

レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線型加速器の基本設計

BASIC DESIGN OF A LINAC TO INJECT ULTRA-SHORT PULSE ELECTRON BEAMS INTO LASER PLASMA WAKE FIELDS

大竹雄次^{#,A)}, 増田剛正^{A)}, 益田伸一^{A)}, 田中俊成^{B)}, 境 武志^{B)}, 小柴裕也^{C)}, 大塚誠也^{C)},
坂上和之^{D)}, 熊谷教孝^{A)}

Yuji Otake^{#,A)}, Takemasa Masuda^{A)}, Shinichi Masuda^{A)}, Toshinari Tanaka^{B)}, Takeshi Sakai^{B)}, Yuya Koshihara^{C)},
Seiya Otsuka^{C)}, Kazuyuki Sakaue^{D)}, Noritaka Kumagai^{A)}

^{A)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)}Nihon University

^{C)}Waseda University

^{D)}The University of Tokyo

Abstract

Innovative particle acceleration technique is laser-plasma wakefield acceleration, which has possibility to dramatically reduce its acceleration length. The technique opens a new window of portable accelerators, as which is employed in industry factories. Even though the technique has the great possibilities, its acceleration feature is not apparent yet. Therefore, extremely short test electron bunches generated by a linac with several femtoseconds in rms and, X and Y transverse sizes of $\sim 50 \mu\text{m}$ in rms to adapt the size of a laser-plasma wakefield phase space should scientifically reveal the acceleration feature of the phase space. We are presently developing the linac to study on the feature. The linac comprises a C-band laser triggered RF gun, a C-band $2\pi/3$ mode traveling wave buncher with 24 cells to longitudinally focus the beam and a Q triplet system to transversely focus it. An electron beam orbital-tracking simulation elucidated the linac can realize our demand at the beam focus point of the wakefield with an operation electron charge of 100 fC and an energy of 10 MeV.

1. はじめに

粒子加速器は、半世紀以前に原理的な動作が確認されて、現状では科学的な発見や医療などに必要不可欠な道具となった[1]。であるが、その建設予算や大きさは重厚長大で、小さな工場や病院で使用出来るものではない。このような状況を打開するためには、加速器を工場の製造ラインや病院の手術室規模で使用出来るサイズやコストにすることが強く求められる。この事が、加速器の広範囲な普及には欠かせない。レーザープラズマ航跡場加速は、この従来の加速器の考え方をコペルニクスの転回で転換できる可能性を持ち、加速エネルギーで規格化した加速距離としては従来の1/1000以下である。

科学技術振興機構の未来社会創造事業[3]では、レーザープラズマ航跡場を使用した小型電子加速器の実証を目指し研究している。この加速器が実現すれば、小型の装置でフェムト秒幅領域の電子線の発生が可能となり、それによる自由電子レーザーの増幅や極端パルス電子線回折装置、手術室に入るような電子線滅菌装置が可能となる。プラズマ航跡場電子加速では、実験が行われて8 GeV程度で10%程度のエネルギー幅の加速に成功しており[4]、現状で小型化の可能性を示しつつある。しかしながらその加速場の位相空間の詳細な解明は、実験的にはなされていない。

このプロジェクトの実施機関の1つは、高輝度光

科学研究センターである。そこでは、線型加速器により百 μm 径以下で数十 fs 幅以下の電子ビームを生成し、それを後段加速するためのレーザー航跡場が発生するキャピラリーに大強度・短パルスレーザーと共に入射する研究開発を実施している。我々は、線型加速器からこのプラズマ中に入射された電子の振る舞いを観測することで、レーザー航跡場の加速特性の精密調査を行い、現状では明確でない特性の詳細解明を目指している。具体的には以下である。プラズマ航跡加速場の位相空間は、縦方向サイズがフェムト秒領域のバンチ幅(rms)で横方向サイズが100 μm 程度である[2]。我々は、テスト電子バンチを高安定な線型加速器で生成して、そのバンチをプラズマ航跡加速場の位相空間に対して縦・横方向で振ることで、航跡場の加速特性のマッピングを目指している。このようなデータは、今までに明確になっておらず、その取得が本研究の中心課題である。

