

J E N D L — 3.2 の完成

(日本原子力研究所) 菊池 康之

1. 序言

JENDL-3¹⁾は、1989年末に公開され、1990年末に編集上のバグを修正した JENDL-3.1 が現在使われている。この JENDL-3.1 を用いて軽水炉、高速炉、遮蔽、核融合炉中性工学等の幅広い見地からベンチマークテストが行われた²⁾。その結果 JENDL-3.1 の問題点がフィードバックされ、それを受けてシグマ委員会内に重核データ修正WGとガンマ線生成データ修正WGを設置し、1992年度から約1年半かけて再評価が行われた。この作業においては、NEA 原子力科学委員会国際評価協力ワーキングパーティー (NEANSC/IECWP) で、実験値間や評価値間の不一致があるとして検討されている点³⁾も考慮した。

この作業がほぼ終了したのでここに報告する。改訂されたデータは JENDL-3 Revision 2 (JENDL-3.2)として、1994年3月に公開予定となっている。

2. JENDL-3 に対するベンチマークテストのまとめ

これらのベンチマークテストにおいて指摘された JENDL-3.1 の主な問題点としては、

- 1) 重核の共鳴パラメータが JENDL-2 のままで時代遅れである。
- 2) ^{235}U の核分裂スペクトルと非弾性散乱に問題がある。
- 3) ^{235}U の捕獲断面積が大きすぎるのではないか。
- 4) ^{238}U の非弾性散乱断面積が大きすぎないか。
- 5) N, Na, Fe の全断面積に問題がある。
- 6) Fe の非弾性散乱断面積が小さすぎる。
- 7) ガンマ線生成断面積にエネルギーバランス等の問題がある。
- 8) 核融合中性子工学の立場からは、DDX を File 6 で与えて欲しい。

等が挙げられる。

また NEANSC/IECWP で問題とされている点としては、

- 1) ^{235}U の捕獲断面積は本当に低いのか。
- 2) ^{235}U の η にエネルギー依存性はあるのか。
- 3) ^{239}Pu の核分裂が 1~100 keV で実験値間に 5% の食い違いがある。
- 4) 核分裂生成物(FP)の非弾性散乱に直接過程を考慮すべき。

等が挙げられる。

3. 改訂項目

上記の問題提起を考慮し、かつ核融合炉中性子工学からの要求や新しい実験値を検討して、JENDL-3.2 のための改訂すべき項目を Table 1 に示すように決定した。

この内、DDX に関しては JENDL 特殊目的ファイルの1つである JENDL Fusion File に対応する事とし、FP データの改訂は FP 核データWG、重核及び Fe, Na は重核データ修正WG、ガンマ線生成データはガンマ線生成データ修正WGが担当して改訂を行った。

4. 重核データ

4.1 共鳴パラメータ

JENDL-3.1 の共鳴パラメータは JENDL-2 の物をそのまま使用しており、そのエネルギー領域も狭く、又共鳴間の干渉を無視した Breit-Wigner 公式を主として用いており、米国の ENDF/B-VI や欧州の JEF-2 に比べて見劣りがしていた。そこでこの時点で核データセンターに原研リサーチフェローとして滞在していた H. Derrien が、Bayes 理論に基づく SAMMYコードを用い、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu の共鳴パラメータの評価を行い JENDL-3.2 に採用した^{4, 5, 6)}。また ^{238}U は Moxon等の JEF-2の評価値⁷⁾を、 ^{235}U は Leal等の評価値⁸⁾を採用した。これらは全て Reich-Mooreの多単位多チャンネル公式によって、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu は世界で最新のものとなった。両者の比較を Table 2 に示す。

Reich-Moore 公式は、レベル間の干渉効果を正しく考慮しているので、核分裂断面積の共鳴の非対称性を正しく再現できる。Fig. 1 に ^{235}U の例を示す。JENDL-2 のパラメータでは再現できない構造が良く再現されている。但し共鳴パラメータから断面積を計算する時間は、共鳴の本数にもよるが、10倍はかかる事に注意を要する。

非分離共鳴に関しては、スペクトルの硬い炉でのドップラー効果を考慮して、 ^{238}U の上限エネルギーを150 keV まで拡張した。

4.2 熱中性子領域の ^{235}U の η 値

熱中性子体系の臨界実験における温度係数の計算値との不一致に関し、Santamarina は、① ^{235}U の捕獲断面積の非 $1/v$ 性、② ^{235}U の ν 値のエネルギー依存性、③ ^{235}U の η 値のエネルギー依存性の3つの可能性を指摘した⁹⁾。この問題は NEANSC/IECWP で検討され、このうち①と②は微分実験の見地から否定されたが、③の ^{235}U の η 値に関しては Geel と Harwell で実験が行われ、エネルギー依存性のある事が確認された¹⁰⁾。JENDL-3.2 で採用した ^{235}U の共鳴パラメータでは、Fig. 2 に示されるようにこのエネルギー依存性が再現されている。

4.3 核分裂断面積

核分裂断面積に関しては、ベンチマークテストからの指摘は特に無かった。

しかし ^{239}Pu に関して 1980年代後半に、その1~100 keV の断面積が ORNL と Geel という世界の二大測定センターでの測定値で5%も食い違い大問題となった。この問題は NEANSC/IECWP で検討され、ORNL が再測定をして規格化の条件を検討した結果解決した¹¹⁾。その結果、JENDL-3.1 を修正する必要はなかった。

^{235}U は、後述の捕獲断面積と共に再検討し、平均のビン巾を小さくして非分離共鳴領域の構造の再現性を向上させたが、本質的には変化はない。(Fig.3参照)

4.4 捕獲断面積

JENDL-3.1 においては、 ^{235}U の α が高すぎる事が積分実験より強く指摘された。JENDL-3.1 の α 値は、Fig.4 に見られるように全ての実験値を平均して求められた。しかし実験値を詳細に検討すると、Muradjan 等により開発された4 π カウンターによる測定値¹²⁾は系統的に低い事が分かった。原理的にバックグラウンド補正の不要な4 π カウンターの利点を考慮して、JENDL-3.2 では低い値を採用した。その結果、10 keV 以下の捕獲断面積は Fig.5 に見られるように大幅に減少した。

^{238}U の 50~200 keV の値は、20年来微分測定と積分測定の矛盾が問題になってきていた。NEANSC/IECWP でこの問題を検討した結果、多くの古い微分測定の規格化に問題がある事が判明し、再規格化の結果積分実験の要求する低い値となり、問題は解決した¹³⁾。JENDL-3.1 は最新の Kazakov 等¹⁴⁾の測定した低いデータを重視して評価しており、修正の必要はなかった。(Fig.6参照)

4.5 非弾性散乱(断面積, 角度分布, エネルギー分布)

アクチノイドの非弾性散乱は、レベル間隔が狭く弾性散乱との区別の難しい事、核分裂と競争する事から実験が困難であり、評価は理論計算に頼らざるを得ない。しかし理論計算の結果も使用する核模型やパラメータに大きく依存し誤差は大きく、現在主要な評価済データファイル間でもその差は数十%になっているケースもある。一方アクチノイドの非弾性散乱は、炉内スペクトル形成に重要な役割をはたしており、特に ^{238}U の非弾性散乱は極めて重要である。そのため非弾性散乱データに対して、積分側から種々のフィードバックが来るが、その要求も相互に矛盾している事も多く、取扱は困難である。

^{238}U に関しては、その非弾性散乱断面積が大きすぎるのではないかと指摘が単純体系ベンチマークテストからなされた¹⁵⁾。実験値としては A.B.Smith 等のもの¹⁶⁾が有るのみで、その値は JENDL-3.1 よりかなり低く JENDL-2 に近いように見受けられた。し

かし原論文を良く検討すると、あるエネルギー以下のレベルへの非弾性散乱は弾性散乱に含まれている事が記述されている。そこでこの低エネルギーレベルへの非弾性散乱を JENDL-3.1 のデータで補正して全非弾性散乱の値を求め、その値を再現するように計算パラメータを求め直し再計算を行った。その結果を Fig.7 に示す。JENDL-3.1 よりは多少低くなったが JENDL-2 よりはまだかなり高い。

^{235}U についても ^{238}U と同じ検討を行った結果、修正の必要がないとの結論に達した。 ^{239}Pu に関しては、個々のレベルへの部分断面積には実験値との食い違いも見られたが、全体としては修正の必要はないと結論された。

いちばん重要な ^{238}U に関しては、NEANSC/IECWP において現在も検討が進んでいるが、新たな実験を国際協力で進める必要性が認識された。しかしそれを待っていたのでは JENDL-3.2 のスケジュールに間に合わないので、現状の部分断面積の実験値を再検討して修正を行った。その結果を Fig.8 に示す。JENDL-3.1 と余り大きな変化はなく、東北大の馬場等の実験値¹⁷⁾ よりかなり大きい。この馬場等の実験値は最近の Obninsk での Kornilov 等の測定¹⁸⁾ でも支持されているので、やや気になるところであるが、現状ではやむを得ない。

結論として JENDL-3.2 のデータは現時点の測定データの現状から見れば最上であるが、今後の測定データにより、大きく変わる可能性もある。

4.6 (n, 2n), (n, 3n) 反応断面積

これらの断面積は実験値が乏しくほとんど理論計算に依っており、その誤差も大きい。 ^{235}U の (n, 2n) 反応断面積の場合は、小林による核分裂スペクトルでの平均値の実験¹⁹⁾ に規格化して求めていたが、その規格化に間違いがあったので修正した。その際に JENDL-3.1 で用いられた単純な蒸発モデル計算から前平衡過程を考慮した計算に変更した。

