



中国原子能科学研究院科学技术丛书

电离辐射防护 基础与实践

夏益华 主编



中国原子能出版社

中国原子能科学研究院科学技术丛书

电离辐射防护基础与实践

主 编：夏益华

副主编：董柳灿 陈 凌

编 著：张红见 赵郁森 王仲文

罗上庚 谢建伦 韩永超

肖雪夫 文富平

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

电离辐射防护基础与实践 / 夏益华主编. —北京:
中国原子能出版社, 2011. 12
ISBN 978-7-5022-5372-1

I. ①电… II. ①夏… III. ①电离辐射—辐射防护—
基本知识 IV. ①R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 235987 号

内 容 简 介

中国原子能科学研究院是我国成立最早的综合性原子能科学研究机构,历史长,学科面宽,电离辐射防护是其中的一个分支,始终在为我国核能和核技术应用事业的健康发展发挥着保驾护航的重要作用。本书共分 16 章及附录,在全面介绍电离辐射防护的理论和体系时,纳入了国际上近几年来的相关最新进展,同时介绍了电离辐射防护在多个方面的实践和应用。

本书内容丰富新颖,条理清晰,理论结合实际,可作为辐射防护和环境保护以及其他相关领域的有用参考书。

电离辐射防护基础与实践

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 谭 俊
责任校对 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 北京画中画印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 31.75
字 数 605 千字
版 次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5372-1
印 数 1—2500 定 价 98.00 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

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

出版委员会

主任 赵志祥

副主任 张昌明 柳卫平

委员 (按姓氏笔画为序)

万 钢	王 楠	王阿凤	王国保	尹忠红	石永康
叶宏生	叶国安	刘森林	许谨诚	李林虎	李和香
李树源	杨丙凡	张东辉	张生栋	张立红	张和平
张锦荣	张静波	陈 凌	陈建欣	邵焕会	罗志福
岳维宏	赵崇德	柯国土	姜兴东	夏海鸿	强家华
樊 胜					

编审委员会

顾问 (按姓氏笔画为序)

王乃彦	王方定	方守贤	阮可强	张焕乔	周永茂
钱绍钧	黄胜年	樊明武			

主任 赵志祥

副主任 柳卫平 许谨诚

委员 (按姓氏笔画为序)

勾 成	卢玉楷	叶国安	吕忠诚	朱升云	刘一兵
关遐令	汤秀章	杨红义	杨启法	肖雪夫	张万昌
张天爵	张先业	张伟国	张应超	陈玉宙	陈永寿
陈钟麟	范显华	林灿生	罗上庚	罗志福	竺礼华
金小海	金华晋	周祖英	姜 山	赵守智	贺佑丰
袁履正	顾忠茂	党淑琴	徐 铄	浦胜娣	容超凡
谢建伦	裴鹿成				

办公室

主任 尹忠红

副主任 李来霞

成 员 (按姓氏笔画为序)

马英霞	王丽英	王宝金	伍险峰	张小庆	骆淑莉
韩翠娥					

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 刘 朔 李 宁 杨树录 张关铭
张铄清 赵志军 侯惠群 谭 俊

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 丁怀兰 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 刘 朔 李 宁 杨树录 张关铭
张铄清 赵志军 谭 俊

总 序

中国原子能科学研究院创建于 1950 年,是我国核科学技术的发祥地和先导性、基础性、前瞻性的综合性核科学技术研究基地。

在党中央和上级部门的关怀和指导下,中国原子能科学研究院为我国的国防建设、国民经济建设和核科学技术的发展做出了重要贡献,造就了 7 位“两弹一星”功勋科学家和 60 多位两院院士,培养了大批科技人才,在核物理、核化学与放射化学、反应堆工程技术、加速器工程技术、同位素技术、核电子学与核探测技术、辐射防护、放射性计量等学科形成了自己的特色和优势,并拥有核科学与技术 and 物理学两个一级学科硕士、博士学位授予权。

为了系统地总结原子能院在核科学技术相关优势学科积累的知识和经验,吸收和借鉴国内外核科学技术最新成果,促进我国核科技事业的发展,我院决定组织出版《中国原子能科学研究院科学技术丛书》,并选定王淦昌、肖伦、丁大钊、王乃彦、阮可强等院士编著的《惯性约束核聚变》、《放射性同位素技术》、《中子物理学——原理、方法与应用》、《新兴的强激光》、《核临界安全》5 本专著首批出版,今后还将组织撰写更多的学术专著纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给为我国核科技事业献身的人们!

