

HE FAN YING DUI

〔日〕长谷川正义 三岛良绩

核反应堆材料手册

Cailiao Shouce

原子能出版社

内 容 简 介

本书共十一篇，全面介绍了核反应堆用的燃料、慢化剂、控制材料、冷却剂、结构材料、屏蔽材料、后处理工程用材料及聚变堆材料。除收集实际工业中加工制造工艺、材料的各种性能数据以及使用经验外，本书对有关理论也作浅易阐述。

本书译自日文《原子炉材料ハンドブック》（日刊工業新聞社，1977年）。本书可供从事核工程和材料生产、加工的技术人员以及有关教学、科研人员参考。

核 反 应 堆 材 料 手 册

[日] 长谷川正义 主编
三岛良绩

孙守仁等 译

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

国防科工委印刷厂印刷

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51.25·字数1260千字
1987年10月北京第一版 1987年10月北京第一次印刷
印数1—700册 ·统一书号：15175·765

定价：12.00元

译者的话

本书的翻译工作是由许多同志共同完成的，各部分分工如下：

第一篇：第一章张崇岩译，第二、三章孙守仁译，潘金生校，第四章丁英译

第二篇：第一章张崇岩译，第二章崔洪才、赞绪译，第三章钢帖木尔译，曲建勋校，第四章潘金生译，第五章孙守仁译、潘金生校，第六、七、八章邵墨堂译、陈明志校

第三篇：姚敏智、徐玉明译，王绍廷、徐玉明校

第四篇：孙守仁译、潘金生校

第五篇：崔洪才、王书义译，姚敏智校

第六篇：第一、二、八章陶天成译，第三、四、七章王杨天、沙泽译，王绍廷、姚敏智校，第五、六章姚敏智译，徐玉明、王绍廷校

第七篇：孙守仁译，第一章潘金生校，第二至五章王绍廷校

第八篇：孙守仁译，潘金生、王绍廷校

第九篇：孙守仁译，曲建勋校

第十篇：孙守仁译，曲建勋校

第十一篇：丁英、吕玉喜译

附录：孙守仁译

在翻译过程中得到黄厚坤同志的帮助，谨致谢意。

1983年9月

目 录

第一篇 概 述

第一章 核反应堆概述.....	1
1.1 原子核和核能	1
1.2 核裂变的链式反应	6
1.3 反应堆	10
第二章 反应堆结构材料	15
2.1 堆芯结构材料	15
2.2 堆芯外的结构材料	19
第三章 反应堆材料与中子的相互作用	21
3.1 中子与原子核的反应	21
3.2 核反应截面	21
3.3 核反应过程动能的变化	24
3.4 核转变过程中原子核的生成和衰变	25
3.5 核裂变	27
3.6 中子的能量分布	28
第四章 辐射损伤	33
4.1 辐射损伤基础	33
4.2 物理性质的变化	39
4.3 机械性能的变化	41
4.4 辐射损伤的回复	42

第二篇 核 燃 料

第一章 核燃料概述	45
1.1 核燃料及其重要因素	45
1.2 核裂变	46
1.3 裂变产物	50
1.4 热功率和燃耗	52
1.5 转换和增殖	55
1.6 燃料的分类	56
1.7 燃料性能的评价	58
第二章 核燃料的资源	64
2.1 核原料资源的分布	64
2.2 铀的采矿、选矿及精制	71
2.3 钍的采矿、选矿和冶炼	82
第三章 铀的浓缩	87
3.1 制取浓缩铀的必要性	87
3.2 浓缩作业和级联	88
3.3 六氟化铀的特性	90

3.4 气体扩散法	93
3.5 离心法	95
3.6 其它方法	97
第四章 核燃料各论	100
4.1 用作燃料的金属的性质和金属型燃料	100
4.2 氧化物燃料	130
4.3 碳化物系和其它化合物系燃料	183
4.4 涂层颗粒燃料	207
4.5 液体燃料	225
第五章 燃料组件的制造和检查	232
5.1 堆型和燃料元件以及燃料组件	232
5.2 燃料设计步骤	238
5.3 燃料组件的制造	243
5.4 燃料检查	248
第六章 核燃料的后处理	258
6.1 后处理的意义及其特点	258
6.2 后处理方式	259
6.3 湿法后处理	260
6.4 干法后处理	267
第七章 燃料循环	272
7.1 核反应和燃料循环	273
7.2 轻水堆的燃料循环	279
7.3 燃料循环费的求法	288
第八章 燃料管理	288
8.1 燃料管理的意义	288
8.2 堆内燃料管理	288
8.3 堆外燃料管理	293
8.4 核燃料的安全管理	295

