

高等学校教学用书

人造放射性元素化学工艺学基础

Я. И. 齐里别尔曼著

朱建钧译

(高等学校内部发行)

人民教育出版社

高等学校教学用书



人造放射性元素化学工艺学基础

Я. И. 齐里别尔曼著

朱建钧译

吴征鎰、刘允斌校

人民教育出版社

本书系根据苏联国立原子科学技术书籍出版社(Госатомиздат) 1961年出版的齐里别尔曼(Я. И. Зильберман)著“人造放射性元素化学工艺学基础”(ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ)译出的。

本书可作为高等学校有关专业的教学参考书。对于从事这方面工作的科学工作者和工程师也有参考价值。

本书译稿由罗文宗、林璋基、邱孝熹、张文青和郭景儒五位同志分工校对。全稿并经吴征镒教授和刘允斌副教授校阅过，汪德熙教授曾校阅其中个别章节。

本书由中国科学院原子核编辑委员会组织翻译和校阅。

人造放射性元素化学工艺学基础

Я. И. 齐里别尔曼著

朱建鈞译

北京市书刊出版业营业许可證出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

京华印书局印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号K13010·1075 开本850×1168¹/₃₂ 印张11 插页1

字数263,000 印数0001—2000 定价(7)¥1.30

1962年12月第1版 1962年12月北京第1次印刷

前 言

和平利用原子能的問題是引起全世界科学家和工程师們注意的現代問題之一。核动力学和放射性元素工艺学基础的講授被納入許多高等学校的教学計劃中，可惜由于缺乏能概括已有的期刊中的和在第一、二次日內瓦国际和平利用原子能會議所提出的报告中的丰富資料的教科书，而使相应的学科的闡述和掌握感到困难。

本书的任务是系統地叙述人造放射性元素化学工艺学，首先是核燃料处理方面的知識。书中論述了被輻照后材料的处理方法，同时說明了电离輻射的化学和生物效应。本书沒有涉及那些还处在實驗室和实验装置研究阶段的核燃料处理方法。

书中所提出的理論在深度上只是为了达到了解工艺学过程的实质所必須的基础。本书系作者在以列宁格勒苏維埃命名的列宁格勒化工学院和以日丹諾夫命名的列宁格勒大学的講稿为基础編写而成。

引 言

中子的发现开辟了研究获取人造放射性元素工业方法的历史。

1930年波塞(Bothe)及别克尔(Becker)发现:在用 α 粒子轰击轻元素(铍、硼、锂)的时候放出一种穿透性很强的射线,他们把它当作 γ 射线。

1932年I.居里(I. Curie)及F.约里奥(F. Joliot)指出:当这种未知的射线打在含氢的化合物上时,该化合物就放出很高能量的质子。

在1932年末切特维克(Chadwick)推测,这种新的射线是由不带电的粒子所组成,他称该粒子为“中子”。这在制造放射性元素的过程中是很重要的第一步。

1933年F.约里奥及I.居里用 α 粒子轰击硼及用中子轰击钠时,首次得到了具有放射性的新元素。他们称这种元素为“放射性元素”。此后,成功地制得了周期表中几乎所有元素的放射性同位素。

1935年费米(Fermi)用中子轰击铀时,得到了一种新的放射性元素,这件事正与他所假定的相符,按照他的假定,这个元素应该占据铀后位置。然而“新的放射性元素”的衰变情况是如此复杂,以至全世界的学者们用了四年之久的时间不断地进行探索,才弄清这种现象的本质。

1939年1月发生一件事情,它从根本上改变了以前对核内能量利用可能性的怀疑态度。这就是由于哈恩(Hahn)及斯特拉斯曼(Strassmann)经过几年复杂的研究以后才解决了费米的“谜”,并且证明:在用中子轰击铀时,铀核裂变成两个在质量上不等的“碎片”。

