

日本氢能发展战略及其对中国的启示

林云蕾^{1, 2}, 卞曙光¹, 程竹静¹, 陈金辉^{1, 2}

(1. 科学技术部高技术研究发展中心, 北京 100044;

2. 清华大学公共管理学院, 北京 100084)

摘要: 探讨了日本在能源领域的重要战略举措——氢能发展战略。通过对日本氢能发展战略的深入分析, 探讨了其实施背景、战略目标、政策举措以及对未来进行展望。同时, 还考察了氢能发展战略在实施过程中面临的挑战。因此, 可以更好地理解日本氢能发展战略及其对中国氢能政策制定和产业发展的启示。

关键词: 日本; 氢能; 氢能发展战略; 氢能社会

中图分类号: F416.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2023.11-12.001

能源是维持和发展国民经济、确保人民生活稳定的必需品^[1-2]。二战后, 石油、煤炭和天然气等化石燃料支持了日本的现代化建设和经济高速增长^[3]。然而, 日本因自然资源匮乏, 自 20 世纪 70 年代的两度石油危机以来, 国内能源供应一直严重依赖进口^[3-4], 面临能源结构脆弱性的挑战。此外, 东日本大地震后, 日本核电站的关闭导致日本的温室气体排放量大幅增加^[1]。日本在能源安全、碳减排和经济增长的多重压力下, 必须发展多样化的零碳能源。

氢能是一种清洁、高效的能源载体, 具备减少温室气体排放、实现能源多元化以及平衡能源存储与分配的潜力, 受到国际社会广泛关注^[5-8]。然而, 要实现氢能的大规模可持续利用, 仍面临技术^[9]、经济^[5]、基础设施^[9]、法律法规^[10-11]等多方面的挑战^[12-13]。因此, 许多国家开始加大对氢能技术研发和推广的投入, 以期在未来能源格局中获得竞争优势^[8, 14-16]。日本作为一个经济强国, 积极推进氢能政策, 并制定了一系列战略以应对氢能领域的挑战^[17-18]。氢能的使用可以极大地促进能源节约和减轻环境负担, 有助于增强日本的能源安全^[19-20]。

自 20 世纪 70 年代以来, 日本一直在探索氢能技术的潜力^[21]。这一努力的背后, 是日本对能源安全、环境可持续性和碳减排等全球性挑战的日益关注, 日本投入了大量资源进行研究和实验, 旨在找到替代传统能源的解决方案^[21]。同时, 为了促进氢能产业发展, 日本制定了长期的氢能发展战略。从“氢能社会”愿景的提出, 到将氢能视为未来能源体系中的关键要素^[22], 日本从政治、工业、经济和外交等方面推动氢能发展, 使其广泛应用于发电、工业、运输、住宅等领域。本文将深入探讨日本氢能发展战略的核心目标和主要内容, 分析其在实现能源可持续性、促进产业创新和推动经济增长等方面发挥的作用。采用文献综述和政策分析的方法, 对日本氢能战略文件、相关政策法规及研究报告进行系统梳理和分析, 并借鉴国际氢能发展的经验, 通过比较分析评估日本氢能发展战略的优势、挑战和发展前景。

1 日本氢能发展战略的实施背景

长期以来, 受地理环境等因素制约, 日本在能源供应方面存在较大的不确定性^[23]。二战后, 为

第一作者简介: 林云蕾 (1989—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为科技政策、创新政策、技术预见。

通信作者简介: 卞曙光 (1964—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为创新管理、科技项目管理、科技政策。电子邮箱: jeanbsg@htrdc.com

收稿日期: 2023-09-13

满足生产用能源需求并适应经济形势变化, 日本政府多次调整能源结构^[24-27], 从最初的以煤为主逐渐向以油为主转变。到 1973 年, 日本 95% 的能源需求依赖进口, 其中大约 78% 是石油^[28]。

中东石油危机爆发后, 日本为降低对进口石油的过度依赖, 进一步实现能源类型多样化, 将重点转向核电, 同时加大了对煤和天然气的进口以部分取代石油^[29]。同时, 日本加快新能源技术的开发, 并在高耗能产业开展节能行动等。核电的大规模应用使得日本的能源自给率提高, 同时为保障能源安全做出了贡献^[30]。然而, 2011 年 3 月东福岛核事故的发生加剧了日本民众对核电安全的质疑^[31]。与此同时, 受到新的低碳节能要求的推动, 日本政府宣布逐渐减少对核能的依赖, 并积极发展可再生能源^[4]。近年来, 以太阳能和风能为代表的可再生能源发展迅速, 太阳能的系统成本下降, 采用率快速增加^[32-33]。然而, 由于可再生能源的产量不稳定, 引入和开发平滑电力负荷技术至关重要^[34-35]。与氢气相关的技术, 如氢气生产、储存、运输和燃料电池, 是平滑电力负荷的技术集群之一^[36]。氢能是一种可实现二氧化碳零排放的能源, 其利用可再生能源生产的电力盈余生产出来, 随后用于燃料电池产生电力^[37]。

2021 年, 日本的统计数据显示^[38], 电力(发电)、燃料和原材料是导致日本二氧化碳排放增加的三大原因, 其中电力是日本二氧化碳排放量最大的部门, 发电行业碳排放量占二氧化碳排放总量的 40.4%。然而即使日本所有电力均由可再生能源提供, 剩余 60.0% 的工业现场也需要降低燃料和原材料带来的二氧化碳排放量。氢气之所以备受青睐, 不仅因为它可以由化石燃料、风能或太阳能等多种资源生产, 理论上可以从全球任何地方进口, 而且使用氢气作为燃料, 得到的唯一产物是水, 不污染环境。因此, 氢能的广泛应用将会给社会带来重大变化, 高效、清洁的氢能将成为从交通到发电等领域的动力来源, 在提高能源效率的同时实现环境友好型社会^[39]。