第三篇 慢化剂材料和反射层材料

第一章 慢化和反射的原理	305
1.1 中子慢化	305
1.2 与慢化有关的各参数	306
1.3 慢化剂材料性质要求	307
1.4 反射层	307
第二章 材料种类和特性	309
2.1 中子截面	309
2.2 有关慢化和反射特性参数	311
第三章 重水	313
3.1 生产	313
3.2 核性能、物理性能和化学性能	316
3.3 辐照效应	319

第四章 石墨	323
4.1 制造和加工	323
4.2 石墨种类及各种性质	327
4.3 辐照效应	338
4.4 选材法	346
第五章 铍及其化合物	350
5.1 制造和加工	350
5.2 各种性能	353
5.3 辐照效应	356
第六章 氢化物	359
6.1 金属氢化物	359
6.2 金属氢氧化物	361
6.3 有机物	362

第四篇 控制材料

第一章 反应堆的控制方式和控制材料	365
1.1 反应性的平衡	365
1.2 功率控制方法(空间的及时间的)	366
1.3 紧急状态时的控制	368
第二章 控制材料的核性能	369
2.1 中子吸收截面	369
2.2 中子吸收反应	372
2.3 反应堆的类型及核特性	372
第三章 硼及硼化物系控制材料	374
3.1 碳化硼	374
3.2 硼硅酸玻璃	378
3.3 硼不锈钢等材料	379
第四章 铪及铪控制材料	380
4.1 作控制材料用的铪	380
4.2 铪的冶炼、熔化及加工	381
4.3 物理性能和机械性能	381
4.4 化学性能	382
4.5 辐照性能	383
第五章 镉控制材料	386
5.1 作控制材料用的镉	386
5.2 镉控制材料	387
5.3 Ag-In-Cd系合金	388
第六章 稀土类化合物系控制材料	393
6.1 Eu_2O_3	393
6.2 EuB_6 等材料	394
第七章 钽及其它快堆控制材料	396
7.1 快堆的控制材料	396

7.2 钽	396
7.3 其它快堆控制材料	398
第八章 其它控制材料	400
第九章 控制材料的设计和制造	403
9.1 引言	403
9.2 沸水堆的控制材料	403
9.3 压水堆的控制材料	404
9.4 其它反应堆的控制棒	404
第十章 加入可燃毒物的燃料	405
10.1 轻水堆燃料	405
10.2 高温气冷堆燃料	406
10.3 板状燃料	406

第五篇 冷 却 剂

第一章 冷却剂	408
1.1 冷却剂的作用与特点	408
1.2 种类与特性	410
第二章 二氧化碳	414
2.1 生产过程	414
2.2 性质	414
2.3 管理技术	418
第三章 氮	420
3.1 生产和运输	420
3.2 氮的性质	421
3.3 管理技术	423
第四章 水和水蒸气(轻水)	426
4.1 性质	426
4.2 辐照效应	430
4.3 反应堆系统内水的管理技术	433
第五章 液态钠	435
5.1 生产	435
5.2 性质	436
5.3 纯度管理	444
第六章 熔盐	455
6.1 一般特性	455
6.2 主要的熔盐	456

第六篇 结 构 材 料

第一章 结构材料概述	463
1.1 反应堆堆芯结构材料	463
1.2 热交换器用的耐蚀耐热合金	468

1.3 聚变堆第一壁材料	469
第二章 锆及其合金	470
2.1 锆的性质	470
2.2 锆合金的种类和性质	473
2.3 元件包壳管和压力管的制造	477
2.4 显微组织对机械性能的影响	481
2.5 腐蚀和吸氢	485
2.6 辐照效应	486
2.7 燃料元件包壳的使用经验	489
第三章 不锈钢	491
3.1 不锈钢的种类和基本性能	491
3.2 焊接方法和焊接区的性能	501
3.3 燃料包壳管的制造	502
3.4 轻水堆介质中的腐蚀	508
3.5 快堆钠介质中的相容性	514
3.6 辐照效应	518
第四章 耐蚀、耐热合金	530
4.1 种类和基本性质	530
4.2 高温强度	534
4.3 热交换器用材料的加工工艺	536
4.4 轻水堆中的腐蚀	542
4.5 高温气冷堆中的腐蚀	546
4.6 辐照效应	552
第五章 镁诺克斯合金	558
5.1 镁诺克斯的成分与性能	558
5.2 镁诺克斯燃料包壳的制造	560
5.3 镁诺克斯燃料包壳材料的使用经验	561
第六章 铝及其合金	563
6.1 反应堆用铝合金的成分与性能	563
6.2 铝包覆燃料的制造	564
6.3 铝在纯水中的腐蚀	565
6.4 铝的使用经验	566
6.5 铝合金的接合	566
第七章 低合金钢	568
7.1 低合金钢的高温水腐蚀	568
7.2 低合金钢的钠腐蚀	570
第八章 高熔点金属及其合金	574
8.1 反应堆用高熔点金属的种类及用途	574
8.2 高熔点金属合金的熔炼、加工	574
8.3 基本性能	575
8.4 机械性能	575
8.5 腐蚀与吸气	578

