

HIGH-SPEED DIFFERENTIAL CURRENT-TRANSFORMER MONITOR FOR SACLA OF XFEL/SPring-8

Shinichi Matsubara ^{#,A)}, Hirokazu Maesaka ^{B)}, Shinobu Inoue ^{C)}, Hiroyasu Ego ^{A, B)}, and Yuji Otake ^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

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

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd.

1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo, 679-5165

Abstract

The XFEL, which was named SACLA, was constructed in the SPring-8 site. In the SACLA, the bunch length of an electron beam is compressed from 1 ns to 30 fs, and the beam charge is decreased from 1nC to 0.3 nC for lasing. A new current-transformer (CT) monitor was developed for the two purposes: one is to measure the charge of the electron beam and the other is to obtain the bunch length in velocity bunching process. The CT monitor has differential outputs and generates high-speed signals. The differential output-signal suppresses common-mode noise from the klystron modulator by a factor of ten. The CT has a sensitivity of 1 pC and a dynamic range of 1 nC. High-speed output-signal, which has the shortest rise-time of 200 ps and the shortest pulse width of 400 ps, is able to measure the bunch length and the time-of-flight at the injector part of the SACLA. Thus, the new CT performance was confirmed to be sufficient for the SACLA.

XFEL/SPring-8 “SACLA” 用の高速差動 CT の特性

1. はじめに

SPring-8 サイト内に建設された XFEL 施設 “SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)” が本年、運転を開始した^[1, 2]。この SACLA のために、新規に差動 Current Transfer (CT) を開発し^[3, 4, 5]、電荷量のモニターに使用している。

この施設ではクライストロンなどの高電圧スイッチングデバイスからのノイズが大きく、モニター装置からの信号を精確に測定することが難しい。さらに電荷量だけでなく、安定な XFEL レーザ光を得るために、加速器上流部での速度変調バンチングによるバンチ長やエネルギーをモニターすることが求められている。SACLA では、熱電子銃から出射された電子ビームから、ビームチョッパーによって 1 ns を切り出し、入射部における速度変調バンチングと 3 段によるシケイン・バンチコンプレッサーにより数 10 fs まで圧縮される。特に数 MeV 以下の非相対論領域のビームに速度変調を与える入射部での僅かなバンチ長やピーク電流への変動が、X 線レーザ発振の特性に大きく影響を与える。そのために、入射部において非破壊でバンチ長とピーク電流を常にモニターすることが重要である。

本高速差動 CT において、これらの要求を実現している。クライストロンノイズなどからのノイズを低減でき、入射部での速度変調バンチングの様子をモニターすることができている。そして、2 台の差動 CT 間の飛行時間を測定することで、電子のエネルギーもモニターできる。

SACLA には、31 台の差動 CT を製造し、据え付け、動作をしている。本稿では、高速差動 CT の構成、特性について報告をする。

2. 高速差動 CT モニターの概要

新規に開発を行った CT の外観を図 1、組み立て構成を図 2 に示す。本 CT はセラミックダクトを用いて CT モニター本体と真空ビームダクトとを切り離している。そのセラミックの外側にフェライトコアを配置している。このコアの材質は高周波でも使うことのできるファインメット^[6]を使用している。このフェライトコアには一巻きしたピックアップコイルを 2 対、電子ビームを軸に直交、対向するように配置している。このリード線を 40 mm と極力短くすることにより、早い出力信号が得られるように努めた。また、このコイルに SMA コネクタを接続しており、対を成す端子において出力信号が正と負の信号が出力されるようにしている。この符号の違う対を成す信号を差し引くことにより、差動信号を形成している。CT 本体のアルミニウムケースと真

