科学通报 2020 年 第 65 卷 第 10 期：875 ~ 881
观 点
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

关于建立我国空间核动力源应用安全机制的建议

刘继忠[1], 唐玉华[1*], 龙杰[2], 吴伟仁[1], 于国斌[1], 张哲[1]

1. 探月与航天工程中心, 北京 100190;
2. 深圳大学空间政策与法律研究所, 深圳 518061
* 联系人, E-mail: tangyuhua2010@126.com

由于探测目标与太阳的关系问题, 月球与深空探测面临受天体遮挡长期无太阳光照或远距离弱太阳光照, 无法满足探测器能源需求的严重问题. 空间核动力源(同位素热/电源、反应堆电源/推进系统)由于其自主能源供给, 被认为是解决这一问题的最佳途径.

与地球表面应用相比, 空间核动力源的应用有着特殊的安全要求. 与地面核能应用不同的是, 空间核能源的使用频次低, 而且会因为飞行项目的不同而有所区别, 其体积和质量等因素的约束更强. 在地面运行的核能装置往往能安排在一个相对稳定的环境中运行, 但是空间核动力源面临的环境却是恶劣多变的. 因发射失败和意外重返大气层导致的潜在事故, 可能使核动力源暴露在极端的物理条件下, 这使得空间核动力源很可能发生泄漏, 威胁到人类和环境安全. 基于以上原因, 空间核动力源的应用需考虑更多的安全要素.

联合国外层空间委员会(简称外空委)2009 年第 46 届会议通过了《外层空间核动力源应用安全框架》(简称《安全框架》), 为各会员国或国际组织安全使用空间核动力源提供了参考和指导. 与美国和俄罗斯相比, 中国处于空间核动力源应用的起步阶段. 在中国积极发展深空探测的背景下, 空间核动力源的应用成为趋势, 有必要对《安全框架》、各国经验及其对中国的适用性进行相关研究, 为中国建立国内的相关机制提供参考和借鉴[1].

1 《安全框架》内容解读

2007 年, 在认识到 1992 年联合国大会通过的《关于在外层空间使用核动力源的原则》(简称《原则》)在相关技术规定方面存在的不足后, 为全面解决空间核动力源应用的安全问题, 联合国和平利用外层空间委员会科技小组委员会(简称科技小组委员会)与国际原子能机构成立了联合专家组, 起草了《安全框架》[1], 并在 2009 年 2 月第 46 届会议上予以通过. 2009 年 4 月, 原子能机构安全标准问题委员会第 25 次会议审议并通过了该《安全框架》[2].

《安全框架》包括空间核动力源应用方面目前最专业和全面的安全管理和技术标准. 其中, 政府指南、管理指南、技术指南对空间核动力源应用实践具有指导意义.



唐玉华 探月与航天工程中心研究员. 主要从事探月工程论证, 开展任务总体设计、组织实施及总体技术管理与协调等工作.

1.1 《安全框架》属性和目标

《安全框架》充分考虑了《关于各国探索和利用包括月球和其他天体在内外层空间活动的原则条约》(简称《外空条约》)和《原则》等相关的国际条约, 其全面的指导内容适用于所有空间核动力源应用. 《安全框架》是一套自愿遵守的指导规则和标准, 不具有国际法的法律约束力[3]. 在应用时,《安全框架》只作为指南使用, 各国可以根据自己的实际情况进行灵活调整, 以适应本国空间核动力源应用的实践.

《安全框架》的根本目标是保护地球生物圈中的人与环境, 使其免受在应用过程中空间核动力源的放射性带来的危害, 并倡导任何国家、组织、非政府实体在使用空间核动力源时, 应当采取相应措施, 确保人类和地球环境不会受到空间飞行任务中使用放射性物质的不利影响.

1.2 适用范围

《安全框架》为空间核动力源在发射、运行和寿终阶段的安全问题提供指导.

《安全框架》的保护对象是处于地球上的人类和环境, 执行飞行任务的宇航员的安全保护和外层空间的环境保护并不在《安全框架》的适用范围之内.

1.3 政府指南概要

《安全框架》的“政府指南”为负责授权、批准或执行空间核动力源飞行任务的国家政府和有关国际政府间组织提供指导. 政府职责包括: 制定安全政策、要求和程序;

© 2020《中国科学》杂志社

监督实施, 确保安全政策、要求和程序得到遵守; 权衡使用空间核动力源的必要性; 制定正式的飞行发射授权程序; 防备和应对紧急情况[4].

