

## 核融合中性子工学・遮蔽工学に対する JENDL-3.3 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

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-3.3 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おり，JENDL-3.2 の積分検証と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。核融合中性子工学及び遮蔽工学における JENDL-3.3 の積分テストは，Shielding 積分テスト WG が実施している。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-3.3 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。JENDL-3.3 のベンチマークとしては，JENDL-3.2 の積分検証に用いられたベンチマーク問題およびその後に入手したベンチマーク実験結果が採用された。これらの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。[2]

JENDL-3.3 は 2002 年 5 月 10 日に公開された 337 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せず，JENDL-3.2 から改訂された核種は限られている。そのため，JENDL-3.2 から改訂され，かつ工学的によく用いられる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 JENDL-3.3 の積分検証は，中性子データに対して，酸

素, ナトリウム, アルミニウム, アルミン酸リチウム(LiAlO<sub>2</sub>), チタン酸リチウム(Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>), シリコン, シリコンカーバイド(SiC), チタン, バナジウム, クロム, 鉄, コバルト, ニッケル, ステンレススチール(SS304, SS316), 銅, ニオブ, タングステン, 水銀を対象として行われた。線生成データに対しても同じ核種を対象として実施された。これらの結果は文献[3~7]に記載されている。

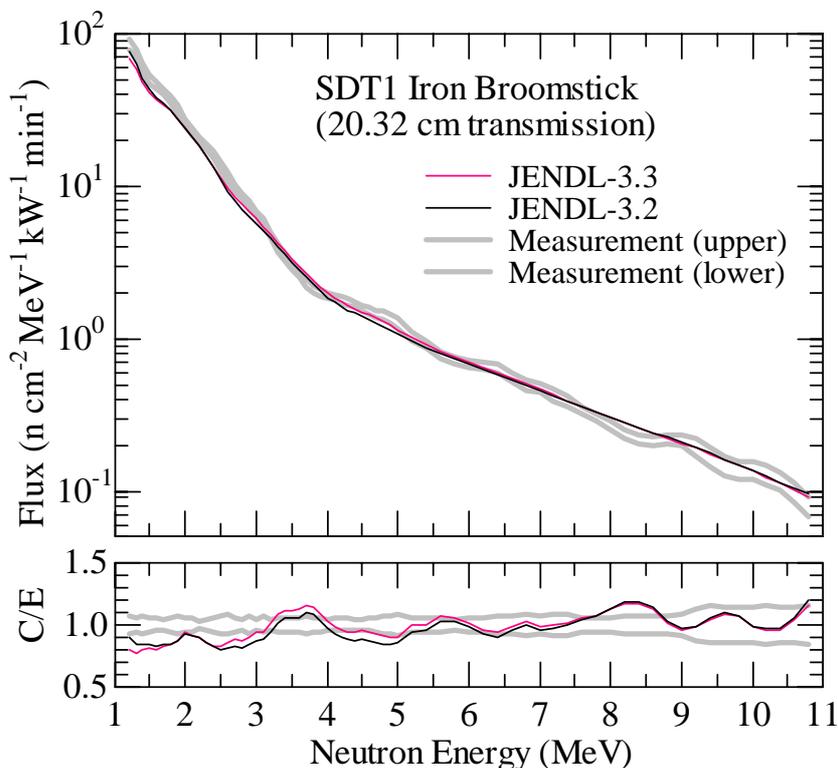


図1 鉄の Broomstick 実験 (8 インチ厚さ) における測定値と計算値の比較

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。JENDL-3.3 では 2.5~7MeV において僅かであるが全断面積が改訂されており, JENDL-3.2 よりバランスの取れた改善がなされている。

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 (<sup>252</sup>Cf 自発核分裂中性子を使用) 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, 良い再現性を示す。

