



Distr.: Limited
8 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问题讲习班：美国进行风险评估的办法
及其在执行一项有效的外层空间核动力源应用安全方案中的作用

美利坚合众国提交的文件**

摘要

依照科学和技术小组委员会与国际原子能机构于 2009 年联合发布的《外层空间核动力源应用安全框架》所建议的適切指南，美利坚合众国计划的外层空间核动力源应用须经过一项安全分析和风险评估程序。美国对核动力源进行的安全分析首先是了解运载火箭、航天器、飞行任务设计和发射规则。这些信息被用于描述一系列假定的事故情形，以生成一个发射事故环境并得出此种事故的发生概率。核动力源组成部分安全测试和连续介质力学模型被用于推定核动力源和核燃料在各种事故情形里是如何反应的。安全分析集事故环境、事故概率、安全测试结果和计算机模拟于一体，说明飞行任务的风险。随后，独立于飞行任务之外的一个国家专家组审查安全分析。审查意见和结果并入第二轮安全分析中，并在随后再次接受独立审查。该核安全分析和审查程序鼓励不断改进飞行任务的风险评估并便利查明在飞行任务设计和今后的核动力源设计方面潜在的应加强安全之处。

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

** 本文件基于 A/AC.105/C.1/2011/CRP.5 号会议室文件。



一. 导言

1. 美国能源部向美国国家航空航天局（美国航天局）提供用于对航天器电力和加热有特别要求的民用空间飞行任务的空间核动力系统。这些能源分为两大类：或者是电力的放射性同位素动力系统，或者是用于局部部件加热的放射性同位素加热器装置。放射性同位素动力系统小巧轻便，寿命长，非常值得信赖。在不可能使用太阳能的地方，它们能够成就空间飞行任务。截至本文撰写之时，美国空间方案包括两种放射性同位素动力系统：放射性同位素热电发电机和先进的斯特林放射性同位素发电机。美国先前所有的放射性同位素动力系统飞行任务都应用了放射性同位素热电发电机。先进的斯特林放射性同位素发电机仍在开发中。

2. 行星和卫星以及它们的表面通常距离太阳遥远并且背光或者环境荒芜。使用放射性同位素动力系统是目前唯一可用的进行这方面探索活动的方式。然而，放射性同位素构成了某种危险。从 1959 年 1 月一个核辅助动力系统（SNAP-3）被展示在艾森豪威尔总统办公桌上的最初岁月起，安全问题一直是并且仍然是美国空间核动力方案的一个中心考虑事项。¹在过去 50 年间开展这些探索活动的过程中，美国依照《外层空间核动力源应用安全框架》（A/AC.105/934）利用了该动力，评估了潜在危险，控制了风险，并成功、安全地扩大了对太阳系的了解。本文件将讨论能源部是如何进行核发射安全分析的。

二. 核安全方面

3. 放射性同位素动力系统和放射性同位素加热器装置使用二氧化钷燃料，其中热量主要通过钷-238 的 α 衰变产生。在使用这些系统的航天器发射和运行期间，二氧化钷燃料的放射性构成潜在危险，可能造成飞行任务事故。因此，依照《安全框架》第 5.2 节，能源部和美国航天局视安全为外层空间核动力系统设计、制造和应用的一个内在特点。设计特别反映与安全有关的考虑因素，包括可被轻易屏蔽的一种放射性同位素（钷-238）；一种放射性同位素燃料形态（一种粗糙氧化物，具有稳定的化学性质，不能溶解且熔化温度高）；以及化学性质稳定的屏蔽物（延性铍包壳和耐高温碳复合材料），从而将公众面临的潜在风险减至最低。图 1²显示有许多保护层覆盖在燃料四周。在美国的放射性同位素动力系统中，用铍封装的二氧化钷燃料球芯块被称为燃料包壳。两个燃料包壳被并排置于一个石墨缓冲壳体中。石墨缓冲壳体由被称为细编穿刺织物的碳复合材料制成。在撞击期间，石墨缓冲壳体保护燃料包壳。石墨缓冲壳体被包裹在一种耐热碳材料中，以保护燃料不受重返时热量及其他热量的冲击。在由细编穿