这个发现的重要性在于由一个铀核生成两个周期表中部元素的核的同时,伴随着质量亏损。因此,根据爱因斯坦关于能量和质量等效原理,应该随着放出动能。

在这一连串的发现中的下一步就是由波尔(Bohr)提出的设想:在中子作用下铀-235能引起裂变,而铀-238则不能引起裂变。这种设想以后得到了实验证明。

以后又确定了在裂变过程中放出次级中子,并在铀-235裂变的同时,铀-238俘获次级中子,生成铀-239的核。

1940年Г. Н. 弗廖洛夫(Г. Н. Флёрв)及К. А. 彼得札克(К. А. Петржак)发现了铀的自发裂变。如果铀的裂变反应是链式的,就可以期待找到一种利用核内能量的方法。

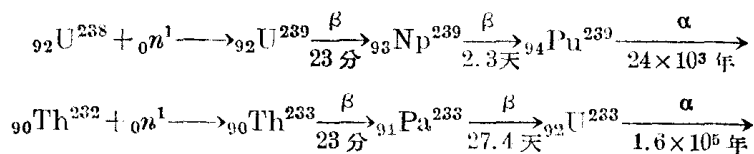
此后不久Ю. В. 哈立顿(Ю. В. Харитон)及Я. В. 谢里多维奇(Я. В. Зельдович)确定了产生具有链式特性的核过程的条件。这样要使链式反应能够进行必须在每一次裂变时,释放出一定数量的中子。

最后,在1940年麦克米伦(McMillan)及阿皮尔逊(Abelson)确定铀-239通过 β 衰变转化成原子序数为93的元素,而后者本身又转变成原子序数为94的元素,后来相应地分别称它们为“镎”及“钚”。

从1940年就开始了紧张而又极端秘密的工作,以制取可裂变物质及制造原子弹。

现在以工业规模制取人造元素是在专门的反应堆内进行的。在反应堆中为增殖中子所需的核燃料裂变的链式反应,是在人们所提供和控制的条件下进行的。

工业上利用了下列反应:



及其他反应。

以提取和净化铀-233和钚为目的而对照射过的物料进行化学处理是核燃料工艺学的任务,也是这一本人造放射性元素工艺学论述的对象。

目 录

前言	v
引言	vii
第一章 在核反应堆中制取核燃料	1
可裂变物质的再生产。反应堆运转的能量特性。铀核裂变。辐照后的铀由于裂变产物引起的放射性。辐照过的铀和钍中由于生成 β 及 γ 放射性的重元素所引起的放射性。文献。	
第二章 必要的净化程度；辐照过的物料在化学处理前的准备	23
核燃料中允许的杂质及必要的净化程度。同位素的质量与放射性的关系。辐照过的物料的老化、老化后裂变产物的比例关系。用居里及克镭当量表示的放射性之间的关系。释热元件的类型。辐照过的金属的溶解。文献。	
第三章 用载体分离微量组份的理论基础	45
放射性盐类在共同晶格中的载带。用吸附法提取放射性离子。吸附在分离照射过的物料中的裂变产物和提取超铀元素中的实际应用。文献。	
第四章 载体沉淀法分离钷和铀-233的化学和工艺学	69
钷的氧化-还原反应。沉淀法分出钷和铀-233。总的评论。文献。	
第五章 载体共沉淀法分离与净化铀和钷的工艺流程	87
氟化物-碘酸盐流程。磷酸盐-氟化物流程。氟化物-醋酸盐流程。文献。	
第六章 放射性胶体在核燃料工艺中的作用	103
某些元素形成放射性胶体的条件。文献。	
第七章 有机溶剂萃取的理论基础	114
无机萃取。基于丧失亲水性的萃取。文献。	
第八章 萃取过程的工艺流程	132
采用硝酸盐作为盐析剂的流程。应用硝酸作为盐析剂的流程。基	

