

## 電荷量精密測定のための可動式ファラデーカップの開発

### DEVELOPMENT OF MOVABLE FARADAY CUP FOR PRECISE CHARGE MEASUREMENT

安積隆夫<sup>#,A)</sup>, 糸賀俊朗<sup>B)</sup>, 高橋直<sup>B)</sup>, 前坂比呂和<sup>A)</sup>, 松原伸一<sup>B)</sup>, 大竹雄次<sup>A)</sup>

Takao Asaka<sup>#,A)</sup>, Toshihiro Itoga<sup>A)</sup>, Sunao Takahashi<sup>B)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>A)</sup>, Shinichi Matsubara<sup>B)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup> JASRI

#### Abstract

The high brightness electron beam is required for the 8-GeV linac in SACLA in order to generate an x-ray free-electron laser. The high peak current beam is generated by bunch compressors, which shorten a bunch length up to several tens of femto-seconds. The precise charge measurement of the bunched beam is indispensable for estimation of the peak current, which is important to determine the characteristics of the x-ray free-electron laser, such as a FEL gain length. The longitudinal charge distribution of the bunched beam is measured by an rf deflector. Simultaneously, the total beam charge is measured by using a current transformer (CT), which is a non-destructive beam current monitor. By using both the distribution and total charge, we can estimate the peak current value. To calibrate the current monitor, we had installed a Faraday cup, which was designed to achieve a resolution of less than 1 pC. The geometry of a collector in the Faraday cup was determined by estimations of energy loss, charge loss and thermal analyses. The collector is designed to be retractable with an actuator, in order that the beam for the user experiment is supplied without intercepting beam transport. To reduce the charge loss due to secondary emission in the collector, a bias voltage can be applied between the collector and a vacuum chamber. In order to check the performance of the Faraday cup, the beam test was carried out. An absolute accuracy of beam charge measurement of the single bunch beam with a bunch length of 20 fs or less was achieved  $\pm 2\%$  by using the Faraday cup. The CT was calibrated with sufficient accuracy.

#### 1. はじめに

SACLA において、アンジュレータから放射される X 線自由電子レーザー (XFEL) のゲイン長や強度などの基本性能を評価するには、高輝度電子ビームの縦方向電荷分布の決定が必要不可欠である[1]。それは、バンチ内のピーク電流にアンジュレータ区間の XFEL 増幅特性が左右されるからである。

バンチ内の縦方向電荷分布は、rf デフレクターによる縦方向分布計測[2]と非破壊型ビーム電流モニター (CT) によるビームの総電荷量測定から算出される。この CT は、ナノ秒の模擬パルス信号による入出力特性から校正係数 (出力電圧・入力電流変換値) が取得され、これが電荷分布取得時に用いられている[3, 4]。CT とその検出回路は入力パルス幅による周波数特性をもつため、その応答はバンチ長に依存する。測定対象のバンチ長は数十フェムト秒なので、当初採用していたナノ秒パルスによる CT の校正では、不十分な状況であった。正確な電荷量を取得するには、このバンチ長に応じた校正係数を適用しなければならない。

以上の要請から、極短バンチビームに対応する CT の校正係数取得を目的として、高確度電荷計測を可能とするファラデーカップを開発し、CT の直下流に導入した。

XFEL の自己増幅過程で生じる 10% 程度のレー

ザー強度変動に収まるように、加速ビームのピーク電流変動の許容値は 10% (rms) と規定している。これを考慮して[5]、ファラデーカップのビーム電荷量測定目標精度は $\pm 2\%$ 以内とした。これを実現するためには、ファラデーカップに入射するビーム電荷量の漏洩をできる限り低減する必要がある。そのため、ビーム衝突部であるコレクター外へ放出する電子数の評価、およびその放出電子を低減するためのコレクターサイズの最適化など、徹底した電荷漏洩要因の排除がなされた。本稿では、それらの評価計算結果を踏まえた機器製作、システム構成を述べ、ビーム試験結果、およびファラデーカップ、CT の電荷量比較測定で得られる CT の校正曲線を示す。