首先, 该指南表明, 任何空间核动力源应用活动应当得到相应国家或政府间组织的授权和批准. 而且, 负责授权或批准空间核动力源飞行任务的国家政府应当制定其各自的安全政策、要求和程序, 并确保其得到遵守, 以达到空间核动力源应用的各项安全要求, 实现根本安全目标.

其次, 政府应当核实使用空间核动力源应用的正当理由. 负责授权、批准或执行空间核动力源飞行任务的国家政府和有关国际政府间组织, 在决定使用核动力源时, 应对各种可能的备选方案进行充分地对比和调研, 以确认空间核动力源的应用需求, 避免盲目使用核动力源而增加人类和环境受到威胁的风险.

再次, 监督和授权空间核动力源飞行发射活动的国家政府, 应当制定全面而严格的空间核动力源飞行发射授权程序. 独立的安全评估(即非执行飞行任务单位的管理组织进行的, 对核动力源安全情况的充分性和有效性的审查)是必要的, 要在核动力源进入外空之前就对其本身及其相关的设施(如航天器、发射系统)、设计(如飞行任务设计)以及规则(如飞行规则)进行独立评估, 在可控的发射前阶段, 最大限度地降低潜在的安全隐患.

最后, 负责授权、批准或实施空间核动力源飞行任务的国家政府和有关国际政府间组织, 应提前做好周全的应急准备. 虽然对核动力源应用进行了前期的论证和授权, 后期各种难以控制的意外情况也应当纳入政府和有关国际政府间组织的规范管理体系, 以便随时准备对可能导致人员受到辐照, 以及地球环境受到放射性污染的发射和飞行紧急情况做出迅速反应. 应急准备活动包括: 制定应急计划、进行培训和演习、制定程序和通知规程、起草潜在事故通知, 以便最大限度地降低放射性核事故对人和环境带来的损害. 必要的应急预案是安全保障必不可少的重要环节, 在国家政府层面应受到最大程度的重视[5].

1.4 管理指南概要

《安全框架》的“管理指南”为涉及空间核动力源应用的组织提供管理方面的指导. 这里的组织主要是指各国直接负责参与发射任务的相关政府部门或机构, 例如国家航空航天局等. 组织的管理职责应当包括承担主要的安全责任、确保为了实现核动力源应用安全提供充足的资源, 以及在组织内部从上到下始终促进和维持一种深入人心的“安全文化”.

第一, 执行空间核动力源飞行任务的组织应当承担主要的安全责任. 这里的组织除了直接执行空间核动力源飞行任务的机构之外, 还应当包括飞行任务的所有参与方, 如航天器提供方、运载火箭提供方、核动力源提供方、发射场地提供方等. 这些组织在管理上的具体安全责任应当包括: (a) 建立和维持必要的安全技术能力; (b) 对所有参与方提供适当的培训; (c) 制定程序, 以加强安全管理; (d) 制定关于使用空间核动力源飞行任务的具体安全要求; (e) 进行安全测试和分析, 并做详细记录, 为飞行发射政府授权程序提供参考依据; (f) 协调处理针对安全问题提出的反对意见; (g) 向公众准确、及时地提供相关信息.

第二, 执行空间核动力源飞行任务组织的最高级别领导层应当严抓安全问题. 安全管理应当纳入飞行任务的总体管理, 通过高级别领导层的重视, 采取必要的措施, 努力在组织内形成一种“安全至上”的理念和氛围[6]. 这种贯穿组织的安全文化应当包括: (a) 实行责任制, 明确安全职责; (b) 积极调整和不断改进安全策略; (c) 组织内从上到下都要做出安全承诺; (d) 保持良好的学习态度, 始终保持安全方面的警惕.

1.5 技术指南概要

《安全框架》的“技术指南”旨在为空间核动力源应用的组织提供技术指导. 这一指导涉及空间核动力源应用的设计、开发和飞行任务各阶段, 有助于为授权和批准程序及应急准备和反应制定提供技术基础, 包括以下 4 个方面.

第一, 核安全技术能力. 空间核动力源应用组织应建立和保持核安全设计、测试和分析能力, 并配备合格的人员和设施. 核安全技术能力应当包括: (a) 严格界定空间核动力源应用的事故情形及其预期发生概率; (b) 说明空间核动力源及其组成部分在正常运行中, 可能经历的物理条件以及潜在事故的特点; (c) 评估可能发生的事故对人与环境造成的可能后果; (d) 确定并评估可以减少对人和环境有影响事故发生的常规和工程设计的安全设置.