	于应用络合剂的流程。TB中作为溶剂的优缺点。文献。	
第九章	化学元素在萃取过程中的行为	156
	铜系元素的行为。甲基异丁基酮提取铀、钍的条件。用酮提取钍和镭的条件。用磷酸三丁酯提取铀和钍的条件。用磷酸三丁酯提取钍和镭的条件。裂变产物的行为。文献。	
第十章	放射性元素的离子交换分离	173
	阳离子交换。阴离子交换。使用络合剂的淋洗。工艺参数对阳离子(稀土)分离效率的影响。文献。	
第十一章	电化学分离法	193
	文献。	
第十二章	放射化学工厂和实验室	208
	放射化学工厂安装-建筑的布置。放射化学实验室的建造。热实验室。放射化学生产的设备。生产控制。检修前设备的去污。保健。文献。	
第十三章	生产废物的处理	249
	气态废物。液体废物。固体废物。文献。	
第十四章	射线的化学作用	284
	α 粒子的作用。 β 粒子的作用。 γ 射线的作用。射线对化学键的作用。射线对有机化合物的作用。射线对应用于工艺上的某些有机物质的作用。射线对于水和水溶液的作用。文献。	
第十五章	辐射的生物作用。最大允许剂量	318
	生物反应。允许剂量。允许剂量率。文献。	
第十六章	γ射线的防护计算基础	332
	辐射强度与放射源的形状、大小及到它的距离间的相互关系。 γ 射线在(防护)介质中的减弱定律。防护计算举例。文献。	

第一章

在核反应堆中制取核燃料

人造核燃料是利用一种可裂变同位素的自持链式反应的特殊装置产生的，这种特殊装置称为核反应堆。反应堆根据其功用及经济上的性能分为热中子、快中子或中能中子等类别[1]。作为一种方便的动力系统，快中子堆是很有前途的。到目前为止建造的反应堆大多数是以热中子运转。这种反应堆有两种类型：核燃料是块状纯金属或化合物以有规则的格子排列在慢化剂中的非均匀堆，及核燃料与慢化剂均匀混合的均匀堆。大多数反应堆是再生堆，即供生产新的可裂变同位素之用。

可以用作原始核燃料的有：

- 1) 含有 99.28% 铀-238 及 0.714% 铀-235 的天然铀；
- 2) 使铀-235 浓缩到所需程度的浓缩铀；
- 3) 含有铀-235、铀-233 或钍-232 的各种合金或化合物。

铀-238 或钍-232 用作中子吸收剂。

生产新的核燃料及可裂变产物时，原始燃料和吸收剂可能有下列几种组合：

核燃料	.....	U ²³⁵	U ²³⁵	Pu ²³⁹	Pu ²³⁹	U ²³³	U ²³³
吸收剂	.....	U ²³⁸	Th ²³²	U ²³⁸	Th ²³²	U ²³⁸	Th ²³²
产物	.....	Pu ²³⁹	U ²³³	Pu ²³⁹	U ²³³	Pu ²³⁹	U ²³³

用一种材料来取代另一种材料时，应该考虑能得到某种收益，即：或是获得有效的功率；或是在燃料的价值及数量上有利可图；或是把不易直接分出和利用的可裂变同位素转化成另一种易分离的同位素。

可裂变物质的再生产

可裂变物质的再生产是基于：裂变时生成的中子仅有一部分消耗于链式反应，其余部分中子将被吸收剂吸收而生成一种新的可裂变同位素。

现在来讨论一下热中子反应堆的运转。在热中子(能量为 0.025 电子伏)作用下铀-238 及钍-232 并不裂变，而铀-235 则能裂变。每一个铀-235 核裂变时，平均放出 2.46 个中子。铀-235 俘获中子时并不是都发生裂变的，它也能发生中子的简单吸收而生成铀-236。裂变几率决定于裂变截面(580 靶)对总的俘获截面(687 靶)之比[2]。因此，在每次裂变时生成的 2.46 个中子中，有一部分(即 $580/687=0.8444$ 或者是 2.08 个中子)将参加下一步的链式反应，15.56% 的中子被铀-235 吸收而生成铀-236。只有用纯的铀-235 同位素进行裂变时才能得到这种中子产额。在天然铀或任何浓度铀-235 的浓缩铀的链式反应中，中子数将由于被铀-238 吸收而减少。关于这点能从中子吸收的宏观截面的计算得到证实。对于铀同位素的混合物，中子吸收宏观截面可以用下面方程式来计算

$$(\Sigma_a)_U = N_{U^{235}}(\sigma_a)_{U^{235}} + N_{U^{238}}(\sigma_a)_{U^{238}},$$

