

# 核燃料燃耗分析

李维时编著

北京师范大学化学系  
放射化学研究室

一九七九年九月

## 内 容 摘 要

本文是由一篇讲稿增补修订而成。它阐述了现代有关核燃料燃耗测定的基本概况，包括燃耗定义，计算，裂变数、截面、 $\lambda$ 值，重核及放射性稳定性裂变片燃耗监测仪的选择与用同位素稀释质谱法进行测定。叙述了以电化学及氧化还原法对重核的测定，放射性碎片燃耗监测仪的活化测定与无损燃耗测量法等如： $\gamma$ 谱法及 $\gamma$ 扫描法，无源及有源中子计数法，无源 $\gamma$ 、 $\alpha$ 分析法及利用同位素时的比值作为燃耗及中子通量的监测仪以区别不同可裂变源的监测仪等。为安全屏障及厂际间的核燃料平衡计算与总的核燃料循环平衡计算等方向提供了分析方法。对现存问题提出了一些看法。本文可作为从事核燃料分析，裂变同位素分析的广大工人，工程技术人员以及大专院校从事此领域的师生参考之用。由于水平有限，错误之处在所难免。



核燃料燃耗测定

前言

第一章

I-1 燃耗定义及计算

I-2 燃耗标准

第二章 燃耗测定中的裂变额

第三章 燃耗监测体的选择规范及中子俘获截面、 $\alpha$ 值

III-1 燃耗监测体的选择规范

III-2 中子俘获截面及 $\alpha$ 值

第四章 无损燃耗测定法

IV-1 多道 $\gamma$ 谱仪及 $\gamma$ 扫描法

IV-2 一种无损 $\gamma$ 测异的实验例

IV-3 有源中子分析

IV-4 无源中子分析

IV-5 无源 $\gamma$ 分析

IV-6 另热燃耗测定法

IV-7 谱指数法

IV-8 铀钚燃料中堆内燃耗测定法

第五章 破坏性燃耗测定法

V-I 通过照射前后的重核变化计算燃耗

V-II 重核的测定

V-II.1 同位素稀释质谱法测定核燃料中铀、钚及其同位素

V-II.1.1 样品的制备溶剂及稀释问题

V-II.1.2 部分样品溶液与同位素稀释剂的选择与汇目

V-II.1.3 通过化学处理制备状态一致的同位素溶液

V-II.1.4 铀、钚的分离

a. 溶剂萃取法.

b. 离子交换法.

V-II.5 质谱分析中应注意的事项.

V-II.6 一些其它利用同位素稀释质谱测定铀钚的实例.

V-III. X射线荧光法测定铀、钚.

V-IV 电化学及氧化还原法测定重核的实例.

V-V 放射法测定钚及其同位素.

第六章 以放射性裂变片作为燃耗监测体的放射性燃耗测定法.

VI-1. 铯<sup>137</sup> ( $Cs^{137}$ )

VI-2. 钷<sup>144</sup> —— 镨<sup>144</sup>

VI-3. 钷<sup>154-155</sup>.

VI-4. 钆<sup>95</sup>.

VI-5. 钷<sup>103-106</sup>

VI-6. 铷<sup>125</sup>

VI-7. 铷<sup>99</sup>

VI-8. 其它.

第七章 以稳定性裂变片同位素为燃耗监测体的燃耗测定法 (同位素稀释质谱法).

VII-1 以钷同位素作为燃耗监测体.

VII-1.1 不经化学处理 (分离) 的直接质谱测定法.

VII-1.2 经化学分离后的同位素稀释质谱测定法.

VII-1.3 分离及精制.

3.1 钷的分离纯化.

3.2 铀的分离纯化.

3.3 钚的分离纯化.

3.4 计算.

