



SNSTC

核安保培训教材（试用版）

核技术应用基础知识

国家核安保技术中心 编著

中国原子能出版社

核安保培训教材(试用版)

核技术应用基础知识

国家核安保技术中心 编著



中国原子能出版社

内容简介 (图灵奖) 核技术应用基础

核技术是以核物理、辐射物理、放射化学、辐射化学和核辐射与物质相互作用为基础,以加速器、反应堆、核辐射探测器和核电子学为支撑技术而发展起来的综合性现代技术学科。

本书对核技术应用基础知识进行了较为系统、全面的介绍,通过本书的学习,可以对核技术在各个领域的应用形成整体的认识和了解。

本书分为十个章节,对原子核与放射性、射线与物质相互作用、核辐射探测方法和探测器原理、放射性核素的制备、核分析技术与方法、核探测技术、放射性示踪技术、辐照技术、核技术在医学领域的应用进行了介绍。

本书主要作为核安保从业人员学习核技术基础知识及涉核单位人员基础知识培训教材使用,也可以作为有关专业人员和高校师生的参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

核技术应用基础知识 / 国家核安保技术中心编著. — 北京:

中国原子能出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5022-8479-4

I. ①核… II. ①国… III. ①核技术应用 IV. ①TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 216276 号

核技术应用基础知识

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

策划编辑 付 真

责任编辑 付 真

美术编辑 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京卓诚恒信彩色印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 6 字 数 96 千字

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-8479-4 定 价 48.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

核安保培训教材编委会及编写组成员

主 任:邓 戈

副 主 任:许振华

编 委:(按姓氏笔画排序)

古德军 叶国安 苏 燕 李 涛 李 森 杨志民

邹树梁 张志俭 张建岗 郝 坚 顾国兴 徐 侃

编写组组长:许振华

编写组副组长:(按姓氏笔画排序)

王利红 王迎庆 刘宏斌 李长久 宋玉收 陈江海

赵永刚 胡洪涛 顾少刚 章俊武

编写组成员:(按姓氏笔画排序)

于 涛 王任泽 王学新 王思聪 王基魁 王晨毅

王黎明 仇春华 左雅慧 史贝贝 冯宗洋 庄大杰

刘卫东 刘立坤 刘 林 汤荣耀 孙洪超 孙树堂

李 伟 李国强 邱小平 杨 林 杨亚鹏 肖巍巍

沈建宇 张梦寒 陈 航 陈甲华 范 韬 拥 军

周 超 周志波 周青芝 周精辟 宗 波 居治豪

孟东原 赵立宏 郜 强 禹 雪 袁 喆 贾林胜

徐潇潇 高雪梅 郭方方 曹 弋 曹 迪 董 林

韩叶良 景 弋 谢金森 黎 春

编辑出版工作

编辑出版工作组

主任：潘启龙

副主任：李 涛

成员：(按姓氏笔画排序)

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

序

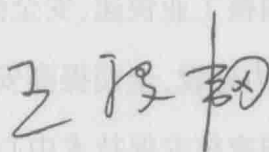
进入新世纪以来,国际社会所面临的核恐怖主义威胁及核扩散风险日趋严峻,为确保我国核工业快速、安全健康地发展,更好地应对上述威胁与风险,加强国家核安保能力建设,全面提高安保从业人员专业水平,显得十分必要和迫切。在此背景下,国家核安保技术中心组织力量编写了一套核安保专业培训教材,系统讲授核安保相关法律文书、管理体制、技术手段和相关技能等基本知识,旨在使核工业领域的核安保培训工作进一步系统化和规范化。这是一件基础性建设工作,在国家“十三五”规划开局之年推出,恰逢其时,具有重要意义。

我国一贯重视核安保工作。多年来,业已建立了国家核安保制度,形成了相关的工作体系,核安保能力建设工作取得了令人瞩目的成绩,并积累了许多实践经验。在国际合作方面,我国签署了包括《制止核恐怖主义行为国际公约》《核材料实物保护公约》及 2005 修订案在内的所有核安保相关国际法律文书,参加了核能发达国家倡领的全球核安保峰会以及国际原子能机构主导的各项核安保活动。所有这些成就与经验,为我国核安保能力的长远建设提供了指导,也为今天培训教材的编写打下了基础。

