

# レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線形加速器開発の現状

## CURRENT STATUS OF THE DEVELOPMENT OF A LINAC TO INJECT ULTRA-SHORT PULSE 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>, 小柴裕也<sup>C)</sup>, 大塚誠也<sup>C)</sup>,  
坂上和之<sup>D)</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>, Yuya Koshiba<sup>C)</sup>,  
Seiya Otsuka<sup>C)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>D)</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

<sup>C)</sup>Waseda University

<sup>D)</sup>The university of Tokyo

### Abstract

Laser wakefield acceleration, that traps and accelerates electrons in plasma waves excited by high-intense ultrashort laser pulses, is expected to realize ultra-small electron accelerators. We are developing a C-band ultrashort pulse linear accelerator (LINAC) for diagnosing the acceleration characteristics of the plasma wave by injecting an electron bunch shorter than its wavelength ( $< 10$  fs) and smaller than its transverse size ( $< 100$   $\mu\text{m}$ ). The electron bunch should be precisely synchronized with the laser pulse (jitter  $< 10$  fs). The realization of the above electron bunch dimensions is in sight by the LINAC with a photo cathode electron RF gun, a buncher acceleration tube, etc. In this accelerator, electron bunch stability conducted by component stabilities is extremely important. A high-power test of a klystron modulator was carried out to achieve a klystron voltage stability of 3.16 ppm at 350 kV, 4  $\mu\text{s}$  width, and 30 pps output. Furthermore, in the master oscillator that generates RF reference signals, a single sideband phase noise is -150 dBc/Hz at 10 MHz from a carrier frequency of 5712 MHz. Both strongly supports the above-mentioned beam performance. We can surely expect more precise synchronization ( $< 10$  fs) than the present one by refined electron beam performance achieved by further developments.

### 1. はじめに

粒子加速器は様々な研究分野で重要な道具となっているが、その規模と建設費は巨大なものとなっている。その事実は、加速器の有用性にも関わらず各分野の現場への広範囲な普及を妨げている。加速器の寸法と必要経費を、小規模な研究室や工場、および病院の手術室等で使用できる程度に抑えることができれば、加速器の広い普及とその結果各分野の発展が期待できる。そのためには、原理的に新しい粒子加速方法が求められている。

レーザー航跡場加速は、高強度極短パルスレーザーをガスに照射して大振幅プラズマ波を励起し、プラズマ波の縦電場によって電子を加速する方法である[1, 2]。その加速勾配は、現在の高周波技術による加速器の1000倍に達し、加速器の著しい小型化が期待できるので各国で研究が進められている。現在、レーザー航跡場加速は、実験で10 GeV程度の電子加速に成功しているが、エネルギースペクトル、放射方向、ダイバージェンス、電荷等のビームパラメータの安定性は、加速器としての実用化には不十分である。この問題を解決するためには、プラズマ波の加速場の位相空間の詳細を解明することが必要不可欠である。これについては、これまでに実験的に明らかにされていない重要な課題である。

科学技術振興機構の未来社会創造事業では[3]、

レーザー航跡場加速を使用した小型電子加速器の実用化を目指した研究を実施している。この研究プロジェクトの実施機関の一つである高輝度光科学研究センターでは、プラズマ波の加速特性を診断するためのCバンド極短パルス線形加速器の開発を行っている。この線型加速器では、確立されている高周波技術に基づき安定な極短電子バンチを生成して、時間空間位相を走査しつつプラズマ波に入射し、それにより加速された電子バンチの振る舞いを精密に観測する。同時に従来のプラズマ診断とレーザーパラメータ計測の結果と合わせてマッピングを行うことによって、レーザー航跡場加速に関する新しい知見を得ることを目指している。このためには、プラズマ波の波長より短く ( $< 10$  fs)、その横方向サイズよりも小さい ( $< 100$   $\mu\text{m}$ ) 電子バンチを、励起レーザーパルスと精密に同期して入射 (ジッター  $< 10$  fs) することが必要である。