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》出版委员会

2005 年 9 月 1 日

前 言

我国核工业的发展已经走过了半个多世纪的历程,核能和核技术应用也已取得了举世瞩目的进展。在不久的将来,我国核电事业将得到空前的发展,到那时,核电发电量在我国总发电量中的比率将可能达到当前世界的平均水平,我国将由核大国向核电强国迈进。

安全与防护是发展的保障,核事业的迅猛发展必将对安全、防护提出更多、更高的要求。中国原子能科学研究院是我国最早开展辐射防护实践和研究的重要研究中心,为了更好地服务和推动我国辐射防护实践和研究的发展,我们特别组织了长期从事辐射防护的专家编写了《电离辐射防护基础与实践》。

本书共分为 16 章。第 1 章绪论,扼要介绍了辐射防护学科的任务、范围及其进展,由夏益华研究员编写;第 2 章和第 3 章是有关辐射防护的核物理学基础(电离辐射与物质的相互作用,电离辐射防护中常用的辐射量和单位),由陈凌研究员、韩永超副研究员编写;第 4 章电离辐射剂量学基础,由董柳灿研究员编写;第 5 章电离辐射的生物效应,由王仲文研究员编写;第 6 章人类活动引起天然辐射照射的升高及其防护,第 7 章辐射防护体系,第 8 章电离辐射防护与辐射源安全国家基本标准,这三章由夏益华研究员编写;第 9 章外照射的防护及剂量计算,9.1 至 9.6 节为夏益华研究员编写,9.7 节为肖雪夫研究员编写;第 10 章中子剂量的计算及防护,由陈凌研究员、韩永超副研究员编写;第 11 章内照射的剂量估算及其监测和防护和第 12 章辐射监测与照射剂量评价中的 12.1 至 12.9 节由夏益华研究员编写;第 12 章的 12.10 节由文富平高工编写;第 13 章运行辐射安全防护中,13.1 节是由张红见副研究员编写,13.2 节由赵郁森研究员编写,13.3 至 13.5 节由张红见副研究员编写,13.6 节由董柳灿研究员编写;第 14 章放射性废物管理和废物最小化,由罗上庚研究员编写;第 15 章环境影响评价,其中 15.1 节由谢建伦研究员编写,15.2 节由董柳灿研究员编写;第 16 章,核或辐射应急以及书

后的附录(包括附表和附图),由夏益华研究员编写或收集。

陈明峻研究员和任天山研究员对本书进行了认真的审阅,提出了许多宝贵的意见,在此表示由衷的感谢。

由于水平和时间的限制,本书还存在不足之处,望大家批评指正。

编写组

2010年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
参考文献	3
第 2 章 电离辐射与物质的相互作用	4
2.1 带电粒子与物质的相互作用	4
2.1.1 带电粒子与物质相互作用的方式	4
2.1.2 描述带电粒子与物质相互作用的几个概念	7
2.1.3 重带电粒子与物质的相互作用	8
2.1.4 β 射线与物质的相互作用	10
2.2 γ 射线与物质相互作用	13
2.2.1 光电效应	14
2.2.2 康普顿效应	15
2.2.3 电子对效应	18
2.3 中子与物质相互作用	19
2.3.1 弹性散射	20
2.3.2 非弹性散射	21
2.3.3 辐射俘获	22
2.3.4 其他核反应	22
参考文献	23
第 3 章 电离辐射防护中常用的量和单位	24
3.1 描述辐射场的量	24
3.1.1 粒子注量(Fluence) Φ	24
3.1.2 粒子注量率 φ	26
3.1.3 能注量 Ψ	26
3.1.4 能注量率 ψ	26
3.2 基本的剂量量	27
3.2.1 吸收剂量 D	27
3.2.2 当量剂量 H_T	28
3.2.3 有效剂量 E	29
3.3 辅助的剂量量	31

