



中国实验快堆系列丛书

快堆辐射防护

徐 铎 主编

赵郁森 编著

中国原子能出版传媒有限公司

中国实验快堆系列丛书

快堆辐射防护

徐 铎 主编
赵郁森 编著

中国原子能出版传媒有限公司

图书在版编目(CIP)数据

快堆辐射防护/赵郁森编著. —北京:中国原子能出版
传媒有限公司,2011.4
(中国实验快堆系列丛书/徐铄主编)
ISBN 978-7-5022-5187-1

I. ①快… II. ①赵… III. ①快堆—辐射防护 IV. ①TL43 ②TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 037071 号

内 容 简 介

本书为中国实验快堆(CEFR)理论基础知识培训的配套丛书,介绍了中国实验快堆辐射防护的基本知识和实际设施及系统。本书共分 6 章,包括与辐射防护相关的核物理学基本概念、常用的辐射防护的单位、辐射测量统计学基础知识、辐射探测基础、辐射防护基础、中国实验快堆的源项与防护、辐射监测的基本原理与中国实验快堆的各个监测系统和中国实验快堆废物来源及管理等内容。由于辐射防护是一门实用性学科,本书在介绍理论基础知识的同时,也叙述了辐射防护的有关法规和实际问题。

本书可供中国实验快堆操纵人员及中国其他快堆操纵人员作为理论基础知识培训使用,也可作为快堆辐射防护设计者的入门读物。

快堆辐射防护

出版发行 中国原子能出版传媒有限公司(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 卫广刚
技术编辑 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 16 字 数 400 千字
版 次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5187-1 定 价 64.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>
发行电话:010-68452845

E-mail:atomep123@126.com
版权所有 侵权必究

总 序

为了裂变核能的可持续应用,我国的基本战略是压水堆—快堆的匹配发展。快中子堆(简称快堆)是主要以平均中子能量比压水堆的热中子高百万倍的 $0.08\sim 0.1$ MeV 的快中子引起裂变链式反应的反应堆。快中子堆的主要特点是,快堆核电站运行时,新产生的易裂变核燃料钚多于消耗掉的钚,即增殖比大于 1,易裂变核燃料得到增殖,因此又称为快中子增殖反应堆。运行中真正消耗的是天然铀中不易裂变且天然丰度占 99.2% 以上的铀-238。快堆的乏燃料经后处理,钚返回堆内再烧,多余的钚则用于装载新的快堆。如此封闭并无限次循环则对铀资源的利用率可从单单发展压水堆的 1% 左右提高到 60%~70%。由于利用率的提高,更贫的铀矿也值得开采,这样世界可采铀资源将增千倍。

在热中子反应堆运行时,会产生长寿命次量锕系核素(MA),其产量约为所产工业钚的 1/10。锕系核素需要衰变三四百万年才能将其放射性毒性降到天然铀的水平。但这些核素在快中子场中可以裂变成一般裂变产物,因此,可用快中子焚烧堆将它们裂变掉,获得裂变能,达到变害为利,减少地质贮存的环境风险。

世界上快堆技术的发展已超过半个世纪,发展增殖快堆最适合的冷却剂是液态金属钠,这是所有快堆国家审慎选择的结果。

钠冷快堆是当前唯一现实的增殖堆,在闭式核燃料循环的支持下,可使我国核能实现长期可持续地安全供应。

钠冷快堆在我国是全新的核电工程。前核工业部 20 世纪 60 年代中后期开始组织钠冷快堆技术的基础研究,1986 年快堆技术发展纳入国家“八六三”高技术计划后,1988—1993 年进行了以实验快堆为目标的应用基础研究,1992 年 3 月国务院批准了建造 65 MW 热功率 20 MW 电功率实验快堆的目标,该堆于 2000 年开始建造。

在核工业研究生部的组织下,我们聘请了从事中国实验快堆设计及有丰富专业知识和经验的各专业专家编写了这部中国实验快堆系列丛书,包括如下 14 篇:

- 1 快堆概论
- 2 快堆物理基础
- 3 快堆热工流体力学

- 4 快堆本体及燃料操作系统
- 5 快堆主热传输系统及辅助系统
- 6 钠工艺基础
- 7 快堆蒸汽动力转换系统
- 8 快堆控制与保护
- 9 快堆电气系统与设备
- 10 快堆辐射防护
- 11 快堆材料
- 12 快堆通用机械设备
- 13 快堆安全分析
- 14 快堆运行

