

2015年日本原子力学会秋の大会

「シグマ」特別専門委員会活動報告と核データ研究の将来展望

(5) 加速器・医療応用分野における核データに期待される役割

高エネルギー加速器研究機構

佐波 俊哉

toshiya.sanami@kek.jp

1. はじめに

核データファイルは中性子の工学応用を主眼に 20 MeV までの中性子入射に対する多くの核種の反応断面積、二次粒子エネルギースペクトルを記述している。加速器の遮蔽設計においては、中性子は二次粒子として生成され、透過力が高く、放射化の原因となるために、その輸送と反応の評価が必要である。中性子の生成と輸送、反応には、経験式や計算コード、実験値に基づくパラメータがよく用いられており、核データは主に 20 MeV 以下の中性子輸送において、モンテカルロコードとともに利用されてきた。

図1に加速器の放射線安全設計で必要となるパラメータについて示す。加速粒子がターゲットやダンプ等に衝突しビームロスを引き起こす。このターゲット内での核反応を適切に取り扱い、エネルギー付与を見積もる必要がある。ターゲットからの二次粒子についてはその種類、生成量、エネルギー、角度分布から、空気、冷却水の放射化、遮蔽材料の透過、放射化を見積もる必要がある。

近年の計算コード(モンテカルロ法)の開発と核反応モデルの整備によりこれらのパラメータに対して、近似式を用いずに、二次粒子生成から求めたい量まですべてを計算することが可能となり、多くの加速器施設で適用されるようになってきている。この手法では実測との良い一致を示すことが多いが、一方で個々のデータ、モデルの適用範囲が見えにくく、結果の信頼度が示しにくい、個々の遮蔽や構造の重要度があらわになり

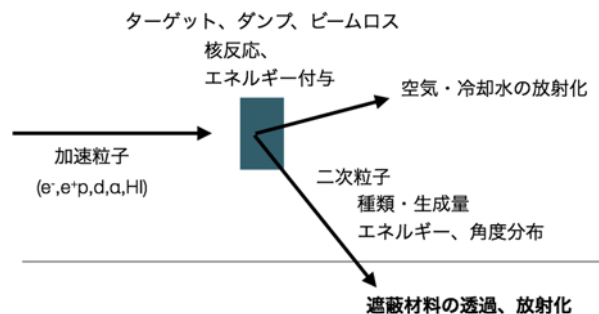


図1 加速器の放射線安全設計で必要とされるパラメータ

くいとといった難点もある。

また、最近の動向として、加速器の廃止措置に係わる指針において、計算をもって放射化の範囲を決定し、実測で確認することが進められている。近年の加速器の大型化、大強度化に伴い、設計裕度に対する厳しい要求、生成割合の低い核種の評価、深層透過の評価が必要となっている。

2014年現在、日本の加速器は総数が1,638台であり、そのうち医療用の直線加速器が1,066台と最多を占めている。その次に多いのは医療用のサイクロトロンで147台であり、これらを含めると医療用の加速器は全体の74.8%を占めている[1]。加速器への核データの応用を考えるに当たり、この割合は無視できない。

これらの状況において、対応する核データを整備して設計や管理に利用することにより、加速器とこれの医療応用において、一層の高度化が見込める。ここで言う核データの整備とは、実験データの取得、評価、モデルの構築、核データファイル化、その応用による検証の一連の繰り返しである。本稿では、2013年度に開催されたJENDL開発検討小委員会においてまとめられた内容[2]を中心に、BNCT、治療用リニアック、RI製造用サイクロトロン等の加速器医療応用と、エネルギー付与、材料損傷評価等の高エネルギー大強度加速器において期待される核データについてまとめ、加速器・医療分野における核データに期待される役割について述べる。

