

水環境保全のためのパルス大強度相対論的電子ビームの運動エネルギー計測

KINETIC ENERGY MEASUREMENT OF PULSED INTENSE RELATIVISTIC ELECTRON BEAM FOR AQUATIC CONSERVATION

佐竹勇人^{#,A)}, 梅村将太^{B)}, 庄司健太^{A)}, 阿蘇司^{B)}, 今田剛^{A,C)}, 高橋一匡^{A)}, 佐々木徹^{A)}, 菊池崇志^{A)}

Hayato Satake^{#,A)}, Shota Umemura^{B)}, Tsukasa Aso^{B)}, Go Imada^{A,C)},

Kazumasa Takahashi^{A)}, Toru Sasaki^{A)}, Takashi Kikuchi^{A)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

^{B)} National Institute of Technology, Toyama College

^{C)} Niigata Institute of Technology

Abstract

In this study, we measured properties of pulsed intense relativistic electron beam (PIREB) produced by a linear induction accelerator. The maximum acceleration voltage of PIREB was 2 MV, and the beam current was 0.11 ~ 0.18 kA. The radiation dose was measured using a LEGO[®] jig. The profile of the PIREB was observed along the distance by the dose distribution of the PIREB. The PIREB was collimated with a slit, and was deflected by a magnet. The CTA film of the dosimeter was irradiated by the PIREB. In order to estimate the kinetic energy of electron, the deflection was calculated by the magnetic flux density. These results indicate that most electrons have the kinetic energies of 10 keV to 70 keV. In addition, it was indicated from the depth of the electric tree that the kinetic energy of electrons is 0.8 MeV to 1.25 MeV.

1. はじめに

船舶の安定航行のために使われるバラスト水の放出による外来水棲微生物[1]や難分解性化学物質の流出[2]による水環境汚染が進んでおり、その対策のため放射線を用いた処理方法が検討・実施されている。本研究グループでは、パルス大強度相対論的電子ビーム (Pulsed Intense Relativistic Electron Beam: PIREB)を用いた処理方法を検討してきている[3-6]。PIREB の処理効果としては、電子線・制動放射による直接作用や放射線分解によって生じた活性種による間接効果が期待できる[7]。処理効果を検討するための指標としてエネルギー効率を明らかにすることは重要だが、これまで PIREB のエネルギーについては評価していない。

本研究では、LEGO[®]で作製した治具及び CTA フィルム線量計を用いて大気に引き出された PIREB の進行距離に対する線量分布を測定した。その後、外部印加磁場による PIREB の偏向実験で、PIREB をネオジウム磁石により偏向し、CTA フィルム線量計によって測定した。線量測定結果から PIREB の偏向量を算出し、運動エネルギーを計測した。また、リヒテンベルグ痕からも運動エネルギーを推定した。

2. 実験方法

PIREB 発生装置には、長岡技術科学大学・極限エネルギー密度工学研究センターに設置されている、極限エネルギー密度発生・応用装置“ETIGO-III”[8]を用いた。Figure 1 に ETIGO-III の外観を示す。ETIGO-III は 4 段のセルから構成される線形誘導加速器であり、1 段あたりの最大加速電圧は 2 MV である。本研究では、加速電圧を 2 MV として実験を行った。ビーム電流は 0.11~0.18 kA である。PIREB は真空中で加速され、厚さ 40 μm の

チタン箔を通過し大気側に引き出される。Figure 2 に典型的な加速電圧波形、Figure 3 に典型的なビーム電流波形を示す。

2.1 PIREB の進行距離に対する線量分布

PIREB の磁場偏向実験では、PIREB が大気に引き出された後 100 mm 程度進行する。そこで、PIREB の各進行距離での線量分布を確認した。

Figure 4 に実験のセットアップ図、Figure 5 に実際に使用した治具の外観を示す。治具は LEGO[®]ブロック (LEGO 社)によって作製した。この治具は PIREB 進行方向に対して 12.8 mm 間隔で計 7 点線量を計測することができる。各計測点では縦:8 mm, 横:96 mm の CTA フィルム線量計(FTR-125[9]; 富士フィルム(株))を 8 本取り付けている。本実験では、3shot 積算させて照射し、照射後の線量測定結果より進行距離に対する線量分布の変化を確認した。

