

話題 (IV)

IAEA 「核分裂過程における中性子放出に関する核データ」専門家会議の報告

(近畿大学原子力研究所) 大澤 孝明

1. はじめに

標記会議が1990年10月22~24日の3日間にわたりウィーンのIAEA本部で開催された。今回の会議は1988年5月に水戸で開催された「核分裂における中性子放出の物理」専門家会議につながるものであり、今回の目的は次の2点にある。

- (1) 核分裂における中性子放出に関する核データのニーズと実験的・理論的研究の現状を、特に前回の会議以降の新しい進展を中心にレビューする。
- (2) 早急に解決すべき課題があれば、「核分裂中性子放出の物理とその核データの応用」に関する新しい調整研究計画(Co-ordinated Research Program)を作り、その課題と目標を確定する。

出席者の内訳は、オーストラリア(1)、中国(1)、フランス(2)、ドイツ(2)、インド(1)、日本(1)、ソ連(2)、米国(1)、E C(1)、IAEA(9)の合計21名、IAEAのScientific secretaryはS. Ganesan氏(IAEA核データ部)であった。

開会の辞において、Konshin(IAEA)は、日本のオメガ計画に言及しつつ、マイナー・アクチニド核種の核データの重要性が高まっていること、なかんずく、核分裂中性子データが臨界性の検討にとって大切であることを強調した。なお、オメガ計画はこの会議にもしばしば口の端にのぼり、人々の関心を引いている様子だった。

会議は表1に示す3つのセッションに分けておこなわれた。

表1 会議の主な内容

セッションI 核分裂中性子スペクトル：最近の新しい測定と計算の現状

セッションII 核分裂中性子数の計算と測定の進歩

セッションIII 核分裂における中性子放出の特殊効果の研究と中性子放出の理論

この会議の全体的概要については別のところ(日本原子力学会誌1991年2月号)に報告を書いたので、ここでは発表論文のいくつかをとり上げてその内容を紹介する。

2. トピックス

2. 1 ^{235}U の熱中性子核分裂における核分裂片の核温度分布

(S. S. Kapoor - Bhabha Atomic Research Centre, India)

1988年の会議においてGeelのKnitterらは、 ^{252}Cf (sf) の核分裂片と核分裂中性子のマ

ルチパラメータ同時測定から求めた核分裂片の核温度と単位密度パラメータについての注目すべきデータを発表したが、今回の会議ではKapoorが ^{235}U (n, n, f)に関して行なった同様な測定結果について報告した。図1にその結果を示す。 ^{252}Cf (sf)の場合ほど顕著ではないが、軽分裂片の核温度が分裂片の質量数とともに増加し、重分裂片の核温度は質量数に依存せず、ほぼ一定であるという特徴は共通している。これは、内部励起エネルギーは $\nu(A)$ と同じく鋸歯状の分布をもつが、A~130のshell領域では単位密度パラメータが小さいため、励起エネルギーが小さい割には核温度が大きくなったものと解釈できる。

2.2 共鳴領域における $\bar{\nu}$ の変動

(E. Fort - CEN Cadarache, France)

^{235}U の $\bar{\nu}$ 値は共鳴ごとに変動を示すことが知られており、かつては、これは共鳴のスピニの違い（およびそれにともなう(n, rf)反応）によるものと理解されてきた。しかし、 ^{239}Pu の場合とは異なり、 ^{235}U の場合には熱中性子核分裂においても3⁻, 4⁻両方のチャンネルが同等に開いているものと考えられるので、この説明は説得的ではない。しかし、最近GeelのHampschが核分裂片の全運動エネルギーを、共鳴ごとに詳細に測定したデータによって、この ν のゆらぎが全運動エネルギー<TKE>のゆらぎに由来するものであることが明らかになった。図2（上）に共鳴核分裂における<TKE>と熱中性子核分裂における<TKE>の差を、同（下）にGwinのデータに基づく ν 値の評価値を示す。Hampschのデータを使って導かれた $\bar{\nu}$ 値（黒四角）が評価値とよく対応していることがわかる。

2.3 ^{235}U と ^{239}Pu の ν 値の積分的検証

(H. Tellier - CEN Saclay, France)

熱中性子領域における ν 値はミクロ的測定によるほか、臨界系における積分量のデータを用いて検証することができる。Tellierはすべての積分データ Y_1 に対する量

$$Q = \sum_i (1/\Delta E^2) [Y_1 - F_1(\dots, x_k, \dots) - \sum_k S_{ik} \Delta x_k]^2$$

