

国际能源科技领域新进展与启示建议^{*}

陈 伟^{*,1,2} 郭楷模¹ 岳芳¹

(1. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071; 2. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190)

摘 要:全球能源生产与消费革命正在不断深化, 新兴产业与新业态不断发展壮大。能源技术创新处于高度活跃期, 新兴能源技术正以前所未有的速度加快迭代, 正孕育一批具有重大产业变革前景的颠覆性技术。本文系统梳理了 2018 年世界主要发达国家和地区的能源科技领域重大发展战略规划, 分析了国际重大科技前沿进展与重要成果, 以准确把握世界能源技术变革和演进方向, 进而为我国能源科技领域的优先谋划和布局提供参考。

关键词:能源科技; 战略规划; 科技进展; 战略启示

中图分类号: G350 文献标识码: A doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2019.04.006

Development Trend of Global Energy Technology and Its Strategic Implication^{*}

CHEN Wei^{*,1,2} GUO Kaimo¹ YUE Fang¹

(1. Wuhan Documentation and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The revolution of global energy production and consumption is constantly deepening, and emerging industries and new formats continue to grow and develop. At the same time, energy technology innovation is highly active, and emerging energy technologies are accelerating at an unprecedented rate, with a number of disruptive technologies spawning. The major strategic planning for energy science and technology developed by major developed countries and regions, as well as the progress and important achievements of energy technology in 2018 are systematically sorted out and analyzed in this paper, which can help to accurately grasp the evolving technology directions. Finally, several constructive recommendations for the development of energy science and technology in China are proposed.

Key words: energy technology; strategy planning; science and technology trends; strategic implication

当前全球能源系统正在从化石能源绝对主导向低碳多能融合方向转变。能源生产与消费革命不断深化, 新产业新业态日益壮大。2018 年各国在能源转型过程中以科技创新为先导, 以体制改革为抓手, 致力于解决主体能源绿色低碳过渡、多

能互补耦合利用、终端用能深度电气化、智慧能源网络建设等重大战略问题, 构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系, 抢占能源竞争战略制高点。本文对 2018 年全球能源科技领域重大战略行动和重要研究进展进行了分析, 并对我国未来发展

^{*} 中国科学院变革性洁净能源关键技术与示范战略性先导科技专项(XDA21000000), 中国科学院战略研究和决策支持系统建设专项(GHJ-ZLZX-2019-35), 中国科学院文献情报能力建设专项(Y8KZ321001、Y8KZ361001), 中国科学院青年创新促进会项目(2017221)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: chenw@whlib.ac.cn; Tel: 027-87199180

提出了建议。

1 主要国家重大战略行动

当今世界面临百年未有之大变局,国际能源格局处于大发展大变革大调整时期,围绕能源科技和产业变革的国际竞争日趋激烈。世界主要国家积极出台各种战略措施,以抢占发展制高点。

1.1 发达国家加强顶层战略主导

2018 年,美国特朗普政府以贸易战为由发动了对华全面科技战,以遏制中国科技创新快速崛起及战略性新兴产业发展,为此首先制定 301 关税清单,定向精确打击中国在航空航天设备、新能源等领域的关键能源技术^[1];其次发布《美国对中国民用核能合作框架》^[2],明令禁止小型模块化轻水堆、非轻水先进反应堆技术、2018 年及之后的新兴核技术对华出口。欧盟公布总额 1000 亿欧元的“地平线欧洲”计划^[3],提出 2021—2027 年将为气候、能源与交通领域研究与创新资助 150 亿欧元,旨在以系统观视角来整合跨学科、跨部门的力量共同解决能源转型面临的重大社会和环境挑战。德国第七能源研究计划总预算达 64 亿欧元^[4],重点支持能效、可再生能源电力、系统集成、核能和交叉技术五大主题研究工作,资助重点从单项技术转向解决能源转型面临的跨部门和跨系统问题,同时利用“应用创新实验室”机制建立用户驱动创新生态系统,加快成果转移转化。日本发布《第五期能源基本计划》^[5],提出了面向 2030 年及 2050 年的能源中长期发展战略,强调降低对化石能源的依赖,大力发展可再生能源和氢能,在安全前提下推进核电重启,同时充分融合数字技术构建多维、多元、柔性能源供需体系,实现 2050 年能源全面脱碳化目标。

