# PHITS 研究会 概要集

# 平成 30 年 8 月 22 日 (水)

# いばらき量子ビーム研究センター 2 階多目的ホール

# 茨城県那珂郡東海村

# 目次

PHITS 研究会プログラム	1
口頭発表概要	4
ポスター発表概要	17

# PHITS 研究会プログラム

8月22日(水)10:30開始

■ 10:30 - 10:35 開会挨拶 高橋 史明(原子力機構)

■ 10:35 - 10:55 PHITS 開発の現状 佐藤 達彦(原子力機構)

■ 10:55 - 11:55 セッション1 座長:橋本 慎太郎(原子力機構) 10:55 - 11:15 宮原 信幸 (量研機構 放医研)

「RI 内用療法のための RI 製造用大強度ビームモニターの開発」

11:15 - 11:35 張 維珊 (量研機構 放医研)

CT conversion methods for retrospective analysis of carbon radiotherapy treatment plan using Monte Carlo simulation

11:35 - 11:55 小川 喜弘 (近畿大学) 「医療用 LINAC から発生するエックス線を評価するための詳細モデル作成」

■ 11:55 - 12:45 お昼休み

■ 12:45 - 13:35 ポスターセッション(13件)

■ 13:35 - 13:45 休憩

■ 13:45 - 15:25 セッション2 座長:小川 達彦(原子力機構) 13:45 - 14:05 小林 知洋 (理化学研究所) 「加速器駆動小型中性子源 RANS-II の開発」

14:05 - 14:25 Alex Malins (原子力機構)

Simulating gamma spectrometers with PHITS: examples of LaBr<sub>3</sub>(Ce) airborne detector and shielded HPGe detector inside a vehicle

14:25 - 14:45 岩元 大樹 (原子力機構)

「モンテカルロ粒子輸送計算における高エネルギー核分裂モデルの改良」

14:45 - 15:05 今野 力 (原子力機構) 「PHITS 付属 JENDL-4.0 中性子用 ACE ファイルに関するコメント」 15:05 - 15:25 後神 進史 (原子力規制庁)

「PHITS の使用済燃料貯蔵施設遮蔽解析への適用性検討」

■ 15:25 - 15:35 休憩

■ 15:35 - 16:55 セッション3 座長:佐藤 達彦(原子力機構)

15:35 - 15:55 後藤 亜希 (宇宙航空研究開発機構)

「ISS 3D-CAD モデル及び PHITS を使用したきぼう船内の被ばく線量評価」

15:55 - 16:15 別所 光太郎 (高エネルギー加速器研究機構 J-PARC センター) 「J-PARC ハドロン実験施設の金標的監視用ガス中放射能と PHITS / DCHAIN-SP による固体標的中生成放射能計算結果の比較」

16:15 - 16:35 阪間 稔 (徳島大学)

「PHITS と深層学習(DLNN)を組み合わせた 多チャンネル放射線検出器の新た な弁別処理技術の試み」

16:35 - 16:55 仁井田 浩二 (高度情報科学技術研究機構) 「長寿命核分裂生成物の核変換シミュレーション」

■ 16:55 - 17:05 総合討論 座長:橋本 慎太郎 (原子力機構)

■17:05-17:10 閉会挨拶 仁井田 浩二(高度情報科学技術研究機構)

●ポスター発表(13件)

P01 岡本 力(株式会社ナイス)

「Windows版 PHITSの MPI 並列環境構築方法の確立」

P02 佐藤 大樹 (原子力機構)

「メニーコアプロセッサ Xeon Phi 上での PHITS による並列計算の性能評価」

P03 國見 友亮 (香川高等専門学校)

「仮想放射線源を用いた放射線遮蔽教材の開発」

P04 片岡 憲昭(東京都立産業技術研究センター) 「電子線照射を用いた卵の表面殺菌と内部線量評価」

P05 徳永 祐也(金沢大学)

「PHITS を用いた宇宙用磁界センサの放射線耐性評価」

P06 笠井 宏哲(東京都市大学)

「核エネルギーから電気へ直接変換する核分裂電池の PHITS を用いた効率評価 手法開発」

P07 普 能 (総研大)

Evaluation of lithium glass scintillation detector responses for tritium production rate measurement in the blanket neutronics experiment by the PHITS code

P08 西川 功一(高エネルギー加速器研究機構)

「大強度陽子加速器におけるコンクリート壁の放射化」

P09 延原 文祥(東京ニュークリア・サービス株式会社)

「静電加速器施設放射化評価における中性子強度解析」

P10 佐藤 史明(北海道大学)

「PHITS を用いた HUNS 熱中性子源体系の検討とビーム特性の計算」

P11 渡邉 岳(九州大学)

「核内カスケード模型の α 粒子入射反応への拡張」

P12 井原 智也(徳島大学)

「counter 機能を用いた前立腺がんの密封小線源療法の線量分布の解析」

P13 井本 尚吾(徳島大学)

「MRI-RT における electron return effect の検証」

# 口頭発表概要

# RI 内用療法のための RI 製造用大強度ビームモニターの開発

宮原信幸1

1放射線医学総合研究所

RIを製造する際、RIの製造効率を低下させないため、ターゲットに常に同じ 位置でビームを照射する必要がある。

同様に RI 製造ターゲット上でのビームプロファイル(電流密度分布)も、タ ーゲット位置と一致させる必要がある。ビームプロファイル(電流密度分布) がターゲットに一致しない場合、ターゲット以外の場所の照射にビームが無駄 に利用されることとなり、RI の収量が低下するのみでなく、不必要な RI 製造 を招く恐れもある。

現状では、kWオーダーのビーム電流プロファイルを測定するためには、RI 製剤ターゲット容器の上に"紙"(コピー用紙等)を設置し、照射ビームによる 熱で当該の紙が変色する(焦げる)形状を定規等により測定しビーム位置並び にプロファイルを確認している。これは、加速器からのビーム調整に連動して おらず、効率が悪く時間がかかるばかりか、作業者の被ばくも問題となる。

本研究では、水冷金属板の水冷面に熱伝対等の温度センサーを設置し、ビー ムプロファイル並びに強度を熱に変換して測定・確認し、従来は即時性のある モニタが不可能であった大強度荷電粒子ビームのビームプロファイル、位置、 強度測定を可能とするビームプロファイルモニタである。

本件は、原子炉等でも実績があり、極めて安価な熱電対等の温度センサーを 銅板等の冷却水側面に設置し、冷却水の徐熱によるシャープな温度分布を得る ことにより、ビーム位置並びにビームプロファイルを正確に測定しようとする ものである。

本件を実用化することにより、RI 製剤ターゲット上でのビーム位置・プロフ アイルを加速器・RI オペレーターともに計算機上の情報として共有することが 可能で、リアルタイムなビーム調整・確認による照射条件の再現性確保・作業 時間の短縮、RI オペレーターの被ばく低減が期待できる

PHITS を用いて荷電粒子による発熱分布を求め、最適な水冷金属板の厚さ を求めるとともに、2 次粒子並びに中性子の寄与についても評価を行った。

# CT conversion method for retrospective analysis of carbon radiotherapy treatment plan using Monte Carlo simulation

Weishan Chang, Yusuke Koba, Shunsuke Yonai, Shinosuke Matsumoto

**Purpose:** Dose by secondary particle  $D_{sp}$  is considered as one of the reason of second cancer: nevertheless most of the treatment planning system (TPS) used in heavy charged particle therapy facilities are not able to calculate dose distribution of secondary particle. Monte Carlo (MC) method is thought as the solution for calculating  $D_{sp}$ . Since density and material composition need to be assigned for MC simulation, the purpose of this work is to provide an evaluation of the CT conversion method for retrospective analysis of carbon radiotherapy treatment plan using MC simulation.

**Materials and methods:** In this work, the CT conversion method proposed by Schneider <sup>[1]</sup> and the conversion method proposed by this work were evaluated. The CT number to stopping power ratio table used in TPS and the standard tissues of reference adult phantoms published in ICRP-111 were used to converse CT number to density and material composition. We formulated polyline relations between mass density, electron density, stopping power ratio and elemental densities for the representative material <sup>[2]</sup>. Figure 1 shows the materials used in this work and sections based on the density were established for conversion.

To verify the conversion methods corresponding to the TPS, we made a treatment plan with a human phantom. The treatment plan was converted using DICOM2PHITS to re-calculate



**Fig. 1** The allocation scheme of CT number and materials used in this work.

by PHITS. The MC re-calculated result was compared to TPS.

**Results:** Figure 2 shows the comparison of depth and lateral dose distribution between Schneider method, method proposed by this work and TPS. Difference of  $R_{50}$  (Range of 50 % dose level) between this work and TPS is smaller than that between Schneider and TPS.



