

放射線治療に用いられる高エネルギー核データの現状と今後の展望



岩本 修
Iwamoto Osamu



国枝 賢
Kunieda Satoshi



岩本 信之
Iwamoto Nobuyuki

1 はじめに

核データは歴史的に原子炉の設計計算での利用が主であったため、中性子と原子核との核反応を主な対象として、研究やデータベースの開発が行われてきた。しかしながら、この核反応データ（核データ）には汎用性があるので、原子炉のみならず、中性子に関わるさまざまな分野で利用することが可能である。また、加速器を用いた高エネルギー中性子の利用や中性子以外の入射粒子へ対応した核データの整備も進められている。これらの核データは放射線治療による線量評価や治療計画策定へも利用可能なものである。ここでは、放射線治療分野への関わりが深い高エネルギー核データについて、データベースの開発という側面から紹介することにより、これらのデータの利用が促進され放射線治療分野へ貢献できることを期待する。

（国研）日本原子力研究開発機構（JAEA）では、原子炉や加速器施設での放射線輸送計算に必要となる核反応の起こりやすさを表す断面積に加えて、核反応によって生成される二次粒子のエネルギーや角度分布等の基礎データをまとめ、シミュレーション計算コードで利用しやすい形式にまとめた評価済核データライブラリ JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library)¹⁾を開発している。これらのデータは物質内での放射線挙動に関するシミュレーションの結果に大きな影響を与えるため、高い精度を持

つものが求められる。放射線治療分野では、さまざまな種類の放射線が利用されており、高いエネルギーの放射線が標的や装置、体内でどのような核反応を起こしているかを精度良く予測することができれば、放射線による線量評価や効果的な治療の推進に貢献できると考えられる。粒子輸送計算を行う PHITS²⁾等のシミュレーション計算コードでは、核反応に関する物理モデルを取り込んでおり、さまざまな高エネルギー放射線の計算が可能となっている。JENDL では、シミュレーションの精度を更に高めるために、高エネルギーの中性子や陽子との核データをまとめた JENDL 高エネルギーファイル、電子線加速器等で発生した光子と原子核との核データをまとめた JENDL 光核反応データファイルを公開している³⁾。本稿では、これらの核データを評価するのに重要な核反応のモデルを含め、放射線治療に関わるシミュレーション計算に利用可能なこれらの核データの概要について紹介する。

2 核反応モデル計算

高エネルギーの中性子や陽子等が原子核と衝突すると、非常に多くの種類の核反応を起こす。しかし、これらの核反応を網羅した測定データが存在しないため、限られた測定データを考慮しつつ核反応の理論モデルに基づいて最も確からしい核データを導出することになる。しかしながら、現状の核反応理論

では、多くの核種や広い入射エネルギー範囲、さまざまな核反応について、精度良く予測できる単一の方法は無い。そのため、JAEA で独自に開発した核反応モデル計算コード CCONE^{4,5)} では、断面積、二次粒子のエネルギーや角度分布の計算に有効なさまざまなモデルを統合し、核反応モデル間の物理的な整合性を保つことで、計算結果の信頼性を高めている。これらの核反応モデルにあるパラメータを最適化することで、さまざまな核反応の測定データを再現し、精度を高めている。つまり、JENDL 等に収録されたデータは、測定データと核反応モデル計算を総合して、個々の核種や反応に関して最も確からしい値を推定したものである。

PHITS では、モンテカルロ法により計算を行うため、イベントごとにある程度短い時間で計算が終了することが求められる。しかしながら、核反応モデル計算では、この制約が少ないため、より詳細な核反応の理論モデルを使うことが可能である。このようなことから、核データを用いることで PHITS 内のモデルを用いた場合より予測精度を向上できる可能性があり、JENDL では高エネルギー核データについて開発を行っている。

3 高エネルギー中性子・陽子核反応データ

原子炉において U や Pu が核分裂した際に生じる大部分の中性子が持つエネルギーは数 MeV 以下である。また、核融合炉において D-T 反応で生じる中性子のエネルギーは 14 MeV にピークを持った分布となる。したがって、原子炉や核融合炉の設計に用いる核データは主に中性子の断面積であり、エネルギーの上限は数十 MeV もあれば事足りる。一方、ここ数十年の間に加速器を使った基礎科学の研究や応用を見据えた研究が本格的に行われるようになった。例えば、原子炉で発生する長寿命放射性廃棄物の処理方法の 1 つとして、大強度陽子加速器と未臨界炉を組み合わせた加速器駆動未臨界システム (ADS) が提案されており、その実現に向けた基礎研究が精力的に行われている。医療分野においては、小型陽子線加速器による放射性薬剤の開発や放射線治療が広く普及しようとしている。また、近年では老朽化した構造物や核物質の非破壊分析においても小型加速器による中性子の利用が検討されている。

