

SPring-8 極短バンチモニター開発テストベンチ TESTBENCH FOR ULTRA-SHORT BUNCH MONITOR AT SPRING-8

谷内 努[#], 鈴木伸介, 出羽英紀, 富澤宏光, 水野明彦, 花木博文
Tsutomu Taniuchi[#], Shinsuke Suzuki, Hideki Dewa, Hiromitsu Tomizawa, Akihiko Mizuno, Hirofumi Hanaki
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

Abstract

Since last year, SPring-8 RF gun testbench has been rebuilt for an R&D of an ultra-short bunch monitor using EO sampling, designed to measure a bunch length of 30-40 fs with a charge of 0.1-0.2 nC per bunch. A single-cell RF gun cavity was replaced with an independent two-cavity system and a 1.4 m-long and a 1.2 m-long accelerator structures were installed for upgrading the beam energy to 85 MeV. The later structure is used as an energy modulator for bunch compression. In order to provide RF power for these cavities, an RF power compressor (SLED) was installed downstream of an 80 MW klystron. After an RF conditioning, a beam commissioning is planed in August 2013.

1. はじめに

SPring-8 II 計画における X 線回折限界リングへの入射に必要な基礎技術の確立を目的とし、SACLA 加速器からの数 10fs の電子ビーム（極短バンチビーム）を非破壊で 3 次元リアルタイム・モニタリングできる EO サンプリング法を用いたバンチモニターの開発が進められているが、SPring-8 の RF 電子銃試験装置を本バンチモニターの開発テストベンチとして利用するための改造が昨年度から始まった。RF 電子銃空洞をマルチセル空洞に変更し、ビームエネルギーを改造前（単空洞）の 3.8MeV から 6MeV（あるいは 10MeV）へ上げ、高電界加速管により 85MeV（現状 30MeV）まで加速してバンチ圧縮系を通過させてバンチモニター直前で数 10fs のバンチ長を得る予定である。改造のため設置された主な機器は、RF パルス圧縮器（SLED）、2 空洞式 RF 電子銃、高電界加速管、シケイン電磁石などである。本稿では、バンチモニター開発テストベンチの概要、主要機器、ビームシミュレーション、RF コンディショニング等について報告を行う。

2. EO サンプリング方式 3 次元バンチモニター

本テストベンチで開発を進めるバンチモニターは、電気光学(EO)結晶のポッケルス効果（1 次の EO 効果）を利用した 3 次元バンチ形状モニター^{[1], [2]}で、SACLA で生成される 0.1~0.2 nC / bunch でバンチ長 30~40 fs (FWHM)の極短電子バンチのリアルタイム観測を目標としており、SPring-8 RF 電子銃試験装置のバンチ長約 10 ps のビームを用いて実証実験^[3]が行われた。Figure 1 に本モニターの構成概念図を示す。この実証試験では、使用できるバンチ長の制約から、通常の EO サンプリングで使われる ZnTe を用いて実施した。結果として、3 次元バンチ計測の原理実証に成功した。しかし、目標とする数 10 fs の時間

分解能の実現には、有機 EO 結晶の DAST で計測系を構築する必要がある。DAST での EO サンプリングの計測は、別途 SCSS 試験加速器の FEL 発振用短バンチにて試験を行い、世界初の実証試験に成功した^[3]。現在、その高時間分解能プローブのための 1 オクターブ光源と線形チャープ自動最適化システムを本 RF 電子銃試験施設に構築中である。

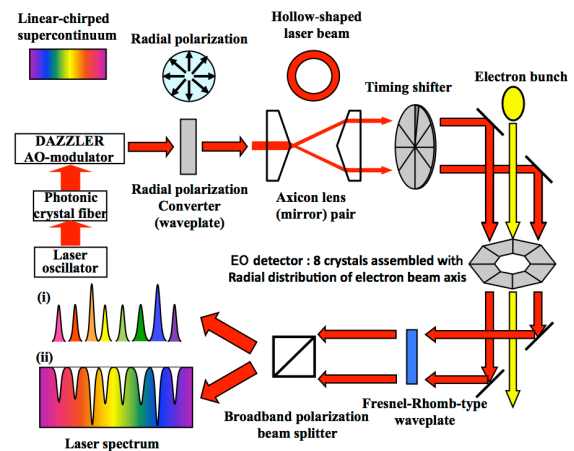


Figure 1: Configuration of 3D bunch monitor.