2. テストバンチ生成用極短バンチ線型加速器に対する要求事項

我々は、Fig. 1 の概念図に示すようなレーザープラズマ航跡加速場への入射用線型加速器を開発する。その装置の性能には以下の条件が課せられる。

A. 前記したように、レーザー航跡場での電子の加速距離が従来の加速器に比較して非常に短いので、なるべく小さい入射器にする必要がある。入射装置の大きさが、プラズマ航跡場加速装置より何十倍も大きかったら製作する意味をなさなくなる。

[#] otake@spring8.or.jp

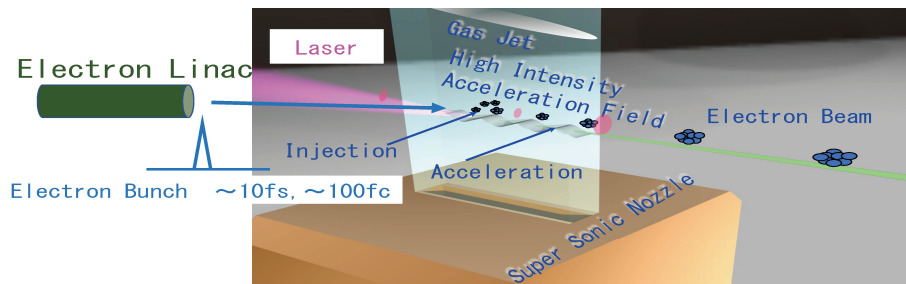


Figure 1: Basic idea of linac to inject to laser plasma wakefield.

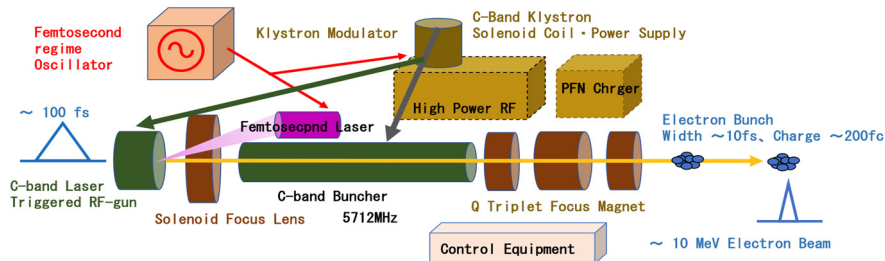


Figure 2: Configuration of linac.

B. プラズマ振動周波数で決まる航跡場の縦方向の大きさから、入射電子ビームのバンチ長は例えば 10 fs 以下が必要である。

C. 横方向のビームサイズは、ヘリウムなどのガスに短パルス・高強度レーザーを照射して光電離により航跡場を生成する点や、レーザーの横方向サイズや航跡場を生成するためにガスを通して放電させるガラス管（キャピラリー）などの径から、例えば rms で 100 μm 程度にする必要がある。

D. 本開発加速器は、プラズマ航跡場の加速特性を診断するためのテストバンチを生成する装置であるから、その出射電荷量はコア型の電流モニター(CT)で検出できる最低 100 fC 以上は必要である。そうでなければビームの診断が難しくなる。勿論、ビーム診断のみを考えれば線型加速器からの出射電荷量が多い方が良いが、空間電荷効果によるビームの縦・横方向のサイズの進行方向に沿った増大を考えると、テストバンチとしての電荷量はなるべく少ない方が良い。この考え方から本研究では、線型加速器からの出射電荷量は、初期設計案としてビーム電流モニターで検出ができそうな 100 fC 以上とした。勿論今後の検討で、より大きな電荷量で前記の所望の縦・横方向サイズが実現できるなら、その限りではない。