为减少二氧化碳排放, 应首先制定能源政策^[38]。自 20 世纪 90 年代以来, 日本的政策制定者和研究人员一直在研究氢能产业的发展前景^[8]。为满足日本能源安全和多样性需求, 以安全性、能源保障、经济效率和环境 (Safety, Energy Security, Economic Efficiency, Environment, S+3E) 的能源

政策为指导原则, 日本制定了一系列具有革命性意义的政策, 旨在实现将氢气作为主要能源的社会, 促进可持续的经济增长, 改善环境和提高能源安全^[40]。日本于 2017 年制定了全球首个国家氢能发展战略——《氢能基本战略》; 2020 年推出的环境创新战略, 将氢能纳入 2050 年实现全球碳中和的技术创新努力中。在一系列氢能政策的推动下, 截至 2023 年 5 月, 日本已建立了 168 个燃料电池电动汽车加氢站, 并在液氢载体开发等领域进展顺利。然而, 日本仍然面临一定的挑战, 包括降低氢能的的生产成本、扩大应用范围、建立全面的氢能生态系统以及构建氢能全球供应链和氢能基础设施等。

综上所述, 日本政府为应对不断变化的能源需求和国际能源形势, 不断调整能源结构。近年来, 在福岛核事故和实现 2050 年碳中和目标的压力下, 日本加快减少核能依赖和大力发展氢能技术的步伐。氢能政策的实施不仅是应对能源挑战的一项关键举措, 也是为了推动可持续发展、提高环境友好性以及确保能源安全性的重要决策。在不断克服挑战的同时, 日本正朝着实现氢能作为主要能源的社会迈出坚实的步伐, 为未来的全球能源格局做出了积极而重要的贡献。

2 日本氢能发展战略的演进历程

日本对氢能和燃料电池的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代。1974 年开始的“阳光计划 (Sunshine Project)”中提出了制氢技术, 1978 年开始的“月光计划 (Moonlight Project)”推进了燃料电池技术研发, 1993 年开始的“新阳光计划 (New Sunshine Project)”启动了国际氢能转换清洁能源网络 (World Energy NETwork, WE-NET)。虽然氢能和燃料电池都被视为未来有前景的技术, 但长期以来其在日本能源政策中主要被定义为节能措施之一。根据日本《能源政策措施基本法》(第 71 号法)规定, 政府必须制订能源基本计划, 能源基本计划是日本长期、全面和系统的综合性能源政策, 每 3~4 年进行一次审查, 并根据形势和需求进行修改。在该法案规定下, 日本于 2003 年 10 月制订了《第一次能源基本计划》, 分别于 2007 年、2010 年、2014 年、2018 年和 2021 年进行了 5 次修订。2014 年 4 月 11 日, 日本内阁会议批准了《第四次能源基本计划》, 氢能首次被纳入能源基本计划中。该计划规划了日本未

来 20 年左右的能源供需结构, 是日本能源系统重大转型的综合蓝图^[41]。该计划指出, 氢能等具有促进二次能源结构转变的潜力, 需要大力推广, 日本将着力打造“氢能社会”, 为此必须制定从制氢到储运、利用的全供应链战略。该计划还强调了建设“氢能社会”的具体步骤, 包含普及固定式燃料电池技术、加快引进燃料电池汽车、实行氢能发电等新技术, 促进氢能稳定供应的制、储、输运技术发展, 制定“氢能社会”路线图等。

自《第四次能源基本计划》实施以来, 日本能源自给率仍较低(2016 年不超过 8%), 其能源供给结构的根本脆弱性依然存在^[42]。此外, 随着人口下降、社会快速老龄化, 节能措施稳步推进, 日本总体能源需求有所降低。而以电力或氢能为动力的新一代汽车、高效利用天然气的热电联产系统等能源应用领域的扩大, 人工智能、物联网和虚拟电厂等数字化技术的发展, 能源需求结构将发生重大转变。资源价格不稳定、全球温室气体排放量增加等也加剧了日本能源结构性问题。

为建立可靠的能源结构, 2018 年 7 月 3 日, 日本内阁批准了新的能源基本计划——《第五次能源基本计划》^[42], 作为日本面向 2030 年乃至 2050 年的新能源政策方向的基础。《第五次能源基本计划》指出, 日本应将可再生能源作为未来的“主要能源”。这是日本政府首次在《能源基本计划》中将可再生能源列为主要动力来源。该计划提出, 日本应在不久的将来, 以燃料电池动力汽车为中心, 加快扩大对交通领域的氢能需求, 建立氢能的“生产、储存、运输和利用”全链条的国际供应链, 利用包括褐煤在内的廉价海外燃料, 以降低中长期的氢能利用成本; 截至 2030 年, 日本将采购约 30 万 t 氢气, 降低每年的制氢成本至 30 日元/ Nm^3 ; 继续进行与氢气生产和运输相关的技术开发, 引入消耗大量氢气的氢基发电, 在交通、发电和工业等领域中广泛利用氢能作为脱碳能源。目标是到 2020 年前将电转气(Power to Gas)技术的核心——水电解系统的单位成本降至 5 万日元/ kW , 以实现最高成本竞争力。到 2025 年, 将在 320 个地点安装加氢站, 燃料电池汽车数量增加到 20 万辆, 到 2030 年增加到 80 万辆。到 2030 年, 将燃料电池公交车的数量增加到 1 200 辆左右, 燃料电池叉车的数量增加至 1 万辆左右, 并且将单位氢能发电成本降至