VII-II. 其它一些例子 (II-1 ~ II-7)

AWT/2410/06

#### 4.

Ⅳ-Ⅱ-8 钹<sup>148</sup>的中子活化放射测号法。

Ⅳ-Ⅲ 以稳定性总稀土裂片为燃耗监测体。

Ⅳ-Ⅲ-1 X射线测定法。

Ⅳ-2 以稳定性稀土裂片中的铈、钕作为燃料监测体的同位素稀释质谱法。

Ⅳ-Ⅳ 以稳定性裂片钕作为燃耗监测体。

Ⅳ-1. 同位素稀释质谱法。

Ⅳ-2. M<sup>98</sup>的中子活化放射测号法。

Ⅳ-Ⅴ 以稳定性裂片钐作为燃耗监测体的同位素稀释质谱法。

Ⅳ-Ⅵ 以稳定性裂片铕作为燃耗监测体的同位素稀释质谱法。

Ⅳ-Ⅶ 以稳定性氦、氙作为燃耗监测体。

Ⅳ-Ⅷ.1 样品的溶剂及惰性气体的净化收集。

Ⅳ.2. 惰性气体的GC/MS测定法。

第八章 以稳定性裂片同位素比作为燃耗监测体。

Ⅷ.1. 基本前提

2 方法评价

3 方法的灵敏度

4. 中子通量

5. 以裂变额比及同位素比区别不同可裂变核。

结束语

## 前 言

原子能事业的发片促进了各种类型反应堆不断增加与发片。可裂变核燃料的品种和形式也日新月异，如早期多应用天然铀金属或其合金作为堆的可裂变材料，而后则有使用浓缩铀及钚作为可裂变源其形式也由金属或合金发展到耐火物的状态。如氧化铀、氧化钚、碳化铀、碳化钚、氮化铀、硅化铀…等以适应在高温下运行堆的需要，为了在高温下运行下不变形及抗腐蚀，有的还须在氧化物颗粒的表面进行三次涂层（甚至五层）——高温热解碳—碳化硅—高温热解碳涂层，同时堆的燃料燃耗深度也较早期大为提高。人们为了掌握核燃料照射前后的原子变化、产生的能等等，以便对堆进行控制，从60年代以前就开始了核燃料燃耗的研究，但是初期只限于少数几个国家。但在短短二十多年里，对燃耗进行研究的国家增加到约20个。除美、英、法、苏外如西德、西德、意大利、比利时、奥地利、瑞典、挪威、丹麦、南斯拉夫、加拿大、波兰和捷克…等国都不同程度的作过有关燃耗方面的工作。其中有的开始较早，有的还处于初期阶段，不论其处于何阶段，由研究国家日益增多的角度来分析，可以看出燃耗对提高反应堆的效率来说是一个很重要的因素，很显然控制了燃耗深度不但可以控制裂变产物的产额和质比以及释放的能等，且可用以分析堆的各种物理参数，为提高堆的运行效率，同位素的产额和质比的综合参数提供了一种可靠的手段，此外对厂际间核燃料的平衡计算及核燃料的总循环的平衡计算是一项很重要的方法。由于燃耗测定具有十分重要的意义，故近年来作了大量的研究工作。随着燃耗研究的发片，对各种裂变产物的裂变产额积累了大量的数据，其中 $U^{235}$ 、 $Pu^{239}$ 两种可裂变源产生的各种主要裂变产物的裂变产额已基本弄清楚，有关 $U^{235}$ 可裂变核产生的各种裂变产物的裂

变产额次之。而  $Pu^{241}$  及较它更重的可裂变核则只限于重质号的裂变产物，早期的研究较集中于热中子堆，近数年来已开始研究快堆及增殖堆燃耗的研究，迄今对  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $Pu^{241}$  可裂变源的热中子裂变已测定了45个质号链，而  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  中子裂变已测定过45个质号链。虽然如此，但是从裂变链的标准偏差来看，还不能说已达到了令人满意的水平。

