

INVASIVE PROPERTY INTO WATER OF PULSED INTENSE RELATIVISTIC ELECTRON BEAM AND ITS IRRADIATION EFFECT TO ZOOPLANKTON

Hironobu Kondo^{A)}, Toru Sasaki^{A)}, Takashi Kikuchi^{A)}, Go Imada^{B),C)}, Nob. Harada^{A)}

^{A)} Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188, Japan

^{B)} Department of Information and Electronics Engineering, Niigata Institute of Technology,
1719 Fujihashi, Kashiwazaki, Niigata 945-1195, Japan

^{C)} Extreme Energy-Density Research Institute, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188, Japan

Abstract

Zooplankton contained in seawater or 3-wt% salt solution has been successfully inactivated using a pulsed intense relativistic electron beam (PIREB). A treatment chamber is filled with seawater or 3-wt% salt solution containing zooplankton, and is irradiated using the PIREB (2 MeV, 0.4 kA, 140 ns). The PIREB invasive properties indicated that seawater, brackish water and 3-wt% salt solution are similar. We found that up to 40% of zooplanktons are inactivated by one shot of PIREB irradiation.

パルス大強度相対論的電子ビームの水中侵入特性と動物プランクトンへの照射効果

1. はじめに

貨物船などの船舶は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、このバラスト水に移入した水生生物が多国間で行き来し、他海域での排出による生態系の破壊や漁業被害などが世界各国で問題となっている。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ている。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^[1]。

本研究では、電子線、活性種、X線などの複合処理効果が期待できるパルス大強度相対論的電子ビーム(PIREB: Pulsed Intense Relativistic Electron Beam)照射による処理方法を提案し、水中へのPIREB侵入特性と動物プランクトン処理の可否を検討する。

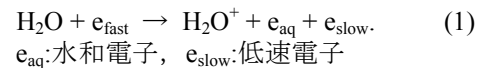
2. PIREB照射による処理の原理^{[2],[3]}

水中での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。直接作用はPIREBやPIREBによって発生した制動X線が生物細胞やDNA分子に直接衝突し、DNAを損傷させる。損傷したDNAは修復がまれに、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に永久的な変化が生じる。

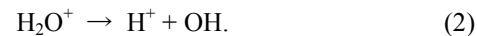
間接作用はPIREBや制動X線が水に衝突し、水

分子を活性酸素に変化させ、生物を不活化する。

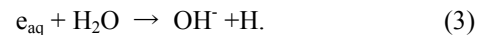
PIREBの高速電子 e_{fast} が水(海水)に衝突すると水がイオン化される。すなわち、



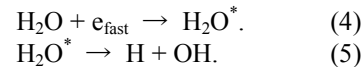
ここで生じた陽イオン H_2O^+ は H^+ イオンとOH(ヒドロキシルラジカル)に分解する。



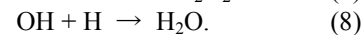
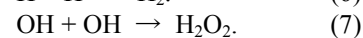
(1)で生成された水和電子と水分子が反応し、OH⁻イオンとH(水素ラジカル)が生成される。



また、PIREB照射により H_2O^* (励起された水分子)も生成され、 H_2O^* はHとOHに分解する。



(2), (3), (5)の反応で生成されたOH, Hはラジカルの相互反応により再結合で分子生成物が生成される。



分布の疎らな電子ビームなどの低LET(Linear Energy Transfer)放射線では再結合の確率が小さいことが知られている。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(生体有機化合物)

