



The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World

AN INTERDISCIPLINARY MIT STUDY

Executive Summary

核能在限碳排世界中的未来

MIT 跨领域研究报告

执行摘要

Translation by Prof. Ning Li (Xiamen University) and Dr. Guanyu Su (MIT)

和平驾驭核能是 20 世纪最惊人的科技成就之一。医药、安全和能源都获益于核能。然而，经过数十年的快速发展，核能投资在很多发达国家都已经停滞，核能在全世界初级能源生产中占比仅达微薄的 5%。

在 21 世纪中，世界面临新的挑战。在为数十亿人口扩大能源应用和经济机遇的同时，必须大幅降低温室气体的排放。电力被广泛认为是深度低碳化的早期候选行业。我们审视了其中的挑战。在大多数区域，如果要在 2050 年供应预期的负荷，同时降低排放，需要有不同于现有系统的发电资产组合。虽然可以通过不同的组合使用多种低碳或零碳技术，我们的分析展示了核电作为可调度低碳技术的潜力。如果没有核电的贡献，要达到深度减排目标的成本将大幅上升（见图 E1，左栏）。成本最低的组合中包含核电为其重要组成部分，其比例随着核电成本下降而显著提高（图 E1，右栏）。

即使有这样的希望，核能在世界很多地方的扩张前景仍然明显黯淡。最根本的原因是成本。在近数十年中，其他发电技术变得更廉价了，而新建核电站的成本则只在上升。这个令人担忧的趋势削弱了核能的潜在贡献，增加了深度低碳化的成本。我们在这项研究工作中审视需要做些什么来阻止和逆转这个趋势。

我们调研了全球近期的轻水堆建造项目，并广泛针对开发中先进核电站概念和设计，审视了近期可以应用于核电站建造的交叉技术进步。对于新建核电站成本的顾虑，我们建议：

(1) 更注重运用已得到实践验证的项目管理和建造管理方法，提高建造和交付新核电站的成功率。

近期在美国和欧洲的核电站建造经历显示了在预算内按期交付电站能力方面的反复失败。以下几项改进急需得到采纳：（a）在开工建造前完成更多的详细设计；（b）使用得到验证的供应链和技能熟练的团队；（c）在早期把制造方和建设方纳入设计团队，保障设计的系统、结构和部件可以在相关标准下有效制造和建设；（d）任命一个有管理几个独立子合同方经验的主合同管理方；（e）建立一个合同架构，保证所有合同方都在项目的成功中有利益所得；（f）启用灵活可变的监管环境，可以及时接纳小规模、不可预计的设计和建造变更。

(2) 从粗笨、高场址依赖性的现场施工型电厂，转向更系列化制造的标准电站。

大幅降低新建核电站成本并缩短工期的机会是存在的。首先，多个标准化机组的部署，特别是在同一场址，使得每台机组的建设均可积累可观的经验。在美国和欧洲，在现场建造效率较低的美国和欧洲，我们建议扩大使用工厂制造，以便于利用制造业在出产复杂系统、结构和部件方面的高生产率。采用一系列交叉技术，包括在工厂和船坞内的模块化建造，先进的混凝土方案（如复合钢板、高强度钢筋、超高性能水泥等），地震隔离技术和先进的厂房布局（如埋置、离岸选址等），可能对新核电站的成本和进度有正面影响。对于不太复杂的系统、结构和部件，或者在现场施工效率高的场址（如在亚洲），常规方法可能是最低成本方案。

这里要强调的是以上建议广泛适用于所有反应堆概念和设计。降低成本的机遇适合改进型的三代轻水堆、小型模块堆（SMR）和四代堆¹。如果没有标准化设计和建造方法的创新，我们不相信任何先进反应堆的固有技术特征可以使得成本下降到足以与其它发电技术相竞争的水平。

在高成本之外，公众对传统二代核电站的严重事故后果（如 2011 年日本福岛核电站）的担忧阻碍了核能的发展。这样的担忧导致某些国家完全放弃核电。为解决安全担忧，我们建议：

（3） 转向采用具备固有和非能动安全性的反应堆设计。

具有高化学和物理稳定性、高热容量、负反应性反馈和高裂变产物包容性的堆芯材料，以及只需少量或无需应急交流电和最少外部干预的工程化安全系统，有可能简化操作，更能容忍人因差错。这样的设计改进已经出现在中国、俄罗斯和美国建造的某些三代轻水堆中。非能动安全设计可以降低发生严重事故的概率，并且在发生事故后缓解厂外后果。这样的设计也可以让新厂的执照申请变得更加容易，加快在发达和发展中国家的部署。我们认为先进反应堆中如基于轻水堆的小型模块堆（如 NuScale）和成熟的四代堆（如高温气冷堆和钠冷快堆）也具有这种设计特征，并已能够进行商业化部署。更进一步，我们对美国和国际监管环境的评估表明现有的监管系统有足够的灵活性来容纳对这些先进堆设计的执照申请。对现有监管框架的一些改动可以提升执照申请的效率和有效性。

最后，还需要政策制定者的关键行动来取得核能的收益：

（4） 低碳化政策应创造一个公平竞争环境，允许所有低碳发电技术择优竞争。

核能创新领域的投资者必须看到按全价值销售其产品获得利润的可能性，包括市场外部减少二氧化碳排放的价值。排除核能角色的政策会阻止对核技术的投资。这会增加低碳化的成本，放慢缓解气候变化目标的进度。把二氧化碳排放成本纳入电价可以更加公平的体现气候友好能源技术的价值。既有和新建核电机组将会成为平等竞争环境的获益者。