我々は、既に前述の電子ビームを実現するための加速器の検討と基本設計を行なった[4]。その結果に基づいた加速器の構成要素の製作と評価試験、および高周波信号とレーザーパルスの高精度同期システムの概念設計を行なった[5]。さらに我々は、開発した構成要素の調整・改良と構成要素の新規開発を進めている。本報告では、極短パルス線形加速器開発の進捗状況について続報を述べる。

## 2. 極短パルス線形加速器の概要

以前報告した様に[4]、極短パルス電子バンチの生成は、実現可能性と予算の制約により、バンチャー加速管により電子バンチの速度変調を行い、加速管後のドリフト空間中でそれを密度変調に変換して短バンチ化する方式を採用した。Figure 1 には線型加速器の概要を示す。加速器の電子ビーム輸送に沿った主要構成要素は、Cバンド(5712MHz)レーザー駆動光陰極高周波電子銃、ビーム収束用のソレノイドコイル、Cバンド  $2\pi/3$  モード進行波バンチャー加速管、および最後のQトリプレットである。電子バンチのエネルギーは高周波電子銃の陰極付近で非常に低いために、ビーム特性は、陰極付近の残留磁場と空間電荷に大きく影響される。これらの条件下で我々は、加速器に沿って電子バンチの低エミッタンスを維持するように、バンチャーでの縦方向圧縮およびQトリプレット磁石での横方向収束パラメータを最適化した。シミュレーションでは、プラズマに入射する電子ビームのサイズが縦方向に10 fs未満に圧縮され、同時に横方向に数10  $\mu\text{m}$ 以下に収束されることが示されている[4, 6]。

その他の加速器の主要な構成要素は、高周波信号の全ての時間基準となる高周波マスター発振器、高周波電力・位相・同期制御のための低電力高周波制御機器、さらに電子銃と加速管に大電力高周波電力を供給するクライストロンを中心とした高周波源、それを駆動する高電圧パルスモジュレータおよびPFN充電用インバータ、クライストロン駆動用の前段増幅器などである。今後の開発要素の一つであるレーザーシステムは、高周波マスター発振器と精密に同期し、光陰極を駆動する[5]。Figure 1では、既存の要素、開発済みの要素、および今後の開発要素を色分けして示す。主要な構成要素は開発済みであ

り、次章に記述する。

## 3. 極短パルス線形加速器主要要素の開発

Figure 2およびFig.3は、それぞれ製作した光陰極高周波電子銃およびバンチャー加速管の小電力高周波試験中の外観である。Figure 3のバンチャー管の試験は、実際にはFigure 2と同様立てた姿勢で行なわれている。これらは、設計通りの高周波特性を持つことが確認された。

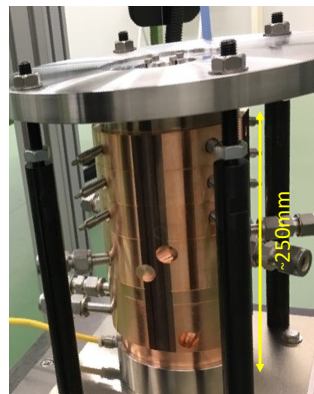


Figure 2: Laser-driven photocathode electron gun.