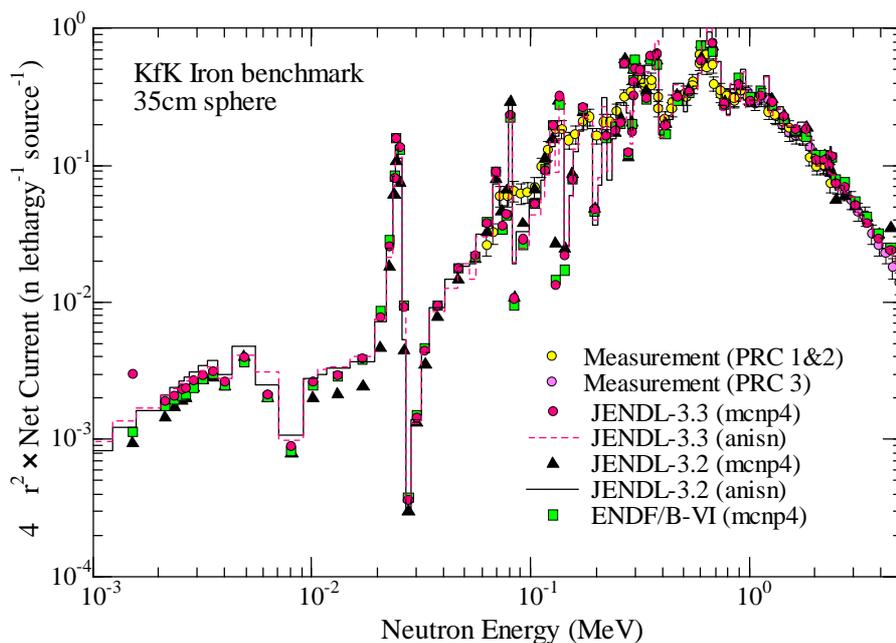


図2 鉄の KfK 実験 (直径 35cm 球) における測定値と計算値の比較

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。1eV ~ 0.5MeV の広いエネルギー範囲において共鳴構造を含めて JENDL-3.2 より良い再現性を示している。0.5 ~ 1MeV では JENDL-3.3 は JENDL-3.2 と同様に若干の過小評価の傾向を示す。一方 JENDL-2 は 0.5 ~ 1MeV では測定値と良好な一致を示しているが、10keV 以下において若干の過小評価となっている。

