

# レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線形加速器の大電力高周波試験

## HIGH POWER RF TEST OF A LINAC TO INJECT ULTRASHORT PULSED ELECTRON BEAMS INTO LASER PLASMA WAKEFIELDS

益田伸一<sup>#, A)</sup>, 増田剛正<sup>A)</sup>, 田中俊成<sup>B)</sup>, 境武志<sup>B)</sup>, 長瀬敦<sup>B)</sup>, 熊谷教孝<sup>A)</sup>, 大竹雄次<sup>A)</sup>

Shinich Masuda<sup>#, A)</sup>, Takemasa Masuda<sup>A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>B)</sup>, Takeshi Sakai<sup>B)</sup>,

Atsushi Nagase<sup>B)</sup>, Noritaka Kumagai<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI),

<sup>B)</sup>Nihon University

### Abstract

Research is being conducted for the practical application of an ultra-compact electron accelerator based on laser wakefield acceleration, which traps and accelerates electrons by high-intensity ultrashort-pulse laser-excited plasma waves. We are developing an ultrashort pulse linear accelerator for diagnosing the acceleration characteristics of plasma waves by injecting ultrashort electron beams into plasma waves. This paper reports high-power the RF tests of an RF electron gun cavity, a buncher accelerator tube, and waveguide elements used for this purpose. The high-power RF tests were carried out at a high-power RF test bench, which is one of the peripheral facility of SACLA. Based on the design of the accelerator under development, components such as cavities and waveguides are arranged. The specifications of the high-frequency pulse required from the filling time of the high-frequency cavity are 1  $\mu$ s in width and 10 pps in repetition. As for the electron gun, as a result of RF conditioning for about one month, operating conditions of an input 2 MW, a width 2  $\mu$ s, and a pulse repetition 10 pps were achieved. For about two months, the buncher tube was conditioned up to an 18 MW input, a 1  $\mu$ s width, and a 10 pps repetition. Finally, the high-frequency power input could be maintained for about 8 hours, and the required acceleration electric field and its stability in the cavity were obtained. As a result, it was demonstrated that the high-power operation conditions required for the laser wakefield experiment can be sufficiently achieved.

### 1. はじめに

科学技術振興機構の未来社会創造事業では、レーザープラズマ電子加速法の実用化を目指し研究を推進している [1]。レーザー航跡場 [2,3]の加速勾配は、現在の高周波技術による加速器の 1000 倍に達し、加速器の大幅な小型化が期待できるが、本加速法により発生した電子ビームのパラメータにはショット毎にばらつきがあり、実用化のためにはより詳細なプラズマ波の加速特性の解明が必要である。本事業の研究実施機関の一つである高輝度光科学研究センターでは、レーザー航跡場にプラズマ波励起レーザーパルスと同期して極短電子バンチを入射しプラズマ波による追加速を行い、その加速特性を調べることを目的とした極短電子ビーム発生のための研究開発を行なっている。

典型的なプラズマ波の波長は時間的には 10-100 fs であり横方向のサイズは 10-100  $\mu$ m である。したがって、これよりも時間空間的に小さな電子バンチを安定に生成し、プラズマ波励起レーザーと精密に同期してプラズマ波に入射する必要がある。我々は、予算規模と開発期間から上記の実現可能性を最大にするため、既に確立されている高周波 (RF) 加速器技術に基づいた高安定な極短電子バンチ生成を目指し、C バンド線形加速器の開発を進めてきた [4-7]。本加速器の極短バンチ発生原理は光陰極電子銃から発生する電子バンチの速度変調によ

る電子バンチ圧縮方法を採用した [4]。特に設計やビームシミュレーションで我々が留意したのは、フェムト秒領域の電子バンチ長の空間電荷効果による伸長を抑え、かつ速度変調が難しくならない最大限の領域である 2MeV 程度の電子源からの出射エネルギーを選択した点である。加えて、この今までの加速器に無い高いエネルギーで速度変調が出来る RF 電子銃の後続のバンチャーシステムを実現することである。このような加速器は既に前例が UCLA [8] と精華大学 [9] であるが、日本では初めてである。以上の設計方針からシミュレーション [4,10]で決定した電子ビームパラメータやそれを実現する RF パラメータを以下に述べる。

