

## Status of Linacs and Lasers at the University of Tokyo in 2010

Y. Nakazono<sup>#,A)</sup>, K. Koyama<sup>A)</sup>, T. Natsui<sup>A)</sup>, L. Kiwoo<sup>A)</sup>, H. Masuda<sup>A)</sup>, K. Miyoshi<sup>A)</sup>, A. Sakumi<sup>A)</sup> and M. Uesaka<sup>A,B)</sup>

<sup>A)</sup> Nuclear Professional School, School of Engineering, the University of Tokyo  
2-22 Shirakatashirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1188 Japan

<sup>B)</sup> Department of Nuclear Engineering and Management, The University of Tokyo  
2-22 Shirane-shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188

### Abstract

At the University of Tokyo, a linac with photocathode RF gun with cartridge-type cathode exchanging system which produces high-brightness low-emittance sub- or femto second electron bunches has been researched and developed. Using the photocathode LINAC system, the application for observation of physico-chemical reactions by pulse radiolysis system in a time-range of picoseconds and sub-pico seconds was investigated. Na<sub>2</sub>KSb photocathode is the workable cathode and has been widely used for photomultipliers which can be driven by visible light. A Na<sub>2</sub>KSb photocathode was installed into RF cavity and the RF was aged. After aging for 12 h, UV light (266 nm; third harmonic of Ti:Sa laser 800 nm) and 400nm visible light (second harmonic) were brought in the Na<sub>2</sub>KSb cathode. The maximal charge was 3.1 nC at 266 nm and 1.6 nC at 400 nm. The saturation charge at 400 nm was half of that at 266 nm. The half life time of the cathode was 100 h. The damping of the quantum efficiency occurred rapidly and it reached 1/5 after 280 h. Electron injection has been investigated into the laser wakefield by the wave breaking in a density down ramp. An oblique shockwave in a supersonic gas flow of M=5 was utilized for producing the steep density ramp. The numerical simulation was performed by using a 1-D particle-in-cell (PIC) code to find the optimum condition for getting a high-quality electron beam. A preliminary experiment using the density ramp in the gas target suggested that electrons were injected by the wave breaking. Further investigations with help of 2-D PIC code were conducted to produce high-quality electron beam. A portable 950 keV X-band (9.4GHz) electron linac X-ray source for on-site non-destructive testing has been investigated at the University of Tokyo. A compact X-band 9.4 GHz magnetron of 250 kW for RF generation device has been adopted to realize an on-site diagnostics and the aim is to generate 0.2 Gy/min of X-ray at 1-m distance. This linac has a problem of short beam current. The comfortable amounts of X-ray have not been achieved yet. This beam oscillation makes lack of beam current and it has been developed by a new simulation code using equivalent circuit analysis for research into a source of this matter.

## 東京大学原子力専攻ライナック・レーザー研究施設現状報告 2010

### 1. S バンド 18MeV 電子線形加速器

東京大学ライナック研究施設では 18L のビームラインは、光陰極 RF 電子銃(1.6 セル、BNL-typeIV)、ソレノイド磁石、進行波型加速管、四極電磁石、シケイン型磁気パルス圧縮器から構成される。0.3 TW の Ti:Sapphire レーザー(800 nm)を光陰極励起用及びプローブ用光源として用いている。S バンドとは電子銃及び加速管に電磁場を励起するために投入するマイクロ波の周波数帯であり 2856 MHz を表す。光陰極 RF 電子銃を用いた線形加速器とパルスラジオリス実験の体系を図 1 に示す。パルスラジオリス実験等の応用研究の際には、大電荷でかつエミッタンスの小さい安定な電子ビームを供給することが要求される。本研究で取り組むアンチモン系光陰極は、量子効率(入射光子に対する放出電子の割合を示す量)が高いことから、大きな電流量を発生させることができる。バンドギャップが小さく可視光領

