

# 高エネルギー中性子輸送計算コード開発の現状 ～ 高精度線量評価を目指して ～

## Review of High Energy Neutron Transport Code in Terms of Dose Evaluation

日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門  
環境・放射線工学ユニット 放射線防護研究グループ

佐藤 達彦

高エネルギー加速器施設の作業員、航空機の乗務員及び宇宙飛行士に対する被ばく線量評価では、20MeV以上の高エネルギー中性子による被ばくが問題となる。しかし、高エネルギー中性子は、一般に物質との反応過程が複雑であるため、その線量の正確な測定は極めて困難である。したがって、高エネルギー中性子輸送を扱えるモンテカルロ計算コードの開発が世界各国で精力的に進められ、線量評価に利用されている。本報告では、それら計算コードの開発の現状について解説し、その使用時における留意点や、今後解決すべき課題について整理する。

### 1. はじめに

高エネルギー加速器施設の作業員、航空機の乗務員及び宇宙飛行士に対する被ばく線量評価では、従来の原子炉やRI施設の作業員に対する評価では無視することのできた、20MeV以上の高エネルギー中性子による被ばくが問題となる。高エネルギー中性子は、一般に物質との反応過程が複雑であるため、その線量の正確な測定は極めて困難である。したがって、その評価は計算に大きく依存している。

このような背景から、高エネルギー中性子の輸送を扱える計算コードがいくつか開発され、線量評価に利用されている。それらの計算コードは、ボルツマン方程式を決定論的手法に基づいて解くタイプ（決定論的コード）と、モンテカルロ法を用いるタイプ（モンテカルロコード）の2種類に分類できる。

決定論的コードは、短い計算時間で大きな体系中における粒子挙動を解析することができるため、加速器の遮へい設計や大気中の粒子輸送計算など、主に、極めて大きな体系に

対する計算に採用されてきた。一方、モンテカルロコードは、精度は良いが計算時間が長いいため、検出器や加速器ターゲット設計、人体内での粒子挙動解析など、主に、複雑な体系に対して精度を要求される計算に使用されてきた。しかし、CPUの性能向上やメモリの増大など急速なコンピュータ技術の進歩により、モンテカルロコードの欠点である計算時間の問題が緩和され、近年、その適用範囲が広がっている。それに伴い、独自のモデルや機能を備えた様々なモンテカルロコードが世界各国で開発され、公開されている。

本報告では、それらモンテカルロコード開発の現状について解説し、その使用時における留意点や、今後解決すべき課題について整理する。

### 2. 計算コード開発の現状

高エネルギー中性子に対する線量評価の実績があり、現在も開発が進められている代表的なモンテカルロコードを表1にまとめる。以下、各コードの特徴や採用しているモデル

表1 高エネルギー中性子に対する線量評価の実績があり、現在も開発が進められている代表的なモンテカルロコードの特徴

計算コード	主な開発機関	特徴
FLUKA <sup>2)</sup>	CERN	汎用計算コード、線量評価実績多数
MCNPX <sup>9)</sup>	LANL	汎用計算コード、核データ利用可
MARS <sup>12)</sup>	Fermi Lab.	汎用計算コード、重イオン輸送可、短計算時間
GEANT4 <sup>14)</sup>	CERN, KEK他	シミュレーションツールキット、オブジェクト指向
PHITS <sup>1)</sup>	RIST, JAEA, GSI	汎用計算コード、重イオン輸送可、核データ利用可

の概略を示す。なお、筆者は、PHITS<sup>1)</sup>の開発に携わっており、他のコードと比較してPHITSに関する記述が多い点に関してご了承いただきたい。また、PHITS以外のコードに関する記述は、必ずしも最新の開発状況を反映していない可能性があることをご理解していただきたい。

## 2.1 FLUKA

FLUKA<sup>2)</sup>は、熱エネルギーから20TeVのハドロン、光子、電子、ミュオン、ニュートリノなど、重イオン以外のほとんど全ての粒子に対する輸送を扱うことができる汎用粒子輸送計算コードである。その開発は、欧州原子核研究所（CERN）において1960年代から継続的に進められている。重イオン輸送に関しては、専用のパッチを当てることにより計算可能となる。

FLUKAは、中性子輸送計算に関わるモデルとして、20MeV以下に対しては多群断面積データを用いるMORSEコード<sup>3)</sup>を基本としたモデル、20MeVから3GeVまでは前平衡<sup>4)</sup>及び蒸発過程<sup>5)</sup>を考慮した核内カスケード（Intra-Nuclear Cascade；以下INCと略す）モデル<sup>6)</sup>、3GeV以上に対してはDual Partonモデル<sup>7)</sup>を採用している。高エネルギー中性子による線量評価にFLUKAを適用した実績は数多くある。例えば、欧州で航路線量を計算するため標準的に使われているEPCARD<sup>8)</sup>は、FLUKAで計算した大気中の中性子スペクトルを採用している。