**Fig. 2** Comparison of dose distribution between Schneider method, this work and TPS.

**Conclusion:** Two CT conversion methods were demonstrated to facilitate MC simulation for retrospective analysis of treatment plans. The propose method shows higher correlation with TPS compared to Schneider method.

#### Acknowledgement

We would like to acknowledge Takuya Furuta and Shintaro Hashimoto for their support.

#### Reference

- W Schneider et al. "Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions" Phys. Med. Biol. 45 (2000) 459-478
- [2] N Kanematsu et al. "Modeling of body tissues for Monte Carlo simulation of radiotherapy treatments planned with conventional x-ray CT systems" Phys. Med. Biol. 61 (2016) 5037–5050

#### 医療用リニアックから発生するエックス線評価のための詳細モデル作成

小川喜弘 1,3, 小川茂美 2, 矢作遼太郎 2

1近畿大学総合社会学部,2日本アキュレイ株式会社,3株式会社 HATC

医療用リニアックを用いた治療施設からの漏えい線量を精度良く評価するためには,リ ニアックの仕様は必要不可欠である。特に,電流値や発生エックス線に関する情報は最も

重要であるが、入手することは非常に困難である。本報告では、 発生エックス線情報を水ファントム中の電離箱による測定と PHITS によるシミュレーション計算との比較より評価する方法 について述べる。医療用リニアックとしては、アキュレイ社製の サイバーナイフとトモセラピーに用いられている2種類のリニ アック(6 MeV 電子線加速器)を対象とした。

図1にサイバーナイフから放出されるエックス線による水フ アントムと電離箱を用いた深部線量分布測定を,図2にトモセラ ピーの場合の配置図を示す。これらの測定結果を再現するように 電子線照射されるターゲットとその周辺ならびにコリメー

タを機構図にしたがって正確に取り扱った詳細モデルを PHITS により作成した。これらのエックス線発生部と水フ ァントムからなる実験体系をさらに PHITS でモデル化し, 深部線量分布と軸外線量比を計算した。

図3にサイバーナイフの場合の深部線量百分率を,図4に トモセラピーの場合の軸外線量比(上図:照射野40 cm,下 図:照射野5 cm)の実測値と計算値を示す。

これらより, 今回作成した電子線照射ターゲット の PHITS モデルは, 発生するエックス線エネルギ ースペクトルを正確に再現していることが明らか となり, エックス線発生数の規格化に有用であるこ とを示している。



図3 深部線量百分率の実測値と計算値



図1 深部線量測定図



図2 配置図



#### 加速器駆動小型中性子源 RANS-II の開発

## 小林知洋<sup>1</sup>,大竹淑恵<sup>1</sup>、池田裕二郎<sup>1</sup>,池田翔太<sup>2</sup>,林崎規託<sup>2</sup> <sup>1</sup>理化学研究所 <sup>2</sup>東京工業大学

1. はじめに

当チームでは 7MeV 陽子線 LINAC と Be 薄膜ターゲットによる理研小型中性子源システム(RANS)を 2013 年より稼働させ、コンクリート内部の非破壊観察(水、空隙、鉄筋腐食、 塩分)、鋼板の腐食部分における水の挙動観察、鋼板の応力下における集合組織の挙動解析 など実用試料の解析を行っている。一方、2016 年から可搬型加速器中性子源の基礎データ 取得を行うために 2.49 MeV 陽子線 LIANC と Li ターゲットを利用した RANS-II の開発を 開始した。中性子発生システムの小型化と、高速中性子を用いたイメージング技術開発が 主たる目的である。

2. RANS-II 開発状況

RANS-II のイオン源はコンパクト(長さ約 40cm)なパルスマイクロ波駆動 ECR イオン 源を採用した。陽子線 LINAC(RFQ 型)についても小型化を意識し、東工大グループと共同 開発を行った。真空試験、冷却試験、電位分布計測を経て、イオン源-RFQ を連結しての加 速試験を開始している。現時点での陽子電流は 2.49MeV,約 1mA(パルスピーク値)であ る。トータルとしての重量は RANS の 25t に対して、1/3 以下の 7~8t を見込んでいる。

3. PHITS を用いた評価

RANS-IIの設計において、PHITSを用いた評価を各所で行っている。

(1)中性子エネルギースペクトルの評価

2.49MeV 陽子による <sup>7</sup>Li(p,n)<sup>7</sup>Be 反応中性子スペクトルは ENDF/B-VII の核データをラ イブラリに追加して評価した。Fig.1 に RANS(7MeV 陽子, <sup>9</sup>Be(p,n)<sup>9</sup>B)との比較を示す。中

性子の総量は RANS に劣るものの、コンクリートの 深部イメージングに適している数百 keV の部分を多 く確保した。MeV 成分の発生がないために遮蔽を簡 素化できる利点もある。

本発表では、さらに以下の項目について報告する予 定である。

(2) Li ターゲット側方への中性子、ガンマ線の漏洩を防止する周辺遮蔽の設計

(3)ターゲット冷却水による中性子減速効果

(4) RANS-II 専用遮蔽シェルターの設計

(5)中性子 TOF スペクトルの評価



Fig.1 発生中性子エネルギースペクトル の評価 (ターゲット前方 1m, 未減速)

## Simulating gamma spectrometers with PHITS: examples of LaBr<sub>3</sub>(Ce) airborne detector and shielded HPGe detector inside a vehicle Alex Malins<sup>1</sup>, Kotaro Ochi<sup>1</sup>, Yukihisa Sanada<sup>1</sup>, Ichiro Yamaguchi<sup>2</sup>, Tatsuhiko Sato<sup>1</sup> <sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>NIPH

This talk will present two examples of using PHITS for simulating gamma ray spectroscopy. The first example concerns a LaBr<sub>3</sub>(Ce) detector used in unmanned helicopter radiation surveys in Fukushima Prefecture [1,2,3]. The detector geometry was modelled based on drawings provided by the instrument manufacturer. The T-Deposit tally was used for simulating the detector response. The parameters dresol and dfano for T-Deposit were determined by fitting peak widths in gamma spectra measured from <sup>137</sup>Cs and <sup>152</sup>Eu sources. The simulated spectra were validated against various measurements from the laboratory with different source positions and thicknesses of shielding. The purpose of creating the PHITS model was to characterize the peak-to-Compton method for estimating the distribution of radiocesium within soil in Fukushima Prefecture. The simulations were used to understand how the ratio of counts under the <sup>137</sup>Cs primary gamma energy peak of the spectra to the Compton continuum depends on the radiocesium depth distribution and height of the helicopter above the ground.

In the second example a simple model of a HPGe gamma spectrometer was created to understand the effect of background radiation when measuring the radioactivity of samples in the field using a monitoring vehicle. In areas with high radiation levels, such as near to the Fukushima Dai-ichi nuclear plant, there is potential for gamma rays from the outside environment to penetrate through the shield around the detector. In some instances this effect can significantly alter the gamma spectrum measured from the sample.

The main difficulties in solving this



problem in PHITS were the need to simulate a large environment to correctly calculate the amount of external radiation penetrating through the shield, and the problem of transporting a sufficient number of gamma ray histories through the shield. These issues were solved using a multi-step calculation method employing PHITS dump files. In the first step the radiation from the outer environment was transported to the edge of the shield. In the second step the PHITS T-WWG tally was used to generate weight windows for transport through the shield. In the third step transport was simulated through the shield. In the final step the gamma spectrum at the detector was calculated using T-Deposit. A new idmpmode setting was added to PHITS which enables the tallying of gamma histories with different weights with T-Deposit. This new mode and results of a test calculation (Fig. 1) will be presented in the talk.

- [1] Y. Sanada et al. 2014. Explor. Geophys. 45(1), 3-7.
- [2] Y. Sanada et al. 2015. J. Environ. Radioact. 139, 294-299.
- [3] K. Ochi et al. 2017. Int. J. Environ. Res. Public Health 14(8), 926\_1-926\_14.