各篇编者多从本专业物理原理、尤其是从钠冷快堆独有的特征出发,结合中国实验快堆的设计成果深入浅出地编写成册,因此既适于大学本科毕业的主控室操纵人员培训也适于快堆高级管理人员学习快堆知识,也可供一般操作人员培训参考。

我国快堆工程分三步发展,各阶段目标具有主要技术选择的一致性。本丛书针对性强,因此对新参与我国后续的示范快堆和大型高增殖快堆的设计者们也是一种实用的入门教材。

这是我国钠冷快堆首部运行操作人员的培训丛书,由于经验不足,疏漏和错误在所难免,敬请各位专家、使用者们不吝指正。

徐 纯

2011年1月3日

前 言

快中子堆(简称快堆),是由快中子维持裂变链式的一类快堆。它无须中子慢化剂,但是相对于热堆而言,它必须使用易裂变材料相对富集的燃料。最新一代快堆使用 MOX 燃料和熔融钠冷却剂。

中国实验快堆(CEFR)是一个池式快中子反应堆,燃料为 64.4% 富集度的 ^{235}U ,使用熔融钠作为冷却剂。它的热功率为 65 MW、电功率为 20 MW。2010 年 7 月 21 日首次达到临界。

CEFR 的辐射防护原理和设施与压水堆核电厂有许多共同之处,但由于钠的活化特性与水的活化特性有着显著差异,CEFR 的辐射防护原理和设施另具特点。因此,为培训 CEFR 的运行人员编写了这本书。

本书是根据核工业研究生部审定的《CEFR 操纵人员基础理论培训教材》中《快堆辐射防护》的编写大纲,广泛听取意见和多年讲课的讲义基础上编写的,基本涵盖了《核电厂操纵人员执照考核标准》(EJ 1043—1996)附录 A 的有关内容。

本书介绍辐射防护的基础理论知识和与中国实验快堆有关的具体辐射防护设施,面向作为 CEFR 运行人员为培养目标的大学理工科毕业生;对快堆辐射防护感兴趣的设计者也是一本实用的入门读物。

核电厂运行最重要的是安全,辐射防护知识是保证运行安全的一个重要方面,而要保证安全运行最重要的因素是运行人员的良好素质。因此,运行人员必须要具有必要的核电厂辐射防护的基础知识,特别是对核电厂辐射防护基本概念的深入理解,以及对辐射防护设施和系统的熟悉。基于此,并考虑到培养对象大部分是非核专业的理工科毕业生,在书中首先介绍了与辐射防护有关的核物理学基本知识,作为其他章节的基础。本书的特点是尽量将我国辐射防护的有关国家标准与 CEFR 辐射防护的实际相结合,阐述 CEFR 设计和运行中辐射防护的基本理论。在此之后,叙述 CEFR 辐射防护的具体设施和系统的设计依据、工作原理、基本构成以及它们的特点。

本书分为 6 章。第 1 章介绍了与辐射防护相关的核物理学基本知识,以及电离辐射防护中经常使用的量和单位。第 2 章介绍了辐射探测和辐射测量统计学的基本知识。第 3 章介绍了辐射防护的基础知识。第 4 章至第 6 章分别介绍了 CEFR 的辐射防护、辐射监测和放射性废物处理,用较大的篇幅描述了 CEFR 的源项、辐射防护设施、辐射监测系统、放射性废物来源和排放量。

核电厂辐射防护是一门综合性实用学科,它不仅涉及有关学科的广泛内容,而且还涉及国家核电的有关法规、导则和各种标准。本书在选材上以介绍 CEFR 辐射防护基础知识和阐述基本概念为主,同时也介绍了有关辐射防护的国家标准及 CEFR 的一些实际辐射防护问题。因此书中所选用的数据和系统等内容不是以某个快堆为依据,而是采用《中国实验快堆最终安全分析报告》的有关内容。况且,国家标准和快堆的系统绝不是一成不变的,随着科学技术进步和生产实践,它们必然会不断修改和不断完善。因此,学习本书应着重理解快堆辐射防护的基本概念、基本原理和方法。

本书的出版,承蒙核工业研究生部、中国原子能科学研究院快堆工程指挥部及原子能出版社和有关同志的大力支持,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 2 月

