

(2) 高転換軽水炉の核データ

NAIG 吉田 正

はじめに

高転換軽水炉の炉物理計算, 炉心設計計算を行うとき必要となる中性子核データに関して最も特徴的なことは, 比較的能量の高い分離共鳴領域と非分離共鳴領域の重要性が大きく浮上することであろう。このエネルギー領域での中性子反応が在来の軽水炉の炉心特性上演じる役割は, $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 反応を除くと, 二義的なものでしかなかった。その ^{238}U の共鳴捕獲も, 在来炉では低エネルギー側の数本 (6.8 eV, 21 eV, 37 eV 等) の共鳴が支配的であり, これだけで大体話がついてしまう。更にも, 1 keV 以下の (共鳴) 断面積が高速炉との関連で問題とされることもほとんどなかった。中性子束が keV 領域以下で急激に減少するためである¹⁾。この意味で, 高転換軽水炉で重要となる分離共鳴領域上部と非分離領域を, これまであまり人の手の入っていない未耕地に喩えてもそう見当違いではあるまい。また, 標準的な高転換炉概念では, プルトニウム燃料の装荷を前提とするから, プルトニウムの, それも特に ^{240}Pu , ^{241}Pu 等の高同位体の重要性が増大してくる。核分裂生成物 (FP) の重要性は論をまたない。重要な FP 核種が在来軽水炉の場合と大きく入れわかることはないが (^{135}Xe はべつ), ここでも中エネルギー領域が問題となってくる。

共鳴領域の重要性

図1は, BWRと高転換BWRでの中性子生成と捕獲のバランスを示したもので, 高転換炉では第2群 (0.6 eV ~ 5 keV の共鳴域) における ^{239}Pu と ^{241}Pu の核分裂反応, ^{240}Pu の捕獲反応が大きく増加していることがわかる。更に詳しく見ると, ^{238}U の第1群の中性子捕獲もかなり多くなっている。第1群は5 keV以上の高速群であるが, ^{238}U の場合には非分離共鳴領域が4 keVから50 keVまで延びているので (JENDL-2), これは在来炉では特別重要とは言えない 非分離共鳴捕獲の増大 を意味している。 $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ の断面積と, これを高転換BWRの中性子束で重みづけしたものを図2に示す。高転換炉でのレスポンスは, 断面積そのものよりもエネルギー依存性が平坦となり, その結果, 高エネルギー側からの寄与が非分離域も含めて増大することになる。また, 冒頭で述べたように, 在来軽水炉では6.68 eV, 21 eV, 37 eV等, 低エネルギー側の数本の共鳴からの寄与が吸収共鳴の大半を占め, これら数本の共鳴パラメータの精度向上が他を差しおいて重要であったが, 高転換炉では数eVから数十keVの非分離領域まで, まんべんなく注意を払う必要が生じる。

このように, 高転換炉では分離域から非分離域に至る広いエネルギー領域の断面積が, 比較的平等に, 全体として核特性に寄与していることがわかった。次に, 非分離域, 分離域それぞれの問題点について少し詳しく見て行くことにしよう。

非分離共鳴領域の問題点

図3は、 $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ の無限希釈断面積のJENDL-2値とENDF/B-IV値を、区間平均のかたちで図示し、比較したものである。分離域と非分離域の境界である4 keVを超えると、両者の差が突然大きくなるのは、非分離共鳴データの評価上のむずかしさを端的に示していると言える。まず、非分離域の断面積測定値は、それが共鳴断面積である以上、大きなバラつき(ゆらぎ)を持つ。図4は $^{239}\text{Pu}(n, f)$ の例であるが、非分離断面積の評価者は、このように大きく広がる断面積の平均値を、非分離パラメータを調節しながらフォローして行かなければならない。測定者が、小エネルギー区間毎の平均値を与えている場合も多く²⁾、評価者自身が平均操作をする必要が常にある訳ではないが、それにしても、非分離パラメータの動かし方に普遍的な指針はない。図5は、世界の代表的な評価済み核データライブラリーの、分離・非分離共鳴領域の構造を示したものである(Cullenらの文献³⁾にもとづく)。非分離域に示した数字は、平均断面積をフォローするために必要となったエネルギー区間の数で、この小区間ごとに異なったパラメータ値のセットが与えられる。 ^{238}U については、このような非分離共鳴領域特有の煩雑さと、それに伴う断面積誤差の増大を避ける意味で、分離領域を現在の4 keV前後から10 keVまで広げようとする動きがある。NEANDCの ^{238}U 共鳴Task Forceの活動⁴⁾がそれで、これまでにかなり具体的な成果が出てきている⁵⁾この動きは、高転換炉への成果の応用を目的に発足したものではないが、数年先行してくれていたおかげで、近いうちにその成果を高転換炉のための核データの精度向上に充分生かすことが可能となろう。

