

Views & Comments

日本氢能战略及实践的启示

李海文^a, Nobuyuki Nishimiya^b

^a Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230031, China

^b Nihon University, Tokyo 101-8308, Japan

氢能因其可通过可再生能源制备（可再生能源的分布比化石燃料更为均匀），并可在无温室气体排放的情况下转化为电能和热能，有望在人类的可持续发展中发挥关键作用。在可再生能源得到广泛利用，大规模储能及运输兴起的背景下，氢能的重要性愈加明显。

日本在先进氢能技术方面处于世界领先地位，这源于其近半个世纪以来持续致力于氢能相关材料、装置和系统开发所奠定的坚实基础。受1973年石油危机的影响，1974年日本启动了名为“SUNSHINE”的第一个国家氢能项目，随后其被1993—2000年的“New SUNSHINE”项目所接替[1]。日本氢能协会成立于1973年，当时正值石油危机时期。作为遏制全球气候变暖的一项举措，

日本在1993年开始了世界能源网络（WE-NET）项目（图1）[2]。该项目提出了构建清洁能源网络的概念，即通过氢能将可再生能源与发电和交通运输等公用事业联系起来。2011年3月11日东日本大地震导致核电站发生泄漏事故后，日本政府在2014年的第四个基本能源计划中着重强调了氢能的重要性。2014年12月15日，燃料电池汽车（FCV）Mirai首次实现商业量产，极大推动了氢能社会的进步，使得2015年成为日本的氢能元年。2017年12月，日本成为首个发布氢能基本战略的国家（图2）[3]。该战略的主要目标是实现氢气与化石燃料的成本平价，大力推广氢能应用，打造出真正意义上的氢能社会。

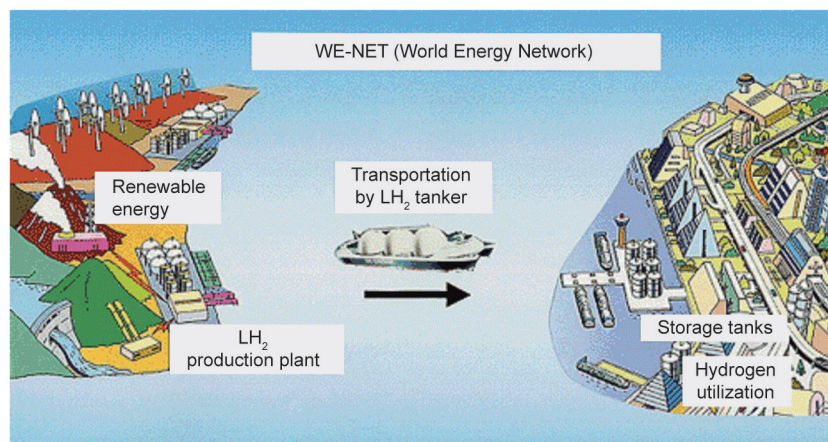


图1. WE-NET项目提出了建立清洁能源网络的概念。LH₂: 液氢。经New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), ©2020许可，转载自参考文献[2]。

