



国防特色教材·核科学与技术

核技术应用

罗顺忠 主编



 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

核技术应用

主编 罗顺忠

参编 张华明 何佳恒

钟文彬 宋宏涛

刘国平 雷家荣

刘秀华

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书是国内第一部旨在介绍非动力核技术(通常称同位素与辐射技术)及其应用所涉及的主要方法、原理及新进展的教材。其内容涉及同位素制备技术,核分析技术,核技术在工业、农业、医学、环境、材料改性等领域的应用;并对其在能源领域的应用作概略介绍。

本书可供大专院校核科学与技术所属专业教学之用,以及相关专业选修教材和参考书。也可作为从事核技术研究及应用的科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核技术应用/罗顺忠主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-81133-532-3

I. 核… II. 罗… III. 核技术应用-教材
IV. TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 154541 号

核技术应用

罗顺忠 主编

责任编辑 张盈盈

*

哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号(150001) 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨工业大学印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:22.5 字数:398 千字

2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷 印数:1 000 册

ISBN 978-7-81133-532-3 定价:45.00 元

序 言

自从 1896 年贝可勒尔(A. H. Becquerel)发现铀的天然放射性至今,核科学技术的发展已经历了 110 多年,在这其间的前 50 年,主要是核科学的进展。随着人工放射性的发现、原子核模型的建立、核裂变、核聚变现象的发现,加速器和反应堆的成功建成和运转为当代最重要的技术科学之一——核技术的诞生奠定了坚实的科学基础。在 20 世纪 40 年代,第一颗原子弹的爆炸成功,为人类揭开了核技术应用的序幕。第二次世界大战以后,核技术应用在军事利用与和平利用两个方向上都得到了迅猛发展。冷战时期超级大国的核军备竞赛,极大地刺激了以核武器为代表的核技术的军事应用,而核反应所蕴藏的巨大能量潜力以及核辐射独有的效应和性能同样又给人们核技术的和平利用带来了极大的探索兴趣。经过此后几十年的发展,核技术对社会、经济和科学起到了非常重要的推动作用。可以说现代很多科学技术领域所取得的成就都与核技术是分不开的。核技术应用用于国民经济各个相关领域带来了巨大的社会效益和经济效益,在美国等发达国家,核技术应用产值在 20 世纪末已占其全年 GDP 的 3%~5%。正如 20 世纪 90 年代 IAEA 的报告中讲到:就应用的广度而言,只有现代电子学和信息技术才能与同位素及辐射技术相提并论。

我国核技术及其应用已有 50 年的历史,无论从核技术自身的发展,核技术应用的拓展,还是核技术产业化的推进,皆取得了长足的进步。体现在:建立起较为完善的教学、科研和产业化体系;具有提供常用同位素的生产能力;部分核仪器仪表成果处于国际领先地位;核技术应用已具有一定的产业化规模。然而与国际发展水平相比,我国在研发投入、创新成果、人才、经济效益等方面尚有较大的差距。

人类进入 21 世纪,科学技术发展的需求、社会进步的需求,人类面临的能源、环境压力给核技术及应用带来新的发展机遇,被称为“第二个春天的到来”。国内不少大专院校把握难得的机遇,陆续恢复或加强、或成立适应其发展的学科或学院,为加快人才培养创造必要的条件。这样一来,相关的教材就成为突出的需求。近年来虽已有一些专著或教材可供大专院校教学和学生学习的之用,然而这些专著或教材基本上仅局限于所涉及核技术的某个具体领域,而缺少从核技术作为一个技术科学的层面对其内涵、应用和发展作全面、系统介绍的教科书。

为了弥补这个不足,产生了编写本教材的想法。编写人员在构思设计本教材的内容时,也只能把它局限于核技术的和平利用方面,在和平利用方面又仅局限于非核能部分。因为核技术的军事应用和核能部分,在专业内涵、学科关联和相关的工程技术等方面,与和平利用的非核能部分有相当大的不同和独立性。本教材内容的限定,看来是必要的,这样既可以避免教材过于繁杂,也使教学更有针对性。

主编及各位编写人员在和平利用核技术的重要支柱——同位素技术及应用领域已经有二十多年的工作经历。积累了较丰富的实践经验并取得重要成果。有这样的基础,该书应该是一部集基础理论和实践、技术和应用的好教材。

