

J A E R I - M  
**94-009**

$^{237}\text{U}$ 、 $^{236}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Np}$  の核データ評価  
(受託研究)

1 9 9 4 年 2 月

中川 康雄・菊池 康之

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、  
お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡  
東海村日本原子力研究所内)で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-  
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

$^{237}\text{U}$ 、 $^{236}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Np}$  の核データ評価

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

中川 庸雄・菊池 康之

(1994年1月12日受理)

$10^{-5}$  eV から 20 MeV の中性子エネルギー領域における  $^{237}\text{U}$  と  $^{236}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Np}$  の核データを評価した。評価したデータは、全断面積、弹性散乱・非弹性散乱断面積、捕獲断面積、核分裂断面積、 $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$  反応断面積、放出中性子の角度分布、エネルギー分布、核分裂当たりの放出中性子数である。これらの核種では測定データが少ないので、光学模型と統計模型による計算や近傍核からの系統性に基づいてデータを評価した。結果は、ENDF フォーマットで編集した。

Evaluation of Nuclear Data of  $^{237}\text{U}$ ,  $^{236}\text{Np}$  and  $^{238}\text{Np}$

Tsuneo NAKAGAWA and Yasuyuki KIKUCHI

Department of Reactor Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 12, 1994)

Nuclear data evaluation for  $^{237}\text{U}$ ,  $^{236}\text{Np}$  and  $^{238}\text{Np}$  was made in the neutron energy range from  $10^{-5}$  eV to 20 MeV. Quantities evaluated are the total, elastic and inelastic scattering, capture, fission, ( $n,2n$ ) and ( $n,3n$ ) reaction cross sections, the angular and energy distributions of secondary neutrons, and the number of neutrons emitted per fission. Since experimental data are very scarce for these nuclides, the evaluation was made on the basis of optical and statistical model calculations, and systematics of data. Results were compiled in ENDF format.

Keywords: Nuclear Data, Evaluation, U-237, Np-236, Np-238

---

The work was performed under the contracts between the Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and Japan Atomic Energy Research Institute.

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.評価手法 .....	2
2.1 共鳴パラメータ .....	2
2.2 核分裂断面積 .....	2
2.3 しきい反応断面積 .....	3
2.4 その他の断面積 .....	4
2.5 放出中性子の角度分布 .....	5
2.6 放出中性子のエネルギー分布 .....	5
2.7 核分裂当たりの放出中性子数 .....	5
2.8 光学ポテンシャルパラメータ .....	6
2.9 レベル密度パラメータ .....	7
2.10 反応のQ値 .....	8
3. $^{237}\text{U}$ の核データ評価 .....	9
3.1 共鳴パラメータ .....	9
3.2 連続領域の断面積 .....	12
3.3 その他のデータ .....	14
3.4 $^{237}\text{U}$ 評価値の議論 .....	15
4. $^{236}\text{Np}$ の核データの評価 .....	17
4.1 断面積測定データ .....	17
4.2 断面積データの評価 .....	19
4.3 その他のデータ .....	21
4.4 $^{236}\text{Np}$ 評価値の議論 .....	22
5. $^{238}\text{Np}$ の核データ評価 .....	23
5.1 断面積測定データ .....	23
5.2 断面積データの評価 .....	23
5.3 その他のデータ .....	24
5.4 $^{238}\text{Np}$ 評価値の議論 .....	26
謝 辞 .....	27
参考文献 .....	27

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Evaluation Methods .....	2
2.1 Resonance Parameters .....	2
2.2 Fission Cross Sections .....	2
2.3 Threshold Reaction Cross Sections .....	3
2.4 Other Cross Sections .....	4
2.5 Angular Distributions of Emitted Neutrons .....	5
2.6 Energy Distributions of Emitted Neutrons .....	5
2.7 Number of Neutrons per Fission .....	5
2.8 Optical Potential Parameters .....	6
2.9 Level Density Parameters .....	7
2.10 Reaction Q-values .....	8
3. Evaluation of Nuclear Data for $^{237}\text{U}$ .....	9
3.1 Resonance Parameters .....	9
3.2 Cross Sections in Continuous Region .....	12
3.3 Other Data .....	14
3.4 Discussion on Results for $^{237}\text{U}$ .....	15
4. Evaluation of Nuclear Data for $^{236}\text{Np}$ .....	17
4.1 Measured Cross Section Data .....	17
4.2 Evaluation of Cross Section Data .....	19
4.3 Other Data .....	21
4.4 Discussion on Results for $^{236}\text{Np}$ .....	22
5. Evaluation of Nuclear Data for $^{238}\text{Np}$ .....	23
5.1 Measured Cross Section Data .....	23
5.2 Evaluation of Cross Section Data .....	23
5.3 Other Data .....	24
5.4 Discussion on Results for $^{238}\text{Np}$ .....	26
Acknowledgements.....	27
References .....	27

## 1. はじめに

近年、マイナーアクチナイドの核データが重要視されつつある。その理由は、原子炉内で生成され、蓄積される核種の種類と量を正確に推定する必要があること、また、マイナーアクチナイド処理の研究が盛んになり、それらの精度の高い核データが要求されるためである。すでに JENDL を始めとして、評価済核データライブラリーにはマイナーアクチナイドの核データがかなり格納されている。ちなみに、JENDL-3<sup>1)</sup> には Th 以上では 50 核種のデータが評価され格納されている。しかし、さらに、多くの核種のデータが必要なので、日本原子力研究所核データセンターでは、「JENDL Actinide File」を作成し、JENDL-3 で不足している核種のデータを整備する計画である。このファイルには、Th ~ Es の核種と崩壊系列上の核種の内、半減期が 1 日未満の核種を除く、89 核種のデータが格納される予定である。

本作業では、JENDL-3 にデータが格納されていないマイナーアクチナイドの内、<sup>237</sup>U、<sup>236</sup>Np、<sup>238</sup>Np の核データ評価を行った。<sup>237</sup>U は、<sup>241</sup>Pu の  $\alpha$  崩壊や <sup>236</sup>U(n, $\gamma$ )、<sup>238</sup>U(n,2n) 反応等で生成され、半減期 6.75 日で  $\beta^-$  崩壊し <sup>237</sup>Np となる。<sup>236</sup>Np は <sup>240</sup>Am の  $\alpha$  崩壊や <sup>237</sup>Np(n,2n) 反応で生成される。<sup>236</sup>Np の半減期 22.5 時間の準安定状態は、その 48 % が  $\beta^-$  崩壊で <sup>236</sup>Pu となる。<sup>236</sup>Pu は、さらに <sup>232</sup>U、<sup>228</sup>Th を経てガンマ線を強く放出する核種 (<sup>212</sup>Bi、<sup>208</sup>Tl) に壊変していくので、<sup>236</sup>Np の準安定状態は、廃棄物処理上は重要な位置にある。しかし、半減期が短いために核データの必要性は低いので、今回の核データ評価の対象にはしなかった。一方基底状態は半減期が  $1.55 \times 10^5$  年と長く、その 91 % は  $\alpha$  崩壊で <sup>236</sup>U になる。<sup>238</sup>Np は <sup>242m</sup>Am の  $\alpha$  崩壊や <sup>237</sup>Np(n, $\gamma$ ) 反応で作られ、半減期 2.117 日の  $\beta^-$  崩壊で <sup>238</sup>Pu となる。

<sup>237</sup>U のデータは ENDF/B-VI<sup>2)</sup> と JEF-2<sup>3)</sup> にデータが格納されている。ただし、JEF-2 は ENDF/B のデータを採用しているので両者は同じものである。<sup>236</sup>Np のデータはどちらにも無い。<sup>238</sup>Np は ENDF/B-VI と JEF-2 にデータがある。しかし、ENDF/B-VI のデータは 10 keV 以上の核分裂断面積を無視しているなどの問題がある。JEF-2 は 10 keV 以下を ENDF/B-VI から 10 keV 以上は ENDL-84<sup>4)</sup> からデータを採用している。

今回の作業で評価の対象としたデータは、中性子エネルギー  $10^{-5}$  eV ~ 20 MeV の断面積、放出中性子の角分布とエネルギー分布、核分裂当たりの放出中性子数 ( $v_{\text{tot}}$ 、 $v_p$ 、 $v_d$ ) である。本報告書の 2 章で、評価手法、使用したパラメータ等についてまとめて示す。続いて、3 章で <sup>237</sup>U、4 章で <sup>236</sup>Np、5 章で <sup>238</sup>Np の評価について記し、既存のデータとの比較検討を行う。

## 2. 評価手法

### 2.1 共鳴パラメータ

3章以降で述べるとおり、分離共鳴パラメータの測定があるのは<sup>237</sup>Uのみである。しかし、測定データがあるのは46 eV～230 eVの間だけなので46 eV以下は仮想レベルを生成して、熱中性子断面積と共鳴積分値の実験データを再現するように調整してパラメータセットを求めた。さらに、30 keV以下では、核分裂断面積、中性子捕獲断面積および全断面積の計算値を再現する様にASREP<sup>28)</sup>を用いて、非分離共鳴パラメータを決定した。

<sup>236</sup>Npと<sup>238</sup>Npには共鳴パラメータの測定値が無い。これらの核では、2.9に示すレベル密度パラメータから推定される平均共鳴レベル間隔と共鳴幅を比較すると、共鳴幅がレベル間隔と同程度かそれよりも大きい。したがって、ドップラー効果は重要ではないと思われるのでNpの2核種に対しては分離及び非分離共鳴パラメータの評価を行わなかった。

### 2.2 核分裂断面積

連続領域における中性子入射による核分裂断面積の測定値は、3核種の中では<sup>237</sup>Uに存在するのみである。そのデータも信頼性の高いデータではない。一方、3核種ともBritt et al.<sup>5,6)</sup>による荷電粒子入射反応を利用した核分裂断面積の測定がある。この他、系統性式や簡易計算によって断面積の推定が可能である。系統性の式はBehrens and Howerton<sup>7)</sup>が3～5 MeVの核分裂断面積に対して求めた式を使用した。

核分裂断面積の簡易計算式は、Bychkov et al.<sup>8)</sup>が(n,2n)と(n,3n)反応断面積計算のために使用した次の式が簡単で信頼性も高そうである。

$$\begin{aligned}\sigma_{n,f}(E) &= (\sigma_a(E) - \sigma_a(E)P^{pre}(E)E) \times K_{A+1}, \\ \sigma_{n,2n}(E) &= (\sigma_a(E) - \sigma_{n,f}(E) - \sigma_a(E)P^{pre}(E)EK_A^f) \times K_A \times (1 - \exp(-\gamma_A)), \\ \sigma_{n,3n}(E) &= (\sigma_a(E) - \sigma_{n,f}(E) - \sigma_{n,2n}(E) - \sigma_a(E)P^{pre}(E)EK_{A-1}^f) \times K_{A-1} \\ &\quad \times (1 - \exp(-\gamma_{A-1})).\end{aligned}\quad (2.1)$$

ここで、 $\sigma_a(E)$ は吸収断面積、 $P^{pre}(E)$ は前平衡過程の中性子放出スペクトルの大きさ、 $K_A^f$ は前平衡過程による中性子放出後に核分裂が起これない状態に行く確率、 $K_A$ は核分裂確率、 $\gamma_A$ はしきい核分裂反応の形状を決める因子である。Bychkov et al.は、吸収断面積として $\sigma_a = (1 + 0.0075A)$ として求めた一定値を使用している。Aは標的核の質量数である。今回の計算では、光学模型で計

算した複合核形成断面積を使用した。系統性からもとまる値も数MeV領域での光学模型の計算値もいずれも 2.7 b 前後である。 $P^{pre}(E)$  については、Bychkov et al. は単に長方形の分布を仮定している。

$$P^{pre}(E) = 0.05 \frac{\sigma_a}{A} E_0 \left( \frac{E}{E_0} \right)^2. \quad (2.2)$$

$E_0$  は  $E+S_n$  (中性子分離エネルギー) である。 $K_A^f$  としては、今回の計算では、 $K_A^f=B_2/E$ 、 $K_{A+1}^f=B_3/E$ とした。核分裂確率  $K_A$  は、次式で与えられる。

$$K_A = \frac{1}{1 + (\Gamma_n/\Gamma_f)_A}. \quad (2.3)$$

$(\Gamma_n/\Gamma_f)$  は Bychkov et al. が求めた次の系統式を使用した。

$$\frac{\Gamma_n}{\Gamma_f} = \exp \left( -\alpha \left( \frac{Z^2}{A} - \beta \right) \right). \quad (2.4)$$

$\alpha$  と  $\beta$  は Bychkov et al. が与えた値 ( $U$  に対しては  $\alpha=2.37$ 、 $\beta=36$ 、 $N_p$  に対しては  $\alpha=2.44$ 、 $\beta=34$ ) を使用した。次に  $\gamma_A$  は、 $(E-B_A^f)C$  で与えられる。 $-B_A^f$  には  $(n,2n)$ 、 $(n,3n)$  反応の Q 値を入れ、C には 2.0 を使うと満足できる形状になることがわかった。

最終的には (2.1) 式で求めた  $\sigma_{n,f}$ 、 $\sigma_{n,nf}$ 、 $\sigma_{n,2nf}$  の和を核分裂断面積の評価値とした。ただし、5 ~ 6 MeV 以下では Britt et al.<sup>5,6)</sup> の測定値や Behrens and Howerton<sup>7)</sup> の系統式から求めた断面積を基に計算値を修正した。

### 2.3 しきい反応断面積

$(n,2n)$  と  $(n,3n)$  反応断面積は Segev and Caner<sup>9)</sup> の方法で求めた。標的核 (質量数 A) と質量数が A-1 の核種の核温度をそれぞれ、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $(n,2n)$  と  $(n,3n)$  反応の中性子分離エネルギーを  $B_2$ 、 $B_3$  とすると、断面積は以下の様に計算される。まず、 $\theta_1$  と  $\theta_2$  を次の式で近似する。

$$\begin{aligned} \theta_1(E) &= \sqrt{\frac{E}{a}}, \\ \theta_2(E) &= \theta_1(E) \times \left( 1 - \frac{B_2}{2E} - \frac{\theta_1(E)}{E} \right). \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、 $\alpha$  は標的核のレベル密度パラメータで、A-1 の核でも変わらないと仮定している。

$$\begin{aligned} W_2 &= E - B_2, \quad W_3 = \max(0, E - B_3), \\ \chi_{21} &= W_2/\theta_1, \quad \chi_{31} = W_3/\theta_1, \quad \chi_{32} = W_3/\theta_2, \end{aligned} \quad (2.6)$$

を用いると、(n,2n) 及び (n,3n) 反応の確率 (reduced cross section)  $R_2(E)$  と  $R_3(E)$  は次のように書ける。

$$\begin{aligned} R_2(E) &= -(1 + \chi_{21}) \exp(-\chi_{21}) + (1 + \chi_{31}) \exp(-\chi_{31}) + 0.5(\chi_{31})^2 (1 + \chi_{32}/3) \exp(-\chi_{32}), \\ R_3(E) &= 1 - (1 + \chi_{31}) \exp(-\chi_{31}) - 0.5(\chi_{31})^2 (1 + \chi_{32}/3) \exp(-\chi_{32}). \end{aligned} \quad (2.7)$$

これを用いて、それぞれの断面積は次の式になる。

$$\begin{aligned} \sigma_{n,M}(E) &= \sigma_{nonela}(E) - \sigma_{n,f}(E), \\ \sigma_{n,2n}(E) &= \sigma_{n,M}(E) \times R_2(E), \\ \sigma_{n,3n}(E) &= \sigma_{n,M}(E) \times R_3(E). \end{aligned} \quad (2.8)$$

今回の計算では  $\sigma_{nonela}(E)$  には光学模型で計算した複合核形成断面積を使用した。これは (n,2n) や (n,3n) 反応が起こるエネルギー領域では弾性散乱外断面積 ( $\sigma_{nonela}(E) = \sigma_{total}(E) - \sigma_{ela}(E)$ ) とほとんど同じである。核分裂断面積  $\sigma_{n,f}(E)$  には (2.1) 式の計算値の和を使用した。また、このまま計算すると (n,2n) 反応が大きくなり、非弾性散乱断面積がほとんど 0.0 になってしまうので、 $\sigma_{n,M}(E)$  から更に非弾性散乱断面積分として 100 mb 差し引いた値を計算に使用した。

(n,4n) 反応断面積は、しきいエネルギーが高いので重要でないので無視した。このため、今回の (n,3n) 反応の評価値は 17 ~ 18 MeV 以上の値が大きすぎる。重い核では、荷電粒子放出反応は非常に起こり難いので全く考慮しなかった。

## 2.4 その他の断面積

全断面積、弹性・非弾性散乱断面積、及び中性子捕獲断面積は、光学模型と統計模型に基づいた理論計算コード CASTHY<sup>10)</sup> を用いた理論計算で求めた。この際、核分裂断面積及び、(n,2n)、(n,3n) 等のしきい反応断面積を競争過程として考慮した。

非弾性散乱断面積では直接過程は考慮しなかった。中性子捕獲断面積では Benzi and Reffo<sup>11)</sup> による簡易計算式 (2.9) 式を用いて直接過程の寄与を計算した。この式は原子番号が 32 ~ 66 の核種に対して導いたものであるが断面積が小さいために大きな誤差は許せるのであえて使用した。

$$[\sigma_{n\gamma}(E)]_{d-c} = K \left[ 6 \left( \frac{Z}{A} \right)^2 \frac{R^4 \sqrt{E} \cdot E_\gamma^3 \cdot 10^{-10}}{2 + 0.5E + 16.8\sqrt{E}/R} \right] \times \left[ 1 + \frac{0.75E_\gamma E_R - 0.61E_R^2}{(E_\gamma - E_R)^2 + 0.25\Gamma_R^2} \right] \quad (2.9)$$

$K$  は規格化因子で今回の計算では 14 MeV で 1 mb になるように決めた。 $R$  は核半径である。 $E_R$  と  $\Gamma_\gamma$  は巨大共鳴のエネルギーと幅である。 $E_\gamma$  は放出ガムマ線のエネルギーで、入射中性子エネルギーと複合核からの中性子分離エネルギーとの和とした。

## 2.5 放出中性子の角度分布

弾性及び非弾性散乱中性子の角度分布はCASTHY の計算値を評価値とした。核分裂中性子及び  $(n,2n)$ 、 $(n,3n)$  反応の放出中性子に対しては、実験室系で等方と仮定した。

## 2.6 放出中性子のエネルギー分布

連続領域への非弾性散乱と  $(n,2n)$ 、 $(n,3n)$  反応による放出中性子に対しては蒸発スペクトルを仮定した。核温度はレベル密度パラメータから決定した。

核分裂中性子のスペクトルも、蒸発スペクトルとし、核温度はSmith et al.<sup>12)</sup> の系統性を採用した。Fig. 2.1 に平均エネルギーの系統性を示す。この図は<sup>252</sup>Cf の自発核分裂中性子の平均エネルギーと核分裂中性子の平均エネルギーとの差を示している。この図から、<sup>252</sup>Cf の自発核分裂の平均エネルギーを 2.13 MeV として平均エネルギー ( $E$ ) を求め、核温度 ( $\theta$ ) を次式で計算した。

$$\theta = \left( \frac{2}{3} \right) E \text{ (MeV).} \quad (2.10)$$

## 2.7 核分裂当たりの放出中性子数

### 即発中性子

実験データがない場合は、Howerton の系統性式<sup>13)</sup>を採用した。

$$v(Z, A_t, E_n) = 2.33 + 0.06[2 - (-1)^{A_t+1-Z} - (-1)^Z] + 0.15(Z - 92) + 0.02(A_t - 235) + [0.130 + 0.006(A_t - 235)] \times [E_n - E_T(Z, A_t)], \quad (2.11)$$

ここで、 $Z$  と  $A_t$  は、標的核の原子番号と質量数、 $E_n$  は入射中性子エネルギーである。 $E_T$  は核分

裂反応のしきいエネルギーであり、次の式で計算される。

$$E_T(Z, A_t) = 18.6 - 0.36Z^2/(A_t + 1) + 0.2[2 - (-1)^{A_t+1-Z} - (-1)^Z] - B_n, \quad (2.12)$$

$B_n$  は複合核からの中性子分離エネルギーである。

### 遅発中性子

系統式としては次の3式を考慮した。

Tuttle の系統式<sup>14)</sup>

$$v_d = \exp[13.81 + 0.175(A_c - 3Z) \times (A_c/Z)]. \quad (2.13)$$

Benedetti et al. の系統式<sup>15)</sup>

$$v_d = \exp[14.268 + 0.1796(A_c - 3Z) \times (A_c/Z)]. \quad (2.14)$$

Waldo et al. の系統式<sup>16)</sup>

$$v_d = \exp[16.698 - 1.144Z + 0.377A_c]/100. \quad (2.15)$$

ここで、 $A_c$  は複合核の質量数、 $Z$  は原子番号である。最近の評価値としては Brady and England<sup>17)</sup> がある。Blachot et al.<sup>18)</sup> では系統式としては Tuttle の系統式を推奨しているが、今回の評価値は、これらの式と Brady and England の値を比較して決定した。

### 2.8 光学ポテンシャルパラメータ

今回の評価対象核種では、光学模型パラメータ決定するに十分な実験データが存在しない。そこで、村田が決め、JENDL-2、-3 の U や Pu 等の評価に使われたポテンシャルパラメータ<sup>19)</sup>を使用することとした。このパラメータは、実数の定数項の値が与えられていない、核種毎に低エネルギー領域の s-wave neutron strength function を再現するように与える事になっている。

今回の対象核種の質量（236 ~ 238）では、近傍核の値<sup>20)</sup>から  $S_0 = 1.0 \times 10^{-4}$  程度が適当と思われる、1 keV 付近で s-wave neutron strength function が  $1.0 \times 10^{-4}$  になる様にパラメータを決めた。

#### potential depth

$$V = 40.5 - 0.05E_n \text{ (MeV)},$$

$W_s = 6.5 + 0.15E_n$  (MeV), (derivative Wood-Saxon 型)

$V_{so} = 7$  (MeV),

#### radius parameters

$r_0 = r_{so} = 1.32$  (fm),

$r_s = 1.38$  (fm),

#### defuseness parameters

$a = b = a_{so} = 0.47$  (fm).