分離共鳴領域の問題点

分離域の核データにも問題はある。現在の世界の代表的な評価済み核データライブラリーであるJENDL-2(日)、ENDF/B-V(米)、KEDAK-4(独)、SOKRATOR(ソ)の相互比較によると³⁾ $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ で約2%程度、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ で4~5%のバラつきが見られる。ただし、比較的バラつきの小さい $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ でも6.68 eV共鳴付近と1 keV以上ではそれぞれ3%と5%の差異が見られる。これらの数字は、データの信頼性に関する一つの目安となろう。しかし、 ^{238}U については、既に述べたNEANDCのTask Force⁴⁾を中心にした活動(主要共鳴データの再解析や新しい実験の計画など)があり、 ^{239}Pu についても、フランスのグループの多準位公式による再解析やtransmission測定計画(ORNL)等があり、状況は着実に改善の方向に向かっている。

高転換炉に関して ^{238}U や ^{239}Pu より問題が多いと思われるのはPu高同位体である。 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu の重要性の大幅な浮上については既に述べた。図6は、 $^{240}\text{Pu}(n, \gamma)$ と $^{241}\text{Pu}(n, f)$ の分離共鳴領域断面積をライブラリー間で比較したものであり、共に10%を超えるバラつきが随所に見られる。これが、Pu高同位体の共鳴領域断面積の現状における信頼性の目安だとするならば、

高転換炉への応用の立場からも、信頼性の大幅な向上が急務であると言える。

核分裂生成核種

図7は高転換BWRにおける、核分裂生成核種(FP)の中性子捕獲率を寄与の大きな順にならべたものである。高転換炉においても、FPは重核(U, Pu)とともに、最も重要な炉心特性の一つである燃焼反応度を決定する要因であることに変わりはない。高転換炉では、熱中中性子の割合が少ないので、 ^{135}Xe によるXeオッシレーションの問題は生じないが、各核種の重要性の比重が在来軽水炉と大幅に異なってくる訳ではない。同図中*印を付したものは、測定データの欠如あるいは不足により、断面積データの信頼性が特に低いと考えられる核種である。

精度の高い測定データがあっても、問題の残るケースがある。FPの中性子断面積は、米国での高速炉プロジェクトの一環としてオークリッジのORELAで長年にわたり測定され、このデータが基礎データベースの重要な一角を構成していた。しかし、本来高速炉への応用をねらったため、入射中性子エネルギーの下限が数keVに設定されていて、高転換炉では重要性の低下しない数keV以下の測定データを欠くFP核種が少なからず存在する。このような穴をどう埋めるか、これも残された問題点となる。

FP崩壊熱については、特に重大な問題は生じないはずであるが、 ^{241}Pu を親核とする崩壊熱成分の増大には留意する必要がある。また、燃焼中に生じたFP核種が中性子を吸って(代表例は $^{133}\text{Cs} \rightarrow ^{134}\text{Cs}$)、シャットダウン後の崩壊熱レベルを変える効果、いわゆる中性子吸収効果には当然在来炉と高転換炉で違いが出てくる(この効果が顕著に出るのは、シャットダウン後1~2年の燃料で、崩壊熱レベルを20~60%程度増大させる)。この効果は、たとえばJNDCのFP崩壊データファイル等を用いた計算で、充分におさえられるが、軽水炉用の崩壊熱曲線を、そのまま無批判に高転換炉にも転用することは避けるべきである。

おわりに

高転換炉の核データに関連する問題点を調べてきたが、高転換炉ではeV領域から高速中性子領域までの中性子断面積が、比較的まんべんなく寄与してくるので、ある特定のエネルギー領域さえしっかりおさえおけば、それで良いということが言いにくい。在来軽水炉と高速炉の双方からの興味の谷間にあった、分離共鳴領域上部と非分離域の断面積、それに ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 等のPu高同位体の断面積データの改善がポイントとなろうが、やはり全エネルギー領域にわたる核データの信頼性向上への地道な努力も放棄されるべきではない。

