# PHITS 研究会 概要集

令和元年8月5日(月)13:00~

高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパス

3号館セミナーホール

茨城県つくば市

## PHITS 研究会プログラム

- 8月5日(月)13:00開始
- 13:00 14:30 セッション1 座長:橋本 慎太郎(原子力機構)
- 13:00-13:30 佐藤 達彦 (原子力機構)
- 「PHITS 開発の現状」
- 13:30-13:50 伊藤 史哲(原子力機構)
- 「レーザー駆動中性子源を用いた核共鳴透過分析技術開発」
- 13:50 14:10 片岡 憲昭(東京都立産業技術研究センター) 「食用鶏卵への電子線照射処理」
- 14:10 14:30 安部 晋一郎 (原子力機構)

「建屋内における二次宇宙線中性子起因ソフトエラー発生率の解析」

■ 14:30 - 14:40 休憩

■ 14:40 - 16:00 セッション2 座長:佐藤 達彦(原子力機構)

14:40 - 15:00 小川 喜弘 (近畿大学)

「ガントリー型リニアックを用いた治療施設の使用時間変更の可能性について」 15:00 - 15:20 阿久津 和音(群馬大学)

「フォトンカウンティング CT システムにおけるバックグラウンドのシミュレ ーション」

- 15:20-15:40 谷内 淑惠(北海道大学)
- 「低エネルギー電子線による DNA 損傷の生成率解析」
- 15:40-16:00 松谷 悠佑 (原子力機構)

「電子飛跡構造解析モードを使用した DNA 損傷生成率の推定」

■ 16:00 - 16:10 休憩

■ 16:10 - 17:10 セッション3 座長:岩元 洋介(原子力機構)

16:10 - 16:30 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 (2)」 16:30 - 16:50 Alex Malins (原子力機構)

Using PHITS to calculate ambient dose equivalent rates in radiocesium contaminated forests

16:50 - 17:10 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のためのコード改良」

■ 17:10 - 17:30 総合討論 座長:橋本 慎太郎(原子力機構)

## レーザー駆動中性子源を用いた核共鳴透過分析技術開発

\*伊藤史哲<sup>1\*</sup>,小泉光生<sup>1</sup>,髙橋時音<sup>1</sup>,鈴木敏<sup>1</sup>,李在洪<sup>1</sup> <sup>1</sup>日本原子力研究開発機構

## 1. 緒言

アクティブ中性子非破壊測定法の一つである核共鳴透過分析法(NRTA)を、核不拡散における保障 措置及び計量管理に適用するには、短パルス中性子源を導入する必要がある。その様な中性子源の一つ として、レーザー駆動中性子源(LDNS)に注目し、NRTA への適用性検討および基礎技術開発を進め ている。

## 2. LDNS を用いた NRTA

NRTA は、原子力機構(NSEC、ISCN)と EC-JRC が共同で開発しているアクティブ中性子非破壊分 析技術の一つで、パルス中性子を試料に透過させ、中性子飛行時間(TOF)測定により、中性子エネル ギースペクトルを求め、核種を定量する技術である<sup>1</sup>。核物質の高精度測定を小型の NRTA 装置で行う ためには、0.1 µ 秒程度の短パルス中性子が必要となるため、極短パルスを発生でき、粒子加速空間が極 小である、レーザー駆動中性子源(LDNS)の将来性に着目した。LDNSのレーザー装置は、核物質取 り扱い施設の主要管理区域外に設置でき、光のみを測定室に送ることができるため、装置の維持管理が 比較的容易となることが期待できる。

## 3. PHITS を用いた評価

本研究では、NRTA への LDNS 適用性を評価し、又システムを最適化するため、以下に記述する点について、シミュレーション研究を開始したところである。

## (1) 中性子発生機構の設計

LDNS では、ピッチャー・キャッチャー方式が多く用いられている。その機構は、水素(又は重水素) を多く含む薄膜(ピッチャー)にレーザーを当て、シース電場により加速された陽子(重陽子)を、薄 膜の後方にある中性子変換素材(キャッチャー)に打ち込み、(p/(d),n)反応により中性子を発生させるも のである。中性子発生反応断面積の大きさと扱いやすさ等から、多くの場合ベリリウムがキャッチャー として選ばれている。LDNS で発生する中性子は高エネルギー成分が多く含まれるため、NRTA に用い る場合、減速体を用いて熱外中性子を得る必要がある。そのため、NRTA に適した中性子発生機構及び、 それに付帯する中性子減速体の設計を行う必要がある。

