

探索

Ray Sollychin

燃料替代方案

在“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”下，专家们正在研究利用钍基燃料循环帮助实现21世纪可持续核能发展的可能性

如同铀一样，钍也是一种可转换材料，可用于生产易裂变材料，易裂变材料反过来又可以作为核反应堆的燃料。在“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”下的一个名为“钍燃料循环的进一步研究”的合作项目中，人们正在探索利用钍燃料为未来大规模部署核能系统提供支持。参与该项目的各方包括欧洲委员会、印度、加拿大、斯洛伐克、俄罗斯、中国、法国和韩国。

可转换材料铀-238和钍-232通过捕获铀-235裂变反应产生的中子分别转换生成新的易裂变材料钚-239和铀-233。这对于提高用于确保核能可持续发展的易裂变材料的可用性是很重要的。

对于大量生产钚-239的主要担忧是材料的扩散，因为钚-239可用于制造核武器。对于钍的使用也同样存在材料扩散的担忧，因为铀-233理论上可以用于核武器。然而，由于铀-232的放射性衰变会释放出强大的、高穿透力的 γ 射线，因此少量的裂变产物铀-232使铀-233武器变得极难隐藏，操作更加危险。此外，根据目前实行的禁试条约，当今世界上尚无已知正在开发的基于铀-233的核武器，基于铀-233的新武器技术即使成功开发，也将难以验证或试验。

在未来的热核反应堆设计中，通过使铀-233在反应堆内“再循环”，而不是从安全的反应堆设施中移出接受后处理，钍

燃料循环的防扩散性也可得到改善。

使用钍燃料可以减少钚和超铀元素的产生，有助于军用钚的处置。在某些特定的使用钍燃料的反应堆设计中，钚可以被“燃烧”，为核武器材料的处置提供一种实用和经济的方法。

与铀燃料相比，钍燃料具有较好的热性能和物理属性。钍燃料对于在较高温度下运行的核能系统设计（如非电力应用）可能是一种较好的燃料方案。此外，二氧化钍的熔点为500 $^{\circ}\text{C}$ ，高于二氧化铀。这种差异在发生临时电力高峰或反应堆冷却剂丧失事件时会提供更高的安全裕度。

钍燃料循环的另一个可能优势与乏燃料的长期管理有关。与铀-钚燃料循环相比，钍燃料循环产生的带有较短半衰期裂变产物的高放射性乏燃料数量较少。从处置库的寿期和空间需求的角度来看，钍燃料循环对长期废物处置工程的要求可能低于铀-钚燃料循环。

主要是由于存在释放 γ 射线的铀-232及其衰变链，乏钍燃料的高放射性给乏燃料管理设施的设计者和运营者带来工程方面的挑战，但不是基本的物理问题。另一方面，存在强大的 γ 射线发射体也为新工业应用的革新发展提供了机会。例如，在运往集中的乏燃料后处理中心的过程中，乏钍燃料可与长寿命燃料设计（不用现场换料的中小型反应堆）合并起来，作为对破坏和盗窃行为的内在威慑。其他应用可

“革新型核反应堆和燃料循环国际项目” 钍基燃料循环的发展步骤

在 2009年1月召开的国际原子能机构/“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”咨询会议期间，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”成员国提出了若干钍基燃料循环方案供审议。会议确定了以下三组适合中、短期应用的燃料循环方案：

① 重水堆、压水堆、沸水堆和高温气冷堆一次通过式铀/钍燃料循环，包括常规一次通过式、燃料倒料和机械重构燃料循环；

② 重水堆、压水堆、沸水堆和高温气冷堆一次通过式钍/钍燃料循环。该方案与第一个方案类似，但采用现有的钍-232代替铀-235，用来在反应堆堆芯产生充足的铀-233之前启动裂变过程。它的一个特别变动是以减少可能作为武器材料的钍-232为目的的设计；

③ 快堆和热中子堆之间的协同作用，其中许多快堆是作为将钍-232转化为铀-233为其他反应堆供料的工厂运营的。

除了合作项目的参与成员外，来自美国钍动力公司、挪威托尔能源公司和德国余力希能源研究所的几名观察员也参加了此次会议。

能涉及医疗设备灭菌、食品辐照、放射治疗设备、医疗诊断设备和海关查验设施等。

钍燃料的经济性

当钍燃料循环大规模实施时，能够在提供的经济优势超过目前的铀基开式燃料循环，尽管预期的钍燃料制造费用可能会高于铀燃料。

预期可能较高的费用是基于铀-233和 Related 的高放铀-232较难操作。不过，其他因素可以缓解较高的制造费用，例如，钍燃料循环不需要浓缩操作，与铀相比，将天然钍氧化物制成可供首次辐照使用的燃料形式所需的转换工艺步骤较少。

此外，钍燃料的“再循环”能力和较高温度运行的可能性将可能提供一些额外的经济效益。从可转换的钍-232向铀-233的转化是在裂变过程中实现的，即在产生能量的同时生成的易裂变铀-233能够继续进行裂变并产生能量（较高燃耗），这个

过程持续很长一段时间，直至受到燃料包壳材料和支撑结构的性能的限制。未来的钍基反应堆设计在较高温度的运行应将核能系统的热效率从目前的最佳值34%提高至高达50%甚至更高，直接有助于降低每台发电机组的燃料费用。

为什么我们不能开始使用钍？

现在就可以开始在经过一些重新设计和重新许可证审批的当前一代核能系统中使用钍。然而，在一次通过式燃料循环（即燃料卸出后不再循环回收剩余的铀-233）中，钍燃料的使用并不是很经济。

几种先进的设计正在开发中，以便以更高效率或特定目的（例如处置钍）更好地利用钍。这些设计包括基于当前反应堆类型的改进型设计或渐进型设计，如印度的先进重水堆和美俄联合开发的钍基VVR-100型反应堆；钍基球床堆，快堆（液态金属冷却和气体冷却）；熔盐堆和加速器驱动系统等先进设计。

此外，几个反应堆概念已经提出，目前正在本着满足小型能源用户需要的目标进行开发。这些设计概念中的一些可以进行优化，以便于钍燃料的使用。

在商业发电中引进钍燃料循环所面临的最大挑战是缺乏与燃料制造相关的基础设施。

核工业受益于铀燃料循环可以利用过去为非民用而投资建造的类似基础设施。然而，钍燃料循环的燃料制造基础设施将必须出于商业考虑进行开发。✪

Ray Sollychin是Neoponora研究所-能源技术网络执行主任，他从2006年到2009年以加拿大政府支持的免费专家身份担任“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”组成员。电子信箱：ray.sollychin@neoponora.com。

燃
替
代
方
案