



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

# 电离辐射防护基础 与应用

Basics and Application for  
Protection Against Ionizing  
Radiation

朱国英 陈红红 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

# 电离辐射防护基础与应用

Basics and Application for Protection  
Against Ionizing Radiation

主 编 朱国英 陈红红

副主编 (按姓氏笔画排序)

王洪复 凤志慧

刘海宽 花正东

陈春晖 高林峰

翟江龙



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。主要内容包括电离辐射基础知识与剂量、辐射生物效应与分子机理、放射损伤与生物剂量估算、核素内污染与促排、辐射监测技术与方法、辐射防护基础与防护体系、放射性废物管理,以及近年国内外有关电离辐射防护与安全管理最新进展,兼具理论性、实用性和可读性。

本书可供高等院校放射医学与防护专业方向的教学与参考,也可供从事辐射安全与防护工作的研究人员、技术人员、放射工作人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电离辐射防护基础与应用 / 朱国英, 陈红红主编.

—上海: 上海交通大学出版社, 2016

核能与核技术出版工程

ISBN 978-7-313-14194-1

I. ①电… II. ①朱… ②陈… 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 298755 号

## 电离辐射防护基础与应用

主 编: 朱国英 陈红红

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: 480 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-14194-1/R

定 价: 148.00 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: 28.75

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)

# 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2334万千瓦。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。

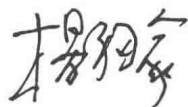
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统总结、整理一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需有一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

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

随着核能与核技术的发展和广泛应用,电离辐射与人们的生活和工作关系日益密切。电离辐射应用在给人们带来净利益的同时,也存在着防护与安全的隐患,尤其是苏联切尔诺贝利核电站事故和 2011 年日本福岛核电站泄漏事件后,人们更是谈“核”色变。电离辐射的生物效应、辐射防护与安全、放射性废物的处置等再次引起了广泛关注。

在电离辐射生物效应和辐射防护研究的早期阶段,有关确定性效应的表现和医学救治等为人们所重视,但近年来,随着辐射防护技术的发展和人们对电离辐射生物效应的深入研究,有关电离辐射随机性效应尤其是低剂量电离辐射诱导的可能损伤(包括随机性效应、旁效应、基因组不稳定性和遗传效应等),以及非损伤效应(包括适应性反应和兴奋性效应等)为人们所关注,已取得了许多重要和突破性的进展。本书内容涵盖了国际和国内有关辐射损伤效应与机制、医学处理、生物剂量估算、辐射防护基础的研究进展与应用实践。

全书共 11 章,其中第 1 章、第 2 章中的第 5 节、第 3 章和第 7 章中的第 1 至第 3 节由朱国英(复旦大学放射医学研究所)编写;第 2 章中的第 1 至第 4 节由花正东(上海市奉贤区环境监测站)编写;第 4 章由凤志慧(山东大学公共卫生学院)编写;第 5 章由王洪复(复旦大学放射医学研究所)编写;第 6 章和第 7 章中的第 4 节由陈红红(复旦大学放射医学研究所)编写;第 8 章由翟江龙(复旦大学放射医学研究所)编写;第 9 章由高林峰(上海市疾病预防控制中心)编写;第 10 章由陈春晖(上海市卫生和计划生育委员会监督所)编写;第 11 章由刘海宽(复旦大学放射医学研究所)编写。

本书涉及放射生物学、放射剂量学、辐射防护、辐射安全与管理体系等方面内容。鉴于编者专业知识和深度的限制,书中存在的不足之处,敬请各位读者提出意见和建议,以便今后修订和完善。



# 目 录

第 1 章 电离辐射概述 .....	001
1.1 辐射的概念和种类 .....	002
1.1.1 电磁辐射和粒子辐射 .....	002
1.1.2 电离辐射和非电离辐射 .....	004
1.2 放射性 .....	004
1.2.1 定义和单位 .....	004
1.2.2 放射性衰变 .....	006
1.3 电离辐射的来源 .....	021
1.3.1 天然辐射源 .....	021
1.3.2 人工辐射源 .....	023
1.4 电离辐射与物质的相互作用 .....	027
1.4.1 带电粒子与物质的作用 .....	027
1.4.2 X 射线、 $\gamma$ 射线与物质的作用 .....	028
1.4.3 中子与物质的作用 .....	028
参考文献 .....	029
第 2 章 电离辐射防护领域中常用的量和单位 .....	031
2.1 基本量和单位 .....	031
2.1.1 半衰期 .....	031
2.1.2 活度 .....	032
2.1.3 注量与注量谱分布 .....	032
2.1.4 质量衰减系数 .....	033
2.1.5 质能吸收系数 .....	035