2.2 外部印加磁場による PIREB の偏向実験

Figure 6 にセットアップ図、Figure 7, 8 に磁石固定用治具にスリットを付けたものの外観を示す。

スリットの形状は矩形で幅は約 3.5 mm, 厚さ 10 mm, 材質はアクリルである。スリットの後の治具の両端部分に磁石を固定できる。磁石はネオジウム磁石(表面磁束密度 314 mT; Neomag)を用いた。

照射実験では、PIREB が大気に引き出された後、矩形スリットを介して切り出され、磁場により偏向されて、 $\phi 150\text{mm}$ の円形アクリルに貼り付けた CTA フィルム線量計に照射される。磁場が紙面の奥から手前の方向に発生するように磁石を設置することで、PIREB は上方向に偏向される。また、磁石を取り付けない場合についても同様に実験を行った。本実験では、PIREB を 3shot 積算し、照射後の線量測定結果及びスリットに残されたリヒテンベルグ痕から PIREB の運動エネルギーを評価した。

[#]hsatake@stn.nagaokaut.ac.jp



Figure 1: Linear induction accelerator "ETIGO-III".

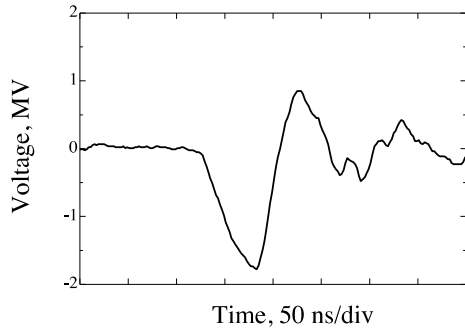


Figure 2: Typical waveform of acceleration voltage.

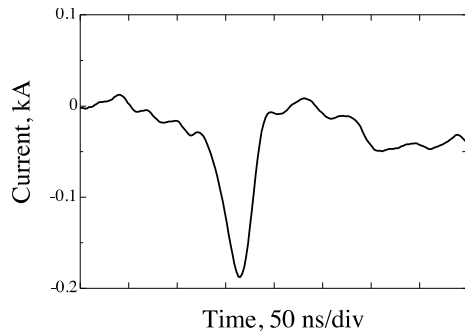


Figure 3: Typical waveform of PIREB current.

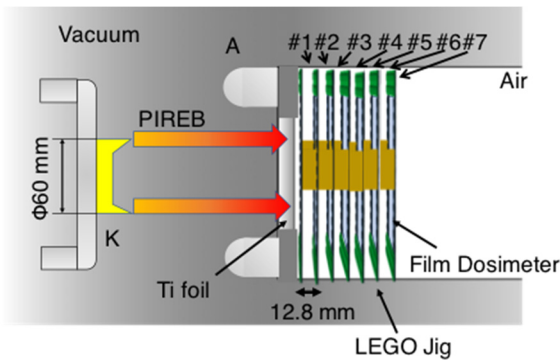


Figure 4: Experimental setup for irradiation profile as a function of distance.

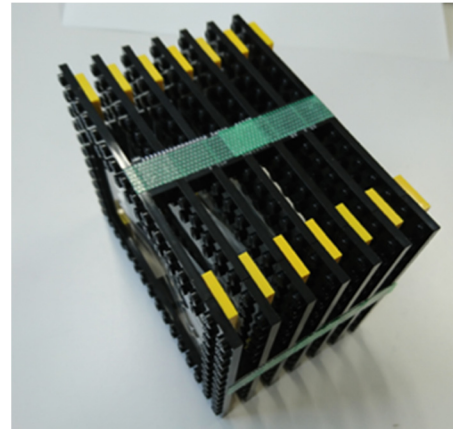


Figure 5: LEGO® jig was made from LEGO®. Jig can measure dose distribution in the range of 64 mm height × 96 mm width and 7 points along distance.

