

785566

HERANLIAO HUAXUE

34341

7572

中国科学院图书馆

基本藏书

核燃料化学



陈与德 王文基
王志麟 周祖铭
编



原子能出版社

7572

核 燃 料 化 学

陈与德 王文基 编
王志麟 周祖铭
王文清 主 审

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了铀、钍、钷的基本化学。内容包括：铀、钍、钷的原子结构与核性质、络合物化学、氧化还原反应、水解聚合与沉淀反应、萃取化学、离子交换反应、金属、氧化物与氟化物的化学等。后两章还简要介绍了前处理工艺及后处理工艺。

本书可作为综合性大学放化专业的试用教材，以及供工科大学有关专业及从事放化工作的科技人员参考。

核 能 料 化 学

陈与德 王文基 编
王志麟 周祖铭

王文清 主审

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张27⁵/₈·字数660千字

1985年4月第一版·1985年4月第一次印刷：

印数1—1500·统一书号：15175·490

定价：5.05元

前 言

根据 1978 年 9 月二机部(现核工业部)教育局青岛教材会议制订的教材编写大纲,我们编写了《核燃料化学》。

根据专业基础课的要求,我们在编写过程中对基础理论作了加强,将铀、钍、钷联系在一起进行讨论。着重介绍了铀、钍、钷的基本性质及有关铀、钍、钷化学的基础理论,在最后两章中还简要介绍了前处理工艺及后处理工艺,以便了解核燃料工艺的概况,并且达到理论联系实际的目的。本书为考虑一些放化专业技术人员的需要,还适当列入了一些参考文献。

本书由复旦大学放化教研组王文基(第三、九章、第四章第一节)、王志麟(绪论、第一、六章、第四章第四节)、周祖铭(第七、八章)、陈与德(第二、五章、第四章第二、三节)共同编写,由陈与德担任主编,北京大学王文清担任主审,参加审校的还有施乃、吴季兰、江林根、高宏成、谌竟清。

本书在编写过程中曾得到有关所、厂、矿及兄弟院校的大力帮助,秦启宗、郑企克等同志都提出过宝贵意见,特此致谢。

由于作者水平的限制,编写时间比较匆促,不足之处在所难免,欢迎读者提出宝贵意见。

编者 1981年

目 录

绪 论

第一节 核能和核裂变	1
一、核能	1
二、核裂变	2
三、核聚变	3
第二节 核燃料	4
一、自持链式反应的条件	4
二、可用于反应堆的核燃料	5
三、核燃料的增殖和转换	7
四、核纯度	8
第三节 核燃料的循环	9
参考文献	10

第一章 铀、钍、钷的原子结构及核性质

第一节 原子结构	11
一、镧系理论	11
二、镧系元素的电子结构	14
第二节 铀、钍、钷在自然界的存在及其核性质	16
一、铀	16
二、钍	19
三、钷	21
四、铀钍放射系	25
五、习题	32
参考文献	32

第二章 铀、钍、钷的络合物化学

第一节 络合物化学的基本概念	34
第二节 络合物稳定常数与络合物的稳定性	36
一、络合物稳定常数	36
二、络合物稳定常数的测定	40
三、离子极化原理与络合物稳定常数的计算式	45
四、影响络合物稳定性的因素	48
五、络合物稳定常数间的相互关系	52

第三节 铀、钍、钷的络合物化学	53
一、铀的络合物化学	53
二、钍的络合物化学	69
三、钷的络合物化学	69
第四节 铀、钍、钷的有色螯合物化学	72
一、金属络合物的可见及紫外光谱	72
二、铀、钍、钷的有色螯合物	74
第五节 铀、钍、钷的水溶性螯合物	80
一、常见的水溶性螯合物	80
二、铀、钍、钷的络合滴定	82
三、掩蔽作用	86
四、习题	87
参考文献	89

