PHITS 研究会 概要集

平成28年9月19日(月)

TKP 熱海研修センター

静岡県熱海市

PHITS 研究会プログラム

9月19日(月)9:00開始

■ 9:00 - 9:05 開会挨拶 仁井田 浩二(高度情報科学技術研究機構)

■ 9:05 - 9:20 PHITS 開発の現状 佐藤 達彦 (原子力機構)

■ 9:20 - 10:35 セッション1 座長:橋本 慎太郎(原子力機構) 9:20 - 9:35 岩元 洋介(原子力機構) 「最新版 PHITS の包括的なベンチマーク計算の紹介」

9:35 - 9:50 Tsai Pi-En (原子力機構)

[[]Benchmark of Neutron Production Cross Sections with PHITS, FLUKA, and MCNP6]

9:50-10:05 加茂前 健(名古屋大学大学院医学系研究科)

「PHITS を用いた放射線治療用電子線に対する金属粉含有機能紙の遮蔽性能評価」

10:05-10:20 阪間 稔(徳島大学大学院医歯薬学研究部)

「PHITS と DLNN を組み合わせた In-situ 多チャンネル放射能濃度深度分布測定器(AFT-DDS: Depth Distribution Spectrometer)の放射能濃度決定への取り組み」

10:20 - 10:35 武山 美麗(山形大学高感度加速器質量分析センター) 「シリコン半導体検出器ボックスの重イオンに対する応答の研究」

■ 10:35 - 10:45 休憩

■ 10:45 - 12:00 セッション2 座長:甲斐 健師(原子力機構)
 10:45 - 11:00 稲垣 博光(中部電力㈱ 原子力安全技術研究所)
 「PHITS を利用した格納容器内線量率分布評価ツールの検証」

11:00 - 11:15 的場 史朗(高エネルギー加速器研究機構) 「J-PARC/MLF ミュオン回転標的における残留放射能評価」

11:15 - 11:30 助川 篤彦(量子科学技術研究開発機構) 「トカマク型核融合実験装置における PHITS を用いた計算の現状」

11:30 - 11:45 永石 直喜(熊本大学大学院保健学教育部)「PHITS モンテカルロコードによる HD120-MLC のモデリング」

11:45 - 12:00 林 剛平(東北大学医学系研究科) 「PHITS を用いた ICRP 参照動物モデルの再現」

■ 12:00 - 13:00 お昼休み

■ 13:00 - 14:15 セッション3 座長:佐藤 達彦(原子力機構)

13:00 - 13:15 古場 裕介(量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所) 「PHITSの放射線治療時の線量評価への応用技術の開発」

13:15 - 13:30 松本 真之介(量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所) 「PHITS を利用した CT 被ばく線量評価技術 WAZA-ARIv2」

13:30 - 13:45 後神 進史(原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ) 「Weight Window パラメータ自動生成機能の開発と、その改良案」

 13:45 - 14:00
 高田 健太(筑波大学医学医療系)

 「さまざまな放射線治療場における PHITS を用いた線量計算」

14:00 - 14:15 小川 喜弘 (近畿大学総合社会学部) 「サイバーナイフの遮へい設計について」

■ 14:15 - 14:25 休憩

■ 14:25 - 15:40 セッション4 座長:小川 達彦(原子力機構) 14:25 - 14:40 山口 一郎(国立保健医療科学院)

□ [Preliminary attempt to re-estimate the concentration of radioactive iodine-132 in the air]

14:40-14:55 永田 寛貴(岡山大学)

「ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応によるガンマ線測定」

14:55 - 15:10 島田 健(株式会社エイ・イー・エス)

「将来有人惑星探査に向けた有人宇宙船内における最適な遮蔽材料と遮蔽厚の 検討」

15:10-15:25 太田 真緒(東京工業大学 大学院理工学研究科) 「Ir-192 密封小線源ケロイド治療における吸収線量の評価」

15:25 - 15:40 原 かおる(北海道大学大学院工学研究院) 「中性子・X 線複合イメージング研究のための PHITS の利用」

■ 15:40 - 15:50 休憩

■ 15:50 - 16:50 セッション 5 座長:岩元 洋介(原子力機構)

- 15:50 16:05 水野 義之(京都女子大学現代社会学部) 「学部教育での環境放射線測定の実験的研究における PHITS 利活用事例」
- 16:05 16:20 松嶋 大輔(東京都市大学 放射線計測研究室) 「可搬型加速器中性子源ターゲット設計のための中性子及びγ線評価」
- 16:20 16:35 帝釋 稜介(神戸大理) 「3He 比例計数管を用いた環境中性子フラックスの測定」
- 16:35 16:50 田中 鐘信(理化学研究所仁科加速器研究センター) 「PHITS を用いた RI ビームファクトリー重イオン加速器施設の放射線影響評価」
- ■16:50-17:20 総合討論 座長:橋本慎太郎(原子力機構)
- 17:20 17:25 閉会挨拶 佐藤達彦(原子力機構)

最新版 PHITS の包括的なベンチマーク計算の紹介

*岩元 洋介¹, 佐藤 達彦¹, 橋本 慎太郎¹, 小川 達彦¹, 古田 琢哉¹, 安部 晋一郎¹, 甲斐 健師¹, 松田 規宏¹, 細山田 龍二², 仁井田 浩二²

¹原子力機構,²RIST

1. はじめに PHITS は、多様な放射線の挙動を解析可能な汎用モンテカルロ計算コードであり、加速器遮蔽設計、医学物理計算などの幅広い分野で利用されている。本研究では、最新の PHITS ver.2.82 の精度検証 を目的として、①核反応による粒子生成断面積(47 ケース)、②加速器遮蔽設計等のための中性子輸送(6 ケ ース)及び③X線治療等のための電磁カスケード(12 ケース)に対し、包括的なベンチマーク計算を実施した。 2. 計算条件 本研究では、PHITS が設定を奨励している物理モデルによる計算の検証を進めた。具体的に は、核子に対しては核内カスケードモデル INCL4.6、重イオンに対しては量子分子動力学モデル JQMD、 残留核の蒸発モデルとして GEM を用いた。また、光子・電子の輸送には電磁カスケードコード EGS5 のア ルゴリズム、20MeV 以下の中性子輸送には JENDL4.0 ライブラリを使用した。

3. 計算結果 陽子、中性子、重イオン等の入射反応について、PHITS は 100MeV 以上のエネルギーで実験 値を概ね再現したが、100MeV 未満では INCL4.6 の適用範囲外のエネルギー領域のため、実験値と大きな 差が生じた。また、陽子―リチウム核反応による中性子エネルギースペクトルは、INCL4.6 において軽い 核種の核反応を正確に記述できないため実験値を再現しなかったと考えられる(図 1)。今後、評価済み核デ ータ JENDL4.0/HE を PHITS に組み込むことで、計算精度を改善する予定である。一方、電磁カスケードの 計算結果は実験値を良く再現した(図 2)。

以上のように、加速器遮蔽設計、医学物理応用等に必要な計算精度を検証するとともに、PHITS の現状 における問題点を抽出し、今後の効率的な改善の指針を得ることができた。



図1 138 MeV 陽子入射によるリチウムか らの中性子エネルギースペクトル



図 2 15, 30, 40, 50 keV の電子入射による シリコン中の線量深さ分布

Benchmark of Neutron Production Cross Sections with PHITS, FLUKA, and MCNP6

Pi-En Tsai¹, Bo-Lun Lai², Lawrence Heilbronn³, Rong-Jiun Sheu², Tatsuhiko Ogawa¹ ¹Japan Atomic Energy Agency, JApan ²National Tsing Hua University, Taiwan ³University of Tennessee, USA

This study aims to provide a systematic benchmark study of the neutron production cross sections from nucleus-induced nuclear reactions, and further help improving the physics models implemented in the radiation transport codes. As listed in TABLE I, there are fifteen thin target experiments selected for this study, which includes a mix combination of ¹²C, ²⁰Ne ⁴⁰Ar, ⁸⁴Kr, and ¹³²Xe projectiles bombarding ^{nat}Li, ^{nat}C, ^{nat}Al, ^{nat}Cu, and ^{nat}Pb target with projectile energies between 135 and 600 MeV/nucleon.

