

# 中間エネルギー領域における FFA-ERIT 方式を用いた二次粒子生成シミュレーションに関する研究

## SIMULATION OF SECONDARY PARTICLE PRODUCTION IN MEDIUM-ENERGY REGION WITH FFA-ERIT SCHEME

高松恒輝<sup>#, A)</sup>, 有馬秀彦<sup>A)</sup>, 米村祐次郎<sup>A)</sup>, 足立恭介<sup>A)</sup>, 石橋一心<sup>A)</sup>, 堂本剛秀<sup>A)</sup>, 池田伸夫<sup>A)</sup>, 森義治<sup>B)</sup>  
Koki Takamatsu<sup>#, A)</sup>, Hidehiko Arima<sup>A)</sup>, Yujiro Yonemura<sup>A)</sup>, Kyosuke Adachi<sup>A)</sup>, Isshin Ishibashi<sup>A)</sup>,  
Takahide Domoto<sup>A)</sup>, Nobuo Ikeda<sup>A)</sup>, Yoshiharu Mori<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup> Kyushu University  
<sup>B)</sup> Kyoto University

### Abstract

The energy recovery internal target (ERIT) method has been proposed for the efficient production of secondary particles. The principle of the ERIT method of neutron production has been experimentally verified with the 11 MeV proton FFA-ERIT ring. The medium-energy ERIT method is expected to expand its application range since the ERIT method with medium-energy primary particles provides a higher production rate of secondary particles and a broader energy spectrum. Since the interaction types increase in the medium energy region, a simulation code using nuclear data and nuclear reaction models is required to evaluate the production rate and energy spectrum of secondary particles. In addition, efficient algorithms are required since a tracking simulation of a large numbers of particles is necessary to achieve sufficient statistical accuracy. In this study, a new simulation method that consists of PHITS code and a tracking code using the leap-frog method has been proposed. In this presentation, the details of the simulation method under development are reported.

### 1. はじめに

加速器を用いて効率良く二次粒子を生成する手法として、標的にビームを繰り返し衝突させるエネルギー回復内部標的 (ERIT) 方式[1]が提唱され、FFA[2]-ERIT 方式によって中性子生成の原理検証がなされた[3]。

ERIT 方式は、1 次粒子をターゲットに衝突させた際に失われたエネルギーを回復し、繰り返しターゲットに衝突させ続けることで大強度 2 次粒子を生成する手法である。この手法では、1 次粒子を入射した後、高周波加速の周波数を固定することによって、ビームの蓄積を行う。2 次粒子を生成するための標的は、ビーム周回及び、高周波加速空洞による再加速のために薄膜を用いる。ビームは標的と衝突し、角度方向に散乱されることで、角度拡がりが増加するが、高周波加速空洞による再加速によって拡がりが増えられ、蓄積リングのアクセプタンス外になるまでリング内を周回する。そのため、その間蓄積リング内のビームは標的と衝突し 2 次粒子を生成する。Figure 1 に ERIT 方式の模式図を示す。

FFA-ERIT 方式において一次粒子として中高エネルギー領域陽子ビームを用いることで、中性子生成量の増加、生成中性子のエネルギー幅の拡張が見込まれ、放射化断面積の核データの評価等、中性子利用研究への本方式の応用範囲の拡大が期待される。FFA-ERIT 方式における中性子生成量とエネルギースペクトルの評価には、ビームと内部標的の相互作用を考慮に入れたシミュレーションが必要である。特に中高エネルギー領域では相互作用の種類が増えるため、核データと輸送計算による評価が重要となる。さらに、FFA-ERIT 方式では

様々な条件の多数の粒子の軌道計算を行う必要があるため、計算精度と計算速度の両立の観点から、シンプレクティック数値積分法が有用である。

本研究では、中間エネルギー領域陽子ビーム FFA-ERIT 方式において、放射線挙動を模擬するモンテカルロ輸送計算コードである PHITS[4]と、リーブ・フロッグ法を用いた軌道計算コードを接続したシミュレーションの開発を進めている。本発表では、開発中のシミュレーション手法の詳細について報告する。

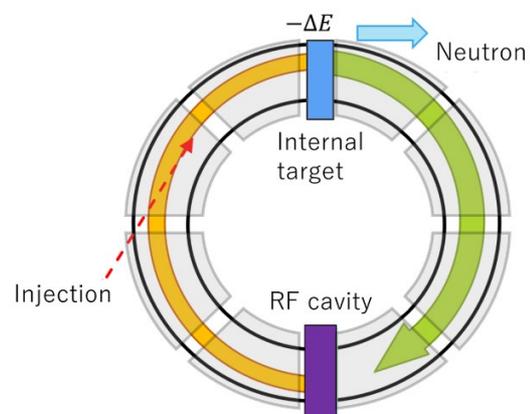


Figure 1: Schematic diagram of ERIT scheme.

