



IAEA BULLETIN

国际原子能机构通报

国际原子能机构旗舰出版物 | 2023年9月 | www.iaea.org/bulletin



核能创新

促进净零排放

全天候低碳能源创新：混合能源系统的魅力，第6页

借助小型和微型核反应堆实现工业脱碳，第12页

当核废物成为资产而非负担时，第20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
帮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导则出版物《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确保核安全的基本安全原则、要
求和建议，并反映国际社会就构成保护人和环境免受电离辐射有
害影响所需的高度安全达成的协商一致。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。外地办事处和联络
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： Joanne Liou

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： 国际原子能机构

请关注我们



我们实现净零排放世界的创新之旅

文/国际原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西

面对气候变化日益严重的后果和可持续发展的迫切需要，人们越来越认识到，核能是支持我们实现净零排放世界转型的可靠解决方案。

若要实现全球气候目标，核能发电量必须在现有基础上增加一倍以上。然而，我们目前的能源技术不足以满足这一需求。要在 2050 年实现净零排放，所需二氧化碳减排量的一半必须靠开发新技术来实现。这就是技术创新如此重要的原因。核工业专家一致认为，提高制造和燃料生产能力以及协调监管办法，对于部署下一代核反应堆至关重要。

随着全球减排和提高能源安全的紧迫性，核能的重要性不容低估，而有助于我们充分发挥核能潜力的创新同样不容低估，包括开发超越基准效率的新型反应堆设计、将人工智能融入核电厂寿期解决方案。除发电外，核反应堆还用于海水淡化，并在更多非电力应用方面拥有巨大潜力。本期《通报》概述一些权威专家对这些创新发展的看法。

人们对小型模块堆的兴趣与日俱增，这种先进核反应堆的电功率通常不超过 300 兆瓦。由于小型模块堆更适合小型电网，也更容易与可再生能源耦合，因此有望扩大全球获取核能

的机会，从而成为发展中国家的潜在解决方案。许多发展中国家已表示愿意更多地了解这项技术。目前有 80 多种小型模块堆设计在 18 个国家处于不同发展阶段，中国和俄罗斯联邦已部署小型模块堆装置，阿根廷也在建设小型模块堆。原子能机构小型模块堆及其应用平台以及原子能机构“核协调和标准化倡议”（NHSI）在支持全球部署安全可靠的小型模块堆方面发挥着重要作用。

在去年联合国气候变化大会（COP27）上，我发起了“原子促进净零排放”（Atoms4NetZero）倡议，旨在为各国和利益相关方提供有关核能专业技术知识和科学证据，实现电力生产以及工业和运输等难以减排部门的去碳化。该倡议有助于树立样板说明核能如何促进实现 2050 年净零排放。

很显然：要实现全球减排目标，我们需要核能。成功与否将取决于许多现有核电厂的持续运行、更多大型传统核电厂的建设，以及包括小型模块堆在内的先进反应堆的部署。所有这一切都将需要在燃料循环的每个环节增强创新与协作。国际原子能机构将继续发挥独特的作用，促进这两方面的工作，使核能能够在创造繁荣昌盛的世界中发挥应有的作用。



“随着全球减排和提高能源安全的紧迫性，核能的重要性不容低估，而有助于我们充分发挥核能潜力的创新同样不容低估。”

—国际原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西



图/国际原子能机构





1 我们实现净零排放世界的创新之旅



**4 何谓净零排放？
核能和创新的作用是什么？**



**6 全天候低碳能源创新
混合能源系统的魅力**



8 利用核能制氢实现钢铁生产脱碳



10 利用核能淡化海水，确保淡水资源安全



12 借助小型和微型核反应堆实现工业脱碳



14 拥抱增材制造给先进核反应堆带来的前景



16 助力未来

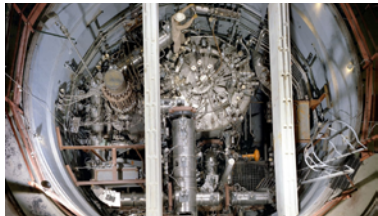
建立小型模块堆和先进反应堆的燃料供应链



18 利用人工智能提高核能生产



20 当核废物成为资产而非负担时



22 钚的长期核能应用潜力



24 创新型核反应堆设计监管



26 深层地质处置库中的乏核燃料核查

问答

28 塑造对核能的认识

国际原子能机构最新动态

30 新闻

32 出版物

何谓净零排放？ 核能和创新的作用是什么？

文/Joanne Liou

在追求可持续、气候适应性强的未来发展过程中，实现温室气体净零排放已成为全球目标。实现净零排放意味着，要么利用不排放任何温室气体的技术，如可再生能源、水电和核能；要么允许一定程度的排放，再通过碳捕集或其他技术从大气中清除这些排放的温室气体。

“气候界一致认为，为确保到本世纪末将全球升温控制在1.5摄氏度以内，作为温室气体主要排放源的能源系统必须实现碳中和。这意味着无排放或净零排放，”原子能机构规划和经济研究处处长Henri Paillere解释说。由196个国家通过的2015年《巴黎协定》旨在将全球升温幅度限制在低于2摄氏度，最好在1.5摄氏度以内。

科学界还一致认为，人类活动是驱动气候变化的主要因素。燃烧化石燃料、开垦土地和砍伐森林（包括红树林）产生二氧化碳和甲烷等温室气体，这些气体聚集热量，导致气温升高。极端天气事件日益频繁、海平面上升和全球气温变化，都凸显了实现碳中和和社会转型的紧迫性。

世界各国已承诺减少温室气体排放，以减轻其影响，应对气候危机。“实现净零排放需要多方面努力，包括减少使用化石燃料、更多依靠清洁能源，”Paillere说。根据国际能源机构发布的《2022年世界能源展望》，核能提供了全球总发电量的10%，占低碳电力供应的四分之一。



Paillere还表示，“核能以低碳足迹和可靠能源生产而闻名，成为清洁能源转型中的关键角色。”

未来创新之路

核工业创新对于充分利用核能潜力实现净零排放目标至关重要。新型反应堆设计以及新的模块化制造方法正在进入人们的视野，所有这些都为部署工作提供了机遇和挑战。原子能机构“核协调和标准化倡议”（NHSI）正在监管者、设计者、营运者和其他利益相关方之间寻找共同点，以支持安全可靠地部署这些先进反应堆，包括小型模块堆。



然而，核电的前景不仅取决于反应堆技术的创新，而且取决于制造工艺、燃料供应安全、乏燃料解决方案和其他因素。人工智能和增材制造等创新正在为安全和可持续的解决方案铺平道路，这些解决方案有助于核电厂节约成本，提高运行经济性。

风能和太阳能是可变能源，严重依赖于天气和一天中的时间，而核电厂是可调度能源，可以根据电力需求调整输出。核能与可再生能源相结合的混合能源系统潜力巨大，既能满足

电网灵活性和减排的需求，又能优化财政资源。此外，扩大核能用于非电力应用，包括区域供暖、制氢、海水淡化和工业流程供热，为减少排放提供了选择。

国际能源机构认为，在追求净零排放的过程中，核能完全有能力帮助电力供应脱碳，减少核能则会使实现净零排放目标代价更大、难以实现。为了利用核能实现净零排放转型，原子能机构发起了“原子促进净零排放”倡议，旨在让决策者了解核能作为清洁、负担得起、有韧性和更安全的能源转型可靠支柱的潜在前进方向。截至2023年8月，共有410座核反应堆在31个国家运行，总装机容量超过368 000兆瓦（电）。此外，还有57座反应堆在17个国家建设中，其中3个国家正在建设首座核反应堆。

在去年举行的2022年国际原子能机构大会上，全球转向核电发展趋势显而易见。多达51个国家宣传了核能在实现其气候变化减缓、能源安全和可持续发展目标方面的作用。

“气候危机和能源危机促使更多国家将核能作为解决方案的一部分，世界各地的民意调查显示，人们对核能的接受率越来越高。”原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西在大会发言中说，“核能作为一种安全可靠的能源，其独特特性对于全球绿色转型至关重要。”



“核能以低碳足迹和可靠能源生产而闻名，成为清洁能源转型中的关键角色。”

—国际原子能机构规划和经济研究处处长Henri Paillere

全天候低碳能源创新： 混合能源系统的魅力

文/Emma Midgley

部署所有低碳能源是减少能源部门排放的关键。为确保全天候低碳能源供应，间歇性可再生能源系统在电网中的份额不断增加，核电厂也被用于混合能源系统，以填补太阳能和风能发电的缺口。

核能是一种可调度的发电能源，能够适应不断变化的能源需求，全天候生产大量可靠的低碳电力。正是由于这种稳定性，核能通常被用作基荷发电——持续运行，输出几乎没有任何变化。核能与可再生能源结合，通过弥补可再生能源的间歇性输出变化，能够提高电网的稳定性。例如，美国的一些核电厂经常将发电量调整10%~15%，以适应电力需求的常见变化和可再生能源的间歇性特点。

“核能-可再生能源混合能源系统能够发挥有力协同作用，将核能的可靠性和基荷能力与间歇性可再生能源相结合。这种综合方案是实现弹性、低碳能源未来的关键，既能满足日益增长的需求，又能减缓气候变化。”

原子能机构水堆技术研发团队负责人Tatjana Jevremovic表示。

为使每小时的能源消耗脱碳，需要利用所有无碳技术。这些能源之间的协同增效潜力仍有待充分挖掘，专家们正在研究直接整合这些系统替代方案的战略优势。核能-可再生能源混合能源系统旨在利用这些能源的各自优势，将核能和可再生能源耦合。目标是为电网提供可靠和可持续的电力，同时为能源消费的各个部门提供低碳能源。