3. レーザープラズマ航跡場入射用線型加速器設計方針

3.1 設計した加速器の概要

現在我々は、開発予定の線型加速器の基本設計を終了しており、その概要を Fig. 2 に示す。線型加速器の主な構成は、C バンド(5712 MHz)・レーザー高周波電子銃、ソレノイドコイル・レンズ、C バンド・バンチャー、Q のトリプレット集束系である。高周波電子銃が 100 fC の電荷、100 fs のバンチ幅で 2 MeV 程度のエネルギーの電子バンチを発生し、進

行波型バンチャーが加速・速度変調により 10 MeV 以上で数十 fs 以下にパルス電子をバンチ圧縮する。最終的に Q トリプレットは、電子バンチをプラズマ加速領域の位相空間に整合する 100 μm (rms)程度のサイズに集束する。以下に前節の各条件に対しての設計案を示す。

3.2 加速器の小型化

前節の A の条件を満たすためには、加速空洞のサイズがその運用周波数に反比例する一方、達成できる最大加速電界強度は比例して大きくなることから、我々は技術的な運用実績も考慮して C バンド(5,712 MHz)線型加速器を採用した[5]。勿論、X バンド(11,424 MHz)加速器を使用すればより小さい装置が実現できるが、まだその技術は汎用で無く、それ故に構成要素も高価であるために採用を見送った。

3.3 10 fs 以下の短バンチ電子の生成

B の条件を実現するためには、電子線型加速器で 10 fs 以下の短バンチを生成する必要がある。この生成の実現方法は、新奇アイデアが無い限り以下の 3 点に集約される。1 つは、従来ある電子ビームの速度変調方式である。数 MeV 以下（一般的には 0.5 MeV 程度まで）の電子を使い、バンチャー加速管内の加速高周波の非クレスト部が電子バンチの速度変調を行う。加速管後のビームのドリフト空間が、速度変調を密度変調に変換して短バンチ化をする[6]。ちなみにこの方法の発展系として、University of California Los Angeles (UCLA)では、約 7 fs のバンチ長を実現している[7]。

次の方法は、自由電子レーザーで使用されている。加速空洞内の高周波電界強度の勾配が、エネルギーチャープを数 MeV 以上の相対論的な電子バンチに沿って付ける。4 台の偏向電磁石で構成されたシケインによるバンチ圧縮器が、電子ビームのチャープ

に比例した位相回転により短バンチ化する[8]。この方法は自由電子レーザーなどでも使用されて確実であるが、装置の規模が大きく予算的にも高額になる。

3 番目の方法は、10 fs 以下の電子バンチをレーザー高周波電子銃から直接生成するものである。この方法は、加速器の加速方向のサイズが以上の方法の中で一番小さく、予算も最低で済む。その理由は、加速器本体の構成要素がクライストロンなどの大電力高周波源と導波管などの高周波電力輸送系、1 つの高周波空洞の実装のみで済むからである。しかしながら 100 fC 程度の電荷とはいえ、今までに 10 fs 以下の電子バンチが直接にレーザー高周波電子銃から生成された例は無い。

以上の検討から今回の研究に於いて我々は、実績のある線型加速器による速度変調を使用したフェムト秒領域のバンチ生成である 1 番目の方法を、開発の優先課題とした。またこの方法の建設費用は、2 と 3 の方法の中間であり装置の実現度も増す。勿論、3 番目のレーザー高周波電子銃から極短パルス電子を直接生成することは、費用面や装置規模で魅力的である。現状では、この研究は 1 番目の方法と両立できる可能性があるため、我々は継続検討課題とした。この実現には、長期の研究が必要であると判断したのも継続検討とした理由でもある。

