

PHITSの最近の動向

Present Status of the PHITS code

(財)高度情報科学技術研究機構 (RIST)
計算科学技術部研究センター長 仁井田 浩二

粒子・重イオン汎用モンテカルロコードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) は、ほぼ全ての粒子と重イオン (原子核) の物質中の輸送と核反応を記述する3次元モンテカルロシミュレーションコードである。高エネルギーから低エネルギーまでの統一的な輸送に加え、重イオンの輸送をも扱えるコードとして、加速器分野だけでなく、航空宇宙分野、粒子線がん治療などの医療分野でも広く利用されている。最近、PHITSではマイクロな領域での放射線挙動に重要な強度分布などの観測量を扱えるようになった。この試みは世界でも初めてのものであり、これにより、放射線影響のよりマイクロな視点からの解明や、物質、生命のマイクロドシメトリ的なアプローチへの橋渡しが可能となる。エネルギーと輸送粒子の拡張によってもたらされたPHITSの幅広い分野の応用例と、新しい機能による最近の応用例を紹介する。

1. はじめに

PHITS¹⁾ とは、Particle and Heavy Ion Transport code System の頭文字から付けられた名前で、ほぼ全ての粒子と重イオン (原子核) の物質中の輸送を記述する3次元モンテカルロシミュレーションコードである。豊富なユティリティーとグラフィカル出力を備えた汎用コードとなっている。本コードは、現在、日本原子力研究開発機構 (原子力機構) の東海研究所で建設中の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の設計・安全評価を目的として、日本原子力研究所 (現 原子力機構) が開発したNMTC/JAMコードを基に、当財団 (RIST) が中心となり、東北大、原子力機構、高エネルギー加速器機構 (KEK)、及びスウェーデンのチャルマース大学等の共同研究により開発されてきた。PHITSは現在J-PARC施設だけでなく、日本の理化学研究

所、アメリカ、ドイツの次期加速器計画、また、粒子線がん治療などの医療分野、航空宇宙分野、半導体の放射線によるソフトエラー評価などのマイクロな領域での利用など、世界的に幅広い分野で利用されている。本解説では、最近のPHITSコードの新しい機能、また、幅広いPHITSの応用例を紹介する。

2. J-PARCでの利用

J-PARCは、大強度陽子加速器を中心とした世界に類の無い複合的な実験研究施設である。その中心施設の一つ、物質・生命科学実験施設は、核破砕パルス中性子やミュオン散乱現象から物質や生命現象を探求する施設であり、この施設の最適化設計、遮蔽計算などに、PHITSが幅広く使われている。これらの施設において、輸送コードに要求される計算精度は非常に厳しい。例えば核破砕パル

ス中性子源の施設では、3 GeVの陽子を入射粒子として、中性子分光で用いるmeVオーダーの中性子まで、エネルギー範囲で12桁、また、施設の大きさが数10mに対して、計算に要求される分解能は数mmの大きさである。これらの要求を満たすようにNMTC/JAMは開発され、その資産はPHITSに受け継がれている。

図1は、J-PARCの核破砕中性子源の計算モデルをPHITSにより3次元表示したものである。中心の水銀ターゲットに3 GeVの陽子が図の左から入射する。水銀ターゲットの周りには、上に2個、下に1個の液体水素による減速材（モデレータ）が配置される。モデレータの横面から実験室に向けて中性子取出し用の窓が開けられていて、ここから左右合わせて23本の中性子ビームラインが導かれる。更に、水銀ターゲットの周りには、ベリリウム（赤の部分）、鉄（青の部分）の反射体が配され、中性子を効率よく取り出す構造になっている。このような構造の最適化作業にNMTC/JAM（現在のPHITS）が開発され、利用されてきた。

