

IAEA BULLETIN

国际原子能机构通报

国际原子能机构旗舰出版物 | 2019年6月

在线阅读：
www.iaea.org/bulletin



核动力堆乏燃料管理 汲取以往教训，增强未来能力

新启动核电国家应对乏核燃料和放射性废物管理问题，第10页

开发有史以来第一个安全处置乏燃料的设施，第14页

将保障纳入乏燃料贮存设施的设计中，第20页

内容还包括：
国际原子能机构新闻



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危险。

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

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：奥尔基洛托1号机组内部

（来源：Hannu Huovila/芬兰TVO电力公司）

请关注我们



乏燃料安全、可靠和可持续管理的重要性

国际原子能机构总干事天野之弥

核电可以帮助解决确保可靠能源供应和抑制温室气体排放这一双重挑战。目前在30个国家运行的451座核动力堆供应的电力占世界总发电量的10%以上，占全部低碳发电量的三分之一。未来几十年，核电将继续在世界低碳能源结构中发挥关键作用。

核动力堆乏燃料的安全、可靠和可持续管理是核能未来的关键。

对于决策者和工程师来说，这一挑战同样重要。事实上，从后处理和再循环到乏燃料整备以便在深层地下处置库中处置的各种乏燃料管理技术解决方案已经存在。此外，研究还确定了分离和嬗变等先进过程的可行性，这些过程有可能进一步减少核废物的影响。任何选定战略的实施都可能需要数十年时间，而为实施这些战略分配必要的资源往往很困难。

乏燃料管理涉及长期承诺，国家战略必须足够灵活，以便能够整合各种新技术，从而提高和加强核电的效率、安全、安保和可持续性。

在本期《国际原子能机构通报》中，我们研究世界各地的解决方案。我们解释俄罗斯的综合战略，即在同一个场所进行干式和湿式贮存、后处理、燃料制造以及最终的高放废物处

置（第6页）。法国专家讲述如何提高乏燃料管理效率（第8页），而安全可靠的运输是我们关于英国乏燃料管理文章的重点（第12页）。

我们介绍瑞典和芬兰对地下处置库开发的联合研究（第14页）；考虑保障措施如何在乏燃料管理设施的设计中发挥作用（第20页），以使运营者和原子能机构保障视察员工作更轻松；通过讨论新启动核电国家可能采取的乏燃料管理方案来展望未来（第10页），并探讨在一些国家计划引入小型模块化反应堆如何会影响乏燃料管理（第11页）。

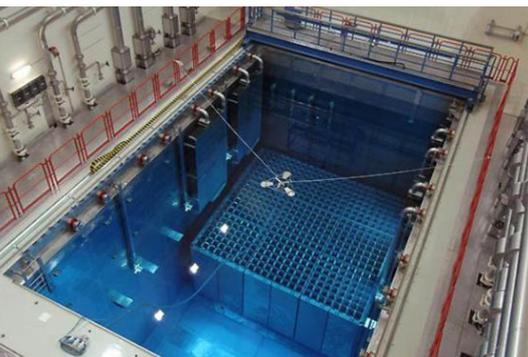
今年的原子能机构核动力堆乏燃料管理国际会议“汲取以往教训，增强未来能力”是我们2015年上一次关于这一主题会议的后续行动。代表们当时强调需要通过主要参与者和决策者之间更多的协调来实现更加一体化的燃料循环管理方案。今年，与会者除其他外，将尤其重点关注在核燃料循环前端作出的决定如何影响乏燃料的管理，以及分享这一领域的最佳实践和经验教训。

原子能机构将继续通过提供技术专门知识和国际交流平台，在乏燃料管理这一重要领域协助成员国。我祝此次会议取得圆满成功。



“核动力堆乏燃料的安全、可靠和可持续管理是核能未来的关键。”

—国际原子能机构总干事天野之弥



（图/瑞士戈斯根核电公司）



（图/能源方案公司）



（图/俄罗斯国家原子能集团公司）

1 乏燃料安全、可靠和可持续管理的重要性

4 核燃料的生命周期



6 同一屋檐下：俄罗斯乏燃料管理综合战略



8 法国核燃料循环的效率：我们能学到什么？



10 新启动核电国家应对乏核燃料和放射性废物管理问题



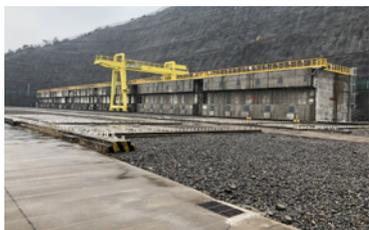
11 小型模块化反应堆：对乏燃料管理的一个挑战？



12 促进英国乏燃料运输的安全和安保



14 开发有史以来第一个安全处置乏燃料的设施



16 积极应对增长：中国的乏燃料管理战略



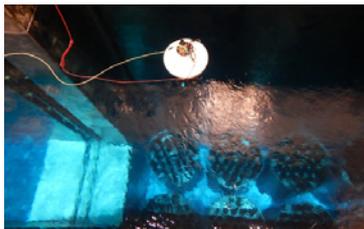
17 核动力堆乏燃料管理网上学习新课程



18 乏燃料管理：40年的研究



20 将保障纳入乏燃料贮存设施的设计中



22 机器人技术挑战赛获胜设计助力加快乏燃料核查

24 问答：简化核动力堆乏燃料的运输和贮存

世界观点

26 汲取以往教训
文/Susan Y. Pickering

国际原子能机构最新动态

- 28 从实验室到现场：印度尼西亚科学家利用核科学为农民开发新作物**
- 29 核专业人员分享如何促进强大安全文化：原子能机构安全领导短训班**
- 30 越南利用辐照提高食品质量**
- 31 国际原子能机构开发追踪水污染源的新方法**
- 32 出版物**

核燃料的

目前在大多数核动力堆中使用的燃料都基于陶瓷氧化铀。燃料的设计及其易裂变材料的含量因反应堆类型的不同而异。压水堆和沸水堆等轻水堆燃料以及现代气冷堆的燃料，使用易裂变铀-235丰度提高至5%的浓缩铀，而坎杜堆和加压重水堆则主要使用铀-235丰度约为0.7%的低浓铀或天然铀。

一座1000兆瓦电功率的压水堆堆芯通常含有120至200个燃料组件。每个燃料组件包含大约500千克的氧化铀，在其运行寿期内堆芯可产生大约2亿千瓦时的电力。这种规模的反应堆每年卸出约40个乏燃料组件，其中共含有大约20吨的氧化铀。

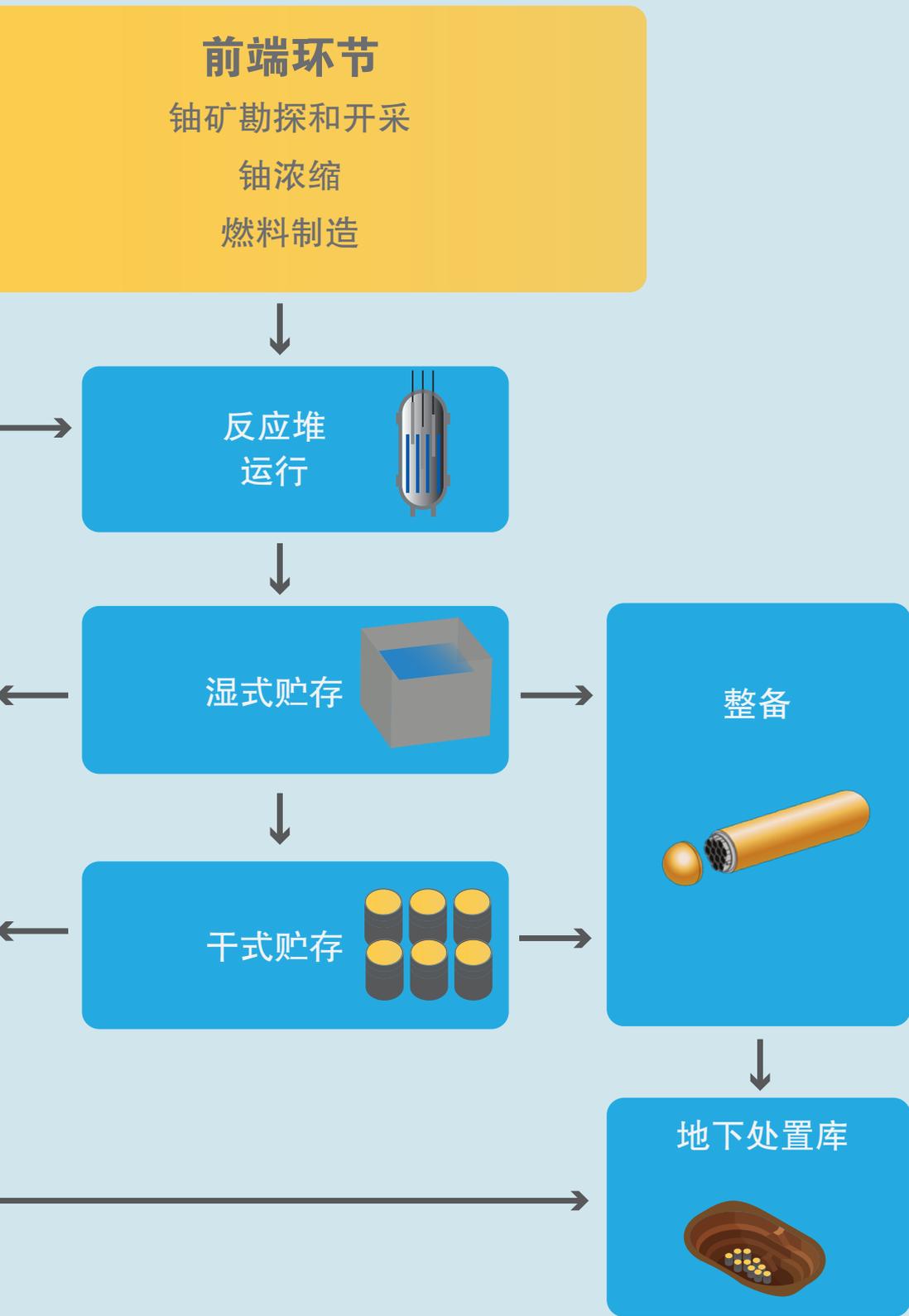
当核燃料不再能维持裂变反应时，便被视为乏燃料。在压水堆中，这需要大约三到七年，主要取决于燃料及其在堆芯中的位置。当乏燃料从堆芯中取出时，看起来就像新燃料组件一样，但具有强放射性，并且非常热，必须对其进行冷却和屏蔽。由于水是良好的冷却和屏蔽材料，因此将其转移到贮存池中。经过一段时间的冷却后，根据需要，可以将其转移到干式贮存设施中。

目前，经过适当时间的贮存后，乏燃料可以：

- 被视为废物，经过整备后在深层地质处置库中处置。这称为开式燃料循环；或者
- 进行后处理以回收残留的易裂变材料，这些材料可作为新燃料在核反应堆中进行再循环，产生高放废物，然后在深层地质处置库中进行处置。这称为闭式燃料循环。



生命周期



同一屋檐下：俄罗斯乏燃料管理综合战略

文/Nicole Jawerth

“一体化综合设施将提高俄罗斯核工业的效率和竞争力，使核能更加安全和环保。”

—俄罗斯矿业与化学联合体总经理Petr Gavrilov

乏燃料管理一站式服务是对俄罗斯西伯利亚克拉斯诺亚尔斯克附近的矿业与化学联合体活动的描述。该联合体的设计适用于处理不同阶段的乏燃料，所有不同阶段的活动全部在一个场址进行。在许多国家，这些涉及不再有用但仍具有很强放射性的燃料的活动都是在单独设施中进行的，这些设施有时相距数百公里。俄罗斯国家乏燃料管理战略采取综合方案，旨在提高效率、降低成本、优化安全和安保。

“俄罗斯核电工业在不断发展，并增加对国家总体能源结构的贡献。因此，我们需要确保乏核燃料的管理是可靠的、可持续的和安全的，”俄罗斯国家原子能集团公司乏核燃料管理项目办公室高级经理、该综合方案设计者之一Anzhelika Khaperskaya说。“这种一体化综合设施将有助于我们减少运输核材料或核废物的需要，使我们能够将安全和安保措施集中在一个地方，从经济角度看，这样也更好。”