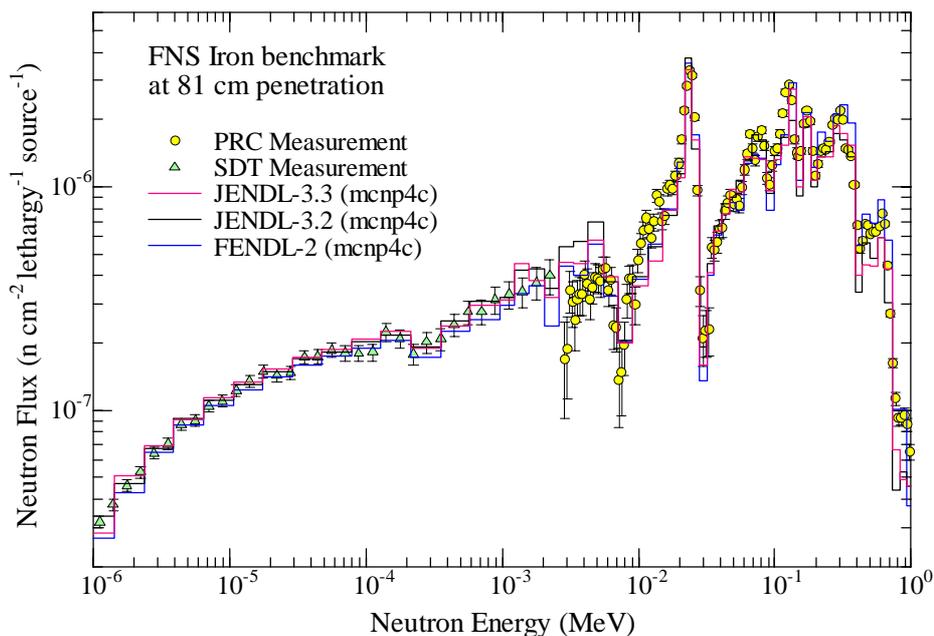


図3 鉄の FNS 円柱透過実験 (81cm 位置) における測定値と計算値の比較

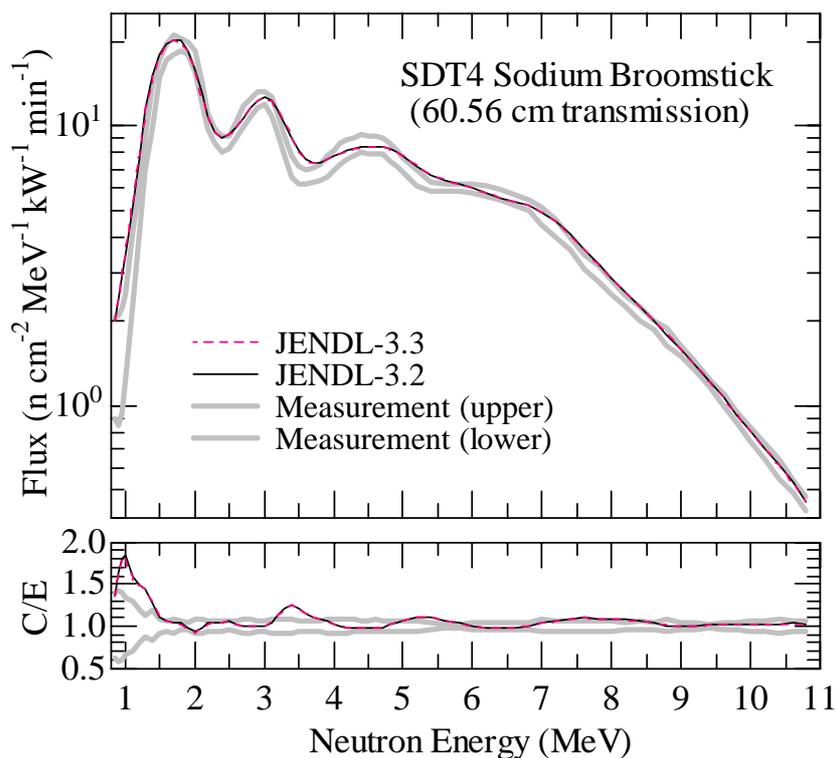


図4 ナトリウムの Broomstick 実験における測定値と計算値の比較

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-3.3 は JENDL-3.2 の全断面積を保存するように評価されているので結果は同一である。

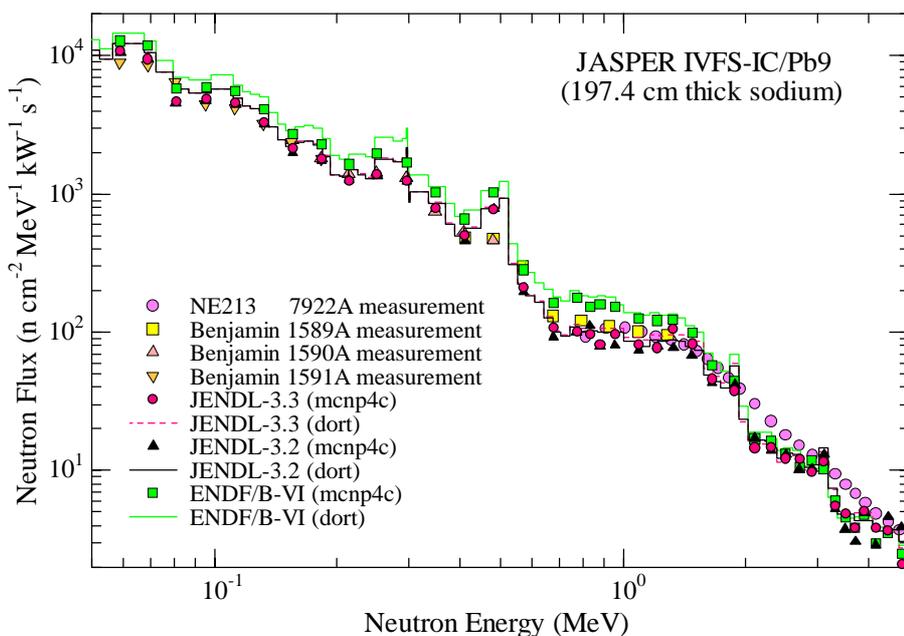


図5 ナトリウムの JASPER 実験 (IVFS-IC/Pb9 体系) における測定値と計算値の比較

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、<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。JENDL-3.3 は JENDL-3.2 と同様に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-3.3 は ENDF/B-VI より良好な再現性を示している。

