



大会

Distr.: Limited
14 December 2010
Chinese
Original: English

和平利用外层空间委员会
科学和技术小组委员会
第四十八届会议
2011年2月7日至18日，维也纳
临时议程*项目10
在外层空间使用核动力源

在外层空间使用核动力源讲习班：美国外层空间核动力源应用的
安全设计和开发

美利坚合众国提交的文件**

摘要

美利坚合众国就其计划中外层空间核动力源应用启动了一个安全分析和风险评估程序，该程序与科学和技术小组委员会及国际原子能机构 2009 年联合发布的《外层空间核动力源应用安全框架》所建议的相关指南保持一致。安全考虑因素在空间核动力源及其拟议的飞行任务应用的最初设计阶段即得到密切关注。由于空间核动力源设计/开发阶段通常远远早于具体的核动力源应用，美国核动力源的安全基础首先侧重于在各种假定事故情形下控制核动力源燃料。随后的拟议飞行任务应用侧重于综合核动力源应用（如核动力源、航天器、发射系统、飞行任务设计、飞行规则）的详细风险评估，以确定可能的设计修改，从而加强与实现飞行任务目标保持一致的飞行任务核安全。安全系统性能定量要求可指导设计/开发工作，但更为重要的是要有一个发射工作核安全严格审查程序，该程序鼓励在设计、开发和核准整个过程中不间断地评估和审议安全加强措施。

* A/AC.105/C.1/L.306.

** 本文件以 A/AC.105/C.1/2011/CRP.6 号会议室文件为依据。



一. 引言

1. 美利坚合众国在外层空间安全使用核动力源的历史很长。自 1961 年起，美国进行了 29 次涉及空间放射性同位素动力系统应用¹的发射，并发射了一个空间反应堆。最初的放射性同位素动力系统应用涉及通信、气象和导航应用。不过，过去 30 年来大多数放射性同位素动力系统应用涉及由美国国家航空航天局（美国航天局）与美国能源部合作支持开展的科学应用。美国航天局的所有放射性同位素动力系统飞行任务均通过放射性同位素动力系统完成，这些任务包括：飞往月球的阿波罗飞行任务；飞往木星的先驱 10 号飞行任务；飞往木星、土星及更远星球的先驱 11 号飞行任务；飞往火星表面的海盗和探路者号飞行任务；飞往木星、土星及更远星球的旅行者 1 号飞行任务；飞往木星、土星、天王星、海王星及更远星球的旅行者 2 号飞行任务；环绕木星运行 8 年的伽利略号飞行任务；在日心轨道运行近 20 年的尤利西斯号飞行任务；仍在环土星轨道运行的卡西尼号飞行任务；以及飞往冥王星的新地平线号飞行任务。²

2. 在这将近 50 年期间，发生了三起涉及美国放射性同位素动力系统的事故，这些事故均非放射性同位素动力系统失灵所致，并且这些系统的安全设置均按所设计的那样运行：1964 年 TRANSIT 5BN-3 号导航卫星飞行任务中断；1968 年 NIMBUS-B-1 号气象卫星发射中断，导致放射性同位素动力系统坠入太平洋，在此寻获了其热源；以及飞行任务中断后，阿波罗 13 号月球飞行任务被成功引向太平洋汤加海沟。

二. 在空间放射性同位素动力系统应用方面对比联合国/国际原子能机构安全框架与美国航天局和能源部核安全实施措施

3. 数十年来，美国航天局与能源部协力工作，为设计和开发放射性同位素动力系统及其空间应用制定了一个综合安全框架。该框架将各种安全考虑因素并入放射性同位素动力系统设计和开发过程的各个方面与各个阶段，将其并入放射性同位素动力系统应用的设计、开发和实施过程。

4. 美国安全框架与和平利用外层空间委员会科学和技术小组委员会和国际原子能机构（原子能机构）2009 年联合发布的《外层空间核动力源应用安全框架》（A/AC.105/934）密切保持一致。美国联邦法律与《联合国/原子能机构安全框架》所载三大类别指南保持一致：政府、管理和技术。³美国根据需要编写并实施自己的安全框架；换句话说，美国程序要求有具体行动和过程，如果要求未予遵行，则不得启动放射性同位素动力系统的应用。

