

# LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR FOR RADIOBIOLOGY RESEARCHES

Kazuyoshi Koyama<sup>\*A,B)</sup>, Aimierding Aimidula<sup>A)</sup>, Yosuke Matsumura<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Yoshidau<sup>B)</sup>, Takuya Natsui<sup>B)</sup>,

<sup>A)</sup>The University of Tokyo

2-22, Shirakata-shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1188

<sup>B)</sup>KEK

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

Parameters of a laser-driven one-dimensional dielectric accelerator were derived from a simple model. In order to obtain 1-MeV electrons, the accelerator length of 2.7 mm is illuminated from both sides by 32 mJ laser pulse which consists of 10 sequential pulses. The length of each laser pulse is 400fs.

## レーザー駆動誘電体加速器；放射線生物学研究への応用を目指して

### 1. はじめに

レーザー駆動粒子加速器にはプラズマを利用する方式と誘電体周期構造を利用する方式が知られている。前者は高電荷量 (nC) かつ高電界加速 (GV/cm) が可能であるが、数十 TW 以上のレーザーが必要である。後者は電荷量は fC と小さく加速電界はプラズマに比べて桁程小さいが、必要なレーザー出力はプラズマ方式の 1/100 程度で済む。従って、数十 kHz 以上の高繰り返し動作が可能である。またビーム径はレーザー波長程度である。マイクロビーム、超短パルスなどの特徴を生かした応用の一つに、放射線生物学研究がある。

高周波加速器では金属でできた遅波回路によって、荷電粒子の速度に一致した、光速より遅い位相速度の加速電場を作り出しているが、周波数が高い光の領域では金属を使った構造は採用できない。誘電率が周期的に変わる構造 (光結晶) を用いると、周期構造からの反射・回折光の干渉によって波長の十倍程度の範囲に光を閉じ込める事ができる。更に、光結晶の周期構造に欠陥を導入する事によって、光に対する遅波構造も可能になる。これまでに、積み木を重ねたような三次元構造の加速器<sup>[1]</sup>、蓮根のような形をした二次元構造の加速器<sup>[2]</sup>、回折格子に似た一次元構造の加速器<sup>[3]</sup>に関する理論的研究が行われてきた。

我々は、製作の容易さの観点から、一次元構造を基本とし、透過型回折格子と似た構造を持つ位相マスク型加速器 (a phase-modulation-mask-type laser-driven dielectric accelerator; PLDA) の試作に向けて設計を進めている。<sup>[4]</sup> 本稿では、加速の原理と加速器構造や電子バンチなどのパラメータの見積もりに関して述べる。

### 2. 加速の原理と構造

#### 2.1 原理

PLDA では、図 1 に示すように、粒子の加速方向に垂直な方向から加速方向と平行または反平行に偏光した、直線偏光レーザーを入射する。加速距離がレーザーの半波長よりも長い場合には、加速・減速の繰り返しが起こ

り、正味の加速は無い。粒子を加速するためには、半波長毎に光の位相を  $\pi$  だけ変える。誘電体を周期的に並べて回折格子のような構造を採ると、格子のバーの内外で位相速度が異なるので、透過光は周期的に位相が異なる波面を形成する。格子の厚さを適当に選ぶと、加速チャンネルの中心で、半波長毎に電場の向きがちょうど反対向きになり、光の電場振動の半周期毎に電場の向きが入れ替わる定在波に似た電場分布を作る事ができる。この電場によって粒子を加速できる。格子を支えるベースプレートは、レーザーの入り口側に置いても加速チャンネル側に置いても本質的な違いはない。材料の強度次第ではベースプレートを除いて、障子の様な自立型格子にすることも可能である。ただし、ベースプレートを加速チャンネル側に置く場合には、格子から中心軸までの距離がやや長くなるので、回折などの影響を受けやすい。

