パルス大強度相対論的電子ビーム照射の線量と動物プランクトンの不活化の関係

RELATIONSHIP BETWEEN INACTIVATION OF ZOOPLANKTON AND DOSE OF PULSED INTENSE RELATIVISTIC ELECTRON BEAM

佐々木千尋#, A), 菊池崇志 A), 佐々木徹 A), 高橋一匡 A), 本田匠 B), 松田朝陽 C), 山内諒太 D), 今田剛 E), F)
Sasaki Chihiro[A)], Kikuchi Takashi[A)], Sasaki Toru[A)], Takahashi Kazumasa[A)],
Honda Takumi[B)] Matsuda Asahi[C)], Yamauchi Ryota[D)], Imada Go[E), F)]
[A)] Nagaoka University of Technology
[B)] Central Research Institute of Electric Power Industry
[C)] National Institute of Technology, Sasebo College
[D)] Kagawa University
[E)] Niigata Institute of Technology
[F)] Extreme Energy-Density Research Institute, Nagaoka University of Technology

Abstract

In recent years, microbes in ballast water destroy the ecosystem and cause damage to the economy. The resulting damage to the fishery industry and the damage to human health caused by the bites and poisons of these marine organisms are also serious. We investigate a new treatment method using Pulsed Intense Relativistic Electron Beam (PIREB). Inactivation rate in irradiated to larvae of *Artemia Salina* was measured and compared to the irradiation dose measured using a film dosimeter. In this way, the relationship between inactivation rate and irradiation dose was investigated. The results showed that the inactivation rates ranged from 10 to 53% for average doses of 21.9 to 24.1 kGy. This difference in the inactivation rate is due to the non-uniform irradiation dose according to the irradiated area.

1. 序論

近年、バラスト水に含まれるプランクトンなどの外来種による生態系への影響が問題となっている[1]。貨物船などは積荷の積み下ろし時に船体が軽くなることで不安定になってしまう。そのため、積み降ろし時に海水を船内に取り込むことで船体の重さを維持している。この船内に取り込む海水をバラスト水と呼ぶ。バラスト水は船に取り込まれたまま移動し、積荷の積み込み時に海へと排水される。この時、海水に含まれる海洋生物が外来種として問題となっている。

バラスト水の処理は濾過や加熱、薬物による方法などで研究や実用化が行われているが、濾過は微生物には効果が薄く、加熱は耐久卵などには効果が薄く、薬品を使う場合は有害な副生成物が発生するなどそれぞれに課題が存在する[2]。一方、電子ビームを用いる方法では耐久卵などにも有効であり、二次汚染もないため、有益な方法であると考えられる。

先行研究[3-5]にて、パルス大強度相対論的電子ビーム(PIREB: Pulsed Intense Relativistic Electron Beam) を用いることで動物プランクトン(アルテミア)を処理できることが確認されており、特にアルテミアの卵は孵化率が約0%になる照射線量を明らかにした。しかし、幼体の不活化と照射線量の関係性は明らかになっていない。そのため、本研究では PIREB を使ってバラスト水の処理をするために必要となる照射線量と不活化の程度の関係を調べることを目的とした。

s183132@stn.nagaokaut.ac.jp

2. 実験方法

2.1 パルス大強度相対論的電子ビーム発生照射設備

本研究では、高エネルギーの電子ビームを照射する必要がある。その実験を行うにあたり、長岡技術科学大学の極限エネルギー密度工学研究センターにある極限エネルギー密度発生・応用装置 ETIGO-III を用いた。ETIGO-III は誘導加速型のパルス電子ビーム加速器である。26 kV まで充電を行い、パルストランスにて 670 kV まで昇圧し、パルス整形線路を通り 12 個の磁性体コア(3個/cell、 4 cell)を通じて 8 MV の出力電圧を得ることができる[6]。

Figure 1 に ETIGO-III の外観写真を、Fig. 2 に典型的な加速電圧とビーム電流波形を、Table 1 に ETIGO-III の設計値を示す。

Figure 1: Experimental Apparatus “ETIGO-III”.

