

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12月 | www.iaea.org/bulletin

研究堆

中子拯救生命：利用研究堆生产医用同位素和放射性药物， 第6页

研究堆网络优化运行，满足日益增长的需求， 第14页

让世界上老化研究堆继续运转， 第16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。

封面照片： L. Gauna Pereira/CNEA

请关注我们



最大限度地发挥研究堆的多功能性、使用寿命和影响力

文/国际原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西

研究堆推动了科技进步，成为履行国际原子能机构（原子能机构）促进和平利用核科学技术使命不可或缺的一部分，是教育、研究和发展的重要工具。研究堆通过其独特的能力，在增强我们对核物理、材料科学和医学的认识方面发挥着关键作用，继而为人类带来了更多的益处，包括生产新型放射性药物等。

有220多座在运研究堆分布在54个国家，还有25座研究堆正在规划或建设中。当今，全球反应堆群逐步老化，大多数反应堆已运行50多年。这种情况是可以控制的，原子能机构正在协助各国制定和实施反应堆翻新和现代化改造计划，以便使反应堆能够继续安全有效地运行。

与此同时，一些核电新兴国家正在开发其首座研究堆设施，这些设施可作为未来核电计划的基石。在核领域，安全和安保至关重要，研究堆的安全和安保也不例外。原子能机构随时准备支持各国履行其国家责任，确保其研究堆从构想到退役的安全、安保和全面优化。原子能机构通过协调

研究项目、专家工作组访问、同行评审、出版导则、规划工具和培训开展这项工作。原子能机构目前正在支持30多个研究堆技术合作项目，世界各国参与了这些项目。这些项目与研究堆的用途一样是多方面的，从提高反应堆的核安全、利用率和运行实绩，到为国家首座研究堆发展核基础结构，不胜枚举。

本期《国际原子能机构通报》介绍了研究堆的多功能性及其对我们生活的深远影响。从医疗到尖端材料和燃料的提升，研究堆为科学进步和社会经济发展奠定了基础。随着各国努力应对气候变化和能源安全的紧迫挑战，研究堆使开发和测试涉及核裂变和聚变能源的创新能源解决方案成为可能。研究堆还经常被用于帮助识别空气污染源、支持土地管理、生产用于治疗放射性同位素以及评估建筑物的结构完整性。

核研究堆有如此众多用途，已成为重要工具。原子能机构积极支持各国最大限度地利用研究堆，决心让每个人都能享受到它们的广泛惠益。



“从医疗到尖端材料和燃料的改进，研究堆为科学进步和社会经济发展奠定了基础。”

—国际原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西



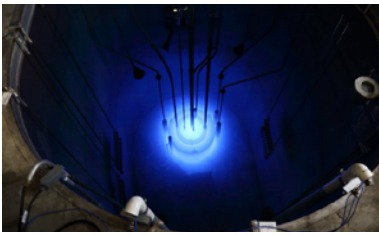
图/国际原子能机构



1 最大限度地发挥研究堆的多功能性、使用寿命和影响力



4 什么是研究堆？研究堆如何促进可持续发展？



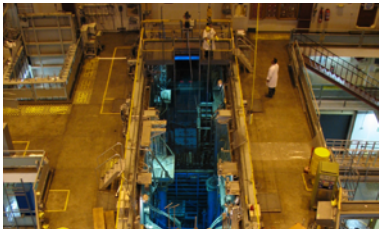
6 中子拯救生命
利用研究堆生产医用同位素和放射性药物



8 中子成像技术的进步为低功率研究堆创造了新机遇



10 国际原子能机构新的同行评审服务帮助各国最大限度地发挥研究堆的功能和效用



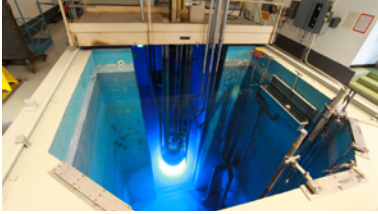
12 支持非洲科学家利用研究堆优势促进社会经济发展



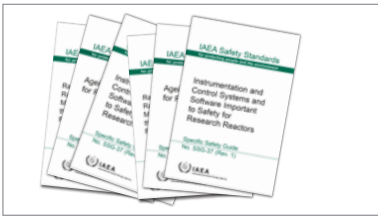
14 研究堆网络优化运行，满足日益增长的需求



16 让世界上老化研究堆继续运转



20 为研究堆计划规划人力资源



22 迅速而有效

更新国际原子能机构“安全导则”的新方案



24 确保埃及研究堆核安保免遭威胁



26 国际原子能机构新工具助力各国研究堆乏燃料管理决策

世界观点

28 巴西的经验：研究堆造福社会

国际原子能机构最新动态

30 新闻

32 出版物

什么是研究堆？研究堆如何促进可持续发展？

文/Joanne Liou 和 Xinwen Tang

全球在运核反应堆有三分之一以上用于研究、教育和生产放射性同位素，而不是用于发电。与用于发电的核动力堆不同，核研究堆主要用于产生中子。中子是不带电的亚原子粒子，有多种用途，如研究原子级材料，生产用于医学、工业和研究的放射性同位素，以及对物体内部结构进行成像。

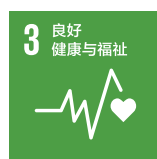
约有220座在运研究堆分布在54个国家，还有25座正在建设或规划中。它们不仅在推动核技术发展方面发挥着关键作用，而且通过帮助各国实现可持续发展目标，在改善日常生活的方方面面中发挥着作用。研究堆有各种规模和设计。与传统的动力堆相比，研究堆通常位于学术和研究机构内，规模较小，运行温度较低。大多数研究堆的热功率在0~100兆瓦，而大型核动力堆的热功率为3000兆瓦。因此，研究堆使用的核燃料量和产生的放射性废物量要低得多。

如何利用研究堆？

研究堆的设计和使用主要面向实验、教育和培训以及为医疗和工业应用生产放射性同位素。它们为研究和了解材料行为、中子相互作用和辐射效应提供了受控环境。除了支持众多学科的研究外，研究堆对于核能的发展也至关重要。作为创新反应堆技术的试验平台，研究堆为材料和核燃料实验提供了现实环境。研究堆还为核设施工作人员、辐射防护和监管人员以及学生和研究人员提供教育和培训机会。

研究堆如何支持联合国“可持续发展目标”？

“可持续发展目标”是联合国于2015年制定的一套17项目标，旨在应对卫生、教育和能源等方面的全球挑战。研究堆有助于实现其中几项“可持续发展目标”，包括：



“可持续发展目标3——良好健康与福祉”：

研究堆在医学成像和癌症治疗方面发挥着重要作用。研究堆生产的放射性同位素用于85%的核医疗程序，对于开发新的放射性药物至关重要，每年通过加强各种癌症的诊断方法和治疗使数百万人受益。“希望之光”是原子能机构的旗舰癌症倡议，正在帮助各国增加获得这种救命治疗的机会。



“可持续发展目标4——优质教育”和“可持续发展目标5——性别平等”：

作为一种教育和培训工具，研究堆为所有学生提供服务。原子能机构支持的讲习班、培训和工作组访问以及原子能机构的玛丽·斯克洛多夫斯卡-居里进修计划和莉泽-迈特纳进修计划培养了一支包罗广泛的人才队伍，为全球科技创新作出了贡献，并推动了全球科技创新。



“可持续发展目标6——清洁饮水和卫生设施”：

研究堆在开发辐射灭菌水处理技术中发挥着关键作用。利用辐射处理废水能够有效消除水中有害微生物、病原体和其

约有**220**座
在运研究堆分布
在**54**个国家，还
有**25**座正在建设
或规划中。

他污染物，可使水安全饮用和用于其他用途。

7 廉价和清洁能源



“可持续发展目标7——经济适用的清洁能源”

研究堆有助于开发和测试新能源技术。研究人员可以对新型核反应堆概念、燃料和材料进行评估，以优化核动力堆设计，从而提高安全性、效率和性能，支持未来的清洁能源发展。“原子用于净零排放”是原子能机构的一项倡议，旨在支持各国利用核能优势实现净零转型。研究堆还利用中子成像、中子散射和中子深度剖析等技术研究氢燃料电池和锂离子电池等非核能概念。

8 体面工作和经济增长



“可持续发展目标8——体面工作和经济增长”

核领域的学生、研究人员和专业人员可以通过在研究堆进行的培训获得实践经验和知识。此类培训可为他们在核领域及相关领域的发展机会做好准备。此外，研究堆还被用于提供产品和服务，例如硅掺杂，将杂质引入硅中以改变电子设备的电气性能。

9 工业、创新和基础设施



“可持续发展目标9——产业、创新和基础设施”

研究堆促进了各个领域的创新，从极端条件下的电子产品和建筑材料到医药等等。研究堆产生的中子对于各行各业的无损检测也很有价值，可确保物品的质量和安全。

17 促进目标实现的伙伴关系



“可持续发展目标17——促进目标实现的伙伴关系”

努力实现可持续发展是一项集体工作，许多拥有研究堆的研究所和大学都参与了协作项目和研究活动，从而加强了在科学、技术和创新方面的地区和国际合作以及获取科学、技术和创新的机会。

国际原子能机构的作用是什么？

原子能机构支持各国高效和可持续地利用研究堆，使其能够充分获得这些核设施的惠益。原子能机构提供研究堆培训班和讲习班，并出版导则、安全标准和电子学习课程。原子能机构的协调研究项目促进国际合作和专家之间的网络联系，同时推动涉及研究堆的科学发展。

原子能机构的研究堆审查工作组访问支持新的研究堆项目，并利用原子能机构的导则和标准评估各国的实践，以改进反应堆设施的运行、利用、安全和维护。原子能机构的若干技术合作项目还侧重于加强各国的运行和维护技术能力，以提高研究堆的安全性、可靠性和利用率。

美国密苏里大学研究堆（MURR）堆芯鸟瞰图。该反应堆生产的放射性同位素用于肝癌、胰腺癌、前列腺癌和甲状腺癌的治疗。

（图/密苏里大学）

中子拯救生命

利用研究堆生产医用同位素和放射性药物

文/Amirreza Jalilian 和 Mary Albon

医用放射性同位素的高效生产和新型放射性药物的开发正在为多种癌症和其他疾病带来更好的诊断和更有效的治疗。因此，对主要利用研究堆或加速器生产的放射性同位素的需求持续增长，临床使用的放射性药物数量也在迅速增加。