### 2. シミュレーションの概要

本シミュレーションでは、PHITS とリーブ・フロッグ法を用いた軌道計算コードを接続し、陽子ビームの軌道シミュレーションを行う。具体的には、陽子ビームと内部標

的の相互作用については PHITS を用いて計算を行い、磁石内のビームの運動と、高周波加速空洞によるビーム加速については軌道計算コードを用いる。

ERIT 方式では、高エネルギー領域において物質中の入射粒子の飛程が、2 次粒子生成の平均自由行程に対してはるかに大きくなるため、従来の方法に対する 2 次粒子生成効率における優位性が低くなる。そのため、本シミュレーションが対象とする ERIT 方式蓄積リングは、核破砕反応チャンネルが開く手前の、数十 MeV から数百 MeV のエネルギー領域を想定している。Table 1 に蓄積リングの光学パラメータを示す。内部標的には、想定しているエネルギー領域において陽子入射中性子生成断面積が比較的大きい物質を使用する。

Table 1: Parameters of FFA-ERIT Ring

Lattice	Radial Sector (FDF-triplet)
Number of cells	8
K value	~2.8
Angle of focusing magnets	6.40 deg.
Angle of 1/2 defocusing magnets	2.55 deg.
Angle of drift section	3.75 deg.
Angle of straight section	9.80 deg.

PHITS を用いた陽子ビームと内部標的の相互作用の計算では、陽子ビームの散乱と中性子の生成量とエネルギースペクトルが計算結果として保存される。陽子ビームでは、多重クーロン散乱やエネルギー分散が考慮される。また、損失されるビーム内陽子は考慮される。対象とする核反応については、陽子入射によって中性子が生成される(p,xn)反応だけではなく、電子・光子・中性子に起因するものも含まれる。

軌道計算においては、磁場中の粒子の運動方程式について数値積分を行う。ここで、磁場は OPERA-3D を用いた 3 次元磁場計算結果を用いる。数値積分のアルゴリズムについては、蓄積リング内の軌道計算を目的としているため、原理的に計算誤差が積み重なり発散しないシンプレクティック数値積分法である、2 次のリープ・フログ法を使用する。

### 3. PHITS から軌道計算コードへの接続

PHITS はモンテカルロ輸送計算コードであるため、最終的な計算結果は一粒子当たり規格化された粒子分布として出力される。一方、軌道計算コードでは単粒子の位置と運動量が計算される。そのため、ERIT 方式蓄積リング内を周回する陽子ビームのシミュレーションを行う際には、PHITS と軌道計算コードを適切な手法を用いて接続する必要がある。

本手法では PHITS によって得られた計算結果である陽子ビーム粒子の各情報(粒子の角度散乱のベクトル、運動エネルギー)の確率分布を作成する。ビーム粒子の角度散乱のベクトルについてはガウス分布に、エネルギー分散については歪正規分布にフィッティングされることで、ビーム粒子の運動状態を表現する確率分布を得る。次に、ビームの代表点となる条件(陽子の運動方向と

運動エネルギー)を複数個選択し、確率分布からその運動条件を持つ粒子の個数を決定する。最後にそれらの運動条件を軌道計算コードに受け渡す。

以上の接続手法の計算例として、PHITS を用いて 20 MeV の陽子ビームと 5 μm の W 薄膜標的の相互作用の計算結果から、散乱された陽子ビームの方位角方向、仰角方向のベクトルをフィッティングした結果をそれぞれ Fig. 2 と Fig. 3 に、エネルギー分散をフィッティングした結果を Fig. 4 に示す。

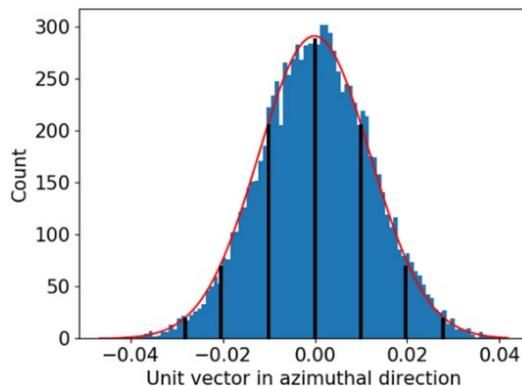


Figure 2: Fitting of proton beam scattering (azimuth).

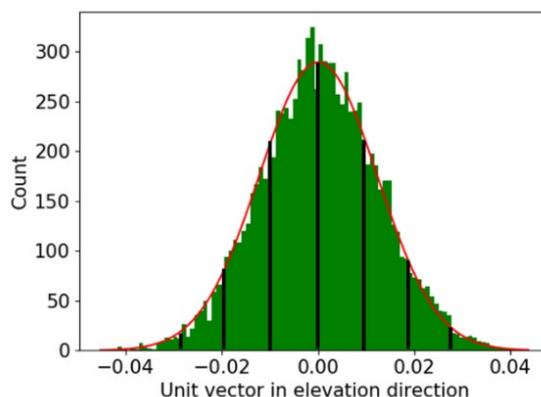


Figure 3: Fitting of proton beam scattering (elevation).

