

## 最新版PHITSコードの特徴 Features of the latest version of the PHITS code

1. 日本原子力研究開発機構、2. 高度情報科学技術研究機構  
3. 高エネルギー加速器研究機構、4. 理化学研究所、5. 東京工業大学  
佐藤 達彦<sup>1</sup>、仁井田 浩二<sup>2</sup>、松田 規宏<sup>1</sup>、橋本 慎太郎<sup>1</sup>、岩元 洋介<sup>1</sup>  
野田 秀作<sup>1</sup>、小川 達彦<sup>1</sup>、中島 宏<sup>1</sup>、深堀 智生<sup>1</sup>、奥村 啓介<sup>1</sup>、甲斐 哲也<sup>1</sup>  
岩瀬 広<sup>3</sup>、古田 琢哉<sup>4</sup>、千葉 敏<sup>1,5</sup>

粒子・重イオン挙動解析コードPHITSは、原子力分野のみならず工学・医学・理学の多様な分野で国内外800名以上のユーザーに幅広く利用されている。本稿では、2012年12月に公開された最新版PHITS (version 2.52) の特徴について解説する。

### 1. はじめに

PHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System) は、NMTC/JAM [1] を基に開発された、任意形状の3次元体系内における放射線挙動を解析可能な汎用モンテカルロ計算コードである。原子力分野で重要となる低エネルギー中性子や光子、医療分野や宇宙開発分野で重要となる高エネルギー陽子や重イオンなど、幅広いエネルギー範囲を持つ様々な放射線に適用可能なため、工学・医学・理学の多様な分野で幅広く利用されている。

現在のPHITS開発チーム体制を図1に示す。基本的な開発は、日本原子力研究開発機構(原子力機構)、高度情報科学技術研究機構(RIST)、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の3機関共同研究契約に基づいて実施し、そのとりまとめを原子力機構が行っている。それ以外に、国内では九州大学、理化学研究所及び宇宙航空研究開発機構(JAXA)、国外ではスウェーデンのチャルマース工科大学及びフランスのCEAと、PHITS開発及びその応用に関する共同研究を結んでいる。PHITSの配布は、RIST原子力コードセンター[2]、OECD/NEAデータ

バンク[3]及びRSICC[4]を介して行っており、基本的に無償である。ただし、原子力コードセンターを介して入手する際は、手数料が必要となる。また、国内の研究機関に所属する研究者は、原子力機構が主催するPHITS講習会(出張講習会含む)に参加することにより、手数料も無料で入手することができる。これらの普及活動の結果、PHITSは、公開から約2年半でそのユーザー数が国内外合わせて800名を超えるに至った。

PHITSコードの概要やその入手方法に関する詳しい情報は、ホームページ[5]、マニュアル[6]、レビュー論文[7]などをご参照いただくとして、本稿では、2012年12月に公開された最新版PHITS (version 2.52) の特徴について解説する。

### 2. PHITS2.52の特徴

PHITS2.52は、2012年12月に公開された最新版PHITSパッケージであり。従来、原子力コードセンターなどに登録されていたPHITS2.24パッケージと比べて、計算機能や精度、ユーザーサポートツールなど、あらゆる面が改良されている。PHITS2.24と比較