# モンテカルロ粒子輸送計算における高エネルギー核分裂モデルの改良

#### 岩元大樹1

<sup>1</sup>J-PARC センター・日本原子力研究開発機構

モンテカルロ粒子輸送解析コード PHITS は、加速器駆動核変換システムや核破砕中性子 源施設等における放射能・被ばく線量評価及び施設の遮蔽設計に重要な役割を演じるが、 PHITS の核破砕反応を記述するモデル INCL4.6<sup>[1]</sup>/GEM<sup>[2]</sup>は、核分裂生成物の収量を大幅に 過小評価することが知られており<sup>[3]</sup>、モデルの高度化が求められている。本研究では、一般 化蒸発モデル GEM に含まれる高エネルギー核分裂モデルの修正を行い、核分裂断面積の予 測精度の高度化を図った。

ここでは、Prokofievが提案した陽子入射核分裂断面積系統式<sup>(4)</sup>に着目し、これと核内カス ケードモデル INCL4.6 による高励起残留核の情報をもとに、高エネルギー核分裂モデルで 用いる核分裂確率を推定するモデルを組み込んだ。図1に、鉛ビスマス核種に対する中性 子、陽子及び重陽子入射核分裂断面積の、修正前後のモデルによる解析値と実験値との比較 を示す。修正前のモデルは核分裂断面積を大幅に過小評価するのに対して、修正後のモデル は核分裂断面積の実験値を比較的精度よく再現していることがわかる。実験値との比較の 結果、修正したモデルは、他の標的核種に対しても、実験値をよく再現することがわかった。

本発表では、米国ロスアラモス 国立研究所 LANL が開発を進めて いるモンテカルロ粒子輸送解析コ ード MCNP6.1<sup>[5]</sup>に組み込まれてい る核破砕反応モデル(CEM03、 INCL4.2/ABLA、INCL4.2/GEMINI 等)及びフランス原子力・代替エネ ルギー庁 CEA が開発を進めている C++言語ベースの核破砕反応モデ ル INCL++/ABLA07 による核分裂 断面積の比較結果についても報告 する。さらに、核分裂生成物収率の



予測精度向上に向けて INCL の改良の必要性についても言及する。

#### 参考文献

[1] A. Boudard et al. Phys Rev C 2013;87:014606.
[2] S. Furihata, NIM A 2001;171:251–258.
[3] Y. Iwamoto et al. JNST 2017; 54:614–635.
[4] AV. Prokofiev. NIM A 2001;463:557–575.
[5] JT. Goorley et al. LA-UR-13-22900 (2013).

#### PHITS 付属 JENDL-4.0 中性子用 ACE ファイルに関するコメント

今野 力

#### 日本原子力研究開発機構

PHITSには日本の核データライブラリJENDL-4.0[1]から作られたACE (<u>A</u> Compact ENDF) ファイルが付属している。2013年に、非分離共鳴データのある核種の中性子用ACEファイ ルで、カーマ近似(t-heat)を使って中性子による吸収線量を計算するために使われる heating number(KERMA係数を全反応断面積で割ったもの)に関するデータに不具合が見つ かり、2014年1月10日に非分離共鳴データのある下記表の130核種の中性子用ACEファイル が更新された(この時、非分離共鳴データの処理をスキップしたため自己遮蔽補正を行う ための確率テーブルp-tableもなくなったが、このことを認識されているPHITSユーザーは 少ない)。この不具合の中身は、ACEファイルに入っているheating numberのp-tableに負 の値が入っていたためPHITSでエラーになったことである。今回、heating numberのp-table

ACEファイルは核データ処理コードNJOY[2]を使って作られる。heating numberのp-table はNJOYのheatrモジュールで計算されたKERMA係数を使ってNJOYのpurrモジュールで計算 される。NJOYコード、JENDL-4.0を詳細に調べた結果、JENDL-4.0の問題の核種は、捕獲反 応で生じる2次 y線の格納形式が特殊(ENDF-6フォーマット[3]で言うと、file12~file15 のmt=102に格納されるのが普通であるが、mt=3に格納されている)であったため、heating numberのp-tableが負になることがわかった。この問題を回避する方法も検討した。 heating numberの非分離共鳴領域での自己遮蔽補正は非常に小さく、NJOYのマニュアルに よると、heatrモジュールで部分KERMA係数を計算しなければ、非分離共鳴領域でheating numberの自己遮蔽補正は行われない(heating numberのp-tableは全て1.0になる)。そこ で、heatrモジュールで部分KERMA係数を計算しないで、非分離共鳴領域でheating number の自己遮蔽補正をしないACEファイル作成してテストした。結果は良好で、この方法を用 いれば2014年1月10日に更新された130核種についてもp-table付きのACEファイルをPHITS で使うことができるようになる。

[1] K. Shibata et al., J. Nucl. Sci. Technol. 48 (2011), 1-30.

[2] A.C. Kahler (Ed.), LA-UR-17-20093 (2016).

[3] M. Herman, A. Trkov (Ed.), BNL-90365-2009 (2009).

#### 表 ACEファイルが修正された核種

As075 Ba130 Ba132 Ba134 Ba135 Ba136 Ba137 Ba140 Br079 Br081 Cd106 Cd108 Cd110 Cd111 Cd112 Cd113 Cd114 Cd116 Ce141 Ce142 Ce143 Ce144 Cf250 Fe059 Ga069 Ga071 Hf174 Hf176 Hf177 Hf178 Hf179 Hf180 Hf181 Hf182 I\_127 I\_129 I\_130 I\_131 I\_135 In113 In115 Kr078 Kr080 Kr082 Kr083 Kr084 Kr085 La138 La139 La140 Mo092 Mo094 Mo095 Mo096 Mo097 Mo098 Mo099 Mo100 Nb094 Nb095 Ni059 Pr141 Pr143 Rb085 Rb086 Rb087 Rh103 Rh105 Ru096 Ru098 Ru099 Ru100 Ru101 Ru102 Ru103 Ru104 Ru105 Ru106 Sb121 Sb123 Sb124 Sb125 Sb126 Se074 Se076 Se077 Se078 Se079 Se080 Se082 Sr084 Sr086 Sr087 Sr088 Sr089 Sr090 Tc099 Te120 Te122 Te123 Te124 Te125 Te126 Te127m Te128 Te129m Te130 Te132 Xe124 Xe126 Xe128 Xe129 Xe130 Xe131 Xe132 Xe133 Xe134 Xe135 Y\_089 Y\_090 Y\_091 Yb168 Yb170 Yb171 Yb172 Yb173 Yb174 Yb176 Zr093 Zr095

#### PHITS の使用済燃料貯蔵施設遮蔽解析への適用性検討

後神進史 原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

原子力規制庁長官官房技術基盤グループでは、使用済燃料輸送容器及び使用済燃料貯蔵施設 に対する遮蔽解析への適用のために PHITS の整備を進めている。これまでの研究で核燃料輸送 物遮蔽解析への適用性を検討し、主に深層透過を効率的に評価できる分散低減機能を充実させ るため、[T-Point]、[T-WWG]、[WW Bias]等といった上記解析に有効な新機能を導入した。

使用済燃料貯蔵施設遮蔽解析への適用を進める上では、使用済燃料を収納した貯蔵用(輸送 兼用を含む。)の金属キャスクの表面において、あらかじめ評価した線束を線源とし、キャスク を貯蔵している建屋のコンクリート壁を透過した後(一部は給排気口からのストリーミング) に、外部空間の空気中での散乱を経た、施設の敷地境界における線量を適切かつ効率的に評価 するための機能、解析手法等を検討する必要がある。これらの検討を実施するために、使用済 燃料貯蔵施設模擬体系に対して PHITS による敷地境界線量評価の試解析を行った。

図1に示すように使用済燃料貯蔵施設模擬 体系([T-3Dshow]出力結果)を設定し、Tally (計算上の仮想検出器)の種類、分散低減法 等の解析条件を変更した数種類の試解析を PHITS3.02 で行った。図2に貯蔵建屋内及び 建屋近辺の中性子輸送計算結果の例を示す。 試解析の作業を通して、入力データ作成の利 便性、作業効率、計算効率、計算結果の信頼 性等を評価した。

ー連の作業から、使用済燃料貯蔵施設遮蔽 解析に PHITS を適用するために有効と考え られる機能として任意の面線源の設定機能等 を抽出した。また、各解析手法の特徴を整理 し、今後の展望と併せて報告する。



金属キャスク(表面に線源設定)貯蔵建屋(コンクリート)

図1 使用済燃料貯蔵施設模擬体系



#### ISS 3D-CAD モデル及び PHITS を使用したきぼう船内の被ばく線量評価

後藤亜希, 島崎一紀

#### 宇宙航空研究開発機構

国際宇宙探査協同グループ(ISECG)は、次世代の有人探査ミッションとして、月周回宇宙ス テーション "Deep Space Gateway" での長期滞在や、月及び火星面探査を計画している。月(月 周回軌道を含む)及び火星といった地磁気圏外は、高 LET 放射線が高い線量率にて降り注ぐ。 したがって、放射線被ばくによる確率的及び確定的影響を防止するためには、放射線防護技術の 確立が不可欠となる。放射線防護技術には、ミッション期間中の被ばく線量の予測及び算定と、 遮蔽設計の最適化がある。特に被ばく線量の予測及び算定について、我々は、放射線輸送コード を用いた計算機シミュレーションを基盤とした手法の確立を目指している。本手法の確立及び実 ミッションへの適用には、放射線輸送コード及び宇宙環境モデルの精度、並びに、宇宙機ジオメ トリの適切な設定に関する検討が必要である。

