



压水堆核电站操纵人员基础理论培训系列教材

核电厂辐射防护

Radiation Protection of Nuclear Power Plants

赵郁森 编著



原子能出版社

压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材

核电厂辐射防护

Radiation Protection of Nuclear Power Plants

赵郁森 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核电厂辐射防护/赵郁森编著. —北京:原子能出版社,
2010. 1

(压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材)

ISBN 978-7-5022-4795-9

I. 核… II. 赵… III. 核电厂—辐射防护 IV. TM623 TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 012620 号

内 容 简 介

本书介绍了压水堆核电厂辐射防护的基本知识。全书共分六章,包括基本概念、辐射探测基础、辐射防护基础、核电厂辐射与防护、辐射监测和核电厂废物管理等内容。由于核电厂辐射防护是一门实用性课程,本书在介绍理论知识同时,也叙述了核电厂辐射防护的实际问题。

本书是压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材之一,也可供从事核电工程的相关技术人员及高等院校核工程专业的师生参考。

核电厂辐射防护

策 划 刘 朔 张 琳
出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 刘 朔
技术编辑 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中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 13.25 字 数 328 千字
版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-4795-9
印 数 1—2500 定 价 58.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn> E-mail:atomep123@126.com
发行电话:010-68452845 版权所有 侵权必究

《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》

编 委 会

主 任：王乃彦

副主任：李和香 李济民 肖 武

顾 问：邵向业 罗璋琳 李文埏 郑福裕 浦胜娣

委 员：（按姓氏拼音顺序排列）

丁云峰 顾颖宾 郭文琪 韩延德 郝老迷

黄兴蓉 李和香 李吉根 李济民 李文埏

李泽华 刘国发 罗璋琳 浦胜娣 阮於珍

邵向业 王 略 王乃彦 夏延龄 肖 武

阎克智 俞尔俊 臧希年 赵郁森 郑福裕

周一东

编委会办公室

主 任：肖 武

成 员：章 超 高小林 梁超梅 周 萍 宋 慧

樊 勤 付 冉

《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》

校 审 专 家

(按姓氏拼音顺序排列)

一审专家:

高秀清	高永春	李文埏	李永章	刘耕国
罗璋琳	彭木彰	浦胜娣	吴炳祥	夏益华
张培升	赵兆颐			

二审专家:

陈 跃	付卫彬	黄志军	蒋祖跃	李守平
马明泽	毛正宥	潘泽飞	唐锡文	王瑞正
魏 挺	薛峻峰	杨 炜	朱晓斌	

统审专家:

曹述栋	丁卫东	丁云峰	宫广臣	苟 峰
顾颖宾	郭利民	何小剑	黄世强	廖伟明
刘志勇	马明泽	毛正宥	缪亚民	戚屯锋
苏圣兵	孙光弟	王晓航	魏国良	吴 放
吴 岗	杨昭刚	俞卓平	张福宝	张志雄
周卫红				

前 言

核电厂操纵人员的素质关系到核电厂的安全运营,而培训工作是保证人员素质的基本环节之一。为适应当前我国大力发展核电的形势,保证核电厂操纵人员的培训质量,使基础理论培训满足国家核安全法规与行业规定的要求,便于对培训过程实施统一规范的管理,国家主管部门决定编写一套适用于核电厂操纵人员的基础理论培训教材——《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》。鉴于核工业研究生部在近20年的核电基础理论培训中,积累了丰富的教学及管理经验,具有稳定的师资队伍和较完整的教材体系,故由核工业研究生部具体承担教材编写的组织工作。

为了编好操纵人员培训教材,核工业研究生部牵头组织长期从事核电培训的专家、教授进行认真分析和讨论,根据我国现有堆型的特点,从压水堆核电厂入手,由核电厂、核动力运行研究所、操纵人员资格审查委员会等单位的专家共同参与编写。这套教材共十二册,包括《核反应堆物理》、《核反应堆热工水力学》、《核电厂辐射防护》、《核电厂材料》、《核电厂通用机械设备》、《核电厂水化学》、《核电厂电气原理与设备》、《核电厂核蒸汽供应系统》、《核电厂蒸汽动力转换系统》、《核电厂仪表与控制》、《核电厂核安全》、《核电厂运行概论》。这套教材内容以核电厂相关专业的基本概念、基本原理及基础知识为主,可为操纵人员下一步培训打下良好的理论基础。

