岂止是电源
核能制氢促进低碳未来

文/Matt Fisher

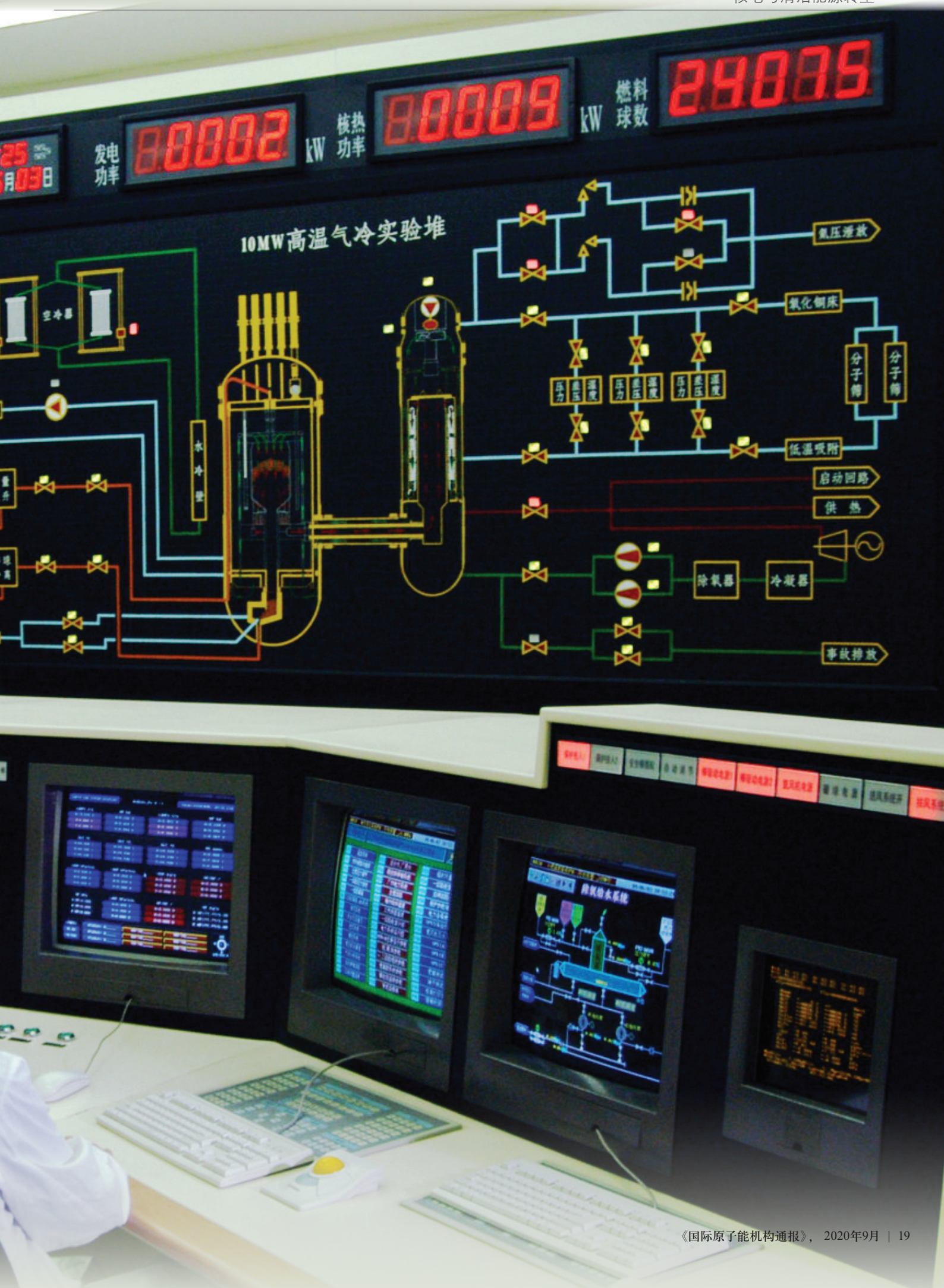
氢是宇宙中最丰富的化学元素，但为各种工业过程生产纯氢耗能高，同时留下大量碳足迹。

“目前几乎95%的氢需求是利用甲烷蒸汽重整等碳密集型生产过程满足的。从全球清洁能源转型的角度看，这是不可持续的，特别是考虑到需求已经相当大，而且还在继续增长。”原子能机构高级核工程师Ibrahim Khamis说。据国际能源机构报道，自1975年以来，氢需求已经增加了两倍多。

氢被用于各种工业过程，从生产合成燃料和石化产品到制造半导体和为燃料电池电动车提供动力。为了减少每年生产7000多万吨氢的环境影响，一些国家将目光投向了核电。

“举例来说，如果仅将目前氢产量的4%转为使用核电生产，那么每年将减少多达6000万吨的二氧化碳排放。”Khamis说，“而如果所有的氢都使用核能生产，那么我们谈论的是每年消除超过5亿吨的二氧化碳排放。”

北京清华大学HTR-10反应堆控制室。（图/国际原子能机构P. Pavlicek）


发电功率
kW
核热功率
kW
燃料球数
10MW高温气冷实验堆
空冷器
水冷壁
氦压渗放
氧化铜床
分子筛
分子筛
压力
差压
温度
压力
差压
温度
压力
差压
温度
低温吸附
启动回路
供 热
除氧器
冷凝器
事故排放