3. テストベンチの機器構成

3.1 大電力 RF 源

従来の SPring-8 RF 電子銃試験装置^[4]は、単空洞の RF 電子銃及び 3m 加速管によるビーム加速を行っており、最大加速エネルギーは 30 MeV であった。今回、バンチモニターのテストベンチとして極短バンチビームを発生しビームエネルギーを 85 MeV まで増強する予定であるため、独立 2 空洞式 RF 電子銃及び 1.4 m 加速管、1.2 m エネルギー変調管を設置した。それに必要な RF パワーを得るため、80 MW クライストロン (Toshiba E3712) 出力 (パルス幅 4 μ s) を SLED ($\beta=8.3$) によりパルス圧縮 (パルス幅 1 μ s)

[#] ihcuinat@spring8.or.jp

し、それぞれの空洞に分配する大電力立体回路を構築した。Figure 2 に回路構成を示す。

RF 電子銃試験装置は本バンチモニターテストベンチの他、カートリッジ式カソード RF 電子銃及び各種 RF コンポーネント大電力試験ラインへも RF を供給する必要があるため 2カ所に真空導波管切替器¹⁵⁾を設置しており、実験・試験に応じて RF パワーの供給先を短時間で切り替え可能になっている。

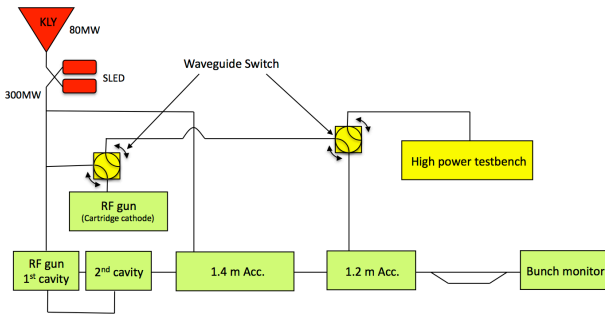


Figure 2: Configuration of high power RF circuit.

3.2 フォトカソード RF 電子銃

SPring-8 RF 電子銃試験装置における RF 電子銃空洞は単空洞の低 Q 値として設計され、カソード面電界 190 MV/m を達成しているが、電子銃から加速管への輸送途中でのバンチ伸張を減らすため、電子銃から出力されるビームエネルギーを 6 MeV に上げる必要がある。このため、独立 2 空洞 RF 電子銃を設置し、第 1 空洞からダミーロードへ出力される RF パワーを第 2 空洞へ供給する回路構成とした。第 1-第 2 空洞中心間距離は 102.9 mm である。RF 電子銃第 1 及び第 2 空洞に置けるエネルギー利得及び最大加速電界強度は、それぞれ 3.2 MeV @ 138 MV/m、2.7 MeV @ 122 MV/m の設計である。また、RF 電子銃のビームエネルギーを 10 MeV 程度まで上げるとバンチ伸張をさらに抑えられるとのシミュレーション結果から、2.7 セル RF 電子銃空洞の設計・試作を進めており、本年度中に実機を製作する予定である。

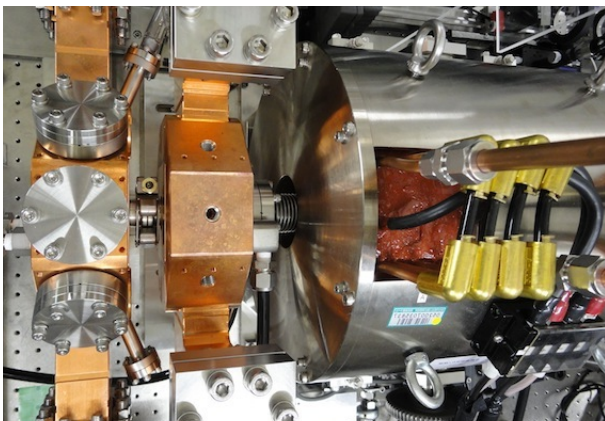


Figure 3: 1st and 2nd cavity of RF gun.

