

For participants only
25 November 2005
Chinese
Original: English

和平利用外层空间委员会
科学和技术小组委员会
第四十三届会议
2006年2月20日至3月3日，维也纳
临时议程*项目9
在外层空间使用核动力源

联合国/国际原子能机构外层空间核动力源可能的
技术安全标准的目标、范围和一般属性联合技术
讲习班（2006年3月20日至22日，维也纳）

外层空间核安全状况和相关需要：设计者的观点

法国提交的工作文件

秘书处的说明

1. 根据大会2005年12月8日第60/99号决议第16段，和平利用外层空间委员会科学和技术小组委员会将与国际原子能机构联合组织一次外层空间核动力源可能的技术安全标准的目标、范围和一般属性技术讲习班，定于2006年2月20日至22日在维也纳举办。
2. 本文件附件所载的工作文件是按照2005年6月13日至15日在维也纳举行的闭会期间会议上由外层空间使用核动力源问题工作组商定的讲习班工作日程示意表（A/AC.105/L.260），为该联合技术讲习班编拟的。

* A/AC.105/C.1/L.283。



附件

外层空间核安全状况和相关需要：设计者的观点

法国提交的工作文件

一. 状况和背景

1. 在不久的将来，各种新举措可能会利用各种核动力与推进系统。至于在外层空间为民用目的而大量利用核能的情况，应当强调，许多国家会受到潜在辐射危害的牵连。的确，过去的经验证明，装有核系统的航天器所涉事故的影响跨越国界，使许多国家不幸受到了牵连。可以举出的例子有：SNAP-9A 事件（1 公斤钷-238 散逸-17 千居里）、1978 年“宇宙-954 号”的反应堆（加拿大北部，污染 5 万平方公里，4 000 多块残骸碎片——共计 85 千居里-回收 50 居里）和 1983 年“宇宙-1402 号”的反应堆（印度洋）。此外，仍然存在着潜在风险，例如最近的卡西尼-惠更斯飞行计划，其成功是借助于三台装有 28.5 公斤钷-238-0.5 百万居里的放射性同位素热电式发电机。
2. 另外，应当强调的是，鉴于迄今为止全球已发射的核动力系统的总数，由此得出每个这种核动力系统每年发生一次事故的概率在 10^{-4} 的范围内。虽然这个数值对许多系统不适用，但却可以与地面发电厂每个反应堆每年堆芯受损频率目前允许的最大值 10^{-6} 相比拟。这突出显示了需要执行综合而细致的外层空间核安全方案的重要性，也表明执行这种方案是理所应当的。
3. 鉴于上述考虑，所有空间核系统在设计上都必须注意安全问题。实际上，安全方面（分析与检验）一向是以往项目和方案的重要部分（例如 SP100、Topaz 和 Nerva）。但是，这种安全分析是根据空间核方案各自订立的安全目标进行的，没有任何国际框架。虽然地面核应用方面的决策多数是在国家一级作出的，但在空间核应用方面，则应当明确反映国际利益。
4. 和平利用外层空间委员会在 1992 年大会通过的此类第一项决议中提出了一个初步的总体办法。虽然某些要点是值得强调的，如禁止在空间反应堆里使用钷同位素钷-239，但据公认，这第一项决议并没有全部处理相关的各个方面（如核推进问题），而且不具有真正的法律约束力。另外，目前还没有确定关于使用空间核动力在数量上的国际安全标准，不过委员会已经就如何制订安全目标提出了建议，以处理这一重要问题。
5. 为过去的项目制订的综合安全方案似乎形成了一种安全政策和安全办法，构成了一种普遍的空间核安全文化。对于地面发电厂，基本的安全宗旨是将风险降低到能合理达到的最低水平。^{a, b}根据纵深防御原则（防御线、多重屏障等概念），安全目标限定为保障公众健康和保护环境。如果可行，安全目标必须有助于利用技术和经济手段将风险（频率 x 后果）完全降为零。

