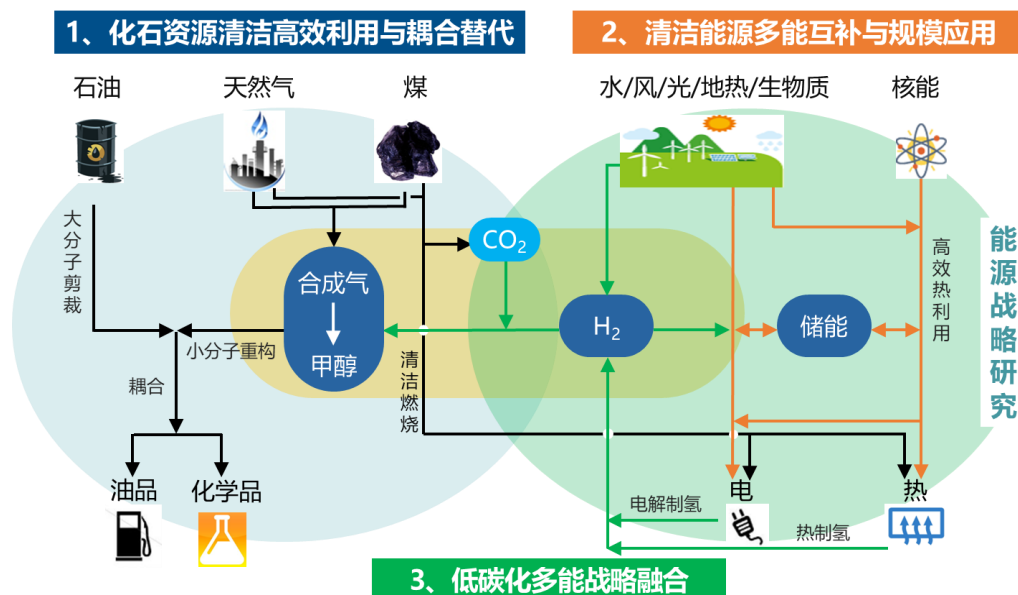




洁净能源科技动态监测快报

2021 年第 01 期（总第 15 期）



本期看点

- 美国能源部《储能大挑战路线图》提出五大重点领域行动
- 欧洲电池技术创新平台发布 2030 战略研究议程
- 日本《绿色增长战略》提出 2050 碳中和发展路线图
- 加拿大发布国家氢能战略提出 2050 愿景
- 牛津能源研究所：碳中和承诺下中国天然气发电的挑战与趋势
- IEA 和 OECD-NEA 联合发布电力成本估算报告

目 录

2021 年第 01 期 (总第 15 期)

◆ 化石资源清洁高效利用

- NETL 总结先进能量转换系统关键技术 2020 年研发进展 2
- DOE 投入 1570 万美元开发煤炭新用途..... 3

◆ 清洁能源多能互补

- 美国能源部《储能大挑战路线图》提出五大重点领域行动..... 5
- 欧洲电池技术创新平台发布 2030 战略研究议程..... 7
- DOE 资助 4500 万美元推进先进太阳能技术研发..... 12
- DOE 资助 3500 万美元支持生物能技术研发..... 13
- 新工艺助力二维钙钛矿太阳能电池获得创纪录转换效率..... 14

◆ 低碳化多能融合

- 日本《绿色增长战略》提出 2050 碳中和发展路线图..... 16
- 加拿大发布国家氢能战略提出 2050 愿景..... 19
- DOE 资助近 1.3 亿美元支持先进可持续交通能源技术研发..... 23
- 原位表征识别铁金属氮掺杂碳材料催化剂活性耐久性位点..... 24
- 美科学家首次揭示锂电池锂沉积热力学作用机制..... 26

◆ 能源战略研究

- 牛津能源研究所：碳中和承诺下中国天然气发电的挑战与趋势..... 28
- IEA 和 OECD-NEA 联合发布电力成本估算报告..... 31

本期概要

美国能源部国家能源技术实验室 (NETL) 总结了该机构 2020 年在先进能量转换系统关键技术方面的研发进展: NETL 一直致力于开发利用化石燃料、可再生能源生产电力、燃料和化学品的先进能量转换系统技术, 目前进行的相关研究包括: 高效热电联产系统的先进涡轮机翼型; 旋转爆震发动机; 磁流体动力发电; 先进诊断技术。

美国能源部 (DOE) 发布《储能大挑战路线图》, 提出未来推进储能发展的五大重点领域行动: DOE 将在技术开发、制造和供应链、技术转化、政策与评估、劳动力培养五大领域开展行动, 除进一步推进储能基础研究外, 还强调加速储能相关技术从实验室向市场的转化, 重点关注增强美国国内具有竞争力的大规模制造能力, 并确保供应链安全性。该路线图的目标是: 到 2030 年, 美国国内储能技术及设备开发制造能力能够满足美国市场所有需求, 无需依靠国外来源。

欧洲电池技术创新平台“电池欧洲”(ETIP Batteries Europe) 发布《电池战略研究议程》, 明确了到 2030 年欧洲电池技术研究和创新优先事项: 该议程从电池应用、电池制造与材料、原材料循环经济、欧洲电池竞争优势四方面, 提出了未来十年的研究主题及应达到的关键绩效指标。

日本经济产业省发布《绿色增长战略》, 提出到 2050 年实现碳中和目标, 构建“零碳社会”: 预计到 2050 年, 该战略每年将为日本创造近 2 万亿美元的经济增长。为落实上述目标, 该战略针对 14 个产业提出了具体的发展目标和重点发展任务, 主要包括海上风电, 氨燃料, 氢能, 核能, 汽车和蓄电池, 半导体和通信, 船舶, 交通物流和建筑, 食品、农林和水产, 航空, 碳循环, 下一代住宅、商业建筑和太阳能, 资源循环, 生活方式等。

加拿大自然资源部发布《加拿大氢能战略》, 提出至 2050 年的氢能战略愿景和发展路径: 通过建设氢能基础设施以及促进终端应用, 使加拿大成为全球前三大氢供应国。近期 (至 2025 年) 将着重奠定氢能基础, 中期 (2025-2030 年) 将实现氢能行业增长和多样化, 长期 (2030-2050 年) 将实现氢能市场的快速扩张。该战略明确提出, 将在战略合作、降低投资风险、研发创新、规范和标准、扶持性政策和法规、公众意识、区域规划、国际市场 8 个方面展开 32 项行动。

牛津能源研究所发布观点文章《中国电力行业的天然气: 挑战与前进道路》, 分析了“十四五”规划和 2060 年碳中和目标背景下中国天然气发电现状、面临挑战和未来趋势: 预计“十四五”期间中国天然气发电将加快增长, 到 2025 年将新增 40-50 吉瓦发电机组, 电力行业天然气消费量将翻一番达到 750-800 亿立方米。但中国政府的 2030 年碳达峰及 2060 年碳中和承诺将限制所有化石燃料消费, 长期内天然气发电不可能显著发展。

国际能源署 (IEA) 和经合组织核能署 (OECD-NEA) 联合发布《电力成本估算报告 2020》, 指出低碳技术发电成本正在持续下降, 且日益低于传统化石燃料: 近年来, 可再生能源平准化发电成本 (LCOE) 具有较强竞争力; 新建核电站发电成本保持稳定, 但长期运行核电站是发电成本最低的低碳发电技术选择; 以目前碳价 30 美元/吨 CO₂ 计算, 且碳捕集与封存技术迟迟未取得突破, 燃煤发电成本优势已逐渐不再; 燃气发电成本在不断下滑, 更具市场竞争力。

化石资源清洁高效利用

NETL 总结先进能量转换系统关键技术 2020 年研发进展

12月14日，美国能源部国家能源技术实验室（NETL）发布文章¹，总结了该机构2020年在先进能量转换系统关键技术方面的研发进展。NETL一直致力于开发利用化石燃料、可再生能源生产电力、燃料和化学品的先进能量转换系统技术，目前进行的相关研究包括：高效热电联产系统的先进涡轮机翼型；旋转爆震发动机；磁流体动力发电；先进诊断技术。主要进展如下：

1、高效热电联产系统的先进涡轮机翼型

NETL 热科学团队正在开发高度可靠的热电联产系统，为该系统的燃气轮机研究先进翼型。该项研究的目的是通过新翼型的冷却设计、新型材料开发和 3D 打印技术以提高燃气轮机效率。该项目已完成的工作集中在通过开发翼型冷却设计提高其耐用性，使涡轮机点火温度达到 1300 摄氏度。研究团队正在确定最有前景的翼型结构用增材制造材料，预计将在 2021 年重点进行该项工作，并对翼型初步设计进行测试。

2、旋转爆震发动机

NETL 研究团队正与其他美国联邦机构合作开发旋转爆震发动机（RDE）技术，该技术可产生可控的连续爆震波，用于改进的涡轮机，可避免常规涡轮机的压力损失和效率下降，减少燃料消耗，降低碳足迹和环境影响。该项技术既可用于陆地发电，也可用于船舶、飞机、航天器等推进装置。NETL 的研究主要针对发电系统，2020 年进行了优化 RDE 与燃气轮机集成的设计、开发可延长运行时间的水冷式装置、氮氧化物排放的实时测量等。

3、磁流体动力发电

磁流体动力发电技术能够提高化石燃料发电厂效率并降低碳捕集成本，其原理是从高速流动的高温电离气体中获取动能并转换为电能。2020 年 NETL 在超高温磁流体动力发电机的研究方面取得了新突破，将新型陶瓷设计用于发动机中，使运行温度高于钾盐沸点，后者为磁流体发电系统常用的电离助剂。

4、先进诊断技术

高效的先进能量转换系统往往需要高温、高压运行环境，难以应用常规诊断技术。NETL 基础燃烧实验室研究团队在 2020 年开发了先进的诊断技术，能够提供准

¹NETL ADVANCES PIVOTAL ENERGY CONVERSION ENGINEERING TECHNOLOGIES IN 2020.
<https://netl.doe.gov/node/10394>

确、真实的数据，以验证下一代化石燃料和可再生燃料（如氢）燃烧发电模型，如直接发电（DPE）系统和 RDE 系统。其主要的诊断研究包括：将激光诊断技术用于 DPE 系统的超高温环境中测量温度；使用激光探针、光谱等技术测量磁流体发电系统的流体导电率；将高速摄像技术用于捕捉 RDE 研究中超音速爆震波与进气道相互作用的过程。

（岳芳）

DOE 投入 1570 万美元开发煤炭新用途

近期，美国能源部（DOE）陆续投入 1570 万美元，支持开发高性能煤基材料，以扩展煤炭作为碳基材料来源在建筑、基础设施等方面的新用途。具体内容如下：

一、用于建筑、基础设施等煤基新材料开发

12 月 10 日，DOE 宣布在“先进煤炭加工”计划下，投入 870 万美元支持 14 个煤基新材料开发项目，以应用于建筑、基础设施等领域²：

1、用于住宅/商业建筑的煤基新材料。包括：①开发轻质、高性能和可扩展的煤基建筑复合材料，含煤量高达 95%（质量分数），物理、化学和热性能超过普通硅酸盐水泥，整体加工成本低于 10 美元/吨；②开发煤基纤维水泥板替代新材料，进行实验室规模挤压试验以评估材料性能和技术可行性，并开发分子动力学模拟以预测材料特性；③开发煤基砖块，将使用无烟煤和塑料废料粘合剂制造煤基砖块，并分析技术经济性和进行市场调查；④开发高性能煤基商用新型复合建筑面板材料，将以煤为主要原料开发原型刚性板，进行性能测试并制定扩大生产规模的计划，同时验证制造成本；⑤开发高性能环保煤基建筑材料，将利用煤热解产物开发建筑材料，包括混凝土砖和碳基结构件，含碳量低于 70%（质量分数），以生产具有低成本和低碳足迹的建筑材料。

2、用于基础设施的煤基组件。包括：①开发煤塑复合材料管道基础设施组件，含碳量为 70%、含煤量为 51%，比现有塑料管道具有更佳的成本、性能和环境效益；②开发用于基础设施产品的轻质高强度煤基建筑材料，比同类商业产品更轻、更结实耐用和耐磨，可实现更大的建筑设计自由度；③利用煤基固体碳材料开发下一代多功能智能路面，将开发和示范可用于野外的多功能智能路面，通过煤基固体碳材料建造和改善沥青路面。

3、煤基高价值碳产品。包括：①开发煤转化为石墨烯的低成本技术，将应用过程工程、在线监测、人工智能和模块化工业设计，示范将煤转化为高质量石墨烯生产设备（250 吨/天）的技术经济可行性；②开发将煤转化为石墨烯的简易技术，尝试采用一种突破性的闪光焦耳加热（FJH）工艺，将不同种类的煤转化为高质量石墨

² DOE Invests \$8.7 Million to Foster New Uses for Domestic Coal Resources. <https://www.energy.gov/fe/articles/doe-invests-87-million-foster-new-uses-domestic-coal-resources>

烯，并利用人工智能技术进行优化，评估其技术经济性，以促进该技术的商业化；③利用褐煤生产锂离子电池负极碳材料，将以褐煤制备的沥青为主要原料，生产用于锂离子电池的高性能硅碳（Si-C）复合材料，评估基于该材料的电极性能并与商用电极比较，研究小试规模生产的可行性；④利用煤炭生产高质量多功能碳量子点，将开发一种新型、边界、低温、经济高效且环保的技术，以生产高价值煤基量子点，进行两个应用样例的评估，如用于太阳电池和光催化。