1.2 能源数字化进程稳步推进

随着数字技术的深度融合,能源系统和运营

模式呈现出智能化、去中心化、物联化等颠覆性趋势。欧盟《能源价值链数字化》^[6]报告指出,如何克服互操作性与标准化和保障网络安全是能源价值链数字化转型面临的两大难题,欧盟应该积极采用物联网、5G 网络与大数据、能源互联网等关键使能技术,并建立可再生能源可用性预测信息交换服务平台、部署优化能源互联网的数字基础设施等措施以解决上述两大挑战。国际能源署《世界能源投资报告 2018》^[7]显示,传统企业能源创新路径正在被数字化浪潮颠覆,能源科技初创企业主要的企业风险投资来源是信息通信(IT)行业而非传统能源行业,互联网公司的跨界竞争对传统能源企业构成威胁。英国石油公司《技术展望报告 2018》^[8]指出,随着数字技术(包括传感器、超级计算、数据分析、自动化、人工智能等)依托云网络应用的发展,到 2050 年一次能源需求和成本将降低 20% ~ 30%。彭博社新能源财经研究表明^[9],到 2025 年数字技术将为全球能源行业带来 380 亿美元年收益。

1.3 油气行业数字化智能化竞争激烈

化石能源行业正在向技术密集型、技术精细型产业转型,为抢占未来竞争制高点,各行业参与方正在加快数字化技术的应用速度、并深化其应用水平。一方面油气企业纷纷实施数字化创新举措,另一方面 IT 企业也在跨界与传统油气企业加强合作。2018 年的重大动向包括:壳牌宣布将和微软扩大合作,在石油行业大规模开发和部署人工智能应用^[10];俄罗斯天然气公司实施 2030 年数字化转型战略,在运营流程管理中引入“工业 4.0”的物联网技术和新方法,使用创新数字技术提升石油业务操作流程效率^[11];巴西国家石油公司在 2018—2022 年商业计划中提出未来三年投资 66.3 亿美元用于基础设施和研发,并成立数字

化转型部门以便在油气业务、创新合作、决策过程等公司运营活动中提高效率和生产力^[12]；中国石油发布国内油气行业首个智能云平台，支撑勘探开发业务的数字化、自动化、可视化、智能化转型发展^[13]；华为提供的油气物联网、数字管道、高性能计算（HPC）与经营管理及智能配送等 ICT 解决方案，已服务 70% 的全球 TOP20 油气企业^[14]；IBM 公司牵手阿布扎比国油，首次将区块链技术应用于油气生产核算^[15]；通用电气和诺布尔钻井公司联合推出世界第一艘数字钻井船，旨在实现减少目标设备上 20% 运营成本的同时提高钻井效率^[16]；谷歌和道达尔计划联合攻坚人工智能在油气勘探领域的应用^[17]。

1.4 交通能源动力向绿色低碳转型

发展绿色交通是应对全球气候能源危机、实施经济社会转型与可持续发展战略的重要路径，欧美发达国家已开始重视制定航空业低碳转型的战略规划。日本宇宙航空研究开发机构公布《第四期中长期发展规划》^[18]，提出开发低排放发动机燃烧器和高效涡轮相关技术等重点方向，并联合多家企业和政府机构组建“飞行器电气化挑战联盟”^[19]，推动日本航空工业低碳转型。英国政府计划投入 2.25 亿英镑（加上企业投入共 3.43 亿英镑）强化航空动力技术研发，通过政企合作开展电气化、发动机、材料与制造工艺等主题研究，打造绿色航空抢占未来航空发展制高点^[20]。

1.5 美欧日大力推动高性能电池研发

国际能源署发布的《全球电动汽车展望 2018》报告^[21]指出，动力电池技术将是决定未来电动汽车发展高度的关键因素。为了抢占发展制高点，美欧日发达国家积极制定政策措施并投入重金推动储能技术研发。欧盟组建“欧洲电池联盟”实施战略行动计划^[22]，从保障原材料供应、构

