

## 核融合中性子工学・遮蔽工学に対する JENDL-3.2 の積分検証

シグマ委員会 炉定数専門部会  
Shielding 積分テストワーキンググループ  
グループリーダー 山野 直樹

ここでは、核融合炉の安全設計を目的とした核融合中性子工学、および放射線遮蔽に関する安全設計・安全解析を目的とした遮蔽工学に係わる JENDL-3.2 の積分検証について概説する。なお、詳細については論文・報告書等の公開された参考文献を引用しているので併せて参照願いたい。

核融合中性子工学と遮蔽工学は基本的な計算手法が同一であり、エネルギー範囲、主たる反応過程や評価量が適用対象により若干異なるが、核データの積分検証という観点からは同一の解析手法が適用できる。核融合中性子工学における JENDL-3.2 の積分テストは、FENDL-2 対象核種の積分テストを目的とした Fusion Neutronics 積分テスト WG が主に実施した。この WG は目的とするタスクを全て終了して 1998 年度に解散したので、Shielding 積分テスト WG が引き継いで核融合中性子工学を含めた積分テストを行うことで現在に至っている。WG の活動内容については、随時その議事録がシグマ委員会のメーリングリスト JNDCmail に通知され、シグマ委員以外でも核データセンターのホームページから過去の記事を含めて閲覧できる。また、シグマ委員会の活動報告は、2 年毎に日本原子力学会誌の資料として報告されており、JENDL-3.2 に関する積分検証についても記載されている。[1] なお、WG メンバーは利用者が主体で構成されており、客観的で中立な立場から積分検証が行えるよう留意している。

積分テストによる検証には、信頼性のあるベンチマーク実験が不可欠であり、また系統的な評価を行うためには、対象核種に対して独立した複数のベンチマーク問題を設定する必要がある。核融合中性子工学のベンチマークとしては、原研 FNS や阪大 OKTAVIAN で行われた中性子透過実験が採用された。[2] また、中性子透過に伴い発生する線生成も重要な評価項目であり、これらに対しても上記の 2 機関による実験データが採用された。遮蔽工学のベンチマークとしては、諸外国で実施された原子炉や  $^{252}\text{Cf}$  線源による遮蔽ベンチマーク実験が採用された。

核融合中性子工学のベンチマーク実験は、一部の実験を除いて比較的薄い試料を用いて行われているため、 $(n, 2n)$ ,  $(n, n')$ ,  $(n, n'')$  反応等の検証に適している。他方、遮蔽工学のベンチマークには厚い体系の中性子透過実験があり、これは全断面積、弾性散乱及び非弾性散乱反応の競合による中性子スペクトル形成や  $(n, \gamma)$  反応を検証するのに適している。また、一部の核種では、全断面積のみを検証する Broomstick 実験も行われており、これら形状や目的の異なるベンチマークを系統的に比較検討することにより、信頼度の高い総合的な核データの積分検証を行うことが可能である。また、ベンチマーク解析に用いる計算手法については、連続エネルギーモンテカルロコード MCNP と決定論的コード ANISN, DORT 等を採用して、両者の計算結果の整合性を判定し、群

定数作成時の断面積処理法や輸送計算法に起因する誤差と核データによる誤差を分離できるように考慮された積分テスト手法を採用している。[3]

JENDL-3.2 は 1994 年に公開された 340 核種の中性子入射に対する評価済核データファイルである。これら全ての核種に対するベンチマーク実験は存在しないので、工学的によく用いられる限られた核種に対する積分検証が行われている。

核融合中性子工学及び遮蔽工学における積分検証は、中性子データに対して、リチウム、酸化リチウム(LiO<sub>2</sub>)、フッ化リチウム(LiF)、ベリリウム、炭素、テフロン(CF<sub>2</sub>)、窒素、酸素、ナトリウム、アルミニウム、シリコン、チタン、バナジウム、クロム、マンガン、鉄、コバルト、ステンレススチール(SS304, SS316)、銅、ジルコニウム、ニオブ、モリブデン、タングステン、鉛を対象として行われた。線生成データに対しては、フッ化リチウム(LiF)、テフロン(CF<sub>2</sub>)、アルミニウム、シリコン、チタン、バナジウム、クロム、マンガン、鉄、コバルト、ステンレススチール(SS316)、銅、ニオブ、モリブデン、タングステン、鉛を対象として実施された。これらの結果は文献[4~9]に詳述されている。

