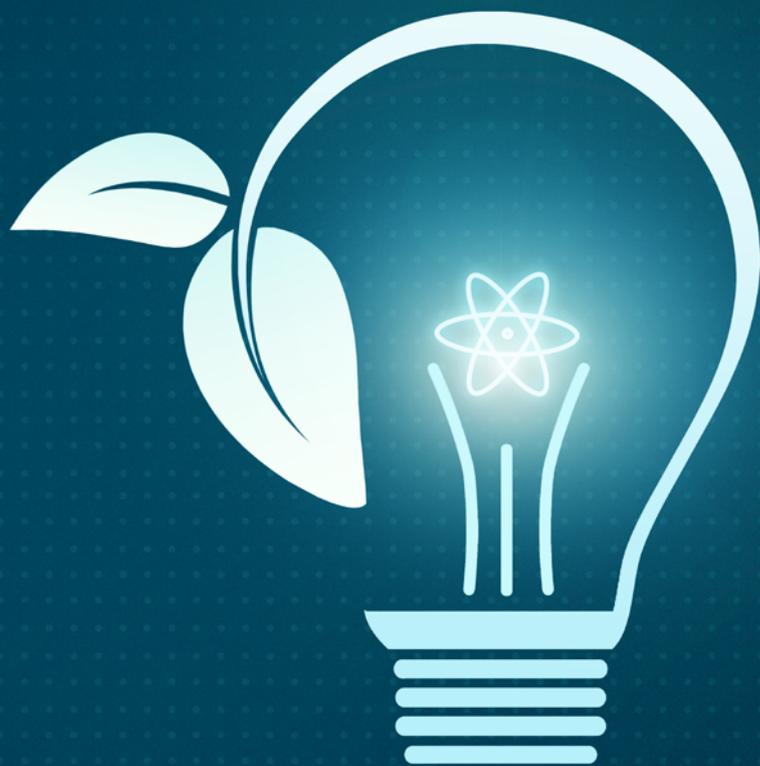




IAEA BULLETIN

国际原子能机构通报

国际原子能机构旗舰出版物 | 2020年9月 | www.iaea.org/bulletin



核 电 与 清 洁 能 源 转 型



- **材料科学和技术的进步扩大了核电的清洁能源效益**，第8页
- **减少核废物和提高效率，促进可持续的能源未来**，第14页
- **智能、稳定、可靠：低碳能源系统中的智能电网与核电**，第22页



国际原子能机构（原子能机构）的使命是防止核武器扩散和协助所有国家特别是发展中国家从核科学技术的和平、安全和可靠利用中受益。

1957年作为联合国下的一个自治机构成立的原子能机构是联合国系统内唯一拥有核技术专门知识的组织。原子能机构独特的专业实验室帮助向原子能机构成员国传播人体健康、粮食、水、工业和环境等领域的知识和专门技术。

原子能机构还作为加强核安保的全球平台。原子能机构编制了有关核安保的国际协商一致准则出版物《核安保丛书》。原子能机构的工作还侧重于协助最大限度地减少核材料和其他放射性物质落入恐怖分子和犯罪分子手中或核设施遭受恶意行为的风险。

原子能机构安全标准提供一套基本安全原则，反映就构成保护人和环境免受电离辐射有害影响所需的高安全水平达成的国际共识。这些原子能机构安全标准的制定针对服务于和平目的的各种核设施和核活动，以及减少现有辐射风险的防护行动。

原子能机构还通过其视察体系核查成员国根据《不扩散核武器条约》以及其他防扩散协定履行其将核材料和核设施仅用于和平目的的承诺情况。

原子能机构的工作具有多面性，涉及国家、地区和国际各个层面的广泛伙伴的参与。原子能机构的计划和预算通过其决策机关——由35名理事组成的理事会和由所有成员国组成的大会——的决定来制订。

原子能机构总部设在维也纳国际中心。外地和联络办事处设在日内瓦、纽约、东京和多伦多。原子能机构在摩纳哥、塞伯斯多夫和维也纳运营着科学实验室。此外，原子能机构还向设在意大利的里雅斯特的阿布杜斯·萨拉姆国际理论物理中心提供支持和资金。

《国际原子能机构通报》

主办单位

国际原子能机构新闻和宣传办公室

地址：维也纳国际中心

PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

电话：(43-1) 2600-0

电子信箱：iaebulletin@iaea.org

执行编辑：Nicole Jawerth

编辑：Miklos Gaspar

设计制作：Ritu Kenn

《国际原子能机构通报》可通过以下网址在线获得：

www.iaea.org/bulletin

《国际原子能机构通报》所载的原子能机构资料摘录可在别处自由使用，但使用时必须注明出处。非原子能机构工作人员的作品，必须征得作者或创作单位许可方能翻印，用于评论目的的除外。

《国际原子能机构通报》任何署名文章中表达的观点不一定代表原子能机构的观点，原子能机构不对其承担责任。

封面照片来源：国际原子能机构

请关注我们



建设清洁能源未来

文/国际原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西

核电在帮助应对全球气候紧急情况方面可以发挥重要作用。

核电已经占到全球所有低碳发电量的三分之一，提供了稳定、可靠的电力供应。它的使用既有助于减少温室气体排放，又有助于满足世界日益增长的人口的需求，尤其是发展中国家人口的需求。

核电厂在运行期间几乎不产生温室气体排放或空气污染物，在其整个寿命内的排放量非常低。它为风能和太阳能等间歇性可再生能源提供了重要的补充。

核电已经做出的巨大贡献——例如，在过去50年里减少了相当于55千兆吨二氧化碳排放——以及目前正在酝酿中的创新技术的巨大潜力，都值得人们更好地了解。

因此，我决定把我就任原子能机构总干事以来的第一次原子能机构“科学论坛”专门用于讨论“核电与清洁能源转型”。来自世界各地的顶尖科学家和专家将在两天的时间里汇聚一堂，探讨核电的科学解决方案如何在为可持续未来铺平道路方面发挥关键作用。

本期《国际原子能机构通报》将为您详细介绍清洁能源转型以及核电如何融入其中（第4页）。您将了解到，在极端事件中，如大流行病或气候变化引的恶劣天气，核电的适应力如何有助于确保能源的持续供应（第6页）。

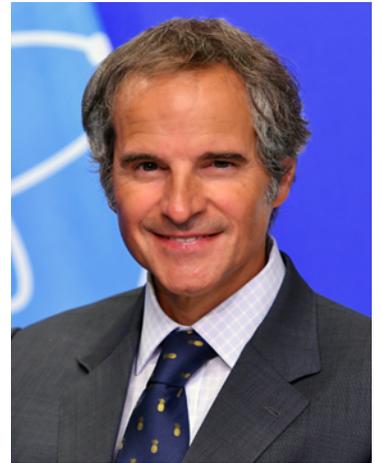
您将看到推动核能未来的创新。例如，材料科学的进步正在助力核电

厂在远远超出原计划的运行时间内，安全、可持续和经济高效地运行（第8页）。部分得益于新概念、新技术和新材料，快堆有望以更少的废物实现更高效的能源生产（第14页）。大型先进核反应堆（第11页）以及小型模块化反应堆和微型反应堆（第16页）由于设计和安全特性得到加强，为各国提供了更宽泛的核电选择，以满足能源和气候需求。

创新的影响不仅仅局限于核电生产。前瞻性融资政策有助于克服新核电项目的经济障碍（第24页）。人工智能和“物联网”等智能技术与核电相结合，使可再生能源占比较高的电网更加高效、稳定和可靠（第22页）。利用核电设施的非电力应用，如制氢，正在将核能的低碳效益扩展到工业和运输等部门（第18页）。

核电技术的进步必须伴随着核安全、核安保和核保障的进展。正在建立一种新的、技术中立的监管框架，以便在不损害安全的前提下进行核电技术的创新（第26页）。一项正在开发的保障技术是神经网络，用于帮助分析人员在审查作为核查活动一部分而收集的监视数据时更有效和更高效地利用时间，以促进防止核武器扩散（第28页）。

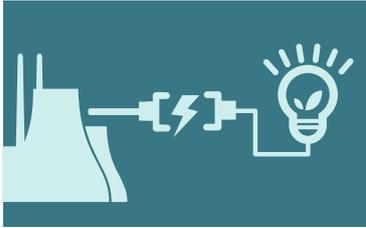
实现可持续发展和满足气候目标将是一个巨大的挑战。核电是一项业已证明的成熟技术，可以做出很大贡献。原子能机构将继续尽其所能，助力世界通过使用核技术向清洁能源未来转型。



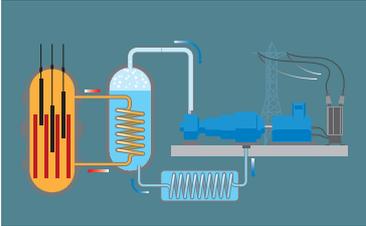
“原子能机构将继续尽其所能，助力世界通过使用核技术向清洁能源未来转型。”

—原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西





1 建设清洁能源未来



4 什么是清洁能源转型？核电如何适应？



6 核电在极端事件下的适应力与安全



8 材料科学和技术的进步扩大了核电的清洁能源效益



11 先进反应堆有助于为核电满足气候目标铺平道路



14 减少核废物和提高效率，促进可持续的能源未来



16 小型堆，潜力大



- 18 岂止是电源**
核能制氢促进低碳未来



- 22 智能、稳定、可靠**
低碳能源系统中的智能电网与核电



- 24 投资清洁能源转型**
对核电的融资和经济支持



- 26 小型模块堆的安全和许可证审批**
技术中立方案



- 28 面向未来的发展**
保障与核电

世界观点

- 30 以核能推动更加深入的去碳化**
文/Kirsty Gogan 和 Eric Ingersoll

国际原子能机构最新动态

- 32 新闻**
- 36 出版物**

什么是清洁能源转型？核电如何适应？

文/Nicole Jawerth

世界需要能源来支持日常生活及推动人类和经济发展。2019年，全球发电量超过2.6万太瓦时。这些电力生产源于各种能源，主要是化石燃料，但也包括核电和可再生能源，如太阳能、水电和风能。

能源的生产和使用是全球最大的温室气体排放源。由于温室气体是驱动气候变化的主要因素，世界各国都在积极努力通过改变能源生产方式，实现清洁能源转型。

下面我们就来仔细了解一下清洁能源转型以及核电所起的作用。

什么是“清洁能源转型”？

清洁能源转型意味着将能源生产从释放大量温室气体的能源（如化石燃料）转向释放少量或没有温室气体的能源。核电、水电、风能和太阳能就是这些清洁能源的一部分。

全球向清洁能源转型的方向是在《巴黎协定》中达成的。《巴黎协定》是《联合国气候变化框架公约》180多个国家之间达成的一项国际协定，核心目标是鼓励使用低碳能源来减少温室气体排放，从而将全球平均气温相对于工业化前水平的升幅控制在2℃以下。

根据国际能源机构的数据，由于全球约三分之二的电力仍来自于燃烧化石燃料，因此要在2050年之前达到这些气候目标，至少需要将80%的电力转向低碳能源。

什么是温室气体、全球变暖和气候变化？

温室气体是地球大气层中吸收

和释放热量的气体。这些气体包括二氧化碳、甲烷、水蒸气、一氧化二氮和臭氧。由于它们吸收热量并把热量辐射回地球，导致地球的平均温度上升。

虽然一些温室气体来自于自然界，但现在大多数温室气体来自于人类。自19世纪末工业革命以来，由于人类活动的增加，温室气体排放上升，主要源于燃烧化石燃料，如驾驶以汽油为燃料的汽车或烧煤取暖。化石燃料燃烧时，会释放出二氧化碳。

100多年来，温室气体的积累速度远远超过了它们的消散速度，根据最公认的科学理论，这加速了全球平均气温的上升。这就是所谓的全球变暖。

全球变暖正在引起环境变化，如更极端的天气模式、不稳定的降雨、干旱和不可预测的季节变化。这些变化被称为气候变化。随着目前全球变暖的速度加快，预计气候变化及其影响将变得更加极端，使地球上的生活更加困难。

核电如何适应清洁能源转型？

核电是当今仅次于水电的第二大低碳发电能源。核电厂在运行过程中几乎不产生温室气体排放。据国际能源机构统计，过去50年，核电的使用减少了超过60千兆吨的二氧化碳排放，几乎相当于两年的全球能源相关排放量。