而铀-235 的裂变宏观截面方程式为

$$(\Sigma_f)_U = N_{U^{235}}(\sigma_f)_{U^{235}},$$

式中 σ_a ——有效吸收截面；

σ_f ——裂变截面；

$N = \frac{\rho N_a}{M}$ ——在 1 立方厘米中的原子核数；

N_a ——阿伏加德罗常数；

ρ ——密度；

M ——原子量。

对天然铀来说,用于裂变的中子占总中子数的分数为

$$\frac{N_{U^{235}}(\sigma_f)_{U^{235}}}{N_{U^{235}}(\sigma_a)_{U^{235}} + N_{U^{238}}(\sigma_a)_{U^{238}}} = \frac{580}{687 + 139 \times 2.75} = 0.543,$$

式中 139 为天然铀中 $N_{U^{235}}$ 与 $N_{U^{238}}$ 之比;

2.75 为铀-238 的吸收截面。

被铀-235 俘获生成铀-236 的中子分数将等于 $\frac{0.543}{0.844} \times 0.1556 = 0.10$ 。

因此,被铀-238 吸收而生成钚的中子分数为 $1 - (0.543 + 0.10) = 0.357$,即占总中子数的 35.7%。

如果全部过程都为热中子所作用,则可利用上述关系式计算核燃料再生的产量。实际上在过程中快中子也在一定程度上参加了反应,部分快中子消耗于铀-238 的裂变上,这样就使快中子增加了 3% 左右。其余部分的快中子在慢化过程中被铀-238 共振吸收,这就是生成钚的主要来源。对于一种用天然铀作为燃料的实验反应堆,穆雷(Murray) [1] 确定了有 10% 快中子用于共振吸收。最后,约有 4% 快中子从系统中跑出去而损失掉。因此,在原来 100 个中子中,只有 89 个中子用作热中子 ($100 + 3 - 10 - 4 = 89$)。

慢化至热能的中子也并不完全被铀所吸收,一部分被慢化剂和反应堆结构材料所吸收,一部分由于泄漏而损失掉。对于上述反应堆来说,这些损失量占原始快中子数的 12%,结果在 100 个快中子中用于生产热能的只有 $89 - 12 = 77$ 个中子。正像我们已经知道的,它们将以下列方式分配:被铀-238 吸收而生成钚,消耗 $77 \times 0.357 = 27.5$ 个中子;用于铀-235 裂变的有 $77 \times 0.543 = 41.5$ 个中子;剩余部分,即 $77 - (27.5 + 41.5) = 8$ 个中子用于铀-235 俘获生成铀-236。

现在来总结一下:总共有 $10 + 27.5 = 37.5\%$ 中子被吸收生成钚; 8% 中子被俘获生成铀-236; 41.5% 中子参加裂变的链式反应。在下一裂变中将重新生成 $41.5 \times 2.46 \approx 100$ 个快中子,全部过程又重复进行。

因此,在天然铀反应堆中,裂变消耗一克铀-235 (或者生成一克裂

变碎片)将产生 $\frac{37.5}{41.5} \approx 0.905$ 克钚, 而燃烧一克铀将产生 $\frac{37.5}{41.5+8} \approx 0.76$ 克钚及 $\frac{8}{41.5+8} \approx 0.16$ 克铀-236。

这些计算都是近似的*。用铀-233 作核燃料、钷-232 作吸收剂, 对核燃料的再生将更为有利。在理论上生成的铀-233(由钷得到)应比实际消耗的多 5~6%。这可用下面原因来解释: 铀-233 一次裂变产生 2.54 个中子[3], 而铀-233 的裂变截面对俘获截面(生成铀-234)及对钷-232 的吸收截面之比为 533:52:7 靶。

热中子钚反应堆不可能进行核燃料的再生产, 因为在动力堆的表征温度 400°C 的情况下, 钚的俘获截面与裂变截面之比值是很不合适的。有可能有效地利用钚于快中子反应堆, 因为对于快中子钚的俘获截面与裂变截面之比值使核燃料的再生产有可能。

反应堆运转的能量特性

铀裂变时放出大量能量。

铀的每个核子的结合能为 7.5 兆电子伏, 质量由 80 到 150 的绝大部分裂变碎片的核子平均结合能为 8.4 兆电子伏。因此, 在裂变时每个核子放出 0.9 兆电子伏的能量, 或者对于铀核来说, 总共放出大约 200 兆电子伏。