在具体的燃耗测量研究中主要有两种形式，一种是无损测量，一种是破坏性测量。其测量的精度以后者为优，但随着研究的发展，某些无损测量燃耗的精度也有一定的提高。破坏性燃耗测量法是一种最重要的测量手段，但不论破坏性测量或无损测量，其关键问题是测量重核及选择能代表实际燃耗的裂变产物，此裂变产物目前国际上通称为燃耗监测体 (Burn up monitor)，有的称为裂变监测体，可根据燃耗监测体的选择规范以及具体的可裂变源的种类和形态选择最适当的燃耗监测体，理想的燃耗监测体是如果存在两种可裂变源时它们应具有相同的裂变产额（不论是稳定的或是放射性的），这样可以避免换算时增加许多麻烦，但此类监测体是不多的。其次是选择裂变产额高且稳定，半衰期长且能作较单一的裂片作燃耗监测体，这样可以减少复杂细致的校正堆内照射及堆外冷却时间的系数。多年来的研究证明裂变产物稀土中的稳定性同位素  $Nd^{148}$  是监测  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  燃耗的理想监测体，因  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  对  $Nd^{148}$  的裂变产额是相等的，其次近年来的作者认为稳定性的同位素  $Sm^{147}$  的裂变产额在以  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  为裂变源时也几乎是一致的，分别为 58% 和 5.9%，故也可以作为燃耗监测体，另一个是选择半衰期为 30 年的放射性同位素  $Cs^{137}$  作为燃耗监测体，但它的不足之处是在某些以耐火材料为可裂变核燃料的高温堆运行下有蒸发及迁移的特点，但在燃料元件的温度为  $500^{\circ}C$  或低于此值时，则其产生的

浓度正比于裂变密度，在此条件下 $Cs^{137}$ 是理想的燃耗监测体， $Mo^{90}$ 与 $Cs^{137}$ 几乎是同样的。

燃耗深度的差异导致重核同位素及以某些其它同位素的比值不同。故可由比值的变化的测出燃耗的不同。如 $U^{235}/U^{238}$ 、 $U^{236}/U^{238}$ 、……比 $Pu^{240}/Pu^{239}$ 、 $Pu^{240}/Pu^{239}$ 、 $Pu^{240}/Pu^{239}$ 、…… $Pu/U$ 比……或 $Kr^{83}/Kr^{84}$ 、 $Xe^{131}/Xe^{132}$ …… $Nd^{143}/Nd^{145}$ 、 $Nd^{145}/Nd^{146}$ 、 $Nd^{146}/Nd^{148}$ ……比值不同代表燃耗深度不同，然而有的同位素对的比值变化只与中子通量有关，对燃耗无关。因此，也可以通过比值变化而测出中子通量，理想的最直接测算燃耗深度的方法是测定照射前后可裂变核的贫化度，但是多年的研究结果证明，这种方法不适宜用于燃耗浅的核燃料，即使应用最好的测算手段，其误差也远远超出希望的范围，一般这种方法只适用于燃耗深度在10%以上的核燃料。

有关测算燃耗的无损测算法不外为 $\gamma$ 射线扫描法，另热法、中子计数法（包括有源及无源）……而破坏性测算则有放射法，最常用的是同位素稀释质谱法（包括离子、气体），还有气体色谱/质谱法、中子活化法、X射线荧光光谱法、电化学法及其它化学法等。具体应用什么方法要看我们的条件而定，但是燃耗测定的一重要特点是要求精密度高，对破坏性测算其取样量要小（特别对燃耗深度高的样品），如测算误差大则对燃耗区别不大的核燃料来说，可能区别不出燃耗较接近的样品，因此应尽可能的提高分析方法的精密度及通过某些特殊的裂片同位素以解决这个问题。



# 第 一 章

## I-1 燃耗的定义

表示燃耗的单位有许多种，如“原子百分裂变”及“原子百分贫化度”。前者可用以计算产生的能量，后者可以测出可裂变核素量的纯变化。

“原子百分贫化度”的定义为：每百个原始可裂变重核的纯损失（用任何核过程），如每百个原始可裂变的 $U^{235}$ 原子损失的 $U^{235}$ 原子数为 $U^{235}$ 的原子百分贫化度。或定义为，在原始可裂变核燃料中每百个质量数大于232重核的裂变值，此定义不能用于增殖堆系统中，因被增殖的原始原子量通常为0，原子百分贫化度可用下式表示：

$$\text{原子百分贫化度} = \frac{100(N_a^0 - N_a)}{N_a^0} \dots\dots (1)$$

其中： $N_a^0$ —照射前可裂变重核的原子数， $N_a$ —照射后可裂变重核的原子数。

计算 $U^{235}$ “原子百分贫化度”的方法是基于测定每单位体积内的裂变值，测定照射后每单位体积内铀同位素原子丰度，假设只有 $U^{235}$ 贫化及已知照射前的 $U^{235}$ 的浓度可以用下式计算原子百分贫化度：  
 原子百分贫化度 =  $\frac{100[E_5^0(U_5^f + f) - U_5^0]}{E_5^0(U_5^f + f)}$   
 ..... (2)