The experimental data are benchmarked by different physics models implemented the PHITS ver. 2.73 (JQMD + GEM) and ver. 2.82 (JQMD2.0 + GEM), FLUKA ver. 2011.2c (RQMD 2.4 + FLUKA's own de-excitation model), and MCNP6 ver. 1.0 (LAQGSM 03.03 + GEM2).

Nia	Duciestile	Beam energy	Target	
NO	Projectile	(MeV/nucleon)		
1	¹² C	400	^{nat} Li	
2	¹² C	400	^{nat} C	
3	¹² C	400	^{nat} Al	
4	¹² C	400	^{nat} Cu	
5	¹² C	400	^{nat} Pb	
6	²⁰ Ne	135	^{nat} Cu	
7	²⁰ Ne	400	^{nat} Cu	
8	²⁰ Ne	600	^{nat} Cu	
9	⁴⁰ Ar	400	^{nat} Cu	
10	⁸⁴ Kr	400	^{nat} Li	
11	⁸⁴ Kr	400	^{nat} C	
12	⁸⁴ Kr	400	^{nat} Al	
13	⁸⁴ Kr	400	^{nat} Cu	
14	⁸⁴ Kr	400	^{nat} Pb	
15	¹³² Xe	400	^{nat} Cu	

Table I. Thin target experimentsselected for the benchmark calculation.

The inter-comparison with models and measurements suggest an overall reasonable agreement. However, the benchmark calculations also points out where the models can be further improved, such as (1) MCNP6's underestimation of intermediate-energy neutrons, (2) FLUKA's overestimation of intermediate-energy neutrons, and (3) the overestimation by PHITS with JQMD model for low-energy neutrons. Also, the revised JQMD2.0 in PHITS improves the neutron production from nucleus-induced reactions.

This benchmark study provides useful information and will lead to future improvements of the physics models implemented in each Monte Carlo code for heavy ion interactions.

PHITS を用いた放射線治療用電子線に対する金属粉含有機能紙の遮蔽性能評価

加茂前健¹,門前一²,川村麻里子¹,奥平訓康³,中谷隆佳³,向山隆史³,末澤正太郎³, 川端文隆³,杉田和真³,三宅良和³,小口宏¹,伊藤善之¹,長縄慎二¹ ¹名古屋大学大学院医学系研究科,²近畿大学医学部,³名古屋大学医学部附属病院

【緒言】 術中放射線治療(intraoperative radiation therapy: IORT) は、高エネルギー電 子線等を用い、手術中の露出した病巣に対し、単回大線量の放射線照射を行う治療法であ る。IORT を行う際、病巣より後方に位置する正常組織の被ばく線量を低減する目的で、遮 蔽板を挿入する場合があるが、それらは硬質でサイズの選択肢も限られていることから、 挿入のための切開範囲が大きくならざるを得ない。患者負担の軽減や美容の観点から改善 が望まれている。本研究の目的は、タングステン粉を高密度で充填した機能紙が、遮蔽板 の代替となりうるか、実測と PHITS により検証することである。

【方法】 IORT の専用装置である Mobetron 1000 (IntraOp Medical 社)、平行平板型及び ダイヤモンド線量計を用いて実測を行った。PHITS では、ターゲット、フラットニングフ ィルタ、コリメータ等を再現し、実測で得たビーム特性と合致する入射電子のエネルギー スペクトルを決定した。続いて、タングステン紙を挿入した際の線量特性を評価した。

【結果】 PHITS による計算結果を Fig. 1 に例示する。タングステン紙を挿入した場合、 その射出面の線量が低減する一方で、入射面で後方散乱線による軽度の線量増加が生じる ことが示された。エネルギースペクトルの評価において、タングステン紙からの制動放射 線と考えられる変化が確認された。



【結論】 IORT にタングステン紙を用いるための線量特性に関する課題を、PHITS を用い て明らかとした。

Fig. 1 Examples of the simulated dose distribution without (a) and with tungsten-based functional papers (TFPs) (b). These simulations reproduced the 9 MeV electron beams' behavior from a Mobetron 1000 accelerator in the water-equivalent solid phantom.

PHITS と DLNN を組み合わせた In-situ 多チャンネル放射能濃度深度分布測定器 (AFT-DDS: Depth Distribution Spectrometer)の放射能濃度決定への取り組み

阪間稔^{1,*}, 藤本憲市², 松本 (川口) 絵里佳³, 井上一雅⁴, 福士政広⁴, 今城裕介⁵, 福原隆宏⁵, 松浦貢⁵

¹⁾ 徳島大学大学院医歯薬学研究部,²⁾ 香川大学大学連携 e-Learning 教育支援センター四国,³⁾ 徳島大学大学院保健 科学教育部,⁴⁾ 首都大学東京大学院人間健康科学研究科放射線科学域,⁵⁾ 株式会社 アドフューテック (AFT)

東日本大震災に伴う東京電力 (株) 福島第一原子力発電所でのベント(蒸気排出)操作や水素爆発では,大 気循環による移流・拡散によって、環境中への放射性物質(主に Cs-134, Cs-137)による広範な環境汚染を引 き起こした。現在,日本原子力研究開発機構を始めとする様々な研究機関や大学,民間企業など我が国の英知 を結集して、環境中へ移流・拡散し土壌へ沈着した放射性物質の詳細な動態調査と、その除去又は低減するた めの除染作業(その新規開発も含め)が盛んに講じられている。現在の動態調査では、原子力災害発生直後で 放出された大量の放射性物質が初期として土壌表層への沈着し、その後、時間経過によるウェザリング効果の 土壌種、地形、植生による自然物質循環に伴って、表層から下方へ移行していく複雑系の段階にあることか ら、複数の汚染地域での各土壌における詳細な放射能濃度深度分布調査が必要とされている。また、現場の除 染作業では、上述の複雑系の段階同様に汚染状況が均一でないために、合理的な除染方法の決定が必要とされ ている。そこで、本研究の共同研究者である首都大学東京大学院の福士らとアドフューテック社の開発メン バーによって,近年,このニーズに対応できる可搬型かつ小型の In-situ 多チャンネル放射能濃度深度分布測 定器(AFT-DDS: Advanced Fusion Technology, Co., Ltd. - Depth Distribution Spectrometer)を開発することに 成功した。しかし、この測定装置は現在、肝心の放射能濃度 (Bq/kg) すなわち定量値(土壌深度方向の一定間 隔層に対する放射能濃度値を決定すること)を与える上で困難を伴っている。そこで本研究では、正確な定 量値を与えることができるように、この装置内部で緻密に配置されている多チャンネル検出器(最大 20 個の CsI(Tl) シンチレーション立方体結晶 1×1×1 cm³)の各検出効率(検出特性)を, CAD 記述で描かれた正 確なジオメトリー体系(PHITS インプット形式への記述: SuperMC/MCAM の利用 [1])を組み込んだ上で, PHITS 計算実行することを考えた。そして、その PHITS 計算実行で得られる膨大なデータ(ビックデータ) をもとに,新たに DLNN(Deep Learning Neural Network:人工知能研究から派生する機械学習の一種である 深層学習ニューラルネットワーク)を適用することを検討した。測定対象とする土壌層において、その均一も しくは不均一層を設定し模擬させ、各層から線源の放射線を発生させる。この設定条件下で、各チャンネル検 出器からの応答特性を機械学習させることで、全く新しい検出効率シミュレーションを提案する(図1)。本 発表では,この装置とこれまでの開発研究の状況について概要する。なお,この研究は環境省の平成 28 年度 環境総合推進費(課題番号 1RF-1602)により実施されている。



図1 PHITS と DLNN を組み込んだ In-situ 多チャンネル放射能濃度深度分布測定器の定量値決定までの流れ

References

[1] Y. Wu and FDS Team, CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation., FUSION ENGINEERING AND DESIGN **84**, 1987-1992 (2009).

