

SPring-8 極短バンチモニタ開発テストベンチのコミッショニング

及び 2.7 セル RF 電子銃大電力試験

COMMISSIONING OF R&D TEST BENCH FOR ULTRA-SHORT BUNCH MONITOR AND HIGH POWER TEST OF 2.7-CELL RF GUN AT SPRING-8

谷内 努[#], 下崎 義人, 鈴木 伸介, 出羽 英紀, 富澤 宏光

Tsutomu Taniuchi[#], Yoshito Shimosaki, Shinsuke Suzuki, Hideki Dewa, Hiromitsu Tomizawa
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

Abstract

An ultra-short bunch monitor using EO sampling, has been developed to measure an electron bunch length of 30-40 fs with a charge of 0.1-0.2 nC per bunch. The RF gun system at SPring-8 has been upgraded for the R&D of the bunch monitor. A single-cell RF gun cavity was replaced with an independent two-cavity system and a 1.4 m-long accelerator structure and a 1.2 m-long energy modulator, were installed for upgrading the beam energy to 85 MeV and a bunch compression. In order to provide RF power for the accelerator, an RF power compressor (SLED) was installed at the output of an 80 MW klystron. After an RF conditioning, a beam commissioning has been performed. Furthermore, a 2.7-cell RF gun cavity has been tested in high power to increase the beam energy up to 10 MeV.

1. はじめに

SPring-8 では数 10 fs 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おり、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行われた。RF 電子銃空洞を 2 空洞に変更し、ビームエネルギーを改造前 (単空洞) の 3.8 MeV から 6 MeV へ上げ、高電界加速管により 85 MeV 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 10 fs のバンチ長を得る。将来的には 2.7 セル RF 電子銃空洞を設置し、ビームエネルギーを 100 MeV とする計画である。これまでに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、エネルギー変調管、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、RF コンディショニングおよびビームコミッショニングの結果とともに、2.7セルRF電子銃空洞のRFコンディショニングについても報告する。

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 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。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]。しかしながら、究極の高時間分解能を実現するためには、1 オクターブ光源と線形チャープ自動最適化システムが必要である。本システムは RF 電子銃試験施設に構築され、近く実証試験を行なう予定である。

2. 機器構成およびコミッショニング

2.1 大電力 RF 源

本テストベンチは RF 電子銃試験装置のビームエネルギーを従来の 30MeV から 65 MeV まで増強するよう 2013 年に改造された^[4]。現在はビームエネルギー 100 MeV での変更申請が許可されている。主な改造・新設 RF 機器は、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、SLED である。Figure 1 に回路構成を示す。

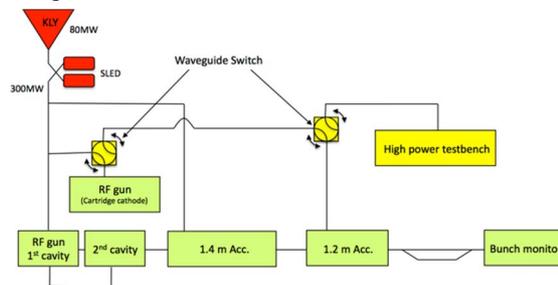


Figure 1: Configuration of high power RF circuit.