本套教材是经过充分准备、精心组织而完成的。首先,根据核电厂操纵人员的培训目标,按照《核电厂操纵人员的执照考核标准》(EJ/T 1043—2004)的相关内容和要求进行课程设置、制定教材编写原则、明确每种教材应涵盖的内容;在总结以往教学经验的基础上,充分征求各核电厂专家的意见,形成了内容完整、要求明确的教材编写大纲。其次,聘请既有较高的专业水平又有较强的实际工作能力和丰富的教学

编者的话

《核电厂辐射防护》是根据核电基础理论培训教材编写大纲要求,在广泛听取核电专家意见的基础上编写的,是《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》之一,也可供核电厂相关人员参考使用。

本书根据《核动力厂运行安全规定》(HAF103)和《核电厂人员的配备、招聘、培训和授权》(HAD103/05)的要求,内容以基础理论知识、基本概念和基本原理为主,涵盖了《核电厂操纵人员的执照考核》标准(EJ/T1043-2004)附录 A 的有关内容。

本书以核工业研究生部核电厂操纵人员培训讲义《核电厂辐射防护》为基础,结合任课老师的教学实践作了修改和补充。在编写上,尽量从原理上着重讲清楚基本概念,并注意联系实际,将这些基本概念与核电厂的运行实际相结合。在内容选择和安排上,为便于读者理解,力求做到由浅入深,尽量避免艰深的理论和繁杂的公式推导,做到既突出重点,又具有一定的全面性、系统性。

全书共分 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 4~6 章分别介绍了压水堆核电厂的辐射与防护、辐射监测和放射性废物管理。

在编写过程中,夏益华和李守平等专家对本教材进行了仔细的审校,并提出了许多宝贵意见,李守平专家还提供了一些素材和插图,在此表示诚挚的谢意。

书中如有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2010 年 11 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	(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	(11)
1.3.3 核反应中的能量变化	(12)
1.3.4 压水堆中常见的中子核反应	(12)
1.4 射线与物质的相互作用	(13)
1.4.1 X 和 γ 射线与物质的相互作用	(13)
1.4.2 中子与物质的相互作用	(18)
1.4.3 β 射线与物质的相互作用	(19)
1.5 辐射和辐射量	(23)
1.5.1 辐射	(23)
1.5.2 辐射量和单位	(23)
1.5.3 天然本底辐射	(31)
复习题	(31)
第 2 章 辐射探测基础	(41)
2.1 辐射探测基本原理	(41)
2.1.1 引言	(41)
2.1.2 电离法	(41)
2.1.3 电离室	(45)

2.1.4	正比计数管	(50)
2.1.5	G-M 计数器	(51)
2.1.6	闪烁探测器	(53)
2.1.7	固体探测器	(58)
2.1.8	中子探测器	(61)
2.2	辐射监测中的核电子学设备	(63)
2.2.1	辐射监测常用的测量仪表	(63)
2.2.2	核电子学系统	(65)
2.2.3	脉冲计数系统	(65)
2.2.4	单道分析器和多道分析器	(66)
2.3	辐射测量的统计学	(66)
2.3.1	概率分布	(66)
2.3.2	标准偏差	(76)
2.3.3	两类误差	(79)
2.3.4	探测限和灵敏度	(79)
复习题		(84)
第 3 章 辐射防护基础		(87)
3.1	辐射对机体的作用	(87)
3.1.1	常见电离辐射的危害性	(87)
3.1.2	辐射的生物效应	(88)
3.1.3	辐射的生物效应的分类	(88)
3.1.4	辐射照射的分类	(90)
3.1.5	辐射风险与其他行业风险的比较	(90)
3.2	辐射防护原则	(92)
3.2.1	外照射防护原则	(92)
3.2.2	内照射防护原则	(92)
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	(93)
3.3.3	干预及干预原则	(98)
3.3.4	事故预防和应急	(98)
3.4	辐射防护实践	(102)
3.4.1	辐射场内影响照射的因素	(102)
3.4.2	对各种射线的防护	(104)
3.4.3	γ 射线外照射的防护	(104)
3.4.4	中子外照射的防护	(113)
3.4.5	内照射防护	(122)
复习题		(124)