4、煤基碳泡沫的连续不间断生产。包括：①开发大气压环境下煤基碳泡沫产品的连续加工工艺，显著降低生产成本，为建立大规模生产平台奠定基础。

5、碳基建筑原型的设计、研究、开发、验证和制造。包括：①开发使用碳基建筑材料的模块化房屋，将使用含碳量至少 71% 的碳基材料，具备轻质、安装快、设计灵活等优点。

二、碳基建筑原型设计、验证和制造

12 月 14 日，DOE 宣布投入 700 万美元³，支持设计、开发、验证和制造碳基建筑原型。本次招标重点针对一个技术主题：利用碳基材料设计和建造部分建筑结构。将通过原型设计，最大限度利用新型碳基产品。建筑原型将使用含碳量至少 70% 的建筑材料，其中一半以上必须由煤炭生产。将通过原型设计和制造，示范碳基建筑材料的技术和经济可行性，包括抗弯强度、浸出和氧化行为、热稳定性、水吸附性等。

（岳芳）

³ DOE Announces More Than \$7 Million for Carbon-Based Building Projects. <https://www.energy.gov/fe/articles/doe-announces-more-7-million-carbon-based-building-projects>

清洁能源多能互补

美国能源部《储能大挑战路线图》提出五大重点领域行动

12月21日，美国能源部（DOE）发布《储能大挑战路线图》⁴，提出将在“技术开发，制造和供应链，技术转化，政策与评估，劳动力培养”五大重点领域开展行动，以建立美国在储能领域的领导地位。作为DOE第一份综合性储能战略，该路线图除了进一步推进储能基础研究外，还强调加速储能相关技术从实验室向市场的转化，重点关注增强美国国内具有竞争力的大规模制造能力，并确保供应链的安全性。路线图提出：到2030年，美国国内的储能技术及设备的开发制造能力将能够满足美国市场所有需求，无需依靠国外来源。关键点如下：

一、“储能大挑战”路线图背景

2017-2020年期间，DOE在储能相关技术研发投入了16亿美元资金，平均每年4亿美元。虽然储能相关各业务部门已制定了各自的发展目标与方向，但DOE尚未提出解决储能问题的全面战略。为此，DOE于2020年1月推出“储能大挑战”计划，旨在加速下一代储能技术的开发、商业化和应用，维持美国在储能领域的全球领导地位。

“储能大挑战”路线图的使命是成为全球储能创新、制造和应用的领导者，愿景是通过储能技术使美国乃至全球能源系统更具弹性、灵活性、可承受性和安全性。

二、路线图是基于“美国创新、美国制造和全球部署”目标的一个全部门战略

路线图设定了“美国创新、美国制造和全球部署”三大战略目标，加速一系列储能技术的创新。DOE确定的成本目标，包括：

（1）到2030年，长期固定式储能的平均成本降至0.05美元/千瓦时，比2020年降低90%。实现这一目标将推动储能在一系列领域的商业应用，包括：满足高峰需求期间的负荷；保障电网能够满足电动汽车快速充电；确保关键基础设施（包括信息技术）的可靠性。

（2）到2030年，300英里续航里程电动汽车的电池组制造成本降至80美元/千瓦时，与目前143美元/千瓦时的锂离子电池成本相比降低44%。实现这一目标将使电动汽车具有成本竞争力，同时有利于固定式储能电池的技术发展。

三、为实现“美国创新、美国制造和全球部署”三大目标，路线图提出在五个领域开展重要行动

为实现DOE提出的“美国创新、美国制造和全球部署”三大战略目标，“储能

⁴ Department of Energy Releases Energy Storage Grand Challenge Roadmap.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-releases-energy-storage-grand-challenge-roadmap>

大挑战”路线图将在以下五个领域开展行动，包括：

(1) 技术开发：使 DOE 当前和未来的储能研发活动围绕以用户为中心和维持长期领导地位的目标进行。具体包括：①开发一组利益相关方案例，识别并更新 2030 年及以后的储能技术性能和成本目标；②确定能在 2030 年前实现成本目标的研发路径和储能技术组合；③开发标准化的度量标准，以促进技术成本和性能评估；④支持美国创新生态系统（包括国家实验室、大学、初创企业）所有储能技术从实验室到市场转化的路径。

(2) 制造和供应链：为美国储能制造业发展技术、方法和策略，以支持和加强美国在创新和持续规模制造的领导地位。包括：①深入理解各种储能技术生产和制造中的技术障碍，识别关键技术指标；②支持创新，降低制造成本，克服技术壁垒；③加速新兴制造工艺工业化推广，加强美国在商业规模测试/验证创新技术的能力；④制定系统设计和测试标准化条例，简化新兴储能技术制造创新的应用过程；⑤加深理解并追求创新，加强国内供应链（包括与盟友和合作伙伴）合作，提高国内供应链弹性，推进关键材料采购的多样化，改善回收利用过程，减少对国外原材料和零部件的依赖；⑥建立国内电池制造生态圈。

表 1 不同储能技术的制造挑战

	先进加工和回收，使关键材料采购多样化	降低制造成本			提高技术性能			扩大生产规模	制定标准化系统设计和测试协议
		过滤膜	先进正极、负极、电解液	安全壳结构和材料	电槽	先进储能材料	双极板		
锂离子电	√		√				√	√	
其他化学	√	√	√		√			√	√
液流电	√	√	√	√			√	√	√
机械储能					√			√	√
化学储能	√	√	√		√	√		√	
热储能				√	√		√	√	√

(3) 技术转化：通过现场验证、示范项目、公私合作、融资业务模式开发以及高质量市场数据的传播，来确保 DOE 研发成果向国内市场转化。具体包括：①加强外部合作伙伴对 DOE 国家实验室专家、设备和知识产权的获取能力，以加速技术创新推向市场进程；②开发全球化项目进行技术测试，生成用于技术验证和标准化评估的数据，降低技术市场转化风险；③寻求行业合作和跨部门参与，将私营部门与政府联系起来，解决储能技术的融资风险；④提供行业和市场分析，支持投资、市场开拓和决策活动；⑤扩大数据收集和分析能力，将 DOE 资助项目与商业机遇联系起来。

(4) 政策与评估：提供数据、工具和分析方法，以支持政策决策并最大程度地发挥储能的价值。具体包括：①识别和评估联邦、州和地方政府的政策法规，对固定式和交通运输领域相关储能技术的部署、运行和价值有重大影响；②开发最前沿

的数据、工具和分析系统，解决政策评估问题；③制定一个协调、系统的客户参与计划，向利益相关方交付开发的储能技术产品；④帮助利益相关方做出明智决定，最大化能源系统和终端用户储能技术的效用和价值。

(5) 劳动力培养：培养研究、开发、设计、制造和运营储能系统的专业人才队伍。具体包括：①通过在“储能大挑战”框架下增加利益相关方的投入，加强和扩大现有计划的相关性；②对所有教育层次和目标人群进行需求评估和技能评估；③为员工发展提供创新机会，以工会为合作对象，促进应对更广泛的储能技术挑战，满足劳动力发展需求。

(汤匀)

欧洲电池技术创新平台发布 2030 战略研究议程

12月15日，欧洲电池技术创新平台“电池欧洲”(ETIP Batteries Europe)发布《电池战略研究议程》⁵，明确了到2030年欧洲电池技术研究和创新优先事项。ETIP Batteries Europe由欧盟委员会在“战略能源技术规划”(SET-Plan)框架下于2019年创建，汇集了工业界、学术界和行业协会的代表，旨在推进电池价值链相关研究和创新行动的实施，加速建立具有全球竞争力的欧洲电池产业。该议程从电池应用、电池制造与材料、原材料循环经济、欧洲电池竞争优势四方面提出了未来十年的研究主题及应达到的关键绩效指标，关键内容如下：

一、电池应用

1、交通应用

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：①电池系统，包括电池单元和系统设计及相关制造工艺，需考虑机械、电气和热等方面；②电池管理，基于知识和数据的电池管理研究，考虑算法、软件和硬件，包括传感器集成、标准化、与车辆内/外系统的互操作性以及车辆到电网技术相关研究；③用于电池设计、制造和管理的数字孪生技术；④开发评估电池性能和安全性的新方法和工具，包括结合物理和虚拟测试的方法。

2、固定式储能

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

(1) 通过创新的技术和组件降低固定式储能电池的成本，改进循环寿命，以确保最佳性能。该主题研究将改进电池能量密度、功率密度、循环和周期寿命、放电深度、充放电倍率等，并降低资本支出、运营支出等，还将进行再利用和再循环设计。**关键绩效指标：**固定式储能电池的完全等效循环寿命增至15000个循环或30年；

⁵Strategic Research Agenda for batteries.

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/batteries_europe_strategic_research_agenda_december_2020_1.pdf

充放电倍率达到 8C/8C；自放电率达到 0.1% 荷电状态/月；放电持续时间超过 10 小时。**预算：**5000 万欧元。

(2) 提高固定式储能系统安全性的技术、方法和工具。该主题研究将解决固定式储能电池系统尺寸和安装相关的安全性问题，如通过组件和系统设计来增强安全性，或通过先进建模进行运行监控以实现故障主动预防和预测。**关键绩效指标：**安全相关的系统维护和运行的运营成本下降 20%；故障报告减少 90%；建立一套监管框架和技术标准。**预算：**5000 万欧元。

(3) 开放式和可互操作的先进电池管理系统。该主题研究将开发可开放访问的电池管理系统，并对数据和格式进行标准化，有助于对电池寿命进行可靠预测并评估第二生命周期，同时将通过可互操作的先进电池管理系统促进系统的集成。**关键绩效指标：**循环寿命大于 15000 次；促进对电池的大规模部署，增加电池的再利用；成本降低 30%。**预算：**3000 万欧元。

(4) 互操作性、数字孪生和多服务模式。该主题研究将通过增强互操作性降低电池成本，更有效地实现机对机协作，通过数字孪生进行仿真模拟以将电池储能系统和混合储能系统纳入电网规划中，以及开发储能系统的多种服务。**关键绩效指标：**到 2024 年互操作性达到 3 级；到 2030 年平准化储能成本（深度放电循环下）低于 0.01 欧元/千瓦时/循环。**预算：**5000 万欧元。

(5) 电动汽车电池可持续性以及二次应用于固定式储能。该主题将解决电池二次再利用的耐久性、性能以及老化带来的安全风险，示范有效的商业模式，开发低成本的技术和生态设计用于电池拆卸和调整。**关键绩效指标：**到 2030 年可二次使用的电池占比达到 20%；所有类型电池的回收效率均得到提高。**预算：**5000 万欧元。

(6) 中长期储能。该主题将开发经济高效的系统和技术，用于中期（大于 5 小时）至长期（几星期至几个月）储能，以实现备用电源、市场套利和可再生能源电力的转移。**关键绩效指标：**中期储能自放电率低于 2%/月；长期储能自放电率低于 0.5%/月；循环寿命大于 15000 次；到 2030 年平准化储能成本低于 0.01 欧元/千瓦时/循环。**预算：**6000 万欧元。

二、电池制造与材料

1、电池制造

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

(1) 创新电池单元组件的设计及制造工艺研究。该主题将通过改进电池设计和配置，在电池单元中应用可改善性能的新型先进材料和组件，同时在电池设计阶段考虑增强安全性和可回收性。**关键绩效指标：**电池能量密度和安全性提高 40%；通过在电池单元中减少使用非活性材料，使每千瓦时的碳强度降低 25%；与当前锂电池生产相比，电池生产成本至少降低 20%。**预算：**9000 万欧元。

(2) **电池单元设计的数字化**。该主题将数字化技术用于开发先进多尺度模型、电化学以及老化机理研究,以缩短电池开发设计时间和成本,并减少对环境的影响。**关键绩效指标**: 电池单元开发成本至少下降 20%; 实验次数减少 1/5 至 1/3。**预算**: 5000 万欧元。

(3) **制造设备和工艺创新**。该主题将改进制造能力,降低材料损耗,提高能效和产品一致性,还将开发适用于新型电池(如固态电池)的新工艺以及循环和数字化概念。**关键绩效指标**: 与当前锂离子电池最先进生产水平相比,电池生产率提高 10%-15%, 电池单元整体生产效率提高 90% 以上; 通过改造将设备资本投入成本降低 8000 万欧元/吉瓦时; 能耗降低 25%。**预算**: 1 亿欧元。

(4) **工艺集成和工厂数字化运营**。该主题将通过数据分析以改进生产线,并进行预防性故障排除。在生产层面将应用机器学习和人工智能技术,在工厂层面将整合能量流和材料流形成供应生态系统。**关键绩效指标**: 生产率提高 10%-15%; 与当前锂离子电池生产相比,能耗降低 25%。**预算**: 6000 万欧元。

2、电池先进材料

未来十年该领域将主要进行如下主题研究:

(1) **车用第 3 代⁶锂离子电池的研究与创新**。该主题将开发可实现更高能量密度和功率密度的先进材料,用于更大容量和/或更高电压下运行,将重点关注调整正极和负极材料、更稳定的电解质材料、粘结剂等。**关键绩效指标**: 质量及体积能量密度分别达到 350-400 瓦时/千克和 750-1000 瓦时/升; 可在 4.7 伏以上的高电压下运行; 在高容量或高电压下可深度循环超过 3000 次或 2000 次; 电堆成本低于 100 欧元/千瓦时。**计划上市时间及预算**: 2025 年以后, 1 亿欧元。

