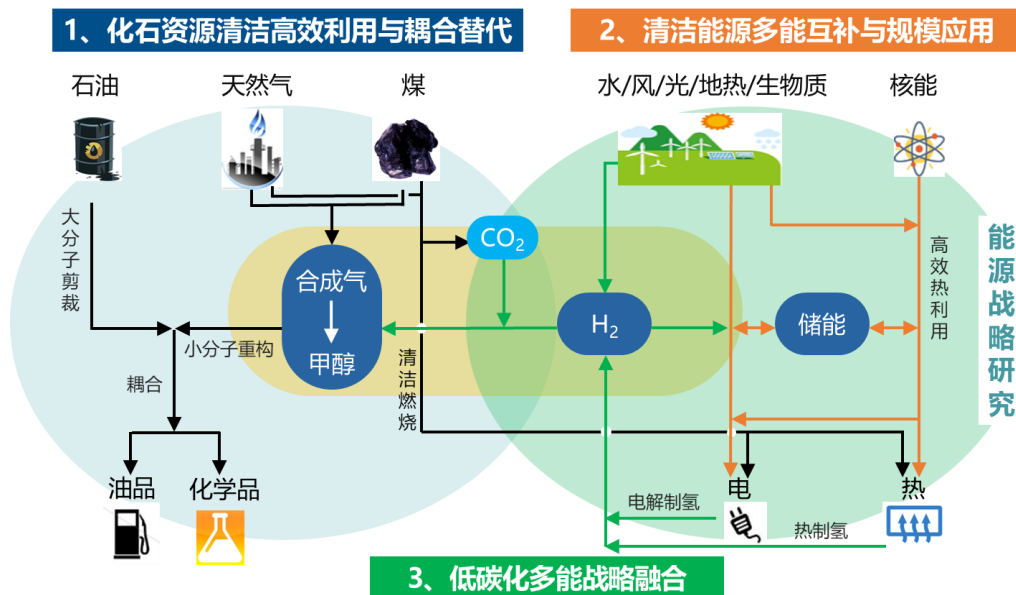




# 洁净能源科技动态监测快报

2022 年第 03 期（总第 29 期）



## 本期看点

- 美国能源部投入上亿美元研发先进碳捕集及利用技术
- 法国公布新的能源计划
- 美国能源部投入近 30 亿美元助力建立本土电池供应链
- 创新使命组织提出未来十年清洁氢能研发创新优先事项
- IRENA：可再生能源智能电气化是能源转型的关键
- IRENA 评述氢能对能源转型的地缘政治影响

# 目 录

2022 年第 03 期 (总第 29 期)

## 化石资源清洁高效利用

- 美国能源部投入上亿美元研发先进碳捕集及利用技术..... 2
- 日本 NEDO 支持开发混凝土和水泥碳循环技术..... 3
- 计算化学筛选策略开发 CO 高效还原制丙醇催化剂 ..... 4
- Co/TiO<sub>2</sub> 催化剂实现 CO<sub>2</sub> 高效催化合成碳氢化合物 ..... 5

## 清洁能源多能互补

- 法国公布新的能源计划 ..... 6
- 美国能源部投入近 30 亿美元助力建立本土电池供应链..... 6
- 美国能源部资助波浪能前沿技术开发 ..... 8
- 澳大利亚投入 4000 万澳元开发超低成本光伏技术..... 9
- 英国政府投入 3100 万英镑开发创新浮动式海上风电技术..... 9
- 激光优化工艺助力 200 cm<sup>2</sup> 大面积钙钛矿电池刷新效率纪录 ..... 10
- 新型双层隔膜制备高效率钙钛矿太阳电池..... 11
- 英意澳研究人员首次成功证明量子电池力学原理..... 11
- 美韩合作开发高能量密度三维弹性固态电解质 ..... 12
- 美国斯坦福大学成功制备长循环寿命金属锂电池..... 12

## 低碳化多能融合

- 创新使命组织提出未来十年清洁氢能研发创新优先事项 ..... 13
- 澳大利亚拨款近 1.3 亿澳元启动未来燃料计划..... 15
- 美国能源部资助 2800 万美元开发低成本清洁制氢技术..... 16
- 日本 NEDO 资助开发 CO<sub>2</sub> 制造塑料技术 ..... 17
- 三菱动力将建全球首个燃氢发电全价值链示范园区 ..... 18
- 新型 CO<sub>2</sub> 分离器保障氢氧化物交换膜燃料电池高效稳定运行 ..... 19
- 澳大利亚皇家墨尔本理工大学实现 CO<sub>2</sub> 直接高效固碳 ..... 20

## 能源战略研究

- IRENA: 可再生能源智能电气化是能源转型的关键..... 21
- IRENA 评述氢能对能源转型的地缘政治影响..... 25

## 本期概要

**美国能源部 (DOE) 先后宣布两笔资助招标计划，共计投入 1.15 亿美元支持先进碳捕集和利用技术研发：**(1) 化石能源和碳管理办公室宣布资助 9600 万美元开发点源碳捕集技术，旨在推进天然气发电和工业领域 CO<sub>2</sub> 捕集效率达到 95% 以上；(2) 生物能源技术办公室与化石能源和碳管理办公室共同资助 1900 万美元开发藻类固碳技术，提高藻类系统捕获 CO<sub>2</sub> 能力并将其用于生物燃料和生物产品的生产。

**法国总统马克龙宣布了面向 2050 年的“法国能源计划”，将大力发展可再生能源和核能：**可再生能源方面，重点发展太阳能和风能，到 2050 年前者累计装机预计超过 100 吉瓦，后者累计装机预计近 80 吉瓦。核能方面，法国计划到 2050 年新建 6 座第三代压水反应堆 (EPR2)，第一座将于 2035 年投入运营，并开展再建设 8 座反应堆的可行性研究。此外，政府还将要求在保障安全运营前提下，将目前在运核反应堆的使用寿命从 40 年延长至 50 年。通过上述措施，到 2050 年将新增 25 吉瓦的核电装机容量。

**美国能源部 (DOE) 发布了两份资助招标计划，共提供 29.1 亿美元以推动电动汽车和电池储能技术在国内开发和制造。计划将确保美国能够建立本土电池供应链，提高经济竞争力，实现能源独立和国家安全：**(1) “电池材料加工和电池制造”计划，新建电池原材料开发、加工、电池组件制造工厂；(2) “电动汽车电池回收和二次利用”计划，示范电池回收再利用并整合到电池供应链。

**创新使命第二阶段 (Mission Innovation 2.0) 启动的“清洁氢能使命”提出了未来十年清洁氢能的关键创新优先事项和重点关注领域：**为实现该使命的 2030 年目标，未来应重点关注两条技术路线：(1) 天然气重整制氢结合碳捕集和封存 (NGR+CCS)；(2) 低碳电解制氢。此外，清洁氢能使命承诺到 2030 年推进在全球部署至少 100 个大型清洁氢谷，通过在不同的地理位置示范清洁氢能的经济可行性和终端应用，扩大氢能规模，从而进一步降低成本，刺激氢能投资。

**日本新能源产业技术综合开发机构 (NEDO) 宣布在“绿色创新基金”框架下，投入 1234 亿日元启动新项目“开发利用 CO<sub>2</sub> 等原料制造塑料技术”，以推进碳循环产业发展，项目实施期为 2021-2030 年，资助 4 个主题：**(1) 石脑油分解炉先进技术开发；(2) 废塑料、废橡胶化学品制造技术开发；(3) CO<sub>2</sub> 制造功能性化学品技术开发；(4) 醇类化学品制造技术开发。

**国际可再生能源机构 (IRENA) 与中国国家电网公司联合发布《可再生能源智能电气化：推动能源服务转型》报告，强调可再生能源智能电气化重点需加强可再生能源发电、电气化和数字化三者之间的协调部署：**清洁电力已经成为当前能源转型主要燃料，能源转型期间构建更智能灵活的电网以及推进终端应用电气化是核心要素。智能电气化战略的实施是建筑、交通运输和工业部门电气化转型的先决条件。

# 化石资源清洁高效利用

## 美国能源部投入上亿美元研发先进碳捕集及利用技术

2月10日，美国能源部（DOE）先后宣布两笔资助招标计划，共计投入1.15亿美元支持碳捕集和利用技术研发，以助力美国实现净零目标。资助详情如下：

### 一、资助9600万美元推进天然气发电和工业碳捕集

化石能源和碳管理办公室（FECM）宣布资助9600万美元开发点源碳捕集技术，旨在推进天然气发电和工业领域CO<sub>2</sub>捕集效率达到95%以上<sup>1</sup>。目前，美国天然气发电和工业部门（如水泥和钢铁）的年均CO<sub>2</sub>捕集和封存量仅为100万吨，碳捕集示范和部署规模远未达到2035年实现无碳电力的目标，因此，该计划将支持开发和测试用于天然气联合循环发电（NGCC）和工业部门的碳捕集技术。具体内容如下：

#### 1、碳捕集技术研发：应用于NGCC工厂的高效材料实验室规模测试

主题1的研发目标是：①开发和测试可从天然气联合循环（NGCC）电厂烟气中有效捕获二氧化碳的碳捕集技术（二氧化碳捕集效率需达到95%以上）；②与具有碳捕集功能的电厂相比，新技术在捕集成本上需降低20%以上。

#### 2、NGCC电厂燃烧后碳捕集技术的工程规模测试

主题2的目标是在真实的烟气条件下，在工业设施中开发95%或更高捕集效率的碳捕集技术。其中，工业部门包括精炼厂、化工生产（氨和石化）、矿物生产（水泥和石灰）、天然气加工和钢铁生产等。

#### 3、碳捕集系统前端工程设计研究

主题3的目标是执行和完成商业规模碳捕集项目的前端工程设计（FEED），实现在工业设施或NGCC电厂中95%的碳捕集效果。其中，工业部门包括精炼厂、化工生产（氨和石化）、矿物生产（水泥和石灰）、天然气加工和钢铁生产。构建先进的碳捕集系统，以实现在工业设施每年捕集并分离10万吨以上的CO<sub>2</sub>，或在NGCC电厂每年捕集并分离50万吨CO<sub>2</sub>，且进行封存。

### 二、资助1900万美元推进碳利用技术

DOE生物能源技术办公室（BETO）与化石能源和碳管理办公室（FECM）共同宣布资助1900万美元用于开发藻类固碳技术，减少温室气体排放和利用生物技术生产可靠原料<sup>2</sup>。该计划旨在提高藻类系统捕获CO<sub>2</sub>能力并将其用于生物燃料和生物产

<sup>1</sup> U.S. Department of Energy Announces Up to \$96 Million to Advance Carbon Capture Technologies for Natural Gas Power and Industrial Sectors. <https://www.energy.gov/fecm/articles/us-department-energy-announces-96-million-advance-carbon-capture-technologies-natural>

<sup>2</sup> U.S. Department of Energy Announces \$19 Million for Carbon Utilization Funding Opportunity. <https://www.energy.gov/eere/articles/us-department-energy-announces-19-million-carbon-utilization-funding->

品的生产。具体内容如下：

### 1、提高藻类系统 CO<sub>2</sub> 利用率

最终目标是实现碳利用效率超过 70%（30 天实验周期内，收获的生物质量（kg）与 CO<sub>2</sub> 供给量（kg）的比值）。

具体策略包括：①改变藻类生长环境中的化学成分以提高 CO<sub>2</sub> 的吸收率；②分离新的菌株或改进现有的藻类菌株以适应生长环境的改变；③开发新的 CO<sub>2</sub> 输送系统，以及优化藻类生长环境以最大限度地增加碳吸收。

### 2、利用来自公共事业和工业来源的人为 CO<sub>2</sub> 的藻类技术

由于藻类生长周期较短、针对较恶劣环境具有耐受性、生长空间需求较小，因此开发高效藻类系统是藻类资源利用的关键途径。藻类原料的多元性和市场终端应用的广泛性使得藻类 CO<sub>2</sub> 转化途径具有更大的商业吸引力。最终该主题需达到的目标是碳利用效率超过 50%（30 天实验周期内，收获的生物质量（kg）与 CO<sub>2</sub> 供给量（kg）的比值）。