#### 2. ファラデーカップ

##### 2.1 設計指針

ファラデーカップは、最後のバンチ圧縮がおこなわれる第 3 磁気バンチ圧縮器後に設置される。この地点のビーム条件は、エネルギーが 1.5 GeV、バンチ当たりの最大電荷量が 0.6 nC、繰返し周波数が 10Hz である。この条件に以下の 3 つを加えて、設計・製作が進められた。

- ビーム電荷量の測定精度は $\pm 2\%$ 以内とする。
- コレクターから低エネルギー電子放出抑制のためのバイアス電圧印加の機能を設ける。
- 電荷量測定時以外は、ビームを遮らないようにコレクターは真空仕様、かつ可動式とする。

<sup>#</sup> asaka@spring8.or.jp

上記の測定精度を満たすためには、電子ビームとコレクター物質との相互作用（電子陽電子対生成によるカスケードシャワーからの電荷漏洩、後方散乱電子の放出、2次電子放出など）による電荷損失の定量評価が必要である。これに加えて、コレクターの冷却系（冷却水、冷却配管）からの電流漏洩に注意を払わなければならない。設計を進めるに当たり、これら要因について以下の手順で検討する。

高エネルギー電子をコレクター内に止めるには、電離・制動放射によるエネルギー損失の理論計算から見積もることができるが、より詳細な定量評価のためにEGS5[6]による電荷量損失のシミュレーションをおこないコレクターサイズを最適化する。そうした上で、コレクターから放出するわずかな低エネルギー電子（ $\sim 300$  eV）捕獲のため、ファラデーカップはバイアス電圧の印加を配慮した構造とする。

通常のファラデーカップでは、高エネルギー電子ビーム照射によるコレクターの温度上昇を抑えるため、冷却水による除熱をおこなう。しかしながら、冷却水を介した電荷漏洩が測定精度の悪化原因となる。これを避けるため、ANSYSによるコレクターの熱解析をおこない、冷却機能の排除を検討する。

## 2.2 電離・制動放射によるエネルギー損失

コレクターでは電荷捕獲のため、ほぼ完全に電子ビームを停止する必要がある。そのため、1.5 GeVの電子ビームがコレクターへ照射される場合、その厚さによるエネルギー損失を見積もる。コレクター材質は、短い放射長  $L_R$  で耐熱性に優れ、超高真空中で使用可能なタングステン ( $L_R$ : 3.5mm) を採用する。Figure 1 に電子ビーム入射時の電離 (Bethe-Bloch の式) と制動放射によるエネルギー損失を示す。これより、1.5 GeVの電子が100 eVまで減少するタングステン長は60mm程度であり、これを踏まえて、コレクターサイズの概略寸法を決定する。

また、横方向の電子拡散範囲は、Moliere 半径  $R_M$  より与えられる。タングステンの場合、入射エネルギーの90%は、半径11 mm円内（全エネルギーの99%の場合は  $3.5R_M$  とする）に収まる。

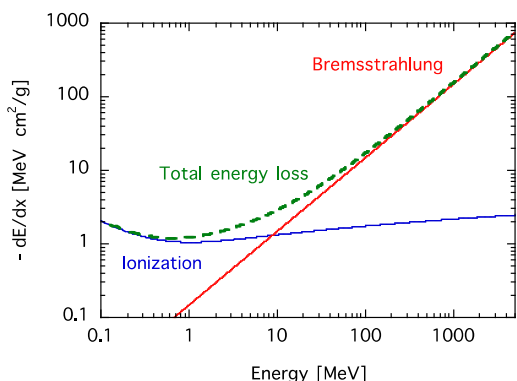


Figure 1: Energy loss of an electron in tungsten. The radiation length of the tungsten is 3.5 mm. The energy of a 1.5 GeV electron reduces to 100 eV through a 60 mm long tungsten block.

