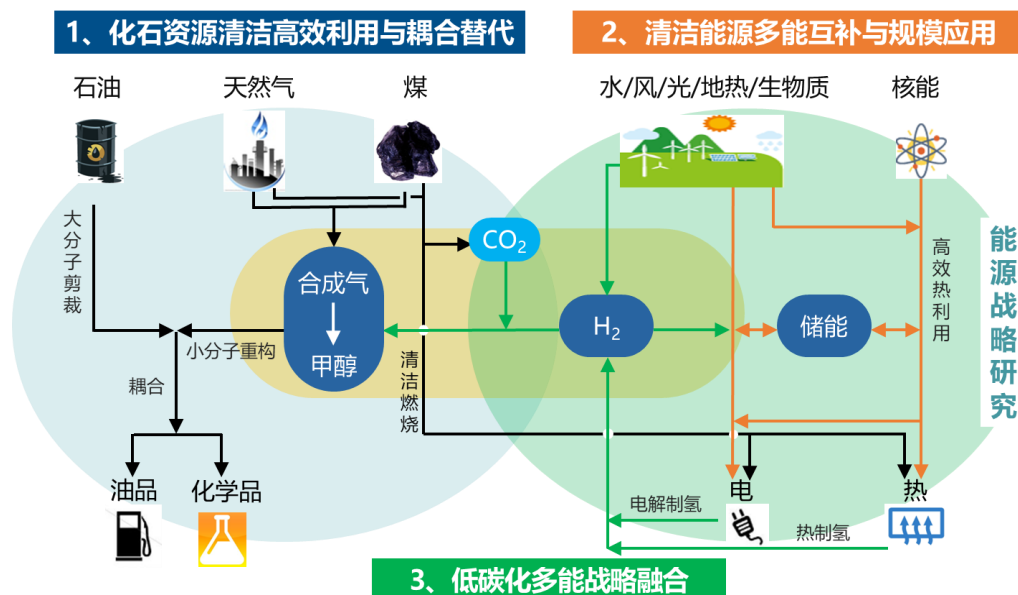




洁净能源科技动态监测快报

2020 年第 10 期（总第 12 期）



本期看点

- DOE 投入 1.22 亿美元启动煤炭提取稀土等原材料多年期计划
- 美国大西洋理事会评述核能创新对美国国防的影响
- 法国公布国家氢能战略未来十年投入 70 亿欧元打造氢能经济
- 日本 NEDO 部署新项目加速燃料电池普及和规模化应用
- IEA 能源技术展望：评估技术方案 2050 年实现净零排放
- BP 能源展望 2050：可再生能源引领能源转型 氢能作用日益凸显

目 录

2020 年第 10 期 (总第 12 期)

◆ 化石资源清洁高效利用

- DOE 投入 1.22 亿美元启动煤炭提取稀土等原材料多年期计划 2
- DOE 投入 7200 万美元支持碳捕集技术研发..... 3
- 通用电气公司宣布退出新建煤电市场 5

◆ 清洁能源多能互补

- 美国大西洋理事会评述核能创新对美国国防的影响..... 6
- DOE 探索人工智能技术在核聚变研究领域的应用潜力..... 9
- ARPA-E 投入 1650 万美元支持生物燃料供应链开发..... 9
- 小分子有机太阳能电池转换效率突破 15%创造世界纪录 10
- 德科学家首次实现太空环境钙钛矿和有机太阳能电池性能测试.....11

◆ 低碳化多能融合

- 法国公布国家氢能战略未来十年投入 70 亿欧元打造氢能经济..... 14
- DOE 资助 3400 万美支持小型 SOFC 发电系统研发..... 15
- 日本 NEDO 部署新项目加速燃料电池普及和规模化应用 16
- 热敏性晶体材料助力热化学电池创造相对卡诺循环效率纪录..... 17

◆ 能源战略研究

- IEA 能源技术展望: 评估技术方案 2050 年实现净零排放 20
- BP 能源展望 2050: 可再生能源引领转型 氢能作用日益凸显 31

本期概要

美国能源部 (DOE) 宣布资助 1.22 亿美元启动“煤炭、稀土和关键原材料 (CORE-CM)”主题多年期 (2021-2023) 研发计划，聚焦 6 大主题领域，包括：盆地关键矿物资源评估；开发矿产废弃物再利用技术；围绕基础设施、工业和商业发展状况设计盆地开发战略；盆地资源开发利用技术评估、开发和现场测试；建设技术创新中心；利益相关方知识宣传和教育。该计划旨在开发从煤炭及其副产品提取回收关键原材料的先进技术，以从美国丰富的自然资源中高效经济地提取回收稀土、锂等高价值关键原材料，以确保美国关键原材料的供应安全。

美国大西洋理事会全球能源研究中心发布《核能技术创新：对美国国防的影响》简报，系统分析了核能创新对美国国防的影响：小型模块化反应堆 (SMR) 和微型核反应堆 (MNR)，可以为某些军事设施提供可靠、灵活的电力，为先进的武器系统提供动力，支持美国国防核不扩散目标从而实现国家安全任务。发展下一代核能技术的最大障碍之一是资金缺乏问题。因此美国国防部 (DOD) 的核能技术采购力，是维持美国核电技术和产业领先重要支撑力量。因为 DOD 采购 SMR 和 MNR 有助于加速新反应堆技术的示范化和商业化。SMR 和 MNR 在美国军事上的应用潜力巨大，主要体现在：能够为美国军事基地和设施提供可靠和安全的电力；为定向能武器供电；为太空飞行和太空基地提供能源。

法国生态转型与团结部发布《法国发展无碳氢能的国家战略》，计划到 2030 年投入 70 亿欧元打造氢能经济，明确提出三大目标：(1) 到 2030 年新建 6.5 吉瓦的电解制氢装置；(2) 发展氢能交通，尤其是用于重型车辆，从而到 2030 年减少 600 万吨 CO₂ 排放；(3) 提升工业部门竞争力，促进就业，到 2030 年通过发展氢能直接或间接创造 5-15 万个就业岗位。

日本新能源产业技术综合开发机构 (NEDO) 宣布将在 2020-2024 年间开展主题为“燃料电池大规模利用的官产学研联合研发项目”，重点聚焦三大主题领域，包括：基础技术开发、先进的氢能利用技术开发和燃料电池多用途应用技术开发，解决燃料电池商业化应用面临的一系列技术挑战 (如耐久性、成本问题)，以在 2030 年后实现燃料电池的规模化商业应用，助力日本氢能社会构建。

国际能源署 (IEA) 发布《能源技术展望 2020》报告，系统评估了一系列不同的清洁能源技术方案，以寻求在确保能源系统弹性和安全性的同时于 2050 年左右实现净零排放的可行方案：在政策的推动下，全球能源系统结构持续向清洁能源转型。过去 20 年能源技术变革显著加快，但 2019 年清洁能源在全球能源结构中的份额仍不到 1/5，全球要想在 2050 年左右实现净零排放需要加大清洁能源发展力度。在可持续发展情景中，到 2070 年能源部门要实现净零排放，就必须进行根本性的技术变革。除能效和可再生能源作为核心支柱外，还包括：终端部门广泛电气化；碳捕集、利用和封存 (CCUS)；氢能及相关燃料；生物能。

英国石油公司 (BP) 发布《世界能源展望 2020》报告，对至 2050 年的全球能源发展进行了预测：到 2050 年，所有部门的能源消费均会有所增长，但增速将减缓；工业部门能源消费向发展中经济体和低碳能源转变。发展中国家生活水平的提高将促使建筑部门用电量增加。交通运输部门能源消费增长放缓，石油消耗在 2020 年代中后期达到顶峰。氢能将扮演越来越重要的角色。全球能源消耗和碳排放量的地区差异缩小，但全球仍将存在严重的能源不平衡状态。

化石资源清洁高效利用

DOE 投入 1.22 亿美元启动煤炭提取稀土等原材料多年期计划

9月22日，美国能源部（DOE）宣布资助1.22亿美元启动“煤炭、稀土和关键原材料（CORE-CM）”多年期（2021-2023）研发计划¹，旨在整合国家实验室、高校和私营企业研究力量，开展联合攻关开发从煤炭及其副产品高效经济地提取回收稀土、锂等高价关键原材料的先进技术，以确保美国关键原材料的供应安全，同时充分挖掘自然资源的经济价值。该多年期计划将聚焦六大主题，具体内容如下：

1、盆地关键矿物资源评估

对含有煤炭、稀土元素和其他关键矿物资源的盆地开展资源评估和物理特性描述，进而综合利用旧数据和新数据开发地质分析模型，以为后续的资源开发奠定知识基础。

2、开发矿产废弃物再利用技术

针对矿产资源加工和利用过程中产生大量的废弃物（如尾矿、煤矸石、废石、废土等），发展相关的处理加工技术，如经过选矿、冶金等再加工处理，从中进一步回收高价值的组分（如稀土元素、碳基产品等）。开展相关的研发计划来弥补目前矿产废弃物加工再利用技术存在的知识和技术差距，以解决该技术应用存在的挑战。

3、围绕基础设施、工业和商业发展状况设计盆地开发战略

系统评估含有丰富矿产关键原材料盆地的区域基础设施、工业和商业发展现状和潜力（如基础设施需求、经济发展挑战和供应链缺口）并制定战略，以更好地指导盆地丰富的矿物资源开发利用来促进当地就业和经济社会发展。

4、盆地资源开发利用技术评估、开发和现场测试

开发一系列的盆地资源开发利用技术评估、开发和现场测试，包括：（1）盆地煤炭、稀土等矿物资源可持续开采技术开发；（2）稀土、锂、镍等关键矿物资源的高效分离纯化工艺；（3）将煤炭、稀土等矿物资源转化为高价值中间产品和最终产品的技术；（4）对上述技术进行实地测试，推进其商业化应用进程。

5、建设技术创新中心

创建一个由公私合作共同运营的技术创新中心，为新开发的矿产资源开发利用技术提供一个实验室规模的验证平台，以验证其技术经济性，减少技术市场化面临

¹ Department of Energy Announces \$122 Million for Regional Initiative to Produce Rare Earth Elements and Critical Minerals. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-122-million-regional-initiative-produce-rare-earth-elements-and>

的潜在风险，加速推进新技术的商用进程。

6、面向利益相关方的知识宣传和教育

针对盆地资源开发利用的各利益相关方，开展必要的知识宣传和教育活动，如对盆地开发商宣传盆地经济发展最佳实践，对技术人员、中等技能工人和科学、技术、工程和数学（STEM）专业人员开展盆地资源开发利用技术的教育和培训工作，以更好地推动盆地经济发展。

（郭楷模）

DOE 投入 7200 万美元支持碳捕集技术研发

9月1日，美国能源部（DOE）化石能源办公室宣布在“碳捕集、利用与封存”计划下资助7200万美元²，支持27个碳捕集技术研发项目，旨在降低发电、工业领域化石能源使用产生的碳排放，确保美国能够继续利用其化石燃料资源获得清洁安全的能源。本次资助项目聚焦两大主题领域，包括：煤/天然气烟气中碳捕集的工程规模测试以及工业源碳捕集的初步工程设计；直接空气碳捕集技术的创新研究和开发。主要内容如下：

一、煤/天然气烟气中碳捕集的工程规模测试以及工业源碳捕集的初步工程设计
该领域将投入5100万美元支持9个研发项目，具体包括如下子领域：

1、工业源的 CO₂ 捕集和压缩（600 万美元）。①设计一种从炼钢厂高炉烟气中捕集 CO₂ 的工业规模碳捕集系统，能够捕集 50%-70% 的碳排放，以开发钢铁行业低碳技术；②采用基于吸附剂的燃烧后碳捕集技术，对水泥生产设施的碳捕集系统进行初步工程分析设计，以从水泥窑和天然气蒸汽发生器的烟气中去除 CO₂，目标是实现捕获能力达 200 万吨/年的碳捕集系统；③为水泥厂进行初步工程设计，以使用基于膜的商业规模碳捕集技术，该技术此前已经通过了小型工程规模的测试和研究；④用于林德蒸汽甲烷重整制氢工厂的林德-巴斯夫先进燃烧后捕集系统的初步工程设计，该系统将用于洛杉矶康沃尔特的制氢厂（世界最大蒸汽甲烷重整制氢工厂之一），实现从烟气流中回收至少 90% 的 CO₂。