今回、既存の宇宙環境モデルの精度、及び宇宙機ジオメトリの設定に関する検討を行うため、 国際宇宙ステーション (ISS) きぼう日本実験棟 (JEM) 及びその周囲複数のモジュールを含む ISS 部分 3D-CAD モデル (以下 ISS モデルと記す) と、JEM 及び Node2 モジュールのみ からなる JEM 3D-CAD モデル (以下 JEM モデルと記す) を作成し、各々の JEM 船内の線 量を PHITS<sup>[1]</sup>を用いたモンテカルロシミュレーションにて計算した<sup>[2]</sup>。また、線量計算値と Area PADLES (Passive Dosimeter for Lifescience Experiments in Space) 実験にて得られた JEM 船内の線量実測値の比較を行った。

ISS モデルは、JEM 及びその周囲のモジュール (Columbus、U.S. Lab、Node1-3 など)や トラス構造などを含む単純なジオメトリとした。JEM モデルは、与圧部、補給部、曝露部を含 むものとした。特に与圧部と補給部は、構造壁、デブリバンパ、実験及びシステムラック、JEM エアロックのジオメトリを再現した。SuperMC (Super Monte Carlo simulation program for nuclear and radiation process)<sup>[3]</sup> ソフトウェアを、CAD モデルファイル形式 (.stp)の PHITS インプットファイル形式への変換に使用した。ISS 及び JEM モデルの各々のパーツは、Al ま たは Al 合金からなるものとし、その密度を調整することで実機での質量を可能な範囲で再現 した。既存の宇宙環境モデルとして、Matthia モデル<sup>[4]</sup> (銀河宇宙線)及び AP8<sup>[5]</sup>モデル(捕 捉陽子線)を使用した。

Area PADLES 線量計(計 17 箇所に設置)と同位置に設置した仮想線量計の吸収線量及び 線量当量を計算したところ、大部分の評価位置について、計算値は実測値と 20% 及び 30% 以 内で一致した。これにより、PHITS、Matthia 及び AP8 モデル、今回作成した ISS 及び JEM モデルの組合せでは、被ばく管理において使用可能な精度を有する線量算定が可能であることが 示された。ISS モデルを使用して得られた計算値は、JEM モデルにて得られた計算値よりも実 測値との比が小さく、ジオメトリの精密さが線量計算精度に影響することがわかった。しかしな がら、ジオメトリの差が計算値に与える影響は大きくないため、計算時間の効率を考慮すると、 ある程度の精度を有する線量計算には評価点周囲の遮蔽環境を再現したジオメトリの使用が重 要と考えられる。本検討で得た知見を基に、次世代ミッションにて適用可能な被ばく線量予測及 び算定手法について、さらなる検討を進める計画である。

- [1] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690, 2018.,
- [2] A. Goto, K. Shimazaki, T. Sato, 42<sup>nd</sup> COSPAR, F2.2-0005-18, 2018.
- [3] Y. Wu et al., Ann. Nucl. Energy, 82, 161-168, 2015.
- [4] Matthia et al., Adv. Space Res. 51, 329-338, 2013.
- [5] Vette, J. I., NSSDC/WDC-A-R&S 91-29, 1991.

# J-PARC ハドロン実験施設の金標的監視用ガス中放射能と PHITS / DCHAIN-SP による固体標的中生成放射能計算結果の比較

別所光太郎 1.2, 萩原雅之 1.2, 渡辺丈晃 1.3, 西川功一 1.2, 倉崎るり 1.3,

#### 武藤亮太郎 1,4, 齋藤究 1,2, 春日井好己 1,5

<sup>1</sup>J·PARC センター,<sup>2</sup>KEK 放射線科学セ,<sup>3</sup>KEK 素核研,<sup>4</sup>KEK 加速器,<sup>5</sup>原子力機構

J-PARCハドロン実験施設では、2013年5月の放射性物質漏えい事故を踏まえ、万一標 的損傷等の異常が発生した場合にもそれを迅速に検知するため、ビーム標的の容器を経由 して循環するヘリウムガス中の放射能レベルを連続監視するシステムを運用している。<sup>1)</sup> システムに組み込まれている Ge 半導体検出器によるガンマ線スペクトル測定から、ビーム 運転中には様々な放射性核種が極微量ながらも定常的に循環ヘリウムガス中に存在し検出 されることが分かっている。これらの核種は金標的やチタン合金製ビーム窓に生成された 後に気相に移行して検出されるもので、これら核種の核反応による固体内への生成と、固 体から気相への移行の各過程について検討を進めている。

ビーム運転中のガンマ線スペクトルには、消滅放射線(511 keV)、および C-10, N-16, O-14, O-19, O-20, F-20, Ne-23, Ne-24, Na-24 (Ne-24 娘), S-37, Ar-41, Au-192 (Hg-192 娘), Hg-191m, Hg-192, Hg-193m, Hg-195, Hg-195m 等に帰属されるピークが観測される。消 滅放射線に対応する核種としては、ビーム停止直後の減衰解析から、C-11, N-13, F-18 等が 候補として考えられている。その他の核種のガンマ線については、ピーク計数率と、循環 気体試料に対する Ge 検出器の検出効率曲線 (ガンマ線標準点線源に対する複数地点での効 率測定と、PHITS 組み込みの EGS5 による光子・電子の輸送過程模擬を利用する Ge 検出 器構造の最適化計算により決定)から、循環気体相全体における各核種の存在量を見積も った。一方、30 GeV 陽子の照射に伴う金標的・ビーム窓での各放射性核種の生成量を、 PHITS / DCHAIN-SP を利用して計算した。測定により求めた気体中の放射性核種の存在 量と、固体中の核種生成量の計算値を核種ごとに比較し、特徴を議論した。

気体中の上記検出核種はいずれも、高エネルギー核反応で金標的またはチタン合金製ビーム窓に生成されることが、PHITS による計算から示された。ただし、金標的内ではAu-196, Au-198, Au-194 等、ビーム窓内では Sc-44, Sc-47, K-42 等の核種が多量に生成されると予想されるが、これらの核種は気相から検出されていない。以上の結果は、固体中に生成された核種のうち、揮発性の高い化学種を生成する C, N, O, F, Ne, Ar, S, Hg 等の核種のみが選択的に気相に移行し、循環気体中から検出されるものと解釈される。また、固体中の生成量に対する気相への移行割合は、C-10, N-16, O-14, O-19, O-20, Ne-23, Ar-41 については 4-6 x 10<sup>-4</sup> の範囲とかなり類似した値を示し、固体から気相へ移行する割合が これらの核種間で類似していることを示唆している。F-20, S-37 や各種の Hg 核種は、これらに比べ 1/20~1/4 程度のやや小さな値を示し、気相に移行する割合が小さいことが分かった。これらの気相移行割合の特徴は、核種の存在化学形態を反映したものと考えられる。

1) R. Muto et al., EPJ Web of Conferences, 153, 07004 (2017)

# PHITS と深層学習 (DLNN) を組み合わせた多チャンネル放射線検出器 の新しい放射線強度弁別処理技術の試み

阪間 稔<sup>1</sup>,藤本 憲市<sup>2</sup>,井上 一雅<sup>3</sup>,福士 政広<sup>3</sup>,荒井 萌子<sup>3</sup>,今城 裕介<sup>4</sup>,福原 隆宏<sup>4</sup>,遠藤倫崇<sup>4</sup>, 松浦 貢<sup>5</sup>,矢島 辰雄<sup>5</sup>,松本(川口)絵里佳<sup>6</sup>,井原智也<sup>6</sup>,井本尚吾<sup>6</sup>,佐藤隆文<sup>6</sup> (<sup>1</sup>徳島大院医歯薬,<sup>2</sup>香川大工,<sup>3</sup>首都大人間健康,<sup>4</sup>(㈱アドフューテック,<sup>5</sup>クリアパルス㈱), <sup>6</sup>徳島大院保健)

#### 1. これまで

これまで、PHITS 計算実行で得られる膨大なデー タ(ビックデータ)や実測定データをもとに、DLNN (Deep Learning Neural Network:深層学習ニューラル ネットワーク)を適用させるという全く新しい発想 に基づく新たな放射線測定技術(放射線強度弁別処理 技術)の開発を行ってきた。この新しい着想の具現化 のため、本研究の共同研究者(首都大学東京)である 福士、井上らと㈱アドフューテックの開発メンバーに よって、近年、可搬型かつ小型の *In-situ* 多チャンネル 放射能濃度深度分布測定器(AFT-DDS)を開発し、その 新しい技術を応用している段階にある。そこで、本研 究会ではこれまでの開発状況について梗概する。特に DLNNの現代段階での成績報告に関して焦点をあて報 告する。