#### (2) 中性子飛行経路の設計

通常中性子 TOF 測定実験を行う場合、中性子発生源からの X 線・ガンマ線を遮蔽するため、中性子 飛行経路上に鉛等を設置し、また中性子の回り込みを防ぐためコリメータ、遮蔽材を設置する。そうし た中性子飛行経路の最適化のための評価を行う必要がある。

#### (3) 検出器の設計

LDNS にて発生する X 線やガンマ線は NRTA 測定の主な背景事象となる。そのため、中性子に対して 高い感度を保ちつつ、X 線、ガンマ線に対してはできる限り不感な検出器が望ましい。その様な検出器 を開発するため、PHITS を用いた検出器の最適化を進めている。

**謝辞**:本研究開発は、文部科学省「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」事業の一部である

参考文献 [1] B. Becker et al. Eur. Phys. J. Plus (2014) **129** 58

<sup>\*</sup>Fumiaki Ito<sup>1\*</sup>, Mitsuo Koizumi<sup>1</sup>, Tohn Takahashi<sup>1</sup>, Satoshi Suzuki<sup>1</sup> and Jaehong Lee<sup>1, 1</sup>JAEA.

\*Fumiaki belongs to NAIS Co., Inc. and has been working on this project at ISCN/JAEA as a dispatched employee from NAIS.

## 食用鶏卵への電子線照射処理

○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

生卵を食べる文化のある日本では、鶏卵の表面に存在するサルモネラ菌を次亜塩素酸で 殺菌する。しかし、パックを開けた際の次亜塩素酸臭のクレームが多く、大量の廃薬品が 出るというデメリットが存在する。その代替法として、電子線による殺菌の方法が研究さ れてきた。電子線は加速電圧を変えることで透過能力を調整できるため、鶏卵の可食部に は電子を照射せず、卵殻のみ電子を照射することが可能である。ただし、電子の照射に伴 い制動 X 線が発生するため、可食部に放射線が照射される。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 0.10Gy 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)。そこで、本研究では PHITS を用いて卵殻に対する深度線量分布を作成し、適切な加 速電圧を求めた。また、卵殻にサルモネラ菌を殺菌する線量(3kGy)の電子線を照射させ た時の可食部の線量が 0.1Gy 以下となるような照射条件を実験と PHITS で検討した。

2. 方法

PHITS を用いて卵の電子線照射モデルを作成した。6 cm×6 cmの面線源の平行ビーム を z 軸正の向きに照射し、線源から 20 μm 離れた位置にあるチタン箔 10 μm を通過するこ とで電子線が広範囲に照射される線源モデルである。炭酸カルシウムからなる卵殻は気孔 を考慮して密度 2.0 g/cm<sup>3</sup>、可食部は水と同等と仮定し密度 1.0 g/cm<sup>3</sup>とした。他の領域は 標準空気とし、照射ウインドウ(チタン箔)と卵殻表面の距離を 2.5 cm とした。電子線の 加速電圧は 80 keV, 100 keV, 150 keV, 200 keV, 250 keV とした。卵殻の深度線量分布を算 出する際には十分に厚い卵殻(0.6 mm 厚)を想定し、これを 30 層(0.02 mm 厚)の検査 領域に分割し、上記の条件で電子線照射した際の各卵殻層の吸収線量を評価した。

結果および考察

卵殻の深さ方向に対する吸収線量をPHITS コードによるシミュレーションで求めた結果を Fig. 1に示す。200 kV で照射した場合、0.2 mm までは電子線による寄与であり、0.2 mm 以降は線量が一定に推移しているため制動 X 線の寄与であることが示された。250 kV で照射した場合、卵殻の最小薄さ(0.26 mm)を超え、電子線が可食部に到達するため、加速電圧は 200kV を上限とする必要がある。





## 建屋内における二次宇宙線中性子起因ソフトエラー発生率の解析

安部晋一郎1

1日本原子力研究開発機構

【背景】 地上に降り注ぐ二次宇宙線によって機器内の半導体デバイスが保持するデータが 書き換わり、その結果として電子機器に一時的な誤動作(ソフトエラー)が生じることが 知られている。IoT の進展に伴い社会インフラを支える電子機器は増加しており、これらの ソフトエラーは致命的な障害へと繋がる恐れがあるため、信頼性保障のためにソフトエラ 一の評価と対策は急務となる。一般的に電子機器は屋内に設置されるため、ソフトエラー 評価の際には壁や天井などによる二次宇宙線の遮蔽効果を考慮しなければならない。そこ で本研究では、建屋内における中性子起因ソフトエラー発生率(SER: Soft Error Rate)の 位置依存性を明らかにするべく、PHITS によるシミュレーションを行った。