这套教材是我国正式出版的核安保专业领域的首套系列培训教学用丛书。其内容丰富、全面,既有核安保相关基本概念,又涵盖了核安保领域的技术进步成果和最新理念;反映了我国核材料、核设施以及运输活动安保的实际管理水平与实践经验,并涉及其他放射性物质及相关设施的相关内容;题材选择上也照顾

到核安保人才培养中各方面多层次的实际需要。期望在今后的使用过程中不断积累经验,充实我国核安保专业的发展成果和国际良好实践,使这套丛书开发得更为系统、规范和适用,为我国核安保能力建设作出更多贡献。

编写出版这样一套几十册数百万字的大型丛书并非易事。我愿借此机会,向本套丛书的策划者、编写者以及其他参加者们表示诚挚祝贺,对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。



国家国防科技工业局副局长

国家原子能机构副主任

前 言

核安保是指防止、侦查和应对涉及核材料和其他放射性物质或相关设施的偷窃、蓄意破坏、未经授权的接触、非法转让或其他恶意行为,以及防范恐怖分子获取核材料、破坏核设施等。其目的是为了应对非国家组织和团体以各种手段获得核材料和其他放射性物质制造粗糙核武器或脏弹,采取各种手段破坏核设施造成核事故,或放射性物质泄漏对公众生命、财产和环境造成损害,诱发公众心理恐慌,危害社会稳定与安全。核安保的目的之一是反对国际核恐怖主义,制止核恐怖主义行为。

我国政府一贯高度重视核安保工作,自上世纪五十年代以来,我国制定了一系列法规标准,逐步形成了一套行之有效的管理体系,保持了良好的核安保记录。近年来,国际恐怖主义活动呈发展趋势,以核工业生产设施为袭击目标或以核技术与产品为主要工具、为实现一定政治目的而有意制造核恐怖,对人类社会安全构成了新的威胁。在这种形势下,对核技术应用相知基础知识了解,成为核安保从业人员的迫切需要,为适应新的安保形势,国防科技工业局组织编写了针对核安保从业人员培训的系列培训教材。其中《核技术应用基础知识》是为核安保从业人员普及核科学技术基础知识教材中的一本。

本书的编写人员有于涛、周超、刘林。

教材编写时力求文字简洁、通俗易懂、图文并茂,力求基础和实用并重,但由于核技术及其应用涉及面广,其发展可谓日新月异,受限于编者的学识和水平,书中疏漏之处与不妥之处在所难免,敬请有关专家和读者批评指正。

编 者

2017年2月

目 录

第1章 概述	1
1.1 核技术	1
1.2 核技术应用	1
1.3 核技术发展历程	4
第2章 原子核与放射性	7
2.1 原子与原子核	7
2.2 原子核的结合能	9
2.3 放射性及其种类	11
2.4 放射性衰变规律	13
2.5 核裂变与核聚变	16
第3章 射线与物质的相互作用	18
3.1 重带电粒子与物质相互作用	18
3.2 γ 和 X 射线与物质相互作用	23
3.3 中子与物质相互作用	25
3.4 几类射线与物质相互作用的特点	28
第4章 核辐射探测方法和探测器原理	30
4.1 概述	30
4.2 气体探测器	30

4.3	闪烁探测器	35
4.4	半导体探测器	37
4.5	中子探测器	39
4.6	热释光探测器(TLD)	41
第5章	放射性核素的制备	43
5.1	概述	43
5.2	反应堆制备	43
5.3	加速器制备	44
5.4	核素发生器制备	45
第6章	核分析技术与方法	46
6.1	概述	46
6.2	X射线荧光分析	46
6.3	中子活化分析技术	47
6.4	穆斯堡尔效应分析技术	50
第7章	核检测技术	51
7.1	概述	51
7.2	α 粒子及其辐射式仪表	52
7.3	β 粒子及其辐射式仪表	53
7.4	γ 和X射线及其辐射仪表	54
7.5	中子与物质相互作用及其辐射仪表	54
第8章	放射性示踪技术	56
8.1	概述	56
8.2	放射性示踪法在工农业中的应用	57

8.3	放射性示踪法在医学中的应用	60
8.4	放射性示踪法在生物学中的应用	63
第 9 章	辐照技术	65
9.1	概述	65
9.2	食品辐照加工	65
9.3	材料辐射加工	66
9.4	辐射降解	67
9.5	辐射固化	67
第 10 章	核技术在医学领域的应用	69
10.1	概述	69
10.2	放射治疗	69
10.3	放射诊断	73
10.4	核医学	78
参考文献		83