このパラメータで計算すると、 $^{237}\text{U}$  の 1 keV 付近で、 $S_0 = 1.0 \times 10^{-4}$ 、 $S_1 = 1.3 \times 10^{-4}$  となる。p wave strength function の値は近傍核の値から推定される値  $2.0 \times 10^{-4}$  と比べて小さめである。

## 2.9 レベル密度パラメータ

レベル密度パラメータは Gilbert and Cameron の公式<sup>21)</sup>を使用し、そのパラメータは、ENSDF<sup>22)</sup> の最新版から採った励起レベルの情報をもとに決定した。スピン J、パリティー  $\pi$ 、のレベル密度は次式で与えられる。

$$\rho_{J\pi}(E) = p(\pi) R(J) \rho_0(E). \quad (2.16)$$

ここで、 $p(\pi)$  は規格化されたパリティー分布でそれぞれのパリティーに対して  $1/2$  とする。スピンの分布関数  $R(J)$  と準位密度  $\rho_0(E)$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$R(J) = \frac{2J+1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{(J+0.5)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \rho_0(E) &= \exp(2\sqrt{aU}) / (12\sqrt{2}\sigma a^{1/4} U^{5/4}), \quad \text{for } E \geq E_x, \\ \rho_0(E) &= C \exp(E/T), \quad \text{for } E \leq E_x. \end{aligned} \quad (2.18)$$

ここで、 $U = E - \Delta$  ( $\Delta$  は pairing energy) である。 $\sigma^2$  は spin-cutoff factor であり、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= 0.146\sqrt{aU}A^{2/3}, \quad \text{for } E \geq E_x, \\ &= \sigma_{\text{exp}}^2 + (\sigma^2(E_x) - \sigma_{\text{exp}}^2) \frac{E}{E_x}, \quad \text{for } E \leq E_x. \end{aligned} \quad (2.19)$$

$\sigma_{\text{exp}}^2$  は、今回の計算では全ての核で 5.0 と仮定した。

今回の評価に使用したレベル密度パラメータを Table 2.1 に示す。このパラメータは (2.18) 式の定温度領域 ( $E \leq E_x$ ) のレベル密度が実際の励起レベル数をよく再現し、かつ、共鳴レベル間隔が分かっている場合<sup>20)</sup> はそれも再現するように決めたものである。レベル密度パラメータから求めた共鳴レベル間隔と実測値は、Table 2.1 の 7 と 8 カラムに示したとおり完全に一致している。レベル密度パラメータから求めた定温度領域のレベル数と励起レベル数の積み上げ図との比較は Figs. 2.2(a) ~ 2.2(h) に示したとおりである。レベル密度パラメータの決定には LEVDENS<sup>23)</sup> を使用した。<sup>234</sup>Np はレベルの測定がなくて LEVDENS を用いた評価ができなかつたので Gilbert and Cameron の系統式<sup>21)</sup> からパラメータを求めた。この値は <sup>236</sup>Np(n,3n) 反応の放出中性子スペクトルの核温度決定の時だけ使用された。<sup>236</sup>Np はレベルが 4 本しか分かっていないので、レベル密度パラメータを近傍核のパラメータから類推した。したがって、Fig.2.2(e) に示したとおりパラメータから求めたレベル数と実際の数が大幅に食い違っている。

## 2.10 反応の Q 値

核反応の Q 値は、Wapstra et al.<sup>24)</sup> のまとめた原子核の質量を用いて求めた。Table 2.2 に (n,Xn) 反応の Q 値としきいエネルギーを示す。

### 3. $^{237}\text{U}$ の核データ評価

#### 3.1 共鳴パラメータ

##### 3.1.1 分離共鳴パラメータ

###### 1) 測定データ

###### ○ 热中性子断面積

Cowen et al.<sup>25)</sup>

古い文献なので入手できなかったが、この文献からEXFORに格納された核分裂断面積は、熱中性子スペクトル平均値として 2 b となっている。

Halperin et al.<sup>26)</sup>

Savannah River の high-flux 炉で  $^{236}\text{U}$  の照射を行い、 $^{238}\text{U}$  の生成量を測定し、それから  $^{237}\text{U}$  の断面積を推定した。preliminary な結果として捕獲断面積が 100 b 以上、核分裂断面積が 50 b 以下と報告している。

Corman et al.<sup>27)</sup>

Savannah River の high-flux 炉で  $\text{U}_3\text{O}_8$  の試料 ( $^{234}\text{U}$  0.05 at.%、 $^{235}\text{U}$  5.66 at.%、 $^{236}\text{U}$  73.08 at.%、 $^{238}\text{U}$  21.26 at.%) を 9.3 日間照射した。このとき、2つの試料を異なった中性子束で照射し、 $^{237}\text{U}$  が  $\beta^-$  decay で  $^{237}\text{Np}$  に崩壊するのを待つために約 3 カ月貯蔵した。2つの試料中の  $^{237}\text{Np}$  の比は、 $^{237}\text{U}$  の吸収断面積の関数になるので、 $^{237}\text{Np}$  の比を測定し、 $^{237}\text{U}$  吸収断面積として  $370 \pm 124$  b を得た。これは原子炉スペクトル中の平均断面積である。 $^{235}\text{U}$  の核分裂断面積の平均値を計算で求め、それと熱中性子エネルギーでの $^{235}\text{U}$  の核分裂断面積との関係は  $^{237}\text{U}$  核分裂断面積の原子炉スペクトル平均値と熱中性子断面積関係と同じと仮定して、 $^{237}\text{U}$  の核分裂断面積として 0.0253 eV で  $478 \pm 16$  b を得た。

###### ○ 共鳴積分値

Halperin et al.<sup>28)</sup>

Idaho の ETR を用いて、3 mm 厚の Cd 円筒中に入れた  $^{236}\text{U}$  試料の照射を行った。質量分析器で生成核種を調べ暫定的な  $^{237}\text{U}$  捕獲断面積の共鳴積分値として  $1200 \pm 120$  b を得た。

○ 分離共鳴パラメータ

McNally et al.<sup>29)</sup>

これは  $^{237}\text{U}$  共鳴パラメータの唯一の測定データである。彼らは、1968年3月に米国ネバダで行われた地下核爆発実験（Pomona）を利用して、 $^{237}\text{U}$  の核分裂断面積を測定した。 $^{237}\text{U}$  の試料は、ORNL の High Flux Isotope Reactor (HFIR) で  $^{236}\text{U}$  を照射し、それを LASL に送って化学分離して作製した物である。試料中の  $^{237}\text{U}$  の量は  $18.1 \mu\text{g}$  であった。試料は、核爆発の中心から  $214.23 \text{ m}$  の位置 (moderator からは  $213.82 \text{ m}$ ) にセットされた。同時に、 $^6\text{Li}$  が  $214.43 \text{ m}$ 、 $^{235}\text{U}$  が  $214.63 \text{ m}$ 、 $^{237}\text{Np}$  が  $215.24 \text{ m}$  の位置におかれていた。断面積は、 $1 \text{ keV}$  以下では  $^6\text{Li}(\text{n},\alpha)$  反応断面積 ( $\sigma (2200\text{m/sec}) = 940.3 \pm 1.6 \text{ b}$ ) に、 $100 \text{ keV}$  以上では  $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$  断面積にそれぞれ規格化された。データが得られたのは、 $43 \text{ eV} \sim 1 \text{ keV}$  と  $100 \text{ keV} \sim 2 \text{ MeV}$  の範囲である。

$43 \text{ eV} \sim 220 \text{ eV}$  で、彼らは共鳴パラメータ解析を行い、34本の共鳴の R-matrix パラメータを求めた。 $\Gamma_\gamma$  は  $35 \text{ meV}$  と仮定した。しかし、断面積の統計精度が極めて悪く、解析結果のパラメータには問題があるとし、彼らは各共鳴の fission area のみを報告している。

2)  $46 \sim 200 \text{ eV}$  の分離共鳴パラメータ

McNally et al.<sup>29)</sup> の解析結果は、信頼性は高くないが、現在利用できる唯一の測定データである。従って、 $46 \sim 200 \text{ eV}$  のエネルギー領域では彼らの解析結果をもとに以下の様に分離共鳴パラメータを決定した。

全ての共鳴が s 波共鳴であると仮定し、 $S_0$  を s-wave neutron strength function、D を平均のレベル間隔とすると、中性子幅は  $g\Gamma_n = S_0 D \sqrt{E}$  となる。さらに、 $2g = 1$  と仮定すれば、

$$\Gamma_n = 2S_0 D \sqrt{E}, \quad (3.1)$$

となる。従って、 $A_f$  を fission area とすると、核分裂幅 ( $\Gamma_f$ ) は

$$\Gamma_f = \frac{A_f (2S_0 D \sqrt{E} + \Gamma_\gamma)}{2\pi^2 S_0 D \sqrt{E}/k^2 - A_f}, \quad (3.2)$$

となる。ここで、 $\Gamma_\gamma = 0.035 \text{ eV}$ 、 $S_0 = 1.0 \times 10^{-4}$ 、 $D = 3.5 \text{ eV}$  と仮定する。 $\Gamma_\gamma$  と D はそれぞれ、McNally et al. の仮定値と測定値であり、s-wave neutron strength function  $S_0$  は近傍核の値からの推定値である。

$40 \text{ eV} \sim 200 \text{ eV}$  における核分裂断面積の計算値と McNally et al. の測定値の比較を Fig. 3.1

に示す。計算値は温度 300 K での値である。また、McNally et al. が報告している平均核分裂断面積と計算値の比較を Table 3.1 に示す。共鳴の谷の部分や、131 eV 共鳴の様に測定と計算の一一致が良いとは言えないが、McNally et al. の測定値の方にも問題があるので今回の評価ではこれでよいことにした。

### 3) 46 eV 以下の共鳴パラメータ

次に、46 eV 以下の共鳴については、上記の平均パラメータと、46 eV 以上の共鳴の内、特に大きな核分裂幅を除いた  $\Gamma_f$  の平均値 4 meV をもとに等間隔の共鳴を発生させた後、熱中性子エネルギーでの断面積と共鳴積分値を再現するよう低エネルギーの共鳴のパラメータを調整して求めた。

核半径は、光学模型の計算の結果得られた 9.38 fm を採用した。さらに、計算式としては、Multi-level Breit-Wigner 公式を使用することとし、全スピン J は統計的手法で仮定値を求めた。

最終的に得られた共鳴パラメータを Table 3.2 に示す。さらに、熱中性子断面積と、共鳴積分値を Table 3.3 に示す。なお、共鳴積分値の計算では、後で述べる 20 MeV までの断面積も考慮されている。

#### 3.1.2 非分離共鳴パラメータ

200 eV ~ 30 keV を非分離共鳴領域とした。非分離共鳴パラメータは ASREP<sup>30)</sup> を用いて、このエネルギー領域の捕獲断面積、核分裂断面積及び全断面積の評価値を再現するように決定した。断面積の評価については 3.2 節で述べる。パラメータの初期値は以下のようにした。

$$\begin{aligned}\Gamma_\gamma &= 35 \text{ meV}, \quad \Gamma_f = 4 \text{ meV}, \\ D &= 3.5 \text{ eV}, \quad S_0 = 1.0 \times 10^{-4}, \quad S_1 = 2.0 \times 10^{-4}, \quad S_2 = 1.0 \times 10^{-4}, \\ R &= 9.38 \text{ fm}.\end{aligned}$$

パラメータフィッティングは以下の順序で行った。

- ① 200 eV ~ 30 keV で  $\Gamma_f$  を核分裂断面積を再現するように決める。
- ②  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  の比を初期値と同じに保ちながら、各エネルギー点で捕獲断面積を再現するように決める。

- ③ 平均レベル間隔  $D$  を動かして捕獲断面積と核分裂断面積を再現するようにする。
- ④ 核半径  $R$  を 30 keV での全断面積を再現するように決める。

この結果を Fig. 3.2 に示す。図の○印が非分離共鳴パラメータで再現しようとした断面積の評価値、実線が平均共鳴パラメータからの計算値である。全断面積も含めて十分な一致が得られている。得られた平均共鳴パラメータを Table 3.4 に示す。

### 3.2 連続領域の断面積

この領域で測定データがあるのは、核分裂断面積だけであり、その他の断面積は完全に計算や系統性にもとづく評価が必要である。

#### 3.2.1 核分裂断面積

##### 1) 測定データ

###### McNally et al.<sup>29)</sup>

43 eV ~ 1 keV と 100 keV ~ 1.83 MeV での測定値が EXFOR に格納されている。測定手法については 3.1 節で既に述べたとおり、地下原爆実験による中性子を使用している。他の核種では、地下原爆による測定が系統的に大きめの断面積を報告していることから、この測定値も多分大きすぎる可能性がある。

###### Cramer and Britt<sup>5)</sup>

(t,p) 反応を用いて核分裂率 (fission probability) を測定した。 $^{237}\text{U}$  の様な短半減期の核種の断面積測定は試料を作成するのに困難を伴うので、通常の中性子入射の実験をするのが難しい。この実験では、質量数の 1 つ小さな核の (t,p) 反応で目的の核の複合核を作り、その核分裂断面積から目的の核種の断面積を求めるものである。この実験では、LASL の Van de Graff からの 18 MeV triton を用いて、入射中性子エネルギー 0.5 MeV ~ 2.25 MeV に相当する  $^{238}\text{U}$  の励起状態を作り、その fission probability を測定した。その結果は、Table 3.5 に示したように 0.24 ~ 0.17 と単調に減少する値を示した。これから核分裂断面積を求めるには複合核形成断面積を用いる必要がある。Cramer と Britt が用いた光学模型パラメータによる複合核形成断面積とそれから求めた

核分裂断面積を Table 3.5 の 3 カラムと 4 カラムに示した。

## 2) 評価

200 eV ~ 1 keV の間は McNally et al. の測定データがある。しかし、この領域は非分離共鳴領域としたので核分裂断面積に大きな構造は入れ難いこと、McNally et al. の測定値が大きすぎるかも知れないことから、彼らの測定値の形状は採用しないことにした。ただし、200 eV 付近での彼らの測定データから 200 eV で 2.5 b と決めた。

100 keV から 2 MeV にも McNally et al. の測定データがある。しかし、1 MeV 前後では、約 1 b としている McNally et al. の測定値は大き過ぎである。核分裂断面積の系統性の式<sup>7)</sup>からは 4 MeV 付近で 0.74 b である。Cramer and Britt の fission probability と今回の評価に使用した光学模型パラメータで計算した複合核形成断面積からは Table 3.5 の 5 カラムと 6 カラムに示したとおり 0.5~0.6 b となる。Bychkov et al. の核分裂断面積の簡易計算式<sup>8)</sup>の結果も 0.7 b となる。そこで、今回は、100 keV では McNally et al. の測定値より若干小さい 0.6 b を 100 keV での評価値とし 5 MeV 付近まで 0.6~0.7 b 程度の断面積を評価値とした。それより上では、光学模型で計算した複合核形成断面積を吸収断面積として、Bychkov et al. の簡易計算式 (2.1) ~ (2.4) 式による計算結果を評価値とした。

Fig. 3.3 に 1 keV ~ 20 MeV 核分裂断面積の評価値を ENDF/B-VI と比較して示す。

### 3.2.2 しきい反応断面積

(2.5) ~ (2.8) 式に示した Segev and Caner の近似式を用いて計算した。弹性外散乱断面積として、光学模型で計算した複合核形成断面積を、核分裂断面積として、上で述べた Bychkov et al. の簡易式より求めた値をそれぞれ使用した。また、高エネルギー領域の非弹性散乱断面積の分として 100 mb を仮定した。計算結果を Fig. 3.4 と Fig. 3.5 に示す。

放出中性子の角度分布は、実験室系等方とした。また、エネルギースペクトルは準位密度パラメータから核温度を推定し、蒸発スペクトルを与えた。

### 3.2.3 全断面積、弹性・非弹性散乱断面積、中性子捕獲断面積

これらの断面積は、核分裂断面積と (n,Xn) 反応断面積を競争過程として考慮し CASTHY による計算を行い、評価値とした。光学模型のポテンシャルパラメータとレベル密度パラメータは 2 章で示したとおりである。捕獲断面積計算のために必要な平均の  $\Gamma_\gamma$  とレベル間隔 (D) は、

分離共鳴領域のデータから次の値を採用した。

$$\Gamma_\gamma = 35 \text{ meV}, D = 3.5 \text{ eV}.$$

非弾性散乱断面積計算のための励起レベルの情報は ENSDF<sup>30)</sup> と Ellis-Akovali<sup>31)</sup> の評価をもとに決定した。Ellis-Akovali の評価値の中でスピンが 9/2 より大きい励起レベルは断面積が小さいと思われる所以無視した。ただし、482 keV と 316 keV のレベルは、それらを除くと前後のレベル間隔が大きくあいてしまって残した。また、スピンが不明なレベルは全て無視した。947.85 keV のレベル以上を連続領域として計算した。今回の計算で使用した励起レベルを Table 3.6 に示す。

弾性散乱及び非弾性散乱中性子の角度分布も CASTHY の計算値を採用した。連続領域への非弾性散乱中性子スペクトルは蒸発スペクトルを採用した。

### 3.3 その他のデータ

#### (1) 即発中性子

$v_p$  は (2.11) 式より求めた。

$$v_p = 2.42 + 0.142E \text{ (MeV)}$$

中性子スペクトルは Fig. 2.1 から求めた核温度 1.31 MeV を持つ蒸発スペクトルを採用した。

#### (2) 遅発中性子

$v_d$  としては系統式より以下の値を得た。

核分裂核	Tuttle <sup>14)</sup>	Benedetti <sup>15)</sup>	Waldo <sup>16)</sup>	Brady and England <sup>32)</sup>
<sup>238</sup> U	0.0323	0.0338	0.0324	0.0350±0.028
<sup>237</sup> U	0.0221	0.0229	0.0222	

Brady and England は総和計算による評価値で ENDF/B-VI や JEF-2 に採用されている。Brady

and England の評価値は誤差内で他の値と一致してはいるが大きすぎると判断し、3系統式の値の平均値（5 MeV 以下で 0.0334、6 MeV 以上で 0.0224）を評価値とした。5 MeV は (n,2n) 反応のしきいエネルギーに近い値であり、5 ~ 6 MeV の間で  $^{238}\text{U}$  の核分裂から  $^{237}\text{U}$  の核分裂に移ると仮定した。6 群の崩壊定数は Brady and England の評価値を採用した。

遅発中性子スペクトルは、ENDF/B-VI を採用した。これも Brady and England による評価値である。

### 3.4 $^{237}\text{U}$ 評価値の議論

$^{237}\text{U}$  評価済データは、ENDF/B-VI と JEF-2 に存在する。しかし、JEF-2 は ENDF/B-VI と基本的に同じなので、ここでは ENDF/B-VI と比較する。

熱中性子領域のデータについては、Table 3.3 に断面積と共鳴積分値を示した。これによると、ENDF/B-VI は、0.0253 eV の吸収断面積として Comman et al.<sup>27)</sup> の値を採用している。今回の評価では、他との関連で若干小さ目の値としたが誤差内で十分に Comman et al. の値と一致している。次に、ENDF/B-VI の核分裂断面積は、Cowen et al.<sup>25)</sup> の値を採用している。しかし、その後の測定値は 50 b 以下、または 0.35 b 以下とかなり曖昧であり、この値の信憑性は薄い。今回の評価は、1.7 b とした。この 2つの断面積からもとまる捕獲断面積も ENDF/B-VI 及び今回の評価とも測定値の曖昧さの中では十分一致している。弾性散乱断面積の差が大きい。

共鳴積分値は、今回の評価値の方が Halperin et al.<sup>28)</sup> の測定値に一致している。ENDF/B-VI が小さい値を与えるのは、分離共鳴領域で McNally et al. の測定データを無視して仮想的に発生させた共鳴パラメータを採用し、小さな断面積を与えていたためである。多分 McNally et al. の値は大きすぎると思われるが、現状では新たな測定を待つのみである。

Fig. 3.6 に全断面積の比較を示す。200 eV 以下の分離共鳴領域は適当なエネルギー幅での平均値を示した。ENDF/B-VI は仮想レベルを採用している。また、今回の評価も 46 eV 以下は仮想レベルであり、両者の差は大きい。その他のエネルギー領域では比較的良く一致している。Fig. 3.7 の弾性散乱断面積も同様の傾向である。

Fig. 3.8 の核分裂断面積は、10 keV 以下の差が極めて大きい。これは、McNally et al. の測定データを評価の基にしたか否かの差である。10 keV 以上は比較的良く一致した。

捕獲断面積の比較を Fig. 3.9 に示した。この断面積は 1 ~ 10 eV での違いは大きいがその他

の領域では評価値間の差が小さい。

非弾性散乱断面積、 $(n,2n)$ 、 $(n,3n)$  反応断面積はそれぞれ Figs. 3.10、3.4、3.5 に示したとおり大きな差が見られる。このうち、 $(n,2n)$  反応断面積の一致は比較的良好。

独立に行った 2 つの評価結果の一致は比較的良好と言える。更に、精度の高い評価値を得るためには、特に、核分裂断面積、捕獲断面積の新たな測定が必要である。

#### 4. $^{236}\text{Np}$ の核データ評価

今回の評価は、半減期 ( $1.550 \pm 0.010 \times 10^5$  年) の基底状態に対して行った。 $^{236}\text{Np}$  には 22.5 時間の isomer があるが、半減期が 1 日以下なので評価の対象にしなかった。

##### 4.1 断面積測定データ

###### Studier et al.<sup>33)</sup>

$^{238}\text{U}(\text{d},4\text{n})^{236}\text{Np}$  反応を利用して試料を作成した。 $\text{U}_3\text{O}_8$  を Argonne の 60 inch サイクロトロンからの 21.6 MeV 重陽子で照射後、長時間（15週間）放置した後  $^{236}\text{Np}$  を化学分離し試料を作成した。その後、CP-3' 重水炉で照射し、核分裂断面積を測定した結果、約 2800 b となった。

###### Jaffey and Lemer<sup>34)</sup>

CP-5 炉で  $^{236}\text{Np}$  の核分裂中性子断面積を測定した。文献入手できなかった。EXFOR に格納されている熱中性子エネルギーでの核分裂断面積は  $2500 \pm 150$  b となっている。

###### Gindler et al.<sup>35)</sup>

$^{236}\text{Np}$  の試料は、Argonne のサイクロトロンで  $^{235}\text{U}$  に重陽子を照射し化学分離して作成した。試料は、Argonne の CP-5 重水炉と Illinois 大学の advanced TRIGA 炉で照射した。中性子量を測定するために、コバルト-アルミのワイヤーも同時に照射した。照射数週間後に  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$ -ray activity を測定して中性子量を求めた。

$\gamma$ -ray spectrometry と放射化学的手法で核分裂生成物の測定が行われた。それらの生成量と saturation activity から  $^{237}\text{Np}$  の核分裂断面積として  $2540 \pm 460$  b を得た。

###### Belyaev et al.<sup>36)</sup>

$^{236}\text{Np}$  の試料は、 $^{238}\text{U}(\text{p},3\text{n})$  反応で作成した。 $^{238}\text{U}$  は Institute of Nuclear Physics of Academy of Science (Kazakh) にある U-150 サイクロトロンを用い 30 MeV の陽子で照射した。その結果、 $36.2 \pm 1.3$  ng の  $^{236}\text{Np}$  が得られた。

$^{235}\text{U}$  の核分裂断面積を標準にして、VVR-M 炉 (Leningrad Institute of Nuclear Physics) の

Maxwellian スペクトル ( $T=330\text{ K}$ ) 中で  $^{236}\text{Np}$  の核分裂断面積を測定した結果、 $0.0253\text{ eV}$  での  $^{235}\text{U}$  の核分裂断面積を  $582.6 \pm 1.1\text{ b}$ 、Westcott factor を  $0.9688$  として、 $^{236}\text{Np}$  の核分裂断面積として  $2760 \pm 170\text{ b}$  を得た。さらに、 $^{235}\text{U}$  核分裂断面積の共鳴積分値を  $275 \pm 5\text{ b}$  として、 $^{236}\text{Np}$  核分裂断面積の共鳴積分値は  $1030 \pm 100\text{ b}$  となった。

#### Val'skiy et al.<sup>37)</sup>

Belyaev et al. と同じ試料を使用し、 $0.0253\text{ eV} \sim 0.3\text{ eV}$  の  $^{236}\text{Np}$  核分裂断面積を Leningrad Institute of Nuclear Physics の原子炉にあるモノクロメーターで測定した。 $0.0253\text{ eV}$  で核分裂断面積は  $2770 \pm 260\text{ b}$  となった。 $0.1\text{ eV} \sim 20\text{ keV}$  の断面積は Kurchtov Institute of Atomic Energy の鉛減速スペクトロメーターを使用して核分裂断面積を求めた。EXFOR には 19 点の平均断面積が収録されている。また、Kovalenko et al.<sup>38)</sup> の図で見ると、全エネルギー領域で  $1/\nu$  の滑らかな傾向を示しており大きな共鳴構造は見られない。これらのデータから求めた共鳴積分は  $1040 \pm 60\text{ b}$  となった。

さらに、平均共鳴パラメータの解析を行った結果、 $\Gamma_\gamma = 53\text{ meV}$  と仮定して、 $\Gamma_f = 410 \pm 160\text{ meV}$  となった。