したPHITS2.52の特徴をコード自体及びパッケージの特徴に分類して表1及び2に示

す。以下、いくつかの項目に関して、その詳細を解説する。

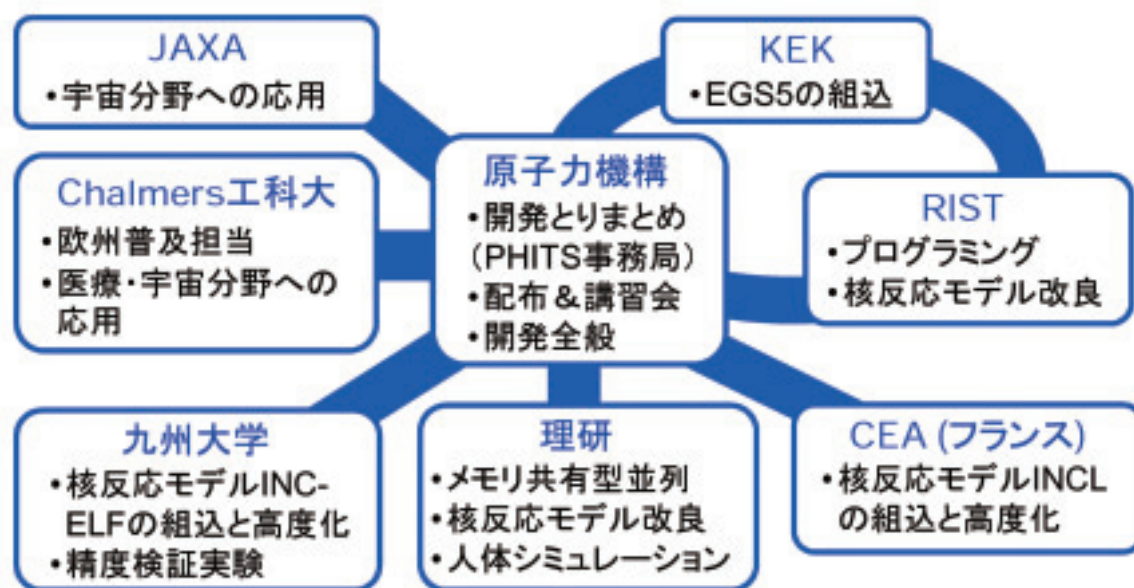


図1 PHITS開発体制

表1 PHITS2.24と比較したPHITS2.52コードの特徴

項目	概要
最新の核内カスケードモデルの組込 (詳細は2.1参照)	中間領域エネルギーの核反応に対する計算精度を高めるため、最新の核内カスケードモデルINCL[12]及びINC-ELF[13]を組み込んだ。
統計マルチフラグメンテーションモデルの組込 (詳細は2.2参照)	核反応により生成する残留核収率の計算精度を高めるため、静的過程に統計マルチフラグメンテーションモデル(SMM)[16]を組み込んだ。
巨大共鳴反応断面積の改訂 (詳細は2.3参照)	光核反応データライブラリJENDL/PD-2004[17]に基づいて、光核反応断面積を改訂した。
新しい反応断面積計算モデルの組込 (詳細は2.4参照)	理研などで開発された核子-原子核および原子核-原子核反応断面積計算モデルKurotama[18]を組み込んだ。
メモリ共有型並列計算機能の導入 (詳細は2.5参照)	OpenMPを利用したメモリ共有型並列計算機能を導入し、メモリ分散型並列と組み合わせたハイブリッド並列計算や、汎用PCでの並列計算を可能とした。
統計誤差計算方法の改良と再開始計算機能の追加 (詳細は2.6参照)	ヒストリー間の分散を計算するタリーでは相対標準誤差を、それ以外のタリーでは相対標準偏差を統計誤差として出力するように全てのタリーを改良した。また、統計が足りなかった場合などに対応するため、一度終了した計算を再開始する機能を追加した。

項目	概要
残留放射能計算機能の追加 (詳細は2.7参照)	残留放射能計算コードDCHAIN-SP[19]をPHITSパッケージに組み込むとともに、PHITSからDCHAIN-SPの入力ファイルを自動で作成する[t-dchain]タリーを作成した。
電子・光子輸送計算アルゴリズムの改良 (詳細は2.8参照)	電子の阻止能をそのカットオフエネルギーに応じて変化させ、高エネルギー電子の挙動がカットオフエネルギーに依存しないようにした。また、光子や電子の輸送計算でもイベントジェネレータとなるよう改良した。
ユーザー定義タリーの導入	多様なニーズに応じるため、ユーザーが各自の必要とする物理量を自由にスコアするための[t-UserDefined]タリーを作成した。
$\delta$ 線生成機能の組込	荷電粒子の飛跡周辺にロックアウトされる電子( $\delta$ 線)の生成を考慮できるように改良し、エネルギー付与の空間的な分布をより精度よく計算可能とした。
DPA計算機能の改良 (詳細は文献 [26])	放射線による材料損傷の指標となるDPAを計算する際、クーロン散乱の効果を適切に考慮できるように改良し、重イオン照射に対しても精度よくDPAを計算できるようにした。
バグ修正と高速化	等方照射線源などに関するバグを修正し、JQMDなど一部のルーチンを高速化した。

表2 PHITS2.24と比較したPHITS2.52パッケージの特徴

項目	概要
インストーラの整備	Windows及びMac用のインストーラを作成し、インストールフォルダを指定するのみでインストールが完了するようにした。
実行シェルの整備	Windowsでは右クリックの「送る」コマンドより、Macではアイコンのドラッグ&ドロップによりPHITSを実行可能とした。
核データライブラリの改訂 (詳細は2.9参照)	JENDL-4.0[20]に基づいて作成した中性子核データライブラリを改訂するとともに、光子及び電子の原子データライブラリを整備した。
講習会用資料の改訂 (HPよりダウンロード可)	基礎実習(ジオメトリ・タリー・パラメータ設定)、応用実習(便利な機能・分散低減・ボクセルファントム)、総合実習用の資料をそれぞれ作成した。
奨励設定ファイルの整備 (HPよりダウンロード可)	ユーザーがPHITS入力ファイルを作る際の参考とするため、様々な使用目的に合わせたPHITSパラメータの奨励設定を決定し、そのサンプル入力ファイルを作成した。
マニュアルの改訂 (HPよりダウンロード可)	マニュアルの不備を大幅に改訂し、原子力分野以外のユーザーでも理解できるようにした。
便利なツールの整備 (HPよりダウンロード可)	PHITSで作成した3次元体系や放射線挙動をアニメーション化するツールなど、PHITSを使った便利な機能の紹介とその使用方法の解説を作成した。

## 2.1 最新の核内カスケードモデルの組込

核反応モデルは、放射線挙動解析計算コードの「肝」とも言うべき部分であり、この精度が計算コード全体の優劣を決定すると言っても過言ではない。PHITSは、量子分子力学模型に基づいて全ての核子間相互作用を解析する核反応モデルJQMD [8] や、核内カスケード模型に基づいて数GeV以上の共鳴状態を丁寧に再現する核反応モデルJAM [9] を世界に先駆けて導入したため、重イオン入射や高エネルギー核子入射核反応に対する計算精度は良い。しかし、PHITS2.24では、数10MeVから数GeVの核子入射に対して、古いタイプの核内カスケード模型Bertiniに改良を加えたモデル [10] を初期設定として採用していたため、その計算精度は最新のモデルと比較してあまり良くないことが報告されていた [11]。