根据计算, 表达能量(兆电子伏)近似分配的能量平衡表如下[4,5]:

裂变碎片的动能·····	162
中子的动能·····	6

* 在反应堆长时间工作下, 特别是以浓缩铀为燃料时, 钚开始对钚中子平衡产生影响。钚的同位素对热中子的吸收截面为:

裂变截面(σ_f), 靶	俘获截面(σ_g), 靶	
Pu ²³⁹ ·····	750	315
Pu ²⁴⁰ ·····	<40	510
Pu ²⁴¹ ·····	1100	380

瞬息 γ 射线的能量.....	6
剩余中子吸收的能量.....	8
β 衰变的能量.....	5
γ 衰变的能量.....	5
中微子带走的能量.....	11
裂变的全部能量	203

在反应堆运转时，当裂变产物的衰变和它们的生成以同一速度进行时，所释放的能量达到最大值(对一次裂变产生192兆电子伏，即203兆电子伏减去中微子带走的能量)。

放出1瓦·秒能量所需的裂变数为[6]

$$\frac{1}{192} \cdot \frac{\text{兆电子伏}}{\text{兆电子伏}} \times \frac{\text{兆电子伏}}{1.6 \times 10^{-6} \text{ 尔格}} \times \frac{10^7 \text{ 尔格}}{\text{瓦} \cdot \text{秒}} = 3.25 \times 10^{10} \text{ 裂变/瓦} \cdot \text{秒},$$

即反应速度为 3.25×10^{10} 裂变/秒，相当于1瓦功率。

因此，可以计算出由裂变产生1兆瓦功率所消耗的铀-235:

$$\begin{aligned} \frac{3.25 \times 10^{10} \text{ 裂变}}{\text{瓦} \cdot \text{秒}} \times \frac{10^6 \text{ 瓦}}{\text{兆瓦}} \times \frac{8.64 \times 10^4 \text{ 秒}}{\text{昼夜}} \times \frac{\text{克原子}}{6.02 \times 10^{23} \text{ 裂变}} \times \frac{235 \text{ 克}}{\text{克原子}} &= \\ &= 1.1 \frac{\text{克}}{\text{兆瓦} \cdot \text{昼夜}}, \end{aligned}$$

即在一昼夜内1.1克铀-235的原子全部裂变能产生1兆瓦的功率(或放出能量为1兆瓦·昼夜)。

由于铀-236的生成，铀-235的实际消耗为 $\frac{1.10}{0.8444} = 1.3$ 克/兆瓦·昼夜。

因此，在消耗铀-235 130克/昼夜时，可以得到热功率100兆瓦。这相当于释放热

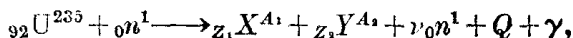
$$100 \times 10^6 \text{ 瓦} \times \frac{0.239 \text{ 卡}}{1 \text{ 瓦} \cdot \text{秒}} \times 3.6 \times 10^3 \frac{\text{秒}}{\text{小时}} = 0.86 \times 10^{11} \text{ 卡/小时},$$

$$\text{相应得到蒸汽} \frac{0.86 \times 10^{11}}{0.64 \times 10^9} = 1.3 \times 10^2 \frac{\text{吨}^*}{\text{小时}}.$$

* 每公斤蒸汽需640仟卡，或 0.64×10^9 卡/吨蒸汽。

铀核裂变

裂变过程可以用方程式表示



这里 X 及 Y——裂变碎片;

A_1 及 A_2 ——裂变碎片的质量数;

Z_1 及 Z_2 ——裂变碎片的电荷(原子序数);

ν ——次级中子数;

Q ——裂变碎片及中子的动能;

γ ——裂变过程中放出的射线。

部分铀-235 由于俘获中子转变成不裂变的铀-236; 其余的铀-235 每个核分裂成两个碎片, 同时放出 2 到 3 个中子。核裂变是不对称的, 两个碎片的质量最可能的比为 3:2。因此, 分裂结果产生两组碎片: 轻组-质量数由 72 到 117; 重组-质量数由 119 到 161。由慢中子引起的裂变反应的详细研究表明, 铀-235 有 30 种以上的分裂方式。