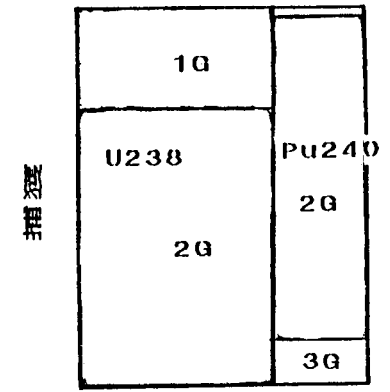
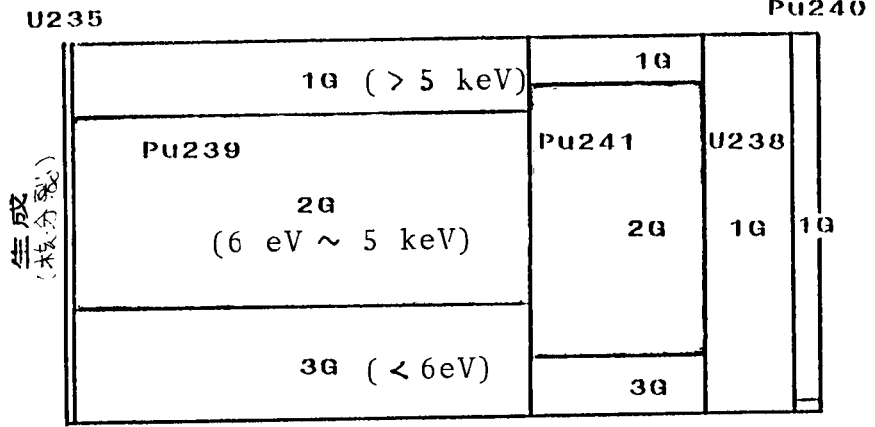
謝 辞

本稿作成にあたって御助力を賜わった、高野秀機、中川庸雄、浅見哲夫、石黒幸雄、水本元治(原研)、水田宏、飯島俊吾(NAIG)の諸氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 竹田らが一般化摂動の方法に基づき、1 keV以下の断面積、特に $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 、 $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ が高速炉のナトリウムボイド係数に大きな影響を与えることを指摘して以来、状況は変わりつつあるが、核データ側の対応はまだ充分とは言えない。T. Takeda, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 23 (1986) 168
- 2) $^{239}\text{Pu}(n, f)$ の例では、R. Gwin et al., Nucl. Sci. Eng., 59, 79 (1976)
- 3) D.E. Cullen and O. Schwerer, Proc. IAEA Mtg. on U and Pu Isotope Resonance Parameters, Vienna (1981) p. 197
- 4) Y. Nakajima, Proc. 1984 Seminar on Nuclear Data, JAERI-M 85-035 (1985) p. 196
- 5) NEANDCの最新の報告。五十嵐信一, 日本原子力学会誌, Vol. 28 (1986年4月), p. 321

HCBWR



BWR

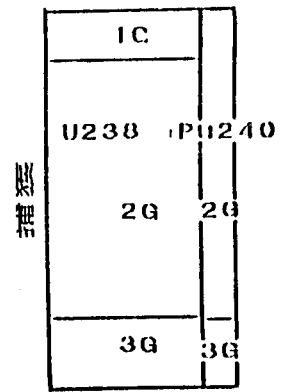
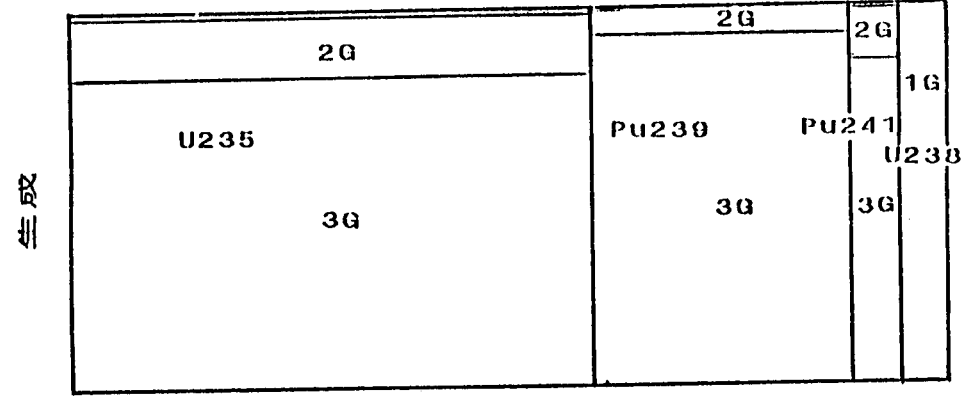


