

能源技术革命创新行动计划 (2016 - 2030 年)

国家发展改革委
国家能源局

2016 年 3 月

能源是人类生存和文明发展的重要物质基础，我国已成为世界上最大的能源生产国和消费国，能源供应能力显著增强，技术装备水平明显提高。同时，我们也面临着世界能源格局深度调整、全球应对气候变化行动加速、国家间技术竞争日益激烈、国内经济进入新常态、资源环境制约不断强化等挑战。为积极应对挑战，党中央、国务院审时度势，在中央财经领导小组第六次会议上作出了推动能源消费、供给、技术和体制革命，全方位加强国际合作的战略部署。党的十八届五中全会进一步明确建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系。

科技决定能源的未来，科技创造未来的能源。能源技术创新在能源革命中起决定性作用，必须摆在能源发展全局的核心位置。为贯彻落实党的十八届五中全会和中央财经领导小组第六次会议精神，围绕可能产生重大影响的革命性能源技术创新和对建设现代能源体系具有重要支撑作用的技术领域，明确今后一段时期我国能源技术创新的工作重点、主攻方向以及重点创新行动的时间表和路线图，特制订本行动计划。

一、能源科技的发展形势

（一）世界能源科技发展趋势。当前，新一轮能源技术革命正在孕育兴起，新的能源科技成果不断涌现，正在并将持续改变世界能源格局。非常规油气勘探开发技术在北美率先取得突破，页岩气和致密油成为油气储量及产量新增长点，海洋油气勘探开发作业水深记录不断取得突破；主要国家均开展了 700℃ 超超临界燃煤发电

技术研发工作，整体煤气化联合循环技术、碳捕捉与封存技术、增压富氧燃烧等技术快速发展。燃气轮机初温和效率进一步提高，H级机组已实现商业化，以氢为燃料的燃气轮机正在快速发展；三代核电技术逐渐成为新建机组主流技术，四代核电技术、小型模块式反应堆、先进核燃料及循环技术研发不断取得突破；风电技术发展将深海、高空风能开发提上日程，太阳能电池组件效率不断提高，光热发电技术开始规模化示范，生物质能利用技术多元化发展；电网技术与信息技术融合不断深化，电气设备新材料技术得到广泛应用，部分储能技术已实现商业化应用。可再生能源正逐步成为新增电力重要来源，电网结构和运行模式都将发生重大变化。

近年来，主要能源大国均出台了一系列法律法规和政策措施，采取行动加快能源科技创新。美国发布了《全面能源战略》等战略计划，将“科学与能源”确立为第一战略主题，提出形成从基础研究到最终市场解决方案的完整能源科技创新链条，强调加快发展低碳技术，已陆续出台了提高能效、发展太阳能、四代和小型模块化核能等清洁电力等新计划。日本陆续出台了《面向2030年能源环境创新战略》等战略计划，提出了能源保障、环境、经济效益和安全并举的方针，继续支持发展核能，推进节能和可再生能源，发展新储能技术，发展整体煤气化联合循环（IGCC）、整体煤气化燃料电池循环等先进煤炭利用技术。欧盟制订了《2050能源技术路线图》等战略计划，突出可再生能源在能源供应中的主体地位，提出了智能电网、碳捕集与封存、核聚变以及能源效率等方向的发展思路，

启动了欧洲核聚变联合研究计划。

纵观全球能源技术发展动态和主要能源大国推动能源科技创新的举措，可以得到以下结论和启示：一是能源技术创新进入高度活跃期，新兴能源技术正以前所未有的速度加快迭代，对世界能源格局和经济发展将产生重大而深远的影响。二是绿色低碳是能源技术创新的主要方向，集中在传统化石能源清洁高效利用、新能源大规模开发利用、核能安全利用、能源互联网和大规模储能以及先进能源装备及关键材料等重点领域。三是世界主要国家均把能源技术视为新一轮科技革命和产业革命的突破口，制定各种政策措施抢占发展制高点，增强国家竞争力和保持领先地位。

（二）我国能源科技发展形势。近年来，我国能源科技创新能力和技术装备自主化水平显著提升，建设了一批具有国际先进水平的重大能源技术示范工程。初步掌握了页岩气、致密油等勘探开发关键装备技术，煤层气实现规模化勘探开发，3000 米深水半潜式钻井船等装备实现自主化，复杂地形和难采地区油气勘探开发部分技术达到国际先进水平，千万吨炼油技术达到国际先进水平，大型天然气液化、长输管道电驱压缩机组等成套设备实现自主化；煤矿绿色安全开采技术水平进一步提升，大型煤炭气化、液化、热解等煤炭深加工技术已实现产业化，低阶煤分级分质利用正在进行工业化示范；超超临界火电技术广泛应用，投运机组数量位居世界首位，大型 IGCC、CO₂ 封存工程示范和 700℃ 超超临界燃煤发电技术攻关顺利推进，大型水电、1000kV 特高压交流和 ±800kV 特高压直流

技术及成套设备达到世界领先水平，智能电网和多种储能技术快速发展；基本掌握了 AP1000 核岛设计技术和关键设备材料制造技术，采用“华龙一号”自主三代技术的首堆示范项目开工建设，首座高温气冷堆技术商业化核电站示范工程建设进展顺利，核级数字化仪控系统实现自主化；陆上风电技术达到世界先进水平，海上风电技术攻关及示范有序推进，光伏发电实现规模化发展，光热发电技术示范进展顺利，纤维素乙醇关键技术取得重要突破。

虽然我国能源科技水平有了长足进步和显著提高，但与世界能源科技强国和引领能源革命的要求相比，还有较大的差距。一是核心技术缺乏，关键装备及材料依赖进口问题比较突出，三代核电、新能源、页岩气等领域关键技术长期以引进消化吸收为主，燃气轮机及高温材料、海洋油气勘探开发技术装备等长期落后。二是产学研结合不够紧密，企业的创新主体地位不够突出，重大能源工程提供的宝贵创新实践机会与能源技术研发结合不够，创新活动与产业需求脱节的现象依然存在。三是创新体制机制有待完善，市场在科技创新资源配置中的作用有待加强，知识产权保护和管理水平有待提高，科技人才培养、管理和激励制度有待改进。四是缺少长远谋划和战略布局，目前的能源政策体系尚未把科技创新放在核心位置，国家层面尚未制定全面部署面向未来的能源领域科技创新战略和技术发展路线图。

（三）我国能源技术战略需求。我国能源技术革命应坚持以国家战略需求为导向，一方面为解决资源保障、结构调整、污染排放、

利用效率、应急调峰能力等重大问题提供技术手段和解决方案，另一方面为实现经济社会发展、应对气候变化、环境质量等多重国家目标提供技术支撑和持续动力。

1. 围绕“两个一百年”奋斗目标提供能源安全技术支撑。我国正处于实现“两个一百年”奋斗目标和中华民族伟大复兴的中国梦的关键阶段，能源需求在很长时期内还将持续增长。这要求通过能源技术创新加快化石能源勘探开发和高效利用，大力发展新能源和可再生能源，构建常规和非常规、化石和非化石、能源和化工以及多种能源形式相互转化的多元化能源技术体系。

2. 围绕环境质量改善目标提供清洁能源技术支撑。我国正在建设“蓝天常在、青山常在、绿水常在”的美丽中国，这要求通过能源技术创新，大幅减少能源生产过程污染排放，提供更清洁的能源产品，加强能源伴生资源综合利用，构建清洁、循环的能源技术体系。

3. 围绕二氧化碳峰值目标提供低碳能源技术支撑。我国对世界承诺，到2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%、非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右、二氧化碳排放2030年左右达到峰值并争取早日实现。这要求通过能源技术创新，加快构建绿色、低碳的能源技术体系。在可再生领域，要重点发展更高效率、更低成本、更灵活的风能、太阳能利用技术，生物质能、地热能、海洋能利用技术，可再生能源制氢、供热等技术。在核能领域，要重点发展三代、四代核电，先进核燃料及循环

利用，小型堆等技术，探索研发可控核聚变技术。在二氧化碳封存利用领域，要重点发展驱油驱气、微藻制油等技术。

4. 围绕能源效率提升目标提供智慧能源技术支撑。我国能源利用效率总体处于较低水平，这要求通过能源技术创新，提高用能设备设施的效率，增强储能调峰的灵活性和经济性，推进能源技术与信息技术的深度融合，加强整个能源系统的优化集成，实现各种能源资源的最优配置，构建一体化、智能化的能源技术体系。要重点发展分布式能源、电力储能、工业节能、建筑节能、交通节能、智能电网、能源互联网等技术。

5. 围绕能源技术发展目标提供关键材料装备支撑。能源技术发展离不开先进材料和装备的支撑。根据重点能源技术需要，重点发展特种金属功能材料、高性能结构材料、特种无机非金属材料、先进复合材料、高温超导材料、石墨烯等关键材料；重点发展非常规油气开采装备、海上能源开发利用平台、大型原油和液化天然气船舶、核岛关键设备、燃气轮机、智能电网用输变电及用户端设备、大功率电力电子器件、大型空分、大型压缩机、特种用途的泵、阀等关键装备。

二、总体要求

（一）指导思想

全面贯彻落实党的十八大和十八届二中、三中、四中、五中全会精神，深入学习贯彻习近平总书记系列重要讲话精神，坚持“四个全面”战略布局，牢固树立创新、协调、绿色、开放、共享的发

展理念，主动引领经济社会发展新常态，以建设清洁低碳、安全高效现代能源体系的需求为导向，以提升能源自主创新能力为核心，以突破能源重大关键技术为重点，以能源新技术、新装备、新产业、新业态示范工程和试验项目为依托，实施制造强国战略，推动能源技术革命，实现我国从能源生产消费大国向能源技术强国战略转变。

（二）基本原则

坚持自主创新。必须把自主创新摆在能源科技创新的核心位置，加强能源领域基础研究，强化原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新，重视颠覆性技术创新。

坚持市场导向。发挥市场在科技创新资源配置中的决定性作用，强化企业创新主体地位和主导作用，促进创新资源高效合理配置。加快政府职能从研发管理向创新服务转变。

坚持重点突破。坚持问题导向，瞄准制约能源发展和可能取得革命性突破的关键和前沿技术，依托重大能源工程开展试验示范，推动能源技术创新能力显著提升。

坚持统筹协调。健全政产学研用协同创新机制，鼓励重大技术研发、重大装备研制、重大示范工程和技术创新平台四位一体创新，坚持统筹国际国内能源科技开放式创新。

（三）总体目标

到 2020 年，能源自主创新能力大幅提升，一批关键技术取得重大突破，能源技术装备、关键部件及材料对外依存度显著降低，

我国能源产业国际竞争力明显提升，能源技术创新体系初步形成。

到 2030 年，建成与国情相适应的完善的能源技术创新体系，能源自主创新能力全面提升，能源技术水平整体达到国际先进水平，支撑我国能源产业与生态环境协调可持续发展，进入世界能源技术强国行列。

三、重点任务

（一）煤炭无害化开采技术创新。加快隐蔽致灾因素智能探测、重大灾害监控预警、深部矿井灾害防治、重大事故应急救援等关键技术装备研发及应用，实现煤炭安全开采。加强煤炭开发生态环境保护，重点研发井下采选充一体化、绿色高效充填开采、无煤柱连续开采、保水开采、采动损伤监测与控制、矿区地表修复与重构等关键技术装备，基本建成绿色矿山。提升煤炭开发效率和智能化水平，研发高效建井和快速掘进、智能化工作面、特殊煤层高回收率开采、煤炭地下气化、煤系共伴生资源综合利用等技术，重点煤矿区基本实现工作面无人化，全国采煤机械化程度达到 95%以上。

（二）非常规油气和深层、深海油气开发技术创新。深入开展页岩油气地质理论及勘探技术、油气藏工程、水平井钻完井、压裂改造技术研究并自主研发钻完井关键装备与材料，完善煤层气勘探开发技术体系，实现页岩油气、煤层气等非常规油气的高效开发，保障产量稳步增长。突破天然气水合物勘探开发基础理论和关键技术，开展先导钻探和试采试验。掌握深-超深层油气勘探开发关键

技术，勘探开发埋深突破 8000 米领域，形成 6000~7000 米有效开发成熟技术体系，勘探开发技术水平总体达到国际领先。全面提升深海油气钻采工程技术水平及装备自主建造能力，实现 3000 米、4000 米超深水油气田的自主开发。

（三）煤炭清洁高效利用技术创新。加强煤炭分级分质转化技术创新，重点研究先进煤气化、大型煤炭热解、焦油和半焦利用、气化热解一体化、气化燃烧一体化等技术，开展 3000 吨/天及以上煤气化、百万吨/年低阶煤热解、油化电联产等示范工程。开发清洁燃气、超清洁油品、航天和军用特种油品、重要化学品等煤基产品生产新工艺技术，研究高效催化剂体系和先进反应器。加强煤化工与火电、炼油、可再生能源制氢、生物质转化、燃料电池等相关能源技术的耦合集成，实现能量梯级利用和物质循环利用。研发适用于煤化工废水的全循环利用“零排放”技术，加强成本控制和资源化利用，完成大规模工业化示范。进一步提高常规煤电参数等级，积极发展新型煤基发电技术，全面提升煤电能效水平；研发污染物一体化脱除等新型技术，不断提高污染控制效率、降低污染控制成本和能耗。

（四）二氧化碳捕集、利用与封存技术创新。研究 CO₂ 低能耗、大规模捕集技术，研究 CO₂ 驱油利用与封存技术、CO₂ 驱煤层气与封存技术、CO₂ 驱水利用与封存技术、CO₂ 矿化发电技术 CO₂ 化学转化利用技术、CO₂ 生物转化利用技，研究 CO₂ 矿物转化、固定和利用技术，研究 CO₂ 安全可靠封存、监测及运输技术，建设百万吨

级 CO₂ 捕集利用和封存系统示范工程,全流量的 CCUS 系统在电力、煤炭、化工、矿物加工等系统获得覆盖性、常规性应用,实现 CO₂ 的可靠性封存、监测及长距离安全运输。

(五) 先进核能技术创新。开展深部及非常规铀资源勘探开发利用技术研究,实现深度 1000 米以内的可地浸砂岩开发利用,开展黑色岩系、盐湖、海水等低品位铀资源综合回收技术研究。实现自主先进核燃料元件的示范应用,推进事故容错燃料元件(ATF)、环形燃料元件的辐照考验和商业运行,具备国际领先核燃料研发设计能力。在第三代压水堆技术全面处于国际领先水平基础上,推进快堆及先进模块化小型堆示范工程建设,实现超高温气冷堆、熔盐堆等新一代先进堆型关键技术设备材料研发的重大突破。开展聚变堆芯燃烧等离子体的实验、控制技术和聚变示范堆 DEMO 的设计研究。

(六) 乏燃料后处理与高放废物安全处理处置技术创新。推进大型商用水法后处理厂建设,加强先进燃料循环的干法后处理研发与攻关。开展高放废物处置地下实验室建设、地质处置及安全技术研究,完善高放废物地质处置理论和技术体系。围绕高放废液、高放石墨、 α 废物处理,以及冷坩埚玻璃固化高放废物处理等方面加强研发攻关,争取实现放射性废物处理水平进入先进国家行列。研究长寿命次锕系核素总量控制等放射性废物嬗变技术,掌握次临界系统设计和关键设备制造技术,建成外源次临界系统工程性实验装置。

（七）高效太阳能利用技术创新。深入研究更高效、更低成本晶体硅电池产业化关键技术，开发关键配套材料。研究碲化镉、铜铟镓硒及硅薄膜等薄膜电池产业化技术、工艺及设备，大幅提高电池效率，实现关键原材料国产化。探索研究新型高效太阳能电池，开展电池组件生产及应用示范。掌握高参数太阳能热发电技术，全面推动产业化应用，开展大型太阳能热电联供系统示范，实现太阳能综合梯级利用。突破太阳能热化学制备清洁燃料技术，研制出连续性工作样机。研究智能化大型光伏电站、分布式光伏及微电网应用、大型光热电站关键技术，开展大型风光热互补电站示范。

（八）大型风电技术创新。研究适用于 200~300 米高度的大型风电系统成套技术，开展大型高空风电机组关键技术研究，研发 100 米级及以上风电叶片，实现 200~300 米高空风力发电推广应用。深入开展海上典型风资源特性与风能吸收方法研究，自主开发海上风资源评估系统。突破远海风电场设计和建设关键技术，研制具有自主知识产权的 10MW 级及以上海上风电机组及轴承、控制系统、变流器、叶片等关键部件，研发基于大数据和云计算的海上风电场集群运控并网系统，实现废弃风电机组材料的无害化处理与循环利用，保障海上风电资源的高效、大规模、可持续开发利用。

（九）氢能与燃料电池技术创新。研究基于可再生能源及先进核能的制氢技术、新一代煤催化气化制氢和甲烷重整/部分氧化制氢技术、分布式制氢技术、氢气纯化技术，开发氢气储运的关键材料及技术设备，实现大规模、低成本氢气的制取、存储、运输、应

用一体化，以及加氢站现场储氢、制氢模式的标准化和推广应用。研究氢气/空气聚合物电解质膜燃料电池（PEMFC）技术、甲醇/空气聚合物电解质膜燃料电池（MFC）技术，解决新能源动力电源的重大需求，并实现 PEMFC 电动汽车及 MFC 增程式电动汽车的示范运行和推广应用。研究燃料电池分布式发电技术，实现示范应用并推广。

（十）生物质、海洋、地热能利用技术创新。突破先进生物质能源与化工技术，开展生物航油(含军用)、纤维素乙醇、绿色生物炼制大规模产业化示范，研究新品种、高效率能源植物，建设生态能源农场，形成先进生物能源化工产业链和生物质原料可持续供应体系。加强海洋能开发利用，研制高效率的波浪能、潮流能和温(盐)差能发电装置，建设兆瓦级示范电站，形成完整的海洋能利用产业链。加强地热能开发利用，研发水热型地热系统改造及增产技术，突破干热岩开发关键技术装备，建设兆瓦级干热岩发电和地热综合梯级利用示范工程。

（十一）高效燃气轮机技术创新。深入研究燃气轮机先进材料与智能制造、机组设计、高效清洁燃烧等关键技术，开展燃气轮机整机试验，突破高温合金涡轮叶片和设计技术等燃气轮机产业发展瓶颈，自主研制先进的微小型、工业驱动用中型燃气轮机和重型燃气轮机，全面实现燃气轮机关键材料与部件、试验、设计、制造及维修维护的自主化。

（十二）先进储能技术创新。研究太阳能光热高效利用高温储

热技术、分布式能源系统大容量储热（冷）技术，研究面向电网调峰提效、区域供能应用的物理储能技术，研究面向可再生能源并网、分布式及微电网、电动汽车应用的储能技术，掌握储能技术各环节的关键核心技术，完成示范验证，整体技术达到国际领先水平，引领国际储能技术与产业发展。积极探索研究高储能密度低保温成本储能技术、新概念储能技术（液体电池、镁基电池等）、基于超导磁和电化学的多功能全新混合储能技术，争取实现重大突破。

（十三）现代电网关键技术创新。掌握柔性直流输配电技术、新型大容量高压电力电子元器件技术；开展直流电网技术、未来电网电力传输技术的研究和试验示范；突破电动汽车无线充电技术、高压海底电力电缆关键技术，并推广应用；研究高温超导材料等能源装备部件关键技术和工艺。掌握适合电网运行要求的低成本、量子级的通信安全工程应用技术，实现规模化应用。研究现代电网智能调控技术，开展大规模可再生能源和分布式发电并网关键技术研究示范；突破电力系统全局协调调控技术，并示范应用；研究能源大数据条件下的现代复杂大电网的仿真技术；实现微电网/局域网与大电网相互协调技术、源-网-荷协调智能调控技术的充分应用。

（十四）能源互联网技术创新。能源互联网是一种互联网与能源生产、传输、存储、消费以及能源市场深度融合的能源产业发展新业态。推动能源智能生产技术创新，重点研究可再生能源、化石能源智能化生产，以及多能源智能协同生产等技术。加强能源智能传输技术创新，重点研究多能协同综合能源网络、智能网络的协同

控制等技术，以及能源路由器、能源交换机等核心装备。促进能源智能消费技术创新，重点研究智能用能终端、智能监测与调控等技术及核心装备。推动智慧能源管理与监管手段创新，重点研究基于能源大数据的智慧能源精准需求管理技术、基于能源互联网的智慧能源监管技术。加强能源互联网综合集成技术创新，重点研究信息系统与物理系统的高效集成与智能化调控、能源大数据集成和安全生产、储能和电动汽车应用与管理以及需求侧响应等技术，形成较为完备的技术及标准体系，引领世界能源互联网技术创新。

（十五）节能与能效提升技术创新。加强现代化工业节能技术创新，重点研究高效工业锅（窑）炉、新型节能电机、工业余热深度回收利用以及基于先进信息技术的工业系统节能等技术并开展工程示范。开展建筑工业化、装配式住宅，以及高效智能家电、制冷、照明、办公终端用能等新型建筑节能技术创新。推动高效节能运输工具、制动能量回馈系统、船舶推进系统、数字化岸电系统，以及基于先进信息技术的交通运输系统等先进节能技术创新。加强能源梯级利用等全局优化系统节能技术创新，开展散煤替代等能源综合利用技术研究及示范，对我国实现节能减排目标形成有力支撑。

以上各项重点任务分解为若干具体技术创新行动，详见附件。

四、政策保障

（一）完善能源技术创新环境。建立健全能源领域相关法律法规及科技成果转化、知识产权保护、标准化等配套政策法规。加强

能源技术创新文化建设，培育多元包容、尊重创新、宽容失败、良性竞争的科研文化。完善能源新技术、新模式等知识产权创造、运用、管理、保护机制。完善能源技术标准体系，推动能源自主创新成果及时转化为标准。建立健全能源技术装备标准、检测、认证和质量监督组织体系，保障能源技术装备质量。加强能源技术创新成果使用、处置和收益管理，强化对能源技术创新成果转化的激励。完善以能力和贡献为导向的能源技术人才评价和激励机制。完善能源技术项目全生命周期闭环评价体系，加强事中事后监管和服务，突出创新绩效评价。

（二）激发企业技术创新活力。建立健全企业主导的能源技术创新机制。激发企业创新内生动力，培育一批具有国际竞争力的能源技术创新领军企业，推动企业成为能源技术与能源产业紧密结合的重要创新平台。健全国有能源企业技术创新经营业绩考核制度，加大技术创新在国有能源企业经营业绩考核中的比重，切实推动国有能源企业成为重大能源技术装备研制和工程应用的主体。鼓励民营企业开展能源技术创新，积极承担国家能源技术创新任务。完善能源领域中小微企业创业孵化等创新服务体系，鼓励能源领域中小微企业加大研发力度，激发“大众创业、万众创新”良好局面。鼓励围绕重点和新兴能源技术领域构建以企业为主导、产学研合作的产业技术创新联盟。