耦合系统

混合能源系统以两种不同的方式整合多种能源发电装置。第一种是通过松散耦合系统，将各种能源的输出结合起来，以提高整个系统的性能和可靠性。第二种是通过更集成、更紧密耦合的系统进行能源整合，但核能-可再生能源混合能源系统尚待实现。这种类型的系统利用每个组合能源系统的独特优势，实现优化能源生产和环境效益。

“核能-可再生能源混合能源系统能够发挥有力协同作用，将核能的可靠性和基荷能力与间歇性可再生能源相结合。”

—国际原子能机构水堆技术研发团队负责人Tatjana Jevremovic

“无论发电是来自核能、风能、水力、太阳能、生物质能还是地热能，向集成度更高的能源系统转型，都有可能确保持续满足电网需求。理想情况下，这类系统还将结合储能解决方案，以有效管理净电力需求的波动。” Jevremovic说，“此外，将碳税纳入采用核能-可再生能源混合系统的经济评价中，可能会使其运行成本甚至低于与传统化石燃料能源相关的成本。”

未来，将根据实时工况设计密切耦合的混合能源系统，以最大限度地发挥协同作用和优化发电。例如，可再生能源可与核电厂进行更大程度的整合，在高峰需求时提供补充电力，弥补核能不能灵活快速改变输出的缺陷。另一个例子是，如果核能与水电系统集成，那么在非高峰时段，核反应堆的多余能量可用来将水泵入高位水库，然后在高需求时段释放出来驱动水轮发电机发电。

核能-可再生能源混合系统还可用于管理和协调偏远或离网地区的发电，以确保医院或运输站等关键基础设施的电力供应。爱达荷国家实验室最近展示了一种称为“箱式微电网”的独立系统。在这种情况下，小型模块堆将与水力、太阳能或风能相结合，在发生停电或大范围电力中断时供电。

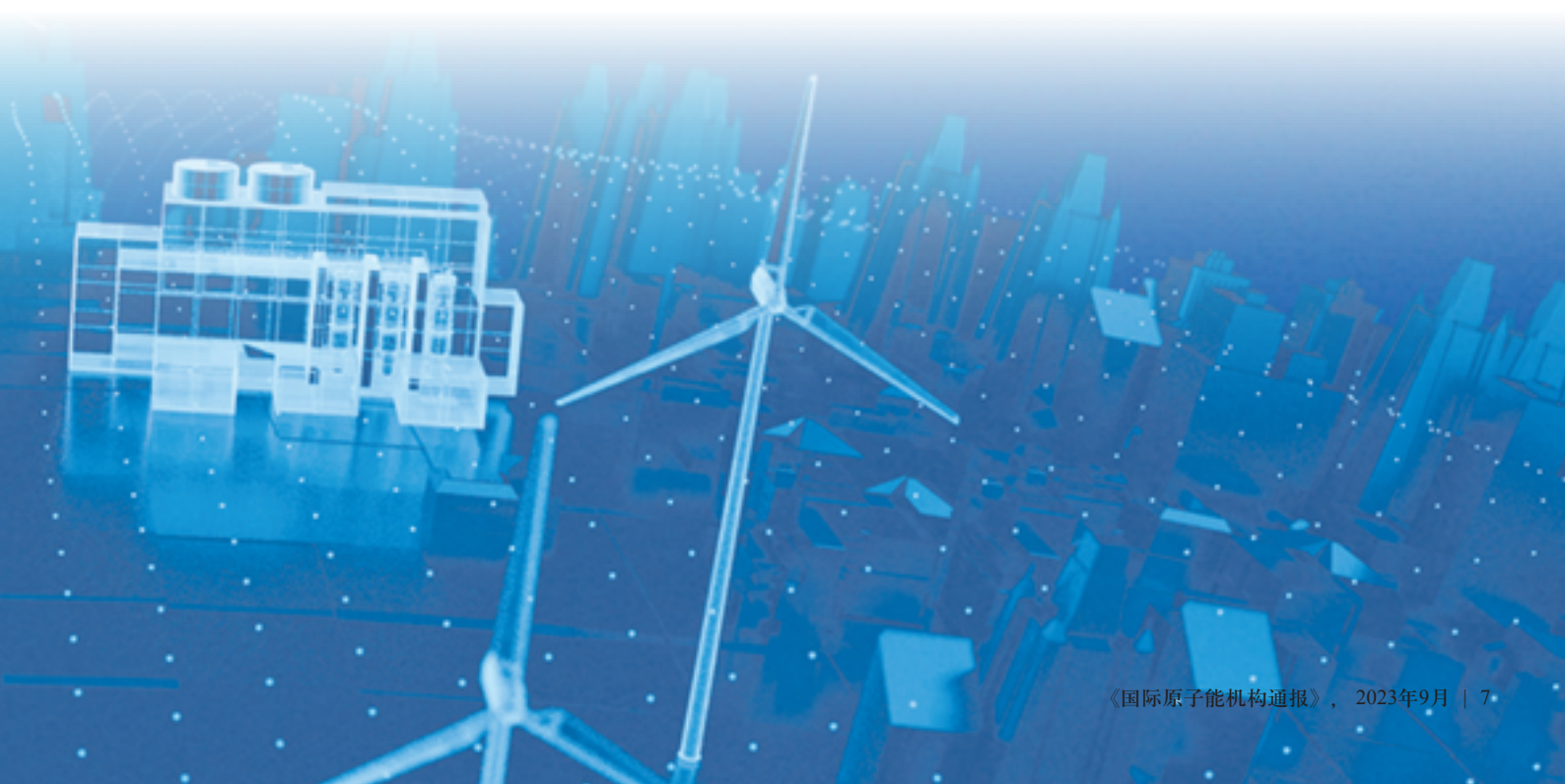
原子能机构的作用

原子能机构最近启动了一个关于核能-可再生能源混合能源系统技术评价和优化的协调研究项目。目标是改进评估核能-可再生能源混合能源系统在当前和未来能源系统中的潜在作用的方法，并确定机会，促进国际合作和知识共享，帮助各国实现净零排放目标。巴基斯坦是该项目参加国之一。“考虑到巴基斯坦能源需求和全球环境挑战，核能-可再生能源一体化战略大放异彩。”巴基斯坦工程应用科学研究所首席工程师、助理教授 Haseeb ur Rehman表示，“阳光和风充足，而核能增加了稳定的核心。这种组合既减少了排放，又提高了能源安全。”

原子能机构与设在巴基斯坦工程应用科学研究所的国际原子能机构协作中心合作开发了一个名为“在线核电厂部件任务模拟器中心”的平台。平台包括两个模拟器，分别基于核能-风能混合能源系统和核能-太阳能混合能源系统。这些在线模拟器使用户能够进行核电厂系统和子系统运行性能的培训。模拟器和相关文件可按要求免费分发给世界各地的核专业人员。

无论核能发电还是可再生能源发电，综合能源系统都有可能确保持续满足电网需求。

(图/国际原子能机构)



利用核能制氢实现钢铁生产脱碳

文/Mariia Platonova

钢铁生产排放的二氧化碳占全球总量的7%以上。未来几十年，随着从能源、交通到建筑和家电等各个领域对钢铁需求的不断增长，这一比例还将激增。然而，核能能够有助于钢铁生产走上净零排放的道路。

全球每年生产约20亿吨钢铁。根据国际能源机构的预测，到2050年，钢铁需求量预计将增长三分之一以上，主要集中在发展中国家。越来越多的全球公司正在寻找使该行业能源密集型工业流程脱碳的方法。

钢铁行业主要依靠焦煤为高炉提供动力，高炉将铁矿石转化为钢材，这一过程会排放大量二氧化碳。然而，使用一种称为直接还原铁的方法可以炼钢，在这种方法中，氢与铁矿石发生反应而不熔化，并且排放水蒸气而不产生二氧化碳。

“生产绿色钢铁所需的氢数量惊人。传统上，几乎所有的氢都是用化石燃料生产的，因此寻找必要数量的脱碳氢将是最大的挑战之一。”原子能机构非电力应用技术负责人 Francesco Ganda说，“零排放的核能制氢能够真正改变这一行业的游戏规则，因为核能有可能全天候提供足够的热量和电力，生产出所需数量的氢。这可有助于在清洁能源转

型方面取得巨大进展。”

核反应堆与制氢装置耦合，可作为热电联产系统高效地生产能源和制氢，该系统配有电解或热化学工艺组件。电解是利用直流电诱导水分子分裂，同时产生氢和氧的过程。

水电解的工作温度相对较低，不到100摄氏度，而蒸汽电解的工作温度高得多，约为700摄氏度至800摄氏度，所需的电力也比水电解少。水电解是利用电力将水中的氢与氧分离的过程。这种技术已实现商业利用几十年。高温电解遵循相同的原理，但使用的是蒸汽形式的水，从而减少了所需的电量。

电解槽技术的进步使传统核反应堆的制氢效率更高、成本更低。美国至少有一座核电厂（位于明尼苏达州草原岛）正在安装高温电解槽，并利用反应堆的热量来降低用电量，从而降低核能制氢的成本。

“固体氧化物电解槽的高温工艺可以利用核电厂以蒸汽形式提供的热能，使电解槽具有令人难以置信的高效率，”生产发电用固体氧化物燃料电池的Bloom能源公司制氢业务开发经理Akhil Batheja说，“由于电力成本占电解制氢成本的大部分，这为核电厂和低碳制氢提供了最佳经济价值基础。”

“世界上有几个国家正在探索和测试利用核能清洁制氢，包括用于钢铁生产。”

—国际原子能机构核能司司长Aline des Cloizeaux



原子能机构的作用

原子能机构通过支持对现有核能力用于制氢的研究，包括通过协调研究项目，帮助各国。为协助各国评价、规划核能制氢项目和制定发展战略，原子能机构还组织了技术会议，并开发了“氢经济评价程序”，作为评估利用核能大规模制氢的技术经济可行性的工具。此外，原子能机构在2022年还发起了一项倡议，为利用核能制氢的商业部署制定路线图，并发

