

# EVALUATION OF DOSE LEVEL FOR LASER-DRIVEN ION ACCELERATOR USING PHITS CODE

H.Sakaki<sup>#A)</sup>, Y.Fukuda<sup>A)</sup>, M.Kanasaki<sup>A,B)</sup>, S.Jinno<sup>A)</sup>, A.Yogo<sup>A)</sup>, M.Nishiuchi<sup>A)</sup>, M.Kando<sup>A)</sup>, M.Ueno<sup>A)</sup>, T.Fukami<sup>A)</sup>, and K.Niita<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> JAEA, 8-1-7 Umemi-dai, Kizugawa, Kyoto, 619-0215, Japan

<sup>B)</sup> Kobe University, 5-1-1, Fukaeminami, Higashinada, Kobe, 658-0022, Japan

<sup>C)</sup> RIST, 2-4, Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1106, Japan

## Abstract

The compact ion particle accelerator has become attractive in view of recent progress in laser-driven ions acceleration. In the development of the instrument, it is necessary to do the bench-mark of the amount of the different types of radiation by the simulation code for radiation shieldings. The Monte Carlo Particle and Heavy Ion Transport code (PHITS) was used for bench-mark the dose on the laser-driven cluster-target type accelerator.

## PHITS コードを用いたレーザー駆動型イオン加速装置のための線量評価

### 1. はじめに

この 10 数年のレーザーシステム、およびそのレーザー光ハンドリング技術の飛躍的な発展とともに、レーザー集光強度が  $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$  を超える値<sup>[1]</sup>を達成できるようになってきた。このようなレーザーと物質の相互作用によって発生するホットプラズマを利用したイオン加速は、クライストロンと加速空洞を用いた RF 加速装置が作りだす電場と比較にならない電場強度( $100\text{GeV}/\text{m}$ )が達成可能であり、この電界勾配<sup>[2-4]</sup>を利用することで従来型加速器を凌駕する超小型サイズの粒子線加速器の実現可能性が現実味を帯びてきている。このような中、原子力機構では、10Hz 程度の高繰り返しが可能で高強度超短パルスレーザーと、原子力機構が発見した物質のクラスター状態を用いるという高効率なターゲット<sup>[5]</sup>を用いて、これまでに He+CO<sub>2</sub> ガスを用いたマイクロサイズのクラスターにて、核子当たり 50MeV を超える He の加速に成功している<sup>[6]</sup>。

しかし、レーザー駆動イオン加速は非常にコンパクトなサイズで、非常に高エネルギーのイオン加速ができるという反面、加速時に用いるホットプラズマから『大量の電子線・X線などの複合放射線』が加速イオンと共に同時発生されるという問題もある。レーザー駆動型加速器を実現するためには、文部科学省から放射線発生装置として設置許認可を受けなくてはならないが、どのような条件(レーザー強度、クラスターサイズ・密度など)で、その程度の複合放射線場が発生するのか? などのメカニズムが十分に調査されておらず、放射線発生装置としての設置条件、線量評価方法、及び、レーザーショット条件による放射線発生モデル化の早期確立を推進する必要がある。

そこで我々は、まずは『実験時に設置するガラス線量計で得られた積算線量』と、放射線遮蔽評価で実績のある『原子核モデルや評価済み核データライブラリを用いたモンテカルロ型粒子輸送コード (PHITS コード) の計算結果』を比較解析することで、レーザー駆動型イオン加速装置における放射線評価手法の確立に向けた動きを開始したので報告する。

### 2. レーザー駆動型イオン加速手法

今回は、CO<sub>2</sub>+He の混合ガスによって生成される CO<sub>2</sub> クラスターを用いて、イオン加速実験を行う。60-bar の混合ガス(混合比 He:CO<sub>2</sub>=9:1)を、クラスターサイズが最大で  $\mu\text{m}$  オーダー近くになる様に設計されたコニカルノズルを用いて真空中に放出することで生成される様な状態を作った上で、生成クラスターに対して  $8 \times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$  の高強度短パルスレーザー光(原子力機構 J-KAREN レーザーシステム)を