これらのベンチマークによる検討より、JENDL-3.2 は JENDL-3.1 と比べて再現性が良好であり、精度並びに信頼性が向上している。特に、ナトリウムや鉄については、多くのベンチマークを系統的に比較検討した結果、整合性のある再現性が得られており予測精度が高い。

図 1 に 8 インチ厚さの鉄を透過する Broomstick 実験 (<sup>235</sup>U 核分裂中性子入射) に対するベンチマーク結果を示した。このベンチマークは 1MeV 以上の全断面積の検証に有効であり、中性子エネルギーが数 MeV の時には、鉄

の全断面積の評価値が 1% 変化すると透過中性子束は約 7.5% 変化する。一般的に全断面積の測定誤差は 2~3% であるため、この積分テストにより 1~2% の精度を検討することができる。

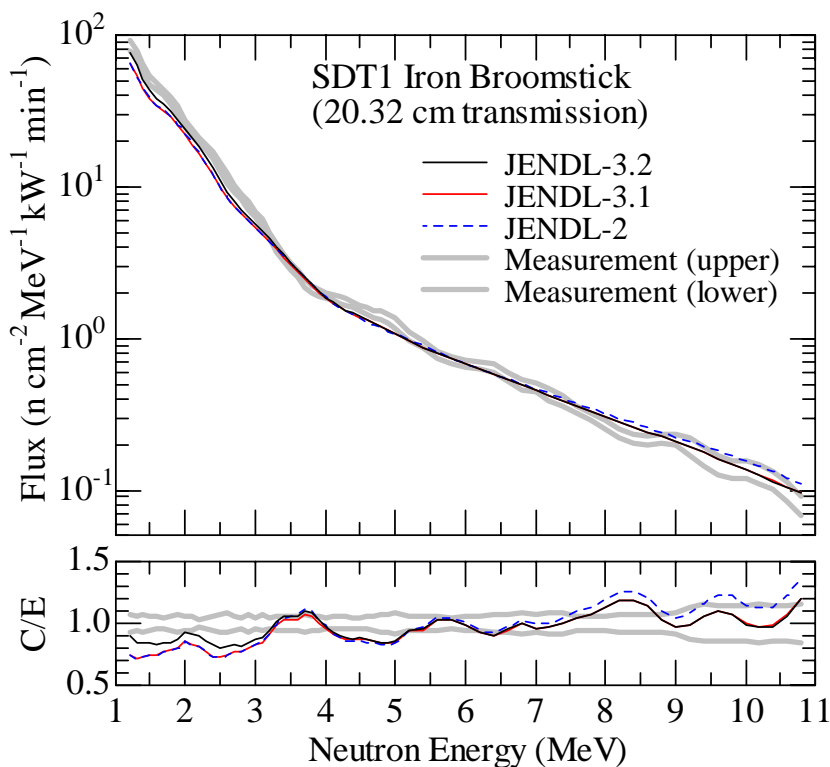


図 1 鉄の Broomstick 実験 (8 インチ厚さ) における測定値と計算値の比較

JENDL-3.2 以前では、全断面積は JENDL-2 が 3MeV 以下で過大評価、7MeV 以上で過小評価となっており、JENDL-3.1 では 7MeV 以上の過小評価は改善されたが、3MeV 以下は JENDL-2 と同様に過大評価である。JENDL-3.2 ではこのエネルギー領域も改善されている。