（三）夯实能源技术创新基础。深化能源领域科研院所分类改革和高等学校科研体制机制改革，强化科研院所和高等院校的源头

创新主力军地位，依托国家重点实验室加强能源技术创新基础研究和重大战略研究，提升原始创新能力。依托骨干能源企业、高校和科研院所建设一批国家能源技术创新平台，探索建立新型的组织结构和运行机制。完善能源领域军民技术融合政策制度，加速核能、航空航天等领域符合条件的军用技术向能源领域转化应用。组织实施能源技术人才培养计划，完善从研发、转化、生产到管理的人才培养体系。抓好高层次骨干人才培养，引进和培养一批站在世界能源技术前沿、勇于创新的技术带头人。培育一批具有宏观战略思维和市场思维的复合型管理人才。

（四）完善技术创新投融资机制。加强中央预算内资金和政府性基金对能源技术创新的支持力度。深化科技计划（专项、基金）管理改革，强化对能源重点领域技术研发和示范应用的支持。推动企业成为能源技术研发投入主体，鼓励企业自主投入开展能源重大关键共性技术、装备和标准的研发攻关。研究设立能源产业科技创新投资基金，支持能源科技示范工程建设和企业技术改造。引导风险投资、私募股权投资等支持能源技术创新。深化金融领域改革，拓宽能源技术创新融资渠道，降低融资成本。积极发挥政策性金融、开发性金融和商业金融的优势，加大对能源技术重点领域的支持力度。

（五）创新税收价格保险支持机制。实施有利于能源技术创新的税收政策，完善能源企业研发费用计核方法，切实减轻能源企业税收负担。研究按照“一案一策”的原则，针对能源技术创新示范

工程落实资源、能源、土地等要素和产品价格优惠政策，促进先进能源技术创新成果的工程应用。完善首台（套）重大能源技术装备支持政策，推进保险补偿机制，研究使用首台（套）装备的优惠政策，加快重大能源技术装备自主化。

（六）深化能源科技国际合作交流。制定能源技术创新国际化战略，积极开展全方位、多层次、高水平的能源技术国际合作。充分利用国际国内能源技术资源，积极融入全球创新网络，提升我国对全球能源技术战略资源配置的掌控能力。相关部门在国际合作交流中，注重在技术合作、知识产权、跨国并购等方面为企业搭建沟通和对话平台。鼓励能源企业、高校和科研机构与国外相关机构开展联合技术创新。结合“一带一路”战略实施，依托重大能源项目，推动我国先进能源技术、装备和标准“走出去”。

五、组织实施

（一）加强组织领导。进一步发挥国家能源委员会在能源技术创新中的统筹协调作用，建立和完善工作会商制度和协调机制，分解任务，明确责任，加强协同配合，确保行动计划各项任务落到实处。发展改革委、能源局重点负责组织实施能源技术创新示范工程。各有关部门根据职能做好相关支持配合工作。各地区要结合本地区特点和发展需求，制定相关配套政策文件，为能源技术创新及相关示范工程建设提供有利条件，切实推动本地区能源技术进步。

（二）组织开展工程试验示范。针对重点技术创新行动，研究设立国家能源技术创新试验示范依托工程，按照公平、公正、公开

原则，通过竞争性机制确定示范工程牵头承担单位。建立国家能源技术创新示范项目跟踪监测和协调服务平台，对示范项目开展全过程、全周期跟踪和服务。按技术领域建立专家组和咨询服务指导机制，对示范效果进行及时评价和总结，并提出推广应用建议。

（三）完善评价机制。建立健全动态评估机制，强化《国家能源技术革命创新行动计划（2016-2030 年）》实施的跟踪监测、科学评估和督促检查，定期对相关战略目标、计划执行等情况进行科学评估评价，及时协调解决行动计划实施过程中遇到的问题。根据能源技术发展形势动态修订行动计划。

（四）做好配套衔接工作。在实施《能源技术革命创新行动计划（2016-2030 年）》中，要加强与《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》、国家科技专项规划、《中国制造 2025》等战略规划的衔接配合，积极推荐重大能源技术创新项目列入国家相关创新专项规划，相互支撑，互为补充，形成共同推进行动落实的良好局面，切实推动我国能源技术革命。

附：

能源技术革命重点创新行动路线图

一、煤炭无害化开采技术创新..... 1

二、非常规油气和深层、深海油气开发技术创新.....5

三、煤炭清洁高效利用技术创新..... 11

四、二氧化碳捕集、利用与封存技术创新..... 18

五、先进核能技术创新..... 23

六、乏燃料后处理与高放废物安全处理处置技术创新.....28

七、高效太阳能利用技术创新..... 33

八、大型风电技术创新..... 39

九、氢能与燃料电池技术创新..... 45

十、生物质、海洋、地热能利用技术创新..... 49

十一、高效燃气轮机技术创新..... 55

十二、先进储能技术创新..... 59

十三、现代电网关键技术创新..... 64

十四、能源互联网技术创新..... 69

十五、节能与能效提升技术创新..... 74

一、煤炭无害化开采技术创新

（一）战略方向

1. 煤炭资源安全高效智能开发。重点在煤炭开采隐蔽灾害探查、重大灾害综合治理、应急救援技术及装备、煤系共生伴生资源综合高效开发利用、煤炭资源回收率提高、煤炭智能开采、地下气化开采等方面开展研发与攻关。

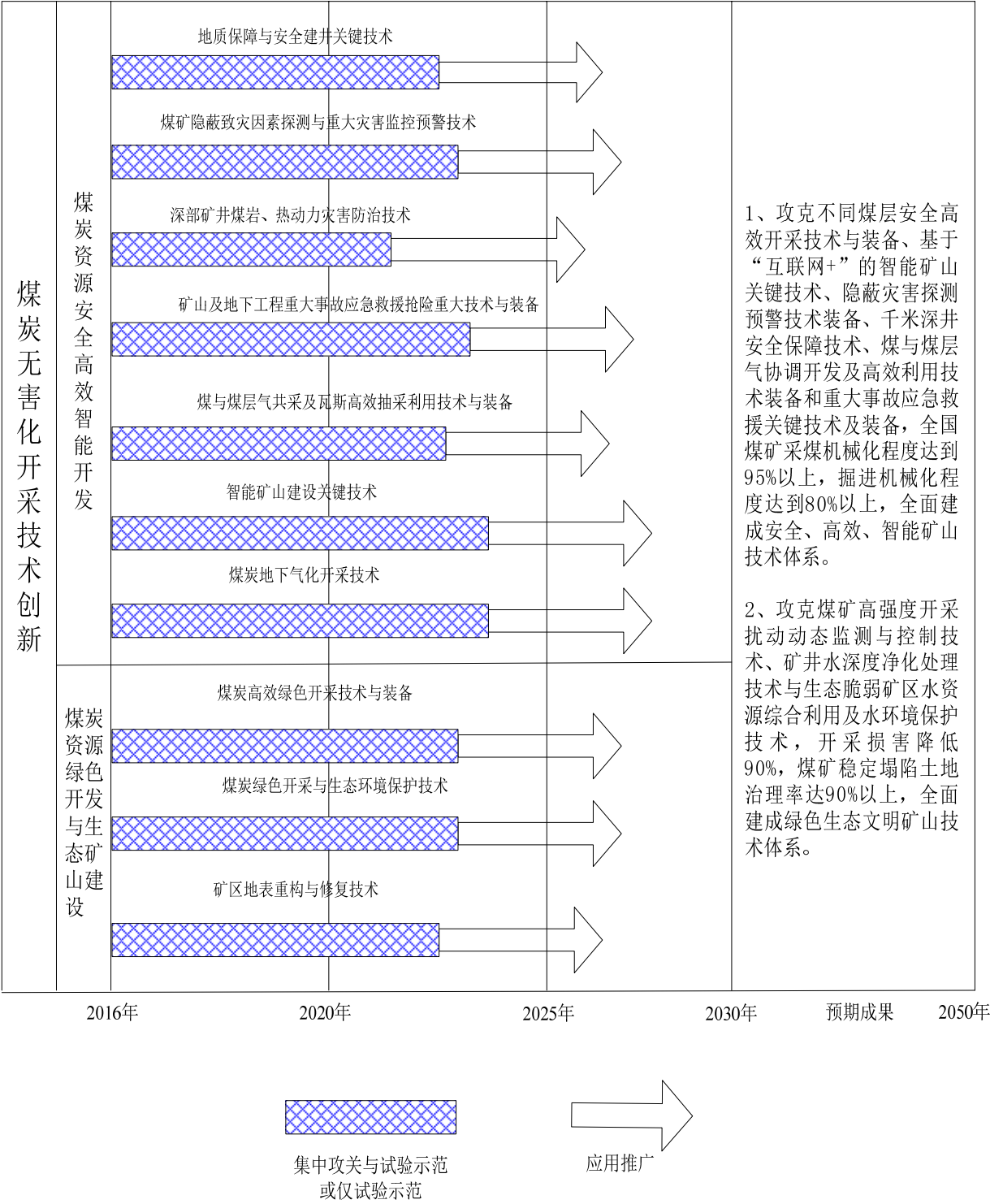
2. 煤炭资源绿色开发与生态矿山建设。重点在绿色高效充填开采、绿色高效分选技术与装备、采动损伤监测与控制、采动塌陷区治理与利用、保水开采、矿井水综合利用及深度净化处理、生态环境治理等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。煤炭安全绿色、高效智能开采技术水平大幅提升。大中型矿区基本实现安全绿色开采，原煤入洗率达到 80%，采动环境损害降低 70%以上，煤矿稳定塌陷土地治理率达到 85%以上；基本实现智能开采，机械装备及智能化控制系统在煤炭生产上全覆盖，重点煤矿区采煤工作面人数减少 50%以上，全国煤矿采煤机械化程度达到 90%以上，掘进机械化程度达到 65%以上；单个气化矿井年气化 50 万吨煤炭。

2. 2030 年目标。煤炭实现科学产能。实现煤炭安全开采；基本建成绿色矿山，原煤入洗率达到应洗尽洗，采动环境损伤降低 90%以上，煤矿稳定塌陷土地治理率达到 90%以上；实现智能化开采，

煤炭无害化开采技术创新路线图



重点煤矿区基本实现工作面无人化、顺槽集中控制，全国煤矿采煤机械化程度达到 95%以上，掘进机械化程度达到 80%以上；规模化地下气化开采矿井实现工业示范。

3. 2050 年展望。全面建成安全绿色、高效智能矿山技术体系，实现煤炭安全绿色、高效智能生产。

（三）创新行动

1. 地质保障与安全建井关键技术。研究西部煤田地质勘探技术、大深度和智能化的地质钻探技术及装备、直升机时间域航空电磁技术、无人机航磁技术、环境地质和灾害地质的评价及煤矿安全地质保障技术；研究千米冲积层立井施工、西部弱胶结软弱岩层钻井法凿井和大斜长沿轴线斜井冻结等安全建井关键技术。

2. 隐蔽致灾因素智能探测及重大灾害监控预警技术。研发煤矿水害、火灾、瓦斯、顶板及冲击地压等主要灾害隐蔽致灾因素智能探测技术与装备，研究重大灾害危险源及前兆信息识别与自分析评价技术，研发事故隐患相关基础参数、工程参数、人员及设备运行状态与故障参数等信息监测技术及装备，以及重大灾害智能预警技术。

3. 深部矿井煤岩、热动力灾害防治技术。研发深部矿井采场及围岩控制技术与装备、以区域卸压增透和致裂卸压增透为主的深部矿井煤岩瓦斯灾害治理技术及装备，研发以阻化泥浆和液氮为主的深部矿井自然发火综合防治技术、工艺与装备；研究以集中降温和局部降温为主的深部矿井热害综合治理技术。

4. 矿山及地下工程重大事故应急救援技术及装备。研发煤矿重大事故灾区高可靠性无人侦测技术、救援通道快速构建技术及装备、灾变环境应急通讯及遇险人员搜求技术与装备，以及分布式联合仿真救援培训演练系统与综合管理信息平台。

5. 煤炭高效开采及智能矿山建设关键技术。研发煤矿智能化工作面成套技术及装备、巷道高效快速掘进技术与装备，以及薄和较薄、大倾角-急倾斜及特厚的煤层高效高回收率开采技术与装备；研发千万吨级矿井大型提升装备、煤矿智能供配电与节能技术；研究矿山海量数据存储管理和并行分析技术、基于云服务和大数据技术的煤矿智能预测和决策系统，以及矿业感知、管控、诊断与维护技术。

6. 与煤系共伴生资源综合利用技术。研究煤矿区煤炭及伴生资源条件探测和精细识别技术，以及矿井水井下储存、深度净化处理、综合利用与水环境保护技术；研发西部煤田控火及热能利用技术、煤与煤层气共采及瓦斯高效抽采利用技术与装备；开发“煤-水-气-热-铀”多资源共采关键技术。

7. 煤炭绿色开采与生态环境保护技术。研发井下采选充一体化技术及装备、绿色结构充填控制岩层沉陷关键技术，以及大型露天矿连续、半连续开采工艺生产系统关键技术与装备。开展无煤柱连续开采、保水开采、矿区环境遥感监测、采动损伤监测与控制、高强度大规模开采、西部浅埋煤层开采覆岩移动与控制等技术研究，研发毛煤井下分选与矸石井下充填处置技术与装备。

8. 煤炭高效分选关键技术与装备。研发煤炭精细化重介质分选技术、高效干法选煤技术、煤炭产品质量监测与选煤过程智能控制技术、千万吨/年模块化洗选技术与装备，以及矿区煤泥综合利用技术。

9. 矿区地表修复与重构技术。研究煤炭开采与城镇化建设协调开发技术、煤炭高强度开采沉陷与生态演变精准监测及修复治理技术，以及赤泥与煤矸石混合堆存技术；研发矿区地貌、土壤、植被、水体重构和景观再造技术。

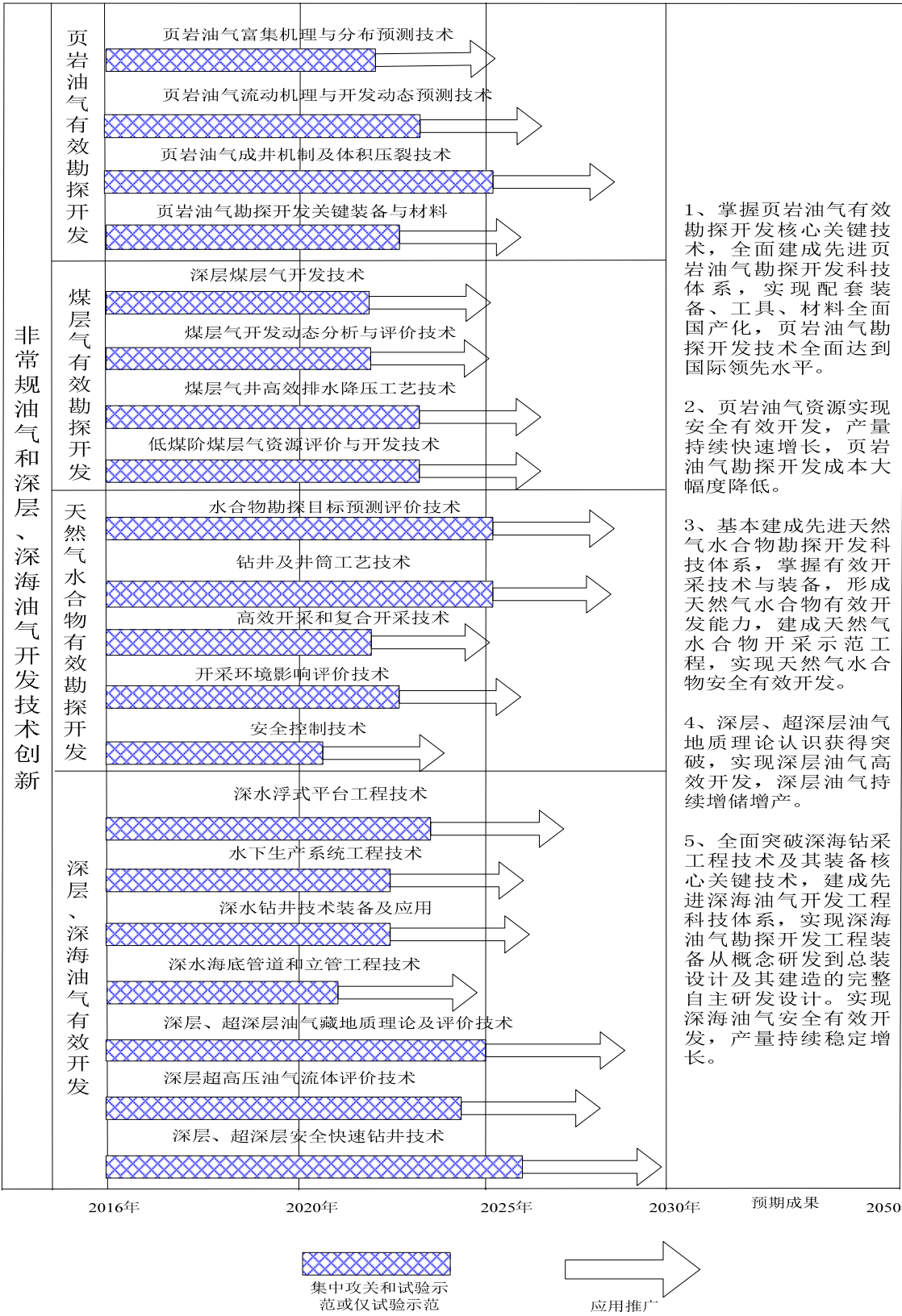
10. 煤炭地下气化开采技术。研究气化煤层的赋存条件判识，以及高可靠性的地下气化炉燃烧工作面位置监测方法，研发拉管法后退式注气装备与工艺，以及地下气化的燃空区充填及气化工作面组的接替技术与工艺。

二、非常规油气和深层、深海油气开发技术创新

（一）战略方向

1. 非常规油气勘探开发。重点在页岩油气赋存机理、资源和选区评价等基础理论与技术，页岩油气藏地质建模、动态预测和开采工艺，页岩油气长水平井段水平井钻完井及压裂改造技术和关键装备等方面开展研发与攻关；在深层煤层气开发、复杂储层煤层气高效增产、低阶煤层气资源评价与开发、煤层气开发动态分析与评价，以及煤层气井高效排水降压工艺等方面开展研发与攻关；在天然气水合物勘探目标预测及评价、钻井及井筒工艺、高效开采，以及环境影响评价和安全控制等方面开展研发与攻关。

非常规油气和深层、深海油气开发技术创新路线图



2. 深层油气勘探开发。重点在深-超深层油气成藏地质理论及评价、储层地震预测及安全快速钻井、深层超高压油气流体评价，以及复杂储集层深度改造和开发配套等方面开展研发与攻关。

3. 深海油气开发与装备。重点在深远海复杂海况下的浮式钻井平台工程、水下生产系统工程、海底管道与立管工程、深水流动安全保障与控制、深水钻井技术与装备，以及基于全生命周期经济性的开发技术评价及优选等方面开展研发与攻关。

(二) 创新目标

1. 2020 年目标。在非常规油气勘探开发方面，初步明确页岩油气富集机理、流动机理，建立页岩油气资源与选区评价、储层微观孔隙结构表征、页岩含气量准确测定、页岩气测井综合评价、甜点地球物理预测、产能预测、长水平段水平井钻完井及分段压裂技术，陆相页岩油气地质与工程应用基础研究取得进展，主要装备、工具、材料基本实现自主化生产，单井成本降低 10%以上，页岩油气勘探开发技术体系总体达到国际先进水平；主要煤层气基地直井平均产量达到 2500 方/天，水平井产量达到 15000 方/天，实现高煤阶煤层气高效开采；油页岩地面干馏收油率达到 90%以上、尾料利用率达到 80%以上，地下原位裂解技术实现产业化，建成 3~5 个示范工程；落实冻土区和海域天然气水合物资源潜力，建成 2~3 个先导开采试验区。在深层油气勘探开发方面，形成深层油气成藏地质理论体系，勘探开发技术体系完善，且总体上都达到国际先进水平；初步形成埋深 7000 米以上深层油气开发技术。在深海油气勘探开发

方面，形成具有自主知识产权的深海油气田开发工程技术体系，自主建造效率更高、能耗更低的第七代超深水半潜平台，形成自主开发 3000 米深水大型油气田工程技术能力。

2. 2030 年目标。在非常规油气勘探开发方面，查明不同类型页岩油气富集机理、开发机理、流固耦合机理，形成适合于中国地质特点的页岩油气资源与选区评价、储层微观孔隙结构表征、页岩含气量准确测定、页岩油气测井综合评价、甜点地球物理预测、产能预测、长水平井段水平井钻完井及分段压裂等技术，配套装备、工具、材料国产化率达到 80%以上，水平井钻完井及压裂改造费用大幅度降低，部分技术达到国际领先水平，实现海相页岩气的高效开发和陆相页岩油气的有效开发；实现低煤阶煤层气选区动用；形成天然气水合物有效开发能力，初步建成天然气水合物试验基地。在深层油气勘探开发方面，技术水平总体达到国际领先且技术趋于成熟；深-超深层油气资源有效开发，勘探开发埋深突破 8000 米领域，形成 6000~7000 米有效开发成熟技术体系。在深海油气勘探开发方面，深海油气勘探开发技术水平总体达到国际领先且技术趋于成熟；实现深远海油气田工程技术有效开发达到 4000 米水深，深海油气勘探、钻井以及开发生产关键工程技术与装备完全国产化。

3. 2050 年展望。全面建成先进的页岩油气科技体系，配套的装备、工具、材料全面实现国产化，页岩油气资源实现高效开发，产量持续快速增长，页岩油气勘探开发技术全面达到国际领先水平，页岩油气勘探开发成本大幅度降低。全面建成深层油气科技创新体

系。全面突破深远海钻采工程技术与装备自主制造能力，建成先进深远海油气开发工程科技体系。非常规和深层、深海油气资源全面高效开发，产量持续快速增长，成为我国油气产量主力。

（三）创新行动

1. 页岩油气富集机理与分布预测技术。针对我国海、陆相页岩层系特点，研究页岩油气赋存机理与分布规律，开展页岩储层微观孔隙结构定量表征、页岩含气量测定、页岩油可流动性评价、页岩油气资源评价与选区评价、页岩油气测井综合评价和“甜点”地球物理预测技术等研究，形成适合于我国地质特点的页岩油气地质理论与勘探技术体系。

2. 页岩油气流动机理与开发动态预测技术。针对我国页岩油气藏的地质特点，以油气藏精细描述和地质建模研究为基础，借助现代油藏工程的技术手段，开展页岩油气多尺度耦合流动机理、物理模拟、产能预测和动态分析方法、数值模拟技术等基础研究，揭示页岩油气藏开发过程中的流动规律，发展页岩油气藏工程理论和技术方法，为页岩油气高效开发提供理论和技术支撑。