原子能机构物理学和化学科学司司长Melissa Denecke说：“医用放射性同位素和放射性药物如果制备和使用得当，可以挽救生命。”

医用放射性同位素是一种放射性元素，当附着在药物制剂中的特定分子上时，会释放出易于追踪的辐射，因此可用于医学诊断。它们还可用于治疗目的，针对肿瘤组织治疗癌症，如前列腺癌、乳腺癌或肠癌。

放射性药物是将医用放射性同位素与生物活性分子相结合的药物。诊断性放射性药物含有能发射射线的放射性同位素，可以针对特定器官、组织或细胞。这些药物通过注射、吸入或口服给患者使用，利用非侵入性的外置

摄像头检测伽马射线，生成目标器官或组织的图像。治疗性放射性药物含有可发射粒子的放射性同位素，可在靶组织中积聚，杀死癌细胞。

研究堆是钼-99 (^{99}Mo)、碘-131 (^{131}I) 和钬-166 (^{166}Ho) 等医用放射性同位素生产的主要来源。碘-131用于诊断和治疗甲状腺癌，是20世纪40年代初研究堆生产的最早放射性同位素之一。研究堆能够生产约35种医用放射性同位素，钼-99占主要份额，是锝-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 的母同位素。全世界约85%的核医学程序，即每年多达5000万次核医学程序，使用锝-99m来诊断癌症、心脏、大脑和骨骼相关疾病。

镥-177 (^{177}Lu) 是基于研究堆的另一种重要放射性同位素。“镥-177是用于治疗骨痛、前列腺癌、胃癌和肠癌的治疗性放射性药物的主要生产原料。”波兰国家核研究中心放射性同位素中心研究员 Renata Miko ajczak说，“全球至少有20种使用镥-177的新药正在研发中。”

40个国家拥有能够生产放射性同位素的研究堆；其中约有**25**个国家正在积极生产用于医疗用途的放射性同位素。

美国里德学院的研究堆堆芯正在辐照用于生产医用放射性同位素的靶件。

(图/Flickr图库网站D. McCullough)

2023年5月，原子能机构启动了一个协调研究项目，利用镭-177开发用于癌症治疗的新型放射性药物。“基于镭-177的放射治疗的最新发展改变了神经内分泌肿瘤和前列腺癌的治疗管理，为患者带来了更好的治疗效果。”原子能机构放射性药物科学家Aruna Korde说，“然而，我们对以镭-177标记的治疗性放射性药物的生物学行为的了解仍然不够深入。”该协调研究项目旨在确定和解决可能限制这些放射性治疗药物疗效的因素，将开展镭-177放射性药物的临床前评价，以评估其针对某些主要癌症的潜力。项目还将为放射性标记以及基于镭-177标记的放射性药物的质量、安全和疗效评估提供指导。

放射性同位素生产

40个国家拥有能够生产放射性同位素的研究堆；其中约有25个国家正在积极生产用于医疗用途的放射性同位素。在大多数情况下，放射性同位素面向国内市场生产。少数国家在地区或世界市场出口放射性同位素，还有一些国家大量出口。原子能机构向世界各国提供如何利用研究堆开发和制造这些诊断和治疗手段的知识和专

门技术。研究堆为医疗应用提供了安全稳定的重要同位素来源，包括放射性药物、放射性同位素治疗源（如近距离放射治疗）和医疗器械消毒。

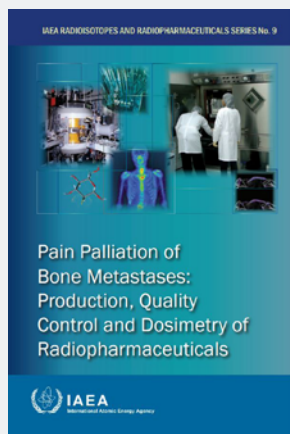
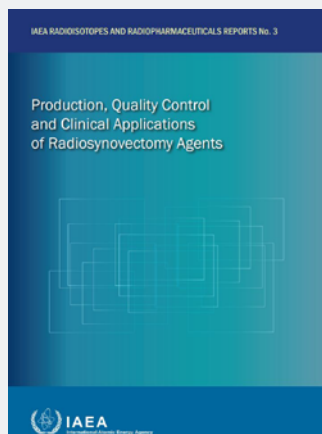
需求持续增长。比利时核研究中心（SCK-CEN）放射性同位素项目经理 Bernard Ponsard说：“要满足利用研究堆生产的放射性同位素日益增长的需求，还有很长的路要走。”

原子能机构支持各国利用研究堆生产放射性同位素，不仅用于医疗用途，还用于工业和研发目的。它编制导则性出版物，召开技术会议以交流信息和专门技能，组织涉及多个国家研究机构的协调研究项目，以及通过培训活动、科学访问和进修促进能力建设。原子能机构还通过其技术合作计划支持各国并促进地区和跨地区项目。

“原子能机构正在全球范围内建立和培养一支能够生产放射性同位素和安全、高质量放射性药物的专业队伍。”Denecke说，“我们的最终目标是帮助提高这些核医学基本工具的全球产量，缩小某些地区在获取使用方面的差距，从而使癌症患者和其他致命疾病患者能够得到所需要的治疗。”

“我们的最终目标是帮助提高这些核医学基本工具的全球产量，缩小某些地区在获取使用方面的差距，从而使癌症患者和其他致命疾病患者能够得到所需要的治疗。”

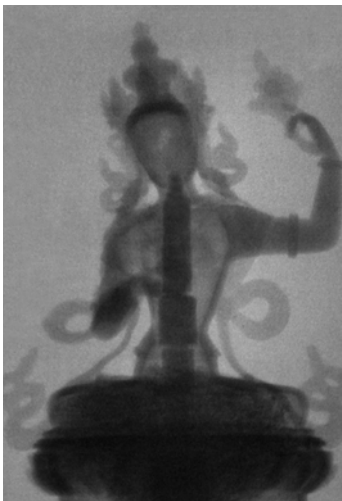
—国际原子能机构物理学和化学科学司司长Melissa Denecke



图为原子能机构最近发布的两份出版物，涉及以下两种类型放射性药物的生产和临床使用：一是用于治疗类风湿性关节炎和血友病患者的关节疼痛，二是用于减轻晚期骨转移引起的疼痛。这些治疗方法可以改善这些疾病患者的生活质量。

中子成像技术的进步为低功率研究堆创造了新机遇

文/Mary Albon



布拉格捷克技术大学（CTU）的中子成像系统揭示了一尊西藏苯教雕像（Chamma）内的世界轴心（连接物质世界与精神世界的标志）。（图/捷克技术大学L. Sklenka）

中子成像是一种利用研究堆或加速器中子源对内部结构进行检查的非侵入性技术。原子能机构项目副主任Molly-Kate Gavello说：“这是一种神奇的工具，在科学和工业研究与开发以及法证学和文物研究方面具有无限的潜能。”中子成像可用于测试电机、减震器和涡轮叶片，可以显示水如何在有生命的植物体内流动，或检查充满铁质岩石的恐龙头骨化石的内部情况。

尽管中子成像技术自20世纪50年代就开始使用，但直到20世纪90年代，二维胶片成像一直是主要成像方式。随着数字技术（包括先进数字照相机）的出现，中子成像现采用计算机断层扫描（CT）技术，该技术使用数百张从不同角度拍摄的图像来创建高度详细的三维（3D）图像。

直到最近，由于技术和资金方面的原因，使用CT或三维成像技术进行中子成像对于低通量中子源（如低功率研究堆）仍不具有可行性。

低功率下的高质量图像

2021年，布拉格捷克技术大学（CTU）的博士生雅娜·马图什科娃和她的导师卢博米尔·斯克伦卡展示了在研究堆功率为500瓦的情况下使用CT进行中子成像的能力，从而改变了

这一局面。

这一突破源于两个方面的发展。首先，低成本、高质量的天文相机在此十年前已经问世。其次，德国慕尼黑工业大学海因茨·迈尔-莱布尼茨研究中子源（FRM II）的研究人员意识到这些新型相机的潜力，并于2016年展示了首个用于中子层析成像（包括低功率反应堆）的迷你设施。布克哈德·施林格尔带领的团队在FRM II研究堆开发并建造了一套配备3D打印探测器外壳的低成本、高质量的中子成像系统，以及用于先进中子断层成像和射线成像实验系统（ANTARES）设施的缩小版专业控制软件。新探测器的图像质量与ANTARES设施通常使用的最先进系统相当。

马图什科娃希望用低功率中子源（如捷克技术大学的500瓦VR-1培训反应堆）测试中子成像，相比之下，20兆瓦FRM II反应堆的功率是捷克技术大学反应堆的4万倍，因此产生的中子也是捷克技术大学反应堆的4万倍。由于新冠疫情的限制，她无法进入捷克技术大学的设施进行实验，因此面临着挑战。

斯克伦卡联系了施林格尔，请他就如何复制FRM II开发的低成本系统提供建议，施林格尔通过视频通话向马图什科娃提供了建议，并向她提供

了有关系统设计和从何处采购必要部件的信息。马图什科娃一步步地在自己家里建造了一套中子成像系统，并用可见光对其进行了测试。

新冠疫情限制解除后，马图什科娃在捷克技术大学反应堆安装了她的系统，并成功生成了捷克技术大学的第一张数字中子二维图像，随后又在500瓦的功率下照射12小时进行中子计算机断层扫描成像。

马图什科娃目前正在改进捷克技术大学的中子成像系统，这是她博士研究的一部分。该系统主要用于教育目的，但也用于开展研究，例如与布拉格国家美术馆合作检查文物。

共享技术和专门知识

FRM II设施和捷克技术大学的经验表明，微型设施可用于任何中子源，包括功率极低的研究堆。施林格尔说，他的团队随时准备免费提供设计图和软件，并在国际上帮助安装和调试。

有了三维打印机制造的部件、缩小到适合笔记本电脑的软件以及天体摄影相机价格的下降，整套设备只需不到5000欧元就能组装完成，而且运

输方便。2022年，施林格尔和美国爱达荷国家实验室的研究科学家亚伦·克拉夫特带领原子能机构专家工作组，在智利核能委员会的RECH-1研究堆安装了数字中子成像系统。施林格尔用手提箱带来了组件，系统在两天内就安装完毕。