核电反应堆可与制氢厂配合，作为热电联产系统有效地生产能源和氢。就制氢而言，热电联产系统配有电解或热化学过程的组件。电解过程利用直流电促使水分子分裂，同时产生氢和氧。水电解的操作温度相对较低，约为80℃至120℃，而蒸汽电解的操作温度高得多，因此效率更高。蒸汽电解可能是与先进高温核电厂相结合的理想选择，因为该过程需要大约700℃至950℃的热输入。

热化学过程通过在高温下诱导与特定化合物发生化学反应，使水分子分裂，产生氢。能够在极高温度下运行的先进核反应堆也可用于为这些过程提供热量。

“特别是利用硫-碘循环生产氢，具有扩大规模进行可持续的长期运行的巨大潜力。”Khamis说，“利用日本的高温试验反应堆设计与中国的HTR-PM 600和HTR-10设计开发这种方法大有可为，其他的研究计划也在继续取得良好的进展。”

目前，一些国家正在实施或探索利用核电厂制氢，助力能源、工业和交通部门去碳化。这也是一种从核电厂获得更多收益的方式，有助于提高核电厂的盈利能力。

原子能机构通过协调研究项目和技术会议等各种举措，向对制氢感兴趣的国家提供支持。原子能机构还制定了“氢经济评价计划”，即用于评定利用核能大规模制氢的经济效益的工具。原子能机构还在2020年初推出了一门关于利用核能热电联产制氢的电子学习课程。

“利用核电厂制氢在促进去碳化努力方面具有很大潜力，但有一些挑战必须首先克服，例如确定将制氢纳入更广泛的能源战略的经济可行性。”Khamis说，“通过热化学水分裂过程制氢需要能够在极高温度下运行的创新型反应堆，而这些反应堆距离部署还有几年的时间。同样，硫-碘工艺仍需要更多年的研发才能达到成熟和实现商业化扩大状态。”他补充说，纳入了非电力应用的核能系统的许可证审批也是一个挑战。

“利用核能制氢提供了大幅减少碳排放的机会，同时也提高了核电行业的盈利能力。”

—俄罗斯原子能海外公司负责市场和业务发展的副总经理Anton Moskvin

研究和测试可行性

美国能源部于2020年初发起的“H2@Scale”倡议，正在研究开发制氢与低碳发电并举的核能系统的可行性。在该倡议资助的几十个项目中，有一个项目将由美国三家商业电力公司与能源部的爱达荷国家实验室合作实施。该项目将包括对在美国的几个核电厂进行制氢技术和经济评价以及试点示范。

参与该项目的电力公司之一，美国最大的低碳电力生产商爱克斯龙（Exelon）公司目前正在采取措施，在其一个核电厂安装一个1兆瓦的聚合物电解质膜电解槽和相关基础设施。该系统可能在2023年投入使用，将用于证明电解产氢的经济可行性，以供应发电相关系统的现场需求以及未来的可扩展性机会。

“这个项目将有助于帮助我们确定核驱动制氢的前景，包括财务考虑因素如何影响任何长期、大规模的产氢。”爱克斯龙发电公司工程和技术服务高级副总经理Scot Greenlee说，“在我们规划低碳未来的过程中，引入核电制氢可以大大提高核电的可持续性。”

不止是制氢

除制氢外，核电还有多种非电力应用，其中包括家庭和企业的区域供暖、工业用途的供热和制冷，以及增加饮用水供应的海水淡化。

随着新的核能系统设计成能够优化电力与非电力的综合利用以及与可再生资源相融合，这些应用的潜在部署也在扩大。新的反应堆设计也在开发中，如小型模块堆，可以提供更灵活的运行，功率输出可以根据需求进行调整。这些特性使得它们特别适合于这种应用，因为通常用于发电的能源可以转用于非电力应用。

俄亥俄州的戴维斯-贝瑟核电厂将利用核能制氢。（图/戴维斯-贝瑟核电厂）

英国也在进行评价。英国的非营利性计划“能源系统推动器”正在对整个能源系统进行建模，现在包括先进核电技术制氢方案。该计划提供了到2050年可能实现温室气体净零排放的最低成本能源结构前景，并且结果表明，先进核技术可以与其他技术一起在制氢中发挥作用。

“虽然氢在英国的确切作用还有待确定，但气候变化委员会和商业、能源和产业战略部所做的分析表明，到2050年，我们可能需要部署约270太瓦时的低碳氢，但依据氢最终用于热力、电力和运输部门的具体应用，这一数字可能会大幅增加。”英国核创新和研究咨询委员会高级战略和经济顾问Philip Rogers说。

新计划

2019年，俄罗斯启动了首个核驱动制氢计划。该计划由俄罗斯国家原子能集团公司运作，将使用核驱动电解法以及利用高温气冷堆的热化学制氢法。其目的是每年生产大量的氢，摆脱采用蒸汽甲烷重整等碳密集型制氢方法。

生产的氢将既供国内使用又出口。目前正在就向日本出口部分氢进行可行性评价。

“由于一定程度上受金属加工等行业扩张而引起的氢需求持续增长，利用核能制氢提供了大幅减少碳排放的机会，同时也提高了核电行业的盈利能力。”俄罗斯原子能海外公司负责市场和业务发展的副总经理Anton Moskvin说。