布了关于通过核能热电联产制氢的电子学习课程。

“世界上有几个国家正在探索和测试利用核能清洁制氢，包括用于钢铁生产。”原子能机构核能司司长Aline des Cloizeaux说，“随着更高效的新型电解槽技术的出现，以及高温反应堆等先进反应堆技术的部署，核能完全有能力为清洁制氢以及钢铁生产和其他行业脱碳作出重要贡献。”

利用低碳核能制氢气可对钢铁行业脱碳产生影响。

(图/Adobe图库)

利用核能淡化海水， 确保淡水资源安全

文/Omar Yusuf

水是气候危机的核心问题。海平面上升、洪旱日益频繁、冰川积雪覆盖面积减少，所有这些预计都会阻碍人们获得饮用水源。如果没有缓解气候变化带来的这些影响和其他影响的解决方案，水资源短缺将日益威胁全球范围内的生活质量。对饮用和工业用淡水的需求不仅限于内陆国家，而且影响小岛屿发展中国家和拥有大片沿海地区的国家。

核电厂可提供一种解决方案，同时具有双重用途：生产低碳电力和将海水转化为淡水。原子能机构非电力应用技术负责人Francesco Ganda说：“以核能为动力的非电力应用，如海水淡化，为当前和子孙后代将面临的一系列水密集型工作——从数百万家庭的消费需求、淡水的工业应用到农业和畜牧业养殖——提供了可持续的解决方案。

近30年来，原子能机构一直支持

各国努力通过核能海水淡化改善清洁水的供应、质量和获取。核能海水淡化利用核电厂产生的热量和电力，通过蒸馏或膜分离（主要是反渗透）去除海水中的盐分和矿物质。利用核能进行海水淡化的碳密集度较低，与化石燃料型技术等替代方法相比，成本具有竞争力。印度、日本和哈萨克斯坦在核能海水淡化方面经验最为丰富，拥有数百堆年成功运行经验。这一解决方案为成千上万的社区提供了一条经济可行的饮用水之路。“核电厂能够帮助满足对饮用水日益增长的需求，并为许多干旱和半干旱地带严重缺水地区带来希望。”Ganda补充说。

1996年，原子能机构成立了第一个核海水淡化咨询组，帮助促进有关核海水淡化活动的讨论，并为各国交流核电厂海水淡化应用经验提供论坛。自那以来，全球对利用核能进行海水淡化的兴趣与日俱增。

核海水淡化厂，例如图中巴基斯坦卡拉奇核电厂的海水淡化厂，已证明是满足日益增长的饮用水需求的可行方案。

（图/巴基斯坦原子能委员会）



“越来越多的国家正在认真考虑利用核能进行海水淡化，以满足用水需求，同时避免碳排放。” Ganda表示，“由于海水淡化是一项非常耗能的技术，因此必须利用核能等大规模零碳能源提供动力，以便继续为世界各地越来越多的人提供必要的清洁用水，同时应对气候变化和实现净零排放的承诺。原子能机构站在支持各国实现这些目标的最前沿。”

为了促进和加快这一科学领域的行动，原子能机构开发并推出了两个软件程序：海水淡化经济评价程序和海水淡化热力学优化程序。两个软件的设计目的是让专家们能够对不同动力源与各种海水淡化程序耦合进行经济、热力学和优化分析。

实现海水淡化的潜力

2022年，原子能机构通过技术合作计划在约旦安曼主办了一次国家培训班，以建设利用小型模块堆淡化海水的能力。通过原子能机构的“小型模块堆及其应用”平台，约旦原子能委员会请求原子能机构核能专家对采用小型模块堆的核淡化研究进行审查。

约旦原子能委员会核动力堆专员Khalid Khasawneh说：“在约旦，海水

淡化被认为是满足预期需求和减少供需缺口的主要淡水来源。”研究发现，利用核能进行海水淡化在约旦是可行的。Khasawneh还表示，“与进口能源相比，核能够为最终消费者提供具有竞争力的淡水价格。”

原子能机构将于2023年10月在莫斯科主办一次跨地区培训班，旨在探讨使用小型模块堆和微型反应堆的热电联产项目的设计考虑因素，在这些项目中，电力或热能成为海水淡化过程的动力。

作为对“原子能机构核海水淡化工具包”分析软件和原子能机构培训的补充，原子能机构出版了一系列旨在向专家介绍利用核能进行海水淡化的设计、经济和安全的技术出版物。为了推动这一领域的创新，原子能机构还完成了许多与海水淡化有关的协调研究项目。

原子能机构正在继续组织力量，加强现有和未来核反应堆如何能够通过利用核能海水淡化技术，为增加获得清洁用水的机会作出贡献。去年，原子能机构启动了一个新的研究项目，以评估包括核海水淡化在内的各种核热电联产应用，并探讨各国为何以及在应对气候挑战的方案组合中考虑核热电联产。

“由于海水淡化是一项非常耗能的技术，因此必须利用核能等大规模零碳能源提供动力，以便继续为世界各地越来越多的人提供必要的清洁用水，同时应对气候变化和实现净零排放的承诺。”

—国际原子能机构非电力应用技术负责人Francesco Ganda

借助小型和微型核反应堆实现工业脱碳

文/Emma Midgley

从水泥和航运到石油、天然气和钢铁生产，各行各业都在研究和改变减少排放和实现作业净零排放转型的做法。新的核能解决方案正在成为一个关键选择。

上游作业，例如通过钻探、泵送和压裂开采天然气和石油，需要大量能源，这些能源目前主要来自化石燃料。下游作业，例如提炼和加工这些材料用作燃料，或用于药品或化肥等产品，也需要热能和电力，而这些热能和电力也主要来自化石燃料。

“大多数石油和天然气作业都燃烧化石燃料来生产上游和下游作业所需的能源。”原子能机构核能司司长Aline des Cloizeaux说，“为了减少这些过程的碳排放，理想情况下，钻井、天然气液化和精炼将采用低碳能源，如核能。”

许多石油和天然气、钻井和开采

作业都在偏远地区进行，在许多情况下，这些过程不可能由电网供电。在这种情况下，微型反应堆或小型模块堆可以提供低碳替代方案。

“从事炼油工艺和钻井作业的公司需要核能。这些都是碳密集型工艺，在30%的情况下，电网无法到达开采或炼油地区。”Terra Praxis公司首席技术官Chirayu Batra说。Terra Praxis是一家非营利组织，致力于为煤炭、工业用热和重型运输等难以减排部门提供脱碳解决方案。“燃烧柴油和天然气来生产这些作业所需的能源对该行业来说是一种商业损失，意味着更多的碳排放。有一种方法可以通过远程、可靠和无碳的能源实现这些过程的电气化。微型反应堆如果放置在船舶或浮动平台上，可以在大多数地方使用，甚至可以在海上使用。”Chirayu Batra说。

“从事炼油工艺和钻井作业的公司需要核能。这些都是碳密集型工艺，在30%的情况下，电网无法到达开采或炼油地区。”

—Terra Praxis公司首席技术官Chirayu Batra



高效清洁运行

虽然小型模块堆和微型反应堆有可能部署在偏远地区，但小型模块堆在塑料制造或其他形式的工业用热加工等行业中也有重要用途。目前的核反应堆能够产生大量热量，但由于蒸汽转化为电力的效率问题，约有60%至70%的热量被释放到环境中。

在减少碳排放的同时，更有效地利用核能的一种方法是将核反应堆产生的热量用于工业或化学过程。美国能源部的“先进反应堆示范项目”正在支持开发一种高温气冷小型模块堆，用于消费品制造厂。

陶氏化学公司计划用小型模块堆取代燃气燃烧和蒸汽发动机，作为陶氏承诺到2030年将碳排放量减少30%的一部分。陶氏的目标是到2050年实现碳中和。

高温核反应堆能够产生750摄氏度的热量，特别适合作为生产烯烃的低碳方法，烯烃是一种可用作塑料、清洁剂和粘合剂起始材料的化合物。陶氏拟建的小型模块堆将位于得克萨斯州Seadrift的现有生产基地，预计每年

可减少约440 000吨二氧化碳的排放。

小型模块堆将用于提供工艺用热，以生产包装、油漆和泡沫中使用的聚乙烯等产品。

这个包括四座反应堆的项目预计将于2026年开始建设，并于本世纪末完工。陶氏董事长兼首席执行官Jim Fitterling表示，该项目“将使陶氏在减少碳排放方面迈出重要一步，同时为我们的客户和社会提供碳足迹更低的产品”。他还表示，该项目“将成为工业部门如何安全、有效、经济地实现脱碳的领先范例”。

原子能机构通过召集专家、政府和监管机构加强这一新技术的安全可靠部署，帮助协调世界各国开发小型模块堆和微型反应堆工作。原子能机构于2022年6月启动了“核协调和标准化”倡议，并于2021年启动了小型模块堆及其应用平台。“核协调和标准化倡议”旨在推进小型模块堆设计、建造、监管和工业方法的协调和标准化，而小型模块堆平台则支持小型模块堆开发、部署、许可和监督的各方面。



美国能源部正在支持开发一座小型模块堆，用于部署在得克萨斯州的一个消费品制造厂。

（图/美国陶氏公司和X能源公司）

拥抱增材制造给先进核反应堆带来的前景

文/Lucy Ashton

想象一下3D打印核反应堆堆芯或核燃料芯块的情景。3D打印技术能够制造出足以承受核反应堆极端环境的坚固材料，这听起来似乎有些牵强，但许多专家认为，为了加快先进反应堆的部署和最大限度地利用核能应对气候变化，3D打印是非常必要的。