^{*} Corresponding author, e-mail: minorusakama@tokushima-u.ac.jp

シリコン半導体検出器ボックスの重イオンに対する応答の研究

武山美麗 1.2, 加治大哉 2, 森本幸司 2, 猪股雄一郎 3, 門叶冬樹 1

1山形大学高感度加速器質量分析センター,2理化学研究所仁科加速器研究センター,3山形大

学大学院理工学研究科

理化学研究所で行われている超重元素研究は、入射ビームと標的との核融合反応により 生成された超重核を気体充填型反跳分離装置「GARIS」を用いて入射ビームや副生成粒子 から分離し、焦点面検出器に導き、測定する手法が用いられている。焦点面検出器は飛行 時間測定器とシリコン半導体検出器ボックス (Si-box) からなり、Si-box は1台の位置有感 型半導体検出器 (PSD) とそれを囲む4台の半導体検出器(SSD)で構成される。Si-box で PSD に打ち込まれた超重核のα壊変や自発核分裂(SF)を検出することで核種の崩壊特性 を測定する。我々は、これまでに²⁰⁶Pb(⁴⁸Ca,2n)²⁵²No反応によりSi-box内で生じる²⁵²No(半 減期: 2.3 s, SF分岐比: 26.9%)を用いて、SFに対するSi-box検出器の応答を調べてきた。結 果として、Si-box内の各面で観測されるエネルギーの相関性が、検出器への打込み深さに応 じて変化する様子が得られた。現在、PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)を 用いて、重イオンに対するSi-Boxの検出応答をシミュレーション技法により調べる研究を 進めている。

[m]

α線の飛程

まず PHITS を用いて 5~15 MeV の α線および 100 MeV の¹²⁰Sn (核分裂 片の対称成分を模擬) を Si 中に各々 10⁴個入射させて飛程を求め、原子核 研究分野で幅広く用いられている計 算 コード SRIM (the Stopping and Range of Ions in Matter) で得られた結 果と比較した。図1は、PHITS と SRIM で得られた Si 中の 5~15 MeV の α線 の飛程とその差を示す。α線の飛程は どちらの計算コードでも入射エネル ギーの増加とともに長くなり、PHITS

とSRIMで得られた飛程の差は4%以内で一致した。

図2は、10 MeV のα線に対する Si-Box 中で の飛跡を二次元的に示したものである。Si-box のPSD と4台の SSD で得られたエネルギースペ クトルの比較から得られた 10 MeV のα線に対 する検出効率は 88% であった。また、5~15 MeV のα線の対する検出効率は 91%~86% であり、 検出効率のエネルギー依存性が確認された。

本研究会では、**PHITS** で得られた結果と²⁵²No 実験の結果との比較について発表する。







図 2. PHITS で得られた PSD より飛び出す 10 MeV α線 15 個の飛跡。

PHITS を利用した格納容器内線量率分布評価ツールの検証

稻垣 博光1, 葛谷 敏男2

1中部電力㈱ 原子力安全技術研究所, 2㈱テクノ中部

1. 目的

中部電力 原子力安全技術研究所では、原子力発電所における作業被ばく低減計画を支援 するツールとして、一次冷却水配管内表面に蓄積した放射性腐食生成物(主に Co-60)を線 源とする原子炉格納容器内の放射線環境を計算するコード(RADTUBE と呼称)を開発し ている。RADTUBE では、y線の遮蔽計算に点減衰核積分法に基づいて作成した簡易計算

アルゴリズムを用いており、線源および遮蔽物の形状 として、開発当初は球、円柱、直方体としていたが、 配管のエルボーやレデューサ等を考慮するため、区分 トーラス(部分円環体)、円錐台、三角柱等の特殊形状 (図1)を追加した。RADTUBEの検証は、QADを 用いた単純形状でしか行っていないため、PHITSを利 用して特殊形状を含む条件で計算結果を検証した。



図1 RADTUBE で取扱可能な形状

2. 方法

格納容器内の再循環系配管周りの線量当量率評価を想定した3条件(直管線源、直管線 源+鉛遮蔽およびエルボー管線源)(図2)にて、RADTUBE, QAD(エルボー管線源除く) および PHITS にて、各々配管内の水の有・無について計算を実施した。

3. 結果

直管線源(a)では、QAD と RADTUBE の計算値は同等で PHITS に対して 1.2 倍となった。 これは QAD と RADTUBE がともに無限媒質中のビルデップ 係数を用いていることに起因す る。鉛遮蔽がある場合(b)においても、RADTUBE では(a)と同様の傾向であったが、QAD では PHITS の 0.9 倍と低くなった。これは QAD の多重層のビルデップ 係数の処理によるも ので、鉛の代わりに鉄で評価した場合には PHITS の 2 倍と高くなる。特殊形状のエルボー 線源(c)においても、RADTUBE は、4 つの評価点ともに PHITS の 1.1~1.2 倍となった。 なお、水の有/無の比率は、(a)(b)(c)のいずれにおいてもコード間による違いはなかった。 これらより、RADTUBE の計算結果は、特殊形状(エルボー)も含めて妥当と考えられる。



図2 計算体系(それぞれ配管内の水の有・無の場合)

J-PARC/MLF ミュオン回転標的における残留放射能評価

的場史朗,牧村俊助,河村成肇 高エネルギー加速器研究機構

J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)では、3 GeV 陽子シンクロトロンから中性子水銀 標的までのビームライン上にミュオン生成用の回転黒鉛標的が設置されている。ミュオン 標的の後方には、散乱ビームや二次粒子を受け止めビーム成形を行うためのスクレーパが 設置されている。スクレーパにはビーム散乱成分を測定するためのハローモニターが設置 されているが、このハローモニターのカバーがミュオン生成回転標的からの輻射熱によっ て加熱され、スクレーパ全面に設置された熱電対によるスクレーパ本体の温度が適切に計 測されていない問題があった。(ビームパワー300 kW で設計値 35 ℃、実測値 75 ℃)。そ こで、2015 年夏季メンテナンス期間に、スクレーパの交換作業を行った。交換作業はキャ スクを用いて遠隔操作によって行われ、使用済みスクレーパの残留放射線量は表面より 70mm 離れた位置で 1.5 Sv/h であった。交換後の新スクレーパにおけるビームパワー500 kW の運転では、熱電対による実測値は 42℃と設計値と近く、適切に温度が計測されてい ることを確認された。現在は 200 kW による利用運転を継続しており、2014 年に導入した 回転標的と共に順調に稼働している。

この交換作業のために、スクレーパの残留放射能について PHITS を用いて評価し、キャ スクに格納した状態での遮蔽計算を行った。表は、PHITS による生成放射能と DCHAIN-SP による評価である。この放射能を線源とした遮蔽計算について図に示した。キャスク表面 での線量率は 0.67 mSv であり、安全な作業が可能であると判定した。