目 录

第 1 章 基本概念	(1)
1.1 原子结构	(1)
1.1.1 原子和原子结构	(1)
1.1.2 原子序数和原子质量数	(2)
1.1.3 同位素和核素	(2)
1.1.4 原子核的结合能	(3)
1.2 放射性及其衰变规律	(6)
1.2.1 放射性	(6)
1.2.2 原子核的衰变规律	(6)
1.2.3 放射性活度衰变规律	(7)
1.2.4 原子核衰变类型	(7)
1.2.5 天然放射性核素	(10)
1.2.6 感生放射性	(10)
1.3 原子核反应	(11)
1.3.1 概述	(11)
1.3.2 原子核反应分类	(12)
1.3.3 核反应中的能量变化	(12)
1.3.4 CEFr 中常见的中子核反应	(12)
1.3.5 中子源	(13)
1.4 射线与物质的相互作用	(15)
1.4.1 X 射线和 γ 射线与物质的相互作用	(15)
1.4.2 中子与物质的相互作用	(20)
1.4.3 β 射线与物质的相互作用	(21)
1.5 辐射和辐射量	(25)
1.5.1 辐射	(25)
1.5.2 辐射量和单位	(25)
1.5.3 天然本底辐射	(33)
第 2 章 辐射探测基础	(43)
2.1 辐射探测基本原理	(43)
2.1.1 引言	(43)
2.1.2 电离法	(43)
2.1.3 电离室	(47)
2.1.4 正比计数管	(51)
2.1.5 G-M 计数器	(53)

2.1.6	闪烁探测器	(55)
2.1.7	固体探测器	(60)
2.1.8	中子探测器	(63)
2.2	辐射监测中的核电子学设备	(65)
2.2.1	辐射监测常用的测量仪表	(65)
2.2.2	核电子学系统	(67)
2.2.3	脉冲计数系统	(67)
2.2.4	单道分析器和多道分析器	(68)
2.3	辐射测量的统计学	(68)
2.3.1	概率分布	(68)
2.3.2	标准偏差	(77)
2.3.3	两类误差	(80)
2.3.4	探测限	(81)
2.3.5	灵敏度	(85)
第 3 章	辐射防护基础	(88)
3.1	辐射对机体的作用	(88)
3.1.1	常见的电离辐射的危害性	(88)
3.1.2	辐射的生物效应	(89)
3.1.3	辐射的生物效应的分类	(89)
3.1.4	辐射照射的分类	(91)
3.1.5	辐射风险与其他行业风险的比较	(91)
3.2	外照射和内照射的防护原则	(93)
3.2.1	外照射防护原则	(93)
3.2.2	内照射防护原则	(93)
3.3	实践与干预	(93)
3.3.1	实践	(93)
3.3.2	对实践的防护要求	(94)
3.3.3	干预及干预原则	(98)
3.3.4	事故预防和应急	(99)
3.4	辐射防护实践	(103)
3.4.1	辐射场内影响照射的因素	(103)
3.4.2	对各种射线的防护	(104)
3.4.3	γ 射线外照射的防护	(105)
3.4.4	中子外照射的防护	(114)
3.4.5	内照射防护	(123)
第 4 章	CEFR 的安全与防护	(129)
4.1	概述	(129)
4.1.1	CEFR 概况	(129)
4.1.2	CEFR 的辐射防护限值	(131)

4.2	CEFR 的辐射源	(132)
4.2.1	堆本体	(132)
4.2.2	冷却剂系统	(135)
4.2.3	辅助回路或系统	(138)
4.2.4	乏燃料的贮存与运输	(144)
4.3	CEFR 的屏蔽	(146)
4.3.1	堆本体屏蔽	(147)
4.3.2	工艺间屏蔽	(149)
4.4	CEFR 辐射照射评价	(155)
4.4.1	工作人员的职业照射	(155)
4.4.2	对环境的影响	(155)
4.4.3	核设施的辐射事故	(156)
4.5	降低工作人员受照的防护措施	(156)
4.5.1	分区与出入控制	(156)
4.5.2	屏蔽	(158)
4.5.3	通风	(159)
4.5.4	降低辐射源活度	(160)
4.5.5	放射性物质的包容	(162)
4.5.6	计划、组织与训练	(163)
4.6	降低居民受照的防护措施	(163)
4.6.1	厂址选择	(164)
4.6.2	防止放射性物质释放的多重屏障设计	(165)
4.6.3	放射性流出物排放控制	(166)
第 5 章	辐射监测	(168)
5.1	剂量测量	(168)
5.1.1	电离法测量 X 射线、 γ 射线剂量	(168)
5.1.2	中子剂量测量	(170)
5.1.3	剂量测量的其他方法	(172)
5.2	辐射防护监测	(174)
5.2.1	区域监测	(174)
5.2.2	个人剂量监测	(180)
5.3	辐射工艺监测	(182)
5.3.1	一回路边界完整性监测	(183)
5.3.2	破损元件监测	(185)
5.3.3	控制室进风空气监测	(187)
5.3.4	其他辐射工艺监测	(187)
5.4	放射性流出物监测	(188)
5.4.1	放射性流出物监测的目的和方案	(188)
5.4.2	气载放射性流出物监测	(189)

