

核データ・炉物理特別会合(3)

JENDL-3.3 の積分テスト

2) 遮蔽関連積分テスト

日本原子力研究所
中性子科学研究センター
前川 藤夫
fujio@cens.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

シグマ委員会・Shielding 積分テストワーキンググループでは、JENDL-3.3 の評価の進行に合わせ、主に遮蔽関連の断面積データに対する積分テストを 1999 年から行ってきた。対象としたデータは核分裂炉、核融合炉や加速器施設等の遮蔽で使われる材料を中心に、Na, Al, Si, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Nb, Wである。2000年11月の核データ研究会では、ワーキンググループリーダーの山野氏によりその時点におけるテストの結果が報告されている[1]。本稿ではその後の結果も含め、2001年3月の日本原子力学会・春の年会で報告を行った JENDL-3.3 の積分テスト結果について述べる。なお、2001年3月時点ではまだ JENDL-3.3 の評価は完結しておらず、その後のデータの変更もあり得るため、本稿の結果は JENDL-3.3 公開版とは必ずしも対応していない可能性があることを申し添えておく。

2. 積分テスト手法

過去に行われたベンチマーク実験の解析を JENDL-3.3 を用いて行い、得られた計算値を実験値と比較することにより、JENDL-3.3の精度を評価した。表1に対象としたベンチマーク実験の一覧を示す。

解析には、モンテカルロ法の MCNP 及び決定論的方法の ANISN と DORT の輸送計算コードを用いた。断面積処理には NJOY-99 コードを用い、JENDL-3.3 から MCNP 用 ACE 形式ライブラリ及び多群の MATXS ファイルを作成した。MATXS ファイルはさらに TRANSX コードによって各材料毎のマクロ断面積へと変換し、ANISN と DORT による計算で使用した。参考のため、JENDL-3.2[2]や ENDF/B-VI[3]等による計算結果との比較検討も行った。

3. 結果

3.1 ナトリウム

JENDL-3.3 では、JENDL-3.2 のデータに対して非弾性散乱断面積に変更が加えられた。全断面積は JENDL-3.2 と同一であるため、全断面積のみに感度のある Broomstick 実験[4]の解析では JENDL-3.2 から特に変化はなく、どちらの計算結果も実験値と良く一致している。2m 近いナトリウム層による核分裂中性子の透過を見た JASPER 実験[5]の解析では、断面積改訂の効果が現れている（図 1）。JENDL-3.2 と比較して JENDL-3.3 の結果は 5~10MeV 領域で大きく、逆に 2MeV 以下で小さいが、スペクトル形状についてはどちらの場合も実験値とほぼ一致している。ただし、実験で使われたナトリウムタンクの変形など実験条件に不明確な部分があるため、実験値との絶対値での比較が行えないのが残念である。

3.2 鉄

鉄は最も重要な遮蔽材料の 1 つであり、JENDL-3.3 では JENDL-3.2 と比較して明らかなデータの精度向上が見られた。図 2 は鉄体系内の 14MeV 中性子透過を $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反応率により見た FNS 実験[6, 7]の解析結果である。JENDL-3.2 では透過距離の増加と共に 14MeV 中性子束を過小に計算する傾向があったが、JENDL-3.3 ではこの問題点が解消されている。これは主に、14MeV 付近の弾性散乱断面積が大きく、逆に弾性外散乱断面積が小さく修正されたためである。14MeV では弾性散乱による 2 次中性子の前方性が強いため、弾性散乱断面積の増加により体系深部へ到達する 14MeV 中性子が増加する。

JENDL-3.3 では、0.85~7MeV のエネルギー領域で Geel で測定された高エネルギー分解能の全断面積データを新たに採用したため、JENDL-3.2 から全断面積の山谷の微細構造が変わった。ただし、MeV 領域の全断面積に敏感な Broomstick 実験の解析からは JENDL-3.2 と JENDL-3.3 の計算結果の間に目立った差はなく、両者とも実験値と良く一致している。