(2) **车用第 4 代⁷锂电池的研究与创新**。该主题将开发固态电解质以及正负极材料,实现更高的热稳定性和电化学稳定性以及更高能量/功率密度,实现快速充电、可循环性并提高安全性。材料开发范围从传统材料到锂金属基负极和高电压正极材料。**关键绩效指标**: 4a 代锂离子电池单元质量能量密度超过 400 瓦时/千克,体积能量密度超过 1000 瓦时/升; 4b 和 4c 代锂电池单元体积能量密度分别超过 800 瓦时/升和 500 瓦时/升; 循环寿命达到 3000 次; 充电倍率达到 3-5C; 电池堆成本降至 75 欧元/千瓦时以下。**计划上市时间及预算**: 2030 年以后, 2 亿欧元。

(3) **固定式储能用锂离子电池的研究与创新**。该主题将开发正负极、电解质、粘结剂等材料以确保固定式储能锂离子电池可用于公用事业规模(超过 100 兆瓦)

⁶ 欧盟对电池进行了分类,第 3 代锂离子电池为优化的锂离子电池,包括: 3a 代,正极材料为 622 型或 811 型镍钴锰酸锂三元材料(NMC622 或 NMC811),负极材料为碳(石墨)+硅(含量 5%-10%); 3b 代,正极材料为高能锂镍锰钴氧化物(HE-NMC)或高电压尖晶石(HVS),负极材料为硅/碳(Si/C)。

⁷ 第 4 代锂离子电池包括 4a、4b 和 4c 代。其中,第 4a 代固态锂离子电池,正极材料为镍钴锰酸锂三元材料(NMC),负极材料为 Si/C; 第 4b 代固态锂金属电池,正极材料为 NMC,负极材料为锂金属; 第 4c 代先进固态电池,正极材料为 HE-NMC 或 HVS,负极材料为锂金属。

和商业高功率应用（低于 100 兆瓦），通过多种材料策略提高公用事业规模应用的导电率、能量密度、寿命以及高功率应用的导电率和容量。**关键绩效指标：**商业高功率应用中电池体积能量密度超过 500 瓦时/升，寿命超过 6000 次循环，充电倍率达到 5-6C；公用事业规模应用中电池体积能量密度超过 500 瓦时/升，寿命超过 10000 次循环，成本低于 0.05 欧元/千瓦时/循环。**计划上市时间及预算：**2030 年，1 亿欧元。

（4）电动汽车轻质先进材料的研究与创新。该主题将开发基于玻璃纤维、碳纤维、新型塑料、高强度钢材的新型轻质材料，并示范材料用于汽车结构和功能部件的高强度重量比性能。**关键绩效指标：**电动汽车车身重量减轻 40%；电池包重量减轻 70%；轻质材料占电动汽车材料的 65%；传动系统成本降低 30%，耐久性提高 30%；行驶里程达到 700 公里；可回收性达到 99%。**计划上市时间及预算：**2025 年后，0.5 亿欧元。

（5）实现超快充电的先进材料研究与创新。该主题将开发各种材料体系，实现用户友好、安全可靠、功率传输能力超过 350 千瓦的超快速充电站。**关键绩效指标：**充电时间低于 10 分钟；功率传输能力超过 350 千瓦；充电过程中欧姆电阻导致的能量损失低于 2%。**计划上市时间及预算：**2025 年后，0.5 亿欧元。

三、原材料循环经济

1、电池一次及二次原材料的可持续加工

到 2030 年关键绩效指标：电池原材料加工中无液体排放；石墨、电池化学和正极活性材料前驱体加工能效比当前最先进水平提升 25%；锂提取及加工过程碳排放比当前最先进水平降低 50%；欧洲电池制造商的原料中，25%的碳酸锂当量由欧洲自身供应。

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

（1）原材料来源、可持续性和可追溯性。该主题将开发协调和直接的方式从全球供应链中获得原材料。**短期（2021-2025 年）优先事项：**开发评估成员国原材料资源/储量的通用方法；确定从欧盟以外地区获取原材料的可持续性要求；全球供应链的可靠采购和可追溯性；开发和评估跟踪和标记技术、数字账本技术。**中期（2026-2030 年）优先事项：**在整个生命周期内对材料进行跟踪和标记。

（2）电池原料的可持续提取和精炼。该主题将开发锂、镍、钴、锰和石墨的加工方案，用于国内和进口原料。**短期（2021-2025 年）优先事项：**可持续锂价值链解决方案；开发正极活性材料前驱体可持续加工工艺，替代当前工艺；电池化学和正极活性材料前驱体加工中无液体排放；用于电池金属浸出和提取的新型可回收试剂；将欧洲的石墨生产整合到电池生产中；开发协同加工和工艺集成的新业务模式；开发新型冶炼和矿渣工程技术，以解决冶炼过程中镍和钴的损失；将加工流程建模与

针对单个主要流程的环境影响评估相结合。**中期（2026-2030年）优先事项：**从工业或城市废物等新来源中回收金属和化学品；开发经济可行的锰回收工艺；合成石墨生产中石油基原料的替代；开发二次产品回收的通用流程；在电池原料加工装置和/或矿山中替代化石燃料并使用智能和/或可再生能源解决方案；开发新的硅生产方法；使用多孔硅等新型策略/材料制造富硅负极（负极密度超过 1200 毫安时/克）。

（3）原材料生命周期评估和材料流分析。该主题将通过新型、整体的电池循环定量工具，增强环境可持续性。**短期（2021-2025年）优先事项：**原材料生命周期数据的开放存取；电池生态标签；在早期设计过程中进行生命周期评估；原材料流分析；可靠的原材料（包括化学品和前驱体）生命周期信息；可靠的回收材料生命周期信息数据；全面可持续性评估；评估一次材料和二次材料的能耗、成本及其他影响。**中期（2026-2030年）优先事项：**采矿的区域生命周期评估、生命周期数据和下一代电池生命周期评估；社会生命周期评估方法在电池价值链中的开发和应用，尤其是原材料相关研究。

2、回收

关键绩效指标：①电池回收，到 2025 年便携式电池回收率达到 55%，2030 年达到 65%，工业和车用电池回收率达到 100%；②电池材料回收，到 2030 年电池材料回收率超过 60%，锂离子电池材料回收率钴>95%、镍>95%、锂>70%、铜>95%。

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

（1）电池收集、反向物流、分选和拆解。该主题将开发综合性技术，以安全有效地处理不断增多的废弃电池，最终进入回收流程。**短期（2021-2025年）优先事项：**研发电池健康评估新技术和新设备；研发产品二次利用和废物回收的标准化诊断协议和界限标准；开发标准化、经济高效的储存和运输容器，配备可视和热负荷监测系统，必要时还配备惰性气体；研发配备能量回收系统的放电技术和装置；开发标准化电池标签系统并探索与电池信息数据库集成；研发自动化电池分选和拆解技术。**中期（2026-2030年）优先事项：**可持续循环利用设计；模块化自动拆解技术；电池拆卸全过程的风险和安全性研究；特殊材料的分选；装配方法。

（2）冶金回收工艺、工业集成和基于二次材料的前驱体。该主题将对电池进行有效加工，以尽可能低的环境足迹和成本回收有价值（或有害）的原材料。**短期（2021-2025年）优先事项：**目前正大规模生产的锂离子电池和镍氢电池的回收；建立可行的整体回收流程，以有效利用在未来 10 年内报废的大量汽车电池废料以及生产废料；电解液、隔膜和电极粘结剂等非金属元素的下游循环或安全处理；进一步开发冶金工具和建模，以对替代技术方案进行技术经济性比较；制定所有回收工艺装置的安全规程；减少回收过程对环境的影响；实现工业闭环，将制造过程的低价值化学品投入电池制造中。**中期（2026-2030年）优先事项：**开发集中、集成和自动化闭

环过程；作为替代方案，开发用于电池废料灵活处理的分散式（本地或移动式）冶金处理装置，以最大限度地减少运输过程；探索直接回收电池材料和组件的方法；探索包含非金属元素回收的电池全材料回收技术；新工艺概念的试点。

四、欧洲电池竞争优势

该领域旨在基于对电池价值链的深入研究，实现新概念前沿电池技术开发的飞跃，以研发低成本、可持续和安全的高性能电池，使欧洲在电池生产和部署方面处于领先地位。因此，未来十年将需要对如下电池技术主题进行研发：

(1) 对技术成熟度 (TRL) 超过 2 级的电池技术进行改进。主要包括：①超越第 4 代电池的锂金属电池 (TRL 为 2-4 级)，采用创新的高电压（大于 4.8 伏）/高容量（大于 500 毫安/克）正极和固态电解质，实现较高能量密度和完全可回收性；②锌基二次电池 (TRL 为 2-6 级)，实现更绿色、安全的储能；③使用低成本电解液的钠离子电池 (TRL 为 2-3 级)，用于无锂储能；④更绿色的液流电池 (TRL 为 3-6 级)，使用低成本活性材料（无关键原材料），具备更高能量密度。

(2) 对技术成熟度 1-2 级的电池概念进行基础研究，以开发使用高可用性金属的新型电池。主要包括：①有机电池 (TRL 为 1-3 级)，包括液流电池；②从钠开始到多价离子金属（除锌以外）的金属电池 (TRL 为 1 级)；③基于阴离子穿梭的电池 (TRL 为 1 级)；④基于活性金属如钠、钾、铝、锌等的高功率一次再生电池 (TRL 为 1-2 级)，用于季节/年度级的电化学储能。

(高天 岳芳)

DOE 资助 4500 万美元推进先进太阳能技术研发

12 月 16 日，美国能源部 (DOE) 宣布在“太阳能技术办公室 2020 财年资助计划 (SETO FY2020)” 框架下提供 4500 万美元资助先进太阳能技术研发⁸，重点聚焦太阳能系统集成和太阳能硬件研究，在确保大电网稳定运行前提下实现太阳能高比例并网集成。本次资助主要关注两大技术主题，具体内容如下：

1、太阳能系统集成技术

(1) 电网技术研发联盟，资助金额为 2500 万美元，主要研究工作将促进电网相关的所有利益相关方开展合作，来开发先进的太阳能电力稳定可靠的并网集成技术，以确保集成太阳能的电网高效安全稳定运行。

(2) 为太阳能电力配备智能电表，资助金额为 600 万美元，主要研究工作是利用先进的传感器技术在太阳能电力设施中大规模部署智能电表，以将其数据整合到公用电力数据系统中，实现对集成太阳能电力系统更加精准的预测、控制和运行。

2、先进太阳能制造技术

⁸Energy Department Announces \$45 Million in Funding for Solar Technologies.
<https://www.energy.gov/articles/energy-department-announces-45-million-funding-solar-technologies>

(1) **产品开发，资助金额为 600 万美元**，研究工作主要致力于开发更加先进高效低成本的制造工艺和流程，并开展现场的技术经济评估，加速新技术新制造工艺的商用进程，降低制造成本，提升美国太阳能制造业竞争力。

(2) **技术和产品测试，资助金额为 800 万美元**，研究工作主要包括太阳能硬件的大批量或高通量低成本制造工艺测试；基于新制造工艺的太阳能硬件现场性能测试；基于新制造工艺的中试规模生产线示范。

(郭楷模)

DOE 资助 3500 万美元支持生物能技术研发

12 月 10 日，美国能源部 (DOE) 宣布资助 3500 万美元支持生物能原料及藻类技术研发⁹，旨在提升生物燃料生产、生物能发电及生物产品生产相关技术水平，降低其风险和成本，以推进美国的生物经济发展。本次资助重点关注两大主题：城市固体废弃物原料表征；先进藻类生产技术。主要内容如下：

1、城市固体废弃物原料表征 (1500 万美元)

(1) **检测特定城市固体废弃物的关键特性及其变化**。主要包括：建立城市固体废物资源库地图，涵盖所有关键特性值，并记录其地理和/或季节变化；对于城市固体废物混合流，针对每种有机组分（如纸张、纸板、木材、纺织品、塑料等）进行含量表征；使用化学、生物、物理等标准方法，以及流变测量和宏观、微观、分子尺度的检测、识别和评估技术，进行城市固体废弃物的空间及时间表征。

(2) **开发快速/实时检测的新方法**。主要包括：快速/实时传感器的应用和集成，包括气体传感器、比色传感器和/或光谱仪（如近红外光谱、拉曼光谱、核磁共振、傅里叶变换红外光谱）；人工智能或其他数据处理/分析/策略/过程控制技术的应用；开发新型、快速的化学、生物和物理分析方法；开发宏观、微观和/或分子尺度的快速检测和识别关键特性的技术。

2、提高藻类产量的技术 (2000 万美元)

(1) **通过供应 CO₂ 提高藻类产量**。该主题下的研究主要通过改良菌株或改进种植方法，同时利用传统方法供应 CO₂ 以促进藻类生长。①在改良菌株方面，包括：通过定向进化试验改善相关菌株的抗逆性；通过基因工程改良菌株以提高产量；开发育种策略提高藻类产量。②在改良种植方面，包括：开发用于作物保护的物理、机械、化学和生物方法；确定和引进新的菌株或藻类以提高抗逆性和/或抵抗害虫；改变培养方法（如在高盐度下培养）以减少病虫害和其他藻类的竞争。

(2) **通过直接空气碳捕集提高藻类产量**。该主题下的研究主要通过改良菌株或改进种植方法，同时利用直接空气碳捕集技术供应 CO₂ 以促进藻类生长。①在改良

⁹Department of Energy Announces \$35 Million for Bioenergy Research and Development.
<https://www.energy.gov/eere/articles/department-energy-announces-35-million-bioenergy-research-and-development>

菌株方面，包括：通过基因工程工具增加细胞表面运输 CO_2 的数量；评估类胡萝卜素的基因和结构成分，并使用合成生物学工具改进固定，调控中心碳代谢酶的表达以提高整体光合效率；进行光照和黑暗条件代谢 CO_2 通量建模，以识别增加白天净碳同化并减少夜间由于黑暗呼吸而导致 CO_2 释放的方法。②在改良种植方面，包括：在碱性条件下培养高产菌株；利用生物学机制或作物保护策略以保持培养基中高含量溶解性无机碳；通过工程化藻类和菌群减少溶解性有机碳损失；进行生物体和系统级的夜间培养能量损失建模，改变培养操作以减少损失。

