

美国能源部反应堆试点计划如何促进创新

7月4日是美国能源部（DOE）反应堆试点计划（RPP）的截止日期，该计划已通过早期节点考核：三座先进试验反应堆在极为紧凑的时间表内已达到临界状态。

安塔瑞斯核能公司（Antares Nuclear）的 Mark-0 反应堆于6月4日在爱达荷国家实验室（INL）达到零功率临界。瓦拉原子公司（Valar Atomics）的 Ward 250 反应堆随后于同月在犹他州达到临界，成为首座由 DOE 授权在国家实验室系统外建造和运行的反应堆。可部署能源公司（Deployable Energy）的反应堆，作为 DOE“核能发射台”（Nuclear Energy Launch Pad）计划的一部分，于六月底在爱达荷国家实验室达到临界，成为第三座达成“7月4日”目标的反应堆。

针对 RPP，可能会存在两种狭隘的解读。支持者将其视为先进核能时代已经到来的证明：主要障碍已被打破，商业部署近在眼前，该计划展示了如何绕开核能监管的缓慢机制。批评者则可能持相反观点：这些小型试验堆中，许多仅运行于零功率或低功率状态，并非向电网供电的商业电厂；因此，该计划在很大程度上只具有象征意义。

这两种观点都未抓住要点。RPP 是对美国能否重建核能开发商创新周期的一次考验，即能否像其他所有复杂技术行业那样，在规模化之前完成“建造、测试、学习、改进”的循

环。

“并非商业反应堆？”

试点计划从未打算在 7 月 4 日前建造出商用核电站。虽然 Radiant 和 Oklo 等公司提交了“满功率”设计，但这些反应堆是在爱达荷国家实验室，而非在客户现场进行示范。

技术就绪水平（TRL）由美国国家航空航天局（NASA）首创，这一概念用于评估项目进展。现已被包括 DOE 在内的大多数行业广泛采用。TRL 的阶段如下所示：

Technology Readiness Levels		
DEPLOYMENT	TRL 9	Actual system proven through successful operations Technology deployed in final form and operated across the full range of expected conditions. Full commercial application.
	TRL 8	Actual system completed and qualified End of development. Full-scale system integrated and tested against end-user specifications. Ready to move to commercialization.
DEMONSTRATION	TRL 7	System/process prototype in an operational environment System prototype demonstrated at or near full scale, integrated with ancillary systems as a near-production-quality build.
	TRL 6	System/process model or prototype demonstration Prototype partially integrated with existing systems. Engineering feasibility fully demonstrated in high-fidelity, relevant applications.
DEVELOPMENT	TRL 5	Component/process validation in a relevant environment Thorough prototype testing in an environment relevant to the end user. Elements integrated with realistic supporting technologies.
	TRL 4	Component/process validation in a laboratory environment A standalone prototype tested in the lab demonstrates the concept. Component elements integrated and validated for feasibility.
RESEARCH	TRL 3	Analytical and experimental proof of concept Proof of concept validated through analytical and laboratory studies. Technical feasibility shown with immature prototype implementations.
	TRL 2	Technology concept and/or application formulated Applied research focuses theory on a specific application. Analytical tools developed for simulation and analysis.
	TRL 1	Basic principles observed and reported Scientific phenomenon identified and validated through peer-reviewed research. Ready to move from scientific to applied research.

RPP 帮助反应堆从 TRL 3 级推进到 TRL 5 级或 6 级。许多核电项目曾试图跳过 TRL 5-7 级，直接进入 TRL 8 级，即在现实世界中测试验证过的全面项目。对核能行业而言，这正是棘手之处：当设计概念作为首个商业项目，在实际运行

时进行首次真正测试，每一个未解决的技术、建造、运营或监管问题都会在最昂贵的时刻暴露出来。

RPP 不会让这些反应堆一夜之间变成商业产品。但通过将真实的硬件、运营、安全论证和测试数据更早地引入流程，使开发商在技术成熟度上更进一步。这不是商业化，但却是迈向商业化的必要一步，是近代历史中缺失的一步。

“这纯粹是公关作秀？”

