

話題・解説(II)

JENDL 高エネルギーファイル 2007

日本原子力研究開発機構

深堀 智生、国枝 賢

fukahori.tokio@jaea.go.jp

kunieda.satosi@jaea.go.jp

九州大学大学院 総合理工学研究院

渡辺 幸信

watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp

清水建設 (株)

小迫 和明

k.kosako@shimz.co.jp

1. はじめに

加速器の設計・遮蔽計算、加速器駆動核変換システムの開発研究、スポレーション中性子源開発と中性子科学への応用、悪性腫瘍の先進的粒子線治療、医療用 RI (診断、治療用) 製造、地球環境中の中性子スペクトル分布、宇宙・地球環境で使用される半導体デバイスの放射線損傷評価などの多岐にわたる応用分野において、20 MeV 以上のエネルギー領域へ拡張された高エネルギー核データが要求されている。これらの応用分野では、核データが従来カバーしていた中性子ばかりでなく陽子入射核反応の断面積データも必要となる。

こうした要求を受けて、シグマ委員会高エネルギー核データ評価 WG では 3 GeV までの中性子及び陽子入射反応に関する評価済高エネルギーファイル (JENDL High Energy File, JENDL/HE) の作成が行われている[1,2]。評価及びデータベース化は当初設定した優先度に従って進められてきた。2004 年 3 月の時点で断面積評価・ファイル化を終えた核種について JENDL/HE-2004 ファイル (66 核種) として公開し、これを改訂したもの及び新たな核種を追加して、2007 年 12 月に JENDL/HE-2007 を公開した。本ファイルは、現時点で公開されている高エネルギーファイルの中では、格納している核種数及び入射エネルギー領域において最も充実した規模を誇るものである。公開後、MCNP 用のライブラリーを順次作成しており、ベンチマーク解析が進んでいる。本報告では、JENDL/HE-2007 の概要を報告する。評価手法に関しては、以前の JENDL/HE-2004 に関する核デ

ータニュース記事[3]を参照していただくことにて、本報告ではそれ以降に導入された手法のみを紹介し、それ以外の部分については割愛させていただきます。

2. ファイルの概要

JENDL/HE に格納予定の核種一覧を表 1 に示す。表中、太字の 106 核種が JENDL/HE-2007 に格納されている。新たに JENDL/HE-2007 に追加された核種は、40 核種である。また、下線（実線または破線）を施された核種が、JENDL/HE-2004 から格納されていたもの（66 核種）で、この内、実線で示されている核種は JENDL/HE-2004 から JENDL/HE-2007 へ至る過程で再評価・改訂が行われたもの（23 核種）である。ここでわかりのように、主要な構造材核種（ステンレス鋼やコンクリート等）、加速器システムのターゲット（候補）核種、人体構成元素、主要なアクチノイド核種はすべて網羅されている。

Li や Be 等 BNCT や加速器中性子源として重要な核種が格納されていないが、これら軽核は評価手法の確立が遅れており、今回の JENDL/HE-2007 への格納は、残念ながら断念された。これらについては、今後早急に評価を行い、次期改訂版には是非格納する予定である。優先度 4 のものは、人体構成元素のマイナーな同位及び耐放射線半導体材料として期待されている同位体であり、当初、格納予定ではなかったが、今後格納していきたいと考えている。

