

# パルス大強度電子ビームから生成される制動放射による動物プランクトンの卵への照射効果

## IRRADIATION EFFECT ON ZOOPLANKTON EGGS APPLIED BY BREMSSTRAHLUNG INDUCED FROM PULSED INTENSE ELECTRON BEAM

風藤孝啓<sup>#,A)</sup>, 皆川勇<sup>A)</sup>, 高橋一匡<sup>A)</sup>, 佐々木徹<sup>A)</sup>, 菊池崇志<sup>A)</sup>, 阿蘇司<sup>A)</sup>, 原田信弘<sup>A)</sup>, 江偉華<sup>A)</sup>, 永石隆二<sup>B)</sup>  
Takahiro Kazetoh<sup>#,A)</sup>, Isamu Minagawa<sup>A)</sup>, Kazumasa Takahashi<sup>A)</sup>, Toru Sasaki<sup>A)</sup>, Takashi Kikuchi<sup>A)</sup>, Tsukasa Aso<sup>A)</sup>,  
Nob. Harada<sup>A)</sup>, Weihua Jiang<sup>A)</sup>, Ryuji Nagaishi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Nagaoka University of Technology

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency

### Abstract

We have considered an irradiation effect on zooplankton eggs applied by bremsstrahlung induced from pulsed intense electron beam. Zooplankton eggs about 200 have been successfully inactivated using a bremsstrahlung at 3kGy. We found that 63.9% of zooplankton eggs are inactivated by bremsstrahlung irradiation. It was the increase of 30 points in comparisons with 33.3% of zooplankton eggs inactivated for non-irradiation case.

### 1. はじめに

貨物船などの船舶は空荷の際、船体を安定させるためにバラスト水を取り込み航行する。近年、このバラスト水中に含まれる水生生物や殺菌が多国間で行き来し、生態系の破壊や漁業被害、健康への被害が問題となっている。これに伴い、国際海事機関(IMO)にてバラスト水管理条約が採択され、2016年以降、全ての船舶にバラスト水処理(水生生物を駆除、殺滅、不活化させる)装置の搭載が義務付けられることとなった。現在、世界各国でフィルタ、薬剤、UVなどを複合した様々な処理装置が研究開発されているが、解決すべき課題も多い<sup>[1]</sup>。

本研究グループでは、電子線、制動放射などの複合効果が期待でき、溶液処理等が不要なパルス大強度相対論的電子ビーム照射によるバラスト水処理を検討してきた<sup>[2]</sup>。これまでに、パルス大強度相対論的電子ビームを模擬バラスト水に照射することによって動物プランクトンを不活化できることが明らかとなった。一方、バラスト水中には、孵化前の卵も含まれることから、それらへの影響を明らかにする必要がある。また、パルス大強度相対論的電子ビーム照射による動物プランクトンの処理は電子線、制動放射などの複合効果であるため、本研究では、パルス大強度電子ビームから誘起される制動放射を照射することで、動物プランクトンの卵の不活化へ与える影響を検討する。

### 2. 放射線照射による処理の原理<sup>[3],[4]</sup>

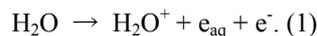
放射線による生物への影響は直接作用と間接作用がある。

放射線による生物への直接作用は、放射線が生物細胞やDNA分子に直接相互作用することによって

DNAを損傷させる。DNAの損傷が大きい場合、修復機能がうまく働かず、修復されなかった細胞は死に至るか、DNAに恒久的な変化を与える。

放射線による生物への間接作用は、放射線が生物の水分子と反応し、ラジカルを形成し、DNA分子を損傷させる過程である。

放射線を水に照射することでラジカルができる過程は次のように表すことができる。水がイオン化するエネルギーをもつ放射線が照射された場合、

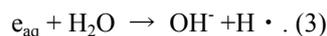


$e_{\text{aq}}$ :水和電子,  $e^-$ :水分子の電離で生じた電子

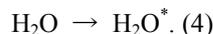
ここで生じた陽イオン  $\text{H}_2\text{O}^+$  は水素イオン  $\text{H}^+$  とヒドロキシルラジカル(OHラジカル)に分解する。