在莫斯科以东约4000公里的西伯利亚中部，2017年开始根据这种综合方案对矿业与化学联合体的用途进行调整。该场址已有人员和设施为加速启动整合提供了必要的基础。

此前，俄罗斯主要在位于西伯利亚西部、莫斯科以东约1600公里的叶卡捷琳堡附近的马雅克生产联合体RT-1厂贮存和部分处理这种燃料。

与主要从事后处理同时拥有一个小型中试制造设施的RT-1厂不同，矿业与化学联合体已拥有乏燃料湿式和干式贮存设施、后处理设施以及轻水堆和快堆新燃料制造设施，并将最终

拥有一个高放废物处置地下实验室。该联合体预计在2035年前完全整合并投入运行。

简化流程

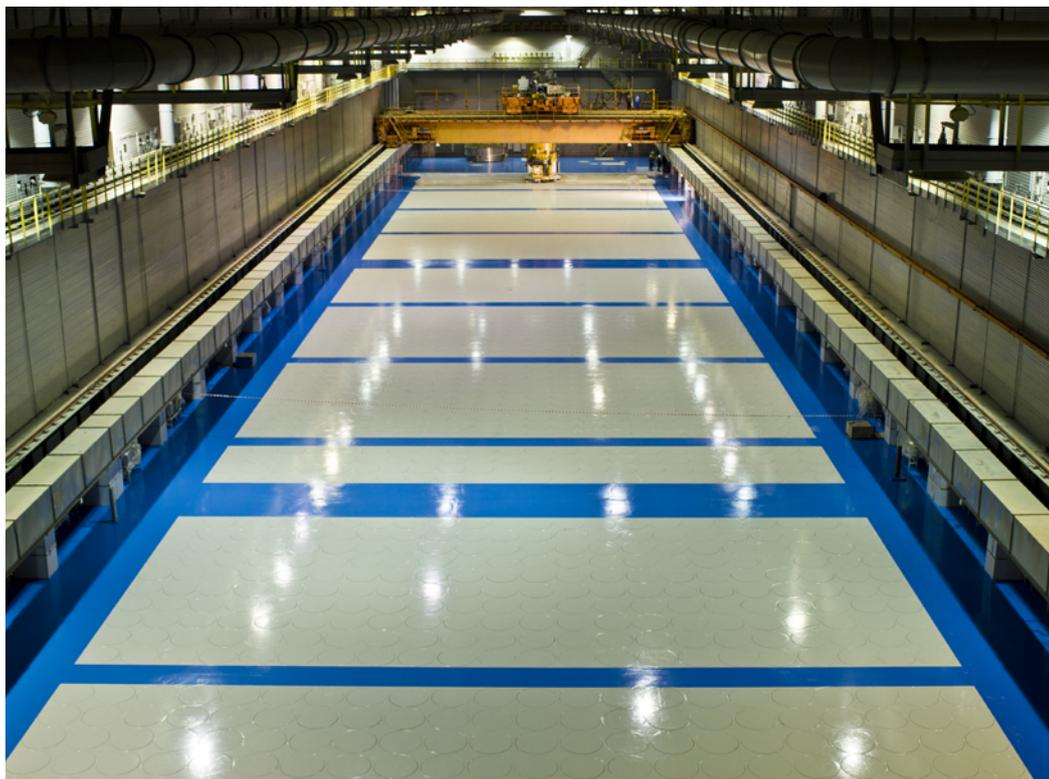
管理流程的每一步都需要采取安全和安保措施，以保护人和环境，并将核材料遭受袭击、盗窃或滥用的风险降至最低。

例如，乏燃料从使用地点（如核电厂）起，然后在贮存、后处理、加工制造或处置等不同场址的设施之间，通常要经过几次运输。核材料的移动需要采取额外的安全和安保措施。

“在整个综合战略中，我们采取了消除安全和安保风险的步骤，以保护人和环境。其中一个步骤是将几个管理流程即湿式和干式贮存、后处理和新燃料制造集中在矿业与化学联合体的一个场址，以尽量减少核材料的运输，”俄罗斯国家原子能集团公司矿业与化学联合体总经理Petr Gavrilov说。

找到减少流程数量的有效方法是建立新方案的关键一步。来自矿业与化学联合体、主要行业机构和俄罗斯科学院的专家们共同努力，选择、测试并在某些情况下开发符合国际原子能机构安全标准和安保导则的新技术、设备和方法，并能够解决复杂的科学和技术难题。

例如，矿业与化学联合体将对称为REMIX的新型铀-钚燃料进行后处理。REMIX燃料是作为尽量缩短乏燃料贮存时间和减少放射性废物处置量的综合方案的一部分而开发的。与用于轻水堆的其他类型的核燃料不



矿业与化学联合体的一个操作员工作站内景。工作人员监督乏核燃料组件自动地从湿式贮存设施重新装载到干式贮存设施。

(图/矿业与化学联合体新闻部)

同，REMIX燃料可以在当今的核电厂循环使用多达七次，这意味着它可以提供足够电厂轻水堆整个寿期使用的核燃料。

“我们一直在开发新的和创新型后处理、再循环和分离技术，以及与核燃料循环相关的基础设施。我们通过在热堆和快堆中多次循环使用铀和钚以及减少放射性废物的放射性毒性，正在努力从根本上减少乏燃料管理的影响和支持未来的可持续发展，” Khaperskaya说。

国家战略

2018年，核电占俄罗斯能源产量的18.4%。俄罗斯核电厂、研究堆和潜艇每年产生大约700吨乏核燃料。随着俄罗斯计划扩展核工业，包括大规模实施快堆，矿业与化学联合体的综合系统有望帮助最大限度地减少这种增长的影响。

“乏核燃料的安全处理是俄罗斯核电发展的战略方向。为满足核电需求，有必要对持久贮存的和新生成的

乏核燃料提供安全和经济有效的贮存，” Gavrillov说。“一体化综合设施将提高俄罗斯核工业的效率和竞争力，使核能更加安全和环保。”

俄罗斯的综合方案只是一个国家如何管理乏核燃料的一个示例。所有拥有核电计划的国家都有国家乏燃料管理政策和战略。

国家战略是根据一个国家核计划的规模和需要制定的，应确保其符合该国的总体能源计划。虽然每项战略不同，但大多数都涉及乏燃料管理不同步骤的技术、政治、社会经济以及安全和安保方面，确保遵守原子能机构的安全标准和安保导则。

虽然乏核燃料的安全可靠管理由各国负责，但国际原子能机构提供技术指导，并协助各国交流信息，以制定考虑周全的战略。原子能机构还为实施这些战略提供专门知识和培训支持。由于乏核燃料是核材料的一种形式，国际原子能机构保障在确保乏燃料不被滥用或不被从和平用途中转运方面也发挥着关键作用。

法国核燃料循环的效率：我们能学到什么？

文/Shant Krikorian

“乏燃料再循环是法国核工业战略的一个重要组成部分，法国核工业拥有30多年的工业经验。”

—法国电力公司高级副总裁兼核燃料部主管Denis Lépée

法国拥有58座核动力堆，2018年生产了法国近72%的电力，是核能发电比例最高的国家之一。然而，除了发电，法国的核电厂还产生了大量乏燃料和放射性废物。

法国专家表示，除了严格的立法和强有力的监管机构外，法国国家乏燃料政策的优势还可归功于其核电厂的标准化和乏燃料再循环政策。这带来了有效和可靠的电力供应，同时也减少了放射性废物负担。

在法国，所有在运机组仅属三种标准类型的压水堆，全部由法马通公司设计：34座三回路900兆瓦（电）反应堆、20座四回路1300兆瓦（电）反应堆和4座四回路1450兆瓦（电）反应堆。因此，法国核动力堆在拥有大规模核电厂的国家中标准化程度最高。所以在处理核燃料循环后端问题时，包括乏燃料和废物管理、退役和环境整治，可以采取标准化方案。

为了管理每年产生的近1150吨乏燃料，法国和其他一些国家一样，早就决定通过乏燃料再循环或后处理来闭合其国家核燃料循环。由此，法国核工业可以从用过的燃料中回收铀和钚供再利用，从而也减少了高放废物量。

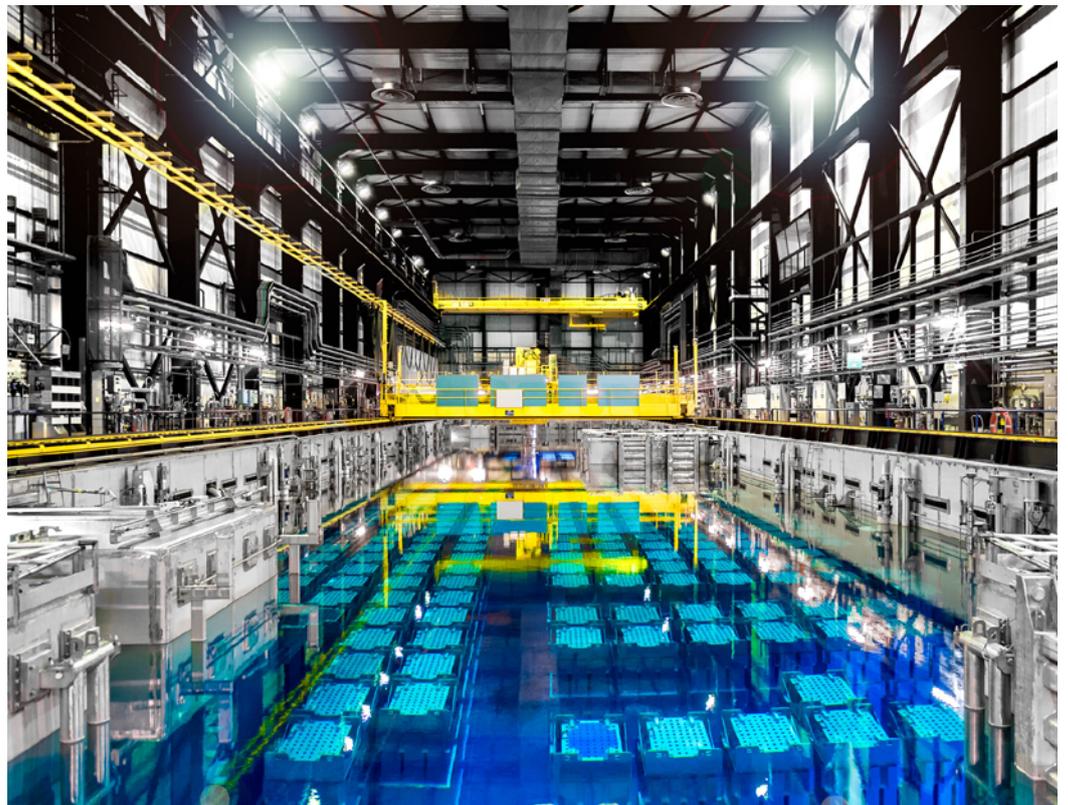
核燃料再循环过程涉及将核动力堆中形成的乏燃料中的钚（燃烧铀燃料产生的副产品）和铀制成一种“混合氧化物”，在核电厂中再次使用，生产更多的电。

“乏燃料再循环是法国核工业战略的一个重要组成部分，法国核工业拥有30多年的工业经验，”运行法国核电厂的法国电力公司高级副总裁兼核燃料部主管Denis Lépée说。

“这样就可以限制乏燃料材料的量和最大限度地减少废物，同时以安全的方式进行废物整备。此战略是法国总体核电生产的重要支柱，对法国的能源独立做出了重大贡献。”

欧安诺集团阿格后处理厂。自1976年该场址投入使用以来，这里已经处理了超过3.4万吨乏燃料。

（图/欧安诺集团）





通过再循环利用，乏燃料中高达96%的可重复利用材料得到回收。在根据《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》提交的第六次国家报告中，法国指出，乏燃料再循环国家政策意味着，与不进行燃料再循环相比，法国运行核电厂所需要的天然铀减少了17%。

负责核燃料循环活动的欧安诺集团为该国核电厂提供燃料并对产生的废物进行管理。该公司表示，其战略是在优化核燃料的能量产出的同时，对乏燃料进行后处理。后处理在阿格后处理厂和马尔库尔混合氧化物燃料制造厂进行。

自20世纪60年代中期开始运行以来，阿格厂已安全处理了2.3万吨乏燃料，足够法国核电厂使用14年。

各核电厂产生的乏燃料组件被

运到阿格厂，存放在一个贮存池中；之后对乏燃料部件进行分离，回收可再循环的材料。在梅洛克斯厂，将钚与贫铀重新混合，生产混合氧化物燃料。

欧安诺集团的营销支持高级副总裁John Czerwin说，这种后处理-再循环战略需要各行业参与者之间密切和定期协调。这些参与者包括管理反应堆、燃料和处置基础设施的人员，以确保综合工业系统的连贯性。

“这证实了该战略的好处：第一，保持有限的核废物；第二，通过加强核材料的再利用节约铀资源；第三，为未来做好准备，以加强法国的能源独立性，确保核能的可持续性，”Czerwin补充道。

法国核安全管理局定期评价这一方案的安全影响。

法国核设施分布图
(资料来源：法国电力公司、法国原子能委员会)

新启动核电国家应对乏核燃料和放射性废物管理问题

文/Shant Krikorian

对大规模低碳电力的需求不断增长，促使许多国家考虑使用核电满足其日益增长的能源需求。由于在首次引进核电的四个国家中有九座核反应堆正在建设中，证明符合国际法律文书、安全标准、安保和核能导则以及保障要求是筹备核能计划的一个重要问题。这还包括乏燃料和放射性废物的管理和处置。

对于诸如孟加拉国、白俄罗斯、土耳其和阿拉伯联合酋长国等新启动核电国家，乏燃料和放射性废物管理问题从核电计划的一开始就应加以考虑，不应忽视，因为这既影响核电的经济性，也影响对核电的公众接受度，国际原子能机构副总干事兼核能司司长米哈伊尔·丘达科夫说。

国际原子能机构支持其成员国制定乏核燃料政策。这项援助以导则、综合核基础结构评审工作组访问以及与基础结构发展问题有关的地区、国家和国际讲习班的形式纳入了原子能机构对新启动核电国家的全面支持。