¹ 包括使用轻量放射性同位素加热机组的火星探路者飞行任务。

² 见载于 A/AC.105/C.1/2011/CRP.6 号文件的图 1，相关情况在 www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html 上查阅。

³ 见载于 A/AC.105/C.1/2011/CRP.6 号文件的图 2，相关情况在 www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html 上查阅。

A. 美国政府指南

5. 美国政府指南已编入联邦法律、总统指令、各机构要求和多机构计划。《国家环境政策法案》和《总统发射核安全批准程序》分别是认可⁴和授权⁵美国放射性同位素动力系统应用的既定程序。《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。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（如动力源、航天器、运载火箭飞行任务设计）进行一次详细的安全分析。美国航天局将更多的安全政策和要求⁶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、开展和参与放射性同位素动力系统应用及放射性同位素动力系统应用开发工作时对政府官员、方案和项目所要求的预期和程序。美国还编写了一份综合性《国家反应框架》⁷以防备⁸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。

B. 美国管理指南

6. 美国管理指南已被正式编入机构要求和放射性同位素动力系统开发计划。美国航天局总部对一项空间放射性同位素动力系统应用的安全负有首要责任。⁹美国航天局总部负责飞行任务的司长为每项飞行任务指定一名方案主任，以确保该机构根据已核准的程序执行飞行任务。放射性同位素动力系统飞行任务应用方案主任依职负责满足《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。依照《联合国/原子能机构安全框架》，由方案主任与开发和实施涉及一项放射性同位素动力系统应用的各个组织保持直接联系。美国航天局总部正式确定负有核安全相关实质性责任的各参与人的安排。核安全管理责任被并入飞行任务整体管理结构之中，并开展涉及所有相关参与人的定期报告和责任审查工作。¹⁰（这些参与人包括美国航天局总部、能源部、美国航天局中心及其各自的支持合同商）。

C. 美国技术指南

7. 美国技术指南与管理指南类似，也被正式载入机构要求和放射性同位素动力系统开发计划。下文更详细地描述了该技术指南。通过在界定、测试和分析

⁴ 《联合国/原子能机构安全框架》第 3.2 节论及“空间核动力源应用的理由”。

⁵ 《联合国/原子能机构安全框架》第 3.3 节论及“飞行任务发射授权”。

⁶ 《联合国/原子能机构安全框架》第 3.1 节论及“安全政策、要求和程序”。

⁷ 美国国土安全部，《国家反应框架》：核/辐射事故附件，2008 年 6 月，NUC-1，可登陆 www.fema.gov/pdf/emergency/nrf/nrf_nuclearradiologicalincidentannex.pdf 查阅。

⁸ 《联合国/原子能机构安全框架》第 3.4 节论及“应急准备和反应”。

⁹ 《联合国/原子能机构安全框架》第 4.1 节论及“安全责任”。

¹⁰ 《联合国/原子能机构安全框架》第 4.2 节论及“安全领导与安全管理”。

涉及放射性同位素动力系统的发射和飞行任务事故/反常现象时开发、维护并应用多机构专门知识来满足该指南规定的要求。¹¹美国航天局和能源部放射性同位素动力系统应用安全要求涵盖一项飞行任务的所有阶段，适用于一个放射性同位素动力系统的开发阶段及其拟定的飞行任务应用。¹²美国航天局和能源部根据一项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。¹³此外，这些风险评估工作有助于编写详细的多机构辐射应急计划，这些计划力求减轻涉及空间放射性同位素动力系统应用的事故的潜在后果。¹⁴

三. 美国外层空间放射性同位素动力系统飞行任务应用的核安全设计和开发要求

8. 能源部和美国航天局维持关于放射性同位素动力系统飞行任务应用全程设计、开发和实施阶段的核安全要求的综合框架。通过适用已编入联邦法定法律、程序和要求之公共和内部政府审议程序（如上文概述），满足该框架要求。

9. 美国航天局的程序性要求¹⁵规定了影响放射性同位素动力系统应用的界定、设计、开发和实施的五个指导性要求。

(a) “使用放射性材料的飞行器、航天器和系统的基本设计应向公众、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所可达到的合理限度（第 6.2.2.b 节）”；

(b) 核安全考虑因素自最初的设计阶段起即被考虑在内，并贯穿所有项目阶段，以确保整个飞行任务的辐射风险可以接受（第 6.2.2.c 节）；

(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（包括医疗装置和其他实验装置）的辐射风险（第 6.2.2.d 节）；