（岳芳）

新工艺助力二维钙钛矿太阳能电池获得创纪录转换效率

钙钛矿太阳能电池的实验室光电转换效率已经突破 25%，且具备成本低廉、工艺简单等优点，被视为最有应用前景的新一代薄膜光伏技术。然而，目前高性能电池主要基于三维钙钛矿薄膜制备，其稳定性不甚理想；相比三维钙钛矿，二维钙钛矿薄膜具备更加优异的稳定性的，但受限于二维钙钛矿薄膜生长机制（其晶粒优先选择平行于衬底方向生长，阻碍了载流子在垂直于衬底方向上的传输效率），基于上述薄膜的电池器件效率受到了抑制。因此，调控优化二维钙钛矿薄膜生长是提升其电池器件性能的关键因素。美国普林斯顿大学 Yueh-Lin Loo 教授研究团队利用溶剂蒸汽退火方法，实现了对二维钙钛矿薄膜晶粒生长方向的优化调控，成功诱导钙钛矿薄膜沿着垂直衬底方向择优生长，显著提升了载流子的传输效率，获得了 18% 的认证光电转换效率纪录，是目前文献报道的二维钙钛矿太阳能电池最高效率。

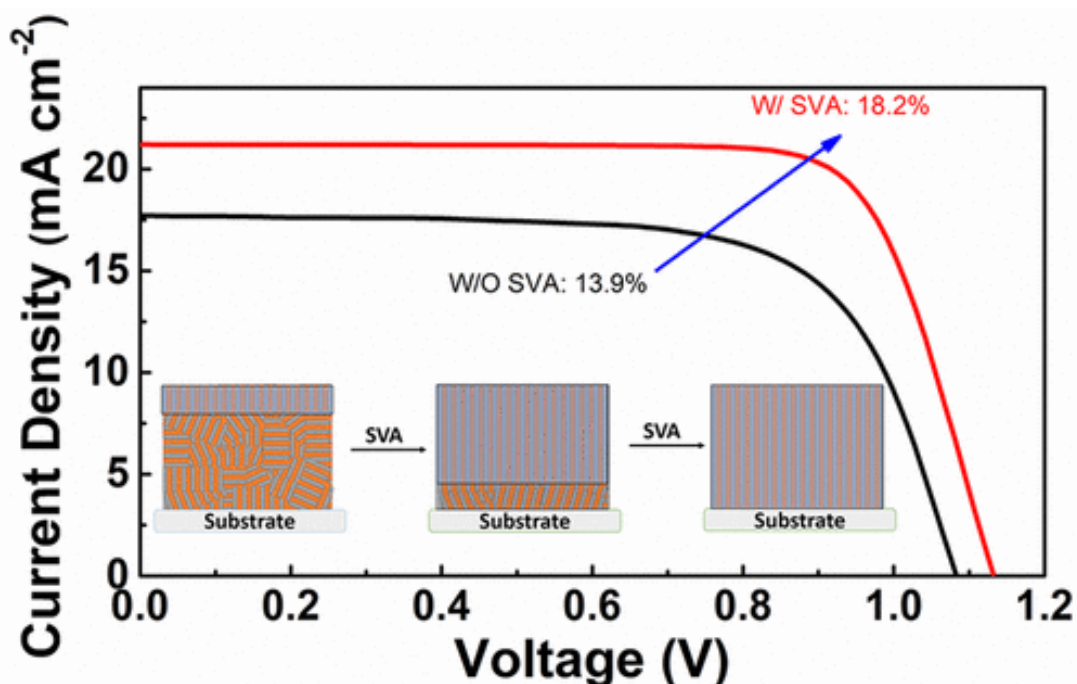


图 1 溶剂蒸汽退火方法助力二维钙钛矿太阳能电池取得新效率

考虑到二维钙钛矿本身具有沿着平行衬底生长的择优取向，研究人员采用溶剂蒸汽退火处理方法（SVA）制备混合阳离子钙钛矿薄膜 $(\text{PEA})_2(\text{MA})_4\text{Pb}_5\text{I}_{16}$ ，原位掠入射广角 X 射线散射（GIWAXS）表征图谱显示，该薄膜具备了垂直衬底择优生长取向，与传统方法制备出的二维钙钛矿薄膜平行衬底择优取向形成鲜明对比，这有利于载流子的快速传输。原子力显微镜测试发现，SVA 处理的 $(\text{PEA})_2(\text{MA})_4\text{Pb}_5\text{I}_{16}$ 薄膜晶粒尺寸有所增加，从传统方法的 100 nm 增至 2 μm ，意味着晶界和缺陷减少了，有助于减少载流子复合。接着研究人员将 SVA 处理和传统方法制备的钙钛矿薄膜作为光敏层组装电池器件进行对比研究，在一个标准模拟太阳光辐照下，基于传统方法制备的二维钙钛矿电池光电转换效率为 13.9%，而采用 SVA 方法制备的钙钛矿薄膜电池效率提升到了 18.2%，且通过了美国国家可再生能源实验室（NREL）的权威认证，是迄今为止二维钙钛矿太阳电池效率的最高值。进一步的长程稳定性测试结果显示，传统方法制备的钙钛矿薄膜电池器件运行 100 小时后效率显著衰减 20%，800 小时后更是大幅衰减了 90%；而 SVA 方法制备的钙钛矿薄膜电池在 800 小时后仍可维持 80% 以上的初始效率，表现出了优异稳定性。

该项研究通过对二维钙钛矿制备工艺的优化，即采用溶剂蒸汽退火处理诱导了钙钛矿晶体呈现出垂直于衬底的择优生长取向，减少了缺陷密度，提升了载流子的传输效率，进而获得了 18.2% 的认证效率纪录，且表现出优异的长程稳定性，将钙钛矿太阳电池进一步向商业化应用方向推进。相关研究成果发表在《*Nano Letters*》¹⁰。

（程向阳 郭楷模）

¹⁰ Xiaoming Zhao, Tianran Liu, Alan B. Kaplan, et al. Accessing Highly Oriented Two-Dimensional Perovskite Films via Solvent-Vapor Annealing for Efficient and Stable Solar Cells. *Nano Letters*, 2020, DOI: 10.1021/acs.nanolett.0c03914

低碳化多能融合

日本《绿色增长战略》提出 2050 碳中和发展路线图

12月25日，日本经济产业省发布了《绿色增长战略》¹¹，确定了日本到2050年实现碳中和目标，构建“零碳社会”，以此来促进日本经济的持续复苏，预计到2050年该战略每年将为日本创造近2万亿美元的经济增长。为了落实上述战略目标，战略针对包括海上风电、燃料电池、氢能等在内的14个产业提出了具体的发展目标和重点发展任务，详细内容如下：

1、海上风电产业

发展目标：到2030年安装10GW海上风电装机容量，到2040年达到30-45GW，同时在2030-2035年间将海上风电成本削减至8-9日元/千瓦时；到2040年风电设备零部件的国内采购率提升到60%。

重点任务：推进风电产业人才培养，完善产业监管制度；强化国际合作，推进新型浮动式海上风电技术研发，参与国际标准的制定工作；打造完善的具备全球竞争力的本土产业链，减少对国外零部件的进口依赖。

2、氨燃料产业

发展目标：计划到2030年，实现氨作为混合燃料在火力发电厂的使用率达到20%，并在东南亚市场进行市场开发，计划吸引5000亿日元投资；到2050年实现纯氨燃料发电。

重点任务：开展混合氨燃料/纯氨燃料的发电技术实证研究；围绕混合氨燃料发电技术，在东南亚市场进行市场开发，到2030年计划吸引5000亿日元投资；建造氨燃料大型存储罐和输运港口；与氨生产国建立良好合作关系，构建稳定的供应链，增强氨的供给能力和安全，到2050年实现1亿吨的年度供应能力。

3、氢能产业

发展目标：到2030年将年度氢能供应量增加到300万吨，到2050年达到2000万吨。力争在发电和交通运输等领域将氢能成本降低到30日元/立方米，到2050年降至20日元/立方米。

重点任务：发展氢燃料电池动力汽车、船舶和飞机；开展燃氢轮机发电技术示范；推进氢还原炼铁工艺技术开发；研发废弃塑料制备氢气技术；新型高性能低成本燃料电池技术研发；开展长距离远洋氢气运输示范，参与氢气输运技术国际标准制定；推进可再生能源制氢技术的规模化应用；开发电解制氢用的大型电解槽；开

¹¹ 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-2.pdf>

发高温热解制氢技术研发和示范。

4、核能产业

发展目标：到 2030 年争取成为小型模块化反应堆（SMR）全球主要供应商，到 2050 年将相关业务拓展到全球主要的市场地区（包括亚洲、非洲、东欧等）；到 2050 年将利用高温气冷堆过程热制氢的成本降至 12 日元/立方米；在 2040-2050 年间开展聚变示范堆建造和运行。

重点任务：积极参与 SMR 国际合作（如参与技术开发、项目示范、标准制定等），融入国际 SMR 产业链；开展利用高温气冷堆高温热能进行热解制氢的技术研究和示范；继续积极参与国际热核聚变反应堆计划（ITER），学习先进的技术和经验，同时利用国内的 JT-60SA 聚变设施开展自主聚变研究，为最终的聚变能商用奠定基础。

5、汽车和蓄电池产业

发展目标：到 21 世纪 30 年代中期时，实现新车销量全部转变为纯电动汽车（EV）和混合动力汽车（HV）的目标，实现汽车全生命周期的碳中和目标；到 2050 年将替代燃料的经济性降到比传统燃油车价格还低的水平。

重点任务：制定更加严格的车辆能效和燃油指标；加大电动汽车公共采购规模；扩大充电基础设施部署；出台燃油车换购电动汽车补贴措施；大力推进电化学电池、燃料电池和电驱动系统技术等领域的研发和供应链的构建；利用先进的通信技术发展网联自动驾驶汽车；推进碳中性替代燃料的研发降低成本；开发性能更优异但成本更低廉的新型电池技术。

6、半导体和通信产业

发展目标：将数据中心市场规模从 2019 年的 1.5 万亿日元提升到 2030 年的 3.3 万亿日元，届时实现将数据中心的能耗降低 30%；到 2030 年半导体市场规模扩大到 1.7 万亿日元；2040 年实现半导体和通信产业的碳中和目标。

重点任务：扩大可再生能源电力在数据中心的应用，打造绿色数据中心；开发下一代云软件、云平台以替代现有的基于半导体的实体软件和平台；开展下一代先进的低功耗半导体器件（如 GaN、SiC 等）及其封装技术研发，并开展生产线示范。

7、船舶产业

发展目标：在 2025-2030 年间开始实现零排放船舶的商用，到 2050 年将现有传统燃料船舶全部转化为氢、氨、液化天然气（LNG）等低碳燃料动力船舶。

重点任务：促进面向近距离、小型船只使用的氢燃料电池系统和电推进系统的研发和普及；推进面向远距离、大型船只使用的氢、氨燃料发动机以及附带的燃料罐、燃料供给系统的开发和实用化进程；积极参与国际海事组织（IMO）主导的船舶燃料性能指标修订工作，以减少外来船舶 CO₂ 排放；提升 LNG 燃料船舶的运输能

力，提升运输效率。

8、交通物流和建筑产业

发展目标：到 2050 年实现交通、物流和建筑行业的碳中和目标。

重点任务：制定碳中和港口的规范指南，在全日本范围内布局碳中和港口；推进交通电气化、自动化发展，优化交通运输效率，减少排放；鼓励民众使用绿色交通工具（如自行车），打造绿色出行；在物流行业中引入智能机器人、可再生能源和节能系统，打造绿色物流系统；推进公共基础设施（如路灯、充电桩等）节能技术开发和部署；推进建筑施工过程中的节能减排，如利用低碳燃料替代传统的柴油应用于各类建筑机械设施中，制定更加严格的燃烧排放标准等。

9、食品、农林和水产产业

发展目标：打造智慧农业、林业和渔业，发展陆地和海洋的碳封存技术，助力 2050 碳中和目标实现。

重点任务：在食品、农林和水产产业中部署先进的低碳燃料用于生产电力和能源管理系统；智慧食品供应链的基础技术开发和示范；智慧食品连锁店的大规模部署；积极推进各类碳封存技术（如生物固碳），实现农田、森林、海洋中 CO₂ 的长期、大量贮存。

10、航空产业

发展目标：推动航空电气化、绿色化发展，到 2030 年左右实现电动飞机商用，到 2035 年左右实现氢动力飞机的商用，到 2050 年航空业全面实现电气化，碳排放较 2005 年减少一半。

重点任务：开发先进的轻量化材料；开展混合动力飞机和纯电动飞机的技术研发、示范和部署；开展氢动力飞机技术研发、示范和部署；研发先进低成本、低排放的生物喷气燃料；发展回收 CO₂，并利用其与氢气合成航空燃料技术；加强与欧美厂商合作，参与电动航空的国际标准制定。

11、碳循环产业

发展目标：发展碳回收和资源化利用技术，到 2030 年实现 CO₂ 回收制燃料的价格与传统喷气燃料相当，到 2050 年 CO₂ 制塑料实现与现有的塑料制品价格相同的目标。

