

OECD/NEA 中間エネルギー 核データコード・モデル比較ベンチマーク

日本原子力研究所

高田 弘

1. はじめに

中間エネルギー領域の核データは加速器を用いた超ウラン元素の消滅処理システム設計、医学利用、宇宙利用等の分野で必要とされる。Pb や Fe 等の核種に関しては中間エネルギー領域まで拡張された核データが作成されたが、大部分の核種についてデータ整備は行われていない。中間エネルギー領域の核反応解析には、前平衡過程または多段階直接過程を考慮した統計モデルに基づく計算コードや核内カスケード蒸発モデルに基づく計算コード等が利用される。各コードの特徴、予測精度を知ることは、今後コードの精度向上を進める上で有用である。このため、OECD/NEA/NSC の主催で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計算が実施された。

これは昨年開催されたベンチマーク計算に係る専門家会合の報告であるが、会合の概要については既に核データニュースにも掲載されたので¹⁾、ここでは、ベンチマークに結果が提出された計算コードのうち、ALICE92²⁾、GNASH³⁾、FKK-GNASH⁴⁾、NUCLEUS⁵⁾、HETC-3STEP⁶⁾の各コードによる結果に着目し、実験との比較につ

表 1. 前平衡過程または多段階直接過程を考慮した統計モデルに基づくコードと核内カスケード蒸発モデルに基づく計算コードに採用されているモデル・コードの一覧

コード名 / 所属	直接過程	前平衡過程	統計過程	核分裂過程
ALICE92/LLNL		GDH-Model	Weisskopf-Ewing	Bohr-Wheeler
GNASH/LANL		Exciton-Model	Hauser-Feshbach	
FKK-GNASH/LLNL	DWUCK4*	FKK-MSD/MS	Hauser-Feshbach	
	カスケード過程	前平衡過程	蒸発過程	核分裂過程
NUCLEUS/JAERI	MECC-4*	-	EVAP-4*	Nakahara-Model
HETC-3STEP/KYUSHU	MECC-7*	Exciton-Model	EVAP-5*	Atchison-Model

*印：コード名

いて紹介する。表1に、各コードに採用されているコード及びモデルを示す。

2. 結果及び考察

図1に反応断面積の比較を示す。20 ~ 100 MeV の領域に注目すると、 ^{90}Zr については、各コードとも入射陽子エネルギーの増加につれて単調に減少する結果を示す。この場合、計算コード間には10%程度の差が見られる。一方 ^{208}Pb については、NUCLEUSとHETC-3STEPによる反応断面積は ^{90}Zr の場合と同様に入射エネルギーの増加につれて減少するのに対して、ALICE92とGNASHによる結果は50 MeVまで増加し、その後減少する。この傾向の違いは、核内カスケードモデルで原子核がエネルギーに依らず一定の核半径で規定され、核反応が縮退したフェルミ海中における自由粒子の二体衝突で取り扱われていることに因るものと考えられる。また、 ^{208}Pb について実験と比較した場合、50 MeVまでの範囲ではGNASHの結果が最も良く一致している。このときALICE92はGNASHよりも約20%小さい結果を与える。

図2と3に、80 MeV 陽子をPbターゲットに入射した場合の放出中性子二重微分断面積の比較を示す。ALICE92とGNASHでは前平衡過程から放出される粒子の角度分布の計算に実験値に基づいて決定されたKalbachの系統式が用いられるので $25^\circ \sim$

