

HEHUA XUE GONGCHENG

核化学工程

M. 本尼迪克特

〔美〕 T. H. 皮格福德 著

H. W. 利瓦伊

原子能出版社

内 容 简 介

这是一本用化工原理的观点论述与核能有关的化学问题的教科书和参考书。全书共分十四章：前四章扼要叙述核动力工业的各种化学工程问题，核物理和放射性方面的知识，核反应堆燃料循环及其管理，溶剂萃取及其在纯化铀、钍、钍和核燃料后处理中的应用；五、六、七三章分别讨论铀、钍、钍-钍及其化合物的物理化学性质、存在状态和各种加工工艺流程；八、九两章分别介绍各种类型堆乏燃料的同位素组成、放射性成分和运行中产生的铀、钍系元素（镭、钍、镭、钍）和它们的化合物；第十章讨论了核燃料后处理的目的、历史及各种流程；第十一章介绍放射性废物的处理和最终处置方法；最后三章论述稳定同位素分离，分别阐明了常用同位素的存在形态、与分离方法有关的化工原理、氘及其它轻元素的分离方法（蒸馏、电解、化学交换等）和铀同位素的分离方法（气体扩散法、离心法、空气动力学法、激光法等）。该书理论与实用并重。每章后附有习题。

本书可作为理工科大学的原子能、放射化学、核化工、同位素应用、核医学、核动力工程等专业高年级学生及研究生的教材或教学参考书，也可供从事上述专业工作的科研、设计和技术人员参考。

Nuclear Chemical Engineering

Second Edition

M. Benedict T.H. Pigford H.W. Levi

McGraw-Hill Book Company, 1981

核 化 学 工 程

〔美〕M.本尼迪克特 T.H.皮格福德 H.W.利瓦伊 著

汪德熙 王方定 祝 疆 译

雷有余 肖啸菴 骆大星

责任编辑 汪忠明

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

昊海印刷厂印刷

（西苑操场甲73号）

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/16 ·印张56·字数1377千字

1988年 8 月北京第一版 1988年 8 月北京第一次印刷

印数1—900

统一书号：15175·851 定价：16.75元

ISBN 7-5022-0062-2/TL·25

译者序

Benedict 等人编著的《核化学工程》自 1957 年问世以来,一直被认为是一本具有独特风格的、有价值的教科书和参考书。其原因是,因为领衔作者美国麻省理工学院教授 Benedict 继承了该校化学学派的传统,用化工原理的观点撰写本书,这在已经出版的许多与核能有关的化学和工程的书籍中是唯一的,也正是这个特点使该书不论从原理上或实用上皆有较大参考价值。经过二十四年,本书第二版终于问世,不但内容更新,篇幅剧增,而且保持了第一版的风格,用化工原理的观点论述与核能有关的化学问题,这是值得庆幸的。

在两版相隔期间,核能和核工业在全世界得到蓬勃发展,这就促使作者将老版做了较为彻底的改写,并增加了大量的新内容,使得第二版几乎是一本全新的书了。在浩如烟海的核化学化工文献中,如何选题材对任何作者皆是个严重的考验。而本书作者在这方面总的说是颇具眼光的;老的合乎逻辑的选题和编排顺序保持了下来,这在原序中讲得很清楚,此处不赘;值得一提的是,新增的内容也是选材十分得当的。例如新增的第三章——核燃料循环及其管理,既从科学技术上也从经济上论证了这个在同类书中常被忽视的课题,其中对压水堆元件换料方案的论述较为详尽,这些皆是难能可贵的。第十一章放射性三废处理也是新增的,虽然这一章写得有不足之处,个别论点(例如,关于从强放废液中提取镅钆无有前途的论点)也难令人同意,但是由于三废处理和最终处置是关系到核能发展前途的重大科技问题,作者对它单独写了篇幅较长的一章,这说明他是颇有见解的。在后处理方面,为其它同类书籍所忽视的快堆后处理和提铀工艺各占了十页,这也是值得欢迎的。可能因为 Benedict 本人专长稳定同位素分离,在本书中这方面内容占了篇幅皆很长的三章:第十二章原理部分写得较其它书完整而实用,第十三章轻同位素分离和第十四章铀同位素分离也皆写得较为详尽,有一定参考价值。在新方法中,作者对铀同位素分离的激光法做了七页的介绍,这是值得称赞的。可惜的是,作者不知为什么把分离铀同位素的化学交换法完全忽视了。其实激光法在美国 1982 年才决定进行扩大实验,而化学法则不论在法国或日本皆已进入中间工厂的规模。正因此,国际核燃料评价会议(INFCE)在几年前就把化学法和喷嘴法并列为较成熟的分离铀同位素的方法,而把激光法称为尚处于实验室阶段的方法。作者对化学法何以一字不提,实为不解。

总的看来,本书不失为理论结合实际的好书,既可作为高等学校放射化学、放射化工专业的教科书,也是对核化学化工专业人员有较大参考价值的专著。

由于此书一大优点是新,感到需要快速翻译出版,以期它能早日与我国同行见面。这个目的在一定程度上的实现,首先要感谢提供原书的学部委员时钧教授,其次要感谢出版社领导的支持。在翻译时,发现原书有误的地方,皆做了更正并加了译者注。但此书涉及面较广,我们水平有限,翻译经验也不多,错误在所难免,尚盼读者不吝批评指正。