## 2.3 エネルギー損失、電荷量損失の定量評価

コレクター内のエネルギー損失とコレクター外に放出する電荷量の定量評価のために、EGS5によるシミュレーションをおこなった。仮定したコレクターは、前節の結果を参考にして、Figure 2 に示す形状とした。ビーム進行方向に垂直な面が  $100$  mm  $\times$   $100$  mm の直方体タングステンに直径  $25$  mm、深さ  $70$  mm の円筒型開口を仮定し、ビーム進行方向の厚さについて検討した。

このシミュレーションでは、10000 個の入射電子を追跡し、運動エネルギーが  $100$  keV 未満となった粒子はその場（コレクター内）でエネルギー付与し停止すると仮定した。1.5 GeV の電子がコレクターへ入射するとき、コレクター内部に付与されるエネルギー分布を Figure 3 に示す。ビーム照射点からのコレクター長が  $130$  mm 以上であれば入射エネルギーの  $99.74\%$  を消費する結果を得た。残りの  $0.26\%$  は、コレクターから放出する電子、陽電子、 $\gamma$  線の合計エネルギーである。

Figure 4 には、コレクター長に対して、外部に放出される電子・陽電子数、電荷量損失を示す。コレクター長が増すにつれて、外部へ放出する粒子数は減少するが、 $150$  mm 以上で電荷損失量はほぼ  $1.8\%$  となる。このとき、放出される電子のエネルギーは、 $100$  keV 以上が大半であり、その空間分布は、衝突点の上流側・下流側に対して  $3:7$  の割合である。

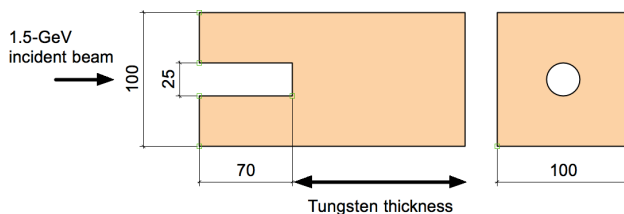


Figure 2: Schematic of the collector in the EGS5. The material of collector is tungsten (Density:  $19.3$  g/cm<sup>3</sup>).

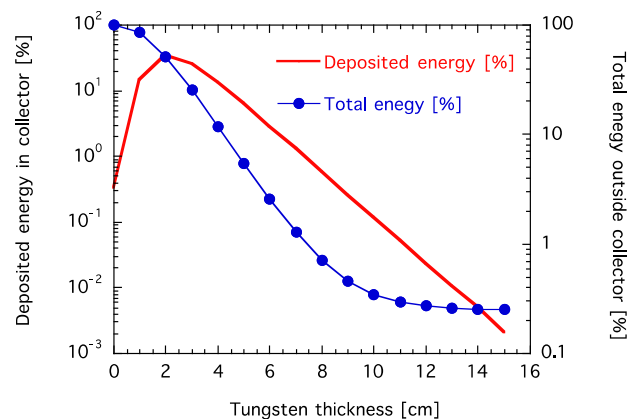


Figure 3: Dependence of energy loss on the thickness of the collector. The red line shows the deposited energy in the collector. The blue line is the total energy of particles outside of the collimator.

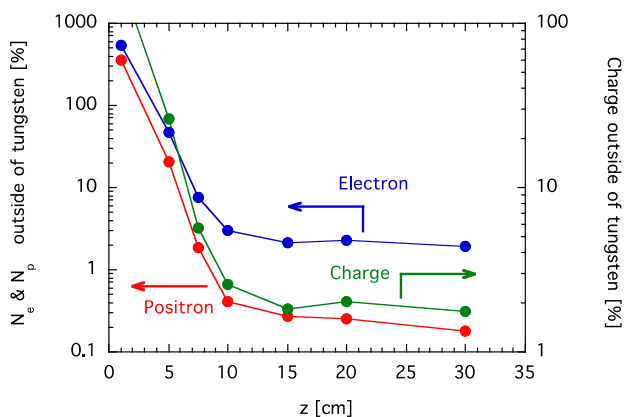


Figure 4: Total charge (Green line) emitted by the collector. The charge loss is obtained to be 1.8% at a 150 mm thickness in the collector. The red and blue lines are number of electrons and positrons, respectively.