(d) 制定与计划中核材料发射相关风险相称的不同地点地面运作和辐射应急计划（第 6.2.2.e 节）；

(e) 辐射应急计划包括有关应急反应和协助源寻获努力的各项规定（第 6.2.2.f 节）。

10. 第一项要求将对人的健康和地球生物圈的危害确定为设计一项飞行任务及其航天器、运载火箭和支撑组件时的首要核安全考虑因素。该要求完全符合

¹¹ 《联合国/原子能机构安全框架》第 5.1 节论及“核安全方面的技术能力”。

¹² 《联合国/原子能机构安全框架》第 5.2 节论及“安全设计和开发”。

¹³ 《联合国/原子能机构安全框架》第 5.3 节论及“风险评估”。

¹⁴ 《联合国/原子能机构安全框架》第 5.4 节论及“减轻事故后果”。

¹⁵ 美国国家航空航天局，“放射性材料发射的核安全问题”，《美国航天局程序性要求》NPR8715.3C，第 6 章，可登陆 http://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?Internal_ID=N_PR_8715_003C_&page_name=Chapter6 查阅。

《联合国/原子能机构安全框架》的“安全目标”¹⁶。第二项要求确保核安全考虑因素涵盖一项飞行任务的全部阶段：从最初的概念设计阶段直至飞行任务结束。第三项要求扩充了前两项要求的应用范围，不仅包括放射性同位素动力系统（包括放射性同位素加热机组），而且包括涉及放射性材料的飞行任务的任何方面。¹⁷第四项和第五项要求与《国家反应框架》对美国航天局的要求保持一致。

11. 这些要求与根据《国家环境政策法案》和《总统发射核安全批准程序》满足《美国航天局程序性要求》的规定相辅相成。这些要求在整个设计/开发过程中对一项飞行任务的核安全产生重大影响。例如，如上文所述，在最后审订拟议的放射性同位素动力系统应用的设计之前，《国家环境政策法案》要求美国航天局编写一份环境影响报告，该报告应客观评估一项拟议放射性同位素动力系统应用和实现目标的合理备选方案（如一个太阳能的航天器设计）对环境的潜在影响，并就此问题征求公众意见。此外，由于《国家环境政策法案》的环境影响报告侧重于发射/飞行任务潜在事故的后果，对拟议放射性同位素动力系统应用进行早期核安全评估必然要求美国航天局确定对环境造成潜在影响（如潜伏性癌症健康影响、土地污染、人口风险）的具体事故情形（如发射事故或飞行任务事故或反常事件的次序），包括这些事故的发生概率。因为评估方法很严格（如定量评估），因此评估有助于确定那些能加强核安全并降低潜在事故风险的航天器、运载火箭、飞行任务设计和飞行规则的变动。

12. 同样，《发射工作核安全总统批准程序》要求对实际发射系统（如动力源、航天器、运载火箭、飞行任务设计）进行一次详细的安全分析，由此建立更为成熟的放射性同位素动力系统应用模型。该模型提供一项工具，让人们能够更深入地了解影响应用核风险的各应用因素，该模型还提供用于指导制定不同地点辐射应急计划的信息。此外，由于《发射工作核安全总统批准程序》涉及所有对飞行任务不同方面负有实质性安全责任的联邦政府机构（如美国航天局——航天器/飞行任务安全；能源部——放射性同位素动力系统安全；国防部——发射场和射程安全；美国环境保护署——事故清除安全），制定和评估安全分析工作可提供一个联络点，以协调就在应用开发阶段发现的任何核安全问题所提出的机构间解决方法。

四. 外层空间放射性同位素动力系统应用核安全落实情况

13. 在满足上文所确定的程序性要求时，美国航天局和能源部在开发的每个阶段、对放射性同位素动力系统应用的各个因素均落实了“核安全”。由于设计和开发新的放射性同位素动力系统通常需要五年或更长时间，该系统的开发早于放射性同位素动力系统的应用。因此，能源部根据大量的潜在飞行任务应用设