“原子能机构在为低功率研究堆提供这项技术方面发挥了关键作用。”施林格尔说，“新的灵敏探测器为这些反应堆开辟了一个全新的应用领域，这些反应堆无法为复杂的中子散射实验提供足够的中子。中子成像使它们更容易用于教育、研究和与博物馆的合作。”

原子能机构支持与研究堆的技术合作，包括专家工作组访问和设备采购。它还出版中子成像指南，提供地区培训，并正在扩大电子学习机会。2022年，通过原子能机构协调，马图什科娃在阿根廷 RA-6 研究堆工作了四个月，帮助安装和测试低成本中子成像系统。

在奥地利塞伯斯多夫的原子能机构中子科学设施也安装和调试了一个类似的中子-X射线双系统，目前正用于培训。

“新的灵敏探测器为这些反应堆开辟了一个全新的应用领域，这些反应堆无法为复杂的中子散射实验提供足够的中子。”

—德国慕尼黑工业大学布克哈德·施林格尔



卢博米尔·斯克伦卡、雅娜·马图什科娃和布克哈德·施林格尔在布拉格捷克技术大学研究堆设施合影。

(图/慕尼黑工业大学)

什么是中子成像？

中子成像是一种非侵入式方法，用于检查不透明物体的内部结构和组成。其原理与X射线成像类似。不过，X射线会被金属等致密材料吸收，而中子束则能穿透大多数金属和岩石，并且会被一些轻元素（如硼、碳、氢和锂）衰减。中子还有助于观察磁场以及技术和结构材料中的应变。

国际原子能机构新的同行评审服务帮助各国最大限度地发挥研究堆的功能和效用

文/Emma Midgley

研究堆是用途广泛的工具。虽然它们并不用于发电，但其中一些正在为开发创新型清洁能源解决方案作出贡献，还有一些在为拯救生命提供放射性同位素和揭示文化遗产的真实情况。许多研究堆得到了充分利用，但也有一些未得到充分利用。为了帮助各国以可持续和有效的方式充分利用其研究堆的潜力，原子能机构启动了“研究堆综合利用评审”服务。

原子能机构研究堆专家 Nuno Pessoa Barradas 说：“许多研究堆建于20世纪50年代和60年代，以满足当时的迫切需要。目前，人们对研究堆的潜力有了更好的了解，新旧反应堆都在开发新的应用。”

继2019年在意大利开展试点评审工作组访问之后，2022年在智利圣地亚哥拉雷纳核研究中心的5兆瓦池式

RECH-1研究堆开展了首次正式“研究堆综合利用评审”与“研究堆运行和维护评定”工作组访问。由国际专家组成的“研究堆综合利用评审”工作组拥有与研究堆利用和应用相关的一系列科学、管理和运行背景。

“核科学技术有助于实现国家在健康、环境、水和农业资源、能源、采矿和工业等领域的发展目标。”智利核能委员会执行主任 Luis Huerta 说，“原子能机构的这些工作组访问旨在对智利核反应堆 RECH-1 进行详尽地审查，对我们的水平和能力进行了分析，以便改进运行和维护，扩大我们核设施的使用和应用，特别是用于新的研发活动中。”

来自阿根廷、比利时、美国和原子能机构的专家以及秘鲁的一名观察员参加了为期五天的工作组访问。工作组发现了扩大利用该反应堆的机

2023年6月，由原子能机构专家和国际专家组成的工作组在爱达荷国家实验室完成了研究堆综合利用评审工作组访问。

(图/爱达荷国家实验室)



会，例如与医用同位素生产方面的利益相关方合作规划未来的需求。工作组还建议该设施营运者制定外联战略，以扩大用户群体。

自工作组访问以来，在原子能机构的协助下，已在这座智利反应堆安装了一套中子成像系统，从而开辟了该反应堆的新研究领域。中子成像是一种非破坏性物体成像方法，类似于X射线照相法。它可用于检查核燃料、电子元件和发动机涡轮叶片，以及确定燃料电池和地质样本的特征。

支持清洁能源解决方案

2023年在美国连续进行的两次“研究堆综合利用评审”工作组访问，都提到了研究堆对研发的重要性，包括对核裂变和聚变反应堆材料研究的重要性。国际专家小组访问了爱达荷国家实验室和麻省理工学院的核反应堆实验室。

爱达荷国家实验室研究堆主要用于研究中子射线照相法和其他非破坏性技术，以及中子辐照，探索核燃料和结构材料在正常和极端条件下的反应。麻省理工学院反应堆进行的辐照是对爱达荷国家实验室和美国其他核研究设施工作的补充，支持了核裂变和核聚变材料开发方面的研究。

工作组认为，爱达荷国家实验室可以提高一些数字化中子能力，以加强其对创新核能解决方案的研究，而麻省理工学院则可以从与全球核科技界更富有成效的合作中获益。此外，工作组还建议麻省理工学院核反应堆实验室改造其老化基础设施，以提高反应堆的可靠利用，并为

外部用户、学生和工作人员提供更具吸引力的环境。

Ron Crone 是爱达荷国家实验室材料与燃料综合实验室副主任，也是此次访问麻省理工学院“研究堆综合利用评审”工作组的成员。他表示相信麻省理工学院的核反应堆实验室有潜力成为“世界领先”的核燃料与材料定制辐照设施。他说：“随着更多的基础设施投资和更多的外部参与，我相信该实验室将在未来几十年内为涉及核裂变和核聚变的创新能源解决方案的重要研究提供支持。”

“研究堆综合利用评审”工作组访问应请求实施，既可以针对研究堆的所有活动，也可以仅限于特定的设施任务领域。审查基于原子能机构关于研究堆战略规划和利用的指南以及国际最佳实践。

原子能机构于2023年发布了“研究堆综合利用评审”准则，其中提供了关于“研究堆综合利用评审”工作组访问的准备、实施和报告的信息，以及关于研究堆设施营运组织自评定的信息。2020年，原子能机构还推出了关于提高研究堆利用战略规划的电子学习课程。

“许多研究堆建于20世纪50年代和60年代，以满足当时的迫切需要。目前，人们对研究堆的潜力有了更好的了解，新旧反应堆都在开发新的应用。”

—国际原子能机构研究堆专家 Nuno Pessoa Barradas

“研究堆综合利用评审”工作组访问

2019年：意大利（试点）

2022年：智利、秘鲁、南非

2023年：伊朗伊斯兰共和国、美国（两次）

2024年：加拿大（计划实施）

支持非洲科学家利用研究堆优势 促进社会经济发展

文/ Omar Yusuf

非洲首个铀矿床是1915年在位于今天刚果民主共和国南部的Shinkolobwe村发现的。大约四十年后的1958年，随着刚果民主共和国金沙萨大学TRICOI研究堆首次临界，非洲的核科学与技术故事拉开了序幕。不久之后，埃及和南非也效仿刚果民主共和国，分别于1958年和1965年将反应堆投入运行。此后，研究堆在非洲大陆的社会经济发展中发挥了至关重要的作用。

非洲现在有11座研究堆，分布在8个国家，即阿尔及利亚、刚果民主共和国、埃及、加纳、利比亚、摩洛哥、尼日利亚和南非。这些设施的热功率高达22兆瓦，通常用于多种用途，包括支持非洲农民可持续土地管理，生产用于癌症治疗的放射性同位素，探测建筑物和工业设备的结构完整性，以及查明工业空气污染的来源。

尽管目前约有10个非洲国家正在考虑核能发电，但许多其他国家认为，部署研究堆是迈向未来发电计划的基石，因为这将有助于建立一支具备相关能力的训练有素的人才队伍。

一些没有研究堆的国家，包括埃塞俄比亚、肯尼亚、尼日尔、卢旺达、塞内加尔、乌干达、坦桑尼亚联合共和国和赞比亚，目前正在考虑或计划建造研究堆设施，并已瞄准具体应用和提供的产品或服务。

培训下一代研究堆专业人员

近年来，对研究堆所提供的辐照服务的需求，以及因此对能够提供这

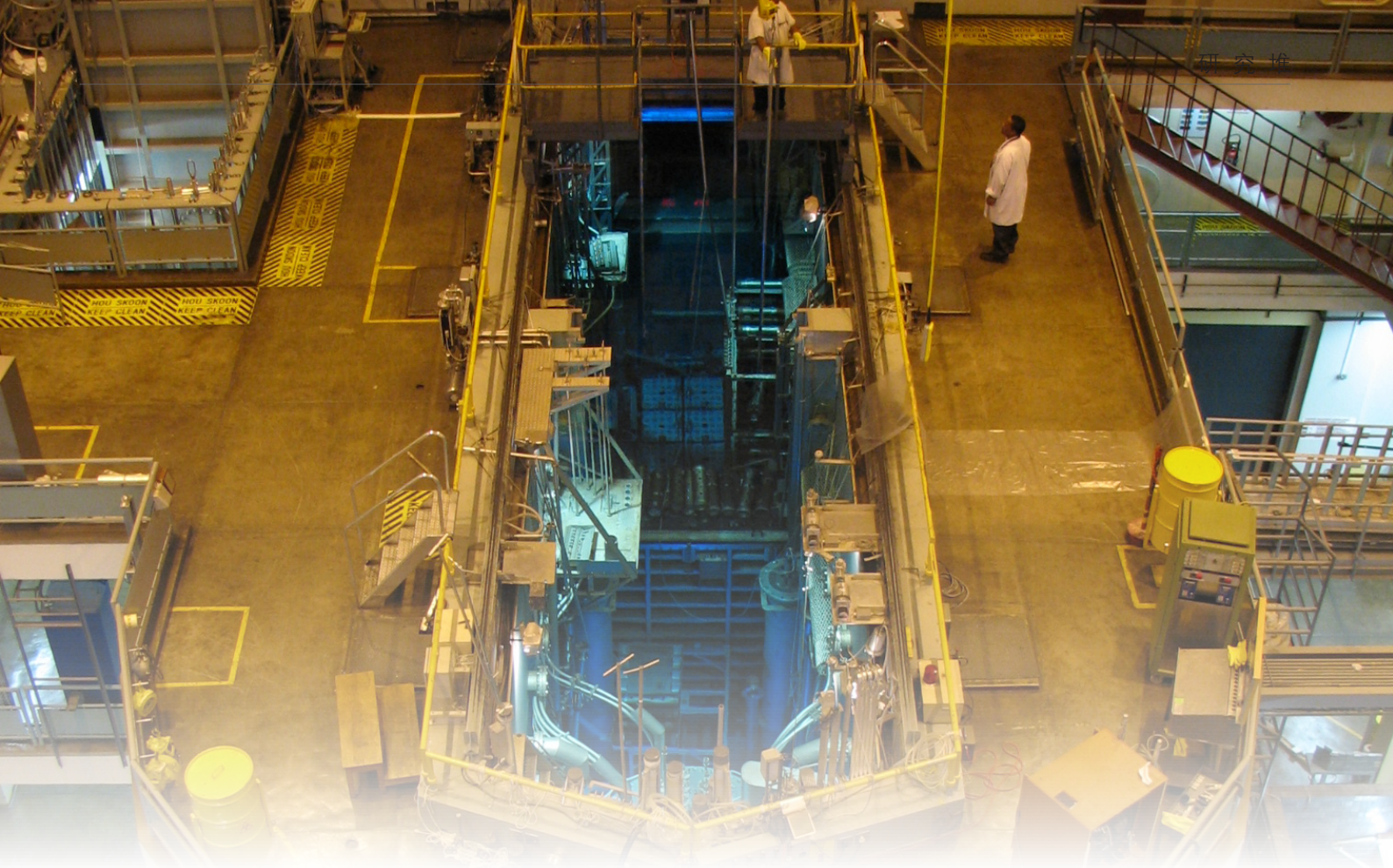
些服务的年轻专业人员的需求都在增加。因此，原子能机构正在支持非洲国家制定建造和使用新研究堆的战略计划。

