



News & Highlights

先进核燃料技术助推核能复兴

Mitch Leslie

Senior Technology Writer

2020年11月，位于美国弗吉尼亚州林奇堡的BWX技术公司宣布其已经再次开始生产一种被称为三层各向同性包覆颗粒（TRISO）的核燃料[1]。该公司设计的移动式核电站将采用此燃料[2]。在美国，不只这一家公司对TRISO核燃料的发展满怀信心，此外至少还有三家公司也在先进反应堆设计中应用了TRISO核燃料[3–4]。

然而，世界范围内并没有商用核反应堆使用此燃料。对比之下，这些公司的研究兴趣似乎很奇怪。60年前，TRISO第一次被装入核反应堆，而现在，TRISO再次进入了人们的视野。为了提升发电站的安全性，以及为了避免如2011年福岛核电站熔断事故等潜在灾害，对所谓的事事故容错燃料需求正在不断增长[5–6]，这是TRISO回归的一大原因。如果一切都按计划进行，位于美国马里兰州罗克维尔的X-energy公司将建造三十多年来美国首个TRISO商业核电站，该核电站于2027年开始发电[7]。其他国家也正在计划或修建类似设施。例如，中国山东210 MW_e的示范站内就有两个TRISO高温气冷反应堆（HTGR），于2021年后半年开始运行[4]。

对于提升反应堆燃料的安全性，全球范围内还有许多处于开发或测试阶段的安全策略，TRISO转型只是其中之一[8]。部分专家认为事故容错燃料可以让核能再度成为主流能源，他们认为这些燃料不仅能让反应堆更安全，还能让反应堆小型化、简易化以及低成本化，由此成为低碳排放能源的有力选择[9]。不过，依赖TRISO或其他事故容错燃料的新型核电站还面临着重大阻碍。建设这些核电站的公司正在部署的是未经验证的技术，且这些技术必须

在短时间内取得授权[10]。这样的核电站是否经济也尚不清楚[10]。

TRISO比传统核燃料更安全，因为铀衰变产生的许多危险裂变产物，比如氪、铯、氙、碘的同位素，都会被TRISO捕捉[11]。每个TRISO粒子直径通常为1 mm，核心由二氧化铀或铀碳氧化物组成，并有三种保护层，全称中的“三层”由此而来[4]。内层是碳缓冲层，外层则是两层高温碳和一层碳化硅（图1）[4]。为了生产可用燃料，数千个TRISO粒子被嵌入石墨，形成一个小型圆柱体或球体（即手掌大小的燃料球）（图1）[4]。

TRISO粒子的多层结构让其极为坚固[12]。在一项研究中，研究人员发现TRISO粒子在1800 °C下烘烤100 h后，依然存储了绝大部分裂变产物[13]。试验温度远高于研究人员预测的事故中HTGR核心所能达到的温度（1600 °C）[14]。TRISO还有另一项优势——TRISO通过一种叫燃耗的方式，能达到比现在80%核电站的燃料更高的能量释放比[12]。然而，TRISO燃料并非不可摧毁。这些粒子会破损、腐蚀，内部结构会退化[11]。但是，美国田纳西大学核工程专业的副教授Nicholas Brown说道：“这种燃料能在更长时间内维持更高的温度。这在事故中至关重要。”因为这样一来，操作人员便有足够时间采取措施，以冷却反应堆。虽然这些粒子很耐用，但与传统轻水型反应堆产物类似，使用过的TRISO燃料也需要存储在专门的设施里。

英国HTGR试验堆龙堆（Dragon），从1964年开始运行，至1975年结束，是第一个使用TRISO的反应堆[4]。



图1. (a) 镶嵌数千个TRISO粒子形成的燃料球(图中靠后位置)。截面图(图中靠前位置)显示了单个粒子的多层结构,其中高温碳层、碳化硅层、碳缓冲层构成保护层,覆盖于中心层二氧化铀或铀碳氧化物上。(b) 单颗燃料球的大小。来源: X-energy (公共来源)。

