

東大ライナック・レーザー施設報告 2013

STATUS REPORT OF LINAC/LASER FACILITY OF UNIVERSITY OF TOKYO IN 2013

上坂充^{*A)}、山下真一^{A)}、上田徹^{A)}、土橋克広^{A)}、藤原健^{A)}、
松村陽介^{B)}、田儀和浩^{B)}、武文晶^{B)}、劉暢恒^{B)}、
草野讓一^{C)}、中村直樹^{C)}、山本昌志^{C)}、田辺英二^{C)}

Mitsuru Uesaka^{*A)}, Shinichi Yamashita^{A)}, Toru Ueda^{A)}, Katsuhiko Dobashi^{A)}, Takeshi Fujiwara^{A)},
Kazuhiro Tagi^{B)}, Wenjing Wu^{B)}, Changheng Liu^{B)}

Joichi Kusano^{C)}, Naoki Nakamura^{C)}, Masashi Yamamoto^{C)}, Eiji Tanabe^{C)}

^{A)}University of Tokyo, Nuclear Professional School

^{B)}University of Tokyo, Department of Nuclear Engineering and Management

^{C)}Accuthera Inc.

Abstract

We have almost recovered from the damages due to the earthquake and we are starting new projects at the linac/laser facility of Nuclear Professional School, University of Tokyo. We have restarted the open use of the facility from this April. We are still recovering our own device to produce multi-Alkali photocathode of Na5KNb under collaboration with JAEA. X-band (11.424GHz) 30 MeV linac for Compton scattering monochromatic X-ray source is repaired. Project of neutron source based on electron linac is started and X-band 30 MeV linac is used in this project. New fiber laser oscillator and regenerative amplifier are going to be installed for the laser driver of the photocathode RF gun and light source of the pump and probe analysis. Development of portable X-band (9.3GHz) 950 keV linac and 3.95/6 MeV linacs have been almost completed and they have been commissioned for the applications. Transmission nondestructive test of thermal-shielded-pipe used at petrochemical complex and PC (Prestressed Concrete) for bridges are under way by the 950 keV and 3.95 MeV linacs, respectively. Especially, the 950 keV system was used on-site for the first time. As for 12 TW 50 fs laser, we moved it to KEK for wider open uses. Furthermore, an new on-chip photonic crystal electron linac and a new fiber laser driver for nano-mm-size and attoseconds beam source for advanced radiation biology are under design and development. The high power ultra-short pulse Yb fiber and solid laser for dielectric acceleration are made. To obtain high energy pulse, chirped pulse amplification (CPA) is applied. With respect to the amplification, the pulses generated by the Yb fiber laser oscillator are amplified up to several mJ by Yb fiber laser amplifiers, which have high gain.

1. はじめに

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻は東北・太平洋沖地震で、ライナック・ブランケット・重照射施設を含め、甚大な被害を受けたが、ライナック・レーザー施設は平成 23 年 9 月の学内・大学連携実験演習を不十分な状態ながら、予定通り実施し、平成 24 年 4 月から共同利用を再開している。平成 25 年度の共同利用テーマを表 1 に示す。

2. Sバンドツインライナック

Sバンドツインライナック・レーザー同期システムについては、前年度報告した RF 電子銃のカソード改良により、RF 電子銃のファイバーレーザードライブの準備が整った。これに伴い、フォトカソード RF ガン用レーザードライブを Er ファイバーレーザーに更新した。中心波長 780-790nm、オシレータでのパルス幅 ~ 120 fs、3 倍波では $\sim 100 \mu\text{J}$ である。カソード (Na2KSb) の QE が上がったため、マルチパスアンプが 1 つで済むことになり、小型化が図れた。そのため、レーザー一式をライナック室の電子銃真横に置くことができた (1)。このことにより、特にレーザーの角度の揺れによる電子ビームの横方向変動が格段に抑制される。4 月に 2 nC のシングルパンチを計測した。これから放射線化学応用に供さ

れる。



Figure 1: Photo of driving laser for S-band photocathode RF-gun.

3. レーザー駆動誘電体加速器

新たな方向として、ナノメートルサイズ・アト秒電子ビーム小型加速器の開発を目指した、レーザー誘電体加速 (図 2) によって電子を加速するシステムを設計してい

* uesaka@nuclear.jp

Table 1: Themes of joint use experiments with S-band linac.

テーマ番号	テーマ名	研究テーマ代表者	専攻内幹事
25L-01	水溶液の放射線効果の研究	勝村 庸介 (東大)	山下 真一
25L-02	パルス&プローブ法を用いる超高速反応の研究	勝村 庸介 (東大)	山下 真一
25L-03	高速応答シンチレータの開発と性能評価	浅井 圭介 (東北大)	藤原 健
25L-04	高温・超臨界溶媒の放射線化学	勝村 庸介 (東大)	山下 真一
25L-05	フォトカソード RF 電子銃の高性能化	大熊 春夫 (JASRI)	上坂 充
25L-06	不定比金属組成を制御した高温超伝導体のピンニング特性に及ぼす電子線照射効果	寺井 隆幸 (東大)	鈴木 晶大
25L-07	パルスラジオリシス法による金属タンパク質の電子移動反応の研究	高妻 孝充 (茨大)	山下 真一
25L-08	照射によるゲル化およびゲル中での照射効果の研究	田口 光正 (JAEA)	山下 真一
25L-09	太陽電池を用いたビームロスモニターの開発	高橋 浩之 (東大)	藤原 健
25L-10	原子炉鉄鋼材料のマイクロ組織発達モデル化に資する照射欠陥挙動分析手法の開発	村上 健太 (東大)	村上 健太
25S-01	フェムト秒ライナックのためのマシンスタディ	上坂 充 (東大)	-