中国原子能科学研究院

汪德熙等

1984 年 7 月于北京

序 言

变质为能的核裂变反应堆的发展和元素转化的实现,使得一些几年前还是科学珍闻的那些化学物质和化工过程,现在已在工业上占据重要地位了。从前铀只用来作为玻璃和陶瓷的染色剂,现已成为世界上最重要能源之一。过去主要用作煤气灯罩的钍,现在也有希望成为仅次于铀的核燃料。锆和它的化学孪生姐妹铪,从前总是在一起作为产品,现在业已被分离成功,并成为具有独特性能的反应堆材料。为了分离这些元素,人们研究出了新的化工过程,而且为了生产核时代的精细化学产品氙、 ^{235}U 和其它分离出来的同位素,又发展起来更新的方法。对于放射性物质的加工,过去主要限于几个居里的镭,现在处理的对象则已是反应堆乏燃料中的许多元素的数百万居里的放射性同位素了。

本书第一版序言中的上述这一段引言,仍可作为第二版的主题。自 1957 年以来,核能体系已对工业发达国家的能源供应起着重要作用。本书叙述在核反应堆中起着特殊重要作用的那些材料,和已研究成功的浓缩、纯化、分离和安全地储存这些材料的方法。自该书第一版问世以来,由于核工业发展之快以及新发表的资料的数量之大,这使得它的第二版可以说是一本全新的书,同第一版相比,只在大体上相仿。

第一章列举了核工业中重要的特殊材料,并扼要叙述核反应堆同生产这些材料的化工厂之间的关系。第二章简要介绍同以后各章所叙述的许多过程有关的核物理和放射性方面的知识。第三章叙述燃料在核反应堆中辐照时所发生的组成上的和反应性上的变化,并说明这些变化何以决定着材料的选择和反应堆燃料循环的处理要求。第四章讲述溶剂萃取的原理,这个化工单元操作在纯化铀、钍和锆以及在堆中卸下的辐照燃料的后处理中得到极为广泛的应用。

铀、钍和锆依次在第五、第六和第七章中介绍。每章都讨论有关元素及其化合物的物理和化学性质,在自然界的存在形态,和从矿石中提取、纯化有关元素并把它转化为核工业中最有用形态的诸流程。

其次的第四章讲述堆中产生的强放射性材料的后处理过程。第八章叙述来自各类有代表性的堆的乏燃料的同位素组成和放射性成分,并简要介绍在堆运行中产生的其它放射性同位素。第九章叙述堆中产生的合成锕系元素:镤、镥、铪、镅和锔及它们的化合物。第十章叙述为了处理辐照燃料、回收其中的铀、钍和其它有用的锕系元素而制定的一些放射化学流程。第十一章叙述将来自堆运行和燃料后处理的放射性废物转化成为稳定的、适于安全而长期储存的形态的方法以及用于这种储存的各种体系。

最后三章讲述稳定同位素分离。在第十二章中,列举了核工业中起主要作用的同位素,讨论了它们在自然界的存在形态,阐明了对于同位素分离方法普遍适用的化工原理。第十三章叙述用于分离氙和其它轻元素的诸方法,特别是蒸馏、电解和化学交换。第十四章叙述用于分离铀同位素的诸方法,特别是气体扩散法,气体离心法,空气动力学法,质量和热扩散法,以及基于激光的方法。

在四个附录中,列有基本物理常数、单位换算表、核性能以及核工厂排放物的放射性最

大允许浓度。

从以上简要介绍可以看出，本书是把科学和工程的原理与核化工中重要的材料和方法的叙述结合起来的。这样做的目的是希望它既可作为课堂教学用的课本，又可作为核工业中化工实践的参考书。

如把本书用于教学，每章后面的习题可能是有用的。对于希望知道比每章讲述的内容更多的读者，他们可参阅参考文献。本书广泛引用由联合国发起的在瑞士日内瓦召开的四次和平利用原子能国际会议会议录中的资料，每章的后面的文献均列为 PICG，并随后注明会议的次数。

在撰写本书时，美国的工程界和商业界正处于从采用英制单位转到实行国际单位制(SI)的过渡阶段。当所引用的文献采用的是英制单位时，本书在大多数情况下保留这些单位。在有些段落也同时提供对应的国际单位的数值，或在脚注中注明换算系数。此外，附录 B 还准备了单位换算表。单位的繁复是件憾事，但在世界科技文献未完全转入国际单位制以前是难以避免的。

在撰写本书时，承蒙多方面给以帮助，在此难于一一列举。我们感谢各自的单位，即麻省理工学院(MIT)，加州大学(伯克利)和 Hahn-Meitner 研究所(柏林)，因为它们给我们撰写这本书的时间和机会。感谢 Marjorie Benedict, Ellen Mandigo, Mary Bosco, Sue Thur 和许多别人在计算、画图 and 打字方面的帮助。对 Judith B. Gandy 和 Lynne Lackenbach 在编辑上的帮助谨此致谢。对于使用过作为本书撰写依据的笔记的各届学生以及他们帮助校订错误，也十分铭感。在近几届学生中谨向 Allen Croff, Charles Forsberg, Saeed Tajik 和扬辰绥(音译)致谢。

在美国同行中，十分感谢橡树岭实验所的 Don Ferguson 和他的同事；埃克森核公司的 Paul Mc Murray 等人；联合通用核服务公司的 James Buckham 和 Wesley Murbach；核燃料服务公司的 James Duckworth；泰来达因华昌阿尔巴尼公司的 Joseph Megy；联合碳化物公司的 Paul Vanstrum 和 Edward von Halle；杜邦公司的 Lombard Squires John Proctor 和他们的同事；麻省理工学院的 Marvin Miller；还有加州大学(伯克利)的 Donald Olander。联邦德国方面，我们感谢欧化公司的 Hubert Eschrich，卡尔斯鲁厄核研究所的 Richard KroebeI，于利希核研究所的 Erich Merz，卡尔斯鲁厄后处理工厂的 Walther Schüller 和联邦德国核燃料后处理学会的 Eckhart Ewest。