例如，通过一个正在进行的地区技术合作项目，来自几个非洲国家的专家参加了原子能机构于2023年6月举办的一个讲习班，学习如何编制建造新研究堆的战略计划。这些面向业务的计划旨在为设施的建设提供正当理由，并为反应堆的使用提出详细建议，包括为工业、医疗和科学用途提供具体的辐射服务或产品。在原子能机构专家的指导下，与会科学家随后应要求提出相应的财务和政策计划，以确保拟建研究堆的安全和可持续性。

在为期一周的培训讲习班上，原子能机构专家为来自埃塞俄比亚、肯尼亚、尼日尔、卢旺达、塞内加尔、乌干达、坦桑尼亚联合共和国和赞比亚的与会科学家提供了专题介绍和实践课程。

作为补充，为了支持与研究堆运行最密切相关领域的能力建设，原子能机构启动了“由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心”（国际研究堆中心）倡议，确定能够满足无法经常利用研究堆的国家的培训和研究需求的设施。2023年5月，原子能机构非洲地区研究堆短训班第三期在最近获得国际研究堆中心资质的摩洛哥国家核能、科学和技术中心举行，该中心运营着MA-R1研究堆。

非洲现在有**11**座研究堆，分布在**8**个国家，即阿尔及利亚、刚果民主共和国、埃及、加纳、利比亚、摩洛哥、尼日利亚和南非。



此次非洲地区第三期研究堆短训班旨在提供反应堆物理以及研究堆安全运行和利用方面的强化培训，为13名参加培训的工程师和物理学家提供了目睹研究堆实时运行的机会。具体来说，学员们能够学习摩洛哥国家核能、科学和技术中心的专家如何生产医用放射性同位素和进行中子活化分析。“短训班教育性很强，信息量很大，很有吸引力，很有价值。”在尼日利亚扎里亚能源研究和培训中心从事医学物理工作的 Yahaya Musa 说，“这次学习课程增强了我的研究堆操作和实验知识，并培养了我在这领域的技能。”

支持反应堆的安全、运行和利用

虽然新晋国家正在努力发展新的研究堆设施，但非洲大陆现有的反应堆也可以受益于运行安全标准的提高、更有效的业务规划，以及研究堆

服务在应对持续存在的国家发展挑战方面的作用。

这正是原子能机构正在开展的另一个技合项目的目标，该项目通过“非洲地区核科学技术研究、发展和培训合作协定”开展，优先改善非洲研究堆的安全和战略运行。从编制安全文件到实施定期安全审查和应急准备安排，科学访问帮助该项目的参与国（所有这些国家目前都在运行研究堆）确定如何更好地遵守原子能机构的相关安全标准和导则。

非洲高级科学家还访问了捷克共和国、法国、德国、牙买加、马来西亚、荷兰和泰国的研究堆机构，以观察和研究国外同行如何在其设施中应用原子能机构的安全标准、老化管理指南和利用计划。这些实地访问和知识交流旨在提高地区能力，加强研究堆在促进社会经济发展中的利用，以及确保其运行安全。

南非SAFARI-1研究堆自1965年起一直在运行，它是世界五大生产医用放射性同位素钼-99的生产堆之一。

(图/南非核能公司)

研究堆网络优化运行，满足日益增长的需求

文/Melissa Evans

核研究堆是核能界的重要科学枢纽，可以在这里举办培训班和开展实验，并提供宝贵的产品和服务，包括生产用于医疗、农业和工业用途的放射性同位素。全球200多座在运研究堆面临着日益增长的需求，原子能机构正在帮助研究堆工作人员通过构建网络来满足这一需求，从而促进以优化运行为目标的协作。

拉丁美洲和加勒比研究堆及相关科研机构地区网络（RIALC）在原子能机构的支持下于2023年启动。该网络是在地区层面根据共同的地区挑战构建的，由9个国家组成，拥有16座在运研究堆。通过联合，每个国家都能从网络中其他研究堆的专家库和能力中获益。每座研究堆设施都能专注于自身具有竞争优势的领域，同时确保更好地满足地区需求，提高服务效率。RIALC网络通过评估其研究堆能力，确定国家和地区的优先事项以及每座反应堆的专长，并通过开展比对活动，促进规范未来工作。

“各国一致同意作为一个整体，以综合协调的方式致力于核技术发展。各国实现的发展水平迥然不同，但这正是RIALC网络额外发挥作用所在，即证明本地区已走过的路，让各国展示其可用的基础设施和资源，” RIALC网络协调员、秘鲁核能研究所所长 Mario Mallaupoma 解释说，“RIALC网络的成立不仅是为了让本地区各国相互支持，也是为了让决策者作出真正的承诺，促进本地区可

持续发展目标的实现，提高人民的生活质量。”

RIALC网络一直致力于五个专题领域：教育和培训；运行和老化；反应堆应用，如用于地质年代分析；中子成像和中子活化分析；以及放射性同位素生产。

自2023年2月启动RIALC网络以来，智利核能委员会接待了来自秘鲁的技术专家，讨论中子活化分析。中子活化分析是一种用于识别痕量元素的无损检测应用，由于其中子通量能力，通常在研究堆中进行。Mallaupoma说：“秘鲁拥有一座10兆瓦的研究堆，是该地区功率最大的反应堆，也是能够产生最大中子通量的反应堆。秘鲁将促进和鼓励更多地利用我们的研究堆开展研究工作，并采取行动，与拉丁美洲和加勒比地区的其他国家共同生产商品和提供服务。”

在2023年9月举行的原子能机构第67届大会上，推出了一门新的西班牙语电子学习课程——“国家核科研机构战略规划”，作为对同一主题英文课程的补充。该课程是为拉丁美洲和加勒比地区量身定制的，具体包括来自阿根廷和智利的RIALC网络代表提供的两个深入案例研究。课程以2017年原子能机构出版的《研究堆战略规划》（原子能机构《核能丛书》第NG-T-3.16号）为基础，重点关注研究堆的运行管理。课程借鉴原子能机构支持研究堆战略规划活动方面的经验，教授参与者学习如何对不同类型

“各国实现的发展水平迥然不同，但这正是RIALC网络额外发挥作用所在，即证明本地区已走过的路，让各国展示其可用的基础设施和资源，”

—RIALC网络协调员、秘鲁核能研究所所长Mario Mallaupoma



的服务需求进行优先排序，以确保研究堆的有效性和可持续性。自2014年以来，原子能机构应各国的请求，就与63个反应堆相关的95项战略计划提供了专家建议。

在RIALC网络建立之前，在原子能机构的支持下，早先构建了一些研究堆网络，包括地区网络和技术网络。“东欧研究堆倡议”（EERRI）成立于2008年，与RIALC网络类似，其目标是加强地区培训工作和优化服务。该网络由奥地利、捷克共和国、匈牙利、波兰、罗马尼亚、塞尔维亚和斯洛文尼亚七个国家组成，活动由参与科研机构主办。在原子能机构的支持下，“东欧研究堆倡议”为核领域的年轻专业人员举办了18期为期六周的培训班。培训内容包括技术讲座、现场参观和在“东欧研究堆倡议”研究堆设施进行实际演练，以培养下一代研究堆工作人员。

技术专门知识共享构成了原子能机构支持的另一个研究堆网络“全球

TRIGA研究堆网络”（GTRRN）的基础。TRIGA（代表“培训、研究、同位素、通用原子公司”）反应堆的设计和功能都很相似，目前全球有30多座反应堆在运行。“全球TRIGA研究堆网络”于2013年11月启动，旨在帮助15个国家的TRIGA研究堆营运者解决共同的问题，例如TRIGA的低浓铀燃料，这种燃料越来越难以获得，使用后也越来越难以处置。原子能机构研究堆专家 Nuno Pessoa Barradas 说：“‘全球TRIGA研究堆网络’是有关TRIGA研究堆的重要资源，网络成员利用该网络共享信息并互相帮助，例如，寻找实验所需的备件，因为有时寻找潜在供应商可能是一项挑战。”

原子能机构帮助各国改善研究堆服务。由于研究堆是独特的科学机制，原子能机构支持的定制网络为世界各地的研究堆专家创造了一个平台，以解决共同面临的挑战，并通过合作充分发挥其科研机构的潜力。

“东欧研究堆倡议”在维也纳技术大学研究堆设施举办培训班，帮助学生发展实践技能。

（图/国际原子能机构）

让世界上老化研究堆继续运转

文/Emma Midgley

目前有220多座在运研究堆，它们提供了诸如生产医用放射性同位素等基本服务，并为农业和工业领域的科学研究提供了条件。然而，这些设施正在老化，世界上大多数研究堆已运行50多年。在原子能机构的协助下，营运者和监管者正集中精力对这些反应堆进行翻新和现代化改造，以便它们能够继续提供产品和服务，同时安全可靠地运行。

“在许多国家，这些老化研究堆无法替代，也没有新建计划。”原子能机构研究堆运行和维护技术负责人 Ruben Mazzi 说，“我们帮助各国采取措施保持这些反应堆运行。每座反应堆的情况不同，老化程度也不同。原子能机构为支持全球反应堆群而提供的资源和服务对于老化管理非常重要。”