5.4.3	液态放射性流出物监测	(189)
5.4.4	放射性流出物监测的取样和测量	(189)
5.4.5	烟囱排气放射性监测	(191)
5.4.6	凝汽器抽气排气放射性监测	(192)
5.4.7	贮槽废液排放放射性监测	(192)
5.5	环境监测	(193)
5.5.1	环境监测目的和方案	(193)
5.5.2	环境监测方法	(195)
5.5.3	环境监测质量保证	(195)
5.5.4	环境质量评价	(196)
5.6	事故应急监测	(197)
5.7	CEFR 辐射监测	(198)
5.7.1	CEFR 辐射防护监测	(198)
5.7.2	CEFR 辐射工艺监测	(205)
5.7.3	CEFR 流出物监测	(210)
5.7.4	CEFR 燃料破损元件监测系统	(213)
5.7.5	CEFR 环境监测	(218)
第 6 章	放射性废物处理	(221)
6.1	概述	(221)
6.1.1	废物最小化	(221)
6.1.2	废物的处理原则	(222)
6.1.3	处理设施的功能	(223)
6.2	废物的分类及来源	(223)
6.2.1	放射性废物分类	(223)
6.2.2	CEFR 废物的来源	(224)
6.3	废物处理	(233)
6.3.1	液态废物处理	(233)
6.3.2	气体废物处理	(235)
6.3.3	固体废物处理	(235)
6.3.4	CEFR 废物管理	(236)
6.4	废物排放	(243)
6.4.1	概述	(243)
6.4.2	排出物放射性流出物的分析	(243)
6.4.3	对排放物放射性流出物的测量	(243)
6.4.4	排放标准	(244)
6.4.5	排放评价	(244)
	参考文献	(246)

第 1 章 基本概念

1.1 原子结构

1.1.1 原子和原子结构

自然界中,所有物质都是由分子组成的,分子又是由更小的微粒原子组成的。原子的半径只有 10^{-8} cm 左右,其质量也很小,一个氢原子的质量只有 $1.673\,559\times 10^{-24}$ g,自然界中最重的铀原子也只有 3.915×10^{-22} g。

原子是由电子和原子核组成的。电子在原子核周围按直径不同的轨道分层绕核运动,最多只能有两个电子在同一个轨道上运动。电子带负电荷,电子的电荷量用 e 表示, $1e=(1.602\,189\pm 0.000\,004\,6)\times 10^{-19}$ C。电子的质量 $m_e=9.109\,5\times 10^{-28}$ g。

原子中存在原子核的概念首先是由卢瑟福于 1911 年提出的。原子核几乎集中了原子的全部质量,且带有正电荷。原子核的半径约为原子半径的 10^{-4} 。

原子核是由更小的粒子组成的,它们是质子和中子。质子的质量 $m_p=1.672\,65\times 10^{-24}$ g,中子的质量 $m_n=1.674\,9\times 10^{-24}$ g。质子带有一个单位的正电荷,而中子不带电。

原子是电中性的。原子核中质子所带的电量等于核外轨道上所有电子的总电量,而两者的符号相反。

虽然原子核几乎集中了原子的全部质量,但它的质量还是非常小的。为方便起见,通常用一个特殊单位来度量原子和原子核的质量。1960 年的国际物理学会议和 1961 年的化学会议分别通过决议,确定以一个 ^{12}C 原子质量的十二分之一作为原子质量单位,记为 u(unit 的缩写),这个原子质量单位又称作碳单位,即 $1\text{ u}=1.992\,67\times 10^{-26}\text{ kg}/12=1.660\,56\times 10^{-27}\text{ kg}$ 。用碳单位表示的电子、质子、中子和氢原子的静止质量见表 1-1。