講演では、上記の他に SiC 複合材料を用いた新しいミュオン生成標的の開発や低エネル ギーミュオン衝突実験等の PHITS 活用事例を紹介する。

表:ビーム停止から 14 日後におけるスクレーパ の誘導放射能

no.	nuclide	[Bq]	[%]	γ線E	半減期
1	Co 58	3.85E+12	19.25	811keV	71d
2	Co 60	3.13E+12	15.67	1332keV 1173keV	5.3y
3	H 3	2.36E+12	11.81	beta5.69 keV	12y
4	Co 57	2.26E+12	11.29	122keV	272d
5	Ni 63	2.11E+12	10.54	beta17keV	100y
6	Fe 55	1.31E+12	6.56	5.9keV	2.7y
7	Mn 54	1.22E+12	6.08	835keV	312d
8	Cr 51	7.70E+11	3.85	320keV	28d
9	V 49	6.08E+11	3.04	4.5keV	330d
10	Co 56	5.87E+11	2.94	847keV 1238keV	77d



トカマク型核融合実験装置における PHITS を用いた計算の現状

助川篤彦¹,林孝夫¹,奥野功一²,田中聖一朗² ¹量子科学技術研究開発機構,²安藤ハザマ

核融合分野の核解析で以前から使用している MCNP に比べ、ソースプログラムの入手の しやすさ、容易にグラフィック出力が得られる PHITS を 2006 年頃からトカマク型核融合 実験装置の核解析に使用している。

PHITS使用に際し、ドーナツ形状のトーラス中性子体積線源を開発・整備し利用してき たが、並列化への対応等に伴いソースプラグラムの大幅な変更が行われた PHITS Ver2.50 以降について対応できていなかった。今回新たに、PHITS Ver.2.82 にトーラス中性子体 積線源の整備を行った結果、従来どおりの核解析が可能となるとともに、最新の PHITS に 対応することで、これまでの計算では得られなかった誤差の分布情報や、計算の効率化に 向けた並列計算の知見が得られるようになり、これまで実施してきた解析結果の再評価を 行っている。

本発表では、トーラス中性子体積線源による MCNP との結果比較、EGS 実装後の PHITS による試解析結果、並列計算に関する結果等、トカマク型核融合実験装置における PHITS を用いた計算の現状について述べる。

PHITS モンテカルロコードによる HD120-MLC のモデリング

永石直喜¹, 荒木不次男¹, 大野剛², 田村健太郎¹, 小松和樹¹, 富永弘史³

1熊本大学大学院保健学教育部,

²熊本大学大学院生命科学研究部,

3熊医療法人社団人優会熊本放射線外科

[目的]

強度変調回転治療(VMAT)治療計画の線量検証を目的に、PHITS(Particle and Heavy Ion Transport code system) モンテカルロコードを用いて、VARIAN 社製の High-definition multileaf collimator (HD120-MLC)のモデリングを行った.

[方法]

最初に、モンテカルロコード EGSnrc/BEAMnrc 用いて二次コリメータ直下に Phase space file (PSF)を作成した. 次に、PHITS で HD 120-MLC のモデリングを行い、PSF を用いて HD 120-MLC の線量特性 (transmission(leaf end, inter & intra-leaf transmission), tongue and groove (T&G) を計算し、モデリングの精度を検証した. 線量特性は EGSnrc/DOSXYZznrc による 計算及びフィルム測定と比較した.

[結果]

照射野 10×10 cm²の最大線量に対して, leaf end の最大透過線量は, PHITS で 20.8%, EGSnrc で 21.0%, 測定で 21.8% であった. inter & intra-leaf の平均透過線量は PHITS で 1.5%, EGSnrc で 1.2%, 実測で 1.1% であった. T&G 効果は PHITS が EGSnrc と測定より 5% 増加した.

[結論]

PHIT による線量特性は EGSnrc 及び測定したものと良く一致し, HD120-MLC のモデリングの精度を検証できた.

PHITS を用いた ICRP 参照動物モデルの再現

林 剛平1

1東北大学医学系研究科

背景.

東京電力福島第一原子力発電所(FNPP)事故により放出された放射性核種の生物影響を議 論する際に、放射能濃度から吸収線量への歓さんが必要である。哺乳動物では、ICRPの publication108 (pub108)によってラット、シカのモデルが公開されている。このモデルを PHITS を用いて再現し、検証することにより PHITS を使って胎児モデルの作成や臓器特 異的に蓄積する核種に依る被ばくを計算することが可能になると考えた。

<u> 方法.</u>

FNPP 事故によって放出された核種で被ばくを議論する際に重要な核種は、短半減期核 種で¹³¹I,¹³²Te-¹³²I, 長半減期核種で¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs, である。これらの核種に関し、外部線 源は、地表から 0.5 g cm-3 に一様に分布させ、半径 5m でミラー条件として計算した。内部 線源は、体内均一分布とした。ファントムの形状は、pub108 に記載されている楕円体とし、 密度は 1 とした。

結果.

被ばくにおける換算係数は、どの核種に於いても、ラットの方が良く一致した。内部被 ばくに関しては、ラット、シカともに、およそ 9 割一致した。外部被ばくに関しては、ラ ットは9割程度一致したが、シカに関しては8割を下回るものがあった。



				ICKI 106			ICKI 106
External	¹³⁴ Cs	5.20*10-5	6.1*10 ⁻⁵	0.85	$1.12*10^{-4}$	1.2*10 ⁻⁴	0.94
[(µGy/day) per	¹³⁷ Cs	1.93*10 ⁻⁵	$2.2*10^{-5}$	0.88	4.19*10 ⁻⁵	$4.5*10^{-5}$	0.93
(Bq/m^2)]	^{131}I	$1.18*10^{-5}$	$1.5*10^{-5}$	0.79	2.73*10-5	3.1*10 ⁻⁵	0.88
	^{132}I	7.35*10-5	8.9*10 ⁻⁵	0.83	1.56*10-4	$1.8*10^{-4}$	0.87
	132Te-132I	$7.97*10^{-5}$	$1.0*10^{-4}$	0.80	$1.69*10^{-4}$	$1.8*10^{-4}$	0.94
Internal	¹³⁴ Cs	1.37*10 ⁻²	$1.5*10^{-2}$	0.91	3.84*10 ⁻³	$4.1*10^{-3}$	0.94
[(µGy/day) per	¹³⁷ Cs	7.55*10 ⁻³	8.2*10-3	0.92	3.81*10 ⁻³	$4.1*10^{-3}$	0.93
(Bq/kg)]	^{131}I	5.50*10 ⁻³	$6.0*10^{-3}$	0.92	$2.95*10^{-3}$	3.1*10-3	0.95
	^{132}I	2.35*10-2	$2.5*10^{-2}$	0.94	9.25*10 ⁻³	9.4*10 ⁻³	0.98
	¹³² Te- ¹³² I	2.61×10^{-2}	$3.0*10^{-2}$	0.87	1.03×10^{-2}	$1.1*10^{-2}$	0.94

PHITS の放射線治療時の線量評価への応用技術の開発

古場裕介,松本真之介

量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所

現在、放射線治療はがん治療の有用な方法の1つとして広く利用されている。放射線治療の治療計画ではCT画像を用いた線量分布計算が行われ、がん組織への線量集中性や正常 組織への付与線量などを評価している。しかしながら、迅速な線量分布計算を行うため照 射時に発生する2次的な中性子などは考慮されていない。近年では光子線治療において高 エネルギー化が進み、光核反応から生じる中性子の影響が懸念されるようになってきてい る。陽子線治療や重粒子線治療においても高エネルギー荷電粒子とコリメータや体内組織 との核破砕反応から多量に中性子が生じることが知られているが、中性子被ばく線量の評 価は必ずしも十分に行われてはいない。核破砕などで生じる中性子を評価するためには PHITSのようなモンテカルロ計算を行うことが有用である。