国际原子能机构总干事天野之弥一再呼吁新启动核电国家加入并批准《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》。他说，在整个核计划的发展过程中，“联合公约”的原则应当成为国家核基础结构的一部分。

综合核基础结构评审工作组访问是评定国家核基础结构状况的重要工具，为安全、可靠和负责任的发展核电计划提供建议和导则。

国际原子能机构核基础结构发展科科长Milko Kovache强调说：“从建造核电厂到最终处置核电厂产生的全部废物，可能需要几十年的时间。因此，为以始终确保安全、安保以及必要资源和能力的方式实施所有未来行动，从一开始就制订一项可信的战略和各种技术计划，以及整个过程融资的方法，这一点很重要。”

向新启动核电国家传达的与废物有关的重要信息如下：放射性废物需要以避免给后代造成不应有的负担的方式进行管理。

关于乏燃料管理，原子能机构建议新启动核电国家：

- 确保在实施核电计划时充分发展乏燃料和放射性废物管理基础结构。此基础结构最好通过制定国家乏燃料和放射性废物政策及相关战略进行建设。
- 考虑到国家政策的制定和实施需要采取持续数十年的系统化、分阶段的方案。
- 在规划核电计划的早期阶段建立废物管理基础结构。

小型模块化反应堆：对乏燃料管理的一个挑战？

文/Irena Chatzis

小型模块化反应堆多年来一直是核工业科学家和研究人员的话题，但它们的首次亮相（预计明年）在多大程度上会对乏燃料管理造成挑战呢？专家说，这取决于特定的小型模块化反应堆设计和一个国家现有的乏燃料管理实践。

小型模块化反应堆相对较小且灵活：功率容量可达300兆瓦(电)，输出可根据需求波动。这使得它们对电网欠发达的偏远地区特别有吸引力，也可用作可再生能源的补充，或用于核动力的非电力应用。小型模块化反应堆可以在工厂制造，然后运输到现场并安装，因此预计它们的建造成本更为低廉。

在世界范围内，大约有50个处于不同开发阶段的小型模块化反应堆设计和概念。阿根廷、中国和俄罗斯的三个小型模块化反应堆电厂正处于建设或调试的后期阶段，均计划于2019年至2022年期间开始运行。

已有核电计划的国家几十年来一直对其乏燃料进行管理。他们积累了丰富的经验，并建立了适当的基础设施。国际原子能机构核燃料循环和废物技术处处长Christophe Xerri说，对于这些国家而言，如果它们选择基于现有技术部署小型模块化反应堆，那么对小型模块化反应堆产生的乏燃料的管理应该不存在什么问题。

Xerri说：“由于这种小型模块化反应堆将使用与常规大型核电厂相同的燃料，因此其乏燃料的管理方式可与大型反应堆相同。”即使是采用新技术的小型模块化反应堆，例如将使用填充石墨棱柱块形或卵石形燃料的高温气冷反应堆，拥有核电厂的国家

也已经拥有贮存和管理乏燃料的解决方案。“他们既可以使用现有的基础设施，也可以根据新的放射性废物流对现有基础设施进行调整，” Xerri说。

新启动核电国家应仔细考虑乏燃料管理，并在引进核能时建立相关基础设施。即使选择基于当前技术的常规核电厂或小型模块化反应堆，他们也需要这样做。“如果他们选择首创技术或不太成熟的技术，他们将面临更多的挑战，因为管理整个燃料循环的经验不足，且缺少基准，” Xerri说。“管理小型模块化反应堆产生的乏燃料和放射性废物的解决方案将是在选择技术以及燃料供应安全时需要考虑的最重要因素之一。”

一些小型模块化反应堆设计具有可以减少与乏燃料管理相关任务的特性。基于这些设计的电厂需要较少频率的换料（每3年至7年一次），而传统电厂的换料频率为1年至2年。有些甚至设计为在不换料的情况下运行长达30年。然而，即便如此，也会留下一些乏燃料，必须妥善加以管理。

为了解决这些问题并支持新启动核电国家，需要对一些小型模块化反应堆技术的燃料循环进行更多的研究和开发。Xerri强调，工程师和设计师拥有独特的机会，可以在小型模块化反应堆开发的早期为改善其乏燃料和放射性废物管理提出解决方案。他说：“这种做法将有助于解决与燃料循环后端有关的不确定性，降低成本，增强社会对核电的接受度。”国际原子能机构参与了若干正在进行的小型模块化反应堆活动，并正在加紧努力支持成员国在这一领域的研究和开发。

促进英国乏燃料运输的安全和安保

文/Nathalie Mikhailova



乏燃料用专门设计的屏蔽容器运输，以保护人们不受其所包容的放射性内容物的影响，且在严重的运输事故中能幸存下来，而不会发生重大泄漏。

(图/国际核服务公司)

乏燃料具有强放射性，在运输过程中可能成为盗窃或破坏的潜在目标。因此，乏燃料在设施之间的运输需要仔细规划，并实施许多安全和安保措施。

在英国，有15座核动力堆，过去几十年来，专业公司一直在国内和从海外运输乏燃料，实现总距离超过1900万公里运输的安全和安保。业内人士表示，强有力的监管框架和利益相关者之间的有效沟通是他们成功的关键。

在英国，乏燃料装运是常有的事：英国几乎每周都有地方在进行燃料装运。大部分来自动力堆的乏燃料已经并将继续运往英国坎布里亚的塞拉菲尔德设施。大部分乏燃料运输都是由铁路直达服务公司提供的，该公司自1995年以来一直从事核材料运输，从未发生过任何辐射释放意外事故。

“我们具有运输乏燃料的能力和基础结构并实现运输的安全和安保，最

重要的是，我们有几十年的经验，”世界核运输研究所秘书长John Mulkern说。该研究所是一家代表核材料运输业集体利益的网络机构。“对于启动核电计划，并因此而寻求发展必要的运输系统的国家来说，这个经验尤其宝贵。”

开发和维护良好的有效运输框架

国际原子能机构协助各国遵照原子能机构的相关安全标准制定和实施运输战略。《放射性物质安全运输条例》（国际原子能机构《安全标准丛书》第SSR-6 (Rev.1)号）规定的“具体安全要求”已为下列组织所采纳，即管理空运的国际民航组织、管理海运的国际海事组织和管理陆运（公路和铁路）的各国家监管局。

2018年发布的第SSR-6 (Rev.1)号文件规定的要求包括放射性物质的活度和分类、货包类型的定义和允许

“我们需要继续以合规的方式运输，并正确地传达我们在做的事情以及为什么它是安全的。”

—世界核运输研究所秘书长 John Mulkern

内容物、货包设计性能和每种类型的测试判据。对于每种货包类型，文件规定了使用前和使用后定期由国家监管机构进行设计审批的要求；文件编制、加标签和加货包标记；外表面温度、辐射和污染限值；托运限值；以及培训。

就包装而言，其要求基于所容纳物质的危险级别。对于乏燃料等高风险放射性物质，包装需要符合规定的设计和性能要求，以承受住涉及冲击和火灾的严重运输事故，而不会大量释放其内容物。这是通过在各种情况下对材料进行严格测试而确定的。例如，英国核燃料有限公司进行了一系列模拟火车以接近160公里/小时速度撞击乏燃料容器事故的公开论证。结果对燃料容器造成的损伤很小，证明了其安全性（见本页科学栏）。

“运输的另一个重要方面是我们如何让这些材料经过的社区消除疑虑，认为它们是安全可靠的。当人们看到容器时，他们往往会有顾虑，” Mulkern说。例如，参与核燃料管理和运输的国际核服务公司在英格兰北部港口城市巴罗因弗内斯（有铁路直通塞拉菲尔德场址）定期召开

社区和利益相关者会议，讨论他们经过该县乃至世界各地运输的是什么东西，以及它们的安全和安保情况怎么样。

危险物质的运输还需要防止潜在的盗窃或破坏行为，这不仅需要通过容器设计而且还要通过相关的安保措施进行适当的实物保护。原子能机构根据请求，协助各国制定和维护实物保护制度，包括支持起草运输安保条例和开展运输安保演习。这些演习的目的是找出运输安保制度中的任何潜在薄弱环节，并做出必要的改进。

规划未来

“展望未来，继续鼓励年轻人直接参与核工业特别是运输业，这一点很重要，” Mulkern说。“世界各地都在建设新的发电厂，因此我们需要确保以适当的方式传承现有的经验和专门知识。人们不仅需要掌握信息，还要有承担装运的经验，无论是乏燃料运输还是退役废物运输，且还要有信心以正确的方式进行运输。我们需要继续以合规的方式运输，并正确地传达我们在做的事情以及为什么它是安全的。”

科学

乏燃料运输

运输放射性物质的货包类型及其性能判据是根据其内容物所构成的危害以及预期保持放射性物质的包封和屏蔽货包的条件来确定的。所谓的B型货包用于运输具有较高放射性水平的物质，如乏燃料。它们的设计不仅能承受放射性物质产生的热量，而且也能在严重运输事故中幸存下来，且其中所包容乏燃料不会发生大量泄漏。

核材料的运输还涉及以下具体要求：对货包做标记和贴标签，在运输工具上挂危险标识，以及文件编制、外部辐射和污染限值、操作控制、质量保证和通知，以及对某些装运和货包类型的核准。

开发有史以来第一个安全处置乏燃料的设施

文/Nathalie Mikhailova

“社会接受度关系到对执行者、监管者和决策者的信任。必须建立和维护这种信任。”

—芬兰辐射和核安全局核废物监管和安全保障部主任Jussi Heinonen

在芬兰和瑞典几十年致力于实施处置战略，以及在瑞典设计的基础上合作开发安全处置方案后，首个乏燃料深层地质处置库正在芬兰奥尔基洛托进行建造。瑞典和其他国家一起也在共同努力建设这种设施。

乏燃料从核动力堆中卸出后，在几十年内继续产生大量热量。因此，它被放置在水池或干式贮存设施中进行冷却。贮存池和容器确保乏燃料保持完整性，不释放任何辐射或放射性物质，从而保护人和环境免受照射。然而，乏燃料在数千年中仍然具有强放射性，因此需要隔离数十万年。

乏燃料一旦热量衰变掉，便被宣布为废物，必须进行处置。处置乏燃料的一种方法是将其埋在地面以下几百米深的专设设施中，即深层地质处置设施中。目的是将乏燃料封装在坚固的密封容器中，并通过掩埋将其隔离，以控制其放射性。此类设施由坑道或洞室系统组成，建于地质上适合确保被埋材料长期安全性的场址（见第15页科学栏）。

芬兰正在建造的设施基于“KBS-3”处置概念，由瑞典核燃料和废物管理公司（SKB公司）与负责乏燃料处置的芬兰核废物管理专家组织（波西瓦公司）密切合作开发。KBS-3方法包括将乏燃料封装在耐腐蚀的铜质容器中，然后将容器埋在地下500米深处处置库坑道的膨胀性粘土中。

“我们两国不仅选择直接处置乏燃料，而且芬兰和瑞典也有类似的

反应堆，这意味着我们有类似的乏燃料。扩大各种研发活动的直接合作对我们双方都有意义，”SKB高级顾问Magnus Westerlind说。“例如，作为一个联合研发项目，我们基本上完成了与铜质容器有关的所有工作。”

两个国家在20世纪70年代末和80年代初的政府决定促使出台了要求核废物产生者也要负责废物管理的政策。在芬兰，1996年以前，洛维萨核电厂的乏燃料先是运到苏联，后来又运到俄罗斯进行后处理。1978年芬兰政府为奥尔基洛托核电厂颁发运行许可证时，要求许可证持有者制定废物管理计划，包括乏燃料的管理计划，而这些废物必须在芬兰处置。

在瑞典，电厂业主们在20世纪70年代末聚在一起组建了SKB公司，旨在共同管理乏燃料。这引发了开发处置概念的研发活动，最终产生了KBS-3方法。1983年，这一概念被选定为一种合适的废物处置方式，此后得到了进一步发展。实施这一概念的场址定下来后，建造计划正在进行。

“在实际实施处置策略的实践中，一个重要的环节是每三年进行一次的评审过程，”Westerlind说。“作为这个过程的一部分，邀请了大学、政府机构、非政府组织和市政当局等多方代表对我们的策略进行评述。这不仅对我们计划的技术审查做出了重大贡献，而且对确保计划符合瑞典的政策也作出了重大贡献。”此外，为了获得和保持公众对乏燃料处置设施选址和建造接受，我们已经开展了大量的

工作，并且还在进行中，他补充说。

在芬兰建造有史以来第一座处置设施

在建造处置设施开始之前，负责实施该概念的公司需要获得建造许可证。在芬兰，该许可证于2015年颁发，这是世界上首次获得地质处置设施的建造许可证。

该场址是经过几年对许多潜在场址进行筛选后选定的。在根据地质资料对该国的陆块进行勘察后，波西瓦公司通过场址专门研究（包括钻探）继续进行场址表征，以找到地质上合适的环境。在此过程中，波西瓦公司还开始与几个市政当局就设施托管问题进行讨论。