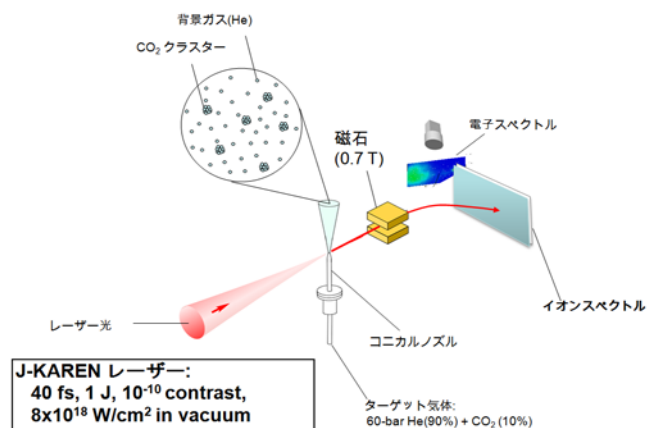


図 1: CO<sub>2</sub> クラスターターゲットによるイオン加速実験概略図

<sup>#</sup> sakaki.hironao@jaea.go.jp

照射する。この際に加速されるイオンのエネルギーは、本実験においてはイオン加速の物理モデル等も未知な状況であり、その物理を解明することも、実験の目的にしている。よって、得られるイオンの最大エネルギーは実際にショットして見なければわからない状況である。そこで、イオンや電子のエネルギー計測は、イオンに関しては固体飛跡検出器 (CR-39) を用いた後方散乱ビーム計測法<sup>[7]</sup>を用い 100MeV 程度のイオンまでの計測レンジを用意し、電子に関しては磁場と蛍光体 (CCD カメラ計測) 用いたエネルギー分光で 200MeV 程度までの計測を実施するようにした。

### 3. 計測結果

#### 3.1 イオン計測結果

図 1 の実験系にて計測されたイオンの計測結果を図 2 に示す。図 2 は、CR-39 の裏面に記録されたイオンが作り出したピットである。今回は、エネルギー未知のイオン生成に挑戦しているために、高エネルギーイオンを後方散乱による計測をもちいている。そのため、表面に関しては計測されたピットが無く、裏面にのみ分布を持った感じにて計測されている。後方散乱で計測されたのイオン数は、前方方向から到来するイオン数の 0.01%程度であること加味して発生イオンのフラックスを逆算すると、 $10^4$ - $10^5$  イオン/cm<sup>2</sup>/shot 程度であることが推測される。また、最大で 40MeV/核子であることも見てとれる。40MeV/核子程度のイオンのピットサイズの大きさから判断すれば、これは背景ガス起因の He ( $\alpha$  粒子) である。

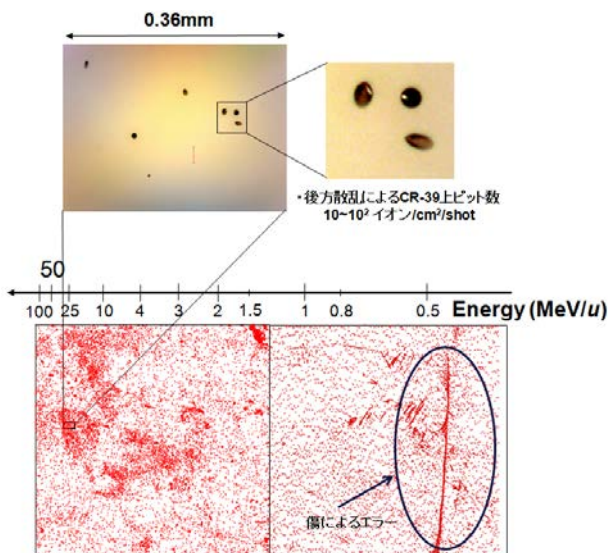


図 2: CR-39(裏面)で計測された、加速イオンの後方散乱 によるピット。後方散乱によるピットが計測されているために、CR-39 に斜め入射するピットが多いため楕円形のピットとなって観測されている。