Y : 積分データの測定値、 ΔE : Y の測定誤差、

F_1 : 積分データの計算値、 x_k : 中性子パラメータ、 S_{ik} : 感度係数

を最小にする変化分 Δx_k を求ることにより、既存の核データファイルの ν 値の検証を行なった。対象とされた臨界系は次の通りである。

U系 $D_2\text{O}-\text{NU}$ 格子、黒鉛- NU 格子、球形HEU均質系

$H_2\text{O}-\text{LEU}$ 格子（減速度の異なる複数の系）

Pu系 $D_2\text{O}-\text{混合金属燃料}$ 格子、 $H_2\text{O}-\text{Pu}$ 均質系

MOX系 $H_2\text{O}-\text{MOX}$ 格子

$\bar{\nu}$ 値の熱中性子領域におけるエネルギー依存性は、 ^{235}U に関してはいずれのファイルにおいても平坦だが、 ^{239}Pu の場合はJEF2.0のみが0.296 eV共鳴でdipをもっており、それ以外のファイルでは平坦という違いがある。

最適の β 値を採用した時の、種々の臨界系の実効増倍率 k_{eff} の計算値と測定値の差を図3に示す。横軸 q は 2.7 eV における減速密度であり、右側ほどソフトなスペクトル、左端は稠密格子スペクトルに対応する。全般的な一致はほぼ良好である。この最適値は、在来のファイルの評価値と比較すると(表2)、JEF2.0ともっとも良好な一致を示す。

2.4 ^{248}Cm の核分裂中性子スペクトルの測定

(M.Blinov - V.G.Khlopin Radium Institute, Leningrad, USSR)

^{248}Cm は ^{252}Cf より長い半減期(4×10^5 年)をもち、しかも適当に強い中性子強度(約 10^4 核分裂/ mg)を有するので、長期間にわたり一定強度の照射を要する実験の中性子源として注目されている。このような実用目的のほか、 ^{248}Cm は ^{252}Cf の近傍核でもあるので、自発核分裂中性子スペクトルの形状が後者のそれと比較してどれほど異なるかという観点からも興味がもたれる。 ^{252}Cf (sf)に対する ^{248}Cm (sf)のスペクトルの相対比を図4に示す。また、 $T_M = 1.38 \text{ MeV}$ のMaxwell分布に対する比を図5に示す。このMaxwell核温度は $0.75 \sim 6 \text{ MeV}$ の範囲のデータに最も適合する値として選ばれたものであり、図中の実線はMannhartによる ^{252}Cf のスペクトルの評価値である。これらの図からわかるように、 ^{248}Cm のスペクトルは ^{252}Cf のそれとはかなり異なった形を示している。特に、 0.5 MeV 以下の低エネルギー成分がMaxwell型より多いことが注目される。Blinovらは、これを自発核分裂過程の早い段階における中性子放出によるものではないかと推定している。そうだとすると、なぜこの核種においてそのような放出が多いのかが問題になろう。この問い合わせるには、この周辺の別の核種について同様な測定を行ない、それも含めて理論解析を行なう必要がある。

いずれにしても、これは、マイナー・アクチニドのデータの重要性が強調された今回の会議で発表された唯一のマイナー・アクチニドの実測データであり、それに上のような特異性がみられたということはたいへん興味深いことである。

2.5 ^{252}Cf の加速途中における中性子放出

(M.Blinov - V.G.Khlopin Radium Institute, Leningrad, USSR)

核分裂中性子のほとんどは十分に加速された分裂片から放出されることが知られているが、高励起核の核分裂においては加速途中の分裂片からの放出の寄与がありうることがEismontによって指摘されてきた。Blinovらは、 ^{252}Cf (sf)からの放出中性子の角度分布を測定し、それを加速途中の中性子放出あり/なしと仮定した場合の計算値と比較することにより、自発核分裂においてもこの過程が無視できないと論じた。