根据核物理概念, 裂变碎片的质量对它们的原子序数的比值过大时, 则具有放射性。通常是伴随有 γ 射线的 β 衰变过程。也有个别情况是碎片放出中子, 但是这种核的质量和原子序数比正好适合的可能性是很少的。必须指出: 由碎片核放出的中子迟缓于裂变放出的中子, 这些中子称为缓发中子, 它们在反应堆的控制上起着重要的作用。

铀-235 分裂的各种可能的方式有着不同的几率。裂变时碎片的产率决定于产生某质量数碎片的裂变数对裂变总数之比(百分数)。图 1 为碎片产率与质量数之间的关系。

很明显地表示出裂变碎片分为轻组和重组, 碎片质量数处在由 72 (锌) 到 161 (铯) 的区间中。

其他两种核燃料(铀-233 及钍-232) 的裂变也以类似的方式进行

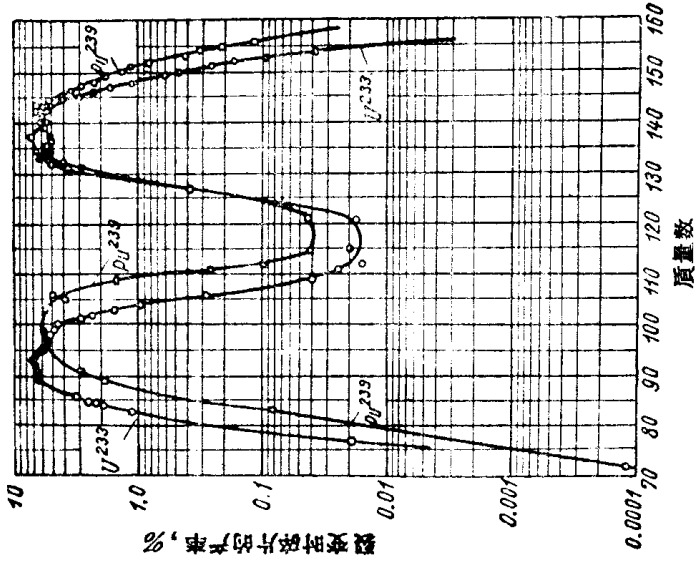


图 2. 铀-233 及铀-239 裂变时的碎片产率。

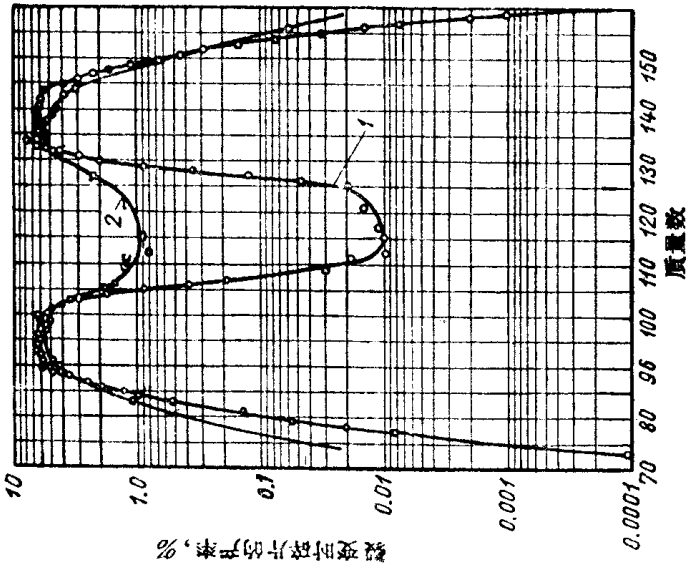


图 1. 铀-235 裂变时碎片产率与质量数的关系:

1—热中子;

2—中子能量为 14 兆电子伏。

(图 2)。

由图 2 可见，每一种碎片的产率由于原始的可裂变同位素质量不同稍有些变化，然而产率曲线的特征保持不变。同样可以从表 1 中看到裂变碎片在产率方面的差别。

表 1. 铀-233、铀-235 及钚-239 裂变时某些碎片的产率

碎片的质量数	裂变时碎片的产率, %			碎片的质量数	裂变时碎片的产率, %		
	U ²³³	U ²³⁵	Pu ²³⁹		U ²³³	U ²³⁵	Pu ²³⁹
轻 组				重 组			
89	6.5	4.8	1.9	127	0.09	0.13	0.37
91	4.1	5.8	3.0	131	2.7	3.1	3.8
103	1.6	3.0	5.8	140	6.0	6.4	5.6
106	0.28	0.38	5.0	144	4.1	6.0	5.3
111	0.025	0.018	0.27				

