

News & Highlights

小型核反应堆是核电领域的下一个大事件吗？

Mitch Leslie

Senior Technology Writer

2019年9月9日，西伯利亚东北部佩韦克地区的居民看到了他们的新核电站驶入港口。“罗蒙诺索夫院士”（Akademik Lomonosov）号浮动核电站（图1）长144 m，配备有两个核反应堆，它将为佩韦克及其周边地区的家庭和工厂提供高达70 MW的电力和50 Gcal·h⁻¹（注：1 cal = 4.19002 J）的蒸汽热。

Akademik Lomonosov号不仅是世界上第一个浮动核电站，也是人们首次投入使用的属于小型模块化核反应堆（SMR）的一种新型反应堆。尽管它们的发电量少于大型核反应堆的发电量，但它们能够克服全尺寸核反应堆所面临的一些问题。SMR的支持者指出，SMR的建造成本将更低，其使用将更灵活、更安全，并且它们



图1. 2019年8月23日，第一座浮动核电站开始了它从俄罗斯摩尔曼斯克到东西伯利亚海佩韦克港口的4700 km的旅程，它将在该港口为楚科奇自治区提供电力。该浮动核电站能够为拥有100 000居民的城市提供能源，它将成为世界最北部的核设施。Akademik Lomonosov号由圣彼得堡的波罗的海造船厂（Baltic Shipyard）建造，该造船厂归俄罗斯Rosatom公司所有。图片来源：Elena Dider, Wikimedia Commons（CC BY-SA 4.0）。

可以为核工业提供急需的动力[2]。

其他国家也在尽力建造SMR。位于美国爱达荷州爱达荷福尔斯市的爱达荷国家实验室（INL）最早可能在2023年将开始建造一座核电站，该核电站最终可容纳12个核反应堆[3]。中国也将开始建造自己的舰载SMR [4]，目前，中国正在开发陆上核反应堆的设计，其中包括一些用于供暖的核反应堆的设计[5]。

麻省理工学院的核科学与工程学教授Jacopo Buongiorno说：“SMR可能会改变核工业。”但是，正如他和其他核专家所提醒的那样，这些微型核反应堆的自身潜力能否得到发挥还有待进一步证明。

目前的大型核反应堆通常产生约1000 MW的能量。相比之下，SMR通常产生300 MW或更少的能量。其实，小型核反应堆已经存在了数10年，在20世纪50年代和60年代美国就已经建造了几座小型核反应堆[6]。但是，SMR的支持者认为，他们现在可以利用新技术和采用新的建造方法来极大地降低成本和提高安全性。

在美国以及其他一些国家，建造标准规模的核反应堆的成本在不断上涨，这是促进SMR发展的主要动力。Buongiorno指出，现在建成一个大型核电站需要大约10年的时间，并且平均花费约为100亿美元。他说：“这种资金方面的理由极大地推进了小型核反应堆的发展。”

建造SMR可能更便宜的一个原因是，与通常为某个特定地点量身定制的大型核反应堆不同，SMR

使用的是标准组件，这些组件是由工厂制造，然后再运送到核电站进行组装[7]。SMR的支持者说，这种预制方法可以节省大量资金。例如，美国俄勒冈州的NuScale Energy公司计划在位于爱达荷州的INL建造12个SMR，每个小型核反应堆将产生60 MW的电力[8]。这些核反应堆合在一起将具有与大型核电站相同的发电能力，而该公司估计这一项目的总成本仅为30亿美元[9]。

顾名思义，SMR是模块化的，这是它们的另一个优点。它们就像串联电池一样可以被连接起来以增压输出，从而提高发电量和电力需求之间匹配的灵活性。随着电力需求的不断增长，公用事业或国家可以逐渐多建一些价格合理的小型核反应堆，而不必建造在初期需要大量资金支出的大型核电站。Buongiorno说：“你可以通过增加小型核反应堆的数量来扩建自己的能力。”