第二, 确保安全的设计和开发能力. 设计和开发过程应: (a) 辨识、评价和落实安全设计、控制和防备措施, 以便降低可能释放放射性材料的潜在事故的概率或减轻可能释放的强度及其潜在后果; (b) 吸取以往的经验教训; (c) 通过适当的测试和分析, 验证和鉴定安全设计和控制结果; (d) 采用风险分析方法, 评估安全设计和控制效能, 并为设计过程提供参考; (e) 采用设计复查, 确保安全设计的可靠性.

第三, 风险评估能力. 风险评估关系到整个核动力源飞行项目的安全性, 各相关组织应当进行必要的风险评估, 以评价空间核动力源在发射、运行和寿终阶段可能发生的事故, 以及对人与环境造成的辐射风险, 并尽可能量化不确定因素, 做出详细的评估报告.

第四, 减轻事故后果能力. 作为空间核动力源应用安全程序的一部分, 相关机构应当对各项安全措施进行评价, 以减轻有可能向地球环境释放放射性材料的事故后果. 相关组织应建立能为减轻事故后果的活动提供支持的能力, 其中包括: (a) 制定和实施应急计划, 以中断可能导致辐射危害的事故连锁进程; (b) 确定是否已发生放射性材料的

释放; (c) 说明放射性材料释放的位置和性质; (d) 指明放射性材料污染区; (e) 建议采取保护措施, 限制受灾地区人群的受照量; (f) 准备关于事故的相关信息, 以便向有关政府、国际组织和非政府实体以及广大公众通报.

2 《安全框架》在美国的执行情况

美国在外层空间安全使用核动力源的历史很长. 自1961 年首次使用空间核动力源起, 美国进行了 30 多次涉及空间放射性同位素源应用的发射. 最初的放射性同位素源应用涉及通信、气象和导航应用, 之后大多数用于月球与深空探测任务, 如月球的"阿波罗"系列飞行任务、木星的"先驱 10 号"飞行任务、土星及更远星球的"先驱 11 号"飞行任务、火星表面的"海盗号"和"探路者号"飞行任务、飞往冥王星的"新地平线号"飞行任务等. 美国还曾发射了一个空间反应堆应用任务.

2.1 美国外空核动力源应用综合安全机制

《安全框架》发布的近 10 年来, 美国贯彻执行了相关要求. 在遵从《安全框架》要求的基础上, 美国根据本国核动力源的实际应用需要, 制定并实施了自己的国内相关安全机制.

美国相关法律与《安全框架》所载 3 大类指南保持一致, 甚至采用了更为严格的核动力源安全使用标准和评估程序. 美国的核动力源应用程序要求有具体法定行动措施和必要的程序, 如果违反措施和程序要求, 外空核动力源应用则不能得到政府部门的批准和启动.

2.1.1 政府指南在美国的应用

政府指南已纳入美国的安全机制中, 包括美国联邦法律、总统指令、各机构要求和多机构计划. 《国家环境政策法案》(the National Environmental Policy Act (NEPA))和《总统发射核安全批准程序》(Presidential Directive/National Security Council-25 (PD/NSC-25))分别是认可和授权美国核动力源应用的既定程序. 《国家环境政策法案》要求美国航天局在一个飞行任务的设计和开发阶段早期即编写一份环境影响报告(https://ceq.doe.gov/laws-regulations/laws.html). 该环境影响报告必须评估飞行任务基线设计的潜在环境影响, 并评估实现飞行任务目标的合理设计选择. 《总统发射核安全批准程序》要求对实际发射系统进行一次详细的安全分析(https://fas.org/irp/offdocs/pd/pd25.pdf).

美国将更多的安全政策和要求正式编入《美国联邦规则法典》和《美国航天局程序性要求》, 以进一步界定在启动、开展和参与核动力源系统及核动力源系统应用开发工作时, 对政府官员、方案和项目的要求和相关程序.

美国还制定了《国家反应框架》(the United States National Response Framework (NRF)), 以防备和应对灾害和紧急情况, 特别包括涉及空间核动力源应用的事故(https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/117791).

2.1.2 管理指南在美国的应用

管理指南已被正式编入美国机构要求和核动力源系统开发计划. 核安全管理责任被纳入飞行任务整体管理结构之中, 由美国航天局总部认定核安全责任人, 并开展涉及所有相关参与方定期提交报告的审查工作. 这些参与方包括美国航天局总部、能源部、美国航天局相关中心及其各自的合同商. 美国航天局总部负责飞行任务的负责人, 为每项飞行任务指定一名核动力源系统飞行任务应用方案主任, 负责与开发和实施该项核动力源系统应用的各个组织保持直接联系, 贯彻落实《国家环境政策法案》、《总统发射核安全批准程序》和《国家反应框架》的要求.