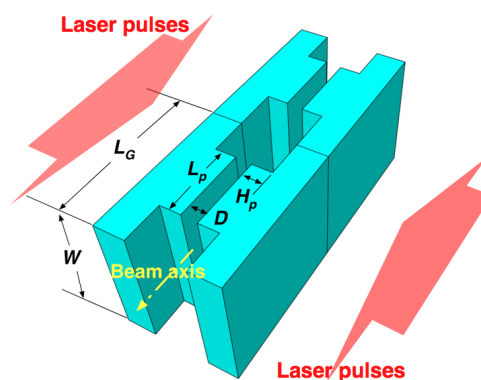


図 1: PLDA 加速器構造の模式図とパラメータ

#### 2.2 パラメータ

PLDA の形状は図 1 に示すように、格子の周期  $L_G$ 、格子の幅  $L_p$ 、格子の高さ (厚さ)  $H_p$ 、加速チャンネルの間隔  $D$  によって表される。簡単のために、格子の長さ (加速チャンネルの幅)  $W$  は  $L_G$  に比べて十分大きいとする。電場の時間振動と空間分布を正弦波で近似し

\* koyama@nuclear.jp

て、電子の速度が非相対論的な場合について入射電子の速度  $v_0$  と  $L_G$  の関係を求めると、レーザーの波長を  $\lambda$  として、

$$\frac{v_0}{c} = \frac{L_G}{\lambda} \quad (1)$$

となる。

格子の厚さは、格子の内外での波面の位相差が  $\pi$ , になる条件から求められる。  $n$  を格子の材料の屈折率として、レーザーの波長で規格化した格子の厚さは、

$$\frac{H_p}{\lambda} \approx \frac{1}{2(n-1)} \quad (2)$$

となる。

チャンネルを挟んだ格子の間隔は、回折が電場分布を大きく変えない条件

$$\frac{D/2}{\lambda} \ll \frac{L_P^2}{\lambda^2} \quad (3)$$

を満たす必要がある。大体  $L_P \approx \lambda/2$  であるから、  $D \ll \lambda/2$  となる。  $D$  が大きくなると近傍の格子からの回折光の干渉の影響が現れる。

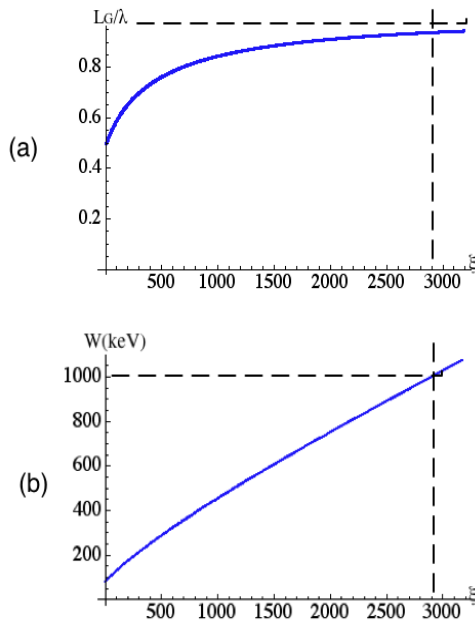


図 2: (a) 非相対論的な電子を加速する場合に必要な格子の周期  $L_G$ . (b) 加速エネルギー  $W$ .  $\xi = x/\lambda$  はレーザー波長で規格化した加速距離。加速電場  $8.7 \text{ GV/m}$  を仮定。点線は  $1 \text{ MeV}$  のエネルギーを得る時のパラメータ。

入射電子のエネルギーが非相対論的な場合には、  $L_G$  は式 (1) の関係から得られる値から始まって、粒子の加速につれて図 2(a) に示すように、次第に大きくし  $\lambda$  に漸近させなければならない。このときの運動エネルギーの変化を、図 2(b) に示す。これらの図から分かるように、初期の格子の周期を  $L_G/\lambda = 0.5$  とした場合には入射電子のエネルギーは  $79 \text{ keV}$  となる。ここでは、格子の幅と真空の部分の幅の比  $L_p/(L_G - L_p)$  を 1 とした。

規格化された格子の厚さは、屈折率を  $n = 1.44$  として  $H_p/\lambda \approx 1.1$  である。上記の単純化した見積りではエネルギー  $1 \text{ MeV}$  を得るに必要な加速の長さは、レーザー波長の約  $2,800$  倍である。