表 1 JENDL 高エネルギーファイルの格納予定核種とその優先度

| | |
|-------------------------|---|
| 1st priority (39 核種) | <u>¹H, ¹²C, ¹⁴N, ¹⁶O, ²⁷Al, ^{50,52,53,54}Cr, ^{54,56,57,58}Fe, ^{58,60,61,62,64}Ni, ^{63,65}Cu,</u> <u>180,182,183,184,186</u> W, <u>196,198,199,200,201,202,204</u> Hg, <u>204,206,207,208</u> Pb, <u>209</u> Bi, <u>235,238</u> U |
| 2nd priority (43 核種) | ⁹ Be, ^{10,11} B, <u>^{24,25,26}Mg, ^{28,29,30}Si, ^{39,41}K, ^{40,42,43,44,46,48}Ca, ^{46,47,48,49,50}Ti, ⁵¹V, ⁵⁵Mn,</u> <u>⁵⁹Co, ^{90,91,92,94,96}Zr, ⁹³Nb, ^{92,94,95,96,97,98,100}Mo, ^{238,239,240,241,242}Pu</u> |
| 3rd priority (40 核種) | ² H, ^{6,7} Li, <u>¹³C, ¹⁹F, ²³Na, ^{35,37}Cl, ^{35,38,40}Ar, ^{64,66,67,68,70}Zn, ^{69,71}Ga, ^{70,72,73,74,76}Ge,</u> <u>⁷⁵As, ⁸⁹Y, ¹⁸¹Ta, ¹⁹⁷Au, ²³²Th, ^{233,234,236}U, ²³⁷Np, ^{241,242,242m,243}Am, ^{243,244,245,246}Cm</u> |
| 4th priority (10 核種) | ¹⁵ N, ¹⁸ O, ^{74,76,77,78,80,82} Se, ^{113,115} In |

3. 新しく導入した評価手法及び結果 — 実験値並びに他の評価値との比較 —

評価手法の主な部分に関しては、以前の JENDL/HE-2004 に関する核データニュース記事[3]を参照していただくことにて、ここでは新しく導入した評価手法（複合粒子（d、t、³He、α）の光学模型ポテンシャル及び前平衡過程からの放出[4]）について概要を紹介し、実験並びに他の評価結果（LA150（最大エネルギー：150MeV）[5]や NRG2003（JEFF-3.1

と同じ、最大エネルギー：200MeV) [6]) との比較をいくつか示す。この導入を計画した経緯は、**図 1** に示すように 20~100 MeV 領域で JENDL/HE を含め既存の評価データが α 生成断面積を大きく過小評価していると指摘されたため、 α 粒子の放出を強調するように改訂しなければならないことからであった。この手法の導入結果、**図 1** の present で示されているように、断面積実験データの再現性が著しく向上した。なお、上記複合粒子に関する評価手法の導入は、テストケースとして ^{56}Fe 、Zr 同位体、 ^{93}Nb 、W 同位体、Pb 同位体及び ^{209}Bi に対してだけ適用され、JENDL/HE-2007 に格納されている。