自20世纪60年代,工程师将TRISO应用到其他几个用于商业供电的HTGR中,但是这些反应堆不久后就关闭了。美国科罗拉多州福特圣弗兰(Fort St. Vrain)液氮冷却反应堆在1979—1989年就使用过此燃料[15]。但是由于TRISO与主流轻水型反应堆不匹配,便不再受欢迎[4]。Brown说,虽然这些商业核电站关闭了,但是TRISO的研究没有停止,今天这些技术已经更上一层楼了。他说道:“在实验室和试验反应堆中,我们在这项技术研发上不断取得突破。”例如,在研发TRISO反应堆的美国公司中,位于华盛顿州西雅图的超安全核能公司(Ultrasafe Nuclear Corporation)选择将TRISO粒子嵌入碳化硅而非石墨芯块中。该公司称,这项技术将让燃料更耐高温和辐射[16]。

包括美国在内的许多国家都对TRISO燃料兴趣高涨,其中还有一个原因就是这些国家都希望建设更小、效率更高、用途更广的轻水型反应堆[17—18]。2011年福岛核事故进一步推动了TRISO和其他事故容错燃料研究的发展。美国能源部已经启动了一项风险降低计划,旨在进一步提升核反应堆的安全性。2020年,该计划为美国五项示范项目提供3000万美元的资助,其中有两个示范项目就基于TRISO燃料[2,18]。

中国即将启动一个新型TRISO核电站。中国首次将TRISO运用于清华大学10 MW高温气冷测试反应堆(HTR-10)中,该发电站运行时间为2003—2007年[17,19]。中国山东石岛湾核电站是HTR-10的继承者,在2021年年初收到了第一批TRISO燃料球。该发电站于2021年下半年启动[4,20]。

在未来10年中,美国也将建设两个TRISO核反应堆并投入使用。加利福尼亚州阿拉梅达的Kairos Power公司目前正于田纳西州橡树岭建造一个示范反应堆,名为赫尔墨斯(Hermes)[21]。这个发电站选择氟化锂和氟化铍熔盐(总称FLiBe),而非水作为发电站的冷却剂[22]。该设

计突出了TRISO的潜在优势,如工程成本更低、工期更短(因为赫尔墨斯并不需要能覆盖核反应堆的防辐射泄露的安全外壳)。Kairos Power公司的核材料和燃料总监Micah Hackett说:“我们的安全外壳就是燃料粒子和FLiBe熔盐的组合。”

赫尔墨斯反应堆是2020年美国能源部资助的风险降低项目之一。Hackett表示,该反应堆规模仅是公司未来商业化产品的十分之一。他说:“我们想证明,我们有能力解决先进反应堆研发中最困难的问题,其中包括竣工、完成授权以及按期投入运行等步骤。”公司计划于2026年上线该反应堆。

X-energy公司于2020年10月收到了美国能源部资助的8000万美元的启动资金,用于在2027年以前投入使用一个TRISO商业反应堆[7]。公司的Xe-100设计便是一个小型模块化氦气冷却反应堆,发电量为80 MW_e[23—24]。X-energy公司将在华盛顿州部署4个TRISO发电站,预计成本达25亿美元,美国能源部将承担其中一半的成本[7,25]。中东国家约旦也同意购买4个反应堆,加拿大也可能采用此技术[26]。超安全核能公司同样建议在加拿大建设一个TRISO示范反应堆[27]。

实现TRISO的高规格安全性是需要付出代价的,这种燃料需要更高的浓缩浓度。Hackett指出,Kairos Power公司使用的燃料的U-235浓缩程度比轻水型反应堆燃料棒更高。不过,他还说:“我们可以从燃料中获取更多能量。虽然生产成本更高,但是从总体来看,成本实际上反而降低了。”

除了不断上涨的燃料成本,新型TRISO核电站还面临着其他阻碍。首先,建设这些核电站的公司都在与时间赛跑。Kairos Power公司计划在2026年以前投入使用一个示范核电站,而Hackett认为这个目标非常“激进”。X-energy公司的计划更不切实际,许多专家质疑,在美国能

