



先进核电技术与核安全系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

电离辐射环境安全

Ionizing Radiation
Environment Safety

陆书玉 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



先 进 核 电 技 术 与 核 安 全 系 列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

电离辐射环境安全

Ionizing Radiation Environment Safety

陆书玉 主编



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为“十二五”国家重点图书出版规划项目“核能与核技术出版工程”之一。主要介绍电离辐射基础知识、辐射安全与防护基本概念、辐射安全与防护标准、核技术在医学与工业等领域应用的辐射防护、辐射环境监测、辐射环境管理和辐射事故管理等内容。

本书可供从事核技术利用、辐射安全与防护、辐射环境监测和辐射环境监督管理方面的专业人士以及对电离辐射环境安全感兴趣的有关人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电离辐射环境安全/陆书玉主编. —上海: 上海
交通大学出版社, 2016
核能与核技术出版工程
ISBN 978-7-313-14193-4

I. ①电… II. ①陆… III. ①电离辐射—辐射防护
IV. ①R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298904 号

电离辐射环境安全

主 编: 陆书玉

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 山东鸿君杰文化发展有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 244 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-14193-4/R

定 价: 78.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 15

印 次: 2016 年 3 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0533-8510898

丛书编委会

总主编

杨福家(复旦大学原校长,中国科学院院士)

编委(按姓氏笔画排序)

于俊崇(中国核动力研究设计院,中国工程院院士)

马余刚(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

马栩泉(清华大学核能技术设计研究院,教授)

王大中(清华大学原校长,中国科学院院士)

韦悦周(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

申 森(上海核工程研究设计院,研究员级高工)

朱国英(复旦大学放射医学研究所,研究员)

华跃进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

许道礼(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

孙 扬(上海交通大学物理与天文系,教授)

苏著亭(中国原子能科学研究院,研究员级高工)

肖国青(中国科学院近代物理研究所所长,研究员)

吴国忠(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

沈文庆(中国科学院上海分院,中国科学院院士)

陆书玉(上海市环境科学学会副理事长,教授)

周邦新(上海大学材料研究所所长,中国工程院院士)

郑明光(上海核工程研究设计院院长,研究员级高工)

赵振堂(中国科学院上海应用物理研究所所长,研究员)

胡立生(上海交通大学电子信息与电气工程学院,教授)

胡思得(中国工程物理研究院,中国工程院院士)

徐步进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

徐洪杰(中国科学院上海应用物理研究所原所长,研究员)

黄 钢(上海健康医学院院长,教授)

曹学武(上海交通大学机械与动力工程学院,教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

潘健生(上海交通大学材料科学与工程学院,中国工程院院士)

本书编委会

主 编 陆书玉

编 委(按姓氏笔画)

戈立新 朱建华 朱 毅 孙达人

汪名侠 陈继亮 罗丽娟 金 峰

顾乃谷 戴继伟

总 序

1896 年法国物理学家贝可勒尔对天然放射性现象的发现,标志着原子核物理学的开始,直接导致了居里夫妇镭的发现,为后来核科学的发展开辟了道路。1942 年人类历史上第一个核反应堆在芝加哥的建成被认为是原子核科学技术应用的开端,至今已经历了 70 多年的发展历程。核技术应用包括军用与民用两个方面,其中民用核技术又分为民用动力核技术(核电)与民用非动力核技术(即核技术在理、工、农、医方面的应用)。在核技术应用发展史上发生的两次核爆炸与三次重大核电站事故,成为人们长期挥之不去的阴影。然而全球能源匮乏以及生态环境恶化问题日益严峻,迫切需要开发新能源,调整能源结构。核能作为清洁、高效、安全的绿色能源,还具有储量最丰富、高能量密集度、低碳无污染等优点,受到了各国政府的极大重视。发展安全核能已成为当前各国解决能源不足和应对气候变化的重要战略。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》明确指出“大力发展核能技术,形成核电系统技术的自主开发能力”,并设立国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项”,把“钍基熔盐堆”核能系统列为国家首项科技先导项目,投资 25 亿元,已在中国科学院上海应用物理研究所启动,以创建具有自主知识产权的中国核电技术品牌。

