

話 題 (Ⅲ)

NEA/NSC 中間エネルギー核データ に関する専門家会合

日本原子力研究所
高田 弘

1. はじめに

本会合の背景として、加速器を利用した核種変換に対する関心の高まりに伴い、1992年にNEA/NSCが中間エネルギーの核反応と粒子輸送に関するベンチマーク問題を提出した経緯がある。その内容は次の通りであった。

PHASE-I (薄いターゲット計算)

入射粒子 : 陽 子

エネルギー : 25、45、80、160、256、800、1600 MeV

標的核 : ^{90}Zr 、 ^{208}Pb

計算項目 : 中性子及び陽子の収量、エネルギー微分断面積、角度微分断面積
二重微分断面積

PHASE-II (厚いターゲット計算)

入射粒子 : 陽 子

エネルギー : 800 MeV

ビーム形状 : ペンシルビーム (広がりのない線状)

体 系 : 直径 20 cm、長さ 60 cm の円筒型

標的核種 : ^{208}Pb 、 ^{186}W

計算項目 : 中性子収量、体系内中性子エネルギースペクトル、漏洩中性子エネルギー
スペクトル、核種生成率

標記専門家会合は、このベンチマーク計算に使用された計算コードの物理モデル、現状の計算精度を確認することを目的として、1994年5月30日から6月1日までの3日間パリのOECD/NEA本部で開催された。会合では、中間エネルギー領域における核データファイルや実験課題も議題とされた。

会合には38名が参加し、薄いターゲット計算、厚いターゲット計算、関連研究の3セ

セッションで、合計31件の個人発表、薄いターゲット計算と厚いターゲット計算に分かれてのグループ討論及びまとめの全体議論を行った。本会合の参加者の内訳は次のとおりであった。

フランス11名、アメリカ、イタリア、各5名、ロシア、ドイツ、OECD/NEA、各4名、日本、オランダ、イスラエル、スイス、スウェーデン、各1名

2. 計算コード

会合で紹介された計算コードについて、その名称と所有機関、コードに組み込まれているプログラム名または計算モデルを示す。

(1) 光学モデルに基づくコード

コード名/所属	直接過程	前平衡過程	統計過程	核分裂過程
ALICE/LLNL		GDH-Model	Weisskopf-Ewing	Bohr-Wheeler
GNASH/LANL		Exciton-Model	Hauser-Feshbach	
FKK-GNASH/LLNL	DWUCK4	FKK-MSD/MSD	Hauser-Feshbach	
MINGUS/ECN	ECIS88	FKK-MSD/MSD	Hauser-Feshbach	

(2) 核内カスケード蒸発モデルに基づくコード

コード名/所属	カスケード過程	蒸発過程	核分裂過程	前平衡過程
NUCLEUS/JAERI	MECC-4	EVAP-4	Nakahara	None
HETC-PSI/PSI	MECC-7	EVAP-5	Atchison	None
HETC-3STEP				
/KYUSHU	MECC-7	EVAP-5	Atchison	Exciton Model
LAHET/LANL	MECC-7	EVAP-5	Atchison	Exciton Model
	ISABEL		ORNL	
FLUKA/MILANO	HADRIN	EVAP-5	Atchison	GDH-Model
	NUCLIN			
	MECC-7			
CEM94M/INR	MECC-Dubna	不明		Exciton Model

(3) 分子動力学モデルに基づくコード

QMD/JAERI

(4) 輸送計算コード

コード名/所属	高エネルギー-粒子輸送	低エネルギー-中性子輸送	γ 線輸送
HERMES/KFA	HETC-KFA2	MORSE-CG	EGS4
LAHET-MCNP/LANL	LAHET	MCNP	MCNP
FLUKA/CERN-MILANO	FLUKA	MORSE-like	FLUKA(EMF)
SHIELD/INR	FLUKA-like	LOENT	EGS4
SITHA/JINR	Systematics	A Code with GR175-V1 lib.	
MOSCOW STATE Univ. Moving Source		MCNP	MCNP

高エネルギー粒子輸送と低エネルギー中性子輸送計算の接続エネルギーは、一般的に 15 ~ 20 MeV が用いられているが、目的によっては更に高い値を接続エネルギーとして選択し計算することも可能である。

3. 薄いターゲット計算

前項に挙げたコードのうち、(1) ~ (3) に分類されたものが薄いターゲットの計算に用いられる。光学モデルに基づくコードについては、実験値を基に決定されたパラメータを用いて直接過程から統計過程までを解析するので、現状では 200 MeV 程度までの入射エネルギーに対して実験を最も良く再現でき、このエネルギー領域の核データファイル作成に利用できることが報告された。また、最近の進展の著しい FKK 理論に基づく計算コードの内容も紹介され、中間エネルギーの核反応解析に対する有効性が示された。

核内カスケード蒸発モデルに基づくコードについては、古典的な自由粒子の衝突と残留核からの粒子蒸発により核反応を取り扱うが、最近の実験と比較すると 256 MeV 以上の入射エネルギーに対して計算と実験はかなり良く一致することが示された。200 MeV 以下については、前平衡過程計算オプションの追加により、これまで実験を過小評価していた後方角度への粒子放出の結果が改善されることが紹介された。これに対して、中性子収量に占める後方角度成分は 5 ~ 10 % 程度であるので、高エネルギー陽子加速器を利用した消滅処理システムのような工学的利用の計算では前平衡成分は効かないのではないかとの意見も出された。一部のコードでは、カスケード過程で核内における粒子の反射屈折を考慮できるようになっており、さらに、核内における粒子の角運動量を正確に取り扱うようモデルを改良することで、数十 MeV の入射エネルギーに対しても光学モデルに基づくコードと同等の計算精度が得られることが報告された。

