

企画セッション（「シグマ」調査専門委員会主催、核データ部会共催）

「将来の核データ 一次世代 JENDL に向けてー」

(4) 医療用同位体生成と放射線治療線量評価

東京工業大学
シグマ調査専門委員会
石塚 知香子

Ishizuka.c.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

この 20~30 年ほどで核医学分野が飛躍的に発展し、それに伴って医療用同位体製造に必要な核データや放射線照射治療の一次被ばく線量評価のための核データも急ピッチで整備されてきた。医療用同位体 (RI) の中でも特に α エミッターは難治性癌の治療に高い効果が期待されることから現在も基礎データの取得が重要なテーマとなっており、国内外で基礎データの収集が進められている。医療用同位体製造に関して不足している核データや照射治療にあたる医療従事者の被ばく線量評価などに必要な、より高度な核データの整備が次のステップとして重要になってくる。そこで我々はこのような現状を踏まえ、医療用同位体・照射治療被ばくに関する話題を中心として、今後広い意味での医療業界で重要と成り得る核データについて検討することを目的としたワークショップを 2024 年 2 月 29 日に開催した。また、この際の議論に端を発し、二次被ばく線量評価や半導体のソフトウェアの要因として今後重要性を増すであろう「残留核の反跳」に関して、更に測定・評価手法の可能性やあり方を広く議論することを目的としたワークショップを 2024 年 8 月 5 日に開催した。本講演では、下記のように、これら二つのワークショップの講演内容の概略や将来の核データを見据えた議論のポイントを共有した。

2. 医療用同位体・照射治療被ばくに関するワークショップ

整備されつつある医療関連の核データとして、医療用同位体 (特に α エミッター) 製造に必要な核データおよび放射線照射治療の被ばく線量評価の高度化のための核データに着目した。また今後整備が必要な核データとして、医療用同位体製造に関して不足している核データおよび放射線治療従事者の被ばく線量評価について検討した。

2.1. 医療用同位体の製造に関する話題

「医療用同位体の製造に関する核データへの要望」と題した永津弘太郎氏 (QST) の講

演では、現在利用されている医療用 RI や QST における RI 生産施設の紹介の後、 ^{67}Cu および ^{225}Ac を例に製法の現状や難しい点に関する情報提供がなされた。講演では特に $^{226}\text{Ra}(p,2n)^{225}\text{Ac}$ 反応の断面積データが非常に少ないとの指摘があった。特に陽子の入射エネルギー $E_p \leq 30 \text{ MeV}$ での断面積データの拡充が重要であるだけでなく、Ra 標的に関しては 30-110 MeV の陽子入射反応で生成される核種についての核データ整備が必要との報告があった。

2.2. 遮蔽・放射線治療時の被ばく線量に関する話題

全 6 件の講演のうち、残りの 5 件の講演は放射線治療時の被ばく線量評価や遮蔽計算に関するものであった。

「医療分野における核データ利用促進に向けた提案-PHITS-」と題した佐藤達彦氏 (JAEA) の講演では、PHITS コードで JENDL-5 を用いた場合の吸収線量計算の問題、粒子線治療の生物学的線量評価や炭素線治療計画への応用例の紹介があった。特に荷電粒子や高エネルギー中性子ライブラリを使った計算では、荷電粒子を明示的に放出するためのカーマ近似はそのまま使えないため、現状では吸収線量計算を JENDL-5 ベースで行うことができないとの報告があった。また粒子線治療の生物学的線量評価への応用を考えると、核反応により生成される (残留核を含む) 全ての二次粒子の収率およびエネルギースペクトルが必要となるが、低エネルギーで各残留核の二重微分断面積の ACE ファイルが整備されていないことや、各反応チャンネルの断面積が高エネルギー中性子および荷電粒子ライブラリで整備されていないことが問題点として指摘された。PHITS の炭素線治療計画への応用に関する議論としては、H, C, N, O だけでよいので CCONE による核反応イベントリストの作成を検討すべきとの提案があった。

「医療分野における核データ利用促進に向けた提案-Geant4-」と題した坂田洞察氏 (阪大) の講演では、医療応用が進んでいる原子核過程として、原子核の崩壊、核破砕、ホウ素捕獲、光核反応の紹介があった。また Geant4 と PHITS で用いられる核反応モデルの対応付けについて詳説いただいた。なお、中性子入射反応や中間エネルギーの荷電粒子入射核反応では、Geant4 よりも JENDL ベースの PHITS のほうが良く、特に加速器中性子源で非常に重要な $^9\text{Be}(p,xn)$ 反応に関しては JENDL-5 が圧倒的に良いとの報告があった。JENDL を Geant4 のデフォルトオプションとするには時間や議論が必要であるが、ENDF 形式から G4NDL 形式への converter は存在しており、JENDL-5 を用いて Geant4 を動かすことは可能であるとの現状報告があった。核データ分野への要望として医療用途では C-12 ビームを H, C, O, Al, Cu, Ti, Sn, Pb 標的に 400 MeV/u 以下で当てるような実験データが有用となるが、角度分布についての情報や 200-400 MeV/u の軽核 ($A < 50$) の微分断面積実験データが不足しているとの報告がなされた。また陽子ビームを用いた実験では標的核が O や Ca の場合に実験データ間のばらつきが大きく、特に Ca 標的に関しては実験デー