[#] matsubara@spring8.or.jp

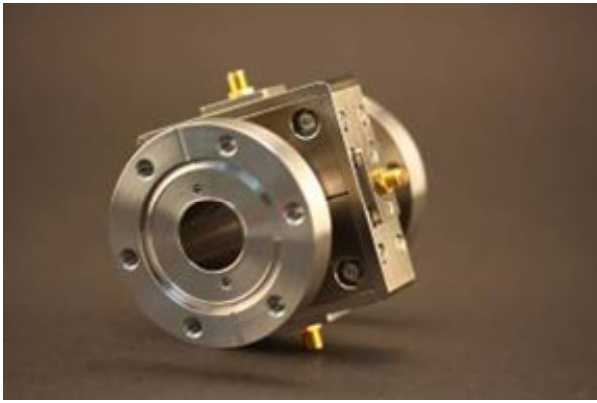


図 1: 高速差動 CT の外観写真

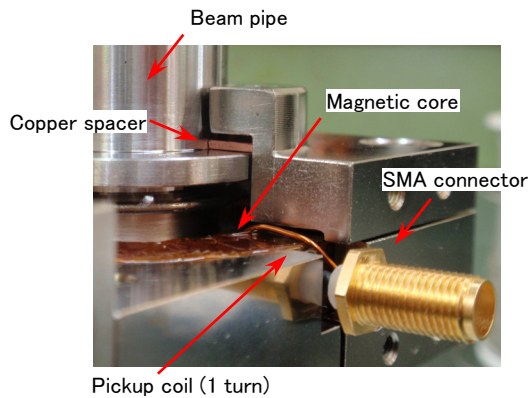


図 2: 高速差動 CT の構成

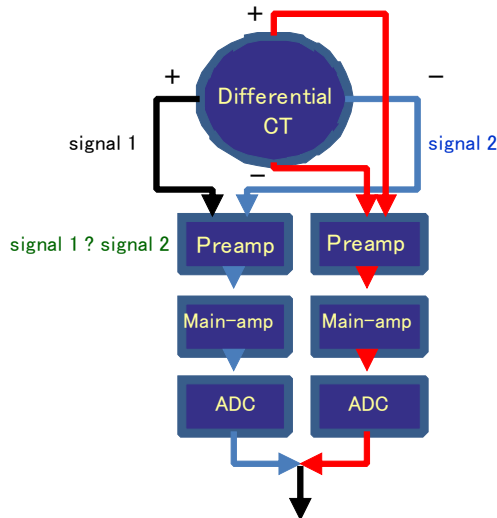


図 3: 高速差動 CT システムの構成

空ダクトとの電気接続を良くするため銅のスペーサを挟んで組み立てている。SMA コネクタのグラウンドも、アルミニウムケースと接触させることにより、

出力信号の減衰を早くし、出力信号のうねりを抑えることができた。

CT 本体から出力される信号は、2 段の増幅回路を通して、VME の波形記憶 AD ボードによって読み取られる。CT システムの構成を図 3 に示す。最初のプリアンプ回路は、CT 本体から 2 m の同軸ケーブルで接続され、対を成す差動信号を差し引いている。CT の信号は、プリアンプを通ったあと、加速器収納部からクライストロンギャラリーに設置された後段のメインアンプまで運ばれている。初段のプリアンプから後段のメインアンプ間、メインアンプから AD ボードまでの伝送路も差動信号で伝送をすることにより、外部環境からのコモンノイズを低減できるように努めている。また、本 CT からの信号は、400 ps と高速な信号のため AD ボードで読み取ることができない。そこで、この 2 段のアンプ回路によって、信号パルス幅を広げている。プリアンプ後で 15 ns、メインアンプ後で 50 ns までパルス幅を広げることにより、サンプリングクロックが 238 MHz の AD ボードによって信号を読み取ることが可能とした。電荷量の測定値は、直交する 2 対の差動信号を足し合わせたものから換算する。これにより電子ビーム軌道による信号強度の変動を低減できると考えている。

特に、加速器最上流に設置した 2 台の CT は、アンプ回路を介さない生信号もクライストロンギャラリーに伝送している。この信号を、12 GHz の高速オシロスコープで測定をすることによりサブナノ秒域の電子ビームバンチ形状を測定している。

3. 高速差動 CT モニターの動作特性

3.1 電荷量特性

XFEL/SPring-8 プロジェクトは、SACLA の建設を行う前に、コンセプトマシンである試験加速器の建設を行い SACLA のための新規開発機器のテストを行った。図 4 に代表的な CT からの差動信号波形を示す。信号の立ち上がり時間が 200 ps であり、パルス幅が 400 ps 程度である。このとき測定をした電子ビームのバンチ長は 200 fs 以下の十分に短いものである。本 CT は、ナノ秒以下の高速な応答性があることがわかった。図 5 に、差動信号によりクライストロンなどのコモンモードノイズを差し引いた様子を示す。コモンモードノイズを 10 分の 1 に小さくすることができた。これにより、SACLA では 1 pC の暗電流も測定することができている。