さらにエネルギーが下がって keV 領域になると、共鳴領域の全断面積の極小値付近のエネルギーを中性子が通り抜けてくる、いわゆる“ウインドウストリーミング現象”が遮蔽の観点から重要になる。図 3 は高エネルギー加速器施設の厚さ 5m の鉄遮蔽について、3 種の評価値を用いて中性子束の透過計算を行った結果である。厚さ 5m の鉄遮蔽の背後では、比較的減衰の早い 1MeV 以上の中性子束と比較して 1MeV 以下の中性子束は 7~8 桁も大きな値を示している。これは、鉄の全断面積の 24, 140, 180, 300 keV 付近には十分の数パーン程度の極小値が存在するためである。さらに、計算に用いた核データの違いにより中性子束に約 1 桁にも及ぶ差が見られ、また中性子スペクトルのピーク構造も異なることが分かる。この原因は、図 4 に示すとおり評価値により断面積の谷

の深さにかなりの差があるためである。図4の例では、313keV付近の全断面積の極小値はLA-150 [8] (ロスアラモスの150MeVまでの評価値で、20MeV以下はENDF/B-VIをつないでいる。)では0.2bであるのに対し、JENDL-3.2ではその2.5倍の0.5bである。図5は鉄体系内の深さ0.81mの位置でkeV領域の中性子スペクトルを測定したFNS実験[7, 9]の解析結果である。300keV付近に着目すれば、JENDL-3.2による中性子束は実験値よりも明らかに小さく、JENDL-3.3は少し小さめ、LA-150では少し大きめであり、JENDL-3.3とLA-150の間あたりが最も良いことが分かる。図5においてスペクトル全体を見渡すと、JENDL-3.3による計算結果はJENDL-3.2に対して実験値と良く一致する方向に動いていることが分かる。

JENDL-3.2では約5MeV以上中性子に対するの2次 γ 線生成断面積が過大に評価されていたが、この問題点はJENDL-3.3において修正された。図6は14MeV中性子を入射した鉄体系からの漏洩 γ 線スペクトル測定実験[10]の解析結果であるが、JENDL-3.3による計算値は実験値と良く一致している。

3.3 バナジウムとタングステン

バナジウムとタングステンでは、JENDL-3.2と比較してJENDL-3.3ではデータの改善が見られた。図7は14MeV中性子を入射したバナジウム体系内における γ 線スペクトル[7, 11]であるが、JENDL-3.2では3MeV以上のエネルギー領域で γ 線束を過小に与えていた。JENDL-3.3ではこの問題点が解消し、計算結果は実験値と良く一致している。図8は同じバナジウム体系内における中性子スペクトル[7, 11]である。10keV以上では、JENDL-3.2による計算値は実験値と良い一致を示していたが、1keV以下で実験値よりも中性子束が過小に計算されていた。そこでJENDL-3.3ではバナジウムの1keV付近の断面積の見直しが行われ、その結果、計算値は実験値により近いものとなった。ただし依然として実験値よりも過小である傾向が見られ、この原因はまだ分かっていない。

図9は14MeV中性子を入射したタングステン体系内における γ 線スペクトル[7]であり、観測されている γ 線の大部分はkeV中性子の捕獲反応に伴うものである。JENDL-3.2による計算値は2MeV以上で実験値よりも小さかったが、JENDL-3.3になって実験値とより良く一致する結果になっている。

3.4 その他の元素

これまでに述べてきた以外でテストの対象となった元素はAl, Si, Ti, Cr, Co, Ni, Cu及びNbである。これらに関しては、JENDL-3.2からの断面積データの改訂が積分実験解析にあまり影響を及ぼさず、JENDL-3.3による計算結果はJENDL-3.2のものとはほぼ同じであった。以下、いくつか例を示す。

図10は14MeV中性子を入射したニッケル球からの漏洩中性子スペクトルである。エ

エネルギー分解能が異なるために 1MeV 以下のスペクトルの山谷の構造が実験値と計算値の間で異なって見えるが、分解能を考慮すれば両者は全エネルギー範囲にわたって概ね一致してる。

図 11 は 14MeV 中性子を入射したクロム球からの漏洩 γ 線スペクトル[12]である。この例では FENDL/E-1.0 の結果は比較的良く実験値と一致しているが、JENDL-3.3 の結果はスペクトル形状で実験値と多少隔たりがあり、今後の改善の余地がある。