3. 页岩油气成井机制及体积压裂技术。开展高精度长水平段水平井钻完井、增产改造与测试工艺技术研究，重点研发海相深层页岩气水平井优快钻井与压裂改造技术、陆相页岩油气长水平段水平井钻完井与压裂改造技术、无水压裂技术、重复压裂技术，实现不同类型（海相、陆相、海陆过渡相）、不同深度（3500 米以浅、3500 米以深）页岩油气高效开发。

4. 页岩油气勘探开发关键装备与材料。针对页岩储层低孔、特低渗特点，研发适合于不同类型页岩的长水平段水平井钻完井关键装备、工具、钻井金属材料、油基钻井液和弹塑性水泥浆体系，开发制备低磨阻、低伤害、低成本的滑溜水压裂液体系 and 高效携砂、低伤害的冻胶压裂液体系，开展压裂返排液再利用技术研究，形成适合于中国页岩油气地质特点的钻完井关键装备、工具及材料，提高国产化比例，大幅度降低钻完井成本，实现页岩油气的高效开发。

5. 煤层气资源有效勘探开发技术。开展超低渗透煤储层改造技术、多煤层煤层气合采技术、深层煤层气开发技术、复杂储层煤层气高效增产技术、低煤阶煤层气资源评价与开发技术、煤层气开发动态分析与评价技术和煤层气井高效排水降压工艺技术等研究，保障我国煤层气产量稳步增长。

6. 天然气水合物勘探开发技术。研究水合物勘探目标预测评价技术、钻井及井筒工艺技术、高效开采和复合开采技术、安全控制技术、开采环境监测技术，建设天然气水合物开采示范工程，掌握有效开采技术，实现天然气水合物安全高效开发。

7. 深层油气高效勘探开发技术。开展深层-超深层油气成藏地质理论及评价技术、深层-超深层油气储层地震预测技术、深层超高压油气流体评价技术、深层复杂储集层深度改造与开发配套技术，以及深-超深层安全快速钻井技术等研究，实现深层油气高效开发。

8. 深海油气有效勘探开发技术与装备。开展深远海浮式钻井平

台工程技术、水下生产系统工程技术、深水海底管道和立管工程技术、深水流动安全保障与控制技术，以及深水大载荷采油装备关键设备轻量化技术、深水油气田全生命周期监测技术研究。研发水深3000米领域油气资源的勘探开发技术与装备，建设海洋深水油气配套产业链。构建基于海洋工程大数据的全景式全生命周期应用研究技术。全面提升海洋工程装备从概念研发到总装设计及其建造的完整自主研发设计能力。

9. 海洋油气开发安全环保技术。研发海底管道运行监测技术、海洋油气泄漏应急处理技术与装备。针对深远海作业，开展海工装备零排放技术、节能技术，健康、安全与环境管理体系（HSE）分析，以及海底油气设备安全监测技术等研究。

10. 非常规及深海油气高效转化及储运技术。研究天然气水合物高效储运技术。针对海上及偏远地区油田，重点开展天然气就地高效转化紧凑型高通量转化技术研究。

三、煤炭清洁高效利用技术创新

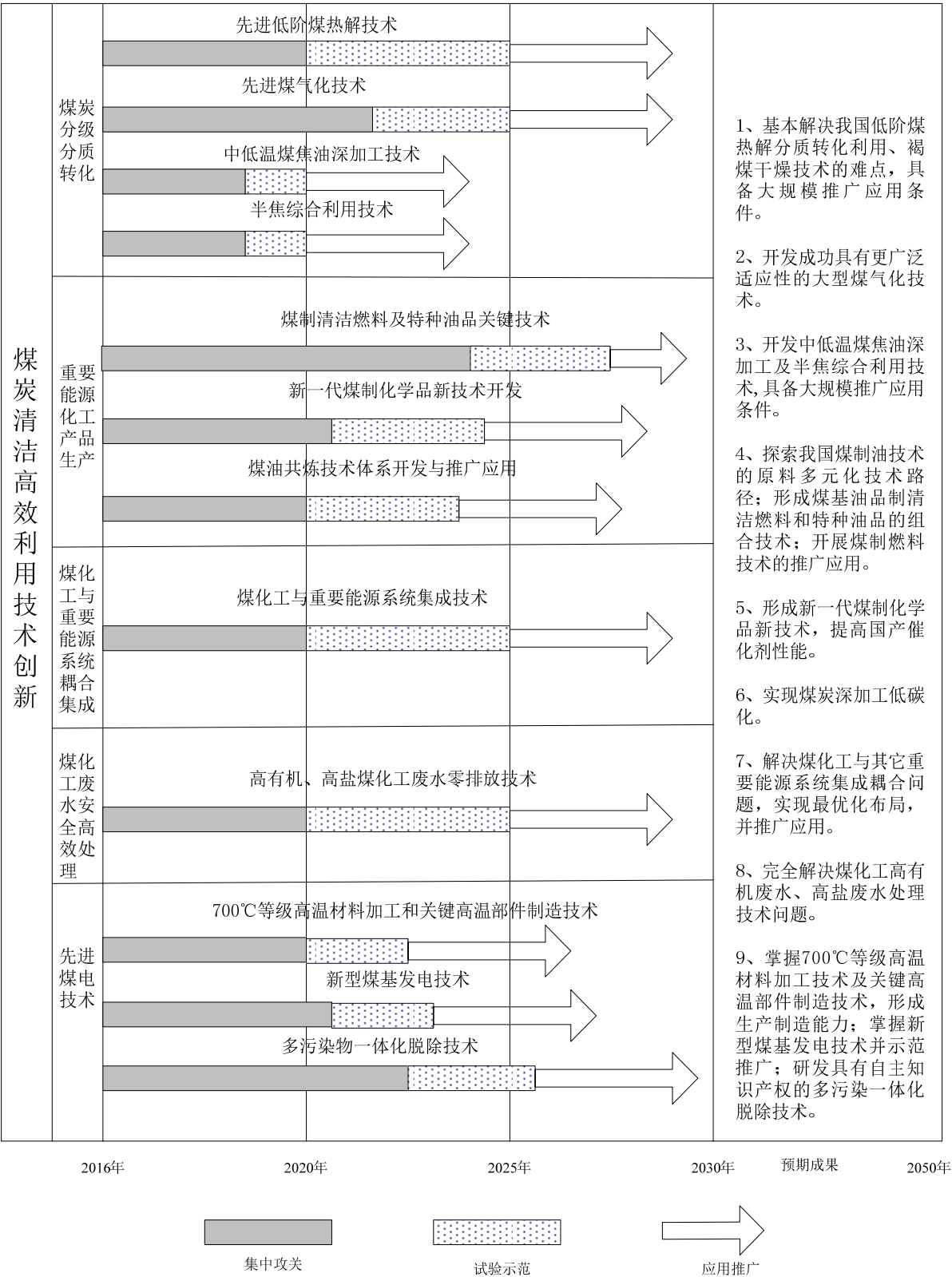
（一）战略方向

1. 煤炭分级分质转化。重点在先进煤气化、大型煤炭热解、加氢液化、焦油和半焦高效转化等方面开展研发与攻关。

2. 重要能源化工产品生产。重点在天然气、超清洁油品、航天和军用特种油品、基础化学品、专用和精细化学品的生产工艺技术等方面开展研发与攻关。

3. 煤化工与重要能源系统耦合集成。重点在与火力发电、炼油、

煤炭清洁高效利用技术创新路线图



可再生能源制氢、生物质转化、燃料电池等系统的耦合集成方面开展研发与攻关。

4. 煤化工废水安全高效处理。重点在提高复杂废水处理能力、降低成本、资源化利用和减少排放等方面开展研发与攻关。

5. 先进煤电技术。重点在常规煤电参数等级进一步提高、新型煤基发电和污染物一体化脱除等方面上开展研发与攻关。

(二) 创新目标

1. 2020 年目标。开发出 3000 吨/天以上大型煤气化技术及煤种适应性强的新一代气化技术；形成成熟的低阶煤热解分质转化技术路线，完成百万吨级工业示范。煤制燃料技术、能效水平进一步提升，掌握成熟高效的百万吨级煤制油及特种油品工业技术和催化剂，完成 10 亿方级自主甲烷化技术开发及工业示范，实现煤制化学品技术的升级和技术集成。突破煤气化废水预处理、改善可生化性、特征污染物降解及深度处理等关键技术，完成废水处理技术工业示范。全面掌握 700℃ 等级高温材料制造和加工技术，掌握新型煤基发电技术，开发和示范燃煤机组烟气多污染物（SO₂、NO_x、Hg 等）一体化脱除技术。

2. 2030 年目标。形成适应不同煤种、系列化的先进煤气化技术体系，突破基于新概念的催化气化、加氢气化等技术。实现百万吨级低阶煤热解转化技术推广应用，突破热解与气化过程集成的关键技术。开发出一批高效率、低消耗、低成本的煤制燃料和化学品新技术并实现工业化应用。突破煤化工与炼油、石化化工、发电、可

再生能源耦合集成技术并完成工业化示范。建设 700℃超超临界燃煤电站，建成新型煤基发电技术示范工程并推广，形成具有自主知识产权的燃煤污染物净化一体化工艺设备成套技术。

3. 2050 年展望。形成完整的煤炭清洁高效利用技术体系，整体达到世界领先水平，煤炭加工转化全生命周期经济、社会和环保效益显著提高，支撑产业实现绿色可持续发展。700℃常规煤电技术供电效率达到 56~60%；掌握磁流体发电联合循环（MHD-CC）发电等探索技术，实现示范应用；全部煤电机组实现低成本污染物超低排放，重金属污染物控制技术全面应用。

（三）创新行动

1. 先进煤气化技术。研发适应于高灰熔点煤的新型超高温气流床气化技术、处理能力 3000 吨级/天以上大型气化炉、千吨级/天连续自动液态排渣床加压气化炉；突破大型流化床加压气化关键技术，开展 2000 吨级/天气化炉工业示范；研制日输送量千吨以上煤气化专用粉煤输送泵；开展新一代煤催化气化和加氢气化技术研究，并推进工业示范。

2. 先进低阶煤热解技术。研发清洁高效的低阶煤热解技术，开展百万吨级工业化示范。加强热解与气化、燃烧的有机集成，开发气化-热解一体化技术和燃烧-热解一体化技术，与燃气循环发电或蒸汽循环发电结合，开展油化电多联产工业示范。研究更高油品收率的快速热解、催化（活化）热解、加压热解和加氢热解等新一代技术。

3. 中低温煤焦油深加工技术。研发煤焦油轻质组分制对二甲苯、中质组分制高品质航空煤油和柴油、重质组分制特种油品的分质转化技术，开展百万吨级工业示范。研究中低温煤焦油提取精酚、吡啶、咔唑等高附加值精细化工产品技术。建设 50 万吨/年中低温煤焦油全馏分加氢制芳烃和环烷基油工业化示范工程。

4. 半焦综合利用技术。研究半焦在民用散烧、工业锅炉、冶金、气化、发电等方面的高效清洁利用技术，完成清洁高效的民用炉灶和工业窑炉燃烧试验、示范及推广；完成半焦用于烧结、高炉喷吹、大型化气流床和固定床气化、粉煤炉和循环流化床锅炉工业化试验、示范及推广。

5. 超清洁油品和特种油品技术。研发温和反应条件下的新一代煤直接液化技术、高温费托合成等新型煤间接液化技术；开发超清洁汽柴油以及军用柴油、大比重航空煤油、火箭柴油等特种油品生产技术；研究煤衍生油预处理、芳香化合物提取、分离及深加工技术。加强煤直接液化与间接液化、高温费托合成与低温费托合成的优化集成，完成百万吨级工业示范。

6. 煤制清洁燃气关键技术。开发煤经合成气完全甲烷化制天然气成套工艺技术，开展 10 亿方/年工业示范。研究煤气化与变换、甲烷化的耦合集成技术，探索一步法煤制天然气技术。开发新一代氢气分离技术，中小型洁净煤气化制工业燃气成套技术。

7. 新一代煤制化学品技术。研发新型的氨、甲醇、煤制烯烃、煤制乙二醇合成技术和催化剂；突破甲醇制芳烃、石脑油与甲醇联

合制烯烃、二甲醚羰基化/乙酸甲酯加氢制乙醇、合成气制高碳伯醇、煤制聚甲氧基二甲醚、甲醇甲苯烷基化制对二甲苯、煤氧热法制电石等技术，并开展大型工业示范。探索合成气一步法制烯烃、乙醇等技术。开展煤制化学品高效催化剂研发、放大与工业制备，设计制造配套的大型工业反应器及其他关键设备。

8. 煤油共炼技术。研究煤油共炼协同反应机理、原料匹配性调控技术，以及新一代高活性、高分散性催化剂制备技术；开发定向转化生产清洁油品、特种油品和芳烃技术；自主研发单台 150 万吨/年大型浆态床加氢反应器、新型高压差减压阀、高压油煤浆输送泵等关键装备；研发含油残渣高效综合利用技术。

9. 煤化工耦合集成技术。研发煤与生物质和垃圾共气化、煤化工制（用）氢系统与风电（太阳能）制氢集成、煤化工与可再生能源电力储能和调峰集成、煤化工与整体煤气化联合循环发电集成、煤化工与燃料电池发电集成、煤化工与二氧化碳捕集、利用与封存集成等关键技术。

10. 高有机、高盐煤化工废水近零排放技术。开发典型污染物高效预处理、可生化性改善、去除特征污染物酚及杂环类和氨氮等高有机废水近零排放关键技术；开发包括臭氧催化氧化的深度处理技术及浓盐水分离、蒸发结晶组合技术；研究废水处理各项技术的优化组合，完善单质结晶盐分离流程和结晶盐利用，开展废水近零排放技术优化和工业示范。进一步研发基于新概念、新原理、新路线的煤化工废水全循环利用“零排放”技术。

11. 700℃等级镍基合金耐热材料生产和关键高温部件制造技术，以及主机和关键辅机制造技术。研发 700℃镍基合金高温材料生产和加工技术，耐热材料大型铸件、锻件的加工制造技术，高温部件焊接材料、焊接工艺及高温材料的检验技术等；研究 700℃机组主辅机关键部件加工制造技术；研发 700℃超超临界发电机组锅炉、汽轮机及关键辅机和阀门国产化制造技术。

12. 新型煤基发电技术。研究 600MW 及以上容量机组褐煤预干燥及水回收高效褐煤发电集成及设备开发技术，实现在 600MW 等级或以上容量机组褐煤高效发电集成技术的工程应用；研发 1000MW 等级超超临界褐煤锅炉配套风扇磨煤机设计制造技术。研究并掌握全燃准东煤锅炉燃烧技术，建设示范工程。

13. 多污染物（SO₂、NO_x、Hg 等）一体化脱除技术。研发自主知识产权的多污染物（SO₂、NO_x、Hg 等）一体化脱除技术，包括研发具有同时吸附多污染物的新型高效吸附剂及高效、低成本氧化剂、氧化工艺与设备、以及高效催化剂等，研发多污染物一体化脱除技术工艺关键装置设计与制造技术，研究工艺流程优化技术等。

14. 煤电技术探索。重点探索研究基于富氧燃烧的超临界二氧化碳布雷顿循环发电及碳捕集技术、整体煤气化燃料电池联合循环（IGFC-CC）发电技术，以及磁流体发电联合循环（MHD-CC）发电技术。

四、二氧化碳捕集、利用与封存技术创新

（一）战略方向

1. CO₂的大规模、低能耗捕集。重点在燃烧后 CO₂ 捕集上实现重大突破，并积极在燃烧前 CO₂ 捕集及富氧燃烧等方面开展研发与攻关。

2. CO₂的大规模资源化利用。重点在 CO₂ 的驱油、驱气、驱水及 CO₂ 的矿化发电和生物化工规模化利用等方面开展研发与攻关。

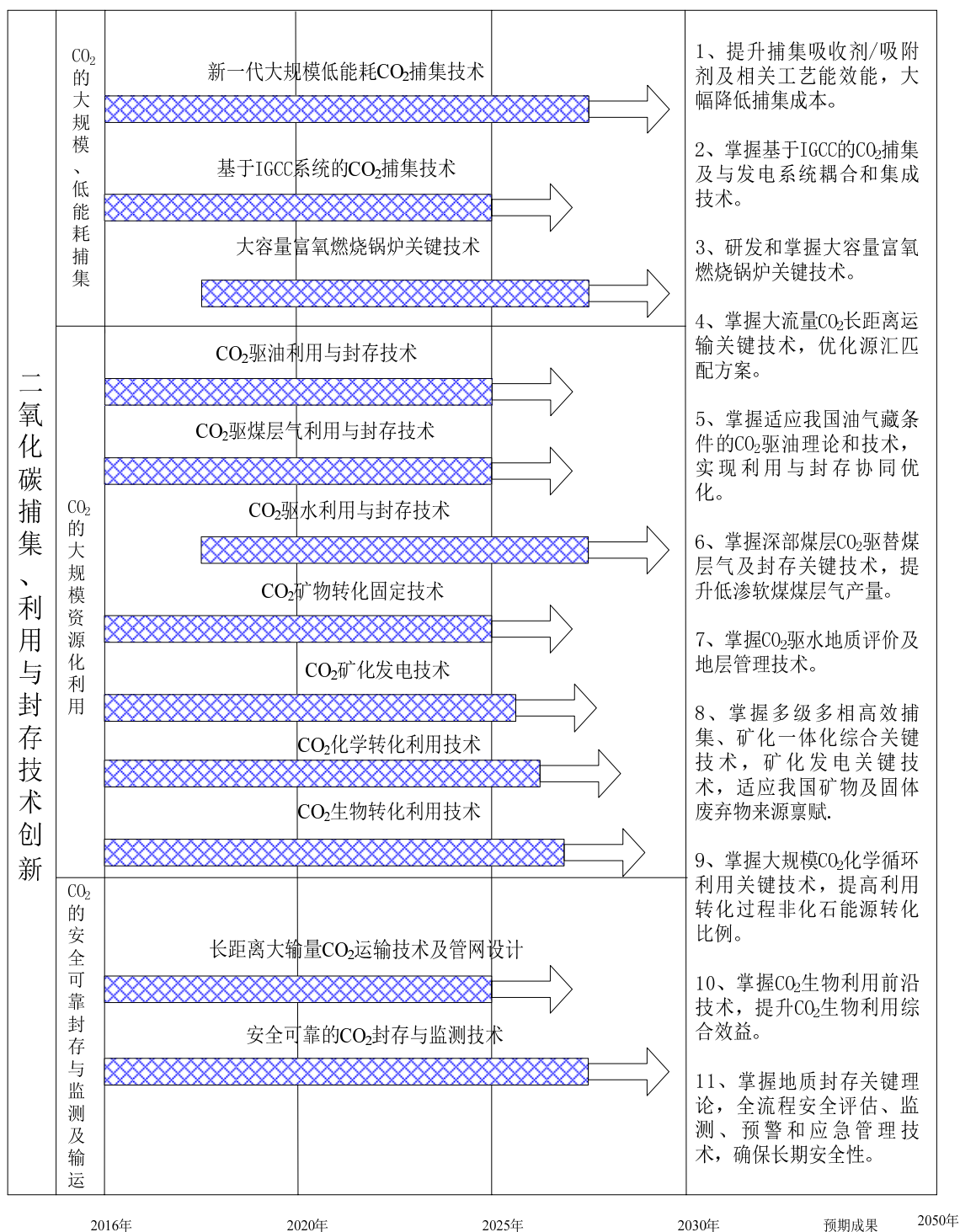
3. CO₂的安全可靠的封存、监测及运输。重点在封存机理、适合我国地质特点的封存理论和工程技术体系建设、全流程的监测和预测（警）、安全高效的 CO₂ 长管道运输及管网优化设计等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。突破低能耗捕集关键材料和工艺，验证基于 IGCC 系统的 CCUS 技术，初步掌握富氧燃烧系统的放大规律和设计方法。集成、配套和完善 CO₂ 综合利用与封存的产业化技术，初步建成涵盖石油、化工、电力、煤炭和生物工程等的 CCUS 技术示范工程。建立封存的监测、核证和计量系统，形成安全环保评价标准；突破 CO₂ 长距离安全运输技术。建成百万吨级全流程 CCUS 技术示范工程。

2. 2030 年目标。燃烧后捕集材料和工艺获得革命性进展，建成基于 IGCC 系统的全流量 CO₂ 捕集示范工程，实现大规模富氧燃烧系统长时间稳定运行。构建涵盖石油、化工、电力、煤炭和生物工

二氧化碳捕集、利用与封存技术创新路线图



集中攻关和试验示范
或仅试验示范

应用推广

程等的 CCUS 技术产业项目集群。建立系统的 CO₂ 地质封存技术规范和安全保障体系，掌握 CO₂ 长距离安全运输技术。商业化碳捕集和封存技术在煤电机组得到应用。

3. 2050 年展望。革命性捕集技术得到产业化应用，CO₂ 减排成本较 2015 年降低 60%以上，经济安全的 CO₂ 捕集和封存技术发展成熟；全流量的 CCUS 系统在电力、煤炭、化工、矿物加工等系统实现覆盖性、常规性应用。

（三）创新行动

1. 新一代大规模低能耗 CO₂ 捕集技术。研究新型高效 CO₂ 吸收（附）剂和材料，以及气、液二次污染物控制技术；研究新型捕集工艺及设备放大技术、吸收和再生过程强化技术、捕集系统与发电系统耦合集成技术，开发核心专有设备；研究 CO₂ 与细微颗粒物、SO₂ 等污染物的协同脱除技术。

2. 基于 IGCC 系统的 CO₂ 捕集技术。研发新型吸附材料和膜分离材料、低能耗 CO₂ 吸收（附）剂、合成气的高效变换技术和净化技术、碳捕集与富氢气体燃烧技术、新型化学链气化技术；研究基于 IGCC 的 CO₂ 捕集系统集成优化技术。

3. 大容量富氧燃烧锅炉关键技术。研究大容量富氧燃烧系统放大技术、大容量富氧燃烧锅炉设计计算方法及工程放大规律、富氧燃烧用大型空分与锅炉系统动态匹配技术，研发适合于富氧燃烧烟气特点的压缩纯化技术（含酸性气体协同处理），以及富氧燃烧全厂系统动态特性、调节控制、节能（水）等技术。

4. CO₂ 驱油利用与封存技术。开发特殊油气藏 CO₂ 驱油技术，研究 CO₂ 与典型油藏混相机理，发展油藏多相多组分相态理论，开发适合驱油封存的调剖技术、混相促进技术、大规模驱油封存场地稳定性评价与控制技术，开发 CO₂ 驱油与封存的动态跟踪与调控技术，优化油藏开采方案及相关配套监测方案。研究 CO₂/油/水多相渗流及油气藏 CO₂ 封存机理，发展封存潜力评价、CO₂ 驱油与封存协同优化方法。