3D打印已经在一些行业中使用，它是一种增材制造技术，涉及一个通过逐层构建材料来打印物体的过程。这与减材制造相反，后者是切掉或烧掉多余的材料。3D打印直接使用数字图纸工作，由计算机控制，可以生成以前难以生成或不可能生成的复杂形状。这种制造方法速度更快，产生的废物更少，减少了出错的可能性，并且通常还能让设计师减轻物体的重量——所有这些特性都能显著降低制造成本。

“未来，核工业可能会广泛使用3D打印和其他先进制造技术，就像航空业和汽车业已经在做的那样。”原子能机构从事先进制造工作的核工程师Aninda Dutta Ray说，“潜力是肯定存在的。现正在顺利推进起始步骤，对照现有的核设计规范和标准进行深入的研究和审查，而一些监管机构甚至已经开始为其许可证持有者起草导则。”

引入和测试3D打印

与大多数新的制造工艺一样，起始步骤微小、缓慢而谨慎。核工业

已经出现了一些首次使用的案例，例如，2017年在斯洛文尼亚的一座反应堆上安装了一个3D打印的泵叶轮。这个类似风扇或涡轮的部件驱动水通过水泵。由于没有该部件的原始图纸，因此采用了3D打印技术。

在美国，橡树岭国家实验室正在为核领域和其他行业开发3D打印技术。在一次史无前例的测试中，橡树岭国家实验室打印出了称为通道紧固件的支架。这些部件于2021年被安装在一座核动力堆中，将一直使用到2027年，之后将被取出和进行检查，以评价它们在反应堆条件下的性能。2022年，法国跨国公司法马通公司在瑞典福斯马克核电站安装了首个3D打印的不锈钢燃料部件。此外，俄罗斯联邦最近建造了一台能够打印直径达2.2米、高1米的物体的3D打印机，而在韩国，3D打印正在被用于制造控制阀部件等物项。

由于3D打印在发明之初并没有考虑到核工业，因此现正在根据核工业的需求调整制造技术。虽然工业标准组织正在创立其他行业的3D打印标准，但关于核工业的标准仍在开发之中。

Dutta Ray认为，找出最佳测试方法、在全球范围内将它们标准化并获得监管机构的批准，可以说比制造技术本身的实际创新和完善更具挑战性。在欧洲，汇集了欧洲六个国家的13个组织的NUCOBAM（“基于增材制造的核部件”）项目正在开展研究，

“未来，核工业可能会广泛使用3D打印和其他先进制造技术，就像航空业和汽车业已经在做的那样。”

—国际原子能机构核工程师
Aninda Dutta Ray



这些燃料组件支架由橡树岭国家实验室与法马通公司和田纳西流域管理局合作制造，是将安装到核电厂的首批3D打印安全相关部件。

(图/美国能源部橡树岭国家实验室F.List)

以制定准许3D打印用于核电厂的认证和评价过程。

美国电力研究所也在与美国能源部和制造商合作开展研究，以简化3D打印等新技术的监管验收。该研究的重点是调查先进制造技术的适用性，制定规范和标准，并利用独立的抗环境退化材料性能测试结果支持监管审查。“随着能源行业继续向先进能源系统（如先进反应堆）过渡，对替代供应链和加速部署的需求正在显著增加，”美国电力研究所先进制造项目首席团队负责人Marc Albert说，“增材制造和其他先进制造方法是加快清洁技术部署的推动因素。”

原子能机构的作用

原子能机构的作用之一是促进国际合作和知识共享。2023年4月，原子能机构发起了“创新支持在运核电厂国

际网络”。该网络是一个包容性网络，是各国就一系列创新主题包括3D打印等先进制造技术开展合作的平台。

2022年6月，原子能机构还发起了“核协调和标准化倡议”，其重点是促进安全可靠的先进核反应堆和小型模块堆的部署。该倡议旨在统一监管方案，并制定更加标准化的工业方案，包括关于适用于小型模块堆增材制造的核规范和标准的共同方案。

“合作创新是让下一代核技术尽快安全地走出实验室和进入世界以便我们能够帮助实现零净目标的关键，”原子能机构核电厂运行和工程支持团队负责人Ed Bradley说。“共享研究结果、技术和知识可节省时间和资源，因为每个核国家不必都去完成同样的试验或投入资金解决同样的难点。我们将以此取得成功。”

助力未来：建立小型模块堆和先进反应堆的燃料供应链

文/Lucy Ashton

工程师们正在为下一代核动力堆做准备，旨在提高能源安全和减缓气候变化。包括小型模块堆在内的许多先进反应堆设计都将需要高丰度低浓铀燃料，这种燃料的铀-235含量在5%到20%之间，超过了大多数在运核电厂燃料所需的5%铀-235含量。

“高丰度低浓铀燃料将实现更加小型化设计、运行周期更长和效率更高。”原子能机构核燃料循环和废物技术司司长Olena Mykolaichuk说，“然而，为了充分利用高丰度低浓铀燃料的好处，一些国家正在提高产能，以确保有充足的供应，这对小型模块堆的部署至关重要。”

俄罗斯联邦和美国已在生产高丰度低浓铀，主要用于研究堆和在运轻水堆。俄罗斯设施是目前唯一一个以商业规模生产高丰度低浓铀的设施。

去年，欧洲原子能共同体供应局编写了一份关于欧洲已经改造或即将改造成以高丰度低浓铀为燃料的研究堆的未来燃料供应报告。传统上，欧洲的研究堆一直以高浓铀为燃料。由于目前缺乏高浓铀生产能力，欧洲以高丰度低浓铀为燃料的研究堆正在由俄罗斯和美国提供燃料，美国表示只能保证供应到2035年或2040年，因此未来改造燃料后的研究堆更加面临供应短缺的风险。

据欧洲原子能共同体供应局估

计，到2035年，欧盟维持其研究堆运行每年将需要700千克到一吨的高丰度低浓铀。这一估算还不包括发电用先进反应堆的未来需求。因此，出于对未来供应安全的担忧，欧洲原子能共同体建议欧盟发展自己生产高丰度低浓铀燃料的能力。

虽然欧洲尚未具备生产高丰度低浓铀的能力，但欧洲大陆最大的核燃料生产商在浓缩技术方面处于世界领先地位。根据欧洲原子能共同体供应局的报告，这些生产商目前可生产铀-235丰度为6%的燃料，并能够利用相同技术生产高丰度低浓铀，不存在重大技术挑战。

然而，此类设施的许可、建设、安全和运行需要大量投资，欧洲生产商表示，他们仍需要了解投资的商业价值。欧洲公司最快也要在五年内才能开始生产高丰度低浓铀，目前正在考虑扩建法国现有工厂的计划，以及在英国或美国建造新设施的计划。

然而，美国核工业警告说，由于缺乏高丰度低浓铀，一些小型模块堆设计的部署可能会推迟数年。目前，在美国政府资助的十个先进反应堆设计中，有九个将在未来十年内需要高丰度低浓铀燃料。美国能源部的预测表明，到2030年将需要超过4万千克的高丰度低浓铀，随着新的先进反应堆群投入运行，这一数量还将逐年增加。

“下一代核技术将需要新型燃料的新供应链。”

—国际原子能机构核燃料工程专家 Ki Seob Sim



为了满足这一需求，美国能源部正在投资国内的高丰度低浓铀生产线。能源部成立了一个高丰度低浓铀联盟，并共同出资在俄亥俄州皮克顿建立了一个示范生产厂。2023年6月，美国监管机构批准皮克顿设施开始浓缩作业。

皮克顿高丰度低浓铀离心机级联预计到2023年底将生产20千克高丰度低浓铀，到2024年产量将达到900千克。由120台独立离心机组成的全规模高丰度低浓铀级联每年可生产约6000千克高丰度低浓铀。

作为补充，还通过稀释国家库存的高浓铀，开始另一种高丰度低浓铀燃料生产。这种三元结构各向同性粒子（即TRISO高丰度低浓铀）燃料由

铀、碳和氧制成，外层覆盖三层碳基和陶瓷材料，可防止放射性裂变产物的释放。然后，这些粒子可以被塑造成台球大小的球体（称为鹅卵石）或圆柱形颗粒。TRISO高丰度低浓铀燃料用于高温气冷反应堆，一些供应商正计划将TRISO高丰度低浓铀燃料用于小型模块堆和微型反应堆设计。

“下一代核技术将需要新型燃料的新供应链。”原子能机构核燃料工程专家 Ki Seob Sim 说，“我们目前正在努力建立这些供应链，但若要确保必要的高丰度低浓铀燃料供应，仍有许多工作要做，包括在许多地区展示这些先进反应堆的明确商业价值。不过，我相信我们能够做到这一点。”

美国能源部已投资在国内生产高丰度低浓铀（HALEU）燃料。位于俄亥俄州皮克顿的高丰度低浓铀示范项目预计将在2023年底前生产出20千克高丰度低浓铀。

（图/美国森图斯能源公司）

利用人工智能提高核能生产

文/Wolfgang Picot

人工智能具有推进核能生产的广阔潜力。这些尖端复杂的计算机系统模仿人类逻辑解决问题和作出决策。人工智能能够提高效率、自动化、安全性和预测性维护以及优化流程，已在一些核领域方面取得长足进步。

人工智能涵盖了数十年来所开发的各种技术，既包括简单的计算机程序，如垃圾邮件过滤程序，也包括更先进的概念，如机器学习，即计算机通过大量数据进行广泛训练来学习以往经验。随着功能强大的微芯片的出现，深度学习应运而生，它模仿人脑的人工神经网络。

生成式人工智能是深度学习的一个子集，通过制作原创文本、图像和视频，引起了公众关注。它用途广泛，适用于多种不同的功能或活动。“生成式工具的作用自然令人感到兴奋，”电力研究所人工智能、量子与核创新负责人Jeremy Renshaw表示，“现有模型功能极为强大，目前正在

在努力开发新的更好工具。”