核电占全球电力的10%左右，占全球低碳电力的三分之一左右。目前，有440座核电反应堆在30个国家

运行。有54座反应堆正在19个国家建造中，包括4个国家正在建造首座核反应堆。

由于核电厂可以几乎不间断地满负荷运行，因此可以提供持续可靠的能源供应。这与太阳能和风能等可变可再生能源形成鲜明对比，后者在产出缺口时，如太阳落山或风停时，需要备用电源。

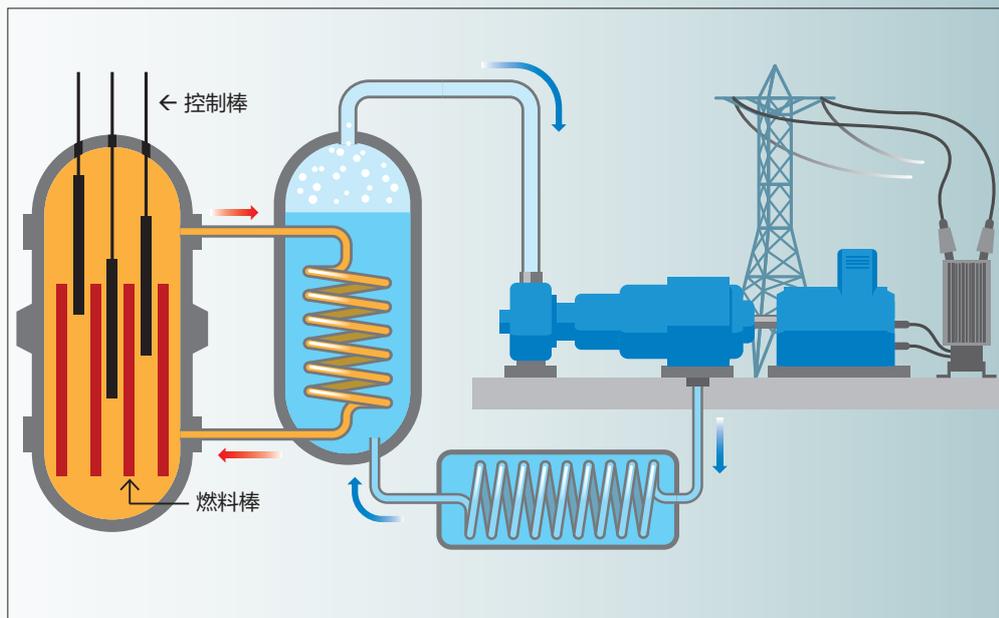
核电厂还可以灵活地运行，以满足能源需求的波动，并为电网特别是那些可变可再生能源比例较高的电网提供稳定性（见第22页）。目前，一些核电厂的设计还能提供非电力服务，例如制氢。除了电力生产外，这些服务还有助于其他部门去碳化（见第18页）。

随着核电技术的不断进步，带来了创新和先进的下一代反应堆设计，促使核电成为更高效、更实惠和更具吸引力的去碳化方案（见第11页）。在一个反应堆设计更小、更灵活、甚至可运输的新时代，预计核电及其非电力应用也会变得更容易获得和更具成本效益，特别是对于全球偏远和难以到达的地区（见第16页）。

核电是如何工作的？

核电是由核能的受控释放产生的，核能是将原子中心聚合在一起的能量。这些中心称为原子核。核能最终以热能的形式通过核裂变释放出来，核裂变是特定材料的原子核分裂的过程。最常用的材料是铀，这是一种天然存在于地壳中的弱放射性重金属。

铀通常被装入燃料棒中，装入之前一般要进行浓缩，以增加其裂变能



力。这些燃料棒被放置在核反应堆内。

压水堆是目前世界上最常见的在运核电反应堆。燃料棒在压水堆中使用，被放置在反应堆的容器内，容器内充满水。在那里，燃料棒受到称为中子的核粒子轰击，这些中子最初是由反应堆内的一个装置（中子源）产生的。这些中子使燃料棒中的铀核分裂，释放出能量和中子。这些新释放的中子会使燃料棒中的其他铀核不断分裂，产生核裂变链式反应。

在压水堆中，核裂变过程中释放的能量会加热燃料棒和周围的水。为了防止水沸腾，水一直处于加压状态，而热量则通过管道排出使附近容器中的水沸腾。沸腾的水产生蒸汽，使巨大的汽轮机高速转动。汽轮机与发电机连接，并使发电机旋转，产生电力。然后，电力流向电网，这是一个相互连接的网络，将电力从生产者提供给消费者。

核裂变持续进行，直到在燃料棒之间插入由吸收中子而不产生额外裂变的材料（如镉）制成的控制棒。这就停止了核裂变链式反应。

压水堆的简化示意图。

（图片来源：iStock.com/jack0m）

核电在极端事件下的适应力与安全

文/Matt Fisher

核电厂的建造应经久耐用。但随着发生全球极端事件的可能性不断增加——从可能影响核电厂的自然灾害和气候变化驱动的天气模式加剧，到可能影响核电厂员工的传染性疾病增多，核电厂员工队伍适应性强、设计稳健对于电厂保持适应能力和助力未来低碳之路发展至关重要。

“为了世界在未来20到30年内减缓气候变化，能源部门需要从根本上转变为低碳能源供应系统。”原子能机构能源系统分析师Loreta Stankeviciute说，“但要做到这一点，能源部门还需要能够抵御和适应极端事件和环境变化。核电的适应力和安全记录使其有能力帮助全球社会战胜这些挑战。”

大流行病

最近发生的史无前例的新冠肺炎疫情便是对适应力的考验。

随着新冠肺炎病毒在2020年上半年蔓延到全球每个角落，社会和经济发生了翻天覆地的变化。采取了封锁等众多限制措施，以控制病毒的传播。

“尽管有这些世界性的限制，但世界各地的核电厂继续安全运行。运营

者无缝实施应急计划，包括各种应急措施，以维持运行并保证人员安全。”

原子能机构核装置安全处处长Greg Rzentkowski说，“运营者采取了必要的预防措施，并认真实施了运行和组织变革，同时继续确保核电厂的安全和安保。”

虽然没有任何国家报告由于新冠肺炎的影响核电反应堆被强制关闭，但根据运营者的报告，一些计划中的维护停堆不得不在获得监管部门批准的情况下缩短或推迟，作为临时缩减非关键性工作的保护健康措施的一部分。还有人担心，与大流行病有关的供应链中断，例如制造商延迟服务和临时关闭，可能导致新建核电项目和大型改造项目的拖延。

“这些与大流行病相关的中断对该行业的影响有多大尚待观察。”原子能机构核电处处长Dohee Hahn说，“我们不断收到的意见为我们提供了关于大流行病对核工业影响的重要见解，并将有助于运营者和监管机构相互学习经验。”

核电不仅证明了它在大流行病期间的适应力，而且还表明它是安全



的，非常适合满足不断变化的能源需求。自大流行病开始以来，包括巴西、印度和韩国在内的一些国家，核电份额有所增加。例如，在英国，核电在大幅减少燃煤发电量方面发挥了重要作用；大流行病引起的电力需求下降使英国临时关闭了煤电厂，转而增加使用核电。

气候变化

在当前大流行病期间，核电厂工作人员的适应力对于核电厂不受阻碍地继续运行至关重要，和这种情况一样，面对极端天气事件，包括由气候变化驱动的事件，也需要核电厂工作人员的适应力和核电厂的稳健设计。

由全球平均气温上升造成的气候变化正在改变极端气温、暴雨、大风和海平面大幅上升等天气事件的严重性和频度。预计在近期到长期内，这些变化将继续增加。

“虽然水温和气温的上升可能会限制反应堆的冷却能力，从而对反应堆运行的连续性构成挑战，但极端的洪水和大风才可能对装置的设计构成威胁，从而影响反应堆的安全。” Rzentkowski说，“气候变化的挑战之一是，随着气候变化的不断发展并使情况变得更加极端，以往的观测和预测模型变得不再可靠。因此，我

们应开始预测这些事件，并定期重新评估相关风险，以确保事故预防和缓解措施仍然充分。”

自然事件

核电厂还可能受到地震、龙卷风、火山活动、冰暴和洪水等极端自然事件的影响。在极少数情况下，这些事件可能极端到超过核电厂的设计能力。

2011年3月11日由大地震后引发的海啸造成的日本福岛第一核电站事故就是一个例子。虽然核电厂被这些事件和随之而来的氢气爆炸所破坏，但没有人因事故而丧生。

福岛第一核电站事故发生后，世界各地已采取具体步骤，进一步加强现有核电厂的安全，并完善新核电厂应对极端事件的设计。这些措施例如包括可替代冷却方案、符合环保要求的备用发电机、防风屏障和密封件，以及场址防洪堤坝。

原子能机构的安全标准也涉及可能影响核电厂场址或核装置安全的各类外部事件，包括场址评价、设计和安全评定。这些标准反映了当前的实践状况，并用于确保核电厂整个寿期的安全。原子能机构还通过其《核能丛书》和其他技术出版物（例如《使能源部门适应气候变化》）提供指导。

材料科学和技术的进步扩大了核电的清洁能源效益

文/Carley Willis

材料科学和技术的进步有助于延长核电厂寿期，使各国能够继续获得清洁能源效益。

“为长期运行而改造核电站的费用比建造新的核电厂低得多。”原子能机构核电厂运行和工程支持工作组组长Ed Bradley说，“核电厂的长期运行是提高当前核电可持续性的绝佳机会，因为它是最具成本效益的低碳电力来源之一。鉴于与过去相比我们今天所拥有的材料和技术，对于许多试图实现去碳化的国家来说，这已经成为有吸引力和竞争力的方案。”

大多数核电反应堆最初建造时的运行寿期为30至40年。延长核电厂寿期需要评估现有核电厂，并确定它是

否可以安全、可靠和具有成本效益地继续运行到假定的退役日期之后。当核电厂运行寿期被延长时，通常可以继续运行20至40年。

“鉴于核电厂在最初选址、设计和建造期间所做的广泛而全面的工作，以及在整个运行过程中的老化管理，加上一定的升级和改造，许多核电厂能够在远超过原预期运行寿期后继续安全运行。”原子能机构高级安全官员Robert Krivanek说。不过，他补充说，一些核电厂的某些组件和设计不容易更新或更新不具有成本效益，这意味着它们不适合长期运行。

老化核电反应堆面临的主要挑战之一是退化。随着核电厂的运行，其

达林顿改造项目2号机组
两台汽轮机俯视图。

(图/安大略电力公司R.
Radell)



结构和部件必须承受住高温、紧张环境和连续运行，随着时间的推移，这些结构和部件可能会磨损。

“常规评价和部件更换可以缓解退化，但随着时间的推移，这可能不是经济上最佳方案，特别是在长期运行的情况下。” Bradley说。

新技术和新材料

激光束焊接和摩擦搅拌焊接等新技术的发展，以及双相不锈钢等材料的发展，提供了更好的抗腐蚀能力，这意味着一些部件现在能够更加长久耐用，使核电厂继续运行变得更加经济可行。