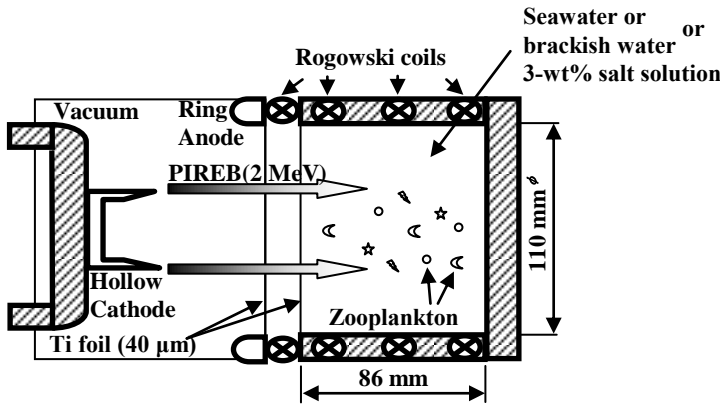


図 1: 処理の概略図

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。

3. 実験方法

図 1 は処理の概略図である。PIREB 発生装置”ETIGO-III”^[4]により 2 MV で加速された PIREB はチタン膜を通して処理容器へ照射される。処理容器はポリプロピレン製で内径 110 mm、深さ 86 mm、容積 800 ml の円筒形である。この容器には海水、汽水または 3-wt%食塩水を封入する。海水には海洋動物プランクトンを混入し、3-wt%食塩水には動物プランクトンの一種であるアルテミア^{[5],[6]}を混入した。

まず、水中への PIREB 侵入特性を調べるため、容器の周囲にロゴスキーコイルを配置し、PIREB 電流を計測した。コイルの設置位置は容器入射前、入射後(容器チタン膜後方 5 mm)、中間(同 35 mm)、終端(同 77 mm)である。

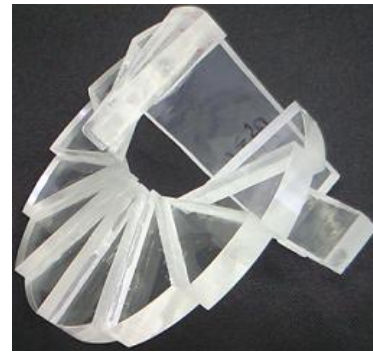
図 2 はアクリル板へのダメージパターンによる PIREB の水中への侵入特性観測装置である。厚さ 10 mm、半径 55 mm、中心角 30° の扇形状のアクリル板を段差 4 mm のらせん階段状に組み立てる。これを水中に沈め、アクリル板への電子の痕跡(ダメージパターン)から PIREB の水中侵入特性を調査する。

4. 実験結果と考察

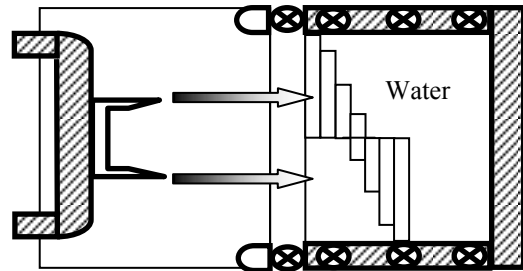
実験結果を示す前に PIREB 照射による動物プランクトンの不活化の理論的な見積りを行う。図 3 は水中標的への照射モデルである。水生生物が水中に一樣に分布すると仮定し、PIREB の照射体積 V_e と容器の体積 V_v の比を不活化率 R_h と見なす。 R_h は、

$$R_h = \frac{N_i}{N_{s0}} = \frac{V_e}{V_v} = \frac{\pi(r_{ed}^2 - r_{ei}^2) \cdot l_e}{\pi \cdot r_v^2 \cdot l_v} \times 100 (\%) \quad (9)$$

N_i : PIREB 照射後の不活化試料数, N_{s0} : PIREB 照射前の生存試料数, r_{ed} : PIREB の外半径 = 35 mm, r_{ei} : PIREB の内半径 = 20 mm, l_e : PIREB の進入長 = 10 mm^[7], r_v : 容器の外半径 = 55 mm, l_v : 容器の深さ = 86 mm