図6はscission point以降の時間 t と分裂片速度(最終速度に対する相対比) U との関係、および時刻 t までに放出される中性子の割合を、 $\nu=2$ と $\nu=5$ の場合について示してある。この計算結果を見ると加速途中の分裂片からの中性子放出が無視できないことになる。図7の黒丸は、 90° での中性子計測数(N_{90})と、加速途中の放出なしとの仮定に基づいて 0° でのデータから計算した 90° での計数($N_0 \rightarrow N_{90}$)の差を、分裂片質量 M と全運動エネルギー E_k の関数として表わしたものである。白丸は、加速途中の放出ありと仮定した N_{90} の計算値と、なしと仮定したときの($N_0 \rightarrow N_{90}$)の計算値との差である。

両者が、絶対値においても、 M と E_k への依存性についてもよく一致していることから、Blinovらは、scission後まもなく非平衡メカニズムにより放出された中性子が存在する可能性が十分あるとしている。

2.6 「非等温Madland-Nixモデル」による核分裂中性子スペクトル計算

(T.Ohsawa - Kinki University, Japan)

核分裂中性子スペクトルの理論計算法としてMadland-Nixの方法がJENDL-3等で採用されたが、近年この方法はスペクトルの低エネルギー・ウィング ($E_n < 0.5 \text{ MeV}$) と高エネルギー・ウィング ($E_n > 5 \text{ MeV}$) を過小評価する傾向があることが明らかになり、これを是正する試みが行なわれている。これに関連した発表としては、R.Walsh(ANSI, Lucas Heights)が東北大の馬場氏らの2MeVにおける ^{232}Th の核分裂中性子スペクトルの測定データを、中性子の重心系非等方性を考慮にいれたMadland-Nixモデルに基づいて解析した結果を示した。しかし重心系非等方性の効果はごく僅かであり、Madland-Nixモデルの欠陥を正すには至らないよう見える。一方、筆者は、①Madland-Nixモデルにおいて、scission pointでの2つの核分裂片の間に統計的平衡が成り立っているという仮定には無理がある、②たとえscission pointで統計的平衡が成立していたとしても、中性子放出の時点では変形エネルギーは励起エネルギーに転換されていることを考えると、Madland-Nixモデルの単一最大核温度の仮定は物理的妥当性を欠くと考え、「非等温モデル」を提唱した。軽・重分裂片の核温度の相違を考慮に入れると、 ^{235}U や ^{252}Cf のスペクトルの計算値と実験値との一致が改善されることを示した。Madland自身は、単一最大核温度の仮定はひとつの単純化であると述べた。非等温性を考慮に入れるとして、2つの分裂片の残留核の核温度をいかにして決めるかという問題は今後に残されている。

3. 今回の会議の特徴と今後の課題

今回の会議では、次の点が共通の認識として確認されたことが特徴といえよう。

①従来の核データファイルでは核分裂スペクトルの形状の検討が不十分であったのみならず、異なる核種、異なる入射エネルギーに対して、同一のスペクトルを与えていているケースがみられるなど、種々の問題点が残っている。(例えば、ENDF/B-Vの場合、40核種の核分裂スペクトルの内訳は次のようにになっている。

- Maxwell型スペクトル (单一核温度) 16核種
- Maxwell型スペクトル (核温度のアレイ) 19核種
- エネルギー依存Watt型スペクトル 5核種

すなわち、40核種のうち35核種までがMaxwell型であり、しかも、16の单一核温度 Maxwell型スペクトルのうち15までが同一の核温度 ($T_M = 1.33 \text{ MeV}$) をもっている。このような状況はENDF/B-V Iになんしても大きく変わっていない。)

②燃料の高燃焼度化や加速器による消滅処理の研究計画が具体化してきていることに対応して、従来マイナー・アクチニド核種としてあまり注目されなかった核種のデータが重要度を増してきた。

- ③核分裂スペクトルの理論研究とモデルの改良、および精密な実験的研究が進んだことにより上の問題点を解決することが可能になりつつある。ただし、理論モデルの精密化と、核分裂におけるエネルギー分配などの基本的問題についてさらに検討が必要である。
- ④核分裂のマルチパラメータ測定等の精密測定が行われるようになり、またそれを解析する理論的道具の改良も進んできたので、scission neutronやprefission neutron、加速途中の核分裂片からの中性子放出などの、核分裂過程における中性子の特異な放出様式についても検討が進んでいる。

核分裂中性子スペクトルの研究は1980年代に大きく進歩したにもかかわらず、核データファイルの現状は、一部を除いて1950～60年代の水準にとどまっているといえる。さしあたりこれを改善しなければならないが、さらに水準を向上させるには、つぎのような方策が必要と思われる。