2、乙醇工厂的 CO₂ 捕集和压缩（150 万美元）：①进行用于乙醇生产设施的混合碳捕集系统的初步工程设计，并评估改造乙醇工厂的费用。将开发一种新型碳捕集系统，包括了生物处理过程中的碳捕集和压缩，以及利用胺吸收技术捕集天然气锅炉产生的 CO₂，目标是具备年处理 20 万吨 CO₂ 的能力。

3、天然气烟气的碳捕集测试（2600 万美元）：①基于燃烧后碳捕集技术设计、建造、调试和测试工业规模的天然气碳捕集工厂，将在加利福尼亚油田的实际条件下至少运行两个月的连续稳态测试，收集数据以进一步扩大碳捕集规模；②天然气

² Department of Energy Invests \$72 Million in Carbon Capture Technologies.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-invests-72-million-carbon-capture-technologies>

联合循环发电厂（NGCC）的烟气流中示范具有增强稳定性的低成本新型溶剂碳捕集技术，将设计、建造和运行一个工程规模的试验系统，每天将吸收 10 吨 CO₂。

4、燃煤烟气或煤和天然气烟气的碳捕集测试（1800 万美元）：①燃烧后碳捕集的新型贫水溶剂的工程规模测试，将开发一种经济有效的合成溶剂方法，在国家碳捕集中心进行 0.5 兆瓦规模的测试，随后进行改进以用于在煤和天然气电厂烟气中进行测试，并对在电厂全面部署进行技术经济分析以及环境健康和安全风险评估；②用于碳捕集的新型膜技术工程规模设计和测试，将设计和建造一个工程规模碳捕集系统，连续稳定运行测试至少两个月，收集数据以进一步扩大规模，目标是实现 DOE 的新型碳捕集性能目标，即以 30 美元/吨的成本产生纯度达 95% 的 CO₂。

二、直接空气碳捕集（DAC）技术的创新研究和开发

该领域将投入 2100 万美元支持 18 个研发项目，具体包括：（1）使用新型结构化吸附剂进行 DAC，设计建造和运行一个捕集能力为 30 千克/天的 DAC 系统，在可再生能源发电厂进行现场测试，收集实际条件下新工艺和材料的运行数据，用于技术经济性和生命周期分析；（2）开发用于 DAC 的先进集成网状吸附剂涂层系统，将金属有机框架（MOF）吸附剂和吸附剂粘结剂浆液涂料相结合，用于空气中的碳捕集；（3）开发和测试 MIL-101(Cr)基吸附剂，以粉末形式存在于聚合物/MOF 复合纤维中和整料表面；（4）示范连续移动的 DAC 系统，对其特有的机械组件进行原型设计并完善工艺，评估对材料寿命的影响，并进行成本评估，确定关键性能指标；

（5）进行 DAC 新方法的碱度波动实验，将示范从空气中直接捕集 CO₂ 并释放至浓缩 CO₂ 环境中的新方法，该方法涉及低成本碱性水溶液碱度的变化；（6）开发用于 DAC 的高渗透性、超薄选择性混合聚合物膜，通过实验和过程模拟，研究膜性能（厚度、渗透性、选择性等）和处理条件（温度、压力、湿度、气体成分、流速等）的影响；（7）利用计算工具、材料表征和实验室规模测试来优化吸附剂材料，以确定其在 DAC 运行条件下的性能，与当前最先进 DAC 技术相比，将大大减少系统的能源需求；（8）设计、制造和现场测试直接从空气中捕集 CO₂ 和水的系统；（9）开发用于 DAC 的可调、快速吸收的氨基聚合物气凝胶吸附剂，该固体吸附剂将达到 4 毫摩尔/克的平衡吸收容量、0.15 毫摩尔/克/分钟的吸收速率，且其抗氧化性是最先进的聚乙烯亚胺的 7 倍；（10）开发一种创新的吸附剂结构，可以将胺吸附剂置于多孔电纺纤维中的分级纳米多孔胶囊结构中；（11）开发用于 DAC 的先进固体吸附剂，将开发两种不同的新型材料（MOF 和含磷树状大分子），具有耐用、高容量、可再生等优点；（12）扩大 DAC 系统规模并整合已通过实验室验证的固态胺 CO₂ 吸附-脱附接触器技术，最终目标是在集成现场设备中测试现有 DAC 材料来降低 DAC 成本，这些设备产生的 CO₂ 纯度在 95% 以上；（13）开发高度多孔的膜吸附剂，含有亲二氧化碳聚合物和自组装无机纳米笼，可通过无电太阳能加热和辐射冷却快速变

温吸附，实现经济有效的 DAC；（14）开发用于 DAC 的低再生温度吸附剂，该吸附剂为离子液体催化的胺掺杂固体吸附剂，可在 80-90℃ 的解吸温度下将 CO₂ 解吸速率提高几个数量级，可将吸附剂再生所需的能量减少 20% 以上，具备利用废热进行再生的潜力，同时可延长吸附剂寿命/稳定性；（15）结合最先进的无水纳米流体溶剂和静电纺丝技术，开发用于 DAC 的下一代纤维包封纳米混合材料，具有选择性水排斥作用；（16）开发用于 DAC 的环境温度下低真空变压吸附的胺吸附剂，这一概念还可扩展至从化工和天然气工业的工艺流中分离酸性气体和含硫气体分子；（17）开发一种使用聚（芳基哌啶）（PAP）离聚物的电化学驱动式 CO₂ 分离装置，将在环境条件下连续分离空气中的 CO₂，还将对 PAP 离聚物中的 CO₂、碳酸氢盐、碳酸盐和氢氧化物的动力学、热力学和传输特性进行表征；（18）开发一种用于 DAC 的增强型去极化电膜系统，与最先进的 DAC 技术相比，可降低 30% 的能耗。

（岳芳）

通用电气公司宣布退出新建煤电市场

9 月 21 日，通用电气（GE）宣布将退出新建煤电市场，停止向新建燃煤电厂提供发电设备³。GE 的这一决定将涉及资产剥离、工厂关闭、相关岗位以及对上市子公司的适当考虑，但仍将服务现有的煤电客户。

GE 正寻求自身的转型发展，其发展重心逐渐转向具备较高经济性和增长潜力的发电业务，退出煤电市场表明了 GE 在发电领域的巨大战略转变。GE 将继续关注并投资其核心的可再生能源和发电业务，致力于推进更低成本、可靠、方便和可持续的电力。GE 蒸汽发电业务将继续为核电提供发电设备，并为现有核电站和燃煤电站提供服务，使其能够以经济高效的方式维持现有设施的运转。

编者按：通用电气电力业务分两大板块：新能源业务和电力业务。其中电力业务包含：燃气轮机业务、蒸汽轮机业务，蒸汽轮机业务按燃料种类又分为核电和煤电。本次变动仅涉及煤电新机业务，不涉及核电新机、核电服务、煤电服务，更不涉及燃气轮机业务。

（岳芳）

³ GE to pursue exit from new build coal power market. <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-pursue-exit-new-build-coal-power-market>

清洁能源多能互补

美国大西洋理事会评述核能创新对美国国防的影响

9月14日，美国大西洋理事会全球能源研究中心发布《核能技术创新：对美国国防的影响》简报⁴，系统分析了小型模块化反应堆（SMR）和微型核反应堆（MNR）在美国军事上的应用潜力，并探讨了美国国防部采购 MNR 面临的机遇和挑战，同时还强调了国防部应该与美国国会、美国能源部等部门协调工作，以支持军用核能系统的开发、演示和部署。报告关键内容如下：

1、核能与美国国防

技术变革能从根本上改变国家安全环境和战争属性。而核能技术创新则是关键领域之一，美国能源部（DOE）和国防部（DOD）都在积极与相关企业合作，为有潜力的核能技术提供研究、开发和资金支持。其中下一代民用核能技术，特别是小型模块化反应堆（SMR）和微型核反应堆（MNR），可以为某些军事设施提供可靠、灵活的电力，为先进的武器系统提供动力，助力美国核工业供应链振兴，并支持美国国防核不扩散目标从而实现美国国家安全任务。

发展下一代核能技术的最大障碍之一是资金缺乏问题。而美国联邦政府各部门和机构，特别是 DOD 的核能技术采购力，是维持美国核电技术和产业领先重要支撑力量。因为 DOD 采购 SMR 和 MNR 有助于加速新反应堆技术的示范和商业化，这将加强美国与俄罗斯、中国在国际民用核出口市场的竞争力。目前，DOD 主要兴趣集中在 MNR 上面（正在开展移动微型核反应堆原型开发计划项目，代号 Pele），正在评估将军事用能设施从依赖高成本、脆弱的化石燃料系统转换为 MNR 系统的可行性。

2、SMR 和 MNR 在美国军事上的应用潜力

DOD 拥有数百个军用设施和移动装置，他们每年都要消耗大量能源，为此 DOD 每年要花费大量资金用于支持能源技术研究。目前，在美国国会的大力支持下，DOD 增加了与私营企业合作的项目，以开发新一代体积更小、安全性更高的反应堆，如 SMR 和 MNR，这两种新型反应堆在美国军事领域的应用潜力主要体现在三个方面：

（1）为美国军事基地和设施提供可靠和安全的电力

美军大量的军事设施依托当地的电网进行供电，然而网络攻击和极端气候事件将导致本地电网供电可靠性和灵活性面临严峻挑战。而一个 SMR 或一组 MNR 可提供比当地传统电网更可靠和更具弹性的电力，因此 DOD 越来越关注在军事设施中

⁴ Innovation in Nuclear Energy Technologies: Implications for US National Defense.
<https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/innovation-in-nuclear-energy-technologies-implications-for-us-national-defense/>

使用 MNR 的可能性，减少对易损电网电力和备用柴油发电机的依赖。目前，DOD 正在研究在美国本土 500 多个设施中使用 MNR 的可能性，旨在提高电网弹性、恢复力以应对由于网络威胁和极端气候事件对能源基础设施的影响。

(2) 为定向能武器供电

目前，DOD 正在积极开展定向能武器（如高功率微波、高能激光器等）研究，寻求利用这种光速武器支持“第三次抵消战略”。然而定向能武器在将电、化学能量转换为光能以用于光放大刺激应用是方面非常低效的。因此集成定向能武器的平台（如海上舰艇）需要增加输入的电力功率，另外还必须解决电力的供应和存储水平，意味着其需要全新的高效供电系统，以确保在定向能武器正常应用的同时满足集成定向能武器平台其他子系统的功率需求。针对上述情况，DOD 将积极探索核定向能武器，如核泵浦激光器，以解决集成定向能武器平台的供电需求。

(3) 为太空飞行和太空基地提供能源

未来信息化战争，各国对太空的依赖性将越来越强（对太空卫星依赖越来越强）。而随着太空成为新的战略空间和制高点，世界军事强国在推进新军事变革过程中，都在设法增强对太空的争夺和控制能力。随着新的《白宫太空政策》出台和美国航空航天局（NASA）用于月球探索任务的“Artemis”项目的开展，对月球空间站和为长距离太空火箭提供电力的新核反应堆的建立越来越受到关注。

3、美国国会和联邦政府在支持军队核能系统研究方面的作用

DOD 是 MNR 的潜在买家和用户，是核能技术创新开发的助推者，在核能系统研发方面扮演关键角色。但目前美国政府中支持先进核能技术研发的主导机构是能源部（DOE），且核能研究的任何推进工作都需要在美国国会、多个联邦机构和核能监管委员会（NRC）之间取得共识前提下得以开展。美国国会和联邦机构在推动核能军事领域应用的作用主要体现在以下几个方面：

(1) 美国国会对先进反应堆示范项目资助情况

美国国会高度重视先进核能技术的示范，对 DOE 的核能预算表现出强有力的支持。2020 财年国会拨款 2.3 亿美元用于支持 DOE 新的先进反应堆示范项目，确立了与私营企业合作的三种资助途径：授予 5~7 年期合同用于两次高级研究示范；授予十年期技术合同用于降低未来示范风险；授予 15 年期的长期合同用于开发新一代的先进概念反应堆。

(2) 美国国会支持 DOD 在其设施中部署 MNR 系统

美国国会已经采取措施鼓励 DOD 考虑在设施中使用 MNR，包括两种形式：1）在《2019 财年国防授权法案》中要求 DOE 部长编制一份报告详细阐明试点计划的需求和项目构成，该计划通过与商业实体签订合同为 DOD 高能耗且价格昂贵的关键国家安全基础设施提供核能，并在 2027 年 12 月 31 日之前至少对一个经许可的