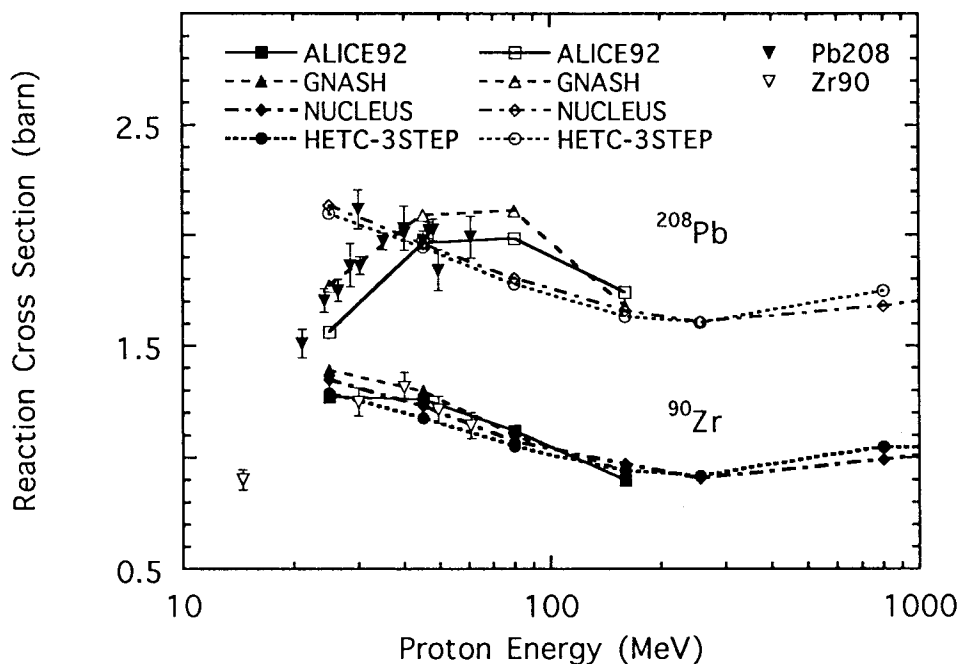


図1 ^{90}Zr と ^{208}Pb の陽子入射による反応断面積に関する ALICE92(実線)、GNASH(破線)、NUCLEUS(一点鎖線)及び HETC-3STEP(点線)の比較。

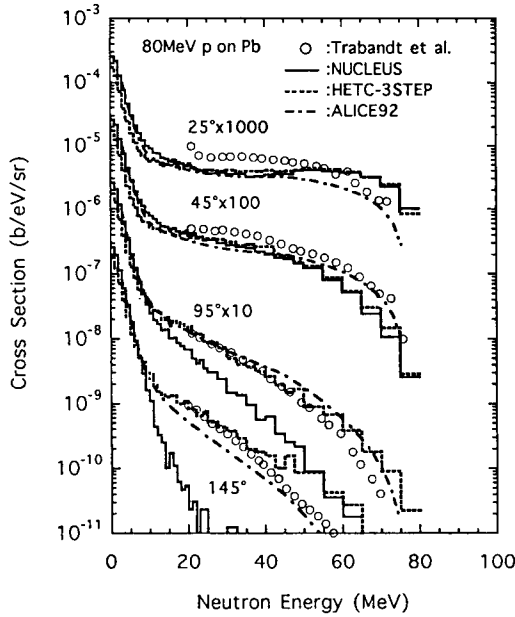


図2 80 MeV 陽子を ^{208}Pb ターゲットに入射した場合の中性子放出二重微分断面積に関する実験(○印)と計算(NUCLEUS：実線、HETC-3STEP：破線、ALICE92：一点鎖線)の比較。

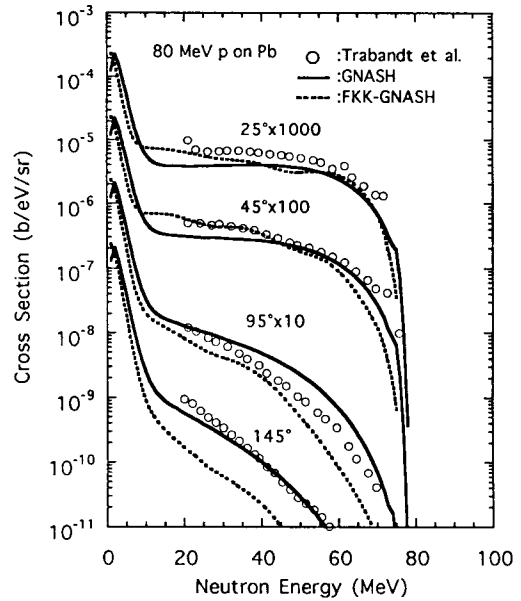


図3 80 MeV 陽子を ^{208}Pb ターゲットに入射した場合の中性子放出二重微分断面積に関する実験(○印)と計算(GNASH：実線、FKK-GNASH：破線)の比較。

145° の範囲に互る中性子放出がかなり良く取り扱われているが、計算は実験を 25° 方向で 40～50% 過小評価し、95° 方向では逆に 50% 程度過大評価する。FKK-GNASH は、95° より後方への中性子放出を GNASH よりもかなり過小評価する。GNASH ではエキシトンモデルによって前平衡過程が計算されるが、FKK-GNASH ではこれを FKK 理論に基づく多段階直接過程モデルで計算するので、この過小評価の改善のためには多段階直接過程に検討を加える必要があると思われる。次に、核内カスケード蒸発モデルを用いた計算は一般的に自由粒子の二体衝突近似の荒さのために、後方への中性子放出を過小評価する。NUCLEUS による計算では 95° より後方の結果にこの影響が現れている。一方、HETC-3STEP による計算では前平衡過程からの中性子放出が考慮されるために、計算と実験は後方でも比較的良く一致する。また、HETC-3STEP は 50 MeV 以上の領域を除いて、ALICE92 と同程度の予測精度を示した。