对葛根翰基金会给作者之一(M. Benedict)一名奖学金所给予的资助深表谢意。

虽然作者在撰写此书时得到许多宝贵的帮助，但此书肯定还会有许多错误和遗漏，盼读者不吝赐教，不胜感谢。

M. 本尼迪克特

T. H. 皮格福德

H. W. 利瓦伊

目 录

序言

第一章 核动力的化学工程问题	1
1. 引言	1
2. 核裂变	1
3. 核燃料	4
4. 核反应堆类型	6
5. 燃料处理流程	8
6. 燃料循环的各步作业	13
7. 燃料后处理	16
8. 同位素分离	18
9. 核聚变	19
参考文献	20
习题	21
第二章 核反应	22
1. 核素	22
2. 放射性	23
3. 衰变链	29
4. 中子反应	36
5. 裂变过程	46
6. 同时发生放射性衰变和中子吸收并需要连续处理的核素的生长和衰变	56
7. 用拉普拉斯变换导出 Bateman 方程 (2-17)	67
术语	69
参考文献	71
习题	72
第三章 核反应堆燃料循环	75
1. 核燃料	75
2. 辐照对核燃料的影响	77
3. 燃料和毒物管理	79
4. 大型压水堆的燃料管理	90
5. 燃料循环成本	99
6. 燃料循环性能的手算	108
7. 燃料循环的物料流程图	126
术语	133
参考文献	136
习题	136
第四章 金属的溶剂萃取	140
1. 应用	140
2. 可萃取的金属有机络合物	140

3. 溶剂萃取原理.....	143
4. 分配系数.....	146
5. 对溶剂的要求.....	152
6. 逆流平衡萃取理论.....	153
7. 溶剂萃取设备.....	176
术语.....	185
参考文献.....	186
习题.....	188
第五章 铀	191
1. 铀同位素.....	191
2. 铀的放射性衰变系.....	192
3. 金属铀.....	196
4. 铀化合物.....	197
5. 铀溶液化学.....	204
6. 铀的来源.....	206
7. 铀资源估计.....	208
8. 铀的浓集.....	210
9. 铀的精制.....	235
10. 金属铀的生产.....	242
参考文献.....	246
习题.....	248
第六章 钍	250
1. 钍的应用.....	250
2. 钍的同位素.....	250
3. 钍的放射性.....	252
4. 金属钍.....	254
5. 钍的化合物.....	256
6. 钍溶液化学.....	259
7. 钍资源.....	260
8. 钍的选矿和提取.....	264
9. 钍的纯化.....	271
10. 硝酸钍转化成氧化物、氟化物、氯化物或金属.....	272
参考文献.....	278
习题.....	280
第七章 锆和铪	281
1. 锆和铪的用途.....	281
2. 在自然界的存在形态.....	281
3. 产量和价格.....	281
4. 锆和铪的金属及合金.....	283
5. 锆和铪的化合物.....	286
6. 从锆石中提取锆和铪.....	292
7. 锆铪分离.....	294

8. 金属锆和铪的生产.....	301
9. 从锆石生产无铪的锆的其它可供选择的流程.....	306
参考文献.....	306
习题.....	308
第八章 辐照燃料和反应堆其它材料的性质	310
1. 裂变产物的放射性.....	310
2. 锕系元素的放射性.....	322
3. 燃料循环方案的选择对辐照燃料性质的影响.....	341
4. 中子活化产生的放射性.....	345
5. 再循环燃料的中子活化作用.....	354
术语.....	357
参考文献.....	359
习题.....	359
第九章 钷和其它锕系元素	361
1. 锕系元素的一般化学性质.....	361
2. 镧的性质.....	374
3. 铈的性质.....	376
4. 钷的性质.....	378
5. 铈的性质.....	397
6. 镧的性质.....	399
参考文献.....	402
习题.....	404
第十章 核燃料后处理	405
1. 核燃料后处理的目的.....	405
2. 辐照核燃料的组成.....	405
3. 核燃料后处理的发展历史.....	405
4. Purex流程.....	413
5. 钍基燃料的后处理.....	456
6. 液态金属(冷却)快中子增殖堆燃料的后处理.....	467
7. 后处理过程中铀的回收.....	475
8. 后处理厂中临界的预防.....	483
参考文献.....	491
习题.....	500
第十一章 放射性废物管理	501
1. 引言.....	501
2. 高水平放射性废物.....	503
3. 非高水平放射性废物.....	533
4. 特殊放射性废物.....	538
5. 放射性废物的处置.....	540
6. 长期安全性的估价.....	544
参考文献.....	548
习题.....	550