域のレーザーで駆動できるという特徴を持ちレーザーの負担を低減でき高性能電子源開発は安定なビーム供給に大きく関係している。光陰極高周波電子銃は、高エネルギー・低エミッタンス・短パルスの電子ビームを生成することが可能な電子源として、国内外で研究開発が行われており高エネルギー加速器の入射器、医療・産業分野への応用等電子ビームの利用研究は大きな役割を果たしている。東京大学ライナック研究施設では線形加速器からの電子ビームを利用した応用研究として、放射線化学における極微量量子現象の解明のためのポンプ&プローブによるパルスラジオリス実験が行われている[1,2]。加速器からの電子ビームを高品質なものにするには、電子を発生する大元である電子源の高性能化および発生した電子を加速する高周波電子銃の最適化が不可欠である。本研究では、高輝度・超寿命の電子源としてのアンチモン系光陰極の開発、及び、光陰極電子銃における研究を主題として行う。

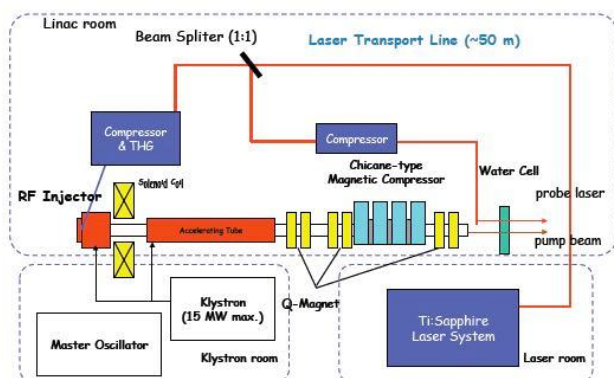


図1：Sバンド電子線形加速器の装置体系

光陰極高周波電子銃により陰極物質にレーザーを照射し光電効果による発生電子を高周波電場によって加速するがCs-Teなどの半導体光陰極は陰極製膜から電子銃への導入の間まで一貫して超高真空に保つ必要があり東京大学ライナック研究施設では図2に示すように電子銃の真空を破ることなく光陰極を交換できるカートリッジ式システムをJASRI/SPring-8、浜松ホトニクス(株)と共同で開発導入を行っている[3]。SPring-8においてカートリッジシステムを搭載した単セル高周波電子銃によりCs-Te光陰極の評価が行われた[4,5]。Cs-Teの量子効率率は3-4%であり数nCの電荷供給可能であるが紫外領域のレーザーが必要でありレーザーに負担がかかるという問題がある。可視光領域レーザーで駆動可能なアンチモン系光陰極の研究開発を行っている。カートリッジ式交換システムについては電子銃後方の空間的問題からSPring-8で使用されているものよりも50cmから80cm程度小型のシステムが要求され陰極プラグ、カソード輸送用直線/回転導入器からなるシステムは陰極を超高真空を保持した状態で輸送可能である。

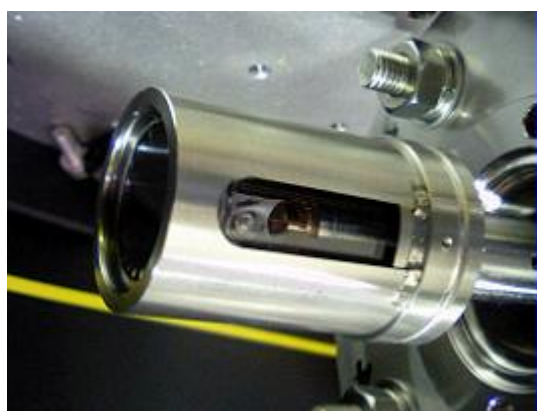


図2：カートリッジ式光陰極高周波電子銃フォトカソード

陰極導入の際にはフィードスルーのベーキングを行った後ゲートバルブを開放しカートリッジ管に封

入された陰極プラグを直線導入器により端板後方まで移動させた後真空密封用コバル膜を破り回転導入器によって陰極プラグを端板の規定位置まで移動することで陰極を交換する仕様で陰極真空度の確認する目的で端板後方に真空計を設置している。このように、カードリッジ式高周波電子銃においてNa<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb光陰極の試験を行い3ヶ月にわたる長時間測定の結果量子効率は最大1.2%、0.1%の量子効率で動作することを確認した。可視光レーザーによる試運転を行いnCオーダーの電子生成に成功し可視光レーザーでNa<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sbは駆動可能であることが明らかになった。放電や残留ガスによる陰極表面の状態変化をもたらす引き出し電荷量の現象や量子効率の劣化については不確定要素が多く高周波電子銃の改良には表面観察やその場観察等システム改善も今後の選択肢の一つとなる可能性が示唆される。