放射線治療における CT 画像や治療計画情報、線量分布情報などは DICOM と呼ばれる 通信プロトコルに定義されたデータとして取り扱われている。本研究では PHITS を用いて 粒子線治療の線量評価を行うためのシステムの一部として、DICOM 形式の CT 画像

(CT-Image)、治療計画(RT-Plan)から Voxel ファントムの構築や照射機器のジオメトリ を PHITS 形式に容易に変換できるツールの開発を目指している。さらに線量分布の計算結 果を DICOM 化(RT-Dose)し、治療計画支援装置等にて取り込むことが可能となるツー ルの開発を行っている。現状では CT-Image と RT-Dose を取り扱えるツールとして DICOM2PHITS、PHITS2DICOM の開発を行った。図1は開発したツールを用いて頭部 陽子線治療を模擬し、PHITS によって線量分布を計算した例である。また、開発したツー ルを容易に利用するために GUI アプリケーションの開発も行った。(図2)これら開発した ツールは広く利用してもらうため PHITS に関連するツールの1部としてパッケージ頒布を 行っている。今後は治療計画(RT-Plan)から照射機器ジオメトリを構築するツールの開発 を行う予定である。



謝辞:本研究を行うにあたり日本原子力研究開発機構の古田琢哉氏、橋本慎太郎氏に協力いただきました。 感謝申し上げます。

図 1. 頭部への陽子ビーム照射を行った際の線量分布の 例 (a) 陽子線, (b)コリメータから発生した中性子, (c) 体内から発生した中性子



図 2. DICOM2PHITS GUI のウィンドウ画面

PHITS を利用した CT 被ばく線量評価技術 WAZA-ARIv2

松本真之介1,古場裕介1

1量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所

CT 撮影は、疾患の発見や治療の方策の決定等において有益な診断法である一方で、撮影 に伴う放射線被ばく線量は他の放射線診断と比較して高いことが知られている。そのため、 被ばく線量の実態の把握に加えて、特に若年層の患者に対する過剰な被ばくを防止するこ とが課題となっている。加えて、我が国では、単位人口当たりの CT 装置の台数は世界的に 最も多く、撮影の件数もトップクラスと推測されている。以上の背景により、欧米にて開 発された CT 撮影によって生じる患者の被ばく線量を評価するためのシステムの ImPACT, CT - Expo などが本邦でも用いられている。一方、量子科学技術研究開発機構放射線医学総 合研究所では、大分県立看護科学大学及び原子力機構との共同研究において、CT 撮影によ る患者被ばく線量評価システム WAZA-ARI の機能拡張版である WAZA-ARI v2 を開発し、 平成 27 年 1 月より本格的な運用を開始した(図1)。

WAZA-ARIv2 は汎用の粒子・重イオン輸送のモンテカルロ計算コード PHITS にて日本 人の標準体型を有するボクセルファントム及び CT 装置から放出される X 線特性をモデル 化した線源を用い、CT 撮影時に受ける臓器被ばく線量計算データベースを構築し臓器線量 を計算している(図2)。

本発表では、WAZA-ARIv2の線量計算システムの特徴及び将来の運用計画について報告する。



図 1. WAZA-ARIv2 のユーザインタフェース



図2. PHITS を用いたモンテカルロ 計算の一例

Weight Window パラメータ自動生成機能の開発と、その改良案

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は、事業者が申請時に実施する安全解析につい て、その妥当性を評価するため、様々な技術の導入と改善に向けた安全研究を継続的に実 施している。核燃料輸送物の安全規制に係る分野においては、各種申請の確認等に用いる 解析コードの1つとして、PHITSの核燃料輸送物遮蔽解析への適用のためのコード改良を 行い、規制に用いるツールとしての整備を進めている。

本研究では、遮蔽解析における深層透過を効率的に計算する上で必須となる分散低減機能の1つである[Weight Window]セクションで設定する Weight Window 下限値パラメータ

を自動的に生成する[**T**-WWG]タリーを 開発し、それによる作業効率の比較や使 用条件等の検討を行った。また、 [**T**-WWG]を実務的に使用する上で、着目 する評価位置への寄与が小さい領域への 粒子輸送を抑制することで、計算精度を 維持したまま計算時間を短縮することが 有効と考えられる。この改良案について、 その効果の予測検証を行った。

図1に示したモンテカルロ粒子分布図 のうち、(A)はアナログ・モンテカルロ計 算を行った結果であり、計算体系の端ま で中性子が到達できていない。(B)は [T-WWG]で生成した Weight Window 下 限値パラメータを設定して計算を行った 結果であり、計算体系全域に渡ってほぼ 均一な粒子数分布となっている。(C)は [T-WWG]の使用に加えて、現行機能を活 用して計算体系内に粒子輸送の優先領域 や抑制領域を段階的に設定することで、 上記改良案を簡易的に再現した試計算の 結果であり、優先領域である最小楕円の 内側領域では多数の粒子がほぼ均一に分 布して高精度の解が得られているのに対 し、抑制領域である最大楕円の外側領域 では到達する粒子数が抑えられ、計算時 間の短縮に対する寄与が確認された。

以上より、深層透過の効率的な計算に おいて[**T**-WWG]は有効に機能し、その改 良案の試計算では計算速度を数倍に改善 できるとの結果を得た。



図1. 鉄体系の中心部から 10[keV]の中性 子を等方発生させた際のモンテカルロ粒 子分布図 (history: 1.0×10⁵ neutrons)

さまざまな放射線治療場における PHITS を用いた線量計算

高田健太1,熊田博明1,榮武二1

1筑波大学医学医療系

放射線治療は、がんの治療法のひとつとして世界中で広く実施されている. 放射線治療 に用いられている代表的なビームは、X線、陽子、重粒子、中性子など多様であり、線量計 算についても、放射線ごとに多様化した線量計算アルゴリズムを使用して評価がなされて いる.

筑波大学では、すでに X 線および陽子線による放射線治療が行われており、中性子を用いた治療法であるホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy: BNCT) についても実用化を目指した開発がなされている段階である.

放射線治療において線量計算を行う機会は、おもに 2 つある. ひとつは、患者の医療画 像データを基に、治療のための照射シミュレーションを行う作業、いわゆる治療計画を立 案する際であり、もうひとつは、放射線治療に関する研究を行うための研究ツールとして の活用である. 前者は、数多くの照射シミュレーションを立案し、そのなかから臨床的に 最適な照射法を決定するため、線量計算には迅速性が求められる. そのため、線量計算ア ルゴリズムには多くの近似が取り入れられており、高速な線量計算を可能としている. 一 方後者の場合には、より高精度な線量計算手法が求められることになり、Monte Carlo 法 など高精度な線量計算アルゴリズムが用いられることが多い. 一般に、線量計算精度と計 算に要する時間との間には相反する関係があるため、両者をひとつの装置で実現すること は難しい.

そこで我々は、治療計画の立案と研究用ツールとしての両方の役割を併せ持つ新しい線 量計算システムを構築することを視野に入れ、BNCT 用の治療計画システムを開発してい る.また、本装置を現在放射線治療に用いられているさまざまな放射線に対して適応でき るよう、基礎的な検証を実施している.すなわち、筑波大学の有する放射線治療装置であ るX線および陽子線の治療装置のビーム輸送系について PHITS を用いて構築し、その輸送 体系で得られた線量計算値を実測値と比較するといった検証を実施している.