具体策略包括：①探索 CO<sub>2</sub> 吸收和转化效率的量化方法和优化途径；②确定目标产品及其特性，以验证其可用性和经济效益；③通过生命周期分析（LCA）和技术经济分析法（TEA）全面分析对环境和经济影响。

（汤匀）

## 日本 NEDO 支持开发混凝土和水泥碳循环技术

1 月 28 日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）在“绿色创新基金”框架下，投入 550 亿日元启动“使用 CO<sub>2</sub> 的混凝土制造技术开发项目”<sup>3</sup>，旨在开发减少混凝土生产碳排放的工艺以及水泥生产过程中的高效 CO<sub>2</sub> 分离/回收技术，以推进该行业大规模固碳技术的早期部署，助力实现碳中和目标。该项目的实施期为 2021-2030 年，目前已确定资助 4 个主题，详情如下：

### 1、创新负碳混凝土材料/施工技术及其质量评估技术开发

该主题下资助 2 个课题：①减少碳排放并最大化固碳效果的混凝土技术开发，包括固碳材料、制造系统、大型预制件、现场施工安装等技术；②混凝土质量管理及定量评估相关方法开发，包括固碳定量评估、混凝土质量管理/监控系统等。

### 2、高 CO<sub>2</sub> 利用率的混凝土开发及其在路面和建筑物的应用

该主题下资助 2 个课题：①将水泥烧制过程中产生的 CO<sub>2</sub> 固定在工业废物中生产混凝土材料，并确保其可加工性和耐久性，可用于路面、建筑和土木工程结构中；②构建生命周期碳排放、生命周期评估、生命周期成本的综合评价体系，以推进碳

---

opportunity

<sup>3</sup> グリーンイノベーション基金事業で、コンクリートやセメント分野のカーボンリサイクル技術の開発に着手。 [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101510.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101510.html)

定价及环境、社会、治理（ESG）投资等的推广。

### 3、混凝土固碳评估的标准化研究与开发

该主题下资助 1 个课题：①基于实验事实和科学依据开发固碳定量评估方法和质量控制方法，包括混凝土材料 CO<sub>2</sub> 固定量评估、建筑物混凝土固碳定量评估、固碳过程的质量控制方法，并将实施标准化开发相关活动。

### 4、CO<sub>2</sub>回收型水泥制造工艺的开发

该主题下资助 2 个课题：①水泥制造过程碳捕集系统开发，将在确保传统悬浮预热器预分解（NSP）窑的热交换性能的同时，使用氧气代替空气进行水泥烧制以产生 CO<sub>2</sub>，并开发相应的碳捕集系统；②开发使用各种钙源生产水泥的技术，将从废混凝土、焚烧灰渣等含钙废物中提取氧化钙，生产人造石灰石，以此为原料生产再生水泥，以实现水泥行业的碳中和。

（岳芳）

## 计算化学筛选策略开发 CO 高效还原制丙醇催化剂

正丙醇主要是在高压和高温下通过乙烯与 CO 和 H<sub>2</sub> 经过氢甲酰化反应制得。这种复杂的制造过程成本较为昂贵，目前每吨丙醇的市场价格约为 1400-1600 美元，限制了正丙醇市场的整体规模。因此，人们希望从 CO<sub>2</sub>/CO 电还原中获得高能量密度的 C<sub>3</sub> 燃料正丙醇。然而，当前 CO 电还原制备正丙醇的选择性低、产率低、稳定性差，发展高效催化剂实现 CO 电还原制正丙醇显得尤为重要。

加拿大多伦多大学 Edward H. Sargent 课题组利用计算化学筛选技术开发出基于银钌共掺杂铜（Ag-Ru-Cu）催化剂，该催化剂能同时促进多重碳-碳耦合，稳定 C<sub>2</sub> 中间体，促进 CO 的吸附，最终有助于改进正丙醇的电合成过程。研究人员首先使用密度泛函理论（DFT）计算筛选催化剂体系，其依据先前的研究成果和相关报道，计算了在不同 Ag-X-Cu 催化剂系统上，\*CO 二聚反应（\*CO+\*CO→\*OCCO）和\*CO 与\*OCCO 中间体之间的耦合反应（\*CO+\*OCCO→\*OCCOCO）的活化能，并将其作为预测 C<sub>1</sub>-C<sub>1</sub> 活性的指标进行 C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> 耦合。在筛选的催化剂体系中，Ag-Ru-Cu 对 C<sub>1</sub>-C<sub>1</sub> 和 C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> 偶联所需要的活化能最低，除此之外，进一步比较了 C<sub>1</sub>-C<sub>1</sub> 和 C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> 偶联的关键反应中间体\*CO 和\*OCCO 在 Ag-Ru-Cu、Ag-Cu 和 Cu 上各自的吸附能，相对于 Ag-Cu 和 Cu，Ag-Ru-Cu 上的\*CO 平均吸附能较高，这些计算结果表明，Ag-Ru-Cu 在高生产速率下具有提高 C<sub>3</sub> 选择性的潜力。为了进一步验证该理论，研究人员在一个膜电极组件（MEA）电解槽中对 CO 电还原反应（CORR）的性能进行了评估，相对于 Cu 电极，Ag-Ru-Cu 电极对总 C<sub>2+</sub> 产物和正丙醇具有更高的选择性，与 DFT 预测一致，在 300 mA cm<sup>-2</sup> 的电流密度下，在 Ag-Ru-Cu 电极上实现了正丙醇法拉第效率（FE）为 37%±3%，比 Cu 电极高 1.8 倍，正丙醇产量为 111±9 mA cm<sup>-2</sup>。

为了进一步探讨 Ag 和 Ru 共掺杂对 CORR 性能的影响，同样制备了 Ag-Cu 电极，并测量了其 CORR 性能进行比较。在相同的电流密度下，Ag-Cu 电极上对 C<sub>2+</sub>产物的总 FEs 高于 Cu 电极，但低于 Ag-Ru-Cu 电极，不同电极上的正丙醇 FEs 均遵循 Ag-Ru-Cu>Ag-Cu>Cu 的顺序，表明 Ag 和 Ru 共掺杂在 Cu 中也促进了 C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> 耦合的步骤，与计算结果一致。同时在 300 mA cm<sup>-2</sup> 下，考察 Ag-Ru-Cu 电极在 MEA 电解槽中的 CORR 稳定性，在 CORR 测量过程中，该系统保持了稳定的 -2.64±0.07 V 电位，在连续 100 小时的工作过程中，Ag-Ru-Cu 电极制正丙醇 FE 稳定保持在 32% 以上。除了上述实验测试评估外，进一步对 Ag-Ru-Cu 电极的选择性、电流密度等方面都进行了测试评估，均优于目前报道的正丙醇电合成方法。研究人员将正丙醇电合成规模扩大到 15 cm<sup>2</sup> MEA，在电位为 -2.60±0.02 V 时，正丙醇的 FE 值为 36%±3%，C<sub>2+</sub>的 FE 达到 93%。

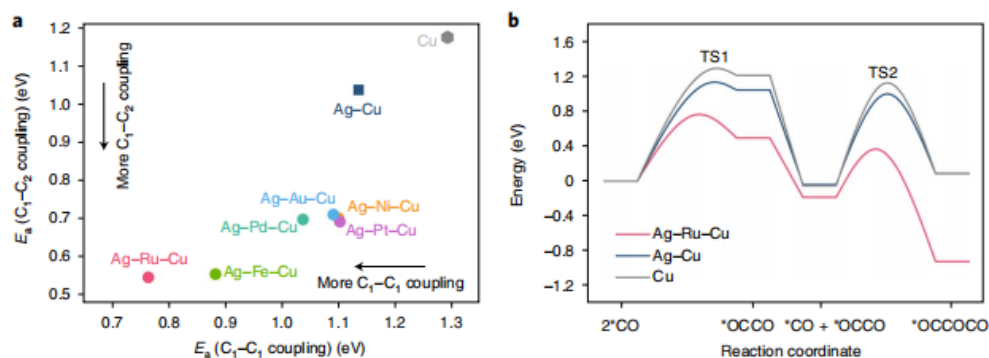


图 1 C<sub>1</sub>-C<sub>1</sub> 和 C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> 耦合的 DFT 计算示意图

该项研究构建了基于银钌共掺杂铜的电催化剂，实现 CO 高效电还原。通过实验及理论计算，证实了 Ag-Ru-Cu 电极在选择性、电流密度和操作时间方面都优于其他报道的正丙醇电合成方法。这项作为 CO 高效利用，实现石化工业的脱碳铺平了道路。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》<sup>4</sup>。（汤匀）

## Co/TiO<sub>2</sub> 催化剂实现 CO<sub>2</sub> 高效催化合成碳氢化合物

1 月 14 日，荷兰乌得勒支大学研究团队制备了稳定在各种氧化物载体上的金属钴（Co）或钴氧化物纳米颗粒催化剂，实现了 CO<sub>2</sub> 高效转化合成碳氢化合物燃料。结果显示，当 Co 与可还原的 TiO<sub>2</sub> 金属氧化物载体相结合时，制备的 Co/TiO<sub>2</sub> 催化剂在氧化和还原状态下都是最活跃的，相较于大多数典型的 Co 基催化剂，Co/TiO<sub>2</sub> 催化剂的 C<sub>2+</sub>选择性可以从 11% 提高到 39%，并且 C<sub>2+</sub>总产率高达 104 毫摩尔/小时·克、碳转化率为 17.5%。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》<sup>5</sup>。

（汤匀）

<sup>4</sup> Xue Wang, Pengfei Ou, Adnan Ozden, et al. Efficient electrosynthesis of n-propanol from carbon monoxide using a Ag-Ru-Cu catalyst. *Nature Energy*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00967-7>

<sup>5</sup> I C Have, J J G Kromwijk, M Monai, et al. Uncovering the reaction mechanism behind CoO as active phase for CO<sub>2</sub> hydrogenation. *Nature communications*, 2022. DOI: [10.1038/s41467-022-27981-x](https://doi.org/10.1038/s41467-022-27981-x).