第1章 概述

1.1 核技术

核技术是指以核性质、核反应、核效应和核谱学为基础，以反应堆、加速器、辐射源和核辐射探测器为工具的现代高新技术。具有高灵敏度、特异性、选择性、抗干扰性、穿透性等特点。广泛应用于国民经济各个领域，并在国家安全中占有重要位置。

核技术以其知识密集性、高效益性及广泛适应性等特点，已被纳入了世界高科技角逐的竞技场。许多发达国家都把核技术视为科技制高点，并大力开发应用。时至今日，核技术已越来越多地进入人类的生活，解决或正在解决人类面临的一些难题，成为影响当今人类生存发展的重要因素之一。

通常核技术主要指同位素和辐射技术两个方面。广义地说，核技术可分为六大类：核能利用技术、核分析技术、核检测技术、放射性示踪技术，辐照技术、核成像技术。

1.2 核技术应用

1.2.1 核能利用技术

民用能源方面，核能利用主要包括以下三个方面：

(1) 利用重核裂变放出的巨大能量。如建造核电站、空间堆电源、核供热堆；用于船舶或潜艇的核动力装置。

(2) 利用轻核聚变放出更加巨大的能量。开发聚变堆，希望最终解决人类面临的能源危机。

(3) 利用衰变能做成电池，如 ^{238}Pu 电池，用于宇宙探测器、人造卫星等。

目前，核能发电约占世界总发电量的 20%，其中法国核能发电量已占其总发电量的 75% 以上。

军用方面是利用核裂变和核聚变反应释放出能量，开发出能源动力装置和核武器，主要应用有：核潜艇（见图 1.1）、原子弹、氢弹和中子弹。



图 1.1 核潜艇

1.2.2 核分析技术

核分析技术是在实验核物理和核化学基础上发展起来的一门新型学科。其特点是利用粒子与物质的相互作用、辐射效应、核谱学和核效应等基本原理和实验方法，研究物质的原子和分子组成、表面状态和内部结构。

核分析技术具有灵敏度高、准确度好、高分辨率、多元素测定能力、微区和微量分析、动态实时分析以及非破坏性等许多非核方法不具备的优点，因而具有重要的科学价值和应用前景。核分析技术的研究和应用，不仅促进了基础研究，同时对促进边缘学科的发展起着重要的作用，如今，核分析技术已经在物理、化学和生物等基础学科领域中发挥了巨大作用，并渗透到国民经济的许多方面。

核分析技术通常分为三类：活化分析技术、离子束分析技术、超精细相互作用分析技术。

核分析技术的主要特点：高灵敏度、准确、快速、不破坏样品且用量极少。

1.2.3 核检测技术

是以核辐射与物质相互作用原理为基础而产生的辐射测量方法和手段。主要涉及核辐射检测仪器仪表，主要包括：厚度计、密度计、料位计、湿度计、成分分析仪、泄漏检测仪、流量计、灰分仪、火灾报警器、核子秤和探伤仪等。核检测技术是其他核技术及应用的基础。

特点：非接触式测量、环境因素影响甚微、无破坏性、易于实现多个参数同时检测和自动化测量。

1.2.4 放射性示踪技术

应用放射性同位素对普通原子或分子加以标记，利用高灵敏、无干扰的放射性测量技术研究被标记物所显示的性质和运动规律，揭示用其他方法不能分辨的内在联系，此技术称放射性同位素示踪技术。

同位素示踪所利用的放射性核素（或稳定性核素）及它们的化合物，与自然界存在的相应普通元素及其化合物之间的化学性质和生物学性质是相同的，只是具有不同的核物理性质。因此，可以用同位素作为一种标记，制成含有同位素的标记化合物（如标记食物、药物和代谢物质等）代替相应的非标记化合物。利用放射性同位素不断地放出特征射线的核物理性质，就可以用核探测器随时追踪它在体内或体外的位置、数量及其转变等，稳定性同位素虽然不释放射线，但可以利用它与普通相应同位素的质量之差，通过质谱仪、气相色谱仪、核磁共振等质量分析仪器来测定。放射性同位素和稳定性同位素都可作为示踪剂，但是，稳定性同位素作为示踪剂其灵敏度较低，可获得的种类少，价格较昂贵，其应用范围受到限制；而用放射性同位素作为示踪剂不仅具有灵敏度高、测量方法简便易行、能准确地定量、准确地定位及符合所研究对象的生理条件等特点。