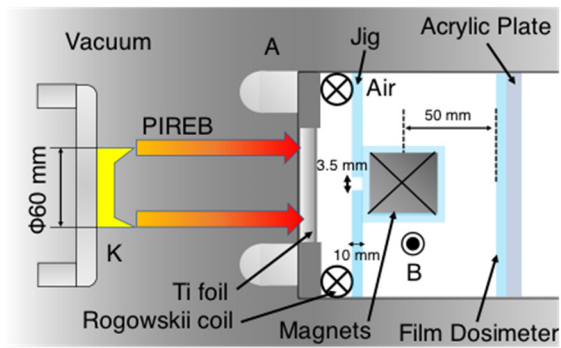


Figure 6: Experimental setup for PIREB deflection. The PIREB was collimated with a slit, and was deflected by a magnet. The film of the dosimeter was irradiated by the PIREB.

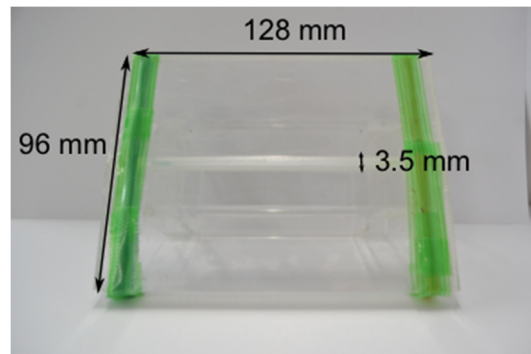


Figure 7: Slit and Jig for magnet (front view). These made from Acrylic plate. The slit width was 3.5 mm.

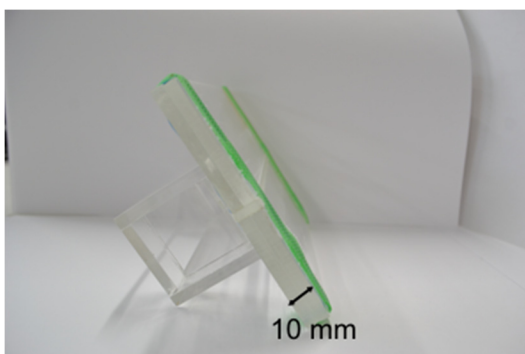


Figure 8: Slit and Jig for magnet (side view). The thickness of the slit plate was 10 mm.

3. 実験結果

3.1 PIREB の進行距離に対する線量分布の確認結果

各計測点における線量測定結果を Figure 9 に示す。

Figure 9 より大気に取り出された直後のビーム形状は円環状になっている。これは、ETIGO-III のカソードが直径 60 mm の王冠型の形状をしているためである。円環状だった PIREB は距離が離れていくと広がっていくことが確認できた。

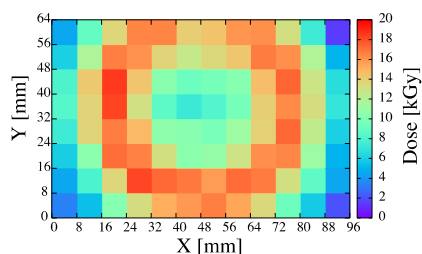
3.2 外部印加磁場による PIREB の偏向実験結果

Figure 10 に磁石を設置した場合の線量測定結果、Figure 11 に磁石を設置しない場合の線量測定結果を示す。結果より線量測定結果の分布が異なっている。このことから、PIREB が磁場による影響を受けたことが示唆された。

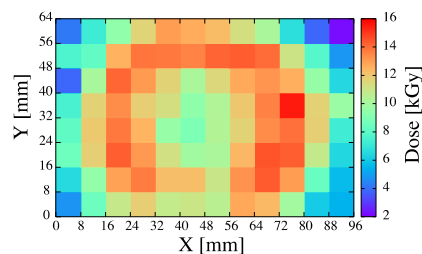
次に、磁石を設置しない場合の線量測定結果からスリット位置は $Y=72$ mm と決定した。これを基準として、PIREB の偏向量を算出し、磁石ありの線量測定結果に重ねたグラフを Figure 12 に示す。結果より、10 keV~70 keV の電子軌道の箇所が高線量となっている。また、1 MeV の電子軌道の一部でも線量が出ている。これから、10~70 keV の電子が多く存在し、1 MeV の電子は少なかったことが示唆される。