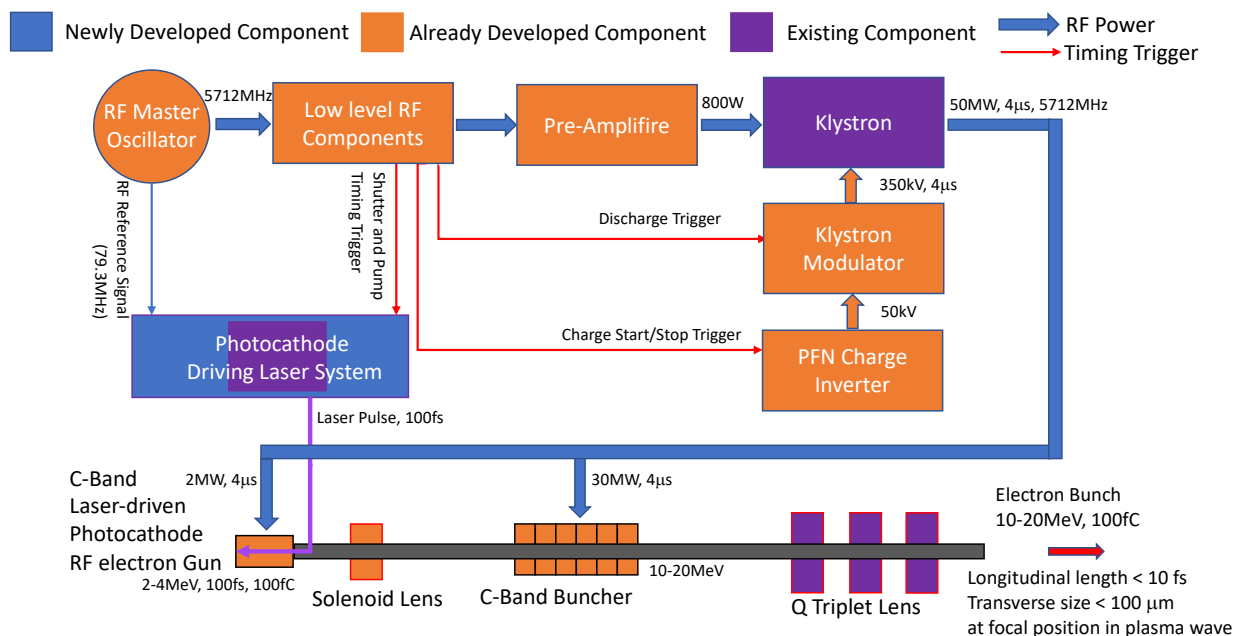


Figure 1: Outline of the linac with the precise synchronization between the RF and the laser pulses.

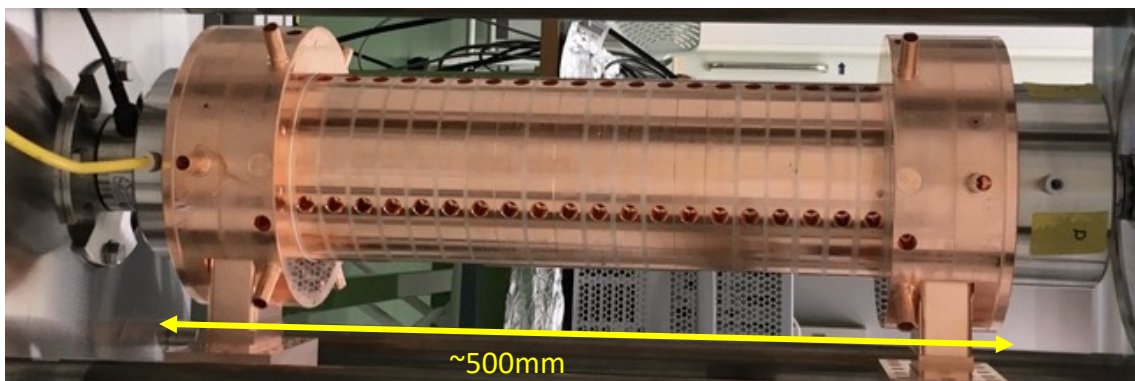


Figure 3: Buncher acceleration tube.



Figure 4: Solenoid lens.

電子銃の下流に設置するソレノイドコイルの外観を Fig. 4 に示す。この電磁石は、主コイルの上流と下流側に補助コイルが巻いてあり、出入口付近の磁場勾配を急峻にし、同時に離れた位置（光陰極表面）での主コイルの漏れ磁場を打ち消すように設計されている。これによって、光陰極表面で発生する低エネルギー電子のエミッタンス劣化を抑えることができる。通電試験によって、設計通りの磁場を発生できることが確認された。

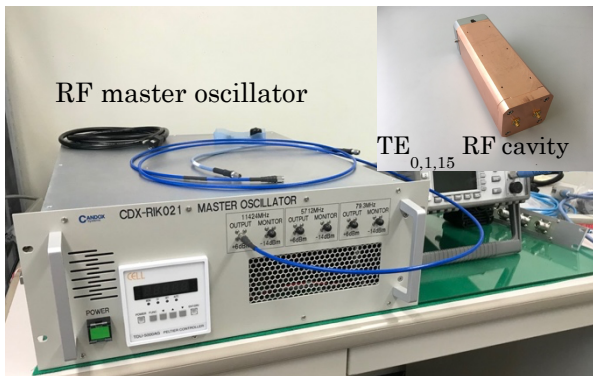


Figure 5: RF master oscillator and RF cavity filter.