“社会接受度和社会因素在选址方面起着至关重要的作用，”芬兰辐射和核安全局（STUK）核废物监管和保障部主任Jussi Heinonen说。“社会接受度关系到对执行者、监管者和决策者的信任。必须建立和维护这种信任。”

波西瓦公司正在建造位于地下400多米深处的昂卡罗处置设施，并将很快开始挖掘处置隧道。处置过程计划于2024年开始。



在其他国家的进展

2011年，SKB公司提交了其在斯德哥尔摩以北150公里的福斯马克建造处置设施的许可证申请，瑞典辐射安全局和土地与环境法院对该申请进行了审查。此后，这两家主管机构向政府提交了审查意见，以供对许可证做出最终决定。

不只是芬兰和瑞典两国在这一领域取得了进展。在法国，放射性废物管理机构Andra目前正在准备许可证申请。在加拿大和瑞士，国家废物管理机构正在通过场址表征调查合适的场址。

在芬兰奥尔基洛托正在建造的昂卡罗乏燃料处置设施由一个坑道专设系统组成。昂卡罗处置设施还用于表征主岩，以支持安全论证研究。（图/波西瓦公司）

科学 深层地质处置设施

经深入研究，已经确定各种岩石类型作为隔离放射性废物深层地质处置设施主岩的适宜性。这些处置设施建在几百米深处的合适地质构造中，设计用于包容高放废物达数十万年。

深层地质处置设施的一个重要特性是它们提供非能动性安全，这意味着一旦处置设施被关闭，就不需要采取任何进一步的人为行动。

在地下几百米处建造这些处置设施，其深度可有效地将废物与潜在的地表扰动隔离数十万年，涉及将废物安置在非动态环境中，而不是条件往往不太稳定、更加动态的近地表地质环境中。

积极应对增长：中国的乏燃料管理战略

随着20世纪90年代初大规模经济增长的开始，中国当局认为核能是国家能源供应安全和低碳足迹的重要因素。中国启动了一项雄心勃勃的核电计划，该计划这些年来一直在增长。

目前，中国在运核反应堆有46座，总装机容量为45吉瓦（电），发电量约占全国总发电量的4%。在建或计划建设的新反应堆有11座，占世界在建核反应堆的20%。据中国工程院估计，中国核电装机容量预计在2035年达到150吉瓦（电），2050年达到300吉瓦（电）。

随着这种增长，要管理的乏燃料量也将成比例地增加。因此，中国正在推进其核燃料循环战略，扩大其乏燃料和放射性废物管理基础设施。

中国已选择闭式核燃料循环政策，包括对乏燃料采取堆内贮存或离堆贮存，然后将乏燃料运出进行再循环并最终用于快堆。中国第一座原型堆，65兆瓦（电）的中国实验快堆于2011年并

网，并作为发展600兆瓦（电）示范快堆的基础，该示范快堆目前正在建设中，计划在2023年前进行调试。容量为1000~1200兆瓦（电）的第一台商业机组可能于2028年12月开始建设，于2034年左右开始运行。根据中国公布的核电战略，快堆技术预计在本世纪中叶占据主导地位。

与此同时，中国的乏燃料管理战略是对现有压水堆产生的乏燃料进行后处理，并将回收燃料制造成混合氧化物燃料供压水堆使用。中国已经在甘肃省建立了一个年产200吨铀（tU/y）的后处理中试厂，2018年1月，中国和法国签署了一项建设一个后处理和再循环厂的协议，以便为压水堆生产混合氧化物燃料。2018年6月，欧安诺集团和中国核工业集团有限公司启动了年产能为800吨铀的乏燃料后处理厂的筹备工作。

计划在2050年前完成一座高放废物地质处置库的建设。地下实验室选址已完成，计划于2026年开始建设。

秦山核电厂的乏燃料贮存。直至中国的乏核燃料再循环和后处理设施建成之前，计划将乏燃料贮存在场内受保护和有通风的容器中。

（图/国际原子能机构 M. Gaspar）



核动力堆乏燃料管理网上学习新课程

文/Natalia Ivanova

国际原子能机构设计了一个概述世界范围内管理乏燃料不同战略的网上学习课程。该课程是乏燃料和放射性废物管理、退役和环境治理课程（包含其他几个模块）的一部分。

该课程面向核专业人员、此专题新成员以及工程和理科学生，阐明了管理乏燃料的不同方案以及可能影响一个国家特定管理战略选择的因素。这是国际原子能机构迄今就此专题制定的最详细的课程。

目前，13个讲座中有4个通过原子能机构的网络教育和培训网络学习平台以及原子能机构的CONNECT平台提供。其余讲座将于2020年初以前上传。讲座除英文外，还有法文、日文、俄文和西班牙文版本。

课程内容

前两讲介绍乏燃料管理，涵盖了乏燃料管理的所有方面——从乏燃料从核反应堆堆芯卸出到被视为废物并在深层地质处置库中处置。这两讲概述了管理乏燃料的不同方案、影响乏燃料战略选择的因素以及选择各种方案的后果。第3讲和第4讲介绍乏燃料贮存，阐明了贮存乏核燃料的不同方案和技术（湿法和干法），以及乏燃料贮存的一般安全考虑，以满足保护人和环境免受电离辐射有害影响这一基本安全目标。

“其余讲座内容将涵盖乏燃料特性和运输，以及乏燃料再循环技术和第四代反应堆的创新型燃料循环，”国



际原子能机构乏燃料管理技术负责人 Amparo González Espartero 说。

“这些讲座的技术内容由来自对乏燃料管理有着不同观点和战略国家的一组专家编写。因此，内容非常均衡，并以事实和数据为基础，”她说。

讲座首先列出网上学习目标的目录和概要，然后是更详细的解释。每一讲由几个章节构成，以加深对材料的理解。在每讲结束时，有一个简短的测验来测试用户的知识，音频概要涵盖关键的学习要点。模块化结构确保用户可以按照自己的进度浏览专题。为了说明信息并使其更易于访问，模块使用不同的媒体格式，包括视频和交互式练习。还提供了叙述文字、补充材料和术语表，以增加用户的理解。

乏燃料管理：40年的研究

文/Laura Gil

20世纪60年代和70年代的核电厂建设热潮带来了新能源时代的希望，同时也带来了新的挑战：处理核电厂卸出的乏燃料。这种燃料可以再循环利用吗？可以处置吗？是否可以贮存，如果可以，可以贮存多长时间，在什么条件下贮存？

多年来，专家们已经为这些问题找到了答案。由国际原子能机构协调的乏核燃料管理近40年的研究现已在一份新的出版物中公布。这份题为《动力堆乏燃料贮存期间行为》（原子能机构《技术文件》第1862号）的原子能机构出版物汇编了自1981年以来专家们就这一专题所记录的相关数据、观察结果和建议。

“当我们在80年代初开始与原子能机构进行研究时，我们意识到贮存强放射性乏燃料具有一系列技术和科学意义，”匈牙利TS Enercon工程咨询公司总经理Ferenc Takáts说。“我们查找了有关这些影响的基本资料，以建立一个有这方面经验国家的通用数据库，因为当时没有这样的东西。”

在核电早期，许多国家计划再循环乏燃料，并以此最大限度地利用铀。再循环的第一步是后处理，这是一个化学过程，涉及将易裂变材料即燃料中未用掉的钚和铀分离出来，以混合氧化物（或MOX）的形式重新利用。法国、俄罗斯和英国目前都拥有商业后处理设施。

其他一些国家选择了乏燃料处置而不是再循环利用。这些国家包括加拿大、芬兰、瑞典和美国。这一替代方案涉及在不允许回取乏燃料的条件下，将乏燃料安全地置于地下深处。

最初，所有国家都计划在自己的设施或国外设施对其乏燃料后处理。然而，在20世纪80年代和90年代，直接处置成为大多数国家的首先方案，因为铀价格持续走低，而与后处理有关的环境问题也引起关注。然后，在21世纪初，由于对廉价低碳电力的需求以及对长期铀供应的担忧，后处理的吸引力再次增加。

虽然这场辩论在不断进行，人们的观点也发生了变化，但管理当局一般都推迟了决定，最终，乏燃料仍被临时贮存比预期更长的时间。

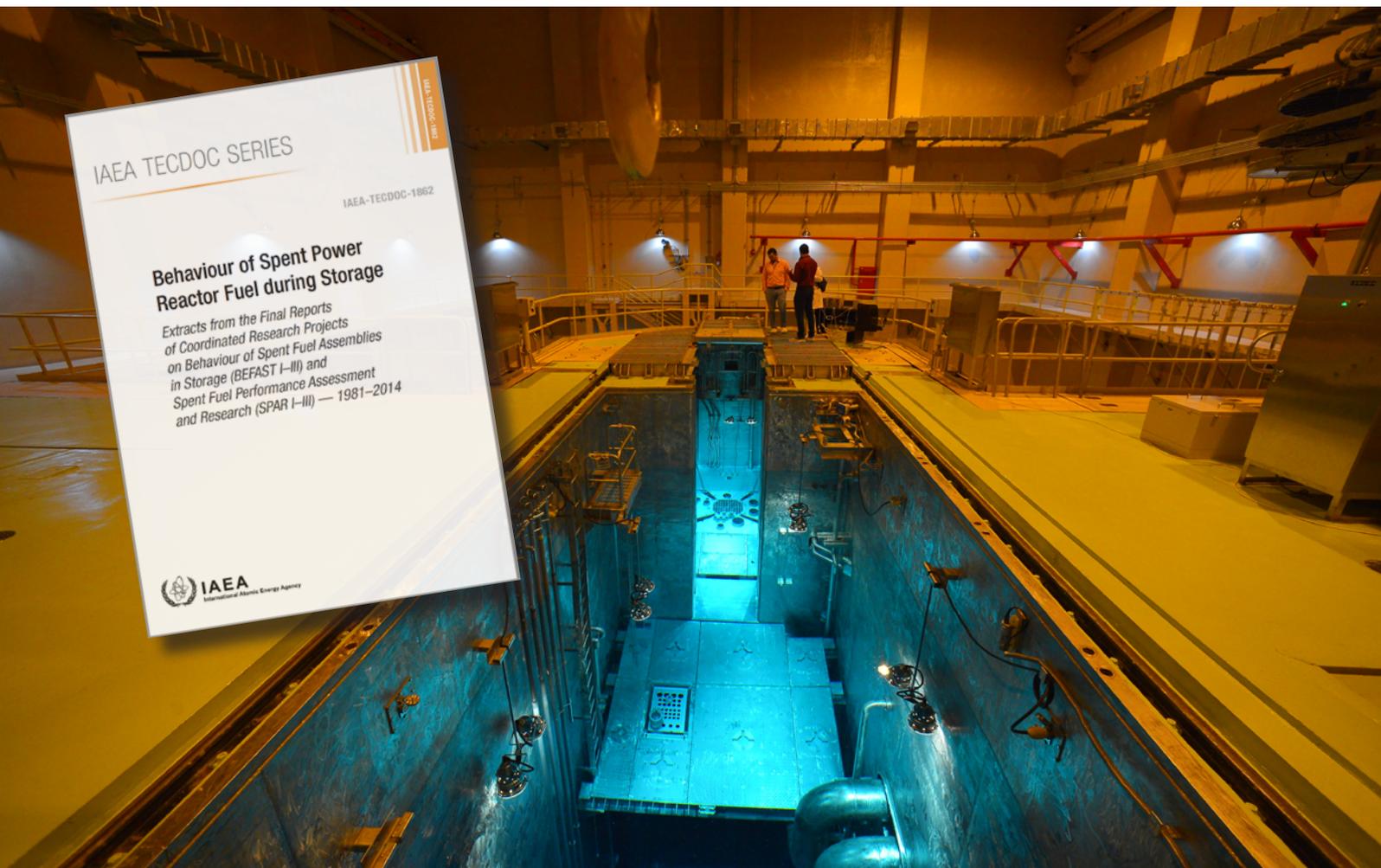
国际原子能机构研究项目

正是在这种背景下，为了响应“临时贮存”的首选方案，国际原子能机构启动了一系列协调研究项目，其中第一个项目于1981年开始。来自10个国家的专家们开始研究和讨论乏燃料贮存期间的行为（BEFAST项目），涵盖了与乏燃料后处理或送去处置前进行贮存有关的所有活动。参与国就乏燃料贮存的基础问题提供了研究和开发成果，并开始建立一个数据库，以协助评价贮存极长时间的乏燃料贮存技术。从1997年开始，启动了一个新的协调研究项目系列，这次更具体地针对乏燃料性能评定和研究（SPAR项目）。

在BEFAST项目和SPAR项目下的研究涉及21个国家和欧洲委员会的30个组织。这项研究促进了信息交流，这非常有益于燃料营运者、核电厂设计人员、监管机构、制造商，尤其是那些参与开发安全评价的人。“我们每个人都以不同的角度看待同一个问题，”Takáts说。

“对同一个问题我们每个人都
都可以从不同的角度来看。”

—Enercon公司总经理Ferenc
Takáts



当1997年Takáts在匈牙利一家咨询公司工作时，匈牙利已经运作了十多年的核电计划。由于没有出口乏燃料的可能性，他们不得不在电厂旁建造一个额外的干式贮存设施。这是一项艰巨任务，因为监管者担心乏燃料仍然具有放射性，且最初会释放大量热量，可能会太热而无法贮存。