受该书主编所邀,我很高兴地为该教材写此序言。我们期望它能为我国核技术的和平利用助一臂之力。

胡思得

中国工程院院士

2008年12月30日于北京

序 言

20 世纪是人类社会科学技术飞跃发展的世纪,许多科学技术领域的成就对人类文明和社会生产力的进步发挥了重大作用,核科学技术是其中之一。虽然核科学技术是以美国 1945 年在日本广岛投放第一颗原子弹的巨大破坏性而引入公众的视野,但随后可控裂变能的应用为人类开辟了一个崭新的清洁能源领域——核能发电;这之后核科学技术以其独特的技术优势显示出诱人的应用前景,因而从第一座核反应堆建成后,各国核科学家倾注了全力研究和开发核科学技术在各个领域的应用,以造福人类。早在 1956 年第一届日内瓦国际和平利用原子能会议上就已显示出核技术的应用价值和发展前景。经过半个多世纪的发展,核技术应用已经取得了巨大的经济和社会效应。

广义的核(科学)技术应用涉及军用和民用,涵盖工业、农业、医学、环境、国防和科学研究等领域,而通常所讲的核技术则主要指民用非动力核技术,亦称同位素与辐射技术。它是以放射性同位素和射线与粒子束为基础,涉及放射性同位素生产设施(反应堆、加速器等)、放射源、放射性同位素制剂(配合物)、射线与粒子束涉及辐射效应、核探测技术、核分析技术等及其应用。

核技术的独特之处在于它基于对原子内部结构科学认识(发现)和核性质系统研究的应用,远远超越了有史以来的常规科学技术。铀(或钚)原子裂变释放的能量远大于含碳燃料(煤炭、石油、天然气)燃烧释放的比能量,并且在环保和运输量上具有无与伦比的优势,使核能发电成为最现实的首选清洁能源;放射性同位素固有的射线“标识”特点,在许多科学技术研究领域引发了一场革命性的变革,在医学上广泛利用放射性同位素标记技术研究人体各项功能与基因片断的关系,了解其功能和作用,使用分子影像技术将基因表达、生物信号传递等复杂过程转化为直观图像,以观察药物或基因治疗的机理;在农学上利用放射性同位素标记技术可研究农作物的施肥管理和生长代谢规律;不同核辐射(射线、粒子)因其能量和特性差异具有不同的穿透物质的能力,与物质相互作用的机制不同、或生成新的产物或引发新的特征信息,为科技工作者提供了重要的揭示和改造自然世界的新的技术途径,如核辐射作用于生物体可造成生物基因突变,这种效应在农业中被用于生物品种改性;核辐射与材料或化学物质作用时发生射线能量沉积或能

量转移传递,而使材料的化学结构发生变化,这种功能已成功地用于有机高分子与材料的辐射加工,它比化学工业的常规方法具有许多优点;利用核辐射对物质的穿透性可实现对材料(或物体)的无损检测,其探测下限可达 $10^{-18} \sim 10^{-19}$ g,工业 CT、医用 CT 和许多核仪器均是利用核辐射穿透性来实现其探测功能的。

我国核技术应用起步较晚,1958 年在中国原子能研究院建成国内第一个反应堆后开始了我国核技术及其应用的奋斗历程,经过 50 年的发展,核技术为推动国民经济建设作出了重要贡献,并极大地推动了相关领域科学技术的进步。自 20 世纪 90 年代以来短暂的低潮之后,面对世界范围的解决资源危机、缓解环境压力、提高健康质量、破解科技难题的需求,核技术及其应用迎来了新的发展机遇,被称为“核技术的第二个春天”已经到来。为适应核工业、核技术及其应用发展形势对专业人才的需求,国内许多大学恢复或新组建核工程和核技术应用的院系或相关专业,组织编写出版核科学技术应用方面的教科书或专著已是当务之急,由此孕育和催生了这本教科书的问世。

《核技术应用》一书的主编及其带领的研究团队从 20 世纪 80 年代初开始,一直从事同位素技术及其应用研究工作,先后在放射性同位素制备、同位素制剂(配合物)的开发和应用,尤其是在医用放射性同位素及其药物化学方面开展了大量、系统的研究工作,积累了丰富的经验,取得了许多创新性成果。先后获得省(部)级科技进步奖 10 余项,发表论文 90 余篇。该书是在多年技术积累的基础上,参阅大量国内外文献资料编写而成。近年来,虽然涉及核技术及应用的学术专著已有不少陆续问世,但尚无从核技术作为一蓬勃发展的科学技术,系统、完整地介绍其基本内容、原理方法及其应用和发展前景的基础性教科书。我相信该教科书的出版有助于弥补上述不足,有益于核技术应用人才培养;并为推动我国核科学技术的发展、缩小与国际先进水平的差距,起到积极的促进作用。

傅依者

中国工程院院士
2009 年 3 月 10 日

前言

核技术(通常指非动力核技术,也称为同位素与辐射技术)应用在解决人类面临的基本问题、突破现代科技难点和推进科技进步方面发挥着不可替代的作用。国际原子能机构(IAEA)曾在一份报告中指出:就应用的广度而言,只有现代电子学和信息技术才能与同位素及辐射技术相提并论。在美国核技术被列入长期优先支持的22项关键技术之一,通过加大投资力度,强化基础研究和应用开发,确立了在国际上的领先地位,并对促进国民经济建设发挥了重要的作用。上世纪90年代核技术应用产业的年产值占其国民经济总产值的比例已超过3%。

在我国,无论是核技术本身的发展、还是应用的产业化规模与国际上发达国家相比尚有较大差距。核技术及其应用经历20世纪末期的相对低潮之后,进入21世纪,获得了新的发展机遇。2003年中国核学会在山东长岛召开的第一届核技术应用发展战略研讨会上,对影响我国核技术及其应用发展的主要问题进行了研讨,提出了相应的对策建议,主要包括恢复或完善高校相关专业、重视和加强人才培养、加大资源投入力度、列入国家重点攻关计划等;并形成了加快核技术及其应用发展的战略报告,受到中央领导的高度重视,并作出重要批示,要求加快核事业的发展。中央领导人的批示精神体现了党中央关于加快核事业发展新的指导思想和战略决策,是贯彻落实科学发展观的重大举措,具有深刻的现实意义和深远的历史意义。核事业的快速发展,核技术及其应用的振兴,关键在于人才培养,而编写出一部既有实用性又有理论性的好教材,是人才培养的基础,也是支撑核事业、核技术及其应用的专业、学科建设的重要组成部分。我们希望用我们的辛勤劳动和初步成果,去实现这一目标。

本教材主编自上世纪80年代初开始涉足核技术及其应用领域,先后在有重要应用价值的放射性同位素的制备及应用,一些特殊核素的行为化学等方面组织开展了大量系统的研究工作,并取得了好的结果。先后获省部级科技进步奖10余项,其中一等奖三项、二等奖五项,发表论文90余篇。本教材是基于20多年研究工作的积累和对核技术及其应用发展的把握所形成的研究生培养用“讲义”的基础上,对其结构作适当调整、内容进行充实和完善后,编辑而成。从基本原理、基本方法及特点入手,系统介绍核技术在多个领域中的应用、取得的成效和发展

趋势。全书分为9章,涵盖核技术应用的主要领域和最新成果,力求让已学习了基础的《原子核物理》、《放射化学》、《辐射防护与测量》等课程的学生通过本课程的学习能初步掌握核技术应用的基本原理、基本方法,熟悉核技术应用的主要范围、了解核技术应用的最新进展以及发展趋势。

本教材在编写过程中,参阅了大量文献和资料,引用了其中一些数据、图表,节录了其中一些文字(包括结果、结论),已将主要的引用来源或出处列于参考文献目录中。教材编写小组对所参阅的文献资料的作者表示衷心的感谢。

感谢原国防科工委(现国防科技局)对本教材的问世所提供的重要支持;感谢国家核技术工业应用工程技术研究中心给予的慷慨帮助;感谢西南科技大学国防学院及有关老师给予的大力协助。

在教材初稿修改过程中,国内核技术及应用领域的专家、学者,如国家核电技术公司董事长付满昌研究员、中国同位素与辐射行业协会秘书长陈殿华研究员、四川大学邓侯富教授和刘宁教授、中国原子能科学研究院倪邦发研究员和张培信研究员、四川原子能研究院陈浩研究员、西南科技大学陈晓明教授等对有关章节进行了斧正,提出了许多宝贵意见。在此,对他(她)们所付出的劳动致以真挚的谢意。

教材编写组尤其要特别真诚致谢中国工程院胡思得院士和傅依备院士。两位德高望重的老前辈在成稿过程中不吝赐教,给予了许多教诲和关心,并欣然为本教材作序。这不仅给编写组以莫大的鼓励,同样更是对核技术及应用人才的培养所给予的深深厚望。

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、原理和应用系统,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,书中难免会出现疏漏不妥之处,也难免会出现以偏概全之误,希望读者予以指正,我们将不胜感激。

编 者

2008年12月16日

目 录

第1章 概 论	1
1.1 核技术的发展历程	1
1.2 核技术的内涵、基本概念和术语	3
1.3 核技术应用及发展	16
习题	22
第2章 放射性核素的制备	23
2.1 放射性核素的来源	23
2.2 反应堆生产放射性核素	27
2.3 加速器生产放射性核素	51
2.4 放射性核素发生器	59
习题	70
第3章 核分析技术与方法	71
3.1 核分析技术基础	71
3.2 X 射线荧光分析	73
3.3 中子活化分析技术	78
3.4 同位素示踪技术	87
3.5 中子衍射	91
3.6 中子照相	97
习题	102
第4章 同位素仪器仪表	103
4.1 同位素仪器仪表概况	104
4.2 同位素仪器仪表核心部件——放射源和探测器	111
4.3 几类同位素仪器仪表及应用	125
4.4 同位素仪器仪表发展趋势	146
习题	147

第5章 辐射加工	148
5.1 辐射加工的基本知识	149
5.2 辐射交联	152
5.3 辐射聚合	185
5.4 辐射接枝及新材料制备	188
5.5 辐射降解	195
5.6 辐射固化及其应用	198
习题	205
第6章 核技术在医学领域中的应用	206
6.1 核医学影像技术及其设备	207
6.2 医用放射性核素	211
6.3 诊断用放射性药物	214
6.4 治疗用放射性药物	227
6.5 放射治疗	234
6.6 发展展望	241
习题	243
第7章 核技术在环境领域中的应用	245
7.1 辐射技术在环境中的应用	245
7.2 核分析技术在环境中的应用	256
7.3 环境科学中核技术的应用前景	265
习题	266
第8章 核技术在农业领域中的应用	267
8.1 辐射育种技术	268
8.2 辐射保藏	291
8.3 辐射杀虫	296
习题	304
第9章 核能的和平利用	305
9.1 核能的来源及核能发电的特点	306
9.2 核裂变发电	309
9.3 核聚变发电及热核聚变堆研究进展	316

9.4 其他形式的核能利用	324
9.5 核能的可持续发展	329
习题	337
附录	338
附录 A 国际单位制(SI)单位	338
附录 B 法定计量单位	340
附录 C 原子物理学和核物理学的量和单位	340
附录 D 基本物理常数	342
附录 E 天然放射性核素	342
附录 F 元素周期表	343
参考文献	344

第1章 概 论

1896年法国物理学家贝可勒尔(A. H. Becquerel)发现了铀(U)的天然放射性,到20世纪30年代末期开始核能和核辐射的开发利用,使得人们对于原子核的研究以及由原子核发射的各类射线与物质的相互作用的认识得到进一步提升,并将其应用于现代科技研究——探索新领域、阐释新现象、确证新物质,逐步形成一门具有丰富内涵且与多学科交叉融合的新兴科学技术,即核科学技术(Nuclear science and technology),简称核技术。

核技术是现代科学技术的重要组成部分,是20世纪人类文明史上一个重要里程碑,是当代最主要的尖端技术之一,也是社会现代化的重要标志之一。核技术现已广泛应用于国防、科研、工业、农业、医学、通讯、交通、环保、资源开发和科学研究等各个领域,形成相对独立和完整的研究和应用体系,并以其知识密集性、交叉渗透性、不可取代性、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。目前,世界上共有100多个国家开展核技术的研究、开发和应用。它的快速发展已成为推进国防和国民经济新技术、新材料、新工艺、新方法不断取得创新发展的动力。

核技术一般分为核武器技术、核动力技术和同位素与辐射技术(简称同辐技术,也称为非动力核技术)。本教材中所述的核技术主要是同位素与辐射技术(包括放射性核素制备,核分析技术,核仪器仪表,辐射加工,核技术在医学、农业、环境等领域的应用等方面)以及核能的和平利用等内容。

1.1 核技术的发展历程

继铀盐的放射性被发现以后,法国科学家居里夫妇(Pierre & Maria Curie)于1898年相继发现了钋(Po)和镭(Ra),并在1902年提炼出0.1g的镭盐和几毫克钋。镭的发现,引起科学和哲学的巨大变革,为人类探索原子世界的奥秘打开了大门。以下主要事件,为核技术的诞生奠定了重要的科学基础并推动核技术应用的迅速发展。

(1)1898年,卢瑟福(E. Rutherford)用强磁铁使铀射线偏转,发现射线分为方向相反的两股,一种非常容易被吸收,称为 α 射线;另一种具有较强的穿透力,称为 β 射线。1900年法国人维拉德(P. Villard)观察到,镭除了上面两种射线之外,还存在着第三种射线,它不受磁场的影响,与X射线非常类似,称为 γ 射线。

(2)1930年,德国物理学家博特(E. Bothe)和贝克尔(H. Becker)用 α 粒子轰击铍、锂、硼原子核,产生了一种能使计数管放电而且穿透力很强的神秘射线。1932年,英国物理学家查德威克(J. Chadwick)研究认为这种“射线”是一种不带电的中性粒子流,它的质量数和质子相

当,并具有很强的穿透本领,命名为“中子”。中子被发现后,成为科学家们进行核科学研究的重要工具,并极大地促进了核科学技术的迅猛发展。

(3)1930年前后,英国物理学家考克拉夫特(J. D. Cockcroft)和瓦尔顿(E. T. Walton)一起建造了第一台粒子加速器。

(4)1931年由美国物理学家范德格拉夫(R. J. Van de Graaft)建造静电加速器和由美国物理学家劳伦斯(E. O. Lawrence)和利文斯顿(M. S. Livingston)设计制造了第一台用来加速离子的回旋加速器。随着微波技术的发展,1947年建造了行波电子直线加速器和驻波质子加速器。

(5)1934年,约里奥-居里(Joliot Curie)夫妇用钋的 α 射线轰击铝箔,发现铝箔有放射性,并用化学方法从铝箔中分离出 ^{30}P (磷-30),首次发现人工放射性。并随后在实验中发现铀裂变产生多个中子和释放出大量能量,预言可以实现链式反应。

(6)1938年,分别由德国出生的美国物理学家贝特(H. A. Bethe)和德国天文学家魏茨泽克(F. V. Wetabckor)各自独立发现聚变反应或称为“热核反应”。

(7)1939年,奥地利物理学家迈特纳(L. Meitner)和她侄子弗里施(O. Frisch)等人一起发现的铀核裂变现象,并测得200 MeV左右的裂变能。

(8)1942年1月,在芝加哥大学早已废弃的足球场西看台下的一个小院落内,由美籍意大利物理学家费米(E. Feimi)设计建造了世界上第一座铀裂变反应堆CP-1(芝加哥1号堆)。

(9)1942年12月2日,人类于此首次完成自持裂变链式反应实验,第一座天然铀-石墨反应堆成功地启动。

(10)1945年7月16日凌晨5时半,美国爆炸了世界上第一颗原子弹(用来进行原子弹爆炸试验)。

(11)1951年12月20日,美国利用它的第一座生产钚的增殖反应堆的剩余热量发电,电功率为100 kW。虽然美国从20世纪50年代初就开始研究和建造用于发电的各种类型的反应堆,但其真正的目的还是在于军事。

(12)1952年11月1日,美国在太平洋的珊瑚岛(即马绍尔群岛)爆炸了世界上第一颗氢弹。

(13)1954年1月21日,美国建造的第一艘核动力潜艇“鹦鹉螺”号下水。

(14)1954年6月27日,前苏联建成世界上第一个使用核燃料发电的核动力反应堆,它的电功率为5 000 kW。

(15)1957年,美国瑞侃(Raychem)公司首次用加速器辐照生产热缩材料(Heat shrinkable materials),开创了辐射化工产业的历史。

(16)1957年,美国凡士通(Firestone)公司首次用加速器辐照硫化技术生产汽车轮胎。

(17)1961年,Allis-Chalmers & William Myers将第一台商用Anger camera在Ohio大学投入使用。

(18)1969年7月21日,美国阿波罗11号飞船登月。为飞船供热的两个装置为 ^{238}Pu (钚-238)同位素发热器。

(19) 1969年,英国工程师亨斯菲尔德(G. N. Hounsfield)设计成功计算机断层成像仪(CT),1972年面世,提高了病变检出率和诊断准确度,大大促进了核医学的发展。

(20) 1970年美国Ford公司首次将电子加速器用于汽车配件涂漆固化。

(21) 1974年第一台正电子发射计算机断层成像仪(PET)问世,在20世纪90年代后期用于临床。

(22) 1976年John Keyes研制出第一台多用途单光子发射计算机断层成像仪(SPECT)。

(23) 1981年J P Mach发表第一个肿瘤显像的单株抗体放射性药物。

(24) 1991年Cytogen公司第一个推出经FDA同意的肿瘤显像的单株抗体放射性药物。

1.2 核技术的内涵、基本概念和术语

1.2.1 核技术的内涵

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的相互作用为基础,以加速器、反应堆、核辐射探测器和核电子学为支撑技术的综合性很强的现代科学技术。是利用放射性同位素的电离辐射以及其他形式的辐射与物质相互作用所产生的物理、化学和生物效应观察自然现象、揭示自然规律、破解科学难题并加以实际应用。

核技术及其应用所涉及的领域和范围十分广泛,从其技术角度可分为射线技术、同位素技术和支撑技术等三方面。重要内涵如下:

(1) 射线技术 辐射加工,离子束加工,核分析技术,核成像技术,辐射检测仪表;

(2) 同位素技术 同位素制备技术,同位素制品(或标记化合物),放射性药物,放射性年代学,放射性同位素能源,同位素示踪;

(3) 支撑技术 加速器技术,反应堆技术,核辐射探测和核电子学,放射源技术,辐射剂量学和辐射防护。

从应用出发,可分为:核技术在工业中的应用;核技术在生命科学中的应用;核技术在农业中的应用;核技术在环境科学中的应用;核技术在材料科学中的应用;核技术在能源领域中的应用;核仪器仪表。

核技术以其独特的优势,在几十年发展的基础上,进一步向其他基础学科以及应用领域渗透,形成一些交叉学科或边缘学科,如核天文学、核考古学、核地质学等。

1.2.2 基本术语、定义

1. 元素、核素和同位素

(1) 元素

具有相同质子数的一类原子的统称。一般由多个同位素组成,如 ^1H (氕)、 ^2H (氘,D)和 ^3H

(氚,T)统称为氢(H)元素。

(2) 核素

是指每一个具有特定的质子数和中子数的某一个元素,如 ^1H 核素, ^2H 核素, ^3H 核素。核素分为稳定核素和放射性核素两类,能够自发产生射线的核素称为放射性核素(Radionuclide)。

迄今已发现的周期表中的109种元素,共有约2800个同位素,其中稳定同位素只有271个,其他都是放射性核素。自然界存在的放射性核素(即天然及宇生放射性核素)只有60多个,其余都是通过反应堆或加速器生产出来的人工放射性核素。辐射防护法定义半衰期大于100d的放射性物质为长寿命放射性核素;半衰期不大于100天的放射性物质为短寿命放射性核素。原生放射性核素即地球形成时和由于其半衰期长还没有完全衰变的初始放射性核素,相关的原始放射性核素 ^{238}U , ^{235}U 和 ^{232}Th 产生的放射性核素除外;宇生放射性核素则是大气中的原子核与来自于宇宙的辐射发生相互作用而产生的放射性核素;人工放射性核素是指由人工产生的放射性核素。一种原子序数为 Z 的核素,当其 $Z+1$ 和 $Z-1$ 的同量异位素皆为稳定核素时,该核素称为受屏核素。缺中子核素,即某核素与其在质子数对中子数坐标系中 β 稳定带上的同位素相比,核素内的中子/质子比值低于 β 稳定带上同位素的中子/质子比值;丰中子核素是指某核素与其在质子数对中子数坐标系中 β 稳定带上的同位素相比,核素内的中子/质子比值高于 β 稳定带上同位素的中子/质子比值。

同素异形体(Allobarns):由于同位素的组分不同而具有不同相对原子质量的元素形态。

同中子异位素(Isotones):具有相同中子数、不同质子数的一类核素。

同量异位素(Nuclear isobarns):具有相同质量数、不同原子序数的一类核素。

同质异能态(Isomeric state):核的某种平均寿命长得足以被观察的亚稳激发态。

同质异能素(Nuclear isomers):处于同质异能态的核素。

(3) 同位素

具有相同原子序数,但质量数不同的一类核素,也就是指原子核中具有相同质子数、不同中子数的这一类原子之间的相互称谓,如 ^1H 和 ^2H 、 ^3H 它们互为同位素。一种元素的同位素混合物中,某特定同位素的原子数与该元素的总原子数之比,即该特定同位素的同位素丰度。在给定样品中,同一元素的一种同位素的原子数与另一种同位素的原子数之比即丰度比。天然丰度是指在一种元素中特定同位素天然存在的丰度。

2. 射线与辐射

物质发出射线的现象称为辐射。辐射包括电离辐射(Ionizing radiation)和非电离辐射两类。能够引起物质电离的辐射称为电离辐射。电离辐射的种类很多,常见的有电磁辐射(包括X射线和 γ 射线),带电粒子射线(包括 α 射线、 β 射线、电子束、质子射线、氘核射线、重离子束、介子束等),不带电粒子射线(即中子)等。绝大多数电离辐射是由核反应堆、加速器等产生的。非电离辐射是指由于能量低而不能引起物质电离的辐射,如红外线、微波等。

γ 射线:由放射性同位素如 ^{60}Co 或 ^{137}Cs 产生,是一种高能电磁波,波长很短($0.001 \sim 0.0001 \text{ nm}$),穿透力强,射程远,一次可照射很多材料,而且剂量比较均匀,危险性大,可用几厘米厚的铅板或几米厚的混凝土墙屏蔽。

X 射线:即伦琴射线,是由 X 光机产生的高能电磁波,波长比 γ 射线长,射程略近,穿透力不及 γ 射线,可用几毫米铅板屏蔽。

β 射线:由放射性同位素(如 ^{32}P 、 ^{35}S 等)衰变时放出来带负电荷的粒子。在空气中射程短,穿透力弱。在生物体内的电离作用较 γ 射线、X 射线强。

中子:不带电的粒子流。中子辐射源为核反应堆、加速器或中子发生器,在原子核受到外来粒子的轰击时产生核反应,从原子核里释放出来。按能量大小分为快中子、慢中子和热中子。

紫外光:是一种穿透力很弱的非电离辐射。核酸吸收一定波长的紫外光能量后,呈激发态,使有机化合物加强活动能力,从而引起变异。可用来处理微生物和植物的花粉粒。

激光:20 世纪 60 年代发展起来的一种新光源。激光也是一种电磁波,波长较长,能量较低。由于它方向性好,左右偏差仅 0.1,单位面积上亮度高,单色性好,能使生物细胞发生共振吸收,导致原子、分子能态激发或原子、分子离子化,从而引起生物体内部的变异。

各种射线所能引起的生物效应等因其电离密度不同而不同。为了获得有效的结果,通常必须选择适当的射线,但由于射线来源、设备条件和安全等因素,目前最常用的是 γ 射线和 X 射线。可见光、红外线、紫外线等是由外层电子引起;X 射线由内层电子引起; γ 射线是由原子核引起。

3. 基本量与概念

(1) 放射性活度(Activity)

一定量的放射性核素在时间间隔 Δt 内发生的自发核衰变的次数 ΔN_0 除以该时间间隔 Δt 所得的商。在 SI(国际单位制)中,放射性活度的单位是每秒的衰变数(衰变/s),称为贝可(Bq)。非 SI 的放射性活度单位居里(Ci)与贝可有如下关系: $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。

放射性核素的原子核衰变伴有 α 粒子、 β^+ 粒子、 β^- 粒子、转换电子、 γ 光子的发射,有时还发射伦琴射线, K 层 X 辐射和 L 层 X 辐射。核衰变数并不总是同发射的粒子数相符合,而同发射的 γ 光子数符合更是罕见。因此,不应使用诸如“ α 、 β 或 γ 活度”这样的术语,为了确定每次核衰变或单位放射性活度发射的粒子或 γ 光子数,必须知道给定放射性核素的衰变纲图。

(2) 比活度(Specific activity)

单位质量的某种放射性物质的放射性活度。最大比活度,即某种放射性物质在无载体的情况下的放射性活度。

(3) 吸收剂量(Radiation absorbed dose)

物理点上单位质量的物质吸收的能量(按有限的小块介质质量平均值)。任何电离辐射的吸收剂量是在所关心的位置上由致电离粒子授与单位质量的被照射物质的能量。在 SI 制中,吸收剂量的专用名和单位均为戈瑞(Gy), $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ (拉德,非 SI 制单位, $1 \text{ rad} = 100 \text{ 尔}$