虽然生成式人工智能像在其他行业一样，能够有助于完成行政任务，但由于它属于新鲜事物和存在不透明性，目前还无法用于核电厂运行；人们尚未完全了解人工神经网络如何运作并得出结论。被称为“可解释人工智能”的更透明系统有望在核电厂运行中得到更广泛的应用。这种人工智能的开发工作正在进行中。Renshaw相信，在可预见的未来，人工智能一旦实现，将在核电厂中得到应用。

机器学习应用程序

机器学习应用于核工业已有一段时间，并已证明能够在各个领域发挥效用。营运者利用机器学习算法进行实时监控和预测性维护。机器学习模型通过筛选大量传感器数据，使人类分析人员能够关注全部数据中一小部分的潜在不规则性。“检查人员只需评估相关数据，无需‘大海捞针’。”Renshaw说。

“人工智能与数字孪生等其他技术一起，可以决定性地提高核能生产效率。”

—国际原子能机构核工程师 Nelly Ngoy Kubelwa

这项技术并不能取代人工分析。但是，它可以提供更快、更准确的结果，同时减少对人类互动的依赖，尽管人类互动仍然不可或缺。机器学习已被应用于核电厂金属罐和管道的裂缝筛查。通过机器学习提高精确度、降低成本和优化人工监督，有可能为核电行业带来巨大效益。

人工智能在核电厂的潜在应用非常广泛。例如，它可以根据用户需求、天气和设备性能等实时数据调整发电量，从而提高效率，确保稳定的电力供应。使用机器人和人工智能系统的自动化可以处理日常任务，将人力干预集中在高价值任务上，提高电厂效率。它还可以优化燃料消耗，最大限度地提高反应堆的能量输出。

原子能机构专门研究创新技术的核工程师 Nelly Ngoy Kubelwa 说：“人工智能与数字孪生等其他技术一起，可以决定性地提高核能生产效率。”数字孪生是实物、人或过程的数字表示，可以模拟真实情况及其结果。

Ngoy Kubelwa表示，业界对人工智能解决方案有着极大的兴趣，但在任何新技术应用于核电厂之前，监管机构需要全面了解和理解这些技术，以制定指导方针，并为其使用发放许可证和许可。

“围绕人工智能尤其是生成式人工智能是否是一种从根本上新颖的东西，以至于我们需要一种全新的方法来监管它，或者我们是否可以调整当前的标准，我们进行了很多讨论。” Ngoy Kubelwa说，“为了部署这项技术，我们需要与监管机构合作制定框架。”

自 2021 年以来，原子能机构一直支持人工智能在核电厂中的潜在应用，编写了一份关于人工智能的报告，并随后在“创新支持在运核电厂国际网络”下成立了工作组，重点关注人工智能部署的监管和技术方面。即将出版的关于核工业人工智能应用和核电厂人工智能安全影响的出版物进一步强调了这一承诺。原子能机构还正在牵头开展一个协调研究项目，探讨人工智能和创新技术如何有助于加快小型模块堆的部署，并考虑建立以人工智能为重点的原子能机构协作中心。

对Ngoy Kubelwa来说，这个话题不仅仅是技术性的。她说：“使用人工智能和其他新兴技术将表明核工业掌握了最新发展的脉搏。积极主动地参与这一领域将在吸引年轻一代的兴趣方面发挥重要作用，这对于确保核能生产的未来至关重要。”

国际原子能机构正在牵头开展一个关于探索人工智能如何助力部署小型模块堆的协调研究项目。

(图/Adobe图库)

当核废物成为资产而非负担时

文/Lucy Ashton

要 让核电厂产生的高放核废物能够推动能源部门的循环经济发展，该怎么办？在闭式燃料循环中运行的快中子反应堆可以实现这一目标。

快中子反应堆使用未被水等慢化剂减慢的中子来维持裂变链式反应，与现有的热核反应堆相比具有一定的优势。当在再利用核燃料的全闭式燃料循环中运行时，快中子反应堆有可能从相同数量的天然铀中提取比热核反应堆多60~70倍的能量，从而显著减少高放废物数量。

国际原子能机构副总干事兼核能部部长米哈伊尔·丘达科夫说：“在闭式燃料循环中使用快堆时，一千克核废物可以多次循环利用，直到铀全部用完，锕系元素（其放射性可保持数千年）被烧尽。然后剩下的是大约30克的废物，这些废物将在200到300年内具有放射性。”

快堆是核能早期部署的首批技术之一，当时铀资源被视为稀缺资源。然而，随着技术和材料方面的挑战阻碍了发展，并且新的铀矿藏被发现，轻水堆成为行业主要发展堆型。然而，一些国家正在努力推进快堆技术，包括小型模块堆和微型反应堆。

目前有五座快堆正在运行：俄罗斯联邦的两座在运反应堆（BN-600和BN-800）和一座试验快堆（BOR-60）、印度的快增殖试验堆和中国实验快堆。欧盟、日本、美国、英国和其他国家都在开展针对各种目标和功能的快堆项目，包括小型模块堆和微型反应堆。

对于一些国家来说，在全闭式燃料循环中运行快堆被视为确保核能长期可持续性的途径。

正在塞韦尔斯克建设的俄罗斯试点示范能源综合体汇集了一座铅冷BREST-OD-300快堆、一座燃料制造和再制造厂以及一座氯化铀-钚混合乏燃料后处理厂。此外，还将建造一座深层地质废物处置库。这个试点项目的重要性不仅在于展示能够进行新燃料的制造、辐照和再循环，而且在于展示所有这些工作在同一个场址完成。

“将整个闭式燃料循环过程设在同一个场址，有利于核安全、核安保和核保障。”原子能机构核燃料循环技术负责人 Amparo Gonzalez Espartero 说，“这在经济上也更有意义，因为核废物和核材料不需要像目前在一些国家那样在不同地点之间转运，从而最大限度地减少了运输和后勤挑战。

运行任何规模的闭式燃料循环都需要快堆以及用于后处理和再循环的基础设施。除其他原因外，经济和保障因素使得不是每个国家都能拥有后处理设施。为了降低成本，后处理设施可向其他国家提供服务，或者各国可共享设施。

俄罗斯还计划在2035年之后部署下一代1200兆瓦（电）快堆，作为与轻水堆并存的自维持系统的一部分。借助快堆，热核反应堆的乏燃料将被后处理和再利用，最终产生的废物足迹比常规核燃料循环的废物足迹小十倍。

其他国家也在推进相关项目。中国正在福建省霞浦县建造两座钠冷快堆（CFR-600）。第一台机组正在调试

“各国正越来越多地关注如何再利用乏核燃料等资源，以清洁方式为本国经济提供动力。”

—国际原子能机构快堆技术研发团队负责人Vladimir Kriventsev



中，预计将于2024年并网。美国由微软联合创始人比尔·盖茨支持的快堆项目正在开发中；尽管美国正在重新努力研究闭式核燃料循环，并利用现有核废物开发自己的燃料供应，但该项目不会在闭式燃料循环中运行。在欧洲，比利时MYRRHA项目旨在到2036年建造一个铅铋冷却加速器驱动系统，以测试其作为未来全闭式燃料循环的一部分分解次锕系元素的能力。

“各国正越来越多地关注如何再循环利用乏核燃料等资源，以清洁方式为本国经济提供动力。”原子能机

构快堆技术研发团队负责人Vladimir Kriventsev说，“目前，材料科学、反应堆物理和工程方面的技术创新改善了设计，增强了安全性能，降低了建造和运行成本，从而提高了快堆核电站的经济性。”

原子能机构通过协调研究项目、技术出版物、技术工作组和会议，在支持快堆的开发和部署中发挥着关键作用。原子能机构“核反应堆和燃料循环革新型国际项目”还通过支持各国的规划与合作，助力推进快堆和相关核燃料循环的发展。

将建有两座快堆的俄罗斯联邦别洛雅尔斯克核电站。

（图/俄罗斯国家原子能电力公司）

钷的长期核能应用潜力

文/Artem Vlasov

印度的沙地蕴藏着为该国无碳未来提供燃料的巨大潜力。由于印度拥有世界上最大的钷储量，其长期核能战略的最终目标就是开发这种银白色、略带放射性的金属，这种金属被认为比传统核燃料更清洁、更高效。

印度孟买霍米·巴巴国家研究所所长Anil Kakodkar说：“自印度核能计划启动以来，钷一直是研发的重点。”印度已经设计并正在开发一个以钷为燃料的反应堆——先进重水反应堆。据Kakodkar称，该反应堆不仅将示范钷基燃料循环，还将示范非能动安全特性。

印度并非唯一打算利用钷独特特性的国家。2023年6月，中国颁发了一座实验熔盐钷基核反应堆的运行许可证。该反应堆建在中国北部的戈壁滩中，将在未来几年内进行测试。日本、英国、美国和其他国家也对研究钷的可能核能应用表现出了热情。

钷用于能源生产的挑战

钷通常存在于火成岩和重矿砂中，以挪威神话中的雷神托尔命名。在自然界中，它比铀含量上高出三倍，但历来很少用于工业或发电。部分原因是钷本身不是核燃料，尽管它可以用来制造核燃料。钷-232是唯一天然存在的钷同位素，被认为是“可裂变”的。这意味着它需要铀或钚等