MNR 进行选址、建造和运行。DOD 采办与保障办公室正与 DOE 合作开展这项工作以评估在国内军事设施部署 MNR 的可行性。2) 美国国会在《2020 财年国防授权法案》中增加了 7000 万美元，用于 DOD 战略能力办公室 (SCO) 开展一项 MNR 的设计和测试计划，重点是用于前线作战基地的移动式反应堆供能系统。

(3) NRC 在支持美国军事核能应用中的关键作用

NRC 在开发民用和国防应用的先进反应堆方面发挥着关键作用，当下其正逐步参与到 DOD 微型反应堆原型项目中，DOD 希望 NRC 向 DOD 战略能力办公室 (SCO) 提供有关 NRC 法规和许可程序的准确且最新的信息。由于 DOD 期望最终在全球多个司法管辖区部署 MNR，因此希望 NRC 也将在提供审查并与外国监管机构进行协调方面发挥关键作用。

(4) DOE 支持高离析低浓缩铀 (HALEU) 燃料生产

MNR 采用轻水反应堆技术或其他先进反应堆技术，通常使用丰度高达 20% 的 U-235 (即高离析低浓缩铀，HALEU) 作为燃料。然而目前 MNR 尚未商用，相关的燃料需求很少，导致相关研发生产进展缓慢。但是如果制造 HALEU，MNR 测试将会受阻导致商用进展缓慢。为解决上述困境，DOE 正在积极开展相关的研究和示范生产工作，包括：① 生产用于早期测试的 HALEU 燃料；② 实施一项为期三年、耗资 1.15 亿美元的项目，以示范在美国当地制造生产 HALEU 燃料技术。

4、结论

美国私营部门与 DOE 合作开发新一代小型核能反应堆技术，有可能为美国未来的国防态势和美国军事系统的日益电气化、低碳化、弹性和数字化做出重大贡献。尽管先进核反应堆的许多军事应用不太可能用于商业化部署，但 DOD 对先进核技术的主要应用——比如为较偏远地区提供可靠的低碳能源——是存在巨大的商业化应用潜力，并有可能对全球能源系统和美国核出口产生巨大影响。在过去，美国新型反应堆的研发创新工作主要由私营部门主导。但他们需要向美国联邦政府寻求资金支持，因此为了更好地利用 DOD 采购能力以推进新概念先进核反应堆商业化，建议美国军队采取下述几个措施：

(1) 证明新型核能技术具备在偏远甚至危险地点安全运行能力；

(2) 采取措施解决国际核安全和核保障问题；

(3) 通过国会拨款，DOD 应继续支持“Pele”项目；

(4) 通过监管流程与 NRC 开展高效合作；

(5) 投资开发先进燃料，为新的核反应堆提供动力；

(6) 明确与中俄的大国竞争不仅仅是核武器能力的竞争，更是核电国际市场的竞争，美国联邦政府应该认真审视并给予高度重视。

(廖明月 曾焱阳 郭楷模)

DOE 探索人工智能技术在核聚变研究领域的应用潜力

8月19日，美国能源部（DOE）宣布在未来三年资助2100万美元支持探索人工智能和机器学习技术在聚变能源领域的应用潜力⁵，旨在通过将人工智能和机器学习技术引入到核聚变的研究过程中，以实现海量实验数据的实时采集和快速高效分析，大幅提升实验效率，缩减实验周期。本次资助项目具体内容如下：

1、麻省理工学院、普林斯顿等离子体物理实验室、劳伦斯伯克利国家实验室将研究利用机器学习加快高频交流变化的电磁波仿真模拟。

2、劳伦斯利弗莫尔国家实验室将利用人工智能技术来开发先进加速器实时模拟系统，加快高能密度等离子体实验室联合项目研究进程。

3、通用原子公司、阿贡国家实验室、劳伦斯伯克利国家实验室和Tech-X公司将利用机器学习和人工智能辅助托卡马克实验装置来实现等离子体稳态自持燃烧。

4、桑迪亚国家实验室、田纳西大学、洛斯阿拉莫斯国家实验室将利用机器学习技术进行原子模型构建以缩减核聚变材料的研发实验周期。

5、普林斯顿等离子体物理实验室、SLAC国家加速器实验室、卡内基梅隆大学、威斯康星大学将利用机器学习技术来实现对实时聚变等离子体行为的预测和控制。

（郭楷模）

ARPA-E 投入 1650 万美元支持生物燃料供应链开发

9月1日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布投入1650万美元，支持“农业资源和管理中的可再生交通燃料监测和分析系统”（SMARTFARM）计划下的6个研究项目⁶，旨在开发与生物原料生产相关的温室气体排放现场量化技术，以更有效地支持生物燃料供应链，并确保碳市场能够激励生产商改进原料生产效率和碳管理。本次资助项目具体内容参见表1。

表1 SMARTFARM 计划资助项目具体研究内容

研究内容	资助金额/万美元
开发一种商业解决方案 SYMFONI，以评估单个地块的土壤有机碳和一氧化二氮（N ₂ O）的动态排放情况。该解决方案能够实现规模放大，以实现区域内每个地块的评估。SYMFONI 是一个集成机载卫星遥感、过程建模、深度学习、大气反演、传感和高性能计算的“系统体系”解决方案	450
开发和部署一种埋入土壤中的分布式碳传感器系统，能够以超低的运行成本探测多个深度的碳通量。该传感器将提供高精度和实时的决策数据，用于经	190

⁵ Department of Energy to Provide \$21 Million for Artificial Intelligence and Machine Learning Research on Fusion Energy. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-provide-21-million-artificial-intelligence-and-machine-learning-research>

⁶ ARPA-E Announces \$16.5 Million for Technologies Supporting the Biofuels Supply Chain. <https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/arpa-e-announces-165-million-technologies-supporting-biofuels-supply-chain>

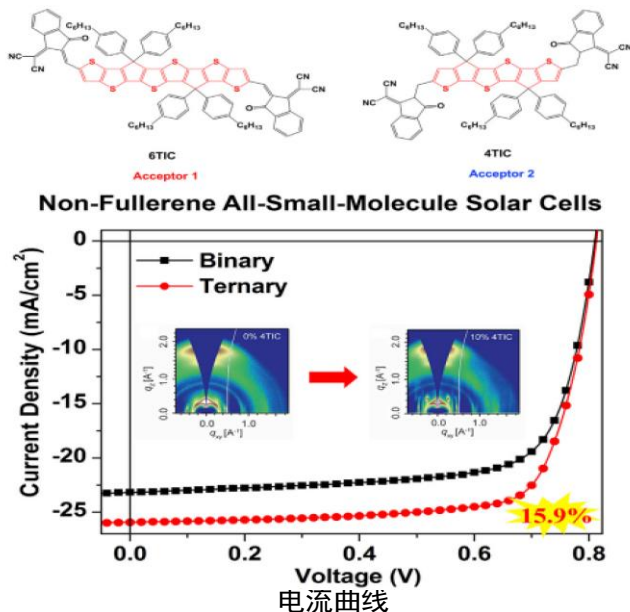
开发一个土壤碳测量和监测综合系统，以满足当前和未来农业碳市场的需求。该系统将包括三个主要组成部分：现场测量硬件、选择测量点的优化空间采样算法、利用国家土壤光谱库现有基础设施的机器学习校准。该系统将实现对土壤碳储量的快速、无损测量	325
开发能够量化 N ₂ O 排放量的智能系统，该系统是一种自主传感系统，使用大气激光成像技术以高时间和空间分辨率监测整个生长季农田内不均匀的 N ₂ O 排放，指导将农业作物生产对气候变化影响和环境危害降至最低的做法	300
开发一种低成本农田 N ₂ O 排放测量系统，利用安装在无人机上的激光传感器来检测农田中的 N ₂ O 排放。传感器的测量结果将与人工智能软件相结合并进行处理，以准确测量整个生长季特定农田的 N ₂ O 排放量，为农民种植生物经济原料作物提供切实可行的激励措施，以改善耕作方式，减少温室气体排放	197
将建造、验证和示范一个用于测量田间土壤碳和 N ₂ O 排放的可靠且经济有效的集成系统，该系统由四个部分组成：现场采样和测量系统；改进土壤碳和温室气体排放量化的过程建模；用于量化模型不确定性的详细模型验证系统；用于大规模实施该系统的操作平台	184

(高天 岳芳)

小分子有机太阳能电池转换效率突破 15% 创造世界纪录

有机太阳能电池具备轻量化、低成本和高机械柔韧性等优点，相比硬基底太阳能电池具备更加广阔的应用空间，获得了研究人员的广泛关注。其中，基于全小分子体系的有机太阳能电池比聚合物太阳能电池具备更好的稳定性和重复性，具有更加良好的应用前景，然而目前该体系的有机电池效率低于后者，距离商用效率指标（15%）还有距离，需要进一步优化改进。

由美国华盛顿大学 Alex K.-Y. Jen 教授课题组牵头的国际联合研究团将高结晶度的有机小分子受体（4TIC）作为附加受体加入到小分子二元混合活性层材料中形成了三元的活性层，得益于 4TIC 受体的高结晶性，三元混合受体薄膜结晶性显著增强，从而增强了载流子的抽取效率并有效抑制了复合，进而增强了电池性能，获得了高达



15.88%（认证效率 15.5%），创下了小分子体系有机太阳能电池效率世界纪录。相关研究表明小分子体系有机太阳能电池性能受限主要原因是活性层材料结晶形貌较难控制导致光吸收和复合损失较多。为

此研究人员基于前期工作开发的高性能混合二元活性层材料卟啉/6TIC 基础上，在上述材料中加入高结晶性的小分子 4TIC 作为附加的受体材料，形成了三元的活性层材料卟啉/6TIC/4TIC，以期实现对活性层材料形貌的优化调控。扫描电镜显示三元活性层薄膜呈现出择优取向，这有利于载流子快速传输；X 射线衍射表征显示相比无 4TIC，含有 4TIC 的三元活性层薄膜的结晶性显著增强，同样有利于载流子的传输，抑制复合损失。进一步通过瞬态吸收（TA）谱测试发现，三元混合活性层薄膜的载流子的寿命得到了延长，载流子的抽取和传输效率得到改善，意味着载流子的复合得到了有效的抑制。随后研究人员分别以二元和三元小分子活性层组装了有机太阳能电池器件进行对比研究，结果显示无 4TIC 附件受体的二元活性层太阳能电池的光电转换效率为 13.54%，而含有 4TIC 的三元活性层电池效率增加到了 15.88%，认证效率为 15.5%，创造了小分子体系有机太阳能电池效率世界纪录，突破了 15% 商用的效率指标，为有机太阳能电池迈向商用奠定了关键技术基础。

该项研究通过向二元活性层材料中添加高结晶性附加受体材料，实现了对活性层薄膜结晶性和形貌优化，从而增强了载流子抽取和传输效率，抑制了复合损失，进而提升了电池器件性能，获得了创纪录的 15.88% 的转换效率，将有机太阳能电池向规模化应用推进了一大步。相关研究成果发表在《*Joule*》⁷。

（程向阳 郭楷模）

德科学家首次实现太空环境钙钛矿和有机太阳能电池性能测试

自 1959 年人类首次成功发射太阳能驱动卫星以来，卫星太阳能电池一直采用硬基板的晶硅太阳能电池，然而其质量较大导致质量能量密度较小（仅为 1-3 W/g），且材料和制备成本较高。相比之下，新生代有机和钙钛矿等薄膜太阳能电池制备成本低廉，且具备轻量化和良好的机械柔韧性，因此其质量能量密度远高于晶硅电池（两者分别可达 10 W/g 和 29 W/g），具备了在太空领域的应用潜力。

⁷ Li Nian, Yuanyuan Kan, Ke Gao, et al. Approaching 16% Efficiency in All-Small-Molecule Organic Solar Cells Based on Ternary Strategy with a Highly Crystalline Acceptor. *Joule*, DOI: 10.1016/j.joule.2020.08.011

德国慕尼黑工业大学 Peter Muller-Buschbaum 教授研究团队实现全球首次在太空环境条件对钙钛矿太阳电池、有机太阳电池的性能和能源输出情况的研究，即在亚轨道火箭飞行过程中对上述两种电池的电化学性能进行原位表征测试，结果显示钙钛矿、有机太阳电池的功率分别达到 14 mW/cm^2 和 7 mW/cm^2 ，证明上述薄膜太阳电池在漫射辐射环境中也可以有效运行，应用于卫星火箭等太空设备不仅可以减少设备质量提升性能，还能够降低成本，展现出了广阔的太空领域应用潜力。尽管已经有很多工作模拟太空环境对有机太阳电池、钙钛矿太阳电池开展测试研究，但模拟环境与真实环境存在差异，太空环境具备微重力、强紫外、宇宙辐照、高温差等多因素环境特性，模拟环境一般采用控制变