第三章 铀、钍、钷的氧化与还原反应

第一节 价态与电位	90
一、铀、钍和钷各价态概述	90
二、电位与平衡常数	93
第二节 歧化反应	99
一、U(V)的歧化	100
二、Pu(IV)的歧化	101
三、Pu(V)的歧化与Pu(III)-Pu(IV)-Pu(V)-Pu(VI)平衡	103
第三节 反应动力学	106
一、氧化还原过程与反应速率	106
二、铀的氧化还原反应动力学	107
三、钷的氧化还原反应动力学	115
第四节 辐射对价态的影响	118
一、 α 辐射效应	118
二、 γ 和X辐射效应	120
第五节 光化学效应	121
一、光化学效应与氧化还原	121
二、铀酰的光化还原	123
三、钷的光致氧化还原	131
第六节 各价态离子的制备	133
一、U(III)的制备	134
二、U(IV)的制备	135
三、U(VI)和U(V)的制备	137
四、Pu(III)的制备	138
五、Pu(IV)的制备	139

六、Pu(V) 和Pu(VI) 的制备	139
七、Pu(VII) 的制备	140
八、钚的各种价态的检测	140
九、习题	142
参考文献	142

第四章 水解、聚合与沉淀反应

第一节 水解与聚合	143
一、Th(IV) 的水解与聚合	144
二、铀的水解与聚合	145
三、钚的水解与聚合	147
第二节 溶解与沉淀	151
一、溶解度的变化规律	151
二、沉淀反应平衡	153
第三节 难溶化合物	162
一、重铀酸铵及氢氧化物沉淀	162
二、过氧化物	163
三、草酸盐	164
四、磷酸盐	165
五、其它难溶化合物	166
第四节 水溶性盐	167
一、硝酸盐	167
二、硫酸盐	171
三、氯化物	175
参考文献	179

第五章 铀、钍、钚的萃取化学

第一节 物质在有机溶剂中的溶解度	180
一、溶剂的性质	180
二、物质在有机溶剂中的溶解度	182
第二节 萃取的基本介绍	188
一、分配定律	188
二、分配比、萃取率和分离系数	189
三、被萃取物的性质与萃取的分类	190
四、简单分子萃取	191
第三节 中性溶剂合物萃取	194
一、磷酸三丁酯的萃取	194
二、各类中性有机磷化合物的萃取	205
三、中性含氧萃取剂及其它中性萃取剂的萃取	212

第四节 阳离子交换萃取	216
一、螯合物萃取	216
二、酸性磷类萃取剂的萃取	231
三、有机羧酸盐及有机磺酸盐的萃取	238
第五节 离子缔合萃取	239
一、胺类萃取剂与金属络阴离子的离子缔合萃取	239
二、金属以络阴离子形式被萃取的其它离子缔合体系	248
三、金属以阳离子形式被萃取的离子缔合体系	249
第六节 协同萃取	253
一、阳离子交换与中性络合协萃体系	254
二、其它协萃体系	258
第七节 萃取机理的研究	259
一、分配比测定法	259
二、一些经典的研究方法	261
三、两相滴定法	263
四、各种谱仪对萃取机理的研究	264
五、萃取化学结束语	267
六、习题	273
参考文献	273

第六章 离子交换反应

第一节 离子交换树脂的一般性质	276
一、结构与分类	276
二、决定树脂性能的一些因素	281
第二节 离子交换平衡	283
一、溶胀平衡	283
二、电解质和非电解质的吸附及唐南平衡	287
三、离子交换的选择性	289
第三节 离子交换过程的动力学	294
一、离子交换速率	294
二、影响交换速率的一些因素	296
第四节 离子交换分离操作程序	299
一、树脂的选择及预处理	299
二、装柱和转型	300
三、吸附和解吸	301
四、树脂的再生	301
第五节 络合物的离子交换	302
一、络合剂存在下的阳离子交换	302
二、络合剂存在下的阴离子交换	304

三、离子交换法测定络合物的稳定常数	307
第六节 阴离子交换法提取铀	313
一、酸性浸出液中铀的吸附	314
二、影响铀的吸附的因素	315
三、树脂中毒	317
四、碱性浸出液中铀的吸附	318
五、习题	319
参考文献	319

第七章 金属、氯化物与氟化物的化学

第一节 热力学基础	320
一、化学反应的热效应	320
二、化学反应的方向与限度	323
第二节 金属铀、钍、钷	328
一、制备	328
二、性质	335
第三节 铀、钍、钷的氧化物	339
一、铀的氧化物	339
二、钍的氧化物	345
三、钷的氧化物	346
第四节 铀、钍、钷的氟化物	349
一、三氟化物	349
二、四氟化物	350
三、六氟化物	354
四、习题	358
参考文献	359