本研究では,我々がこれまでに得たさまざまな線量計算結果を示すとともに,本システ ムの将来的な活用方法についても紹介する. サイバーナイフの遮へい設計について

小川喜弘1,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

<u>はじめに</u>

6 MeV 電子線により発生するエックス線を用いたサイバ ーナイフは、ガントリー型リニアックとは異なり照射方法が 特殊であるため、これまでの遮へい計算申請では安全側を考 慮して、過剰な遮へいが施されていた。今回、「放射線施設 のしゃへい計算実務マニュアル 2015(公益財団法人 原子 力安全技術センター発行)」に記載されている簡易法ではな く、PHITS を用いた遮へい計算・放射線量評価システムを構 築したので、その概要について報告する。

<u>遮へい計算・放射線量評価システム</u>

システムは、プレ・ソルバー・ポストと呼ぶ3つのパート から構成されている。ここで、プレはソルバーである PHITS への入力ファイルを CAD 情報から構築するパートであり、ポ ストは PHIS からの多くの出力情報を処理し、可視化するパ ートである。

プレの主要な機能は,

- 3次元 CAD で作成された情報(図1)を PHITS の形状や 物質入力情報へ変換
- エックス線エネルギースペクトル、いろいろなコリメー タによる照射位置(ノード)、照射時間の設定(図2) など

ポストの主要な機能は,

- ターゲットから発生するエック ス線エネルギースペクトルの編 集
- 深部量百分率(PDD)分布の解析
- 遮へい計算結果の解析
- 漏えい線量分布の可視化 (CAD や PDF ファイルへの出力) (図3) など

である。





図1



図2

図 3

Preliminary attempt to re-estimate the concentration of radioactive iodine-132 in the air

Ichiro Yamaguchi ¹, Alex Malins ²

¹ NIPH, ² JAEA

Background

Data cleaning is necessary to reconstruct radiation doses accurately at the time of the nuclear accident. By observing data we found irrational results such as an unbalanced activity ratio between ¹³²Te and its short-lived daughter ¹³²I (Table 1). This was caused by incorrect decay correction, as "ingrowth" was not considered. We also observed missing ¹³²Te peaks at low energy in gamma spectra despite clear ¹³²I peaks at higher energy (Fig. 1).

測定試料採取点*		採取日時	放射能濃度(Bq/m ³)					
			¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³² I	¹³² Te	4
【3-1】(33km北西)1回目		3月25日 12:28~12:52	38	1.6	1.9	110	1.6	不検出
【3-1】(33km北西)2回目	· 相馬郡飯舘村長泥	3月25日 13:28~13:50	440	8.1	10	680	14	^{99m} Tc : 5.2
【3-1】(33km北西)3回目		3月25日 14:28~14:50	330	6.2	7.7	410	5.4	^{99m} Tc: 3.7
【3-1】(33km北西)4回目		3月25日 15:28~15:49	290	9.6	14	380	6.3	^{99m} Tc: 3.7
Aコース		3月19日 13:16~13:36	25	6.1	7.0	29	11	^{99m} Tc: 1.6
Dコース		3月19日 13:41~13:58	1.2	不検出	不検出	14	不検出	不検出
Cコース		3月19日 13:54~14:14	1.7	不検出	不検出	15	不検出	不検出
福島大学		3月18日 12:50~13:00	不検出	不検出	不検出	11,000	不検出	不検出

Table 1. Radioactivity concentrations in air measured in 2011 in Fukushima.

Purpose

To reconstruct concentration of radioactive 132 I in the air.

Methods

Detector responses were calculated using PHITS Monte Carlo.

Results

Data will be shown at the meeting.

Discussion

There is a discrepancy between the measured and calculated spectra. We need to consider the effect of



Fig. 1. HPGe spectrum of an air sampler filter from Fukushima city measured on 19 Mar, 2011 15:51-16:08. Air sampled 18 Mar, 2011 12:50-13:00, sample volume: 1m³, filter: charcoal.

background radiations for the estimation of the ¹³²I air concentration, even if the detector and sample were inside a shield. Re-analysis of the spectrum would be able to improve the quality of dose reconstruction for the early stages of the nuclear accident. Acknowledgement: We wish to thank Dr. Kazumasa Shimada for his advice on analysis of the monitoring data. This work was supported by the extraordinary committee of Japan Health Physics Society

ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応によるガンマ線測定 永田 寛貴¹,小汐 由介¹,福田 大輔¹,中家 剛², Roger Wendell²,芦田 洋輔², Akira Konaka^{3,6}, Corina Nantais⁴,鈴木 州⁵,竹内 康雄⁵,矢野 孝臣⁵ ¹岡山大学,²京都大学,³RCNP,⁴Toronto,⁵神戸大学,⁶TRIUMF

T2K 実験では、ニュートリノと酸素原子核 との中性カレント準弾性散乱反応の反応断 面積が測定されている。今後の測定で統計誤 差を減少させることができるが、系統誤差を 減少させることはできない。この系統誤差の 最も大きい原因は、二次ガンマ線の放出であ る。二次ガンマ線は、ニュートリノと水中の 酸素原子核との反応によって弾き飛ばされ る核子が、ほかの酸素原子核と反応すること





で発生する。T2K 実験のSK シミュレーションの結果と実際の観測データを比較すると、 ズレが生じている部分が存在している。この部分が二次ガンマ線の寄与によるものである と考えられている。つまり、この二次ガンマ線を精度よく測定できれば、シミュレーショ ンを修正し、系統誤差を減らすことができる。この二次ガンマ線の精密測定にむけて、我々 は大阪大学核物理研究センターのN0コースを用いた実験を行っている。今回の報告では、 実験に使用したGe半導体検出器の検出効率を実測とPHITSコード(ver2.82)で比較した結 果を報告する。また、今後使用する予定のあるCsI(Tl)検出器の応答を実測とPHITSコー ドの結果で比較も行ったので報告をする。



図 3: Ge 半導体検出器の検出効率の 実験値(赤)と PHITS(青)

将来有人惑星探査に向けた有人宇宙船内における

最適な遮蔽材料と遮蔽厚の検討

永松愛子¹, <u>島田健²</u>, 佐藤達彦³, 武田和雄⁴
 ¹宇宙航空研究開発機構,
 ²株式会社エイ・イー・エス,
 ³日本原子力研究開発機構,
 ⁴高度情報科学技術研究機構

地磁気や太陽活動の変動、飛行する宇宙機の軌道高度によって、船内の宇宙放射線環境 は大きく変化する。国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station)が飛行する低 軌道高度(LEO: Low Earth Orbit)被ばく線量に起因する一次宇宙線源は、銀河宇宙線(GCR: Galactic Cosmic Ray)・地球磁場に捕捉された陽子線(TP: Trapped Proton)・太陽粒子線に よるが、地磁気圏外(BLEO: Beyond Low Earth Orbit)では地球磁場の影響を受けないため、 銀河宇宙線が支配的となる。

有人宇宙船内では、上述した一次宇宙線と宇宙船体や宇宙船内に搭載された機器との相 互作用で発生する二次粒子線によって継続的な被ばく影響を受ける。こうした複雑な放射 線環境において、宇宙放射線被ばくによるリスクを最小限に抑えるためには、有人宇宙船 の適切な遮蔽設計が必須であり、将来の有人惑星探査を行う上での必須の技術である。

我々は、人体への宇宙放射線被ばくを抑えるためのパッシブシールド検討の一環として、 ISSの日本実験棟「きぼう」と同等の平均遮蔽厚を持たせた仮想有人宇宙船内を構築し、最 も効果的な遮蔽材料と遮蔽厚を、PHITS シミュレーションを用いて評価した。