これらに関するシミュレーションを行うにあたり、PHITS は極めて有用である。PHITS では 20 MeV 以下の中性子入射核データに JENDL 等の核データライブラリを用い、より高いエネルギーにおける核データはコード内に実装された核内カスケード (INC) や分子動力学 (QMD) 等のモデルで計算される。したがって、ほぼすべての核反応を取り扱うことができる。しかし、INC や QMD では原子核内の核子を古典力学的に扱っているため、量子力学的効果が大きくなる約 100 MeV 以下の核データには測定データと計算値の間に大きな食い違いが生じることが知られている。100 MeV 以上であっても、核種生成に対する断面積の計算精度に課題があった。

2007 年に JAEA を中心とした研究グループにより 3 GeV までの陽子・中性子に対する核データを収録した高エネルギーファイル JENDL/HE-2007⁶⁾ が公開された。このファイルは米国産の核反応モデルコード及び INC や QMD の評価計算結果を組み合わせで整備された。また、20 MeV 以下のデータは当時の汎用核データライブラリの最新版であった JENDL-3.3 が採用された。公開後には、国内外の加速器遮蔽研究や ADS の基礎研究に参照されている。更に、国際原子力機関を中心に整備された核融合炉開発のための核データライブラリ FENDL-3 へ半数近い核種の核データが採用されるなど、国際的にも高く評価された。

しかし、JENDL/HE-2007 には応用上の大きな弱点があった。それは、Li や Be に対する核データが収録されていないことである。Li や Be は小型加速器中性子源のターゲット材として極めて有用な原子核であり、特に陽子入射核データの収録については産学から強い要望があった。一方、質量数の小さな原子核 (軽核) は個性の塊であり、中重核のように周辺核種との類似性を利用した測定データからの内外挿が困難であった。そこでこの要望に対応するために、筆者らのグループでは荷電粒子入射にも適用可能な新たな共鳴解析コード AMUR⁷⁾ を開発した。また、軽核の (p,n) 反応によって二次中性子のエネルギー分布に現れる顕著なピークを理論的に計算するために、国外の研究者と協力して原子核による中性子や陽子の散乱を精度よく計算できる光学モデルコード OPTMAN⁸⁾ を改良して、(p,n) 反応についても計算を可能にした。更に、さまざまな測定デー

タを用いて、CCONEにおけるモデルパラメータをLiやBeターゲット用に最適化した。これら3つのコードを組み合わせることで、200 MeVまでの陽子入射核データを世界で初めて整備した。

高エネルギーファイルの最新版は、2015年に公開されたJENDL-4.0/HE⁹⁾である。JENDL/HE-2007との大きな違いは前述のLiやBeに対する陽子入射核データが収録されていることである。また、多くの中重核の評価計算において、国産コードCCONEが適用された。更に20 MeV以下の中性子入射核データに対しては、すべて最新の汎用核データライブラリであるJENDL-4.0で更新されている。JENDL-4.0/HEでは収録データの最大エネルギーを下げた200 MeVとしたが、これはPHITSにおけるINCが改良され、200 MeV以上の核データ計算において精度が向上したことによる。今後は、中性子や陽子入射のみならず、重陽子や α 粒子等の核データも必要となるであろう。既に重陽子入射核データに関しては評価計算手法の開発に大きな進展があり、今後の核データライブラリ開発に期待していただきたい。

4 光核反応データ

近年、電子線加速器を使用したX線や γ 線（総称して光子と呼ぶ）による放射線治療が数多く行われている。電子線加速器における加速電圧は10 MV若しくはこれより大きな電圧を持つ加速器も利用されている。10 MV以上の加速電圧を持った電子線加速器を利用することのデメリットの1つとして、光子を発生させるために用いたターゲット材と光子との核反応による中性子の発生がある。発生した中性子はターゲット材のみならず、周りのコンクリートや鉄等の遮蔽材と核反応を起こすことで放射性核種を生成する可能性がある。このため、装置や施設の更新若しくは廃止措置等では生成及び蓄積された放射性核種を考慮した放射線安全の確保が求められる。

放射性核種の蓄積量を適切に評価するためには、加速器の運転状況に基づいた光子とターゲット材やその周囲の遮蔽材との核反応シミュレーションを行う必要がある。このシミュレーションを行うための基礎データの1つが、光子と原子核との核反応断面積データ（光核反応データ）である。この用途のた

めのデータとして、2004年に日本原子力研究所（現JAEA）から公開された光核反応データファイルJENDL/PD-2004¹⁰⁾があり、68種の原子核と光子との光核反応データが収録されている。しかしながら、コンクリートを構成する主要な元素のうち例えばCaについては^{40,48}Ca、Oについては¹⁶Oのみの収録となっており、組成比の多い核種を収録してはいるが、安定同位体でも未収録のものがあるため、詳細な評価を行うためには不十分となっていた。