源部资助的所有的先进核电站中，能否有一个可以按时准备就绪[10]。此外，即使工程成本更低，新核电站也可能没法与天然气这样传统、廉价的能源相竞争[10]。Brown还说到，对TRISO的兴趣终将会阻碍其发展，“因为公司太多，而资源太少”。

考虑到TRISO核电站的不确定性，研究人员也在探索其他增进核能安全的方法。一部分研究开始思考改变燃料构成以避免熔断[8]。还有一部分研究将眼光投向了燃料棒的外壳。锆合金外壳并不会在300℃，即反应堆正常运行的情况下发生腐蚀[8]。然而，如果温度上升，锆合金外壳就会与水蒸气发生反应，变得脆弱，且还有可能释放氢气。在福岛核事故中，老化的金属外壳产生了氢气，最终导致爆炸的发生[8]。

福岛核事故催生了不少有关新型外壳防护策略的研究，比如采用不同材料制作外壳涂层。美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的核能、等离子体以及放射工程专业的教授Brent Heuser说：“铬是涂层的最好选择。”他的团队发现，在700℃的环境下，1μm厚的铬涂层可以将外壳氧化时间推后20h。法国的研究者也发现，更厚的涂层在1200℃的环境下也可以抵御氧化[28]。Heuser认为这样的研究结果非常有利，因为有新涂层的燃料棒可以被直接应用于现有反应堆。研究人员已经在数个反应堆中对铬涂层外壳进行了试验，其他类型的外壳也在试验中[8]。研究人员还使用了多种不同的抗氧化材料制作外壳，比如铁、铬、铝合金。然而，Heuser说道：“这些材料相比传统涂层外壳，需要更为详尽的研究。”Heuser认为，升级外壳并不能阻止事故发生，但是至少可以提供一个小时以上的“处理时间”。