Fig.9 に ^{235}U の (n, 2n) 反応断面積を示す。最近の評価である ENDF/B-VI や JEF-2 と比較して、相互の食い違いの大きい事が分かる。

4.7 核分裂スペクトル: χ

核分裂スペクトルは実験が困難である事から、誤差の大きい量である反面、原子炉の臨界性に大きな感度を持つ事から、核データの見地では最も問題の残る量である。核分裂スペクトルを表す公式としては、Maxwell, Watt²⁰⁾, Madland-Nix²¹⁾ 等が提唱されている。JENDL-3.1 では、主要アクチノイドに対しては、理論的に最も秀れた Madland-Nix を採用している。しかしこれらの公式には、レベル密度や核温度等のパラメータが必要で、この誤差がスペクトルの誤差となる。

JENDL-3.2 では、 ^{238}U において、JENDL-3.1 で採用されたレベル密度パラメータが過

大評価であったため、スペクトルが硬すぎた事が分かり修正した。また実験値の比較的豊富な ^{235}U , ^{239}Pu と ^{238}U に関しては、大沢が核分裂片の非等温性と多チャンス核分裂の影響を考慮した改良 Madland-Nix 公式²²⁾を採用した。Fig. 10~13 に ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu の核分裂スペクトルの JENDL-3.1 と JENDL-3.2 の比較を示す。

5. 構造材データ

構造材及び一部の軽核のデータについては、遮蔽ベンチマークテスト²³⁾からのフィードバックが重要であった。

5.1 全断面積

全断面積のテストとしては、Broomstick 実験²⁴⁾が極めて有効である。この実験は被検体の細長い棒(Broomstick)に対して軸方向の中性子透過スペクトルを TOF で測定するものである。一度でも散乱された中性子は検出器に届かないので、透過率は $\exp(-\Sigma x)$ で表され、全断面積の直接的な検証となる。テストでは、N, Na, Feに問題が指摘された。

1) ^{14}N

^{14}N の評価において、JENDL-2 から JENDL-3 への再評価中に弾性散乱と非弾性散乱のバランスを崩していたことが判明し、評価をやり直した。

2) ^{23}Na

JENDL-3.1 の Na の Broomstick スペクトルは Fig. 14 に示すように、全エネルギー領域で過大評価となっている。これは全断面積の過小評価を意味する。微分実験と比較してみると(Fig. 15), JENDL-3.1 では KfK の Cierjacks 等の実験値²⁵⁾に基づいて評価をしている。一方 ORNL の Larson 等はこれより高い値を与えている²⁶⁾。JENDL-3.2 では Larson 等の値に基づいて再評価を行った。その結果 Fig. 14 に示すように、Broomstick スペクトルを極めて良く再現できるようになった。

3) Fe

JENDL-3.1 の Fe の Broomstick スペクトルを Fig. 16 に示すが、3 MeV 以下で ENDF/B-IV と比較してかなり過小評価になっている。しかし平均値で比較すると、JENDL-3.1 と ENDF/B-IV の間に差はほとんどない。このパラドックスを説明するために両者を詳細に検討すると、このエネルギー領域でまだ残っている共鳴構造に差が見られた。JENDL-3.1 では KfK の Cierjacks 等の高分解実験データ²⁷⁾を NDES でトレースして求めているが、実験の分解能により構造が鈍ってきているのを補正していなかった。そのため共鳴の山は低くなり谷は浅くなっている。この谷が浅くなった事により、ウィンドウ効果による透過を過小評価してしまったと思われる。一方 ENDF/B-IV では何らかの方法で分解能を補正しているものと思われる。このことは 19

70年代（今ではない）の米国の核データ活動の実力を如実に物語っている。

原因は分かったが対策は容易ではない。分解能関数のかかった量から元の量を導くのは一種のアンフォールディングである。今回は Fig. 17 に示す式により、アイテレイションにより求めた。この意味は、ある点を中心として分解能関数を掛けて積分した値がその点での JENDL-3.1 の値と等しくなるためには、どれだけ JENDL-3.1 より変化しなければならないかをアイテレイションで求めるものである。このアイテレイションは無限回繰り返すと、各々のピークでの δ 関数に収束してしまうので、適当な所で打ち切らなくてはならない。Broomstick 実験の結果に合わせるように試行錯誤の結果、1～2回のアイテレイションで十分である事が判明した。この様にして求めた全断面積を Fig. 18 に示す。JENDL-3.2 による Broomstick スペクトルは Fig. 17 に示すように著しい改善が見える。

この方法による修正は、Broomstick 実験のない Cr, Ni 等にも適用した。

5.2 Fe の非弾性散乱

厚い Fe の体系中の深層透過スペクトルを測定した ASPIS 実験²⁰⁾を解析したところ、JENDL-3.1 は 0.5～2 MeV のエネルギー領域のスペクトルを過小評価する事が分かった。種々の感度解析の結果から 2 MeV 以上の非弾性散乱断面積の過小評価が疑われた。最近の微分実験と比較した結果、JENDL-3.1 のデータは過小評価である事が確認され、Fig. 19 に示されたように JENDL-3.2 では約 20 % 大きな値を採用した。この差は主として ⁵⁶Fe の 847 KeV への非弾性散乱に依るものである。(Fig. 20参照)

JENDL-3.2 を用いても、この領域のスペクトルはまだ過小評価気味であり、特に END F/B-IV に比べてもかなり過小評価になっている。この原因は現在解明中である。

5.3 天然元素の非弾性散乱データの Q-値

²⁵²Cf 線源を中心に置いた Fe 球殻からの漏洩スペクトルを測定した KfK 実験²¹⁾及び FNS での中性子透過実験²²⁾において、JENDL-3.1 は数十 keV 以下の低エネルギースペクトルを過小評価する事が指摘された。この原因解明もかなり手間取ったが、結局 Q-値の与え方に問題のある事が判明した。

天然元素のデータを同位体のデータから組み上げる際に、ENDF フォーマットの制約から、非弾性散乱の総レベル数を 40以下に押さえなくてはならない。そのためエネルギーの近いレベルを組み合わせて一本のレベルと見なしていく。JENDL-3.1 では、主同位体である ⁵⁶Fe のレベルが例えばマイナーな ⁵⁴Fe のより低いレベルと組み合わせられ、Q-値としては、⁵⁶Fe の値が与えられている。このため断面積としては圧倒的に大きい主同位体の非弾性散乱のしきい値が小さくなったような効果となり、非弾性散乱による中

性子減速能が小さくなり、低エネルギーのスペクトルの過小評価となっていた。

JENDL-3.2 ではこの問題を解決するために、レベルの組み合わせを変えて、主同位体のレベルは常に最も低くなるようにし、主同位体のQ-値が変わらないようにした。同様な修正を他の天然元素に対しても行った。

6. 核分裂生成物 (FP) データ

6.1 熱中性子断面積及び共鳴積分

最近オメガ計画のために、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 等の熱中性子断面積が測り直されており、従来信じられていた値と大きく異なる値が報告されている。これらの新実験値を採用して再評価を行った。

6.2 共鳴パラメータ

FP のデータは、ORNL の Macklin 等が精力的に測っていたが、彼の処理コードに誤りがあり、そのため発表された実験値に補正が必要となった^{8,11)}。JENDL-3.1 の共鳴パラメータの一部にはこの補正がなされていないものがあり、補正を行った。また JENDL-3.1 の評価以後公刊された実験値がある場合にはこれも考慮して再評価を行った。

6.3 捕獲断面積

JENDL-3.1 の評価以後新しい実験データが公刊された場合には、それらを考慮し、必要なら規格化をやり直した。Fig. 21 には ^{124}Sn の例を示す。

また新しい実験値のエネルギー依存性を再現するために、光学ポテンシャルその他のパラメータまで戻って再評価したケースもある。

6.4 非弾性散乱断面積

偶々核の弱吸収体で核分裂収量が大きい核種の場合には、非弾性散乱の効果が炉特性に無視できなくなる。これらの核種に対しては、直接過程を考慮して再評価を行った。これは NEANSC/IECWP のタスクでもある。

7. ガンマ線生成データ

ガンマ線生成データは、JENDL-3 で初めて取り入れられた。従って評価法も他のデータに比べて経験不足の面は否めない。またベンチマークテストにしても本格的なものは端緒に着いたばかりである。

しかし核融合中性子工学や遮蔽の立場からのフィードバックはかなりあり、また評価者自身がデータの見直しやチェックを行った結果、全体にかなりの問題があり、全面的

に見直しを行った。

7.1 エネルギーバランス

JENDL-3.1 ではエネルギーバランスのとれていない核種がかなりあった。この原因は以下の二つである。

1) 積分データの安易な採用

JENDL-3 公開前に ORNL/TSF における積分実験を利用したベンチマークテスト^{8,2)}を行った。その結果、統計モデル計算で与えられた熱中性子捕獲によるガンマ線スペクトルが実験に合わない事が指摘された。そこで急遽再評価が行われたが、時間の制約から積分実験の値をなぞる事で済ませた核種もあった。この場合ガンマ線多重度の検討をしていなかったためエネルギーバランスが崩れてしまった。