図4と5に 160 MeV 陽子を Zr ターゲットに入射した場合の放出中性子二重微分断面積の結果を示す。80 MeV 陽子入射の場合と比較して ALICE92 は全体的に実験を過大評価しており、エネルギーによっては 2 倍以上の差が見られる。GNASH は 45° と 95° 方向で実験を一部 30% 程度大きく評価するが、全体的に良い一致が得られている。

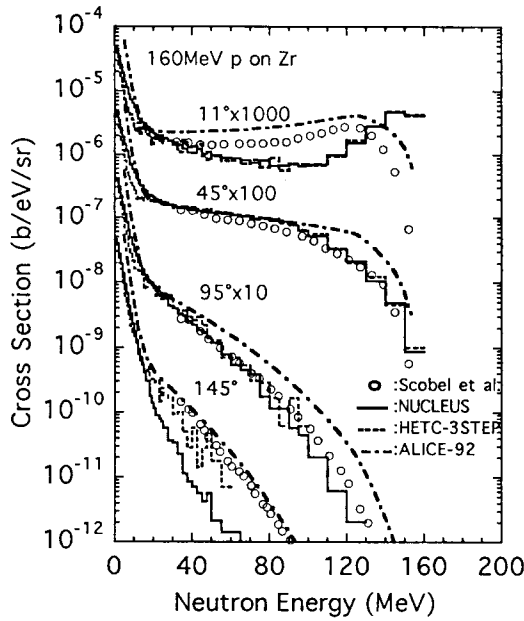


図4 160 MeV 陽子を ^{90}Zr ターゲットに入射した場合の中性子放出二重微分断面積に関する実験 (○印) と計算 (NUCLEUS : 実線、HETC-3STEP : 破線、ALICE92 : 一点鎖線) の比較。

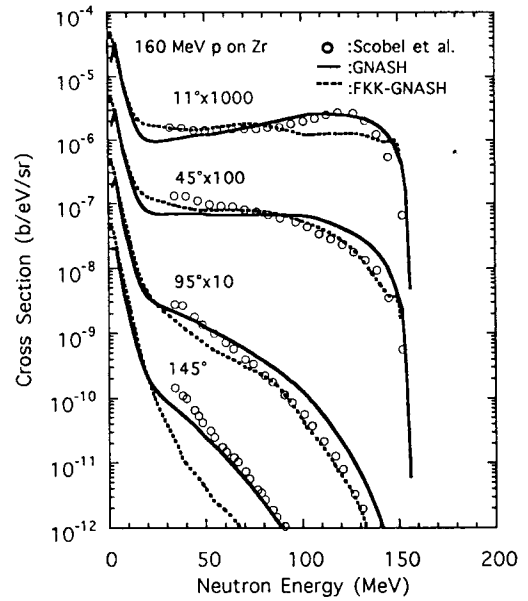


図5 160 MeV 陽子を ^{90}Zr ターゲットに入射した場合の中性子放出二重微分断面積に関する実験 (○印) と計算 (GNASH : 実線、FKK-GNASH : 破線) の比較。

FKK-GNASH と NUCLEUS は 145° 方向の中性子放出の過小評価が顕著である。さらに、NUCLEUS による計算は、前方の中性子エネルギースペクトルの準弾性散乱成分を過大評価し、それに続く連続成分を過小評価する。この不一致は HETC-3STEP による計算でも共通に観測された。LAHET コードによる計算や最近の分子動力学的手法 QMD による核反応解析から、核内カスケードモデルを用いて前方への粒子放出を精度良く予測するためには、核内カスケード過程においてポテンシャルの変化による核子の反射屈折や入射エネルギーに依存したポテンシャルの深さの変化を考慮することが必要であることがわかった。

図6と7に 256 MeV 及び 800 MeV の陽子を Pb ターゲットに入射した場合の放出中性子二重微分断面積の比較を各々示す。入射エネルギーが 200 MeV を超える場合の核反応解析では、 π 中間子の生成を考慮する必要があるが、現状では核内カスケード蒸発モデルでのみ π 中間子の取り扱いが考慮されている。図からわかるように、NUCLEUS と HETC-3STEP は入射エネルギーが 256 MeV 以上の場合、後方への 15 MeV 以上の中性子放出についてはほぼ一致した結果を与える。これは以下の現象に因ると考えられる。即ち、入射エネルギーが高い場合、核内カスケードが発達し核反応に関