図1 中性子の生成/吸収バランス

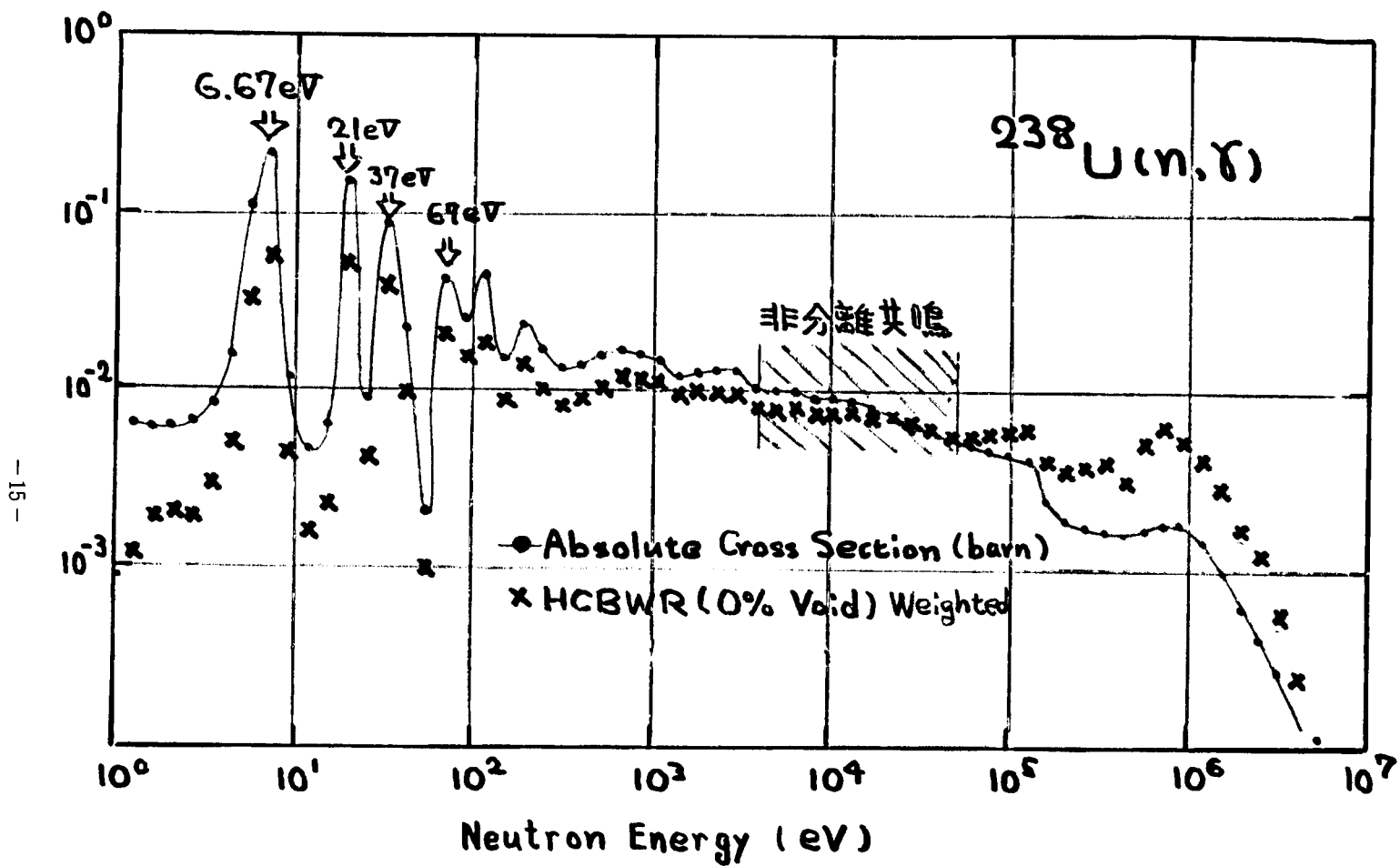


図2 ^{238}U 中性子捕獲断面積と高転換BWRでの反応割合

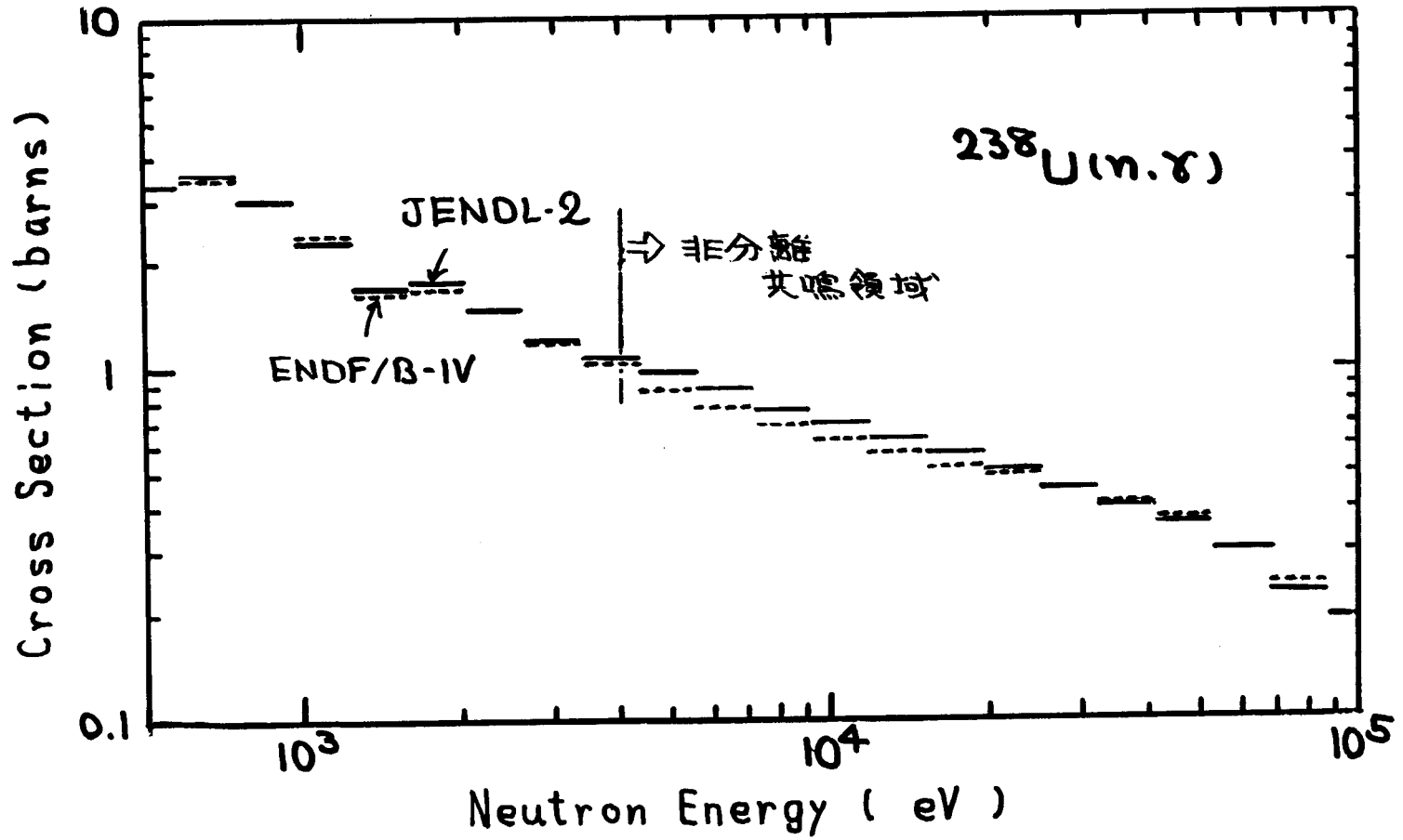