- (a) 重要核種 (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu 等) の典型的なエネルギー点(熱中性子、 2MeV , 7MeV , 14MeV 等)におけるスペクトルの精密測定を行なう。
[現状では測定データ相互の間にかなり大きな食い違いがあり、特にスペクトルの 300keV 以下および 5MeV 以上の領域での良質なデータが望まれる。]
- (b) 理論計算モデルそのものの改良・精密化とともに、計算の入力データとなる物理量(中性子過剰核の準位密度、核分裂のQ値、核分裂片の質量・荷電・運動エネルギー分布、初期分裂片の励起エネルギー、逆過程断面積等)の精度の良い計算法の開発もしくは標準化が必要である。
- (c) (a)の測定値をベンチマーク・データとして、計算モデルと諸物理量計算法の検証を行なう。いくつかのベンチマーク・ポイントで確証された計算手法は、内外挿によりマイナー・アクチニド核種の核分裂スペクトル計算に適用できよう。

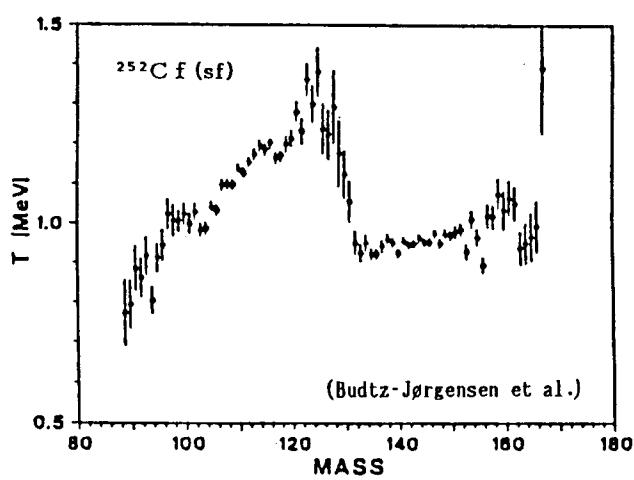
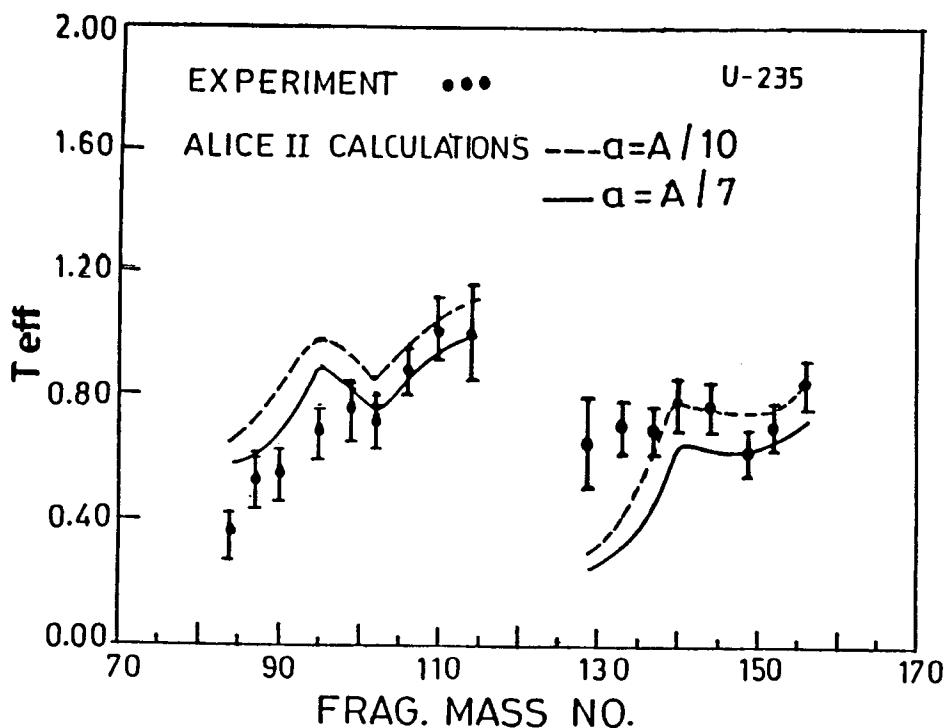
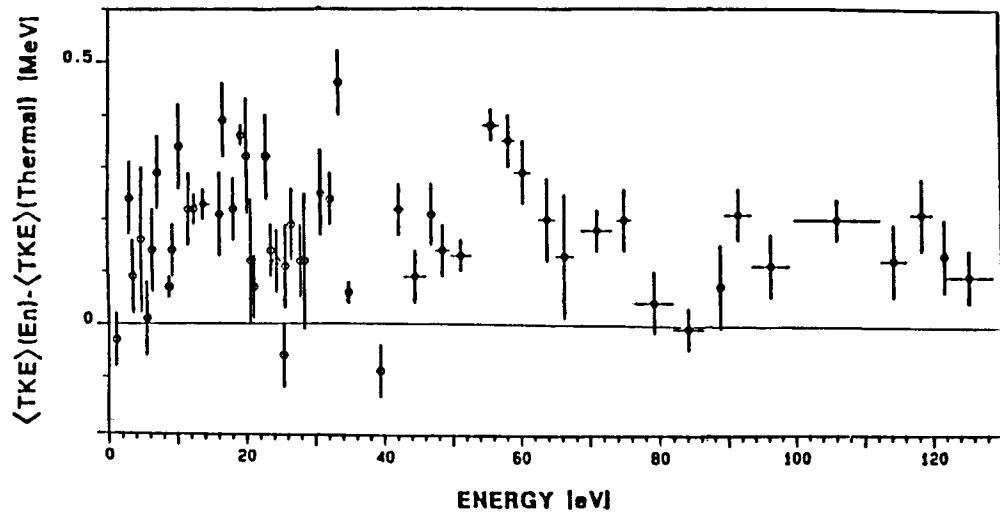


