

JAERI-Research

95-043



JENDL-3の数種類の断面積に対する
共分散マトリックスの決定

1995年6月

中川庸雄・柴田恵一・千葉 敏・中島 豊

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

本レポートは、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。

入手の問合わせは、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、お申し越してください。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）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

JENDL-3の数種類の断面積に対する共分散マトリックスの決定

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

中川 庸雄・柴田 恵一・千葉 敏

中島 豊

(1995年5月16日受理)

評価済核データライブラリーJENDL-3.1およびJENDL-3.2に格納されている ^{14}N 弾性散乱断面積、 $^{14}\text{N}(n, p)$ 反応断面積、 ^{15}N 弾性散乱断面積、 ^{23}Na 非弾性散乱断面積、Fe非弾性散乱断面積、 ^{240}Pu 核分裂断面積の共分散マトリックスを推定した。それぞれの断面積データの評価手法と測定データを検討し、評価値の標準偏差(誤差)と相関マトリックスを推定し、各断面積に対して、18群構造の共分散マトリックスとして与えた。

Determination of Covariance Matrices
for Several Cross-section Data in JENDL-3

Tsuneo NAKAGAWA, Keiichi SHIBATA, Satoshi CHIBA and Yutaka NAKAJIMA

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

(Received May 16, 1995)

Covariance matrices were determined for the ^{14}N elastic scattering, $^{14}\text{N}(n,p)$ reaction, ^{15}N elastic scattering, ^{23}Na inelastic scattering, Fe inelastic scattering and ^{240}Pu fission cross sections stored in JENDL-3.1 and JENDL-3.2. By considering their evaluation method and experimental data, standard deviations and correlation matrices for these reaction data were determined in the 18 energy group structure.

Keywords: Covariance Matrices, Cross Section, JENDL-3

目 次

1. はじめに	1
2. 共分散の検討	2
2.1 ^{14}N 弾性散乱断面積の共分散	4
2.2 $^{14}\text{N}(n, p)$ 反応断面積の共分散	13
2.3 ^{15}N 弾性散乱断面積の共分散	19
2.4 ^{23}Na 非弾性散乱断面積の共分散	29
2.5 Fe非弾性散乱断面積の共分散	35
2.6 ^{240}Pu 核分裂断面積の共分散	44
3. まとめ	59
参考文献	60

Contents

1. Introduction	1
2. Determination of Covariance Matrices	2
2.1 Covariance of ^{14}N Elastic Scattering Cross Section	4
2.2 Covariance of $^{14}\text{N}(n, p)$ Reaction Cross Section	13
2.3 Covariance of ^{15}N Elastic Scattering Cross Section	19
2.4 Covariance of ^{23}Na Inelastic Scattering Cross Section	29
2.5 Covariance of Fe Inelastic Scattering Cross Section	35
2.6 Covariance of ^{240}Pu Fission Cross Section	44
3. Conclusion	59
References	60

1. はじめに

中性子入射反応断面積等に対する共分散データの重要性は最近ますます高まっている。日本の評価済核データライブラリー JENDL でも、かなり以前から共分散データを格納する試みがあったが、JENDL-3 でも評価値に共分散データを与えるに至っていない。最近、JENDL-3 を基に作成した JENDL Dosimetry File¹⁾ に共分散データを格納した。しかし、これは、IRDF-85 等の既存のデータファイルに格納されている共分散データを借用したもので、JENDL Dosimetry File 独自の共分散評価をしたわけではない。一方、動燃事業団と原電が行った JENDL-2 を基にした炉定数の調整作業で JENDL-2 の主要断面積に対する共分散データが必要になり、既存の評価値 (ENDF/B 等の諸外国の評価済データ) や測定値との比較から主要な断面積の誤差と相関マトリックスを推定した。²⁾ このときの経験から、共分散に関する情報が、調整結果に極めて敏感に影響を与えることが分かり、共分散データの重要性が改めて認識された。

JENDL の最新版 JENDL-3.2³⁾ は 1994 年 6月に完成したが、JENDL-3.2 にも共分散データは与えていない。共分散データの整備はさらに今後の課題として残されている。シグマ委員会では、そのため、「共分散評価ワーキンググループ」を編成し、5年度から共分散評価手法の本格的検討に乗り出した。この成果は、数年後に期待できる。

本報告書では、JENDL-3.1 と JENDL-3.2 に格納されている以下の断面積の共分散について検討する。これらのデータは、上記の炉定数調整作業の際に検討の対象としていなかったが、その後、必要が出てきたために共分散の検討を行うものである。

^{14}N 弾性散乱断面積

^{14}N (n,p) 反応断面積

^{15}N 弾性散乱断面積

^{23}Na 非弾性散乱断面積

Fe 非弾性散乱断面積

^{240}Pu 核分裂断面積

共分散の評価手法はシグマ委員会で検討中であり、まだ確立されていないので、JENDL-3 の評価手法や既存の測定値を比較検討して、これらの断面積の共分散を決定した。この方法は、客観性には欠けるが、共分散の第一次近似値としては十分使用に耐えられる。2章に上記6種類の断面積の共分散の具体的な決定方法及び検討結果を示す。

2. 共分散の検討

6種類の反応断面積の共分散は、それぞれのデータの評価手法、評価に利用した測定データとその誤差やばらつき等を参考にして推定した。ただし、それぞれの断面積で事情が異なるので、共分散決定の手法は統一していない。以下の節で、断面積毎に検討手法と結果を示す。

共分散は、マトリックスの対角成分（分散）の平方根である標準偏差と相関マトリックスとして示す。標準偏差は、以下では単に「誤差」と称し、「%」で与える。誤差及び相関マトリックスは中性子エネルギー 18 群の群平均断面積に対する値として与える。18 群のエネルギー構造を Table 2.1 に示す。今回の作業では、10 ~ 20 MeV を 1 群とした群を追加している。この群番号を 0 とする。

共分散の評価手法はシグマ委員会で検討中であり、まだ確立されていないので、JENDL-3 の評価手法や既存の測定値を比較検討して、これらの断面積の共分散を決定した。この方法は、客観性には欠けるが、共分散の第一次近似値としては十分使用に耐えられる。2章に上記6種類の断面積の共分散の具体的な決定方法及び検討結果を示す。

2. 共分散の検討

6種類の反応断面積の共分散は、それぞれのデータの評価手法、評価に利用した測定データとその誤差やばらつき等を参考にして推定した。ただし、それぞれの断面積で事情が異なるので、共分散決定の手法は統一していない。以下の節で、断面積毎に検討手法と結果を示す。

共分散は、マトリックスの対角成分（分散）の平方根である標準偏差と相関マトリックスとして示す。標準偏差は、以下では単に「誤差」と称し、「%」で与える。誤差及び相関マトリックスは中性子エネルギー 18 群の群平均断面積に対する値として与える。18 群のエネルギー構造を Table 2.1 に示す。今回の作業では、10 ~ 20 MeV を 1 群とした群を追加している。この群番号を 0 とする。

Table 2.1 18 energy group structure

No.	Upper boundary
0	20.0 MeV
1	10.0
2	6.065
3	3.679
4	2.231
5	1.353
6	820.9 keV
7	387.8
8	183.2
9	86.52
10	40.87
11	19.30
12	9.119
13	4.308
14	2.035
15	961.1 eV
16	454.0
17	214.5
18	101.3
Lowest energy	0.01 meV

2.1 ^{14}N 弾性散乱断面積の共分散

2.1.1 JENDL-3.1 の ^{14}N 弾性散乱断面積

JENDL-3.1の ^{14}N の弾性散乱断面積は、以下のように評価されている。

- 1 eV 以下 : 10.0 barns の一定値
- 1 eV 以上 : (全断面積) - (反応断面積の和)

まず、共分散行列の対角要素(分散)の評価について述べる。Fig. 2.1.1 と Fig.2.1.2 に JENDL-3.1 の評価値と誤差幅を示した。Fig. 2.1.1 からわかるように、1 eV 以下の値は、0.0253 eV での Rossel の測定値⁴⁾ に規格化したものと思われる。これ自体は 1947 年の古い測定であるが、Gibert⁵⁾、Fermi⁶⁾ の測定値がこの値の上下にあり、中心値としては比較的精度良くもとまっていると考えられる。Mughabghab et al.⁷⁾ は 10.05 ± 0.12 barns を推奨している。また、1 eV 以上の値とのつながりも比較的うまくいっている。今回は、測定値のばらつきから 5 % の標準偏差を与えることにした。そして、1.353 MeV まで、5 % であると仮定した。一方、数 MeV 以上では、Fig. 2.1.2 より明らかなように、JENDL-3.1 の値は測定値に比べて一様に 30 % 程度過小評価になっている。従って、6.065 MeV 以上では 30 % の誤差があるものとした。1.353 MeV から 6.065 MeV の間は、10 % ~ 30 % の標準偏差が滑らかにつながるようにした。

非対角要素の評価では、接近する群間には比較的強い相関があるとして、自群からはじめて、100 %、50 %、20 %、10 %、5 % と順次相関が弱まると仮定した。さらに、これより遠い群とも 2 % の相関があると仮定した。弾性散乱断面積は、通常水素の弾性散乱に相対的に測定されるが、水素の断面積自体にかなり強い相関がある (effective range theory によるフィッティングや Phase-shift analysis) ので、エネルギーの離れた測定値にもこの程度の相関が残ると仮定したものである。ただし、6.065 MeV 以上では、測定値より一様に 30 % 小さい事実を考慮し、80 ~ 90 % の強い相関を与えた。Table 2.1.1 と Fig. 2.1.3 に相関マトリックスを示す。

2.1.2 JENDL-3.2 の ^{14}N 弾性散乱断面積

JENDL-3.1 の積分テストの結果、JENDL-3.1 の全断面積は 5 ~ 10 MeV で小さすぎるものが指摘された。また、JENDL-3.1 のデータは 14 MeV 付近の中性子入射反応の二重微分断面積の測定値をうまく再現しない。これらの問題点を解決するために再評価が行われた。

JENDL-3.1 で全断面積を過小評価していたのはデータ編集の誤りであることがわかり、全断面積の測定値を良く再現するよう修正された。また、二重微分断面積の問題は、仮想的な励起レベルを 20 MeV 付近まで考慮する事により、非弾性散乱断面積を修正し解決した。このときに、5 MeV 以上の弾性散乱断面積も測定データに極めて良く一致するように改良が施された。

従って、JENDL-3.1 で測定値と系統的な差があり誤差が大きいとした 6 MeV 以上にはもはや 30 % の誤差は無い。JENDL-3.2 の評価値は、10 MeV 以下では Perey et al.⁸⁾ のデータのばらつき内にあり、そのばらつきは 15 % 程度なので、誤差を 15 % とした。10 MeV 以上では、測定値のばらつきも小さく、JENDL-3.2 と測定値との一致も極めて良い。この領域で報告されている測定値^{9~12)}の誤差は 3 ~ 7 % である。今回は、10 MeV 以上では JENDL-3.2 の誤差は 6 % と仮定した。JENDL-3.2 と測定値の比較を Fig. 2.1.4 に示す。相関マトリックスについては、6 MeV 以上で強い相関を与える必要は無くなったので低エネルギー領域と同様の相関とした。Table 2.1.2 と Fig. 2.1.5 に誤差と相関マトリックスを示す。

Table 2.1.1 Covariance of ¹⁴N elastic scattering cross section (JENDL-3.1)

群 誤差(%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
30	30		20	15	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		
100	100																					
90	90	100																				
80	80	100	100																			
10	10	20	50	100																		
5	5	10	20	50	100																	
2	2	5	10	20	50	100																
2	2	2	5	10	20	50	100															
2	2	2	2	5	10	20	50	100														
2	2	2	2	2	5	10	20	50	100													
2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100												
2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100											
2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100										
2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100									
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100								
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100							
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100						
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100					
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100				
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100			
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100		
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100

Table 2.1.2 Covariance of ¹⁴N elastic scattering cross section (JENDL-3.2)

群 誤差(%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
0	100																				
1	50	100																			
2	20	50	100																		
3	10	20	50	100																	
4	5	10	20	50	100																
5	2	5	10	20	50	100															
6	2	2	5	10	20	50	100														
7	2	2	2	5	10	20	50	100													
8	2	2	2	2	5	10	20	50	100												
9	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100											
10	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100										
11	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100									
12	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100								
13	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100							
14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100						
15	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100					
16	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100				
17	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100			
18	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	10	20	50	100		

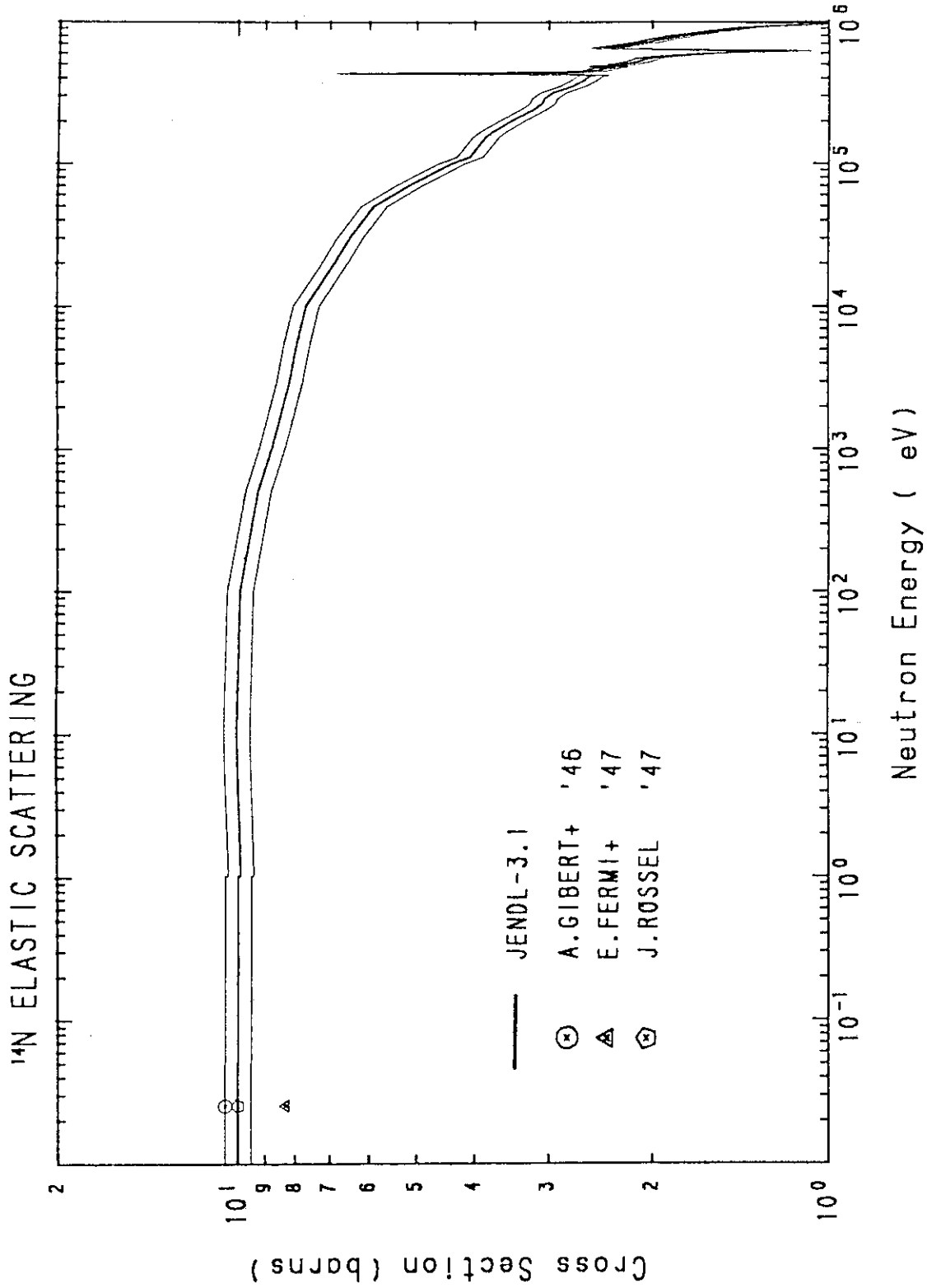


Fig. 2.1.1.1 ¹⁴N elastic scattering cross section (10⁻² eV ~ 1 MeV)

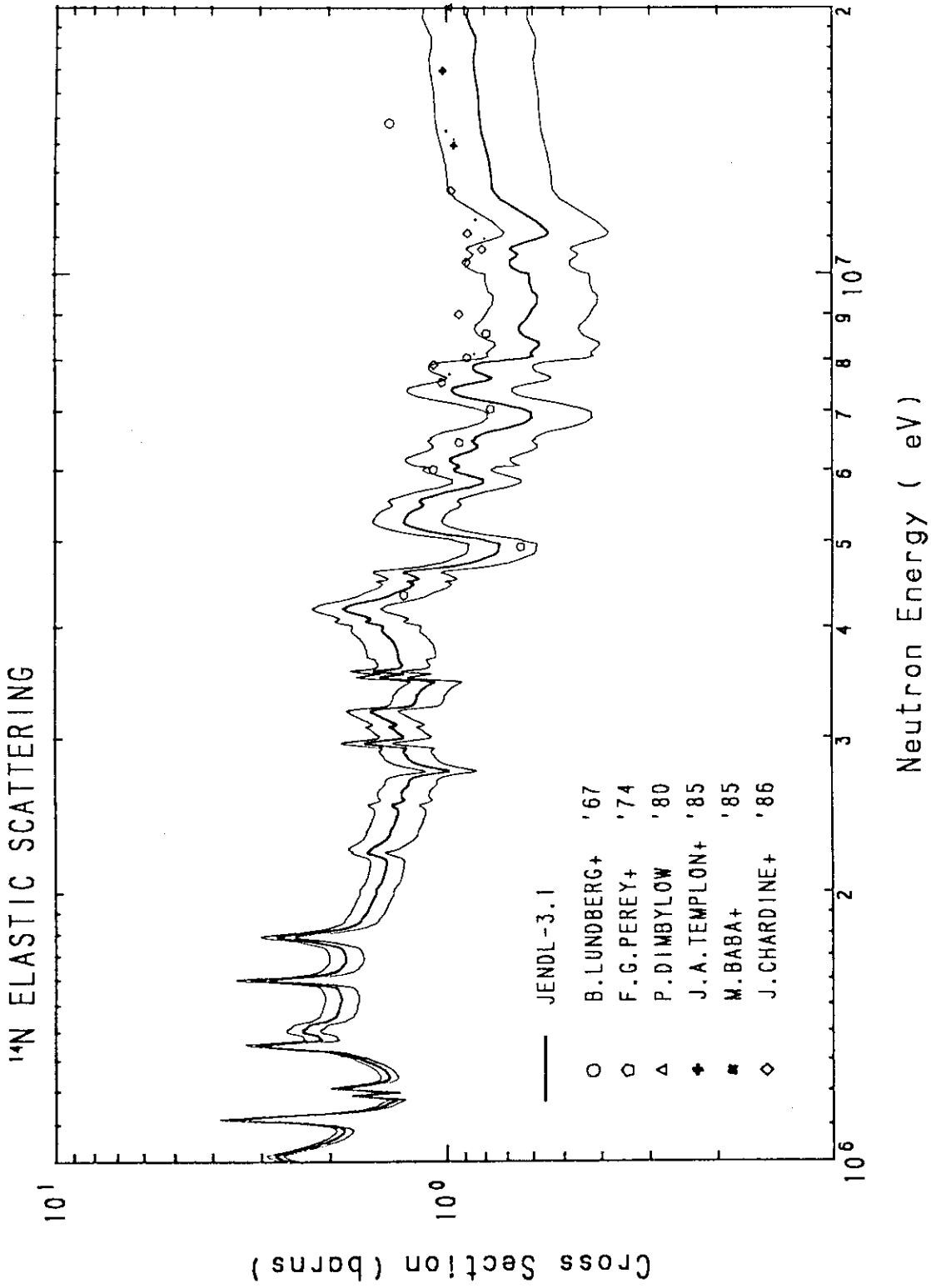


Fig. 2.1.2 ¹⁴N elastic scattering cross section (JENDL-3.1, above 1 MeV)

Correlation Matrix

N-14 elastic scattering(JENDL-3.1)