JENDL-3.2 の再評価では、ORNL/TSF の実験値に合うよう分岐比等のパラメータを調節して、再度統計モデル計算を行った。計算値ではエネルギーバランスは自動的に保たれる。Fig. 22 に ^{60}Ni の熱中性子捕獲ガンマ線スペクトルを示す。

2) 天然元素の Q-値

前述の非弾性散乱の場合と類似した問題で、JENDL-3.1 における天然元素の Q-値は、同位体中の最大のもので与えられていた。これでは当然放出ガンマ線のエネルギーを過大評価してしまうので、同位体存在比と生成断面積の積を重みとした平均値を与える事とした。

7.2 天然元素の離散単位

JENDL-3.1 では、天然元素のガンマ線スペクトルは連続スペクトルのみが与えられていた。しかしこれではベンチマークテスト等で観察される鋭いピークスペクトルを再現できない。JENDL-3.2 では数 MeV 以下の領域で離散レベルからのガンマ線を考慮した。Fig. 23 には 1.7 MeV 中性子入射に対する ^{60}Ni からのガンマ線スペクトルを示す。

7.3 MeV 領域のガンマ線スペクトルの形

JENDL-3.1 の計算による評価値は、高エネルギー中性子入射に対するガンマ線スペクトルの数 MeV の領域での実験値の形を再現できないケースがかなりある。JENDL-3.2 の評価では、エネルギーバランスに注意しながら、実験値に合うよう計算値を手直した。Fig. 24 に ^{56}Fe の 9 MeV 中性子入射に対するガンマ線スペクトルを示す。

8. 結語

JENDL-3.1 の利用経験にもとづくフィードバック情報を受けて再評価を行い、JENDL-

3.2 として 1994年 3月に公開の運びとなった。

この改訂作業においては、重要な核種のデータの変更は、感度解析に基づく積分データ検証コードシステム CATEX⁹³⁾により、その都度チェックを行い、間違った方向へ行かない様に注意を払って行った。

JENDL-3.2 への改訂において、積分実験からのフィードバック情報は真剣に考慮されたが、評価は JENDL の基本ポリシーどおり微分データに基づいて行われた。その結果、積分実験との一致も飛躍的に向上したが、一部においては問題がまだ残されているものもある。例えば ²³⁵U の金属球の臨界度は改善されたものの、まだ1%の過大評価になっている。これを解消するには、 χ をさらに軟化させる、非弾性散乱断面積をさらに小さくする、核分裂断面積を下げる等が必要となるが、微分データの立場及び他の積分データのバランスから採用できなかった。

JENDL-3.2 は現時点では世界でも最良の評価済核データライブラリーであり、今後数年にわたって凍結版として改訂する事なく利用していく予定である。

参考文献

- 1) Shibata, K. et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 -JENDL-3-", JAERI 1319 (1990).
- 2) 例えば、浅見哲夫他: 日本原子力学会誌, 31 [11], 1190 (1989).
- 3) 菊池康之: 日本原子力学会誌, 32 [2], 167 (1990).
- 4) Derrien, H.: to be Published in J. Nucl. Sci. Technol., 31 [5] (1994).
- 5) Derrien, H.: J. Nucl. Sci. Technol., 30, 845 (1993).
- 6) Derrien, H.: "Revision of the ²⁴¹Pu Reich- Moore Resonance Parameters by Comparison with Recent Fission Cross Section Measurements", JAERI-M 93-251 (1994).
- 7) Moxon, M.C. et al.: Int. Reactor Phys. Conf., Jacksonhole, Sept. 1988, Vol. 1, p.281 (1988).
- 8) Leal, L.C. et al.: Nucl. Sci. Eng., 109, 1 (1991).
- 9) Santamarina, A. and Tellier, H.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Mito, May 1988, p.47, Saikon Pub. Co. (1988).
- 10) Tellier H.: Proc. Int. Symp. Nuclear Data Evaluation Methodology, BNL, Oct. 1992, p.107, World Scientific (1993).
- 11) Fort, E. et al.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Juelich, May 1991, p.854, Springer-Verlag (1992).
- 12) Muradyan G.V. et al.: Proc. Int. Conf. Neutron Cross Sections for Technology,

- Knoxville, Oct. 1979, p.488, NBS Special Publication 594 (1980).
- 13) Kanda, Y. et al.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Juelich, May 1991, p. 851, Springer-Verlag (1992).
 - 14) Kazakov, L.E. et al.: Yad. Konst., 3(1986), 英訳:INDC(CCP)319/L, p.45(1990).
 - 15) Tian, D. et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 30, 1087 (1993).
 - 16) Smith, A.B. et al.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Antwerp, Sept. 1982, p.39, D. Reidel (1983).
 - 17) Baba, M. et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 27, 601 (1990).
 - 18) Kornilov, N.V. et al.: "Inelastic Scattering of 1-2.5 MeV Neutrons by ^{235}U and ^{238}U Nuclei", INDC(CCP)-355 (1991).
 - 19) Kobayashi, K. et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 10, 668 (1973).
 - 20) Watt, B.E.: Phys. Rev., 87, 1037 (1952).
 - 21) Madland, D.G. and Nix, J.R.: Nucl. Sci. Eng., 81, 213 (1982).
 - 22) Ohsawa, T. and Shibata, T.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Juelich, May 1991, p.965, Springer-Verlag (1992).
 - 23) Kawai, M. et al.: "Shielding Benchmark Tests of JENDL-3", to be published as JAERI-report (1994).
 - 24) Straker, E.A.: "Experimental Evaluation of Minima in Total Cross Sections of Several Shielding Materials", ORNL-TM-2242 (1968).
 - 25) Cierjacks, S. et al.: "High Resolution Total Neutron Cross Sections for Na, Cl, K, V, Mn and Co Between 0.5 and 30 MeV", KFK-1000 (Supplement) (1969).
 - 26) Larson, D.C. et al.: "Measurement of the Neutron Total Cross Section of Sodium from 32 keV to 37 MeV", ORNL-TM-5614 (1976).
 - 27) Cierjacks, S. et al.: "High Resolution Total Neutron Cross-Sections Between 0.5 - 30 MeV", KFK-1000 (1968).
 - 28) Carter, M.D. and Packwood, A.: "The Winfrith Benchmark Experiment in Iron-Experimental Results", Proc. Specialists' Meeting on Sensitivity Studies and Shielding Benchmarks, Paris, Oct. 1975, p.111 (1975), OECD.
 - 29) Werle, H. et al.: "Measurements of Neutron Leakage Spectra from Iron Sphere with a ^{252}Cf Source in the Center", NEACRP-U-73 (1976).
 - 30) Maekawa, F.: Private Communication (1993).
 - 31) Macklin, R.L. and Winters, R.R.: Nucl. Sci. Eng., 78, 110 (1981).
 - 32) Cai, S. et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 27, 844 (1990).
 - 33) Hasegawa, A.: Private Communication (1990).

Table 1 Revision items

DDX

⁶Li, ⁹Be, ¹²C, ¹⁴N, ¹⁹F, ²⁷Al, Ti, Cr, Co, Zr, Nb, Mo, Sb, Ta, W, Pb, Bi,
²³²Th, U

Total cross section

Fe, Na, O

Fission product

New data → thermal value, R.I., capture

Correction error of ORELA data → resonance parameters

Direct inelastic → weak absorber

Heavy nuclides

χ for ²³³U, ²³⁸U, (²³⁹Pu, ²³⁵U)

ν & η for ²³⁵U

Resonance parameters for ²³³U, ²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu

Cross sections for ²³³U(n,n'), ²³³U(n,2n), ²³⁵U(n,f), ²³⁵U(n,γ), ²³⁸U(n,n')

γ-ray production data

Energy balance

Discrete level

MeV region γ spectra

Addition of 10 nuclides 59 → 69

Table 2 Resolved resonance parameters

Nuclide	JENDL-3.1	JENDL-3.2	ENDF/B-VI
U-233	SLBW 1 ~ 100 eV 159 res	R-M 0 ~ 150 eV 189 res	A-A 0.79 ~ 60 eV 83 res
U-235	SLBW 1 ~ 100 eV 148 res	R-M 0 ~ 500 eV 1029 res	R-M 0 ~ 2.25 keV 3355 res
U-238	MLBW 0 ~ 9.5 keV 841 res	R-M 0 ~ 10 keV 1651 res	R-M 0 ~ 10 keV 1913 res
Pu-239	R-M 0 ~ 1 keV 393 res	R-M 0 ~ 2.5 keV 1070 res	R-M 0 ~ 2 keV 787 res
Pu-241	SLBW 0 ~ 100 eV 92 res	R-M 0 ~ 300 eV 243 res	R-M 0 ~ 300 eV 243 res

In each box, resonance formula, resolved resonance range and number of resonances are given. (SLBW: single-level Breit-Wigner, MLBW: multilevel Breit-Wigner, A-A: Adler-Adler, R-M: Reich-Moore)