新一代小型核反应堆也可能更安全。Buongiorno说，它们总体上产生的辐射较少，而且它们的尺寸允许人们能够使用不同的策略来控制辐射并冷却核反应堆堆芯。传统的核反应堆位于安全壳内，安全壳有助于防止辐射释放。对于最先进的AP1000型号，如位于美国佐治亚州沃格特勒的两个正在建设的核电站，其钢筋混凝土盖板高82 m、宽44 m [10]。相比之下，NuScale公司的每个核反应堆正好可以被装入高25 m、宽4.6 m的鱼雷形钢制外壳中（图2）。由于该鱼雷形钢制外壳比标准的安全壳小得多，所以它的承压能力将比标准安全壳的大15倍以上[10]。

对于堆芯冷却，SMR通常依靠的是被动机制，而不是三哩岛（Three Mile Island）事故和福岛（Fukushima）事故中失效且导致核燃料过热和熔化的主动系统。海啸摧毁了福岛核电站冷却泵的备用发电机[11]。一系列错误导致三哩岛核电站的操作人员关闭了冷却泵[12]。NuScale公司的核反应堆没有利用冷却泵使水通过堆芯进行循环。相反，他们设计了一种所谓的自然循环。在这种循环中，水的密度在加热和冷却过程中不断地变化，从而使水在堆芯中不断循环[13]。NuScale公司的核反应堆位于水池中，水池有利于控制核反应堆的温度[10]。

除了NuScale这样的小型公司，Westinghouse、General Electric和Rolls Royce等这种大型公司也正在开发SMR设计。在美国，在INL的NuScale公司的核反应堆是最早投入建造的核反应堆。对于美国核管理委员会（NRC）要求的五个设计审查阶段，该公司的计划现在

已经通过了其中的三个[14]。NuScale公司还与一家公用事业财团签订了购买核反应堆电力的合同[15]，并预测其第一台核反应堆将于2026年被投入使用。其他SMR可能也会很快上线。中国的陆上SMR示范堆可能会在2025年之前被建成并投入使用[16]，而且中国的舰载SMR计划于同年投入使用[4]。

人们对SMR有很高的期望，一些对SMR持怀疑态度的人则质疑核反应堆是否能达标。他们举例称，美国在20世纪50年代和60年代公开的小型核反应堆存在着严重的安全问题，而且反应堆产生的电力价格也非常昂贵[6]。其他批评者质疑，即使SMR发展已较为成熟，但是相较于便宜的天然气发电及价格越来越合理的可再生能源，其是否还能保持竞争力呢？[17]

“它们是否经济实惠？没有人能知道。”乔治华盛顿大学公共政策和国际事务教授及NRC前主席Allison Macfarlane说道，“只有你开始建造它们，你才能知道答案。”

她说，SMR不能以一己之力振兴日渐衰颓的美国核工业。美国核工业发展过程中出现的问题是由许多因素导致的，其中包括天然气的竞争和20世纪90年代电力市场的放松管制。她还说，“我不清楚SMR是否会解决所有这些问题。”

但是Buongiorno仍指出，对于像美国这种传统核电站造价昂贵的国家，建造小型核反应堆要比在俄罗斯和中国这样的国家建造更有用，因为俄罗斯和中国的核电站建设仍在蓬勃发展。他说，在INL的NuScale公司的核反应堆性能的好坏在一定程度上将对美国能否建造更多的SMR产生重大影响。他说：“它们必须达到人们所期许的效果。如果这些早期的SMR项目也有近期成本超支和延误的情况，那么美国对SMR的建造也会停滞。”

References

- [1] Boyd J. Is the world ready for floating nuclear power stations? [Internet]. New York: IEEE Spectrum; 2019 Sep 30 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/nuclear/is-the-world-ready-for-floating-nuclear-power-stations>.
- [2] Temple J. Small reactors could kick-start the stalled nuclear sector [Internet]. Cambridge: MIT Technology Review; 2017 Jul 17 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.technologyreview.com/s/608271/small-reactors-could-kick-start-the-stalled-nuclear-sector/>.
- [3] Ridler K. Plan to build 1st small US nuke reactors in Idaho advances [Internet]. Washington, DC: Seattle Times; 2019 Jul 18 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.seattletimes.com/northwest/plan-to-build-1st-small-us-uke-reactors-in-idaho-advances/>.
- [4] Cohen A. China enters global tech race for small modular nuclear reactors [Internet]. New York: Forbes; 2019 Apr 25 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.forbes.com/sites/arielcohen/2019/04/25/china-enters-global-tech-race-for-small-modular-nuclear-reactors>.