美国航天局与相关部门协力工作, 为设计和开发核动力源及其空间应用构建了一个综合安全机制. 该机制将各种安全因素并入核动力源系统设计和开发过程的各个方面与各个阶段. 美国航天局负责航天器的设计和建造, 确保航天器飞行的安全; 能源部负责政府使用核能技术的开发和生产, 提供电源和核安全分析报告, 确保核动力源系统的安全; 国防部和美国航天局提供发射设施, 保障发射场和射程安全; 环境保护局负责清除发射事故对环境造成的污染. 以上几个部门协同工作, 使在应用开发阶段发现的核安全问题得以妥善解决.

2.1.3 技术指南在美国的应用

美国技术指南与管理指南类似, 也被正式载入机构要求和核动力源系统开发计划. 在界定、测试和分析涉及核动力源系统的发射和飞行任务事故/异常现象的过程中, 相关部门进行技术的开发和维护, 经过多部门专业知识的融合来满足该技术指南规定的要求. 美国航天局和能源部核动力源系统应用安全要求涵盖一项飞行任务的所有阶段, 两个部门根据机构间正式协议进行合作, 开展综合风险评估工作, 以支持设计和开发程序以及发射授权程序, 同时有助于详细的多机构辐射应急计划编制.

2.2 美国外空核动力源应用安全审查程序

美国进行的空间核安全审查包括两个单独的程序: 《国家环境政策法案》和《总统发射核安全批准程序》.

《国家环境政策法案》为相关方(包括公众和政府或非政府机构)在飞行任务发展阶段的早期, 对发射任务的潜在环境影响进行审议提供机会, 确保对飞行任务发射事故的潜在环境影响采取的措施得到有效保障. 需由提出这项飞行任务的机构做出环境影响评价, 编制环境影响报告. 该报告需阐述飞行任务的目的和需求, 并对实现飞行任务目标的各种合理选择和潜在环境影响进行比较评价. 潜在影响包括在假定发生核动力系统发射事故时, 可能产生的健康影响和土地污染的估计. 该报告在核安全试验和多数据分析基础上形成, 并需把对公众审查意见所做的答复纳

入其中. 《国家环境政策法案》程序履行通常需要两年以上时间才能完成.

《总统发射核安全批准程序》确保在决定是否批准核安全发射前, 各相关机构对飞行任务的核动力源应用安全已达到一致认识. 该程序要求各机构间相互协调, 编制一份核安全分析报告和一份安全评价报告, 并在发射前得到总统批准. 美国国家航空与航天局、能源部、环境保护署和国防部联合成立一个特设机构——核安全审查小组, 对安全分析报告进行详细审查, 并编写一份安全评价报告. 依据该安全分析报告、安全评价报告以及其他有关资料所提供的数据, 飞行任务机构经与跨部门核安全审查小组成员机构协商, 决定是否进行该项飞行任务, 并请求总统批准该发射. 若非重大至必须提交总统决定, 科学和技术政策办公室负责人被授权批准这种发射. 核安全发射审批程序总共需要大约 5 年才能完成. 图 1 所示为美国核动力源安全审批流程.

安全分析报告包括对事故进行预估后做出的概率风险评价结果、事故的发生情况、发生概率以及发生事故时的物理环境, 还有在特定的事故情况下可能发生的燃料外泄的概率和特点. 对假定的燃料外泄的特点描述包括数量、定位、粒度分布、材料散布、最后定位以及被外泄的材料形态. 事故的环境特点以及核动力系统反应的估计需根据模拟实际发生的事故情况的测试和分析方案推导而来.

除了上述《国家环境政策法案》文件、安全分析报告和安全评价报告外, 相关责任机构或任务机构还和各州、地方和联邦政府官员协调制定辐射应急计划, 针对放射性材料外泄的潜在可能, 制定有关建议和保护行动指南, 以便在出现发射事故时执行[6].

在安全审批过程中, 履行完《国家环境政策法案》程序和《总统发射核安全批准程序》共需要 5~7 年时间.

2.3 美国外空核动力源应用的核安全设计和开发要求

《美国航天局的程序性要求》(NASA Procedural Requirement (NPR) 8715.3 “General Safety Program Requirements”, Chapter 6 “Nuclear Safety for Launching Radioactive Materials”) 规定了影响核动力源系统应用的界定、设计、开发和实施的 5 个指导性要求: (a) 使用放射性材料的项目, 应向公众、环境和使用者提供保护, 以便将接触辐射源所致辐射风险降至最低; (b) 核安全因素在最初的设计阶段即应考虑, 并贯穿项目所有阶段, 以确保整个飞行任务的辐射风险可以接受; (c) 确认并分析所有包含或使用放射性材料的空间飞行设备的辐射风险; (d) 制定与预计核动力源发射风险相应的地面运作和辐射应急计划; (e) 辐射应急计划包括有关应急反应和指导放射源寻获活动的相关规定[7].