5. CO₂ 驱煤层气与封存技术。研究低渗软煤的流固耦合作用理论，深化驱煤层气 CO₂ 封存潜力的评估方法；突破并验证适合深度 1000 米以上、渗透系数 1mD 以下煤层中驱煤层气的注入性增强技术；开发适合于吸附态 CO₂ 的监测技术，形成并验证驱煤层气监测技术体系。

6. CO₂ 驱水利用与封存技术。研究封存与驱水相互作用规律，提出驱水利用的潜力评价方法与选址准则，并应用于典型盆地的目标区圈定；提出安全性、稳定性评价方法，开发封存与产水协同优化模型，构筑驱水利用全流程系统工艺。

7. CO₂ 矿物转化、固定和利用技术。针对钢铁、化工等过程产生的大量工业固废，结合我国丰富的钾长石等天然矿物质，研发工业固废和典型钙镁基天然矿物中 CO₂ 矿化的高选择性产品分离技术，形成多级多相反应与分离一体化大型装备，实现矿渣的高效综合利用。

8. CO₂ 矿化发电技术。利用大规模工业碱性固废、天然碱性矿

物矿化 CO₂ 发电并联产化学品，研究 CO₂ 矿化电池（CMC）的化学反应过程、催化材料及传输机制，有效利用矿化反应低位化学能发电；研究 CO₂ 矿化电池的工程放大技术，形成可商业化电池堆；研发燃煤电厂低浓度烟气 CO₂ 直接矿化发电技术，以及纯碱、镁盐、硅氧化物等化工加工过程中应用 CO₂ 矿化电池发电的耦合技术。

9. CO₂ 化学转化利用技术。研发 CO₂ 与甲烷重整制备合成气技术，研究 CO₂ 与氢气制液体燃料、甲醇、碳酸酯、丙烯酸等高值化学品及可降解塑料的高效催化剂和专属反应器的放大技术，研究并验证光/电、光/热的 CO₂ 转化技术、电解水与 CO₂ 还原耦合的电能和化学能循环利用技术。

10. CO₂ 生物转化利用技术。研发高效低成本的固碳优良藻类（菌种）的大规模培育及高效生物光反应器放大技术，研究 CO₂ 微藻土壤改良、制备生物柴油和化学品、CO₂ 气肥等技术。探索微藻基因工程改良前沿技术。

11. CO₂ 安全可靠封存与监测及运输技术。研究地质封存机理、长期运移规律及预测方法，以及封存地质学理论与场地选址方法；开发注入过程和关井后的长期监测、风险预测、预警与应急管理技术与方法，以及长寿命井下设备与工程材料；研究 CO₂ 有效封存的计量和验证方法。研究长距离大输量 CO₂ 运输的管道微损伤监测和止裂及自封堵技术、管线泄漏检（监）测技术、沿线高后果区智能报警技术。

12. 建设百万吨级碳捕集利用和封存系统示范工程。完成燃烧后

CO₂ 捕集技术的放大研究、脱碳工程与电厂系统的工程化集成技术研究；建设百万吨级大型 CO₂ 捕集系统示范工程，配合开展百万吨级 CO₂ 驱油和封存的协同优化，保证封存的长期安全性。

五、先进核能技术创新

（一）战略方向

1. 核能资源勘探开发利用。重点在深部铀资源勘探开发理论、新一代高效智能化地浸采铀，以及非常规铀资源（主要包括黑色岩系型及海水中的铀资源等）开发利用等方面开展研发与攻关。

2. 先进核燃料元件。重点在自主先进压水堆核燃料元件示范及推广应用、更高安全性及可靠性和经济性的压水堆燃料元件自主开发、先进燃料技术体系完善，以及智能制造在核燃料设计制造领域应用等方面开展研发与攻关。

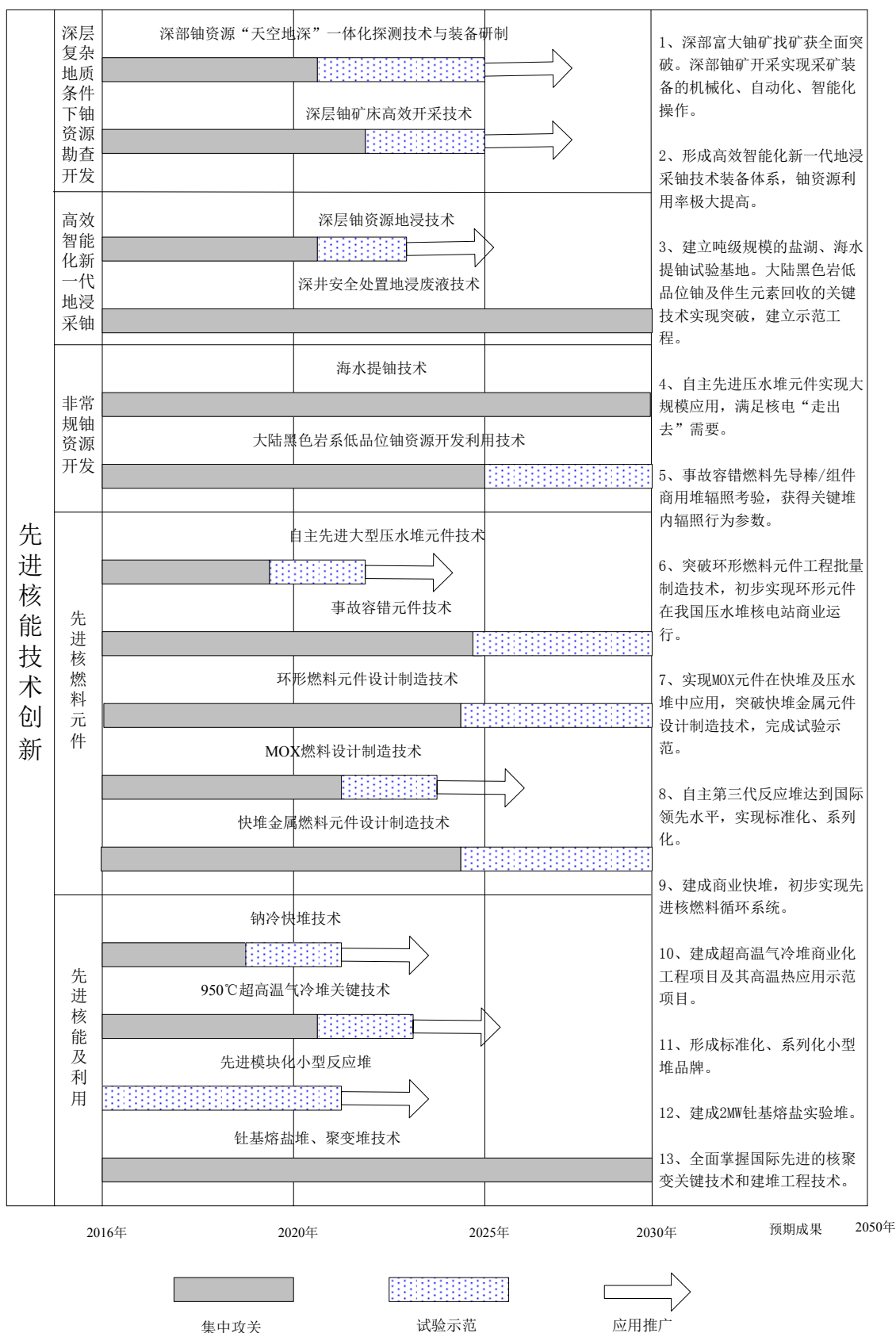
3. 新一代反应堆。重点在快堆及先进模块化小型堆示范工程建设、先进核燃料循环系统构建、超高温气冷堆关键技术装备及配套用热工艺，以及新一代反应堆的基础理论和关键技术等方面开展研发与攻关。

4. 聚变堆。重点在 ITER 的设计和建造、堆芯物理和聚变堆工程技术、聚变工程技术试验平台（FETP）自主设计建造，以及大型托卡马克聚变堆装置设计、建造和运行等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。在核能资源勘探开发利用方面，创新深部铀成矿理论，实用性综合勘查深度达到 1500 米。实现埋深 800 米以内

先进核能技术创新路线图



的可地浸砂岩铀资源经济开发利用，建成千吨级数字化、自动化的地浸采铀示范工程。黑色岩系型等低品位铀资源铀浸出率达超过80%。获得先进的盐湖、海水提铀功能材料，完成提铀放大工艺优化设计及配套装置加工。在先进核燃料元件方面，实现自主先进核燃料元件的应用；事故容错燃料元件（ATF）、环形燃料元件初步具备辐照考验条件；研制 MOX 燃料示范快堆考验组件并完成辐照考验。在反应堆技术方面，突破自主第三代超大型压水堆关键技术；示范快堆开工建设；完成超高温气冷堆在 950℃ 高温运行及核能制氢的可行性论证，建设高温气冷堆 700℃ 工艺热示范工程；建成先进模块化小型堆示范工程（含海上核动力平台）。熔盐堆、行波堆、聚裂变混合堆等先进堆型关键材料及部分技术取得重要突破；等聚变堆离子体的参数和品质获得提高，为设计建造聚变工程技术试验平台（FETP）奠定基础。

2. 2030 年目标。在核能资源勘探开发利用方面，形成国际领先的深部铀成矿理论体系及技术体系；实现深度 1000 米以内的可地浸砂岩智能化、绿色化经济开发利用；建成黑色岩系型等低品位铀资源综合回收示范工程，建成盐湖、海水连续提铀试验装置并获得技术经济评价参数。先进核燃料元件，具备国际领先核燃料研发设计能力，事故容错燃料先导棒/先导组件实现商用堆辐照考验，初步实现环形元件在压水堆核电站商业运行；MOX 组件批量化生产管理技术达到国际先进水平，快堆金属元件具备规模化应用条件。在反应堆技术方面，第三代压水堆技术全面处于国际领先水平，实

现系列化发展；突破 100KW 级商用增殖快堆电站关键技术，实现商业后处理厂-MOX 元件-商业快堆闭路循环；建设完成 950℃超高温气冷堆及高温热应用商业化工程；先进模块化小型堆实现标准化、规模化建设；熔盐堆等先进堆型关键设备材料取得重大突破，具备建设示范工程条件。聚变工程技术试验平台（FETP）成功运行，掌握聚变堆芯燃烧等离子体的实验、运行和控制技术。

3. 2050 年展望。完全掌握铀资源成矿理论，深部铀资源、非常规铀资源开发具备规模化经济开采能力，能保障核能长久发展。核燃料自主设计能力进入世界先进水平，智能制造、柔性制造等先进技术广泛应用。四代核能系统全面实现“可持续性、安全性、经济性和核不扩散”的要求，核能在供热、化工、制氢、冶金等方面具备规模建设条件。建设 100 万 KW 量级聚变原型电站，实现核聚变能源商用化应用。

(三) 创新行动

1. 深部铀成矿理论创新与一体化铀资源探测技术与装备。探索热液型铀多金属成矿带成矿体系、砂岩型铀矿超常富集机理及多能源矿产间作用关系、非常规铀资源富集模式与规律、纳米地学、铀成矿模拟试验，以及铀矿地质大数据规律等。研究大探深、高精度地面及井中地球物理勘查技术，以及高效钻进技术、纳米测试技术、基于互联网的综合分析评价技术、智能化预测技术；研制铀多金属勘查新型放射性仪器。

2. 地浸采铀高效钻进与成井技术。研发专用地浸钻孔钻进设

备，采铀工艺钻孔结构，基于随钻测斜、定向钻进的高效安全钻孔成井技术、地浸井场快速开拓和布置技术；研究复杂难浸铀资源地浸高效浸出技术；开展绿色、智能地浸采铀技术研究，建设数字化、绿色地浸矿山。

3. 黑色岩系型、磷块岩型的低品位铀资源开发技术及盐湖、海水提铀技术。研发工艺矿物学特征，选矿试剂合成、矿物分选工艺和选矿技术，铀高效浸出工艺及浸出装置、分离方法、产品制备及工艺废水处理技术，进行工业试验示范；研发盐湖和海水提铀装置、实验室平台，突破高性能提铀材料及功能材料提铀性能，建立国家级开放性的海水提铀方法测试平台，研究海水提铀与海水淡化耦合技术、铀酰化学技术。

4. 先进自主压水堆元件。推进自主先进锆合金包壳核燃料元件技术攻关和产业化应用。研发事故容错元件（ATF）高铀密度或掺杂燃料芯块，先进金属、新型复合的新型包壳材料；完善适用于 ATF 元件包壳堆内辐照考验及辐照后检查技术，研究燃料制备和性能评价关键技术。研究压水堆环形燃料堆芯和组件设计技术，开展环形燃料组件堆外热工水力等验证、小组件试验堆内辐照考验和先导组件商用堆内辐照考验。

5. 快堆及燃料元件设计与工程化技术。完善快堆法规、标准体系，突破大型商用快堆的热工水力、非能动事故余热排出等关键技术，形成快堆电站自主化的软件及设计集成技术，实现设备自主化；突破快堆 MOX 组件芯块设计与成型工艺技术，高性能结构材料，

组件制造工程化技术，掌握快堆 MOX 换料运行技术。突破大增殖比的 (U、Pu) Zr 金属元件及添加 MA 的金属燃料关键技术。

6. 超高温气冷堆关键技术及高温热工程应用技术。攻关 950℃ 超高温气冷堆关键技术，开展安全与事故分析、堆内构件材料及结构分析等。开发基于 HTR-PM 现有堆芯设计的气-气中间换热器，提供 700℃ 的工艺热生产煤气、油品和焦炭。

7. 先进小型堆关键技术及工程化。针对陆上模块式小型堆，突破关键设备、模块化建造技术、运行技术及安全审查技术，完善法规标准。针对海上核动力平台，开展工程设计、设备制造、工厂化总体建造和海上运行调试技术研究，建设示范工程，完善法规标准。开展大功率空间核反应堆电源技术研究，突破设计、关键材料、装备、运行技术等。

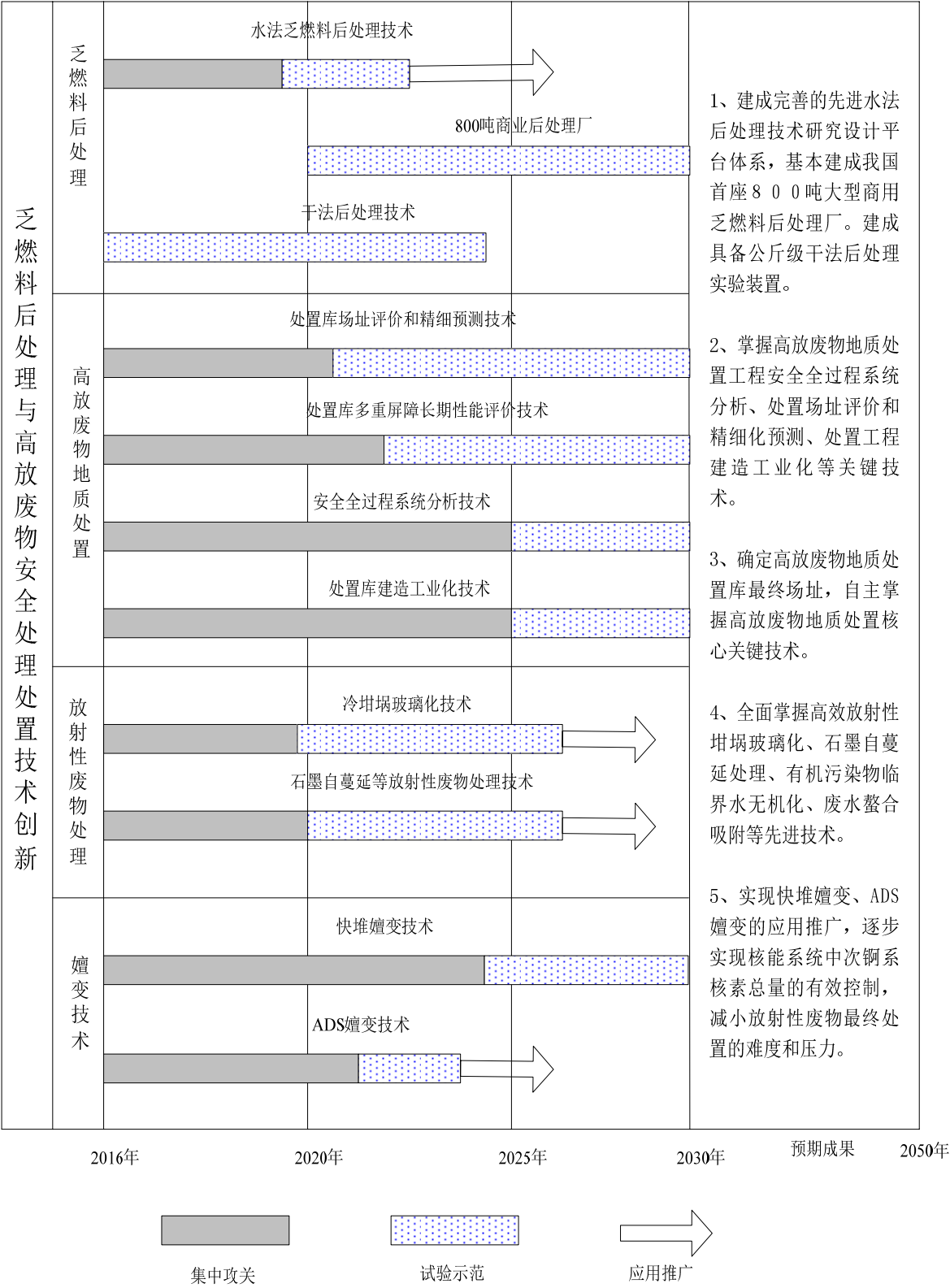
8. 钍基熔盐堆基础理论与关键技术。建立完善的研究平台体系，研究关键基础理论和关键工艺技术，突破熔盐制备技术、高温材料腐蚀机理及控制技术、回路技术、反应堆运行控制技术，探索钍-铀循环在线后处理技术，建成 2MW 钍基熔盐实验堆。

9. 聚变物理研究。完善等离子体诊断、控制、加热、加料等手段，研究先进托卡马克等离子体实验，实现高比压、高约束的等离子体实验运行，提升对聚变等离子体的认识水平和控制能力，设计建造聚变工程技术试验平台 (FETP)。

六、乏燃料后处理与高放废物安全处理处置技术创新

(一) 战略方向

乏燃料后处理与高放废物安全处理处置技术创新路线图



1. 乏燃料后处理。重点在大型商用水法后处理厂建设、全分离的无盐二循环流程研究、后处理流程经济性和环保性的提高，以及适用于快堆等的先进燃料循环的干法后处理等方面开展研发与攻关。

2. 高放废物地质处置。重点在高放废物地质处置研发体系创新、高放废物处置地下实验室建设、地质处置及安全技术，以及高放废物地质处置理论和技术体系完善等方面开展研发与攻关。

3. 高放废物处理。重点在高放废液处理、高放石墨处理、 α 废物处理，以及冷坩埚玻璃固化高放废物处理等方面开展研发与攻关。

4. 放射性废物嬗变技术。重点在长寿命次锕系核素总量控制、次临界系统设计和关键设备研究、外中子源驱动次临界高效嬗变系统（含加速器驱动和聚变驱动）技术体系完善，以及降低高放废物安全处理（置）难度等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。在乏燃料后处理方面，掌握大型商用乏燃料后处理厂自主设计、建造及运行技术，突破动力堆乏燃料后处理工艺、设备等关键技术，建立动力堆高放废液分离工艺技术；针对快堆 MOX 乏燃料后处理，建立适用于我国乏燃料后处理中试厂的水法处理工艺流程，具备示范条件；推进乏燃料干法后处理技术研究，基础研究取得重要突破。在高放废物地质处置方面，建成高放废物处置地下实验室，掌握实验室现场试验关键技术体系；掌握场址评

价方法，提出 3~5 个高放废物处置库候选场址，确定工程屏障选材，完成高放固化体多重介质多因素蚀变与核素迁移中间规模试验；提出废石墨、重水堆乏燃料等特殊废物的最终处置方案，完成可行性研究；掌握中等深度放射性废物处置技术。在放射性废物处理方面，突破高放废液煅烧、水冷鼓泡、出料和贵金属沉积等技术，研制出两步法冷坩埚玻璃固化科研样机（35L/h 高放废液）、石墨自蔓延处理中间装置、有机物超临界水无机化工程样机，以及废水螯合吸附等工程样机，放射性废物处理技术水平显著提高。在先进分离嬗变技术方面，完成实验规模的 MA 嬗变技术和分离工艺研究，掌握分离-嬗变关键技术，获得整个环节的数据和经验；建成较完善的外中子源驱动次临界嬗变系统技术研究平台体系，掌握加速器中子源、紧凑型聚变中子源系统以及次临界反应堆或包层的系统关键技术，确定外中子源驱动次临界系统的嬗变性能等运行参数。

2. 2030 年目标。在乏燃料后处理方面，建成完善的先进水法后处理技术研发平台体系，基本建成我国首座 800 吨大型商用乏燃料后处理厂；建立我国锕系元素分离一体化先进水法后处理流程，提出干法后处理技术的优选路线，建成具备公斤级熔盐电解分离铀、钚的实验装置。在高放废物地质处置方面，确定高放废物处置库推荐场址，完成处置库工程设计，掌握地质处置技术和安全评价技术，具备建库条件；建成中等深度处置库。在放射性废物处理方面，全面掌握高放废液冷坩埚玻璃固化技术、石墨自蔓延处理技术、有机物超临界水无机化技术、卤渣热等静技术、废水螯合吸附技术，

放射性废物处理技术进入先进国家行列。在先进分离嬗变技术方面，完成使用于 60 万 KW 快堆核电站的含 MA 混合氧化铀钚燃料（MOX）的设计、研制及随堆考验，确定外源驱动次临界系统技术路线，掌握自主产权的关键设备设计制造技术，建成外源次临界系统工程性实验装置。

3. 2050 年展望。干法后处理实现工业化应用，逐步取代水法后处理，实现快堆嬗变、ADS 嬗变技术的应用推广，逐步实现核能系统中次锕系核素总量的有效控制。解决历史上遗留废物隐患，废物最小化达到世界领先水平。掌握高放废物地质处置工业化技术，建成高放废物处置库并运行。

（三）创新行动

1. 先进乏燃料后处理工艺及关键技术设备。针对大型核燃料后处理厂，开展首端处理技术及新型无盐试剂二循环流程开发、工艺流程台架热试验及验证；建设后处理全流程数字模拟平台，研究脉冲萃取柱数字模拟与仿真技术，实现大型关键设备国产化；研发自动化控制技术、远程操作系统与设备、大型先进热室设计，以及先进干法首端技术及干法分离技术。

