

# 助力未来：建立小型模块堆和先进反应堆的燃料供应链

文/Lucy Ashton

工程师们正在为下一代核动力堆做准备，旨在提高能源安全和减缓气候变化。包括小型模块堆在内的许多先进反应堆设计都将需要高丰度低浓铀燃料，这种燃料的铀-235含量在5%到20%之间，超过了大多数在运核电厂燃料所需的5%铀-235含量。

“高丰度低浓铀燃料将实现更加小型化设计、运行周期更长和效率更高。”原子能机构核燃料循环和废物技术司司长Olena Mykolaichuk说，“然而，为了充分利用高丰度低浓铀燃料的好处，一些国家正在提高产能，以确保有充足的供应，这对小型模块堆的部署至关重要。”

俄罗斯联邦和美国已在生产高丰度低浓铀，主要用于研究堆和在运轻水堆。俄罗斯设施是目前唯一一个以商业规模生产高丰度低浓铀的设施。

去年，欧洲原子能共同体供应局编写了一份关于欧洲已经改造或即将改造成以高丰度低浓铀为燃料的研究堆的未来燃料供应报告。传统上，欧洲的研究堆一直以高浓铀为燃料。由于目前缺乏高浓铀生产能力，欧洲以高丰度低浓铀为燃料的研究堆正在由俄罗斯和美国提供燃料，美国表示只能保证供应到2035年或2040年，因此未来改造燃料后的研究堆更加面临供应短缺的风险。

据欧洲原子能共同体供应局估

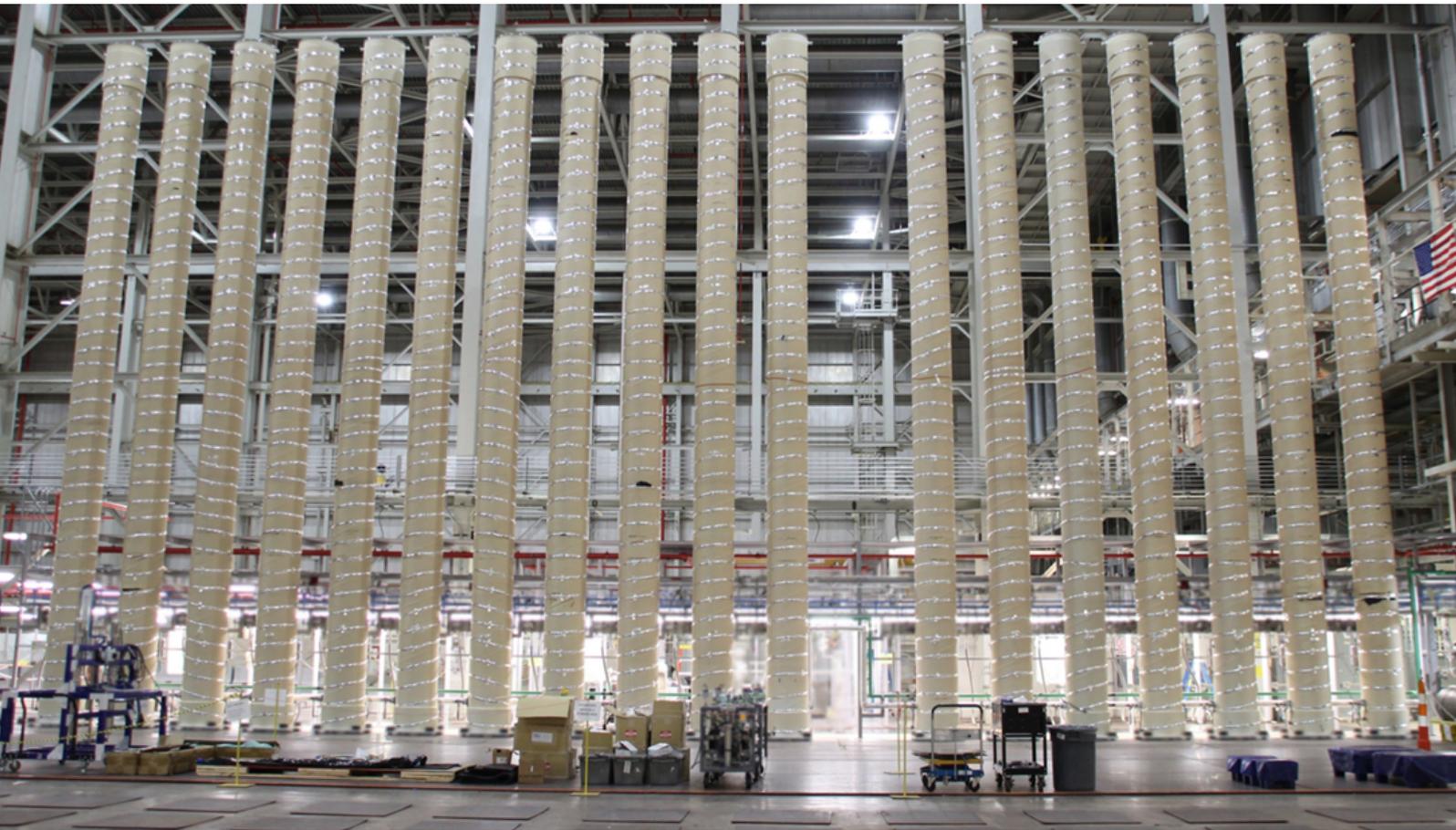
计，到2035年，欧盟维持其研究堆运行每年将需要700千克到一吨的高丰度低浓铀。这一估算还不包括发电用先进反应堆的未来需求。因此，出于对未来供应安全的担忧，欧洲原子能共同体建议欧盟发展自己生产高丰度低浓铀燃料的能力。