タ自体が古く、かつ少ないという問題が提示された。

「粒子線治療時に体内で発生した二次中性子の線量評価」と題した松本真之介氏（都立大）の講演では、粒子線治療中に発生する中性子の空間線量分布について実測値および臓器線量の評価値についての紹介があった。当初懸念していた血液中の鉄の放射化などは実際には無視できる程度であるものの、二次被ばくの線量評価では **Fragment** の線量についての情報はやはり重要であるとの共通認識を得た。以上の 3 件が放射線治療に関する核データの高度化に関する話題であり、続く 2 件は許認可のための遮蔽計算で重要となる核データについての話題提供である。

「放射線施設許認可のための遮蔽計算における問題点」と題した田中鐘信氏（理研）の講演では、加速器施設の線量評価では放出中性子エネルギーが $E_n \geq 150 \text{ MeV}$ でのみ妥当な **Moyer** の式が使用されており、減衰効果については遮蔽計算の高度化が必要であろうとの指摘があった。また、最近理研で行われた U ビーム入射 Cu 標的の中性子生成量データ測定についての紹介があった。一方で、理研 RIBF で使用している Be や W 標的、また将来ビームダンプで活用される物質の中性子生成量データはまだ存在しておらず、これらの核データを揃えてほしいとの要望があった。（医療用）RI 生成には大強度ビーム施設が不可欠であり、遮蔽も厚くなるため線量の減衰など線量評価が難しい。ビームダンプで生成される中性子の遮蔽評価のためには数 MeV から 20 MeV の中性子散乱の高精度な核データが必要であるという指摘があった。

「高エネルギー γ 線による光核反応の測定核データ、遮蔽設計」と題した佐波俊哉氏（KEK）の講演では、加速器施設で評価すべき放射線や相互作用について概説があった。KEK でも理研でも放射線の評価のために必要な事項には共通部分が多いものの、KEK は電子加速器が主であるため電子の制動放射の計算が必要になる点が異なるということであった。なお小型加速器施設の許認可で重要となる核データに関しては、断面積の精度が必要になるのは限定的であるとの指摘があった。また高エネルギー γ 線による光核反応の測定結果と PHITS や MCNP などの計算値との比較では、 $\text{Cu}(\gamma, \text{xn})$, $\text{Sn}(\gamma, \text{xn})$, $\text{Pb}(\gamma, \text{xn})$, $\text{Au}(\gamma, \text{xn})$ 反応のいずれの場合でも特に $E_n = 2 \text{ MeV}$ 以上で実験値の再現性が非常に良くないという現状の課題点が示された。

3. 残留核の反跳に関するワークショップ

2023 年度に開催した上記ワークショップでの議論を受け、2024 年 8 月 5 日に二次被ばく線量評価や半導体のソフトウェアの要因として今後重要性を増すであろう「残留核の反跳」に関するワークショップを開催した。PHITS における残留核の取扱い・原子核の反跳の測定手法・計算手法・評価手法についての講演 6 件を通して、残留核の反跳に関する核データ整備の問題点の洗い出しを試みた。

「PHITS と JENDL-5 を組み合わせた医学物理計算の問題点」と題した佐藤達彦氏

(JAEA) の講演では、最近の PHITS の開発動向の紹介の後、PHITS と JENDL-5 を組み合わせた医学物理計算における問題点が指摘された。吸収線量の計算をする場合に粒子飛程が短い場合にはカーマでも可能であるが、二次荷電粒子の飛程が 5 mm ほどになるとカーマでは対応できないため、現状では PHITS で吸収線量を出すことはできない。

一方で、JENDL-5 の各残留核の生成断面積を PHITS に取り込んで放射化計算することはできる。なお JENDL-5 では、主要な残留核ごとにエネルギー分布は入っているが、角度分布は入っていないため、残留核のエネルギーや角度の情報は重要であること、今後整備が期待されることなどの議論がなされた。また医学物理計算では残留核のエネルギーだけ決められたら良いが、半導体エラーの計算ではエネルギー保存がイベントごとに成立していることが不可欠であるとの議論があった。