建完整生态系统、强化产业领导力、培训高技能劳动力、打造可持续产业链、强化政策和监管等六个方面开展行动，要在欧洲打造具有全球竞争力的电池产业链。美国能源部将在未来五年为储能联合研究中心继续投入 1.2 亿美元^[23]，开展液体溶剂化科学、固体溶剂化科学、流动性氧化还原科学、动态界面电荷转移和材料复杂性科学五大方向研究，以设计开发超出当前锂离子电池容量的新型高能多价化学电池，并研究用于电网规模储能的液流电池新概念。日本新能源产业技术综合开发机构将在未来五年（2018—2022）资助 100 亿日元^[24]，旨在通过整合全日本相关的国立研究机构、企业界和政府力量，共同推进全固态电池关键基础技术开发和固态电池应用的社会环境分析研究工作，攻克全固态电池商业化应用的技术瓶颈，为到 2030 年左右实现规模化量产奠定技术基础。

1.6 核能发展重视安全高效

如何在保障安全的前提下，实现核能高效利用是国际社会共同关注的问题，为此美日等核强国积极制定核能安全发展政策并开展了核能安全利用技术研究活动。美国能源部在 2018—2022 年期间将资助 4 亿美元^[25]，重点开展新型反应堆示范工程、核电技术监管认证、先进反应堆设计开发等工作，包括核部件和完整装置的先进制造和建造技术研究、反应堆系统结构优化、多技术类型的小型模块化反应堆设计开发、先进传感器和控制系统开发、核电站辅助设施和支持系统开发等，以加速核能技术创新突破。日本原子能委员会发布《原子能技术研究开发基本原则》^[26]，提出建立电力自由化市场、发展多种反应堆技术以及强化国际合作，明确政府、国立科研机构、产业界三大创新主体任务，旨在指导未来原子能技术的研究开发工作。美国国家科学院发布《美国燃烧等离

子体研究战略计划最终报告》^[27],评估了美国聚变研究的进展,建议美国继续参与国际热核聚变实验堆(ITER)计划,并启动国家研究计划迈向紧凑型聚变发电中试阶段。

1.7 新能源与可再生能源加快应用

氢能发展备受重视。日本公布新修订的《燃料电池技术开发路线图》^[28],提出面向 2040 年的车用、家用和商用燃料电池技术发展目标。澳大利亚发布《国家氢能产业发展路线图》^[29],描绘了澳大利亚氢能产业的未来发展蓝图,打造从制备到应用全产业链,实现到 2025 年与其他能源成本竞争力相当。

欧盟前瞻谋划风能和海洋能未来发展。欧盟《风能战略研究和创新议程》^[30]提出风电并网集成、系统运营和维护、下一代风电技术、海上风电配套设施、浮动式海上风电五大优先发展领域,明确了至 2030 年的愿景目标。欧盟联合研究中心发布《海洋能源未来新兴技术》报告^[31],提出了十大发展方向,力图弥合研发与产业化的鸿沟,开发潜力巨大的海洋能源。

人工智能(AI)推动地热产业智慧化转型升级。美国能源部资助机器学习在地热领域的应用研究项目^[32],聚焦机器学习用于地热资源勘查和开发先进数据分析工具,从而提升地热资源的勘查开发水平。日本新能源产业技术综合开发机构部署研究课题^[33],旨在利用物联网(IoT)、人工智能等技术改善地热发电站的管理运营效率,将地热发电站的故障发生率降低 20%,同时将利用率提高 10%,提升地热经济性。

2 重要研究进展

2.1 燃气轮机增材制造工艺取得突破

3D 打印技术在燃气轮机制造中的应用已从

原型试制逐渐走向实际生产,它将给制造过程带来更灵活的设计、更快速的制造过程、更低的污染排放等诸多优势。德国西门子公司利用 3D 打印技术,成功制造和测试了镍基超级合金材料的航改燃气轮机干式低排放(DLE)预混合器,可以显著降低 CO 排放^[34]。英国罗-罗公司在新一代大涵道比涡扇发动机核心机上使用 3D 打印部件和陶瓷基复合材料,成功完成了 100 多个小时的测试,燃油效率较第一代遑达发动机提高 25%,同时排放降低^[35]。