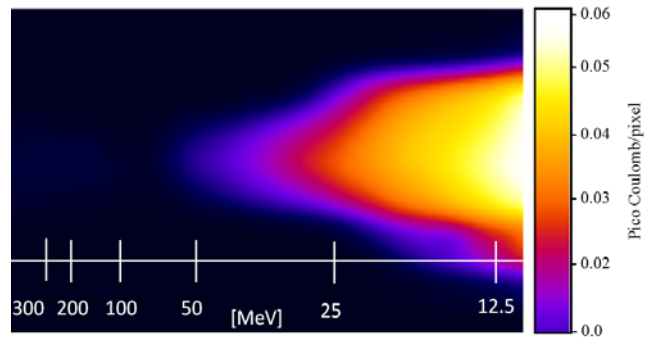


図 3: 電子スペクトロメーターにて同時計測された電子のエネルギー分布。Maxwell 分布になっている。

#### 3.2 同時発生の電子計測結果

イオン加速が発生した際の電子エネルギーは、電子スペクトロメーター (ESM) で観測した。図 3 にその計測例を示す。輝度の違いが電子の電荷量に比例している。イオンと同時発生した電子は、最大で 70MeV 程度のエネルギーになっている。また ESM の輝度から平均フラックスを計算すれば、 $< 6.0 \times 10^7$  電子/cm<sup>2</sup>/shot 程度であり、イオンのフラックスと 3 桁ほど異なる。

#### 3.3 線量計の計測結果

図 1、図 2 の計測が行われている際に、電子スペクトロメーターは真空槽内に設置されているが、それが設置されている部分の真空槽外壁面にガラス線量計を設置し (図 5 の☆印位置)、トータルの線量の積分値を計測した。その結果、線量計で  $4.5 \mu\text{Sv}$ /ショット (12500 ショット平均) の線量を得た。

### 4. PHITS による線量計算

#### 4.1 線源

PHITS を用いたモンテカルロによる放射線量計算を行った。実験で用いたジオメトリを入力し、図 4 で示される様な線源 (3 章で述べられた実測結果を反映させた) を仮定して、その際の線量を求めた。