第八章 铀和钍的生产工艺

第一节 铀的生产工艺	360
一、矿物资源	360
二、铀矿石的预处理	361
三、铀矿石的浸出	362
四、铀的浓缩与纯化	367
五、铀的氧化物、氟化物和金属铀的生产	383
第二节 钍的生产工艺	385
一、钍矿石及其预处理	385
二、独居石的分解	386
三、钍的精制	389
参考文献	391

第九章 核燃料后处理工艺

第一节 核燃料后处理概况	392
一、核燃料后处理的任务与要求	392
二、核燃料后处理方法概述	394
第二节 辐照核燃料的冷却、去壳和溶解	396
一、核燃料体系	396
二、辐照核燃料元件的冷却	397
三、元件的去壳	398
四、燃料芯的溶解	401
第三节 普雷克斯 (Purex) 流程	403
一、流程概述	403
二、铀、钚和裂变产物的 TBP 萃取化学	405
三、钚的价态调节	417
四、溶剂的降解	420
第四节 超铀核素和裂片核素的提取	422
一、镎-237 的提取	422
二、铯-137 的提取	426
三、锶-90 的提取	427
四、钷-147 的提取	429
五、镅-99 的提取	430
六、镅和钷的提取	431
参考文献	431

绪 论

核燃料化学以核燃料作为研究对象。核燃料是可以进行裂变或聚变反应、并能释放出巨大能量——核能的物质。因此，从广义上说，核燃料包括可裂变物质和可聚变物质。在本书中只限于讨论裂变核燃料。由于钍-232和铀-238是生产可裂变物质的核原料，且其本身也能被快中子所分裂，在习惯上也统称为核燃料。因此，本书所涉及的核燃料包括裂变燃料和核原料——铀、钍和钷等。

第一节 核能和核裂变

一、核 能^[1-3]

核能，也称原子能，它的发现和发展还只有三十多年的历史。但是，它的出现标志着科学技术史上的重大发展，为人类开发和利用新的能源开辟了极为广阔的前景。

现代社会的发展对于能源的需求量越来越大。世界上一次能源*的用量，1900年为13.4亿吨标准燃料，1970年为72亿吨，预计2000年将达250亿吨。目前使用的能源中，石油、天然气和煤的比重占90%以上。实践表明，人类对能源的需求，不能只靠这些有机燃料，因为它们的储量有限。据估计，已查明的资源仅够使用一百至一百五十年。同时，煤、石油和天然气又是珍贵的化学工业原料。因此，探索 and 开发新能源是十分紧迫的任务。可以预料，到廿一世纪，核能将在满足人类对能源的需求中发挥重要的作用。

核能的获得主要有两种途径：一种是重核裂变；另一种是轻核聚变。原子核在裂变或聚变过程中释放出来的能量非常巨大。例如一个铀-235原子核发生裂变时，平均会释放出大约200兆电子伏特的能量；而一个碳原子燃烧生成二氧化碳时，只释放出4.1电子伏特的能量。因此，1克铀-235裂变所释放的能量，相当于两吨半优质煤完全燃烧时所释放出的能量。同样重量的轻核聚变时，放出的能量比重核裂变时还要大几倍。例如，1克氘化锂(^6Li)完全反应时所产生的能量约为1克铀-235裂变能的三倍。

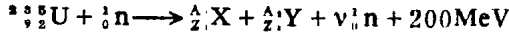
地球上蕴藏的核能资源十分丰富。据估计，目前已探明的陆上的铀矿和钍矿资源，按蕴藏的能量计算，大约相当于已知的地下煤资源的七倍，或者石油资源的一百倍以上。如再考虑大海中铀的蕴藏量（约四十五亿吨铀），特别是预计到不久的将来受控聚变反应的实现和聚变能的利用，则海水中的氘都成为可用的燃料，一吨海水就相当于三百五十吨煤，足以满足人类一百亿年的需要，为人类的能源供应展示了宏伟的前景。

* 一次能源包括煤、石油、天然气、核能、太阳能和水能等，而电力等一般称之为二次能源，系采用一次能源转换来的。

二、核 裂 变

1939年哈恩(O. Hahn)发现了铀核裂变现象。在慢中子轰击下,铀-235原子核俘获一个中子并立即发生分裂,生成两个原子序数和质量数都不相同的碎片——新核(有时也分裂成三块或四块碎片),同时产生2—3个新的中子,并释放出很大的能量(约200MeV)。

