

JAERI-M  
4717

核分裂片のエネルギー損失と化学反応系  
中での核分裂片線量率

1972年2月

佐藤章一・森山 昇・池添康正・清水三郎  
小林敏明・山崎弥三郎・団野皓文

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

## 核分裂片のエネルギー損失と、化学反応系中 での核分裂片線量率

日本原子力研究所・高崎研究所・研究部

佐藤章一・森山 昇・池添康正

清水三郎・小林敏明・山崎弥三郎

田野皓文

( 1 9 7 2 年 2 月 3 日 受理 )

低温化学照射装置で行なっている濃縮ウラン-パラジウム合金箔を用いた核分裂片照射実験を中心として、核分裂片のエネルギー損失に関連した現象について、一般的な議論を行なった後、核分裂片のエネルギー損失を各種のモデルで計算を試みた。線源の核燃料内、化学反応气体中、器壁で失われる核分裂片のエネルギーの割合を計算した。これから計算された核分裂片線量率は化学線量計による実験結果とよく一致した。

JAERI - M 4717

Energy Losses of Fission Fragments and Fission Fragment  
Dose Rates in Chemical Reaction Systems.

Shoichi SATO, Noboru MORIYAMA, Yasumasa IKEZOE,  
Saburo SHIMIZU, Toshiaki KOBAYASHI, Yasaburo YAMAZAKI

and Akibumi DANNO

Division of Research, Takasaki Radiation  
Chemistry Research Establishment, JAERI.

(Received 3 February 1972)

The energy losses of fission fragments have been calculated with various models, in connection with the fission fragment irradiation experiments, being carried out in the Low Temperature Fissiochemical Loop with enriched uranium-palladium fuel foil.

A general description is first made of the phenomena associated with the energy loss of fission fragments. The energy losses of fragment energies from the fuel foil are calculated for the source fuel, gaseous chemical reaction systems and the reaction vessel wall, respectively. The fission fragment dose rates derived therefrom are in good agreement with those obtained with chemical dosimeters.

# 目 次 な し

## 1. はじめに

低温化学照射装置 (Low Temperature Fissiochemical Loop, LTFL) は、化学反応器として原子炉を利用するという概念、即ち化学原子炉の概念を実現するため、このような原子炉に適用し得る反応系の探索実験を目的として建設された。本装置は、昭和44年度に特性試験<sup>1)</sup>を行ない、45年度から本格的な照射運転<sup>2)</sup>が行なわれている。LTFL を用いて、核分裂片を含む炉内放射線で照射されたものは、気体化学線量計として、亜酸化窒素<sup>3)</sup>、エチレン<sup>4)</sup>など、および照射試料として、工業的に有用な中間体であるシアノ化水素を生成する窒素とエチレンの混合ガス<sup>5), 5a)</sup> である。

化学原子炉の概念<sup>6)</sup>の特徴は、原子炉内の放射線エネルギーを直接的に化学的なエネルギーに転換しようという点であって、その最も進んだ形式として、核分裂エネルギーのうち85%を占める核分裂片の反跳エネルギーを利用する形式が考えられる。この方法で、オゾン製造<sup>6a)</sup>、窒素固定<sup>6b)</sup>などの反応が、プロセス的考察<sup>7)</sup>も含めて盛んに行なわれている。このような核分裂片放射線化学反応の工業利用開発のための装置として、LTFL は適当した性能を有する。

核分裂による化学反応の実験のためには、化学反応物質と核分裂片線源となる核燃料物質を充分接触させて照射を行なう必要がある。これは、例えば<sup>235</sup>Uから生成する核分裂片の飛程が、金属ウラン中で約7μ、常温常圧空气中で約2cmの程度であることによる。この意味で最も容易に考えられるのは、気体反応系に六つ化ウランのような気体核燃料を混合し、また液体反応系には気体核燃料を物理的に溶解し、またはウラニル塩のような可溶性核燃料を溶解するような方法が考えられる。しかし、この方法では、反応生成物は照射後に核燃料を含む反応系から全体的に分離しなければならず、また、このような核燃料で炉心を形成したとすれば、化学反応系としての反応条件と核分裂反応系としての炉心条件を調和させることは著しく困難であることが明らかである。

これに対し、化学反応气体と固体核燃料の組み合わせでは、この2つの条件を調和させることは可能であり、照射後の反応生成物は、少くとも核燃料からの分離の必要がない。もちろん反応生成物を利用するためには、核分裂生成物の分離は必要であるが、この点も克服は可能であると評価されている。<sup>8)</sup>

この意味で、極めて薄い板状核燃料と気体反応系の組み合わせが、高崎研究所における化学原子炉での反応研究にあたりますとりあげられた。本報告では、現在反応研究に用いられている核燃料、核分裂片とそのエネルギー損失に関する一般的な議論、および実際に LTFL で照射が行なわれた条件での核分裂片線量率の評価について述べることとする。

## 2. 核 燃 料

核分裂片による化学反応を研究するにあたり、考えられる固体核燃料としては、酸化ウラン粉末のような粒状のもの、ウランを含有するガラスから製造したガラス繊維、あるいは極めて薄い板状の合金、蒸着膜などがあろう。<sup>6)</sup> いずれにせよ、この目的のためには、固体燃料の少くとも1方向が、核分裂片の燃料中の飛程より短かい程度の寸法であることが必要である。このため、微粉末酸化ウラン、ウラン含有ガラス繊維、ウラン合金吹付けアルミニウム板、ウラン合金箔が実際の使用を考えて考慮された。このうち、ウラン含有ガラス繊維、ウラン合金吹付けアルミニウム板については製造の方針で検討されたが、技術的な困難さと経済的な理由で、実際には製造されなかつた。微粉末酸化ウランについては、粒径2~3μのものの入手が困難であったことと、実験にあたり、照射済燃料の飛散の問題を考えて使用しなかつた。以下に最終的に考えられ、または使用された核燃料の製造法、仕様について一通り述べる。

### 2.1 ウラン含有ガラス繊維

ウラン含有ガラス繊維<sup>9)</sup>としてはシリカ系統のものとリン酸塩系統のものが代表的であるが、製造目標としたガラスは、次の仕様のものであった。

(イ) ガラス組成例:  $UO_2$  45%,  $SiO_2$  42%,  $Na_2O$  9%,  $TiO_2$  4% (重量比)<sup>9)</sup>

(ロ) 寸法: 繊維径3μを目標とする。

このようなガラスを製造する1例として、次のような装置が必要とされた。

(イ) ルツボ: 単ノズル直接加熱電気炉(白金製、30ml)

(ロ) 変圧器: 電気炉加熱用。30KW。

(ハ) 繊維巻き取りボビンとその調節器: 20cm径30~50cm長のボビンを最大15,000r.p.m.で回転する。その制御のためのコントローラー。

原料として50gの $UO_2$  (天然および90%濃縮)を用い、まず原料を溶解してビードを作る。均一性に問題があるときは30~60meshに粉碎し、再溶解し、ビードとする。上記の電気ルツボに入れ加熱(最高1250°C)し、下に置いたボビンに、ルツボのノズルから引き出して巻き取る。製造上のパラメーターとしては、ルツボ温度、ボビン回転数と、ノズルからボビンまでの距離がある。装置全体の大きさは、高さ2.6m、床面積3×4m程度とみこまれた。

### 2.2 ウラン合金板の吹きつけアルミニウム板

核燃料の厚みが薄ければ、何等かのベース上にのった形式の核燃料も片面に出る核分裂片は損失となるが使用できると考え、次の仕様の基板上ウラン吹きつけ形式の核燃料を考えた。

(イ) ウラン燃料組成: 90%濃縮ウラン20%+パラジウム80%の合金

(ロ) 基板: 純度99.8%以上、JIS A1PS、(または米国規格1080)相当のアルミニウム板、厚さ0.5mm。

(ハ) 吹きつけ: 核燃合金層の寸法が、幅30~100mm、長さ30mm、厚み4μ±1μ

## 2.3 粒子状ウラン

球状ウラン微粒子としては、酸化ウラン粉碎により4～40 μ径の粒子を作る方法<sup>10)</sup>あるいは酸化ウランまたは炭化ウランを粉碎後研磨処理により100～700 μ径の球状に成形、焼成する方法<sup>11)</sup>などが報告されている。しかし、3～4 μ径を目標とするとき、製造はかなり複雑困難とみられ、特に粒度の不均一は僅かでも化学反応実験上の大きな誤差になることを考えると、問題が多いと考えられた。

## 2.4 ウラン合金箔

米国BNLの化学原子炉研究グループは、濃縮ウランのパラジウム合金が極めて良い展延性をもち、構造的な性質もかなり満足できることから、この合金の箔を製造し<sup>12)</sup>、窒素固定反応などに<sup>6), 13)</sup>使用している。高崎研究所では、このパラジウム合金箔の寄贈を受け、LTFLでの実験に使用することができた。この合金箔について述べる。<sup>12)</sup>

(イ) ウランーパラジウム合金の性質：相図によれば、ウランとパラジウムは、ウラン濃度0から約3.5重量%までの範囲で<sup>14)</sup>相均一固溶体をつくる。融点は、パラジウムの融点1555°Cからウラン量が増すと低下して、ウラン約3.0%で極小値約1300°Cとなり、ふたたび高くなる。ウラン量のより大きい側の相図はやや複雑である。この低ウラン領域の合金は、均一相、高融点（ウランの融点1133°Cより高い）、のほか白金族金属の特性として耐食性があり、展延性に富む。耐食性は、たとえば540°C、100時間空气中放置後、やや表面に酸化ウランが生じて青味をおびるが、大部分は合金相のままである。

(ロ) 合金箔の製造：20重量%ウランの合金（融点約1400°C）は薄板状の原料から出発し圧延により極めて薄い箔に加工される。充分薄くなつてからは、真空中で電熱焼きなましを行い、必要に応じて化学的または電解エッチングを行なう、合金を腐蝕性反応気体、たとえば、酸化窒素を含む気体中などで用いる場合は、耐食性は不充分であるので、この目的には、圧延時に合金薄板の上下を白金の薄板でサンドイッチして、ロールにかける。これにより充分合金と密着した白金被覆ができる。最大限度まで薄く箔をつくる努力をしたとき、厚さ1.3 μまで、かなり等厚でピンホールのない箔がつくられる。実験目的には主に、幅2 in 2.8 μ厚さの白金被覆なしのものが初期には主に製造され、後には合金層厚さ2.1 μ、白金被覆（両面）各0.2 μのもの<sup>13a)</sup>が製造された。我々の入手したものは後者である。20%ウラン合金中および白金中での核分裂片の平均飛程はそれぞれ約6および4 μであるから、合金中の核分裂片は、生成数の半分以上が外部に放出されることになる。

(ハ) 合金箔の性質<sup>12)</sup>：ウランーパラジウム合金箔については、前述の空気酸化に対する観察のほか、空気力学的試験、放射線損傷試験なども行なわれている。幅4 in、厚さ2.5 μの箔は、支持わく上で垂直空気流の流速約40 m/secまで耐えた。炉中では $1 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> secで燃焼率0.5%まで冷却なしのカプセル中の箔はほとんど変化が見られない。 $5 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> sec、燃焼率50%の条件では、冷却が行なわなければ損傷は少ないと、無冷却では融解破損する。（同じ中性子束、25%燃焼の場合は原形が保たれた。<sup>13)</sup>）この高中性子束の実験条件ではガラス繊維とし核燃料はどのようにしても完全に融解してしまう。以上の予備的試験のほか、蜂の巣状の箔の集合体（Honeycomb assembly）を製造する試験が行な

われ、化学反応器、炉心を構成するに充分な耐食性、耐熱性、構造特性、核特性を有することが結論された。いいかえると、このウラン合金箔を用いて行なえる適當な化学反応があれば、この箔を用いた化学原子炉は構成可能であることになる。

### 3. 核分裂片のエネルギー損失

この章では核分裂片の生成とそのエネルギー損失をあつかう。

#### 3.1 核分裂片

ウランなどの重い元素の核が熱中性子を吸収して、核分裂を起こすとき、<sup>14)</sup>核はだいたい質量比2:3の2ヶの分裂片となり、100MeV近くのエネルギーをもって、互いに飛びはなれる。このような分裂片は一般に中性子過剰で励起状態にあり、 $10^{-15}$ 秒の間に中性子が蒸発し、 $\gamma$ 線を放射して、基底状態または核異性体の状態となる。核分裂片とは、速度、方向のような核分裂現象に直結した性質をもつものをいい、媒体中で減速、散乱されたあと、このような性質が無視できる状態となったものは核分裂生成物という。

ウランからの核分裂片は<sup>15)</sup>初期エネルギー50~115MeV、質量数70~160amu、初期荷電+16~+24というような幅をもつ。当然各核分裂片のエネルギー損失過程は異なり、全体として見れば、大きな幅をもつことになる。このようなウラン核分裂片の飛程ないしはエネルギー損失曲線については多くの実測と、経験式、半理論式などが与えられている。<sup>16)</sup>

化学原子炉での化学反応の研究にあたっては、核分裂片の生成時の知識だけでなく、核燃料から脱出して化学反応系中でエネルギーを失う核分裂片エネルギー損失の過程の知識が重要である。しかし、電子線、 $\gamma$ 線などの定義しやすい、单一エネルギーの放射線の場合と異なり、核分裂片のエネルギー損失過程は相当複雑になる。このエネルギー損失過程、即ち核燃料または化学反応系のエネルギー吸収過程の研究は、米国AGNのグループにより詳細に取り扱われ、最終的な形ではないが実験的には、これまでで最も一般的な結論が得られている。これを中心に次の2節で、エネルギー損失過程について一般的に述べる。

#### 3.2 核分裂片エネルギー損失(1) 飛程

核分裂片は重荷電の重粒子線であり、 $\alpha$ 線などの重粒子線とエネルギー損失過程は定性的には類似している。しかし、陽子、重陽子、 $\alpha$ 粒子などより、質量、荷電共に一桁以上大きい核分裂片エネルギー損失は定量的にはかなり異なる。

飛程に関しては上述の軽い荷電粒子線の間では、簡単に表現するとき、次の関係がある。

$$R_A = R_B (M_A/M_B) (Z_B/Z_A)^2 (E_A/E_B) \quad (1)$$

空气中(15°C, 1気圧)の陽子、重陽子、 $\alpha$ 粒子の飛程は、初期エネルギー1.2, 4, 8 MeVで(1)式の関係をほぼ満足する。<sup>17)</sup>ここで添字AとBは、A粒子とB粒子、M、Z、Eは粒子の質量、荷電、エネルギーを示す。即ち、飛程RはM、Eの一次に比例し、Zの二次に逆比例する。