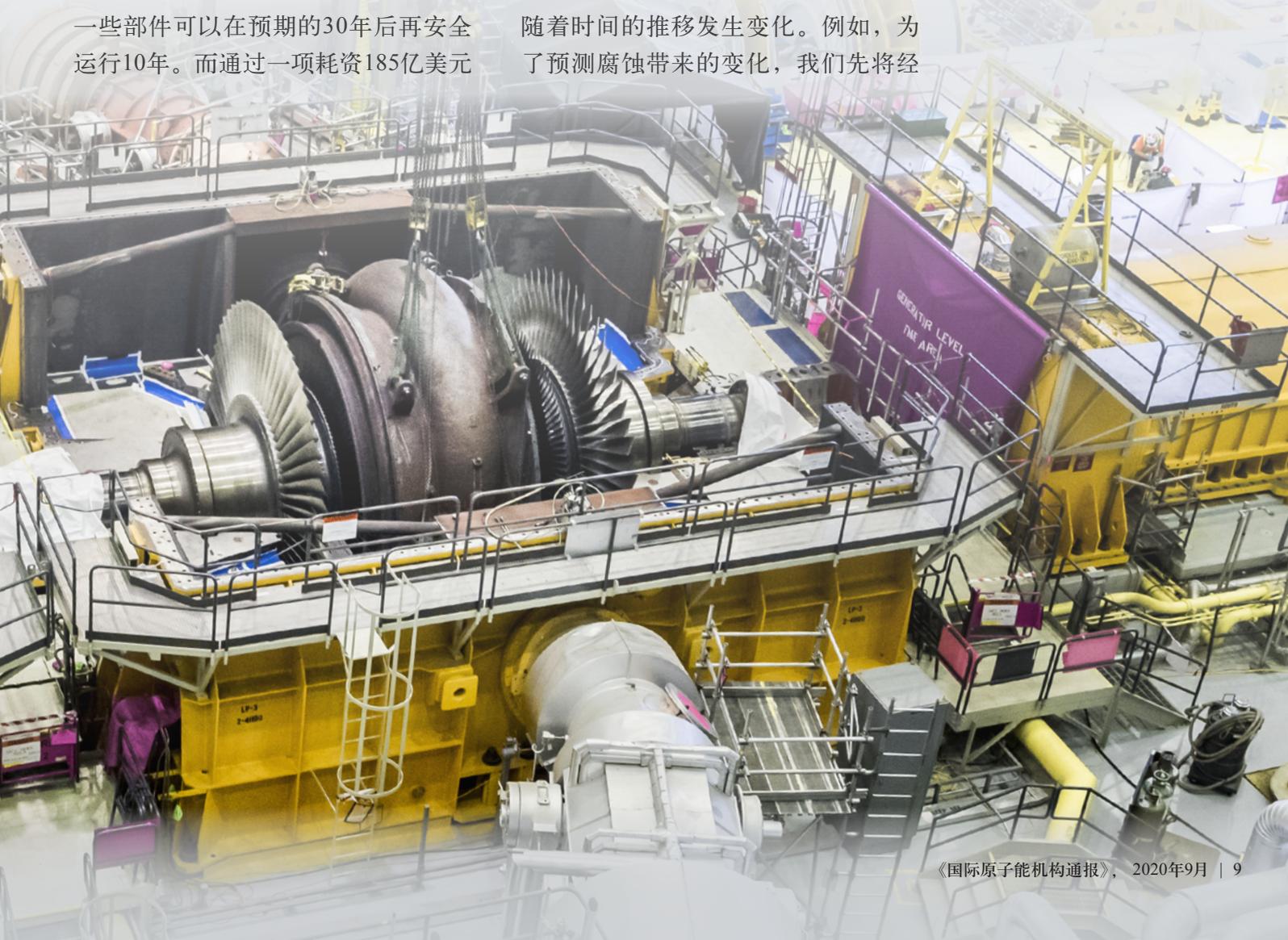
研究人员还在更好地了解核电厂的不同运行条件如何影响部件和结构。例如，加拿大安大略省的坎杜反应堆在1970年至1993年期间投入使用，通过材料科学研究和部件检测，一些部件可以在预期的30年后安全运行10年。而通过一项耗资185亿美元

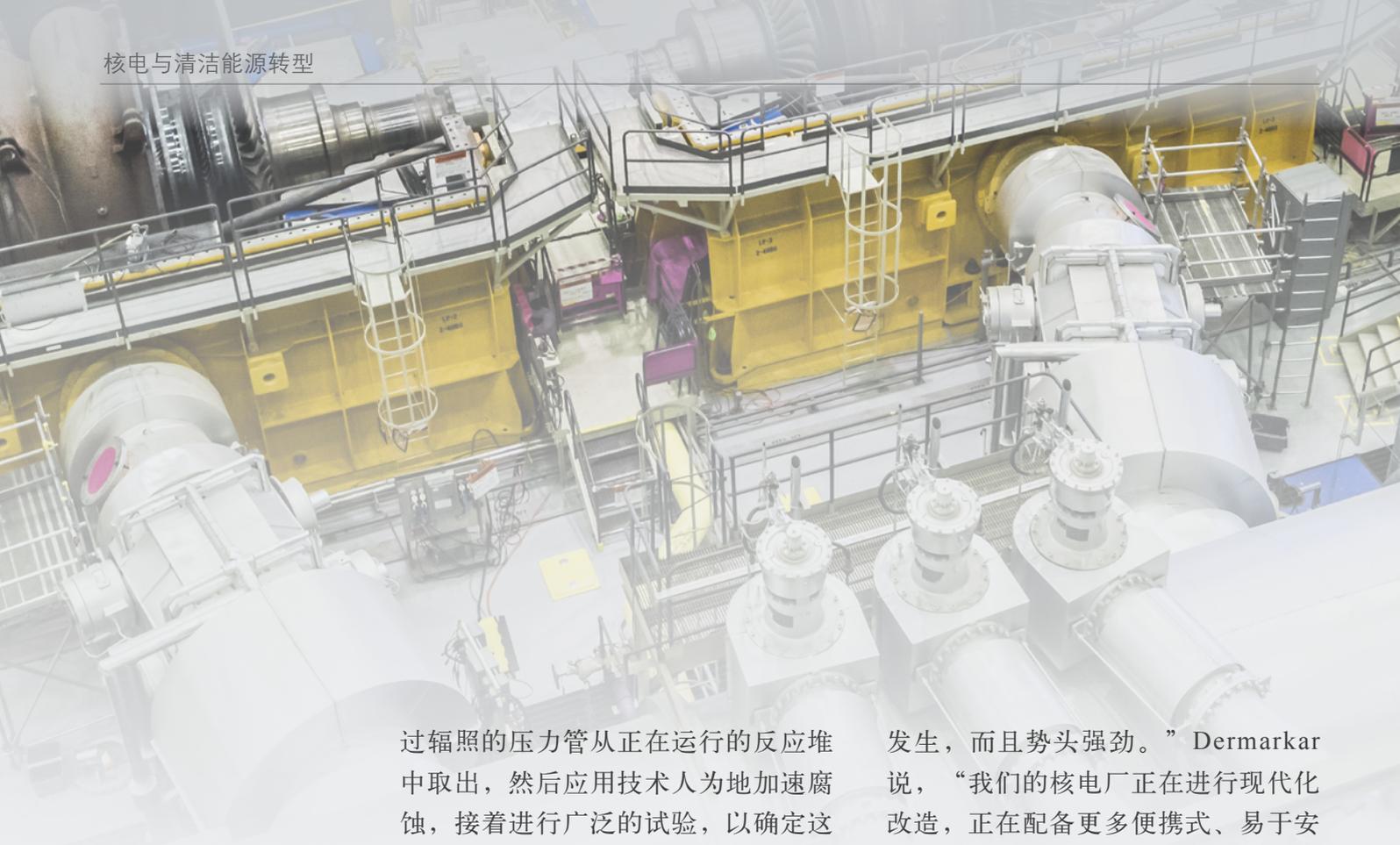
的改造计划，将使运行时间第二次进一步延长，最多可延长40年。这意味着，一些建于20世纪80年代的反应堆将安全运行到21世纪60年代。

“我们的反应堆建造时核电厂在世界上刚起步不久，我们的反应堆设计的最初预期寿命保守估计为30年。”由分布在7个国家的坎杜堆核电运营者组成的行业集团，坎杜堆所有者集团的总经理兼首席执行官Fred Dermarkar说，“随着我们对这些设施的运行和熟悉，以及对它们老化情况的了解，我们可以认识到继续长期运行的巨大好处。”

Dermarkar解释了最先进的材料科学如何用于预测未来许多年的材料特性。他说：“坎杜反应堆使用称作压力管的部件冷却燃料。在反应堆环境中，由于高中子通量、高温和高压以及冷却水的腐蚀，压力管的特性会随着随着时间的推移发生变化。例如，为了预测腐蚀带来的变化，我们先将经

“随着我们对这些设施的运行和熟悉，以及对它们老化情况的了解，我们可以认识到继续长期运行的巨大好处。”
—坎杜堆所有者集团总经理兼首席执行官Fred Dermarkar





过辐照的压力管从正在运行的反应堆中取出，然后应用技术人为地加速腐蚀，接着进行广泛的试验，以确定这些人为老化部件的材料特性。通过这种方式，我们可以证明这些部件能用多久。在实验室里领先一步，我们就可以有把握地认为，这些部件将继续安全、可靠地运行，直到其预定的改造日期。”

大数据与核电

研究人员现在也在探索如何利用大数据评估和确定核电厂长期运行的可行性。大数据是一个术语，用于描述对非常快速、往往实时收集的极为复杂且数量庞大的数据分析，以确定趋势和模式，并预测结果和行为。

就核电厂长期运行而言，从运行日志、反应堆测量和报告事件等核电厂运行情况中收集数百万个数据点。通过使用核相关大数据软件对这些数据进行挖掘，研究人员可以利用模拟工具预测核电厂的系统、结构和部件在不同状况下的老化情况，并确定哪些可能需要更换，以及需要进行更换的大致时间。

“大数据不仅仅是未来，它正在

发生，而且势头强劲。” Dermarkar 说，“我们的核电厂正在进行现代化改造，正在配备更多便携式、易于安装的仪器，以收集数据并及早预测问题，使我们能够及早采取纠正行动。我们看到实实在在的好处：我们的核电厂今天的性能比历史上任何时候都要好。”

帮助各国实现核电厂的长期运行是原子能机构工作的一部分。原子能机构制定国际公认的安全标准，通过技术出版物提供导则，例如通过《核电厂老化管理：国际通用老化经验教训》出版物提供导则，以及通过长期运行安全问题同行评审工作组访问共享专门知识。原子能机构还为世界各地的营运者、监管者和决策者讨论经验和共享良好实践协调了一个工作组。

“长期运行的主要挑战是保持最高的安全标准，并以经济的方式实现这一目标。”安特吉公司核电分公司许可证展期服务负责人、原子能机构长期运行工作组组长 Garry G Young 说，“我们的工作正在不断探索如何确保高效和安全，并传播在该领域取得的成果和进展，使研究和发展对大家都是最有益的。”

先进反应堆有助于为核电满足气候目标铺平道路

文/Matt Fisher

先进反应堆有助于使核电成为更容易获得、更加可持续和更负担得起的低碳能源方案。这些反应堆具有更强的安全性能和优化成本效益的设计，预计将为提高经济效益、简化许可证审批程序和提高公众接受度打开大门，最终有助于各国考虑采用核电实现其气候目标。

“先进反应堆设计可运行60年或更长时间，并有望简化许可证审批程序，因而符合减缓气候变化的要求，而减缓气候变化既需要快速实施，又需要长期可持续性。”原子能机构核电技术发展科科长Stefano Monti说，“公众的参与和接受对于核电的未来至关重要，随着反应堆设计从安全和经济角度不断改进，全球社会对这一重要的低碳电力来源的看法也将随之改善。”

先进反应堆及相关燃料和燃料循环代表了核电技术的前沿。它们的设计建立在六十多年来核电研究、开发和经验教训的基础上。

原子能机构与各国合作，以确定和应对与发展先进反应堆有关的挑战，如技术创新和安全设计标准。这种支持包括开展协作研究项目和活动（如与国际专家举办讲习班），以及与第四代核能系统国际论坛合作。第四代核能系统国际论坛是一项国际合作努力，成员目前包括13个国家，自2000年成立以来一直在开展研究和开展活动，以支持下一代核能系统。

先进反应堆的一些显著特性包括：提高热效率、最大限度地减少废物、优化自然资源利用，以及能够同时满足核能的电力和非电力应用（如

制氢）（见第18页）。这些特性扩大了运行潜力，极大地提高了核电厂的经济性。

精湛的设计

先进反应堆主要有两类：“渐进型”和“创新型”。渐进型反应堆为低碳能源生产提供了一座坚固而直接的桥梁，而未来的创新型反应堆将进一步有助于各国走上低碳之路，同时大幅减少高放废物，扩大核电的非电力应用。

目前，已有15座渐进型反应堆正在运行，更多渐进型反应堆即将陆续建成。韩国的APR1400反应堆和俄罗斯的VVER-1200反应堆均为具有更高效率和先进安全特性的压水堆设计。APR1400反应堆除了正在韩国部署外，还有一座核电厂目前正在阿拉伯联合酋长国建造，首台机组将于2020年投入运行。

VVER-1200机组目前有三台在俄罗斯运行，有几座正在孟加拉国、白俄罗斯、俄罗斯本国和土耳其建造，还有几台建在白俄罗斯的机组预计将于2020年底进行调试。法国设计的EPR反应堆有两台机组在中国运行，还有几台在芬兰、法国和英国在建，其设计目的是简化电厂运行，同时提高发电能力。

中国的1090兆瓦（电）HPR1000反应堆，又称“华龙一号”，正在中国各地建造，并计划出口到其他国家，包括阿根廷和英国，首批机组预计在2020年底开始运行。该反应堆融合先进的能动和非能动安全系统，例如在失去电源时仅靠重力插入控制棒，以



及采用可承受较高压力的新型安全壳结构，最大限度地降低了发生核事故时的泄漏几率。

1157兆瓦（电）AP1000压水堆目前已在中国的两座核电厂运行。这种反应堆的设计相对简单，包括较少的阀门，并具有利用自然力的特性，例如加压气体、重力流、自然循环流和对流等具有安全相关的功能。还有几座AP1000机组正在美国建造，计划于2022年开始发电。

