

解 説 (I)

核分裂収率の測定 — 原理と方法を中心として —

京都大学原子炉実験所

中込 良廣

e-mail: nakagome@rri.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

原子核分裂の発見(1939年)以来、既に半世紀以上が過ぎ、その反応で解放される莫大なエネルギーは、利用面において我々の生活に多大な影響を及ぼしてきた。他の自然現象にも見られるように、一般に、現象のメカニズムを解明する研究よりも、その現象から得られるものを利用する研究の方が先行する。核分裂も、ご多分に漏れず、分裂機構は分からなくても、とにかく結果としてのエネルギーが原子力として利用されてきている。核分裂に関する「核データ」は、原子力利用の上で欠くことのできない基礎データであるが、又、核分裂機構解明の重要な情報でもある。核分裂現象は、他からエネルギーをもらうことなく自らが分裂する「自発核分裂」と、中性子入射等による外部からのエネルギー持ち込みによる「粒子(又は γ 線)入射核分裂」に大別される。これらの核分裂から実験的に得られる核データとして、核分裂断面積、核分裂片の質量分布(収率)、運動エネルギー分布、荷電分布、角度分布、即発中性子数及びエネルギースペクトル、即発ガンマ線の数及びエネルギースペクトル、遅発中性子スペクトル、ベータ線スペクトル、それに軽粒子放出を伴う三体核分裂関係のデータ等がある。

これらの核データのうち、核分裂機構解明の点で最も基本的なデータの一つとして、核分裂片の質量収率が挙げられる。質量収率の測定は、歴史的に最も古く、HahnとStrassmann¹⁾による核分裂の発見は、まさに、核分裂片(正確には核分裂生成物)の収率測定に端を発したものであった。当時は、化学的処理により核分裂生成物を分離し、その放射能を測定する方法がとられたが、その後、1960年代前半から、電離箱や半導体検出器による核分裂片の運動エネルギー²⁻⁵⁾や速度(飛行時間法)⁶⁾の測定から質量数を導出する、いわゆる物理的方法が主流となってきている。この方法による核分裂片質量収率の測定は、主として、高エネルギー分解能検出器の開発と電子回路機器の高性能化に伴い、着実にその精度が向上してきている。

ここでは、物理的方法による核分裂片質量収率の測定に的を絞り、かつ、あまり核分裂実験に縁のない方々を対象に話を進めることにする。実験研究者にとって至極当然のことや説明不足等多々あることと思うが、お許し願いたい。

2. Fission Fragment と Fission Product

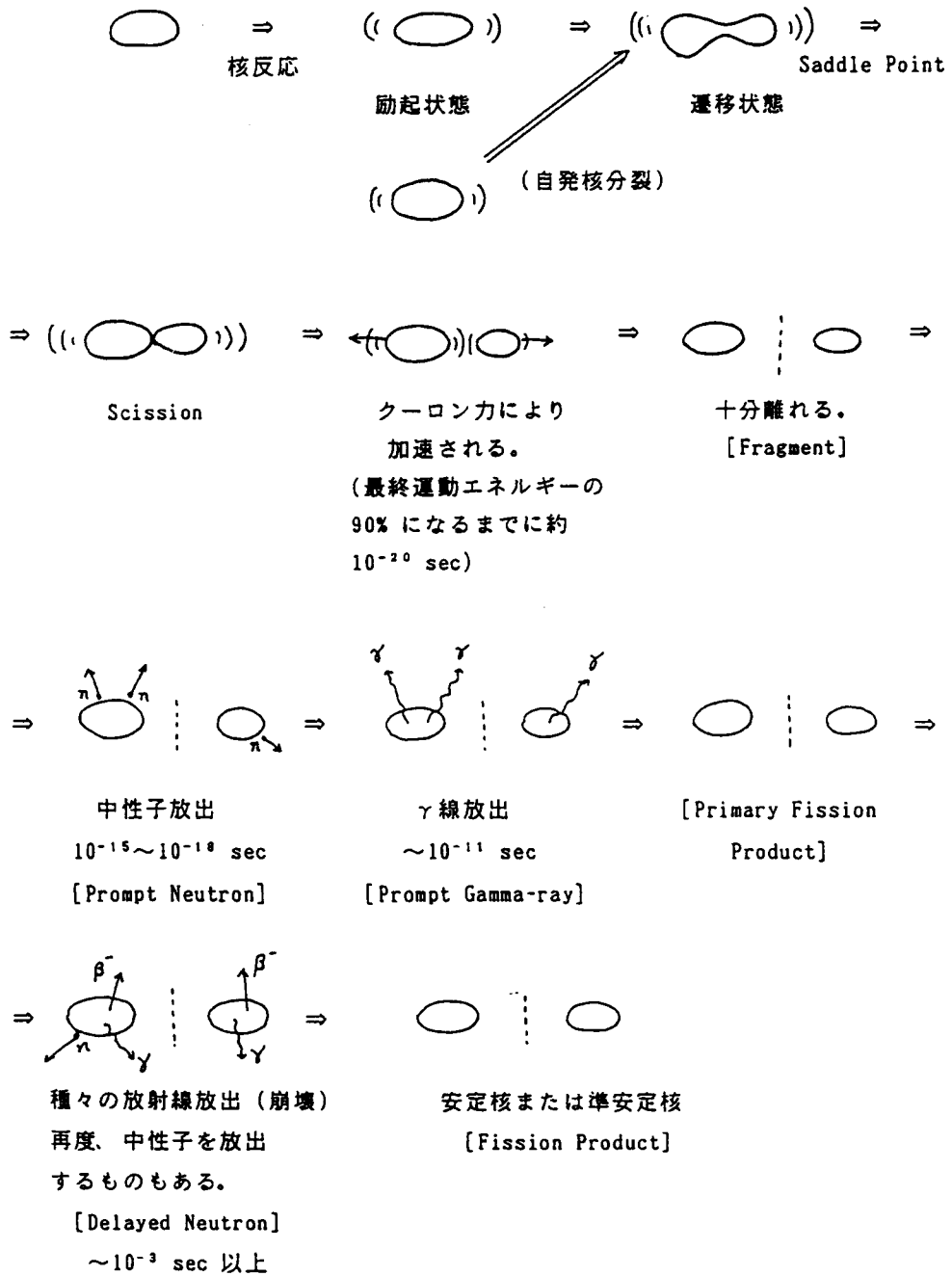
まず、測定の話をする前に、現在考えられている核分裂のプロセスについて整理しておく。理解を助けるために、第1図にそのプロセスをイラストで示した。