二. 空间核应用和自然环境

6. 首先，值得注意的是，所有与发电厂相关的安全目标都是以人体承受的自然和人造（医疗）辐射环境为基础而确定的。还应强调的是，空间自然环境中的辐射仍然是十分有害的（范艾伦辐射带、银河系宇宙射线、太阳粒子活动，等等）。这就意味着，在距离地球遥远的地方，安全目标应当适应无人状况和迥然不同的自然环境。这还引发了一个问题，即在估测事故风险时应该用哪种临界剂量或最低释放量，还有在正常操作条件下应采用哪种剂量限值。这涉及到：

(a) 核热推进系统的放射性逸漏，为此，应根据安全目标来确定可接受的燃料侵蚀水平和工作温度值，同时考虑到对系统性能的直接影响；

(b) 核电推进系统初级回路的放射性水平（裂变产物在燃料中的滞留，工作温度，等等）；

(c) 航天器上工作人员可接受的剂量；

(d) 行星上的应用，为此需要相对于反应堆的影响小到可忽略不计的自然本底而确定一个周界范围（或场区边界）。

7. 不过，应当记住，除了远离地球的情形，其他重要的安全问题还适用于空间核系统（按预定或意外地）进入地球大气层的情形。所有这些安全问题都与所涉及的核系统类型有关，并且是核动力系统从发射前直到最终处置的每个任务阶段可能出现的具体情形所共有的。以下是对这些问题的讨论。

三. 核动力系统在外层空间正常工作条件下的具体安全特性

8. 就空间反应堆的正常工作条件而论，安全要求可概括如下：

(a) 在到达安全工作轨道之前应保持反应堆无放射性产物；

(b) 确定工作轨道应以放射性产物在可能进入大气层之前衰变至可忽略不计的水平为准；

(c) 反应堆使用后应留存在空间中。

A. 净反应堆和初始轨道

9. 即便严谨的反应堆设计避免了未经许可下的启动和工作，上文提到的第一点也是在一方面强调发射的航天器须带有清洁的堆芯，另一方面是只允许在成功进入安全轨道之后才进行工作。首先，安全的初始轨道仍需要作出界定，它将是安全目标的一部分。其次，考虑到和平利用外层空间委员会先前的建议，只允许使用以新铀燃料为动力的反应堆。因此，空间应用上的多数裂变反应堆都设计为使用浓缩铀-235，特别是高浓缩铀（93%），原因是对紧凑度和最小质量的要求。

10. 相反，因为空间反应堆以大量高浓缩铀为燃料，所以空间使用的核反应堆在地面运输与发射期间及发射后的保障问题必须解决。这类系统必须始终由坚定承担不扩散责任的稳定政府来控制。

B. 工作轨道

11. 此外，一旦非临界状态的冷铀堆芯进入轨道后，如果预定要返回地球轨道（往返任务、地球重力加速度等等）必须对工作轨道慎重处理，即使只是在加速度阶段长时间留在地球轨道的核电推进系统，也要慎重对待。这些工作轨道应该与初始轨道不同，因为堆芯的放射性较高，必须作为安全要求之一，根据轨道寿命和反应堆放射总量（衰变期）适当界定工作轨道。

C. 最后处置

12. 最后，还必须确定最后处置空间反应堆的具体轨道，同时要考虑到由于滞留时间加长，流星/残块撞击的危险也随之加大。至于其他可供选择的解决办法，如太阳系逃逸轨道和将核动力系统朝太阳方向发送，对此将进行调查研究，在对减少风险和必要额外能量储备（以延长反应堆堆芯寿命）的技术可行性这两方面加以平衡折衷后，可以将其作为安全建议提出。

D. 核动力系统引发的辐射

13. 通常核动力系统装有一个屏蔽罩，而不（像地面核应用那样）使用生物屏蔽防护。这样，反应堆引发的辐射对自然环境的影响可以减弱到忽略不计，尽管如此，强调载人飞行任务需要规定辐射剂量限度仍然很重要。这类辐射剂量限度将大大影响到系统的性能：核热推进系统的质量推力比或核电推进系统的质量动力比。