## 2.2 MCNPX

MCNPX<sup>9)</sup>は、FLUKAと同じく、重イオン以外のほとんど全ての粒子に対する輸送を扱うことができる汎用粒子輸送計算コードである。その開発は、20MeV以下の中性子輸送計算で世界的に用いられているMCNP 4<sup>10)</sup>の適用エネルギー範囲を拡張する目的で、米ロスアラモス国立研究所（LANL）において1990年代から進められている。

MCNPXは、150MeV以上の中性子輸送には他のコードと同じくINCを基本としたモデルを採用しているが、150MeV以下に対しては、評価済み核データファイルLA150<sup>11)</sup>を使用できるため、このエネルギー領域に対する計算精度がよい。（次章参照）

## 2.3 MARS

MARS<sup>12)</sup>は、重イオンを含むほとんど全ての粒子に対する輸送を扱うことができる汎用粒子輸送計算コードである。その開発は、1970年代にソ連で開始され、現在は米国国立フェルミ加速器研究所でその改良が進められている。20MeV以下の中性子輸送はMCNP4に接続し、20MeVから5GeVまでは前平衡及び蒸発過程を考慮したINCモデル、5GeV以上はQuark-Gluon Stringモデル<sup>13)</sup>を採用して計算する。MARSは、計算結果に大きく影響する生成2次粒子を優先的にサンプリングする方法を採用しているため、他のコードと比べて計算時間が短く、深層透過計算など大きな体系に対する計算に有利である。

## 2.4 GEANT4

GEANT4<sup>14)</sup>とは、他のモンテカルロコードと違い、物理モデルや計算方法を指し示す名前ではなく、各物理モデルを繋ぐインターフェイスや幾何学形状を作成するシミュレーションツールキットを表した名前である。その開発は、1990年代にCERN及び高エネルギー加速器研究機構（KEK）で開始され、現在はC++言語とオブジェクト指向技術を用いて世界各国の研究機関で並行して進められている。

GEANT4を用いて粒子輸送計算を行うためには、各ユーザーがその目的に応じた物理モデルのパッチを当てる必要がある。したがって、GEANT4には他のモンテカルロコードのように確定した物理モデルは存在しない。各物理モデルのパッチは、ウェブ上で公開されており、高エネルギー中性子輸送計算に必要なモデルとしては、前平衡及び蒸発過程を考慮したINCモデルやQuark-Gluon Stringモデルを組み込んだパッチなどが提供されている。また、GEANT4は、CADで作成した幾何学形状をシミュレーション体系として取り込めるため、複雑な体系中における粒子挙動を簡単に解析することができる。

## 2.5 PHITS

PHITS<sup>1)</sup>は、重イオンを含むほとんど全ての粒子に対する輸送を扱うことができる汎用粒子輸送計算コードである。PHITSは、日本原子力研究所（原研）で開発したNMTC/JAM<sup>15)</sup>を基に、東北大学及び高度情報科学技術研究機構（RIST）において2002年に開発され、現在はRIST、日本原子力研究開発機構（原子力機構）及びGSIでその改良が進められている。

PHITSは、中性子輸送計算に関わるモデルとして、20MeV以下に対してはMCNP4を基本としたモデル、20MeVから3.5GeVまでは前平衡及び蒸発過程を考慮したINCモデル、

3.5GeV以上に対してはJAMモデル<sup>16)</sup>を採用している。また、オプションで、量子分子動力学を採用したJQMDモデル<sup>17)</sup>を選択することも可能である。さらに、LA150や、現在日本で開発中の評価済み高エネルギー核データファイルJENDL High Energy File<sup>18,19)</sup>（JENDL/HE）を利用可能なため、これらのライブラリを使用すれば、中・高エネルギー中性子に対して従来よりも精度の高い線量評価が可能となる。そのうえPHITSは、極めて洗練された重イオン核反応モデルを組み込んでいるため、重イオン加速器や宇宙船内など、重イオン核反応により生成される中性子被ばくが問題となる体系における線量を精度良く評価することができる<sup>20)</sup>。