3.4 100 μm 程度の横方向サイズの短バンチ電子の生成

前記したように、レーザープラズマ航跡場に打ち込む電子バンチの横方向サイズは、プラズマ生成用レーザーのサイズから、100 μm (rms)程度が必要である。C の条件を実現するために我々は、以下の手法で電子ビームの最終集束ビームサイズを得るようにした。電子発生用レーザーの横方向サイズ (数百 μm (rms)) で決定される電子銃からの出射ビームサイズは、その後段加速での減衰はあるが、現状の最終エネルギーの 10 MeV 程度では横方向の空間電荷効果で大きな減少は期待できない。電子銃からの出射電子ビームは、そのエミタンスが良くエネルギー幅が狭く、それを維持するように輸送すれば、集束・発散が自由自在である、そのために我々は、この点を今回のビーム輸送系の設計で重視した。電子銃を出た後のエネルギーがまだ数 MeV の領域では、ソレノイド磁場を使用するビーム集束が一般的である。このようなソレノイド磁場集束では、ブリリアンフロー[9]などの概念からビームを強く絞るのは得策ではない。このため我々は、横方向の空間電荷効果を強くしないようにビームの電荷密度を下げて運用することを主眼とした。これは、電子銃で発生した時点での全幅で数百 μm 程度のビーム径をなるべく維持しつつ加速器に沿って輸送することである。この条件は、レーザー高周波電子銃空洞から縦方向を速度変調するバンチャー空洞出口までに適用される。

バンチャーを出た後にエミタンスを小さく維持されて輸送されたビームは、Q のトリプレット磁石を使用して横方向に集束される。最終的にビームは、このトリプレット磁石後のドリフト空間に沿って、

レーザー航跡場に至る点までに縦・横方向に集束される。集束点での縦・横方向サイズは、各 10 fs 以下で数百 μm (rms)以下である。

4. 設計したレーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線型加速器

4.1 設計した線型加速器の概要

以上の設計方針に従って我々は、前節の速度変調案に相当する Fig. 2 の線型加速器を開発することにした。その構成は先に述べたように、C バンドの 2.6 セル・レーザー高周波電子銃による短電子バンチ発生、進行波型バンチャー加速管による速度変調 (縦集束) と Q トリプレット磁石によるビームの横方向への最終集束システムである。それにより電子ビームは、数 fs で約 100 μm (rms)に集束される。本装置の特徴は、従来の加速器のように速度変調が容易な 0.5 MeV 以下の電子をバンチャー加速管により扱うのではなく、2 MeV 程度のより高い β の電子を電子銃から発生して、それをバンチャー加速管により極短パルス化する点にある。電子のバンチング過程でのエネルギーを大きくすることで、空間電荷効果を抑えてエミタンスの悪化を低減することにある。この点は、従来の加速器の特徴から大きく変わる部分である。加えて、エミタンスなどのビームの質が悪化すると最終集束点でビーム絞れなくなる可能性があるため、当面我々は空間電荷効果低減のためにビームの電荷量を 100 fC 程度に抑えることにした。しかしながら最終的には、継続した実験や改良により、現状でプラズマ航跡場加速で実現している少なくとも数 pC 以上の電子ビームを加速したいと考えている。その加速器の基本仕様を Table 1 に示し、以下に設計の具体案を示す。

Table 1: Specification of Injector Linac for Laser Plasma Wakefield Acceleration (LPA)

Item	Specification
Beam Energy	10 ~ 20 MeV
Energy Spread	0.02 %
Beam Charge	10 ~ 1000 fC
Beam Pulse Width	< 10 fs (rms)
Beam Pulse Repetition	< 30 pps
RF Source Peak Power	< 50 MW
RF Pulse Width	1 ~ 4 μs
Beam Emittance	< 4×10^{-9} mrad
X&Y Focal Point Beam size	~ 50 μm (rms)
Focal Point Bunch Length	< 3 fs (rms)

The focal point means the point of the LPA.