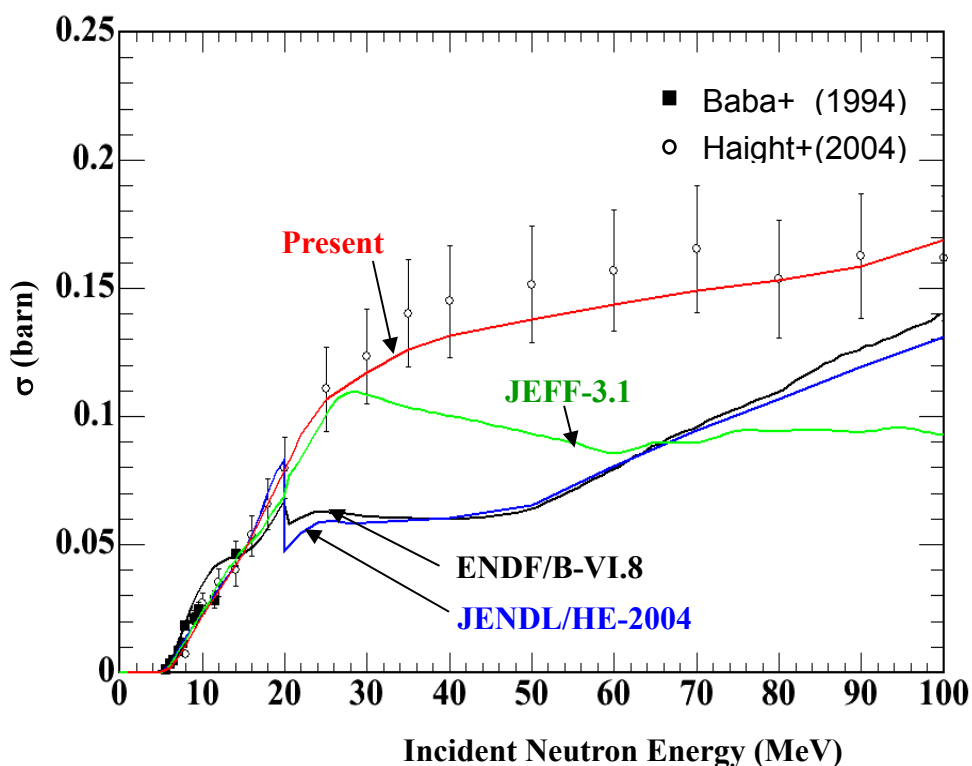


図 1 Fe(n,α)断面積の比較

3.1 複合粒子の光学模型ポテンシャル

複合粒子の光学模型ポテンシャル (OMP) は、従来いくつか提案されているが、現象論的なグローバルに広いエネルギー範囲 (特に 20 MeV 以上) にわたったものはあまりない。ここでは、ロスアラモス国立研究所の Madland が提案した簡易フォールディングポテンシャルに基づき、OMP の検討を行った。

図 2 に α 粒子を例にフォールディングポテンシャル導出の概念を示す。基本的に α 粒子ポテンシャルを 2 個の陽子及び中性子ポテンシャル (入射エネルギーはそれぞれ 1/4 に均等に振り分けられると仮定する) の重ね合わせとして記述する。この際、陽子及び中性