核反応で励起状態にある複合核や自発核分裂性核は、回転や振動を伴い変形し、遷移状態に移る。分裂するか元の状態に戻るかの境目である“鞍点 (Saddle Point)”を超えて変形した原子核は、核分裂に移行する。更に変形が進み、原子核が二つ（核分裂は二つに限らず三つ以上になることもあるが、ここでは二つに分裂する場合を扱う）に分離した状態となる。これを“Scission”と呼ぶ。この後、二つの原子核はクーロン力により加速され、互いに十分離れた状態になる。このときの原子核を「核分裂片 (Fission Fragment)」と呼ぶ。Fragmentは一般に高い内部エネルギーを有し、中性子やガンマ線を放出する。これを即発中性子、即発ガンマ線と呼んでいる。当然、これらは加速中のFragmentからも放出されていると考えられる。こうしてできる原子核を「一次核分裂生成物 (Primary Fission Product)」と呼ぶ。核種によっては、さらにベータ崩壊し、中性子やガンマ線を放出する。これらは、遅発中性子、遅発ガンマ線と呼ばれる。このようにして、殆どの内部エネルギーを放出した核分裂片を「核分裂生成物 (Fission Product)」と呼ぶ。

前節で述べたように、核分裂で生じる分裂片の測定方法には、化学的と物理的方法の二つがあるが、通常、実験手法から見て、化学的方法では Fission Product (FP) を、物理的方法では Primary Fission Product を測定することになる。すなわち、核分裂後 $10^{-15} \sim 10^{-18}$ 秒で即発中性子が放出されるため、現在においては如何なる方法を用いても Fragment を直接測定することはできないのである。しかし、第1図から分かるように、Primary Fission Product は、即発中性子数の補正を行えば Fragment の質量を導出することができるため、一般に、物理的方法は Fragment を測定する手段とされている。

3. 核分裂片質量収率の測定方法

物理的方法により核分裂片の質量収率（分布）を求める方法としては、分裂した二つの核分裂片のそれぞれの運動エネルギー又は速度を、同時に測定する方法が主である。両分裂片の運動エネルギーを測定するものを「二重エネルギー測定法 (Double-Energy



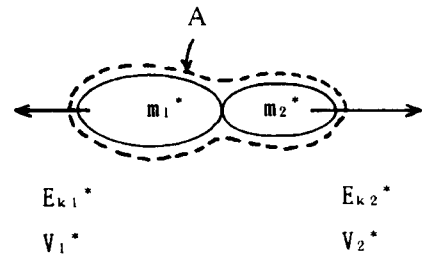
第1図 核分裂のプロセス (Gindler et al. ⁷⁾)

Measurement Method): 2E法」、速度を測定する場合を「二重速度測定法 (Double-Velocity Measurement Method): 2V法」と呼んでいる。その他、速度とエネルギーを組み合わせる「1V-2E法」や「2V-2E法」等がある。

3.1 2E法の原理と測定方法

3.1.1 測定原理

二重エネルギー (2E) 法は、Fragment の質量収率を求めるのに、最も簡便かつ実用的な方法で、その原理は、核分裂系の運動量と質量の二つの保存則に基づいたものである。以下に、この方法でいかに核分裂片の収率を測定できるかを述べることにする。ここでは、原子核が二つに分裂する場合について取り扱い、*印のついた諸量は、即発中性子放出前の Fragment のものを表すものとする。



第2図 核分裂系の諸量、 m 、 A : 質量
 V : 速度、 E : 運動エネルギー

第2図に Scission 時での原子核の様子と、Fragment の質量、運動エネルギー及び速度の関係を示す。Fragment 質量 m_i^* ($i=1,2$) と運動エネルギー $E_{k_i}^*$ の関係は、

$$m_1^* E_{k_1}^* = m_2^* E_{k_2}^* \quad (3.1.1)$$

で表される。また、分裂前の原子核の質量を A とすると、

$$m_1^* + m_2^* = A \quad (3.1.2)$$

である。

(3.1.1) と (3.1.2) 式から分かるように、 A はその反応系から決まる量 (例えば、 $^{235}\text{U}(n,f)$ 反応の場合、複合核として $A=236$) であるから、 $E_{k_1}^*$ と $E_{k_2}^*$ を同時に測定すれば m_1^* と m_2^* を得ることができることになる。これが、「2E法」と呼ばれる所以である。

しかし、前述のように、実際には $E_{k_1}^*$ や $E_{k_2}^*$ を直接測定することは不可能である。すなわち、Fragment は即発中性子を放出することにより、質量及び運動エネルギーが変わってしまう。質量 m_i^* の Fragment から、 ν_i 個の中性子が放出された場合の分裂片の質量を m_i とすると、

$$m_i = m_i^* - \nu_i \quad (3.1.3)$$

となる。中性子は、クーロン力で加速中の Fragment から重心系で等方的に放出されると考えられており、中性子放出後の分裂片の平均運動エネルギー E_{ki} は、以下のように表される。この E_{ki} が、我々が実験的に測定できる量である。

$$E_{ki} = (m_i / m_i^*) E_{ki}^* + E_{Ri} \quad (3.1.4)$$

ここで、 E_{Ri} は中性子の放出により m_i の分裂片が受ける反跳エネルギーである。核分裂を起こす核種は、一般に質量数が大きく、核分裂片の質量も殆ど 80 amu 以上であることから、1~2個の中性子が放出されたとしても、 E_{Ri} は 0.1 MeV のオーダー又はそれ以下となる。このため、以降 E_{Ri} を無視することにする。

(3.1.1) から (3.1.4) 式までを使って、 m_1^* について整理すると、

$$m_1^* = \frac{AE_{k2}}{E_{k2} + E_{k1}(1 + \xi_1)} \quad (3.1.5)$$

$$\xi_1 = \frac{1 + \nu_1 / m_1}{1 + \nu_2 / m_2} - 1 \approx \frac{\nu_1}{m_1} - \frac{\nu_2}{m_2} \quad (3.1.6)$$

となる。 m_2^* についても、同様にして得られる。

以上のことから、 E_{k1} と E_{k2} を同時に測定し、 ξ_1 の補正を行えば Fragment の質量を得ることができることになる。しかし、 ξ_1 という量は核分裂片質量が分からないと求めることができないため、(3.1.5) 式からだけでは m_1^* を導き出せないことになる。

これを解決するための方策として、Schmitt ら²⁾ は仮想質量 (Provisional Mass) μ なる量を導入し、 E_{ki} から μ_i を介して m_i^* を得るという解析手法を確立させた。以降、彼らの巧妙な解析法を紹介する。