(a) ダメージパターン観測用のアクリル板



(b) 侵入特性観測用実験装置の断面図



(c) 侵入特性観測用実験装置の外観写真

図 2: PIREB の水中侵入特性観測

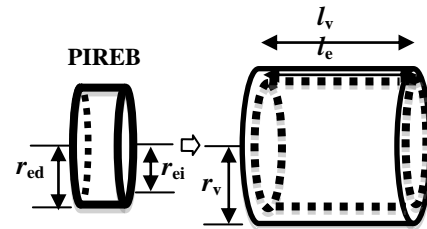


図 3: PIREB の水中標的への照射モデル

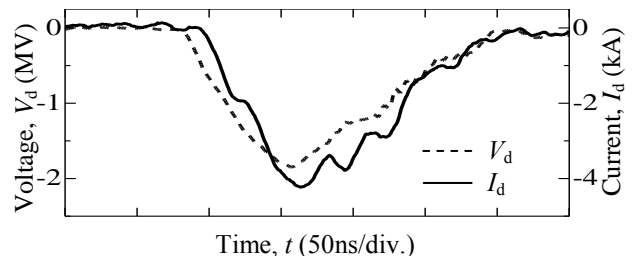


図 4: 電子ビームダイオード電圧及び電流

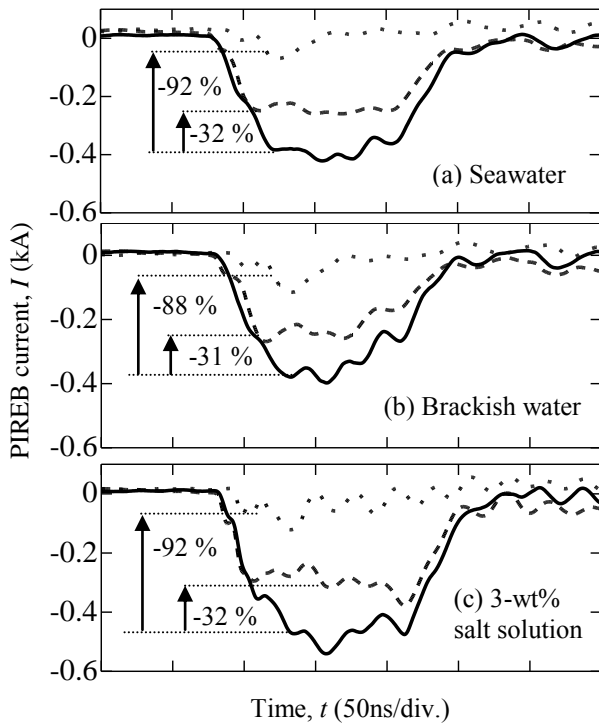


図 5: 水中への PIREB 侵入特性

と表される。(9)式より $R_h = 3.2\%$ と見積もられた。
 図 4 は電子ビームダイオード電圧 V_d 及び電流 I_d を示す。ピーク値で ~ 2 MV の電圧がダイオードに印加され、最大 ~ 4 kA の電流が流れる。この電力供給により PIREB を発生させる。

図 5 は海水、汽水と 3-wt% 食塩水に PIREB を照射した際の PIREB 電流である。同図(a)では PIREB は容器入射前でパルス幅 140 ns, 0.4 kA であった。入射後、中間、終端と侵入するにつれ、電流は 0.27 kA, 0.03 kA, 0.03 kA となった。同図より水中への PIREB 侵入特性はいずれの処理容器中でも同様の傾向を示した。これにより、様々な海域での処理に適用できることが明らかとなった。

図 6 は水中に設置したらせん階段状アクリル板に記録された PIREB のダメージパターンである。2 MeV の PIREB を水中へ設置したアクリル板へ照射したところ、1 段目のアクリル板にダメージが確認された。これにより、0-4 mm まで PIREB は水中へ侵入することがわかった。また、ロゴスキーコイルによる侵入特性結果との比較から 2 MeV の PIREB は水中に 5 mm 程度侵入し、容器中間や終端へは侵入しないことがわかった。

表 1 は海水に混入した動物プランクトンに PIREB を 1 回照射した際の不活化率を示す。1 回の PIREB 照射で 40 % の動物プランクトンが不活化した。不活化率は、

$$\text{不活化率} = (\text{不活化数} \div \text{総数}) \times 100 (\%) \quad (10)$$

とし、実体顕微鏡を用いて、1 分間観察しても運動しない個体を不活化とした^[8]。

表 2 は 3-wt% 食塩水に混入した動物プランクトン



図 6: 水中に設置したアクリル板へのダメージパターン

表 1: 海水に PIREB を 1 回照射した際の動物プランクトンの不活化率

総数 [匹]	不活化数 [匹]	不活化率 [%]
25	10	40

表 2: 3-wt% 食塩水に PIREB を 1 回照射した際の動物プランクトンの不活化率

総数 [匹]	不活化数 [匹]	不活化率 [%]
41	1	2
45	1	2
42	2	5
48	2	4
42	1	2

に PIREB を 1 回照射した際の不活化率を示す。1 回の PIREB 照射では 2-5 % の動物プランクトンが不活化した。(9)式による見積りとの比較から、海水では PIREB 照射体積以上の処理効果が確認できた。3-wt% 食塩水では(9)式の見積りと同程度となった。この結果、今回の実験では PIREB の侵入特性が同程度でも、動物プランクトンの不活化は溶液に依存する可能性があることが分かった。

