

钷的长期核能应用潜力

文/Artem Vlasov

印度的沙地蕴藏着为该国无碳未来提供燃料的巨大潜力。由于印度拥有世界上最大的钷储量，其长期核能战略的最终目标就是开发这种银白色、略带放射性的金属，这种金属被认为比传统核燃料更清洁、更高效。

印度孟买霍米·巴巴国家研究所所长Anil Kakodkar说：“自印度核能计划启动以来，钷一直是研发的重点。”印度已经设计并正在开发一个以钷为燃料的反应堆——先进重水反应堆。据Kakodkar称，该反应堆不仅将示范钷基燃料循环，还将示范非能动安全特性。

印度并非唯一打算利用钷独特特性的国家。2023年6月，中国颁发了一座实验熔盐钷基核反应堆的运行许可证。该反应堆建在中国北部的戈壁滩中，将在未来几年内进行测试。日本、英国、美国和其他国家也对研究钷的可能核能应用表现出了热情。

钷用于能源生产的挑战

钷通常存在于火成岩和重矿砂中，以挪威神话中的雷神托尔命名。在自然界中，它比铀含量上高出三倍，但历来很少用于工业或发电。部分原因是钷本身不是核燃料，尽管它可以用来制造核燃料。钷-232是唯一天然存在的钷同位素，被认为是“可裂变”的。这意味着它需要铀或钚等

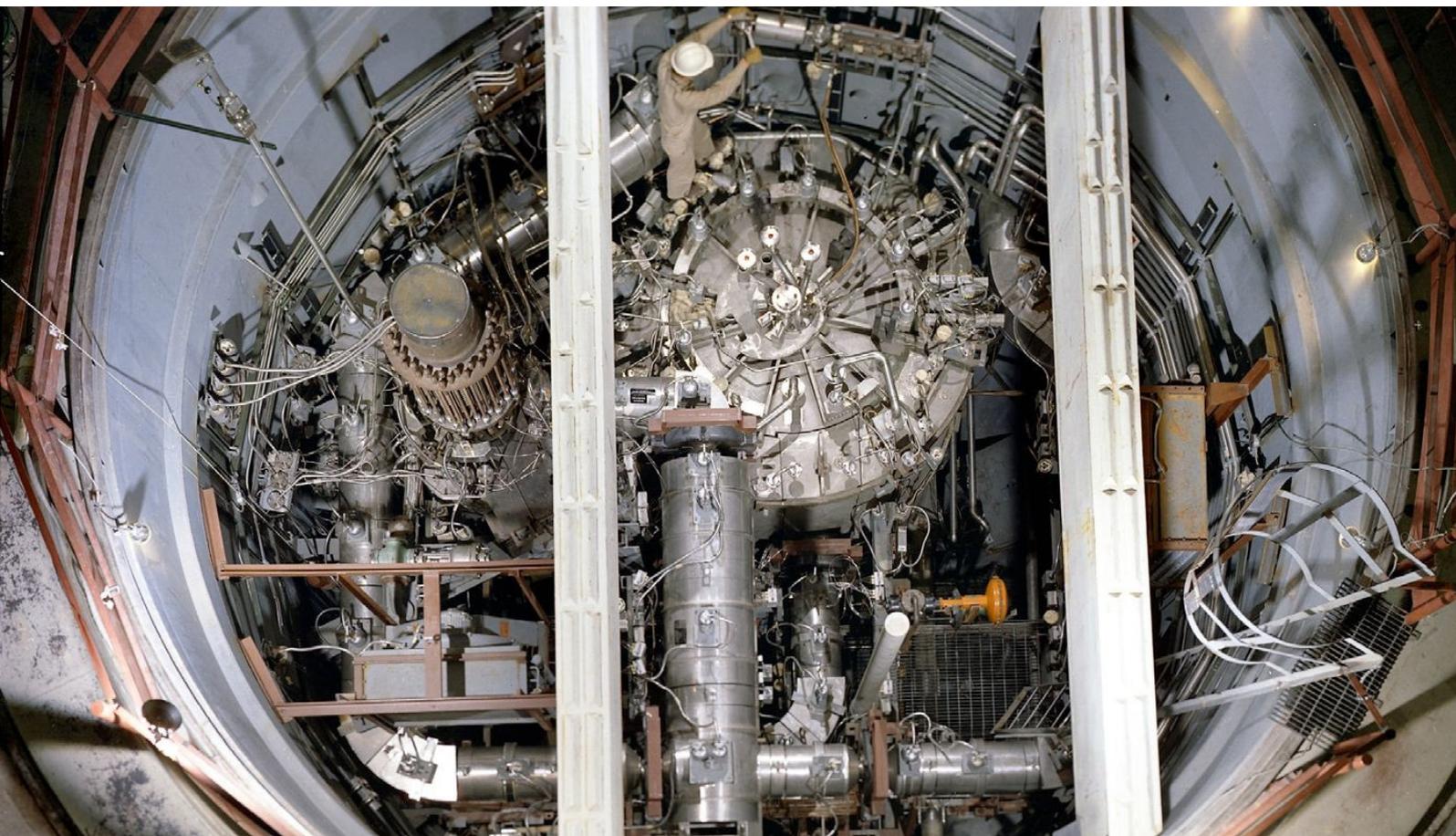
驱动元素来引发和维持链式反应。经过辐照后，钷-232会发生一系列核反应，最终形成铀-233，然后铀-233可以分裂释放能量，为核反应堆提供动力。