从世界来看,核能应用范围正不断扩大。目前核能发电量美国排名第一,中国排名第六;不过核能发电的占比方面,法国占比约 74%,排名第一,中国仅约 2%,排名几乎最后。但是中国在建、拟建和提议的反应堆数比任何国家都多。相比而言,未来中国核电有很大的发展空间。2015 年为中国核电重启的关键年,据中国核能行业协会发布的最新数据显示,截至 2015 年 6 月底,中国投入商业运行的核电机组共 25 台,总装机容量为 2 334 万千瓦。值此核电发展的历史机遇期,中国应大力推广自主开发的第三代以及第四代的“快堆”、

“高温气冷堆”、“钍基熔盐堆”核电技术,努力使中国核电走出去,带动中国由核电大国向核电强国跨越。

随着先进核技术的应用发展,核能将成为逐步代替化石能源的重要能源。受控核聚变技术有望从实验室走向实用,为人类提供取之不尽的干净能源;威力巨大的核爆炸将为工程建设、改造环境和开发资源服务;核动力将在交通运输及星际航行等方面发挥更大的作用。核技术几乎在国民经济的所有领域得到应用。原子核结构的揭示,核能、核技术的开发利用,是 21 世纪人类征服自然的重大突破,具有划时代的意义。然而,日本大海啸导致的福岛核电站危机,使得发展安全级别更高的核能系统更加急迫,核能技术与核安全成为先进核电技术产业化追求的核心目标,在国家核心利益中的地位愈加显著。

在 21 世纪的尖端科学中,核科学技术作为战略性高科技学科,已成为标志国家经济发展实力和国防力量的关键学科之一。通过学科间的交叉、融合,核科学技术已形成了多个分支学科并得到了广泛应用,诸如核物理与原子物理、核天体物理、核反应堆工程技术、加速器工程技术、辐射工艺与辐射加工、同步辐射技术、放射化学、放射性同位素及示踪技术、辐射生物等,以及核技术在农学、医学、环境、国防安全等领域的应用。随着核科学技术的稳步发展,我国已经形成了较为完整的核工业体系。核科学技术已走进各行各业,为人类造福。

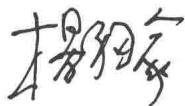
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统总结、整理一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需有一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

这套丛书的编委及作者都是活跃在核科学前沿领域的优秀学者,如核反应堆工程及核安全专家王大中院士、核武器专家胡思得院士、实验核物理专家沈文庆院士、核动力专家于俊崇院士、核材料专家周邦新院士、核电设备专家潘健生院士,还有“国家杰出青年”科学家、“973”项目首席科学家、“国家千人计划”特聘教授等一批有影响的科研工作者。他们都来自各大高校及研究单

位,如清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、上海大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、上海市辐射环境监督站等。本丛书是他们最新研究成果的荟萃,其中多项研究成果获国家级或省部级大奖,代表了国内甚至国际先进水平。丛书涵盖军用核技术、民用动力核技术、民用非动力核技术及其在理、工、农、医方面的应用。内容系统而全面且极具实用性与指导性,例如,《应用核物理》就阐述了当今国内外核物理研究与应用的全貌,有助于读者对核物理的应用领域及实验技术有全面的了解,其他书目也都力求做到了这一点,极具可读性。

由于本丛书良好的立意和高品质的学术成果,使得本丛书在策划之初就受到国家的重视,成功入选了“十二五”国家重点图书出版规划项目。另外,本丛书也受到上海新闻出版局的高度肯定,部分书目成功入选了“上海高校服务国家重大战略出版工程”。

在丛书出版的过程中,我们本着追求卓越的精神,力争把丛书从内容到形式上做到最好。希望这套丛书的出版能为我国大力发展核能技术提供上游的思想、理论、方法,能为核科技人才的培养与科创中心建设贡献一份力量,能成为不断汇集核能与核技术科研成果的平台,推动我国核科学事业不断向前发展。