2. 高放废物地质处置库技术。围绕地下实验室工程及现场试验，开展高放废物处置库选址研究，并形成完善的场址评价技术体系；重点研究以地下实验室为研发平台的地质处置工程（艺）技术和工程屏障、处置库概念设计、处置库开挖技术，以及废物罐的运输、就位及回取技术和验证；研究处置库的核素释放和迁移、安全

评价和安全全过程系统分析，掌握概率安全评价技术；开展处置库屏障系统安全特性演化试验和评价。

3. 先进废物处理技术。研究放射性石墨废物自蔓延处理技术；突破冷坩埚玻璃固化技术、有机污物超临界水处理技术，以及高放卤渣热等静压陶瓷固化技术，研究废水螯合吸附技术。

4. 快堆嬗变技术。完成中国实验快堆（CEFR）中单个次锕系核素小样件的辐照，主要包括 CEFR 嬗变靶件的设计和研制、嬗变靶件的辐照考验和辐照后检验、以及辐照后芯块的化学分析与分离工艺研究等。完成示范快堆（CFR600）中嬗变组件的辐照和后处理，主要包括含次锕系元素的 MOX 燃料制造技术研究，批量使用含 MA 燃料的快堆堆芯设计、安全评价和随堆考验，批量使用含 MA 燃料的反应堆安全运行技术，以及辐照后含 MA 燃料的后处理技术研究等。

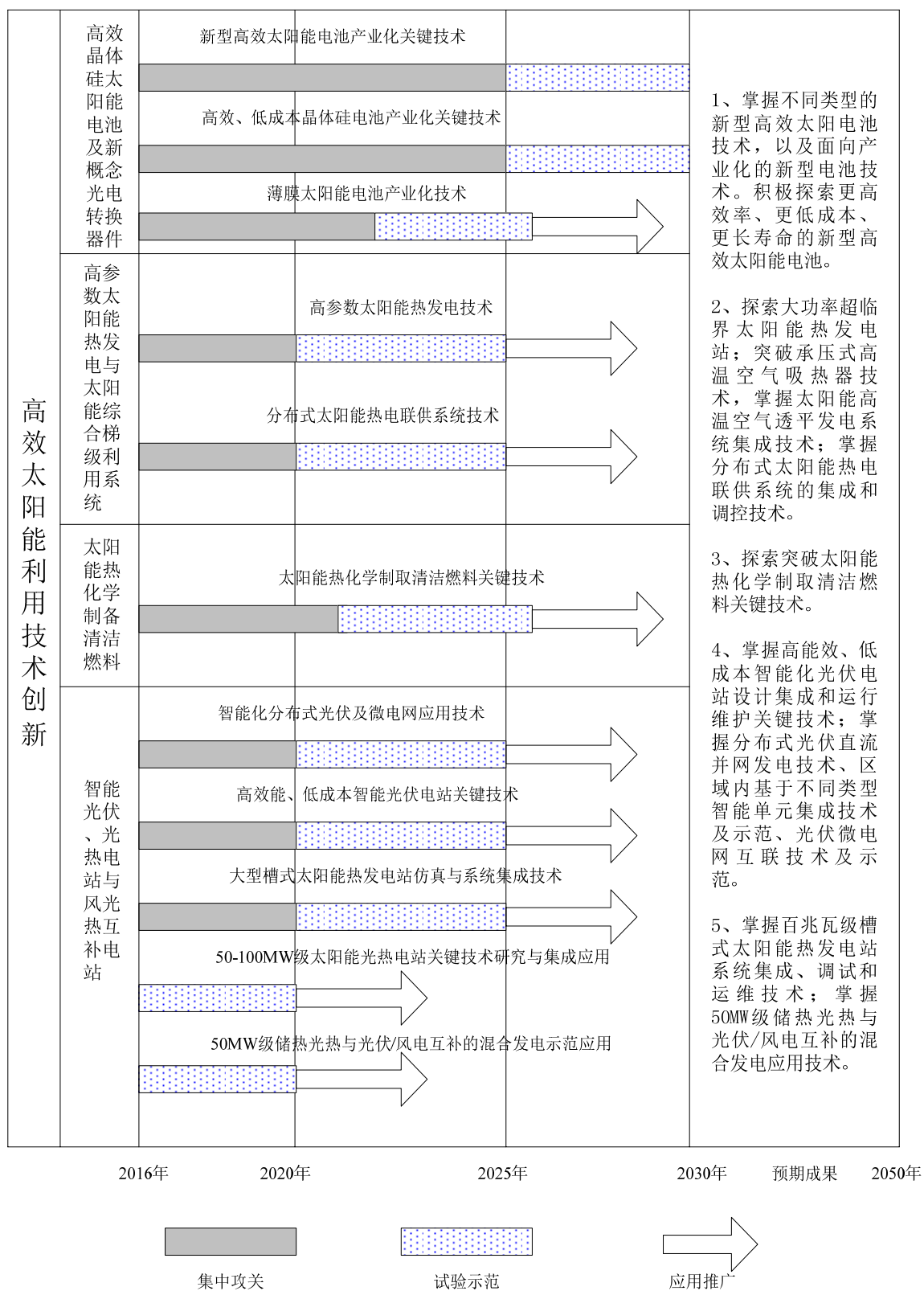
七、高效太阳能利用技术创新

（一）战略方向

1. 太阳能高效晶体硅电池及新概念光电转换器件。重点在开发平均效率 $\geq 25\%$ 的晶体硅电池产线（如异质结（HIT）电池和叉指背接触（IBC）电池或二者的结合），探索更高效率、更低成本的新概念光电转换器件及面向产业化技术等方面开展创新与攻关。

2. 高参数太阳能热发电与太阳能综合梯级利用系统。重点在超临界太阳能热发电、空气吸热器、固体粒子吸热器、50~100MW 级大型全天连续运行太阳能热电站及太阳能综合梯级利用、100MWe

高效太阳能利用技术创新路线图



槽式太阳能热电站仿真与系统集成等方面开展研发与攻关。

3. 太阳能热化学制备清洁燃料。重点在太阳能热化学反应体系筛选、热化学在非平衡条件下的反应热力学和动力学机理及其与传热学和多项流的耦合作用机理探索、太阳能制取富含甲烷的清洁燃料等方面开展研发与攻关。

4. 智能光伏电站与风光热互补电站。重点在高能效、低成本智能光伏电站，智能化分布式光伏和微电网应用，50MW 级储热的光光热互补混合发电系统等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。突破三五（III-V）族化合物电池和铁电-半导体耦合电池的产业化关键技术，建成 100MW 级 HIT 太阳能电池示范生产线；掌握分布式太阳能热电联供系统的集成和控制，以及太阳能热化学制备燃料机理；掌握智能光伏电站设计和建造成套技术，实现发电效率 $\geq 80\%$ ；掌握 50MW 级塔式光热电站整体设计及关键部件制造技术；突破光热-光伏-风电集成设计和控制技术，促进风光互补利用技术产业化。

2. 2030 年目标。大幅提高铜铟镓硒（CIGS）、碲化镉（CdTe）电池的效率，建立完整自主知识产权生产线，实现在建筑中规模应用并达到国际前沿水平；HIT 电池国产化率 $\geq 85\%$ 并达到批产化水平。掌握高参数太阳能热发电技术，全面推动产业化应用；建成 50MW 太阳能热电联供系统，形成自主知识产权和标准体系。突破太阳能热化学反应器技术，研制出连续性工作样机。

3. 2050 年展望。开发出新型高性能光伏电池，大幅提升光电转换效率并降低成本，至少一种电池达到世界最高效率；实现光电转化和储能一体化；太阳能热化学制备清洁燃料获重大突破并示范。

（三）创新行动

1. 新型高效太阳能电池产业化关键技术。研发铁电-半导体耦合电池、钙钛矿电池及钙钛矿/晶体硅叠层电池产业化的关键技术、工艺及设备，建立电池组件生产及应用示范线，建成产能 $\geq 2\text{MWp}$ 的中试生产线，组件平均效率各为 $\geq 14\%$ 、 $\geq 15\%$ 、 $\geq 21\%$ 。探索新型高效太阳能电池技术，探索研发更高效、更低成本的铁电-半导体耦合电池、铁电-半导体耦合/晶体硅叠层电池、钙钛矿电池、染料敏化电池、有机电池、量子点电池、新型叠层电池、硒化锑电池、铜锌锡硫电池和三五（III-V）族纳米线电池等电池技术，实现至少一种电池达到世界最高效率。

2. 高效、低成本晶体硅电池产业化关键技术。研究低成本晶体硅电池、HIT 太阳电池、IBC 电池产业示范线关键技术和工艺，推进 HIT 太阳电池设备及原材料国产化，开发 IBC 与 HIT 结合型高效电池；建成设备国产化率 $\geq 80\%$ 的百兆瓦级电池示范生产线，产线电池平均效率各为 $\geq 21\%$ 、 $\geq 23\%$ 、 $\geq 23\%$ 。研制太阳能电池关键配套材料，开发高效电池用配套电极浆料关键技术，包括正银浆料制备技术，以及无铅正面银电极、低成本浆料银/铜粉体功能相复合电极材料等。

3. 薄膜太阳能电池产业化关键技术。研究碲化镉、铜铟镓硒及

硅薄膜等薄膜电池的产业化关键技术、工艺及设备，掌握铜铟镓硒薄膜电池原材料国产化技术；建成产能 100MWp 示范生产线，组件平均效率各为 $\geq 17\%$ 、 $\geq 17\%$ 、 $\geq 15\%$ 。

4. 高参数太阳能热发电技术。研究高温高效率吸热材料、超临界蒸汽发生器、二氧化碳透平；研发高温承压型空气吸热器、50kW 级高温空气-燃气联合发电系统、高性能太阳能粒子吸热器；研究高温粒子储热、粒子蒸汽发生器的设计方法及换热过程、粒子空气换热装置的高温粒子与空气间换热规律。

5. 分布式太阳能热电联供系统技术。研究不同聚光吸热的分布式太阳能热电联供系统长周期蓄热材料、部件和系统，研制单螺杆膨胀机、斯特林发动机、有机工质蒸汽轮机等低成本高效中小功率膨胀动力装置，提出不同聚光吸热的高效中小功率热功转换热力循环系统；建设 1~1000kW 级分布式太阳能热电联供系统集成示范，掌握电站的动态运行特性和调控策略。

6. 太阳能热化学制取清洁燃料关键技术。研究热化学反应体系筛选及反应热力学和动力学，以及金属氧化物还原反应制取清洁燃料、甲烷（催化）干湿重整过程、含碳物料的干湿重整过程等的反应热力学和动力学机理；研究太阳能高温热化学器内传热学与反应动力学的耦合作用机理、太阳能热化学制取清洁燃料的多联产系统热力学机理和动态过程。

7. 智能化分布式光伏及微电网应用技术。研究分布式光伏智能化技术、分布式光伏直流并网发电技术，以及区域性分布式光伏功

率预测技术，开展区域内基于不同类型智能单元的分布式光伏系统设计集成技术、光伏微电网互联技术的研究及示范。

8. 高效、低成本智能光伏电站关键技术研究及示范。研究智能光伏电站设计集成和运行维护技术、高可靠智能化平衡部件技术、兆瓦级光伏直流并网发电系统关键技术，开展百万千瓦级大规模智能光伏电站群的运行特性及对电网的影响研究。

9. 大型槽式太阳能热发电站仿真与系统集成技术。建立100MWe 槽式太阳能热发电站仿真系统，搭建槽式集热器、导热油系统、储热系统、蒸汽发生系统、汽轮机仿真模型。研究大型槽式太阳能热发电站系统集成技术，实现气象条件与集热、储热、蒸汽发生与汽轮发电协同控制与调节技术，研究可复制、模块化的系统集成与集成控制技术，电站参数优化方法等。

10. 50~100MW 级大型太阳能光热电站关键技术与集成应用。研究定日镜及大型定日镜场技术、塔式电站大型镜场在线检测技术、大型吸热器技术及大型高效储换热技术、适合光热发电系统的热力装备技术，研究塔式电站系统集成与控制技术、光热发电系统参与电网调节的主动式控制技术，建立可全天连续发电的50MW级槽式太阳能高效梯级利用示范电站；研究20MW级直接产生过热蒸汽型的多塔集成调控塔式太阳能热发电站集成应用。

11. 50MW 级储热光伏、光热、风电互补的混合发电示范应用。研究储能光热电站(>10MW)与光伏(>20MW)/风电(>20MW)混合发电站的整体设计技术，研究储能光热电站与光伏/风电互补

发电的协调技术；研究混合发电站的控制技术及自动化运维技术，实现各种工况下光热-光伏/风电混合发电站的平稳发电以及突变条件下的快速响应；研究 50MW 级储能光热电站与光伏/风电混合发电站整体系统集成、工程化及运营技术，实现示范应用。

八、大型风电技术创新

（一）战略方向

1. 大型风电关键设备。重点在 10MW 级及以上风电机组，以及 100 米级及以上风电叶片、10MW 级及以上风电机组变流器和高可靠、低成本大容量超导风力发电机等方面开展研发与攻关。

2. 远海大型风电系统建设。重点在远海大型风电场设计建设、适用于深水区的大容量风电机组漂浮式基础、远海风电场输电，以及海上风力发电运输、施工、运维成套设备等方面开展研发与攻关。

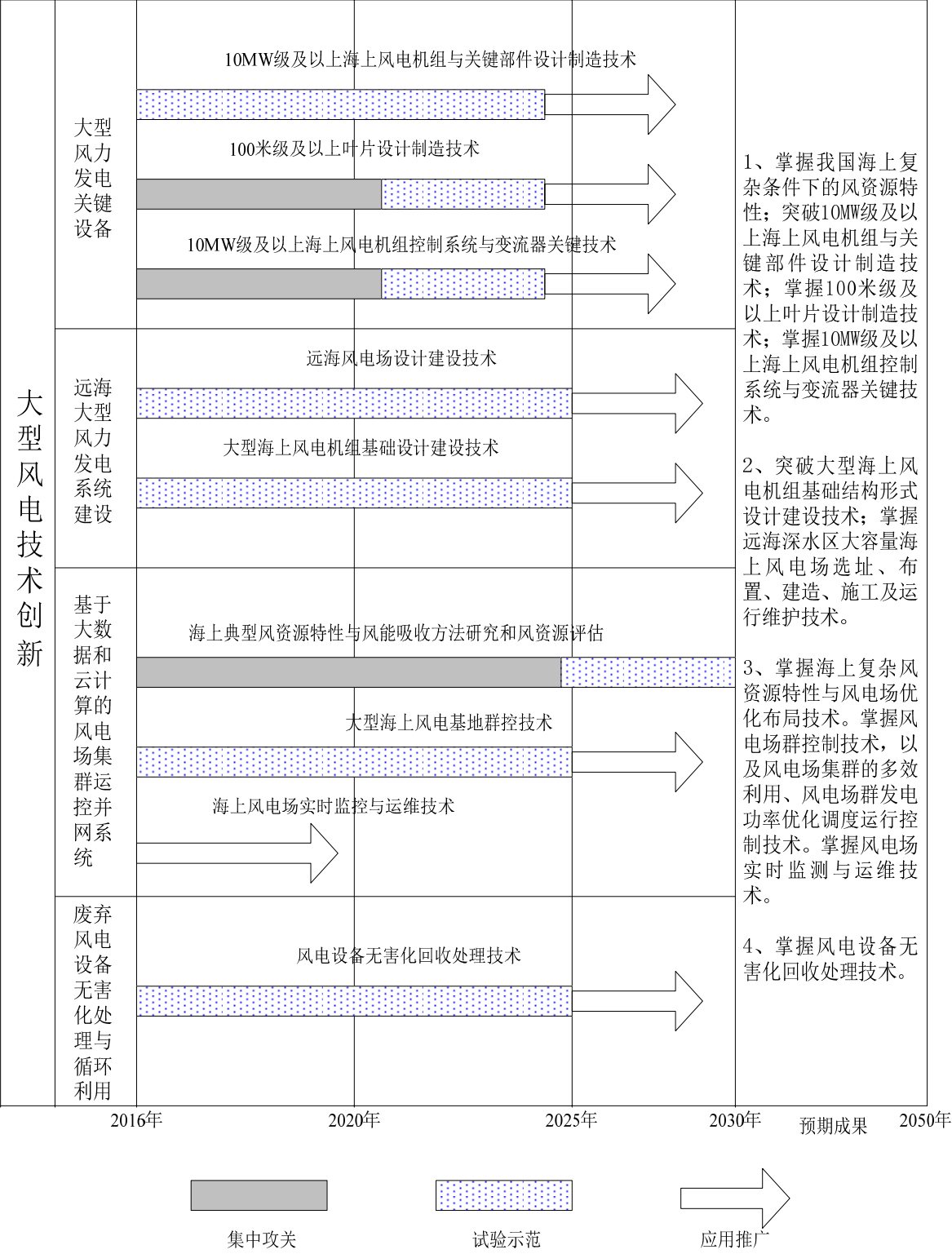
3. 基于大数据和云计算的风电场集群运控并网系统。重点在典型风资源特性研究与评估、基于大数据大型海上风电基地群控、风电场群优化协调控制和智能化运维、海上风电场实时监测及智能诊断技术装备等方面开展研发与攻关。

4. 废弃风电设备无害化处理与循环利用。重点在风电设备无害化回收处理、风电磁体和叶片的无害化回收处理等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。形成 200~300 米高空风力发电成套技术。掌握自主知识产权的 10MW 级以下大型风电机组及关键部件的设计制

大型风电技术创新路线图



造技术，形成国际竞争力；突破近海风电场设计和建设成套关键技术，形成海上风电工程技术标准。掌握复杂条件下的风资源特性及各区域风电资源时空互补性，评估风资源可获得性，进行风电场优化布局；建立风电场群控制与运维体系，支撑区域风电规模并网。

2. 2030 年目标。200~300 米高空风力发电获得实际应用并推广。突破 10MW 级及以上大型风电机组关键部件设计制造技术，建立符合海况的远海风电场设计建设标准和运维规范；掌握风电场集群的多效利用、风电场群发电功率优化调度运行控制技术；掌握废弃风电机组材料的无害化处理与循环利用技术，支撑风电可持续发展；成为风电技术创新和产业发展强国。

3. 2050 年展望。突破 30MW 级超大型风电机组关键技术，掌握不同海域规模化风电开发成套技术与装备，形成完整的风能利用自主创新体系和产业体系，风能成为我国主要能源之一。

（三）创新行动

1. 100 米级及以上叶片设计制造技术。研究 100 米级及以上叶片三维设计方法与设计体系、叶片载荷与破坏机理和优化校核方法，以及基于高效叶片气弹、轻量化结构、和新材料技术相结合的一体化设计技术；研究 100 米级及以上叶片结构轻量化设计技术、叶片碳-玻材料混杂及铺层优化设计技术；研制 100 米级及以上大型海上风电机组叶片，研究大型叶片测试技术，推动具有自主知识产权的系列化风电叶片产业化。

2. 大功率陆上风电机组及部件设计与优化关键技术。研究大功

率风电机组整机一体化优化设计及轻量化设计技术；开展大功率机组叶片、载荷与先进传感控制集成一体化降载优化技术，大功率风电机组电气控制系统智能诊断、故障自恢复免维护技术，以及大功率陆上风电机组及关键部件绿色制造技术研发。

3. 陆上不同类型风电场运行优化及运维技术。研究风电机组和风电场综合智能化传感技术、风电大数据收集及分析技术；研究复杂地形、特殊环境条件下风电场与大型并网风电场的设计优化方法及基于大数据的风电场运行优化技术；研究基于物联网、云计算和大数据综合应用的陆上不同类型风电场智能化运维关键技术，以及适合接入配电网的风电场优化协调控制、实时监测和电网适应性等关键技术。

4. 典型风资源特性与风能吸收方法研究及资源评估。研究陆上和海上复杂条件影响下的风特性并揭示脉动特性，研究边界层风垂直变化并分析不同海域的热力稳定度。根据海上典型风资源特征，探明多尺度叶片流场复杂特性和描述方法，获得不同尺度流场特征参数相互耦合的物理机制，开展适合我国风资源特性的高性能大型风电机组的专用翼型族研究。普查陆上和海上典型风资源并分析数据，建立风资源评估数值模型，开发自主知识产权的风资源评估系统。

5. 10MW 级及以上海上风电机组及关键部件设计制造关键技术。研究适合我国海况和海上风资源特点的风电机组精确化建模和仿真计算技术；研究 10MW 级及以上海上风电机组整机设计技术，

包括风电机组、塔架、基础一体化设计技术，以及考虑极限载荷、疲劳载荷、整机可靠性的设计优化技术；研究高可靠性传动链及关键部件的设计、制造、测试技术，以及大功率风电机组冷却技术。研制自主知识产权的 10MW 级及以上海上风电机组及其轴承和发电机等关键部件。

6. 10MW 级及以上海上风电机组控制系统与变流器关键技术。

研究海上风电机组在风、波浪、洋流耦合下的运行特性；研究风电机组智能化控制技术、极端工况（覆冰、台风）下的载荷安全控制技术。研究风电机组变流器和变桨距控制系统等的模块化设计技术，以及中高压变流技术、新型变流器冷却技术；研制大型海上风电机组智能型整机控制系统、变流器及变桨距控制装备，并推广应用。

7. 远海风电场设计建设技术。研究海上风电场建设选址技术，提出适合我国远海深水区风资源条件的风电机组优化布置方法。开展极端海洋环境荷载作用下海上风电机组结构的非线性荷载特性、远海深水区极端海况条件下大容量海上风电机组基础的荷载联合作用计算方法等研究；开发远海风电机组施工与建造技术、远海风电场并网技术、深水电缆铺设及动态跟随风电机组的柔性连接技术、风能与海洋能综合一体化互补利用技术与装备。

8. 大型海上风电机组基础设计建设技术。研究提出适用于我国远海深水区大容量风电机组的海上基础结构型式。探索远海深水区大容量海上风电机组基础的疲劳发生机理与控制方法，开展极端海

洋环境荷载作用下的失效模式与分析方法研究，提出其反应控制策略与防灾减灾对策。研究大容量风电机组基础设计制造技术，研制远海海洋环境荷载特点下满足施工与制造要求的新型漂浮式基础。

9. 大型海上风电基地群控技术。建立包含海上风电场群运行数据、实测气象数据以及数值天气预报数据的大数据平台，研发基于大数据的海上大型风电基地运行优化技术、风电场群发电功率一体化预测技术、风电场群协同控制优化技术、风电场及场群真实能效评估和优化策略。研究海上风电场群电能的多效利用技术，研究储能系统的功率和容量选取以及混合储能系统的协调控制问题。