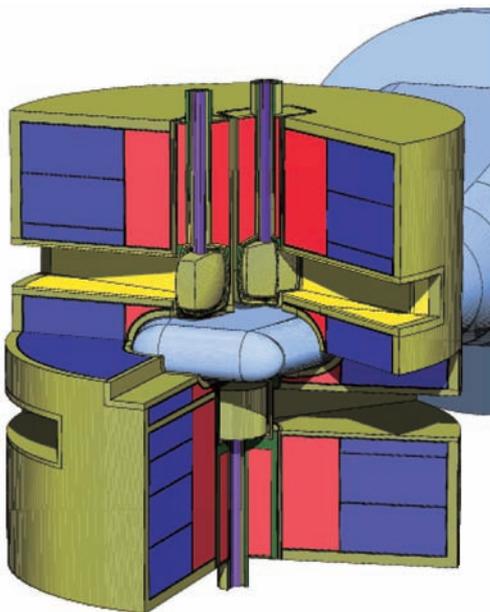


図1 J-PARC核破砕中性子源、計算モデルのPHITSによる3次元表示

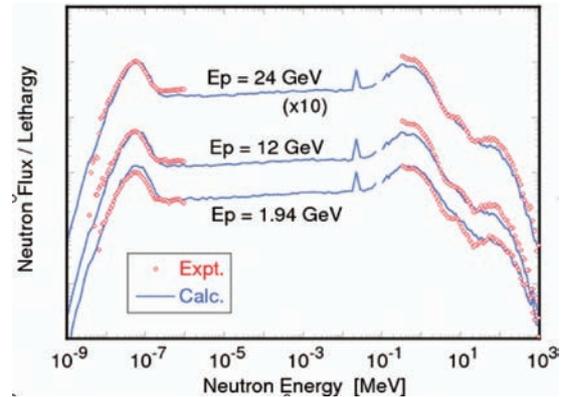


図2 核破砕中性子スペクトルの実験との比較。入射陽子エネルギーが24、12、1.94GeV。赤丸は実験値²⁾から求めたスペクトル、青線がPHITSの結果。

コードの精度検証としては、AGSで行われた水銀ターゲット実験ASTE (AGS Spallation Target Experiment)²⁾の測定値との比較が行われている。図2は、入射陽子エネルギーが24、12、1.94GeVの時の中性子スペクトルの比較である。実験では放射化サンプルを用いた測定であるので、赤丸は各種放射化データからadjustment法を用いて求めたものである。PHITSの結果は、GeV領域からmeV領域まで、非常に広いエネルギー範囲で実験値をよく再現している。このような輸送をシミュレートするには、非常に広いエネルギー領域にわたり核反応を正確に記述しなければならない。PHITSでは、高エネルギーの粒子入射の核反応にJAM、原子核・原子核反応にはJQMDという核反応モデルを用いている。PHITSのひとつの特徴は、採用しているこれらの核反応モデルが極めて洗練されており、また、精度検証が良くなされていることである。更に、20MeV以下の中性子の輸送には、炉物理などで用いられている核データを用いた計算を行うことができる。具体的には、この部分にはMCNPコードがPHITSに組み込まれている。これらによって、広いエネルギー範囲にわたり中性子のスペクトルが再現され、また、核破砕ターゲットとその

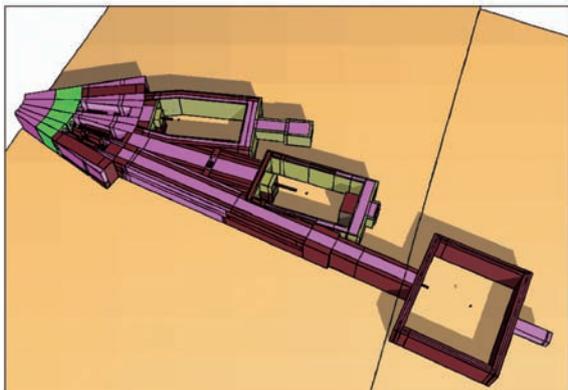


図3 J-PARC、中性子分光器施設の遮蔽計算モデルのPHITSによる3次元表示

周りの物質の発熱、損傷評価³⁾がなされてきた。

J-PARCの多くの施設で、PHITSが遮蔽評価の標準コードとして既に用いられているが、中性子分光器施設（一つの例を図3に示す）では、PHITSだけの特殊な機能を用いた遮蔽計算が行われている。核破碎中性子源で生成されたパルス中性子は、ガイド管で分光器室に導かれる。中性子分光に用いられる中性子エネルギーは、meVの冷中性子であり、それらの輸送効率を上げるために、ガイド管にはスーパーミラーと呼ばれる鏡面ガイドが用いられる。また、高エネルギー中性子によるバックグラウンドを低減するために、ガイド管の途中に、T0チョッパーと呼ばれる回転遮蔽体を設置し、中性子の速度の違いから高エネルギー成分だけをカットすることがある。このように、分光器施設の遮蔽を計算するには、その線源となる中性子を正確に記述しなければならないが、そのためには、スーパーミラー等の光学デバイス、T0チョッパーのような時間依存のメカニカルデバイスをシミュレートしなければならない。そのためにPHITSでは、これらの中性子ビーム輸送の各種デバイスを模擬する機能を開発し、分光器施設の遮蔽計算を行っている。この特殊機能は、他の輸送コードでは実現されてなく、PHITSの利用によって、分光器施設の遮