2.2 受控核聚变研究持续取得进展

核聚变研究强国在核聚变理论方法、材料开发和实验装置方面取得了突破性进展,稳步推进受控核聚变商业化应用进程。中国科学院合肥等离子体物理研究所全超导托卡马克装置等离子体中心电子温度首次达到 1 亿度,实验参数接近未来聚变堆稳态运行模式所需要的物理条件^[36]。美国普林斯顿等离子体物理实验室研发出一种涟漪扰动法(共振磁扰动(RMPs)),能够扭曲等离子体的方向、减轻等离子体对装置的破坏、减少聚变反应中等离子体的不稳定性并大幅提高可控核聚变的持续时长^[37]。麻省理工学院与英国联邦聚变能系统公司(CFS)合作开发了新型高温(-223℃)超导材料,能够以体积更小的磁体产生能量更强的磁场,有助于减少聚变反应启动所需的能量^[38]。

2.3 高密度储能电池成果斐然

储能技术在充放电循环反应机理研究、中间产物认知、界面优化、新材料开发等方面成果斐然。美国斯坦福直线加速器中心等机构合作利用 X 射线技术成功揭示了充放电过程中锂离子在磷酸铁锂正极材料中的运动机制,为设计开发高效的锂离子电池积累了关键的理论基础^[39]。美国

伊利诺伊大学芝加哥分校等机构合作开发新型锂-空气电池,创造在自然空气环境中稳定运行超 700 次的循环寿命纪录^[40]。斯坦福大学制备全球首个可伸缩锂金属电池,展现出优异的机械柔韧性和化学稳定性,推动柔性电子器件发展^[41]。澳大利亚皇家墨尔本理工学院开发了全球首个基于活性炭电极的可充电质子电池^[42]。哈佛大学研发出基于低成本醌类有机电解液的新型液流电池,创造工作寿命最长纪录,而且较全钒液流电池成本大幅下降^[43]。

2.4 航空动力新概念获成功验证

麻省理工学院成功研发并在大气环境中试飞全球首个基于固态储能和无机械活动部件的新概念飞行装置,凭借离子推进系统的精巧设计以及三级升压电路实现轻质高压电源等关键技术突破,成功验证这一航空动力新概念,未来有望应用到无人机等小/微型城市飞行器等领域^[44]。

2.5 钙钛矿太阳电池商业化前景渐明

钙钛矿太阳电池器件结构日趋完善,效率已超多晶硅,逼近单晶硅,但实现商业化仍需攻克规模化制造工艺、稳定性等关键挑战。瑞士洛桑联邦理工学院首次实验揭示了连续沉积钙钛矿生长机理,为制备高性能的钙钛矿薄膜及其光电器件提供了重要的理论参考^[45]。中国科学院半导体研究所创造单结钙钛矿太阳电池转换效率世界纪录(23.7%),并通过美国国家可再生能源实验室的权威认证^[46]。英国牛津光伏公司成功开发出效率高达 28% 的钙钛矿/晶硅叠层电池^[47]。日本东芝公司采用新型弯月面涂布技术制造全球最大面积(703 平方厘米)的钙钛矿电池单元,突破大面积工艺瓶颈,为钙钛矿电池走出实验室迈向商业化奠定了坚实的技术基础^[48]。

2.6 氢能与燃料电池取得新进展

氢能作为清洁能源,引起了世界广泛关注。

美欧日等发达国家投入重金开展氢能开发利用技术的研究活动,取得了一系列突破和进展。德国亥姆霍兹柏林能源材料中心设计开发了双光阳极串联光电催化系统,创造了太阳能到氢能 19% 的转化效率纪录^[49]。剑桥大学等机构合作将染料敏化的无机半导体二氧化钛光阳极与光系统 II 结合,并与氢化酶组成半人工光合系统,实现了在无外偏压辅助(即零偏压)的情况下高效光解水产氢^[50]。日本国立产业技术综合研究所开发了陶瓷电解质低温致密烧结工艺,制备出全球首个商用规格的质子陶瓷燃料电池^[51]。