Figure 13, 14, 15 は実際のリヒテンベルグ痕を示している。リヒテンベルグ痕から PIREB のアクリルに対する侵入長は 3 mm~5 mm である。NIST の EStar[10]より、侵入長から運動エネルギーを算出すると 0.8 MeV~1.25 MeV となった。

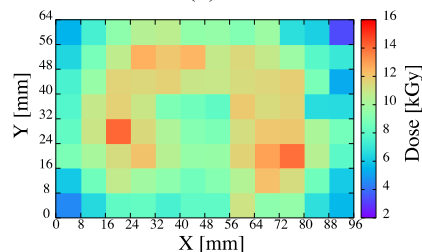
線量測定結果及び、リヒテンベルグ痕から 10 keV~1.25 MeV の電子が存在することが示唆された。



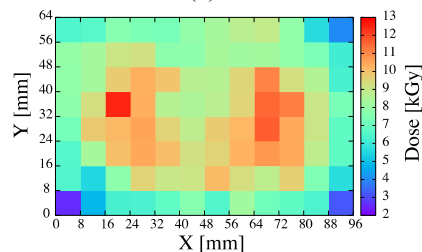
(a) #1 (part of Figure 9)



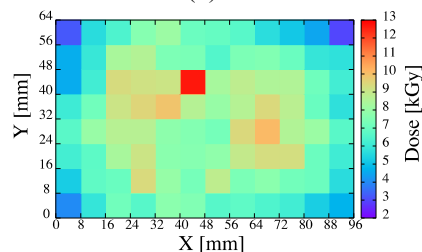
(b) #2



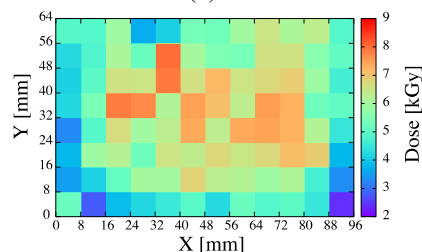
(c) #3



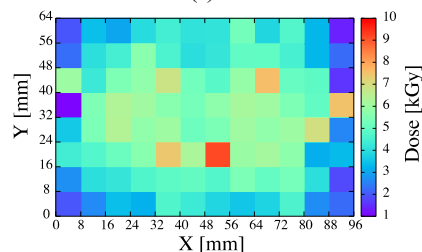
(d) #4



(e) #5



(f) #6



(g) #7

Figure 9: The dose distribution of PIREB for each position indicated by # 1 to # 7 in Figure 4.

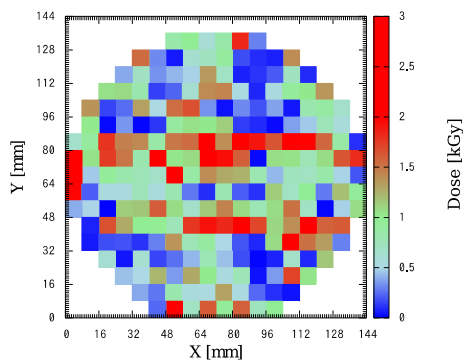


Figure 10: Result of irradiation dose (without magnet).

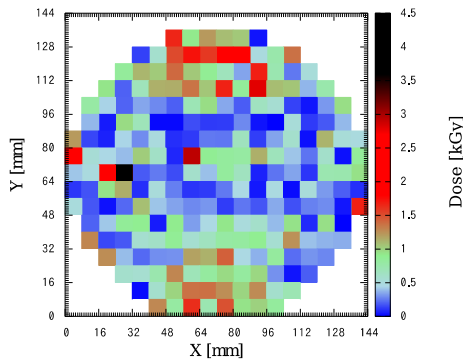


Figure 11: Result of irradiation dose (with magnet).