本加速器が生成する上述の電子ビームのパラメータは、ビームエネルギー 10-20MeV、ビーム電荷 $\sim$ 100 fC、バンチ長 < 10 fs、ビームサイズ < 50  $\mu$ m、エミッタンス  $4 \times 10^{-9}$  mrad、繰り返し < 30 pps である [4]。この性能を実現するための加速器の概要とビームシミュレーション [4,10]によって決定された RF パラメータを Fig. 1 に示す。光陰極高周波電子銃によって 100 fs の電子バンチを生成し、ビーム収束用ソレノイドコイルによって  $2\pi/3$  モード進行波バンチャー加速管に電子を入射する。バンチャー加速管は電子ビームに速度変調をかけ、その結果縦方向に電子バンチが圧縮され 10 fs 以下の極短電子バンチが生成される。それぞれの空洞に必要な加速場を得るため、それぞれ 2 MW および 15-30 MW 程度の RF 電力をクライストロンによって供給する。バンチ圧縮と同時に Q トリプレット電磁石により電子バンチの横方

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

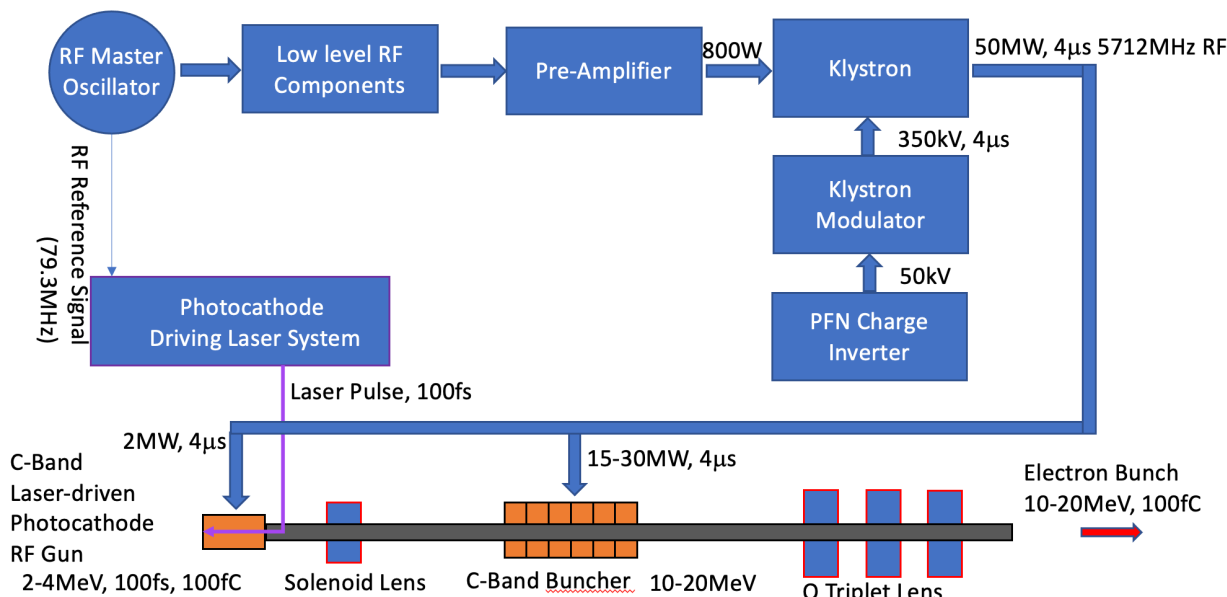


Figure 1: Schematic layout of a C-band linac to produce ultrashort electron bunches.

向ビームサイズを  $50 \mu\text{m}$  以下に収束する。その他主要な加速器構成要素を以下に示す。電子ビームの安定性を高めるため、低位相ノイズ性能の高周波マスターオシレータ、高安定な PFN 充電電圧特性を持つクライストロ

んことを実証するため大電力高周波試験を実施した。本稿では、これまでに制作した本加速器の構成要素である光陰極高周波電子銃およびバンチャー加速管の大電力試験の結果について報告する。

## 2. RF 大電力試験

RF 大電力試験は、SACLA の付帯設備である大電力高周波テストベンチを借用して実施された。高周波空洞や導波管等の構成部品は、開発中の加速器の設計に基づき  $50 \text{ MW}$  のクライストロン出力を方向性結合器によって分配し、 $2 \text{ MW}$  を電子銃、 $18 \text{ MW}$  をバンチャー管に投入するように配置した。このため本試験は、高周波空洞以外の構成部品である導波管や RF モニター、大電力方向性結合器、およびウォーターロード等の大電力試験も兼ねている。Figure 2 に配置図を示す。この図では電子銃とバンチャー管を同時に接続しているが、実際には、電子銃の試験時にはバンチャー管の代わりにウォーターロードを接続している。同様に、バンチャー管試験時には、電子銃の代わりにウォーターロードを接続し、電子銃とバンチャー管の試験を別々に行うようにした。 $50 \text{ MW}$  の電力の分配は、 $4 \text{ dB}$  および  $10 \text{ dB}$  の大電力方向性結合器を組み合わせで行なっている。余剰電力はダミーロードおよびウォーターロードによって吸収している。Figure 3 に大電力試験全体の配置を示す。クライストロンは遮蔽室の外に配置され (Fig. 3(a))、導波管によって遮蔽室内に配置した電子銃およびバンチャー管に RF 電力が供給される (Fig. 3(b))。ただし、Figure 3(b) は電子銃の試験時の配置を示している。大電力運転は、平日日中に行い、夜間および休日は停止している。

