

JAERI-M

7 2 7 6

$^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の中性子核データの評価

1977年9月

宝珠山 健\*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

$^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の中性子核データの評価

日本原子力研究所シグマ研究委員会

宝珠山 健\*

(1977年8月19日受理)

$^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の中性子核データについての評価を行った。内容は全断面積, 弾性散乱断面積, 捕獲断面積, 非弾性散乱断面積, 更に弾性・非弾性散乱中性子の角度分布, 弾性散乱に対する実験室系での散乱角度の余弦の平均, 非弾性散乱における二次中性子のエネルギー分布等である。入射中性子エネルギーは  $10^{-5}$  eV から 15 MeV である。共鳴領域では, BNL-325 第3版及び他のデータより分離共鳴パラメータのセットを選定した。高速中性子エネルギー領域では, 五十嵐 (JAERI) によって開発された計算コード CASTHY を用いて断面積を理論計算により求めた。得られた中性子捕獲断面積は他のデータと比較して妥当なものであることを確認した。今回の結果は他の Mo 同位元素及び天然 Mo 元素と一所に ENDF/B 形式で日本独自の評価済核データライブラリ第1版 JENDL-1 に格納済である。

---

\* ) 三菱原子力工業 (株)

本報告書は三菱原子力工業 (株) が日本原子力研究所の委託により行った研究の成果である。

Evaluation of the Neutron Nuclear Data for  $^{92}\text{Mo}$  and  $^{94}\text{Mo}$

Takeshi HOJUYAMA\*

Japanese Nuclear Data Committee

( Received August 19, 1977 )

Evaluation of the neutron nuclear data for  $^{92}\text{Mo}$  and  $^{94}\text{Mo}$  has been made for the total, elastic scattering, radiative capture and inelastic scattering cross sections in the energy range from  $10^{-5}\text{eV}$  to 15 MeV. Included are the angular distributions of the elastic and inelastic scattering, the average cosines of scattering angles in the laboratory system for elastically scattered neutrons, and the energy distributions of inelastically scattered neutrons. In the resonance region, the resolved resonance parameters in the BNL-325 3rd edition (1973) and others were used to obtain the complete set. In the fast neutron energy region, the neutron cross sections were calculated with the computer code CASTHY developed by S. Igarasi (JAERI). The evaluated capture cross sections obtained are considered to be reasonable in comparison with other measured and evaluated data. These data were compiled together with the data for other molybdenum isotopes and element molybdenum in the Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version One, JENDL-1.

Keywords: Evaluation, Molybdenum-92, molybdenum-94  
Neutron Nuclear Data, Neutron Cross Section,  
Neutron Resonance Parameters,  
Energy Range  $10^{-5}\text{eV}$  -- 15 MeV

---

\*) Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

## 目 次

1. 序 文 .....	1
2. 共鳴領域 .....	1
3. 連続領域 .....	2
3.1 光学ポテンシャル .....	2
3.2 原子核の励起準位 .....	3
3.3 準位密度パラメータ .....	3
3.4 平均共鳴パラメータ .....	4
4. 断面積のプロット .....	4
5. 結 言 .....	5
謝 辞 .....	5
参考文献 .....	6

## 1. 序 文

日本原子力研究所・原子核データ室を中心として進められている日本の評価済核データライブラリ (JENDL) の第1版, JENDL-1 作成作業の一部として三菱原子力担当分の $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$ の断面積評価を行った。

$^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$ は信頼すべき断面積測定値が極めて少ないので, ある程度簡便なやり方として既に核分裂生成物に関する断面積の評価<sup>1)</sup>で行われているのと同様の手法によって断面積を求めた。入射中性子エネルギー領域は  $10^{-5}\text{ eV} \sim 15\text{ MeV}$  である。

JENDL-1 は ENDF/B と同じ形式を持っているので今回の作業は共鳴パラメータの決定と連続領域 (共鳴領域よりも入射中性子の運動エネルギーが高い領域) での断面積計算の二つの部分に分けて行った。

共鳴領域では BNL-325 第3版<sup>2)</sup>を主にして他の文献のデータも利用して, 断面積が再現できるよる共鳴パラメータセットを選定した。

連続エネルギー領域では実験データが少ないので原子核を光学モデルで扱い, Hauser-Feshbach の統計理論式により断面積計算を行った。これらの断面積計算は原研で開発された計算コード CASTHY を用いて行われた。

中性子核データの内容は全断面積, 弾性散乱断面積, 捕獲断面積, 非弾性散乱断面積, 更に弾性・非弾性散乱による角度分布, 弾性散乱に対する実験室系での散乱角度の余弦の平均, 非弾性散乱による二次中性子のエネルギー分布等である。

中性子捕獲断面積は他の実験並びに評価データと比較を行った結果, 平均的な値を示し妥当なものであると思われる。今回の結果は他のモリブデン同位元素及び天然モリブデン元素と一緒に ENDF/B フォーマットで上記 JENDL-1 に格納済である。

## 2. 共 鳴 領 域

このエネルギー領域での作業は断面積再現に必要な共鳴パラメータ・セットを求める事である。<sup>2)</sup>今回は, 現状では一番まとまっておりますそのデータも新しい BNL-325 第3版を基にして以下の方針でパラメータ・セットを選定した。

- 1) 共鳴エネルギーのみあって  $\Gamma_n$  が与えられていない場合は共鳴パラメータとして採用しない。
- 2)  $\Gamma_\gamma$  を与えていない場合は平均値を用いた。
- 3) 入射中性子が S-波か P-波かは換算中性子幅が自由度 1 の  $\chi^2$ -分布に従うとしてその分布形より判定した。
- 4) 複合核のトータル・スピン量子数, J が  $1/2$  か  $3/2$  かは $^{92}\text{Mo}$ に関しては換算中性子幅の

## 1. 序 文

日本原子力研究所・原子核データ室を中心として進められている日本の評価済核データライブラリ (JENDL) の第1版, JENDL-1 作成作業の一部として三菱原子力担当分の $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$ の断面積評価を行った。

$^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$ は信頼すべき断面積測定値が極めて少ないので, ある程度簡便なやり方として既に核分裂生成物に関する断面積の評価<sup>1)</sup>で行われているのと同様の手法によって断面積を求めた。入射中性子エネルギー領域は  $10^{-5}\text{ eV} \sim 15\text{ MeV}$  である。

JENDL-1 は ENDF/B と同じ形式を持っているので今回の作業は共鳴パラメータの決定と連続領域 (共鳴領域よりも入射中性子の運動エネルギーが高い領域) での断面積計算の二つの部分に分けて行った。

共鳴領域では BNL-325 第3版<sup>2)</sup>を主にして他の文献のデータも利用して, 断面積が再現できるよる共鳴パラメータセットを選定した。

連続エネルギー領域では実験データが少ないので原子核を光学モデルで扱い, Hauser-Feshbach の統計理論式により断面積計算を行った。これらの断面積計算は原研で開発された計算コード CASTHY を用いて行われた。

中性子核データの内容は全断面積, 弾性散乱断面積, 捕獲断面積, 非弾性散乱断面積, 更に弾性・非弾性散乱による角度分布, 弾性散乱に対する実験室系での散乱角度の余弦の平均, 非弾性散乱による二次中性子のエネルギー分布等である。

中性子捕獲断面積は他の実験並びに評価データと比較を行った結果, 平均的な値を示し妥当なものであると思われる。今回の結果は他のモリブデン同位元素及び天然モリブデン元素と一緒に ENDF/B フォーマットで上記 JENDL-1 に格納済である。

## 2. 共 鳴 領 域

このエネルギー領域での作業は断面積再現に必要な共鳴パラメータ・セットを求める事である。今回は, 現状では一番まとまっておきそのデータも新しい BNL-325 第3版<sup>2)</sup>を基にして以下の方針でパラメータ・セットを選定した。

- 1) 共鳴エネルギーのみあって  $\Gamma_n$  が与えられていない場合は共鳴パラメータとして採用しない。
- 2)  $\Gamma_\gamma$  を与えていない場合は平均値を用いた。
- 3) 入射中性子が S-波か P-波かは換算中性子幅が自由度 1 の  $\chi^2$ -分布に従うとしてその分布形より判定した。
- 4) 複合核のトータル・スピン量子数, J が 1/2 か 3/2 かは $^{92}\text{Mo}$ に関しては換算中性子幅の

大きさを判定した。 $^{94}\text{Mo}$ に関しては $\mathcal{G}\Gamma_n$ ,  $\Gamma_\gamma$ ,  $\mathcal{G}\Gamma_n \cdot \Gamma_\gamma / \Gamma$ が与えられているので三者のバランスより $\mathcal{G}$ -因子を求め $\mathcal{G}_J = (2J+1) / 2 \cdot (2I+1)$ より $J$ を決定した。

5) その他のデータ<sup>3)</sup>, 他の共鳴との類推も利用した。このようにして選定された共鳴パラメータをTable 1とTable 2に示す。

この共鳴パラメータの妥当性の検証の為に、このパラメータを用いて断面積計算を行い、例えば2200m/sでの捕獲断面積を調べ見る必要があるが序文でも述べたとおり $^{92}\text{Mo}$ と $^{94}\text{Mo}$ には実験データが乏しいのでそういう検討は行えなかった。

### 3. 連続領域

このエネルギー領域でも信頼すべき実験データが少ないので原子核を光学モデルで扱いHauser<sup>5), 6), 7), 8)</sup>, Feshbach<sup>10), 9), 27)</sup>の統計理論式により断面積計算を、原研で開発されたCASTHYコードにより行った。

以下この理論計算に必要な各種物理量すなわち、光学ポテンシャル、原子核の励起準位、準位密度パラメータ、平均共鳴パラメータについて述べる。

#### 3.1 光学ポテンシャル

中性子透過率を理論計算する為の原子核力のポテンシャルとして以下のような光学模型を採用した。

$$V(r) = -[V_0 \cdot f_1(r) + i\{W_1 \cdot f_1(r) + W_s \cdot f_2(r)\}] - V_{s0} \cdot (\hbar/m_\pi \cdot c)^2 \cdot 1/r \cdot |df_1(r)/dr| [s \cdot \ell] \text{---- (a)}$$