2. DLNN を組み込んだ新しい放射線強度弁別処理技術

近接した20チャンネルの検出器群において,測定 担当する最近傍層のみを放射線線源とする放射能強度 を測定することは,他の層からの放射線影響を除去す る必要性がある。様々な線源設定を仮想し,phits計算 を行い,20チャンネルの放射線検出器(1×1×1 cm<sup>3</sup>, CsI(TI)シンチレーション検出器)の検出応答を 蓄積し,それを学習用データと未学習データに分割し, DLNN 学習に供した。



図1 学習させるデータ形式

本研究で適用させた DLNN の学習システムの構造 は,階層型ニューラルネットワーク(学習:全層の結合 係数を一括して更新)の積層自己符号化器による評価 方法である。図1は,AFT-DDS測定装置における20 チャンネルCsI検出器の各検出器から出力される1024 chのPHITS計算によるガンマ線スペクトルと2次元 マッピングの入力データ形式及びデータ数を示してい る。図2,3,4 については,phits計算結果をベースとし たDLNN学習状況と学習用データに対する成績結果を スライドにしたものである。これまでの,未学習デー タに対する成績結果では,放射能強度(Bq値)を与え る誤差幅(真値からの誤差幅)に20%を設定したとし て74.56%の正答率であった。このことからDLNNが 放射能強度値を与える可能性が示唆される。詳細につ いては,本発表にて報告する。

(本研究は(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(IRF-1602)により 実施された。)



図2 学習データ(単一層だけに放射能強度(3段階: 0.5, 1.0, 1.5)の線源分布の場合



図 3 学習データ (連続する 3 層に放射能強度 (3 段 階: 0.5, 1.0, 1.5)の線源分布の場合



図4 学習用データに対する学習結果

#### 長寿命核分裂生成物の核変換シミュレーション

# 仁井田浩二 高度情報科学技術研究機構

高レベル放射性廃棄物に含まれる半減期の長い長寿命核分裂生成物を核変換により低減、 もしくは有用核種をリサイクルして資源化する研究開発を内閣府の革新的研究開発推進プ ログラム ImPACT (Impulsing PAradigm Change through disruptive Technology)で実施 している。その中で、加速器を用いた LLFP (Long Life Fission Products)の核変換法の確立 のために、ImPACT の PJ-2 プロジェクトでは、理研 RIBF を用い、LLFP の陽子・重陽子 入射反応断面積、核破砕反応による同位体生成断面積データを取得し、PJ-3 プロジェクト では、これらの測定データと既存の核反応データから、最新の核反応理論、核構造理論を 駆使し、核変換シミュレーションに必要な核反応データベースを構築してきた。また、こ れらのデータベースとともに、PHITS による核反応シミュレーションを用いて、巨視的体 系における核変換プロセス構築に必要な、変換効率、発熱等の情報を得てきている。本発 表では、ImPACT のなかの PJ-3 プロジェクトで作成した LLFP 用の核データ、生成核種 断面積データ、それらを用いるための PHITS に追加された新機能等を紹介する。また、そ れらを用いた巨視的体系での変換効率、発熱密度、生成される新たな長寿命核種の評価等、こ れまで PHITS シミュレーションによって得られた結果を概説する。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)の一環として実施したものです



#### Windows 版 PHITS の MPI 並列環境構築方法の確立

岡本力,杉田武志,関優哉 株式会社ナイス

#### 概要

粒子・重イオン輸送計算コード PHITS は、モンテカルロ計算コードであるため、その計 算には多大な CPU 時間を要する場合がある。従来の PHITS 配布パッケージには、Windows 版ロードモジュール (exe ファイル) としてシングルスレッド用とメモリ共有型 (OpenMP) 並列用のみ格納されており、メモリ分散型 (MPI) 並列計算を行うことができなった。そこ で本研究では、Windows PC を用いた MPI 版のロードモジュールの作成方法及び PC クラス タの構築方法を調査し、その手順書を作成した<sup>[1]</sup>。本成果により Windows 版の MPI 並列計 算用ロードモジュールを含んだパッケージの配布がバージョン 3.06 より開始された。

#### 構築方法の手順

MPIプロトコルとして米国アルゴンヌ国立研究所が配布しているフリーソフト MPICH2 を利用する。手順書には①Windows PC への MPIプロトコルインストール方法 ②MPI をインスト ールした複数のWindows を内部ネットワークで接続する方法 ③Windows で PHITS を MPI 用にコン パイルする方法の 3 項目を網羅している。

#### 検証計算

PHITS 例題ファイルの中性子遮蔽計算(Shielding)、核反応計算(NuclearReaction)と粒子 治療計算(ParticleTherapy)を用いて構築した PC クラスタによる計算速度の検証を行った。

検証に用いた PC のスペックを表1に、結果を表2に示す。また MPI による計算時間の 短縮比を図1に示す。OMP では PC1 台分しかスレッドを確保できず速度に限度が生じる が、MPI は PC クラスタを構築することで計算時間をより短縮できる可能性を示せた。

表 1. PC のスペック					
マシン名	CPU	コア(スレッド)	メモリ		
master	Core i7-7700K 4.2GHz	4(8)	32GB		
node	Core i7-6700K 4.0GHz	4(8)	16GB		
表 2. 検証計算結果					





図 1.シングル版と比べた計算速度比

[1] H29 JAEA 役務契約「Windows 版 PHITS の MPI 並列環境構築方法の確立及び手順書の作成」による成果

# メニーコアプロセッサ Xeon Phi 上での PHITS による並列計算の性能評価 佐藤大樹 日本原子力研究開発機構

近年の科学技術分野における高性能計算(HPC; High-Performance Computing)では、 GPGPU(General-Purpose computing on Graphics Processing Units)をはじめ演算回路 を多数搭載したメニーコアシステムによる高並列計算が注目を集めている。インテル社も HPC向けのメニーコアシステムとして、x86 アーキテクチャベースの Xeon Phiファミリ ーを開発している。x86 互換である Xeon Phi は、GPGPU とは異なり x86 アーキテクチャ 上で動作するプログラムはソースコードの修正なしに使うことができる。

本研究では、第2世代 Xeon Phi (KNL; Knights Landing)上での分散メモリ (MPI; Message Passing Interface)、共有メモリ (OpenMP) および両者の組み合わせ (Hybrid) 技術に基づく PHITS における並列計算の性能を評価した。評価に用いた KNL (プロセッ サー・ナンバー7210)は1つのボードに64個の演算コアを有し、その動作周波数は1.30GHz である。また、インテル社のハードウェアマルチスレッデイング技術 (HTT; Hyper-Threading Technology) にも対応しており、最大256 スレッド (64 コア×4 スレッド/コア) の演算処理が可能である。

図1に、推奨入力ファイル「NuclearReaction.inp」を用いた各並列技術に基づく並列計 算の性能とスケーラビリティを示す。ただし、すべての計算において計算量を2.5×10<sup>8</sup>ヒス トリーに固定し、EPS ファイルへの出力はオフとした。縦軸は並列技術を用いない逐次計 算による計算時間を並列計算による計算時間で割った比であり、大きいほど高い並列性能 があることを示している。まず MPI 並列の結果において、63 並列まではほぼ線形に高速化 されていることが分かる。PHITS は並列計算の管理に演算コアを1つ占有するため、64 個 の演算コアを持つ当該 KNL では 63 並列を超えると1つの演算コアが1つ以上のタスクを 処理しなければならず、スケーラビリティが著しく悪化する。OpenMP 並列では、すべて の演算コアを使用する 63 並列に達する前に大きな性能の悪化が認められた。OpenMP 並列

が効率的でない理由は、PHITS のソ ースコードが OpenMP 技術に最適化 されておらず、並列タスク間のオーバ ーヘッドが大きいことが予想される。 Hybrid 並列においても、OpenMP に よる遅延が影響し、MPI のみの並列計 算に比べて性能が劣っている。また、 すべての計算において HTT は有効で あり、HTT を用いた MPI 並列が最も 高い性能を示すことが分かった。



図1 並列計算の性能とスケーラビリティ

# 仮想放射線源を用いた放射線遮蔽教材の開発 國見友亮<sup>1</sup>,春日貴章<sup>2</sup>,天造秀樹<sup>1</sup>,横山開<sup>1</sup>,名越安優未<sup>1</sup> <sup>1</sup>香川高等専門学校,<sup>2</sup>大阪大学大学院