第十二章 稳定同位素的用途、分离方法和分离原理	551
1. 稳定同位素的用途.....	551
2. 同位素的分离方法.....	553
3. 术语.....	564
4. 分离级的性质.....	566
5. 级联的类型.....	570
6. 简单级联.....	571
7. 再循环级联.....	572
8. 理想级联.....	576
9. 单级分离极小的级联.....	581
10. 分离能力、分离功和分离势.....	583
11. 分离势的微分方程.....	589
12. 同位素分离工厂的平衡时间.....	592
13. 方形化级联.....	599
14. 广义的理想级联.....	600
15. 三组分同位素分离.....	608
术语.....	616
参考文献.....	619
习题.....	621
第十三章 氢和其它轻元素的同位素分离	624
1. 氘的来源.....	624
2. 氘的生产方法和工厂.....	626
3. 蒸馏的分离系数.....	629
4. 氢蒸馏.....	634
5. 水蒸馏.....	638
6. 电解.....	653
7. 电解和水蒸气-氢交换.....	660
8. 氘交换法的分离系数.....	665
9. 交换塔的理论级数.....	669
10. 单温交换法.....	670
11. 双温水-硫化氢交换法.....	675
12. 双温氨-氢交换法.....	697
13. 甲胺-氢交换法.....	700
14. 双温水-氢交换法.....	703
15. 分离锂同位素的交换方法.....	704
16. 其他元素的交换方法.....	704
术语.....	707
参考文献.....	709
习题.....	712
第十四章 铀同位素分离	715
1. 引言.....	715
2. 铀的同位素含量.....	716

3. 一些铀浓缩工程项目.....	717
4. 气体扩散法.....	720
5. 气体离心法.....	747
6. 空气动力法.....	773
7. 质量扩散法.....	790
8. 热扩散法.....	798
9. 激光同位素分离法.....	805
术语.....	811
参考文献.....	816
习题.....	820
附录A 基本物理常数	823
附录B 换算系数	823
附录C 核素的性质	826
附录D 某些选定的放射性核素的放射性(允许)浓度极限值.....	881

第一章 核动力的化学工程问题

1. 引言

从重元素的可控核裂变产生动力是当今核反应在技术上的最重要的应用。这是因为：世界上铀、钍核燃料所蕴藏的能量大大超过煤、石油和天然气所蕴藏能量的总和^[H1]；核燃料的能量远比传统燃料的能量强大而集中；世界上许多地区用核裂变产生能量可与用传统燃料燃烧产生能量在经济效益上相匹敌。

建立以裂变堆为基础的核动力工业，包括生产直到近年来才在商业上有重要意义的材料，特别是铀、钍、锆和重水。核动力工业也以许多新型化工过程为基础，这些过程包括分离同位素、溶剂萃取分离金属和大规模地分离、纯化强放射性物质。本书主要涉及生产用于核裂变堆的特殊材料的方法、分离同位素和回收从核反应堆卸出的放射性燃料的处理过程。

本章扼要介绍核裂变反应及最重要的可裂变燃料，还简述典型的核电站、可用于产生核动力的主要反应堆堆型特性及核电站的主要燃料循环，并给出使这种燃料循环既可行又经济的化工过程。本章结尾介绍了有朝一日在产生动力上可能具有重要实际意义的另一过程：轻元素的可控聚变。聚变过程是利用氢和锂的稀有同位素，这些同位素可用与裂变堆材料所用的相似的同位素分离方法生产。由于同位素分离方法在核化工上如此重要，所以，同位素分离除在本章扼要介绍外，还将在本书最后三章中详细讨论。

2. 核裂变

目前产生动力的反应堆所利用的核裂变过程是由中子与可裂变原子核（如 ^{235}U 核）相互作用而启动的。核分裂成两个碎片，放出巨大能量，并产生几个新中子。在适当条件下，产生的中子与另外的 ^{235}U 原子作用，从而引起中子链式反应，只要有足够的 ^{235}U 保持反应，链式反应就能持续进行。图 1-1 为单个 ^{235}U 核裂变的示意图，裂变链式反应示于图 1-2。为保持链式反应速率恒定，可使中子泄漏出核反应堆，或在堆中放置硼、 ^{238}U 或其它不可裂变材料以吸收中子。图 1-3 为稳态链式反应。

^{235}U 能以多种形式发生裂变，其中一例示于图 1-4。含有 92 个质子和 143 个中子的 ^{235}U 核分裂成两个碎片和几个多余中子，但生成核中的质子、中子总数等于参与反应的中子和 ^{235}U 核中的质子、中子总数。图例中裂变碎片是含 56 个质子和 88 个中子的 ^{144}Ba ，含 36 个质子和 53 个中子的 ^{89}Kr 和三个多余中子。裂变碎片并不稳定，接着还要进行放射性衰变。衰变使核中的一些中子转变成留在核中的质子和以 β 辐射形式飞出核的电子。在本例中， ^{144}Ba 中的四个中子连续转变成质子，最终生成物为 ^{144}Nd ； ^{89}Kr 中的三个中子转变成质子，最终生成物为 ^{89}Y 。