上式の前半は中心ポテンシャルで虚数部は更に核内部と核表面部とに分かれる。後半はスピナー軌道ポテンシャルである。

ここで、

$V_0, W_1, W_s, V_{s0}$  : ポテンシャル強度

$f_1(r)$  : Woods - Saxon型の形状因子で

$$= 1 / \{1 + \exp[(r - R_1) / a_0]\} \text{---- (b)}$$

$$R_1 : \text{核半径} = r_0 \cdot A^{1/3} + r_1 \text{---- (c)}$$

$f_2(r)$  : 微分 Woods - Saxon型の形状因子で

$$= 4 \exp[(r - R_2) / b] / \{1 + \exp[(r - R_2) / b]\}^2 \text{---- (d)}$$

$$R_2 = r_s \cdot A^{1/3} + r_2$$

$m_\pi$  :  $\pi$ -中間子の質量

$c$  : 光速度

$s$  : 入射中性子のスピン



大きさを判定した。 $^{94}\text{Mo}$ に関しては $\rho\Gamma_n$ ,  $\Gamma_\gamma$ ,  $\rho\Gamma_n \cdot \Gamma_\gamma / \Gamma$ が与えられているので三者のバランスより $\rho$ -因子を求め $\rho_J = (2J+1) / 2 \cdot (2I+1)$ よりJを決定した。

5) その他のデータ<sup>3)</sup>, 他の共鳴との類推も利用した。このようにして選定された共鳴パラメータをTable 1とTable 2に示す。

この共鳴パラメータの妥当性の検証の為に、このパラメータを用いて断面積計算を行い、例えば2200m/sでの捕獲断面積を調べ見る必要があるが序文でも述べたとおり $^{92}\text{Mo}$ と $^{94}\text{Mo}$ には実験データが乏しいのでそういう検討は行えなかった。

### 3. 連続領域

このエネルギー領域でも信頼すべき実験データが少ないので原子核を光学モデルで扱いHauser-<sup>5), 6), 7), 8)</sup> Feshbach <sup>10), 9), 27)</sup> の統計理論式により断面積計算を、原研で開発されたCASTHYコードにより行った。

以下この理論計算に必要な各種物理量すなわち、光学ポテンシャル、原子核の励起準位、準位密度パラメータ、平均共鳴パラメータについて述べる。

#### 3.1 光学ポテンシャル

中性子透過率を理論計算する為の原子核力のポテンシャルとして以下のような光学模型を採用した。

$$V(r) = -[V_0 \cdot f_1(r) + i\{W_1 \cdot f_1(r) + W_s \cdot f_2(r)\}] - V_{s0} \cdot (\hbar/m_\pi \cdot c)^2 \cdot 1/r \cdot |df_1(r)/dr| [s \cdot \ell] \text{---- (a)}$$

上式の前半は中心ポテンシャルで虚数部は更に核内部と核表面部とに分かれる。後半はスピナー軌道ポテンシャルである。

ここで、

$V_0, W_1, W_s, V_{s0}$  : ポテンシャル強度

$f_1(r)$  : Woods - Saxon型の形状因子で

$$= 1 / \{1 + \exp[(r - R_1) / a_0]\} \text{---- (b)}$$

$R_1$  : 核半径 =  $r_0 \cdot A^{1/3} + r_1$  ----- (c)

$f_2(r)$  : 微分Woods - Saxon型の形状因子で

$$= 4 \exp[(r - R_2) / b] / \{1 + \exp[(r - R_2) / b]\}^2 \text{---- (d)}$$

$R_2 = r_s \cdot A^{1/3} + r_2$

$m_\pi$  :  $\pi$ -中間子の質量

$c$  : 光速度

$s$  : 入射中性子のスピン

$l$  : 入射中性子の軌道角運動量

$$[s \cdot l] = [j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)] \text{----- (e)}$$

但し  $|l-s| \leq j \leq l+s$

これらのパラメータは全断面積の実験値によく一致するように、核分裂生成物の核データの<sup>1)</sup>評価の中で既に定められているのでそれを用いた。Table 3に光学ポテンシャルパラメータの一覧を示す。

### 3.2 原子核の励起準位

非弾性散乱断面積を計算するために標的核の励起準位のエネルギー、スピン、パリティを基底準位から10数番目の準位までについて求めた。

<sup>92</sup>Mo, <sup>94</sup>Mo両方とも Nuclear Data Sheets<sup>11), 14)</sup>を基準としこれらよりも新しい実験があればそれで補った。準位エネルギーのみあってスピン、パリティがわからない時にはNDSにある崩壊図の遷移形式(E1, M1, etc)と他の準位のスピン、パリティを考慮して決めた。

採用した準位構造を<sup>92</sup>MoについてはTable 4に、<sup>94</sup>MoについてはTable 5にそれぞれ示す。

### 3.3 準位密度パラメータ

連続準位での準位密度はGilbert-Cameron<sup>20), 21)</sup>の公式を用いている。この式は次のような形をしている。

$$\rho(U, J) = \begin{cases} \rho_G(U, J) = (2J+1) / (C_0 \cdot U^2) \times \exp\{2\sqrt{au} - J(J+1) / (2\sigma_M^2)\} & U > U_x \\ \rho_G(U, J) \times \exp\{(U-U_x) / T\} & U \leq U_x \end{cases} \text{----- (f)}$$

ここで

$U$  : 励起エネルギー =  $E - A$

$E$  : 原子核に与えられるエネルギー

$A$  : ペアリング・エネルギー

$J$  : 励起状態でのスピン

$a$  : 準位密度パラメータ

$\sigma_M$  : スピン切断因子

$$U_x = 2.5 + 150 / A$$

$T$  : 核温度、(f)の両式が $U_x$ で滑らかに接続する条件から決められる。

$$C_0 : \text{規格化定数} = \sqrt{2\pi} \cdot 24 \cdot a^{1/4} \cdot \sigma_M^2 / U^{3/4}$$

この準位密度パラメータを五十嵐<sup>23)</sup>がまとめたものがありそれと彼がWapstra-Gove<sup>22)</sup>の表から複合核の中性子分離エネルギーをまとめたものと一緒に今回用いたパラメータとしてTable 6に示す。

## 3.4 平均共鳴パラメータ

中性子捕獲断面積計算に必要な平均共鳴パラメータを求め、他のデータとの比較を行った。

i) 平均輻射幅 ( $\bar{\Gamma}_\gamma$ )

共鳴領域で選定した  $\Gamma_\gamma$  を平均して  $\bar{\Gamma}_\gamma$  を得た。但し  $^{92}\text{Mo}$  では  $J=1/2$  の場合と  $J=3/2$  の場合とで  $\bar{\Gamma}_\gamma$  の値に差があったがここでは全共鳴に渡って平均した。

得られた値並びに他のデータ及びその平均値と一緒に Table 7 に示す。この表を見ると今回の結果は  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の両方とも他のデータの平均値とほぼ等しくなっている。今回の値が他のデータに比べて大幅にかけ離れてはいずれもむしろ妥当なものであると思われる。

ii) 平均準位間隔 ( $\langle D \rangle_{\text{obs}}$ )

共鳴領域で求めた共鳴準位のうち s-波に対する共鳴準位間隔について平均を求めて、<sup>19)</sup>  $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  とした。

結果を  $\bar{\Gamma}_\gamma$  と同様な形式で Table 8 に示す。この表を見ると  $^{92}\text{Mo}$  の結果は他のデータの平均値より約 15% 程度小さい、 $^{94}\text{Mo}$  も平均よりやや小さいがその差は 10% 以内である。現状の他のデータ間のバラツキ具合から考えて今回の値は比較的妥当な結果を与えていると思われる。

iii)  $2\pi\bar{\Gamma}_\gamma/\langle D \rangle_{\text{obs}}$ 

捕獲断面積計算値を決定するのはこの量なので上記の  $\bar{\Gamma}_\gamma$  と  $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  より求めた。

結果を  $\bar{\Gamma}_\gamma$ ,  $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  と同様な形式で Table 9 に示す。この表を見ると今回の  $^{92}\text{Mo}$  の値は他の平均値に比べて約 8% 大きい、 $^{94}\text{Mo}$  は約 17~18% 小さい目である。上で述べた  $\bar{\Gamma}_\gamma$ ,  $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  に比してやや平均値からのズレ具合が大きいようであるが今回の値だけが特にとび離れているわけではない。最終的な妥当性の検討はこれらを用いて行なわれる断面積計算値によってなされる。

## 4. 断面積のプロット

$^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の両核種に対して  $\sigma_t$ ,  $\sigma_e$ ,  $\sigma_\gamma$ ,  $\sigma_{\text{in}}$  について入射中性子の運動エネルギー  $10^{-2}\text{eV}$  ~  $15\text{MeV}$  に渡って断面積プロットを行った。

i)  $^{92}\text{Mo}$ 

$\sigma_t$  については Fig. 1 に、 $\sigma_e$  については Fig. 2 に、 $\sigma_\gamma$  については Fig. 3(a), 3(b) として  $\sigma_{\text{in}}$  については Fig. 4 にそれぞれ示す。

$^{92}\text{Mo}$  に関しては  $\sigma_\gamma$  の 1 keV 以上の領域を除いて比較できるデータが他にないので  $\sigma_\gamma$  についてのみ Benzi<sup>12)</sup> 及びその他<sup>24), 25)</sup> のデータとの比較プロットを行った。結果を Fig. 3(b) に示す。この図を見ると今回の結果は Benzi の値に比べてやや高目である。Musgrave<sup>24)</sup>, その他<sup>24), 25)</sup> のデータから考えて今回の値の方が妥当と考えられる。