表 1-1 碳单位表示的几种粒子和氢原子的质量

名称	符号	质量/kg	原子质量单位/u
电子	e	$9.109\,5\times 10^{-31}$	0.000 548 6
质子	p	$1.672\,65\times 10^{-27}$	1.007 277
中子	n	$1.674\,954\times 10^{-27}$	1.008 665 2
氢	^1_1H	$1.673\,559\times 10^{-27}$	1.007 825

电子质量为 $5.485\,8\times 10^{-4}\text{ u}$ 。 ^{238}U 的原子质量为 238.050 786 u,它的 92 个电子质量为 $5.046\,9\times 10^{-2}\text{ u}$,占 ^{238}U 原子质量的 2.12×10^{-4} 。

一般的原子核数据表中只注明原子质量。如果忽略电子的结合能,原子核的质量近似为

$$m_N = m - Zm_e \quad (1-1)$$

式中, m_N ——原子核质量;

m ——原子的质量;

m_e ——电子的质量;

Z ——原子核外轨道上电子数目。

1.1.2 原子序数和原子质量数

通常用符号 ${}_Z^AX$ 表示不同元素的原子核,其中, X 为元素符号, Z 为原子序数, A 为原子质量数。

1.1.2.1 原子序数

原子核中质子的数目称为原子序数,用符号 Z 表示。原子序数确定了原子的化学特性,也确定了元素。氦的化学符号是 He , ${}^4\text{He}$ 的原子可以用 ${}_2^4\text{He}$ 表示,同样 ${}^{12}\text{C}$ 原子用 ${}_6^{12}\text{C}$ 表示。科学家发现了各种元素排列的规律性,这就是元素周期表。

1.1.2.2 原子质量数

如果忽略原子中电子的质量,原子的质量可用原子核的质量表示,即可以用原子核所含的质子和中子数目确定。原子核中质子数和中子数之和称为原子质量数,也称质量数,用符号 A 表示。

不同元素的原子,其原子核是不相同的。根本区别就在于组成原子核的质子数和中子数不同。中子和质子统称为核子。

1.1.3 同位素和核素

一种元素的原子核包含有相同的质子,但是,该元素的原子核可能包含不同的中子,这就是说一种元素可以有不同类型的原子核。元素磷(P)的原子序数为15,也就是说,每个磷原子核中含有15个质子,但是各个磷原子核含有不同数量的中子。这种含有相同质子数、不同中子数的原子称为同位素,它们在元素周期表上占有相同的位置。表1-2列出了元素磷的部分同位素。

表 1-2 元素磷的各种同位素

符号	中子数	质量数
${}_{15}^{28}\text{P}$	13	28
${}_{15}^{29}\text{P}$	14	29
${}_{15}^{30}\text{P}$	15	30
${}_{15}^{31}\text{P}$	16	31
${}_{15}^{32}\text{P}$	17	32
${}_{15}^{33}\text{P}$	18	33
${}_{15}^{34}\text{P}$	19	34

通常把具有相同质子数 Z 、中子数 N 的一类原子(核)称为一种核素,即核素是指任一种元素的任一种同位素,也就是说原子核构成(核内中子数和质子数及特定能态)完全相同的物质就是一种核素。某一种元素有多少种同位素就有多少种核素。核素分为稳定的和不稳定的两种,不稳定的核素称为放射性核素。例如氢元素有 ${}_1^1\text{H}$ 、 ${}_1^2\text{H}$ 和 ${}_1^3\text{H}$ 三种同位素,三者之中任何一种都称为核素。其中 ${}_1^1\text{H}$ 和 ${}_1^2\text{H}$ 是稳定的核素, ${}_1^3\text{H}$ 是不稳定的核素,即放射性核素。

天然存在的元素大多是同位素的混合物,例如,天然铀是三种同位素的混合物。这三种天然同位素是 ${}^{234}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 和 ${}^{238}\text{U}$ 。对于天然存在的元素,一种核素在它所属的天然元素中所