这些要求与美国《国家环境政策法案》和《总统发射核安全批准程序》的规定相辅相成, 在整个设计/开发过程中对一项飞行任务的核安全能够产生决定性的影响.

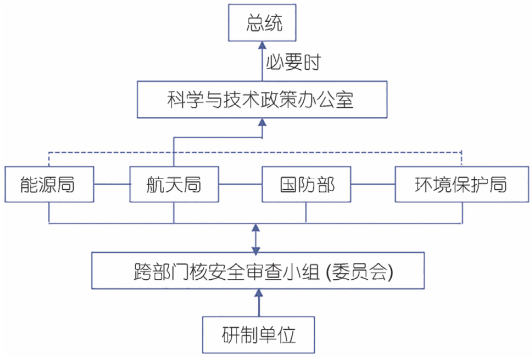


图 1 美国核动力源安全审批流程

Figure 1 Safety approval flow of nuclear power source in USA

2.4 美国对公众的事故信息传播

美国航天局、媒体和公众之间及时、有效和高效的信息流动, 对成功应对潜在的发射事故发挥了重要作用.

根据《安全框架》“技术指南”相关要求, 美国建立了一个由联邦、州和地方政府的工程师和公共事务专家组成的联合信息中心. 它的主要职责是重点关注公众健康和安全及环境保护, 确认和核准辐射信息, 并及时发布. 该中心负责就飞行任务搭载放射性材料的任何问题, 开展管理机构和辐射控制中心与新闻媒体和广大公众之间的信息交流和沟通协调.

核动力源发射前, 联合信息中心人员制订发射事故情况下的新闻稿、计划和策略, 以便向媒体、决策者和相关公共组织介绍情况, 协助告知公众飞行任务的风险. 联合信息中心会创建针对具体事故的预制公告, 以便在发生发射事故时, 及时、准确、一致地发布新闻. 预制公告是针对发射的所有可能的结果而起草的, 包括发射前、升空初期以及发射的亚轨道和轨道阶段发生的事故, 以及建议公众采取的保护行动. 一旦发生事故, 联合信息中心将从辐射控制中心获得信息, 生成有关发射事故的及时信息, 散发给媒体和其他群体. 联合信息中心也负责审查伙伴机构针对事故编写的任何新闻, 监测消息发布、媒体内容和公众对发射事故的认知, 以确保公众得到正确、适当的保护行动方面的信息. 联合信息中心生成的所有信息在公开发布之前须经协调机构代表核准.

联合信息中心还负责起草发给有关政府和国际组织的外交电报. 发射前, 联合信息中心起草外交电报, 介绍飞行任务、核动力源和发射风险. 美国国务院会将电报发给世界各地的使馆和使团. 联合信息中心还负责编写发射事故的预制消息外交电报, 以便在需要时能够尽快地将准确信息及时发布给有关政府. 所有这些国际消息在发布前须经协调机构代表核准[8].

3 中国空间核动力源应用实践

我国由于航天发展和深空探测活动起步晚, 涉及空间

核动力应用的任务较少. 在我国的探月工程中, 2013 年 12 月发射的嫦娥三号月球软着陆巡视探测任务中, 由于探测器要度过月夜–180°C左右的低温, 完成长期月面探测任务, 首次在空间任务中使用钚 ^{238}Pu 放射性同位素热源, 纳入热控系统, 为着陆器和巡视器进行月夜保温, 确保在月昼唤醒后两器上的各设备正常工作. 在 2018 年 12 月发射的嫦娥四号人类首次月球背面软着陆巡视探测任务中, 为保证着陆器和巡视器在月面长期生存和全时域月面温度探测, 再次应用了钚 ^{238}Pu 放射性同位素热源, 并研发了同位素电源. 通过两次的工程实施, 初步建立了我国的空间核动力源安全的管理机制.