子のポテンシャルとして、国枝-千葉-柴田グローバルポテンシャル[7]を用いた。各種複合粒子の弾性散乱角度分布を考慮した結果、**図 3** に示すように、real part ($V(E)$)、real diffuseness (a_R)、imaginary diffuseness (a_I) を微調整した。物理的な意味をこじつけると、real part の場合は複合粒子の内部エネルギーの、diffuseness は複合粒子の半径は中性子及び陽子がバラバラであるよりも小さいことの影響であると考えられる。各複合粒子の弾性散乱角度分布の実験データに対する再現性は従来のグローバルポテンシャルよりもよいことを確認している。

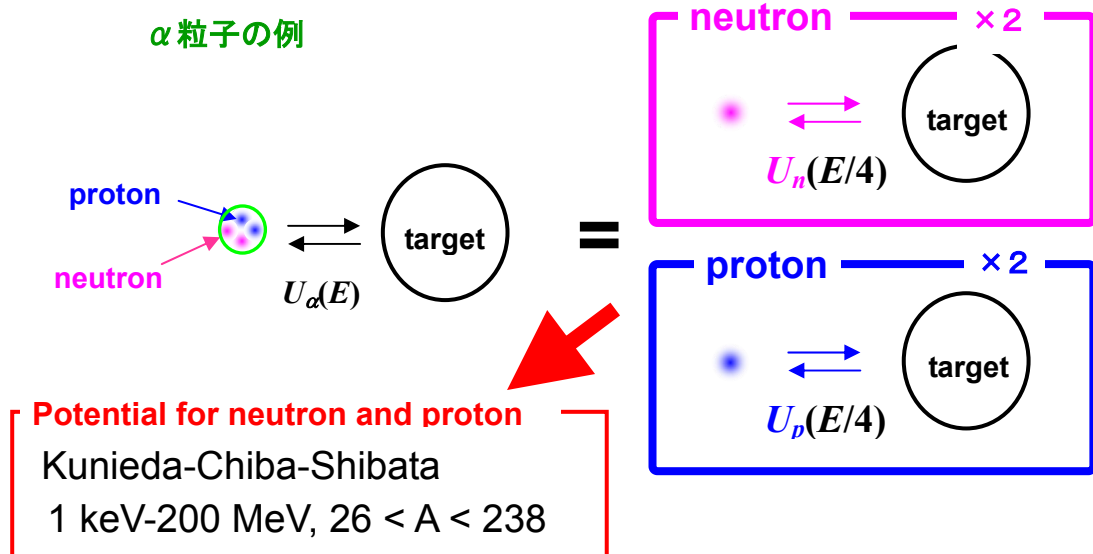


図 2 フォールディングポテンシャルの概念 (α 粒子を例として)