図1 (上) $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ における核分裂片質量数の関数としての核温度分布。
 (下) Geel グループによる $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ の核温度分布。



from F.-J. Hambisch et al.

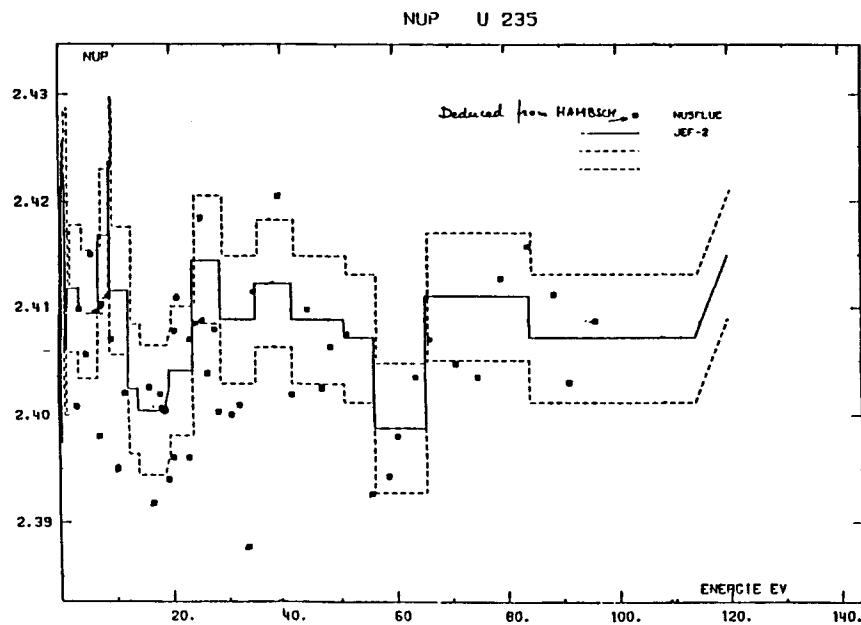


図2 (上) ^{235}U の共鳴核分裂と熱中性子核分裂における全運動エネルギーの差
(Hambischによる)。
(下)Gwinのデータに基づく ν 値の評価値。