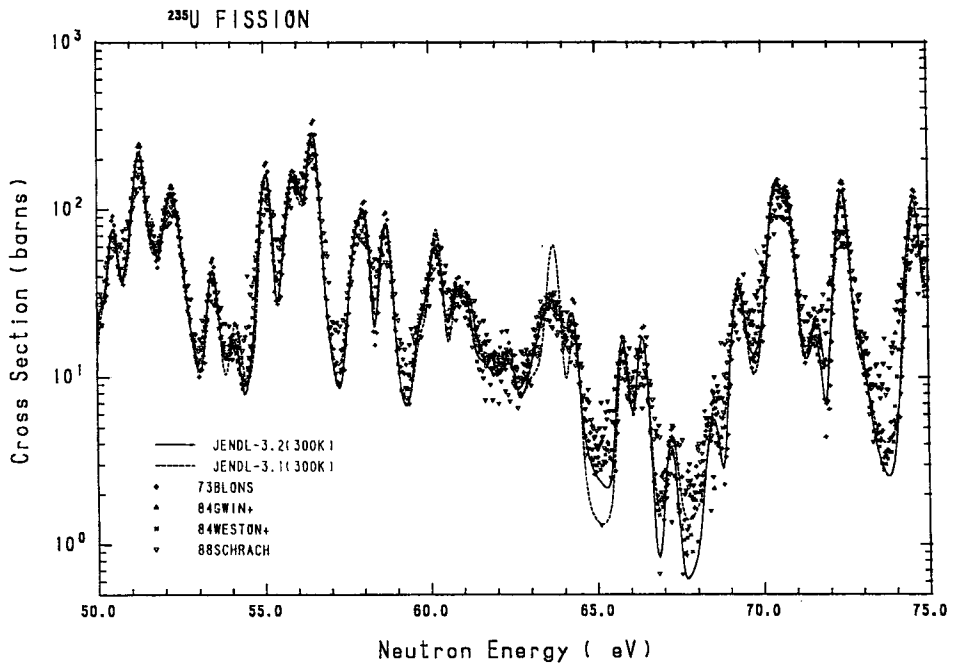


Fig. 1 Fission cross sections of ^{235}U
 JENDL-3.1 : Breit-Wigner formula
 JENDL-3.2 : Reich-Moore formula

