

# 减少核废物和提高效率，促进可持续的能源未来

文/Jeffrey Donovan

**快**中子反应堆可以提高核能的效率，减少放射性废物的环境足迹。一些国家正在探索这些创新型反应堆，以帮助确保可持续的能源未来。

快中子反应堆维持裂变链式反应不需要使用水等慢化剂慢化中子。在现有热堆中只有一小部分天然铀被用作燃料，而快堆则可以利用燃料中包含的几乎所有铀，使提取的能量多70倍，从而减少对新的铀资源需求。

快堆也采取所谓的闭式核燃料循环运行。在闭式燃料循环中，乏燃料，即经过辐照后的核燃料，被再循环和再利用。这种能源系统有可能持续数千年。相比之下，在开式燃料循环中，核燃料只使用一次，乏燃料被宣布为废物，最终在地质处置库中进行地下处置。

快堆还可以产生或“增殖”比消耗量更多的燃料，并燃烧掉乏燃料中包含的一些废物，例如次锕系元素，这是热堆无法有效做到的。燃烧掉这些废物，可以大大减少寿期最长的放

射性废物的数量、毒性和寿期。

“随着许多国家在寻找提供清洁能源的可持续方式，能源的环境足迹，例如它的废物，对他们来说都是大问题。”原子能机构核燃料循环技术负责人Amparo Espartero Gonzalez说，“减少这一足迹的能力，同时也能从核燃料中获得更多的收益，这是快堆日益吸引许多国家的重要部分，也是推动其技术发展的原因。”

## 东山再起

快堆是核电早期部署的首批技术之一，当时人们认为铀资源稀缺。但是，由于技术和材料方面的挑战阻碍了发展，并且发现了新的铀矿藏，轻水堆最终成为行业标准。目前已有五座快堆投入运行：俄罗斯的两座在运堆（BN-600和BN-800）和一座试验堆（BOR-60），印度的快中子增殖试验堆（FBTR）和中国实验快堆（CEFR）。

新的概念、技术和材料研究进



展，加上将核电纳入可持续能源的长期愿景，现在正在重振快堆方案。这些进步一般都以创新升级为特征，例如安全性能提高、设计改进和更紧凑提高了经济性。新的设计还包括采用可替代冷却剂，例如熔盐、铅、铅铋和气体。

“快堆已经发展了几十年，主要作为燃料增殖反应系统，近年来，还作为长寿命电池型小型模块堆甚至微堆。”原子能机构快堆技术发展工作组组长Vladimir Kriventsev说，“快堆可以使核电成为可持续数千年的能源，并能显著改善核废物管理。”

## 发展中的快堆

世界各地都在发展快堆。原子能机构通过协调研究项目、技术出版物、技术工作组和国际会议等方式在支持快堆发展和部署以及共享信息和经验方面发挥着核心作用。

俄罗斯已经运行着两座钠冷快堆，计划在2035年后部署一座下一代1200兆瓦（电）商用快堆，作为与轻水堆配合使用的自持系统的一部分。在快堆的协助下，热堆的乏燃料将经过后处理再利用，最终的废物足迹将比普通核燃料小10倍。

印度正在进行500兆瓦（电）钠

冷原型快中子增殖反应堆调试，这是印度正在规划的几座工业快堆中的第一座。中国运行着一座20兆瓦（电）实验快堆，正在建造一座大型示范快堆，并计划最终部署商用快堆。

在北美，正在开发使用不同冷却剂（包括熔盐）的若干快堆设计。美国计划建造一座试验快堆，以促进该技术的进一步发展，并计划建造一座1.5兆瓦（电）示范微型快堆，同时用于论证一种适合用于未来创新型反应堆的新型后处理燃料。

自20世纪50年代以来，快堆的技术可行性已得到充分证明。法国的1200兆瓦（电）“超凤凰”快堆于1998年关闭之前商业运行了12年，并继续对该技术进行研究和开发。韩国和日本也是如此。日本计划重新启动一座实验性快堆。

不过，快堆更广泛的工业部署在很大程度上仍将取决于经济性的改善。

“在预计铀价比现在高得多、更加重视废物最小化的资源受限的世界里，与传统的热堆相比，创新的紧凑型快堆可能会更具经济竞争力。”原子能机构核电技术发展科科长Stefano Monti说，“随着一些国家积极发展快堆，我们预计快堆在未来几十年为清洁能源系统作出重要贡献。”

俄罗斯别洛亚尔斯克电站的BN-800反应堆。

（图/俄罗斯国家核电厂电力和热力生产联合企业）