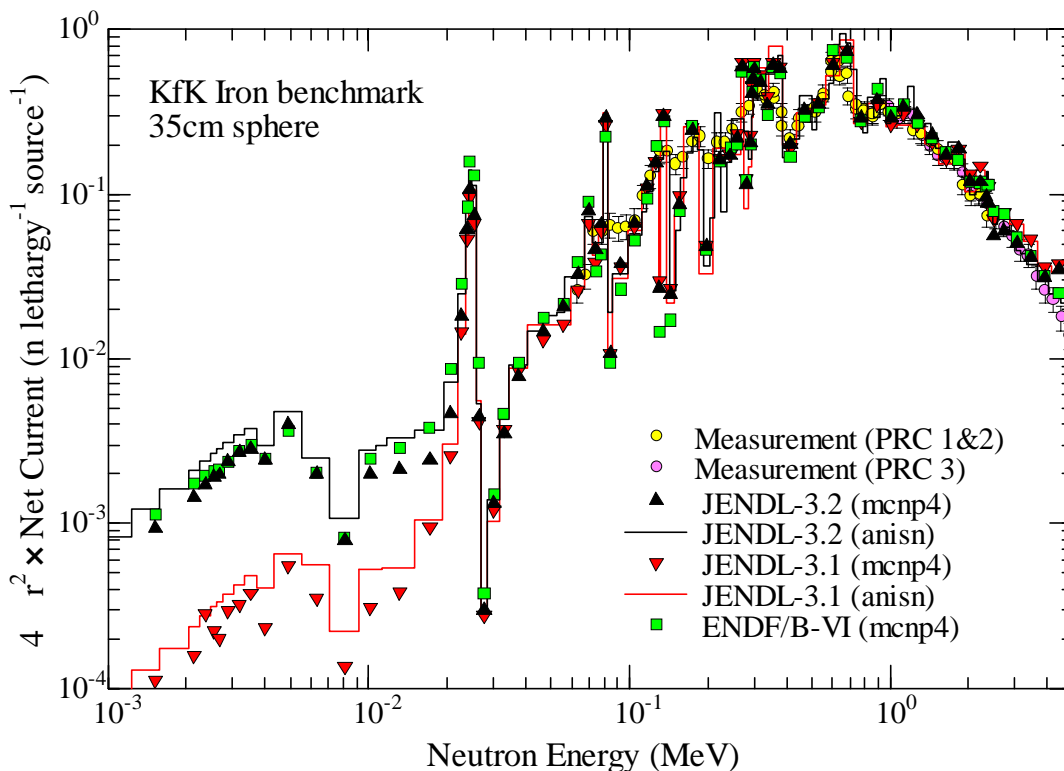


図2 鉄の KfK 実験 (直径 35cm 球) における測定値と計算値の比較

図2には直径 35cm の鉄球からの漏洩中性子エネルギースペクトルを測定した KfK 実験 ( $^{252}\text{Cf}$  自発核分裂中性子) に対するベンチマーク結果を示した。図中の PRC は反跳陽子検出器(Proton Recoil Counter)による測定値を意味するが、測定エネルギー範囲では 2MeV 以上で JENDL-3.1 が若干過大評価しているのを除き、良い再現性を示している。しかし、測定範囲外である 24keV s 波共鳴以下のエネルギー領域では、JENDL-3.1 のみが中性子束を大幅に過小評価していることが分る。この原因は、鉄の非弾性散乱の離散準位に対する断面積の格納方法に問題があることが判っており、JENDL-3.2 で解決された。

図3は原研 FNS (D-T 中性子) で行われた厚い鉄円柱体系の中性子透過実験に対するベンチマーク結果であり、透過厚さ 81cm 位置における測定値との比較を示した。この体系では、上記の KfK 実験と異なり非弾性散乱反応が特に強調されないため、24keV s 波共鳴以下のエネルギー領域における JENDL-3.1 の過小評価は現れておらず、0.5 ~ 1MeV を除いて再現性は良好である。この例のように、体系によって核データの問題点の顕在化の程度が異なるので、取扱いには十分な注意が必要である。0.5 ~ 1MeV では、JENDL-3.1 は中性子束を過小評価し、JENDL-3.2 では若干改善されているが、傾向は同じであることが分る。一方、ENDF/B-VI は測定値と良好な一致を示している。