一定程度上来讲，的确如此。7 月 4 日是美国建国 250 周年纪念日，这一节点的选择当然是为了扩大影响，而非匹配特定需求的时间表。但公司炫耀成绩是常态。如果这才是真正目的，那营销代价未免过于高昂。投资者的热情可以理解，因为他们在多年来只停留在纸面反应堆而备受诟病的领域里，看到了实实在在的进展。对某些开发商而言，这一截止日期起到了推动作用，促使他们摒弃核工业典型的十年开发周期。对另一些开发商来说，从众多开发者中被选入试点计划本身就是很好的公关。

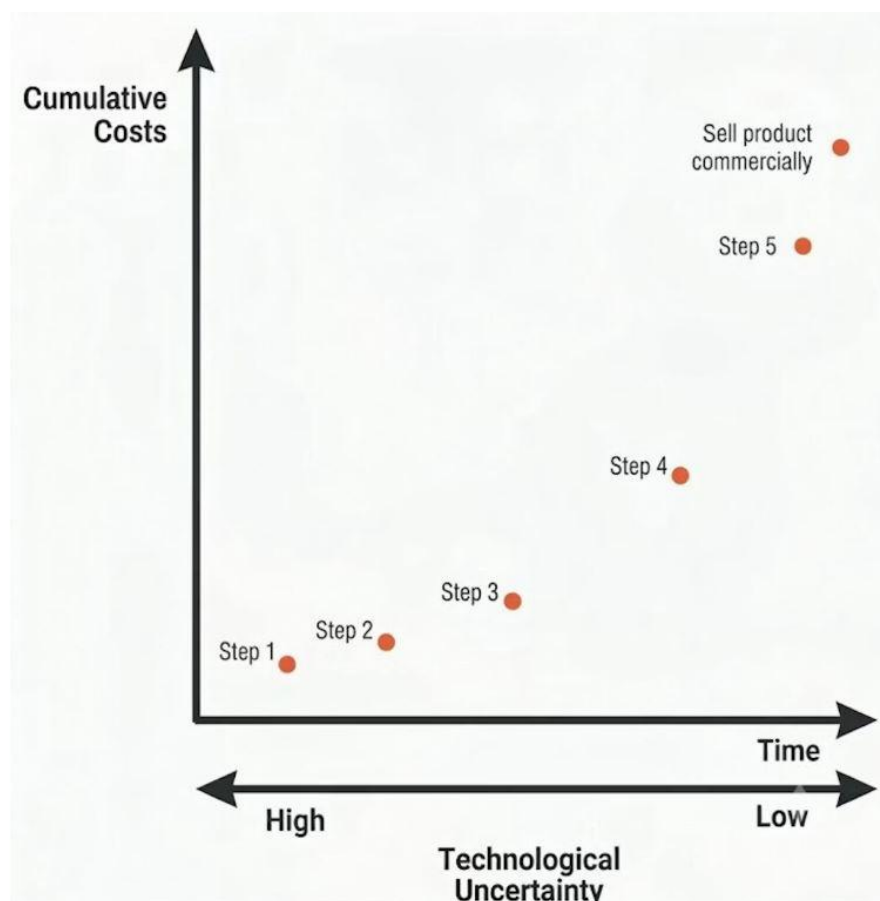
公司必须权衡参与 RPP 和原型建造的成本与价值，而正如一开始就宣传的那样，其价值不包括向客户销售，但确实可以向投资者和大众展示成果。

在经历了多年停滞，以及上一个重大项目——沃格特勒（Vogtle）核电站 3 号和 4 号机组——出现重大问题之后，有些人淡化 RPP 的重要性。认为没有人应该从过去的示范和

随后的商业产品（如首次成功着陆的可重复使用火箭，或首台交流发电机、无线充电，或胡佛水坝的竣工）中获得启发，这种说法有些荒谬。这些显然不仅仅是为了公关。

“这一步是不必要的？”

原型并不总是必要的，但设计精良的原型总是有用的。美国在反应堆原型制造方面拥有丰富经验。美国开发商也建造了多台首堆商业项目。有些运行不佳，最终在短暂运行后退役。挑战在于，从项目一开始就要确定下图中哪一步是不必要的。