そこで、PHITS2.52には、中間領域エネルギーに対する最新の核内カスケード模型を2つ、それぞれ独立して組み込んだ。1つはフランスCEAが中心となって開発しているINCL [12] で、もう1つは九州大学で開発しているINC-ELF [13] である。どちらも、近年注目されているコアレスセンス模型を組み込んでおり、従来のカスケード模型では全

く再現できなかった高エネルギーフラグメント生成を再現することができる。例として、JAM、INCL、INC-ELFモデルでそれぞれ計算した陽子入射に対する中性子生成及び重陽子生成反応断面積を図2に示す。図より、中性子生成に対しては、どのモデルもほぼ実験結果を再現可能だが、重陽子生成に関しては、コアレスセンス模型が組み込まれていないJAMモデルは大幅に過小評価してしまうことが分かる。また、INC-ELFの重陽子生成断面積が高エネルギー側で高いのは、複合粒子のノックアウト過程も考慮しているためである。

PHITS2.52では、モデルの計算時間や汎用性を検討した結果、中間エネルギーの陽子・中性子・ $\pi$ 粒子・重陽子・三重陽子・ $^3\text{He}$ ・ $\alpha$ 粒子入射反応に対する初期設定モデルとしてINCLを採用することとした。これらの改良は、原子力機構とCEA及び原子力機構と九州大学の共同研究による成果である。

## 2.2 統計マルチフラグメンテーションモデルの組込

PHITSでは、JQMD、JAM、INCLなど各核子の挙動を運動力学的に扱う動的過程モデルと、動的過程を経て平衡状態に達した原子

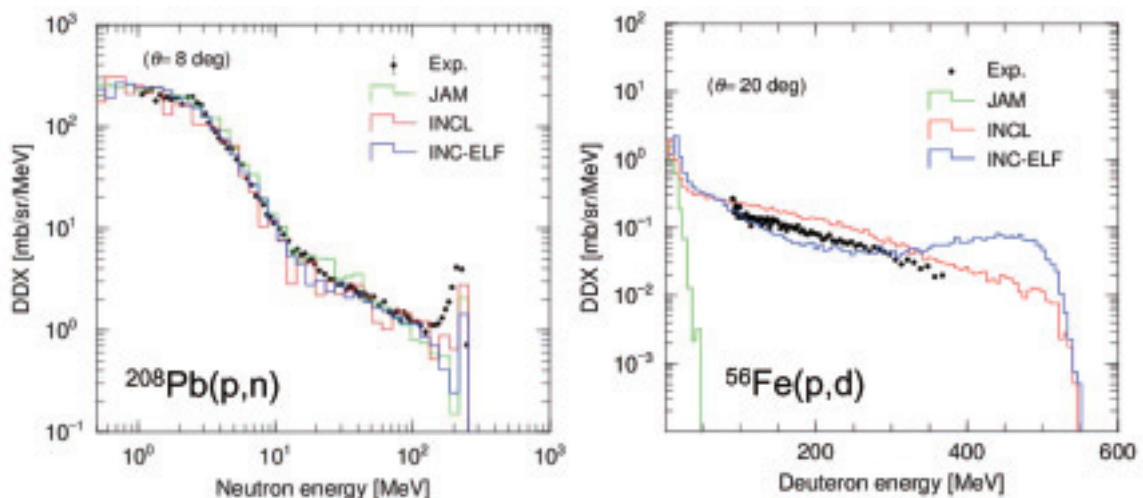


図2 JAM、INCL、INC-ELFモデルでそれぞれ計算した $^{208}\text{Pb}$ -陽子(258MeV)反応の中性子生成断面積(左図)及び $^{56}\text{Fe}$ -陽子(558MeV)反応の重陽子生成断面積(右図)

核からの核子放出や核分裂など統計学的に扱う静的過程モデルを組み合わせて核反応を模擬する。この静的過程モデルには、通常、蒸発モデルGEM [14] が用いられる。しかしGEMは、核分裂は扱えるものの、高い励起エネルギーの場合に原子核が3つ以上に分裂するマルチフラグメンテーション反応を模擬できず、重核からの軽核生成反応断面積を過小評価してしまう問題点が指摘されていた [15]。

そこで、PHITS2.52では、その静的過程シミュレーションに統計マルチフラグメンテーションモデルSMM [16] を新たに組み込み、原子核が3つ以上に分裂する反応を模擬できるようにした。具体的には、動的過程直後の残留核励起エネルギーが2MeV/u以上の場合、SMMを起動して数多くある分裂パターンからエントロピー的に取り得る状態をモンテカルロ法により決定し、分裂後の各残留核の蒸発過程をGEMで再現するよう変更した。これにより、PHITS2.24で見られた一部の残留核収率に対する過小評価が改善された (図3参照)。なお、SMMを導入することにより計算時間が従来の数倍程度になる場合があるため、PHITS2.52の初期設定ではSMMを起動しない設定とした。

