

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4月 | www.iaea.org/bulletin

核退役



机器人、人工智能和三维模型：高科技突破如何助力核退役，第14页

“退役始于设计”：设计先进反应堆时如何考虑处置，第16页

循环经济如何改变核退役，第18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幫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

编辑： Estelle Marais

执行编辑： Emma Midgley

设计制作： Ritu Kenn

信息图表： Adriana Vargas Terrones

《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：

(图/国际原子能机构)

请关注我们



应对退役的挑战

文/国际原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西

随着越来越多的国家采纳核电来改善能源安全和缓解气候变化，成功实施核设施退役的挑战也将越来越大。应对这一挑战的关键因素就是提前谋划。

目前，全球有56座反应堆在建，许多国家在实施扩大核电机组或建设首个核电项目的计划。

在涉及核反应堆寿期结束时，目前的深谋远虑和创新起着关键作用。新核电站，包括采用小型模块堆的核电站，在设计时都考虑了退役问题。换言之，设计人员甚至在建造开始之前就在计划如何拆除他们的核反应堆。

原子能机构在促进采用新兴核技术以及时机成熟时加强统一监管条例以实现安全高效的退役方面具有独特的全球作用。

目前世界所依赖的423座核动力堆中，几乎有一半预计将在2050年前进入退役进程。每座反应堆都可能需要长达20年或更长时间才能完全退役。

原子能机构通过讲习班、论坛、工作组访问和出版物推广安全标准和良好国际实践，协助各国确保在适当的技术和监管框架内开展退役工作。

退役反映了对循环工业和核循环的责任与承诺。越来越多的物质得到回收利用，同时节省了成本，缩短了

时间框架。与此同时，数据科学、人工智能、机器人和无人机等新技术也在为退役活动带来更大的有效性和安全性。

原子能机构确保成功退役项目的经验教训和创新得到分享，包括通过我们的国际退役网进行分享。它还发挥着确保安全的重要作用，即使在具有挑战性的情况下也是如此。2011年福岛第一核电站事故需要创新，例如，使用宇宙射线 μ 子成像来帮助定位破损燃料、建设地下冻土墙来阻止地下水渗入反应堆厂房内的污染水中，以及使用机器人在受限区域工作。这些创新有助于提高效力和效率，同时最大限度地减少对工作人员、公众和周围环境的危险。

安全至关重要，但这不是唯一的考虑因素。保障是退役过程的关键。在乏燃料被转移或处置时，原子能机构视察员随时待命，以核实核电厂使用的材料没有被从和平用途中转用。

原子能机构支持的国际合作和知识共享对于满足全球日益增长的核退役需求至关重要。重要的是要正确处理好核燃料循环后端，以便核能能够在应对世界最紧迫的挑战方面，从缓解气候变化和空气污染到提供能源安全以及抗击癌症和心脏病所需的核医学，发挥充分和可持续的作用。



“原子能机构确保成功退役项目的经验教训和创新得到分享，包括通过我们的国际退役网进行分享。它还发挥着确保安全的重要作用，即使在具有挑战性的情况下也是如此。”

—国际原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西



(图/国际原子能机构)



1 应对退役的挑战



4 核退役
正视过去，确保未来



8 图表：核电厂退役



10 斯洛伐克为核电厂退役树立全球样板



12 下一代工具使经历严重事故的核反应堆退役更快、更有效



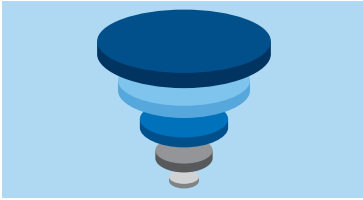
14 机器人、人工智能和三维模型：
高科技突破如何助力核退役



16 “退役始于设计”
设计先进反应堆时如何考虑处置



18 循环经济如何改变核退役



20 图表：退役放射性废物的管理



24 核退役市场将蓬勃发展



26 退役期间实施核保障



28 提前60年做准备：
阿联酋首个核电厂与未来退役计划



30 鼓励下一代追求退役事业

问答

32 专家对法国乏燃料后处理设施退役的见解

世界观点

34 核电厂退役的新商业模式

国际原子能机构最新动态

36 新闻

40 出版物

核退役

正视过去，确保未来

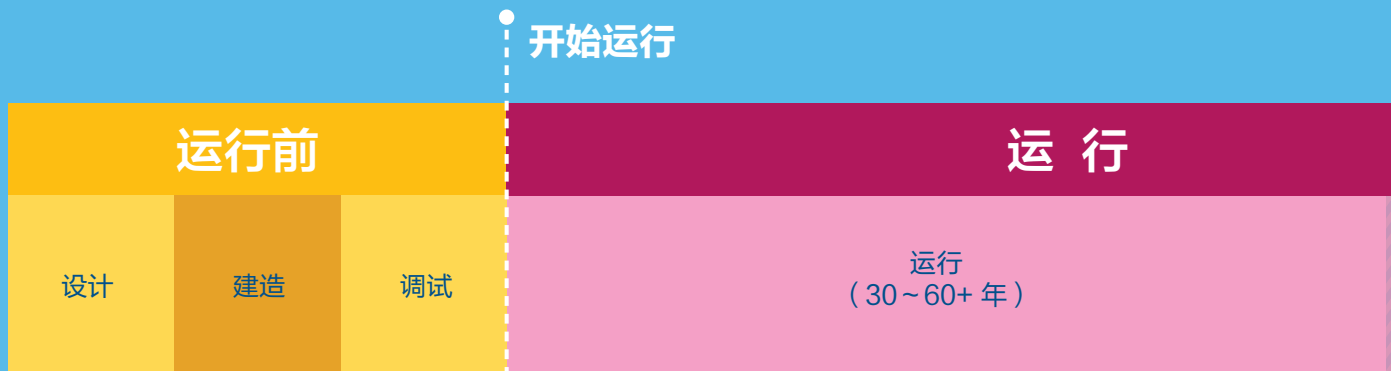
文/ Patrick O'Sullivan

预计在未来10至20年内，需要退役的核设施数量将大幅增加。设施的使用年限和永久关闭的时间之间不是简单的关系，因为包括政治和经济力量在内的多种因素都会影响这一决定。除其他因素外，时间也可能取决于维护、修缮费用和电力市场状况（见第8页和第9页）。然而，政府的政策越来越多地推动根据可持续性原则立即拆除的战略，从而不将废物管理等退役相关负担留给后代。场址是否有可能被重新用于建造新的核设施

或其他目的也是重要的考虑因素。

时间跨度和预算

大型核设施退役是一项复杂的工作，通常需要很长的时间跨度和大量的预算。例如，核动力堆的退役费用，包括相关废物管理费用，通常在5亿至20亿美元之间，而气冷石墨慢化反应堆由于尺寸更大和更加复杂，退役费用远高于压水堆或沸水堆的费用。退役过程通常需要15至20年左右，尽管这会有所不同。大型燃料循



环设施（例如用于乏燃料后处理的设施）的退役费用通常在40亿美元左右，同时这类设施的退役可能需要30多年才能完成。一座热功率输出为10兆瓦的研究堆的退役费用可能超过2000万美元，需要5至10年完成退役，尽管费用取决于反应堆的规模、用途和运行历史。然而，一些成功的例子表明，有可能实现更省时、花费更少的退役过程。

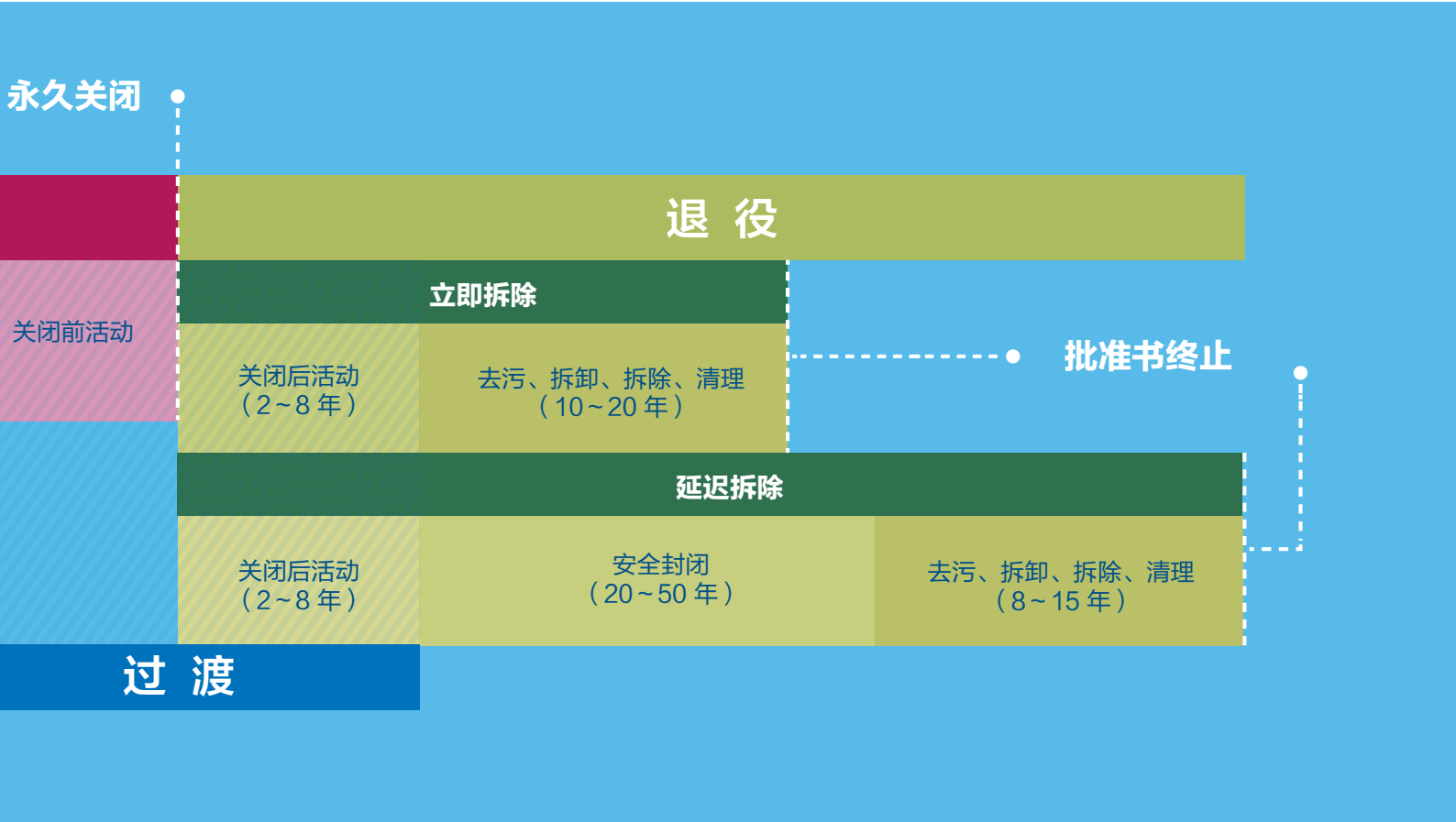
退役行业面临的最大挑战

从现在到2050年，核设施将永久关闭的数量预计会增加，这意味着需要大量的人力和财力资源来实施必要的退役计划，其中一些退役计划将持续到本世纪末。对于商业设施，

通常在运行期间预留资金来支付退役费用。然而，大量设施的退役通过国家资源直接或间接提供资金。在这些情况下，能否获得足够的资金可能会推迟退役实施。实施未来的退役计划还需要大量高技能的人才队伍。鼓励年轻人投身退役和放射性废物管理事业，是该行业目前面临的最重大挑战之一（见第30页）。

废物的再循环和再利用

退役会产生大量物质和废物，其中大部分没有受到放射性污染。目前正在努力确保根据循环经济原则再循环或再利用包括金属、混凝土碎片和土壤在内的大部分未受污染的废物（见第28页）。在一些情况下，拆



除过程中产生的瓦砾可以用来填充因拆除地面以下结构而产生的空间。目前也在考虑更多地利用金属回收，包括在核工业中回用。

大部分被放射性污染的物质——通常占退役产生的物质总量的约5%——含有极低水平的放射性，适合在近地表处置库中处置。一小部分放射性污染物质（不到所产生物质总量的5%）由于放射性水平高或存在高活度或长寿命的放射性核素，不适合将解除监管控制或进行近地表处置；这些物质最终将在地下处置设施中安全处置（见第20、21、22和23页）。