虽然欧洲尚未具备生产高丰度低浓铀的能力，但欧洲大陆最大的核燃料生产商在浓缩技术方面处于世界领先地位。根据欧洲原子能共同体供应局的报告，这些生产商目前可生产铀-235丰度为6%的燃料，并能够利用相同技术生产高丰度低浓铀，不存在重大技术挑战。

然而，此类设施的许可、建设、安全和运行需要大量投资，欧洲生产商表示，他们仍需要了解投资的商业价值。欧洲公司最快也要在五年内才能开始生产高丰度低浓铀，目前正在考虑扩建法国现有工厂的计划，以及在英国或美国建造新设施的计划。

然而，美国核工业警告说，由于缺乏高丰度低浓铀，一些小型模块堆设计的部署可能会推迟数年。目前，在美国政府资助的十个先进反应堆设计中，有九个将在未来十年内需要高丰度低浓铀燃料。美国能源部的预测表明，到2030年将需要超过4万千克的高丰度低浓铀，随着新的先进反应堆群投入运行，这一数量还将逐年增加。

“下一代核技术将需要新型燃料的新供应链。”  
—国际原子能机构核燃料工程专家 Ki Seob Sim



为了满足这一需求，美国能源部正在投资国内的高丰度低浓铀生产线。能源部成立了一个高丰度低浓铀联盟，并共同出资在俄亥俄州皮克顿建立了一个示范生产厂。2023年6月，美国监管机构批准皮克顿设施开始浓缩作业。

皮克顿高丰度低浓铀离心机级联预计到2023年底将生产20千克高丰度低浓铀，到2024年产量将达到900千克。由120台独立离心机组成的全规模高丰度低浓铀级联每年可生产约6000千克高丰度低浓铀。

作为补充，还通过稀释国家库存的高浓铀，开始另一种高丰度低浓铀燃料生产。这种三元结构各向同性粒子（即TRISO高丰度低浓铀）燃料由

铀、碳和氧制成，外层覆盖三层碳基和陶瓷材料，可防止放射性裂变产物的释放。然后，这些粒子可以被塑造成台球大小的球体（称为鹅卵石）或圆柱形颗粒。TRISO高丰度低浓铀燃料用于高温气冷反应堆，一些供应商正计划将TRISO高丰度低浓铀燃料用于小型模块堆和微型反应堆设计。

“下一代核技术将需要新型燃料的新供应链。”原子能机构核燃料工程专家 Ki Seob Sim 说，“我们目前正在努力建立这些供应链，但若要确保必要的高丰度低浓铀燃料供应，仍有许多工作要做，包括在许多地区展示这些先进反应堆的明确商业价值。不过，我相信我们能够做到这一点。”

美国能源部已投资在国内生产高丰度低浓铀（HALEU）燃料。位于俄亥俄州皮克顿的高丰度低浓铀示范项目预计将在2023年底前生产出20千克高丰度低浓铀。

（图/美国森图斯能源公司）