(1)で生成された水和電子と水分子が反応し、OH<sup>-</sup>イオンと水素ラジカル(H<sup>•</sup>)が生成される。



また、水が励起するエネルギーをもつ放射線が照射された場合、励起された水分子( $\text{H}_2\text{O}^*$ )も生成され、 $\text{H}_2\text{O}^*$ はHとOHに分解する。



分布の疎らな制動放射などの低LET(Linear Energy Transfer)放射線では再結合の確率が小さいことが明らかとなっており、その場合、拡散してタンパク質などと反応する。このとき、OHとRH(生体有機化

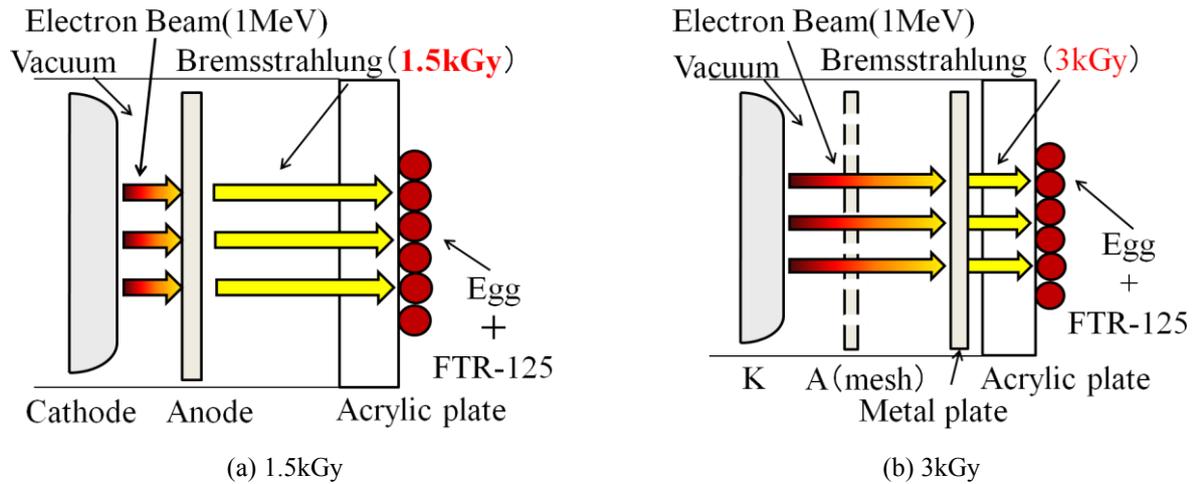


Figure 1: Schematic diagram of egg treatment by using ETIGO-II

合物)との水素引き抜き反応により、水生生物を死に至らしめる。さらに、OH が DNA 近傍に生じたときは DNA に損傷を与え、直接作用と同様に細胞死や DNA に変化が生じる。

本研究ではパルス大強度電子ビームから誘起される制動放射を動物プランクトンの卵に照射する。制動放射は低 LET であり、放射線の直接作用、間接作用による動物プランクトンの卵の不活化が期待できる。

### 3. 実験方法

Figure 1 は大強度パルスパワー発生装置“ETIGO-II”<sup>[5]</sup>によって発生した制動放射を用いた水生生物卵処理の概略図である。Figure 2 に電子ビームダイオード電圧  $V_d$  の時間変化を示す。ピーク値で ~1MV(FWHM:50ns)の電圧がダイオードに印加される。この高電圧パルスにより電子ビームを発生させる。発生した電子ビームを(a)平板アノード電極または(b)厚さ 1mm の金属プレート(ステンレス製)にて遮蔽し、制動放射を発生させた。発生した制動放射の吸収線量は、三酢酸セルロースフィルム線量計(FTR-125)<sup>[9]</sup>を用いて計測を行い、(a)の場合には 1.5kGy、(b)の場合には 3kGy の吸収線量であった。