試験加速器において測定をした電荷量と CT システムの出力を図 6 に示す。CT からの出力を 2 段のアンプ回路を通して、AD ボードで読んだものである。電荷量に線形応答をしており、この測定結果をもとに SACLA においても電荷量の測定ができています。SACLA の 2 台目のシケイン・バンチコンプレッサー以降の CT プリアンプにおいて、電荷量が

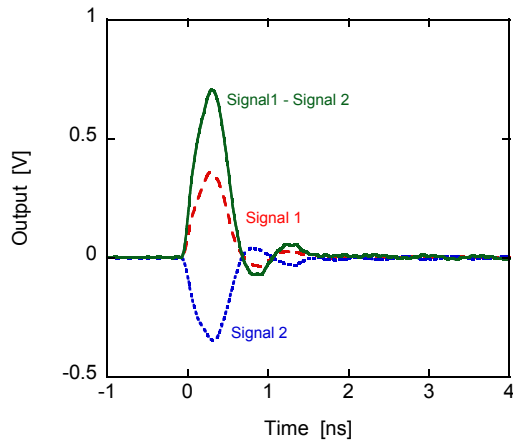


図 4：高速差動 CT からの出力信号波形

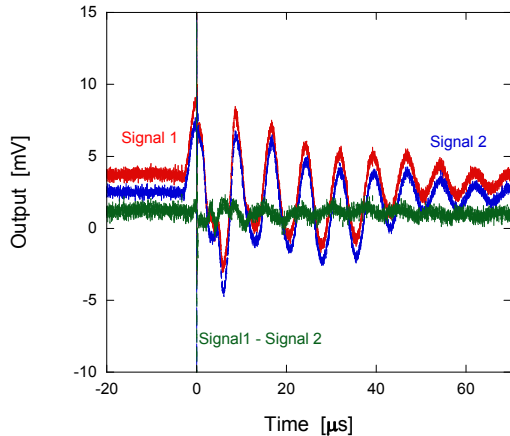


図 5：高速差動 CT の環境ノイズ

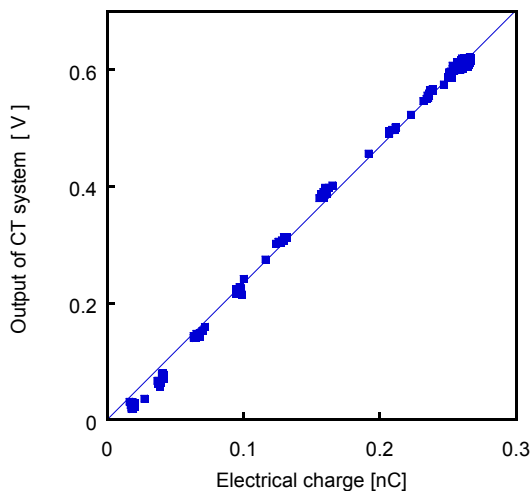


図 6：高速差動 CT システムの電荷量依存性
試験加速器において、計測

多くなると出力飽和が起こる問題があった。これは、電子バンチ長が短くなり、CT 出力の高い周波数成分が増えたため、プリアンプ回路の初段アンプが不安定になっていると考えられる。これは試験加速器での開発段階から知られていた問題であり、プリアンプの入力に減衰器を追加することで、線形なダイナミックレンジを確保することとした。