【手法】 二次宇宙線の初期エネルギーおよび入射方向分布を得るために、地球上のほぼ全 ての場所、時期における宇宙線フラックスを見積もる解析モデル PARMA4.0 (PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere ver. 4.0) [1]を用いた。なお、PARMA4.0 は PHITS のユーザー定義線源として利用可能な形式(usrsors.f) でも公開されており、簡 単に利用することができる。PHITS を用いて 5 階建ての建屋への二次宇宙線照射計算を行 い、中性子フラックスの空間分布を出力すると同時に、Multiplier 機能を用いて SEU 断面 積を中性子フラックスに乗じてエネルギー積分することで SER の空間分布を出力した。

【結果】建屋内における二次宇宙線中性子フラックスの空間分布及び SER の空間分布を、 図1及び図2にそれぞれ示す。中性子フラックスは2階の中心部で最も低くなる一方、SER は1階の中心部で最も低くなっ

た。これは、地面によって反射 された低エネルギー中性子が 1 階における中性子フラックスの 増加に寄与する一方、低エネル ギー中性子は SEU 断面積が低 いために SER の増加へ大きく 寄与しないことが原因である。 本計算結果より、高い信頼性が 要求される機器は可能な限り低 階層に設置すべきことを定量的 に明らかにした。

## 【参考文献】

 T. Sato, PLoS ONE, vol. 11, e0160390 (2016).



図 1.建屋内の二次宇宙線中性子フラックスの空間分布



図 2.建屋内のソフトエラー発生率の空間分布

ガントリー型リニアックを用いた治療施設の使用時間変更の可能性について

小川喜弘 1, 3, 小林一之 2

1近畿大学・総合社会,2日本アキュレイ株式会社,3株式会社 HATC

ガントリー型リニアックの特徴を考慮した治療施設からの漏 えい線量評価システムを,3次元モンテカルト輸送計算コード PHITSを用いて構築している。図1に示すように加速器ターゲ ットから放出された放射線が対向板と相互作用し,対向板からの 発生放射線情報を用いた回転照射を模擬した放射線情報による 施設からの漏えい線量について検討する。

図 2 に示す管理区域境界における漏えい線量を以下の条件で 計算した。治療用 X 線 (6MeV) と MVCT 用 X 線 (3.5MeV) の対抗板を 120 か所 (3 度間隔)の位置に配置し、それぞれの位 置から三ヶ月当たりのビーム使用時間を利用線錘として発生さ せる。治療用 X 線 (6MeV) と MVCT 用 X 線 (3.5MeV)のタ ーゲット位置 120 か所に漏えい線源を配置し、それぞれの位置か ら三ヶ月当たりのビーム使用時間を漏えい線の等方点線源とし て発生させる。





計算結果の一例として,アイソセンター平面での実効線量分布 を図3に示す。同施設において従来法を用いた結果と比較し,追 加の工事なく使用時間変更が可能であることがわかった。



図2

図3

## フォトンカウンティング CT システムにおける

バックグラウンドのシミュレーション

阿久津和音<sup>1</sup>, 星和志<sup>2</sup>, 大野由美子<sup>3</sup>, 鈴木宏輔<sup>2</sup>, 取越正己<sup>4</sup>, 櫻井浩<sup>2</sup> 1群馬大学大学院理工学府, <sup>2</sup>群馬大学理工学府,

3群馬県立県民健康科学大学,4群馬大学重粒子線医療医学センター

生体内の電子密度分布と実効原子番号を 得る試みとして、2つのエネルギーのX線 を用いた CT スキャンが提唱されてきた。 この方法を更に敷衍すれば、CT スキャン においてX線光子一つ一つのエネルギーを 識別することにより、電子密度や実効原子 番号を定量的に求めることが可能である。 近年 Photon Counting CT (PCCT) と呼 ばれる装置が医療現場に展開されつつあり、 それを実現できる素地が整えられつつある。

当研究室では、PCCT の原理を用いて、 電子密度を直接測定することを目指した開 発研究を行っている。ところが、当研究室 所蔵のフォトンカウンティング CT 装置の 測定データに背景放射線(バックグラウン ド)が含まれていることが、既に先行研究 により報告されている。そこで、本研究で は、PHITS 計算コードを用いて実験装置 のシミュレーションを行い、バックグラウ ンドの評価を行った。