Figure 4 にバンチャー管の大電力試験での運転履歴を示す。上の図はインバーターの到達充電電圧値であり、 $48 \text{ kV}$  でクライストロン出力  $50 \text{ MW}$ 、バンチャー管への入

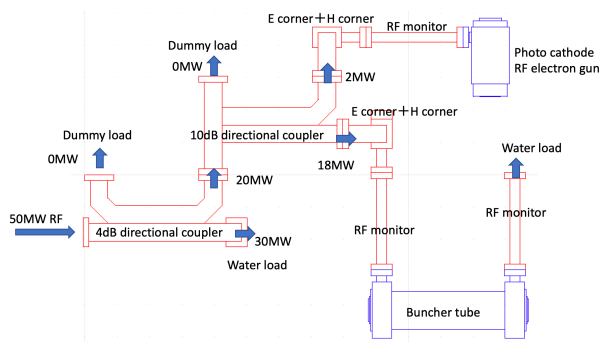
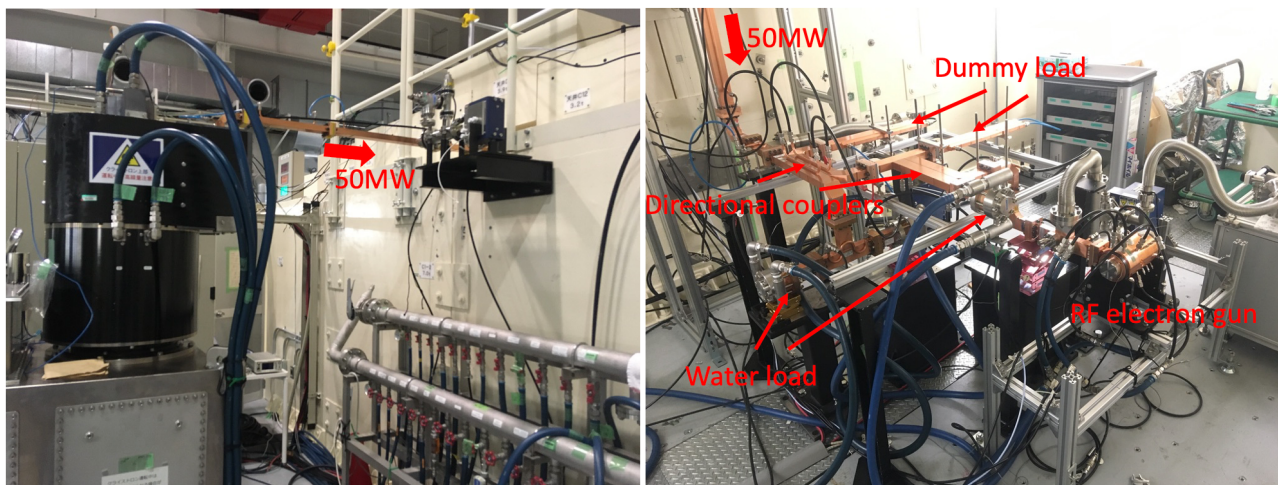


Figure 2: Layout of directional couplers and RF cavities.

ンモジュレータ [5]、および低ジッターの LLRF を開発している。また光陰極駆動レーザーとマスターオシレータとの精密同期システム [6]、レーザープラズマ加速場の特性取得のための構成機器の制御およびデータ処理系を含めた加速器制御システム [7]、マスターオシレータと同期して各機器に高精度トリガーを供給するトリガーシステム [THOA11 参照]を開発中である。

本線形加速器の運転条件は、レーザープラズマ加速実験から要求される繰り返しが  $0.1\text{-}1 \text{ pps}$  程度、また空洞のフィリングタイムから要求される RF パルス幅が  $1 \mu\text{s}$  以上、および要求されるビームエネルギーを得るためクライストロンの RF 出力を分配し、電子銃へ  $2 \text{ MW}$  程度、バンチャー管へ  $15\text{-}30 \text{ MW}$  程度の RF 電力入力を安定に維持することである。我々は、これらの運転条件が達成でき



(a) Klystron (outside of shield room)

(b) Directional couplers and an RF electron gun (inside of shield room)

Figure 3: Layout of an RF high power test.