# 清洁能源多能互补

## 法国公布新的能源计划

2月11日，法国总统马克龙宣布了面向2050年的“法国能源计划”<sup>6</sup>。为了应对气候变化和电力需求增长的挑战，确保2050年碳中和目标实现，法国将大力发展可再生能源和核能。可再生能源方面，重点发展太阳能和风能，到2050年前者累计装机预计超过100吉瓦，后者累计装机预计近80吉瓦。核能方面，法国计划到2050年新建6座第三代压水反应堆（EPR2），第一座将于2035年投入运营，并开展再建设8座反应堆的可行性研究。此外，政府还将要求在保障安全运营前提下，将目前在运核反应堆的使用寿命从40年延长至50年。通过上述措施，到2050年将新增25吉瓦的核电装机容量。

（郭楷模）

## 美国能源部投入近30亿美元助力建立本土电池供应链

2月11日，美国能源部（DOE）发布了两份资助招标计划<sup>7</sup>，即“电池材料加工和电池制造”计划和“电动汽车电池回收和二次利用”计划，共提供29.1亿美元以推动电动汽车和电池储能技术在国内开发和制造。该项计划将确保美国能够建立本土电池供应链，提高经济竞争力，实现能源独立和国家安全。具体内容如下：

### 一、电池材料加工和电池制造

#### 1、电极材料从原料提取分离到正极制造的国内商业化规模生产

创建一个商业化可持续的电池前体市场，包括原材料提取到正极制造整个供应链。原材料资源可以来自地质矿床和非常规资源，包括但不限于煤矿尾矿和酸性废水，并以生产电池级前体作为产出目标。

#### 2、利用合成原料和天然原料制造电池级石墨的国内商业化规模生产

建立一个国内可持续的从天然原料和合成原料来源制造石墨负极供应链。石墨是目前绝大多数锂离子电池的负极材料，涵盖了所有主要应用，预计在可预见的未来具有很强的市场可行性。由于从前驱体到组件的加工过程较为简单，这一领域资助方向包括石墨化、球化以及从高纯度石墨原料制备石墨负极粉末。

#### 3、实现国内商业化规模的电池材料提取和加工

<sup>6</sup> La Nouvelle Stratégie énergétique de la France. <https://www.gouvernement.fr/la-nouvelle-strategie-energetique-de-la-france>

<sup>7</sup> Biden Administration, U.S. Department of Energy to Invest \$3 Billion to Strengthen U.S. Supply Chain for Advanced Batteries for Vehicles and Energy Storage. <https://www.energy.gov/eere/articles/biden-administration-us-department-energy-invest-3-billion-strengthen-us-supply-chain>



支持在国内生产商业可行的电池前体材料（不包括领域 1 和领域 2）。竞标方应确定其拟议的生产规模、建造时间和经济预测结果，以及确定其拟议的电池前体材料的上游原料和下游供应市场。

### **1-3 拟资助金额合计 1.5 亿美元。**

#### **4、实现国内从非传统原料来源进行分离和电池级材料的生产示范**

加速材料分离和提取技术的商业化应用，实施大规模示范项目以充分利用国内非传统资源的潜力。非传统资源来自于各种有害物质如尾矿、煤灰和排污池等。

#### **5、实现国内电池材料分离与加工的示范**

支持先进工艺的大规模示范，这些示范项目将有助于提高产量、降低用能成本和减少污染物排放等。竞标方应确定其拟议的生产规模、建造时间和经济预测结果，以及确定其拟议的电池前体材料的上游原料和下游供应市场。

### **4-5 拟资助金额合计 0.5 亿美元。**

#### **6、国内商业规模的电池组件制造**

在美国建立新的电池制造厂、新的生产装备、改造或扩大现有电池制造厂，开发锂离子电池负极材料、隔膜材料、硅负极活性材料或含硅电极，以及上述领域中没有包含的锂电池组件（包括性能增强、电池外壳、电解质和其他相关技术），并设计一个将电池模块生产、封装、应用集成于一体的系统，应用于电动汽车和/或电网级储能应用，制造先进的电池单元。

#### **7、国内商业规模的电池回收**

在美国建立新制造工厂或生产装备、改造或扩大现有美国电池回收工厂。所有回收材料都将被充分利用，对于那些电池生产过程的中间产品，应确定生产电池级前体材料的潜在国内合作伙伴。

### **6-7 拟资助金额合计 1.5 亿美元。**

#### **8、国内电池单元级元件制造的示范**

*拟资助金额 0.5 亿美元。*为电池单元、材料或组件的加工建立一个大规模的制造示范设施。该工厂将引进从未在电动汽车和电网市场大规模使用过的新制造工艺或技术。优先资助新一代电池化学和/或通过实施新型制造工艺以降低成本。

## **二、电动汽车电池回收与二次利用**

### **1、电池回收和重新整合到电池供应链**

*拟资助金额 4000 万美元。*加快回收过程的发展，将回收材料重新纳入电池供应链，以提高国内供应链弹性。以废旧锂电池和制造废料为原料创新工艺，产出应符合电池供应链再利用的要求。

### **2、电池二次利用大规模示范**

*拟资助金额 2000 万美元。*建立示范项目，以了解和验证废弃电动汽车电池的实

际性能和应用潜力，包括汽车行业以外的应用能力。资助技术包括但不限于快速、准确地对电池健康状态进行分级的技术、动态平衡地对电池健康状态进行分级技术、动态平衡二次利用电池的解决方案。

(汤匀)

## 美国能源部资助波浪能前沿技术开发

1月25日，美国能源部（DOE）宣布投入2500万美元支持8个创新波浪能项目<sup>8</sup>，旨在推进对波浪能技术的研究、开发和示范以加快其大规模部署。此次资助的项目将在俄勒冈州海岸附近的PacWave测试场进行水域测试，重点关注3个主题领域，详情如下：

### 1、波浪能转换器测试

该主题领域重点关注在PacWave设施中测试用于远程和微电网的波浪能转换器系统设计，以及产生公开可用数据和知识的波浪能转换器系统。本次将资助2个项目：①在PacWave场地部署和测试50千瓦规模波浪能转换器设备，以提高效率并降低成本；②将SeaRAY k2自主海上电力系统推进到商业准备阶段，该系统由SeaRAY k2波浪能转换器组成，完全集成了位置保持、收集和发送数据、存储能量等功能，可支持无人海上活动和设备，包括海底车辆、传感器包和操作设备。

### 2、先进波浪能转换器设计

本主题支持开发稳健的波浪能转换器系统设计以产生离网或并网电力，本次将资助2个项目：①对以往资助项目中开发的Triton波浪能转换器进行性能改进，并在PacWave设施中测试进行系统设计；②设计一种点吸收式波浪能转换器Centipod 1P6，使用小型可控电力输出系统，并使用可显著降低成本的充气浮子。

### 3、波浪能技术研发

该主题领域直接利用PacWave测试设施进行有潜力的波浪能技术研发以推动整个海洋能行业的发展，涉及波浪能转换器系统及组件、环境监测技术、仪器仪表和健康监测系统、波浪测量系统和其他支持技术。本次将资助4个项目：①部署NeuralWEC设备，以示范真实海况中使用基于传感器和人工智能的监测控制技术，可使波浪能转换器的成本效率翻倍；②测试和验证一种新型的电磁谐振取力器波浪能转换器组件技术，能够以3:1的低峰均功率比<sup>9</sup>发电；③在PacWave进行声学测量，建立一个声学事件库，检测、定位、识别波浪能转换器发出的噪声；④开发和示范环境数据集成评估工具，以支持海洋能项目的有效环境监测和适应性管理框架，该工具将作为PacWave收集的所有环境数据的中央存储库。

(岳芳)

<sup>8</sup> DOE Announces \$25 Million for Cutting-Edge Wave Energy Research. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-25-million-cutting-edge-wave-energy-research>

<sup>9</sup> 较低的峰均功率比表明设计与预期的波强度非常匹配。

## 澳大利亚投入 4000 万澳元开发超低成本光伏技术

1 月 10 日，澳大利亚可再生能源署（ARENA）宣布将投入 4000 万澳元，支持研发超低成本太阳能光伏技术<sup>10</sup>，以实现政府设定的“太阳能 30 30 30”目标，即到 2030 年光伏组件效率达到 30%，且公用事业规模光伏装机成本达到 30 澳分/瓦。此次资助重点关注两大技术领域：

### 1、电池和组件

该领域投入 2000 万澳元，支持通过太阳电池和组件的前沿研发和创新以提高效率、延长寿命并实现大规模可持续制造，实现降低成本的目的。

### 2、降低系统平衡部件及运维成本

该领域投入 2000 万澳元，支持通过创新的工厂设计和配置、先进的自动化组装和施工技术大幅降低公用事业规模光伏的建设成本，以及通过自动维护技术和智能监控系统等降低运行成本。

（岳芳）

## 英国政府投入 3100 万英镑开发创新浮动式海上风电技术

1 月 25 日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）宣布将投入 3160 万英镑支持 11 个先进浮动式海上风电项目<sup>11</sup>，以加快英国海上风电部署。此次资助重点关注将大型海上风力涡轮机部署在深海区域的技术，主要包括 4 个领域：

### 1、动态电缆

投入 161 万英镑支持 1 个项目：①加速开发用于动态应用的高压输出和阵列间电缆，将在海中示范额定电压在 66-132 千伏的聚合物绝缘电缆，并将下一代光纤应变传感技术集成到动态高压输出和阵列间电缆中，以改善海上电缆的监测和维护。

### 2、锚定和系泊

投入 114 万英镑支持 2 个项目：①开发用于浮动式海上风电的可拆卸浮标系泊系统；②深埋拉伸锚杆示范项目，将利用成熟的海上钻井技术来提供高效的锚固系统，可穿透高强度地质构造，灵活适应地质变化。

### 3、浮体和基座

投入 100 万英镑支持 2 个项目：①铰接式风柱的性能示范，该结构通过浮力柱在单个锚点周围产生翻转力矩来实现环境载荷的稳定性；②Spar-Buoy 型浮动式平台的海上风电部署，该设计可稳定支撑海上环境的大型载荷。

### 4、多种技术的集成示范

<sup>10</sup> Ultra Low Cost Solar PV Research and Development Round. <https://arena.gov.au/funding/ultra-low-cost-solar-pv-research-and-development-round/>

<sup>11</sup> £60 million boost for floating offshore wind. <https://www.gov.uk/government/news/60-million-boost-for-floating-offshore-wind>

投入 2790 万英镑支持 6 个项目：①示范由 3 艘驳船组成的三体船，过箱形梁和支撑相互连接，风力涡轮机机舱、叶片和塔架安装在中心驳船的船尾附近，驳船结构简单，可在各地以低成本制造；②浮动式海上风电集成示范，该示范装置将集成在 Pentland 示范项目的 15-18 兆瓦浮动式平台上，示范新型系泊系统、大规模动态电缆保护和辅助设备、新型模块化浮体装配方法、数字孪生和先进监控系统等一系列创新技术；③海底变电站到浮动式海上风电接口的组装示范，将使用动态阵列间电缆将海上风电与海底变电站连接；④在张力腿平台上设计、安装和测试风力涡轮机，以示范集成的、工程化浮动式海上风电解决方案；⑤兆瓦级规模浮动式海上风电的低成本浮体基础示范，将在深海区域示范 2 兆瓦规模平台，该平台同时还可利用 0.5 兆瓦的波浪能，此次示范将包括主体结构、动态电缆、系泊、锚和张紧系统；⑥示范由系泊系统、浮体基础和风力涡轮机组成的集成动态系统，该系统采用油气行业技术来建造大型浮体基础。

（岳芳）

## 激光优化工艺助力 200 cm<sup>2</sup> 大面积钙钛矿电池刷新效率纪录

短短十年间，钙钛矿太阳能电池转换效率已经突破 25%，逼近单晶硅电池，被视为最有希望取代晶硅电池的新一代太阳能电池技术。但是目前高性能的钙钛矿太阳能电池主要是小面积器件（0.1cm<sup>2</sup>），大面积组件（一般由多个小单元太阳能器件组成）的性能与小面积器件还存在显著差距，主要原因是众多小器件组合在一起存在电流损失等问题，因此如何有效解决上述问题进一步提升大面积钙钛矿电池性能成为了研究热点。

意大利罗马第二大学 Aldo Di Carlo 教授课题组牵头的国际联合研究团队通过利用激光设计优化钙钛矿太阳能电池模块几何架构，开发近 200 cm<sup>2</sup> 大面积器件（192 cm<sup>2</sup>）获得了 11.9% 的转换效率，创造了大面积钙钛矿电池效率的新纪录（该面积尺度）。相关研究表明了电池模块的最佳几何架构（也即电池单元间距）与电池单元的有效辐照面积有关。为此，研究人员首先制备了混合阳离子复合卤素钙钛矿材料——铯离子掺杂的甲脒甲胺铅碘溴（ $\text{Cs}_{0.05}\text{MA}_{0.14}\text{FA}_{0.81}\text{PbI}_{2.5}\text{8Br}_{0.42}$ ），在此基础上制备辐照面积为 2.25 cm<sup>2</sup> 的钙钛矿电池单元，电化学性能测试显示电池效率为 18.71%。随后通过模拟计算显示，以该电池为单元组成的电池模块最佳的单元间距在 4.5 mm，为此研究人员利用激光优化设计了电池模块的几何图案以精确控制电池单元间距。随后以上述电池单元分别制备了不同单元间距（2.7 mm、3.8 mm、4.5 mm 和 6.8 mm）的 48 cm<sup>2</sup> 和 192 cm<sup>2</sup> 不同尺度的大面积电池模块，并开展了电化学性能测试，结果显示所有电池模块均具有较高的填充因子，达到 90% 以上，主要原因是激光设计实现了对电池单元间距的优化控制；且无论哪个面积尺度模块均是在 4.5 mm 间距时候