满足未来需求

鉴于未来退役需求程度以及新技术和新兴技术提高退役效率的潜力，一旦此类技术广泛采用并且其成本效

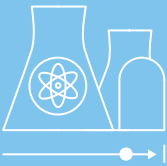
益得到证明，在不久的未来，项目实施可能会发生重大变化。一些发展包括：应用数字技术支持规划和优化项目实施；更多地使用远程操作工具，包括使用无人机和机器人分割核电厂部件、处理材料、测量和去污；提高废物管理活动的自动化；以及使用人工智能（见第12页）。

供应链的作用在确保未来项目尽可能有效和高效地实施方面至关重要。已有证据表明，供应链组织正在新技术研发、工程、拆除和放射性废物管理等领域发展专门知识，以提供更广泛的退役服务。针对核电厂退役的一个最新发展情况是出现了退役联合体，该联合体将各种专业化公司联合起来，通过遵循标准化方案和承担所有相关项目风险，在固定预算内实施整个退役项目，（见第24页）。

什么是核退役？

在核能行业，“退役”是对实现核设施永久关闭、去污、拆除和解除监管控制的所有活动的总称。直到放射性物质和其他有害物质从场址清除、以前用作核设施的建筑物和土地已准备好用于新用途，退役才算完成。（退役过程）最后一步涉及广泛的调查，以证实场址不存在任何重大的放射性，使其能够解除监管控制。

全球设施退役数量



420⁺座
全球在运核动力堆

全球目前约有420座核动力堆在运行，其中大部分即将完成初始设计运行寿期。



1/2
在2050年前关闭

到2050年，多达一半的现有在运核电机组可能永久关闭，因此需要退役。



≈200座
不再运行

超过200座核动力堆已经不再运行，其中21座已经完全退役。

222座

研究堆，
位于53个国家

353座

燃料循环设施，
位于40个国家

可能永久关闭

目前在运的大量研究堆（222座，位于53个国家）和燃料循环设施（353座，位于40个国家）也可能在这个时期永久关闭。

≈450座 **+150**座

研究堆

和

燃料循环
设施

已完全退役

约有450座研究堆已完全退役，还有150多座燃料循环设施也已完全退役。

自本世纪初以来，特别是在20世纪中叶建立核计划的国家，如法国、德国、意大利、日本、俄罗斯联邦、英国和美国，已获得大量的退役经验。包括保加利亚、加拿大、立陶宛、斯洛伐克、西班牙和乌克兰在内的其他国家也拥有这方面专门知识，而比利时、中国、印度、韩国、巴基斯坦和瑞典预计在未来30年内开展重大计划。

核电厂退役

文/Joanne Liou

退 役是核电厂寿期的最后阶段。退役规划始于核电厂设计阶段，以确保拆除和相关废物管理能够安全有效地实施，而不会对环境产生负面影响。一旦核电厂永久关闭，它要从一个涉及发电运行过程的设施转变为一个其活动与退役准备和实施有关的设施，包括对组织和核电厂安全系统的改变。当推迟拆

1

准备

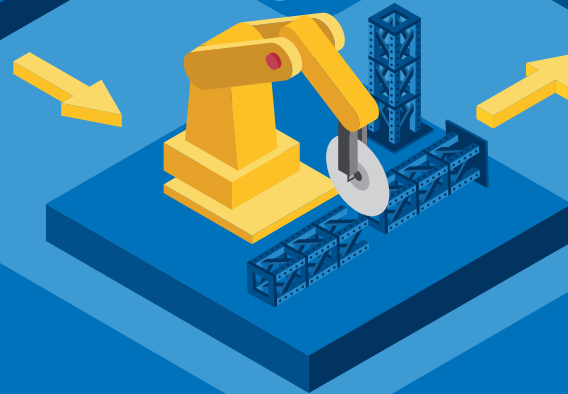
退役成功的关键是从设计阶段就**仔细规划和考虑项目的所有方面**，包括资金、组织转型和监管审批。



3

去污和拆卸

对放射性部件去污，通过切割缩小尺寸，并放置废物包中，或从设施中移除作进一步处理。



2

关闭后

将燃料从堆芯中移除，并转移到乏燃料贮存设施。**调整设施的安全和废物管理系统**。确定设施的退役相关特征和预计遇到的辐射水平。

除时，要将设施置于稳定状态，直到开始拆除，同时放射性水平自然衰减。从核电厂永久关闭到完成退役所需的时间因国家而异，可能从大约十年到70年或更长时间不等。

退役后，场址可用于其他社会或经济目的。退役过程包括以下主要活动：

5

清理和准备再利用

通过清除任何受污染的土壤或其他物质进行处置，**使场址做好最终再利用准备**。填充构筑物拆除后留下的地面孔洞。



4

拆除

尽可能地将所有建筑物、构筑物和非放射性部件分解成碎片，并进行整理和回收利用。**将放射性废物单独处理并送去贮存或处置。**

6

最终调查和解除监管控制

对场址详细调查，从而向监管机构提供保证，即**已经达到商定的清理水平**，场址可以解除监管控制，并重新用于其他目的。

斯洛伐克为核电厂退役树立全球样板

文/Michael Amdi Madsen

斯洛伐克于2004年加入欧盟时，有一个与核安全有关的重要条件：该国需要关闭博胡尼斯V1核电厂机组并使其退役。这些是苏联时期的反应堆，被认为不再符合当时的相关核安全标准。斯洛伐克政府承诺使这些反应堆退役，并在此过程中为其他国家树立了安全、高效和有效实施核电厂退役的样板。在原子能机构和欧盟委员会的支持下，斯洛伐克目前正在分享它所汲取的经验教训，以使其他国家受益。

斯洛伐克一半以上的电力来自核能。博胡尼斯核电厂的四座反应堆在这方面发挥了重要作用。博胡尼斯V1核电厂第一台机组于1978年开始运行，是该场址第一座采用水冷、水慢化动力堆（WWER）440 V230型设计的压水堆。它是苏联开发的最早版本“水-水高能反应堆”之一。然而，安全壳厂房设计存在挑战，因为与后来采用改进型设计建造的厂房相比，它面临更大的

大型管道破裂风险。

随着博胡尼斯V1核电厂退役项目的进展，原子能机构核燃料循环和废物技术司司长Olena Mykolaichuk与斯洛伐克国有核和退役公司（JAVYS）的专家开展了密切合作。“在整个退役过程中，核和退役公司转向了创新数字工具，以确保这一过程安全高效。这些工具现正被世界各地的退役项目所采用，” Mykolaichuk说。

核和退役公司使用的工具包括虚拟建模和仿真。工程师们利用仿真技术，开发程序用来提取嵌在混凝土反应堆竖井中的反应堆容器，然后将其移出并下放到水池中，在水池中可以用锯安全地将其切割成段，然后打包，进行安全贮存。

核和退役公司项目经理Eva Hrasnova说，该项目表明，水下使用的带锯和圆锯等机械切割工具是分割WWER-440型反应堆一回路放射性部件的安全和高效方法。她还表示，经

“在整个退役过程中，核和退役公司转向了创新数字工具，以确保这一过程安全高效。这些工具现正被世界各地的退役项目所采用。”

—国际原子能机构核燃料循环和废物技术司司长Olena Mykolaichuk



验表明，综合使用化学、电化学和超声波等退役方法以及爆破和研磨等机械方法，证明对后续有效的废物管理至关重要。

“博胡尼斯V1核电厂退役为退役者提供了许多实用的见解。” Mykolaichuk说，“从确定如何通过重新利用建筑物进行贮存来节省空间和资金，到回收大量钢材、金属和混凝土，以支持循环经济原则。”

博胡尼斯V1核电厂退役工作正在进行，预计将持续到2027年。在欧盟和欧洲复兴开发银行的财政支持下，该项目最终费用预计将达到12.39亿欧元。

为了肯定核和退役公司在博胡尼斯V1核电厂退役方面取得的成就，并为了进一步加强世界各地类似项目的实施，该公司于2021年3月被指定为原子能机构协作中心。因此，作为核设施退役和放射性废物管理协作中心，核和退役公司能够与原子能机构协调，与其他国家分享经验。

“我们能够在博胡尼斯有效地展示物理和放射性表征、去污、拆卸、拆除和相关废物管理方面的技术进步和安全。”核和退役公司首席执行官

Pavol Štuller在奥地利维也纳举行的协作中心签字仪式上说，“我们与原子能机构的合作集中于已实施和计划开展的工作，并将随着协作中心在未来几年的发展而得到进一步加强。”

原子能机构和核和退役公司之间的伙伴关系已取得成果，原子能机构于2022年5月在斯洛伐克特纳瓦举办了“水冷、水慢化动力堆退役项目实施经验教训”国际讲习班。在讲习班上，核和退役公司专家与来自亚美尼亚、比利时、保加利亚、中国、捷克共和国、芬兰、匈牙利、意大利、挪威、土耳其和乌兹别克斯坦的专家以及欧洲复兴开发银行和欧盟委员会的代表分享了该公司的退役见解。

“其中一些国家目前正在运行WWER型反应堆，并计划使其退役，而另一些国家正在启动核电计划或建设核设施，并已经在考虑其长期退役要求。” Mykolaichuk说，“我们看到出现了更加负责任和更具前瞻性的核活动，这些活动从一开始就考虑到退役及其挑战。核和退役公司在博胡尼斯V1核电厂工作所带来的经验教训将加强这些活动。”

2011年10月11日至14日，来自格鲁吉亚、希腊、匈牙利、立陶宛、俄罗斯、斯洛文尼亚和乌克兰的专家参加了对斯洛伐克特纳瓦和博胡尼斯核电厂的团体科学访问。

(图/国际原子能机构 D. Calma)



下一代工具使经历严重事故的核反应堆退役更快、更有效

文/Nayana Jayarajan

在日本发生有记录以来最强烈地震的几天里，福岛第一核电站1至4号机组显然将永久关闭。2011年3月11日，地震引发的巨大海啸波冲破了日本的沿岸防线，包括核电站周边地区，造成了大范围破坏。洪水摧毁应急发电机，导致三台机组的核燃料过热，堆芯部分熔化。核电站还经历了几次氢气爆炸，爆炸破坏了厂房，并导致放射性物质释放。超过15万人被迫从福岛县撤离，当局设立了一个禁区。然而，即使海啸后的直接危机已基本解决，但这座严重受损设施退役所带来的挑战才刚刚开始。

经历严重事故的核设施的退役是一项复杂工作，与计划关闭后的退役相比，往往需要采用特定方案、技术和做法。这使得在进行所有作业的同时保证辐射安全成为一项重大挑战。例如，在受损反应堆退役过程中，最棘手的工作之一就是清除乏燃料和破损燃料。

在福岛第一核电站事故中，一些核燃料熔化并掉落到1号、2号和3号反应堆机组安全壳底部。安全壳厂房内辐射水平较高，限制了工作人员进入反应堆附近区域。营运者面临一个重大挑战：他们如何在不知晓破损燃料确切位置的情况下清除这些燃料？

宇宙射线 μ 子成像由此登场。这项技术60多年前首次采用，此后一直用于从火山和古埃及金字塔内部情况成像到货运集装箱中核材料检测等各种应用。 μ 子跟踪装置在天然存在的

高能亚原子粒子穿过材料时对其检测和跟踪，然后利用轨迹变化确定材料密度。铀和钚等核材料的密度非常大，因此，利用这种技术相对容易识别。

宇宙射线 μ 子成像在福岛第一核电站用于估计反应堆堆芯中燃料碎片的位置和状况。2015年，日本专家开发了一种改进技术，可以追踪小到30厘米的碎片。这项技术曾用于确定福岛第一核电站1号机组反应堆中破损燃料状况，这是退役的一个重要先决条件。

在利用技术创新应对事故后退役和恢复工作中的独特且未预见的挑战方面，这个例子只是众多例子中的一个。

“事故的后果往往不可预测，现有的组织和技术基础设施以及可用技术也许不适于或不足以满足事故后的需要。通常情况下，受损核设施退役时，会在个案的基础上制定技术方案和开发相关设备，”曾共同领导过一个旨在记录和分析受损核设施退役和治理项目即“管理受损核设施退役和治理国际项目”的原子能机构退役专家Vladimir Michal说，“在许多情况下，像宇宙射线 μ 子成像一样，这些技术在退役甚至其他行业中都有着更广泛的应用。”

另一个值得注意的例子是，2016年至2019年期间，在乌克兰切尔诺贝利核电站4号机组反应堆厂房上方建造了一个新的安全封隔“罩”。建造的目的是为了取代1986年灾难后修建的