铀-235的裂变过程可由下式表示:



式中: X和Y——裂变过程所产生的碎片;

A_1 和 A_2 ——裂变碎片的质量数;

Z_1 和 Z_2 ——裂变碎片的原子序数;

ν ——裂变过程中产生的新的中子数。

在上述反应中,平均每一个核子放出的能量是:

$$\frac{200}{235+1}\text{MeV/核子} = 0.85\text{MeV/核子}$$

在原子核裂变过程所释放出的能量中,其主要部分(80%以上)是以裂变碎片的动能形式出现,这种动能立即转化为热能,其余部分则以瞬发 γ 射线和裂变中子动能形式以及放射性裂变产物的 β 、 γ 衰变能量等形式出现(表1)。

裂变过程中释放出来的大量能量,来源于裂变过程中的质量亏损。即裂变产物的总质量,小于发生裂变的核加上引起裂变的中子的总质量。这种裂变过程中的质量亏损也反映在裂变前后核的平均结合能的变化上。结合能是核子结合成原子核时放出的能量,结合能除以核子的总数就得到每个核子在原子核中的平均结合能。由结合能曲线(图1)可以看到,中等质量的原子核结合最牢,平均结合能最大;较重和较轻的原子核的平均结合能都略小。因此,当一个质量数为235的铀原子核分裂为两个中等质量数的新核时,则两个新核的结合能之和就大于原来铀核的结合能。裂变前后结合能之差,即裂变过程中释放的能量。例如,从结合能曲线可以看到,铀核的每一个核子的平均结合能约为7.5 MeV,裂变后生成的两个中等质量数新核的核子结合能,平均约为8.4MeV,每一个铀-235核有235个核子,因此裂变过程中释放出来的能量即为:

$$235 \times (8.4 - 7.5) \approx 200\text{MeV}$$

铀核裂变时,每一个重核除了分裂成两块具有中等质量数的裂变碎片和释放出大量能量外,还产生2—3个快中子(速度约20000公里/秒)。在适当条件下,这些中子会被另一些铀核所吸收,再引起裂变,于是产生更多的中子,从而引起更多的铀-235裂变,如此连续进行下去,形成链式反应(图2)。

如对链式反应不加控制,则在极短时间内(小于百万分之一秒),将有大量铀-235核裂变,释放出巨大能量,从而发生爆炸。原子弹爆炸即利用此原理。在原子弹爆炸时,由于巨

表1 裂变能的分配 (MeV) [4]

裂变碎片动能	168±5
瞬发 γ 射线能量	5±1
裂变中子动能	5±0.5
裂变产物的 β 粒子	7±1
裂变产物的 γ 射线	6±1
中微子	~10
总裂变能	201±6

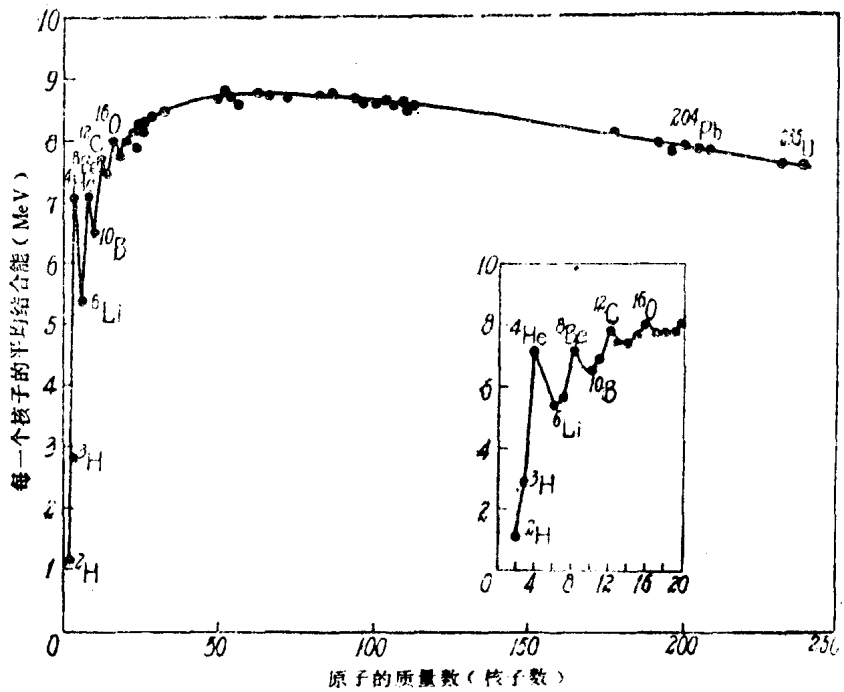


图1 平均结合能曲线^[4]