### 2.3 巨大共鳴反応断面積の改訂

光子のエネルギーが中性子(もしくは陽子)放出のしきい値エネルギー(約8MeV)を超

えると、光核反応が起きる。光核反応には、光子が原子核全体と共鳴する巨大共鳴反応(8~25MeV)、核内にある仮想的な重陽子と共鳴する準重陽子崩壊反応(25~150MeV)、核内の核子単体と共鳴して $\pi$ 粒子などを放出する核子共鳴反応(150MeV~)がある(括弧内は、支配的な光子エネルギー)。PHITS2.24は、これらの反応機構の中で巨大共鳴のみ扱うことができたが、その反応断面積は、単純なローレンツカーブで表現されており、その精度に関する検証は十分に行われていなかった。

そこでPHITS2.52では、光核反応断面積として、評価済核データライブラリJENDL/PD-2004 [17] に格納された値を採用した。例として、PHITS2.24及び2.52で採用した ${}^6\text{Li}$ と ${}^{184}\text{W}$ に対する光核反応断面積を図4に示す。図より、 ${}^6\text{Li}$ に対しては新旧PHITSの光核反応断面積が全エネルギー領域で大きく異なることが分かる。これは、 ${}^6\text{Li}$ など軽いターゲットに対する光核反応断面積が単純なローレンツカーブでは再現できないためである。一方、 ${}^{184}\text{W}$ に対しては、低エネルギー側ではほぼ一致するものの25MeV以上の高エネルギー領域で新旧PHITSの光核反応断面積が異なる。これは、PHITS2.52で採用した核データライブラリJENDL/PD-2004が準重陽子崩壊反応による寄与も含んでいるためである。ただし、その反応機構そのものはまだ組み込まれていないため、

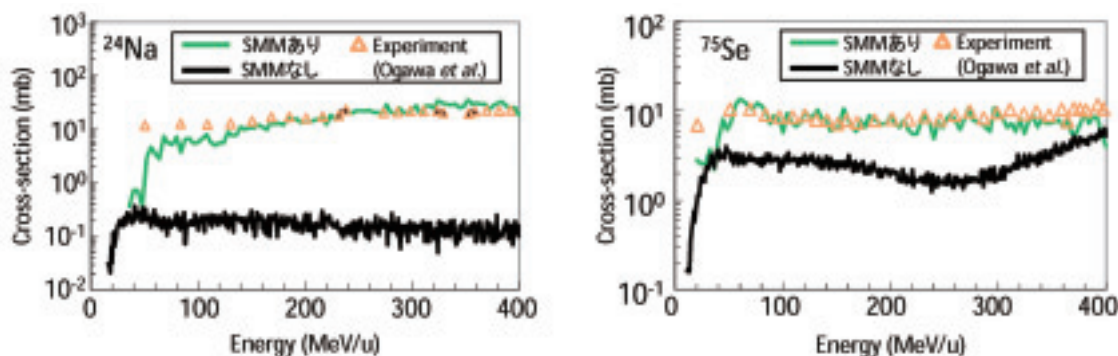


図3  ${}^{\text{Nat}}\text{Pb}(\text{C}, \text{x})$ フラグメンテーション反応による ${}^{24}\text{Na}$ と ${}^{75}\text{Se}$ 生成断面積の入射エネルギー依存性

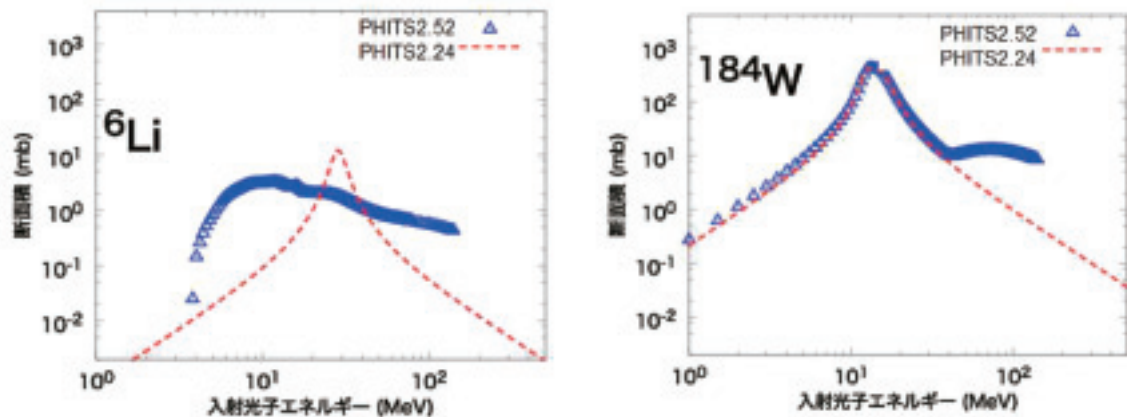


図4 PHITS2.24及び2.52で採用した ${}^6\text{Li}$ と ${}^{184}\text{W}$ に対する光核反応断面積

PHITS2.52を用いても高エネルギー光核反応を精度よく再現することはできない。今後、準重陽子崩壊、核子共鳴反応機構を順次、PHITSに組み込んでいく予定である。

#### 2.4 新しい反応断面積計算モデルの組込

PHITS2.24には、核子-原子核及び原子核-原子核反応断面積を計算するモデルとして、Pearlstein-Niitaの式、Shenの式、NASAの式などが組み込まれている。これらに加え、PHITS2.52では、Kurotamaモデル [18] を組み込んだ。例として、NASAの式とKurotamaモデルで計算した ${}^{12}\text{C}$ - ${}^{12}\text{C}$ 反応断面積の入射エネルギー依存性を図5に示す。図より、