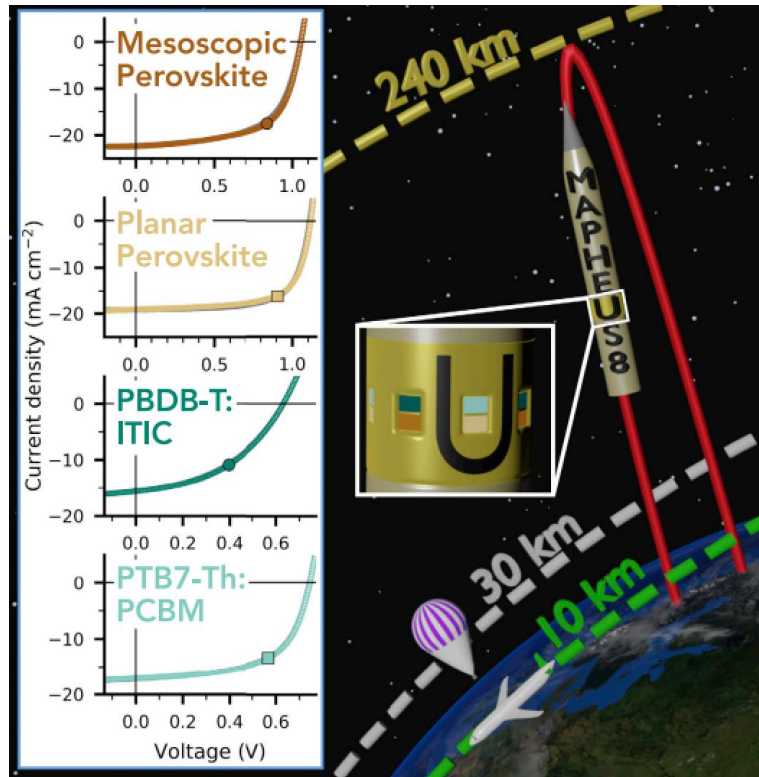


图 1 4 种类型钙钛矿电池电压-电流曲线及其在火箭上的摆放位置示意图

量法，即只能模拟其中一些环境条件，无法完全模拟真实环境。为此，研究人员设计制备了 4 种太阳电池，其中 2 种钙钛矿太阳电池分别为平板型和多孔型；另外 2 种是有机太阳电池，分别为正向结构和反向结构。随后将其置于代号为“MAPHEUS-8”的火箭系统，成功将钙钛矿电池和有机太阳电池送入到太空环境中，并开展了一系列性能测试。为了确保实验科学性，研究人员将制备的样品均匀缠绕分散在火箭系统周身，即电池部位分为 8 个独立部分，8 个对称排列的舱口分别有 2 个模块，8 个舱口以方位角对称分布，成 45° 角，确保每个电池样品获得同等机会的辐照条件。整个火箭升空为三个阶段，阶段一为上升过程中，阳光直射有效载荷的一侧；阶段二为缓慢角度漂移后有效载荷与太阳辐射方向一致；阶段三下降过程中阳光直射再次出现。电化学性能测试显示，在第一阶段，4 种电池均表现出优秀的光电性能，最高电流密度超过 20 mA/cm^2 ；其中 2 类钙钛矿太阳电池质量比功率密度超过 14 mW/cm^2 ，而 2 类有机太阳电池功率密度达到了 7.5 mW/cm^2 ，远远高于传统晶硅电池。意味着采用上述太阳电池可以大幅减少火箭整体质量，对火箭太空飞行任务意义重大。二阶段，火箭飞行姿态与太阳光照平行，意味着电池无法获得太阳光直接

辐照只能获得漫射辐射。第三阶段，火箭与太阳光形成一定夹角，部分电池器件得到显著的阳光直接辐照，部分只获得漫射辐射。但无论是第二还是第三阶段，电池都表现出了光电性质，只是有所差异。相比而言，传统晶硅太阳电池在没有直射光时便停止工作，而上述薄膜电池具有用于深空探索的潜力。

该项研究首次将钙钛矿电池、有机太阳电池送入太空环境并成功实现了性能测试研究，发现上述两种电池在太阳光直射和漫射辐射环境下均表现出良好的光电转换性能，由于具备低成本和轻量化特性，有助于太空设备的瘦身和性能提升，对太空探索事业发展意义重大。下一步研究人员将致力于提升电池寿命、长期稳定性，以满足在太空中的长期使用需求。相关研究成果发表在《*Joule*》⁸。

（程向阳 郭楷模）

⁸ Lennart K. Reb, Michael Böhmer, Benjamin Predeschly, et al. Perovskite and Organic Solar Cells on a Rocket Flight. *Joule*, 2020, DOI: 10.1016/j.joule.2020.07.004

低碳化多能融合

法国公布国家氢能战略未来十年投入 70 亿欧元打造氢能经济

9月8日，法国生态转型与团结部发布《法国发展无碳氢能的国家战略》⁹，计划到2030年投入70亿欧元发展绿色氢能，促进工业和交通等部门脱碳，助力法国打造更具竞争力的低碳经济。此次发布的国家氢能战略是法国在9月3日推出的《国家经济复苏计划》中“生态转型”的重要举措之一，该复苏计划将在“生态转型”方面投入300亿欧元，发展绿色交通、清洁能源技术创新、建筑节能翻新、农业转型和循环经济、生物多样性等，可再生和低碳氢的绿色技术是清洁能源技术创新的主要方向。

一、国家氢能战略目标

法国国家氢能战略主要有三大目标：（1）到2030年新建6.5吉瓦的电解制氢装置；（2）发展氢能交通，尤其是用于重型车辆，到2030年减少600万吨CO₂排放；（3）提升工业部门竞争力，促进就业，到2030年通过发展氢能直接或间接创造5-15万个就业岗位。

二、国家氢能战略优先事项

根据法国国家氢能战略，未来将投入34亿欧元重点实施三大优先事项：

1、通过打造法国的电解制氢行业促进工业脱碳（18.36亿欧元）

（1）促进法国电解制氢行业的兴起。法国明确了到2030年新建6.5吉瓦电解槽的目标，提出开发高效的电解制氢项目，并扩展至工业规模以实现盈利。例如，2021年开始，法国将启动一个关于氢能的欧洲共同利益重要项目（IPCEI），涉及在法国开发吉瓦级规模的电解槽，以及开发其他重要部件的工业化，如燃料电池、储氢罐等，法国政府将为上述举措投入15亿欧元资金。

（2）通过氢能替代化石燃料促进工业脱碳。氢能将在炼油、化工（生产氨和甲醇等）、电子和食品等行业发挥脱碳潜力，为通过发展氢能加速法国工业脱碳，该战略提出如下方向：使电解制氢更加可靠；适应及开发工业流程；支持氢能解决方案（投资和设施运营）。该战略进一步指出，将为具备竞争力的电解槽建立法规、税收等机制。

2、开发无碳氢能交通（9.18亿欧元）

（1）开发以氢为燃料的大型车辆。将开发氢动力轻型商用车辆、重型货车、公交车、垃圾车、火车等。例如，2020年底前将启动一个开发或改进氢能生产、运输、

⁹ Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France.
<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/DP%20-%20Strat%C3%A9gie%20nationale%20pour%20le%20d%C3%A9veloppement%20de%20l%27hydrog%C3%A8ne%20d%C3%A9carbon%C3%A9%20en%20France.pdf>

应用（交通或发电）相关组件和系统的项目。到 2023 年，该项目将投入 3.5 亿欧元以实施示范。

(2) 开发大型区域项目。该战略建议在地区层面上开发氢能在工业和交通部门的应用。例如，2020 年底前将发起“区域氢中心”项目，将工业供应商和区域应用集合起来，部署区域大规模氢能生态系统，以最大化规模经济。到 2023 年，该项目将投入 2.75 亿欧元。

3、支持绿氢技术的研究、创新和开发（6.46 亿欧元）

(1) 研究与创新。该战略确定了氢能的新用途，如通过氢能促进能源系统中对可再生能源的部署；将无碳氢用于工业脱碳（如钢铁、化工等）；将氢能用于未来交通，尤其是航空和海运；建立未来的氢能基础设施，在天然气网中注入氢以促进天然气行业脱碳。为此，战略提出继续支持氢能技术研发，保持国际领先地位，支持创新以促进新技术的产业化。例如，2020 年底前法国的“氢能应用”优先研究计划将支持开发下一代氢能技术（涉及燃料电池、储氢罐、材料、电解槽等）。该计划将获得 6500 万欧元的资助。

(2) 发展专业技能。将进行技能建设，以支持地区氢能使用。包括对氢能汽车运行技术人员、质量-安全-环境管理人员、消防员、工程师和研究人员的技能培训和人才培养。例如，2021 年起将投入 3000 万欧元支持此类技术和职业教育培训。

（岳芳）

DOE 资助 3400 万美支持小型 SOFC 发电系统研发

9 月 15 日，美国能源部（DOE）宣布资助 3400 万美元用于支持“小型固体氧化物燃料电池（SOFC）系统和混合电解槽技术”主题的新研发项目¹⁰，旨在将国家实验室、学术机构和私营企业研究力量进行有机整合，联合攻关开发先进高效低成本的电解槽技术和 SOFC，进一步改善小规模 SOFC 发电系统技术发电效率和成本效益，使其达到商业化应用水平，加快该技术在全美的部署和规模化应用。本次资助将聚焦三大技术主题，包括：（1）小型分布式 SOFC 发电系统；（2）用于生产氢气和电力的混合系统开发和验证；（3）用作 SOFC 燃料的煤制合成气净化技术开发。具体内容如下：

1、小型分布式 SOFC 发电系统

推进模块化 SOFC 系统的标准制定，并为实现降低 SOFC 系统成本的长期目标提供明确的途径，在此基础上为数据中心和其他关键电力用户提供弹性的模块化燃料电池；针对数据中心和商业建筑，设计和建造一个容量 20 kW 的 SOFC 发电原型系统，并开展现场的性能验证工作，评估发电系统的性能和经济性，以进一步提升

¹⁰ DOE Invests \$34 Million to Develop Small-Scale Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Systems.
<https://www.energy.gov/articles/doe-invests-34-million-develop-small-scale-solid-oxide-fuel-cell-sofc-systems>

系统性能降低成本，使其在无补贴的情况下具备良好的经济竞争力，实现 1000 美元/千瓦成本目标；针对分布式发电，使用先进的低温、高功率 SOFC 以及高性能的电厂平衡组件建造 5-25 kW 的 SOFC 发电原型系统。

2、用于生产氢气和电力的混合系统开发和验证

开发并示范一个容量为 2-5 kW 固体氧化物电解池（SOEC）（是反向运行的固体氧化物燃料电池，能够电解水生产氢气），并利用新技术进一步提升 SOEC 的性能、寿命和经济性，以加速实现该技术的商业化应用；开发一个集成了 SOFC 和 SOEC 两种工作模式的混合系统原型，使得系统同时具备发电和产氢功能，并开展相关现场测试，评估技术经济性，通过新材料、新架构研发设计持续优化系统成本，使其走向商业化；优化改进可逆固体氧化物燃料电池（RSOFC）系统单元组件性能（如密封件、涂层等）和热管理系统，以提升其性能和延长寿命；依托新技术开发高性能低成本的 RSOFC 系统，将该技术的制氢成本减少 30% 至 2 美元/千克。

3、用作 SOFC 燃料的煤制合成气净化处理技术开发

系统研究分析煤制合成气中的污染物对整体煤气化固体氧化物燃料电池（IGSOFC）发电系统性能的影响；利用现有设备和/或重新设计一套新的煤制合成气清洁系统；将清洁系统集成到 IGSOFC 发电系统开展现场测试，确保使合成气中的污染物含量降低到 SOFC 系统降解速率可以接受的水平，同时又不能过高地提升系统成本，使其具备良好的技术经济性。

（廖明月 郭楷模）

日本 NEDO 部署新项目加速燃料电池普及和规模化应用

9 月 1 日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布将在 2020-2024 年间开展主题为“燃料电池大规模利用的官产学研联合研发项目”¹¹，旨在整合政府、研究机构和产业界研发力量，开展联合攻关，解决燃料电池商业化应用面临的一系列技术挑战（如耐久性、成本问题），以在 2030 年后实现燃料电池的规模化商业应用，助力日本氢能社会构建，并强化日本在全球燃料电池市场的领先地位。研究项目将重点聚焦三大主题领域，包括基础技术开发、先进的氢能利用技术开发和燃料电池多用途应用技术开发，具体内容如下：