蔽評価、また、S/N評価の効率を非常に高めている。

3. その他の加速器分野での利用

J-PARCの加速器もそうであるが、新しい加速器施設のトレンドは、大強度である。これらの施設では、ターゲットもしくはビームダンプなどで生成する2次粒子の種類、生成数が従来と比べて桁違いに増加する。これらを精度良く評価することが、現在の加速器施設の設計の重要な問題である。特に、加速粒子が重イオン（原子核）の場合、物質中のレンジが短いため、非常に小さな領域に発熱や損傷が集中するので、計画の成否を左右する重要な課題である。現在世界には、大強度の重イオン加速器を用いて、ターゲットから発生する2次原子核を再加速し、それを用いた実験を行う計画が幾つかある。ドイツGSI（ドイツ重イオン研究所）の将来計画FAIRの中のフラグメントセパレーター Super-FRS、アメリカの次期加速器計画RIA（Rare Isotope Accelerator）、理化学研究所で建設中のRIビームファクトリーのBig-RIPS、これらの施設では、ビームダンプの設計、電磁石の放射線による熱負荷や損傷の評価等が重要な課題である。PHITSは、重イオン反応・輸送を扱える数少ないコードであり、また、磁場中の運動、熱評価、損傷評価が直接できることから、上記の3つの施設で、最適化設計、遮蔽計算にPHITSが共通に使われている。

図4は、アメリカ、ミシガン州立大学のRIA計画グループが作成したフラグメントセパレーター部分のPHITS用計算モデルである。ビームとして⁴⁸Caの中性子の多いアイソトープを用い、Liターゲットで生成される中性子過剰核²²Cの収量を増やしている。ターゲットの次に3個の4重極磁石、その次に二重極、更に4重極の磁石が並ぶシステムである。上の図は、⁴⁸Caビームで反応しなかった

ものがビームダンプに到達する様子、下の図は、ターゲットで生成された ^{22}C が下流の電磁石のシステムを通過する様子がシミュレートされている。これら重イオン反応、1次粒子、2次粒子の軌跡と共に、遮蔽、発熱、損傷等を同時に評価できるのがPHITSの大きな特長である。

その他の加速器関係では、国内外で建築中、もしくは計画中の陽子、炭素線がん治療施設の遮蔽評価にPHITSが用いられ始めている。図5は、炭素線がん治療施設の一部であるが、作成された計算モデルをPHITSで3次元表示したものである。加速器本体、ビーム輸送系、照射室、これは複雑なレイアウト

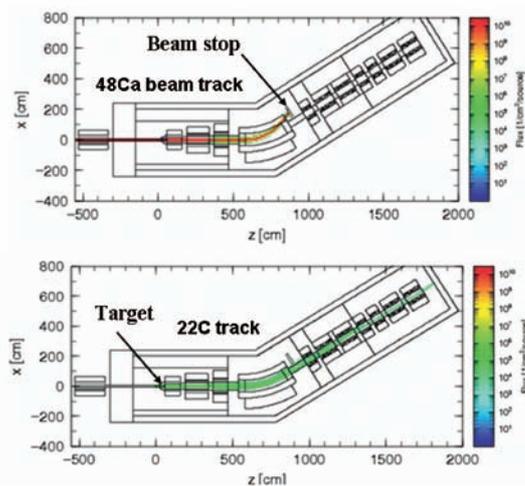


図4 RIAのフラグメントセパレーター部分のPHITSによる計算例

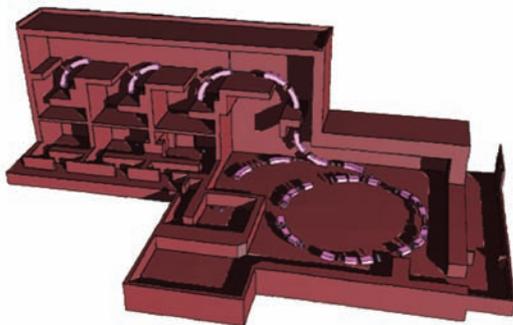


図5 炭素線がん治療施設の計算モデルのPHITSによる3次元表示

であり、従来の1次元簡易計算モデルでは、遮蔽能の正確な評価は難しい。このような複雑な3次元構造では、PHITSのような3次元モンテカルロ計算が力を発揮する。特に、炭素線に関しては、炭素線からの2次粒子を直接PHITSで計算できるので、遮蔽能評価の精度が上がるのが期待されている。