创新促进可持续性

创新型反应堆仍在开发中，一些设计可能在2030年左右开始建造。它们的共同设计特点包括：发电和制氢等其他非电力应用所需的高运行温度，以及高度可靠的固有安全特性，通过最大限度地减少废物和优化自然资源利用来提高可持续性，以及提高实物保护和防扩散能力的特殊措施。

一些设计预计还包括诸如液态金

属或熔盐等新型冷却剂，使反应堆能够在环境压力和更高的温度下运行，以提高效率。一些设计还可能采用闭式核燃料循环运行，目的是减少放射性废物的数量、毒性和寿命。

BN-800钠冷快堆让我们看到了创新型反应堆的未来。BN-800，连同早期版本BN-600以及中国实验快堆，是目前正在商业运行的三座快堆。BN-800自2016年10月起在俄罗斯运行，采用钚和铀组合的混合氧化物燃料。许多创新型反应堆设计预计采用类似的物理原理运行，将核电技术的极限推向新的高度。了解更多快堆信息，请参见第14页内容。

“虽然下一代核电反应堆离进入商业运行可能还有好几年的时间，但在研发举措方面不断取得的进展非常令人鼓舞。”原子能机构核电处处长Dohee Hahn说，“随着我们努力实现清洁能源的未来，很明显，核电在使我们达到所需的目标方面将发挥重要作用。”

采用欧洲压水堆的中国台山核电厂。
（图/台山核电合营有限公司）



新燃料提供更多的能源、产生更少的废物

研究人员正在研究为核反应堆提供燃料的新方法。目的是最大限度地减少核废物的影响，降低运行和维护成本，同时提高核电厂实绩，进一步加强核安全。

一种方案是对乏燃料（即经过辐照后的核燃料）中剩余的铀和钚进行多次再循环。这种回收的燃料可以为下一代核反应堆提供动力，更有效地利用资源，同时减少核废物的数量和放射性毒性。通过多次再循环，反应堆有可能几乎只靠回收的乏燃料而不用新开采的天然铀资源运行。

耐事故燃料是正在为当前和未来的反应堆设计开发的一种有前途的新型燃料。这种燃料使用新的改进燃料和包壳（包围燃料的外管），可以更好地承受反应堆中的温度变化和极端工况。这意味着，例如，它可以比目前使用的燃料更长时间地承受反应堆堆芯中主动冷却丧失。

对于先进反应堆，目前正在开发在反应堆堆芯中使用寿期更长的新型燃料，这意味着它们能提供更多的能量、产生更少的废物。它们使用陶瓷化合物、金属和合金形式的高原子密度铀钚混合物，以提高反应堆实绩。这使得这种燃料更适合在快堆运行过程中增殖或生成新的燃料。由于这些燃料所使用的材料类型也能高效地传热，因此燃料的整体温度降低，变得更加均匀，从而提高了安全性。



减少核废物和提高效率，促进可持续的能源未来

文/Jeffrey Donovan

快中子反应堆可以提高核能的效率，减少放射性废物的环境足迹。一些国家正在探索这些创新型反应堆，以帮助确保可持续的能源未来。

快中子反应堆维持裂变链式反应不需要使用水等慢化剂慢化中子。在现有热堆中只有一小部分天然铀被用作燃料，而快堆则可以利用燃料中包含的几乎所有铀，使提取的能量多70倍，从而减少对新的铀资源需求。

快堆也采取所谓的闭式核燃料循环运行。在闭式燃料循环中，乏燃料，即经过辐照后的核燃料，被再循环和再利用。这种能源系统有可能持续数千年。相比之下，在开式燃料循环中，核燃料只使用一次，乏燃料被宣布为废物，最终在地质处置库中进行地下处置。

快堆还可以产生或“增殖”比消耗量更多的燃料，并燃烧掉乏燃料中包含的一些废物，例如次锕系元素，这是热堆无法有效做到的。燃烧掉这些废物，可以大大减少寿期最长的放

射性废物的数量、毒性和寿期。

“随着许多国家在寻找提供清洁能源的可持续方式，能源的环境足迹，例如它的废物，对他们来说都是大问题。”原子能机构核燃料循环技术负责人Amparo Espartero Gonzalez说，“减少这一足迹的能力，同时也能从核燃料中获得更多的收益，这是快堆日益吸引许多国家的重要部分，也是推动其技术发展的原因。”

东山再起

快堆是核电早期部署的首批技术之一，当时人们认为铀资源稀缺。但是，由于技术和材料方面的挑战阻碍了发展，并且发现了新的铀矿藏，轻水堆最终成为行业标准。目前已有五座快堆投入运行：俄罗斯的两座在运堆（BN-600和BN-800）和一座试验堆（BOR-60），印度的快中子增殖试验堆（FBTR）和中国实验快堆（CEFR）。

新的概念、技术和材料研究进



展，加上将核电纳入可持续能源的长期愿景，现在正在重振快堆方案。这些进步一般都以创新升级为特征，例如安全性能提高、设计改进和更紧凑提高了经济性。新的设计还包括采用可替代冷却剂，例如熔盐、铅、铅铋和气体。

“快堆已经发展了几十年，主要作为燃料增殖反应系统，近年来，还作为长寿命电池型小型模块堆甚至微堆。”原子能机构快堆技术发展工作组组长Vladimir Kriventsev说，“快堆可以使核电成为可持续数千年的能源，并能显著改善核废物管理。”

发展中的快堆

世界各地都在发展快堆。原子能机构通过协调研究项目、技术出版物、技术工作组和国际会议等方式在支持快堆发展和部署以及共享信息和经验方面发挥着核心作用。

俄罗斯已经运行着两座钠冷快堆，计划在2035年后部署一座下一代1200兆瓦（电）商用快堆，作为与轻水堆配合使用的自持系统的一部分。在快堆的协助下，热堆的乏燃料将经过后处理再利用，最终的废物足迹将比普通核燃料小10倍。

印度正在进行500兆瓦（电）钠

冷原型快中子增殖反应堆调试，这是印度正在规划的几座工业快堆中的第一座。中国运行着一座20兆瓦（电）实验快堆，正在建造一座大型示范快堆，并计划最终部署商用快堆。

在北美，正在开发使用不同冷却剂（包括熔盐）的若干快堆设计。美国计划建造一座试验快堆，以促进该技术的进一步发展，并计划建造一座1.5兆瓦（电）示范微型快堆，同时用于论证一种适合用于未来创新型反应堆的新型后处理燃料。

自20世纪50年代以来，快堆的技术可行性已得到充分证明。法国的1200兆瓦（电）“超凤凰”快堆于1998年关闭之前商业运行了12年，并继续对该技术进行研究和开发。韩国和日本也是如此。日本计划重新启动一座实验性快堆。

不过，快堆更广泛的工业部署在很大程度上仍将取决于经济性的改善。

“在预计铀价比现在高得多、更加重视废物最小化的资源受限的世界里，与传统的热堆相比，创新的紧凑型快堆可能会更具经济竞争力。”原子能机构核电技术发展科科长Stefano Monti说，“随着一些国家积极发展快堆，我们预计快堆在未来几十年为清洁能源系统作出重要贡献。”

俄罗斯别洛亚尔斯克电站的BN-800反应堆。

（图/俄罗斯国家核电厂电力和热力生产联合企业）

小型堆，潜力大

文/Irena Chatzis



奥罗拉发电厂是一种先进裂变电厂设计。

(图/Oklo公司)

听到“核电”一词，通常会让人联想到巨大的发电厂和冷却塔，但随着小型模块堆和微堆开始成为现实，核电的面貌和影响范围正在发生变化。

“小型模块堆和微堆与大型核反应堆一样提供低碳能源，但它们更小、更灵活、更经济适用，因此它们可以用在较小的电网中，建在大型反应堆不适用的难以到达的地方。”原子能机构小型模块堆技术工作组组长Frederik Reitsma说，“许多小型模块堆设计成不仅提供电力，而且提供非电力服务，增加了其清洁能源的好处和成本效益。”

小型模块堆功率预计不超过300兆瓦（电），微堆依据设计不同，功率不超过10兆瓦（电）。除了模块化之外，其他一些共同特点是采用可提高安全性的非能动内置系统，能够有效和灵活地生产能源以满足波动需求，以及设计更简单，比当前反应堆建造速度更快、复杂程度更低。它们还具有工厂化制造的更多可能性，从而能够减少现场施工时间，使它们更容易和更经济高效地复制以进行更多部署。

“大型核反应堆是一项重大工程，需要大量的长期投资，这对某

些情况是可行的，也是合适的。然而，对于其他情况，小型模块堆和微堆可以是一种更现实和更快的方法，有时也是经济地获得核电的唯一途径。”Reitsma说，“如果把这一点与有效的融资和市场政策结合起来，核电的用户范围会更加广泛，使其成为能源市场上更具竞争力和吸引力的方案。”了解更多核电融资和市场政策信息，请参见第24页内容。

首座小型模块堆

世界上第一台先进小型模块堆于2019年并网发电，并于2020年5月开始商业运行。

位于俄罗斯北极海岸的“罗曼索诺夫院士号”浮动核电厂配备两台35兆瓦（电）KLT40S小型模块堆机组，现在产生的能源足以为一个约10万人口的城市供电。该电厂还拥有每小时50千兆卡的供热能力，并且用于海水淡化，每天可生产多达24万立方米的淡水饮用水。

“借助小型核反应堆，北极地区最早可在2040年实现净零排放。”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 Moskvina说，“‘罗曼索诺夫院士号’将取代一座燃烧褐煤

的电厂。除了有助于消除北极生态系统中的有害气体排放外，它还将为该地区居民在寒冷的极北地区不至于无光无热提供保障。”

处于建造后期的其他小型模块堆包括阿根廷的30兆瓦（电）CAREM反应堆和中国的210兆瓦（电）HTR-PM反应堆。还有几个项目已进入监管审批后期，包括美国NuScale 电力公司的小型模块堆和加拿大的几个项目。全世界总共有70多个小型模块堆设计处于不同的发展阶段。

原子能机构开展了一些与小型模块堆有关的活动，以支持世界范围的研究和发展。原子能机构促进小型模块堆设计、开发和部署方面的合作，并作为共享小型模块堆监管知识和经验的中心。

微型动力源

虽然小型模块堆的设计一般都是基于众所周知的反应堆系统，但微堆是你期望在科幻电影中看到的那种东西。它们足够小，整个电厂可以在工厂里建造，然后用卡车运输。通过非能动性自调节安全系统，它们只需要少量的劳动人员就可以运行。由于独立于电网运行，它们可以在不同的地点移动和使用。它们的功率可达10兆瓦（电），每周运行7天，每天24小时，可为大约5000多个家庭提供10年或更长时间的电力。

这些结构紧凑、可移动的反应堆可作为医院等地的备用电源，或取代通常以柴油为燃料的发电机，成为偏远社区以及工业区和矿区的唯一电力来源。

目前在世界各地由私营公司和研究团体正在开发的微堆有十多座。

其中一座接近部署的微堆是由美国新成立的Oklo公司正在开发的1.5兆瓦（电）奥罗拉快中子堆。奥罗拉微堆目前正在走监管程序，其设计主要利用自然物理现象进行运行和自调节，这意味着它的活动部件非常少，

从而提高了安全性。预计它还可以使用高丰度低浓铀燃料，在不换料的情况下运行数十年。

“裂变反应可以有多种利用形式：

小型堆和大型堆，不同的燃料，不同的冷却方式，以及为商业模式、社区互动和所有权提供多种不同的方式。” Oklo公司首席运行官Caroline Cochran说，“裂变的新颖使用和分布式小型装置的建造，可以在最大限度地减少资源使用的同时，实现人类发展。”

其他处于后期阶段的微堆包括由总部位于英国的欧洲铀浓缩公司主导的U-Battery公司开发的4兆瓦（电）反应堆，预计将于2028年开始运行。

大规模部署

小型模块堆和微堆尽管取得了进展，但还远未大规模部署。

“这是‘鸡和蛋’的问题，” Reitsma说，“一方面，投资开发和部署小型模块堆需要有保障的市场和产品需求，但另一方面，如果没有开发和论证的资金，甚至没有做必要的研究或建立可能需要许可证审批的试验设施，就无法确保市场。潜在的投资者如果对市场风险不确定，就会对新技术投资犹豫不决。”