「アクティブ標的 TPC を用いた残留核の測定」と題した川畑貴裕氏（阪大）の講演では、時間射影型検出器（TPC）の動作原理から始まり、荷電粒子の三次元的な飛跡を検出できる MAIKo アクティブ標的と MAIKo プラスの開発状況の解説があった。また高密度環境下における 3α 反応の MAIKo を用いた測定を例に、TPC の検出器ガスを標的とするアクティブ標的での反跳核の測定ではシリコン検出器での測定に比べて作業量が膨大となることが示された。次に α 非弾性散乱を例に反跳核からの崩壊粒子の同時計測手法について報告があった。反跳核からの崩壊粒子の測定は、解析が非常に煩雑になりがちな TPC の他にシリコン検出器でも行われており、最近開発された従来よりも大きな立体角で検出可能なシリコン検出器および波形解析を利用した粒子識別の手法についての解説があった。

「逆運動学法を用いた終状態の同定と核データへの寄与」と題した大津秀暁氏（理研）の講演では、逆運動学法を用いた残留核の粒子同定の可能性について報告があった。重粒子線入射で生成された高速軽粒子によるドーズの評価には反跳原子核の情報は重要であるが、逆運動学法では入射エネルギーが高いほど、残留核のチャンネル候補が増えて扱いが難しくなる。また残留核が放射性で長寿命であれば放射化法により生成粒子の識別は可能であるがエネルギー情報は失われてしまう。一方、残留核が放射性で短寿命の場合には In beam gamma などの工夫が必要となる。逆運動学での測定では、残留核がローレンツブーストされ、比較的前方に集中するため角度の情報は乏しくなる半面、磁気スペクトロメータの併用により、残留核の粒子識別はよくできるという特長がある。先ほどの川畑氏の講演とは逆で、逆運動学法では陽子入射は扱えるのが、中性子入射反応の逆運動学はできないという手法による得手不得手が共有された。

「ミューオン捕獲反応における反跳エネルギー計算について」と題した湊太志氏（九大）の講演は 2024 年度春の年会にて開催された企画セッション「ミューオン核データの進展」での講演に準じ、半導体ソフトウェアと原子核の反跳との結びつきの解説に始まり、シリコンがミューオンを吸収して放出される粒子の組成について、PHITS

(QMD+GEM) を用いた計算と、より詳細な原子核理論 (STDA+MEC+CCONE) に基づく計算との比較について報告があった。その結果、定性的傾向がよく一致していることが示された。なお、ソフトウェアの評価では放出粒子のエネルギー情報だけでは不十分であることやエキシトンモデルによる前平衡過程の計算が不可欠あることが指摘された。

「PHITS を用いた PKA スペクトルと弾き出し断面積」と題した岩元洋介氏 (JAEA) の講演では、PHITS による PKA スペクトルの計算と弾き出し損傷計算および検証実験についての報告があった。PHITS と核データを用いることで広いエネルギーに対応したあらゆる粒子に対する材料の PKA スペクトル弾き出し損傷計算が可能であり、弾き出し断面積の実験データとの比較から PHITS の計算結果が実験を良く再現できることが示された。しかしながら、20 MeV~100 MeV の中性子・陽子照射による材料の PKA スペクトルの測定や核データ整備、2 核種以上からなる合金や半導体のはじき出し損傷計算などが課題として指摘された。

「JENDL における反跳核エネルギースペクトルの評価」と題した岩本修氏 (JAEA) の講演では、反跳核のエネルギースペクトルが JENDL-5 から提供されるようになった経緯から始まり、中性子の入射エネルギーが 20 MeV 以上と以下で入れ方が違うことやその理由などが解説された。20 MeV 以下では反応チャンネルごとに反跳核エネルギースペクトルデータを区別しているが、入射エネルギーが高くなるとチャンネルが増えすぎてしまうため区別していない。二体反応や 20 MeV 以下の反応であれば、残留核の運動エネルギーも与えられる。CCONE では方位角も扱える。JENDL-5 では C 以上の安定核を中心に 200 以上の残留核反跳エネルギー分布が収録されているが、残留核がターゲットと大きく異なる場合には信頼性の問題からエネルギーを収録していない。また CCONE で上手く計算できるのは重い核であり、人体や半導体の構成元素など軽めの核種については実験データの整備が重要であるとの指摘があった。

4. おわりに

筆者は昨年度からシグマ調査専門委員会に加わった新参加者である。シグマ専門調査委員会に対しては、学生時代から核データに関する高尚な議論の場であるという強いイメージを抱いていた。果たして自分がお役に立てるだろうかという不安もあったが、企画セッションでご紹介した二つの研究会を世話人として一緒に企画・運営して下さった合川 正幸先生、片渕 竜也先生、新倉 潤先生、深堀 智生先生、福田 茂一先生 (あいいうえお順) のお陰で、何とか、これまでとは少しだけ違った方向の議論ができたのではないと思う。今回の企画セッションでは二つの研究会で得た情報をより多くの皆様と共有できたことが大変うれしかった。質疑応答では、質問者の悩みを解決することもできたとし、核データの精度について開発者側とユーザ側の間には未だギャップがあることも明らかになった。引き続き次世代の核データのために必要な情報を精査し、核データに

関わるコミュニティの発展に少しでも貢献できればと思う。