Kurotamaモデルは、粒子線治療で用いられる数100MeV/uエネルギー領域において、NASAモデルよりも実験値の再現性が良いことが分かる。ただし、初期設定で使うモデルは、PHITS2.52でもPHITS2.24と同じくPearlstein-Niitaの式(核子-原子核)とNASAの式(核子-核子)とした。本改良は、小濱洋央氏(理研)、飯田圭氏(高知大学)、親松和浩氏(愛知淑徳大学)らとの共同開発による成果である。

#### 2.5 メモリ共有型並列計算機能の導入

並列計算には、MPIを使ったメモリ分散型並列と、OpenMPを使ったメモリ共有型並列

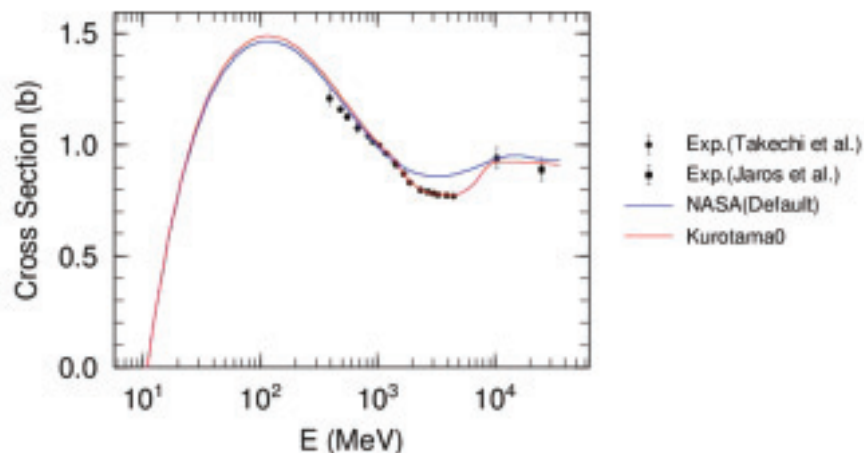


図5 NASAの式とKurotama0で計算した ${}^{12}\text{C}$ - ${}^{12}\text{C}$ 反応断面積の入射エネルギー依存性。Kurotama0とは、高エネルギー側で有効なKurotamaモデルに基づく公式[18]を、低エネルギー側でNASAの式により補完したものである。

がある。PHITS2.24では、メモリ分散型並列のみ対応していた。しかし、メモリ分散型並列計算では、並列プロセス毎にシングル計算と同等のメモリを使用する（8並列で8倍のメモリ領域を使用する）ため、メモリ不足の問題から高分解能ボクセルファントムなど巨大なメモリを必要とする体系を並列計算で処理できない欠点があった。

そこで、PHITS2.52では、メモリ共有型並列計算にも適応可能となるようソースコードを抜本的に改良した。また、メモリ分散型並列とメモリ共有型並列を組み合わせたハイブリッド並列計算も可能とした。その結果、ハイブリッド並列を基本とする「京」などのスーパーコンピュータのみならず、MPIプロトコルをインストールしていない汎用のPCでも並列計算が可能となった。例として、メモリ共有型並列計算でコア数を1～8まで増やしたときのスケーラビリティ（コア数が1とNのときの計算時間比： $t_1/t_N$ ）を図6に示す。図より、コア数を増やしてもスケーラビリティは理想値の90%以上を保持し、コア数にほぼ反比例して計算時間が短縮できることが分かる。ただし、コア数が1の場合のメモリ共有型並列計算の計算時間は、シングル計算

と比べて約2倍となるため、コア数が2以下の場合には、メモリ共有型並列計算を実行するメリットはほとんどない。

本成果は、次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発プロジェクト、理化学研究所戦略的研究展開事業、理化学研究所基礎科学特別研究員制度の支援によって得られたものであり、原子力機構と理化学研究所の共同研究による成果である。また、開発において「京」コンピュータ試験利用および理研情報基盤センター RICCCシステムを利用した。

## 2.6 統計誤差計算方法の改良と再開始計算機能の追加

統計誤差は、モンテカルロ計算精度を検証する上で重要な指標であるが、PHITS2.24では、誤った計算方法で統計誤差を導出していた。そこでPHITS2.52では、検出器の応答関数などヒストリー間の分散を計算するタリーでは相対標準誤差を、それ以外のタリーでは各ヒストリーもしくは各バッチ計算結果の相対標準偏差を統計誤差として出力するように全てのタリーを改良した。例として、PHITSの2次元プロットで出力した粒子フラックス