1、基础技术开发

该主题重点围绕聚合物电解质燃料电池（PEFC）和固体氧化物燃料电池（SOFC）开展，以进一步提升上述两种电池性能和耐久性，降低成本，以期在 2030 年后实现商用：

¹¹ 2020 年度「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」に係る実施体制の決定について. https://www.nedo.go.jp/koubo/HY3_00025.html

(1) 围绕聚合物电解质燃料电池 (PEFC)

针对 PEFC, 开发高活性低铂含量阴极催化剂、具有高电导率良好稳定性的阳极催化剂、以及具有高离子导电率的电解质膜等。另外, 还将建立“PEFC 性能评估分析平台”, 以快速获取基于新材料的电池性能各项指标数据, 并将结果反馈给研究人员, 用于指导研究人员的实验优化改进, 提高研发效率并缩短研发周期。

(2) 固体氧化物燃料电池 (SOFC)

开发高性能的基于质子传导的 SOFC 和燃料电池堆的先进评估和分析技术, 在此基础上开发出新型的基于 SOFC 发电系统, 将发电效率提升到 65% 以上的水平, 且运行寿命超过 13 万个小时。

2、先进氢能利用技术开发

该主题重点围绕燃料电池和储氢技术开展, 具体内容包括:

(1) 基于新材料的燃料电池技术

将开发高性能低成本的非铂催化剂、能够在高温环境下保持高效稳定运行的电解质薄膜等新材料, 以开发出比主题 1 中性能和性价比更高的新型燃料电池技术, 并在 2030 年后实现商用。

(2) 储氢技术

储氢系统对于燃料电池的利用至关重要, 但成本依然很高。因此, 为了进一步降低成本并强化储氢系统, NEDO 将开发一种通过构建损伤积累 (如克服氢脆等问题) 和寿命评价模拟技术来实现碳纤维强化树脂制储氢罐的高效设计方法, 以及降低储氢罐用的碳纤维成本。

3、燃料电池多用途应用技术开发

除了常规的固定式发电、道路交通运输应用领域, NEDO 将联合相关的企业开拓燃料电池更多广阔的应用空间, 如探索在船舶、航空领域的应用潜力。

(陈梦石 郭楷模)

热敏性晶体材料助力热化学电池创造相对卡诺循环效率纪录

低品位热能 (<100°C) 广泛存在于自然环境 (如太阳光热、地热、人体热量等) 和工业生产过程中 (如工业废热), 但由于缺乏经济高效的回收技术, 该部分能源大部分被废弃了。水系热化学电池被认为是一种低成本、易于规模化生产的热电转换技术, 在低品位热能回收利用方面应用潜力巨大。然而由于影响热电转化性能三参数 (塞贝克系数、电导率或热导率) 实现同时协同优化面临困境, 使得该电池技术一直难以突破, 应用受到限制。

由华中科技大学 Jun Zhou 教授牵头的联合研究团队利用热敏性晶体材料诱导形成稳定可持续离子浓度梯度，实现了塞贝克系数和热导率的同时协同优化，进而获得了 11.1% 的相对卡诺循环效率，是迄今为止报道的热化学电池中的最高值（先前报道的最高效率为~3.95%），让该电池技术向商业化应用迈出了关键一步。热化学电池主要是由冷热电极和电解质组成，依托两个电极温差以及电解质离子浓度差来工作（电极温差和离子浓度差是决定塞贝克系数关键因素）。但在封闭系统下离子浓度梯度是热力学非平衡态，会自发地通过扩散作用过度到离子均匀分布的热力学平衡态，因此稳定状态下离子浓度梯度基本归零，意味最终热化学电池只能依托温

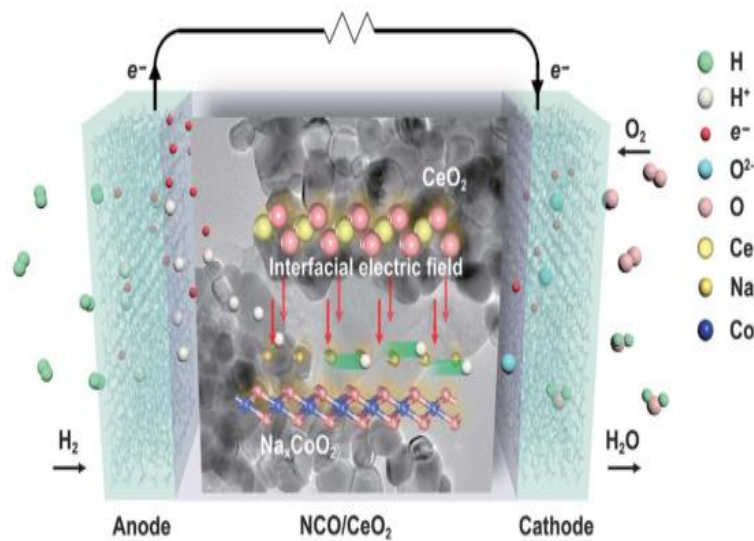


图 1 基于异质结 NCO/ CeO₂ 质子传导材料的燃料电池结构示意图

度梯度来维持工作，这必然会削弱电池性能。为此，研究人员向传统的热化学电池电解质中加入了含有胍阳离子 (Gdm⁺) 添加剂，其能够与靠近热化学电池顶部冷电极 4 价的亚铁氰根离子 Fe (CN)₆⁴⁻ 具备强烈的电子耦合从而形成晶体材料，相关测试发现该晶体材料具有低的晶格能以及高的溶解熵，展现出优异的溶解度温敏性，使得该材料沉淀到底部的热电极

时很容易重新溶解，这意味热电极一端会保持一个高 Fe (CN)₆⁴⁻ 浓度状态，而冷电极一端保持高 Fe (CN)₆³⁻ 浓度状态，形成稳定浓度梯度差，让氧化还原电对持续稳定（即实现可逆的氧化-还原）工作。随后研究人员对比研究了 Gdm⁺ 添加剂对电池性能影响，电化学测试结果显示，50K 的温度梯度下，亚铁氰根离子浓差可达 47 倍，相应塞贝克系数从不含 Gdm⁺ 添加剂体系的 1.4 mV/K 提升至 3.73 mV/K。且随着运行时间增加无 Gdm⁺ 添加剂热化学电池热导率系数会大幅攀升，从 0.67 W/mK 增加到 1.64 W/mK，这会导致电池性能衰退；相反，含有 Gdm⁺ 添加剂电池器件热导率系数始终保持在一个稳定数值，为 0.4 W/mK，意味着电池具备了长程稳定性。进一步功率密度测试显示，含有 Gdm⁺ 添加剂电池的器件功率密度可达 6.86 W/m²，相对卡诺循环效率高达 11.1%，近 19 倍于无添加剂器件，创造了热化学电池相对卡诺循环效率纪录。最后研究人员还开发了由 20 个单元组成的热化学电池模块，获得了 96 mW 的输出功率，成功驱动了多种商业化电子器件（如电风扇、LED 灯泡等），展

现出强劲的商业化应用潜力。

该项研究创造性地利用热敏性晶体材料诱导形成稳定可持续离子浓度梯度，从而实现了热化学电池的塞贝克系数和热导率同时优化，获得了创纪录的相对卡诺循环效率纪录，并利用基于新设计的电池模块成功驱动了多种商业化电子器件，展现出了广阔的商业应用前景。相关研究成果发表在《*Science*》¹²。

（郭楷模）

¹² Boyang Yu, Jiangjiang Duan¹, Hengjiang Cong, et al. Thermosensitive crystallization–boosted liquid thermocells for low-grade heat harvesting. *Science*, 2020, DOI: 10.1126/science.abd6749

能源战略研究

IEA 能源技术展望：评估技术方案 2050 年实现净零排放

9月10日，国际能源署（IEA）发布了《能源技术展望 2020》¹³报告指出，要实现能源转型和气候目标，全球需要大力开发和部署清洁能源技术。报告系统评估了一系列不同的清洁能源技术选项，以寻求在确保能源系统弹性和安全性的同时于 2050 左右实现净零排放的可行方案。报告要点如下：

一、清洁能源技术发展现状

在政府政策的推动下，全球能源系统逐渐向清洁转型。在欧洲、美国、中国和印度相关政策支持的推动下，全球风能和太阳能光伏迅速发展。风能已占全球电力供应的 5% 以上，太阳能约占全球电力供应的 2.5%。受巴西、美国和欧盟的推动，交通运输生物燃料稳步增长，已占到全球运输能源需求的 3%。

自 2000 年以来能源技术变革加速。过去 20 年能源技术变革显著加快，但 2019 年清洁能源在全球能源结构中的份额仍不到 1/5。生物能在一次能源需求占比最大（约占 9%），其次是核能（占比 5%）、水电（占比 3%）、太阳能和风能（占比 1%）。具体表现为：

电力部门：①随着超临界、超超临界等技术被电厂采用，亚临界发电厂在燃煤电厂发电量占比从 2000 年的 75% 已降至 2019 年的 40%，煤电碳排放量逐渐降低。②风电、光伏等可再生能源发电技术推动能源系统进一步绿色转型，2019 年太阳能光伏发电量增长约 25%，达到 710 太瓦时以上。

替代燃料：①受交通运输燃料清洁化的激励措施影响，全球生物燃料供应从 2000 年的不到 1% 增至目前的 3%。②从废原料中提炼的加氢处理植物油（HVO）技术受到越来越多的关注，占生物燃料总产量的 8%。③近年来，氢能技术重新受到关注，发展低碳氢、电解槽制氢等关键技术尤为重要。

能源终端应用：①结构性经济变化，包括向能源强度较低的服务业和轻工业转变，有助于减缓能源总体需求增长。②在建筑部门，符合最低能源性能标准的电器和设备占 2019 年能源总需求的 1/3。③在交通部门，发展更高效的动力系统、更轻的材料和其他技术改进有助于提高车辆燃油经济性。④电动汽车经历了十年的快速发展，2019 年销量达到 210 万辆，占全球汽车市场的 2.6%。

二、净零排放需要能源转型

实现能源部门净零排放需要多样化的燃料和技术方案。单一的燃料和技术都不

¹³ Energy Technology Perspectives 2020.
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

能使整个能源部门实现净零排放。在净零排放情景下，低碳电力、生物能源、氢和氢基燃料将提供 70% 以上的终端能源需求，与目前化石燃料所提供的份额大致相同。

利用可再生能源、CCUS 和核能等低碳技术，电力部门将是最早实现脱碳的行业之一。到 2070 年，全球发电量将增加近两倍，其中约 70% 的增长是为了满足终端部门不断增长的电力需求，而 30% 的增长是生产低碳燃料，尤其是氢气。在可持续发展情景中，到 21 世纪 50 年代发电部门将完全脱碳，到 2070 年全球建筑和乘用车部门将达到零排放，但重工业（比目前下降 90%）和长途运输部门（比目前下降 55%-85%）仍将存在排放。

替代燃料将在交通、建筑和工业脱碳中发挥重要作用。可持续发展情景中，生物质转化为液体燃料这一新兴技术将推动全球生物燃料供应快速增长。目前，氢主要由化石燃料生产，仅用于炼油和化工。在可持续发展情景中，低碳制氢技术将占主导地位。到 2070 年，电解槽装机容量将从目前的 170 兆瓦增加到超过 3000 吉瓦。由于天然气成本较低，结合 CCS 制氢也将发挥重要作用。

三、实现净零排放的技术需求

在可持续发展情景中，到 2070 年能源部门要实现净零排放，就必须进行根本性的技术变革。除能效和可再生能源作为核心支柱外，还包括：终端部门广泛电气化；碳捕集、利用和封存（CCUS）；氢能及相关燃料；生物能。具体来看：①电气化：电力在终端能源需求中占比将从目前的 1/5 上升到 2070 年的近 50%，为累计碳减排贡献近 1/5。②CCUS：CCUS 技术能减少化石燃料发电厂在发电和工业中的碳排放，产生负排放，并在长期内生产碳中性燃料。③氢能及相关燃料：到 2070 年，全球氢产量将增长 7 倍达到 5.2 亿吨，氢能在终端能源需求中占比将达 13%。④生物能：到 2070 年，可持续生物能在一次能源需求中占比将翻一番达到 20%，其通常与 CCUS 技术结合用于交通运输部门以及发电和供热领域，生物能将贡献 12% 的累计碳减排量。

