

# 先进反应堆有助于为核电满足气候目标铺平道路

文/Matt Fisher

**先**进反应堆有助于使核电成为更容易获得、更加可持续和更负担得起的低碳能源方案。这些反应堆具有更强的安全性能和优化成本效益的设计，预计将为提高经济效益、简化许可证审批程序和提高公众接受度打开大门，最终有助于各国考虑采用核电实现其气候目标。

“先进反应堆设计可运行60年或更长时间，并有望简化许可证审批程序，因而符合减缓气候变化的要求，而减缓气候变化既需要快速实施，又需要长期可持续性。”原子能机构核电技术发展科科长Stefano Monti说，“公众的参与和接受对于核电的未来至关重要，随着反应堆设计从安全和经济角度不断改进，全球社会对这一重要的低碳电力来源的看法也将随之改善。”

先进反应堆及相关燃料和燃料循环代表了核电技术的前沿。它们的设计建立在六十多年来核电研究、开发和经验教训的基础上。

原子能机构与各国合作，以确定和应对与发展先进反应堆有关的挑战，如技术创新和安全设计标准。这种支持包括开展协作研究项目和活动（如与国际专家举办讲习班），以及与第四代核能系统国际论坛合作。第四代核能系统国际论坛是一项国际合作努力，成员目前包括13个国家，自2000年成立以来一直在开展研究和开展活动，以支持下一代核能系统。

先进反应堆的一些显著特性包括：提高热效率、最大限度地减少废物、优化自然资源利用，以及能够同时满足核能的电力和非电力应用（如

制氢）（见第18页）。这些特性扩大了运行潜力，极大地提高了核电厂的经济性。

## 精湛的设计

先进反应堆主要有两类：“渐进型”和“创新型”。渐进型反应堆为低碳能源生产提供了一座坚固而直接的桥梁，而未来的创新型反应堆将进一步有助于各国走上低碳之路，同时大幅减少高放废物，扩大核电的非电力应用。

目前，已有15座渐进型反应堆正在运行，更多渐进型反应堆即将陆续建成。韩国的APR1400反应堆和俄罗斯的VVER-1200反应堆均为具有更高效率和先进安全特性的压水堆设计。APR1400反应堆除了正在韩国部署外，还有一座核电厂目前正在阿拉伯联合酋长国建造，首台机组将于2020年投入运行。

VVER-1200机组目前有三台在俄罗斯运行，有几座正在孟加拉国、白俄罗斯、俄罗斯本国和土耳其建造，还有几台建在白俄罗斯的机组预计将于2020年底进行调试。法国设计的EPR反应堆有两台机组在中国运行，还有几台在芬兰、法国和英国在建，其设计目的是简化电厂运行，同时提高发电能力。

中国的1090兆瓦（电）HPR1000反应堆，又称“华龙一号”，正在中国各地建造，并计划出口到其他国家，包括阿根廷和英国，首批机组预计在2020年底开始运行。该反应堆融合先进的能动和非能动安全系统，例如在失去电源时仅靠重力插入控制棒，以





及采用可承受较高压力的新型安全壳结构，最大限度地降低了发生核事故时的泄漏几率。

1157兆瓦（电）AP1000压水堆目前已在中国的两座核电厂运行。这种反应堆的设计相对简单，包括较少的阀门，并具有利用自然力的特性，例如加压气体、重力流、自然循环流和对流等具有安全相关的功能。还有几座AP1000机组正在美国建造，计划于2022年开始发电。

### 创新促进可持续性

创新型反应堆仍在开发中，一些设计可能在2030年左右开始建造。它们的共同设计特点包括：发电和制氢等其他非电力应用所需的高运行温度，以及高度可靠的固有安全特性，通过最大限度地减少废物和优化自然资源利用来提高可持续性，以及提高实物保护和防扩散能力的特殊措施。

一些设计预计还包括诸如液态金

属或熔盐等新型冷却剂，使反应堆能够在环境压力和更高的温度下运行，以提高效率。一些设计还可能采用闭式核燃料循环运行，目的是减少放射性废物的数量、毒性和寿命。

BN-800钠冷快堆让我们看到了创新型反应堆的未来。BN-800，连同早期版本BN-600以及中国实验快堆，是目前正在商业运行的三座快堆。BN-800自2016年10月起在俄罗斯运行，采用钚和铀组合的混合氧化物燃料。许多创新型反应堆设计预计采用类似的物理原理运行，将核电技术的极限推向新的高度。了解更多快堆信息，请参见第14页内容。

“虽然下一代核电反应堆离进入商业运行可能还有好几年的时间，但在研发举措方面不断取得的进展非常令人鼓舞。”原子能机构核电处处长Dohee Hahn说，“随着我们努力实现清洁能源的未来，很明显，核电在使我们达到所需的目标方面将发挥重要作用。”

采用欧洲压水堆的中国台山核电厂。  
（图/台山核电合营有限公司）





## 新燃料提供更多的能源、产生更少的废物

研究人员正在研究为核反应堆提供燃料的新方法。目的是最大限度地减少核废物的影响，降低运行和维护成本，同时提高核电厂实绩，进一步加强核安全。

一种方案是对乏燃料（即经过辐照后的核燃料）中剩余的铀和钚进行多次再循环。这种回收的燃料可以为下一代核反应堆提供动力，更有效地利用资源，同时减少核废物的数量和放射性毒性。通过多次再循环，反应堆有可能几乎只靠回收的乏燃料而不用新开采的天然铀资源运行。

耐事故燃料是正在为当前和未来的反应堆设计开发的一种有前途的新型燃料。这种燃料使用新的改进燃料和包壳（包围燃料的外管），可以更好地承受反应堆中的温度变化和极端工况。这意味着，例如，它可以比目前使用的燃料更长时间地承受反应堆堆芯中主动冷却丧失。

对于先进反应堆，目前正在开发在反应堆堆芯中使用寿期更长的新型燃料，这意味着它们能提供更多的能量、产生更少的废物。它们使用陶瓷化合物、金属和合金形式的高原子密度铀钚混合物，以提高反应堆实绩。这使得这种燃料更适合在快堆运行过程中增殖或生成新的燃料。由于这些燃料所使用的材料类型也能高效地传热，因此燃料的整体温度降低，变得更加均匀，从而提高了安全性。