4. 宇宙飛行士の被ばく線量評価

宇宙線には、地表面では存在しない高エネルギー粒子や重イオンが多数含まれているため、宇宙飛行士の被ばく線量を評価するためには、それら粒子の宇宙船及び人体内における輸送計算を行う必要がある。現在、宇宙飛行士の被ばく線量は、一般に、米国航空宇宙局(NASA)が開発した1次元の重イオン輸送計算コードを用いて評価されているが、この方法では中性子による線量を正確に評価できない。PHITSは、高エネルギー反応、重イオン反応、そして、低エネルギーの中性子輸送まで統一的に記述できるので、この分野でも力を発揮できる。原子力機構の佐藤達彦氏は、PHITSを用いて宇宙船内の粒子輸送計算を行い、荷電粒子スペクトルだけでなく、中性子スペクトルに対する測定値も精度良く再現することに世界で初めて成功した⁴⁾(図6)。また、得られたスペクトルに、同じく

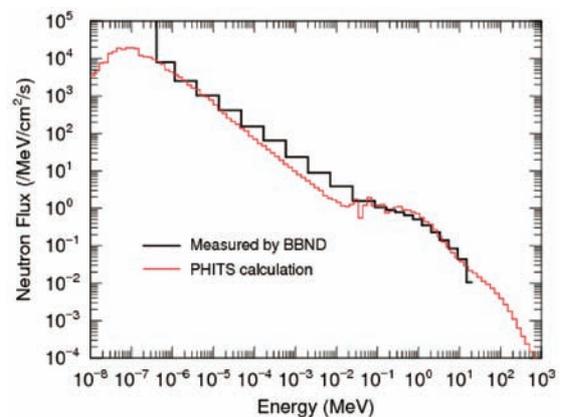


図6 シャトル内の中性子スペクトルの比較。測定値は、STS-89⁵⁾のBBNDによる測定。

PHITSを用いて計算したフルエンスから実効線量当量への換算係数^{6,7)}を適用し、各粒子による宇宙飛行士の被ばく線量への寄与を明らかにした。このPHITSを用いた宇宙飛行士の被ばく線量評価方法は、既にロシア科学アカデミー IMBPにおいて採用されており、今後は、日本や欧州の宇宙開発機関と協力して、その精度向上を目指したさらなる研究を進める計画である。

5. 航空機乗務員の被ばく線量評価

ICRP1990年勧告で航空機乗務員の宇宙線被ばくが職業被ばくの一部と認められて以降、その被ばく線量評価を目的とした数多くの計算モデルが欧米にて開発されてきた。しかし、その精度を決定する上で最も重要となる大気中の中性子スペクトルに関して、地表面から航空機巡航高度までの幅広い高度範囲における測定値を正確に再現可能な計算モデル

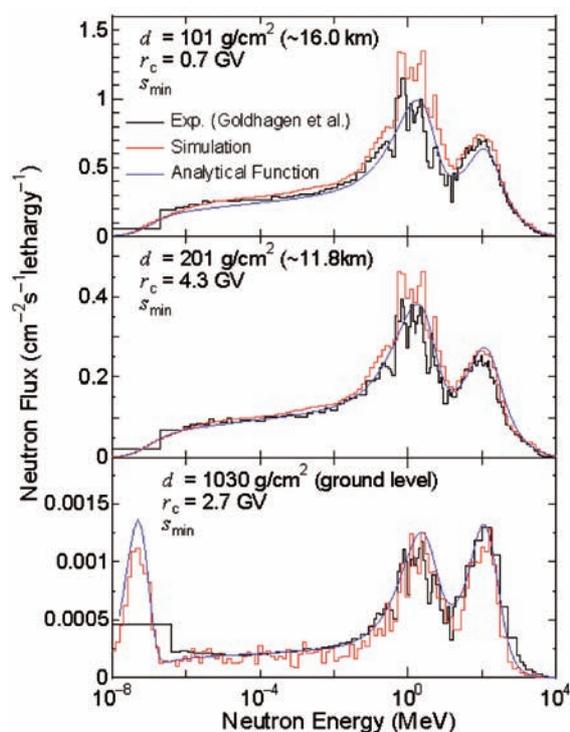


図7 16Km、12Km、地上における中性子スペクトル。黒が測定値、赤がPHITSの計算結果、青が解析関数。

は存在しなかった。そこで、原子力機構の佐藤達彦氏らは、PHITSに最新のJENDL高エネルギー核データライブラリ⁸⁾を組み合わせ、大気中の粒子輸送計算を行い、地表面から高々度まで、様々な地点における中性子スペクトル測定値を精度良く再現することに世界で初めて成功した⁹⁾(図7)。また、得られた結果の系統性を解析し、高度20km以下の任意の地点における中性子スペクトルを予測可能な解析関数を確立し、エクセルファイルEXPACSとして一般に公開した¹⁰⁾。更に、陽子やミュオンなどの荷電粒子に対するスペクトル予測モデルを確立し、そのモデルをベースとした航空機乗務員被ばく線量評価コードを開発し、日本の航空会社に提供する予定である。