随着公司与政府投入大量资金，用于提升反应堆（包括TRISO燃料）的安全性，以及其他一些新项目上线，未来几年，我们将会清晰地认识到核燃料安全的重要性。

References

- [1] BWXT completes TRISO fuel line restart [Internet]. London: World Nuclear News; 2020 Nov 10 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/BWXT-completes-TRISO-fuel-line-restart>.
- [2] Delbert CI. These 5 advanced nuclear reactors will shape the future of energy [Internet]. New York City: Popular Mechanics; 2021 Jan 5 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.popularmechanics.com/science/energy/a35131133/advanced-nuclear-reactor-designs/>.
- [3] Patel S. The power interview: USNC making headway on advanced nuclear fuel [Internet]. Houston: Power; 2021 Mar 4 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.powermag.com/the-power-interview-usnc-making-headway-on-advanced-nuclear-fuel/>.
- [4] Patel S. The allure of TRISO nuclear fuel explained [Internet]. Houston: Power; 2021 Mar 1 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.powermag.com/the-allure-of-triso-nuclear-fuel-explained/>.
- [5] Oberhaus D. Nuclear “power balls” may make meltdowns a thing of the past [Internet]. San Francisco: Wired; 2020 Jun 30 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.wired.com/story/nuclear-power-balls-triso-fuel/>.
- [6] 5 things you should know about accident tolerant fuels [Internet]. Washington, DC: United States Department of Energy; 2018 Jul 17 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.energy.gov/ne/articles/5-things-you-should-know-about-accident-tolerant-fuels>.
- [7] US Department of Energy announces \$160 million in first awards under Advanced Reactor Demonstration Program [Internet]. Washington, DC: United States Department of Energy; 2020 Oct 13 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.energy.gov/ne/articles/us-department-energy-announces-160-million-first-awards-under-advanced-reactor>.
- [8] Allen M. Ten years after Fukushima: could new fuels make nuclear power safer? [Internet]. Bristol: Physics World; 2021 Feb 23 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://physicsworld.com/a/ten-years-after-fukushima-could-new-fuels-make-nuclear-power-safer/>.
- [9] These accident tolerant fuels could boost the performance of today’s reactors [Internet]. Washington, DC: United States Department of Energy; 2020 Jan 28 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.energy.gov/ne/articles/these-accident-tolerant-fuels-could-boost-performance-todays-reactors>.
- [10] Cho A. U. S. Department of Energy rushes to build advanced new nuclear reactors [Internet]. Washington, DC: Science; 2020 May 20 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.sciencemag.org/news/2020/05/us-department-energy-rushes-build-advanced-new-nuclear-reactors>.
- [11] Demkowicz PA. TRISO fuel: design, manufacturing, and performance. Report. Idaho Falls: Idaho National Lab; 2019 Jul.
- [12] TRISO particles: the most robust nuclear fuel on Earth [Internet]. Washington, DC: United States Department of Energy; 2019 Jul 9 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.energy.gov/ne/articles/triso-particles-most-robust-nuclear-fuel-earth>.
- [13] Morris RN, Baldwin CA, Demkowicz PA, Hunn JD, Reber EL. Performance of AGR-1 high-temperature reactor fuel during post-irradiation heating tests. Nucl Eng Des 2016;306:24–35.
- [14] TRISO fuels triumphs at extreme temperatures [Internet]. London: World Nuclear News; 2013 Sep 26 [cited 2021 Aug 18]. Available from: https://www.world-nuclear-news.org/ENF-Triso_fuel_triumphs_at_extreme_temperatures-2609137.html.
- [15] Kindelspire T. StFort. Vrain plant provides storied history [Internet]. Boulder: Daily Camera; 2011 Mar 20 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.dailycamera.com/2011/03/20/fort-st-vrain-plant-provides-storied-history/>.
- [16] FCM™ fuel: fully ceramic micro-encapsulated fuel [Internet]. Seattle: Ultrasafe Nuclear Corporation. c2021 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://usnc.com/fcm-fuel/>.
- [17] Advanced nuclear power reactors [Internet]. London: World Nuclear Association; [updated 2021 Apr; cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>.
- [18] Energy Department’s Advanced Reactor Demonstration Program awards \$30 million in initial funding for risk reduction projects [Internet]. Washington, DC: United States Department of Energy; 2020 Dec 16 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.energy.gov/ne/articles/energy-departments-advanced-reactor-demonstration-program-awards-30-million-initial>.
- [19] She D, Chen F, Xia B, Shi L. Simulation of the HTR-10 operation history with the PANGU code. Front Energy Res 2021;9:704116.
- [20] First fuel shipped to China’s HTR-PM project [Internet]. London: Nuclear Engineering International; 2021 Jan 13 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.neimagazine.com/news/newsfirst-fuel-shipped-to-chinas-htr-pm-project-8453226>.
- [21] Kairos Power plans Hermes demonstration reactor at Oak Ridge [Internet]. London: World Nuclear News; 2021 Jul 16 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Kairos-Power-plans-Hermes-demonstration-reactor-at>.
- [22] Technology: how it works [Internet]. Alameda: Kairos Power; c2021 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://kairospower.com/technology/>.
- [23] Leslie M. Are small reactors nuclear energy’s next big thing? Engineering 2020;6(3):210–2.
- [24] X-energy’s reactor: Xe-100 [Internet]. Greenbelt: X-energy; c2021 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://x-energy.com/reactors/xe-100>.
- [25] Cary A. Nation’s 1st advanced nuclear reactor could operate near tri-cities under new agreement [Internet]. Kennewick: Tri-City Herald; 2021 Apr 1 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.tri-cityherald.com/news/local/article250356926.html>.

- [26] Proctor D. The power interview: X-energy' s plan for sustained growth [Internet]. Houston: Power; 2021 Mar 31 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.powermag.com/the-power-interview-x-energys-plan-for-sustained-nuclear-growth/>.
- [27] Patel S. USNC' s MMR Project becomes first SMR in Canada to enter formal licensing phase [Internet]. Houston: Power; 2021 May 20 [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.powermag.com/usnc-s-mmr-project-becomes-first-smr-in-canada-to-enter-formal-licensing-phase/>.
- [28] Engineered zircaloy cladding modifications for improved accident tolerance of LWR nuclear fuel [Internet]. Washington, DC: United States Department of Energy; [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1391853/>.