## 2. プラズマ波の破壊による航跡場への初期電子入射

レーザーパルスによりプラズマ中に励起された光速で進むプラズマ波を利用したレーザー航跡場加速器は単一エネルギー電子加速が可能となった。応用に際しエネルギー、エネルギー幅、電荷量、出射方向の安定性に課題を有している。エネルギーおよびエネルギー幅と電荷量に関して初期電子の供給が制御されていないため出射方向のバラツキはプラズマ中においてレーザーパルス伝播時の不安定性によるものと予想される。前者に対し初期電子入射の制御技術、後者に対しレーザーガイド用プラズマチャンネル形成技術の開発が急務である。初期電子入射にはレーザーパルスとの相互作用を使用した光学的方法とプラズマ中密度不連続面において発生する波の破壊による方法がある。簡便かつ小型化が望ましいため弊学では12TW、50fsのチタンサファイアレーザー(波長800nm)を用いレーザープラズマ加速実験を実施、加速電子エネルギー、電荷量、方向のレーザー・プレパルス依存性およびレーザー光軸に対し平行な外部磁場による電子ビーム集束と方向の安定化効果などを報告した[6-10]。初期電子入射と安定加速を目指し磁場を1Tに強化しプラズマガイドコーンを形成しメインパルスの約10psec前にプレパルスを導入した事によるプラズマチャンネルを形成、7TWのレーザー出力にて電子加速実験を実施し100MeV級の準単色電子加速に成功した。複数のレーザーパルスを使用しない単純な構成で電子入射できる可能性がある超音速ジェット中階段状密度分布を利用した初期電子入射の予備的実験を実施、電子入射に密度不連続が有効と予想するが安定性に関する議論が成立するには至っていない。超音速ノズルの改良に先立ち2D PICコードを用い密度分布最適条件の探索を行っている。計算時間短縮に一次元粒子コード(1-D Particle in cell; PIC)により図3のように電子入射に必要な階段状電子密度分布密度比と密度不連続特性長さに関する情報を得た。

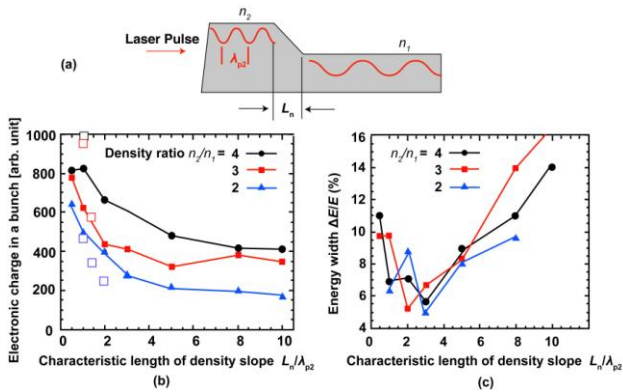


図 3 (a)密度分布の模式図。(b)密度変化の特性長に対する入射電荷量。中抜け四角の記号は、レーザーパルス幅が 9fs の場合の結果。(c)密度変化の特性長に対する単一エネルギー成分のエネルギー幅。

入射電荷量は密度比が 3 ないし 4 で最大であり密度変化特性長が短いほど大きい。エネルギー幅は密度比依存性は見られないが密度特性長が  $\lambda$  の 2~3 倍で最小(5~6%)である。最初のポテンシャル井戸に入射され加速された電子に関する結果で階段の上下での密度比が大きくなると 2 番目、3 番目のポテンシャル井戸に入射される電子量が無視できなくなりエネルギー幅が広がって複数のエネルギーピークが現れる。複数のレーザーパルスを使用せず単純な構成で電子入射するためにガスジェット・ターゲット中の密度に段差を発生する。超音速ノズルの喉部の面積はノズル先端での分子の数密度を  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  以上という条件およびガス供給用ソレノイドバルブの Cv 値、ノズルまでのコンダクタンス等を用いて決定した。分子密度の干渉計計測結果でノズル開口は矩形であるので干渉縞のずれは密度に比例する。このように、超音速ジェット中に斜め衝撃波を応用して階段状密度分布を生成する事に成功した。初期電子入射の予備的実験を実施し電子入射可能であることを示したが初歩的段階であり密度分布と加速エネルギー、エネルギー幅の再現性の関係に課題は残る。今後 2次元粒子コードによるシミュレーションおよびレーザー照射実験により本方式の可能性を検証し、これまで実施してきた強磁場中におけるレーザーパルス導入法で得た知見と小型実用機として最適な方式を見出し基礎技術を確認する。

