

放射性核素概论

卢玉楷 马崇智 著
姚历农 金小海

科学出版社

放射性核素概论

卢玉椿 马崇智 著
姚历农 金小海

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书是一本放射性核素方面的专著。作者在总结自己工作经验的基础上,较为全面地论述了放射性核素发展史、衰变规律、生产方法、各种应用以及与此有关的探测方法和辐射防护等问题。全书共分十一章:绪论,放射性核素的衰变和生长,放射性核素的来源,加速器生产放射性核素,反应堆生产放射性核素,放射性标记化合物的制备,核辐射探测器基础,射线能量的测量与放射性核素的分析鉴定,放射性活度的测量,放射性核素的应用,辐射防护基础。

本书可供核物理、核化学工作者以及大专院校有关专业的师生和研究人员参考。

放 射 性 核 素 概 论

卢玉楷 马崇智 著

姚历农 金小海

责任编辑 荣毓敏 姚为克

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

*

1987年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1987年8月第一次印刷 印张:16 1/4

印数:0001-1,600 字数:368,000

统一书号:13031·3615

本社书号:4856·13-3

定价:3.80元

序

原子能的和平利用有两大支柱：1. 核电站；2. 同位素。若就其应用之广，投资之小，见效之快，效益系数（经济效益与费用之比）之大，当推同位素的应用。其实，核电站的核燃料亦是同位素，不过一般说同位素的应用不包括核电站。同位素已广泛地用于军，用于民。用于民者如工、农、医、理等各行、各业、各科。从对技术应用的广度而言，同位素可与电子学、计算机相提并论，鼎足而三。同位素技术是新技术之一，是新的产业革命内容之一。

稳定同位素的应用虽然正方兴未艾，但在国民经济中的应用还远不如放射性同位素。在发达国家中应用后者的效益系数逐年增加：1960年为1.2—2，1965年为5，1975年为8，至八十年代则为10—15。同位素的应用公认为改进质量，提高效益的重要手段。到2000年工农业总产值翻两番，应用同位素技术于国民经济各部门中是必不可少的了。

我国同位素事业始于1958年中国科学院原子能研究所的核反应堆开始运转之时，经过我们二十几年的奋斗，加上兄弟单位的共同努力，虽已具有相当规模，但与发达国家比还相当落后。我们的作者有鉴于此，特写成此书，期能把放射性同位素的应用推广到国民经济部门，加快“翻两番”的步伐。

“同位素”为习惯用语，作者采用学术上逐渐通用的“核素”代之。放射性核素的生产与应用综合了许多门科学技术，其中以放射化学为主。故本书看起来好像是着重讲放射性核素生产的放射化学书籍。虽然有许多重要的核素没讲，或语焉

不详,则留待其它乐于写作的同志分别去写放射性核素的“各论”小册子,亦让贤之意。重要的放射源则另有作者的专著在写作中,本书就从略了。至于放射性核素生产中的操作、化学加工、分装等设备装置,以及产品的质量控制,亦希望将来有人总结出来。

作者们与我共同从事放射性核素事业,皆在二十年以上,今总结其学习与工作的经验,写成此书,有利于建设四化,振兴中华,作序贺之。

肖 伦

于中国原子能科学研究院

前 言

放射性核素，人们习惯地称为放射性同位素。1896年，贝克勒耳发现元素铀具有放射性。这一重大发现，不仅产生了一门新学科——核科学，而且开创了人类利用核能和核技术的新时代。

原子核裂变时释放出巨大的能量，这种核能首先用于军事上，研制成功了核武器，随后又作为核动力而得到广泛的应用。另一方面，放射性核素射线的应用和示踪应用也获得重大成就。半个多世纪以来，放射性核素的应用已深入到国民经济各部门和人民生活中，在工业、农业、医学和科学技术中创造出数以亿计的经济效益和明显的社会效果。放射性核素应用投资少，效益大，被称为核工业中的“轻工业”。

“经济建设必须依靠科学技术，科学技术要面向经济建设”的方针，为发展放射性核素技术指明了方向。宣传普及核科学，推广核技术的应用，加强放射性核素的科研、生产，是加快国民经济的技术改造，推动我国四个现代化建设的需要，这也是核科学技术工作者的光荣任务。正是在这种形势下，作者撰写了本书。我们期望，本书的出版将对从事放射性核素科研、生产、应用以及需要了解该学科情况的读者有所裨益。

在撰写过程中，作者力求比较全面地介绍放射性核素的诸方面。因此，全书共有十一章，主要介绍放射性核素的发展历史，衰变规律，生产方法，各种应用，以及与之紧密相关的射线探测和辐射防护等。限于篇幅，亦缘它因，许多重要内容未列专门章节，其中如放射化学分离方法，放射源的制备工艺，

放射性产品的质量控制等。放射性核素的应用也只能是挂一漏万。

作者衷心感谢：我国放射化学家、学部委员肖伦教授为本书作序；学部委员王世真教授、夏祖平副研究员、黄彬助理研究员以及张文惠、范深根、贾璋、秦久昌诸位工程师审阅了书稿的有关章节，并提出宝贵意见。

鉴于作者学识水平所限，错误和不当之处在所难免，竭诚希望读者惠赐高见，以期改正。

作者谨识

一九八四年仲秋，于中国原子能科学研究院

目 录

序.....	ix
前言.....	xi
第一章 绪论	1
1.1 放射性核素发展简史	1
1.1.1 早期的原子学说	1
1.1.2 放射性的发现	3
1.1.3 放射性衰变	6
1.1.4 同位素的发现	6
1.1.5 人工放射性核素的发现	8
1.1.6 放射性核素的早期应用	10
1.2 原子核物理基础	17
1.2.1 原子核的组成	17
1.2.2 核素和同位素	19
1.2.3 质量亏损和结合能	20
1.2.4 原子核的稳定性	21
1.2.5 原子核反应	22
1.2.6 射线与物质的相互作用	26
参考文献	32
第二章 放射性核素的衰变和生长.....	33
2.1 放射性核素的衰变定律	33
2.2 几种放射性核素组成的混合衰变	37
2.3 放射性核素的连续衰变	37
2.3.1 放射性核素的两次连续衰变	37
2.3.2 暂时平衡	40
2.3.3 长期平衡	42
2.3.4 无平衡	44

2.3.5	多代子体的连续衰变	46
2.3.6	分支衰变	63
	参考文献	64
第三章	放射性核素的来源	65
3.1	引言	65
3.2	放射性核素的来源	66
3.2.1	天然放射性核素	67
3.2.2	人工放射性核素	69
	参考文献	78
第四章	加速器生产放射性核素	79
4.1	引言	79
4.2	核反应的选择	80
4.3	靶子制备	81
4.3.1	对靶子物的要求	82
4.3.2	靶子的制备	82
4.4	产额计算	83
4.4.1	激发函数及其测定方法	83
4.4.2	束流测量	84
4.4.3	产额计算	85
4.4.4	一些重要放射性核素的产额	88
4.5	辐照技术	92
4.5.1	内靶与外靶	92
4.5.2	靶子辐照时的发热量	93
4.5.3	靶子的冷却	93
4.5.4	靶子的拆卸	97
4.6	辐照后靶子物的化学处理	97
4.7	加速器生产放射性核素举例	100
4.7.1	^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F	105
4.7.2	^{123}I	108
4.7.3	^{201}Tl	115
4.7.4	^{52}Fe	117

4.7.5	^{78}Br	118
4.7.6	超短半衰期核素发生器	121
	参考文献	123
第五章 反应堆生产放射性核素		129
5.1	引言	129
5.2	用于生产放射性核素的核反应	132
5.2.1	(n, γ) 反应	132
5.2.2	(n, f) 反应	133
5.2.3	(n, p) 反应	133
5.2.4	(n, α) 反应	135
5.3	辐照技术	135
5.3.1	辐照及运输装置	136
5.3.2	靶子物的选择和靶子的制备	140
5.3.3	靶子的安全性研究	143
5.3.4	辐照实验技术	144
5.4	产额计算	150
5.5	一些常用放射性核素的生产	156
5.5.1	(n, γ) 反应生产放射性核素举例	156
5.5.2	(n, p) 反应生产放射性核素	163
5.5.3	(n, α) 反应生产放射性核素	166
5.6	应用二次核反应生产放射性核素	168
5.6.1	初级核反应发射的带电粒子的能量和通量	169
5.6.2	利用二次核反应生产放射性核素	173
5.6.3	二次核反应生产放射性核素举例	173
5.7	西拉德-查默斯效应浓集放射性核素	175
5.7.1	原理	175
5.7.2	热原子反冲组份的分离方法	177
5.7.3	高比活度 ^{51}Cr 、 ^{64}Cu 、 $^{59+55}\text{Fe}$ 的制备	179
5.7.4	反冲效应富集放射性核素的影响因素	180
5.8	利用放射性核素发生器制备短寿命放射性核素	181
5.8.1	概况	181

5.8.2	放射性核素发生器的基本原理	185
5.8.3	一个较满意的医用发生器应具备的主要条件	188
5.8.4	母、子体的放射化学分离方法	189
5.8.5	常用色层发生器的制备	189
5.9	从混合裂变产物分离放射性核素	193
5.9.1	概述	193
5.9.2	裂变产物的分离	195
5.10	超铀元素的合成	201
5.10.1	超铀元素的发现	201
5.10.2	超铀元素的合成	203
5.10.3	几种重要超铀元素的生产	208
	参考文献	212
第六章	放射性标记化合物的制备	217
6.1	引言	217
6.2	放射性标记化合物的制备方法	218
6.2.1	制备标记化合物应考虑的几个因素	220
6.2.2	化学合成标记法	220
6.2.3	同位素交换标记法	225
6.2.4	生物合成标记法	227
6.2.5	辐射合成标记法	229
6.2.6	电化学标记法	232
6.3	碘标记化合物的制备	232
6.3.1	碘化标记机制	233
6.3.2	放射碘化方法	233
6.3.3	碘化标记方法应用实例	235
6.4	标记化合物的质量控制	239
6.4.1	标记化合物的纯化方法	239
6.4.2	标记化合物的质量控制	240
6.5	放射性标记化合物的稳定性	241
	参考文献	244
第七章	核辐射探测器基础	245

7.1	引言	245
7.2	气体探测器	245
7.2.1	气体探测器的一般原理	246
7.2.2	电离室	250
7.2.3	正比计数管	256
7.2.4	盖革计数管	265
7.3	闪烁计数器	269
7.3.1	闪烁计数器的出现和发展	269
7.3.2	闪烁计数器工作原理	269
7.3.3	闪烁计数器的结构	275
7.4	半导体探测器	282
7.4.1	概述	282
7.4.2	原理	282
7.4.3	半导体探测器的结构	288
7.4.4	半导体探测器的性能参数	291
	参考文献	294
第八章	射线能量的测量与放射性核素的分析鉴定	295
8.1	引言	295
8.2	带电粒子能量的测量	295
8.2.1	射程法	295
8.2.2	用气体探测器测定带电粒子能量	299
8.2.3	磁谱仪方法	302
8.2.4	半导体探测器测定方法	307
8.3	γ 射线能量的测量	311
8.3.1	概述	311
8.3.2	闪烁谱仪测量方法	311
8.3.3	半导体 γ 能谱仪测量方法	322
8.4	X 射线能量的测量	325
8.4.1	正比管 X 射线谱仪	326
8.4.2	NaI(Tl) X 射线谱仪	326
8.4.3	半导体 X 射线谱仪	327

8.4.4	几种 X 射线谱仪性能的比较	327
8.4.5	X 射线能量刻度标准源	329
8.5	放射性核素的分析鉴定	329
8.5.1	通过测定半衰期鉴定放射性核素	329
8.5.2	通过能量测量鉴定放射性核素	331
	参考文献	338
第九章	放射性活度的测量	339
9.1	引言	339
9.1.1	放射性活度单位	339
9.1.2	直接测量和间接测量	340
9.2	放射性活度的直接测量方法	340
9.2.1	量热方法	340
9.2.2	小立体角方法	347
9.2.3	4π 计数方法	354
9.2.4	大面积 2π 流气式正比计数器方法	360
9.2.5	内充气正比计数器方法	361
9.2.6	4π 高压正比计数器方法	363
9.2.7	4π 闪烁直接测量方法	367
9.2.8	符合直接测量方法	383
9.3	放射性活度的间接测量方法	395
9.3.1	概述	395
9.3.2	直接比较方法	396
9.3.3	间接比较方法	399
	参考文献	410
第十章	放射性核素的应用	412
10.1	引言	412
10.2	放射性核素在农业上的应用	413
10.2.1	辐射育种	413
10.2.2	刺激增产	416
10.2.3	防治虫害	417
10.2.4	食品保藏	418

10.2.5	放射性示踪技术在农业上的应用	422
10.3	放射性核素在工业上的应用	426
10.3.1	放射性核素检测仪表	426
10.3.2	放射性测井	433
10.3.3	辐射化学加工	436
10.3.4	静电消除	439
10.3.5	γ 射线探伤	443
10.3.6	示踪原子的应用	445
10.4	放射性核素在医学上的应用	446
10.4.1	在临床诊断方面的应用	449
10.4.2	在临床治疗上的应用 ..	459
10.4.3	在基础医学研究中的应用	461
10.5	年代测定	462
10.6	核衰变能的利用	466
	参考文献 ..	470
第十一章	辐射防护基础	474
11.1	引言	474
11.2	辐射防护中常用的辐射量和单位	475
11.2.1	描述辐射场的物理量和单位	475
11.2.2	吸收剂量及其单位	476
11.2.3	比释动能	477
11.2.4	照射量 X 及其单位	479
11.2.5	辐射防护中专用的量和单位	482
11.3	电离辐射对人体的损伤作用	484
11.3.1	电离辐射对人体的生物效应	484
11.3.2	影响辐射损伤的因素	485
11.3.3	辐射对受照器官或组织的危险度	486
11.4	辐射防护标准	487
11.4.1	我国现行辐射防护标准	487
11.4.2	ICRP 关于辐射防护标准的新建议	490
11.5	辐射防护	491

11.5.1	外照射防护	491
11.5.2	内照射防护	500
11.6	辐射防护监测	503
11.6.1	个人剂量监测	503
11.6.2	现场监测	504
11.6.3	环境监测	505
参考文献		506

第一章 绪 论

1.1 放射性核素发展简史^[1-13]

1896年,贝克勒耳(H. Becquerel)发现铀的放射性,揭开了原子能科学发展的序幕。1938年,哈恩(O. Hahn)和斯特拉斯曼(F. Strassmann)发现放射性核素铀的裂变现象,则使人类进入利用原子能的时代。放射性核素及其放射性的发现和研究,不仅揭示了原子结构的奥秘,促进核物理学科的出现和发展;同时也加速放射化学的诞生。毋庸置疑,放射化学和核物理的发展,又为放射性核素的制备、分离、提纯和鉴定开辟了新的前景。正是各学科之间这种紧密联系,相互促进,彼此渗透,使原子能科学得到迅速发展,并为人类带来巨大的利益。现今,铀-235、钚-239等放射性核素作为核燃料,已成为一种重要能源;放射性核素应用于工业、农业、医学和科学技术领域,亦已创造出巨大的经济效益。

放射性核素,通常习惯地称为放射性同位素。本世纪初,索迪(F. Soddy)等人提出同位素概念,在近一百年中,放射性同位素的研究、生产和应用得到了十分迅速的发展。追溯历史,大家会注意到,放射性核素的发展经历了若干重大历史事件。

1.1.1 早期的原子学说

原子学说的发展经历了漫长的年代。公元前六世纪,古希腊哲学家认为宇宙万物皆由水组成。一百多年后,亚里士多

德(Aristotle)学派提出“四要素”学说,即物质系为水、土、火和气组成。公元前五世纪,留基伯(Leucippus)和德谟克利特(Democritus)则将物质归结为大量不可分割的微粒所组成,这种微粒称为原子(希腊语,意即不可分割)。在相当长的时期内,这些概念统治着自然科学,直到1661年玻意耳(R. Boyle)提出最简单的物质是元素,尤其是十八世纪末十九世纪初,拉瓦西(A. Lavoisier)、道耳顿(J. Dalton)提出化学元素学说和原子学说并用实验证明之后,才冲破旧的观点,获得新的发展。

十八世纪初,科学家发现了28个元素,十九世纪头五十年又发现27个元素,至1865年已知65个元素。大量元素发现后,人们开始探索各元素之间的内在联系。1869年,门捷列夫(Д. И. Менделеев)发现元素的化学性质随着原子量的增加而周期性地变化,这就是著名的元素周期律。他将已发现的元素按周期律排成一个表,称元素周期表。每个元素在表中的排列序号,称原子序数。后来发现,实际上元素化学性质是随原子序数的增加而呈周期性变化,而且原子序数就是核外的电荷数,亦是核内的正电荷数,即质子数。

在前人研究的基础上,1897年汤姆孙(J. J. Thomson)通过实验证实了原子中带负电粒子的存在,并正式命名为“电子”。电子的发现,动摇了原子不可分割的观念。

二十世纪以来,原子结构的研究获得了重大发展。1910年英国科学家卢瑟福(E. Rutherford)在用 α 粒子轰击金箔的实验中,发现绝大部分 α 粒子都穿过金箔,但有极少的 α 粒子被金箔弹回来(大角散射)。这一事实说明,原子里面大部分空间是空荡的,原子中有一个质量很大,体积很小而带正电的“原子核”。1911年,卢瑟福根据上述实验,提出了有名的“原子行星模型”。1913年,玻尔(N. Bohr)提出了量子理论