そこで、このような用途にも対応した新しい光核反応データファイルの開発を行った。光核反応データの光子エネルギー範囲は、中性子等の粒子放出の閾エネルギーからパイオンの生成が起こる140 MeV¹¹⁾までとした。現在よく利用されている加速器の加速電圧の観点から考えると光子エネルギーは数MeVから20 MeVの範囲が最も重要となる。このエネルギー領域では光子が原子核に吸収されたときに、原子核内の中性子と陽子が逆位相で振動する現象を引き起こす。この領域の原子核の性質を理解するために1960年代頃から数多くの実験が行われており、非常に多くの核種について中性子の生成断面積の測定データがある。これらの断面積を再現するように、光子のエネルギーに依存した1本の断面積曲線を描くことができれば、核データの評価として十分である。しかしながら、必要とされるエネルギー領域や核反応のすべてに測定データが存在しないため、核反応理論に基づいて断面積の計算を実施し、測定データを内挿若しくは外挿する必要がある。このように測定データを再現すると共に、中性子及び陽子等が生成される断面積やどの方向へどのくらいのエネルギーを持って放出されるのか（二重微分断面積又は角度・エネルギースペクトルと呼ばれる）等のシミュレーションを行うために必要な情報についても評価を行い、これらのデータを収録した光核反応データファイルJENDL/PD-2016¹¹⁾を2017年に公開した。

このファイルには、ほぼすべての安定核を含む2,681核種を収録した。これにより、例えば図1に示すように、JENDL/PD-2004では中性子の発生が予想されなかった光子エネルギー領域（10 MeV以下）において中性子発生量の推定が可能になったり、18 MeVまでの中性子発生量の過小評価を改善することができるようになったりした。

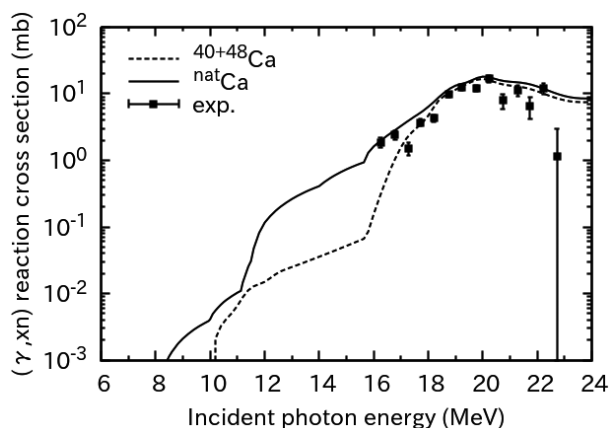


図1 光子入射によるCaの中性子生成断面積

点線はJENDL/PD-2004に収録された ^{40}Ca と ^{48}Ca のデータ（合計で天然Caの97.1%を占める）を使った結果。実線はJENDL/PD-2016に収録されたCaの全安定同位体から計算した天然Caの結果。四角点は天然Caに対する測定データ

今後、電子線加速器施設における中性子の発生量を低減する遮蔽材の研究開発や施設の放射化量推定に必要な核種の他に、長寿命核分裂生成核種である ^{99}Tc 、 ^{129}I 、 ^{135}Cs 等の収録もあることから、光子を用いたこれらの核種の安定若しくは短寿命核種への変換量推定への利用も可能である。また、核セキュリティのための光子を用いた核分裂性核種の非破壊検査、宇宙での超新星爆発における光子誘起元素合成（ γ 過程元素合成）に関する研究等広い用途での利用が期待される。

5 おわりに

これまで、JENDLとして開発してきた高エネルギー核データについて、概要を紹介した。これらの核データは加速器を用いたさまざまな利用に用いる

ことが可能であり、放射線治療への利用も期待される。現状のPHITSにはJENDL-4.0が付属しているが、本稿で紹介したJENDL-4.0/HEに収録された中性子や陽子の高エネルギー核データ及びJENDL/PD-2016の光核反応データについても利用可能にするため、PHITSの開発グループと連携して開発を進めているところである。

現在、中性子核データについて、不確かさを表す共分散データが整備されており、原子炉の臨界性等の核計算では核データ起因の誤差についての議論が活発に行われているところである。シミュレーション計算の結果がどの程度の不確かさを持つかを定量的に評価できれば、放射線治療への利用においても活用できる可能性があると考えられ、今後の展開の1つとして、共分散データの利用拡大が期待される。

参考文献

- 1) K. Shibata, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 449 (2013)
- 2) T. Sato, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 684 (2018)
- 3) Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Agency; <https://www.ndc.jaea.go.jp/>
- 4) O. Iwamoto, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 687 (2007)
- 5) O. Iwamoto, *et al.*, *Nucl. Data Sheets*, **131**, 259 (2016)
- 6) Y. Watanabe, *et al.*, *J. Korean Phys. Soc.*, **59**, 1040 (2011)
- 7) S. Kunieda, *EPJ Web of Conferences*, **146**, 12029_1 (2017)
- 8) E. Soukhovitski, *et al.*, *JAEA-Data/Code* 2008-025 (2008)
- 9) S. Kunieda, *et al.*, *JAEA-Conf* 2016-004, 41-46 (2016)
- 10) N. Kishida, *et al.*, *AIP Conference Proceedings* **769**, 199-202 (2005)
- 11) N. Iwamoto, *JAEA-Conf* 2016-004, 53-58 (2016)

((国研)日本原子力研究開発機構)