1.2.5 辐照技术

辐照技术是利用射线与物质间的作用，电离和激发产生的活化原子与活化分子，使之与物质发生一系列物理、化学、生物化学变化，导致物质的降解、聚合、交联、改变物质性状等相关技术。

特点：简单、快捷。

1.2.6 核成像技术

核成像是核技术与现代图像理论相结合的产物，是利用与核有关的物理量在被测对象中的衰减规律或分布情况，获得物体内部的详尽信息，通过电子计算机对这些信息作快速处理，最终重建被测物的内部图像。数据获取部分，从物理原理到具体结构均可相距甚远，但数据处理部分则都基于计算机信息处理和图象重建技术。

核成像技术包括 X 射线断层扫描技术（XCT）、正电子断层扫描技术

(PET)、核磁共振计算机断层扫描技术 (NMR - CT)、单光子发射断层扫描技术 (SPECT) 和康普顿散射断层扫描技术 (CST) 等。

1.3 核技术发展历程

核技术诞生于 20 世纪初, 自 1896 年亨利·贝可勒尔发现了铀盐的放射性后, 随着镭和钋以及人工放射性的发现, 原子核模型的建立, 同位素示踪概念的引入等, 随即将核科学技术的开创性知识投入应用, 如夜光粉用于钟表业, X 射线用于医学诊断, 同位素示踪用于分析化学, 镭应用于癌症治疗等。20 世纪 30—40 年代, 反应堆、加速器和各种新型辐射探测器的研制成功, 核技术得到迅速发展。军事上制成了原子弹和氢弹; 能源工业方面, 世界各国建造了大量的核电站; 工业、农业、医学、地质、材料、考古、法学等领域都有核技术的贡献。到 20 世纪 70 年代, 由于受到一些发达国家反核力量的抵制以及公众对放射性的非理性恐惧, 核技术的发展及其应用受到一定程度的影响。然而, 由于核技术的不可取代性及其重大的经济效益和社会效益, 到了 20 世纪末又恢复了发展的势头。

1895 年, 伦琴发现 X 射线。

1896 年, 贝克勒尔发现放射性。

1898 年, 居里夫妇发现放射性元素钋和镭, 大大促进了放射性的研究。贝克勒尔 (见图 1.2) 与居里夫妇 (见图 1.3) 因发现放射性荣获 1903 年诺贝尔物理学奖。