“为帮助尽量减少场址工作人员受到的辐射照射，并系统地推进福岛第一核电站的退役工作，携带辐射测量/可视化工具的遥控机器人成为研究和发展的一个优先领域。”

—日本原子力开发机构执行主任Kentaro Funaki

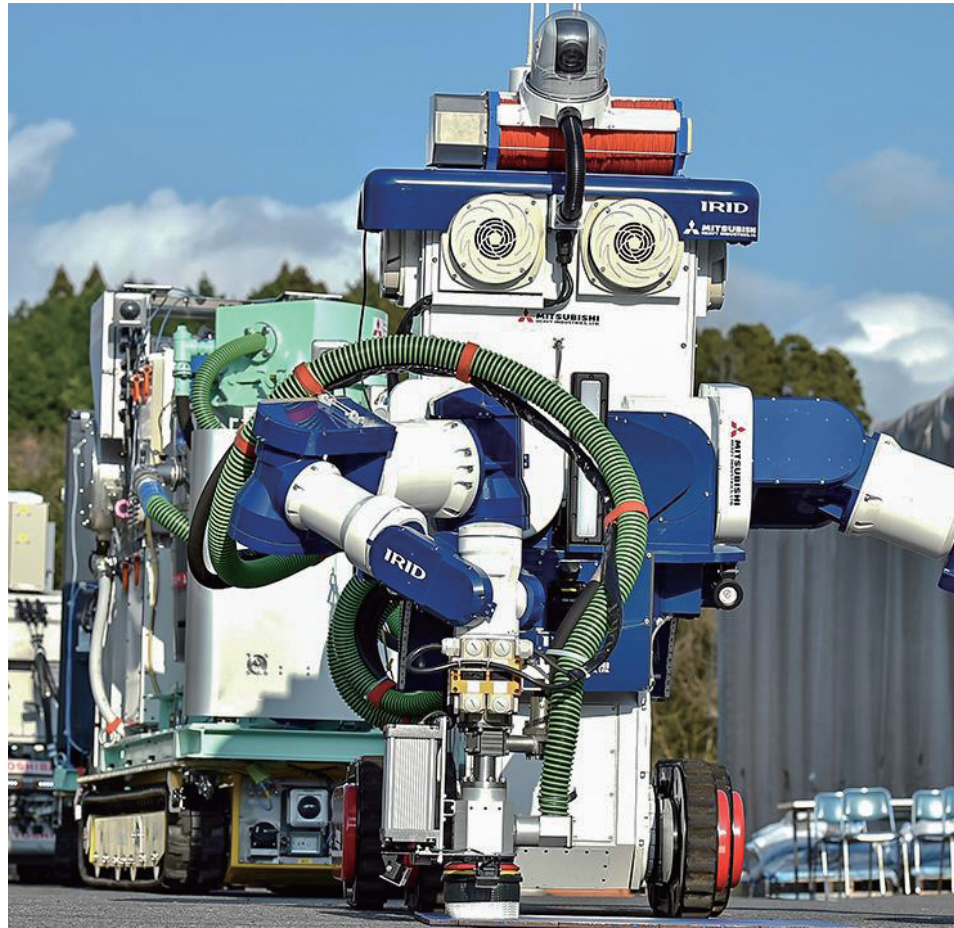
临时掩蔽设施，这是世界上最大的陆基可移动结构，设计寿命为一百年，能够抵御严重的龙卷风。新的封隔结构建在受损4号机组以西约180米的地方。建造和随后的定位均使用了最先进的土木工程技术。

国家专业化企业切尔诺贝利核电站公司代理总经理Valeriy Seyda表示：“新安全封隔设施不仅能防止放射性物质释放，还有助于未来的退役工作。”安全封隔结构旨在防止放射性污染物释放，保护反应堆的内部结构，并为退役提供便利。为了后一个目的，封隔结构包括两台最先进的遥控起重机。它们悬挂在屋顶下方，设计用于4号机组最终退役，同时保护工作人员和环境。

在福岛第一核电站，建造地下冻土墙这种成熟的工程技术被用来防止地下水流入现场并与反应堆厂房内已经被污染的水混合。1500米长的冻土墙通过冻结土壤而建，这样它就不会被地下水渗透，从而减少需要处理的污染水总量。

先进的远程操作和机器人技术现在能够使退役工作在高辐射水平地区进行。例如，在福岛第一核电站，机器人被用于监测和测量、开展调查、去污以及为清除燃料碎片做准备。

日本原子力开发机构执行主任Kentaro Funaki表示：“为帮助尽量减少场址工作人员受到的辐射照射，并系统地推进福岛第一核电站的退役工作，携带辐射测量/可视化工具的遥控机器人成为研究和发展中的一个优先领域。”Funaki强调国际联合项目是政府资助的一系列研究和发展项目的一个关键领域。他说，“正在进行广泛努力，以便在福岛第一核电站1号和



2号机组附近实现放射性热点的三维可视化。通过整合国家和国际联合研究项目的成果，我们已经取得了巨大成功，未来还将继续开展这方面的工作。”

特别是由于辐射的存在以及设备运行的精准条件方面的不确定性，在核环境中使用非核技术带来了诸多挑战，包括巨大的开发成本。然而，布线和其他关键部件方面的进步，以及抗辐射设备的开发，使得有可能在这些具有挑战性的环境中安全、有效地应用机器人技术。此外，激光技术使得能够对此类人类通常无法进入的环境的内部进行扫描，同时保护工作人员的健康和安全。Michal表示：“这些进步极大地提高了安全、有效地拆除遭受严重核事故的设施的可能性，即使在极具挑战性的情况下亦是如此。”

福岛第一核电站部署去污机器人支持退役活动。

（图/日本国际核退役研究所）

机器人、人工智能和三维模型： 高科技突破如何助力核退役

文/Jeffrey Donovan

随着越来越多的国家选择立即拆除退役的核设施，机器人、无人机、人工智能和其他新兴数字技术将在该领域发挥越来越关键的作用，这些技术已在帮助推进全球核退役项目。

为了有助于高效完成这项工作并降低风险，包括金融风险 and 放射性风险，各国正在转向虚拟现实和三维仿真等高科技工具，随着一些老化的核电厂和其他核设施逐步退役，这一趋势在未来几年似乎将加强。

“无论是在日本福岛第一核电站等事故现场工作的抗辐射机器人，还是用于更好地规划退役电厂拆除的三维建模，核退役部门都越来越发现自身处于技术创新的前沿。”“这些技术可为规划和实施项目提供极其重要的见解，特别是在可能对人有风险的情况下，从而有助于确保这些工作安全有效地进行。”

从欧洲到亚洲和美洲，利用前沿技术克服独特挑战和推进退役项目的例子比比皆是。挪威能源技术研究所便是处于这一趋势前沿的组织，它于2019年成为原子能机构协作中心，专注于支持原子能机构的活动和成员国核退役知识管理的数字化。该研究所已率先使用虚拟现实系统支持核环境中的维护和退役。

“可利用这些技术进行工作人员培训，包括辐射可视化培训，使他们了解辐射状况。”能源技术研究所研究经理István Szóke说，“能源技术研究所专业技术的核心是将核资产的三维数

字模型与包括实时辐射物理模型在内的物理和人工智能模型结合起来。这意味着辐射可视化的背后是实际物理学，例如，辐射传输模型可计算待拆除设备周围环境中存在的辐射水平，可对其可视化，用于规划和培训目的。”这种做法目前在退役计划中越来越普遍，包括在动力堆和研究堆的退役以及燃料循环设施的拆除方面。

最近，能源技术研究所为旨在建立整个退役过程中使用的模块化综合信息管理系统的国际协作提供了支持。这包括建立一个基于三维扫描和计算机辅助设计的综合系统，或制作包含三维放射学和其他数据的建筑信息管理模型。这种模型或设计可管理所有信息，与放射物理模型和其他系统集成并将它们全部整合到一个系统中，以支持将放射性风险降到“合理可行尽量低”的原则。

意大利和斯洛伐克的退役项目也成功地使用了数字仿真和三维建模。意大利负责退役与放射性废物管理的国有核电管理公司（Sogin）利用三维模型和模拟帮助为反应堆拆除和废物管理做准备。斯洛伐克核和退役公司（JAVYS）在拆除该国博胡尼斯A1和V1核电厂动力堆部件时采用了三维模型和模拟。与能源技术研究所一样，核电管理公司以及核和退役公司作为原子能机构退役和放射性废物管理协作中心，与全球核能界分享知识和经验。

当前的一个相关趋势是使用机器

“该项目的目的是利用参与退役的各种组织的专门知识，充分发挥新技术和新兴技术的潜力。”

—国际原子能机构核燃料循环和废物技术司司长Olena Mykolaichuk

人技术增加。由于自动化远程操作机器人能够更好地进入难以触及的区域并进行工作，使工作人员能够远离用于操纵部件的工具工作，从而降低工作人员的风险，并提高效率。携带传感器和三维系统的移动机器人越来越多地被用来扫描设施和收集数据，这些数据可用于构建场地的三维模型。“行业目前非常紧迫的目标之一是研究如何使用人工智能将现在很容易制作的三维扫描转化为智能建筑信息管理模型。” zōke说，“与此相关的是设施‘数字孪生’开发，它不仅可以用来支持复杂系统的退役，而且可以搭建设施整个寿期的知识。”

2022年，原子能机构发起了一项旨在加强新技术和新兴技术在核设施退役中作用的全球倡议。该倡议是参与规划或实施退役和相关研究活动的组织之间的合作项目，旨在提供用于退役数据管理、规划、许可证审批和实施的新兴数字工具和技术的信息。

原子能机构核燃料循环和废物技术司司长Olena Mykolaichuk表示：“该项目的目的是利用参与退役的各种组织的专门知识，充分发挥新技术和新兴技术的潜力。”原子能机构将在2025年的一份报告中发布该项目成果，包括从几个国家获得的经验信息，以进一步支持世界各地成功实施项目退役。

“机器狗”：自走式机器人对切尔诺贝利4号机组周围进行辐射测绘。

（图/美国波士顿动力公司）



“退役始于设计”

设计先进反应堆时如何考虑处置

文/Joanne Liou

从一开始就为寿期终结进行规划，可能并不是特别有吸引力，也不是优先事项。然而，当涉及核设施寿期时，考虑寿期终结的价值正促使设计者、供应商和监管机构提前解决退役问题。这种称为“退役始于设计”的前瞻性方案借鉴最佳实践和以往经验教训，贯彻同样适用于核安全、核安保和核保障的“始于设计”概念。从一开始就考虑退役，设施开发商可以作出使退役更安全、更高效、更具成本效益的设计选择。

原子能机构退役技术专家Helena Mrazova表示：“通过在核设施的设计阶段考虑退役，可以优化设施的最后阶段——退役，这是在反应堆寿期中必须要处理的事项。”早期几代核电厂在设计时注重短期运行实绩，而将退役作为事后考虑。例如，20世纪70年代在法国建造的一些石墨气冷反应堆的设计没有涉及如何拆除，现在证明这项工作很难实施。

“我们的设施高度超过60米，直径30米，墙体是厚达5米以上的混凝土，堆芯中容纳了数吨的石墨。拆除这些反应堆极具挑战性，因为它们在设计中根本没有考虑退役。法国电力公司最近建造了一个石墨反应堆退役示范设施（也已成为原子能机构协作中心），在全尺寸实体模型和数字三维模型上测试、改进和优化创新工具和远程处理技术，以验证退役方案的可行性，并优化这些反应堆的退