部署的另一个主要障碍是对广泛的小型模块堆和微堆设计的法规适用。系统、结构和部件的多样化组合，意味着针对常规核电厂制定的标准监管方案必须重新加以评价和最终调整，以确保足够的安全水平。了解更多小型模块堆监管过程信息，请参见第26页内容。

“目前，许多首创先进小型模块堆一直走监管程序，一旦完成，我们预计一般至少还需要四到五年的时间才能建成并运行。” Reitsma说，“但随着小型模块堆和微堆成为主流，我们可以预期看到这个期限会缩短，因为部署过程应该会变得更快、更具成本效益和更容易。”

“裂变的新颖使用和分布式小型电厂建造，可以在最大限度地减少资源使用的同时，实现人类发展。”

—美国Oklo公司首席运行官
Caroline Cochran

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。

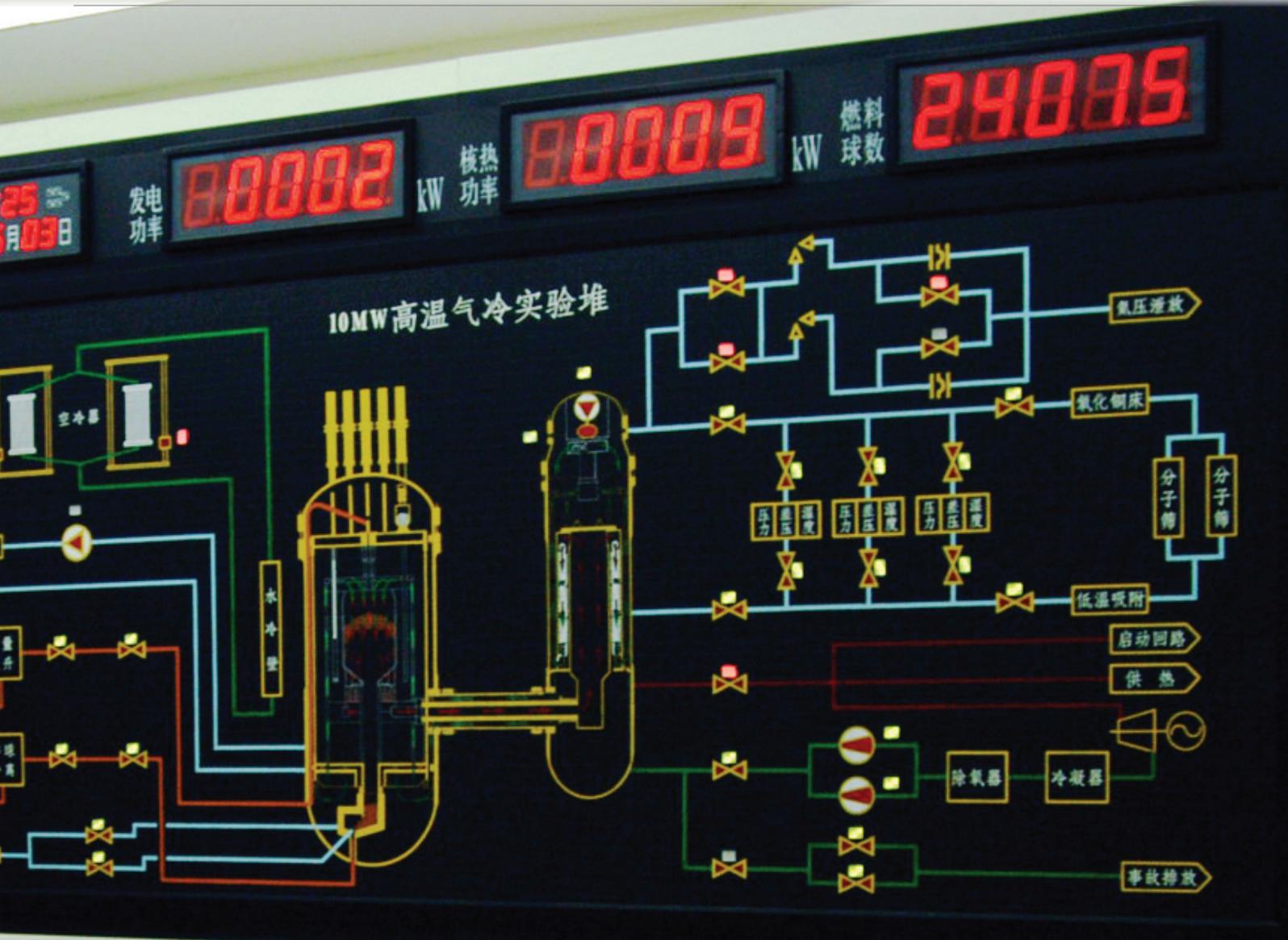
氢被用于各种工业过程，从生产合成燃料和石化产品到制造半导体和为燃料电池电动车提供动力。为了减少每年生产7000多万吨氢的环境影响，一些国家将目光投向了核电。

“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)





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。

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。”

“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

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 Moskvina说。

智能、稳定、可靠

低碳能源系统中的智能电网与核电

文/Sinead Harvey

核电与智能电网——连接生产者和消费者并使用新技术的双向网络——相结合，可以帮助各国向低碳电力资源过渡，确保可靠、稳定和可持续的能源供应。

许多国家正在使低碳能源结构多样化，以帮助他们经济去碳化和实现气候目标。这使得全球向可再生能源转变；然而，仅靠这些能源还不能完全可靠地满足需求。

“低碳可再生能源对气候友好，但由于太阳能和风能的间歇性，以及缺乏大规模的储能能力，它们并不总是容易控制或能够满足能源需求。这意味着电网往往需要补充能源。”原子能机构规划与经济研究科科长Henri Paillere说，“随着更多样化的能源输入网络，电网不得不变得更加灵活、更具有适应性，以确保可靠和有适应能力的能源供应。”

核电可以每周7天、每天24小时产生低碳能源。它为各国转向低碳能源系统提供了能源安全。核电厂通过灵活运行，可以补充可再生能源的可变发电量，凭借其大型蒸汽轮机的惯性，这些核电厂还可以帮助稳定电网，确保清洁可靠的电力供应。

传统上，电网依靠燃烧煤炭和天然气等化石燃料发电厂，通过开启和关闭满足能源需求。

而智能电网则可以接受多种不同

的能源，并且与不太灵活的传统电网不同，可以在不同能源之间动态切换。虽然智能电网早已存在，但技术进步使其更上一层楼。智能电网可以利用人工智能和物联网（一种通过互联网连接的计算机和设备系统，可以动态地分享和处理数据）等最新技术收集信息，提高运行效率和自动化流程。

例如，智能电网可以利用人工智能生成的预报来预测阴天和无风的日子，并动态地从太阳能和风能生产切换到核能等可替代能源，以实现不间断的供应。人工智能还可以预测风暴可能袭击的地点和可能持续的时间，在输电线路受损的情况下，向电网发出信号，以扩大生产规模，实现生产多样化。

如果输电线路出现断裂或停电，电网物联网系统的传感器和设备可以通知电网运营者需要进行维修工作，并改道供电或从其他来源取电。

在传统的电网中，风暴的影响只能在风暴过后才能评估。因此，生活在断电线路的下游，往往意味着在线路修复之前没有电。智能电网由于能够找到电力生产和输送的替代方案，因而适应能力更强，可以减少用户的停电时间。

以全球最大的电力生产商之一法国电力公司（EDF）为例，目前正在开发的一些创新型智能电网技术包括

使用5G（新一代移动互联网技术）来加强物联网，以及开发更高效的电流混合网络。区块链技术为跟踪和处理交易提供了一种高度安全的方式，也正在被引入，以证明正在生产清洁能源的地点和数量。法国电力公司正在使用一种名为“数字孪生”的方法来构建虚拟环境，用于预测电网维护需求和减少维修费用。

“我们对智能电网的研发重点是应对一系列挑战。我们也在考虑社会对更绿色的电力基础结构的期望，并为风险做好准备，如气候变化的影响、网络风险以及确保网络对潜在危机的适应能力。”法国电力公司研发部门经理Bernard Salha说，“当然，计算能力的提高所带来的任何新方法都将经过在现有模型上的测试，以提高其准确性。”

原子能机构高级核安全官员Dian Zahradka说，评价这些技术进步的影响是这一过程的重要组成部分。“新技术只有在安全的情况下才是有益的。根据原子能机构的安全标准，任何设计修改，包括人工智能和物联网技术的使用，都要经过严格的安全评定，以评价这些变化和现代化可能对核电站产生的任何影响，以及它们如何与电网互动。原子能机构组织技术会议，以讨论潜在的影响并分享核电站使用这些技术的经验。”

电网惯性与核电

智能电网可以让更多的能源主动连接并动态使用。然而，这也为电频率的更大波动打开了大门，从而带来了更多的不稳定性。

电网以特定的频率运行，并被设计为保持在一定范围内，以确保能源的稳定供应。当人们打开和关闭电气设备时，频率的变化会不断发生。这些变化通常被能源的发电运动部件所吸收，如核电厂或化石燃料电厂的旋转涡轮。

这种沉重的旋转质量可以转动得稍快或稍慢，就像一个减震器，帮助平衡频率波动，缓冲快速变化。这些部件的运动方式及其对电网中能量的影响称为电网惯性。

然而，像太阳能这样的可再生能源没有这些运动部件。其他有这些运动部件（如风力涡轮机）的可再生能源，这些运动部件并不直接连接到电网，而是通过变频器运行，这意味着它们不具备必要的电网惯性。

“没有惯性，电网吸收波动的能力有限，会变得不稳定。”美国爱达荷国家实验室综合能源系统国家技术总监Shannon Bragg-Sitton说，“在大的变化面前，它也会变得特别脆弱，比如能源的突然中断、净负荷的大幅变化或严重的输电事件。这些变化可能会导致突然的电力过载或短缺，并可能最终停电。核电可以协助应对这一挑战，并为电网提供一些必要的稳定性。”

原子能机构通过出版物、讲习班和技术会议，支持各国评估电网的可靠性和适应力，包括使用核电。原子能机构还将核工业和电网系统的利益相关者联系起来，使他们能够交流信息，介绍良好实践，讨论共同的挑战和机遇。这些活动有助于各国制定实现能源安全和可持续性的能源战略。

投资清洁能源转型 对核电的融资和经济支持

文/Shant Krikorian



创新性的融资和市场政策是投资新建核电厂变得更具吸引力的方式之一，这可能有助于为清洁能源的未来铺平道路。

核电在运行过程中不产生温室气体排放，因其在减少温室气体排放和缓解气候变化方面的重要作用，已被许多国家广泛认可。其灵活而持续的能源流还可以在其他能源，如风能或太阳能等可变的可再生能源不可用时补充供应。

尽管有这些好处，但采用核电的最大挑战之一是经济性。虽然今天的核电的经济性在许多市场上仍然具有竞争力，但新建核电的融资会有很高的前期资本支出，并需要长期投资。

“能源市场正在发生变化，许多国家的能源市场变得更加不可预测，因为他们为了去碳化而使能源来源多样化，这导致能源价格和供应的波动更大。”原子能机构规划、信息和知识管理处处长黄玮说，“这种更加不稳定的市场，导致了致力于核电等寿期长、前期成本大的资本密集型技术的不确定性。”

核能研究所总经理兼首席执行官 Maria G. Korsnick表示，核工业融资和市场政策的创新方案有助于缓解不确定性，抵御市场波动。技术的进步也有助于使核电成为更具成本效益的选择（见第14页）。

“为了让核电在低碳能源的未来充分发挥其潜力，核电厂必须为清洁能源属性和其他利益获得适当的补偿，而这些属性和利益在电力市场上的估值并不一致，”Korsnick说，“政策制定者应该在日益形成的共识的基础上寻求方法，即包括核能是快速过渡到清洁电力系统的最具成本效益的方式。这意味着优先保护现有的核能资产，并为建设先进的核能设施创造一个途径。”

根据国际可再生能源机构的数据，据估计，2017年全球直接能源部门补贴总额至少为6340亿美元，其中主要以对化石燃料和可再生能源发电技术的补贴为主。

鼓励核电投资

几十年来，购电协议已被用于一系列技术，但现在在核电领域，购电

协议作为减少不确定性和确保新的核电厂项目长期收入的最广泛使用的方案，正得到越来越多的认可。这些协议是由项目实施方和核电购买方达成的，目的是在一个特定的，通常是很长的一段时间内，就特定数量的电力价格达成一致，该价格通常包括项目的全部成本加上利润。购电协议通常还通过政府和供应商提供的其他形式的支持以及诸如“差价合同”和“建设、拥有、运行”等创新核电融资计划加以补充，其目的是降低风险和吸引投资。

