

放射線治療等に資するシミュレーション方法の調査研究

(財)高度情報科学技術研究機構 仁井田 浩二

物質中の放射線の挙動を解析する数値シミュレーションは、主に原子力エネルギー分野で発展してきた。従来の原子力分野で用いられてきた粒子輸送モンテカルロコードは、一体のボルツマン方程式を基礎とする輸送コードである。従って、これらのコードによって計算される物理量は、フラックス、線量、発熱等、ある領域での平均的な一体の物理量に限られる。しかしながら、半導体の放射線によるソフトエラーの問題、生命体の細胞や DNA レベルでの放射線の影響、放射線による物質損傷の微視的メカニズム等、よりマイクロなレベルでは、平均的な一体の物理量ではなく、イベント毎の最大強度などの平均値の周りの分散が問題となってきている。即ち、関連の情報を含む多体の物理量である。これらの量を扱うためには、ひとつひとつの核反応を直接模擬できるイベントジェネレーターと呼ばれる新しい手法を輸送コードに導入する必要がある。本調査研究では、各分野でのニーズと開発状況を調査し、核反応を直接模擬する新しいシミュレーション方法、具体的には、粒子・重イオン輸送コード PHITS に取り込むべきイベントジェネレーター機能を設計し、プロトタイプを作成することを目的とした。

全ての粒子の物質中の輸送を、低エネルギーから高エネルギーまで取り扱うことのできる統合シミュレーションコードの現状の調査のため、平成18年10月22日から3日間、ベルギー、アントワープで開催された第一回モンテカルロ治療計画ヨーロッパワークショップ (First European Workshop on Monte Carlo Treatment Planning) と、平成18年11月13日から4日間開催された米国アルバカーキ、米国原子力学会 Winter Meeting の中で、米国原子力学会の加速器施設の遮蔽分科会が主催した遮蔽のための計算コードの企画セッションの2つの会議に出席した。

ベルギーのアントワープで開催されたモンテカルロ治療計画の会議では、基本的に1次元の簡易モデルを用いて運用されている現状の線量計算コードに対して、強度変調放射線治療 (IMRT) 等の照射技術の進歩、PET、CT、MRI 等の測定技術の進歩に伴い、それらを支えるより高精度の線量計算コードが強く求められていることが示された。研究レベルで多く実施されている3次元モンテカルロ詳細計算により、1次元簡易モデルの問題点が定量的に明らかにされ、3次元モンテカルロ計算コードが、今後の治療計画ソフトウェアの主流になることが確認された。現実的な問題としては、PET、CT、MRI のデータからモンテカルロ計算モデルを作成するアルゴリズムの改善、高細密ボクセルデータの計算速度の改善等が挙げられる。3次元モンテカルロ計算により、空間的な分解能が増し、複数の組織が複雑に関係した患部での治療計画の精度が向上することが期待されている。治療計画では、3次元モンテカルロ法が民間レベルでも導入されつつある現状であるが、研究レベルでは、次の段階として、細胞や DNA 等の微視的な放射線の影響という観点から、イベントジェネレーターの機能を有したシミュレーションの必要性が認識され、本会議で発表した BNCT

の微視的な解析は、モデルとして単純化されたシンプルモデルではあるが、今後のマイクロシメトリ的アプローチのひとつとして注目を集めた。

米国原子力学会の分科会では、ほぼ全ての粒子の物質中の輸送を、低エネルギーから高エネルギーまで取り扱うことのできる統合シミュレーションコードの世界的現状として、次の5つのコードについての議論がなされた。米国ロスアラモス研究所のMCNPXコード、世界の研究機関の協同によるGEANT4コード、イタリア国立核物理研究所とCERNのFLUKAコード、米国フェルミ研究所のMARSコード、そして当財団と日本原子力研究開発機構のPHITSコードである。これらの中でPHITSは、開発規模や、ユーザー数等は小規模であるが、ドイツGSI（ドイツ重イオン研究所）の将来計画FAIR、米国の次期加速器計画RIA（Rare Isotope Accelerator）、理研のRIビームファクトリー等の世界を代表する重イオン加速器施設の概念設計や遮蔽設計に使われ、重イオン（原子核）の輸送が取り扱える総合コードとして、現在、世界をリードするものとなっている。現状のPHITSの問題点は、高エネルギーの核反応に関しては、粒子入射の高エネルギー核反応にJAM、重イオン反応（原子核・原子核反応）には核子間力を基礎とする分子動力学（Molecular Dynamics）手法のJQMDという、いずれもイベント毎の情報が記述できるモデルになっているが、従来の原子力の分野である、核データを用いる低エネルギーの中性子の輸送に関しては、イベント毎の情報を記述することはできないことである。この領域を含めて、広い分野で利用可能なイベントジェネレーターが実現されれば、新しい原子力の研究分野に資するとともに、PHITSが汎用モンテカルロシミュレーションコードとして更に世界をリードすることとなる。

本調査研究では、PHITSの低エネルギー中性子輸送部分に、核データと核反応モデルを組み合わせた簡単なモデルを作ることによって、全エネルギー領域でイベントジェネレーターを実現した。今回作成したモデルは、まだ、プロトタイプの域を出ていないが、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、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的アプローチへの橋渡しが期待される。

PHITSは、エネルギー範囲、輸送粒子の拡張によって、現在建設中のJ-PARCの加速器、中性子分光器、また、粒子線治療施設、宇宙線起源の放射能評価、半導体のソフトエラー評価等のように、原子力分野だけに限らない幅広い分野で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系の役割も果たして来た。本調査研究で行った、イベントジェネレーターの試みは、これまでの放射線挙動のシミュレーションが一体の物理量の世界で行われてきたとすると、一体を超える、新しい多体の物理量の世界へ誘う新たな縦系としての役割を果たすのではないかと期待している。