

東大ライナック・レーザー施設報告 2019

STATUS REPORT OF LINAC/LASER FACILITY OF UNIVERSITY OF TOKYO IN 2019

橋本 英子^{#,A)}, 山下 真一^{A)}, 上田 徹^{A)}, 安見 厚志^{A)}, 土橋 克広^{A)}, 三津谷有貴^{B)}, 草野 譲一^{C)},
田辺 英二^{C)}, 上坂 充^{A)}

Eiko Hashimoto^{#,A)}, Shinichi Yamashita^{A)}, Toru Ueda^{A)}, Toru Ueda^{A)}, Katsuhiro Dobashi^{T,A)}, Yuki Mitsuya^{B)},
Joichi Kusano^{C)}, Eiji Tanabe^{C)}, Mitsuru Uesaka^{A)}

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

^{B)} University of Tokyo,

^{C)} Accuthera Inc.

Abstract

We operate various accelerators; S-band linacs, heavy irradiation system, and X-band linacs at the Nuclear Professional School, University of Tokyo. S-band linacs was celebrating its 40th anniversary in 2018, since the operation work was started. We avail ourself of the research in radiation chemistry used by very-short pulse beam, quantum beam engineering. In heavy irradiation system, ion beam are generated by 1MV Tandetron and 3.75 MV Van de Graff accelerator. We investigate the radiation-induced phenomena which is observed by microstructure, chemical analysis and mechanical properties. We have developed 950 keV/3.95 MeV X-band electron linac-based X-ray sources for on-site bridge inspection and visualized the inner structure of a lower floor slab. These systems can visualize in seconds the inner states of bridges, including cracks of concrete, location and state of wires and other imperfections.

1. はじめに

東大原子力専攻では、Sバンド及びXバンド電子ライナック、タンデトロン及びバンデグラフ加速器を有し、研究・共同利用が行われている。昨年度、電子線形加速器施設ライナックは、利用開始以来、40周年を迎えた。極短パルスを用いた放射線化学、量子ビーム工学、等の開発等の実験研究に利用されて着実に成果を出し続けている。他、学生実習でも利用されている。1MVタンデトロン、3.75MVバンデグラフ加速器は、放射線照射場における材料中の欠陥に関する研究に利用されている。Xバンドライナック群は、小型・可搬可能である利点を利用して、産業・社会インフラ、特に実際の橋梁でのX線撮像の実証試験が進展している。さらに、福島第一原子力発電所の炉内に存在する燃料デブリ塊に含まれる物質の分析研究も展開している。また、DNA損傷のメカニズム解明を目的として、卓上用レーザーを用いたレーザー誘電体電子加速システムの開発を進めている。

る。2018年～2019年前半において、高周波窓(RF窓)交換(18L:1箇所、35L:2箇所)、電子銃交換、マグネット電源更新、真空ポンプ素子交換、を行った。その他、装置の現状についてまとめる。

Table 1: Beam Performance in the ACC Parameter

| Operation mode | Pulse width | Beam Energy [MeV] | Maximum Output current | Repetitive frequency [pps] |
|----------------|-------------|-------------------|------------------------|----------------------------|
| 35L | Long pulse | 1μs | 25 | 200mA |
| | Short pulse | 2ns | 28,35 | 0.5A |
| | | 10ns | | 1A |
| Single pulse | 10ps | 28,35 | 500pC | 10 |
| 18L | 7ps | 22 | 100pC | 14 |

2. Sバンドツインライナック

電子線形加速器施設ライナックには、2本のビームライン(18L、35L)を有しており、運転モードを選択することにより、またTable 1に各運転モードにおける電子ビーム性能を示す。Figure 1、Fig. 2に35L、18Lの大まかな構成を示す。35Lは熱電子銃、18Lは光陰極RF電子銃(RF-GUN)(1.6セル、BNL-tyoeIV)により電子を引き出している(Fig. 3)。Ti:Sapphireのレーザー(780-790nm)を光陰極励起用及びプローブ用光源として用いている。半導体光陰極としてCs-Teを採用している。

最近、経年劣化による保守作業が頻繁に行われてい

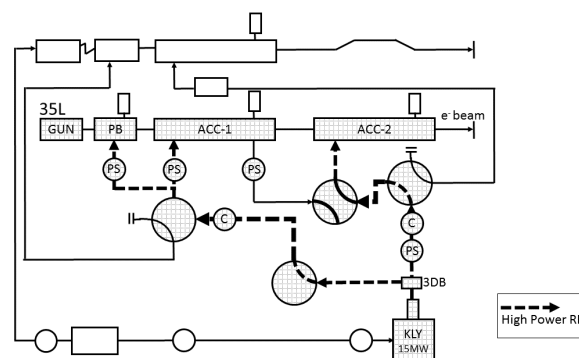


Figure 1: The schematic drawing of beamline 35L.