2022年，在对波兰 MARIA 研究堆进行运行和维护评估期间，专家们讨论了质量保证和管理系统、运行和维护实践以及老化管理计划。

(图/波兰国家核研究中心)

原子能机构于2001年启动了“研究堆安全增强计划”，以应对日益老化的研究堆群。该计划旨在协助各国确保高水平的研究堆安全，包括实施《研究堆安全行为准则》，为各国制定和协调研究堆安全方面的政策和法规提供指导。作为该计划的一部分，各国正在原子能机构的支持下致力于实施系统性老化管理计划。

原子能机构开展补充活动来帮助各国管理老化研究堆，制定和继续更新安全标准和技术准则，同时还开展同行评审和咨询服务，并组织技术会议、讲习班和培训班。

原子能机构调整了针对核电厂的长期运行安全问题评审服务的方法，使其适用于研究堆，并于2017年完成了对比比利时BR2号研究堆的首次





长期运行安全问题工作组访问。长期运行安全问题工作访问根据原子能机构安全标准对设施的程序和实践进行评估，并为进一步提高此类设施现代化和翻新项目的安全性和有效性提供建议。原子能机构研究堆安全处处长 Amgad Shokr 说：“除了对系统和部件进行翻新和现代化，还可以实施安全升级的翻新和现代化，以使反应堆设施符合最新原子能机构安全标准。

定期检查反应堆设施的结构、系统和部件是否有可能退化，对于评估老

化对安全和运行的影响或避免昂贵的维修十分重要。反应堆营运者实施例行维护和定期测试计划，以确保结构、系统和部件能够持续发挥预期功能，并确保反应堆在运行限值和条件内运行。在某些情况下，这些检查需要特殊的技术和额外的资源，而并非所有营运组织都能提供这些技术和资源。

原子能机构应请求向各国提供所需的设备或专家建议，使营运者能够通过检查开展具体检查活动。在役检查旨在评估对反应堆安全和运行

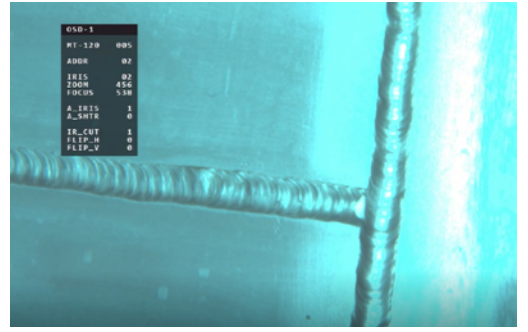
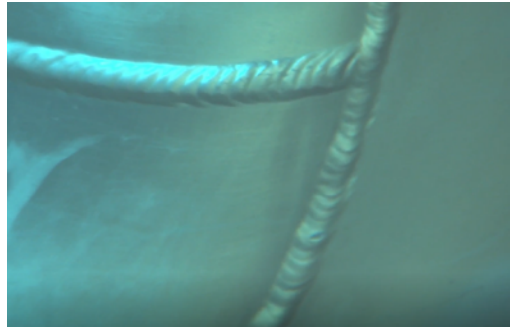
目视检查和无损检测用于评估反应堆设施的结构、系统和组件（包括堆芯支架和栅格）的安全和运行状况。

（图/国际原子能机构 R. Mazzi）



利用高清抗辐射水下摄像机检查和监控研究堆水箱焊缝。

(图/国际原子能机构 Mazzi)



至关重要的部件的状态。专用设备可以监测反应堆物理基础设施的结构缺陷和损坏情况。这些检查利用抗辐射水下摄像机和其他专业工具，在早期阶段以及随着时间的推移，识别反应堆混凝土部件和金属部件结构中的裂缝、其他缺陷或薄弱环节。

原子能机构计划2024年发布一份新的出版物，暂定名为《研究堆无损检测、在役检查和在线监测大纲准则》。

加强可持续性

另一项支持各国管理反应堆老化的同行评审工作组访问是“研究堆运行和维护评定”(OMARR)，其重点是研究堆从调试到退役的整个生命周期中需要解决的运行和维护问题。通过这项评审工作组访问，各国可以加强研究堆的可持续性和可靠性，并优化人力和财政资源的利用，同时考虑到原子能机构标准、国际良好实践和

国家法规。

这些工作组访问查明需要改进的领域，解决具体的运行挑战，以及为国际专家和当地人员分享经验和良好实践创建一个平台。自2012年以来，在孟加拉国、智利、刚果民主共和国、印度尼西亚、意大利、伊朗伊斯兰共和国、波兰、葡萄牙、泰国、美国 and 乌兹别克斯坦已经完成或正在进行“研究堆运行和维护评定”工作组访问和“研究堆运行和维护评定”前期工作组访问。

南非核能公司反应堆运营总经理 Sammy Malaka 以专家身份参加了2018年在刚果民主共和国 TRICO II 研究堆进行的“研究堆运行和维护评定”前期工作组访问和2023年进行的在役检查工作访问。TRICO II 研究堆自2004年以来一直处于长期关闭状态，目前计划重新启动，恢复其科研、培训、放射性同位素生产和材料表征活动。

什么是研究堆老化?

与研究堆有关的老化分为两种。

物理老化是指反应堆系统和部件物理状况退化。随着时间的推移，暴露在侵蚀性环境和运行工况，如辐照、腐蚀剂和振动，会使一些材料和部件退化。

陈旧老化是另一种老化类型，即计算机、仪器仪表和控制系统所使用的技术变得过时，或者安全法规发生变化而变得过时。

“成功完成这两次工作组访问，将使 TRICO II 设施能够建立最低限度结构、系统和部件来支持重启反应堆及其长期运行的计划。” Malaka 表示，“我们特别强调了启动老化管理计划对于管理老化结构、系统和部件以及跟踪和监测升级、现代化改造或更换项目的重要性，在重启计划取得成功后，这会有利于设施的长期运行。”

2023年5月，在澳大利亚和捷克共和国专家的支持下，对泰国 TRR-1/M1

研究堆进行了“研究堆运行和维护评定”工作组访问。该反应堆用于放射性同位素生产、研发、教育和培训。“工作组提出的建议有助于建立和实施 TRR-1/M1 设施的系统性、有效维护和老化管理计划，以加强反应堆的运行和有效利用。”泰国核技术研究所反应堆经理 Kanokrat Tiyaapun 表示，“这是泰国未来核计划所需的核能力（技术专长和人力资源）和基础设施可持续发展的关键。”

评审工作组访问和咨询服务

原子能机构提供30多项同行评审和咨询服务，帮助各国加强和提高核相关实践。同行评审应请求进行组织，由原子能机构领导，并得到国际专家团队的支持。同行评审根据原子能机构导则、安全标准和国际良好实践，对有关国家的国家基础结构和现行实践进行评估。这些服务通常被称为“工作组访问”，侧重于从核安全到卫生部门等一系列专业领域。

原子能机构提供若干同行评审工作组访问，以协助各国安全、可靠和可持续地利用其研究堆。原子能机构专门针对研究堆的同行评审包括研究堆综合核基础结构评审、研究堆综合利用评审、研究堆综合安全评定以及研究堆运行和维护评定。与核安保有关的国际实物保护咨询服务和长期运行安全问题除涉及核电厂，也涵盖研究堆。

2023年，在位于捷克共和国 Řež 的 LVR-15 研究堆控制室，原子能机构评审工作组专家和 Řež 研究中心工作人员讨论研究堆综合安全评定审查的建议。

（图/Řež研究中心）



为研究堆计划规划人力资源

文/Sara Kouchehbagh

对于希望引进或扩大研究堆计划的国家而言，制定人力资源管理战略通常是在开始这项重大投资之前需要检查的一项内容。原子能机构通过建模工具、教育资源、出版物和同行评审服务，在人力资源管理方面为各国提供支持。

核工业在规划人力资源（包括研究堆计划）时要求高标准质量，并依靠一支训练有素的员工队伍来确保安全和可持续性。这支队伍正面临着若干挑战，包括合格人员退休以及与留住人才有关的问题。各国和各组织需要认识到制定和实施人力资源管理战略的重要性，以便长期增加合格人员数量，并留住他们。

“人力资源管理是项目成功开发的支柱。”塞内加尔首座研究堆项目技术协调员兼石油和能源部秘书长 Cheikh Niane 说，“我们应明确我国支持核计划的劳动力状况，以及我们的招聘人才库。”

塞内加尔是计划建造首座研究堆的几个国家之一。2022年12月，原子能机构在塞内加尔试行了一项新的培训服务，内容涉及原子能机构的“新研究堆计划人力资源建模工具”，该工具是以美国2011年向原子能机构提供的“核电人力资源”建模工具为基础开发的。“核电人力资源”工具有助于各国在计划启动核电计划时了解其劳动力需求和人力资源流动情况。

研究堆计划的新工具有助于各国更好地了解人力资源需求以及在这一

领域协调发展国家劳动力的必要性。在塞内加尔举办的讲习班包括人力资源模型演示、在与会者的计算机上安装和配置工具，以及使用动态建模和练习的基本技能培训。讲习班还涉及劳动力规划、安全和管理人力资源数据方面的良好实践。

2023年4月，在拥有一座在运研究堆和两座拟建研究堆的泰国举办了一次类似培训班，目的是向工作人员介绍建模工具的使用方法，并就泰国的劳动力计划提供反馈意见。此外，培训班还介绍了原子能机构关于今后如何最好地将“核电人力资源”建模工具用于研究堆的指导和合作情况。