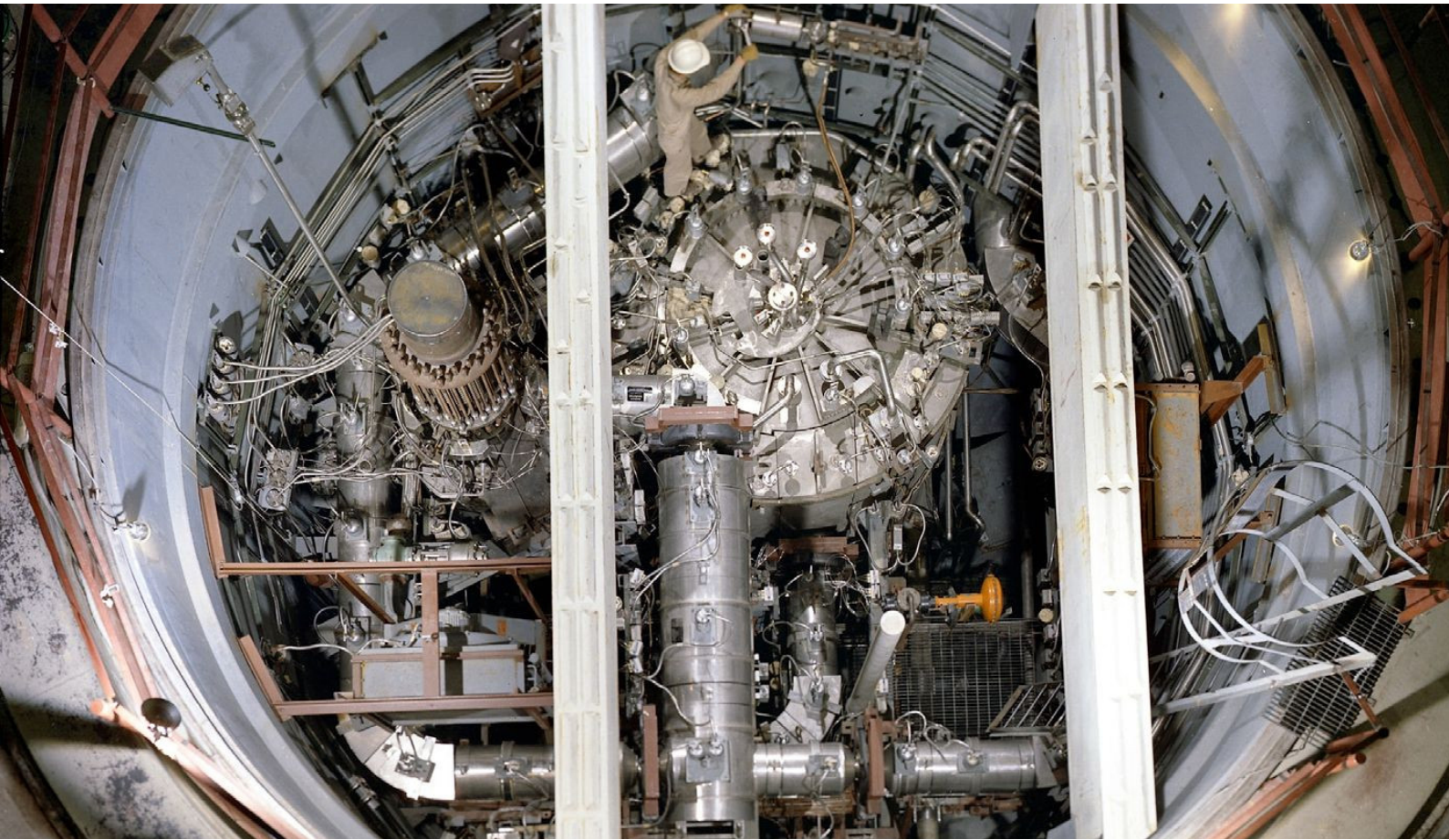
驱动元素来引发和维持链式反应。经过辐照后，钷-232会发生一系列核反应，最终形成铀-233，然后铀-233可以分裂释放能量，为核反应堆提供动力。

然而，利用钷生产能源并非没有挑战。一些经济和技术障碍使钷的应用面临挑战。尽管钷资源丰富，但目前提取这种金属的成本却很高。“矿物独居石是稀土元素的主要来源，也是钷的主要来源。”原子能机构铀资源专家Mark Mihalasky说，“如果没有目前对稀土元素的需求，独居石就不会仅因其钷含量而被开采。钷是一种副产品，提取钷所需的方法比提取铀的方法成本更高。但是，如果对钷及其核能应用有更高的需求，这种情况就会改变。”

同样昂贵的还有钷动力核设施的研究、开发和测试，因为在钷方面缺乏丰富的经验，而且铀在核能方面历来占据主导地位。“钷的另一个障碍是辐照后难以处理。”原子能机构燃料工程和燃料循环设施技术负责人Anzhelika Khaperskaia说，“由于钷中存在强伽马射线发射子产物，因此与铀燃料相比，钷燃料需要更昂贵的遥控燃料制造工艺。此外，乏钷燃料的后处理也具有挑战性。溶解二氧化钷和处理气态产品存在困难，需要在工业规模上达到成熟。由于在溶解过程中使用氟化物，后处理设备也会受到腐蚀。”

“由于钷的丰富性及其可裂变材料的增殖能力，钷有可能为人类的能源需求提供长期解决方案。”

—国际原子能机构燃料循环设施专家Kailash Agarwal



一项为期四年的原子能机构协调研究项目重点研究开发钍基核能的可能性，研究使用钍作为燃料的好处和挑战，并分析其在不同类型反应堆中的应用——从最常用的水冷反应堆到熔盐反应堆。该项目的成果最近发表在一份题为《部署钍基核能的近期和长期选择》（原子能机构《技术文件》第2009号）报告中。

钍能提供什么？

钍比传统核燃料铀-235有几个优点。在为水冷堆或熔盐堆提供燃料时，钍产生的可裂变材料（铀-233）多

于其消耗的可裂变材料，而且与钚燃料相比，钍产生的长寿命次锕系元素较少。据估计，钍在地壳中的平均含量为10.5ppm，而铀的含量约为3ppm。

上述原子能机构报告作者之一，原子能机构燃料循环设施专家 Kailash Agarwal说：“由于钍的丰富性及其可裂变材料的增殖能力，钍有可能为人类的能源需求提供长期解决方案。”

除了钍燃料反应堆和核能总体上在运行中不会排放温室气体之外，另一个优点是，与目前铀燃料反应堆相比，它们产生的长寿命核废物更少。

20世纪60年代钍基实验核反应堆俯视图。

（图/美国能源部橡树岭国家实验室）

创新型核反应堆设计监管

文/Nayana Jayarajan 和 Volha Piotukh

管理核工业的现行条例是专门为自20世纪60年代第一批商业核电厂开始运行以来一直在使用的反应堆类型制定的，是在过去60年获得的经验的基础上发展而来。随着包括小型模块堆在内的新型先进核反应堆的开发，监管当局正在努力确保其流程、条例和导则也进行创新，以使首创技术得到安全可靠的部署。

对于美国核管理委员会新许可证和延期许可证部门主管、原子能机构小型模块堆监管者论坛主席 Brian Smith 来说，制定技术中立的条例和导则是优先事项。他说：“在美国，我们50多年来只有大型轻水堆，我们的条例是基于这些类型的反应堆制定的。”他还表示：“虽然一些小型模块堆也使用轻水作为冷却剂，但它们其中有一些是完全不同的。我们必须为它们提出一个几乎全新的框架，一个技术中立、风险知情和基于实绩的框架。”

为了应对监管这些创新技术的挑战，监管者本身正在探索不同的战略，例如审查现有条例的适用性，优先招聘具有各种专业的技术人员，以及学习申请者和其他监管者的经验。

“其中一些较新的设计在反应堆中使用不同的材料，如石墨；有些还会达到比现有全部反应堆（轻水堆）都高的温度，因此，我们必须将这些考虑在内，” Smith 说，“拥有合适的技术人员也是一项挑战，不仅对我们，对所有监管者都是如此。对于这些较新的设计，你必须拥有熟悉不同新技术的技术专家，才能对反应堆本身的安全方面作出评价。”

另一个行之有效的策略是鼓励应用前参与，也称为供应商设计审查或许可审批前审查。这种做法使监管者能够审查其条例对创新设计技术规格的适用性，并使申请者能够在正式许可审批过程开始之前熟悉了解监管要求。小型模块堆监管者论坛建议，应利用监管者与反应堆供应商之间在许可证审批前的互动来预测或确定更高层次的监管干预的节点，这种干预可能导致许可证持有者的活动暂停或延迟。

通过合作实现统一

小型模块堆较低的前期资本成本、较少的资源需求以及非电力应用的潜力，使其对正在实施或考虑实施核电计划的国家越来越有吸引力。例如，约旦正在考虑小型模块堆，部分原因是这个干旱的内陆国家找到足够的水资源来冷却传统核电厂被证明具有挑战性，约旦原子能委员会主席 Khaled Tukan 说。

对这些国家来说，国际合作以及向其他成熟监管者学习的机会是确保核电计划安全可靠的关键。小型模块堆监管者论坛成立于2015年，是一个国际监管者团体，确定可能对小型模块堆监管审查构成挑战的共同安全问题并提出解决方案。

Smith 认为，该论坛是分享小型模块堆监管知识和经验的重要平台。论坛组织地区研讨会，并就关键议题形成共同立场，“我们可以把这些立场带回自己的国家，看看如何修改或修订我们自己的导则。”

世界各地正在开发80多个小型模块堆设计，原子能机构的目标是通

“虽然一些小型模块堆也使用轻水作为冷却剂，但它们其中有一些是完全不同的。我们必须为它们提出一个几乎全新的框架，一个技术中立、风险知情和基于实绩的框架。”

—美国核管理委员会新许可证和延期许可证部门主管 Brian Smith

过“核协调和标准化倡议”，制定协调统一的监管和共同工业方案，推动安全可靠的先进核反应堆在全球的有效部署。

原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西在2023年6月的“核协调和标准化倡议”全体会议上重申了原子能机构这一倡议的重要性。“方案的协调统一可促进小型模块堆和部件的国际贸易，因为这使开发者能够设计和制造符合更加统一的整套全球标准的反应堆，而不必应对不同国家的多套、有时是相互冲突的要求，”他说。