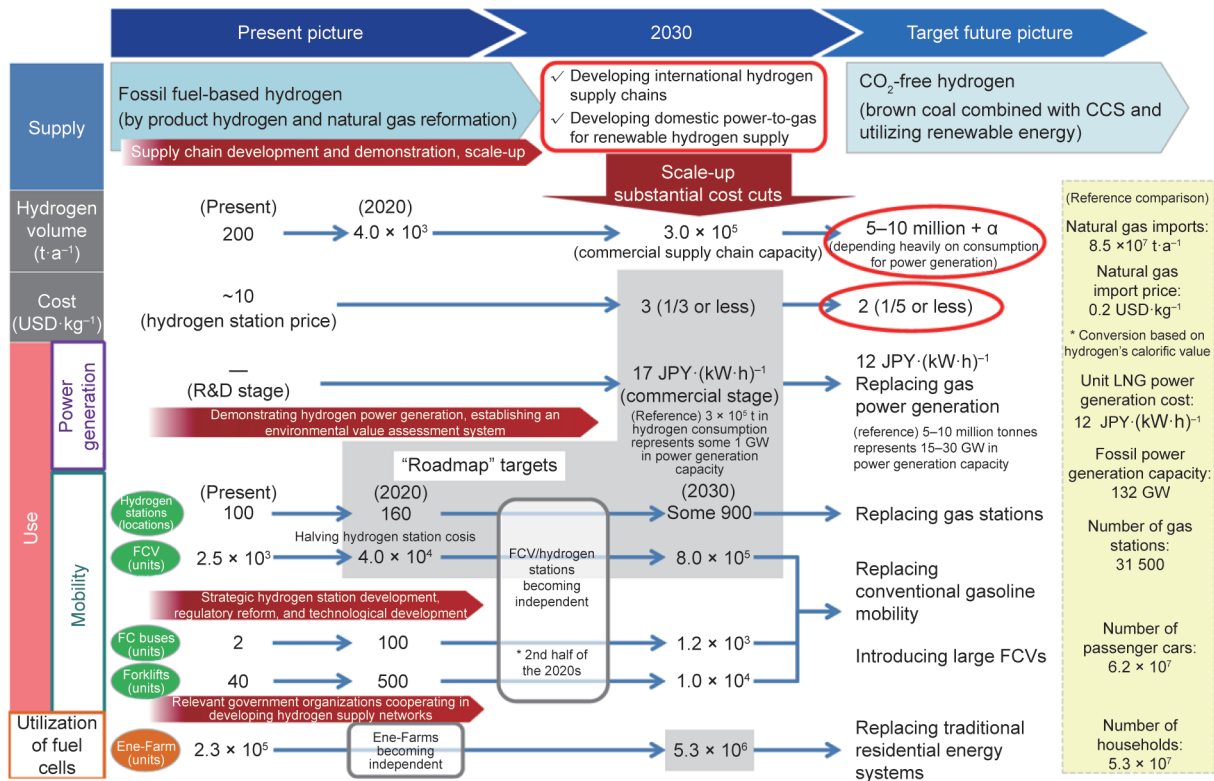


图2. 日本氢能基本战略的设想。CCS: 碳捕集与封存; α : 附加部分; LNG: 液化天然气。经Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), ©2017许可, 转载自参考文献[3]。

日本的氢能产业涵盖了从生产到应用的整条供应链, 如图3 [4]所示。目前, 日本国内氢源主要来自于天然气重整制氢和副产氢。碳捕集与封存 (CCS) 技术可以成为通过化石燃料制氢而不排放二氧化碳 (CO_2) 的方法。利用可再生能源制氢是生产氢气而不排放二氧化碳的理想方式, 世界上最大的太阳能制氢设施 (10 MW) 于2020年3月竣工。同时, 使用液氢、甲基环己烷 (MCH) 和氨的国际氢供应链可补充有限的国内产能并降低成本[5]。

氢能的应用可分为三类: 交通运输类、固定电站类和其他类。截至2020年9月, 日本已售出包括丰田Mirai和本田Clarity车型在内的约3700辆燃料电池汽车。迄今为止, Mirai车型在全球的销量已突破10 000台, 新一代Mirai II于2020年12月发布, 其续航里程超过800 km。丰田为加强其在全球燃料电池 (FC) 交通运输领域的地位, 还与中国的汽车企业共同注册成立了一家合资公司。目前, 日本已有约20辆燃料电池巴士投入运营, 并计划在2020年东京奥运会期间投入100辆。截至2020年9月, 日本共售出约160辆燃料电池叉车, 2020年全年的销售目标为500辆。此外, 燃料电池卡车及船舶等其他交通运输应用目前正处于示范阶段。日本目前投入运

营的加氢站数量约为130座 (包括移动式加氢站), 预计到2025年, 在Japan Hydrogen Mobility (JHyM) (由私营公司、金融机构和政府机构组成的财团) 的支持下, 加氢站总数将增加至320座[6,7]。降低成本是加氢站得以推广普及的最重要因素之一, 这不仅需要技术的进步, 还需要监管的放松。

Ene-Farm是一套住宅燃料电池系统, 配备700 W固体高分子型燃料电池 (PEFC) 或固体氧化物燃料电池 (SOFC), 利用天然气或丙烷气制氢实现热电联供。尽管在氢气原位制取过程中不可避免地会排放二氧化碳, 但其总能效高达85%, 与采用传统电力的住宅相比, 可实现每套系统每年减少1.3 t的二氧化碳排放。研发 (R&D) 的重点是降低成本和尺寸, 以及延长使用寿命。在东日本大地震后, Ene-Farm销量大幅增长, 到目前为止, 已安装超过37.2万套。工业和商用燃料电池系统主要集中在SOFC上, 因其比PEFC的发电效率更高。2017年, 京瓷 (Kyocera) 开始销售3 kW的SOFC系统, 其发电效率为52%, 总能效 (包括电和热) 达到90%。2019年, 三浦 (Miura) 发布了4.2 kW的SOFC系统, 其发电效率为50%, 总能效为90%。2020年, 东京燃气公司联合三浦开始研制5 kW SOFC系统, 其发电效率可