10. 海上风电场实时监测与运维技术。分析影响海上风电场群运维安全及成本的因素，研究海上风电场运维技术，开发基于寿命评估的动态智能运维管理系统；研发海上风电场的运行维护专用检测和作业装备及健康模型与状况评估、运行风险评估、剩余寿命预测和运维决策支持等技术。研究海上机组的新型状态监测系统装备技术及智能故障预估的维护技术、关键部件远程网络化监控与智能诊断技术。

11. 风电设备无害化回收处理技术。研究叶片无害化回收处理技术，研究适合叶片性能要求和大尺度几何结构的易回收或降解的树脂体系及其成型技术；研发不同类型风电叶片组成材料的高效分离回收技术及装备，以及不可回收材料无害化处理技术与装备。研发不同类型风电磁体回收与无害化处理关键技术与装备；研究不同组成材料的永磁体高效清洁分类回收技术与永磁材料再利用技术，

并研制回收处理设备。

九、氢能与燃料电池技术创新

（一）战略方向

1. 氢的制取、储运及加氢站。重点在大规模制氢、分布式制氢、氢的储运材料与技术，以及加氢站等方面开展研发与攻关。

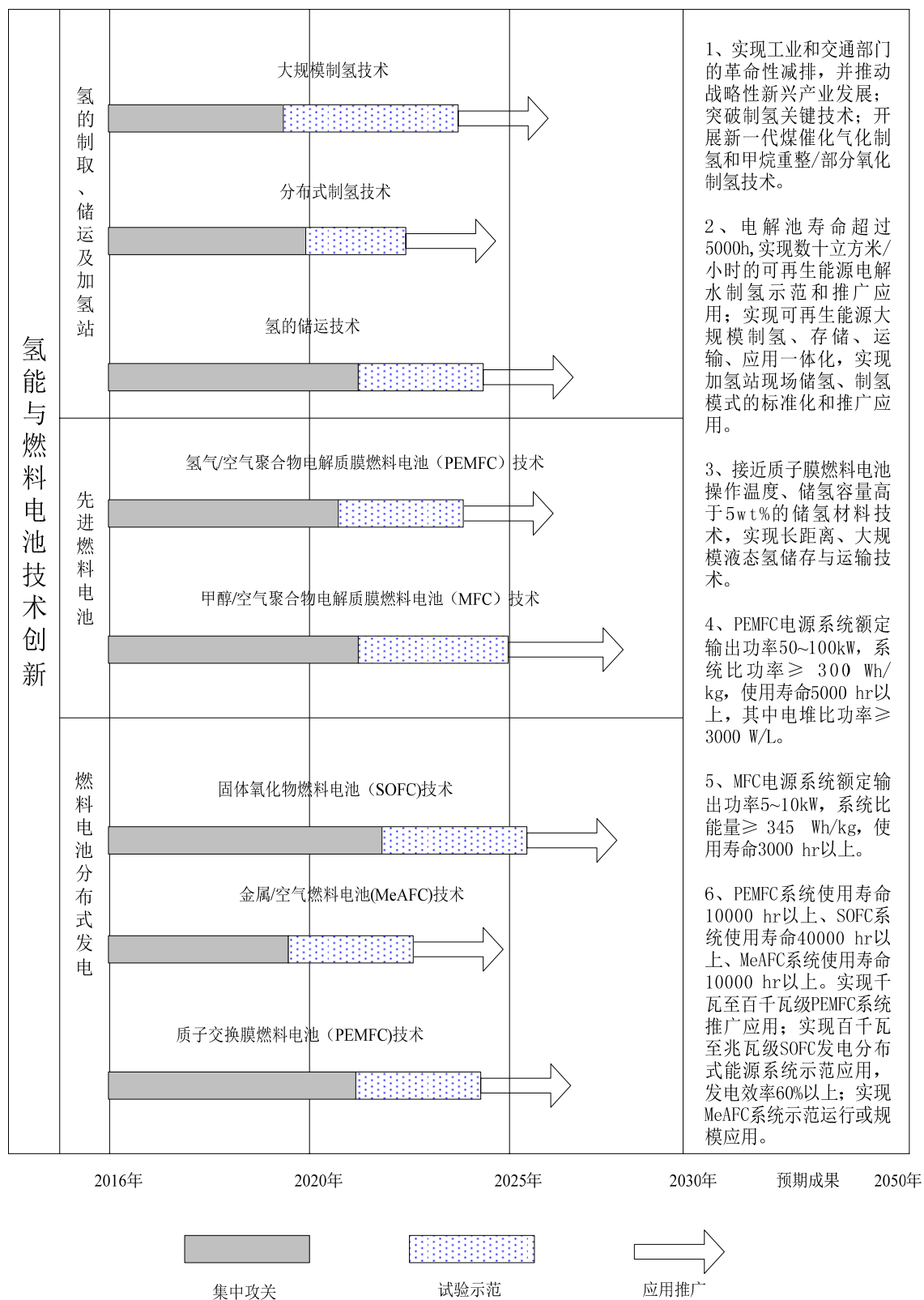
2. 先进燃料电池。重点在氢气/空气聚合物电解质膜燃料电池（PEMFC）、甲醇/空气聚合物电解质膜燃料电池（MFC）等方面开展研发与攻关。

3. 燃料电池分布式发电。重点在质子交换膜燃料电池（PEMFC）、固体氧化物燃料电池（SOFC）、金属空气燃料电池（MeAFC），以及分布式制氢与燃料电池（PEMFC 和 SOFC）的一体化设计和系统集成等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。建立健全氢能及燃料电池规模化应用的设计、工艺、检测平台。基本掌握高效氢气制备、纯化、储运和加氢站等关键技术，以及低成本长寿命电催化剂技术、聚合物电解质膜技术、低铂载量多孔电极与膜电极技术、高一致性电堆及系统集成技术，突破关键材料、核心部件、系统集成、过程控制等关键技术，实现氢能及燃料电池技术在动力电源、增程电源、移动电源、分布式电站、加氢站等领域的示范运行或规模化推广应用。其中，PEMFC 电源系统实现额定输出功率 50~100kW、系统比功率 $\geq 300\text{Wh/kg}$ 、电堆比功率 3000W/L 以上、使用寿命 5000hr 以上；MFC 电源系统

氢能及燃料电池技术创新路线图



实现额定输出功率 5~10kW、系统比能量 $\geq 345\text{Wh/kg}$ 、使用寿命 3000hr 以上;开发出接近质子膜燃料电池操作温度、储氢容量高于 5wt%的储氢材料或技术,及长距离、大规模氢的储存及运输技术。

2. 2030 年目标。实现大规模氢的制取、存储、运输、应用一体化,实现加氢站现场储氢、制氢模式的标准化和推广应用;完全掌握燃料电池核心关键技术,建立完备的燃料电池材料、部件、系统的制备与生产产业链,实现燃料电池和氢能的大规模推广应用。其中,PEMFC 分布式发电系统使用寿命达到 10000hr 以上、SOFC 分布式发电系统使用寿命达到 40000hr 以上、MeAFC 分布式发电系统使用寿命达到 10000hr 以上。

3. 2050 年展望。实现氢能和燃料电池的普及应用,实现氢能制取利用新探索的突破性进展。

(三) 创新行动

1. 大规模制氢技术。研究基于可再生能源和先进核能的低成本制氢技术,重点突破太阳能光解制氢和热分解制氢等关键技术,建设示范系统;突破高温碘-硫循环分解水制氢及高温电化学制氢,完成商业化高温核能分解水制氢方案设计。研发新一代煤催化气化制氢和甲烷重整/部分氧化制氢技术。

2. 分布式制氢技术。研究可再生能源发电与质子交换膜/固体氧化物电池电解水制氢一体化技术,突破高效催化剂、聚合物膜、膜电极和双极板等材料与部件核心技术,掌握适应可再生能源快速变载的高效中压电解制氢电解池技术,建设可再生能源电解水制氢

示范并推广应用；研究分布式天然气、氨气、甲醇、液态烃类等传统能源与化工品高效催化制氢技术与工艺，以及高效率低成本膜反应器制氢和氢气纯化技术，形成标准化的加氢站现场制氢模式并示范应用。

3. 氢气储运技术。开发 70Mpa 等级碳纤维复合材料与储氢罐设备技术、加氢站氢气高压和液态氢的存储技术；研发成本低、循环稳定性好、使用温度接近燃料电池操作温度的氮基、硼基、铝基、镁基和碳基等轻质元素储氢材料；发展以液态化合物和氨等为储氢介质的长距离、大规模氢的储运技术，设计研发高活性、高稳定性和低成本的加氢/脱氢催化剂。

4. 氢气/空气聚合物电解质膜燃料电池（PEMFC）技术。针对清洁高效新能源动力电源的重大需求，重点突破 PEMFC 的低成本长寿命电催化剂、聚合物电解质膜、有序化膜电极、高一致性电堆及双极板、模块化系统集成、智能化过程检测控制、氢源技术等核心关键技术，解决 PEMFC 性能、寿命、成本等关键问题，并实现 PEMFC 电动汽车的示范运行和推广应用。

5. 甲醇/空气聚合物电解质膜燃料电池（MFC）技术。针对清洁高效新能源动力电源的重大需求，重点突破 MFC 耐高温长寿命电催化剂、新型耐高温聚合物电解质膜、有序化膜电极、一体化有机燃料重整、高温条件下电堆系统集成优化、智能控制等核心关键技术，并实现 MFC 在电动汽车上应用的示范运行和推广应用（无需制氢、储氢、加氢站）。

6. 燃料电池分布式发电技术。重点研发质子交换膜燃料电池（PEMFC）及氢源技术、固体氧化物燃料电池技术（SOFC），以及金属空气燃料电池（MeAFC）技术。在分散电站工况条件下，突破 PEMFC、SOFC、MeAFC 燃料电池关键材料、核心部件、系统集成和质能平衡管理等关键技术，建立分布式发电产业化平台，实现千瓦至百千瓦级 PEMFC 系统在通讯基站和分散电站等领域的推广应用；实现百千瓦至兆瓦级 SOFC 发电分布式能源系统示范应用，发电效率 60% 以上，并开发适于边远城市和工矿企业等分布式电站；实现 MeAFC 系统在智能微电网、通讯基站和应急救援等领域的示范运行或规模应用。

十、生物质、海洋、地热能利用技术创新

（一）战略方向

1. 先进生物质能与化工。重点在生物航油（含军用）制取、绿色生物炼制升级、生态能源农场构建等方面开展研发与攻关。

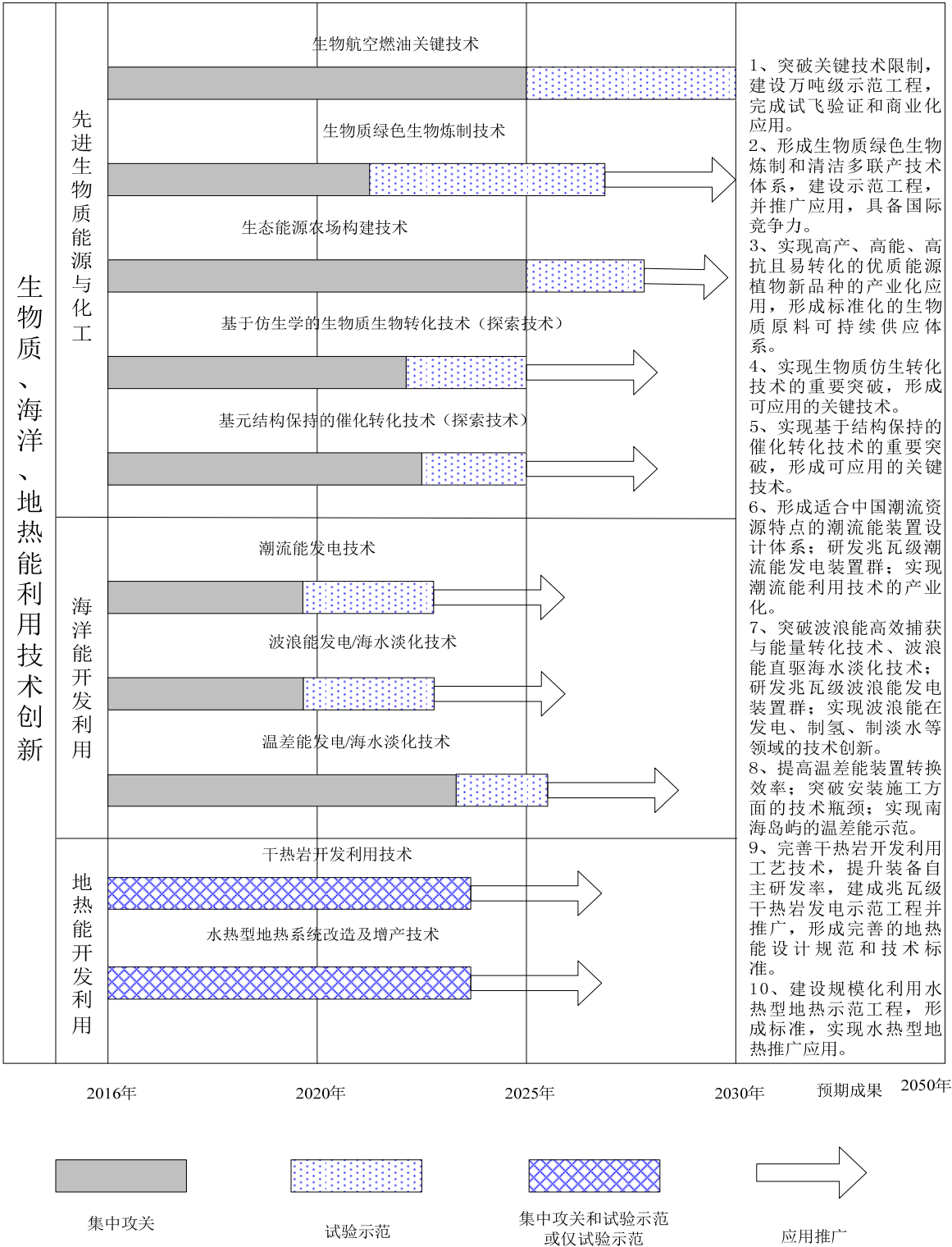
2. 海洋能开发利用。重点在海洋能源高效开发利用、远海海域海洋能开发利用、海洋能利用技术应用领域扩展等方面开展研发与攻关。

3. 地热能开发利用。重点在干热岩开发利用、水热型地热系统开发利用升级等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。在先进生物质能与化工方面，建成千吨级生物航油示范工程，完成台架试验并实现木质纤维素生物航油试飞验

生物质、海洋、地热能利用技术创新路线图



证；建成万吨级纤维素乙醇示范，实现生物天然气商业化示范；开发生物柴油多联产和炼制技术，形成万吨级示范工程；建设千吨级生物橡胶和生物基材料单体及聚合物、万吨级生物基聚氨酯、十万吨级生物基增塑剂及 PVC 制品等的示范生产线；升级生物天然气工程技术，实现商业化；培育一批新兴能源植（作）物新品系（种），初步建立生物质原料可持续供应体系。在海洋能开发利用方面，制订南海海洋能利用路线图。完善潮流能、波浪能装置设计体系，开发高效率的潮流能装置翼型与叶轮；提高温（盐）差能发电效率，研发温（盐）差能发电实型装置。地热能开发利用，掌握干热岩开发关键技术，建成 100kW 级干热岩发电示范；突破干热岩开发设备设计及制造关键技术，解决结垢、回灌难题，实现浅层地热规模化开发利用；建成兆瓦级地热综合梯级利用示范。

2. 2030 年目标。在先进生物质能与化工方面，具有商业化运营能力；完成万吨级多元化原料的生物航油集成与生产示范，形成十大类、百余种重大化工产品的先进生物制造工艺及产业链，建立 10 余个重大化工产品生物制造产业示范工程；创建 5~10 个生态能源农场示范，设立能源植物生态影响长期定位试验观测点，形成标准化的生物质原料可持续供应体系。在海洋能开发利用方面，实现海洋能装置设计与制造技术的协同发展并提升自主研发率，突破关键基础元器件和功能部件设计制造技术；突破波浪能高效捕获与能量转换技术，实现潮流能电场运行标准化，完善温（盐）差能海况样机开发；在南海建立波浪能、温差能示范电站，实现波浪能、温差

能利用技术在南海的初步应用；全面推广应用成熟的海洋能利用技术。在地热能开发利用方面，实现干热岩开发利用设计与制造技术的协同发展，完善干热岩开发利用工艺，提升装备自主研发率，建成兆瓦级干热岩发电示范工程；建设规模化利用水热型地热示范工程，形成完善的设计规范和技术标准。

3. 2050 年展望。生物航空燃料技术支撑商业化应用，形成多元化生物质原料可持续供应保障体系，低值生物质生物炼制和绿色多联产技术形成国际竞争力，生态能源农场具有持续绿色能源贡献能力。建立兆瓦级波浪能、潮流能发电装置群；实现潮流能、波浪能发电技术在近海海域的产业化；建立完整的海洋能产业链，实现海洋能发电和制淡水技术的全面应用。形成完善的地热能利用技术标准体系，实现干热岩发电工程推广、水热型地热应用。

(三) 创新行动

1. 生物航油（含军用）制取关键技术。突破纤维素及非粮生物质的水热降解、中间体加氢脱氧等技术，研究油脂提取及加氢异构技术、油脂与木质纤维素生物航油的加氢精制技术、油脂与木质纤维素原料互补的燃油组成及能质性能调控技术、生物航油适应性燃烧技术；提升基于纤维素和油脂类原料互补、生物航油高洁净精制和副产物高质化利用等的技术体系。打造生物航油产业化研发平台并研制全产业链制备装备，建立千（万）吨级示范工程，加强自主技术集成与工业应用示范。

2. 绿色生物炼制技术。突破烃类大宗化学品绿色炼制转化的共

性关键技术，研发分散生物质原料高效清洁收集模式，升级生物能源、生物基材料和化学品联产技术，建立生物质生化转化技术平台；研制大型连续高效发酵转化关键设备，研发国产化、成套化、标准化的生物质绿色制造和多联产装备体系，优化废弃物原料智能化收集、高效转化和资源综合利用等关键技术体系，推进生物质能源与化工产品的配额应用，形成产业化应用模式。

3. 生态能源农场。研究能源植物高效光合固碳、细胞壁生物合成、油脂合成、糖合成代谢网络及其调控机制，选育能源植物新品种；突破能源植物资源在非农耕边际土地或废水中高产、低成本、规模化培育技术，研究能源植物生态影响调控技术，建立生态能源农场资源数据库；研发智能化生物质原料收运储技术装备，建立多元化、多渠道、智能化的新兴生物质原料持续供给体系，建设生态能源农场示范。

4. 生物质能源开发利用探索技术。重点探索研究基于仿生学的生物质生物转化技术、基元结构保持的催化转化技术等。

5. 波浪能利用技术。突破海上生存能力技术、波浪能利用关键元器件和功能部件设计制造技术，研究高转换率波浪能发电技术与工艺，研发兆瓦级波浪能发电装置群；研发海上多能互补发电制淡水综合平台，开展波浪能在海洋仪器供电/驱动、海水淡化和海洋综合养殖业等方面的应用；实现波浪能装置设计制造及电场运行的标准化，推进波浪能技术产业化。

6. 潮流能利用技术。研发潮流能发电机组水下密封技术，开发

高效率的潮流叶轮及适合潮流资源特点的翼型叶片，突破发电机组水下密封、低流速启动、模块设计与制造等关键技术；研发兆瓦级潮流能发电装置群，研究潮流能发电场建设技术与标准体系；建设示范工程，推进规模化利用。

7. 温（盐）差能利用技术。研究温（盐）差能发电热力循环技术，研制温（盐）差能实际海况试验样机，突破安装施工方面的技术瓶颈，建设温（盐）差能利用技术示范工程，并推广应用成熟技术。

8. 干热岩开发利用技术。研发靶区定位和探测的技术设备、大体积压裂技术设备及配套施工技术；突破人工裂隙发育延伸控制技术、施工工艺、裂隙网络优化技术、宽负荷耦合发电技术、干热岩中高温发电工艺，开发高效热电转换地面发电设备，掌握系统高压全封闭运行设计工艺；研究干热岩开发利用系统稳定运行优化控制方法、成井测试及微地震监测装置，形成开发利用环境影响评价方法与指标体系，建立开发利用工程化技术体系和标准，建设示范工程。

9. 水热型地热系统改造与增产技术。突破储层物性综合测试技术及相应测试方法和手段、储层增效技术，掌握孔隙和裂隙型热储动态开发回灌示踪与评价方法，研制示踪、酸化处理材料及储层酸化技术配套装备，形成完善的增效工艺；研究群井开发动态测试、预测与评价技术；研发储层、井筒、输运系统和发电系统核心部件防除垢技术，形成整套工艺；研发规范化取样和测试设备与工艺、

结垢预测热动力学软件、阻垢剂加注工艺与设备。形成水热型地热能储可持续开发利用的创新理论、技术体系、行业标准与大数据信息化技术平台。

十一、高效燃气轮机技术创新

(一) 战略方向

1. 先进材料与制造。重点在高性能复合材料、高温耐热合金材料涂层、大尺寸高温合金（单晶、定向结晶）铸造、复杂结构高温合金无余量精密铸造、高精度与高质量 3D 打印及智能制造等方面开展研发与攻关。