例如，土耳其的阿库尤核电厂项目就采用了购电协议以及政府和供应商融资和贷款担保的方式。

“阿库尤核电厂将涵盖项目成本的购电协议与俄罗斯国家原子能公司的供应商融资相结合，后者将建设、拥有和运行该核电厂。这给所有参与的实体提供了稳定和保证，使他们知道电价和各种投资是安全的，”阿库尤核电公司董事会副主席Anton Dedusenko说，“该购电协议提供的保障为与潜在投资者讨论持有该项目高达49%的股权开辟了道路。当电厂的未来收入有保证和确定性时，这样的大额投资通常是有吸引力的，而这正是购电协议所能提供的。”

碳定价

着眼于清洁能源的未来，政府对低碳发电的支持政策具体化为直接补贴、上网电价、配额义务和能源税减免。

正在广泛采用的办法之一是碳定价，其目的是减少排放和鼓励使用低碳能源。这也有助于使这些能源在化石燃料成本低的情况下成为更具竞争力和更稳定的选择。

最简单形式的碳定价是对发电站和工业锅炉等排放的二氧化碳按吨征税。在碳定价方案下，使用化石燃料、排放大量二氧化碳的工厂将比使用低碳能源、排放较少的工厂支付更多的费用。

“碳价格是根据温室气体排放的估计费用制定的，比如对人们健康和环境的损害费用。”国际原子能机构规划和经济研究科科长Henri Paillere说，“目的是将二氧化碳排放造成的损害负担转回给责任源，以此鼓励使用低碳能源，最终减少温室气体排放。”

就核电而言，因为可以减少排放，碳价还可以使其运行比化石燃料更有竞争力，特别是从长远来看。通过稳定价格，投资核电的一些不确定因素也会减少。

“低碳技术，如核电，也包括水电和可变可再生能源，需要这样的碳价，以保持与化石燃料相当的竞争力，特别是当化石燃料价格下跌时。”经济合作与发展组织核能机构高级经济顾问Jan Horst Keppler说，“但从长远来看，政府必须让项目开发商和投资者相信，他们对实施稳定或不断上升的碳价持认真态度。”

在各国探索融资和政策选择时，原子能机构在能源规划方面的活动有助于它们引导这一进程。原子能机构对现有融资模式进行调查，组织专家会议，并根据成功完成的项目发表关于核电成本和效益的综合报告。

“在急剧波动的能源市场中，确保现有核电厂的持续运行和加快新核电厂的部署可能具有挑战性，”Paillere说，“政府机构需要继续认识到核电作为可持续发展和清洁能源发电的关键作用。”



小型模块堆的安全和许可证审批技术中立方案

文/Miklos Gaspar



美国纽斯凯尔电力公司的小型模块堆模拟控制室。
(图/美国西北能源公司)

小型模块堆可能更小，并采用具有许多固有安全特性的创新技术，但在监管方面的最终目标仍然不变：确保对人和环境的保护，并将事故和放射性释放的风险降至最低。

小型模块堆设计和部署的新型方案可能对现有的监管框架构成挑战。与现有反应堆相比，小型模块堆的设计一般比较简单，小型模块堆的安全概念更多地依赖于反应堆的非能动系统和固有安全特性，如低功率和运行压力。这些特性都增加了安全裕度，并且在某些情况下，实际上消除了反应堆堆芯受到严重损害的风险，从而消除了发生事故时放射性大量释放的可能性。因此，减少了对坚固的安全壳和应急响应措施的依赖。

“与现有反应堆相比，小型模块堆对安全系统、运行措施和人为干预的依赖性一般较小。因此，通常的监

管方案，即基于冗余安全措施来弥补潜在的机械和人为故障，可能并不合适，应该考虑新的想法。”原子能机构核装置安全处处长Greg Rzentkowski说。然而，他补充说，当前安全方案所依据的主要概念，例如确保在若干工程和程序层面预防和减轻事故的纵深防御概念，如果利用风险和性能信息加以实施，则对于小型模块堆至关重要。

为了证明任何类型的核电厂设计的安全性，需要对核电厂所有状态——正常运行、预期运行事件和事故工况——进行全面安全评定。在此基础上，可以确定电厂设计抵御内部和外部事件的能力，并确定安全设施的性能标准，包括应急规划。

“小型模块堆的概念验证需要证明基本安全功能——反应堆控制、堆芯冷却和反应性密封——的有效性，在

优化纵深防御策略以最大限度地降低事故风险的基础上，一旦发生事故，切实消除事故后果。” Rzentkowski说。鉴于新的设计和安全理念，应具体考虑安全论证文件的验证、单元之间接口、材料特性和人为因素。此外，他补充说，无论事故风险有多低，可扩展的密封和应急响应安排对于应对意外情况是必不可少的。

技术中立的框架

由于包括小型模块堆在内的创新技术的概念和设计在技术上多种多样，原子能机构正在努力建立一个技术中立的安全框架，以帮助在原子能机构现有安全标准的基础上统一国际方案。

这种技术中立的框架包括一个总体部分——社会和健康目标、风险目标和高级安全原则和要求的层次结构，然后可在国家框架中加以阐述，以根据所使用的具体技术处理监管和技术要素。Rzentkowski补充说，这种方案可以灵活地实现创新和成熟技术的平衡结合，这对于按照一般安全目标和具体风险目标优化防护和缓解措施是必要的。

一些国家已经在这一领域积极开展工作。例如，加拿大以及阿根廷、中国、俄罗斯和美国等几个少数国家正在对小型模块堆进行监管审查。

“加拿大核安全委员会的技术中立监管框架主要基于原子能机构的安全标准，在不影响安全的前提下，能够在反应堆设计、建造、运行和退役方面实现新颖和创新。”加拿大核安全委员会主席Hugh Robertson说，“在设计安全裕度存在不确定性、运行经验有限的情况下，可能需要采取额外的运行控制措施。在这些情况下，保护措施将与风险相称。”

他补充说，核监管机构之间的协作和监管要求的统一可以使所有相关方受益。“这最终会使许可证审批程序更加高效和有效。事实上，让多双眼睛关注共同的安全问题，可以提高安全水平。随着我们不断探索进一步的统一机会，尊重监管主权的同样科学和监管信息也可以使用。”

论证安全的个案研究

虽然原子能机构的安全标准作为保护人和环境免受电离辐射有害影响的全球参考，一般来说是技术中立的，可以适用于小型模块堆，但原子能机构将通过为规定这些标准的实施制定具体导则，进一步支持国家监管机构。“旨在论证如何利用核电厂设计要求进行水冷堆和高温气冷堆两种最常见小型模块堆技术的许可证审批的个案研究已经完成。” Rzentkowski说。

与此同时，小型模块堆监管机构论坛正在开展共享监管知识和经验以及确定良好实践的工作。该论坛由原子能机构主办，由一个致力于应对监管小型模块堆新型设计挑战的国际小组组成，以确定小型模块堆的新安全建议。在举行了一次关于制定专门针对小型模块堆的国家标准的会议之后，这些建议现在可在原子能机构网站上查阅。论坛的工作集中于小型模块堆的多模块性质和模块之间相互依存的安全方面，以核实如果一个模块出现问题，对其他模块的影响将是最小的。

“认识到安全将始终是第一优先事项，小型模块堆的监管方案需要将重点从一个反应堆依次转移到对设计的稳健性、安全论证文件的完整性以及为确保反应堆整个寿期安全而采取的流程充分性进行全球安全评定，以避免先建后修的安全问题。” Rzentkowski说。

面向未来的发展 保障与核电

文/Adem Mutluer

随着核电技术的不断发展，世界各地的核设施和核材料数量不断增加，保障技术需要与时俱进，才能保持效力。保障是用于核实核材料和核技术只用于和平目的，而没有被转用于制造核弹的一套技术措施。

“人工智能、增材制造和分布式账本技术是眼前可能会影响国际保障执行的一些变化。”原子能机构保障外联协调官员Chad Haddal说，“随着先进的核电生产手段的发展，也要求保障继续调整，以确保持续有效的保障核查。”

技术的进步有助于使核电生产更具可持续性、成本效益、安全性和可靠性。在许多国家寻求能源生产去碳化和建设清洁能源未来的途径中，核电等可靠的低碳能源变得越来越重要。

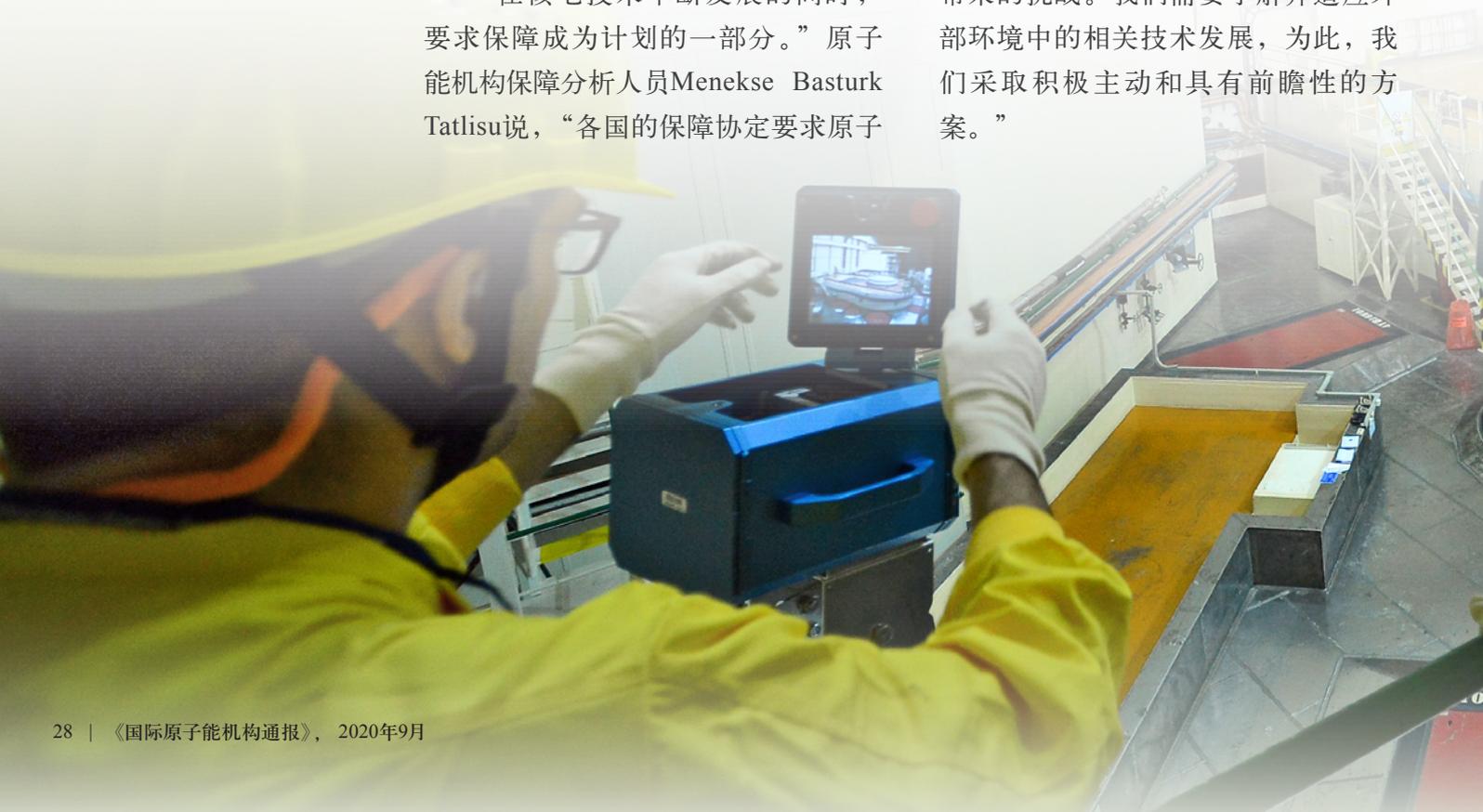
“在核电技术不断发展的同时，要求保障成为计划的一部分。”原子能机构保障分析人员Menekse Basturk Tatlisu说，“各国的保障协定要求原子

能机构能够核查各自国家的所有核材料。为了履行这一义务，要求各国提供原子能机构可进行核材料使用和数量核查的所有核设施的设计资料。”

新技术和新兴技术

原子能机构保障专家密切关注新技术和新兴技术，以紧跟发展情况及其对他们工作的影响。这项工作的一部分包括原子能机构保障组织的“新兴技术讲习班”，国际专家通过这些讲习班与原子能机构工作人员一起讨论和概述这些技术。