2015 年 11 月

前 言

2014年4月15日,习近平总书记在中央国家安全委员会上首次提出总体国家安全观,并首次将核安全作为非传统安全纳入国家安全体系,充分体现了国家对核安全的高度重视和确保核安全的坚定信心。核安全是核能和核技术事业发展的生命线,是核能和核技术健康有序发展的重要保障。电离辐射环境安全作为核安全的一个重要组成部分,也越来越受到人们的关注。

为提高核技术应用行业从业人员、辐射环境管理人员、辐射环境监测人员的安全文化素养和辐射安全防护的专业知识水平,上海市环境科学学会组织有关专业技术人员编写了《电离辐射环境安全》一书。

本书内容包括电离辐射基础知识、辐射安全与防护基本概念、辐射安全与防护标准、核技术医学应用辐射防护、核技术工业等领域应用辐射防护、辐射环境监测、辐射安全管理和辐射事故管理等。本书不仅可用于广大核技术应用从业人员、相关管理人员的辐射安全防护知识培训,还可作为从事辐射安全防护工作的管理人员和专业技术人员的案头常备参考书。

本书在编写过程中,得到了国家环境保护部核安全管理司、上海市环境保护局、上海市辐射环境监督站领导和专家的关心和指导,提出了许多宝贵意见和建议。所有参与编写的人员为本书付出了辛勤劳动,在此表示衷心的感谢。限于编者的水平和经验,加上编写时间仓促,本书存在的不足之处,恳请读者批评与指正。

目 录

第 1 章 电离辐射基础知识	001
1.1 X 射线的发现	002
1.2 放射性的发现	003
1.3 自发核跃迁的主要类型	003
1.3.1 α 衰变	004
1.3.2 β^- 衰变	005
1.3.3 β^+ 衰变	006
1.3.4 轨道电子俘获(EC)	006
1.3.5 同核异能跃迁	007
1.4 放射性核素的衰变规律	008
1.4.1 半衰期	009
1.4.2 射线能量	010
1.5 核素、同位素及放射性活度	010
1.5.1 核素与同位素	010
1.5.2 放射性活度	010
第 2 章 辐射安全与防护的基本概念	013
2.1 辐射生物效应	013
2.1.1 辐射效应的分类	013
2.1.2 影响辐射效应的因素	014
2.2 辐射剂量学中常用量及其单位	015
2.2.1 照射量及其单位	015
2.2.2 吸收剂量及其单位	016

2.2.3	比释动能及其单位	017
2.2.4	剂量当量及其单位	017
2.2.5	当量剂量及其单位	018
2.2.6	有效剂量	019
2.2.7	集体剂量与集体有效剂量	020
2.3	辐射防护的基本方法	021
2.3.1	时间防护	022
2.3.2	距离防护	022
2.3.3	屏蔽防护	022
2.3.4	防止放射性物质进入体内	022
第3章	辐射安全与防护标准	025
3.1	辐射防护标准沿革	025
3.1.1	放射性工作卫生防护暂行规定	025
3.1.2	放射防护规定(GBJ8—74)	026
3.1.3	《放射卫生防护基本标准》(GB4792—84)与《辐射 防护规定》(GB8703—88)	026
3.1.4	《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》 (GB18871—2002)	027
3.2	辐射防护要求	027
3.2.1	实践的正当性	028
3.2.2	剂量限制和潜在照射危险限制	029
3.2.3	辐射安全与防护的最优化	029
3.2.4	剂量约束和潜在照射危险约束	030
3.3	职业照射的控制	030
3.3.1	职业限值	031
3.3.2	辐射工作场所的分区	034
3.3.3	个人防护用具的配备与应用	035
3.3.4	职业照射监测和评价	036
3.3.5	职业照射的记录	037
3.4	公众照射的控制	038
3.4.1	公众照射的剂量限制	038