2. 治療用リニアック

治療用リニアックは、前述の通り、日本の加速器のおよそ65%を占め、最も多いタイプの加速器である。加速粒子は電子で、そのエネルギーはおおむね20 MeV以下である。加速された電子はターゲット等へ入射した際に制動放射による光子を放出するために、その影響の評価のためには光子入射に対する断面積が必要である。このエネルギー帯の光子の相互作用のうち中性子を生成するのは巨大共鳴反応が主であり、この中性子の遮蔽とその相互作用により空気中に生成する放射能の評価が必要になる。

必要とされる光子断面積は、一次電子エネルギーが低いことから反応の閾エネルギー付近のデータになる。また、空気の放射化について、従来問題とされなかったが、今後評価が要求される $^{16}\text{O}(\gamma,n)^{15}\text{O}$ ($T_{1/2}=2.04$ min)、 $^{14}\text{N}(\gamma,n)^{15}\text{N}$ ($T_{1/2}=9.96$ min)などの、生成量の多い短寿命核種についても推定が求められている。これらに使用できる核データとして、近日にリリースされる新しいJENDL/PDに期待したい。また、測定データが少ない核種については実験が必要とされており、近年整備されつつある、レーザーコンプトン散乱ガンマ線などの新しい光子源を用いた測定をすすめて行く必要がある。

3. 生成放射能評価

生成放射能の評価は様々な場面で必要になる。特に小型のサイクロトロンやタンデム

などの廃止措置においては計算で量と範囲を見積もり、実測値で妥当性を確認することが求められており、核データを用いた信頼性の高い計算推定が有効と考えられる。ここでは粒子束を計算し、これに放射化断面積を乗じて放射化量を推定する。この放射化量の推定により、部材のクリアランスを行う際の代表核種の決定が可能になる。様々な加速粒子について、反応の閾値付近の正確なデータが必要な場合が多い。

4. 陽子、重陽子の断面積の整備

数 MeV から 100 MeV までのエネルギーの陽子、重陽子は BNCT や PET 核種製造等の加速器の医療応用において加速粒子として用いられる。このため陽子、重陽子ビームとターゲット物質との反応断面積・反応生成物分布データ・放射化断面積、二次中性子・光子のエネルギー、角度微分断面積が加速器の遮蔽設計や放射化の評価のために必要とされる。特に、中性子源として期待される Li, Be, Ta, W の (p,n)、(d,n) 反応、PET の標識化合物製造で使用される ^{18}O (p,n) 反応については必要性が高い。また、ビームパイプ (Fe, Ni, Cr, Zr, Cu)、超伝導体 (Nb, He, Al, V)、コリメータ (W, Ta) など加速器を構成する材料をターゲットとした反応についてもビームロスとその影響評価の計算に使用される。近々リリースされる JENDL-4.0/HE のデータに期待したい。

5. 中性子の減速、検出に係わる反応

加速器のターゲットで生成したエネルギーの高い中性子を減速し、使用に適したエネルギーとするために、また、ビームダンプ、ビームロスによる中性子を効率的に遮蔽し、不要な放射化を防ぐために、中性子の減速と検出に係わる核データの整備が期待される。中性子の効率的な減速と、これに伴う光子線量を抑えるための減速材核種 (Pb, F, Mg, Ca, Na)、中性子の強度分布の把握に利用される核種 (In, Bi) の放射化断面積、中性子に対するカーマファクターを精度よく求めるための生体構成元素の (n, γ) 反応、標準断面積として用いられる、 ^{10}B (n, α)、 ^{14}N (n, p)、 ^1H (n, p) などについて、中性子生成に用いられるエネルギーから熱領域までの幅広い範囲でのデータが利用されるようになっている。今後の実験計画による実験データの取得と、減速材体系の計算による設計と実測の比較のデータが期待できることから、これらの知見の核データへの反映を行うことが必要であると考えられる。

6. 中高エネルギーの荷電粒子生成、放射化断面積

高エネルギー場において生成する放射化物の評価・推定、および高エネルギー粒子によるエネルギー付与の推定は、高エネルギー・大強度加速器の遮蔽設計・放射線管理、構成機器のクリアランス評価や、宇宙環境での半導体ソフトエラーの見積り、付与エネルギーや線量を計算するための基礎データとして重要である。このエネルギー領域における二次粒子生成は、モンテカルロコードに組み込まれたイベントジェネレータにより記述され