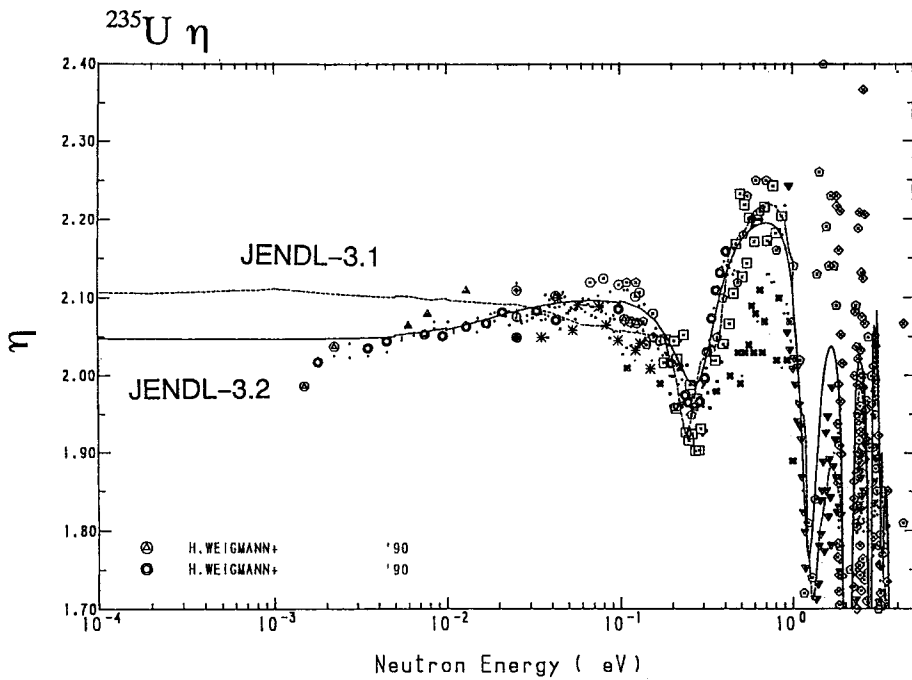


Fig. 2 η -values of ^{235}U

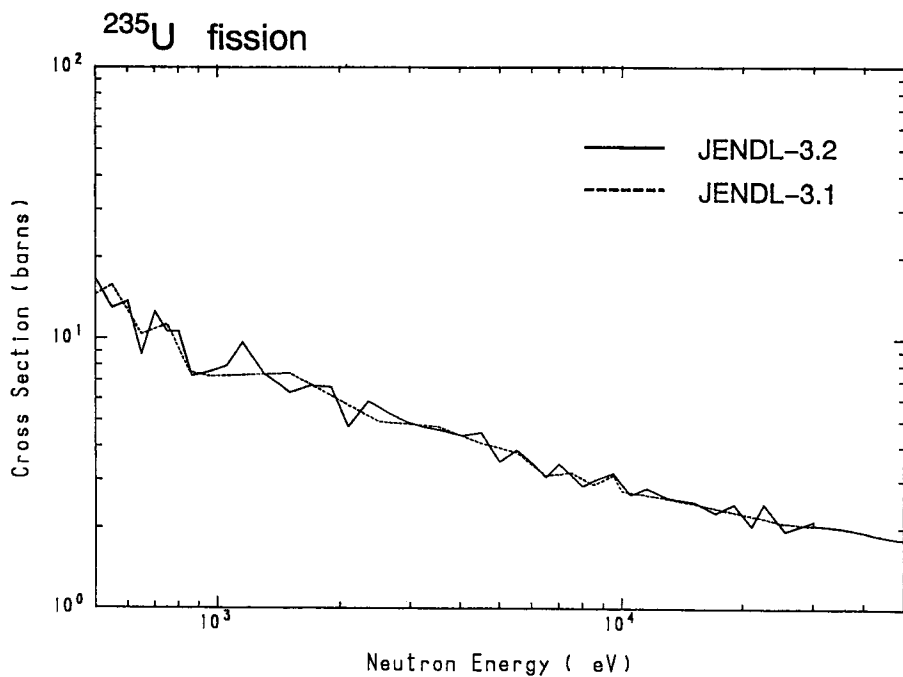


Fig. 3 Fission cross sections of ²³⁵U above resolved resonance region

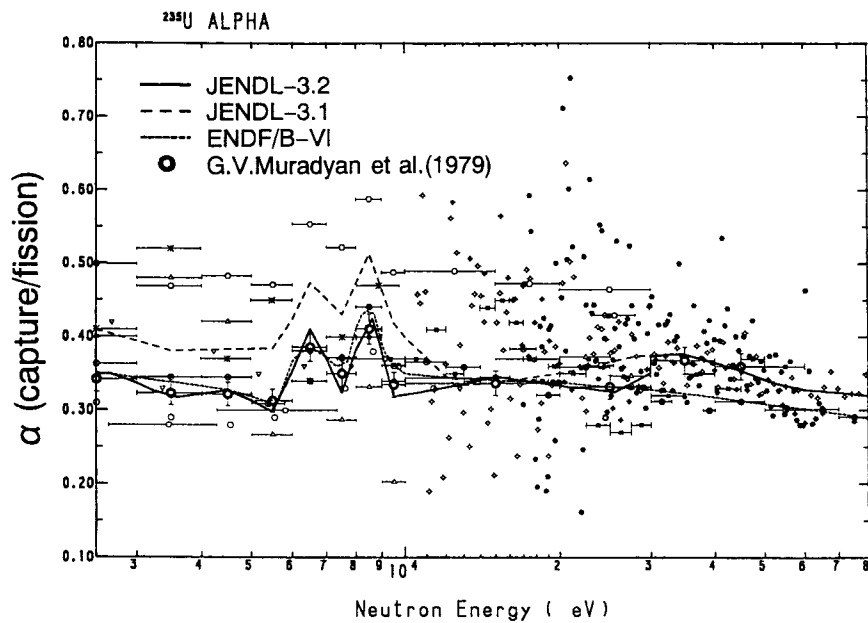


Fig. 4 α -values of ²³⁵U

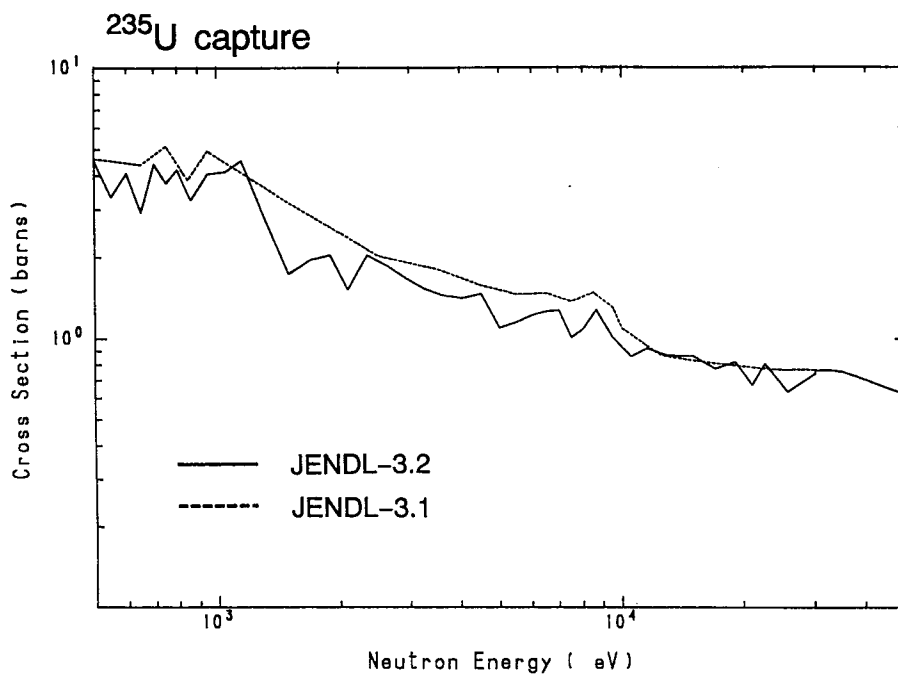


Fig. 5 Capture cross sections of ^{235}U

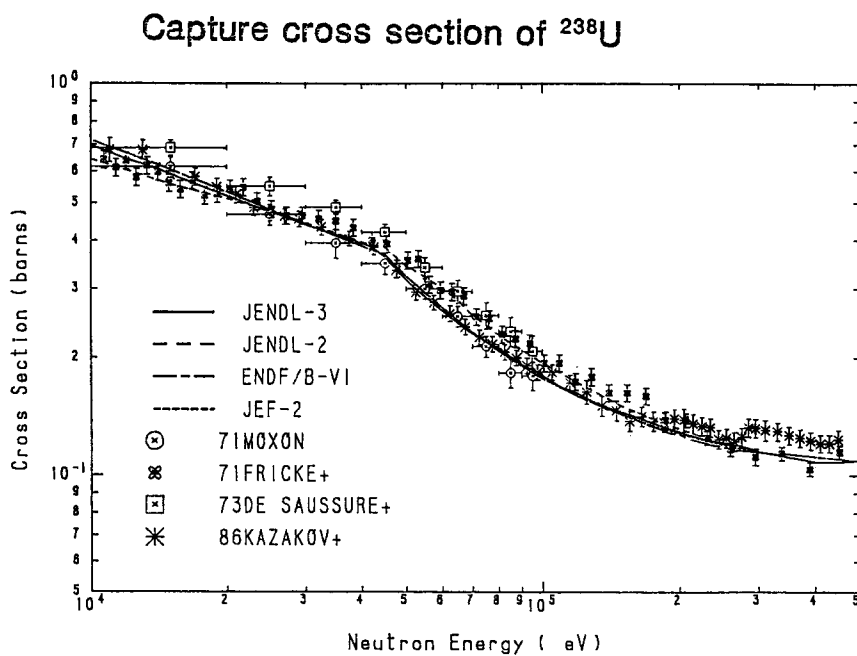


Fig. 6 Capture cross sections of ^{238}U

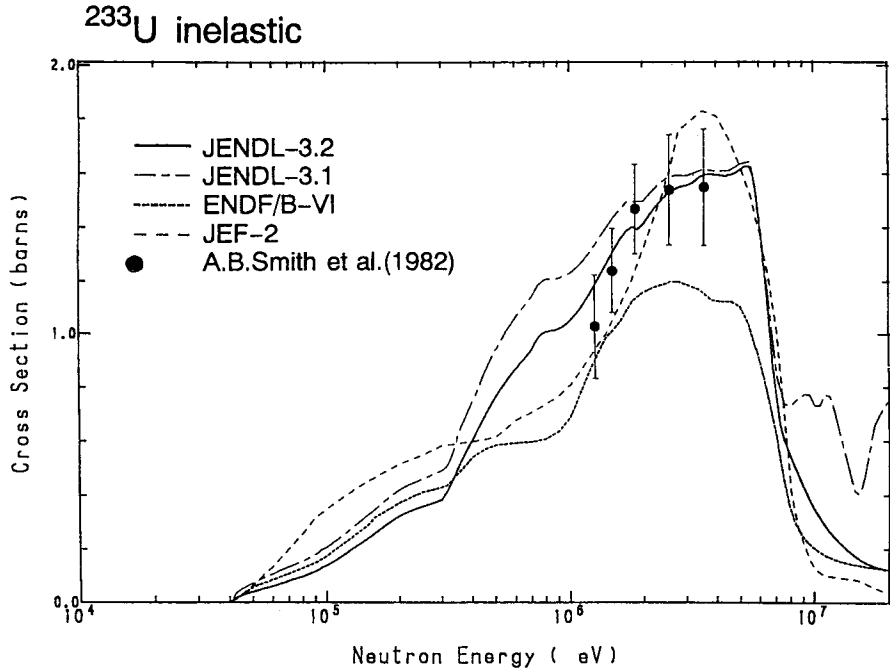


Fig. 7 Total inelastic scattering cross sections of ^{233}U . The data of Smith et al. were corrected for low-lying levels with JENDL-3.1.

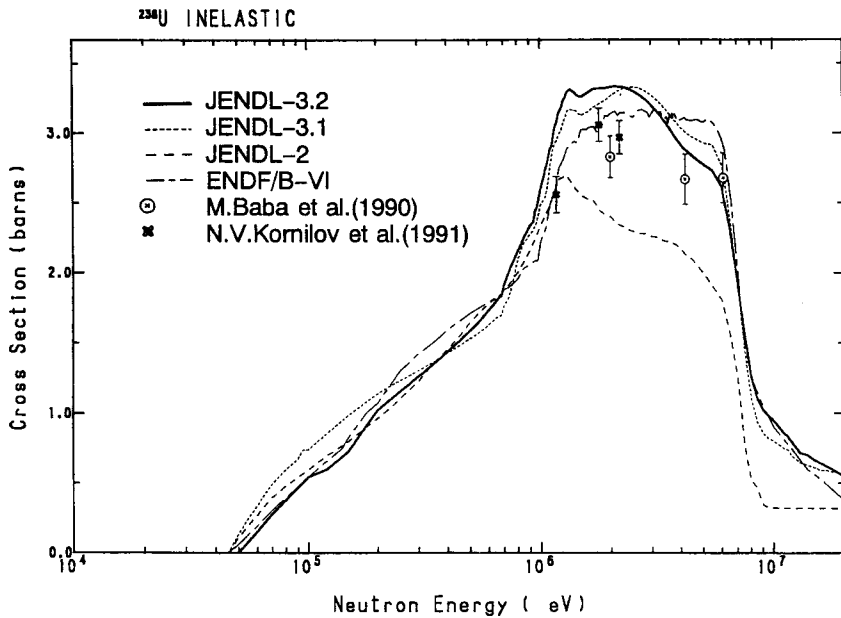


Fig. 8 Total inelastic scattering cross sections of ^{238}U . The data of Kornilov et al. were added the cross sections of low-lying levels by adopting data from ENDF/B-VI.