#### Lindner and Seegmiller<sup>39)</sup>

試料は 1968 年に  $^{235}\text{U}$  に重陽子を照射して作成したもの  $4.0\text{ ng}$  を使用した。試料中には  $^{235}\text{Np}$  と  $^{237}\text{Np}$  が混ざっていたが熱中性子領域の測定には影響が無い。測定は、Livermore Pool-Type Reactor (L PTR) を用いて行った。 $^{235}\text{U}$   $59\text{ ng}$  も同時に照射され、それぞれの核分裂生成物が測定された。

核分裂断面積は  $^{99}\text{Mo}$  の生成量を比較して決定した。 $^{236}\text{Np+n}$  核分裂からの  $^{99}\text{Mo}$  生成量を  $6.47\%$ 、 $^{235}\text{U}$  のそれを  $6.11\%$ 、 $^{235}\text{U}$  の核分裂断面積を  $540\text{ b}$  として  $^{236}\text{Np}$  の核分裂断面積として  $2140 \pm 160\text{ b}$  を得た。ただし、L PTR のスペクトルで  $^{235}\text{U}$  の断面積  $540\text{ b}$  が妥当かどうかの問題があると著者達は指摘している。

#### Britt and Wilhelm<sup>6)</sup>

$(^3\text{He},\text{df})$  反応を利用して  $^{236}\text{Np}$  の核分裂率 (fission probability) を測定した。それから核分裂断面積を求めるには複合核形成断面積が必要である。一般に、MeV 領域の複合核形成断面積はエ

エネルギーと核種に大きくは依存しない。すでに断面積がわかっている核種も同時に測定しそれらの断面積を再現するように複合核形成断面積を決めた。その結果、複合核形成断面積は3.1 b となつた。これを用いて fission probability を核分裂断面積に変換した。

数値データは EXFOR にもなく、Ref. 6 の中に図があるだけである。

## 4.2 断面積データの評価

### 4.2.1 20 keV 以下の断面積

平均の共鳴間隔は、Table 2.1 に示したとおり、レベル密度パラメータから 0.11 eV と推定される。一方、Val'skiy et al.<sup>37)</sup> によると平均核分裂幅は 400 meV 程度もありレベル間隔よりも大きい。従って、レベルの重なりが顕著でありドップラー効果は重要でないと考えられるので、共鳴パラメータの評価は行わなかった。20 keV 以下の核分裂断面積、捕獲断面積および弾性散乱断面積は次のように決定した。全断面積はこれらの和として求めた。熱中性子断面積と共鳴積分値を Table 4.1 に示す。

#### (1) 核分裂断面積

熱中性子エネルギーでの核分裂断面積は、Val'skiy et al. の測定値を採用し 2770 b とした。Val'skiy et al. の測定データを見ると 10 eV を境にして上下で断面積の勾配が変わっている。10 eV 以上はほぼ  $1/\nu$  であるがそれ以下は勾配が急である。今回は、10 eV 前後で勾配が変わる 2 本の直線で断面積を近似した。結果を Fig. 4.1 に示す。

#### (2) 捕獲断面積

捕獲断面積は、 $\alpha$  (capture-to-fission ratio) から求めた。古い計算ではあるが、Bell<sup>40)</sup> の推定では  $^{236}\text{Np}$  に対して  $\alpha = 0.3$  となった。一方、後で述べる CASTHY による計算では 20 keV で捕獲断面積が 715 mb となり、これと上記の核分裂断面積から  $\alpha$  を求めると 0.253 となる。この値は Bell の推定値とほぼ一致するので、今回の評価では、核分裂断面積に 0.253 を乗じて捕獲断面積の評価値とした。

#### (3) 弹性散乱断面積

光学模型の計算値を採用した。低エネルギー領域での shape elastic scattering 断面積の計算結果

から核半径は 9.83 fm となった。

#### 4.2.2 20 keV 以上の断面積

##### (1) 核分裂断面積

20 keV 以上では、Bychkov et al. の簡易計算式による結果を基に決定した。計算では、光学模型で計算した複合核形成断面積を吸収断面積とした。計算値は、2 ~ 3 MeV 以下で Britt and Wilhelmy<sup>6)</sup> の測定値や Behrens and Howerton<sup>7)</sup> の系統式から推定される値に比較して小さくなった。Britt and Wilhelmy が使用した複合核形成断面積 3.1 b は今回の光学模型計算で得られた値 2.7 b と比べて大きい。しかし、3.1 b が他の断面積既知の核種のデータをもよく再現する値であるとの事なので、1 ~ 5 MeV は Britt and Wilhelmy の測定値を平均的に再現する断面積を採用し、それ以下では、それを滑らかに延長した値を評価値とした。5 MeV 以上では、簡易式による計算値を採用した。Fig. 4.1 に核分裂断面積の評価値を示す。

##### (2) (n,2n)、(n,3n) 反応断面積

(2.5) ~ (2.8) 式に示した Segev and Caner の近似式を用いて計算した。光学模型で計算した複合核形成断面積を弾性外散乱断面積として使用した。核分裂断面積は、Bychkov et al. の簡易式より求めた値を使用した。さらに、100mb を非弾性散乱断面積分として差引いた後(n,2n)、(n,3n) 反応断面積を計算した。Fig. 4.2 と Fig. 4.3 に結果を示す。

放出中性子の角度分布は、実験室系等方とした。また、エネルギースペクトルは準位密度パラメータから核温度を推定し、蒸発スペクトルを与えた。

##### (3) 全断面積、弹性・非弹性散乱断面積、中性子捕獲断面積

これらの断面積は、核分裂断面積と(n,Xn) 反応断面積を競争過程として考慮にいれてCASTHY による計算を行い、評価値とした。光学模型のポテンシャルパラメータとレベル密度パラメータは 2 章で示したとおりである。

捕獲断面積計算のために必要な平均の  $\Gamma_\gamma$  とレベル間隔 (D) は次の値を採用した。

$$\Gamma_\gamma = 35 \text{ meV}, D = 0.11 \text{ eV}.$$

直接過程の捕獲断面積は (2.9) 式で求め、CASTHY の結果に加えた。この時、全断面積は CASTHY の計算値を採用し、弾性散乱断面積を調整して断面積全体の統一がとれるようにした。

非弾性散乱断面積計算のための励起レベルの情報は Schmorak の評価<sup>22,41)</sup>をもとに決定した。324 keV まで 4 本の励起レベルしかわかつてない。370 keV 以上は連続領域として計算した。今回の計算で使用した励起レベルのデータを Table 4.2 に示す。

弾性散乱及び非弾性散乱中性子の角分布は CASTHY の計算値を採用した。連続領域への非弾性散乱中性子スペクトルは蒸発スペクトルを採用した。

#### 4.3 その他のデータ

##### (1) 即発中性子

(2.11) 式より求めた  $v_p$  は次のように成了。

$$v_p = 2.72 + 0.136E \text{ (MeV)}$$

一方、実験データは Jaffey and Lerner<sup>34)</sup> による  $3.12 \pm 0.14$  と Lindner and Seegmiller<sup>39)</sup> による  $2.3 \pm 0.8$  がある。なお、Lindner and Seegmiller の値は、EXFOR では  $2.4 \pm 0.8$  としている。これは標準データを修正したためらしい。今回は、

$$v_p = 2.4 + 0.136E \text{ (MeV)}$$

を評価値とする。中性子スペクトルは Fig. 2.1 の系統性から求めた核温度 1.364 MeV を持つ蒸発スペクトルを採用した。

##### (2) 遅発中性子

$v_d$  としては系統式より以下の値を得た。

核分裂核	Tuttle <sup>14)</sup>	Benedetti <sup>15)</sup>	Waldo <sup>16)</sup>
$^{237}\text{Np}$	0.00699	0.00705	0.00708
$^{236}\text{Np}$	0.00485	0.00485	0.00486

3者の一致は極めて良い。今回はこれらの平均値を採って以下の値を評価値とした。

$$v_d = 0.00705 \quad E_n < 5.5 \text{ MeV},$$

$$0.00485 \quad E_n > 7.0 \text{ MeV}.$$

6群の崩壊定数は、質量数毎に大きくは変化しないので、 $^{238}\text{Np}$  に対して Brady and England<sup>32)</sup> が評価した値を採用した。遅発中性子スペクトルは与えなかった。

#### 4.4 $^{236}\text{Np}$ 評価値の議論

ENDF/B-VI と JEF-2 には  $^{236}\text{Np}$  の評価値が与えられていない。ここでは、ENDL-86<sup>4)</sup> と今回の評価値を比較する。

熱中性子領域のデータについては、Table 4.1 で断面積と共鳴積分値が比較されている。核分裂断面積は、今回の評価値が 0.0253 eV に焼き直した測定値を採用しているのに対し ENDL や Mughabghab<sup>20)</sup> は原子炉スペクトルでの測定値を 0.0253 eV の断面積としている。共鳴積分値を見ると今回の評価値の方が測定値との一致は良い。捕獲断面積は、測定値が全く無いので ENDL と今回の評価値の間には大きな差がある。

Fig. 4.1 は  $10^{-2}$  eV ~ 20 MeV までの核分裂断面積の比較である。20 keV 以下の Val'skiy et al. の測定値に今回の評価は良く一致している。1 MeV 以上の断面積は ENDL と今回の評価が非常に良く一致している。

全断面積を Fig. 4.4 に示した。Fig. 4.5 は弾性散乱断面積の比較である。捕獲断面積の比較を Fig. 4.6 に示した。今回の評価値が 10 eV で不連続になるのは核分裂断面積と  $\alpha$  から求めたためである。ENDL と今回の評価は 1 術近く違っている。今回の評価に使用した  $\alpha$  の推定値は、残念ながら信頼性の高いものとは言えない。一方の ENDL も 0.0253 eV で 100 b とした根拠が不明である。

Fig. 4.7 に示した非弾性散乱断面積は形は似てはいるが断面積値には大きな差がある。理論計算に基づく今回の結果の方が良さそうに思える。Fig. 4.2 と Fig. 4.3 で示した ( $n,2n$ )、( $n,3n$ ) 反応断面積の差も極めて大きい。

## 5. $^{238}\text{Np}$ の核データ評価

### 5.1 断面積測定データ

#### Spencer and Baumann<sup>42)</sup>

原子炉で、 $^{238}\text{Np}$ の核分裂断面積と共鳴積分値を測定した。 $^{235}\text{U}$ の核分裂断面積と共鳴積分値をそれぞれ 563.2 b と 274 b として、熱中性子スペクトル中での  $^{238}\text{Np}$  の核分裂断面積として  $2070 \pm 30$  b、共鳴積分値として  $880 \pm 70$  b を得た。

#### Britt and Wilhelmy<sup>6)</sup>

( $^3\text{He},\text{df}$ ) 反応を利用して  $^{238}\text{Np}$  の核分裂率 (fission probability) を測定した (4.1 節参照)。

### 5.2 断面積データの評価

断面積の評価は以下のように行った。なお、レベル密度パラメータから推定される平均レベル間隔が 0.29 eV と小さく、レベル間の重複が顕著であると推定できるので、共鳴パラメータの評価は行わなかった。

#### (1) 核分裂断面積

熱中性子エネルギーでの核分裂断面積は、Spencer and Baumann の測定値を採用し 2070 b とした。20 keV 以下は  $1/\nu$  の形を採用した。

20 keV 以上では、Bychkov et al. の簡易計算式による結果を基に決定した。計算では、光学模型で計算した複合核形成断面積を吸収断面積とした。計算値は、Britt and Wilhelmy<sup>6)</sup> の測定値に比較して小さくなかった。1 ~ 5 MeV は Britt and Wilhelmy の測定値を平均的に再現する断面積を採用し、それ以下は、それを滑らかに延長した値を評価値とした。6.6 MeV 以上は、Bychkov et al. の簡易式による計算値を採用した。

今回の評価値から求めた共鳴積分値は 940 b となり、Spencer and Baumann の測定値と誤差内で一致した。

### (2) (n,2n)、(n,3n) 反応断面積

(2.5) ~ (2.8) 式に示した Segev and Caner の近似式を用いて計算した。光学模型で計算した複合核形成断面積を弹性外散乱断面積として使用した。核分裂断面積は、Bychkov et al. の簡易式で求めた値を使用した。さらに、100 mb を非弹性散乱断面積分として差引いた後 (n,2)、(n,3n) 反応断面積を計算した。

放出中性子の角度分布は、実験室系等方とした。また、エネルギースペクトルは準位密度パラメータから核温度を推定し、蒸発スペクトルを与えた。

### (3) 全断面積、弹性・非弹性散乱断面積、中性子捕獲断面積

これらの断面積は、核分裂断面積と(n,Xn) 反応断面積を競争過程として考慮にいれてCASTHY による計算を行い、評価値とした。光学模型のポテンシャルパラメータとレベル密度パラメータは 2 章で示したとおりである。

捕獲断面積計算のために必要な平均の  $\Gamma_\gamma$  とレベル間隔 (D) は次の値を採用した。

$$\Gamma_\gamma = 35 \text{ meV}, D = 0.294 \text{ eV}.$$

1 eV 以下では  $1/\nu$  型を仮定して 1 eV での計算値を外挿した。直接過程の捕獲断面積は (2.9) 式で求め、CASTHY の結果に加えた。

1 eV 以下の弹性散乱断面積は、1 eV での計算値と同じと仮定した。

非弹性散乱断面積計算のための励起レベルの情報は Shurshikov の評価<sup>22,43)</sup> をもとに決定し、524 keV まで 29 本の励起レベルを考慮した。528 keV 以上は連続領域として計算した。今回の計算で使用した励起レベルのデータを Table 5.1 に示す。

弹性散乱及び非弹性散乱中性子の角度分布は CASTHY の計算値を採用した。連続領域への非弹性散乱中性子スペクトルは蒸発スペクトルを採用した。

## 5.3 その他のデータ

### (1) 即発中性子

(2.11) 式より求めた  $v_p$  は次のようになった。

$$\nu_p = 2.697 + 0.148E \text{ (MeV)}$$

実験データは Solonkin et al.<sup>44)</sup> の  $2.3 \pm 0.5$  がある。彼らは、核分裂生成物の質量分布を測定し、重い質量数にたいして平均値  $138.8 \pm 0.2$  を得た。軽い方は  $^{238}\text{Np}$  では測定できなかったが近傍核の値から 97.98 と推定した。これを用いて  $\nu_p$  を推定したものである。Solonkin et al. を完全に採用する事をせず、今回は 2.697 と 2.3 の平均から、

$$\nu_p = 2.50 + 0.148E \text{ (MeV)}$$

を評価値とする。中性子スペクトルは Fig. 2.1 の系統性から求めた核温度 1.346 MeV を持つ蒸発スペクトルを採用した。

## (2) 遅発中性子

$\nu_d$  としては系統式より以下の値を得た。

核分裂核	Tuttle <sup>14)</sup>	Benedetti <sup>15)</sup>	Waldo <sup>16)</sup>
$^{239}\text{Np}$	0.0147	0.0151	0.0151
$^{238}\text{Np}$	0.0101	0.0103	0.0103

3者の一致は極めて良い。今回はこれらの平均値を採って以下の値を評価値とした。

$$\nu_d = \begin{cases} 0.0151 & E_n < 6.5 \text{ MeV}, \\ 0.0102 & E_n > 8.0 \text{ MeV}. \end{cases}$$

6群の崩壊定数は、Brady and England<sup>32)</sup> が評価した値を採用した。遅発中性子スペクトルは与えなかった。

## 5.4 $^{238}\text{Np}$ 評価値の議論

測定データは熱中性子スペクトルによる核分裂断面積と共鳴積分値だけであるが、評価値は ENDF/B-VI や JEF-2 等に格納されている。

熱中性子断面積を Table 5.2 で比較した。核分裂断面積に関しては評価値はほぼ一致している。しかし、捕獲断面積は決め手がなく、評価値のばらつきは極めて大きい。JEF-2 と ENDF/B-VI が一致するのは同じ評価値を採用しているためである。ENDL-86 は  $^{236}\text{Np}$  と全く同じ値を捕獲断面積に与えている。

核分裂断面積の共鳴積分値は、今回の評価値から計算すると Spencer and Baumann の測定値より大きくなつたが、誤差内では一致した。ENDL-86 は大きすぎる。

Fig. 5.1 は JEF-2 と今回の評価の全断面積の比較である。JEF-2 は 10 keV 以下のデータを ENDF/B-VI から 10 keV 以上のデータを ENDL から採用した。ENDF/B-VI の 10 keV 以上のデータは正しく評価されていないためである。100 eV 以下は仮想的に作った共鳴を与えており、平均的には今回の評価値と良く一致していると言える。

Fig. 5.2 は JEF-2、ENDL-86 と今回の評価の弾性散乱断面積の比較である。3つの評価値が比較的よく一致している。

核分裂断面積の比較を Fig. 5.3 に示す。10 keV 以下で JEF-2 (= ENDF/B-VI) と今回の評価値の傾向は非常に良く一致している。ENDL-86 は断面積の傾きが緩やかすぎ、このため、共鳴積分値が大きすぎる。

捕獲断面積を Fig. 5.4 に示した。この断面積は評価値間の差が大きい。熱中性子エネルギーでの断面積測定が望まれる。

非弾性散乱断面積、(n,2n)、(n,3n) 反応断面積を Figs. 5.5 ~ 5.7 に示す。捕獲断面積と同様に評価値間の差が大きい。

## 謝 辞

本研究にを実施するにあたり、動力炉・核燃料開発事業団の池上哲夫氏、若林利夫氏および石川眞氏にお世話になりました。また、日本原子力研究所核データセンターの中島豊氏からは本報告書に対して貴重な意見をいただきました。感謝致します。

## 参考文献

- 1) K.Shibata, T.Nakagawa, T.Asami, T.Fukahori, T.Narita, S.Chiba, M.Mizumoto, A.Hasegawa, Y.Kikuchi, Y.Nakajima and S.Igarasi: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3, -- JENDL-3 --," JAERI 1319 (1990).
- 2) Evaluated Nuclear Data File/B-VI, ENDF/B-VI, BNL/NNDC (1990).
- 3) Joint Evaluated File, JEF-2, OECD/NEA Data Bank (1990).
- 4) Evaluated Nuclear Data Library, ENDL-86, LLNL (1986).
- 5) J.D.Cramer and H.C.Britt: Nucl. Sci. Eng., 41, 177 (1970).
- 6) H.C.Britt and J.B.Wilhelmy: Nucl. Sci. Eng., 72, 222 (1979).
- 7) J.W.Behrens and R.J.Howerton: Nucl. Sci. Eng, 65, 464 (1978).
- 8) V.M.Bychkov, V.I.Plyaskin, Eh.F.Toshinskaya: "Evaluation of the (n,2n) and (n,3n) Cross-Sections for Heavy Nuclei with Allowance for Non-Equilibrium Processes," INDC(CCP)-184/L (1982).
- 9) M.Segev and M.Caner: Annals. of Nucl. Energy, 5, 239 (1978).
- 10) S.Igarasi and T.Fukahori: "Program CASTHY - Statistical Model Calculation for Neutron Cross Sections and Gamma Ray Spectrum -," JAERI 1321 (1991).
- 11) V.Benzi and G.Reffo: "Fast Neutron Radiative Capture Cross Sections of Stable Nuclei with 32<Z<66," CCDN-NW/10 (1969).
- 12) A.Smith, P.Guenther, G.Winkler and R.Mcknight: "Prompt-Fission-Neutron Spectra of  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{240}\text{Pu}$  Relative to that of  $^{252}\text{Cf}$ ," ANL/NDM-50 (1979).
- 13) R.J.Howerton: Nucl. Sci. Eng., 62, 438 (1977).

## 謝 辞

本研究にを実施するにあたり、動力炉・核燃料開発事業団の池上哲夫氏、若林利夫氏および石川眞氏にお世話になりました。また、日本原子力研究所核データセンターの中島豊氏からは本報告書に対して貴重な意見をいただきました。感謝致します。

## 参考文献

- 1) K.Shibata, T.Nakagawa, T.Asami, T.Fukahori, T.Narita, S.Chiba, M.Mizumoto, A.Hasegawa, Y.Kikuchi, Y.Nakajima and S.Igarasi: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3, -- JENDL-3 --," JAERI 1319 (1990).
- 2) Evaluated Nuclear Data File/B-VI, ENDF/B-VI, BNL/NNDC (1990).
- 3) Joint Evaluated File, JEF-2, OECD/NEA Data Bank (1990).
- 4) Evaluated Nuclear Data Library, ENDL-86, LLNL (1986).
- 5) J.D.Cramer and H.C.Britt: Nucl. Sci. Eng., 41, 177 (1970).
- 6) H.C.Britt and J.B.Wilhelmy: Nucl. Sci. Eng., 72, 222 (1979).
- 7) J.W.Behrens and R.J.Howerton: Nucl. Sci. Eng, 65, 464 (1978).
- 8) V.M.Bychkov, V.I.Plyaskin, Eh.F.Toshinskaya: "Evaluation of the (n,2n) and (n,3n) Cross-Sections for Heavy Nuclei with Allowance for Non-Equilibrium Processes," INDC(CCP)-184/L (1982).
- 9) M.Segev and M.Caner: Annals. of Nucl. Energy, 5, 239 (1978).
- 10) S.Igarasi and T.Fukahori: "Program CASTHY - Statistical Model Calculation for Neutron Cross Sections and Gamma Ray Spectrum -," JAERI 1321 (1991).
- 11) V.Benzi and G.Reffo: "Fast Neutron Radiative Capture Cross Sections of Stable Nuclei with 32<Z<66," CCDN-NW/10 (1969).
- 12) A.Smith, P.Guenther, G.Winkler and R.Mcknight: "Prompt-Fission-Neutron Spectra of  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{240}\text{Pu}$  Relative to that of  $^{252}\text{Cf}$ ," ANL/NDM-50 (1979).
- 13) R.J.Howerton: Nucl. Sci. Eng., 62, 438 (1977).

- 14) R.J.Tuttle: Proc. of Consultant's Meeting on Delayed Neutron Properties, 1979 Vienna, INDC(NDS)-107/G+special, p.29 (1979).
- 15) G.Benedetti, A.Cesana, V.Sangiust, M.Terrani and G.Sandrelli: Nucl. Sci. Eng., 80, 379 (1982).
- 16) R.Waldo, R.A.Karam and R.A.Meyer: Phys. Rev., C23, 1113 (1981).
- 17) M.C.Brady and T.R.England: Nucl. Sci. Eng., 103, 129 (1989).
- 18) J.Blauchot, M.C.Brady, A.Filip, R.W.Mills and D.R.Weaver: "Status of Delayed Neutron Data - 1990," OECD/NEA (1990).
- 19) H.Matsunobu, Y.Kanda, M.Kawai, T.Murata and Y.Kikuchi: Proc. Int. Conf. on Nuclear Cross Sections for Technology, Knoxville, Oct. 22-26, 1979, p.715 (1980).
- 20) S.F.Mughabghab: "Neutron Cross Sections, Vol. 1, Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections, Part B: Z=61-100," Academic Press, Inc. (1984).
- 21) A.Gilbert and A.G.W.Cameron: Canadian J. Phys., 43, 1446 (1965).
- 22) ENSDF: Evaluated Nuclear Data File, as is Jan. 1993.
- 23) S.Iijima: "Program LEVDENS," Private communication.
- 24) A.H.Wapstra, G.Audi, K.Bos and R.Hoekstra: Nucl. Phys., A432, 1 (1985).
- 25) G.A.Cowen, G.A.Jarvis, G.W.Knobeloch and B.Warren: LA-1669, p.8 (1955). (Data were taken from EXFOR 12500)
- 26) J.Halperin, J.J.Pinejian, C.R.Baldock, J.H.Oliver, R.W.Stoughton: "Neutron Capture Cross Section of the 6.75-day Uranium-237," ORNL 3994, 1 (1966).
- 27) W.R.Cormman, E.J.Hennelly, C.J.Banick: Nucl. Sci. Eng., 31, 149 (1968).
- 28) J.Halperin, J.H.Oliver, C.R.Baldock, R.W.Stoughton: "The Neutron Capture Resonance Integral of the 6.75-day  $^{237}\text{U}$ ," ORNL 4306, 1 (1968).
- 29) J.H.McNally, J.W.Barnes, B.J.Dropesky, P.A.Seeger, and K.Wolfsberg, Phys. Rev., C9, 717 (1974).
- 30) Y.Kikuchi: "Program ASREP," private communication.
- 31) Y.A.Ellis-Akovali: Nuclear Data Sheets, 49, 181 (1986).
- 32) M.C.Brady and T.R.England: Nucl. Sci. Eng., 103, 129 (1989).
- 33) M.H.Studier, J.E.Gindler and C.M.Stevens: Phys. Rev., 97, 88 (1955).

