

## PROPERTY OF ELECTRON BUNCH COMPRESSION AT SCSS TEST ACCELERATOR

### - TEMPORAL BUNCH PROFILE MEASUREMENT USING RF ZERO-PHASING METHOD -

Kazuaki Togawa<sup>1</sup>, Hitoshi Tanaka, Toru Hara, Yuji Otake  
SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN  
1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

#### Abstract

The SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) test accelerator, which can generate an intense EUV SASE light, was constructed to prove a new concept for compact and stable X-ray free electron lasers. Since the injector system is required to produce a highly compressed electron beam (compression factor~300) without breaking a low-emittance ( $<1\pi$  mm mrad), it is very important to investigate bunch compression performance. We have adopted an RF zero-phasing method to measure the temporal bunch profiles of the electron beam. In the first experiment, the characteristic of the magnetic bunch compressor was evaluated, and the measured compression factor agreed well with a calculation. We conclude that this method can be used for systematic study of the bunch compression.

### SCSS試験加速器における電子ビームのバンチ圧縮特性 - RF Zero-phasing法による時間方向バンチプロファイルの測定 -

#### 1. はじめに

SPring-8サイトでは、理化学研究所と高輝度光科学研究センターによる合同チームにより、X線自由電子レーザー研究施設の建設が行われている[1]。本加速器は、CeB<sub>6</sub>熱電子銃と速度変調バンチ圧縮システムによる低エミッタンス入射器、高電界C-band主加速器、真空封止アンジュレータにより構成され、相対的に低いエネルギーでコンパクトなXFELを実

現することを目指している[2]。この方式を実証するため、2005年にSCSS試験加速器（エネルギー250 MeV）を建設、2007年には波長50 nmから60 nmの極短紫外域でSASEレーザー出力を飽和させることに成功し、ユーザー運転を開始するに至った[3]。

SCSS試験加速器の構成と1次元シミュレータで解析したビーム特性を図1に示す。CeB<sub>6</sub>熱電子銃により発生したピーク電流1 A、パルス幅2  $\mu$ sの低エ

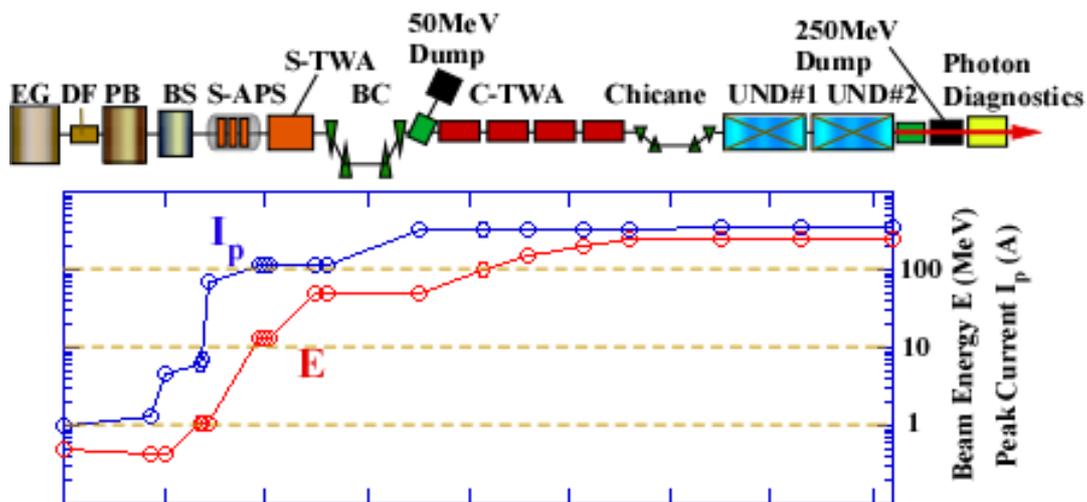


図1：SCSS試験加速器のレイアウトと1次元シミュレータで解析したビーム特性。

EG:電子銃、DF:ビームディフレクタ、PB:238MHzプレバンチャー、BS:476MHzブースター、S-APS:APS型S-band加速器、S-TWA:S-band進行波管、BC:磁気バンチ圧縮器、C-TWA:C-band進行波管、UND:真空封止アンジュレータ