図 12 は最近 FNS で阪大グループが測定した、核融合炉ブランケット候補材料であるアルミン酸リチウム (LiAlO_2) からの漏洩 γ 線スペクトル[10]である。アルミのデータに JENDL-3.3、リチウムと酸素のデータに JENDL-3.2 を用いた計算によるスペクトルでは、実験で観測された 6MeV 付近の強い離散 γ 線ピークを大幅に過小評価している。このピークは酸素-16 の第 2 励起レベルから基底状態に遷移する時に放出される 6.13MeV の γ 線に相当し、良く知られた離散 γ 線である。しかし JENDL-3.2 では、14MeV 中性子入射に対する酸素-16 からのこの離散 γ 線生成断面積をほぼ 0 に近い値としており、これが不一致の原因であることが分かった。これは JENDL-3.3 のアルミのデータの積分テストを行った時に見つかった副産物である。この例は、ベンチマーク実験が核データの積分テスト、そして問題点摘出にいかにか本質的な役割を果たすかを物語っている。

4. まとめ

積分テストの結果、前バージョンである JENDL-3.2 と比較し、JENDL-3.3 では多くの点でデータの精度が向上していることが確かめられた。問題点はまだいくつか残されているが、その多くは JENDL-3.3 の公開までに解決されるであろう。本稿で紹介した本ワーキンググループの活動が、JENDL-3.3 の多くのデータに関する信頼性を保証し、今後世界中のより多くのユーザーが JENDL-3.3 を利用することに多少なりとも役立てれば幸いである。

謝 辞

本稿は、シグマ委員会 Shielding 積分テストワーキンググループ活動の成果をまとめたものである。データを提供していただいたワーキンググループメンバーの方々に深く感謝いたします。

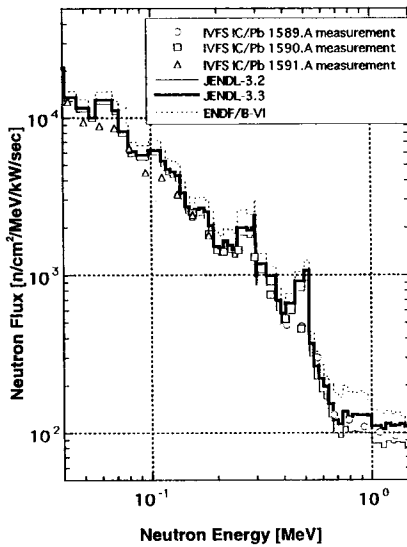
参考文献

- [1] N. Yamano, *JAERI-Conf2001-006*, pp. 39-44 (2001).
- [2] T. Nakagawa, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **32**, 1259 (1995).
- [3] P. F. Rose (Ed.), *BNL-NCS-17541* (1991).
- [4] R. E. Maerker, *ORNL/TM-3870* (1972).
- [5] F. J. Muckenthaler, et al., *ORNL/TM-11989* (1992).
- [6] K. Oishi, et al., *Proc. 7th International Conference on Radiation Shielding*,
Sept. 12-16, 1988, Bournemouth, UK, pp. 331-340 (1988).
- [7] F. Maekawa et al., *JAERI-Data/Code 98-021* (1998).
- [8] M. B. Chadwick, et al., *Nucl. Sci. Eng.* **131**, 293 (1999).
- [9] C. Konno, et al., *Fusion Eng. Des.* **18**, 297 (1991).
- [10] T. Nishio, et al., *JAERI-Conf2001-006*, pp. 172-177 (2001).
- [11] F. Maekawa, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **36**, 242 (1999).
- [12] J. Yamamoto, et al., *JAERI-M94-014*, pp. 18-31 (1989).

表1 ベンチマーク実験の一覧.