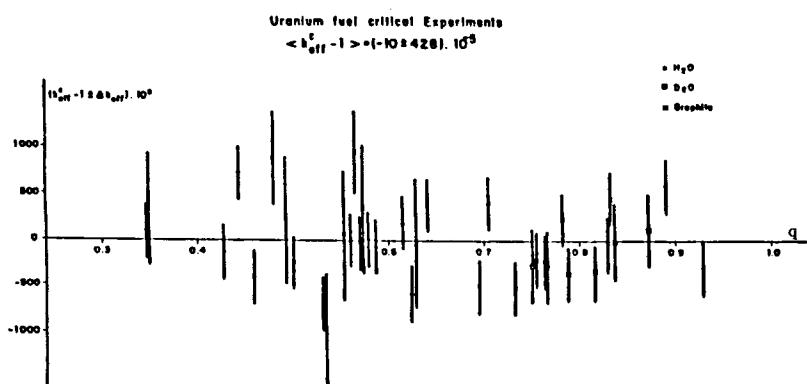
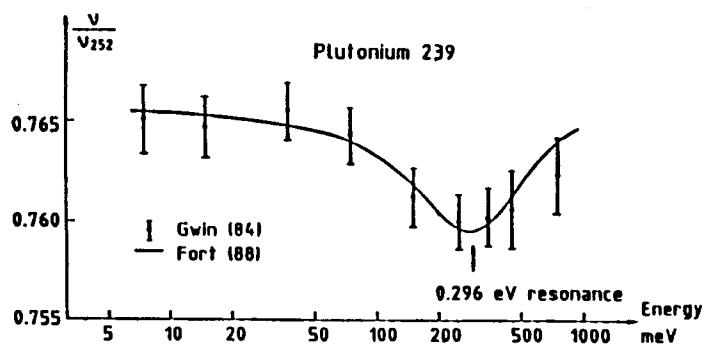


図3 (上) ^{239}Pu の0.296 eV共鳴における ν のdip。(下)種々の臨界系の実効増倍率 k_{eff} の計算値と測定値の差。横軸 q は2.7 eVにおける減速密度。

表2 ^{235}U と ^{239}Pu の ν 値。

	U 235	Pu 239
ENDF/B5	2.4367	2.8914
JEF2.0	2.432	2.8772
Divadeenam (84)	2.425 ± 0.003	2.877 ± 0.006
Malinovsky (85)	2.424 ± 0.006	-
Axton (86)	2.426 ± 0.005	2.879 ± 0.006
This work	2.434 ± 0.004	2.875 ± 0.007

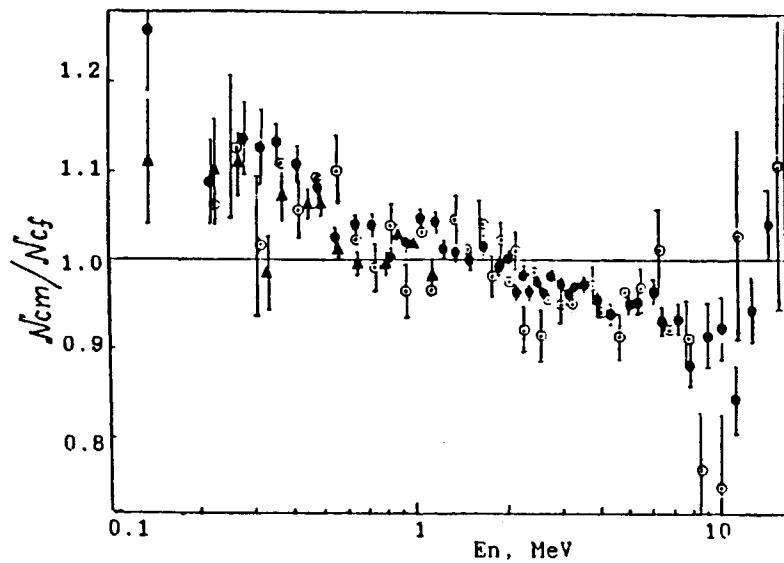


図4 $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ に対する $^{248}\text{Cm}(\text{sf})$ のスペクトルの相対比。