## 3.4 平均共鳴パラメータ

中性子捕獲断面積計算に必要な平均共鳴パラメータを求め、他のデータとの比較を行った。

i) 平均輻射幅 ( $\bar{\Gamma}_\gamma$ )

共鳴領域で選定した  $\Gamma_\gamma$  を平均して  $\bar{\Gamma}_\gamma$  を得た。但し  $^{92}\text{Mo}$  では  $J=1/2$  の場合と  $J=3/2$  の場合とで  $\bar{\Gamma}_\gamma$  の値に差があったがここでは全共鳴に渡って平均した。

得られた値並びに他のデータ及びその平均値と一緒に Table 7 に示す。この表を見ると今回の結果は  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の両方とも他のデータの平均値とほぼ等しくなっている。今回の値が他のデータに比べて大幅にかけ離れてはいずれもむしろ妥当なものであると思われる。

ii) 平均準位間隔 ( $\langle D \rangle_{\text{obs}}$ )

共鳴領域で求めた共鳴準位のうち s-波に対する共鳴準位間隔について平均を求めて、<sup>19)</sup>  $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  とした。

結果を  $\bar{\Gamma}_\gamma$  と同様な形式で Table 8 に示す。この表を見ると  $^{92}\text{Mo}$  の結果は他のデータの平均値より約 15% 程度小さい、 $^{94}\text{Mo}$  も平均よりやや小さいがその差は 10% 以内である。現状の他のデータ間のバラッキ具合から考えて今回の値は比較的妥当な結果を与えていると思われる。

iii)  $2\pi\bar{\Gamma}_\gamma/\langle D \rangle_{\text{obs}}$ 

捕獲断面積計算値を決定するのはこの量なので上記の  $\bar{\Gamma}_\gamma$  と  $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  より求めた。

結果を  $\bar{\Gamma}_\gamma$ ,  $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  と同様な形式で Table 9 に示す。この表を見ると今回の  $^{92}\text{Mo}$  の値は他の平均値に比べて約 8% 大きい、 $^{94}\text{Mo}$  は約 17~18% 小さい目である。上で述べた  $\bar{\Gamma}_\gamma$ ,  $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  に比してやや平均値からのズレ具合が大きいようであるが今回の値だけが特にとび離れているわけではない。最終的な妥当性の検討はこれらを用いて行なわれる断面積計算値によってなされる。

## 4. 断面積のプロット

$^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の両核種に対して  $\sigma_t$ ,  $\sigma_e$ ,  $\sigma_\gamma$ ,  $\sigma_{\text{in}}$  について入射中性子の運動エネルギー  $10^{-2}\text{eV}$  ~  $15\text{MeV}$  に渡って断面積プロットを行った。

i)  $^{92}\text{Mo}$ 

$\sigma_t$  については Fig. 1 に、 $\sigma_e$  については Fig. 2 に、 $\sigma_\gamma$  については Fig. 3(a), 3(b) として  $\sigma_{\text{in}}$  については Fig. 4 にそれぞれ示す。

$^{92}\text{Mo}$  に関しては  $\sigma_\gamma$  の 1 keV 以上の領域を除いて比較できるデータが他にないので  $\sigma_\gamma$  についてのみ Benzi<sup>12)</sup> 及びその他<sup>24), 25)</sup> のデータとの比較プロットを行った。結果を Fig. 3(b) に示す。この図を見ると今回の結果は Benzi の値に比べてやや高目である。Musgrove<sup>24)</sup>, その他<sup>24), 25)</sup> のデータから考えて今回の値の方が妥当と考えられる。

ii)  $^{94}\text{Mo}$ 

全ての反応断面積について ENDF/B-IV と比較して  $\sigma_t$  については Fig. 5 に,  $\sigma_e$  については Fig. 6 に,  $\sigma_\gamma$  については Fig. 7(a), 7(b) に, そして  $\sigma_{in}$  については Fig. 8 にそれぞれ示す。

共鳴領域では基本的には ENDF/B-IV も JENDL-1 も BNL-325 第3版<sup>2)</sup> を使っているが  $\sigma_e$  並びに  $\sigma_t$  に差が見られる。これはポテンシャル散乱断面積を計算する為の核半径に差がある為と思われる。すなわち JENDL-1 が  $0.65 \times 10^{-12} \text{cm}$  なのに対して ENDF/B-IV は  $0.5484 \times 10^{-12} \text{cm}$  を用いている。JENDL-1 は BNL-325 に示されている値をそのまま採用しているが, ENDF/B-IV がどういう根拠でこの値を選んだかわからない。

$\sigma_\gamma$  については ENDF/B-IV が  $2200 \text{m/s}$  での値を  $0.016 \text{b}$  にする為  $1/v$  の形で補正量を File 3 に与えているが, JENDL-1 はそれをしていない。BNL-325 に従えば規格化すべきであるが, 規格化断面積の根拠が今の所はっきりしない。

$10 \text{keV}$  以上の  $\sigma_\gamma$  は ENDF/B-IV も理論計算によっている ( $\sigma_\gamma$  は Ref. 28), 29),  $\sigma_{in}$  は Ref. 30),  $\sigma_t$  は Ref. 28), 29), そして  $\sigma_e \equiv \sigma_t - \sigma_\gamma - \sigma_{in}$  としている) がその詳細はわからない。 $\sigma_\gamma$  については更に Benzi<sup>12)</sup> 及びその他<sup>24), 25)</sup> のデータも一諸に Fig. 7(b) に示す。この図を見ると今回の結果の方が ENDF/B-IV に比べてやや高めである。少なくとも  $10 \sim 100 \text{keV}$  の範囲では Musgrove<sup>24)</sup>, その他<sup>24), 25)</sup> に近い結果を JENDL-1 の方が与えている。

$\sigma_{in}$  については JENDL-1 は ENDF/B-IV の約 1.5 倍になっているがどちらがより妥当かは今の所わからない。

## 5. 結 言

入射中性子の運動エネルギー  $10^{-5} \text{eV}$  から  $15 \text{MeV}$  にわたって  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の中性子核データの評価を行った。得られた評価値のうち捕獲断面積は第4章で述べたとおり他のデータと比較して妥当なものであることが確認された。この結果はベンチマーク炉心を用いた Mo サンプルワース実験解析によっても支持<sup>31)</sup>されている。

今後の課題としては高速エネルギーでの反応すなわち  $(n, 2n)$ , 荷電粒子放出断面積等を評価すること, Mo の他の同位元素との整合性をよくすること, そして全体に信頼度を更に高めることであろう。

## 謝 辞

本研究を実施するに当り御協力戴いた日本原子力研究所核データセンターの方々, 特に CASTHY コード使用法を御教示下さった五十嵐信一氏, データファイルのテープ化に御尽力戴いた中川庸雄氏に深く感謝の意を表します。

ii)  $^{94}\text{Mo}$ 

全ての反応断面積について ENDF/B-IV と比較して  $\sigma_t$  については Fig. 5 に,  $\sigma_e$  については Fig. 6 に,  $\sigma_\gamma$  については Fig. 7(a), 7(b) に, そして  $\sigma_{in}$  については Fig. 8 にそれぞれ示す。

共鳴領域では基本的には ENDF/B-IV も JENDL-1 も BNL-325 第3版<sup>2)</sup> を使っているが  $\sigma_e$  並びに  $\sigma_t$  に差が見られる。これはポテンシャル散乱断面積を計算する為の核半径に差がある為と思われる。すなわち JENDL-1 が  $0.65 \times 10^{-12} \text{cm}$  なのに対して ENDF/B-IV は  $0.5484 \times 10^{-12} \text{cm}$  を用いている。JENDL-1 は BNL-325 に示されている値をそのまま採用しているが, ENDF/B-IV がどういう根拠でこの値を選んだかわからない。

$\sigma_\gamma$  については ENDF/B-IV が  $2200 \text{m/s}$  での値を  $0.016 \text{b}$  にする為に  $1/v$  の形で補正量を File 3 に与えているが, JENDL-1 はそれをしていない。BNL-325 に従えば規格化すべきであるが, 規格化断面積の根拠が今の所はっきりしない。

$10 \text{keV}$  以上の  $\sigma_\gamma$  は ENDF/B-IV も理論計算によっている ( $\sigma_\gamma$  は Ref. 28), 29),  $\sigma_{in}$  は Ref. 30),  $\sigma_t$  は Ref. 28), 29), そして  $\sigma_e \equiv \sigma_t - \sigma_\gamma - \sigma_{in}$  としている) がその詳細はわからない。 $\sigma_\gamma$  については更に Benzi<sup>12)</sup> 及びその他<sup>24), 25)</sup> のデータも一諸に Fig. 7(b) に示す。この図を見ると今回の結果の方が ENDF/B-IV に比べてやや高めである。少なくとも  $10 \sim 100 \text{keV}$  の範囲では Musgrove<sup>24)</sup>, その他<sup>24), 25)</sup> に近い結果を JENDL-1 の方が与えている。

$\sigma_{in}$  については JENDL-1 は ENDF/B-IV の約 1.5 倍になっているがどちらがより妥当かは今の所わからない。

## 5. 結 言

入射中性子の運動エネルギー  $10^{-5} \text{eV}$  から  $15 \text{MeV}$  にわたって  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の中性子核データの評価を行った。得られた評価値のうち捕獲断面積は第4章で述べたとおり他のデータと比較して妥当なものであることが確認された。この結果はベンチマーク炉心を用いた Mo サンプルワークス実験解析によっても支持<sup>31)</sup>されている。

今後の課題としては高速エネルギーでの反応すなわち ( $n, 2n$ ), 荷電粒子放出断面積等を評価すること, Mo の他の同位元素との整合性をよくすること, そして全体に信頼度を更に高めることであろう。

