

■ 2024年 核技术 评论

总干事的报告



IAEA

国际原子能机构
原子用于和平与发展

GC(68)/INF/4

2024 年核技术评论

总干事的报告

GC(68)/INF/4

目录

概要.....	3
总干事的前言.....	5
执行概要.....	7
A. 核电.....	11
A.1. 核电预测.....	11
A.2. 在运核电厂.....	12
A.3. 新的或扩大的核电计划.....	14
A.4. 核电技术发展.....	18
A.4.1. 先进水冷堆.....	19
A.4.2. 小型模块堆及微堆.....	20
A.4.3. 快堆.....	23
A.4.4. 核电的非电力应用.....	25
B. 核燃料循环.....	26
B.1. 前端.....	26
B.2. 后端.....	31
C. 退役、环境修复和放射性废物管理.....	34
C.1. 退役.....	34
C.2. 环境治理和天然存在的放射性物质管理.....	36
C.3. 放射性废物管理.....	38
D. 聚变研究和技术发展促进未来能源生产.....	43
E. 研究堆、粒子加速器和核仪器仪表.....	51
E.1. 研究堆.....	51
E.2. 粒子加速器.....	55
E.3. 核仪器仪表.....	58
F. 原子数据和核数据.....	59
G. 核电和核燃料循环中的人工智能应用.....	60
H. 人体健康.....	61
H.1. 肠道消化功能的无创评定：优化碳-13 蔗糖呼气检测.....	61
H.2. 保证质量：近距离放射治疗的新发展.....	65

H.3. 查看心脏内部：核成像显示心脏淀粉样变性的关键作用.....	68
I. 粮食和农业.....	70
I.1. 辐照技术促进疫苗发展：应用核技术预防家畜传染性疾病.....	70
I.2. 宇宙射线中子传感器核技术与遥感图像结合促进农业用水管理	73
J. 放射性同位素和辐射技术.....	76
J.1. 细胞靶向放射性药物的新型递送系统.....	76
J.2. 放射性示踪剂技术与用于矿山废水回收的人工湿地	79
K. 同位素水文学.....	82
K.1. 追踪水循环：氚分析的新发展.....	82
L. 海洋环境	85
L.1. 人工智能改进对海洋微塑料污染的监测与研究.....	85
附件.....	88
简称表	90

概要

- 为响应成员国的要求，秘书处每年编写一份综合性“核技术评论”。今年的报告随附于后，其中突出强调了 2023 年令人瞩目的发展情况。
- 《2024 年核技术评论》涵盖以下选定领域：核电、核燃料循环、退役、环境治理和放射性废物管理、聚变研究和技术发展促进未来能源生产、研究堆、粒子加速器和核仪器仪表、原子数据和核数据、人工智能用于核电和核燃料循环、人体健康、粮食和农业、放射性同位素和辐射技术、同位素水文学和海洋环境。
- 草案版本已通过 GOV/2024/2 号文件提交 2024 年 3 月理事会会议。本最后版本根据理事会的讨论结果以及所收到的成员国的意见编写。

总干事的前言

无论是用于生产可靠的低碳能源，还是用于解决粮食、健康、水 and 环境问题，核技术在应对我们诸多最紧迫的挑战中都发挥着重要作用。

2023 年，我们看到，为了实现气候目标以及应对安全和负担得起的能源的挑战，一些成员国修订了其核能政策，对核电的兴趣依然浓厚。在阿拉伯联合酋长国迪拜举行的《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第 28 届会议（“气候公约”缔约方大会第 28 届会议）上，原子能机构在“原子用于气候”（Atoms4Climate）展馆举办了一系列活动，介绍核能如何为难以减排的部门和制氢行业脱碳做出重大贡献，促进快速脱碳。原子能机构于 2023 年 12 月 1 日发布了得到数十个成员国认可的“核电声明”，强调了“净零”何以需要核电。国际能源机构更新的《2050 年净零排放》路线图几个月前便证实了这一点，并且认为，到 2050 年，核电容量将增加一倍以上，这与原子能机构 2023 年 9 月发布的高值预测一致。此外，在“气候公约”缔约方大会第 28 届会议期间，20 多个国家发表了一份宣言，呼吁到 2050 年将核电容量增加两倍，并请地区开发银行和国际金融机构将核电纳入其贷款政策，同时强调需要可靠的供应链来加快该技术的部署。自 1995 年开始举行年度气候峰会以来，“气候公约”缔约方大会第 28 届会议在合作伙伴的同心协力下，凭着此前数年的努力，以多年来的决心首次在闭幕时取得了重大成就。“气候公约”198 个签署国批准的首份“全球评估”明确提到“核”是实现温室气体深度和快速减排所需的低排放技术之一。

与此同时，越来越多的国家将核技术用于非动力应用，包括加强粮食安全、应对气候变化的影响、保护环境免受污染以及改善癌症和其他危及生命的疾病护理。正如本报告突出强调的那样，原子能机构通过其在奥地利和摩纳哥的核应用实验室工作、协调研究项目以及与全球领先研究机构的伙伴关系继续在这些领域和其他关键领域进行创新。原子能机构研究与发展活动的许多领域正越来越多地利用人工智能帮助推动创新，这一趋势将继续发展。

科学研究和数据是知情决策的基石，原子能机构不断寻找机会，使其研究与发展活动能够帮助各国充分利用核科学技术保护和改善人民的健康和福祉。继原子能机构“人畜共患疾病综合行动”、“核技术用于控制塑料污染”和“希望之光”倡议之后，随着 2023 年全球粮食不安全状况加剧，原子能机构和联合国粮食及农业组织发起了一项名为“原子用于粮食”（Atoms4Food）的联合倡议，旨在支持各国利用核技术（包括通过我们实验室开发的气候智能型农业和完善的水资源管理实践），加强粮食安全和营养安全。



图 FW.1. 原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西在阿拉伯联合酋长国迪拜举行的“气候公约”缔约方大会第 28 届会议上发言。
(照片来源：原子能机构)

几十年来，核科学技术一直是帮助各国满足发展需求的重要工具，当然还可以做得更多，用于更多领域。《2024 年核技术评论》通过强调 2023 年核技术的一些关键发展，将帮助成员国在应对当前挑战和新挑战时作出知情决定。

执行概要

1. 原子能机构连续第三年上调了其对未来几十年核电潜在增长的年度预测，确认在能源安全和气候变化危机的背景下，在电气化需求增加而且需要寻找化石燃料替代品来提供热能和氢气以实现工业和交通部门脱碳的情况下，人们重新燃起了对核电的兴趣。原子能机构将其对 2050 年的低值预测提高到 458 吉瓦，与 2022 年的低值预测相比，大幅上调了 55 吉瓦。对 2050 年的高值预测从上一年的 873 吉瓦上调至 890 吉瓦，与 2020 年的预测相比增加了 175 吉瓦。
2. 截至 2023 年 12 月，全球在运核电容量为 371.5 吉瓦（电），由 31 个成员国的 413 座反应堆提供。此外，21.3 吉瓦（电）（25 座反应堆）的许可运行容量全年仍处于暂停运行状态。2023 年期间，来自五座反应堆的 5 吉瓦（电）的新核电容量连接到电网，之前暂停运行并重新连接到电网的两座反应堆恢复了另外 1.6 吉瓦（电）的容量。成员国的报告显示，全球核电机组产生了大约 2515.2 太瓦·时的低排放、可调度电力。¹ 2023 年底，17 个国家在建的反应堆总容量为 61.1 吉瓦（电）（59 座反应堆）。全世界约 67% 的在运反应堆容量已经使用了 30 多年。在同一时期，6 吉瓦（电）核电容量（五座反应堆）被永久下线。
3. 目前有约 50 个国家有意在其能源结构中加入核电，其中 27 个国家处于启动和实施其国家核电计划的不同阶段。到 2035 年，运行核电国家的数量可能会增加约 30%，与目前的 31 个国家相比，新增 10 至 12 个运行核电厂国家。这种日益浓厚的兴趣要求充分发展核基础结构。
4. 水冷堆一直是全世界核电厂采用的主要技术。全球关注核电技术发展的驱动因素是需要加速部署先进型反应堆，包括小型模块堆。目前小型模块堆发展的趋势侧重于提高其经济性、安全性能和可扩展性。成员国对浮动核电厂和微堆及其应用越来越感兴趣，一些国家目前正开展浮动核电厂海基小型模块堆的设计开发。
5. 核能用于非电力应用是成熟技术，其中包括地区供热、海水淡化和各种工艺的直接供热。目前有 65 座反应堆在若干成员国运行，还有许多其他成员国对这一可选方案显示出日益强烈的兴趣。
6. 快堆的重点在于通过采用被动停堆系统和探索不同的冷却剂来改进安全措施，特别是在革新型反应堆设计方面。快中子系统的中期部署依靠钠冷快堆作为首选方案。
7. 人工智能实施方面的研究与发展已经证明了其在电力和先进核反应堆应用中高效优化核心设计的潜力。它还可以提高安全性、操作效率和成本效益，同时促进先进核技术的发展。

¹ 总发电量不包括乌克兰的反应堆机组，因为截至本报告发布时，尚未提交 2023 年的运行数据。

8. 在聚变能领域，私营部门的公司正获得越来越多的投资，许多公司的目标是独立开发自己的研究和示范装置。同时，聚变领域的公私合作模式也开始形成，这反映了聚变能供资的总体增长，2023年的供资总额达62.1亿美元，出现了同比增长（2022年为48亿美元）。聚变产业的地域分布也越来越多样化，在12个国家有43家公司在运营中。监管机构和立法机关也开始着手处理聚变能挑战和机遇。

9. 国际热核实验堆组织的理事机构——国际热核实验堆理事会继续考虑国际热核实验堆的修订计划，其中涉及将第一壁材料由铍改为钨。此外，国际热核实验堆组织继续进行关键部件维修战略和供应商合同的最终确定，同时还继续与法国核安全管理局接触。2023年，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的研究人员将2022年12月在国家点火装置实现的核聚变能点火突破重复了至少三次。

10. 《2022年铀资源、生产和需求》（“2022年红皮书”）的全球预测显示，到2030年，铀需求量估计在60 960吨铀（低需求情景）和76 592吨铀（高需求情景）之间，到2040年则在63 040吨铀（低需求情景）和108 272吨铀（高需求情景）之间。从2023年到2040年期间，19个国家已规划和预期的矿山将投入运营，从而使全球名义总产能达每年77 138吨铀。“2022年红皮书”显示，全球勘探和开发支出继2014年至2020年减少20亿美元之后，2021年小幅增加了约280万美元。

11. 下一个十年，核燃料生产行业所有核燃料类型的细分市场都将面临日益增长的需求，原因是既有核电国家和启动核电国家的建设计划都在不断扩大，其雄心勃勃的目标是开发新的燃料类型，包括用于小型模块堆和先进堆的燃料。低浓铀+以及特别是高丰度低浓铀的生产需要解决安全和安保问题，从新的许可证审批过程和更新的法规到专门设计的供应链基础设施均如此。

12. 全球乏核燃料正以每年约7000吨重金属的速度积累，而贮存的存量约为30万吨重金属。对于那些制定了长期成熟核计划并奉行开式循环战略的国家而言，面临的主要挑战仍然是需要更多的乏核燃料贮存容量和处置前不断延长的贮存期。

13. 在全球范围内，有210座核反应堆已经永久退役。正在进行拆除的设施数量继续增加，出现了永久关闭后尽早拆除设施的趋势。数字技术在推进核退役方面将发挥越来越重要的作用，包括使用移动机器人扫描结构的物理和辐射状况。

14. 采用综合放射性废物管理原则和实践的全球趋势有助于优化从废物产生到处置的废物处理工程。综合废物管理可简化过程、降低环境风险并促进负责任的放射性废物管理。此外，采用放射性废物分级的趋势日益明显，其目的是减少运往处置设施的放射性废物量，从而使这些设施作为宝贵的长期资产得到保护。

15. 截至2023年底，在54个国家有234座在运研究堆，包括临时关闭的研究堆。此外，有10个国家正在建造11座新研究堆，包括一套加速器驱动系统，还有14个成员国有建造新研究堆的正式计划。全世界研究堆群的逐步老化促使营运者和监管机构采用新的技术和方法来评定研究堆持续安全运行的运行工况。

16. 详尽的科学研究有赖于中子源能产生并提供给研究人员的中子数量。因此，除研究堆之外，科学工作者和工程师们继续开发基于粒子加速器和散裂靶技术的新一代中子源。

17. 粒子加速器在癌症治疗所需的亚细胞成像和辐照方面发挥着关键作用。为了医疗诊断目的，经常采用超声波、计算机断层照相法和磁共振成像法等系列广泛成像技术。随着离子和 X 射线束操作技术的日臻成熟，将离子束或 X 射线束聚焦到纳米尺度已成为可能，从而使可应用于医学成像以及人工制品可视化的新多光谱成像方法成为可能。

18. 作为辐射探测器数据采集系统的组成部分，正越来越多地采用现场可编程门阵列。这种阵列用途广泛，从设置数据采集参数和发出数据流/路由数据，到执行先进信号分辨，甚或完整事件重建。所部署的数据处理算法则是更复杂功能的核心，无论是传统功能还是基于人工智能的功能。

19. 各成员国正在向国际热核实验堆投入更多资源，以获得高质量的 γ 相互作用数据。这些数据主要用于有源中子探询法、裂变反应堆和聚变装置屏蔽中 γ 射线加热的更精确估算以及空间应用创新。

20. 最紧迫的公众健康营养问题之一是，为什么尽管采取了多种公众健康干预措施，中低收入国家的儿童仍然比同龄人矮小。肠道环境功能障碍在中低收入国家生活环境不卫生的儿童中越来越常见。原子能机构支持优化无创呼气检测，以测量作为肠道环境功能障碍中小肠功能指标的蔗糖消化情况，可适用于所有年龄段。为了获得更全面的结果，该检测可与其他检测一起进行，以涵盖蔗糖消化之外肠道环境功能障碍的其他方面。

21. 宫颈癌是世界各地妇女中第四种最常见的癌症。近距离放射治疗是放射治疗的重要组成部分，在这种疾病的管理中发挥着关键作用，但需要进行精心优化，以避免剂量不足或过量造成不良影响。原子能机构正在开发一种新的剂量学审核方法，以提高近距离放射治疗的质量。原子能机构还致力于弥合中低收入国家在近距离放射治疗教育和培训方面日益扩大的差距，这种差距因该技术日渐复杂却又缺乏培训设备而更加复杂化。原子能机构正在采用一种具有成本效益的虚拟现实工具，可以克服物理、地理和后勤局限，让用户能够进行近距离放射治疗操作。通过将剂量学审核与创新教育工具相结合，原子能机构正在采取一种全面的方法来提高参与近距离放射治疗的保健专业人员的能力。

22. 医学研究和治疗策略的最新进展为心脏淀粉样变性患者带来了新的希望。针对淀粉样蛋白沉积潜在机制的创新药物，加上核心脏病学等完善的诊断成像工具，使保健服务提供者能够更早、更有效地进行干预。通过先进的成像技术，核心脏病学能够精确检测心脏淀粉样变性，并将其与其他心脏疾病区分开来。这些技术的无创性使其在全面评价心脏淀粉样变性方面具有特别重要的价值，有助于更及时、更准确地控制病情。

23. 疫苗常常是预防可能造成全球巨大经济损失的家畜疾病的最具成本效益的方法。最近，由于新型辐照器可以在较短时间内提供精确的辐照剂量，加上对免疫系统的强化认识实现了对疫苗接种反应的更有效评定，人们对利用辐照技术生产疫苗重新燃起了兴趣。技术进步还使人们能够利用电子束和其他辐照方法使病原体失去活性，从而不再使用放射性物质生产辐照疫苗。

24. 农业区有 30 亿人面临严重或极严重的缺水问题，而气候变化将使这一情况更加糟糕。目前，宇宙射线中子传感器技术正与高分辨率遥感图像一起使用，用于监测大面积区域或流域的土壤水分。这项技术有可能为用于气候智能型灌溉的遥感技术带来革命性变化，从而大大改善决策者和农业社区获取基准数据的机会，同时还提供潜在环境研究应用，如土壤水分趋势分析、作物用水生产率建模、监测湿地水利用率变化和干旱预测，以及提供支持气候变化适应政策的数据。

25. 放射性药物为诊断或治疗目的提供一种将放射性核素递送到器官、组织或细胞靶点的安全有效方法。放射性药物可与预靶向方案、化疗综合疗法或放射增敏剂结合使用。预靶向方案有可能改变诊疗策略，以便能用半衰期短的放射性核素，降低健康组织受到辐射的可能性。目前正在广泛研究纳米递送系统，包括诊疗纳米系统，目的是提高药物的安全性和疗效。纳米粒子递送有望带来诸多好处，包括靶点的放射性核素治疗浓度更高，副作用更小。

26. 人工湿地由于能耗低，机械基础设施简单，因而是传统污水处理厂一种具有成本效益的环保型替代方案，适于处理所有类型的废水，包括来自采矿业的废水。然而，要优化处理过程，还需要更好地了解其复杂的流体动力学工作原理。原子能机构正在开展放射性示踪剂技术使用研究，以制定规程和导则，并验证人工湿地的水流模型；增强用于矿山废水回收的人工湿地的水力性能；优化人工湿地的污染物去除效率；以及预测湿地在各种条件下的动态反应。

27. 氚是唯一融入水分子的放射性同位素，是水循环过程的宝贵示踪剂。由于氚的半衰期短，主要用于估计地下水的补给以及评定易受污染的程度。由于当代天然水中的氚浓度较低，氚含量的测量在技术上具有挑战性。为了获得准确和精确的结果，以用于水文应用，需要对氚进行大量富集。原子能机构开发并广泛测试了一种创新型聚合物电解质膜氚富集系统，该系统有望彻底改变各国为水文和放射性警戒目的在超低水平上确定环境水样中氚浓度的能力。