17 日元/ kW 。

自《第五次能源基本计划》公布以来, 由于新冠疫情的影响导致人们生活方式、地缘政治和经济安全环境等迅速变化, 应对碳中和已成为全球趋势, 将应对全球变暖视为制约经济增长的时代已经结束, 绿色低碳产业了成为新的增长点。考虑到能源形势的变化, 2021 年, 日本政府制订了《第六次能源基本计划》^[43], 该计划从加强 S+3E 的视角实施能源政策, 即首先确保稳定供应, 在安全的前提下, 通过提高能源效率实现低成本能源供应, 最大限度地追求环境适宜性。该计划的制订有两个关键主题: 一是到 2050 年实现碳中和及温室气体减排目标; 二是确保稳定的能源供应并降低成本, 同时采取行动应对气候变化。在该计划中, 面向 2030 年的氢能利用、氢能成本、氢能社会、国际氢能供应链、氢监管和标准化等目标得到进一步量化。为实现 2050 年碳中和的目标, 该计划大幅提高了日本 2030 财年的排放目标, 其中, 2030 财年温室气体排放量比 2013 财年减少 46%。该计划指出, 氢能发电是脱碳电源实现碳中和的最重要举措之一, 日本将努力攻克技术难题, 使其在 2050 年成为电力系统的主要供应和调节力量, 实现 2050 年发电成本低于或等于燃气发电的目标。该计划还规定, 为扩大氢能供应量并降低供应成本, 日本将利用绿色创新基金, 以综合方式开发和示范应用有助于建立大规模国际氢能供应链的技术。

日本《能源基本计划》的主题是展示能源政策的路径, 它提供了一个详细的蓝图, 描述了日本如何实现可持续、安全、高效的氢能供应, 从而为政府、企业和研究机构等制定氢能政策提供重要参考, 并确保氢能政策的一致性, 以满足日本发展需求。

在《第四次能源基本计划》规定下, 2014 年, 日本经济产业省发布了“氢和燃料电池战略路线图”, 该战略图可视为日本在氢能发展方面的顶层设计^[44]。“氢和燃料电池战略路线图”旨在通过以下 3 个阶段实现“氢能社会”: 第一阶段, 氢能利用的急剧扩大, 通过大幅提高固定燃料电池和燃料电池汽车的使用范围, 日本将率先占领全球氢和燃料电池市场; 第二阶段, 到 21 世纪 20 年代后半期, 全面引进氢能发电, 建立大规模的氢能供应体系, 进一步增加氢能需求的同时, 日本将扩大现有氢能供应来源的范围, 并在传统的电力和热能之外建立

包括氢能在内的新的二次能源结构; 第三阶段, 将制氢和碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 结合起来, 或者利用可再生能源制氢, 建立一个完全无碳的氢能供应系统。根据氢能利用发展的后期进展, 日本政府于 2016 年 3 月、2019 年 3 月分别对路线图进行了修订^[45]。

为统筹协调日本自 20 世纪 70 年代以来一直进行的公共和私营部门的氢能研发计划, 制定面向 2050 碳中和的共同目标, 2017 年 12 月 26 日, 日本在可再生能源、氢能及相关问题部长级会议上公布了《氢能基本战略》^[19], 该战略根据各部委、机构、学术界和商界人士意见编制, 《氢能基本战略》是全球第一个国家级氢能战略, 该战略的目标是到 2030 年日本氢气价格达到 3 美元/kg, 到 2050 年为 2 美元/kg。2023 年 6 月, 日本内阁批准了对《氢能基本战略》的修订^[46], 与第一版《氢能基本战略》相比, 此次修订有以下重点:

(1) 明确氢能战略的对象范围: 氢气用作各种燃料和原料的存在形式将作为该战略覆盖的对象, 例如, 氨和合成甲烷 (e-methane)、合成燃料 (e-fuel) 等碳再利用产品。

(2) 确保稳定的氢气供应: 日本目前制定了 2040 年的氢气供应量目标为 300 万 t/年, 2050 年的氢气供应量目标为 2 000 万 t/年。根据氢气需求潜力预测, 该战略将 2040 年氢气 (含氨气) 供应量目标定为 1 200 万 t/年。氢气成本目标保持不变, 2030 年为 30 日元/Nm³, 未来将达到 20 日元/Nm³。

(3) 建立国内制氢基础设施: 由于制氢方面对可再生能源制氢的电解水设备需求将增加, 预计到 2030 年, 全球水电解槽使用量将达 134 GW, 为提高日本在世界能源供应中的地位, 该战略设定了到 2030 年全球日本相关企业安装水电解槽的产能达到约 15 GW 的目标。

(4) 开发碳捕集/碳回收: 利用绿色创新基金等资金, 支持有效利用二氧化碳作为原料的碳回收技术的建立和实施, 并加快商业环境的建设 (包括制定商业法律), 以期在 2030 年启动碳捕集与封存业务, 力争到 2030 年实现碳储存能力达到 600 万~1200 万 t 的目标。

(5) 支持建设大规模氢能供应链: 未来 15 年日本公共和私营部门将总计投资 15 万亿日元用于建设氢能供应链。为创造规模化需求、构建高效供

应链, 实现氢气、氨气的稳定和低价供应, 培育具有国际竞争力的产业集群, 日本将在储罐、管道等供应基础设施建设上给予资助, 并且优化氢能基地布局。未来 10 年, 将建立大约 3 个大型基地, 主要建在有大规模工业需求的大型城市及地区, 此外将建立 5 个中型基地。