3.4.2	外照射源的控制	038
3.4.3	非开放场所中放射性污染的控制	039
3.4.4	放射性废物管理	040
3.4.5	放射性物质向环境排放的控制	040
3.4.6	公众照射的监测	041
3.4.7	含放射性物质消费品的管理	043
3.5	我国现行相关标准	043
第4章	放射性同位素与射线装置的应用	047
4.1	辐射源	047
4.2	密封源的类型与性质	048
4.2.1	α 源	048
4.2.2	β 源	049
4.2.3	γ 源	050
4.2.4	中子源	050
4.3	密封源应用	050
4.3.1	γ 辐照装置	050
4.3.2	仪表上的密封源	051
4.3.3	医疗上应用	051
4.4	非密封源应用	053
4.4.1	放射性药物研制与生产	053
4.4.2	核素发生器	054
4.5	射线装置应用	055
4.5.1	加速器	055
4.5.2	X 射线机	056
4.6	放射源和射线装置的分类	056
4.6.1	放射源分类	056
4.6.2	射线装置分类	060
第5章	医用 X 射线诊断辐射防护	061
5.1	概述	061
5.2	正当性判断	062

5.3	合理应用	062
5.4	设备要求	064
5.5	X 射线设备机房防护要求	066
5.6	防护安全操作要求	070
5.7	CT 检查中的辐射防护	071
5.7.1	概述	071
5.7.2	CT 机房防护要求	072
5.7.3	CT 操作中的防护要求	073
5.7.4	降低 CT 检查中患者受照剂量的方法	073
5.8	介入放射学中辐射防护	074
5.8.1	概述	074
5.8.2	介入放射学防护特点	075
5.8.3	机构、设备和人员要求	076
5.8.4	介入放射学中患者防护	077
5.8.5	介入放射学中工作人员防护	077
5.9	医用 X 射线诊断质量管理	078
5.9.1	医学影像质量管理	078
5.9.2	X 射线诊断装置的质量控制检测	079
第 6 章	临床核医学辐射防护	081
6.1	概述	081
6.1.1	核医学应用与发展	081
6.1.2	核医学工作特点	082
6.2	辐射危害因素分析	082
6.2.1	外照射危害	083
6.2.2	内照射危害	084
6.2.3	放射性(三废)对周围环境影响	085
6.2.4	常用放射性核素特性	086
6.3	工作场所辐射防护	086
6.3.1	工作场所的分级	086
6.3.2	工作场所分区	087
6.3.3	工作场所布局	088

6.3.4	工作场所的辐射防护要求	088
6.3.5	放射性药物操作防护要求	089
6.3.6	核医学治疗的防护	090
6.3.7	个人防护用具	090
6.3.8	医用放射性废物管理	091
6.4	PET-CT 辐射防护	093
6.4.1	辐射危害	094
6.4.2	工作场所辐射防护要求	095
6.4.3	工作人员防护措施	096
6.5	核医学治疗中的辐射防护	097
6.5.1	^{131}I 治疗中的辐射防护	097
6.5.2	^{90}Y 治疗患者护理要求	099
6.5.3	^{89}Sr 治疗患者护理要求	100
6.6	放射性粒籽源植入治疗辐射防护	101
6.6.1	粒籽植入治疗特点	101
6.6.2	辐射源项分析	101
6.6.3	粒籽植入工作条件要求	101
6.6.4	粒籽植入中的防护	102
6.7	临床核医学质量管理	103
6.7.1	质量保证	103
6.7.2	质量控制	104
第7章	放射治疗中的辐射防护	107
7.1	概述	107
7.2	医用电子直线加速器辐射防护	108
7.2.1	加速器工作原理	108
7.2.2	辐射源项	109
7.2.3	辐射危害因素分析	111
7.2.4	医用加速器治疗室辐射防护要求	112
7.2.5	医用加速器安全操作要求	112
7.3	后装 γ 源近距离治疗装置辐射防护	113
7.3.1	工作原理	113