28. 人工智能正在成为微塑料识别领域的基本工具。尽管人们对海洋塑料污染的认识有所进步，但对微塑料的定量和表征仍然困难重重。人工智能利用机器学习算法来揭示海洋环境中降解聚合物的复杂性，代表了一种范式转换。其光谱分析速度快，再加上对生成降解聚合物光谱的物理、化学和生物过程的模拟，使人工智能成为改进微塑料识别的基本工具。

A. 核电

A.1. 核电预测

状况

1. 原子能机构连续第三年上调了其对未来几十年核电潜在增长的年度预测，确认在能源安全和气候变化危机的背景下，在电气化需求增加而且需要寻找化石燃料替代品来提供热能和氢气以实现工业和交通部门脱碳的情况下，人们重新燃起了对核电的兴趣。

2. 在对全球核电容量的新展望中，原子能机构将其对 2050 年的低值预测提高到 458 吉瓦，与 2022 年的低值预测相比，大幅上调了 55 吉瓦。对 2050 年的高值预测从上一

890 吉瓦
2050 年

年的 873 吉瓦上调至 890 吉瓦，与 2020 年的预测相比增加了 175 吉瓦。要实现这一预测，就需要现有机组大规模维持长期运行，并在未来 30 年内新建超过 600 吉瓦的容量。除了雄心勃勃的新建计划，现有机组的长期运行对实现高值预测也至关重要。小型模块堆和其他类型先进堆等新的技术方案，可以通过为部署核电提供机会以满足不同需求并克服制约因素（如

电网规模较小或离网应用的国家，以及非电力应用），对大型反应堆构成补充。不过，预计核电扩容大部分将通过大型反应堆来实现。

3. 无论高值预测还是低值预测，预计的核电容量演变方式存在地区差异和动态变化。国际协作是应对核发展和部署挑战的关键，例如统一监管要求和标准化，以及放射性废物的最终处置。融资也是一项有待解决的挑战。

趋势

4. 人们对先进型和革新型反应堆技术（包括小型模块堆及其应用）的兴趣很大，而且越来越大。虽然先进的大型水冷堆预计将成为未来几十年核电扩容的主力，但小型模块堆预计将在帮助难减排部门脱碳方面发挥关键作用，在可替代类似规模化石燃料电厂的市场上提供低碳能源。核部门将继续应对一系列挑战，包括降低成本、能力建设，以及在监管和行业层面加强协调和标准化，以提高竞争力并加快部署新的核电装机容量。为了支持这些成员国工作，总干事 2022 年启动了“核协调和标准化倡议”，该倡议为所有核利益相关方（政府、监管机构和行业）提供一个独特的机会，以小型模块堆技术为重点，为实现安全可靠先进堆的全球部署这一共同目标而发挥协同作用。

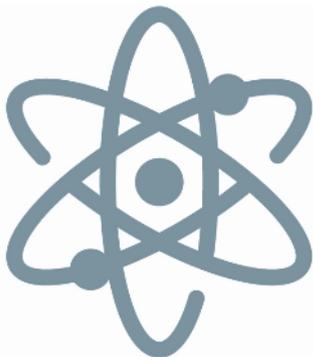
5. 同时，许多已经决定提前淘汰核电的国家正在重新考虑这一选择方案，并参与到未规划的长期运行中。

A.2. 在运核电厂²

状况

6. 截至2023年12月，全球在运核电容量为371.5吉瓦（电），由31个成员国的413座反应堆提供。获得运行许可的21.3吉瓦（电）（25座反应堆）额外容量在2023年暂停运行。这包括印度的四座反应堆，总净容量为639兆瓦（电），日本的21座反应堆，总净容量为20633兆瓦（电）。日本的两座反应堆（高滨1号和高滨2号）在2011年暂停运行后重新启动。

7. 2023年，总容量为377.6吉瓦（电）的418座反应堆在运行，但只有总容量为364.48吉瓦（电）的403座反应堆向原子能机构报告了它们的发电量。2023年报告的总发电量为2515.2太瓦·时，比2022年略增长1%³。三个最大的生产国是：美利坚合众国，拥有世界上最大的反应堆群，占所报告的总发电量的30%（742.4太瓦·时）；中国占16%（406.5太瓦·时），连续四年比法国生产更多的核电；法国占13%（323.8太瓦·时）。



2023年底,全球在运
核电容量达

377.6吉瓦(电)

产生于

418座在运反应堆

31个国家

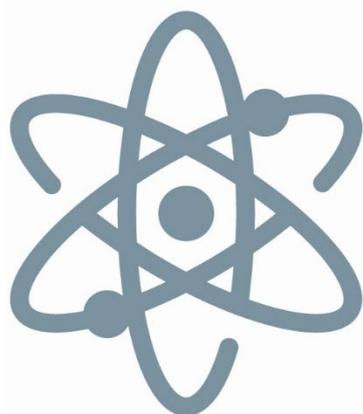
8. 2023年，总容量为5吉瓦（电）的五座压水堆在五个不同的成员国接入电网。

在中国，防城港3号机组于1月10日并网，这是在防城港场址建造的两个华龙一号（HPR1000）示范堆中的第一个。在斯洛伐克，Mochovce-3反应堆于1月31日接入电网，这是一个VVER V-213型反应堆，净容量为440兆瓦（电）。在美利坚合众国，Vogtle-3 AP1000反应堆（1117兆瓦（电））于3月31日并入电网。在白罗斯，VVER V-491型白罗斯2号反应堆（1110兆瓦（电））于5月13日并网。12月21日，大韩民国的Shin-Hanul-2（1340兆瓦（电））APR-1400反应堆并网。除了Mochovce-3和Shin-Hanul-2，所有这些反应堆都在2023年开始商业营运。

² 数据来源：原子能机构动力堆信息系统（www.iaea.org/pris）根据成员国2023年11月底前提供的数据进行了更新。

³ 总发电量不包括乌克兰反应堆机组，因为截至发布时，尚未提交2023年的运行数据。

9. 2023 年底，17 个国家在建的反应堆总容量为 61.1 吉瓦（电）（59 座反应堆）。在这一年里，中国和埃及开始建造六座压水堆型核动力堆，总容量为 6.8 吉瓦（电）。在中国，四座 CAP1000 反应堆于 2023 年开工建设：海阳 4 号（1161 兆瓦（电））、连

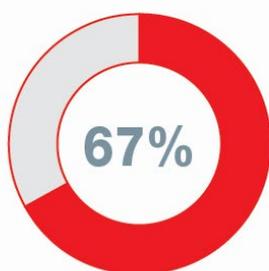


2023年底总容量为
61.1 吉瓦(电)
59 座反应堆
在建于
17 个国家

江 1 号（1224 兆瓦（电））、三门 4 号（1163 兆瓦（电））、徐大堡 1 号（1000 兆瓦（电））和一个 HPR1000 反应堆机组 — 陆丰 6 号（1116 兆瓦（电））。在埃及，VVER-1200 反应堆 El Dabaa-3 号（1100 兆瓦（电））于 5 月 3 日开始建造。

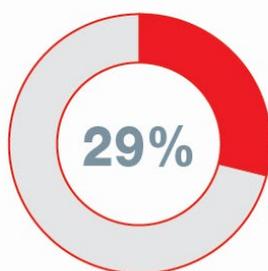
10. 全球约 67% 的在运反应堆容量（261.8 吉瓦（电），295 座反应堆）已运行超过 30 年，而 29%（112.2 吉瓦（电），142 座反应堆）以上已运行超过 40 年，4%（17.5 吉瓦（电），28 座反应堆）运行超过 50 年。老化的机组突出了对新的或提高出力的在运核电容量的需求，以抵消已规划的退休，并为可持续性和全球能源安全及气候变化目标作出贡献。政府、电力公司和其他利益相关方正投资于越来越多反应堆的长期运行和老化管理计划，以确保可持续运行并向新装机容量顺利过渡。

261.8 吉瓦(电)
295 座反应堆



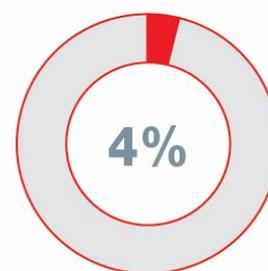
在运30年以上

112.2 吉瓦(电)
142 座反应堆



在运40年以上

17.5 吉瓦(电)
28 座反应堆



在运50年以上

11. 即使机组群老化，在运核动力堆仍然表现出高水平的总体可靠性和实绩。负荷因子也称为容量因子，是反应堆的实际能量产出除以全年以参考单位功率运行时产生的能量产出。高负荷因子表示运行实绩良好。2023 年，全球容量因子中位数为 87.74%。自 2013 年以来，沸水反应堆（沸水堆）和压水反应堆（压水堆）一直是性能最好的反应堆，其容量因子中位数分别为 89.3% 和 82.7%。

12. 在整个 2023 年，6 吉瓦（电）核电容量（五座反应堆）被永久下线。在比利时，Tihange-2（压水堆，1008 兆瓦（电））于 2 月 1 日关闭，随后中国台湾的国盛 2 号（沸水堆，985 兆瓦（电））于 3 月 14 日关闭。德国最后三个运行中的反应堆 — Emsland（压水堆，1335 兆瓦（电））、Isar-2 号（压水堆，1410 兆瓦（电））和 Neckarwestheim-2 号（压水堆，1310 兆瓦（电））— 在该国实施核电淘汰政策十二年后，于 4 月 15 日关闭。

趋势

13. 到 2023 年底，全球 69 年的累计运行经验超过 19 751 个堆-年，来自 35 个国家总容量为 497.9 吉瓦（电）的 647 座反应堆。过去十年，核电装机容量一直处于稳定水平；自 2013 年初以来，新增了 69.8 吉瓦（电）的核电容量并入电网，其中超过 79% 的容量增长发生在亚洲，那里同一期间共有 55.4 吉瓦（电）（54 座反应堆）的总容量并入电网。自 2013 年初以来，中国的新增并网容量达 40.02 吉瓦（电），在该地区处于领先地位。

A.3. 新的或扩大的核电计划

状况

14. 目前有约 50 个国家有意在其能源结构中加入核电，以支持国家社会经济发展，其中 27 个国家处于启动和实施国家核电计划的不同阶段：

15. 17 个国家处于决策阶段 — 考虑采用核电但尚未作出决定的国家（阿尔及利亚、萨尔瓦多、爱沙尼亚、埃塞俄比亚、印度尼西亚、哈萨克斯坦、蒙古、摩洛哥、尼日尔、菲律宾、塞内加尔、斯里兰卡、苏丹、泰国、突尼斯、乌干达、赞比亚）。这些国家中的大多数已经开展了预可行性研究，让决策者了解核电的好处以及成功核电计划的需要和要求。其他国家已经启动了本国的计划，正努力建立国家协调机制和制定计划路线图。

16. 10 个处于决策后阶段 — 已经决定并正在建设基础结构的国家，或者已经签订合同并将在不久的将来开始建造或已经开始建造的国家。在这些国家中，孟加拉国、埃及和土耳其已经开始建造其第一座核电厂。波兰已选定了技术，并与供应商签订了合同。加纳、约旦、肯尼亚、尼日利亚、沙特阿拉伯和乌兹别克斯坦一直在准备或评价其首座核电厂的投标。

27 个启动核电国家

17 决策阶段

考虑核电但未作出
最后决定的国家



10 决策后阶段

已决定并正在建设基础结构
或已签合同并正准备
或已开工建设的国家



17. 在孟加拉国和土耳其，首台机组的新核燃料分别于 2023 年 10 月和 2023 年 4 月运抵厂址，孟加拉国首台机组计划于 2024 年底、土耳其首台机组计划于 2025 年初投入商业运行。埃及埃尔达巴 3 号机组（VVER-1200）于 2023 年 5 月浇筑了第一罐混凝土。埃及核与辐射监管机构于 2023 年 8 月颁发了埃尔达巴 4 号机组的建造许可证，正在进行建造场址准备工作。在波兰，已经完成了到 2042 年总核电装机容量达 6000—9000 兆瓦（电）的压水堆建造的技术和供应商选择。在沙特阿拉伯，核电厂技术供应商的选择工作预计将于 2025 年完成，首台机组将于 2036 年调试。

18. 到 2023 年底，17 个国家正在建设总容量为 61.1 吉瓦（电）的反应堆（59 座反应堆），其中包括在 2023 年期间开工建设的总容量为 6.7 吉瓦（电）的六座反应堆。中国开始建造四座 CAP1000 反应堆（海阳 4 号、连江 1 号、三门 4 号和徐大堡 1 号）和陆丰核电站 6 号机组（HPR1000），总容量为 5.7 吉瓦（电）。在匈牙利，建造两座 VVER V-527 反应堆的 Paks II 项目正在筹备之中。Paks-5 反应堆的第一次混凝土浇筑计划于 2024 年底进行。



图 A.1. 拉斐尔·马利亚诺·格罗西总干事 2023 年 9 月 25 日在维也纳举行的大会第六十七届常会期间与孟加拉国科学和技术部耶费希·奥斯曼部长阁下举行双边会晤。(照片来源：原子能机构)

19. 约旦计划于 2026 年发布用于电力生产和海水淡化的小型模块堆项目的招标说明书。加纳将其反应堆技术的选择范围扩大到小型模块堆，目前正在审查五家潜在供应商关于发展约 1000 兆瓦（电）反应堆的建议，计划于 2029 年进行调试。肯尼亚已宣布，正在考虑建造一座研究堆以及小型模块堆和大型核电厂。乌兹别克斯坦已经开始对总装机容量为 2400 吉瓦（电）的核电厂进行场址表征和许可证审批，首座核电厂计划于 2026—2030 年进行调试。

20. 爱沙尼亚对其核电计划仅考虑小型模块堆技术。2023 年 10 月进行了综合核基础结构评审第一阶段工作组访问，以审查基础结构状况。工作组访问确定，该国已对其核电基础结构需求进行了全面评定，使政府能够决定是否启动核电计划。在工作组访问期间，原子能机构参观了昆达费米能源公司为了让一个潜在场址周围的当地社区参与而设立的公众宣传室（图 A.2）。政府预计会在 2024 年决定是否继续实施该计划。



图 A.2. 2023 年 10 月，爱沙尼亚昆达费米能源公司用于向公众宣传核能潜力的公众宣传室。（照片来源：原子能机构）

21. 哈萨克斯坦选定了建造首座核电厂的场址，并宣布将于 2024 年举行全民公决，以决定是否继续建造。哈萨克斯坦于 2023 年 3 月接待了原子能机构的综合核基础结构评审第一阶段后续工作组访问。

趋势

22. 到 2035 年，运行核电国家的数量可能会增加约 30%，与目前的 31 个国家相比，新增 10 至 12 个运行核电厂国家。这一显著增加需要这些国家在原子能机构的支持下加强基础结构准备，以确保负责任的部署。在亚美尼亚、阿根廷、保加利亚、捷克共和国、匈牙利、伊朗伊斯兰共和国、巴基斯坦、罗马尼亚和斯洛伐克等许多扩大核电国家，建造新核电厂的决策或项目实施工作也在取得进展。一些成员国的核工业也在支持全世界对核能的新兴趣，并正在发展生产新部件的额外能力。

23. 吸引能源规划者和政策制定者关注的技术发展是，预计到 2030 年可以获得和部署若干同类首创的小型模块堆设计。一些国家已将小型模块堆纳入其技术考虑范围，或继续监测发展动态，其中包括爱沙尼亚、加纳、印度尼西亚、约旦、肯尼亚、菲律宾、波兰、沙特阿拉伯、苏丹、乌干达和赞比亚等启动核电国家，以及保加利亚、捷克共和国、



罗马尼亚和南非等扩大核电国家。其驱动因素在于小型模块堆技术的进步，以及小型模块堆相对于大型核电厂可能具有的优势，如前期基建投资费用较低、适用于较小电网、非电力应用以及模块化扩展的可能性。

24. 同时，以逐步发展的核电厂为基础着手发展其核电计划的成员国继续显示出对大规模核电厂技术的兴趣。

25. 无论计划是基于大型核电厂还是小型模块堆，都仍然需要并应适当发展国家核电基础结构，包括核安全、核安保和核保障。一些成员国继续报告其打算利用正在运行的参考设计，并汲取原设计国家监管机构和营运者的经验。

A.4. 核电技术发展

状况

26. 全球关注核电技术发展的驱动因素是需要加速部署先进型反应堆，包括小型模块堆。这一关注不仅限于电力生产，还包括地区供热、制氢和海水淡化等非电力应用。非传统利益相关方对利用核电实现能源密集型工业活动的脱碳也越来越感兴趣。对创新应用的探索反映了核技术的动态发展，如用于热电联产的浮动核电厂、偏远地区的微堆以及外层空间应用的核解决方案等。在可变可再生能源兴起的背景下，先进堆能够为电网提供灵活性，因此受到越来越多的关注。此外，核工业正在拥抱人工智能，特别是机器学习和深度学习技术，通过强大计算能力和数据分析工具彻底改造操作和维护系统。

27. 核电技术不断发展，重点是开发先进堆和扩大其应用范围。通过不断研究和创新，核电正在成为满足全球能源需求同时减少碳排放的关键力量。将核电纳入非电力部门的努力体现了一种战略方案，旨在最大限度地发挥核技术可为全球能源格局的各个方面带来的各种惠益。这一战略演变将核电定位为可持续的低碳能源未来的重要贡献者。

趋势

28. 水冷堆一直是全世界核电厂采用的主要技术。目前的趋势包括加强水冷堆安全性能，例如采用无源冷却系统来强化整个系统的可靠性，以及改进燃料设计以提高燃料效率并减少废物。

29. 由于小型模块堆紧凑小巧，有可能部署在电网基础结构有限的偏远地区或区域，因此全世界都在继续认真考虑小型模块堆。目前小型模块堆发展的趋势侧重于提高其经济性、安全性能和可扩展性。

30. 当前快堆技术发展趋势的重点在于通过采用被动停堆系统和探索不同的冷却剂来改进安全措施，特别是在革新型反应堆设计方面。此外，还十分重视改进快堆的经济性，以降低建造费用并提高燃料效率。