3 启示建议

3.1 攻克卡脖子技术难题推进能源革命高质量发展

当今世界面临百年未有之大变局,我国的发展处于重要战略机遇期。迫切需要充分认识到能源科技创新在能源革命中的极端重要性,深化开展高质量的能源科技供给侧改革,突破核心技术卡脖子问题,包括:1)推动化石资源清洁高效利用与耦合替代,解决高能耗、高耗水、高排放等瓶颈问题。重点研究油煤气资源的融合转化,定向高效制备清洁燃料和化学品技术,突破煤炭清洁高效燃烧关键技术,大幅提高化石资源总体利用效率与产品质量、降低过程能耗与排放目标。2)加快清洁能源多能互补与规模应用,满足高比例替代煤炭消费需求。亟需攻克可再生能源交直流混合高效稳定供电技术、可再生能源供热系统技术、多能互补分布式发电与智慧微网关键技术,着重推动大规模低成本储能单元、系统并网与控制 and 系统集成关键技术的开发与示范。3)扎实做好高端特种材料与制造工艺,泵、阀门、轴承、仪器仪表、催化剂等关键部件的基础共性技术研发,提

升国产化自主可控水平。

3.2 加强现代能源系统架构整体设计与关键核心技术研究

为破解我国现有能源体系结构性缺陷,实现化石能源/可再生能源/核能低碳化多元融合,需要尽快开展多能融合的未来能源系统研究,从能源全系统层面着手优化,突破多能互补、耦合利用技术。重点突破氢/甲醇等重要能源载体的低成本合成技术,如可再生能源电解制氢、核能高温制氢、二氧化碳低成本捕集、加氢制甲醇/液体燃料,以及燃料电池大规模应用等关键核心技术。这是新一轮能源革命中我国能源科技有可能走在世界前列的领域,有助于我国抢占先机,早日建成能源科技强国。

3.3 尽快建立国家能源实验室形成跨学科融合创新平台

能源与信息、生物、纳米、先进制造等前沿学科的交叉融合将是未来能源科技创新的最佳路径,也最有可能催生颠覆性技术。我国应尽快建立能源领域的国家实验室,牵头组织优势力量开展重大关键技术集成化创新和联合攻关,高度关注能源与关联领域(生态、环境、化工、交通等)产生的相互影响,试点布局跨学科、跨系统重大项目,带动液态阳光、规模化高性能储能、氢能与燃料电池、智慧综合能源网络等潜在颠覆技术的发展应用,实现我国能源科技水平从跟跑向并行、领跑的战略性转变。

参考文献

[1] Office of the United States Trade Representative Executive Office of the President. Findings of the Investigation into China's Acts, Policies, and Practices Related to Technology Transfer, Intellectual

Property, and Innovation under Section 301 of the Trade Act of 1974 [EB/OL]. 2018-03-22. <https://ustr.gov/sites/default/files/Section%20301%20FINAL.PDF>.

[2] Department of Energy. DOE Announces Measures to Prevent China's Illegal Diversion of U. S. Civil Nuclear Technology for Military or Other Unauthorized Purposes [EB/OL]. 2018-10-11. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-measures-prevent-china-s-illegal-diversion-us-civil-nuclear-technology>.

[3] European Commission. Proposal for a Decision of the European Parliament and of the Council on Establishing the Specific Programme Implementing Horizon Europe-the Framework Programme for Research and Innovation [EB/OL]. 2018-06-07. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1540387739796&uri=CELEX%3A52018PC0436>.

[4] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Innovations for the Energy Transition: 7th Energy Research Programme of the Federal Government [EB/OL]. 2018-09-19. https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/7th-energy-research-programme-of-the-federal-government.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

[5] 経済産業省. 第5次エネルギー-基本計画 [EB/OL]. 2018-07-03. <http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf>. Ministry of Economy, Trade and Industry. Cabinet Decision on the New Strategic Energy Plan [EB/OL]. 2018-07-03. https://www.meti.go.jp/english/press/2018/0703_002.html.