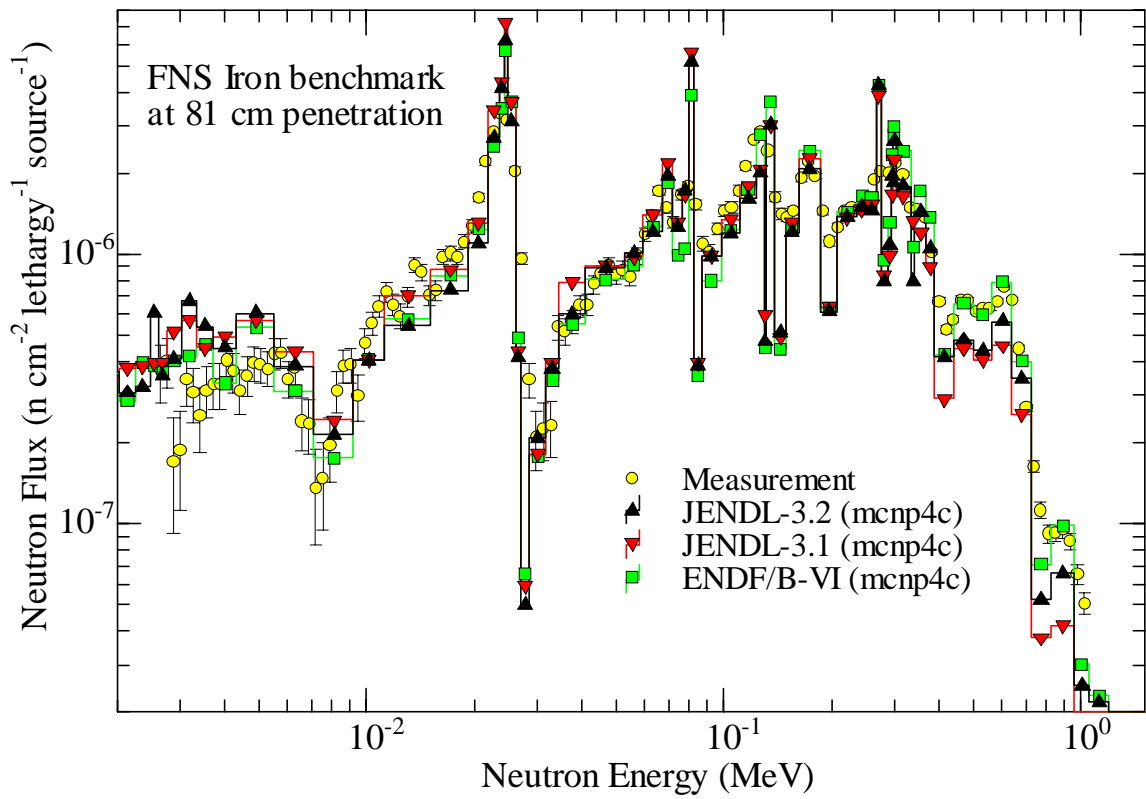


図3 鉄の FNS 円柱透過実験 (81cm 位置) における測定値と計算値の比較

図4 はナトリウムの Broomstick 実験に対するベンチマーク結果を示した。JENDL-3.2 以前では、全断面積を過小評価している。JENDL-3.2 では全断面積が再評価され、積分テストの結果とも良好な一致を示している。