6. 粒子線治療における線量評価

近年、陽子や重イオンの線量局在性や高い生物効果比(RBE)を生かして、粒子線がん治療施設の建設及び建設計画が国内外で相次いでいる。既に述べたようにPHITSは、それらの施設の遮蔽設計に利用され始めているが、更に、患者の線量評価や治療計画の立案にも極めて重要な役割を果たすと期待されている。なぜなら、PHITSは、磁場中における荷電粒子の挙動やエネルギー及び角度分散を正確に扱えるため、従来のような患者体内に限定した線量評価でなく、ワブラー磁石やリッジフィルターなどのビーム制御機器を含めた総合的な線量評価が可能だからである¹¹⁾。また、PHITSは、エネルギー沈着に寄与する荷電粒子のLET分布や、マイクロドジメトリ分野で放射線の線質を表す指標として用いられているLineal Energy分布を直接計算可能なため、生物学的効果の違いを考慮した線量評価も可能である¹²⁾。このようなPHITSの特徴を生かし、既存の粒子線治療線量評価システムにPHITSを組み込み、より信頼性の高いシステムを構築する研究が国内外で進め

られている。

図8は、原子力機構の研究炉で行われているBNCT(Boron Neutron Capture Therapy)治療のための線量評価システムJCDS (JAERI Computational Dosimetry System)¹³⁾が患者のCTやMRIデータから作成したモンテカルロ計算用のボクセルデータをPHITSで3次元表示したものである。図9は、PHITSにより計算された、このデータに対する線量分布である。BNCTでは、熱中性子、光子の輸送が必要であることから、JCDSでは現在、

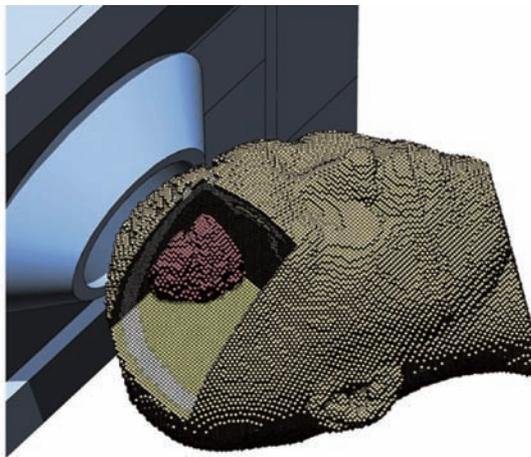


図8 モンテカルロ計算用のボクセルデータのPHITSによる3次元表示

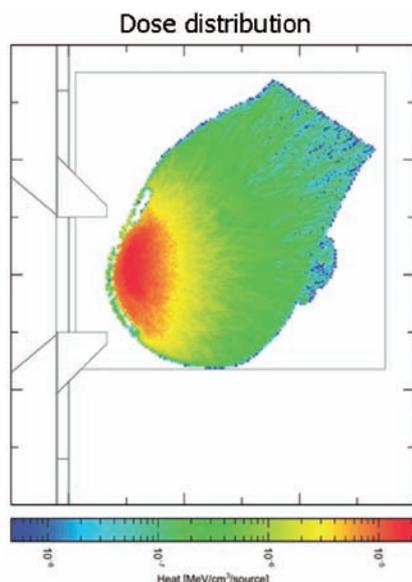


図9 PHITSにより計算された線量分布

MCNPを輸送コードとして用いている。これをPHITSに変えることにより、BNCTだけでなく、陽子線、炭素線の線量評価システムとして利用することができる。

7. 半導体ソフトエラー発生率の評価

半導体に放射線が入射し、その有感体積内における電離量があるしきい値を超えると、メモリー反転など誤動作(ソフトエラー)を誘発する。このソフトエラーは、従来、電離密度の高い重イオンが多数存在する宇宙船内においてのみ懸念されていた。しかし、近年、半導体素子の急激な小型化に伴い、地上や航空機内においても、宇宙線由来の中性子により誘発されるソフトエラーが問題となっている。このようなソフトエラーの発生率を評価するためには、半導体有感部分など微小体積中における電離量の分散(各イベント毎の値)を計算する必要がある。したがって、カーマ近似など一体の物理量の平均値を求める近似は適用できず、全ての粒子の輸送をイベント毎に模擬する必要がある。次節で解説するように、このような反応の記述の仕方を、イベントジェネレーターと呼ぶ。PHITSは、低エネルギー中性子を含む全ての粒子に対する輸送計算をイベントジェネレーターモードで扱える唯一の計算コードであり、今後、この分野での幅広い応用が期待されている。