他补充说，原子能机构作为处理安全和监管问题的中心拥有几十年的经验，是促进国家监管框架方面国际合作的理想机构。“更加协调统一的监管方案将有助于加强国际合作，并使各国能够实施高标准的安全和安保，”他说。“核协调和标准化倡议”于2022年6月发起，由两个独立但互补的轨道组成：监管轨道及工业轨道。小型模块堆监管者论坛为监管轨道提供支持，并正在制定借助其他监管者的许可证审批审查和开展联合审查的程序。

“核协调和标准化倡议”监管轨道还包括一个制定监管者间信息共享框架的工作组，以及另一个侧重于多国许可证审批前审查的工作组。在各国许可证审批前审查这项工作中，监管者将共同努力，查明新反应堆设计在被提交国家许可证审批审查之前存在的潜在挑战。

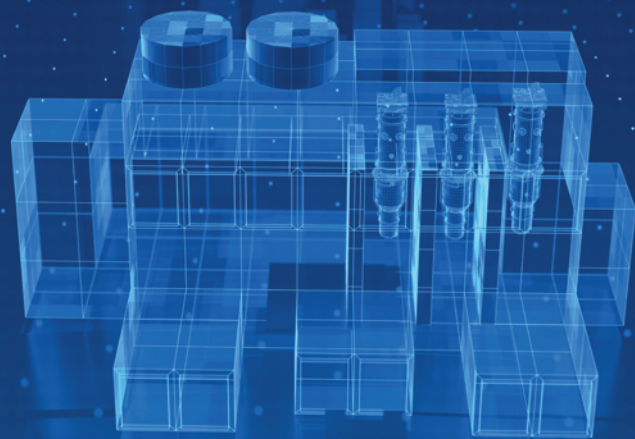
让公众知情和参与是核电发展的基石。有关小型模块堆等创新型反应堆设计安全的公众宣传和利益

NHSA 核协调和标准化倡议

安全可靠的

先进核反应堆

全球有效部署



相关方的参与，对其成功部署至关重要。“由于这些反应堆的位置可能离居民更近，监管者的当务之急是与公众接触并倾听他们的意见，特别是在属于首次部署反应堆的启动核电国家，”Smith说，“监管者正在通过建立一种开放、专业和稳健安全文化，以及通过强调其独立性、透明度和作为一个能够及时、可靠和容易地获取信息的可信来源的作用来应对这一挑战。”

深层地质处置库中的乏核燃料核查

文/Eva Morela Lam Redondo

随着世界各国寻求替代化石燃料的解决方案来应对气候变化，一些国家在制定核能计划，以提供可持续的低碳能源。运行核反应堆的国家有责任提供高放废物地质处置能力。国际上公认的高放废物地质处置方法是挖掘深层地质处置库。加拿大、芬兰、法国、瑞典和瑞士都制定了最先进的深层地质处置库计划。

正在开发的新设施例如包括芬兰的乏燃料封装厂和深层地质处置库——前者是将乏燃料安全密封在处置罐中，后者则是永久安全地储存处置罐。两个设施都必须遵守芬兰的国际法律义务，允许原子能机构核查核材料和平利用情况。

原子能机构通过实施称为“保障”的一系列技术措施来监督核设施、核材料和核活动，从而履行核核查任务。这些措施使原子能机构能够独立核查各国是否履行了仅为和平目的使用核材料的法律责任。各国通过与原子能机构签订保障协定来接受这些措施。因此，通过执行保障，原子能机构可以向世界提供关于各国正在履行其核不扩散承诺的可信保证。

芬兰辐射和核安全局核材料保障部门负责人Marko Hämäläinen说：“芬兰与国际原子能机构的合作体现了我们通过有效的保障履行国际不扩散义务的坚定承诺。”

封装厂和深层地质处置库设施给实施保障带来了挑战和机遇。目前正在制定创新解决方案，以便原子能机构保障视察员能够核查所贮存的核材料。深层地质处置库位于地下500米深处，计划在未来100年内运行，进入该

处置库是这些挑战之一。封装厂和深层地质处置库投入运行后，将成为世界上首个与国际原子能机构签订全面保障协定的此类设施。因此，原子能机构视察员需要制定新的可持续保障方案，以便目前和在遥远的未来核查这些难以接触的核材料。

“作为保障视察员，我们首先需要能够在乏核燃料转移到封装厂和深层地质处置库设施之前对其进行核查，然后执行保障措施，以确认乏燃料未被转用或替代，以及这些设施未被用于未申报的目的，”原子能机构核保障视察员Courtney Ames说，“对于原子能机构保障视察员来说，封装厂和深层地质处置库设施在乏燃料转移期间和转移之后保持知识的连续性是一项挑战，特别是在实际接触地质处置库有限的情况下。通过利用新技术，采取团队合作和仔细分析，我们可以实现保障目标。”

原子能机构、欧盟委员会以及芬兰辐射和核安全局之间需要合作制定保障措施和方法，包括在处置乏燃料之前开发和测试乏核燃料核查技术。

2012年，原子能机构启动了封装厂和地质处置库项目，以专门应对新型设施带来的保障执行挑战。在与对应方的密切合作下，就该项目实施了一项综合方案，其中纳入了“保障始于设计”原则，可最大限度地减少对深层地质处置库的运行影响。“保障始于设计”需要在设施规划和设计的早期阶段就纳入保障考虑因素，并将这些考虑因素持续贯穿于整个建设、运行和退役过程。就芬兰而言，“保障始

“作为保障视察员，我们首先需要能够在乏核燃料转移到封装厂和深层地质处置库设施之前对其进行核查，然后执行保障措施，以确认乏燃料未被转用或替代，以及这些设施未被用于未申报的目的。”

—国际原子能机构核保障视察员 Courtney Ames



于设计”应使原子能机构和欧洲原子能共同体的保障视察员以及国家当局（芬兰辐射和核安全局）能够有效地履行职责，同时不干扰封装厂和深层地质处置库设施的运行。

“我们在封装厂和地质处置库项目中实施了‘保障始于设计’原则”。这种前瞻性方案减少了改造需要，并为营运者、芬兰辐射和核安全局、国际原子能机构和欧盟委员会节省了宝贵的资源。” Hämäläinen说。

其他最新制定的概念和措施，包括远程监控系统，也正在实施中。通过使用远程监控系统观察核材料所在地，原子能机构可以减少现场视察，进而降低因往返设施而产生的碳排放。地震监测和激光封隔系统等技术也可以在减少视察方面发挥作用，

地震监测可以发现任何未申报的穿透深层地质处置库周围岩石情况，而激光封隔系统可以分析容器顶盖的焊接轮廓，从而生成独特的自然“特征径迹”，如果这种“特征径迹”发生变化，则表明容器罐已被打开。

到2025年，芬兰的封装厂和深层地质处置库设施将全面投入运行，用于乏核燃料的安置。通过合作与创新，原子能机构、欧盟委员会以及芬兰辐射和核安全局正在共同实施有效和高效的保障，以实现原子能机构的核查目标，同时确保对设施运行的影响最小。通过纳入“保障始于设计”原则，封装厂和深层地质处置库设施将提供处理和处置乏核燃料的解决方案，支持低碳核能转型，以及促进原子能机构对核材料和核技术的核查。

芬兰ONKALO乏核燃料
深层地质处置库入口。

（图/Posiva公司）

塑造对核能的认识

文/Irena Chatzis

随着人们对气候变化、能源安全、能源公正和可持续发展的关注，公众对核能的想法也在发生变化。与此同时，核能倡导者也在寻找创新和吸引人的方式来宣传这种清洁能源的好处。核能影响者、模特Isabelle Boemeke就是这些倡导者之一。

Boemeke在社交媒体上被称为“Isodope”，她认为核能对于创造人类既能生存又能繁荣发展的未来至关重要。在这次采访中，Boemeke解释了她如何利用自己的网络形象向年轻一代宣传核能。

您是如何对核能产生兴趣的？

2015年，我在社交媒体上关注的一位科学家在推特上谈论熔盐钍基反应堆。我做了一些研究，但没有找到像我这样没有技术背景的人能够理解的信息。这激发了我对核能的好奇心，于是我询问大家对核能的看法。他们的回答归结为：核能确实很好。我们肯定需要核能来解决气候变化问题，但人们绝对讨厌核能。

随着2019年澳大利亚、亚马逊和加利福尼亚发生火灾，我意识到我们在应对气候变化方面的步伐不够快，于是开始寻找解决方案；我再次接触到核能。我突然意识到，人们自以为了解的关于核能的一切都错了。之所以是错误的，是因为他们的信息大多来自文化参考、电影和动画片，比如《辛普森一家》。我试着想办法告诉人们，核能是世界第二大清洁能源，而那些已经实现电力脱碳的国家大多是通过水电或核电实现的。

“Isodope”就是这样诞生的吗？

我们生活在一个由社交媒体塑造的世界，社交媒体影响者比比皆是。我意识到，传达核信息的最佳方式就是制作能够吸引社交媒体上的人们并为之对话的内容。我知道我的内容必须与众不同，因为我不想只制作一个视频。我想出了一个角色，她穿着打扮充满未来感，使用通俗易懂的语言和丰富多彩的视觉效果。

我称她为“Isodope”，这是化学术语“isotope”（同位素）的双关语。

您的主要受众是谁？

我关注的是千禧一代（即20世纪80年代和90年代出生的人）和年轻人。年轻人的生计岌岌可危。我们和我们的后代将成为受气候变化影响最严重的人。

除了亲核团体之外，您如何接触到更广泛的受众？

在这方面，社交媒体是一个非常实用的工具。你不仅可以创建内容（这就是我所做的），还可以通过这些内容与人们互动。你可以回应那些有疑问和好奇的人。

每一个场合都是提出核能话题的机会。例如，当我去看医生时，有人问起我的工作，我就会说我从事核能工作，结果总是会成为一次有趣的对话。让核电厂周围的社区参与进来也非常重要。这些人是最好的宣传者，因为他们的社区从这一设施中获益良多。