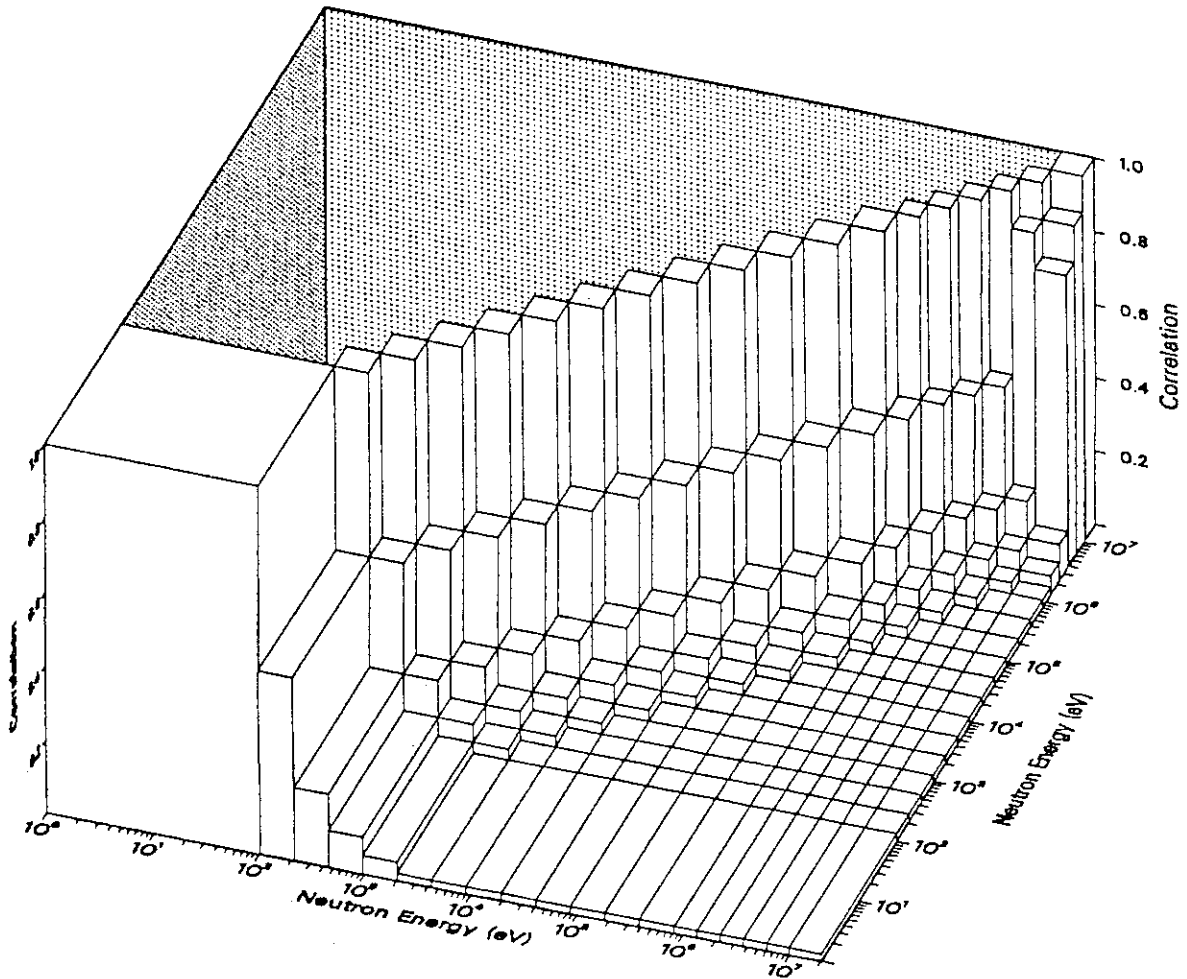


Fig. 2.1.3 Correlation matrix of ¹⁴N elastic scattering cross section (JENDL-3.1)

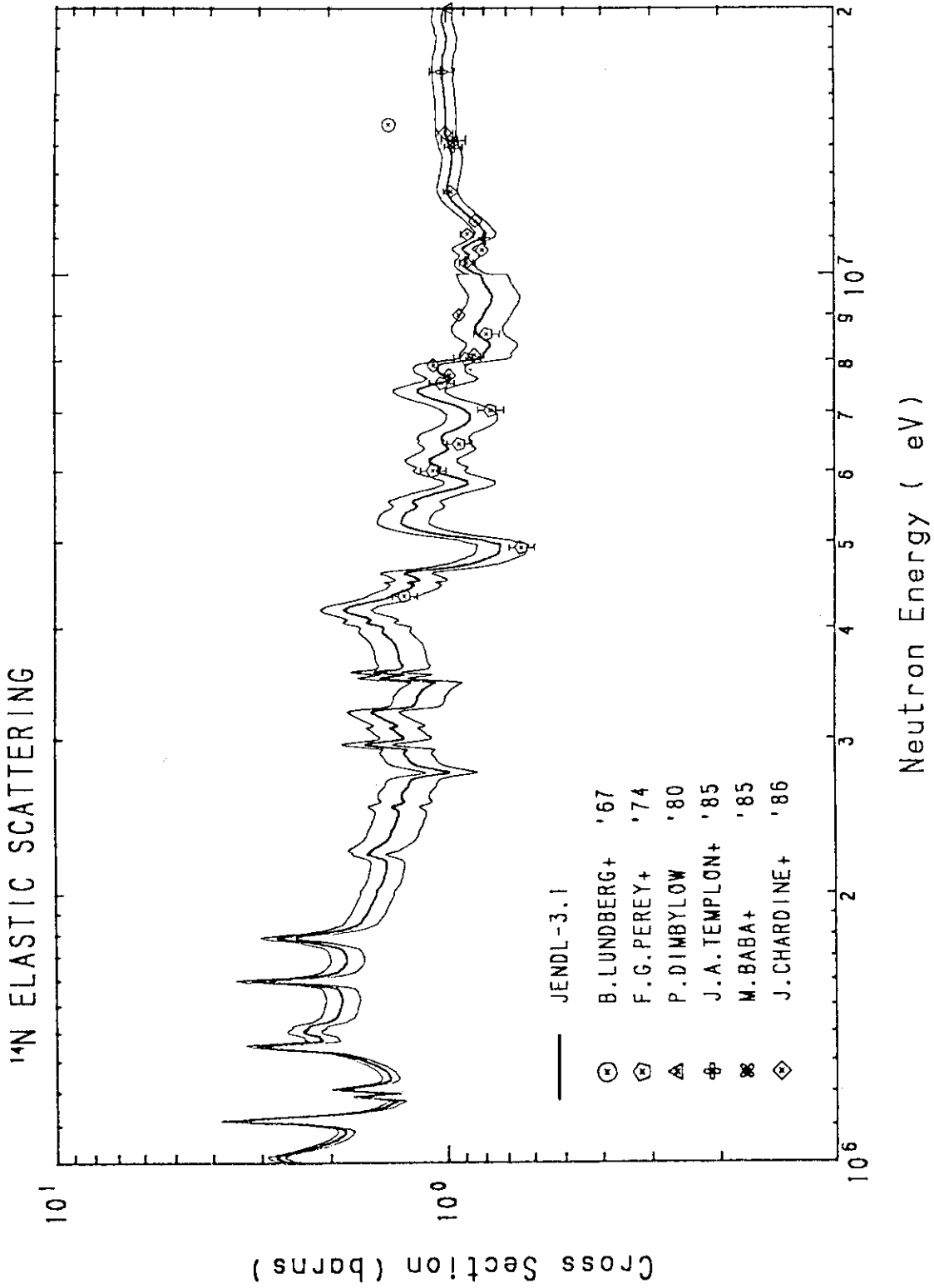


Fig. 2.1.4 ¹⁴N elastic scattering cross section (JENDL-3.2, above 1 MeV)

Correlation Matrix

N-14 elastic scattering(JENDL-3.2)

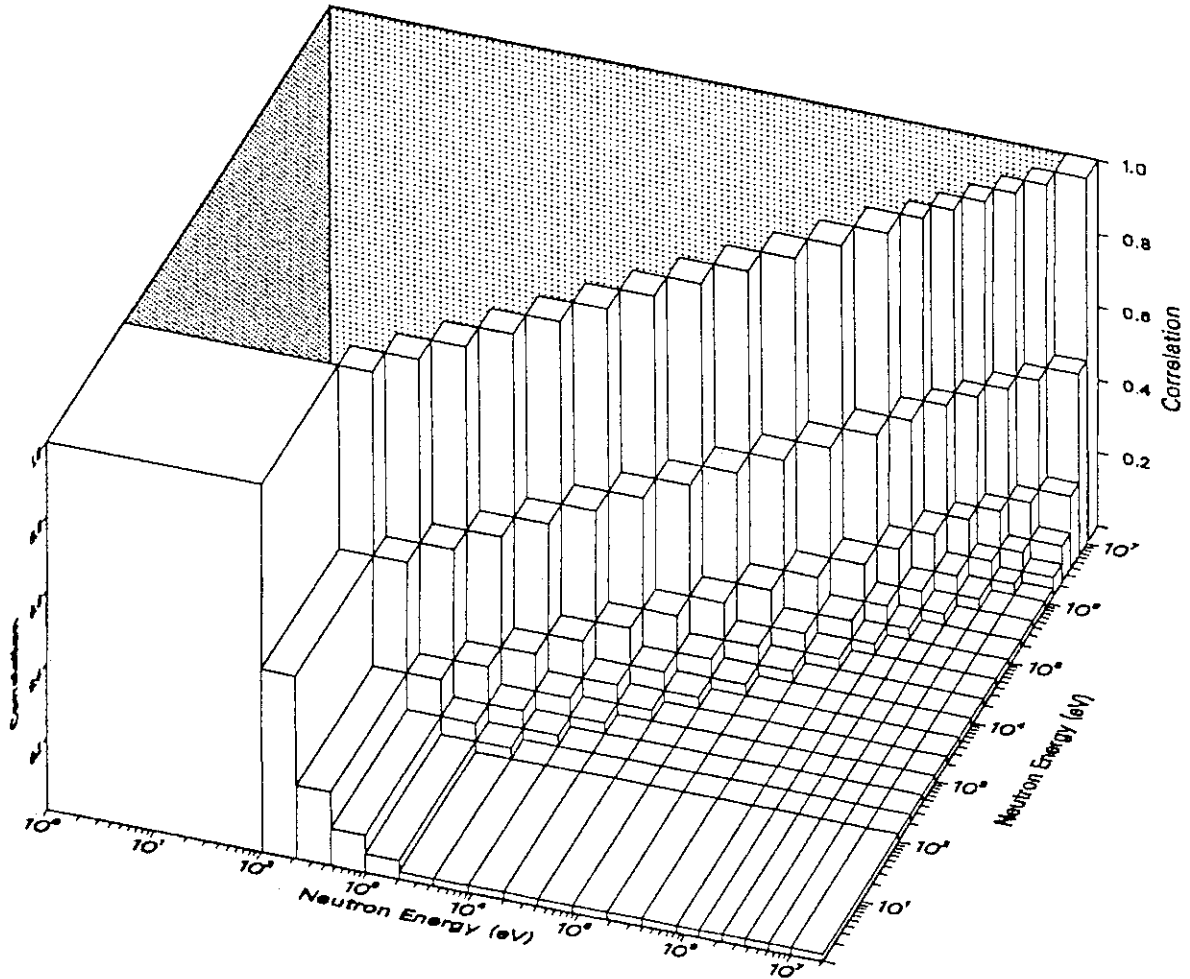


Fig. 2.1.5 Correlation matrix of ¹⁴N elastic scattering cross section (JENDL-3.2)

2.2 $^{14}\text{N}(n,p)$ 反応断面積の共分散

JENDL-3.1 の $^{14}\text{N}(n,p)$ 反応断面積は、7 MeV 以下では測定データに基づいて、それ以上では GNASH¹³⁾ による理論計算の結果を基にして評価された。測定データとの比較を行うと、100 keV 程度以下のエネルギー領域では、最新の Koehler and O'brien¹⁴⁾ の測定値（評価には用いられていない）と非常に良く一致していることがわかる（Fig. 2.2.1）。従って、203.5 keV まで 2 % の標準偏差を与えた。次に 7 MeV 以上では、GNASH の計算値を採用しているが、測定値との差が大きいため、6.065 ~ 10 MeV の群に 20 %、10 ~ 20 MeV の群に 25 % の誤差を与えることにした。また、203 keV から 7 MeV までは、評価の基になった測定値のうち、特に新しい測定である Morgan¹⁵⁾ の値とのばらつきを考慮して標準偏差を与えた。結果を Fig. 2.2.1 と 2.2.2 に JENDL-3.1 の誤差幅として示した。

共分散の非対角要素を検討するに当たっては、この反応が低エネルギーで $1/\nu$ 型の振る舞いをしていることに注目する必要がある。中性子実験では完全に単色の中性子を得ることができず、常に低エネルギーのバックグラウンド中性子を伴っていることを考慮すると、エネルギー間の相関が比較的強いものと思われるので、最低の相関を 5 % と仮定した。また、陽子を直接計る場合でも、 ^{14}C の β 線を計測する場合でも、規格化その他の系統的誤差が弾性散乱の測定に比べて大きくなる可能性が高い（薄いサンプルを用いる必要がある）ので、隣合う群間の相関も弾性散乱より強いと仮定し、自群からはじめて、100 %、80 %、60 %、40 %、20 %、10 % と順次減少させていった。今回決定した誤差と相関マトリックスを Table 2.2.1 と Fig. 2.2.3 に示す。

JENDL-3.2 では、7 MeV 以上のデータを Anderson and Wong⁴²⁾ のデータを再現するように eye-guide で修正した。しかし、Anderson and Wong のデータのばらつきが大きいため、誤差は JENDL-3.1 と同じと仮定する。Fig. 2.2.4 に JENDL-3.2 のデータを誤差幅をつけて示した。

Table 2.2.1 Covariance of ^{14}N (n,p) cross section (JENDL-3.1, JENDL3.2)

群 誤差(%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
25	20	15	10	10	10	8	5	5	5	5	5	5	5	3	2	2	2	2	2
100																			
80	100																		
60	80	100																	
40	60	80	100																
20	40	60	80	100															
10	20	40	60	80	100														
5	10	20	40	60	80	100													
5	5	10	20	40	60	80	100												
5	5	5	10	20	40	60	80	100											
5	5	5	5	10	20	40	60	80	100										
5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100									
5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100								
5	5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100							
5	5	5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100						
5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100					
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100				
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100			
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100		
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100	
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	20	40	60	80	100

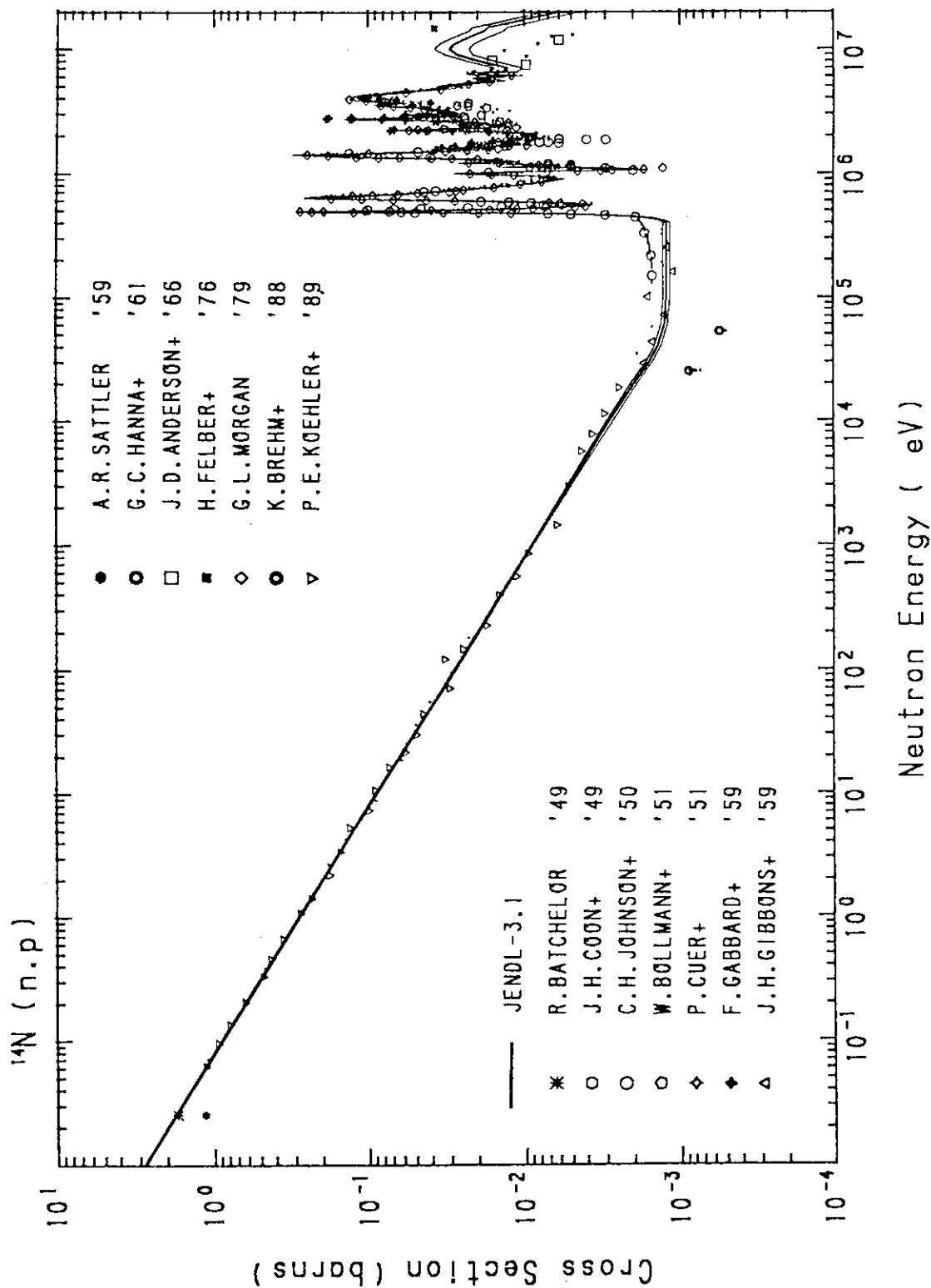


Fig. 2.2.1 $^{14}\text{N} (n,p)$ reaction cross section

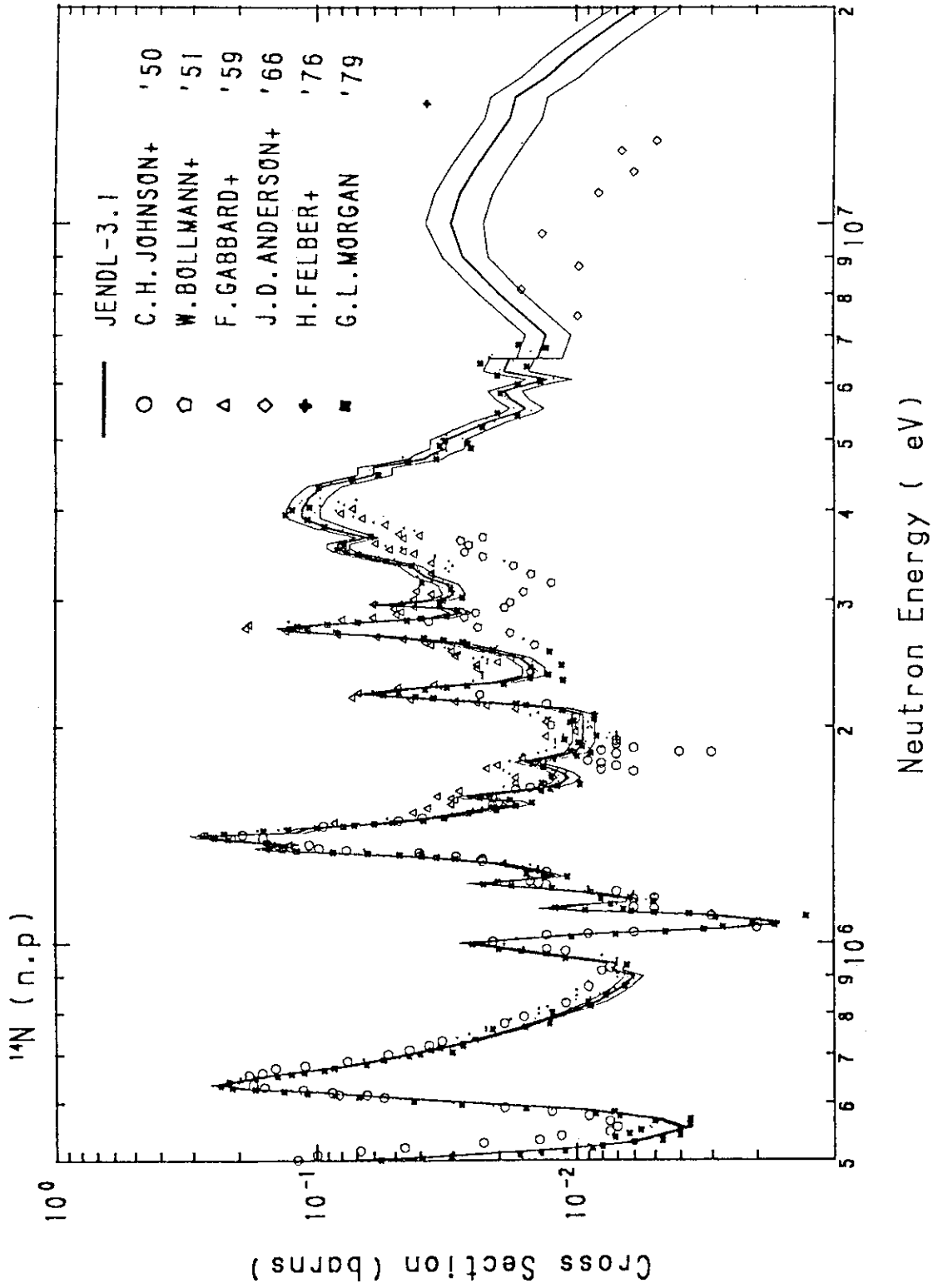


Fig. 2.2.2 ^{14}N (n,p) reaction cross section (above 500 keV)