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

[#] ihcuinat@spring8.or.jp

給する必要があるため2カ所に真空導波管切替器^[5]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。

2.2 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。

Figure 2は設置された独立2空洞RF電子銃である。

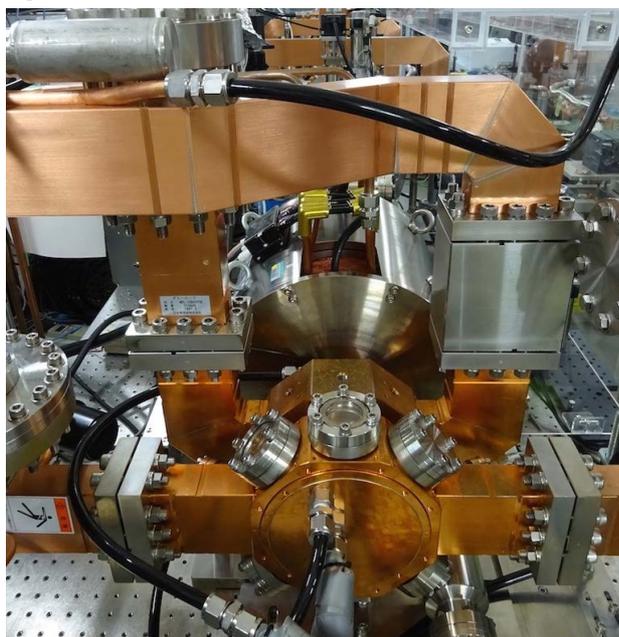


Figure 2: 1st and 2nd cavity of RF gun.

RFコンディショニングの結果、最大ビームエネルギー7.1 MeVを達成しており、この時の第1及び第2空洞に置けるエネルギー利得及び加速勾配は、それぞれ3.8 MeV @ 136 MV/m、3.3 MeV @ 118 MV/m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電子銃空洞を製作した。RFコンディショニングの結果は後述する。

2.3 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^[6]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。また、低暗電流加速管と同様に、表面電界低減のためのアイリス断面楕円化、カプラー部の表面電流集中の小さい導波管カプラーが採用されている。加速管およびエネルギー変調管の主なパラメータをTable 1に、内部構造と設置状況

をFigure 3に示す。

Table 1: Parameters of 1.4 and 1.2 m-long 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
Accelerating length	1155 / 945 mm
Total length	1365 / 1155 mm
Filling time	415 / 340 ns
Operation temperature	30 °C

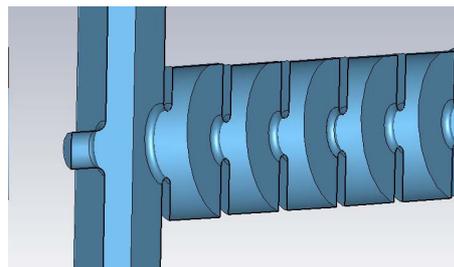


Figure 3: Accelerator structures with double-feed waveguide coupler.

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、本テストベンチでビームエネルギー65 MeV(エネルギー変調管クレスト位相加速時)を達成するために必要とされる平

均加速勾配は 28 MV/m である。また、電子銃のエネルギー増強後の 100 MeV 運転時には、加速勾配 42.8 MV/m が必要となる。

2.4 バンチ圧縮系

1.2m 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。シケイン中央部には 6 極電磁石が設置され、非線形補正を行うことができる。

設置されたシケイン電磁石を Figure 4 に示す。

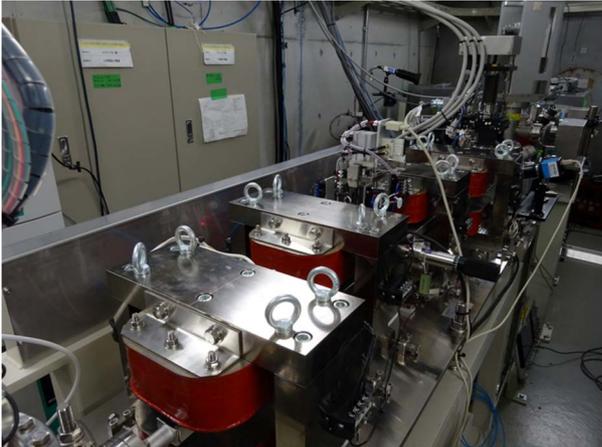


Figure 4: Chicane magnets for bunch compression.

2.5 RF コンディショニングおよびビームコミッショニング

2013 年 5 月に 1.4m 加速管の RF コンディショニングを開始し、コンディショニングの進捗に合わせて RF 電子銃空洞および 1.2m エネルギー変調管への RF パワー分配比を調整し、コンディショニングを進めた。RF パワーがあるにつれて SLED および導波管からの放射線量が増加したため、5mm 厚鉛シートによる部分遮蔽を施した。遮蔽により最大 50 $\mu\text{Sv/h}$ ほどであった SLED および導波管の表面線量は数 $\mu\text{Sv/h}$ 以下に下がった。