- 34) A.H.Jaffey and J.L.Lerner: "Number of Neutrons per Fission," ANL-6600, p.124 (1961). (Data were taken from EXFOR 12251).
- 35) J.E.Gindler, L.E.Glendenin, E.L.Krapp, S.J.Fernandez, K.F.Flynn and D.J.Henderson: J. Inorg. and Chem., 43, 445 (1980).
- 36) B.N.Belyaev, E.A.Gromova, S.S.Kovalenko, A.V.Lovtsyus, Yu.A.Nemilov, Yu.A.Selitskii, A.V.Stepanov, A.M.Fridkin, V.B.Funshtein, V.A.Yakovlev, V.N.Okolovich and G.A.Petrov: Sov. Atom. Energy, 60, 177 (1986).
- 37) G.V.Val'skiy, E.A.Gromova, V.V.Danichev, V.N.Dement'ev, V.S.Zenkevich, S.S.Lovalenko, G.V.Mozolev, Yu.S.pleva, Yu.A.Selitskiy, N.I.Trubaev, A.M.Fridkin, V.B.Funshtein and V.A.Yakovlev: Proc. 1st Int. Conf. on Neutron Physics, Kiev, Sep, 14-16, 1987, Vol.3, p. 99 (1987). (Data were taken from EXFOR 40995).
- 38) S.S.Kovalenko, Yu.A.Selitsky, V.B.Funshtein, S.V.Khlesbnikov and V.A.Yakovlev: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Mito, May 30- June 3, 1988, p.995 (1988).
- 39) M.Lindner and D.W.Seegmiller: Radiochimica Acta, 49, 1 (1990).
- 40) G.I.Bell: Phys. Rev., 158, 1127 (1967).
- 41) M.R.Schmorak: Nuclear Data Sheets, 63, 139 (1991).
- 42) J.D.Spencer and N.P.Baumann: Trans. Amer. Nucl. Soc., 12, 284 (1969). (data were taken from EXFOR 12475).
- 43) E.N.Shurshikov: Nuclear Data Sheets, 53, 601 (1988).
- 44) A.A.Solonkin, V.F.Teplykh, E.V.Platygina, K.A.Petrzhak and A.V.Mosesov: Sov. Atom. Energy, 64, 497 (1988).

Table 2.1 Level density parameters

Nuclides	$a$ (MeV $^{-1}$ )	$T$ (MeV)	$\Delta$ (MeV)	$\alpha_M$ (MeV $^{1/2}$ )	$E_x$ (MeV)	$D_0$ (eV)	$D_0$ (eV) $^{\text{exp}}$
U-235	31.4	0.39	0.69	31.55	4.1984	10.6	10.6±0.5
U-236	30.42	0.39	1.18	30.752	4.5349	0.44	0.44±0.06
U-237	31.6	0.37	0.69	31.431	3.807	14.7	14.7±0.8
U-238	30.1	0.38	1.12	30.762	4.227	3.5	3.5±0.8
<hr/>							
*Np-234	27.16		0.0	17.57	3.1410	0.508	
Np-235	31.4	0.35	0.57	31.16	3.2900	0.268	
Np-236	28.0	0.35	0.0	29.50	2.2579	0.718	
Np-237	29.6	0.39	0.49	30.42	3.7161	0.111	
Np-238	30.0	0.344	0.0	30.71	2.4075	0.52	0.52±0.04
Np-239	30.38	0.376	0.43	31.00	3.4944	0.294	

\*) taken from Gilbert and Cameron (Ref.21).

Table 2.2 Q-values and threshold energies of (n, 2n), (n, 3n) and (n, 4n) reactions

Nuclide	(n,2n) (MeV)	(n,3n) (MeV)	(n,4n) (MeV)
U-237	-5.1044	-11.657	-16.959
	5.1262	11.707	17.032
Np-236	-5.7298	-12.709	-18.835
	5.7544	12.763	18.916
Np-238	-6.5684	-12.311	-19.290
	6.5965	12.364	19.373

Table 3.1 Average fission cross section of  $^{237}\text{U}$  in resonance region

energy range (eV)	McNally et al. <sup>29)</sup>	calculated
43 ~ 65	3.89±0.93	4.26
65 ~ 100	5.06±0.32	4.95
100 ~ 200	1.52±0.10	1.30

Table 3.2 Resolved resonance parameters of  $^{237}\text{U}$ 

Energy(eV)	total spin	$\Gamma_n(\text{meV})$	$\Gamma_\gamma(\text{meV})$	$\Gamma_f(\text{meV})$
-0.8 *	1.0	2.4	35.0	0.1
1.5 *	1.0	0.5333	35.0	0.1
5.0 *	1.0	1.043	35.0	3.0
8.5 *	1.0	1.361	35.0	4.0
12.0 *	1.0	1.617	35.0	4.0
15.5 *	0.0	5.512	35.0	4.0
19.0 *	1.0	2.034	35.0	4.0
22.5 *	0.0	6.641	35.0	4.0
26.0 *	1.0	2.380	35.0	4.0
29.5 *	1.0	2.535	35.0	4.0
33.0 *	0.0	8.042	35.0	4.0
36.5 *	1.0	2.819	35.0	4.0
40.0 *	1.0	2.951	35.0	4.0
43.5 *	0.0	9.234	35.0	4.0
46.2	1.0	3.173	35.0	26.0
52.4	0.0	10.14	35.0	0.611
57.3	1.0	3.533	35.0	0.907
60.3	1.0	3.627	35.0	0.551
67.5	0.0	11.50	35.0	1.540
70.0	0.0	11.72	35.0	1.040
73.8	1.0	4.007	35.0	40.30
81.1	0.0	12.60	35.0	8.020
82.7	0.0	12.74	35.0	0.904
87.3	0.0	13.08	35.0	1.390
88.4	1.0	4.387	35.0	9.960
92.7	0.0	13.48	35.0	0.880
93.7	1.0	4.520	35.0	2.330
98.0	1.0	4.620	35.0	1.240
103.9	1.0	4.760	35.0	0.350
112.4	0.0	14.84	35.0	1.720
119.9	1.0	5.107	35.0	2.460
129.5	0.0	15.94	35.0	0.514
131.0	0.0	16.02	35.0	12.80
138.8	0.0	16.50	35.0	2.150
143.0	0.0	16.74	35.0	1.950
145.4	1.0	5.633	35.0	2.250
153.7	0.0	17.36	35.0	2.710
160.2	0.0	17.72	35.0	1.760
169.1	0.0	18.20	35.0	2.430
175.3	1.0	6.180	35.0	5.420
184.9	1.0	6.347	35.0	3.620
192.4	1.0	6.473	35.0	15.90
200.9	1.0	6.613	35.0	1.550
207.7	0.0	20.20	35.0	30.90
212.4	0.0	20.40	35.0	2.050
216.7	0.0	20.60	35.0	8.760
235.0	0.0	21.40	35.0	96.70

\*) hypothetical levels

Table 3.3 Thermal cross sections and resonance integrals of  $^{237}\text{U}$ 

Quantity	Reference	values	
$\sigma_{\text{cap}}$	66Halperin <sup>26)</sup>	order of 100 b	
	Mughabghab <sup>20)</sup>	443±167 b	
	ENDF/B-VI <sup>2)</sup>	476.0 b	
	present work	452.4 b	
$\sigma_{\text{fis}}$	55Cowen <sup>25)</sup>	2.0 b	
	66Halperin <sup>26)</sup>	< 50 b	in a reactor spectrum
	Mughabghab <sup>20)</sup>	< 0.35 b	in a reactor spectrum
	ENDF/B-VI <sup>2)</sup>	2.00 b	
	present work	1.70 b	
$\sigma_{\text{abs}}$	67Cornman <sup>27)</sup>	478±160 b	at 0.0253 eV
	ENDF/B-VI <sup>2)</sup>	478.0 b	
	present work	454.1 b	
$\sigma_{\text{ela}}$	ENDF/B-VI <sup>2)</sup>	9.13 b	
	present work	24.39 b	
$\sigma_{\text{total}}$	ENDF/B-VI <sup>2)</sup>	487.1 b	
	present work	478.5 b	
$\text{RI}_{\text{cap}}$	68Halperin <sup>28)</sup>	1200±200 b	
	Mughabghab <sup>20)</sup>	1200±200 b	
	ENDF/B-VI <sup>2)</sup>	311 b	
	present work	1080 b	
$\text{RI}_{\text{fis}}$	ENDF/B-VI <sup>2)</sup>	9.22 b	
	present work	48.7 b	

Table 3.4 Unresolved resonance parameters of  $^{237}\text{U}$ Energy independent parameters

$$R = 9.668 \text{ fm}, \Gamma_\gamma = 35 \text{ meV}$$

Energy dependent parameters

E(keV)	$S_0(10^{-4})$	$S_1(10^{-4})$	D(eV)	$\Gamma_f(\text{meV})$	$\sigma_{\text{tot}}(\text{b})$	$\sigma_\gamma(\text{b})$	$\sigma_f(\text{b})$
0.2	1.014	2.028	3.57	6.23	41.38	16.80	2.515
0.3	1.016	2.031	3.57	7.67	36.01	12.72	2.294
0.4	1.017	2.034	3.56	8.90	32.81	10.41	2.145
0.5	1.018	2.036	3.57	10.08	30.62	8.885	2.045
0.6	1.019	2.038	3.57	11.09	29.01	7.807	1.955
0.8	1.020	2.040	3.57	13.07	26.74	6.347	1.834
1.0	1.021	2.041	3.56	14.85	25.19	5.402	1.744
1.5	1.020	2.040	3.56	18.64	22.77	4.033	1.582
2.0	1.018	2.036	3.55	22.00	21.31	3.283	1.481
3.0	1.013	2.026	3.54	27.62	19.58	2.476	1.347
4.0	1.004	2.009	3.51	32.43	18.52	2.043	1.264
5.0	1.002	2.004	3.51	35.90	17.83	1.777	1.192
6.0	0.997	1.993	3.49	38.97	17.30	1.594	1.139
7.0	0.993	1.985	3.48	41.77	16.90	1.459	1.099
8.0	0.989	1.977	3.47	44.15	16.57	1.356	1.066
10.0	0.983	1.965	3.46	48.10	16.07	1.209	1.013
11.4	0.973	1.947	3.43	50.00	15.78	1.134	0.978
15.0	0.975	1.950	3.44	59.52	15.31	0.913	0.919
25.0	0.993	1.986	3.49	69.36	14.61	0.702	0.8232
30.0	1.005	2.010	3.51	72.73	14.41	0.640	0.794

$S_2$  is the same as  $S_0$  at every energy points.

Table 3.5  $^{237}\text{U}$  fission cross section based on  $(t, \text{pf})$  cross section measured by Cramer and Britt<sup>5)</sup>

$E_n(\text{MeV})$	$p_f$	$\sigma_c(b)$	$\sigma_f(b)$	$\sigma_c^{\text{present}}(b)$	$\sigma_f^{\text{present}}(b)$
0.5	0.24	3.65	0.88	2.49	0.60
0.6	0.24	3.64	0.87	2.48	0.60
0.7	0.24	3.63	0.87	2.48	0.60
0.8	0.22	3.63	0.80	2.50	0.55
1.0	0.20	3.64	0.73	2.58	0.52
1.25	0.19	3.67	0.70	2.71	0.51
1.50	0.18	3.70	0.67	2.83	0.51
1.75	0.18	3.70	0.67	2.91	0.52
2.00	0.18	3.70	0.67	2.94	0.53
2.25	0.17	3.70	0.63	2.94	0.50

Table 3.6 Level scheme of  $^{237}\text{U}$ 

No.	energy(MeV)	spin-parity	No.	energy(MeV)	spin-parity
GS	0.0	1/2+	16	0.69765	5/2+
1	0.01139	3/2+	17	0.72045	3/2-
2	0.05630	5/2+	18	0.73434	1/2-
3	0.08286	7/2+	19	0.75816	3/2-
4	0.15996	5/2+	20	0.83245	5/2+
5	0.20419	7/2+	21	0.84694	1/2+
6	0.2740	7/2-	22	0.8650	1/2-
7	0.3160	9/2-	23	0.87215	3/2+
8	0.42615	7/2+	24	0.89343	5/2+
9	0.4820	9/2+	25	0.9034	3/2-
10	0.54062	1/2-	26	0.9057	1/2+
11	0.55498	3/2-	27	0.9094	1/2-
12	0.57801	5/2-	28	0.9110	5/2-
13	0.66427	3/2+	29	0.9206	3/2+
14	0.66645	5/2+			
15	0.67759	3/2+			

GS: ground state

Levels above 0.94785 MeV were assumed to be overlapping.

Table 4.1 Thermal cross sections and resonance integrals of  $^{236}\text{Np}$ 

Quantity	Reference	Values	
$\sigma_{\text{cap}}$	ENDL-86 <sup>4)</sup>	100 b	
	present work	701 b	
$\sigma_{\text{fis}}$	55Studier <sup>33)</sup>	about 2800 b	
	61Jaffy <sup>34)</sup>	2500±150 b	
	80Gindler <sup>35)</sup>	2540±460 b	in a reactor spectrum
	86Belyaev <sup>36)</sup>	2760±170 b	Maxwellian spectrum (T=330 K)
	87Val'skiy <sup>37)</sup>	2770±260 b	at 0.0253 eV
	90Lindner <sup>39)</sup>	2140±160 b	in a reactor spectrum
	Mughabghab <sup>20)</sup>	2500±150 b	
	ENDL-86 <sup>4)</sup>	2514 b	
	present work	2770 b	
$\sigma_{\text{abs}}$	ENDL-86 <sup>4)</sup>	2614 b	
	present work	3471 b	
$\sigma_{\text{ela}}$	ENDL-86 <sup>4)</sup>	13 b	
	present work	12.27 b	
$\sigma_{\text{total}}$	present work	3483 b	
$\text{RI}_{\text{cap}}$	ENDL-86 <sup>4)</sup>	56.8 b	
	present work	259 b	
$\text{RI}_{\text{fis}}$	86Belyaev <sup>36)</sup>	1030±100 b	> 0.6 eV
	87Val'skiy <sup>37)</sup>	1040±60 b	
	ENDL-86 <sup>4)</sup>	1690 b	
	present work	1030 b	

Table 4.2 Level scheme of  $^{236}\text{Np}$ 

No.	energy(MeV)	spin-parity	No.	energy(MeV)	spin-parity
GS	0.0	6 -	3	0.273	4 -
1	0.060	1 +	4	0.324	5 -
2	0.231	3 -			

GS: ground state.

Levels above 0.37 MeV were assumed to be overlapping.

Table 5.1 Level scheme of  $^{238}\text{Np}$ 

No.	energy(MeV)	spin-parity	No.	energy(MeV)	spin-parity
GS	0.0	2 +	15	0.2860	1 -
1	0.02643	3 +	16	0.2983	6 -
2	0.06222	4 +	17	0.30091	6 -
3	0.08665	3 +	18	0.3286	6 +
4	0.10626	5 +	19	0.3325	1 +
5	0.12176	4 +	20	0.34238	5 -
6	0.13601	3 -	21	0.3501	3 -
7	0.16577	5 +	22	0.36841	2 -
8	0.17915	4 -	23	0.3741	2 +
9	0.18286	2 -	24	0.4085	6 -
10	0.21548	3 -	25	0.4313	4 +
11	0.22120	6 +	26	0.4404	4 -
12	0.23280	5 -	27	0.4563	5 +
13	0.25870	4 -	28	0.4626	6 +
14	0.27558	5 +	29	0.5242	6 +

GS: ground state.

Levels above 0.528 MeV were assumed to be overlapping.

Table 5.2 Thermal cross sections and resonance integrals of  $^{238}\text{Np}$ 

Quantity	Reference	Values	
$\sigma_{\text{cap}}$	ENDL-86 <sup>4)</sup>	100 b	
	ENDF/B-VI	202.8 b	
	JEF-2	202.8 b	
	present work	450 b	
$\sigma_{\text{fis}}$	69Spencer <sup>41)</sup>	2070±30 b	in a Maxwellian spectrum
	Mughabghab <sup>20)</sup>	2088±30 b	
	ENDL-86 <sup>4)</sup>	2070.8 b	
	ENDF/B-VI	2026.9 b	
	JEF-2	2026.9 b	
	present work	2070 b	
$\sigma_{\text{abs}}$	ENDL-86 <sup>4)</sup>	2170.8 b	
	ENDF/B-VI	2229.7 b	
	JEF-2	2229.7 b	
	present work	2520 b	
$\sigma_{\text{ela}}$	ENDL-86 <sup>4)</sup>	13 b	
	ENDF/B-VI	21.25 b	
	JEF-2	20.81 b	
	present work	12.41 b	
$\sigma_{\text{total}}$	ENDF/B-VI	2251.0 b	
	JEF-2	2250.5 b	
	present work	2532.5 b	
$\text{RI}_{\text{cap}}$	ENDL-86 <sup>4)</sup>	56.8 b	
	ENDF/B-VI	100 b	
	JEF-2	101 b	
	present work	201 b	
$\text{RI}_{\text{fis}}$	69Spencer <sup>41)</sup>	880±70 b	
	Mughabghab <sup>19)</sup>	880±70 b	
	ENDL-86 <sup>4)</sup>	1390 b	
	ENDF/B-VI	898 b	
	JEF-2	920 b	
	present work	940 b	

