

## パルス大強度相対論的電子ビームの発散角計測系の構築

### DEVELOPMENT OF DIVERGENCE ANGLE MEASUREMENT SYSTEM FOR PULSED INTENSE RELATIVISTIC ELECTRON BEAM

中野竜也<sup>#,A)</sup>, 菊池崇志<sup>A)</sup>, 佐々木徹<sup>A)</sup>, 高橋一匡<sup>A)</sup>, 今田剛<sup>B,C)</sup>

Tatsuya Nakano<sup>#,A)</sup>, Takashi Kikuchi<sup>A)</sup>, Toru Sasaki<sup>A)</sup>, Kazumasa Takahashi<sup>A)</sup>, Go Imada<sup>B,C)</sup>,

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

<sup>B)</sup> Niigata Institute of Technology

<sup>C)</sup> Extreme Energy-Density Research Institute, Nagaoka University of Technology

#### Abstract

Water pollution due to the outflow of medicines and the influence of the ecosystem due to alien species artificially moved from other sea areas are problems in water environments. Pulsed intense relativistic electron beam (PIREB) is one of solutions for the problems. However, the beam profile of PIREB is not spatially uniform. Therefore, it is necessary to understand the irradiation dose distribution to determine the most effective irradiation conditions for various applications. The purpose of this study is to construct a measurement system to measure the divergence angle of PIREB. The dose distribution of the PIREB collimated by an acrylic aperture was measured by a film dosimeter. The dose distribution obtained as a color image was analyzed for the divergence angle, rotation, tilt, etc., of the PIREB Irradiation experiments were carried out using the measurement system, and the divergence angle was calculated from the obtained dose distribution.

#### 1. はじめに

昨今、世界中で様々な環境問題が発生している。水環境に関しては難分解性物質の海洋放出[1]やバラスト水による生態系への影響[2]などが問題として挙げられる。これらの問題を解決するための方法の一つとして、パルス大強度相対論的電子ビーム(Pulsed Intense Relativistic Electron Beam:PIREB)を用いた応用研究が行われている。これまでに、PIREB の強い電離作用による有機化合物の分解[3]や水中の微生物の不活性化[4]などが行われてきた。

これらの研究は、試料を封入した容器をターゲットとしてPIREBを照射し、その影響を試料の分析結果により評価するという方法で行われている。しかし、PIREB のビームプロファイルは必ずしも空間的に一様ではないことから、様々な試料への効果的な照射条件を決めるために、照射線量分布を把握することが必要である。本研究では、PIREB の発散角を測定する計測系の構築を目的とした。照射する PIREB のビームプロファイルはカソード形状を反映した円環状であるため、円環状ビームの発散角を評価できる計測系が必要である。計測系を設計・製作し、その計測系を使用して PIREB の照射実験を行い、線量分布の測定、発散角の導出を行った。