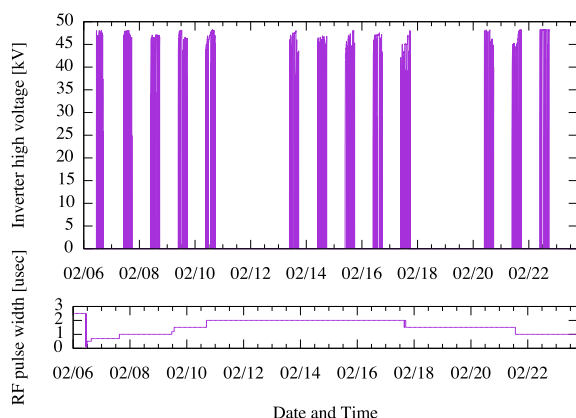


Figure 4: Inverter charge voltage and an RF pulse width of the RF power test of a buncher tube.

力 18 MW に対応する。下の図は RF パルスの時間幅の設定値を示している。短い RF パルス幅からコンディショニングを始めて徐々にパルス幅を伸ばすようにした。Figure 5 は、Fig. 4 の時間軸に対応する真空度の履歴を示す。CCG1、CCG2、および CCG4 はそれぞれクライストロン下流、バンチャー管上流、および下流に配置したコールドカソードゲージによる測定値である。コンディショニングが進むことにより真空度が良くなっているのがわかる。スパイク状になっているのは導波管内で放電が生じて真空度が悪化していることを示す。充電電圧が串状になっているのは真空悪化によってインターロックがかかったことを示している。トータルでおよそ2ヶ月間のコンディショニングにより、最終的に繰り返し 10 pps、パルス幅 1  $\mu$ s、入力電力 18 MW の条件で、放電によるインターロックがかかる頻度が下がり8時間程度の大電力運転が維持できるようになった。今回の大電力試験では時間が限られていたが、フィリングタイムから要求されるパルス

幅と、レーザー航跡場加速実験に要求される繰り返し周波数に対して十分な値まで到達できた。今後は実機設置後にコンディショニングを進めれば、さらに繰り返しを上げ、パルス幅も伸ばせる感触が得られている。

Figure 6 に、結合度-60 dB の方向性結合器による RF モニタ波形を示す。上段と下段は、それぞれ最終的に到達したバンチャー管への RF 入力波形と反射波形を示す。入力パルス 18 MW に対し反射は 0.2 MW で、電力反射率は 1% 程度である。

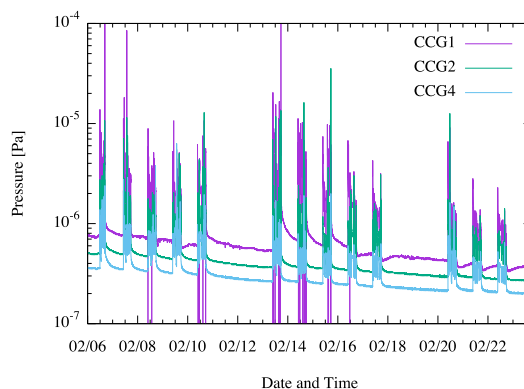


Figure 5: Vacuum pressure of the high power test of a buncher tube. CCG1 is located at downstream of a klystron, CCG2 and CCG4 are at upstream and downstream of the buncher tube, respectively.

Figure 7 に電子銃の大電力試験時の運転履歴を示す。バンチャー管の大電力試験の場合 (Fig. 4) と同様に上の図はインバーターの到達充電電圧値であり、充電電圧 48 kV で電子銃への RF 入力電力 2 MW に対応する。下の図は RF パルスの時間幅の設定値を示している。およそ 1 ヶ月間のコンディショニングにより、最終的に繰

り返し 10 pps、パルス幅 2  $\mu$ s、入力電力 2 MW の条件で、放電によるインターロックがかかることもなく8時間程度の大電力運転が維持できていることがわかる。電子銃の大電力試験の結果については、THP39 で詳細を報告しているのそちらを参照されたい。