実験装置のジオメトリを図1に示す。半 径 3[mm]のアルミニウム棒を仮想試料と し、120[keV]の X 線を入射させた場合の、 PCCT 装置内部の放射線散乱状況のシミュ レーションを行った。

X 線をコーンビームにした場合の放射線 飛程を図2に示す。装置内部は真空である。 図2より、遮蔽用パイプの後方でコーンビ ームが遮蔽されている様子が分かる。よっ て、遮蔽用パイプはバックグラウンドの低 減に寄与していると考えられる。

図3に検出器後部を開いた場合と閉じた 場合の比較を示す。X線はダイレクトビー ムにしている。装置内部は真空とした。図 3(a)及び(b)を比較すると、検出器内部で 多重散乱があることが分かる。

詳細については発表にて報告する。



(ダイレクトビーム・真空)

## 低エネルギー電子線による DNA 損傷の生成率解析

谷内淑惠<sup>1</sup>、吉井勇治<sup>1</sup>、伊達広行<sup>1</sup> <sup>1</sup>北海道大学

医療で使用される診断用および治療用 X 線の生物学的影響の評価を行う際、X 線によって組織中に発生する二次電子線の飛跡構造解析が有用である。特に、二次電子線が生体へ付与するエネルギーの密度を Microdosimetry における物理量である線量平均線エネルギー

(Dose-mean lineal energy:  $y_D$ )を用いて評価した場合、生物学的効果比(Relative biological effectiveness: RBE)と正の相関関係にあることが明らかとなっている[1]。当研究室のモンテ カルロシミュレーションコード(WLTrack)を用いた  $y_D$ 値の算出では、計算に必要となる 電子線付与エネルギーのサンプリングを"マイクロメートルスケール"で行った。しかし、 DNA 損傷をはじめとする細胞への実際的な影響の解析では"ナノメートルスケール"での サンプリングが不可欠である。また、生物学的影響を評価するにあたっては、DNA 損傷の 中で修復が困難な DNA 二本鎖切断(DNA-DSB)について(より複雑な型としての DSB に 関する生成率を含めて)詳細に検討する必要がある。

本研究では、汎用コードである PHITS を用いて DNA 損傷生成率を解析するとともに、 WLTrack での解析結果との比較を行い、液相水中における電子線飛跡解析コードの検証を 行うことを目的とした。まず飛跡長 (Path length) および射影飛程 (Penetration length)の計 算結果を比較することにより、両シミュレーションコードにおける (電子衝突断面積デー タに主として由来する)電子線飛跡構造の違いを明らかにし、DNA 損傷生成率の解析を行 った。当日は、詳細な解析結果を踏まえ議論する。

[1] Yachi Y, et al Sci. Rep. under submission.

8

## 電子飛跡構造解析モードを使用した DNA 損傷生成率の推定

松谷悠佑<sup>1</sup>,甲斐健師<sup>1</sup>,吉井勇治<sup>2</sup>,谷内淑恵<sup>2</sup>,伊達広行<sup>2</sup>,佐藤達彦<sup>1</sup> <sup>1</sup>日本原子力研究開発機構,<sup>2</sup>北海道大学

放射線被ばく後の生物学的効果は、DNA 主鎖への初期損傷から生じる。誘発される DNA 損傷は、液相水中における電子線の飛跡構造とフリーラジカルの拡散シミュレーションよ って推定することが可能であるが、両者を考慮した計算は時間を要する。本研究では、近 年 PHITS に実装された電子線飛跡構造解析モード [1] で得られる非弾性散乱(電離・電子 的励起)のナノメートルスケールにおける空間分布のみに着目して、電子線(光子線)照 射後の DNA 主鎖切断を推定可能なシンプルなモデルを提案する。

本モデルでは、電子線トラック毎の電離数ならびに励起数と 10 塩基対 (3.4 nm) 以内に 存在するイベントの組合せを確率的にサンプリングし、一本鎖切断 (SSB) の生成率 ( $Y_{SSB}$ )、 二本鎖切断 (DSB) の生成率 ( $Y_{DSB}$ ) とその生成率比 ( $Y_{DSB}/Y_{SSB}$ )を計算した [2]。計算さ れた単一エネルギーの電子線の生成率を、他の計算コードによる推定結果 [3] や生物試料 を用いた実測値 [4-7] と比較した。また、光子照射 (電子線スペクトル) に対する  $Y_{DSB}$ の 相対値 (生物学的効果比: RBE) も計算し、リニアック X 線 (高エネルギー光子) から特 性 X 線 (超軟 X 線) までの様々なエネルギーに対する RBE 実測値 [8] とも比較を行った。