大裂变能的释放，爆炸中心的温度可上升到上千万度，压力上升到几十亿个大气压，把一切物质化为气体，形成一团火球，从而产生冲击波、光热辐射、贯穿辐射和放射性污染等杀伤因素。一般的原子弹的爆炸威力相当于两万吨梯恩梯 (T.N.T.) 炸药。用作原子弹的裂变物质可以是高纯的 ^{235}U (93.5% 以上)，或者是 ^{239}Pu 或 ^{233}U 。

如果能够控制这种裂变链式反应，使它保持在一定的程度进行而不引起爆炸，人们就可以按照自己的需要来利用这一巨大的核能。反应堆就是维持和控制裂变链式反应的装置，它能将巨大的核裂变能以一定功率持续地输出。所以，反应堆也称为原子锅炉。

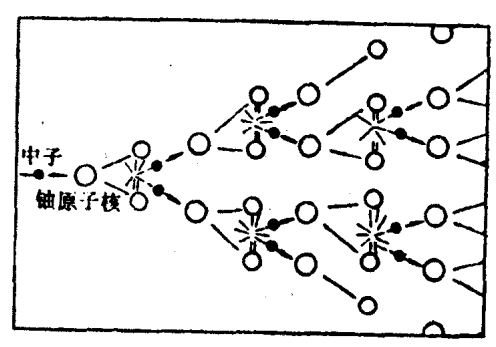


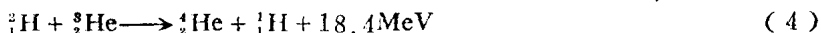
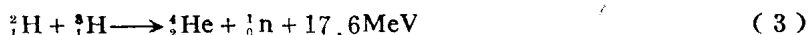
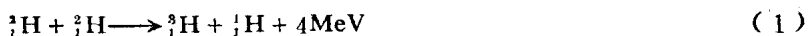
图2 铀的裂变链式反应^[5]

三、核 聚 变

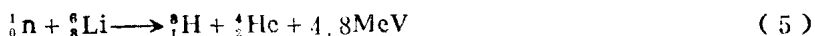
聚变反应是质量很轻的核聚合成质量较重的核的反应。由结合能曲线可以看到，不仅重核分裂成中等核时能释放能量，两个轻核聚合成一个较重核时也会释放出能量，即聚变能

在核聚变过程中，由于参与聚变反应的原子核之间有很强的静电斥力，只有当原子核具有足够的动能时，才能克服这种斥力而互相接近，发生核反应。因此，通常是使原子核处于非常高的温度，例如几千万度，这时有相当多的核具有足够的动能，实现聚合反应。同时，反应中放出的热量又导致温度的升高，使反应加速进行，造成了自持的聚变反应。由于聚变反应是在高温下进行的，所以，这样的聚变反应又称为热核反应。

聚变反应中通常考虑的是以下几种反应：



上述各反应中，以反应(3)氘-氚反应的反应截面最大，且放出的能量也多。但氚在自然界中不存在，可在反应堆中用锂的同位素 ${}^6_3\text{Li}$ 来生产氚：



这样，合并(3)式和(5)式可以得到：



平均每个核子放出的能量为 $\frac{22.4}{8}\text{MeV}/\text{核子} = 2.8\text{MeV}/\text{核子}$ 。

热核反应在自然界早已存在，它是太阳以及一切恒星的能量来源。不可控的热核反应，人类也已经实现，这就是氢弹。氢弹是人们利用热核反应的一种核武器。在氢弹中除了装有聚变燃料氘和氚外，通常还装有可裂变物质，利用可裂变物质引起爆炸时产生的高温来点燃氘氚的聚变反应。氢弹的爆炸威力一般要比原子弹大几十倍到上千倍。