3.3.1	待积当量剂量和待积有效剂量	31
3.3.2	集体当量剂量和集体有效剂量	32
3.4	运行实用量	32
3.4.1	周围剂量当量 $H^*(d)$	33
3.4.2	定向剂量当量 $H'(d, \Omega)$	33
3.4.3	个人剂量当量 $H_p(d)$	34
3.5	比释动能	34
3.5.1	比释动能 K	34
3.5.2	比释动能与吸收剂量的关系	35
3.6	照射量	36
	参考文献	38
第4章 电离辐射剂量学基础		39
4.1	空腔电离理论	39
4.1.1	引言	39
4.1.2	法诺定理	39
4.1.3	空腔电离理论	40
4.1.4	大空腔和中等空腔	43
4.2	空腔电离室	46
4.2.1	结构简介	46
4.2.2	用空腔电离室测量空气吸收剂量和照射量	49
4.2.3	用空腔电离室测量介质中 X 或 γ 射线的吸收剂量	51
4.2.4	用空腔电离室测量介质中电子束和 β 射线的吸收剂量	53
4.3	吸收剂量测量的其他标准方法	54
4.3.1	测量吸收剂量的量热方法	54
4.3.2	测量吸收剂量的化学方法	57
	参考文献	62
第5章 电离辐射的生物效应		63
5.1	生物体对电离辐射的反应	63
5.1.1	辐射生物效应的发生过程	63
5.1.2	电离辐射对 DNA 的损伤	64
5.1.3	电离辐射对细胞的损伤	66
5.1.4	辐射与染色体畸变	66
5.1.5	辐射诱发的 DNA 损伤与修复	67
5.2	大剂量照射——确定性效应(组织反应)	68

5.2.1	确定性效应的概念	68
5.2.2	杀死细胞及体外细胞存活曲线	68
5.2.3	组织或器官确定性效应的剂量阈值	69
5.2.4	半致死剂量(LD50 剂量)	70
5.2.5	放射病	71
5.2.6	不同器官和组织的确定性效应	71
5.3	辐射的随机性效应——致癌效应	72
5.3.1	癌症的诱发	73
5.3.2	线性无阈的剂量响应关系	74
5.3.3	辐射致癌效应的概率估计	74
5.3.4	影响辐射致癌的生物学因素	75
5.3.5	辐射与其他复合因素的致癌作用	76
5.3.6	辐射致癌病因概率和病因判断	76
5.4	辐射的随机性效应——遗传效应	77
5.5	胎内照射效应	78
5.5.1	胚胎的致死效应	78
5.5.2	畸形	78
5.5.3	智力迟钝和智力下降	78
	参考文献	79
第 6 章	人类活动引起天然辐射照射的升高及其防护	80
6.1	天然辐射照射的来源及其本底水平	80
6.2	人为活动引起天然辐射照射水平的升高	84
6.2.1	我国对天然辐射照射问题的关注情况	84
6.2.2	国际上对天然照射问题的关注情况	86
6.3	对天然辐射照射的控制和防护	88
6.3.1	对天然辐射照射进行控制需要考虑的原则	89
6.3.2	法规和标准情况	90
	参考文献	91
第 7 章	辐射防护体系	93
7.1	辐射防护体系的形成	93
7.2	辐射防护体系的建立基础	96
7.2.1	辐射防护体系的研究工作基础	96
7.2.2	辐射防护体系的辐射生物效应基础	96
7.2.3	对天然本底照射的考虑	97

7.3	辐射防护体系的基本目的	97
7.4	辐射防护体系的基本组成	97
7.5	辐射防护体系的核心	100
7.6	辐射防护法规体系监管的范围	102
7.7	辐射防护与安全的国家基础结构	103
	参考文献	104
第8章	电离辐射防护与辐射源安全国家基本标准	105
8.1	体现新的进展	105
8.2	基本标准的结构和组成	105
8.2.1	四个层次	105
8.2.2	两类活动,两个子体系	106
8.2.3	三类照射	106
8.3	一般要求	106
8.3.1	对实践的适用	107
8.3.2	对实践中源的适用	107
8.3.3	适用于干预要求的具体对象	107
8.3.4	管理范围	108
8.3.5	主要责任方及其责任	108
8.3.6	实施的监督管理	109
8.4	对实践的主要要求	109
8.5	职业照射的控制	109
8.5.1	职业照射剂量限值	109
8.5.2	工作场所分区的目的和原则	110
8.6	医疗照射的控制	110
8.7	公众照射的控制	111
8.8	持续照射情况的干预	112
8.9	应急照射情况下的干预	112
	参考文献	112
第9章	外照射的防护及剂量计算	113
9.1	外照射防护的一般方法	113
9.2	γ 剂量率的计算	114
9.2.1	基于光子注量率计算 γ 剂量率	114
9.2.2	基于 γ 射线(点)源活度的剂量计算	115