其中： $f$ —每单位体积裂变数。 $U_5^f$ —每单位体积最后总铀原子数。 $U_5^0$ —每单位体积最后 $U^{235}$ 原子数。 $E_5^0$ —原子 $U^{235}$ 丰度。

也可以用一种不十分严密的表现法来表示，通过测定每单位体积内 $U^{235}$ 及裂变数，使用 $U^{235}$ 的 $\alpha$ 值——俘获对裂变截面比值。  
 原子百分贫化度 =  $\frac{f(1 + \alpha)}{[(U^{235}) + f(1 + \alpha)]}$  ..... (3)

其中： $f$ —每单位体积裂变数。 $U^{235}$ —最后每单位体积 $U^{235}$ 原子数。 $\alpha$ — $U^{235}$ 的俘获对裂变截面比值。

原子百分裂变由一常数与 (Mwd/t) 兆瓦天/吨 有关，此常数依赖于可裂变核反应系统的特性。例如在非均匀的沸水堆中， $U^{235}$  每次裂变释放的能量为 205 Mev. 将原子百分裂变值乘以 8700 就转换为 Mwd/t，以式表示如下。

$$\text{原子百分裂变} = \frac{100(N_f \cdot P)}{(NA^0 > 232)(f \cdot Y)} \dots \dots \dots <4>$$

$$\text{Mwd/t} = K (\text{原子百分裂变})$$

其中： $N_f \cdot P$  — 为选择的产生裂片核原子数， $f \cdot Y$  — 为已测得的裂片核的裂变额。 $NA^0 > 232$  — 为原始质量数大于 232 的重核原子数。 $K$  — 比例常数。

如可裂变核多于一时，必须以可裂变核的各裂变的贡献加和裂变额。

有效的裂变额可以下式表示：

$$(f \cdot Y)_{\text{有效}} = \sum_n R_n (f \cdot Y)_n \dots \dots \dots <5>$$

其中加和系数  $R_n = \frac{n \text{核的裂变数}}{\text{总裂变}}$

常用于裂片燃料监测仪测得后表示原子百分裂变的公式为：

$$\text{原子百分裂变} = \frac{100(N_f \cdot P)}{\frac{N_0}{C_0} [1 + R_{9/8} + R_{9/8} (1 + \lambda_9) + F_8 / N_0] \cdot (f \cdot P)} \dots \dots \dots <6>$$

其中： $N_0$  —  $U^{238}$  的原子数， $C_0$  — 开始时  $U^{238}$  的原子份额。

$R_{9/8}$  —  $Pu^{239}/U^{238}$  的最后原子比值。 $R_{9/8}$  —  $Pu^{240}/U^{238}$

最后的原子比值。 $\lambda_9$  —  $Pu^{239}$  的俘获时裂变比。

$F_8$  —  $U^{238}$  的裂变值。

此式因素较多，故常用下面简单式子表示：

$$\text{燃耗} \% = \frac{\text{裂变数/毫升溶液}}{(\text{原始可裂变核} + \text{次级可裂变核的原子数}) / \text{毫升溶液}} \times 100 \dots \dots <7>$$

其中每毫升裂变数是以如  $Cs^{137}$  或  $Ce^{144}$  或其它放射性裂片测定值。

原始可裂变及次级可裂变原子/毫升，是在照射后小心测得铀原子数/毫升，加上裂变/毫升及钚原子数/毫升得到的。

上述几个公式的精确度依赖于对选择的裂片或的裂变额的精确度及加权系数 $\alpha$  [1] [2]。如以焦耳表示时  $1 \text{ MWd} = 2400 \text{ kWh} = 8.64 \times 10^{10}$  焦耳。