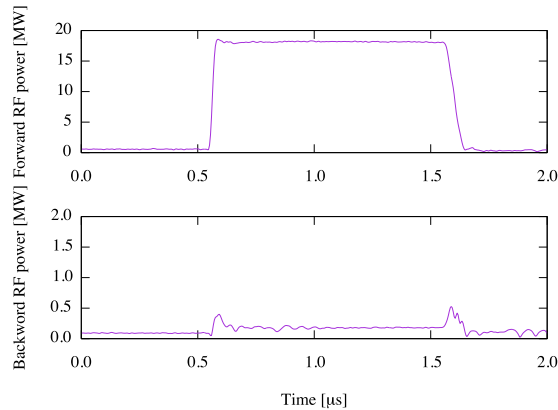


Figure 6: Waveforms of an RF input pulse and a reflected pulse of the high power test of buncher tube.

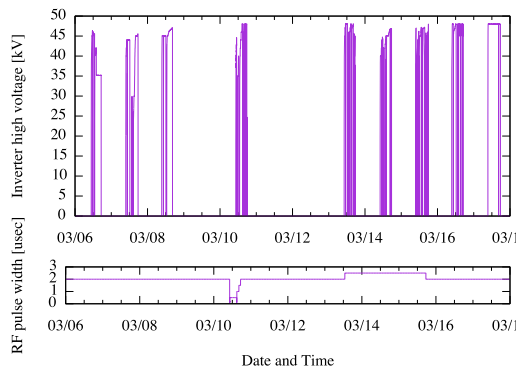


Figure 7: Inverter charge voltage and an RF pulse width of the RF high power test of the RF electron gun.

### 3. まとめ

未来社会創造事業において開発中の極短パルス線形加速器の構成要素である、電子銃とバンチャー管の大電力試験を実施した。電子銃に関してはおよそ1ヶ月の RF コンディショニングの結果、入力 2 MW、幅 2  $\mu$ s、繰り返し 10 pps の運転条件が達成された。バンチャー管はおよそ2ヶ月で、入力 18 MW、幅 1  $\mu$ s、繰り返し 10 pps までコンディショニングが進んだ。また、それぞれ最終的に 8 時間程度、高周波電力の入力が維持でき、要求さ

れる空洞の加速電場とその安定性が得られた。本大電力試験で到達できた運転条件は、フィリングタイムから要求されるパルス幅と、レーザー航跡場加速実験に要求される繰り返し周波数に対しても十分な値であり、要求される運転条件を達成できることが実証された。

### 謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1 に支援を受けたものである。

本高周波大電力試験にあたり SACLA 関係者の皆様には多大なご協力をいただきましたことを感謝します。

### 参考文献

- [1] <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>
- [2] 小方厚 他、“レーザーとプラズマと粒子ビーム”、大阪大学出版会、2012.
- [3] E. Esarey *et al.*, “Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators”, Rev. Mod. Phys. **81**, 2009, pp. 1229-1285.
- [4] Y. Otake *et al.*, “BASIC DESIGN OF A LINAC TO INJECT ULTRA-SHORT PULSE ELECTRON BEAMS INTO LASER PLASMA WAKE FIELDS”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2019, pp. 1176-1180.
- [5] S. Masuda *et al.*, “CURRENT STATUS OF THE DEVELOPMENT OF A LINAC TO INJECT ULTRA-SHORT LOW JITTER SYNCHRONIZATION BETWEEN AN ULTRASHORT PULSE ELECTRON BEAMS INTO LASER PLASMA”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Aug. 9-12, 2021, pp. 97-101.
- [6] S. Masuda *et al.*, “DEVELOPMENT OF A LOW JITTER SYNCHRONIZATION BETWEEN AN ULTRASHORT ELECTRON BUNCH LINAC AND A LASER PLASMA ELECTRON ACCELERATOR”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 188-192.
- [7] T. Masuda *et al.*, “CONTROL SYSTEM DESIGN OF A LINAC TO INJECT ULTRASHORT-PULSED ELECTRON BEAMS INTO A LASER PLASMA ACCELERATION FIELD”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online (Kyushu Univ.), Oct. 18-21, 2022, pp. 188-192.
- [8] J. Maxson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 2017, pp. 154802.
- [9] Y. Wu *et al.*, “High-throughput injection-acceleration of electron bunches from a linear accelerator to a laser wakefield accelerator”, Nature Phys. **17**, 2021, pp. 801-807.
- [10] Y. Koshiba *et al.*, “レーザー加速の特性理解に向けた C-band Linac のシミュレーション”, 2019 年度ビーム物理研究会, Osaka, Japan, Nov. 25-27, 2019.