31. 人们对核热的应用越来越感兴趣，例如为海水淡化厂提供电力，以解决许多地区的缺水问题；通过高温电解生产氢气；或用于需要高温热量的行业，如化工部门和制造部门。

A.4.1. 先进水冷堆

状况

32. 水冷堆占世界在运商用核电厂的 95%以上。水冷堆有着悠久而成功的运行历史，为满足全球能源需求做出了巨大贡献，因其可靠性和效率而被广泛用于发电。核工业不断发展，目前正在进行先进设计、安全强化以及混合能源系统（可再生能源与核能源相结合）等替代技术方面的研究与发展，以满足日益增长的能源需求并应对气候挑战。材料科学、计算模式和安全工程的进步正在推动先进水冷堆技术的改进。这包括非能动安全设施和系统、完善的燃料技术、更有效的冷却方法、放射性废物的减少和抗扩散性的增强。例如，一些国家已在运行和（或）建设先进压水堆设计，如 AP1000、APR1400、EPR、HPR1000 和 VVER1200。阿拉伯联合酋长国巴拉卡厂址 3 号机组 APR1400 于 2023 年 2 月开始商业运行。在美利坚合众国，沃格特勒电厂 3 号机组 AP1000 反应堆于 2023 年 7 月开始商业运行。2023 年 11 月，白罗斯核电厂 2 号机组开始商业运行。俄罗斯联邦正在开发一个具有光谱调节功能的 VVER-S 反应堆。许多国家当前的重点工作是进一步开发概念性超临界水冷堆，包括探索各种应用的更小型设计，以及优化超临界水冷堆，以在混合中子谱条件下有效运行。继续开展国家案例研究，就先进核电厂进行核-可再生混合能源系统（特别是太阳能和风能这两种可变速能源）的技术和经济分析，以提供基本电力荷载，增强电网的稳定性，并将核热用于非电力应用。



图 A.3. 竣工后的美国佐治亚州沃格特勒核电厂 3 号机组。
(照片来源：南方核运营公司)

趋势

33. 17 个成员国有 55 座在建水冷堆机组，其中 50 座为先进渐进型压水堆（ACP (1)、AP1000 (1)、APR-1400 (3)、CAP1000 (6)、CAREM (1)、EPR (3)、HPR1000 (11)、PRE KONVOI (1) 和 VVER (23) 变体），两座为先进沸水堆，三座为加压重水堆。这些反应堆设计增强了防止严重事故的安全设施，并提高了燃料经济性。这些反应堆机组的单机组功率从 25 兆瓦（电）到 1630 兆瓦（电）不等。这些反应堆大多采取多台机组位于单个场址的安排。

34. 为了应对气候变化挑战和满足能源需求，许多运行核电的国家都在努力尽可能延长电厂运行寿期（最初预计为 40 年），重点是电厂现代化以及强化主要部件和设备。

A.4.2. 小型模块堆及微堆

状况

35. 2023 年底，有两座小型模块堆示范电厂投入运行。拥有两座 KLT-40S 反应堆、每座功率为 35 兆瓦（电）的俄罗斯联邦“罗蒙诺索夫院士号”浮动核电站进行了首次换料。该浮动核电站自 2020 年 5 月起投入商业运营，为楚科奇地区的佩韦克镇供热并供电。在中国，石岛湾厂址的球床模块式高温堆示范工程已宣布自 2023 年 12 月 6 日起开始商业运营，两座反应堆的满功率为 200 兆瓦（电）。2023 年还有三座小型模块堆电厂处于不同的建造阶段。阿根廷 CAREM-25 反应堆建造的目标是于 2028 年并入电网。中国海南省昌江的 ACP100 示范工程于 2021 年 7 月开工建设，2023 年 8 月已安装堆芯。该多用途压水堆机组称为“玲珑一号”，到 2027 年可发电 125 兆瓦（电）。RITM-200N 设计已获得在俄罗斯联邦雅库特乌斯季扬斯基区的场址许可证，预计到 2028 年将产生 55 兆瓦（电）的电力。为 RITM-200C 反应堆制造各种配置的锻造坯料的工作已经开始 — 2027 年，将在俄罗斯联邦楚科奇建造一座配备这种反应堆的浮动核电站。

供近期部署的设计开发和许可证审批

36. 加拿大计划于 2025 年在达林顿厂址开始建造具有自然循环的 BWRX-300 反应堆，预计于 2028 年底并入电网。该微型模块堆的设计旨在于安大略省乔克河离网应用。ARC-100 的供应商设计审查正在进行中，准备场地的许可证也在审查之中。ARC-100 的首台机组将位于新不伦瑞克的勒普罗角。

37. 中国山东省石岛湾的世界首座模块式高温气冷堆核电厂 HTR-PM（球床模块式高温气冷堆）示范项目于 2023 年 12 月 6 日投入商业运行。HTR-PM 示范项目是一个协作项目，由清华大学作为技术牵头人，负责研发、主要部件和系统的设计；中国华能集团有限公司作为业主和电厂营运者；中国核工业集团有限公司（中核集团公司）作为设计、采购和施工承包商和燃料制造商。



图 A.4. 拉斐尔·马利亚诺·格罗西总干事参观位于中国山东省石岛湾的球床模块式高温气冷堆（HTR-PM）示范项目。（照片来源：国家原子能机构）

38. 在法国，法国电力公司为 NUWARD 项目成立了一家全资子公司，该项目旨在开发两个总发电量为 340 兆瓦（电）的压水堆机组。同时，“法国 2030”项目征集活动促进了先进模块堆的活动。2023 年，八个小型模块堆项目被选中。这些项目基于多种第四代反应堆技术，包括钠冷快堆、铅冷快堆、熔盐堆和高温气冷堆技术。在欧洲，捷克共和国、芬兰和法国的三家核监管机构公布了关于法国 NUWARD 小型模块堆联合早期审查第一阶段的报告，荷兰王国、波兰和瑞典的另外三家监管机构也将加入第二阶段的审查。

39. 在意大利，环境和能源安全部于 2023 年 9 月启动了国家可持续核能平台，该平台汇集了意大利的核利益相关方，目的是为可能在该国部署核能开展预可行性研究，其中将小型模块堆、先进模块堆和微堆作为参考技术。

40. 在日本，正在讨论由私营部门利益相关方开发的十多项小型模块堆设计。日本原子力开发机构热功率为 30 兆瓦的高温工程试验堆已投入运行，用于制氢示范项目。

41. 大韩民国有两种重要的小型模块堆设计。第一种名为系统一体化模块式先进反应堆（SMART），是一种压水堆，能够发电 100 兆瓦（电）。已宣布与加拿大建立新的伙伴关系，并将提交许可证申请，以便有可能在加拿大乔克河实验室部署系统一体化模块式先进反应堆。第二种称为革新型小型模块堆，是一种一体化压水堆，设计发电容量为 170 兆瓦（电），由一个国家财团开发。

42. 俄罗斯联邦按照不同技术路线开发了至少 20 种小型模块堆设计，用于发电和热电联产陆基和海基核电厂。签订了建造一座 10 兆瓦（电）SHELF-M 反应堆机组的协议，为 Sovinoye 的采矿作业供电。RITM-200N 水冷小型模块堆将于 2024 年在雅库特开工建造。目前正在开发两个中型电厂水冷堆项目，分别采用 VVER-600 和 VVER-C-600，以取代科拉核电厂反应堆厂址老化的 VVER-440 反应堆。VVER-C-600 项目具有中子频谱调节功能，用于燃料燃耗补偿，可在封闭的燃料循环中运行。

43. 英国选择了五项小型模块堆和先进模块堆设计，以供进一步考虑，将于 2024 年夏季授予合同。这些设计包括 NUWARD、BWRX-300、ARC-100、VOYGR 和 AP300。启动了对采用标准回路型压水堆的 470 兆瓦（电）Rolls-Royce 小型模块堆的监管审查。

44. 美利坚合众国正在开发多种小型模块堆设计。NuScale VOYGR 设计可能由六个模块组成，每个模块可发电 77 兆瓦（电），其许可证审批和示范已从爱达荷福尔斯转移到美国和欧洲（包括罗马尼亚）的其他潜在用户。第四代反应堆的两种技术是 TerraPower 公司的 Natrium 钠冷快堆和 Xe-100，后者采用高温气冷堆技术。其他先进设计包括卡伊洛斯电力公司氟盐冷却高温堆、eVinci 微型反应堆和 Holtec 公司 SMR-160 中小型堆。微堆应用、研究、验证和评价项目也在进行中。

趋势

45. 2023 年全年，成员国对浮动核电厂和微堆及其应用越来越感兴趣。为促进设计开发和早期部署，正在做出大量的行业和监管努力。成熟度较高的技术有望在 2030 年左右及早部署。2023 年，加拿大、捷克共和国、日本、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国继续开展小型模块堆的一个称为微堆的子集的技术发展活动。微堆设计用于产生最多 20 兆瓦（电）的较低功率，被认为是在偏远地区或小岛屿提供热电联产和（或）替代柴油发电机的最佳解决方案。微堆采用的技术包括高温堆、快堆和热管。



图 A.5. 拉斐尔·马里亚诺·格罗西总干事出席 2023 年 11 月在维也纳原子能机构总部举行的“部署浮动核电厂——好处与挑战”国际专题讨论会开幕式。（照片来源：原子能机构）

46. 越来越多的国家目前正开展浮动核电厂海基小型模块堆的设计开发。丹麦的一家反应堆设计初创公司正在开发能产生 100 兆瓦（电）的紧凑型熔盐堆。大韩民国继续开发 BANDI-60，这是一种基于压水堆的浮动动力装置，能产生 60 兆瓦（电）。俄罗斯联邦即将建造的浮动核电厂采用了 RITM-200M 设计。采用小型模块堆的浮动核电厂为小众市场设计，包括为偏远社区提供分布式发电和供热，海水淡化，以及通过与海洋和造船业合作的混合能源系统。正在分析和评估这些可移动小型模块堆概念的法律、监管和体制方面，以促进部署工作。

47. 在这种快速发展的情况下，总干事于 2021 年设立了原子能机构小型模块堆及其应用平台，以协调原子能机构在小型模块堆领域的活动，并提供一个联络点，供成员国和其他利益相关方通过官方渠道就小型模块堆及其应用所涉一般性问题请求援助，同时也作为原子能机构响应这些请求的机制。在 2023 年通过该平台机制开展的主要协作工作中，值得注意的是为审查约旦采用小型模块堆进行海水淡化的可行性研究进行的专家工作组访问以及浮动核电厂国际专题讨论会。

A.4.3. 快堆

状况

48. 截至 2023 年 12 月，有五座钠冷快堆在三个成员国运行：三座在俄罗斯联邦，一座在中国，一座在印度。2023 年，俄罗斯 BN-800 反应堆转为满负荷使用混合氧化物燃

料，这标志着闭合核燃料循环的第一阶段。印度目前正在调试一座 500 兆瓦（电）的原型快中子增殖堆，这是一座实验工业规模钠冷快堆，预计 2024 年并入电网。中国目前正在建造两台完全相同的 CFR-600 示范堆机组，第一台已开始调试。常阳实验快堆将在改进工程后于 2026 年重新启动。液态重金属冷却剂技术正在吸引越来越多的关注，特别是在快中子小型模块堆领域。俄罗斯联邦正在建造一座 300 兆瓦（电）示范性铅冷快堆 BREST-OD-300，而中国、英国和美利坚合众国以及欧洲联盟正在开发若干铅冷快堆设计。在第四代国际论坛开发的六个革新型反应堆概念中，有三个（钠冷却、液态重金属冷却和氦冷却）是快中子系统，其余两个（熔盐冷却和超临界水冷却）可以在快中子谱或慢化中子谱中运行。



图 A.6. TVEL 燃料公司将燃料发往中国，用于为首座 CFR-600 快中子堆堆芯装料。
(照片来源：TVEL 燃料公司)

趋势

49. 快中子系统的中期部署依靠钠冷快堆作为主要选择方案。俄罗斯联邦除本国三座在运钠冷快堆之外，还在开发 1200 兆瓦（电）BN-1200 大型反应堆，并建造多用途研究快堆。中国正在开发 1 吉瓦（电）CFR-1000 第四代反应堆。总部位于美利坚合众国的泰拉能源公司正在开发与熔盐储存相结合的 Sodium 钠冷快堆。这项先进技术的峰值功率可达 500 兆瓦（电），因此有可能取代典型的煤电厂，也可以与其他可再生能源结合使用。美国的另一个钠冷快堆项目“多功能试验堆”正在等待美国国会批准。在法国，在“法国 2030”项目征集活动的 15 个项目中，有七家公司在 2023 年被选中开发快中子小型模块堆。2023 年启动了四个衍生的快中子小型模块堆项目。虽然钠冷快堆仍是最成熟的技术，但一些国家正在建造和开发铅冷快堆，如 BREST-300，这是俄罗斯联邦目前正在建造的一座反应堆，预计将于 2028 年调试。处于开发之中的还有英国-美利坚合众国联合开发的 450 兆瓦（电）西屋铅冷快堆、意大利-罗马尼亚联合开发

的 120 兆瓦（电）欧洲先进铅冷示范快堆以及中国和法国的若干小型模块堆型铅冷快堆设计。新成立的公司正在瑞典开发 55 兆瓦（电）的 SEALER，在法国开发 LFR-AS-30（30 兆瓦（电）），在英国开发 LFR-AS-200（200 兆瓦（电）），意大利也在进行研发。欧洲联盟和美利坚合众国正在开发其他快中子谱反应堆技术，如气冷快堆和熔盐快堆。

A.4.4. 核电的非电力应用

状况

50. 核能用于非电力应用是成熟技术，其中包括地区供热、海水淡化和各种工艺的直接供热。目前大约有 70 座反应堆在若干成员国运行，还有许多其他成员国对这一可选方案显示出日益强烈的兴趣。

51. 2023 年，10 个成员国的 45 座核动力堆为非电力应用提供了 2046.0 吉瓦时的热电当量。在俄罗斯、中国、斯洛伐克、捷克共和国、瑞士、罗马尼亚、匈牙利和保加利亚，这些热量的大部分（88%）被用于地区供热，共计 1799.1 吉瓦时。印度和瑞士的工业供热使用了 211.8 吉瓦时（10%），海水淡化使用了 35.1 吉瓦时（2%）。

52. 中国最近启动了一项部署大规模地区核能供热的重要计划，成为包括保加利亚、捷克共和国、匈牙利、罗马尼亚、俄罗斯联邦、斯洛伐克、瑞士和乌克兰在内的现有核热用户群体的一员。继 2021 年在浙江省秦山核电站启动地区供热示范项目后，中国于 2022 年启动了红沿河项目。此外，芬兰和波兰等已建立了广泛地区供热网络的其他国家也在考虑利用核热，重新以零排放的核能为这些网络供电。

53. 随着对海水淡化的利用在全球迅速发展，核能淡化海水引起了成员国越来越大的兴趣，目的是让全球越来越多的人口能够获得满足基本需求的清洁水。印度正计划大幅扩大其核能淡化海水能力，计划在卡尔帕卡姆安装两台多效蒸馏机组，利用核能供热提供动力，每天可处理 1000 立方米的海水。其他国家（日本和美利坚合众国）正在利用核电为反渗透海水淡化装置提供动力，而哈萨克斯坦和巴基斯坦则已具备了核能加热淡化海水的经验，中国计划安装以核能为动力的反渗透装置。

54. 一些成员国已表示对利用核能制氢感兴趣，其中包括加拿大、中国、法国、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、瑞典、英国和美利坚合众国。与 2022 年开始商业制氢的瑞典奥斯卡港核电厂一样，美国九英里角核电厂于 2023 年开始利用低温电解法制氢。此外，英国（希舍姆核电厂）和美利坚合众国（普雷里岛核电厂）都在开发将现有核电厂与高温蒸汽电解装置连接的项目，利用从核电厂二次回路提取的蒸汽来提高制氢效率。在俄罗斯联邦，俄罗斯核电厂联合企业正在对科拉核电厂氢生产试点综合设施建设项目进行环境影响评估。其他几个核反应堆与低温电解装置的耦合项目正在开发阶段，分别位于法国、俄罗斯联邦和美利坚合众国等国。



图 A.7. 九英里角清洁能源中心于 2023 年开始商业核能制氢。
(照片来源：星座能源公司)

趋势

55. 在各种低碳能源中，核能的独特之处在于它能够全天候、大规模、不受地理限制地以可靠和可调度的方式提供热能和电力。这种独特的优势组合正促使人们越来越关注核能的潜力，即不仅有助于电力部门脱碳，而且有助于其他目前以化石燃料供电、产生了全球大部分碳排放的能源应用脱碳。这些部门包括供暖、运输和各种工业应用，从水泥到石油和天然气生产、炼铁、化肥生产和大量其他化学品。核能可以在电气化可行的地方提供零碳电力，直接提供零碳热能以取代化石燃料的燃烧，并为制氢提供脱碳化能源，而制氢正日益被成员国视为实现低碳经济的关键因素。此类应用越来越有吸引力，因为世界许多地区的化石燃料成本正处于历史高位，全球对能源供应安全的担忧日益突出，而且成员国正在加大应对气候变化的力度。

B. 核燃料循环

B.1. 前端

状况

56. 截至 2023 年 10 月 30 日，铀现货价格为 74.00 美元/磅八氧化三铀（192.38 美元/千克铀），创 16 年来新高。这与 2016—2021 年相对平稳的市场价格（约 20—30 美元/磅八氧化三铀，52—78 美元/千克铀）相比发生了巨大变化，涨幅约为 200%。