4.2 レーザー高周波電子銃空洞

今回の加速器に採用したレーザー高周波電子銃空洞は、高エネルギー加速器研究機構と日本大学のグループが開発を進めていたものを基本にしている [10]。それは Fig. 3 に示す 2.6 セル空洞であり、図には CST Studio Suite (CST)により計算された内部の電

磁界の時間ショットを示す。空洞の特徴としては、シャントインピーダンスを上げるためにベル型形状を持ち、大電力高周波の入力部が空洞下流にある。大電力高周波入力部は、空洞と結合する TM01 モード円形導波管と TE10 モード角形導波管のモード変換部で構成される。このような入力結合部を用意した理由は、円形伝送路のモードが TM01 進行波であるが故に、通常の定在波による結合器と比較してそのモードの電界強度を半分以下にできる点である。また、モード変換部の角形導波管と対向した部分にダミーの導波管を付けることで、結合部分の電磁界の非対称性は 1 ポートの角形導波管結合と比較して低減する。進行波とダミー導波管による結合部の非対称性電磁界成分強度の低減は、ビームへの不要な横方向キックや集束成分を低減でき、これによりビームのエミッタンスの悪化も低減できる。このような特徴を持つ空洞であるが、その特性を Table 2 に示す。

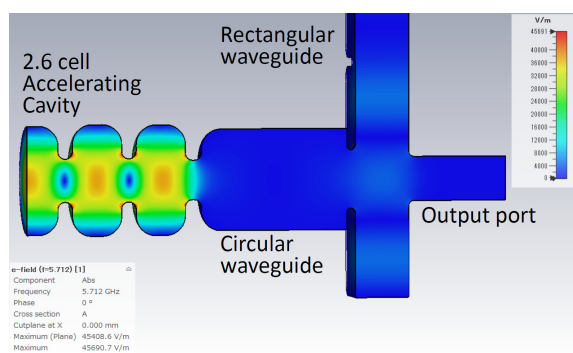


Figure 3: 2.6 cell RF electron gun.

Table 2: Specification of Laser Triggered RF Gun

Item	Specification
Beam Energy	2 ~ 3 MeV
Beam Charge	10 ~ 1000 fC
Beam Pulse Width	< 100 fs (rms)
Beam Pulse Repetition	< 30 pps
RF Source Peak Power	< 2 MW
RF Pulse Width	1 ~ 4 μ s
Beam Emittance	$\sim 3.5 \times 10^{-7}$ mrad
X&Y Beam size	~ 1 mm (rms)
Acceleration RF Mode	π
Unloaded Q	> 12,000
Shunt Impedance	> 90 Ω /m
Filling Time	0.28 μ s
Laser Pulse Width	~ 100 fs (rms)
Laser Pulse Power	1 μ J ~ 1 mJ
Laser Wave Length	~ 265 nm

4.3 バンチャー加速管

従来の加速器での電子ビームの速度変調によるバンチ圧縮では、進行波型バンチャー加速管のビームの入り口付近でのセル長は、低い β に合わせた長いものから加速による β の上昇に比例した短いものに徐々に変わる。先に述べたように我々は、本加速器

に於いて高 β でのバンチ圧縮を考えている。今回のように 2 MeV 程度の電子をバンチャーで速度変調する場合は、 β がほぼ 0.97 程度で速度は殆ど変化しない。今回設計したバンチャー加速管は、それに沿ったセルの寸法を一定とした定インピーダンス(CI)管である。このために加速電子が、加速管入り口付近で高周波の位相速度に対して多少スリップするが、それは無視出来る程度である。このCI管採用により、構造が簡単になり低価格で製造でき、加速管セルの周波数調整や導波管入出力結合器の寸法調整が簡素化できる。加速モードは従来を踏襲して $2\pi/3$ モードとして、導波管・加速セル結合器は電磁場の非対称性によるビームの横方向キックを低減できる 2 ポートを導入した[11]。結合器への入力高周波電力は 20 MW、4 μ s 程度を想定している。これにより、電子を速度変調して非クレスト加速をしたとしても、次節のビームの軌道シミュレーションから加速管全体で 10 MeV 以上の加速利得が期待できる。今回進行波型のバンチャーを採用した理由は、反射波がクライストロンに悪影響を与えないようにするためと、20 MW 程度の高周波に耐えられるクライストロンを保護するためのサーキュレータの調達が技術的に難しいからである。バンチャー加速管は、非クレスト加速を行うので 2 ポートでも余分な集束力が発生する[12]。我々は、この効果を低減するために 4 ポート入力も検討したが、加速管の通常セル部での加速モードとそれ以外の電磁界の混在がシミュレーションで確認されたので、この方法を採用しなかった。加速管のセル数は、達成できる電子のエネルギーや物理的に導波管などが接合できるかなどの条件（物理的な干渉）から、結合器セルも含めて 24 セルとした。以上の設計指針に従い空洞の結合セルや通常セルの寸法を決めるために、我々は Fig. 4 のシミュレーションを行った。さすがに 24 セルの電磁界シミュレーションを行うのは現実的では無いので、CI管である特徴を生かして 6 セルでのシミュレーションを行った。CI管では、セル数が実機とシミュレーションで違ってもセルの寸法が加速管に沿って変わらないので、通常セルや結合セルの高周波的な寸法はセル数に依存しない。これ故に、このようなセル数の少ないシミュレーションで今回の加速管を設計しても、何ら問題は無い。以上のような指針で設計したバンチャー加速管のパラメータを Table 3 に示す。