7.3.2	辐射源项	113
7.3.3	辐射危害因素分析	113
7.3.4	后装放射治疗室防护要求	113
7.3.5	后装放射治疗安全操作	114
7.4	γ 刀辐射防护	114
7.4.1	结构原理	114
7.4.2	治疗室防护要求	115
7.4.3	安全操作要求	115
7.5	放射治疗中的质量保证与质量控制	116
7.5.1	放射治疗质量保证	116
7.5.2	放射治疗质量控制	117
第8章	工业辐照装置辐射防护	119
8.1	概述	119
8.1.1	γ 辐照装置用途	119
8.1.2	γ 辐照装置类型	120
8.1.3	辐照装置工艺设备配置与功能	121
8.2	工业用辐照装置的安全防护原则	123
8.2.1	纵深防护原则	123
8.2.2	冗余防护原则	123
8.2.3	多样性防护原则	124
8.2.4	独立性防护原则	124
8.2.5	安全分析原则	124
8.3	工作场所辐射防护	125
8.3.1	工作场所布局与分区	125
8.3.2	辐照室安全防护	125
8.4	放射源安装时的安全防护	127
8.4.1	安装前的准备	127
8.4.2	安装时的安全操作	127
8.4.3	剂量监测	128
8.5	放射性“三废”管理	128
8.5.1	固体废物	128

8.5.2	液态废物	129
8.5.3	气态废物	129
第 9 章	工业射线探伤辐射防护	131
9.1	工作原理与类型	131
9.1.1	工业射线探伤的基本原理	131
9.1.2	工业射线探伤类型	132
9.1.3	工业射线探伤的特点	133
9.2	γ 射线探伤辐射源项	133
9.2.1	γ 射线探伤放射源要求	133
9.2.2	常用 γ 放射源的特性	133
9.3	工业 γ 射线探伤辐射防护	134
9.3.1	γ 射线探伤作业操作程序	134
9.3.2	γ 射线探伤装置的防护性能要求	135
9.3.3	放射源的安全防护要求	136
9.3.4	工作场所的辐射防护要求	136
9.3.5	使用 γ 射线探伤装置单位的要求	137
9.3.6	工业 γ 射线探伤的防护监测	139
9.3.7	现场 γ 射线探伤控制区距离的计算	140
9.4	工业 X 射线探伤辐射防护	142
9.4.1	两类射线探伤的区别	142
9.4.2	设备要求	142
9.4.3	工作场所辐射防护要求	143
9.4.4	工业 X 射线探伤的防护监测	144
9.5	辐射事故与预防对策	145
9.5.1	密封源常见事故的处理原则	145
9.5.2	射线装置常见事故的处理原则	146
9.5.3	γ 射线探伤突发事件的应急处置	146
第 10 章	含密封源仪表辐射防护	149
10.1	仪表类型	149
10.1.1	透射式仪表	149

10.1.2	反射式仪表	150
10.1.3	反应式仪表	151
10.2	仪表的工作原理	152
10.2.1	料位计	152
10.2.2	密度计	153
10.3	仪表的辐射防护	153
10.3.1	屏蔽防护	153
10.3.2	防护措施	154
10.3.3	含密封源仪表的维护和源泄漏检验	155
10.3.4	工作场所警戒线的设置	156
10.3.5	含密封源仪表的贮存	156
10.3.6	操作人员的防护与管理	157
10.3.7	含密封源仪表突发事件的应急处理	157
第 11 章	安全检查系统辐射防护	159
11.1	货物/车辆辐射检查系统安全防护	159
11.1.1	检查系统组成与分类	159
11.1.2	工作流程	160
11.1.3	辐射工作场所分区	160
11.1.4	辐射水平控制要求	161
11.1.5	检查系统辐射安全要求	161
11.1.6	安全操作要求	163
11.2	X 射线行李包检查系统辐射防护	164
11.2.1	结构组成与类型	164
11.2.2	安全检查工作流程	164
11.2.3	检查系统安全防护要求	165
11.2.4	检查系统使用中的安全防护要求	166
11.2.5	操作人员防护措施	166
第 12 章	辐射环境监测	167
12.1	监测目的和分类	167
12.2	辐射监测仪器	168