2.1.6	累积因子	036
2.1.7	辐射长度	037
2.1.8	阻止本领与带电粒子射程	037
2.1.9	照射量	042
2.1.10	比释动能	043
2.1.11	吸收剂量	044
2.2	防护量和单位	050
2.2.1	器官吸收剂量	050
2.2.2	器官当量剂量	050
2.2.3	有效剂量	051
2.3	监测实用量和单位	052
2.3.1	空气比释动能	052
2.3.2	周围剂量当量	053
2.3.3	定向剂量当量	057
2.3.4	个人剂量当量	058
2.4	外照射剂量的计算	060
2.4.1	X与 $\gamma$ 外照射的剂量计算	060
2.4.2	中子外照射的剂量计算	071
2.4.3	电子外照射剂量的计算	074
2.4.4	其他辐射粒子的剂量计算	075
2.4.5	常用的外照射剂量计算软件简介	076
2.5	内照射剂量的估算	079
2.5.1	放射性核素摄入量的估算	079
2.5.2	用于内照射剂量估算的生物动力学模型	081
2.5.3	待积有效剂量的估算	085
2.5.4	参考人体模型	087
	参考文献	088
<b>第3章</b>	<b>电离辐射的生物效应</b>	<b>091</b>
3.1	确定性效应(有害的组织反应)	092
3.1.1	组织和器官反应	093
3.1.2	细胞存活曲线	094

3.1.3	确定性效应的剂量阈值 .....	095
3.1.4	放射病 .....	097
3.1.5	主要组织和器官的反应 .....	098
3.2	随机性效应 .....	103
3.2.1	致癌效应 .....	104
3.2.2	遗传效应 .....	107
3.2.3	随机性效应的辐射危险度评估 .....	109
3.3	其他辐射效应 .....	115
3.3.1	非癌症疾病效应 .....	115
3.3.2	出生前(宫内)照射效应 .....	116
3.4	电离辐射生物效应的影响因素 .....	116
3.4.1	电离辐射相关因素 .....	117
3.4.2	机体相关因素 .....	120
3.4.3	环境因素 .....	121
3.5	关于电离辐射健康效应的概述 .....	121
	参考文献 .....	122
<b>第 4 章</b>	<b>电离辐射生物效应的分子基础 .....</b>	<b>125</b>
4.1	概述 .....	125
4.2	靶学说和靶分子 .....	126
4.2.1	靶效应 .....	127
4.2.2	基因组 DNA 的辐射效应 .....	131
4.2.3	染色质的辐射效应 .....	139
4.2.4	生物膜的辐射效应 .....	142
4.3	信号转导和基因诱导 .....	145
4.3.1	细胞通信和信号转导概述 .....	145
4.3.2	辐射信号转导中的信使分子及早期基因表达调控 .....	147
4.4	小剂量电离辐射生物效应的研究进展 .....	150
4.4.1	适应性反应 .....	150
4.4.2	免疫兴奋效应 .....	155
4.4.3	抑制肿瘤效应(tumor-suppression effect) .....	159

参考文献 .....	162
<b>第 5 章 放射损伤与医学处理 .....</b>	<b>165</b>
5.1 急性放射病与医学处理 .....	165
5.1.1 病因与发病机制 .....	166
5.1.2 临床表现 .....	167
5.1.3 诊断 .....	170
5.1.4 治疗 .....	172
5.1.5 预防 .....	174
5.2 慢性放射病与医学处理 .....	175
5.2.1 慢性外照射放射病 .....	175
5.2.2 内照射放射病 .....	178
5.3 皮肤放射损伤与医学处理 .....	181
5.3.1 病因和病理 .....	181
5.3.2 主要病理改变 .....	182
5.3.3 急性皮肤放射损伤临床表现和治疗 .....	182
5.3.4 慢性皮肤放射损伤临床表现和治疗 .....	184
参考文献 .....	185
<b>第 6 章 放射生物剂量估算 .....</b>	<b>187</b>
6.1 生物剂量学基本概念 .....	188
6.1.1 理想的生物剂量计应具备的条件 .....	188
6.1.2 生物剂量学方法的优点 .....	189
6.2 生物剂量计指标的分类和评价 .....	190
6.2.1 细胞遗传学方法 .....	190
6.2.2 体细胞 DNA 损伤和基因突变分析 .....	210
6.2.3 蛋白剂量计—— $\gamma$ -H2AX .....	214
6.3 常用生物剂量计方法学 .....	216
6.3.1 常规染色体畸变分析 .....	216
6.3.2 胞质分裂阻断微核法(CB 微核法) .....	222
6.3.3 药物诱导 PCC-R 的检测 .....	225
6.3.4 染色体荧光原位杂交 .....	230