図3 ²³⁸U中性子捕獲断面積のライブラリー間の比較例

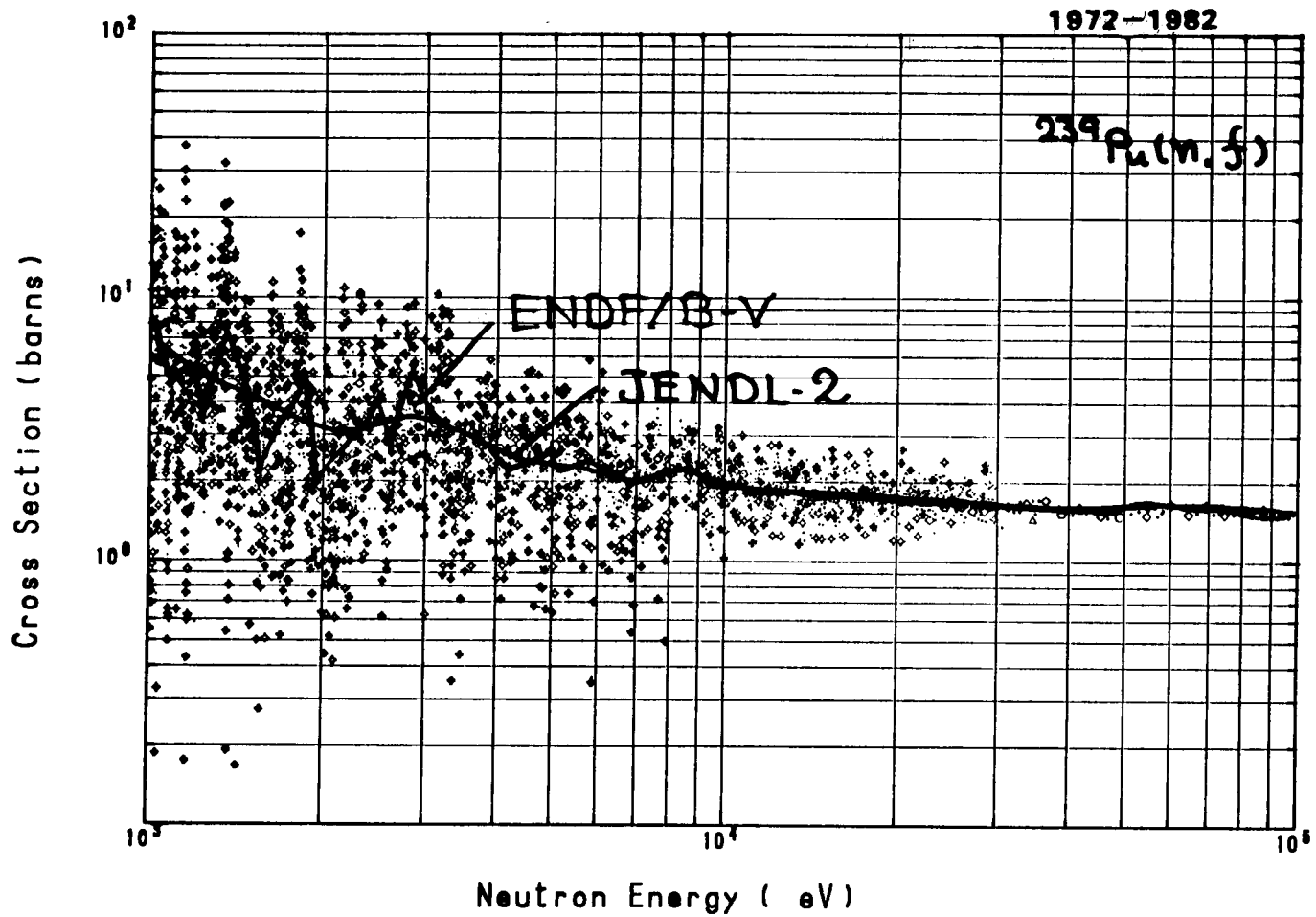


図4 非分離共鳴領域における ^{239}Pu 核分裂断面積

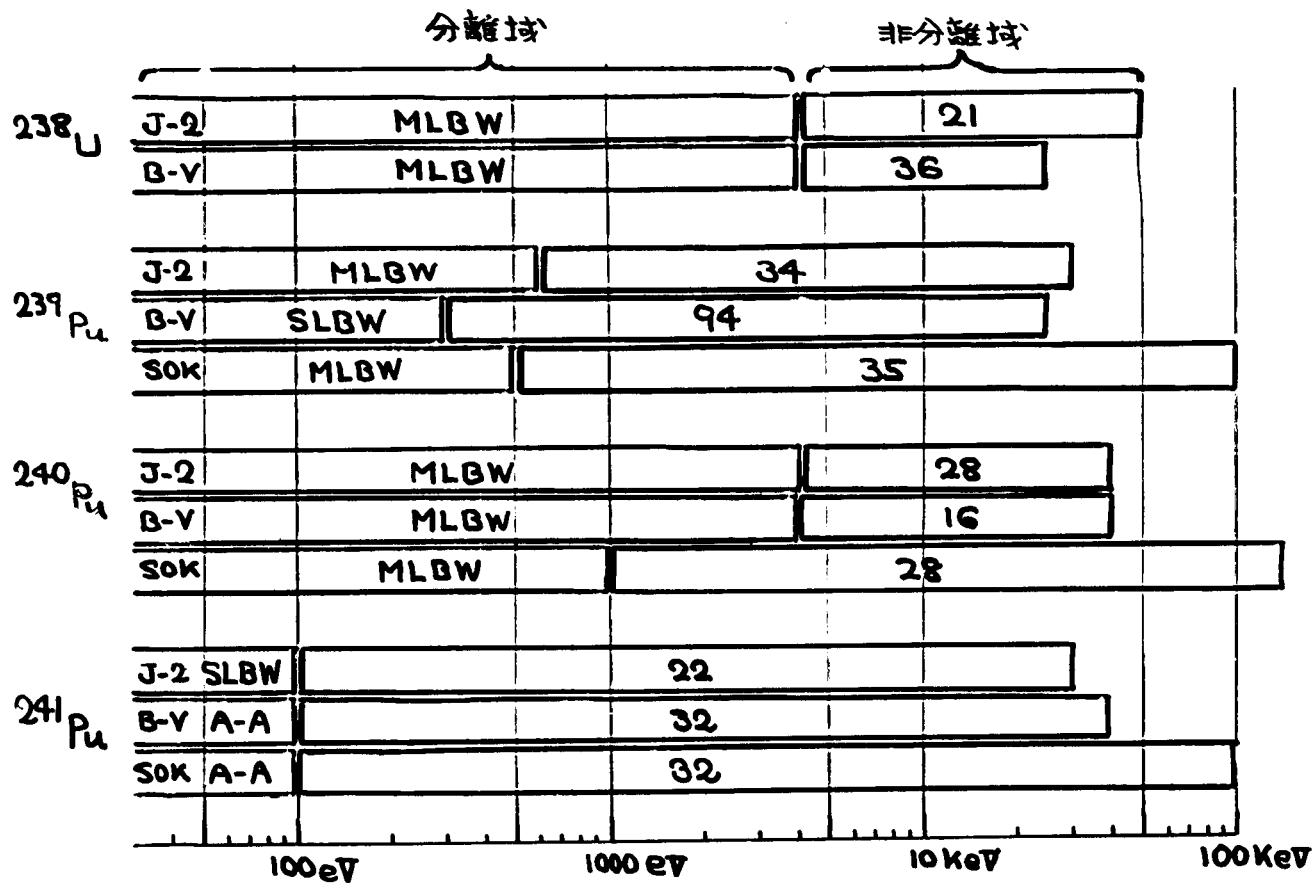