このPHITSの新しい機能を用いて、ルネサステクノロジの有田豊氏は、熱中性子による半導体のソフトエラーの発生率を計算し実験値と比較した¹⁴⁾。彼らは、図10のように、半導体素子にボロンを含む材料がある場合、熱中性子の吸収の断面積が大きいいため、吸収反応によって発生するLiと α 粒子によるエネルギーの付与によるソフトエラー発生率を評価した。PHITSでは、ボロンの吸収反応をイベント毎に、発生するLiと α 粒子のエネルギー、運動量を正確に記述できるため、この

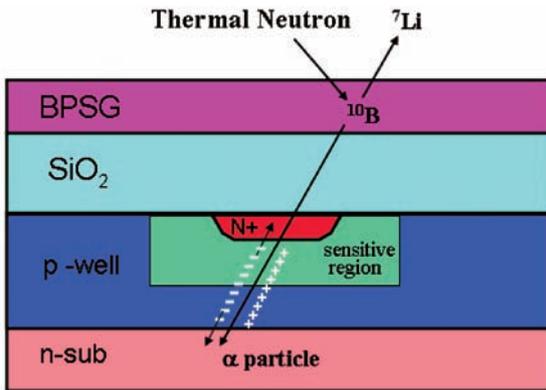


図10 ボロンを含む材料とSensitive領域の模式図

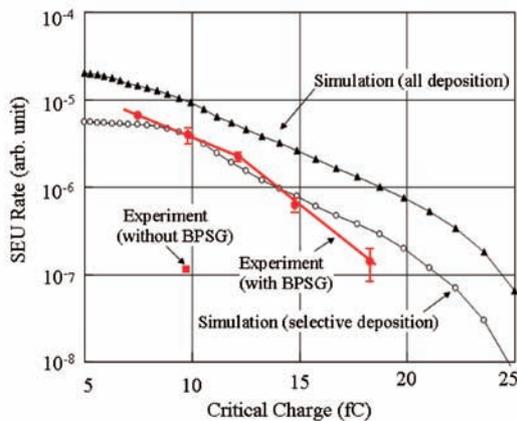


図11 ソフトエラーの発生率、実験とPHITSの結果の比較

ような計算が可能となっている。図11は、Critical Chargeの関数としてのソフトエラーの発生率である。エネルギー付与の領域をSensitive領域に限定したPHITSの結果(中抜き丸)は、実験(赤)の結果をよく再現している。

8. イベントジェネレーターモード

最近開発されたPHITSの新しい機能としてイベントジェネレーターモードというのがある。これは、世界でも初めての試みであり、従来の輸送コードには含まれない新しいタイプの概念なので、ここで細かく解説したい。

高エネルギー核反応シミュレーション分野

では、イベントジェネレーターという言葉が良く使われる。これは、一種の核反応モデルであるが、ひとつの物理モデルに基づいた核反応モデルである必要はなく、複数のモデルや、各種パラメータ、また、核データを用いた複合的な計算モデルということができる。特徴は、特定の生成2次粒子の断面積を独立に計算するだけでなく、イベント、即ち、ひとつの核反応で生成される全ての2次粒子と反跳核を、エネルギー保存、運動量保存の制約の基で、モンテカルロ的に生成(ジェネレート)できるモデルを指す。