“由于存在这些不确定因素，我们贮存乏燃料的温度限值必须在350摄氏度以下，这对设计人员来说是一个不必要的额外负担，” Takáts说。原子能机构项目成果对启示监管机构有所助益，他补充道。“值得庆幸的是，我参加了BEFAST协调研究项目，并有机会咨询一位德国专家，他们对高温干式贮存条件下燃料包壳的行为有更深入的了解。通过从国外收

集证据，我们得以证明我们的法规过于严格，应该在集体研究的基础上进行修订。”

根据该协调研究项目的结论准备了一项研究报告，并提交给监管机构。监管机构接受了这一论证结果并提高了贮存温度限值。这是该领域专家参与原子能机构协调研究工作使营运者受益的许多例子之一。

“所有的研究都有助于我们对乏燃料性能进行持续的技术监测，”国际原子能机构乏燃料管理专家Laura McManniman说。“这些项目是协作和研究的良好载体，它们为专家提供了一个自由分享信息的平台。”

原子能机构《技术文件》第1862号所汇编的研究工作的亮点可在线获得，并可应请求提供印刷本。

将保障纳入乏燃料贮存设施的设计中

文/Adem Mutluer

“从设计角度看，在设计选择最终确定之前，全面了解可能的保障活动及其对乏燃料设施设计的影响非常重要。”

—国际原子能机构保障司概念和方案科科长Jeremy Whitlock

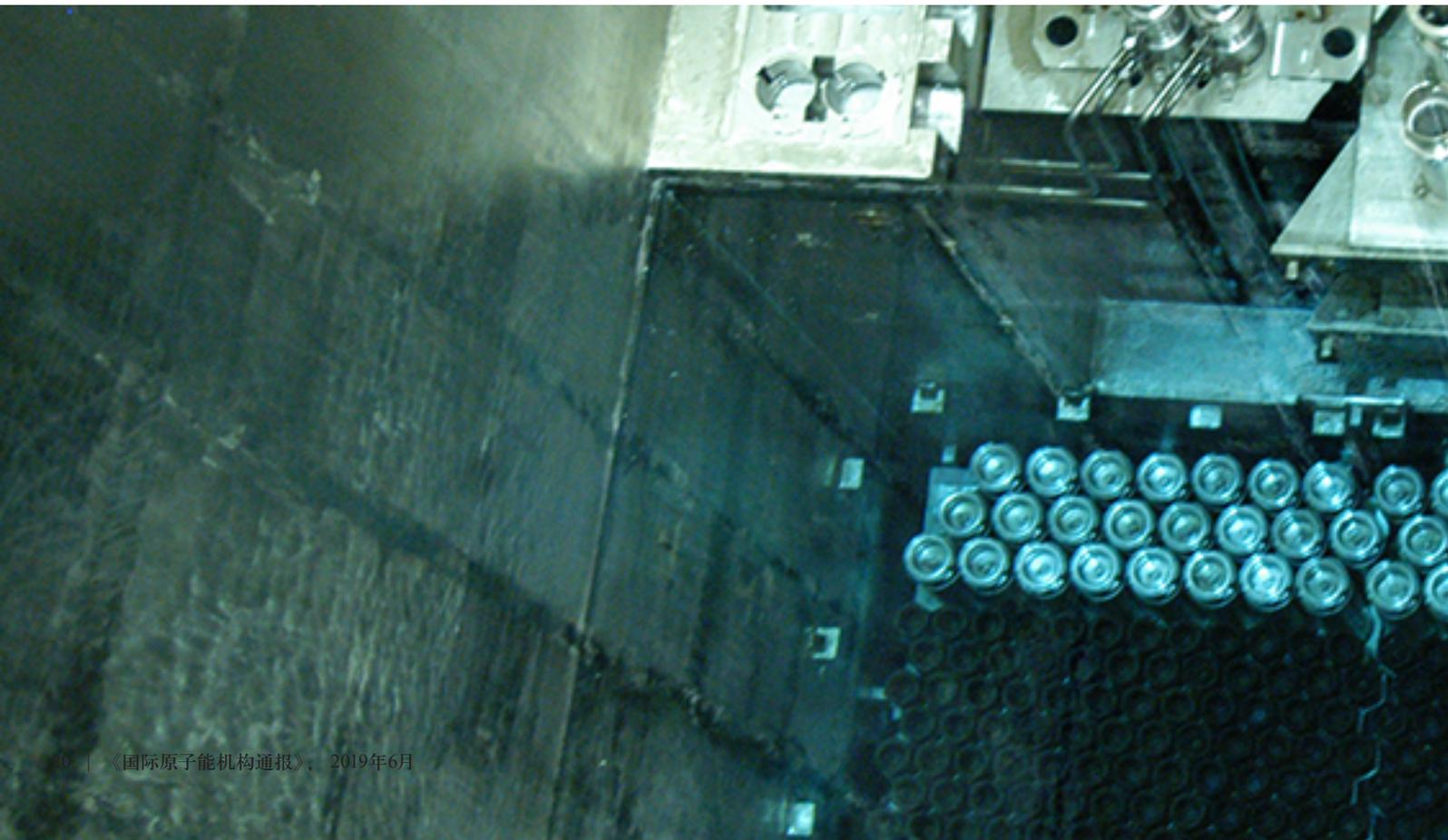
原子能机构致力于加强核技术对世界和平与繁荣的贡献，同时核查核材料没有从和平利用中转入。原子能机构保障是全球核不扩散制度的一个重要组成部分，它规定对各国遵守其国际法律义务的情况进行独立核查。为此，原子能机构通过其“保障设计”文件丛书发布导则，以协助核设施设计者和运营者在设计过程的早期阶段就考虑与核设施（包括乏燃料贮存设施）相关的保障活动。

在着手建造或改建设施之前考虑保障要求，这一概念称为“保障设计”，是自愿性的，旨在促进并改进现有保障要求的实施。但是，如果采用“保障设计”，可以更有效和更高效地实施保障视察，同时减轻设施运营者的负担。

“这一目的是使新建乏燃料设施具有保障特性，”原子能机构保障司概念和方案科科长Jeremy Whitlock说。“通过在乏燃料设施的设计和建造中考虑这些特性，可以在对被视察设施的运行造成最小干扰的情况下进行保障活动。”

在设计和建造过程的早期确认保障，有助于利益相关者就设施运行、保障要求和相关主题进行公开对话，从而允许开发核查方法，以尽可能减小实施保障对运营者的影响，同时不降低所执行保障活动的有效性。此外，这些方法将通过帮助原子能机构以最佳方式开展核查活动来提高保障的效率。

在了解保障活动的情况下，设计者还可以更有效地规划预期的核查活



动需求。这包括尽量减少视察员的辐射照射，增加使用保障设备进行维护的机会，确保现场远程数据传输的能力，以及减轻可能干扰核查的事件的影响。

乏燃料贮存设施是核燃料循环的重要组成部分，原子能机构保障将继续发展，以应对相关的核查挑战。对乏核燃料贮存设施实施保障也是原子能机构核查工作的重要组成部分。2018年，原子能机构对全世界超过25个国家的82个乏核燃料贮存设施实施了保障。在这些设施中约持有57 000个重要量的核材料。

在绘制乏核燃料贮存设施的蓝图时，设计人员认识到乏燃料贮存周期尤为重要。可能要求乏燃料设施确保材料可以长期（例如100年）回取。

“从设计角度看，在设计选择最终确定之前，全面了解可能的保障活动及其对乏燃料设施设计的影响非常重要，”Whitlock说。“早期规划可以将灵活性纳入设施的基础结构，以支持

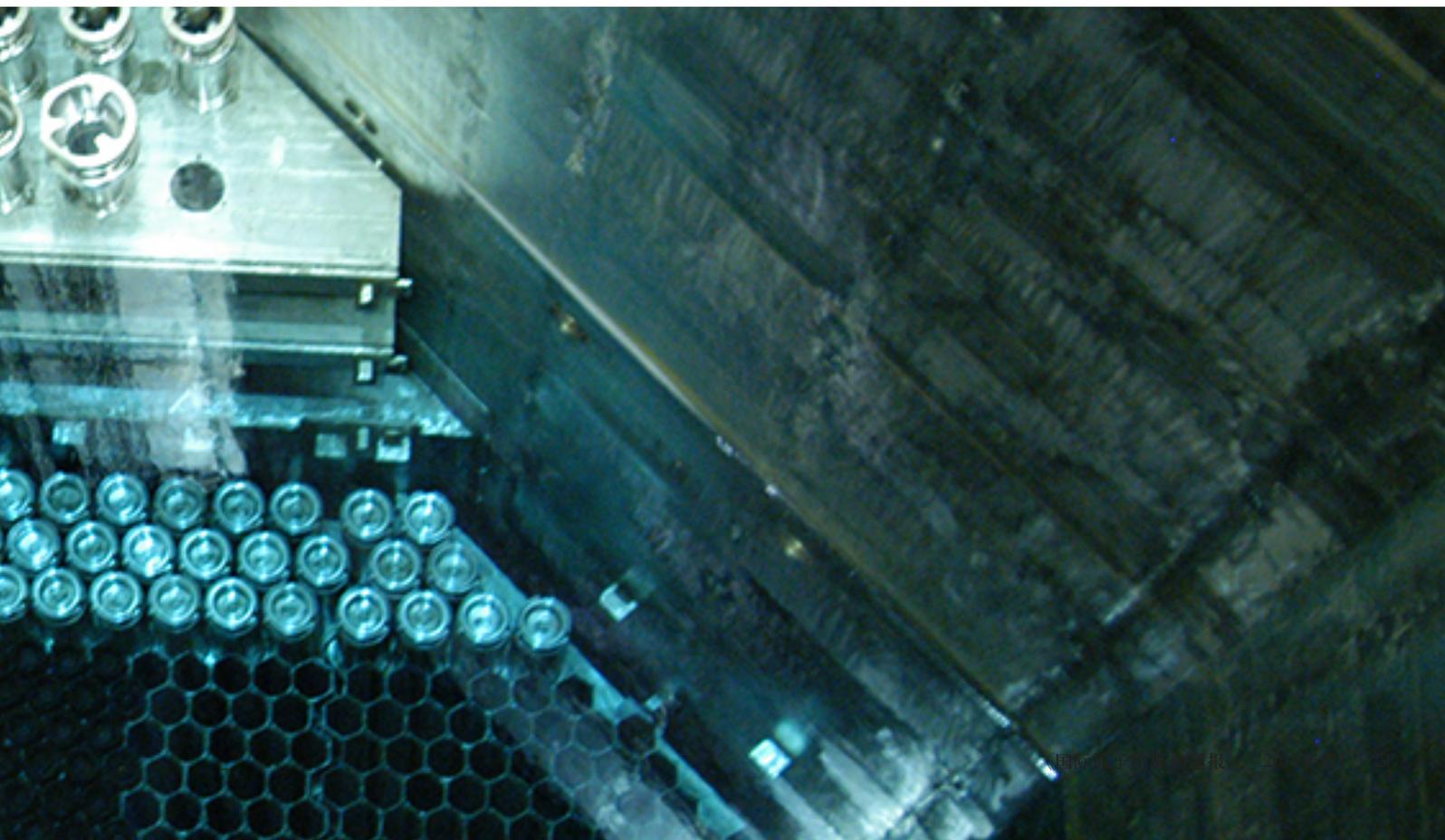


未来的技术创新，这可能既有利于营运者又有利于保障实施。”

“保障设计”文件丛书可在原子能机构网站上查阅。

在斯洛伐克莫霍夫采核电厂乏燃料贮存设施进行视察员培训。

(图/原子能机构D. Calma)



机器人技术挑战赛获胜设计 助力加快乏燃料核查

文/Adem Mutluer

“能够为核不扩散努力以及原子能机构的重要核查工作做出贡献非常令人激动。”

—Datastart公司的所有者兼首席执行官Peter Kopias

获胜设计“水面无人艇”在芬兰洛维萨核电厂进行真实环境测试。

(图/国际原子能机构)