• 本书中的核素均用化学符号表示，如铀-235 示为 ^{235}U 。

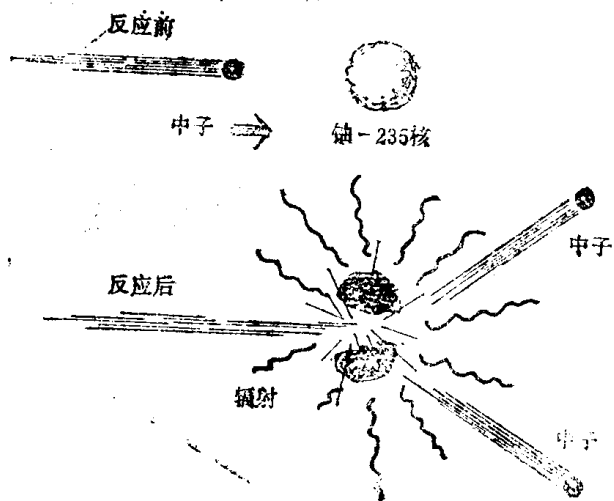


图 1-1 ^{235}U 核被中子诱发裂变

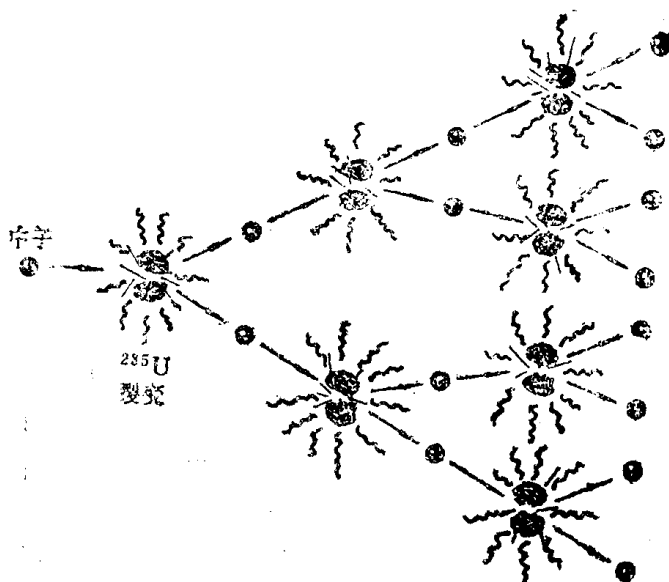


图 1-2 裂变链式反应

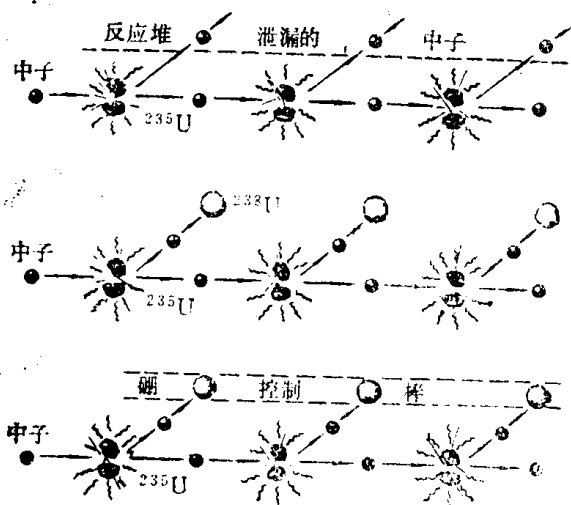


图 1-3 稳态裂变链式反应

标注在各个反应物和生成物上的数字表示它们的质量，质量单位采用原子质量单位（以 amu 表示），其定义是：中性原子的质量与 ^{12}C 原子质量的十二分之一的比值。在本例中，生成物的质量比反应物的质量小*。

$$\text{占 } ^{235}\text{U} \text{ 原子质量的 } \frac{0.210675}{235.043915} =$$

0.0008963 份额在裂变反应中消失。由此质量亏损可以度量这一裂变反应放出的能量。表示能量和质量关系的 Einstein 方程 (1-1) 为：

$$\Delta E = c^2 \Delta m \quad (1-1)$$

它意味着，当 Δm 公斤的质量消失时， ΔE 焦

反应物		生成物		差 值
^{235}U	235.043915	^{144}Nd	143.910039	
中子	1.008665	^{89}Y	88.905871	
		三个中子	3.025995	
总计	236.052580		235.841905	0.210675

耳的能量会就地产生。关系式中， c 是光速 (2.997925×10^8 米/秒**)，从而此裂变反应放出的能量为：

- 计算中未考虑电子质量，因为在放射性衰变时，核放出的电子最终又成为环绕中性原子的核的轨道电子。
- 基本物理常数列于附录A. 质量和能量的当量表列于附录B.

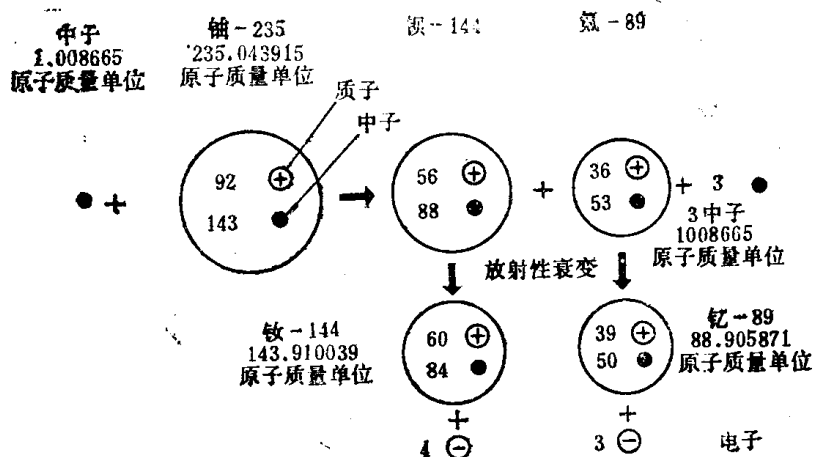


图1-4 ^{235}U 裂变举例

$$(0.0008963)(2.997925 \times 10^8)^2 = 8.06 \times 10^{13} \text{ 焦耳/公斤 } ^{235}\text{U} \quad (1-2)$$

或 3.46×10^{10} 英热单位/磅。

单次核事件伴随的能量变化常用百万电子伏 (MeV) 表示, 它的定义是: 一个电子的电荷 (1.602×10^{-19} 库仑) 通过电位差为 1000000 伏的电场加速所获得的能量。因而 1 百万电子伏 $= 1.602 \times 10^{-19} \times 10^6 = 1.602 \times 10^{-13}$ 焦耳。