μ_i は以下の関係式を満たすものとする。もちろん、このような関係は厳密には成り立たず、 μ_i は、 m_i^* と m_i の中間的な質量として考えられる。

$$\mu_1 E_{k1} = \mu_2 E_{k2} \quad (3.1.7)$$

$$\mu_1 + \mu_2 = A \quad (3.1.8)$$

上式の意味するところは、実験的に測定される E_{k1} と E_{k2} から、 μ_1 と μ_2 をそれぞれ求めることができることである。

(3.1.5)、(3.1.7) 及び (3.1.8) 式から、次の関係が導き出される。

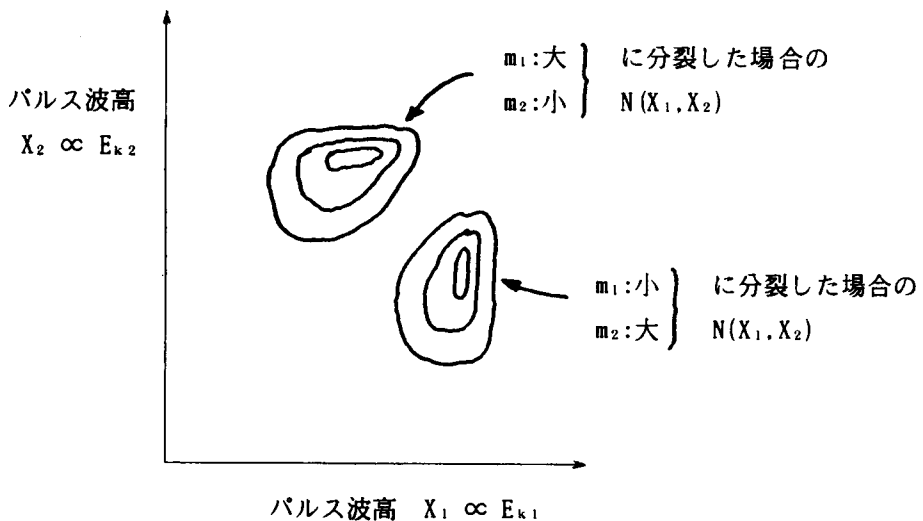
$$m_1^* = \frac{\mu_1}{1 + \xi_1 E_{k1} / (E_{k1} + E_{k2})} \quad (3.1.9)$$

また、(3.1.5) と (3.1.9) 式から、

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{m_1^* (1 + \xi_1)}{1 + \xi_1 m_1^* / A} \\ &\approx m_1^* (1 + \xi_1 m_2^* / A) \end{aligned} \quad (3.1.10)$$

が得られる。

すでに述べたように、我々が測定できる量は二つの Primary Fission Fragment の運動エネルギー E_{k1} と E_{k2} であり、それらのエネルギースペクトルは各々のパルス波高 X_1 、 X_2 として測定される。これらのデータは、同時測定によりイベント $N(X_1, X_2)$ の二次



第3図 二つの核分裂片の運動エネルギー同時測定における二次元パルス波高分布 $N(X_1, X_2)$ の模式図

元の形で記録される。核分裂性アクチノイド核種のうち、大部分のものは大小（重核と軽核）二つに分裂し、そのパルス波高スペクトルは、二つのグループに分かれた形状を示す（第6図参照）。パルス波高の低い部分が重核グループ、高い方が軽核グループに相当する。このようなパルス波高スペクトルから得られる $N(X_1, X_2)$ を、模式的に示したものが第3図である。

$N(X_1, X_2)$ は、次式により $N(\mu_1, E_k)$ に変換される。

$$N(\mu_1, E_k) = N(X_1, X_2) J \begin{pmatrix} X_1 & X_2 \\ \mu_1 & E_k \end{pmatrix} \quad (3.1.11)$$

ここで、 E_k は全運動エネルギーで、

$$E_k = E_{k1} + E_{k2}$$

$$J \begin{pmatrix} X_1 & X_2 \\ \mu_1 & E_k \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial X_1}{\partial \mu_1} & \frac{\partial X_2}{\partial E_k} & - & \frac{\partial X_1}{\partial E_k} & \frac{\partial X_2}{\partial \mu_1} \end{vmatrix} \quad (3.1.12)$$

である。

通常、エネルギー E_{ki} とパルス波高 X_i は、

$$E_{ki} = a_i X_i + b_i, \quad (i=1,2) \quad (a_i, b_i \text{ は比例定数}) \quad (3.1.13)$$

で表される比例関係にあるため、

$$X_1(\mu_1, E_k) = [E_k(1 - \mu_1/A) - b_1] / a_1 \quad (3.1.14)$$

$$X_2(\mu_1, E_k) = [\mu_1 E_k / A - b_2] / a_2 \quad (3.1.15)$$

となり、(3.1.11) と (3.1.12) 式から $N(\mu_1, E_k)$ を求めることができる。なお、シリコン半導体検出器を用いる場合、Fragment のような重イオン粒子に対して、エネルギーとパルス波高の関係が (3.1.13) 式のような単純なものではなく、同式の比例定数が質量依存の形 ($E_{ki} = (a_i + a_i' m_i) X_i + b_i + b_i' m_i$)⁸⁾ になることが知られていることから、 $X_i(\mu_1, E_k)$ は若干複雑なものとなる。

いずれにしても $N(\mu_1, E_k)$ が得られると、

$$N(\mu_1) = \sum_{E_k} N(\mu_1, E_k) \quad (3.1.16)$$

及び

$$N_1(m_1^*)dm_1^* = N(\mu_1) \left| \frac{d\mu_1}{dm_1^*} \right| dm_1^* \quad (3.1.17)$$