単一エネルギー電子線照射に対する Y<sub>DSB</sub> ならびに Y<sub>DSB</sub>/Y<sub>SSB</sub>の計算結果は、他の計算結 果や実測値とよく一致し、300 eV の初期エネルギーを有す電子線の Y<sub>DSB</sub> が最大となること がわかった(図1A)。また、様々な光子照射に対しても、RBE の再現にも成功した(図1 B)。本研究の結果により、電離と励起で構成される非弾性散乱の空間分布のパターンのみ で、電子線が誘発する DNA 主鎖切断の生成率を十分に推定できることが示された。



図 1. DNA 二本鎖切断生成率の計算結果(A:単一エネルギー電子線,B:光子線)

1) Sato T, et al. J. Nucl. Sci. Technol. 1881-1248 Online (2018).

4) Folkard M, et al. Int. J. Radiat. Biol. 64: 651-658 (1993).

5) Botchway SW, et al. *Radiat. Res.* 148: 317–324 (1997). 6) de Lara CM, et al. *Radiat. Res.* 155: 440–408 (2001).

7) Fulford J, et al. *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 1053–1066 (2001).

8) Yachi Y, et al. Sci. Rep. under submission.

<sup>2)</sup> Matsuya Y, et al. J. Appl. Phys. under submission.

<sup>3)</sup> Friedland W, et al. Radiat. Res. 150: 170-182 (1998).

## PHITS 付属 JENDL-4.0 中性子用 ACE ファイルに関するコメント(2)

#### 今野 力1

#### 1日本原子力研究開発機構

昨年のPHITS研究会で、2014年に改定される前のPHITSにバンドルされている日本の核デ ータライブラリJENDL-4.0[1]から作られたACE (<u>A</u> Compact ENDF) ファイルを使ってPHITS のカーマ近似(t-heat)で中性子による発熱を計算すると発熱がNaN(<u>Not a Number</u>)に なる原因(NJOYを独自に修正したため、非分離共鳴核種の ACEファイルのheating number のp-tableに負の値が入ったため)とその対処方法(NJOYのheatrモジュールで部分KERMA 係数の計算をしない)を報告した。その後の研究で、もっと適切な対処方法が見つかり、 また、ACEファイルのheating numberのp-tableに負の値が入るとPHITS計算で発熱がNaNに なる原因が特定できたので報告する。

heating numberのp-tableに負の値が入った原因は、核データライブラリのエネルギーバ ランスの崩れに対処するため、全KERMA(核発熱定数)のみ運動学的手法でするように核 データ処理コードNJOYを修正されたことが原因であった。昨年はこの対処法としてNJOYの heatrモジュールで部分KERMAを計算するのをやめてheating numberのp-tableを1.0にする (自己遮蔽補正をしない)方法を提案したが、発熱数でも非分離共鳴の自己遮蔽は生じる

ため、この方法は厳密には正しくない。修正されたNJOYコードでは全KERMAのみ運動学的 手法で計算するように変更されたが部分KERMAはエネルギーバランス法で計算するように なっていたため、全KERMAと部分KERMAで整合性がとれておらず、heating numberのp-table が負になった。そこで、部分KERMAも運動学的手法で計算するようにNJOYをさらに変更し、 heating numberのp-tableを適切に設定することができるようにした(図1参照)。

次に、ACEファイルのheating numberのp-tableに負の値が入るとPHITS計算で発熱がNaN になる原因を調べた。MCNPコードではACEファイルのheating numberのp-tableに負の値が 入っていても発熱を計算できているので、PHITSとMCNPのソースコードを比較したが、関 係する箇所はほとんど同じであった。検討の途中でPHITSをgfortranで再コンパイルした ところNaNがでなくなった。一方、ifortでPHITSを再コンパイルするとNaNが生じた。PHITS 付属の実行ファイルはifortで作成されたためNaNが生じたと考えられる。また、MCNPでNaN

が発生しなかったのは付属の実行ファイ ルがgfortranでコンパイルされたためと 考えられる。なお、PHITS、MCNPではheating numberの負のp-tableを0.0にしているた め、計算で得られる発熱は正しくないこと に注意が必要である。heating numberの p-tableが負の場合、エラーメッセージを 出力するようにPHITSを修正されることを 要望する。