当一个 ^{235}U 原子在上述反应中发生裂变时所放出的能量为:

$$\frac{(8.06 \times 10^{13} \text{ 焦耳/公斤})(235.04 \text{ 克/克原子})}{(1.602 \times 10^{-13} \text{ 焦耳/百万电子伏})(6.023 \times 10^{23} \text{ 原子/克原子})(1000 \text{ 克/公斤})} = 196 \text{ 百万电子伏/原子} \quad (1-3)$$

^{235}U 的原子能以多种形式进行裂变, 图 1-4 所示的反应仅为其中的一例。图 1-5 示

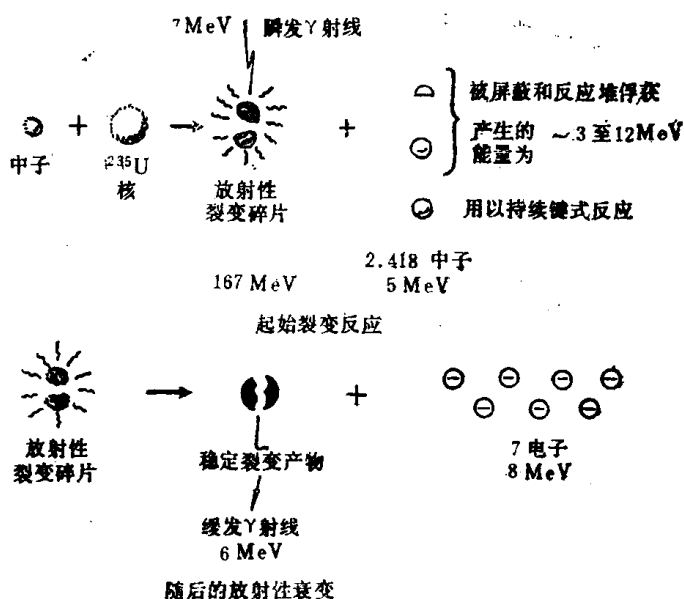


图 1-5 ^{235}U 裂变的平均产额

出了 ^{235}U 的所有可能形式裂变产生的粒子和能量的平均产额。在图上端的起始裂变反应中, ^{235}U 分裂成两份放射性裂变产物, 同时放出几个快中子 (平均为 2.418 个) 和 γ 辐

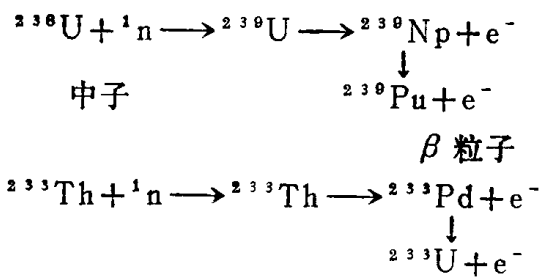
射。其中一个中子用以保持裂变反应。其余的中子可用以引发需要的核反应，也可通过泄漏逃出反应堆，或被反应堆中的元素俘获生成不需要的产物或废物而丢失。

起始裂变反应发生后，放射性裂变产物紧跟着进行放射性衰变，放出 β 粒子和缓发 γ 射线，最终变成稳定裂变产物。由于放射性裂变产物的半衰期范围很广，从不到一秒到几百万年，所以在停堆后一个相当长的时期内，裂变产物仍将放射 β 粒子和 γ 射线，不过其放射率在逐渐减弱。

裂变时放出的总能量是图中各种粒子携带能量的总和，即 196 至 205 百万电子伏。因为从典型的动力堆散失的能量可达 5 百万电子伏的 γ 能量，这部分能量未能利用，所以，裂变放出能量的标称值为 200 百万电子伏。这相当于裂变时每磅 ^{235}U 放出能量约为 35.2×10^9 英热单位，或每克 ^{235}U 放出能量约为 0.95 兆瓦日。此外，有些 ^{235}U 未进行裂变而消耗在与中子作用生成 ^{236}U 上。考虑到这一反应，每消耗一磅 ^{235}U 放出的能量约为 29×10^9 英热单位，或每消耗一克 ^{235}U 放出能量约为 0.78 兆瓦日。这大约是烧掉相当质量的煤所放出能量的二百万倍。

3. 核燃料

除 ^{235}U 外，其它两种同位素也可用作核裂变反应堆的燃料。它们是 ^{239}Pu 吸收中子生成的钚-239， ^{239}Pu ；和天然钍吸收中子生成的 ^{233}U 。制备这些同位素的反应如下：



这三种可裂变燃料核素的性质列于表 1-1。

表 1-1 核燃料的性质

同 位 素	^{235}U	^{239}Pu	^{233}U
来 源	天然铀中 占 0.7%	下述核素吸收中子 ^{238}U ^{232}Th	
每次裂变产生的中子数	2.418	2.871	2.492
每吸收一个热中子*产生的 中子数	1.96	1.86	2.2
吸收截面(靶)			
热中子*	555	1618	470
快中子	1.5	2	2

* 在产生动力的典型堆中。

可裂变材料每吸收一个中子产生的中子数小于每次裂变产生的中子数，这是因为，有的中子被吸收后产生了较重的同位素 ^{236}U 、 ^{240}Pu 或 ^{234}U ，而不是引起裂变。