参考文献 .....	234
<b>第 7 章 放射性核素的健康危害与医学处置 .....</b>	<b>239</b>
7.1 放射性核素毒理学 .....	239
7.1.1 放射性核素分类 .....	239
7.1.2 放射性核素内污染途径与代谢 .....	240
7.1.3 放射性核素内照射作用特点 .....	243
7.2 有应用意义的常见放射性核素 .....	245
7.2.1 放射性碘 .....	246
7.2.2 放射性铯 .....	247
7.2.3 放射性锶 .....	247
7.2.4 放射性镉 .....	248
7.2.5 放射性磷 .....	248
7.2.6 放射性碳 .....	249
7.3 放射性核素内污染的医学处理 .....	249
7.3.1 内污染的测量和判断 .....	250
7.3.2 内污染的医学处理原则 .....	251
7.3.3 内污染的处理方法 .....	251
7.3.4 污染扩散的控制措施 .....	254
7.4 常用核素的促排 .....	254
7.4.1 $^{131}\text{I}$ 的阻吸收和促排治疗 .....	255
7.4.2 放射性铯的阻吸收和促排治疗 .....	256
7.4.3 放射性锶的阻吸收和促排药物研究及促排治疗 .....	257
7.4.4 钷和超钷核素、铈等稀土核素促排药物研究和 促排治疗 .....	258
7.4.5 铀的促排药物研究和促排治疗 .....	260
7.4.6 钍促排药物研究和促排治疗 .....	261
7.4.7 $^{210}\text{Po}$ 的促排治疗 .....	261
7.4.8 放射性核素内污染临床治疗药物 .....	262
参考文献 .....	263

<b>第 8 章 辐射测量方法</b> .....	265
8.1 概述 .....	265
8.2 环境辐射测量 .....	266
8.2.1 环境辐射现场测量 .....	266
8.2.2 生活饮用水中总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 放射性测量 .....	268
8.2.3 空气中氡浓度测量 .....	271
8.2.4 建材辐射水平测量 .....	275
8.3 场所辐射剂量测量 .....	277
8.3.1 X 射线、 $\gamma$ 射线剂量测量 .....	277
8.3.2 中子剂量测量 .....	279
8.4 个人剂量测量 .....	281
8.4.1 基本要求 .....	282
8.4.2 X 射线、 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线个人剂量测量 .....	284
8.4.3 中子个人剂量测量 .....	287
8.4.4 内照射个人剂量测量 .....	289
8.5 表面污染测量 .....	293
8.5.1 表面污染分类 .....	293
8.5.2 直接测量法 .....	293
8.5.3 间接测量法 .....	294
参考文献 .....	296
<b>第 9 章 辐射防护基础</b> .....	297
9.1 辐射防护的基本原则 .....	298
9.1.1 正当性 .....	298
9.1.2 防护的最优化 .....	299
9.1.3 个人剂量限值 .....	300
9.1.4 剂量约束和参考水平 .....	301
9.2 我国现行辐射防护的基本剂量限值 .....	305
9.2.1 对放射工作人员的剂量限值 .....	305
9.2.2 对公众的剂量限值 .....	306
9.2.3 表面污染控制水平 .....	306
9.3 外照射和内照射防护措施 .....	307

9.3.1	外照射防护 .....	307
9.3.2	内照射防护 .....	308
9.4	放射诊疗的辐射防护 .....	309
9.4.1	X射线影像诊断中的辐射防护 .....	310
9.4.2	临床核医学中的辐射防护 .....	326
9.4.3	放射治疗中的辐射防护 .....	337
9.5	其他核技术应用的辐射防护 .....	349
9.5.1	非医用加速器 .....	349
9.5.2	$\gamma$ 辐照装置 .....	352
9.5.3	射线探伤装置 .....	355
9.5.4	辐射型集装箱/车辆检查系统 .....	356
9.5.5	含密封源仪表 .....	358
	参考文献 .....	359
第 10 章	我国辐射防护体系 .....	361
10.1	概述 .....	361
10.2	放射卫生法律法规 .....	362
10.2.1	放射卫生立法 .....	362
10.2.2	放射卫生法律规定 .....	364
10.2.3	违反放射卫生法的法律责任 .....	370
10.3	放射卫生防护标准 .....	374
10.3.1	标准和标准化概述 .....	374
10.3.2	国际放射卫生防护标准介绍 .....	374
10.3.3	我国放射卫生标准体系 .....	376
10.3.4	现行放射卫生防护标准 .....	377
10.4	核或辐射事故卫生应急 .....	382
10.4.1	核或辐射事故概念、分级及其可能的后果 .....	382
10.4.2	核或辐射事故应急依据 .....	385
10.4.3	核或辐射事故医学应急准备 .....	386
10.4.4	核事故与辐射事故的医学应急响应 .....	393
	参考文献 .....	397