“让专家简要介绍对核能发电以及更广泛的核技术有潜在影响的新技术，有助于我们了解这会如何影响保障工作组访问和我们今后开展这些访问的环境，”Haddal说，“我们既关注新技术带来的优势，也关注新技术带来的挑战。我们需要了解并适应外部环境中的相关技术发展，为此，我们采取积极主动和具有前瞻性的方案。”



应用和完善技术

原子能机构正在开发的新技术中一个最新例子是称为神经网络的一套学习算法。这些计算机操作的网络大致以人脑的联想记忆为基础，设计成逐步掌握、分析和确定有助于理解数据的模式。

在保障中，分析人员审查通过视频监控收集的大量数据。2019年，原子能机构在世界各地的核设施中对1425台监视摄像机进行了维护。这些摄像机24小时不间断工作。它们提供了对核材料了解的连续性，并使保障视察员能够确保没有未被发现的材料接触和没有未申报的设施运行。由于一些设施使用多个监视摄像机，这可能产生大量数据。

使用可通过人工智能和机器学习开发的神经网络，可帮助保障视察员确定设施内的核材料移动和其他保障相关活动。这些技术还可以确定用于评价和跟踪目标并识别意外目标和行为的最相关指标。这将使分析人员在审查监视数据时能够更有效和更高效地利用时间。

内置保障

随着技术为有效利用核电打开了新的大门，经验表明，设计新设施时

最好从早期就考虑到保障。

“从一开始就纳入保障考虑对于国家、营运者和原子能机构保障都是双赢，” Basturk Tatlisu说，“通过在新的核电设施和工艺的设计中尽早纳入保障考虑，可以进一步简化营运者以及原子能机构保障视察员的保障核查过程。”

例如，通过在设计新核设施的新燃料贮存、反应堆堆芯和乏燃料贮存时考虑保障，可以使保障执行更具成本效益和效率，同时把对核设施运行的影响降到最低。

各国可以查阅原子能机构“在设计中纳入保障”丛书文件，以找到关于在设计新的核反应堆、改造或建造核设施以及建立长期乏燃料管理设施等设施时应考虑哪些保障因素的导则和建议。这套丛书为主管部门、设计者、设备供应商和潜在采购商在考虑与设计核设施有关的经济、运行、安全和安保因素的同时作出明智选择提供了建议。

“‘在设计中纳入保障’丛书旨在帮助各国在成本、法律要求和运行效率之间取得最佳平衡。” Basturk Tatlisu说，“在发展核燃料循环的所有方面时，从最初的规划到退役，都应考虑到‘在设计中纳入保障’。”

保障视察员在安装监视摄像机。

(图/原子能机构 D. Calma)



以核能推动更加深入的去碳化

文/Kirsty Gogan 和 Eric Ingersoll



Kirsty Gogan是人类能源组织的共同创始人和常务理事，人类能源组织是专注于大规模深度去碳化和能源获取的环保非政府组织。



Eric Ingersoll是人类能源组织的首席技术官，也是一位战略顾问和企业家，在新能源技术的商业化方面有着丰富的经验。

在实现《巴黎协定》关于到2050年将全球气温增幅限制在1.5℃至2℃的气候目标方面，世界远远没有走上正轨。目前的预测显示，到2050年，化石燃料仍将占世界能源使用的大部分。

如果我们未能实现1.5℃的目标，则可能意味着接受气候影响，例如数百万人因海平面上升而流离失所，还有数百万人面临极端热浪，以及与生物多样性有关的重大影响，包括物种丧失、北冰洋海冰消失以及几乎所有珊瑚礁的丧失。

如果我们未能达到2℃的目标，则世界上半的人口可能会暴露在夏季的“酷热”中，南极冰层可能会崩塌，干旱可能会大规模增加，撒哈拉沙漠可能会开始向欧洲南部扩展。世界粮食供应可能会受到威胁，推动大规模的人口迁移，导致文明崩溃的风险不断增加。

目前的能源途径，甚至包括大规模扩大可再生能源发电的能源途径，正在将世界推向灾难性的气候结果，很有可能出现4℃的结果。这可能意味着地球上相当一部分地区将变得不适合居住。

我们共同发起的“清洁能源部长级灵活核电运动”探讨了核能在消除能源转型风险方面可以发挥的更大作用。在此，我们介绍了利用核能推动更深入去碳化的两个机会。

首先是通过先进反应堆和热能储

存的结合，扩大核能在电力生产中的作用。这样做的目的是为了补充未来能源电网中的可再生能源。

二是通过利用核能大规模、低成本制氢，解决目前占能源消费四分之三的石油和天然气的使用问题。

为了实现核能部署所需的费用、规模和速度，需要一种新的模式。核工业必须结合技术和业务创新运用承诺和创造力，就像可再生能源行业学会的那样。

如何通过大批量、低成本、可快速部署和具有商业吸引力的制造模式使核技术能够在2050年之前为所有人提供零排放和可持续能源？

未来电网中的灵活核电

作为美国能源部高级能源研究计划署MEITNER计划的一部分，我们最近对先进核电站的成本和性能要求进行了研究，为寻求设计具有成本竞争力的有用产品供21世纪30年代早期商业化的先进反应堆开发商确定了市场要求。

我们的研究确定了核电厂业主和投资者以及整个社会所需要的价格和性能特征，以实现可负担的、可靠的、有适应力的、灵活的，尤其是清洁的未来电力系统。我们的研究表明，成本低于3000美元/千瓦的先进反应堆将有很大的市场。将核电厂与热能储存结合起来，能够使核电成为一种调峰资源——创造额外的宝贵储

能，并为能源系统带来附加值。对于电网运营者、能源系统建模者和政策制定者来说，这显示了灵活的核技术不仅在降低排放而且在降低整个能源系统的总成本方面的价值。

氢能合成燃料

为了达到所需的减排规模和速度，同时增加全球能源供应和经济增长，零碳及碳中和燃料替代品需要实现与化石燃料的价格和性能平等。

无排放的核能制氢可以与其他零二氧化碳排放的生产方法具有成本竞争力，并有可能与低成本天然气的蒸汽甲烷重整具有成本竞争力（Allen等，1986；彭博新能源财经，2020；Boardman等，2019；Gogan和Ingersoll，2018；氢能委员会，2020；国际能源机构，2019b；美国国家可再生能源实验室，2019b；M.Ruth等，2017；Yan，2017）。即使是欧盟和美国昂贵的首创常规核电站，也能以与当今风能和太阳能资源相当的成本生产清洁氢，且容量因子良好。

大规模、低成本的清洁氢如果能与廉价石油竞争，则可以实现航空、航运、水泥生产和工业的去碳化。我们估计这一目标价格为0.9美元/千克。

目前对可再生能源产氢的预测估计到2030年将低至2美元，到2050年则更低。尽管我们预计可再生能源的资本成本将继续下降，但价格下降受到容量因子低的限制。

目前的核电站能够以低于2美元/千克的价格提供清洁氢，新一代先进模块堆可能在2030年达到0.9美元/千克的产氢价格。

为了推动清洁产氢的大幅增长，

核工业将需要改变项目实施和部署模式，以扩大规模并提供清洁热能、燃料和电力。这将需要同样集中精力于降低成本、提高性能和部署率，从而使可再生能源开始改变全球能源系统。

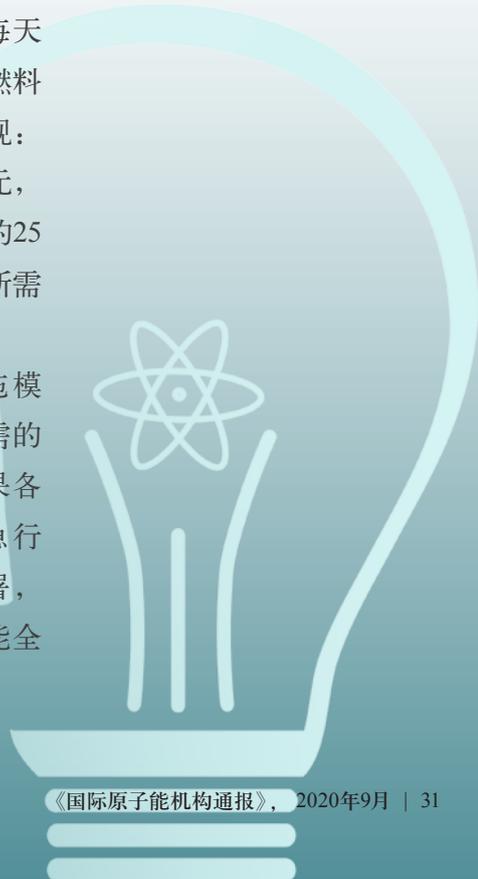
通过从传统建设项目转向高生产率的制造环境，如造船厂，或‘氢巨型工厂’，即位于棕色地带的炼油厂（如大型沿海石油和天然气炼油厂），可以实现近期成本的大幅降低。

从传统建设转向先进反应堆的高生产率制造，将大幅降低清洁氢和合成燃料生产的成本。领先的船厂已拥有广泛的制造能力，可以生产设计用途的制氢设施。

巨型工厂和船厂制造的海上核电站可以使世界重新走上实现《巴黎协定》1.5/2℃目标的轨道。这种大规模的去碳化努力可以在占用土地极少的情况下实现，使得大面积的土地可以用于自然生态系统的重新植树造林和再生，这与国家规模的可再生能源工业发展所带来的“能源扩张”不同。

利用这些实施模式，从当今每天消耗1亿桶石油到等量的清洁替代燃料的三十年过渡能够以更低的成本实现：清洁能源替代燃料将花费17万亿美元，而不是维持到2050年石油流量所需的25万亿美元。这与纯可再生能源战略所需的70万亿美元形成鲜明对比。

核能，通过这些转变的实施模式，能够以低于维持化石燃料所需的成本实现经济去碳化。然而，如果各国政府和其他行为者不采取紧急行动，以降低成本及加快创新和部署，这一转变将无法开始。需要将核能全面纳入世界的去碳化努力中。



简化贮存

国际原子能机构在非洲开展放射性废物管理培训



在实际操作活动中，参加培训人员在观看原子能机构专家拆除以前用在工业环境中的弃用放射源。（图/原子能机构O. Yusuf）

弃用密封放射源的适当处理、整备和贮存对于确保人和环境的安全和安保至关重要。然而，这些活动可能具有挑战性，特别是对那些在这一领域尚不具备国内专门知识的国家而言。因此，原子能机构支持制定一种对于弃用密封放射源相对较少的国家来说更简单、更具成本效益的弃用密封放射源管理方案。2020年在乌干达坎帕拉举办的原子能机构培训班首次采用了这一新方案。

该方案需要一种能为通常用于工业和医药领域的低活度、中子和伽马放射源的处理、整备和贮存提供所有必要环节的设施。被称为“双重ISO型容器”概念的这种设施由两个相互靠近放置的标准运输容器组成，配有适当的通风、污染控制、安全和安保

基础设施。其中一个容器用作处理和整备设施，而另一个容器则用于接收和临时贮存低活度弃用密封放射源，以及随后贮存经整备的源。

这种设施及其程序得益于国际同行评审。曾召集一个由来自德国、加纳、摩洛哥和美国专家组成的国际放射性废物管理小组，对“双重ISO型容器”设施的运作情况以及原子能机构培训班本身进行考察。专家们还审查了该设施和废物管理的技术程序（从最初接收到最终贮存），以便对照所有相关的国际标准和最佳实践评价这一方案。这些努力得到了欧洲联盟的财政支持，是原子能机构根据《非洲核科学技术研究、发展和培训地区合作协定》（非洲地区核合作协定）采

取的更广泛举措的一部分。“非洲地区核合作协定”的重点是支持非洲国家加强核安全和核安保的法律和监管基础结构。使用带有活性放射源的设施需要得到每个国家的国家监管机构的许可。在乌干达，这项工作是在培训班之前已经完成。“这种方案是按照原子能机构安全标准实施的，”乌干达监管机构原子能委员会首席执行官Deogratias Sekyanzi说。

一些国家，例如喀麦隆，已经制定了使用运输容器贮存弃用密封放射源的先进计划，而在其他国家，这种方法的安全性还有待论证。原子能机构废物安全专家David Bennett解释说，通过2020年启动的一个新的技术合作项目，原子能机构正在努力提高国家组织论证贮存安全的能力。