四、重工业减排技术需求

化工、钢铁和水泥三大重工业占工业能源消耗的一半以上，约占工业直接 CO₂ 排放量的 80%。到 2070 年，重工业排放将减少 90%。目前，化石燃料占工业终端能源需求的 70%，而化工、钢铁和水泥生产占工业部门化石燃料总需求的 60%。在可持续发展情景下，到 2070 年工业部门化石燃料的使用量将减少 60% 以上，主要由电力和生物燃料取代。近期内，在可持续发展方案下，化工、钢铁和水泥行业已出现有助于减少碳排放量的新兴技术，这些技术处于不同的发展阶段，如表 1、表 2 和表 3 所示，TRL 代表技术成熟度。

表 1 化工部门主要新兴技术现状

技术	TRL/可用时间/ 对净零排放重 要性	部署情况
CCU S	化学吸附	11/现在/非常重要 氨 : 马来西亚、印度等地许多商业氨工厂利用 CCUS 捕集 CO ₂ , 一些用于提高石油采收率 (EOR)
		9/现在/非常重要 甲醇 : 巴西、巴林等地的商业煤基工厂将碳捕集作为生产流程的一部分
		7/2025 年/非常重要 高价值化学品 : 中国石化位于河南的石化厂 2015 年起利用 CCUS (120 万吨/年) 提高石油采收率, 并计划将碳捕集能力提升至 50 万吨/年
	物理吸附	9/现在/非常重要 氨 : 捕集技术已作为生产流程的一部分广泛用于商业制氨工厂, 一些项目将捕集的 CO ₂ 用于 EOR
		7/2023 年/非常重要 甲醇 : 美国计划 2020 年投产甲醇工厂工业规模碳捕集项目, 用于 EOR;
		8/现在/非常重要 甲醇 : 新疆敦华石油甲醇工厂碳捕集项目 (10 万吨/年) 于 2016 年投运
		7/2025 年/非常重要 高价值化学品 : 延长石油在榆林煤制化学品工厂投产碳捕集 (5 万吨/年), 正在靖边建设更多大规模项目 (36 万吨/年), 并通过 EOR 实现二氧化碳的封存
氢能	波动性可再生能源电解制氢	8/2025 年/非常重要 氨 : 澳大利亚计划开发 60-160 兆瓦规模电解槽, 智利、德国、摩洛哥、英国和美国正在开发试点项目
		7/2025 年/重要 甲醇 : 冰岛 George Olah 试点 (4000 吨/年) 2011 年投产, 日本三井化学 (100 吨/年) 2009 年投产, 德国 Carbon2Chem 项目 2018 年使用电解制氢和钢铁厂 CO ₂ 生产甲醇, 还有两个电解制氢项目 2019 年获资助
直接 电气 化	甲烷热解制甲醇	6/2030 年/中等重要 巴斯夫公司正在德国利用电加热甲烷生产氢气进行试点, 计划到 2030 年实现工厂规模生产
	蒸汽裂解装置电气化	3/待定/中等重要 2019 年, 六家大型石化公司共同发起“未来裂解联盟”采用可再生能源运行石脑油或蒸汽裂解装置
生物 能	生物质气化	5/待定/低重要 氨 : 通过生物质气化生产氨的技术经济评估已完成, 但其在经济上尚不可行
		8/待定/低重要 甲醇 : 加拿大 2016 年投产首个废物制甲醇商业工厂, 荷兰 2020 年投产 BioMCN 设施, 瑞典计划生物甲醇预商业项目
	乙醇脱水制乙烯	5-9/现在/中等重要 巴西、印度等地的商业工厂使用发酵生产乙醇, 生产规模分别为 20 万吨/年和 17.5 万吨/年
	木质素基生产苯、甲苯和混合二甲苯 (BTX)	6/2030 年/中等重要 荷兰成功进行 BioBTX 技术的中试测试; 比利时和德国的八个合作伙伴于 2018 年发起的 ALIGN 项目旨在提升三种木质素提取工艺
替代 燃料	甲醇生产	7/2030 年/低重要 三个试点工厂于 2013 年投产, 几个商业规模的示范项目正在开发中, 主要集中在中国
	汽油催化裂化	9/现在/低重要 第一个商业工厂 (4 万吨/年) 正在韩国运行

表 2 钢铁部门主要新兴技术现状

技术	TRL/可用时间/ 对净零排放重 要性	部署情况
CCUS 高炉：废气 富氢和/或 CO ₂ 的去除 (利用或封 存)	5/2030 年/非常 重要	日本 COURSE 50 项目已完成实验测试，计划到 2030 年实现商业规模；通过真空变压吸收对炉顶煤气进行循环利用已在欧盟 ULCOS 项目实验高炉中被证实；安赛乐米塔尔正在法国敦刻尔克钢厂 IGAR 试点项目进行进一步概念开发，2017 年成功完成实验室测试并计划在 2025-2027 年完成工业规模示范，2019 年启动的 3D 项目将测试高炉气体的胺基碳捕集，计划到 2021 年中试，2025 年达到工业规模；ROGESA 试点项目正在德国高炉中测试富氢焦炉煤气，计划 2020 年投运；STEPWISE 项目正在瑞典试点将高炉煤气脱碳（14 吨/天）用于发电
高炉：废气 转化为燃料	8/现在/中等重 要	兰扎科技与首钢集团和唐明 2018 年在中国建成首个商业工厂，年产 3000 万升乙醇，第二个乙醇工厂（8000 万升/年）计划建在比利时根特，将于 2021 年初完工；欧洲 FReSMe 项目正试点钢铁废气转化为甲醇（1 吨/天）
高炉：废气 转化为化学 品	7/2025 年/中等 重要	2018 年启动的德国 Carbon2Chem 试点工厂利用钢铁废气生产氨和甲醇，计划到 2025 年建成工业规模工厂；欧洲 Carbon4PUR 项目正试点将钢铁废气转化为聚氨酯泡沫和涂料（20 吨/年）
直接还原 铁：天然气 碳捕集	9/现在/非常重 要	墨西哥两家工厂 2008 年投运，捕集排放 CO ₂ 的 5%用于饮料行业，正计划扩大捕集能力；阿布扎比工厂 2018 年起投运碳捕集（80 万吨/年）用于 EOR；委内瑞拉 Finmet 商业工厂胺基碳捕集 CO ₂ 纯度接近 100%
熔融还原： CCUS	7/2023 年/非常 重要	ULCOS 开发的 Hisarna 试点正在荷兰艾默伊登塔塔钢铁厂运营（年产 6 万吨钢，CCS 未实施）；预计 2023-2027 年印度将建成一座示范规模工厂（50 万吨/年）；2027-2033 年荷兰将建成一座工业规模工厂（150 万吨/年）；FINEX 工厂正进行胺基碳捕集的初步测试
氢能 高炉：电解 氢混合	7/2025 年/中等 重要	蒂森克虏伯 2019 年起在德国一座高炉中测试氢气替代一部分煤
直接还原 铁：天然气 与高比例电 解氢混合	7/2030 年/重要	1990 年代特诺恩在墨西哥测试了混入 90%的氢气；萨尔茨吉特正在德国进行兆瓦级电解槽示范和可行性研究，以将氢气直接还原铁整合到现有工厂中；蒂森克虏伯正计划在 2020 年代中期前建设使用氢气的商业化直接还原钢铁厂
直接还原 铁：仅基于 电解氢	5/2030 年/非常 重要	HYBRIT 项目中试工厂 2020 年 8 月在瑞典投运，计划到 2025 年建成示范工厂（1 吨/年）；安赛乐米塔尔主导的汉堡试点工厂将于 2030 年建成
熔融还原： 氢气等离子 体还原	4/待定/中等重 要	奥地利 SuSteel 项目正将 100 g 规模反应器升级至 50 kg 批量运行，计划 2020 年投运；犹他大学正开发闪速炼铁技术，并调试了一个小型试点反应器

	辅助过程：氢用于高温热	5/2025 年/重要	2020 年初 Ovako 和 Linde 在瑞典成功试验用氢气为炼钢供热；挪威的工业园 2020 年签署协议利用氢气替代化石燃料炼钢
直接电气化	电解：低温碱性	4/待定/中等重要	Siderwin 项目将利用 ULCOWIN 电解工艺在 2020 年底前开发一个试点工厂
	电解：高温熔融氧化物	4/待定/低重要	麻省理工学院的研究促成了波士顿金属公司成立，并于 2014 年投产第一个原型电解槽，目前正在建设中试工厂
生物能	高炉：热处理生物质	7/2025 年/中等重要	Torero 合作项目使用生物质部分替代安赛乐米塔尔在比利时根特工厂的煤炭，大规模示范将于 2020 年底投运
	高炉：木炭	10/现在/中等重要	木炭目前在商业上被用来替代高炉的部分煤（主要在巴西）

表 3 水泥部门主要新兴技术现状

	技术	TRL/可用时间/对净零排放重要性	部署情况
CCUS	化学吸附（部分捕集率 < 20%）	8/现在/中等重要	德克萨斯州 Capitol Aggregates 商业水泥厂 2014 年投运，碳捕集率 15%（7.5 吨/年）
	化学吸附（完全捕集）	7/2024/非常重要	兰扎科技与首钢集团和唐明 2018 年在中国建成首个商业工厂，年产 3000 万升乙醇，第二个乙醇工厂（8000 万升/年）计划建在比利时根特，将于 2021 年初完工；欧洲 FReSMe 项目正试点钢铁废气转化为甲醇（1 吨/天）
	钙循环	7/2025/非常重要	台湾水泥公司 2017 年起在工厂进行测试，成功完成中试规模试验，计划 2025 年实现商业规模（45 万吨/年）运行；CEMCAP 项目在德国完成中试示范；CLEANKER 项目在意大利进行商业前改造示范（130 万吨/年），计划 2020 年启动
	富氧燃烧	6/2030 年/重要	丹麦预分解窑成功完成试点；四家欧洲水泥生产商 2019 年底发起联合研究，计划在德国建造半工业富氧燃烧试验设施
	新型物理吸附（使用二氧化硅或基于有机物吸附）	6/2035 年/重要	加拿大 CO2MENT 项目 2019 年试验将 CO ₂ 用于低碳燃料和混凝土；2020 年初，几家公司宣布进行联合研究，以评估美国科罗拉多州 Holcim Portland 水泥厂碳捕集商业设施（72.5 万吨/年）的设计和成本
	直接分离	6/2030 年/重要	2019 年，LEILAC 项目在比利时海德堡水泥厂成功进行了中试示范，目标是在 2025 年进行大规模示范（10 万吨/年）
	其它捕集技术	4-5/待定/中等重要	已经进行了一些其他技术（膜分离、冷冻氨等）的实验室和小规模试验，但仍处于相对早期开发阶段
	在混凝土和其	9/现在/中等重要	多个商业规模工厂使用 CO ₂ 生产骨料或混凝土固

	他惰性碳酸盐材料中固定/矿化二氧化碳		化；2016年，中材国际和 CNBM 在中国完成了一个利用 CO ₂ 生产沉淀碳酸钡（5万吨/年）的项目；海德堡能源公司和亚琛工业大学的 CO ₂ Min 项目验证了橄榄石和玄武岩吸收 CO ₂ 的能力；法国 FastCarb 项目正研究再生混凝土骨料的加速碳化，目前处于实验室规模
替代原料	煅烧粘土	9/现在/重要	目前在有限几个国家低比例使用，由古巴、印度和瑞士研究人员合作开发；中国正开发一种大型闪速煅烧炉，将大大提高煅烧粘土的能效，目前已建成两条 300 吨/天的生产线
	硅酸钙碳化	8/现在/中等重要	Solidia Technologies 于 2014 年在美国的拉法基（Lafarge）工厂首次投产，现在在匈牙利的另一家工厂投运
	硅酸镁	3/待定/中等重要	研发仍主要在大学实验室进行
	碱活化粘合剂（地质聚合物）	9/待定/中等重要	一些水泥已经商业化，但主要用于非结构应用，例如 CEMEX 在瑞士开发的 Vertua Ultra Zero；其他处于早期开发阶段
直接电气化	直接电气化	4/待定/中等重要	瑞典 CemZero 项目 2017 年的可行性研究显示了水泥窑电气化的技术可行性，目前正在探索建立一个试验工厂；2018 年在挪威启动的 ELSE 项目表明了分解炉电气化的技术可行性
	光热发电直接加热	6/待定/中等重要	法国 SOLPART 项目于 2019 年完成中试测试，计划到 2025 年开设一家部分使用太阳能发电加热的水泥厂；2019 年美国初创企业 Heliogen 在莫哈韦沙漠的试验设施中证明了利用光热发电产生 1000°C 以上热量的可能性；保罗·谢勒学院、苏黎世联邦理工学院和拉法基·霍尔西姆正进行一项在窑炉中使用光热发电的研究
氢能	氢气的部分使用	4/待定/中等重要	矿物制品协会已获资助在进行英国物理试验将氢和生物质在窑炉中混合，计划在 2021 年完成
	碳酸钙脱碳	3/待定/中等重要	基于电解槽制氢的概念已通过麻省理工学院实验室规模的测试得到验证
技术性能	先进磨削	6-9/现在/中等重要	各种技术处于不同发展阶段，有些接近商业化水平