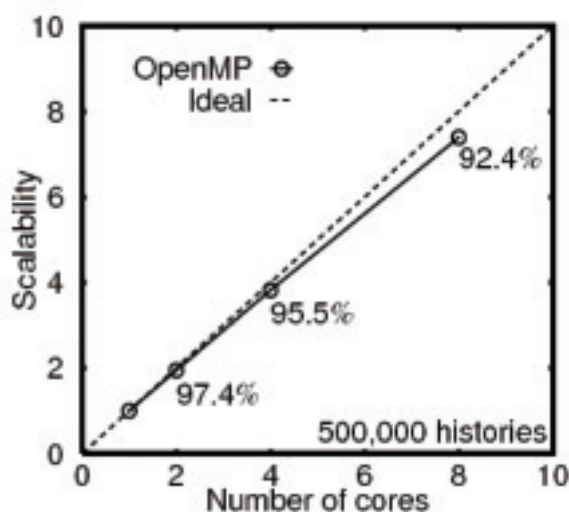


図6 メモリ共有型並列（OpenMP）計算でコア数を1～8まで増やしたときのスケーラビリティ（コア数が1とNのときの計算時間比： $t_1/t_N$ ）

とその統計誤差分布を図7に示す。図より、フラックスの小さい領域(左図寒色系)では、その相対誤差が大きい(右図暖色系)ことが分かる。このように統計誤差を可視化することにより、統計の足りない領域が直感的に分かるようになり、より効果的な計算が可能となった。

また、一度終了した計算からタリー出力や初期乱数を読み込んで計算を再開する機能を追加した。この機能を用いれば、あらかじめ設定していたヒストリー数やバッチ数では統計が十分でなかった場合に、これまでの計算結果を無駄にすることなく、より統計精度のよい結果を得ることができる。ただし、古いバージョンのPHITSで計算した結果からの再開計算はできない。これらの改良は、原子力機構・システム計算科学センター・原子力コード高速化作業の一環として、(株)富士通システムズ・イーストの大日向大地氏らと実施した共同開発の成果である。

## 2.7 残留放射能計算機能の追加

残留放射能の時間変化の計算は、加速器の遮へい設計や粒子線治療の医療従事者の2次被ばくなどを評価する際、不可欠となる。そのためには、照射直後に生成された放射性残留核の収率のみならず、その時間減衰を評価

する必要がある。しかし、PHITS2.24では照射直後の残留核収率計算のみ可能で、その時間変化を追跡するためには、ユーザー自身がその計算結果を基にDCHAIN-SP [19] など残留放射能計算コードの入力ファイルを作成する必要があった。

そこで、PHITS2.52では新たなタリー [t-dchain] を導入し、照射時間や照射後の冷却時間などを指定すれば、PHITSからDCHAIN-SP用の入力ファイルを直接出力できるようにした。また、PHITSとの接続計算用に調整したDCHAIN-SPやそれを実行するためのバッチファイルを整備し、PHITS2.52パッケージに組み込んだ。これらの成果により、PHITSとDCHAIN-SPを用いて簡単に残留放射能の時間変化を計算可能となった。例として、PHITS2.52パッケージを用いて計算した150MeV陽子を水ファントムに6分間で5 Gy照射したときの残留放射能の時間変化を図8に示す。図より、照射直後は $^{14}\text{O}$ や $^{15}\text{O}$ が多数生成されているが、数10分後にはそれらはほとんど崩壊し、 $^{11}\text{C}$ や $^{13}\text{N}$ のみが残ることが分かる。今後は、PHITSとDCHAIN-SPをソースレベルで統合し、一度計算した残留放射能分布からその周辺の被ばく線量をPHITSで再計算する機能を開発する予定である。

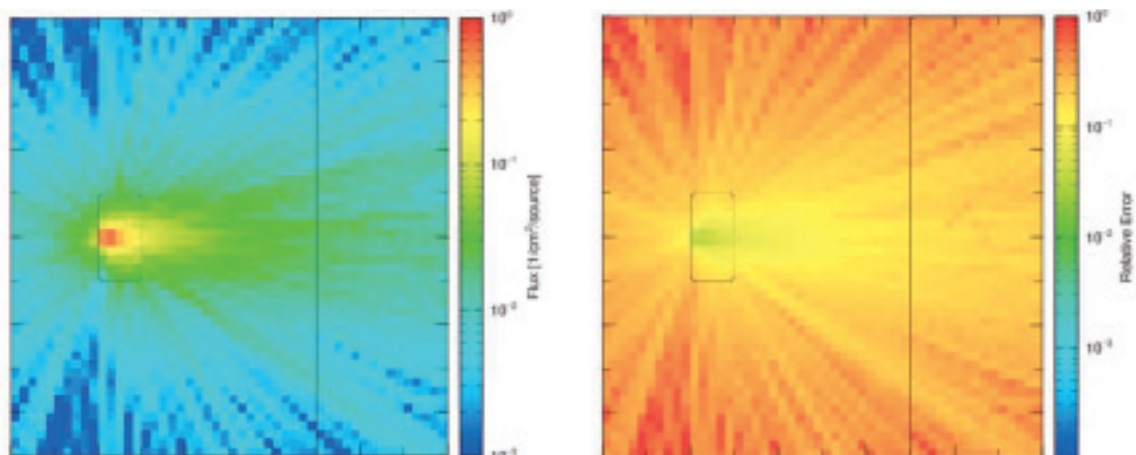


図7 PHITSの2次元プロットで出力したWターゲットから発生するX線フラックス(左図)とその統計誤差分布(右図)