しかし、このような関係は $\alpha$ 粒子と核分裂片の間では成り立たず、同じ荷電粒子線といつても統一的な議論は困難である。核分裂片の二酸化ウラン中の飛程は、質量阻止能の加成性を仮定すれば、核分裂片の質量Mに対して、

$$R = (205)(M)^{-2/3} \quad [\text{mg/cm}^2] \quad (2)$$

のように与えられる。これは極めて単純な表現であるが同一質量の核分裂片でも、荷電と初期エネルギーに幅があることも考慮して、初期速度の等しい $\alpha$ 粒子と核分裂片の飛程の比の関係式を用いて次のような一般的な表現ができる。<sup>18)</sup>

$$R = (0.0542)(M_2/Z_2)(E_1^{1/2} M_1^{1/2} / Z_1^{2/3}) \quad [\text{mg/cm}^2] \quad (3)$$

ここで添字 1, 2 は粒子と阻止物質を示す。 $Z_2$  は従って阻止物質の原子番号、 $Z$  は質量  $M$  の核分裂片の最大確率の荷電である。一方、飛程の阻止物質依存性を示す(3)式の前半に定数項を入れ、エネルギー依存性を  $1/2$  次としたときは、実験的に、

$$R = (0.0968 + 0.0497 M_2/Z_2)^{1/2} (E_1^{1/2} M_1^{1/2} / Z_1^{2/3}) \quad [\text{mg/cm}^2] \quad (4)$$

のような式が得られる<sup>18)</sup>。

このように、核分裂片のエネルギー損失、この場合でいえば飛程については、1ヶの核分裂片の挙動を考え全体をその総計として補える行き方と、始めから平均的なエネルギーあるいは飛程を考える立場があり得る。このような平均的な性質の核分裂片の取り扱いを行なうことは工学的な計算、特にエネルギー吸収効率計算では大きな誤差を生じない<sup>19)</sup>とされている。

核分裂片の飛程、特に全てのエネルギー吸収物質に対して適用できる値が、AGN グループにより開発されていることは特記に値する。即ち、全元素につき、<sup>235</sup>U と <sup>252</sup>Cf からの平均、軽、重片に対する飛程の表<sup>20)</sup>が与えられている。化合物については、<sup>21)</sup>  $R_0$ ,  $R_i$  [ $\text{mg/cm}^2$ ] を化合物とその i 成分の元素の飛程、 $f_i$  を i 成分の重量分率として、

$$(1/R_0) = \sum_i (f_i / R_i) \quad (5)$$

の関係が成り立つ。 $R_i$  としては表 1 に示した値をとればよい。表 1 は文献中の表<sup>20)</sup> の抜粋である。

このような扱いは固体一般に対して成立するが、気体に関しては、「pressure-density」効果といわれる現象がある、物質を決めただけでは飛程はきまらない。この効果は<sup>22)</sup> 気体の吸収体中で、核分裂片により電子励起された気体分子の radiative エネルギー損失が高圧ほど不完全になり（減少し）、このため核分裂片トラック中の平衡イオン電荷が低圧の場合より相対的に高くなることから、同じ厚さ ( $\text{mg/cm}^2$ ) の低圧気体より高圧気体中のエネルギー損失が大となる現象である。この効果はまた、ある程度以上の高圧では飽和する。この効果を定量的に表現する方法はまだ見出されない。従って、この表を用いる計算では気体 ( $R_i$ ) として与えてある値は  $O_2$ ,  $N_2$  としてではなく原子としての値  $M_2$ ,  $Z_2$  (後述) を用いている) の飛程は最大 20% くらい過大評価することがあり得る。

表 1 に与えた値は、全体としての核分裂片の飛程を多くの物質について測定した結果を、Lindhard, Scharff および Schiott の理論計算式を用いて、実験結果が最もよく合うよう求めた(12)式で計算した値である。用いられた解析は次の(6)～(11)式のようにおいた核分裂片のエネルギーと飛程のパラメーター、 $\epsilon$  と  $k\rho$  を使ってている。

表1 元素中の<sup>235</sup>U核分裂片の飛程<sup>20)</sup>

元素	飛 程 [mg/cm <sup>2</sup> ]			元素	飛 程 [mg/cm <sup>2</sup> ]		
	輕 片	中重片	重 片		輕 片	中重片	重 片
H	1.22	1.12	1.03	Ca	4.57	4.02	3.52
D	2.64	2.40	2.16	Ti	5.17	4.53	3.92
He	2.79	2.52	2.26	Cr	5.30	4.65	4.05
Li	3.46	3.10	2.77	Fe	5.4	4.7	4.1
Be	3.50	3.14	2.79	Co	5.59	4.89	4.26
B	3.48	3.11	2.76	Ni	5.43	4.75	4.13
C	3.30	2.93	2.62	Cu	5.77	5.04	4.39
N	3.41	3.03	2.70	Zn	5.81	5.08	4.42
O	3.51	3.12	2.77	Ge	6.23	5.43	4.72
F	3.83	3.40	3.01	Br	6.51	5.57	4.92
Ne	3.74	3.32	2.93	Kr	6.72	5.85	5.08
Na	3.99	3.53	3.11	Zr	6.88	5.99	—
Mg	3.93	3.49	3.06	Pd	7.44	6.46	5.58
Al	4.15	3.66	3.22	Ag	7.46	6.47	5.59
Si	4.08	3.61	3.17	Xe	8.46	7.33	6.32
P	4.30	3.79	3.33	Pt	10.52	9.07	7.77
S	4.23	3.75	3.29	Au	10.56	9.11	7.79
Cl	4.52	3.98	3.49	Pb	10.93	9.42	8.05
Ar	4.93	4.33	3.79	Th	11.75	10.11	8.62
K	4.62	4.06	3.56	U	11.95	10.27	8.75

$$\epsilon = 3.253 \times 10^4 \left[ \frac{M_2}{Z_1 Z_2 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2} (M_1 + M_2)} \right] E \quad (6)$$

$$\rho = 1.663 \times 10^5 \left[ \frac{M_1}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}) (M_1 + M_2)^2} R \right] \quad (7)$$

$$k = 0.0793 \xi \left[ \frac{Z_1^{1/2} Z_2^{1/2} (M_1 + M_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4} M_1^{3/2} M_2^{1/2}} \right] \quad (8)$$

$$\epsilon \equiv kE \quad (9)$$

$$k\rho \equiv KR \quad (10)$$

$$\tau \equiv KT \quad (11)$$

ここで、添字 1, 2 は入射粒子と阻止物質を表わし、M は原子量、Z は核荷電、T は吸収物質厚さ [mg/cm<sup>2</sup>] E はイオンエネルギー [MeV]、R はイオン飛程 [mg/cm<sup>2</sup>]、 $\xi = Z^{1/6}$  である。このように定義するとき、求められた最適定数を入れて、次式が飛程の一般式として得られる。

$$k\rho = 1.158 \epsilon^{0.5} (1 - e^{-0.0987 \epsilon}) + 0.01939 \quad (12)$$

たとえば<sup>252</sup>Cf の核分裂片の軽片および重片の平均飛程は U-Pd (20 wt % U) 合金中で、そ

それぞれ 790, 6.29 [ $\text{mg/cm}^2$ ] と求められ、これは吸収体の厚さを変えて測定した値とそれぞれわずか 0.747 %, 0.660 % の標準偏差であった。すなわち、表 1 および(5)式により求めた固体中の核分裂片の飛程は誤差 1 ~ 2 % の精度である。

### 3.3 核分裂片エネルギー損失 (2) 脱出エネルギー

1 ケの核分裂片の物質中のエネルギー損失は図 1<sup>23)</sup> の実線に示すような経過をたどる。

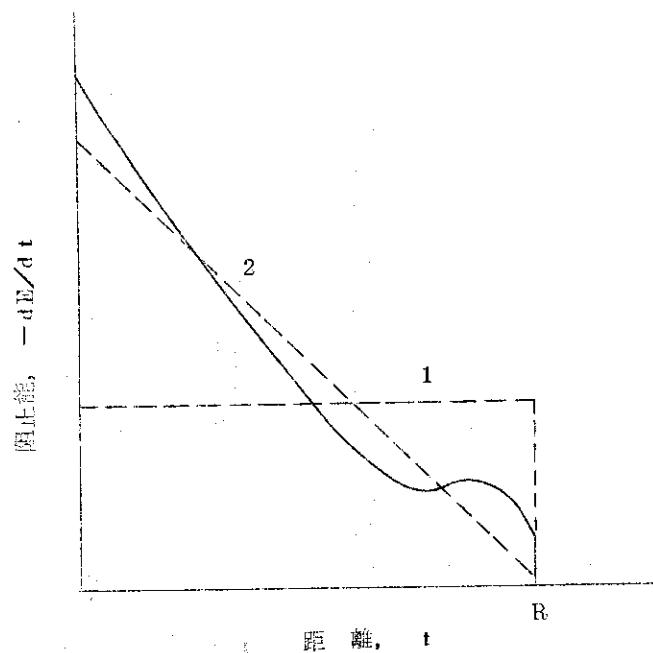


図 1. 核分裂片飛距離と阻止能。

実線：真の阻止能曲線

破線：1. 線型近似 2. 平方近似

これを核分裂片の飛距離に対して一定（線型近似）または直線的減少（平方近似）として扱うことが行なわれている。

核分裂片が、核燃料から脱出するときどのようなエネルギースペクトルを有するかが報告されているので、その値を図 2<sup>24)</sup> に示す。これは二酸化ウラン薄膜の厚さを広く変化させ、脱出核分裂片のエネルギー分布を測定した例で、値自体はあまり意味がないが、定性的に見れば極めて興味深い結果である。この測定は、半導体検出器は薄膜から 10mm の距離におかれて、チエンバー圧力は充分低圧で  $6 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$  の原子炉中性子束中で  $10^6 \text{ events/min}$  以下で約 4 万カウント記録した結果である。値自体は特定の幾何学的条件でのものであるが、定性的に、膜厚が厚くなったときに低エネルギー核分裂片の寄与が大きくなつてゆくことがよくわかる。さらに充分厚い核燃料物質表面から脱出する核分裂片のエネルギー分布は右下端の図の如く半対数グラフで直線に近い形で低エネルギー側に伸びた形になる。

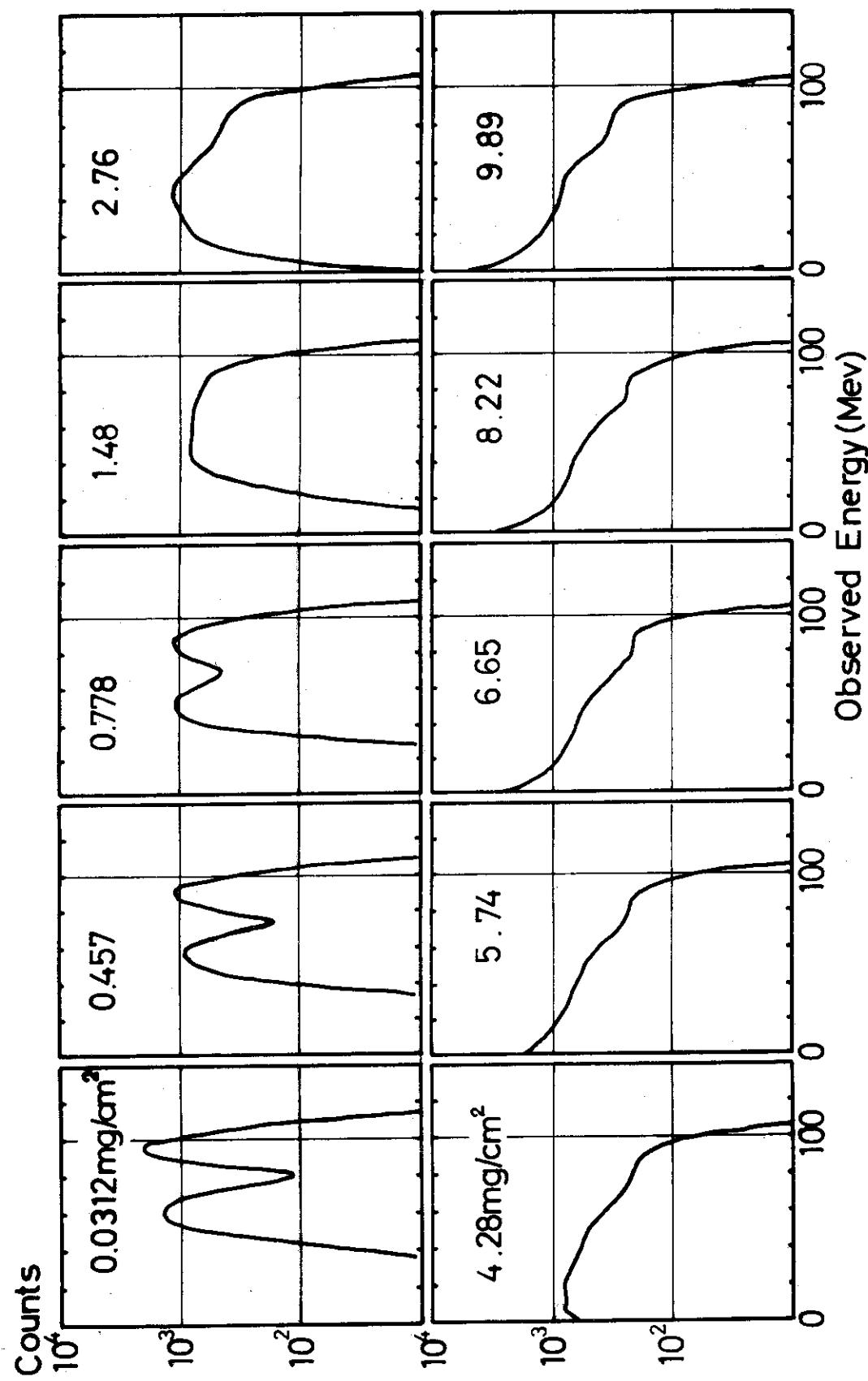


図 2  $\text{UO}_2$  薄膜から脱出する核分裂片のエネルギースペクトル<sup>24)</sup>  
 図中の値は  $\text{UO}_2$  膜厚さ。半導体検出器により 40,000 カウント  
 以上を記録した時の実測値を平滑化したスペクトル。  
 ( 実験条件は本文参照 )

核燃料から脱出する核分裂片全体の有するエネルギーについて、核分裂片の初期エネルギーと全生成核分裂片(数)を基準として、次のようなパラメータを定義する。

V：脱出核分裂片の平均エネルギー(核分裂片生成時のエネルギー  $E_0 = 1$ とした相対値)

S：脱出分率(= (核分裂片脱出数) / (生成数))

D：核分裂片生成時のエネルギーのうち、核燃料外に脱出したエネルギーの割合

以上の定義から明らかのように

$$D = V \cdot S = (E_s / E_0) \cdot S \quad (13)$$

の関係が成り立つ。ただし、 $E_s$ は核燃料脱出時の核分裂片の平均エネルギーである。

核燃料から脱出する1ヶの核分裂片のエネルギー  $E_s$ について古くから次の形の指数法則(Power Rule)と呼ばれる式が用いられている。

$$E_s = E_0 (1 - \beta)^x \quad (14)$$

$$\beta = t / R \quad (15)$$

ここで、 $t$ は核分裂片の飛距離、 $R$ は核分裂片平均飛程 [mg/cm<sup>2</sup>]である。 $T$ を平板核燃料の厚さ、または球状、円筒状核燃料の径 [mg/cm<sup>2</sup>]として、 $t = T$ であるとき  $x = 0$ 、1, 2 の場合のエネルギー脱出分率  $D_x$ は解析的に求められている。 $D_0$ は脱出分率  $S$ と考えてよい。その解は、次の如くである。<sup>25)</sup>