五、长途运输减排技术需求

2019 年，交通运输占全球终端能源消费近 30%，占能源部门直接 CO₂ 排放总量的 23%。由于重型卡车、海运和航空等部门对能量和功率密度的要求较高，上述长途运输方式的电气化较为困难。2070 年，卡车运输领域，电力和氢气将成为主要动力来源；海运领域，生物燃料、氢和氨将提供超过 80% 的燃料需求；航空领域，生物燃料和合成燃料将占燃料需求的四分之三。近期内，重新卡车、海运和航空领域正在利用各种新兴技术来提高能源效率，从而有助于系统的改进和降低燃料消耗，

同时开发更清洁的燃料和能够依靠这些燃料运行的动力系统,具体技术现状如表4、表5和表6所示。

表4 重型卡车部门主要新兴技术现状

	技术	碳减排方法	TRL/可用时间/对净零排放重要性	部署情况
系统和物流效率	高炉: 废气富氢和/或CO ₂ 的去除(利用或封存)	减少空气阻力	8-9/现在-2025年/中等偏低重要	日本Energy ITS于2018年示范联网和自动驾驶汽车(CAV)技术; 2011年加州PATH计划; 2014年美国国家能源技术实验室进行智能卡车示范; 2016年欧洲开展卡车队列挑战; 2017年欧盟SARTRE项目示范车间通讯(V2V)技术
	自动驾驶卡车	能源和燃料利用率	5-8/2025-2035/重要	Plus.ai于2019年在美国进行了一次自动卡车旅行; 2020年, Einride为自动驾驶卡车招募远程操作员
能效	锂离子电池	电气化	5-9/现在-2050年/重要	汽车锂离子电池(镍锰钴、镍锰铝)以及公交车和卡车锂离子电池(磷酸铁锂)技术正不断改进; 其他新兴技术如固态锂金属电池, 可能使电动汽车在中长期内具有商业可行性
	质子交换膜燃料电池	氢	7-9/现在-2030年/重要	美国能源部通过其国家实验室与丰田、巴拉德和现代一起, 在质子交换膜的基础和应用研究以及商业化方面处于领先地位
替代燃料和动力系统	ED95发动机	燃料转换	8-9/现在/重要	斯堪尼亚率先推出了可以使用95%乙醇的压燃式发动机; 瑞典有数百辆此类卡车在运行
	电动重型卡车	电气化	8-9/现在/重要	2019年全球累计交付电动重型卡车超过23000辆, 95%以上在中国; 比亚迪、康明斯、戴姆勒、荷兰E-moss和扶桑是最早的电动重型卡车制造商; 特斯拉的半自动卡车将很快上市
	燃料电池重型卡车	氢	8-9/现在/重要	戴姆勒、日产、丰田、现代、斯堪尼亚、大众和标致雪铁龙正开发燃料电池卡车; 初创企业Nikola已经获得了大量投资, 并获得许多中型卡车订单; 联邦快递和UPS正在测试增程版燃料电池车; 欧洲h2Share项目示范了几辆超过12吨的重型卡车
替代燃料基础设施	大功率充电装置	电气化	5-6/现在-2030/重要	特斯拉正开发超快充原型(1.2-2兆瓦); 戴姆勒正研制一款功率高达3兆瓦的充电桩

加氢站	氢	9/现在/重要	2019 年全球有超过 400 个加氢站为道路车辆提供氢气，其中大部分位于日本、德国、美国和中国；许多 70 兆帕加氢站正在建设中
电动道路系统	电气化	6-9/现在/重要	西门子已在瑞典和德国的高速公路上建造了电动汽车高速公路示范系统，总长超过 30 公里；道路输电和传感设计正在测试中

表 5 海运部门主要新兴技术现状

	技术	碳减排方法	TRL/可用时间/对净零排放重要性	部署情况
远洋船	氨燃料内燃机	燃料转换	4-5/2022/2030 年/重要	全球领先的造船商最近合作开发了一种氨内燃机深海油轮，将于 2030 年实现商业化；各造船厂已宣布开发使用氨内燃机大型船舶；曼恩能源和瓦锡兰公司分别宣布开发氨燃料发动机，预计将于 2023 年投入运行
	氢燃料内燃机	燃料转换	4-5/2025/2030 年/重要	现代重工计划在 2022 年前开发出大型氢内燃机；日本海上航运零排放路线图的目标是到 2030 年实现氢燃料内燃机大型船舶商业化
中短途船舶	氨燃料电池	燃料转换	4-5/2030 年/重要	欧盟 ShipFC 项目计划开发一艘 2 兆瓦氨动力燃料电池船，并于 2023 年投入使用
	氢燃料电池	燃料转换	7/2020 年/重要	几艘氢燃料电池船大型原型已经完成测试；欧盟“地平线 2020”旗舰项目正在两艘小型船舶上示范技术可行性
	氢燃料内燃机	燃料转换	8/2020 年/重要	2017 年一艘同时燃烧氢气和柴油的船 Hydroville 开始运营；贝赫公司(BeHydro)宣布计划从 2020 年开始开发 0.8-2.8 兆瓦的氢内燃机
	纯电动动力系统	燃料转换	8/2020 年/重要	北欧国家正在率先开发纯电池电动船舶，可行驶几百公里；到 2022 年，挪威将有 80 艘纯电动渡轮
停泊时使用岸电	岸电	燃料转换	9/2020 年/中等重要	全球有 80 多个港口（主要在欧洲）配备用于岸电的基础设施；越来越多船舶配备了岸电设备
风力辅助推进	轻帆	能源效率	7-8/2020 年/中等重要	一些公司正在商业化，并在新造和现有船上安装轻帆
	弗莱特纳旋翼/帆	能源效率	8/2020 年/重要	一些公司正将这些技术商业化，配备该技术的船正在运行测试阶段

表 6 航空部门主要新兴技术现状

技术	碳减排方法	TRL/可用时间/对净零排放重要性	部署情况	
发动机	超高涵道比 (UHBR) 发动机	燃料转换	5/2030-2035/重要	罗尔斯-罗伊斯公司超级风扇 (UltraFan) 的地面测试将于 2021 年开始,节油潜力达到 25%; 制造商与空客在欧盟 Clean Sky 2 计划下合作开发 UHBR 发动机, 将于 2030 年面世
	开式转子发动机	燃料转换	5/2035 年/重要	GE36 开式转子发动机 20 世纪 80 年代就进行了示范; 2017 年, 赛峰 (SAFRAN) 对一个示范模型进行了地面测试, 计划于 2030 年上市
机身	氢燃料电池	燃料转换	3/待定/中等重要	波音公司和美国国家航空航天局在 2013 年之前进行了小规模原型试飞, 空客公司在 2019 年进行了试飞; 尽管概念已经得到验证, 两家制造商均未明确大型机身建造计划
替代动力系统	混合动力飞机	燃料转换	4-5/待定/中等重要	空客公司和罗尔斯-罗伊斯公司正在 E-fanx 项目中开发一种混合动力飞机原型, 计划到 2021 年进行试飞; 莱特电气计划在 2030 年推出一架 186 座的短程飞机; 小型混合动力飞机 (Cassio 和 Ecopulse) 已经完成飞行试验
	纯电动飞机	燃料转换	3/待定/中等重要	2019 年, 在加拿大一架装有电池和电动发动机的九座水上飞机进行了首次飞行 (航程约为 160 公里), 开创了短距离小型电池电动飞机的先河
	燃料电池飞机	燃料转换	3/待定/中等重要	德国航天中心在 2016 年测试了一架燃料电池驱动的四座滑翔机; 波音公司在 2008 年测试了一个燃料电池飞机原型; 目前还没有宣布大型燃料电池飞机的计划

六、更快创新情景实现 2050 净零排放

与可持续发展情景相比, 更快创新情景通过加强能源技术创新, 将进一步减少碳排放近 100 亿吨, 相当于目前能源相关碳排放近 30%, 有望在 2050 年实现净零排放。更快创新情景中, 到 2050 年交通碳排放将降至 11 万吨 (主要来自重型卡车、航空和海运); 工业碳排放将降至近 9 亿吨 (主要来自钢铁、水泥和化学品生产); 建筑碳排放将降至 3 亿吨。这些剩余排放将被其他技术领域的负排放抵消。

在可持续发展情景中, 许多因素会影响技术应用的速度, 通过了解不同能源技术的特点 (如表 7 所示) 有利于加快创新周期促进技术应用。

表 7 不同能源技术类型的创新属性

属性	描述	过去的技术	可持续发展情景中的技术
体积小到可以批量生产	小型装置可以加速原型设计和测试。新一代技术每隔几年就会上市，并伴随着相关的创新改进。某些情况下不匹配的投资和消费周期可能导致供过于求和激烈的市场竞争	光伏；锂离子电池	热泵；燃料电池
模块化	模块化提供了无法批量生产但较容易标准化并安装至设施中的较大单元。好处是降低了资本要求，减少了与规模扩大相关的风险，并使部署速度与价值链中的其他要素相匹配	光伏；电解铝	基于固体吸附剂的直接空气碳捕集；化工产品电解制氢路线；小型模块化核反应堆；标准化建筑改造
提供消费者重视的服务	技术需要在利基市场中应用，这些市场中少数消费者愿意为其特定的利益支付溢价。终端用户尤其是早期用户，往往会为提供便利、娱乐和名誉利益的产品支付额外费用。虽然许多低碳技术的性能或经济优势有限，但可提供声誉和其他好处	乘用车；智能恒温器；发光二极管；微型出行工具；智能手机	自动、联网、电动的共享汽车；电器互联；建筑光伏一体化；分散的能源交易；电动变色门窗
溢出效应（与其他技术进步有很强的协同作用）	在不同部门的研究人员和工程师之间进行共享，减少对专门能源研发的需求。一项技术在一个应用中商业化所需的进步可能有益于另一个不相关的应用。例如电动汽车被推广了几十年，直到消费电子产品电池、混合动力汽车、轻量化和电机的溢出效应助力了电动汽车发展	联合循环燃气轮机；光伏；车用锂离子电池；照明发光二极管；海上风能和地热	CCUS；电池、燃料电池和电解槽；生物燃料；智慧能源互联网
可作为即用型替代或快速连接使用	一项新技术不需要改变相关设备或基础设施，可以更快地采用。碳捕集可能是此类装置，但需要对相关基础设施进行重大改造（例如碳封存）	某些生物燃料，如加氢植物油；生物甲烷催化转化器；脱硫	氢基合成燃料；使用现有道路和电力基础设施的电动汽车；航空生物燃料
用数字化解决方案取代硬件或人工	许多能源部门已经用数字技术取代了人工或模拟过程。数字技术创新需要有限的资金，并且允许不断的试验和原位升级。此外，许多数字产品可产生具有商业价值的的数据，意味着投资风险由能源相关价值流和数据相关价值流分担。	地震地质勘探；电网管理	自动、联网、电动和共享的车辆；被动需求响应；数字孪生运行和维护；3D 打印
最小限度地依	碳捕集的成功在很大程度上取决于	生物质发	可再生能源与储能；

<p>赖于价值链中其他技术的改进</p>	<p>CO₂ 运输、利用和封存的同步发展；波动性可再生能源发电通常依赖于电网或储能解决方案的改进。这些依赖性增加了价值链中每一个耦合元素的研发风险，并可能显著减缓创新的步伐</p>	<p>电；核能；发光二极管；煤气化</p>	<p>强化冶炼还原钢</p>
<p>适应当地条件的最低需要</p>	<p>一些技术，如电池，在新的地区部署时可能需要适应当地的气候条件。燃料供应的变化，例如生物质气化，也会使全球市场的技术标准化更加困难。在某些情况下，最终产品的用途需要适应当地消费者的偏好、法规和期望</p>	<p>内燃机；涡轮机</p>	<p>新型化学电池；燃料电池</p>