我々は、高周波基準信号とレーザーパルス間の正確なタイミング制御のために、安定な低位相ノイズ高周波マスター発振器を開発した [5]。Figure 5 に外観を示しているように、本装置は、将来使用するための 11424 MHz 信号、Cバンド用の 5712 MHz 信号、およびレーザーシステムとの同期基準である 79.3 MHz 信号を生成する出力端子を持っている。この発振器は 10 MHz の基準信号から 11424 MHz を生成し、これを分周して他の信号を生成している。我々は、11424 MHz に対して  $10^5$  を超える高い Q 値を持つ TE<sub>0,1,15</sub> モードの円筒形高周波空洞フィルタを開発した (Fig. 5 右上参照)。11424 MHz の信号を高周波空洞フィルタに通した場合の分周後の 5712 MHz 出力の側波帯位相ノイズを測定し、フィルタなしの場合と比較を行なった。10 MHz での側波帯位相ノイズがフィルタの効果によって、-140 dBc/Hz から -150 dBc/Hz に改善した。測定したスペクトル全体では、Fig. 6 に示す様に、10 Hz および 10 MHz でそれぞれ -80 dBc/Hz および -150 dBc/Hz の低位相ノイズが得られ、世界最高レベルの位相ノイズ性能を実現した。

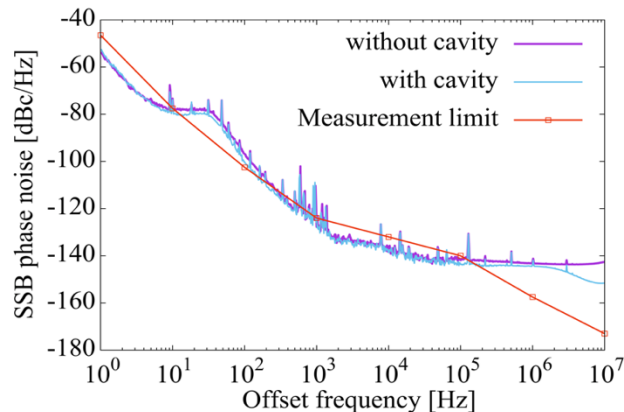


Figure 6: SSB phase noise of RF master oscillator 5712 MHz carrier signal.

加えて我々は、5712 MHz の高周波信号を増幅してクライストロンへ高周波駆動信号を入力するための C バンド半導体増幅器を開発した。本装置の外観を Fig. 7 に示す。上が増幅器で下が電源である。信号増幅には GaN 半導体の FET 素子を使用しており、従来のクライストロン駆動用前段増幅器より小型になっている。高周波出力は、最大 5 $\mu$ s 幅のパルス幅で、繰り返しは最大 60 pps、1 mW 入力時に 800 W の出力定格である。詳細は省くが、時間ジッターを極力抑えるには、ドロップ電源を使用するなど高周波電力と位相の安定化を図っている。

大電力高周波を発生するクライストロン駆動用の高電圧機器として、我々は、パルスモジュレータおよびその PFN 充電用インバータを開発した。Figure 8 に、これらの大電力試験の様子を示す。この装置は、繰り返し 30 pps、パルス幅 4  $\mu$ s で、350 kV の高電圧パルスを出しクライストロンを駆動できる。インバータの充電制御周波数を SACLA で使用されている現状の 20 kHz から 40 kHz に変更することによってより細かな充電電圧の制御が可能となり、PFN 充電電圧の電圧ジッターはおおよそ 3.16 ppm (rms) が得られた。従って、モジュレータの 350 kV 出力電圧の電圧ジッターも同様であり、世界最高水準の電圧安定度である。その結果、高安定な電子加速エネルギーを得ることが期待できる。



Figure 7: C-band GaN semiconductor pre-amplifier.