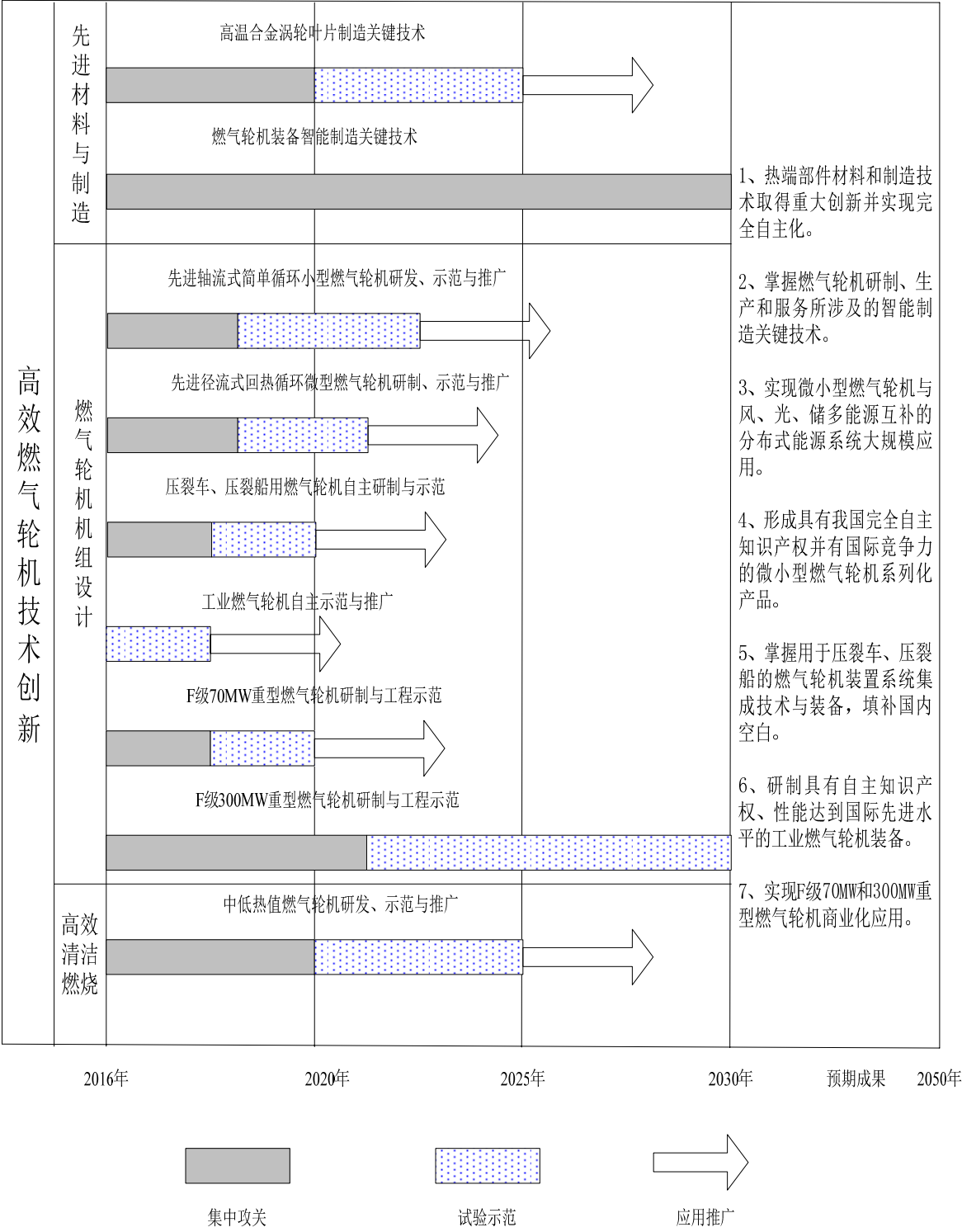
2. 燃气轮机机组设计。重点在微型燃气轮机领域的高效径流式叶轮及系统一体化设计、中小型燃气轮机领域的高效多级轴流压气机设计、重型燃气轮机领域的先进气动布局与通流设计等方面开展研发与攻关。

3. 高效清洁燃烧。重点在低污染燃烧室、分级燃烧燃烧室、回流燃烧室、贫预混与预蒸发燃烧室和可变几何燃烧室，以及低热值燃料稳燃与多燃料适应性、富氢与氢燃料燃烧等方面开展研发与攻关。

(三) 创新目标

1. 2020 年目标。突破热端部件设计制造技术，具备高性能复合材料大规模制备技术；建成微型、小型和中型燃气轮机整机试验平台、重型燃气轮机整机发电试验电站；实现 1MW 以下级微小型燃气轮机及分布式供能系统、1-10MW 级小型燃气轮机和 10-50MW

高效燃气轮机技术创新路线图



级工业驱动用中型燃气轮机的产业化；完成 F 级 70MW 等级整机研制和 300MW 等级重型燃气轮机设计。

2. 2030 年目标。热端部件材料和制造技术取得重大创新和实现完全自主化，高性能复合材料实现低成本和大规模应用；形成具有完全自主知识产权并有国际竞争力的微小型燃气轮机系列化产品；实现 F 级 70MW、300MW 等级重型燃气轮机商业化应用；完成 H 级 400MW 等级重型燃气轮机自主研制。

3. 2050 年展望。突破新原理燃气轮机及循环系统，实现微小型燃气轮机与风光储多能互补的分布式能源系统大规模应用，H 级及以上级重型燃气轮机与整体煤气化循环动力系统实现商业化应用。

（三）创新行动

1. 高温合金涡轮叶片制造。开展高温合金涡轮铸造叶片模具技术、叶片铸造成形技术、大型高温合金涡轮叶片精铸件晶体取向及组织控制技术和尺寸形状精度控制技术、叶片服役损伤的检测体系和评估技术及损伤修复技术，以及高温合金涡轮叶片焊接、特种加工和涂层技术研究，掌握高温合金涡轮叶片制造核心关键技术，形成自主研发能力。

2. 燃气轮机装备智能制造。开展燃气轮机关联设计与多学科优化设计技术、燃气轮机快速工艺设计与仿真优化设计、部件及整体虚拟装配技术、燃气轮机在线（位）检测与制造过程智能管控技术、高精度 3D 金属/合金打印技术、燃气轮机全寿命期的大数据与智能决策技术，以及高效、高精度、高柔性和高集成度的燃气轮机智能

生产线技术研究，掌握燃气轮机研制、生产和服务所涉及智能制造关键技术。

3. 先进径流式、回热循环微型燃气轮机。开展整体插拔式单筒燃烧室和回流燃烧室高效低污染设计技术、离心压气机和向心涡轮设计加工与试验验证、高效回热器设计与验证、燃气轮机与高速电机一体化设计和气浮轴承与磁悬浮轴承技术研究，掌握 1MW 及以下功率等级分布式供能燃气轮机技术；建设示范工程，形成具有完全自主知识产权并有国际竞争力的产品。

4. 先进轴流式简单循环小型燃气轮机。开展高效轴流式动力涡轮设计、伴生气和煤制气等低热值燃料燃烧室研制，掌握 1-10MW 功率等级简单循环小型燃气轮机技术；建设示范工程，实现分布式供能用轴流式小型燃气轮机的产品化与型谱化。

5. 压裂车（船）用燃气轮机。研制满足页岩油气开发需求且性能达到国际目前先进水平的压裂车（船）用燃气轮机装置，研究压裂车（船）用燃气轮机装置集成总体设计及优化技术、高功率密度和轻量化燃气轮机装置系统集成设计技术；完成样机制造，建设示范工程。

6. F 级 70MW 重型燃气轮机。开展具有完全自主知识产权的燃气轮机整机设计与系统集成、全尺寸燃烧室的全温全压性能试验、透平叶片冷却试验，以及整机空负荷试车试验与带负荷发电试验，掌握 F 级 70MW 等级重型燃气轮机核心技术；建立示范工程。

7. F 级 300MW 等级重型燃气轮机。研制 F 级 300MW 等级重

型燃气轮机整机装备，开展整机设计、关键部件试验及工业考核，以及整机制造与系统集成，整机空负荷试验及带负荷发电试验验证，实现装备从部分国产化制造到自主设计、制造及保障；建设示范工程。

8. 高参数燃氢燃气轮机。开展燃氢燃气轮机稳燃技术、燃氢燃气轮机高效低 NO_x 燃烧室设计技术、有效防止氢脆和提高机组寿命的新型合金材料，以及燃氢燃气轮机高温涡轮叶片冷却技术研究。

9. 燃气轮机试验平台建设。建设燃气轮机试验与示范平台、高性能微型和小型燃气轮机整机验证平台、30MW 等级天然气管线燃气轮机增压试验站示范平台，以及 70MW、300MW 等级重型燃气轮机示范电站，满足各功率档燃气轮机试验与示范需要。

十二、先进储能技术创新

（一）战略方向

1. 储热/储冷。重点在太阳能光热的高效利用、分布式能源系统大容量储热（冷）等方面开展研发与攻关。

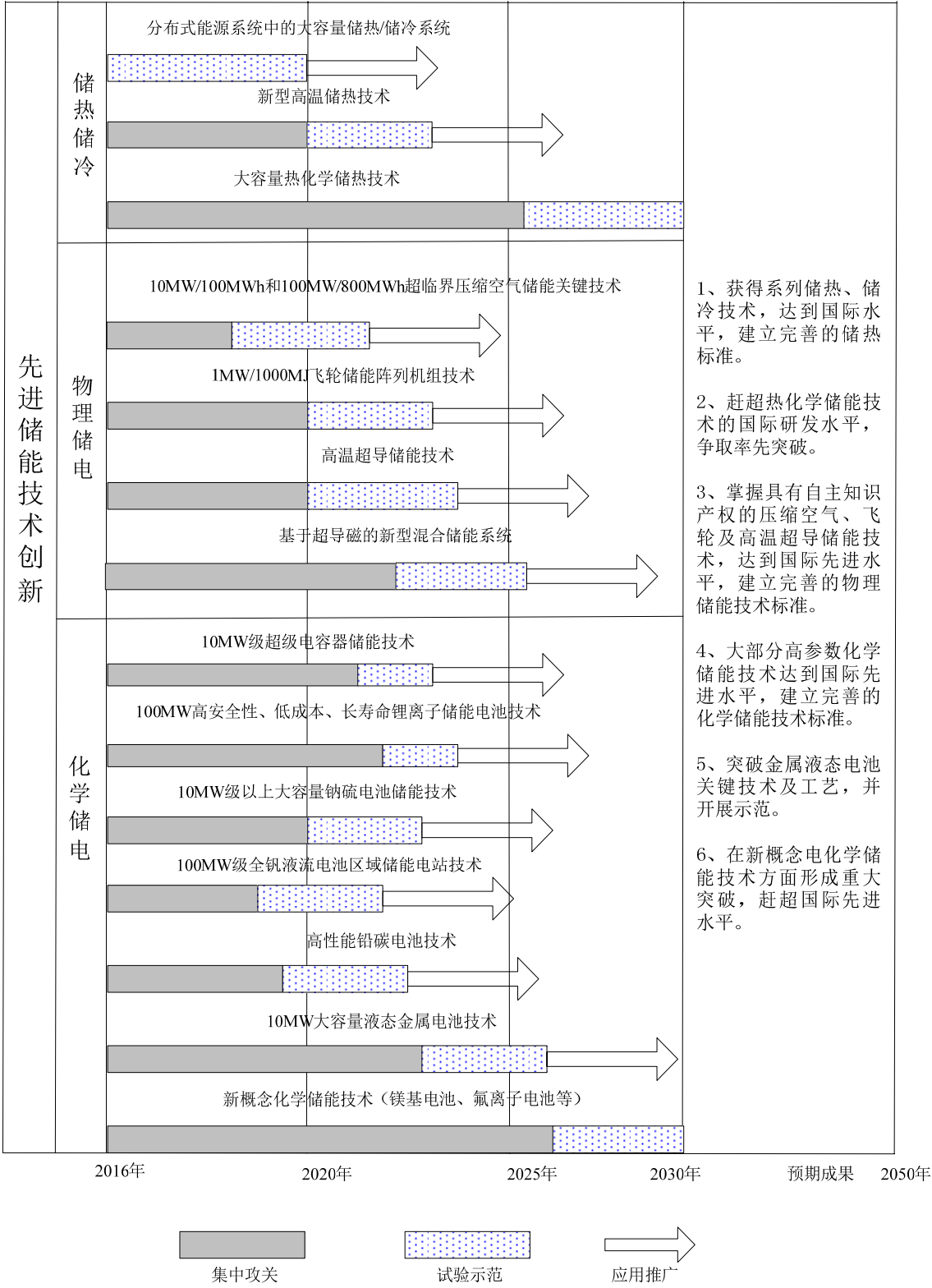
2. 物理储能。重点在电网调峰提效、区域供能的物理储能应用等方面开展研发与攻关。

3. 化学储能。重点在可再生能源并网、分布式及微电网、电动汽车的化学储能应用等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。突破高温储热的材料筛选与装置设计技术、压

先进储能技术创新路线图



压缩空气储能的核心部件设计制造技术，突破化学储电的各种新材料制备、储能系统集成和能量管理等核心关键技术。示范推广 10MW/100MWh 超临界压缩空气储能系统、1MW/1000MJ 飞轮储能阵列机组、100MW 级全钒液流电池储能系统、10MW 级钠硫电池储能系统和 100MW 级锂离子电池储能系统等一批趋于成熟的储能技术。

2. 2030 年目标。全面掌握战略方向重点布局的先进储能技术，实现不同规模的示范验证，同时形成相对完整的储能技术标准体系，建立比较完善的储能技术产业链，实现绝大部分储能技术在其适用领域的全面推广，整体技术赶超国际先进水平。

3. 2050 年展望。积极探索新材料、新方法，实现具有优势的先进储能技术储备，并在高储能密度低保温成本热化学储热技术、新概念电化学储能技术（液体电池、镁基电池等）、基于超导磁和电化学的多功能全新混合储能技术等实现重大突破，力争完全掌握材料、装置与系统等各环节的核心技术。全面建成储能技术体系，整体达到国际领先水平，引领国际储能技术与产业发展。

（三）创新行动

1. 储热/储冷技术。研究高温（ $\geq 500^{\circ}\text{C}$ ）储热技术，开发高热导、高热容的耐高温混凝土、陶瓷、熔盐、复合储热材料的制备工艺与方法；研究高温储热材料的抗热冲击性能及机械性能间关系，探究高温热循环动态条件下材料性能演变规律；研究 10MWh 级以上高温储热单元优化设计技术。开展 10~100MWh 级示范工程，示

范验证 10~100MWh 级面向分布式供能的储热（冷）系统和 10MW 级以上太阳能光热电站用高温储热系统；开发储热（冷）装置的模块化设计技术，研究大容量系统优化集成技术、基于储热（冷）的动态热管理技术。研究热化学储热等前瞻性储热技术，探索高储热密度、低成本、循环特性良好的新型材料配对机制；突破热化学储热装置循环特性、传热特性的强化技术；创新热化学储热系统的能量管理技术。

2. 新型压缩空气储能技术。突破 10MW/100MWh 和 100MW/800MWh 的超临界压缩空气储能系统中宽负荷压缩机和多级高负荷透平膨胀机、紧凑式蓄热(冷)换热器等核心部件的流动、结构与强度设计技术；研究这些核心部件的模块化制造技术、标准化与系列化技术。突破大规模先进恒压压缩空气储能系统、太阳能热源压缩空气储能系统、利用 LNG 冷能压缩空气储能系统等新型系统的优化集成技术与动态能量管理技术；突破压缩空气储能系统集成及其与电力系统的耦合控制技术；建设工程示范，研究示范系统调试与性能综合测试评价技术；研发储能系统产业化技术并推广应用。

3. 飞轮储能技术。发展 10MW/1000MJ 飞轮储能单机及阵列装备制造技术。突破大型飞轮电机轴系、重型磁悬浮轴承、大容量微损耗运行控制器以及大功率高效电机制造技术；突破飞轮储能单机集成设计、阵列系统设计集成技术；研究飞轮单机总装、飞轮储能阵列安装调试技术；研究飞轮储能系统应用运行技术、检测技术、

安全防护技术；研究飞轮储能核心部件专用生产设备、总装设备、调试设备技术和批量生产技术。研究大容量飞轮储能系统在不同电力系统中的耦合规律、控制策略；探索飞轮储能在电能质量调控、独立能源系统调节以及新能源发电功率调控等领域中的经济应用模式；建设大型飞轮储能系统在新能源的应用示范。

4. 高温超导储能技术。探索高温超导储能系统的设计新型原理，突破 2.5MW/5MJ 以上高温超导储能磁体设计技术；研究高温超导储能系统的功率调节系统 PCS 的设计、控制策略、调制及制造技术；研究高温超导储能低温高压绝缘结构、低温绝缘材料和制冷系统设计技术；研究高性能在线监控技术、实时快速测量和在线检测控制技术。布局基于超导磁和电化学及其它大规模物理储能的多功能全新混合储能技术，重点突破混合储能系统的控制技术及时间尺度下的能量匹配技术。开发大型高温超导储能装置及挂网示范运行。

5. 大容量超级电容储能技术。开发新型电极材料、电解质材料及超级电容器新体系。开展高性能石墨烯及其复合材料的宏量制备，探索材料结构与性能的作用关系；开发基于钠离子的新型超级电容器体系。研究高能量混合型超级电容器正负电极制备工艺、正负极容量匹配技术；研发能量密度 30Wh/kg、功率密度 5000W/kg 的长循环寿命超级电容器单体技术。研究超级电容器模块化技术，突破大容量超级电容器串并联成组技术。研究 10MW 级超级电容器储能装置系统集成关键技术，突破大容量超级电容器应用于制动能

量回收、电力系统稳定控制和电能质量改善等的设计与集成技术。

6. 电池储能技术。突破高安全性、低成本、长寿命的固态锂电池技术，以及能量密度达到 300Wh/kg 的锂硫电池技术、低温化钠硫储能电池技术；研究比能量>55Wh/kg，循环寿命>5000 次（80%DOD）的铅炭储能电池技术；研究总体能量效率≥70%的锌镍单液流电池技术；研究储能电池的先进能量管理技术、电池封装技术、电池中稀有材料及非环保材料的替代技术。研究适用于 100kW 级高性能动力电池的储能技术，建设 100MW 级全钒液流电池、钠硫电池、锂离子电池的储能系统，完善电池储能系统动态监控技术。突破液态金属电池关键技术，开展 MW 级液态金属电池储能系统的示范应用。布局以钠离子电池、氟离子电池、氯离子电池、镁基电池等为代表的新概念电池技术，创新电池材料、突破电池集成与管理技术。

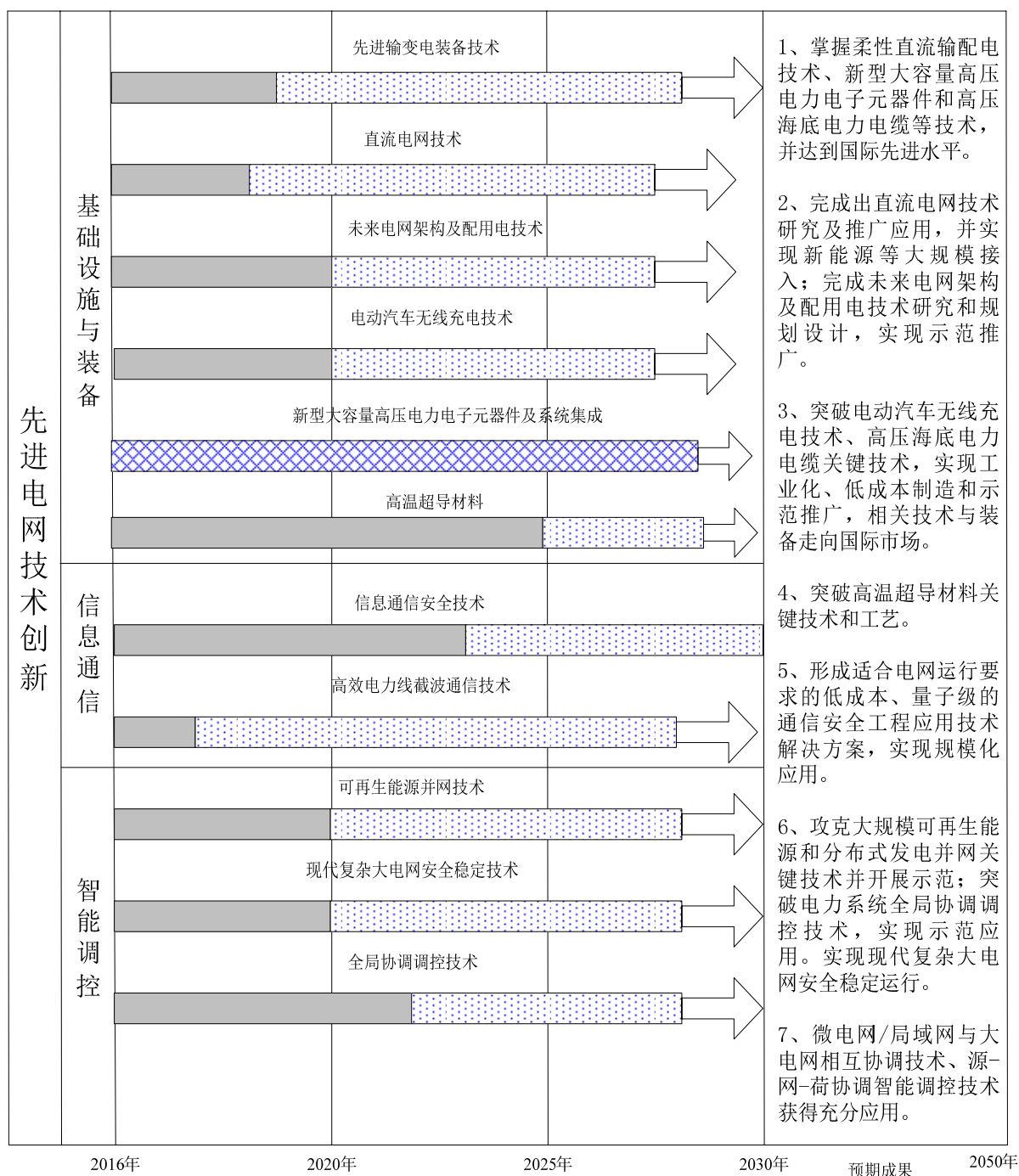
十三、现代电网关键技术创新

(一) 战略方向

1. 基础设施和装备。重点在柔性直流输配电、无线电能传输、大容量高压电力电子元器件和高压海底电力电缆等先进输变电装备技术，以及用于电力设备的新型绝缘介质与传感材料、高温超导材料等方面开展研发与攻关。

2. 信息通信。重点在电力系统量子通信技术应用、电力设备在线监测先进传感技术、高效电力线载波通信、推动电力系统与信息系统深度融合等方面开展研发与攻关。

现代电网关键技术创新路线图



集中攻关



试验示范



集中攻关和试验示范或仅试验示范



应用推广

3. 智能调控。重点在可再生能源并网、主动配电网技术、大电网自适应/自恢复安全稳定技术、适应可再生能源接入的智能调度运行、电力市场运营、复杂大电网系统安全稳定等方面开展研发与攻关。

(二) 创新目标

1. 2020 年目标。突破柔性直流输配电、电动汽车无线充电技术，掌握大容量高压电力电子器件和高压海底电力电缆等先进输变电装备关键技术，实现工业化、低成本制造及示范推广，相关技术及装备走向国际市场。突破信息通信安全技术和电力线载波技术，形成宽带电力线通信标准；形成适合电网运行要求的低成本、量子级的通信安全技术。研究大规模可再生能源和分布式发电并网关键技术并开展示范；突破电力系统全局协调调控技术，实现示范应用。完成现代复杂大电网安全稳定技术研究，实现现代复杂大电网安全稳定运行。

2. 2030 年目标。柔性直流输配电技术、新型大容量高压电力电子器件和高压海底电力电缆等先进输变电装备达到国际先进水平。突破高温超导材料关键技术和工艺。形成适合电网运行要求的低成本、量子级的通信安全工程应用技术解决方案，实现规模化应用。微电网/局域网与大电网相互协调技术、源-网-荷协调智能调控技术获得充分应用。