## 3. 考察

以上のコード開発の現状を踏まえて、高エネルギー中性子線量をより高精度に評価するため、今後解決すべき課題について整理する。

### 3.1 核内カスケードモデルの改良

核内カスケード（INC）モデルは、原子核を古典的な点核子の集合と仮定し、そこに入射した核子と原子核内の核子が2体衝突反応を引き起こしながらカスケードを形成していく過程を模擬する核反応モデルである。その開発は、米国オークリッジ国立研究所で1960年代に開始され、世界各国の様々な研究機関でその改良が行われてきた。中重核の核反応に対する実験値の再現性が良く、現在使用されているほとんど全ての中性子輸送モンテカルロコードで採用されている。

しかし、INCモデルは、入射粒子のエネルギーが低く、ターゲット核の質量数が小さい場合、2次粒子生成微分断面積などの実験データを再現できない傾向があることが知られている。これは、INCモデルで採用している核構造モデルが、低エネルギー入射かつ軽核ターゲットに対する核反応で特に重要とな

る表面効果を十分に考慮していないからである。また、軽核は、核反応における原子核殻構造の影響が大きく、その影響を考慮していない点も、上記不一致の原因と考えられている。人体は、主に水素、炭素、酸素、窒素などの軽核で構成されるため、より精度の高い線量評価のためには、これらの核種に対する核反応をより正確に再現できるモデルの確立が望まれる。

### 3.2 高エネルギー核データファイルの整備

現在、20MeVから数GeVまでの中・高エネルギー中性子に対する評価済み核データファイルの開発が世界各国で精力的に進められている。米国では、ブルックヘブン国立研究所(BNL)でパイオニア的な研究がなされた後、LANLにて150MeVまでの核データファイルLA150<sup>11)</sup>が開発され、公開されている。日本では、原子力機構を中心としたシグマ委員会高エネルギー核データ評価ワーキンググループが、3 GeVまでの核データファイルJENDL/HE<sup>18,19)</sup>を作成中であり、その輸送計算コード用ライブラリが近日公開予定である。

核データファイルに格納する断面積は、各ターゲット核種に対して、実験データやそれに基づく系統式、核理論計算を用いて総合的に評価される。したがって、INCのような画一的なモデルによる計算値よりも、実験値に対する再現性は必然的に高くなる。今後、様々な核種に対する高エネルギー核データファイルが整備されることにより、より高精度な高エネルギー中性子線量評価が可能となると期待できる。

### 3.3 核データを利用したイベントジェネレータの開発

一方、核データを用いてある量を評価する

際、求められる量はその平均値であり、その統計的なゆらぎは求められないことに注意する必要がある。例えば、高エネルギー中性子検出用シンチレータの応答関数を計算するためには、各入射粒子によるエネルギー沈着量の分布が必要となり、その計算を核データのみ用いて行うことはできない<sup>a)</sup>。これは、核データには生成2次粒子の相関に関する情報が入っていないため、2つ以上の粒子を放出する核反応チャンネルが開いた際、エネルギー及び運動量保存則が成立しないことに起因する。また、核データを用いて中性子によるエネルギー沈着量を計算する際に使用するカーマ近似は、エネルギー沈着量の平均値を導出するための近似であり、それを用いて統計的なゆらぎを計算することはできない。

そのようなゆらぎを計算するためには、イベントジェネレータを用いて核反応を模擬する必要がある。この場合、イベントジェネレータとは、INCモデルなど、模擬する反応系の中でエネルギー及び運動量保存則が成立し、輸送計算コードと独立して使用できるイベント発生ルーチンを意味する。現在のところ、20MeV以下の中性子核反応をイベントジェネレータで模擬できる汎用計算コードは、PHITSのみである。PHITSは、その計算に、核データに蒸発モデルを組み合わせ生成2次粒子間の相関を持たせたモデル<sup>21)</sup>を採用している。しかし、このモデルは高エネルギー核データには適用しておらず、高エネルギー中性子核反応をイベントジェネレータで模擬するには、INCなど他の核反応モデルを採用する必要がある。

例として、PHITSを用いて計算した、直径・厚さともに5インチの液体シンチレータに10及び100MeVの中性子が入射したときのエネルギー沈着量分布を図1に示す。図より、核データファイルLA150にカーマ近似を適用し

a:低エネルギー中性子入射で、2つ以上の粒子を放出する核反応チャンネルが開かない場合は計算可能である。

て計算した結果は、体系内で反応しなかった中性子によるピークが見られる。また、100MeV入射の場合、2つ以上の粒子を放出する核反応チャンネルが開くためエネルギー保存則が成立せず、沈着エネルギーが入射エネルギーよりも大きくなるイベントが存在する。このように、核データを用いてある量の統計的なゆらぎを計算すると、物理的に起こり得ない結果を得る可能性がある。一方、イベントジェネレータを使用して核反応を模擬した場合、上記のような問題は発生しない。今後、高エネルギー核データを利用したイベントジェネレータの開発を進めるとともに、各ユーザーが自分の用いるモデルの特徴を十分に理解して計算コードを使用することが望まれる。