の関係から、(3.1.10)式の微分 ($d\mu_1/dm_1^*$) を使って質量 m_1^* の生成量 (収率) を求めることができる。

また、全運動エネルギーは、平均値として次式から得られる。

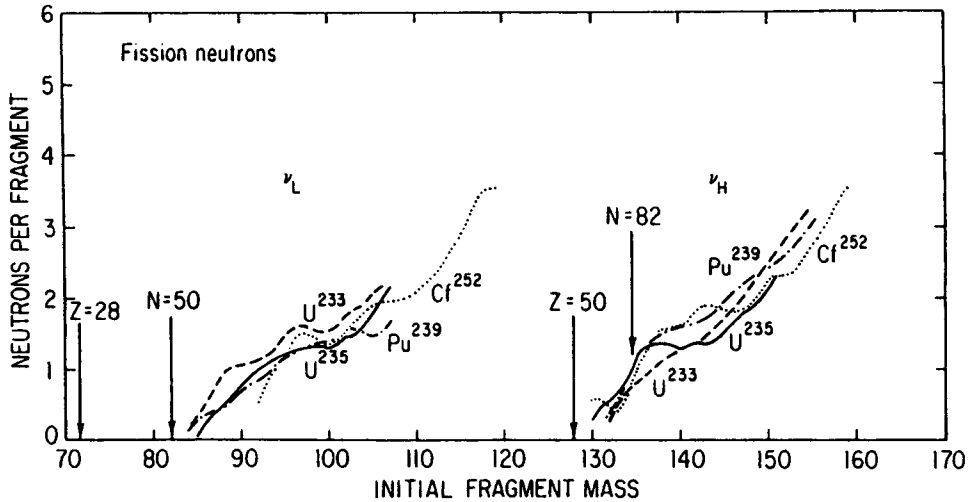
$$\langle E_k^*(m_1^*) \rangle = \langle E_k(\mu_1) \rangle \left\{ 1 + \left(\frac{\nu_1}{A} \frac{\mu_2}{m_1} + \frac{\nu_2}{A} \frac{\mu_1}{m_2} \right) \right\} \quad (3.1.18)$$

ここで、

$$\langle E_k(\mu_1) \rangle = \frac{\sum_{E_k} E_k(\mu_1) N(\mu_1, E_k)}{\sum_{E_k} N(\mu_1, E_k)} \quad (3.1.19)$$

である。

以上のことから分かるように、2E法の解析に当たっては、(3.1.6)式で表される ξ_1 の値、即ち、各質量 m_1^* ごとの放出中性子数 $\nu_1(m_1^*)$ が必要となる。 $\nu_1(m_1^*)$ は、熱中性子核分裂や自発核分裂の場合、第4図に示すように有名な“鋸歯状型”となることが測定されている。⁹⁾ また、核分裂性核種によってその形状が異なることが分かっているが、全体として各核種ともよく似た形となっている。このことを拡大的に利用して、 $\nu_1(m_1^*)$ の実験値のない核種に対し、第4図に示す核種の $\nu_1(m_1^*)$ 値の平均的な形状と同じものとして ξ_1 が求められている。一方、 ξ_1 は $\nu_1(m_1^*)$ の値に敏感で、質量分布の微細構造に影響を及ぼすものの、軽核及び重核グループの平均質量や運動エネルギーに対しては、殆ど影響しないことが分かっている。なお、 $\nu_1(m_1^*)$ は E_k^* と逆比例関係にあることが実験¹⁰⁾ から分かっており、厳密には、 $\langle E_k^* \rangle$ と E_k^* の差を考慮した補正 (その差約 10 MeV で1個) を行った $\nu_1(m_1^*)$ 値を使用する必要がある。

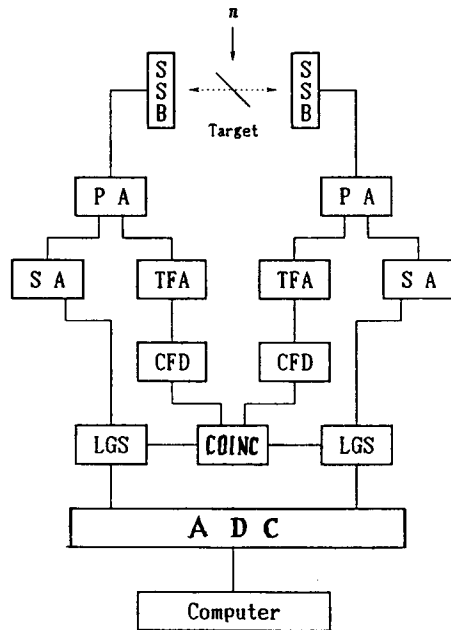


第4図 即発中性子数と核分裂片質量の関係⁹⁾: $\nu(m^*)$

2E法は、測定手法そのものの簡便さから利用価値の高いものであるが、即発中性子数の補正を行う必要から、質量分布の微細構造を議論する場合、どの $\nu_i(m^*)$ 値を使用したかが問題となる。

3.1.2 測定方法

2E法の標準的な測定方法を第5図に示す。核分裂性試料(中性子核分裂の場合 ^{235}U や ^{239}Pu 、自発核分裂の場合は ^{252}Cf など)を挟んで、向かい合わせに運動エネルギー測定用の検出器を配置する簡単な測定体系で、全体を真空容器内にセットする。検出器としては、シリコン半導体検出器(SSB)や電離箱が使用される。試料と検出器の距離は、核分裂反応率及び検出器有感面積の大きさにもよるが、3~5cmが用いられている。この方法では、互いに反対方向に出る二つの核分裂片の運動エネルギーをそれぞれ測



第5図 二重エネルギー(2E)法の測定システムの例
SSB:silicon surface barrier detector, PA:preamplifier,
SA:spectroscopy amplifier, TFA:timing filter amplifier,
CFD:constant-fraction discriminator, COINC:coincidence,
LGS:linear gate and stretcher, ADC:analog-to-digital converter

定することから、試料の厚さはできる限り薄いものが要求される。通常、数 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下の厚さの薄膜が使用される。これらの薄膜試料は、主に、Ni 膜（厚さ $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度）に電着又は蒸着するか、ニトロセルロースに溶かし込んだ溶液を水面上に滴下させてできる薄膜をすくい取る方法などで作成される。試料が厚い場合、試料内での Fragment のエネルギーロスが大きくなり、そのエネルギーを使って求められる質量が不正確なものとなる。