(平板,  $\beta \leq 1$ )

$$S = 1 - \beta / 2 \quad (16)$$

$$D_1 = 1 - 3\beta / 4 + \beta \ln \beta / 2 \quad (17)$$

$$D_2 = 1 - \beta / 2 - \beta^2 / 3 + \beta \ln \beta \quad (18)$$

(平板,  $\beta \geq 1$ )

$$S = 1 / 2 \beta \quad (19)$$

$$D_1 = 1 / 4 \beta \quad (20)$$

$$D_2 = 1 / 6 \beta \quad (21)$$

(球,  $\beta \leq 1$ )

$$S = 1 \quad (22)$$

$$D_1 = 1 - 3\beta / 8 \quad (23)$$

$$D_2 = 1 - 3\beta / 4 + \beta^2 / 5 \quad (24)$$

(球,  $\beta \geq 1$ )

$$S = 3 / 2 \beta - 1 / 2 \beta^3 \quad (25)$$

$$D_1 = 3 / 4 \beta - 3 / 24 \beta^3 \quad (26)$$

$$D_2 = 1 / 2 \beta - 1 / 20 \beta^3 \quad (27)$$

円筒の場合は、かなり複雑なダ円積分を含む解となる。解析的に簡単である  $x = 1$  (線型近似) または  $2$  (平方近似) の場合についての値がこれまで求められているが、実験の値は、 $x = 1.5$  に近く、さらに細かく実験値で  $\beta$  と  $x$  の関係を求めると、 $\beta > 0.8$  では  $x = 1.55$  (一定)、 $0.8 \geq \beta > 0.1$  では、

$$x = 1.72 - 0.214\beta \quad (28)$$

の関係が最もよく結果と一致する。<sup>26)</sup> また上のように求められた各ジオメトリーでの  $D_X$  は、 $D_0 (=S)$ ,  $D_1$  または  $D_2$  が求められているとき、 $x$  が中間値なら加重調和平均をとり、

$$D_X = \frac{(b-a)(D_a D_b)}{bD_b - aD_a + X(D_a - D_b)} \quad (29)$$

として求められる。平板と円筒形核燃料について、(29)式を用いて  $D_{1.5}$  と  $D_X$  を算出した結果を表2に示した。 $S, D_2$  としては、文献値<sup>25)</sup>を、 $x$  として(28)式によって求めた値を使った。任意の組成の平板または円筒状の核燃料に対して、表1と(5)式から飛程を求め、これと平板の厚さまたは円筒の径の比  $\beta$  をとれば、その核燃料から脱出する核分裂片の平均エネルギー( $V$ )、核分裂片の数( $S$ )、および核分裂片生成時の全エネルギーに対する脱出片が外に持ち出したエネルギーの割合( $D_X$ )が判る。図3,4に表2の結果を示した。指数  $x$  の差による  $D$  の相異は円筒形核燃料で、平板状燃料より大きい。しかし全体的に  $D_{1.5}$  と(28)式の  $x$  を用いた  $D_X$  とではほとんど差がない、 $D_{1.5}$  はかなりよい近似であることがわかる。 $D_1$  または  $D_2$  を用いたときは、全体に 10 ~ 20 %の誤差を生じる。

脱出核分裂片の平均エネルギー(相対値) $V$ を、(13)式において脱出分率  $S = D_0$ ,  $D = D_X$  ( $x$  は(28)式より)として求めた結果(表2)を、 $S, D$ と共に図5,6に示した。厚い線源から脱出する核分裂片の平均エネルギー  $V$  は、図2からも考えられるように一定値に近づく。平板の場合も円筒の場合も、 $V$  の極限値は約 0.392 になる。平板の場合  $\beta = 1$  でほとんどこの極限値に達するので表2では  $\beta \geq 1$  の  $V$  の値は省略した。つまり厚い(平板の場合で飛程と同じくらい以上の厚さ、円筒の場合で飛程の4倍以上の径をもつ)線源から脱出する核分裂片の平均エネルギーは、平均初期エネルギー  $E_0 = 84.8 \text{ MeV}$  とすれば、(848)[0.392] = 332 MeV の程度である。

### 3.4 Spallation

核燃料の表面から数百 Å 以内の位置で核分裂片が発生するとき、そのエネルギーは表面付近に存在する未分裂ウランをたき出すに充分であることが判っている。この現象は、U-EjectionあるいはSpallation<sup>26b)</sup>と呼ばれ、そのたき出されたウラン原子数が、核燃料を脱出する核分裂片1個当たり何個であるか(この数を  $N$  とする)という問題は、化学原子炉プロセスを考えるとき、核燃料と核分裂生成物による反応系内の汚染、反応領域外へのウランの plate-out、燃料体の損傷につながる重大な問題である。

定性的にいえば、 $N$  は初期には数百から時に数万の程度の大きさを有するが、熱中性子線量にして例えば  $10^{15}$  (金属)<sup>26c)</sup> ~  $10^{16}$  ( $UO_2$ )<sup>26d)</sup> n/cm<sup>2</sup> 以上で  $N$  は数個程度の値に落着く。この初期の値については、微小結晶粒の蒸発(critical size~100 Å), 热スパイク、あるいは核分裂片の原子との衝突過程などで説明されているが、 $N$  が一定値に達した  $UO_2$  は照射を一時中断しても真空中に保存してあれば、この一定値は保たれ、湿ったヘリウムと接触させてから再照射を行なうと再び大きな  $N$  を示す。<sup>26e)</sup> という報告にも示されているように、表面状態に極めて敏感な現象であることは確かである。

我々の実験に使用されている燃料には  $0.2\mu$  の白金の被覆がある、これは反応気体が腐蝕性である場合、燃料の腐蝕を防ぐ効果を期待することと共に、ウランまたは燃料内に蓄積する核

分裂生成物のたき出しを防ぐことも考へてある。 $200\text{ }\text{\AA}$  の厚さは、 $\text{UO}_2$  燃料の場合の critical size  $100\text{ }\text{\AA}$  などという値の 1 倍上であり、ウランの plate-out を一応防ぐには充分な厚さといえよう。しかし、この点については、ミクロン程度以下の薄い被覆の Spallation 抑制効果というような測定は、これまでの文献リスト<sup>26a)</sup>にも見当らず、今後の一つの重要な研究課題といえるであろう。

表2 半板状、円筒状燃料から脱出核分裂片、脱出分率S、エネルギーV、効率D。

$\beta$	SLAB						CYLINDER						SLAB						CYLINDER					
	S*	D <sub>1,s</sub>	D <sub>1,s</sub>	X*	D <sub>x</sub>	V	S	D <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>s</sub>	D <sub>s</sub>	V	$\beta$	S	D <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	X	D <sub>x</sub>	S	D <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	X	D <sub>x</sub>	V
0.00	1.000	1.000	1.000	1.720	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.00	0.500	0.166	0.199	1.55	0.195	0.848	0.319	0.376	0.371	0.338	
0.01	0.990	0.991	0.990	1.716	0.922	0.999	0.973	0.979	0.977	0.978	0.977	0.977	1.05	0.176	0.158	0.190	0.186	0.825	0.314	0.366	0.354	0.329		
0.02	0.980	0.980	0.980	1.711	0.867	0.805	0.999	0.946	0.955	0.954	0.953	0.953	1.10	0.451	0.151	0.181	0.178	0.801	0.291	0.346	0.346	0.324		
0.03	0.970	0.970	0.970	1.707	0.821	0.817	0.999	0.923	0.911	0.911	0.911	0.911	1.15	0.431	0.142	0.170	0.169	0.776	0.331	0.278	0.325	0.319		
0.04	0.960	0.960	0.960	1.703	0.790	0.813	0.999	0.900	0.923	0.913	0.913	0.913	1.20	0.416	0.138	0.166	0.162	0.752	0.268	0.310	0.313	0.303		
0.05	0.950	0.950	0.950	1.703	0.763	0.699	0.999	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	1.25	0.400	0.133	0.160	0.157	0.729	0.259	0.309	0.309	0.303		
0.10	0.940	0.940	0.940	1.694	0.710	0.755	0.998	0.855	0.887	0.871	0.871	0.871	1.30	0.384	0.128	0.154	0.151	0.707	0.249	0.297	0.297	0.291		
0.12	0.930	0.930	0.930	1.690	0.710	0.755	0.998	0.855	0.887	0.871	0.871	0.871	1.35	0.370	0.123	0.148	0.145	0.685	0.240	0.287	0.281	0.273		
0.14	0.920	0.920	0.920	1.686	0.680	0.731	0.997	0.810	0.867	0.853	0.853	0.853	1.40	0.357	0.119	0.143	0.140	0.655	0.233	0.276	0.273	0.264		
0.16	0.920	0.920	0.920	1.686	0.652	0.729	0.997	0.810	0.865	0.853	0.853	0.853	1.45	0.341	0.116	0.137	0.134	0.645	0.225	0.269	0.264	0.269		
0.18	0.910	0.910	0.910	1.681	0.625	0.687	0.995	0.790	0.833	0.817	0.817	0.817	1.50	0.327	0.111	0.137	0.131	0.635	0.219	0.261	0.261	0.261		
0.20	0.900	0.900	0.900	1.677	0.600	0.667	0.995	0.772	0.818	0.801	0.805	0.805	1.55	0.313	0.111	0.133	0.131	0.627	0.218	0.250	0.255	0.247		
0.22	0.890	0.890	0.890	1.673	0.577	0.648	0.993	0.750	0.799	0.781	0.781	0.781	1.60	0.302	0.107	0.128	0.126	0.608	0.211	0.252	0.255	0.246		
0.24	0.880	0.880	0.880	1.669	0.556	0.632	0.992	0.731	0.782	0.764	0.770	0.770	1.65	0.293	0.101	0.125	0.122	0.592	0.205	0.245	0.245	0.245		
0.26	0.870	0.870	0.870	1.664	0.536	0.616	0.991	0.714	0.766	0.749	0.756	0.756	1.70	0.291	0.098	0.118	0.115	0.576	0.199	0.238	0.238	0.233		
0.28	0.860	0.860	0.860	1.664	0.517	0.596	0.990	0.690	0.690	0.690	0.690	0.690	1.75	0.285	0.095	0.114	0.112	0.561	0.197	0.231	0.226	0.220		
0.30	0.850	0.850	0.850	1.660	0.518	0.576	0.985	0.598	0.681	0.728	0.728	0.728	1.80	0.277	0.092	0.110	0.108	0.547	0.188	0.225	0.221	0.211		
0.32	0.840	0.840	0.840	1.656	0.500	0.557	0.987	0.582	0.664	0.705	0.705	0.705	1.85	0.270	0.090	0.108	0.106	0.533	0.183	0.219	0.215	0.203		
0.34	0.830	0.830	0.830	1.652	0.484	0.541	0.987	0.567	0.646	0.688	0.688	0.688	1.90	0.263	0.087	0.104	0.102	0.520	0.173	0.207	0.203	0.190		
0.36	0.820	0.820	0.820	1.648	0.469	0.526	0.983	0.553	0.630	0.672	0.672	0.672	1.95	0.256	0.085	0.102	0.100	0.495	0.169	0.202	0.200	0.189		
0.38	0.810	0.810	0.810	1.643	0.453	0.519	0.981	0.536	0.598	0.650	0.650	0.650	2.00	0.250	0.083	0.101	0.100	0.475	0.165	0.202	0.200	0.188		
0.40	0.800	0.800	0.800	1.637	0.437	0.514	0.525	0.517	0.595	0.662	0.662	0.662	2.0	0.245	0.083	0.100	0.100	0.455	0.155	0.195	0.194	0.182		
0.42	0.790	0.790	0.790	1.630	0.423	0.506	0.511	0.517	0.595	0.651	0.651	0.651	2.1	0.236	0.079	0.098	0.098	0.432	0.152	0.188	0.188	0.176		
0.44	0.780	0.780	0.780	1.626	0.410	0.496	0.505	0.515	0.577	0.625	0.625	0.625	2.2	0.227	0.075	0.090	0.090	0.412	0.150	0.180	0.180	0.170		
0.46	0.770	0.770	0.770	1.622	0.397	0.486	0.506	0.516	0.562	0.613	0.613	0.613	2.3	0.217	0.072	0.086	0.086	0.397	0.148	0.168	0.168	0.156		
0.48	0.760	0.760	0.760	1.619	0.384	0.476	0.507	0.517	0.551	0.581	0.581	0.581	2.4	0.208	0.069	0.082	0.082	0.381	0.146	0.165	0.165	0.154		
0.50	0.750	0.750	0.750	1.617	0.370	0.467	0.508	0.516	0.542	0.570	0.570	0.570	2.5	0.200	0.066	0.079	0.079	0.377	0.142	0.162	0.162	0.152		
0.52	0.740	0.740	0.740	1.613	0.362	0.459	0.509	0.516	0.532	0.559	0.559	0.559	2.6	0.192	0.064	0.078	0.078	0.373	0.137	0.158	0.158	0.146		
0.54	0.730	0.730	0.730	1.609	0.352	0.450	0.506	0.514	0.526	0.547	0.547	0.547	2.7	0.185	0.061	0.073	0.073	0.363	0.132	0.152	0.152	0.145		
0.56	0.720	0.720	0.720	1.604	0.341	0.440	0.503	0.517	0.517	0.536	0.536	0.536	2.8	0.178	0.059	0.070	0.070	0.351	0.128	0.146	0.146	0.139		
0.58	0.710	0.710	0.710	1.600	0.331	0.431	0.500	0.517	0.517	0.536	0.536	0.536	2.9	0.172	0.057	0.068	0.068	0.347	0.124	0.141	0.141	0.134		
0.60	0.700	0.700	0.700	1.593	0.323	0.421	0.495	0.505	0.505	0.524	0.524	0.524	3.0	0.166	0.055	0.066	0.066	0.342	0.120	0.139	0.139	0.132		
0.62	0.690	0.690	0.690	1.587	0.313	0.411	0.411	0.411	0.471	0.519	0.519	0.519	3.1	0.161	0.053	0.063	0.063	0.338	0.116	0.128	0.128	0.126		
0.64	0.680	0.680	0.680	1.582	0.304	0.402	0.411	0.411	0.471	0.518	0.518	0.518	3.2	0.156	0.052	0.062	0.062	0.334	0.114	0.125	0.125	0.124		
0.66	0.670	0.670	0.670	1.579	0.296	0.393	0.410	0.410	0.478	0.517	0.517	0.517	3.3	0.151	0.050	0.060	0.060	0.329	0.110	0.118	0.118	0.116		
0.68	0.660	0.660	0.660	1.575	0.289	0.381	0.412	0.412	0.476	0.516	0.516	0.516	3.4	0.147	0.049	0.058	0.058	0.326	0.107	0.116	0.116	0.114		
0.70	0.650	0.650	0.650	1.570	0.282	0.376	0.412	0.412	0.477	0.515	0.515	0.515	3.5	0.142	0.047	0.057	0.057	0.322	0.104	0.112	0.112	0.110		
0.72	0.640	0.640	0.640	1.566	0.274	0.371	0.411	0.411	0.477	0.514	0.514	0.514	3.6	0.138	0.046	0.056	0.056	0.317	0.101	0.108	0.108	0.106		
0.74	0.630	0.630	0.630	1.562	0.267	0.361	0.411	0.411	0.478	0.513	0.513	0.513	3.7	0.133	0.045	0.055	0.055	0.312	0.098	0.105	0.105	0.103		
0.76	0.620	0.620	0.620	1.557	0.260	0.351	0.408	0.408	0.476	0.512	0.512	0.512	3.8	0.131	0.043	0.051	0.051	0.309	0.095	0.102	0.102	0.100		
0.78	0.610	0.610	0.610	1.553	0.254	0.349	0.405	0.405	0.475	0.511	0.511	0.511	3.9	0.130	0.042	0.050	0.050	0.306	0.093	0.100	0.100	0.096		
0.80	0.600	0.600	0.600	1.548	0.249	0.341	0.401	0.401	0.475	0.510	0.510	0.510	4.0	0.125	0.041	0.049	0.049	0.303	0.091	0.098	0.098	0.096		
0.82	0.590	0.590	0.590	1.543	0.243	0.337	0.398	0.398	0.475	0.509	0.509	0.509	4.1	0.120	0.040	0.048	0.048	0.300	0.089	0.096	0.096	0.095		
0.84	0.580	0.580	0.580	1.539	0.237	0.332	0.396	0.396	0.475	0														