第 4 章 核电厂辐射与防护 (128)

4.1 概述 (128)

4.1.1 压水堆核电厂简介 (128)

4.1.2 核电厂的辐射防护限值 (129)

4.2 核电厂的辐射源 (129)

4.2.1 堆本体 (129)

4.2.2 冷却剂系统 (132)

4.2.3 乏燃料的贮存与运输 (133)

4.2.4 废物处理系统 (133)

4.3 核电厂辐射危害 (134)

4.3.1 工作人员的职业照射 (134)

4.3.2 对环境的影响 (136)

4.3.3 核电厂的辐射事故 (137)

4.4 降低工作人员受照的防护措施 (138)

4.4.1 分区与出入控制 (138)

4.4.2 屏蔽 (140)

4.4.3 通风 (142)

4.4.4 降低辐射源活度 (144)

4.4.5 放射性物质的包容 (145)

4.4.6 计划、组织与训练..... (145)

4.5 降低公众受照的防护措施 (146)

4.5.1 厂址选择 (146)

4.5.2 防止放射性物质释放的多重屏障设计 (148)

4.5.3 放射性流出物排放控制 (149)

复习题..... (150)

第 5 章 辐射监测 (151)

5.1 剂量测量 (151)

5.1.1 电离法测量 X、 γ 射线剂量 (151)

5.1.2 中子剂量测量 (153)

5.1.3 剂量测量的其他方法 (154)

5.2 辐射防护监测 (156)

5.2.1 区域监测 (157)

5.2.2 个人剂量监测 (162)

5.3 辐射工艺监测 (164)

5.3.1 一回路边界完整性监测 (165)

5.3.2 破损元件监测 (168)

5.3.3 控制室进风空气监测 (169)

5.3.4 其他辐射工艺监测 (170)

5.4 放射性流出物监测 (170)

5.4.1	放射性流出物监测的目的和方案	(170)
5.4.2	气载放射性流出物监测	(171)
5.4.3	液态放射性流出物监测	(171)
5.4.4	放射性流出物监测的取样和测量	(172)
5.4.5	烟囱排气放射性监测	(173)
5.4.6	凝汽器抽气排气放射性监测	(174)
5.4.7	贮槽废液排放放射性监测	(174)
5.5	环境监测	(175)
5.5.1	环境监测目的和方案	(175)
5.5.2	环境监测方法	(177)
5.5.3	环境监测质量保证	(177)
5.5.4	环境质量评价	(178)
5.6	事故应急监测	(179)
	复习题	(179)

第 6 章	放射性废物管理	(181)
6.1	概述	(181)
6.1.1	废物最小化	(181)
6.1.2	废物的处理原则	(181)
6.1.3	处理设施的功能	(182)
6.2	废物的分类及来源	(182)
6.2.1	放射性废物分类	(182)
6.2.2	放射性废物的来源	(183)
6.3	废物处理	(187)
6.3.1	液态废物处理	(187)
6.3.2	废气处理	(189)
6.3.3	固体废物处理	(190)
6.4	废物排放	(192)
6.4.1	概述	(192)
6.4.2	放射性流出物的分析	(192)
6.4.3	对放射性流出物的测量	(193)
6.4.4	排放标准	(193)
6.4.5	排放评价	(194)
	复习题	(194)

索引	(195)
-----------------	--------------

参考文献	(199)
-------------------	--------------

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。

原子由电子和原子核组成。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, $1\text{ e}=(1.602\,189\pm 0.000\,004\,6)\times 10^{-19}$ 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,而两者的电性相反。