#### 2. 発散角計測系の製作

##### 2.1 基本構想

計測系の設計について基本的な構想を以下に述べる。計測系の基本的な構造を Fig. 1 に示した。各部品用途は以下の通りである。

- アパーチャによってビームを制限する。

<sup>#</sup> s161060@stn.nagaokaut.ac.jp

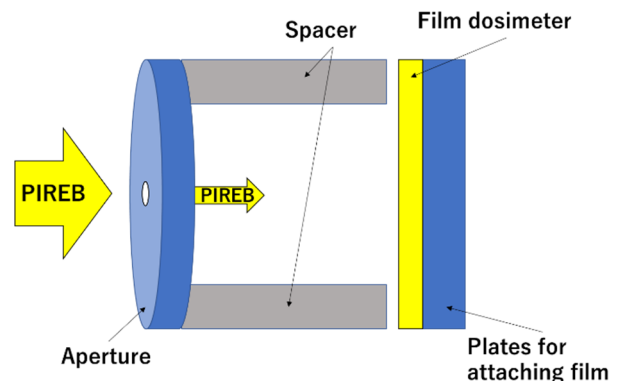


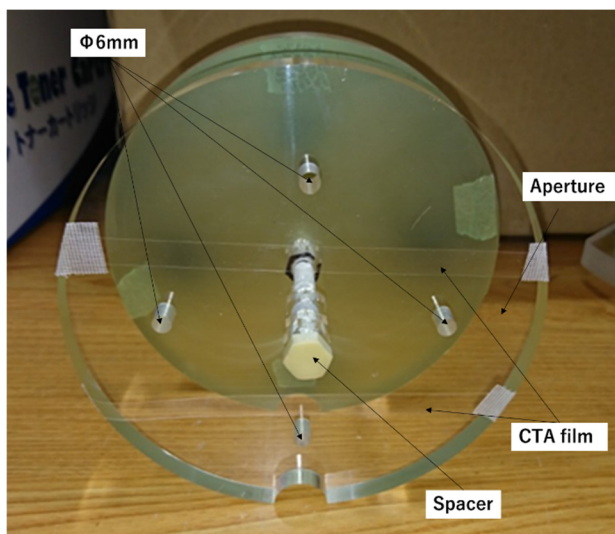
Figure 1: Concept of measurement system.

- スペースによってアパーチャから計測部までの間隔を取る。
- フィルム線量計によってPIREBの線量分布を得る。
- フィルムは単体で保持できないので、板材に貼り付けて使用する

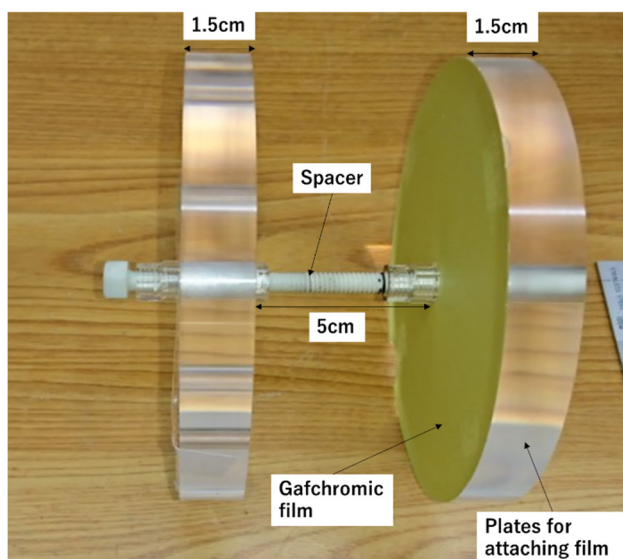
##### 2.2 製作した計測系

2.1 の基本構想をもとに製作した計測系を Fig. 2 に示す。

アパーチャは Fig. 3 に示すような設計となっている。直径 150 mm、厚さ 15 mm のアクリル板を使用し、中心から 75 mm 位置に上下左右 4 カ所に直径 6 mm の穴を設けている。実験では最大エネルギー 2 MeV の電子を照射するが、アクリルに対する 2 MeV の電子の侵入長は 0.86 cm 程度であり、アパーチャの穴から抜けてくる電子以外を貫通させない十分な厚さが取れている。これにより円環状のビームの一部をコリメートして線量分布が得られる。4 カ所の穴を設けているのは、穴を通り線量フィル



(a) Front view



(b) Side view

Figure 2: Measurement system for PIREB.

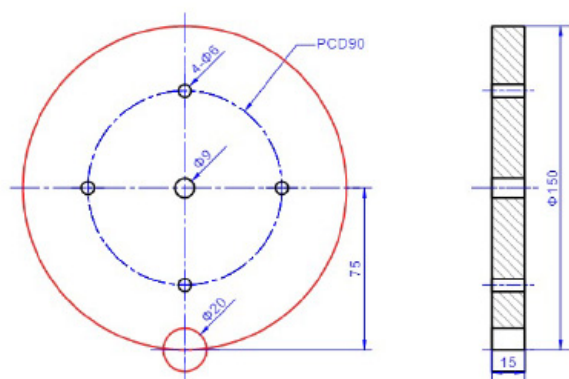


Figure 3: Aperture plate (drawings).

ムに照射された電子が他の穴を通る電子と干渉しないように、かつ一度の照射で複数カ所のデータを得るため

ある。また、スペーサを通す穴として中央に直径 9 mm の穴、照射実験のセットアップ上、必要となる測定器のケーブルを通すためのスペースとして下部 1 カ所に直径 20 mm の半円切り欠きを設けた。

線量フィルムを保持するため、直径 150 mm、厚さ 15mm のアクリル板をアパーチャと同様に、スペーサを通すために中央に直径 9 mm 穴、下部 1 カ所に直径 20 mm の半円切り欠きを設けた。

アパーチャと線量フィルムを支持台の間のスペーサとして M8×100 のボルトを使用した。アパーチャとフィルム線量計との間隔を 5 cm とし、ボルトを固定するためにアパーチャ、フィルムを貼り付けるアクリル板それぞれをナットで挟み込む形にしている。