運動エネルギー検出のためのエレクトロニクス回路系には、両 Fragment を同時に同定するために同時計数回路が用いられる。

3.1.3 2E 法による測定例

2E 法による質量収率測定は種々の核種に対して広く行われており、ここでは、最も多く報告されているシリコン半導体検出器 (SSB) を用いた例を紹介する。

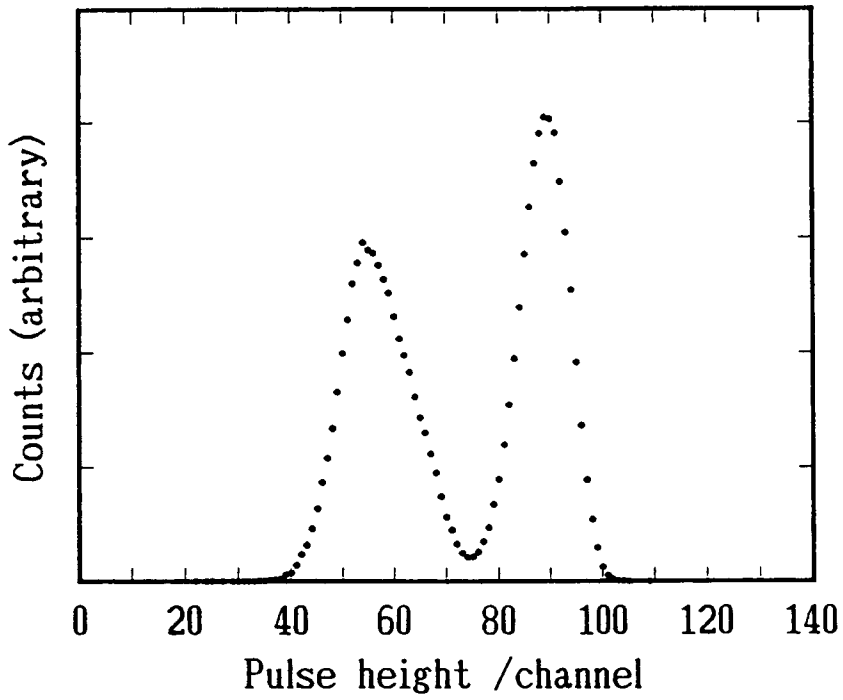
SSB で測定された ^{235}U の熱中性子核分裂での核分裂片運動エネルギーのパルス波高スペクトルを、第 6 図に示す。低チャンネル（低エネルギー）側の幅の広い部分が重核グループ（平均運動エネルギー約 70MeV ）、高い方で幅の狭い部分が軽核グループ（同約 100MeV ）に対応しており、核分裂片は、 $50 \sim 100\text{MeV}$ の幅広い運動エネルギーを持っていることが分かる。二つの核分裂片の運動エネルギーパルス波高スペクトルを同時計数した $N(X_1, X_2)$ 分布の例を第 7 図に示す。3.1.1 で述べた解析方法によって得られた ^{235}U の熱中性子核分裂での Fragment 質量分布（収率） $N(m^*)$ を、化学的方法によって測定された FP の質量収率（図中 $N(m)$ ）と比較して第 8 図に示す。当然のことながら、 $N(m^*)$ は、対称分裂質量（ $^{235}\text{U}(n,f)$ の場合 $m^* = 118$ ）に対して鏡面对称に分布するが、 $N(m)$ は各分裂片からの ν 値が異なるため、非対称型となる。 $N(m^*)$ の分布の特に収率の多い部分に構造が見られるが、近年、核分裂過程におけるモードの違いの現れとして、運動エネルギー分布の解析とともに世界的に研究^{11, 12)}が進められている。

2E 法による質量収率分布の測定精度は、エネルギー検出器の分解能及び測定回路系機器の性能向上により、 0.5amu 以内の誤差で質量数を求めることができる。収率の誤差は、その殆どが統計によるものとなる。

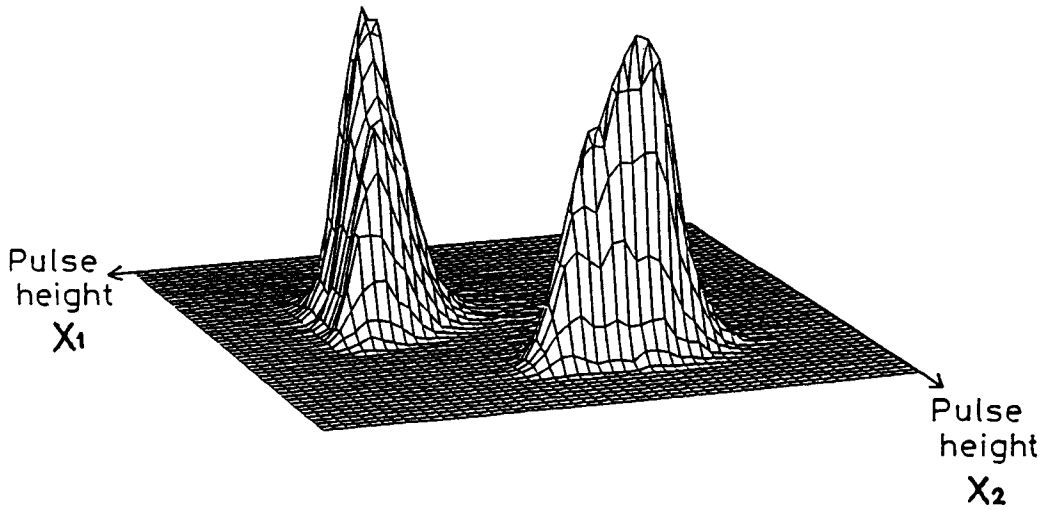
3.2 2V 法の原理と測定方法

3.2.1 測定原理

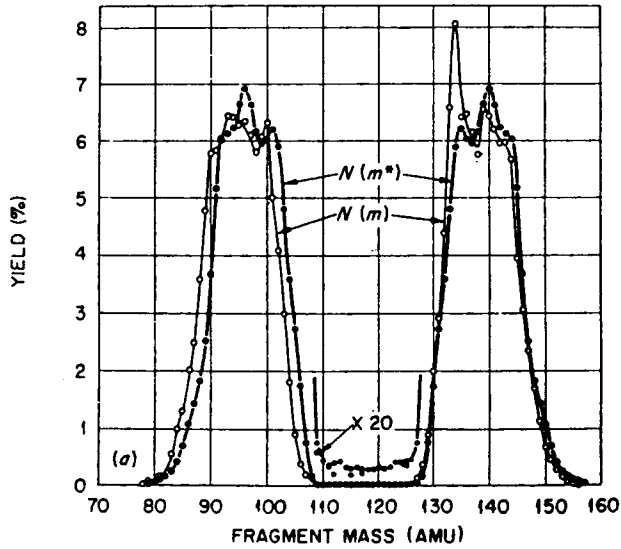
この方法は、両方の Fragment の速度を同時に測定することにより、運動量保存則及び質量保存則から核分裂片質量を求める方法である。基本的には、前述の 2E 法と原理



第6図 $^{235}\text{U}(n,f)$ における運動エネルギーパルス波高分布: $N(X_1)$



第7図 $^{235}\text{U}(n,f)$ における $N(X_1, X_2)$ 分布



第8図 $^{235}\text{U}(n,f)$ におけるFragmentの質量収率 $N(m^*)$ 及びProductの質量収率 $N(m)$ (Schmittら²⁾)