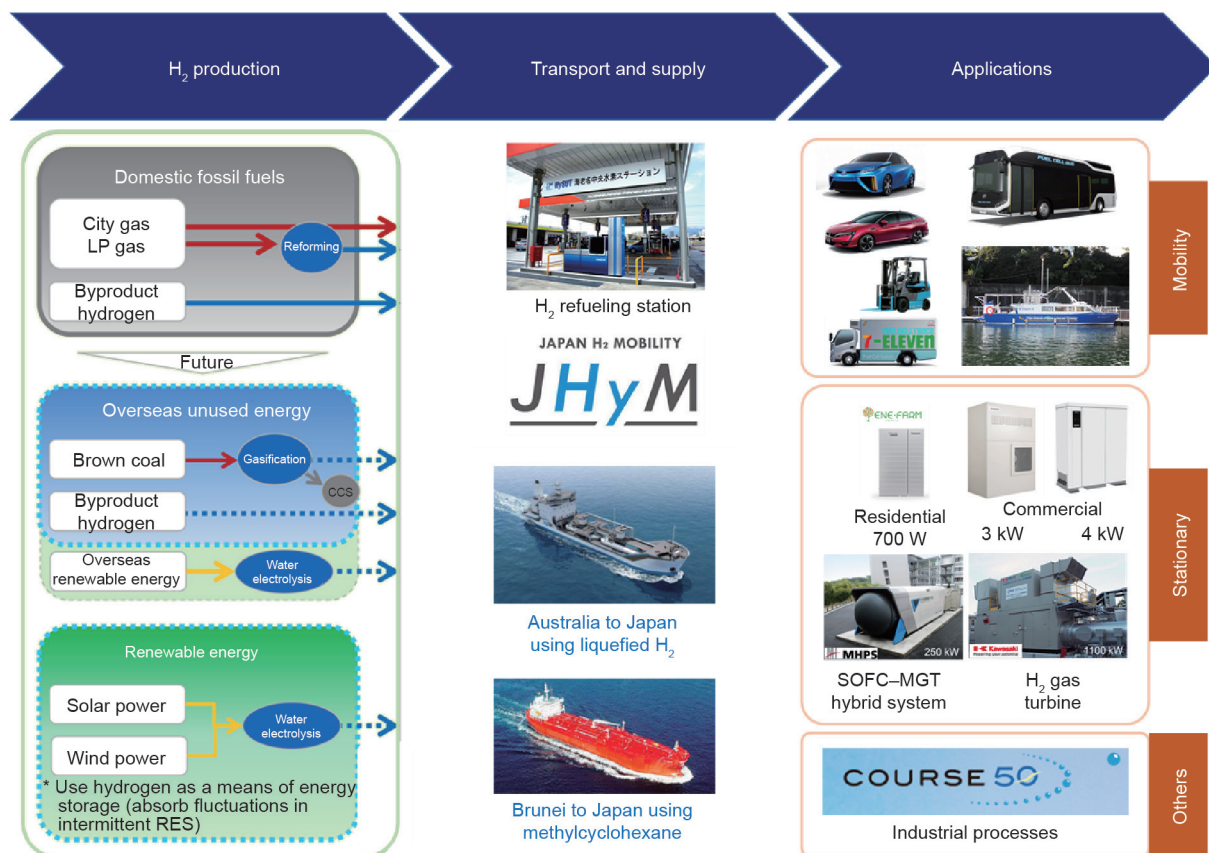


图3. 日本氢能产业概述。LP gas: 液化石油气; RES: 可再生能源; SOFC: 固体氧化物燃料电池; MGT: 微型燃气轮机; JHyM: Japan Hydrogen Mobility. 经METI, ©2019许可, 转载自参考文献[4]。

达65%。早在2015年春,三菱日立电力系统(MHPS)就开始在九州大学伊都校区示范SOFC和微型燃气轮机(MGT)集成的加压混合发电系统(MEGAMIE)。与传统发电系统相比,这套250 kW的系统实现了55%的发电效率并减少了47%的二氧化碳排放量。目前,研究人员正在研制1 MW级的MEGAMIE系统,并计划在将来的大型项目中建造由SOFC、燃气轮机和蒸汽轮机组成的100 MW级集成发电系统来取代火力发电厂。值得强调的是,上述民用和工业用燃料电池系统基于现有基础设施,采用天然气或丙烷气作为燃料。与传统电力传输相比,这种分布式发电系统具有更高的能效和更低的二氧化碳排放。当燃料在将来改用纯氢时,这些优势将更加显著。