### 1-2. 测燃耗用样品。

可裂变材料照射前后的组份变化是燃耗测定的基准物质。故选择及制备照射的样品是一关键性问题。首先是重量问题。不论是燃料元件或试样，金属或合金、氧化物或耐火材料都必须精确称量其重量。若重量称量不够准确，则可能导致燃耗测定结果变得毫无意义。故一般制备试样时须重复称量2-3次。因称取照射后的样品是十分困难的，尤其是燃耗深度较大的样品，故应在制备样品时精确称量。有的实验室多年前仍应用照射过的元件进行燃耗测定。近年来对细棒状燃料组件也直接使用 $\gamma$ 扫描无损燃耗测定法以测定燃耗的分配。而燃耗测定法多采用制备的试样或取极少量部份燃料溶液。如可裂变材料为高浓缩铀或钚……时。制备试样时只须数十毫克至百毫克，如应用天然铀时则须1-2克氧化物。在照射过程中对堆的各种参数必须十分清楚，在制定燃耗与裂片裂变额的曲线时，试样燃耗要由浅到深，准确记录放置堆中及由堆中取出时间，冷却时简要根据需要情况处理。但亦须准确记录以便计算时能校正堆外放置时间。

有关试样的制备有不少报导，如称取定量的数十毫克及至百毫克高浓缩铀 $^{235}\text{U}$ 、铀 $^{235}$ 或纯度较高的钚 $^{239}\text{Pu}$ 、钚 $^{241}$ 等氧化物与高纯度的金属(99.99%)铝粉混合，将混合物移入加工的单片纯铝(99.999%)封装管中。在氦气氛中以氩弧焊接法将铝塞熔融焊接在管端，焊接后对每个铝封装管都要浸渍在液氮中，然后于丙酮中进行探漏试验。

测漏合格后每6个封装管为一组构成一个兰笔式组件，置

于 (MTR) 材料实验堆或其它堆辐反射体部位，此处的 Cd, Co 比为  $15 \pm 1$ 。其图示如下(3)

IDO - 14656 (1965) P.7

对试样用的可裂变材料组份在制备前也必须要作详尽的分析，除必须进行同位素组成分析外，还要对其中的杂质，如显层杂质中稀土、钍、铀，……20多种，以及非显层杂质及显层与氧的比进行分析，经照射后冷却，溶于适当的混酸中，根据需要选择一些裂片作为燃耗监测体，取一部份溶液，用适当的方法进行分析，此溶液的分析结果，如用放射性裂片，可用前值(6)式进行计算。

## 第二章 燃料测定中的裂变额

在燃料测定的方法中，较精确的一种方法是测定被照射样品中被选定的一种或几种裂变以及重核的数，它们的裂变额依赖于核燃料的组成及各包的可裂变核。

采用的燃料监测体的精密密度依赖于被测定的裂变燃料监测体及重核的分析方法的精密密度，及用以将裂变原子数转换为裂变时的裂变额的精密密度。故裂变额在燃料测定中是一关键性的因素，若所用的裂变额精密密度差，则将严重影响结果。

测定照射过样品中裂变数的化学分析方法有三种，其一是测量照射过的重核总数的减少数（衰化度），其二是测量选择的重核照射前后的比值及包括核常数的计算关系；其三是测量被选为燃料监测体的裂变的原子数并以其裂变额限之。

裂变的裂变额一般分为相对裂变额及绝对裂变额，经过多年的研究与发片，其精密度的标准偏差大体在2%。在大量的裂变中早已为人们所注意的是 $Nd^{148}$ ，这个裂变。因其裂变额对 $U^{235}$ 及 $Pu^{239}$ 是一致的。若以它为燃料监测体时，可以不考虑两种裂变源时的各包的分别裂变额，因此可以用把 $1/d^{148}$ 的裂变额作为100，相对于它的其它裂变的裂变额，称为相对裂变额，换言之，即以 $Nd^{148}$ 的裂变额作为标准，这样处理有很大的优点，因一般对裂变的测定都是用同位素稀释质谱法测同位素间的比值。而不是绝对量，这样可以避免采用绝对量样品时的许多困难。例如以测定83~86质数链的裂变额为例：先得到相对于 $Nd^{148}$ 的裂变额，然后以 $Nd^{148}$ 的裂变额 $1.69 \pm 0.01$ 乘之，即可转换为它们的绝对裂变额如下表所示：