役，” Mrazova说。

厚望与机会

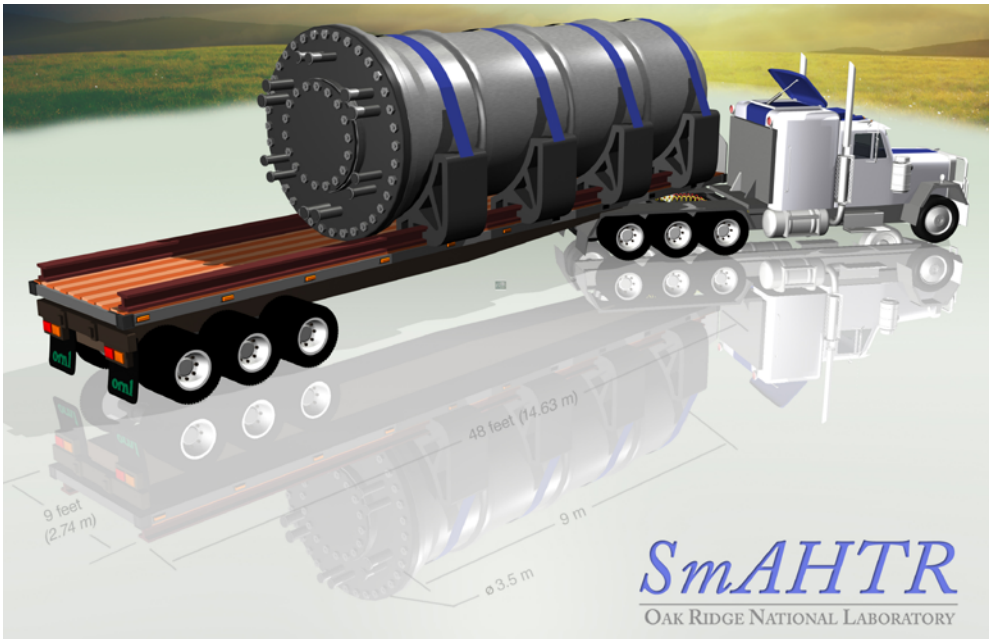
“退役始于设计”的目的是为了更好地规划退役活动的顺序，减少工作人员可能受到的辐射照射，以及减少放射性废物产生量，从而减轻废物设施和子孙后代的负担。加拿大海上和陆基移动式核电厂开发商即Prodigy清洁能源公司的监管事务总监Marcel Devos表示：“‘退役始于设计’不仅涉及物理设计特征，还包括如何规划和开展退役活动的业务架构。” Devos曾在加拿大核安全委员会管理“供应商设计审查”计划。他说：“确定筹资机制和明确退役责任对于成功完成报废过程至关重要。”

虽然“退役始于设计”还没有获得普遍采用，但加拿大已为实现这一前瞻性做法采取步骤。加拿大核安全委员会对反应堆供应商的审查包括在设计中纳入退役，其中吸取了原子能机构与经合组织核能机构记录的经验教训。“加拿大的未来业主和营运者越来越希望供应商完成‘供应商设计审查’过程，并制定明确的计划来解决发现的差距。行业正在认识到，报废考虑是许可证审批和环境评定过程中的一个优先事项。” Devos说。

人们越来越关注小型模块堆，这是一种功率有限的先进核反应堆，每座反应堆电功率通常高达300兆瓦。Devos说：“包括小型模块堆在内

“通过在核设施的设计阶段考虑退役，可以优化设施的最后阶段——退役，这是在反应堆寿期中必须要处理的事项。”

—国际原子能机构退役技术专家Helena Mrazova



许多小型模块堆设计较小，足以用卡车或船运集装箱运输。

(图/美国能源部橡树岭国家实验室)

的下一代核电厂的开发者有巨大的机会通过设计和部署过程解决与核设施寿期终止相关的社会问题，同时加快退役，并减少对子孙后代的废物负担。”

小型模块堆的退役

全球有80多个处于不同发展阶段的小型模块堆设计和概念。由于小型模块堆组合在规模、材料和技术上有所不同，这些先进反应堆的退役方案也会不同。Mrazova说：“退役过程将取决于设施的设计、可及性和紧凑性，以及国家乏燃料和放射性废物管理计划和实践。”

鉴于小型模块堆的模块化及其不同部署模式，可以重新定义传统退役实践。通常被称为微堆的一些较小的小型模块堆，设计成工厂组装，整体运至安装地点。在寿期结束时，模块将被送回原厂换料或运至退役设施。“这种方案可以减少成本和电厂所在地进行的活动范围，提高核和辐射安全，以及提高对小型模块堆部署

的接受度。” Mrazova说，“一些退役活动也有可能实现标准化，如回路设备的去污或拆除。”然而，这种方案也会留有一些任务有待解决，例如开发专用拆除工具和远程操作设备。

了解所用材料，如钢材类型，并了解对钢材生产商的要求标准，包括要求保持极低杂质含量以最大限度地减少活化，将对退役废物管理产生积极影响。通过在设计中纳入退役，事先仔细处理好材料成分，就可以限制杂质含量和对寿期结束时拆除工作的相关费用影响。

“包括小型模块堆在内的核设施退役的一般规则是采用‘退役友好型’设计，强调早期方案的重要性。” Mrazova说，“小型模块堆的突出特点，如模块化设计和材料选择，应使退役过程更高效、成本更低，并减少参与退役的全球工作人员的日剂量率。”

原子能机构正在编写一份专注于小型模块堆退役设计方面的出版物，预计将于2024年出版。

循环经济如何改变核退役

文/Artem Vlasov

传统的线性经济模式，即提取材料、将材料转为制成品以及在消费后丢弃，经常被批评制造了大量的废物和污染，并导致了气候变化和生物多样性丧失。根据联合国环境规划署国际资源小组的数据，自然资源的开采和加工造成了约一半的全球温室气体排放。

与这种模式不同，所谓的循环经济提供了一种减少浪费和相关污染的方式。它是一种旨在通过对资源减量化、再利用和再循环，尽可能长时间地有效保持资源使用的生产和消费模式。

核设施退役时，采用循环经济原则会带来许多好处。退役是一个多学科过程，通常持续十年或更长时间，涉及对核设施的去污、拆卸和拆除，从而使场址可以解除监管控制和再利用。在这个过程中，通过回收利用材料，会产生较少的废物。这样做还

会有利于降低退役成本和减少延迟风险。

“通过将循环经济的原则应用于退役，我们既可以减少需要处置的放射性和非放射性废物数量，还会减少从地下提取的原材料数量，”瑞典Cyclife公司放射性废物技术和退役经理Arne Larsson说，“相反，我们可以重新利用现有设施、建筑物和构筑物中的材料和设备，支持将场址重新用于其他有用的目的。”

全球有200多座核动力堆已关闭等待退役，而预计未来几十年内，将有数百座目前在运反应堆关闭和退役。当前核设施在铺设第一块砖前就制定了退役和废物管理计划。相比之下，20世纪60年代和70年代建造的核反应堆设计却没有考虑循环性原则。

然而，即使是老旧设施也可以通过利用循环性原则有效地退役：核

法国格勒诺布尔市曾是六个核设施的所在地。在成功退役后，该场址现在成为可再生能源领域的研发中心。

(图/Unsplash网站)



电厂高达90%的非放射性材料，如金属、混凝土、甚至工作服，都可以再利用或再循环。以乏燃料为主的仅3%的材料具有高放射性，即便如此，这些燃料中仍有95%以上可以经后处理，用于制造新的燃料和副产品。

“采用循环经济原则可以为最大限度地减少废物、提高效率和增强可持续性提供重要的推动力。”原子能机构退役和环境治理处代理处长Vladimir Michal说，“核设施退役产生大量可再循环和再用于其他目的的材料。”

从六个核设施到一个可再生能源中心

再循环在退役工作中已经很普遍。拆卸后，大型金属部件可以熔化，变成“新”金属，重新回归经济中。设备部件可以在其他在运核设施中再利用，诸如混凝土等拆除建筑物的材料可作为填充材料用于场址治理或房屋、道路等其他建筑项目。例如，位于悉尼的澳大利亚MOATA研究堆于2009年退役时，超过85%的材料得到再利用或再循环。

退役后留下的材料，如果无法去污和清理供再利用或再循环，则作为放射性废物在不同类型的处置库中处置，直到其不再对人或环境构成危害（见第22页）。

包括核电厂、研究堆及其他医

疗或工业设施在内的核场址重新调整用途的例子有很多。核电厂场址可以变为废物处理和贮存设施、或培训操作人员的研究中心。这些场址可以成为工业园区，建筑物通过重新调整用途，可以用于其他传统行业，吸引企业和创造新的就业机会，从而获得新的生命。

在法国格勒诺布尔市，包括三座研究堆、一个实验室和两个放射性废物贮存设施在内的六个核设施于2012年成功去污和拆除。该场址现用作绿色能源技术和可再生能源研发中心，专注于电动汽车、电池和氢能。

原子能机构为各国、组织和个人提供了在退役领域合作和分享知识和技术的空间。原子能机构的电子学习平台包含关于退役、环境治理、放射性废物和乏燃料管理的讲座。

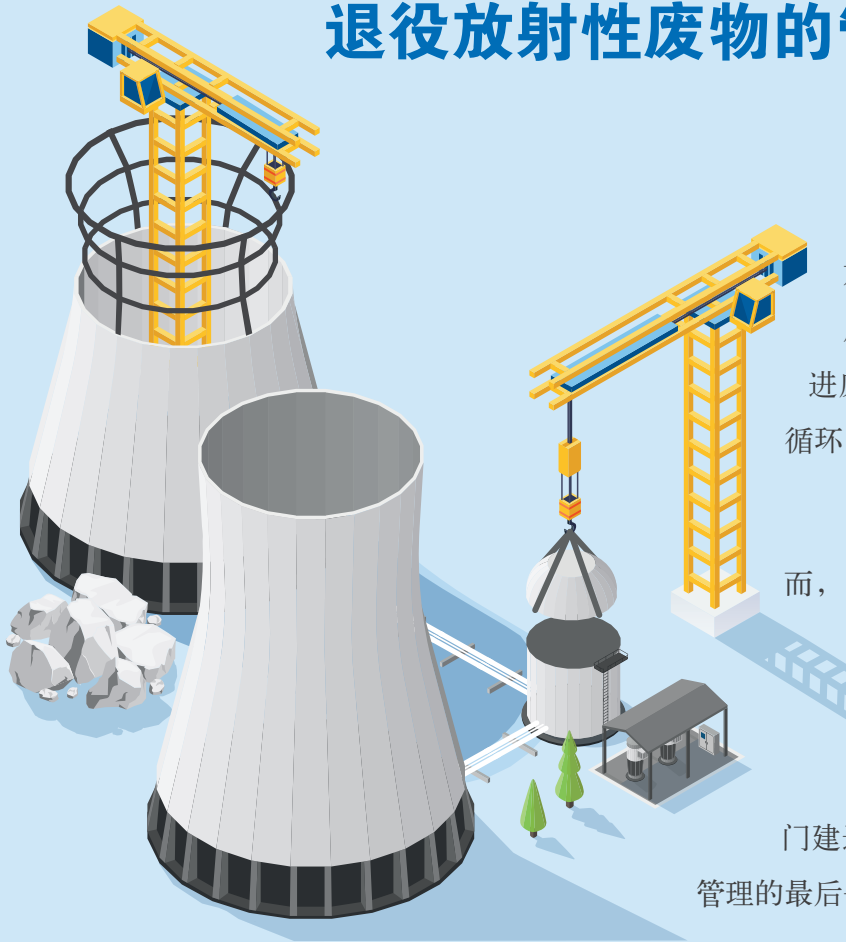
原子能机构的国际退役网成立于2007年，旨在为参与退役工作的专业人员能够合作和互动提供论坛。此外，原子能机构还支持成员国的能力建设，促进对退役计划及其他相关活动（如放射性废物和乏燃料管理）进行专家工作组访问、同行评审和咨询服务。

“循环经济为使行业适应可持续性和循环性、减少环境影响以及为子孙后代节约资源提供一个充满前景的方案。”Michal总结道。

“采用循环经济原则可以为最大限度地减少废物、提高效率和增强可持续性提供重要的推动力。”