¹⁶ “根本安全目标是保护地球生物圈中的人与环境，使其免受空间核动力源应用在有关的发射、运行和寿终阶段可能造成的危害”（第2节“安全目标”）。

¹⁷ 事实上，美国航天局已根据一项飞行任务涉及的放射性材料的数量确立了五级核安全遵守情况。对迄今为止的所有放射性同位素动力系统任务而言，包括那些涉及放射性同位素加热机组的任务，最严格的核安全级别要求获得总统办公室的发射核安全批准。

计和性能要求（这两方面能对有些安全性能目标提出相对立的设计流线或挑战），制定放射性同位素动力系统设计所涉核安全的各方面内容。如果在放射性同位素动力系统的具体应用上无法充分实现确保其安全性能的目标，那么飞行任务的应用就必须考虑为确保安全性能勉强合格而在设计上又有哪些选择。也就是说，仅仅依靠放射性同位素动力系统或放射性同位素动力系统应用核安全设计，应用的辐射风险还无法降至“可以合理达到的最低限度”。只有在系统层面上采取不间断的综合性做法，通常才能确保放射性同位素动力系统应用的安全性能勉强合格。

14. 能源部的放射性同位素动力系统开发方案确定了组成部分和系统层面安全目标、要求和性能规范。因为美国航天局放射性同位素动力系统应用的周期性性质（如每十年执行一项或两项飞行任务），能源部为其放射性同位素动力系统持续地确定、评估、开发并执行安全加强措施，而这些又相对独立于美国航天局具体飞行任务计划。至于新的放射性同位素动力系统的主要动向，能源部和美国航天局合作制定了涉及放射性同位素动力系统所有方面的核安全要求。能源部又将这些要求阐释为放射性同位素动力系统层面的具体性能目标，这些目标可以测试和（或）分析所证实。从最早的设计阶段开始并且在整个开发阶段，在由能源部、美国航天局及其特定辅助性组织参加的设计/开发情况审查上，将定期跟踪并报告在满足这些要求并实现性能目标方面所取得的进展。

15. 通用热源——近期能源部放射性同位素动力系统的结构单元——的开发提供了一个范例，说明了能源部针对核安全而在系统层面采取的不间断综合性做法。这些通用热源模块¹⁸旨在多种正常情况和事故情况（如发射台爆炸、固体和液体推进剂起火、弹片撞击、地面撞击和再入大气等）下控制二氧化钚燃料。尽管通用热源已使用了近 30 年，能源部仍根据一般的安全测试和分析以及具体飞行任务的安全测试和分析所得结果数次加强其安全设置。通用热源设计核安全相关资料来自能源部放射性同位素动力系统安全测试¹⁹和美国航天局事故环境界定测试。²⁰这些测试不仅有助于界定并评估安全要求和性能规范，而且为加强核安全模型提供数据，这些模型可在未来放射性同位素动力系统和放射性同位素动力系统应用的整个设计/开发过程中得到应用。

16. 美国航天局核安全落实工作涵盖放射性同位素动力系统应用所有各个阶段和所有各个方面。除了上文讨论的放射性同位素动力系统核安全设计/安全程序以外，放射性同位素动力系统应用的设计通常带来“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所可达到的合格限度”的多个机

¹⁸ 见载于 A/AC.105/C.1/2011/CRP.6 号文件的图 3，相关情况在 www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html 上查阅。

¹⁹ 见载于 A/AC.105/C.1/2011/CRP.6 号文件的图 4，相关情况在 www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html 上查阅。

²⁰ 见载于 A/AC.105/C.1/2011/CRP.6 号文件的图 5，相关情况在 www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html 上查阅。

会。²¹如上文所讨论的，在整个设计/开发阶段启动并开展核安全风险评估，便能确定并评估发射系统、航天器和飞行任务设计潜在选项所涉核安全方面的内容。例如，在某些航天器设计中，如果给放射性同位素动力系统留出一些备选位置，则有助于避免或抑制与某些发射完整撞击事故相关的潜在放射性同位素动力系统放射性溢漏。在发射阶段，可以有一些机会来避免或抑制放射性材料的潜在事故溢漏。发射方面的具体范例包括：加强指令自毁系统的可见度和遥测技术；缩短指令发射自毁系统的反应时间；并添加多余和自动运载火箭自毁系统。所有这些作法均有助于限制与整个飞行系统（如运载火箭及其放射性同位素动力系统应用载荷）完整撞击相关的潜在压毁力和火灾危险。发射场射向位置具体范例：提高在轨或入轨后反常现象中航天器控制的可能性；部署地面指挥资源以提高在轨反常现象中航天器控制的可能性。这两种作法均使一个飞行任务更能减缓导致放射性同位素动力系统应用失控再入大气和发生地面撞击的在轨反常现象。与涉及绕地球变轨（如重力助推）轨道科学飞行任务相关的范例包括：将关键机动期间的操作降至最少；使绕地球变轨轨道远离地球。第一种作法有助于限制出现造成撞击地球风险的反常现象的可能性，第二种作法则限制任何反常现象导致撞击地球的可能性。

