

ENERGY CHIRP LINEARIZATION IN BUNCH COMPRESSORS FOR XFEL/SPring-8

Kazuaki Togawa¹, Toru Hara, Hitoshi Tanaka
SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN
1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

Abstract

In the X-ray free electron laser project at SPring-8 (XFEL/SPring-8), a nanosecond electron bunch produced by the CeB₆ gun is compressed to a few hundred femtosecond by using an rf-buncher system and three magnetic chicanes (bunch compressors) in order to obtain a 3 kA peak current at the end of the 8 GeV linac. In this compression scheme, nonlinear energy chirp, mainly negative second-order chirp, is generated in the bunch obviously by the rf-fields and the bunch compressors. If this nonlinear chirp remains at the latter bunch compressors, the bunch can't be compressed to sub-picosecond without over bunching, which causes emittance degradation. To overcome this problem, a high-harmonic chirp-correction cavity is introduced in the XFEL/SPring-8. The correction cavity is located just before the first bunch compressor. We found that positive second-order chirp imprinted to the bunch by over correction is enhanced at the bunch compression process, and this enhanced chirp can suppress the negative chirp generated at the following accelerating rf-fields and the bunch compressors. In this paper, we report on analytical consideration and numerical simulation study for this new compression method.

XFEL/SPring-8のバンチ圧縮器におけるエネルギーチャープの線形化

1. 序論

XFEL/SPring-8計画 [1]では、CeB₆熱電子銃において生成したピーク電流1 Aの低エミッタンス単バンチビーム（バンチ長~1 ns）を、8 GeVリニアックの終端までに、ピーク電流3 kA（バンチ長~数100 fs）まで圧縮してアンジュレーターに入射し、SASEプロセスによるX線レーザーを発生する。初期エミッタンスを可能な限り悪化させないように、低エネルギー領域では、バンチャーシステムを用いた速度変調方式でピーク電流20 Aまで圧縮する。高エネルギー領域では、多段のシケイン型磁気バンチ圧縮器を使い（XFEL/SPring-8では3段）、ビームエネルギーの増加に伴って段階的にバンチ長が短くなるよ

うに、バンチ圧縮を行う。

RF加速およびバンチ圧縮の過程で生じる非線形のエネルギーチャープ（主成分として負の2次チャープ）は、エミッタンスを悪化させるオーババンチングの要因となる為、一般に、高調波空洞を用いた補正が行われる。我々は、このチャープ補正を効率的に行う新しい手法を考案した。図1にその原理図を示す。要点は次の通りである。

- (1) バンチ圧縮が緩い状況（多段バンチ圧縮システムの前半部）ではエネルギーチャープの非線形性が多少残った場合でも、オーババンチすることなく圧縮できる。
- (2) 多段バンチ圧縮システムの最初の段階で、過剰に補正することで、正の2次チャープをビームにイ