重点任务：发展将 CO₂ 封存进混凝土技术；发展 CO₂ 氧化还原制燃料技术，实现 2030 年 100 日元/升目标；发展 CO₂ 还原制备高价值化学品技术，到 2050 年实现与现有塑料相当的价格竞争力；研发先进高效低成本的 CO₂ 分离和回收技术，到 2050 年实现大气中直接回收 CO₂ 技术的商用。

12、下一代住宅、商业建筑和太阳能产业

发展目标：到 2050 年实现住宅和商业建筑的净零排放。

重点任务：针对下一代住宅和商业建筑制定相应的用能、节能规则制度；利用大数据、人工智能、物联网（IoT）等技术实现对住宅和商业建筑用能的智慧化管理；建造零排放住宅和商业建筑；先进的节能建筑材料开发；加快包括钙钛矿太阳能电池在内的具有发展前景的下一代太阳能电池技术研发、示范和部署；加大太阳能建筑的部署规模，推进太阳能建筑一体化发展。

13、资源循环产业

发展目标：到 2050 年实现资源产业的净零排放。

重点任务：发展各类资源回收再利用技术（如废物发电、废热利用、生物沼气发电等）；通过制定法律和计划来促进资源回收再利用技术开发和社会普及；开发可回收利用的材料和再利用技术；优化资源回收技术和方案降低成本。

14、生活方式相关产业

发展目标：到 2050 年实现碳中和生活方式。

重点任务：普及零排放建筑和住宅；部署先进智慧能源管理系统；利用数字化技术发展共享交通（如共享汽车），推动人们出行方式转变。

（郭楷模）

加拿大发布国家氢能战略提出 2050 愿景

12 月 16 日，加拿大自然资源部发布《加拿大氢能战略》¹²，旨在通过建设氢能基础设施以及促进终端应用，使加拿大成为全球主要氢供应国，推进国家的清洁能源转型。该战略分析了加拿大发展氢能的机遇和挑战，提出了至 2050 年的氢能战略愿景和近、中、长期发展路径，并明确将在战略合作、降低投资风险、研发创新等 8 个方面开展 32 项行动。详细内容如下：

一、加拿大发展氢能的机遇和挑战

1、发展机遇

（1）氢能生产。加拿大具有氢能生产的丰富原料储备、熟练技术工人和战略性能源基础设施，在氢能和燃料电池技术创新方面也处于领先地位。目前，加拿大主要通过天然气蒸汽重整技术年产约 300 万吨氢，已建立了氢生产供应链，并做好准备向清洁制氢转变。预计到 2050 年加拿大氢能产量将增至目前的 7 倍，每年生产超过 2000 万吨低碳氢，氢能生产方式也将转为多种途径，包括电解制氢、化石燃料制氢、生物质制氢、工业副产氢等。

（2）终端应用。氢能应用将集中在能源密集型行业，包括将氢气用于长途运输（燃料电池车、氢发动机）、发电、工业和建筑供热，以及用作工业原料。加拿大政府制定了到 2025 年零排放汽车（包括燃料电池车）占轻型汽车年销量 10%、2030 年

12 HYDROGEN STRATEGY FOR CANADA. https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf

达到 30%、2050 年达到 100% 的目标。加拿大在燃料电池车方面具有技术优势，当前全球投运的 2000 多辆燃料电池巴士中约一半为加拿大技术。此外，燃料电池有望在中/重型货运、铁路运输和航运发挥重要作用，在采矿设备（包括物料搬运车）方面也有较大应用潜力。而在短期内，氢-柴油混燃卡车将成为可能的发展方向。在发电方面，可通过氢燃气轮机或固定式燃料电池供电，用于负荷管理、长期储能以及偏远社区和工业区（如矿区）的供电。在工业领域，氢可为石油和天然气的上游开采供热，并用作下游精炼环节的化学原料，此外还可为水泥、钢铁、造纸等工业过程供热，以及用作沥青、氨、甲醇、液体燃料、钢铁、氮肥等生产中的原料。将氢气混入天然气网或发展纯氢输送管网，可为建筑供气及供热。

(3) 氢气出口。加拿大拥有强大的氢气生产能力，建立了国际贸易伙伴关系，并拥有深水港、管道网络等基础设施，有助于加拿大成为全球最大清洁氢供应国，预计到 2050 年加拿大氢出口额可能达到 500 亿加元。

2、面临挑战

(1) 经济和投资。目前氢与其他传统燃料相比还不具备成本竞争力，以燃料电池为主的终端应用成本也较高，未来 5-10 年需要强有力的政策和财政支持以降低风险，吸引投资。

(2) 技术和创新。尽管加拿大的某些氢能和燃料电池技术已处于商业准备阶段，但仍需进一步支持研发以降低成本，并开发新的应用解决方案、实现新的技术突破。

(3) 政策和法规。加拿大目前缺乏全面和长期的氢能相关政策和监管框架，已制定政策的各地区政策缺乏一致性。

(4) 氢能基础设施可用性。加拿大目前低碳制氢供应有限，而且缺乏运输和存储氢气的基础设施，阻碍了试点和应用推广，长期来看还需建设专门的输氢管道和液化工厂等基础设施，以确保低碳氢的供应。

(5) 规范和标准。目前加拿大的氢能部署尚处于早期阶段，缺乏相关规范和标准，以确保氢能应用的最佳实践。

(6) 公众意识。民众、工业界和各部门对氢能发展机遇和安全性缺乏认知，需增强对氢能安全利用和经济、环境效益的认识和理解，以建立良好发展的氢能行业。

二、发展愿景及路径

1、氢能战略 2050 愿景

加拿大政府计划通过发展氢能，到 2050 年实现如下目标：（1）高达 30% 的能源以氢的形式输送；（2）成为全球前三大清洁氢生产国，国内供应量超过 2000 万吨/年；（3）建立低碳氢供应基地，交货价格达到 1.50-3.50 加元/千克；（4）超过 500 万辆燃料电池汽车投运；（5）建立全国加氢网络；（6）在当前通过天然气供应的能源中，实现 50% 以上由氢气掺混现有天然气管道和新建专用输氢管道来提供；（7）通过低成本氢气供应网络带动新兴产业发展；（8）造就约 35 万个氢能行业岗位；（9）国内市场氢能直接部门收入超过 500 亿美元；（10）形成有竞争力的氢出口市场；（11）相关 CO₂ 减排量最高达到 1.9 亿吨/年。

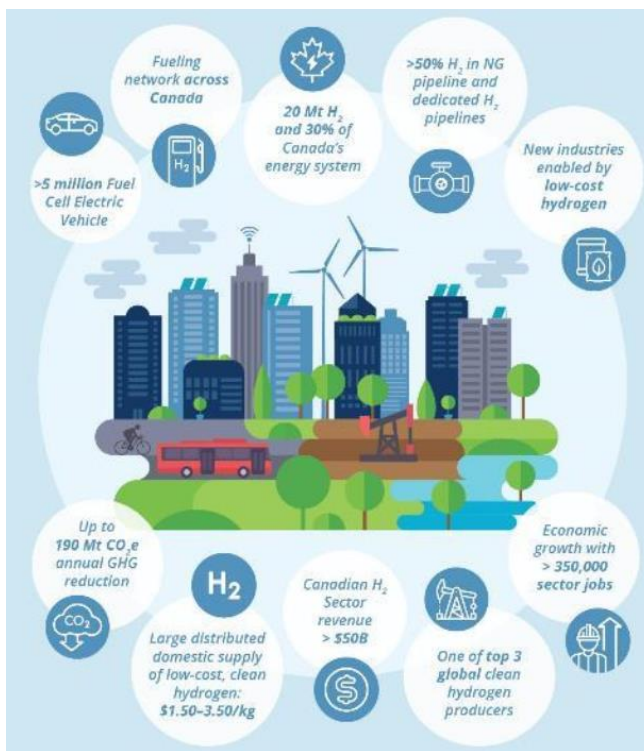


图 1 加拿大氢能战略 2050 年愿景

2、发展路径

（1）近期（至 2025 年）：**奠定氢能经济基础**。规划和开发新的氢供应和分配基础设施，以支持成熟应用的早期部署，同时支持新兴应用的示范。清洁燃料标准等法规将是推动氢能行业近期投资增长的基础，同时还需出台新的政策和监管措施。

（2）中期（2025-2030 年）：**实现氢能行业增长和多样化**。随着技术的成熟和终端应用的技术成熟度达到或接近商业化，氢能应用将聚焦于相比其他零排放技术能够实现价值最大化的途径。

（3）长期（2030-2050 年）：**氢能市场快速扩张**。随着部署规模的扩大和新商业应用的增多，在氢能供应和分配基础设施的支持下，加拿大将开始受益于氢经济。

三、行动举措

该战略针对加拿大氢能发展提出在 8 个方面采取 32 项行动，具体包括：

1、战略合作

战略性利用现有和新的合作伙伴关系，合作规划促进氢能发展。具体行动包括：

（1）通过政府间工作组、跨多级政府和独立团体进行协作，确定优先部署领域，并分享通过早期部署获得的知识、最佳做法和经验教训；（2）利用加拿大的创新清洁技术公司和世界领先的氢能和燃料电池专业知识，扩大公私合作伙伴，以加速跨价值链的项目部署；（3）促进区域部署中心的跨部门合作，以展示氢能多种应用对综

合生态系统的经济和运行优势；（4）加强与国际伙伴的合作并采取协同举措，吸引外国投资，并加速加拿大在全球市场上获得发展机遇。

2、降低投资风险

建立资金计划、长期政策和商业模式，以鼓励工业和政府投资发展氢经济。具体行动包括：（1）实施长期政策以确保产生持续的氢需求，并降低建造氢能供应和分配基础设施的私营投资风险；（2）启动多年期计划并形成清晰的长期监管环境，以支持氢能生产和终端应用项目，包括项目的可行性评估；（3）开发区域部署中心，以示范、验证和实施整个价值链（生产、分配到终端应用）的商业案例；（4）促进各级政府和私营部门的共同资助。

3、研发创新

采取行动支持进一步技术研发，制定研究重点，促进利益相关方之间的合作，以确保加拿大在氢能和燃料电池技术方面保持全球竞争优势和领先地位。具体行动包括：（1）制定战略性基础研究优先事项，确保持续取得氢能技术进步并提升经济性，设定技术性能和成本目标；（2）投入专门资金持续支持研发，以确保加拿大保持氢能和燃料电池的技术领先地位；（3）利用学术界、政府实验室和私营部门实验室的专业知识，创建区域研究中心，并鼓励以任务为导向进行研究、开发和试点部署；（4）支持企业基础研究项目，协调审查和信息共享，促进联邦实验室、工业界、学术界以及国际合作伙伴之间的合作。

4、规范和标准

更新并制定规范和标准，以适应行业的快速变化，消除国内和国际部署障碍。具体行动包括：（1）更新、协调并确认规范和标准，以支持部署并促进新技术和基础设施在早期市场的采用；（2）成立规范和标准工作组，其中包括有管辖权的省级主管部门，以共享经验教训并确定准则和标准的差异；（3）制定基于性能的标准，并确保不会将氢排除在更广泛的法规、标准和规定之外；（4）促进加拿大在国际标准和认证方面的领导和参与（例如制定全球碳强度指标、天然气系统中氢的掺混标准等），简化国际贸易。

5、扶持性政策和法规

确保各级政府将氢能纳入清洁能源路线图和战略，并鼓励其应用。具体行动包括：（1）确保各级政府在制定新的政策、计划和法规时考虑氢能在加拿大未来能源体系中的重要作用；（2）鼓励政府更新现有政策、计划和法规，以促进国内氢能生产和终端应用的增长；（3）确保氢能成为国家和省/地区级综合清洁能源路线图的一部分；（4）制定基于性能的标准，定义氢能的碳强度阈值，明确政府支持项目中可再生氢应用程度的时间进度要求。

6、公众意识

在技术快速发展的时期，从国家层面引导公民和社区了解氢能安全性、用途和益处。具体行动包括：（1）支持氢能区域部署中心的社区参与；（2）开展宣传和推广活动，对政府、行业、公众和其他重要影响者进行氢能安全、用途和效益方面的宣传教育；（3）为氢能早期市场开发一套工具和资源，以帮助终端用户进行定量评估，并依托政府运营网站管理工具和资源；（4）支持工业界和学术界合作开发氢能课程，进行认识、兴趣、技能培养和培训，开发下一代人才库，为新的氢能发展机遇做好人力准备。

7、区域规划

实施多层次、协同的政府工作，促进制定区域氢能发展规划，以确定氢气生产和终端应用的具体机遇和计划。具体行动包括：（1）多级政府共同努力促进区域氢能规划的制定，确保联邦政府参与以及国家氢能战略取得协同效应；（2）确定建立区域氢能中心的机会，涵盖整个价值链相关项目；（3）制定和实施区域氢能规划，涵盖公用事业、主要相关行业以及清洁技术公司；（4）确定与其他省/地区协调和交叉的领域，以促进和加速氢能整体应用。

8、国际市场

与国际伙伴合作，确保在全球推广包括氢气在内的清洁燃料，促进加拿大工业在国内外蓬勃发展。具体行动包括：（1）发展领先的加拿大品牌，使加拿大成为全球低碳氢及其应用技术的首选供应商；（2）投资氢能基础设施，将氢能供应与国际市场联系起来，例如用于氢气运输的液化设施以及从加拿大西部到美国的氢气管道；（3）开展国内旗舰项目，突出加拿大的专业知识，吸引国内市场投资，并在国际上推广；（4）利用现有国际论坛/组织展现加拿大的领导地位，并开拓新的市场机会。