Correlation Matrix N-14 N,P

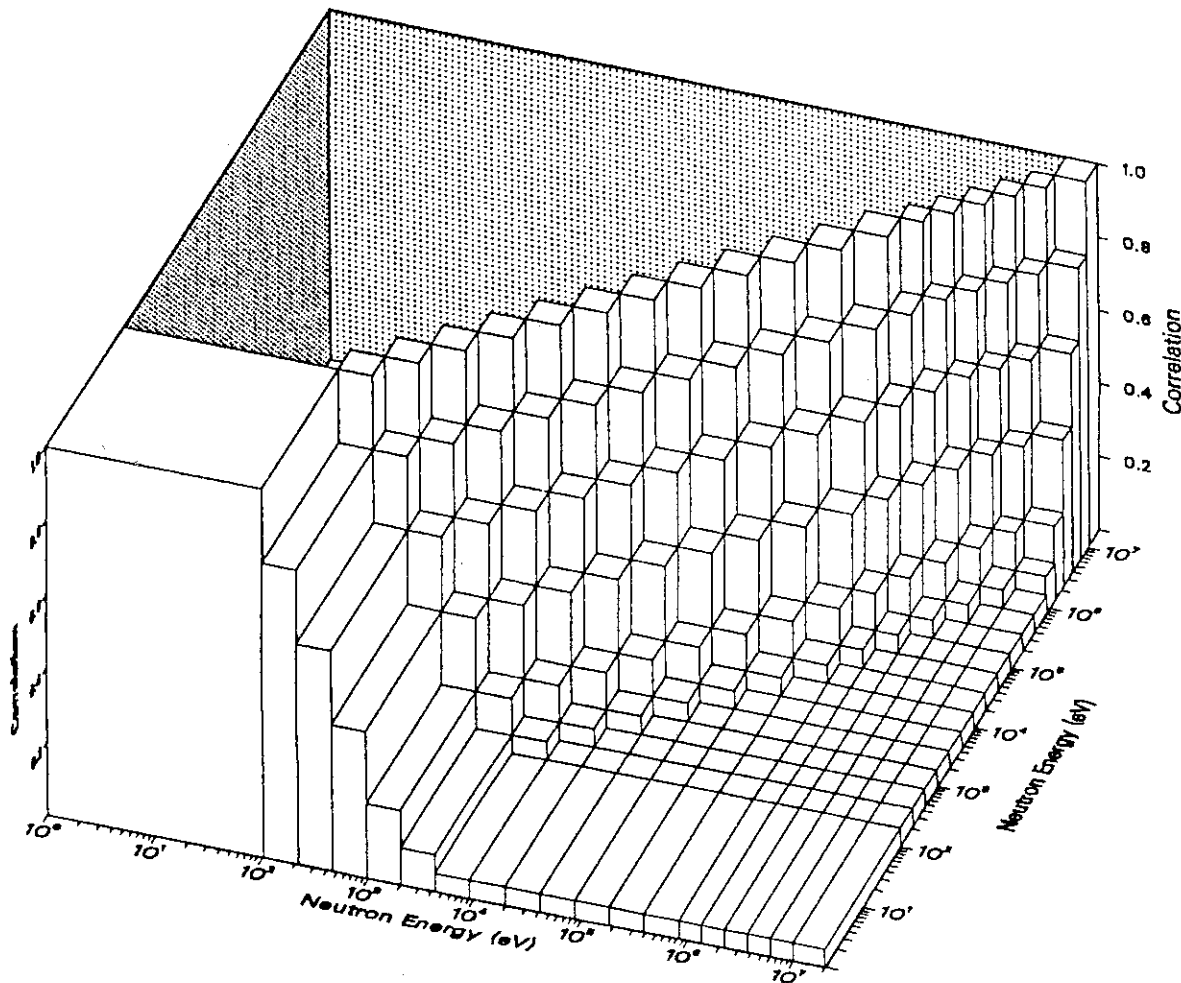


Fig. 2.2.3 Correlation matrix of $^{14}\text{N}(n,p)$ reaction cross section

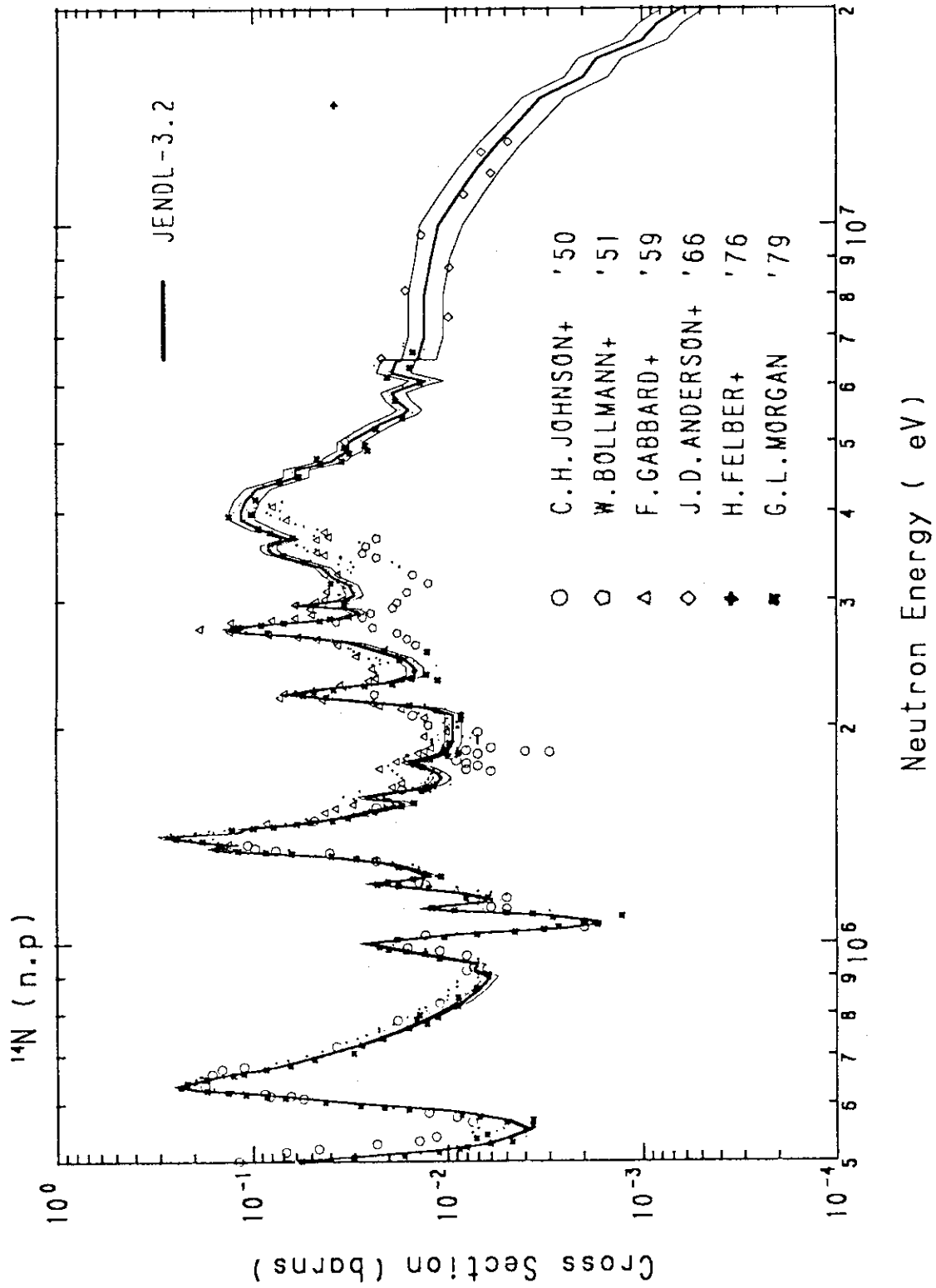


Fig. 2.2.4 ^{14}N (n,p) reaction cross section

2.3 ^{15}N 弾性散乱断面積の共分散

JENDL-3.2 に格納されている ^{15}N の弾性散乱断面積¹⁶⁾ は、JENDL-3.1 と同じデータであり、全断面積と弾性散乱外断面積（弾性散乱断面積以外の反応断面積の和）の差として求められた。従って、弾性散乱断面積の共分散行列は、全断面積と弾性散乱外断面積の共分散行列の和として与えられる。但し、6 MeV 以下では弾性散乱外断面積は全断面積の 1 % 以下の値であるので、この領域では全断面積の共分散が弾性散乱断面積の共分散に等しいとにおいて良さそうである。

反応断面積は実験値がほとんどないので、統計模型による理論計算により評価された。従って、その和である弾性散乱外断面積も全く理論計算により求められたことになる。理論計算の誤差（標準偏差）は ORNL の Hetrick et al. の経験則¹⁷⁾ により決定した。Table 2.3.1 に彼等が計算値に与えた誤差を示す。この経験則に従うと 6 MeV 以上で弾性散乱外断面積の標準偏差は 10 % となる。

一方、全断面積は 900 keV 以上では Zeitnitz et al.¹⁸⁾（一律 4 % の誤差が与えられている）の測定値を基に評価されている。900 keV 以下は 0.0253 eV で Mughabghab et al.⁷⁾ の推奨値があるのみで、評価値はその値を通るように共鳴パラメータが決められている。そこで誤差としては、900 keV 以下は ORNL の経験則より 10 % とし、それ以上のエネルギーでは Zeitnitz et al.¹⁸⁾、Sikkema¹⁹⁾、Fossan et al.^{20,21)} の実験値と評価値のずれで与えると以下のようなになる。

群	エネルギー範囲	誤差	誤差の推定方法
18~6	0.01 meV ~ 820.9 keV	10%	ORNL の経験則
5	820.9 keV ~ 1.353 MeV	4%	Zeitnitz et al. ¹⁸⁾ 、Fossan et al. ²¹⁾ の測定値のばらつきから推定した。
4	1.353 MeV ~ 2.231 MeV	4%	Zeitnitz et al. ¹⁸⁾ 、Fossan et al. ²⁰⁾ 、Sikkema ¹⁹⁾ の測定値のばらつきから推定した。
3	2.231 MeV ~ 3.679 MeV	3%	Zeitnitz et al. ¹⁸⁾ 、Fossan et al. ²¹⁾ 、Sikkema ¹⁹⁾ の測定値のばらつきから推定した。

2	3.679 MeV ~ 6.065 MeV	4%	Zeitnitz et al. ¹⁸⁾ 、Fossan et al. ²¹⁾ の測定値のばらつきから推定した。
1	6.065 MeV ~ 10.0 MeV	2%	Zeitnitz et al. ¹⁸⁾ の測定値のばらつきから推定した。
0	10.0 MeV ~ 20.0 MeV	1%	Zeitnitz et al. ¹⁸⁾ の測定値のばらつきから推定した。

400 keV ~ 20 MeV の領域での全断面積の測定値と JENDL-3.1 の比較を Fig. 2.3.1 に示す。図には上記の誤差幅も示した。

以上の全断面積の誤差と弾性散乱外断面積の 6 MeV 以上の誤差から、弾性散乱断面積の誤差が以下のように求められた。

群	エネルギー範囲	誤差
18~6	820.9 keV 以下	10%
5	820.9 keV ~ 1.353 MeV	4%
4	1.353 MeV ~ 2.231 MeV	4%
3	2.231 MeV ~ 3.679 MeV	3%
2	3.679 MeV ~ 6.065 MeV	4%
1	6.065 MeV ~ 10.0 MeV	5%
0	10.0 MeV ~ 20.0 MeV	7%

Fig. 2.3.2 に断面積と誤差を示す。測定値が 1 MeV 付近にあり、誤差幅から大きくはみ出しているが、古い測定であり、JENDL-3.1 の評価では考慮に入れていないので、上記の誤差に問題は無いものとする。

相関マトリックスは Nakagawa and Kikuchi²⁾ の推定基準に従い作成した。即ち、820 keV 以下の基本的に理論計算により評価値が決定された領域は、比較的遠方まで相関があると想定できるので緩やかに減少する相関を与えた。820 keV 以上の測定値から評価値を求めた領域は、測定誤差の約半分は統計誤差であるので遠い群との強い相関は考えなかった。Table 2.3.2 と Fig. 2.3.3 に得られた誤差と相関マトリックスを示す。

Table 2.3.1 Hetrick et al.¹⁷⁾により与えられた計算値の誤差

断面積 X (m b)	標準偏差 (%)
$500 < X$	10
$100 < X < 500$	15
$30 < X < 100$	20
$X < 30$	≥ 30

Table 2.3.2 Covariance of ¹⁵N elastic scattering cross section (JENDL-3.1,-3.2)

群	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
誤差(%)	7.0	5.0	4.0	3.0	4.0	4.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	
0	100																			
1	70	100																		
2	30	50	100																	
3	10	30	50	100																
4	0	10	30	50	100															
5	0	0	10	30	50	100														
6	0	0	0	0	0	0	100													
7	0	0	0	0	0	0	70	100												
8	0	0	0	0	0	0	60	70	100											
9	0	0	0	0	0	0	50	60	70	100										
10	0	0	0	0	0	0	40	50	60	70	100									
11	0	0	0	0	0	0	30	40	50	60	70	100								
12	0	0	0	0	0	0	20	30	40	50	60	70	100							
13	0	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	100						
14	0	0	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	100					
15	0	0	0	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	100				
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	100			
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	100		
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	100	

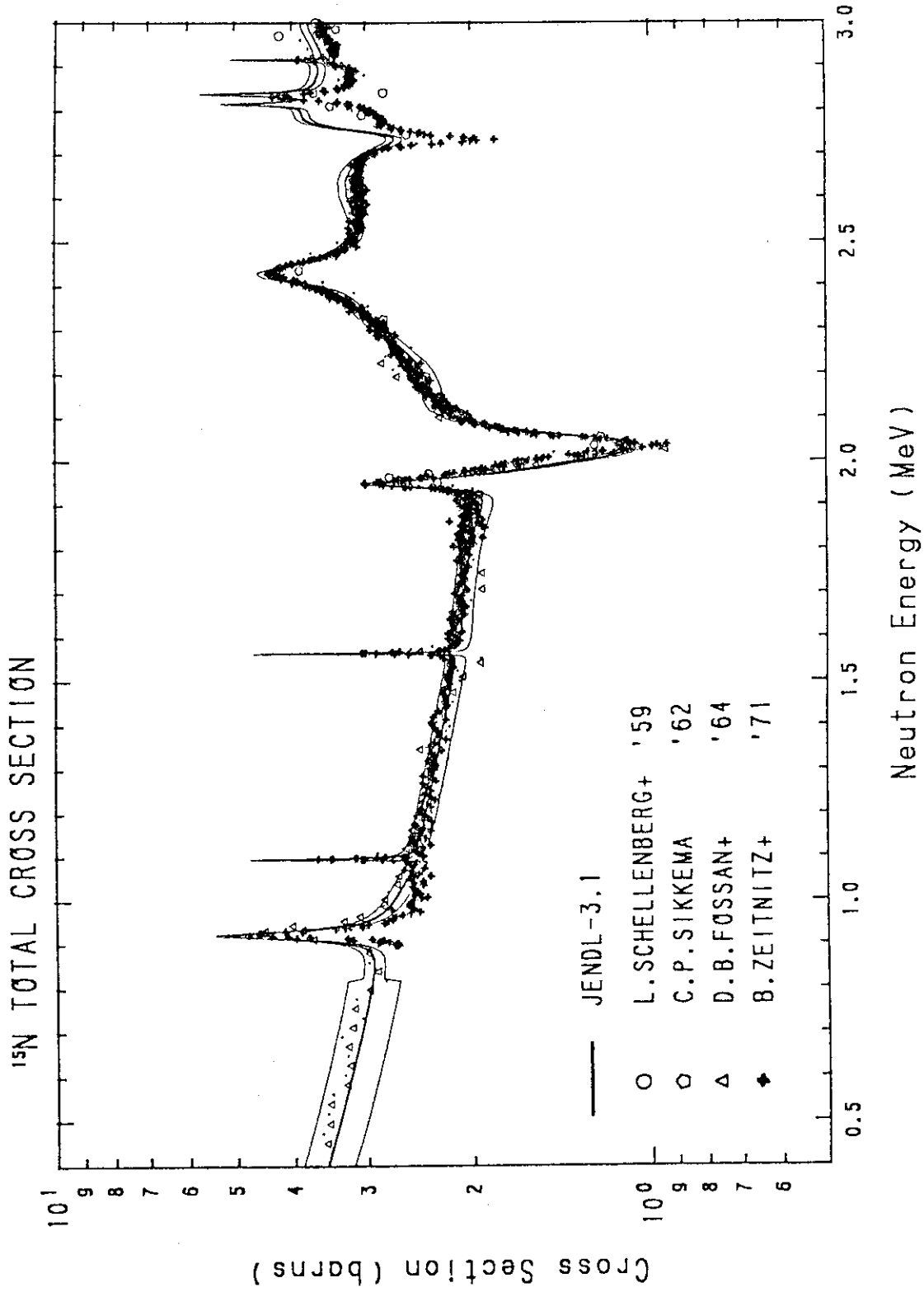


Fig. 2.3.1(a) ¹⁵N total cross section (400 keV to 3 MeV)