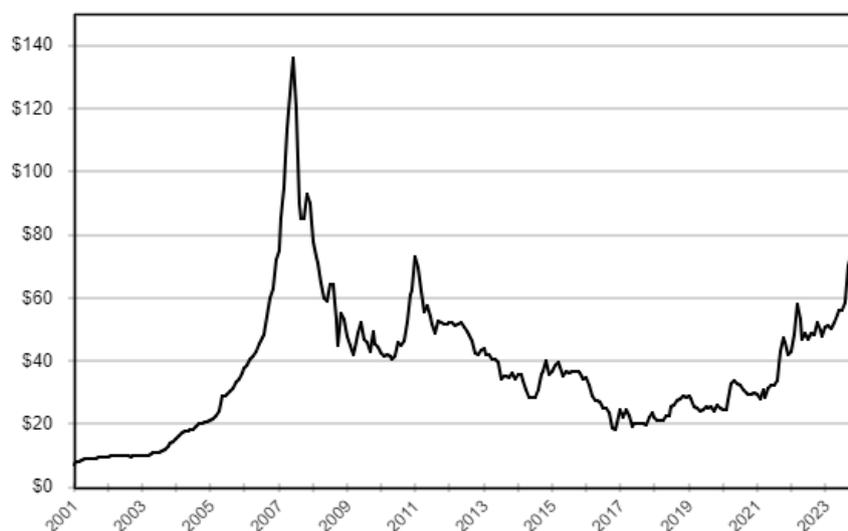
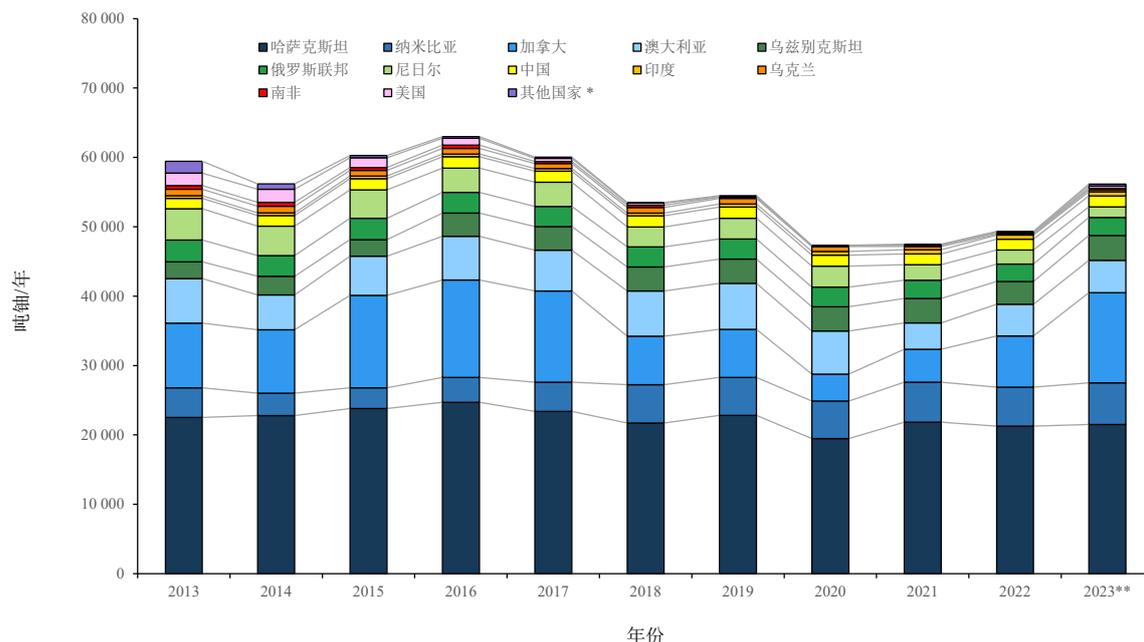


图 B.1. 2001—2023 年铀现货价格演变。
(截至 2023 年 10 月；数据来源：UxC 公司)

57. 经济合作与发展组织核能机构（经合组织核能机构）— 原子能机构联合出版物《2022 年铀资源、生产和需求》（“2022 年红皮书”）涵盖了 2019 年至 2020 年的情况，显示全球铀矿产量减少了 13%，从 54 478 吨铀减至 47 342 吨铀。加拿大和哈萨克斯坦等主要生产国近年来限制了总产量，以应对 2021 年前至年中持续低迷的铀市场。此外，由于全球 2019 冠状病毒病大流行，铀产量下降在 2020—2021 年出乎意料地加剧。

58. “2022 年红皮书”报告，截至 2021 年 1 月 1 日，闲置矿山的总产能超过每年 29410 吨铀，此外至少还有 33.5 万吨地下可开采铀资源。这些业务拥有运营所必需的一切执照、许可证和协议，而且过去曾进行过商业生产，因此有可能在相对较短的时间内（一两年内）恢复生产。然而，“2024 年红皮书”的初步数据显示，铀产量有所回升，2021 年小幅增至 47 504 吨铀，2022 年增至 49 336 吨铀，2023 年增至 56 143 吨铀，这是 2019 冠状病毒病大流行之前十年的平均水平。2023 年，铀年产量最高的四个国家（澳大利亚、加拿大、哈萨克斯坦和纳米比亚）的产量预计将比 2022 年分别增加约 2%、76%、1%和 7%。



* “其他国家”包括其余小生产国。
** 经合组织核能机构-原子能机构估计。

图 B.2. 2013—2023 年全球铀产量演变。

59. 全球已查明可开采常规铀资源（即合理确定资源以及推断在通常所开采类型的地质矿床中存在的资源）足以支持核发电容量的近期和中期增长。“2022 年红皮书”报告，超过 600 万吨已查明铀资源按当前市场价格可开采，按 2020 年全球反应堆相关铀需求量 60 114 吨铀算，足够使用 100 多年。

60. 从历史上看，一级铀供应的缺口一直由二级供应来填补。不过，这一数字一直在下降，预计会持续下降到 2040 年。随着近期铀市场现货价格持续上涨，铀生产行业重新焕发了生机，一些初级生产国重新启动了因铀现货价格长期低迷而被闲置和保养的业务。这些业务包括澳大利亚的哈尼穆恩矿、加拿大麦克阿瑟河矿和基湖厂以及美利坚合众国史密斯牧场-高地矿业业务（均于 2022—2024 年恢复生产），再加上纳米比亚蓝格·海恩里希矿（预计将于 2025 年重新启动）。

61. “2022 年红皮书”显示，全球勘探和开发支出继 2014 年至 2020 年减少 18.8 亿美元之后，2021 年小幅增加，达到近 2.8 亿美元，比 2020 年增长 10%。“2024 年红皮书”的初步数据显示，预计 2022 年和 2023 年的支出将继续大幅上升。例如，NexGen 能源公司于 2023 年宣布了对加拿大阿萨巴斯卡盆地 Arrow 矿床附近的扩大勘探计划。

62. 燃料生产市场的特点历来都在于燃料生产商与供应商之间的竞争激烈。目前，全球和地区燃料生产能力都超过了需求。

63. 核燃料生产是一项成熟技术，并且多年来通过制造过程自动化和数字化不断改进，减少了运行废物，增强了工作人员的辐射防护。与此同时，许多国家通过提高燃

料损耗和延长燃料循环时间来改善核反应堆经济性，以及通过减少燃料破损发生率来提高核燃料运行可靠性，这些都取得了进展。

64. 一些成员国打算在轻水堆中更多地使用后处理铀燃料和铀-钚燃料，以优化天然易裂变资源的利用。包括法国、印度、日本和俄罗斯联邦在内的多个成员国计划在快堆中使用铀钚混合燃料。运行加压重水堆的一些成员国已开始用稍浓缩铀堆芯取代天然铀堆芯，以提高其反应堆的竞争力。

65. 比利时、加拿大、中国、法国、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、西班牙和美利坚合众国等若干成员国都有正在进行的研究、发展和示范计划，通过导引试验棒和导引试验组件的制造、辐照和辐照后检验、燃料性能评价、系统热工水力学以及严重事故规范的制定和验证，在现有反应堆群中部署耐受事故燃料。耐受事故燃料纳入了新材料，其中一些设计通过将换料停堆时间延长至两年，可使反应堆运行时间更长、更有效，从而提高核电厂的经济效益。一些成员国正在开发先进制造技术，如增材制造（如使用 3D 打印机），或采用人工智能和全自动燃料制造工艺，以便在市场上部署革新型燃料和掺杂燃料。

66. 一些小型模块堆设计将采用常规燃料设计（类似于大型反应堆常用的低浓燃料设计）。其他小型模块堆开发商选择了比如基于高丰度低浓铀的更具创新性的燃料设计，以获得超出常规燃料设计所能取得的效益。目前正在研发用于轻/重水冷却小型模块堆的二氧化铀燃料、铀-钚混合氧化物燃料和耐受事故燃料、用于浮动和陆基轻水冷却小型模块堆的陶瓷燃料、用于高温气体/熔盐/热管冷却小型模块堆的三层各向同性燃料、用于液态金属/气体/热管冷却小型模块堆类型快堆的金属或陶瓷燃料以及用于熔盐冷却小型模块堆的熔盐燃料。然而，此类设计需要独立或全新的燃料制造厂和供应链。这些革新型燃料设计在工业部署之前还必须进行资格认证和许可证审批，特别是那些浓缩水平较高的设计，如低浓铀+和高丰度低浓铀，更是如此。

趋势

67. 在第 28 届联合国气候变化大会期间，22 个国家发表了一份宣言，以推进到 2050 年将核电容量增加两倍的宏伟目标。“2022 年红皮书”的全球预测显示，到 2030 年，铀需求量估计在 60 960 吨铀（低需求情景）和 76 592 吨铀（高需求情景）之间，到 2040 年则在 63 040 吨铀（低需求情景）和 108 272 吨铀（高需求情景）之间。然而，如果像世界核协会的《核燃料报告：2023—2040 年全球供需和供应情景》报告的那样，由于小型模块堆的引入而导致铀需求增加，到 2040 年，世界年度铀需求可能从 86 914 吨铀（低需求情景）到高达 184 316 吨铀（高需求情景）。

68. 从 2023 年到 2040 年期间，19 个国家已规划和预期的矿山将投入运营，从而使全球名义总产能达每年 77 138 吨铀。要保证铀供应，就必须让闲置矿山重新投入运营，落实已规划和预期的矿山，而新矿床的发现则需要持续有利的市场条件。这对于新铀矿的开发尤为重要，因为从发现矿床到开始采矿作业平均需要 10—15 年的时间。此外，还需要及时对勘探和开采/加工技术进行大量投资，包括投资具有成本效益的铀提取技术，以开采非常规矿床类型（如磷酸盐和黑色页岩矿床中的铀）。



69. 可推动不够经济的边缘铀矿床发展为生产矿山的近期创新和发展包括：从不整合面型矿床中原地开采铀，如加拿大阿萨斯卡盆地的凤凰矿床；砂岩型铀矿床的原地生物浸取，如中国的 512 号铀矿床，该矿床正在进行现场试验；提高低品位铀矿石的选矿水平，就像在纳米比亚马里尼卡钙结岩型矿床所做的那样；以及地表钻孔资源采掘，这是一种革新型可扩展新采矿方法，可用于开采相对较小的高品位矿体，这些矿体要么太小，要么太深，无法用露天或地下采矿方法经济地进行开采。此外，通常用于从其他类型矿床提取金属的堆浸技术也显示出可用于铀矿作业的前景。

70. 核燃料组件并非可互换商品，而是包含设计、许可证审批和研发活动的复杂产品，需要达到一定的技术规格要求。这些取决于反应堆的物理特性、公用事业的反应堆运行和燃料循环管理战略，以及国家或地区的许可证审批要求。燃料设计和制造技术的新发展可分为两个主要方面：为现有反应堆群开发的渐进型或革命性燃料，可在安全和性能以及运行经济性和废物管理方面实现改进；以及为先进堆（包括小型模块堆）开发的渐进型或革命性燃料。

71. 一些成员国已计划发展许可证审批基础结构，以支持在 21 世纪 20 年代中期突破燃耗和丰度传统限值 5%，并安全和经济地使用现有轻水堆实现按 24 个月周期运行，而不需要对制造厂和运输容器进行物理改造（即只通过改变许可证审批程序）。

72. 然而，下一个十年，核燃料生产行业所有核燃料类型的细分市场都将面临日益增长的需求，原因是既有核电国家和启动核电国家的建设计划都在不断扩大，其雄心勃勃的目标是开发新的燃料类型，包括用于小型模块堆和先进堆的燃料。目前正在探索多种不同耐受事故燃料设计，形成了种类繁多、复杂程度各异的解决方案；一些耐受事故燃料设计相对容易利用现有生产线和设施进行制造，而另一些则需要建立新的生产线和设施。强化型耐受事故燃料和革新型核燃料设计都要求丰度在 5%以上（制造多种革新型概念性燃料需要低浓铀+和高丰度低浓铀）。所有类型的小型模块堆燃料的成功部署将需要从研发阶段到工业化阶段的燃料生产技术的成熟。

73. 开发新的经认证低浓铀+和高丰度低浓铀运输包装对低浓铀+和高丰度低浓铀燃料的利用也至关重要。目前，北美和俄罗斯联邦正在考虑高丰度低浓铀计划。俄罗斯国家原子能公司“Rosatom”拥有以各种形式生产铀-235 丰度达 19.75%的低浓铀+和高丰度低浓铀的技术能力。在大多数国家，现行核燃料循环基础设施法规限制铀-235 丰度不得超过 5%。然而，未来十年，由于小型模块堆的大规模部署，对高丰度低浓铀的需求可能会发生相当大幅度的变化，许多新反应堆设计都需要低浓铀+或高丰度低浓铀。在美利坚合众国，Centrus 能源公司于 2023 年 10 月开始进行高丰度低浓铀示范生产，并将随着高丰度低浓铀需求的增长逐步扩大生产。铀浓缩公司已宣布准备向国际市场供应低浓铀+燃料，正在探索建造一个专门的高丰度低浓铀装置，并与欧安诺公司签署了联合开发低浓铀+和高丰度低浓铀燃料运输容器的协议。

B.2. 后端

状况

74. 全球乏核燃料正以每年约 7000 吨重金属的速度积累，而贮存的存量约为 30 万吨重金属。对于那些制定了长期成熟核计划并奉行开式循环战略的国家而言，面临的主要挑战仍然是需要更多的乏核燃料贮存容量和处置前不断延长的贮存期。在一些国家，乏核燃料在经过初始冷却时间后，从湿法贮存转移到干法贮存。有的国家已开始运行新干法贮存设施（如阿根廷、斯洛伐克和斯洛文尼亚），有的则正在规划（如日本）。美国能源部启动了一个或多个联邦综合临时贮存设施的以同意为基础的选址方案倡议。

75. 成员国正在其核电厂退役项目框架内继续进行乏核燃料的拆除和迁移。已部署新技术来改进适用于乏核燃料贮存系统的视察技术，主要是用于检测工具的新型机器人平台。乏核燃料运输在一些国家是常规操作。近年来，为容纳新的或不断扩大的库存，开发了一些新的贮存和运输货包并颁发了许可且投入使用。

76. 一些核电厂的延寿使得需要贮存的乏核燃料数量增加。英国的后处理厂关闭后，全球后处理能力大幅下降。法国、印度、日本和俄罗斯联邦继续以商业规模开发适合于现有反应堆群和先进堆燃料的新循环利用技术。日本六所村后处理厂预计将于 2024 年投入商业运营。美利坚合众国奥克洛公司已向美国核管理委员会提交了计划，概述了商业规模后处理厂的预申请工作。俄罗斯联邦正在对马雅克生产联合企业的 RT-1 和 ODC 后处理厂进行现代化改造，以提高其乏核燃料后处理能力和运行效率。

趋势

77. 对于确保乏核燃料能够继续安全贮存并随后运输到处置设施或后处理设施而言，仍然至关重要的是了解乏核燃料在各种贮存系统中的行为以及贮存结构、系统和部件的老化与降质机理。随着乏燃料处置计划在一些成员国取得进展并进入建造最后阶段，准备活动（如制定表征计划）的数量也在增加。考虑到通过生产具有较高初始浓缩丰度和较高燃耗的乏燃料实现了更高的反应堆效率，导致热量输出增加，包壳脆化的风险可能增加，从而可能影响后续乏燃料管理步骤，因此，继续开展此类工作尤为重要。

78. 随着为现有反应堆群（如掺杂燃料）和先进堆设计（包括小型模块堆）设想新的燃料设计，从而可能带来乏燃料管理中潜在的不同行为，将需要寻求革新型乏燃料管理解决方案，以便及时部署。原子能机构协调有关这一问题的国际研究活动，通过收集业务经验、研究成果以及政策和战略方案，促进信息共享，强化成员国的知识和能力建设。

79. 尽管全球乏燃料后处理能力总体上有所下降，但人们对开发现有燃料的先进再循环技术和支持先进堆及小型模块堆部署和可持续性的先进再循环技术越来越感兴趣。将新型和革新型燃料循环与现有燃料循环相结合是一项重要工作，以应对当前的能源供应挑战，并确保核电可持续、安全和可靠发展。一些国家已经实施了以综合方式处理乏燃料和放射性废物管理的倡议，而其他国家则正在开始讨论和制定相关倡议。新型反应堆和相关燃料循环的部署将是一项重大挑战，因此，国际合作和伙伴关系对于取得成功至关重要。

C. 退役、环境修复和放射性废物管理

C.1. 退役

状况

80. 在全球范围内，有 210 座核反应堆已经永久退役，其中 23 座已经完全退役。这些关闭的反应堆分布在欧洲、亚洲和北美洲的 21 个国家。⁴ 超过三分之二的已关闭反应堆（包括退役反应堆和正在退役的反应堆）都集中在五个国家，即法国（14 座）、德国（33 座）、日本（27 座）、英国（36 座）和美利坚合众国（41 座），因此这些国家正在进行的动力堆退役计划规模最大，不过保加利亚、加拿大、意大利、大韩民国、立陶宛、俄罗斯联邦、斯洛伐克、西班牙和瑞典等其他若干国家以及中国台湾地区也有一些动力堆退役项目正在实施中。

81. 2023 年的主要退役进展包括全球有五座动力堆最终关闭，其中包括德国最后剩余的动力堆（埃姆斯兰、伊萨 2 号和内卡维斯特海姆 2 号）、比利时的一座动力堆（蒂昂热 2 号）和中国台湾的一座沸水堆（国圣 2 号）。这一关闭率与过去十年的平均水平持平。营运者仍然强烈希望将 20 世纪 80 年代建造的反应堆寿期延长至 60 年或更长。