| | | | |
|--------|--------------------|-------------------|-------------------|
| d | $V(E) \times 0.85$ | $a_R \times 1.05$ | $a_I \times 1.35$ |
| t, h | $V(E) \times 0.80$ | $a_R \times 1.15$ | $a_I \times 1.35$ |
| a | $V(E) \times 0.95$ | $a_R \times 1.00$ | $a_I \times 1.00$ |

図 3 フォールディングポテンシャルパラメータの微調整

3.2 複合粒子の前平衡過程からの放出

20 MeV 以上のエネルギー領域における複合粒子放出スペクトルに関して、Kalbach モデルは非常に大きな過小評価を示している。このため、GNASH に岩本-原田-佐藤の前平衡過程からの複合粒子放出モデルを導入し、複合粒子放出を強調するようにした。複合粒子の前平衡過程からの放出割合の概念を図 4 に示す。α粒子の場合、従来はフェルミ面より上に 4 粒子がなければ放出が起らなかったものを、形成因子 (Formation Factor) を導入することにより、フェルミ面以下の (1~4) 核子を pick-up し、放出できるようにしたものである。

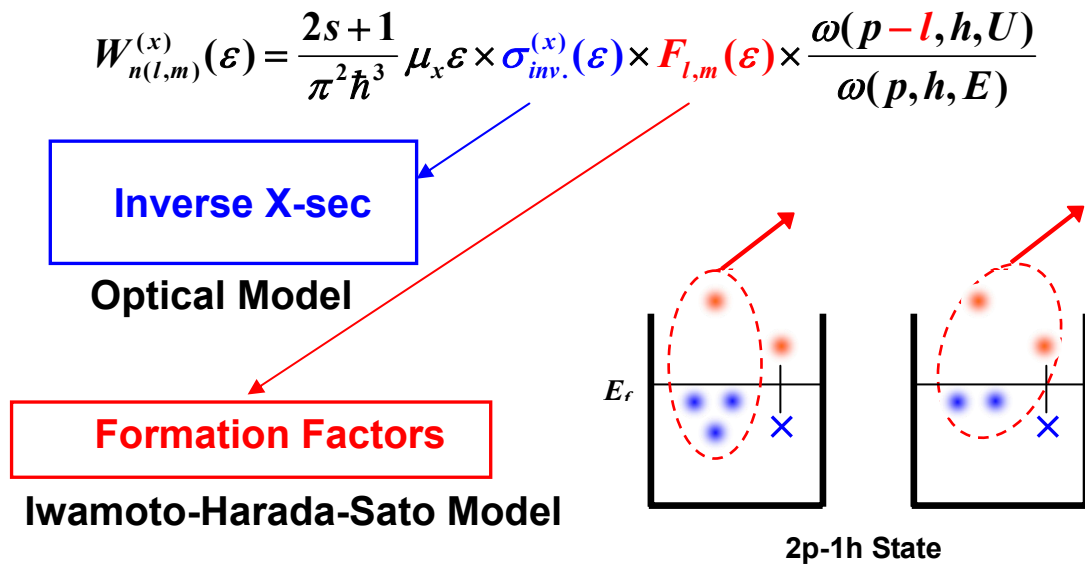


図 4 複合粒子の前平衡過程からの放出割合の概念

図 5, 6 に ^{56}Fe 及び ^{208}Pb の中性子入射α放出スペクトルの計算及び他の評価結果と実験データの比較を示す。中重核の ^{56}Fe の場合、今回の計算結果、他の評価結果及び実験データ間の差は小さいが、スペクトル中の前平衡部分の形状及び絶対値は今回の計算結果がもっともよい。 ^{208}Pb の場合は差が顕著で、今回の計算結果が実験データをほぼ再現できているのに対し、ENDF/B-VII の結果は前平衡部分のスペクトル量が全く不足しており、JEFF-3.1 の結果は前平衡部分も併せてほぼ再現できているようであるが、全体的に物理的でない形状を与えている。以上の結果から類推すると、重い核であればあるほど、岩本-原田-佐藤モデルによる前平衡過程からの複合粒子放出の影響が大きく、これを用いないとスペクトルの再現は非常に困難であることがわかる。今回の計算では、岩本-原田-佐藤モデルにおけるオリジナルのパラメータから若干の修正を施したが、現状では 100 MeV までしか実験値を再現できていない。これ以上のエネルギーに関しては、今後の課題である。また、他の核種への適用を拡大し、その傾向を検討する必要があると思われる。