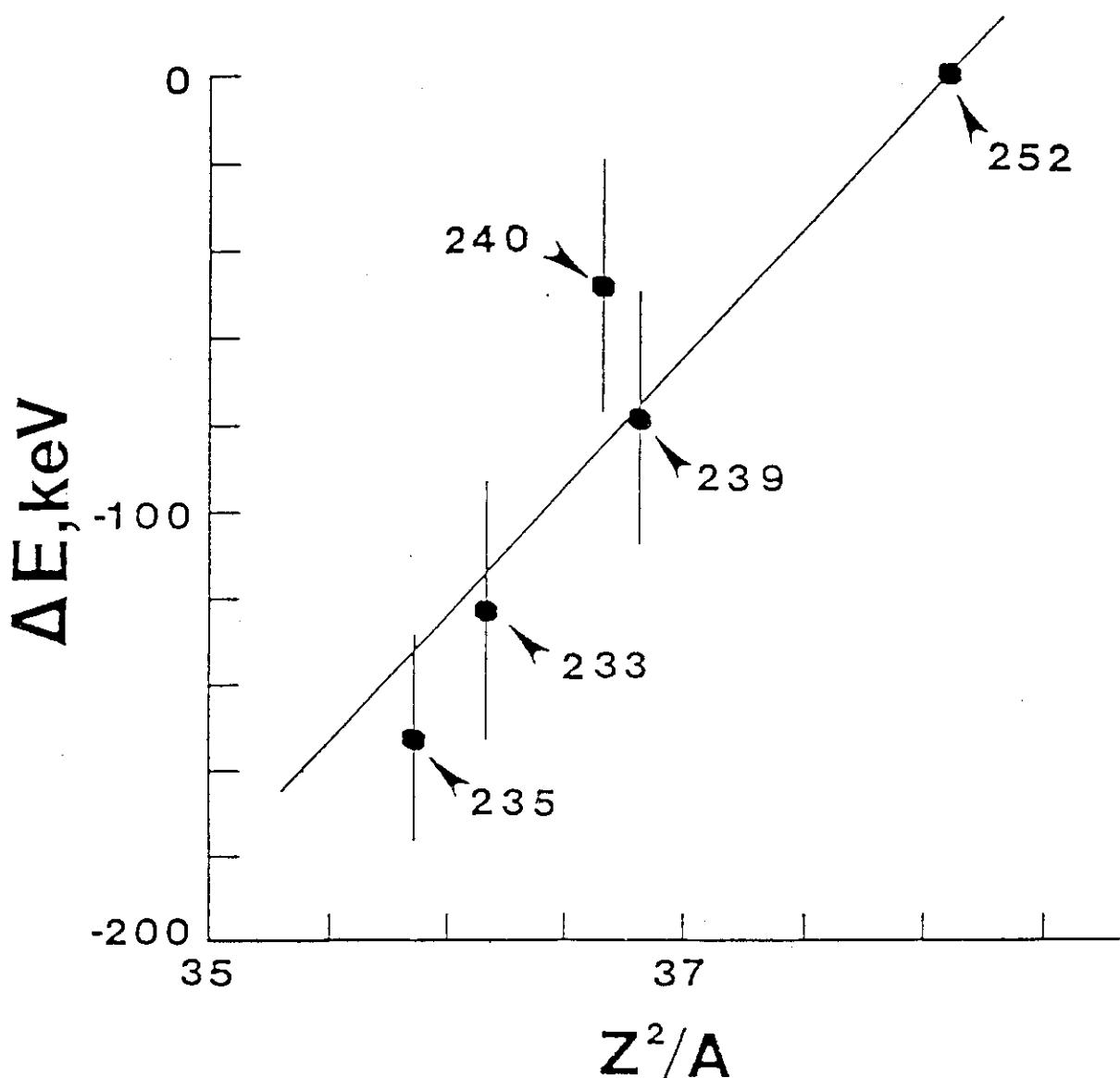
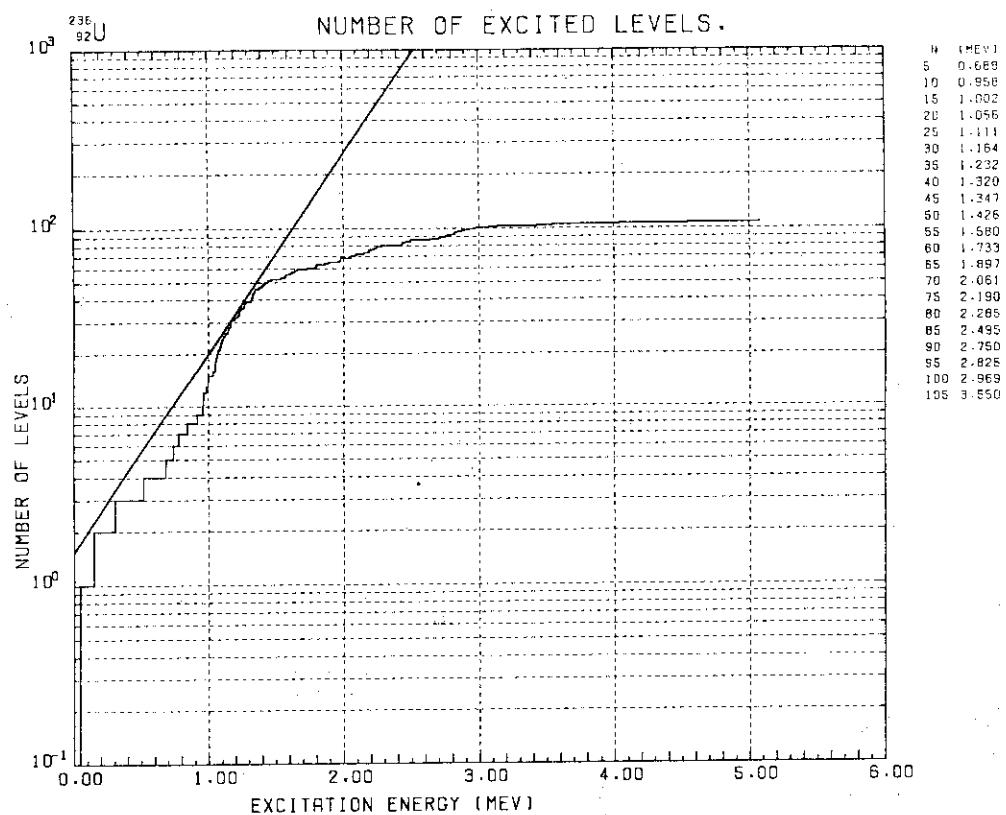
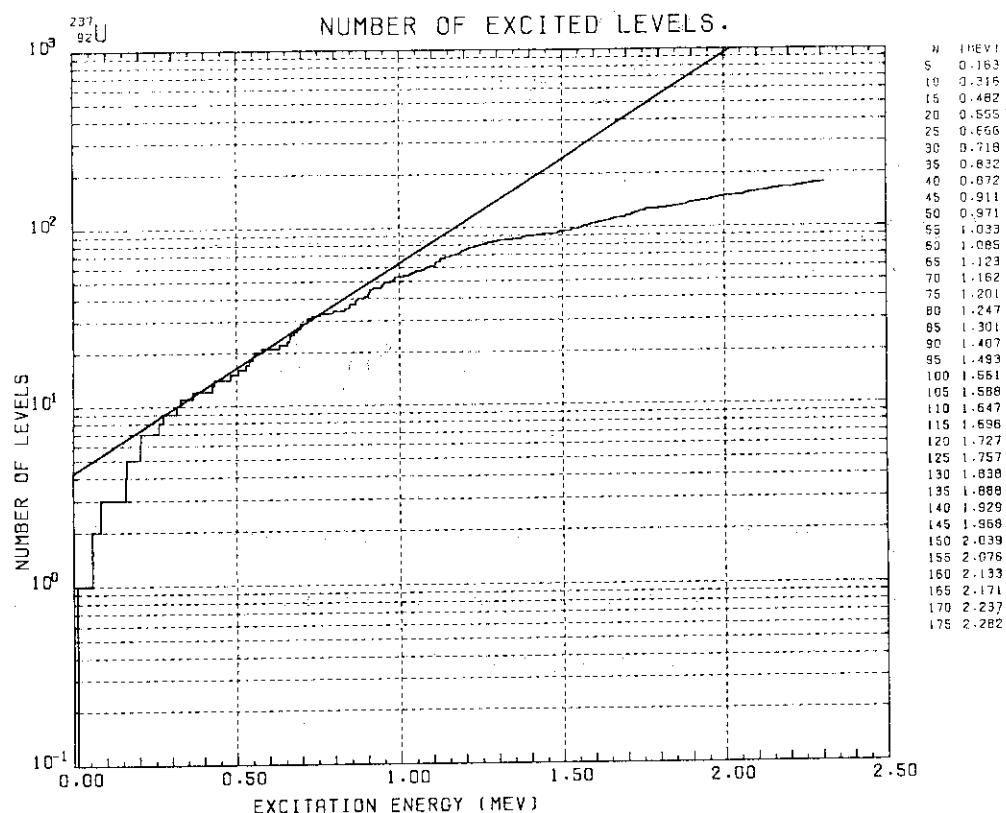
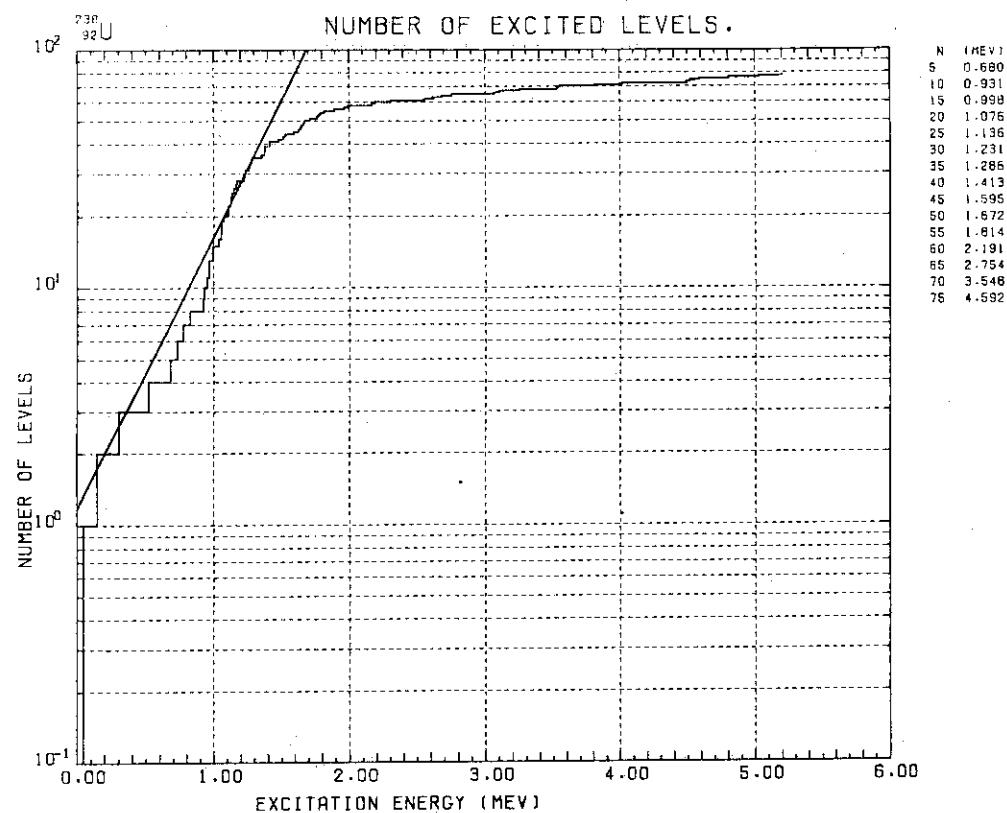
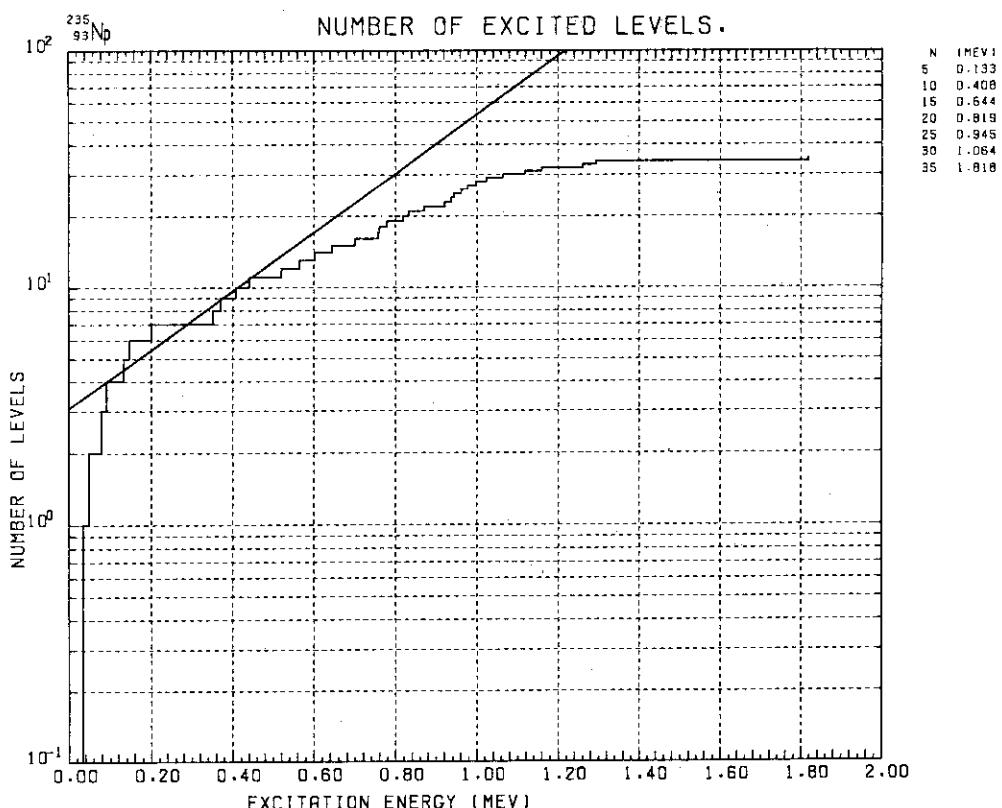
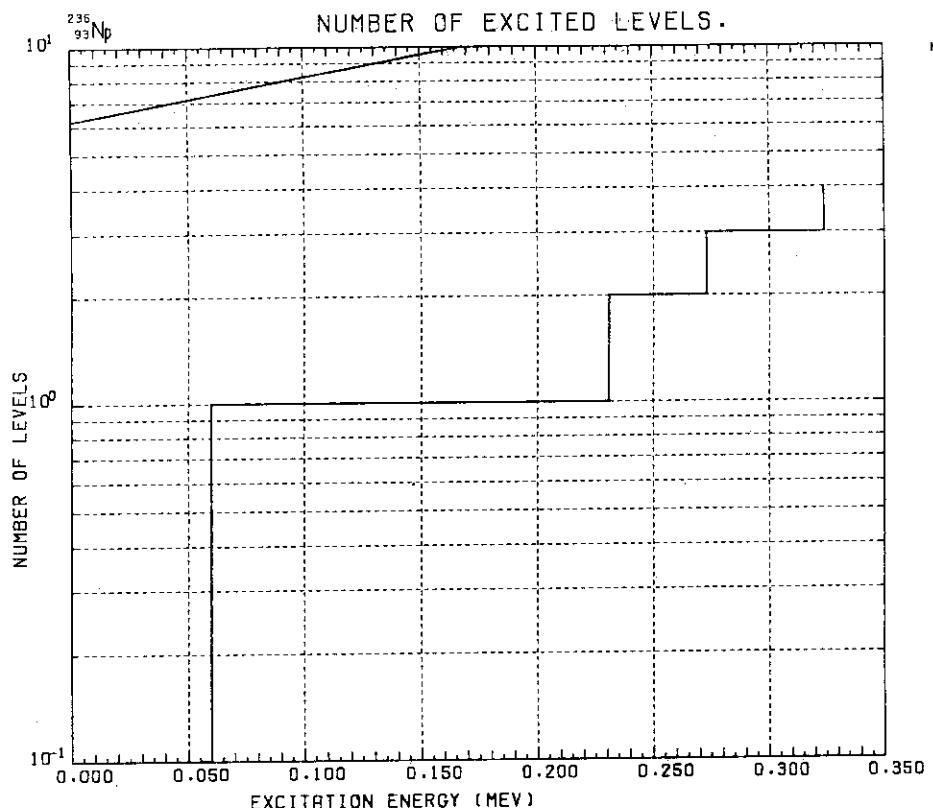
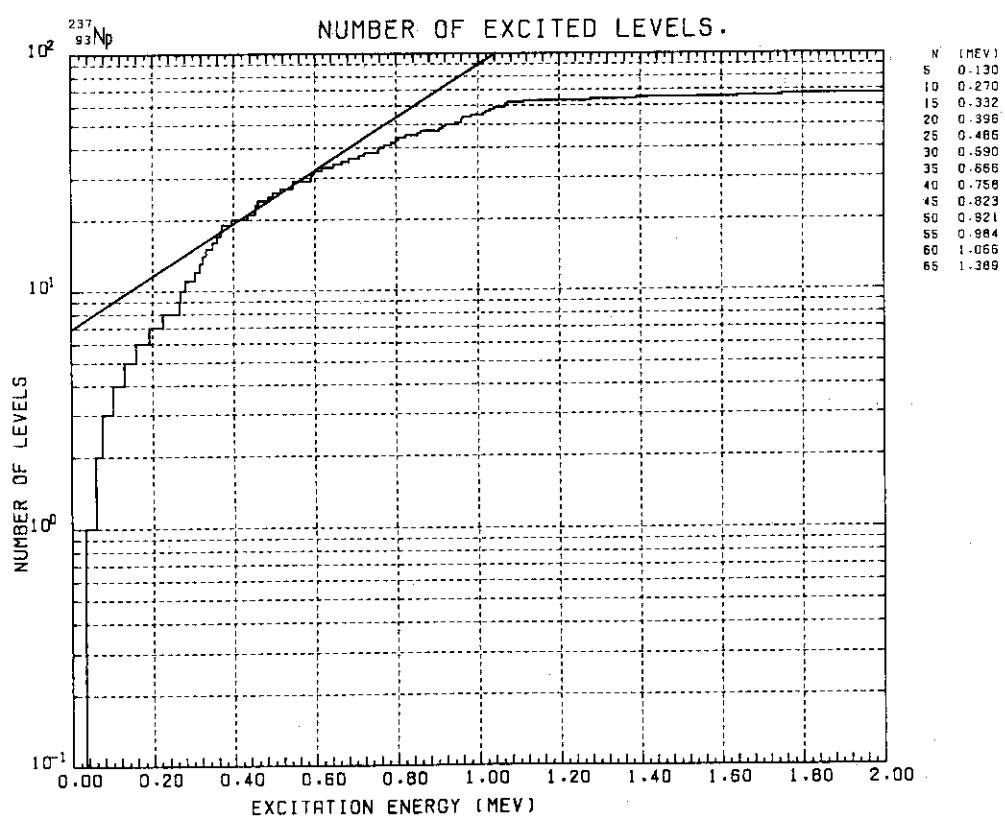
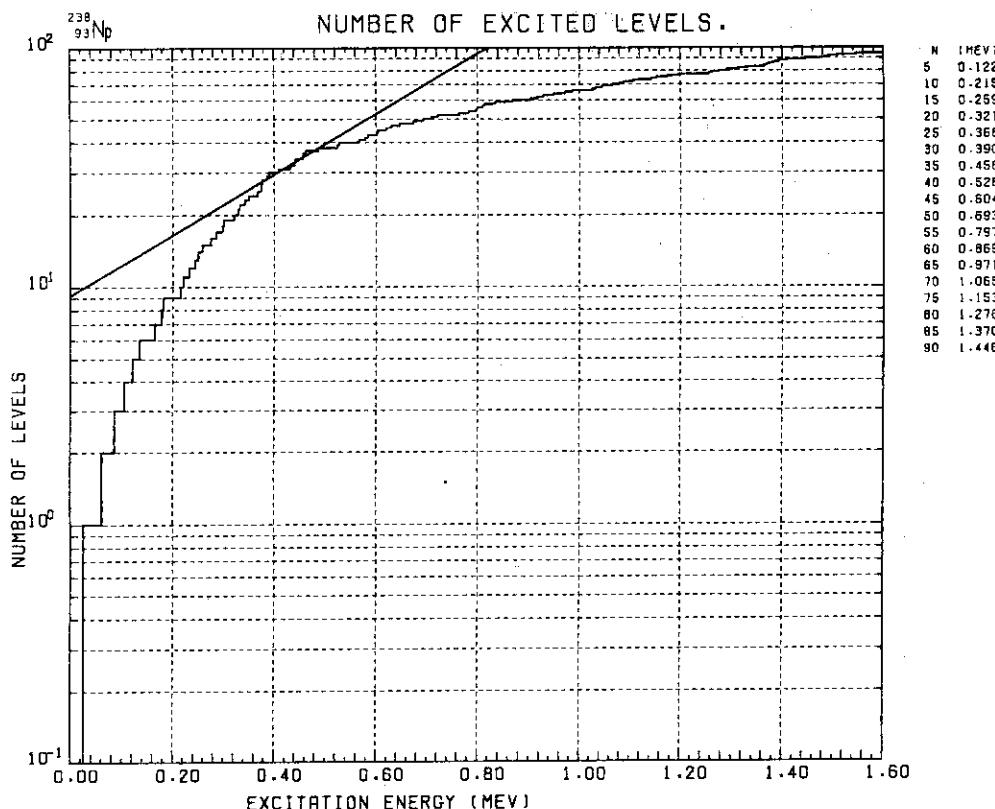
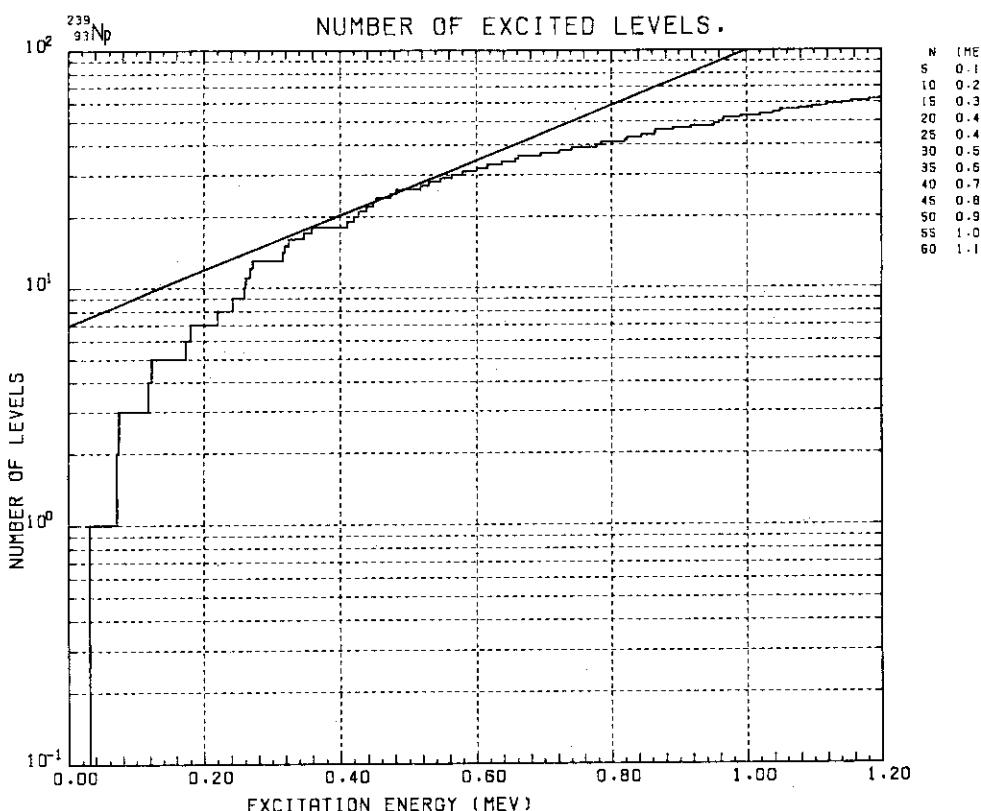


Fig. 2.1 Systematics of nuclear temperature for fission spectra (taken from Ref. 12). Numbers in the figure indicate nuclides:  $233 = {}^{233}\text{U}$ ,  $235 = {}^{235}\text{U}$ ,  $239 = {}^{239}\text{Pu}$ ,  $240 = {}^{240}\text{Pu}$  and  $252 = {}^{252}\text{Cf}$ .

Fig. 2.2 (a) Staircase plot of excited levels of <sup>236</sup>UFig. 2.2 (b) Staircase plot of excited levels of <sup>237</sup>U

Fig. 2.2 (c) Staircase plot of excited levels of <sup>238</sup>UFig. 2.2 (d) Staircase plot of excited levels of <sup>235</sup>Np

Fig. 2.2 (e) Staircase plot of excited levels of  $^{236}\text{Np}$ Fig. 2.2 (f) Staircase plot of excited levels of  $^{237}\text{Np}$

Fig. 2.2 (g) Staircase plot of excited levels of <sup>238</sup>NpFig. 2.2 (h) Staircase plot of excited levels of <sup>239</sup>Np

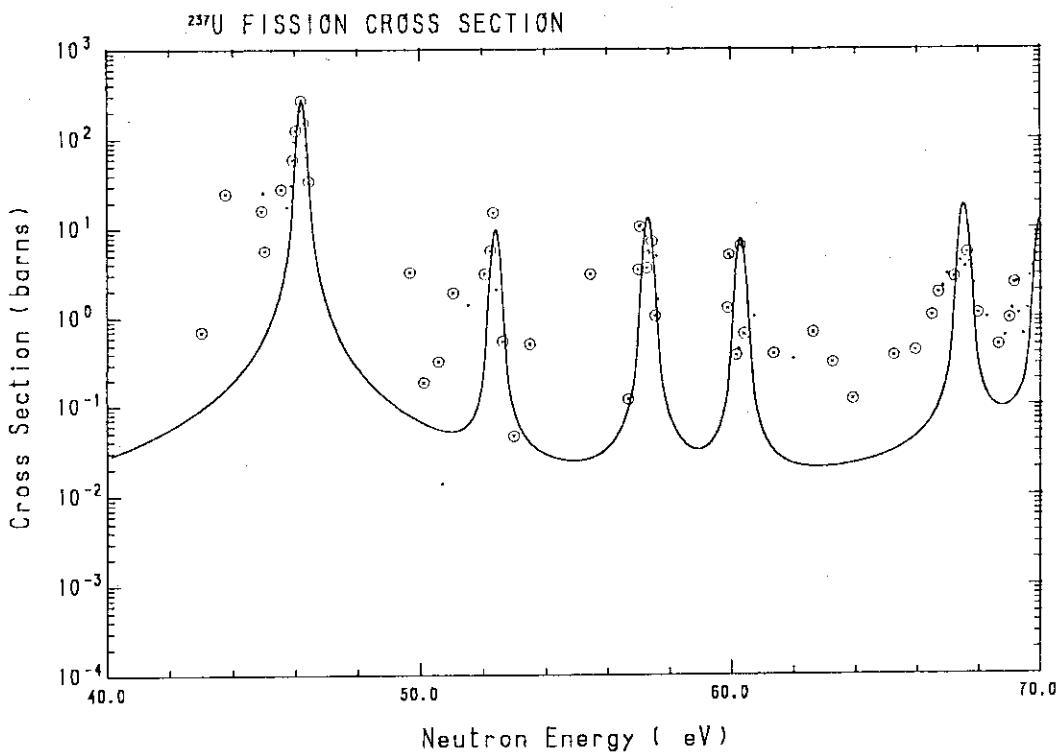


Fig. 3.1 (a)  $^{237}\text{U}$  fission cross section in the energy range from 40 to 70 eV  
Open circles are the data measured by McNally et al.<sup>[29]</sup>, and a solid curve shows the calculated cross section at 300 K.

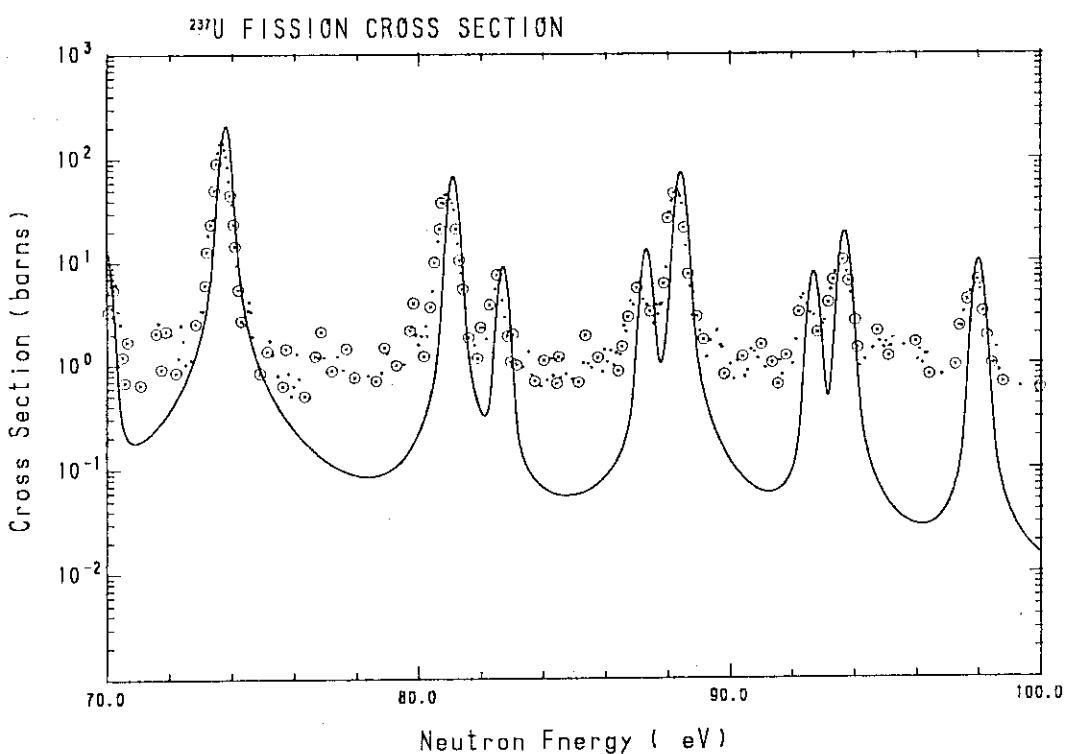


Fig. 3.1 (b)  $^{237}\text{U}$  fission cross section in the energy range from 70 to 100 eV  
Open circles are the data measured by McNally et al.<sup>[29]</sup>, and a solid curve shows the calculated cross section at 300 K.