以上の計算結果とコレクターを可動式とする重量の制限から、コレクターサイズはビーム衝突点から 150 mm の厚みをもつ 100 mm×100 mm×220 mm (φ25 mm で深さ 70 mm のビーム入射用円筒穴付き) の直方体タングステン (39 kg) とした。

#### 2.4 熱解析

高エネルギービーム照射によるコレクターの温度上昇を抑制するための冷却機能は、その冷却水を介した電荷漏洩の原因となる。この機能の有無を判断するために、熱解析をおこなった。

仮定した電子ビーム条件は、バンチ当たりの電荷量が 0.6 nC で、ビームエネルギーが 1.5 GeV のシングルバンチが 10 Hz の繰り返し周波数であり、このときコレクターの温度分布を有限要素法 (ANSYS) により評価した。コレクターの 1/4 モデルにおける結果を Figure 5 に示す。なお、入熱は平均パワー (定常解析) として与えた。ここで、入熱領域は、EGS5 によるシミュレーションで得たコレクター内のエネルギー分布 (Figure 3)、すなわち衝突点から 100 mm (ビーム径相当として 50 μm 角を仮定) の間で 98.8% のエネルギー付与があることを反映した。また、コレクターの下部に 30 °C の温度固定を与える領域 φ10 mm 面積相当分を設けた。この温度固定部は絶縁材となるアルミナ (熱伝導率 32 W/(m K)) を仮定した。

ビーム照射点から 150 mm の深さで最高温度 90.2°C、コレクター表面温度は 84°C 程度となる。このビーム条件におけるファラデーカップの利用では、発熱による問題はないものと判断した。このため、冷却水によるコレクターの除熱機能は省略できる。なお、コレクターとアルミナの熱接触コンダクタンスは、真空内における界面であること考慮して 100 W/m<sup>2</sup>/K と与えた。

以上のことから、冷却水などを介したコレクターからの電荷漏洩は完全に無視できるので、実際の測定では、前節で述べた 1.8% の電荷損失のみを考慮し、この損失分の加算補正をおこなうこととする。

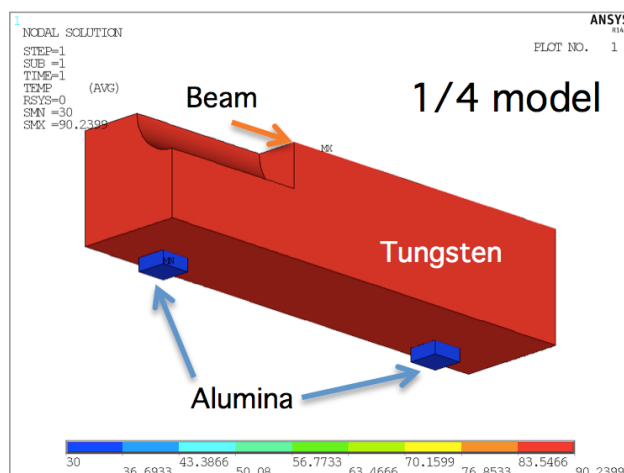


Figure 5: Thermal distribution of the collector in a condition of a total electron charge of 0.6nC with a 1.5 GeV beam energy at a 10 Hz repetition. The maximum temperature is 90.2°C at a depth of 150 mm from a beam collision point.

#### 2.5 可動式ファラデーカップの製作

設計指針と電荷損失・熱解析の評価結果を反映して製作したファラデーカップを Figure 6 に示す。コレクターは、タングステンが 95% 組成のブロック (アライドマテリアル社製 HM-7) を用いた。コレクター形状は 100 mm×100 mm×220 mm の直方体であり、ビームは φ25 mm で深さ 70 mm の開口部に入射される。総重量が 50 kg (サポートフレーム込み) のコレクターは、圧搾空気で駆動するアクチュエーターにより上下移動可能な構造となっている。また、この駆動機構にはコレクター移動・停止時の衝撃を緩和するためのダンパーを 2 箇所装備した。