为了使聚变能为人类服务，世界各国正在积极研究和探索可控热核反应，目前已经取得了一些可喜的进步。可以相信，随着科学的发展，这一取之不尽的能源为人类服务的时候将为期不会太远了。

第二节 核 燃 料

一、自持链式反应的条件

反应堆是维持裂变链式反应的进行，并可以人为地控制反应快慢的装置。通过反应堆可以将核裂变能转变为一定功率的热能或电能。反应堆也常用于生产新的可裂变物质。

反应堆要维持裂变链式反应持续不断地进行，同时又要控制反应速度，使链式反应保持在一定程度上，主要的关键是控制中子的数目，保持中子的平衡。中子是实现裂变链式反应的媒介。维持链式反应的基本条件是：平均每一个核裂变时所放出的中子中，至少要有一个中子能够引起另一个核发生裂变。在反应堆中，并非每一个中子都能引起新的核裂变。在中子与反应堆内各种物质作用的过程中，有些过程会使中子增加，而有些过程则使中子损失。因此，中子的平衡是由中子参与以下各过程的相对程度所决定。

1. 各种能量的中子被可裂变物质吸收并引起核裂变，这样的过程由于裂变产生新的中子，结果使中子数目增加；

2. 一部分中子被可裂变物质俘获，发生 (n, γ) 反应，而不发生裂变，这一过程使中子数目减少；

3. 中子被堆内材料和杂质吸收，使中子数目减少；

4. 部分中子飞逸出系统之外，造成中子损失。

通常裂变链式反应进行的条件可用中子有效增殖因数 K_{eff} 来表示。 K_{eff} 就是在某一时间

内（或某一代内），由裂变而产生的中子数与在各种过程中消耗掉的中子总数（包括引起裂变所用去的中子数）的比值。

$$K_{\text{有效}} = \frac{\text{裂变产生的中子数}}{\text{各种过程消耗的中子总数}}$$

$K_{\text{有效}} = 1$ ，即中子数目保持不变，链式反应得以持续进行，在单位时间内发生裂变的核数保持不变，这时称反应堆处于“临界状态”，反应堆以恒定的功率运转。

$K_{\text{有效}} > 1$ ，中子数目将越来越多，功率不断增长，反应堆处于“超临界状态”。这时，若不加控制任其无限增加下去，将可能发生反应堆事故。

$K_{\text{有效}} < 1$ ，中子数目越来越少，链式反应将不能维持，功率将逐渐减小。这时，反应堆处于“次临界状态”，链式反应将很快停止。

由此可见，要使链式反应能够持续、恒定地进行，在反应堆的设计；核燃料和反应堆材料的选用时，必须考虑尽量减少中子的损失和控制中子的平衡。这就要求：必须选择那些吸收中子能力小、纯度高的材料作反应堆的各种材料，尽量减少因被吸收而损失的中子数；反应堆设计要考虑防止和减少中子的泄漏；适当增加反应堆的体积和核燃料的用量，以利于维持链式反应的进行；此外，反应堆还必须设有控制装置，以控制和调节反应堆的运行功率。

二、可用于反应堆的核燃料

反应堆中子在与重核作用时可能产生下列核反应：

- (1) 引起核裂变，裂变截面为 σ_f ；
- (2) 辐射俘获，俘获截面为 σ_c ；
- (3) 弹性散射；
- (4) 非弹性散射。

作为反应堆裂变燃料，必须具有较高裂变截面、较低辐射俘获截面、较长半衰期和容易获得等条件。许多重核在与中子作用时都能引起核裂变，但是，目前能用作反应堆裂变燃料的还不多。许多超重核具有较高裂变截面（表2），如 ^{246}Cm 、 ^{249}Cf 、 ^{251}Cf 和 $^{242\text{m}}\text{Am}$ 等，尤以 $^{242\text{m}}\text{Am}$ 具有很高的热中子裂变截面（ $\sigma_f = 6600$ 靶）。裂变截面愈高，就可使临界质量愈小，从而使反应堆的体积也愈小。例如，无反射层时， ^{235}U 的临界质量为 22.8 公斤，而 $^{242\text{m}}\text{Am}$ 的临界质量只有 23 克。因此，这些核素在将来可能被用作宇宙飞船中小型反应堆的裂变燃料。至今，已用于反应堆的裂变燃料仅有 ^{235}U 、 ^{239}Pu 和 ^{233}U 三种。其中， ^{235}U 天然存在， ^{239}Pu 和 ^{233}U 则系利用 ^{238}U 和 ^{232}Th 通过反应堆生产。