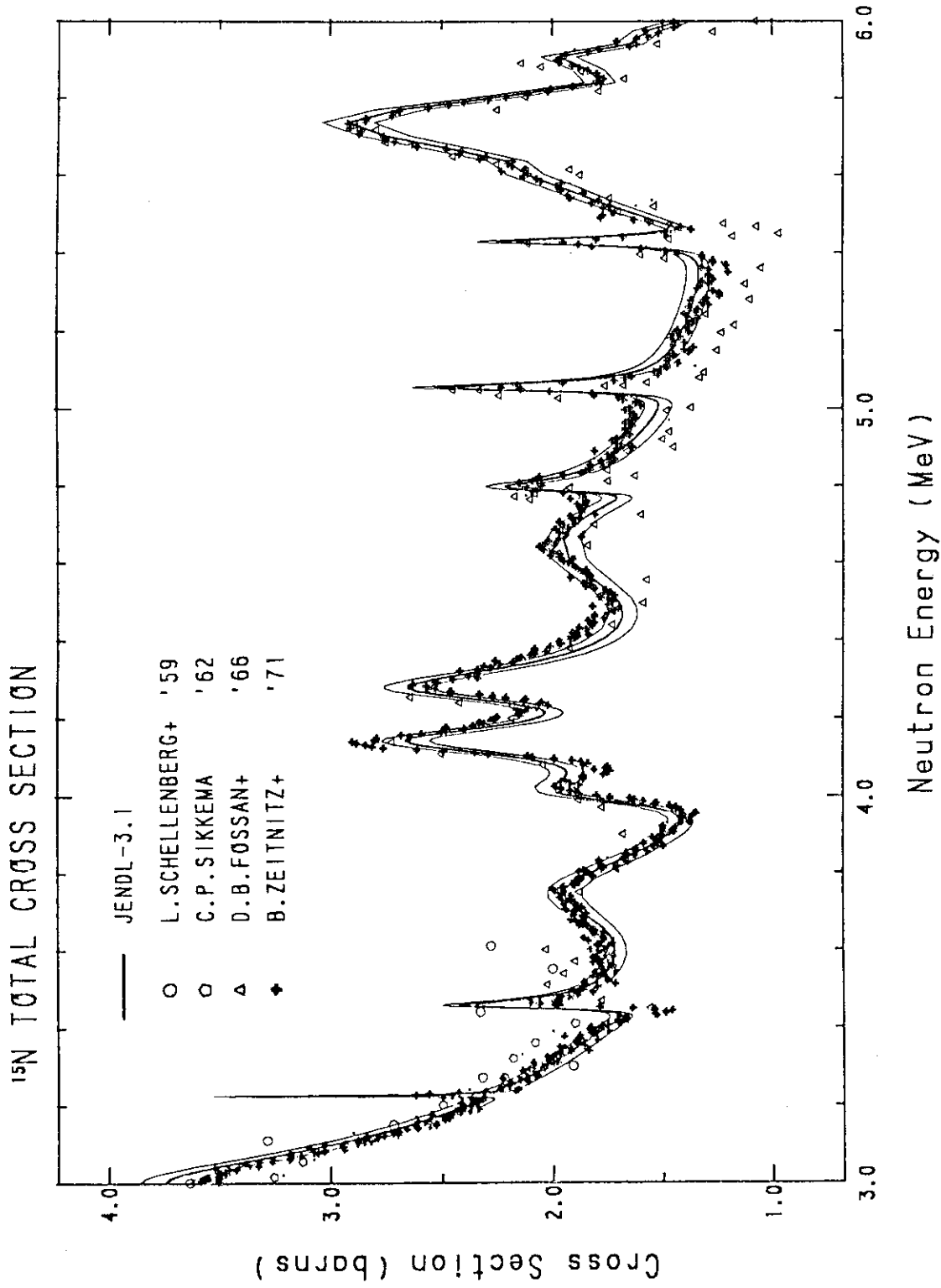


Fig. 2.3.1(b) ¹⁵N total cross section (3 to 6 MeV)

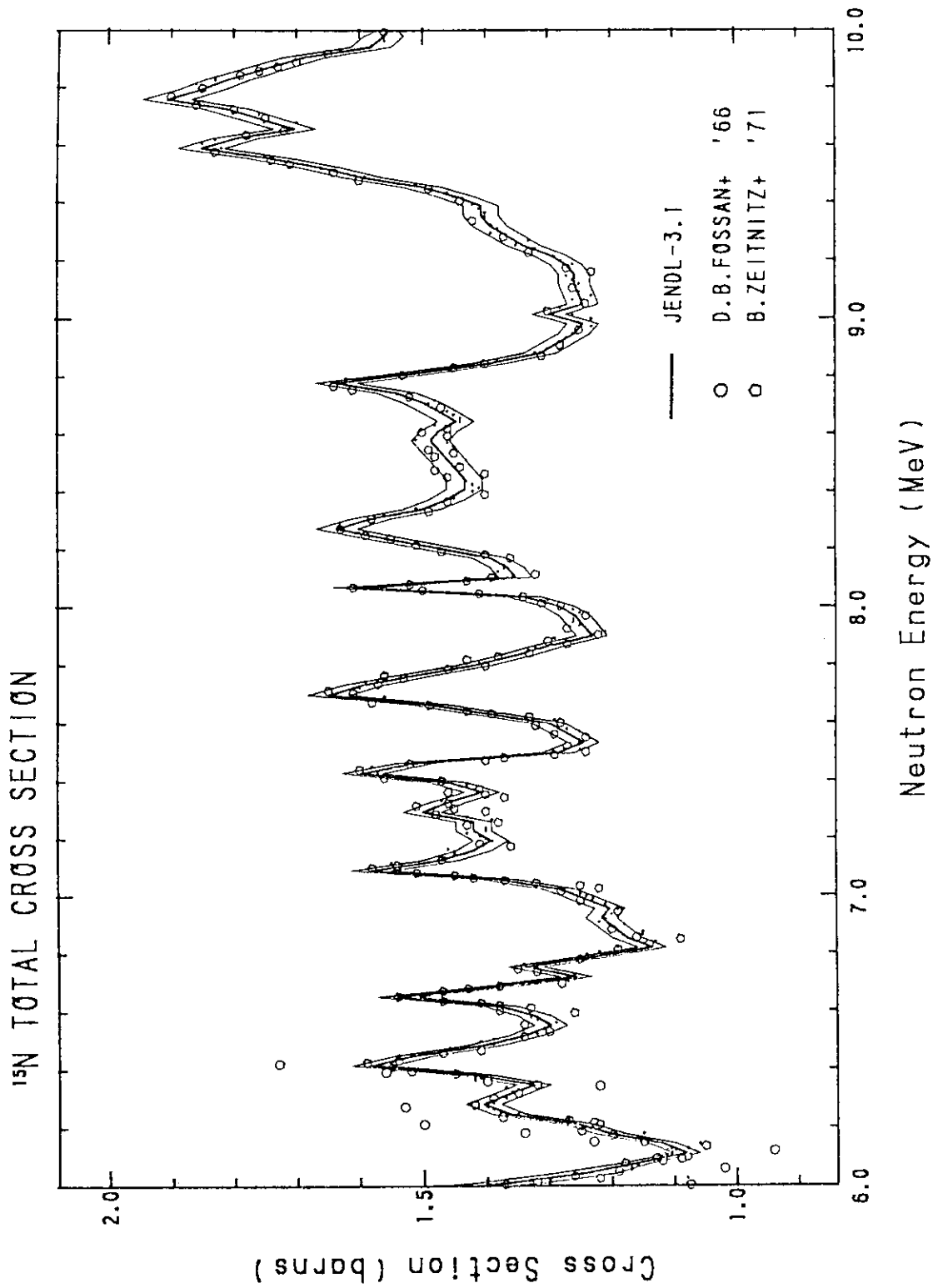


Fig. 2.3.1(c) ¹⁵N total cross section (6 to 10 MeV)

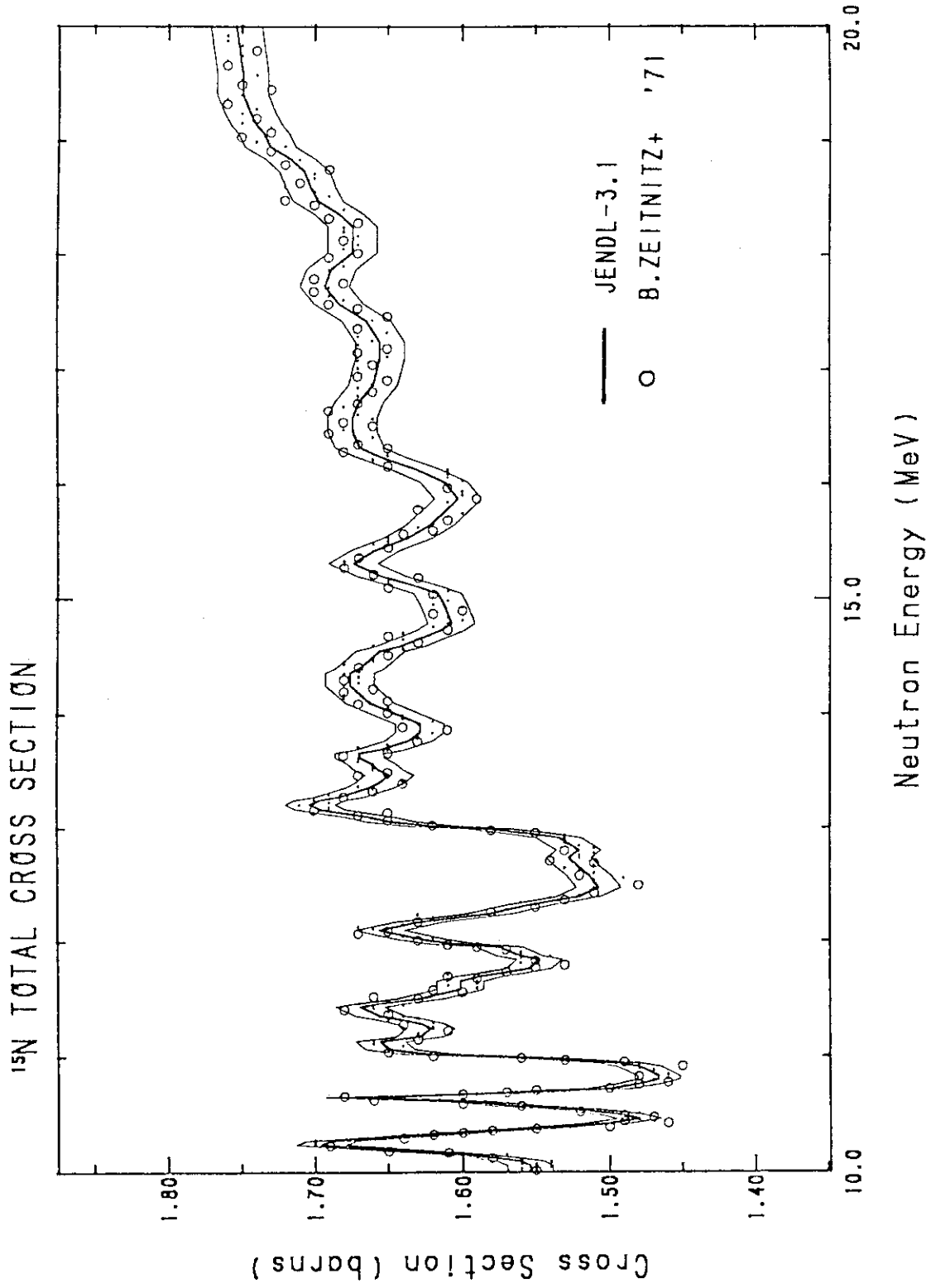


Fig. 2.3.1(d) ¹⁵N total cross section (10 to 20 MeV)

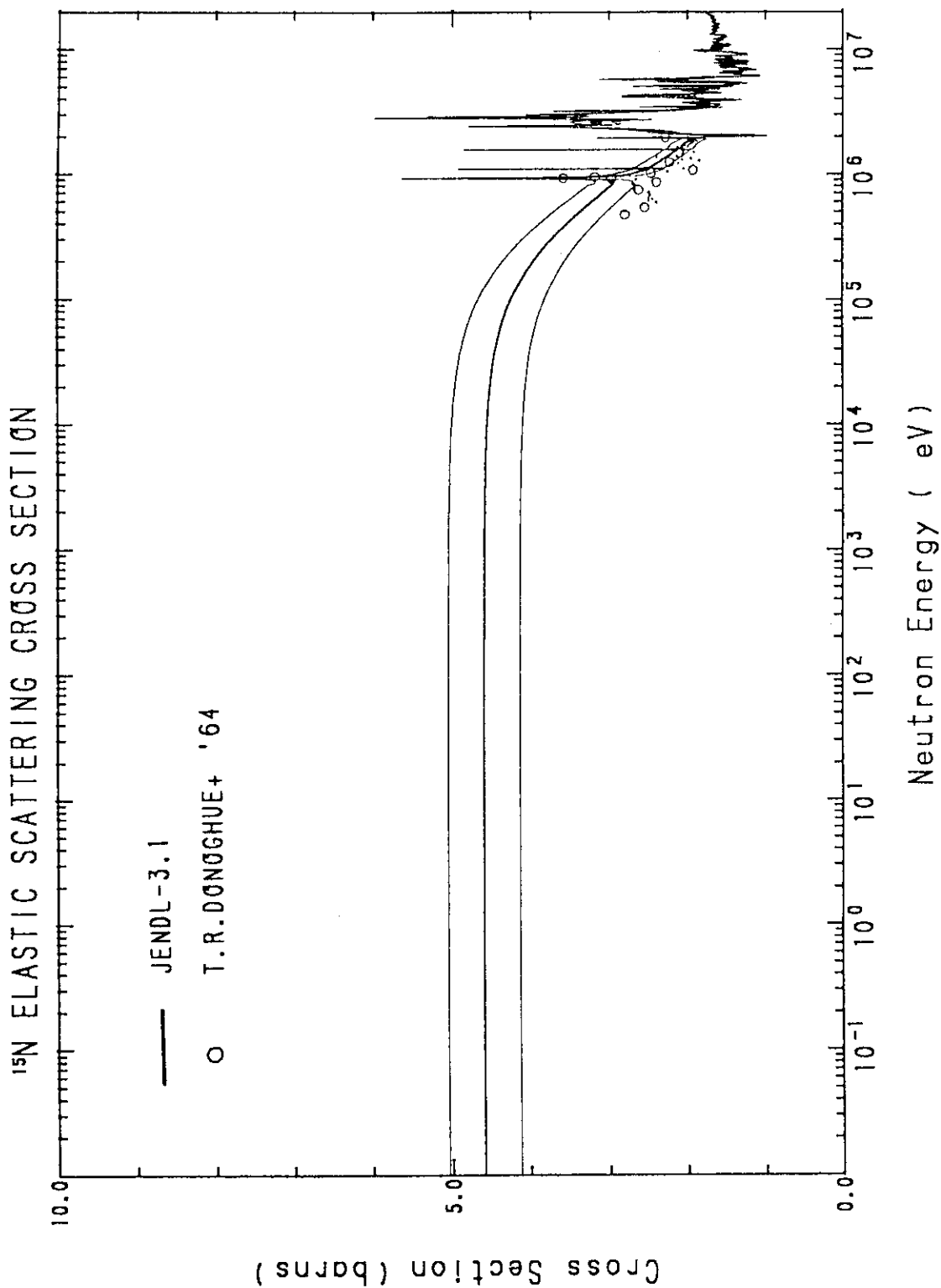


Fig. 2.3.2 ¹⁵N elastic scattering cross section

Correlation Matrix

N-15 elastic scattering

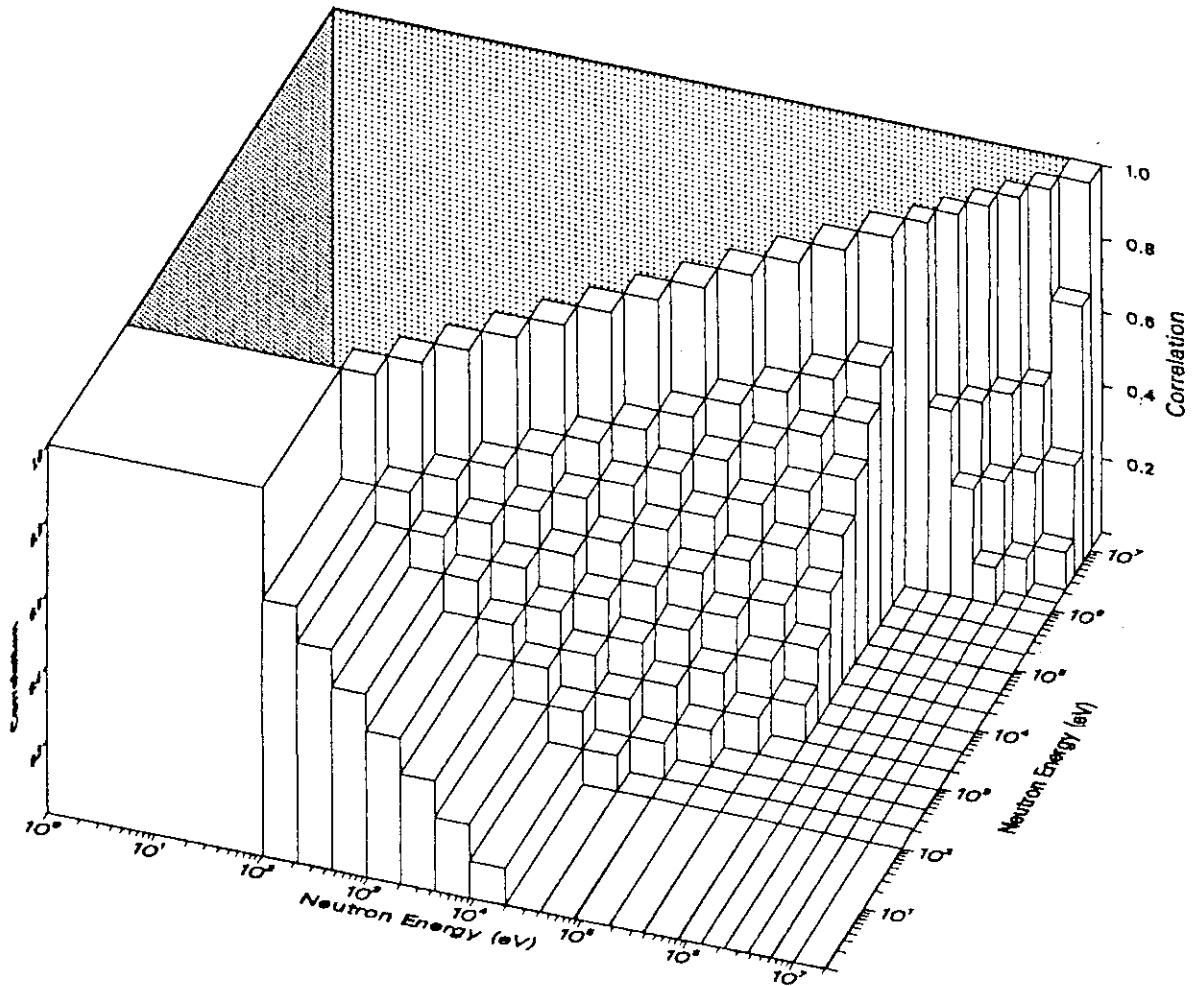


Fig. 2.3.3 Correlation matrix of ^{15}N elastic scattering cross section

2.4 ^{23}Na 非弾性散乱断面積の共分散

JENDL-3.1 と JENDL-3.2 の ^{23}Na 非弾性散乱断面積は同じデータであり、次のように評価したものである。

入射中性子エネルギー 5 MeV 以下

1st level (Q-value = -0.4399 MeV)

Towle and Gilboy²²⁾、Chien and Smith²³⁾、Lind and Day²⁴⁾ の実験データに基づいて評価した。

2nd level (Q-value = -2.0764 MeV) 及び 3rd level (Q-value = -2.3909 MeV)

Freeman and Montague²⁵⁾、Lind and Day²⁴⁾、Towle and Owens⁴¹⁾ の実験データに基づいて評価した。

その他の準位 (Q-values \leq -2.6398 MeV)

CASTHY コード²⁶⁾ による光学模型及び統計模型での計算に基づいて評価した。

入射中性子エネルギー 5 MeV 以上

すべての準位

CASTHY コード²⁶⁾ による光学模型及び統計模型での計算に基づいて評価した。

これらの評価法及び JENDL-3.1 の評価値と Perey 等の高分解能実験データ²⁷⁾ (評価には用いられていない) との比較 (Fig. 2.4.1) から JENDL-3.1 は 1.35 MeV 以下では Perey 等のデータをよく再現しており、誤差 10% とした。1.35 MeV 以上では Perey 等の実験値の構造を再現していないことと 2 MeV 以上では信頼できる全非弾性散乱断面積の実験データがほとんどないことを考慮して誤差を 20% とした。Fig. 2.4.2 と 2.4.3 に JENDL-3.1 とその誤差幅を示した。

評価値はほとんどすべての群において実験値に基づいているので、異なるエネルギー点間の相関として相手の群が自群から離れるに従って順次 1.0 (自群)、0.5、0.3、0.1 とした。Table 2.4.1 と Fig. 2.4.4 に誤差と相関マトリックスを示す。

Table 2.4.1 Covariance of ^{23}Na inelastic scattering cross section (JENDL-3.1)