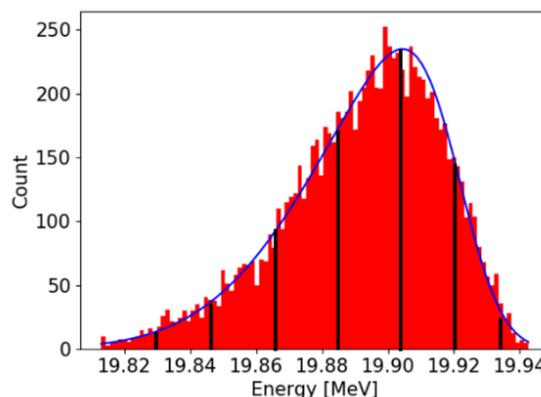


Figure 4: Fitting of proton beam energy scattering.

#### 4. ビームと内部標的の相互作用の処理

PHITS はモンテカルロ計算を行うため、相対誤差を小さくするには十分な計算時間の確保が必要である。本手法では、計算時間を短縮するために、事前に PHITS で複数の条件における相互作用の計算を行った結果を集約した事前データを用いる。

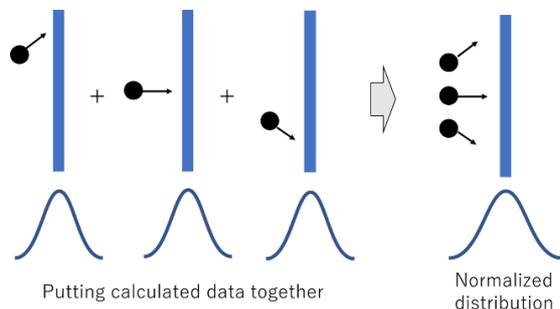


Figure 5: Schematic diagram of the system of beam - internal target interaction.

本シミュレーションでは、軌道計算後の蓄積リング内ビームの代表点である粒子一個ずつに注目し、その粒子一個ずつに対して PHITS もしくは事前データを利用することで、陽子ビームと内部標的の相互作用の種類と角度とエネルギーに関する確率分布を計算する。Figure 5 にその模式図を示す。陽子ビームの確率分布を得た後は、前節で述べた処理を再び行い、軌道計算コードへ粒子の条件を受け渡す。

事前データとして、ある範囲内において、特定の角度・運動エネルギーを持つ複数の陽子ビームの条件を定義し、それぞれの条件に対して標的に衝突させる計算を行う。相互作用の処理を行うときには、蓄積リング内陽子ビームの代表点一個ずつに対して、最もその代表点の運動状態に近い事前データを選択し利用する。それらの事前データである分布を重ね合わせ規格化する事で、衝突後のビームがどのように振舞うか決定する確率分布や、中性子の生成量やエネルギースペクトルを計算する。事前データの範囲外の代表点が存在する場合は、その粒子の角度、運動エネルギーを持った陽子ビームにおける輸送計算をシミュレーション実行中に行う。

#### 5. まとめ

本研究では、中間エネルギー領域陽子ビーム ERIT 方式において、放射線挙動を模擬するモンテカルロ輸送計算コードである PHITS と、リーブ・フロッグ法を用いた軌道計算コードを接続した新たなシミュレーション手法の開発を行っている。本シミュレーションでは、陽子ビームと内部標的の相互作用については PHITS を用いて計算を行い、磁場内の陽子ビーム粒子の軌道と、内部標的の反対方向に存在する高周波加速空洞による陽子ビーム粒子の加速は軌道計算コードを用いて、ビームの

縦方向と横方向を考慮に含めた計算を行う。シミュレーション終了後、陽子ビームの周回数、陽子ビーム内粒子数と事前に PHITS から計算された中性子の生成量とエネルギースペクトルから、最終的な生成量、エネルギースペクトルを求める。

本シミュレーションでは、ERIT 方式蓄積リング内を周回する陽子ビームを再現するため、PHITS から出力された分布から陽子ビームの運動状態の確率分布を作成する。その後蓄積リング内ビーム粒子の代表点となる運動条件を複数個決定し、軌道計算コードに受け渡す。また、軌道計算後の蓄積リング内ビームの代表点である粒子一個ずつに対して PHITS もしくは事前データを利用することで、陽子ビームと内部標的の相互作用の計算の効率化を行った。

今後、PHITS と軌道計算コードを接続する手法の正当性の評価を行う。その後本シミュレーションを用いた陽子ビーム軌道並びに中性子生成シミュレーションを行う予定である。

#### 参考文献

- [1] Y. Mori, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A., 562(2006), 591-595.
- [2] K. R. Symon *et al.*, Phys. Rev., 103(1956), 1837-1859.
- [3] K. Okabe *et al.*, Proceedings of EPAC08, (2008), 3512-3514.
- [4] T. Sato *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., 55(2018), 684-690.