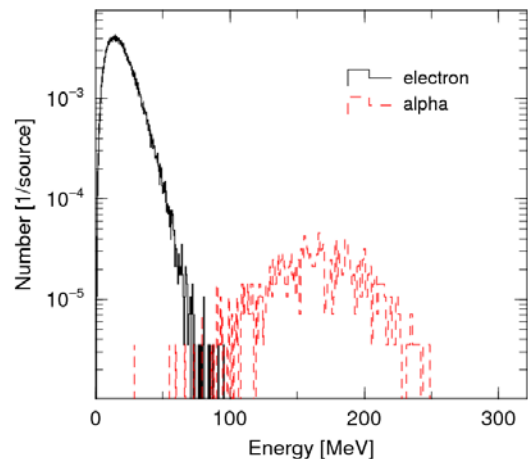


図 4: PHITS によるシミュレーションで用いた線源。実測された値に合わせている。

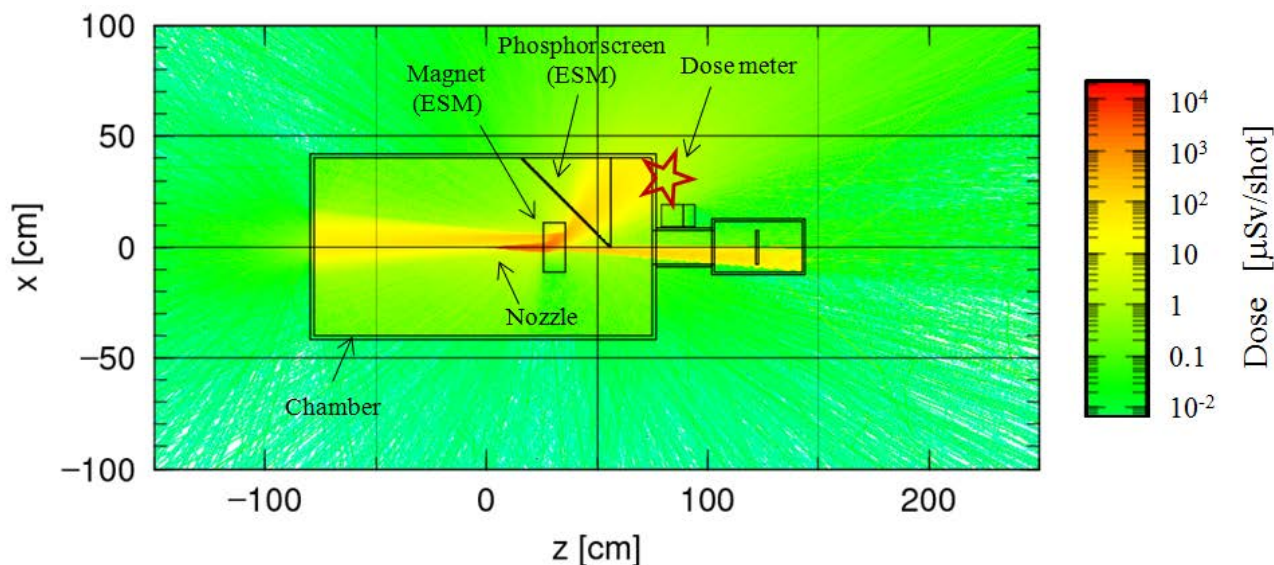


図 5: PHITS によるシミュレーションで得られた 1 ショット当たりの線量。XZ 平面での分布をカラースケール表示。実験に即した体系になっている。ESM によって、低エネルギーの電子が後方に軌道を変えられている。

#### 4.2 計算結果

PHITS による図 5 に計算結果を示す。これは、真空槽の中で、レーザーとクラスターが相互作用して、その後図 4 で示される様な放射線分布が発生しているという条件で計算され、結果として 1 ショット当たりの放射線量がカラースケールで表されている。

実測に用いた線量計は☆印の場所に設置されていたが、この計算結果からその場所においては、 $< 10 \mu\text{Sv/shot}$  程度になることがわかる。この値は、線量計測値とほぼ一致する。

### 5. まとめ

わずかなエネルギーの投入で高エネルギー加速が可能で、ターゲット交換の容易さ等の特徴も有するクラスターターゲットは、レーザー駆動型加速器を実現するための技術として最も近い方式と思われる。今回、そのクラスターターゲットに関してその線量評価を PHITS コードにて行った。当然のことながら、新しい加速メカニズムから発生する放射線に対しても、実測した放射線の分布結果を反映させた計算パラメーターを入れれば、実測に応じた線量評価が可能であることがわかった。

今後は、現在用いている  $\text{CO}_2+\text{He}$  というターゲットの組み合わせを他のガスの組み合わせに変えるなど、レーザー強度を変えるなどする事を行い、それぞれの場合の線量評価を行いながら、放射線発生装置として『レーザー駆動型粒子線加速器』という枠組みを作り上げ、基礎実験用としてではなく、医療や産業に応用する流れを作りたい。

### 謝辞

本研究は、日本学術振興会『最先端・次世代研究開発支援プログラム』に平成 22 年度採択された「革新的レーザー駆動イオン加速手法の開発」の研究開発の一環として行われた。

### 参考文献

- [1] S.-W. Bahk et al., Optics Letters, **29** (2004) 2837.
- [2] A. P. Fews et al., Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 1801.
- [3] F. N. Beg et al., Phys. Plasmas **4** (1997) 447.
- [4] R. A. Snavely et al., Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 2945.
- [5] Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 165002.
- [6] Y. Fukuda et al., submitted to Radiat. Meas. (2011).
- [7] M. Kanasaki et al., J. J. of App. Phys. **51** (2012) 056401.