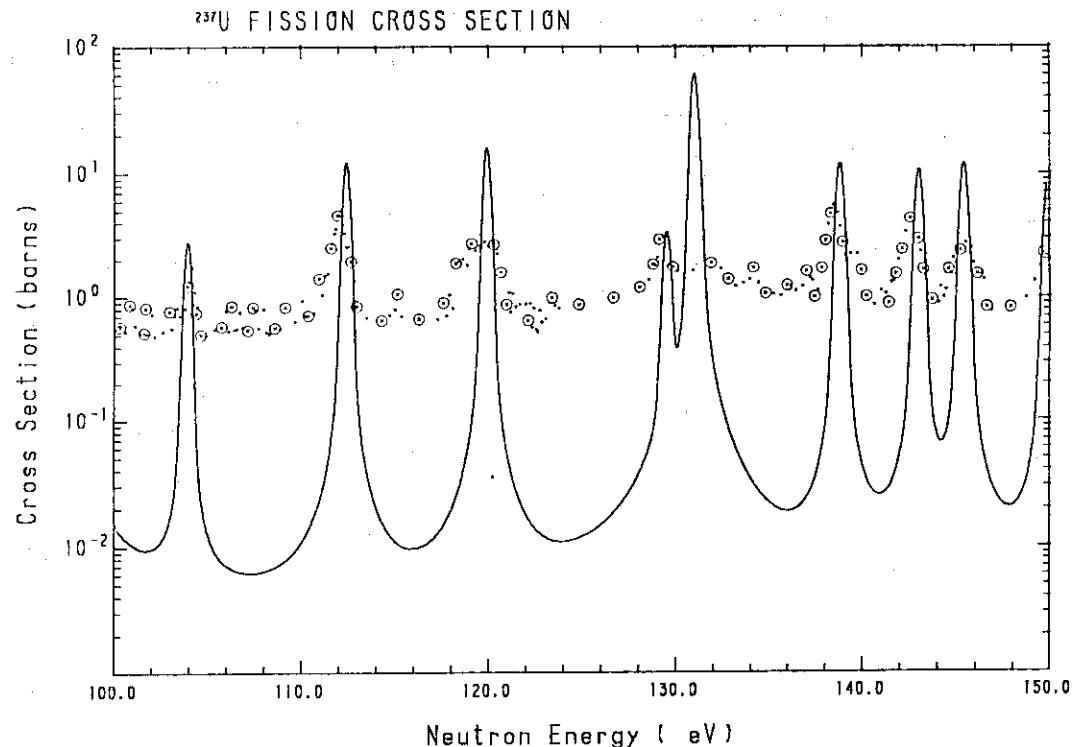


Fig. 3.1 (c)  $^{237}\text{U}$  fission cross section in the energy range from 100 to 150 eV  
Open circles are the data measured by McNally et al.<sup>29)</sup>, and a solid curve shows the calculated cross section at 300 K.

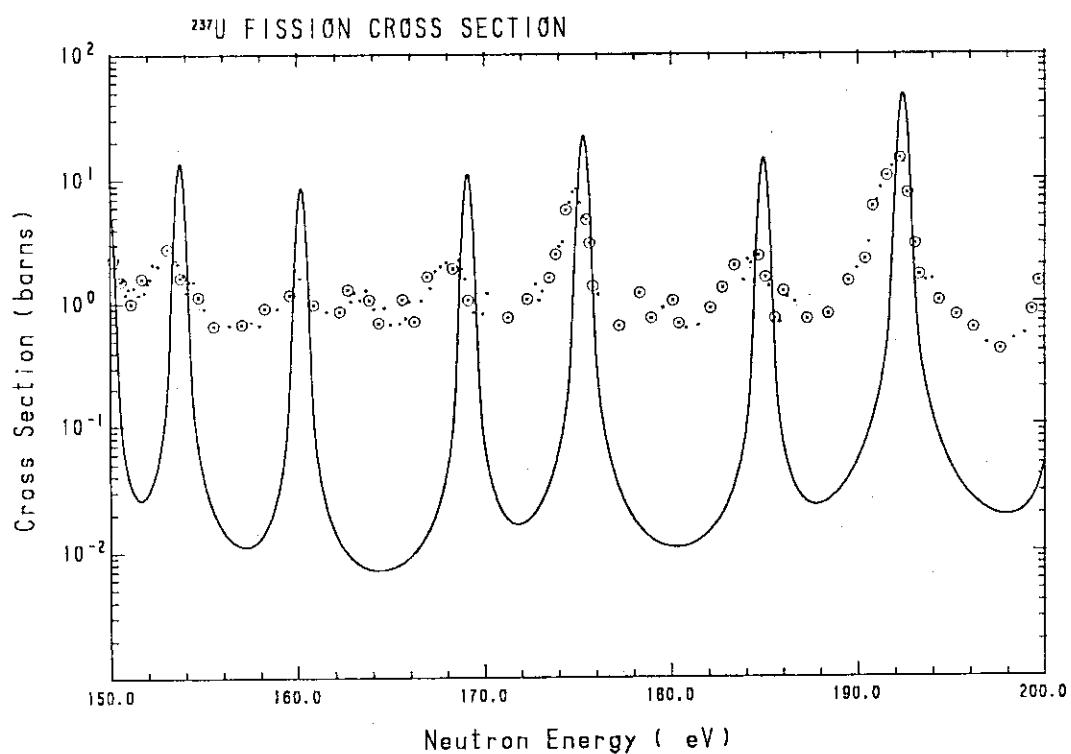


Fig. 3.1 (d)  $^{237}\text{U}$  fission cross section in the energy range from 150 to 200 eV  
Open circles are the data measured by McNally et al.<sup>29)</sup>, and a solid curve shows the calculated cross section at 300 K.

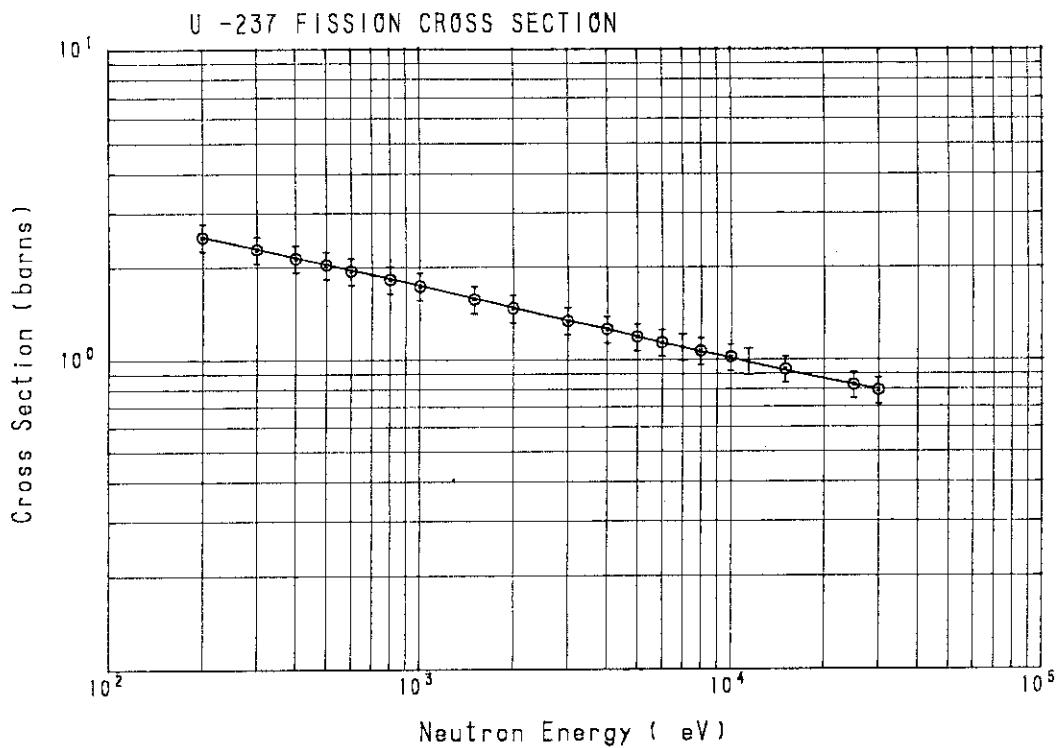


Fig. 3.2 (a)  $^{237}\text{U}$  fission cross section in the unresolved resonance region  
Open circles indicate the evaluated cross sections and their assumed errors. A solid curve is the result of parameter fitting with ASREP.

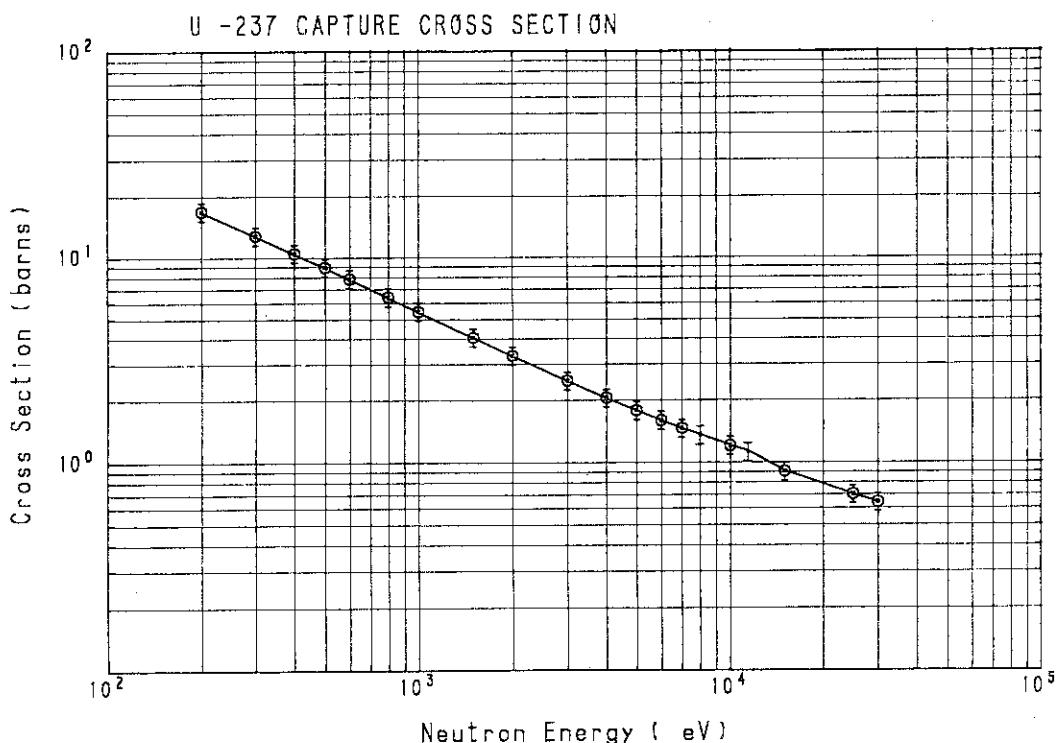
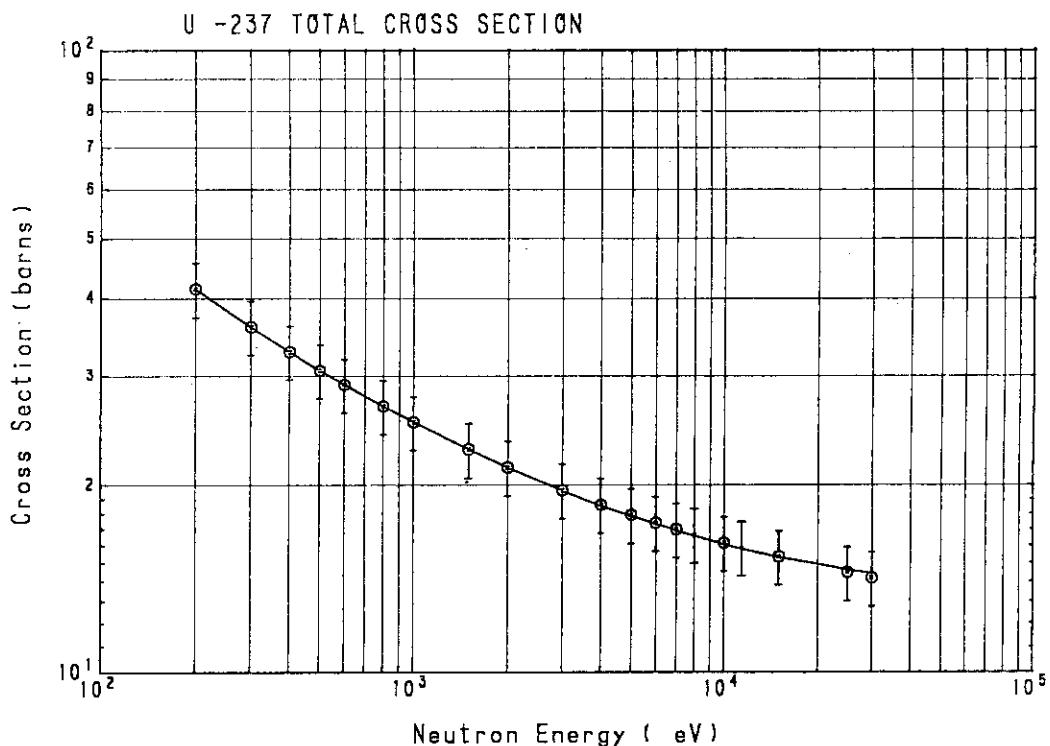
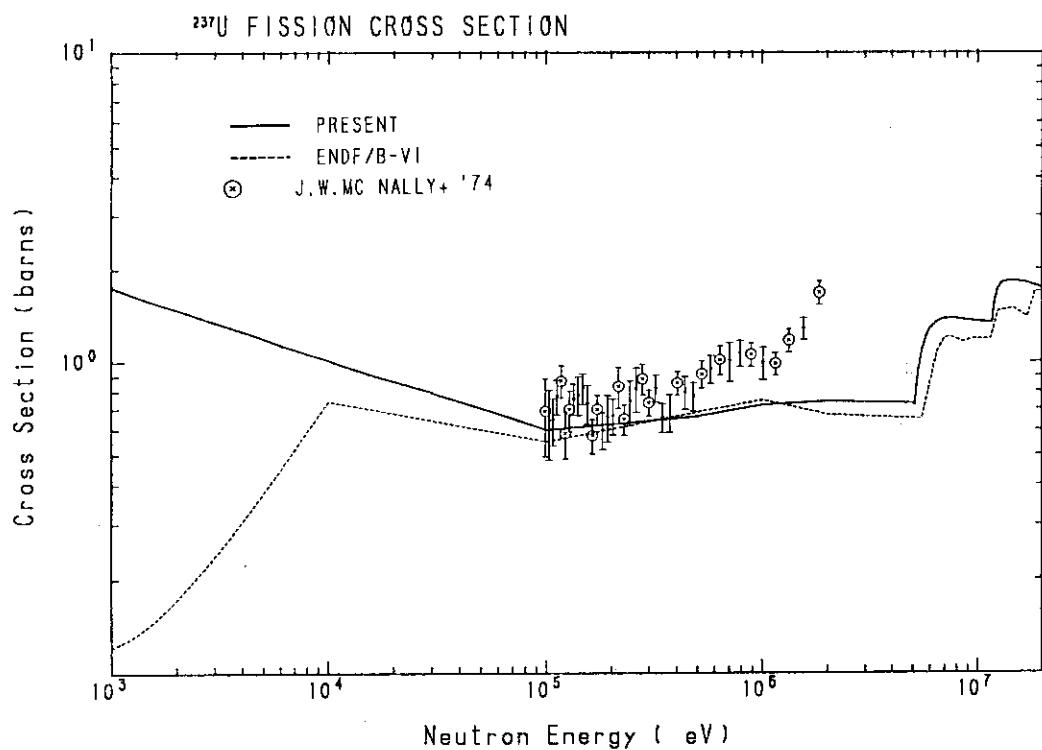
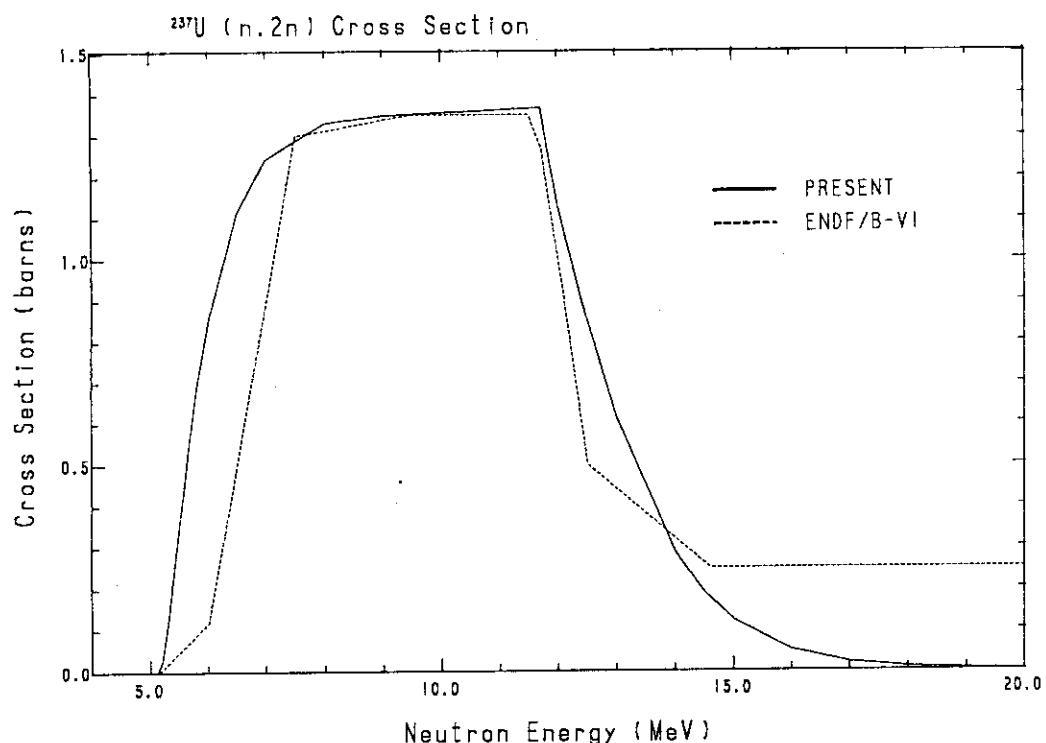
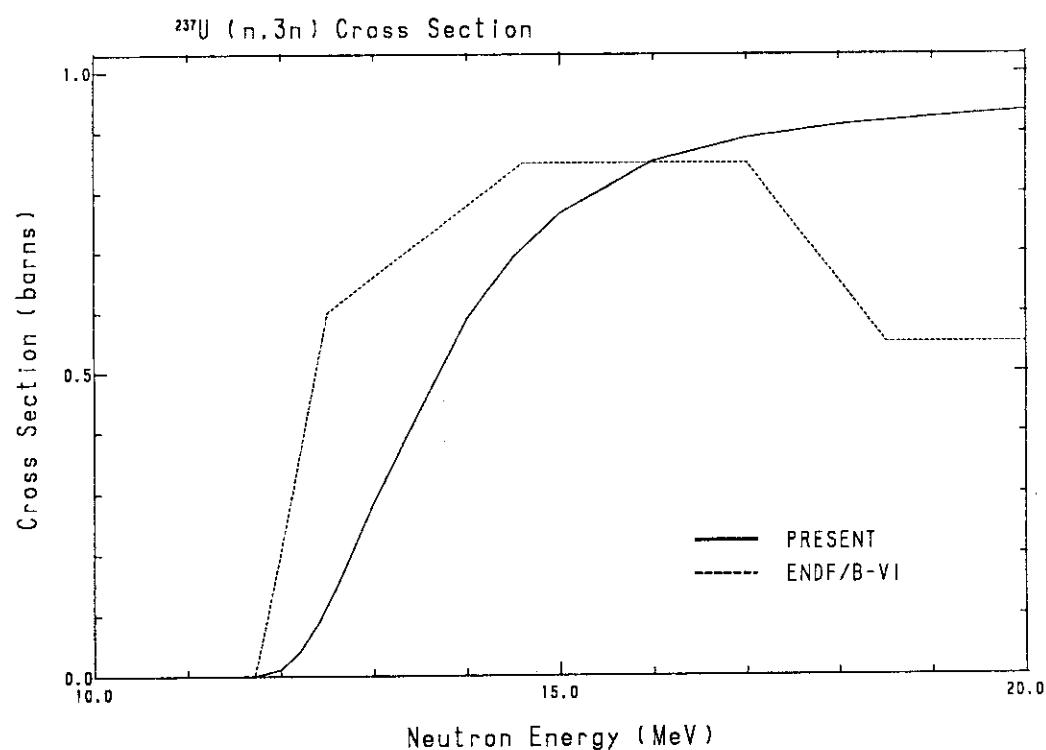


Fig. 3.2 (b)  $^{237}\text{U}$  capture cross section in the unresolved resonance region  
Open circles indicate the evaluated cross sections and their assumed errors. A solid curve is the result of parameter fitting with ASREP.

Fig. 3.2(c)  $^{237}\text{U}$  total cross section in the unresolved resonance region

Open circles indicate the evaluated cross sections and their assumed errors. A solid curve is the result of parameter fitting with ASREP.

Fig. 3.3  $^{237}\text{U}$  fission cross section in the energy range from 1 keV to 20 MeV

Fig. 3.4  $^{237}\text{U}(n, 2n)$  reaction cross sectionFig. 3.5  $^{237}\text{U}(n, 3n)$  reaction cross section

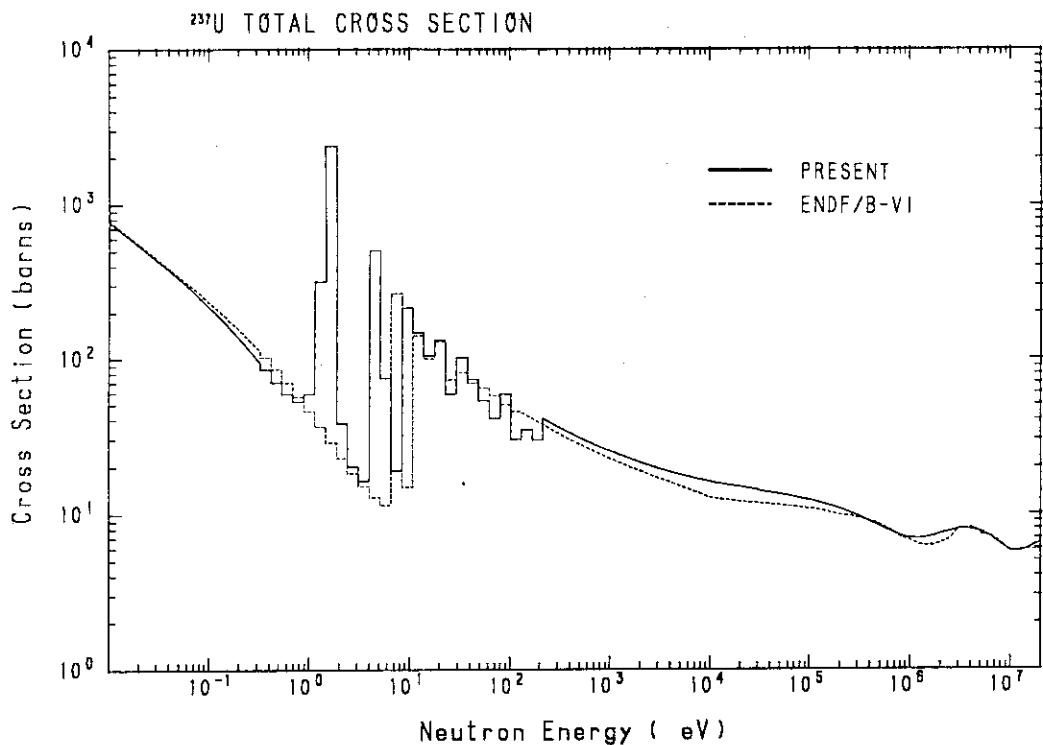


Fig. 3. 6  $^{237}\text{U}$  total cross section. Below 200 eV, average cross sections are shown.