図5 主要な評価済データファイルでの分離域・非分離域の構造

ML : Multi-Level, SL : Single-Level, BW : Breit-Wigner, A-A : Adler-Adler
 J-2 : JENDL-2, B-V : ENDF/B-V, SOK : ソ連の SOKRATOR, 数字は非分離域分割数

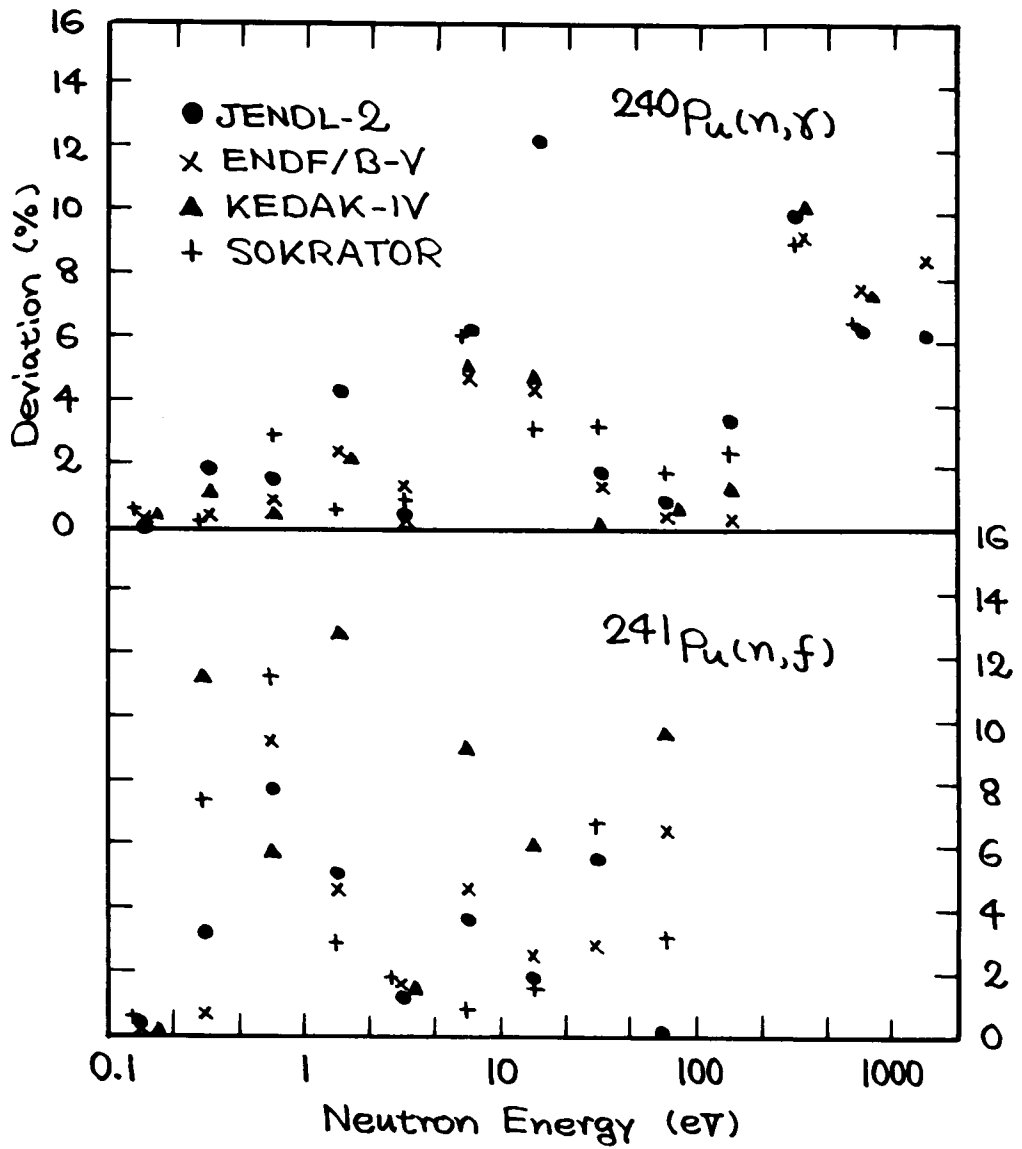


図6 Pu 高同位体分離共鳴領域断面積のライブラリー間比較 (平均からの差異)