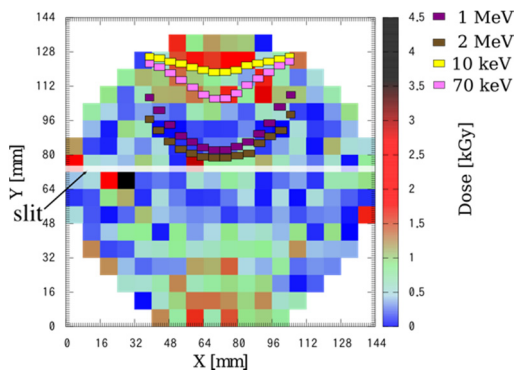


Figure 12: Result of irradiation dose (with magnet) and deflection points.

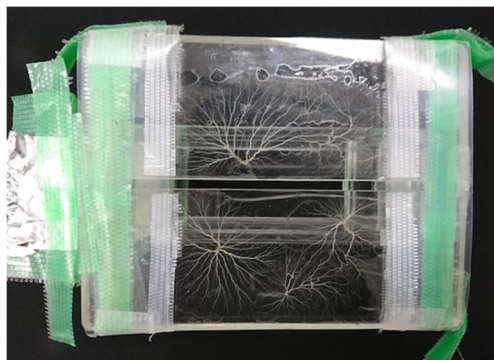


Figure 13: Electric tree after PIREB irradiation (front view).

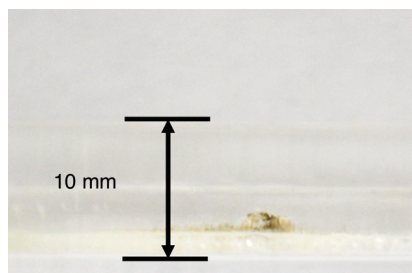


Figure 14: Electric tree after PIREB irradiation (side view)
1. The depth of electric tree was 3 mm.

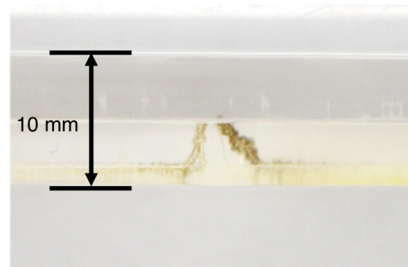


Figure 15: Electric tree after PIREB irradiation (side view)
2. The depth of electric tree was 5 mm.

4. まとめ

PIREB の運動エネルギー計測に向けて2つの実験を行った。

- (1) PIREB の進行距離に対する線量分布の確認
- (2) 外部印加磁場による PIREB の運動エネルギー計測

(1)の結果から、PIREB は進行するにつれて広がっていくことが確認できた。(2)では線量測定結果から10~70 keV の運動エネルギーを持つ電子が存在し、リヒテンベルグ痕からは0.8 MeV~1.25 MeV の電子が存在することが示唆された。

参考文献

- [1] 環境省(2011), 海洋生物保全戦略;
https://www.env.go.jp/nature/biodic/kaiyo-hozen/pdf/pdf_honbun.pdf
- [2] 河川整備基金助成事業; 「医薬品の河川と下水道における存在実態とその水生生物影響に関する研究」報告書, 17-1211-4 号, (2006).
- [3] T. Kazetoh *et al.*, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.135, pp.355-356 (2015).
- [4] T. Kikuchi *et al.*, Plasma and Fusion Research, Vol.6, pp.120621-1-3(2011).
- [5] H. Kondo *et al.*, Plasma Fusion Res., Vol.5, p.036(2010).
- [6] K. Shoji *et al.*, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering(to be published).
- [7] 柴田徳思:”放射線概論”, p.257, 通商産業研究社(2013).
- [8] A. Tokuchi *et al.*, Proc. 12th Int’l Conf. on High-Power Particle Beams, pp. 175-178(1998).
- [9] Ryuichi TANAKA *et al.*, Manual of CTA Dose Meter(1982).
- [10] NIST E-star;
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.htm>