[6] European Commission. Digitalization of the Energy

- Sector [EB/OL]. 2018-05-30. https://setis.ec.europa.eu/system/files/setis_magazine_17_digitalisation.pdf.
- [7] International Energy Agency. World Energy Investment 2018 [EB/OL]. 2018-07-17. <http://www.iea.org/newsroom/news/2018/july/global-energy-investment-in-2017-.html>.
- [8] BP. Technology Outlook 2018 [EB/OL]. 2018-03-15. <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/technology/bp-technology-outlook-2018.pdf>.
- [9] Bloomberg New Energy Finance. Digitalization Could Provide \$38 Billion in Benefits to Energy [EB/OL]. 2018-01-29. <https://about.bnef.com/blog/digitalization-provide-38b-benefits-energy/>.
- [10] STEVEN N. Shell Announces Plans to Deploy AI Applications at Scale [EB/OL]. 2018-09-20. <https://blogs.wsj.com/cio/2018/09/20/shell-announces-plans-to-deploy-ai-applications-at-scale/>.
- [11] World Oil. Gazprom Neft Implements 2030 Digital Transformation Strategy [EB/OL]. 2018-11-26. <https://www.worldoil.com/news/2018/11/26/gazprom-neft-implements-2030-digital-transformation-strategy>.
- [12] RODRIGO P, ANDRÉ R. Petrobras Turns to Digital Transformation [EB/OL]. 2018-11-23. <https://www.valor.com.br/international/news/5994721/petrobras-turns-digital-transformation>.
- [13] 中国石油新闻中心. 中石油发布勘探开发梦想云平台 [EB/OL]. 2018-11-29. <http://news.cnpc.com.cn/system/2018/11/29/001712270.shtml>.
- PetroChina News Center. PetroChina Launches Exploration and Development Dream Cloud Platform [EB/OL]. 2018-11-29. <http://news.cnpc.com.cn/system/2018/11/29/001712270.shtml>.
- [14] 华为技术有限公司. 华为在 2017 全球油气峰会展示安全高效产油气 ICT 解决方案 [EB/OL]. 2017-11-13. <https://www.huawei.com/cn/press-events/news/2017/11/Huawei-Safe-Efficient-Oil-Gas-ICT-Solutions>.
- Huawei Technologies. Huawei Demonstrates Safe and Efficient Oil and Gas ICT Solutions at ADIPEC [EB/OL]. 2017-11-13. <https://www.huawei.com/en/press-events/news/2017/11/Huawei-Safe-Efficient-Oil-Gas-ICT-Solutions>.
- [15] 郑焱璐. IBM 与阿布扎比国家石油公司合作开发区块链供应链系统 [EB/OL]. 2018-12-10. <http://blockchain.people.com.cn/n1/2018/1210/c417685-30453893.html>.
- ZHENG Yanlu. IBM Partners with Abu Dhabi National Oil Company for Blockchain Supply Chain System [EB/OL]. 2018-12-10. <http://blockchain.people.com.cn/n1/2018/1210/c417685-30453893.html>.
- [16] Offshore Energy Today. GE, Noble Corp. in ‘World’s First’ Digital Drilling Rig Push [EB/OL]. 2018-02-23. <https://www.offshoreenergytoday.com/ge-noble-corp-in-worlds-first-digital-drilling-rig-push/>.
- [17] Total. Total to Develop Artificial Intelligence Solutions with Google Cloud [EB/OL]. 2018-04-24. <https://www.total.com/en/media/news/press-releases/total-develop-artificial-intelligence-solutions-google-cloud>.
- [18] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構. 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構の中長期目標を達成するための計画 [EB/OL].