82. 继续从研究堆退役获得大量经验，全世界约有 450 座研究堆已完全退役。目前，有 67 座研究堆正在退役。

83. 世界各地的燃料循环设施还在推进重大退役工程，包括在法国、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国的一些厂址。

84. 正在进行的几个退役项目取得了重大技术进展，包括国家放射性废物管理公司完成了已退役何塞·卡夫雷拉核电厂的恢复，这是西班牙将完全拆除的首座核电厂（图 C.1）。



座核反应堆
永久退役

⁴ 根据截至 2023 年 12 月 31 日的动力堆信息系统数据库（[PRIS - Home \(iaea.org\)](https://pris-Home.iaea.org)），于 2024 年 6 月 6 日提取。



图 C.1. 何塞·卡夫雷拉核电厂厂址的封隔建筑。
(照片来源：国家放射性废物管理公司)

85. 此外，布伦尼利斯核电厂的营运者于 2023 年 9 月获法国政府授权完成该设施的拆除工作。这一授权为反应堆厂房的彻底拆除工程、土木工程结构的翻新、剩余多余部件的拆除以及厂址的最终治理铺平了道路。

86. 日本原子力开发机构的后端计划取得了重大成就。例如，一座快中子增殖堆——文殊堆已进入退役的第二阶段，包括拆除与钠有关的部件（如中子屏蔽）和发电部件（如涡轮机）的准备工作，以及 2023 年 2 月获得的监管当局的批准。

87. 2023 年 10 月，俄罗斯核电厂联合企业从联邦环境、工业和核监督服务局获得了新沃罗涅日核电厂 1 号和 2 号动力机组退役权的许可证。计划的项目竣工日期为 2035 年。



图 C.2. 作为文殊堆退役工作的一部分，拆除高压给水加热器。
(照片来源：日本原子力开发机构)

趋势

88. 尽管未来的设施关闭率存在不确定性，但正在进行拆除的设施数量继续增加，出现了永久关闭后尽早拆除设施的趋势。影响这一趋势的因素包括政府政策、设施业主将设施长期维护相关成本降至最低的愿望以及最终拆除和相关材料管理成本的不确定性。

89. 人们越来越强调将循环经济原则用于退役项目。退役的可持续性体现在不同层面，包括更有效地利用退役材料，力图将需要最终处置的废物数量最少化，以及更多地考虑对厂址或设施进行再利用/改换用途，以支持未来的工业项目。然而，循环经济需要从政策制定者、监管机构到社区等不同利益相关方之间的协作，而这几方在日常生活中对放射性的接受程度可能有不同看法和期望。

90. 展望未来，数字技术在推进核退役方面将发挥越来越重要的作用。重要的益处包括：效率及现有人力、财政和技术资源的优化利用；最大限度减少工作人员所受辐射的辐射安全；促进了解退役活动的监管过程和利益相关方参与；以及促进现有和未来工作人员之间有效知识和经验传授的知识管理。

91. 与日益采用数字化密切相关的其他发展有使用移动机器人扫描结构的物理和辐射状况，以及将遥控操作工具用于废物处理、包装作业和在难以进入区域（如由于高剂量率）进行作业。

92. 数字技术将为整个核工业带来更多潜在好处，使核设施设计者、营运者和监管机构以及未来退役项目的各利益相关方更方便利用从正在进行的退役项目获取的经验。

C.2. 环境治理和天然存在的放射性物质管理

环境治理

93. 环境治理活动主要集中在四类受污染场址，即核场址（最终也是退役项目的一部分）；前铀矿开采和加工场址；受辐射事故影响的场址；以及那些进行过非核工业作业并留下残留物/废物需要妥善管理的场址（如图 C.3）。



图 C.3. 天然存在的放射性物质残留物的临时贮存。(照片来源：原子能机构)

94. 2023 年，世界各地的治理工作继续取得稳步进展。在英国，核退役管理局原来负责清理该国 17 个历史最悠久的民用核场址，现已将工作计划扩大到包括先进气冷堆群。在美利坚合众国，107 个场址中有 91 个成功处理了受污染的水和土壤。超过 17.9 万集装箱的超铀废物得到永久处置。到 2023 年底，清理出了 1.7 万英亩土地。在华盛顿州，汉福特工厂的 B 反应堆现已与橡树岭国家实验室和洛斯阿拉莫斯国家实验室一起成为曼哈顿计划国家公园的一部分，完成了储罐水处理的关键活动，并通过升级和改进设施降低了风险。虽然因所存在的放射性废物的独特性，其余场址的清理工作相对困难，但目前仍在 16 个场址开展清理工作。

天然存在的放射性物质管理

95. 除放射性废物外，许多国家还面临着处理非核业务产生的、所含天然存在的放射性核素水平各异的大量残留物的挑战。

96. 磷石膏是化肥生产过程中大量产生的硫酸钙副产品。由于运输和长期贮存需要投资和运营费用，磷石膏往往作为废物被成堆丢弃在位于空旷地带的露天场所。磷石膏堆放的不利环境影响通常表现为对地下水、地表水和土壤的污染。

97. 磷石膏含有稀土元素铁、钛、镁、铝和锰，但也含有有毒重金属。许多稀土元素被欧洲联盟列为“关键”原材料。磷石膏还具有不同的潜在用途，包括：用作路基，不仅便宜，而且甚至比目前的路基材料更有效；用于农业土壤改良，为土壤提供很需要的硫；作为填埋覆盖物，以加快废物降解，延长填埋场寿期；作为制作陶瓷屋瓦的材料；以及作为牡蛎壳碎那样的海洋底物的材料。通过采用类似方案，其他业务产生的残留物也可以产生价值，通过出售这些材料获得的利润还可重新投入到受污染场址治理中。这种方案是一种潜在解决办法，特别是对那些不能以其他方式获得治理这类场址所需资源的低收入成员国而言。

趋势

环境治理

98. 在全世界继续努力治理受污染场址的同时，治理领域势头强劲的趋势已不仅仅是降低风险，而是一种不影响安全的价值聚合的广泛视角。循环经济的原則要求重点关注在核业务和非核业务结束后让场址重新具有利用价值。成功的治理工程将发挥关键作用，确保核电能够为减轻气候变化影响做出贡献。在这方面，需要可持续的适应性治理解决方案，同时考虑到积极的参与性决策过程。

天然存在的放射性物质管理

99. 许多国家已经示范了如何通过采用循环经济方案尽量减少天然存在的放射性物质残留物（例如，西班牙将磷石膏用作土壤结构改良剂，荷兰王国将天然存在的放射性物质残留物用作填埋场稳定剂）。从天然存在的放射性物质残留物中可以提取出关键材料，但这需要采用革新型技术，并将非常需要推进采取循环性方案的政府政策，而这需要有适应循环经济假想方案的监管来支撑。

C.3. 放射性废物管理

状况

100. 2023 年全年，一些国家在放射性废物管理方面取得了重大进展，重申其致力于负责任地处理和处置废物，并承诺采取更安全、更可持续的废物管理实践。

101. 在实施废物管理解决方案方面拥有数十年经验的成员国进一步推进了一些主要国家计划。例如，法国国家放射性废物管理机构于 2023 年 1 月提交了在地质贮存工业中心项目下建造地质处置设施的许可证申请。此外，考虑到未来核电厂退役产生的废物，国家放射性废物管理机构申请了环境许可，以提高其收集、存贮和处置工业中心设施对极低放废物的处置能力。国家放射性废物管理公司（西班牙）宣布将埃尔卡博

里处置设施的低放废物处置能力大幅提高到四倍。瑞士国家放射性废物处置合作组织等待着在其建议的场址开展地下调查的许可。德国、日本、乌克兰和英国等其他成员国正在积极推进选址过程。



图 C.4. 在 2023 年正式访问法国期间，拉斐尔·马利亚诺·格罗西总干事参观了位于默兹/上马恩省的国家放射性废物管理机构设施，包括由国家放射性废物管理机构总干事 Pierre-Marie Abadie 介绍地质贮存工业中心的放射性废物深部地质处置项目。

(照片来源：国家放射性废物管理机构)

102. Studsvik 公司（瑞典）和核服务公司（德国）签署了一项排他协议，实施 Studsvik 公司处理具有挑战性的放射性废物的专利技术 — “inDRUM” 技术，从而实现放射性废物管理创新。在俄罗斯联邦，托木斯克理工大学和 TVEL 公司正协作实施一个项目，利用放电加速放射性混凝土的去污。这种创新方法有望实现更快、更高效的去污，同时最大限度地减少传统混凝土破碎方法通常伴随的粉尘扩散。俄罗斯联邦物理学和动力工程研究院所开发了一种快堆钠冷却剂固相氧化技术，并建立了一个试验性工业设施 MINERAL 100/150。由雅各布工程公司、阿特金斯公司和西屋电气公司合伙组成的退役联盟（英国）正在开创一种创新方案，从核退役管理局场址的燃料池中安

全回收碎片。经过了测试的松化污物回收工具（BSRT）可提供一种类似于工业吸尘器的具有成本效益的高效解决方案。



图 C.5. 拉斐尔·马利亚诺·格罗西总干事在 2023 年 8 月对瑞典进行正式访问期间由导游带领参观了瑞典核燃料和废物管理公司的密闭容器实验室以及用于乏燃料深部地下贮存的密闭容器。（照片来源：原子能机构）

103. 在本报告所涉期间，最近肩负责任和（或）较小规模责任的一些成员国建立了国家能力和设施。例如，白罗斯正在建立放射性废物管理组织方面取得重大进展。该国的目标是在 2030 年之前有一座长期贮存和处置设施投入运行，该设施业务范围不仅包括白罗斯核电厂产生的废物，还包括使用电离辐射源的各个部门产生的废物。荷兰王国已开始建造多功能贮存大楼，这是一座用于贮存中低放废物的新设施，设计寿命为至少 100 年。津巴布韦已建成一座国家集中式放射性废物管理设施，用于放射性废物和弃用密封放射源的长期管理。菲律宾和委内瑞拉玻利瓦尔共和国的国家贮存设施的安全和安保条件得到改善，增加了不久的将来可用的贮存能力。



图 C.6. 津巴布韦新建的集中式废物管理设施。(照片来源：原子能机构)



图 C.7. 菲律宾（左）和委内瑞拉玻利瓦尔共和国（右）的贮存设施条件得到改善。
(照片来源：菲律宾核研究所（左）和委内瑞拉科学研究所（右）)

104. 2023 年 7 月，斯洛文尼亚放射性废物管理机构开始为建造中低放废物处置设施进行场址准备，修建了主要进出道路，建立了必要的公用事业联系和基线环境监测。然而，在澳大利亚，在一个传统的业主代表机构以担心存在偏见为由，成功地对南澳大利亚一个集中式放射性废物管理设施的首选场址提出质疑后，政府不打算继续选择该首选场址。



图C.8. 斯洛文尼亚建造核电厂运行废物处置设施的场址准备。
(照片来源：斯洛文尼亚放射性废物管理机构)

趋势

105. 采用综合放射性废物管理原则和实践的全球趋势正在改变核工业。这种方案通过优化从废物产生到处置的废物处理，确保核技术的可持续利用。它需要政策和战略制定者之间的协调，以解决与设定目标的充分性相关的各种挑战，然后选择关于整合放射性废物管理的适当技术选项。综合废物管理可简化过程、降低环境风险并促进负责任的放射性废物管理。加拿大核废物管理组织通过了一项管理放射性废物的综合战略，但不包括乏核燃料。这个综合方案包括在深部地质处置库处置中放废物和非燃料高放废物，以及在近地表处置设施处置低放废物。

106. 成员国对部署小型模块堆的兴趣必将改变核能领域。然而，小型模块堆给放射性废物管理带来了巨大挑战。随着各国拥抱这一革新型技术，必须调整适当的放射性废物政策和战略，以适应小型模块堆。这就需要对废物处理、贮存和处置设施进行大量投资，并对合格人员进行培训。提供资金，特别是为处置设施提供资金，对于履行这些不断变化的放射性废物管理责任以确保核能的可持续未来至关重要。

107. 另一个日益明显的趋势是采用放射性废物分级，重点是预防和尽量减少废物产生，以及废物回收和再利用。这个方案旨在减少运往处置设施的放射性废物量，从而使这些设施作为宝贵的长期资产得到保护。安大略电力公司的西部清洁能源分类和回收设施就是这种趋势的一个明证，最大限度地减少核电厂产生的废物，降低贮存需求和退役费用。此外，比利时的 RECUMO 设施用于回收医用放射性同位素生产过程产生的放射性残留物以及回收低浓铀，进一步表明了比利时对减少废物的承诺。同样，韩国水电和核电公司在罗马尼亚的氙清除设施在培养氙管理专门知识的同时也展示了限

制废物产生的动力。在英国，核废物服务公司公布了其放射性废物管理战略，表示遵循废物分级原则。该战略强调减少废物，为退役废物设定了 50%的回收目标，目的是到 2030 年将二次废物减少约 70%。

108. 核科学家们正在考虑如何利用废物创造价值，回收放射性同位素，用于医疗应用和太空探索。英国航天局和英国国家核实验室正在研究镅-241 空间电池。2023 年，智利和斯洛文尼亚共移除 32 个高活度源。此外，根据“全球镭-226 管理倡议”，从泰国移除了弃用镭源。目前正在克罗地亚、萨尔瓦多、埃塞俄比亚、印度尼西亚、马来西亚、斯洛文尼亚和西班牙等 17 个成员国开展工作，清点可用于生产放射性同位素治疗癌症的弃用镭源。

D. 聚变研究和技术发展促进未来能源生产

状况

109. 2023 年，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的研究人员将 2022 年 12 月在国家点火装置实现的聚变能点火突破重复了至少三次。

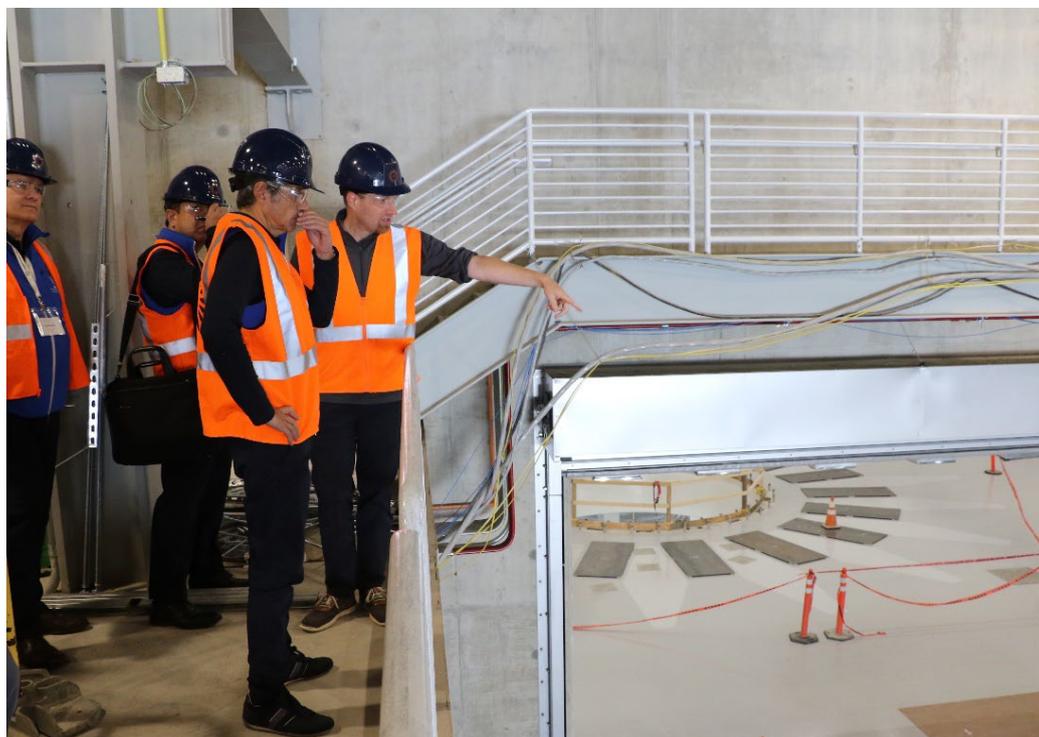


图 D.1. 拉斐尔·马里亚诺·格罗西总干事参观 SPARC 托卡马克大厅。
(照片来源：原子能机构)

110. 2023 年 2 月，聚变能领域的首个原子能机构协作中心 — 英联邦聚变系统和麻省理工学院的等离子体科学与聚变中心共同庆祝计划产生净科学能量增益的托卡马克 — SPARC 建造场址的正式启用。SPARC 预计将于 2025 年投入运行，作为净科学能量增益示范。其后续项目 ARC 预计将于 2035 年完工，作为电力生产示范。

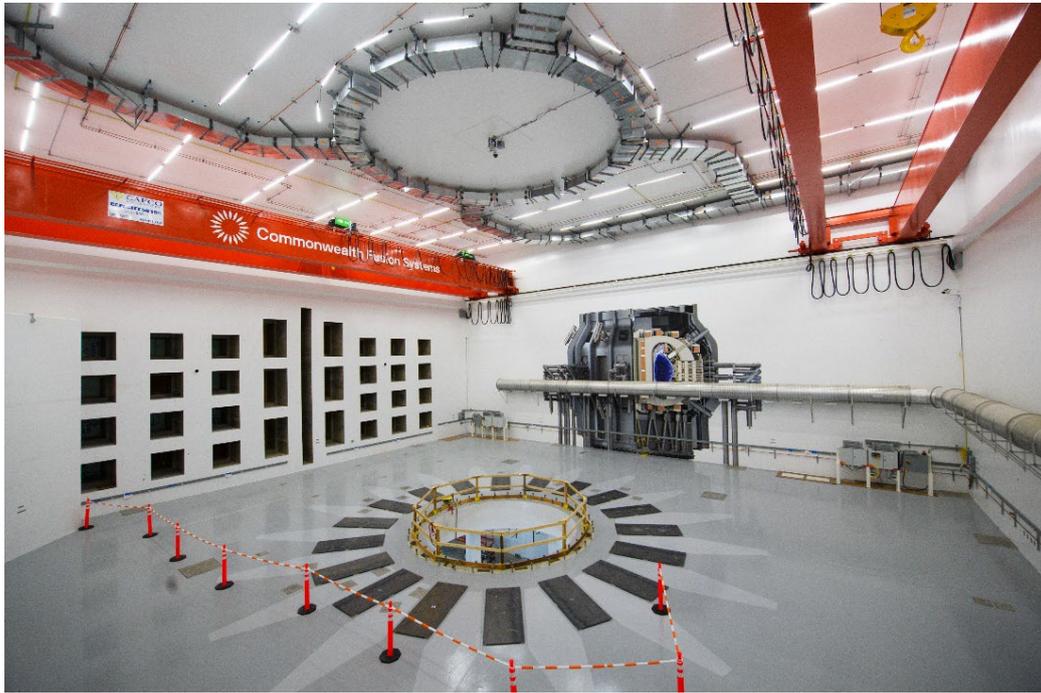


图 D.2. 做好机器组装准备的 SPARC 托卡马克大厅。
(照片来源：英联邦聚变系统)