9.2.3	比释动能率常数 Γ_k	116
9.2.4	γ 点源比释动能率的计算	117
9.2.5	非点源剂量率的计算	117
9.3	X、 γ 射线在物质中的减弱规律	123
9.3.1	窄束与宽束	123
9.3.2	窄束 X 或 γ 射线的减弱规律	123
9.3.3	宽束 X 或 γ 射线的减弱规律	126
9.4	γ 和 X 射线的屏蔽计算	129
9.4.1	利用宽束减弱规律计算 γ 屏蔽	130
9.4.2	查图、查表法	131
9.4.3	X 射线的屏蔽计算	134
9.5	带电粒子外照射的防护	138
9.5.1	β 粒子的剂量计算	138
9.5.2	带电粒子的屏蔽计算	142
9.6	辐射平衡与剂量互易原理	147
9.6.1	辐射平衡	147
9.6.2	剂量互易原理	148
9.7	利用蒙特卡罗方法计算外照射剂量	150
9.7.1	蒙特卡罗方法及其特点	150
9.7.2	蒙特卡罗方法的计算程序	152
9.7.3	MCNP 计算程序简介	153
9.7.4	利用蒙特卡罗方法计算外照射剂量举例	155
	参考文献	159
第 10 章	中子剂量的计算及防护	160
10.1	中子源	160
10.2	中子剂量的计算	161
10.2.1	快中子剂量计算	161
10.2.2	热中子剂量计算	162
10.2.3	比释动能算法	163
10.2.4	剂量换算因子法	163
10.2.5	蒙特卡罗模拟算法	163
10.3	中子的防护	164
10.3.1	中子屏蔽材料	164
10.3.2	中子屏蔽的计算	165

参考文献	167
第 11 章 内照射的剂量估算及其监测和防护	168
11.1 概述	168
11.2 专用名词解释	168
11.3 器官(组织)待积当量剂量的计算	169
11.3.1 比有效能量 $SEE(T \leftarrow S)$ 的计算	169
11.3.2 待积当量剂量的计算	170
11.3.3 待积有效剂量的计算	170
11.4 放射性核素进入人体的主要途径及其在体内的生物动力学模型	170
11.5 摄入滞留函数与摄入排泄函数	179
11.6 内照射监测	182
11.6.1 常规内照射监测计划的设计	182
11.6.2 测量方法	183
11.6.3 监测频度	185
11.6.4 参考水平:调查水平,记录水平	189
11.6.5 事故或事件后的评估	191
11.6.6 测量结果的解释与摄入量估算	191
11.7 内照射防护	193
11.7.1 防止放射性物质经呼吸道进入体内	193
11.7.2 防止放射性物质经口进入体内	193
11.7.3 建立污染控制区和内照射监测系统	194
参考文献	194
第 12 章 辐射监测与照射剂量评价	195
12.1 辐射监测的目的	195
12.2 辐射监测的分类	195
12.3 辐射监测的运行实用量	196
12.4 个人监测	197
12.4.1 需要进行个人监测的人员范围	197
12.4.2 个人外照射监测计划的设计	197
12.4.3 外照射个人剂量计的选择	198
12.4.4 内照射个人监测计划的设计	199
12.5 工作场所监测	200
12.5.1 工作场所外照射监测	200
12.5.2 表面污染监测	201