—国际原子能机构退役和环境治理处代理处长
Vladimir Michal

退役放射性废物的管理



在退役期间，对放射性物质和被放射性污染的物品——从防护服到反应堆部件——进行表征和分类，以促进废物预防和废物最少化、再利用和再循环。

放射性物质和物品受到监管控制。然而，由于退役产生的大部分物质的放射性水平极低，因此被解除监管控制。

不适合再循环的放射性物质经分类和包装后临时贮存，然后在专门建造的设施中处置，处置是放射性废物管理的最后一步。

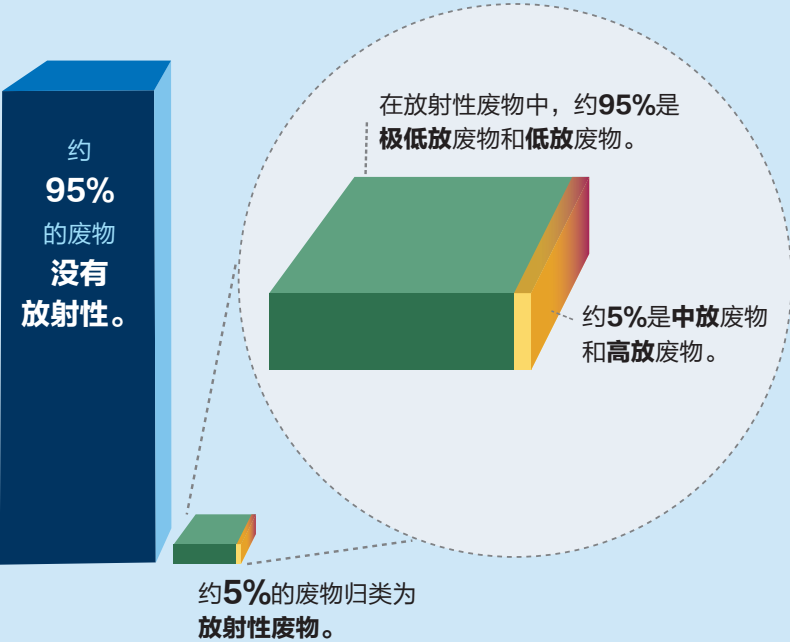
废物分级制度



一个优先事项是最大限度地减少放射性废物的产生。

废物分级制度是实施可持续退役和废物管理的一个关键因素，它确定了管理废物的优先次序。通过在核设施的设计阶段考虑退役问题，可以防止和最大限度地减少废物的产生。

退役产生的废物数量



退役产生的废物在数量和放射性方面差异很大。核电厂退役产生的物质中约5%的放射性水平意味着必须将该物质作为放射性废物进行管理（见下文说明）。



放射性废物的类别和类型

放射性废物的分类可能因国家而异。

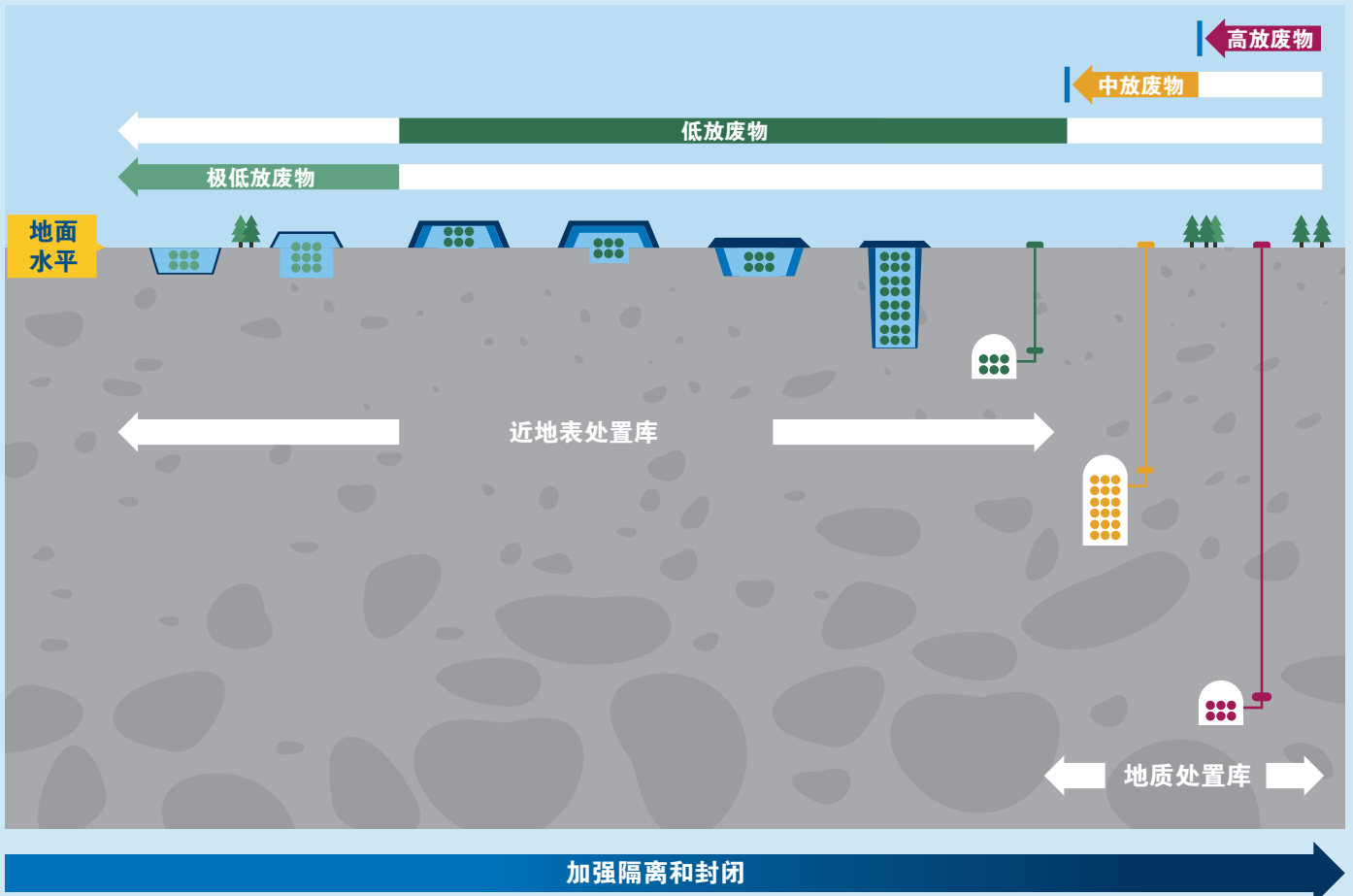
VLLW	LLW	ILW	HLW
极低放废物 混凝土、土壤、碎石等。 	低放废物 个人防护设备、擦拭物品、构件去污和拆除的辅助系统等。 	中放废物 反应堆回路部件、高度污染的金属等。 	高放废物 乏燃料、乏燃料包壳、后处理产生的玻璃固化废物等。 
适合在近地表填埋场处置。	适合在近地表设施中处置；需要几百年的隔离和封闭。	适合在地质处置库较深处处置；需要几千年的隔离和封闭。	适合在地表以下几百米处的深部地质层处置；需要几千年的隔离和封闭。

放射性废物处置设施基于多重屏障和安全功能提供隔离和封闭。

解除监管控制的物质的再利用和再循环



基于放射性废物类别的处置方案



如何安全管理放射性废物？



通过多层保护，公众和环境可以免受电离辐射使用所带来的危害和风险，包括来自放射性废物的危害和风险。



进入管理放射性废物的场址受到严格控制。



按照严格的程序，放射性废物管理安全是运营者的首要责任，并由独立的监管机构监督。



放射性废物由合格且经验丰富的人员进行管理。



废物管理设施和活动的监管批准基于安全论证文件和详细的安全评定。

放射性废物安全处置的研究、发展和示范已有几十年。



放射性废物安全管理如何促进联合国“可持续发展目标”？



- ▲ 放射性废物、环境释放、退役和治理的安全管理，有利于保护陆地生命和水下生命。
- ▲ 放射性废物、环境释放、退役和治理的安全管理，有助于物质、物品和场址的再循环和再利用。
- ▲ 核技术只有在整个寿命期内得到安全使用，包括放射性废物、环境释放和退役得到安全管理，才是可持续的。
- ▲ 核技术的可持续利用直接促进了九个“可持续发展目标”。

核退役市场将蓬勃发展

文/Joanne Burge 和 Emma Midgley

随着世界各地许多核电厂即将寿期结束，一个以核设施退役为基础的随新行业正在兴起。除了核电厂外，核燃料循环涉及的许多其他设施，例如研究中心、乏燃料后处理设施或废物处理设施，也需要在寿期结束后退役。总的来说，从现在到2050年，全球可能会花费数千亿美元用于退役，企业和投资者已经做好准备。

全球目前约有420座核动力堆在运行。预计到2050年，约有200座核反应堆将开始退役过程。除了反应堆退役工作（从开始到结束可能持续20年或更长时间的项目）外，新核设施的设计也需要退役专门知识。目前全球有50多座反应堆在建。在建造之前，每座反应堆都需要制定退役计划。因此，退役行业看起来有着强劲的长期前景。

核工程、建设、拆除和废物管理公司预计将成为退役行业的主要服务提供者。它们的作用将是对核设施去污和拆除，并在考虑可持续性和社会经济因素的情况下，修复场址，供未来安全使用。还必须根据循环经济原则，以考虑环境影响的方式拆除核设施并确保其安全，包括循环利用回收的金属、电线和电缆，以及将清洁混凝土与钢筋混凝土分开。与此同时，这项复杂的任务需要一支高技能的核工作人员队伍，并必须扩大这支队伍，以避免未来出现核技能短缺。

为了保留知识和推动行业发展，

原子能机构国际退役网为参与核设施退役和拆除的组织和个人提供了一个分享经验教训的论坛。原子能机构通过提供安全、法律和技术咨询，以及通过培训班和讲习班支持知识共享，协助各国规划和实施退役工作。它在促进广泛的国际合作以及开展技术审查以确定良好实践并确保汲取经验教训方面发挥着重要作用。

“该网络汇集了参与核设施退役和拆除工作的组织和个人，”原子能机构退役专家Tetiana Kilochytska说，“它有助于传播与退役过程有关的信息，例如分享最佳实践和创新，以加强世界各地退役行业的合作与协调。”

为助力他人而分享专门知识的一个组织是英国塞拉菲尔德场址负责机构。该场址拥有一系列核设施，例如核动力堆、燃料后处理设施和废物处理厂。塞拉菲尔德场址在20世纪50年代启用时，该场址上的卡尔德霍尔核电厂是世界上首个商用核电厂。在紧凑的占地面积上有大量老化的核设施，这意味着在现场工作的退役专业人员必须在退役期间制定创新和独特的解决方案，包括数字化和机器人技术。

“这是一项极为复杂的核退役挑战，”塞拉菲尔德有限公司Mike Guy说，“原因是在拥挤的场址上，比邻而立的设施数量众多、性质多样。我们必须应对各种各样的废物挑战，包括贮存在水池中的废物，以及从非常大而复杂的单元中清除废物。”

“[原子能机构国际退役网]有助于传播与退役过程有关的信息，例如分享最佳实践和创新，以加强世界各地退役行业的合作与协调。”

—国际原子能机构退役专家Tetiana Kilochytska

塞拉菲尔德场址退役工作始于20世纪80年代，预计本世纪继续进行，甚至持续更久。这种丰富的经验意味着塞拉菲尔德极具与国际退役界分享独特专门知识和经验的优势。它实施了新的流程，以简化和加快处理遗留场址的放射性废物，并分享了构筑物拆除知识，以帮助工程师设计更容易拆卸的设施。

此外，对与塞拉菲尔德有限公司合作的供应链投资，表明有可能给进军核工业的公司带来经济利益。2021年，英国核退役管理局（监督塞拉菲尔德场址退役的公共机构）将其40亿美元年度预算中约55%用于伙伴公司提供的服务。

加速退役

从几年来实施退役计划中获得的经验越来越多地被用于缩短退役项目的持续时间。由于劳动力成本占项目成本的很大比例，因此减少用于各种项目的年限可以大幅削减预算。最近在美国启动的商业动力堆退役项目旨

在将主要拆除阶段（不包括与许可证终止有关的活动）的持续时间缩短至5到7年，约为当前全球该阶段活动平均持续时间的一半。

通过优化主要项目活动与拆除和废物管理之间的互动，有可能缩短完成项目所需的时间跨度。良好的项目管理以及设施所有者与供应链之间良好关系至关重要。诸如塞拉菲尔德项目等重大项目，通常旨在以期限长达十年的合同为基础制定与供应链的长期合作方案。

尽早获得退役批准也有助于缩短实现设施解除监管控制所需的时间期限。德国最近的计划旨在与几乎永久关闭设施的同时获得退役批准。这种方案要求在永久关闭设施之前进行详细的规划活动和相关安全评定。

退役项目会产生极其大量需要有效管理的物质。有机会回收或再利用大量这种物质，并能够快速处理必须作为废物管理的物质，也是降低总体成本的关键，更是未来加速退役的一个重要促进因素。

英国塞拉菲尔德场址的退役工作预计将持续数十年。

（图/塞拉菲尔德有限公司）



退役期间实施核保障

文/Jennifer Wagman

原子能机构通过称为保障的一系列技术措施来帮助阻止核武器的扩散，这些措施的作用是核实各国正在履行不滥用核材料和核技术的国际法律义务。这些义务延伸到退役项目。截至2023年3月，共有200多个核设施已永久停止运行，原因要么是它们已达到自然寿期，要么是国家的政策决定。在整个退役过程中，甚至有时在退役之后，各国仍然有履行保障协定的法律义务。

由于退役是一个多变和漫长的过程，原子能机构制定了导则，以确保在设施出于保障目的已被确定为退役之前继续适用保障。

原子能机构的这些导则要求实现两个主要保障目标：第一个是核实所有核材料已从该设施转移到已知场所；第二个是确保所有必要设备要么已从设施中移除，要么已在设施中无法使用。