（高天 岳芳）

DOE 资助近 1.3 亿美元支持先进可持续交通能源技术研发

12月10日，美国能源部（DOE）宣布资助1.28亿美元资助先进可持续交通技术研发¹³，旨在推进先进低碳交通能源技术研发突破和部署，包括生物能源、氢燃料电池、电驱动等能源动力技术，以实现美国交通能源可持续发展。本次资助由3个办公室来提供，包括生物能源技术办公室、氢能与燃料电池技术办公室和先进车辆技术办公室，具体内容如下：

一、生物能源技术办公室（资助金额：3500万美元）

借助人工智能技术开发城市固体废弃物的高效识别表征处理技术，提升固体废弃物到生物燃料、生物基产品转化效率，降低转化经济成本，实现2030年2.5美元/加仑油当量成本目标；开发和测试先进的藻类菌株和栽培技术，提高单位面积藻类

¹³ Department of Energy Announces \$128 Million for Sustainable Transportation Research
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-128-million-sustainable-transportation-research>

产率并开展工业规模的示范，以实现 2030 年单位面积日均 25 克的产量。

二、氢能燃料电池技术办公室（资助金额：3300 万美元）

针对重型卡车用的质子交换膜燃料电池，开发新型高性能双极板，以进一步增强电池性能和寿命（寿命要达到 25 000 小时），降低成本；针对重型卡车开展高性能、低成本的大型电解槽研发，以实现高效低成本产氢，降低氢气成本，使燃料电池卡车具备与传统燃油卡车相当的成本竞争力；针对重型卡车用的氢能加注站开发一系列低成本高性能组件，包括软管、接头、喷嘴、冷却器、压缩机、高精度流量计和控制阀等，实现氢燃料的高流量快速加注。

三、先进车辆技术办公室（资助金额：6000 万美元）

开发能够在极端环境下（如超过 4.5V 工作电压，工作电压范围在-40℃~40℃，15 分钟快充充满等）运行的下一代液态电解质锂电池；开发性能与锂电池相当甚至更优但成本更加低廉的新概念电池，如锂硫电池、锂空气电池，其比容量要达到 1000 毫安时/克；借助人工智能和机器学习技术来优化逆变器架构，开发出性能更佳成本更低的逆变器，以在 2025 年将逆变器的功率在 2015 年水平上增大 10 倍达到 100 千瓦/升，成本下降 50% 至 2.7 美元/千瓦，寿命翻倍达到 30 万英里以上；开发燃烧系统模拟仿真技术和先进低成本的后处理技术（减少铂族贵金属使用量），借此研发出燃烧效率更高、排放更低的燃烧系统，以实现到 2025 年将 NO_x 排放减少 80%、PM 颗粒物减少 70% 目标；利用轻量化材料设计开发新型的汽车传动系统，以实现到 2025 年将其质量减少 25% 目标，提升车辆的燃油经济性；借助大数据和人工智能技术，利用海量数据建模对燃料电池汽车技术的性能开展分析评估，考察其节能性、经济性和环保性；依托大数据、人工智能技术、传感技术、互联网技术、高速摄像技术等来发展先进的网联自动驾驶车辆技术，并对现有的公路基础设施进行更新升级（如加装先进的传感器、实时的道路通讯系统等）以满足未来网联自动驾驶汽车的发展需求；利用先进的能源、环境、经济评估模型来评价新开发的先进车辆技术经济、环境效益，研究探索新技术规模化应用面临的机遇和挑战。

（郭楷模）

原位表征识别铁金属氮掺杂碳材料催化剂活性耐久性位点

氧还原反应（ORR）是能量转换器件（金属-空气电池、燃料电池等）的一种重要催化反应，通过 ORR 可以将化学能转化为电能或将电能转化为高附加值的化学品。因此，设计制备高活性和高耐久性的 ORR 催化剂是该领域研究热点。贵金属铂（Pt）基催化剂可以实现高活性和高耐久性，但成本高昂，亟需开发非贵金属高活性高耐久性催化剂。法国蒙彼利埃大学 Frédéric Jaouen 教授课题组牵头的国际联合研究团队，利用原位表征手段证实了铁金属氮掺杂碳材料（Fe-N-C）催化剂中包含两

种类型 FeN_x 催化活性位点，分别为高自旋 Fe(III)N_x 位点（铁位点 S1）和低自旋或中自旋 Fe(II)N_x 位点（铁位点 S2）。其中 S1 位点的 ORR 活性不持久，会迅速转变为三氧化二铁而失效；而 S2 位点耐久性更好，为设计开发高活性高耐久性的非贵金属催化剂积累了关键理论知识。

理论上，为了提高 Fe-N-C 催化剂的耐久性，在设计过程中应提高耐久型 FeN_x 位点的含量，降低非耐久性 FeN_x 位点的含量。然而，目前仍不清楚这两种位点的活性和耐久性差异，主要原因是先前研究工作缺乏有效的原位表征手段。为此，研究人员利用先进原位表征手段发现 Fe-N-C 催化剂中的 FeN_x 位点确实包含两种不同类型的活性位点 S1 和 S2，且穆斯堡尔谱测试结果表明两个位点最初都起着 ORR 活性的作用，但在质子交换膜燃料电池电解质环境中运行 50 h 后 S1 活性大幅消退，仅 S2 起主要作用。进一步的原位 X 射线吸收近边结构光谱表明，在 0.2–0.8 V 区域，FeN_x 位点的一个重要部分发生了 Fe(III)/Fe(II) 氧化还原转变和构象变化，随着电位降低，Fe(III)N₄ 的平均配位变化为 Fe(II)N₄，部分铁三价离子被还原从而分配到高自旋的 Fe²⁺ 阳离子，即 S1 中的部分位点发生刻蚀，此时发现 0 h 到 5 h 运行期间，催化剂活性也呈现了下降趋势，即 S1 位点的数量减少导致了催化活性下降，这表明 S1 位点 ORR 活性并不持久，会迅速转变为三氧化二铁而失效，而 S2 位点耐久性更好。

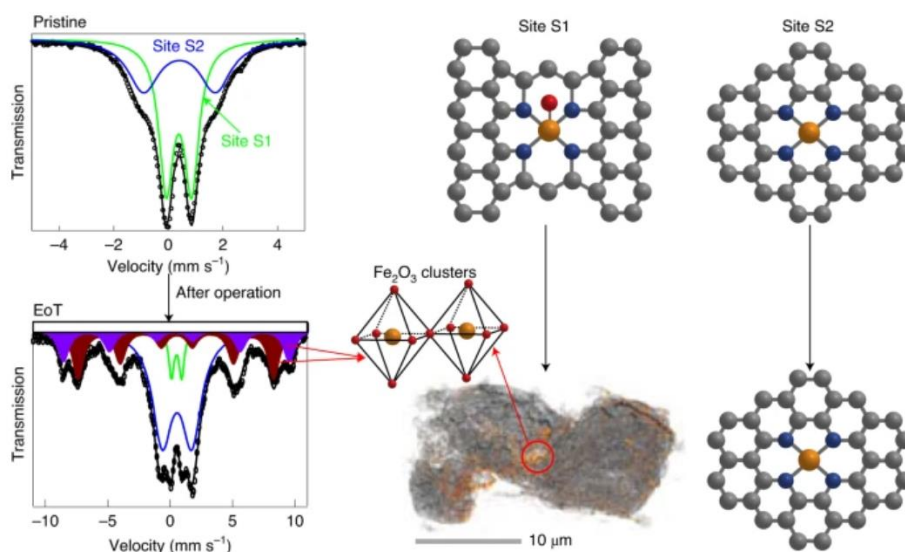


图 1 Fe-N-C 催化剂的催化活性、可逆光谱表征和分子结构示意图

该项研究利用先进的原位表征技术证实了 Fe-N-C 催化剂包含两种类型的 FeN_x 位点，分别为高自旋 Fe(III)N_x 位点和低自旋或中自旋 Fe(II)N_x 位点，并揭示了前者为非耐久性活性位点，后者为高耐久性位点，为设计开发高活性、高耐久性的燃料电池催化剂指明了新思路。相关研究成果发表在《*Nature Catalysis*》¹⁴。

（郭楷模）

¹⁴ Jingkun Li, Moulay Tahar Sougrati, Andrea Zitolo, et al. Identification of durable and non-durable FeN_x sites in Fe-N-C materials for proton exchange membrane fuel cells. *Nature Catalysis*, 2020, DOI: 10.1038/s41929-020-00545-2

美科学家首次揭示锂电池锂沉积热力学作用机制

石墨负极表面的非均匀锂沉积是导致锂离子电池容量衰减和内部短路的最主要原因。通常认为，上述非均匀锂沉积是因为锂离子在石墨负极上嵌入时，受到动力学限制部分金属锂在石墨表面析出，形成不均匀的锂沉积薄膜所致。动力学研究认为，随着充放电倍率的提高，石墨负极嵌锂电位会降至 0 V (vs Li^0/Li^+) 以下，引起锂在石墨表面的非均匀沉积。但也有实验观测到，当电位高于 0 V 或充放电倍率较小时同样会出现非均匀沉积现象，这是动力学难以解释的。因此，亟需探明锂在石墨表面非均匀沉积的潜在机理，以为电池性能的设计改善提供科学理论依据。斯坦福大学 Yi Cui 教授课题组首次揭示了热力学对石墨表面锂非均匀沉积的作用机制，即锂离子电池内部的温度不均一性会导致石墨负极部分区域的锂沉积电位和嵌锂电位偏离平衡电极电位，进而在 0 V (vs Li^0/Li^+) 以上电位发生锂金属的析出沉积。这种由热力学因素引起的欠电位非均匀锂沉积现象，很好地解释了慢充条件下石墨负极表面同样会出现锂沉积现象的原因，为更好地理解不均匀锂沉积行为和延长锂离子循环寿命提供了理论基础。

相关研究表明，锂离子电池充放电过程中涉及锂沉积和石墨嵌锂两个半反应过程，这两个半反应中温度系数和平衡电极电位存在密切的关系。为了精确测量两个半反应过程的温度系数，研究人员设计了非等温 H 型电解池，两侧电极均为锂箔或均为石墨，电解液为 1 mol 六氟磷酸锂 (LiPF_6)。H 型电极的一端用可调温加热装置加热，从而在两电极间形成温度梯度，然后记录锂箔与石墨双电极开路电压随时间的变化情况。当两个电极的电压差 ΔV 趋于稳定时，其数值与该条件下的平衡电极电位相等。锂沉积过程平衡电极电位的温度系数为 1.12 mV/K ，与石墨嵌锂过程的温度系数 (0.97 mV/K) 相差约 0.15 mV/K ，而电极发生锂沉积与石墨嵌锂二者间理论平衡电极电位的差值约为 80 mV ，因此当电池内部温度分布均一时，只有环境温度超过 500°C 才有可能在嵌锂过程同时发生锂沉积，这显然与实际情况不符。因此，研究人员推测出现不均匀沉积应该有其他潜在原因。随后，研究人员利用加热装置对器件中心区域进行加热，温度升高 71 K 时，锂沉积电位上升至 80 mV ，且锂离子在中心高温区域进行锂沉积而非边缘区域，表明锂沉积反应是从热力学上自发进行的。为了证实该机理，作者进一步在锂-铜 (Li-Cu) 和 Li-石墨纽扣电池上对局部高温区域进行了锂沉积研究。在 Li-Cu 电池中，其基底上放置了小型加热装置对电池内的局部区域进行加热。实验初始阶段加热装置关闭，发现没有锂沉积形成；随后开启加热装置，输出功率为 80 mW ，温度升高至 95°C ，Cu 片中心区域出现了银色块状物。经 SEM 与 XRD 表征证实，该物质为温度不均匀分布引起的 Cu 片上沉积的金属锂。类似现象在 Li-石墨纽扣电池中同样被观测到，且整个实验过程中石墨电极的电位始终保持 0 V (vs. Li^0/Li^+) 以上，证实了电池内部不均匀的温度分布确

实可以导致石墨负极在高于 0 V (vs. Li^0/Li^+) 的电位下发生锂沉积反应。

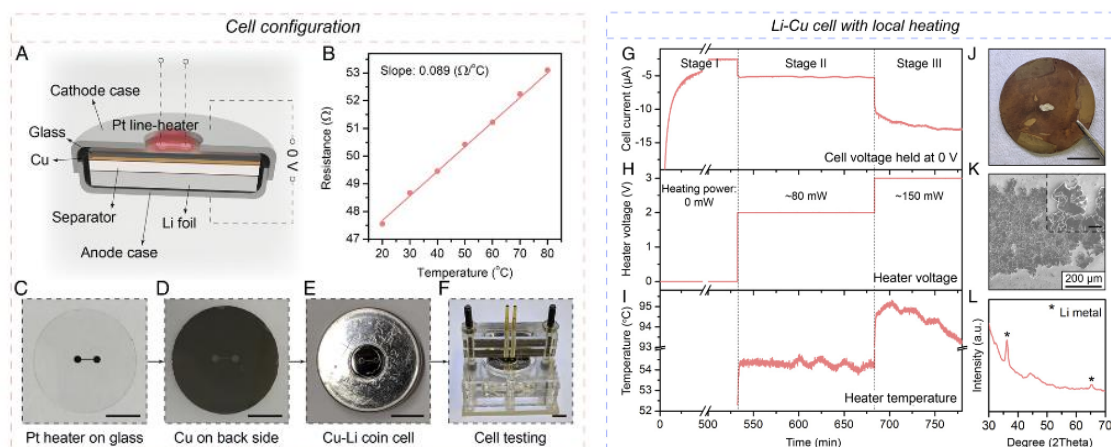


图 1 锂-铜电池局部加热实验示意图（左图：电池结构，右图：电池局部加热实验）

该项研究首次从热力学角度出发，证实了温度不均一性是影响锂离子电池中锂沉积行为的一大重要因素，对这一机理的深入阐释有助于更好地理解锂离子电池循环过程中容量衰减和电池失效的根本原因，为设计开发高性能、长循环寿命的锂离子电池积累了关键科学理论。相关研究成果发表在《*Proceedings of the National Academy of Sciences*》¹⁵。

（郭楷模）

¹⁵ Hansen Wang, Yangying Zhua, Sang Cheol Kim, et al. Underpotential lithium plating on graphite anodes caused by temperature heterogeneity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117 (47): 29453-29461.