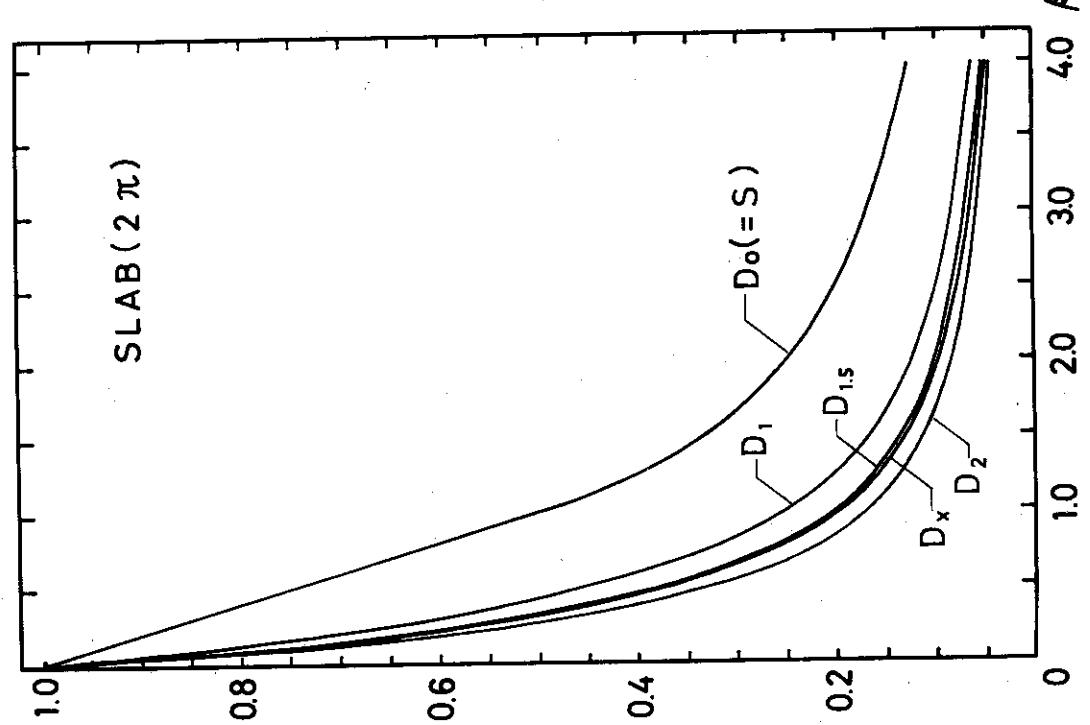


図3 エネルギー析出効率(D)と核燃料厚さ( $\mu$ 、飛程との比)。  
平板燃料。

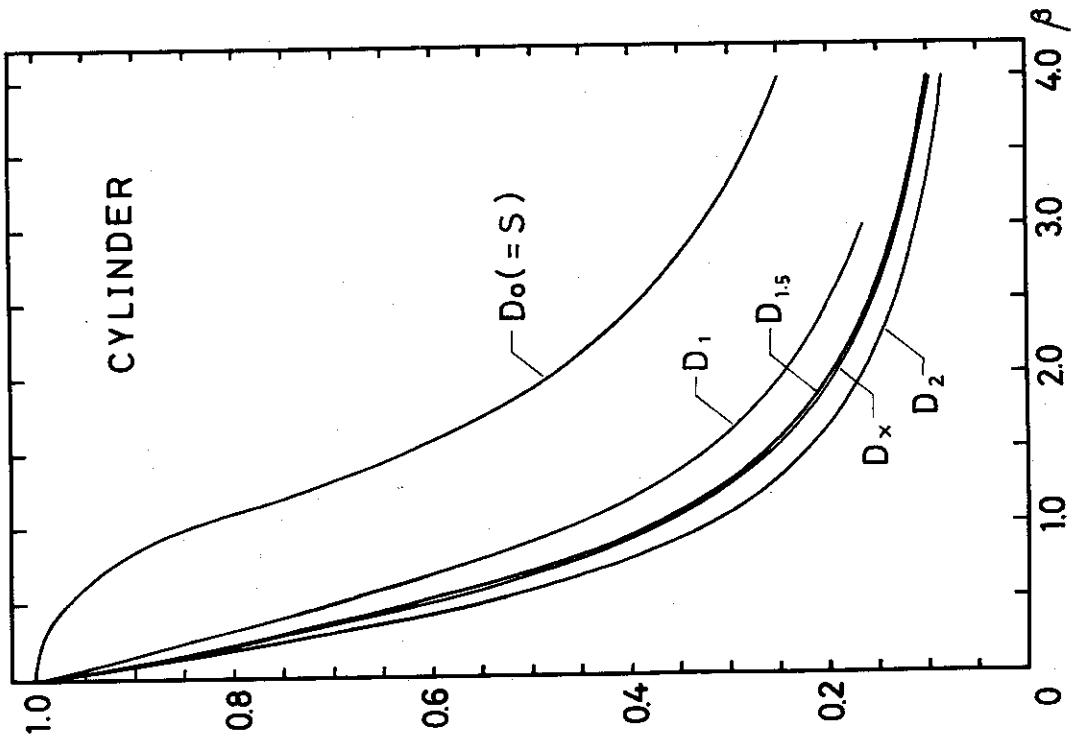


図4 エネルギー析出効率(D)と燃料径( $\mu$ 、飛程との比)。  
円筒形燃料。

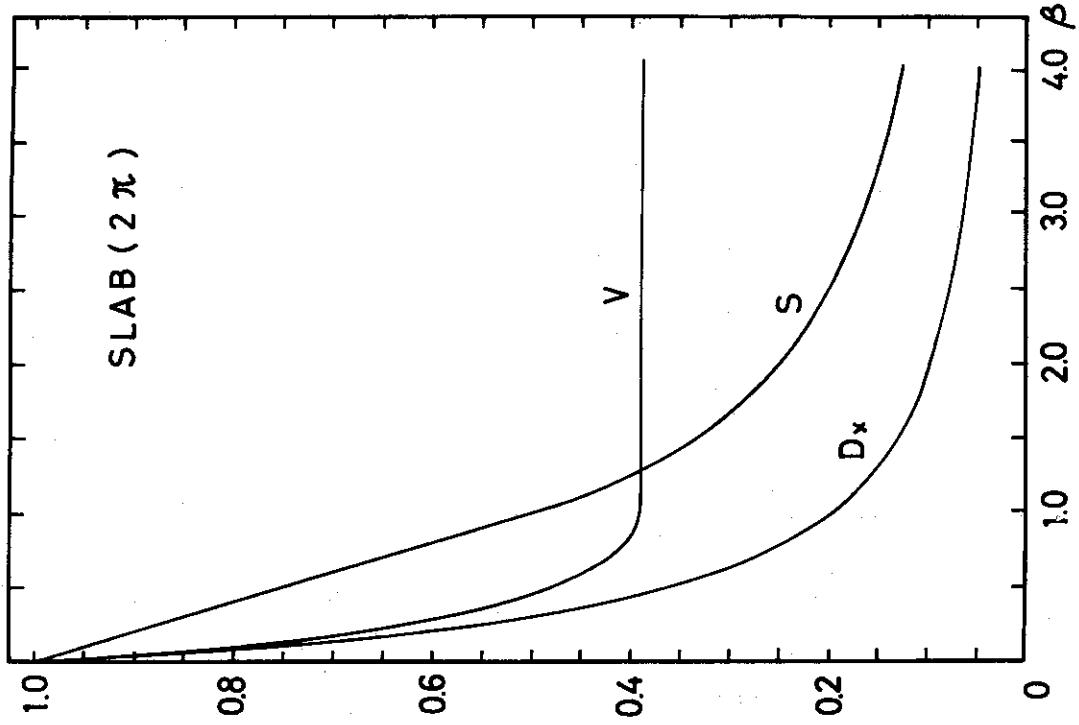


図 5 平均脱出エネルギー ( $V$ , 相対値), 脱出率 ( $S$ , 生成核分裂片 1 個/ $\mu$ ), およびエネルギー一析出効率 ( $D_x$ , 相対値)。平板燃料。

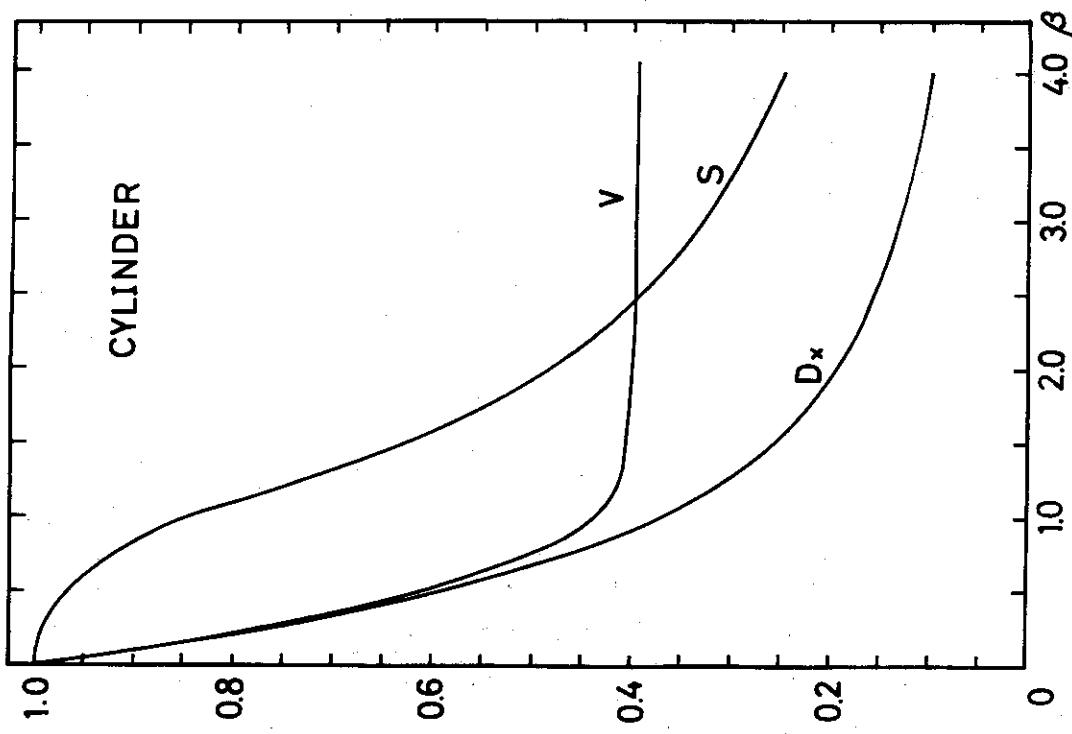


図 6  $V$ ,  $S$ ,  $D$  対  $\mu$  (核燃料の径の生成核分裂片飛程/ $\mu$  対する比)。  
円筒形燃料

#### 4. 照射実験条件での線量の評価

この章では、JRR-3 設置の低温化学照射装置 (LTFL) で 46 年までに核分裂片照射された試料を中心に、前章の取扱いを行なって、核分裂片照射線量の計算を実際に行なってみる。

##### 4.1 核分裂片線源中のエネルギー損失

照射試料は、2.4節に述べたウラン-パラジウム合金箔を核分裂片の線源として照射された。この線源は、両面を  $0.2 \mu$  の白金層で被覆した全厚  $2.5 \mu$  のウラン-パラジウム合金箔である。白金と合金中の核分裂片の飛程をまず求めると、表1から  $R_n [mg/cm^2]$  を物質  $n$  に対する飛程として

$$R_U = 10.27, R_{Pd} = 6.46, R_{Pt} = 9.07$$

となる。(5)式により、20%ウランと80%パラジウムの合金中の飛程  $R_{U-Pd} = 6.98 [mg/cm^2]$ ，合金の密度  $\rho_{U-Pd} = 12.8 [g/cm^3]$  を用いれば、 $R_{U-Pd} = 5.45 \mu$  となる。同様に、白金中での飛程を長さで表現すれば、 $\rho_{Pt} = 21.45 [g/cm^3]$ ，ゆえに  $R_{Pt} = 4.32 \mu$  となる。前章での取扱いに従い、箔の厚さと飛程の比  $\beta$  をとると、 $T = 2.1 \mu$  ゆえに、 $\beta_{U-Pd} = (2.1)/(5.45) = 0.385$  となる。表2より、脱出分率などは： $S = 0.808$ ,  $D = 0.430$ ,  $V = 0.533$  となる。