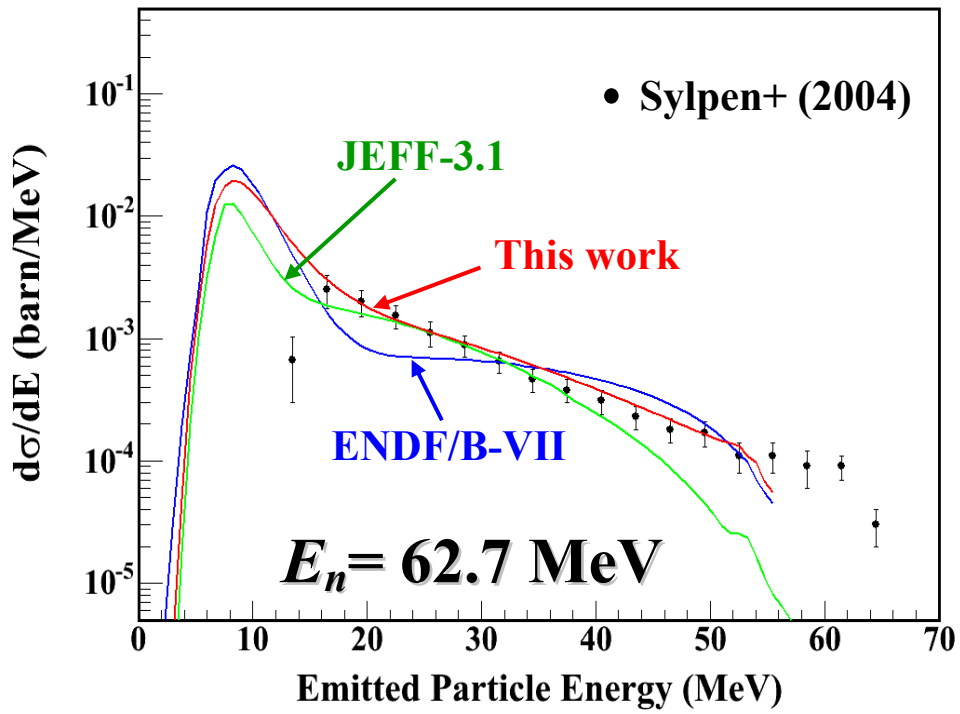


図5 $^{56}\text{Fe}(n,\alpha)$ スペクトルの比較

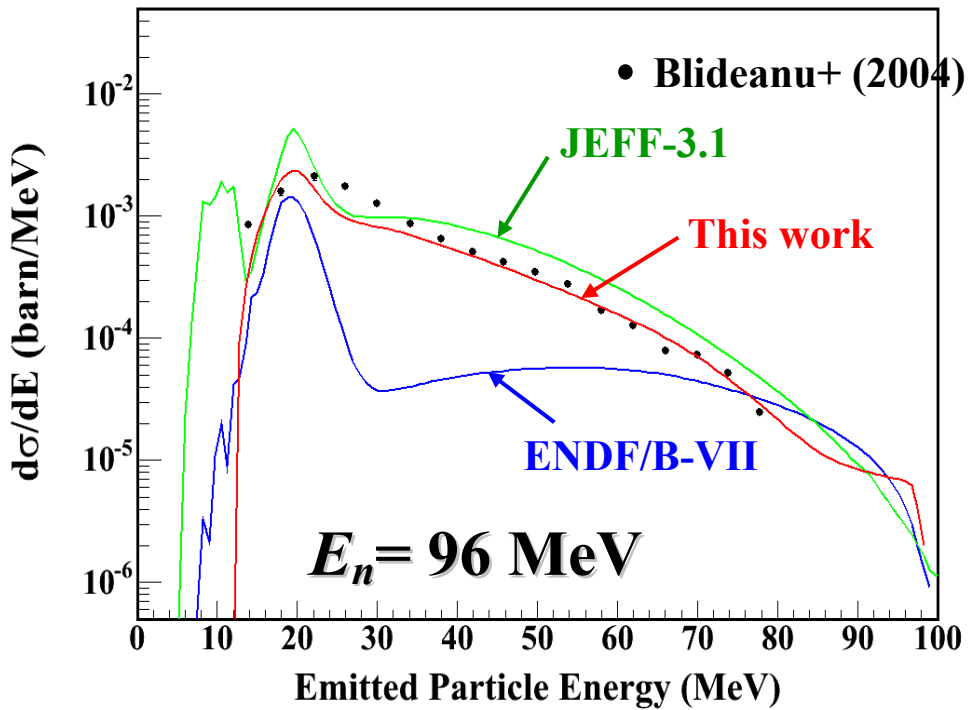


図6 $^{208}\text{Pb}(n,\alpha)$ スペクトルの比較

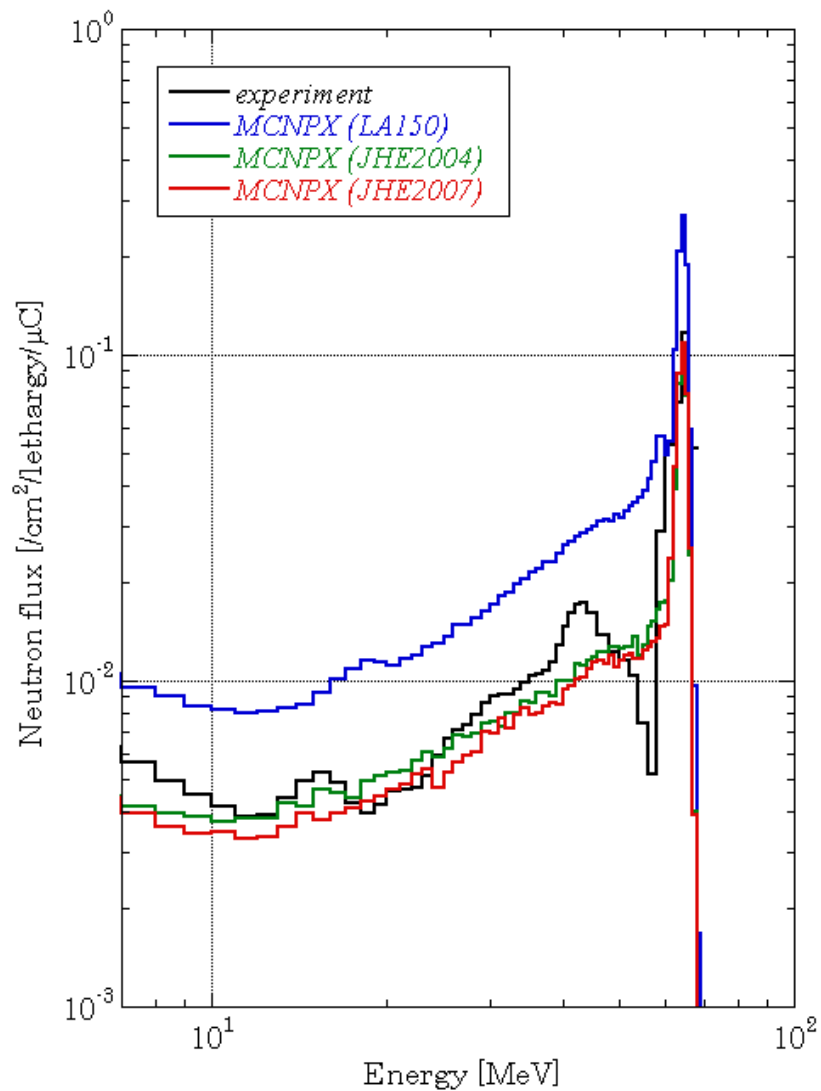


図7 TIARA における中性子深層透過実験 (130 cm 厚鉄遮蔽体、68 MeV $p\text{-}^7\text{Li}$ 中性子源) による JENDL/HE-2007 のベンチマークテスト結果

4. ベンチマーク

高エネルギー領域では実験データが不足しているため、多くの評価結果を微分的に検証するのは難しい。このため、JENDL/HE-2007 を用いた MCNP 用のライブラリーを作成し、いくつかのベンチマーク計算を行った。ここでは、中性子深層透過実験のベンチマークの結果を示すことにする。

図7に TIARA における 68 MeV 中性子深層透過実験[8]の MCNPX 解析結果の例を示す。この場合の鉄遮蔽体厚さは 130 cm である。JENDL/HE-2004, 2007 も LA150 も同様のスペクトル形状を示しているが、JENDL/HE が実験データ全体をよく再現しているのに比べて、

LA150 は 2 倍程度の過大評価になっている。実験値と計算値のスペクトル形状が若干異なるのは実験データのアンフォールディング法による処理限界のためであると考えられる。この結果からわかるように、少なくとも鉄体系では JENDL/HE-2004, 2007 のベンチマーク計算結果は、良い精度で積分実験データを再現している。JENDL/HE-2004 及び 2007 間の差は、3. で述べた α 生成断面積を修正したにもかかわらず、小さい。