は同じで、測定する対象がエネルギーか速度かの違いだけである。

第2図から、分裂直後のFragment質量 m_i^* ($i=1,2$)と速度 V_i^* の関係は、

$$m_1^* V_1^* = m_2^* V_2^* \quad (3.2.1)$$

で表される。

Fragmentは即発中性子を放出することにより、質量及び速度が変わる。しかし、中性子がFragmentから重心系で等方的に放出されるとすると、平均として、Fragmentの速度は変化しないと考えてよい。従って、中性子放出後の分裂片の速度を V_i とすると、

$$V_i = V_i^* \quad (i=1,2) \quad (3.2.2)$$

として表わせることになる。このことは、我々が測定できる量 V_i は、 V_i^* とほぼ等しいものとして扱えることを意味している。

分裂片が距離 L を飛行するのに要する時間を T_i とすると、

$$V_i = \frac{L}{T_i} \quad (3.2.3)$$

であるから、(3.2.1)と(3.2.2)式を使って、

$$\frac{m_1^*}{T_1} = \frac{m_2^*}{T_2} \quad (3.2.4)$$

となる。 T_i は、時間-波高変換器により、パルス波高 X_i として測定される。 T_i と X_i の関係は、

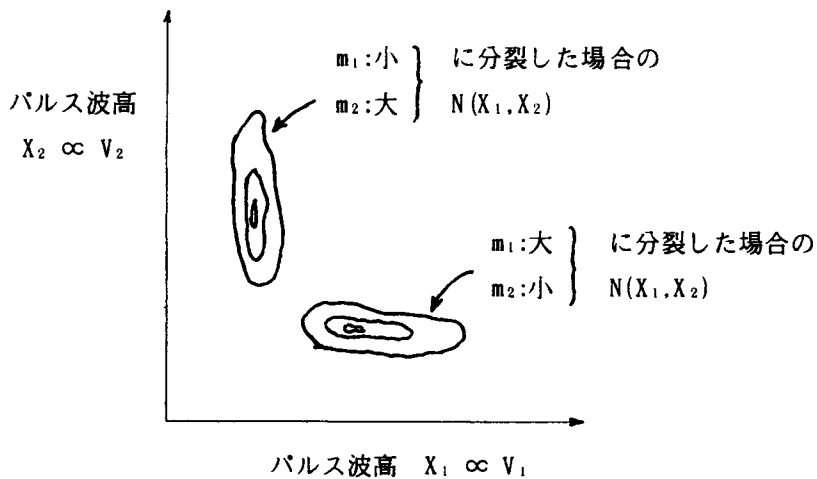
$$T_i = a_i X_i + b_i \quad (i=1,2) \quad (3.2.5)$$

であるので、

$$E_{k_i}^* = \frac{1}{2} m_i^* \left(\frac{1}{a_i X_i + b_i} \right)^2 \quad (3.2.6)$$

から、 m_i^* の運動エネルギー $E_{k_i}^*$ が求まる。

実験的には、飛行時間の同時測定により、イベント $N(X_1, X_2)$ として二次元の形で記録される。飛行時間スペクトル(パルス波高分布) X_1 及び X_2 は、それぞれ第11図のような形を示すことから、 $N(X_1, X_2)$ を模式的に表すと第9図のようになる。



第9図 二つの核分裂片の速度同時測定における二次元パルス波高分布 $N(X_1, X_2)$ の模式図

$N(X_1, X_2)$ は、次式により $N(m_1^*, E_k^*)$ に変換される。

$$N(m_1^*, E_k^*) = N(X_1, X_2) J \begin{pmatrix} X_1 & X_2 \\ m_1^* & E_k^* \end{pmatrix} \quad (3.2.7)$$

ここで、

$$J \begin{pmatrix} X_1 & X_2 \\ m_1^* & E_k^* \end{pmatrix} = \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial X_1}{\partial m_1^*} & \frac{\partial X_2}{\partial E_k^*} \\ \frac{\partial X_1}{\partial E_k^*} & \frac{\partial X_2}{\partial m_1^*} \end{array} \right| \quad (3.2.8)$$

である。従って、

$$N(m_1^*) = \sum_{E_k^*} N(m_1^*, E_k^*) \quad (3.2.9)$$

の関係から、 m_1^* の生成量 (収率) が得られる。

また、全運動エネルギーの平均は、

$$\langle E_k^*(m_1^*) \rangle = \frac{\sum_{E_k^*} E_k^* N(m_1^*, E_k^*)}{\sum_{E_k^*} N(m_1^*, E_k^*)} \quad (3.2.10)$$

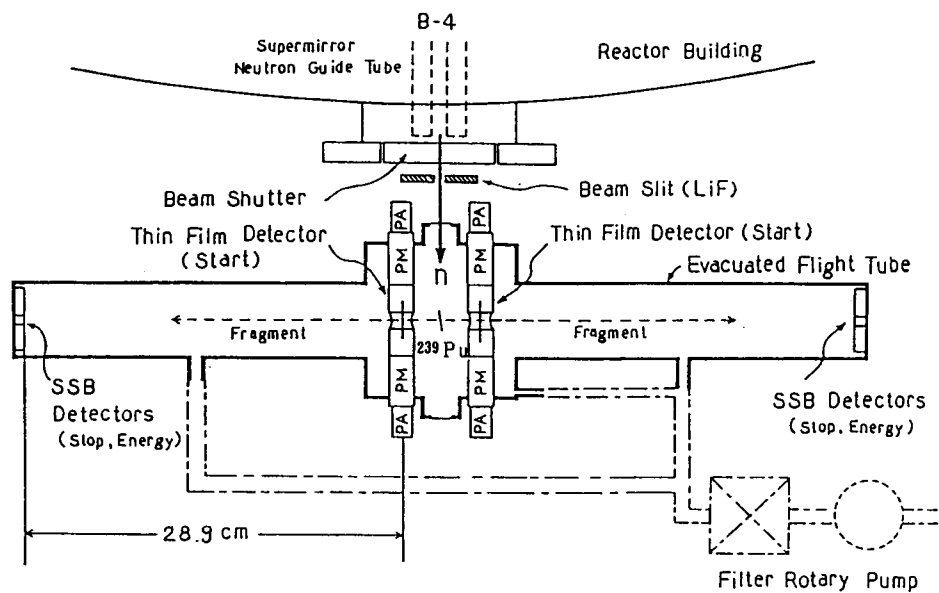
として求めることができる。

このように、2V法は、2E法のように即発中性子の補正を行うことなく Fragment の質量収率を求めることができることが、最大の利点である。しかし、分裂片をある程度の距離を飛ばす必要があることから、2E法に比べて計数率が格段に少なくなり、長時間にわたる測定が必要となる。