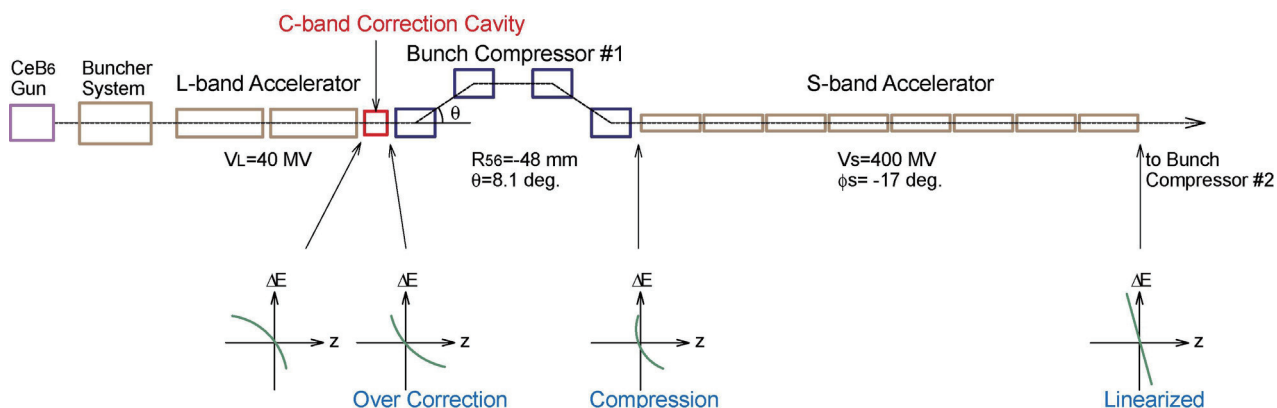


図1：高調波補正空洞を用いた過剰補正によるエネルギーチャープの線形化の原理図。

¹ E-mail: togawa@spring8.or.jp

ンプリントする。これはバンチ圧縮の過程で増大し、後段のRF加速並びにバンチ圧縮による非線形性を大幅に抑制することができる。

(3) インプリントする正の2次チャープは、最終段のバンチ圧縮器の圧縮ポイントで必要な圧縮特性を得るのに十分な線形性が確保できるように決定する。

本稿では、このチャープ補正に関する理論的考察とシミュレーション解析について報告する。

2. 2次摂動展開による解析

まず、論点を明確にするために、S-band加速部の終端においてエネルギーチャープを線形化するケース(図1)について考察する。

バンチの中心を基準として、バンチ圧縮器(以降BCと記す)に入射する前の電子の位置を Δz 、BCを通過した後の電子の位置を $\Delta z'$ とする。行路長の1次のエネルギーチャープ依存性を表す係数を R_{56} 、2次の係数を T_{566} と置き、 Δz を $\Delta z'$ の2次のオーダーまで記述すると、

$$\Delta z = C_1 \Delta z' + C_1^3 \left[T_{566} \left(\frac{E'}{E} \right)^2 + \frac{R_{56}}{2} \frac{E''}{E} \right] \Delta z'^2 + o(\Delta z'^3) \quad (1)$$

となる。ここで E' 、 E'' はそれぞれエネルギーの z に関する1回、2回微分を表す。 C_1 はエネルギーに関する1次のバンチ圧縮係数であり、次式で定義される。

$$C_1 = \frac{1}{1 - R_{56} E' / E} \quad (2)$$

また、 R_{56} と T_{566} は、近似的に $T_{566} = -3R_{56}/2$ の関係がある。

BC#1の入口ではL-band加速管とC-band補正空洞によりエネルギーチャープが付けられているので、進行方向(z 軸)のエネルギー分布は、

$$\begin{aligned} E(\Delta z)_{\text{before BC\#1}} &= E_L(\Delta z) + E_C(\Delta z) \\ &= E_0 + E_0' \Delta z + \frac{1}{2} E_0'' \Delta z^2 + o(\Delta z^3) \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_0 = eV_L \cos \phi_L + eV_C \cos \phi_C \quad (4)$$

$$E_0' = k_L eV_L \sin \phi_L + k_C eV_C \sin \phi_C$$

$$E_0'' = -k_L^2 eV_L \cos \phi_L - k_C^2 eV_C \cos \phi_C$$

と表すことができる。 E_0 、 E_0' 、 E_0'' はバンチ中心の値であり、 V_L 、 V_C はRF電場の振幅、 k_L 、 k_C はRF電場の波数、 ϕ_L 、 ϕ_C はバンチ中心における位相で、添字はRFの周波数バンドを表す。ここで、L-band加速管に入射するビームエネルギーは、L-band加速管によるエネルギー利得に対して充分小さいので無視した。また、電子速度は光速として、L-band加速管の前段における位相スリップは無いとした。

式(1)を式(3)に代入し、 $\Delta z'$ について2次の項まで求めると、BC#1通過後のエネルギー分布が得られる。それにS-band加速管によるエネルギーゲインを加算すると、S-band加速部終端におけるエネルギー分布が得られる。

$$\begin{aligned} E(\Delta z')_{\text{after S}} &= E(\Delta z')_{\text{after BC\#1}} + E_S(\Delta z') \\ &= E_0 + eV_S \cos \phi_S + (C_1 E_0' + k_S eV_S \sin \phi_S) \Delta z' \\ &\quad + \left\{ \frac{C_1^2}{2} E_0'' + C_1^3 \left[T_{566} \left(\frac{E_0'}{E_0} \right)^2 + \frac{R_{56}}{2} \frac{E_0''}{E_0} \right] E_0' \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} k_S^2 eV_S \cos \phi_S \right\} \Delta z'^2 + o(\Delta z'^3) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)の $\Delta z'^2$ の係数をゼロにすることが、エネルギーチャープを線形化するための条件である。最も効率的な補正空洞の位相は $\phi_C = -180^\circ$ であるので、この時の補正空洞の電圧は、