鼓励各国在退役期间与原子能机构合作，定期提交相关活动计划，并更新设计资料，以反映设施内的变化。随着核材料和必要设备的转移，原子能机构不断重新评定在设施实施的保障和活动，并在与有关国家协商后进行必要的修订。与各国就这一过程的细节进行早期接触，称为“保障始于设计”。

原子能机构保障部高级技术顾问Jeremy Whitlock说：“‘保障始于设计’是一个及时和具有成本效益的合作过程，在这个过程中，我们确保所有利益相关方提前充分了解保障义务。” Whitlock与行业、监管机构和其他利益相关方合作，以便在新建或改造的核设施（包括正在退役的核设施）的设计阶段纳入保障。“为协助各国进行核设施退役，我们制定了概述保障要求和活动的导则。这些导则有助于各国和设施运营者了解必要的步骤，以及如何与原子能机构合作，确保退役如期取得进展。”

作为核反应堆退役的一部分，在将乏燃料转移到另一个设施进行贮存或长期处置的“活动”期间，应遵守原子能机构保障。对于此类活动，通常安装额外的保障监视和（或）监控设备，并定期审查记录的数据。

“原子能机构通过核查核材料运往贮存场所的情况，随时保持对该材料了解的连续性。这有助于提供可信的保证，即核材料没有被从和平用途中转用，”原子能机构核保障视察员Lai San Chew说。Chew负责核实乏燃料项目、观察转移情况以及在乏燃料转移期间审查更新的设计资料，为最终退役做准备。

一旦完成所有核材料转移，设施运营者将开始拆除必要设备。最后，

营运者拆除最重要的基本设备，即反应堆堆芯，将其在废物处理设施中处置。然后，国家将最后更新的设施设计资料发送给原子能机构，以便正式通知原子能机构设施已退役。

在确保核材料在贮存或长期处置设施中得到适当保障后，原子能机构核实正在退役的原设施中没有核材料，并确认所有必要设备已拆除或无

法使用。一旦确定某一设施出于保障目的已退役，原子能机构便停止对该设施的例行视察和设计核查活动。

原子能机构保障分析员Kerrin Swan表示：“通过与国家和设施营运者合作，确保充分了解受保障设施退役的特殊需要，我们帮助实现安全可靠的过渡到关闭运行，以满足该国的所有国际义务。”

在荷兰阿尔梅洛的铀浓缩公司（URENCO）进行保障视察。

（图/国际原子能机构D. Calma）



提前60年做准备： 阿联酋首个核电厂与未来退役计划

文/Artem Vlasov

自半个多世纪前发现石油和天然气储备以来，阿拉伯联合酋长国（阿联酋）经历了一场引人注目的经济转型。在短短几十年内，该国已从一个小型渔业和珍珠贸易经济体转变为全球旅游、贸易、商业和金融中心。为了在减少碳排放的同时保持这种经济发展，阿联酋正在实现能源结构多样化，包括引入核能。

巴拉卡核电厂是阿联酋和阿拉伯世界的首个核电厂，于2020年开始运行。目前有三座反应堆在运行，还有一座即将建成。当核电厂在未来几年全部投入运行后，预计将为阿联酋提供高达25%的电力，能够满足50万户阿联酋家庭用电需求。然而，与任何其他核电厂一样，它将在60至80年的使用寿命结束时进行拆卸。如今，每个启动核计划的国家在设计核设施时，都需要制定核设施退役的初步计划，以便场址能够得到重新利用。

“退役是一个多学科的过程。退役规划，包括建立必要的资金，应在核设施发展的早期阶段就开始，并在运行阶段继续进行。“退役的详细规划通常在设施永久关闭前几年开始；这包括确保组织和技术准备的活动，从而实现从运行到退役的平稳过渡。”原子能机构退役专家Tetiana Kilochytska说，“成功启动首个核电厂的阿联酋已制定核电厂寿期结束时的初步退役计划。”

精心规划的能力

作为向阿联酋核管理局即联邦核监管局申请运行许可证的一部分，巴拉卡核电厂运营者纳瓦能源公司提交了初步退役计划。该计划设想退役将由纳瓦公司负责，并将在最后一座反应堆永久关闭五年后开始。据负责阿联酋核电计划的阿联酋核能公司称，四台机组每台机组的退役过程预计将

“成功启动首个核电厂的阿联酋已制定核电厂寿期结束时的初步退役计划。”

—国际原子能机构退役专家
Tetiana Kilochytska



持续13年左右。

退役方面的一个经常性挑战是相关活动的总费用存在不确定性，包括退役产生的放射性废物和乏核燃料的长期管理费用的不确定性。例如，建设一个用于处置长寿命放射性废物和乏燃料的地质处置库的费用可能高达数十亿美元。

阿联酋已做好应对这一挑战的准备，并已采取步骤建立“退役信托基金”。该基金由年度捐款筹资，负责支付核电厂退役和相关活动的费用。为确保该基金能够满足未来预期，计划定期审查年度捐款，并在核电厂寿期内至少每三年更新一次核电厂退役计划。

Kilochytska表示：“成功退役的关键因素之一是在进行退役时充分获得专门知识和技术。”阿联酋正在采取步骤，确保及时提供合格和称职的工作人员，以进行退役、放射性废物处置以及在此过程中对人和环境进行辐射保护。随着机器人和人工智能等技术的不断发展，新的进步有望通过提供更快的拆卸技术、更高的去污效率和更好的工作人员保护，为更高效的退

役提供更多机会。

为可持续发展的明天做好今天的准备

原子能机构通过培训班和讲习班协助各国规划和实施退役，提供安全、法律和技术咨询，以及支持知识共享。它在促进广泛的国际合作以及开展技术审查以确立最佳实践和确保汲取以往实践的经验教训方面发挥着重要作用。

Kilochytska表示：“阿联酋核能政策的发展得益于其与原子能机构的持续互动。”阿联酋与原子能机构专家合作，确保在巴拉卡核电厂的整个运行过程中，包括在退役计划方面保持强有力的核安全、核安保和透明度。

巴拉卡核电厂将在阿联酋2050年“净零”战略中发挥关键作用，该战略旨在大幅提高阿联酋清洁能源产量。它将每年避免释放超过2200万吨的温室气体，相当于近500万辆汽车的排放量，占阿联酋根据气候变化国际条约《巴黎协定》所作减排承诺的四分之一。巴拉卡核电厂已是该地区最大的一个发电设施，也是最大的清洁电力来源。

阿联酋首个核电厂尚未完全投入运行，但该国已在精心规划未来退役。

（图/阿联酋核能公司）



鼓励下一代追求退役事业

文/Annie Engstroem

退役行业当前面临的主要挑战之一一是吸引青年专业人员进入该领域。需要新一代加入退役工作人员队伍的驱动因素有两个。一方面，目前寿期结束的老化反应堆数量越来越多，急需扩大工作人员队伍来实施退役。另一方面，退役部门预计未来将蓬勃发展，产生对科学和工程专业人员的更大需求，因此这个行业需要为未来做好准备。

据估计，目前在运核动力堆中，有12%至15%将在2030年之前退役，为了确保以具有成本效益的方式安全拆除这些反应堆，并考虑到其未来的利用，退役工作将需要一系列来自各学科的专业人员。与此同时，世界各地正在建造新的核设施，这些设施也终将退役。

“像我这样的青年专业人员渴望利用我们的技能帮助推进退役计划，增进公众对核领域的信任。”原子能机构玛丽·斯克洛多夫斯卡-居里进修计划奖学金获得者、25岁的核化学师Simona Šandalová说。

核场址退役所涉及的复杂挑战意味着年轻人在这个领域有各种职业机会。其中包括涉及人工智能、数据科学和机器人等新兴技术的职位，以及面向那些希望专门从事物理学、化学、工程、项目管理、废物管理或环境治理职业的人的机会。简言之，退役部门将为现在和在可预见未来进入该行业的人提供工作保障和职业机会。

“40年前，退役并不是核电厂或燃料循环设施开发者优先关注的问题，几乎没有考虑过确保这些设施寿期结束时拥有具备适当技能的工作人员

队伍的问题。”原子能机构退役专家Patrick O’ Sullivan说，“今天，吸引青年核专业人员参加退役和相关废物管理活动已成为大多数计划的主要优先事项。”

为实现经济脱碳，各国也在投资先进的核反应堆，如小型模块堆，从技术角度来看，这些反应堆的退役预计会更容易、费用更低，因为它们可被运回工厂进行拆卸和回收。

“非洲核能年轻一代”副主席Marorisang Makututsa说：“如果各国要努力将核能纳入其能源结构，则确实需要在发展基本技能方面找准定位，从一开始就考虑核电厂的拆除工作。”“非洲核能年轻一代”是一个非营利组织，旨在通过组织培训和国家网络活动，动员和赋能非洲青年核专业人员。目前，南非运营着两座核动力堆，埃及正在建造首座反应堆，加纳与非洲大陆其他约十个国家一起正在考虑将核电引入能源结构。

年轻人的机会

退役是核寿期的最后一步；然而，拆除核电厂是一个多学科过程，需要对整个核寿期有深入了解。因此，专门从事退役工作的工程师、科学工作者和其他专业人员都具备可迁移能力，可触类旁通地用于核寿期的其他阶段，包括核装置的设计、建造和运行。

“拥有退役专门知识和经验的年轻人在其他行业也有很多机会。”原子能机构核人力资源发展专家Lisa Lande表示，“管理项目、获得废物管理所需技术专门知识以及了解污染物对环境影

“像我这样的青年专业人员渴望利用我们的技能帮助推进退役计划，增进公众对核领域的信任。”

—国际原子能机构玛丽·斯克洛多夫斯卡-居里进修计划奖学金获得者、核化学师Simona Šandalová

响的能力在环境部门和技术行业的各个领域都非常宝贵。”

在法国，国家核科学和技术研究所正在积极鼓励学生探索退役新的创新解决方案。Florent Lemont是法国可替代能源和原子能委员会研究主任、国家核科学和技术研究所马尔库负责人。2022年，他在法国组织了一项名为“Hackadem”的挑战赛，600名高中生和大学生组队参赛，为未来核设施退役提出创造性解决方案。

“许多参赛者没有意识到退役是一个涉及高科技、数字化、化学等领域的交叉创新领域。” Florent Lemont表示，“通过挑战赛，他们对退役领域的未来机遇以及获得该领域经验的价值有了深刻的认识。”

原子能机构吸引学生和青年专业人员参与的举措

原子能机构组织了一系列积极活动，以突出强调退役领域的职业机遇，并支持成员国的核能力建设。

原子能机构与世界各地（捷克共和国、法国、大韩民国、斯洛伐克和

英国等国）的大学积极合作，以开展研究并交流退役和环境治理的技术信息、经验和最佳实践。在美国佛罗里达国际大学，通过这种合作，原子能机构向具有科学、技术、工程和数学背景的学生提供了培训计划和实习计划，并将原子能机构关于退役材料纳入了佛罗里达国际大学的课程。

2022年9月，原子能机构组织了“国际原子能机构挑战赛：2022年核设施退役创新”，邀请学生和青年专业人员提交有关核设施拆除的原创论文。主题包括如何加强退役工作的有效性、如何利用循环经济模式规划和实施退役，以及如何将退役战略纳入核电厂的设计。

“退役是一项未来挑战，需要具备相关技能的未来工作人员队伍。” O’ Sullivan说，“这就是为什么原子能机构直接或通过其协作中心组织和实施一系列积极活动促进年轻人从事退役事业，这些活动包括建立大学伙伴关系、开展培训计划和进修计划，以及鼓励年轻人参加其专家讲习班和会议。”

工作人员在法国阿格的一个核燃料后处理厂参加退役活动。

（图/国际原子能机构M. Klingenboeck）



专家对法国乏燃料后处理设施退役的见解

文/ Michael Amdi Madsen

目前，法国约70%的电力来自56座核电厂。这些反应堆产生的所有乏燃料，以及一些来自其他国家的乏燃料，都在该国北部科唐坦半岛阿格场址进行后处理和部分再循环。

阿格第一个后处理设施UP2-400在运行了35年后，于2003年关闭，目前正在退役，预计需要数十年时间。为了更好地了解项目进展情况以及UP2-400等设施退役所面临的挑战，我们采访了欧安诺集团寿期终止业务管理高级副总经理Eric Delaunay。欧安诺集团是法国大型国有企业，负责确保该场址安全和适合未来使用。