¹ 美利坚合众国，能源部，《空间原子能：历史》（华盛顿哥伦比亚特区，1987 年），第 17 页。

² 见 A/AC.105/C.1/2011/CRP.5/中的图 1，可查阅 www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html。

刺织物制成的通用热源舱内装有两个隔热石墨缓冲壳体。通用热源舱是一种气动热防护层，防止重返期间释放燃料并还能在撞击情形下保护燃料。在一个放射性同位素动力系统内部，可能堆叠着若干个通用热源舱。所有这些内在的安全设置以安全测试为补充，评估各系统对潜在事故情形的反应。

4. 外层空间核动力系统的安全离不开运载火箭、末级、航天器、飞行终止系统和飞行任务剖面等的综合安全设置。美国航天局有一个广泛的方案，以确保运载火箭和航天器的可靠性。这一综合安全办法的其他要素支助发射前期和发射期间的一系列安全组织及其相关的应急规划活动。

5. 能源部开展概率风险评估以确定在发生事故时该硬件的潜在反应和说明放射性同位素动力系统的任何潜在燃料释放。假定的燃料释放大气输运和扩散模型被用来估算人遭受燃料照射的可能性和后果以及各种事故情形下的风险。

三. 核系统安全测试

6. 依照《安全框架》第 5.2(c)节，美国核发射风险评估得到 30 余年安全测试的支助，既包括在组成部分一级的测试又包括全面的转换器截面。安全测试注重燃料包壳对各种冲击作出的反应。典型的是，据报告燃料包壳的反应体现在包壳发生严重变形、裂纹尺寸（如有）和二氧化铀颗粒粒度分布状态等方面。安全测试包括下述方面：

(a) 爆炸超压测试。早期测试以冲击管测试为主，亦称为爆炸超压测试。这一测试系列评估爆炸导致一股冲击波碰撞一个通用热源舱或放射性同位素热电发电机的效应。测试舱以与冲击波传播方向垂直的一个端面为导向。模拟的石墨块被置于测试舱任一面以模拟三舱层叠在一起的情形。在测试舱内的燃料包壳填满了二氧化铀燃料模拟物；

(b) 碎片射弹测试。进行碎片测试是为了确定运载火箭爆炸导致小碎片和射弹撞击通用热源的效应。起初，测试是用细编穿刺织物板进行的，以确定仅由通用热源舱导致的速度衰减程度。随后利用铝弹对半舱目标进行测试。另外，这个测试系列审查钛弹对无遮蔽金属层的冲击效果；

(c) 坠落测试。在通用热源舱开发期间进行从直升飞机上的坠落测试，以确定通用热源舱的终速并审查它是如何落到地表的；

(d) 固体推进剂燃烧测试。两个通用热源舱组成部分被暴露于来自一个大型固体推进剂立方体的燃烧时间较长的火中。这些组成部分、一个无遮蔽的燃料包壳和由带有两个燃料包壳的一个石墨缓冲壳体组成的防撞组件被置于推进块的每一边，直接暴露于火中。二氧化铀燃料模拟物被用在这两个组成部分中；

(e) 无遮蔽包壳撞击测试。进行无遮蔽包壳撞击测试是为了确定在燃料包壳和燃料对与不同介质发生撞击的反应。测试条件旨在反映发射坪上或早期上升阶段发生的事故会造成的结果。无遮蔽包壳撞击测试是通过含有二氧化铀或二氧化铀的燃料包壳进行的；

(f) 通用热源撞击测试。通用热源舱撞击测试旨在对通用热源舱因中断轨道飞行而重返大气层并随后经历对地撞击进行模拟。在制造用于这些测试的通用热源舱时，外层表面全被移去了一小层石墨。所移量为在发生意外重返情况下预计融化物质厚度的两倍。通用热源舱内的所有燃料包壳都塞满了二氧化铀燃料。在以所预测的重返速度遭到撞击之前，各舱常受到预计在重返期间出现的一个热剖面的影响。撞击角度在这些测试中是不同的。各舱撞击的是钢体；