8.6 辐照效应	580
8.7 高熔点金属的接合	580

第七篇 压力容器及管道材料

第一章 对结构材料性能的要求	583
1.1 失稳破坏	584
1.2 塑性变形	587
1.3 疲劳强度	589
1.4 蠕变断裂	594
1.5 钢材的辐照脆化	596
第二章 轻水堆	603
2.1 压力容器及安全壳	603
2.2 管道及蒸汽发生器用材料	616
第三章 快中子增殖堆	627
3.1 反应堆容器	627
3.2 管道及蒸汽发生器	632
第四章 新型转换堆	640
4.1 压力管的材料及其特性	640
4.2 反应堆冷却系统用的材料	643
4.3 密封塞材料	643
第五章 高温气冷堆	645
5.1 混凝土压力容器	645
5.2 蒸汽发生器及管道	651

第八篇 屏蔽材料

第一章 屏蔽概述	661
1.1 辐射和辐射源	661
1.2 辐射与屏蔽体之间的相互作用	661
1.3 γ 射线的屏蔽基础	663
1.4 中子屏蔽的基本概念	665
第二章 屏蔽材料	667
2.1 非金属屏蔽材料	667
2.2 金属屏蔽材料	672
2.3 混凝土	673
2.4 有机屏蔽材料	677
第三章 屏蔽材料的辐射损伤	680
3.1 金属屏蔽材料的辐射损伤	680
3.2 非金属屏蔽材料的辐射损伤	680
3.3 混凝土的辐射损伤	681
3.4 有机屏蔽材料的辐射损伤	681

第九篇 商用反应堆材料的使用经验

第一章 轻水堆燃料的使用经验	684
1.1 沸水堆燃料的使用经验	684
1.2 压水堆燃料的运行实践	687
第二章 反应堆压力容器的使用经验	692
2.1 轻水堆压力容器及管道	692
2.2 快中子反应堆容器及管道	700
第三章 环境效应	706
3.1 水环境效应	709
3.2 钠环境效应	715

第十篇 辐照试验

第一章 辐照试验设备	722
1.1 试验、研究用反应堆	722
1.2 实验反应堆	726
1.3 辐照试验方法	727
1.4 中子辐照剂量	728
1.5 传送容器	729
1.6 辐照容器罐	730
1.7 辐照回路	730
1.8 其它辐照装置	733
第二章 辐照后的试验设备	735
2.1 冶金试验设备(燃料试验)	735
2.2 机械性能试验设备(材料试验)	738
第三章 中子剂量测量	740
3.1 阈探测器	740
3.2 辐照剂量的评价	741
3.3 用阈探测器测定快中子能谱	742
3.4 耐高温的中子探测器的研究	743

第十一篇 聚变堆材料

第一章 概论	745
1.1 聚变堆原理	745
1.2 聚变堆	747
第二章 聚变堆材料的选择和辐照行为	751
2.1 第一壁材料的选择	751
2.2 再生区材料选择	752
2.3 聚变堆特有的材料问题	752
第三章 第一壁材料的表面现象	754
3.1 表面现象	754

3.2 溅射	754
3.3 起泡	755
第四章 结构材料与冷却剂的相容性	756
4.1 液体锂	756
4.2 锂系熔盐	756
第五章 再生区材料	758
5.1 固体再生区材料	758
5.2 液体再生区材料	760
第六章 超导磁体材料	762
6.1 超导磁体材料的问题	762
6.2 超导磁体材料的辐射损伤	763
第七章 屏蔽材料	764
附录	
1. 主要物理常数	765
2. 元素单体的晶体结构、原子半径、离子半径、原子量	766
3. 单体元素的密度、初级电离能、电子亲和度、熔点、沸点	768
4. 主要元素的物理常数	770
5. 单位换算率	771
6. 放射性核素衰变系	774
7. 辐射量单位	776
8. 主要放射性核素的每 1 微居里的原子数和克数	776
9. 各种元素的 (n, p) , (n, α) 反应的平均截面和 H, He 的产额	777
10. 元素的热中子截面	781
11. 各种材料对 γ 射线的质量衰减系数	794
12. 某些材料的照射量积累因子	800
13. 某些元素和化合物的移出截面	803