占的原子百分数称为该核素的天然丰度。例如, ^{238}U 核素的天然丰度为99.276%,也就是说在天然铀中有99.276%的 ^{238}U 。

用粒子(如反应堆中的中子)轰击天然同位素,可得到多种人工同位素,人工产生的同位素都是不稳定的同位素,最终将发生衰变放出粒子或 γ 射线变成稳定的元素。近几十年来,有若干种高原子序数的元素由人工制造出来,但这些元素都是不稳定的。

1.1.4 原子核的结合能

1.1.4.1 能量单位

核物理学或反应堆物理学的能量单位一般使用电子伏特(eV)表示。1 eV 为一个电子在真空中通过电位差为1 V 的电场时所获得的能量,它与国家标准所规定的能量单位焦耳(J)之间的关系为 $1\text{ eV}=1.602\,2\times 10^{-19}\text{ J}$ 。除 eV 外,有时也用千电子伏特(keV)、兆电子伏特(MeV)和吉电子伏特(GeV)等单位,它们与 eV 的关系分别为: $1\text{ keV}=10^3\text{ eV}$; $1\text{ MeV}=10^6\text{ eV}$; $1\text{ GeV}=10^9\text{ eV}$ 。

1.1.4.2 质量和能量的相互关系

按照爱因斯坦的质能关系式,质量和能量的相互关系为

$$E = mc^2 \quad (1-2)$$

式中, E ——物体的总能量;

c ——光在真空中的传播速度;

m ——运动物体的质量,称为动质量。

式(1-2)说明,物体的总能量与它的质量成正比,比例常数为 c^2 。

考夫曼(W. Kaufmann)于1902年通过实验证明,运动物体的质量随其运动的速度变化而变化,即

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2} \quad (1-3)$$

式中, $\beta=v/c$;

m_0 ——物体静止时具有的质量,称作静止质量;

v ——物体的运动速度;

c ——光在真空中传播的速度。

物体静止时具有的能量称为静止质量能。这就是说,任何一定质量的物体都具有相应的能量,即使它的运动速度为零,其总能量也不为零。根据质能关系式,1 g 物质的静止质量能为

$$E=0.001\text{ kg}\times(2.997\,9\times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2=8.997\,4\times 10^{13}\text{ J}$$

同理,一个原子质量单位的物质所相应的静止质量能为

$$E=1.660\,6\times 10^{-27}\text{ kg}\times(2.997\,9\times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2/(1.602\,2\times 10^{-13}\text{ J/MeV})=931.5\text{ MeV}$$

为了以后使用方便,将电子、质子和中子的静止质量和静止质量能列于表1-3。

光子(γ 射线)没有静止质量,它的动质量表示为

$$m_\gamma = E/c^2 = \hbar\nu/c^2 = \hbar/c\lambda \quad (1-4)$$

式中, $\hbar=6.626\,2\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$,称普朗克常数; ν 、 λ 分别为光子的频率和波长。

表 1-3 几种粒子的静止质量和静止质量能

粒子名称	符号	静止质量/u	静止质量能/MeV
电子	e	0.000 548 8	0.511
质子	p	1.007 276 5	938.279 7
中子	n	1.008 665 0	939.573 1

当物体以速度 v 运动时,考虑相对论效应,其动能 T 为

$$T = E - m_0 c^2 = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 (1/\sqrt{1-\beta^2} - 1) \quad (1-5)$$

如果 $v \ll c$, 即 $\beta \ll 1$, $1/\sqrt{1-\beta^2} = 1 + \beta^2/2$, 则式(1-5)变为

$$T = m_0 c^2 (1 + \beta^2/2 - 1) = m_0 v^2/2 \quad (1-6)$$

这就是经典力学的动能公式。

1.1.4.3 质量亏损

计算表明,原子核的质量总是小于组成它的所有核子的质量总和。如 ^2H 核由一个质子和一个中子组成,两个核子的质量和为 $m_p + m_n$, ^2H 原子核的质量为 $m_N(^2\text{H})$, 两者差值为

$$\Delta m = m_p + m_n - m_N(^2\text{H}) \quad (1-7)$$

如果用 ^1H 的原子质量代替 m_p , 用 ^2H 的原子质量代替 $m_N(^2\text{H})$, 多出的电子质量正好相减掉, 所以具体计算中可以用原子质量代替核质量, 即

$$\begin{aligned} \Delta m &= m(^1\text{H}) + m_n - m(^2\text{H}) \\ &= 1.007\,825\,\text{u} + 1.008\,665\,\text{u} - 2.014\,102\,\text{u} = 0.002\,388\,\text{u} \end{aligned}$$