政府层面, 探索建立了由国家航天局指导下的安全机制, 成立了由国家航天局、生态环境部、国家核应急办公室、航天/电子和核工业等部门联合的专项综合协调小组, 开展产品应用过程的监督和协调. 航天局负责探月任务的总体设计和实施过程管理和监督, 组织开展核动力源应用安全评价以及发射许可的审批; 生态环境部负责对同位素热源的引进、转移、运输、环境污染评估、放射性产品操作资质等的审批; 国家核事故应急办公室组织制定任务发射阶段应急计划, 组建应急领导小组和发射现场应急指挥部, 形成应急响应机制, 并组织专项应急演练, 做好应急准备; 航天/电子部门负责发射系统和航天器的研制、维护, 并对核动力源使用环境进行分析, 提出相关设计要求; 核工业部门负责设计、制造满足要求的核动力源, 提交核动力源应用安全分析报告.

管理方面, 在我国已经建立的非空间使用的放射性同位素产品安全管理规章制度基础上, 进一步完善空间核动力源的核安全管理规章制度. 在嫦娥四号任务中, 国家航天局组织成立了监督专家组, 对同位素热电源研制和应用全过程进行监督并出具评价意见; 组织成立了同位素热源产品空间安全使用评价专家委员会, 制定了《探月工程嫦娥四号任务同位素热源产品空间安全使用评价要求》. 在发射前, 专家委员会与监督专家组沟通, 对研制单位提交的产品安全分析报告进行审查, 评估使用安全性, 并给出评估意见后, 进行任务发射许可审批. 工程总体实施单位制定了《探月工程嫦娥四号任务同位素源发射场操作流程和辐射防护要求》, 实施了人员安全防护管理; 组织研制单位和探测器系统、应急实施单位等编制同位素热源产品操作和使用安全相关的培训教材, 在发射场对任务相关人员和在场人员进行了培训. 国家核应急办牵头组织核应急组织, 并与地方政府充分沟通协调, 初步形成应急反应机制[9].

在技术方面, 工程总体组织制定了同位素源的研制和试验技术规范. 提出了空间核动力源系统的技术要求, 产品和试验技术指标充分考虑了热电源产品在存储、运输、使用和探测器发射以及在轨运行过程中可能遭遇的一般和紧急事故情况下, 保持热电源产品的安全性的设计要求. 开展了探测器应用空间核动力源的安全性的优化设计; 实施了 4 大类 19 项安全性专项试验; 在热电源存储和使用过程中进行了辐射剂量监测和分析; 在嫦娥四号任务中制定了《探月工程嫦娥四号任务同位素热源安全评价指标要求》, 并在发射前编制同位素热源产品安全分析报告, 提交安全使用评价委员会审查; 制定了发射阶段应急预案, 并经国家核应急办审批后实施.

综上, 我国的空间核动力安全管理机制包含的安全协调组织、安全管理、技术规范、应急准备响应以及相应的培训工作, 体现了联合国/原子能机构《安全框架》的以人为本的安全目标. 《安全框架》"政府指南", "管理指南"和"技术指南"的多项要求在管理机制中得到了直接体现.

4 中国建立空间核动力源综合安全机制的建议

《安全框架》发布 10 年来, 虽不具有国际法上的约束力, 但经外空委会员国实践表明, 该框架的指导内容有助于提升一国空间核动力源应用的安全水平. 参考《安全框架》不仅有利于本国空间事业的安全发展, 也能够促进各国外空活动的长期可持续性发展.

根据《安全框架》指导内容, 制定本国相应的较为详细的安全机制, 包括政府要素、管理要素和技术要素, 以反映本国具体的空间核动力源应用要求和组织管理架构, 对政策制定者、飞行任务设计者、管理者、科学家和工程师具有实用价值和指导作用.

通过探月工程实践, 我国初步践行了《安全框架》指南内容, 表明了中国政府对空间核动力源安全的重视. 鉴于《安全框架》的空间核动力安全实践的现实指导作用, 以及美国空间核动力源应用综合安全机制实践经验, 面对我国深空探测活动必须发展的空间核动力源, 提出以下安全管理机制建议:

(1) 建立或完善国家层面法律法规体系, 保证空间核动力源应用安全的所有责任和程序得到切实的履行.

为适用《安全框架》中提及的基本安全原则, 表明国家长期的核安全承诺, 向国际社会表明国家在安全目标上的基本立场, 展示负责任大国形象, 应制定相关核安全法规政策和战略的实施机制. 在具体工作中, 应当重点考虑以下要素的体现: (a) 《安全框架》包含的安全目标和原则; (b) 空间核动力源相关的国际法律约束, 例如《外空条约》、《核动力源原则》; (c) 国家涉及核安全的法律法规机制的适用范围说明.

建立国家层面安全框架, 应包含如下内容: (a) 保护人类和地球环境免受核动力源威胁的安全原则; (b) 与空间核动力源相关的设施和活动类型; (c) 对空间核动力源应用相关审批进行分级授权, 并明确授权依据和必要的决策程序; (d) 建立一套机制, 对负有安全责任的人员和组织进行独立监督; (e) 对潜在的核紧急事件做出防备和应急

方面的规定, 建立及时向潜在受影响者进行通报的机制.