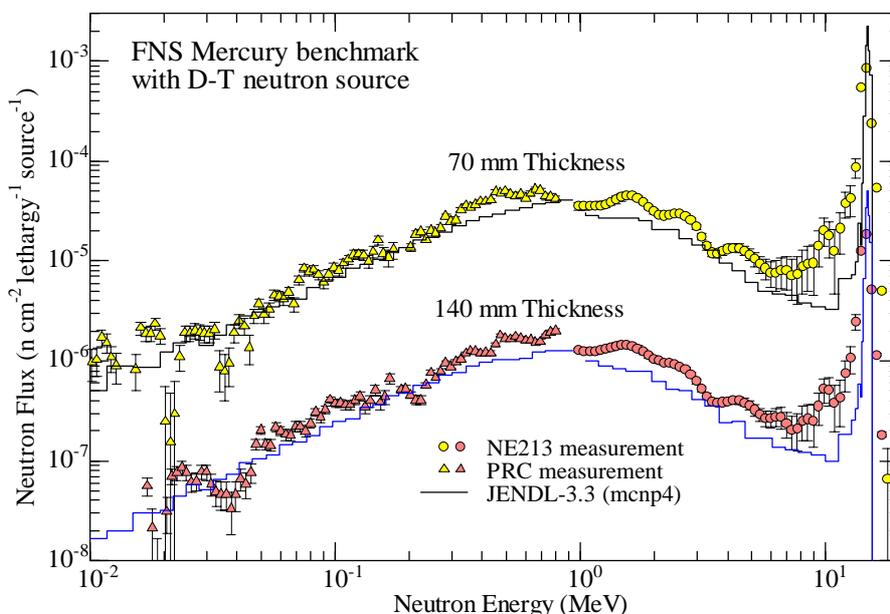


図6 水銀の FNS 透過実験における測定値と計算値の比較

図6は JENDL-3.3 で初めて評価・格納された水銀に対する原研 FNS のベンチマーク結果である。  
[6] 0.3 ~ 10MeV の中性子エネルギースペクトルは透過厚さが増すに従って測定値に比べ過小評価する傾向がある。図7には FNS で行われた線発熱に対する計算値と測定値の比を示すが、線発熱についても 30%程度過小評価の傾向がある。