各种燃料每吸收一个中子所产生的中子数大于 1.0，这一事实表明，它们都能维持核链

式反应。比保持核链式反应所需的一个中子多出的中子可用于生产新的有用同位素，如前述的反应那样，由 ^{238}U 可生产 ^{239}Pu ，或由钍可生产 ^{233}U 。

当可裂变材料吸收每个中子产生的中子数大于 2.0 时，从理论上讲，可裂变材料的产生速度就可大于其消耗速度。一个中子用以维持链式反应，第二个中子用以产生可裂变材料的新原子而代替被第一个中子消耗掉的原子。这一过程称做增殖。图 1-6 示出了由 ^{238}U 增殖 ^{239}Pu 所发生的反应。全过程中只消耗了 ^{238}U ，而 ^{239}Pu 是由 ^{238}U 产生后再在裂变中消耗掉的。

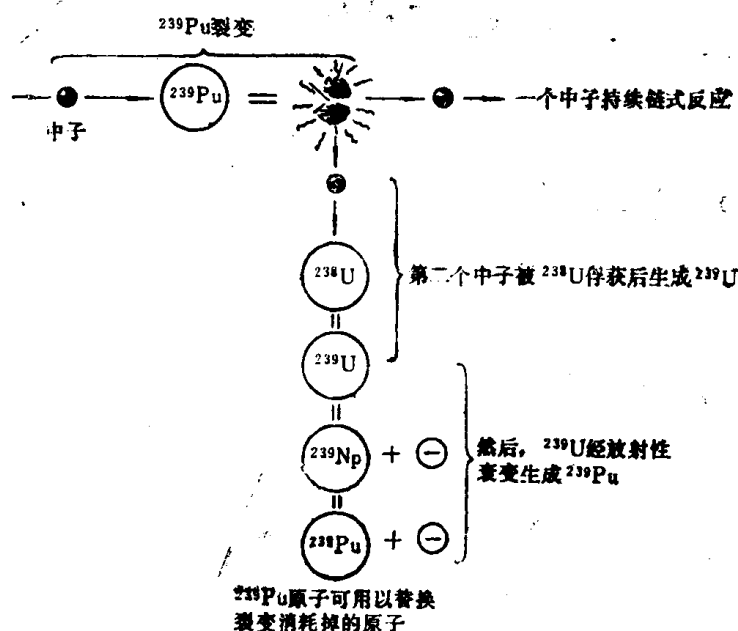


图 1-6 ^{239}Pu 的增殖

在用钚作燃料的热堆中，每个中子被吸收后所产生的中子数小于 2.0，故增殖是不可能的。而对于 ^{233}U ，这一数据实质上大于 2.0，故在热堆中可实现增殖。在快堆中，每个中子被吸收后所产生的中子数与每次裂变所产生的中子总数相近，因此 ^{233}U 和钚都可能增殖。照这里所述增殖的定义， ^{235}U 不可能增殖，因为没有天然同位素能够生产 ^{235}U 。

快堆是堆中中子平均速度接近于裂变瞬间的中子速度（约为 15×10^6 米/秒）的反应堆。在这样高速下，可裂变原子吸收中子的几率低，因而用以度量这一几率的中子吸收截面小。

热堆是堆中的中子被慢化到与堆材料达到热平衡为止的反应堆。在典型的动力堆中，热中子速度约为 3000 米/秒。在此较低的速度时，中子吸收截面比快中子大得多。

为保持裂变过程而需要的可裂变材料的临界质量大致上与其子吸收截面成反比。因而在热堆中钚的临界质量最小，铀同位素在热堆中的临界质量较大，在快堆中更大。由于这个原因及其它一些原因，除为了增殖钚必须用快堆外，一般都采用热堆堆型。

4. 核反应堆类型

反应堆的类型，除分为热堆和快堆外，还可以按他们的用途、慢化中子用的慢化剂的类别、冷却剂的类别或燃料的类别来分类。建立反应堆的主要目的是用于研究、试验、生产物料（如放射性同位素或钚）和产生动力。本书主要涉及动力堆。

慢化中子的最有效的物质是俘获中子几率小的低分子量元素，即氢、氘（原子量为 2 的氢同位素，化学符号 D）、铍或碳。含有这些元素的慢化剂的例子是轻水（ H_2O ）、重水（ D_2O ）、氧化铍和石墨。

许多热动力堆堆型中，慢化剂、燃料及冷却剂在堆中是互相分开的。图 1-7 是用这种

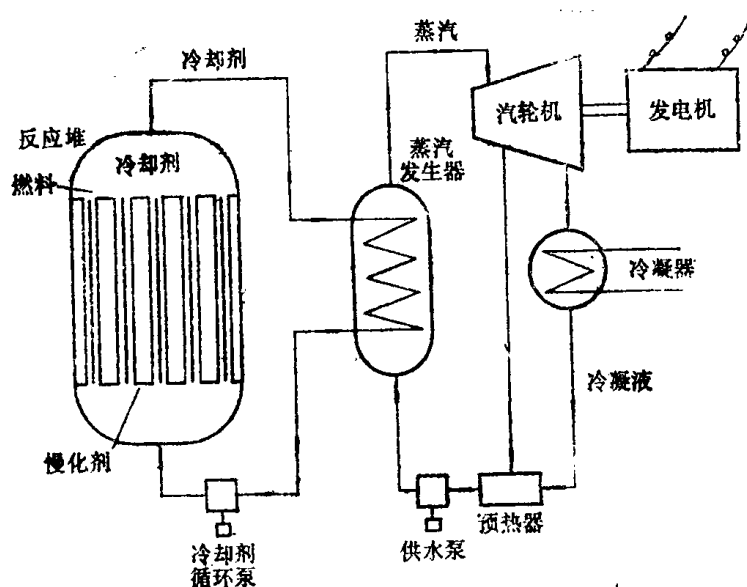


图1-7 燃料、慢化剂和冷却剂互相分开的核电站示意图

堆的核电站示意图。表 1-2 列举了五个有关慢化剂、燃料和冷却剂互相分开的例子，并详细注明有关这种堆的参考资料。在这种堆型中，燃料和慢化剂一般都固定在堆中，只有冷却剂流经反应堆以带走裂变热。热的冷却剂经堆流入蒸汽发生器，与供水进行热交换而冷却。