几乎所有技术或机械产品都有其前身原型。预期的价值——如建立供应链、增加公司知识、寻找创新机会，以及最

重要的是在生产前发现问题——必须与金钱和时间成本相权衡。从会计角度看，很难为原型制造的多数益处赋予具体数字。即使是项目风险降低也难以定义。随着项目风险容忍度的降低，为消除障碍支付费用的意愿变强。大多数核电项目风险容忍度极低，并希望获得按时、按预算交付的保证。相反，零部件和劳动力的成本更容易用美元衡量。再加上试验反应堆许可和审批的不确定性，很容易证明原型制造的成本高于其节省的成本。换言之，我们可以评估成功项目的潜在回报，但无法真正评估随之而来的项目风险。风险/回报关系是不可知的。

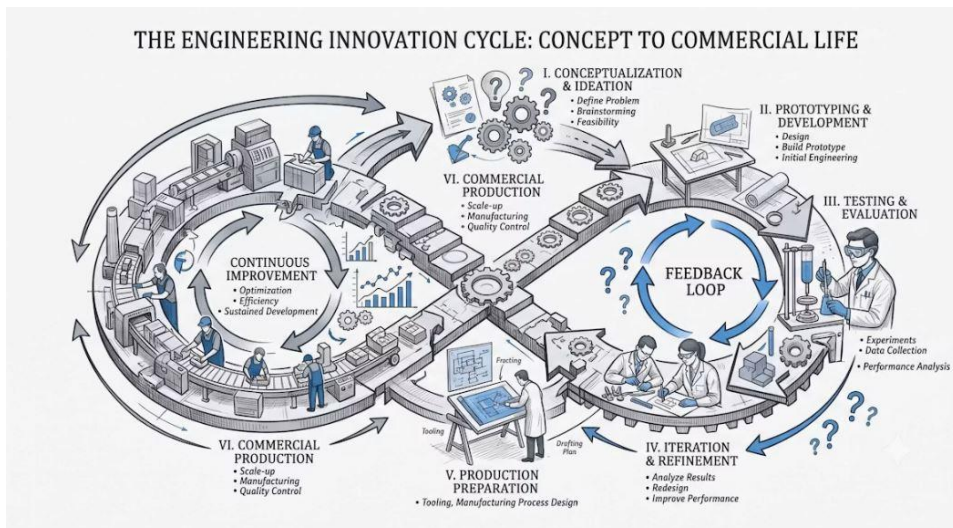
大多数以创新闻名的大公司使用成本效益分析来决定哪些概念应受到关注，但几乎从不以此为依据跳过原型阶段。对于安全至关重要的产品尤其如此，如车辆、药品、制造设备或消费电子产品。

这种方法对于大型反应堆来说具有挑战性。建造反应堆耗时数年，耗资数十亿。如果仅作为研发支出而无法售电，很难论证其合理性。如此一来，第一个客户成为了测试案例，设计改进后再出售给下一个客户。沃格特勒项目之后，买家已拒绝这种方式。小型反应堆的原型更容易制作，就像波音公司可以建造原型飞机来测试制造和运营，然后才最终敲定可投产的设计。

RPP 如何融入创新周期？

创新周期对大多数人而言太过抽象，关于创新的概念层出不穷。人们很容易发出这样的疑问：“为什么不直接制造最终产品呢？”但这种想法轻视了技术创新的不确定性，以及创造新事物所需的努力。

创新周期是一项技术通过反复的设计、测试、学习和改进，从概念走向产品的过程。开发者从一个想法开始，对其工作原理进行建模，测试其部件，构建更大的集成系统，识别失败或性能未达预期的部分，更改设计或制造工艺，然后在更高的成熟度级别重复该循环。不仅核能领域如此。