仮想有人宇宙船内を LEO および BLEO 計算環境に置き、厚さを変えた種々の遮蔽材量 を船壁に付加し、中心の水球内(直径 30cm φ)に付与される線量(吸収線量、線量当量、 実効線量当量)を算出した。本計算では LEO と BLEO どちらにおいても、水素を多く含 むポリエチレン(厚さおよそ 15 g/cm²)が最も遮蔽効果が高く、LEO にて最大約 30%、BLEO で約 22%の線量当量への低減効果があった。

シミュレーション結果の妥当性検証のため、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所重粒子加速器 HIMAC にて、「きぼう」船壁を模擬したアルミニウムブロックとその後ろに設置したポリエチレン遮蔽材に、宇宙放射線の構成粒子である 230MeV 陽子を照射し、PHITS シミュレーション結果を実験的にも評価した。

A. Nagamatsu: Preliminary Dose Estimation beyond LEO, ISS-Exploration Technical Interchange Meeting#3: Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface: Cis-lunar Vehicle Requirements (i-SMT Rad.),モスクワ (2016.4)
 島田 健、永松愛子、佐藤達彦、明石小百合、西 啓輔、武田和雄: 有人宇宙船における最適な遮蔽材料 と遮蔽厚 の検討(Ⅱ)、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京(2016.3)

Ir-192 密封小線源ケロイド治療における吸収線量の評価

太田 真緒^{1,4}, 中尾 徳晶², 栗林 茂彦³, 宮下 次廣³, 茂松 直之⁴, 林崎 規託⁵ ¹東京工業大学 大学院理工学研究科

2清水建設 技術研究所

3日本医科大学付属病院 放射線治療科

4慶應義塾大学 医学部 放射線科学教室

5東京工業大学 科学技術創成研究院

ケロイドとは、外傷や手術等の傷が治る過程において、炎症が持続することにより線維 形成が終息せず皮膚の線維成分が過剰に増殖する病変であり、良性疾患ではあるものの、 醜形、疼痛、痒みを伴うことから治療対象となっている。その治療法のひとつとして外科 的切除の後に再発防止を目的とした術後放射線治療が行われているが、電子線照射の場合、 複雑な形状や広範に及ぶ手術創に対して均一な線量を照射することが難しく、辺縁線量が 不足する可能性がある。

そこで、患部に密着させることで線量集中性に優れ、多様な形状の患部に順応して治療 できるという利点をもつ、Ir-192 密封小線源を用いた表在照射の研究に取り組んでいる。 これまでに、線量評価用人体ファントムとして MIRD ファントムを用いた照射体系におい て、Ir-192 密封小線源治療における患部の吸収線量と、照射に伴う各臓器への被ばくを、 放射線輸送計算コード PHITS により評価した。そして、PHITS によるシミュレーション から計算された吸収線量の精度を確認するため、組織等価ファントムと蛍光ガラス線量計 を用いた実験体系を準備し、実際に Ir-192 密封小線源からの吸収線量を測定することで、 計算値と実測値の比較検証を行った。

中性子・X線複合イメージング研究のための PHITS の利用

原かおる¹,佐藤博隆¹,加美山隆¹,篠原武尚² ¹北海道大学大学院工学研究院,²日本原子力研究開発機構

中性子と X 線の物質に対する透過能力の違いを相補的に利用した複合イメージングを行う ため、北海道大学・45 MeV 電子線形加速器施設に複合線源システムを構築した。図1に示 すように複合線源は主に 2 つの生成標的と、黒鉛反射材、ポリエチレン減速材、ホウ酸レ ジン・鉛遮蔽材で構成されている。それらを載せたステージを遠隔操作で昇降させること によって、どちらかの生成標的を電子ビームライン上に配置し、中性子または X 線の生成 を選ぶことが出来る。さらに、中性子・X 線両用検出器システムを整備し、複合線源と併用 することで、同一ビームライン上で試料と検出器の配置を変えることなく中性子・X 線それ ぞれの透過イメージを取得することが可能となった。本発表では複合イメージングの測定 手法と共に PHITS を利用したシミュレーション計算結果を報告する。複合線源から得られ る中性子・X 線ビームのエネルギー分布や、色々な試料に対する透過率を計算した。



図1:中性子・X線複合線源システム

*本研究は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業、光・量子融合連携研究開発プログラムにおいて、国立大学法人北海道大学が実施した「加速器を利用した中性子分光イメージングとX線の複合利用技術の高度化」の成果である。

学部教育での環境放射線測定の実験的研究における PHITS 利活用事例

水野義之

京都女子大学現代社会学部

京都女子大学現代社会学部の学部教育において私は、「現代社会は学びのフィールド」を モットーとして基礎教育と卒論指導を行ってきた。3.11 以降は卒論テーマを原子力災害へ とゆるやかに舵取りし、例えば放射線環境と宇宙線[1,2]、家屋環境と外部被曝 [3,4]、食品 の放射能測定[5,6]など、学生に身近な素材に潜む環境放射線の測定実験をテーマとして受 け入れ、卒論指導を行った。PHITS の利活用は、その2年目、3年目の研究[2,4,6]を歴代 先輩の成果[1,3,5]を踏まえて精緻化し、あるいは実証性を高める段階で、ニーズが発生した。

例を挙げる。まず文献[1]では、宇宙線を可視化したいという学生の希望を叶えるため、 単なる可視化でなく地上付近で起こりうるμ粒子で誘起した核反応(深非弾性散乱)で発 生したπ中間子を霧箱で記録するという世界初の実験を行い、トリガー回路系を工夫する ことで目的イベントの映像記録に成功した。そこで2年目は、この確認のため例えば地上 付近の2次宇宙線γ線誘起の電磁的粒子多重発生と区別するために、PHITS を利用した[2]。

文献[3]では、外部被曝の遮蔽の一つとして、鉄成分が 50%近いリモナイトを地表に散布 することで、遠方 γ 線の斜め入射(有効厚増加)による遮蔽効果の増幅を測定したり、無 限平面の線源から来る γ 線線量率の高さ依存性やコンクリート遮蔽効果の測定等を行った。 文献[4]では無限平面の線源から飛来する γ 線のスカイシャイン込みの線量率における、四 周コンクリート遮蔽効果の高さ依存性の実験データを、PHITS を使うことで理解を試みた。

文献[5]では、大阪大学核物理研究センターの Ge 半導体 y 線検出器を使って、放射能濃 度測定済みのお米サンプル(複数)を再測定し、相対比を比較した。ただしお米サンプル 容器が大きく、検出効率が不明で、Bq 濃度測定に至らなかった。そこで文献[6]では、天然 y 線放射核種 La+Lu を使い、大型食品サンプルの検出効率(有効立体角)を実験で測定 しつつ Bq 濃度測定まで行い、福島での測定結果ともよい一致を確認した。この測定可能性 をお米以外の食品にも拡張し、例えば不定形の大型食品サンプルでも Bq 濃度測定可能な方 法は、PHITS を使って実現可能である。これは今年度(2016)の学生の研究課題である。

参考資料

- [1] 桂真理「拡散型霧箱と可変トリガーを活用した宇宙線 µ 粒子の深非弾性散乱観測に関する研究」、京都 女子大学卒業論文、2013年1月.
- [2] 中野千春「霧箱による宇宙線 μ 粒子・深非弾性散乱の観測改善とシミュレーションの研究」、京都女子大学卒業 論文、2015年1月.
- [3] 上坂りさ「原発災害後の長期汚染地域における家屋環境での空間線量率の低減方策に関する研究」、京都女子大学卒業論文、2014年1月.
- [4] 段塚祐子「原発事故後・現存被曝状況の屋内環境における外部被曝低減方法の"PHITS"による調査研究」、京都女子大学卒業論文、2016年1月.
- [5] 木下美咲「食品の調理・加工による放射性核種除去に関する研究」、京都女子大学卒業論文、2015年1月.
- [6] 植田晴香「Ge 半導体 y 線検出器を用いた大型食品サンプルの放射能濃度推定における測定精度改善に関す る研究」、京都女子大学卒業論文、2016年1月.