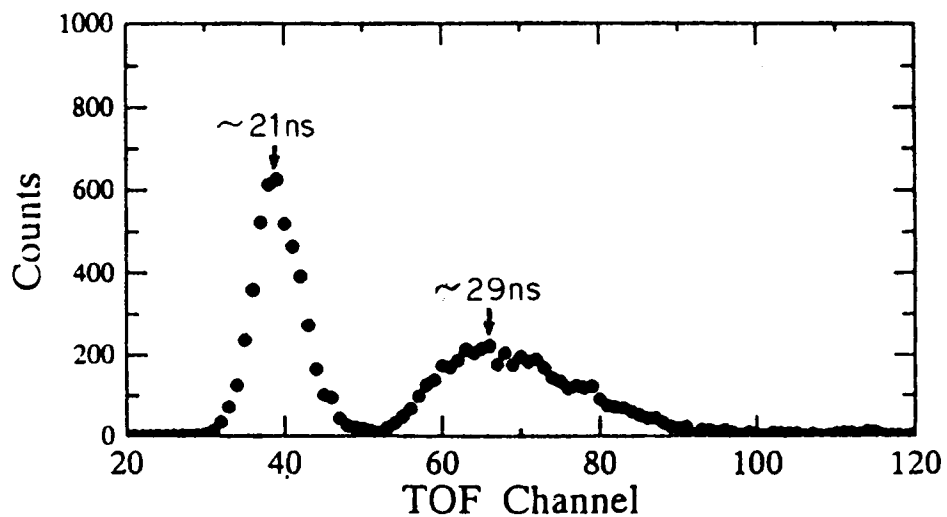
3.2.2 測定方法

2V法では、通常、速度は飛行時間法 (TOF) で測定される。測定方法の一例を第10図に示す。

核分裂片の速度が約 1cm/ns ($^{235}\text{U}(n,f)$ の場合、軽核グループの平均速度は 1.4cm/ns、重核グループは 0.97cm/ns)⁶⁾ であることから、飛行距離として、時間測定回路系の分解能及び同時計数率を勘案して、30cm 程度から 2m 弱の長さを使用されている。スタート検出器は、特に Fragment が重イオンであることから、できるだけ検出器内でのエネルギーロスの少ないもの、即ち、減速や散乱の少ないものが要求される。このため、



第 10 図 二重速度 (2V) 法の測定配置例



第 11 図 $^{239}\text{Pu}(n,f)$ における核分裂片飛行時間スペクトル

薄膜シンチレーション検出器^{13, 14)} (Thin Film Detector: TFD)、炭素やニッケルの薄膜 (厚さ $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度) からの δ 線を検出する装置⁶⁾ (最近、MCP (Micro-channel Plate) が使用されている) 等がスタート検出器として使用される。一方、ストップ検出器として、シリコン半導体検出器、シンチレーション検出器、PPAC (Parallel Plate Avalanche Counter)、MWPC (Multiwire Proportional Counter)、電離箱等が使用されるが、特にシリコン検出器の場合、高密度プラズマによる検出時間の遅れの補正が必要となる。これらの検出器を用いた場合の時間分解能 (ΔT) は、およそ 200ps である。

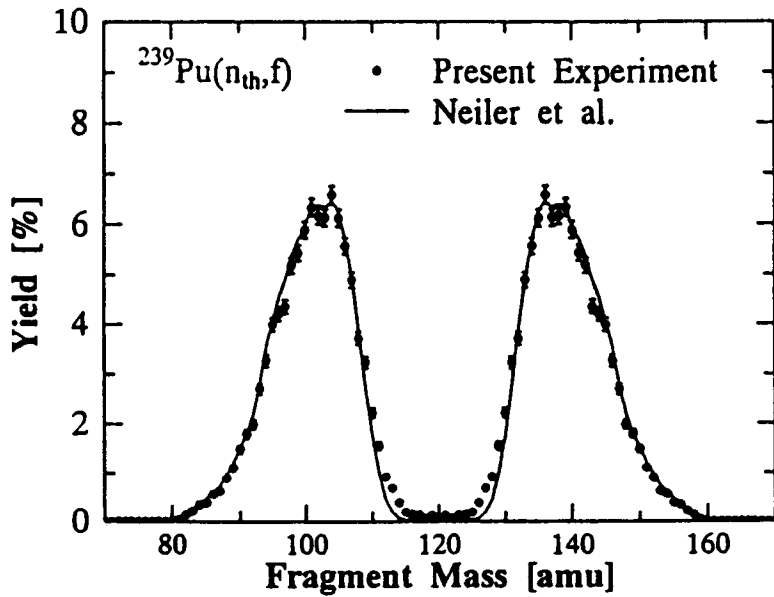
核分裂性試料は、2E 法で述べたことと同様、薄膜であることが要求される。測定回路系は、特に時間を測定対象とすることから、時間分解能に直接関係する電子機器やケーブル長さ等の選定に配慮が必要となる。また、通常、2V 法は長時間の測定が必要となることから、測定回路系の安定性が重要となる。

3.2.3 2V 法による測定例

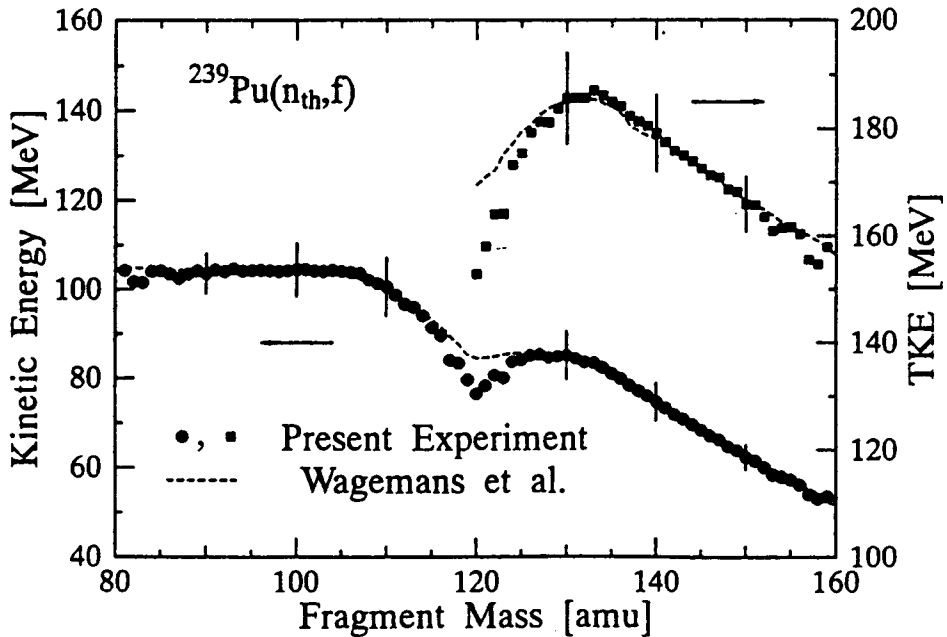
²³⁹Pu の熱中性子核分裂での核分裂片飛行時間スペクトルの一例を、飛行距離 32cm の場合について第 11 図に示す。時間が短く (即ち、低チャンネル側) 鋭いピークが軽核グループで、他方の幅の広い集団が重核グループである。軽核グループのピーク値で約 21ns、重核グループで約 29ns である。このデータは、スタート検出器として TFD、ストップ検出器として SSB を用いて得られたものである。近年、時間パルス波高変換器 (TAC) の時間分解能の向上により、飛行距離 30cm 程度で十分なデータが得られるようになった (1960 年代では、175cm)。両 Fragment の時間スペクトルを同時計数して得られた $N(X_1, X_2)$ データから、3.2.1 で述べた解析法により導出された Fragment の質量分布及び運動エネルギー分布を第 12 図及び第 13 図に示す。両データとも 2E 法の測定結果と比較して示している。質量収率の誤差は統計によるものである。軽核グループは、その質量に殆ど関係なく運動エネルギーが一定で、分裂の相手方の重核グループのそれは、質量とともに大きく変化することが分かる。質量収率は、²³⁵U(n,f) の場合と形状に大きな違いがあり、核分裂モードが ²³⁵U と異なることを暗示している。