表一、83~86质数链相对于 $Nd^{148}$ 的裂变额 ( $U^{235}$ )

核种	相对于 $Nd^{148}$ 的相对裂变额 (三样平均值)
$Kr^{83}$	$0.3114 \pm 0.0042$
$Kr^{84}$	$0.5974 \pm 0.0077$
$Rb + Kr^{85}$	$0.7838 \pm 0.0051$
$Kr^{86}$	$1.1459 \pm 0.0098$

上表的相对裂变额以  $Nd^{148}$  的裂变额  $1.69 \pm 0.01$  校正后即可得到其各自的绝对裂变额, 如表二所示:

表二、 $Kr^{83} \sim Kr^{86}$  的绝对裂变额

$Kr^{83}$	$Kr^{84}$	$Rb + Kr^{85}$	$Kr^{86}$
$0.526 \pm 0.008$	$1.00 \pm 0.01$	$1.32 \pm 0.01$	$1.94 \pm 0.02$

除掉计数绝对裂变额是裂变数, 除测定的燃料监测体的裂变原子数外, 裂变额的计数都 (在重质峰内) 是在一个相对裂变额 100% 标准化的基础上进行的 (如图 2 所示)。

测得的相对无同号链 88 的 83~86 质号链的原子数  
标准化点

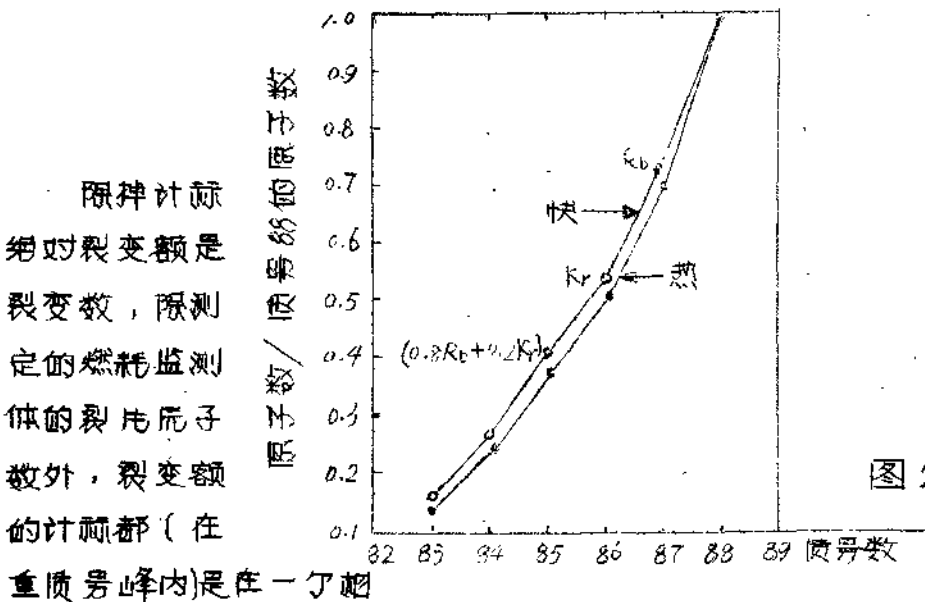


图 2.

除掉计数绝对裂变额是裂变数, 除测定的燃料监测体的裂变原子数外, 裂变额的计数都 (在重质峰内) 是在一个相对

.14.

对裂变额 100% 标准化的基础上进行的 (如图 2 所示)。

在重质号峰内材超过 20% 的裂变额是经实验测定过的, 其相对的不确定度约为 1%, 在其余的 20% 中经测得的组内对每个值标准指定其相对的不确定度最大为 20%, 则对每个单独裂变额的数值的不确定度只增加 2%。