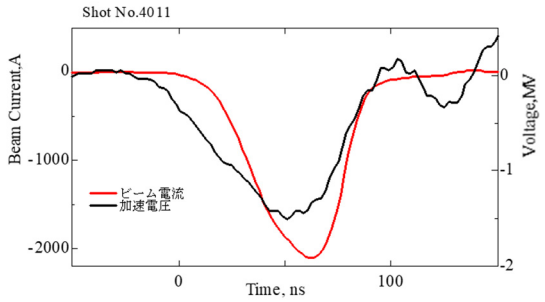

Figure 2: Typical acceleration voltage and beam current.

Table 1: Nominal Values of ETIGO-III (1cell)

Input current	15 kA
Input voltage	670 kV
Output current	5 kA
Output voltage	2 MV
Pulse width	50 ns (FWHM)

2.2 照射対象

本実験の照射対象としてアルテミア(*Artemia Salina*)の幼体を用いた。アルテミアは甲殻類に属する節足動物であり、卵の状態で直径約200 μm[7]、幼体では体長約500 μm[8]になる。アルテミアは、実際のバラスト水処理試験でも使用されており[9]、乾燥卵の状態での保存ができること、海水に投入した後約 24 時間で孵化すること、孵化適正温度が 28 ℃であり孵化後活動温度が 0 ℃～38 ℃であるため一年を通して飼育が可能なことから実験に使用しやすい。これらのことから、本研究ではアルテミアを照射対象とした。Figure 3 にアルテミアの幼体の写真を示す。

Figure 3: Artemia larvae.

2.3 照射実験方法

ディスポカップに塩分濃度 2%の人工海水を 1 L 作製し、約 200 個のアルテミアの乾燥卵を投入した。その後、室温 28 ℃で 28 時間以上経過させ、孵化させた。この中から生存個体を 50 匹ずつ合計 100 匹取り出し、それぞれ Fig. 4 に示す照射容器に人工海水 30 g と共に封入した。その後、このうちの片方に PIREB の照射を行い、照射の有無による影響を測定した。照射容器には人工海水が封入されている全範囲に CTA フィルム線量計を張り付け、照射線量の測定を行った。また、同様の実験は合計 6 回行い、それぞれの照射を行った集団を集団 1 から集団 6 とした。

Figure 4: Irradiation container (6cm×7cm).

3. 実験結果

3.1 照射線量測定結果

照射線量は照射容器の照射面を縦横 1 cm ずつに分け、それぞれの位置にて測定を行った。Figure 5 に集団 1 から集団 6 の照射線量測定結果を示す。

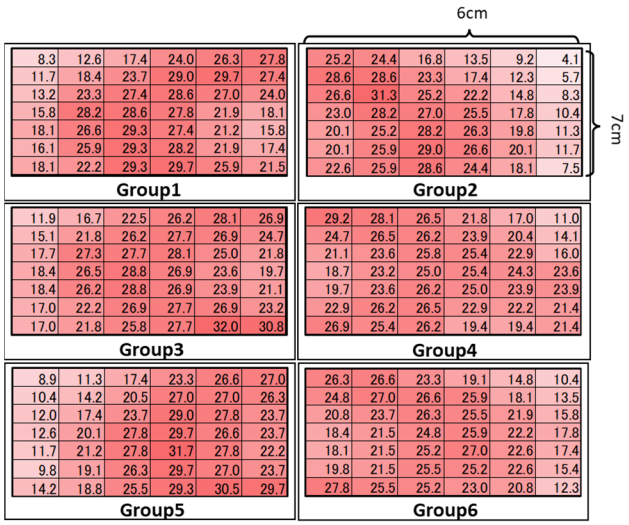

Figure 5: Results of irradiation dose measurement (Unit: kGy).