双重容器方案

设施建成后，下一步是根据《放射源安全和安保行为准则》和原子能机构安全标准中概述的要求和导则，从其装置中取回放射源。拟议方案的核心是当地人员必须遵循的技术程序，以回收弃用放射源，并将其整备成适合贮存的形式。程序包括使用由不锈钢制成的特殊密封小容器，将弃用放射源密封在里面。这种密封小容器的设计使得无需使用专门设备就能进行适当密封，使其在任何国家都易于操作。密封后，装有放射源的密封小容器被放置在铅屏蔽内，然后再放入有混凝土衬里的桶内，作为弃用密

封放射源贮存和运输的货包。

原子能机构高级专家 Mohamed Al-Mughrabi说：“在乌干达展示的那种新设施可以在不到1000平方米的面积上建造，而且成本低廉。”

培训非洲放射性废物管理 人员

作为支持世界各地管理弃

用密封放射源的持续努力的一部分，原子能机构正在通过其技术合作计划组织一系列实践培训班，涵盖“双重ISO型容器”设施的建造、许可证审批和使用。这些培训班预计在整个非洲举办，特别是在尚无废物处理、整备和贮存设施的国家举办。

在乌干达以及喀麦隆、塞内加尔和津巴布韦示范了“双重

ISO型容器”方案后，同时受益于国际技术同行评审的结论，计划将这一概念引入更多国家，包括喀麦隆、埃塞俄比亚、马达加斯加和尼日利亚。

在欧盟委员会、西班牙和美国的共同资助下，原子能机构开展了题为“加强放射性废物管理”的RAF9062号项目。

文/Omar Yusuf

更美味、更有营养的蔬菜 保加利亚在原子能机构的支持下提高食品质量



马里察蔬菜作物研究所教授Nasya Tomlekova和新开发品种种植者Iliya Valchanov。

(图/马里察蔬菜作物研究所)

保加利亚是欧洲生物多样性最丰富的国家之一，长期以来一直是各种食品的主要出口国。过去几十年来，随着气温逐渐升高，农民的主要作物产量和质量都有所下降。为了适应不断变化的环境，并继续提供健康、可持续的蔬菜，现正在使用核技术。

“基于全国蔬菜生产的悠久传统，我们在保加利亚以优质

作物闻名。”位于保加利亚第二大城市普罗夫迪夫的马里察蔬菜作物研究所分子生物学实验室负责人Nasya Tomlekova说，“我们现在遇到了与当地品种低产和质量有关的更复杂问题。我们需要在这一领域内发展和推广这些产品——利用核技术，可以实现这一目标。”

目前的植物育种计划由原子能机构与联合国粮食及农业组织

(粮农组织)合作支持，重点是开发新的辣椒、番茄和马铃薯品种。

从2020年起，未来三年将向农民提供三个辣椒品种。其中，2020年推出的“Zlatna shipka”品种，其产量比传统品种高7%。2021年，将推出产量更高、β-胡萝卜素含量增加（与胡萝卜中的含量相同）的“Desislava”辣椒品种。β-胡萝卜素含量增加很重要，因为我

们的身体会将β-胡萝卜素转化为维生素A，β-胡萝卜素摄入量高，对皮肤和眼睛健康以及增强免疫系统至关重要。将于2022年推出的“Toniko”辣椒品种也将提高β-胡萝卜素含量。

“像每位农民一样，我投入了大量的心血和工作，以提供健康优质的收成，”参与植物育种计划试点试验的农民Yancho Valchev说，“我们面临着气候变化、蔬菜病害、病虫害等许多困难，但通过这些计划，我们的作物能够创下更高的产量和更好的质量。”

“作为一个快三十岁的年轻人，我对健康的食品和健康的生活很感兴趣，而作为一个农民，我能够通过新品种提供这些，”参与该计划的另一位农民Iliya Valchanov说，“现在，这样的产品在当地市场上很受欢迎，尤其受年轻人欢迎，他们对健康饮食有着共同的兴趣。”

这只是原子能机构和粮农

组织支持保加利亚农业的最新努力。在过去的50年里，保加利亚专家在参加原子能机构关于利用核技术促进可持续粮食生产和食品安全的培训班和研究后，已经开发了76个作物品种（见本页“科学”栏）。

粮农组织/原子能机构粮农核技术联合处植物育种家和遗传学家Fatma Sarsu说：“原子能机构、粮农组织和马里察蔬菜作物研究所之间卓有成效的协作将继续促进开发出产量高、营养质量更好、能够适应气候变化的辣椒、番茄和马铃薯改良品种，从而加强该国的粮食安全。”

科学 什么是突变育种？

突变育种的基本原理是利用X射线或伽马射线等核技术诱导植物发生变化，以达到改良作物的目的。在对植物的种子或细胞进行辐射照射后，科学家将这些新变异植株或种子取回，放在无

菌培养基中生长。随着植物的生长，他们会根据生长、颜色、营养价值 and 耐热性等特性对植物进行监测和选择。而对这些选择会连续进行几代监测，之后开发出新的植物系和新品种。

利用核技术可加速自然进化过程，产生具有改良特性的作物品种。

保加利亚目前有18个伽马辐照设施，使该国能够继续努力为国内消费提供可持续的食品，并保持强劲的出口。在国家辐照设施中，已经培育的并显示出所需特性的突变系和品种储存在已拥有6万份种子样本的国家基因库中或全国各地的研究机构中，以供将来使用。过去50年来，通过原子能机构技术合作计划和在保加利亚实施的协调研究项目，已经推出了76个作物品种。这些品种已记录在粮农组织/原子能机构突变品种数据库中。

文/Carley Willis

在国际原子能机构的支持下，中国电子束行业全球最大的废水处理厂正式投运

全球最大的电子束处理废水厂2020年6月在中国正式建成投运，日处理工业废水量达3万吨。该处理过程建立在原子能机构自2010年以来转让的技术基础上，每年将节省450万吨淡水——足够每年10万人饮水需求。

该厂位于中国南方的冠华针织厂——全球最大的精梳纱进口商，采用电子束技术处理被工业

染料残留污染的水，因为这些染料分子无法用细菌或化学物质分解。利用电子束技术，可以将废水中这些长而复杂的分子分解，而处理后的水可以回用。

中国作为全球最大的纺织生产国，其纺织业传统上一直使用化学物质处理废水。但随着环保政策的加强，该行业正在转向电子束技术——一种高效、环保的废水处理方法。

“正常情况下，这类废水会通过化学过程处理，而化学过程会产生二次废物。”原子能机构辐射化学家Bum Soo Han说，“电子束处理是一种生态友好且具有成本效益的废水处理方法，因为它可以节省化学物质的处理时间和成本，而且没有二次废物产生。”

这一切始于2012年原子能机构的一个技术合作项目，中国



冠华针织厂7台电子加速器处理印染废水。（图/清华大学核能与新能源技术研究院）

科学家通过这个项目制定了电子束处理废水计划。原子能机构的支持包括：提供在其他国家的现有设施进行进修、举办国家培训班，以及派专家访问提出建议和项目开发指导。

“2013年我通过原子能机构的资助参加了在匈牙利的一次进修，”清华大学核能与新能源技术研究院教授何仕均说，“在国际实验室工作和参加培训班直接影响了我们现在所做的工作。”

2017年，在上海西南300公里的金华市建成了一个试点设施，每天可处理来自附近一家纺织厂的1500吨废水。该示范项目启动两年后，冠华针织厂开始建设商业废水处理厂。这座新废水处理厂由中广核技术发展股份有限公司承建，实现了7台电子加速器联机运行，日处理废水量

达3万多吨。“通过这个流程产生的废水，70%以上可以在厂内回用，比以前50%的回用率有所提高。这意味着工厂运行所需的直接来自附近河流的水减少了，每年可节约用水450万吨。”中广核技总经理胡冬明说。

该项目的成功经验已被中国其他行业广泛分享，以期将该技术推广用于处理因人口增长和工农业发展而产生的越来越多的废水。何仕均说：“中国的废水排放量很大，用常规技术很难处理。但有了电子束技术，我们可以大大提高排放水的回收率。”其他示范项目正在新疆、湖北、广西等省展开。何仕均说：“我们正致力于在中国各种不同的行业应用电子束技术。”

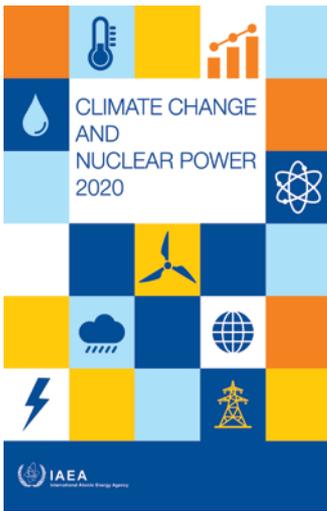
运作过程

纺织行业在生产过程中消

耗大量的水，并排放染料、淀粉、酸、盐和洗涤剂等化学物质。Han说：“利用电子束技术的辐射方法可以分解废水中的大量污染物，并去除这些复杂的污染物。”在这个过程中，电子加速器产生的电子束能够电离水分子，从而产生活性自由基，与废水中的有害有机污染物发生反应。这些污染物随后降解并变成更简单的化学形式，更容易利用常规方法处理。

“这个项目是原子能机构技术合作计划和协调研究项目提供的少量种子支持如何有助于刺激一个国家的一个可持续产业兴起的显著实例。”负责原子能机构与中国技术合作项目的Gashaw Wolde说，“其结果是显然在全国范围内产生社会经济影响的更清洁、更高效的工业流程。”

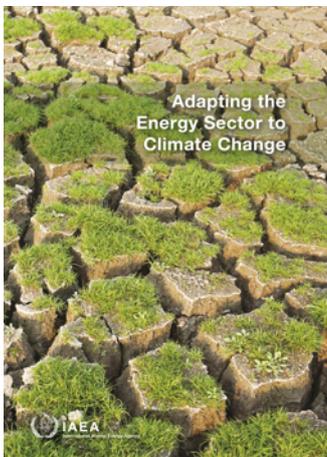
文/Carley Willis



《气候变化与核电（2020年版）》

本出版物提供了核电现状的最新情况，以及核电与其他低碳能源一起对旨在助力世界按照2016年《巴黎协定》限制全球升温在1.5℃以内的宏伟减缓战略作出贡献的前景。自2000年以来，原子能机构定期发布此类信息和分析，以支持那些选择将核电纳入能源系统的成员国以及那些考虑其他战略的成员国。2020年版侧重于已被纳入低碳能源系统的核能在促进实现1.5℃气候变化减缓目标方面的巨大潜力，以及实现这一潜力的挑战。审查了影响向低碳能源系统转型的能源系统和市场相关因素。2020年版还概述了实现大规模容量增长所需的发展，以按照限制全球升温在1.5℃的要求，迅速实现全球能源系统去碳化。

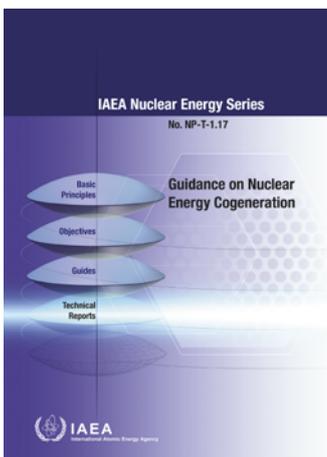
非丛书出版物；ISBN：978-92-0-115020-2；英文版；28欧元；2020年



《使能源部门适应气候变化》

本出版物探讨逐渐的气候变化和极端的天气事件对能源部门造成的各种影响，以及应对这些影响的潜在方式。探讨了供应链的所有要素：资源基础、可消耗能源的开采和运输、发电、输配电。本出版物涵盖三个案例研究，其中评价了阿根廷、巴基斯坦和斯洛文尼亚能源部门的薄弱环节。

非丛书出版物；ISBN：978-92-0-100919-7；英文版；40欧元；2019年



《核能热电联产导则》

本出版物简要介绍实施核能热电联产的优势、经验和未来规划，并着重介绍了过去开发的一些与各种产业有关的示范项目，描述了核能-产业联合体的技术概念。本出版物旨在使学术界和工业界用户以及政府机构和公共科研机构关注核能热电联产各方面的基本情况。

国际原子能机构《核能丛书》第NP-T-1.17号；ISBN：978-92-0-104119-7；英文版；32欧元；2019年

**欲了解更多信息或订购图书，请联系：
国际原子能机构市场和销售股**

Marketing and Sales Unit
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria
电子信箱：sales.publications@iaea.org

科学论坛

核能应对气候变化



IAEA

国际原子能机构
原子用于和平与发展

2020

#Atoms4Climate

在线阅读本期和其他各期《国际原子能机构通报》：

www.iaea.org/bulletin

更多了解国际原子能机构及其工作，请访问网址：

www.iaea.org

或通过以下方式关注我们：