四. 外层空间核动力系统在意外事故条件下的具体安全特征

14. 已经说过，安全问题依飞行任务阶段而异，并且与相关核系统的类型关系密切。发射过程应当单独处理，除此之外，不同的飞行任务阶段可概述如下：

(a) 地球轨道，相当于初始阶段或工作阶段（如在往返飞行任务或单次或多次近地飞越情况下）。关于初始阶段，应当强调，核热推进系统（高推力）入轨飞行时间短暂，将能降低放射性堆芯的事故风险。相反，携带放射性堆芯的低推力核电推进系统则要求长时间的近地过渡期。

(b) 行星间环境，在这里，不可接受的轨道事故可能变成是能够允许的。这就意味着，例如，可以考虑对深空飞行降低要求，采用与现行近地安全标准不同的极限。这样，在反应堆整个寿命期间，安全目标可以有所不同，完全有别于标准发电厂的方式。

(c) 行星应用，在此，由于事故情况可能涉及的人数不同，也因为不存在生物圈，所以安全目标也将不同于地面发电厂的安全目标。不过，如同对于发电厂一样，应当考虑到常见的冷却剂流失事故和废燃料管理的相关问题等方面的标准措施。另外，放射性同位素热电式发电机设置在月球上，这突出表明，目前不能排除考虑将一个行星作为 α 放射性地面废物的最终堆存地，而且这将要求有具体的规范。

15. 最后，对飞行任务可靠性的一些要求在某些情况下可能超过安全目标的限度。事实上，某些冗余部件，以及为确保飞行任务成功而需要维持核动力源工作，这些也会有助于保障安全。

A. 在地球轨道上的事故

16. 防止意外返回危险，即防止初次启动后发生放射性热返回的情况。如果充分的稳定工作轨道和飞行轨迹能降低这类情况发生的可能性，这种危险是可以防止的。此外，保持系统即使在意外条件下都可作机动飞行，也有助于降低风险。还值得注意的是，这种降级工作模式可以作为飞行任务可靠性的一个重要目标。保持核电推进系统或核热推进系统“可作机动飞行”，就是在堆芯受损的情况下（燃料元件堵塞，反应控制装置失灵等）确保有最低限度的推力。这还意味着在转换系统出现故障时有备用部件（涡轮泵、分离式散热器等）接替。

17. 与地面发电厂不同的是，空间反应堆不可能设置防护覆盖层/禁区。这就是说，首先，在事故发生期间，必须尽量保持反应堆的完好状况，其次，反应堆应设计为即使在发生事故时都是安全的。例如，在任何情况下都必须保持对反应性的控制，在冷却剂流失时，应当可以控制从堆芯排除衰变热。对反应性的控制包括：

(a) 一个负空穴系数，以避免冷却剂流失时立即进入临界状态；

(b) 一个负的总功率系数，以在涉及温度变化的所有情形下自行限制裂变反应（从而反应堆无法立即进入临界状态）；

(c) 充分的多普勒加宽效应，可在可能发生的事故中（反应性引入事故）限制燃料温度升高，并避免堆芯融化。值得注意的是，有些空间反应堆是体积小的快速反应堆，中子频谱速度快往往导致多普勒系数很低，不过，另一方面，如果使用铀燃料，就会有一个重要的时间差，不会立即进入临界状态（ $\beta \sim 650\text{pcm}$ ）；^c

(d) 估测自然空间辐射对裂变反应链的影响（如在太阳粒子现象期间因太阳 $p+$ 辐射通量而引起的扰动）。

18. 在克服冷却剂流失事故和排除衰变热方面，核热推进系统和核电推进系统在堆芯功率密度水平上有所差异：

(a) 功率密度高的核热推进系统与地面发电厂相比，往往带有较多的密闭式冷却剂罐和（或）附加的主动式安全装置。与核电推进系统不同的是，在核热推进系统中排除衰变热还要求对形成的剩余推力有具体的防备办法；

(b) 对于功率密度低的核电推进系统，被动排热仍然是适合的，这样，预计只会出现传导热和辐射热传送现象，正如过去已经运用的高温反应堆原理一样。

B. 其他可能的事故情况

19. 应当制订适当的安全标准和要求，以确保在空间核动力系统的设计和操作中明确地处理流星危害问题。的确，流星可能会造成冷却剂流失事故或对转换循环（涡轮泵，或者特别是核电推进器的散热器，等等）造成局部破坏。对这些情况必须根据其后果和概率与流星质量和体积相关的程度进行分类列表。应该强调的是，行星应用也与此有关。^d