eiko@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

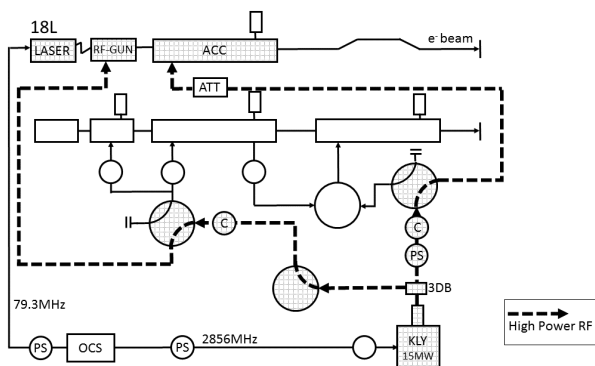


Figure 2: The schematic drawing beamline 18L.

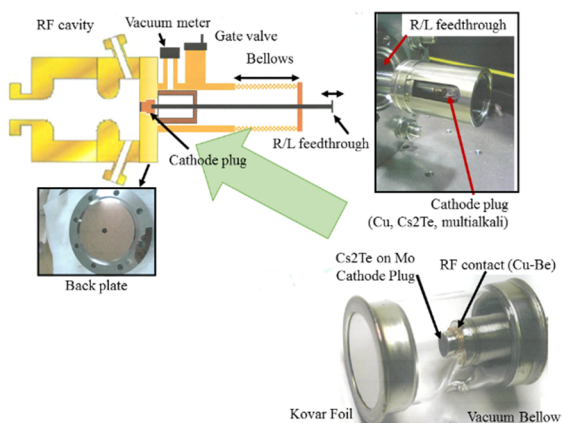


Figure 3: The schematic drawing of RF-GUN at beamline 18L.

2.1 RF 窓更新

18L は、真空度が $1\text{E}-6 \sim 7\text{ Pa}$ の状態で通常運転している。しかし、数年前からの真空度低下により $1\text{E}-5\text{ Pa}$ の状態で運転していた。低真空であったが、得られたビーム強度はユーザー利用に差し支えが無かったことから RF 窓交換せず低真空を維持したまま運転を行っていた。2019 年 8 月に $1\text{E}-5\text{ Pa}$ を下回る兆候が出たので、2019 年 10 月に RF 窓交換を実施した。

RF 窓交換前後での真空度、ビーム強度、QE 値を Table 2 に示す。

QE の換算は、下記の式で求めることができる。

$$QE = \frac{Q[pC]}{E[\mu J]} \cdot 10^{-6} \times \frac{1239.84}{\lambda[nm]} \quad (1)$$

Q は発生電化量、E はレーザーの 3 倍高調波エネルギー、 λ はレーザー波長である。

$1\text{E}-5\text{ Pa}$ のような低真空下でも RF-GUN は、ビーム発振できた。熱電子銃ではこの環境下では非常に難しい。RF-GUN の新しい利点であると考えられる。

2.2 RF 窓冷却方法の変更

利用開始当初、パルス幅は最大 $4.5\ \mu\text{s}$ まで、繰り返し周波数は最大 200 pps まで設定可能であったため、RF 窓の熱負荷も大きく、水冷却していた。現在の運転モード (Table 1) は、熱負荷の影響はほとんど無いと考えられる。その影響以上に、水冷却による水管接続部の腐食、水

管の振動によるマイクロ波への影響の方が大きいのではないかと判断し、RF 窓の冷却方法を水冷から空冷に変更した。変更後 35L は利用実験に問題なかったが、18L はビーム発振後、約 20 分間の周期で、ビーム強度が増減する現象が発生した。その際、位相を変えても全く戻ら無かった。また、マグネットの偏向度を変えても劇的に変わることは無かった。そこで、RF 窓の冷却を水冷に戻したところ、安定したビームに戻った。現在、この現象について、原因究明中である。

2.3 熱電子銃交換

35L は、エミッタンスの小さい高品質の電子ビームをユーザーに提供するために、電子銃とソレノイド磁石との距離を縮め、ゲートバルブを設置していない。その影響で、RF 窓交換のような作業の場合には、ビームライン全体が大気開放となってしまう。今年度は短いスパンで 2 度の RF 窓交換を行い、大気開放した。作業後に電子ビームの電流測定をした結果、作業前の 1/3 程度の出力だった。原因としては、電子銃の電子源表面に酸素や水が付着したことが考えられる。これに伴い、電子銃の交換を行った。Figure 4 取り外した熱電子銃部を示す。前回の交換が、東日本大震災後復旧作業時だったので、約 7 年ぶりの交換作業となった。