### 3. レーザーの仕様

レーザーの強度はレーザー電場による誘電体の破壊で制限され、レーザーのパルス幅は加速に必要な時間に等しい。例えば、  $\text{SiO}_2$  の、パルス幅が  $100 \text{ fs}$  から  $1 \text{ ps}$  で波長が約  $1 \mu\text{m}$  のレーザーに対する光学的破壊の閾値は  $I_{th} \approx 10^{13} \text{ W/cm}^2$  ( $E_{th} \approx 8.7 \times 10^7 \text{ V/cm}$ ) である。<sup>[5]</sup> 必要なレーザーのエネルギー  $E_L$  は、照射面積  $A$  とパルス幅  $\tau_L$  を使って、

$$E_L(1) = I_{th} A \tau_L = I_{th} L_A^2 W / \langle v \rangle \quad (4)$$

と表される。ただし、  $L_A$ ,  $W$  と  $\langle v \rangle$  は夫々、加速距離、加速チャンネルの横幅、電子の平均速度である。

レーザーのエネルギーを減らすことは、レーザーのパルス幅を短くする、すなわち電子が存在する領域近傍のみを照射すれば可能である。たとえば、全加速器時間  $\tau_L = L_A / \langle v \rangle$  を  $N$  分割しパルス幅を  $L_A / \langle v \rangle / N$  にすると、パルス当たりの加速距離も  $L_A / N$  になるので、必要な夫々のレーザーのエネルギーは、

$$E_L(N) = I_{th} L_A^2 W / (\langle v \rangle N^2). \quad (5)$$

となる。このようなパルス分割照射に関しては Plettner<sup>[3]</sup> が、超短パルスを多数に分割して、夫々のパルスを反射鏡を使った光学遅延回路を通して照射する方法を提案しているが、レーザーと加速器の間には堅牢な光学台と複雑な光学マウントが必要である。我々は、移動や取り扱いの自由度を増すために、レーザーと加速器の間を光ファイバーで結合することを検討している。図 3 に示すように、レーザーにファイバーレーザーを用いて、必要なパルス数に分割後に、一つは陰極の励起源に、残りを適当な長さのファイバーで遅延を調整しつつ夫々のパルスを増幅して照射する。この場合、出力の相互の位相調整は必要である。

上記の破壊の閾値  $8.7 \times 10^7 \text{ V/cm}$  (レーザー強度では、  $10^{13} \text{ W/cm}^2$  に対応)<sup>[5]</sup> を使って、  $1 \text{ MeV}$  の電子加速に必要なパラメータを表 1 に載せる。例えば、片側の励起を 5 分割 (全体で 10 分割) すると、レーザーのエネルギーを  $19 \text{ mJ}$  から  $3.8 \text{ mJ}$  に減らすことができ、ファイバー当たりのレーザーパルスは、  $380 \mu\text{J}$ ,  $400 \text{ fs}$  ですむ。ただし、実際には、反射・回折による損失があるので正確な見積りには数値シミュレーションを用いる必要がある。

ファイバーレーザーは空間モードがほぼ  $\text{TEM}_{00}$  であり集光に優れているので加工機に使われる事が多く、最近では  $10 \text{ kW}$  の連続発振も可能になってある。一方、パルス発振でも性能の向上は著しく、先頭出力  $1 \text{ GW}$  でパルス幅が  $1 \text{ ps}$  (パルスエネルギー  $10 \text{ mJ}$ ) のパルスを、繰り返し  $50 \text{ kHz}$  で得ることに成功している。<sup>[6]</sup>

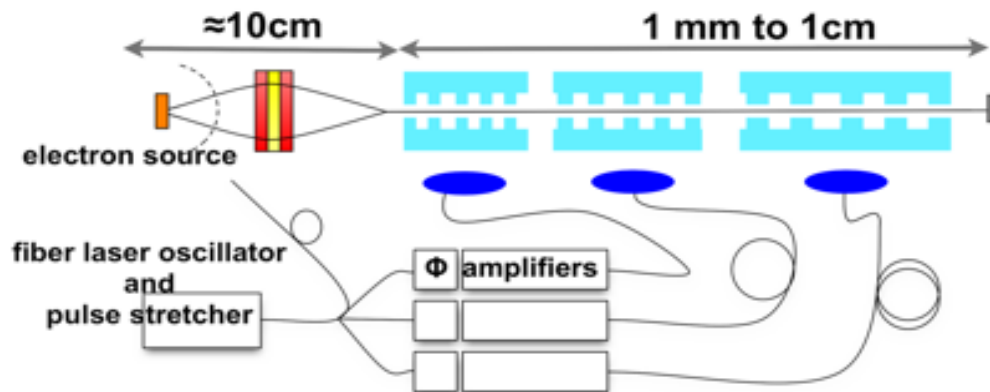


図 3: ファイバーレーザーを使った誘電体加速器の概念図。Φ は位相調整器。

表 1: 1MeV の電子加速に必要な加速器とレーザーのパラメータ。ただし、レーザー波長を  $1\mu\text{m}$  とし、反射・回折などの影響は無視した。