<sup>1</sup> E-mail: [togawa@spring8.or.jp](mailto:togawa@spring8.or.jp)

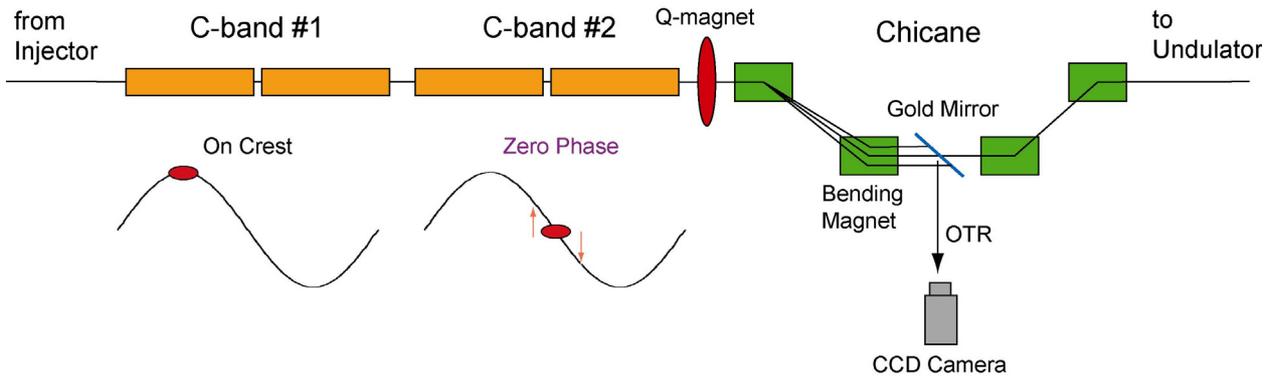


図2：RF Zero-phasingによる時間方向バンチプロファイルの測定原理。

ミッタンスビームから、ビームディフレクタにより1 nsの単バンチを切り出す。これを238MHzプレバンチャーと476MHzブースターで構成されるバンチャーシステムに入射し、速度変調バンチングにより約100倍のバンチ圧縮を行う。次のS-band加速管では、バンチング側のオフ Crest 加速を行ってビームにエネルギーチャープを与え、直後の磁気バンチ圧縮器で約3倍にバンチを圧縮する。最終的に約300 Aにまで増強したビームをアンジュレータに入射し、SASEレーザーを発生する。このように、SCSS試験加速器では小さいエミッタンスを保ちつつ非常に高いバンチ圧縮を実現しなければならないため、圧縮特性を把握することは、加速器システムの性能を評価する上で非常に重要である。

SCSS試験加速器では、圧縮特性を評価するのに必要な時間方向バンチプロファイルの測定に、RF Zero-phasing法と呼ばれる手法を用いた[4]。本稿では、最初の実験として行ったRF Zero-phasing法による磁気バンチ圧縮器の圧縮特性の評価について報告を行う。

## 2. RF Zero-phasing法による時間方向バンチプロファイルの測定

図2にRF Zero-phasing法の測定原理を示す。2台あるC-band加速ユニットの後半(C-band#2)のRF位相を90°ずらして、バンチ長に比例した線形のエネルギーチャープをビームに与え、その直下流のシケイン偏向電磁石の分散を利用してエネルギー分布を測定し、その分布から間接的に時間方向プロファイルを求める。エネルギー分布、即ちシケイン分散部の水平空間プロファイルは、ビームラインに挿入した金ターゲットにビームを衝突させた時に発生するOTR光をCCDカメラで検出することで測定した。

バンチの時間方向プロファイルとエネルギー分散部の水平空間プロファイルの変換式は以下のように求めることができる。C-band#2に入射するビームのエネルギーを $E_1$  (~150 MeV)、C-band#2の加速電圧振幅を $V_2$  (50~100 MV、バンチ長に応じて調