(g) 大碎片测试。大碎片测试涉及运载火箭上的一块大碎片抛向放射性同位素热电发电机一个模拟截面时形成的撞击。进行了一系列的火箭车测试，以模拟大碎片撞击。模拟热源被置于模拟放射性同位素热电发电机内，加热到撞击发生之时的发射前温度。模拟放射性同位素热电发电机由八个通用热源舱堆叠而成，其中两个舱装有二氧化铀模拟物燃料包壳，六个舱由含有表示燃料包壳的固体钨块的大块石墨制成；

(h) 飞板测试。飞板测试涉及一个薄板状碎片对一个塞满二氧化铀燃料模拟物的燃料包壳的正向撞击。薄板由航天器级别的铝构成。用于前三次测试的燃料包壳是某次震激管测试的残留物。在测试前加热燃料包壳，以使其达到发射前温度；

(i) 侧向飞板测试。侧向飞板测试对板状大块碎片撞击满载通用热源舱和无遮蔽燃料包壳进行模拟。所有包壳都载有二氧化铀燃料模拟物。在侧向撞击配置中，利用滑板轨道使金属板加速冲向其目标；

(j) 放射性同位素热电发电机末端撞击测试。放射性同位素热电式发电机撞击测试意在就放射性同位素热电发电机内燃料包壳相对通用热源舱层叠位置产生的变形以及每一位置上的变形差异生成测试数据。次要目标是获得燃料包壳发生破裂时碎片燃料模拟物释放的相关数据。将九个装有二氧化铀燃料包壳的模拟通用热源舱堆叠在一个模拟放射性同位素热电发电机内，并将后者加热到发射前温度。在这一测试中，火箭滑车推进模拟放射性同位素热电发电机撞向某一具体目标；

(k) 铀延展性测试。用于封装二氧化铀燃料的燃料包壳由铀制成。为了更好地了解包壳物质的属性，在不同温度下进行了抗拉测试，以描述铀在某种功能温度和应变比率上的反应；

(l) 固体推进剂燃烧鉴定测试。进行了一系列测试来调查和鉴定当各种固体推进剂在大气条件下燃烧时处于其下和附近的环境并衡量各种同位素物质或其代用品对这些环境的反应。

四. 核安全分析

7. 在美国，空间核动力系统在其开发和应用期间须接受几类安全和环境审查，例如《安全框架》第 5.3 节所描述的那些审查。审查侧重安全分析报告及相关文件，这些文件的拟订是发射核准程序的一部分。在审查程序中，重要的文件构成部分包括：

(a) 运载火箭数据手册。美国航天局为具体的飞行任务拟订一本运载火箭数据手册，供能源部针对发射核准程序进行各种分析和编制安全分析报告时使用。数据手册介绍关于飞行任务、运载火箭、航天器、发射设施、飞行任务时间安排和轨道等的详细参考设计信息。此外，数据手册还查明潜在事故及相关事故环境（爆炸超压、火球、碎片、撞击和重返）和概率等的范围；

(b) 安全分析报告。能源部对涉及在外层空间使用核动力系统的每项飞行任务进行正式分析，以评估核安全和潜在的飞行任务风险。安全分析被记录在三级叠代的安全分析报告中，作为发射核准程序的一部分。报告包括安全分析报告初稿、安全分析报告草稿和安全分析报告终稿；

(c) 安全评估报告。作为发射核准程序的一部分，一个称之为机构间核安全审查小组的外部小组审查美国航天局的数据手册和能源部的安全分析报告，并对飞行任务进行独立的安全评估。审查小组在安全评估报告中描述审查和独立评估。其间，美国航天局和能源部提供审查小组在解决潜在技术问题可能要求提供的其他资料。审查小组拟订的安全评估报告和意见初期草稿可能会被并入安全分析报告的后期版本中，从而加强安全分析。

