

放射性核素衰变机制及辐射防护优化技术探索

李福华

大亚湾核电运营管理有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21082

[摘要] 放射性核素的衰变是辐射产生的根本,不同类型的衰变及能量、半衰期对危害程度与方式具有直接的影响。本文系统总结了放射性核素衰变机理与辐射防护技术的关系并分析了现阶段在理论研究和实际应用方面的主要问题。结果表明加深多尺度衰变机制的研究、智能防护设备的研发以及与其他学科相结合的方式,有助于更加精准地做好防护措施、提高安全性和效率等,并且能够很好地为核电运行维护、辐射污染防治与相关工作人员提供理论指导和依据。

[关键词] 放射性核素; 衰变; 辐射防护

中图分类号: O434.11 **文献标识码:** A

Exploration of Radioactive Isotope Decay Mechanisms and Optimization Techniques for Radiation Protection

Fuhua Li

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., Ltd.

[Abstract] The decay of radioactive nuclides is the fundamental mechanism behind radiation generation, with different types of decay, along with their energy levels and half-lives, directly influencing the severity and modes of harm. This paper systematically examines the relationship between the decay mechanisms of radioactive nuclides and radiation protection technologies, while analyzing major challenges in both theoretical research and practical applications. The findings indicate that advancing research on multi-scale decay mechanisms, developing intelligent protection systems, and integrating these insights with other disciplines will enable more precise protective measures, enhance safety and efficiency, and provide robust theoretical guidance for nuclear power plant operation and maintenance, radiation pollution prevention, and related personnel work.

[Key words] radioactive nuclide; decay; radiation protection

引言

随着我国核工业体系逐步完善,核电发电、核医学检查、工业探伤和放射性废料处理等涉核技术应用不断扩展,放射性核素应用频率、使用规模呈明显增长趋势。放射性核素衰变产生电离辐射对人身安全及生态环境具有潜在伤害、不可逆危害。人体接触电离辐射后会造骨骨髓造血系统损伤、免疫系统下降;周边环境受到电离辐射后将会带来长期影响,辐射安全防护已成为保障涉核技术产业化发展的关键前提。辐射防护技术的开发与更新一直以核素衰变机制为理论基础,不同核素衰变模式不同,释放粒子类型不同,射程衰减规律差异显著,直接影响着屏蔽措施的选择方案。当前复杂极限核场景频繁增多,传统手段已无法满足精细化需求、智能化要求、全天候目标,而受制于研究衰变机制有限,导致目前辐射技术发展缓慢,基于此,本文阐述了衰变与辐射的相关关系,分析现有行业问题,探究针对性方法,为提升防护技术、提高核安全能力提供理论基础与实践支撑^[1]。

1 放射性核素衰变机制与辐射防护技术的核心关联

自从十九世纪末期发现天然放射性元素以后,在大量人为核转变的实验基础上,科学家们发现原子核也是可分的,从而诞生了专门研究原子核的结构、特性和相互转变等新学科——原子核物理学(Nuclear physics)。原子核物理学的研究成果获得了广泛的应用,例如,原子核技术与医学相结合,就产生了一门新兴学科——核医学(Nuclear medicine)。在原子核物理学中,通常把组分不同的原子核算作不同的核素,如氢的三种同位素就是三种不同的核素。

不稳定原子核自发地放射出高能粒子或射线而变成另一种稳定原子核的过程,统称放射性衰变。主要有 α 、 β 、 γ 及中子等几种衰变方式,不同类型的衰变,其辐射特性也不一样。构成辐射防护技术的基本理论内容。 α 衰变主要是发射氦原子核,在所有辐射中,它具有最大的电离作用和最小的穿透能力,因而只能造成人体体表的伤害,其防护方法比较简单,如用一张纸就

可挡住,戴手套穿工作服等一般性防护措施即可达到要求。 β 衰变主要是发出电子,它比 α 粒子有更强的穿透力。它能穿透皮肤并使皮下组织受到伤害。其一般防护可用塑料或玻璃等物质作为阻挡层来实现。由 γ 衰变发出的电磁波能量大、穿透力强、电离能力强,是主要的危险类型之一,在核领域最严重的是 γ 射线的辐射影响。因此在防护上采用铅板、混凝土墙或其他高密度材料做屏蔽层来阻挡它,防止对人体的损害。

半衰期、衰变常数、辐射能量衰减对辐射防护的策略制定、材料选择和运维方式产生直接的影响。由于半衰期长、短分别意味着辐射污染存在长期、短期的问题,前者需要采取长期防护措施,后者可通过隔离一定时间进行控制。衰变过程中能量衰减规律决定了辐射剂量的分布和累积特征,这是精确设定防护区以及人员活动时间的关键依据。同样地,随着辐射防护技术的发展反过来也深化了人们对衰变机制的研究,复杂的实际防护问题又促使学者深入研究多核素综合衰变及衰变产物的再次辐射等问题。二者密切关联,高度相关,准确把握衰变本质是优化和精准实施放射性防护的关键所在。