群 誤差(%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
0	100																				
1	50	100																			
2	30	50	100																		
3	10	30	50	100																	
4	0	10	30	50	100																
5	0	0	10	30	50	100															
6	0	0	0	10	30	50	100														
7	0	0	0	0	0	0	0	100													
8	0	0	0	0	0	0	0	0	100												
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100											
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100										
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100									
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100								
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100							
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100						
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100					
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100				
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100			
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100		

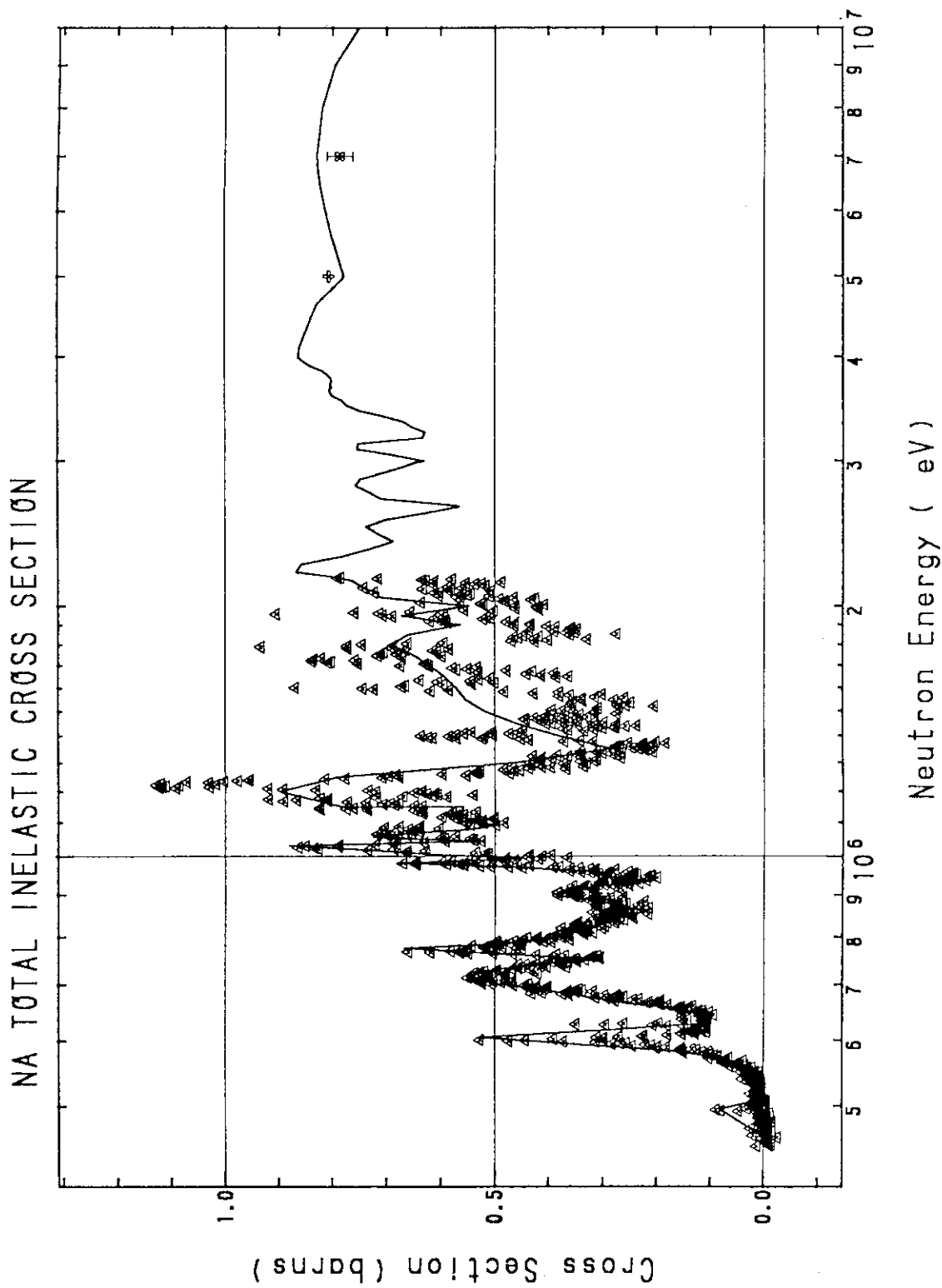


Fig. 2.4.1 ^{23}Na total inelastic scattering cross section. The solid line is JENDL-3.1 and triangles below about 2 MeV are experimental data by Perey²⁷⁾.

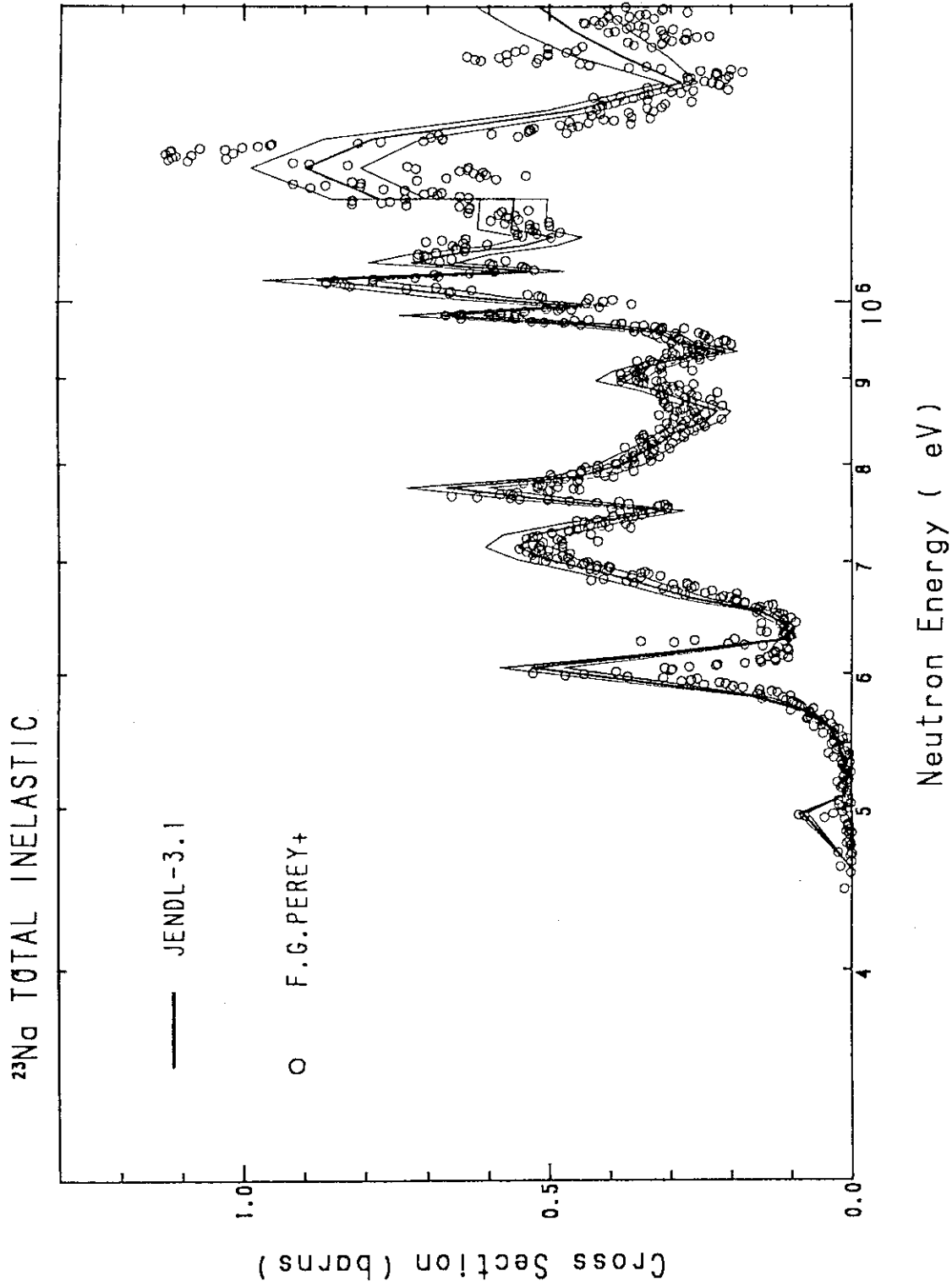


Fig. 2.4.2 ^{23}Na total inelastic scattering cross section (below 2 MeV)

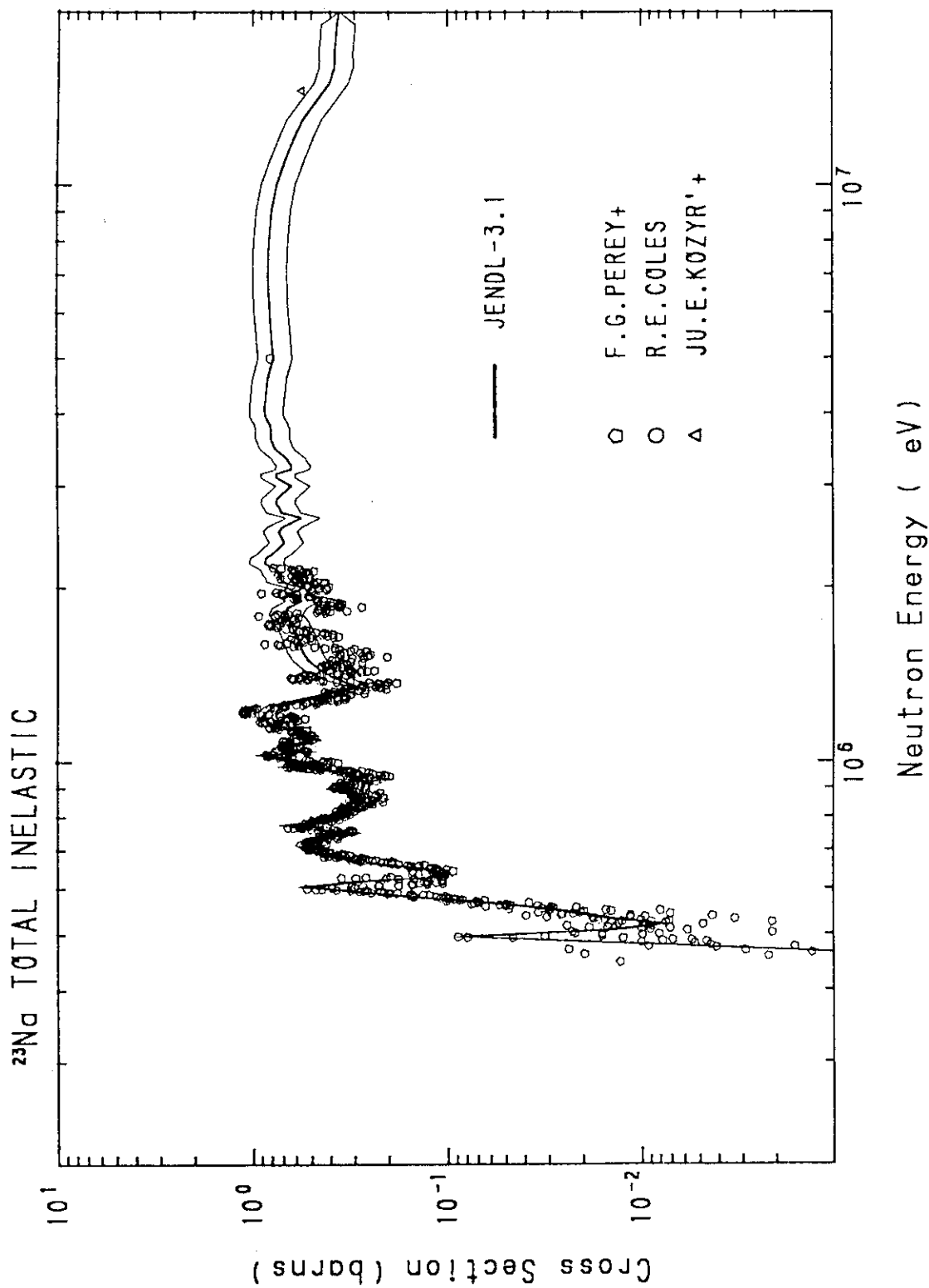


Fig. 2.4.3 ^{23}Na total inelastic scattering cross section

Correlation Matrix

Na-23 total inelastic scattering

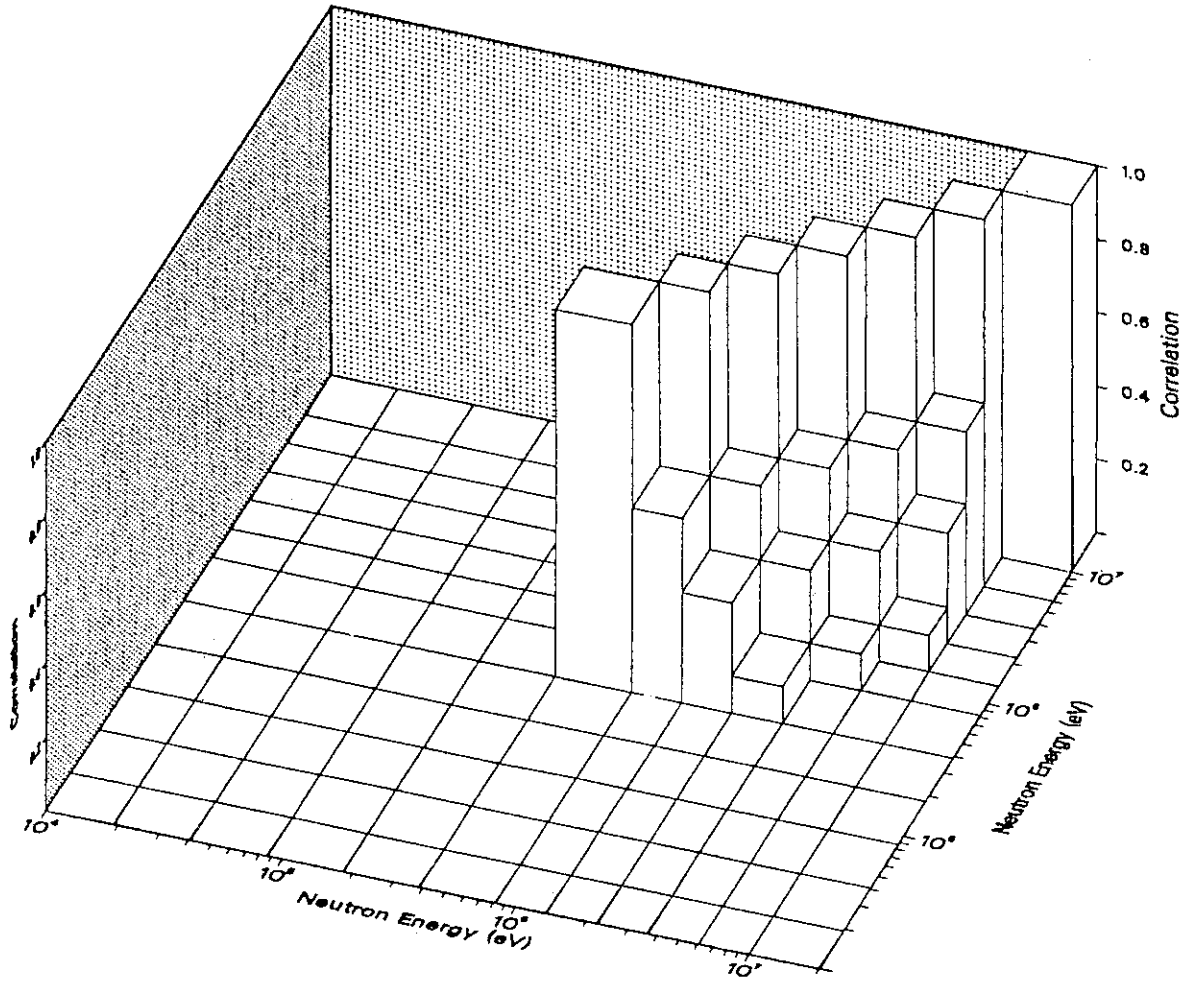


Fig. 2.4.4 Correlation matrix of ^{23}Na total inelastic scattering cross section

2.5 Fe 非弾性散乱断面積の共分散

2.5.1 JENDL-3.1 の Fe 非弾性散乱断面積

評価値は以下のようにして得られた。

14 keV - 850 keV

^{57}Fe 、 ^{58}Fe (元素組成比はそれぞれ 2.1 %、0.28 %) の非弾性散乱のみが寄与する領域である。それぞれの同位体の断面積は統計模型による理論計算で求められ、天然元素の断面積を合成した。

850 keV - 2.1 MeV

^{56}Fe の第 1 励起準位による非弾性散乱断面積が支配的な領域である。JENDL-3.1 (JENDL-2でも同様) では Perey et al.²⁷⁾ の高分解能ガンマ線測定データを基に評価した。ただ、この測定値はすべての補正 (多重散乱補正等) がなされているだけでなく、しかも最も新しい Kinney and Perey²⁸⁾ (100 keV 間隔の平均断面積のみが表で与えられている) に比べ大きめの値となっている。

2.1 MeV - 20 MeV

4 つの同位体の非弾性散乱断面積を統計模型およびチャンネル結合法を用いた理論計算により求め、その結果を合成した。2 ~ 4 MeV の領域では既存の測定値^{29,30)} に比べかなり小さめになっている。

誤差は次のように決定した。理論計算値のみで評価をした場合は ^{15}N の誤差決定に使用した ORNL の経験則¹⁷⁾ に基づいて決定した。測定値を考慮して評価値を決めた場合は評価値の周りの測定値のばらつきから誤差を推定した。

群	エネルギー範囲	誤差	誤差の推定方法
11	14 keV ~ 19.3 keV	30%	ORNL の経験則
10	19.3 keV ~ 40.87 keV	20%	ORNL の経験則
9	40.87 keV ~ 86.52 keV	30%	ORNL の経験則
8	86.52 keV ~ 183.2 keV	30%	ORNL の経験則

7	183.2 keV ~ 387.8 keV	30%	ORNL の経験則
6	387.8 keV ~ 820.9 keV	30%	ORNL の経験則
5	820.9 keV ~ 1.353 MeV	26%	平均断面積の測定値 ^{28,31)} の評価値 に対するばらつきから推定した。
4	1.353 MeV ~ 2.231 MeV	13%	5 群と同じ
3	2.231 MeV ~ 3.679 MeV	37%	⁵⁶ Fe(n,n ₁)の測定値 ^{29,32,33)} の評価値 に対するばらつきから推定した。
2	3.679 MeV ~ 6.065 MeV	10%	ORNL の経験則
1	6.065 MeV ~ 10.0 MeV	10%	ORNL の経験則
0	10.0 MeV ~ 20.0 MeV	10%	ORNL の経験則

Fig. 2.5.1 に断面積と誤差幅を示す。相関マトリックスは、理論計算値のみから評価した領域は比較的遠い群まで相関があるとした。820 keV 以下と 3.6 MeV 以上の計算値はそれぞれ異なる同位体の寄与が大きいため、2つの領域間の相関は考えなかった。Table 2.5.1 と Fig. 2.5.2 に JENDL-3.1 の誤差と相関マトリックスを示す。

2.5.2 JENDL-3.2 の Fe 非弾性散乱断面積

評価値は以下のようにして得られた。

14 keV - 850 keV

JENDL-3.1 の場合と同様に ⁵⁷Fe、⁵⁸Fe の理論計算値から組み立てた。唯一違う点は ⁵⁷Fe の第 1 励起準位の非弾性散乱断面積に共鳴構造を入れたことである。JENDL-3.1 ではこの共鳴構造は ⁵⁷Fe の同位体のファイルには入っていたが、天然元素データ作成の際には編集上の手違いにより組み込まれなかった。

850 keV - 2.1 MeV

遮蔽のベンチマークテストの結果³⁴⁾、低めの断面積が好ましいことが分かったので、Voss et al.³⁵⁾ の高分解能ガンマ線測定データを基に評価した。彼等の測定値は角度 1 点 (125度) での測定値なので、Smith³¹⁾ が測定した角度分布を用いてデータの補正を行った。