#### 4. まとめ

高エネルギー中性子線量評価に適用できるモンテカルロコード開発の現状について解説し、将来に向けて解決すべき課題について整理した。今後、各コードが使用する計算モデルは多様化する方向にあり、各ユーザーが自

分の目的に適したコード及びモデルを選択する必要性が高まると予想される。本報告が、その手助けとなれば幸いである。

#### 謝辞

本報告を作成するにあたり数多くの貴重な助言を頂きました高度情報科学技術研究機構の仁井田浩二氏、九州大学の渡辺幸信助教授、日本原子力研究開発機構の中島宏氏、遠藤章氏、佐藤大樹氏に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) H. Iwase *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., **39** (2002) 1142.
- 2) A. Fasso *et al.*, Proc. of the Monte Carlo 2000, Lisbon, Oct. 23-26 (2001) 955.
- 3) M. B. Emett, ORNL-4972 (1975).
- 4) J. J. Griffin, Phys. Rev. Lett., **17** (1966) 478.
- 5) I. Dostrovsky *et al.*, Phys. Rev. **111** (1958) 1659.

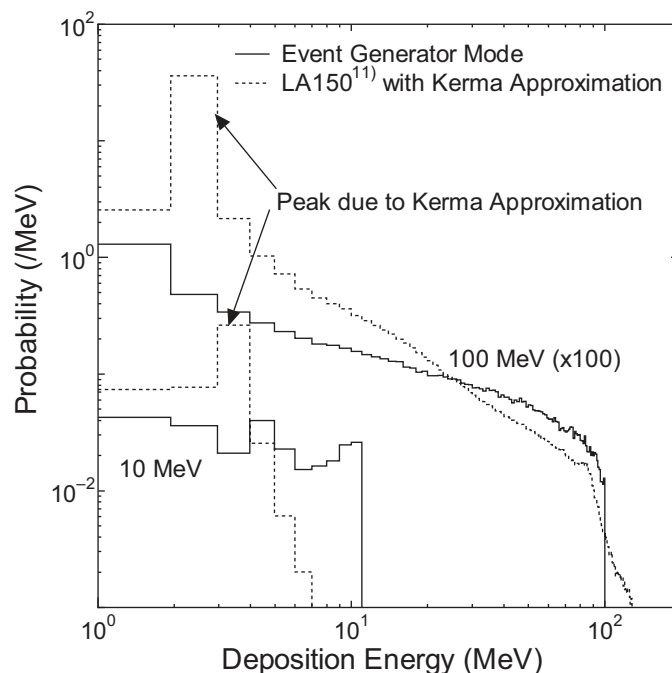


図1 PHITSを用いて計算した、直径・厚さともに5インチの液体シンチレータに10及び100MeVの中性子が入射したときのエネルギー沈着量分布。

- 6) H. W. Bertini, Phys. Rev. **131** (1963) 1801.
- 7) A. Capella *et al.*, Phys. Rep. **236** (1994) 225.
- 8) H. Schraube *et al.*, GSF-Bericht 08/02 Neuherberg (2002).
- 9) J. S. Hendricks *et al.*, LA-UR-05-2675 (2005).
- 10) J. F. Briesmeister, LA-12625-M (1997).
- 11) M. B. Chadwick *et al.*, Nucl. Sci. Eng. **131** (1999) 293.
- 12) N. V. Mokhov, FERMILAB-FN-628 (1995).
- 13) N. S. Amelin *et al.*, Sov. J. Nucl. Phys. **52** (1990) 172.
- 14) S. Agostinelli *et al.*, Nucl. Instr. Meth. **A506** (2003) 250.
- 15) K. Niita *et al.*, JAERI-Data/Code 2001-007 (2001).
- 16) Y. Nara *et al.*, Phys. Rev. **C61** (1999) 024901.
- 17) K. Niita *et al.*, Phys. Rev. **C52** (1995) 2620.
- 18) T. Fukahori *et al.*, J. Nucl. Sci and Technol. **Suppl.2** (2002) 25.
- 19) Y. Watanabe *et al.*, Proc. of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, USA, Sept.26-Oct.1, 2004; AIP Conference Proc. 769 (2005) 326.
- 20) T. Sato *et al.*, Proc. of 6<sup>th</sup> International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application, Tsukuba, Oct. 6-8 (2004) 25.
- 21) T. Sato *et al.*, Radiat. Prot. Dosim **106** (2003) 145.