(6) 强化氢能产业竞争力: 此次修订, 将 2017 年《氢能基本战略》中未出现的氢能产业政策作为重要支柱纳入其中, 旨在向日本国内外市场推广日本企业的技术和产品, 增强日本企业的产业竞争力。从市场启动相对较快、市场规模较大的领域和日本企业具有技术优势的领域两个角度出发, 重点关注以下 5 个类别、9 个领域的产业: 氢能供应 (制氢、氢能供应链建设), 脱碳型发电, 燃料电池, 氢能的直接利用 (无碳钢、无碳化工产品、氢燃料电池船舶), 氢化化合物的利用 (燃料氨、碳回收产品)。

(7) 制定氢能安全利用举措: 日本基于科学的数据, 即通过国家项目等获取有助于制定安全标准的科学数据; 规则的合理化, 设定氢能供应链的优先发展领域, 通过技术标准化创建安全环境, 为负责高压气田安全保障的地方政府提供支持; 营造氢能安全使用环境, 通过信息传播和教育等手段, 加强对氢的物理性质、操作、安全措施等的学习, 确保具备有安全基础的人力资源, 了解主要国家的动向和实际情况, 加强与相关组织的沟通。

此外, 根据《第六次能源基本计划》规定, 日本经济产业省 (METI) 与相关部门和机构合作, 领导制定了《2050 年碳中和绿色增长战略》, 该战略于 2020 年 12 月 25 日发布, 2021 年 6 月 18 日进行了修订^[47]。通过《2050 年碳中和绿色增长战略》, 日本政府设定了高目标, 针对包括氢能在内的 14 个领域有前景的产业制定了行动计划及各项政策, 如预算编制、税收、监管、改革与标准化和国际合作, 并将不断更新。该战略将氢能作为一种选择, 总体要求有以下 3 点: 增加氢能供应和需求、加强氢能基础设施建设和降低氢能成本。2022 年 12 月 22 日, 日本政府在绿色增长战略实施委员会会议上通过了未来的能源政策, 根据岸田政府的能源战略, 未来 10 年日本将提供超 7 万日元的补贴, 用于建立氢气及相关气体的供应网络。

从 2014 年开始, 日本历次《能源基本计划》均

为氢能政策的制定提供了战略方向，从内阁、经济产业省到 47 个都道府县，制定了一系列宏微观的氢能相关政策，形成了自上而下的氢能政策动力。在氢能战略的推动下，日本实现了世界第一辆燃料电池汽车商业化与家用燃料电池普及等。在输氢、氢能发电和氢能供热等，各类氢能相关技术相继成功示范。

3 日本氢能发展战略的目标和关键举措

3.1 日本氢能战略的目标

3.1.1 减少温室气体排放

日本的温室气体排放量在东日本大地震后大幅增加，2016 年其向联合国提交的国家自主贡献（nationally determined contributions, NDCs）中提出，到 2030 财年，日本温室气体排放量将比 2013 财年减少 26%，到 2050 年减排 80% 的温室气体。《面向 2050 年的国家能源和环境技术创新战略》（NESTI 2050）根据《巴黎协定》确定了有前景的技术领域，有助于到 2050 年实现碳中和，该战略将氢能等能源载体的生产、运输、储存和利用技术列为重点发展的优先技术领域之一。根据日本氢能委员会预测，到 2050 年，全球氢能市场价值将超过 2.5 万亿美元，氢能将占能源总需求的 18%，氢能的普及将助力每年减少 60 亿 t 以上的二氧化碳排放。日本政府重视氢能寄予厚望，将其视为降低碳排放和清洁能源的关键。

3.1.2 加强能源安全

日本作为资源匮乏的国家，尤其重视自身能源安全。能源安全、经济效率和环境适宜性被称为“能源三难困境”，低碳技术是解决该困境的有效办法。由于氢气可以从可再生能源和其他能源中生产，通过储存和运输，日本可以从本国以外的任何地方采购氢气，从而减少对进口能源的依赖，有助于减轻与能源供应相关的风险。可再生能源提高了日本能源自给率，但可再生能源不稳定、易波动，当可再生能源电力供应不足时，必须使用其他电力来源弥补短缺，当供应过剩时，必须控制产量。而氢能可以实现大规模、长时间储存，平滑可再生能源波动，在扩大可再生能源应用方面潜力巨大。

3.1.3 促进经济增长

由于煤炭、石油等化石燃料存在可持续性发展的问题，随着技术进步，从中长期看，氢的使用成本有很大的下降空间，同时在日益重视脱碳的背景

下，氢能产业被视为在未来能够创造巨大经济增长的领域。日本旨在通过投资氢能技术的研发、生产和推广应用创造就业机会并推动经济增长。日本政府希望通过氢能技术的推广和应用，促进日本制造业发展，提高氢气制、储、运输的相关设备的产值。同时，随着氢能利用领域的扩大，日本将支持商业公寓、家庭住宅和交通领域等多个领域涉及氢能的新兴产业发展，通过推动技术创新，增强日本国内企业的竞争力。此外，氢能的使用可以提高能源利用效率，从而提高整体经济效益。

3.1.4 引领全球氢能利用

日本氢能战略旨在通过技术创新、国际合作、基础设施建设、应用推广和标准制定等多个方面的举措，引领全球氢能利用的发展，从而推动全球清洁能源转型并加速氢能市场的全球化。这将有助于减少温室气体排放，应对气候变化。此外，日本还寻求通过向全球市场出口氢技术和产品，从而增强氢能产业的国际竞争力，为日本企业创造商机并引领全球氢能产业发展。