2 放射性核素衰变机制研究及辐射防护技术应用现存问题

2.1 衰变机制认知不足,制约防护策略精准制定

目前,国内学者对放射性核素衰变的研究主要停留在单个核素基础性研究上,而对复杂情况下多种核素的耦合衰变以及链式衰变的机理缺乏认识。而在实际工程问题中,往往存在多个放射性核素共存的现象,且它们相互之间发射出的射线彼此叠加、相互影响产生协同效应,并且初衰产物继续衰变形成一系列链式反应等复杂现象。而当下研究多数忽略了这些因素的影响并沿用单一核素衰变模型计算其剂量值,使结果与现实情况大相径庭。同时在极限温度及压力条件下,核素的衰变系数以及辐射衰减规律会有细微变化,然而针对这一领域的机制分析较为稀少,从而很难在极端环境下得到准确防护,并造成一定程度上出现冗余防护或者防护不足的问题^[2]。

2.2 防护技术更新滞后,难以适应复杂辐射场景需求

当前我国辐射防护技术与设备相对落后,传统的辐射防护手段难以适应多样化和复杂的核应用环境,在辐射防护材料方面,传统铅基的屏蔽材料质量大、柔软性差、抗老化性能弱,仅适用于固定式的屏蔽场合,难以满足移动式作业、高空作业以及精准治疗等场景的防护需求,且存在重金属污染问题,环保性差。在防护设备方面,现有防护装备多为通用化的产品,智能化程度偏低,无法实时监测辐射环境剂量,并进行及时预警辐射危险,难以实现个性化和精确化辐射防护。在辐射防护工程领域,传统的屏蔽工程设计采用固定式结构,针对临时性的核应用、应急事故处理等场合具有架设耗时长,机动性较差、适应能力低等缺点,缺乏应急保护能力,应对不了突如其来的辐射危机事件。

2.3 跨学科融合不够,理论与技术衔接存在脱节

放射性衰变机理的研究是核物理学范畴,而辐射防护技术研究则是工程学和材料学科的工程应用领域。并且该研究又

涉及诸多其他相关学科如智能传感器技术、自动化技术、电子工程技术和环境工程技术等多个领域的融合协同与集成,对各相关领域的创新协同高度依赖。但当前由于行业内存在严重的学科隔离现象,从事原子物理学的学者侧重从理论上深入研究衰变机制及原理,主要精力集中于理论计算模型的建立和基础性数据参数的测算,较少关注衰变原理的实际应用,偏重于基础理论研究;而从事材料学及工程技术人员更侧重在如何将防护措施具体地运用于实际防护中,缺乏对深入认识衰变原理及其中间衰变机理以及各种衰变之间的关系等基本概念的深刻理解与掌握,因此很难将理论研究成果转化应用于具体防护设计实践之中,研发活动缺少理论上的创新支持。另外,从事基础理论研究机构或大学科研院所很少同企业的实际生产需要结合在一起,在从事衰变规律和衰变机理的基础理论与开发之间没有很好结合起来,众多优秀的有关衰变机制的成果不能得到实用化、产业化和商品化。有关防护手段的技术革新和进步缓慢发展。

3 放射性核素衰变机制及辐射防护优化技术的应用策略

3.1 深化衰变理论探究,构建多尺度衰变模型

衰变机制研究不够深入,全方位加强核素衰变基础理论研究。摆脱单独的核素衰变研究,构建多维和多种尺度的衰变理论体系。一是混合核素衰变的耦合关系。核电站运行、核废料储存以及核电事故后等情况下往往会有多个核素同时发生衰变反应,对此种耦合衰变机制开展研究,并研究分析不同的核素衰变射线累加作用、链式衰变核素的辐射特性,对复杂条件下核素辐射的剂量进行分析。二是极值工况下对核素衰变的影响,对极端高温高压强腐蚀条件影响下的衰变情况有针对性地研究,完善各种极端衰变数据储备。三是利用大数据和数值模拟技术建立包含微观核素衰变、中观核素衰变过程中辐射传播和宏观环境核素分布的多尺度衰变模型,对各个场景中的辐射情况进行精准计算,实现个性化、精确防护,完全解决防护精准性不高的问题。