3.3 加速管

本テストベンチに設置された加速管 (1.4 m 加速管及び 1.2 m エネルギー変調管) は、SPring-8 線型加速器における暗電流低減を目的として開発された低暗電流加速管¹⁶⁾の設計をベースに、ビーム形状およびエミッタンスの対称化のためカプラー部がダブルフィード化されている。主なパラメータを Table 1 に、内部構造と設置状況を Figure 4 に示す。

Table 1: Parameters of accelerating structures.

Frequency	2856 MHz
Accelerating Mode	Traveling wave $2\pi/3$ mode
Coupler	Double-feed waveguide coupler
Iris diameter (2a)	20 mm
Coupler iris diameter	39.6 mm
Disk thickness	5 mm
Iris shape (cross section)	Ellipse
(Major / minor radius)	(4.0 mm / 2.5 mm)
Group velocity v_g/c	0.01
Number of cells	33 / 27
Total length	1365 / 1155 mm
Filling time	415 / 340 ns
Operation temperature	30 °C

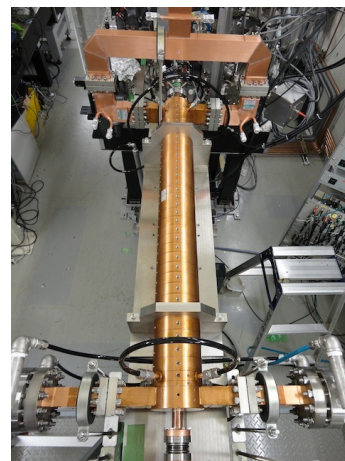
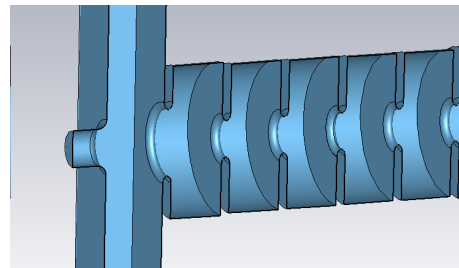


Figure 4: Accelerator structure with double-feed coupler. (upper: inside structure, lower: installed acc.)

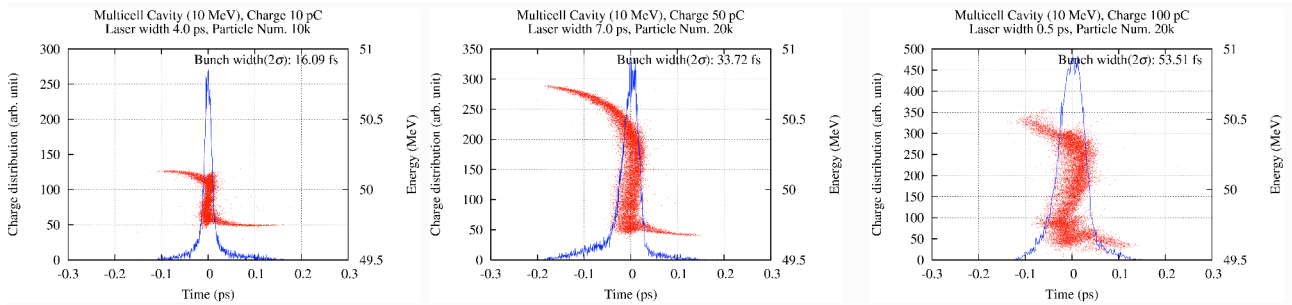


Figure 5: Simulation for bunch compressor.