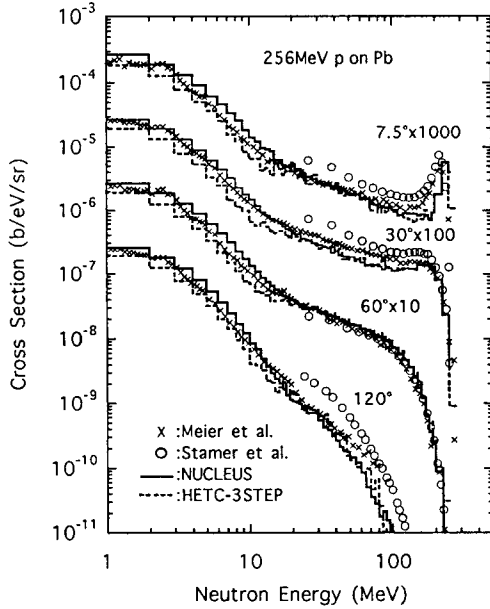


図6 256 MeV 陽子を ^{208}Pb ターゲットに入射した場合の中性子放出二重微分断面積に関する実験(○、X印)と計算(NUCLEUS：実線、HETC-3STEP：破線)の比較。

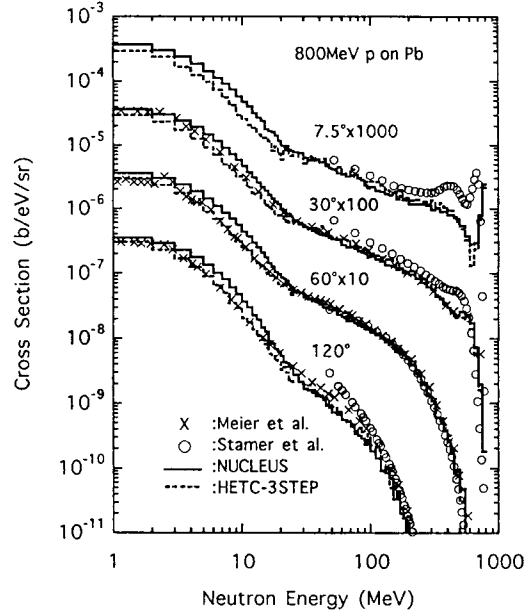


図7 800 MeV 陽子を ^{208}Pb ターゲットに入射した場合の中性子放出二重微分断面積に関する実験(○、X印)と計算(NUCLEUS：実線、HETC-3STEP：破線)の比較。

与する核内核子数が増える。このため、カスケード過程が終了した段階で、平衡条件に近いエキシトン数が形成される割合が大きくなり、カスケード及び蒸発過程からの中性子放出に比べ前平衡過程からの中性子放出の割合が小さくなるためと考えられる。尚、10 MeV 以下の計算結果の違いは、蒸発過程で用いられる準位密度パラメータの違いによるものである。各々の計算は 7.5° の前方の中性子エネルギースペクトルの準弾性散乱成分とそれに続く連続部に不一致が見られるものの全体としては実験と比較的良く一致する。

3. まとめ

GNASH などの前平衡過程を考慮した統計モデル計算コードでは 160 MeV 以下の入射エネルギーに対する放出粒子二重微分断面積を一部を除いて比較的良く予測できることがわかった。これは、コードに既存の実験値に基づいて決定された角度分布のパラメータや光学ポテンシャルパラメータが用いられているためである。核内カスケード蒸発モデルは前平衡過程の導入によって 160 MeV 以下のエネルギー領域で特に後方への

粒子放出が改善され、ALICE92 や GNASH とともに比較的良好一致を示す結果が得られたが、前方における準弾性散乱成分とそれに続く連続部については、さらにカスケードモデルの改良が必要であることがわかった。

今回のベンチマークによって得られた知見に基づき、核種生成断面積も含めたより多くの微分実験との比較を通して、各々の計算コードについてパラメータの見直し、モデルの改良により、一層の精度向上が達成されることが期待できる。

おわりに、ベンチマーク計算に関しては昨年開催された専門家会合の報文集⁷⁾が既に出版されている。報文集には他の計算コードについても、採用されているモデル及び計算結果が掲載されているので、関心のある方はそちらも参照して頂きたい。

参考文献

- (1) 高田 弘、"NEA/NSC 中間エネルギー核データに関する専門家会合"、核データニュース、No.49, p27-31 (1994).
- (2) M.Blann and H.K.Vonach, Phys. Rev. C28, 1475 (1983).
- (3) P.G.Young, E.D.Arthur and M.B.Chadwick, LA-12343-MS (1992).
- (4) M.B.Chadwick and P.G.Young, LA-UR-93-104 (1993).
- (5) T.Nishida, Y.Nakahara and T.Tsutsui, JAERI-M 86-119 (1986) (in Japanese).
- (6) K.Ishibashi et al., "High Energy Transport Code HETC-3STEP Applicable to Incident Energies below 100 MeV", Proc. of Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol., Gatlinburg, Tennessee, May 9-13, 1994, p571 (1994).
- (7) OECD/NEA, "Intermediate Energy Nuclear Data: Models and Codes", Proc. of A Specialists' Mtg., Issy-les-Moulineaux, FRANCE, 30 May - 1 June, 1994. (OECD/NEA) (1994).