

# EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF CURRENT TRANSFORMER FOR ULTRASHORT BUNCHES

Takahiro Watanabe<sup>1,A)</sup>, Shigeki Sasaki<sup>A)</sup>, Takahiro Fujita<sup>A)</sup>, Hiroto Yonehara<sup>A)</sup>, Haruo Ohkuma<sup>A)</sup>  
Akira Sakumi<sup>B)</sup>, Toru Ueda<sup>B)</sup>, Kunihiko Miyoshi<sup>B)</sup>, Kohta Kanbe<sup>B)</sup>, Mitsuru Uesaka<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198 Japan

<sup>B)</sup> Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo

2-22 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka-gun, Ibaraki 319-1188 Japan

## Abstract

An integrated current transformer is supposed to give an electron charge of a passing bunch irrespective of the bunch duration. However, it has been challenging to experimentally verify its validity in femtosecond regime. In fact, the reliability of bunch charge measurement for femtosecond bunches has been discussed in the plasma acceleration field, both positive and negative results having been shown. At the SPring-8, the verification of the reliability is as well required, since femtosecond bunches will be generated and transported through the transport lines in near future. Here we report on our experimental characterization of the integrated current transformer for femto- to pico-second bunches using a 18 MeV linac with a chicane-type bunch compressor of the University of Tokyo.

## Current Transformerの極短バンチ応答試験

### 1. はじめに

電流量／電荷量の非破壊計測器として広く用いられているCurrent transformer (通称CT) は、SPring-8でも以前より用いられ、蓄積リングおよびビームトランスポート系などにおいて通過電流の測定に供されている。例えば、蓄積リング内ではDCタイプのCT (DCCT) およびIntegrated CT (ICT) によって電流量／電荷量を測定し、Booster Synchrotronから蓄積リングへの輸送系 (SSBT、Synchrotron-to-Storage ring Beam Transport line) には、入射効率を計測し、インターロックにも用いられるためのIntegrated CT (ICT) が設置されている。

一方、文献[1]にも紹介されている通り、現在SPring-8サイトではXFELの建設が進み、また蓄積リング側も次期計画が進行している。このような背景のもと、将来、輸送系SSBTをフェムト秒の極短バンチが通過することが予想される。上記に示した通り、CTによる電荷量計測は単なるモニターのみでなく、インターロックにも用いられているため、その信頼性の確認は必須であるが、我々の調べた限り、フェムト秒バンチに対して実験的にその信頼性を確認したデータは希少である。原理的にはICTはバンチ長に依存しないが、実験的なEvidenceが欲しいのは言うまでもない。

この点は、フェムト秒バンチ発生を行っているプラズマ加速の分野でも指摘され、実際、各国のプラズマ加速施設において、CTのフェムト秒バンチ応答試験が行われている。ところが、ヨーロッパのグループでは「CTは短バンチに対して過大な電荷量を

出力する」という結果が得られ<sup>[2]</sup>、一方アメリカでは「CTは正確な電荷量を出力する」という結果が得られ、筆者の知る限り、未だこの議論に決着はついていない。その背景として、プラズマ加速は1GeVとエネルギーが高いためにビームキャッチャーが容易に使えないこと、エネルギー幅が広いこと、ショット毎の揺らぎが小さくないことなどが挙げられる。

以上のような背景から、我々は、安定なRF加速器から発せられる電子バンチを用いてICT計測を行い、その信頼性を確認する試験を行った。実験は、以前より極短バンチ発生・計測を行っている東京大学ライナック (東海村) を利用した。本ライナックは、実験中にフェムト秒ストリークカメラ (浜松ホトニクス, FESCA-200) によるバンチ長同時計測が行えること、そして20MeVという低エネルギーのため、信頼性の高いビームキャッチャーによる電荷量計測が容易であることが本研究にとっての特長である。

### 2. 実験

#### 2.1 Integrated Current Transformer

現在、蓄積リングおよびSSBTに設置されているICTはBergoz Instrumentation社のものである。本実験も、同社のICTを対象に行った。今回使用したのはout-of-flangeタイプのもので、Pulse charge to output ratioは5:1、時定数は70nsのものを用いた<sup>[3]</sup>。なお、これらのスペックは、現在蓄積リングで使用されているICTとは多少異なる。

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

まず、LinearityおよびOff-center position sensitivityについては、既にBergoz社およびコーネル大学CESRにて計測され、ともに0.1%以下の誤差であることが確認されている<sup>[3]</sup>。そこで、この2点については本実験の対象からは外し、バンチ長依存性について試験するものとする。

ICTは、原理的には、入射バンチ長に依らない。なぜなら、コア部に設置されたコンデンサにより、通過電子によって励起された場は一旦このコンデンサに蓄積され、その時定数に従ってゆっくり出力を出すからである。しかしながら、短バンチ応答に関しては、実験的検証は希少であり、上述のように現在検証中であると言える。