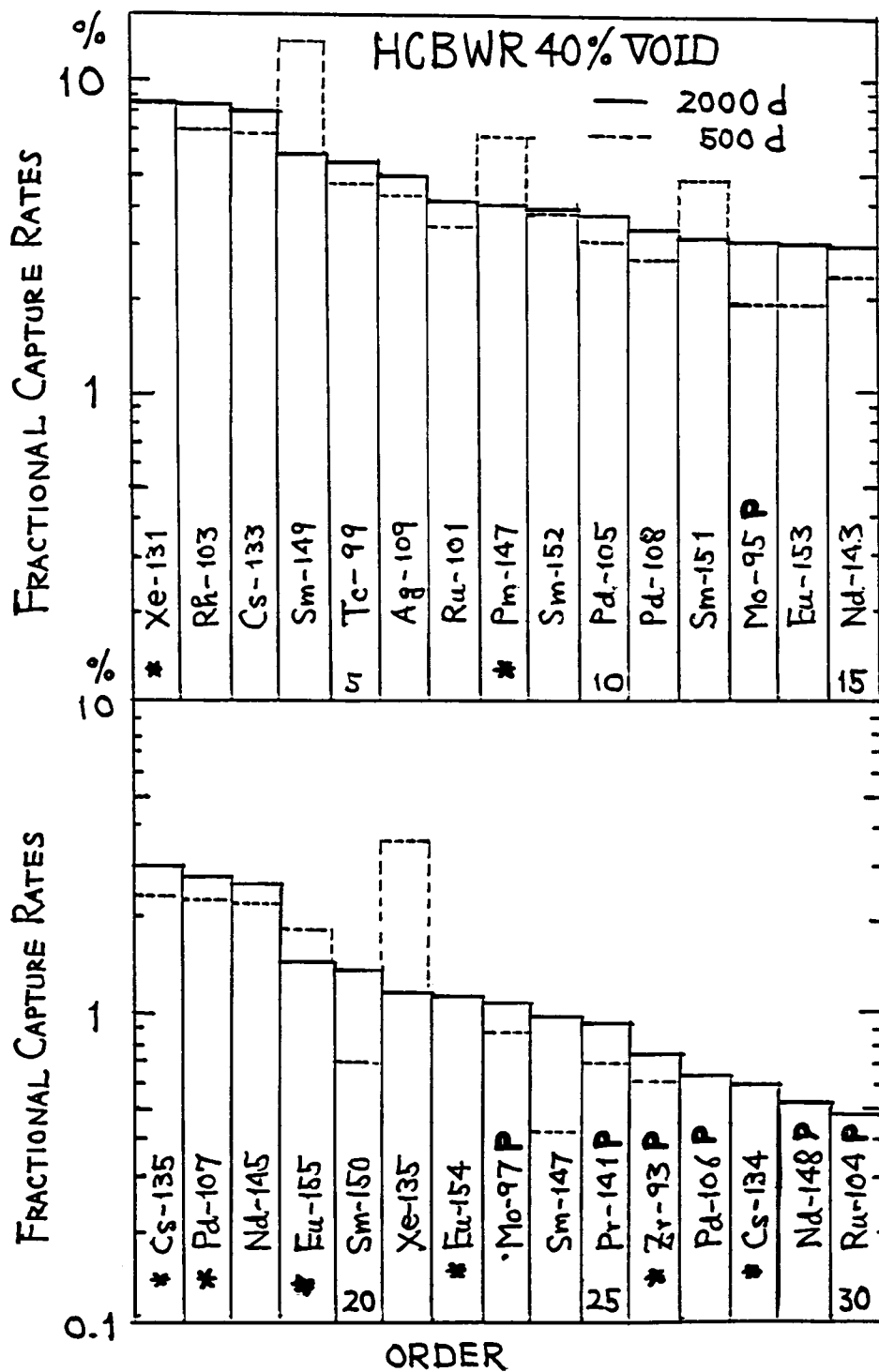


図7 HCBWRでの核分裂生成核種の中性子吸収率