整)、C-bandの波数を $k_c$  (119.7 m<sup>-1</sup>)、シケインのディスパージョンを $\eta$  (150 mm) と置く。基準粒子から測ったz座標を $\Delta z$ 、エネルギー偏差を $\Delta E$  とすると、エネルギー分散部における水平座標 $\Delta x$ は、

$$\begin{aligned} \Delta x &= \eta \frac{\Delta E}{E_1} \\ &= \left( \frac{dE_1}{dz} + \frac{dE_2}{dz} \right) \eta \frac{\Delta z}{E_1} \\ &= \left( \frac{dE_1}{dz} \pm k_c e V_2 \right) \eta \frac{\Delta z}{E_1} \end{aligned}$$

と表すことができる。ここで、マイナス符号はバンチング側ゼロ位相、プラス符号はデバンチング側ゼロ位相の場合を示す。 $dE_1/dz$  はビームが持つintrinsicエネルギーチャープであるが、以下の理由により、C-band#2のゼロ位相で与える線形のチャープ $dE_2/dz$ と比較して十分小さいとして無視した。 $dE_1/dz$ の主要要素は、磁気圧縮のためにS-band加速管で与えるエネルギーチャープとC-band加速管で発生するSingle-bunch Wakefieldによるエネルギーチャープである。前者は負のチャープであるのに対し、後者は正のチャープであることから、これらはキャンセルする方向に働く。測定の分解能を上げるために、C-band#2のRFをオフにした状態で、シケイン入口の四極電磁石によりプロファイルモニター上に焦点を結ぶようビームを水平方向に収束するのであるが、図3に示すように、その時の水平ビームサイズがZero-phasingを行ったときのサイズより十分に小さいことから、intrinsicエネルギーチャープ及びビームサイズの影響は十分小さいと考えられる。以上より、時間と水平座標の関係が次のように求められる。

$$\Delta t = \pm \frac{E_1}{k_c e V_2 c \eta} \Delta x$$

Zero-phasingの測定分解能は、CCDカメラの1 pixel 間隔に相当する水平ビームサイズで決まり、時間に換算すると約3 fsである。ビームプロファイルの生データを図3の青色実線で示すが、OTR光の光量が

小さいことからノイズが目立つため、隣接10点のデータを平均化することでノイズ除去を行った（青色四角のデータ）。これにより、時間分解能は30 fsとなるが、この分解能ではバンチの微細構造を消してしまうことは無いことが図3より確認できる。

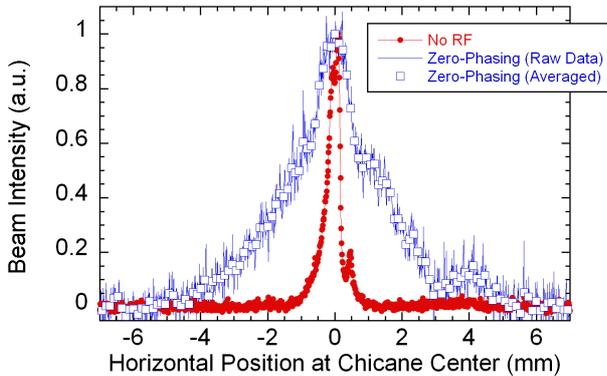


図3：Zero-phasingによる、シケイン分散部における水平ビームプロファイルの変化。

### 3. 磁気バンチ圧縮器の圧縮特性

まず、最終的なピーク電流を決める磁気バンチ圧縮器の圧縮特性の評価を行った。バンチ圧縮器は4台の矩形電磁石で構成され、圧縮係数は以下の式で与えられる。

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

ここで、 $E$ 、 $E'$ はそれぞれ磁気バンチ圧縮器への入射ビームのエネルギーと1次のエネルギーチャープを表すのであるが、試験加速器ではS-band加速管の電圧と位相により決定される。また、 $R_{56}$ はバンチ圧縮器の幾何形状から決まる1次のモーメントコンパクションを表し、 $-20$  mmである。