开发者需要了解当部件组装在一起、操作员使用规程、仪表收集数据、施工顺序遇到现场条件、以及系统在真实安全论证下接受审查时，设计会如何表现。在制造和建造原型时，会发现许多挑战。在原型阶段，这一问题还是次要的，但如果是在建造一个商业项目，就不得不停工了，损失大量工时来解决问题，可能还需要寻求监管机构批准，然后再继续推进。在沃格特勒增加两台 AP1000 反应堆的过程中，多

次发生这种情况。

在建造这一阶段，需要投资建造完整商业产品所需的设备、劳动力和流程。这一步无可替代。

一个零件在模型中可能看起来完美，但在制造中，总会出现边缘毛刺，需要手工去除。一个来自供应商的零件可能超出公差范围而无法安装，导致需要垂直整合该部件的生产。一个装配顺序在技术上可能可行，但在现场却不切实际。一个施工步骤可能需要与预期不同的工具、程序或劳动力计划。这些正是原型应该在商业项目被迫承受这些问题之前发现的问题。

有很多事情是无法通过建模完成的。冷却剂测试回路或单个部件的循环测试能提供非常有价值的部件级数据，但无法提供系统级数据。集成效应测试就是为实现此目的而创造的一个例子。通过完整的系统，可以测试在部件层面无法完全验证的流程：调试、启动、运行和监控、监管、瞬态和模拟故障模式。凯洛斯公司（Kairos）多年来一直致力于此，从非核工程测试单元到他们的首座核反应堆赫尔墨斯（Hermes）。但凯洛斯在他们的原型迭代中吸取了许多重要教训，并进行垂直整合，避免未来问题的发生。

原型制造是使商业化成为可能的基本步骤。核能行业之所以放弃反应堆原型制造，是因为对于监管成本高的大型反应堆来说，这是一种昂贵的选项。对原型的需求并未消失，

而是实现需求的机会变得更难合理化。

对 RPP 的整体看法

RPP 的成功不应仅以三座反应堆是否在 7 月 4 日前达到临界来衡量。这一里程碑固然重要，但更关键的问题是，该计划是否帮助美国重建了一个实用的核能创新周期：能产生有用数据的原型、可复刻的 DOE 授权途径、能在利用 DOE 经验的同时保持 NRC 独立审查许可，以及能将早期测试结果转化为更安全、性能更好、商业可行性更高的产品的开发商。

狭义角度来看，RPP 可能显得微不足道或过于初步。但从整体看，它是核能部署生态系统更大转变的一部分。DOE 为试验堆创建了快速通道。开发商为早期核原型投入了硬件、资金和团队。监管机构被要求更仔细地思考测试、授权和商业许可应如何互动。政策制定者已开始将核能部署视为一项严肃的国家优先事项，而非遥远的愿景。

RPP 应放在这个大系统中去理解。核能部署依赖于许多不可替代的要素：试验堆、商业许可、燃料供应、制造、融资、客户需求、监管现代化和劳动力能力。一个领域的进步不能解决其他领域的问题，但可以使整个系统更有能力。对 RPP 的狭隘看法忽略了这一点。将其视为重建核能部署条件的更广泛努力中的一个组成部分时，其价值最为清晰。

公司进入 RPP 计划的原因各不相同，下一阶段可能并不

适合每个技术目标、商业模式或开发时间表。这不应被解读为失败。一个有用的原型路径应帮助公司确定下一步需要什么，无论是在 DOE 授权下继续测试，转向 NRC 许可，进行更多设计工作，更换厂址，还是转向不同的市场。

RPP 的影响也可能超出最初的参与者。可部署能源公司（Deployable Energy）通过 DOE 新的“核能发射台”计划达到临界，表明该试点有助于建立一个更广泛的概念：先进反应堆开发商需要一条更快、更实用的途径来建造和测试真实系统。“发射台”计划现在是检验这一概念能否成为一种常态化能力，而非一次性截止日期演练的试金石。

RPP 从来无法解决先进核能面临的所有障碍。但 RPP 确实挑战了一个人们太容易接受的现状：核能开发商必须从纸面设计和部件测试直接进入完整的商业许可，两者之间几乎没有反应堆原型制造的空间。

对外合作部 李安琪 供稿

摘自突破研究所官网

文章内容不代表本公众观点