电化学性能达到最佳，其中 48 cm<sup>2</sup> 模块转换效率为 17.79%，而 192 cm<sup>2</sup> 超大模块依然获得了 11.9% 高转换效率，创造了该尺度大面积钙钛矿电池效率新纪录。研究人员进一步开展了器件的长程稳定性研究，实验室结果显示，室温下封装电池模块在一个标准的模拟太阳光辐照下连续稳定运行 4000 小时后性能基本没有衰退，表现出了优异的长程稳定性。为了探究电池性能改善的潜在机制，研究人员对电池进行了一系列微观表征，结果发现经过激光设计优化的电池模块的薄膜均匀性提升，且串联阻抗减少，使得电池的电流损失得到了有效抑制，这是电池模块性能增强的主要原因。

该项研究通过激光设计方法实现了对钙钛矿电池模块中电池单元间距的优化调控，改善了薄膜均匀性，减少了电流损失，进而增强了电池性能，成功开发出了光电转换效率 11.9% 的 192 cm<sup>2</sup> 大面积钙钛矿器件，且可以连续稳定运行 4000 余小时而基本没有性能衰退，呈现出了良好长程稳定性。研究人员下一步将针对制备工艺的经济性问题开展深入研究以加速其商用步伐。上述研究成果推动了钙钛矿太阳能电池大面积制备工艺的进步，为其规模化生产应用积累了关键技术。相关研究成果发表在《*Advanced Energy Materials*》<sup>12</sup>。

（王珍 郭楷模）

## 新型双层隔膜制备高效率钙钛矿太阳能电池

1 月 20 日，韩国蔚山先进能源技术研究开发中心和瑞士洛桑联邦理工学院研究团队合作，引入了一种介孔-TiO<sub>2</sub> (m-TiO<sub>2</sub>) 电子传输层 (ETL) 结构，并在其表面附着一薄层含聚丙烯酸 (PAA) 的 SnO<sub>2</sub> 量子点 (paa-QD-SnO<sub>2</sub>)，paa-QD-SnO<sub>2</sub>@m-TiO<sub>2</sub> 的均匀双层膜在很大程度上改善了钙钛矿对光的吸收，并与钙钛矿薄膜形成出色的电子选择性接触。结果表明，基于该双层膜制备的钙钛矿太阳能电池光电转换效率达到 25.7%，并具有高度稳定性。进一步将该双层膜应用于大面积模块 (64 cm<sup>2</sup>)，光电转换效率仍保持在 20% 以上。相关研究成果发表在《*Science*》<sup>13</sup>。

（汤匀）

## 英意澳研究人员首次成功证明量子电池力学原理

1 月 14 日，由英国、意大利和澳大利亚研究人员组成的国际研究团队利用超快光谱法，首次证明量子电池力学原理。为证明这一原理，研究人员使用电子束沉积技术构建了一系列“微腔”，由分散在分布式布拉格反射器 (DBR) 之间的聚苯乙

<sup>12</sup> Luigi Angelo Castriotta, Mahmoud Zendejdel, Narges Yaghoobi Nia, et al. Reducing Losses in Perovskite Large Area Solar Technology: Laser Design Optimization for Highly Efficient Modules and Minipanel. *Advanced Energy Materials*, 2022, DOI: 10.1002/aenm.202103420

<sup>13</sup> M Kim, J Jeong, H Lu, et al. Conformal quantum dot-SnO<sub>2</sub> layers as electron transporters for efficient perovskite solar cells. *Science*, 2022. DOI: 10.1126/science.abh1885

烯基体中的有机半导体 Lumogen-F 橙 (LFO) 组成。结果显示, 随着微腔尺寸和分子数量的增加, 充电时间减少, 证明了量子电池“超吸收”作用, 并在低浓度下, 高光致发光量子产率约 60%。未来还需对嘈杂环境下进行优化和改进, 并克服量子电池在高浓度下的猝灭限制, 以实现量子电池实际应用。相关研究成果发表在《*Science Advances*》<sup>14</sup>。

(汤匀)

## 美韩合作开发高能量密度三维弹性固态电解质

1 月 12 日, 美国佐治亚理工学院与韩国科学技术院合作, 利用丙烯酸丁酯(BA)、丁二腈(SN)和双(三氟甲磺酰基)酰亚胺锂(LiTFSI)组成的均相溶液在组装好的电化学池中 70℃ 聚合, 合成了内置塑料-晶体嵌入弹性体电解质。铜箔上原位形成的弹性体电解质可适应长时间的锂电镀和剥离过程的体积变化, 库仑效率为 100.0%。制备的全固态锂电池在环境温度下, 能量密度超过 410 瓦时/千克, 库伦效率为 99.4%。该弹性体电解质表现出高离子电导率、低界面电阻和高锂离子迁移数, 助力高能固态锂电池的稳定运行。相关研究成果发表在《*Nature*》<sup>15</sup>。

(汤匀)

## 美国斯坦福大学成功制备长循环寿命金属锂电池

1 月 13 日, 美国斯坦福大学研究人员以 1,2-二乙氧基乙烷(DEE)分子为基体, 精细调控了端基的氟化程度与分子相互作用, 合成了一系列氟化 1,2-二乙氧基乙烷(FDEE), 实现了金属锂电池电极稳定性和高导离子率的平衡。结果显示, 金属锂电池循环效率高达  $99.9 \pm 0.1\%$ , 是迄今所报道的最高纪录。在充放电快速循环条件下, 金属锂沉积形貌依然非常理想, 无锂枝晶存在。该工作的分子设计理念和精细分子调控的思想为将来的电解液工程提供了一个新的方向。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》<sup>16</sup>。

(汤匀)

<sup>14</sup> J Q Quach, K E Mcghee, L Ganzer, et al. Superabsorption in an organic microcavity: Toward a quantum battery. *Science Advances*, 2022. DOI: 10.1126/sciadv.abk3160

<sup>15</sup> M J Lee, J Han, K Lee, et al. Elastomeric electrolytes for high-energy solid-state lithium batteries. *Nature*, 2022. DOI: 10.1038/s41586-021-04209-4

<sup>16</sup> Z Yu, P E Rudnicki, Z Zhang, et al. Rational solvent molecule tuning for high-performance lithium metal battery electrolytes. *Nature Energy*, 2022. DOI: 10.1038/s41560-021-00962-y.

# 低碳化多能融合

## 创新使命组织提出未来十年清洁氢能研发创新优先事项

近期，创新使命第二阶段（Mission Innovation 2.0）启动的“清洁氢能使命”<sup>17</sup>发布了一份讨论文件<sup>18</sup>征求公众意见，提出通过推进氢能价值链的研发创新、部署示范清洁氢谷、为建立全球氢经济创造有利环境，实现到 2030 年清洁氢能成本降至 2 美元/千克的目标。该文件提出了未来十年清洁氢能的关键创新优先事项和重点关注领域，以及成功部署氢谷的关键因素和主要障碍，关键点如下：

### 一、清洁氢能研发创新的关键优先事项和创新需求

#### 1、清洁制氢

为实现该使命的 2030 年目标，未来应重点关注两条技术路线：（1）天然气重整制氢结合碳捕集与封存（NGR+CCS）；（2）低碳电解制氢。其优先领域和创新需求为：

##### （1）NGR+CCS（按优先级由高到低排序）

•**碳封存能力**。通过创新确定和/或开发碳封存技术并最大限度减少 CO<sub>2</sub> 泄漏。该领域创新需求为：①废旧井的性能再表征；②部署海底设备以提高碳封存能力。

•**工艺材料**。通过创新以减少重整和碳捕集过程的材料使用和/或成本。该领域创新需求为：①寻找/开发昂贵稀有材料的替代材料；②开发材料回收方法；③开发使用先进溶剂的工艺，以降低催化剂再生成本和腐蚀影响。

•**碳捕集能力**。通过创新改进碳捕集技术、工艺及其效率，以提高碳捕集率。该领域创新需求为：①开发燃料电池以增强燃烧后碳捕集工艺；②优化 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub> 的分离过程以增强碳捕集率；③开发下一代增压燃烧前碳捕集技术。

•**工艺技术**。通过设计/集成新技术到工艺中或寻找最佳反应顺序，以最大化氢气产量。该领域创新需求为：①部署先进技术，如用于吸附增强水煤气变换的陶瓷膜；②将气体加热重整技术大规模集成到自热重整工艺中；③改进工艺中的氢气净化。

##### （2）低碳电解制氢（按优先级由高到低排序）

•**电化学组件**。通过电解槽组件创新以改进材料使用和回收，降低成本。该领域创新需求为：①减少催化剂中的稀有材料；②电解槽回收和材料循环；③使用镍基合金；④减小电解槽隔膜的厚度；⑤增加电极和催化剂的比表面积；⑥催化剂分层

<sup>17</sup> 清洁氢能使命是 Mission Innovation 2.0 启动的首批任务之一，将通过推进氢能技术和工业过程的研究创新，到 2030 年在全球范围内至少部署 100 个涵盖生产、储存和终端应用的氢谷来促进成本下降，使最终用户的清洁氢成本降至 2 美元/公斤。

<sup>18</sup> DISCUSSION PAPER: Launched at COP 26 for public consultation and open for responses. [http://mission-innovation.net/wp-content/uploads/2021/11/Mission-Innovation-Discussion-Paper\\_final.pdf](http://mission-innovation.net/wp-content/uploads/2021/11/Mission-Innovation-Discussion-Paper_final.pdf)

或溶解；⑦降低从催化剂层到多孔传输层的界面电阻；⑧使电解槽更易于维护。

•**电解槽制造**。通过创新提高电解槽制造工艺的效率并降低成本。该领域创新需求为：①使用先进制造方法。

•**电化学工程**。电解槽设计创新以及集成至更多能源系统。该领域创新需求为：①减少电极之间的间隙；②增加电堆密度；③增加模块尺寸；④利用回收的废热；⑤电解槽与波动性可再生能源系统的集成；⑥创新冷却工艺；⑦开发更可靠、低维护的去离子水系统。

•**电解工艺**。通过电解反应和工艺创新以提升氢气产量和减少电力消耗。该领域创新需求为：①碱性电解槽快速升温；②提高低热值效率；③开发新的电解路线；④电解槽优化设计。

## 2、氢气分配和存储

### (1) 氢气分配

该领域创新优先事项如下：①改造现有天然气网络，即寻找避免氢脆的材料和工艺；②开发与纯氢兼容的分配网络，如使用聚合物材料；③扩大氢气管道基础设施规模，提升其利用率；④进一步开发氢载体（例如氢化物或液态有机氢载体）；⑤提高氢气转化/压缩效率并开发与氢气兼容的替代压缩机（即离子液体、电化学），以降低压缩损失；⑥通过使用最佳压缩水平和正确确定组件尺寸，优化整个氢气生产和分配基础设施的压力水平；⑦增加管式拖车的标称管压，以降低氢气输送成本；⑧提高液氢槽罐车效率，降低长途氢气输送成本。

### (2) 储氢

该领域创新优先事项如下：①开发氨、液体有机氢载体等用作储释氢介质；②开发具备高体积能量密度的储氢材料，例如金属氢化物和多孔吸附剂，还需解决液化效率问题。

## 3、终端应用

用于采矿、农业、建筑等行业重型非道路车辆可能难以实现电气化，是氢能优先应用领域，此外钢铁、氨和水泥也是高优先级领域。重型非道路车辆的创新优先事项为：①开发用于原位加氢的低成本、安全、高效终端应用设备；②降低非道路车辆用燃料电池的成本，提升耐用性和效率。

## 二、通过部署氢谷建立全球的氢经济

“清洁氢能使命”承诺到 2030 年推进在全球部署至少 100 个大型清洁氢谷，通过在不同的地理位置示范清洁氢能的经济可行性和终端应用，将有助于扩大氢能规模，从而进一步降低成本，刺激氢能投资。