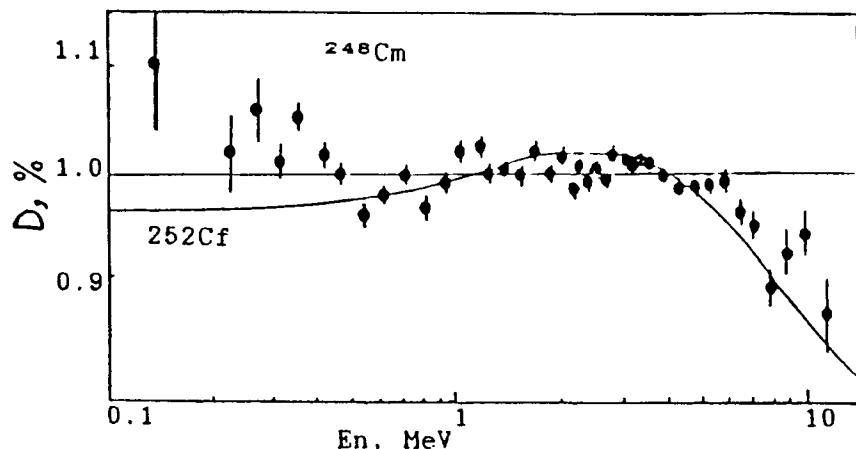


図5 $^{248}\text{Cm}(\text{sf})$ のスペクトル ($T_M = 1.38\text{ MeV}$ の Maxwell 分布に対する比)。

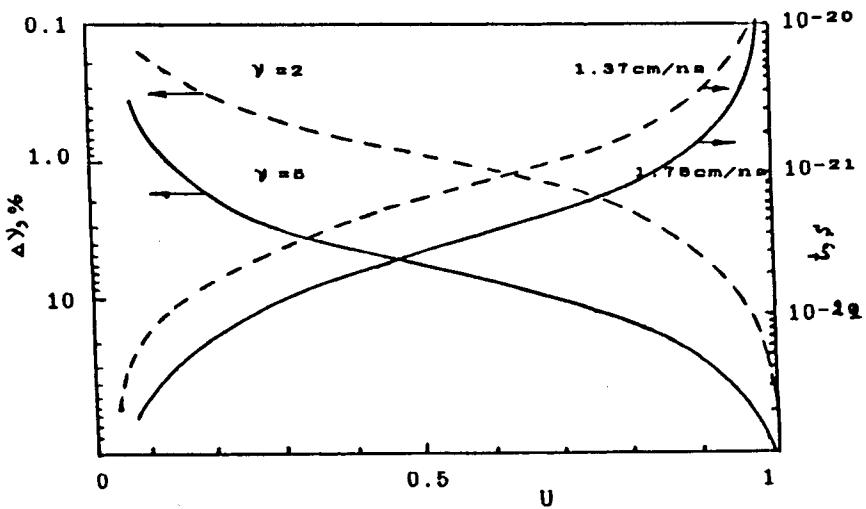


図6 Scission point 以降の時間 t と分裂片速度（最終速度に対する相対比） U との関係、および時刻 t までに放出される中性子の割合。

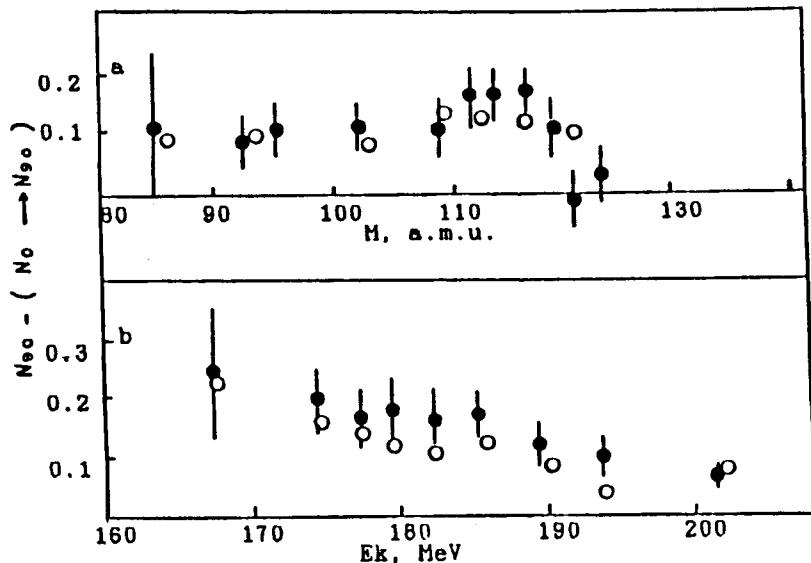


図7 黒丸は、90°での中性子計測数 (N_{90}) と、加速途中の放出なしとの仮定に基づいて 0°でのデータから計算した90°での計数 ($N_0 \rightarrow N_{90}$) の差。白丸は、加速途中の放出ありと仮定した N_{90} の計算値と、なしと仮定したときの ($N_0 \rightarrow N_{90}$) の計算値との差。