五. 安全分析计算综述

8. 发射安全分析是利用一组计算机代码模拟事故次序、放射性同位素释放（“源项”）、放射性同位素输运和后果的各个阶段和现象来进行的。³美国航天局为运载火箭、事故概率和环境拟订数据手册，以此作为计算输入项。现象代码确定放射性同位素动力系统硬件对爆炸、撞击、燃烧和重返的反应。代码生成一套查找表，查找表被用作输入项来确定一个假定事故情形的源项。放射性同位素动力系统的安全设置通常避免物质释放。一旦发生释放，源项便会被转换成一组后果代码，以确定被释放物质可能被输运多远以及可能产生什么健康影响或环境影响。风险评估最终会生成有关事故概率、释放概率、可能后果、平均值和风险估算数的一个函数。

A. 爆炸和撞击

9. 能够出现的潜在事故情形较被测试情形广泛得多。因此，安全分析依靠数值模拟来增加现有的安全测试数据库。必须予以模拟的具有潜在破坏性的环境是发射破坏性事件造成的爆炸、放射性同位素动力系统硬件撞击地表以及残骸和固体推进剂碎片撞击放射性同位素动力系统硬件。连续介质力学代码被用来清楚地模拟数据手册规定的事故环境。方案包括非线性本构模型和准确分析可能导致几何非线性的各种大变形。由于爆炸和撞击情形而导致的机械损伤的数值模拟提供对动力源（及其组成部分）造成的破坏，特别是对动力源内部的燃料包壳造成的破坏的估算数。通过数值模拟确定燃料包壳暴露、破坏和变

³ 关于发射核准安全分析的计算流程，见 A/AC.105/C.1/2011/CRP.5 中的图 2，可查阅 www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html。

形的估算数。每一事故情形的评估均是按包壳逐一进行的，其结果被提供给嵌入源项分析代码的一个释放模型。释放模型参照数值模拟提供的包壳破坏信息确定被释放物质的二氧化铀数量及其颗粒粒度分布情况。

10. 这些数值模拟审查各种机械载荷情形，例如爆炸、地表撞击、航天器碎片撞击以及在一些飞行任务中来自完整航天器的残骸的撞击。在大多数情形下，机械损伤归因于一条复杂的事件链。数值模拟减弱这条复杂的事件链，提供关于单一事件的源项分析代码信息，随后可被用于解释渐次的事件链。源项分析代码提供在地表撞击事件、碎片撞击、航天器残骸撞击和爆炸模型内的燃料包壳暴露、变形和破坏的详细信息。之后可合并这些单个结果，以供估算因机械载荷而发生的释放。

B. 燃烧和热分析

11. 发射事故环境可导致液体推进剂和固体推进剂燃烧。美国在硬件中构建了若干保护层，以在发生发射区事故时帮助防止放射性同位素动力系统燃料的释放。例如，预计液体推进剂燃烧不会烧热到足以熔化载有放射性同位素动力系统燃料的铀包壳。利用若干代码模拟液体推进剂燃烧、固体推进剂燃烧、热机械撞击以及蒸发环境对放射性同位素动力系统硬件和燃料的影响。

12. 代码输入项描述由于同步或近同步撞击导致的固体推进剂燃烧、浮云和被释放的二氧化铀块进入不同颗粒粒度的容器内的分布情况。代码组从这一出发点预测浮云里含有二氧化铀的浮质的组成和颗粒粒度分布情况。实际上，代码将机械损伤释放的二氧化铀颗粒源项（通过粒度容器进行聚集）转化成包括蒸发、浓缩和颗粒凝聚等影响的源项。

C. 重返分析

13. 由放射性同位素动力系统给力的航天器可能遇到由于疏忽导致的重返情形。通用热源舱被设计成能够应付重返情形，一组代码被用于评估和确认通用热源舱的设计。对若干代码加以一起利用，为在重返期间可能遇到的运动、加热、热反应、化学和非黏性流场等相继的物理学问题提供综合解决方案。对参数上的重返空间进行评估需要为重返飞行动力学、气动力表面加热以及通用热源舱消融和热反应执行成千上万个解决方案。因为每个飞行任务具有独一无二的轨道特征，所以对每个单独的飞行任务都要进行这一分析。这一分析得出的热、物理和速度结果被传递到源项分析中。