值的相对裂变额都指定其相对不确定度为 20%, 按下式

$$\text{计标: } FY_j \% = 100 \frac{Y_j}{Y_j + \sum_{i \neq j} Y_i} \quad (1)$$

其中:  $Y_i, Y_j$  = 相对于  $N \times 10^{10}$  的节  $i$  及节  $j$  次裂变的各子裂变额。

按上式计标的裂变额与单独测得的裂变额相比较非常吻合, 如表 4 所示, 为了比较先列出实测的各种裂变的绝对裂变额 (平均值)。

表三. 由测得的裂变数计标  $U^{235}$  绝对裂变额

质号链	加权平均值	质号链	加权平均值	质号链	加权平均值
87	2.54 ± 0.01	90	5.90 ± 0.04	93	6.34 ± 0.04
88	3.61 ± 0.02	91	5.90 ± 0.03	94	6.41 ± 0.04
92	5.95 ± 0.03	106	6.389 ± 0.004	143	5.90 ± 0.03
95	6.45 ± 0.03	131	2.79 ± 0.04	144	5.42 ± 0.02
96	6.23 ± 0.04	132	4.16 ± 0.06	145	3.86 ± 0.02
97	5.86 ± 0.03	133	6.73 ± 0.04	146	2.95 ± 0.01
98	5.77 ± 0.03	134	7.51 ± 0.11	147	2.12 ± 0.04
99	6.14 ± 0.10	137	6.28 ± 0.03	148	1.69 ± 0.01
100	6.24 ± 0.03	138	6.80 ± 0.03	150	6.638 ± 0.004
101	5.03 ± 0.04	140	6.31 ± 0.03	151	0.408 ± 0.012
102	4.19 ± 0.04	141	5.50 ± 0.34 <sup>a</sup>	152	0.212 ± 0.006
104	1.82 ± 0.01	142	5.88 ± 0.03	154	0.0563 ± 0.0009

注: a 此表为放化测号法的结果。

表四：以标准化法计算以<sup>235</sup>U的绝对裂变率。

核素链	百分裂变率	核素链	百分裂变率	核素链	百分裂变率
Kr <sup>83</sup>	0.529 ± 0.012	Zr <sup>92</sup>	5.98 ± 0.11	Mo <sup>100</sup>	6.30 ± 0.11
Kr <sup>84</sup>	1.01 ± 0.022	Zr <sup>93</sup>	5.37 ± 0.11	Ru <sup>101</sup>	5.08 ± 0.09
Rb+Kr <sup>85</sup>	1.33 ± 0.02	Zr <sup>94</sup>	6.45 ± 0.12	Ku <sup>102</sup>	4.21 ± 0.08
Kr <sup>86</sup>	1.95 ± 0.04	Mo <sup>95</sup>	6.51 ± 0.12	Ru <sup>104</sup>	1.83 ± 0.03
Rb <sup>87</sup>	2.57 ± 0.05	Zr <sup>96</sup>	6.26 ± 0.11	Ru <sup>106</sup>	0.389 ± 0.008
Sr <sup>89</sup>	3.61 ± 0.06	Mo <sup>97</sup>	5.92 ± 0.11	Xe <sup>131</sup>	2.86 ± 0.007
Sr <sup>90</sup>	5.93 ± 0.11	Mo <sup>98</sup>	5.83 ± 0.10	Xe <sup>132</sup>	4.27 ± 0.10
Zr <sup>91</sup>	5.92 ± 0.11	Tc <sup>99</sup>	6.24 ± 0.12	Cs <sup>133</sup>	6.76 ± 0.12
Xe <sup>134</sup>	7.75 ± 0.18	Nd <sup>143</sup>	5.12 ± 0.11	Sm <sup>147</sup>	1.01 ± 0.02
Cs <sup>137</sup>	6.32 ± 0.11	Nd+Ce <sup>144</sup>	5.95 ± 0.10	Nd <sup>150</sup>	0.640 ± 0.012
Bd <sup>139</sup>	6.03 ± 0.12	Nd <sup>145</sup>	3.89 ± 0.07	Sm <sup>151</sup>	0.409 ± 0.014
Ce <sup>140</sup>	6.35 ± 0.11	Nd <sup>146</sup>	2.97 ± 0.05	Sm <sup>152</sup>	0.213 ± 0.007
Ce <sup>141</sup>	5.53 ± 0.35	Sm <sup>147</sup>	2.14 ± 0.05	Sm <sup>154</sup>	0.0564 ± 0.0011
Ce <sup>142</sup>	5.90 ± 0.11	Nd <sup>146</sup>	1.70 ± 0.03		