ており、モデルの検証のための実験データ取得、積分実験、放射化実験が多く行われるようになってきた。これらのモデルとデータ比較から、中高エネルギーの二次粒子生成、放射化断面積を核データとして整備することにより、照射影響評価の精度を大きく向上させることが期待される。特に半導体への影響評価では、データの検討と影響評価が系統的に行われており、その成果の核データへの取り入れに期待したい。一方で、二次粒子生成については対象粒子が複数になることから現状のデータフォーマットでは十分な記述ができないおそれがあるので検討が必要である。

7. 重イオン加速器の放射線安全設計に係わるデータ

治療を目的とした重イオン加速器の設置、運用が行われており、その遮蔽設計や二次粒子による線量の評価のために、重イオン入射に伴い生成する中性子、光子の発生量やエネルギースペクトル、角度分布が必要である。すでに治療に利用される入射イオン種・エネルギーについて実験データが取得されているが、手法の高度化・高精度化のためにはモンテカルロ計算が必須であり、これに用いるために実験データを評価し、核データを整備することは、計算精度の向上に寄与するものと考えられる。前項同様、多くの種類の入射粒子、ターゲット、二次粒子放出反応があり得るが、実験データの得られている入射イオン種、ターゲットについて進めていくことが必要と考える。

8. 材料損傷評価に必要な核データ

近年の ADS、IFMIF、核破砕中性子源、国際リニアコライダー (ILC)、LHC の High Luminosity upgrade などの大強度加速器の設計、運用においては、被照射材料、特にビーム出射窓やターゲット被覆材、コリメータなどに非常に大きい出力のビームが入射するおそれがあり、その損傷の程度を見積もることが重要となっている。この見積もりに必要とされるのは、10 MeV 以上の陽子、中性子照射に対する材料のはじき出し断面積とガス(陽子、ヘリウム)生成二重微分断面積である。はじき出し断面積については実験的検討が行われており、ガス生成二重微分断面積とともに、核データの一部として提供され、評価精度向上に寄与するものと期待される。

9. おわりに

加速器・医療応用分野における核データに期待される役割について、必要とされているデータを中心に概観した。ここに述べた必要とされるデータの多くは JENDL-4.0/HE と JENDL/PD により提供されるエネルギー、粒子、ターゲット核種によりカバーされることが期待できる。しかし、個別の応用を見た場合に、これではまだ不十分な場合も見られる。例えば、いくつかの BNCT の計画では、放射化反応が起きる閾値のごく近傍のエネルギーを利用するが、ここでは閾値付近の詳細なデータが必要とされ、広範なエネルギーをカ

バーするデータの与え方では十分な記述が得られない可能性が指摘される。このようなニーズは利用者・実験者・評価者の間のコミュニケーションで容易に拾い上げ、充足させることができると思われる。核データの整備とは、実験データの取得、評価、モデルの構築、核データファイル化、その応用による検証の一連の繰り返しである、と考えるゆえんである。

また、今回取り上げた範囲には、既存の中性子入射と核分裂・核融合応用を基軸とした核データの範囲を超えるものが多い。すでに核データの入射粒子とエネルギー範囲の拡大が進められているが、一方でこれまで基軸として提供してきたデータの高精度化の活動を継続すべきことは疑いのないところである。利用者・実験者・評価者の間のコミュニケーションに基づく整備戦略をどのように継続していくかということは今後の重要な課題と考える。評価データ情報の共有と品質保証の仕組み、必要なデータの取得の推進といった方策は、この目的にかなうものとする。

参考文献

- [1] 日本アイソトープ協会ホームページ 放射線利用統計
<http://www.jrias.or.jp/report/cat/101.html>
- [2] JENDL 委員会、JENDL 開発検討小委員会、JENDL 開発検討小委員会報告 -JENDL 開発の今後の方向性-、JAEA-Review 2014-046