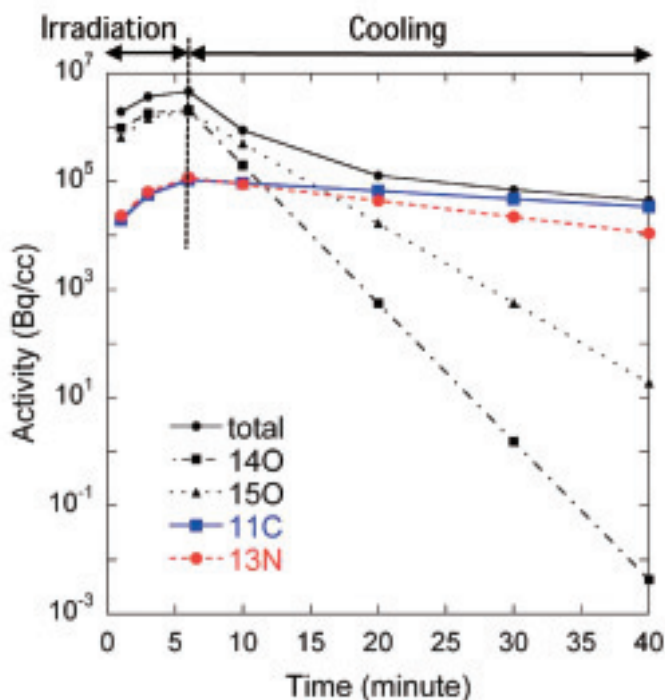


図8 PHITS2.52パッケージを用いて計算した150MeV陽子を水ファントムに6分間で5 Gy照射したときの残留放射能の時間変化

## 2.8 電子・光子輸送計算アルゴリズムの改良

PHITS2.24では、電子のカットオフエネルギーを低くすると、高エネルギー電子の挙動が変化してしまう問題点があった。これは、PHITS2.24で採用している電子の阻止能がカットオフエネルギーに依らず一定のため、大量の2次電子を放出する高エネルギー電子に対して阻止能と2次電子放出によるエネルギー損失の重複が起これ、その飛程が短くなっていたためである。そこで、PHITS2.52では、電子の阻止能をカットオフエネルギーに依存して変化させ、上記重複が起きないように改良した。

また、PHITS2.24では、光電効果やコンプトン散乱が起きた際、各イベントでエネルギーが保存しない問題点があった。そこで、PHITS2.52では、中性子や陽子の場合と同じく、光子や電子の輸送計算でもイベントジェネレータとなるよう改良した。これにより、付与エネルギーのヒストリー間での分散を正しく計算できるようになった。例として、

PHITS2.24とPHITS2.52で計算した667keV光子入射に対するCsI検出器の応答関数を図9に示す。PHITS2.24ではエネルギー保存が成立しないため光電ピークの幅が広がっていたが、PHITS2.52ではその問題が解決されている。

## 2.9 核データライブラリの改訂

PHITSで低エネルギー中性子、光子及び電子を輸送するためにはデータライブラリが必要となる。しかしPHITS2.24パッケージには、JENDL-4.0[20]に基づいて整備した中性子に対する核データライブラリしか付録されておらず、光子や電子に対する原子データライブラリは含まれていなかった。そこで、JENDL-4.0及びEEDL [21] を元に光子-原子及び電子-原子相互作用ライブラリをそれぞれ整備し、PHITS2.52パッケージに付録した。また、中性子ライブラリに関しては、一部の核種でKerma係数が異常に大きい問題があったため、その評価方法を改訂した。さ

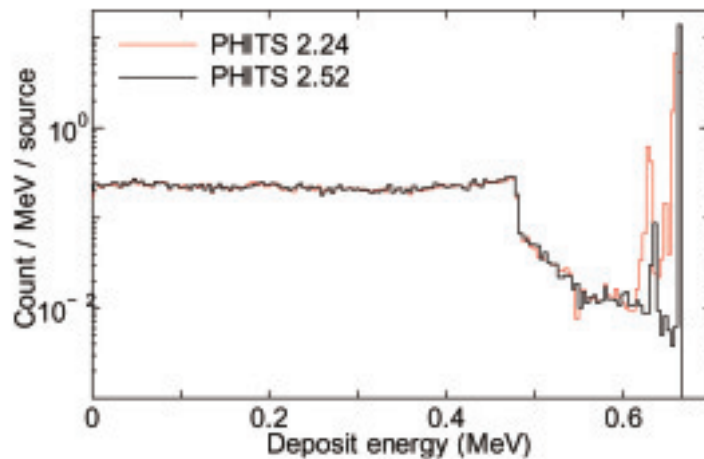


図9 PHITS2.24とPHITS2.52で計算した667keV光子入射に対するCsI検出器の応答関数

らに、水など15物質に対して熱中性子散乱則  $S(\alpha, \beta)$  データを収納した。

例として、新旧ライブラリ及びENDF/V-II.1[22] に格納された $^{35}\text{Cl}$ に対する中性子Kerma係数を図10に示す。図より、古いライブラリは、低エネルギー中性子に対するKerma係数を新しいライブラリやENDF/B-VII.1と比較して約1000倍も過大評価していたことが分かる。古いライブラリを使って中性子による人体内の被ばく線量を計算した場合、人体に0.1%程度しか含まれない $^{35}\text{Cl}$ の有無により結果が大きく変わってしまう問題があったが、新しいライブラリを使えば、このような問題は生じない。ただし、このような大きな変化があった核種は希であり、ほとん