ファラデーカップによるビーム電荷量の測定時以外は、コレクターがビーム軸外に移動し、加速器下流へのビーム輸送がおこなわれ、利用運転可能になる。このとき低エミッタンスビームに対して、真空容器内で構造体の非対称性によるビーム航行場の影響を最小限に抑えるため、ビームダクトと同様の内径をもつ φ22 mm のパイプをコレクター上部に設けており、そこをビームが通過することになる。

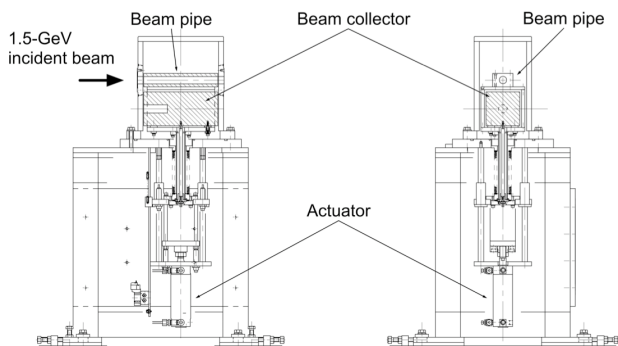


Figure 6: Schematic drawing of the movable Faraday cup. The material for the collector is 95% tungsten.

### 3. ビーム試験

#### 3.1 機器配置・電荷量測定系

最終段の磁気バンチ圧縮器後方に備えられている CT の校正をおこなうため、可動式ファラデーカップは、Figure 7 に示すように rf デフレクター空洞出口から 7 m 後方に設置した。その直前には、コレクターへ入射するビームサイズ、ならびにビーム位置確認のためのスクリーンモニターと校正対象となる CT が設置される。

コレクターに捕獲された電荷は、フィードスルーを介して電気信号として取り出され、120 dB のダイナミックレンジをもつピコアンメータ (KEITHLY 社製 6487 型ピコアンメータ) に入力される。コレクターと真空容器は電氣的に絶縁されており、電圧源を内蔵するピコアンメータから最大 500 V のバイアス電圧の印加が可能である。

コレクターとピコアンメータ間は 15 m 長の低ノイズ 3 軸ケーブル (KEITHLEY 社製) で接続される。

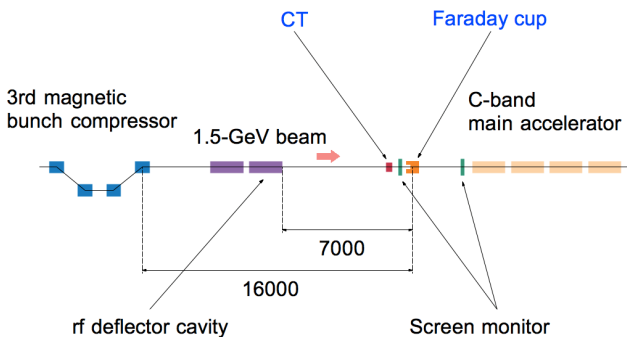


Figure 7: Faraday cup is installed between the 3rd magnetic bunch compressor and the main accelerating section, which consists of the C-band accelerating structures. In order to check the beam size and position, a screen monitor is installed before the Faraday cup. The non-destructive beam current monitor is installed in the front of the screen monitor.

#### 3.2 ビーム電荷量測定

ファラデーカップと CT のビーム電荷量比較測定に先立ち、コレクターに捕獲される電荷量について、バイアス電圧依存性、および入射エネルギー依存性を取得し、漏洩電荷量を評価する。また、ファラデーカップへビーム照射を続けた場合について、その動作、測定に関する健全性を確認する。

上記した測定では、通常の利用運転で設定されるビームパラメーターを用いた。ファラデーカップには、ビームエネルギーが 1.4 GeV、バンチ長が 20 fs (FWHM)、繰返し周波数が 10 Hz のビームが入射される。そのビーム電荷量は、0.3 nC 程度であるが、第 1 磁気バンチ圧縮器のエネルギー分散部にあるビームスリット開口幅で調整可能である。

コレクター外へ放出する漏洩電荷量の内、低エネルギー電子については、コレクターと真空容器との間にバイアス電圧を印加することで評価できる。バイアス電圧によるビーム電荷量特性とともに、入射