在更快创新情景中需进一步扩大能源部门技术变革。更快创新情景中，到 2050 年可再生能源新增装机容量将提升至 770 吉瓦/年，比可持续发展情景高出近 50%。与可持续发展情景相比，2050 年更快创新情景中氢、氨、碳氢化合物合成燃料和生物燃料等替代燃料的需求将增长 20% 左右，以抵消化石燃料使用量下降 40% 的影响。与可持续发展情景相比，2050 年更快创新情景中电气化、CCUS、生物能和氢能将贡献额外减排量的 90%。电气化和生物能的发展将使几乎 60% 的额外减排成为可能，其中电气化的贡献更大。

七、助力清洁能源转型的有效措施

长期愿景应得到适合当地基础设施和技术需求的清洁能源转型政策支持，各国政府应围绕五个核心领域制定有效的战略政策：

(1) 解决现有用能资产的排放问题：现有大部分资产将在未来数十年内继续使用，可利用投资周期表提前淘汰某些资产或将其重新利用。

(2) 在技术早期应用阶段加强技术市场转化：各国政府应制定市场框架，通过适当的手段和激励措施，使私人资本投资效益最大化。

(3) 开发和升级支持技术部署的基础设施：进行战略规划，克服清洁能源技术部署中的瓶颈问题。

(4) 加大对研发示范的支持力度：加大开发新的早期技术，以取得快速进展；通过增加公共研发经费支持大规模示范项目的落成。

(5) 扩大国际科技合作：进行国际合作，利用现有的多边论坛等机制。

(汤匀 岳芳)

BP 能源展望 2050：可再生能源引领转型 氢能作用日益凸显

9月14日，英国石油公司（BP）发布《世界能源展望 2020》报告¹⁴，基于三种预测情景（快速转型、净零排放和一切照旧），对至 2050 年的全球能源供需、碳排放、投资进行了预测。报告指出，未来 30 年全球能源需求增速将低于过去 20 年，能源需求增长将完全来自新兴经济体，能源消耗和碳排放地区差异将缩小，可再生能源的飞速增长将引领能源低碳转型，氢能也将发挥越来越重要的作用。关键点如下：

一、能源转型的全球背景

到 2050 年，全球 GDP 将持续增长但增速放缓。受疫情影响，2018-2050 年全球 GDP 年均增速约为 2.6%，远低于过去 20 年的平均水平。到 2050 年，世界人口将增加 20 亿以上达到约 96 亿人。发展中经济体将占世界经济增长的 80% 以上，中国和印度贡献了约一半的增长。预计在未来 30 年内，城市化进程将相对较快的国家将占全球 GDP 增长的一半以上，而 2018 年仅占三分之一。

经济发展将导致能源需求增长，但增速低于过去 20 年。快速转型情景（0.3%）和净零排放情景（0.3%）中，2018-2050 年一次能源的年平均增速显著低于过去 20 年（2.0%）。一切照旧情景中一次能源需求年增长（0.7%）比其他两种情景更快、更持久，表明能效增长更慢。

疫情对经济活动和能源需求具有持续性影响。快速转型情景中，全球 GDP 水平将在 2025 年和 2050 年分别降低约 2.5% 和 3%。印度、巴西和非洲的经济结构最易受到疫情影响。疫情对石油需求影响最为明显，2025 年和 2050 年分别减少 300 万桶/天和 200 万桶/天。如果疫情进一步扩大，可能会造成更大的经济损失：导致全球 GDP 水平到 2025 年和 2050 年分别降低 4% 和近 10%；到 2050 年能源需求与石油需求将分别下降 8% 和 500 万桶/天。

二、部门能源消费预测

所有部门的能源消费均有所增长，但增速减缓。2018 年，工业能源需求占全球 45%，非燃烧用能占 5%，其余用于建筑（29%）和交通（21%）。快速转型情景中，到 2050 年交通、工业和建筑部门一次能源需求增速相比 21 世纪前 20 年有所放缓，工业和建筑部门最为明显，交通部门能源需求增长将占总增量近 60%。净零排放情景中，到 2050 年电力和氢能的需求进一步增加，尤其在交通和工业领域。一切照旧情景中，到 2050 年交通、工业和建筑部门一次能源需求量都将大幅增加，但增幅低于过去 20 年。

工业部门能源消费向发展中经济体和低碳能源转变。到 2050 年，一切照旧情境下工业部门一次能源需求将增长约 15%（年均增速 0.5%），远低于过去 20 年增速；

¹⁴ Energy Outlook 2020 edition. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook>

其他两种情景下能源需求相对稳定。三种情景下，工业能源需求增长都集中在新兴国家（中国以外），尤其是印度、亚洲其他国家和非洲，这是因为能源和劳动力密集型工业活动越来越多地从发达国家转移到了发展中国家。三种情景下，到 2050 年工业部门煤炭使用量都急剧下降，在快速转型情景和净零排放情景中更为明显，取而代之的是电力、生物质和氢的份额不断增加。

发展中国家生活水平的提高将促使建筑部门用电量增加。随着生活水平的提高，照明和电器需求增多，促使建筑部门用电量大幅增加，发展中国家尤为明显。快速转型和净零排放情景下，亚洲和非洲发展中国家建筑用能显著增加，但被发达国家建筑能源消费的大幅下降抵消，因此两种情景下建筑总年均能源消费将上升 0.2% 或 0.1%。日益增加的用电量挤占了石油、天然气和煤炭的需求份额，到 2050 年，建筑部门对石油的需求已基本为零，对天然气的需求将下降 50% 或 90%。

交通运输能源消费增长放缓，石油消耗在 2020 年代中后期达到顶峰。三种情景下，客运和商业运输能源需求强劲增长，但被效率提升所抵消，尤其是乘用车、卡车和航空。交通运输部门一次能源需求增长完全来自发展中国家，发达国家基本持平。到 2050 年，石油在运输部门终端能耗占比从 2018 年的 90% 下降至约 80%（一切照旧情景）或 40%（快速转型情景）或 20%（净零排放情景）。相反，电力、氢能、生物燃料和天然气所占能耗份额增加。在快速转型情景和净零排放情景中，电力在终端能源消耗中占比将增至 30% 或 40%。

三、地区能源需求预测

全球能源需求增长将完全来自新兴经济体。三种情景下，到 2050 年新兴国家约占能源需求的 70% 左右（2008 年约为 50%）。发达世界能源消费下降的主要原因是能效提高节约的能源超过了能源需求增长。新兴经济体的能源消耗增长由印度和其他亚洲国家引领，两国能源需求增长之和超过快速转型和净零排放情景中全球能源需求总增长，是一切照旧情景下全球总增长的 60%。中国能源需求增长急剧放缓，由于能效加速提升以及经济结构从高耗能产业持续转移，到 2050 年中国在快速转型和净零排放情景中能源需求已回到 2018 年水平。尽管如此，三种情景下中国仍然是最大的能源市场，到 2050 年将占世界能源需求的 20% 以上，几乎是印度的两倍。

全球能源消耗和碳排放量的地区差异缩小。2018 年，发达国家人均能源消费是新兴经济体的 3 倍多，美国是印度的 12 倍。快速转型情景下，到 2050 年发达经济体和新兴经济体能源消耗差异缩小；然而发达国家人均能源消费仍为新兴经济体的 2 倍多。其他两种情景也呈现相同趋势。快速转型情景下，人均碳排放差异显著减小，主要原因是人均能源消费减少，以及发达经济体和新兴经济体燃料使用平均碳强度的改善程度大致相同。

到 2050 年，全球仍存在严重的能源不平衡状态。2018 年，全球石油产量近 3/4

进行了国际贸易，天然气产量约 1/4 进行了国际贸易；中国 70% 的石油和 40% 以上的天然气消费来自进口，印度则分别为 80% 和 50%。快速转型情景中，由于石油需求下降 50%，到 2050 年中国油气净进口量略有下降；印度则由于煤改气等导致油气净进口量增加一倍以上。油气出口将继续由中东和俄罗斯主导；美国油气出口将在 2030 年代达峰，之后随着致密油和非传统油气产量下降而下降。

四、分品种能源供需预测

可再生能源将引领能源结构向低碳转型。快速转型和净零排放情景中，可再生能源（不包括水电）增长均超过 10 倍，其在一次能源中占比将从 2018 年的 5% 上升至 2050 年的约 40% 或 60%；一切照旧情景中也占一次能源需求总增长的 90%。风能和太阳能将推动可再生能源发电快速增长，到 2050 年成本分别下降 30% 和 65%（快速转型）或 35% 和 70%（净零排放）。

化石能源在一次能源占比从 2018 年的近 85% 下降到 2050 年的约 40%（快速转型情景）或约 20%（净零排放情景）。煤炭消费下降最为突出，在快速转型和净零排放情景中到 2050 年降幅超过 80%；天然气前景最为持久，到 2050 年其消费量在快速转型情景下与 2018 年基本持平，净零排放情景下降低 40%，一切照旧情景下增加 35%；到 2050 年，石油需求在快速转型和净零排放情景下分别下降 50% 和 80%，在一切照旧情景下比 2018 年水平略有下降。

随着世界向低碳能源转型，氢能将扮演越来越重要的角色。随着技术发展、成本下降以及碳价上涨，氢能将在 2035-2050 年显著增长。到 2050 年，氢能在终端能源消费中约占 7%（快速转型）或 16%（净零排放）。氢为工业过程高温供热具有特殊优势，到 2050 年将占工业终端能源消费的 10% 左右（快速转型）或 18%（净零排放）；氢在交通中主要用于长途运输，到 2050 年约 7%（快速转型）或 10%（净零排放）的车公里数由氢能驱动。快速转型情景中，中国和发达经济体中氢的使用最为明显；净零排放情景中，氢气的使用范围更广，在印度和亚洲其他发展中国家也有显著增长。

五、能源相关碳排放预测

快速转型和净零排放情景中碳排放量显著下降。受疫情影响，能源相关碳排放量短期内急剧下降。快速转型情景下，到 2050 年能源相关碳排放将比 2018 年下降约 70% 至略高于 90 亿吨；净零排放情景则将下降 95% 以上达到 150 亿吨左右。一切照旧情景下，能源相关碳排放下降幅度有限，到 2050 年仅下降 10% 左右。快速转型情景下，到 2050 年交通部门将是碳排放最大来源（约占 1/3），工业和电力部门各占约 1/4。净零排放情景下，电力部门的负排放（主要来自生物质发电结合 CCUS）将抵消一部分工业和交通排放。

低碳转型将使全球能源系统发生根本变化。快速转型和净零排放情景中，到

2050 年全球化石燃料使用量下降 50% 或 70%，油气消费将下降 1/3 或 2/3。2050 年，电力将占终端能源消费的 50%（快速转型）或 60%（净零排放）。到 2050 年，氢气将占终端能源消费的 7%（快速转型）或 16%（净零排放）。传统化石能源消费减少还导致生物能的作用日益增强。到 2050 年，生物能源约占一次能源的 7%（快速转型）或 10%（净零排放）。

六、能源相关投资预测

能源转型要求投资方式发生重大转变。快速转型和净零排放情景中，风能和太阳能发电厂投资将显著增加，2020-2050 年期间年均投资 5000-7500 亿美元，比 2013-2018 年的投资水平高两到三倍；一切照旧情景中为 3000-4000 亿美元。净零排放情景中，风能和太阳能投资呈现驼峰状，后半段预测期内可能出现供应链产能过剩问题。快速转型和净零排放情景中，石油和天然气需求的显著下降，上游投资步伐也相应迅速放缓。

石油和天然气新生产设施仍需大量投资。如果石油生产商未来 30 年只投资于维护现有（棕地）设施，以及完成已获批项目，石油产量年均将下降 4% 以上，到 2050 年全球石油供应将降至 2500 万桶/天，天然气产量年均降幅为 4.5%，难以满足三种情景下的需求水平。到 2050 年仍需对油气上游新生产设施进行大量投资，预计约为 9-20 万亿美元。净零排放情景中，到 2035 年需投入数万亿美元的石油投资以确保充足供应，但 2035-2050 年需求下降速度超过产量的自然下降速度，意味着到 2050 年部分投资设施可能无法被充分利用。

（岳芳）



《洁净能源科技动态监测快报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心

联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

联系人：陈伟 郭楷模 岳芳

联系电话：(027) 87199180

电子邮件：energy@whlib.ac.cn