## 謝 辞

本研究を実施するに当り御協力戴いた日本原子力研究所核データセンターの方々, 特に CASTHY コード使用法を御教示下さった五十嵐信一氏, データファイルのテープ化に御尽力戴いた中川庸雄氏に深く感謝の意を表します。

ii)  $^{94}\text{Mo}$ 

全ての反応断面積について ENDF/B-IV と比較して  $\sigma_t$  については Fig. 5 に,  $\sigma_e$  については Fig. 6 に,  $\sigma_\gamma$  については Fig. 7(a), 7(b) に, そして  $\sigma_{in}$  については Fig. 8 にそれぞれ示す。

共鳴領域では基本的には ENDF/B-IV も JENDL-1 も BNL-325 第3版<sup>2)</sup> を使っているが  $\sigma_e$  並びに  $\sigma_t$  に差が見られる。これはポテンシャル散乱断面積を計算する為の核半径に差がある為と思われる。すなわち JENDL-1 が  $0.65 \times 10^{-12} \text{cm}$  なのに対して ENDF/B-IV は  $0.5484 \times 10^{-12} \text{cm}$  を用いている。JENDL-1 は BNL-325 に示されている値をそのまま採用しているが, ENDF/B-IV がどういう根拠でこの値を選んだかわからない。

$\sigma_\gamma$  については ENDF/B-IV が  $2200 \text{m/s}$  での値を  $0.016 \text{b}$  にする為に  $1/v$  の形で補正量を File 3 に与えているが, JENDL-1 はそれをしていない。BNL-325 に従えば規格化すべきであるが, 規格化断面積の根拠が今の所はっきりしない。

$10 \text{keV}$  以上の  $\sigma_\gamma$  は ENDF/B-IV も理論計算によっている ( $\sigma_\gamma$  は Ref. 28), 29),  $\sigma_{in}$  は Ref. 30),  $\sigma_t$  は Ref. 28), 29), そして  $\sigma_e \equiv \sigma_t - \sigma_\gamma - \sigma_{in}$  としている) がその詳細はわからない。 $\sigma_\gamma$  については更に Benzi<sup>12)</sup> 及びその他<sup>24), 25)</sup> のデータも一諸に Fig. 7(b) に示す。この図を見ると今回の結果の方が ENDF/B-IV に比べてやや高めである。少なくとも  $10 \sim 100 \text{keV}$  の範囲では Musgrove<sup>24)</sup>, その他<sup>24), 25)</sup> に近い結果を JENDL-1 の方が与えている。

$\sigma_{in}$  については JENDL-1 は ENDF/B-IV の約  $1.5$  倍になっているがどちらがより妥当かは今の所わからない。

## 5. 結 言

入射中性子の運動エネルギー  $10^{-5} \text{eV}$  から  $15 \text{MeV}$  にわたって  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の中性子核データの評価を行った。得られた評価値のうち捕獲断面積は第4章で述べたとおり他のデータと比較して妥当なものであることが確認された。この結果はベンチマーク炉心を用いた Mo サンプルワークス実験解析によっても支持<sup>31)</sup>されている。

今後の課題としては高速エネルギーでの反応すなわち ( $n, 2n$ ), 荷電粒子放出断面積等を評価すること, Mo の他の同位元素との整合性をよくすること, そして全体に信頼度を更に高めることであろう。

## 謝 辞

本研究を実施するに当り御協力戴いた日本原子力研究所核データセンターの方々, 特に CASTHY コード使用法を御教示下さった五十嵐信一氏, データファイルのテーブル化に御尽力戴いた中川庸雄氏に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Igarasi S., Iijima S., Kawai M., et al. : JAERI-M 5752 (1974)
- 2) Mughabghab S.F. and Garber D.I. : BNL-325, 3rd edition Vol.1 (1973)
- 3) Schmidt J.J. : KFK-120, Part 1 (1966)
- 4) Drake M.K. : BNL-50274, Vol. I (1970)
- 5) Hauser W. and Feshbach H. : Phys. Rev., 87, 366 (1952)
- 6) Moldauer P.A. : Phys. Rev., 123, 968 (1961)
- 7) Moldauer P.A. : Phys. Rev., 135, B642 (1964)
- 8) Moldauer P.A. : Rev. Mod. Phys., 36, 1079 (1964)
- 9) Igarasi S. : JAERI-1224 (1972)
- 10) Igarasi S. : to be published.
- 11) Kocher D.C. : Nuclear Data Sheets, 10, 241 (1973)
- 12) Benzi V. and Reffo G. : CCDN-NW/10 (1969)
- 13) Lederer C.M., Hollander J.M., and Perlman I. : "Table of Isotopes" 6th ed., John Wiley & Sons, Inc. (1968)
- 14) Kocher D.C. and Horen D.J. : Nuclear Data Sheets, B7, 299 (1972)
- 15) Larsen J.S. and Ball J.B. : Phys. Rev., 7, 751 (1973)
- 16) McEllistrem M.T., Brandenberger J.D., Sinram K., et al. : Phys. Rev., C9, 670 (1974)
- 17) Cochavi S., Moalem A., Ashery D., et al. : Nucl. Phys., A211, 21 (1973)
- 18) Taketani H. : Phys. Rev. Lett., 27, 520 (1971)
- 19) Sasaki M. : private communication (1975)
- 20) Gilbert A. and Cameron A.G.W. : Can. J. Phys., 43, 1446 (1965)
- 21) Cameron A.G.W. and Elkin R.M. : Can. J. Phys., 43, 1288 (1965)
- 22) Wapstra A.H. and Grove N.B. : Nuclear Data Tables, A9, 265 (1971)
- 23) 五十嵐信一 : to be published.
- 24) Musgrove A.R. : AAEC/E-198 (1969)
- 25) Dovbenko A.G., Zaharova S.M., Kolesov V.E., et al. : At. Energ., 18, 114 (1965)
- 26) Weigmann H., Rohr G., and Winter J. : "Proc. Third Conf. Neutron Cross Sections and Technology" Knoxville, Tennessee, 749 (1971)
- 27) Nakamura H. and Hachiya M. : to be published.
- 28) Schmittroth F. and Schenter R.E. : HEDL-TME-73/63 (1973)
- 29) Schmittroth F. : HEDL-TME-73/79 (1973)
- 30) Dunford C.L. : AI-AEC-12931 (1970)
- 31) Hasegawa A. : to be published.



Table 1 Resonance Parameters of  $^{92}\text{Mo}$ 

$$I^\pi = 0^+$$

$$R' = 6.4 \text{ (fm)}$$

$$M/n = 91.1173$$

$$\bar{\Gamma}_\gamma = 0.217 \text{ (eV)}$$

$E_R$ (eV)	J	$\ell$	$\Gamma$ (eV)	$\Gamma_n$ (eV)	$\Gamma_\gamma$ (eV)
3470	1/2	0	0.1839	0.0079	0.176 <sup>c</sup>
18680	3/2	1	0.2655	0.0235	0.242 <sup>d</sup>
23226	3/2	1	0.267	0.025	0.242 <sup>d</sup>
30600	1/2	1	0.251	0.075	0.176 <sup>c</sup>
31690	1/2	0	8.015	7.8	0.215
42860	3/2	1	0.745	0.525	0.220
5568	3/2	1	0.55	0.25	0.300
6024	3/2	1	0.532	0.29	0.242 <sup>d</sup>
6470	1/2	1	1.208	1.1	0.108
6800	1/2	0	0.760	0.58	0.180
7120	1/2	0	0.710	0.52	0.190
8789	3/2	1	1.42	1.25	0.170
8893	1/2	1	3.72	3.5	0.220
9127	1/2	1	1.83	1.6	0.230
10546	3/2	1	0.60	0.23	0.370
11079	3/2	1	0.385	0.18	0.205
11494	1/2	0	11.162	11	0.162
12800	3/2	1	0.352	0.11	0.242 <sup>d</sup>
13700	1/2	0	32.132	32	0.132
14100	1/2	1	5.355	5.2	0.155
14500	3/2	1	0.352	0.11	0.242
15670	1/2	1	6.172	6.0	0.172
15720	3/2	1	1.110	0.95	0.160
16500	1/2	0	62.666	62.5	0.166
17300	3/2	1	0.500	0.125	0.375
18000	3/2	1	0.565	0.40	0.165
18100	3/2	1	2.242	2.0	0.242 <sup>d</sup>
19200	1/2 <sup>b*</sup>	1 <sup>b</sup>	3.180	3.0	0.180
20300	1/2	0	0.650	0.49	0.160
20600	1/2	0 <sup>a</sup>	0.650	0.50	0.150
20700	3/2 <sup>b*</sup>	1 <sup>b</sup>	0.312	0.07	0.242 <sup>d</sup>
21100	1/2	0	31.177	31	0.177

$E_R$ (eV)	J	$\ell$	$\Gamma$ (eV)	$\Gamma_n$ (eV)	$\Gamma_\gamma$ (eV)
21700.	3/2 <sup>b*</sup>	1 <sup>b</sup>	0.377	0.135	0.242 <sup>d</sup>
23900.	3/2	1	7,955	7.6	0.355
25500.	3/2	1	4,360	4.2	0.160
25800.	1/2	0	36,666	36.5	0.166
26200.	1/2 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	73,176	73	0.176 <sup>c</sup>
28000.	1/2 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	13,176	13	0.176 <sup>c</sup>
28700.	1/2 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	26,176	26	0.176 <sup>c</sup>
29800.	1/2	0	37,199	37	0.199
30100.	3/2 <sup>b*</sup>	1 <sup>b</sup>	0.557	0.315	0.242 <sup>d</sup>
30300.	1/2	1	5,727	5.6	0.127
31100.	1/2	0	57,260	57	0.260

Note a : Estimated by the adjacent level.

b : S-or P-wave selected by the  $\chi^2$ -examination of reduced neutron width.

\*J was estimated by the value of  $\Gamma_n^{(1)}$

c : Average value of  $\Gamma_\gamma$  for J=1/2 was adopted.

d : Average value of  $\Gamma_\gamma$  for J=3/2 was adopted.