施設, 機関, 国等	中性子源	実験の名称	対象材料
ORNL/米国	核分裂炉	JASPER 実験 (n)	Na
		Broomstick 実験 (n)	Na, Fe
		平板実験 (n)	SS-316
ASPIS/WINFRIITH	核分裂炉	平板実験 (n)	Fe
KfK/ドイツ	Cf-252	球実験 (n, γ)	Fe
NIST/米国	Cf-252	球実験 (n)	Fe
OKTAVIAN/阪大	D-T	パルス球実験 (n, γ)	Al, Si, Ti, Cr, Co, Cu, Nb, W
FNS/原研	D-T	体系内測定実験 (n, γ)	V, Fe, SS-316, Cu, W, SiC
		漏洩スペクトル測定実験 (n, γ)	V, Fe, SS-316, Cu, W, LiAlO ₂ , Li ₂ TiO ₃
IPPE/ロシア	D-T	パルス球実験 (n)	Al, Fe, Ni

JASPER IVFS IC/Pb
Neutron spectrum at 25 cm behind Pb shield



JASPER IVFS IC/Pb
Neutron spectrum at 25 cm behind Pb shield

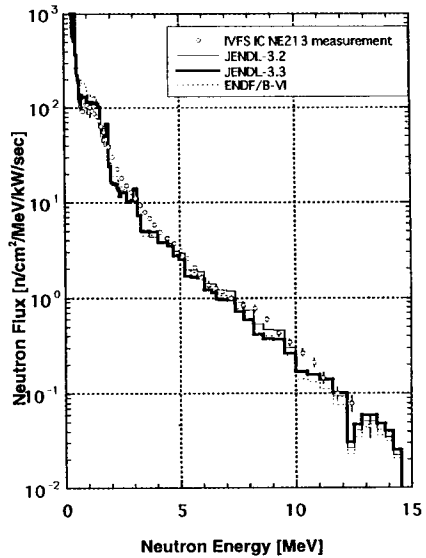


図1 ナトリウムに関する JASPER 実験の結果 (左: keV 領域, 右: MeV 領域) .

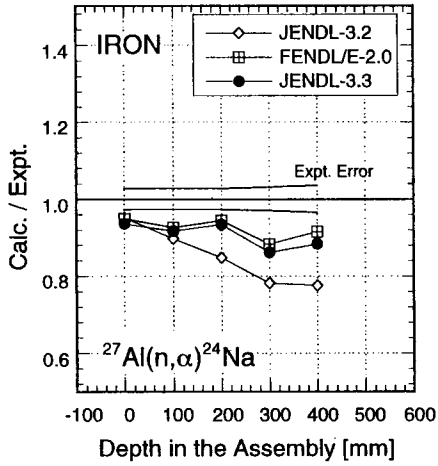


図2 14MeV 中性子を入射した鉄体系中の $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反応率の実験値と計算値の比.

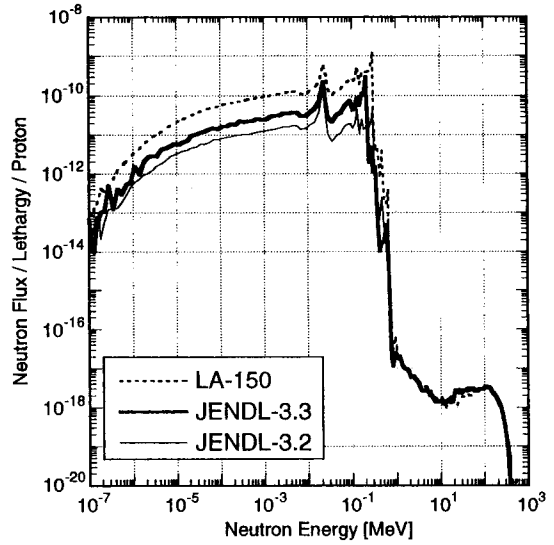


図3 高エネルギー加速器施設の厚さ5mの鉄遮蔽体に対する中性子透過計算結果.