单一核分裂片のエネルギー損失を(14), (15)式のような指数法則で指数  $x = 1.5$  の形に従うとして、白金層による損失を求めてみる。

図6Aの如く、U-Pd 層から出たところを原点として、等方的に放出される 1 個の核分裂片のエネルギーを、

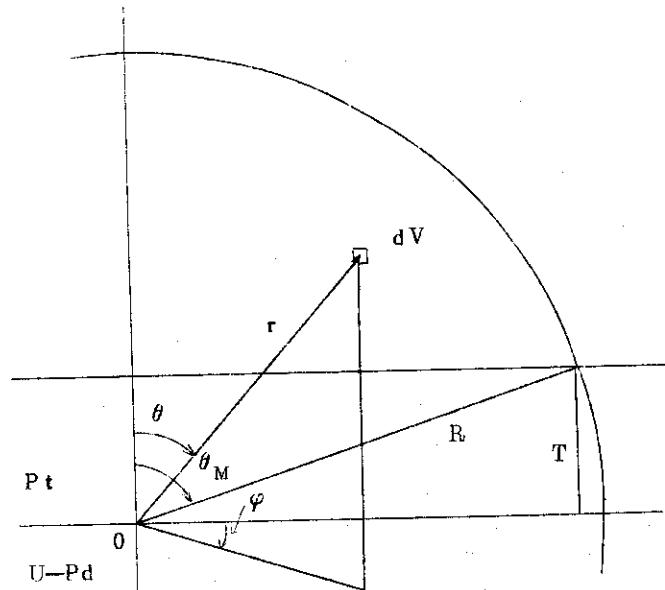


図 6 A ウラン合金層から出て、白金被覆層でエネルギーを失う核分裂片。合金層表面上の点(0点)から放出される核分裂片の(平均、残留)エネルギーに応する飛程を  $R$ 、白金被覆層の厚さを  $T$  とする

$$E \propto E_0 = (1 - r/R)^{1.5}$$

とすれば

$$-\frac{dE}{dr} = \frac{3}{2} \frac{E_0}{R} (1 - \frac{r}{R})^{1.5} \quad (30)$$

原点から距離  $r$ , 角座標  $\theta$ ,  $\varphi$  の点にある微小体積  $dV$  中のエネルギー吸収を考える。核燃料の箇の片側で、白金層の外側に出るエネルギー  $\frac{1}{2} E_{v0}$  を、図 6A のような、白金内の飛程  $R$  に等しい半径の半球中の全エネルギー  $\frac{1}{2} E_{vt}$  に対して求める。 $V'$  を半球の外側部分の体積として

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} E_{v0} &= \int_{V'} \left( -\frac{dE}{dr} \right) \left( \frac{k}{4\pi r^2} \right) dV \\ &= \frac{3KE_0}{8\pi R} \iiint_{V'} v' (1 - \frac{r}{R})^{0.5} \sin \theta dr d\theta d\varphi \\ &= \frac{3KE_0}{4R} \int_0^{\theta_M} \int_{T/\cos \theta}^R (1 - \frac{r}{R})^{0.5} dr \sin \theta d\theta \\ &= \frac{KE_0}{2} \int_0^{\theta_M} \left( 1 - \frac{T}{R \cos \theta} \right)^{1.5} \sin \theta d\theta \\ \therefore \frac{E_{v0}}{E_{vt}} &= \int_0^{\theta_M} \left( 1 - \frac{T}{R \cos \theta} \right)^{1.5} \sin \theta d\theta \quad (31) \end{aligned}$$

$$\therefore E_{vt} = KE_0 \quad (\text{後述})$$

ここで、図から見られるように

$$\beta = T/R (= 0.2/4.23 = 0.0473)$$

$$\theta_M = \cos^{-1} \beta (= 1.5235)$$

であることを用いて、(31) 式を数値積分する。これまでの記号により、全体としてのエネルギー脱出の効率を  $D_{pt}$  とすれば、(31) 式の結果は

$$D_{pt} = E_{v0} / E_{vt} = 0.756$$

となる。

また、白金層を脱出する核分裂片の数の効率  $S_{pt}$  は、白金層に入った数を基準とするとき、図 6A における半球の全面積  $\frac{1}{2} S_T$  に対する白金層外にある表面積  $\frac{1}{2} S_0$  の比で考えればよいかどうか。

$$S_{pt} = \left( \frac{1}{2} S_0 \right) / \left( \frac{1}{2} S_T \right)$$

$$= \frac{S_0}{2} / 2\pi R^2$$

$$S_0 = \int_0^{\theta_M} 2\pi R^2 \sin \theta d\theta$$

$$= 2\pi R^2 \left( 1 - \frac{T}{R} \right)$$

上記の定数を入れて、

$$S_{Pt} = (1 - \beta) = 0.953$$

よって白金層を脱出する核分裂片のエネルギーの、白金層に入ったときのエネルギーに対する比  $V_{Pt}$  は、

$$V_{Pt} = D_{Pt} / S_{Pt} = 0.794$$

となる。核分裂片のエネルギー損失が全体として、(14), (15), (28) 式で表わされるとして、白金層を出る核分裂片のエネルギーに対応する、吸収体中の飛距離の比  $\beta_F$  を求めてみる。燃料体から出る核分裂片の平均エネルギーは、 $0.533 \times 0.794 = 0.423$  であるから、

$$0.423 = (1 - \beta_F)^{1.72 - 0.214 \beta_F}$$

これをといて、

$$\beta_F = 0.409$$

以上をまとめると、U-Pd 層を出たところ、Pd 層内および全体としての値をそれぞれ、 $D_{U-Pd}$ ,  $D_{Pt}$ ,  $D_F$  のように表わすと、この白金被覆ウラン-パラジウム合金箔からの核分裂片の性質は、次のように表わせる。

$S_{U-Pd} = 0.808$	$S_{Pt} = 0.953$	$S_F = 0.770$
$V_{U-Pd} = 0.533$	$V_{Pt} = 0.794$	$V_F = 0.423$
$D_{U-Pd} = 0.430$	$D_{Pt} = 0.756$	$D_F = 0.325$
$\beta_{U-Pd} = 0.385$	$\beta_{Pt} = 0.047$	$\beta_F = 0.409$

(32)

つまり、使用した核燃料中に生じた核分裂片は、その総数の 77 % が燃料外に脱出し、その平均エネルギーは  $(84.8)(0.423) = 36 \text{ MeV}$ 、核分裂直後の核分裂片の全エネルギーの 33 % (全核分裂エネルギーの 84.8 % が核分裂片のエネルギーになるとすれば、全核分裂エネルギーの 28 %) が、核燃料の外側で利用でき得るエネルギーとなる。

これまで実験に使用した核燃料は、幅 3 ~ 5 mm, 長さ 5 ~ 10 cm で、固体中の飛程に比較して充分大きな寸法であり、以上の計算で無限平板として扱ったことは充分成立すると思われる。

#### 4.2 化学反応系中のエネルギー損失

##### 4.2.1 気体中の飛程等

これまで LTFL では、化学線量計として 1 気圧の (亜酸化窒素), (1 % の酸化窒素添加炭酸ガス) および 0.5 ~ 2 気圧の (エチレン), ならびに化学反応系として 0.5 ~ 2 気圧の (5.25 % エチレン添加窒素ガス) が照射されてきた。47 年以降では (アンモニア + エタン)

系、(炭酸ガス)+(エチレン)または(エタン)の系などが照射試料として考えられている。これらの気体について、核分裂片エネルギーの吸収を推定してみるとことになる。

LTFIで使用されているカプセル<sup>27,28)</sup>は、円筒部全長1425mm、円筒状の内部1355mm径25mm、内径23mm、内容積54.80mlで、1端には有効径14mmのSUS27製0.05mm厚さの耐圧50気圧の破裂板、他端には流体試料導入口がついている。この破裂板の周辺固定に銀ロウが用いられているほかは、全部SUS27素材で溶接で部品の接合を行なってある。この内部に図7のようなSUS27製のわくから針を中央部に出し、ここに核燃料の箔をセットするようにして照射実験を行なった。従って、幅5mmまたは3mmの箔を使用する場合、箔が中心部にあるとして、箔の最も壁に近い部分で距離は9または10mmとなる。窒素、亜酸化窒素などの問題とする気体中の核分裂片の飛程は後述の如く $R_{N_2} = 2.42$ ,  $R_{N_2O} = 1.56$  [cm, 標準状態]となるが、上述の核燃料を出たときの平均エネルギー4.5MeVに対する飛程は、この値の半分以下の程度であるので、核燃料箔の幅と比較して径方向の長さは一応充分長いと考えてあつかう。即ち、核燃料を出るところまでは平板状、出た後は棒状として近似することとする。

気体中の飛程は Pressure-Density効果がある(3.2節)が、一応無視することとして、取扱う気体について標準状態での飛程や飛距離と飛程の比などを求めると表3のようになる。

表3 反応気体中の核分裂片の飛程等 (0°C)

気 体	核分裂片の 飛程 $R$ [ $\frac{mg}{cm^2}$ ]	標準状態の密 度 $\rho_0$ [ $\frac{mg}{cm^3}$ ]	飛 距 離 $t^{*1}$ [ $\frac{mg}{cm^2}$ ]	飛距離と飛程 の比 $\beta^{*2}$ [-]
N <sub>2</sub> O	3.06	1.97	2.26	0.738
CO <sub>2</sub>	3.07	1.97	2.26	0.737
NO <sub>2</sub>	3.09	2.05	2.36	0.764
CO <sub>2</sub> +1%NO <sub>2</sub>	3.07	1.97	2.26	0.737
N <sub>2</sub>	3.03	1.25	1.44	0.475
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.38	1.25	1.44	0.606
N <sub>2</sub> +5.25%C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.99	1.25	1.44	0.482
NH <sub>3</sub>	2.33	0.760	0.874	0.376
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.21	1.34	1.54	0.698
NH <sub>3</sub> +5%C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.32	0.789	0.908	0.392
NH <sub>3</sub> +5%C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.33	0.785	0.903	0.387
CO <sub>2</sub> +5%C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.89	1.93	2.22	0.769
CO <sub>2</sub> +5%C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.90	1.93	2.22	0.764

\*1  $t = L\rho_0$  L: カプセル内飛距離=カプセル内半径=1.15 cm

\*2  $\beta = t/R$  (4.2.2節の計算で $\beta_0$ とする値)

このうち、エチレンと窒素+5.25%エチレンは圧力を変えた実験も行なったので、表4にてそれぞれの圧を変えたときの同様な値を示した。

表4 反応気体中の核分裂片の飛程等(圧変化)

気體	圧力 P [atm]	R [mg/cm <sup>2</sup> ]	$\rho^{*1}$ [mg/cm <sup>3</sup> ]	t [mg/cm <sup>2</sup> ]	$\beta^{*2}$ [—]
$O_2H_4$	0.5	2.38	0.574	0.660	0.277
	1		1.15	1.32	0.554
	2		2.29	2.64	1.11
	5		5.74	6.60	2.77
	10		11.5	13.2	5.54
	15		17.2	19.8	8.32
$N_2 + 5.25\%$ $O_2H_4$	0.5	2.99	0.573	0.659	0.220
	1		1.15	1.32	0.441
	2		2.29	2.63	0.882
	5		5.73	6.59	2.20
	10		11.5	13.2	4.41
	15		17.2	19.8	6.61

\*1 25°Cでの値

\*2 次節の計算で  $\beta'_G$ 

求められた  $\beta$  と前節で求めた  $\beta_F = 0.409$  の和が 1 を越える場合は、当然核燃料から脱出した核分裂片のエネルギーが全部、反応気体中で吸収されてしまうことになる。また、その和が 1 以下であるならば、脱出した核分裂片の一部が器壁に達してしまう場合 ( re-entry, 再突入 ) を意味することになる。

#### 4.2.2 カプセル中の気体の吸収線量計算法

核燃料を、内半径  $R_c$  [cm] のカプセルの中心にある長さ  $2L$  [cm] の棒状線源と仮定する。このカプセル内の気体中に吸収される核分裂片のエネルギーを求めるには、1ヶの核分裂片のエネルギー損失が、(14),(15),(28)式に従うとしてカプセルの幾何学的条件を満すように計算することが望ましいが、これは極めて数学的に複雑な形になるので、図8のような四種のモデルを考えて計算を行なった。

- (a) 1ヶの核分裂片のエネルギー損失は(14),(15),(28)式に従うが、核分裂片は半径方向にのみ放出される。
- (b) 1ヶの核分裂片のエネルギー損失は線型 ((14)式で  $x = 1$ ) で、核分裂片は等方的に放出される。
- (c) 同じく等方的、(14)式で  $x = 1.5$ 。
- (d) 等方的、平方型 ( $x = 2$ ) エネルギー損失。以上の四つのモデルについて計算を試みる。(b)は、カプセル内の気体の吸収線量について過少評価、(d)は過大評価となること、および(c)が最も実際に近いだろうことが考えられる。しかし、(c)は解析が困難で、数値積分によるほかないとみられ、一方(a)は(b)に近く、これよりやや小さい値を与えるほか、計算は最も簡単で、(b)よりも良いモデルであるといえる。

ここで Steinberg の方法により次のパラメーター<sup>29)</sup> を定義する。 $\epsilon_0$  を核分裂エネルギー (= 200MeV/fission) のうち、反応気体に吸収されたエネルギーの総合的割合とすれば、

$$\epsilon_0 = \epsilon_{KE} + \epsilon_{SG} + \epsilon_{EG} \quad (33)$$

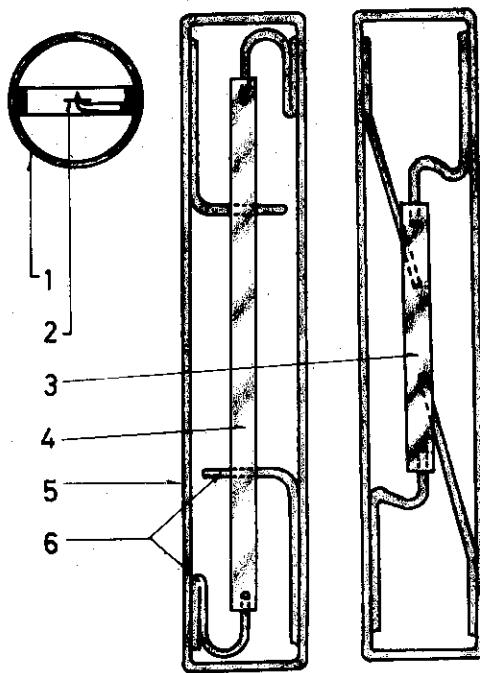


図 7 ウラン合金箔燃料の取り付け

1. 内カプセル(管), 2, 3. 合金箔(5mm×5cm), 4. 同(5mm×10cm),  
5, 6 SUS 27(1mm厚板材製)針付き支持わく

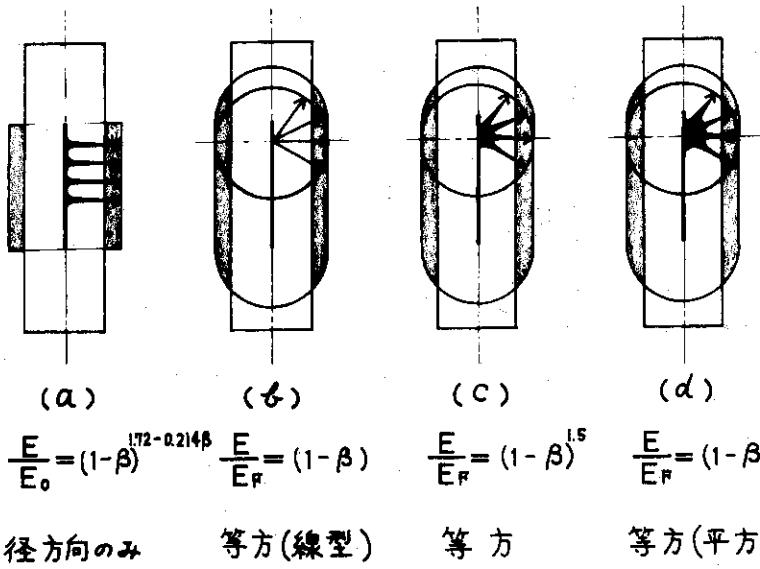


図 8 反応気体(カプセル内)中の核分裂片のエネルギー損失のモデル。 $\beta = R_c/R_s$ ,  $R_c$ 、ガス中(カプセル内)飛距離。 $R_s$ 、燃料体を脱出する核分裂片の平均残留エネルギーに対応する飛程。モデル(a)のみ  $R_s$  として初期エネルギーに対応する飛程をとる。