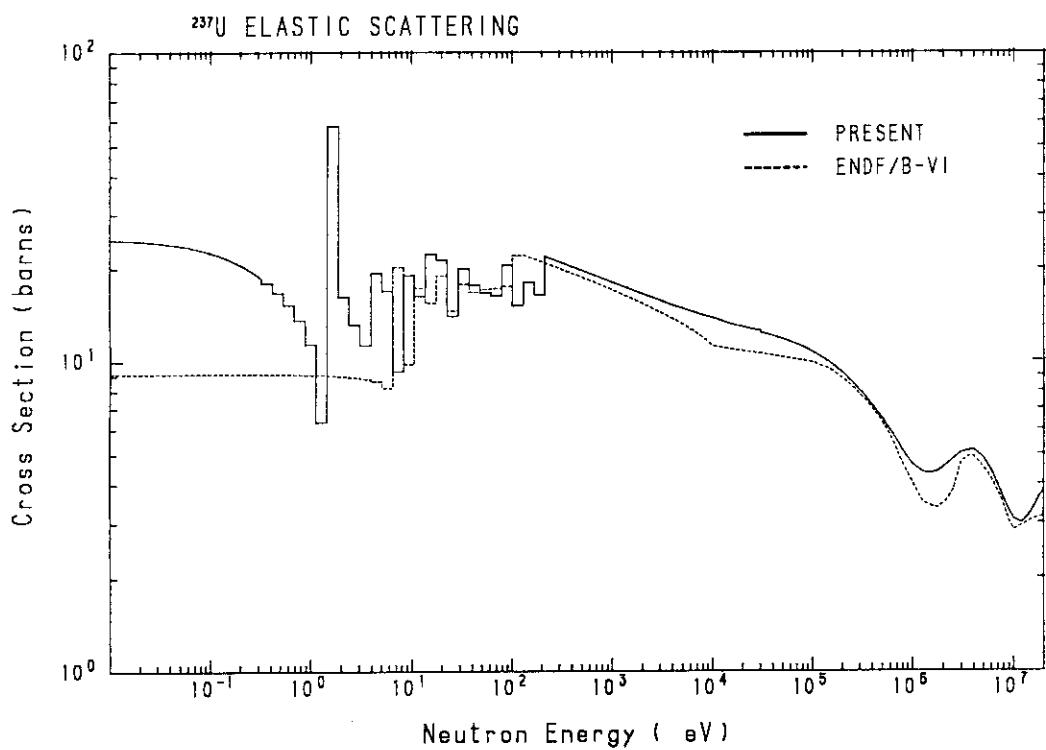


Fig. 3. 7  $^{237}\text{U}$  elastic scattering cross section. Below 200 eV, average cross sections are shown.

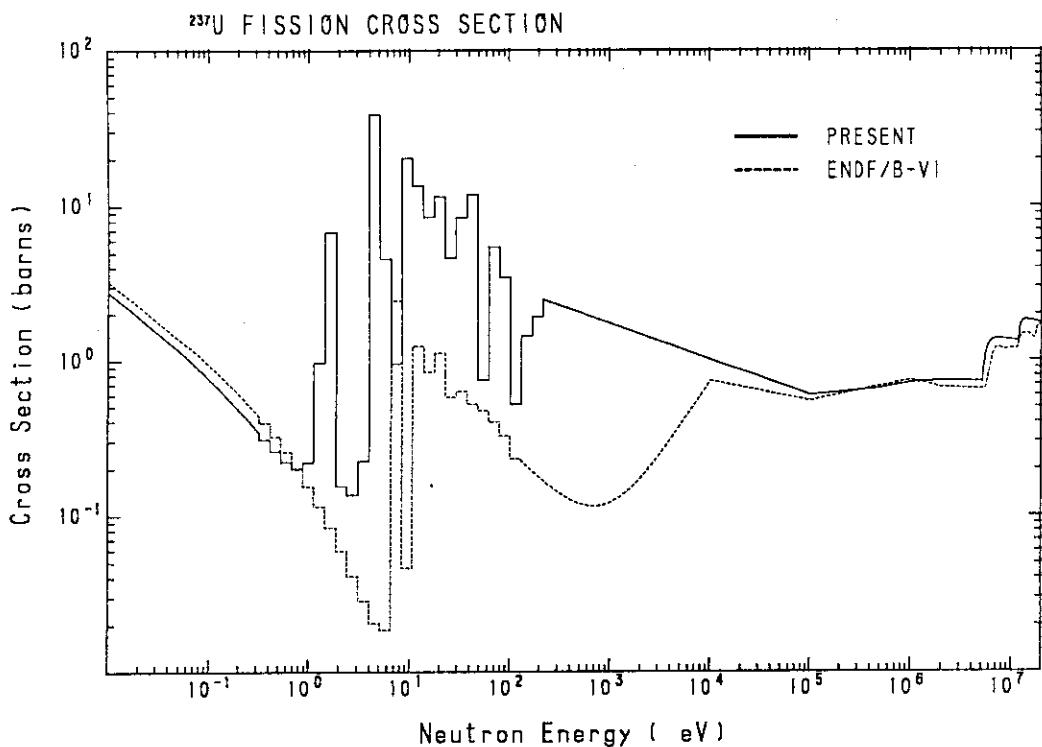


Fig. 3.8  $^{237}\text{U}$  fission cross section. Below 200 eV, average cross sections are shown.

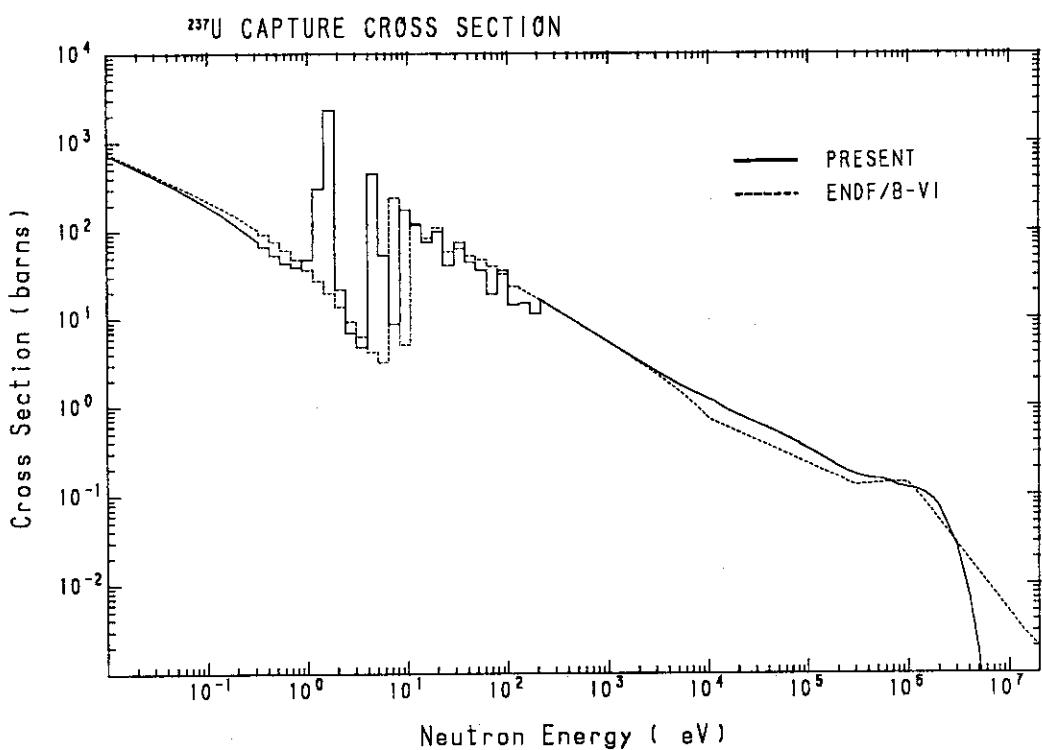
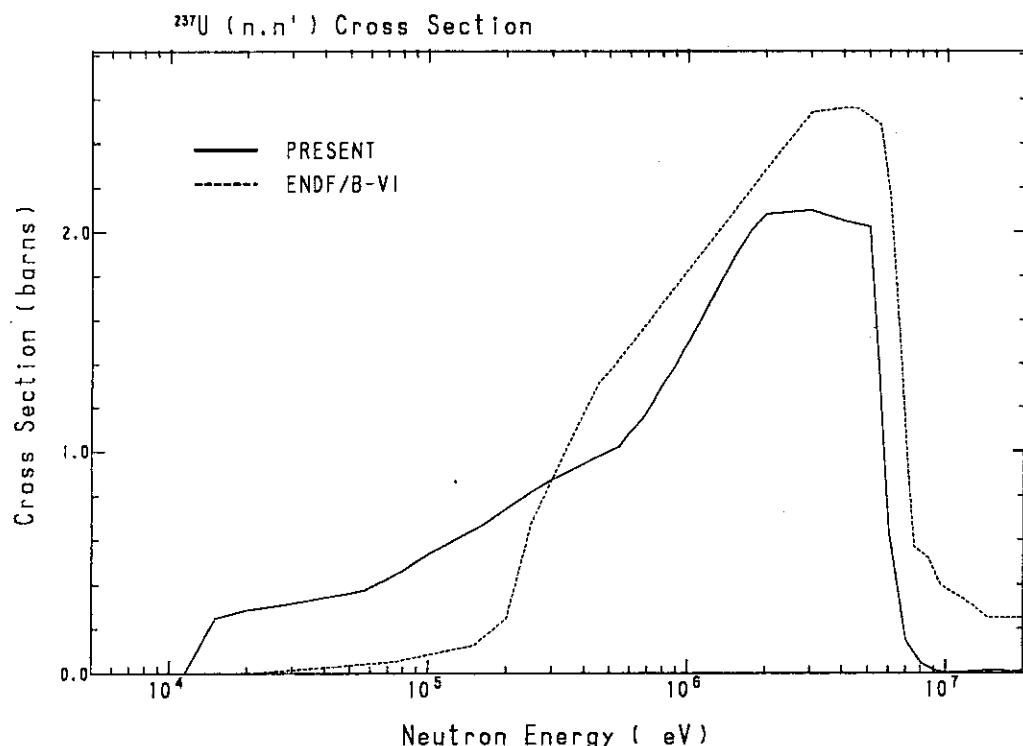
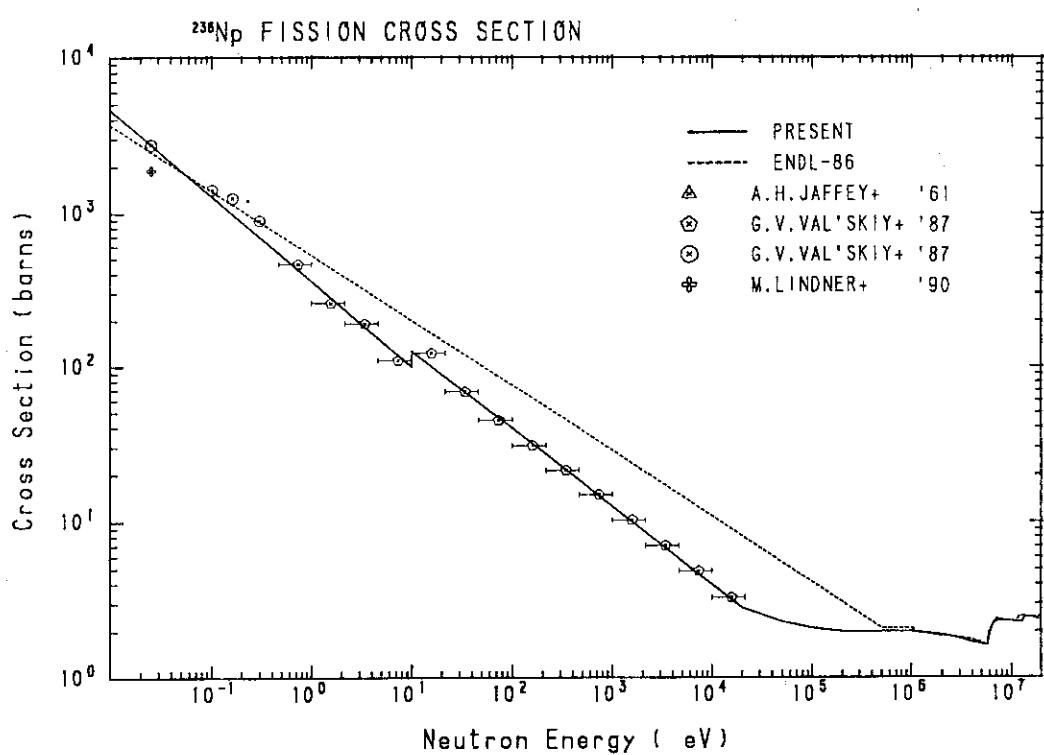
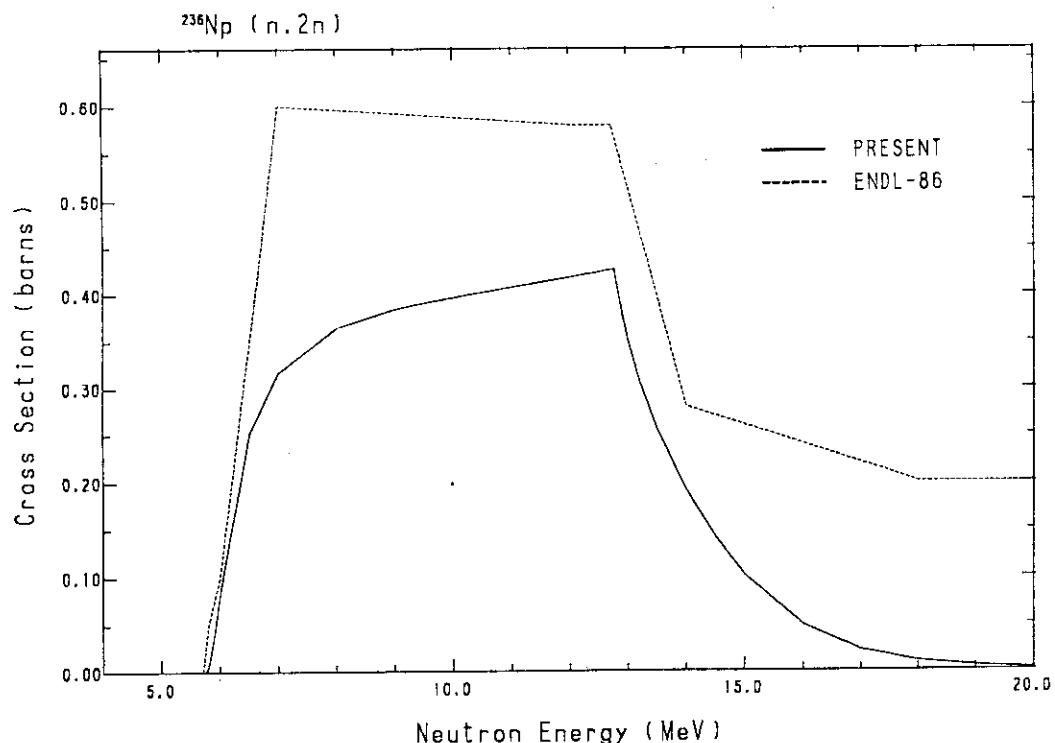
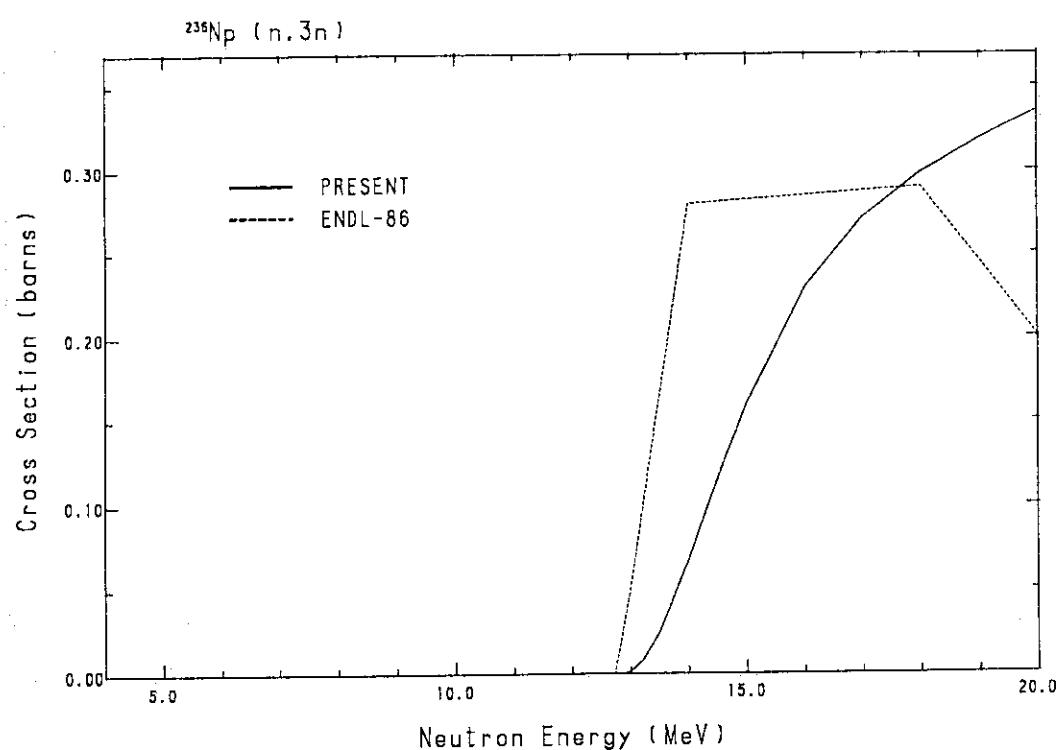
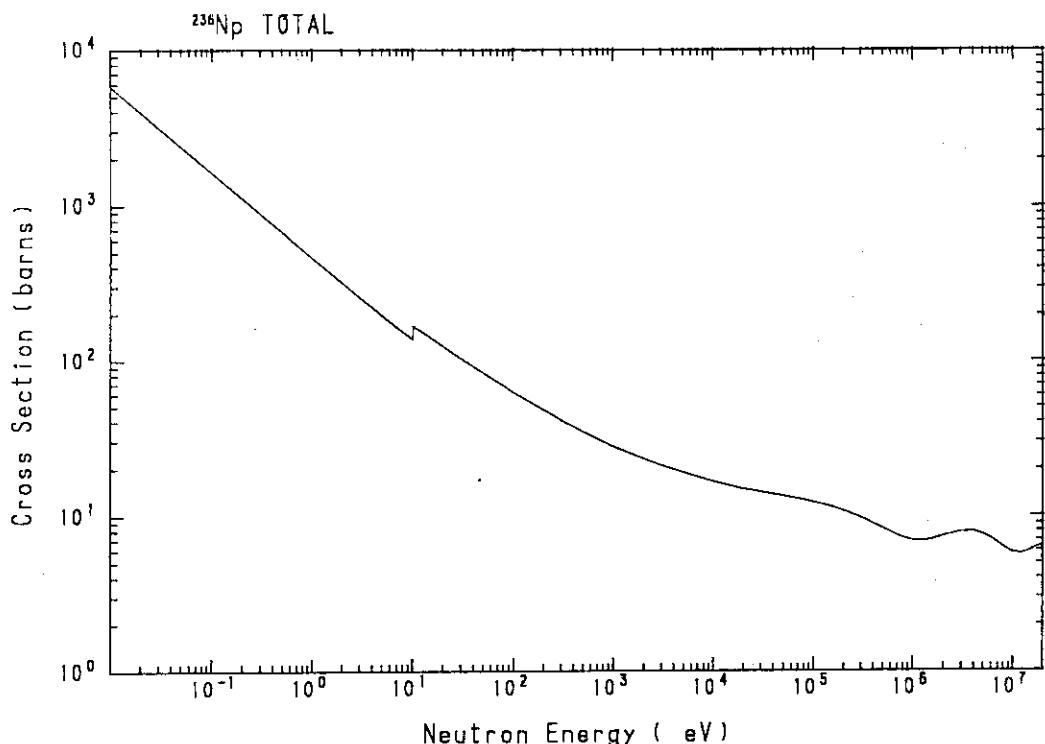
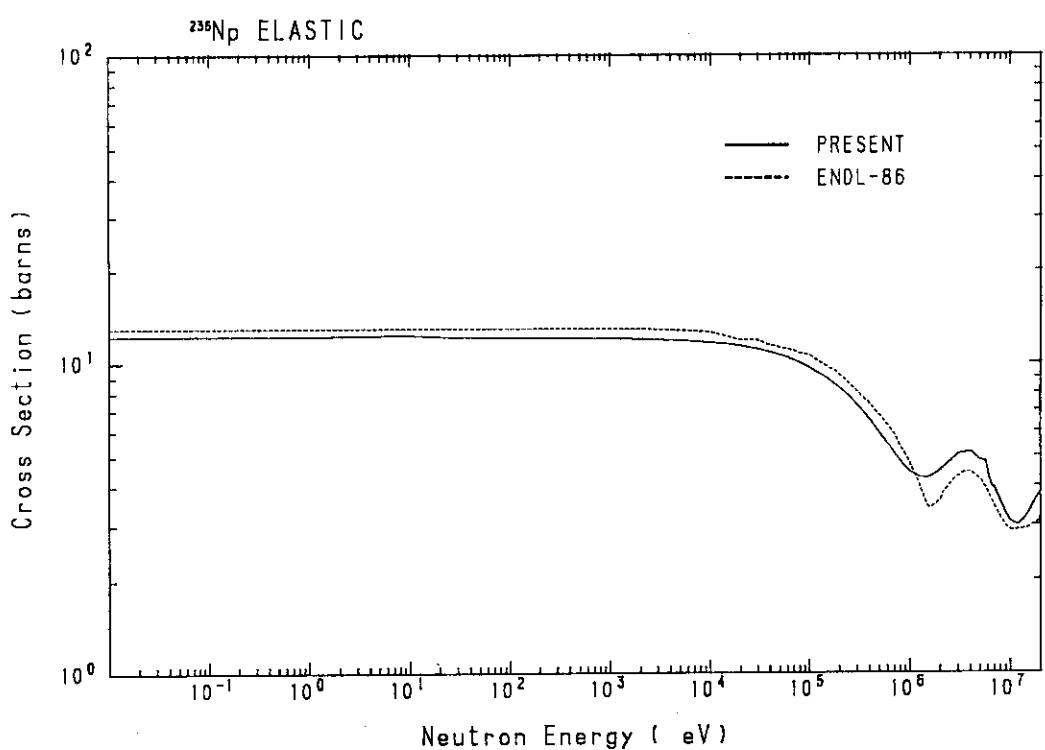
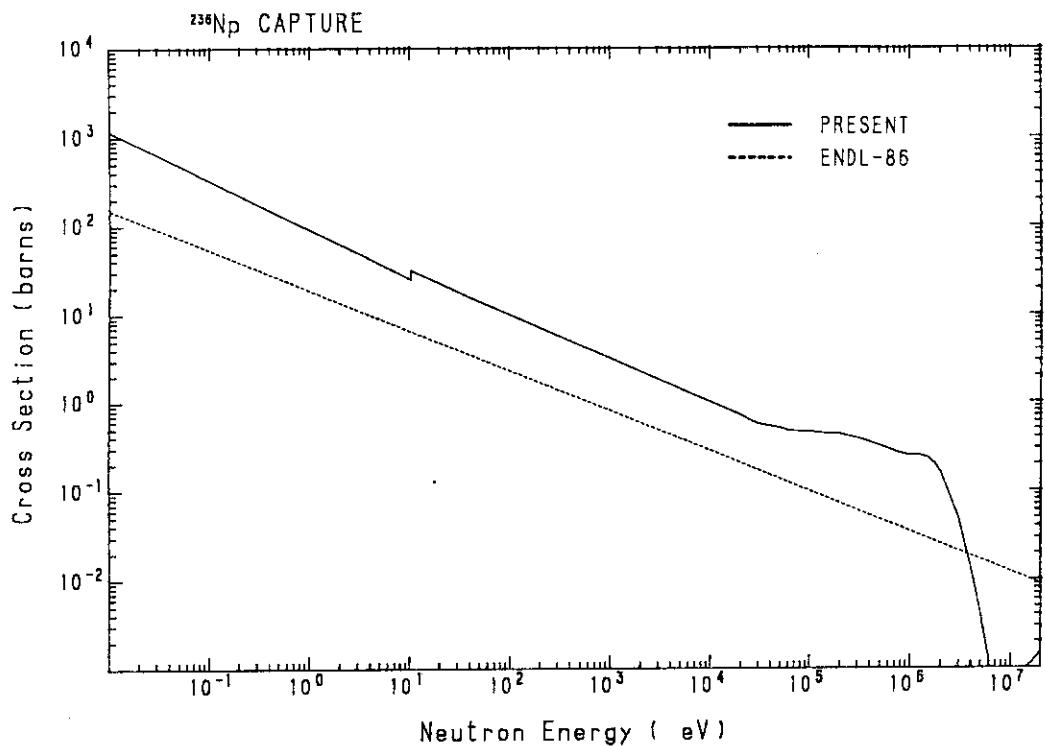
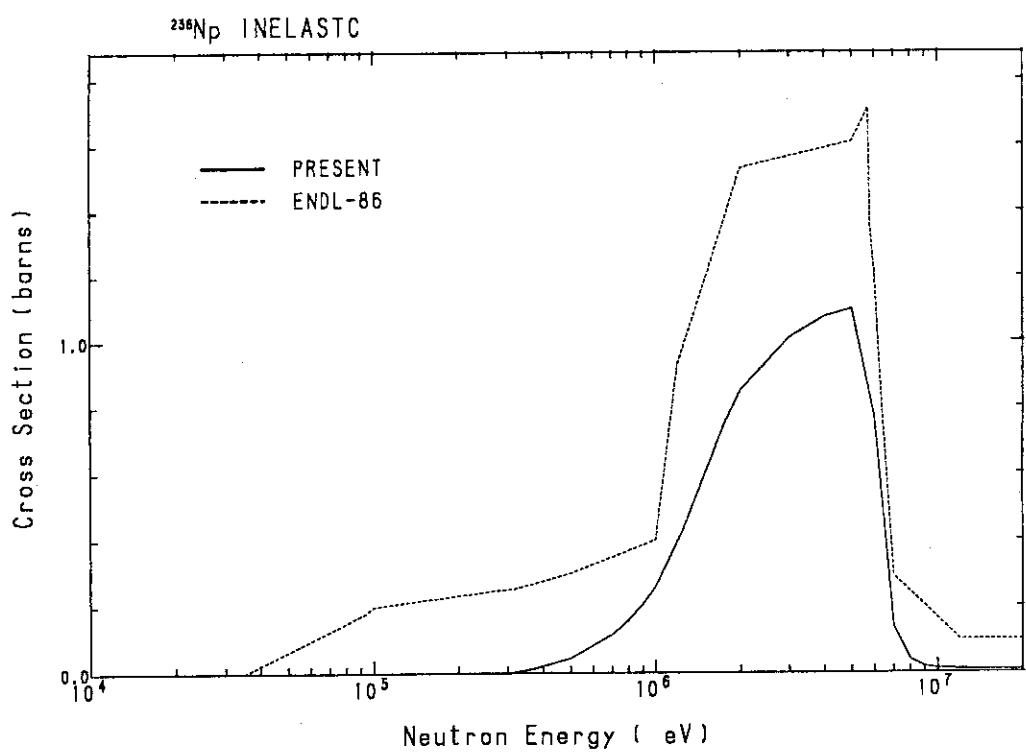


