連載
講座

核データ研究の最前線

～たゆまざる真値の追及, そして新たなニーズへ応える為に～

第7回 高エネルギー領域への挑戦

九州大学 執行 信寛

高エネルギー加速器研究機構 岩瀬 広

日本原子力研究開発機構 岩元 洋介, 佐藤 達彦

数十 MeV 以上の高エネルギー粒子加速器施設の核設計における放射線輸送計算の高精度化に向けて、実測データを用いた計算コードの精度検証及び核反応モデルの改良、評価済み高エネルギー核データライブラリの利用等が重要となる。本稿では高エネルギー領域の中性子や照射損傷に関する核データの測定例と国内で開発されている粒子・重イオン輸送計算コード PHITS の進展について概観する。

KEYWORDS: *High Energy, Accelerator, Proton, Heavy Ion, Neutron, Simulation, PHITS*

I. はじめに

核反応断面積等の推奨値を纏めた JENDL (日本), ENDF (米国), JEFF (欧州) 等の評価済核データライブラリは、原子力工学の基礎を支えるデータベースの一つである。しかし、これらのライブラリの開発は、主に核分裂炉や核融合炉の設計に用いられることを念頭に実施されてきたため、反応粒子の種類やエネルギー範囲に制限が設けられている。例えば、我が国の汎用ライブラリである JENDL-4.0 のエネルギー上限値は 20MeV である。また、整備の対象は中性子反応のデータである。しかし、以下に述べる通り、加速器を用いた種々のアプリケーションの開発には更に高いエネルギーの核反応に対するデータが必要となる。また中性子のみならず、陽子をはじめとする荷電粒子反応のデータが必要である。

例えば、原子炉で発生する長寿命核廃棄物の処理方法の一つとして、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 (Accelerator Driven System: ADS) が提案されている。このシステムは、GeV 程度の高エネルギー陽子反応により中性子を効率よく発生させ、その中性子による核変換により、高レベル放射性廃棄物の減容化を図るものである。このシステ

ムの設計や検証を行うためには、高エネルギー陽子等による中性子生成量、エネルギースペクトル等のデータが不可欠である。そのため世界で実験やシミュレーション研究が行われてきた。日本においても九州大学の研究グループが中心となり、3GeV までの陽子入射中性子生成断面積の測定が世界に先駆けて実施された¹⁾。さらに、3GeV までの陽子・中性子に対する核反応データを収録した特殊目的ファイル JENDL/HE-2007²⁾ が作成された。

また、国際協力で進められている核融合炉 (材料) 研究の一環として、40MeV 重陽子加速器中性子源施設 (IFMIF) の建設が計画されている。この施設設計に必要とされる 150MeV までの陽子、中性子、重陽子の核データライブラリが IAEA 主導で各国の協力の下に FENDL-3³⁾ として整備された。

高エネルギー粒子のデータは医療や宇宙線に関わる分野においても必要である。例えば粒子線がん治療では、体の深い部分にあるがんに対して、核子あたり数 100MeV 以上陽子や炭素等を照射する方法が用いられる。今後なるべく低線量での効果的な治療のために、陽子や重イオンと物質中の原子核との反応で発生する二次粒子生成量等の情報が求められている。さらに、宇宙ステーション、人工衛星や航空機は、宇宙線や大気上層で生成される高エネルギー粒子に晒されるため、搭乗員への影響のみならず搭載電子機器のメモリの情報が反転するソフトエラーという現象が発生することが知られている。この現象を解明のため高エネルギー粒子が半導体と起こす反応の知見が重要である。

また、高エネルギー加速器の構造材等の寿命を評価す

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need (7); Challenge to High Energy Area : Nobuhiro Shigyo, Yosuke Iwamoto, Hiroshi Iwase, Tatsuhiko Sato.