フィルム線量計は富士フィルム製 CTA フィルム線量計 (FTR-125) と Ashland 製 GAFCHROMIC フィルム (HD-V2) の 2 種類を使用している。それぞれの特徴を Table 1、および Table 2 に示す。

Table 1: CTA Film Dosimeter

Size	Width 8mm, Length 100m/roll, Thickness 125 $\mu$ m
Measurable range	5kGy-300kGy
Method of measurement	Convert change in absorbance to light with wavelength of 280nm to dose

Table 2: GAFCHROMIC Film

Size	80mm×100mm, Thickness 105 $\mu$ m(active layer 8 $\mu$ m, polyester substrate 97 $\mu$ m)
Measurable range	10Gy-1000Gy
Method of measurement	Convert color changes to dose

CTA フィルム線量計は、Table 1 に示すような特徴があり、線量によって 280 nm の波長光に対する吸光度が変化することを利用して 5 kGy から 300 kGy までの線量を測定できる。PIREB が計測系に照射されたことを確認する目的でアパーチャ前面に穴に重ならないように横向きに 2 枚貼り付けている。GAFCHROMIC フィルムは、Table 2 に示すような特徴があり、フィルムの色の变化から線量を測定できる。アパーチャによりコロケートされた PIREB の線量分布を得るため、アクリル板と同じ形状に切り取り、両面テープでアクリル板に貼り付けた。

### 3. 構築した計測系を用いた照射実験

#### 3.1 実験装置と実験条件

製作した計測系を用いて PIREB 照射を行った。PIREB の照射には、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 PIREB 発生装置"ETIGO-III"[5]を使用した。実験には 1 段の誘導

加速セルを使用したため、加速電圧の最大値は約 2 MV である。

### 3.2 実験結果と解析

#### 加速電圧とビーム電流波形

実験時の典型的な加速電圧とビーム電流を Fig. 4、Fig. 5 に示す。

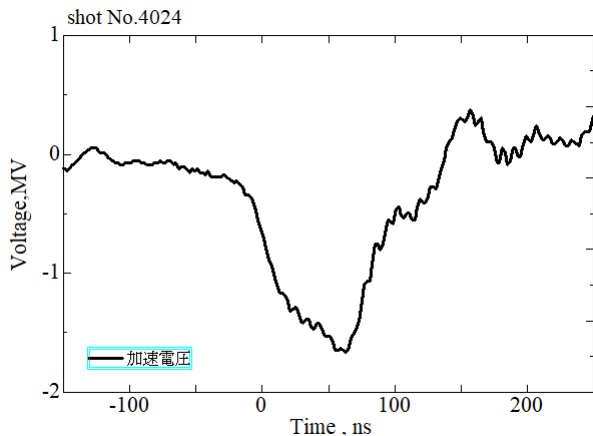


Figure 4: Typical accelerating voltage.

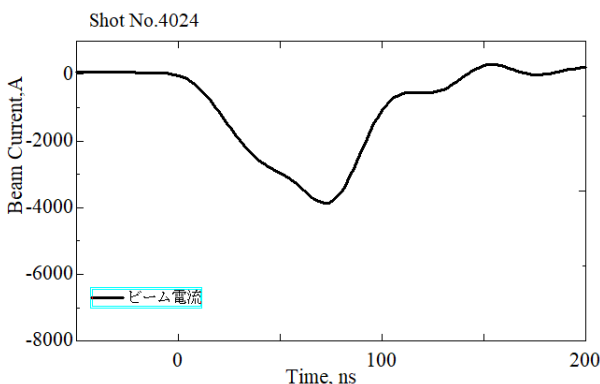


Figure 5: Typical beam current.

加速電圧の最大値は 1.6 MV 程度、ビーム電流のピーク値は 4kA 程度、FWHM はおおよそ 50 ns であった。

PIREB が計測系に照射されたことを確認する目的で取り付けられた CTA フィルムの測定結果については、最大で 8 kGy/shot 程度であり、前述の電流・電圧波形と合わせて、計測系に PIREB が照射されていることが確認できた。次に GAFCHROMIC フィルムの測定結果について、照射前後のフィルムを Fig. 6 に示す。

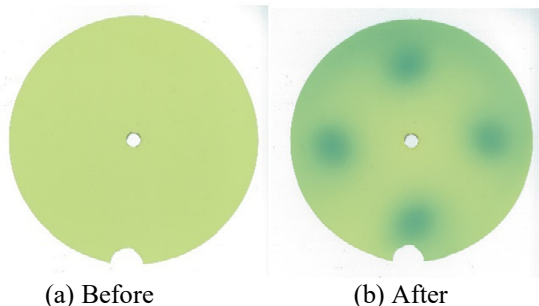


Figure 6: GAFCHROMIC film for (a) before PIREB irradiation and for (b) after PIREB irradiation.