（5） 政府应建立反应堆场址，让相关公司部署原型堆用于针对监管执照申请的测试和运行。

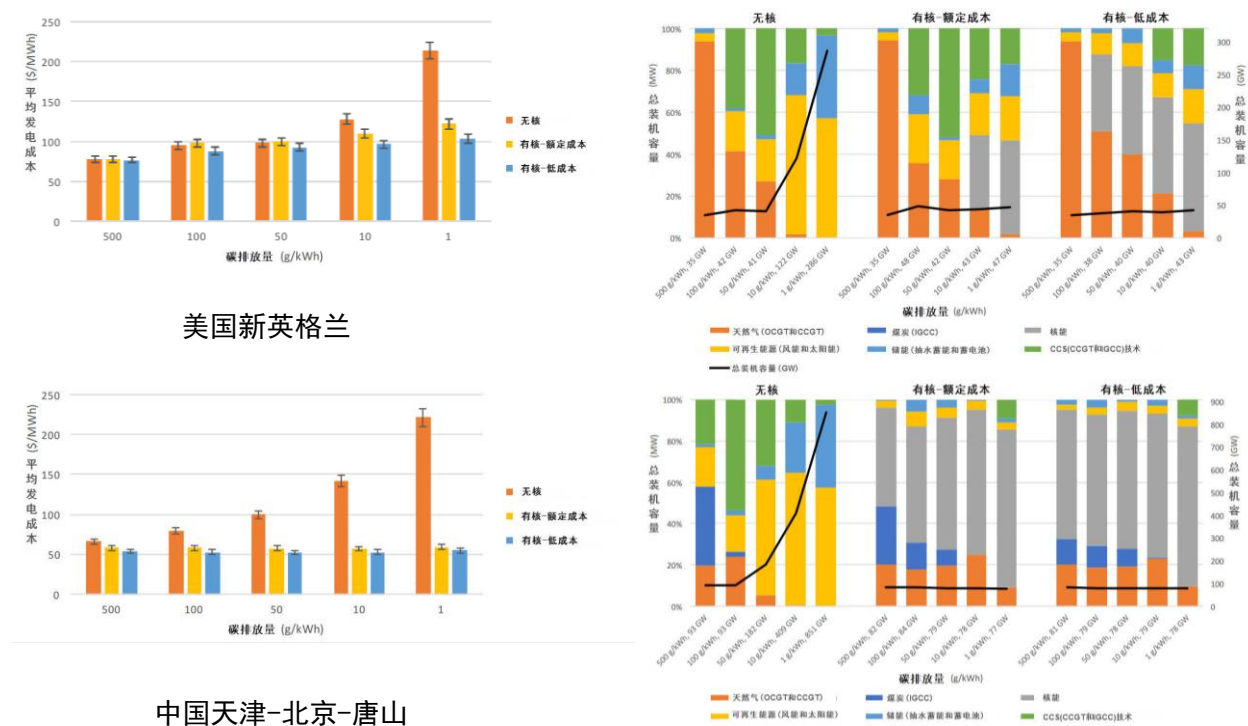
这样的场址应该向选择多种反应堆概念并有兴趣测试原型堆的公司开放。政府应该提供合适的管理和支持，包括安全协议、基础设施、环保核准和燃料循环服务，并且直接参与到所有测试中。

（6） 政府应该围绕先进反应堆设计的原型堆测试和商业化部署建立资助项目，采用四种杠杆：（a）摊分监管执照申请费用的经费；（b）摊分研发成本的经费；（c）资助为达到特定技术里程碑节点的经费；（d）奖励成功示范新设计的生产信用经费。

¹反应堆设计通常被划分为四代。建于 1950 到 1960 年代的最早商业核反应堆划为第一代系统。第二代系统包括在 1970 到 1990 年代建造的商业反应堆。第三代反应堆是在二代系统上采纳了渐进改进的商业设计。第四代核能系统用于表示非水冷却、正在开发中的一类先进反应堆设计。

在开展本研究的过程中新的发现层出不穷。在报告概论和主体中有对这些发现的详细讨论。报告由 5 个重大主题领域组成（含相应章节标题）：核能的机遇，核电站的成本，先进反应堆的技术评价，核工业的商业模式和政策，核反应堆的安全监管和执照申请。

图 E.1: 2050 年的（左）平均系统电价（\$/MWh_e）和（右）核电装机容量（占峰荷百分比%），分别在美国的新英格兰区域和中国的天津-北京-唐山（T-B-T）区域，根据所受碳约束的不同（gCO₂/kWh_e），在三种不同的可获得技术情景中：（a）没有核电，（b）允许有正常隔夜建造成本的核电（新英格兰每千瓦\$5,500，T-B-T 每千瓦\$2,800），和（c）允许有隔夜建造成本改进的核电（新英格兰每千瓦\$4,100，T-B-T 每千瓦\$2,100）。



本研究使用名为 GenX 的 MIT 系统优化工具进行模拟。对于特定的电力市场，模拟所需输入参数包括所有发电厂（核电，具有电池存储的风电和太阳能，有/无碳捕集的化石能源）的每小时电力需求，每小时天气模式，经济成本（资金，运营和燃料），以及它们的增长率。GenX 模拟能鉴定出一套电气系统发电组合，使得每个市场平均系统电力成本得到最大限度地降低。在严格限制碳排的无核能情形，我们所看到的成本上升主要来自于额外的扩建和能源存储成本，这在完全依赖可变可再生能源技术的情形中变得十分必要。当前世界电力部门的平均碳排放强度约等价于每千瓦时 500 克二氧化碳 (g/kWh_e)；根据国际能源署 2017 年制定的稳定气候变化的方案，为了将全球平均变暖限制在 2 °C，电力部门的碳排放强度目标应该为 2050 年 10 到 25 g/kWh_e，以及 2060 年不超过 2 g/kWh_e。