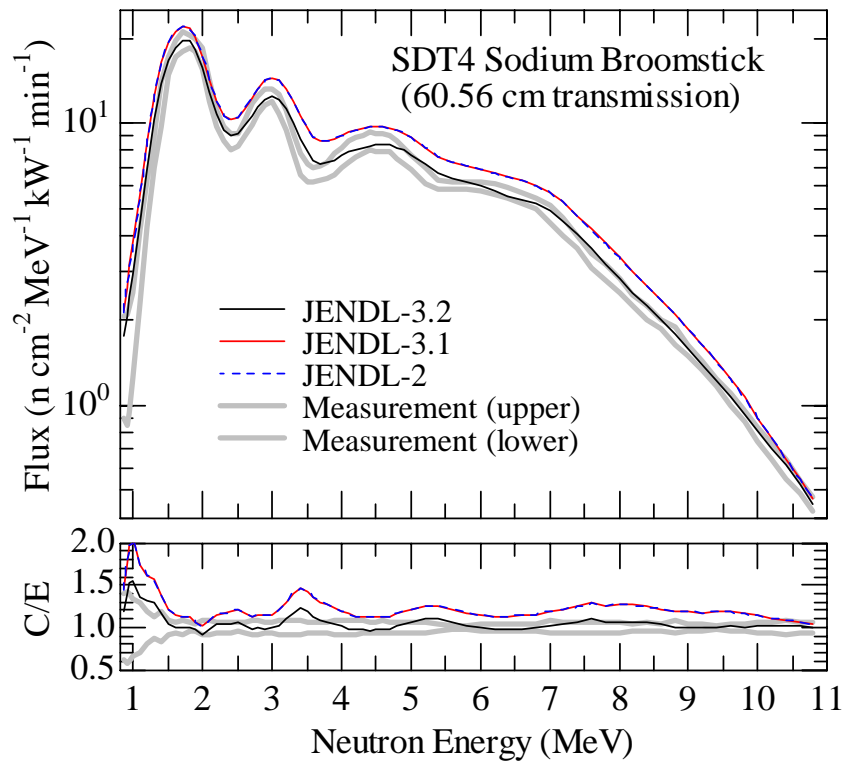


図4 ナトリウムの Broomstick 実験における測定値と計算値の比較

図5には約2m厚さのナトリウムを透過した中性子エネルギースペクトルを測定した JASPER 実験(IVFS-IC/Pb9 体系、 $^{235}\text{U}$  核分裂中性子入射)に対するベンチマーク結果を示した。JENDL-3.2 は測定されたエネルギー領域において実験値を良く再現していることが分る。他方、ENDF/B-VI は1.5MeV以下で中性子束を過大評価しており、JENDL-3.2 は ENDF/B-VI より良好である。

しかしながら、他の核種において問題点や検討事項も指摘され、それらの多くは核融合炉設計用の特殊目的ファイル JENDL-FF において改善がなされているが、まだ解決されていない問題も存在する。これらは、シグマ委員会の JENDL-3.2 問題点検討小委員会で検討され、JENDL-3.2 の問題点・今後の検討事項としてまとめられ、核データセンターのホームページに公表されており、次期改訂版である JENDL-3.3 に反映される。