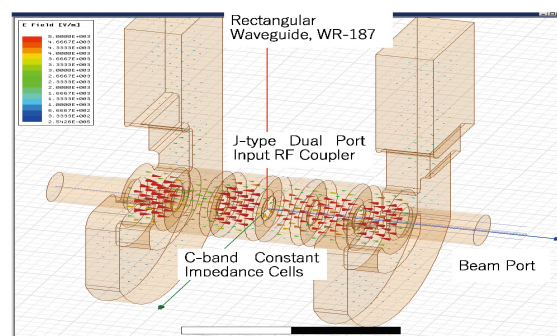


Figure 4: $2\pi/3$ acceleration mode along traveling wave buncher.

Table 3: Specification of Traveling Buncher

Item	Specification
Cavity Type	Disk Loaded
Operation Frequency	5712 MHz, C-band
Output Beam Energy	10 ~ 20 MeV
RF Pulse Repetition	< 30 pps
RF Source Peak Power	< 30 MW
RF Pulse Width	1 ~ 4 μ s
Operation Frequency	5712 MHz, C-band
Acceleration RF Mode	TM01-Traveling Wave, $2\pi/3$
Unloaded Q	> 8,000
Shunt Impedance	> 55 M Ω /m
Filling Time	~ 0.1 μ s
Group Velocity v_g	~ 0.023c
Cumulative Phase Error	< 3 deg
RF Coupler	J Type (Dual Feed)

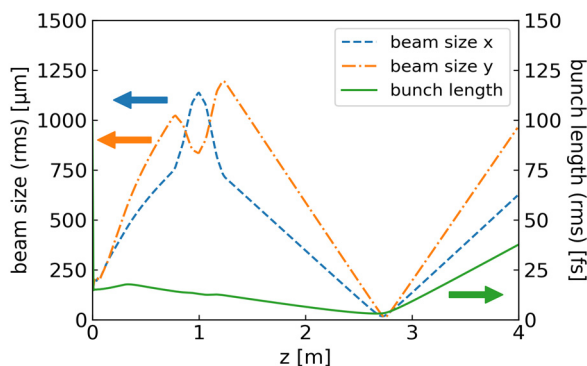


Figure 5: Beam envelope along linac.