エネルギーによる依存性も併せて取得した。これらの測定結果を Figure 8 に示す。いずれのエネルギーにおいても ~300 V のバイアス電圧では電荷量への顕著な影響は観測されず、測定された電荷量変化は  $\pm 1\%$  内に抑えられており、コレクターの外部へ著しい電荷放出・漏洩は起きていないと推測される。

次に、ファラデーカップへの連続ビーム照射によるビーム電荷量安定度測定の結果と CT のビーム電荷量の時間推移を Figure 9 に示す。ピコアンメータのノイズレベルは 60 fC (SD) であり、これを差引いたビーム電流安定度は 0.2% (SD) である。ファラデーカップは、連続ビーム照射に対して問題無く動作し、また、周辺機器のノイズによる電荷量測定精度の劣化は無いことが確認された。

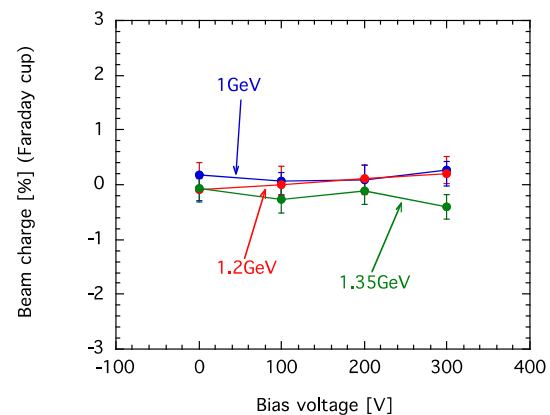


Figure 8: Charge dependence of the incident beam energy (1 GeV, 1.2 GeV and 1.35 GeV), as a function of the bias voltage fed into the Faraday cup.

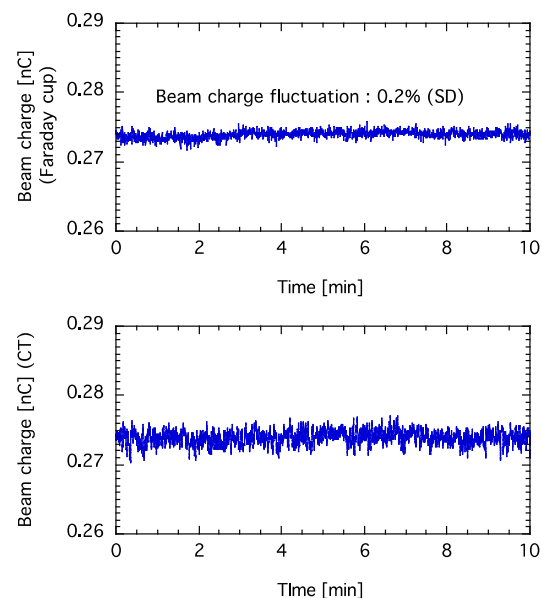


Figure 9: Beam charge stability measured with the Faraday cup and the non-destructive beam current monitor (CT).

Figure 10 は、ファラデーカップと CT の両方で計測されたビーム電荷量を示す。ファラデーカップで取得した電荷量に対して、CT では-12%の隔たりがあり、校正係数の修正が必要である。また CT の信号強度に対して、その後段にある増幅器の非線形性が現れていることも判明した。この非線形性補正については参考文献[7]を参照されたい。

この結果に基づく CT の校正係数を修正後、バンチの縦方向電荷分布測定を実施した。この結果、ピーク電流は 20 fs にわたって 3.5 kA 以上となっていることが確かめられた (Figure 11)。このことは規格化エミッタンスを  $0.7 \pi \text{ mm mrad}$  としたときのレーザー出力に関するシミュレーション結果と矛盾しない[8]。