### 3. 950 keV linac における等価回路解析

弊学原子力専攻では小型非破壊検査用 950 keV 電子 linac の開発を行っているが、on-axis カップリングの APS 型であり 250 kW 出力の 9.4 GHz マグネトロンを RF 源としている。80 mA の加速ビーム電流を目指し設計されたが実験において十分なビーム量が得られず、2.5 usec のビームパルス内においてビーム電流量の振動が観測された[11]。950 keV

linac によるビーム加速試験においてビーム電流とエネルギースペクトラムが測定されているがエネルギー測定においてビームエネルギーはほぼ設計値に達しているものの電流量振動が明らかになった。振動周期は 9.4 MHz でビームと加速電場の相互作用に起因すると予想された。ビームローディングが加速管中の RF パワーを変化させビーム加速状況が変化が繰り返されていると考えられた。このような現象を計算できるシミュレーション方法を選択し新たに計算コードを作成し等価回路解析にビーム加速とビームローディングの効果を付加した。完成した計算コードでシミュレーションを行ったところ実験と同様な現象を再現することができた。ビーム振動の原因は「高周波発生源の振動」と「加速管そのものの特性の問題」の 2 種類が考えられ実験及び考察から加速管そのものの特性であることが明らかになった。加速管特性の問題点はシミュレーションでは計算できない過渡的な現象に起因して起こっていることになり、ビームを減少させると振動現象が観察されないことからビームと高周波の相互作用起因することが予想された。ビームと高周波の相互作用を時間領域で計算できるシミュレーションが必要となった。このような現象を計算できる方法として PIC(Particle In Cell)法があるが、PIC 法で計算できる時間スケールは高周波の周期で数周期分ほどの時間で 1000 周期以上の計算では時間的困難であるため今回の現象には適用できないと考えた。シミュレーションコードは C++により自作しこのコードを用いて 950 keV linac の加速空洞特性を入力し実験時電子ビーム値を入射する条件で計算を行った。実験と同じように計算でもビームが振動するという現象が見られ、実験では入射ビームの電流値を低くすれば振動が起こらなかったが計算でも低電流で振動現象が見られなかった。このように、東京大学原子力専攻上坂研究室で開発中の非破壊検査用 950keV X-band linac においてビーム電流振動が問題であったが計算のため等価回路解析を用いたシミュレーションコードを C++言語で新開発しビーム振動現象を定性的に再現することができた。ビーム振動現象の原因を解明しサイドカップル空洞を採用した 2 号機を設計し振動問題が起こらないことを本コードを使用し現在製作を予定している。

### 参考文献

- [1] M.Uesaka et al., Radi.Phys. Chem, 60 (2001)
- [2] Y.Muroya et al., Nucl. Instr. Meth. A, 489 (2002)
- [3] 守谷宏範、修士論文、東京大学 (2007)
- [4] J.Sasabe et al., Proc. 2005 Nucl. Instr. Meth. A, 528(2004)
- [5] H.Dewa et al., Proc of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003
- [6] T. Hosokai, et al., Phys. Rev. E 67 (2003) 036407.
- [7] T. Hosokai, et al., Phys. Plasmas. 11 (2004) L57.
- [8] T. Ohkubo, et al., Phys. Plasmas. 13 (2006) 033110
- [9] K. Kinoshita, et al., Jpn.J.Apl.Phys. 45 (2006) 2757
- [10] N. Hosokai, et al., Phys.Rev.Lett. 97 (2006) 057004
- [11] T. Natsui, et al, AIP Conf. Proc. 1099, pp. 75-78