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 $1\text{ u}=1.992\,67\times 10^{-26}$ kg/ $12=1.660\,56\times 10^{-27}$ 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静止质量

粒子名称	符号	质量/kg	原子质量/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 $5.485\,8\times 10^{-4}$ u。 ^{238}U 的原子质量为 238.050 786 u,它的 92 个电子的质量为 $5.046\,9\times 10^{-2}$ 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

$$m_N = m - Zm_e$$

(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 ——原子核外轨道上的电子数目。

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 , 4He 的原子可以用 ${}_2^4H$ 表示,同样 ${}^{12}C$ 原子用 ${}_6^{12}C$ 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数和中子数目确定。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 元素磷的部分同位素

磷同位素	中子数	质量数
${}_{15}^{28}P$	13	28
${}_{15}^{29}P$	14	29
${}_{15}^{30}P$	15	30
${}_{15}^{31}P$	16	31
${}_{15}^{32}P$	17	32
${}_{15}^{33}P$	18	33
${}_{15}^{34}P$	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)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 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 和 ${}^3_1\text{H}$ 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 ${}^2_1\text{H}$ 是稳定的核素, ${}^3_1\text{H}$ 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分数称为该核素的天然丰度。例如, ${}^{238}\text{U}$ 核素的天然丰度为99.27%,也就是说在天然铀中有99.27%的 ${}^{238}\text{U}$ 。

用粒子(反应堆中的中子)轰击天然同位素,可得到700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

$$E = 0.001\text{ kg} \times (2.997\,9 \times 10^8\text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 8.97\,4 \times 10^{13}\text{ J}$$

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

$$T = E - m_0c^2 = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2(1/\sqrt{1-\beta^2} - 1) \quad (1-5)$$

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

$$T = m_0c^2(1 + \beta^2/2 - 1) = m_0v^2/2 \quad (1-6)$$

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, $m(^1\text{H})$ 为 ^1H 的原子质量;

$m(Z, A)$ 是原子序数为 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 ^A_ZX 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

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

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

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

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,并释放出很大的能量。实验证明,能量为 $0.025\,\text{eV}$ 的中子被 H_2O 分子中的 ^1H 原子核吸收时,生成 ^2H 并放出 $2.224\,\text{MeV}$ 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 $2.224\,\text{MeV}$ 。反之,若用能量为 $2.224\,\text{MeV}$ 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 $2.224\,\text{MeV}$,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

$$\epsilon = E_b / A \tag{1-11}$$

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,得到图 1-1 所示的曲线。

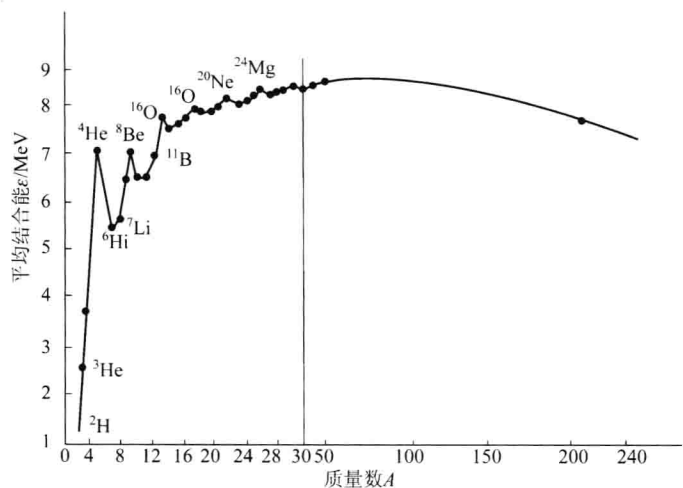


图 1-1 核子平均结合能与质量数的关系

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, $\epsilon=8.6$ 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。此后的十多年里,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

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

$\Delta N(t)$ 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。式中 λ 是一个比例常数,称为衰变常数。如果将式(1-12) 变为下式

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