Figure 6 より、フィルムの着色から PIREB が照射されていることが確認できる。この着色の変化をもとに解析を行って線量分布を得る。

GAFCHROMIC フィルムの線量解析は以下の方法で行った。GAFCHROMIC フィルムは RGB 値に対する線量応答がわかっており、フィッティング係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  を用いて Eq. (1) のように表される[6]。

$$dx(D) = \log\left(\frac{(a + bD)}{c + D}\right) \quad (1)$$

ここで、 $dx$  は RGB 値(16bit)、 $D$  は線量(Gy)である。Equation (1) を線量  $D$  について解き、フィッティング係数を求めることで、GAFCHROMIC フィルムの色の变化から線量を計算する。今回は、GAFCHROMIC フィルムの画像データの RGB 値のうち R 値を取得し、次の式によって R 値から線量に換算した[6, 7]。

$$D = 700 \times \left( \frac{\left(0.461179 - 0.16923 \times \exp\left(\frac{R}{56250}\right)\right)}{\left(1.00519 \times \exp\left(\frac{R}{56250}\right) - 1\right)} \right) \quad (2)$$

ここで、 $R$  は RGB の R 値(16bit)を表す。

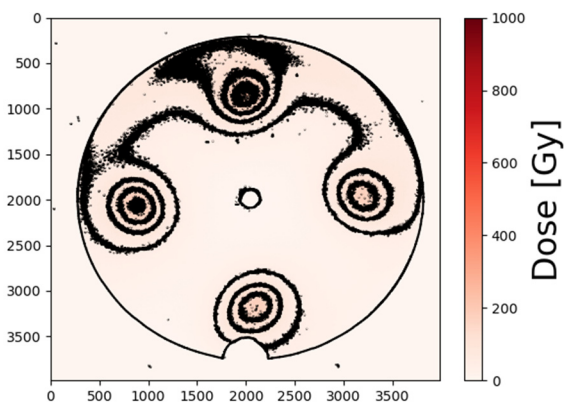


Figure 7: Dose analysis results for GAFCHROMIC film irradiated by PIREB.

Figure 7 に GAFCHROMIC フィルムの線量解析結果を示す。Figure 7 はカラーバーによって線量を示している。解析の結果、アパーチャに上下左右に開けた穴によりコリメートされた PIREB が発散しながら照射されていることが確認でき、線量分布が得られている。解析結果の黒線は線量の等高線である。コリメートされた PIREB の発散は同心円ではなく、楕円のような形状をしていることが確認できる。また、Fig. 7 の上側および左側の等高線と右側、下側の等高線の違いから、それぞれの穴を抜けてきた線量の大きさは異なることがわかる。このことから円環状の PIREB には強度に偏りがあると思われる。

Figure 8 は、Fig. 7 の線量解析結果とアパーチャの図 (Fig. 3) を重ねて表示した画像である。アパーチャの上下左右に配置された穴の位置と線量解析結果の線量の最も大きいと思われる中心部が重ならないことがわかる。このことから PIREB はアパーチャの穴に対して角度をもって侵入したと思われる。

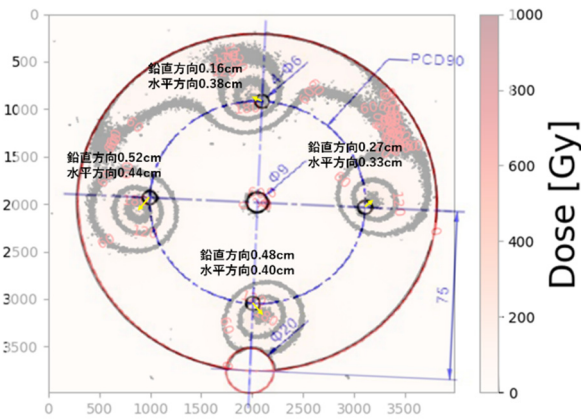


Figure 8: Dose distribution (Fig. 7) overlapped by aperture plate (Fig. 3).