对于 ^4He , 则有

$$\begin{aligned} \Delta m &= 2m(^1\text{H}) + 2m_n - m(^4\text{He}) \\ &= 2 \times 1.007\,825\,\text{u} + 2 \times 1.008\,665\,\text{u} - 4.002\,603\,\text{u} = 0.030\,337\,7\,\text{u} \end{aligned}$$

组成原子核的 Z 个质子和 $A-Z$ 个中子的质量之和与该原子核的质量之差称为原子核的质量亏损。所有原子核的质量亏损都是正值, 即

$$\Delta m(Z, A) = Zm(^1\text{H}) + (A-Z)m_n - m(Z, A) > 0 \quad (1-8)$$

式中, $m(^1\text{H})$ —— ^1H 的原子质量;

$m(Z, A)$ ——原子序数为 Z 、原子质量数为 A 的原子的质量。

在原子核的质量亏损计算中, 使用的是原子质量 $m(^1\text{H})$ 和 $m(Z, A)$ 。因为在计算 Δm 时, Z 个 ^1H 原子中的电子质量正好为 ^AX 原子中 Z 个电子的质量所抵消。严格地说这是一种近似, 因为在多电子的原子中 Z 个电子的结合能, 不等于 Z 个 ^1H 原子中电子的结合能之和, 不过其差别极小。

1.1.4.4 结合能

按照质能关系式, 既然核子结合成原子核时质量减小了 Δm , 那么相应能量的减小就是 $\Delta E = \Delta mc^2$ 。这说明, 核子结合成原子核时会释放出能量, 这个能量称为原子核的结合能, 结合能用符号 E_b 表示。相反, 把原子核分为组成它的各个核子时必须消耗相同的能量。

依据上述解释, ^2H 的结合能为

$$E_b = \Delta mc^2 = 1.660\,6 \times 10^{-27} \times 0.002\,388 \times \frac{(2.997\,9 \times 10^8)^2}{1.602\,2 \times 10^{-13}} = 2.224\,\text{MeV}$$

对于任何原子核,其结合能为

$$E_b = [Zm(^1\text{H}) + (A - Z)m_n - m(Z, A)]c^2 \quad (1-9)$$

由于 1 u 质量对应的能量为 931.5 MeV,所以原子核的结合能也可以表示为

$$E_b = [Zm(^1\text{H}) + (A - Z)m_n - m(Z, A)] \times 931.5 \text{ MeV} \quad (1-10)$$

式中, E_b 的单位为 MeV,质量的单位为 u。

任何两个相互吸引的物体,当它们的相对位置靠近时,总是要放出能量。核子间的作用力是短程强引力,其作用范围约为 $2 \times 10^{-15} \text{ m}$ 。当两个核子之间的距离小于这个数值时,就发生强吸引,并放出很大的能量。实验证明,能量为 0.025 eV 的中子被 H_2O 分子中的 ^1H 原子核吸收时,生成 ^2H 并放出 2.224 MeV 的能量。这就是说,束缚于 ^2H 核中的一个质子和一个中子的能量比它们处于自由状态时少 2.224 MeV。反之,若用能量为 2.224 MeV 的光子照射 ^2H 原子核时,它就可能被拆开,生成一个质子和一个中子,产生的这类中子就是反应堆中光致中子的来源。若光子的能量小于 2.224 MeV,这个过程就不能发生。