3.2 日本氢能战略的关键举措

3.2.1 扩大氢能利用范围

日本积极构建氢能供应体系，研究多种氢能利用形式以扩大氢能需求。日本致力于扩大氢燃料电池汽车、公交车、叉车、卡车及其他工业车辆的使用范围，支持在船舶等汽车以外的运输方法中使用氢气，推出激励制度支持氢燃料船的商业化，实现燃料电池技术的横向扩展和加氢站等基础设施的有效利用；除独立式住宅外，在公寓楼、商业场所、工厂、公共机构和疏散场所等安装商用燃料电池，地方政府将根据自身条件建立氢能利用模型；引入氢气发电，大幅增加氢需求，通过基于现有液化天然气发电体系的氢气混烧技术示范、纯氢发电技术示范等推动氢发电商业化，促进引入可在紧急情况下使用的独立电源（如氢气）；推广工业用氢气，支持建立世界领先的氢气还原炼钢技术；中央政府将支持地方政府的氢气使用举措，并与地方政府通过合作扩大区域氢气需求、优化区域氢气供需，政府将进一步与企业合作，促进氢气与合成燃料在发电和船舶等各个领域的实际应用；推动电转气（power to gas）系统的安装和商业化应用，以储存可再生能源产生的剩余电力；开发符合氢气燃烧特性的燃烧器，实施技术研究、开发和示范计划；除国内市场外，

还要在可再生能源扩张和成本削减进展比日本更快的欧洲等海外市场促进氢能设备销售。

3.2.2 完善氢能基础设施

日本将推动技术发展，根据情况灵活、及时地实施加氢站等必要的基础设施建设。加氢站方面，考虑到燃料电池汽车、燃料电池公交车、燃料电池卡车的广泛应用，到2030年日本将建设约1000个加氢站，兼顾人流和物流，实现最佳选址，并将进行加氢站监管改革；实现在现有加油站安装加氢站，并安装快速充电器，同时引入零排放汽车租赁和共享，使加氢站成为多样化的能源供应站；推进公交、货车等商用车的充电设施和加氢站建设，包括商业场所专用充电加氢设施的建设；延长加氢时间并在周末开放，或在现有加油站或便利店的相同位置建设加氢站，使用户更方便地使用加氢站；稳步扩大可用于燃料电池公交车的加氢站建设，以提高燃料电池公交车的使用率；在加氢站建设早期进行补贴，支持企业建设加氢站；制氢设施方面，将推进低成本、高效率制氢设施的引进，继续支持引入水电解槽，加强核心技术研发以降低水电解槽的成本并提高效率；储氢和输氢等方面，将推广发电和储氢设施的组合使用，支持运输氢相关设施的扩建，构建各地区间存储和输送氢的系统，推动氢液化和制冷创新技术的研发，改善海外装卸港的码头和氢气出口供应设施的环境问题等。

3.2.3 开发氢能相关技术

制氢技术方面，在目前进行的电解水项目成果基础上，将进行适当的技术开发，进一步提高电流密度、电解水制氢效率和耐久性；研发大型高效褐煤汽化炉；研究利用甲烷发酵产生的沼气生产氢气，对生物质、地热、洋流等可再生能源制氢的动力源和发电设施进行研究。储运技术方面，研发大型液化氢储罐、大型液氢运输船和大容量液氢装载系统等，研发提高氢气液化效率的技术，减少车用氢气罐中昂贵的碳纤维的使用，并开发高效的碳纤维缠绕技术。

氢能利用技术方面，为了在各种运输装备中利用燃料电池系统，将支持开发垃圾车、扫雪车、建筑车等高功率燃料电池车辆的研发；研发大容量液化氢汽化器、增压泵、管道和接头，利用余热进行载体脱氢工艺的优化研发；实施氢还原炼钢等制造工艺的改革；开展氢能发电的可行性研究，开发预

测可再生能源发电、电力供需平衡和氢需求的技术。使用二氧化碳捕集设备进行氢气发电，研究碳捕集与封存技术，进行二氧化碳封存技术示范、低成本二氧化碳分离技术研发，开展二氧化碳分离、收集、运输和封存国际标准化研究等。

3.2.4 确保充足的财政支持

在国家、地市政府的努力下，日本提供补贴和税收优惠，以减轻加氢站的成本负担，政府将持续做好加氢站建设运营的财政支持，提高加氢站土地租金补贴率；推进实施各种补贴制度和融资制度，为资本投资提供税收支持和其他措施，以鼓励商业阶段的大规模生产，旨在通过促进竞争降低成本；扩大燃料电池客车的补贴规模，采取燃料电池公交车激励措施以补偿高于柴油的加氢价格，对于其他具有大量氢气利用潜力的商用车，将根据车型的需求和开发状况进行支持；为推进氢能船舶商业化，将提出如免除港口入境费等激励制度；为氢气产能提升提供财政支援。此外，日本政府还为研发提供大量资金，2020财年日本政府对氢能的资助包括投入2.47亿美元用于清洁能源汽车（包括但不限于氢气和燃料电池）研发、9250万美元用于燃料电池研发、3000万美元用于氢气供应基础设施研发、1.2亿美元用于燃料电池汽车加氢站等。日本国家研发机构新能源和工业技术开发组织正在资助氢能项目，旨在生产氢气并建立大规模供应链，该资金来自绿色创新基金（《2050年碳中和绿色增长战略》下的关键政策工具之一），用于达成碳中和目标。