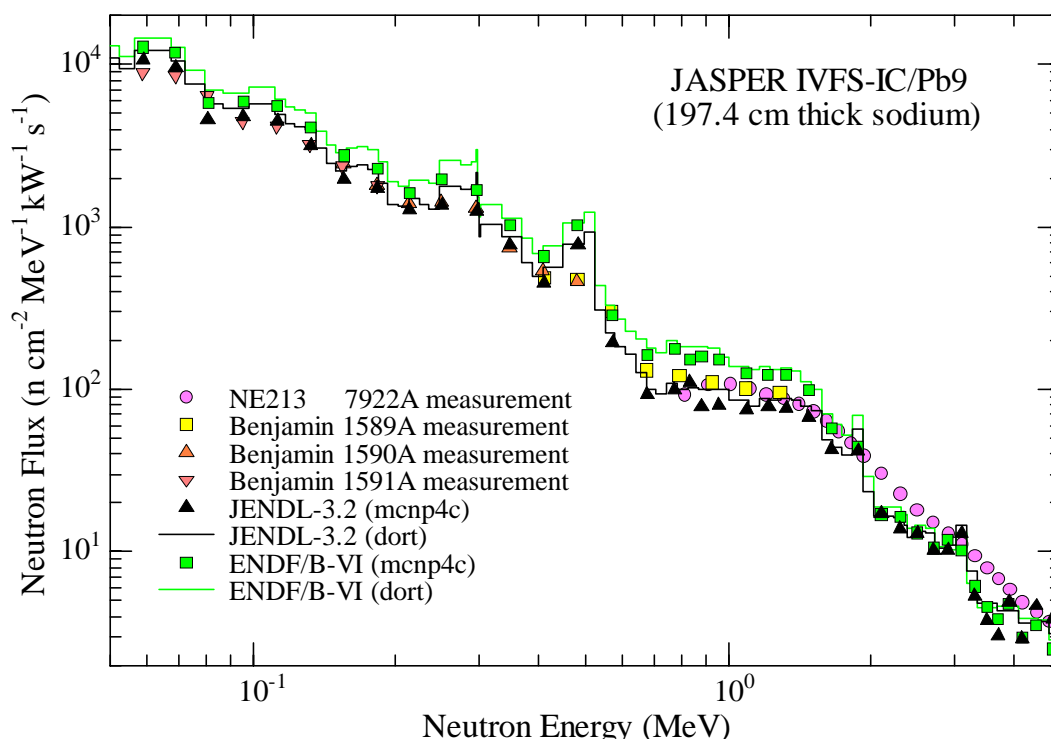


図5 ナトリウムの JASPER 実験 (IVFS-IC/Pb9 体系) における測定値と計算値

このように、JENDL-3.2 からは、評価された核データはシグマ委員会による積分テストを経て、問題点があれば再検討を行うようにシステム化されており、それ以前の JENDL より信頼性が飛躍的に向上している。但し、積分検証が可能である元素・核種は限られているので、どの元素・核種が積分テストされているか、利用者は留意する必要がある。例として、遮蔽材及び構造材として多用される鉄について、JENDL-3.2 では natural と各同位体についてデータが与えられている。積分検証が行われ再調整が行われたのは natural のデータであり、各同位体を天然存在比で合成したデータとは整合性が取れていない。またそのようなデータは何ら保証されない。JENDL-3.2 の利用において natural のデータが与えられている元素は極力それを使うことを推奨する。

また、JENDL-3.2 を利用するに際して輸送計算に用いる群定数ライブラリー等についてはシグ

マ委員会によって確認されたものを用いることを推奨する。[10] JENDL-3.2 のデータ格納形式は ENDF-5 format と ENDF-6 format であるが、そのデータの与え方は米国の ENDF/B シリーズとは多少異なっている。従って、群定数ライブラリー等を用いる場合には、そのライブラリー等を作成した断面積処理プログラムが正しく JENDL-3.2 のデータを処理しているかを確認すべきである。核データの誤差と断面積処理の誤差を混同してはならない。同様に、適用する体系のモデル化を含めた輸送計算法の誤差は、核データの誤差と区別して取り扱う必要がある。

2002 年 6 月 17 日

## 参考文献

- [1] 「シグマ」特別専門委員会編, 「シグマ委員会」における核データ収集・評価の活動 1993, 1994 年度の作業報告, 日本原子力学会誌, 37[12], pp.1095-1103, (1995).
- [2] F. Maekawa, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, A. Takahashi, Y. Oyama, “Compilation of Benchmark Results for Fusion Related Nuclear Data,” JAERI-Data/Code 98-024 (1998).
- [3] N. Yamano, “On the Integral Test Method for Neutron Nuclear Data Evaluation,” Ann. Nucl. Energy, 24[13], pp.1085-1094 (1997).
- [4] N. Yamano, A. Hasegawa, K. Ueki, M. Kawai, “Status on Neutron Data Testing of JENDL-3.2 with Shielding Benchmarks,” Proc. 8th Int. Conf. on Radiation Shielding, April 24-28, 1994, Arlington, Texas, Vol.2, pp.824-831, ANS Inc. (1994).
- [5] N. Yamano, A. Hasegawa, K. Ueki, M. Kawai, “Status on Testing of JENDL-3.2 Iron Data with Shielding Benchmarks,” Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 9-13, 1994, Gatlinburg, Tennessee, Vol.2, pp.812-814, ANS Inc. (1994).
- [6] Y. Oyama, “Integral Data Testing of JENDL-3.2 for Fusion Reactor and Shielding Applications,” Proc. 1994 Symposium on Nuclear Data, Nov. 17-18, 1994, JAERI, Tokai, JAERI-Conf 95-008, pp.65-71 (1995).
- [7] N. Yamano, C. Konno, K. Ueki, “Validation of JENDL-3.2 Sodium Data with Shielding Benchmarks,” Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 19-24, 1997, Trieste, Italy, 59, Part II, pp.1189-1191, Italian Physical Society (1997).
- [8] 今野力, 国際熱核融合実験炉(ITER)の炉構造物に対する遮蔽設計計算精度の実験的評価に関する研究, 学位論文, 東北大学 (1998).
- [9] 前川藤夫, 積分実験による核融合炉設計用 2 次線データの検証に関する研究, 学位論文, 大阪大学 (1998).
- [10] N. Yamano, “Present Status of Libraries Processed from JENDL-3.2,” Proc. 1995 Symposium on Nuclear Data, Nov. 16-17, 1995, JAERI, Tokai, JAERI-Conf 96-008, pp.9-14 (1996).