2.1 MeV - 5 MeV

この領域で支配的なのは ^{56}Fe の第1~5 (850 keV ~ 2.96 MeV) レベルの非弾性散乱断面積である。JENDL-3.1 のこれらの断面積の評価値はいずれも測定値に比べかなり低めになっている。そこで、JENDL-3.2 では測定値を考慮して理論計算値の修正を行った。

5 - 20 MeV

JENDL-3.1 と全く同じ理論計算値を採用した。

今回推定した誤差は以下のとおりである。誤差の決定法は上記の JENDL-3.1 の場合と同じである。

群	エネルギー範囲	誤差	誤差の推定方法
11	14 keV ~ 19.3 keV	30%	ORNL の経験則
10	19.3 keV ~ 40.87 keV	15%	ORNL の経験則
9	40.87 keV ~ 86.52 keV	20%	ORNL の経験則
8	86.52 keV ~ 183.2 keV	30%	ORNL の経験則
7	183.2 keV ~ 387.8 keV	30%	ORNL の経験則
6	387.8 keV ~ 820.9 keV	30%	ORNL の経験則
5	820.9 keV ~ 1.353 MeV	19%	平均断面積の測定値 ^{28,31)} の評価値に対するばらつきから推定した。
4	1.353 MeV ~ 2.231 MeV	11%	5 群と同じ
3	2.231 MeV ~ 3.679 MeV	9%	$^{56}\text{Fe}(n,n_1)$ の測定値 ^{29,32,33)} の評価値に対するばらつきから推定した。
2	3.679 MeV ~ 6.065 MeV	10%	ORNL の経験則
1	6.065 MeV ~ 10.0 MeV	10%	ORNL の経験則
0	10.0 MeV ~ 20.0 MeV	10%	ORNL の経験則

Fig. 2.5.3 に断面積と誤差幅を、Table 2.5.2 と Fig.2.5.4 に JENDL-3.2 の誤差と相関マトリックスを示す。

Table 2.5.1 Covariance of ^{54}Fe inelastic scattering cross section (JENDL-3.1)

群 誤差(%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	10.0	10.0	10.0	37.0	13.0	26.0	30.0	30.0	30.0	30.0	20.0	30.0
1	70	100										
2	60	70	100									
3	50	60	70	100								
4	0	0	0	0	100							
5	0	0	0	0	50	100						
6	0	0	0	0	0	0	100					
7	0	0	0	0	0	0	70	100				
8	0	0	0	0	0	0	60	70	100			
9	0	0	0	0	0	0	50	60	70	100		
10	0	0	0	0	0	0	40	50	60	70	100	
11	0	0	0	0	0	0	30	40	50	60	70	100

Table 2.5.2 Covariance of ^{nat}Fe inelastic scattering cross section (JENDL-3.2)

群 誤差(%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	100											
1	70	100										
2	60	70	100									
3	0	0	0	100								
4	0	0	0	0	100							
5	0	0	0	0	50	100						
6	0	0	0	0	0	0	100					
7	0	0	0	0	0	0	70	100				
8	0	0	0	0	0	0	60	70	100			
9	0	0	0	0	0	0	50	60	70	100		
10	0	0	0	0	0	0	40	50	60	70	100	
11	0	0	0	0	0	0	30	40	50	60	70	100

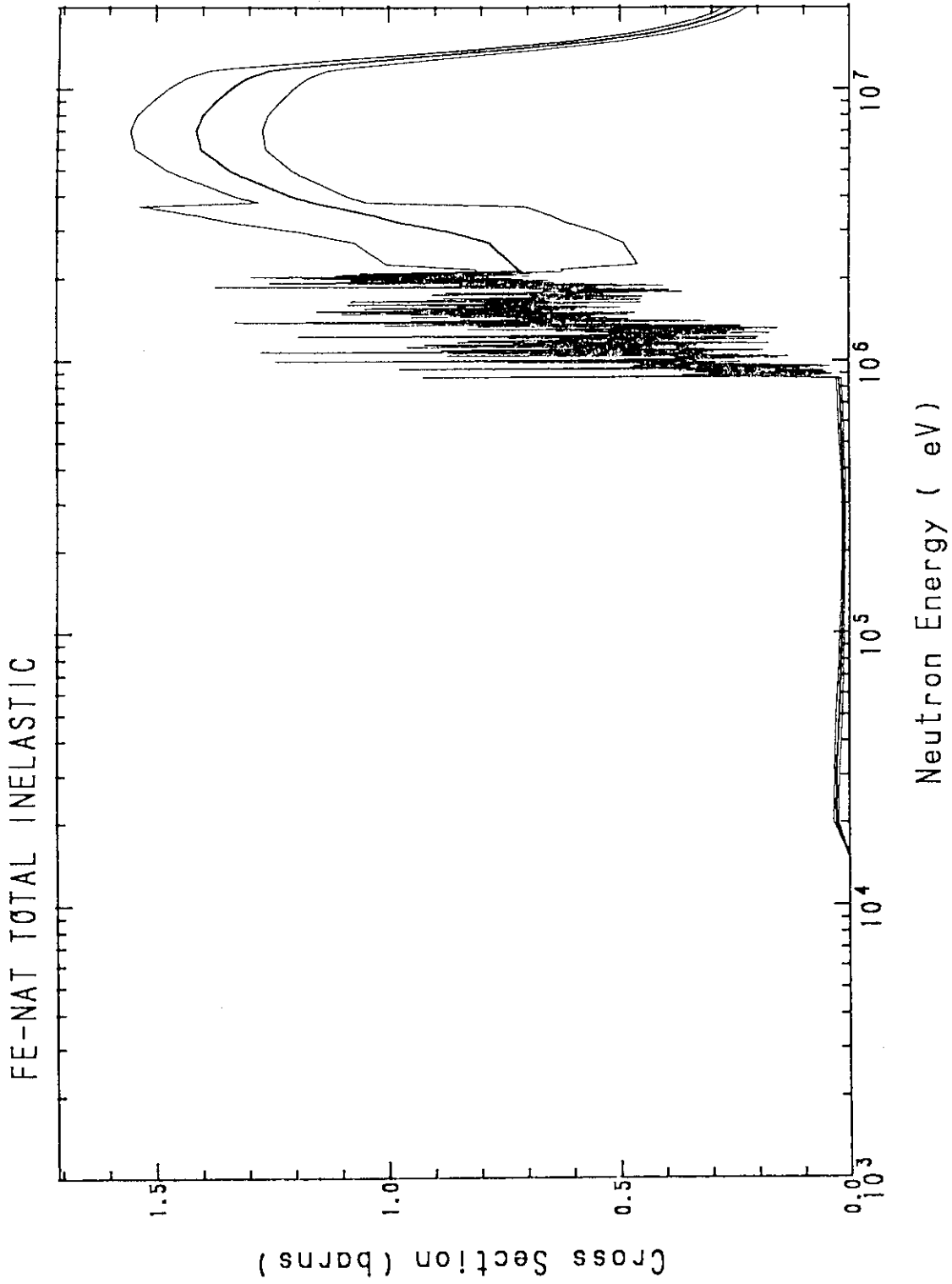


Fig. 2.5.1 Fe total inelastic scattering cross section (JENDL-3.1)

Correlation Matrix Fe-nat inelastic(JENDL-3.1)

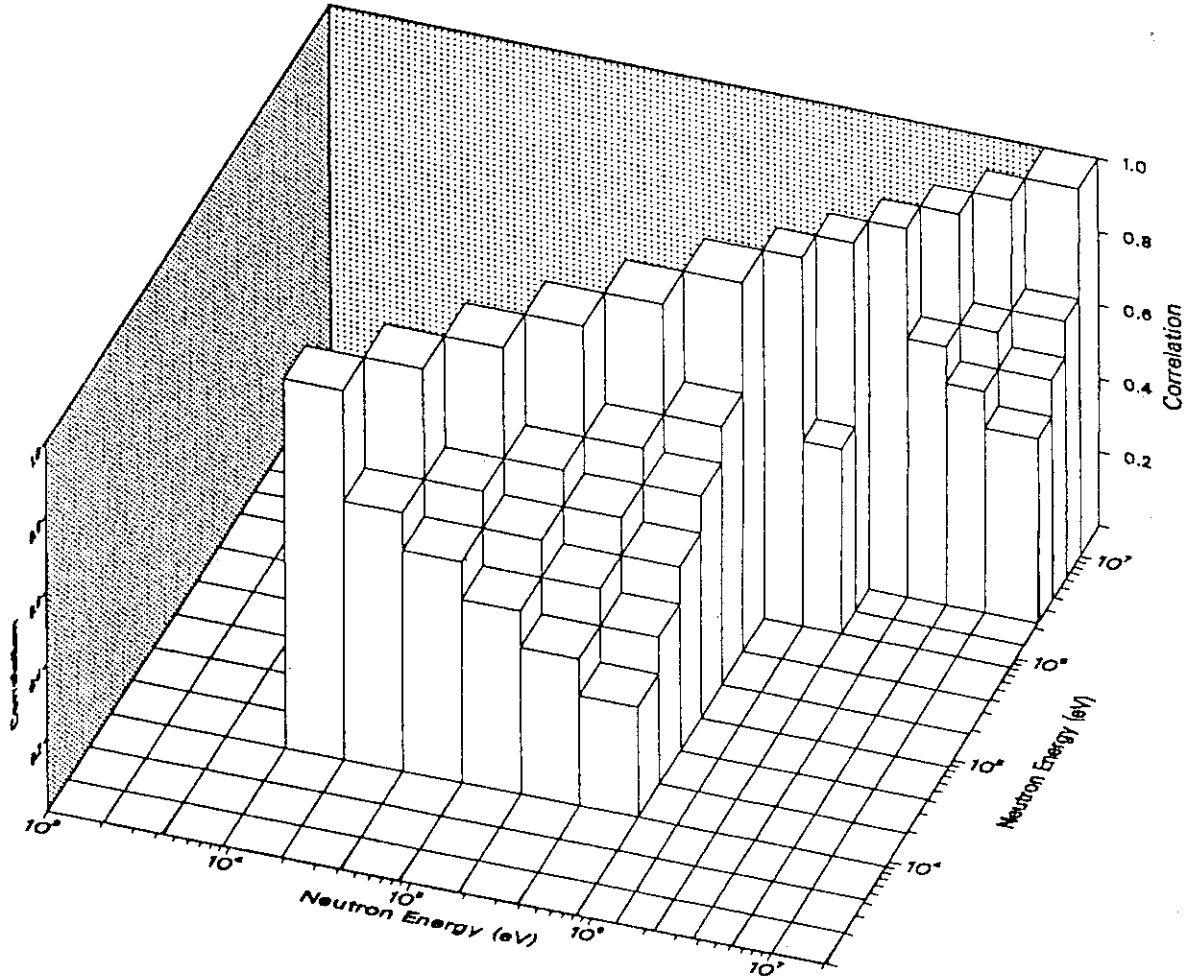


Fig. 2.5.2 Correlation matrix of Fe total inelastic scattering cross section (JENDL-3.1)

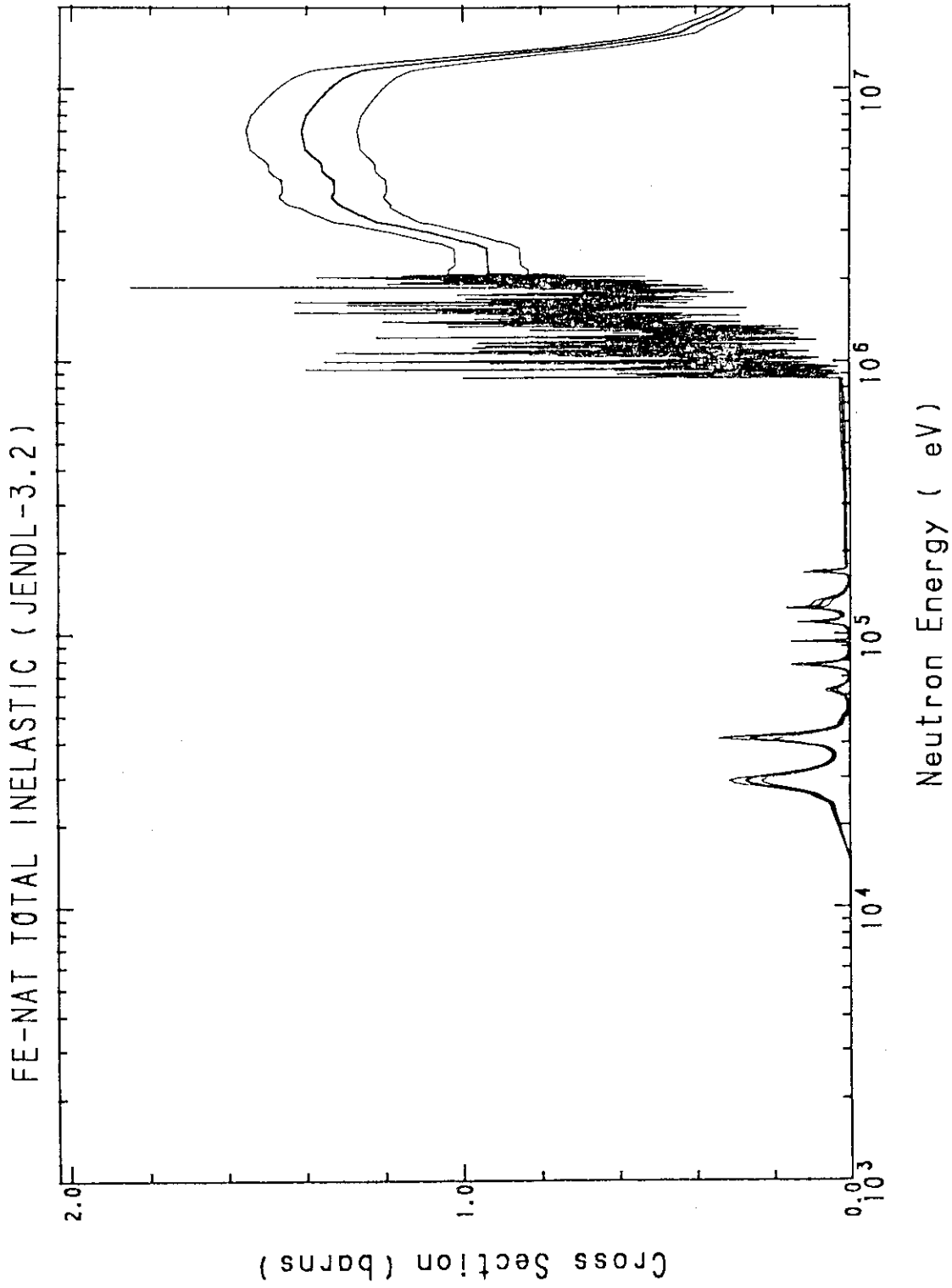


Fig. 2.5.3 Fe total inelastic scattering cross section (JENDL-3.2).

Correlation Matrix Fe-nat inelastic(JENDL-3.2)

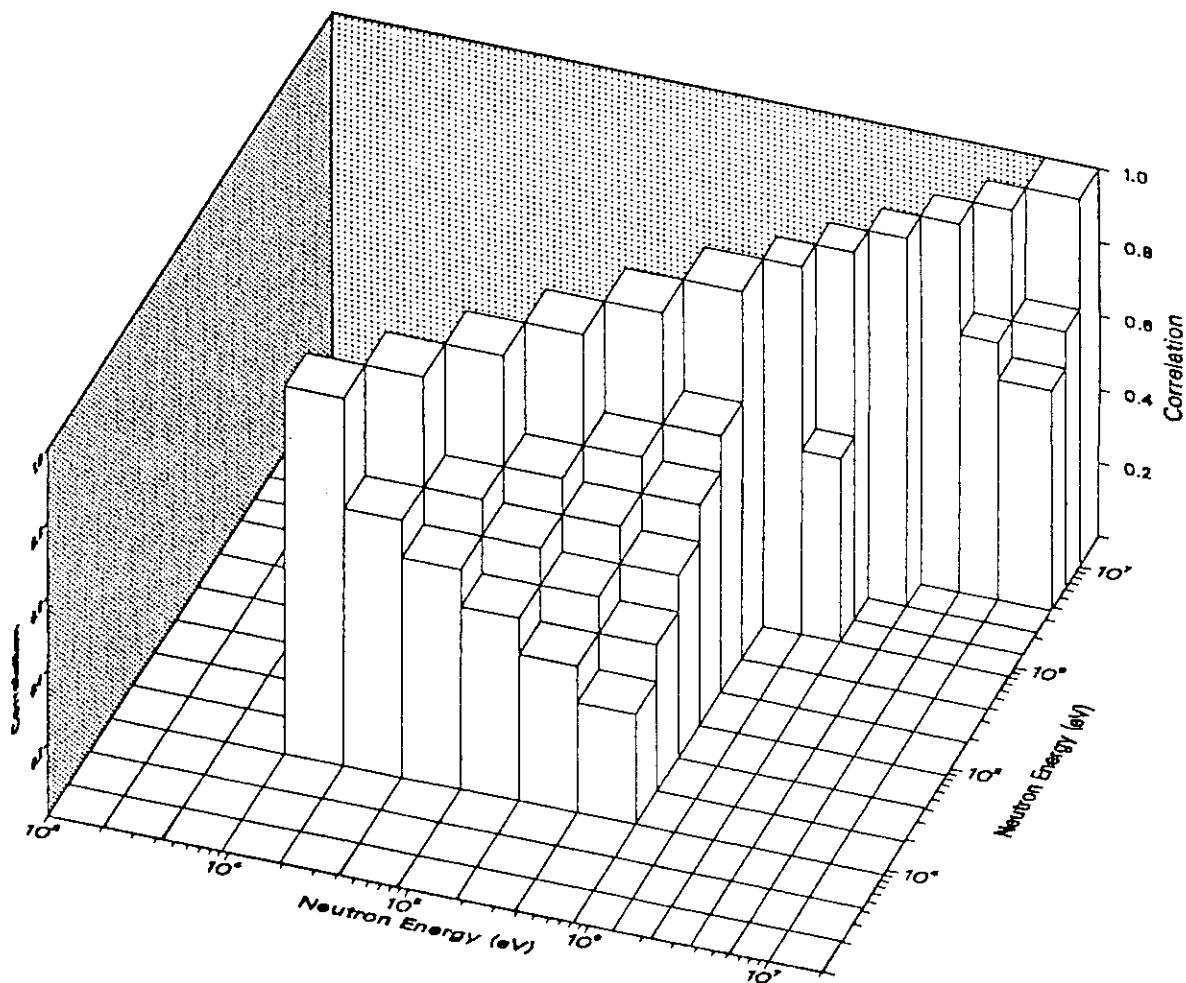


Fig. 2.5.4 Correlation matrix of Fe total inelastic scattering cross section (JENDL-3.2)

2.6 ^{240}Pu 核分裂断面積の共分散

JENDL-3.1 及び JENDL-3.2 に格納されている ^{240}Pu 核分裂断面積のデータは、次のように評価したものである。

4 keV 以下 (分離共鳴領域)

熱中性子エネルギー領域では、Mughabghab の推奨値³⁶⁾ を基に、負のエネルギーの共鳴と 1.1057 eV 共鳴のパラメータを決め、熱中性子エネルギー断面積と共鳴積分値が Mughabghab の推奨値とほぼ一致するようにしている。

中性子幅は、20 eV ~ 500 eV では、Hockenbury et al.³⁷⁾、500 eV ~ 4 keV では Kolar and Boeckhoff³⁸⁾ の測定データに基づいている。捕獲幅が測定されていない共鳴に対しては平均値として 29.5 meV を仮定した。また、このエネルギー領域は sub-threshold fission の領域であり、核分裂断面積が小さい。核分裂幅は、610 eV 以下では Weston and Todd³⁹⁾ の測定データを、610 eV 以上では Auchampaugh and Weston⁴⁰⁾ のデータをそれぞれ基にしている。

4 ~ 100 keV

Weston and Todd の測定した平均の核分裂断面積を、100 keV での評価値に規格化し評価値とした。さらに、4 ~ 40 keV の範囲は非分離共鳴領域とし、断面積を再現する非分離共鳴パラメータを決定した。

100 keV ~ 20 MeV

この領域では、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu の核分裂断面積や ^{238}U 捕獲断面積との同時評価を行い、その結果を採用した。