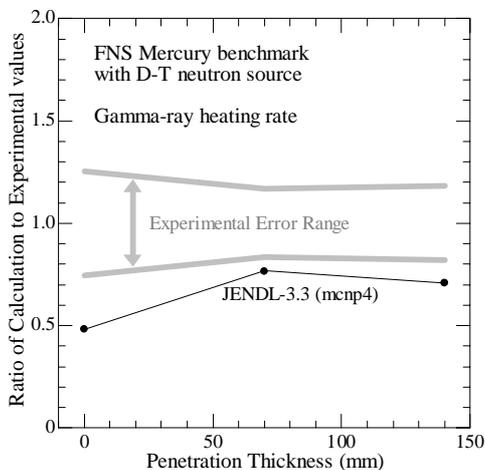


図7 水銀の FNS 透過実験における線発熱率に対する計算値と測定値の比

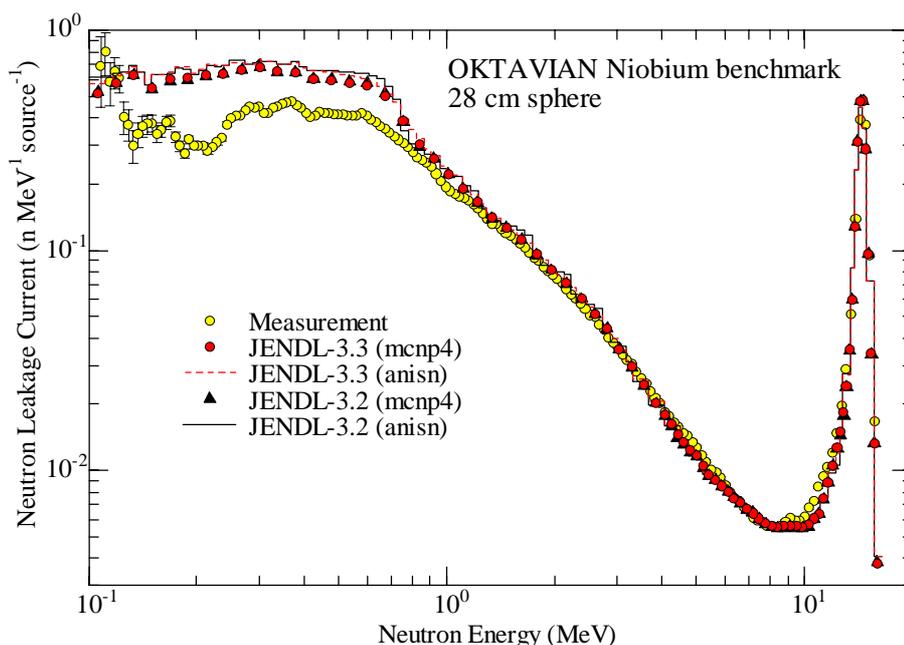


図8 ニオブの OKTAVIAN 実験 (直径 28cm 球) における測定値と計算値の比較

図8は直径28cmのニオブ球からの漏洩中性子エネルギースペクトルを測定した OKTAVIAN 実験 (D-T 中性子) に対するベンチマーク結果を示した。0.8MeV 以上では良い再現性を示すが、0.8MeV 以下では JENDL-3.3 は JENDL-3.2 と同様に過大評価となることが指摘された。[7]

これらのベンチマークによる検討より、JENDL-3.3 は JENDL-3.2 と比べて再現性が良好である核種が多く、精度並びに信頼性が向上している。しかしながら、JENDL-3.2 と同等である核種も見られ、まだ解決されていない問題も存在する。Shielding 積分テスト WG はこれらの問題点や今後の検討事項を指摘した。

JENDL-3.3 では、JENDL-3.2 と同様に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核種は限られているので、どの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は、同位体毎にデータが与えられており、JENDL-3.2 のような natural のデータは存在しない。積分検証が行われたのは各同位体を天然存在比で合成したデータであり、各同位体についてはテストされていない。

また、JENDL-3.3 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。[8] JENDL-3.3 のデータ格納形式は 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

プログラムが正しく JENDL-3.3 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 7 月 15 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 1999, 2000 年度の作業報告, 日本原子力学会誌, 44[1], pp.106–114, (2002).
- [2] N. Yamano, “On the Integral Test Method for Neutron Nuclear Data Evaluation,” *Ann. Nucl. Energy*, 24[13], pp.1085–1094 (1997).
- [3] N. Yamano, “Status on Testing of JENDL-3.3 with Shielding Benchmarks,” *Proc. 2000 Symposium on Nuclear Data*, Nov. 16-17, 2000, JAERI, Tokai, JAERI-Conf 2001-006, pp.39–44 (2001).
- [4] 前川藤夫, JENDL-3.3 の積分テスト(遮蔽関連積分テスト), 核データ・炉物理特別会合, 日本原子力学会 2001 年春の年会 (2001); 講演録は「核データニュース」, No.69, pp.20–28, 日本原子力研究所核データセンター, ISSN 0385-4876 (2001).
- [5] N. Yamano, K. Ueki, F. Maekawa, C. Konno, C. Ichihara, Y. Hoshiai, Y. Matsumoto, A. Hasegawa, “Integral Test of JENDL-3.3 with Shielding Benchmarks,” *Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology*, Oct 7–12, 2001, Tsukuba, pp.841–846, to be published in *J. Nucl. Sci. Technol. Supplement 2* (2002).
- [6] F. Maekawa, S. Meigo, Y. Kasugai, T. Kai, M. Harada, K. Shibata, Y. Ikeda, H. Takeuchi, “Experimental Study on Cross Section Data of Mercury with D-T and  $^{252}\text{Cf}$  Neutron Sources,” *Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology*, Oct 7-12, 2001, Tsukuba, pp.986 – 989, to be published in *J. Nucl. Sci. Technol. Supplement 2* (2002).
- [7] C. Ichihara, S. Hayashi, I. Kimura, J. Yamamoto, A. Takahashi, “Measurement of Leakage Neutron Spectra from a Spherical Pile of Niobium Bombarded with 14 MeV Neutrons and Validation of Its Nuclear Data,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, 38[11], pp.959–966 (2001).
- [8] C. Konno, “MATXS Files processed from JENDL-3.2 and -3.3 for Shielding,” *Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology*, Oct 7–12, 2001, Tsukuba, pp.1037–1040, to be published in *J. Nucl. Sci. Technol. Supplement 2* (2002).