4.4 加速器に沿った電子ビームの輸送特性

既に述べたように加速器に沿った電子ビームの輸送では、空間電荷効果によるビームの発散を低減するために輸送中の電子密度を上げないようにした。レーザー高周波電子銃で発生した点でのビームの縦方向のサイズ (100 fs, rms) と横方向の径 (200 μ m, rms) は、バンチャーと Q のトリプレット間であるべく絞らずに維持されるものとした。前記した要素を使用した加速器に於ける設計されたビーム輸送の様子は、Fig. 5 に示すものである。このシミュレーションは、General Particle Tracer (GPT) を使用して行われた。シミュレーションに使用した電子の数は 10,000 個で、電荷量は 100 fC、想定するレーザーサイズは 200 μ m で、それぞれは rms の値である。電子ビームの高周波電場に対する出射位相は -5 deg で、バンチャー内の高周波電場のビームに対する位相は 226 deg である。電子銃の直下流のソレノイドコイルの集束磁場は、500 (A/T) * 0.1 m である。Q 磁石の磁場は、上流から各々 0.8、-0.925、0.945 T/m である。このシミュレーションでの Q トリプレット後の縦方向集束点でのビームサイズは、各で X=44.3 μ m、Y=56.7 μ m、バンチ長=2.867 fs (rms) であり、我々の要求を満足するものとなっている。前記の集束点は、

陰極位置から計って 2.69 m である。ちなみにこのシミュレーションは、Fig. 3 の CST により計算した電子銃の 3 次元電磁分布を GPT に取り込んで行ったビーム軌道のトラッキングである。特に β の小さい場所で 3 次元電磁場を入力してシミュレーションを実施しているので、ビームの振る舞いはより現実に近いものと考えている。他の加速器の構成要素は、GPT に用意されたものを使用しており、3 次元ではあるが軸対称の要素となっている。しかし電磁石に於いては、要素端部の軸方向の漏れ磁場がシミュレーションに反映されている。

5. まとめ

我々は、レーザープラズマ航跡場への入射用電子線型加速器の基本設計について本稿で述べてきた。航跡場の発生点での最終集束に於いて、航跡場の位相空間に適合する所望の 50 μ m (rms) 程度の横方向サイズと 3 fs 程度の縦方向サイズの実現性を、シミュレーションにより示した。現状の研究の進捗は、本稿の結果と、製作した本線型加速器用のクライストロンモジュレータで所望の性能 (350 kV, 4 μ s) を得ている点である。加えて、高周波電子銃空洞と進行波型バンチャー加速管の具体的な設計をしつつあることで、近く製作を開始する点である。

謝辞

本研究は、JST の未来社会創造事業 JPMJMI17A1 の支援で行われている。著者等は、事業の参加メンバーに対して、彼らの本研究に関する助力に感謝するものである。

参考文献

- [1] 熊谷寛夫編集、加速器、実験物理学座 28、共立出版、1975.
- [2] 小方 厚、レーザー/プラズマ加速の概要、加速器とレーザー特集、OHO 加速器スクール、高エネルギー加速器科学奨励会、1998、pp. IV-1-IV-49.
- [3] <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>
- [4] A. J. Gonsalves *et al.*, Phys. Rev. Lett. 122, 2019, pp. 084801
- [5] T. Inagaki *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 080702, 2014.
- [6] J. C. Slater, *Microwave Electronics*, D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC., 1950. pp. 226-23.
- [7] J. Maxson *et al.*, Phys. Rev. Lett. 118, 154802, 2017.
- [8] M. Dohlus *et al.*, Electron Bunch Length Compression, I. S. Ko. (Eds), ICFA Beam Dynamic Letters, Chapter 4.1, No. 38, 2005, PP. 15-23.
- [9] Martin Reiser, Theory and Design of Charged Particle Beams, WILEY-VCH, 2004, pp. 212-221.
- [10] T. Tanaka *et al.*, CHARACTERIZATION OF COLD MODEL CAVITY OF CRYOCOOLED C-BAND 2.6-CELL RF GUN AT 20K, Proc. of IPAC2017, MOPIK009, 2017 pp. 518-521.
- [11] C. Suzuki *et al.*, INPUT COUPLER DESIGN FOR C-BAND ACCELERATING STRUCTURE, Proc. of PAC'97, 1997 pp. 536-539.
- [12] H. Maesaka *et al.*, ANALYSIS AND MEASUREMENT OF FOCUSING EFFEC IN A TRAVELING WAVE LINEAR ACCELERATOR, Proc. of FEL2013, TUPSO46, 2013, pp. 329-333.