12.5.3	空气污染监测	201
12.6	环境监测	202
12.6.1	环境监测的对象和目的	202
12.6.2	环境监测的分类	202
12.6.3	几类环境监测简介	204
12.6.4	环境监测方案的制订原则	206
12.6.5	制订环境监测方案要考虑的因素和步骤	206
12.6.6	环境监测方案的基本内容	206
12.7	流出物监测	208
12.7.1	引言	208
12.7.2	流出物的排放类型与控制要求	208
12.7.3	流出物监测的法规要求	209
12.7.4	流出物排放的管理限值、运行限值、行动水平	210
12.7.5	流出物监测的目的	211
12.7.6	流出物监测计划编制的原则要求	211
12.7.7	不同设施的流出物监测内容	211
12.7.8	气载流出物监测计划的分级	212
12.8	环境样品的采集、预处理及其管理	213
12.8.1	样品与样品的代表性	213
12.8.2	取样原则	214
12.8.3	采样量的要求	215
12.9	辐射照射的评价	216
12.9.1	职业照射	216
12.9.2	公众照射	217
12.9.3	患者的医疗照射	217
12.9.4	有效剂量的应用	217
12.9.5	集体有效剂量	218
12.9.6	不确定度及其评估	219
12.10	中国原子能科学研究所的辐射监测实例	219
12.10.1	辐射监测计划	219
12.10.2	个人监测	223
12.10.3	流出物监测	224
12.10.4	辐射环境监测	227
12.10.5	工作场所监测	229

12.10.6	监测数据报送	231
12.10.7	监测工作的质量保证	231
参考文献	232
第 13 章	运行辐射安全防护	234
13.1	核设施不同阶段的辐射防护考虑	234
13.1.1	设施选址阶段	234
13.1.2	设施设计和建造阶段	235
13.1.3	运行阶段	237
13.1.4	安全文化建设	238
13.1.5	放射性废物管理	240
13.2	核电厂辐射防护	241
13.2.1	核电厂的辐射源项	241
13.2.2	核电厂辐射防护目标和基本原则	247
13.2.3	职业照射的控制	250
13.2.4	公众照射控制	258
13.2.5	核电厂的辐射监测	262
13.3	研究堆的辐射防护	265
13.3.1	研究堆基本概念	265
13.3.2	研究堆辐射危害特征和辐射安全控制措施	266
13.3.3	中国实验快堆的辐射防护	273
13.3.4	研究堆辐射安全评价实例	280
13.4	临界实验装置的辐射防护	284
13.4.1	临界实验装置概述	284
13.4.2	临界实验装置的辐射危害和安全控制措施	284
13.4.3	临界实验装置的辐射安全评价	288
13.4.4	日本 JCO 燃料制造厂临界事故的辐射后果分析	291
13.5	非密封放射源操作场所的辐射防护	294
13.5.1	非密封放射源操作场所的辐射防护原则	294
13.5.2	后处理设施的辐射防护	299
13.5.3	放射性固体废物处置前活动的辐射防护	310
13.5.4	同位素生产和应用的辐射防护	324
13.6	放射源及射线装置的辐射防护	336
13.6.1	引言	336
13.6.2	放射源的辐射防护	337

13.6.3 射线装置的辐射防护	350
参考文献	360
第 14 章 放射性废物管理和废物最小化	362
14.1 引言	362
14.2 放射性废物的管理	364
14.2.1 放射性废物管理原则	364
14.2.2 放射性废物分类	364
14.3 放射性废物的处理与处置	365
14.3.1 气载放射性废物的处理与排放	365
14.3.2 放射性废液的处理与固化	366
14.3.3 废源的处理	370
14.4 核设施退役	371
14.5 废物最小化	377
参考文献	379
第 15 章 环境影响评价	381
15.1 核设施环境影响评价	381
15.1.1 总论	381
15.1.2 大气环境影响评价	382
15.1.3 地面水(河流)环境影响评价	390
15.2 放射性物质运输环境影响评价	394
15.2.1 引言	394
15.2.2 目的和意义	394
15.2.3 货包及装运工具	395
15.2.4 运输线和运输情景	400
15.2.5 正常运输的环境影响评价	401
15.2.6 事故工况的环境影响评价	406
15.2.7 安全运输保障措施和质量保证大纲	414
15.2.8 事故应急预案	416
15.2.9 报告书的结论和建议	416
参考文献	416
第 16 章 核或辐射应急	418
16.1 引言	418
16.2 什么是核应急	418