$$\begin{aligned} V_C &= \left(\frac{k_L}{k_C} \right)^2 V_L \cos \phi_L + \left(\frac{k_S}{C_1 k_C} \right)^2 V_S \cos \phi_S \\ &\quad - 2C_1 T_{566} k_L \left(\frac{k_L}{k_C} \right)^2 \left(\frac{V_L \sin \phi_L}{V_L \cos \phi_L - V_C} \right)^2 V_L \sin \phi_L \\ &\quad + C_1 R_{56} k_L \frac{\left(\frac{k_L}{k_C} \right)^2 V_L \cos \phi_L - V_C}{V_L \cos \phi_L - V_C} V_L \sin \phi_L \end{aligned} \quad (5)$$

と表記することができる。式(5)の各項とバンチ圧縮係数 C_1 の関係を図2に示す。加速器パラメータは図1に記載した値を用いた。 ϕ_L は式(2)、(3)より C_1 の関数として求めることができるので、その関係を用いた。

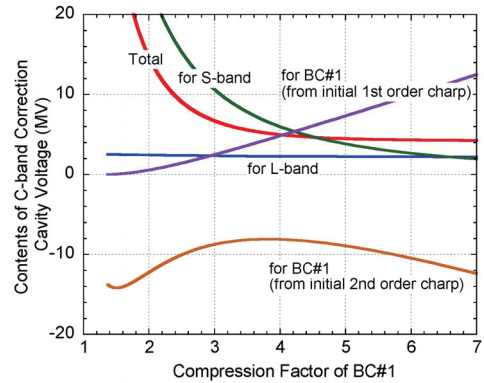


図2: エネルギーチャープを線形化するC-band補正空洞電圧の各成分とバンチ圧縮係数 C_1 との関係。

ここで、各項の物理的考察を行う。第1項はL-band加速管で生じる2次チャープの補正電圧で、これはバンチ圧縮には依存しない。通常の高調波補正空洞ではこの電圧を発生し、直前の加速管による2次チャープのみを補正する。今回我々が提案した過剰補正の効果は第2項目以降に現れる。第2項は、S-band加速管の2次チャープを補正するC-band補正空洞の電圧が、バンチ圧縮係数の2乗に反比例して大幅に低減できることを示している。例えばバンチ圧縮係数が5の場合、S-bandの10倍の周波数を持つ補正空洞を導入したと等価になる。

第3項と第4項はBC#1に關与した項である。第3項は、入射ビームの1次チャープが起源となってBC#1がもたらす固有の2次チャープを補正する電圧であり、ビームがバンチング位相にあれば常に正の値となる。第4項は、入射ビームの2次チャープが起源となってBC#1で増長された2次チャープを補正する電圧である。BC#1を出たビームが、S-band加速管の2次チャープを打ち消すだけの正の2次チャープを持つように補正空腔の電圧を選ぶので、分数部の分子が負となり、第4項は負の値となる。第3項と第4項は、バンチ圧縮係数を大きく取ると絶対値が大きくなるが、結果的に互いに打ち消しあう方向に働く。

XFEL/SPring-8ではBC#1のバンチ圧縮係数5 (20 ps→4 ps) を想定しているので、約5 MVの補正空腔電圧でS-band加速部終端までの全ての2次チャープを補正することが可能となる。補正空腔は必ず減速位相で動作させるため、この電圧が大きいとビームエネルギーを大きく損失してしまうことになる。エネルギー利得の観点からも、過剰補正は有効である。

以上の議論は、カスケード方式で、S-band加速部以降のBC#2 (圧縮係数10)、オフクレストC-band加速部 (1.45 GeV)、BC#3 (圧縮係数3)、C-band主加速部 (8 GeV) にも適応できる。BC#2の圧縮係数が比較的大きいことから、補正空腔の電圧を僅かだけ増加することでリニアック終端のエネルギーチャープを線形化することができる。