これらを考慮し、エネルギー毎に誤差を検討した結果は、次のとおりである。

0.1 eV 以下	50 %	このエネルギー領域は、共鳴が無く比較的滑らかに断面積が変化する。熱中性子断面積の測定値は Mughabghab によると 0.056 ± 0.030 barn、JENDL-3.1 から求めた値は 0.058 barn である。推奨値との一致は良好であるが、測
-----------	------	---

定値の誤差が大きい。今回は、そのため大きな誤差を与えた。

0.1 ~ 20 eV	30 %	1.057 eV 共鳴の影響を大きく受ける領域である。この共鳴の中性子幅の誤差は約3%と小さい。しかし、核分裂幅は古い測定しか無く誤差もはっきりしない。断面積が小さいので当然誤差も大きいものと思われる。
20 ~ 60 eV	100 % 以上	Weston and Todd ³⁹⁾ によると、彼らの平均断面積の誤差は約220%である。従って、核分裂幅の解析値の誤差は大きい。
60 ~ 600eV	20 %	Weston and Todd の平均核分裂断面積の誤差とほぼ同じにする。
0.6 ~ 4 keV	15 %	この領域では、測定データから得られた核分裂幅の誤差は5~20%である。一方、中性子幅の誤差も5~10%程ある。両者の中間の値(12%、8%)から15%程度と推定。
4 ~ 100 keV	7 %	Weston and Todd の平均核分裂断面積測定値の誤差は5%程度。他の測定データとのばらつきを考慮し、大きめの7%とした。
100 ~ 500 keV	7 %	同時評価の結果の誤差は2~4%である。しかし、このエネルギー領域の測定データのばらつきは6~10%以上もあるので、大きめに誤差を見積もった。
0.5 ~ 1 MeV	3 %	同時評価の結果の誤差は2%、測定データのばらつきは3~5%。
1 ~ 10 MeV	2 %	同時評価の結果の誤差と同じにした。
10 ~ 20 MeV	4 %	同上

100 keV 以上は同時評価結果出力された誤差であり、 1σ の値である。その他の領域は統計処理を行って誤差を決定していないので必ずしも 1σ の値とは言い切れない。100 keV 以上の

領域で JENDL-3 と主な測定データとの比較をした図を Fig. 2.6.1 に示す。この図には、主に、1980 年以降の測定データを示した。実線が JENDL-3.1 の評価値、細い実線が上記の誤差幅である。以上の検討結果を 18 群の群構造にしたものを Table 2.6.1 に示す。

18 群の相関マトリックスは以下のような考察の結果決定した。

4 keV 以下 (13 ~18 群) は分離共鳴領域であり、多数の共鳴が核分裂断面積に参与している。個々の共鳴のパラメータの誤差が他の群の断面積に与える影響は大きくはない。

4 ~ 100 keV は Weston and Todd の測定データを基に断面積が決められている。Weston and Todd が与えている誤差要因から求めた相関マトリックスは以下ようになり、かなり相関が強い。

upper energy

111.1 keV	100			
67.38	97	100		
24.79	95	96	100	
9.119	93	91	97	100
3.355				

ここでは、JENDL-3.1 の評価が、多数ある測定の中の 1 つとして Weston 等のデータを採用しているので、評価値の相関はこれよりかなり弱いと考える。50 ~200 keV (8~9 群) で同時評価の結果得られた隣の群との相関が 0.5 程度なので、この領域でもそうなるように、上記の値を 0.6 倍した値を与える。さらに遠方の群との相関は徐々に 0.0 になるよう与える。10 ~ 40 keV (10群) のこれより高エネルギー領域との相関も同時評価の結果がでてくるがこの値はかなり小さい (0.01~0.05)。しかし、これは同時評価の際のエネルギー領域の下限であり、JENDL-3.1 のデータとして採用されていないので無視する。

100 keV ~ 20 MeV (1 ~ 9 群) は同時評価の結果を断面積として JENDL-3.1 に採用した。この領域は同時評価結果の相関マトリックスを採用する。

誤差と相関マトリックス検討の結果を Table 2.6.1 と Fig. 2.6.2 に示した。

他の反応との相関マトリックス

100 keV 以上の同時評価の結果から ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu の核分裂断面積との相関マトリックスを決定する。これらの断面積の誤差については、「炉定数調整」作業時にすでに検討されている²⁾。ここでは、同時評価結果の相関マトリックスを 18 群構造で平均したものを他反応との相関マトリックスとして採用する。なお、値が負になる所が同時評価を行ったエネルギー領域の下限付近で数カ所あるが、これは全て 0.0 とする。約 10 群以上 (100 keV 以下) では、同時評価値が無いので対角成分のみに推定値を与える。推定値は、100 keV 以上の対角成分の平均値の半分とする。ただし、 ^{238}U 核分裂断面積との相関は ^{238}U 核分裂断面積がほとんど 0.0 なので相関は無いものとする。Table 2.6.2 ~ 2.6.5 に結果を示す。Fig. 2.6.3 ~ 2.6.6 はこれらを 3次元表示にしたものである。

Table 2.6.1 Covariance of ²⁴⁰Pu fission cross section (JENDL-3.1, JENDL-3.2)

群 誤差(%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18									
4.0	100																											
74		100																										
71			100																									
72				100																								
70					100																							
64						100																						
63							100																					
56								100																				
54									100																			
49										100																		
25											100																	
10												100																
10													100															
5														100														
5															100													
0																100												
0																	100											
0																		100										
0																			100									
0																				100								
0																					100							
0																						100						
0																							100					
0																								100				
0																									100			
0																										100		
0																											100	
0																												100

Table 2.6.2 Covariance of ²⁴⁰Pu fission cross section and ²³⁵U fission cross section (JENDL-3.1, JENDL-3.2)

群	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
誤差(%)	4.0	2.0	2.0	2.0	2.5	5.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	14.0	15.0	17.0	20.0	20.0	100.0	
²³⁵ U σ _f																				
0	4.0	15.	10.	9.2	8.2	5.0	3.1	1.8	0.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	9.2	33.	14.	12.	9.2	5.9	3.5	2.0	2.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2.3	10.	26.	7.8	6.4	4.5	2.8	2.0	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	2.0	1.1	7.7	7.3	7.2	6.6	4.7	3.0	2.1	2.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	2.0	1.6	5.9	6.8	8.3	34.	13.	11.	7.0	6.3	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	2.0	1.2	2.9	5.3	8.9	16.	43.	16.	11.	8.2	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	2.5	0.0	0.7	3.1	7.2	14.	15.	39.	13.	11.	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	3.0	0.0	0.0	2.3	5.3	11.	13.	14.	47.	17.	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	3.0	0.0	0.0	1.3	4.5	10.	14.	14.	36.	16.	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	4.0	0.0	0.0	0.0	3.1	8.3	13.	16.	18.	38.	12.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0
17	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0
18	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0

Table 2.6.3 Covariance of ²⁴⁰Pu fission cross section and ²³⁸U fission cross section (JENDL-3.1, JENDL-3.2)

群	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
誤差(%)	4.0	2.0	2.0	2.0	2.5	5.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	14.0	15.0	17.0	20.0	20.0	100.0	
²³⁸ U σ_f	12.	12.	7.5	6.7	6.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6.5	26.	10.	8.8	7.2	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.4	9.2	20.	5.8	4.9	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.7	6.3	5.8	21.	5.7	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.7	4.9	4.6	6.4	28.	11.	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.4	2.5	3.4	6.7	13.	18.	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.4	2.3	5.5	11.	9.3	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	1.4	4.5	8.8	7.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.5	3.7	7.3	5.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	2.6	6.4	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 2.6.4 Covariance of ²⁴⁰Pu fission cross section and ²³⁹Pu fission cross section (JENDL-3.1, JENDL-3.2)

群	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
誤差(%)	4.0	2.0	2.0	2.0	2.5	5.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	14.0	15.0	17.0	20.0	20.0	100.0
²³⁹ Pu σ _f	20.	17.	14.	14.	14.	13.	11.	8.8	7.9	7.7	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	5.0	20.	17.	14.	14.	13.	11.	8.8	7.9	7.7	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	4.2	15.	32.	19.	18.	17.	16.	15.	12.	10.	11.	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2.1	10.	18.	27.	17.	17.	16.	15.	12.	10.	11.	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.7	8.8	17.	17.	29.	19.	18.	17.	14.	12.	12.	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	2.3	11.	16.	18.	19.	35.	23.	18.	16.	16.	16.	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	2.2	11.	15.	18.	20.	24.	26.	21.	19.	19.	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	2.4	9.7	14.	17.	20.	24.	25.	24.	21.	21.	9.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	2.5	6.0	10.	13.	16.	19.	20.	51.	23.	24.	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	3.2	1.0	4.8	6.5	9.3	12.	14.	18.	43.	21.	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	2.8	1.3	4.6	7.0	9.4	13.	17.	21.	20.	49.	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0
16	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0
17	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0
18	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0

Table 2.6.5 Covariance of ²⁴⁰Pu fission cross section and ²⁴¹Pu fission cross section (JENDL-3.1, JENDL-3.2)

群	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
誤差(%)	4.0	2.0	2.0	2.0	2.5	5.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	14.0	15.0	17.0	20.0	20.0	100.0	
²⁴¹ Pu σ _f																				
0	4.0	2.4	3.3	3.8	3.5	3.8	2.3	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	4.0	0.7	10.	5.8	5.6	4.6	3.0	2.3	1.9	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	3.0	0.1	2.1	11.	3.4	3.3	2.2	0.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	2.5	0.0	1.7	2.7	13.	3.9	3.7	2.3	1.7	1.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	3.0	0.0	0.7	2.3	3.4	18.	7.1	6.4	4.8	4.1	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	3.0	0.0	0.3	1.5	4.0	7.8	25.	9.8	7.3	5.6	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	3.0	0.0	0.0	0.2	2.5	6.6	8.5	24.	9.7	7.7	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	3.0	0.0	0.0	0.0	1.9	4.9	7.0	9.1	34.	12.	12.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	3.0	0.0	0.0	0.0	1.8	4.3	5.2	8.1	14.	26.	12.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	6.0	0.0	0.0	0.0	0.6	3.0	4.2	7.0	11.	11.	24.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0
17	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0
18	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0

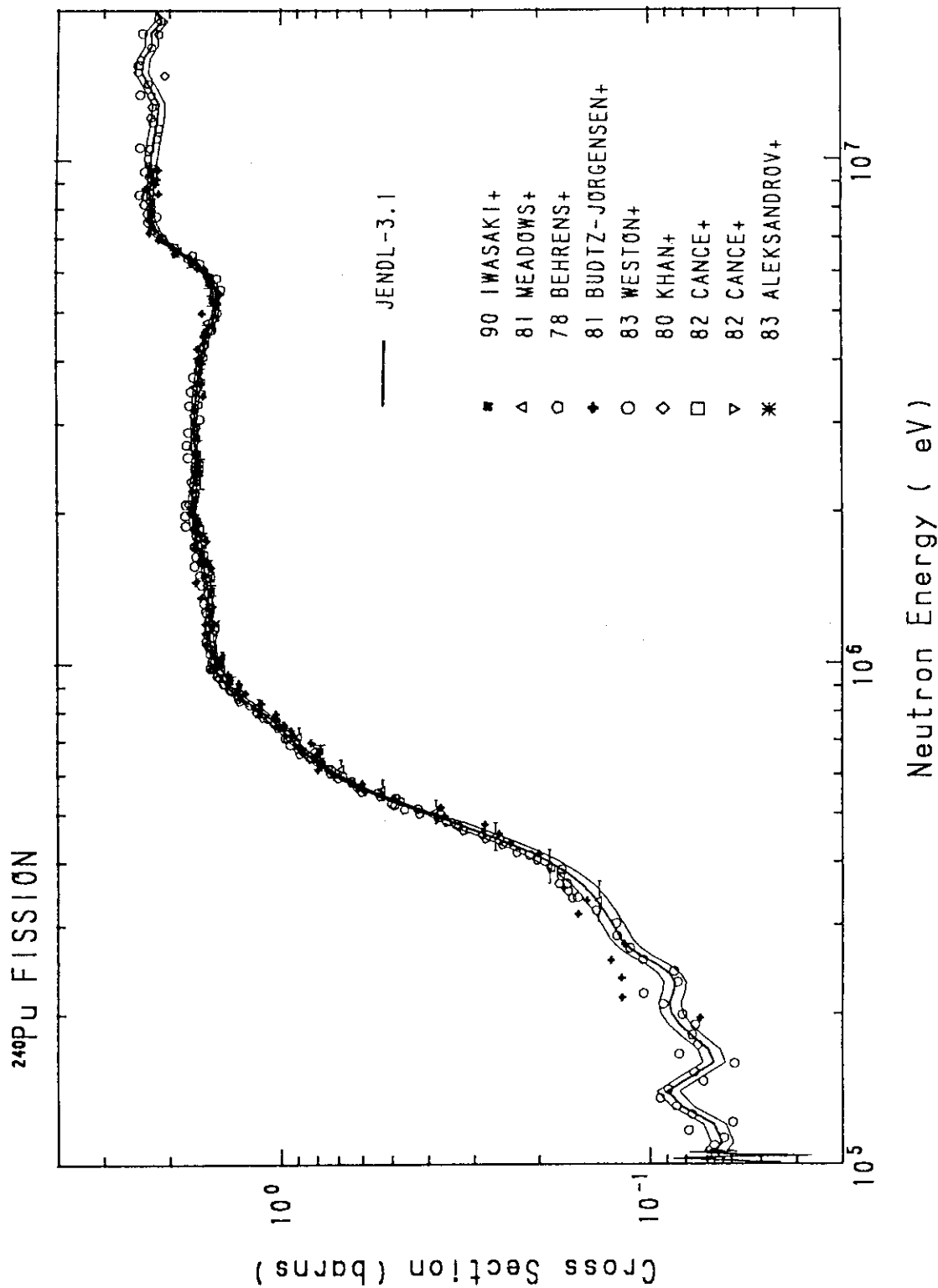


Fig. 2.6.1 ^{240}Pu fission cross section (above 100 keV)

Correlation Matrix Pu-240 fission

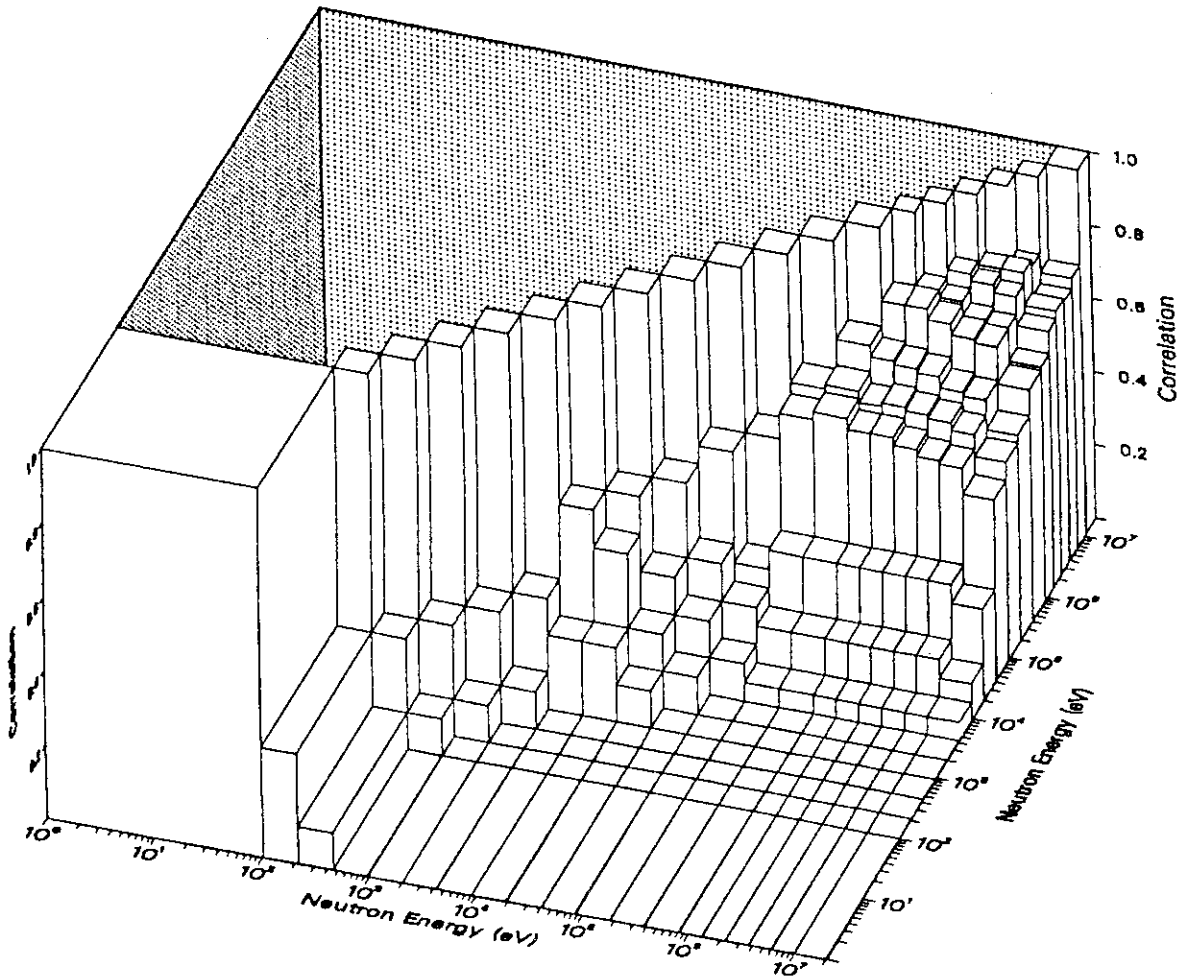


Fig. 2.6.2 Correlation matrix of ^{240}Pu fission cross section

Correlation Matrix Pu-240 fission and U-235 fission

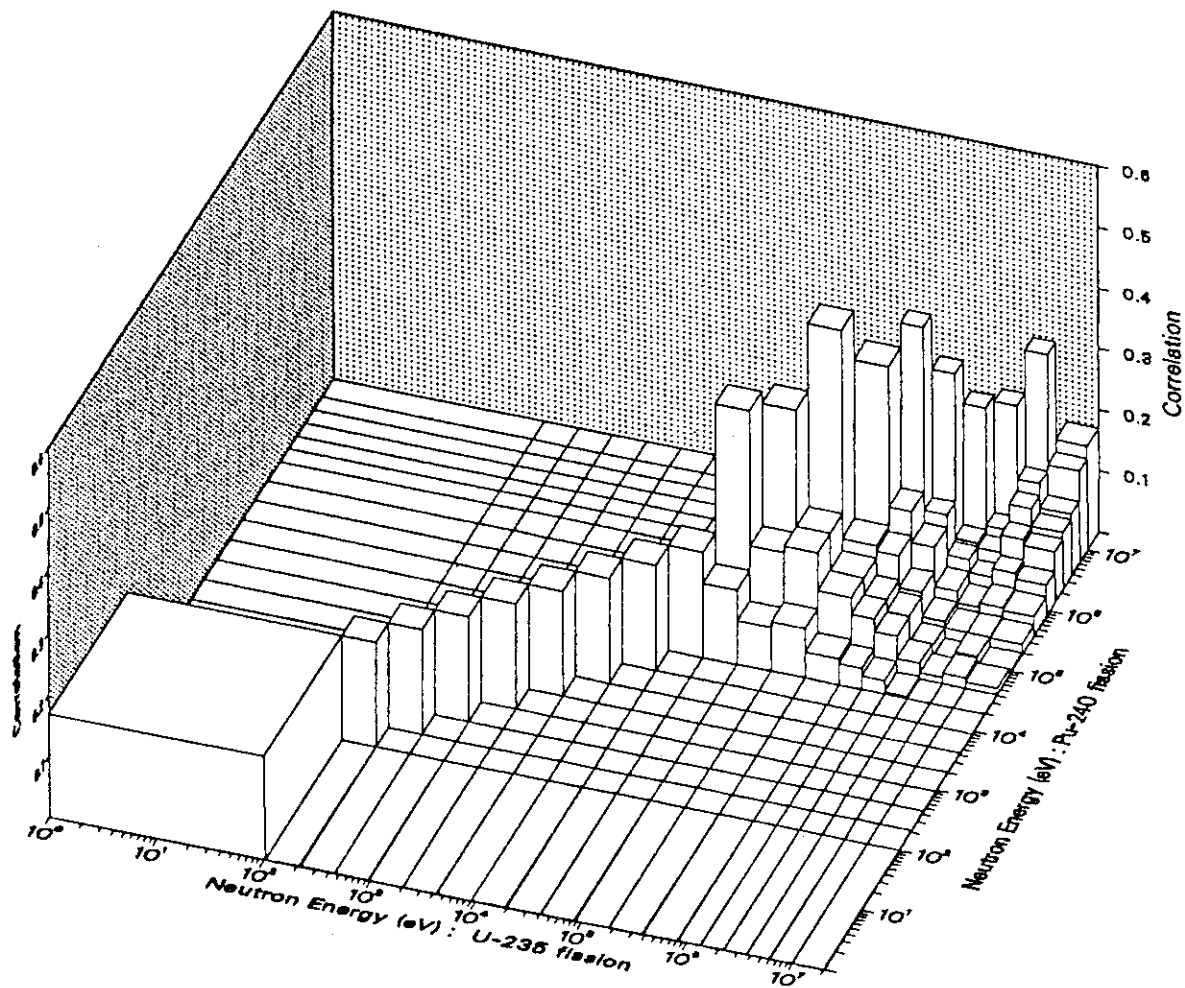


Fig. 2.6.3 Correlation matrix of ^{240}Pu fission cross section and ^{235}U fission cross section