これらのコードでは、粒子蒸発計算に残留核の励起エネルギーを考慮した Ignatyuk らの準位密度パラメータを用いる傾向にあることがわかった。また、蒸発過程と競合して取り扱われる高エネルギー核分裂過程については、コードで採用されているモデルにより結果が異なることが予想されるが、今回の問題ではその違いについて、定量的に把握するこ

とはできなかった。

QMD コードについては、核反応過程毎に解析モデルを使い分けることなく、また、調整パラメータを用いずに核反応をダイナミカルに記述できるコードとして筆者が紹介した。会合にはこの分野の専門家の出席は少なかったが、新しい核反応解析手法として注目された。しかしながら、前述したコードに比べて長い計算時間を必要とすることが短所として指摘された。

グループ討議では、ベンチマークに結果を提出した計算コードの精度としては、微分断面面積に対して30%、二重微分断面面積に対してファクター2と結論づけられた。ここでは、ALICE や GNASH と比較して、核内カスケード蒸発モデルが異なる値の反応断面面積を出す点が問題として指摘された。討議では、コード間の優劣について議論をするというよりも今後のベンチマークの継続に対する関心が高く、以下の項目について実験データの調査、収集を行うことになった。(a) 中性子入射に対する ^{27}Al 、 ^{56}Fe からの核種生成断面面積と陽子入射に対する ^{197}Au からの核種生成断面面積、(b) 重陽子やアルファ粒子の生成断面面積、(c) π 中間子生成断面面積、(d) 医学利用の観点から 250 MeV 以下のエネルギー範囲で陽子または中性子を ^{16}O または ^{12}C に入射した場合の粒子生成断面面積、及び (e) 陽子入射に対する核分裂断面面積及び核分裂生成物収率。

核データファイルとしては、Fe、Th について 100 MeV までのエネルギー範囲で中性子、陽子及びアルファ粒子の二重微分断面面積、核種生成率、弾性散乱断面面積、全断面面積、 γ 線スペクトルのデータを格納し、Th については、さらに核分裂反応断面面積と核分裂生成物収率も含んだパイロットデータファイルの作成を試みる事が採択された。

4. 厚いターゲット計算

厚いターゲット計算については、本会合が開催された時点でまだ最終的な結果がまとまっておらず、計算コードの精度について言及するには至らなかった。筆者にとって、HERMES と LAHET についてはレポートやマニュアルを通じて知識を有していたが、本会合では FLUKA やロシアのコードに関して新たな情報を得る機会となった。特に FLUKA についてはここ数年間に精力的にコード整備を行っている印象を受けた。

グループ討議では、核データファイルの利用について議論があり、医学利用のような特殊目的のためには、ALICE コード等を用いて 250 MeV までの核データライブラリは利用価値があると言えるが、これまでに核破砕中性子源を設計、稼働させて来た実績及び実験と計算の比較から見ると、高エネルギー領域で核データファイル利用するコードシステムは早急には必要ないという意見が大勢を占めた。これには、核データファイルを準備しても NJOY のような処理コードを更に用意しなければならず、これに対して、出席者の多くが興味を有していないことも理由の1つとして挙げられる。

厚いターゲットの場合、これまでは実験データや計算コードシステムに関する情報の流

通は核破砕中性子源の設計に関するコミュニティー (ICANS) に留まっていた感があり、今回の会合をきっかけに、さらに多くの人が情報を得ることができるようにすることで意見が一致した。このため、計算に関してはコード等を NEA データバンクに登録することを進めることになった。対象として、遮蔽計算用の中性子データライブラリ、HILO86 ($E_n < 400$ MeV)、LANL ($E_n < 800$ MeV) 及び LAHI-KFA ($E_n < 2.8$ GeV) と照射及び冷却中の核種の生成・崩壊の計算するコードシステム ORIHET/PSI 及び CINDER90/LANL が挙げられた。

実験については、COSMOTRON/FERFICON - LANL/ChalkRiver、SUNNYSIDE-LANL、Stop Targets-LANL、Dubna の実験、日本及び PSI における遮蔽実験、LANSC E、IPNS 及び ISIS の中性子源ターゲットにおけるエネルギー付与、発熱分布測定等について、その実験値を調査、収集を行うことになった。

計算結果がまだ纏まっていないという現状ということもあり、今回の会合に結果が間に合わなかった、NMTC/JAERI、LAHET、FLUKA については、計算結果の提出に 2 ヶ月の猶予期間が与えられた。今後のベンチマークの進め方については、これらの計算結果の比較を行った後に再検討することになった。

5. その他

中間エネルギー領域の核データを利用する立場として、LANL から高エネルギー陽子加速器を用いた消滅処理システムにおいて核特性、遮蔽、材料の照射損傷を評価するために、W、Pb 等のターゲット用核種、アクチノイド核種、構造材用核種についてのデータの必要性が示された。

一方、実験的にデータを取得する立場として、フランスの SATURNE 加速器施設 (サイクロトロン、 $E < 1.5$ GeV/n) が、これまでに核種生成断面積を測定してきた実績等を紹介し、データ取得のために施設利用の協力が可能な旨の報告を行った。SATURNE は数年後に運転を停止する計画とのことで、関係者からは施設の存亡に対する危機感が伝わってきた。

中間エネルギーの核データの検討については、今年度 NEA に設立された中間エネルギー核データ評価サブグループ (SG-13) においても活動が開始されことになっている。そこで、本会合のグループ討議でまとめられた薄いターゲットの今後の作業については、このサブグループと作業内容の調整を行って進めることとして、今回の会合を終了した。