D. 源项分析

14. 源项系指可能被释放的放射性同位素动力系统燃料的数量和形式（如有）。由于所设计的硬件是要装载燃料，所以源项可能无任何价值。通过应用一个仅在单个飞行任务分析中便能产生数百万个潜在结果的蒙特卡洛代码，即可生成供进行发射安全分析的源项。源项试图描述发射事故环境的全部威胁要素。

15. 在每次模拟一开始，通过从运载火箭中随机抽样取得一个概率分布函数来确定事故发生在哪里。源项代码随后逐步追踪在事故中会发生的所有攻击：包括最初的爆炸、空中碎片撞击、放射性同位素动力系统的地表撞击、固体推进剂或其他大碎片对放射性同位素动力系统的撞击、残骸大量落下以及液体和固体推进剂燃烧。整个模拟过程对各种分布情况进行取样，得出数百万个独特的解决方案。

16. 源项分析的最终结果是得到关于潜在二氧化钚燃料释放的一个概率函数，供后果分析取样。关于最终释放的详细信息包括释放的质量、颗粒粒度分布情况、释放位置和燃烧环境参数。另外，所得结果还明确在假定事故发生时的释放概率，释放概率连同事故概率一起得出该情形的总概率。

E. 后果分析

17. 后果系组指计算被释放放射性同位素动力系统燃料的大气输运及其在健康影响、剂量和土地污染等方面的相应后果的一组代码。接下来 50 年间的潜在癌症死亡人数即是健康影响的特征。利用线性非临界剂量模型，同时还可选择一个最低限度（阈）值。在多种情形下随机运行代码组，这被称之为“观察”。每次观察均随机抽取具体的源项、天气条件和发射时间。重要性取样用以确保在分析中虑及导致低概率、高后果事件的变量组合。

18. 应用拉格朗日轨道、高斯烟团模型完成大气输运，能够处理多个颗粒粒度源项。物质在云团中的输运和扩散受制于因空间和时间而异的各种气象条件。这些条件包括网格节点处的风分量、稳定级别、混合层高度和下表面粗糙程度。通过一个四维风场（三个空间维度加上时间）以时间步长追踪用颗粒粒度、最初云维度和初始坐标等特征详细描述的每个源云。

19. 当发生烟团与地表的互动时，便开始计算在规定网格节点处的空气和地表浓度。在计算出输运和浓度后，即可评估对暴露人口的潜在剂量和健康影响。一个单独模块依据不同剂量路径的剂量转换系数计算潜在剂量。由于源项可能涉及不同的颗粒粒度，并且分辨率可能随应用不同而不同，所以这一内置模块没有把剂量转换系数限制在颗粒粒度的固定清单。剂量和健康影响计算还包括与潜在污染地区有关的其他数据，例如人口密度、土地使用、粮食生产和粮食消费。

20. 后果组的结果被并入平均数后果、各种百分位数后果和风险（平均数后果乘以释放概率）表中。还生成互补的累积分布函数曲线图。这些曲线图显示某一特定级别的后果或更大后果可能发生的概率。这些结果为决策者评估在外层空间应用放射性同位素动力系统带来的风险提供技术基础。

六. 结论

21. 放射性同位素动力系统使得探测从太阳到冥王星的太阳系深度、绕外行星飞行并观测一个比一个更加陌生的外行星卫星以及行至太阳系和更远处的外围成为可能。虽然放射性同位素动力系统应用经常涉及大量放射性同位素物质，

但是美国制定了一个广泛的安全方案，该方案在严格的风险评估程序支助下评估潜在的飞行任务风险和确保飞行任务的安全进行。依照《安全框架》，美国应用风险评估：在放射性同位素动力系统的设计和开发过程以及放射性同位素动力系统应用的各个发展阶段中发挥着基本作用；支助放射性同位素动力系统应用的论证过程；并为发射核安全授权程序提供技术基础。