(2018 年 2 月 5 日 受理)

■前回タイトル

第6回 核データの利用のために

るために、放射線による照射損傷の見積りで、弾き出し損傷量というデータの整備が期待される。

高エネルギー核反応は複雑で、生成される二次粒子は多種多様である。そのため核反応モデルに基づくシミュレーションの役割は非常に大きい。施設の遮蔽設計や照射対象への線量予測には、原子核反応以外に人体や建物等の複雑な体系を模擬し中性子フルエンスや線量を算出できるようにした PHITS, MCNP, GEANT4, FLUKA, MARS, EGS, SuperMC などのシミュレーションコードが利用されている。しかし、精度検証が進んだ部分とまだ不十分な部分があるのが現状である。また、高エネルギー核反応を記述できる単一モデルが望まれるがまだ存在しないため、複数の核反応モデルを適切に組み合わせて使用する必要がある。

モデルの検証を行うためには、実際にデータを測定することが不可欠である。本連載の第2回⁴⁾で数 MeV 以下の共鳴領域の中性子核データの重要性が述べられているが、高エネルギー領域でも中性子のデータは核反応モデルの高度化に重要な役割を果たす。このため日本では高エネルギー領域の中性子測定が積極的に行われている。

この回では、高エネルギー領域での核データ測定例とシミュレーションの進展について述べる。

II. 核データ測定

1. 国内の主な実験施設

高エネルギー領域の核データ測定には加速器が不可欠のツールである。現在国内の核データ測定に利用可能な主な加速器施設を表1に示す。

この他にも若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン、京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器やビームエネルギーが低いものの九州大学加速器・応用ビーム加速器センタータンデム加速器などでも核データ測定が可能である。ここではシミュレーションと関連のある測定例として、HIMAC と RCNP での中性子測定、京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器ではじき出し断面積測定に

表1 国内の主な高エネルギー核データ測定可能な施設

施設	加速粒子	最大エネルギー
量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所 TIARA	陽子	90MeV
理化学研究所・仁科加速器研究センター RIBF	重イオン	25MeV/u
量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所 HIMAC	陽子	200MeV
量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所サイクロトロン	重イオン	800MeV/u
大阪大学核物理研究センター (RCNP) リングサイクロトロン	陽子	80MeV
	重イオン	15MeV/u
	陽子	400MeV
	重イオン	100MeV/u

ついて述べる。

2. HIMAC での中性子測定

医療用重イオン加速器である HIMAC では、昼は治療、夜は様々な用途の実験に利用されている。粒子線がん治療では、長期的に二次中性子による二次被ばくのリスクを検討することが望ましいとされる。1MeV 付近の中性子は放射線荷重係数が高く、線量への寄与が大きい。そこで、重イオンビームを人体や構造物中の元素に照射して生成される中性子エネルギースペクトルが測定されている。

中性子のエネルギーは飛行時間(TOF)法で測定し、中性子検出器には有機液体シンチレータが使用される。数 100keV から数 100MeV の広いエネルギー範囲の中性子を測定するため2種類の大きさのシンチレータを準備し、15° から 90° まで6方向に設置する。個体標的の作成が困難な窒素や酸素をビームにし、固体炭素標的に照射する場合もある。さらに標的と検出器の間に長さ約 1m の鉄のブロックを置き標的から直接検出器に入る中性子を遮断し、床等から散乱するバックグラウンド中性子の測定を行う。

測定例として、100MeV/u 酸素ビームを炭素標的に照射した時の中性子エネルギースペクトルの測定結果と PHITS, FLUKA, Geant4 による計算結果を図1に示す⁵⁾。この例では、PHITS はエネルギースペクトルをおおよそ再現するが、FLUKA や Geant4 は測定値の再現性が中性子のエネルギーによっては低い。これはコードが採用している核反応モデルが異なるためであり、現状ではコードの精度評価と予測精度を吟味した上でコードを利用することになる。

HIMAC や隣接のサイクロトロンでは、中性子の他に荷電粒子エネルギー分布や軽粒子生成断面積等シミュレーション検証に必要な核データの測定も行われている。

図1 100MeV/u 酸素を炭素標的に照射した時の中性子エネルギースペクトル

3. RCNP での中性子測定

次世代加速器や将来期待される人類の宇宙進出で遭遇する高エネルギー放射線に対する防護では、二次中性子の遮へいが最も重要である。JENDL-HE の整備は、高エネルギー領域での精度を大きく向上させ J-PARC などの加速器設計に多大な貢献を果たしたが、モデル計算を基本としているため、測定による検証が重要となる。核データといった微分量ではなく、厚い遮へい体透過後のエネルギー分布などの総合的な量を実測することとそのメカニズムについて理解することが実験の目的である。