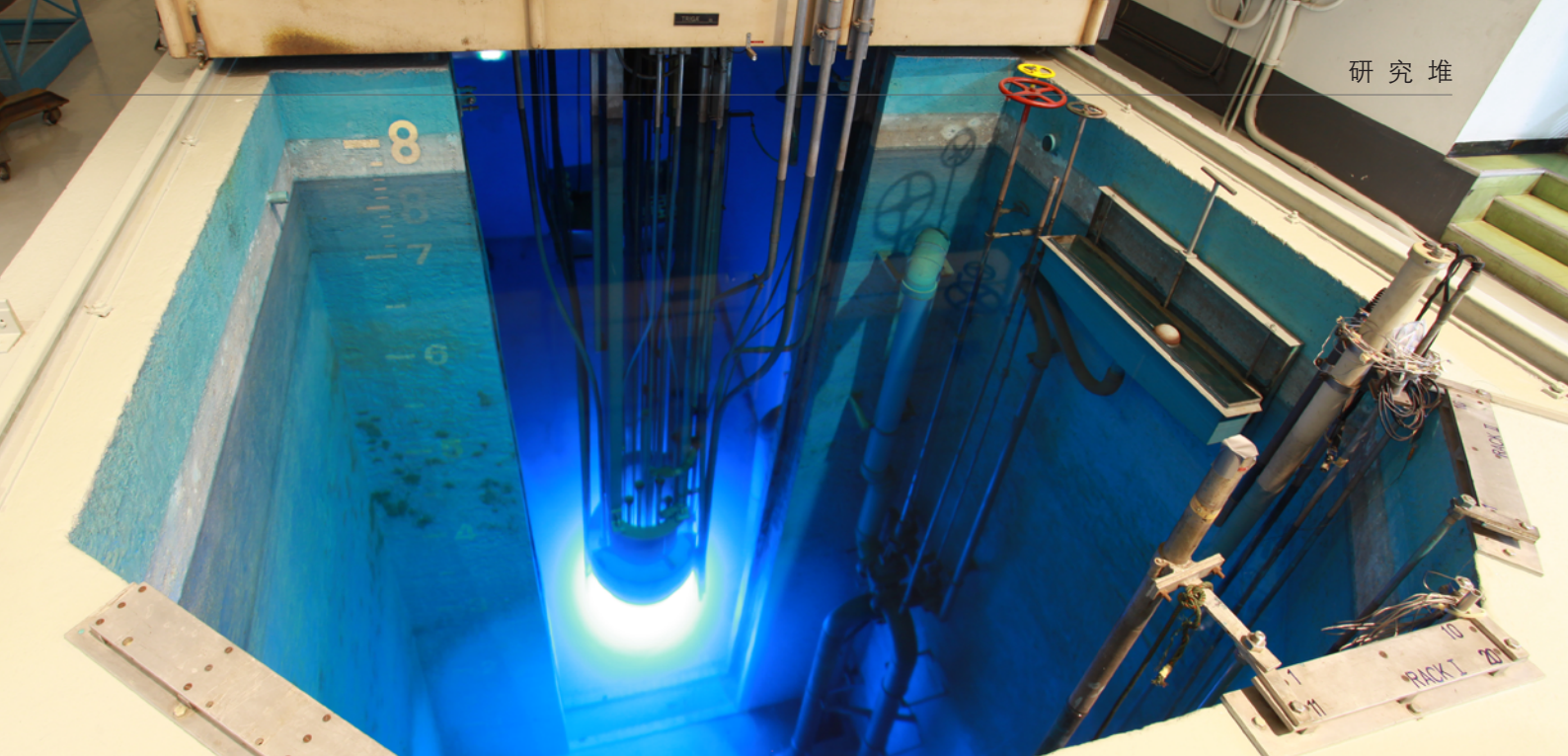
“根据原子能机构的‘里程碑方案’，人力资源发展是发展新研究堆基础设施的重要组成部分。”泰国核技术研究所反应堆主管 Kanokrat Tiyapun 表示，“利用该模型获得的结果将作为一份支持文件，用于与决策者就人力资源需求、能力和国家满足新研究堆计划要求的能力进行沟通。”

为工作队伍提供更多资源

原子能机构还提供关于人力资源发展的免费在线教育材料，包括在线模块和出版物。新近发布的题为《核能领域的人力资源管理》的出版物（原子能机构《核能丛书》第NG-G-2.1号（修订版1））为负责培养合格和可持续工作人员的决策者和高级管理人员提供了指导。该出版物涵盖了人力资源管理的关键要素，如劳动力规划、

“利用该模型获得的结果将作为一份支持文件，用于与决策者就人力资源需求、能力和国家满足新研究堆计划要求的能力进行沟通。”

—泰国核技术研究所反应堆主管 Kanokrat Tiyapun



培训和发展以及绩效管理，这些要素需要纳入国家的管理战略。该出版物为有效开展人力资源管理提供了明确的指标，是高级管理人员、人力资源专业人员和部门经理的理想之选。该出版物对新近开始实施核计划的国家以及寻求优化其当前核计划的国家也很有用。

除了现成的材料外，原子能机构的“里程碑方案”还通过适用于研究堆计划的分阶段方法，支持启动核电国家制定核能计划。在一国选择通过“里程碑方案”发展研究堆时，首先要报告需要研究堆的理由，然后在满足所有要求的前提下，建造和运行反应堆。

人力资源发展是“里程碑方案”的19个基础结构要素之一，包括建立监管机构和法律框架以及确保核安全和核安保。解决人力资源发展，可借助研究堆核基础结构综合评审（INIR-RR）服务，这项服务可帮助各国确定国家核基础结构状况，并确定进一步发展需求，从而从规划一直到退役对项目予以支持。

“获得充足的人力资源是任何项目成功的关键。”原子能机构研究堆处处长 Petr Chakrov 说，“发展这些资源是一个复杂、动态的过程，我们的新建模工具有助于各国以更全面、更现实的方式为其研究堆计划规划人力资源。”

TRR-1/M1是一座TRIGA Mark III 研究堆，由位于泰国曼谷的泰国核技术研究所（TINT）运营。

（图/泰国核技术研究所）

支持女性加入到核领域

2020年，原子能机构启动了玛丽·斯克洛多夫斯卡-居里进修计划（MSCFP），通过提供核相关领域硕士学位奖学金，支持下一代女性核专业人员。原子能机构于2023年3月启动了一个新倡议，即“莉泽-迈特纳计划”，为女性职业生涯早期和中期发展提供为期多周的核设施培训访问。

——国际原子能机构——
玛丽·斯克洛多夫斯卡-居里
 进修计划

——国际原子能机构——
莉泽-迈特纳
 计划

迅速而有效： 更新国际原子能机构“安全导则”的新方案

文/ Wolfgang Picot

研究堆对于推进核科学、开展实验以及生产用于医疗和其他目的的重要同位素至关重要。原子能机构关于研究堆的“安全导则”在确保这些设施的安全方面发挥着不可或缺的作用。“安全导则”是构成原子能机构《安全标准丛书》的三套出版物之一。这些丛书包括：

1. 《安全基本法则》，以非专业读者可理解的语言，确定基本安全目标以及防护和安全原则；
2. 《一般安全要求》（GSR）和《特定安全要求》（SSR），规定现在和将来为确保对人与环境的保护而必须满足的要求，并帮助各国建立本国的监管框架；
3. 《一般安全导则》（GSG）和《特定安全导则》（SSGs），介绍国际良好实践，不断反映最佳实践，

并就如何遵守《特定安全要求》提供建议和指导。

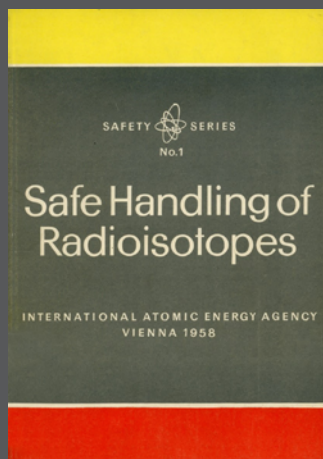
由于“安全导则”的技术性很强，因此更新工作非常细致。从世界各地使用核技术的各种经验中收集知识，并将其纳入“安全导则”。原子能机构编制的草案由多个安全标准委员会审查，并与参与国分享，以征求意见和进一步的投入，最终提交安全标准委员会核可。

由于其复杂性以及需要仔细考虑核与辐射研究、开发和安全实践方面的进展，此类修订通常会持续数年。

不过，原子能机构在最近更新11部研究堆“安全导则”时采取了一种新方案。通过同时更新这些导则，原子能机构加快了进程，并在2022年到2023年的12个月内完成了出版。

国际原子能机构《安全标准》建立 65周年

原子能机构的安全标准历史悠久，第一部《放射性同位素的安全处理》（国际原子能机构《安全丛书》第1号）于1958年发布，当时原子能机构刚刚成立一年。这也是原子能机构的第一份出版物。如今，大多数用户可在原子能机构网站上免费查阅《安全标准丛书》。



领导该项目的原子能机构高级核安全官员 David Sears 说：“通过采取专门过程，将研究堆‘安全导则’作为一个批次一并修订，使参与国更容易协调对安全标准内容的审查，并及时提供反馈意见。”

在短时间内完成如此复杂的项目是一项重大成就。“由于时间紧迫，该项目需要原子能机构内部的大力合作、高度关注以及专家、国家代表和原子能机构技术编辑的集中努力。”Sears 说，“如果没有每一位参与者的投入和奉献，这个项目是不可能完成的。”

关于研究堆的《特定安全要求》出版物《研究堆安全》（原子能机构《安全标准丛书》第 SSR-3 号）于2016年更新。它涵盖了研究堆安全运行的所有要求，从管理和监管监督到场址评价、设计、建造、运行、利用、改造和退役。此外，它还纳入了福岛第一核电站事故的相关经验教训以及各国的经验和反馈意见。

最近的更新涉及11项《特定安全导则》，这些《特定安全导则》为如何满足第SSR-3号的要求提供了指导，并

提出了最佳实践。第SSR-3号整本概述了所有相关问题，而这些《特定安全导则》则涉及具体技术专题，如维护、定期测试和检查、堆芯管理和燃料处理、运行限值和条件、仪器仪表控制和老化管理。

“因为研究堆种类繁多，所以更新研究堆安全标准相当不易。”荷兰核研究和咨询集团高通量反应堆主管 Onne Wouters 表示，“这些原子能机构‘安全导则’适用于所有设施，从最小的临界装置到像高通量反应堆这样的大型研究堆。”

许多研究堆已升级电子设备，还有一些反应堆正在进行新的应用改造，以扩大其预期用途。由于许多研究堆已有几十年的历史，老化管理也变得越来越重要。“面对新的电子技术和老化的反应堆，我们必须不断改进和适应。”Wouters 说，“这些‘安全导则’必须不断反映这些变化。”

原子能机构安全标准对各国没有法律约束力，各国可自行决定是否适用。许多使用原子能机构安全标准的国家在其国家法规中采用了这些标准。

“因为研究堆种类繁多，所以更新研究堆安全标准相当不易。这些原子能机构‘安全导则’适用于所有设施，从最小的临界装置到像高通量反应堆这样的大型研究堆。”