<b>第 11 章 放射性废物的管理</b> .....	399
11.1 概述 .....	399
11.1.1 放射性废物的来源 .....	399
11.1.2 放射性废物的主要特性 .....	400
11.1.3 我国放射性废物管理的历史回顾 .....	401
11.1.4 放射性废物管理与辐射防护 .....	404
11.2 放射性废物的分类 .....	406
11.2.1 放射性废物的分类方法 .....	406
11.2.2 IAEA 推荐的放射性废物分类体系 .....	407
11.2.3 我国的放射性废物分类 .....	410
11.3 放射性废物的管理 .....	412
11.3.1 放射性废物管理的基本目标 .....	413
11.3.2 放射性废物管理的基本原则 .....	414
11.3.3 放射性废物管理的基本步骤 .....	416
11.3.4 放射性废物的管理体制与运行机制 .....	419
11.4 放射性废物的处置方式 .....	420
11.4.1 放射性废气的净化 .....	420
11.4.2 放射性废液的净化、浓缩 .....	421
11.4.3 固体放射性废物的焚烧、压缩 .....	422
11.4.4 放射性废物的固化 .....	423
11.4.5 放射性废物的包装、暂存与运输 .....	427
11.5 医用放射性废物的管理 .....	429
11.5.1 医用放射性废液的管理 .....	431
11.5.2 医用放射性废气的管理 .....	432
11.5.3 医用固体放射性废物的管理 .....	432
11.5.4 放射性实验动物尸体的管理 .....	433
参考文献 .....	433
附录 .....	435
索引 .....	437



# 第 1 章

## 电离辐射概述

电离辐射(ionizing radiation),或简称为辐射(radiation),是指能直接或间接引起物质原子电离的辐射,是原子以电磁波( $\gamma$ 射线或 X 射线)或粒子(电子、质子、 $\alpha$ 粒子、中子、负  $\pi$  介子和带电重离子等)形式传递时所释放的一种能量。

早在 1895 年 11 月德国物理学家伦琴(Roentgen)发现了一种看不见但能穿透物质的射线,并采用表示未知数的 X 来命名,称为 X 射线,X 射线被发现后不久即在医学中得到应用。1896 年 3 月法国科学家贝可勒尔(Becquerel)发现铀元素能发射出一种不可见的具有穿透力的辐射,能使空气电离和胶片感光。1898 年 7 月居里(Curie)夫妇首次从沥青铀矿中提炼出一种新元素,命名为钋(Po),同年 12 月又成功分离出另一种新元素镭(Ra),并提出了一个新名词“放射性”(radioactivity)。1900 年维拉德(Villard)发现了  $\gamma$  射线;1902 年卢瑟福(Rutherford)和弗雷德里克(Frederick)发现并确定了  $\alpha$  和  $\beta$  射线。1923 年 Hevesy 用<sup>212</sup>Pb 研究铅盐在豆科植物中的分布和转移,最先提出了“示踪”(tracer)的概念。1928 年盖革(Geiger)和米勒(Muller)研制了电离辐射测定方法,发明了用于电离辐射计数的盖革-弥勒计数器。1930 年劳伦斯制成了第一台回旋加速器,射线及相关核技术的应用也越来越广泛。而 1932 年查德威克(Chadwick)发现了中子,安德森发现了正电子;1934 年费米利用中子制造放射性元素,是人类能够进行原子变革的重要标志,开创了核能研究和实际应用的新阶段。

在核事业发展的早期,用于研究和应用的辐射源主要是来自自然界的放射性物质,如可制成  $\gamma$  射线源的镭、可制成中子源的镭-铍混合物等,并通常被封装在小容器内,以达到安全和操作方便。此后,随着核反应堆的发展,出现了人工放射性核素,辐射源的种类及其应用日益繁多,使用量也不断增加。目