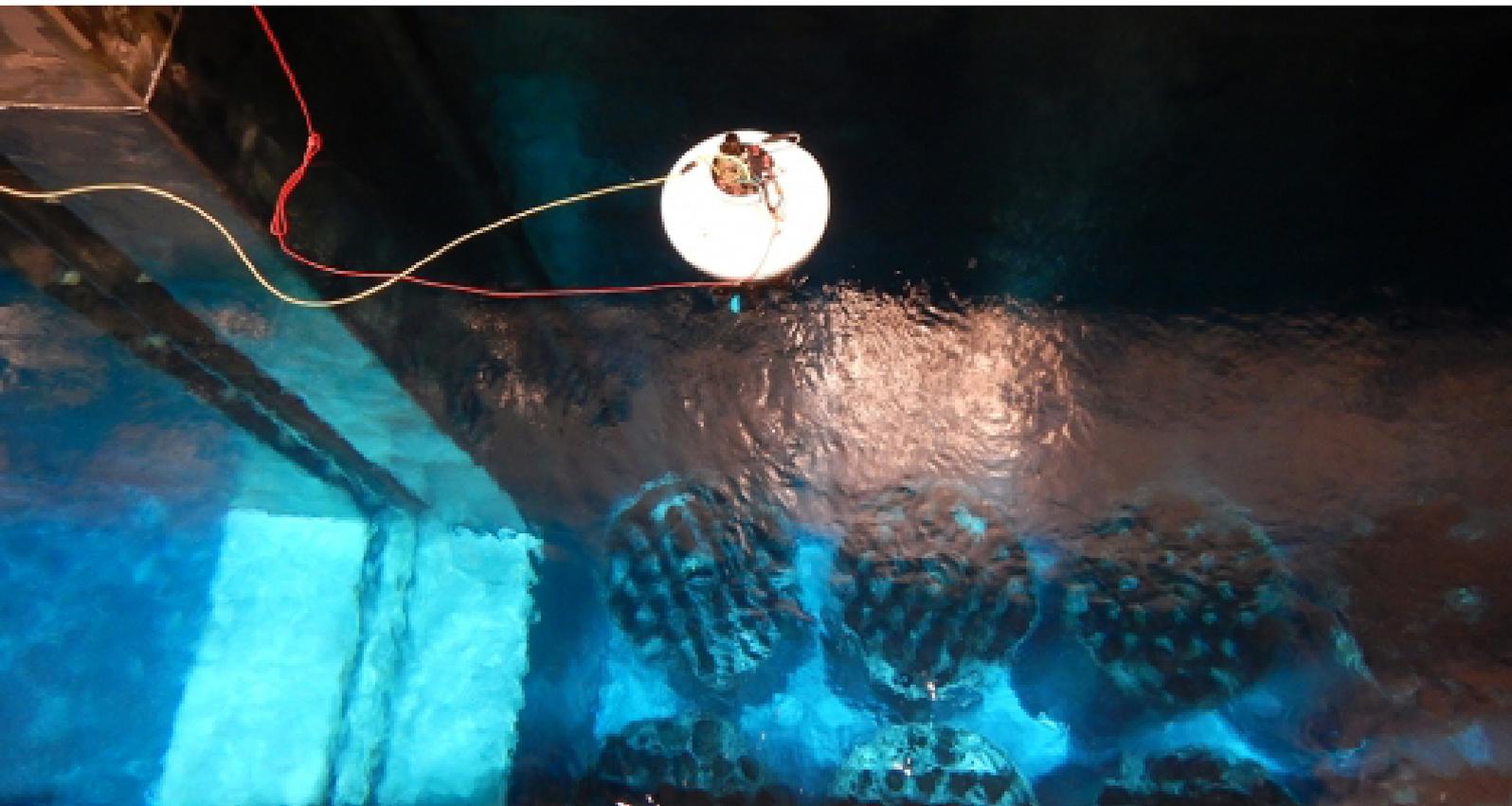
虽然乏核燃料不再维持可发电的核链式反应，但它仍然含有可用于武器的核材料。这就是为什么乏燃料核查成为原子能机构核保障工作的一个核心组成部分。

乏燃料通常贮存在水下以进行冷却。核查水下乏核燃料可能是一个棘手而漫长的过程。它要求原子能机构视察员从乏核燃料池上方拍摄单个乏燃料组件图片，每次有数百个组件。这一过程被确定为机器人技术有可能发挥有益作用的领域，因此2017年，原子能机构发起了一项挑战活动，采用众包方式寻求使乏燃料核查更加有效和高效的创意和解决方案。

在对世界各地核设施进行视察活动时，核保障视察员经常使用称为改进型切伦科夫观察装置的小型手持式光学

仪器。改进型切伦科夫观察装置用于证实贮存于水下的乏核燃料的存在情况。乏核燃料在从反应堆堆芯卸出后，通常放置于水下进行冷却。视察员的任务是核实所贮存的燃料数量是否与国家当局申报的数量相符，并且没有燃料被移出和可能从和平利用中转运。

目前，保障视察员需要将改进型切伦科夫观察装置悬挂在乏燃料池上方的龙门架上，通过镜头手动观察各个燃料组件。就机器人技术挑战赛而言，原子能机构的目的是寻求一些设计，这些设计能够将新开发的、可提供数字记录的下一代切伦科夫观察装置安装在一个小型机器人浮动平台内，该平台能够自动地推动自身穿过乏燃料池表面。通过将下一代切伦科夫观察装置稳定在垂直位置，这个“水



面无人艇”可以在更短的时间范围内提供更清晰的图像。

机器人挑战赛吸引了超过300份提交作品。在选定进行演示的12项建议中，有3项设计经过了真实环境测试。2019年初，由一个匈牙利工程师小组设计的“水面无人艇”被宣布为原子能机构机器人挑战赛的获胜者。获奖设计的选择首先经过原子能机构专家的全面设计和性能评价。“在2018年11月机器人挑战赛的最后阶段，这些设计在芬兰核电厂的乏燃料贮存池中进行了实际测试，”原子能机构保障司技术预见专家Dimitri Finker说。“这使我们的专家有机会审查每个设计的优点，并评价其中哪些设计适合保障的操作需求，具有内置安全考虑因素，并且提供了核查用的最佳图像质量。”原子能机构目前将与其成员国、核设施运营者和获奖“水面无人艇”的设计者合作，以最终确定设计方案，并确保其符合所有适用的要求和条例。在此之前，原子能机构将寻求其成员国对在这一领域使

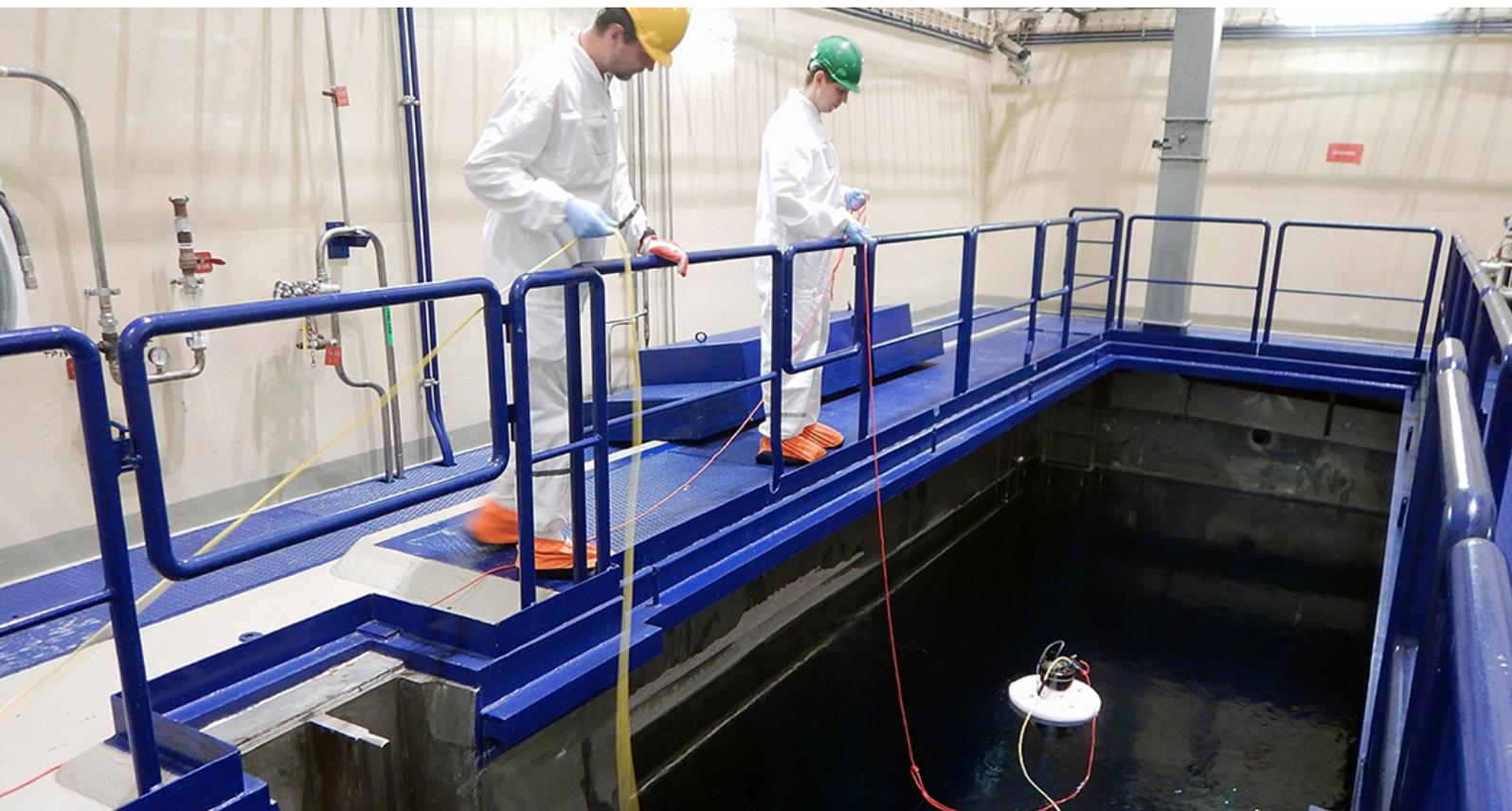
用“水面无人艇”的许可。

“我们很高兴我们的设计从如此激烈的竞争中脱颖而出。能够为核不扩散努力以及原子能机构的重要核查工作做出贡献非常令人激动，”获奖公司Datastart的所有者兼首席执行官Peter Kopias说。“机器人挑战赛需要创造性的工程解决方案。我很高兴我们的独特设计满足了用户的需求。”

除机器人挑战赛外，原子能机构还开展其他技术挑战赛，以确定和支持有可能帮助其开展工作的有前景的技术发展。“通常情况下，只会向少数高度专业化的研究机构寻求对可能用于保障工作的技术设备的正式投标。随着原子能机构面临的技术挑战，正在向数以百计的技术利益相关者寻求科学解决方案，”Finker说。最新的挑战，即原子能机构断层扫描重建和分析挑战，旨在通过先进的数据处理技术改进乏核燃料的核查过程，以分析从改进型切伦科夫观察装置和可能的下一代切伦科夫观察装置中获取的图像。

国际原子能机构专家审查获胜的“水面无人艇”设计的性能。

(图/国际原子能机构)



简化核动力堆乏燃料的运输和贮存

文/Nicole Jawerth

贮存和运输高放乏核燃料需要采取预防措施及强有力的安全和安保措施。迄今为止，人们通常一直使用单独的容器或屏蔽容器将乏燃料从核电厂贮存和运输到贮存地点并最终运输到处置或再循环的地方。另一种方案是使用适合贮存和运输的两用屏蔽容器，简化了这一过程，从而使其既更加便宜又更加安全。

为了更多地了解这些独特的屏蔽容器及其在乏核燃料安全管理中的作用，《国际原子能机构通报》执行编辑Nicole Jawerth采访了瑞士联邦核安全检查局运输和预处置部门的Bernd Roith。Roith在乏核燃料运输和贮存解决方案方面拥有八年的经验。他经常作为专家参与原子能机构加强乏燃料安全管理项目。

问：由于乏核燃料是铀和钚等放射性元素的混合物，其安全可靠的处理至关重要。什么是两用屏蔽容器？它如何适用于乏燃料的安全可靠管理？

答：乏燃料管理没有“一刀切”的解决方案；每个国家都有自己的流程和战略。一些国家将乏燃料贮存在池中，而另一些国家则采用基于容器的系统或具有干燥条件的特殊厂房。后处理燃料是一些国家采用的另一种方案。

两用屏蔽容器是干法贮存和运输选择之一。这些屏蔽容器设计用于确保放射性物质不会释放，无论是在贮存中还是在运输中。虽然它们的确切特性取决于一个国家的乏燃料管理需求，但这些屏蔽容器通常是大型、密集排列的桶状容器，在运输和临时贮

存期间容纳乏核燃料或高放废物。两用屏蔽容器通常由钢或铸铁制成，有一个用螺栓连接的防泄漏双盖系统，同时仍可以根据需要安全简单地回取燃料。

每个两用屏蔽容器必须符合严格的安全标准，涵盖四个主要功能：机械完整性、散热、屏蔽和临界控制。



“每个两用屏蔽容器必须符合严格的安全标准，涵盖四个主要功能：机械完整性、散热、屏蔽和临界控制。”

—瑞士联邦核安全检查局运输和预处置部门Bernd Roith

将所有这些功能整合到一个设计中，同时又要符合国际运输要求和国家贮存要求，这使得两用屏蔽容器的开发和使用非常复杂，但是一旦装配，它们便简化了管理过程中的其他步骤。

问：与其他贮存方法相比，两用屏蔽容器有哪些优势？

答：两用屏蔽容器消除了一些额外的乏燃料处理。通常，对于许多其他选择，每个步骤都需要不同的贮存容器或设施，这意味着还需进行燃料转移，并且通常这些容器不是为公路运输而设计的。两用屏蔽容器可以装满燃料，运输和放置到临时贮存处，然后运输到最终贮存设施或后处理设施，无需再处理或再包装。这使得它们成为公路运输乏燃料国家最受欢迎的选择之一。