氢气燃烧是一种可用于大规模发电的方法,比如目前为用户提供可靠电力供应的热电厂就是采用上述方式。2018年1月,MHPS成功论证了一台采用30%氢气与天然气混合燃料的700 MW大型燃气轮机,可使二氧化碳排放减少10%。2020年3月,该系统收到了美国一家发电厂的订单。与采用氢混合燃料的汽轮机相比,开发纯氢大型汽轮机更具挑战性。2018年,川崎重工成功

测试了一台100%氢燃料1 MW涡轮机。此外,还对氢载体的燃烧进行了测试。2014年,日本产业技术综合研究所(AIST)以含30%氨的煤油为燃料,通过燃气轮机实现了21 kW发电,2015年通过燃烧甲烷-氨气混合物和100%氨气实现了41.8 kW发电。2018年,IHI株式会社成功示范了氨与煤(煤与氨的混合燃料中含有20%的氨)的共烧。2020年,AIST论证了一套MCH供应链,该供应链利用可再生能源生产的氢气进行氢共烧发电。这个共烧系统采用60%氢气与柴油的混合燃料,可以在300 kW功率下运行700多个小时。

除能源领域的应用外,氢还可用来打造绿色工业过程。例如,在炼钢过程中采用氢还原铁矿石。为开发环境友好型炼钢技术,日本制定了一项名为“通过创新技术在炼钢过程中减少最终二氧化碳排放”的倡议(COURSE 50),旨在通过抑制高炉的二氧化碳排放以及从高炉煤气中捕获、分离和回收二氧化碳,使二氧化碳排放量减少约30%。

一座名为HARUMI FLAG的氢能小镇将首次在2020年东京奥运会奥运村落落成。该小镇是日本首座拥有完整氢基础设施系统的地方,包括:一座用于公交系统的

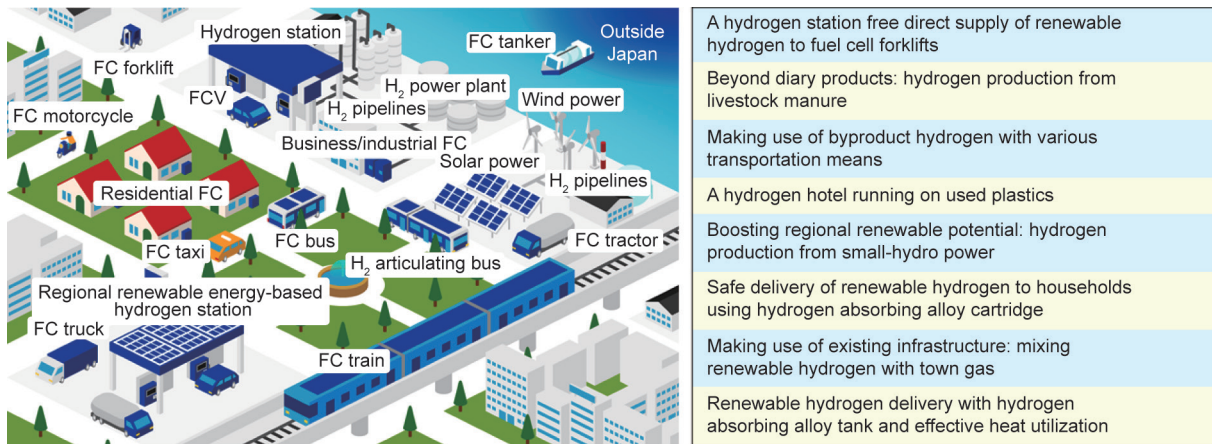


图4. 在日本创建多样化的氢能社会。(a) 氢能社会的样貌；(b) 建设区域性低碳氢能供应链的项目。经Ministry of the Environment, Government of Japan, ©2016许可，转载自参考文献[8]。