3. 2050 年展望。无线输电技术得到应用，电网的系统、设备、通信、控制等技术引领国际先进水平，完全掌握材料、核心器件、

装备和系统成套技术。完全解决可再生能源和分布式电源并网消纳问题。建成世界领先的、安全高效的、绿色环保的现代电网。

（三）创新行动

1. 先进输变电装备技术。研发高可靠性、环保安全（难燃、低噪声）、低损耗、智能化及紧凑化的变压器；研制高电压、大电流、高可靠性和选相控制的替代 SF6 的新型气体介质断路器及真空和固态断路器，并开展示范应用；研制安全高效的新型限流器；突破高压海底电力电缆的制造和敷设技术，研发新型电缆材料、先进附件；研发高质量在线监测/检测装备和系统。

2. 直流电网技术。研究直流电网架构及运行控制技术，建立直流电网技术装备标准体系；开展新型电压源型换流器、直流断路器、直流变压器、直流电缆、直流电网控制保护等核心设备研发和工程化；建设包含大规模负载群、集中/分布式新能源、大规模储能在内的直流电网示范工程。

3. 电动汽车无线充电技术。以电动汽车无线充电为突破点和应用对象，研发高效率、低成本的无线电能传输系统，实现即停即充，甚至在行驶中充电。形成电动汽车无线充电技术标准体系，研究电动汽车无线充电场站的负荷管理，建设电动汽车无线充电场站示范工程。

4. 新型大容量高压电力电子元器件及系统集成。研究先进电力电子元器件及应用；开展新一代大容量、高电压电力电子器件的材料研发和关键工艺技术研究；研发用于高电压、大容量直流断路器

和断路保护器的高性能电力电子器件；建设高水平生产线，提高质量、降低成本，推进国产化。研究高压大容量固态电力电子变压器、大容量双向/多向换流器、多功能并网逆变器、智能开关固态断路器、固态电源切换开关、软常开开关设备。

5. 高温超导材料。研究高温超导基础理论、各系材料配方及制备工艺；开展面向超导电力装备的应用型超导材料研究；推动高温超导材料的实用化，并研究其成套工程技术；开展高温超导在超导电缆、变压器、限流器、超导电机等领域的示范和应用。

6. 信息通信安全技术。研究电力线频谱资源动态、高效地感知与使用；研究降低对已有通信业务干扰的关键技术，形成宽带电力线通信技术标准体系。建设能源互联网量子安全通信技术与常规网络融合应用示范，提出电网量子安全通信加密理论、量子通信协议及量子安全通信与经典网络通信融合的模式。形成适合我国电网量子安全通信要求的低成本、量子级安全可靠的通信技术解决方案。采用低功耗通用无线通信技术，实现电网末端海量信息的采集和传输。

7. 高效电力线载波通信技术。研究进一步提高电力线载波通信频谱效率的通信方式，提高工作带宽并充分考虑利用电力线三相之间形成的多输入多输出构架，使电力线载波通讯系统物理层的传输速率达到 Gbps；使电力线通信应用范围扩展到包括互联网接入、家庭联网、家庭智能控制、新能源监控及电力安全生产等众多领域。

8. 可再生能源并网与消纳技术。制定大规模清洁能源发电系统

并网接入技术标准和规范。研究并实现基于天气数据的可再生能源发电精确预测。研发并推广增强可再生能源并网能力的储能、多能源互补运行与控制、微电网、可再生能源热电联产等技术。发挥电力大数据和电力交易平台在促进可再生能源并网和消纳中的作用。实现电网和可再生能源电源之间的高度融合，促进可再生能源高效、大容量的分布式接入及消纳。

9. 现代复杂大电网安全稳定技术。研究交直流混合电网、智能电网、微电网构成的复杂大电网稳定机理分析技术，在线/实时分析技术和协调控制技术；建立能源大数据条件下的现代复杂大电网仿真中心，研究满足大规模间歇性能源/分布式能源/智能交互/大规模电力电子设备应用的、高效精确的电力系统仿真技术；加强电网大面积停电的在线/实时预警和评估技术研究。

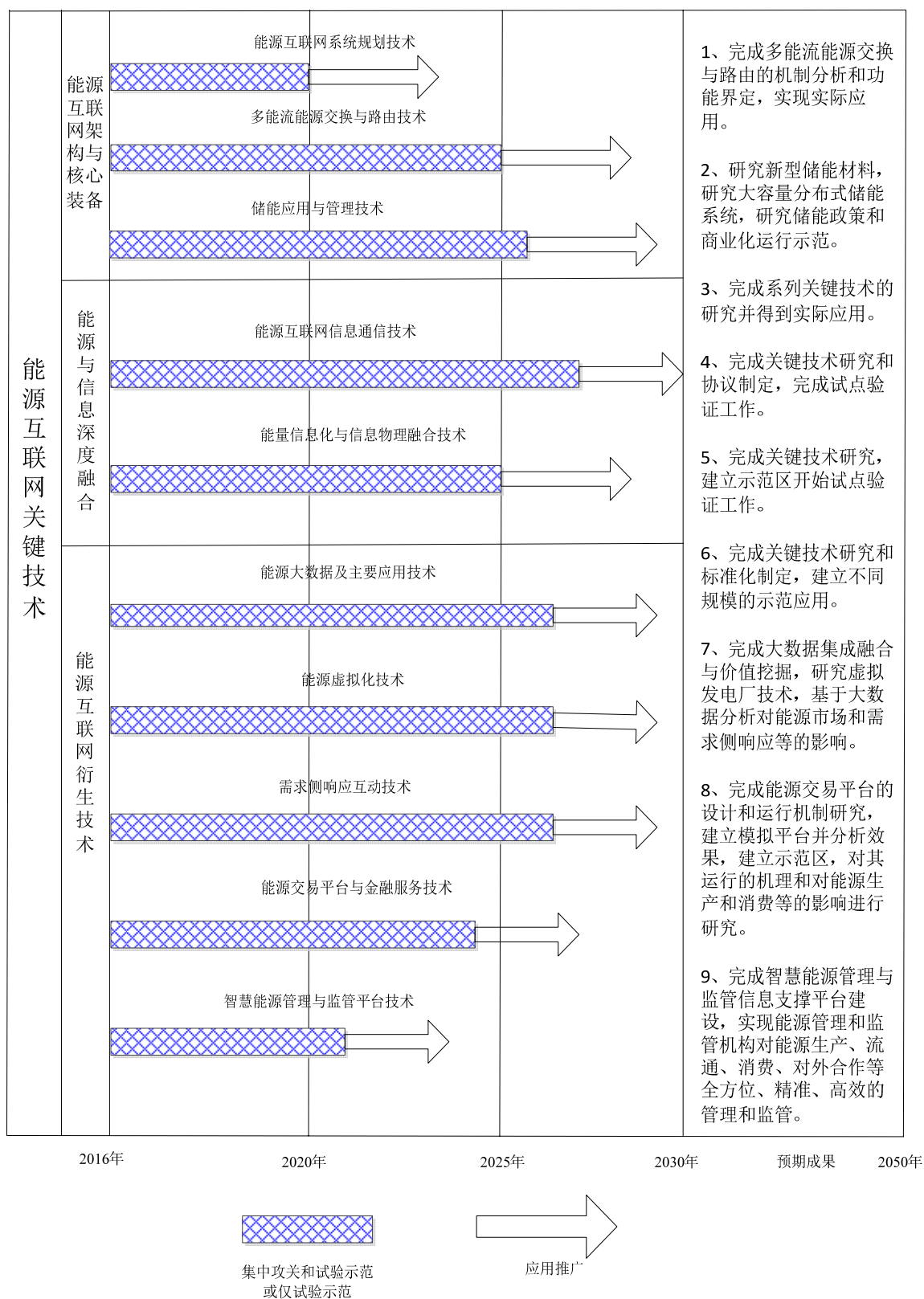
10. 全局协调调控技术。研究大规模风电/光伏接入的输电网与含高比例分布式可再生能源的配电网之间协调互动的建模分析、安全评估、优化调度与运行控制技术，建立多种特性发电资源并存模式下的输配协同运行控制模式；针对未来电网中多决策主体、多电网形态特点，构建具有高度适应性的调度运行控制体系，开展“分布自律-互动协调”的源-网-荷协同的能量管理技术研发与示范应用。

十四、能源互联网技术创新

（一）战略方向

1. 能源互联网架构设计。重点在能源互联网全局顶层规划、功

能源互联网技术创新路线图



能结构设计、多能协同规划、面向多能流的能源交换与路由等方面开展研发与攻关。

2. 能源与信息深度融合。重点在能量信息化与信息物理融合、能源互联网信息通信等方面开展研发与攻关。

3. 能源互联网衍生应用。重点在能源大数据、能量虚拟化、储能及电动汽车应用与管理、需求侧响应以及能源交易服务平台、智慧能源管理与监管支撑平台等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。初步建立能源互联网技术创新体系，能源互联网基础架构、能源与信息深度融合及能源互联网相关应用技术取得重大突破并实现示范应用。部分能源互联网核心装备取得突破并实现商业化应用。建立智慧能源管理与监管技术支撑平台。初步建立开放的能源互联网技术标准、检测、认证和评估体系。

2. 2030 年目标。建成完善的能源互联网技术创新体系。形成具有国际竞争力的系列化、标准化能源互联网核心技术装备，核心设备和发展模式实现规模化应用。形成完善的能源互联网技术标准、检测、认证和评估体系，以及具有国际竞争力的能源互联网支撑系统和行业服务体系。

3. 2050 年展望。全面建成国际领先的能源互联网技术创新体系，引领世界能源互联网技术创新。建成基础开放、共享协同的能源互联网生态体系。

（三）创新行动

1. 能源互联网生产消费智能化技术。研究可再生能源、化石能源智能化生产，以及多能源智能协同生产技术。研究智能用能终端、智能监测与调控等能源智能消费技术。研究综合能源和智能建筑集成技术，将分布式能源发电和天然气网、建筑节能等相结合实现冷、热、电三大能源系统的整合优化运行。

2. 多能流能源交换与路由技术。研究灵活高效、标准化的能源互联网网络拓扑结构。研究能源路由器、能源交换机、能量网卡等关键设备。研究适用于能源互联网的新型电力电子器件、超导材料等基础技术。研究多能流能源交换与路由机制与方法，建立标准化的能源交换机与路由器系统架构与功能指标。研究多能耦合的能源互联网运行及控制可靠性技术，确保能源互联网的高可靠性运行。

3. 能量信息化与信息物理融合技术。研究能量信息数字化处理的理论架构和方法。研究信息-能量耦合的统一建模与安全分析技术。研究系统结构优化、多元信息物理能源系统的网络协同控制等信息物理能源系统融合技术。研究开放的信息物理能源融合技术接口标准。研究利用能量信息化与网络化管控盘活碎片化存量灵活性能源资源技术。

4. 能源互联网信息通信技术。研究面向能源互联网的新型海量信息采集技术体系架构与高效传输处理核心技术。研究支撑大规模分布式电源和负荷计量、监测等功能的各类新型传感器件。研究信息物理系统数据、终端客户信息、物理网络数据等能源互联网海量信息技术处理与融合技术。研究能源互联网信息安全技术。

5. 能源大数据及其应用技术。研究能源互联网用户大数据、设备大数据、运行大数据、交易大数据、金融大数据等各类大数据集成技术。研究多源数据集成融合与价值挖掘关键技术。研究能源大数据在引导政府决策、提升企业业务水平与服务质量以及创新能源产业商业模式等方面的支撑技术。

6. 能源虚拟化技术。研究虚拟电厂、分布式能源预测、区域多能源系统综合优化控制及复杂系统分布式优化技术，研究能源虚拟化技术参与多能源系统的能量市场、辅助服务市场、碳交易市场等支撑技术。在能源系统自动化程度较高、分布式能源较为丰富的地区开展能源虚拟化技术参与市场交易试点工作。

7. 能源互联网储能应用与管理技术。研发能源互联网各类应用场景下的支持即插即用、灵活交易的分布式储能设备和电动汽车应用技术。研发支撑电、冷、热、气、氢、储等多种能源形态灵活转化、高效存储、智能协同的核心装备。研发支撑储能设备模块化设计、标准化接入、梯次化利用与网络化管理关键技术。

8. 需求侧响应互动技术。研究基于智能用能的需求侧响应互动技术。研究基于用户行为心理学等交叉学科手段进行需求响应建模技术。研究需求响应资源辨识与量化，需求响应计量，需求响应参与辅助服务结算等关键技术。研究需求响应参与系统调峰、调频等辅助服务市场支撑技术。

9. 能源交易服务平台技术。研究满足能源互联网各类功能的交易市场交易平台技术。研究能源结构生态化、产能用能一体化、资源配

置高效化的全新市场架构设计技术。研发基于身份识别的自动交易和实时结算技术体系。研究基于能源互联网的金融服务技术。开发服务于能源生产、传输、储存和消费等全寿命周期的能源互联网金融产品与融资工具。研究能源自由交易情景下能源系统安全保障技术。

10. 智慧能源管理监管平台技术。研究基于能源大数据，支撑能源规划、改革和决策的智慧能源精准管理技术；研究基于能源互联网，覆盖能源生产、流通、消费和国际合作等全领域，且和智慧能源发展水平相适应的现代能源监管技术。

十五、节能与能效提升技术创新

(一) 战略方向

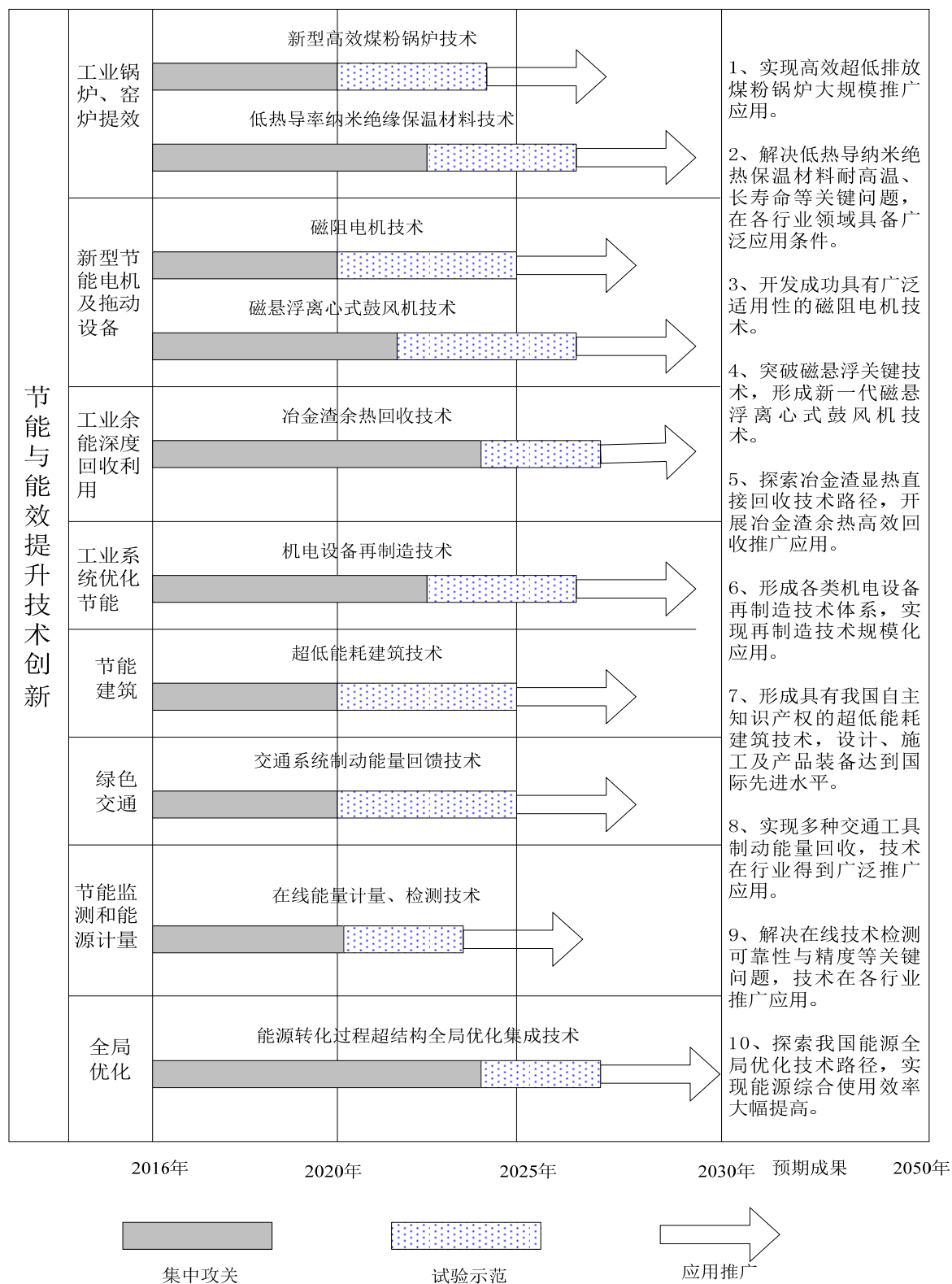
1. 现代化工业节能。重点在高效工业锅（窑）炉、新型节能电机、工业余热深度回收利用等相关领域，以及基于先进信息技术的工业系统节能等方面开展研发与攻关。

2. 新型建筑节能。重点在建筑工业化、装配式住宅、被动式节能技术与产品等相关领域，以及高效智能家电、制冷、照明、办公等终端用能产品开展研发与攻关。

3. 先进交通节能。重点在高效节能运输工具、制动能量回馈系统、船舶推进系统、数字化岸电系统等相关领域，以及基于先进信息技术的交通运输系统开展研发与攻关。

4. 全局优化系统节能。重点在能源全局优化系统集成，能源梯级利用等相关领域，包括系统优化、多能互补、多能转化、智能调

节能与能效提升技术创新路线图



度等方面开展研发与攻关。

（二）创新目标

1. 2020 年目标。工业、建筑、交通等重点行业基本形成具有自主知识产权的先进节能技术和装备体系，建立开放的节能标准、检测、认证和评估技术体系。重点高耗能产品单位能耗明显降低，终端用能产品能效大幅提升，主要交通运输工具能耗显著下降，以超低能耗、高比例非化石能源为基本特征的绿色建筑体系初步形成，能源全局系统优化技术初见成效，对实现节能减排目标形成有力支撑。

2. 2030 年目标。在能源消费领域全面建立具有自主知识产权的先进节能技术体系，节能技术、产品和装备具有全球竞争力。形成国际先进的能效标准、检测、认证和评估技术体系。主要领域能源效率达到国际先进水平，系统节能成为能效提升的关键驱动力，支撑温室气体排放在 2030 年前尽早达到峰值。

3. 2050 年展望。全面建成国际领先的节能技术体系，引领全球节能技术创新。先进节能技术与新一代信息技术深度融合，各领域能源获得充分、高效和有序利用。

（三）创新行动

1. 高效工业锅（窑）炉技术。开发新型高效煤粉锅炉、大型流化床锅炉、燃气锅炉烟气全热回收、高炉煤气锅炉蓄热稳燃、高效低氮解耦燃烧（层燃）、新型低温省煤器、智能吹灰优化与在线结焦预警系统等工业锅炉节能技术。研究新型蓄热式燃烧、低热导率

纳米绝热保温材料、黑体强化辐射和预混式二次燃烧等工业窑炉节能技术。建设绿色锅炉示范工程，运行效率提高到 90%以上，促进高效节能锅炉应用。

2. 新型节能电机及拖动设备。研究新型自励异步三相电机、磁阻电机、稀土永磁同步电机、变极起动无滑环绕线转子感应电动机等新型高效电机节能技术与设备。研究大型往复压缩机流量无级调控、磁悬浮离心式鼓风机、曲叶型离心风机、新型高效节能水泵等拖动设备节能技术。开展电机能效提升工程，改造电机系统调节方式，建设基于互联网的电机系统节能提效研发平台，鼓励高效耗能设备替代，加快系统无功补偿改造。

3. 工业余能深度回收利用技术。重点研发冶金渣余热回收、冶金余热余压能量回收同轴机组应用、全密闭矿热炉高温烟气干法净化回收利用、焦炉荒煤气余热回收、转炉煤气干法回收、化工生产反应余热余压利用、高效长寿命工业换热器、螺杆膨胀动力驱动、有机朗肯循环（ORC）低品位余热发电等工业余能深度回收利用技术和设备，提高工业余能回收利用效率。

4. 工业系统优化节能技术。研究开发钢铁、建材、石化等高耗能工业领域的可视化能源管理优化系统。开发基于智能化控制的燃料及蒸汽高效利用技术。研究应用机电设备再制造、建筑材料薄型化生产、玻璃瓶罐轻量化制造等资源减量化与循环化利用技术。研发高档数控机床、机器人、操作系统及相关工业软件、信息通信设备等工艺系统优化节能技术。建设绿色制造工程，实现制造业绿色

发展，主要产品单耗达到世界先进水平。

5. 先进节能建筑技术。重点研究建筑工业化、装配式住宅、超低能耗建筑等先进建筑节能技术。研发高效能热泵、磁悬浮变频离心式中央空调机组、温湿度独立控制空调系统、排风余热与制冷机组冷凝热回收等主动型建筑节能技术。研发高防火性墙体保温材料、节能型材、热反射镀膜玻璃、低辐射（Low-E）玻璃、建筑遮阳等被动式节能技术与产品。推进光伏建筑一体化（BIPV）、太阳能空调等节能技术在建筑上的应用，开发高效智能空调、电冰箱、洗衣机等节能电器。推进现代木结构、新型钢结构建筑及装配式住宅的示范应用。

6. 绿色交通技术。开发先进高速重载轨道交通装备和新能源汽车等高效节能运输装备。研究开发城市轨道交通牵引供电系统制动能量回馈、轨道车辆直流供电变频空调、缸内汽油直喷发动机、车用燃油清洁增效、基于减小螺旋桨运动阻力的船舶推进系统、数字化岸电系统等交通运输节能技术。开发应用沥青路面冷再生、LED智能照明、大功率氙气灯照明等交通道路系统节能技术。

7. 节能监测和能源计量。研发快速准确的便携或车载式节能检测设备，在线能源计量、检测技术和设备，热工检测便携式设备、在线设备和检测技术。研究石油、化工、冶金等流程工业领域压缩机、水泵、电机等通用设备运行效能评估及节能改造技术。研究建筑能耗数据监测与评估诊断技术。

8. 全局优化技术。研究提高能源生产侧与消费侧响应效率、实

现跨部门能源规划布局的全局优化建模技术。研究非石油资源能源转化利用的最优路径比选技术，以及能源转化过程超结构全局优化集成技术。研发油气跨区域最优管网布局设计。研究能源系统智慧化建设最优路径比选与全局优化的系统设计。研究具有耦合金融、匹配供需、精准计量、身份识别、自动交易、实时结算、适时监管等功能的能源全局动态优化调度技术，攻克一批智能互联互通、支撑智慧化架构节点的全局优化构建技术。