Correlation Matrix Pu-240 fission and U-238 fission

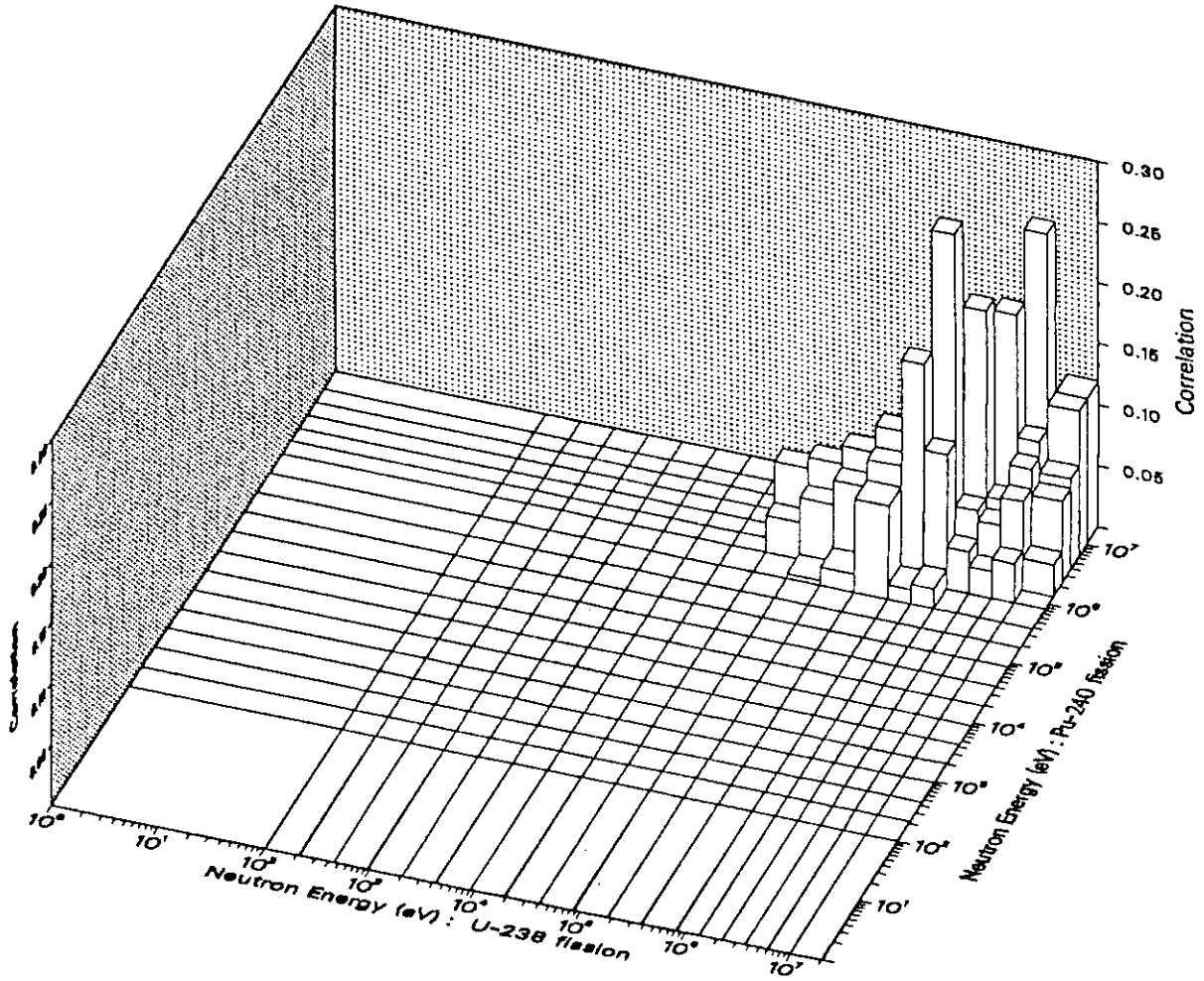


Fig. 2.6.4 Correlation matrix of ^{240}Pu fission cross section and ^{238}U fission cross section

Correlation Matrix Pu-240 fission and Pu-239 fission

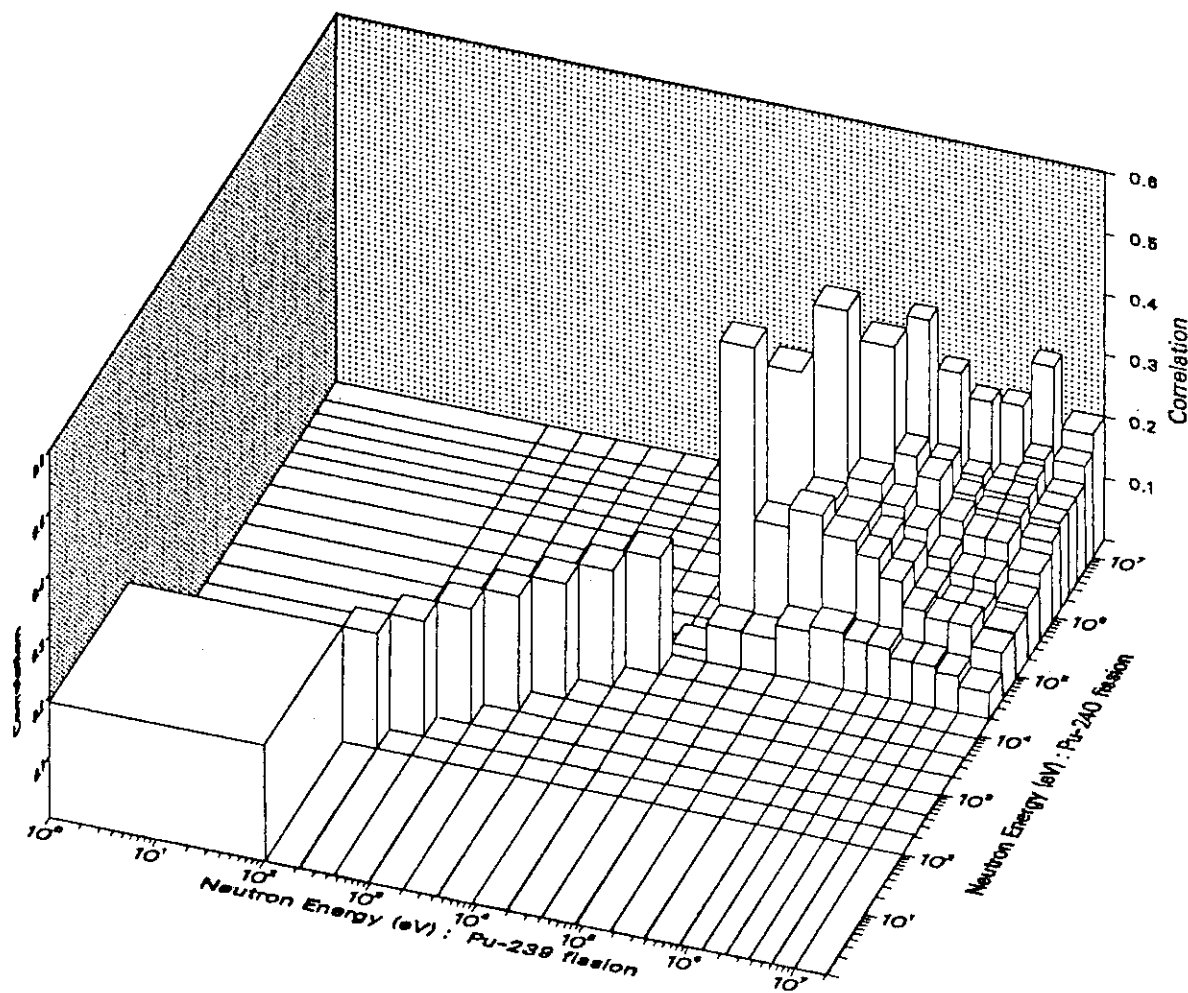


Fig. 2.6.5 Correlation matrix of ^{240}Pu fission cross section and ^{239}Pu fission cross section

Correlation Matrix Pu-240 fission and Pu-241 fission

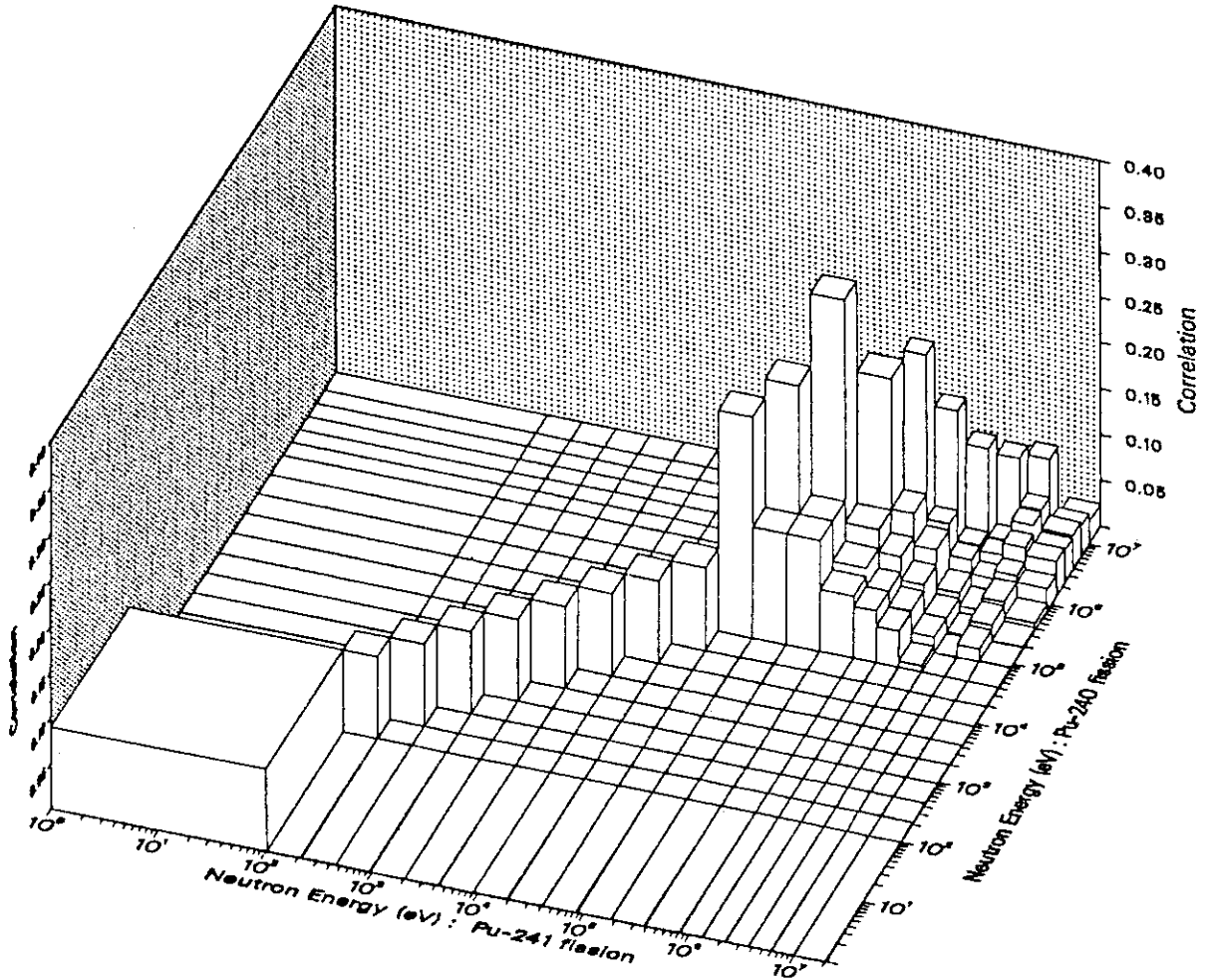


Fig. 2.6.6 Correlation matrix of ^{240}Pu fission cross section and ^{241}Pu fission cross section

3. ま と め

JENDL-3 の 6 種類の反応断面積の共分散データの推定を行った。 ^{14}N の弾性散乱断面積と Fe の非弾性散乱断面積は、JENDL-3.1 と JENDL-3.2 の両方のデータに対して共分散を与えた。そのほかの、 $^{14}\text{N}(n,p)$ 反応断面積、 ^{15}N 弾性散乱断面積、 ^{23}Na 非弾性散乱断面積および ^{240}Pu 核分裂断面積は、JENDL-3.1 と JENDL-3.2 でデータが同じなので 1 種類の共分散を与えた。

断面積の誤差は、測定値や評価手法を考慮して推定した。測定値と JENDL-3 の比較図に誤差幅をつけて結果を図示した。それらの図から、測定値のばらつきと比較して今回の推定値がほぼ妥当なものであることが確認できた。

共分散は、本来、核データ評価の際のデータ fitting 等により導かれるものであろう。今回の作業のように、既に評価値があり、それに対する共分散を決めなければならない場合は、かなり強引な仮定のもとに相関マトリックスを推定しなければならない。今回の結果のうち、 ^{240}Pu 核分裂断面積の 100 keV 付近より上は、同時評価の結果得られた相関マトリックスを与えており、信頼できるものである。その他の断面積については、このようなデータ fitting 手法がデータ評価に使用されていなかったため、大まかな推定値を与えた。

現在、シグマ委員会の「共分散評価ワーキンググループ」で共分散評価手法の検討が進められている。その結果、より一般的な場合に適用できる共分散の導出法が提案されることを期待する。

参 考 文 献

- 1) Nakazawa M., Kobayashi K., Iwasaki S., Iguchi T., Sakurai K., Ikeda Y. and Nakagawa T.: "JENDL Dosimetry File," JAERI 1325 (1992).
- 2) 中川 庸雄、菊池 康之: 「評価済核データの共分散と炉定数調整結果の検討」、未公開 (1992).
- 3) 日本原子力研究所核データセンター: Japanese Evaluated Nuclear Data Library version-3、Revision 2 (1994).
- 4) Rossel J.: *Helvetica Physica Acta*, 20, 105 (1947).
- 5) Gibert A., Keller R. and Rossel J.: *Helvetica Physica Acta*, 19, 493 (1946).
- 6) Fermi E. and Marshall L.: *Phys. Rev.*, 71, 666 (1947).
- 7) Mughabghab S.F. et al.: "*Neutron Cross Sections, Vol. 1 Part A*," Academic Press (1981).
- 8) Perey F.G. and Kinney W.E.: "Nitrogen Neutron Elastic and Inelastic Scattering Cross Sections from 4.34 to 8.56 MeV," ORNL-4805 (1974).
- 9) Dimbylow P.: *Phys. in Medicine and Biology*, 25, 637 (1980).
- 10) Templon J.A., Dave J.H., Gould C.R. Singkarat S.: *Nucl. Sci. Eng.*, 91, 451 (1985).
- 11) Baba M., Ono M., Yabuta N., Kikuti T. and Hirakawa N.: *Proc. INT. Conf. on Nuclear Data for Basic and Applied Science, Santa Fe, 13-17 May 1985, Vol. 1*, p. 223 (1986).
- 12) Chardine J., Haouat G., Seguin S. and Humeau C.: "Neutron Elastic and Inelastic Scattering from ^{14}N between 7.7 and 13.5 MeV," CEA-N-2506 (1986).
- 13) Young P.G. and Arthur E.D.: "GNASH: A Preequilibrium, Statistical Nuclear-Model Code for Calculation of Cross Sections and Emission Spectra," LA-6947 (1977).
- 14) Koehler P.E. and O'brien H.A.: *Phys. Rev.*, C39, 1655 (1989).

- 15) Morgan G.L.: Nucl. Sci. Eng., 70, 163 (1979).
- 16) Fukahori T.: "Evaluation of Neutron Nuclear Data of ^{15}N ", JAERI-M 89-047 (1989).
- 17) Hetrick D.M. et al.: "Generation of Covariance Files for the Isotopes of Cr, Fe, Ni, Cu and Pb in ENDF/B-VI," ORNL/TM-11763 (1991).
- 18) Zeitnitz B. et al.: "High Resolution Total Neutron Cross Section of ^{15}N between 0.9 and 32.0 MeV," KfK-1443 (1971).
- 19) Sikkema C.P.: Nucl. Phys., 32, 470 (1962).
- 20) Fossan D.B. et al.: Phys. Rev. 135B, 1347 (1964).
- 21) Fossan D.B. et al.: Phys. Rev. 152, 980 (1966).
- 22) Towle J.H. and Gilboy W.B.: Nucl. Phys., 32, 610 (1962).
- 23) Chien J.P. and Smith A.B.: Nucl. Sci. Eng., 26, 500(1966).
- 24) Lind D.A. and Day R.B.: Ann. Phys., 12, 485(1961).
- 25) Freeman J.M. and Montague J.H.: Nucl. Phys., 9, 181(1958).
- 26) Igarasi S. and Fukahori T.: JAERI 1321(1991).
- 27) Perey F.G., Kinney W.E. and Macklin R.L.: Proceedings of 3rd Conf. on Neutron Cross-Sections and Technology, Knoxville, Vol. 1, 191 (1971).
- 28) Kinney W.E. and Perey F.G.: Nucl. Sci. Eng., 63, 418 (1977).
- 29) Gilboy W.B. and Towle J.H.: Nucl. Phys. 64, 130 (1965).
- 30) Broder D.L. et al.: "Inelastic Neutron Scattering ($n, n'\gamma$) by Fluorine, Iron, Cobalt, Nickel and Tantalum Nuclei," Proc. Second Int. Conf. on Nuclear Data for Reactors, Helsinki 1970, Vol. 2, p.295, (1970).
- 31) Smith D.L.: "Fast-Neutron Gamma-Ray Production from Elemental Iron: $E_n \leq 2$ MeV," ANL/NDM-20 (1976).
- 32) Smith A. and Guenther P.: Nucl. Sci. Eng., 73, 186 (1980).
- 33) Hopkins J.C. and Silbert M.G.: Nucl. Sci. Eng., 19, 431 (1964).
- 34) Hasegawa A.: Private communication (1993).
- 35) Voss F. et al.: "Measurement of High Resolution γ -Ray Production Cross

- Sections in Inelastic Neutron Scattering on Al and Fe between 0.8 - 13 MeV,"
Proc. Third Conf. on Neutron Cross Sections and Technology, Knoxville 1971,
p. 218 (1971).
- 36) Mughabghab S.F.: "*Neutron Cross Sections, Vol. 1, Part B,*" Academic Press
(1984).
 - 37) Hockenbury R.W. et al.: Nucl. Sci. Eng., 49, 153 (1972)
 - 38) Kolar W. and Boeckhoff K.H: J. Nucl. Energy, 22, 299 (1968).
 - 39) Weston L.W. and Todd J.H.: Nucl. Sci. Eng., 88, 567 (1984).
 - 40) Auchampaugh G.F. and Weston L.W.: Phys. Rev. C12, 1850 (1975).
 - 41) Towle J.H. and Owens R. O.: Nucl. Phys., A100, 257 (1967).
 - 42) Anderson J.D. and Wong C.: UCRL-50001-66-2, p.19 (1966). Data were
taken from EXFOR.