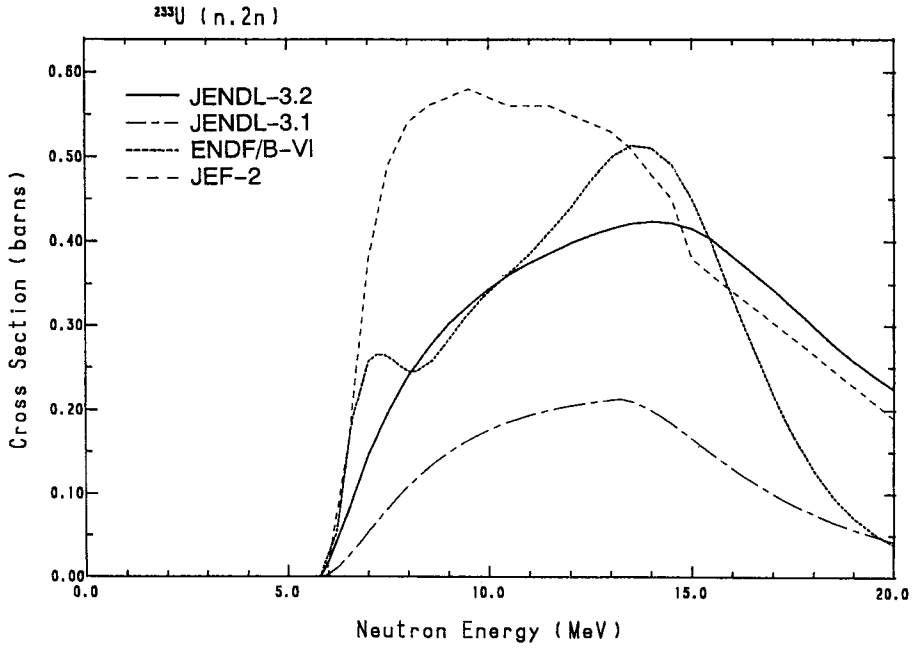


Fig. 9 (n,2n) reaction cross sections of ^{233}U

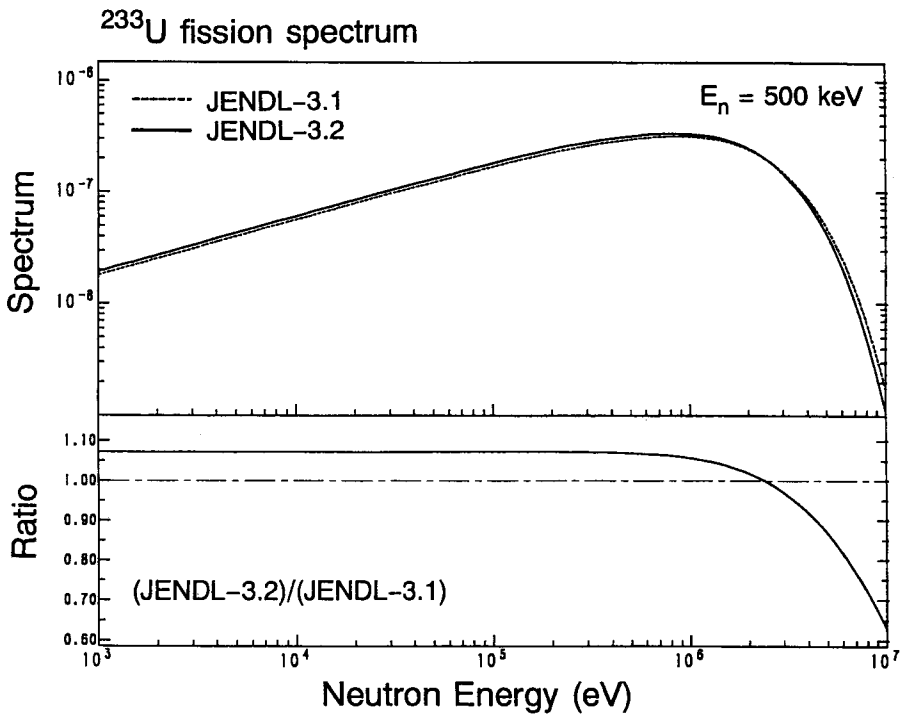


Fig.10 Fission spectra of ^{233}U at $E_n = 500 \text{ keV}$

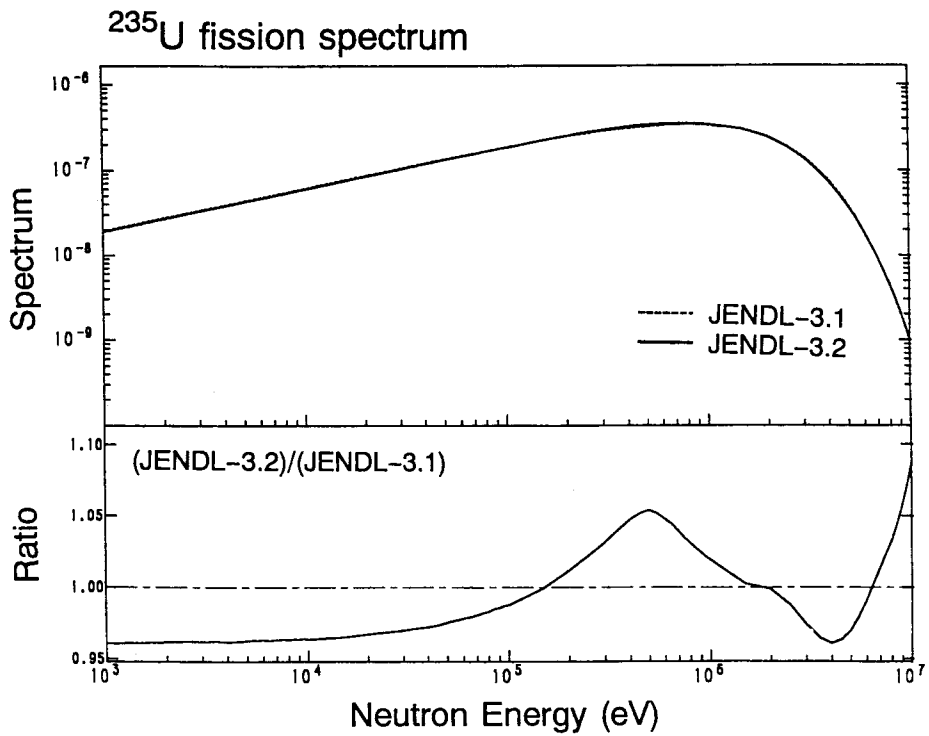


Fig.11 Fission spectra of ^{235}U at $E_n = 500 \text{ keV}$

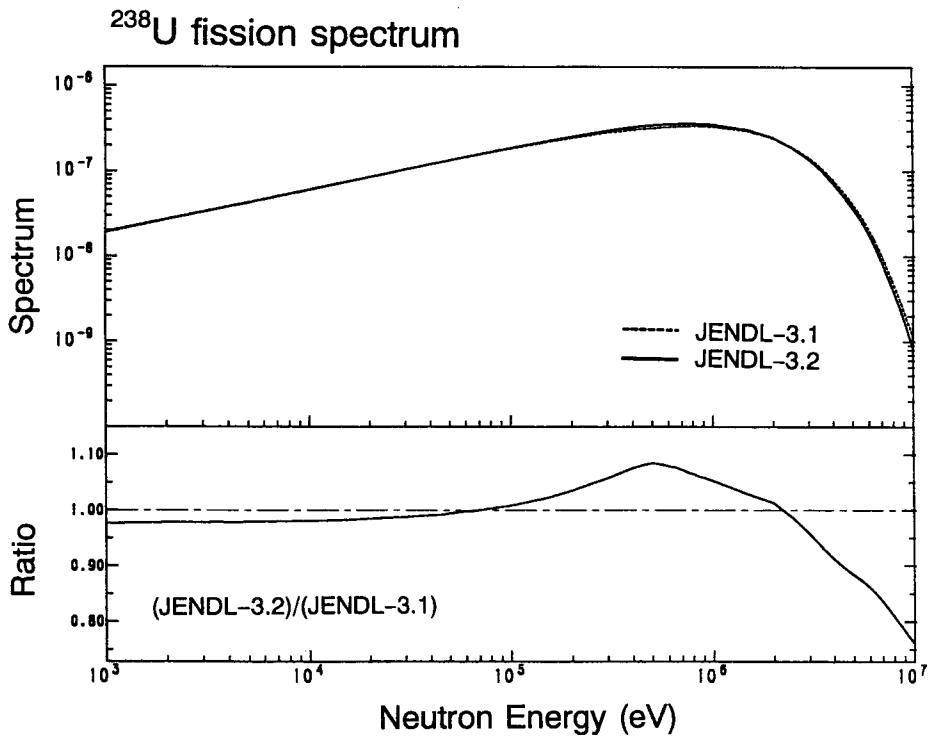


Fig.12 Fission spectra of ^{238}U at $E_n = 2 \text{ MeV}$

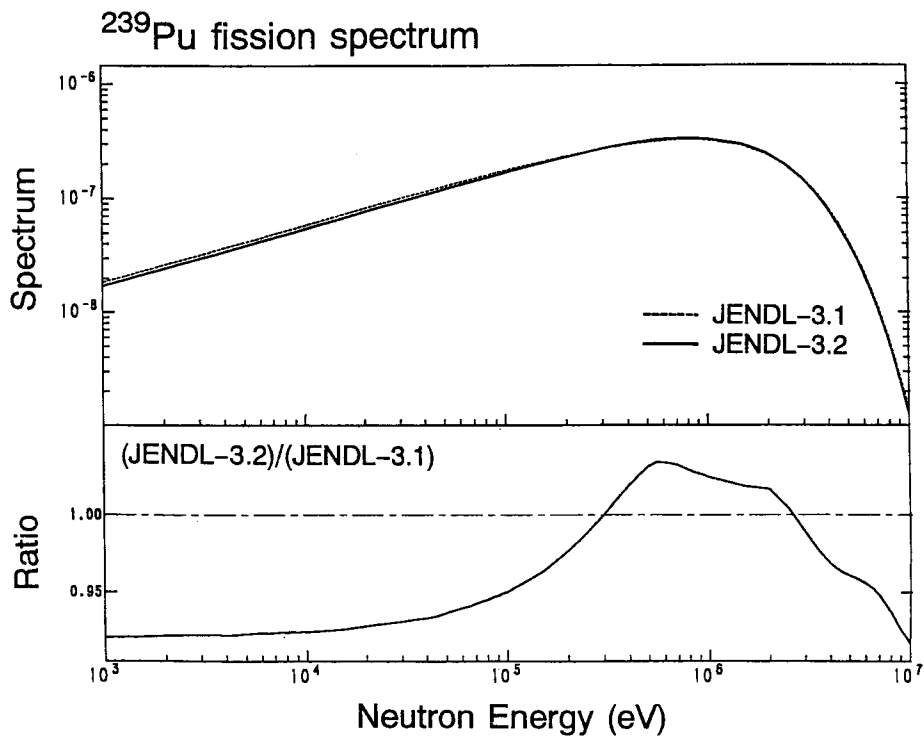


Fig.13 Fission spectra of ^{239}Pu at $E_n = 500$ keV

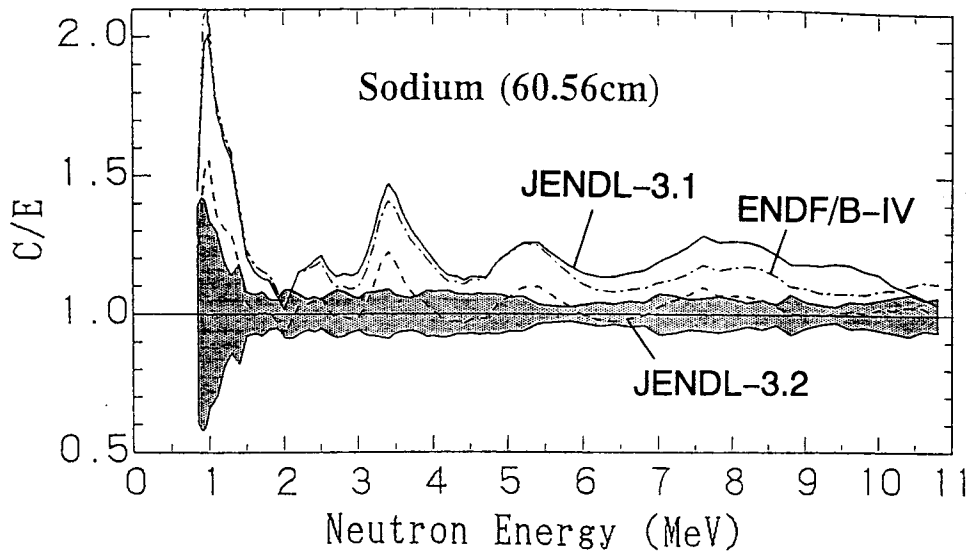


Fig.14 Comparison of measured and calculated uncollided flux of sodium Broomstick benchmark

