

当核废物成为资产而非负担时

文/Lucy Ashton

要 让核电厂产生的高放核废物能够推动能源部门的循环经济发展，该怎么办？在闭式燃料循环中运行的快中子反应堆可以实现这一目标。

快中子反应堆使用未被水等慢化剂减慢的中子来维持裂变链式反应，与现有的热核反应堆相比具有一定的优势。当在再利用核燃料的全闭式燃料循环中运行时，快中子反应堆有可能从相同数量的天然铀中提取比热核反应堆多60~70倍的能量，从而显著减少高放废物数量。

国际原子能机构副总干事兼核能部部长米哈伊尔·丘达科夫说：“在闭式燃料循环中使用快堆时，一千克核废物可以多次循环利用，直到铀全部用完，锕系元素（其放射性可保持数千年）被烧尽。然后剩下的是大约30克的废物，这些废物将在200到300年内具有放射性。”

快堆是核能早期部署的首批技术之一，当时铀资源被视为稀缺资源。然而，随着技术和材料方面的挑战阻碍了发展，并且新的铀矿藏被发现，轻水堆成为行业主要发展堆型。然而，一些国家正在努力推进快堆技术，包括小型模块堆和微型反应堆。

目前有五座快堆正在运行：俄罗斯联邦的两座在运反应堆（BN-600和BN-800）和一座试验快堆（BOR-60）、印度的快增殖试验堆和中国实验快堆。欧盟、日本、美国、英国和其他国家都在开展针对各种目标和功能的快堆项目，包括小型模块堆和微型反应堆。

对于一些国家来说，在全闭式燃料循环中运行快堆被视为确保核能长期可持续性的途径。

正在塞韦尔斯克建设的俄罗斯试点示范能源综合体汇集了一座铅冷BREST-OD-300快堆、一座燃料制造和再制造厂以及一座氯化铀-钚混合乏燃料后处理厂。此外，还将建造一座深层地质废物处置库。这个试点项目的重要性不仅在于展示能够进行新燃料的制造、辐照和再循环，而且在于展示所有这些工作在同一个场址完成。

“将整个闭式燃料循环过程设在同一个场址，有利于核安全、核安保和核保障。”原子能机构核燃料循环技术负责人 Amparo Gonzalez Espartero 说，“这在经济上也更有意义，因为核废物和核材料不需要像目前在一些国家那样在不同地点之间转运，从而最大限度地减少了运输和后勤挑战。

运行任何规模的闭式燃料循环都需要快堆以及用于后处理和再循环的基础设施。除其他原因外，经济和保障因素使得不是每个国家都能拥有后处理设施。为了降低成本，后处理设施可向其他国家提供服务，或者各国可共享设施。

俄罗斯还计划在2035年之后部署下一代1200兆瓦（电）快堆，作为与轻水堆并存的自维持系统的一部分。借助快堆，热核反应堆的乏燃料将被后处理和再利用，最终产生的废物足迹比常规核燃料循环的废物足迹小十倍。

其他国家也在推进相关项目。中国正在福建省霞浦县建造两座钠冷快堆（CFR-600）。第一台机组正在调试

“各国正越来越多地关注如何再利用乏核燃料等资源，以清洁方式为本国经济提供动力。”

—国际原子能机构快堆技术研发团队负责人Vladimir Kriventsev



中，预计将于2024年并网。美国由微软联合创始人比尔·盖茨支持的快堆项目正在开发中；尽管美国正在重新努力研究闭式核燃料循环，并利用现有核废物开发自己的燃料供应，但该项目不会在闭式燃料循环中运行。在欧洲，比利时MYRRHA项目旨在到2036年建造一个铅铋冷却加速器驱动系统，以测试其作为未来全闭式燃料循环的一部分分解次锕系元素的能力。

“各国正越来越多地关注如何再循环利用乏核燃料等资源，以清洁方式为本国经济提供动力。”原子能机

构快堆技术研发团队负责人Vladimir Kriventsev说，“目前，材料科学、反应堆物理和工程方面的技术创新改善了设计，增强了安全性能，降低了建造和运行成本，从而提高了快堆核电站的经济性。”

原子能机构通过协调研究项目、技术出版物、技术工作组和会议，在支持快堆的开发和部署中发挥着关键作用。原子能机构“核反应堆和燃料循环革新型国际项目”还通过支持各国的规划与合作，助力推进快堆和相关核燃料循环的发展。

将建有两座快堆的俄罗斯联邦别洛雅尔斯克核电站。

（图/俄罗斯国家原子能电力公司）