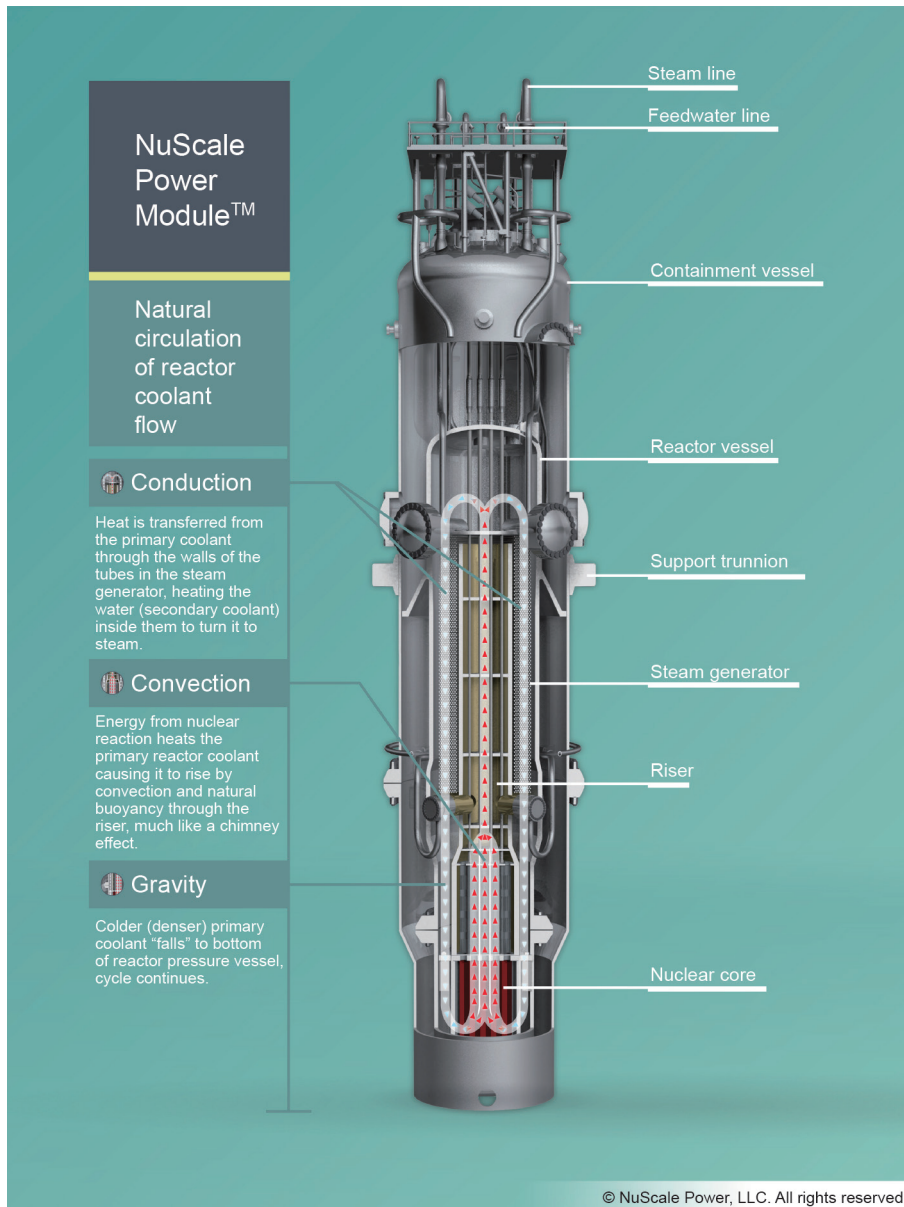


图2. NuScale公司的SMR依靠被动水循环来冷却堆芯。随着堆芯中的水越来越热，核反应堆的密度变得越来越小，并且开始从堆芯中升起来。这些水将核反应堆的部分热量传递给蒸汽发生器中的水，然后堆芯开始冷却，同时它的密度变得越来越大，最终沉到堆芯底部并开始循环。图片来源：NuScale，Wikimedia Commons（CC BY-SA 3.0）。

- [5] Xu M, Stanway D. China plans pilot nuclear reactor for heating in northeast [Internet]. London: Reuters; 2019 Jun 16 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.reuters.com/article/china-nuclear/china-plans-pilot-nuclear-reactor-for-heating-in-northeast-idUSL4N23O15A>.
- [6] Ramana MV. The forgotten history of small nuclear reactors [Internet]. New York: IEEE Spectrum; 2015 Apr 27 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://spectrum.ieee.org/tech-history/heroic-failures/the-forgotten-history-of-small-nuclear-reactors>.
- [7] Fares R. 3 ways small modular reactors overcome existing barriers to nuclear [Internet]. New York: Scientific American; 2016 May 19 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/3-ways-small-modular-reactors-overcome-existing-barriers-to-nuclear/>.
- [8] Danko P. NuScale boosts small modular reactor power, lowers electricity costs [Internet]. Portland Business Journal; 2018 Jun 6 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.bizjournals.com/portland/news/2018/06/06/nuscale-boosts-small-modular-reactor-power-lowers.html>.
- [9] Conca J. NuScale's small modular nuclear reactor passes biggest hurdle yet [Internet]. New York: Forbes; 2018 May 15 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2018/05/15/nuscales-small-modular-nuclear-reactor-passes-biggest-hurdle-yet>
- [10] Cho A. Smaller, safer, cheaper: one company aims to reinvent the nuclear reactor and save a warming planet [Internet]. American Association for the Advancement of Science; 2019 Feb 21 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.sciencemag.org/news/2019/02/smaller-safer-cheaper-one-company-aims-reinvent-nuclear-reactor-and-save-warming-planet>.