- 2018-03-30. <http://www.jaxa.jp/about/plan/pdf/plan04.pdf>.
- Japan Aerospace Exploration Agency. JAXA Mid-Long Term Plan [EB/OL]. 2018-03-30. <http://www.jaxa.jp/about/plan/pdf/plan04.pdf>.
- [19] Japan Aerospace Exploration Agency. Electrification Challenge for Aircraft (ECLAIR) Consortium [EB/OL]. 2018-07-02. http://global.jaxa.jp/press/2018/07/20180702_eclair.html.
- [20] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Lift off for Electric Planes-New Funding for Green Revolution in UK Civil Aerospace [EB/OL]. 2018-07-16. <https://www.gov.uk/government/news/lift-off-for-electric-planes-new-funding-for-green-revolution-in-uk-civil-aerospace>.
- [21] International Energy Agency. Global EV Outlook 2018 [EB/OL]. 2018-05-30. https://webstore.iea.org/download/direct/1045?fileName=Global_EV_Outlook_2018.pdf.
- [22] European Commission. Strategic Action Plan on Batteries [EB/OL]. 2018-05-17. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_3&format=PDF.
- [23] Department of Energy. Department of Energy Announces MYM120 Million for Battery Innovation Hub [EB/OL]. 2018-09-18. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-120-million-battery-innovation-hub>.
- [24] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 全固体リチウムイオン電池の研究開発プロジェクトの第2期が始動 [EB/OL]. 2018-06-15. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100968.html.
- New Energy and Industrial Technology Development Organization. The Second Phase of the R&D Project for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries Started [EB/OL]. 2018-06-15. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100968.html.
- [25] Department of Energy. U. S. Industry Opportunities for Advanced Nuclear Technology Development [EB/OL]. 2018-12-07. <https://www.grants.gov/web/grants/search-grants.html?keywords=DE-FOA-0001817>.
- [26] 原子力委員会. 技術開発・研究開発に対する考え方 [EB/OL]. 2018-04-24. http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/senryaku_wg/pdf/009_01_00.pdf.
- The Atomic Energy Commission. Approach to Technology Development and Research And Development [EB/OL]. 2018-04-24. http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/senryaku_wg/pdf/009_01_00.pdf.
- [27] The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U. S. Burning Plasma Research [EB/OL]. 2018-12-13. <https://www.nap.edu/catalog/25331/final-report-of-the-committee-on-a-strategic-plan-for-us-burning-plasma-research>.
- [28] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. NE-DO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ [EB/OL]. 2017-12-20. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100889.html.
- New Energy and Industrial Technology Development Organization. NEDO Revises and Pre-releases Fuel Cell Section of "NEDO's Technology Development Roadmap for Fuel Cells and Hydrogen" [EB/OL]. 2017-12-20. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100889.html.

- go.jp/english/news/AA5en_100334.html.
- [29] Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. National Hydrogen Roadmap [EB/OL]. 2018-08-23. <https://www.csiro.au/en/News/News-releases/2018/Roadmap-finds-Hydrogen-Industry-set-for-scale-up>.
- [30] European Technology & Innovation Platform on Wind Energy. Strategic Research and Innovation Agenda 2018 [EB/OL]. 2018-10-24. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/ETIPWind-strategic-research-and-innovation-agenda-2018.pdf>.
- [31] European Commission Joint Research Centre. New Technologies in the Ocean Energy Sector [EB/OL]. 2018-03-27. <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/new-technologies-ocean-energy-sector>.
- [32] DOE. Energy Department Announces MYM3. 6 Million in Machine Learning for Geothermal Energy [EB/OL]. 2018-07-19. <https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-announces-36-million-machine-learning-geothermal-energy>.
- [33] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 地熱エネルギーのさらなる高度利用を目指す技術開発 8テーマを採択 [EB/OL]. 2018-07-04. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100988.html.
- New Energy and Industrial Technology Development Organization. Theme 8 Technology Development Aims to Further Use Geothermal Energy [EB/OL]. 2018-07-04. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100988.html.
- [34] Siemens. Siemens Achieves Breakthrough with 3d-Printed Combustion Component for SGT-A05 [EB/OL]. 2018-08-08. <https://www.siemens.com/press/en/feature/2018/powergeneration-services/2018-08-05-05.php>.
- [35] Rolls-Royce. 3-D Printed Parts and New Materials Help Rolls-Royce to Engine Test Success [EB/OL]. 2018-10-11. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/11-10-2018-3d-printed-parts-and-new-materials-help-rolls-royce-to-engine-test-success.aspx>.
- [36] 中国科学院等离子体物理研究所. EAST 装置取得 1 亿度等离子体运行等成果 [EB/OL]. 2018-11-12. http://www.cas.cn/syky/201811/t20181112_4670007.shtml.
- Hefei Institutes of Physical Science of the Chinese Academy of Sciences. Chinese Fusion Tool Pushes Past 100 Million Degrees [EB/OL]. 2018-11-13. http://english.cas.cn/newsroom/news/201811/t20181113_201191.shtml.
- [37] JOHN G. Discovered: Optimal Magnetic Fields for Suppressing Instabilities in Tokamaks [EB/OL]. 2018-09-10. <https://www.pppl.gov/news/press-releases/2018/09/discovered-optimal-magnetic-fields-suppressing-instabilities-tokamaks>.
- [38] DAVID C. MIT and Newly Formed Company Launch Novel Approach to Fusion Power [EB/OL]. 2018-03-09. <http://news.mit.edu/2018/mit-newly-formed-company-launch-novel-approach-fusion-power-0309>.
- [39] LI Yiyang, CHEN Hungru, LIM Kipil, et al. Fluid-Enhanced Surface Diffusion Controls Intraparticle Phase Transformations [J]. Nature Materials, 2018, 17: 915-922.
- [40] MOHAMMAD A, BAHARAK S, PEDRAM A, et al. A Lithium-Oxygen Battery with a Long Cycle Life in an Air-Like Atmosphere [J]. Nature,