可搬型加速器中性子源ターゲット設計のための中性子及びγ線評価

松嶋大輔¹,串間祐介¹,羽倉尚人¹,小林知洋²,大竹淑恵²

1東京都市大学 放射線計測研究室

2国立研究開発法人 理化学研究所 光量子工学研究領域 中性子ビーム技術開発チーム

理化学研究所において稼働中の理研小型中性子源システム RANS[1]をより小型化し、産業利用とインフラ構造物の非破壊測定を主な目的とする RANS2 プロジェクトが 2015 年度からスタートしている。

RANS2 は加速器を RFQ のみとし、エネルギーを 2.49 MeV に抑えることにより加速器重量、遮蔽体重量を抑制

する。一方、ターゲットには中性子発生閾エネルギ ーのより小さいリチウムを用いることとした。 RANS2を構築するにあたり、事前にターゲット周 辺における中性子発生とガンマ線発生のシミュレ ーションを PHITS で行い、実際のターゲット,遮 蔽の厚さを決定する指針とする。

RANS	RANS2	
Proton	Proton	
7 MeV	2.49 MeV	
100 μA	100 μA	
9Be(p, n)9Be	7Li(p, n)7Be	
RFQ + DTL	RFQ	
5 t	3 t	
20 t	< 0.7 t	
15 m	< 5 m	
	RANS Proton 7 MeV 100 μ A 9Be(p, n)9Be RFQ + DTL 5 t 20 t 15 m	

Hawkesworth[2]によれば、十分な厚さを持つターゲット を想定した場合、RANSの条件である7 MeV 陽子によ

Table1: RANS と RANS 2 の諸元比較

る ${}^{9}Be(p,n){}^{9}B$ 反応の中性子収率は約 $10^{10} \mu C^{-1}$ である。RANS2 で想定している 2.49MeV 陽子による ${}^{7}Li(p,n){}^{7}Be$ 反応の中性子収率は約 $10^{9} \mu C^{-1}$ と一桁小さいことから、中性子束が測定に十分な量か検討する必要がある。

PHITS を用いてターゲットを擬似的に作成し、Li ターゲットに 2.49MeV の陽子線を照射する。そこから発 生する中性子量とガンマ線量から評価を行う。計算を行うに当たり、デフォルトで採用されているモデルでは 用いる陽子線のエネルギーが低いために適切に中性子が発生しないことが分かった。そこで、MCNP に付随し ている ENDF/B-VII.1 収録の陽子核反応断面積「ENDF70prot」を PHITS に実装することにより計算を行った。

Figure 1 は、2.49 MeV 陽子が 80 µm 厚の Li ターゲットに衝 突した際に放出される中性子の前方 1m 位置におけるエネ ルギー分布を PHITS コード(Ver2.82)により計算した結果で ある。モデレータ無しの場合、中性子の最大エネルギーは約 700 keV、平均エネルギーは約 600 keV となる。RANS2 で予定されている定格電流(100µA)を考慮すると前方 1 m 位 置における全中性子束は 1.65×10^5 cm⁻²s⁻¹となり、高速中性 子イメージングに関しては十分に実行可能な量であると判 断される。

研究会では、進捗状況と今後の方針について述べていく 予定である。



Figure 1: Energy distribution of neutrons formed by 2.49MeV proton with Lithium target at a distance of 1 m calculated using PHITS code.

【参考文献】

- Y.Otake (partial auther), M. Uesaka and H. Kobayashi: Compact neutron source. In A.W.Chao, W.Chou (Eds.) Reviews of Accelerator-Science and Technology, New Jersey: World Scientific, 8 (2016), 181.
- [2] M.R. Hawkesworth, Atomic Energy Review 15, 169-220(1977)

3He 比例計数管を用いた環境中性子フラックスの測定 帝釋稜介¹,身内賢太朗¹,岸本祐二²,関谷洋之³,鈴木優飛⁴,菊池崇矩⁴, 田中雅士⁴,寄田浩平⁴,他中性子測定コンソーシアム ¹神戸大理,2KEK,³東大宇宙線研,⁴早大理工

私は暗黒物質探索実験グループ NEWAGE に所属して いる。NEWAGE グループの装置概念図を図1に示す。 この実験では、バックグラウンドとなる物質の一つに 中性子がある。本研究では、3He比例計数管を用いて、 地上および神岡地下における環境中性子フラックスを 測定した。用いた 3He 比例計数管を図 2 に、取得され るデータを図3に示す。測定データから中性子フラッ クスを得るためには、3He に対する中性子の反応断面 積のエネルギー依存および遮蔽体による中性子の熱化 を出来るだけ正確に再現する必要がある。ただ、低エ ネルギー側(meV オーダー)での中性子の振る舞いを再 現するのは非常に困難であるのが現実である。そのた め、今回は粒子シュミレーションソフトである Geant4とPHITSの2種類のソフトを用いて解析を行 い、結果を比較することから、系統誤差を見積ろうと 考えた。この結果について報告する。



図1

暗黒物質探索実験 NEWAGE で用いてい る検出器の概念図。3次元飛跡を検出出来 るガス TPC となっており、暗黒物質とタ ーゲット原子核との弾性散乱事象を捉え る。中性子は暗黒物質同様、原子核と弾 性散乱するため、バックグラウンドとな り得る。





図 2 左が 3He 比例計数管。図 2 右がポリ エチシールド。装置には 3He が 10 気圧 で封入されている。装置の大きさは直径 5.17cm、長さ 38cm となっている。



地上の環境中性子測定データである。横軸に ADC 値、 縦軸に event 数をとっている。右のピークは 764keV、 左のピークは回路から生じるノイズ。赤で記された部 分は解析に用いたデータ。黄色で記された部分はウォ ールエフェクト効果による event を示している。

PHITS を用いた RI ビームファクトリー重イオン加速器施設の放射線影響評価 田中 鐘信

理化学研究所仁科加速器研究センター

理化学研究所仁科加速器研究センターでは、Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) を運用している。重イオンビームによる核反応から、多様な不安定核を生成し実験を行い、 不安定核にみられる特異な性質を解明することによる究極の原子核モデルの構築や、宇宙 における未解明の重元素生成プロセスの研究を目指している。

RIBF は多段のサイクロトロンを擁しており、Ca, Kr, Xe, U など多種の重イオンを加速 できる。最下流の SRC 超伝導リングサイクロトロンから、加速エネルギー核子当たり 350A MeV のウランを 1 particle μ A (6×10¹² paticle/s)の大強度ビームを、RI ビーム分離生成 装置 BigRIPS の標的に入射することを最終目標としている。2016 年現在は、カルシウム 500pariticle nA、ウラン 50partile nA 等である。標的における破砕反応や飛行核分裂反 応により大量の不安定核ビームを生成し、BigRIPS により実験に必要な核種のみを選別し、 下流の実験装置に輸送する。

標的、ビームダンプを始め、様々な装置で放射線量、熱負荷、放射線損傷、残留放射線 などの放射線影響がある。これらについて、PHITSを用いて評価し、現実との比較を報告す る。