図 7 及び図 8 はそれぞれ、海水と 3-wt% 食塩水に PIREB を照射し、照射後に運動を停止(不活化)した動物プランクトンを示す。照射前には活発に運動していた動物プランクトンは、照射後に運動を停止した。運動を停止した動物プランクトンの中には脱色や体の一部が破損したものが観測された。

5. まとめ

PIREB 照射による処理方法を提案し、水中への PIREB 進入特性と動物プランクトン処理の可否を行い、以下の結論を得た。

- (1) 海水、汽水と 3-wt% 食塩水の PIREB 侵入特性は同様の傾向を示し、様々な海域でのバラス

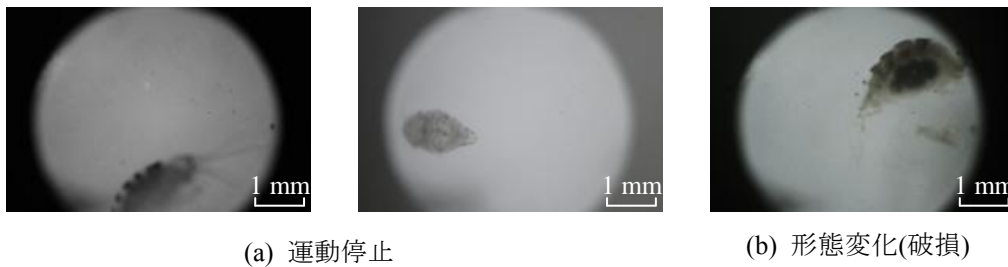


図 7: PIREB 照射後に不活化した動物プランクトン(海水)

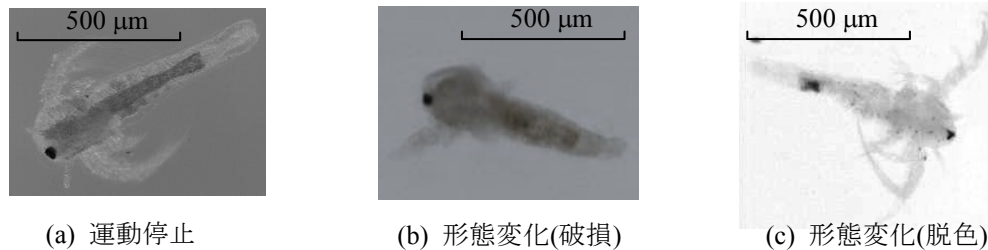


図 8: PIREB 照射後に不活化した動物プランクトン(3-wt%食塩水)

ト水処理に適応できる。

- (2) 2 MeV の PIREB 照射により動物プランクトンの不活化に成功した。海水では 40 %、3-wt% 食塩水では 2-5 %の動物プランクトンが不活化した。今回の実験では動物プランクトンの不活化は溶液に依存する。

参考文献

- [1] GloBallast, <http://globallast.imo.org/>.
- [2] 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).
- [3] 増田康治：放射線生物学, pp.15-17, 南山堂, (2002).
- [4] A. Tokuchi, *et al.*, Proc. 12th Int'l Conf. on High Power Particle Beams, pp.175-178 (1998).
- [5] Food and Agriculture Organization, Fisheries Technical Paper **361**, pp. 79-251 (1996).
- [6] J. E. Doyle and B. R. McMahon, Comp. Biochem. Physiol., **112A**, pp. 123-129 (1995).
- [7] ESTAR: Computer program for calculating stopping-power and range tables for electrons (Ver. 1.2), M. Berger, S. Couresy, and A. Zucker, <http://physics.nist.gov/Star> (1999).
- [8] 日本舶用品検定協会：バラスト水管理システムの承認の際の生物分析方法(第2回改訂版), <http://www.hakuyohin.or.jp/>, (2010).