能源战略研究

牛津能源研究所：碳中和承诺下中国天然气发电的挑战与趋势

12月14日，牛津能源研究所发布观点文章《中国电力行业的天然气：挑战与前进道路》¹⁶，分析了“十四五”规划和2060年碳中和目标背景下中国天然气发电现状、面临挑战和未来趋势。报告指出，昂贵的天然气进口成本和燃气轮机技术以及缺乏充分竞争的电力市场，是中国天然气发电面临的主要障碍。尽管如此，预计“十四五”期间天然气发电仍将加快增长，到2025年将新增40-50吉瓦发电机组，电力行业天然气消费量将翻一番达到750-800亿立方米。中国政府提出的2030年碳达峰及2060年碳中和承诺将限制煤炭消费，加上集成可再生能源对电力系统的灵活性要求，未来政策框架对天然气发电将更为支持，但碳中和目标将限制所有化石燃料（包括天然气）消费，天然气发电不可能在长期内显著发展。主要内容如下：

1、中国天然气发电发展缓慢

目前，天然气在中国电力行业中占比较小。尽管中国天然气发电装机容量从2010年的26吉瓦增至2019年的90吉瓦，但仍仅占发电机组总容量的4.5%，在火电机组中不到10%。在发电量方面，2019年中国天然气发电量为236太瓦时，仅占全国总发电量的3.2%，而燃煤发电占比则达到62%。从增长速度来看，风电和太阳能发电的增速快于天然气发电。此外，天然气发电的平均运行时间仍较低，2019年约为2500小时，煤电则达到了4000小时。

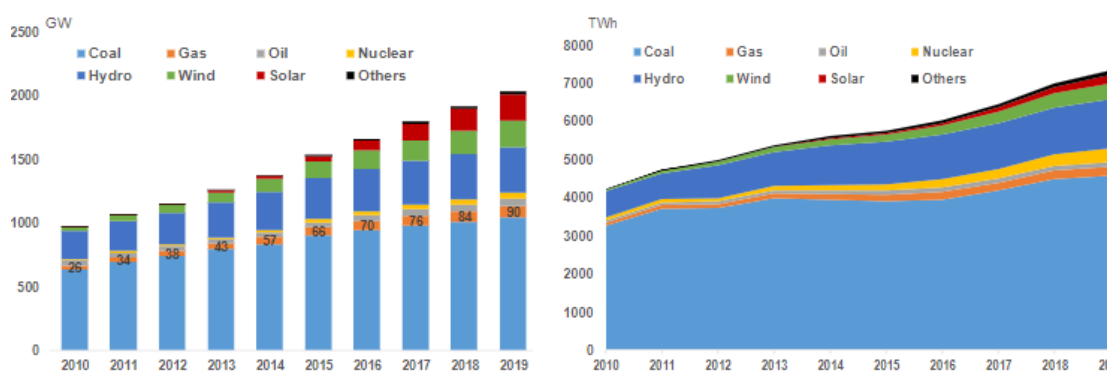


图1 2010-2019年中国电力装机容量（左图，单位：吉瓦）和发电量（右图，单位：太瓦时）

2、“十三五”期间天然气发电机组建设未达到规划目标

尽管政府已经认识到天然气作为“清洁能源”的优势，并实施政策促进其在电力及其他部门的发展，但截至2020年9月，中国天然气发电装机容量为97吉瓦，

¹⁶ Natural gas in China's power sector: Challenges and the road ahead. <https://www.oxfordenergy.org/wp-content/uploads/2020/12/Insight-80-Natural-gas-in-Chinas-power-sector.pdf>

未达到“十三五”规划中设定的 110 吉瓦目标。虽然“十三五”规划制定了天然气发电目标，但缺乏具体的实施政策。另外，2017 年冬季北方地区煤改气导致的严重天然气供应短缺使中国天然气政策发生重大转变，从推广天然气发电厂转变为有序发展天然气调峰电厂并限制新建热电联产电厂。政策变化加上天然气的高昂成本，使天然气在中国电力系统中的作用一直极为有限。

3、过高的天然气成本是中国天然气发电的主要障碍

燃料成本占天然气发电成本的七成以上，中国近一半的天然气需求通过进口 LNG 或管道天然气满足，其成本远大于国内资源丰富的煤炭，因此天然气发电难以与煤电竞争，收回投资成本极大依赖于补贴。即使 2020 年由于充足的供应和新冠疫情影响，全球天然气价格大幅下跌，中国天然气发电成本仍高于煤电成本。另外，中国缺乏完善的碳排放交易市场，试点市场的碳价也持续较低水平，因而难以体现天然气发电相对于燃煤发电的低排放优势。短期内，由于严格监管的电力市场结构及煤电的优势地位，天然气发电仍将面临较大挑战。

4、昂贵的燃气轮机技术是中国天然气发电的另一个障碍

昂贵的燃气轮机技术及对国外制造商的依赖是另一个发展障碍。当前中国燃气轮机技术落后于国际水平，目前约能实现 70% 的组件国产化，但核心组件制造、某些特定技术、定期检查和维护仍由外国厂家掌握，设备成本占前期投资成本的 50%。中国大多数天然气发电厂都采用 9E 和 9F 级燃气轮机，但国际领先厂商如西门子和通用电气已经开发了更先进的 9H 级燃气轮机，在效率、启动时间、排放量和灵活性方面均有改善，其热效率可达 64%，比超超临界燃煤电厂高近 20%，但设备价格也比同级别燃煤电厂高出 30%。而且，中国大多数天然气发电厂的维护都依赖与国外供应商的服务协议，中型电厂一个大型维护周期的成本可能高达 6000 万美元。尽管天然气发电在降低污染物排放方面有优势，但对燃煤电厂改造以实现超低排放的成本仍低于“煤改气”。中国正努力缩小与国外的技术差距，国家电力投资集团成立了中国联合重型燃气轮机技术公司，计划到 2023 年完成 300 兆瓦 F 级重型燃气轮机的设计和开发，到 2030 年完成 400 兆瓦 G/H 级燃气轮机的开发。哈尔滨电气集团和上海电气集团也通过组建合资公司实现一些零部件国产化以提供本地维护服务。因此，国内燃气轮机技术发展将有助于降低天然气电厂的成本。

5、缺乏竞争性的电力市场难以实现天然气发电盈利

在完全竞争性电力市场中，用电高峰期和非高峰期之间的价格差异可能会使灵活的天然气发电获利。尽管中国进行了新一轮电力市场改革，超过 70% 的发电仍低于基准价，辅助服务市场也处于起步阶段，天然气发电难以收回投资成本。监管机构对放开市场、提高电价持谨慎态度。尽管地方政府可在基准价格范围内调整天然气发电价格，但不足以支撑燃料和运营成本，仍需依靠政府支持。此外，发电厂的

运行主要由安全调度而非经济调度决定。为保证电力供应，通常保持燃煤电厂 50%-60%的负荷运行水平，以将储备电量维持在较高水平，多余电量也会被用于调峰，压缩了天然气发电厂的运行时间。目前中国正进行电力现货市场试点，但现货价格仍然偏低，其主要原因是超过 90%的发电量受限于长期合同或基准价格，无法将天然气发电的灵活性充分变现。而且，疫情危机导致经济增长放缓，政府调低电价以降低企业成本，短期内基准电价不太可能上调，这使得天然气发电市场前景黯淡。

6、过高的天然气进口依存度将影响政策制定

2019 年，中国天然气消费同比增长 8.6%达到 3064 亿立方米，占一次能源消费的 8.1%。天然气进口依存度达 43%，略低于 2018 年（44%）。天然气进口依存度从 2005 年开始迅速增长，尽管受到疫情影响，预计 2020 年仍将达到 42.6%。中国已成为仅次于日本的全球第二大 LNG 进口国。鉴于中国巨大的能源需求，专家估计，当中国天然气占能源消费 15%时，天然气消费量将占全球天然气贸易量的 50%。因此，天然气进口依赖可能威胁中国能源安全，进而影响未来的政策制定。

7、“十四五”期间中国新建天然气发电机组将达 40-50 吉瓦

尽管受到上述阻碍，但天然气发电的灵活性、低排放等优点仍有利于其发展。为实现碳中和目标，中国最迟要在 2050 年前淘汰燃煤发电并实现电力净零排放。这需要尽快集成间歇性可再生能源，提高电力系统灵活性成为优先事项之一。由于储能技术仍无法实现大规模商业部署，平衡电力系统要求部署包括天然气发电的灵活性技术。因此，预计“十四五”规划将实施更强有力的政策支持建设天然气发电机组。迄今为止，政策重点仍放在燃煤电厂技术升级，“十三五”规划提出到 2020 年完成 220 吉瓦燃煤电厂灵活性改造，但过高成本和缺乏激励措施，仅完成了计划的 25%。预计到 2025 年，天然气发电装机容量将新增 40-50 吉瓦，达到 140-150 吉瓦，比当前水平增加 50%；电力部门天然气消费量将增长 40%-50%，达到 750-800 亿立方米。未来十年，中国天然气需求将翻一番达到 5500-6000 亿立方米。

8、2060 年碳中和目标下，天然气发电不可能显著扩张

中国要实现到 2060 年净零排放目标，需要彻底改变能源结构，化石燃料在能源消费中占比需从当前的 85%大幅减少。这将限制煤炭消费，为低碳能源增长提供了空间。然而，由于净零排放电力将主要依靠可再生能源，限制化石燃料消费也将影响天然气发电的部署。清华大学气候变化与可持续发展研究院（ICCSA）在 2020 年 10 月发布的“中国长期低碳发展战略与转型路径研究”项目成果指出，中国最早应在 2025 年之前限制煤炭消费，天然气在能源结构中占比预计从当前的 8.5%升至 2025 年的 11%，到 2030 年达到 13%。根据 ICCSD 的 1.5°C 情景，到 2050 年中国天然气发电装机容量达到 200 吉瓦，天然气发电（配备碳捕集系统）仅占总发电量的 3%。

（岳芳）

IEA 和 OECD-NEA 联合发布电力成本估算报告

12月10日，国际能源署（IEA）和经合组织核能署（OECD-NEA）联合发布《电力成本估算报告 2020》¹⁷，指出低碳发电技术的发电成本正在持续下降，且日益低于传统化石燃料发电成本。近年来，在许多国家可再生能源平准化发电成本（LCOE）相比于可调度的化石燃料发电已具有较强的竞争力；新建核电站的发电成本保持稳定，但长期运行（LTO）核电站是发电成本最低的低碳发电技术选择；以目前碳价 30 美元/吨 CO₂ 计算，且碳捕集与封存技术迟迟未取得突破，燃煤发电成本优势已逐渐不再；基于较低的天然气价格和其在能源转型中的作用日益明确，燃气发电成本在不断下滑，更具市场竞争力。

这是自 1981 年以来发布的第 9 版《电力成本估算报告》。这项前瞻性研究基于经合组织和非经合组织 24 个国家 243 个发电厂提供的 2025 年电力机组投产情况进行发电成本估算，包括化石燃料和核电基荷发电，以及一系列可再生能源发电，还首次将储能技术、氢能、长期运行核电站的电力成本数据纳入估算。由于 LCOE 指标只包括单个发电厂单项发电技术的发电成本、维护成本和燃料成本，并不涉及该项发电技术在整个电力系统中的附加价值，为开展更具体的系统成本比较，国际能源署（IEA）设置了“价值调整后的平准化发电成本”（VALCOE）这一指标，将不同发电技术的系统价值（容量价值、灵活性价值等）和系统成本均纳入考量，对选定地区和发电技术进行了估算比较。

一、低碳发电技术成本竞争力越来越强

低碳发电技术平均发电成本正在下降，并且日益低于传统化石燃料发电成本。如果在有利的气候条件下大规模部署太阳能光伏发电，其成本竞争力将非常高。此外，统计 14 个国家陆上风电平均发电成本，显示其中 10 个国家到 2025 年陆上风电将成为 LCOE 最低的发电技术。与上一版的数据相比，海上风电发电成本大幅下降，五年前其 LCOE 中位数超过 150 美元/兆瓦时，而目前则远低于 100 美元/兆瓦时。两种水力发电技术（径流式和调节式）都可以在合适的地点提供有竞争力的替代电力方案，但成本将极大依赖于建设地点。然而，IEA 的 VALCOE 指标结果显示，风能和太阳能等间歇性可再生能源的系统价值将随着其在电力供应中所占份额的增加而降低，因此，需设置合理的并网比例以实现电力系统价值最大化。

新版报告中新建核电站的电力成本估算值低于上一个版本，但地区差异仍然显著。归功于学习效应，一些经合组织国家的核电站平均隔夜建设成本反映出下降趋势。核电到 2025 年仍将是成本最低的可调度低碳发电技术，只有大型水电可以做出类似的贡献，但后者高度依赖于自然资源禀赋。与化石燃料发电相比，核电站预计

¹⁷ Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

比燃煤电厂成本更低。虽然燃气-蒸汽联合循环发电（CCGT）在一些地区具有竞争力，但其 LCOE 在很大程度上取决于各个地区的天然气价格和碳排放价格。长期运行核电站的电力成本极具竞争力，不仅是成本最低的低碳发电技术选择，也是所有发电方式中成本最低的一种。