3.3 2E 及び 2V 法における今後の課題

特に、核分裂機構を解明するために必要な Fragment の質量分布及び運動エネルギー分布の測定において、2E 法は、重イオンに対する検出器のエネルギー校正や即発中性子数の補正等、多少の不確定さはあるものの、最も有効な測定手段である。また、ほぼ完成された手法といってもよいが、 $\nu_i(m_i^*)$ 値の種々核種に対する測定及びその精度の向上が、今後、2E 法の信頼性を高めるためのキーポイントとなろう。



第 12 図 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ の Fragment 質量分布 (収率)



第 13 図 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ の Fragment 運動エネルギー分布

2V法は、極めてよい近似で Fragment の質量及び運動エネルギー分布を測定できる手法であるが、TOF のスタート及びストップ検出器の性能向上、又は新型検出器の開発が今後の重要な課題となろう。

両測定法に共通した課題として、核分裂性試料の準備が挙げられる。使用される薄膜試料は、質量収率測定において最も基本的かつ重要なもので、取り分け高純度試料の準備が必要不可欠である。我が国では、この種の試料が入手しにくく、かつ、取り扱い施設及び設備が欧米と比較して不十分であることから、今後の積極的な改善が必要である。一方、薄膜製作技術はほぼ確立しており、特段の問題点はないが、全く新しい製作技術の開発研究が期待される。

4. おわりに

「核分裂片収率の測定」というタイトルの下では、本来ならば、あらゆる測定手法についての解説をすべきであると思われるが、この機会に、あまり核分裂と縁のない方々に、“如何にして、核分裂片の質量収率を測定するのか”を紹介することを目的として述べてみた。ここでは、筆者が直接携わっている物理的測定法のうち、二重エネルギー法と二重速度法の2種類の測定法のみを紹介した。

核分裂発見後、既に60年近くが経っているが、未だそのメカニズムは解明されていない。なぜ非対称分裂なのか？、なぜ軽核グループの運動エネルギーは質量によらず一定なのか？、なぜ $\nu(m^*)$ は鋸歯状になるのか？、なぜ・・・等、核分裂現象は、なぜなぜづくしなのである。一方、最近の傾向として、分裂片の組 (Fragment 質量の比： m_1^*/m_2^*) を関数とした全運動エネルギー (E_k^*)、 E_k^* を関数とした質量収率分布、 $\nu(m^*)$ と中性子エネルギースペクトル等の相関測定及び解析から、複数の核分裂モードの存在、Fragment の内部励起エネルギーの導出及び核分裂系におけるエネルギーバランスなどの研究が、精力的に行われており、確実にメカニズム解明に近づいていることも事実である。これらの研究の基本となっているのが、質量収率及び運動エネルギー分布の測定である。いかに精度よく測定するかは、核分裂機構の解明に役立つばかりでなく、「核データ」としても重要なことである。

今回、不十分な内容であるが、これを機会に、一人でも多くの方々が核分裂に興味を持っていただければ、うれしい限りである。

参考文献

- 1) O. Hahn and F. Strassmann, *Naturwissenschaften*, 27, 11(1939)
- 2) H.W. Schmitt, J.H. Neiler and F.J. Walter, *Phys. Rev.*, 141, 1146(1966)
- 3) J.H. Neiler, F.J. Walter and H.W. Schmitt, *Phys. Rev.*, 149, 894(1966)
- 4) M.J. Bennett and W.E. Stein, *Phys. Rev.*, 156, 1277(1967)
- 5) F. Pleasonton, *Phys. Rev.*, 174, 1500(1968)
- 6) J.C.D. Milton and J.S. Fraser, *Can. J. Phys.*, 40, 1626(1962)
- 7) J.E. Gindler and J.R. Huizenga, "Nuclear Chemistry", Vol.II, Ed. by L. Yaffe, Academy Press 1968
- 8) H.W. Schmitt, W.M. Gibson, J.H. Neiler, F.J. Walter and T.D. Thomas, *Proc. Symp. Physics and Chemistry of Fission*, Vol.I, p.531, IAEA, Vienna, 1969
- 9) J. Terrell, *Phys. Rev.*, 127, 880(1962)
- 10) E.E. Maslin, A.L. Rodgers and W.G.F. Core, *Atom. Weapons Res. Estab. Rep.* No. O-43/67, 1967
- 11) H.-H. Knitter, F.J. Hamsch, C. Budtz-Jørgensen and J.P. Theobald, *Z. Naturforsch.*, 42a, 786(1987)
- 12) Y. Nakagome, T. Miyauchi, T. Saito, N. Takahashi, A. Yokoyama, D. Yano S. Mori, H. Baba and T. Tamai, *Proc. Specialists' Meeting on Fission Product Nuclear Data*, p.310, Mito, May 25-27, 1992
- 13) I. Kanno and Y. Nakagome, *Nucl. Instrum. Methods*, A251, 108(1986)
- 14) I. Kanno, Y. Nakagome and I. Kimura, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 25, 111 (1988)
- 15) K. Nishio, Y. Nakagome, I. Kanno and I. Kimura, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 32, 404(1995)