

東大ライナック・レーザー施設報告 2014

STATUS REPORT OF LINAC/LASER FACILITY OF UNIVERSITY OF TOKYO IN 2014

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. 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. 1.7MeV tandetron (RAPID) was moved around from Asano campus(Tokyo) to HIT building in Tokai campus.

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 26 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 ~120fs、3 倍波では ~100 μ 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

グルバンチを計測した。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.

* 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
26L-01	水溶液の放射線効果の研究	勝村 庸介 (東大)	山下 真一
26L-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
26L-03	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
26L-04	高温・超臨界溶媒の放射線化学	勝村 庸介 (東大)	山下 真一
26L-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
26L-06	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
26L-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
26L-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
26L-09	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
26L-10	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
26S-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)	-

3. 重照射棟 (HIT)

重照射棟 (High Fluence Irradiation Facility: HIT) には、重イオンビームを加速するタンデトロンとバンデグラフ加速器が設置されている。HIT も東日本震災からの復旧を進めている。東大浅野キャンパスより 1.7 MeV タンデトロン (RAPID) を移設し、ビームラインの再編成を行った。25 年度中に設置許可が下りたため、共同利用を再開する。



Figure 2: Photo of 1.7 MeV tandetron(RAPID).

4. 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によって電子を加速するシステムを設計している [1]。レーザー誘電体加速により数 mm で電子の加速が可能となり、今後大きなブレイクスルーとなる可能性を秘めている。図 3 に示すように、従来と比較にならない小型の加速器から出るマイクロ径の電子ビームが個々の細胞・細胞中の核などを狙い撃ちすることで、低線量放射線の生物影響の解明につながると期待している。

レーザー駆動誘電体加速 (DLA) での加速電界強度の上限を決める大きな要因は回折効率と入射レーザー強度である。非線形光学効果 (自己集束効果と自己位相変調効果) によるレーザー光の波面の歪み評価を行った。

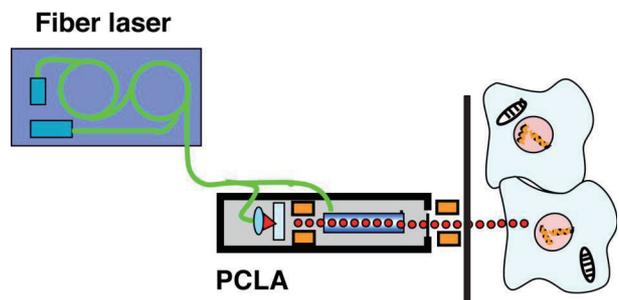


Figure 3: Illustration of application of Fiber Laser Accelerator.

自己位相変調効果の影響はピコ秒以下のパルス幅で誘電体が数ミリ以上の厚さの場合に顕著になること、対向レーザー照射の配位では回折格子基板の厚さは 1 mm 以下であるのでピコ秒以上のパルスでは、非線形光学効果は考慮する必要は無いこと、近接場を利用する配位ではプリズム等の長い光路を必要とする可能性があるためにサブピコ秒のパルス幅では問題となることが解った。また、非相対論的領域での加速勾配に与えるレーザー電界の空間分布高調波成分の影響についてもシミュレーションを行い、電子加速の条件が明らかになっている [2]。

先行しているレーザー誘電体加速では、レーザー光を誘電体格子に垂直に入射するが、新たに、斜め入射レーザー誘電体加速が提唱されている。従来手法との違いは、プリズムの導入とレーザーの斜め入射である。定性的には、プリズムはレーザーパルスの群速度の減速によりレーザーパルスを圧縮し、より高い電界の発生を容易にする。さらに回折格子の電磁波の透過と加速電場の速度を加速対象の粒子の速度と一致させ、そのピッチとレーザーの波長とレーザー入射角の関係によって加速する粒子の速度を決定できる。これまでに、SiO₂ をリソグラフィにより加工し回折格子を制作した。

5. 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には 3 台の X バンドライナック (950 keV、6 MeV、30 MeV) が設

置されており、さらにもう一台 (3.95 MeV) が放射線発生装置設置許可申請手続き中である。

5.1 6 MeV 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。

5.2 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 線源が整備された^[3]。これらは社会インフラ等の非破壊検査への応用を目指しているものである^[4]。

そのうち一台は、9.3 GHz(250kW) のマグネトロンを使用した 950keV の X 線源である (図 4)。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。

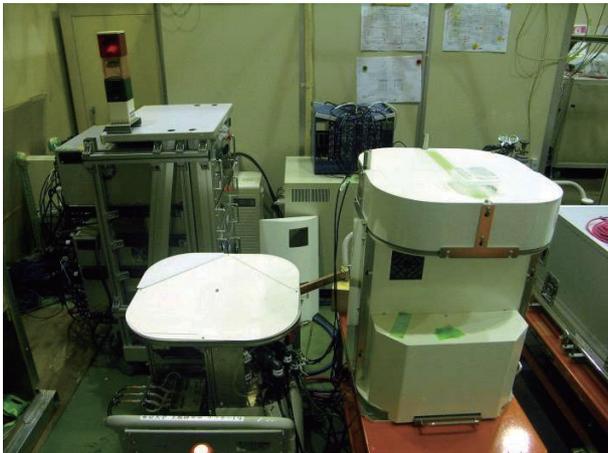


Figure 4: Photo of 950 keV X-ray source based on X-band Linac.