ビーム加速では、レーザー光をソレノイド下流のビューポートから入射し、真空ダクトに設置された誘電多層膜ミラーにてカソード面へほぼ垂直 (88.6 度) に照射している。カソード面におけるレーザー照射位置は斜入射用ビューポートから UV 用 CCD カメラにて観察できるので、これにより粗い位置調整を行い、微調整はソレノイド励磁量を変えながら下流のプロファイルモニターでのビーム位置の変化を見て行っている。

ビームエネルギーは、まず加速管上流のエネルギー分析系にて RF 電子銃への RF パワーおよび加速位相を調整し、RF 電子銃のビームエネルギーを決める。その後、シケイン部にて加速管およびエネルギー変調管の RF パワーおよび加速位相を調整する。最大エネルギー (現在は 85 MeV) 加速時は、エネルギー変調管でも RF クレスト位相にて加速を行っている。2013 年 10 月に 61 MeV のビームエネルギーを

確認し、現在は 85 MeV が達成されている。この時の平均加速勾配は、1.4m 加速管、1.2m エネルギー変調管ともに 37.6 MV/m である。

3. 2.7 セル RF 電子銃空洞

3.1 空洞構造

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を受け、現在の 2 空洞からさらにビームエネルギーを上げるため、2.7 セル RF 電子銃空洞を設計・製作した。RF 源からのパワーに制限があるため、従来の低 Q 型空洞ではなく通常の定在波型空洞とした。導波管との結合孔は第 2 セルに設けられている。この構造にすると、導波管伝搬モードと空洞の励振モードの電磁場分布の関係から空洞の $\pi/2$ モードは励振されず、0 モードと π モードのみとなり、2 つのモードの共振周波数間隔は 6 MHz となる。また、従来は空洞と一体であったフォトカソード (CLASS1 無酸素銅) はプラグ構造とした。空洞背面のフランジから容易に交換可能である。Figure 5 に 2.7 セル RF 電子銃空洞の構造および写真を示す。

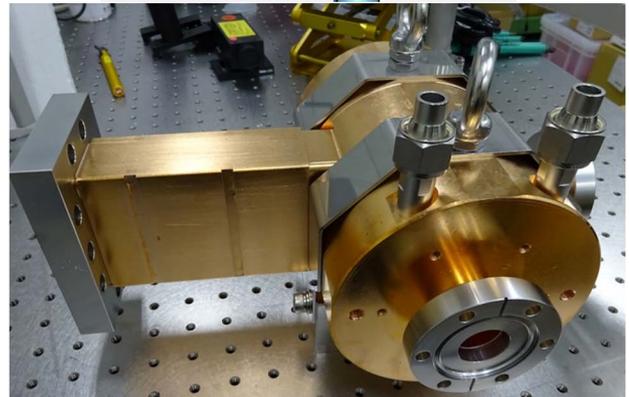
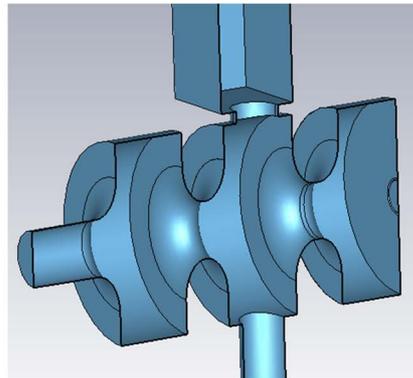


Figure 5: 2.7-cell RF gun cavity.

3.2 真空型サーキュレータ

定在波空洞からの反射波による他空洞への影響を低減するとともにクライストロンを保護する必要があるため、低 Q 空洞では必要としなかったサーキュレータが必要となる。そこで、SPring-8 と日本高周波 (株) により共同開発された真空型 10MW サーキュレータ^[5] (SPring-8 線型加速器電子入射部真空

立体回路^[6]で採用)を改良した真空型 30MW サーキュレータを製作した。Figure 6 は真空サーキュレータおよび RF 電子銃空洞設置の様子である。

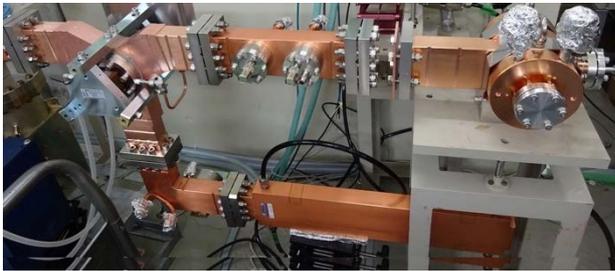


Figure 6: 30 MW vacuum circulator and 2.7-cell RF gun cavity.