问：UP2-400退役项目在实施中面临哪些挑战，这些挑战与其他大型核设施（如核电厂）的退役相比有何不同？

答：UP2-400退役项目面临的主要挑战是在绝大部分已闭设施中存在放射性沉积物和污染。在核电厂中，将乏燃料移除和对整个系统去污，就去除了核电厂中存在的99%以上的初始放射性。只有反应堆压力容器及其内部构件仍有大量的放射性。在像UP2-400这样的后处理厂中，情况有些不同。每件设备和每个小室都受到一定程度的放射性污染，这些部件在拆除之前需要取回并进行整备。这意味着，在退役项目的大部分时间里，需要保留后处理厂的安全功能，而在核电厂中，一旦卸料完成，乏燃料池清空，安全等级和系统就会降低。

问：项目面临的主要运营和战略退役风险是什么，目前正在采取哪些措施来管理这些风险？

答：主要的战略风险是费用超支和项目完成延迟，而延迟会产生额外费用。延迟可能是由涵盖项目各个方



“未来，机器人技术将提高生产力，加强工作人员的安全，改善我们员工的工作条件和激励机制。”

—法国欧安诺集团寿期终止业务管理高级副总经理Eric Delaunay

面的各种运营风险所致。两个最重要的问题是：首先，对高活度单元和设备的初始辐射状况缺乏了解；其次，在职业发展和员工留任方面面临挑

战。为了缓解第一个风险，我们实施了一项非常全面的表征计划，在几年内显著减少有关后处理厂及其单元的不确定性。与此同时，我们努力通过广泛的行动应对人力资源挑战，包括参与地区和国家培训计划、采取积极的招聘政策、对员工持续培训以促进组织的多面性和流动性，以及在退役实践中开展创新以改善工作环境。

问：UP2-400退役项目大约20年前开始，预计还会持续几年。随着时间的推移，技术创新是如何影响项目的？您认为哪些未来的技术发展将会产生最大的影响？

答：在过去的20年里，最重大的技术变化一直与项目各个层面的数字化有关。数字技术在能力和效率、成本和多样性三个相关方面得到了发展。20年前，虚拟模型开发复杂且成本高昂，虚拟现实技术有限，智能手机和平板电脑也不存在。而在过去的几年里，这些技术都得到了长足的发展，现在能够为我们的活动带来实际显著的效益，并彻底改变和改进了我们组织内的各种流程。未来，机器人技术将提高生产力，加强工作人员的安全，改善我们员工的工作条件和激励机制。

问：可持续性和循环经济原则在核工业中越来越重要。这些原则对阿格退役活动有什么影响？

答：在考虑循环经济原则时，我们面临的一个挑战是，我们正在对四五十年前建造的设施进行退役，这些设施在设计时没有考虑循环经济。然而，自2008年在我们的公司成立一个专门负责我们自己核设施退役的整个部门以来，欧安诺15年来一直致力于

闭合核工业循环，解除对废弃建筑物的限制，以供未来重新使用。我们还注重在退役过程的各个阶段最大限度地减少废物产生，并越来越多地重复使用设备和循环利用材料。法国最近的监管变化也为从退役核设施中回收金属供核工业再利用打开了大门。

问：阿格退役工作的主要社会经济影响是什么，您如何看待自己对当地社区的责任？

答：退役活动约占阿格场址总体活动和社会经济影响的20%，该场址还拥有两个正在运行的乏燃料再循环厂。欧安诺诺曼底场址为当地社区提供了大量就业机会和收入来源。欧安诺每年的支出超过8.5亿欧元，其中70%以上支出在诺曼底地区。欧安诺阿格厂还与科唐坦地区瑟堡商会建立了伙伴关系，以培训和雇用当地工人。2023年，欧安诺在科唐坦地区场址将招聘500人，其中20%将从事退役工作。此外，还将雇用200名勤工俭学学员，为期一至三年。

问：原子能机构工作如何支持阿格退役活动，国际合作活动如何更好地支持退役项目？

答：我们的退役项目非常密集，需要我们专注于项目实施。然而，这也是一项受益于其他人创新和经验的长期努力。原子能机构对退役和环境治理的支持为与其他人交流和取长补短提供了一个独特的论坛，包括可以支持我们活动的趋势和创新，如数字技术、机器人、培训和能力发展。例如，我们对“新技术和新兴技术推进退役项目”技术会议方面正在取得的进展特别感兴趣，我们希望这些举措能避免开发工作的重复。

核电厂退役的新商业模式

文/ Bruce A. Watson



Bruce A. Watson是美国核管理委员会（核管会）核材料安全与保障办公室退役铀回收和废物计划处特别助理。作为前核电厂营运者以及美国核动力堆许可证终止技术负责人，他在场址反应堆和材料退役方面积累了广泛经验。Bruce还在原子能机构拥有丰富的国际退役经验，协助制订退役“安全导则”和培训计划。他曾作为专家参加过多次原子能机构同行评审和咨询工作组访问。

长期以来，美国一直是核技术的开拓者，目前运营着世界上历史最悠久、规模最大的核电计划之一。随着一批批反应堆老化退役，越来越多的退役项目正在立项。当前，核管会监管着17座正在主动退役的核电厂、八座处于安全贮存状态的核电厂，以及两座研究堆和其他几个核场址的退役。此外，由能源部监管的几个国防相关场址也正在退役。这一需求正推动着创新，各公司都在探索应对这一挑战的创造性方式。

2010年，美国出现了一种退役的全新商业模式。在此之前，涉及由核管会发放许可证的反应堆的所有退役项目都采用了类似的商业模式，即核电厂营运者继续全权负责退役过程。营运者要么选择自己实施所有退役工作，要么签约一家公司为其开展这项工作。在20世纪90年代初，10座由核管会发放许可证的反应堆被关闭，并于2009年完成退役，所有这些反应堆都采用了这种传统模式。

然而，到2010年底，退役公司与营运者之间经长期讨论，取得了成

果，在这一领域开辟了一种实施退役项目的新方式。起初，有一个美国营运者同意将临时许可证转让给一家退役公司。在退役完成后，再将土地和乏燃料干法贮存设施的许可证转让回原来的营运者。核管会批准了这种做法，并在不久之后又批准了另一个营运者与退役公司之间的类似过程。

机会与挑战

达成转让协议经多年谈判才得以实现。潜在许可证持有者必须仔细权衡机会与挑战。一方面，这样的许可证转让使退役公司有机会全面利用核电厂的退役信托基金。另一方面，它们也要对这一业务带来的所有财务和监管风险承担全部责任。尽管存在这些风险，那些交易最终仍得以推进。三年后，即2013年，第一批公司同意将永久而非临时的许可证转让作为设施出售的一部分。

在许多方面，2013年是具有里程碑意义的一年。退役公司首次与即将关闭的核电厂的营运者洽谈，提出购买核电厂以实施其退役。随后，就当



年关闭的一座核电厂进行了出售协议谈判。营运者和退役公司申请将许可证永久转让给退役公司。

获取此类许可证的退役公司通常可以将这些活动纳入其既有业务，因为它们可能已经在运营核废物处置场址或获得了提供乏燃料贮存服务的认证。

大幅加快规划时间表

2013年这起许可证转让的一个显著结果是大大加快了退役活动的规划时间表。所涉电厂的许可证初步计划在2073年终止。这意味着，营运者可利用核管会要求在60年内完成许可证终止的规定。就许可证终止而言，电厂必须完全退役，包括对土地进行环境治理，使其能够重新用于其他用途。因此，新的许可证持有者计划在2030年前完成同样的过程，同时乏燃料干法贮存设施仍作为有许可证且接受视察的设施。

其他一些营运者安全贮存中的核电厂时间更长，目前正临近其2030年退役的最后期限，营运者可能也希望考虑这种许可证转让，以进入更快的退役过程。一个重要的考虑因素是，在美国，核电厂停止运行后必须在60年内完成退役并终止许可证。

现在，许可证转让在美国已相当

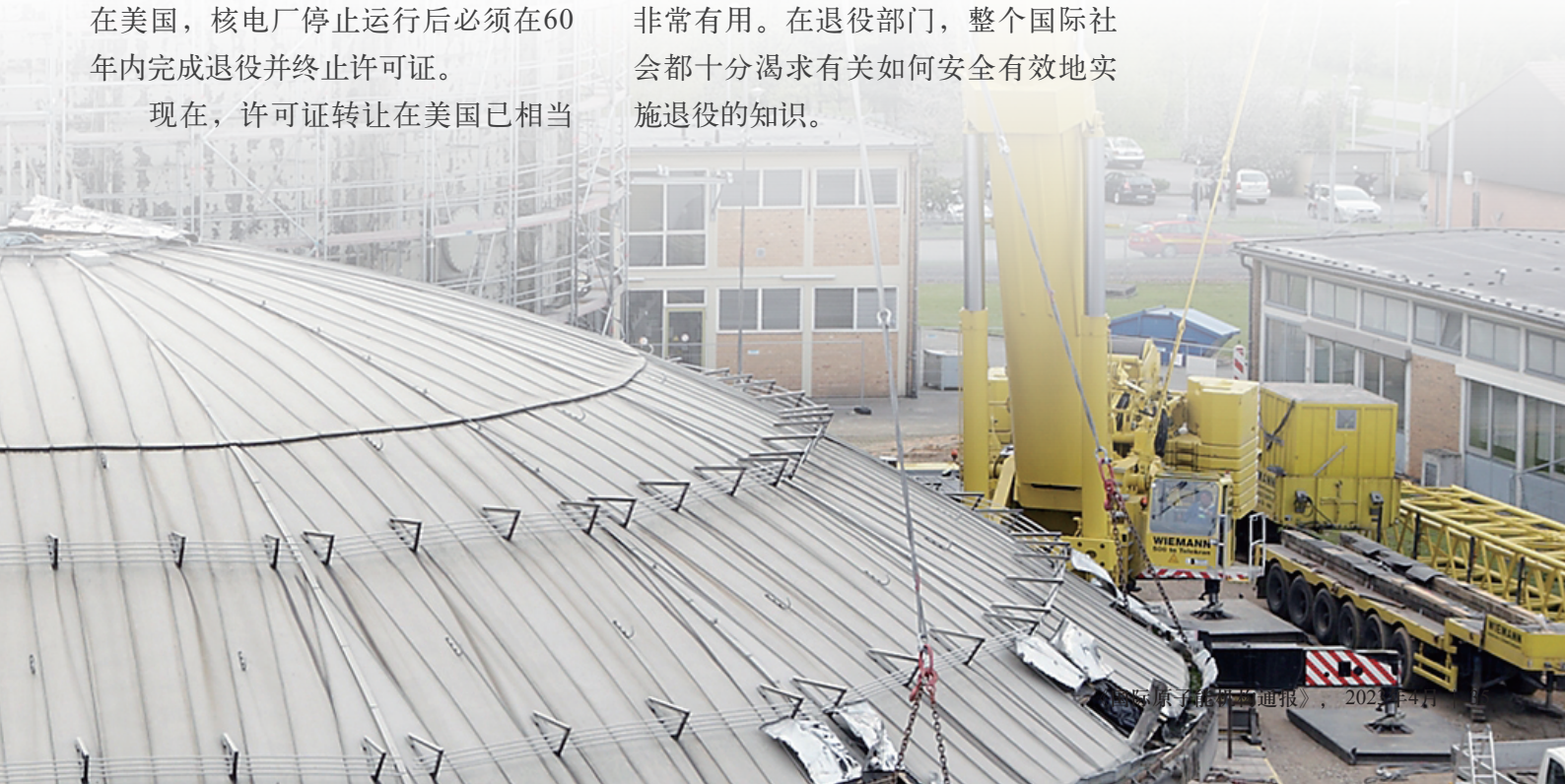
普遍，大量正在退役的核电厂都采用了这种办法。尽管如此，营运者继续实施电厂退役的传统商业模式依然存在，仍然是许多进行中退役项目的基础。

此外，其他国家不太可能受到启发，效仿美国的退役模式。主要原因是，与大多数其他国家相比，美国核电厂在商业上是独立的。因此，美国的商业模式不同于大多数其他国家。

加快世界各地的类似项目

然而，美国正在实施的加速退役过程可能有助于加快世界各地类似项目的进展。在各国际组织推动下，我们通过原子能机构的安全标准、讲习班、论坛、工作组访问和出版物与其他国家分享经验教训。原子能机构在促进退役方式一致性方面做了重要工作，确保退役工作安全实施，并在坚实的监管框架内进行。