111. 2023 年 10 月，日本 JT-60SA 托卡马克产生了第一等离子体。这台四层楼高的机器可维持加热到两亿摄氏度的等离子体约 100 秒，远远长于以前的大型托卡马克。JT-60SA 中的等离子体与计划用于国际热核实验堆的等离子体非常相似，物理学家可以利用它来研究等离子体稳定性及其如何在长时间尺度上影响聚变功率输出，从而提供可适用于更大型托卡马克的经验。此外在日本，2023 年，日本六所村还安装了国际聚变材料辐照设施线性原型加速器。

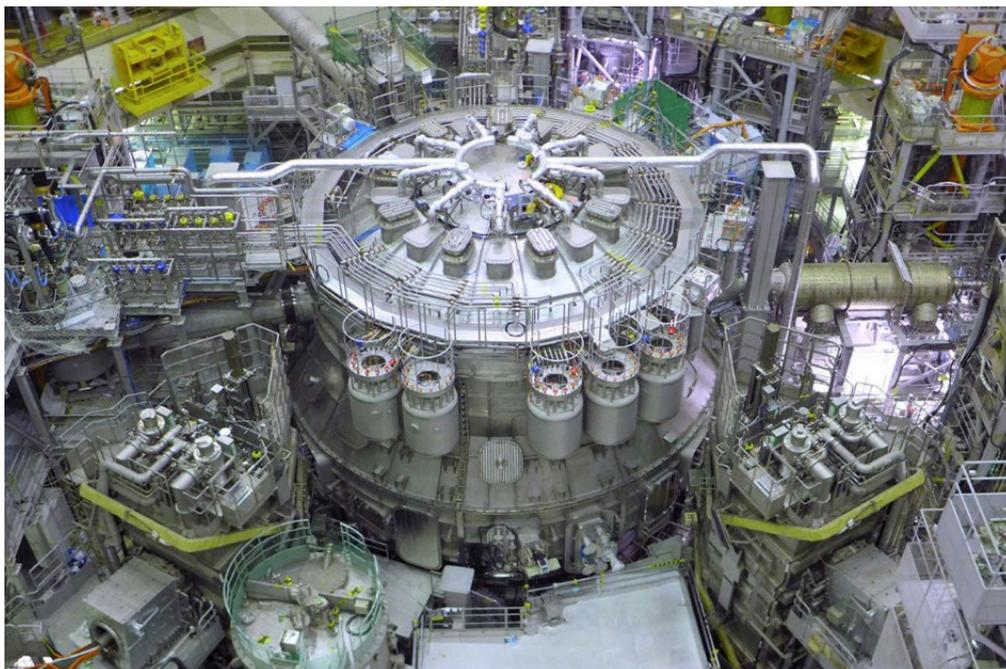


图 D.3. 最大在运托卡马克 JT-60SA 由日本和欧洲联盟共同设计和建造。
(照片来源：量子科学技术研究开发机构)

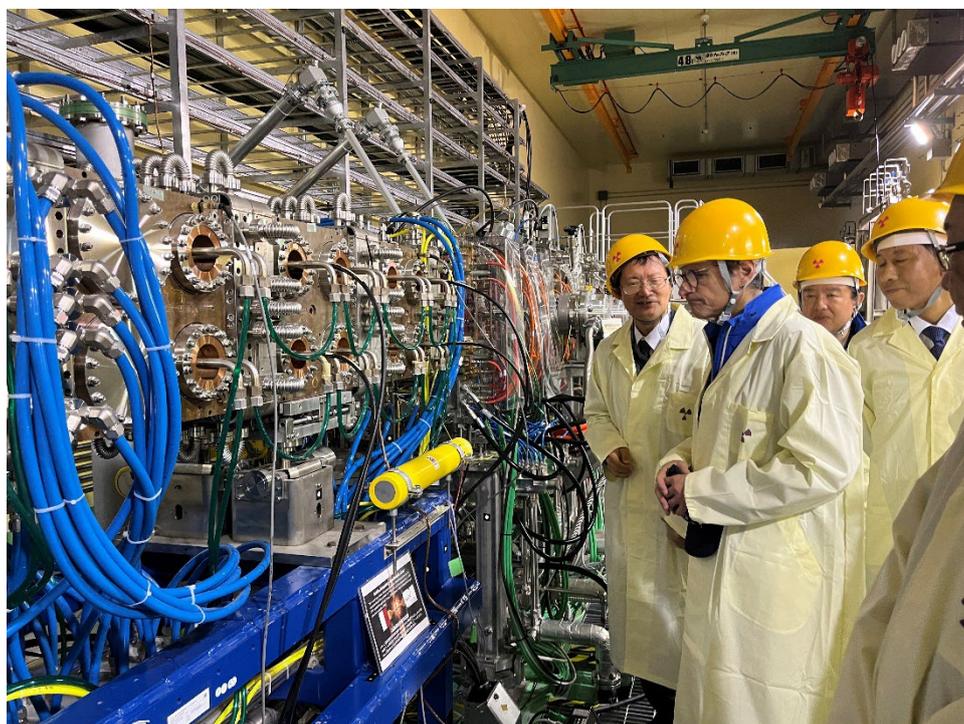


图 D.4. 原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西在正式访问日本期间
参观六所村核聚变研究所的国际聚变材料辐照设施线性原型加速器。
(照片来源：量子科学技术研究开发机构)

112. 中国的先进超导托卡马克实验装置（EAST）实现了 403 秒的稳态高约束长等离子体运行。这一突破提高了先进超导托卡马克实验装置在 2017 年创造的 101 秒原始记录。在高约束等离子体运行期间，粒子的温度和密度大大提高，这将提高未来聚变电厂的发电效率。同样在中国，由于加热、运行、控制、诊断和供电系统的升级，HL-3 托卡马克首次在高约束模式下运行，等离子体电流达到 100 万安培。

113. 2023 年，法国的 WEST 托卡马克开始运行钨偏滤器。进行了通过一系列约一分钟的等离子体脉冲产生高中子注量的第一次实验活动，以证明这种新部件的耐受性和性能。

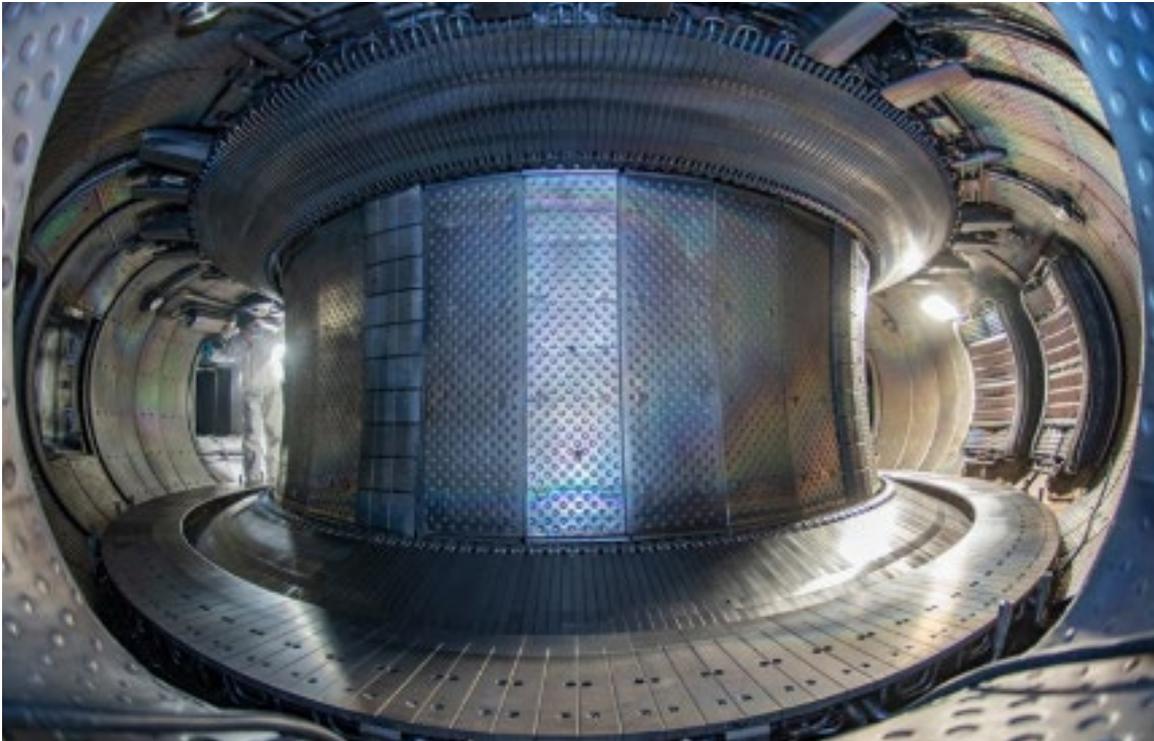


图 D.5. 装有主动冷却钨偏滤器的 WEST 托卡马克。
(照片来源：法国可替代能源和原子能委员会)

114. 经过 40 年的运行和 2023 年全年开展的最终氦-氙实验，欧洲联合环的退役工作已经开始，并将持续到 2040 年左右。欧洲联合环的退役将为聚变界提供宝贵的信息，可以分析容器内材料随着运行时间推移而发生的变化。

115. 世界上最大的仿星器 — 德国 Wendelstein 7-X (W7-X) 的研究人员能够实现 13 亿焦耳的能量转化。未来，W7-X 的目标是在等离子体保持稳定半小时的情况下，达到 180 亿焦耳的能量转化。

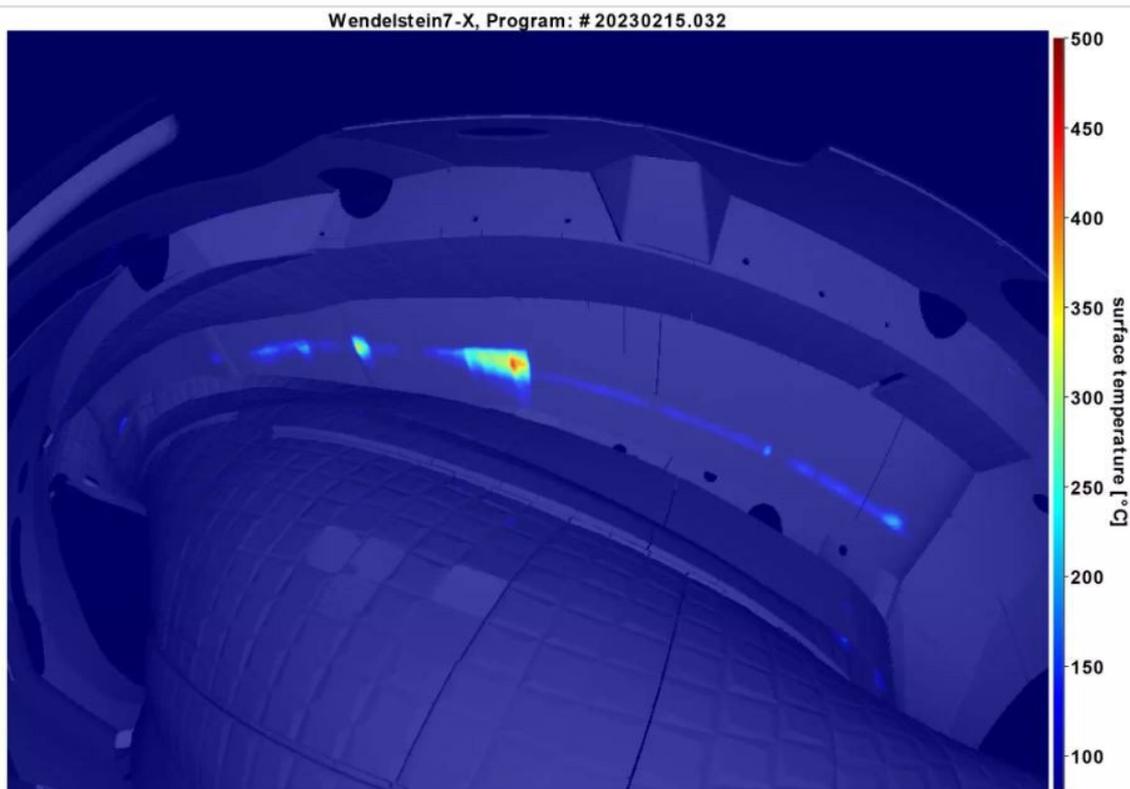


图 D.6. W7-X 真空容器的红外图像显示了水冷偏滤器靶板处的温度分布。中间一条清晰可见的线即所谓的走向线。这是等离子体与偏滤器接触的地方，温度最高。

个别区域的温度高达 600 摄氏度（红色区域）。偏滤器瓦片可承受高达 1200 摄氏度的高温。（照片来源：马克斯·普朗克等离子体物理研究所）

116. 2023 年，国际热核实验堆组织及其各国内机构继续推进国际热核实验堆优化基线的开发工作，该基线涉及将第一壁材料由铍改为钨，预计这将提高容器内部件的韧性，同时最大限度地减少机器内留存的氙量。在关键部件的维修以及正在进行的制造、组装和安装方面取得了进展，同时热核实验堆组织还继续与法国核安全管理局合作，采用分阶段许可证审批办法，其中包括三个实验运行阶段，每个阶段都有具体的里程碑和安全要求，以指导热核实验堆项目顺利完成。理事会成员强调了热核实验堆的重要价值及其使命。

117. 意大利偏滤器托卡马克试验设施的建造继续取得进展，这是一个新的超导托卡马克，专门用于研究示范聚变电厂的先进偏滤器解决方案。实施该项目的财团由许多意大利研究机构和国际伙伴（包括世界上最大的能源公司之一）组成，已为建造该设施筹集了近五亿欧元。偏滤器托卡马克试验的主要任务是探索和试验可用于欧洲示范聚变电厂的等离子体动力排气概念的物理学和技术。

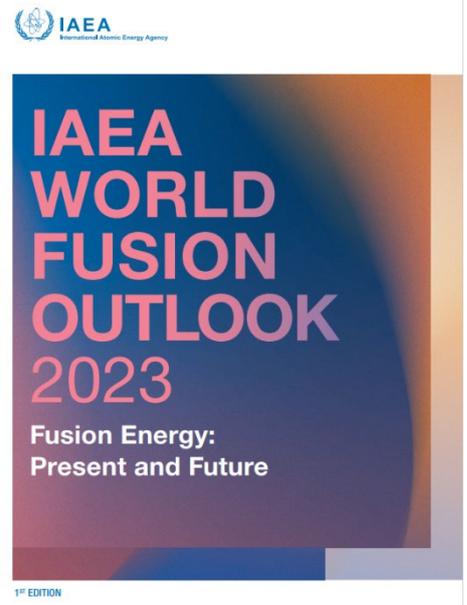
118. 示范聚变电厂的目标是示范核聚变能的净电力增益。在中国、欧洲联盟、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国，至少有 12 个这样的概念处于不同的开发阶段，目标完成日期在 2030 至 2050 年之间。各国政府、私营公司和一些公私合资企业正在开发这些概念（图 D.4）。



图 D.7. 超过 140 个公共和私营实验聚变装置正在运行、建设或规划中，而一些组织正在考虑示范聚变电厂设计。（照片来源：原子能机构聚变装置信息系统）

趋势

119. 在原子能机构和英国政府于 2023 年 10 月在伦敦举办的第 29 届国际原子能机构聚变能会议上，总干事介绍了作为聚变能最新发展权威信息的全球参考资料的首份原子能机构《世界聚变展望》，还宣布将于 2024 年召开世界聚变能源小组首次会议。会议期间，英国宣布了“聚变未来计划”，表示将在未来五年内追加投资 6.5 亿英镑（7.93 亿美元），用于一揽子研发计划，包括设立 2200 个培训名额、新建一座燃料循环测试设施，以及资助私营聚变能公司发展基础结构，特别是在英国原子能管理局的卡勒姆园区。这是在英国决定退出欧洲原子能联营“研究和培训计划”之后宣布的。几周后，英国能源安全和净零排放部与美国能源部宣布建立新的战略伙伴关系，以加速聚变能示范和商业化，重点推进两国的聚变能战略。