Table 2: Each Value before and after RF Window Exchange

| | Before exchange | After exchange |
|----------------|----------------------------|----------------------------|
| Vacuum | $1.3\text{ E}-5\text{ Pa}$ | $2.0\text{ E}-7\text{ Pa}$ |
| Beam intensity | 28 nA | 35 nA |
| QE | 2.65 % | 3.8 % |

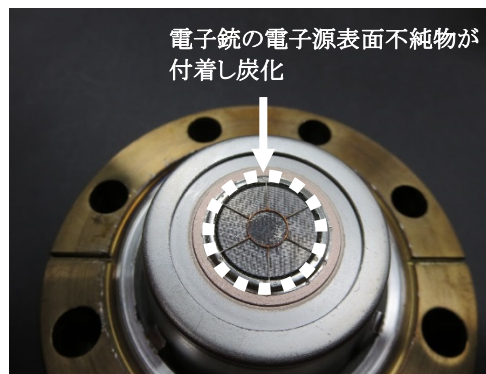


Figure 4: The photo of thermal electron gun at beamline 35L.

2.4 集束系マグネット電源更新

集束系マグネット電源が経年劣化による故障が多発している。ビームを確認中にマグネット電源が突如故障し、突然ビームを見失うという事象もあった。順次電源の更新を行っている。これまで、リップルノイズが低いシリーズ方式の電源のみを採用していた。昨今のスイッチング式

電源は、高性能化し著しい。そのため、さほど精密な制御が必要ないところはスイッチング方式電源を採用する予定である。

2.5 電子線形加速器施設ライナック創立 40 周年

電子線形加速器施設ライナックは、全国共同利用開始以来、創立 40 周年を迎え、その記念式典が 2019 年 3 月 15 日に東大東海キャンパスにて執り行われた。Figure 5 に記念式典での会場の様子を示す。会場には、地元関係者、東大関係者及び縁のある研究者等、約 100 名の方々が記念式典に参加され、大変盛況であった。ご来賓の皆様からのご祝辞は、創立当時の苦労話やエピソード、世界的研究成果等、多岐に渡る大変興味深いものであった。



Figure 5: The photo of 40th ceremony at Electron Linac Facility of University of Tokyo.

3. 重照射施設(HIT)

東大原子力国際専攻より移設された 1.7 MV タンデロン加速器は、周辺装置のマイナーなトラブルがあったもののメンテナンスに大きな影響を与えるような故障も無く安定に稼動している。バンデグラフ加速器は東日本大震災時に、加速管にクラック等による絶縁不良、低真空で運転停止中である。修理のめどは立っていない。

4. レーザー誘電体電子加速システム

現在、X 線治療はがん治療法の一つとして利用されているが、DNA 損傷のメカニズムは解明されていない。マイクロサイズの粒子ビームを細胞核に照射し、オンタイムで測定可能な卓上用レーザーを用いたレーザー誘電体電子加速システムの開発を進めている。加速管の設計及びシミュレーションの結果に基づき、来年度より誘電体加速器の実証実験を行う。

5. X バンドライナック群

我々は4台の X バンド電子線形加速器 (ビームエネルギー: 0.95、3.95、6、30 MeV) の利用・開発に興じている [1]。これらは、核融合炉ブランケット棟医療用小型ライナック室に設置されている。平成 30 年度は X 線非破壊

検査装置の橋梁点検車システム搭載化に挑んだ。

5.1 可搬型 3.95 MeV 小型 X 線源

本年度は、対象物の透過力の高い 3.95 MeV X 線源も用いて、検査車両に搭載し、実橋において撮像試験をおこなった。3.95 MeV X 線源は、最大で 75 cm 程度までのコンクリート厚さであっても透過撮像が可能であり、大型橋のように桁が厚い構造であっても撮像することが可能である。また、3.95 MeV X 線源を用いた屋外での実橋の試験は、日本初である。今年度は、Fig. 6 に示すように、点検用車両として高所作業車に 3.95 MeV X 線源を搭載した形で、茨城県東海村における箱桁橋の透過撮像を行った。X 線源および高周波源は高所作業車バケット内に設置したが、電源および制御系は橋の上(道路面)に設置した。検出器は、橋梁点検車を用いて下部マンホールより桁内にアクセスして設置した。Figure 7 に X 線源を高所作業車に搭載し撮像箇所を位置合わせを実施した様子を示す。撮像対象箇所は桁側面で、厚さは約 40 cm である。Figure 8 に撮像結果を示す。型枠鉄筋の様子が鮮明に確認できる。

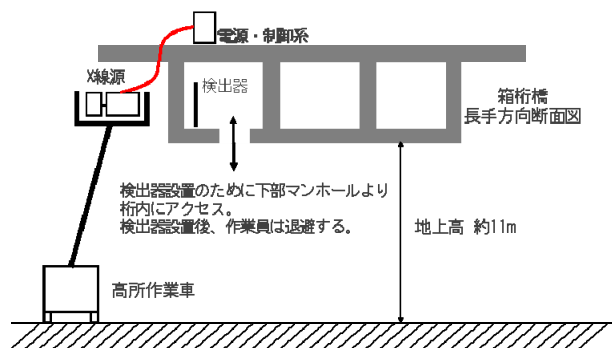


Figure 6: The schematic drawing of Bridge NDT with 3.95 MeV Linac.