本装置によって発生した制動放射を 200 個程度の動物プランクトンの卵へ照射した。動物プランクトンとしてアルテミア(*Artemia salina*)<sup>[6],[7]</sup>を使用している。照射後、照射有り/無しのアルテミアの卵の不活化率(非孵化率と孵化後の不活化率の合計)の変化を評価した。不活化率は

$$\text{卵の不活化率} = \frac{\text{非孵化数} + \text{孵化後の不活化数}}{\text{卵の総数}} \quad (6)$$

とし、実体顕微鏡を用いて、1 分間観測しても運動しない個体を不活化されたものとした<sup>[8]</sup>。

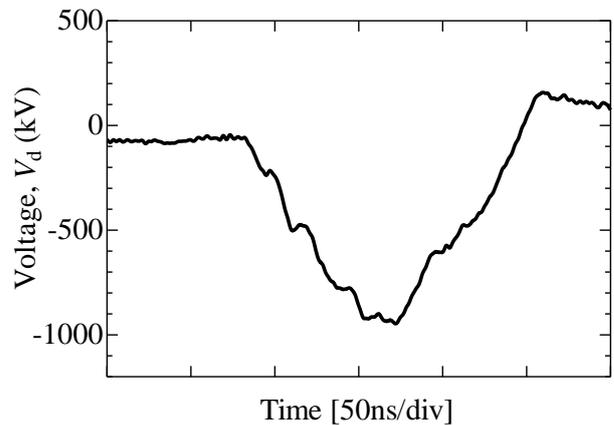
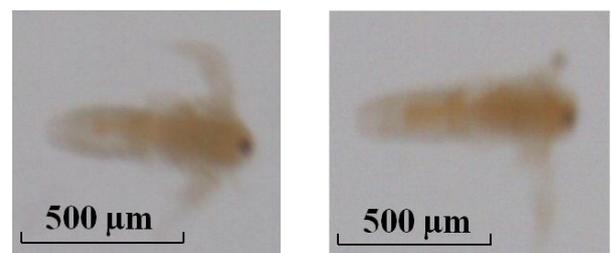


Figure 2: Time evolution of e-beam diode voltage



(a) Stop motion

(b) Morphological change

Figure 3: Inactivated zooplankton after incubation

### 4. 実験結果

Figure 3 に孵化後に運動停止(不活化)した動物プランクトンを示す。運動を停止した動物プランクトンの中には体の一部が破損したものが観測された。

Figure 4 に動物プランクトンの卵に 1.5kGy の制動放射を照射した際の卵の不活化率を示す。1.5kGy の制動放射照射で 46.8%の卵が不活化した。照射無し(コントロール)の場合は 33.3%であったのに比べ、卵の不活化率が約 12 ポイント増加した。また、非

孵化率は照射有りの場合は 20.9%であり、照射無しでは 18.9%と、同程度であった。孵化後の不活化率は、照射有りの場合 25.8%であり、照射無しの場合で 14.4%と比較すると約 11 ポイント増加した。

Figure 5 に 3kGy の制動放射を照射した際の卵の不活化率を示す。3kGy の制動放射照射で 63.9%の卵が不活化した。照射無しの場合の 33.3%に比べ、卵の不活化率は約 30 ポイント増加した。また、非孵化率は照射有りの場合は 40.8%であり、照射無しの場合の 18.9%と比較すると、約 21 ポイント増加した。孵化後の不活化率は、照射有り 23.1%であり、照射無しの場合の 14.4%と比較すると、約 9 ポイント増加した。

非孵化率は、吸収線量 1.5kGy の場合では 20.9%であり、3kGy での 40.8%と比較すると、制動放射 3kGy の方が約 20 ポイント大きくなった。このため、3kGy の制動放射は卵の非孵化に有効であることが分かった。