了解更多



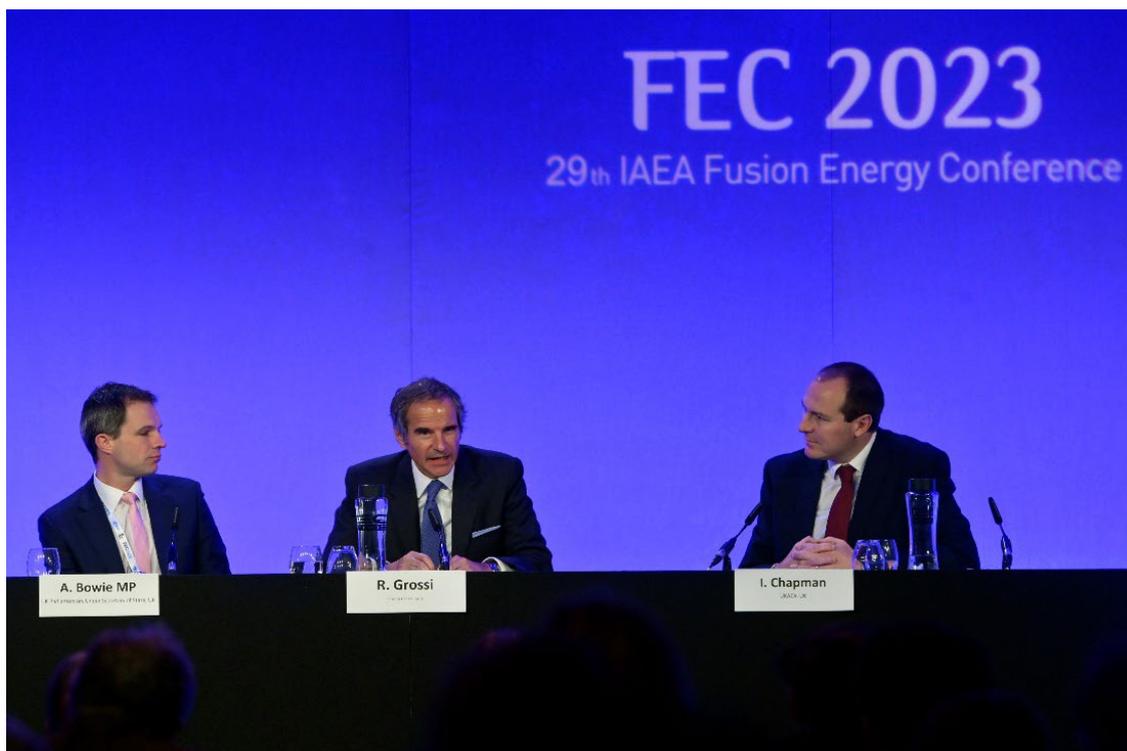


图 D.8. 伦敦第 29 届国际原子能机构聚变能会议开幕式。从左至右：英国议会副国务大臣（核与网络部长）安德鲁·鲍伊、原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西和英国原子能管理局首席执行官伊恩·查普曼。（照片来源：原子能机构）

120. 与此同时，德国联邦教育和研究部宣布，除了未来五年已指定为研究机构提供的 3.7 亿欧元（3.96 亿美元）外，2028 年前还将为聚变研究提供超过 10 亿欧元的资金。

121. 日本通过了首份国家聚变能战略，强调有必要创建国内聚变能产业，让私营部门更广泛地参与聚变能研发。日本政府还宣布将成立聚变能工业委员会，以发展相关产业，并制定聚变能技术监管准则。此外，政府还将优先在学术界开展聚变能教育。

122. 美国能源部聚变能源科学办公室发布了“建设桥梁”愿景，其中概述了三个关键要素：1) 职工队伍发展和保持 — 确保为多样化和卓越的人才建立可持续和有弹性的途径；2) 弥合差距 — 与国家实验室、大学和行业一起创建创新引擎，以解决研发差距并支持国内聚变能供应链；3) 转型科学 — 培育等离子科学和技术发现，转化为创新影响。该愿景是整体聚变能战略的一部分，旨在帮助聚合私营和公共部门的聚变研发活动。

123. 核聚变能领域的私营公司正受到越来越多的关注，得到越来越多的投资，许多公司的目标是独立开发自己的研究和示范装置。美国私营公司 Helion 宣布与微软达成协议，将向后者提供预计将于 2028 年投入运行的首座聚变发电厂的电力，目标发电量为 50 兆瓦。Helion 还宣布与纽柯公司合作开发 500 兆瓦聚变电厂，为纽柯公司的炼钢设施供电，目标启动运营日期为 2030 年。

124. 在不断变化的聚变能领域，公私合作模式开始形成。2023 年 5 月，美国能源部宣布作为其“基于里程碑的聚变发展计划”的一部分，将向八家公司提供 4600 万美元的资金，用于在其前 18 个月推进聚变电厂的设计和研发。这些公司系从众多提交了计划书的公司中选择，它们的计划书详细介绍了其将商业聚变能推向市场的计划，而资金将在其达到预先确定的商业化里程碑并经美国能源部核实后才提供。在“法国 2030”项目征集的框架下，一家公司获得了一个仿星器聚变堆的开发项目。

125. 整个聚变能行业在筹资方面实现了同比增长。聚变行业协会发布的题为《2023 年全球聚变行业》的年度聚变行业报告显示，聚变能产业目前共吸引了 62.1 亿美元的投资（超过了 2022 年的 48 亿美元）。该报告调查了 43 家私营聚变能公司，既有老牌公司，也有初创公司。尽管美利坚合众国在这一领域仍处于领先地位，有 25 家运营中的聚变能公司（包括许多行业翘楚），但该行业的地域分布正越来越多样化，每 12 个国家至少有一家聚变能公司。

126. 监管机构和立法机关也开始着手处理聚变能挑战和机遇。2023 年，加利福尼亚州成为美利坚合众国将聚变能作为有别于裂变能的独立技术的第一个州。立法强调了聚变能的安全和环境优势，并为未来的州法规奠定了基础。在此之前，核管理委员会一致投票决定将聚变能监管与裂变能监管分开，在副产品材料框架下对近期聚变能系统（例如粒子加速器）进行监管。

127. 英国政府确认，英国所有计划中的聚变原型能源设施将继续由环境机构及健康和安全局监管，这与核电厂不同，后者由核监管办公室监管。

128. 此外，由加拿大、日本和英国作为成员、巴林和新加坡作为观察员组成的“敏捷国家”聚变能工作组提出了联合建议，承认聚变能可以为应对气候变化和能源安全等全球挑战做出重要贡献，以及若干国家正在采用的聚变能监管统一方案的益处；并主张明确一个监管框架，该框架将对独立于聚变技术的聚变能设施适用，保持对人类和环境的适当保护，且与核聚变能危害相称，同时保持透明并支持创新。

129. 对超级计算、人工智能和“工业元宇宙”的兴趣也有所增长。2023 年，英国原子能管理局、戴尔科技集团、英特尔公司和剑桥大学宣布开展协作。这项协作旨在探索具有先进预测能力的超级计算机和人工智能技术如何为英国的聚变电厂原型设计——能源生产用球形托卡马克提供数字孪生。此外，美国能源部宣布为七个团队提供 2900 万美元的资金，用于聚变能科学方面的机器学习、人工智能和数据资源研究。麻省理工学院的等离子体科学与聚变中心是七家受援机构之一，获得了 500 万美元的资金，用于原子能机构认可的一个名为“聚变研究坚持开放和 FAIR 原则，促进机器学习应用”的项目。该项目符合原子能机构——等离子体科学与聚变中心协作中心协议以及原子能机构以等离子体科学与聚变中心为技术协调方的题为“人工智能用于加速聚变研究与发展”的协调研究项目。



图 D.9. 超级计算、人工智能和“工业元宇宙”将推动英国聚变电厂原型——能源生产用球形托卡马克的发展。(照片来源：英国原子能管理局)

E. 研究堆、粒子加速器和核仪器仪表

E.1. 研究堆

状况

130. 截至 2023 年底，在 54 个国家有 234 座在运研究堆，包括临时关闭的研究堆。这些研究堆继续产生中子束，为科学、医学和工业提供不可或缺的辐照服务，并强化教育和培训计划。附件中的表 E-1 列出了研究堆最常见的应用。

131. 目前，不足全球 10% 的研究堆群负责向世界市场提供大部分重要的医用放射性同位素，如锝-99m、碘-131、镭-177 或钷-166，并负责测试未来先进动力堆的核燃料和结构材料这一事实，促成了若干建造新型高功率多功能研究堆的项目。例如，阿根廷的 RA-10 研究堆即将完工，而大韩民国的 Ki-Jang 研究堆、法国的儒勒·霍洛维茨反应堆（已批准继续投资以完成建造）和俄罗斯联邦的多用途研究快堆仍在继续建造；荷兰王国宣布 PALLAS 反应堆全部资金到位并开始筹备建造工作；巴西政府再次承诺建造巴西多用途反应堆；南非政府最近核准更换已有 58 年历史的 SAFARI-1 反应堆。

132. 总体而言，有 10 个国家正在建造 11 座新研究堆（包括一套加速器驱动系统）：阿根廷、多民族玻利维亚国、巴西、中国、法国、伊朗伊斯兰共和国、大韩民国、俄罗斯联邦、沙特阿拉伯和乌克兰。2023 年，捷克共和国一座新的次临界核设施 VR-2 开始投入运行。



图 E.1 a. 阿根廷 RA-10 研究堆的建造已接近完工。
(照片来源：阿根廷国家原子能委员会)



图 E.1 b. 捷克共和国的 VR-2 次临界核设施于 2023 年开始投入运行。
(照片来源：捷克理工大学)

133. 到 2023 年底，14 个成员国有建造新研究堆的正式计划，它们是：孟加拉国、白罗斯、比利时、中国、印度、荷兰王国、尼日利亚、菲律宾、南非、塔吉克斯坦、泰国、美利坚合众国、越南和赞比亚。此外，相当数量的国家正在考虑建设研究堆，它们是：阿塞拜疆、埃塞俄比亚、印度、伊拉克、肯尼亚、马来西亚、蒙古、缅甸、尼日尔、菲律宾、卢旺达、塞内加尔、苏丹、突尼斯、乌干达和坦桑尼亚联合共和国。

134. 国际社会继续努力尽量减少民用部门的高浓铀使用。随着比利时钼-99 生产中的高浓铀完全转换为低浓铀，自 2023 年 4 月起，这种需求量极大的医用放射性同位素的全球所有主要生产商均已采用非高浓铀生产方法。迄今为止，共有 109 座研究堆和主要医用同位素生产设施从使用高浓铀转换为使用低浓铀或已确认正在关闭，6925 千克高浓铀被从 48 个国家（和中国台湾）返还原产国或以其他方式得到处置。

趋势

135. 成员国正在提高对其在运研究堆的利用率，以支持“可持续发展目标 7”（负担得起的清洁能源）下的能源转型和脱碳。中子成像和中子深度表达谱等中子技术可用于表征氢燃料电池和锂离子电池。一些研究堆用于对结构材料和燃料进行辐照和测试，这些活动对于开发核裂变和核聚变新能源概念以及支持美利坚合众国等若干国家恢复对核研究、发展和示范的兴趣至关重要。爱达荷国家实验室的中子射线照相反应堆具有独一无二的实验能力，可对高放样品进行常规分析，使工作人员能够对辐照核燃料和结构材料进行研究，帮助开发革新型核能解决方案。2023 年，爱达荷国家实验室修

订了其战略，以积极扩大对中子射线照相反应堆的使用，帮助开发革新型核能解决方案。

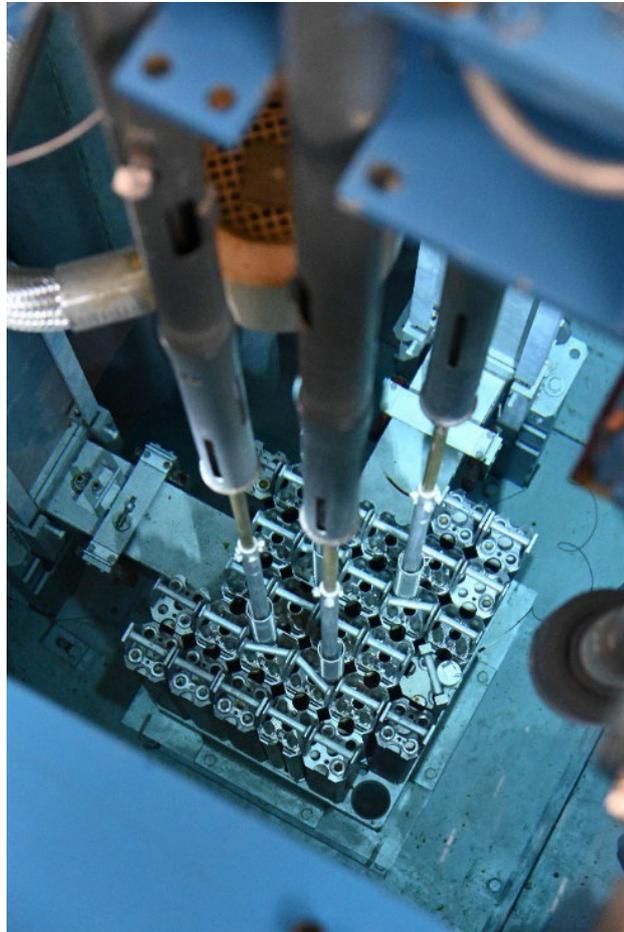


图 E.2. 爱达荷国家实验室中子射线照相反应堆堆芯及其用于材料研究的内部设备视图。(照片来源：爱达荷国家实验室)

136. 麻省理工学院的研究堆也在扩大其能力，以增加其在核裂变和核聚变相关材料辐照领域的活动，对爱达荷国家实验室和美国其他核研究设施的工作构成补充。原子能机构通过 2023 年中开展的综合研究堆利用评审工作组访问，支持这两个机构的扩展项目。

137. 先进反应堆技术的测试仍然是研究堆的重要应用之一。俄罗斯联邦正准备建造该国首个 10 兆瓦熔盐研究堆，以展示熔盐燃料技术和燃烧次锕系元素的实际可行性。建设许可证预计将于 2027 年发放。

138. 全世界研究堆群的逐步老化促使营运者和监管机构采用新的技术和方法来评定研究堆持续安全运行的运行工况。其中一种方法是时限老化分析，其目的是评价结构、系统和部件的运行工况和剩余寿命，尤其是那些视察和更换成本高、对反应堆运行可利用率有重大影响的结构、系统和部件。时限老化分析已成功应用于支持核电厂的长期运行。一些研究堆营运者已开始利用时限老化分析来支持其运行许可证的延期。由

于与动力堆不同，研究堆应用时限老化分析需要采用适当的分级方案。目前正在考虑共同努力制定一种适用于所有成员国的通用方法。

139. 许多国家通过由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心方案等国际和地区协作倡议获得机会利用研究堆。目前，四大洲共有七个这样的中心，最新的一个于2023年在摩洛哥指定。

E.2. 粒子加速器

状况

140. 对于从发动机、药品到塑料和蛋白质的一切而言，详尽的科学研究有赖于中子源能产生并提供给研究人员的中子数量。因此，除研究堆之外，科学工作者和工程师们继续开发基于粒子加速器和散裂靶技术的新一代中子源。2023年，世界上最大的科学技术基础结构项目之一——欧洲散裂源的建造阶段稳步推进。此外，通过成员国协作和多种实物捐助，该设施有史以来最强大的直线质子加速器、氦冷钨靶轮及其相关的先进中子仪器调试取得了相当大的进展。欧洲散裂源最近实现的一些主要里程碑包括完成质子加速器调试并且安装了靶块容器的永久屏蔽以及慢化器和中子生产旋转靶轮。与此同时，15条优选尖端中子束线和散射仪（也称为中子束终端站）复杂实验装置的安装也取得了重大进展。⁵

⁵ 欧洲散裂源仪器仪表网页：<https://europeanspallationsource.se/instruments>

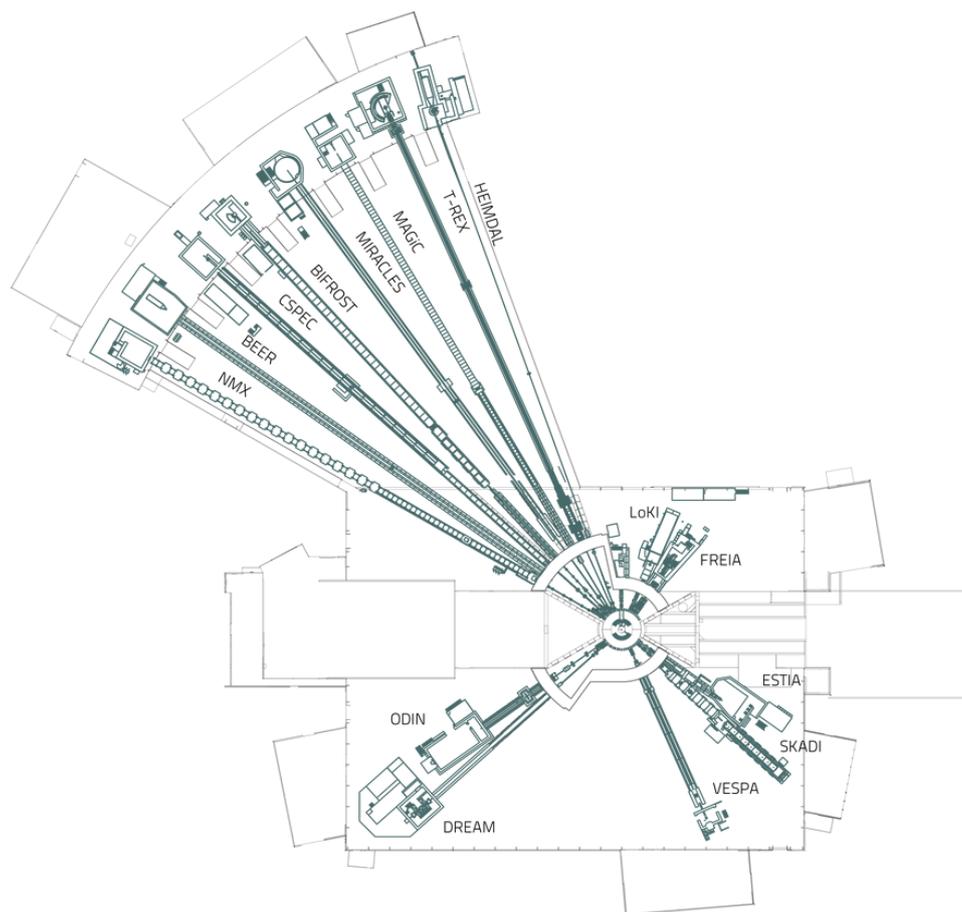


图 E.3. 欧洲散裂源未来一代加速器中子源将提供的一套中子散射和光谱分析仪器。
(照片来源：欧洲散裂源)