Table 2 Resonance Parameters of  $^{94}\text{Mo}$ 

$$I^\pi = 0^+$$

$$R' = 6.5 \text{ (fm)}$$

$$M/n = 93.0985$$

$$\bar{\Gamma}_\gamma = 0.193 \text{ (eV)}$$

$E_R$ (eV)	J	$\ell$	$\Gamma$ (eV)	$\Gamma_n$ (eV)	$\Gamma_\gamma$ (eV)
1088	1/2 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	0.19316	0.00016	0.193 <sup>d</sup>
1051.7	3/2 <sup>b</sup>	1 <sup>b</sup>	0.19605	0.00305	0.193 <sup>d</sup>
1541.8	1/2 <sup>b</sup>	0 <sup>c</sup>	1.24	1.1	0.140
1660.4	1/2 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0.2124	0.0124	0.200 <sup>a</sup>
2178.4	3/2	1	0.4515	0.1915	0.260
3599.0	1/2 <sup>b</sup>	1 <sup>c</sup>	1.297	1.13	0.167
4362.7	3/2	1	0.444	0.254	0.190
4616.4	1/2 <sup>b</sup>	1 <sup>c</sup>	0.703	0.511	0.192
4916.7	1/2 <sup>b</sup>	1 <sup>c</sup>	1.290	1.09	0.200
5383.0	1/2 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	15.500	15.3	0.200 <sup>a</sup>

Note a : KFK-120/I was used.

b : Since  $g\Gamma_n$ ,  $\Gamma_\gamma$ , and  $g\Gamma_n\Gamma_\gamma/\Gamma$  were given, g-factor was obtained by the balance of them. J was determined by the following relationship

$$\left( g_J = \frac{2J+1}{2(2I+1)} \right)$$

c : S-or P-wave was selected by the  $\chi^2$ -examination of reduced neutron width.

d : Average value was used.

Table 3 Optical Potential Parameters

Geometrical Parameters(fm)	Potential Strength (MeV)
$r_0 = r_s = 1.16$	$V_0 = 46 - 0.25 \cdot E$
$r_1 = 0.6$	$W_I = 0.125 \cdot E - 4 \times 10^{-4} \cdot E^2$
$r_2 = 1.1$	$W_s = 7$
$a_0 = 0.62$	$V_{so} = 7$
$b = 0.35$	

Table 4 Level Scheme of  $^{92}\text{Mo}$

NDS <sup>14)</sup>	BENZI <sup>12)</sup>	TIS <sup>13)</sup>	LARSEN <sup>15)</sup>	MCELLISTREM <sup>16)</sup>	TAKETANI <sup>18)</sup>	ADOPTED
0.0	0+	0.0	0.0	0.0		0.0
1.5094	2+	1.54	1.505	1.509		1.509
2.2825	4+	2.33	2.275	2.281		2.283
2.52	(0+)		2.515	2.517	0+	2.520
2.5262	5-	2.57				2.526
2.6115	6+	2.66				2.612
2.7594	(8+)	2.79				2.759
2.8487	3-		2.845			2.849
3.005						
3.063						
3.092	2+		3.090	3.089	2+	3.092
3.370						
3.543			3.535			3.535
3.572						
3.621						3.621
3.623	(7-)					3.623
3.688						3.688

\* Estimated from  $\gamma$ -decay scheme in NDS.

Table 5 Level Scheme of <sup>94</sup>Mo

NDS <sup>(11)</sup>	BENZ I <sup>(12)</sup>	TIS <sup>(13)</sup>	LARSEN <sup>(15)</sup>	MCCELLISTREM <sup>(16)</sup>	COCHAVI <sup>(17)</sup>	ADOPTED
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.871099	0.871	0.871	0.870	0.871	0.87	0.871
1.573726	1.573	1.573	1.575	1.573	1.57	1.574
	1.58	1.58				
1.8642			1.865	1.864	1.74	1.740
2.0673			2.070		1.87	1.864
2.300			2.300 (4+, 3-)		2.07	2.067
2.3929	2.40	2.40	2.395		2.30	2.300
2.42337	2.422	2.422	2.425			2.393
2.5336			2.540 (5-)			2.423
2.568			2.570			2.534
2.608			2.615			2.568
2.73971 (1, 2)+	2.74	2.74				2.608
2.774			2.775			2.740
2.837						
2.8725	2.856	2.856 (7, 8+)				2.856
2.9307			2.870			2.873
2.9555						2.956

\* Estimated from  $\gamma$ -decay scheme in NDS.

Table 6 Parameters for Level Density Formula and Neutron Separation Energy

parameter Isotope	$C_0$ (MeV <sup>-1</sup> )	$a$ (MeV <sup>-1</sup> )	$A$ (MeV)	$\alpha$ (MeV <sup>-1/2</sup> )	$E_x$ (MeV)	$S_n$ (MeV)
Mo-92	803.42	9.7232	2.2100	5.6430	6.3404	—
-93*	846.62	10.1359	1.2800	5.8032	5.3929	8.0723
Mo-94	899.13	10.6500	2.0000	5.9911	6.0957	—
95*	969.65	11.3644	1.2800	6.2326	5.3589	7.3751

\* compound nucleus

Note  $C_0$  : normalization constant

$a$  : level density parameter

$A$  : pairing energy

$\alpha$  : Spin cut-off factor,  $\sigma_M^2$  is given as following form ;  $\sigma_M^2 = \alpha \cdot U^{1/2}$

$E_x$  : energy of turning-point ( $=U_x + A$ )

$S_n$  : neutron separation energy from compound nucleus

Table 7 Comparison of Average Gamma Width ( $\bar{\Gamma}_\gamma$  (meV))

Reference Isotope	Musgrove <sup>24)</sup>	Benzi <sup>12)</sup>	Dovbenko <sup>25)</sup>	Weigmann <sup>26)</sup>	average value	Present Work
Mo-92	260	120	270	224 ± 22 *	219	217
Mo-94	260	160	220	149 ± 15 *	197	193
				* S-波のみ		

Table 8 Comparison of Average Level Spacing ( $\langle D \rangle_{\text{obs}}$  ( $10^3$  eV))

Reference Isotope	Musgrove	Benzi	Dovbenko	average value	Present Work
Mo-92	2.03	3.245	2.4	2.56	2.174
Mo-94	1.03	1.936	1.0	1.32	1.247

Table 9 Comparison of  $2\pi\Gamma_T / \langle D \rangle_{\text{obs}}$  ( $10^{-6}$ )

Reference Isotope	Musgrove	Benzi	Dovbenko	average value	Present Work
Mo-92	805	232	707	581	627
Mo-94	1586	519	1382	1162	972