- [11] Fukushima Daiichi Accident [Internet]. London: World Nuclear Association; [updated 2018 Oct; cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-accident.aspx>.
- [12] Three Mile Island Accident [Internet]. London: World Nuclear Association; [updated 2012 Jan; cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx>.
- [13] How the NuScale module works [Internet]. Portland: NuScale Energy; [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.nuscalepower.com/technology/technology-overview>.
- [14] Hall B. NuScale marks regulatory milestone [Internet]. Corvallis: Corvallis Gazette-Times; 2019 Jul 24 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.gazette-times.com/story/news/2019/07/24/nuscale-gets-approval-to-build-plant-in-oregon/1171110001/>.

gazettetimes.com/news/local/nuscale-marks-regulatory-milestone/article_db54da42-75fc-5c19-8576-768817120ef1.html.

- [15] Stevens T. Nuclear energy project that could power some Utah cities moves forward as environmental group warns of costs [Internet]. Salt Lake Tribune; 2019 Jul 25 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.sltrib.com/news/politics/2019/07/25/nuclear-energy-project/>.
- [16] CNNC launches demonstration SMR project [Internet]. World Nuclear News;

2019 Jul 22 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/CNNC-launches-demonstration-SMR-project>.

- [17] Neuhauser A. Small nuclear passes a milestone—but does it have a future? [Internet]. Washington, DC: US News and World Report; 2018 May 23 [cited 2019 Dec 5]. Available from: <https://www.usnews.com/news/national-news/articles/2018-05-22/small-nuclear-passes-a-milestone-but-does-it-have-a-future>.