然而，利用钷生产能源并非没有挑战。一些经济和技术障碍使钷的应用面临挑战。尽管钷资源丰富，但目前提取这种金属的成本却很高。“矿物独居石是稀土元素的主要来源，也是钷的主要来源。”原子能机构铀资源专家Mark Mihalasky说，“如果没有目前对稀土元素的需求，独居石就不会仅因其钷含量而被开采。钷是一种副产品，提取钷所需的方法比提取铀的方法成本更高。但是，如果对钷及其核能应用有更高的需求，这种情况就会改变。”

同样昂贵的还有钷动力核设施的研究、开发和测试，因为在钷方面缺乏丰富的经验，而且铀在核能方面历来占据主导地位。“钷的另一个障碍是辐照后难以处理。”原子能机构燃料工程和燃料循环设施技术负责人Anzhelika Khaperskaia说，“由于钷中存在强伽马射线发射子产物，因此与铀燃料相比，钷燃料需要更昂贵的遥控燃料制造工艺。此外，乏钷燃料的后处理也具有挑战性。溶解二氧化钷和处理气态产品存在困难，需要在工业规模上达到成熟。由于在溶解过程中使用氟化物，后处理设备也会受到腐蚀。”

“由于钷的丰富性及其可裂变材料的增殖能力，钷有可能为人类的能源需求提供长期解决方案。”

—国际原子能机构燃料循环设施专家Kailash Agarwal



一项为期四年的原子能机构协调研究项目重点研究开发钍基核能的可能性，研究使用钍作为燃料的好处和挑战，并分析其在不同类型反应堆中的应用——从最常用的水冷反应堆到熔盐反应堆。该项目的成果最近发表在一份题为《部署钍基核能的近期和长期选择》（原子能机构《技术文件》第2009号）报告中。

钍能提供什么？

钍比传统核燃料铀-235有几个优点。在为水冷堆或熔盐堆提供燃料时，钍产生的可裂变材料（铀-233）多

于其消耗的可裂变材料，而且与钚燃料相比，钍产生的长寿命次锕系元素较少。据估计，钍在地壳中的平均含量为10.5ppm，而铀的含量约为3ppm。

上述原子能机构报告作者之一，原子能机构燃料循环设施专家 Kailash Agarwal 说：“由于钍的丰富性及其可裂变材料的增殖能力，钍有可能为人类的能源需求提供长期解决方案。”

除了钍燃料反应堆和核能总体上在运行中不会排放温室气体之外，另一个优点是，与目前铀燃料反应堆相比，它们产生的长寿命核废物更少。

20世纪60年代钍基实验核反应堆俯视图。

（图/美国能源部橡树岭国家实验室）