950 keV 小型 X 線源は放射線障害防止法に定められる 1 MeV 以上の放射線発生装置では無いため、同法の制約を受けずに運用可能である。

2012 年 5 月の実証実験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た。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した。

2013 年 12 月末に改造作業が終わり、年末年始にかけて調整運転を行い、1 月初旬に北九州市の洞海湾に面する民間のコンクリート埠頭の非破壊検査に望んだ。悪天候等の悪条件が重なった現場において、予定の検査箇所を全て検査することは出来なかったが、コンクリート構造物の配筋が健全であることを示すことが出来、同埠頭の修繕費を大幅に節約できることが解った。このことにより、民間施設のライフサイクルの見極めのために本装置が有用であると考えている。

さらに、2 月に茨城県つくば市にある国土技術政策総合研究所の敷地内にて、950 keV 小型 X 線源を用いた橋梁 T 字桁の非破壊検査試験を実施した。図 5 は試験の様子である。2 個並んだ白い筐体が X 線源であり、T 字桁へ向けて X 線を照射する。X 線源は橋梁スキャン架台に設置されており、水平方向及び垂直方向に移動させることが出来る。また、X 線源を傾けた状態で X 線を照射することも可能である。

図 6 に、試験にて取得した透過画像の例を示す。X 線検出器として用いたのはイメージングプレートであり、照射時間は 20 分である。撮像したのは T 字桁の下のフランジと呼ばれる部分であり、コンクリート厚さは 350 mm である。中央の縦の太い像は直径 19 mm のステンレス綱サンプルである。上部から縦に 3 本の鉄筋が下まで延びているのが判る。また、下部に水平方向の配筋があり、斜めにも配筋が存在するの判る。350 mm のコンクリート内部の鋼材の像を得ることが出来た。一



Figure 5: Photo of NDT in Tsukuba.

方で、T 字桁の上下の中間部分 (ウェブ) は 160 mm 厚であり、16 インチフラットパネル検出器 (FPD) により、ライブ映像を取得することができた。FPD の露光時間は 1 秒である。イメージングプレートでも、照射時間 2 分で鮮明な画像が得られることが判った。

これらの結果は、950 keV 小型 X 線源が橋梁等の大型コンクリート構造物の非破壊検査に有用であることを示している。

今後は 3.95 MeV X 線源を用いて同様の試験を実施し、より大型の被照射体での撮像を実証する予定である。また、同様のサンプルに対して CT 等の断層撮像技術を適用し、配筋等の径をより定量的に評価するための技術開発も行う。

5.3 可搬型 3.95 MeV 小型 X 線源

もう一台の 3.95MeV 小型 X 線源 (図 7) は、現在施設検査待ちの状態であり、試運転を行っている。

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



Figure 6: image of NDT in Tsukuba.

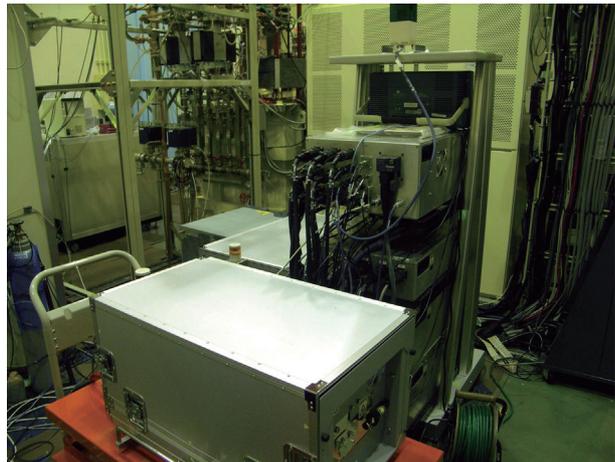


Figure 7: Photo of 950 keV X-ray source based on X-band Linac.

なる。

3.95MeV 機は最大 2 Gy/min(焦点位置から 1 m) の X 線を発生でき、非常に短時間で 500 mm 厚の PC 橋梁の内部構造を可視化可能であると考えている。実験室内の試験運転では、フラットパネルディテクター (FPD) により、ライブ (1 秒) で 400 mm 厚程度の PC サンプル (フランジ部分) を可視化出来ている。

土木研では下フランジ部分のライブ映像を取得を目指している。また、ウェブ部分も上述の 950 keV での試験のものより厚い。

5.4 11.424 GHz 30 MeV 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。

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。電子銃からの電子ビームの発生から、ターゲットとの相互作用による中性子ビームの発生までをシミュレーションし、システム全体として得られる中性子のエネルギー分解能を求めた [5]。

6. 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, "Parameter study for the laser-driven dielectric accelerator taking account of nonlinear optical effects", 本プロシーディングス, SUOM07, 2014.
- [3] 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.
- [4] M. Uesaka, et. al, "Forward special inspection of social and industrial infrastructures by 950 keV/3.95 MeV X-band linac X-ray source", 本プロシーディングス, MOOL02, 2014.
- [5] K. Tagi, et. al, "Simulation of Neutron Generation in Short Pulsed X-band Linac Neutron Source", 本プロシーディングス, SUP003, 2014.