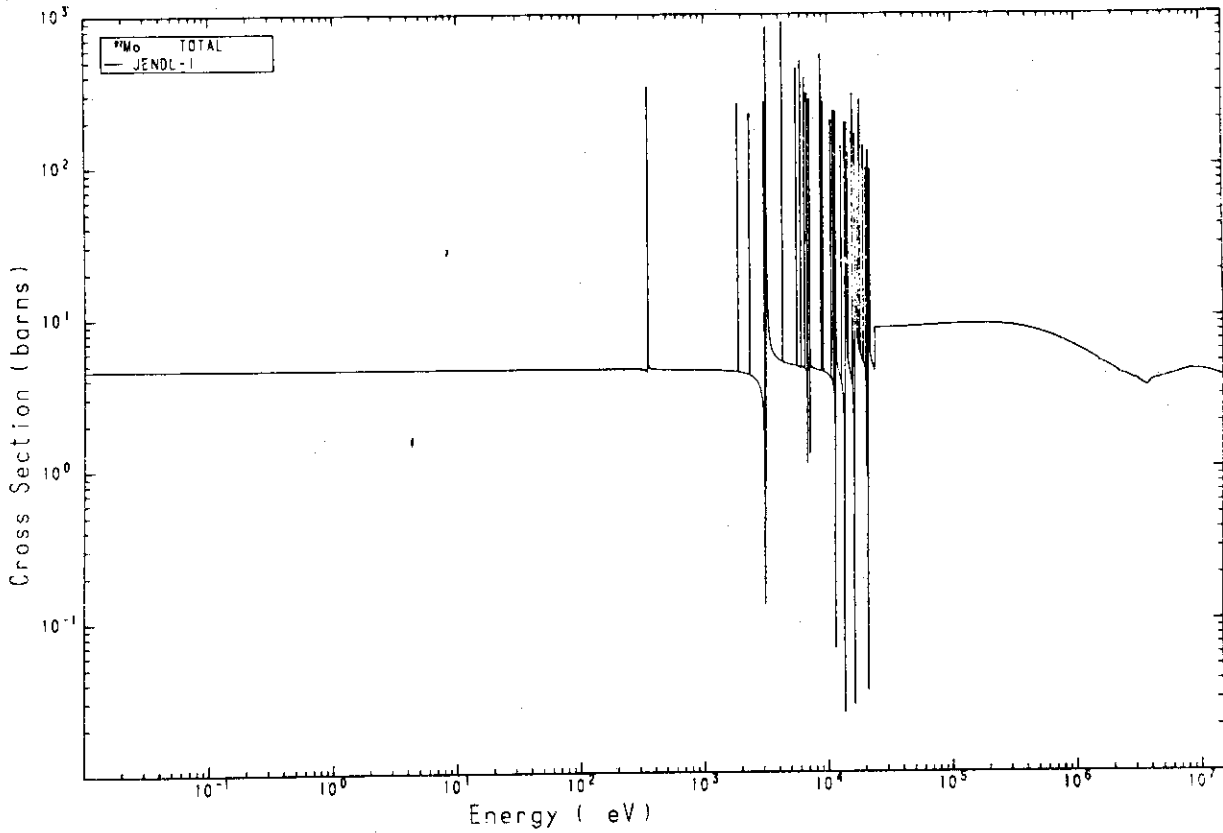


Fig.1 Total Cross Section of Molybdenum-92

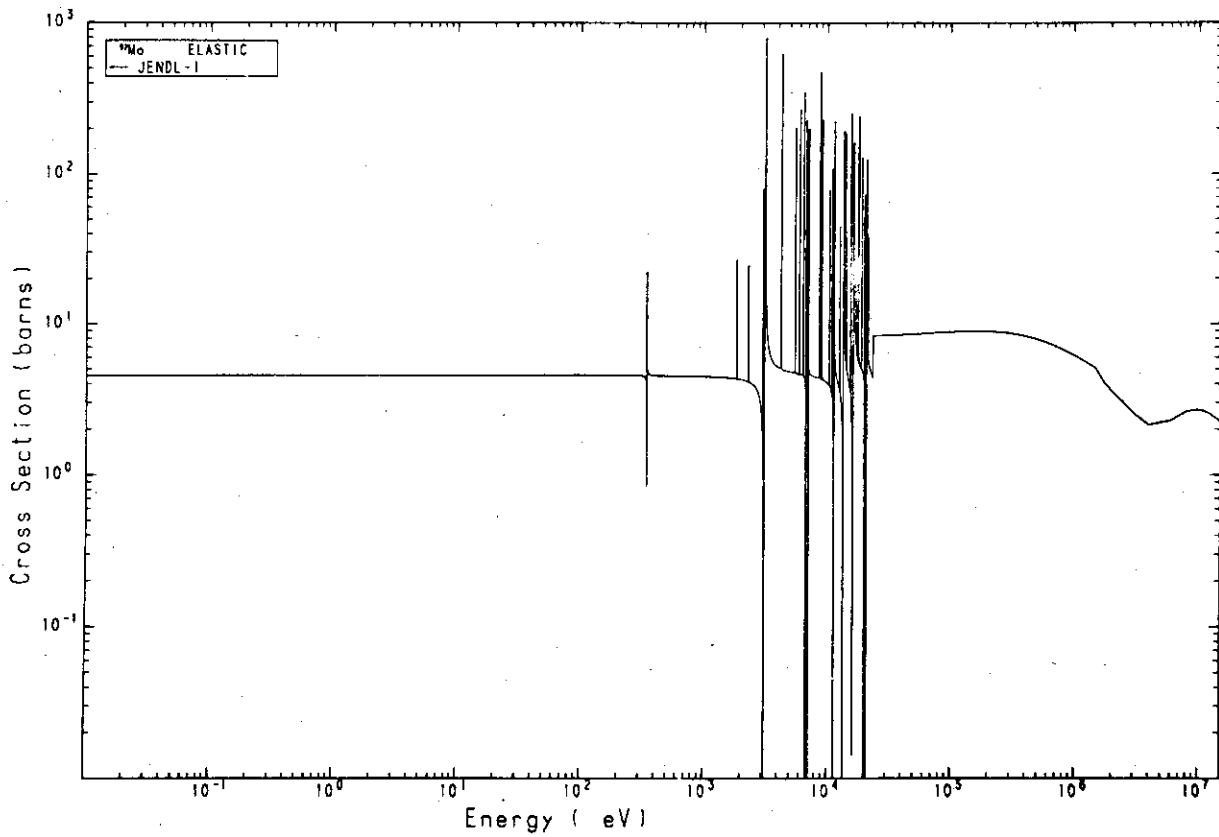


Fig.2 Elastic Scattering Cross Section of Molybdenum-92



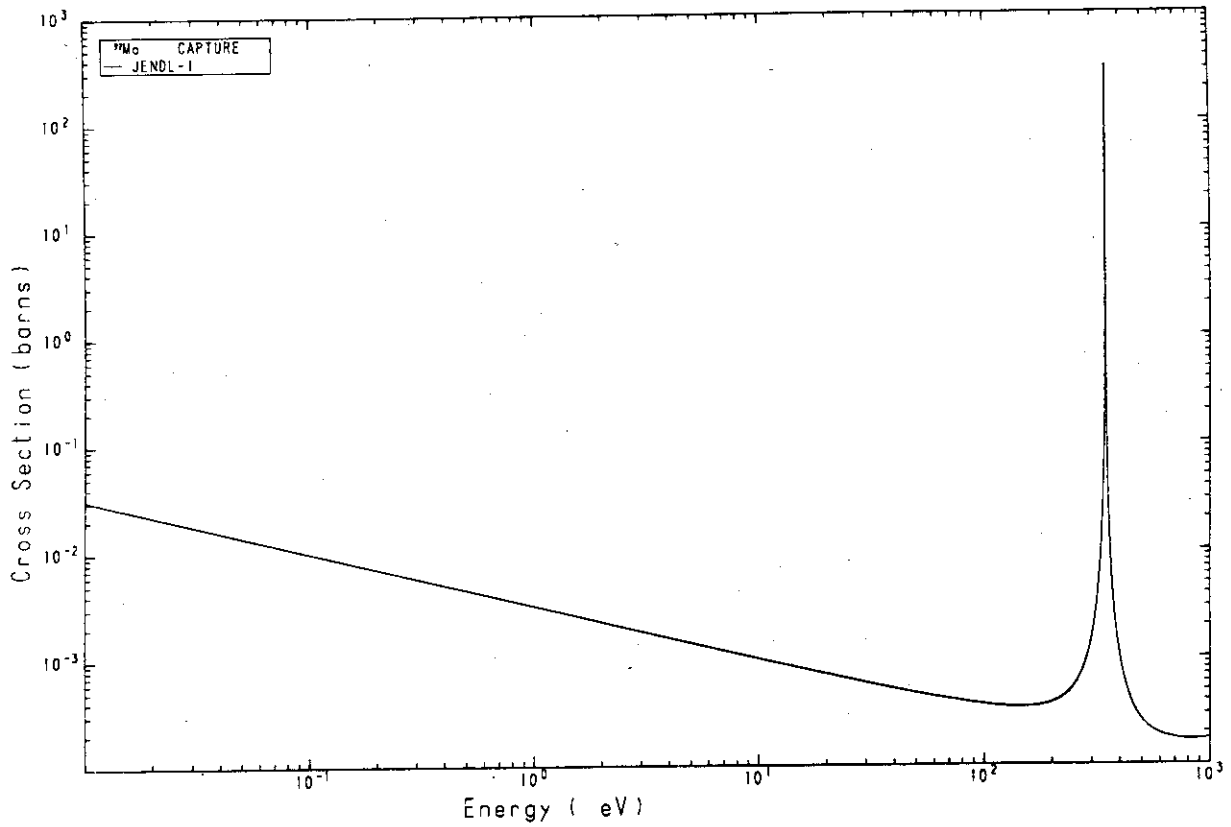
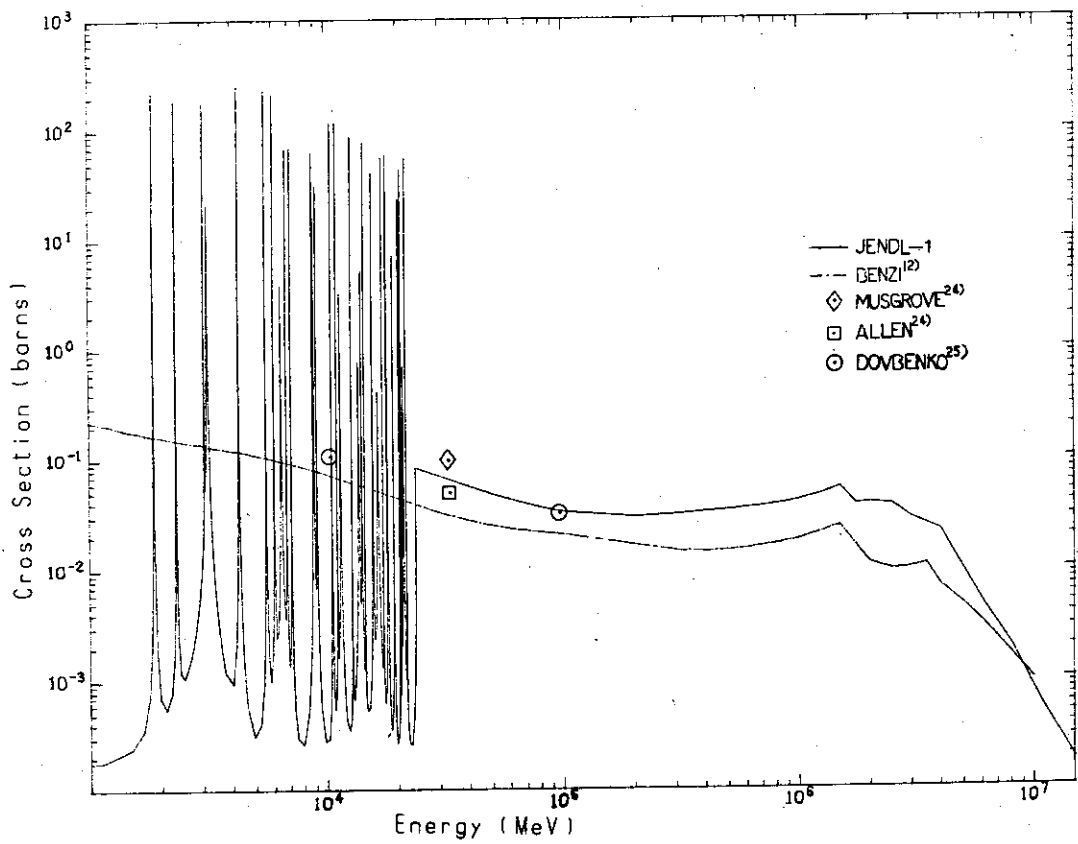