第一篇 概述

第一章 核反应堆概述

1.1 原子核和核能

1.1.1 原子核的构造

原子是物质保持其化学性质的最小单位。具有不同性质的每种元素的原子由带正电的原子核和围绕原子核的带负电的电子群组成，它的重量几乎都集中在原子核内。原子核又是由带正电的质子和不带电的中子两种质量几乎相等的核子组成。中子和质子两者的组合方式有一定的规则，它们的组合既决定了原子核的物理性质（例如质量）也决定了它的化学性质（例如由正电荷数决定的称为化学结合力的所有性质）。

为简明地描述这些事实，将各种原子核作如下的标示。某元素X的核素，它的原子序数 Z ，也就是它的正电荷数，记在该元素符号的左下方，将质量数 A 记在该元素符号的左上方，标示成 ${}_Z^AX$ 。这样就可以表明这个原子核是由 Z 个质子和 $A-Z$ 个中子组成。对各种核素进行研究后可以发现有些核素的 Z 相同，即化学性质一样，但质量数 A 不同，也就是存在有许多质子数相同，中子数不同的同位素。例如，铀有三种同位素、 ${}_{92}^{238}\text{U}$ （天然丰度99.27%）、 ${}_{92}^{235}\text{U}$ （0.72%）和 ${}_{92}^{234}\text{U}$ （0.0057%）。氢也有三种， ${}_1^1\text{H}$ （天然丰度99.985%）、 ${}_1^2\text{D}$ （0.015%）和 ${}_1^3\text{T}$ （微量）。

1.1.2 核力和质量亏损

在原子核内将质子 ${}_1^1\text{p}$ 和中子 ${}_0^1\text{n}$ 结合起来的是一种既能克服质子正电荷间的库仑力，也能结合中性粒子的力。核子之间的万有引力十分微弱，所以在极其接近的核子之间必然有核力在起作用。

可是，在精确地测定各种原子核的质量时，如果将原子核的质量和组成它的单个核子质量总和相比较，可以看到它们有差异（参见表1.1）。这个差额就是质量亏损。这个亏损和核子结合能之间有等价的关系，这个质量差相当于将一个原子核分离成零散的核子所需要的能量。在能量 E 和质量 m 之间有 $E=mc^2$ 的等价关系。这里 c 是光速。1克的质量约合 9×10^7 尔格，或等于 2.7×10^7 千瓦小时的能量。图1.1画出了每个核子的结合能和质量数之间的关系。

铁等中等重量的原子核具有更强的结合能，显示出稳定状态。另外，释放结合能的方法可以将轻核聚合成较重的核，也可以是将重核分裂成两个较轻的核。前者的典型例子，如由H-H的聚合在太阳内放出大量能量，核聚变的详细情况在第十一篇内叙述。

表 1.1 代表性的原子核及其辐射的物理性质(摘自ANL5800)

原子序数 (电荷)	核素或粒子	天然丰度(%)	半衰期(衰变形式)	质量 (以 ¹² C为基准)
1	¹ ₁ H	99.985	—	1.0078252
	² ₁ H(D)	0.015	—	2.0141022
	³ ₁ H(T)	≈0	12.26年(β ⁻)	3.0160299
2	⁴ ₂ He	100	—	4.0026036
3	⁶ ₃ Li	7.42	—	6.0151263
	⁷ ₃ Li	92.58	—	7.0160053
5	¹⁰ ₅ B	19.61	—	10.012939
	¹¹ ₅ B	80.39	—	11.0093051
92	²³³ ₉₂ U	—	1.62×10 ⁵ 年(α)	233.03950
	²³⁵ ₉₂ U	0.72	7.13×10 ⁸ 年(α)	235.04393
	²³⁸ ₉₂ U	99.27	4.51×10 ⁹ 年(α)	238.0508
94	²³⁹ ₉₄ Pu	—	2.44×10 ⁴ 年(α)	239.05216
0	¹ ₀ n	—	12.8分(β ⁻)	1.0086654
-1	⁰ ₋₁ e(β)	—	—	5.48597×10 ⁻⁴
+1	¹ ₁ P	—	—	1.0072766
+2	⁴ ₂ α	—	—	4.0015064
(+30~60)	FP	—	≈∞	≈90附近和≈140附近