### 1、成功部署氢谷的关键因素

成功部署清洁氢谷将取决于 5 方面因素：①令人信服的项目概念，可利用当地



资产（如丰富的可再生能源）并满足当地需求（如当地工业脱碳）；②开发一个可行的商业案例，通过有竞争力的清洁氢生产刺激承购商的购买意愿；③公共支持和/或资金，以弥补任何资金缺口；④项目开发过程中的有效合作，确保所有相关方的持续承诺；⑤政策支持和公众支持。

## 2、清洁氢谷部署的障碍

部署清洁氢谷将面临 5 方面障碍：①确保公共资金，需通过增进资助实体对技术的认识并灵活调整项目概念来解决；②确保对清洁氢的承购，解决方法是可靠的投资计划和加强与各行业潜在承购商合作；③获得私人投资，这依赖于结构化的开发方法、承购商和股权合作伙伴早期参与等；④降低技术障碍，确保产品的可用性和可靠性；⑤监管规定，近 40% 的氢谷仍面临这方面挑战。

（岳芳）

## 澳大利亚拨款近 1.3 亿澳元启动未来燃料计划

2 月 19 日，澳大利亚可再生能源署（ARENA）宣布在“未来燃料基金”框架下拨款 1.279 亿澳元启动“未来燃料计划”<sup>19</sup>，支持开发零排放汽车技术。该计划基于“未来燃料基金”第一轮 2455 万澳元的成功资助，旨在实现零排放车辆技术的示范和部署。关键信息如下：

### 1、计划目标

**（1）克服障碍。**确定零排放汽车的部署障碍，并通过用户告知、行业实践、政策、监管或标准减少或消除障碍。

**（2）优化电网集成。**示范并深化对解决方案的理解，以经济高效地将电动汽车和/或制氢电解槽集成到电网中。

**（3）示范新的应用案例和创新解决方案。**示范可复制并可为零排放汽车提供可持续价值的新应用案例和解决方案。

**（4）增强技能、能力和知识共享。**获得和分享知识，以提升技能和能力，从而加速向零排放汽车过渡。

### 2、重点关注领域

**（1）支持轻型电动汽车的部署。**该领域将支持电动乘用车、SUV 和轻型商用车的部署，包括：①支持充电基础设施、电气升级，降低安装成本，以降低总成本；②集成充电管理以优化电动汽车与电力系统的集成；③开发电动汽车集成的创新解决方案和商业模式，包括充电站和家庭的智能充电以及其他软硬件解决方案。

**（2）支持重型电动汽车的部署。**该领域将支持包括卡车和公交车在内的重型电动车辆的部署和整合，包括：①支持充电基础设施、电气升级，降低安装成本，以

<sup>19</sup> Future Fuels funding round open for fleets. <https://arena.gov.au/news/future-fuels-funding-round-open-for-fleets/>

降低总成本；②集成充电管理以优化电动汽车与电力系统的集成；③开发电动汽车集成的创新解决方案和商业模式，包括停车场智能充电以及其他软硬件解决方案；重型电动车辆在运输、物流、农业和采矿业的应用案例；示范公交车队的创新充电方法；支持开发适用于货运和物流的公共充电桩，以扩大重型车辆的使用范围。

### **(3) 将氢作为交通燃料推向市场**

该领域将支持氢燃料电池汽车和相关氢基础设施（如加氢站）的部署，包括：①氢能基础设施，如电解槽、加氢装置和储氢装置；②示范氢能汽车用于基地往返、州内/州际旅行等案例。

（岳芳）

## **美国能源部资助 2800 万美元开发低成本清洁制氢技术**

2 月 7 日，DOE 宣布投入 2800 万美元用于清洁氢能的研究和前端工程设计（FEED）项目<sup>20</sup>，旨在开发创新的下一代制氢技术，利用城市固废、残留煤炭废物、废塑料和生物质原料低成本生产清洁氢，推进实现 DOE “氢能攻关”计划将清洁氢成本在 10 年内降低 80% 至 1 美元/千克的目标。此次资助由《两党基础设施法案》提供资金，重点关注如下主题：

### **1、通过工艺优化和模块化技术减少清洁氢生产成本**

该主题关注通过优化工艺中的关键参数和/或将多单元组合为可同时完成多个任务的子系统，以开发更高效和紧凑的系统，提高能效和降低制氢成本，此外还关注将废物混合至生物质中制氢的方法。重点技术包括：①从各种气化单元作业中选择性提取氢气，以缩小设备尺寸、改变反应平衡，并通过密度变化影响气流速度；②将碳去除技术与气化系统运行相结合，以提高资本成本效率；③将多个单元（如合成气净化系统、水煤气变换等）组合为一个单元。

### **2、利用废物和生物质大规模生产氢气**

该主题关注将废物和生物质混合用于气化制氢的相关技术，将推进创新和灵活的模块化气化技术（5-50 兆瓦规模）和工艺，使用生物质与传统废煤、废塑料、城市固体废物或其他废物混合原料，生产纯度超过 99% 的氢气。

### **3、废塑料共气化结合碳捕集制氢中的传感器和控制技术**

该主题关注通过先进传感技术优化生物质和混合废物（包括废塑料）的共气化过程，对进入气化炉的原料流和气化过程中运行条件的实时信息进行监测和传感，包括有利于形成有害污染物及相关前驱体的环境。

### **4、天然气制氢装置部署碳捕集系统的 FEED 研究**

该主题重点关注甲烷蒸汽重整（SMR）和甲烷自热重整（ATR）制氢装置，部

<sup>20</sup> U.S. Department of Energy Announces \$28 Million to Develop Clean Hydrogen.  
<https://www.energy.gov/fecm/articles/us-department-energy-announces-28-million-develop-clean-hydrogen>

署商业规模先进碳捕集系统的 FEED 研究，选取美国现有或在建甲烷蒸汽重整制氢装置，以及现有或计划将于 2023 年以内开始建设的甲烷自热重整制氢装置进行研究，拟部署的碳捕集技术成熟度须达到 6 级以上，可实现以 95% 的 CO<sub>2</sub> 纯度捕集 95% 的排放量，并提出 CO<sub>2</sub> 运输、长期封存或转化为其他产品（如合成骨料、混凝土、生物炭、耐用碳产品等）的可行技术。

（岳芳）

## 日本 NEDO 资助开发 CO<sub>2</sub> 制造塑料技术

2 月 18 日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布在“绿色创新基金”框架下，投入 1234 亿日元启动新项目“开发利用 CO<sub>2</sub> 等原料制造塑料技术”<sup>21</sup>，旨在开发有效利用 CO<sub>2</sub> 等碳原料生产塑料及高价值化学品技术，以推进碳循环产业发展，助力实现碳中和目标。该项目的实施期为 2021-2030 年，目前已确定资助 4 个主题的 9 个课题，详情如下：

### 1、石脑油分解炉先进技术开发

该主题下资助 1 个课题：①氨燃料石脑油分解炉技术开发及应用，将开发用于石脑油分解炉的氨燃烧器原型，设计和开发相应的石脑油分解炉（测试规模），基于上述结果进一步设计、建造和运行石脑油分解示范炉（万吨/年规模）并进行性能评估。

### 2、废塑料、废橡胶化学品制造技术开发

该主题下资助 3 个课题：①废轮胎（废塑料）制造化学品技术开发，开发将废旧轮胎热解为化工原料并转化为丁二烯和轻质芳烃的技术，以及废旧轮胎低温分解生产异戊二烯的技术；②碳资源循环型合成橡胶基础化工制造技术开发，将开发由废旧轮胎和植物转化的乙醇高效合成丁二烯技术，以及利用植物原料高效合成丁二烯和异戊二烯技术；③废塑料化学回收技术开发，将开发废塑料直接分解制烯烃和废塑料制合成气生产乙醇技术。

### 3、CO<sub>2</sub> 制造功能性化学品技术开发

该主题下资助 2 个课题：①CO<sub>2</sub> 制功能性塑料技术开发，将开发聚氨酯原料制备技术，以及聚碳酸酯制中间体技术和熔融法制聚碳酸酯的高性能工艺；②多官能度环碳酸酯化合物量产工艺开发及应用。

### 4、醇类化学品制造技术开发

该主题下资助 3 个课题：①人工光合作用制绿氢等技术开发与示范，将开发高活性水分解光催化剂及光催化剂负载片材，开发包含氢/氧分离模块的氢回收系统，以及通过万平方米级室外试验验证制氢可行性成本；②CO<sub>2</sub> 制基础化学品技术开发

<sup>21</sup> グリーンイノベーション基金事業で、CO<sub>2</sub> からプラスチック原料を製造する技術開発に着手。  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101517.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101517.html)

及示范，将开发甲醇膜式反应分离工艺以及创新的甲醇制烯烃（MTO）催化工艺；③CO<sub>2</sub>生产醇类和烯烃类化学品技术，将开发高效生产乙醇以及利用乙醇生产烯烃技术。

（岳芳）

## 三菱动力将建全球首个燃氢发电全价值链示范园区

2月22日，三菱动力公司宣布将建设“高砂氢能园区”，这将是全球首个从制氢到氢能发电的全价值链示范中心，旨在推进到2025年实现其纯氢燃气轮机技术的商业化<sup>22</sup>。该中心将建在三菱重工旗下兵库县高砂机械厂的燃气轮机开发和制造工厂，在当前的T-Point 2联合循环发电厂验证设施基础上，增加氢气生产和存储设备，通过示范测试来提高产品可靠性，并使用JAC级重型燃气轮机和H-25级中小型燃气轮机进行验证，目的是将燃气轮机碳排放降至零碳，同时保持低氮氧化物（NO<sub>x</sub>）排放。



图1 三菱动力公司高砂氢能园区示意图

该中心的制氢设施将使用电解水系统，三菱动力还将验证其他制氢技术，如甲烷裂解制氢等。对于氢燃气轮机的关键部件燃烧室，三菱动力将创建一个工作流程，包括开发中心的开发、设计，制造工厂的实际机器生产，以及示范设施的验证测试。三菱动力的燃气轮机开发过程包括在基本设计阶段对所有元件进行验证测试，将结果纳入详细设计，最后使用实际设施进行验证。在同一工厂内完成此开发周期将实现更快的产品开发和商业化。

<sup>22</sup> Mitsubishi Power to Establish Hydrogen Power Demonstration Facility “Takasago Hydrogen Park” at Takasago Machinery Works. <https://power.mhi.com/news/20220222.html>

T-Point 2 设施是世界领先的 566 兆瓦级燃气轮机联合循环发电设施，已于 2020 年 7 月 1 日开始长期验证测试，包括验证下一代 JAC（J 系列风冷）重型燃气轮机，目前已实现世界首个燃气轮机入口温度达到 1650℃ 的高效系统，并连接至当地电网。为支持到 2025 年实现纯氢燃气轮机商业化，三菱动力已在 T-Point 2 设施完成了 JAC 级燃气轮机燃用 30% 含氢燃料的验证，还将使用 H-25 级燃气轮机进行 100% 氢燃料的验证。

（岳芳）

## 新型 CO<sub>2</sub> 分离器保障氢氧化物交换膜燃料电池高效稳定运行

氢氧化物交换膜燃料电池（HEMFC）的碱性环境允许在设备中使用低成本催化剂和双极板。然而，HEMFC 的性能会受到空气进料中 CO<sub>2</sub> 气体的不利影响。其容易与氢氧根离子在 HEMFC 阴极形成碳酸盐，从而导致电池性能的大量损失。