Fig.3(a) Radiative Capture Cross Section of Molybdenum-92



b) Fig.3(b) Radiative Capture Cross Section of Molybdenum-92

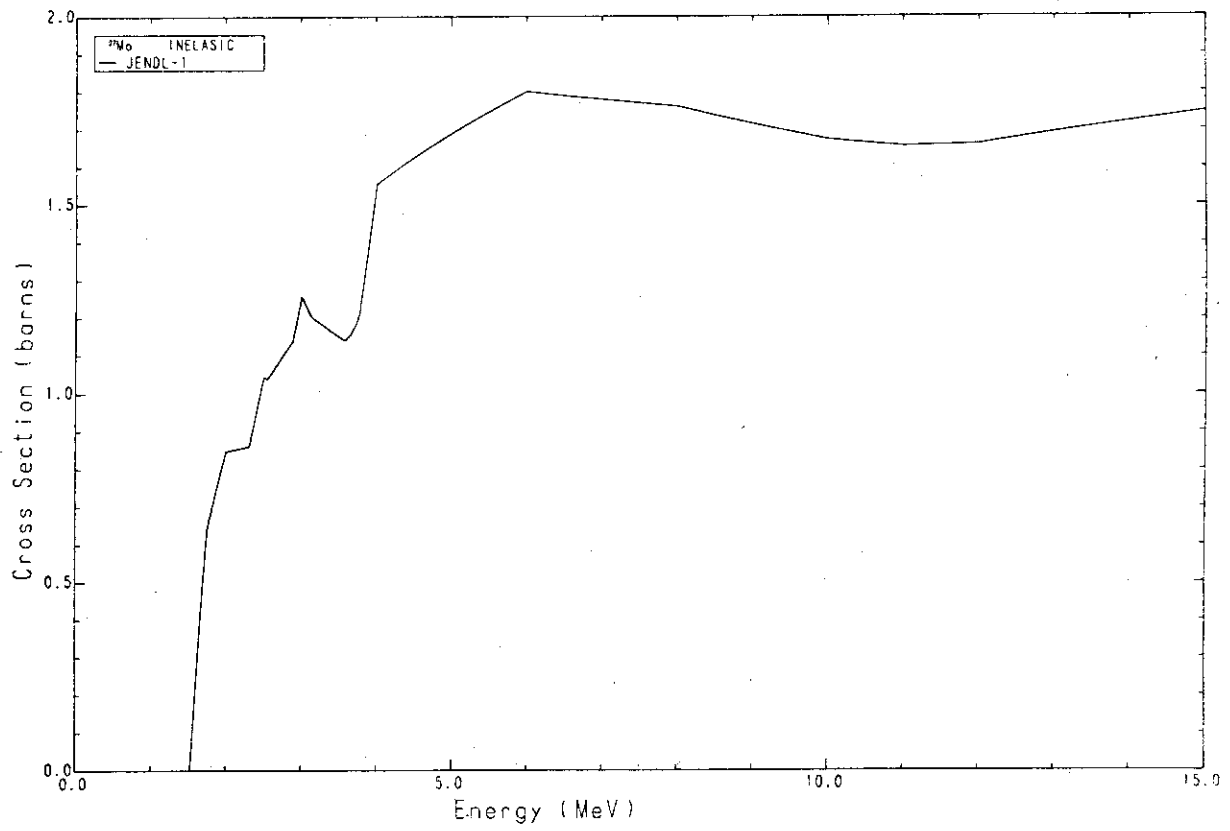


Fig. 4 Inelastic Scattering Cross Section of Molybdenum-92

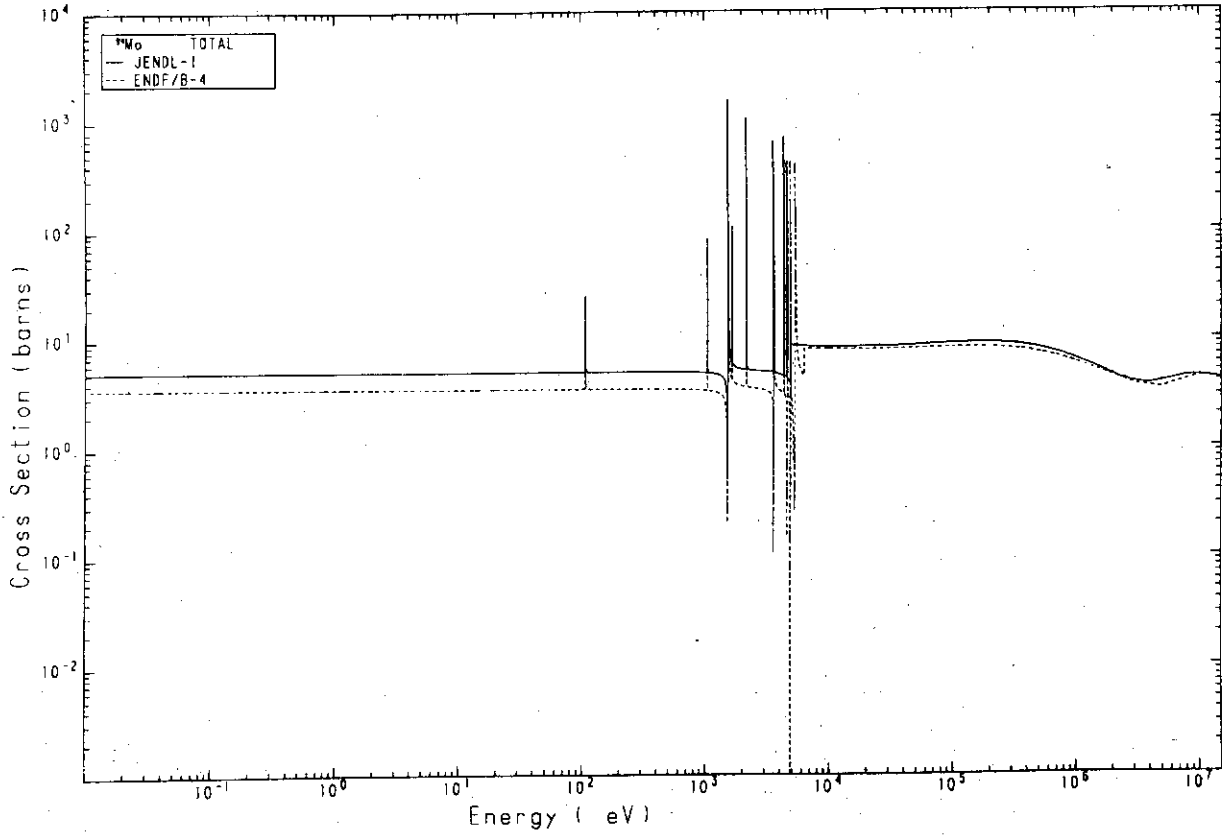


Fig.5 Total Cross Section of Molybdenum-94

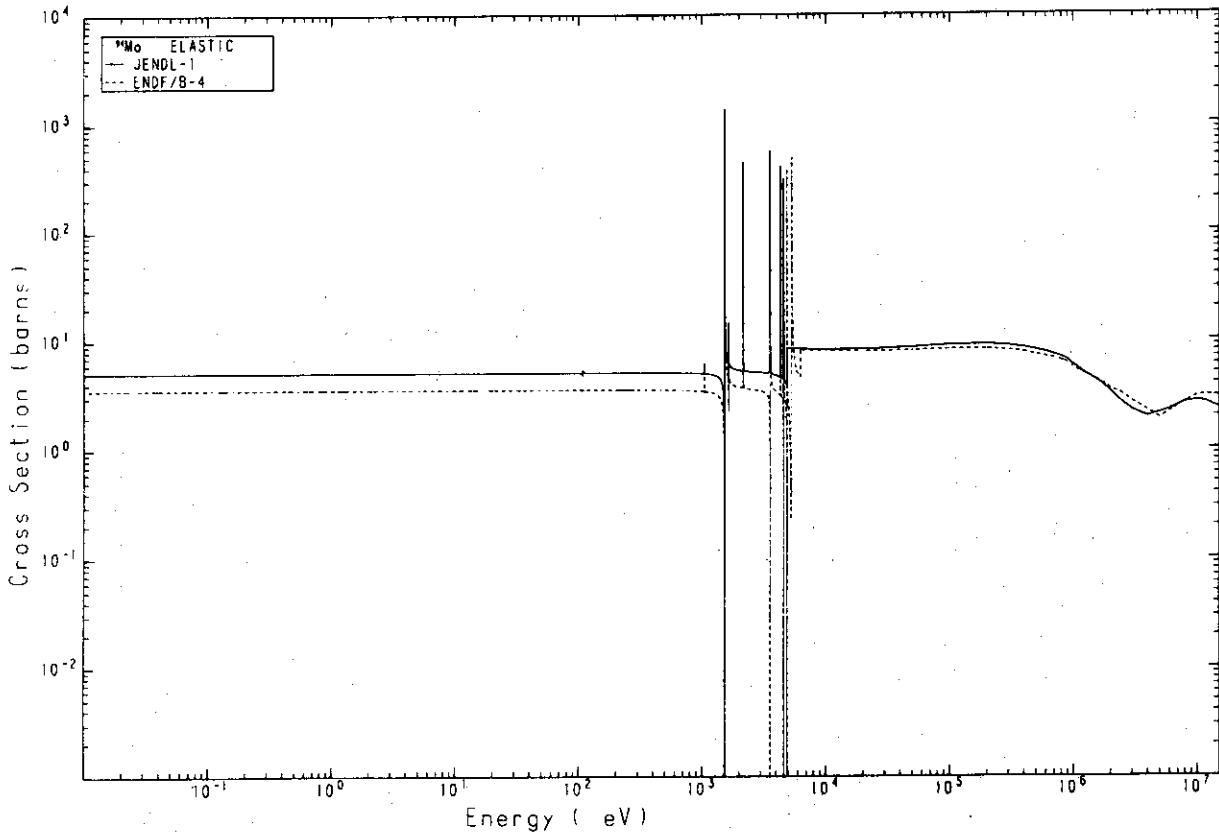