快速加氢站；向居民区和燃料电池汽车输送燃料和氢的地下管道；供公用空间和商业建筑使用的下一代燃料电池；以及用于所有私人住宅的Ene-Farm。

相比于新型氢能小镇，打造符合当地资源及需求的氢能社会具有更大的挑战性，但同时也更具有现实意义。为此，日本环境省推出了一个通过构建区域低碳氢气供应链来创建氢能社会的项目（图4）[8]。在这些项目中，氢气可通过以下方式制取：①利用风电、太阳能和小型水电的电能水解制氢；②利用牲畜粪便和废塑料制氢；③利用烧碱生产过程中的副产气制氢。氢气以各种方式（如管道、气瓶、高压长管拖车以及合金储氢罐等）从生产地输送到终端用户（如叉车、加氢站、酒店、游泳池、温泉等）。这些示范为建立一个具有低碳氢供应链的地区性氢能社会提供了重要启示。换言之，创建一个符合当地条件且现实可行的氢能社会是极为必要的。

向全新氢能社会的转变要求提升公众对此的接受程度。根据调查报告的结果，日本公众对氢能技术的认识有了显著提升，特别是在燃料电池汽车方面[1]。氢能展览在这一过程中将发挥重要的作用，借此可提供最新的相关信息，使参观者有机会看到并体验这些先进技术所发挥的重要作用。例如，九州大学伊都校区的氢能展厅每年会接待约8000名参观者，在那里，示范版和商业版的燃料电池汽车（Mirai和Clarity）、Ene-Farms、ME-GAMIE以及加氢站均向参观者开放。国际合作是加速实现氢经济并达成2015年12月在巴黎举行的联合国气候变化大会（第21届缔约方会议，COP21）上通过的《巴黎协定》目标的另一重要方面。日本还积极推进政府和产业层面的国际活动。氢能委员会（Hydrogen Council）成立于2017年1月，是由领先的能源、运输和工业企业



图5. 福岛氢能研究基地。经Government of Japan, ©2020许可，转载自参考文献[9]。

发起的全球性倡议，旨在以团结和长远的眼光加速氢经济的发展。2018年10月，日本举办了首次部长级会议，鼓励世界各国推动全球范围内的氢能利用，并进一步巩固成员国之间的和谐合作。2019年6月，日本主办的二十国集团（G20）峰会的公报和行动计划中首次提到了氢能的重要性。

福岛一直在与核电站灾难作斗争，但它将通过可再生能源制氢重新崛起。福岛氢能研究基地的建设（图5）[9]，不仅会促进福岛的复兴，同时也证明氢气可以成为一种最优的解决方案，其可以确保可靠的能源供应，改善自然环境，以及创造出可持续、丰富多彩的美好生活。2020年被称为“国际氢能社会元年”，它将被单独定义和具体设计。不断推进氢能技术研发，加强国际合作，必将加速实现真正的氢能社会。

References

- [1] Sasaki K, Li HW, Hayashi A, Yamabe J, Ogura T, Lyth S, editors. Hydrogen energy engineering: a Japanese perspective. Tokyo: Springer Japan; 2016.

- [2] World energy network [Internet]. Kawasaki: New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO); c1998–2003 [cited 2020 Oct 20]. Available from: <https://www.enea.or.jp/WE-NET/index.html>.
- [3] Basic hydrogen strategy [Internet]. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry; 2017 Dec 26 [cited 2020 Oct 20]. Available from: https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003a.pdf.
- [4] Challenges for Japan's energy transition—basic hydrogen strategy [Internet]. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry; 2019 Oct [cited 2020 Oct 20]. Available from: <https://www.nedo.go.jp/content/100899750.pdf>.
- [5] Nagashima M. Japan's hydrogen society ambition: 2020 status and perspectives. Paris: French Institute of International Relations; 2020.
- [6] Hydrogen energy navi [Internet]. Kawasaki: New Energy and Industrial Technology Development Organization; c2020 [cited 2020 Oct 20]. Available from: <http://hydrogen-navi.jp/en/index.html>.
- [7] Japan H₂ mobility [Internet]. Tokyo: Japan Hydrogen Station Network Joint Company; 2019 Apr [cited 2020 Oct 20]. Available from: <https://www.jhym.co.jp/en/nav-about/>.
- [8] Projects for the creation of hydrogen society [Internet]. Tokyo: Ministry of the Environment, Government of Japan; [cited 2020 Oct 20]. Adapted from: https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/suisoshakai_pamphlet_eng_1126_2.pdf.
- [9] Giant leap towards a hydrogen society [Internet]. Tokyo: the Government of Japan; c2020 [cited 2020 Oct 20] Available form: <https://www.japan.go.jp/tomodachi/2020/earlysummer2020/hydrogen.html>.