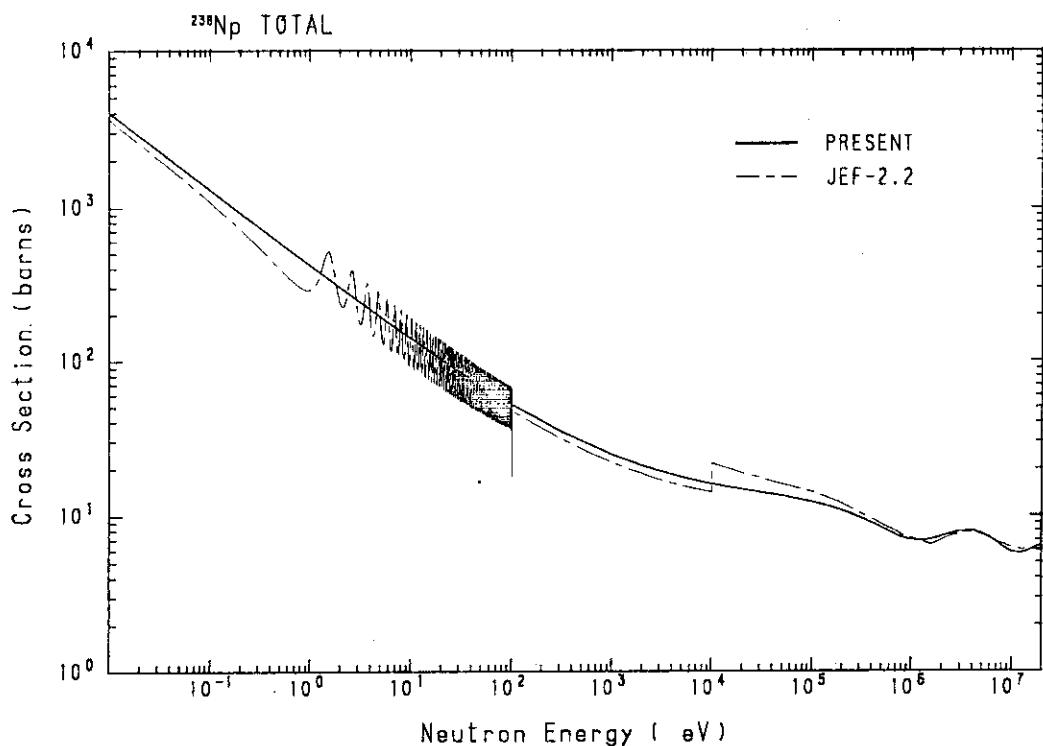
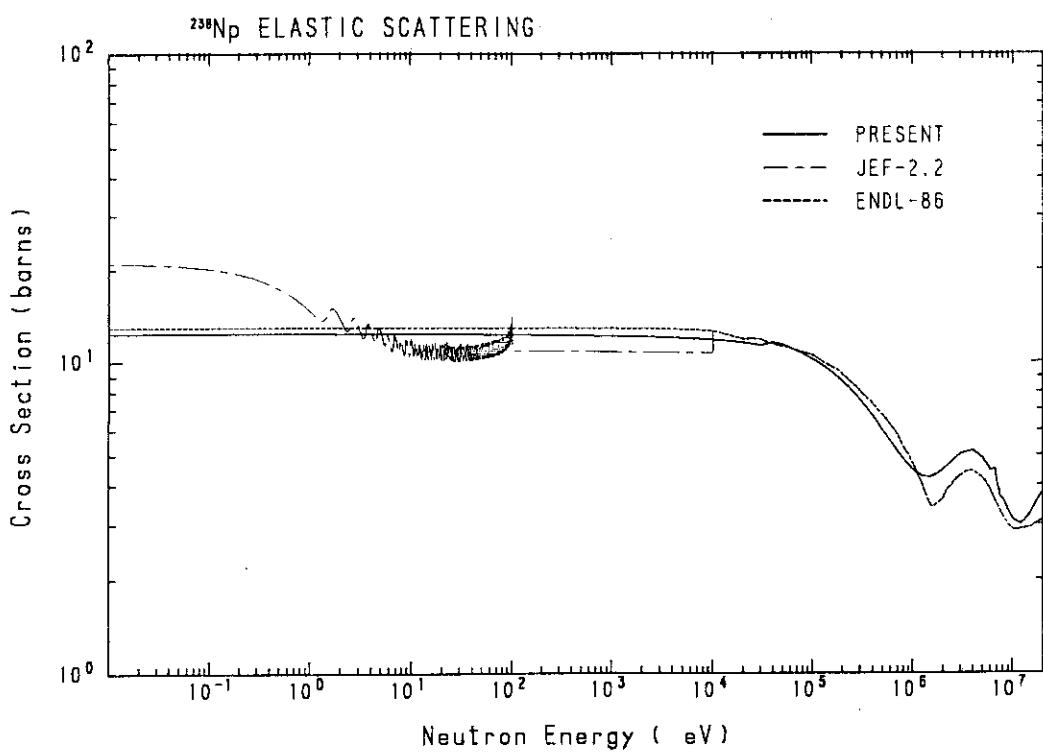
Fig. 3.9  $^{237}\text{U}$  capture cross section. Below 200 eV, average cross sections are shown.

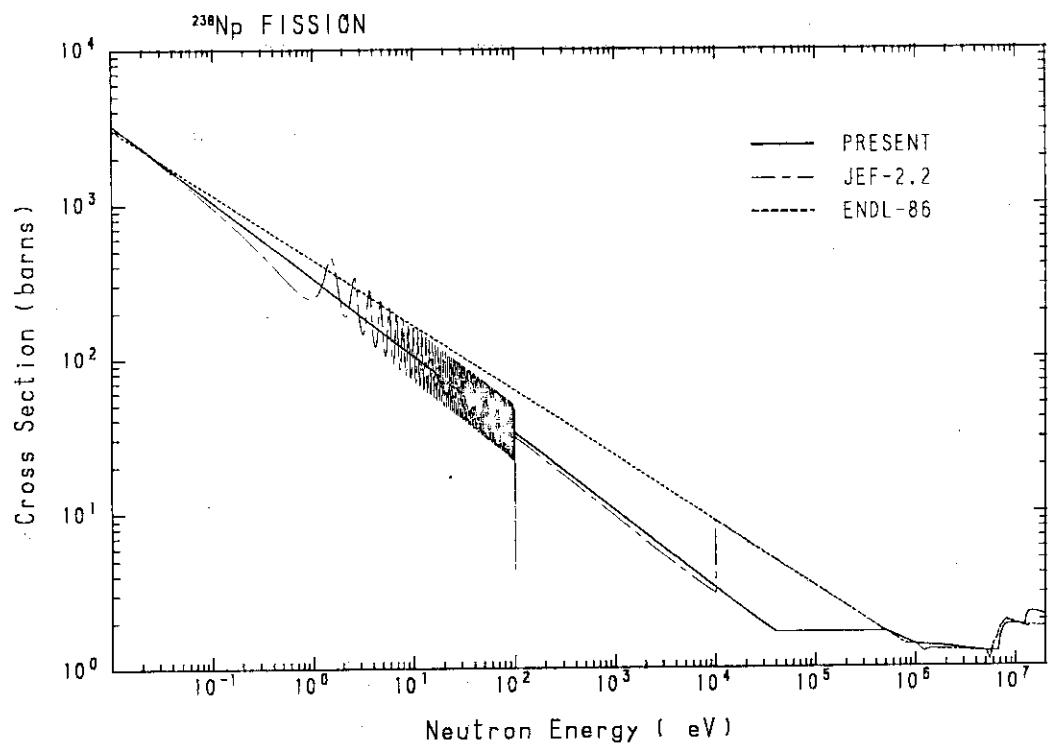
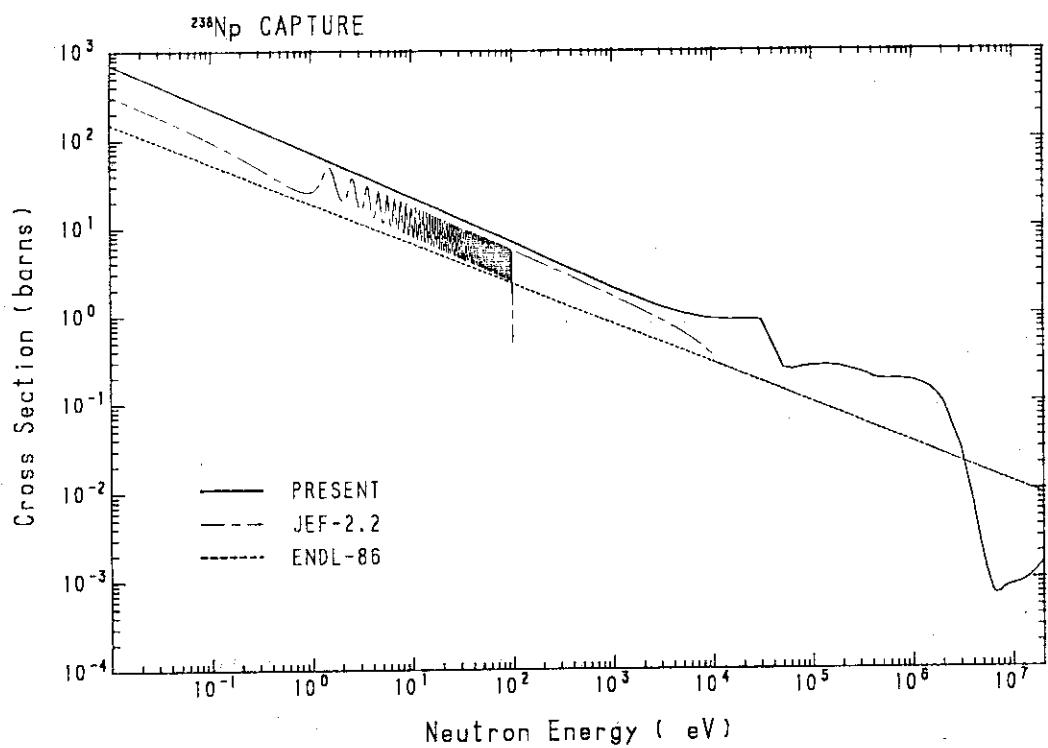
Fig. 3.10  $^{237}\text{U}$  inelastic scattering cross sectionFig. 4.1  $^{236}\text{Np}$  fission cross section

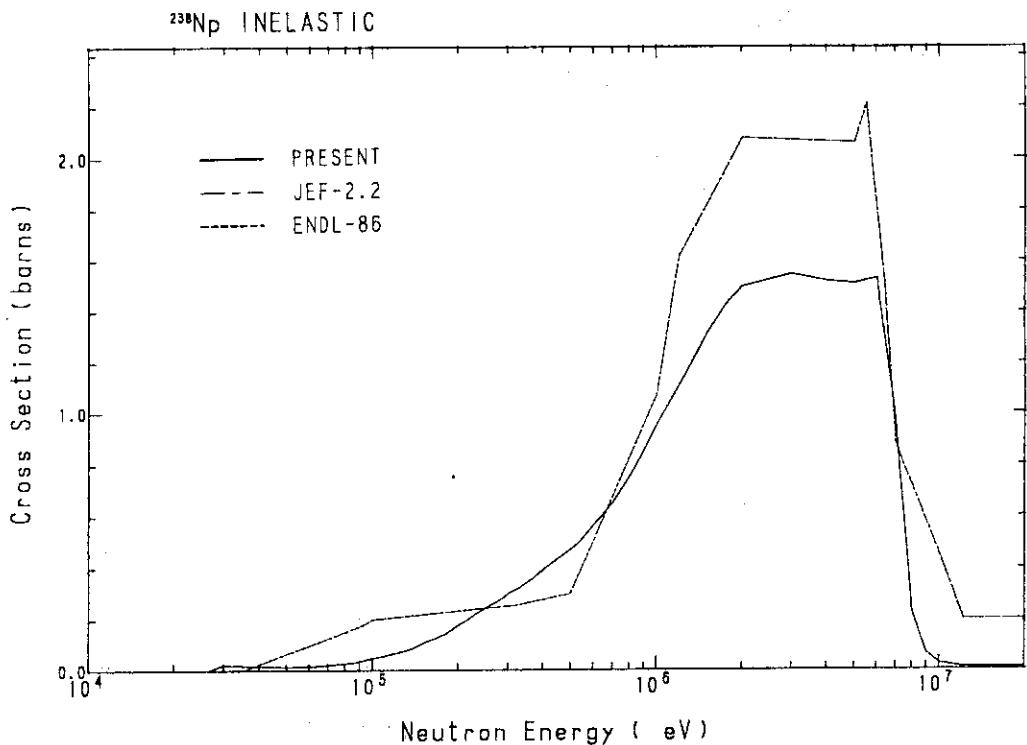
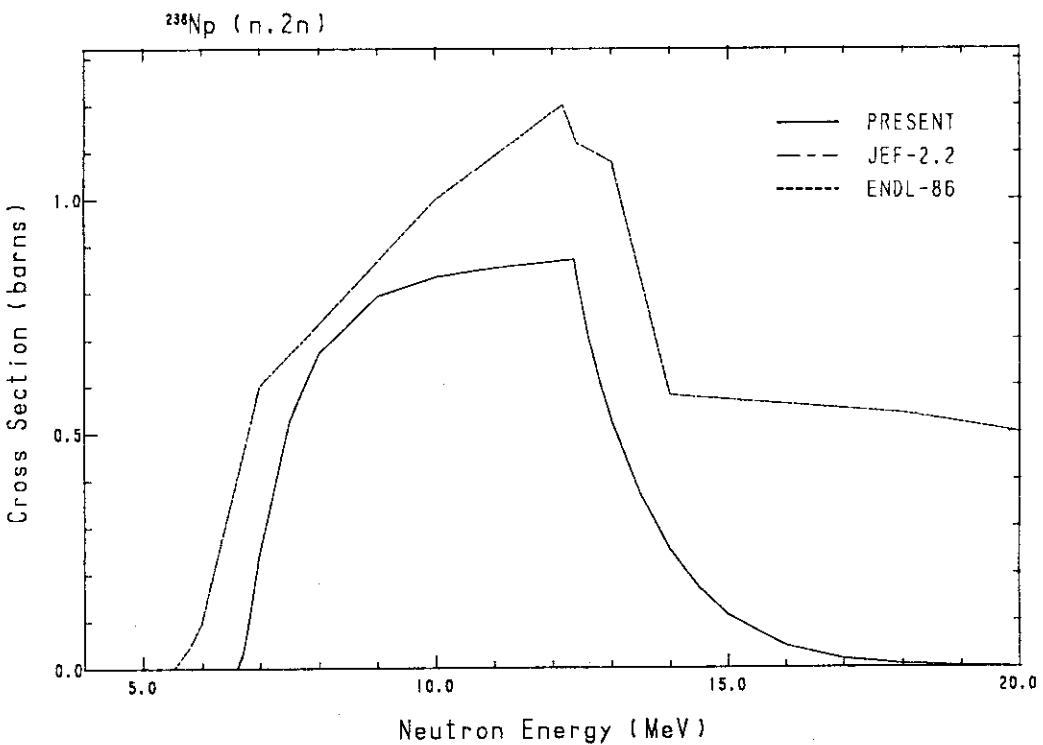
Fig. 4.2  $^{236}\text{Np}(n, 2n)$  reaction cross sectionFig. 4.3  $^{236}\text{Np}(n, 3n)$  reaction cross section

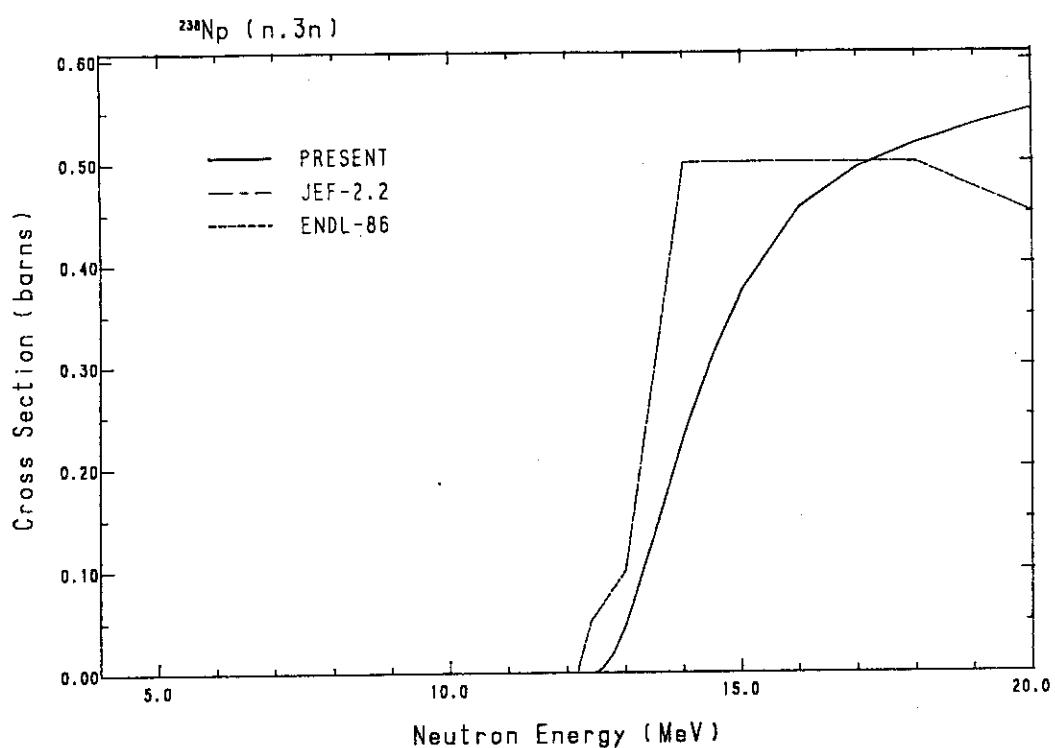
Fig. 4. 4  $^{236}\text{Np}$  total cross sectionFig. 4. 5  $^{236}\text{Np}$  elastic scattering cross section

Fig. 4. 6  $^{236}\text{Np}$  capture cross sectionFig. 4. 7  $^{236}\text{Np}$  inelastic scattering cross section

Fig. 5.1  $^{238}\text{Np}$  total cross sectionFig. 5.2  $^{238}\text{Np}$  elastic scattering cross section

Fig. 5.3  $^{238}\text{Np}$  fission cross sectionFig. 5.4  $^{238}\text{Np}$  capture cross section

Fig. 5.5  $^{238}\text{Np}$  inelastic scattering cross sectionFig. 5.6  $^{238}\text{Np}(n, 2n)$  reaction cross section

Fig. 5. 7  $^{238}\text{Np}(\text{n}, \bar{3}\text{n})$  reaction cross section