因为每一次裂变获得两个核，所以说一次核裂变的碎片的总产率为 200%。

几乎所有的裂变碎片都是带有放射性的，通常是 β 衰变。这种衰变并不引起质量的变化，然而每放出一个电子导致原子序数的增加。原始的裂变碎片核的半衰期是很短的，随着衰变的进行，以后的核变得愈来愈稳定，即它们的半衰期增长了。这样每个原始的放射性核给出特征性的放射“链”。核燃料工艺学的任务之一，是基于燃料及裂变碎片的物理化学性质而设法净化燃料除掉裂变碎片。

一般核燃料从反应堆取出放置几十天后再进行净化。在此时间之后，由于碎片的放射性衰变，照射过的物料的放射性下降了，而且半衰期短的碎片几乎完全消失掉。只有在衰变链后部生成的某些半衰期比较长的和产率比较大的同位素才具有工业意义[7,8](见第 10—12 页)。

衰变链有不同的长度，每一个碎片平均经过三步衰变然后生成稳定性同位素。某些具有工业意义的裂变产物的数据总结在表 2 中[6,

8, 9, 10]。

表 2. 具有工业意义的长寿命裂变碎片

同 位 素	半 衰 期	产 率 %	β 能量, 兆电子伏	γ 能量, 兆电子伏
易挥发的:				
Xe ¹³³	5.3 天	6.5	0.35	0.081
I ¹³¹	8.0 天	3.1	0.608	0.364
Ru ¹⁰³ →Rh ¹⁰³	42天/57分	3.0	0.217/—	0.498/0.040
Ru ¹⁰⁶ →Rh ¹⁰⁶	1年/30秒	0.38	0.39/3.53; 3.1; 9.44	—/1.04; 0.62; 0.51
Kr ⁸⁵	10.3年	0.29	0.695	0.54
长寿命的 β 和 γ 放射体:				
Nd ¹⁴⁷	11.3天	2.7	0.83; 0.60; 0.38	0.53; 0.32; 0.092
Ba ¹⁴⁰ →La ¹⁴⁰	12.8天/40小时	6.4	1.02; 0.48/1.32; 1.67	0.57; 0.19/2.55; 1.62; 0.82; 0.49
Eu ¹⁵⁶	15.4天	0.013	2.40; 0.5	2.0
Ce ¹⁴¹	33天	6.0	0.58; 0.442	0.15
Te ^{129m} →Te ¹²⁹	37天/72分	0.35	1.8	0.106/0.3; 0.8
Ru ¹⁰³ →Rh ¹⁰³	42天/57分	3.0	0.217/—	0.498/0.040
Zr ⁹⁵ →Nb ⁹⁵	65天/35天	6.4	0.371/0.160	0.76/0.745
Ce ¹⁴⁴ →Pr ¹⁴⁴	282天/17.4分	6.0	0.3; 0.17/2.97	0.134/—
Ru ¹⁰⁶ →Rh ¹⁰⁶	1年/30秒	0.38	0.39/3.53; 3.1; 2.44	—/2.40; 1.25; 0.51
Sb ¹²⁵	2年	0.021	0.616; 0.299	0.609; 0.431; 0.714
Cs ¹³⁷	29年	6.0	0.51	0.66
不放出 γ 射线的长寿命的 β 放射体:				
Pr ¹⁴³	13.7天	5.7	0.92	—
Sr ⁸⁹	51天	4.8	1.48	—
Y ⁹¹	57天	5.8	1.54	—
Te ^{127m} →Te ¹²⁷	105天/9.3小时	0.13	—/0.7	—
Eu ¹⁵⁵	1.9年	0.03	0.154; 0.243	—
Pm ¹⁴⁷	2.6年	2.7	0.227	—
Sr ⁹⁰ →Y ⁹⁰	28年/61小时	5.8	0.6/2.18	—