为了比较起见，下面列举Pu<sup>239</sup>相对及绝对裂变率。

核	加权平均值	核	加权平均值	核	加权平均值
Kr <sup>83</sup>	0.1772 ± 0.0021	118~130	3.74 ± 0.750 <sup>b</sup>	Nb <sup>123</sup>	2.642 ± 0.014
Kr <sup>84</sup>	0.2870 ± 0.0034	Xe <sup>131</sup>	2.122 ± 0.025	Ce+Nd <sup>142</sup>	2.226 ± 0.012
Rb+Kr <sup>85</sup>	0.4383 ± 0.0020	Xe <sup>132</sup>	3.002 ± 0.036	Nd <sup>145</sup>	1.787 ± 0.007
Kr <sup>86</sup>	0.4532 ± 0.0054	Cs <sup>133</sup>	4.229 ± 0.016	Nd <sup>146</sup>	1.469 ± 0.006
Rb <sup>87</sup>	0.5885 ± 0.0030	Xe <sup>134</sup>	4.239 ± 0.050	Sm <sup>147</sup>	1.264 ± 0.038
Sr <sup>88</sup>	0.7435 ± 0.0064	Xe <sup>135</sup> +Xe <sup>136</sup>	8.140 ± 0.077	Ni <sup>148</sup>	1.000
Sr <sup>90</sup>	1.233 ± 0.017	Cs <sup>137</sup>	3.470 ± 0.014	Sm <sup>149</sup>	0.7306 ± 0.0030
Zr <sup>91</sup>	1.482 ± 0.005	Ba <sup>138</sup>	3.181 ± 0.012	Nd <sup>150</sup>	0.5666 ± 0.021



Zr <sup>92</sup>	1.777 ± 0.006	139	3.37 ± 0.67 <sup>b</sup>	S <sub>m</sub> <sup>151</sup> S <sub>nc</sub> <sup>152</sup>	0.4776 ± 0.024 0.3423 ± 0.0172
Zr <sup>93</sup>	2.324 ± 0.008	Ce <sup>140</sup>	3.305 ± 0.013	153	0.214 ± 0.043 <sup>b</sup>
Zr <sup>94</sup>	2.651 ± 0.010	141	3.42 ± 0.68 <sup>b</sup>	S <sub>m</sub> <sup>154</sup>	0.1591 ± 0.0010
Zr <sup>96</sup>	3.015 ± 0.011	Ce <sup>142</sup>	2.971 ± 0.010	155~160	0.285 ± 0.057 <sup>b</sup>

注. b. 指估算产额。

表六 Pu<sup>239</sup>的绝对裂变产额。

质量数	裂变额 %	质量数	裂变额 %	质量数	裂变额 %
83	0.301 ± 0.006	97	5.64 ± 0.16	142	5.04 ± 0.11
84	0.487 ± 0.010	101	6.50 ± 0.28	143	4.48 ± 0.10
85	0.574 ± 0.011	102	6.65 ± 0.29	144	3.78 ± 0.08
86	0.770 ± 0.016	104	6.61 ± 0.24	145	3.03 ± 0.06
87	1.00 ± 0.02	106	4.55 ± 0.19	146	2.49 ± 0.05
88	1.35 ± 0.03	125	0.116 ± 0.014	147	2.15 ± 0.08
90	2.09 ± 0.04	131	3.60 ± 0.09	148	1.70 ± 0.03
91	2.52 ± 0.04	132	5.90 ± 0.12	149	1.24 ± 0.03
92	3.02 ± 0.05	133	7.18 ± 0.15	150	0.965 ± 0.020
93	3.95 ± 0.07	134	7.20 ± 0.17	151	0.811 ± 0.044
94	4.50 ± 0.08	137	6.74 ± 0.14	152	0.581 ± 0.031
95	4.86 ± 0.11	138	5.40 ± 0.11	154	0.270 ± 0.006
96	5.12 ± 0.09	140	5.61 ± 0.12		