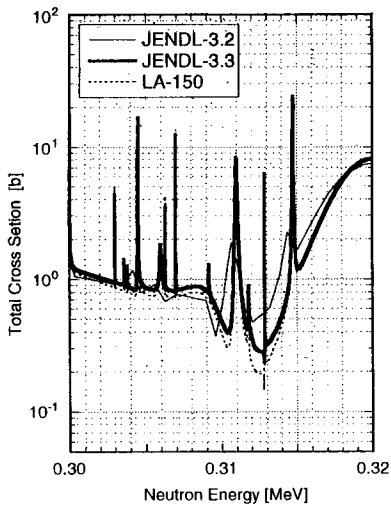


図4 3つの核データファイルの310keV付近の鉄の全断面積極小値の比較.

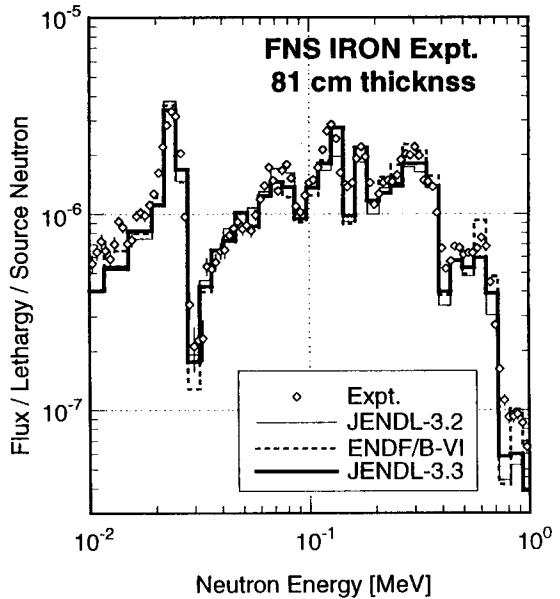


図5 FNS 鉄体系実験、81cm 深さにおける keV エネルギー中性子スペクトルの比較.