五. 核动力系统发射期间关键的安全问题

20. 首先，重要的是记住，放射性同位素系统（放射性同位素热电式发电机）和使用反应堆的系统（核热推进器和核电推进器）初始放射性总量不同。通常一个铀反应堆只有几居里，而在使用放射性同位素热电式发电机的飞行任务中，纯 ²³⁸PuO₂ 燃料会产生几百千居里。下面的表格显示了典型的带有放射性同位素热电式发电机和反应堆的航天器的标准总量示例，以及一些事故的示例，其中两种核动力源都有（单位：居里）：

带有放射性同位素热电式发电机的飞行任务 (卡西尼)	带有反应堆的飞行任务	放射性同位素热电式发电机事故 SNAP-9	“宇宙-954号”事故	切尔诺贝利
~500 千居里	几居里	17 千居里	85 千居里(可能) 50 居里(回收)	>百万居里

21. 不过，使用反应堆的核动力系统虽没有初始放射性，但有临界状态风险。的确，如果预期放射性同位素热电式发电机进入地球大气层时保持完整，就应当制订具体的安全标准和要求，以确保发生发射事故时反应堆处于不能工作的状态（以避免意外进入临界状态）。可以提出两个办法：

(a) 如现已用于发射装置上的，可执行核动力源的摧毁指令，以避免飞行轨道错误，并防止任何堆芯临界状态的风险。这种摧毁（分散）办法可用于使用铀的反应堆，这种反应堆一方面放射性水平很低，另一方面，如果摧毁系统本身能确保分散堆芯燃料元件，就不会进入临界状态。备用装置和被动装置可以确保燃料元件分离并避免临界组合。不过，考虑到空间反应堆所含的基本上都是高浓缩铀，从扩散方面来看，这个办法可能是无法接受的。^e

(b) 一旦发生堆芯溢流或压缩，必须确保控制堆芯的反应性。可能的解决办法有很多，如特定的吸收式安全系统，在轨道上装料和抑制堆芯，不过这些办法都会影响整个系统的性能。

六. 外层空间核动力系统的其他具体安全特性

22. 在空间使用核系统所固有的一些具体的安全特性也必须加以强调：

(a) 在反应堆已经装上核燃料后，可以在其周围进行某些运输和技术操作；

(b) 反应堆将要在双重介质（地球和空间）中运行，没有地点限制。这样，确定安全标准的工作就更加复杂。特别是，在对核热推进系统进行地面试验时，对放射性产物释放的限制限制了单位引擎的推力水平；