ここで、 $\epsilon_{KE}$ は全核分裂エネルギーのうち、核分裂片の運動エネルギーとなる比率( $\epsilon_{KE} = 0.848$ )、 $\epsilon_{SG}$ は核分裂片が核燃料を脱出するときにもって出る平均エネルギーの核分裂片初期エネルギーに対する比率で、これまでの表現では $\epsilon_{SG} = D_F$ 、使用した燃料では $D_F = 0.325$ である。 $\epsilon_{EG}$ は脱出した核分裂片のうち容器壁などに再突入しないで気体中に吸収されるエネルギーの比率(non-reentry fraction)で、これから問題にしようとする値である。次に各モデルでの計算を実際に行なってみる。

## (a) モデル

$R_0$ をカプセル内径[cm]、Rを反応気体中の核分裂片の初期エネルギーで考えた平均の飛程[cm]とし、次のような飛程、飛距離の比 $\beta'_0$ 、 $\beta_G$ を定義する。

$$\beta'_0 = R_0 / R \quad (34)$$

$$\beta_G = \beta_F + \beta'_0 \quad (35)$$

このように表わした $\beta_G$ が1より大きいときは、脱出した核分裂片は全部気体中でエネルギーを放出し切ってしまうことを意味する。

モデルの前提により、気体中で1ヶの核分裂片が飛距離rを飛んだ後にもつエネルギーEの初期エネルギー $E_0$ に対する比Vを考えると、カプセルの中心から半径方向にrより遠いような体積中に吸収されるエネルギーの核燃脱出総エネルギーに対する比 $(1 - \epsilon_{EG})$ は

$$(1 - \epsilon_{EG}) = V_F \cdot (1 - \beta_G)^{1.72-0.214\beta_G} \quad (36)$$

となる。この式にて、 $D_F = V_F \cdot S_F = \epsilon_{SG}$ の関係を入れれば、

$$\epsilon_{EG} = 1 - S_F (1 - \beta_G)^{1.72-0.214\beta_G} / D_F \quad (37)$$

$$\epsilon_{EG} \cdot \epsilon_{SG} = D_F - S_F (1 - \beta_G)^{1.72-0.214\beta_G} \quad (38)$$

使用した燃料での値 $S_F$ 、 $D_F$ を入れて、

$$\epsilon_{EG} = 1 - (0.770 / 0.825) (1 - \beta_G)^{1.72-0.214\beta_G} \quad (39)$$

$$\epsilon_{EG} \cdot \epsilon_{SG} = (0.325) - (0.770) (1 - \beta_G)^{1.72-0.214\beta_G} \quad (40)$$

でエネルギー効率が算出される。

## (b) モデル

棒状線源から等方的に核分裂片が放出されるとき、核燃料から脱出するときの核分裂片の平均飛程 $R_S$ 、カプセル内径 $R_0$ とし、図9の如く球座標をとる。このとき、核燃料上の1点0から距離r、角座標 $\theta$ 、 $\phi$ で表わされ( $r \leq R_S$ )る位置にある微小体積dV中に吸収される核分裂片のエネルギーは、Kを常数として、 $(-dE/dr)(K/4\pi r^2)dV$ のようになれる。従って飛程と等しい半径 $R_S$ 、体積Vの球内に吸収されるエネルギー $E_{VT}$ と、カプセル内半径 $R_0$ の円柱で半径 $R_S$ の球を切ったときその外側にある体積V'の球の部分で吸収されるエネルギー $E_{VO}$ とはそれぞれ次のようになる。

$$E_{VT} = \int_V \left( -\frac{dE}{dr} \right) \left( \frac{K}{4\pi r^2} \right) dV = KE_0 \quad (41)$$

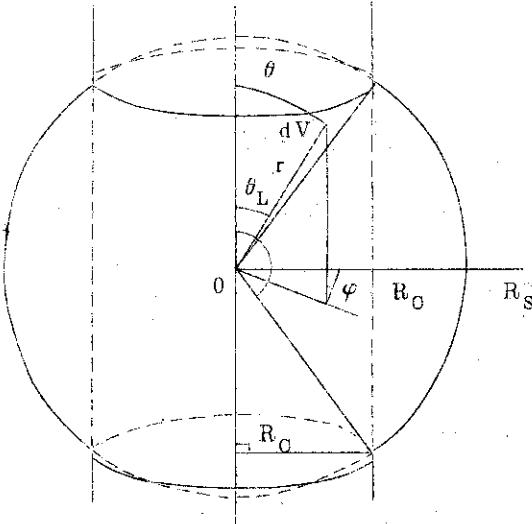


図 9 円筒形カプセルの中心軸上にある棒状核分裂片線源(0点)  
から放出された核分裂片の  $dV(r, \theta, \varphi)$  の中のエネルギー損失

$R_s$ : 核分裂片(平均、残留)エネルギーに対応する気体中飛程

$R_0$ : 内カプセル内径

$$E_{vo} = \int_V \left( \frac{dE}{dr} \right) \left( \frac{K}{4\pi r^2} \right) dV \quad (42)$$

ここで(b)モデルの前提により

$$\frac{E}{E_0} = (1 - \beta), \quad \beta = \frac{r}{R_s} \quad (43)$$

$$\therefore -\frac{dE}{dr} = \frac{E_0}{R_s} \quad (44)$$

ここで  $E$  は、距離  $r$  飛んだ後の初期エネルギー  $E_0$  の核分裂片のエネルギーである。核燃料を出たところのエネルギー  $E_F$  を初期エネルギーとして考える。(42)式は、

$$E_{vo} = \int_V \left( \frac{E_F}{R_s} \right) \left( \frac{K}{4\pi r^2} \right) dV \quad (45)$$

となる。これに(46)式を代入し、図9のような  $\theta_L$  から  $\theta_H$  までの間で積分する。 $r$  は  $R_0 / \sin \theta$  と  $R_s$  の間で積分することになる。

$$dV = r^2 \sin \theta d\theta dr d\varphi \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \therefore E_{vo} &= \frac{E_F K}{4\pi R_s} \int_0^{2\pi} d\varphi \iint \sin \theta dr d\theta \\ &= \frac{E_F K}{2R_s} \int_{\theta_L}^{\theta_H} \left( R_s - \frac{R_0}{\sin \theta} \right) \sin \theta d\theta \end{aligned}$$

$$= \frac{E_F K}{2} \int_{\theta_L}^{\theta_H} \sin \theta d\theta - \frac{E_F K R_C}{2 R_s} \int_{\theta_L}^{\theta_H} d\theta \quad (47)$$

ここで、

$$\beta_C = R_C / R_s [= R_C / R (1 - \beta_F)] \quad (48)$$

とおき、図9から明かな(49)式の関係を用いて(47)式を整理すれば、(50)式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_H &= -\cos \theta_L = -\sqrt{R_s^2 - R_C^2} / R_s \\ \theta_H - \theta_L &= 2 \cos^{-1} \beta_C \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

$$E_{VO} = KE_F (\sqrt{1 - \beta_C^2} - \beta_C \cos^{-1} \beta_C) \quad (50)$$

よって(41)式と(50)式から、 $\epsilon_{EG}$ を求める

$$\begin{aligned} \epsilon_{EG} &= 1 - \frac{E_{VO}}{E_{VT}} \\ &= 1 - \frac{1}{KE_F} \cdot KE_F (\sqrt{1 - \beta_C^2} - \beta_C \cos^{-1} \beta_C) \\ &= 1 - \sqrt{1 - \beta_C^2} + \beta_C \cos^{-1} \beta_C \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{SG} \cdot \epsilon_{EG} &= D_F \cdot \epsilon_{EG} \\ &= D_F (1 - \sqrt{1 - \beta_C^2} + \beta_C \cos^{-1} \beta_C) \end{aligned} \quad (52)$$

### (c) モデル

上の取り扱いで、(42)式において、(43), (44)式に代えて(53), (54)式を用いるモデルである。

$$\frac{E}{E_0} = (1 - \beta)^{1.5}, \quad \beta = r / R_s \quad (53)$$

$$\therefore -\frac{dE}{dr} = \frac{3}{2} \frac{E_0}{R_s} (1 - \beta)^{0.5} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \therefore E_{VO} &= \int_{V'} \frac{3E_F}{2R_s} \left(1 - \frac{r}{R_s}\right)^{0.5} \left(\frac{K}{4\pi r^2}\right) dV \\ &= \frac{3KE_F}{8\pi R_s} \int_{V'} \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{r}{R_s}\right)^{0.5} dV \\ &= \frac{3KE_F}{8\pi R_s} \iiint_{V'} \left(1 - \frac{r}{R_s}\right)^{0.5} \sin \theta d\theta dr d\varphi \end{aligned}$$

$$= \frac{3KE_F}{4R_S} \int_{V'} \int_{V'} \left(1 - \frac{r}{R_S}\right)^{0.5} \sin \theta d\theta dr \quad (55)$$

$r$ については

$$\int_{R_C/\sin\theta}^{R_S} \left(1 - \frac{r}{R_S}\right)^{0.5} dr = \frac{2}{3} R_S \left(1 - \frac{R_C}{R_S \sin \theta}\right)^{3/2} \quad (56)$$

であるから、(55)式はさらに

$$\begin{aligned} E_{VO} &= \frac{3KE_F}{4R_S} \int_{\theta_L}^{\theta_H} \frac{2}{3} R_S \left(1 - \frac{R_C}{R_S \sin \theta}\right)^{3/2} \sin \theta d\theta \\ &= \frac{KE_F}{2} \int_{\theta_L}^{\theta_H} \left(1 - \frac{R_C}{R_S \sin \theta}\right)^{3/2} \sin \theta d\theta \\ &= KE_F \int_{\theta_L}^{\pi/2} \left(1 - \frac{R_C}{\sin \theta}\right)^{3/2} \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (57)$$

(41)式を用いれば

$$\begin{aligned} \varepsilon_{EG} &= 1 - \frac{E_{VO}}{E_{VT}} \\ &= 1 - \int_{\theta_L}^{\pi/2} \left(1 - \frac{R_C}{\sin \theta}\right)^{3/2} \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (58)$$

この式の  $\theta_L$  は (49) 式で得られる。 (58) 式を数値積分する。 $\varepsilon_{EG}$ ,  $\varepsilon_{SG}$  は (52) 式と同様にして求めめる。

#### (d) モデル

同じく (b) の取り扱いで、(42) 式において (43), (44) 式に代えて (59), (60) 式を用いたモデルである。

$$\frac{E}{E_0} = (1 - \beta)^2, \quad \beta = r / R_S \quad (59)$$

$$\therefore -\frac{dE}{dr} = \frac{2E_0}{R_S} \left(1 - \frac{r}{R_S}\right) \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \therefore E_{VO} &= \int_{V'} \frac{2E_F}{R_S} \left(1 - \frac{r}{R_S}\right) \left(-\frac{K}{4\pi r^2}\right) dV \\ &= \frac{KE_F}{2\pi R_S} \int_{V'} \left(1 - \frac{r}{R_S}\right) \sin \theta d\theta dr d\varphi \end{aligned}$$

$$= KE_F \left[ \frac{1}{R_S} \iint_{V'} \sin \theta d\theta dr - \frac{1}{R_S^2} \iint_{V'} r \sin \theta d\theta dr \right] \quad (61)$$

ここで、(49)式により

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_S} \iint_{V'} \sin \theta d\theta dr &= \frac{1}{R_S} \int_{\theta_L}^{\theta_H} (R_S - \frac{R_C}{\sin \theta} \sin \theta d\theta) \\ &= 2 \frac{R_C}{R_S} \left[ \sqrt{\frac{R_S^2 - 1}{R_C^2}} - \cos^{-1} \frac{R_C}{R_S} \right] \\ &= 2 \beta_0 (\sqrt{(1/\beta_0^2) - 1} - \cos^{-1} \beta_0) \end{aligned} \quad (62)$$

また

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_S^2} \iint_{V'} r \sin \theta d\theta dr &= \frac{1}{R_S^2} \int_{\theta_L}^{\theta_H} \sin \theta d\theta \int_{R_C / \sin \theta}^{R_S} r dr \\ &= \frac{1}{2} \int_{\theta_L}^{\theta_H} \sin \theta d\theta - \frac{R_C^2}{2 R_S^2} \int_{\theta_L}^{\theta_H} \frac{d\theta}{\sin \theta} \\ &= \frac{1}{R_C} \sqrt{R_S^2 - R_C^2} - \frac{R_C^2}{4 R_S^2} \log \left( \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{R_C^2}{R_S^2}} \right) / \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R_C^2}{R_S^2}} \right) \right)^2 \\ &= \sqrt{1 - \beta_0^2} - \frac{\beta_0^2}{2} \log \frac{1 + \sqrt{1 - \beta_0^2}}{1 - \sqrt{1 - \beta_0^2}} \end{aligned} \quad (63)$$

よって(61)式は

$$E_{v0} = KE_F \left( \sqrt{1 - \beta_0^2} - 2 \beta_0 \cos^{-1} \beta_0 + \beta_0^2 \log \frac{1 + \sqrt{1 - \beta_0^2}}{\beta_0} \right) \quad (64)$$

$$\begin{aligned} \therefore \epsilon_{EG} &= 1 - \frac{E_{v0}}{E_{vT}} \\ &= 1 - \sqrt{1 - \beta_0^2} + 2 \beta_0 \cos^{-1} \beta_0 + \beta_0^2 \log \frac{1 + \sqrt{1 - \beta_0^2}}{\beta_0} \end{aligned} \quad (65)$$

$\epsilon_{EG}$ ,  $\epsilon_{SG}$ は(52)式と同様にして $\epsilon_{SG} = D_F$ として求める。

以上により計算された値を表5に示す。 $\epsilon_{EG}$ ,  $\epsilon_{EG}$ ,  $\epsilon_{SG}$ はそれぞれ、再突入しないエネルギー効率、核分裂片が気体中に与えるエネルギー効率である。飛距離 $R_C$ と飛程 $R$ の比 $\beta'_0$ を知れば、(33)式により、 $\beta_0$ が求まる。表4と比較して判ることは、N<sub>2</sub>または、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>を反応気体とするとき、このカプセルでは、1気圧程度以上では燃料を脱出した核分裂片は