どの核種に対しては、新旧ライブラリでほぼ同等の結果を与える。

### 3 まとめと今後の予定

PHITS2.52は、PHITS2.24から様々な面が改良され、放射線挙動解析に関してこれまでにないパワフルなツールとなっている。既にPHITSユーザー登録済みの方は、原子力コードセンターを介して旧バージョンを入手した方は原子力コードセンター ([nucis@tokai.rist.or.jp](mailto:nucis@tokai.rist.or.jp)) に、PHITS講習会を介して入手した方はPHITS事務局 ([phits-office@jaea.go.jp](mailto:phits-office@jaea.go.jp)) にリクエストを出すことにより、無償で最新版を入手可能である。また、新規ユーザーは、従来と同じく、国内で

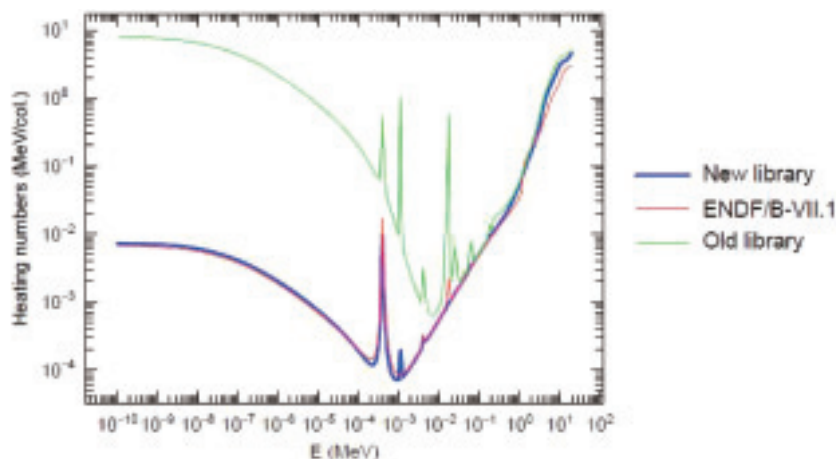


図10 新旧ライブラリ及びENDF/V-II.1[22]に格納された $^{35}\text{Cl}$ に対する中性子Kerma係数

あれば原子力コードセンターにリクエストを出すか、PHITS講習会に参加することにより入手可能である。

今後は、まず、電磁カスケード輸送計算コードEGS5[23]との統合を最優先事項として開発を進める予定である。既にPHITS2.52パッケージには、暫定版としてPHITSとEGS5を統合した実行ファイルが含まれているが、暫定版は、メモリ共有型並列計算や再開計算機能などPHITS2.52から組み込まれた様々な機能に未対応である。また、Li(d, n) 反応など工学的に重要な核反応を再現するため、歪曲波ボルン近似DWBAと核内カスケードモデルを組み合わせた新たな核反応モデルや、JENDL高エネルギーファイル [24] など陽子や高エネルギー中性子に対する核データにも対応したイベントジェネレーターモードの開発なども考えている。その他、できるだけユーザーのニーズに合った改良をしていきたいと考えているので、改良の要望やバグ情報などがあれば、引き続き積極的にPHITS事務局もしくはPHITSユーザーコミュニティサイト [25] まで連絡いただけるようお願いしたい。PHITS開発チーム一同、ユーザー満足度No.1コードを目指し、ユーザーとともにコードを成長させていきたいと考えているので、今後とも末永くPHITSの発展にご協力いただければ幸いである。

## 参考文献

- [1] K. Niita et al., JAERI-Data/Code 2001-007 (2001)
- [2] <http://www.rist.or.jp/nucis/>
- [3] <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-1857/>
- [4] <http://www-rsicc.ornl.gov/codes/ccc/ccc7/ccc-778.html>
- [5] <http://phits.jaea.go.jp/indexj.html>
- [6] K. Niita et al., JAEA-Data/Code 2010-022 (2010)
- [7] K. Niita et al., Prog. Nucl. Sci. Technol. 1, 1-6, (2011)
- [8] K. Niita et al., Phys. Rev. C52, 2620 (1995)
- [9] Y. Nara et al., Phys. Rev. C61, 024901 (1990)
- [10] H. Takada et al., JAERI-Data/Code 98-005 (1998).
- [11] 岩瀬広、核データニュース、96、9-17 (2010)
- [12] J. Cugnon et al., J. Korean Phys. Soc. 59, 955 (2011)
- [13] Y. Sawada et al., Nucl. Instr. Meth. B 291, 38-44 (2012)
- [14] S. Furihata et al., Nucl. Instr. Meth. B 171, 251-258 (2000)
- [15] T. Ogawa et al., Prog. Nucl. Sci. Technol. in press.
- [16] J.P. Bondorf et al., Physics Reports, 257, 133 (1995)
- [17] <http://www.ndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-pd-2004.html>
- [18] K. Iida et al., J. Phys. Soc. Japan 76, 044201 (2007)
- [19] T. Kai et al., JAERI-Data/Code 2001-016 (2001)
- [20] [http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/J40\\_J.html](http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/J40_J.html)
- [21] S. T. Perkins et al., Lawrence Livermore National Lab. UCRL-50400 Vol. 31 (1991)
- [22] <http://www.nndc.bnl.gov/endl/b7.1/>
- [23] <http://rcwww.kek.jp/research/egs/>
- [24] <http://www.ndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-he-2007.html>
- [25] <http://www.facebook.com/phitscommunity>
- [26] Y. Iwamoto et al., Nucl. Instr. Meth. B 274, 57-64 (2012)