る [1]。

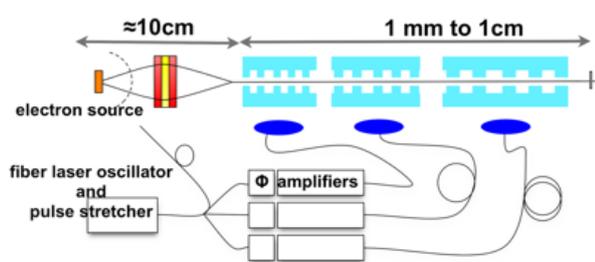


Figure 2: Sketch of a fiber-laser-pumped dielectric accelerator. Φ is the phase controller [1].

現在は、透過型回折格子を用いたレーザー駆動誘電体加速器の設計を進めている [2]。これまでは、解析的に電子加速の条件を求めて結果に関して発表したが、実際には回折・干渉や反射の影響があるので、設計に当たっては電界分布は数値計算で求める必要がある。FDTD(時間領域差分法)の一つである Meep コードを用いて電界分布の計算を行っている。

一方で、このレーザー駆動誘電体加速器のためのレーザーシステムの開発も行っている [3]。YbレーザーはLD励起可能で、励起波長と発振波長が近いのでレーザー媒質への熱負荷が小さい。このため Ybレーザーは高出力化が容易である。また、Ybは広帯域での発振が可能なのでモードロックレーザーとしてさまざまな分野で利用されている。しかし、誘電体加速やレーザーとといった新しい加速器技術の分野にはより高出力の超短パルスレーザーが必要とされている。表 2 に、誘電体加速及び Ti:Sapphire TW レーザーに対する要件を示す。

Yb ファイバーレーザー発振器から繰り返し周波数 62MHz、パルスエネルギー 1.6nJ を得た後、高増幅率が可能な Yb ファイバーレーザーを前段の増幅器に用いて、パルスエネルギーを数 mJ まで増幅させる。その後、高強度パルスの増幅が可能な Yb 固体レーザーを後段の増幅器に用いて、パルスエネルギーを数 J まで増幅させる。また、発振器と Yb ファイバーレーザー増幅器の間に強度変調器を、Yb ファイバーレーザー増幅器と固体レーザー増幅器の間にポッケルスセルを導入し、繰り返し

し周波数を徐々に低減させて自然放射光を抑えつつ増幅を行う。最終的に繰り返し周波数 50Hz、パルスエネルギー数 J の出力を得ることを目標としている。現時点で繰り返し周波数 62MHz において平均出力 20W を得ることができた。今後さらなる高出力化を目指す。

4. Xバンドライナック群

ブランケット棟医療用小型ライナック室(図 3)には 3 台の X バンドライナックが設置されており、さらにもう一台が放射線発生装置設置許可申請手続き中である。



Figure 3: Photo of experimental room for X-band linac.

4.1 6MeV ライナック

NEDO プロジェクトにより設置されている、9.3 GHz(1.5 MW) のマグネトロンを使用した 6MeV ライナックである。NEDO プロジェクトによる癌治療用の加速管のテストや、X 線検出器の開発のための X 線の発生に利用している。

4.2 可搬型 950 keV 小型 X 線源

日本学術振興機構 (JST) による平成 22 年度の拠点整備事業により、X バンドライナックベースの可搬型 X 線

Table 2: Laser parameter values^[1]

	Laser for DLA to Accelerate electron to 1 MeV	Oscillator for Ti:Sapphire TW laser
Central Wavelength	1000 nm	790 nm
Pulse duration	400 fs	30 fs
Pulse Energy	0.38 mJ/fiber	> 5.3 nJ
Average Power	-	> 400 mW
Repetition Rate	-	78 MHz

源が整備された^[4]。

一台は、9.3 GHz(250kW) のマグネトロンを使用した 950keV の X 線源である。筐体は、X 線ヘッド、RF ユニット、コントロールラックの 3 台で構成されており、総重量は 400kg 以下である。RF ユニットと X 線ヘッドはフレキシブル導波管で接続されており、配置に自由度を持たせてある。

2004 年 5 月 7 日 8 日の両日に、福島県いわき市小名浜の日本化成小名浜工場で蒸留塔の内部の透視の実証試験を行った。従来用いられていた 300 keV の X 線管では確認することが難しいとされた目皿の穴を確認することに成功した。