特に放射線防護について学習すること は自身の身を守る上でも重要であり、放 射線の遮蔽方法を学ぶことは必要である。 本研究室では Augmented Reality(AR)とい う表現手法を用いた遮蔽教材の開発を 2010年度より行ってきた[1]。このシステ ムはあらかじめ EGS4 を用いて計算した 遮蔽材内部での放射線の輸送の様子を、 AR を用いて現実画像空間上に 3DCG で





表示し、視覚的に観察できる教材であるため、直感的な理解に結びつきやすい。しかしながら、 このシステムでは学習者はあらかじめ計算された放射線の飛跡しか観察できず、学習者にとって 試行性の低い教材となってしまうという問題点があった。本研究では、学習者自身が試行しなが ら放射線防護について学習することができ、より教育効果の高い遮蔽教材を開発することを目的 とした。図1に本システムの構成を示す。本システムは USB カメラで撮影したステージ上の画 像から、遮蔽材の配置に合わせて自動的に計算体系を構築し遮蔽計算を行うため、学習者は自由 に遮蔽材を配置し遮蔽効果を確かめることができる。

本教材では放射線の遮蔽方法の学習のため2種類の表現方法を実装し、放射線の遮蔽方法の学 習を行う。図2に示すように、放射線の飛跡を線で表現する飛跡モード、放射線の吸収率をドッ トで表現する吸収線量モードの2種類である。飛跡モードでは、y線、電子線、陽電子線、中性 子線の飛跡を、青、赤、緑、紫の4種類の線によって表現し、吸収線量モードでは、各放射線の 吸収率を、青、赤、緑、紫の4種類のドットの濃淡によって表現する。これら2種類の表現方法 を使用することにより、学習者は遮蔽材の種類、密度によって放射線の遮蔽方法を直感的に理解 することが可能である。



(a) USB カメラ画像



(b) 飛跡モード図 2 放射線の遮蔽表現



(c) 吸収線量モード

 Ayako Yano et al.:"A Tangible Augmented Reality System to Support Comprehension of Radiation Shielding", Progress in Nuclear Science and Technology, 4, pp.565-568, (2014).

#### 電子線照射を用いた卵の表面殺菌と内部線量評価

○片岡 憲昭,河原 大吾,関口 正之 東京都立産業技術研究センター

1. はじめに

サルモネラ菌による食中毒は平成4年以降、卵及びその加工品が原因と疑われる224件の内、201件(約90%)が設付きによるSEの食中毒であった。そのため、包装の前に生卵の紫外線処理と薬剤処理が行われているが、煩雑な工程であり薬剤残留や廃液の環境への 負荷が避けられない。その代替法として、非加熱・乾式処理に対応した放射線を用いた方 法が研究されてきた。日本国内では食品への放射線照射は食品衛生法上、馬鈴薯の芽止め に限られているが、食品の異物検査や厚さ計測に伴うX線検査では0.1Gy以下の食品への 放射線照射が認められている(厚生省告示第370号)。これは0.1Gy以下の食品への 放射線照射が認められている(厚生省告示第370号)。これは0.1Gy以下の線量であれば食 品の品質が変化しないことを示しており、卵内(可食部)の吸収線量が0.1Gy以下であれ ば厚生労働省の認可を必要とせずに殺菌することが可能である。そこで、本研究では卵殻 に電子線を殺菌線量(3kGy)照射させた時の可食部の線量が0.1Gy以下となるような照射条

2. 方法

1. 実験については、Fig. 1 に示す模擬サンプルを作成し、各加速電圧で電子線を照射した。表面線量は RCD線量計、可食部の線量は TLD で評価した。

 2. PHITS (Version 3.02) を用いて卵の電子線照射モ デルを作成した。卵殻(CaCO3, d=2.0) 0.6mm, 卵(H2O, d=1.0) 4.5cm×4.5cm×4.5cm とし、線源一卵殻距離と Ti 箔 10μm については実験と同様に設定した。線源は 6cm×6cmの面積線源を平行ビームで照射し、表面の線 量と内部の線量を評価した。





3. 結果および考察

卵殻に 3kGy 照射した時の可食部の吸収線量 を実験と PHITS で評価した(Fig. 2)。可食部の 線量を 0.1Gy 以下にするためには加速電圧 150kV 以下に設定することが実験値と解析値 から明らかとなった。今後は 80kV~150kV の 照射で卵殻に均一に照射させるモデルを構築 する予定である。



Fig. 2 Dose of egg when eggshell is irradiated with 3kGy

#### PHITS を用いた宇宙用磁界センサの放射線耐性評価

徳永祐也<sup>1</sup>, 尾崎光紀<sup>1</sup>, 八木谷聡<sup>1</sup> 1金沢大学自然科学研究科

宇宙電磁環境を調査するため、磁界センサを搭載した科学衛星により宇宙プラズマ波動 観測が行われている。この観測で使用する磁界センサは、高放射線環境下で使用されるた め、放射線試験により耐性評価を行う。しかし、放射線試験はコストが高く時間もかかり、 容易に行うことはできない。そこで、PHITS を用いることで開発した磁界センサの放射線 シールド性能とトータルドーズ効果 (TID) に対する耐性をシミュレーションにより評価し た。

本研究で取り扱う磁界センサは、図 1 の放射線シミュレーションモデルのように、コイ ルとその内部の集積回路で構成される。この銅線が密集したコイルは、磁界ベクトルを検 出すると同時に集積回路の放射線シールドとしても使用する。放射線耐性の評価には、 PHITS の T-track と T-deposit を用いた。評価内容は、コイルの放射線シールド性能と内 部にある集積回路の吸収線量である。コイルは銅線が密集したものであり、5 mm 厚の銅板 と見なせる。そこで、銅板 5 mm に、α線を照射するシミュレーションを行った。その結 果、240 MeV 以下のα線を遮蔽することが分かった。コイルは、α線 240 MeV 以下に対し て放射線シールドとして使用可能である。また、本研究の磁界センサに、γ線1 MeV が入 射した場合における集積回路の年間吸収線量をシミュレーションした。図 2 は、磁界セン サにおける年間吸収線量のシミュレーション結果である。集積回路の放射線による電気的 特性の劣化(TID)は、ゲート酸化膜に放射線が入射することで起きる。そのため、シミュ レーションモデルでは、集積回路を SiO2で模擬した。また、実際の厚みは数µmであるが、 シミュレーションが不可能なため、1 mm で評価を行った。その結果、γ線1 MeV を磁界 センサに照射した場合、集積回路の年間吸収線量は 0.052 rad/year 以下となった。宇宙空 間では 400 krad 以上の放射線耐性が求められるため、本研究の磁界センサは十分な放 射線耐性をもつことが分かった。



本発表では、PHITS を用いた宇宙磁界センサの放射線耐性評価について詳細に述べる。

図 1. シミュレーションモデル(磁界センサ)



#### 核エネルギーから電気へ直接変換する核分裂電池の PHITS を用いた効率評価手法開発

# 笠井 宏哲、竹澤 宏樹 東京都市大学 工学部原子力安全工学科

**緒言**:現在の原子力発電では、核分裂で発生するエネル ギーを、蒸気を介して電気に変換している。より高い効率を 得ようとする考え方の中に、核分裂のエネルギーを直接電 気に変換するいうものがある。直接変換にはいくつかの種類 があるが、本研究では核分裂電池に着目した。核分裂電池 は図1に示すように二枚の電極とその片方に塗布された核 燃料で構成されている。核燃料から放出された電荷(平均+ 20eC)をもった核分裂片(FP)が正極に到達すると、極板間 に電圧が発生する。この電場の中をさらにFPが正極に到達 した場合、粒子の運動エネルギーが静電エネルギーに変換 される。これが核分裂電池の原理である。本研究では、核分



図1核分裂電池の概念図

裂電池(単一セル)の実証実験を先行研究に倣って、Cf 中性子源や研究炉を利用して行うことを 最終目標としている。そのためには、実験時の核分裂電池の性能をあらかじめ評価しておく必要が ある。したがって、本研究ではFPイールド、電荷等を考慮した変換効率・性能評価手法を開発する。 今回は、その第一段階として、並行平板型核分裂電池を対象としたPHITSによる変換効率評価 手法を検討した。

**方法**: 核分裂電池の形状は図1のような並行平板のほかに、円柱状や球状のものが考えられているが、現在のPHITSでは一様な電場のみ設定可能なため、並行平板を選択した。PHITSを用いて、図1に示される燃料層で発生したFPの正極への到達率を計算した。また、その結果と式(1)を利用し変換効率を求めた。表1に計算条件を示す。

変換効率 = 
$$\frac{FPの到達率 \times FPの持つ電荷 \times 極板間の電圧}{核分裂のエネルギー(200MeV) ÷ 発生する核分裂片の数(2)}$$
式(1)

結言:解析結果を図2に示す。並行平板において最大約7%の変換効率が得られ、その値は先行研究<sup>1</sup>と同等であった。今後は、上記に示す実験を行うため、FPイールドやFPガス、FPの電荷などの効果をPHITSに組み込み、核分裂電池の変換効率・性能評価手法を高度化する。

FP模擬粒子	<sup>137</sup> Cs	10
FPの初期エネルギー	100MeV (仮)	8
F P の電荷	+20eC(固定)	
極板間電圧/距離	0-5MV/3cm	
極板材料/厚み	黒鉛/1cm	₩ 2
核燃料/厚み	UO₂∕0.25µm	0
maxbch	5000	
maxcas	200	電圧 (MeV) 図2 PHITSで計算した変換効率

表 1:計算条件

#### 参考文献

[1] Donald King et.al, Conceptual analysis of the power production of fission electric cell reactors, 10<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, Arlington, April 14-18, 2002, 125-132.