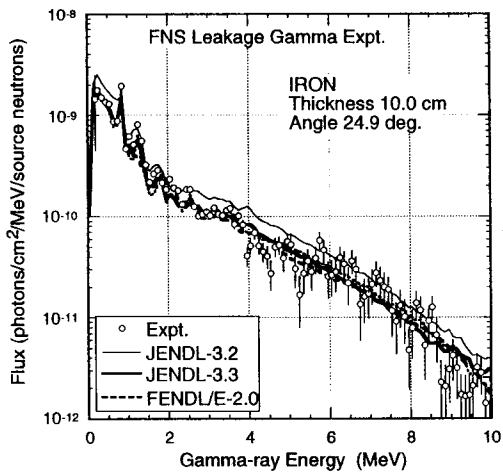


図6 14MeV 中性子を入射した鉄体系からの漏洩 γ 線スペクトル。

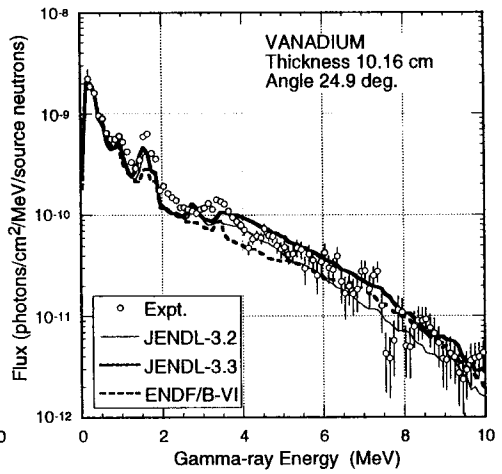


図7 14MeV 中性子を入射したバナジウム体系からの漏洩 γ 線スペクトル。

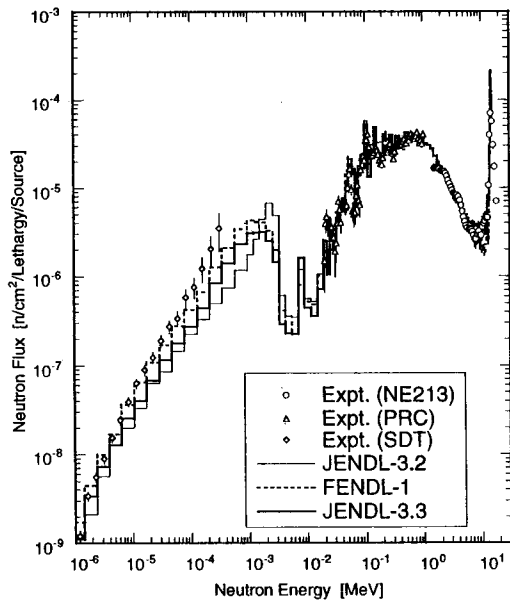


図8 14MeV 中性子を入射したバナジウム体系内の中性子スペクトル。

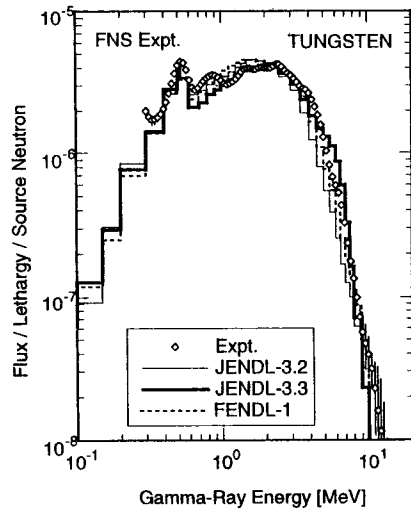


図9 14MeV 中性子を入射したタングステン体系内の γ 線スペクトル。

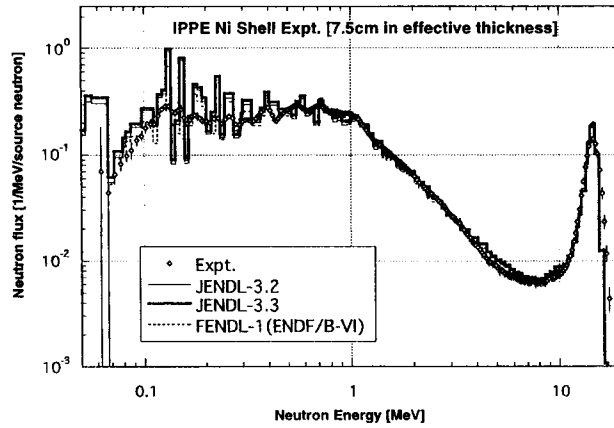


図 10 14MeV 中性子を入射したニッケル球からの漏洩中性子スペクトル。

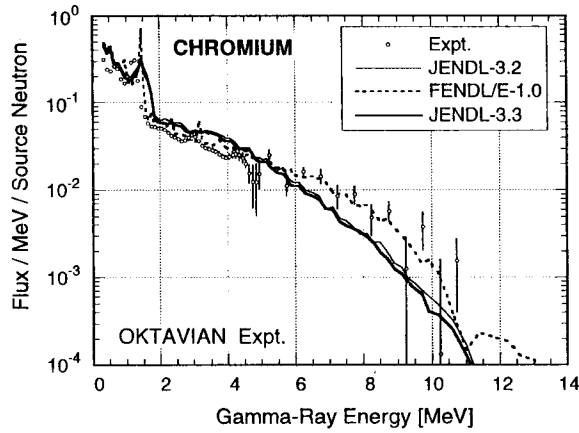


図 11 14MeV 中性子を入射したクロム球からの漏洩γ線スペクトル。

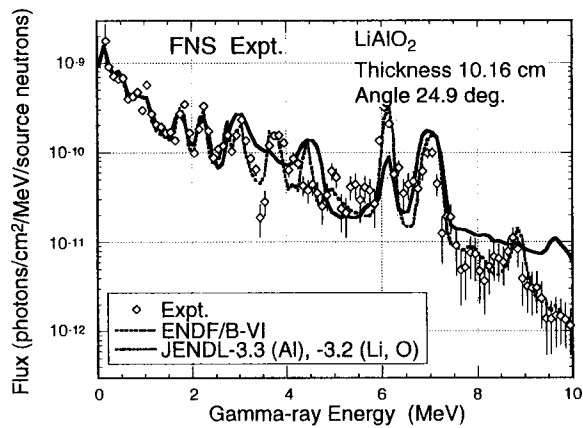


図 12 14MeV 中性子を入射したアルミン酸リチウム体系からの漏洩γ線スペクトル。