3.2.5 发展国际氢供应链

日本为了建立稳定的国际氢供应链，需要通过政府间外交和私营部门的努力确保获取廉价的海外资源，以及通过能源载体技术实现高效的氢气运输和储存。为发展国际供应链，除液氢外还可以基于有机氢化物法的甲基环己烷（MCH）、氨气和甲烷等氢气载体；研究大规模运输、装卸和储存技术，同时发展液化氢卸载设施；通过与澳大利亚、文莱等国家的联合开发和示范项目，建立基础技术、开发和氢能供应链示范，并将开展商业化相关设施的建设，在商业化早期阶段，日本将利用现有基础设施并继续开发用于大容量加氢和脱氢的工厂及运输游轮。与欧洲、中东国家合作推动建立国际氢能供应链。日本的公共和私营部门已经与澳大利亚和阿

拉伯联合酋长国等国家建立了伙伴关系，澳大利亚被视为日本最重要的氢能源合作伙伴之一，世界第一艘氢运输船氢前沿（Suiso Frontier）^①项目已经成功应用。

4 日本氢能战略面临的挑战与启示

日本将氢能视作实现净零转型的支柱，自2014年发布的《第四次能源基本计划》中首次将氢能纳入能源基本计划以来，在完成氢能战略目标方面取得了一定的成果，然而其氢能战略实施过程也面临巨大的挑战。

首先，与欧洲等地区相比，日本可再生能源发电力不足，日本的氢能战略是优先使用化石燃料生产的氢气而不是可再生能源生产的氢气。虽然氢气将在净零转型中发挥作用，但前提是由可再生能源生产的绿氢，而日本的氢气主要以蓝氢的形式存在，蓝氢是天然气生产的副产品，与化石燃料密切相关，蓝氢对于大幅减少碳排放或解决其对进口能源依赖的作用有限。2021年，日本与澳大利亚合作启动了一个联合项目，将褐煤转化为氢气，澳大利亚生产氢气后，将在不进行碳捕捉的情况下运往日本。褐煤是煤化程度最低的煤，其燃烧将造成大量污染，虽然日本通过进口褐煤制得的氢气，基本实现零碳排放，然而制氢过程带来的污染仍受到很多质疑。日本持续推迟摆脱化石燃料的进程。

其次，制氢成本居高不下，氢气价格困境依然存在。当前普及氢气的问题是降低成本，由于可再生能源发电的成本问题，目前绿氢价格比其他类型的氢更贵，根据国际能源署（IEA）《2021年全球氢能回顾》（Global Hydrogen Review 2021）报告，绿氢的成本约为3.0～8.0美元/kg，而天然气生产的灰氢成本为0.5～1.7美元/kg，蓝氢成本为1.0～1.5美元/kg，由于技术进步，预计到2030年，部分地区绿氢价格还有下降的空间，可降至1.5～3.5美元/kg。绿氢价格的问题造成了ENE-FARM（家用燃料电池热电联供系统）由于价格过高，无法快速推广。同样，以丰田“Mirai（未来）”等为代表的燃料电池汽车对于普通消费者而言价格高昂。即使燃料电池汽车以大众化的价格出售，也需要加氢站为其提供燃料，而目前日本的加氢站成本仍维持高位，这导致了高昂的用车成

本。而来自光伏和风能的电力将首先以氢气的形式储存，然后在需要时将其转换回电力的这一过程，由于受到转换效率的阻碍，造成的电力损失将使二次电价与一次电价相比可能过高。

最后，日本燃料电池车辆市场增长不足。日本政府和产业界大力推动氢电气化攻略，其目标是到2030年燃料电池汽车累计销量达80万辆，加氢站达1000个。尽管自2015年起就投入使用，但只有约7000辆燃料电池汽车下线，远低于2021年3月累计生产4万辆的目标。一方面，大规模生产燃料电池汽车的高成本和技术障碍影响了汽车制造商进入新兴乘用车市场的信心，市场的增长潜力尚不确定，日本汽车制造商并没有积极追求电动传动系统，而是在车辆组合中优先考虑利润更高的混合动力车和高效汽油发动机^[48]。另一方面，缺乏氢能基础设施也阻碍氢能市场增长。截至2021年末，日本已建成160个车站，集中在东京、大阪、名古屋和福冈附近。但车站通常位于工业区，运营时间有限，这降低了供应商进一步投资的意愿，而欠发达的加油网络给驾驶员带来不便，影响了公众对燃料电池汽车的需求。

日本在推动氢能战略时面临的挑战为中国在氢能领域的发展提供了宝贵的经验教训，具有重要的借鉴意义。

第一，降低氢能关键材料和设备对国外的依赖度。由日本经验可知，建立完善的本土供应链可以降低制氢和氢能供应成本，提高产业创新能力和竞争力。目前中国在质子交换膜电解水制氢、高压储氢、低温液态储氢、储氢合金以及燃料电池等的关键材料和设备方面对国外依赖度较高，导致成本居高不下，为氢能产业供应链带来诸多不稳定因素。因此，可以通过研究，提出氢能领域所需的关键材料和元部件清单，资助重点领域的研发，扶持生产企业，并积极寻求替代方案。

第二，促进氢能消费。根据IEA发布的《2023年全球氢能回顾》（Global Hydrogen Review 2023）^[49]可知，2022年全球氢气需求规模达到9500万t，然而原油炼化和化工仍是氢气主要的应用场景。日本为实现“氢能社会”，构建氢能供应体系，采取多种措施扩大氢能利用范围。为实现中国绿色氢能技术规模化应用，促进氢能产业发展，除了着眼于

^① Suiso 在日语中代表氢。

绿氢制取、储存、输配技术以及电力系统协同技术外, 还应注重提升氢能消费, 如开发氢能与风光电互补系统、合理规划加氢站建设、开发多种应用场景、通过补贴进一步扩大原有氢能市场规模和开发燃料电池私人用车等新兴市场。