3. 1次元シミュレーターによる数値解析

筆者の一人 (H.Tanaka) が開発した1次元の粒子トラッキングコードを用いて、前章で得られた結果の妥当性をチェックした。当コードは、加速管、偏向電磁石等で構成されるシステムの「エネルギーと時間で構成される位相空間分布」を精密にトレースするものである [2]。但し、空間電荷、CSR、Wake Fieldの効果は導入していない。

まず、前章で議論した加速器パラメータにおける最適な補正空腔電圧とバンチ圧縮係数の関係について、2次摂動計算で得られた結果 (バンチ圧縮係数はエネルギーの2次まで考慮) と1次元シミュレーターの結果を図3にプロットし比較した。両者は非常に良い一致を示しており、過剰補正効果の妥当性

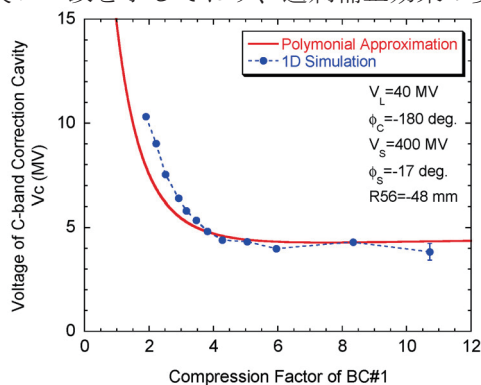


図3：1次元シミュレーター及び2次摂動計算で得られた最適な補正空腔電圧とバンチ圧縮係数の関係。

を裏付ける一つの結果が得られたと考えられる。

次に、バンチ圧縮が終了するBC#3 (エネルギー1.45 GeV) の出口における位相空間分布を求めた。この計算では、電子銃からビームをスタートさせ、バンチャーシステム及びL-band加速管の前段における速度変調バンチングの効果も考慮した。また、BC#3のバンチ圧縮係数3を得るよう、オフクレストC-band加速部の位相を -41.5° に選んだ。BC#1とBC#2には、バンチ前後の不要な成分を除去するためにエネルギーフィルターを設けた。補正空腔電圧のスキャンによって大きく変化する位相空間分布の様子を図4に示す。スキャンした時に一定のバンチ圧縮係数が得られるよう、バンチ圧縮器の磁場強度を調整した。補正空腔電圧を6 MVに近づけると、非線形効果で広範囲に分布していた電子が中央に集合し、非常に狭い領域に線形化された位相空間分布が出来上がる様子が明確に表されている。高密度かつ線形の位相分布を達成するためには、高調波空腔による過剰補正が必要不可欠であることをこの図が示している。

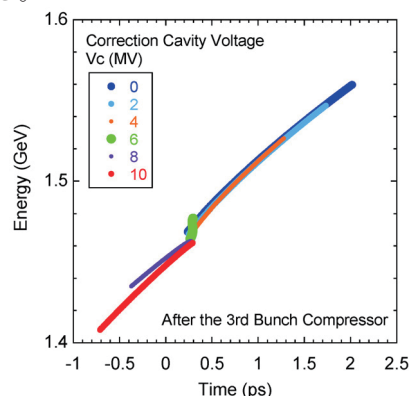


図4：補正空腔電圧によって変化するエネルギー対時間の位相空間分布。

4. まとめと課題

RF加速およびバンチ圧縮の過程で生じるビームエネルギーの2次チャープを、高調波補正空腔を利用して効率的に抑制する新しい手法を見出した。そして、この手法がXFEL用加速器に対して有効に働くことを、2次摂動展開計算と1次元粒子シミュレーターによる解析で確認した。

最後に、高調波補正空腔の電圧、位相変動がビーム圧縮特性に及ぼす影響を調査したところ、他のRF機器と比較して感度が高いことが明らかとなった [2]。従って、補正空腔の超安定化が実機における重要な技術的課題であると考えている。

参考文献

- [1] T.Shintake, “X線自由電子レーザー建設の現状” in this proceedings.
- [2] H.Tanaka, et al., “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” in this proceedings.