图 1.2 贝克勒尔在实验室

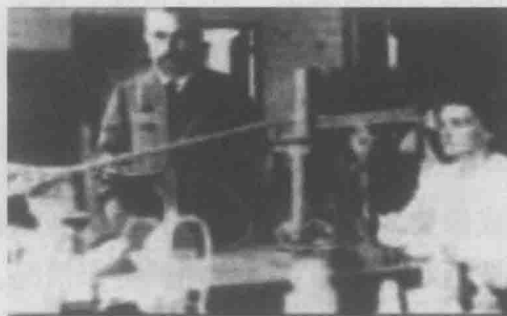


图 1.3 居里夫妇

1898 年, 卢瑟福揭示铀辐射组成复杂, 把“软”的成分称为 α 射线, “硬”的成分称为 β 射线。

1900 年, 维拉德发现镭射线中除 α 、 β 外, 还有 γ 射线 (见图 1.4)。

1931 年, 劳伦斯等人建成第一台回旋加速器, 回旋加速器原理见图 1.5。

1932 年, 考克拉夫特和瓦尔顿发明高压倍加器, 用以加速质子, 实现人工核反应。

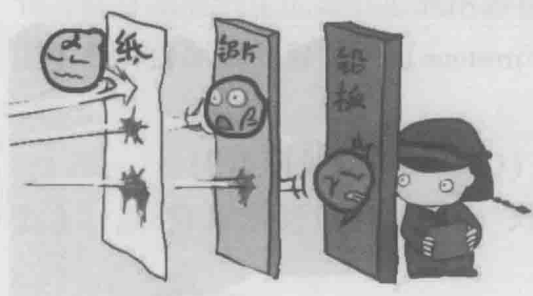


图 1.4 α 、 β 、 γ 射线穿透能力比较

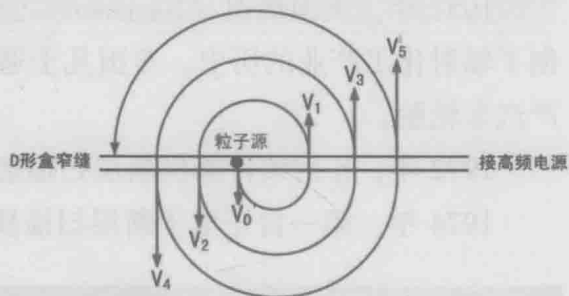


图 1.5 回旋加速器原理

1932 年, 查德威克发现中子。中子成为科学家进行科学研究的重要工具。

1934 年, 约里奥-居里夫妇发现人工放射性。 ^{210}Po 的 α 轰击铝箔 (^{27}Al), 用化学方法分离出 ^{30}P (不稳定), 通过俘获轨道电子放出中微子的 EC 衰变为 ^{30}Si 。并于 1935 年获得了诺贝尔化学奖。

1938 年, 德国物理学家贝特和德国天文学家魏茨泽克各自独立发现核聚变反应。

1939 年, 奥地利物理学家迈特纳和她侄子弗里施等人一起发现铀核裂变现象 (见图 1.6)。

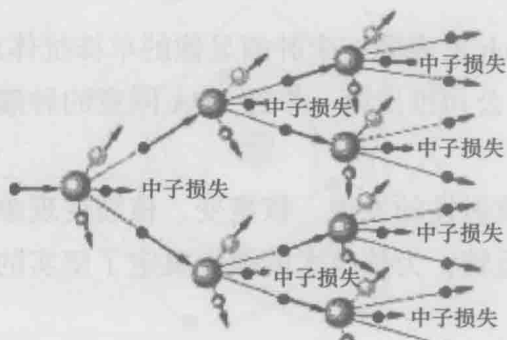


图 1.6 裂变反应示意图

1942 年, 在费米主持下美国建成世界上第一座裂变反应堆。

1945 年 7 月 16 日, 美国试验爆炸了第一颗原子弹“大男孩”, 爆炸当量相当于 2 万吨 TNT。

1952 年 11 月 1 日, 美国在太平洋的一个珊瑚岛上 (马绍尔群岛) 爆炸了世界上第一颗氢弹。

1954 年 1 月 21 日, 美国第一艘核动力潜艇“鹦鹉螺”号下水。

1954 年, 前苏联建成世界上第一个核电站, 电功率 5 000 kW。

1957 年, 美国瑞侃 (Raychem) 公司首次用加速器辐照生产热缩材料, 开创了辐射化工产业的历史。美国凡士通 (Firestone) 用加速器辐照硫化技术生产汽车轮胎。

1972 年, X 射线计算机断层扫描装置 (CT) 面世 (见图 1.7)。

1974 年, 第一台正电子断层扫描技术仪 (PET) 问世 (见图 1.8)。



图 1.7 CT 机

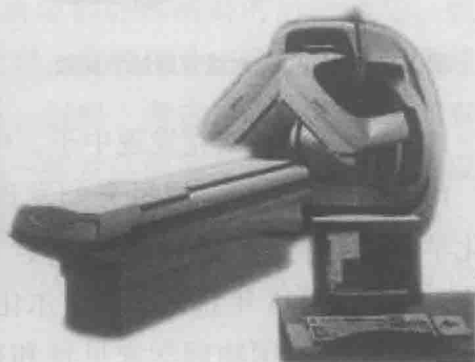


图 1.8 多用途 SPECT

1976 年, John Keyes 研制出第一台多用途单光子发射断层扫描技术成像仪 (SPECT)。

1981 年, J. P. Mach 发表第一个肿瘤显像的单株抗体放射性药物。

1991 年, Cytogen 公司推出第一个经 FDA 同意的肿瘤显像的单株抗体放射性药物。

总之, 随着人工放射性的发现、核聚变、核裂变现象的发现, 以及加速器和反应堆的成功建成运转, 为核技术的诞生奠定了坚实的科学基础。