一方、炉物理などで用いられる従来のモンテカルロコードは、Boltzmann方程式を基礎とする。この方程式は、位相空間での一体の分布関数の時間発展を記述する方程式で、例えば、座標、運動量空間での中性子の確率分布を与える方程式である。従って、数値解法の手法に拠らず、この方程式から得られる解は、一体の物理量、フラックス、発熱等の平均値であり、実際のイベントを模擬することはできない。しかしながら、この方程式をモンテカルロ法で解くと、数値計算上のひとつひとつのモンテカルロヒストリーで、あたかも実際のイベントを模擬できているように見えるが、全く違う概念である。この点は誤解され易い点なので、詳しく説明すると、実際のイベントを構築するには、一体以上の情報が必要である。例えば、中性子入射反応で、終状態に2個の中性子がある(n, 2n)反応のイベントを構築するには、生成される2つの中性子の相関の情報が必要になってくる。このような相関の情報は、基礎方程式であるBoltzmann方程式の中にも、利用する核データの中にも含まれていない。実際、数値計算の中のひとつひとつのモンテカルロイベントでは、正しい相関の情報が入っていないので、エネルギーと運動量は保存されない。ヒストリー平均した後に、これらが保存することがBoltzmann方程式の性質上保証されて

いるに過ぎない。

前節で述べたような、半導体ソフトエラー評価のように、放射線影響のミクロな取り扱いには、平均値の周りの分散や分布が重要となる。所謂マイクロシメトリック的アプローチである。マイクロシメトリック分野では、平均量に対して、統計的側面、確率的量、微視的量等として議論されるが、物理的に見れば、これらを決定しているのは、多体の情報、即ち相関の情報である。高エネルギー核反応モデルでのイベントジェネレーター概念が、低エネルギー領域の輸送計算にも必要となってくる理由である。

PHITSでは、高エネルギー領域では、核反応モデルとして、イベントジェネレーターを用いているが、20MeV以下の核データを使う中性子輸送に関しては、従来のMCNPタイプの輸送コードを用いている。従って、2つのタイプの輸送コードがPHITSの中には混在していることになる。そこで、20MeV以下の核データを使う中性子輸送に関しても、イベント毎にエネルギーと運動量が保存する、即ち、核反応からの全ての放出粒子と反跳核のエネルギーと運動量を記述できるモデル、イベントジェネレーターを開発した。これにより、ミクロな領域での放射線挙動に重要な平均値周りの強度分布等の観測量を扱えるようになった。この試みは世界でも初めてのもので、今後、上に述べた半導体のソフトエラーの解析を含め、放射線影響のよりミクロな視点からの解明や、物質、生命のマイクロシメトリック的なアプローチへの橋渡しが期待される。

イベントジェネレーターモードの最もシンプルな例題を次に紹介する。図12の結果は、19MeVの中性子が3 μm の厚さのSiに入射したときのSi内でのエネルギー付与分布である。従来のMCNPタイプの計算でエネルギー付与を計算するときは、カーマ(kerma)と呼ばれる、中性子反応で生成される荷電粒

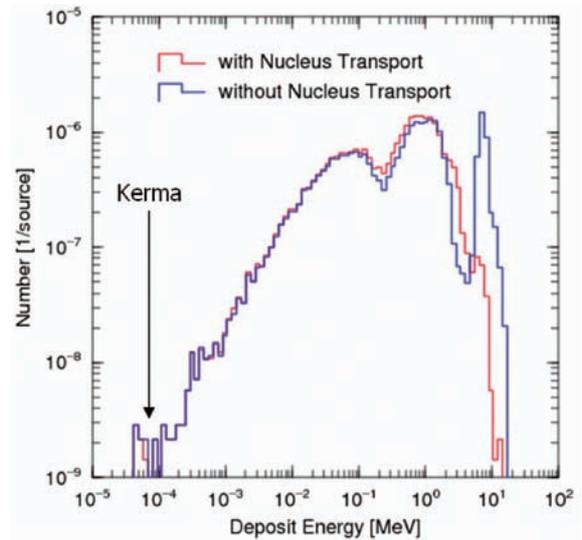


図12 19MeVの中性子が3 μm のSiに入射したときのエネルギー付与分布

子の運動エネルギーの和の平均値の核データと、Si内での中性子のフラックスを乗じて求める。この場合、Siの厚さが非常に薄いため、Si内の中性子のエネルギー分布はほぼ単色なので、カーマを用いたエネルギー付与は、図12の矢印の100eVの位置に δ 関数的に現れる。スペクトルに分布があっても、この方法では、エネルギー付与の分布は求められず、平均値が求まるだけである。一方、これをPHITSのイベントジェネレーターモードで計算すると、図中の青線のように広範囲な分布が得られる。半導体のソフトエラーは、あるしきい値以上のエネルギー付与のときにエラーが発生することから、この分布の形が重要である。更に、PHITSでは、反跳を受けた原子核や生成された荷電粒子の輸送を取り扱える。通常、これらは、運動エネルギーが小さく、物質中でのレンジが非常に小さいため、局所近似、即ち、荷電粒子は生成された場所で全ての運動エネルギーを熱として付与するという近似を用いる。しかしながら、考えている物質のサイズが、このレンジと同等になると、この局所近似は成立しない。実際、PHITSで局所近似を用いず、これらの荷電粒子も輸送させた結果が赤線である。局所