# **Evaluation of lithium glass scintillation detector responses for tritium production** rate measurement in the blanket neutronics experiment by the PHITS code

Neng Pu<sup>1</sup>, Takeo Nishitani<sup>2</sup>, Teruya Tanaka<sup>1,2</sup>, and Mitsutaka Isobe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

<sup>2</sup>National Institute for Fusion Science, National Institutes of Natural Sciences

Lithium (Li) glass scintillation detectors have been utilized to measure neutrons for evaluation of the tritium production rate (TPR) in the fusion blanket neutronics experiments [1]. The Li glass scintillation detector method (Li glass method) perform to be the on-line measurement of TPR which can compare with off-line measurement of TPR by using the activation foil method and the <sup>6</sup>Li<sub>2</sub>O pellets method. Due to the large thermal neutron cross section of the  ${}^{6}Li(n,\alpha)T$  reaction, enriched  ${}^{6}Li$ glass scintillation detector has the large efficiencies of the thermal neutron. TPR in a neutron and gamma-ray mixed field can be evaluated by the spectrum of <sup>6</sup>Li glass scintillation detector subtracted that of <sup>7</sup>Li glass scintillation detector (<sup>6</sup>Li glass - <sup>7</sup>Li glass). TPRs in the Li<sub>2</sub>O blanket have been measured by <sup>6</sup>Li<sub>2</sub>O pellet method and Li glass method in the benchmark neutronics experiment with D-T neutrons at the Fusion Neutronics facility (FNS) of JAERI [2]. TPRs measured by Li glass method have been found the discrepancies from that by 6Li2O pellet method in the front side of blanket which close to the neutron source. In order to study the reason of the discrepancies, the neutron responses of Li glass detectors have been calculated by the Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS). The neutron spectra are obtained for calculation of Li glass detectors at the different position in the blanket. From the PHITS calculation, the neutron spectra change to harder from blanket back side to blanket front side. On the one hand, the reaction rate of several reaction such as <sup>6</sup>Li(n,n'α)D, <sup>7</sup>Li(n,n'  $\alpha$ )T, <sup>7</sup>Li(n,2n)<sup>6</sup>Li and the elastic scattering of <sup>6</sup>Li and <sup>7</sup>Li increase with neutron energy. The counts loss of Li glass method has been found to come from those reactions. On the other hand, thermal neutron peak were only considered for calculation of TPR from Li glass in previous work, where lose the information from the  ${}^{6}\text{Li}(n,\alpha)T$  reaction on high energy neutron range. Therefore, the ratios of thermal neutron peak reaction rate of (<sup>6</sup>Li glass - <sup>7</sup>Li glass) and total TPR from <sup>6</sup>Li glass were evaluated

to be a correction factor to correct TPR measured by Li glass method. By using the correction factor, TPR measured by Li glass method agree well with TPR measured by <sup>6</sup>Li<sub>2</sub>O pellet method.

#### Reference:

[1] S. Yamaguchi, *et al.*, "An on-line method for tritium production measurement with a pair of lithium-glass scintillators", Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A **254**, 413 (1987).

[2] H. Maekawa, et al., "Fusion blanket benchmark experiments on a 60 cm-thick Lithium-Oxide cylindrical assembly", JAERI-M 86-182 (1986).



Fig. 1 Comparison of TPRs measured by <sup>6</sup>Li<sub>2</sub>O pellet method and Li glass method, and correction for Li glass method.

#### 大強度陽子加速器におけるコンクリート壁の放射化

西川 功一<sup>1,2</sup>、別所 光太郎<sup>1,2</sup>、萩原 雅之<sup>1,2</sup>、関本 俊<sup>3</sup>、三浦 太一<sup>2</sup>、八島 浩<sup>3</sup>、金井 敦史<sup>4</sup> J-PARC センター<sup>1</sup>、KEK 放射線<sup>2</sup>、京都大学複合原子力科学研究所<sup>3</sup>、東京ニュークリア・サービス<sup>4</sup>

《はじめに》大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、加速器トンネル内において、ビームロスによる放射化が 起きやすいビームダンプやビーム合流点(シンクロトロンへの入射部)、分岐点を中心とした12箇所のコン クリート壁に観測孔を設置し、当地点よりコア抜きしたコンクリートを粉砕し、U-8容器に密閉してアルミ ケースに重ね入れ、観測孔に挿入している。ビーム運転に伴いそれぞれのコンクリート中に生成される放射 能濃度の深度分布を毎年測定している。<sup>1,2)</sup>本報告では、50GeVシンクロトロン(MR)入射部のコンクリ ート壁における放射能濃度の深度分布、中性子束について解析を行った。

《コンクリート内各深度における放射能濃度の測定と解析》2017 年夏の運転停止期間中に、観測孔のコンク リート試料を回収し、高純度 Ge 半導体検出器で各深度における放射能濃度を測定した。コンクリート試料中 の放射能濃度は、深度と共に指数関数的に減衰し、高エネルギー中性子による核反応で生成される核種 Be-7、 Na-22、Mn-54 等と熱中性子によって生成される核種 Eu-152、Co-60 等では、減衰の勾配が異なっていた。ま た熱中性子生成核種では、表面から約 60 cm を境に勾配が緩やかになる傾向も見られた。

《シミュレーション計算》コンクリート内各深度における放射化のメカニズムを理解するため、粒子輸送モンカルロコード PHITS Ver. 3.02<sup>3)</sup>を用いシミュレーション計算を行った。コンクリート中に存在する元素の含有量は、中性子放射化分析法と化学分析法を用い定量した値を用いた。中性子放射化分析は、京都大学原子炉実験所で行った。MRのビームラインを模擬した体系を作成し、MRへのビーム入射部付近のコリメータで大きなビームロスが起きると想定して、陽子・中性子の粒子輸送計算を行い、放射能観測試料の設置点に対応する領域のコンクリート内各深度において、エネルギーごとに中性子束を求めた。ここで、高エネルギー中性子による<sup>7</sup>Be、<sup>22</sup>Na、<sup>54</sup>Mnの生成反応の閾エネルギーはそれぞれ1.0 MeV、13 MeV、30 MeV であることを考慮し、熱中性子領域にあたる1.0 meV~0.5 eV、<sup>54</sup>Mn、<sup>22</sup>Na、<sup>7</sup>Be 生成にそれぞれ対応する、1.0 MeV 以上、

13 MeV 以上、30 MeV 以上の各エネルギー領域について 中性子束と深度の関係についてプロットをし、放射能 として実測される傾向と比較した。図1に計算結果か ら得られた中性子束の深度分布を示す。熱中性子にあ たる1.0m eV~0.5 eV のエネルギー領域の中性子束の 深度分布で、実験値で観測された変曲点が表れ、勾配 が緩やかになる傾向が再現された。発表では、放射能 測定で得られた高エネルギー中性子生成核種と熱中性 子生成核種の深度分布と、シミュレーション計算によ る観測孔内の各深度での中性子束を比較し、議論する。



図1. 計算結果から得られた中性子束の深度分布

J. Kitagawa, M. Hagiwara, T. Miura, A. Kanai, K. Seki., KEK-Proceedings., 2013-15, 386-392 (2013)
A. Kanai, J. Kitagawa, M. Hagiwara, K. Seki, T. Miura., KEK-Proceedings., 2016-18, 245-250 (2016)
T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol., 55, 684-690 (2018)