美国特拉华大学 Brian P. Setzler 教授课题组开发了一种电化学驱动的 CO<sub>2</sub> 分离器（EDCS），它可利用具有传导阴离子和电子功能的短扩散程薄膜从进气中去除 CO<sub>2</sub>，且除去效率高达 99%。此外，这种 EDCS 像燃料电池一样由氢供电，但不需要电线、双极板或集电器，因此可以像典型的分离膜一样实现模块化。发挥短扩散程薄膜 EDCS 作用的一个关键挑战是控制电流密度，研究人员提出了一种通过供给阳极氢的速率来控制电流密度的策略。通过对不同 H<sub>2</sub> 流速下短扩散程薄膜 EDCS 进行测试，结果表明随着 H<sub>2</sub> 流速的增加，CO<sub>2</sub> 的分离效率先显著提高，随后趋于稳定。除此之外，研究人员还对短扩散程薄膜 EDCS 的性能和耐久性进行了测试，并和外部负载的 EDCS 进行了比较。测试结果表明，两种 EDCS 在空气流量高达 3000 sccm（标准立方厘米/分钟）时的 CO<sub>2</sub> 去除率均超过 99%（正常 EDCS 的去除率为 2.7 ppm（百万分之一），短扩散程薄膜 EDCS 的去除率为 3.3 ppm），两种 EDCS 的 CO<sub>2</sub> 去除率几乎相同。在正常的 EDCS 中，电流密度负载控制在 50mA cm<sup>-2</sup>。对于短扩散程薄膜 EDCS，将 10% 的氢气（总流量为 100 sccm）注入到阳极，短扩散程薄膜 EDCS 在低空气流量（1000 和 2000 sccm）时的表现明显好于普通 EDCS，这主要因为在低空气流速下，短扩散程薄膜相对于未改性膜具有更高的离子阻力，可以更好地减少碳酸盐和碳酸氢盐的反扩散。它可以将 99% 的 CO<sub>2</sub> 从空气中分离，随后将去除 CO<sub>2</sub> 的进气输送到下游的 HEMFC 堆中，仅消耗通入氢气总量的 2%。这种类型的 EDCS 可以被放大，例如扩展到一个紧凑的螺旋缠绕模块，因为它不使用燃料电池组件，如双极板或电流收集器。因此，预计每千瓦的成本仅为 1.4 美元。此外通过添加碳优化短扩散程薄膜，在优化条件下，25 cm<sup>2</sup> 的短扩散程薄膜 EDCS 在连续 450 小时的运行后能去除 99% 的 CO<sub>2</sub>。

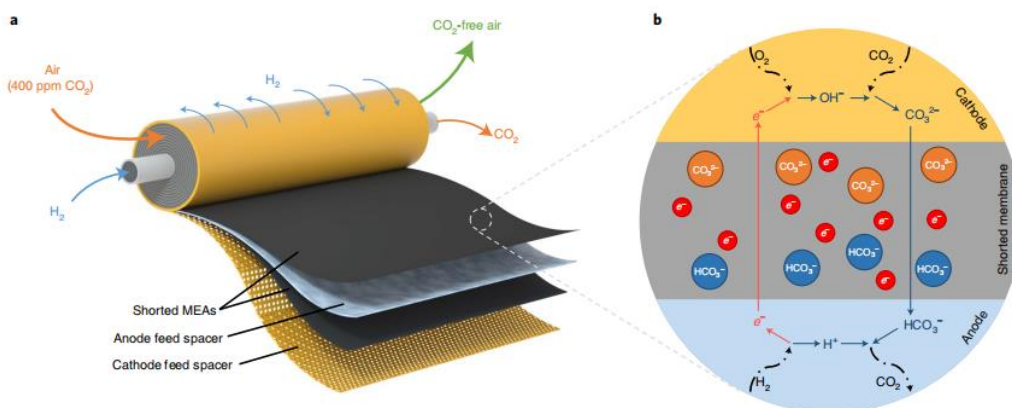


图 1 短扩散程薄膜 EDCS 的工作原理示意图 (a, 带有两个短扩散程 MEA 的螺旋形 EDCS 模块; b, 具有短扩散程 MEA 的 EDCS 中化学和传输过程)

该研究设计制备了一种短扩散程薄膜 CO<sub>2</sub> 分离器 (EDCS), 具有较高的分离面积和体积比且结构紧凑, 能够去除空气中近 99% 的 CO<sub>2</sub>, 从而保障基于该分离器的 HEMFC 高效稳定运行。这一技术使 HEMFC 能够更接近市场, 并且可以进一步扩展其应用领域, 例如航天器或核潜艇等装置中, 具备了广阔的应用前景。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》<sup>23</sup>。(严烙意 汤匀)

## 澳大利亚皇家墨尔本理工大学实现 CO<sub>2</sub> 直接高效固碳

1 月 17 日, 澳大利亚皇家墨尔本理工大学报道了一种利用镓 (Ga) 和铟 (In) 液态金属合金, 将 CO<sub>2</sub> 连续直接转化为固体碳的稳健且高选择性的方法。研究人员利用该合金的低熔点促进低温下 CO<sub>2</sub> 还原, 在 200 °C 下产生 319 微摩尔/小时的固体碳, 即使在室温下也能实现 CO<sub>2</sub> 活化和固体碳生成, 并无需使用补充还原剂 (如氢气)。添加的液态金属合金没有因结焦而存在失活现象, 生成的固体碳自发积聚在液态金属合金顶部, 易于收集。该方法为 CO<sub>2</sub> 转化为永久储存的固体碳开辟了一条新途径。相关研究成果发表在《*Energy & Environmental Science*》<sup>24</sup>。

(汤匀)

<sup>23</sup> A Lin Shi, Yun Zhao, Stephanie Matz, et al., A shorted membrane electrochemical cell powered by hydrogen to remove CO<sub>2</sub> from the air feed of hydroxide exchange membrane fuel cells. *Nature Energy*, 2022. DOI: 10.1038/s41560-021-00969-5

<sup>24</sup> K Zuraiqi, A Zavabeti, J Clarke-Hannaford, et al. Direct conversion of CO<sub>2</sub> to solid carbon by Ga-based liquid metals. *Energy & Environmental Science*, 2022, DOI: 10.1039/D1EE03283F.

# 能源战略研究

## IRENA：可再生能源智能电气化是能源转型的关键

2月15日，国际可再生能源机构（IRENA）与中国国家电网公司联合发布《可再生能源智能电气化：推动能源服务转型》报告<sup>25</sup>，指出用可再生能源替代化石燃料标志着历史性转变，然而为了确保可持续性和全球气候稳定，这种能源转型需要以更快的速度推进。而在能源转型期间，构建更智能灵活的电网以及推进终端应用电气化是核心要素。报告强调可再生能源智能电气化重点需加强可再生能源发电、电气化和数字化三者之间的协调部署，以更高效的方式推动能源服务转型。具体内容如下：

### 1、清洁电力成为当前能源转型主要燃料

来自高碳化石燃料的电力将继续被来自风能、太阳能、水力和其他可再生能源的清洁、低碳电力所取代。在不同的可再生能源发电种类中，作为波动性可再生能源的低成本太阳能光伏和风能技术预计将占全球发电总量的大部分。随着能源终端应用从化石燃料转变为电力，能源服务的电气化将变得更为普遍。电动汽车和燃料电池汽车将在很大程度上取代化石燃料汽车和卡车，热泵和电锅炉将替代建筑和工业领域的石油和天然气锅炉。来自可再生能源的电力也可以用于制造氢气和合成燃料，用于那些难以直接电气化的应用领域。对输电、配电、储能和充电网络基础设施进行改造升级将为终端应用电气化提供有力的支撑。同时加快部署高能效技术将有助于清洁电力的充分利用。此外，数字化技术对实现能源转型至关重要，是扩大可再生能源发电和普及电气化的关键环节。其包括“智能”数字设备、信息和通信技术（ICT）的部署，以及相关的作业实践，通过更灵活的方式满足可再生能源电力需求、优化电力交付和使用过程、提高更高效率的用电服务等。将这些智能方法整合到能源转型过程中，对于降低峰值电力负荷上升的风险和增强新电网基础设施的投资作用至关重要。智能数字技术还提升了电力利用效率，充分利用包括太阳能和风能在内的日益增多的廉价波动性可再生能源。

### 2、实现智能电气化面临的挑战

在政策方面，推动实现电气化高度依赖法规、税收和补贴，这需要相当大的政治意愿。即使在有政治意愿转变市场和供应链的领域，如全球汽车工业转向电动汽车，家用供暖转向热泵，但这仍需要多年时间。人们每隔 10-15 年才会更换取暖设

<sup>25</sup> Smart Electrification with Renewables: Driving the Transformation of Energy Services.  
<https://www.irena.org/publications/2022/Feb/Smart-Electrification-with-Renewables>

备和汽车，在世界上一些地区，建筑材料每年的更新率不到 1%。对于能源转型过程中成本和收益的分配需要公平、公正才能得到广泛的接受。

**在技术方面**，能源转型需要在干旱地区部署大量的波动性可再生能源，这涉及到在面临可能与峰值需求不匹配的不同发电量和峰值产量时合理安排供需关系。此外，必须扩张电网、电动汽车充电网络和氢能在内的其他燃料生产设施建设并扩建新的基础设施。面对转型所需的技术仍需不断创新和改进，以降低总成本为关键目标。

### 3、终端应用电气化技术发展趋势

**建部门**。目前，建筑部门每年能源消耗量高达 122 艾焦，约占全球终端能耗的 30%。其中，一半以上的能源是由天然气、石油、煤炭或生物质能提供，电力约占住宅建筑能源消耗的 24%，其中 51%用于商业和公共建筑。在建筑领域实现更高电气化的关键技术包括：①通过热泵进行空间供暖和加热用水；②利用电加热器进行供暖以及使用电炉和电烤箱烹饪；③使用可再生电力生产的氢气或合成甲烷等燃料，通过天然气管网供给家庭和商业建筑。

**交通运输部门**。目前，全球交通运输部门（包括公路、铁路、海运和航空）每年能源消耗量高达 121 艾焦，但仅有约 1%的能源由电力供应，其中三分之二用于铁路运输，其余用于有轨电车和地铁。在交通运输领域实现更高电气化的关键技术包括：①使用电动汽车，包括乘用车、卡车和公共汽车，主要（但不完全）是为了满足中短途交通运输需要；②利用可再生电力生产氢气，为燃料电池汽车或长途运输火车提供动力；③在能源密集的货运和长途运输行业（如海运和航空），利用可再生电力生产合成气或氢衍生物，以取代化石燃料。

**工业部门**。目前，全球工业部门能源消耗总量达到 119 艾焦，其中约 28%的能源由电力供应，仅四种能源密集型工业产品（水泥、钢铁、化工产品氨和乙烯）就占工业能耗的 60%左右。在工业领域实现更高电气化的关键技术包括：①工业加热过程直接电气化，使用电锅炉和/或熔炉进行中高温加热；②增加使用热泵进行低温加热和部分中温加热；③利用可再生能源生产的氢气和/或其衍生物燃料，特别是应用于高温加热和非能源用途（例如直接作为工业过程的原料）。

### 4、智能电气化战略的实施是建筑、交通运输和工业部门电气化转型的先决条件

能源转型需要的不仅仅是建造大量的风能和太阳能发电厂、转向电动汽车和热泵、改造工业流程使用可再生能源、创新技术进行基础设施建设、实现经济电气化，它还需要全新的策略和详细的计划来整合所有这些技术和设备，并对输电网络进行管理。考虑到电力需求的持续增长以及风能和太阳能等可再生能源发电具有的波动性，向电气化的转型将对现有电力供需平衡提出极大挑战。因此，结合智能数字基础设施、市场设计、监管框架和商业模式进行调控，将大幅减少高峰负荷。实现直



接和间接电气化的良性循环所需的主要策略分为以下三大类：①更好地进行电力需求与供应相匹配。一项有效的战略将不仅仅是减少电力需求峰值，而是合理的将电力需求进行分配以配合波动性可再生能源的生产，在这一过程中需要通过储能技术来调整能源供应，以更好地满足电力需求。②扩大电网服务。可再生能源发电相较于集中式发电厂更为多变、分散和独立，因此它需要更多的电网服务，如负载服务、频率调节、黑启动能力和提前进行电力储备，以最大限度利用波动性可再生能源。③扩大电气化机会。除了整合更多的可再生能源之外，还可利用包括制氢等其他技术满足电力需求。