表 1-2 燃料、慢化剂、冷却剂相互分开的核动力堆实例

	气冷堆	改进气冷堆	高温气冷堆	重水堆	重水慢化有机冷却堆
燃料形式	U合金	UO ₂	ThC ₂ + UC ₂	UO ₂	UO ₂
浓缩度	天然U	2% ²³⁵ U	93% ²³⁵ U	天然铀	0.7-2% ²³⁵ U
包壳	Mg合金	不锈钢	石墨	锆合金	锆合金
慢化剂	石墨	石墨	石墨	D ₂ O	D ₂ O
冷却剂	CO ₂	CO ₂	He	D ₂ O	三联苯
控制材料	B	B	B ₄ C	B ₄ C	B ₄ C
参考资料	[L1]	[C2]	[S1]	[C1]	[E2]

供水则转化成蒸汽以驱动蒸汽轮机，然后蒸汽冷凝下来，经过预热又作为供水再循环到蒸汽发生器。冷却剂在蒸汽发生器中冷却后又经冷却循环系统回到反应堆。蒸汽轮机则驱动发电机。

当用 H_2O 作冷却剂时，同时又可当作慢化剂，这样就可简化堆结构。图 1-8 是压水堆

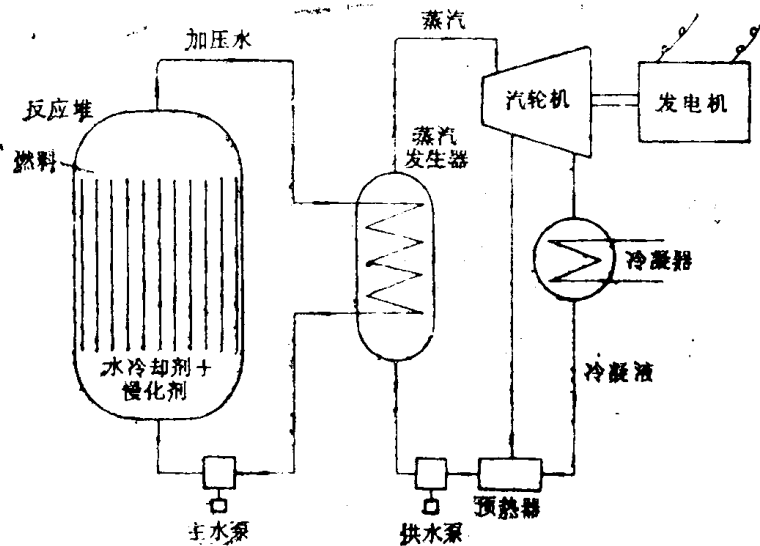


图 1-8 压水堆核电站示意图

核电站的示意图，堆中冷却剂和慢化剂均采用液态水，水压很高，约为 150 巴（2200 磅/英寸²），所以当水在堆中被加热到最高温度达 300°C 左右时仍为液态。它与图 1-7 的主要原则性区别是，堆中的冷却剂和慢化剂没有分开。压水堆是美国最通用的两种动力堆型之一。关于它的更详细的资料将在第三章中介绍。

采用 H_2O 作冷却剂和慢化剂的沸水堆是美国通用的另一种动力堆型。这种反应堆中的水的压力较低，约为 70 巴（1000 磅/英寸²），因此当水流经反应堆时发生沸腾而部分转化成蒸汽。离开堆的冷却剂分离为再循环的水和直接送到涡轮机的蒸汽，沸水堆核电站示意

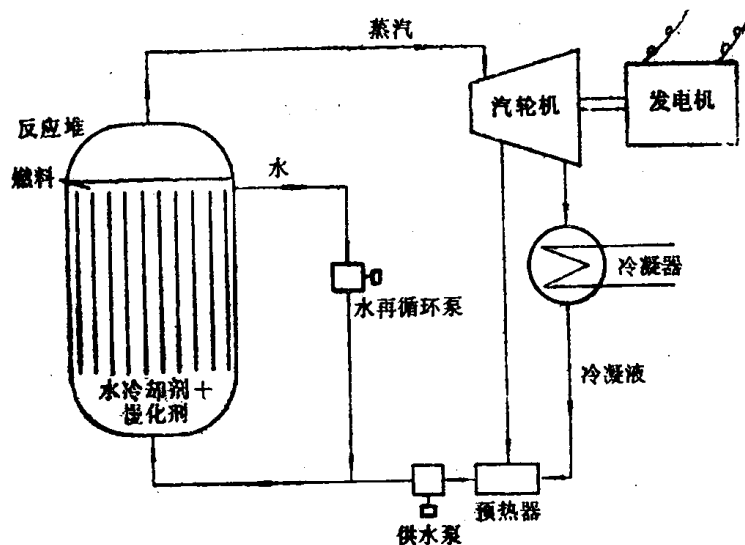


图 1-9 沸水堆核电站示意图