大阪大学核物理研究センター RCNP では、陽子ビームから ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応により得られる約 400MeV までの高エネルギー準単色中性子を用いて TOF 実験ができる。準単色中性子を直接遮へい体へ打ち込み、その遮へい体背後での中性子エネルギースペクトルが遮へい体の厚みを変えて測定される。20MeV 以上では NE213 シンチレータによる TOF を主体とした高エネルギー分解能測定で行い⁶⁾、 ${}^3\text{He}$ 中性子検出器にポリエチレン減速体等を組み合わせるボナーボール測定器のアンフォールディング解析で高エネルギーから熱中性子の広範囲のエネルギースペクトルが取得できる⁷⁾。前者は主に原子核反応モデルや核データの検証、後者は主に線量評価のためである。

陽子ビームをリチウムターゲットに照射して生成させた準単色中性子はコリメータを通して TOF トンネル内で利用できる。TOF トンネルは約 100m で、ターゲットから見てコリメータで投影される領域内に測定器が設置されるよう約 18m の距離を取る。遮へい体として一辺約 100cm の鉄及びコンクリートブロックでそれぞれ最大 100cm、300cm のものが使われる。

結果の例を図 2 に示す。250MeV 陽子で生成させた 246MeV 準単色中性子を入射粒子とした鉄遮へい体背後(10cm から 100cm)で、NE213 で測定した中性子エネルギースペクトルで注目したいのは、ピーク中性子数の遮

へい体厚の関数としての減衰である。物質による放射線の減衰計算で最も単純なモデルは、放射線数が全断面積の逆数である平均自由行程に依存して減衰するが、この実験ではピーク中性子は遮へい深部にわたって多数の小角散乱を含んでおり、従ってその減衰の傾きは全断面積にならない。測定値と PHITS 計算(JENDL-HE)のピーク中性子数の減衰は傾きでほぼ一致が得られ、JENDL-HE は小角散乱も含めて中性子の深層透過においても現象をよく再現できることが推測される。

4. はじき出し断面積測定

高エネルギー加速器の構造材等の放射線による照射損傷の評価の指標として、はじき出し損傷量 Displacement Per Atom (DPA) 値がある。それは、照射領域に存在する全原子数に対するはじき出された原子数の比で定義され、はじき出しの確率を表すはじき出し断面積に比例する。従って、DPA 値を精度良く予測できれば、機器の交換頻度等の運転計画の立案に役立つ。

はじき出し断面積は、核データや核反応モデルを用いて導出されるはじき出し原子のエネルギーとキンチン・ピースモデルと呼ばれる、はじき出し数導出モデル等で計算される。これまでに数 10MeV 以上の予測精度向上を目指し、PHITS にはじき出し損傷計算コードとして普及している SRIM コードにはない核反応を取り入れた照射損傷モデルが開発されている。

はじき出し断面積は実験で検証することが重要であるが、原子のはじき出し数を直接観測できない。そのため、放射線照射でサンプルに生じた欠陥(はじき出された原子と残った空孔の生成)に伴う金属の電気抵抗増加を測定して、間接的にはじき出し断面積を導出する。はじき出し損傷の初期過程をあらわすために、欠陥が修復しないよう試料を 10K 以下である極低温下の環境に置く必要がある。高エネルギー領域で唯一の米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)の実験では、試料を液体ヘリウムで冷却していたが、多くの施設では安全面から使用できない。

その後、様々な加速器施設ではじき出し断面積の検証実験を行うため、京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器において、可搬型ギフォード・マクマホン(GM)冷凍機を活用し無冷媒で試料を冷却する極低温照射装置が開発された。この装置は、温度 4K 程度まで冷却可能な全長約 50cm の GM 冷凍機に、銅・アルミニウム板からなる高熱伝導度のターゲットアセンブリを通し、試料を熱伝導で冷却する。そして、125MeV、1nA の陽子を照射した銅試料中の欠陥に伴う微小な電気抵抗増加($1.53\mu\Omega$)の測定値から銅のはじき出し断面積が導出されている(図 3)⁸⁾。FFAG 加速器の実験値と BNL の実験値を用いると、PHITS の照射損傷モデルの予測精度が、SRIM に比べて格段に優れていることがわかる。

この装置を改良して、RCNP や J-PARC で、アルミニ

図 2 RCNP246MeV 準単色中性子の鉄遮へいによる減衰(左)とピーク中性子の減衰(右)