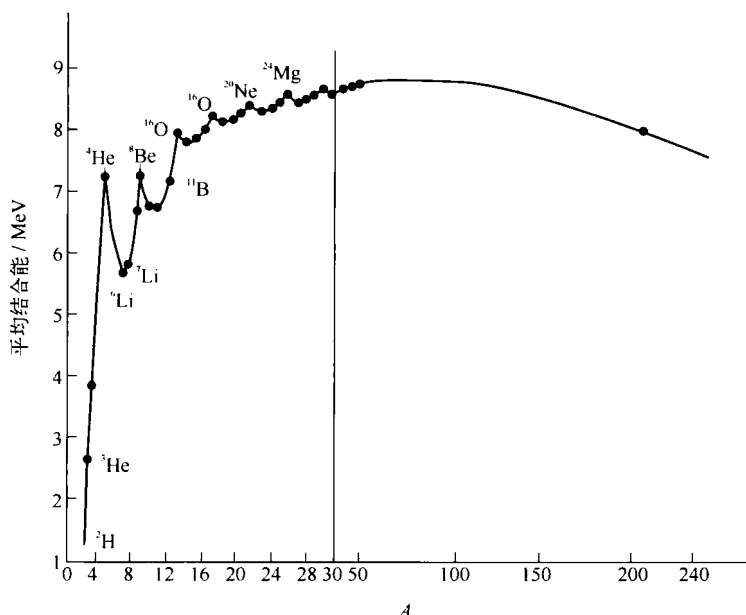
1.1.4.5 平均结合能

原子核的结合能除以该原子的质量数 A 所得的商,称为平均结合能,以 ϵ 表示,即

$$\epsilon = E_b / A \quad (1-11)$$

它表示原子核拆散成核子时,外界对每个核子所做功的最小平均值。或者说,表示核子结合成原子核时,平均一个核子所释放的能量。原子核的平均结合能越大,原子核内的核子结合得越紧。

以各原子核的平均结合能为纵坐标、质量数为横坐标对所有核素作图,得到如图 1-1 所示的曲线。



由图 1-1 可得出如下结论：

(1) 轻核区：若将平均结合能小的原子核结合成平均结合能大的原子核时，会伴随能量释放。例如， ^2H 原子核的平均结合能为 1.112 MeV， ^4He 原子核的平均结合能为 7.074 MeV，将两个 ^2H 原子核聚变为一个 ^4He 核时会释放出很大的能量。同理，将一个 ^2H 原子核与一个 ^3H 原子核聚变成一个 ^4He 原子核并放出一个中子时，也会释放出能量。这正是聚变堆的物理基础。

(2) 质量数 $A=40\sim 120$ 的中等原子核区：其平均结合能大，且几乎接近一个常数， $\epsilon=8.6\text{ MeV}$ 。

(3) 重核区：平均结合能比中等核小，例如铀核的平均结合能为 7.6 MeV。当重核裂变成两个中等核时，伴随很大的能量释放。若将 $A=236$ 的重原子核分裂成两个质量数为 $A=118$ 的原子核时，则每个核子的结合能可由 7.6 MeV 增至 8.6 MeV。即一个具有 236 个核子的原子核，分裂成两个具有 118 个核子的原子核，要释放出 236 MeV 的能量。这正是裂变反应堆的物理基础。

1.2 放射性及其衰变规律

1.2.1 放射性

100 多年前，法国物理学家贝可勒尔发现铀的化合物能使放在附近的照相底片感光。后来认识到这个现象是由于铀发射出来某种肉眼看不见的、穿透力极强的光线所致。此后的 10 多年里，科学家通过实验证实了某些天然核素的原子是不稳定的，它们能自发地转变成另一种核素的原子，并伴随着发射出某种粒子和能量。这种物理现象称为放射性，这种不稳定的核素称为放射性核素，这个转变过程称为放射性衰变。原子序数大于等于 84 的所有元素都是不稳定的，具有所谓的天然放射性；而原子序数小于 84 的元素主要以稳定的同位素形式存在，仅有少量的同位素是不稳定的。

1.2.2 原子核的衰变规律

放射性核素的衰变都有自己固有的衰变速度。衰变后产生的子体核素，有的是稳定的，有的仍是不稳定的。

一定数量的某种放射性核素并不是在某一时刻突然全部衰变完，而是随时间的增加而逐渐地减少。放射性核素在时间间隔 t 到 $t+\Delta t$ 内衰变的原子核数目 ΔN ，与 Δt 的大小及在 t 时刻没有衰变的原子核数目 N 成正比，即

$$\Delta N(t) = -\lambda N(t) \Delta t \quad (1-12)$$

式中， $\Delta N(t)$ 代表原子核数目 $N(t)$ 的变化，由于 $N(t)$ 是随 t 的增加而减少，所以 $\Delta N(t)$ 应为负值，式(1-12)右边有负号； λ 是一个比例常数，称为衰变常数。如果将式(1-12)变为式(1-13)

$$\lambda = -\Delta N(t) / (N(t) \Delta t) \quad (1-13)$$

则可知 λ 的物理意义为单位时间内，一个核素衰变的概率，单位为 s^{-1} 。