在相关的法律体系中, 应规定对关于使用空间核动力源应用的正当性论证要求, 包括: (a) 审议使用空间核动力源应用的正当合理性, 并与可能的非核能办法进行对比; (b) 不同类型空间飞行任务使用空间核动力源应用所需的正当性论证类型; (c) 在不同情况下对使用空间核动力源应用的正当性论证的依据.

在应急准备和反应的法律法规和政策中应当考虑到以下方面: (a) 国际公约等国际法律文件, 例如国际原子能机构的相关核安全公约, 以及联合国外空委的相关核安全原则文件; (b) 应急准备和反应中政府职能部门的权责划分; (c) 应急准备中涉及的参与人员和资金物质支持方面的规定等.

(2) 建立和完善政府层面空间核动力源应用安全机制, 使涉及核动力源应用安全的全要素和全过程得到保障.

由核动力源应用的授权部门(国家航天局)牵头, 制定一套多部门协同参与的安全保障机制, 各方权责分明、流程安全、计划周密, 使空间核动力源应用的授权和批准实现制度化, 确保核动力源设计、研制、生产、试验、运输、存储、发射及应急全过程安全得到切实有效的保障. 国家应提供充足的资源和权限, 使安全保障机制运行后, 能够独立进行安全决策, 避免受到利益相关方(国家机关或实体)的影响和支配, 及时有效地履行安全责任. 权限主要包括负责空间核动力源安全性的人或组织有权对所有必要的相关安全信息进行审查, 以及对与核动力源相关的任何场所进行检查.

国家主管部门应当制定管理办法或条例, 规范空间核动力源应用飞行任务发射授权程序和要求. 包括: (a) 按照分级办法, 发射携带核动力源应用的空间飞行任务所需的授权类型; (b) 批准带有核动力源应用的空间飞行任务的依据, 以及可适用的决策过程.

(3) 加强核动力源应用安全技术储备, 使相关部门具备和维持安全应用的技术能力.

参与空间核动力源任务的任何组织, 包括空间核动力源的设计、制造, 以及发射和飞行阶段中的所有参与组织, 要树立核动力源安全意识, 制定安全技术规范. 中高级管理层应确定该组织各级人员的技术能力要求, 并应提供培训或采取其他行动, 以达到所需的能力水平. 该组织应对所采取措施的有效性进行评估. 各级人员应达到并保持适当的熟练程度.

(4) 建立通畅的信息沟通机制, 及时准确通报与其密切相关的核动力源事件信息.

对安全负有主要责任的组织的高级管理人员应做出适当安排, 向公众、有关政府和国际组织提供与空间核动力源任务相关的准确、及时的信息. 特别是发射前或事故情况下, 若对境外有影响, 应及时履行通报和协调义务.

5 结语

空间核动力源是一把双刃剑, 它既是实现人类走出地球, 探索更远宇宙空间不可或缺的关键性设备, 同时又对生物圈和环境具有潜在的威胁风险. 这一客观事实要求各国在开展空间核动力源应用时遵守国际和国内安全规则. 对中国而言, 空间核动力源应用仍处于起步阶段, 在国家《航天法》制定的背景下, 相关部门的决策者应当充分借鉴《安全框架》等国际规则和主要航天国家的空间核动力源安全管理机制, 制定适用于我国的空间核动力源应用安全管理机制, 这将有利于中国的空间核动力源应用安全尽早实现制度化和精细化的管理, 保障宇宙探索任务的顺利实施.

致谢 感谢民用航天技术预先研究项目(D020216)资助.