時間方向バンチプロファイルの測定は、マシンパラメータをEUV Laserが発振する状態にセットして行った。図4にバンチ圧縮前後のプロファイルを示す。圧縮前のプロファイルは、S-band加速管の加速位相をクレストにセットし ( $E' = 0$ )、ビームを圧縮せずにバンチ圧縮器を透明な状態として通過させ

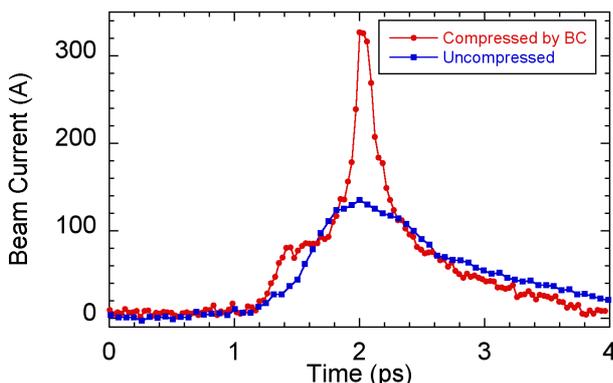


図4：磁気バンチ圧縮前後の時間プロファイル。

て測定した。これより、ピーク電流を基準とした圧縮係数が $\sim 2.4$ であることが分かる。

一方、表1に示すS-band加速管のRFパラメータを式(1)に代入すると線形の圧縮係数を求めることができる。計算結果は2.2であり、実験結果と比較的良好な一致を示すことから、磁気バンチ圧縮器は設計通り健全に動作していると結論できる。

S-APSへの入射ビームエネルギー	1 MeV
S-APSの電圧振幅	12 MV
S-APSの加速位相	$-25$ deg.
S-TWAの電圧振幅	38 MV
S-TWAの加速位相	$-25$ deg.

表1：S-band加速管のRFパラメータ。

### 4. まとめと今後の課題

SCSS試験加速器において、RF Zero-phasing法による時間方向バンチプロファイルの測定を行い、磁気バンチ圧縮器の圧縮特性の評価を行った。実験で求めた圧縮係数は計算値と良好な一致を示し、システムが設計通り動作することを確認した。また、この方法により、ピーク電流だけでなく詳細なバンチの時間構造も評価できる可能性が十分にあることが分かった。

さて、磁気バンチ圧縮器は、ビームエネルギーが十分に高い強相対論領域で動作するため、線形の枠組みで比較的容易にバンチ圧縮を評価することができる。これに対し、バンチャーシステムにおける速度変調バンチングは、圧縮原理そのものが極めて非線形性の強い現象であるため、バンチングの評価と制御が非常に難しい。しかしながら、これをうまくコントロールすることができれば、電子ビームのバンチ長を可変にできるなど幅広いビームチューニングが可能となることが期待できる。今後、RF Zero-phasing法を用いて、系統的な速度変調バンチングの特性を、単純な圧縮比だけでなくピーク幅等の電流分布も併せて調べていく。

### 参考文献

- [1] T. Shintake, “X線自由電子レーザー計画の現状”, 本学会プロシーディングス
- [2] T. Shintake et al, “SPring-8 Compact SASE Source”, Proceedings of SPIE, Optics for Fourth-Generation X-Ray Sources, edited by R. O. Tatchyn, A. K. Freund, and T. Matsushita (SPIE, Bellingham, WA, 2001), Vol. 4500, p. 12-23
- [3] H. Tanaka et al., “Operation Status of the SCSS Test Accelerator: Continuous Saturation of SASE FEL at the Wavelength Range from  $\sim 50$  to  $60$  nm”, Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, p. 1944-1946
- [4] D. X. Wang et al., “Measurement of femtosecond electron bunches using a RF zero-phasing method”, Phys. Rev. E 57 (1998) p. 2283-2286