#### 静電加速器施設放射化評価における中性子強度解析

延原文祥 1, 長島洋子 1, 桝本和義 2, 松村宏 2

1東京ニュークリア・サービス株式会社,2高エネルギ加速器研究機構

#### 1.序

中性子発生加速器廃止時に、PHITS コード使用した放射化計算評価が行われている。現 段階では、リニアック施設以外の施設は個別評価が必要となっており、各施設に対して計 算と測定の負荷が発生するため、ある程度のカテゴリで放射化の範囲を決定していくこと が望まれている。本発表では、こうしたカテゴリ化に資するため、昨年度規制庁安全研究 において KEK 殿(TNS 一部実施)にて実施された「静電加速器施設における放射化評価」の 内、典型的な条件での中性子強度解析を実施した例を報告する。

静電加速器施設では、陽子、重陽子など様々な加速粒子を用いて PIXE や年代測定など 各種分析に利用されている。全ての運転が中性子発生を意図しているわけではないが、中 には加速粒子が標的やダンプ等に衝突することにより、中性子が発生することもある。加 速粒子のエネルギや標的物質等により中性子発生数は異なる。実施設での測定と計算評価 の比較は実施するが、個別対応とすると計算ケース数が膨大となる。計算により主たるタ ーゲット物質と使用エネルギ範囲内の中性子発生量を求め、代表施設での放射化計算と紐 付けすることで、総合的な評価が行え、カテゴリ分類に資することができると考えた。但 し、PHITS コードの持つ粒子エネルギ毎、ターゲット毎の特性や過去文献等の比較を行い、 計算評価状況をより適切に把握することとした。

#### 2.計算条件

計算は、PHITS 2.88 と TENDL-2014(陽子、重陽子)又は ENDF/B-VII(Li ターゲット) を用いて行った。陽子入射時は、比較検証のためモデル(INCL)とした場合、最新の PHITS 3.02 の kurotama モデルを利用した場合についても比較を行った。

#### 3.計算結果

陽子がビーム構造物ステンレス入射時及び、重陽子が中性子発生ターゲットである Li入 射時の結果を図1に示す。発表では、計算を行った主たるターゲットでの結果を報告する。





# PHITS を用いた HUNS 熱中性子源体系の検討とビーム特性の計算

佐藤 史明, 原 かおる, 加美山 隆 北海道大学

北海道大学・45 MeV 電子線形加速器施設には加速器駆動型中性子線源(Hokkaido University Neutron Source, HUNS) があり、その線源からのパルス中性子ビームを用いて中性子透過イメージング等の実験が行われている [1]。2018 年現在、加速器の更新作業が進められており、電子ビーム強度の増強が予定されている。本研究では PHITS を利用して HUNS 熱中性子源のビーム特性についてシミュレーション計算し、中性子強度の向上を目指した熱中性子源体系の改良の検討を行っている。

HUNS 熱中性子源体系は、中性子生成標的、減速材、反射材と放射線遮蔽材等で構成される。図 1 に現在の熱中性子源の水平方向断面の概略図を示す。中性子生成標的は、主に タングステン円板と鉛ブロックの組み合わせであり、それらの中に水冷用のステンレス配 管が通っている。図 1 の挿入図に示すように、中性子生成標的に 34 MeV の電子ビームを 照射することで発生させた制動放射線を利用し、(γ, n)反応を誘起して中性子を生成する。 それら中性子は常温のポリエチレンブロックで減速し、電子ビーム軸に対して 90°方向に 放出される熱中性子をビームとして実験に使用する。実験時、典型的な中性子検出器位置 はポリエチレン減速材表面から距離(*L*)約 7 m であり、その位置でのパルス中性子ビー ムの積分強度は 0.01-0.1 eV の中性子エネルギー範囲で 10<sup>3</sup> n/cm<sup>2</sup>/pulse 程度である [2]。

PHITS シミュレーションでは、現在の HUNS 熱中性子源体系を基本として中性子生成 標的、減速材、反射体等の配置やサイズを多少変更し、中性子ビームのエネルギー分布の 計算を行った。第1 段階では、中性子生成標的に電子ビームを照射し中性子を発生させた 場合の計算を行い、中性子の位置やエネルギー等の情報を生成標的表面において、Dump 機能を利用してタリーした。第2段階では、Dump データを Source として読み込み、い くつかの熱中性子源体系で粒子輸送計算を試しており、中性子ビームの熱中性子エネルギ 一領域の積分強度がより高くなる体系を検討している途中である。図2に一例として現在 の熱中性子源体系の場合で計算した中性子ビームのエネルギー分布を示す。ここでは計算 時間を短縮する観点から *L* = 1 m の位置で中性子ビームをタリーした。発表では、検討中 の熱中性子源体系や、中性子ビームのエネルギー分布等の計算について報告する。

#### 参考文献

K.Y. Hara, H. Sato, T. Kamiyama, T. Shinohara, EPJ Web Conf. 146 (2017) 03032.
上原優, 原かおる, 浅子穰, 佐藤博隆, 加美山隆, 篠原武尚, 原子力学会 2017 秋, 学生ポスター.



ロ2. シミュレーション結果の 中性子エネルギー分布

## counter 機能を用いた前立腺がんの密封小線源療法の線量分布の解析

井原智也<sup>1</sup>, 阪間稔<sup>2</sup>, 井本尚吾<sup>1</sup>, 佐藤隆文<sup>1</sup> <sup>1</sup>徳島大学大学院保健科学教育部,<sup>2</sup>徳島大学大学院医歯薬学研究部

前立腺がんは年齢とともに増加する疾患で,特に 65 歳以上に多く,80 歳以上では約 20% の人に前立腺がんが認められるという報告がある.前立腺がんの治療方法として,手術・放 射線療法・化学療法が挙げられる.中でも放射線療法には,IMRT や 3D-IGRT による外部 照射,<sup>125</sup>Iシード線源の永久挿入による低線量率小線源療法(low dose rate : LDR),<sup>192</sup>Irシ ード線源の一時挿入による高線量率小線源療法(high dose rate : HDR)がある.放射線療法 は,他のがん治療と比較して患者の身体的苦痛が少なく,元の臓器機能を温存できることが 大きなメリットである.しかし,放射線を照射する上で線量分布を把握することが必要であ り,特に腫瘍のまわりに存在する正常組織(リスク臓器)の吸収線量を把握することは非常 に重要である.前立腺がんの放射線療法におけるリスク臓器は膀胱と直腸である.

本研究では、図1のように成人男性の ICRP Publication110 ボクセルファントムの前立 腺(region number=115)内に <sup>125</sup>I シード線源または <sup>192</sup>Ir シード線源を埋め込み(形状は図2 の通り), counter 機能を用いて散乱線の解析をおこなった. counter 機能は,放射線が指定 領域に入ったとき・出たとき・相互作用を起こしたときの counter 値を設定することで,図 3 のようにシード線源から出た  $\gamma$ 線がどのような線量分布になるか散乱回数ごとに弁別す ることができる. それぞれの散乱線が,吸収線量にどのように寄与するか解析した.



# MRI-RT における electron return effect の検証

井本尚吾<sup>1</sup>, 阪間稔<sup>2</sup>, 井原智也<sup>1</sup> <sup>1</sup>徳島大学大学院保健科学教育部 <sup>2</sup>徳島大学大学院医歯薬学研究部放射線理工学分野

MRI-RT とは MR 画像を用いた画像誘導放射線治療(IGRT)の1つである. kV-X 線画像 や CBCT による位置合わせが現在の IGRT の主流であるが,近年,MR 画像を用いた位置 合わせが注目されている.MR 画像は CT 画像と違い軟部組織のコントラストが高く,腫瘍 が見やすいという特徴がある.そのため,腫瘍や臓器の抽出が容易で,より高い精度の位 置合わせが期待できる.また治療中も MRI を撮影し続け、腫瘍や周辺組織、リスク臓器を リアルタイムに観察しながら治療することが可能である.MRI-RT の欠点としては,画像 の幾何学的歪み,RF 波による熱,磁場による散乱電子の曲がり(electron return effect : ERE)などがある.

本研究では、MRI-RT の欠点の一つである磁場による散乱電子の飛程の曲がりの影響について、PHITS を用いて検証した. 図 1 のように磁場中で 6MV-X 線を水に照射し、ローレンツ力による散乱電子の飛程の曲がりの影響を調べた. 磁場がビームと直交する場合には、ローレンツ力によって引き戻された散乱電子が表面で線量を落とすためビーム出口の線量が高くなる. 図 2 には 0.75T(テスラ)のときの deposit, 図 3 には 0.2, 0.75, 1.5, 3, 5T と磁場強度を変化させた結果を示す.0.75T のときの ERE が最も大きい結果となった.