## 2.2 実験手法

実験を行った東京大学ライナック（東海村）は、2本のLinacを有し、以前より極短電子バンチの発生・計測研究を行っている。

2本のうちの1本は35MeV Linacであり、熱電子銃、Sub-harmonic buncher (SHB)、加速管、およびArc-typeの磁気バンチ圧縮器から成る。もう1本の18 MeV Linacは光陰極RF電子銃、加速管、およびChicane-typeの磁気バンチ圧縮器から成る。

我々は、1ピコ秒以下のバンチに対するICTの応答を計測するという目的から、RF電子銃を有する18MeV linac（以下18L）を選択し、実験を行った。

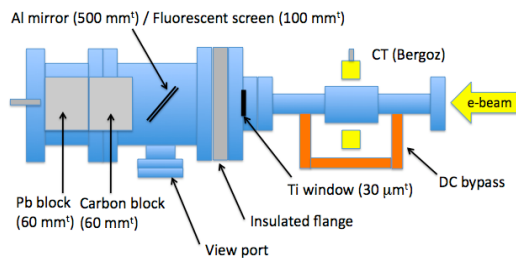


図1 実験セットアップ

18LのChicane-type圧縮器下流約2メートルのところに、図1に示す通りICTおよびビームキャッチャーを設置した。このICTはOut-of-flange型であるため、その内側にセラミックで切られた真空チェンバを設置し、両端をDC bypassした。図2は、ICT用フランジ（コア抜き）およびDC bypassの写真である。

ICT用真空チェンバの下流には厚さ30 $\mu\text{m}$ のチタン窓を配置し、その下流にはチェレンコフ光を発生させるためのガスチェンバを配置した。従って、このチタン窓は真空とガスとを仕切る役目を果たす。

ガスチェンバ内にはCO<sub>2</sub>ガスを封入し、18MeVでもチェレンコフ光を発するよう、屈折率を上げた。

チェレンコフ光は厚さ500 $\mu\text{m}$ のアルミ蒸着ミラーによって反射され、光学系によってストリークカメラに導かれた。また、上記アルミミラーの背面には

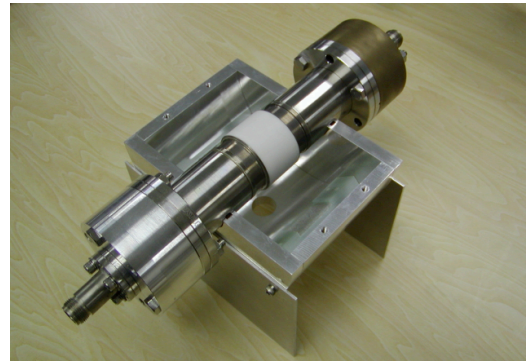


図2 ICTチェンバおよびDC Bypass（コア抜き）

アルミナ蛍光版（Desmarquest, AF995R）が付いており、これを180度回転することでビームポジションをCCDカメラによって計測出来るようになっていた。

18MeVという低エネルギーを生かし、アルミミラー／蛍光版の直下流10mm（ガスチェンバ内）に、ビームキャッチャーを設置した。このビームキャッチャーは60mm厚のカーボンブロックおよび60mm厚の鉛ブロックから構成されており、ガスチェンバのSUSフランジと一体型になっている。更に、このチェンバ自体（ターゲット含）がLinacのダクトとは絶縁されていることで、上記一体型のビームキャッチャーの出力から電荷量を計測する仕組みになっている。なお、20MeV電子に対するカーボンおよび鉛のRadiation lengthはそれぞれ188mm、5.6mmとなっており、カーボンである程度Attenuateされた電子が鉛ブロックによって確実に止められると考えられる。

実験の手順は以下の通りである。18Lを調整し、バンチ長を20psから1ps以下まで調整する。各バンチ長に対し、ICTとビームキャッチャーで電荷量を測定する。ビームキャッチャーは電子バンチ長に依存しないとされるため、これをReferenceとし、ICTのバンチ長依存性を評価する。ICTおよびビームキャッチャーの出力は、オシロスコープ上で積分を行い、そのインピーダンスから電荷量を計算する。

この電荷量計測の間、併行してストリークカメラによるバンチ長の同時計測も行う。

## 3.3 実験結果

図3に、ストリークカメラにて計測されたバンチ分布を示す。実際の実験では、各バンチ長に対し、5~10ショット程度のバンチを計測し、その半値幅の平均値からバンチ長を定義した。本実験では、バンチの非対称性、Fine structure等は研究対象外であるため、上記のような手法によりバンチ長の概算を行った。

図3は、各バンチ長においてICTとビームキャッチャーによる電荷量測定の結果

$$Ratio = \frac{ICT}{Beam\ catcher} = \frac{\int V_{ICT}(t)dt/R_{ICT}}{\int V_{BC}(t)dt/R_{BC}} \quad (1)$$