1.1.3 放射性 (放射性衰变)

天然存在的原子核几乎都是稳定的，但有几种轻核和比铅重的核是不稳定的，放出⁴₂α粒子或⁰₋₁β粒子，变成更稳定的新核（前者是⁴₂He的原子核，后者是和电子⁰₋₁e相同的高速运动的粒子）。这种性质称为放射性，其现象称为放射性衰变。对于同位素，具有放射性的称为放射性同位素，多用英文缩写字母RI表示。另外，放射性衰变后生成的新核，有的仍然没有达到稳定的基态，还处于激发态。这时进一步放出γ射线（电磁波）最终达到稳定的状态。但是，即使这样生成的新核也还有许多是不稳定的，还要再次地反复进行放射性衰变，形成链式衰变，经过漫长的年月之后才变成稳定的核。如镭、铀以及由核裂变生成的新核——核裂变产物(FP)，就是这种核的典型代表。

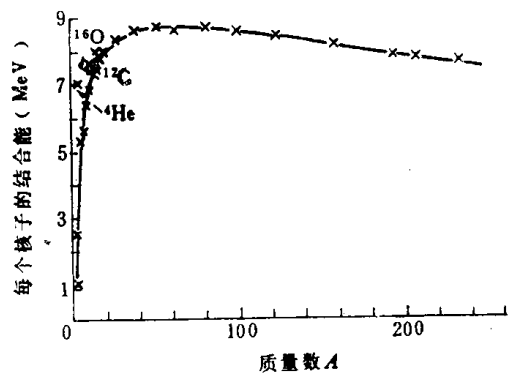


图1.1 每个核子的结合能和原子核质量数的关系

放射性核发生衰变的比率完全是一种几率，因为它的数值是由结合能的状态和放出粒子的能量而决定的，所以靠化学处理不能使它变化。这

个数值构成各种核的固有量，利用它可以分析放射性核素。

从上述的几率关系可知，在时刻 t ，放射性核素 N 个核的衰变率 dN/dt 与其总核数 N 成比例，如将比例常数定为 λ ，则可有下式：

$$dN/dt = -\lambda N$$

如将 $t=0$ 时的核数定义为 N_0 ，则，

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

由此可见放射性核素的衰变服从指数衰减规律。除采用核素的固有值——衰变常数 λ 来表示外，另一种更方便的表示法是采用放射性核素的量减少一半所需的时间，称为半衰期 $t_{1/2}$ 。

$t_{1/2} = 0.6931/\lambda$ 。而放射性活度的单位是用居里来表示。 $1\text{Ci}(\text{居里}) = 3.7 \times 10^{10}$ 衰变/秒。

1.1.4 辐射与原子、分子的相互作用

从原子核里射出的粒子或者结合体以及以电磁波的形式放出的原子核内外的能量统称为辐射。与反应堆关系较密切的辐射有 α 辐射、 β 辐射、 γ 辐射、X辐射、质子(p)、重氢核(d)、中子(n)以及裂变产物(FP)等。这些粒子由于某些原因得到能量而克服原子核或原子内的结合力跑出来，所以通常具有较大的动能。经常用电子伏作为能量单位，电子克服1伏电位差移动所需的能量定义为1电子伏(1电子伏 $=1.6 \times 10^{-12}$ 尔格)。

带电粒子(α 、 β 、 μ 、d、FP)以高速度通过物质，使原子核外的电子脱离轨道成为自由电子，失掉一些电子的原子成为带正电荷的离子。这称为电离现象(这时原子核没有变化)。具有这种能力的辐射称为电离辐射。在物质中粒子所能走过的距离叫射程。这个值与它所具有的动能成函数关系，对于同一类的辐射，能量越高，射程越远。这里值得注意的是，X辐射、 γ 辐射、中子等由于自身没有直接的电离能力，所以它们所走过的距离长，并且和物质相互作用能产生二次带电粒子。换言之，要阻止带电粒子，也就是说对它进行屏蔽是比较容易的。而对于非带电粒子的屏蔽包含着复杂的过程，所以比较困难。质量大的带电粒子FP，在固体中射程非常短，只有几十微米。如后面所述，裂变时放出的能量几乎都作为动能传给了FP。该能量是在发生核裂变的极其微小的范围内，它集中地传给物质，从而转换成热能。因此，只要是使用固体燃料，目前阶段还不能避免对材料结构的损伤。高能中子和 γ 辐射(进一步也还包括由此生成的高能二次电子)同样也显示了损伤效应。除固体的辐照损伤外，水由于受 β 辐射、 γ 辐射和快中子的照射也产生辐射分解，形成爆鸣气。