### 5、利用可再生能源实现智能电气化的未来优先发展方向

电气化程度的提高必将带来新的挑战，如供应短缺和负荷失调；但也会带来新的机遇，如更灵活的发电选择。因此，实现电气化成功转型需要注意两点：①利用智能化手段实现清洁能源需求响应之间的协调和高度集成各种波动性可再生能源（如智能充电的电动汽车、储能技术、热泵和电锅炉、电解槽等技术装备）；②更好的理解不同行业电气化可能存在的技术限制，以避免电力系统中断或承担昂贵的使用成本。未来智能电气化发展七大重点方向与行动如表 1 所示。

表 1 未来智能电气化发展七大重点方向与行动

优先发展方向	行动
<b>规划、市场设计、社会关注类</b>	
<b>1、规划：</b> 认识到未来的电气化需要对基础设施进行投资，包括电力和数字基础设施	<ul style="list-style-type: none"> <li>•智能电气化特别依赖于智能规划和进行基础设施网络投资</li> <li>•用于电网和建筑物的智能数字基础设施网络技术，对于降低基础设施成本、向终端行业提供更优质的服务至关重要。</li> </ul>
<b>2、市场设计：</b> 探索具有灵活性和经济刺激的市场需要	<ul style="list-style-type: none"> <li>•为智能电气化基础设施制定路线图，包括电网、充电基础设施、氢运输网络和区域供热/冷却等领域。</li> <li>•支持数字化解决方案的试点，以探索新计划实践面临的挑战。</li> </ul>
<b>2、市场设计：</b> 探索具有灵活性和经济刺激的市场需要	<ul style="list-style-type: none"> <li>•需对全系统终端应用部门灵活性技术进行奖励以加快技术部署。</li> <li>•零售和批发市场的设计应充分认识到关键电气化技术和战略的经济性，以及它们将如何随着数字化和去中心化等趋势在各个行业发展。</li> </ul>
<b>3、社会关注：</b> 反映消费者和社区的需求和愿望	<ul style="list-style-type: none"> <li>•调整法规，通过使用时间关税等措施，让消费感受到价格信号的影响。</li> <li>•消除创新技术和所有权模式的应用障碍，允许各项技术参与多个市场。</li> </ul>
<b>3、社会关注：</b> 反映消费者和社区的需求和愿望	<ul style="list-style-type: none"> <li>•能源资源的日益分散以及地方所有权和对能源生产环境影响的认识正在改变人们参与能源系统的方式。</li> <li>•消费者和社区必须参与电气化工作并从中受益，否则，能源转型</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•让公民参与能源转型过程中各项选择、治理和责任等方面。</li> <li>•更好地洞察消费者的需求和期望，并定制相应解决方案。</li> <li>•了解传统基础设施和生产商在电气化转变过程中可能受到的影响，并在必</li> </ul>

	可能面临阻力。	要时制定适当的经济政策来缓解。
<b>技术类</b>		
<b>4、交通运输领域</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 电动汽车将在未来几十年迅速发展，了解电动汽车将如何影响电力系统供应、系统运行和智能充电至关重要。</li> <li>• 尽管乘用车、货运卡车和公共汽车的电气化正取得进展，但运输行业其它难以脱碳的领域（如长途海运和航空）的未来仍不明朗。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 扩大智能充电基础设施规模，评估和规划电力基础设施需求，特别是在配电层面，以避免出现需求瓶颈。</li> <li>• 支持探索“车辆到电网”（V2G）技术和商业模式的试点项目。</li> <li>• 继续在海运和航空领域探索高潜力的电力存储技术和清洁能源选择应用的研究。</li> </ul>
<b>5、建筑领域</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 增加可再生电力在建筑能源消耗中的比例，如热泵、电锅炉、先进的建筑围护结构和集中供暖基础设施等。然而，在大多数市场上，能效措施和先进清洁低碳技术的实际部署过于迟缓。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 鼓励部署热泵和电锅炉。</li> <li>• 通过区域供热/制冷和蓄热，抓住机会提供大规模的集中解决方案。还可以考虑使用可再生电力与电锅炉和蓄热。</li> <li>• 实施在新的基础设施中建立高效的建筑外立面等建筑法规。</li> <li>• 新建和现有建筑中资助或激励智能计量设备和智能电器基础设施。</li> </ul>
<b>6、工业领域</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 大多数情况下，由于成本和特殊的工业要求，工业电气化落后于交通和建筑领域。然而，有针对性的工业电气化解决方案可能很快将实现重大突破，因为大部分工业能源的使用只针对少数能源密集型商品。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支持在工业过程中直接和间接使用电力技术的研发和示范。</li> <li>• 探索能源密集型产业向低成本、高负荷可再生电力基地的搬迁和共建。</li> <li>• 寻求全球协调，确保公平竞争环境，避免碳泄漏。</li> </ul>
<b>7、其他燃料：</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 使用可再生电力生产氢或其他合成燃料可能在智能电气化过程中发挥关键作用，例如，作为难脱碳地区直接电气化的补充。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 建立政策框架，明确基础设施投资，改善整个供应链的经济效益。</li> <li>• 扩大低成本、理想的高负荷系数可再生电力的可用性。</li> </ul>

(汤匀)

## IRENA 评述氢能对能源转型的地缘政治影响

1月15日，国际可再生能源机构（IRENA）发布《能源转型的地缘政治：氢能因素》报告<sup>26</sup>，深入分析了氢能发展对地缘政治的影响。报告指出，氢能已被公认为能源转型的关键组成部分，随着全球氢能发展势头的增强，需考虑其不确定性带来的影响，从能源转型的整体角度来制定开发和部署策略。2020年代将是争夺氢能技术领先地位的时代；氢能贸易和投资流动将催生新的相互依存模式，并带来双边关系的转变；拥有大量低成本可再生能源的国家可能会成为绿氢的主要生产国，并产生相应的地缘经济和地缘政治影响；对于化石燃料出口国来说，氢能有助于实现经济多元化和发展新的出口产业；支持发展中国家开发可再生能源和绿氢对于能源系统转型至关重要，并有助于全球公平和稳定。报告关键点如下：

• **当前的能源转型规模庞大、前所未有的，对世界各地既定的社会经济、技术和地缘政治趋势将产生深远影响。** 可再生能源结合能源效率，已经成为对全球能源转型影响深远的前沿技术。能源转型并不是简单的燃料替代，而是从一种体系向另一种体系的转变，并将带来相应的政治、技术、环境和经济影响。需要注意的是，氢能能否或者能在多大程度上加剧或缓解这些影响，以及以何种方式来加剧或缓解这些影响。

• **作为清洁能源拼图中缺失的一块，氢能很可能在未来几年进一步影响能源价值链。** 气候变化的紧迫性一直是将政策重点重新瞄准氢能的主要驱动力。根据 IRENA 的 1.5°C 情景预测，到 2050 年，清洁氢能将满足终端能源消费的 12%。其中大部分氢将通过可再生能源生产，其余氢将来自结合碳捕集与封存的天然气制氢。

• **氢能很可能会影响能源贸易的地理格局，进一步区域化能源关系。** 可再生能源成本正逐渐下降，但氢能输运成本仍然很高，正在浮现的地缘政治版图很可能表现出能源关系的日益区域化。可再生能源可以在每个国家部署，可再生电力可以通过电网出口到邻国。此外，通过管道和船运，氢可以作为载体促进可再生能源的远距离输送，使得偏远地区未开发的再生资源得到利用。一些现有的天然气管道经过技术改造后，也可以用于输送氢。

• **拥有大量低成本可再生能源的国家可能会成为绿氢生产国，并影响地缘经济和地缘政治。** 在利用这些因素成为氢能生产和使用中心的地区，可能会出现新的电力节点。在拥有丰富的再生资源以及具备向大型需求中心出口能力的地方，绿氢可能最为经济。新的发电设施可能部署在利用这些因素成为氢气生产和使用中心的地方。

• **与石油和天然气相比，氢能行业的竞争将更激烈，利润也将更少。** 清洁氢能所

<sup>26</sup> Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor.  
<https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>

产生的回报无法与当今的石油和天然气相媲美。氢能是资源转化而非资源提取行业，有可能在许多地方实现有竞争力的生产。这将难以获得传统化石燃料行业中的产地租凭等利润，而目前化石燃料约占全球国民生产总值（GDP）的 2%。此外，随着绿氢成本的下降，新的、多样化的参与者将进入市场，使氢能更具竞争力。

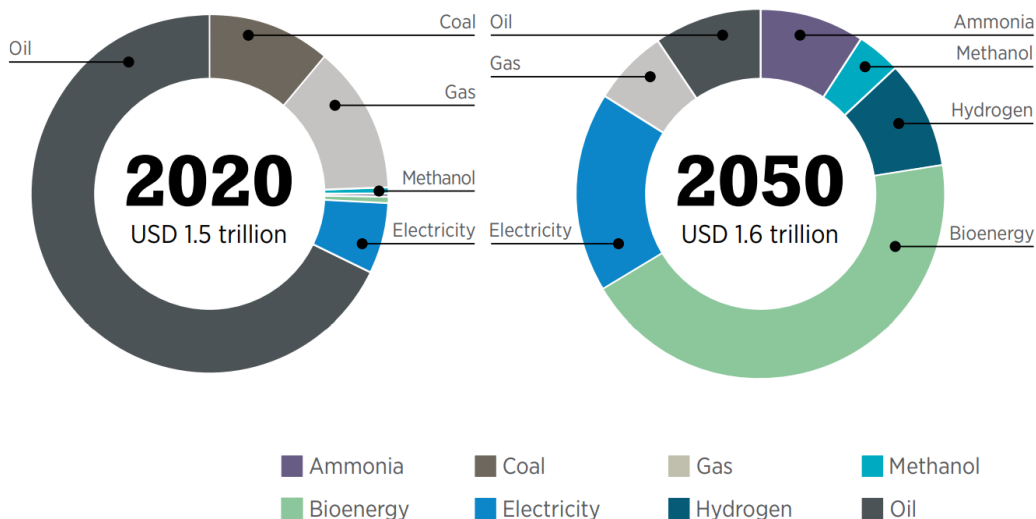


图 1 2020-2050 年能源商品贸易结构的变化

• **氢能贸易和投资的流动将催生新的相互依存模式，并带来双边关系的转变。**一系列快速增长的双边交易表明，其将不同于 20 世纪基于碳氢化合物的能源关系。30 多个国家和地区制定了包括进出口计划在内的氢能战略，表明跨境氢能贸易将大幅增长。传统上没有能源贸易的国家正在建立以氢能相关技术和产品为核心的双边关系。随着国家间经济联系的变化，其政治动态也可能发生变化。

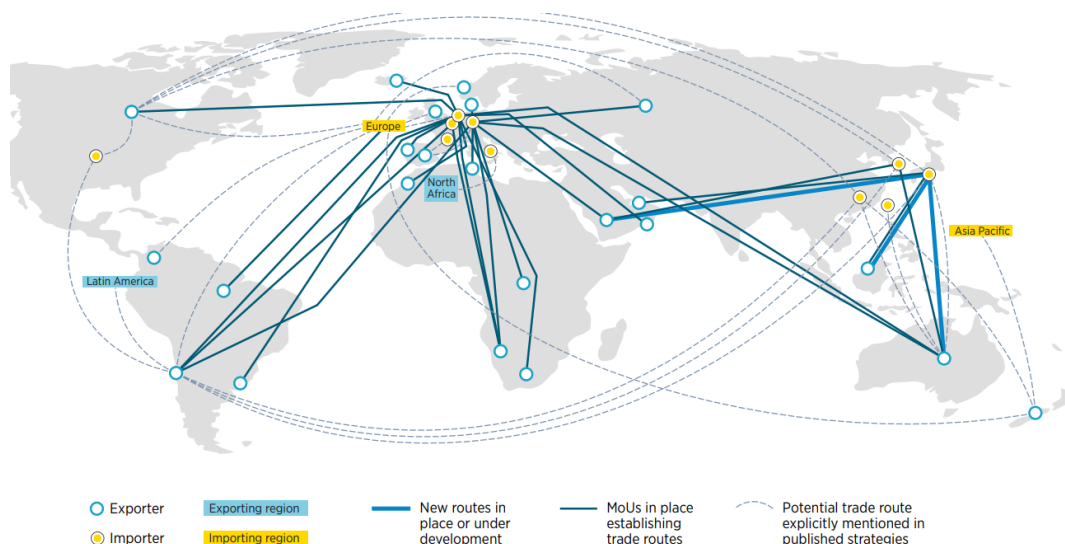


图 2 不断扩大的氢能贸易路线、计划和协议网络

• **氢能外交正在成为一些国家经济外交的标准配置。**氢能将被视为能源安全和国家整体恢复力的一个要素，特别是对于其他解决方案不可行或不经济的行业。一些希望成为氢能进口国的国家已经在进行专门的氢能外交。德国和日本一直是先驱者，