原子能机构在提供统一退役方案的信息（如剂量限值）方面发挥着重要作用，以确保在成功清理场址的时间上形成广泛一致，并加强当地社区的安全。原子能机构的文件在这方面非常有用。在退役部门，整个国际社会都十分渴求有关如何安全有效地实施退役的知识。



气候智能型农业在提高阿塞拜疆棉花生产力方面大有可为



同位素技术帮助阿塞拜疆研究人员和农民获得关于如何在保持土壤健康的同时优化肥料使用和提高棉花生产效率的关键信息。（图/国际原子能机构 M.Zaman）

在原子能机构与联合国粮食及农业组织（粮农组织）合作支持的一个项目中，阿塞拜疆研究人员和农民基于核技术和相关技术，实施气候智能型农业实践，成功将棉花产量提高一倍以上。该试点项目采用名为“超级棉花”的新品种，结合精心实施的气候智能型农业实践，深入了解如何可持续提高农业生产力，已使棉花产量从该国平均每公顷3吨提高到每公顷8吨。

该试点项目是原子能机构技术合作项目的一部分，于2021年实施，重点是棉花生产制定气候智能型农业导则、对阿塞拜疆研究人员和进步农民进行气候智能型农业实践培训，以及设计农场示范试验。另一个项目于2022

年启动，重点是加强与棉花生产的土壤、养分和水管理有关农业实践的最佳实践，旨在帮助提高棉花生产力，因为阿塞拜疆的土地特别易受气候变化和土壤退化的影响。自1991年以来，阿塞拜疆年平均气温已上升0.4摄氏度，降雨量也在减少，洪水、干旱和热浪等极端天气事件也更加频繁。

“总的来说，60%的作物生产力提高归功于利用土壤养分和水管理的战略应用，”粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心土壤科学家、项目技术官员 Mohammad Zaman说，“这关乎在合适的生长阶段，以恰当的方式，使用正确的数量。”

气候智能型农业实践涉及利用同位素技术获得关于如何

在保持土壤健康的同时优化肥料使用和提高农业生产效率的基本信息。

Zaman说：“在我们开始项目时，阿塞拜疆的土壤严重退化，肥力很差，因此土壤无法提供棉花生长需要的所有基本养分。”为了解决这个问题，原子能机构专家开发了一整套核技术和核相关农业技术，从准备土壤和选择最佳棉花品种，到向棉田施用养分和灌溉，以及确保杂草和病虫害得到防治。

“应用土壤、养分和水分改进管理实践，再加上使用‘超级棉花’品种，使我们的棉花生产力、质量和利润都得到了提高，”参加试点项目的阿塞拜疆农民 Sakhavat Mammadov 说，他

过去两年一直在自家农场采用气候智能型农业实践。

核技术和核相关技术不仅有助于提高农业生产力，而且有助于建立农业系统抵御气候变化的能力。在阿塞拜疆，研究人员使用了一种涉及稳定同位素氮-15的技术。氮在植物生长和光合作用中起着重要作用，光合作用是植物将二氧化碳和阳光转化为植物食物的过程。Zaman解释说，土壤中缺乏氮等营养物，导致产量低且营养不足。另一方面，过量或不正确地施用氮肥，会造成温室气体排放以及地表水和地下水的污染。

“由于气候变化和土壤快速退化，阿塞拜疆的棉花预计将成为产量降幅最大的作物之一。” Zaman说，“利用氮-15等同位素技术，能够有助于适应这种情况，使棉花部门更具竞争力，以及确保就业和改善农村人口的

福利。”

过去，阿塞拜疆是棉花的主要生产国和出口大国，在20世纪80年代棉花产额超过83万吨，创造了四分之一的国家收入。然而，20世纪90年代向自由市场转型和其他行业的快速增长，使棉花失去了在阿塞拜疆经济中的关键作用，2009年产量降至3.1万吨的历史新低。

该项目成果显示了气候智能型实践在提高农业生产力方面的巨大潜力。“鉴于阿塞拜疆的棉花种植总面积为10.5万公顷，如果10%的面积采用原子能机构气候智能型农业实践，则棉花产量将达到8.4万吨，而不是3.15万吨，比传统的棉花种植实践增加166%。” Zaman说，“看到气候智能型农业实践在该项目应用中取得的非凡成功，为其如何帮助阿塞拜疆大幅提高棉花产量，从而极大地影响阿塞拜疆经

济，提供了令人振奋的一步和巨大的希望。”

原子能机构通过其技术合作计划和粮农组织/原子能机构联合中心，协助各国应用气候智能型农业方法提高生产力，使农业系统适应气候变化并减少其对环境的影响。粮农组织/原子能机构联合中心也支持这一领域的研究。在一个专注于利用气候智能型核解决方案帮助最大限度地减少农业对气候影响的协调研究项目中，来自巴西、智利、哥斯达黎加、伊朗伊斯兰共和国和巴基斯坦的科学家报告减少了50%的温室气体。其他气候智能型农业实践包括助力安哥拉在反复发生的干旱中制定牲畜的均衡饮食解决方案，助力肯尼亚改善土壤用水和养分管理，以及助力突尼斯防治土壤侵蚀。

文/Artem Vlasov



科学家们利用稳定同位素氮-15收集关于棉花需要多少氮肥以及棉花如何有效吸收氮肥的量化数据。

(图/国际原子能机构M. Zaman)

利用核技术应对拉丁美洲和加勒比地区自然灾害



无损检测技术可在不妨碍可能已经弱化的结构或危险结构的情况下，提供关于材料强度和完整性的可靠数据。

(图/拉美和加勒比地区核合作协定)

拉丁美洲和加勒比地区是世界第二大灾害多发地区。其独特的构造结构和天气模式使其容易受到地震、洪水和飓风等自然事件的影响。由于气候变化加剧了这些脆弱性，该地区迫切需要有能力评估自然灾害后建筑结构的安全性和完整性，特别是在城市地区。在原子能机构的帮助下，该地区已实现这一能力的自主化。

通过原子能机构的协助，已在阿根廷、智利、墨西哥和秘鲁建立四个响应中心，能够利用核无损检测技术评估本国和邻国的道路、桥梁等民用结构的完整性。这些中心将支持在紧急情况

下采取协调一致的地区响应。

无损检测技术利用不同类型的辐射检测混凝土、管道和焊接中的缺陷，可在不妨碍可能已经弱化的结构或危险结构的情况下，提供关于材料强度和完整性的可靠数据。这些技术安全、快捷，有助于保护平民。

这四个响应中心通过原子能机构2018年启动一个技术合作项目建立，该项目旨在利用核技术加强拉丁美洲和加勒比地区的城市结构评定，并提高工业产品和服务的质量。

“最近在该地区发生的地震极大地突出了能够改善灾害多发地区应急响应协调的网络的重要

性。通过发展响应中心，该地区已在减轻灾害影响方面实现自立。”原子能机构助理工业技师Gerardo Maghella说。

作为建立这些中心的一部分，原子能机构通过正在进行的地区技术合作项目，于2018年11月7日至18日在布宜诺斯艾利斯组织了无损检测技术专家的培训和认证。来自阿根廷、巴西、哥斯达黎加和墨西哥的九名学员获得了使用X射线和 γ 射线的数字射线照相先进方法的新认证或再认证。他们现在有资格使用最新无损检测技术检查土木工程结构。

来自阿根廷、智利、哥斯达

黎加、古巴、多米尼加共和国、厄瓜多尔、墨西哥、秘鲁、乌拉圭和委内瑞拉玻利瓦尔共和国等十个国家的另外24名参加者获得了无损检测民用方法的资格，包括目视检查和超声波检测，超声波检测使用声波检测材料中的缺陷并测量其厚度。

“该认证对我们各自国家在土木工程领域推广无损检测方法起到了非常重要的推动作用，”新认证的专家之一、墨西哥无损检测代表、墨西哥国家核研究所项目负责人Eduardo Robles说。

培训和认证由非营利性的意大利无损检测监测诊断学会根据

与原子能机构的“实际安排”，按照国际标准ISO 9712号（无损检测）和 ISO 17024号（认证机构的一般要求）提供，赋予这些专家培训其他人的资质。

阿根廷国家原子能委员会部门负责人、阿根廷新响应中心协调员Hernán Xargay表示：“原子能机构组织的ISO级别培训和认证增强了对满足国际要求的信任，并有利于整个地区方法的统一。”

领导智利新响应中心的智利核能委员会质量控制协调员Mario Barrera Méndez表示赞同：“原子能机构建立的网络是该地区新的应急响应能力的基

石。作为四个响应中心之一，我们打算在拉丁美洲和加勒比地区需要无损检测技术的地方分享我们在无损检测技术方面获得的大量知识。”

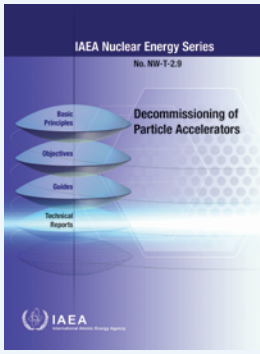
无损检测是一种利用核技术在不损坏材料的情况下对材料进行检查的质量控制方法。原子能机构支持使用无损检测技术来保持核设施和其他工业设施安全运行所需的严格质量控制。这种支持表现为向成员国提供设备和援助，包括培训当地工作人员应用这项技术。阅读更多关于原子能机构无损检测工作的信息。

文/Pauline Sophie Hennings

无损检测是一种利用核技术在不损坏材料的情况下对材料进行检查的质量控制方法。

（图/拉美和加勒比地区核合作协定）

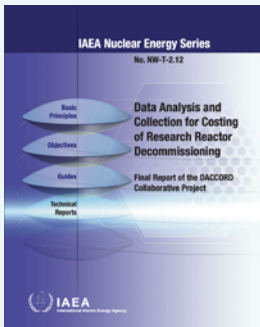




《粒子加速器退役》

本出版物介绍从实施粒子加速器退役项目中获得的经验教训。基于这些信息，并突出强调典型的问题和关切，本出版物为所有在此过程中发挥作用的人提供实用信息。本出版物面向加速器设施特别是接近退役阶段的设施或将设施维持在推迟拆除状态的营运者，以及监管机构、废物管理者、政府层面的决策者、地方当局、退役承包商和加速器设计者。预计本出版物所描述的经验教训将有助于在新设施的设计阶段进行退役规划，从而在不影响结构特性和施工效果的情况下最大限度地减少放射性废物的产生。

ISBN: 978-92-0-102419-0



《研究堆退役成本计算的数据分析和收集：“研究堆退役成本计算的数据分析和收集”协作项目最终报告》

本出版物报告“研究堆退役成本计算的数据分析和收集”项目情况，该项目支持成员国编制研究堆退役的初步成本估算。该报告对退役经验有限的计划特别有益。研究堆退役的成本计算项目范围很广，有许多可能的投入和影响因素，需要在编制估算时予以适当考虑。本出版物提供关于研究堆退役的单位因素信息，并为估计不确定性和突发事件以及评定退役规划和表征活动的影响提供依据。它还涉及 CERREX-D2 (Excel研究堆成本估算) 软件代码的使用，该软件代码由原子能机构开发，赋能非专业用户编制退役初步成本估算。

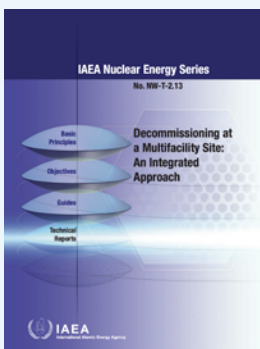
ISBN: 978-92-0-108621-1



《管理受损核设施的退役和治理》

作为《核安全行动计划》的一部分，原子能机构牵头了“管理受损核设施退役和治理国际项目”。“管理受损核设施退役和治理国际项目”的重点是根据实际受损设施的案例研究和经验教训，为事故受损核设施的退役和治理提供实用指南。本出版物总结了“管理受损核设施退役和治理国际项目”的成果，面向监管机构、营运组织、技术支持组织和参与事故后受损或因遗留问题而受损的核设施退役和治理的政府官员。

ISBN: 978-92-0-142621-5



《多设施场址的退役》

近年来，一些成员国已完成多设施核场址的退役。本出版物整合其技术和组织经验，提供信息和实用指南，以促进安全、及时和具有成本效益地实施退役。讨论了退役的所有阶段，从规划和拆除到废物管理和场址解控，以及组织方案和供资。本出版物面向参与退役活动规划、管理、批准和执行的决策者、设施营运者、承包商和监管机构，对于核设施即将完成预计寿期的多设施场址营运者尤其重要。本出版物也将有益于新核设施的设计者和建造者，以促进最终退役。

ISBN: 978-92-0-119522-7

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科

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

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：