SACLA において本 CT で測定された値は、電子ビームの輸送や、ピーク電流値を算出する電荷量に用いられている。

3.2 時間応答特性

SACLA の入射部において、本高速 CT を用いて、非破壊にバンチ長とピーク電流を常にモニターする。入射部の加速空洞と CT のセットアップを図 7 に示す。238MHz サブハーモニックバンチャー (SHB) 下流の CT (CT-238) と、1428MHz 補正空洞下流の CT (CT-476) の 2 個の出力は、プリアンプ入力前で分岐し、定常的なビーム電荷量の測定用以外に出力信号を直接観測できるようにしている。入射部の 238 MHz SHB の RF 電力を変化させた時の本 CT からの出力信号のパルス幅とピーク値を図 8 (a) と (b) に示す。RF 電力が大きくなるに従って、速度変調バンチングによってバンチ長が短くなり、ピーク電流が大きくなる様子が測定できた。特に、バンチャー空洞から 2 m 下流の CT-476 は、顕著にバンチ長の変化を観測できた。また、測定できるバンチ長の限界は、試験加速器において確認されている 400 ps と一致した。

図 8 (a)において、CT-476 の信号のパルス幅は SHB 空洞励振電力が 4 ~ 6 kW の時、400 ps の測定限界でほぼ一定の値になったが、図 8 (b)で示す出力信号のピーク値は SHB 電力に対してさらに細かい反応を示していることが確認できる。つまり、本 CT ではピーク電流値を測定することにより、電子ビームのバンチ長の 400 ps 以下の変化を直接測定できることがわかった。また、CT からの信号ピーク電圧がバンチングに従い大きくなるが、アンプ回路を通した CT システムからの信号つまり電荷量には大きな変化なく測定できている。238 MHz SHB の RF 電力を更に大きくしていくと、CT-476 からのピーク電流値が低下した。このとき、CT システムからの信号も小さくなり、実際に電荷量が CT-476 手前で喪失していると考えられる。このときビームはオーババンチングの条件となっており、図 9 に示すように CT の出力信号からもパルスが 2 つに分かれるなどのバンチの様子が観測できた。

また、CT-238 と CT-476 の出力信号の立ち上がり時間の差を測定することにより、2 つの CT 間の Time-of-Flight (TOF) を測定できる。電子銃の電圧値を変動させたときの TOF の測定結果を図 10 に

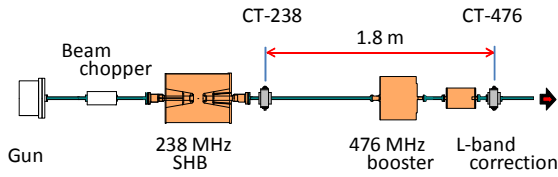


図 7: SACLA での入射部における CT の配置

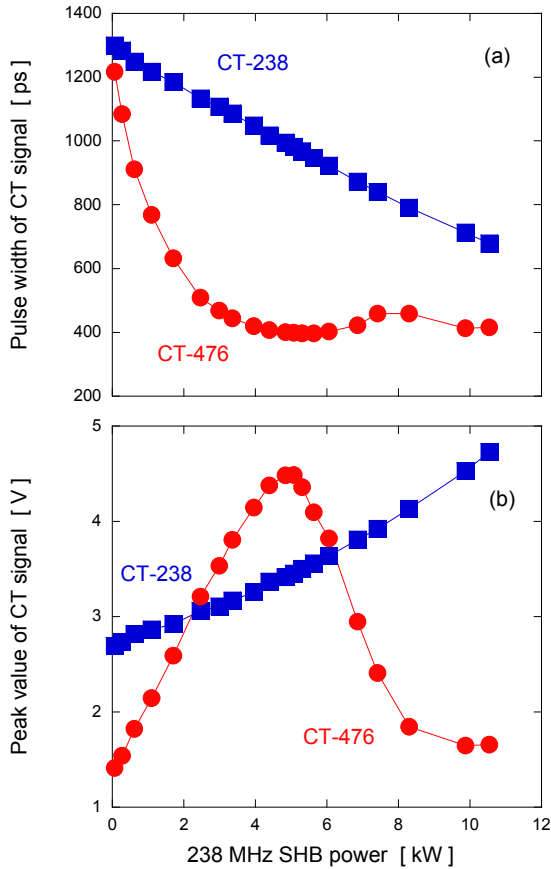


図 8: 高速差動 CT 信号の 238 MHz SHB の RF 電力の依存特性, (a) 出力信号のパルス幅 (FWHM), (b) 出力信号のピーク電圧値

示す。電子銃の高電圧が増加し、電子ビームの速度が増加するにしたがって TOF が短くなっている。

本 CT により、ビームの電荷量の測定以外にも、ピーク電流と 400 ps までのバンチ形状を直接測定観測することができた。特に、CT-238 では、十分に 238 MHz SHB によるバンチ長とピーク電流の変動とビームチョッパーによる電子ビームの切り出しの様子をモニターすることができる。