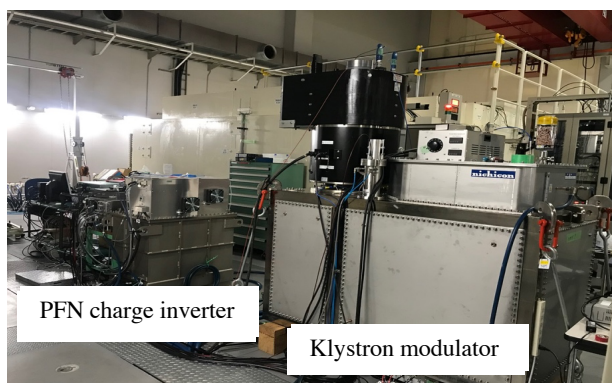


Figure 8: PFN charging inverter and klystron modulator during high-power test.

高周波信号、電子ビーム、およびレーザーパルス精密同期させるためには、レーザーシステムが重要である。このシステムは、新規開発する 1550nm 帯ファイバーレーザーを発振器として、それを 800nm 帯に波長変換して Ti:Sapphire レーザーにより増幅、さらに紫外光に波長変換し、光陰極を駆動する。このレーザーシステムは、さらにプラズマ波を励起するレーザーシステムへの種光を供給する[5]。

この発振器は、安定かつ共振器長のフィードバック制御周波数帯域の広い、Er ファイバーを用いた超短パルスレーザー[7-9]であり、高周波信号と精密同期する。増幅用の Ti:Sapphire レーザーは、以前理研 SCSS で実施された 60 nm FEL への外部種光入射実験[10] に使用された既存システムを借用したものである。我々は、これを超短パルスレーザー増幅器として再整備している。

#### 4. まとめ

超小型加速器の実用化研究のために我々は、縦方向に短く (< 10 fs) 横方向に小さい (< 100  $\mu$ m) 電子バンチを生成し、プラズマ波に入射することによって航跡場の加速特性を解明しようとしている。このための超短パルス線形加速器の開発を行なっている。我々は、設計性能を満足させる光陰極高周波電子銃とバンチャー加速管の製作を行なった。さらに、低電力および大電力高周波機器の開発を行なった。世界最高レベルの高周波マスター発振器の位相ノイズ性能 (10 MHz で -150 dBc/Hz) とクライストロンモジュレータの PFN 充電電圧安定性 (3.16 ppm) が達成された。これらは、SACLA 加速器の位相と電力の安定性能を上回る水準である。この事実からは、これまでに達成された高周波信号と電子ビームの同期性能 (ジッター ~13.6 fs) [11] よりも精密な同期 (同 < 10 fs) が期待できる。

我々の今後の研究の主要課題は、高周波マスター発振器に 10 fs の精度で同期するレーザーシステムの開発、および線形加速器システム全体の制御のためのトリガーシステムとマスター制御システムの開発である。

#### 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。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] E. Esarey *et al.*, “Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators”, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 2009, pp. 1229-1285.
- [3] <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>
- [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*

- Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2016, pp. 1176-1180.
- [5] S. Masuda *et al.*, “DEVELOPMENT OF LOW JITTER SYNCHRONIZATION BETWEEN AN ULTRASHORT ELECTRON BUNCH LINAC AND A LASER PLASMA ELECTRON ACCELERATOR”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 188-192.
- [6] 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.
- [7] J. Takayanagi *et al.*, “Generation and detection of broadband coherent terahertz radiation using 17-fs ultrashort pulse fiber laser”, Opt. Express **16**, 2008, pp. 12859-12865.
- [8] D. Ma *et al.*, “37.4 fs pulse generation in an Er: fiber laser at a 225 MHz repetition rate”, Opt. Lett. **35**, 2020, pp. 2858-2860.
- [9] N. Davoudzadeh *et al.*, “Custom fabrication and mode-locked operation of a femtosecond fiber laser for multiphoton microscopy”, Sci. Report **9**, 2019, p. 4233.
- [10] G. Lambert *et al.*, “Injection of harmonics generated in gas in a free-electron laser providing intense and coherent extreme-ultraviolet light”, Nature Phys. **4**, 2008, pp. 296-300.
- [11] Y. Otake *et al.*, “Timing and low-level rf system for an x-ray laser”, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 2016, p. 022001.