另一个应该充分解释的话题是放射性废物，因为这是人们提出的最大问题之一。见过核废物的人都会告诉你，这是地球上最无聊的东西：混凝土容器罐，就放在那里。这将真正有助于展示核废物的样子，并向人们传递这样一个信息：核废物是安全管理的，而且说实话，比人们想象的更无聊。



“每一个场合都是提出核能话题的机会。”

—核能影响者、人称“Isodope”的模特Isabelle Boemeke

在您作为核能影响者的职业生涯中，您最大的成就是什么？

出于多种原因，拯救加州代阿布洛峡谷核电厂免于在2022年关闭，是当务之急。当我开始作为一名核能影响者工作时，我研究了美国计划提前关闭的核电厂。当时共有5座，其中代阿布洛峡谷核电厂最引人注目，不仅是因为它是一座美丽的设施，可以再运行20年，而且因为它是美国反核运动的象征。在20世纪60年代末和70年代建造代阿布洛峡谷核电厂时，曾发生过许多抗议活动，包括一次约有3万人参加的集会。

拯救这座核电厂意味着向公众和政界人士发出一个信息：潮流已经改变；人们现在开始支持使用核能。我认为这是一项有意义的事业，于是我与美国许多不同的组织合作。我们组织了全国最大的拥核集会。我还创建了一个名为“拯救清洁能源”的非

营利组织，并给加州州长写了一封由80位顶尖能源和气候专家及企业家签名的信，敦促他继续保持代阿布洛峡谷核电厂运行。其结果是，原计划于2025年关闭的这座核电厂将在2025年后至少再运行五年。

您对“Isodope”有哪些最新项目和计划？

我目前正在写一本关于核能的书，《辐射未来》(Rad Future)；这本书的写作风格类似“Isodope”，通俗易懂。在非营利领域，我非常关注煤炭向核能转型，因为我认为这可能是我们加快核能部署的最佳选择，至少在美国是这样。

最后，我认为我们可以通过时尚行业接触到完全不同的受众。我做过关于核能的时尚社论和访谈，我会继续做下去。未来，我们可以在这方面开展很多有趣的合作。

运行安全评审组成立40年 改进全球核电厂运行安全



运行安全评审组成员2018年在西班牙阿尔马拉斯进行第200次运行安全评审组评审。(图/国际原子能机构M. Klingenboeck)

国际原子能机构正在庆祝运行安全评审组成立40周年，其评审是原子能机构向成员国提供的最重要安全同行评审服务之一。运行安全评审组计划旨在通过将实际做法与原子能机构安全标准进行比较，帮助各国加强其核电厂在调试和运行期间的安全。自1983年8月对韩国古里核电厂进行首次工作组访问以来，原子能机构已对37个国家进行了218次运行安全评审组工作访问，对这些国家的运行安全实绩进行了客观和独立的评定。

“通过这些工作组访问，数千名专家为全球在运核电厂的持续安全改进提供了支持，”原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西说。

运行安全评审组工作访问旨在通过确定应改进的领域并提出改进方法，协助核电营运者加强其电厂的运行安全。

在运行安全评审组访问期间，来自成员国和原子能机构的专家对照国际公认核安全标准即原子能机构安全标准对核设施的安全实绩进行评定，并提出具体的安全改进建议和意见。在工作组访问期间，对这些标准在包括电厂管理、人员培训和资格认证、运行和安全文化在内的广泛领域的应用情况进行评定。

对在运核电厂的运行安全评审组工作访问可在电厂开始商业运行后的任何时间开展。后续访问通常在主要访问结束后18个月左右进行。运行前安全评审组工

作访问是在核电厂的调试阶段进行，通常是在第一批核燃料被装入核反应堆之前的几个月。为了补充这些工作组访问，还开展法人运行安全评审组工作访问，以审查全部核电厂内各核电厂在运行安全方面的集中职能，如法人管理；安全实绩监测；监督、采购或人力资源。

目前的运行安全评审组计划

最近的分析表明，核设施的营运者对运行安全评审组工作访问的调查结果迅速采取行动，95%以上的调查结果在后续工作组访问时已得到解决或取得令人满意的进展。

近年来，该计划更加重视事故管理以及人员、技术和组织之间的互动等领域。该计划还强调安全文化，即一个组织的文化如何优先考虑和重视安全。运行安全评审组计划努力灌输一种安全文化，鼓励东道组织在早期阶段自己发现和解决安全问题。

促进信息共享、透明度和信任

迄今为止，运行安全评审组工作访问已确定了1350项良好实践，这些良好实践也在原子能机构网站上向公众提供。营运组织

经常审查这些良好实践，并实施那些适用的良好实践。

为确保透明度，运行安全评审组准则以及这项服务所依据的原

子能机构安全标准都向公众提供。

“原子能机构的同行评审工作组访问现在比以往任何时候都更加重要，因为它们为实现全球

气候目标所需的核能大幅扩张奠定了基础，”格罗西总干事说。

文/Nayana Jayarajan

国际原子能机构在联合国高级别政治论坛上展示对可持续发展目标的支持

原子能机构参加了7月10日至19日在纽约联合国总部举行的2023年联合国可持续发展问题高级别政治论坛，强调了核科学技术对实现可持续发展目标的重要贡献。

“在这个水源危机、能源危机和气候危机交织在一起的时代，我们面临着不确定的未来。我们必须共同努力，找到可行的解决方案，以处理各国的优先事项，增强其复原力，减少全球不平等现象，”原子能机构负责技术合作部的副总干事刘华说。

原子能机构致力于帮助各国实现其可持续发展目标，2023年高级别政治论坛对五项可持续发展目标进行了审查，包括清洁水和卫生（可持续发展目标6）以及负担得起的清洁能源（可持续发展目标7）。原子能机构促进利用核科学技术创造清洁、可靠和负担得起的能源，以及利用同位素水文学等核技术加强水资源管理。

今年是实施17项可持续发展目标的中间点，这些相互关联的目标旨在应对世界面临的全球性挑战，并计划在2030年之前实现。原子能机构主办了一次展

览，并组织了一次会外活动，活动的重点是通过南南合作和三角合作改善清洁水和能源的获取。

联合国南南合作办公室办事处主任Dima Al-Khatib强调了这种方案的重要性。她表示：“南南合作和三角合作正在证明，这些合作是增强能力和缓解南方国家正在努力应对的挑战（无论是水管理、能源、数字化还是贫困）的一种创新方式。南南合作是一个在各个层面都具有影响的宝贵合作机制。”

南非的Xolisa Mabhongo大使强调了南南合作在能源规划方面的重要性，因为这需要高水平的技术能力。在原子能机构的支持下，南非主办了几期核能管理短训班，以帮助非洲国家的专家建设有关核能寿期的知识和技能。

“与可信赖的伙伴携手合作，我们可以通过扩大科学技术带来的成熟解决方案的范围来应对气候和能源危机，”原子能机构总干事派驻联合国代表、原子能机构驻纽约联络处负责人Vivian Okeke说。

根据《2023年可持续发展目

标报告：特别版》，尽管全球获得清洁能源的情况有所改善，但仍有6.75亿人用不上电，23亿人无法获得安全的烹饪燃料。原子能机构通过其技术合作计划协助各国实现可持续发展目标。

原子能机构副总干事刘华在联合国教育、科学及文化组织关于基于科学的水资源评估的会外活动上发言时强调，“利用基于科学的评估，科学家可以向决策者提供管理、保护和保存水资源所需的信息；让每个人都能获得清洁的水将是可持续发展取得的突破。”

在全球范围内，有22亿人仍无法获得安全饮用水，35亿人缺乏卫生服务。气候变化和冲突加剧了一些地区的缺水问题。塔吉克斯坦常驻联合国代表Jonibek Hikmat大使介绍了塔吉克斯坦目前正在面临的因气候变化而加剧的水安全挑战。原子能机构向塔吉克斯坦提供了定制的技术合作支持，以评定咸海盆地的地下水资源，并刚刚开始了一个关于冰川的国家项目。

文/Melissa Evans

国际原子能机构
出版物



免费
在线



请在此处下载



www.iaea.org/books



欲订购图书，请致函：
sales.publications@iaea.org

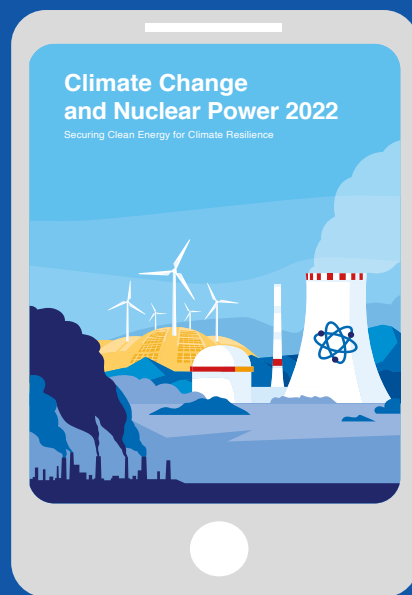
下载

《2022年气候变化与核能》
以及国际原子能机构关于净零排放创新解决
方案的其他出版物：

《小型模块堆部署技术路线图》
《核能-可再生能源混合能源系统》
《小型模块化快堆的优势和挑战》



www.iaea.org/bulletin/64-3



与我们合作

实现净零排放能源系统

ATOMS4 NETZERO

国际原子能机构欢迎成员国、业界、金融机构和其他利益相关方
与我们合作，并贡献其专业知识、建模工具、行业知识、
宣传和财政资源。

<https://www.iaea.org/zh/fu-wu/yuan-zi-cu-jin-jing-ling-pai-fang-atoms4netzero>



SCIENTIFIC FORUM

NUCLEAR ENERGY FOR CLIMATE

2023年9月26日至27日

了解更多



atoms.iaea.org/SciFoNetZero

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：