五. 从美国航天局放射性同位素动力系统外层空间飞行任务学到的核安全经验教训

17. 过去 50 年来，美国进行了 29 次空间放射性同位素动力系统应用飞行任务、经历了 3 次放射性同位素动力系统应用失败、开展了数百次事故环境界定和放射性同位素动力系统安全测试、执行了经改进的新风险评估模型方法和技术，并且获益于航空航空间域和核工程技术与系统应用的总体进步，它据此一直在不断改进其放射性同位素动力系统核安全设计与设计和开发程序。在开发/实施每个放射性同位素动力系统应用后，美国航天局都会收集“经验教训”，将与有效执行核放射安全审查程序相关的“错误因素”和“成功因素”编制成文件，供日后潜在放射性同位素动力系统应用借鉴。与设计 and 开发安全核动力源应用相关的主要经验教训包括：

(a) 与放射性同位素动力系统、航天器和运载火箭开发商和供应商合作拟订应对事故方案。此举提供了一种手段，用于理解每个放射性同位素动力系统应用部件对威胁放射性同位素动力系统燃料控制的事故情形的影响程度，此举还为评估潜在核安全加强措施提供了客观依据；

(b) 与发射工作授权程序参与机构协同开展严格的核发射安全分析、审查和评估工作。此举为发射工作核安全授权程序提供了一个共同的信息数据库；

(c) 认识到每架航天器/运载火箭的配置都是独特的。可实现的风险减缓程度并非总能预测。需要对所有配置和潜在的风险加强措施进行严格分析；

²¹ 美国国家航空航天局，“放射性材料发射的核安全问题”，《美国航天局程序性要求》NPR8715.3C，第 6 章，第 6.2.2 节）可登陆 http://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?Internal_ID=N_PR_8715_003C_&page_name=Chapter6 查阅。

(d) 给持续评估和认真审查安全加强措施实施情况提供种种激励，以此支持形成“安全文化”。如上文所述，美国航天局和能源部为形成此种文化提供协助，已将“核安全”因素纳入对拟议或计划中放射性同位素动力系统应用的所有主要审查，设立了核安全风险小组并将该小组纳入放射性同位素动力系统应用的整个设计和开发程序。（进行详细的风险分析，如能界定并评估风险减缓选项便总能有助于了解事故情形）。此外，美国航天局/能源部放射性同位素动力系统应用安全分析的独立评估工作与负责发射工作核安全授权的总统办公室共同为减少核风险创建了一个持续有力的激励机制。如果该程序仅仅依赖做出一项分析，表明达到了一个预定的“可接受”安全水平，那么，进行放射性同位素动力系统应用的组织一旦认为他们已达到“可接受”的安全水平，对持续加强安全工作的激励力度将很有限。此外，鉴于事故风险评估具有很高的不确定性和可变性，并且空间放射性同位素动力系统科学应用通常具有独特性，严格依赖预定的“可接受”安全水平是不切实际的。在整个设计和开发阶段不间断地审查计划中放射性同位素动力系统应用的核安全，将核安全评估置于独立审查之下，并将核发射安全最终授权赋予最高级别的政府机关，可强有力地激励在放射性同位素动力系统应用所有各个阶段持续努力减少核安全风险。

六. 结论

18. 美国与《联合国/原子能机构安全框架》整个指南范围保持一致，规定必须有一个涵盖拟议/计划中放射性同位素动力系统应用所有各个阶段、组成部分和参与方的核安全审批程序，并用严格的风险评估和从以前放射性同位素动力系统应用中学习的“经验教训”支持这些程序，从而已将安全有效纳入放射性同位素动力系统应用的设计、开发和运行工作。