一些国家紧随其后。潜在的出口国也正在部署类似的战略，其中许多国家将氢能（尤其是绿氢）置于外交最高级别。

•**化石燃料出口国认为清洁氢能是实现经济多样化的一种有吸引力的方式。**许多出口国正在转向清洁氢能以发展新的出口产业，其可利用已建立的能源基础设施、熟练的劳动力和现有的能源贸易关系。除了生产蓝氢，许多化石燃料生产国也有充分的可再生能源潜力，可以直接转向绿氢。阿拉伯联合酋长国的氢能领先路线图明确采用这种双重路线，其他几个国家正在探索这条道路，包括澳大利亚、阿曼和沙特阿拉伯。尽管如此，化石燃料生产国应继续制定基础广泛的经济转型战略，因为仅靠氢能无法弥补收入损失。

•**生产绿色电力进而大规模生产绿氢的潜力已超过预估全球需求几个数量级。**许多国家已经宣布了其成为氢能出口国的目标，从而限制了出口集中的可能性。从国家战略和不断增长的双边协议来看，即使是智利、摩洛哥和纳米比亚等能源净进口国也准备成为绿氢出口国。然而，氢能供应将受到资本部署速度和生产成本的限制，特别是在长期市场无法保证的情况下。

•**非洲、美洲、中东和大洋洲具有最大的绿氢生产技术潜力。**然而，生产大量低成本绿氢的能力差异很大。各国必须根据更广泛的社会和经济优先事项来制定战略，包括能源系统脱碳能力以及解决能源获取和能源贫困问题的能力，目前全球 80 多个国家都在采取行动。获得丰富的可再生能源是清洁氢能竞赛中的优势之一，但这可能还不够。许多其他因素也在发挥作用，包括现有的基础设施和当前的能源结构，以及资本成本和获得必要技术的机会。技术潜力能否实现还将取决于政府支持、投资环境和政治稳定等软性因素。

•**较高的项目融资成本并不一定会阻碍对较高风险国家的投资。**石油和天然气上游行业表明，在盈利潜力充足的地方，尽管存在国家风险，投资仍将流入。这同样适用于具有低成本绿氢潜力的国家。当然，这也是有限度的。由于在这些地区开展业务存在巨大风险，处于动荡中的国家不太可能实现投资机会。

•**2020 年代可能会成为一个争夺技术领先地位的大竞赛时代，因为随着规模效应和基础设施扩张，绿氢成本可能会大幅下降。**清洁氢能的地缘政治可能会分几个阶段发展，预计到 2020 年代末，绿氢将开始在成本上与蓝氢竞争，在中国（由于其低成本的电解槽）或巴西和印度（可再生能源便宜且天然气价格相对较高）等国家将会更快发生。在 2021 年天然气价格飙升期间，整个欧洲的绿氢已经比灰氢更便宜。但这一趋势将在很大程度上取决于可预测的需求，尤其是在没有替代品、难以减排的行业。

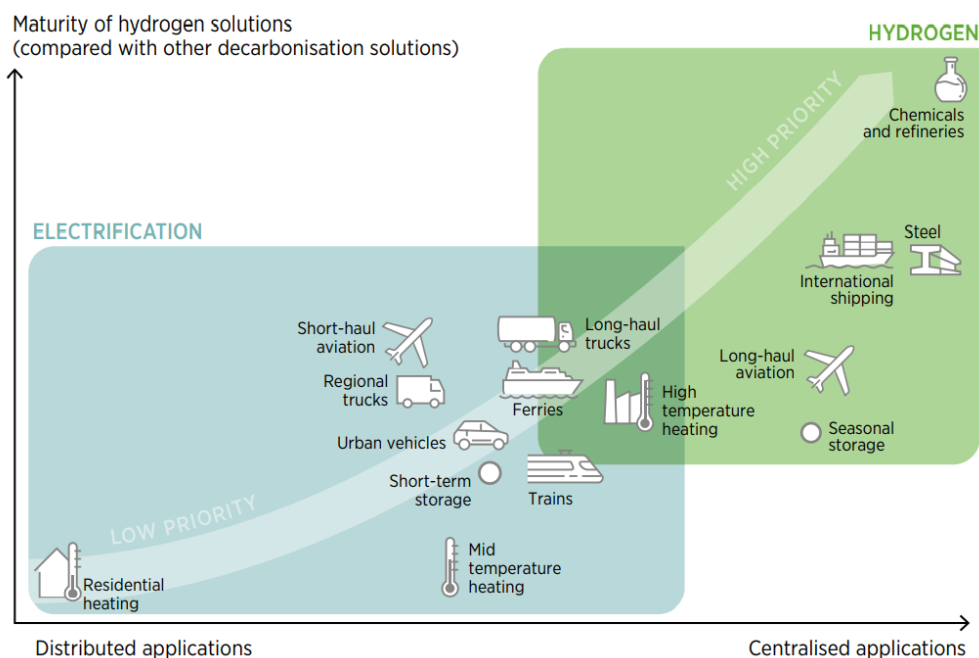


图 3 清洁氢能政策优先事项

•到 2030 年代，氢能的跨境贸易将与绿氢成本竞争力同步增长。在许多脱碳情景中，氢能需求从 2035 年开始加速增长。IRENA 预计，到 2050 年，三分之二的绿氢生产将用于本地，三分之一用于跨境交易。管道，包括经过改造的天然气管道，可能会促进一半的贸易，另一半将以氢基衍生物（尤其是氨）的形式船运。

•短中期内，优势国家和地区可以保持技术领先地位并制定不断增长的市场规则。在氢能价值链中占有一席之地可以提高经济竞争力。直接经济风险很高，市场潜力巨大。从长远来看，具有充足可再生能源潜力的国家可以成为绿色工业化的场所，利用其潜力吸引能源密集型行业。

•设备制造为未来几年至几十年的市场提供了机会。氢能价值链是广泛的，可再生能源将需要大量投资。另外，估计到本世纪中叶，电解槽市场潜力将达到 500-600 亿美元，燃料电池市场潜力为 210-250 亿美元。中国、欧洲和日本在电解槽的生产 and 销售方面已经取得了较好的领先优势，但市场仍处于起步阶段且规模相对较小。创新和新兴技术可以改变当前的制造业格局。

•任何形式的氢能都可以增强能源独立性和弹性，但大部分源于绿氢。目前，氢能可以通过三种主要方式来增强能源安全：减少进口依赖；缓解价格波动；通过多样化提高能源系统的灵活性和弹性。这些优点大多与绿氢有关。相反，蓝氢将遵循天然气市场的模式，导致进口依赖和市场波动。此外，绿氢的预期成本降低意味着对基于化石燃料的供应链的投资（尤其是计划持续运营多年的资产）可能会最终搁浅。

•氢能和可再生能源技术的原材料需求可能会引起对材料安全的更多关注。虽然目前大多数矿产和金属资源供应充足，但由于需求迅速增长以及采矿和炼油项目的

长交付周期，市场可能会变得非常紧张。供需之间的小幅变动也可能导致价格大幅波动。这种波动可能会影响氢能供应链，进而影响设备的总体成本，以及矿工和原材料出口商的收入。在考虑超出已知风险的可能风险时，由新冠肺炎疫情引起的供应链问题也具有参考意义。

•**氢能贸易流不太可能武器化或“卡特化”。**因为氢能可以通过许多一次能源生产，并且可以在世界许多地方生产。事实上，氢是一种产品而非原材料或能源。因此，绿色能源贸易流动不太可能像石油和天然气那样容易受到地缘政治影响。然而，供应短缺也可能出现，特别是在氢能贸易早期，供应商数量有限，大多数贸易仍受双边安排的制约。

•**制定氢能贸易的规则、标准和监管将对确定哪些技术主导未来市场产生重大影响。**清洁氢能市场的成功取决于能否制定透明一致的规则、标准和规范，以促进其与国家、地区和部门的部署。标准旨在提高各种商品和服务的质量、安全性和互操作性。同时，不同的标准可能会减慢进度并导致市场分散，引发监管竞争，并设置贸易壁垒。制定标准可能是地缘政治竞争或国际合作的舞台。最终，所有参与者都可以从一个连贯透明的全球体系中获益。

•**为了监测和管理氢能对气候变化的贡献，需要建立基于透明可信的国际体系的原产地证书。**排放量测算方式的透明度至关重要。如果氢能战略延长化石燃料的使用并阻碍能效和电气化提升，将会存在众所周知的碳锁定的风险。稳健且深思熟虑的政策框架有助于确保氢能有效地助力温室气体减排。

•**早期的价格透明将支持全球氢能市场的快速发展。**新兴市场的货币和定价机制可能会产生相当大的地缘政治影响。随着市场的扩大，所选货币将成为全球基准。由于进口成本的波动，与该货币相关的国家将在一定程度上免受风险的影响。例如，有可能成为关键进口市场之一的欧盟寻求以欧元为其未来氢能进口的计价单位。此外，碳价可能会对绿氢发展有所帮助，使其能够与灰氢乃至化石燃料竞争。从这个意义上说，氢能可能会卷入一系列更广泛的碳贸易战。

•**投资决策是长期的，搁浅资产的风险很高，因此应以长期逻辑对固定式基础设施进行评估。**当前围绕能源基础设施的每一项投资和规划决策都应该考虑到脱碳经济的地理位置可能与目前现状截然不同。终端用途的显著电气化将重塑需求。在供应方面，可再生氢能的生产可能会发生在当今油气田以外的地方。虽然一些现有的基础设施可以重新利用，但这种重新利用的技术挑战和经济成本应该从一开始就考虑在内。

•**帮助发展中国家尽早部署氢能技术可以改善所有国家的能源安全，同时防止全球脱碳差距扩大。**多元化的氢能市场将降低供应链风险并提高所有人的能源安全。获得技术、培训、能力建设和负担得起的资金将是充分发挥氢能在全球能源系统脱

碳和促进全球稳定与公平方面潜力的关键。建立氢能贸易关系可以为在可再生能源丰富的国家建立氢能价值链、刺激绿色产业和创造就业机会开辟新的可能性。

•**全球努力的重点应该是提供最直接的优势和部署可实现规模经济的氢能应用，特别是在未来几年。**优先考虑氢能是最佳（也许是唯一）替代品的高需求应用，更有可能具有成本效益，并且不易受到新兴市场风险的影响。一个可能的例子是支持在已经使用氢能的工业应用中加速向绿氢转变，如炼油、氨和甲醇的生产。

•**根据氢能的开发方式，氢能对可持续发展既有积极影响，也有消极影响。**“人类安全”的概念经常被用来描述地缘政治不稳定的根源，以解释气候变化、贫困和疾病等威胁，这些威胁可能破坏国家内部和国家之间的和平与稳定。展望未来，重要的是要更好地了解全球威胁和脆弱性的多维性质，以预见和化解大规模部署氢能可能带来的某些风险。

（金琳 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](mailto:energy@whlib.ac.cn)