.02$	$\pm 0.12$
L-band補正空洞	$\pm 0.03$	$\pm 0.06$	$\pm 0.12$
L-band APS I	$\pm 0.01$	$\pm 0.06$	$\pm 0.12$
L-band APS II	$\pm 0.01$	$\pm 0.06$	$\pm 0.12$
C-band補正加速管	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$	$\pm 0.049$
S-band加速ユニット (4系統)	$\pm 0.01^*$	$\pm 0.1^*$	$\pm 0.097^*$
C-band加速系 I (12系統)	$\pm 0.01^*$	$\pm 0.2^*$	$\pm 0.097^*$
C-band加速系 II (52系統)	$\pm 0.01^*$	$\pm 0.5^*$	$\pm 0.24^*$

### 5. シミュレーション結果に対する考察

1Dシミュレータを用いたモンテカルロシミュレーションの結果は(1)式を用いた評価に比べ桁程度緩い許容誤差を与える。これは(1)式の定式化が設計位相を固定してなされているためと考えられる。バンチング位相にズレが生じた場合、電子ビームは、

もとの設計条件を満たす別の位相に自立的に集群する。この結果、(1)式で予測されるほどピーク電流は変化せず、逆にピーク位置のシフト(時間ジッター)が生じる。電圧変動が生じた場合も同様に考えて良く、電子ビームは自立的に設計条件にあった位相に向かって圧縮されていく。完全にピーク電流が保存されないのは、チャープが非線形であること、バンチ圧縮器軌道長のエネルギー依存性が非線形であることに依る。RF系のパラメータが変動した場合に電子ビームが自立的に異なった位相でバンチ圧縮される様子を図5に示す。

### 参考文献

- [1] M. Dohlus, et al., "Bunch Compression for Linac-based FELs", ICFA Beam Dynamics Newsletter, No. 38, 2005, 15-37.
- [2] 田中均、原徹、渡川和晃、"Path-lengthと規格化エネルギー偏差の厳密な関係", Memo-29, Oct. 2<sup>nd</sup>, 2006.

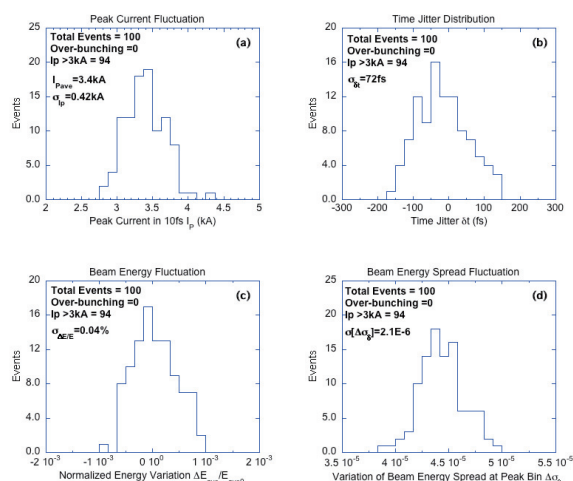


図4：表1の最大許容誤差ビーム性能に及ぼす影響：(a) ピーク電流値、(b) ピークの時間ジッター、(c) 平均ビームエネルギー、(d) エネルギー広がりの変動。

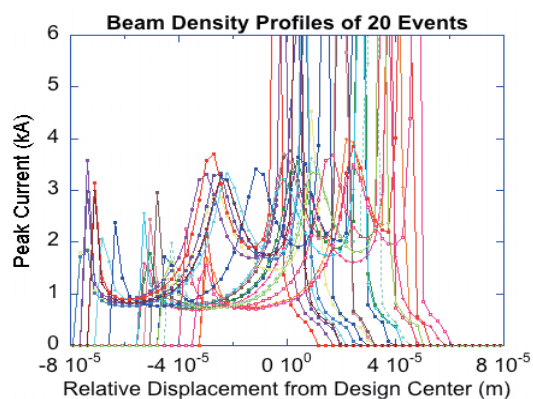


図5：RF系の変動に応じバンチ圧縮のピーク位置がシフトする様子。