

从设计上确保安全 新一代核反应堆如何解决安全问题

文/Joanne Liou

1942年，在芝加哥大学运动场的看台下，发生了第一次自持核链式反应。在一个木制框架中，石墨块与铀穿插在一起构成了“堆”——核反应堆。上方，一根控制棒挂在一根绳子上，一名身穿防护服的男子站在旁边，准备在发生任何故障时用斧头砍断绳子。控制棒会落入反应堆堆芯，停止链式反应。这名男子是世界上第一个核安全系统的化身。

在随后的几十年里，安全影响了反应堆的发展，从20世纪50年代的原型堆和60年代的商业化动力堆，到20世纪90年代出现的先进设计。今天的反应堆与最初的斧头人相去甚远，其设计和系统确保了高水平的安全。

新一代核反应堆包括一些已经投入运行的反应堆和尚未部署的反应堆设计。原子能机构将先进核反应堆区分为渐进型反应堆和创新型反应堆，两者均汲取了2011年福岛第一核电站事故的经验教训。渐进型反应堆改进了现有设计，保持了经验验证的设计特征，而创新型反应堆采用了新技术。

大多数渐进型反应堆都可在市场上获得，并且已经并网。与传统反应

堆相比，这些反应堆的基本安全方案基于采取强化纵深防御战略，通过更加强调固有安全特性和非能动特性，减少对操作员干预的依赖，以尽量减少事故风险。

创新型反应堆吸收了在使用冷却剂、燃料、运行环境和系统配置方面的根本性改变。一些创新型概念正被考虑在未来10至20年内部署。

原子能机构核电技术发展处处长Stefano Monti说：“从技术角度看，[创新型反应堆]有很大不同，因为它们通常不使用水作为冷却剂。”他补充说，从物理角度看，不同的冷却剂也改变了提取热量的方式以及产生和维持核裂变反应的方式。

例如，钠、铅和铅铋或气体冷却的先进快中子反应堆，使用能量高得多的中子来引起裂变。快中子反应堆的设计目的是提高燃料效率，从而减少高放废物。原子能机构安全评定处处长Vesselina Ranguelova说：“从安全角度看，由于发生事故的可能性和放射性后果都有所降低，与它们的运行相关的风险非常低。原子能机构的先进反应堆信息系统提供了所有这些类型的先进

反应堆的详细技术和安全信息。

去年，世界上第一座先进小型模块堆在俄罗斯部署，许多创新小型模块堆正在开发中，以供近期部署。在全球范围内，约有70个小型模块堆概念和设计，阿根廷和中国的两座小型模块堆已处于建造后期阶段。

安全系统

从福岛事故中汲取的教训使国际安全要求得到显著加强，这些要求将体现在先进反应堆的设计中，从而使发生具有严重放射性后果的事故的可能性极低，并且一旦发生事故，从实际上消除放射性后果。（关于福岛第一核电站事故的更多信息，见第14页）。

小型模块堆的概念验证，要求供应商在开发和评价纵深防御战略的基础上，证明反应堆控制、堆芯冷却和反应性限制等基本安全功能的有效性。

例如，美国纽斯凯尔电力公司设计了一个模块化轻水堆，将蒸汽生成和热交换组件集成到一个单元中，预计将在2027年部署。“现有核电机组目前面临的主要安全挑战集中在清除残余（衰变）热和保持反应堆冷却的能力上，”纽斯凯尔电力公司监管事务经理Carrie Fosaaen说，“纽斯凯尔电厂的总体设计采用了更简单的系统，这排除了对现有核设施目前所需复杂配置的需要。”

鉴于创新的性质，引入非能动和其他创新的安全特性对监管提出了挑战。监管机构的任务是核实设计者的安全声明，这可能需要额外的研究和分析来评价新设计。

“为了论证设计安全，需要对所有电厂状态——正常运行、预期运行事件和事故工况——进行全面评定。在此基础上，可以确定设计抵御内部和外部事件的能力，并证明安全特性的有效性。”Ranguelova说，“虽然创新设计很有前景，但必须辅之以监管机构健全的安全评定和许可证审批过程，以支持其利用和部署。”

技术中立的安全框架

原子能机构正在评估现有原子能机构安全标准可在多大程度上适用于创新技术。“我们的安全标准是技术中立的。然而，它们大多是利用反应堆的运行经验制定的，这些反应堆大多是水冷反应堆。”Ranguelova补充说。尽管这些标准原则上是中立的，但对于某些或所有类型的小型模块堆来说，实施起来可能会有所不同。

Ranguelova说：“存在一些差距，我们还需要制定更多的导则或支持文件，以便将这些标准适用于创新技术。”原子能机构预计将在2022年发布一份关于原子能机构安全标准对小型模块堆技术适用性的安全报告。

“虽然创新设计很有前景，但必须辅之以监管机构健全的安全评定和许可证审批过程，以支持其利用和部署。”
—国际原子能机构安全评定处处长Vesselina Ranguelova

“现有核电机组目前面临的主要安全挑战集中在清除残余（衰变）热和保持反应堆冷却的能力上。”

—纽斯凯尔电力公司监管事务经理Carrie Fosaaen