発散角の導出方法を Fig. 9 に示す。

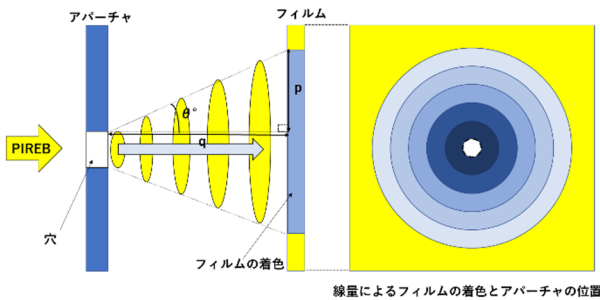


Figure 9: Derivation of divergence angle.

Figure 9 に示すようにアパーチャとフィルムとの距離  $q$ 、ビームの広がり  $p$  とすると、発散角  $\theta$  は Eq. (3) のように表される。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{q}\right) \quad (3)$$

また、Fig. 8 に示されるような場合は、Eq. (4) のように補正を加えた導出方法を用いる。

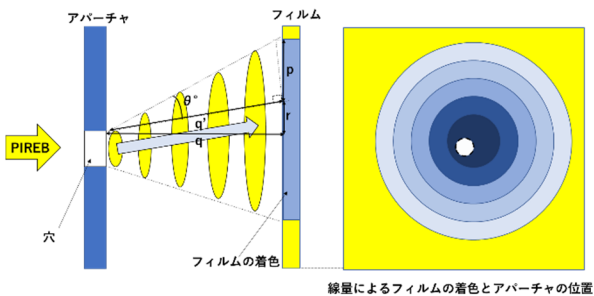


Figure 10: Derivation of corrected divergence angle.

Figure 10 は、Fig. 8 に示すような斜め入射を考慮する場合の発散角の補正を示している。アパーチャとフィルムとの距離  $q$ 、その間に実際に PIREB が進んだ距離  $q'$ 、補正前のビームの広がり  $p+r$  とすると、補正後の発散角  $\theta$  は、Eq. (4) のように表される。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\sqrt{q^2 + r^2}}\right) \quad (4)$$

これらより、この実験における PIREB の発散角を算出した。結果を Table 3 に示す。

Table 3: Divergence Angle

Hole Position	upper side	lowerside	right side	left side
PIREB spreading direction: up	11°	12°	14°	14°
down	9°	13°	13°	14°
right	11°	13°	16°	14°
left	11°	15°	13°	15°

Table 3 では、アパーチャのそれぞれの穴を通過した PIREB に対して、上下左右それぞれの方向の広がりをもとに発散角を導出している。Table 3 の結果や Fig. 7 からわかるように、構築した計測系により PIREB の発散は、円の中心から外側に向かって大きいことがわかった。

#### 4. まとめ

本研究では、空間的に非一様な PIREB の発散角計測系を構築することを目的とした。計測系の設計・製作においては、PIREB の制限と線量分布の取得を基本構想として、アパーチャとフィルム線量計を用いた計測系を製作した。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 PIREB 発生装置”ETIGO-III”を使用して計測を行ったところ、アパーチャによる PIREB の制限およびフィルム線量計による線量分布の取得が可能であることが確認できた。さらに線量分布から発散角を導出したところ、発散角は 9~16° であることがわかった。また、アパーチャの中心とフィルムに照射された線量中心から PIREB が角度をもってアパーチャに侵入していること、円環状の PIREB における円の中心方向と円の外側に向かう方向との発散角の違いなどが得られた。

#### 参考文献

- [1] 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).
- [2] 環境省(2011), 海洋生物多様性保全戦略; [https://www.env.go.jp/nature/biodic/kaiyo-hozen/pdf/pdf\\_honbun.pdf](https://www.env.go.jp/nature/biodic/kaiyo-hozen/pdf/pdf_honbun.pdf)
- [3] Takashi KIKUCHI *et al.*, Plasma Fusion Res., Vol.6, No.1206021 pp.1206021-1-1206021-3 (2011).
- [4] Hironobu KONDO *et al.*, Plasma Fusion Res., Vol.5, No.036 pp.036-1-036-3 (2010).
- [5] A. Tokuchi *et al.*, Proc. 12th Intl' Conf. High Power Particle Beams, Vol.1 (1998) pp.175-178.
- [6] GAFCHROMIC DOSIMETRY MEDIA, TYPE HD-V2
- [7] Y. Yuri *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A828 (2016) 15-21.