表4列出了几种核燃料的裂变常数。可以看到， ^{235}U 、 ^{239}Pu 和 ^{233}U 不仅可吸收热中子而引起裂变，同时也可被快中子分裂。并且，在用快中子裂变时，每吸收一个中子产生的平均中子数 (η) 都比热中子裂变时高。如铀-235 被热中子裂变时，每次裂变平均放出 2.43 个中子，但由于存在辐射俘获，故铀-235 核每吸收一个中子，平均产生的中子数 (η) 只有 2.07 个。但用快中子裂变时， η 值就可提高到 2.57 个。这是很重要的，因为 η 值的大小与计算中子平衡有关，并与增殖比关系很大。

^{238}U 和 ^{232}Th 不能被热中子分裂，只有能量大于 1.1MeV 的快中子才有可能使其裂

变,但其裂变几率比非弹性散射几率小得多,因此绝大部分高能中子都因非弹性散射而损耗能量。而当中子能量为几十电子伏时,俘获几率最大。

天然铀中仅含有0.714%的 ^{235}U ,绝大部分是 ^{238}U 。但热中子在天然铀中引起 ^{235}U 裂变的几率比被 ^{238}U 俘获的几率约大200多倍,因此,天然铀虽然只含有约1/140的 ^{235}U ,但它被中子分裂的几率还是超过了 ^{238}U 俘获的几率。所以,反应堆也可以直接利用天然铀作为核燃料。但用天然铀作燃料的反应堆,其体积较大,功率较小。为提高反应堆的功率或军事上的需要,就需进行同位素分离,将 ^{235}U 浓集,由于 ^{235}U 和 ^{238}U 的性质差异极微,所以分离过程极为复杂,目前工业分离主要采用气体扩散法。

表 2 某些重核的热中子裂变截面和俘获截面^[6-8]

核素	σ_f 靶	σ_c 靶	半衰期	主要获得方法
^{227}Th	200		18.2天	$^{226}\text{Ra}(n,\gamma)^{227}\text{Ra} \xrightarrow{\beta}$
^{229}Th	30.5	54	7340年	铀人工放射系成员
^{230}Pa	1500		17.7天	$^{232}\text{Th}(d,4n)$
^{231}Pa	700	760	1.31天	$^{232}\text{Th}(d,2n)$
^{234}Pa	<5000		6.75小时	铀天然放射系成员
^{234m}Pa	<500		1.17分	铀天然放射系成员
^{231}U	400		4.2天	$^{231}\text{Pa}(d,2n)$
^{232}U	75.2	73.1	72年	$^{233}\text{U}(n,2n)$
^{233}U	530.6	47.0	1.58×10^5 年	$^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{Th} \xrightarrow{\beta} ^{233}\text{Pa} \xrightarrow{\beta}$
^{235}U	580.2	98.3	7.1×10^8 年	天然存在
^{234}Np	900		4.4天	$^{233}\text{U}(d,n)$
^{236}Np	2500	1600	>5000年	$^{235}\text{U}(d,4n)$
^{238}Np	2070		2.117天	$^{235}\text{U}(d,2n)$
^{237}Pu	2400		45.6天	$^{235}\text{U}(\alpha,2n)$
^{238}Pu	16.5	547	87.75年	$^{235}\text{U}(d,2n)^{238}\text{Np} \xrightarrow{\beta}$
^{239}Pu	741.6	271.3	24400年	$^{235}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta}$
^{240}Pu	0.03	289.5	6600年	$^{239}\text{Pu}(n,\gamma)$
^{241}Pu	1009	368	15.2年	$^{240}\text{Pu}(n,\gamma)$
^{242}Pu	<0.2	18.5	3.87×10^5 年	$^{241}\text{Pu}(n,\gamma)$
^{243}Pu	196	60	4.955小时	$^{242}\text{Pu}(n,\gamma)$
^{241}Am	3.15	832	433年	$^{241}\text{Pu} \xrightarrow{\beta^-}$
^{242}Am	2900		16小时	$^{241}\text{Am}(n,\gamma)$
^{243m}Am	6600	1400	152年	$^{241}\text{Am}(n,\gamma)$
^{244m}Am	1600		26分	$^{243}\text{Am}(n,\gamma)$
^{244}Am	2300		10.1小时	$^{243}\text{Am}(n,\gamma)$
^{242}Cm	5	16	163天	$^{242}\text{Am} \xrightarrow{\beta^-}$
^{243}Cm	600	225	32年	$^{242}\text{Cm}(n,\gamma)$
^{245}Cm	2020	345	8500年	$^{244}\text{Cm}(n,\gamma)$
^{247}Cm	90	60	1.56×10^7 年	$^{246}\text{Cm}(n,\gamma)$
^{249}Bk	960	350	3.22小时	$^{249}\text{Bk}(n,\gamma)$
^{249}Cf	1660	465	352年	$^{249}\text{Bk} \xrightarrow{\beta^-}$
^{251}Cf	4300	2850	898年	$^{250}\text{Cf}(n,\gamma)$
^{252}Cf	1300	17.6	17.8天	$^{252}\text{Cf}(n,\gamma)$