第三, 大力推动氢能科技创新。中国氢能相关研究起步较晚, 经过发展, 目前氢能产业链已初具雏形, 然而, 中国氢能领域的一些关键技术与国际先进水平还存在一定差距, 电解水与光解水等新型制氢技术还需要持续发力, 有机液态储氢和固态储氢相关核心技术自主性低, 质子交换膜燃料电池的性能低于国际领先水平。从国家战略需求出发, 强化问题导向和目标导向, 中国应进一步加强可再生能源制氢、储氢系统、加氢站规划和建设、氢能安全监测和氢燃料电池及其动力装备等方面关键技术的研发和示范应用, 建立氢能技术创新平台, 建立以“链主企业牵头+中小企业配套+科研院所联合”为核心的技术攻关体系, 加强产学研合作, 共同解决氢能技术面临的挑战。通过技术创新, 提高中国在全球氢能市场的竞争力。

第四, 加强国际合作。中国可以积极寻求与氢能技术领域的先进国家和地区如欧洲、加拿大和日本等开展合作, 同时定期跟踪最新的技术发展趋势, 避免重复研发, 缩短技术验证周期。此外, 中国可以充分利用“一带一路”倡议下的机遇, 与沿线国家合作, 共同建设氢气生产、储存、运输等氢能基础设施, 开展氢能示范应用项目, 扩大中国氢能投资市场, 提高国际影响力和竞争力。■

参考文献:

- [1] 张明慧, 李永峰. 论我国能源与经济增长关系 [J]. 工业技术经济, 2004, 23(4): 77-80.
- [2] 李金柱. 能源经济及能源结构优化对策 [J]. 中国煤炭, 2001, 27(8): 7-12.
- [3] 赵爱国. 日本煤炭清洁利用及对我国的启示 [J]. 中国煤炭, 2007, 33(10): 82-83.
- [4] 付瑞红. 日本能源安全的国内体制保障与启示 [J]. 国际关系学院学报, 2009(6): 41-45, 68.
- [5] 符冠云. 氢能在我国能源转型中的地位和作用 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(10): 15-21.
- [6] BENGHANEM M, MELLIT A, ALMOHAMADI H, et al. Hydrogen production methods based on solar and wind energy: a review[J]. Energies, 2023, 16(2): 1-31.
- [7] ACAR C, DINCER I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment[J]. Journal of cleaner production, 2019, 218: 835-849.
- [8] KOVAČ A, PARANOS M, MARCIUŠ D. Hydrogen in energy transition: a review[J]. International journal of hydrogen energy, 2021, 46(16): 10016-10035.
- [9] 邹才能, 李建明, 张茜, 等. 氢能工业现状、技术进展、挑战及前景 [J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 1-20.
- [10] 尚娟, 鲁仰辉, 郑津洋, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展和挑战 [J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5499-5505.
- [11] 唐建荣, 张荣荣. 我国发展低碳经济的可能路径 [J]. 科技进步与对策, 2010, 27(4): 30-32.
- [12] MINIĆ D. Hydrogen energy: challenges and perspectives[M]. London: Intech Open, 2012: 1-2.
- [13] ZOHURI B. Hydrogen energy: challenges and solutions for a cleaner future[M]. Berlin: Springer, 2019: 141-164.
- [14] AVARGANI V M, ZENDEHBOUDI S, SAADY N M C, et al. A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: prospects and challenges[J]. Energy conversion and management, 2022, 269: 115927.
- [15] RAZI F, DINCER I. Challenges, opportunities and future directions in hydrogen sector development in Canada[J]. International journal of hydrogen energy, 2022, 47(15): 9083-9102.
- [16] SOLOMON B D, BANERJEE A. A global survey of hydrogen energy research, development and policy[J]. Energy policy, 2006, 34(7): 781-792.
- [17] Ifri. Japan's hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications[EB/OL]. [2023-08-11]. https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf.
- [18] 王雪莹, 薛雅. 国际社会促进氢能研发与产业发展的举措与借鉴 [J]. 全球科技经济瞭望, 2022, 37(10): 61-68.
- [19] 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議. 「水素基本戦略」[EB/OL]. [2023-08-12]. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf.
- [20] SALIMI M, HOSSEINPOUR M, Borhani T N. The role of clean hydrogen value chain in a successful energy transition of Japan[J]. Energies, 2022, 15(16): 1-19.
- [21] IIDA S, SAKATA K. Hydrogen technologies and developments in Japan[J]. Clean Energy, 2019, 3(2): 105-