表 5 核燃料注1) 脱出エネルギー効率  $\epsilon_{SG}$ ・再突入損失しない効率  $\epsilon_{EG}$  の各モデル注2) に対する値

model	$\beta'_c$	(a)				(b)				(c)				(d)			
		$\epsilon_{EG}$	$\epsilon_{SG}$	$\epsilon_{SG}$	$\epsilon_{EG}$	$\epsilon_{EG}$	$\epsilon_{SG}$	$\epsilon_{SG}$	$\epsilon_{EG}$	$\epsilon_{EG}$	$\epsilon_{SG}$	$\epsilon_{SG}$	$\epsilon_{EG}$	$\epsilon_{EG}$	$\epsilon_{SG}$	$\epsilon_{SG}$	
0.01	0.025	0.008	0.026	0.009	0.039	0.013	0.051	0.017	0.31	0.677	0.220	0.684	0.222	0.799	0.260	0.871	0.283
0.02	0.051	0.017	0.053	0.017	0.077	0.025	0.100	0.033	0.32	0.694	0.226	0.701	0.228	0.814	0.264	0.883	0.287
0.03	0.077	0.025	0.079	0.026	0.113	0.037	0.146	0.048	0.33	0.711	0.231	0.718	0.233	0.828	0.269	0.894	0.290
0.04	0.103	0.033	0.104	0.034	0.149	0.048	0.191	0.062	0.34	0.727	0.236	0.734	0.239	0.841	0.273	0.904	0.294
0.05	0.128	0.042	0.130	0.042	0.183	0.060	0.233	0.076	0.35	0.743	0.242	0.750	0.244	0.854	0.278	0.914	0.297
0.06	0.153	0.050	0.155	0.050	0.217	0.070	0.273	0.089	0.36	0.759	0.247	0.766	0.249	0.866	0.282	0.923	0.300
0.07	0.177	0.058	0.179	0.058	0.249	0.081	0.312	0.101	0.37	0.774	0.252	0.781	0.254	0.878	0.285	0.931	0.303
0.08	0.201	0.065	0.204	0.066	0.281	0.091	0.349	0.113	0.38	0.789	0.257	0.796	0.259	0.889	0.289	0.939	0.305
0.09	0.225	0.073	0.228	0.074	0.312	0.101	0.384	0.125	0.39	0.804	0.261	0.811	0.263	0.900	0.292	0.946	0.307
0.10	0.249	0.081	0.252	0.082	0.342	0.111	0.419	0.136	0.40	0.818	0.266	0.825	0.268	0.910	0.296	0.953	0.310
0.11	0.273	0.089	0.275	0.090	0.371	0.120	0.451	0.147	0.41	0.832	0.271	0.839	0.273	0.919	0.299	0.959	0.312
0.12	0.296	0.096	0.299	0.097	0.399	0.130	0.482	0.157	0.42	0.846	0.275	0.852	0.277	0.928	0.302	0.964	0.313
0.13	0.318	0.103	0.322	0.105	0.426	0.139	0.512	0.167	0.43	0.859	0.279	0.865	0.281	0.936	0.304	0.970	0.315
0.14	0.341	0.111	0.344	0.112	0.453	0.147	0.541	0.176	0.44	0.872	0.283	0.878	0.285	0.944	0.307	0.974	0.317
0.15	0.363	0.118	0.367	0.119	0.479	0.156	0.569	0.185	0.45	0.884	0.287	0.890	0.289	0.952	0.309	0.978	0.318
0.16	0.385	0.125	0.389	0.126	0.504	0.164	0.595	0.193	0.46	0.896	0.291	0.901	0.293	0.958	0.311	0.982	0.319
0.17	0.407	0.132	0.411	0.134	0.528	0.172	0.620	0.202	0.47	0.908	0.295	0.913	0.297	0.965	0.313	0.985	0.320
0.18	0.428	0.139	0.432	0.141	0.552	0.179	0.644	0.209	0.48	0.919	0.299	0.923	0.300	0.970	0.315	0.988	0.321
0.19	0.449	0.146	0.454	0.147	0.575	0.187	0.667	0.217	0.49	0.930	0.302	0.934	0.303	0.975	0.317	0.991	0.322
0.20	0.470	0.153	0.474	0.154	0.597	0.194	0.689	0.224	0.50	0.940	0.305	0.943	0.307	0.980	0.319	0.993	0.323
0.21	0.490	0.159	0.495	0.161	0.619	0.201	0.710	0.231	0.51	0.949	0.309	0.953	0.310	0.984	0.320	0.995	0.323
0.22	0.510	0.166	0.515	0.167	0.640	0.208	0.730	0.237	0.52	0.959	0.312	0.961	0.312	0.988	0.321	0.996	0.324
0.23	0.530	0.172	0.535	0.174	0.660	0.215	0.743	0.243	0.53	0.967	0.314	0.975	0.315	0.991	0.322	0.997	0.324
0.24	0.549	0.179	0.555	0.180	0.680	0.221	0.767	0.249	0.54	0.975	0.317	0.977	0.317	0.994	0.323	0.998	0.325
0.25	0.569	0.185	0.574	0.187	0.699	0.227	0.785	0.255	0.55	0.982	0.319	0.983	0.320	0.996	0.324	0.999	0.325
0.26	0.587	0.191	0.593	0.193	0.717	0.233	0.801	0.260	0.56	0.988	0.321	0.989	0.321	0.998	0.324	1.000	0.325
0.27	0.606	0.197	0.612	0.199	0.735	0.239	0.817	0.265	0.57	0.994	0.323	0.994	0.323	0.999	0.325	1.000	0.325
0.28	0.624	0.203	0.631	0.205	0.752	0.244	0.831	0.270	0.58	0.998	0.324	0.998	0.324	1.000	0.325	1.000	0.325
0.29	0.642	0.209	0.649	0.211	0.768	0.250	0.845	0.275	0.59	0.998	0.325	0.998	0.325	1.000	0.325	1.000	0.325
0.30	0.660	0.214	0.666	0.217	0.784	0.255	0.858	0.279	0.60	0.998	0.326	0.999	0.326	1.000	0.326	1.000	0.326

注1) U-Pd 合金箔・Pt 被覆,  $S_p=0.770$ ,  $D_F=0.325$ ,  $\mu_p=0.410$  である燃料。

注2) 図 8 のエネルギー損失モデル。 $\beta'_c$  は、図 8 における  $\beta$  ではなく、初期エネルギー損失モードルの  $\beta$  と同じである。(図 8 の(a)モデルの  $\beta$  と同じ)。

ほとんど完全に気体中に吸収されてしまい、a～dのどのモデルでも計算値は大差がなく ( $\therefore \beta_g > 0.9$ )、1気圧でモデル(a)と(d)での $\epsilon_{EG}$ の差は5%程度である。しかし、0.5気圧付近では、( $\beta'_c = 0.24$ として) $\epsilon_{EG}$ の値は(a), (d)モデルに対し、0.55と0.77で20%以上の差がある。これまでの論議に従い、(c)モデルが最も真実に近いと考えられるがその対応する値は0.68で両者のほぼ中間となる。以下の計算では、(c)モデルの値を用いることとする。

#### 4.2.3 実験条件での核分裂片線量率

以上の計算法を、46年度までに低温化学照射装置で実際に照射実験が行なわれた系と、近い将来に予定されている系について、実際に計算を行なってみるととする。

核分裂片による線量率 $I_{FF}$ は(66)式によって求められる。

$$I_{FF} = N \phi_{th} \sigma_F E \epsilon_0 / KW \quad [Mrad/hr] \quad (66)$$

$$N = 0.503 [\text{mg}^{235}\text{U}/\text{cm}^2 \text{Foil}] \times 6.023 \times 10^{23} [\text{atom/mole}]$$

$$\times A [\text{cm}^2 \text{Foil}] / 235 \times 10^3 [\text{mg}^{235}\text{U}/\text{mole}]$$

$$= 1.290 \times 10^{18} A [\text{atom}^{235}\text{U}/\text{Foil}]$$

$$\sigma_F = 580 \times 10^{-24} [\text{cm}^2]$$

$$E = 200 [\text{MeV/Fission}]$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_{KE} \cdot \epsilon_{SG} \cdot \epsilon_{EG} = 0.848 \times 0.325 \times \epsilon_{EG} [-]$$

$$K = 6.242 \times 10^{10} [\text{MeV/mg} \cdot \text{Mrad}] / 36 \times 10^3 [\text{sec}/hr]$$

$$= 1734 \times 10^7 [\text{MeV} \cdot \text{hr} / \text{Mrad} \cdot \text{mg} \cdot \text{sec}]$$

また、 $\phi_{th}$ は熱中性子束 [ $n/\text{cm}^2 \text{sec}$ ] で、46年度にJRR-3が10MW運転を再開してから以後(LTFL71-4より71-8運転まで)5回の照射実験で、LTFLの照射プラグの最先端位置照射を行なった24ヶのカプセルのコバルトモニター放射化より求めると、(モニターの $1\text{mm}\phi \times 1\text{mmH}$ のコバルトベレットは、内カプセル先端、後端部に各1ヶ、各カプセルにつけられていて、それぞれの値の平均は $(3.08 \pm 0.05) \times 10^{11}$ および $(1.86 \pm 0.03) \times 10^{11}$  [ $n/\text{cm}^2 \text{sec}$ ]であった。その平均をとれば $(2.47 \pm 0.04) \times 10^{11}$ となるから、 $\phi_{th} = 2.5 \times 10^{11} [\text{n}/\text{cm}^2 \text{sec}]$ とおく。Wはカプセル中の気体の重量 [ $\text{mg}$ ] である。以上の値を入れれば(66)式は、

$$I_{FF} [\text{Mrad}/\text{hr}] = 595 \epsilon_{EG} \cdot \frac{A (\text{cm}^2)}{W(\text{mg})} \quad (67)$$

となる。これを用いて、表3, 4の例について計算を行なってみる。

表3, 4の $\beta$ (4.2.2節の $\beta'_c$ )が、 $1 - \beta_F = 0.591$ より大であれば、 $\epsilon_{EG} = 1$ である。従って、表のうち、 $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2 + 1\% \text{NO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2 + 5\% \text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2 + 5\% \text{C}_2\text{H}_4$ は、1気圧0°Cで、また、 $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{N}_2 + 5.25\% \text{C}_2\text{H}_4$ は2気圧、25°C以上で全部

$\epsilon_{EG} \geq 1$  となり、表 5 を用いずに (67) 式で核分裂片線量率  $I_{FF}$  が求められる。よって表 3, 4 の残りの例についてのみ計算を行なえば、表 6 の如くなる。

表 6 核分裂片線量率  $I_{FF}$ 

気 体	温 度 (°C)	压 力 (気 压)	$\beta'_c$	$\epsilon_{EG}^{*1}$	$I_{FF}^{*2}$ [Mrad/hr]
$N_2$	0	1	0.475	0.967	21.0
$N_2 + 5.25\% C_2H_4$	0	1	0.482	0.972	21.1
$NH_3$	0	1	0.376	0.885	31.6
$NH_3 + 5\% O_2H_6$	0	1	0.392	0.902	31.0
$NH_3 + 5\% C_2H_4$	0	1	0.387	0.897	31.0
$C_2H_4$	25	0.5	0.277	0.747	35.3
	25	1	0.554	0.997	23.5
$N_2 + 5.25\% O_2H_6$	25	0.5	0.220	0.640	30.3
	25	1	0.441	0.945	22.3

\*1  $\epsilon_{EG}$  はモデル (C), 表 5 の値(補間)

\*2  $I_{FF}$  は (67) 式において、ウラン合金箔面積  $A = 2.5 [cm^2]$ , カプセル体積  $= 54.8 ml$  として求めた  $W$  を用いて求められた。

表 6 でも明らかのように、低圧、低密度または、飛距離と飛程の比  $\beta'_c$  の小さい場合に核分裂片線量率は大きくなる。また、高圧では、一定量の核燃料から得られる核分裂片エネルギーは一定で、それがカプセル内の燃料に近い部分にある気体に吸収されることになり、(66) または (67) 式のような、与えられた核分裂片エネルギーを全気体量で割りつけるような計算を行なう場合は、圧に反比例して  $I_{FF}$  が減少する。

実際の照射にあたっては、核燃料の有無にかかわらず原子炉からの直接の  $\gamma$  線、速中性子が化学反応を起こす。実例をあげると、低温化学照射装置で照射されたエチレンでは、このバックグラウンド放射線の線量率は (JRR-3 10MW運転時、照射プラグ最先端位置照射) 3.8 Mrad/hr であった。ウラン合金箔  $2.5 cm^2$  を用いたときの全線量率は、エチレン圧 1, 2 気圧 ( $25^\circ C$ ) でそれぞれ  $21.8$ ,  $15.5$  Mrad/hr で、差をとって実測の  $I_{FF}$  の値として  $18.0$ ,  $11.7$  Mrad/hr が得られた。実験条件の  $\phi_{th}$ ,  $W$ などを入れて (66), (67) 式による計算を行なって、それぞれ  $22.7$  と  $11.4$  Mrad/hr という値が求められた。<sup>30)</sup> 上記の値とは実験誤差を考えるとよい一致をみているといえる。

#### 4.2.4 線量率分布

実験に使用されたような長方形の平板形核燃料を用いて気体を照射する場合、興味ある点の一つは核燃料からの距離に対する線量率の変化である。線源(核燃料)に近い場所での核分裂片線量率は極めて大きいであろうし、飛程の末端付近での値はもちろん小さいはずである。その比率がどの程度かを評価した結果を次に述べる。

円筒形のカプセルの中心に、細長い箔燃料を置き、あまり高圧でない気体がこの箔からの核分裂片で照射される場合、即ち現在 LTFI で行なわれている実験条件に近い場合は、棒状等方(無限長さ)線源として扱うことができよう。また、極めて高圧の気体、または液体が照射される場合は、例えば箔の幅よりも照射試料中の核分裂片飛程が短かいような時、平

板等方(無限広さ)線源として扱うことができよう。

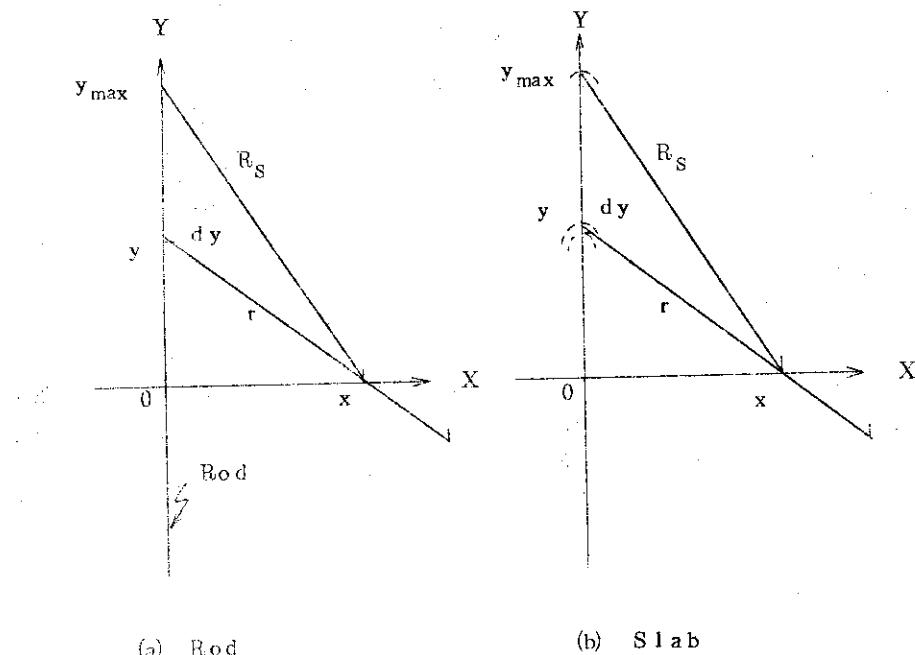


図 10 棒状および平板状核燃料から距離  $x$  の点への核分裂片の照射  
( $R_s$ :核燃料脱出時の核分裂片の平均飛程)