また、孵化後の不活化率は吸収線量 1.5kGy では 25.8%であり、3kGy での 23.1%と同程度であった。

この結果、吸収線量が増加すると、卵の非孵化にも有効であり孵化後の不活化にも有効であることが分かった。

## 5. まとめ

パルス大強度電子ビーム誘起の制動放射照射によるアルテミアの卵の不活化へ与える影響を検討した。

3kGy 程度の制動放射をアルテミアの卵に照射した結果、照射無しの場合の不活化率 33.3%であったのに対し、照射有りでは 63.9%と約 30 ポイント増加した。これより、制動放射照射はアルテミアの卵の不活化に有効であることが分かった。

また、非孵化率は吸収線量 1.5kGy では 20.9%であり、3kGy での 40.8%と比較すると、制動放射 3kGy の方が約 20 ポイント大きくなった。この結果、吸収線量が増加すると、卵の非孵化にも有効であり孵化後の不活化にも有効であることが分かった。

## 参考文献

- [1] GloBallast, <http://globallast.imo.org/>.
- [2] H. Kondo, *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, 036 (2010).
- [3] 生命フリーラジカル・研究会：水と活性酸素, p.35, オーム社, (2002).
- [4] 増田康治：放射線生物学, pp.15-17, 南山堂, (2002).
- [5] W. Jiang, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **32**, L752 (1993).
- [6] Food and Agriculture Organization, Fisheries Technical Paper **361**, pp. 79-251 (1996).
- [7] J. E. Doyle and B. R. McMahon, Comp. Biochem. Physiol., **112A**, pp. 123-129 (1995).
- [8] 日本船用品検定協会：プラスト水管理システム[5] の承認の際の生物分析方法(第 2 回改訂版), <http://www.hakuyohin.or.jp/>, (2010).
- [9] JAERI-memo : JAERI-M-82-033

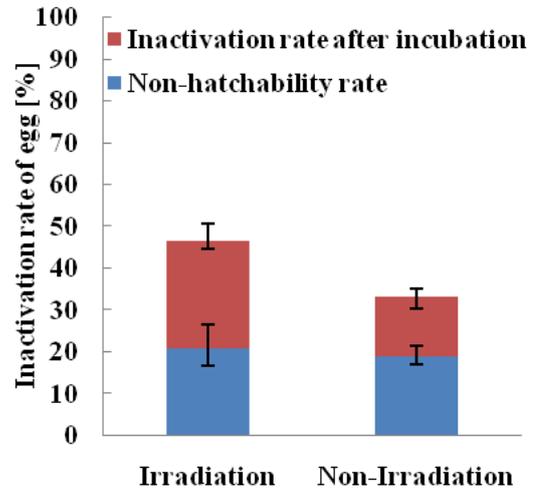


Figure 4: Inactivation rate of egg at 1.5kGy

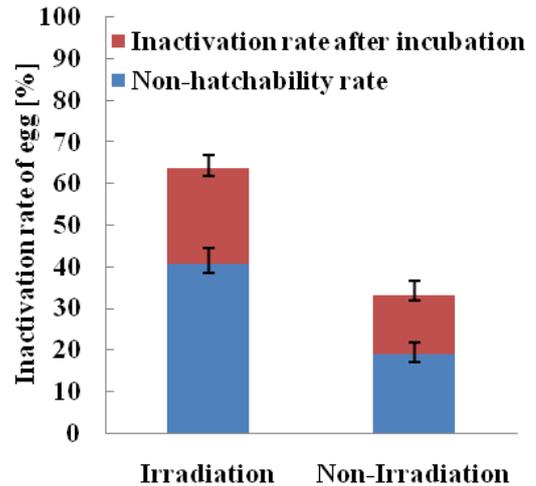


Figure 5: Inactivation rate of egg at 3kGy