—荷兰核研究和咨询集团高通量反应堆主管 Onne Wouters



国际原子能机构最近更新了关于研究堆的11部“安全导则”。

确保埃及研究堆核安保免遭威胁

文/ Vasiliki Tafili

在包括研究堆在内的各类核设施中实施核安保措施，可确保防止恶意行为和其他犯罪行为或蓄意的未经授权行为，这些行为可能造成放射性后果，或导致其他不利情况。原子能机构的国际实物保护咨询服务（IPPAS）应请求就核材料和其他放射性物质以及包括核研究堆在内的相关设施和活动的实物保护提供同行咨询。

埃及2005年接受了一次国际实物保护咨询服务工作组访问，2014年再次接受专家工作组访问，当时对核安保制度现状进行的独立评估确定有必要升级该国核研究堆的实物保护系统。

为回应国际实物保护咨询服务的建议，并且为了加强其研究堆（即ETRR-1号和ETRR-2号研究堆）的核安保，埃及制定了《核安保可持续性

综合计划》（INSSP），该计划是原子能机构量身定制的机制，旨在确定并优先考虑各国的国家核安保需求。

实物保护升级

对埃及的国际实物保护咨询服务包括一个实物保护升级项目，该项目将核安保系统作为优先事项，保护两座研究堆免遭破坏、盗窃或任何其他非法获取核材料的行为，以及减轻或尽量减少此类恶意行为造成的放射性后果。该项目前两个实施阶段覆盖2015年至2020年，最后阶段正在进行中。

“在埃及的具体项目实施中，原子能机构核安保计划中不同援助工具的互补性显而易见。”原子能机构核安保司司长Elena Buglova说，“对埃及的国际实物保护咨询服务工作组访问是与埃及合作的起点，但项目的实

实物保护系统对于核电站和研究堆的核安保至关重要。

（图/国际原子能机构D. Calma）

施需要广泛的技术和财政支持，以制定新的法规、开展技术能力建设，当然还有升级研究堆综合体的实物保护系统。”

ETRR-1号研究堆处于长期关闭状态，而ETRR-2号综合设施则作为国家核能研究设施，并用于教育目的，最重要的是，用于生产医疗、农业和工业用的放射性同位素。ETRR-2号研究堆的最大功率为22兆瓦，位于距开罗约60公里的埃及原子能管理局的核研究中心。它是一座露天池式反应堆，设计用于多个领域，包括中子物理学、材料科学和用于治疗癌症的硼捕获疗法。

ETRR-2号研究堆升级后的综合实物保护系统已投入使用。“该设施现已部署现代化和多样化的核安保系统，工作人员具备操作这些系统所需的专门知识。”埃及核与辐射监管局核安保部主任 Mahmoud Gad 表示，“升级项目对国家核安保非常重要，有利于加强 ETRR-2号研究堆设施的实物保护系统。”

在整个项目实施期间，埃及举办了一系列国家培训班，共有80多人参加。这些培训班涵盖了与核安保相关的一系列技术领域，如反应堆的监管授权、法规起草、计算机安全检查以及针对内部威胁的预防和保护措施。

Gad 说：“尽管面临新冠疫情等挑战，但在所有利益相关方的努力下，我们在商定的时间框架内成功完成了重要的里程碑。”该项目由原子能机构核安保基金提供资金支持。

通过强有力的设计和实施、定期的威胁评定、适当的知识管理和有效的维护来保持项目成果的可持续性，是埃及在不同项目阶段进行实物保护能力建设的关键因素。“可持续性正在推动原子能机构在世界各地实施的核安保援助项目，确保各国在加强核安保制度方面的努力能够长期持续下去，” Buglova 说。

原子能机构正在与更多已确定需要对其研究堆进行核安保技术升级的国家开展类似项目。

“可持续性正在推动原子能机构在世界各地实施的核安保援助项目，确保各国在加强核安保制度方面的努力能够长期持续下去。”

—原子能机构核安保司司长 Elena Buglova

国际原子能机构新工具助力各国研究堆乏燃料管理决策

文/ Sara Kouchehbagh

研究堆的用途和益处多种多样，诸如医用同位素生产、教育、研究、培训、材料测试。然而，对于运行或计划运行这些强大工具的国家来说，一个关键的挑战是乏燃料管理，特别是相关的基础设施和成本。

原子能机构的新工具正在使这项任务变得更加容易，原子能机构还利用这些工具举办了讲习班，以帮助各国进行决策。

“研究堆后端综合决策评价”（BRIDE）以定制的Excel 电子表格为基础，可使各国能够对现有技术进行量化比较，确定适合本国国情的最佳战略。而“研究堆燃料循环成本Excel估算”（FERREX）可为各国提供所选战略的详细成本估算。这两种工具均应请求免费提供。

原子能机构编写了包括这些工

具应用实例的教程，并于2022年在马来西亚试办了一个关于BRIDE应用讲习班。作为讲习班后的一项活动，对FERREX工具进行了讨论。

“妥善处置核乏燃料对于确保安全至关重要，而BRIDE工具为就最终处置库作出明智决策提供了宝贵的见解。”马来西亚核能机构 Julia Abdul Karim说，“在我看来，BRIDE工具对马来西亚这样的国家尤其有所助益，有助于对其乏燃料的未来管理进行战略规划。”马来西亚核能机构目前运营着该国唯一一座研究堆TRIGA PUSPATI。

在TRIGA PUSPATI运行40年之后，马来西亚正在制定老化管理战略和计划，以处理其乏燃料。在2022年11月举办的讲习班上，马来西亚核能机构提出了七种方案供与会者考虑。随后，与会者对BRIDE工具进行了试

马来西亚TRIGA PUSPATI研究堆自1982年以来一直在运行。

（图/马来西亚核能机构）



点应用，其中包括对每项活动的成本比较，以帮助确定首选方案。对马来西亚而言，下一步是根据讲习班的结果制定乏燃料处置战略计划，然后提交马来西亚政府和技术界进行审查。

“这次讲习班使我们能够帮助马来西亚梳理出许多处置残余核材料的方案，”主持这次讲习班的原子能机构核工程师John Dewes说，“我们不仅仔细研究了每种方案的全寿期成本，还考虑了非经济方面，如环境影响、人力资源可用性、法律和监管准备情况以及政治和公众支持。同时考虑到所有这些因素非常复杂，但BRIDE工具可有条不紊地评估每个方面，然后将结果综合起来。”

研究堆燃料循环

截至2023年10月，共有224座在运研究堆分布在54个国家，另有25座研究堆处于规划或建设中。研究堆的燃料循环与大多数核动力堆一样，从燃料制造开始，到乏燃料管理和处置结束。与动力堆类似，研究堆的燃料循环包括临时贮存，以及对确定为废物的乏燃料

进行后处理或处置。乏燃料管理的最佳方法最终由各国自行决定。

原子能机构根据各国国情提供量身定制的方案，以满足各国的需求。最近出版的《研究堆乏燃料管理：方案和决策支持》（原子能机构《核能丛书》第NF-T-3.9号）是若干协调研究项目的直接成果，它提供了有关研究堆乏燃料管理现有战略的更多信息，并介绍了决策方法，以协助决策者在若干选项之间作出决定。

该出版物介绍了要考虑的原子能机构决策支持框架工具，有助于根据各国具体情况确定首选方案。此外，还提供了一些国家目前使用的技术实例。该出版物还提供了有关BRIDE和FERREX工具的信息以及案例研究和教程，以帮助用户。

“原子能机构的这些工具和讲习班能够促进教育过程，使各国能够就最适合本国的方案得出自己的结论。”Dewes说，“像马来西亚这样的国家随后可以自己确定最佳解决方案，同时还能获得所有相关利益攸关方的重要支持。”

“妥善处置核乏燃料对于确保安全至关重要，而BRIDE工具为就最终处置库作出明智决策提供了宝贵的见解。”

—马来西亚核能机构Julia Abdul Karim



巴西的经验： 研究堆造福社会

文/José Augusto Perrotta



José Augusto Perrotta自1978年以来，一直从事核反应堆技术领域工作。Perrotta 1983年入职巴西国家核能委员会核和能源研究所 (IPEN)，2022年6月从该研究所退休，目前是该研究所名誉研究员。

在该研究所工作期间，他担任过多项技术、管理和协调职务，包括核反应堆堆芯工程部负责人、核工程中心负责人、燃料电池和氢计划协调员以及巴西多用途反应堆企业技术协调员。

研究堆对世界的重要性可以用科学、技术、创新和社会之间密不可分的联系这一理念来说明。科学研究和发现带来了新技术的发展，推动创新，最终在健康、能源、农业、工业和经济发展方面造福社会。研究堆尤其如此。

人们直接感受到研究堆好处的一种方式是通过核医学治疗和诊断癌症及心血管疾病。巴西每年进行200万例核医学程序，而核医学严重依赖研究堆放射性同位素生产。2009年，世界最大的医用同位素供应商加拿大国家通用研究堆关闭，核医学对研究堆放射性同位素生产的这种依赖性变得显而易见。随后，用于诊断成像的钼-99出现全球供应短缺，巴西和许多其他国家都受到严重影响。巴西核医学使用的钼-99占全球供应量的5%。不过，巴西已开始依赖其他国家供应这种同位素。

在这次供应危机之后，巴西决定

在圣保罗郊外约120公里的伊佩罗市开始建造一座新的多用途研究堆。这是目前全球正在规划或建设的约25座新研究堆之一。新反应堆的目的是为医疗和工业应用生产放射性同位素，并将用于燃料和材料辐照测试，以支持巴西核能计划，为科学研究和应用研究以及创新提供中子束。

巴西和巴西以外的许多人都将受益于研究堆，无论是因为他们需要放射性药物，还是由于为人类福祉和改善我们的社会而开发的更多知识和技术技能。

巴西的能源需求并不严重依赖核能，大部分电力来自水电、风能和沼气。不过，自20世纪50年代以来，巴西一直是核技术研究的先驱。巴西是南半球第一个启用核研究堆的国家。IEA-R1是一座2兆瓦池式反应堆，1957年在圣保罗核和能源研究所 (IPEN) 开始运行，至今仍在使用，生产用于医学和科学研究的放射

性同位素。1960年，200千瓦的IPR-1 TRIGA研究堆在贝洛奥里藏特开始运行；1965年，500瓦的 Argonauta 研究堆在里约热内卢核工程研究所开始运行；1988年，IPEN/MB-01临界设施在圣保罗开始运行。