図3 陽子エネルギーに対する銅のはじき出し断面積

ウム、鉄、銅、タングステン等の材料に対して、数100MeV から数10GeV 領域の極低温陽子照射実験が継続・計画中である。今後は、核データ測定領域を超えて、照射損傷の専門家と協力して異なる手法(例えば陽電子消滅法による欠陥測定など)とミックスさせることで、高エネルギー放射線損傷の初期過程の解明が進むと期待される。

Ⅲ. シミュレーションの進展

前述の通り、全ての核データを実験で得ることはできないため、様々な高エネルギー用シミュレーションコードの開発が続けられている。ここでは国内で開発が進められている PHITS について紹介する。

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System^{9,10)})は、NMTC/JAM を基に開発された、任意形状の3次元体系内における放射線挙動を解析可能な汎用モンテカルロ計算コードである。その適応放射線は、原子力分野で重要となる20MeV以下の中性子や光子の他に、加速器工学や医療・宇宙分野で重要な高エネルギー陽子や重イオンなど、現実的に挙動解析が必要となるほぼ全ての放射線である。その解析の舞台となる3次元幾何学形状は、MCNPと同じくGeneral Geometry(面を組み合わせて1つの形状を定義する形式)で記述する。PHITSには、タリーと呼ばれる放射線挙動解析結果からユーザーが必要な物理量を引き出す機能があり、特定の領域や任意の3次元メッシュ空間内での放射線フラックス、発熱量、生成核種分布などを簡単に出力できる。さらに、ANGELと呼ばれる独自の描画ツールを内蔵しており、作成した幾何学形状や計算結果を可視化することが可能である。

PHITSは、ユーザー登録制の公開コードであり、高度情報科学技術研究機構(RIST, 日本)、経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA, 欧州)データバンク、放射線安全情報計算センター(RSICC, 米国)からパッケージを入手できる。また、国内であれば年約10回開催される講習会に参加することでも入手可能である。パッケージ

		核反応モデル(またはライブラリ)		原子反応モデル	
エネルギー	粒子	中性子	陽子他	原子核	μ粒子
		1 TeV	1 TeV/u	1 TeV	電子
↑	1 TeV	JAM + GEM	JAMQMD + GEM	JAM/JQMD + GEM	EPDL97
		3.0 GeV			もしくは EGS5
		INCL4.6 + GEM	d, t, ³ He, α	JQMD + GEM	
		20 MeV	10 MeV/u	200 MeV	
↓	1 keV	JENDL -4.0	ATIMA	ATIMA + Original	1 keV
		0.1 MeV	1 keV		
				*JQMD + GEM	**飛跡解析 1 MeV
					**負μ粒子のみ

図4 最新版 PHITS(version 3.02)で標準的に使われるモデル(またはライブラリ)とその適用放射線の種類及びエネルギー

には、Fortran で書かれたソースプログラムの他、バイナリ形式や核データライブラリなど PHITS を実行するために必要なファイルが全て含まれる。PHITS は、Windows, Mac, Linux を OS とするほぼ全てのコンピュータで動作し、Windows 及び Mac に対しては、専用のインストーラから簡単に動作環境を構築できる。また、メモリ分散型(MPI)及びメモリ共有型(OpenMP)並列計算に対応しているため、スーパーコンピュータによる大規模計算にも適している。

最新版 PHITS(version 3.02)で標準的に使われるモデル(またはライブラリ)とその適用放射線の種類及びエネルギーを図4にまとめる。各モデルは、核反応と原子反応のモデルに分類できるが、ここでは前者のみ紹介する。核反応は、核子と核子が直接相互作用する動的過程と、その後に平衡状態に達した原子核が崩壊する静的過程に分けて模擬する。核子が引き起こす核反応の動的過程には、初期設定では核内カスケードモデル JAM 及び INCL4.6 が用いられるが、INC-ELF や修正した Bertini モデルも利用可能である。一方、原子核が引き起こす核反応の動的過程には、通常、量子分子動力学モデル JQMD が用いられる。これは、原子核同士の衝突シミュレーションには、各核子間の核力を全て考慮した計算が必要になるためである。静的過程のシミュレーションには蒸発・核分裂モデル GEM が使われる。最新版では、光子やμ粒子による核反応も JAM や JQMD と GEM を組み合わせて再現できる。