问：原子能机构如何适应两用屏蔽容器的发展和使用？

答：两用屏蔽容器的设计受贮存设施类型及其安放地点的影响。这意味着在不考虑这些差异的情况下，制定适合全球所有两用屏蔽容器的明确要求并不容易。原子能机构已经制定与两用屏蔽容器运输有关的安全要求，并且能够协调各国两用屏蔽容器的不同贮存要求。因此，当各国开始生产核能时，他们可以求助于原子能机构的辅助性文件来决定两用屏蔽容器是否适合于他们，以及如何设计和使用两用屏蔽容器来处理乏燃料。

原子能机构还协调有关如何优化两用屏蔽容器设计和使用的研究。例如，在原子能机构会议上提出的一项

讨论涉及干法贮存中燃料的老化。两用屏蔽容器通常设计使用至少40年或50年，但现在更多地考虑使用100年或更长时间。这可能需要修改实际设计或需要新设计，以减少长期贮存对两用屏蔽容器的可能影响，并确保它们继续满足高安全标准，无论是在运输中还是在贮存中。

问：您认为两用屏蔽容器的未来会怎么样？

答：随着核电厂的发展，两用屏蔽容器设计人员一直在努力改进他们的设计。由于核电厂运行时间更长，产生更多乏燃料，因此目标是优化设计以使每个两用屏蔽容器的燃料含量最大化。它还意味着使用新材料以适应更长的贮存时间以及随着核电厂使用富集度更高的燃料而产生的更高热负荷。新设计也可能更加简化，以使其制造更容易、更便宜，同时仍满足所有运输和贮存要求。

一些国家正在逐步淘汰核能生产，目前这一代专家最终会退休。年轻人对这个行业工作的兴趣也可能会下降，但很明显我们将来会需要人。这正是原子能机构通过组织电子学习课程和提供培训对构建知识提供真正帮助所在。

安放在瑞士ZWILAG贮存设施的两用屏蔽容器。
(图/ZWILAG)



汲取以往教训

超过28年的核能燃料循环领域工作令我了解了系统、知识管理和核设施运行

文/Susan Y. Pickering



桑迪亚国家实验室荣誉主任 Susan Y. Pickering 在桑迪亚国家实验室拥有超过28年的核相关研究和开发经验。

2019年原子能机构核动力堆乏燃料管理国际会议的主题是“汲取以往教训，增强未来能力”。从我们在核能方面的集体经验中可以汲取重要教训，无论我们来自成熟的核电计划还是新兴的核电计划，会议为我们分享这些经验教训提供了一个理想场所。

核能计划需要对时间和资源作出长期承诺才能取得成功。这些计划带来了许多挑战，有技术性的和非技术性的。我在核能燃料循环方面工作了28年。我面临过许多挑战，也得到了许许多多的经验教训。我愿意分享我的一些意见和想法。

核能系统是复杂而综合的。例如，处置设施是由废物形式、容器、回填物和主岩构成的多障碍封闭系统，每个组成部分的性能都会对其他部分产生影响。今天的贮存决策会如何影响未来的处置方案呢？乏燃料容器是否可以排除特定模式的运输或处置概念/场址？我们需要利用从摇篮到坟墓的方法来审视这些系统。

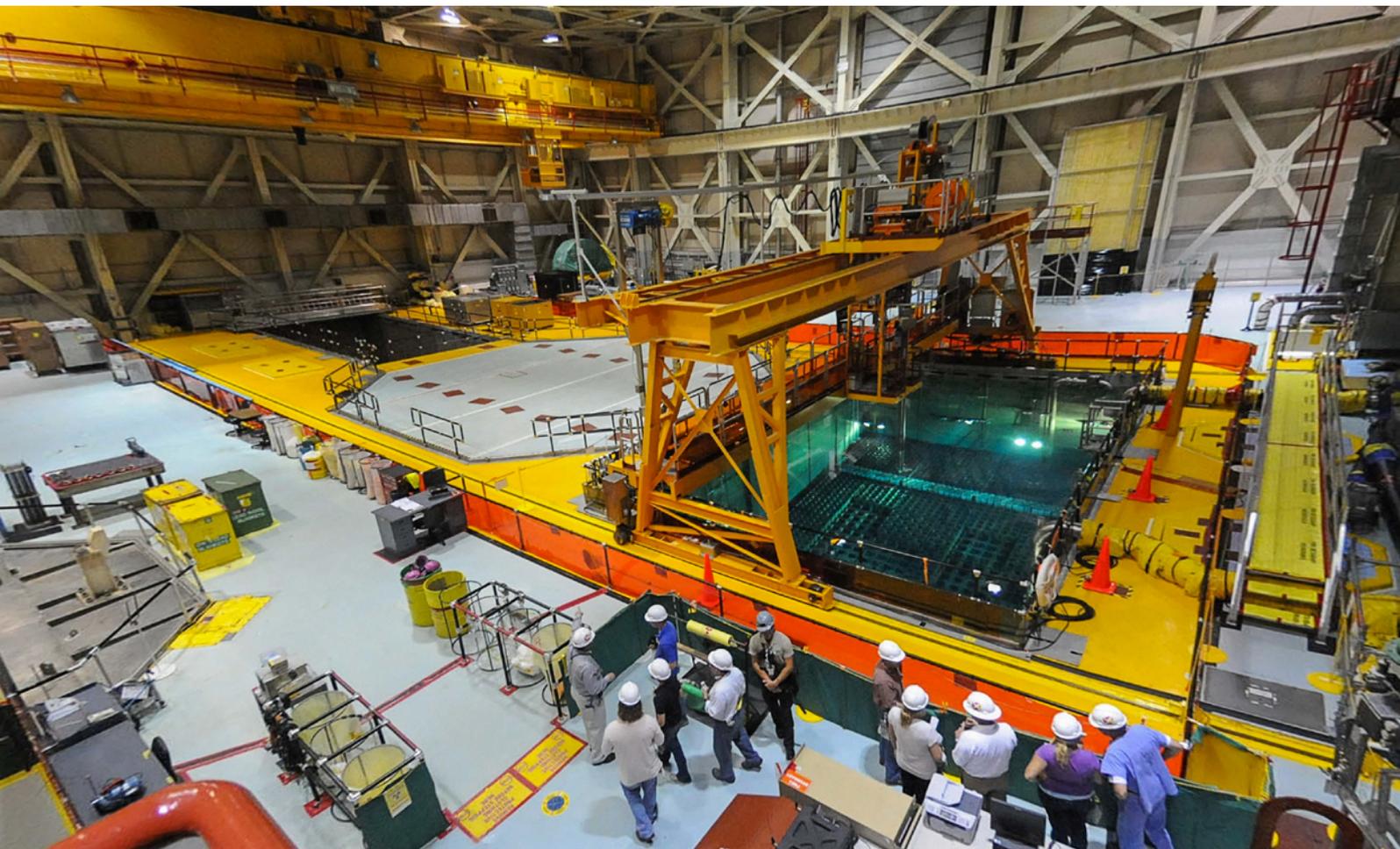
核设施的寿命可以持续数十年。在核设施的整个寿期中，将出现一些问题，而这些问题将不得不由那些没有做过最初工作的人，甚至可能是那些在最初工作完成时还没有出生的人来解决。因此，应尽快启动质量保证和知识管理计划。

核设施的问题通常可归因于人

员、部件或程序（也被称为3P）的不足。担任领导职务的人对3P具有很大的影响。强大的质量保证和知识管理计划会引入控制措施来加强3P。这样的计划将（1）提供人员资格的客观证明，（2）提供解决不同专业人员意见的过程，（3）确保设备和部件足以满足其预期用途，（4）通过确定工作流程提高一致性，（5）提高技术工作的可信度和可辩驳性，（6）提供对整个项目周期的知识管理，以及（7）提供对项目问题及其解决方案的见解。精心设计、实施良好的质量保证和知识管理计划是一个关键的成功因素。

我认为在质量保证和知识管理计划中有两大类信息需要保留：按照传统标准定义的信息（例如质量保证记录）和没有按照这类标准定义的信息（例如关键决策背后的逻辑）。第二类信息往往被忽视，即使在出现问题时保护核设施至关重要。例如，核设施是否记录了关键活动的结果和结论是如何产生的？它们可以复制吗？

核系统通常被认为具有争议性。利益相关者很多，往往意见相反，可能成为冲突的根源。必须对利益相关者的影响予以重视，因为它们可能会影响决策者和决定者。利益相关者通常需要频繁的参与、透明度和影响力。核设施与其利益相关者之间的关系很重要，必须采用资源予以支持。



与公众、利益相关者和地方政府合作增加了成功的可能性。

在核设施较长的寿期内，保持高水平的卓越运行将是困难的。降低成本的压力可能导致不明智的决定。人员和组织的更替可能导致知识流失。随着时间的推移自满可能会增加。设施老化，且可靠性会下降。长年累月，还会出现新的、未预料到的漏洞，如网络安全。

了解风险对于妥善管理核计划至关重要。核设施事故通常属于“后果严重、概率低事件”的风险类别。即使事故频度估计极低，但后果可能巨大、代价高昂且影响持久。这些系统很复杂，需要可靠的科学和复杂的工程设计，以确保妥善管理风险。政府发起人、监管机构和执行团队中技术上称职的领导是成功的一个重要因素。

领导者的一个强有力的工具是

独立审查，可以是同行评审或独立评定。原子能机构提供许多类型的评审。在所有情况下，评审人员必须具备资格并独立于所审查的工作。我们都是人，都会犯错误。明智的领导者依靠关键步骤和决策环节的独立审查来发现问题，同时使影响很小，解决方案的实施成本更低。

组织各级领导必须欣然采纳能够促进强大核安全文化的行为。每一天，每一种情况，他们都必须表现出对安全的承诺，奖励积极行为和惩罚消极行为。他们能够接受意外情况，并对正常事件和异常事件作出安排。他们必须了解不确定性、风险、边际、纵深防御和恢复力。有能力的人是强大安全文化最重要的成功因素。正如美国核安全之父海军上将H.G. Rickover所说：“规则不能代替理性思想。”

美国布伦瑞克核电厂2号机组的乏燃料池。

(图/美国核管理委员会)

从实验室到现场：印度尼西亚科学家利用核科学为农民开发新作物



BATAN研究人员庆祝使用辐照开发的水稻品种取得成功
(图/印尼国家核能机构BATAN)

在过去几年里，印度尼西亚农民使用通过该国植物突变育种计划开发的植物，为超过2000万人种植了足够的水稻。该计划最初产生于1997年与原子能机构和联合国粮食及农业组织（粮农组织）的合作，此后已发展成为一个全面的伙伴关系网络，将利用核技术的科学研究成果带到农民田地。

“印度尼西亚的核技术已被用于包括农业在内的生活的各个领域，”印度尼西亚国家核能机构BATAN副主席Suryantoro说。“通过辐射突变工程研究，BATAN提高了当地作物品种的质量，使新的和改良的种子可以被社区广泛使用。”

当与粮农组织/原子能机构粮农核技术联合处的第一个植物育种合作项目于1997年开始时，BATAN研究机构的科学家们通过原子能机构协调研究项目和技术合作项目，获得了最先进的设备、核技术的广泛培训和专家的支持。这为印度尼西亚的植物突变育种计划奠定了基础。

此后，通过该计划开发了超过35个新的作物品种，包括大豆和水稻。这些新品种通过辐照培育，根据其与其他当地品种相比的改良特性加以挑选，考虑的特性例如包括更高的产量、更短的耕作时间，以及对各种气候变化胁迫因素和各种疾病的抵抗力（参见植物突变育种）。这些新作物种子一旦选定后，接着会进行繁育并提供给农民。

“重要的是生产更多的种子以增加种植面积，”东爪哇农业部官员A. Sidik Tanoyo说。“这将有助于提高生产力和农民的收入。”

为了帮助确保广泛使用这些新作物品种，该计划已发展成为一个全面的伙伴关系网络，为大规模种植扫清道路。这种模式基于研究机构、部委、政府机构、种子培育公司、农民合作社、市场利益相关者和出口集团之间的合作。这些合作伙伴关系覆盖整个供应链，从种子开发和培育到分销和田野种植。

“该计划涉及许多国家部委

和机构以及三个国际组织，旨在从上游到下游运作，”BATAN同位素和辐射技术应用中心负责人Totti Tjptosumirat说。“在上游位置，BATAN开发优质种子；农业部然后将种子分发给种子生产者，产业部将这一创新向下游传递给中小企业或初创公司。”

在全国各地种植更多的水稻

BATAN的23个新的水稻品种中有3个现已在全国不同地区广泛种植。这些水稻品种被称为Bestari、Inpari Sidenuk和Mustaban，之所以被选中，是因为它们能够在比其他当地品种更短的时间内平均生产超过150%的水稻，它们也更能抵抗气候变化以及病虫害。

“在我们地区，飞虱虫害无处不在，当我看到Mustaban这些好品种时，谢天谢地，飞虱不会对它有影响，”万丹省西朗区种子培育人员Hamid说。在附近的加斯曼村，另一位种子种植人员Tatang还说：“我们不需要使用杀虫剂了。Mustaban品种一开花，就没有米臭虫了。”

BATAN专家计划继续研究和开发扩大新的植物品种数量，并吸收农民反馈意见以进一步改进和改善植物性状。研究还将针对优化植物如何利用当地农业实践（如肥料系统）以及在不同环境条件下（如当地土壤、强风和大雨）进行生长。