近似(青線)のときに見られた10MeV近傍のピークが消滅している。これは、Si内で生成された高いエネルギー荷電粒子の一部が、Siの外に輸送され、そのエネルギーをSiには、付与しなかったことを示している。この主成分は α 粒子である。このように微小領域でのエネルギー付与を考える場合には、イベント毎の付与エネルギー分布が重要であると共に、反跳原子核、生成荷電粒子の輸送も考慮しなくてはならない。PHITSのイベントジェネレーターモードにより、20MeV以下の中性子輸送に関しても、これらを取り扱えるようになった。

9. まとめ

PHITSは、エネルギー範囲、輸送粒子の拡張によって、原子力の幅広い分野に利用されるとともに、異なる分野の関連付け、研究の交流のための横糸の役割も果たして来た。また、イベントジェネレーターの試みは、これまでの原子力の分野が一体の物理量の世界であるとすれば、一体を超える、多体の物理量の世界へ誘う新たな縦糸としての役割を果たすのではないかと期待している。

謝辞

本報告は、東北大学の中村尚司氏、原子力機構の佐藤達彦氏、高エネルギー加速器機構の岩瀬広氏の協力のもとに作成されました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) H.Iwase, K.Niita and T.Nakamura, *J.Nucl. Sci. Technol.* **39** (2002) 1142.
- 2) H. Nakashima, et. al., "Research Activities on Nuclonics under ASTE Collaboration at AGS/BNL", *Proc. of Int. Conferece on Nuclear Data for Science and Technology*, Tsukuba, Japan, 2001.; "Current Status of the AGS Spallation Target Experiment", *Proc. of the 6th meeting of the Task Force on SATIF*, SLAC, 2002.
- 3) M. Harada, N. Watanabe, C. Konno, S.Meigo, Y. Ikeda, K. Niita, *J. Nucl. Material.* **343** (2005) 197.
- 4) T.Sato, K.Niita, H.Iwase,H.Nakashima, Y. Yamaguchi and L.Sihver, *Radiat. Meas.* **41** (2006) 1142.
- 5) H.Matsumoto, T.Goka, K.koga, S.Iwai, T.Uehara, O.Sato and S.Takagi, *Radiat Meas.*, **33** (2001) 321.
- 6) T. Sato, S. Tsuda, Y. Sakamoto, Y.Yamaguchi and K.Niita, *Radiat. Prot. Dosim.* **106**(2) (2003) 137.
- 7) T. Sato, S. Tsuda, Y. Sakamoto, Y.Yamaguchi and K.Niita, *J.Nucl. Sci. Technol. Suppl.* **4** (2004) 287.
- 8) T.Fukahori et al., *J.Nucl. Sci. and Technol. Suppl.*2, (2002) 25; Y.Watanabe, et al., *Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, Santa Fe, USA, Sep.26-Oct.1, 2004; *AIP CP769* (2005) p326-331.
- 9) T. Sato and K. Niita, *Radiat. Res.* **166** (2006) 544.
- 10) <http://www3.tokai-sc.jaea.go.jp/rphpwww/radiation-protection/expacs/expacs.html>
- 11) H.Nose, K.Niita, M.Hara, K.Uematsu, O.Azuma, Y.Miyauchi, M.Komori and T.Kanai, *J.Nucl. Sci. Technol.* **42**(2) (2005) 250.
- 12) T. Sato, R. Watanabe and K. Niita, *Radiat. Prot. Dosim.* **122** (2006) 41.
- 13) H.Kumada, K.Yamamoto, A.Matsumura, T.Yamamoto, Y.Nakagawa, N.Nakai, T.Kageji, "Verification of the Computational Dosimetry System in JAERI for boron

neutron capture therapy", *Physics in Medicine and Biology*, **49** (2004) 3353;
H.Kumada, K.Yamamoto, T.Yamamoto,
K. Nakai, Y. Nakagawa, T. Kageji,
A.Matsumura, "Improvement of dose
calculation accuracy for BNCT dosimetry
by the multi-voxel method in JCDS",

Applied Radiation and Isotopes, **61**
(2004) 1045.

14) Y. Arita, K. Niita, M. Takai,
T.Kishimoto, I.Ogawa, T.Yoshihara, and
J.Mitsubishi, to be published in JJAP
2007.