しかし、これら核反応モデルは核種によって複雑に異なる核構造を考慮できないため、その影響が大きくなる20MeV以下の中性子が引き起こす核反応に適用できない。従って、そのような低エネルギー中性子による核反応は、JENDL-4.0に基づいて整備したACE形式の核データライブラリで模擬する。その際、イベントジェネレータモードにより二次中性子のみならず二次陽子や反跳核などの情報も引き出せる。今後は、低エネルギー中性子以外の粒子に対して整備された核データライブラリ

(JENDL-4.0/HE や JENDL-PD など)も扱えるよう改良していく予定である。

IV. 終わりに

高エネルギー放射線が関係する分野は多岐に亘る。しかし必要なデータを全て実測できないため、核反応モデルに基づくシミュレーションが活用される。その予測精度検証には実験データが必要になるという、実験とシミュレーションが一体となったアプローチが必要である。

最後に最近の進展として、理化学研究所では放射性廃棄物の低減化を目指し、RI ビームを水素及び重水素標的に照射し逆運動学による核種生成断面積測定が行われている。このデータは放射性廃棄物中の長寿命核種の核変換に役立つことが期待される。また日本のグループが中心となり、米国フェルミ国立加速器研究所での120GeV陽子からの中性子生成量測定が行われるなど、国内では不可能なエネルギー領域の測定が行われている。核データライブラリでは、PHITSの項でも述べた最新の核反応モデルを使い200MeVまでの陽子、中性子核データを収録したJENDL-HE/4.0¹¹⁾が整備されている。今後も様々な分野からのニーズに応えるべく、新たな実験手法の開発や、核データ、計算コード、核反応モデル等の検証や改良が続くであろう。

— 参考資料 —

- 1) K. Ishibashi, et al., "Measurement of Neutron-Production Double-Differential Cross Sections for Nuclear Spallation Reaction Induced by 0.8, 1.5 and 3.0 GeV Protons," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **34**, 529-537 (1997).
- 2) Y. Watanabe, et al., "Status of JENDL High Energy File," *J. Kor. Phys. Soc.*, **59**, 1040-1045 (2011).
- 3) R.A. Forrest, et al., "FENDL-3 Library, Final Report of the Coordinated Research Project on Nuclear Data Libraries for Advanced Systems: Fusion Devices", INDC (NDS)-0645 (2013).
- 4) 木村敦等, 「核データ研究の最前線 第2回」, 日本原子力学会誌, **59**, 40-44 (2017).
- 5) Y. Imahayashi, et al., "Measurement of Cross Sections and Yields of Neutron Produced by 100 MeV/u C (C, xn) Reaction," JAEA-Conf 2014-002, 133-138 (2014).
- 6) M. Hagiwara, et al., "Shielding benchmark experiment using hundreds of MeV quasi-monoenergetic neutron source by a large organic scintillator," *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, **4**, 327-331 (2014).
- 7) T. Matsumoto, et al., "Measurement of neutron energy spectra behind shields for quasi-monoenergetic neutrons generated by 246-MeV and 389-MeV protons using a Bonner sphere spectrometer," *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, **4**, 332-336 (2014).
- 8) Y. Iwamoto, et al., "Measurement of the displacement cross-section of copper irradiated with 125 MeV protons at 12 K," *J. Nucl. Mat.*, **458**, 369-375 (2015).
- 9) T. Sato, et al., "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02," *J. Nucl. Sci. Technol.*, (2018) <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>; <http://phits.jaea.go.jp>
- 10) Y. Iwamoto, et al., "Benchmark study of the recent version of the PHITS code," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, 617-635 (2017).
- 11) S. Kunieda, et al., "Overview of JENDL-4.0/HE and benchmark calculation," JAEA-Conf 2016-004, 41-46 (2016).

著者紹介

執行信寛 (しぎょう・のぶひろ)

九州大学 大学院工学研究院
(専門分野/関心分野)核データ, 中性子計測, 原子核工学

岩元洋介 (いわもと・ようすけ)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)放射線工学, はじき出し損傷, 核データ応用

岩瀬 広 (いわせ・ひろし)

高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター
(専門分野/関心分野)放射線物理学, 保健物理, 震災復興

佐藤達彦 (さとう・たつひこ)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)放射線物理, 放射線生物, 宇宙線被ばく