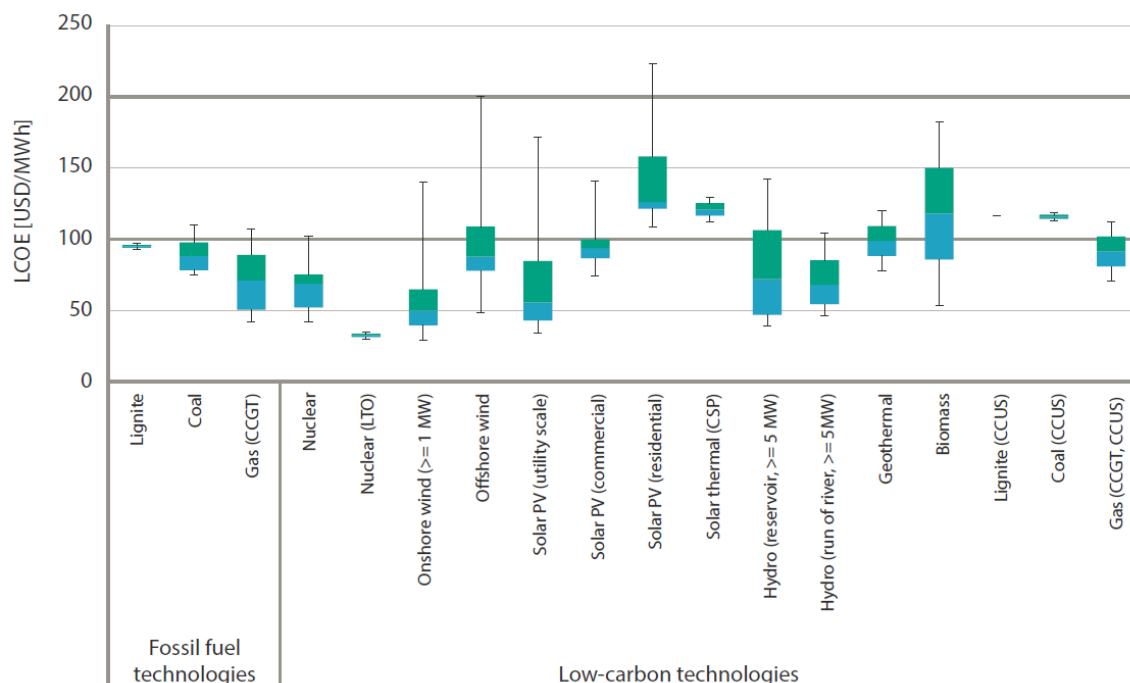


图 1 不同技术平准化发电成本区间（单位：美元/兆瓦时）

注：图中数值按折现率 7% 计算；箱线图表示最大值、中位数和最小值；CCGT：燃气-蒸汽联合循环发电技术；CCUS：碳捕集、利用和封存技术。

二、发电成本竞争力取决于国家和地方条件

由于有利于可再生能源发电的地址条件不同、燃料成本差异以及技术成熟度有别，所有发电技术的成本都因各国和地区而大相径庭。此外，一项发电技术在电力系统发电总量中的占比对其价值、负荷因子和平均成本也有影响。虽然在本报告中大多数国家的可再生能源发电技术都有很强竞争力，但数据显示，在一些国家（如日本、韩国和俄罗斯）的可再生能源成本仍高于化石燃料发电或核能发电。即使在同一国家，不同区域的条件不同也会造成地方一级的发电成本差异。在欧洲，陆上风电和海上风电以及公用事业规模太阳能发电都能够与天然气和新建核电相竞争。在美国，燃气发电受益于预期较低的天然气价格，但从电厂 LCOE 中位数来看，陆上风电和公用事业规模光伏是成本最低的发电技术（碳价 30 美元/吨 CO₂），比燃气发电成本更高的是海上风电、新建核电和燃煤发电。在中国和印度，预期间歇性可再生能源 LCOE 将达到最低，公用事业规模太阳能光伏和陆上风电是成本最低的发电技术，核电也具有一定的竞争力，为两国目前碳密集型发电结构的转型提供了有前景的技术选择方案。

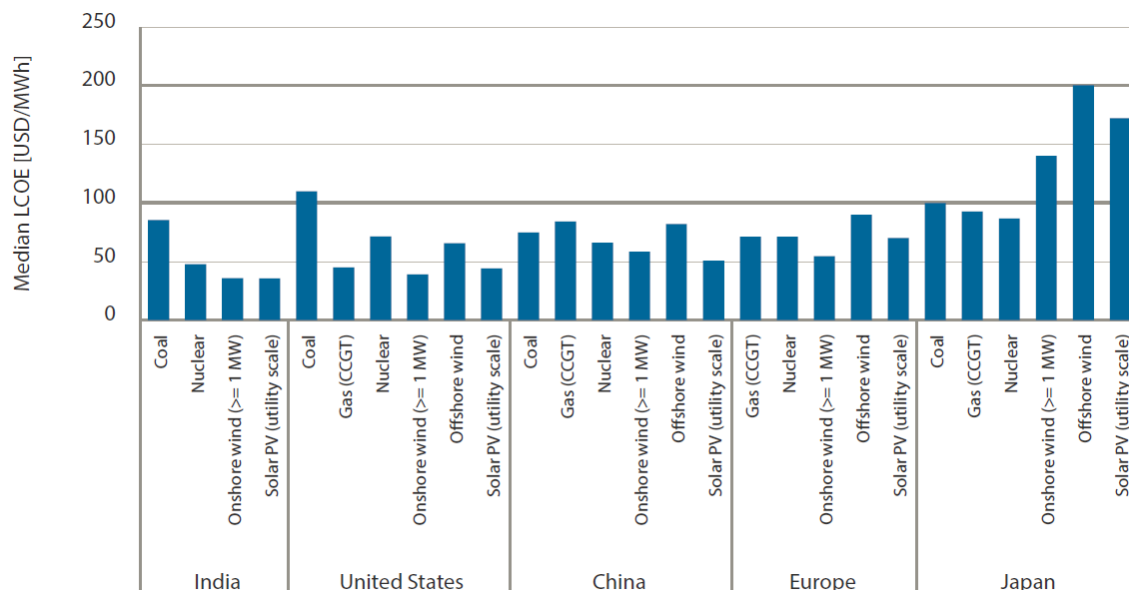


图 2 主要地区不同发电技术平准化发电成本中位数比较（单位：美元/兆瓦时）

注：图中数值按折现率 7% 计算。

三、延长核电站服役年限具有较好的成本效益

相较于投资新建核电站，对现有核电站设施进行大规模翻修，安全延长旧核电站原定服役年限，其发电成本大大降低。即使延寿后核电站利用率有所下降，但在高比例可再生能源系统中，现有核电延寿这一潜在的低碳发电方案，其成本也低于重新投资其他低碳技术。此外，从财政角度来看，核电站服役年限的延长，能大大减少核电站退役基金经费的使用。

四、碳捕集技术虽会提高发电成本，但仍将是较为可行的减排方案

在碳排放成本为 30 美元/吨 CO₂ 的情况下，由于配备 CCUS 设备的投资成本较高，并且会降低热效率，因此为燃煤和燃气电厂配备 CCUS 比纯化石燃料发电更昂贵。但随着碳排放成本的提高，对于燃煤电厂而言，配备 CCUS 的发电机组在每吨 CO₂ 50-60 美元的价格下具有成本竞争力。对于燃气发电而言，只有碳价格高于 100 美元/吨 CO₂ 情况下 CCUS 技术才具有竞争力。而在这么高的碳价下，间歇性可再生能源、水电或核电可能将成为成本最低的发电技术选择。尽管未来碳价预测具有较大不确定性，但在未来全球碳价超过 100 美元/吨 CO₂ 的情景下，如果需要灵活的低碳发电但缺乏有竞争力的替代发电技术，同时拥有经济可用的化石燃料资源，CCUS 仍可能成为某些低碳发电组合的一种补充。

五、低碳发电技术需与市场相适应

为了增强不同区域和市场之间发电成本的可比性，有必要统一某些假设条件，报告在基础情景中假设核电、煤电和气电的容量因子为 85%、折现率 7%。基于现有技术组合以及市场环境，这些参数可能会因单一市场情况有很大差异。例如随着可再生能源发电占比日益增加，基荷电厂市场份额会降低。报告因此还估算可调度的

基荷发电技术（如气电、煤电和核电）负荷因子为 50%。取决于调度的优先顺序不同，不同技术也会受到不同程度的影响。在美国，由于其气价较低，煤电机组通常最后调度，因此负荷因子也更低。CCGT 技术由于投资成本相对较低，且在许多地区可变成本适中，非常适合在不同环境和不同地区发电。而核电机组由于投资成本高，需要具备较高的利用率，核电才具有成本竞争力。

竞争力的一个关键决定因素是折现率，折现率反映了投资的机会成本以及各种风险和不确定性，例如与政策法规发展、市场设计、系统开发以及未来投资和燃料成本有关的风险和不确定性。在 LCOE 计算方法学中，折现率与资本成本相对应。一项技术资本密集程度越高，其 LCOE 对折现率变化越敏感。在基荷核电站中，这意味着新建核电站成本尤其取决于折现率。折现率较低（3%）时，反映市场环境稳定，投资保障高，新建核电站的 LCOE 低于新燃煤电厂和燃气电厂。如果折现率在 7%或 10%（这意味着面临风险较高的经济环境），新建核电站的成本将超过化石燃料发电厂。

六、系统成本计算对呈现能源整体价值具有重要作用

由于 LCOE 指标只包括单个发电厂单项发电技术的发电成本、维护成本和燃料成本，并不涉及该项发电技术在整个电力系统中的附加价值。而某一特定类型的可再生能源发电技术与整个能源系统是相互关联的，并不具有随时稳定可靠的发电能力。发电量的大小并非受到电力需求的调控，因此降低了发电的价值。电力可靠性保障需要可调度的电力容量，如储能和需求响应，以确保供应的安全性。此外，间歇性可再生能源发电的潜在快速变化需要进行平衡。为了涵盖上述不确定因素的影响，并保障低碳电力以低成本的价格满足市场特定需求，需要进行整个电力系统级的分析。因此，国际能源署开发了 VALCOE 的系统价值模型，对发电成本进行估算。这种新计算模型是根据电力系统中单项技术对实现整个电力系统安全运行的所有方面的贡献价值进行调整，其计算结果反映了现有技术在整个电力系统中的价值。结果显示，太阳能光伏发电机组在单个发电厂产量中显示出高度相关性，随着其在电力系统中占比增加，发电价值显著降低，在系统分析中将考虑这一现象。相比之下，风电产量在每个风力发电厂之间的相关性较小。即使其占比增加，其价值损失也较小。虽然目前可再生能源发电量在整个能源系统中占比较低，相关性对能源市场的影响较小，但随着可再生能源发电量占比的不断增加，相关性影响可能会上升。具有高可变成本技术（如高灵活性的开式循环燃气轮机）的燃气发电在电力系统中具有更高的系统价值。

VALCOE 度量标准提供了一种从单个发电技术出发，考察其在整个电力系统中系统价值的创新方法。其系统价值不仅取决于间歇性可再生能源在整个能源系统中所占的比例，还取决于互补资源的成本，如储能或移动互联技术，以及竞争技术的

成本。与许多其他假定长期运行成本最优情景模拟未来系统发展的分析方法不同，VALCOE 计算场景试图复制真实的现实世界系统，未来还将不断进行系统化分析并完善当前的数据结果。评估不同发电技术的系统价值，可以更全面地了解其经济成本。但为了衡量发电技术对整个社会的全部成本，还需考虑人类健康影响（空气污染和重大事故）、环境、就业、自然资源可获得性和供应安全性等因素。

七、储能在能源系统中变得尤为重要

间歇性可再生能源发电与天气的相关性，将导致瞬时电力需求与供应之间的不匹配，某些时刻会导致供应过剩，而在其他时候又会导致供应不足。因此，不同电力储能技术在各种应用和服务中显得至关重要。储能可以改善风能和太阳能光伏发电等间歇性可再生能源发电与电力需求的稳定性。在未来的低碳系统中，多种灵活性方案（例如储能、需求灵活性以及核电、水电等灵活低碳发电）的组合可能将提供成本最低的解决方案。

八、未来氢能的发展潜力在很大程度上取决于制氢成本

自 20 世纪 70 年代以来，全球对纯氢的需求量增长了三倍多，目前每年需求约为 7500 万吨。需求主要来自炼油和合成氨（占纯氢需求量的 95%左右）。此外，某些工业还使用氢化气体作为气体混合物的一部分，目前每年混合氢需求约为 4500 万吨，主要用于化学生产和钢铁部门。氢的生产成本受到若干因素的影响，最终成本取决于所使用的燃料（天然气、煤炭或电力）和技术（天然气制氢和煤制氢中有没有利用碳捕集与封存技术、不同类型的电解技术等）。目前，天然气制氢成本在 0.7-1.6 美元/千克 H₂ 之间，配备 CCUS 的天然气重整制氢成本高达 1.2-2.0 美元/千克 H₂。在石油和化工领域，低碳氢要取代目前的化石燃料制氢，面临的障碍是成本，只有当电价低于 20 美元/兆瓦时，电解制氢才能与传统技术竞争；而在钢铁生产中，只有当电价非常低（低于 10 美元/兆瓦时）时，电解制氢才能与传统方式竞争；对于乘用车，必须降低燃料电池和车载储氢的成本，以使其在长距离里程（400 - 500 公里）应用上能与电动汽车竞争。

（汤匀）



《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