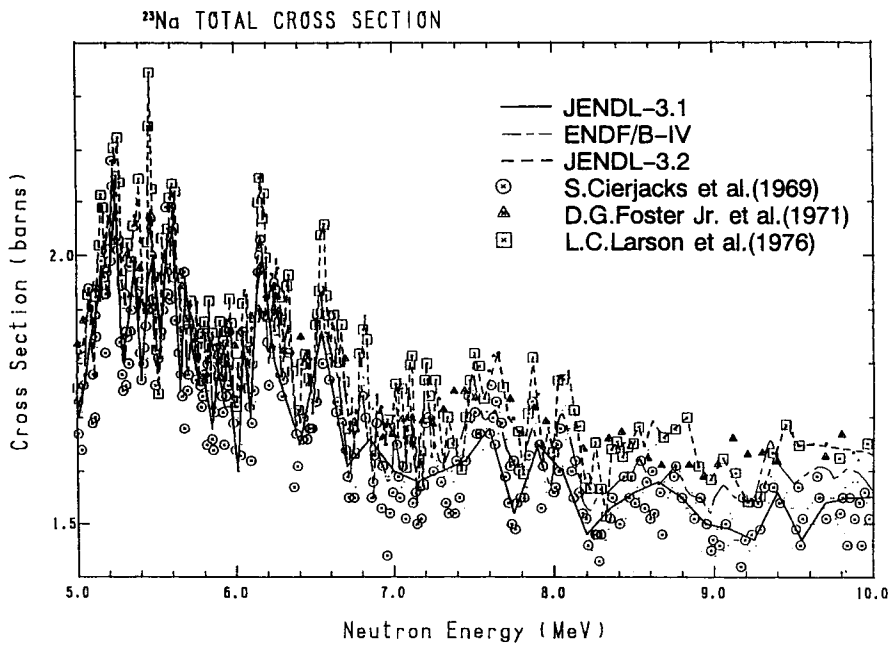


Fig.15 Total cross sections of ^{23}Na

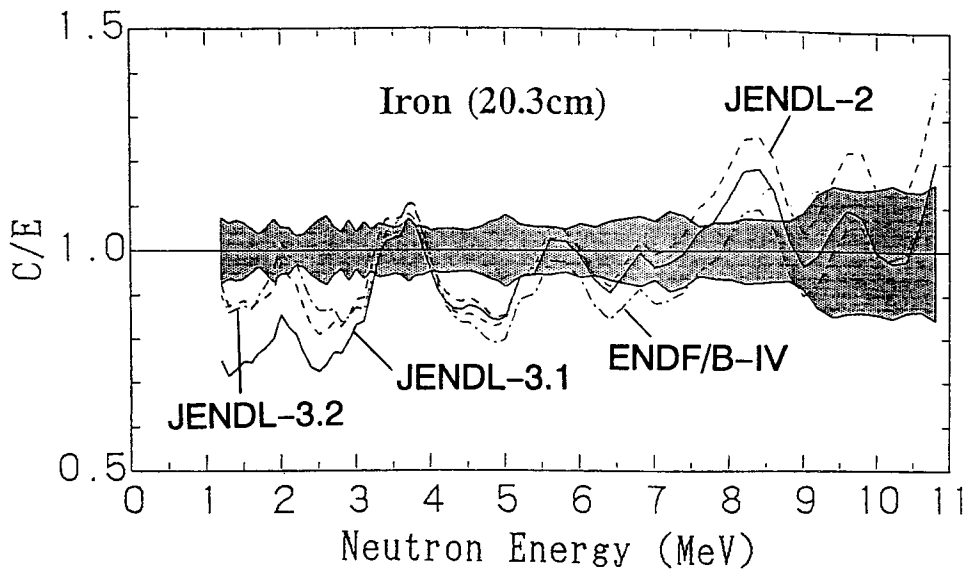


Fig.16 Comparison of measured and calculated uncollided flux of iron Broomstick benchmark

Unfolding of total cross section

$$\sigma_{J3}(E_0) = \int_{E_0-D}^{E_0+D} C \sigma_w(E) R(E) dE$$

- σ_{J3} cross section in JENDL-3
- σ_w cross section to be unfolded
(same as σ_{J3} at the 1st iteration)
- C factor
- R resolution function