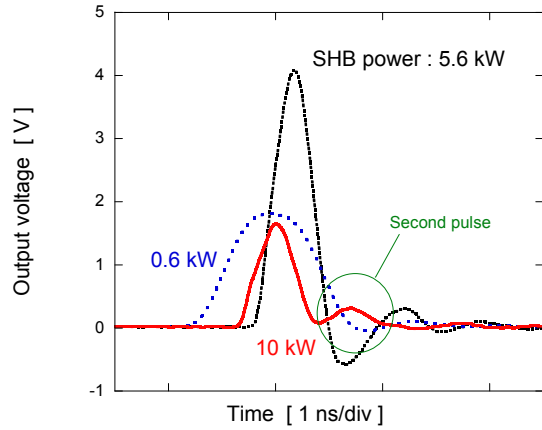


図 9: CT-476 の出力波形, 青破線: SHB 電力が、0.6 kW の時の出力波形, 黒点線: SHB 電力が、5.6 kW の時の出力波形, 赤実線: SHB 電力が、10 kW の時の出力波形

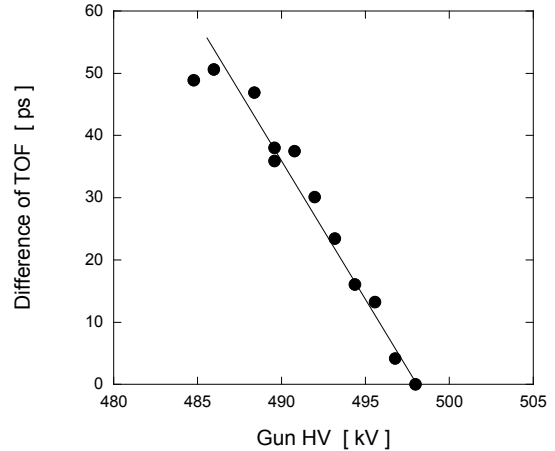


図 10: 電子銃電圧による CT 間による Time-of-Flight (TOF) の変動。電子銃電圧 498 kV の TOF の値を 0 として、TOF の変動を示す

4. まとめ

XFEL 施設 SACLA のために高速差動 CT を設計、製作、設置して使用している。本 CT は、4 つの信号出力ポートを備え、2 対の差動信号を成している。これによりクライストロンなどの高電圧スイッチング機器がある環境において、ノイズを低減した CT システムによって電荷量を測定することができ、1 pC の暗電流の測定も可能となった。SACLA には、本 CT を 31 台、加速器に沿って設置して、電子ビームの輸送の確認やピーク電流値の算出に用いられている。また、CT からの生信号波形は、最短立

ち上がり時間 200 ps、パルス幅 400 ps の時間応答性がある。これにより、非相対論領域での速度変調バンチングを行う入射部において電子ビームバンチ形状やピーク電流値を直接モニターすることができている。現在レーザ発振をしている SACLA の更なる安定化には、上流に位置する入射部の安定化が重要であり、そのためには電子ビームの状態を観測できる高速 CT モニターが貢献できる。今後、CT モニターからの信号をもとに、フィードバック制御などを行っていく予定である。

参考文献

- [1] H. Tanaka, "Operation status of X-ray FEL facility SACLA at SPring-8", in these proceedings.
- [2] Y. Otake, "Commissioning and performance of the instruments for XFEL/SPring-8 accelerator "SACLA"", in these proceedings.
- [3] A. Higashiya *et. al.*, "Development of a beam current transformer for the X-FEL Project in SPring-8", Proc. of FEL'07 (2007).
- [4] H. Maesaka *et. al.*, "Beam diagnostic system of XFEL/Spring-8", Proc. of the DIPAC'09 (2009).
- [5] H. Maesaka, *et. al.*, "Commissioning and performance of the beam monitor system for XFEL/SPRING-8 "SACLA"", in these proceedings.
- [6] http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod0/p0_8.html