- 113.
- [22] 経済産業省 . Overview of Basic Hydrogen Strategy[EB/OL]. [2023-08-12]. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_4.pdf.
- [23] ZHANG Q, ISHIHARA K N, MCLELLAN B C, et al. Scenario analysis on future electricity supply and demand in Japan[J]. *Energy*, 2012, 38(1): 376-385.
- [24] LESBIREL S H. Structural adjustment in Japan: terminating “old king coal”[J]. *Asian survey*, 1991, 31(11): 1079-1094.
- [25] HAN X L, LAKSHMANAN T K. Structural changes and energy consumption in the Japanese economy 1975-85: an input-output analysis[J]. *The energy journal*, 1994, 15(3): 165-188.
- [26] KAGAWA S, INAMURA H. A structural decomposition of energy consumption based on a hybrid rectangular input-output framework: Japan’s case[J]. *Economic systems research*, 2001, 13(4): 339-363.
- [27] FRAGKOS P, VAN SOEST H L, SCHAEFFER R, et al. Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States[J]. *Energy*, 2021, 216: 119385.
- [28] PERKINS F C. A dynamic analysis of Japanese energy policies: their impact on fuel switching and conservation[J]. *Energy policy*, 1994, 22(7): 595-607.
- [29] 王绍媛, 吕春生 . 日本能源海上通道中的美国因素分析 [J]. *东北财经大学学报*, 2012(4): 27-32.
- [30] SUZUKI T. Energy security and the role of nuclear power in Japan[EB/OL]. http://www.nautilus.org/wp-content/uploads/2011/12/Reg_Japan_final.pdf.
- [31] SHADRINA E. Fukushima fallout: gauging the change in Japanese nuclear energy policy[J]. *International journal of disaster risk science*, 2012, 3: 69-83.
- [32] 樊柳言, 曲德林, 汪海波, 等 . 福岛核危机后日本新能源格局的转变及其影响与启示 [J]. *中外能源*, 2011, 16(8): 29-34.
- [33] 経済産業省 . 「エネルギー白書 2018」[EB/OL]. [2023-08-12]. <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/>.
- [34] 张文亮, 丘明, 来小康 . 储能技术在电力系统中的应用 [J]. *电网技术*, 2008(7): 1-9.
- [35] 李鹏, 张玲, 盛银波 . 新能源及可再生能源并网发电规模化应用的有效途径: 微网技术 [J]. *华北电力大学学报 (自然科学版)*, 2009, 36(1): 10-14.
- [36] HIKIMA K, TSUJIMOTO M, TAKEUCHI M, et al. Transition analysis of budgetary allocation for projects on hydrogen-related technologies in Japan[J]. *Sustainability*, 2020, 12(20): 8546.
- [37] CONVERSE A O. The impact of large-scale energy storage requirements on the choice between electricity and hydrogen as the major energy carrier in a non-fossil renewables-only scenario[J]. *Energy policy*, 2006, 34(18): 3374-3376.
- [38] Japan Center for Climate Change Actions. 4-04 日本の部門別二酸化炭素排出量 (2021 年度)[EB/OL]. [2023-08-12]. <https://www.jccca.org/download/65477>.
- [39] SHARMA S, AGARWAL S, JAIN A. Significance of hydrogen as economic and environmentally friendly fuel[J]. *Energies*, 2021, 14(21): 1-31.
- [40] BEHLING N, WILLIAMS M C, MANAGI S. Fuel cells and the hydrogen revolution: analysis of a strategic plan in Japan[J]. *Economic analysis and policy*, 2015, 48: 204-221.
- [41] 経済産業省 . 「第 4 次エネルギー基本計画」[EB/OL]. [2023-08-12]. https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf.
- [42] 経済産業省 . 「第 5 次エネルギー基本計画」[EB/OL]. [2023-08-12]. https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf.
- [43] 経済産業省 . 「第 6 次エネルギー基本計画」[EB/OL]. [2023-08-12]. https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf.
- [44] 赵青, 郑佳 . 全球主要国家 2019 年氢能发展政策概述 [J]. *全球科技经济瞭望*, 2020, 35(4): 11-20.
- [45] 水素・燃料電池戦略協議会 . 「水素・燃料電池戦略ロードマップ」[EB/OL]. [2023-08-15]. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/roadmap_hyoka_wg/pdf/002_s05_00.pdf.
- [46] 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議 . 「水素基本戦略」[EB/OL]. [2023-08-15]. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_2.pdf.
- [47] 経済産業省 . 「2050 年カーボンニュート (下转第 18 页)

Practice and Strategic Thinking on the Intersection and Integration Between the Fields of Nuclear Science and Technology and Quantum Science and Technology

CHEN Shuangkai, DU Jingling, XU Lijun, YU Hong, WU Xianfeng
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract: Quantum science and technology is a global hot spot in R&D and one of the disruptive technologies. Nuclear science and technology belongs to the strategic high-tech field, which is developed based on the microscopic nuclear system, satisfies the laws of quantum mechanics, and is one of the best places for the application of quantum science and technology. This paper systematically reviews the domestic and foreign policies on quantum science and technology and fully investigates the current situation of the intersection and integration of nuclear science and technology and quantum science and technology at home and abroad. It puts forward reference suggestions for the innovative development of China's nuclear science and technology from three aspects: the intersection and integration of quantum computing, quantum measurement, and quantum communication with nuclear science and technology.

Keywords: disciplinary intersection; nuclear science and technology; quantum science and technology

(上接第9页)

ラルに伴うグリーン成長戦略」[EB/OL]. [2023-08-15]. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html.

[48] East Asia Forum. Japan's bet on hydrogen cars needs a jump-start[EB/OL]. [2023-08-15]. <https://www.eastasiaforum.org/2022/04/13/japans-bet-on-hydrogen-cars-needs-a-jump-start/>.

[eastasiaforum.org/2022/04/13/japans-bet-on-hydrogen-cars-needs-a-jump-start/](https://www.iaea.org/reports/global-hydrogen-review-2023).

[49] IEA. Global Hydrogen Review 2023[EB/OL]. [2023-08-15]. <https://www.iaea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.

Development of Japan's Hydrogen Energy Strategy and Its Implications for China

LIN Yunlei^{1,2}, BIAN Shuguang¹, CHENG Zhujing¹, CHEN Jinhui^{1,2}

(1. High Technology Research and Development Center, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Beijing 100044;

2. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: This paper explores Japan's important strategic initiative in the energy field— its hydrogen energy strategy. Through an in-depth analysis of Japan's hydrogen energy strategy, the implementation background, strategic goals, policy initiatives, and future prospects of Japan's hydrogen energy strategy are discussed. It also examines the challenges faced in implementing hydrogen energy strategy. Through the research of Japan's hydrogen energy strategy, this paper aims to provide implications for China's hydrogen energy policy formulation and industrial development.

Keywords: Japan; hydrogen energy; hydrogen energy strategy; hydrogen society