表 3 几种核燃料的裂变常数

ν : 每次裂变所放出的平均中子数
 η : 裂变物质每吸收一个中子后产生的中子数

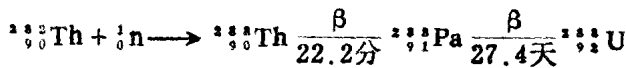
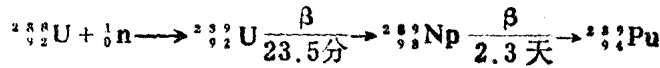
$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c}$$

σ_f : 裂变截面 (靶) σ_c : 俘获截面 (靶)

核 燃 料	ν	σ_f	σ_c	η
对于热中子 (能量为 0.025eV)				
^{235}U	2.49	530.6	47.0	2.28
^{239}Pu	2.43	580.2	98.3	2.07
^{239}Pu	2.88	741.6	271.3	2.11
^{238}U	—	5×10^{-4}	2.7	—
天然铀	—	4.15	3.4	1.34
^{232}Th	—	3.9×10^{-5}	7.4	—
对于快中子 (能量为 2 MeV)				
^{235}U	2.63	1.93	0.04	2.58
^{239}Pu	2.63	1.28	0.06	2.52
^{239}Pu	3.12	1.95	0.04	3.06

三、核燃料的增殖和转换

天然铀中大量的是 ^{238}U 。同时,自然界还有大量的 ^{232}Th 存在。它们虽不能为热中子所分裂,但它们在反应堆中能俘获一个中子,生成新的裂变燃料 ^{239}Pu 和 ^{233}U 。其反应式如下:



由于这种反应所需的中子来自另一些裂变燃料的裂变,因此,新的裂变燃料的产生是以另一些裂变燃料的消耗为代价的。如果新生成的裂变燃料和消耗的裂变燃料是同一种物质,则把这种过程称为核燃料的增殖;若不是同一种裂变物质,则称为核燃料的转换。新生成的可裂变核数与消耗的可裂变核数的比值即为增殖比(或转换比)。

当增殖比大于1时,只要供给廉价的核原料就可不断产生越来越多的裂变燃料。这样,就可以充分利用天然存在的大量的 ^{238}U 和 ^{232}Th 了。

决定增殖比能否大于1的关键,是看裂变过程中裂变核每吸收一个中子,或每消耗一个裂变核所能提供的次级中子数(η)。由于维持裂变链式反应需要用去一个中子,因此, $\eta-1$ 是容许泄漏或被其它材料(包括核原料 ^{238}U 和 ^{232}Th)吸收的中子数。由于反应堆中慢化剂、冷却剂、结构材料和控制棒,以及积累的裂变产物等都要吸收一些中子。此外,还有不可避免的中子泄漏,所以,用于增殖新的裂变燃料的中子数总是小于 $\eta-1$ ($\eta-1$ 是增殖比的理论上限)的。例如, ^{235}U 热中子裂变时, $\eta-1$ 只有1.07,这显然是不可能实现增殖比大于1的。对于热中子, ^{233}U 的 $\eta-1$ 值最大($\eta-1=1.28$),但对于快中子,则以 ^{239}Pu