3.3 RF コンディショニング

2.7 セル RF 電子銃空洞の RF コンディショニングは RF パワー分配システムおよび導波管切替器により 85MeV 線形加速器と RF 源を共有できる大電力試験ラインで行われた。コンディショニング時は SLED の温度設定を 30°C から 45°C に変えることで SLED 空洞を離調し、準矩形 RF パルス形状とした。はじめに真空型サーキュレータおよび反射波出力ポートに取り付けられた SiC ダミーロードのみの構成で RF コンディショニングを行い、RF パルス幅 2 μsec 、繰り返し 10 pps にてピークパワー 30MW の耐電力を確認した。その後 RF 電子銃空洞を取り付け、コンディショニングを行った。サーキュレータと RF 電子銃空洞の間に RF 窓は設けず、同一真空系とした。真空排気はサーキュレータ上流側に排気速度 100 l/s のスパッタイオンポンプ 1 台と NEG ポンプ (SAES Getters D-400) 1 台を配置し、RF 電子銃空洞の導波管と対抗する排気ポートには NEG ポンプ (SAES Getters D-400) 1 台を設置した。RF 投入前のベース圧力は 1×10^{-6} Pa 以下であった。

RF コンディショニングは RF パルス幅 2 μsec 、繰り返し 10 pps にて行い、トータル約 60 時間のコンディショニングにより入力パワー 18MW に到達した。RF コンディショニング開始 21 時間後、37 時間後、64 時間後の暗電流を Figure 7 に示す。

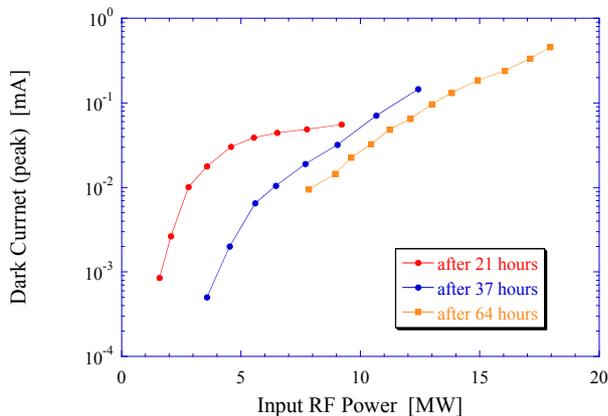


Figure 7: Dark current measured during RF conditioning.

単純には比較できないが、暗電流量は従来の単空洞 RF 電子銃と同レベルであると思われる。今後 2.7 セル RF 電子銃を加速器ラインに設置し、SLED 出力にてコンディショニング後にビームエネルギーを測定する予定である。

4. まとめ

EO サンプリング方式バンチモニター開発のため改造された RF 電子銃テストベンチのビームコミッショニングを行い、ビームエネルギー 85 MeV の加速に成功した。さらに電子銃のビームエネルギーをあげるため 2.7 セル RF 電子銃を製作し、RF コンディショニングを行った。今後も RF コンディショニングおよび電子銃空洞入れ替えなどを行い、100 MeV へビームエネルギー増強およびバンチ圧縮調整を行っていく予定である。

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] 谷内 努他, "SPring-8 極短バンチモニタ開発テストベンチ", 第 10 回日本加速器学会年会報文集, 名古屋, 392 (2013).
- [5] 三浦 厚他, "真空大電力サーキュレーターの開発", 第 11 回日本加速器学会年会報文集, 青森, 641-644 (2014).
- [6] T. Taniuchi, et al., "Vacuum Waveguide System for SPring-8 Linac Injector Section", Proc. of IPAC14, Dresden, Germany, June 15-20, 2014, 3863-3865 (2014).