Fig.6 Elastic Scattering Cross Section of Molybdenum-94

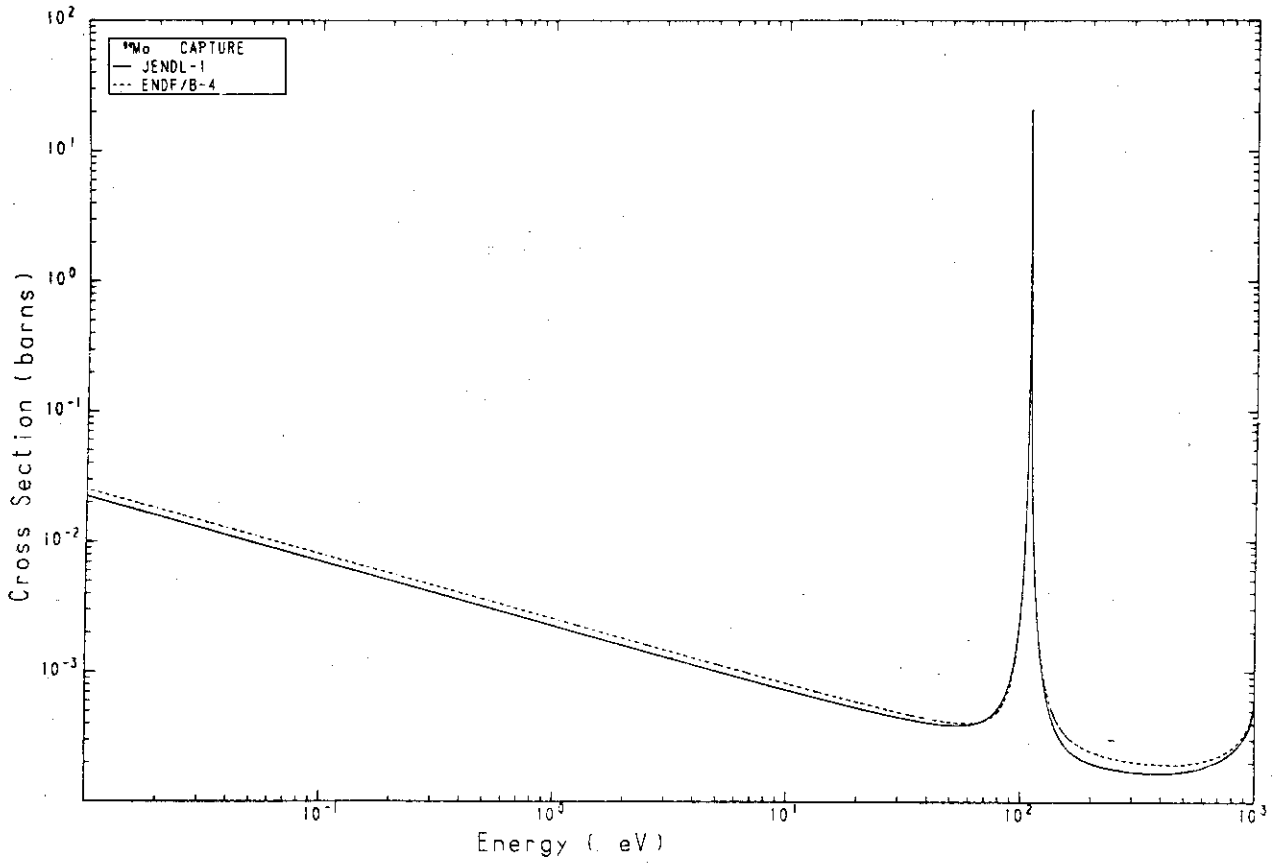


Fig.7(a) Radiative Capture Cross Section of Molybdenum-94

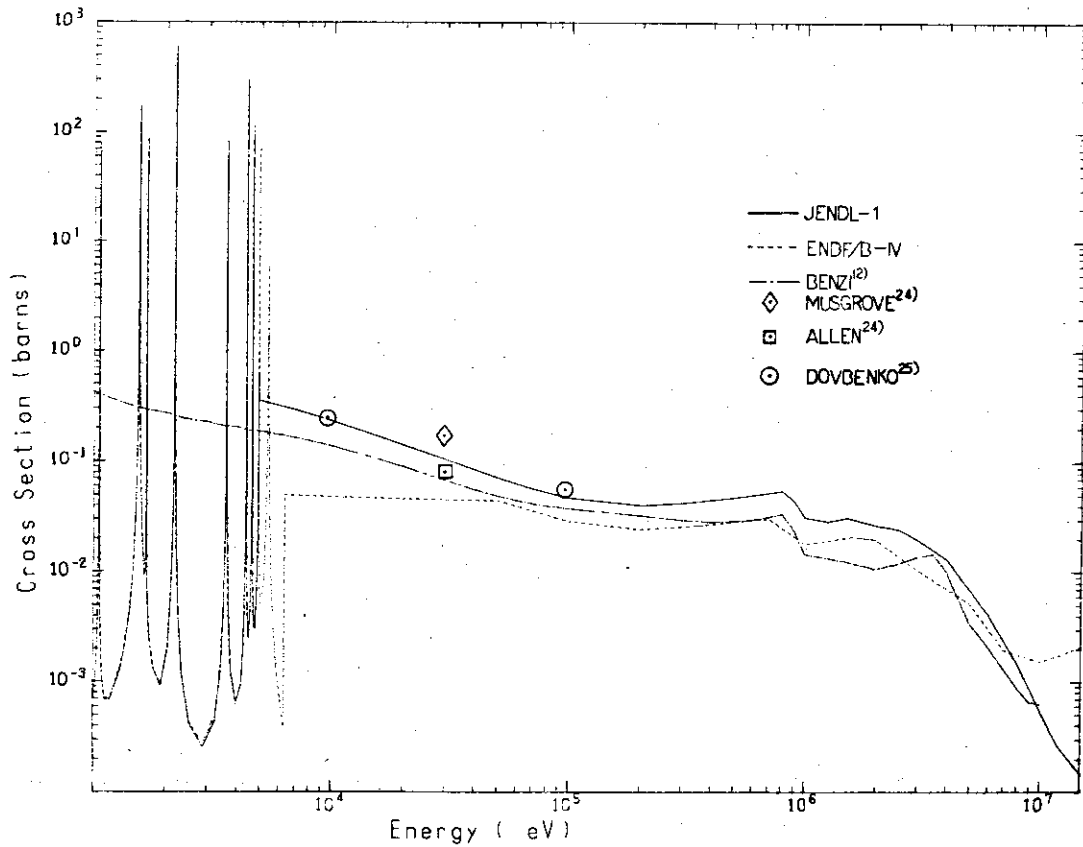


Fig.7(b) Radiative Capture Cross Section of Molybdenum-94

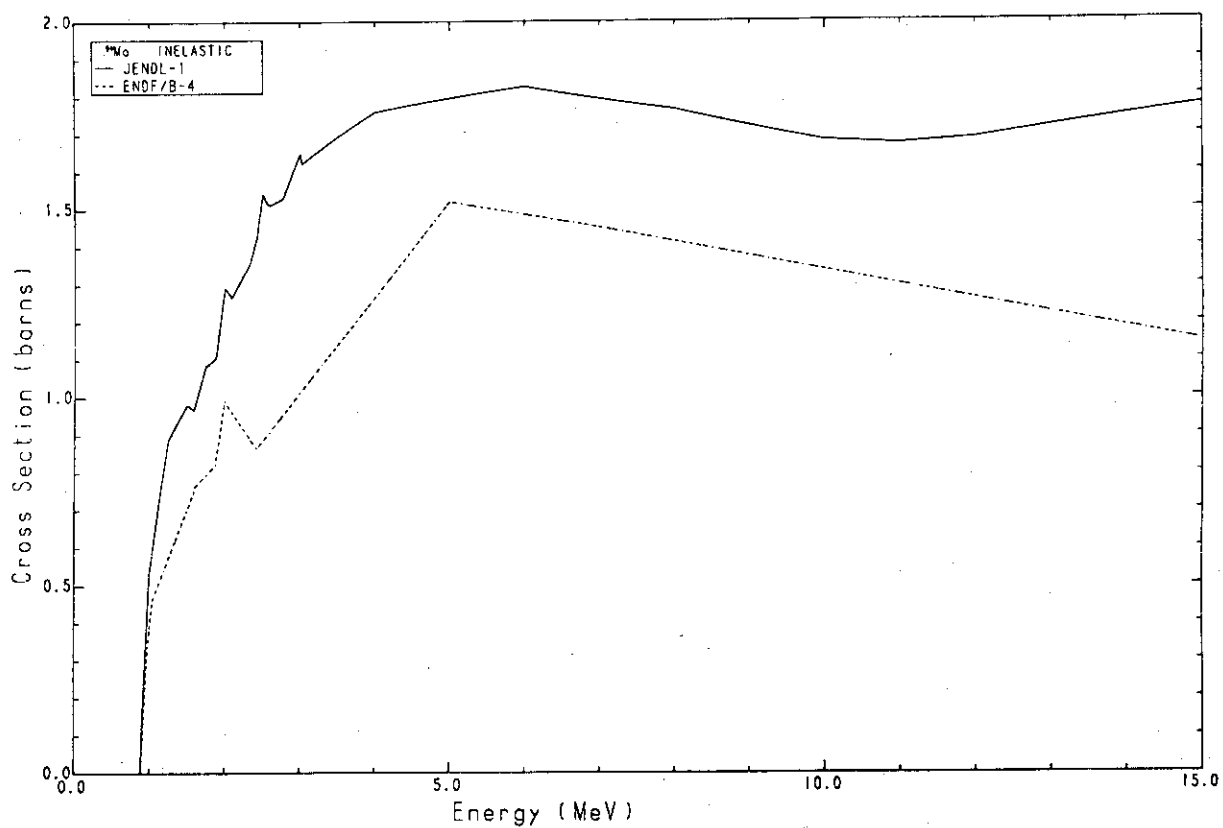


Fig.8 Inelastic Scatteirng Cross Section of Melybdenum-94