- 2018,555(7697):502.
- [41] LIU Kai, KONG Biao, LIU Wei, et al. Stretchable Lithium Metal Anode with Improved Mechanical and Electrochemical Cycling Stability [J]. *Joule*, 2018, doi:10.1016/j.joule.2018.06.003.
- [42] SHAHIN H, SAEED S M, AMANDEEP S O, et al. Technical Feasibility of a Proton Battery with an Activated Carbon Electrode [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43 (12): 6197-6209.
- [43] KWABI D G, LIN Kaixiang, JI Yunlong, et al. Alkaline Quinone Flow Battery with Long Lifetime at pH 12 [J]. *Joule*, 2018, 2:1894-1906.
- [44] XU Haofeng, HE Yiou, STROBEL K L, et al. Flight of an Aeroplane with Solid-State Propulsion [J]. *Nature*, 2018, 563(7732):532-535.
- [45] UMMADISINGU A, GRÄTZEL M. Revealing the Detailed Path of Sequential Deposition for Metal Halide Perovskite Formation [J]. *Science Advances*, 2018, 4(2):e1701402.
- [46] National Renewable Energy Laboratory. Best Research-Cell Efficiencies [EB/OL]. 2019-01-03. <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>.
- [47] Oxford PV. Oxford PV Perovskite Solar Cell Achieves 28% Efficiency [EB/OL]. 2018-12-20. <https://www.oxfordpv.com/news/oxford-pv-perovskite-solar-cell-achieves-28-efficiency>.
- [48] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 面積世界最大のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールを開発 [EB/OL]. 2018-06-18. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100976.html.
- New Energy and Industrial Technology Development Organization. NEDO and Toshiba Develops World's Largest Film-based Perovskite Photovoltaic Module - 703 cm² Module Achieves 11.7% Power Conversion Efficiency [EB/OL]. 2018-06-18. https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100391.html.
- [49] CHENG W H, RICHTER M H, MAY M M, et al. Monolithic Photoelectrochemical Device for Direct Water Splitting with 19% Efficiency [J]. *ACS Energy Letters*, 2018, doi: 10.1021/acsenenergylett.8b00920.
- [50] SOKOL K P, ROBINSON W E, WARNAN J, et al. Bias-Free Photoelectrochemical Water Splitting with Photosystem II on a Dye-Sensitized Photoanode Wired to Hydrogenase [J]. *Nature Energy*, 2018, 3:944-951.
- [51] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 世界初、実用サイズのプロトン導電性セラミクス燃料電池セル(PCFC)の作製に成功 [EB/OL]. 2018-07-04. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100987.html.
- New Energy and Industrial Technology Development Organization. The World's First Successful Production of Practical-Size Proton Conductive Ceramic Fuel Cell (PCFC) [EB/OL]. 2018-07-04. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100987.html.