この実証実験では、蒸留塔の 4 階相当部分に、分解された本装置をクレーンでつり上げ、塔の上で組み立てを行うという作業が伴った。この塔は硝酸を濃縮するための塔であり、検査時は洗浄されているが、硝酸が残留している可能性があるため、化学防護服や手袋の着用が義務付けられており、作業性が悪かった。

この実証試験の経験を踏まえ、より簡易な作業で設置運用が可能となるように、2013 年 4 月末より改造が行われている。具体的には、猿橋子にリフターを設置してリフターによる揚貨が可能となるような構造とし、ケーブル類の着脱も従来のねじ込み式丸型コネクタを廃し大型のワンタッチ式コネクタに変更する。

改造は 9 月末に終わり、東大内での試運転後に広島での実証試験に臨む予定である。

もう一台の 3.95MeV 小型 X 線源は、現在放射線発生装置設置許可申請手続き中である。年内には、設置許可が下りるものとして、4 MeV 未満の放射線発生装置に許された、設置場所以外の場所への一時持ち出しを行い、つくば市の独立行政法人土木研究所内の一角(屋外)で、プレストレストコンクリート橋梁の透視の実証試験を行う予定である。

日本国内において 1 MeV 以上の放射線発生装置が屋外に持ち出され使用されるのは、これが初めての例となる。

また、医療用小型ライナック室内で、橋梁サンプルに対して部分 CT 撮像を行う実験を行っている。被写体からの散乱 X 線の画像への影響を抑えるために、コリメーターを具備したラインセンサーを用いる。

先行して、プレストレストコンクリート(PC)橋梁の非破壊検査の実証実験のための予備実験を行った。理化学研究所でコンクリートサンプルに対し 450keV X 線管とライナックベースの CT 装置で比較実験を行った結果を図 4 に示す。最終的には、橋梁全体に CT を適用して内部構造を取得し、構造解析による橋梁の強度劣化の推定に結びつけたい。

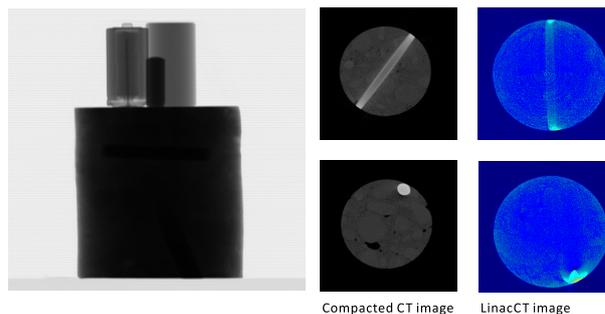


Figure 4: Results of CT for PC sample with 450 keV X-ray tube and X-ray source based on linac.

4.3 11.424 GHz 30MeV ライナック

本機は、11.424GHz(50MW)のクライストロンを用いた電子線源であり、2001 年度から 5 年間行われた、文部科学省「先進小型加速器の要素技術の普及事業」の成果物である。

震災後、熱カソード RF 電子銃でのビーム発生には成功したが、ビームラインのアライメントがずれていることが判明し、アライメント再調整を二度に渡って行った。

また、今年度より本機の 30 MeV の電子ビームを用いた中性子源計画が始まった^[5]。

福島第一原発の炉心に残っている溶融燃料の分析を行うことは、廃炉措置、ひいては福島への復興に向けて非常に重要な課題である。溶融燃料の分析のためにデータの精度を向上させることが必要である。

東京大学東海キャンパスでは、2011 年 3 月に弥生炉の運転が停止され、現在廃炉措置が行われている。炉心内部は核燃料使用施設であることから、炉心内部に加速器を設置することによってプルトニウムやウラン・アメリカシウムなどのデータの測定を行うことが可能になる。

ビーム強度を上げるため、ビーム入射器を現在の熱カソード RF 電子銃と α 電磁石の構成から、20 keV 熱電子銃と進行波型バンチャーに変更する。現在は、バンチャーの基本設計が進み、中性子発生用ターゲットの基本設計にも着手している段階^[6]である。

5. 謝辞

本研究へ日頃からの協力いただいている、高エネルギー加速器研究機構吉田光宏氏、夏井拓也氏、日本原子力研究開発機構 羽島良一氏、西森信行氏、松葉俊哉氏に、に厚く感謝いたします。

- [1] K. Koyama, et. al, "DESIGNING OF PHOTONIC CRYSTAL ACCELERATOR FOR RADIATION BIOLOGY", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2765 2012.
- [2] K. Koyama, et. al, "Designing of the laser driven dielectric accelerator", 本プロシーディングス, MOOT06, 2012.
- [3] Y. Matsumura, et.al, "Development Of High Power Ultra-short Pulse Ytterbium Laser For Dielectric Accelerator", 本プロシーディングス, MOOT06, 2013. .
- [4] M. Uesaka, "Commissioning of portable 950 keV /3.95 MeV X-band linac X-ray source for on-site transmission testing" Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.26, 2012.
- [5] M. Uesaka, et. al, "X-band linac neutron source at Decommissioned Yayoi for Fukushima Analysis", 本プロシーディングス, SAP117, 2013.
- [6] K. Tagi, et. al, "Design of X-band Linac Neutron Source for nuclear data measurement", 本プロシーディングス, SAP001, 2013.