低暗電流加速管の特徴としては下記の2点が上げられる。

- ディスク部アイリス近傍の表面電界強度を低減させるため、アイリス断面形状を表面電界が最も小さくなるような扁平率を持つ楕円とした。
- 空洞円筒面に導波管との結合孔を設ける従来型カップラーでは結合孔を迂回する表面電流集中によりパルスヒーティングが起これ放電の原因となるため、電流集中の起きない導波管カップラーを採用した。

低暗電流加速管は大電力試験により最大 27.6 MV/m (クライストロン出力により制限) の加速電界の発生が確認されているが、本テストベンチにおける平均加速電界は 29 MV/m である。

3.4 バンチ圧縮系

1.2 m 加速管でエネルギー変調された電子バンチは、偏向角 15 度の偏向電磁石 4 台からなるシケインを通過するとバンチ先頭と最後部の行路差からバンチ圧縮される。

バンチ圧縮系の設計ポイントは次の通りである。

- バンチ圧縮過程でのエネルギーに対するシケイン内行路長の非線形性の補正は行わない。非線形性としては、エネルギーチャープを与える RF の非線形性及び、シケイン軌道自体の非線形が存在する。
- RF の非線形性に対しては、電子銃空洞出口のビームエネルギーを上げることによって、加速管入口までの間のバンチ伸張を抑え、加速管入口でのバンチ幅を短く (約 10 ps) することで対処した。
- シケイン軌道自体の非線形性は、シケイン入口での $\Delta E/E$ が大きいほど目立ってくるが、これに対してもシケイン入口でのバンチ幅を短く設計することで対処した。

これらの結果、非線形性の補正を行わなくても計算上は 30 fs が達成可能である。

現時点でのシミュレーションによるバンチ圧縮の結果を Figure 5 に、設置されたシケイン電磁石を Figure 6 に示す。

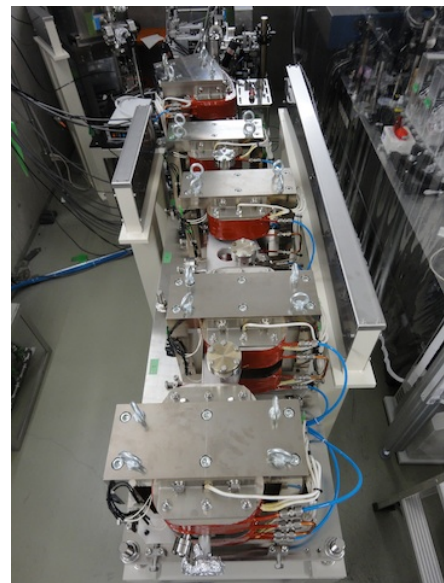


Figure 6: Chicane magnets for bunch compression.

4. 立ち上げ状況と今後の予定

現在までに独立 2 空洞式 RF 電子銃、1.4 m 加速管及び 1.2 m エネルギー変調管、シケイン電磁石及び Q 電磁石、エネルギー分析用偏向電磁石等の主要機器の設置、各空洞への導波管接続が完了し、真空立ち上げ及び RF コンディショニングが開始されている。今後さらにコンディショニングを行い、RF 電子銃からのビーム発生、加速試験を経て、バンチ圧縮調整、バンチモニターによるビーム観測を行っていく予定である。また、極短バンチ圧縮に関しては、条件を細かく設定して精度を上げたシミュレーションを行う必要がある。

参考文献

- [1] H Tomizawa, H Hanaki, T Ishikawa, "Non-destructive single-shot 3-D electron bunch monitor with femtosecond-timing all-optical system for pump & probe experiments," in proceeding of FEL 2007, Novosibirsk, Russia, (2007) 472.
- [2] H. Tomizawa, et al., "Feasibility Study of Single Shot Realtime Non Distractive Three Dimensional Bunch Charge Distribution Monitor", Proc. of 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, 2010, p307.
- [3] Y. Oyamasu, et al., "Feasibility study of a single-shot 3D electron bunch shape monitor with an electro-optic

- sampling technique”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **16**, 052801, 2013.
- [4] T. Taniuchi, et al., “Upgrade of a Photocathode RF Gun at SPring-8”, *Proc. of FEL2004, Trieste, 2004*, p431.
- [5] T. Taniuchi, et al., “High Power Waveguide Switching System for SPring-8 Linac”, *Proc. of EPAC2006, Edinburgh, 2006*, p2499.
- [6] T. Taniuchi, et al., “High Power Test of Low Dark Current Accelerating Structure”, *Proc. of 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, 2011*, p1286.