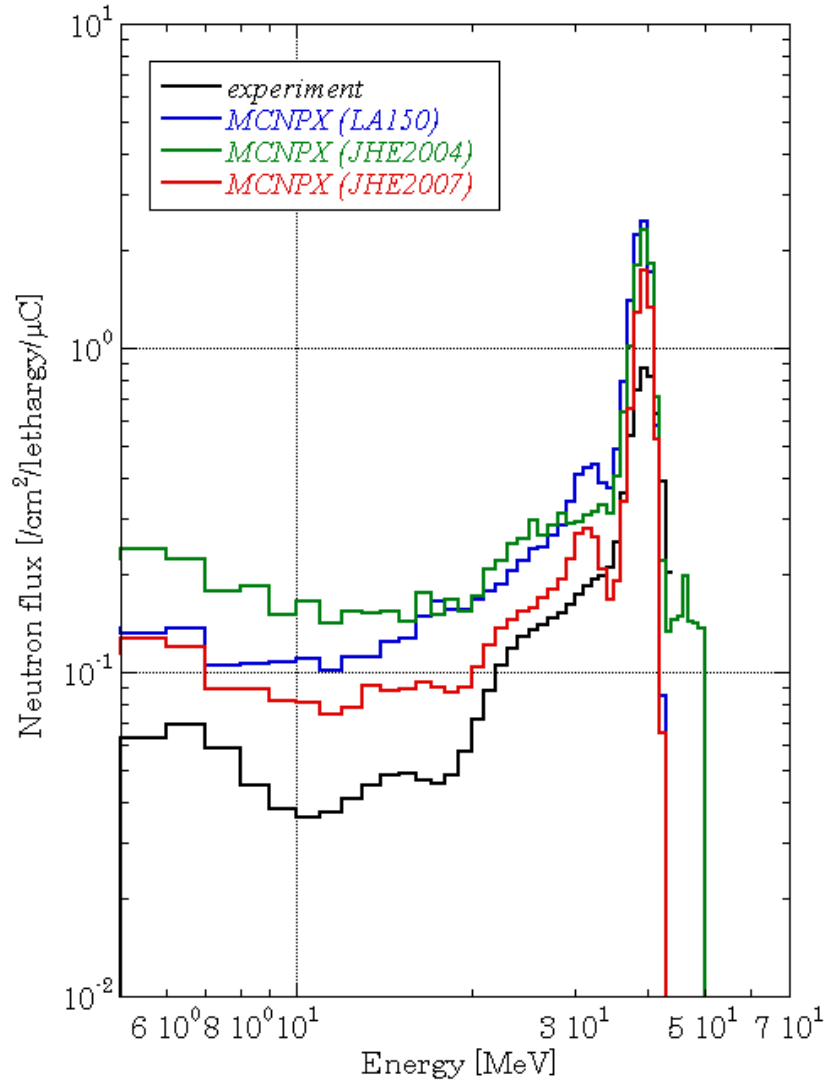


図 8 TIARA における中性子深層透過実験 (150 cm 厚コンクリート遮蔽体、43 MeV $p\text{-}^7\text{Li}$ 中性子源) による JENDL/HE-2007 のベンチマークテスト結果

図 8 にコンクリート遮蔽体についての中性子深層透過解析結果の比較を示す。この場合は、遮蔽体厚さは 150 cm、入射中性子は 43 MeV $p\text{-}^7\text{Li}$ 中性子源からのものである。この場合も、JENDL/HE-2004, 2007 及び LA150 の結果は同様の形状をしているが、

JENDL/HE-2007 がより実験値を再現している。

5. まとめと展望

本報告では、2007年12月に公開された高エネルギーファイル JENDL/HE-2007 の概要を紹介した。このファイルには、表 1 中、JENDL/HE-2004 の改訂版を含む 106 核種に対して、3 GeV までの中性子及び陽子入射反応の評価済み断面積データが含まれている。微分レビューの結果及びベンチマーク計算結果は良好である。断面積ファイルから MCNP 用ライブラリーを作成しているが、現在公開準備中である。今後は、さらに評価・ファイル化作業を継続して進め、全 132 核種の早期公開を目標にしている。すでに公開済の核種に関しても必要に応じて改訂を加えていく予定である。公開中の JENDL/HE-2007 をユーザの方々に広く使用していただき、指摘された問題点を逐次解決していくことで、信頼性の高いファイルにしたいと考えている。なお、評価済断面積ファイルの入手については、原子力機構核データ評価研究グループの web ページ (<http://www.ndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-he-2007.html>) または直接問い合わせたい。最後になったが、この場を借りて、高エネルギー核データ評価 WG メンバーの皆様に、これまでの断面積評価及びレビュー作業への協力に対して感謝を申し上げたい。

参考文献

- [1] T. Fukahori, *et al.*, *J. Nucl. Sci. and Technol., Suppl.* **2**, 25-30 (2002).
- [2] Y. Watanabe *et al.*, Proc. of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Sept. 26-Oct. 1, 2004, Santa Fe, USA; AIP Conference Proceedings, Vol. 769, pp. 326-331 (2005).
- [3] 渡辺幸信、深堀智生、「JENDL High Energy File 2004」、核データニュース No.81、p.60-70 (2005).
- [4] 国枝賢、深堀智生、「中重核に対する核子入射クラスター生成断面積の評価方法の検討」、日本原子力学会 2007 年秋の大会 (2007).
- [5] M.B. Chadwick, *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **131**, 293-328 (1999).
- [6] A.J. Koning, private communication (2004).
- [7] S. Kunieda, *et al.*, *J. Nucl. Sci. and Technol.* **44**[6], 838-852 (2007).
- [8] H. Nakashima *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **124**, 243 (1996).