1.1.5 中子通量和截面

为了求得中子和原子核发生反应的几率，作如下定义，首先如假定平均速度为 v 的中子密度是 n ，那么每秒通过单位面积的中子数就等于 nv 。

其次将每个原子核发生核反应的几率叫做微观截面。这是把原子核作为有效截面 σ 厘米²的球体，而设想一个中子通过该截面的几率。因为原子核的半径是 10^{-12} 厘米量级，所以这个截面采用 10^{-24} 厘米²作为单位，称作靶恩。实际应用的单位还有毫靶恩(1/1000靶恩)。

核反应有种种形式，它们的发生几率可以由各个反应的几率和求得。所有反应几率的总和叫做总截面 σ_{tot} ，各个反应几率称作分截面。例如，中子的核反应包括散射(截面 σ_s)或吸收(截面 σ_a)，所以总截面应该是， $\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_a$ 。

在1厘米³中具有 N 个原子核的物质，其反应几率应为 $\Sigma = N\sigma$ ，称为宏观截面。设某物质的密度为 ρ ，原子量为 A ，则 ρ/A 是每1厘米³的摩尔数*。这里如用阿伏伽德罗常数 $6.02 \times$

* 原文误为原子数。——译者注

10^{23} 相乘, 可以求得 1 厘米³内的原子核数。由此可得

$$\Sigma = 6.02 \times 10^{23} \rho \sigma / A \quad (1.2)$$

i 种原子核同时存在时, 可使用在该体系中各自的单位体积原子核数 N_i , 与它的化学结合状态以及物质的形态无关。这样,

$$\sum_{i=1}^n N_i \sigma_i = N_1 \sigma_1 + N_2 \sigma_2 + N_3 \sigma_3 + \dots \quad (1.3)$$

宏观截面和中子通量的乘积 $\Sigma \phi$ 表示在 1 厘米³内某物质发生核反应的几率。另外, 中子在物质中, 在发生核反应之前移动的平均距离定义为平均自由程 λ , $\lambda = 1/\Sigma$ 。

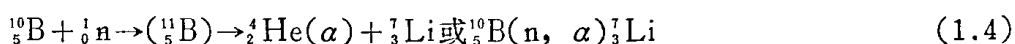
如前所述, 核反应几率和入射中子的能量有密切的关系, 一般作为能量的函数用 $\sigma(E)$, $\Sigma(E)$ 表示。在反应堆工程学里, 将中子按能量范围划分成组, 在各组中多以平均截面表示这一能量范围所占的反应截面部分, 这样的值称为组常数。

1.1.6 辐射和核反应

因为中子不带电, 所以它容易接近原子核, 即使能量很低也能与原子核发生相互作用。另外, 高能的 α 、 p 、 d 等带电粒子以及 γ 射线也能与核发生相互作用, 产生新的核。这些都称为核反应。其过程是入射粒子和靶核结合成为新核, 称作复合核。这新核是不稳定的。经过衰变生成第二个新的核。这时放出的粒子可以与入射粒子相同, 也可以不同。前者是散射, 后者是吸收。

散射进一步可以分成两种类型, 一种是粒子和核的总动能, 在碰撞前后保持不变的弹性散射。另一种是一部分能量作为靶核的激发能消耗了, 粒子和核的总动能发生了变化的非弹性散射。在由中子引起的核反应中, 几乎任何能量范围的中子都可以发生弹性散射。而非弹性散射, 只有在高能中子与非常重的核 (例如, 铀) 进行碰撞的情况, 或反应要有能量阈值的情况以及低能中子与分子结构非常坚固的核 (例如水分子中的氢) 相碰撞的情况等等这些限定条件下才能发生。另外, 在弹性散射中, 也包括中子仅仅接近原子核, 不生成复合核就离开的情况, 称为势散射。

以下试以吸收的情况为例, 用核反应方程式的形式表示:



(1.4) 式的 (n, α) 反应的例子中复合核 ${}^1_0\text{B}$ 在中子过剩时是不稳定的, 放出 α 粒子后趋于稳定。这种核反应称为放出带电粒子反应。主要是轻核发生的反应。一般情况下, 放出带电粒子的反应多是由一定阈值能量的入射粒子产生的阈值反应。但是, (1.4) 式是任意中子能量的少数例子。同时, ${}^6_3\text{Li}(\text{n}, \alpha){}^3_1\text{T}$ 反应也很好地被用于中子探测和中子屏蔽。下列之例则为, 复合核将激发能以 γ 辐射形式放出, 所以称为俘获:

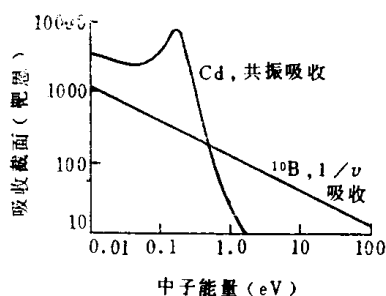
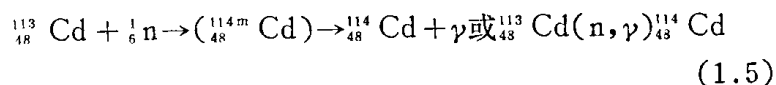


图1.2 ${}^{10}\text{B}$ 和 ${}^{113}\text{Cd}$ 的中子吸收截面和入射中子能量的关系

于稳定。这种核反应称为放出带电粒子反应。主要是轻核发生的反应。一般情况下, 放出带电粒子的反应多是由一定阈值能量的入射粒子产生的阈值反应。但是, (1.4) 式是任意中子能量的少数例子。同时, ${}^6_3\text{Li}(\text{n}, \alpha){}^3_1\text{T}$ 反应也很好地被用于中子探测和中子屏蔽。下列之例则为, 复合核将激发能以 γ 辐射形式放出, 所以称为俘获:



任何能量的中子都能引起这个反应, 物质与中子最容易发生吸收反应, 这时放出的 γ 辐射称作俘获 γ 辐射。这个 (1.5) 式的例子, 中子吸收率也非常大, 所以 Cd 可作反应堆的控制材料。

在特定的能量区域产生显著吸收的现象叫做共振吸收。如图1.2所示, Cd 的情况是在 0.4

电子伏附近有共振吸收。这样的现象在复合核的激发能级和入射能接近的情况下发生，这时中子能量范围一般在0.1~1千电子伏。吸收的发生几率和入射中子的速度成反比。上述的 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反应截面是严格遵守 $1/v$ 规律的典型例子（参见图1.2）。

1.1.7 核裂变

如用中子轰击铀的同位素 $^{235}_{92}\text{U}$ ， $^{235}_{92}\text{U}$ 的核可能分裂成两个中等质量原子核，这时还放出 ν 个中子（对热中子引起的裂变来说约为2.5个）。因此，这些中子就能进一步轰击其它的铀核，有可能维持链式反应。可控地维持这种链式反应的装置就是核反应堆。

核裂变生成的裂变产物或叫做裂变碎片的新核加上放出中子质量的总和与原来的铀质量相比是有差异的。而且这个差额等于能量 Q ，它以动能的形式传给放出的粒子：

$$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow \text{X} + \text{Y} + 2.5\text{n} + Q \text{ (约198兆电子伏)} \tag{1.6}$$

铀的同位素中数量最大的 $^{238}_{92}\text{U}$ 需要能量在1兆电子伏以上的快中子才能使它裂变，而 $^{235}_{92}\text{U}$ 是唯一天然存在的，任何能量的中子都可以使它产生裂变的同位素。此外， $^{238}_{92}\text{U}$ 俘获中子后生成的 $^{239}_{94}\text{Pu}$ 和 $^{232}_{90}\text{Th}$ 吸收中子后生成的 $^{233}_{92}\text{U}$ ，都是人造的原子核，与 $^{235}_{92}\text{U}$ 具有同样的可裂变性。这些能被任何能量中子引起裂变的物质叫易裂变物质，而像 $^{238}_{92}\text{U}$ 这样要某一能量以上的中子方能引起裂变的叫可裂变物质，原子序数在90以上的元素均与此相当。另外，俘获中子变成新的易裂变物质的那种物质是潜在的易裂变物质。易裂变物质和潜在易裂变物质统称为核燃料。表1.2汇集了一些核燃料特性。潜在的易裂变物质俘获中子变成易裂变物质的现象叫做转换。如果新生成的易裂变物质比消耗掉的要多的话，这就是增殖。提高同位素的天然浓度叫浓缩。例如铀的浓缩就是提高 ^{235}U 的浓度。

表 1.2 裂变物质的特性(摘自ANL5800)

		^{235}U	^{239}Pu	^{233}U	天然铀
由热中子产生	裂变时放出的中子数 ν	2.43	2.90	2.50	2.43
	裂变截面 σ_f	577	742	527	4.2
	辐射俘获截面 σ_γ	106	287	54	3.5
	燃料吸收一个中子后放出的中子数 $\eta_{th} = \frac{\sigma_f \nu}{\sigma_f + \sigma_\gamma}$	2.06	2.10	2.27	1.33
η_{fast} (由快中子产生)		2.18	2.74	2.60	1.09
质量数 (和 ^{12}C 的相对值)		235.04393	239.05216	233.03950	