K. Shibata et al., J. Nucl. Sci. Technol.
48 (2011), 1-30.
A.C. Kahler (Ed.), LA-UR-17-20093 (2016).





# Using PHITS to calculate ambient dose equivalent rates in radiocesium contaminated forests

Alex Malins<sup>1</sup>, Naohiro Imamura<sup>2</sup>, Tadafumi Niizato<sup>1</sup>, Minsik Kim<sup>1</sup>, Kazuyuki Sakuma<sup>1</sup>, Yoshiki Shinomiya<sup>2</sup>, Satoru Miura<sup>2</sup>, Masahiko Machida<sup>1</sup> <sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>FFPRI

About 72% of the <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs fallout in Fukushima Prefecture from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) deposited on forests [1]. Future choices for the management of contaminated forests depend on estimates of radiation doses to workers and residents under different management scenarios. This talk describes research conducted with PHITS to understand the factors necessary for creating appropriate models for calculating ambient dose equivalent rates ( $\dot{H}$ \*(10)) in

forests from inventories of <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs. The models herein were based measurements from FFPRI and JAEA surveys of forest sites in Fukushima and Ibaraki Prefectures [2,3]. These surveys provided measurements of densities, dimensions, moisture contents and <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs inventories of crowns, trunks, organic layers and soil in the forests. Three geometry models were created for forests, varying from a simple model representing trees and the atmosphere as homogeneous matter, to models layers of with representations of individual tree trunks and crowns. A new PHITS function allows counter values to be set separately for source particles upon generation from each multi-source, meaning the contributions



from radiation originating in different source regions to  $\dot{H}^{*}(10)$  could be calculated easily. The counter function also allowed calculation of the contributions of scattered and unscattered photons to  $\dot{H}^{*}(10)$  separately.

Good correlation was obtained between simulated and measured  $\dot{H}^{*}(10)$  values across nine sites for the 2011-17 period (Fig. 1). Despite the different levels of geometric detail, the results from all three geometry models were all within a few percent of each other. The elemental compositions chosen for materials had a negligible effect on the calculations. Uncertainties in the input <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs radioactivities and their distribution, and the biomass, soil and organic layer densities and moisture contents were deduced to be the main causes of uncertainty in simulated  $\dot{H}^{*}(10)$ . It is expected that dose rate modelling with PHITS will provide useful information for understanding the environmental dynamics of <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs within Fukushima's forests, and for evaluating future management options for the forests.

#### References

[1] H Kato & Y Onda, 2018. J For Res 23, 73-84. DOI: 10.1080/13416979.2018.1448566

- [2] N Imamura et al, 2017. Sci Rep 7, 8179. DOI: 10.1038/s41598-017-08261-x
- [3] T Niizato et al, 2016. J Environ Radioact 161, 11-21. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.017

## PHITS の使用済燃料貯蔵施設遮蔽解析への適用のためのコード改良

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。これまでの研究で使用済燃料 輸送容器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]等といった新機能を導入した。

引き続き使用済燃料貯蔵施設の敷地境界線量評価への適用性を検討し、当該評価を精度よく 実施する上で有効と考えられる以下の機能を抽出した。これらは主に、貯蔵建屋から敷地境界 までの広範囲な空間における放射線粒子輸送を効率的かつ高精度に評価する上で、実務のため に有効な機能である。

① 面線源を設定する機能(キャスク表面線量を基に線源設定を行うために必要な機能)

- ② Tally(計算上の仮想検出器)の評価値及び統計誤差の計算中の推移を表示する機能
- ③ 統計目標を達成した Tally から順次計算を停止させる機能
- ④ 評価結果に対する線源ごとの寄与を分割表示する機能
- ⑤ 二次元分布図の任意座標における数値を抽出する機能

本発表では上記5件のうち、①~④の機能について、PHITSに実装するコード改良の結果を 報告する。改良結果の例として、②の機能を使用して得られる結果を図1及び図2に示す。各 図の横軸は計算の進行を示す Batch 数である。当該機能を使用する事により、計算の終盤では 統計誤差が単調減少し、評価値に有意な変化が見られなくなることが明確に視覚化できること から、当該機能はモンテカルロ計算における評価精度の信頼性を確認するための重要な機能で ある。また、③の機能の効果を検証した結果では、7つの[T-Point]Tallyを配置した迷路構造の 中性子透過計算において、当該機能の使用により約3倍の計算効率の向上が認められた。

今後は上記⑤の機能を組み込むとともに、評価精度の信頼性向上のためのより高度な機能等 を検討していく予定である。





図2.評価値及び統計誤差の計算の推移