这些研究堆是巴西核技术研究中心发展的催化剂，因为反应堆的多学科应用涉及从健康到工程等不同领域。由于这些研究堆位于学术环境中，大学生和研究人员可以利用它们进行研究和专业培训。在过去几十年里，巴西的研究堆使得其科学家和工程师能够在许多领域开展科学技术研究，包括研究核动力堆使用的材料以及中子在工业、农业和环境中的应用。其他研究领域包括铀和钍及其各种化合物的核燃料循环可能性、核燃料开发、放射性废物处理和贮存研究、核计量学，以及核反应堆和其他核与辐射设施的设计。

研究堆是巴西核事业的基础，巴西参与了核领域许多激动人心的新发展。研究领域包括核聚变、高强度激光利用、用于空间探索的微型反应堆和小型模块化反应堆。巴西开发了用于小型模块化反应堆和研究堆的低浓

铀燃料。在研究清洁能源解决方案方面，开发了氢和燃料电池。

巴西遵守原子能机构《研究堆安全行为准则》，对核安全进行了良好的国家管理，建立了新的独立核监管机构和相关营运组织。在这方面，原子能机构发挥着非常重要的作用，原子能机构提供的服务，如原子能机构安全标准和技术文件、讲习班、培训班、专题讨论会、技术合作和评审工作组，使巴西在核设施中创造了浓厚的安全和安保文化氛围。

核和能源研究所继续提供强大的研发能力，其在圣保罗大学开设的核技术研究生学位课程成为培养巴西下一代核技术专业人员的關鍵。迄今为止，已有3300多名学生从该大学硕士和博士学位课程毕业，核和能源研究所每年约有1000名学生攻读各级学位。核技术课程受到男女学生的青睐，2022年女生占学生总数的46%。然而，尽管取得了这些成就，人力资源仍然是我们在研究堆和整个核领域的未来方面面临的巨大挑战之一，因为需求大于可用资源。我们必须吸引更多的年轻人从事核专业。没有人才，我们将一事无成。

“巴西和巴西以外的许多人都将受益于研究堆，无论是因为他们需要放射性药物，还是由于为人类福祉和改善我们的社会而开发的更多知识和技术技能。”

—巴西核和能源研究所名誉研究员 José Augusto Perrotta

原子能机构和粮农组织发起“原子用于粮食”倡议，扩大核技术全球粮食安全应用



原子能机构和粮农组织发起的“原子用于粮食”（Atoms4Food）倡议将支持各国以不同方式利用创新核技术加强粮食安全。（图/国际原子能机构K. Laffan）

在2023年10月18日于罗马举行的“世界粮食论坛”上，原子能机构和联合国粮食及农业组织（粮农组织）共同发起了“原子用于粮食”倡议，以帮助加强粮食安全，解决世界各地日益严重的饥饿问题。

“原子用于粮食”倡议将支持各国利用创新核技术提高农业生产力、减少粮食损失、确保粮食安全、改善营养状况和适应气候变化的挑战。

“我们正处于一个前所未有的时代，饥饿和营养不良正在加剧，对人类构成威胁。”原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗

西和粮农组织总干事屈冬玉在一份联合声明中说，“‘原子用于’倡议旨在通过利用核技术和其他先进技术优势，为成员国提供适合其具体需求和情况的突破性解决方案。”

世界面临着巨大的粮食安全和营养挑战。2022年，有6.91亿至7.83亿人面临饥饿，31亿人无法负担健康饮食，占全球人口的40%以上。与此同时，肥胖症在世界每个地区越来越普遍。

“随着全球粮食需求的增加，极端气候的加剧将导致更多农作物歉收。我们需要利用我们拥有的一切工具来种植

更多的粮食，”格罗西总干事说，“核科学为种植更强壮、更健康、更安全的作物以及保护我们生活所需的粮食提供了极好的创新工具。”

“原子用于粮食”倡议借鉴了原子能机构和粮农组织近60年来在支持各国利用核技术和同位素技术解决方案加强粮食安全以及营养和食品安全方面共同积累的经验。

核技术可以不同方式用于加强粮食安全。核技术可用于加速植物的自然突变过程，以培育出更能抵御疾病和气候变化的作物。核技术和同位素技术还可用

于评估土壤中养分利用和水利用情况，诊断和表征动物疾病病原体，追踪水污染源，以及研究各种形式的营养不良。昆虫不育技术以昆虫种群为目标，减少了杀

虫剂在农作物和牲畜中的使用。对食品进行辐照可确保食品免受病原体感染，并延长其保质期，从而有助于食品安全。

“原子用于粮食”倡议聚焦

专门设置的研究，通过具体的创新和解决方案，关注各国的具体需求。

文/Sinead Harvey

国际原子能机构核安保培训中心建立打击核恐怖主义的专门知识

原子能机构开设了一个独特的核安保培训中心，这是首个同类国际设施，用于支持应对全球核恐怖主义的不断努力。

原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西于2023年10月3日在奥地利塞伯斯多夫原子能机构实验室举行仪式，正式宣布原子能机构核安保培训和示范中心（NSTDC）启用，来自45个国家和地区的代表出席了仪式。

该中心将提供2000多平方米的专业技术基础设施和设备，供培训班学员学习核材料和其他放射性物质的实物保护，以及探查和应对涉及核材料和核设施的犯罪行为。

“核安保是我们工作的最重要领域之一，旨在确保核材料永远不会落入坏人之手。”格罗西先生说，“国际核安保示范中心将对来自世界各地的核安保和核材料实物保护专家进行培训，以提高他们的技能。”

近年来，随着越来越多的国家开始实施核电计划，以及核材料实物保护领域唯一具有法律约束力的国际文书《核材料实物保



原子能机构核安保培训和示范中心于2023年10月启用。

(图/国际原子能机构K. Laffan)

护公约》修订案于2016年生效后，向原子能机构提出的核安保培训请求不断增加。

新中心共两层，包含模拟环境、虚拟现实工具和先进软件。该中心将提供核设施实物保护、信息和计算机安全、核法证学、重大公共活动和其他核安保相关工作领域的核安保系统实践。

格罗西总干事补充说：“我们正在为各国提供更好、更安全、更可靠地开展核工作的工具。”

该中心于10月份迎来了第一批参加放射性物质安全管理培训班的学员，这是提供的23个培训

班和讲习班之一。

原子能机构核安保司司长 Elena Buglova说：“通过建设这个新中心，原子能机构可以利用最新的专业设备、计算机模拟工具和先进的培训方法，提供独特的培训活动，弥补现有的差距。”

该中心位于一座多功能大楼中，大楼由15个捐助方提供的1800多万欧元预算外资金和实物捐助建成，增强了原子能机构满足各国核安保能力建设需求的能力。

文/Sinead Harvey

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

《研究堆安全》

以及国际原子能机构关于研究堆的其他出版物：

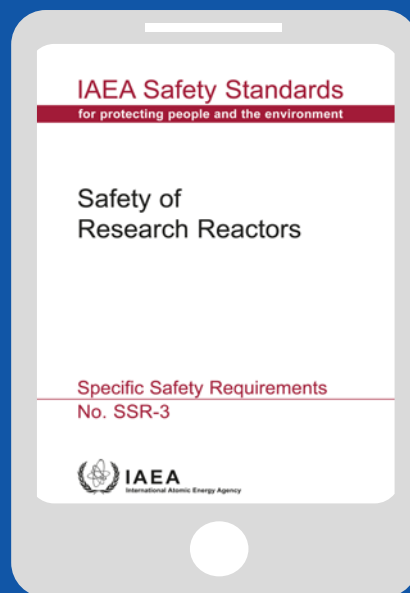
《新研究堆计划的可行性研究准备》

《研究堆的调试》

《研究堆燃料辐照后检验技术》



www.iaea.org/bulletin/64-4

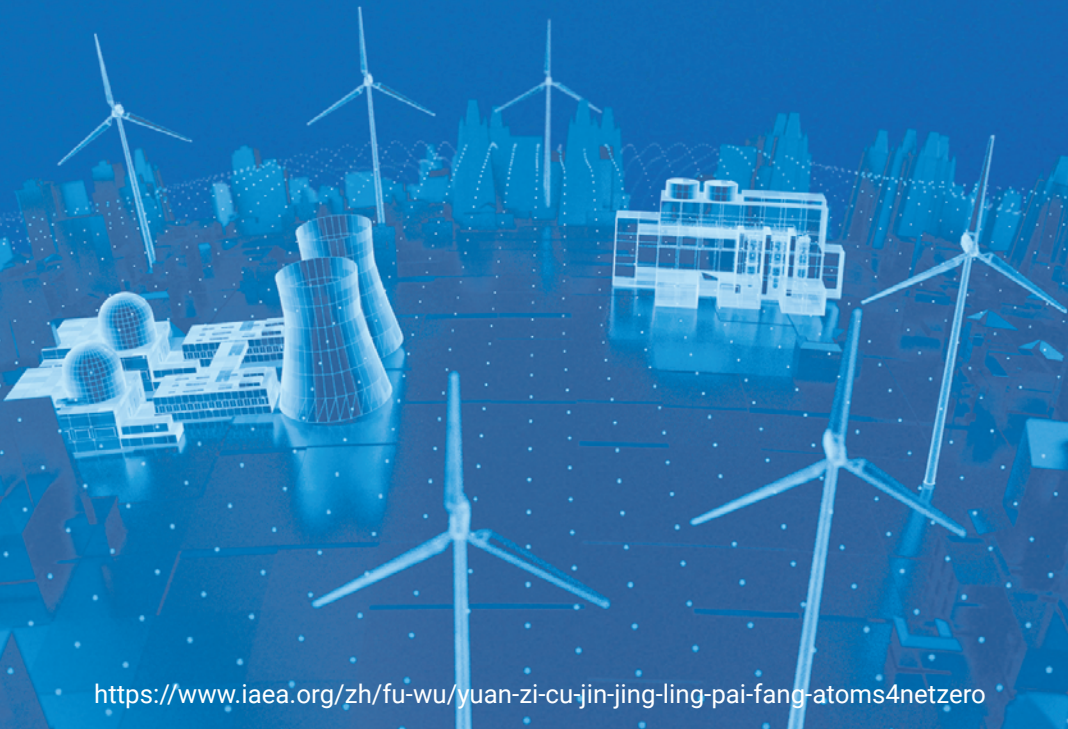


与我们合作

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>



在线阅读《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：