Modified cross section at E_0

$$= C \times \sigma_w(E_0)$$

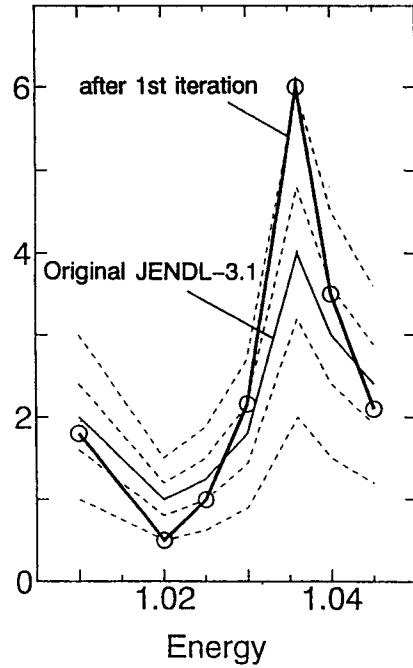


Fig.17 Unfolding of total cross section

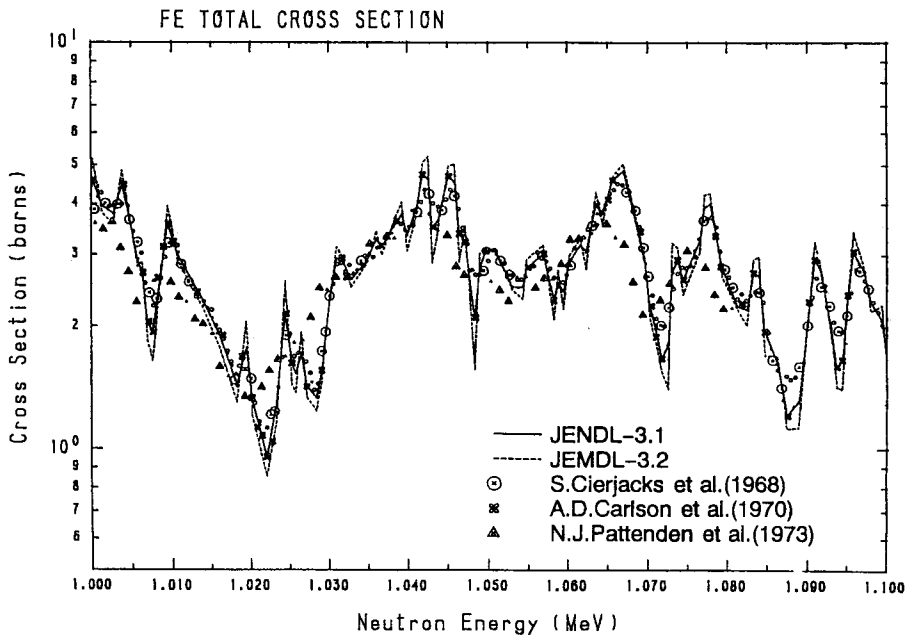


Fig.18 Total cross sections of ^{56}Fe

^{nat}Fe Total Inelastic Scattering

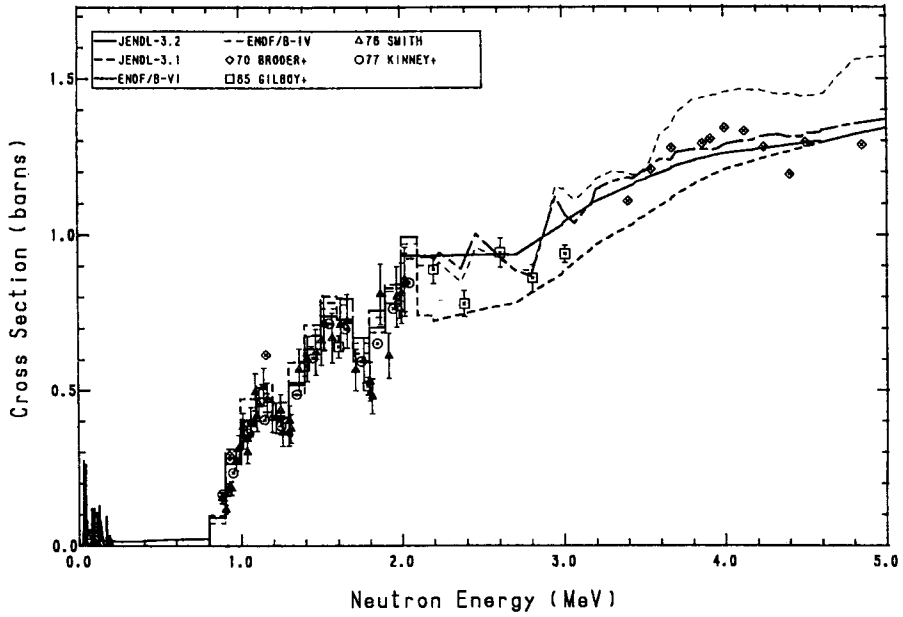


Fig.19 Total inelastic scattering cross sections of ^{nat}Fe

⁵⁶Fe(n,n'), E_x = 847 keV

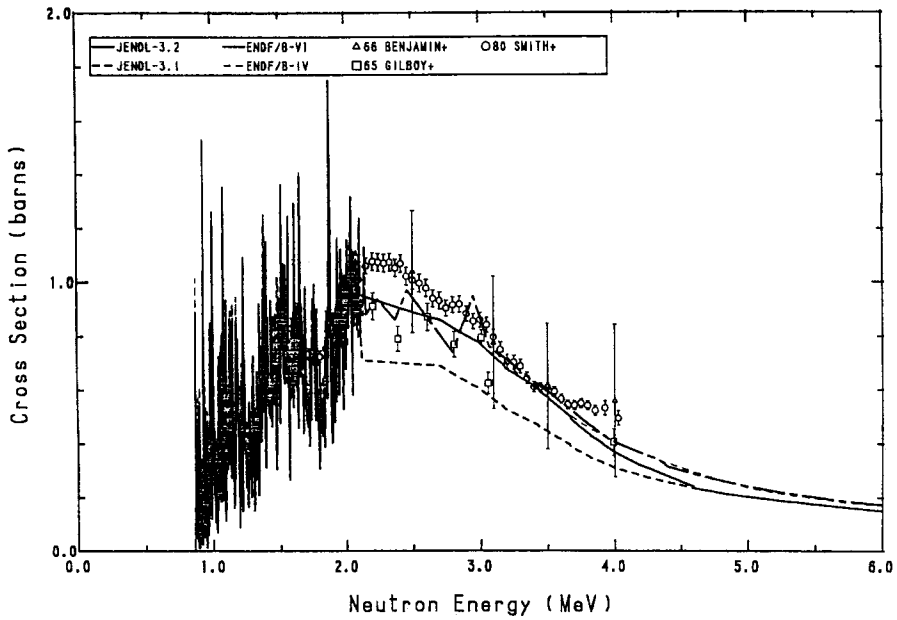


Fig.20 Inelastic scattering cross sections of ⁵⁶Fe to the 847 keV level

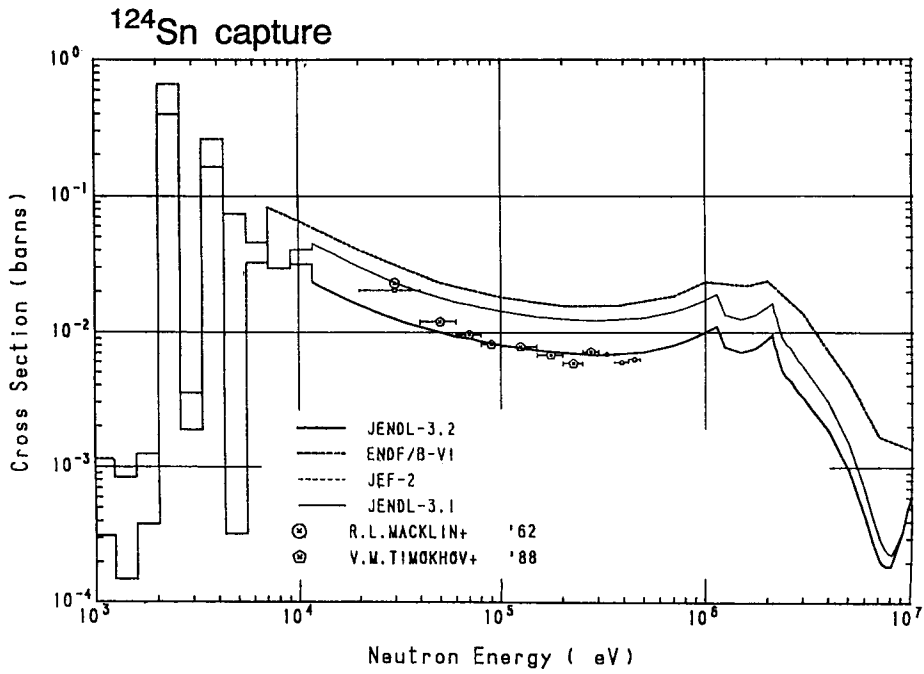


Fig.21 Capture cross sections of ^{124}Sn

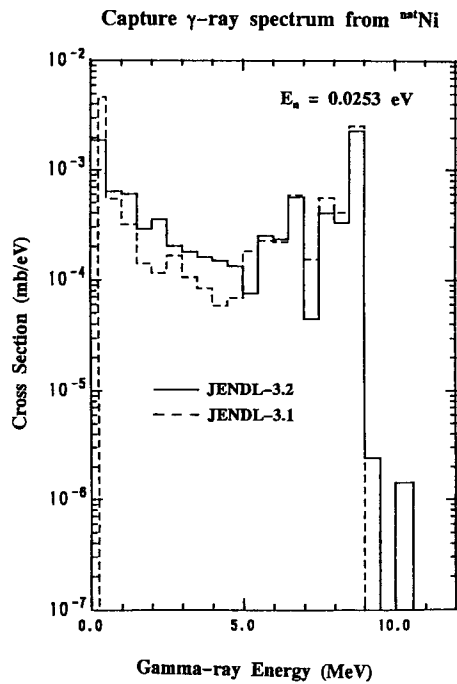


Fig.22 Thermal capture γ -ray spectra of ^{64}Ni

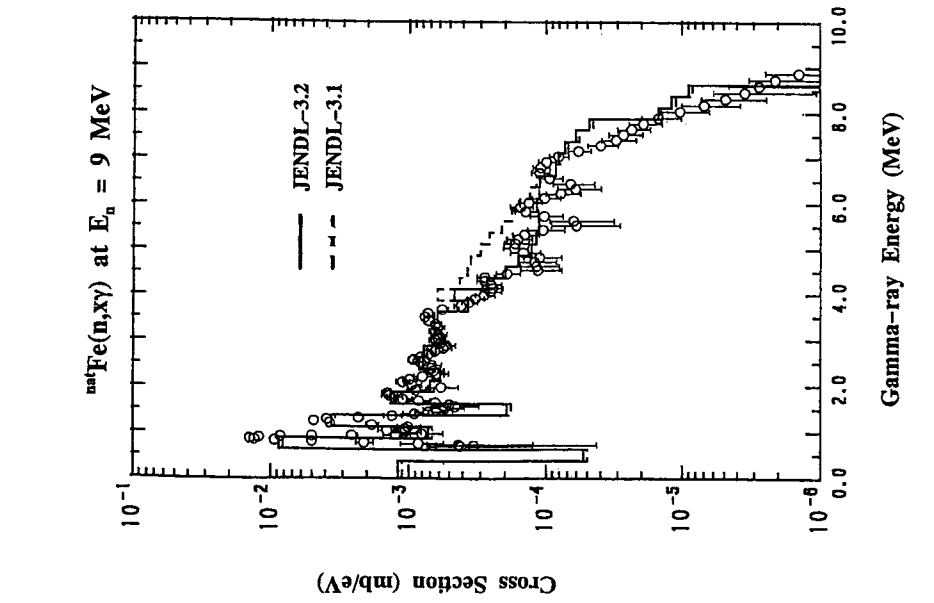


Fig.23 γ -ray spectra of ^{58}Ni by 1.7 MeV neutrons

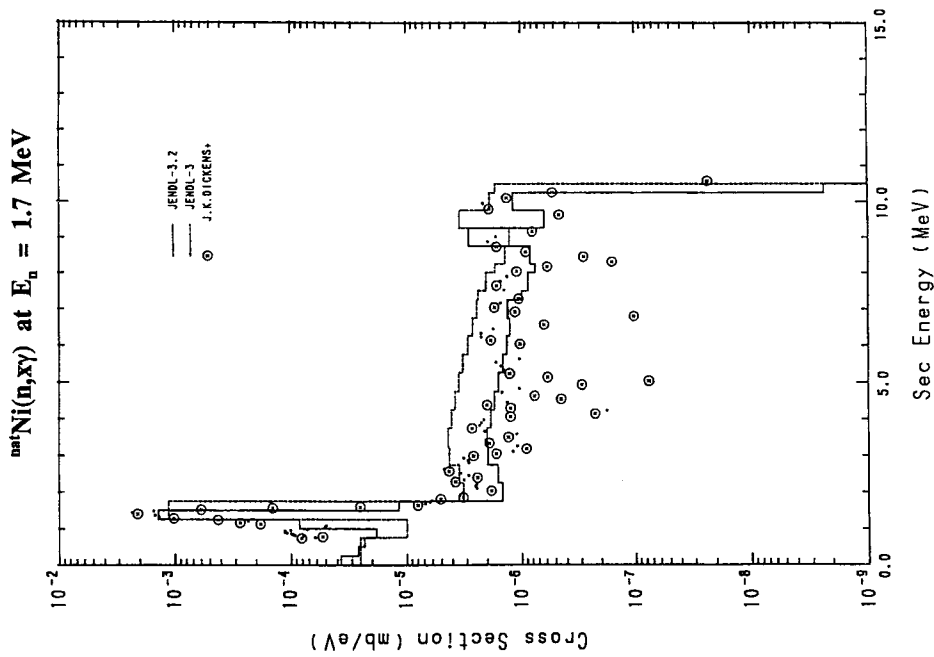


Fig.24 γ -ray spectra of ^{56}Fe by 9 MeV neutrons