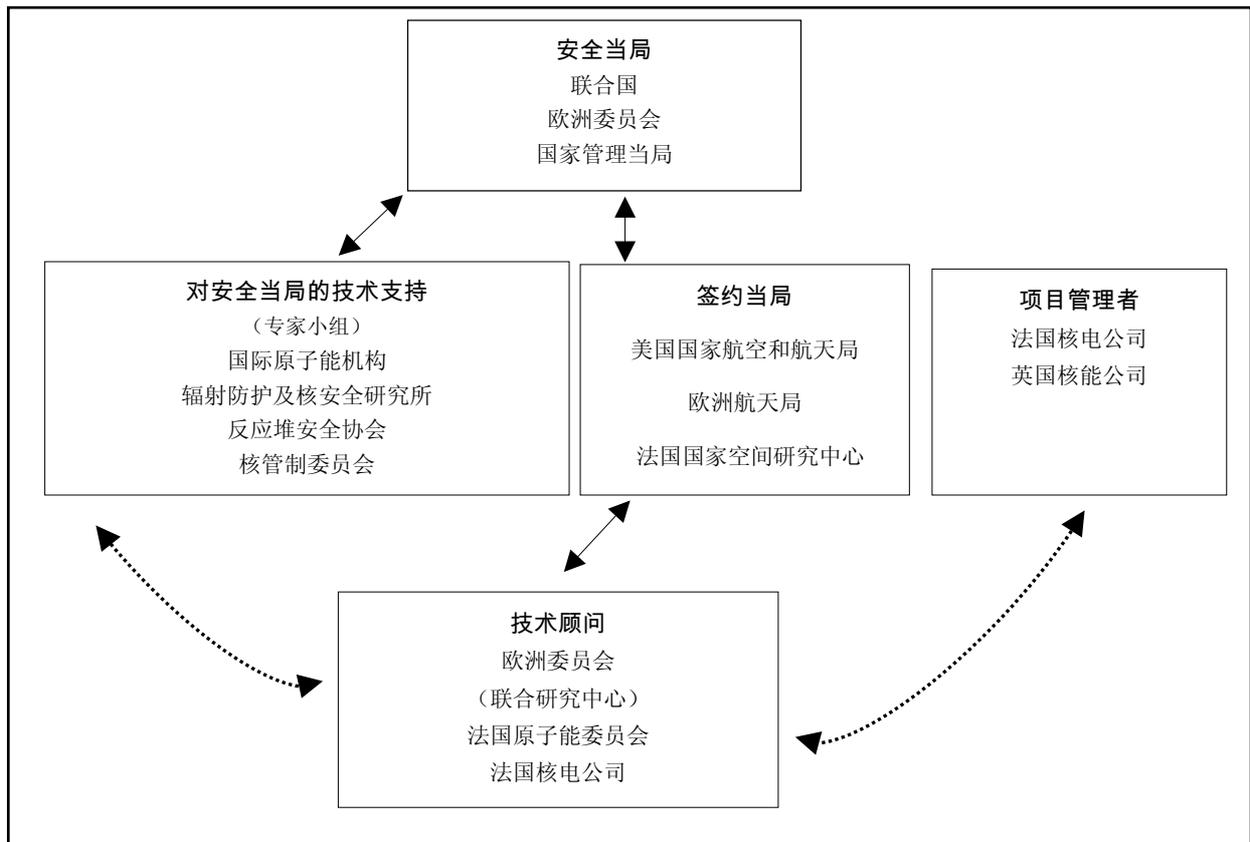
(c) 由于行星际飞行中的失重因素，很难通过自然对流排除衰变热（被动安全），因此可能限制核电推进系统堆芯的功率密度；

(d) 距离地球遥远时，控制信号延迟可能会加大处理反应性事故的难度。如果已经将这定为安全问题，就应当在反应堆控制方面为系统的遥测控制制订一些性能标准。

七. 用于确定安全目标的法律框架

23. 安全目标可以帮助确定空间核动力系统是否足够安全。这样，提供建议和安全指导方针可以帮助安全当局做出决定，因此，对于在空间使用核动力源，重要的是明确谁来作决策（操作者、管理者、设计者、公众或部长），以及谁来承担法律责任（如签约当局）。

24. 对于地面核应用，多数决定都是在国家一级作出的，然而在空间应用问题上，应当明确反映国际利益，因为所涉及到的国家应该更关心可能的空间核动力系统事故造成的跨国界影响。以下的图表根据地面应用，提供了一个例子，说明哪些人可能在空间应用的安全审查和批准程序中发挥作用。



注

- ^a 《核电厂的规范措施和安全标准：关于核电厂的规范措施和安全标准的国际讨论会记录》，国际原子能机构，会议记录系列（维也纳，国际原子能机构，1989年）。
- ^b M.S.El-Genk 编，《对空间核动力与核推进的评论：1984-1993年》（纽约，美国物理研究所出版社，1994年）。
- ^c S. Bernard 等著，《使用球床反应堆的 MAPS 核热推进载货航天飞机的概念设计》，为1996年在新墨西哥州阿尔伯克基举行的第13届空间核动力与推进问题讨论会撰写的论文。
- ^d 欧洲航天局，《月球核动力系统研究》（1998年）。
- ^e E. Rigaut 和 X.Raepsaet，《法国原子能委员会目前的核空间方案中优化的推进单元系统初探》，在2005年6月5日至9日于加利福尼亚州圣地亚哥举行的空间核会议上发表的论文。