推荐阅读文献

1 Yin Y H, Long J. Reconsideration of the principles relevant to the use of nuclear power sources in outer space (in Chinese). J Beijing Univ Aeronaut Astronaut: Soc Sci Ed, 2013, 26: 27–32 [尹玉海, 龙杰.《关于在外层空间使用核动力源的原则》之再思考. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2013, 26: 27–32]
2 Wang G Y, Lü D. Analysis on the current situation and development of international rules for space nuclear power source application (in Chinese). Aerospace China, 2016, 9: 40–44 [王国语, 吕端. 空间核动力源应用国际规则现状与发展分析. 中国航天, 2016, 9: 40–44]
3 Yang C X, Cui H B. International regulations on the nuclear power source in outer space (in Chinese). J Beijing Univ Aeronaut Astronaut: Soc Sci Ed, 2014, 27: 22–27 [杨彩霞, 崔海豹. 空间核动力源的国际法律规制. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2014, 27: 22–27]
4 Steven A M, David J D H. Nuclear power sources and future space exploration. Chicago J Int Law, 2005, 6: 149–150
5 Summerer L, Wilcox R E, Bechtel R, et al. The International Safety Framework for nuclear power source applications in outer space—Useful and substantial guidance. Acta Astronaut, 2015, 111: 89–101
6 Yang C X. Towards a new legal framework governing the use of nuclear power sources in outer space. Annals Air Space L, 2014, 39: 455–465
7 Yin Y H, Long J. The U.S. outer space nuclear power sources security mechanism and its implication for China (in Chinese). J Beijing Inst Technol: Soc Sci Ed, 2014, 16: 105–110 [尹玉海, 龙杰. 美国外空核动力源安全机制对中国的启示. 北京理工大学学报(社会科学版), 2014, 16: 105–110]
8 Hu W J, Chen H Y, Chen J H, et al. Advances of safety research on nuclear space power sources (in Chinese). J Deep Space Explor, 2017, 4: 453–462 [胡文军, 陈红永, 陈军红, 等. 空间核动力源的安全性研究进展. 深空探测学报, 2017, 4: 453–462]
9 Dean K. Nuclear security and nuclear emergency response in China. Sci Glob Secur, 2010, 20: 30–63

Summary for “关于建立我国空间核动力源应用安全机制的建议”

Suggestions for China on establishing safety mechanisms for space nuclear power source applications

Jizhong Liu[1], Yuhua Tang[1*], Jie Long[2], Weiren Wu[1], Guobin Yu[1] & Zhe Zhang[1]

[1] *Luna Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China;*
[2] *Institute of Space Policy and Law, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China*
* Corresponding author, E-mail: tangyuhua2010@126.com

With the development of deep space exploration in China, the application of space nuclear power source (NPS) is becoming increasingly intense when solar energy cannot meet the mission requirements. Because of the particularity of its nuclear operation and use, the safety of the whole process has become a matter that must be paid attention to and guaranteed. Establishing a scientific and efficient safety mechanism is an important means to ensure the safety of the whole process. The *Safety Framework for Nuclear Power Source Applications in Outer Space* (*Safety Framework*) was developed jointly by United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS) and International Atomic Energy Agency (IAEA), providing safety standards and technical guidelines for all countries. The *Safety Framework* is a consensus reached by the member states of COPUOS on the safety of space NPS, and it can be applied to all space NPS applications. Countries can flexibly adjust the guide according to their own actual situation to adapt to the organizational structure of their space NPS applications. According to the practical application needs of space NPS, the United States has developed and implemented its own domestic safety mechanisms. The comprehensive safety mechanism for space NPS applications in the United States is closely consistent with the requirements of the *Safety Framework*, and its relevant national laws are consistent with the three categories of guidance contained in the *Safety Framework*, namely, the guidance of government, management and technology. Even within the system of the federal law of the United States, stricter standards and assessment procedures for the safe use of space NPS have been adopted. The space NPS application program of the United States requires specific legal action measures and necessary procedures. If the relevant measures and procedures are not followed, the application of space NPS cannot be approved and started by the government departments. The guidelines of the three aspects of the *Safety Framework* have been strictly implemented in the comprehensive security mechanism of the United States. China’s space NPS application is still in its infancy. Although the relevant provisions of the *Safety Framework* have been tried to implement in China’s Chang’E-3 and -4 missions, there is still no long-term national space NPS safety mechanism. Based on the *Safety Framework* and the experience of the United States, combined with the safety practice of space NPS in China, this article puts forward some suggestions for further improving the comprehensive safety management mechanism in China: (1) Establish or improve the national laws and regulations system to ensure that all responsibilities and procedures for the safety of space NPS applications are effectively fulfilled; (2) establish or improve the safety mechanism of space NPS application at the government level, so as to ensure the whole elements and process of space NPS application safety; (3) strengthen the safety technology reserve of space NPS application, so that relevant departments have and maintain the technical capacity of safety application. In the context of the drafting of China’s national space law, the decision makers of relevant departments of space NPS application should draw on the international rules such as the *Safety Framework* and the safety management mechanism of space NPS in major space countries, and formulate the safety management mechanism applicable to China’s space NPS application, which will be conducive to the early realization of China’s space NPS application safety system and meticulous management to ensure the smooth implementation of the space exploration mission.

nuclear power source, safety mechanism, safty framework, suggestions for China

doi: 10.1360/TB-2019-0587