格子周期 $L_G$	0.5λ から 0.94λ
入射エネルギー	79 keV
加速チャンネル幅 $W$	0.1 mm
加速長 $L_A$	0.48 mm
照射面積 (片側) $A$	$4.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$
加速時間 $\tau_A$	2 ps
レーザーパワー $P_L$	4.8 GW
エネルギー (片側)	9.6 mJ
パルス幅 $\tau_L$	2 ps
パルス分割数 (片側) $N$	5
ファイバー当たりのレーザーパワー	950 MW
ファイバー当たりのエネルギー	0.38 mJ/fiber
片側の合計エネルギー	1.9 mJ
パルス幅	400 fs

#### 4. まとめ

放射線生物学研究への応用に当たっては、電子エネルギーは試料セルの構造で左右されるが数百 keV から数 MeV の範囲である。初期電子の速度は格子構造の周期  $L_G$ 、レーザー波長  $\lambda$  で決まり  $v/c = L/\lambda$  である。入射電子のエネルギーが非相対論的な場合は加速につれて  $L_G$  を  $\lambda$  に漸近するように大きくする必要がある (1MeV で  $L_G/\lambda = 0.94$ )。次元構造を基本とする位相マスク型加速器 (PLDA) に対する簡単な試算では、1MeV の電子を得るためには、格子周期  $L_G$  を波長の半分から波長まで変化させた構造を用いて、全体で 0.48mm の長さで済む。加速チャンネルの断面の大きさを  $100\lambda \times 0.5\lambda$  ( $100\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ ) として、必要なレーザーのパワー、エネルギーとパルス幅は夫々 4.8GW、19mJ (両側)、2ps となる。レーザーの負担を小さくするために、片側 5 分割 (全部で 10 分割) するとレーザーのパワー、エネルギーとパルス幅は夫々 950MW、3.8mJ (両側)、400fs に軽減される。励起のためにファイバーレーザーを用いると、ファイバー当たりのエネルギーは 0.38mJ (950MW) で済む。反射・回折による損失がある

ので正確な見積りには数値シミュレーションを用いる必要があるが、桁違いではないであろう。これは、現在のレーザー技術で達成可能なパラメータであり<sup>[6]</sup>、入射電子源を小型化できればきわめて使い勝手の良い加速器を実現できる。もし、約 10GW のレーザーパルス出力が難しい場合は、加速距離の延長で対応可能である。電場強度は照射強度の平方根に比例するので、必要なレーザーエネルギーの増加は照射強度の変化に比べて緩やかである。今後は、レーザーの導入方法、電子源の小型化の研究も開始して、実証器の設計を進める。

実証器の設計の当っては、誘電体境界での反射と回折の影響を取り込んで評価する必要がある、そのために CST コードを用いた電界計算シミュレーションを行っている。<sup>[7]</sup> また、励起用レーザーは市販品では間に合わないので、独自に開発を行っている。<sup>[8]</sup>

この研究は、科研費基盤研究 (C)24510120 によって行われた。

#### 参考文献

- [1] B. Cowan, *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **11** (2008)011301.
- [2] X. Lin, Phys. Rev. ST Accel. Beams **4** (2001)051301.
- [3] T. Plettner, P. P. Lu, and R. L. Byer, Phys. Rev. ST Accel. Beams **9** (2006)111301.
- [4] K. Koyama, *et al.*, Proceedings of IPAC2012 (New Orleans), **WEPPP019**, 2763 (2012). <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/weppp019.pdf>
- [5] A. -C. Tien, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82** (1999)3883.
- [6] J. Limpert, *et al.*, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **15** (2009)159.
- [7] A. Aimidula, *et al.*, Proceedings of HEDS2012 (Yokohama) **HED-P07** (in press), A. Aimidula, *et al.*, 本プロシーディングス. **THPS116** (大阪豊中, 2012).
- [8] Y. Matsumura, *et al.*, 本プロシーディングス. **THPS114** (大阪豊中, 2012).