この二つの場合について、図 10 のように、棒状線源(a)の場合は、線源に垂直の方向の X 軸上の点  $x$  (核燃料を脱出する核分裂片の平均飛程  $R_s$  を基準とし、X 軸上の原点から  $x$  までの距離  $X$  を  $X = x/R_s$  でとる) での線量率を  $E_x$ 、 $x = 0.5$  の位置での線量率  $E_{0.5}$  とするとき、 $D_x = E_x / E_{0.5}$  を求めれば、平均飛程  $R_s$  の半分の距離での線量率を基準とした、線量率の分布が得られる。平板線源(b)の場合も同様に、X 軸を平板から垂直にとり、対応する  $E_x$  と  $E_{0.5}$  を求め、 $D_x$  を得ることができる。

棒状線源では、棒状線源上にとった Y 軸上の、原点から距離  $y$  の位置の微小長さの線源  $dy$  から  $x$  点への核分裂片線量率を考え

$$E_x = 2 \int_0^{y_{\max}} \left( -\frac{dE}{dr} \right) \left( \frac{k}{4\pi r^2} \right) dy \quad (68)$$

エネルギー損失過程については、指数法則において 15 乗則が成立つと考えれば、(54)式

$$-\frac{dE}{dr} = \frac{3}{2} \frac{E_0}{R_s} \left( 1 - \frac{r}{R_s} \right)^{0.5} \quad (54)$$

が用いられる。また、

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad \therefore y dy = r dr \quad (69)$$

であるから (68) 式は、 $R_s \equiv 1$  として  $x$  を考えれば、

$$\begin{aligned}
 E_x &= \frac{3 E_0 K}{4 \pi R_s} \int_0^{y_{\max}} \sqrt{1 - \frac{r}{R_s}} \frac{dy}{r^2} \\
 &= \frac{3 E_0 K}{4 \pi} \int_0^{y_{\max}} \frac{\sqrt{1 - \sqrt{x^2 + y^2}}}{x^2 + y^2} dy
 \end{aligned} \tag{70}$$

$x = 0.5$  とするときは、

$$y_{\max} = \sqrt{1 - x^2} = \sqrt{3}/2 \tag{71}$$

$$\therefore D_x = E_x / E_{0.5}$$

$$\begin{aligned}
 &\frac{\int_0^{\sqrt{1-x^2}} \frac{\sqrt{1-\sqrt{x^2+y^2}}}{x^2+y^2} dy}{\int_0^{\sqrt{3}/2} \frac{\sqrt{1-\sqrt{0.25+y^2}}}{0.25+y^2} dy}
 \end{aligned} \tag{72}$$

同様に平板線源では、(68)式に対応して、平板上にとったY軸上で原点からyの距離にある微小幅dyの円環からx点への核分裂片線量率を考え、(54), (69)式を用いて

$$\begin{aligned}
 E_x &= \int_0^{y_{\max}} \left( -\frac{dE}{dr} \right) \left( \frac{K}{4 \pi r^2} \right) 2 \pi y dy \\
 &= \frac{3 E_0 K}{4 R_s} \int_0^{y_{\max}} \sqrt{1 - \frac{r}{R_s}} \frac{y dy}{r^2} \\
 &= \frac{3 E_0 K}{4} \int_0^{y_{\max}} \frac{y \sqrt{1 - \sqrt{x^2 + y^2}}}{x^2 + y^2} dy
 \end{aligned} \tag{73}$$

前と同様(71)式の関係を用いて、 $x = 0.5$  の位置での核分裂片線量率  $E_{0.5}$  を基準として、核燃料平板からの距離xに対する線量率分布は、次の  $D_x$  を求めればよい。

$$D_x = E_x / E_{0.5}$$

$$\frac{\int_0^{\sqrt{1-x^2}} \frac{y \sqrt{1 - \sqrt{x^2 + y^2}}}{x^2 + y^2} dy}{\int_0^{\sqrt{3}/2} \frac{y \sqrt{1 - \sqrt{0.25 + y^2}}}{0.25 + y^2} dy} \tag{74}$$

(72), (74)の両式を計算した結果の一部を表7に示した。 $x = 0.1, 0.9$  の位置の線量率は、 $x = 0.5$  (平均飛程の半分の位置)での線量率を1として、それぞれ約10と0.1(棒状線源)

表7 棒状(Rod)および平板(Slab)核燃料からの距離Xに対する線量率 $D_X$ の変化(注)

X	$D_X$	
	Rod	Slab
0.01	123.260	11.468
0.05	22.826	6.907
0.10	10.470	4.991
0.15	6.420	3.902
0.20	4.429	3.152
0.25	3.254	2.588
0.30	2.484	2.142
0.35	1.944	1.779
0.40	1.545	1.476
0.45	1.240	1.219
0.50	1.	1.
0.55	0.807	0.812
0.60	0.649	0.649
0.65	0.518	0.508
0.70	0.408	0.387
0.75	0.313	0.283
0.80	0.233	0.195
0.85	0.162	0.122
0.90	0.101	0.0643
0.95	0.0474	0.0219
0.99	0.0090	0.0018

(注) Xは核燃料脱出時の核分裂片の平均飛程 $R_s = 1$ としたときの値。  
(前節までの議論での $\beta_0$ にあたる。)

および約5と0.06(平板線源)であり、位置による線量率の差は、著しく大きい。また棒状線源での分布の方が、平板線源の場合より勾配が大きいといえる。

## 5. 総 括

核分裂片による化学反応気体の照射を考えて、核分裂片の運動エネルギーの損失のモデルについて考察を行なった。一般的な論議を行なった後、実際に低温化学照射装置を用いて行なわれている照射実験条件に対して実行可能な核分裂片線量率の計算法を開発した結果を述べた。本報告の内容に従えば、次の条件を満す核分裂片照射実験における核分裂片線量率が容易に求められる。

- (1) 平板、円柱、球形で近似される固体ウラン燃料を使用した実験。
- (2) マクロに円柱状の容器中に棒状線源があると考えられる照射容器で、内寸法が核分裂片の飛程の程度であり、核分裂片が反応物質を通過した後に容器壁に再突入する可能性がある場合。

次のような計算手順で線量率が求められる。

- (1) 核分裂片飛程  $R$  : 核燃料、被覆材、吸収体などの原子量、重量比から、元素については表 1、混合物、化合物については(5)式により飛程が求まる。
- (2) 飛距離、飛程の比  $\beta$  : 核燃料、被覆材の厚さ、径など、または吸収体中の幾何学的飛距離と  $R$  の比をとって  $\beta$  が求められる。
- (3) 燃料脱出エネルギー効率  $\epsilon_{EG}$  : 脱出率  $S$ 、エネルギー効率  $D$  は、表 2、図 3、4 から  $\beta$  をパラメーターとして求められる。また、被覆の効果は 4.1 節の取扱いで評価できる。
- (4) 非再突入 (non-reentry) エネルギー効率  $\epsilon_{EG}'$  : 燃料脱出後の核分裂片が、再び器壁などに突入し、吸収体中で脱出核分裂片エネルギーが完全に利用できない場合、その効率  $\epsilon_{EG}'$  を計算しなければならない。円柱状器壁をもつ容器の中心に棒状の線源のある場合については、吸収体中の飛距離、飛程の比  $\beta_0'$  から、表 5 により  $\epsilon_{EG}'$  が求められる。
- (5) 核分裂片線量率  $I_{FP}$  : 以上の値を用い、(66)式に従って  $I_{FP}$  が求められる。

以上により求められた計算は、気体化学線量計として用いたエチレン線量計の実験結果となりよく一致することが示された。

## 6. おわりに

本研究は、低温化学照射装置による化学原子炉開発を目的とした核分裂片による化学反応研究の一環として行なわれたものであり、この研究の進行にあたり、多くの方々の支援を受けた。本研究を可能ならしめた、高崎研究所の歴代所長（宗像英二理事長、沢柳正一氏、本島健次アインストープ事業所長および現所長大久保一郎氏）、東海研究所の研究炉管理部をはじめとする多くの部課、また側面からの御援助を受けた高崎研究所放射線化学研究委員会化学用原子炉分科会委員の方々に感謝する。極薄いウラン合金箔の製造、これを用いた基礎研究を行ない、またこの箔を贈与していただいた米国BNLのB.Manowitz,M.Steinbergの両氏、また核分裂片エネルギー損失の基礎的研究の道を開拓した米国旧AGNの研究グループに対して尊敬と感謝の念を抱いたい。再突入モデルの計算にあたって、東海研究所計算センターの稻見泰生氏の協力を得たこと、および原稿浄書等に研究部東悦子夫人が努力していただいた事を特記して感謝する。

## 参考文献

- 1) 佐藤・森山・助川・國野・大島・山崎・岡本・浜ノ上・池添・徳永, JAERI-M 4630 「低温化学照射装置 (LTFL) の運転報告, I. 昭和 44 年度運転」 46 年 11 月
- 2) 高崎研究部, JAERI-memo (投稿予定) 「低温化学照射装置 (LTFL) の運転報告, II. 昭和 45 年度運転」。
- 3) 池添・徳永・助川・森山・佐藤・國野・橋本, JAERI-memo 3780 「炉内放射線による化学反応 IV. 亜酸化窒素線量計」 44 年 11 月.
- 4) Y. Ikezoe, S. Sato, A. Danno, J. Nucl. Sci. Technol. 8, 394 (1971).
- 5) 池添・徳永・森山・下沢・田村・國野, JAERI-memo 3506 「炉内放射線による化学反応, II. 硝素-エチレン系」 44 年 4 月; 池添・森山・佐藤・大島・國野, 第 13 回放射線化学討論会講演要旨集 p.119, 1970 年 10 月東京.
- 5a) 佐藤・森山・池添・岡本・浜ノ上・徳永・清水・小林・國野, 日本化学会第 26 春季年会講演, 47 年 4 月 平塚.
- 6) M. Steinberg, Adv. in Nucl. Sci. Technol. vol. 1, Academic Press (1962). p. 247.
- 6a) M. Steinberg, M. Beller, BNL 13812, "Ozone Synthesis for Water Treatment by High Energy Radiation," July, 1969.
- 6b) M. Steinberg, Chem. Eng. Progr. 62(9), 105 (1966).
- 7) M. Steinberg, BNL 9985, "Fission Recoil Synthesis," Feb. 1966; BNL 10020 "Chemonuclear and Radiation Chemical Process Research and Development," Feb., 1966; BNL 11262 "Status Report of Chemonuclear Reactors and Radiation Chemical Processing," 1967; Isotopes & Radiation Technol. 4(2), 142 (1966-67); M. Beller, M. Steinberg, BNL 50006, "Estimation of Chemonuclear Costs," Aug. 1966.
- 8) S. Kahn, F. R. Standerfer, AGN 8137, "Fissiochemical Process Development Program. vol. 1 Applied Research," March, 1965, Chap. IV.
- 9) C. D. Wirkus, D. R. Wilder, J. Nucl. Materials 5, 140 (1962).
- 10) C. C. Bazell, R. V. Davies, AEEW-R391, "An Investigation into Methods for Particle Size Analysis of UO<sub>2</sub> Powder and the Effect of Ball-Milling on Size Distribution," Sept. 1964.
- 11) N. R. Williams, AERE-M1116, "A Preparation of Porous UC<sub>2</sub> Spheroids," Nov., 1962.
- 12) M. Steinberg, G. Farbar, BNL 827, "Chemonuclear Fission Fragment Source and Fuel Development Progress Report," Oct., 1963.
- 13) M. Steinberg, M. Loeffelholz, J. Pruzansky, BNL 6852, "Fission Fragment Energy Deposition Efficiency for Thin Uranium-Containing

Elements and the Fixation of Nitrogen."March 1963.

- 13a) M. Bellcr, W. Tucker, M. Steinberg, BNL 50293, "Experimental Work in the Brookhaven Chemonuclear In-Pile Research Loop," Dec. 1970.  
P. 8 および P. 44, Table 1.
- 14) 石森・岡下・梅沢, JAERI-memo 2377 「核分裂片の化学」41年8月  
(G. Herrman, Radiochim. Acta 3, 169 (1964) および 4, 173 (1965) の訳)
- 15) J. H. Cusack, P. A. King, AGN 8196, "Fissionochemical Development Program" Aug. 1966 vol. 1, Chap. II.
- 16) S. Kahn, R. Harman, V. Forgue, Nucl. Sci. Eng. 23, 8 (1965).
- 17) J. W. T. Spinks, R. J. Woods, "An Introduction to Radiation Chemistry," John Wiley & Sons, (1964); 阿部・後藤田・堀田・大島・杉浦訳「放射線化学入門」, 産業図書 (1967), p. 37
- 18) 文献 15, p. II-13.
- 19) M. Steinberg, nucleonics 21 (8), 151 (1963).
- 20) 文献 15, p. II-71.
- 21) 文献 15, p. II-28.
- 22) 文献 15, p. II-62.
- 23) J. Sears, M. Steinberg, BNL 695, "Fission Fragment Energy Deposition for Formation of Chemical Products in Two Phase Systems," Sept., 1961.
- 24) 文献 15, p. II-17, 18.
- 25) 文献 15, Appendix A.
- 26) 文献 15, p. II-84
- 26a) 菊池, JAERI-memo 4567 「核分裂生成物と結晶格子との相互作用—重イオン照射研究への足がかり」46年9月.
- 26b) 文献 15, p. II-87.
- 26c) M. D. Rogers, J. Adam, J. Nucl. Materials 6, 182 (1962).
- 26d) M. D. Rogers, J. Nucl. Materials 22, 103 (1967).
- 26e) P. J. Peterson, M. M. Thorpe, LA-3352-MS, "Fission Fragment Removal of Uranium from a Fissioning Surface," Sept., 1965; LA-3413, "Fission Fragment Removal of Uranium from a Fissioning Surface, II" Jan., 1966.
- 27) 高崎研究所研究部, JAERI-memo 3010, 「低温化学照射装置の設計計算, I. カプセルの気送力について」43年2月.
- 28) 高崎研究所研究部, JAERI-memo 2833, 「低温化学照射装置の設計計算」42年9月.
- 29) 文献 6, p. 274.
- 30) 佐藤・森山・池添・岡本・浜ノ上・徳永・清水・小林・団野, 日本原子力学会 昭和47年年会講演, 「エチレン線量計による核分裂片線量の測定」47年3月 平塚.