在此基础上,还应加强理论研究与实验论证相结合,建立相应的实验体系和模拟系统,结合实际测试结果对理论体系进行修正和补充。并做好不同学科之间的相互协同攻关,实现相关领域的交叉运用如核物理、材料学以及环境工程等方面,并将这些领域有效地联系在一起。并且还要创建相应研究和数据信息共享机制等,综合分析国内外的研究成果,持续更新衰变参数数据资料以及模型算法内容等。通过完善的相关理论知识体系和技术手段不仅能够有效支持核电站运行及核废料处理等相关应用的基础上,同时还能后续开展的核辐射监测及应急等工作提供必要的理论基础支撑,有效提高了我国相关领域的基本研究水平及安全保障的整体能力。

3.2 聚焦场景需求,研发智能化、模块化防护装备

针对不同核应用场景的差异化防护需求,实现辐射防护装置及技术智能化、模块化、轻量化发展。在防护材料方面,利用

新型复合材料制备工艺, 研制石墨烯、钨系高分子等轻型高效环保复合屏蔽材料, 以取代传统铅基防护材料, 具有良好的屏蔽性能与柔韧性、绿色环保优势, 适用于移动作业场合以及精准治疗。智能防护方面, 综合运用物联网技术和传感技术、人工智能等手段, 开发集剂量检测、报警、数据传输、控制等功能一体化的智能型防护装备, 能够用于从业人员个人防护和区域内的辐射监测的智能化管理。在工程防护方面, 提出可组合式的模块化拆装移防护屏障, 可根据作业现场需要, 根据辐射强度的不同, 进行组合, 非常适用于应急防护、临时作业需要, 对复杂、动态场景具有较强的适用性。

上述技术设备体系能够全面满足核工业运维、医疗放射诊疗以及核应急等多元化应用场合下的防护需求。之后还将不断改进材料配比与成型工艺, 进一步增强复合屏蔽材料的耐久性和适应性, 扩展其在狭窄作业空间和频繁移动情况下的应用范围。同时进一步改进智能系统的算法, 提升对辐射数据的实时分析、预警能力, 并且进行全过程动态监控防护状态。完善对模块化防护屏障的拼接结构以及快速拆装设计以提高适用场地效率及坚固性。整体方案综合考虑安全效果以及使用方便性和环保要求等条件, 在各个应用领域建立起一个分层式、灵活型、智能化的现代辐射防护体系^[3]。

3.3 加强核科学、材料学与工程技术协同创新

破除学科藩篱及产学研壁垒, 构建多学科融合和产学研一体化创新机制。一方面促进核物理、材料学、机械、AI、环境等相关学科深度融合, 在衰变原理基础理论研究的基础上, 以具体场景需求为引导, 发挥各个学科领域技术优势, 对防护材料、智能装备、辐射环境等关键问题进行协同研究攻关, 实现理论—材料—技术—工程的全链条协同创新。另一方面建设高校院所和核工业企业的产学研一体化合作平台, 形成理论—技术—试点—转化的研究闭环, 并加速将衰变原理最新研究成果转化为相

关防护技术与装备发展, 同时结合实际工程应用反馈进一步完善衰变理论模型, 做到理论与技术发展的相互支撑。此外强化行业的人才交叉培养工作, 培育既懂核物理基本理论又具备材料研制能力和工程应用经验的技术复合型人才, 不断为辐射防护技术创新优化提供智力支撑。

4 结论

放射性核素衰变理论是发展和完善辐射防护技术的基本依据, 它们的有效结合对保障核工业的健康快速发展至关重要。目前我国衰变和防护的理论研究、实践应用尚存在基础薄弱、深度不足等问题, 并在复杂工程条件下难以发挥其应有的功能与效率, 这已成为制约我国核能利用水平提升的重大瓶颈之一。基于上述分析, 从衰变和防护二者之间的基本联系入手, 探讨了当前我国在此方面存在的不足, 并进一步指出了深化多尺度衰变、研发智能模块化装备、实现多学科融合创新的优化措施。通过加强和改善这两方面的理论创新与技术研发, 从而有效提高了放射源的精确保护、高效利用与功能拓展等目标, 并解决了传统辐射防护中存在的弊端问题。今后应更加重视基础理论的研究及不同学科间的交叉合作与技术创新, 使得相关技术朝着更加智能、准确以及环保等方面进步, 为促进我国核工业水平和保障其安全运行提供坚实的基础。

[参考文献]

- [1] 韦丽雅, 许婧菲, 于江, 等. 放射性金属核素螯合剂标记化学的研究应用进展[J]. 核技术, 2025, 48(6): 49-64.
- [2] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [3] 曹奇锋, 张震宇, 陈珍平, 等. 基于非支配排序遗传算法的辐射屏蔽多目标优化[J]. 核动力工程, 2020, 41(1): 167-171.

作者简介:

李福华(1980--), 男, 汉族, 山东省济宁市人, 工程师, 本科, 研究方向: 安全文化与人因绩效提升。