Figure 7: The photo of Bridge NDT with 3.95 MeV Linac.

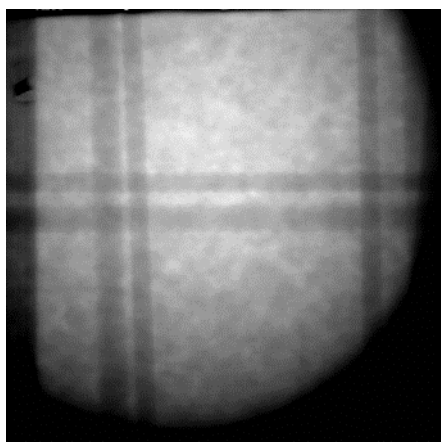


Figure 8: The result of Bridge (slab) NDT with 3.95 MeV Linac.

また、中性子源として放射線発生装置の変更申請中である。橋梁鉄筋コンクリート内の水分検出、核物質の測定などの中性子利用実験を予定している[2]。

さらに、福島第一原子力発電所の炉内燃料デブリ小片を、その場で元素分析を行い性状分布推定可能なシステムを構築中である[3]

5.2 可搬型 950 keV 小型 X 線源

950 keV X 線源を点検車両として Fig. 9 のように高所作業車に搭載し、大阪府の沿岸部にある T 桁橋において、特にひび割れ・エフロレッセンスの発生している桁側



Figure 9: The photo of Bridge NDT with 950 keV Linac.

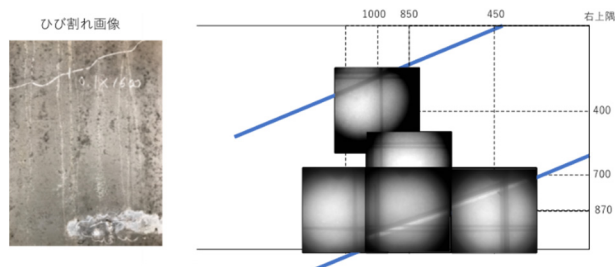


Figure 10: The result of Bridge (slab) NDT with 950 keV Linac.

面・桁下部の撮像を実施した[4, 5]。

特にひび割れとエフロレッセンスが生じている部分において、広い範囲においてシーす管内の鋼材下部領域が白く抜けているのが見られていた。したがって Fig. 5 に示すとおり、グラウトの充填不良が生じているのが確認された。一方で、ひび割れのみのでる箇所では、グラウトの充填不良は検出されなかった。

また、桁下部の撮像においては、グラウトが充填されていない場合は、40 cm 程度の透過厚にもかかわらずシーす管のパターンが鮮明に見られることが多い。Figure 10 ではシーす管のパターンが鮮明に見られないことからグラウトが充填されていることが示唆され、他の業者による破壊試験(はつり)によってもグラウトが充填されていることが確認され、桁下部のような厚肉箇所においても 950 keV 機を用いた透過撮像でグラウト充填不良の検出を行うことが出来た。

謝辞

小型・可搬型 X バンド電子ライナック型 X 線源の研究開発の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:JST)により行われた。この場をお借りし、感謝を申し上げる。

参考文献

- [1] M. Uesaka *et al.*, "On-site Bridge Inspection by 950 keV / 3.95 MeV Portable X-band Linac X-ray Sources", Bridge Optimization - Inspection and Condition Monitoring. doi: 10.5772/intechopen.82275
- [2] Y. Kusumawati *et al.*, "X-band electron LINAC-based compact neutron source for nuclear debris on-site screening using short-distance neutron resonance transmission analysis", E-Journal of Advanced Maintenance, Japan Society of Maintenance, Vol. 11, No. 1, 2019, pp. 46-64.
- [3] I. Ozawa, Junya *et al.*, "Fukushima Nuclear Fuel Debris Component Analysis by Spectral CT Method with Portable High Energy X-Ray Source", Proceedings of 2018 Pacific Basin Nuclear Conference, Basin, China, 2018, pp. 257-261.
- [4] Y. Mitsuya *et al.*, "可搬型電子ライナックによる高エネルギー X 線源を用いた橋梁の非破壊検査", 光学, vol.46, No.8, 2017, pp. 306-311.
- [5] M. Uesaka *et al.*, "On-site Non-Destructive Inspection of Bridges Using the 950 keV X-Band Electron Linac X-ray Source", Journal of Disaster Research, Vol.12, No.3, 2017, pp. 578-584.