^{235}U 核裂变时，中子几乎都是在 10^{-14} 秒以内放出，称为瞬发中子。而0.65%的中子是由裂变产物放出的，半衰期约为10秒左右，称之为缓发中子。一般可以分为6组，第 i 组的产额记作 β_i 。

核裂变时，一般生成质量数约为1比2的一对放射性碎片，如图1.3所示。它们在 β 衰变的同时还放出 γ 射线，连续几次衰变，其放射性是永久的。核裂变时不仅放出瞬发 γ 射线，也有缓发 γ 射线，反应堆停堆后仍继续有 γ 射线放出，这在安全对策上是值得重视的问题之一。

表1.3 ^{235}U 核裂变的缓发中子产额和它的平均寿命(摘自Keepin数据)

组	β_i	λ_i (秒 $^{-1}$)
1	0.027	3.01
2	0.075	1.14
3	0.258	0.301
4	0.127	0.111
5	0.142	0.0305
6	0.021	0.0124

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i = 0.0065, \quad \lambda_D = \beta / \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} = 0.077 \text{ (秒}^{-1}\text{)}$$

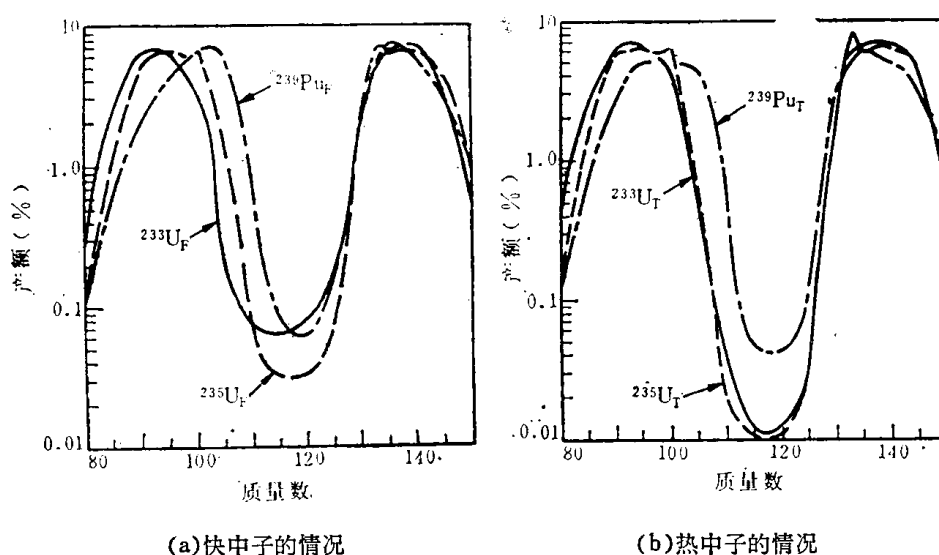


图1.3 ^{233}U 、 ^{235}U 及 ^{239}Pu 的裂变产额

如果存有裂变产物(不仅包括由核裂变直接生成的产物,也包括衰变的产物)的反应堆继续运行,那么由裂变还要生成新的裂变产物,裂变产物自身进行衰变以及俘获中子产生新核,这些反应之间将产生竞争并达到平衡。特别是当中子吸收截面大的Xe、Sm积累时,将影响裂变链式反应。另外,气体状态的裂变产物累积在燃料内,也将产生种种问题。

1.2 核裂变的链式反应

1.2.1 临界

反应堆的裂变链式反应由中子而得以自持,并保持堆内中子数不随时间而变化的状态,叫做临界。因为在反应堆内发生的裂变次数和中子数成正比,所以临界也可以说是功率一定的状态。一般情况要包含缓发中子的贡献,当需要特别强调时,称作缓发临界。

为表示堆内中子增减情况,引入有效中子倍增因子 k_{eff} 定义为

$$k_{eff} = \frac{\text{平均每一代中子寿命内产生的中子数(核裂变)}}{\text{平均每一代中子寿命内损失的中子数(吸收+泄漏)}} \quad (1.7)$$

临界时,其值当然是1。 $k_{eff} < 1$ 为次临界,中子数减少下去,链式反应不能自持。 $k_{eff} > 1$ 为超临界,中子数不断增加。另外,反应性 ρ 的量由下式定义: