

序

核技术与现代医学的深度融合，是当代医疗科技发展的重要里程碑。从核医学影像诊断到放射性核素靶向治疗，医用同位素的广泛应用为肿瘤等重大疾病的诊疗带来了革命性突破，也让我国核医疗产业迈入了高速发展的新阶段。与此同时，医疗放射性废物的安全、高效处理，始终是核医疗事业健康发展的底线要求，关系到生态环境安全、公众辐射防护与行业的可持续发展，是核技术应用领域必须攻克的核心课题。

当前，我国医用同位素国产化进程持续加快，核医学临床应用规模不断扩大，医疗放射性废物的产生量、核素种类与组分复杂度均显著提升，对废物处理的理论研究、技术研发、工程实践与合规管理都提出了前所未有的挑战。但长期以来，国内针对医疗放射性废物全链条处理的系统性学术专著较为稀缺，尤其是能够融合基础理论创新、核心技术研发、工程化应用与标准体系解读的一体化成果更为少见，难以满足行业快速发展的现实需求。

该书作者团队长期深耕医疗放射性废物处理与核安全领域，兼具深厚的理论研究功底与丰富的工程实践经验。全书以医疗放射性废液处理为核心，从配位化学与计算化学的基础理论出发，系统阐释核素-配体配位作用机理、焓熵协同效应等核心科学问题，完整构建从辐射探测基础原理、放射性废物在线监测系统设计，到核医疗生产端与使用端废液全流程处理工艺、工程化系统开发的技术体系，同时全面梳理医疗放射性废物管理相关的法规标准与技术规范，实现基础理论、技术创新、工程应用与监管标准的深度融合。

书中既有基于量子化学计算、分子动力学模拟的前沿理论方法解析，也有痕量医疗核素高效分离材料固相萃取、移动式/固定式废液智能处理系统等工程化成果的详细呈现，更贴合我国核医疗行业的实际发展需求，填补了国内该领域系统性专著的空白。该书既可为高校、科研院所的相关研究提供理论参考，也能为医疗机构、工程企业的技术应用与项目实施提供实践指导，还能为监管部门制定相关政策标准提供技术支撑。

欣闻该书付梓，乐见我国核医疗废物处理领域的研究成果得以系统总结与传播。相信该书的出版，能为我国核医疗事业的安全、绿色、可持续发展注入新的动力，也期待行业同仁以此为基，持续推动技术创新与产业升级，共同守护好核医疗发展的生态安全与公众健康底线。

谨此为序。



2026年4月21日

自序

20 世纪中叶以来，随着核医学技术的突破性发展，放射性同位素在肿瘤精准诊疗、心血管疾病动态显像等临床领域展现出革命性价值。我深切体会到核医学在推动精准医疗变革中的战略意义，亦对其伴生的放射性废物治理难题保持高度关注。《医疗放射性废物处理技术》的问世恰逢其时——当我国核医学诊疗量以年均 18% 的增速跃居全球第二之际，医疗放射性废物的年产生量已突破 6.3 万 m^3 ，而传统衰变贮存技术对短半衰期核素的处理效率不足 40%，这种剪刀差的持续扩大迫使我们必须以系统工程思维重构相关产业的废物治理体系。

医疗放射性废物的特殊性在于其兼具生物危害与辐射风险的双重属性：放射性药物残留液常含 ^{131}I (8.02d)、 ^{177}Lu (6.65d) 等短半衰期核素，并与蛋白质、代谢产物形成复杂络合物，传统吸附材料（如离子交换树脂、活性炭、沸石）对其净化效果将大打折扣。这些特征决定了医疗放射性废物处理不能简单移植核电站技术，必须构建具有医疗特色的解决方案。

本书以技术创新链为主线展开深度剖析：在基础研究层面，首次建立医疗放射性核素的配位化学结构搜索程序，揭示 ^{131}I 、 ^{177}Lu 等关键医疗核素的微观作用机制；在材料开发层面，系统阐述特异性功能化材对痕量核素分离的构效关系；在工程应用层面，创新设计移动式净化装置与智能监测系统；在标准规范层面，对比分析中、美、欧监管体系的异同。这种“分子-材料-设备-系统-标准”的多尺度研究方法为破解医疗放射性废物处理难题提供了全新视角。

本书不仅是技术成果的凝练，更蕴含方法论层面的创新——将我及团队在核燃料循环领域积累的十余年复杂低放废液处理技术体系经验创造性拓展至核医疗场景，并发展出针对性的痕量医疗核素超快分离材料研制、智能化工艺装备设计开发等特色方向。期待本书能激发更多交叉学科创新，助力我国在 2030 年前建成医疗放射性废物“即产即消”的技术体系，为全球核医学可持续发展贡献中国方案。

聂小琴

2026 年 1 月 15 日

前 言

医学是核技术应用的重要领域之一，核医学利用放射性同位素诊断、治疗和研究疾病是现代医学的重要组成部分。2021 年 6 月，国家原子能机构联合国家七部委发布了我国核医学领域的首个纲领性文件《医用同位素中长期发展规划（2021—2035 年）》，标志着我国核医学进入蓬勃发展的新时期。然而在核医学技术造福人类的同时，其伴生的放射性废物问题也随之而来。医用同位素的研发、放射性药物的生产以及使用环节同步带来爆发式增长的医疗放射性废物。放射性药物中所使用的通常是短半衰期核素，因此过去主要采用静置衰变法来处理放射性废物，效率低。医疗放射性废物处理技术的滞后，严重制约了行业发展。与此同时，医疗放射性废物由于包含人体排泄液等复杂的环境介质，传统的放射性废物处理技术难以适用，因此亟须构建从分子设计到工程应用的全链条解决方案。

本书编写团队已从事核燃料循环体系和核电站体系复杂放射性废物处理领域相关工作超过十五载，针对核医疗产生的放射性废物，率先在国内尝试进行相关废液快速处理技术的突破，并在三甲医院核医学科落地了我国首套医院现场的医疗放射性废液处理工程装置，同步开展了真实源项的多轮热试验验证。尽管已经取得了初步的成果，但我们深刻意识到，要应对这种多核素复合污染的新挑战，还需要整个行业的共同努力。为此，作者将自身十多年来从事复杂低放废液基础研究和工程转化的粗浅经验进行分享，尝试与合作单位共同撰写《医疗放射性废物处理技术》一书，以供相关领域的同行交流，促进医疗放射性废物处理技术的快速发展。

本书共分为 7 章，形成“学-研-产-用-政”有机衔接的一体化知识体系：第 1 章立足全球视野解析核医学发展脉络，分析核医疗放射性废物的来源和分类，提出废物高效治理的紧迫性；第 2 章通过源项分析构建废物分类的量化模型，剖析核医疗研发、生产、使用过程中产生的废液和固废特性；第 3 章系统评述分离材料的技术演进路径，从不同医疗核素及其应用角度着手，分析现有材料和技术的可行性；第 4 章建立分子层面的理论研究方法，结合清华大学开发的机器学习配体搜索软件，介绍对医疗放射性废物具有特异性处理性能的材料优势配体及其模拟方法；第 5 章聚焦智能监测技术的前沿突破，从辐射安全及辐射测量角度，分析基于人工智能技术的核素在线监测方法；第 6 章依托前期医院现场装置的工程化经验，提供可模块化设计的技术转化可行思路；第 7 章立足国内现行放射性废物处理技术政策法规，为医疗放射性废物处理技术相关标准的改进提供见解，力求便于读者阅读和参考。

在本书的编写过程中，作者课题组的多名研究人员做出了贡献，特别感谢龚俊源、王君玲、李杰、彭银银、李娥、章云龙、郭浩阳、肖林泽、嵇钰辰、郭琦、李冷怡、宋宛蓉、张雯琪付出的辛勤劳动。感谢范国滨院士、李隼院士、邓建军院士、唐立院士、董发勤教授、彭述明研究员、杨宇川研究员、黄曾研究员等专家一直以来对医疗放射性废物处理技术发展的关心与支持。

本书由彭述明研究员主审，他提出了许多宝贵意见，对此谨表衷心的感谢。

本书中难免存在疏漏，敬请读者指正。

作 者

2026 年 1 月 20 日

目 录

第 1 章 核医学概述	1
1.1 核医学现状及发展趋势	2
1.2 核医疗放射性废物	2
1.2.1 核医疗放射性废物来源	3
1.2.2 核医疗放射性废物分类	7
1.2.3 核医疗放射性废物管理的现状与挑战	9
参考文献	10
第 2 章 医疗放射性废物源项	11
2.1 医用放射性同位素与放射性药物	11
2.1.1 医用放射性同位素分类	11
2.1.2 放射性药物分类	14
2.2 放射性药物研发与生产端废物源项	16
2.2.1 放射性药物研发与生产端废液源项	18
2.2.2 放射性药物研发与生产端固体废物源项	30
2.3 放射性药物应用端废物源项	34
2.3.1 放射性药物应用端废液源项	36
2.3.2 放射性药物应用端固体废物源项	39
2.4 医疗放射性废物管理	44
2.4.1 医疗放射性固体废物管理	49
2.4.2 医疗放射性废液管理	50
参考文献	52
第 3 章 医疗放射性核素分离材料研发	54
3.1 医疗放射性废物处理处置现状	54
3.1.1 贮存衰变技术	54
3.1.2 化学分离与沉淀技术	56
3.1.3 膜分离技术	63
3.1.4 吸附与离子交换技术	66
3.2 医疗放射性核素分离材料前沿进展	77
3.2.1 碘分离材料	78
3.2.2 镭分离材料	92
3.2.3 钨分离材料	103
3.2.4 铈分离材料	114

3.2.5 铯分离材料·····	129
3.2.6 其他医疗放射性核素分离材料·····	139
参考文献·····	154
第4章 医疗放射性废液的理论与计算化学 ·····	164
4.1 医疗放射性废液体系配位结构搜索程序·····	164
4.1.1 阳离子核素配位结构搜索程序的算法原理·····	164
4.1.2 阳离子核素配位结构搜索程序的应用案例·····	170
4.2 阳离子核素配位过程中的理论与计算化学·····	176
4.2.1 焓熵协同效应的理论基础·····	176
4.2.2 晶体场与配位场的理论模型·····	178
4.3 阴离子核素离子交换过程中的机理·····	181
4.3.1 季铵等官能团的马利肯电荷和静电势·····	181
4.3.2 阴离子交换过程中的能量分解·····	186
4.4 医疗放射性核素分离材料的分子动力学模拟·····	188
4.4.1 从头算分子动力学模拟·····	188
4.4.2 经典分子动力学模拟·····	189
4.4.3 机器学习势函数分子动力学模拟·····	191
参考文献·····	192
第5章 医疗放射性废物监测技术 ·····	194
5.1 辐射基础原理·····	194
5.1.1 辐射的基本概念·····	194
5.1.2 放射性核素的衰变·····	195
5.1.3 衰变常数与半衰期·····	201
5.1.4 辐射与物质的相互作用·····	201
5.1.5 辐射剂量与危害·····	204
5.2 放射性测量仪器·····	205
5.2.1 气体探测器·····	206
5.2.2 闪烁体探测器·····	208
5.2.3 半导体探测器·····	211
5.3 医疗放射性废物的监测·····	213
5.3.1 医疗放射性废物监测的需求·····	213
5.3.2 医疗放射性废物的监测流程·····	214
5.4 医疗放射性废物在线监测系统平台设计·····	217
5.4.1 系统平台设计概述·····	217
5.4.2 系统平台的架构与设计·····	218
5.4.3 数据采集、处理与分析功能设计·····	220
5.4.4 监测数据的预警设计·····	221
5.4.5 系统平台的可视化展示设计·····	223

5.5 医疗放射性废物在线监测技术的发展趋势·····	225
5.5.1 技术创新的方向·····	225
5.5.2 未来展望·····	227
参考文献·····	228
第6章 医疗放射性废液处理工艺设计与工程应用 ·····	230
6.1 核医疗生产端放射性废液处理工艺·····	230
6.1.1 微滤+纳滤膜梯度预处理工艺·····	231
6.1.2 离子交换纤维固相萃取工艺·····	235
6.1.3 移动式核医疗生产端废液处理系统·····	240
6.2 核医疗使用端放射性废液处理工艺·····	248
6.2.1 高密度澄清预处理工艺·····	249
6.2.2 离子交换纤维分质分级深度净化工艺·····	250
6.2.3 放射性在线监测技术·····	251
6.2.4 固定式核医疗使用端废液处理系统·····	253
参考文献·····	256
第7章 医疗放射性废物管理 ·····	257
7.1 放射性废物处理技术标准与规定·····	260
7.1.1 放射性废液处理技术标准与规定·····	263
7.1.2 放射性固体废物处理技术标准与规定·····	265
7.2 医疗放射性废物处理技术标准与规定·····	270
7.2.1 医疗放射性废液处理技术标准与规定·····	274
7.2.2 核医学放射性废液快速处理技术要求·····	278
7.2.3 医疗放射性固体废物处理技术标准与规定·····	282
参考文献·····	285

第 1 章 核医学概述

核医学是一门高度交叉的学科，它融合了医学、物理学、化学和生物学等多个领域的知识，利用放射性同位素对疾病进行诊断与治疗。自 20 世纪中叶起，核医学在全球范围内得到了迅速的发展，尤其在肿瘤、内分泌疾病以及心血管疾病的诊断与治疗中，展现了重要的临床价值。随着科技的不断进步，核医学的应用领域逐渐拓展，相关技术与设备的不断更新换代也推动了该领域的飞速发展。在中国，核医学的发展历程可谓波澜壮阔，经历了从依赖进口到逐步实现自主研发和生产的几个重要阶段。在此过程中，国家对核医学基础设施的投资和技术水平的提升起到了至关重要的作用。具体来看，根据中华医学会核医学分会的统计数据，2010—2025 年，中国核医学相关科室的数量从 875 个增长到 1285 个，增幅显著。这一变化不仅体现了核医学在临床医学中的重要地位，也表明国家在推动核医学事业发展方面的努力与成效。然而，尽管中国的核医学发展取得了长足的进展，但在实际应用中仍面临着一系列的挑战。当前，国内大部分医疗放射性核素仍依赖进口，这使得在资源供应方面存在一定的“瓶颈”。尤其在一些核心技术领域，我国缺乏足够的自主创新能力，使得我国核医学产业的整体技术水平与国际先进水平相比，仍有差距。此外，放射性药物的种类较为有限，获得批准上市的新药品种也较为稀缺，这在一定程度上制约了核医学进一步发展的空间和潜力。因此，要实现核医学领域的长远发展，除了继续加强自主研发生产和技术创新外，还需要促进多学科的合作，增强核医学的综合应用能力。尤其是在放射性药物的研发和生产方面，需要加强与生物医药、化学工程等领域的交叉合作，推动新药的上市审批进程，提高国内创新药物的研发成功率。同时，国家层面也应进一步加大对核医学的政策支持与资金投入，特别是在放射性药物研发、核素生产等关键环节，解决当前的“瓶颈”问题。

总的来说，核医学作为现代医学的一项重要技术，其在未来的医学发展中将继续扮演着不可或缺的角色。随着技术的不断进步、政策的持续扶持以及国际合作的不断深化，核医学有望在更广泛的领域内为临床治疗提供更加精准和高效的解决方案。本章将全面介绍中国核医学的发展现状，包括核医学科室的数量增长、设备更新、人才队伍建设以及放射性药物的制备情况。同时，探讨当前核医学面临的挑战，如放射性核素的供应问题、创新能力不足等。在此基础上，本章还将展望核医学的未来发展趋势，包括自主生产与创新研发、技术整合与多学科合作、个体化医疗以及教育与人才培养等方面。通过对现状的深入分析和未来趋势的预测，本章旨在为核医学领域的研究者、临床医生、政策制定者和相关产业提供全面的参考和指导。

1.1 核医学现状及发展趋势

近年来，核医学领域在政策支持和技术进步的双重驱动下迎来了重要发展机遇。2021年6月24日，国家原子能机构联合国家七部委发布了我国核医学领域的首个纲领性文件《医用同位素中长期发展规划（2021—2035年）》。该文件明确指出，未来我国医用同位素的生产与使用规模将增加10倍，为核医学的快速发展奠定了战略基础。作为重要支撑，文件提出了促进医用同位素生产能力建设、推动关键技术突破以及优化资源配置等具体目标。2024年10月31日，国家原子能机构等十二部门联合发布的《核技术应用产业高质量发展三年行动方案（2024—2026年）》进一步强化了核技术在医疗领域的核心地位，提出要加快医疗核技术储备，推进创新性医疗产品研发，并加强核医学领域的产业链和供应链安全性。这一行动方案明确了核技术在精准医学、肿瘤诊疗以及慢性疾病管理中的广阔应用前景。

地方层面，四川省积极响应国家号召，充分发挥本地资源优势，于2023年1月率先出台了《四川省医用同位素及放射性药物产业发展行动计划（2022—2025年）》，着力打造区域性医用同位素研发与生产高地。2024年7月，四川省人民政府进一步出台《关于促进核医疗产业高质量发展的意见》，明确指出四川要建设自主可控的核医疗产业体系，积极发展放射性药物研发、核医学诊疗中心建设以及核环保产业配套服务。文件还强调要加强核医学相关设备、技术及专业人才的本地化储备，推动区域核医学产业链的全面升级。

从全球范围来看，核医学正在向精准化、智能化方向发展。基于放射性同位素的诊疗技术在癌症、心血管疾病和神经系统疾病等重大疾病的早期筛查和精准治疗中表现出强大优势。同时，核医学领域的技术创新正在从诊断设备的优化向核药物研发、智能化影像分析和个性化治疗模式转变。我国核医学产业在政策推动下加速崛起，预计在未来十年内，核技术将成为医疗领域的重要支柱，为人类健康提供更加精准、高效和可持续发展的解决方案。

1.2 核医疗放射性废物

核医疗放射性废物的管理是核医学领域中一个至关重要的环节。随着核医学技术的不断进步和应用范围的扩大，放射性废物的产生量也在逐年增加。核医疗放射性废物不仅涉及医疗、工业和科研等多个领域，还涉及公众健康和环境安全。因此，建立一套科学、合理的放射性废物管理体系显得尤为重要。

本节重点探讨核医疗放射性废物的来源、分类及其管理措施。首先，本节将分析核医疗放射性废物的主要来源，包括诊断性和治疗性放射性药物的使用、实验室操作过程中所产生的废物以及患者在治疗过程中所产生的排泄物和污染物等。对这些废物来源的深入了解可以为后续的废物管理提供基础数据。接着，本节对核医疗放射性废物进行分类，主要包括固体废物、液体废物、气体废物和废旧放射源。每种类型的废物都有其特

定的处理要求和管理措施，了解这些分类有助于制定相应的处理方案，确保废物的安全处置。最后，本节将讨论核医疗放射性废物管理的现状与挑战，包括当前管理体系的不足之处、技术手段的局限性以及政策法规的滞后性等问题。本书通过对这些问题的分析，提出改进建议，为未来核医疗放射性废物的管理提供参考。

1.2.1 核医疗放射性废物来源

核医学作为现代医学中的一项重要技术，近年来在医疗诊断和治疗方面取得了显著进展，尤其是在肿瘤学、心血管疾病、内分泌疾病等多个领域，核医学技术为临床提供了精准的诊断手段和个性化的治疗方案。然而，核医学技术的不断普及和应用带来的不仅是医疗水平的提升，还伴随着放射性废物的增加。如何有效管理和处置这些放射性废物，已成为核医学领域不可忽视的挑战。放射性废物作为核医学技术使用中不可避免的副产品，如果没有得到妥善处理，可能会给环境、公众健康以及从业人员的安全带来严重威胁。因此，建立和完善放射性废物的管理体系，确保其科学、规范、安全的处理，成为核医学领域亟待解决的核心问题之一。核医学领域的放射性废物主要来源于以下几个方面：诊断性和治疗性放射性药物的使用、实验室操作过程中所产生的废物，以及患者在治疗过程中所产生的排泄物和污染物。针对这些来源，本书将逐一探讨各类放射性废物的产生背景、危害及其处理方法。

1. 诊断性放射性药物

核医学最常见的诊断方法是通过使用放射性药物进行影像学检查，这些药物能通过体内辐射信号被探测，从而显示患者的病变区域。常见的放射性药物包括 ^{99m}Tc 和 ^{123}I 等，这些药物广泛应用于早期诊断、肿瘤定位、心血管疾病的评估等（图 1.1）。在诊断过程中，放射性药物被注射到患者体内后，设备通过探测其辐射信号，生成影像来帮助医生诊断。虽然它们在体内的作用时长不等，但都能有效地显示出病变区域。然而，尽管这些药物在体内发挥着重要的诊断作用，在使用后却往往会产生一定量的废物，这些废物通常包括空药瓶、注射器、废弃的药物及相关消耗品。



图 1.1 诊断性放射性药物靶向治疗

^{99m}Tc 是一种半衰期相对较短的放射性药物，其半衰期约为 6h，其特点是放射性衰减速度较快，因此即使在体内或废物中残留的放射性物质含量相对较高，也能在较短时间内降低到安全水平。这使得 ^{99m}Tc 的废物处理相对容易，医院和实验室在处理这类废物时可以通过适当地隔离和储存，确保其在短时间内不对环境或人体造成危害。与之相比， ^{123}I 的半衰期较长，约为 13h，这意味着体内或废物中的放射性物质会残留更长时间，从而使得其废物的管理变得更为复杂。尽管 ^{123}I 的衰减速度较快，但其废物中的放射性物质需要较长时间才能达到安全标准。因此，对于 ^{123}I 等药物的废物，处理时必须采取更为严格的措施，确保其在长时间内得到有效的管理和处置。例如， ^{123}I 废物的储存需要专门的设施，并且要求在处理过程中采取更为严格的防护措施，如加装辐射防护屏障，加强废物储存的监控，以避免对周围环境和人员造成潜在危害。在此过程中，医疗机构通常会与专门的废物处理公司合作，确保这些废物得到安全、有效的处置。

诊断性放射性废物的管理尤为重要，主要体现在其放射性衰减特性和化学成分上。例如， ^{99m}Tc 的半衰期较短，因此它的放射性会迅速衰减，相较于某些放射性药物（如 ^{123}I ），其废物处理难度较低，处理过程可相对简便。然而， ^{123}I 等放射性药物则可能在体内或废物中残留较长时间，这使得其废物管理更具挑战性，需要更严格的安全防护措施，如加强废物储存和管理的监控，确保放射性废物得到安全处置和无害化处理。

2. 治疗性放射性药物

治疗性放射性药物，特别是用于恶性肿瘤治疗的药物，如 ^{131}I 和 ^{177}Lu ，通过靶向照射肿瘤细胞或组织发挥治疗作用。这些药物通过特定途径进入患者体内，直接作用于肿瘤部位（图 1.2）。然而，尽管治疗性放射性药物在治疗过程中取得了一定的效果，但仍有部分药物未被完全吸收或代谢，部分药物会通过患者的排泄物（如尿液、粪便等）排出体外，形成治疗后产生的放射性废物。

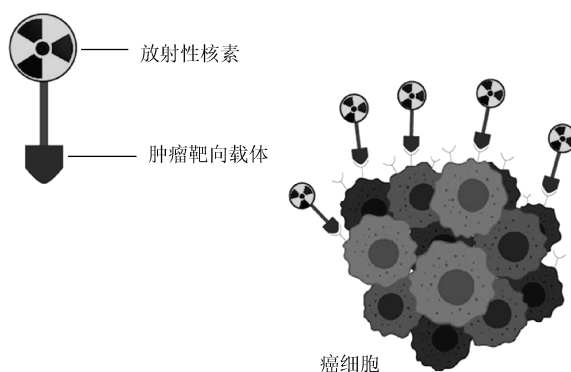


图 1.2 放射性配体治疗：精准打击癌细胞的靶向放射疗法

这些治疗后产生的废物具有较强的放射性，尤其是患者排泄物中的药物残留物，管理难度较大。为了防止这些废物对公众健康和环境造成危害，核医学机构通常会采取严格的隔离措施。例如，患者在接受放射性治疗后，其排泄物需要在一定时间内进行专门

储存，并严格监控其放射性衰减过程。一般来说，直到废物的放射性水平下降到安全标准以下，才能进行最终处置。

3. 实验室操作过程中所产生的废物

核医学实验室在进行放射性药物的准备、研究以及临床前期试剂的制备过程中，也会产生一定量的放射性废物。这些废物的种类多样，包括污染的实验器材（如试管、培养皿）、化学试剂（如溶剂、酸碱类试剂），以及在放射性药物配制过程中产生的残余物。与普通化学实验室废物不同，核医学实验室废物不仅含有放射性物质，还可能包含具有腐蚀性或毒性的化学成分，因此其处理过程更加复杂且需要更高的安全标准（图 1.3）。

这些废物的处置必须严格遵循相关的安全规定，通常要求废物在专门设计的容器内进行隔离存放，并标明放射性水平和危险程度。实验室工作人员必须接受专业培训，定期更新相关的放射性防护和废物处理知识，确保实验环境的安全与合规。对于这些废物的储存和运输，核医学机构会依据放射性物质的半衰期和危险性，制定相应的管理方案，并在处理过程中采取充分的防护措施，避免泄漏或污染其他区域。



图 1.3 实验室危险废物

4. 患者在治疗过程中所产生的排泄物和污染物

在核医学治疗过程中，患者的排泄物可能含有一定量的放射性物质。这类废物主要包括尿液、粪便、汗液等，特别是接受放射性治疗的患者，治疗过程中体内的放射性物质可能通过这些排泄物排出体外。这些排泄物一旦被污染，也会成为放射性废物的一部分。与此同时，患者使用过的衣物、床单、毛巾等物品如果被放射性药物污染，也需要进行专门的处理。

由于这类废物不仅涉及放射性安全，还涉及生物安全和化学安全，其处置复杂性较高。为确保处理过程的安全性，通常会采取特殊的储存措施，直到废物中的放射性物质衰减到安全水平。这类废物在收集、运输、储存以及最终处置过程中，都必须遵循严格的标准。医院和医疗机构通常会设置专门的隔离区域，配备专业的人员进行废物管理，并采取放射性废物洗涤程序处理污染的衣物和床单。对于患者的排泄物，则通常通过特殊的储存设施进行暂时存放，直到其放射性水平降至安全标准。

由于核医学废物具有放射性、化学性和生物性等多重危险性，其管理必须非常严格，涉及的环节也非常繁杂。具体来说，放射性废物的管理需要满足以下几个基本要求。

(1) 安全隔离与标识：所有的放射性废物必须存放在专门设计的容器中，并明确标注放射性标识。容器必须密封良好，以防止放射性物质泄漏。对这些废物进行有效的隔离，以确保其不会对环境造成污染（图 1.4）。



图 1.4 医疗废物管理：专用容器与运输

(2) 适当的储存与衰减：由于不同放射性药物的半衰期不同，废物的放射性衰减速度也各不相同。对于半衰期较短的放射性药物，可以通过暂时储存的方式进行管理，等待其衰减至安全水平；对于半衰期较长的药物，则需要进行长期储存，并定期监测其放射性水平。

(3) 专业人员的处理与处置：放射性废物的管理必须由经过专门培训的专业人员来执行，确保其处理过程符合安全标准。所有涉及废物分类、储存、运输、处置等环节的人员都需要接受严格的安全培训，并定期参与专业技能的提升。

(4) 环境监控与应急措施：核医学机构需要建立完善的环境监控体系，对放射性废物的储存和处理区域进行实时监控。同时，还需要制定应急预案，确保在出现异常情况时能够迅速采取有效的应对措施，避免对工作人员、患者或公众造成伤害。

核医学的放射性废物管理是一个复杂而细致的过程，涵盖了从废物产生到最终处置的每一个环节。为了确保公众和环境的安全，必须严格执行，并且不断更新和完善相关管理规定和技术标准。随着核医学技术的不断发展和应用范围的扩大，放射性废物的管理工作也将日益受到重视。通过科学的管理和有效的技术手段，核医学领域能够在提供诊疗价值的同时，最大限度地减少对环境和公众健康的潜在危害。

1.2.2 核医疗放射性废物分类

核医学在医疗诊断和治疗中应用了多种放射性物质，而这些放射性药物及其使用过程中产生的废物也需要经过严格的管理和处理。医疗放射性废物是指在医疗、诊断、治疗过程中产生的，具有一定放射性的废弃物。基于其潜在的辐射危害，合理分类和有效管理医疗放射性废物至关重要。为了确保这些废物对环境 and 公众的影响降到最低，核医疗放射性废物通常根据其物理形态和化学特性进行分类。以下是核医疗放射性废物的主要分类及其处理方法。

1. 固体废物

固体废物是核医学应用过程中最常见的一类废物，通常包括被污染的纸张、塑料手套、注射器、玻璃器皿、针头、药瓶、吸附材料等。这些废物因含有放射性物质，需要进行严格的处置。固体废物的处理方法依据其放射性强度、半衰期、化学成分等因素来选择，主要的处理方法有：①压缩处理，通过压缩将废物体积减小，便于储存和后续处理。这种方法通常适用于较轻、较小的固体废物，如注射器、手套等。②焚烧处理，对于部分可燃的固体废物，可以通过焚烧的方法减少其体积。焚烧过程中，放射性物质必须被有效隔离，以防泄漏。焚烧设备需要具备严格的过滤系统，确保废气中不含有放射性物质。③固化处理，对某些化学性质复杂的废物，可以采用固化处理，将废物混合在固化剂中形成稳定的固体块状物，便于储存和处置。这种处理方法适用于那些含有较高化学危险性的固体废物。

固体废物的处理，特别是放射性废物的处理，必须严格遵守一系列安全标准和操作规范，以确保在废物处理过程中不会对环境、公众健康或工作人员的安全构成潜在威胁。放射性废物，尤其是在核医学领域产生的废物，具有高度的放射性和特殊的物理化学性质，如果管理不当，可能给生态环境和人体健康带来严重的二次污染或长期危害。因此，废物的处理不仅需要符合技术要求，还需要完善的法律和安全监管措施。

放射性废物的处理需要遵循严格的安全标准，这些标准主要涵盖以下几个方面。

(1) 分级管理与分类储存：根据废物的放射性水平和衰减速率，放射性废物应进行分类管理。高放射性废物需要专门的储存设施，以确保其衰减过程中的放射性物质不会扩散到环境中；而低放射性废物则可以采取更为简便的管理方式，但仍需采取适当的防护措施。

(2) 放射性废物的安全衰减管理：放射性废物通常会有一个衰减期，衰减期取决于废物中所含放射性物质的半衰期。放射性废物的半衰期越短，其放射性衰减越迅速，处理起来相对简单；相反，半衰期较长的废物则需要在专门的容器中储存更长时间，以确保废物的放射性降到安全水平。

(3) 放射性废物的安全处置与最终无害化处理：对于经过一定时间衰减后仍需处理的废物，最终必须经过无害化处置。例如，经过适当衰减后的放射性废物，可以通过深埋或其他科学方法处理，确保其不对环境造成长期污染。

在核医学和放射性药物的广泛应用中，放射性废物的处理和管理始终是一个不容忽视的重要环节。为了确保放射性废物不对环境和公众健康造成危害，医疗机构必须采取

严格的管理措施和安全标准，实施全程监控和分类处置。通过高效的废物管理和先进的处理技术，可以大大减少核医疗放射性废物对环境的负面影响，为社会的可持续发展和健康安全提供有力保障。

2. 液体废物

液体废物主要包括在核医学诊疗全过程中产生的放射性药物稀释液、冲洗液、清洗用溶剂、废弃的药物溶液等。液体废物通常含有较高浓度的放射性物质，因此其处理需要特别谨慎。常见的处理方法包括：①蒸发处理，对于水溶性液体废物，可以通过蒸发的方法去除液体中的水分，从而减少废物的体积。蒸发过程中的废气需要经过有效的过滤和净化，避免放射性物质的挥发。②沉淀处理，某些液体废物中含有放射性金属离子，经过沉淀处理，可以将这些金属离子从液体中分离出来，形成固体废物，便于后续处理。③化学处理，通过添加化学试剂，将液体废物中的放射性物质转化为不易挥发、易于固化或安全处置的形式。这种方法通常用于处理一些化学成分复杂、含有多种污染物的液体废物。

液体废物的管理不仅对维护公共卫生至关重要，更是环境保护的关键环节。由于液体废物可能含有各种放射性物质，如果处理不当，其给水体、土壤和大气的污染可能带来长期且深远的影响。因此，液体废物的处理必须严格遵循一系列环境法规和技术标准，确保废物得到有效处置，并且其处理后的排放不会对环境构成任何危害。各国和地区通常会有专门针对放射性废物的处理标准和环境保护要求。例如，国际原子能机构（International Atomic Energy Agency, IAEA）制定了一系列放射性废物管理的国际指导原则，涵盖了废物的分类、处理、运输、储存和最终处置等各个环节。此外，很多国家和地区还根据自身的环境条件和放射性物质的特点，制定了更加严格的地方性法规和技术标准。在中国，环保部门对废物排放有严格的监管规定，特别是对于核医学等产生放射性废物的医疗领域。废物的处理单位必须经过许可，且所有处理过程必须符合国家环保标准。这些法规的实施确保了放射性废物处理的高效、安全，降低了可能带来的环境风险。

3. 气体废物

气体废物包括在核医学过程中产生的放射性气体，如 ^{133}Xe 、 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 、 ^{131}I 等。这些放射性气体在医疗应用中（尤其是在某些诊断性放射性药物使用过程中）有时会释放到空气中。气体废物的处理通常采用以下几种方法：①过滤法，通过高效的空气过滤系统（如HEPA过滤器^①）将空气中的放射性颗粒物或气体分子捕集，防止其直接释放到环境中。过滤材料通常需要定期更换和处理，以防积累过多的放射性物质。②吸附法，使用具有较强吸附能力的物质（如活性炭或特定的化学吸附剂）吸附废气中的放射性物质。吸附后的废气需要通过专业的废气处理装置进行清理，确保放射性物质不会泄漏。

气体废物的处理需要充分考虑其放射性特性和潜在的环境影响。特别是高挥发性放射性气体，必须在产生的源头进行有效控制和处理，以防其扩散到大气中，影响空气质量及周围环境。

① HEPA 过滤器：指高效空气过滤器，high efficiency particulate air filter。

4. 废旧放射源

废旧放射源指的是不再使用的放射源，这些放射源可能已经超出了使用期限或因为设备更新、技术更替而被淘汰。废旧放射源通常来源于核医学诊断和治疗设备，如用于影像检查的放射性同位素源、治疗用的放射源等。废旧放射源的管理必须按照国家和国际的相关规定进行，以确保其不对环境和人类健康构成威胁。主要的处置方法包括：①回收利用，一些废旧放射源仍具有一定的价值，可以通过特殊工艺进行回收和再利用。例如，部分放射源可以重新处理、修复后用于其他医疗领域。②安全处置，如果废旧放射源无法回收利用，必须将其安全处置。常见的处置方法是将其封装并储存于专门设计的安全设施中，直到其放射性衰减至安全水平后再进行处置。废旧放射源的储存通常需要符合国际安全标准，确保放射性物质不会泄漏。

废旧放射源的管理是核医学和其他涉及放射性物质领域中的一项关键任务。这些废旧放射源，包括过期或不再使用的放射性同位素和相关设备，若得不到妥善处理 and 处置，可能会对公众安全 and 环境造成严重的潜在威胁。因此，废旧放射源的管理必须严格遵守国家和国际的法律法规，并由专业机构负责回收与处置，以确保其处理过程的安全性和合规性。IAEA 是全球核能与放射性物质管理领域的权威机构，制定了一系列关于放射性废物管理和放射源处置的国际指导原则和标准。例如，IAEA 强调废旧放射源的回收和处置必须符合“源头安全”和“长期监控”的原则，且所有相关活动必须透明公开，确保社会公众的知情权和安全。在中国，废旧放射源的管理受到了严格的法律约束。根据《放射性废物安全管理条例》等相关法规，所有废旧放射源的收集、贮存、运输和处置必须经过国家核安全管理部门批准和监督。此外，相关法律明确要求：任何单位不得随意丢弃、遗弃放射性废物，必须交由符合资质的专业机构进行回收和处理。这些法规的目的是保障放射性废物的全生命周期管理，并最大限度地减少其对环境和社会的潜在危害。

1.2.3 核医疗放射性废物管理的现状与挑战

总的来说，核医疗放射性废物的管理是一项涉及技术、法规、伦理等多个方面的复杂任务，它直接关系到公众安全、环境保护以及医疗健康事业的可持续发展。核医学作为一种在疾病诊断和治疗中不可或缺的技术，随着应用的日益广泛，其产生的放射性废物种类和数量也在逐渐增加。这些废物不仅具有强烈的放射性危害，还可能伴随有化学毒性、环境污染等潜在风险，因此如何科学、有效地管理和处置这些废物，是摆在全球各国面前的一道严峻课题。在处理核医疗放射性废物时，首先需要进行严格的分类，这是因为不同种类的废物具有不同的处理要求。例如，固体废物、液体废物、气体废物以及废旧放射源，其处理方式和安全标准都大相径庭。对于固体废物，可以通过封存、固化、高温焚烧等方法进行处理，确保废物不会对环境产生二次污染。对于液体废物，则需要通过物理、化学或生物等手段去除其放射性成分，防止其渗透至水源或土壤中。对于气体废物，则通常需要采用高效的过滤系统进行处理，避免有害放射性气体的泄漏。

废旧放射源的处理更是复杂,需要依托精密的技术进行回收、再利用或销毁,确保废弃物不会对环境 and 人类健康造成长期威胁。

然而,单靠技术手段还远远不够,核医学废物的管理必须遵循严格的法规 and 标准,保障废物处置过程的安全性 with 规范性。各国 and 地区在这一领域已经制定了众多法律 and 国际协议,以确保废物的管理从源头到处置的每一个环节都能够得到有效监控。IAEA 等国际组织也在不断推动全球核废物管理的标准化 and 一致性,通过发布相关指导文件,帮助各国提升废物处理技术 and 管理水平,减少跨境核废物流动带来的环境风险。此外,许多国家还要求核医学设施必须按照规定进行废物的标识、分类、储存 and 运输,并且对废物的最终处置要经过严格的许可 and 审查程序。这些法规为核废物的安全管理提供了强有力的保障,确保了废物管理的规范性 and 可操作性。尽管当前核医学废物管理已经取得了显著的进展,但随着放射性物质种类的增加以及技术的不断发展,未来的废物管理工作仍然面临许多新的挑战。例如,随着更加先进的核医学技术的应用,放射性废物的种类 and 来源也将变得更加多样化,如何适应新的废物类型,制定更为精准的处理方案,将是未来核废物管理需要解决的重要问题。与此同时,公众对于核安全的关注度不断提升,核废物管理的社会透明度和公众参与度也逐渐成为一个不可忽视的因素。核医学废物的管理不仅仅是专业人员的责任,更需要全社会的共同努力,通过加强公众的核安全教育和知识普及,营造全社会参与 and 支持核废物管理的良好氛围。此外,科技的进步也为废物管理提供了新的机遇。近年来,随着纳米技术、微生物技术等领域的突破性进展,新的废物处理技术不断涌现。例如,纳米材料吸附能力和微生物降解技术的应用可能给废物的处理带来更加高效、环保的方法。这些技术不仅能够大幅度提高废物处理的效率,还能降低处理成本,并减少对环境的负面影响。未来,这些先进的技术将可能成为核医学废物管理中的重要组成部分,为废物的安全处置提供更加创新的解决方案。

与此同时,在全球化背景下,核废物管理的国际合作变得愈加重要。放射性废物的跨境运输 and 处置问题,尤其是在一些缺乏相关技术 and 设施的发展中国家,仍然存在很大的挑战。因此,国际加强信息共享、技术援助 and 政策协调,是推动全球核医学废物管理水平提升的关键。各国可以通过合作 with 交流,分享最佳实践 and 先进经验,共同应对核废物管理中的难题。尤其是在放射性废物的最终处置领域,亟须全球范围内共享 with 普及一些高安全性的处置技术 and 经验。

参 考 文 献

国家核安全局, 2023. 医疗、工业、农业、研究和教学中产生的放射性废物管理. 核安全导则 HAD 401/16—2023.

国家核安全局, 2020. 核设施放射性废物处置前管理. HAD 401/12—2020.

汪静, 李思进, 石洪成, 2024. 2024 年全国核医学现状普查结果简报. 中华核医学与分子影像杂志, 44 (10): 617-618.

王绪, 潘社奇, 赵庆凯, 等, 2022. ITER 放射性废物管理现状 and 对 CFETR 放射性废物管理的启示. 核技术, 45 (9): 85-93.

赵微鑫, 王强, 杨陆婷, 等, 2020. 全国核医学现状 with 发展趋势研究分析. 国际放射医学核医学杂志, 44 (2): 92-98.

张锦明, 杜进, 2019. 中国放射性药物制备的现状 with 展望. 同位素, 32 (3): 178-185.

中国核技术网, 2020. 新的纳米粒子有望提高放射性药物的效率. <https://www.centa.cn/show-117-3651-1.html>.

Jha A K, Singh A M, Shetye B, et al., 2014. Radiation safety audit of a high volume Nuclear Medicine Department. Indian Journal of Nuclear Medicine, 29 (4): 227-234.