文/Driss Haboudane

核专业人员分享如何促进强大安全文化：原子能机构安全领导短训班



初级和中级职业专业人员通过原子能机构安全领导短训班的小组练习活动了解安全领导技能。

(图/原子能机构J. Gil Martin)

参加2019年4月22日至5月3日在土耳其安卡拉举办的核和辐射安全领导短训班的人员表示，组织内的核安全领导和强大安全文化发展，需要为具有不同背景的核专业人员之间进行开放和富有意义的讨论创造空间。

在常规和应急情况下，由于其固有的复杂性，核和辐射工作环境中的安全领导尤为重要。原子能机构的安全领导短训班帮助中早期核和辐射专业人员发展其在整个职业生涯中引领安全所需的技能。

来自14个国家的监管机构、核营运者和技术组织共计29名专业人员参加了这次短训班。他们分析了案例研究，进行了练习，参加了讨论并听取了应邀专家关于核和辐射安全（包括应急准备）的专题介绍。短训班是在一个原子能机构技术合作项目的框架内举办的，该项目旨在加强欧洲核和辐射安全组织的能力建设

活动，以确保设施的安全运行。

参加人员表示，短训班为建设安全领导力的讨论提供了环境，并为他们在研究机构中发挥这种领导力提供了灵感和策略。

介绍团队内部沟通的新方式

短训班参加者塞尔维亚辐射与核安全和安保检查局国际合作和项目管理处处长Milijana Steljic突出强调了个人行为以及使用某些工具建立强大的团队以促进安全的重要性。

“这次短训班鼓励我以一种全新的方式思考，尤其是思考自己作为领导者的角色，以及如何平衡自身的专业输出和通过自身行动激励团队成员的能力，” Steljic说。“短训班将专题介绍和讲座与案例研究、小组工作、比赛和技术参观相结合，展示了我们的领导行为，并向我们介绍了一套供日常使用的领导者工具。”

“我想把团队建设活动和定期讨论案例研究引入到我的团队，并使用这些新的领导者工具评价我的团队表现，”她继续说道。“我想最好是把这种观念引入到整个组织，我希望我们所有人都能进行更开放的交流，以便在我们的组织中建立强大的安全文化。”

促进所有团队成员对领导力的承诺

另一位参加者，阿塞拜疆国家核与放射性活动管理局技术立法和标准部高级顾问Aysel Hasanova强调了适当的计划在激励核安全专业人员方面的作用，并指出所有小组成员——不仅是管理人员——都可以成为安全领导者。

“领导者的行为强烈影响安全。安全领导意味着无论一个人是否为管理者，都要不断地发展并使自己成为团队所有成员的榜样，” Hasanova说。“我努力促进强大安全文化，传递来自经验丰富专业人员的知识，吸引年轻专业人员和职业女性，并且致力于在全国范围内引入新的人力资源发展工具——这就是我选择参加这次短训班的原因。”

“以前，我认为人必须天生就是一个领导者，但我现在相信每个人都可以发掘和发展自己的领导才能，”她说。“什么都不是一天造就的，但我们需要以明确的目标开始，并做出巨大的承诺，以实现这些目标。”

文/Nathalie Mikhailova

越南利用辐照提高食品质量



食物产品在越南原子能研究所辐射技术研究与发展中心使用电子束辐照装置（如图所示）和 γ 辐照装置进行辐照处理。

（图/原子能机构E. Marais）

每天早上，越南胡志明市的一个储藏室里都排列着数百个装满冷冻海鲜、干果和蔬菜、传统东方药品和保健食品的箱子。它们将经过类似于机场安全筛查的过程，但采用的是较高强度的光子束或电子束，这是过去二十年来在原子能机构支持下建立的食品辐照计划的一部分。

食物辐照使用不同剂量，可确保根茎类蔬菜和水果不会过早发芽或成熟；寄生虫被杀死，香料被去污；沙门氏菌被消灭；以及消除会破坏肉类、禽肉和海鲜的真菌。

1999年，在原子能机构和联合国粮食及农业组织（粮农组织）的帮助下，食品辐照方法首次被引入越南，辐照产品的大市场自此打开，显著提高了公司出口食物产品的能力。食品辐照已成为越南食品行业的支柱，为提高该国农业竞争力做出了重要贡献。

“1999年，我们每年照射的食品为259吨，到2017年已增加到1.4万吨，”越南原子能研究所辐射技术研究与发展中心电子束部主任Cao Van Chung说。“这表明对我们工作需求的真正激增。今天，我们已成为国家辐射技术领域的领先设施之一，在食品辐照领域处于领先地位。”

引入 γ 和电子束辐照

这种显著增长成为可能，归因于引入了两种辐照方法：1999年引入的 γ 辐照装置，使用在混凝土室内带屏蔽辐射源产生的电离能量；以及自2013年以来投入使用的电子束辐照装置。电子束辐照装置不依赖于放射源，而是使用由直线电子加速器等专用设备产生的高电荷电子流。食物不会与放射性物质接触，照射既能保持食物的质量，又能提高食物的安全性，同时不会留下任何残

留的放射性。

Chung说，虽然两种方法的辐照过程是相同的，但各有不同的互补优势。 γ 辐照装置使用可以容纳各种产品尺寸的较高的铝制箱。箱子围绕从一个高架单轨系统悬挂下来的放射源移动并通过辐照室。食品需要两轮照射，以确保包装产品的所有面都经过适当处理。

另一方面，电子束辐照装置包含双面束流，这使得照射过程比使用 γ 辐照装置快三倍，因为整个产品可以在一个圆形体内照射。然而，电子束辐照装置的尺寸有限，最大箱子尺寸为 $60 \times 30 \times 50$ 厘米，重量为15千克，因此更大更重的产品必须使用 γ 照射。这些机器并排工作，每周7天、每天24小时运行，只在越南新年期间停运。

在引入 γ 辐照装置和电子束辐照装置之前，使用传统方法，包括罐装、冷藏和冷冻以及化学防腐剂，对海产品、水果和蔬菜等食品进行防腐处理，由于其效果较低，妨碍了制造商出口产品的能力。

这些辐照设备是在原子能机构技术合作计划的支持下获得的，该计划还为工作人员提供了培训和专家建议。越南是原子能机构在该领域支持的40个国家之一。

辐射技术利用的增长

越南原子能研究所辐射技术研究与发展中心已从1999年成

立时仅有20名员工发展到现在79名。除了食品辐照服务外，它还提供医疗产品和巴氏杀菌食品的辐射灭菌，并将其研发产品商业

化，如农业用植物保护剂和医药用金银纳米凝胶。

该中心还进行研究和开发，并提供辐射技术领域的培训。它

与国际合作伙伴合作，寻找进一步改进辐照技术的方法。

文/Estelle Marais

国际原子能机构开发追踪水污染源的新方法



湖泊、海洋和河流中过量的硝酸盐会增加藻类的生长，从而导致有毒的蓝绿色藻华。国际原子能机构与马萨诸塞大学达特茅斯分校合作开发了一种追踪水中硝酸盐污染来源的创新方法。

(图/国际原子能机构L. Wassenaar)

国际原子能机构与马萨诸塞大学合作开发了一种追踪湖泊、海洋和河流中氮污染来源的创新方法。核衍生分析工具提供了一种更便宜、更安全、更快捷的方法来确定水中过量的氮化合物是否来自农业、污水系统或工业，从而有助于预防和治理工作。氮作为地球上一种必不可少的丰富元素，是自20世纪中期以来广泛用于农业的一种重要肥料。“水质方面的一个主要全球性问题是，我们几十年来一直在田间过度施肥，无论是粪肥还是合成肥料，”原子能机构同位素水文学科负责人Leonard Wassenaar说。“所有这些营养物质，特别是硝酸盐等各种氮形式，都渗入地下水，最终渗入河流、湖泊和溪流。”

过多的硝酸盐会增加藻类

的生长，从而导致湖泊表面出现有毒藻华。它们还会沉入湖底，滋生细菌，形成所谓的死区。“我们现在看到更多的鱼类死亡，成千上万的鱼漂浮在水面上，因为湖底——鱼类通常的栖息地——由于大量有机物质而缺氧，”Wassenaar说。

去除水中硝酸盐非常困难且代价高昂，因此需要使用一些工具来了解氮的来源和途径，以便更好地为水保护和治理工作提供信息。

发表在《质谱学快报》杂志上这种新方法，可测量水中硝酸盐稳定同位素的数量和比例。氮有两种具有不同重量的稳定同位素或不同原子形式。例如，由于在人体废物与肥料中这种重量差是不同的，因此同位素可用于识别来源。

“同位素工具对于测量水中营养物质非常有用，”Wassenaar说，“但它们的使用受成本和可及性的限制，历史上一直非常困难。这项新技术使科学家们能够为大规模的研究提供更多的样品，而且成本更低。我认为这是一个游戏改变者。”

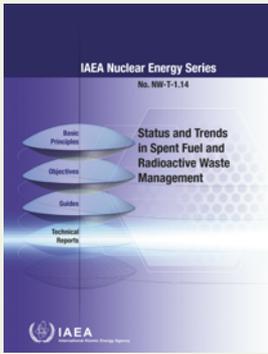
新方法使用氯化钛（一种盐）的形式将水样品中的硝酸盐转化为一氧化二氮气体。从这种气体中，同位素可以用质谱仪或激光等设备进行分析。目前的方法使用转基因细菌或剧毒的金属镉进行一氧化二氮的转化，这使得它们既费劲又昂贵，而且它们的使用仅限于一些非常专业的实验室。

马萨诸塞大学达特茅斯分校海洋科学与技术学院河口与海洋科学教授Mark Altabet说：“这是一种相对简单的方法，而过去却是一个非常复杂和昂贵的过程。”样品分析的成本比过去减少了5到10倍，制备样品只需几分钟。

Altabet计划利用这种方法研究为控制美国东海岸河口长岛湾污染所采取措施的影响，长岛湾过去严重受过量硝酸盐的影响。

原子能机构促进应用核技术和同位素技术来确定水源、年龄、质量和可持续性，以帮助各国更好地管理这一重要资源。

文/Luciana Viegas



《乏燃料和放射性废物管理的现状和趋势》

本出版物全面概述放射性废物和乏燃料存量管理状况、计划、目前实践、技术和趋势；包括对放射性废物和乏燃料管理的国家安排和计划的分析、对当前废物和乏燃料存量的概述以及对未来数量的估计；还讨论了这些领域的国际和国家趋势。

国际原子能机构《核能丛书》第NW-T-1.14号；ISBN：978-92-0-108417-0；英文版；39欧元；2018年

www.iaea.org/publications/11173/status-and-trends

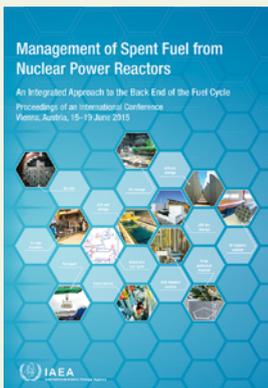


《发展新核电计划的国家管理乏燃料和放射性废物的备选方案》

本出版物简要概述与发展健全的放射性废物和乏核燃料管理系统有关的关键问题。其目的是向拥有小规模或新建核电计划的国家简要介绍管理核电厂运行和退役期间产生的反应堆废物和乏燃料的挑战，并描述在该领域的当前和潜在的替代方案。

国际原子能机构《核能丛书》第NW-T-1.24 (Rev. 1)号；ISBN：978-92-0-103118-1；英文版；32欧元；2018年

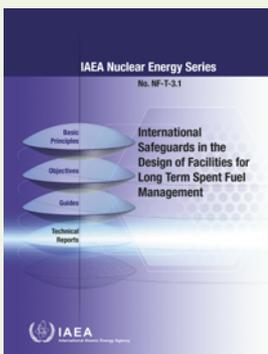
www.iaea.org/publications/12255/options-for-management



《核动力堆乏燃料管理：燃料循环后端综合方案》

本出版物介绍2015年国际原子能机构核动力堆乏燃料管理国际会议的成果，该会议分享和审查了与核燃料循环后端有关的成就和经验教训以及相关挑战。会议的主要目标是提高对电力发展和处置可用性如何影响乏燃料管理的认识，评价自原子能机构关于这一主题的会议开始以来在动力堆乏燃料管理方面的进展并确定未决问题和预期的未来挑战。

《国际会议文集》；ISBN：978-92-0-101819-9；英文版；28欧元；2019年
www.iaea.org/publications/13488/management-of-spent-fuel



《乏燃料长期管理设施设计中的国际保障》

本出版物面向乏燃料长期管理设施的设计者和营运者。供应商、国家当局和财政支持者也可以从所提供的信息中受益。本出版物补充了国际原子能机构《核能丛书》第NP-T-2.8号《核设施设计和建造中的国际保障》所述的一般考虑因素。

国际原子能机构《核能丛书》第NF-T-3.1号；ISBN：978-92-0-100717-9；英文版；36欧元；2018年

www.iaea.org/publications/10806/international-safeguards

**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

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：



气候变化与核电作用国际会议

2019年10月7日至11日
奥地利·维也纳



主办单位：



IAEA

国际原子能机构
原子用于和平与发展

原子用于气候