照射ごとに線量が多少異なるが、実験はすべて同様の条件で行っている。この結果からそれぞれの集団の平均線量が 21.9 kGy~24.1 kGy であること、それぞれの集団の最大照射線量と最小照射線量に大きな差があることが確認できる。

3.2 不活化率測定結果

不活化率は移動しない個体を不活とし、以下の式で求めた。 Table 2 に集団 1 から集団 6 の不活化率測定結果を示す。

$$\text{最大不活化率} = \frac{\text{不活化個体数}}{\text{活性個体数} + \text{不活化個体数}} \quad (1)$$

$$\text{最小不活化率} = \frac{\text{不活化個体数}}{\text{封入個体数}} \quad (2)$$

Table 2: Average Inactivation Rate

Group1	34.0~36.2%
Group2	20.0%
Group3	51.6~53.2%
Group4	14.0~17.5%
Group5	22.0~23.4%
Group6	10.0~10.6%

最大不活化率と最小不活化率の差は大きくないが、各集団の不活化率の差が大きくなっていることがわかる。

3.3 照射線量と不活化率の関係

Figure 6 に Fig. 5 と Table 2 及び未照射集団を加え、まとめた結果を示す。

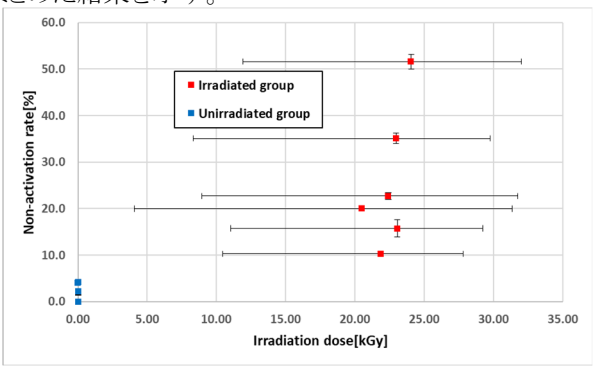

Figure 6: Relationship between irradiation dose and inactivation rate.

ここで、照射線量のプロット点は各集団で測定した照射線量の平均値とし、エラーバーの最大値は照射線量が一番多かった箇所、最小値は照射線量が一番少なかった箇所の線量である。また、不活化率は中間値を用いている。

照射以外の工程を同様に行った集団の不活化率と比較すると明らかに不活化率が異なっていることがグラフから確認できる。また、統計的仮説検定を有意水準 5%で照射及び未照射の集団に有意な差が無いとした場合の P 値は、分散が等しい場合は 0.38%、分散が異なる場合では 1.3%であり、統計的仮説検定を用いた場合でも不活化率が異なっていることが確認できた。

一方、照射条件が概ね同じであったにもかかわらず照射毎の不活化率が大きく異なる理由は、ターゲット(アルテミア)の位置と照射線量がどちらも不均一なためターゲットに多く当たった集団とあまり当たらない集団ができてしまったと考えられる。

4. 結論

本研究では PIREB を使ってバラスト水の処理をするために必要となる照射線量と不活化の程度の関係を調べることを目的とした。照射線量と不活化率の測定から、平均線量 21.9～24.1 kGy で 10～53%の動物プランクトンが不活化するという関係が示された。一方、各集団の不活化率には差があり、これは Fig. 5 に示した通り、照射面の場所による照射線量の不均一さが原因であると考えられる。

参考文献

[1] http://globallast.imo.org
[2] Yasutada SUZUKI, "バラスト水の処理及び分析方法", Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 70, 20-27(2016).
[3] Hironobu KONDO, Hiroki TAKEHARA, Takashi KIKUCHI, Toru SASAKI, Go IMADA and Nob. HARADA, "Demonstration for Inactivation of Zooplankton by Irradiation with a Pulsed Intense Relativistic Electron Beam", Plasma Fusion Res. 5, 036 (2010).
[4] Takahiro Kazetoh, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Nob. Harada, Go Imada, “Incubation Rate of Zooplankton Egg after Irradiation of Pulsed Intense Relativistic Electron Beam”, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.135 No.6 pp.355-356 (2015).
[5] Kenta Shoji, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Nob. Harada, and Go Imada, “Hatchability of Zooplankton Egg in Water after Irradiation with Pulsed Intense Relativistic Electron Beam”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.12, No.S2 (2017) pp.S127-S128.
[6] A. Tokuchi *et al.*, Proc. 12th Intl'l Conf. High Power Particle Beams, Vol.1 (1998) pp.175-178.
[7] http://plankton.image.coocan.jp/Crustacea1-2-011-1.html
[8] http://plankton.image.coocan.jp/Crustacea1-2-011.html
[9] https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/ballastwater/unyo/seibutubunseki_rev2_2010.pdf