を取ったものである。式(1)の  $R_{ICT}$ 、 $R_{BC}$  はそれぞれICTおよびビームキャッチャーの計測インピーダンスであり、本実験では共にオシロスコープの50オーム入力を用いた。

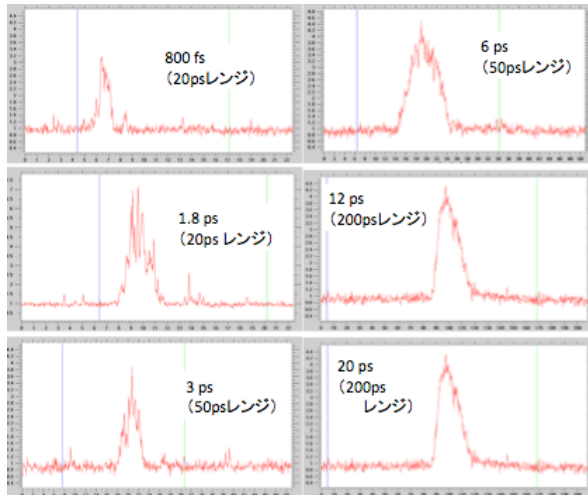


図3 ストリークカメラによるバンチ長計測

図4の横軸は、ストリークカメラによって計測されたバンチ長であり、計測結果からストリークカメラ入力スリットサイズ分をDeconvolutionした値になっている。図からわかる通り、校正後のバンチ長が半値幅800fsから20psとなる範囲で電子バンチ長を変化させて計測を行った。

縦軸は、式(1)に示されるようなRatio=ICT/Beam catcherとなっている。実際の計測ではこのRatioを100ショット取得し、平均値をプロットしている。エラーバーはPeak-to-peakの値を示している。

実験中の電荷量は常に300pC/bunch程度となるようビームを調整した。なぜなら、バンチ長を変える際に電荷量が大きく変動すると、Linearityの影響も結果に含まれるためである。バンチ長を変える度にRFガンに照射するUVレーザーのエネルギーを調整し、電荷量が300pC程度となるようにした。

この図から、まずバンチ長に依らず、Ratioはほぼ一定になっていることがわかる。計測精度の誤差から生じる凹凸は確認できるが、バンチが短くなるほどRatioが大きく、あるいは小さくなるような現象は一切見られなかった。

また、Ratioの絶対値が1.04±0.02と、「1」に非常に近いことがわかる。つまり、ICTによる電荷量出力の絶対値と、Beam catcherによる計測の絶対値がほぼ同じであると言える。4%の違いの原因については、電気信号伝送系におけるロスの違い、受け側の

インピーダンスの違い、高周波ノイズが積分計算に与える影響の違いなどが考えられる。これらは、全て実際に用いられる環境で決まる。

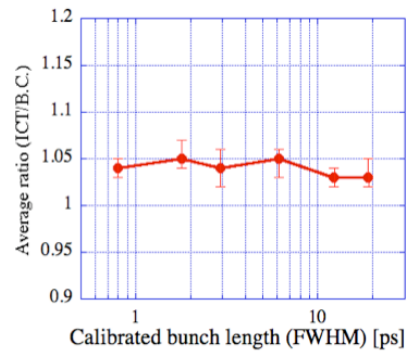


図4 ICTバンチ長依存性計測結果。エラーバーはPeak-to-peak。

以上より、我々が用いたICTが半値幅800fsから20psまで（ガウシアン分布仮定でRMS値としては340fsから8.5psまで）でバンチ長依存性を持たないこと、更にもその絶対値はBeam catcherの示す値と数パーセントの誤差の範囲で一致していることがわかった。

## 6. まとめ

Integrated Current Transformer (ICT) のバンチ長依存性について、半値幅800fs～20ps (RMS 340fs～8.5ps) の範囲で実験的検証を行った。その結果、上記範囲においてICTがバンチ長に依存しないことを確認した。更に、ICTの出力の絶対値がビームキャッチャーの出力絶対値と比べ4%の範囲で一致することを確認した。4%の差は環境ノイズが原因であると考えられる。

本研究で得た知見は、冒頭でも述べた通り、プラズマ加速をはじめとする将来の短バンチ発生分野にとっても有益であると考えられる。

## 謝辞

高嶋武雄氏、小林和生氏（ともにJASRI）には、実験における計測機器の調整および議論の場で協力を頂きました。青木毅氏（JASRI）には現状のCT計測に関する情報をいただきました。室屋裕佐氏をはじめとする勝村庸介研究室（東京大学）の方々には、実験ライン確保の際にご協力いただきました。ここに感謝致します。

## 参考文献

- [1] T. Watanabe et al., this proceedings.
- [2] <http://www.bergoz.com/products/ICT/ICT.html>
- [3] Y. Glinec et al., Rev. Sci. Instrum. **77**, 103301 (2006).