このように、確度の高い測定により、ピーク電流が精度良く求まり、レーザー増幅に関するシミュレーション結果と実験の比較がより正確におこなうことができるようになった。

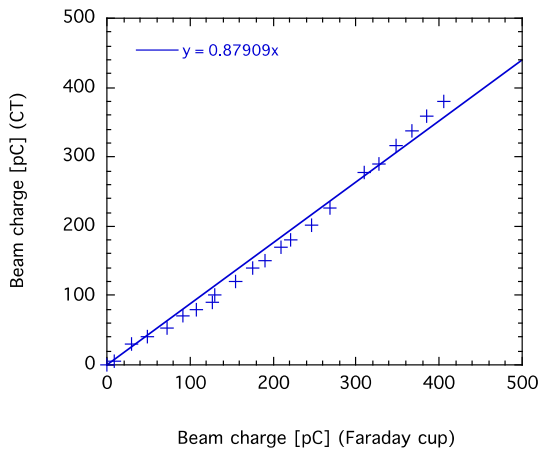


Figure 10: Comparison with the Faraday cup and the non-destructive beam current monitor (CT) for measurement of the short pulse beam after passing the 3rd magnetic bunch compressor.

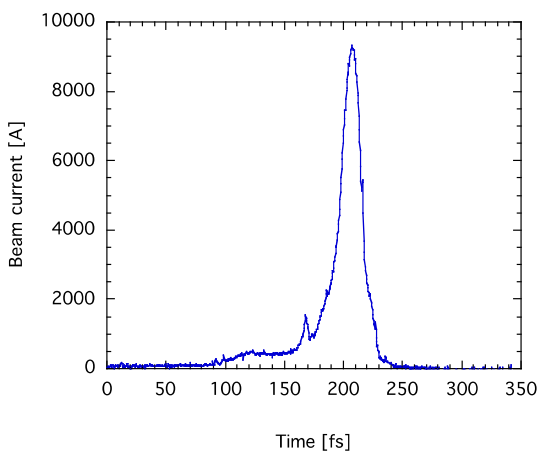


Figure 11: Longitudinal bunched beam-current in the longitudinal distribution of bunched beam.

#### 4. まとめ

極短バンチビームの縦方向電荷分布を把握するため、rf デフレクターと CT による同時計測をおこなっている。この CT の校正係数の健全性を確認するために、高確度で電荷量測定を可能とする可動式ファラデーカップを開発した。ファラデーカップの設計では、EGS5 によるエネルギー損失、ならびに電荷量損失の評価計算をおこない、コレクターサイズの最適化をおこなった。このシミュレーションに基づいて製作したファラデーカップを最終段磁気バンチ圧縮器の後に設置した。

ファラデーカップによるビーム電荷量測定結果 (バイアス電圧特性、入射エネルギー依存性) から、設計目標を満足し、 $\pm 2\%$ 以下の確度で測定できていると推測される。また、ファラデーカップと CT による比較測定から、CT は模擬パルス信号で得られた校正係数よりも-12%ずれていることが分かり、さらに CT の検出回路において、非線形特性をもつことが判明した。

ビーム試験結果を反映した CT の校正係数を修正後、取得されたバンチ内のピーク電流は、自由電子レーザー理論からの推定値と矛盾しないことが確かめられ、SACLA が設計通りの性能を発揮していることが確認された。

#### 参考文献

- [1] T. Tanaka, et al., "SACLA における光源性能評価と光源高度化", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012) p. 54.
- [2] H. Ego, et al., "Development of High Gradient Transverse C-band Deflecting Structure for the Diagnosis of Temporal Bunch Structure in the XFEL/Spring-8 "SACLA"", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] A. Higashiya, et al., "Development of a Beam Current Transformer for the X-FEL Project in Spring-8", Proceedings of FEL'07 (2007).
- [4] S. Matsubara, et al., "XFEL/Spring-8 "SACLA"用の高速差動 CT の特性", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011) p. 460.
- [5] H. Tanaka, et al., "XFEL/Spring-8 のバンチ長性能に及ぼす RF 機器変動の影響評価", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (2007) p. 613.
- [6] EGS5: <http://rcwww.kek.jp/research/egs/egs5.html>
- [7] S. Matsubara, et al., "SACLA の高速差動 CT システムの非線形応答の抑制", in these proceedings.
- [8] T. Ishikawa, et al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region", Nature Photon. 6, 540-544 (2012).