141. 2023 年初，在国际聚变材料辐照设施示范聚变电厂定向中子源（IFMIF-DONES）计划最高理事机构 — IFMIF-DONES 指导委员会⁶ 第一次会议上，正式宣布启动位于西班牙格拉纳达埃斯库萨尔的 IFMIF-DONES 建造阶段。这是制定国际聚变计划的一个重要里程碑，那一协定基于三大支柱：国际热核实验堆、示范聚变电厂和 IFMIF-DONES⁷。该设施由先进加速器、液态锂靶和辐照测试模块组成，将为示范聚变电厂提供材料辐照的必要实验数据和可比辐照条件下的试验能力。在基础机构建造取得进展的同时，还开展了各种活动，以促进和推动聚变领域和其他相关科技领域（如放射性同位素生产和核数据测量）的研究、发展和创新项目协作。

⁶ <https://fusion.bsc.es/index.php/2023/04/13/ifmif-dones-starts-construction-phase/>

⁷ IFMIF-DONES 主页：<https://ifmif-dones.es/>

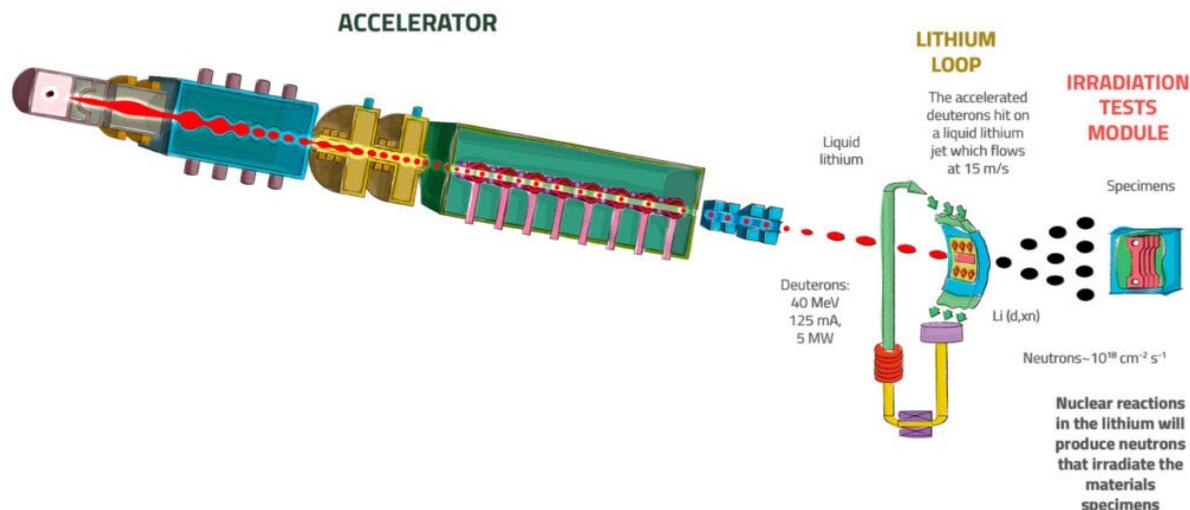


图 E.4. 基于大功率氘核加速器、用于产生高能中子的液态锂靶回路和材料辐照试验模块的 IFMIF-DONES 设施示意图。(照片来源：IFMIF-DONES)

趋势

142. 粒子加速器在癌症治疗所需的亚细胞成像和辐照方面发挥着关键作用。为了医疗诊断目的，经常采用超声波、计算机断层照相法和磁共振成像法等系列广泛成像技术。随着离子和 X 射线束操作技术的日臻成熟，将离子束或 X 射线束聚焦到纳米尺度已成为可能。通过与各种探测器系统结合，用如此微小的光束扫描人工制品，除了获得分析信息外，人工制品图像本身也越来越重要。随着新多光谱成像方法的出现，鉴别颜料、发现画作下的隐藏素描，甚至揭示古董字画的内部分布都成为可能。此外，与用于诊断目的的医学成像类似，目前正在开发基于机器学习的复杂图像处理方法，以改善人工制品的可视化，甚至是其缺失细节的可视化。

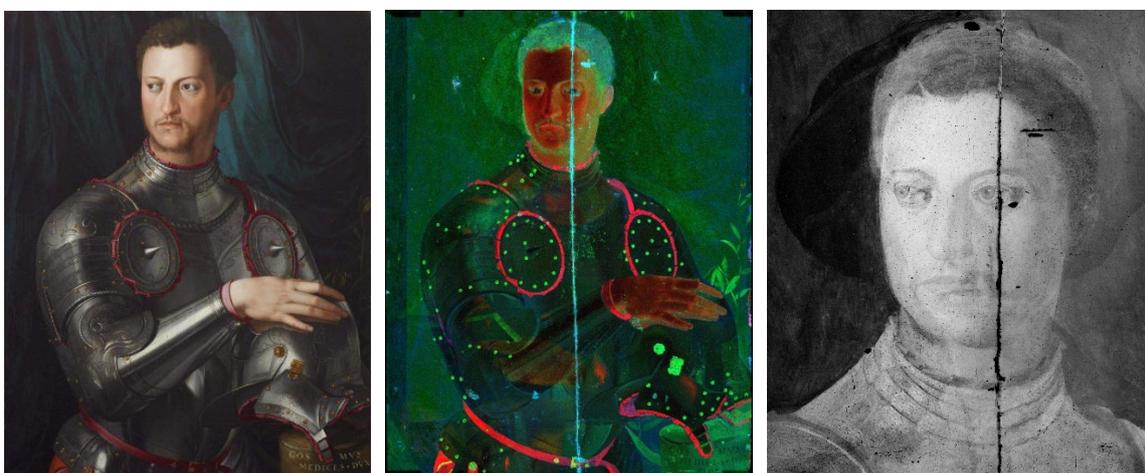


图 E.5. 澳大利亚同步加速器高清 X 射线荧光显微镜拍摄的一幅 16 世纪布龙齐诺所作科西莫·德·美第奇公爵肖像画（左）揭示了一幅底版肖像，并能无损检测和绘制颜料中的金属（右）。铅（Pb）元素分布图清晰地显示了原作，如头部和肩部周围（还显示了底层另一个人的眼睛）。（照片来源：新南威尔士美术馆（左）；澳大利亚核科学与技术组织（中和右））

143. 遗产成像的最新趋势是将多模态成像与图像处理相结合。医学成像还有其他一些共性，例如，患者和人工制品都很脆弱，为了最大限度地减少可能的辐射损伤，以达到最大的放射治疗效果或收集不可或缺的分析信息，无论是用于照射还是用于分析的辐射剂量都至关重要。因此，医学应用是加速器科学技术的强大动力，关系到粒子/X 射线剂量的精确和可控应用。⁸ 医学领域的这种需求以及多光谱成像技术也在改变遗产成像的能力。⁹

E.3. 核仪器仪表

状况

144. 除传统的仪器背包和无人机外，无人驾驶地面车辆的部署在辐射测绘领域具有诸多优势。这些地面平台形式多样，其中以轮式、腿式和履带式机器人最为普遍。无人驾驶地面车辆可以为承受高剂量率而专门设计，使其能够执行核设施拆除和退役等任务。机器人能按两种模式运行：远程控制（遥控）或利用合适的传感器和复杂算法自主运行。在某些室外环境中，卫星导航开始发挥作用，不过当前的流行趋势是采用基于光检测及测距的同步定位和测绘，这也适用于室内。目前，采用现成定位堆栈来确保自主导航是可行的。该领域常见的传感器阵列包括光检测及测距、雷达、RGB 系统、深度摄像机和热像仪，以及各种剂量率计、光谱仪和其他辐射探测系统。场景数据融合是当代的一种趋势，这种技术将多个数据源结合起来，用上下文信息丰富辐射测量的内容。数据处理可通过机载计算机或远程站实时进行，因此有必要将相关数据流传输到本地地面控制站或云端。此外，数据记录器还可以捕捉信息，用于后期处理。

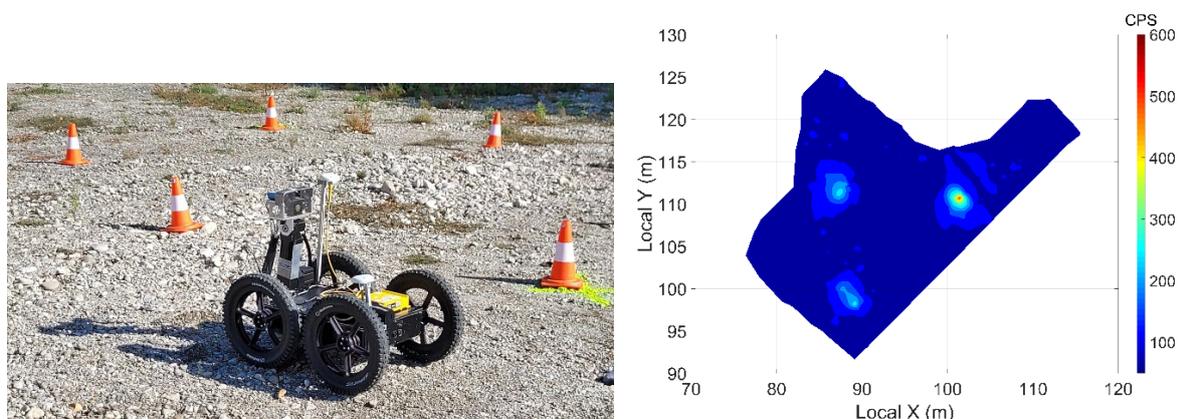


图 E.6. 在奥地利塞伯斯多夫核科学和仪器仪表实验室培训讲习班上使用的配备仪器仪表的无人驾驶地面车辆（左）和获得的“热区”辐射图（右）。

CPS 代表每秒计数。（照片来源：原子能机构）

⁸ Bertrand, L. 等人，“更安全分析遗产样品和物品的实际进展”，《分析化学趋势》第 164 卷（2023 年）。<https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117078>

⁹ Gibson, AP，“医学成像应用于遗产”，《英国放射学杂志》第 96 卷第 1152 期（2023 年）。<https://doi.org/10.1259/bjr.20230611>

趋势

145. 作为辐射探测器数据采集系统的组成部分，正越来越多地采用现场可编程门阵列。这种阵列用途广泛，从设置数据采集参数和发出数据流/路由数据，到执行先进信号分辨，甚或完整事件重建。所部署的数据处理算法则是更复杂功能的核心，无论是传统功能还是基于人工智能的功能。其中一个例子是为现场可编程门阵列嵌入式系统应用执行 γ -中子分辨算法。混合辐射场在电离辐射的许多实际应用中都很常见，具有分辨能力的探测器是必要工具。举例来说，可以应用可在频域运行的算法，而不适用传统的时域脉冲形状分辨方案。通过仔细定义适当品质因数，可以加速脉冲形状（和辐射场）分辨所需的分析（见图 E.7），使此类算法可以实时应用，而其实施已成为近年来现代探测器数据采集系统的发展趋势，应用领域广泛，从核科学和核安保到辐射防护和医用物理学。此外，高级合成（即用高级语言对现场可编程门阵列板进行编码的可能性）普及使更多开发人员可以使用现场可编程门阵列。

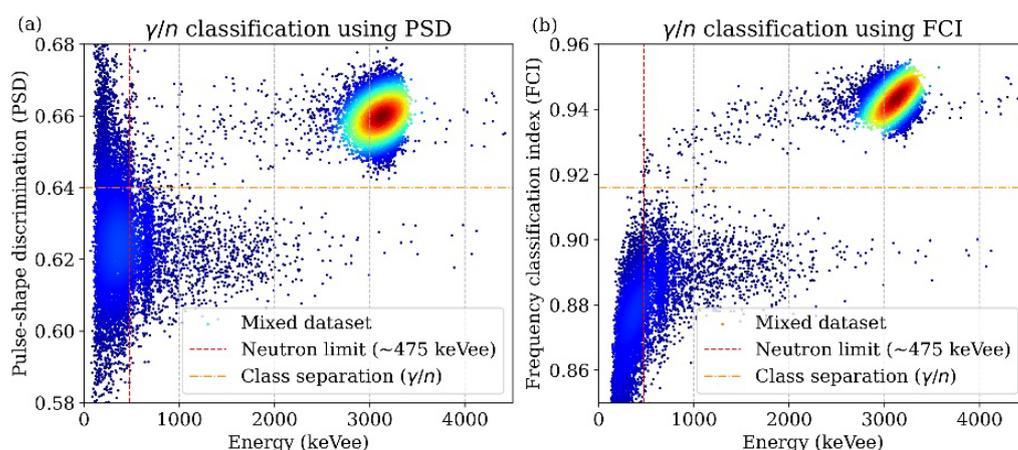


图 E.7. 以传统脉冲形状分辨进行 γ /中子分离（左）较之于以频率分类指标进行分离（右），后者在整个能量区间定性显示出优异的分类性能。实验数据来自位于奥地利塞伯斯多夫的原子能机构中子科学设施。（照片来源：Morales, I. R. 等人，“用嵌入式实时应用频域分析 SiPM CLYC 探测器进行 γ /中子分类”）¹⁰

F. 原子数据和核数据

状况

146. 随着核模拟代码越来越先进，国际热核实验堆的开发需要更多地依赖核数据库和原子数值数据库。在中子和材料活化方面，这有赖于利用核聚变编评数据库，而在聚变等离子体中的原子相互作用方面，国际热核实验堆利用的是 CollisionDB 数据库。

¹⁰ Morales, I. R. 等人，“用嵌入式实时应用频域分析 SiPM CLYC 探测器进行 γ /中子分类”，《核工程和核技术》（2023 年）。<https://doi.org/10.1016/j.net.2023.11.013>

趋势

147. 各成员国正在向国际热核实验堆投入更多时间和资源，以获得高质量的 γ 相互作用数据。这些数据主要用于有源中子探询法、裂变反应堆和聚变装置屏蔽中 γ 射线加热的更精确估算以及空间应用创新。为了获得高质量的 γ 相互作用数据，需要用最新的实验和理论信息更新涉及 γ 反应数据的旧核数据库。为实现这一目标，正在开展新的核数据评价工作。

148. 全球对用于诊断和治疗的医用放射性同位素的需求快速增长，也对核数据产生了重大影响。特别是为了优化同位素生产线，实现最低杂质含量，便需要精确性高得多的生产截面。要想获得更精确的生产截面，就需要实验核物理学家和核反应理论建模人员进一步努力。

G. 核电和核燃料循环中的人工智能应用

状况

149. 人工智能是一个总括术语，包括几十年来开发的各种技术。人工智能在推进核能生产方面具有巨大潜力。复杂的人工智能系统在解决问题和决策时模仿人类逻辑。凭借其提高效率、自动化、安全和预测性维护以及优化流程的能力，人工智能已经在核领域的一些领域取得了长足的进步。

150. 在运核电厂和燃料循环设施都在采用人工智能应用。这些应用目前独立于安全相关系统、过程或功能。以无损检验应用为例，这可确保提高视察的速度和准确性，为决策者提供有关最佳堆芯装料设计的信息，并简化复杂的维护停堆时间表。其他人工智能应用包括通过人工智能辅助代码和数学模式改进先进核设计的评定和优化。

151. 当前关于人工智能安全、安保和可靠性的工作主要集中在风险识别、故障后果、“可解释性”、可信度以及与持续部署人工智能有关的伦理考虑因素。涉及设施数字系统或流程的人工智能未来部署假想方案可能影响核电厂的核安全或核安保。此外，与任何数字系统一样，确保验证和网络安全的适当措施也在与各种应用方案同步发展。有关组织正在积极制定管理核设施和辐射设施中人工智能技术的方案。

趋势

152. 人工智能在商业核电和核燃料循环设施设计和运行中的应用越来越多，不仅可以提高安全性、运行效率和成本效益，同时也促进先进核技术的发展。基于人工智能的系统有助于分析运行过程中收集的大数据，以提高运行可靠性并防止人员事故。这些进步有助于强化核能在现代能源领域的可持续性和竞争力。

153. 核工业以各种方式利用人工智能来提高安全性、效率和成本效益。在安全和维护方面，人工智能可用于预测设备故障、分析传感器数据和优化维护时间表，以缩短停用时间并提高安全性。例如，某些机器学习算法目前可能有助于检测异常情况和改进预警系统。人工智能也越来越多地用于有效地识别历史非结构化数据源和文档中事件（包括重复事件）的低级相关性。这种方法使得可以系统地识别未采取纠正措施的重复事件，并将重大事件的搜索时间减少一个数量级（调查违规、偏差、重大缺陷等）。

154. 人工智能实施方面的研发工作表明，它具有在动力和先进核反应堆应用中高效优化堆芯设计的潜力。人工智能驱动的解决方案可优化燃料装料模式，延长燃料加载时间。这样可以提高输出功率，最大限度地减少废物产生，降低运行费用。此外，人工智能有可能通过模拟复杂的物理过程，来支持先进核反应堆和燃料循环设施的设计，从而导致改进设计并缩短开发时间。随着经验的积累和不确定因素的解决，商业核电行业和燃料循环设施中人工智能解决方案的开发和部署有望加速。

155. 人工智能正越来越多地用于视频数据分析，以帮助运行人员确保生产和运营设施的安全。这既适用于个人防护设备的控制机制，也适用于现场人员的安全。

H. 人体健康

H.1. 肠道消化功能的无创评定：优化碳-13 蔗糖呼气检测

状况

156. 最紧迫的公众健康营养问题之一是，为什么尽管采取了多种公众健康干预措施，包括补充食物和改善水质卫生条件，中低收入国家的儿童仍然发育迟缓（比同龄人矮小）。联合国机构关于粮食安全和营养问题的最新联合报告指出，约有 1.5 亿五岁以下儿童发育迟缓，这对他们的精神运动发育和日后罹患慢性病的风险造成了严重影响。¹¹ 虽然与发育迟缓有关的因素错综复杂，尚未完全明了，但肠道环境功能障碍（其特点是肠道结构完整性和功能的系统性长期紊乱）与中低收入国家生活环境不卫生的儿童发育迟缓有着越来越明显的相关性。¹² 肠道环境功能障碍可能通过各种途径（包括增强肠道通透性、发炎和减少营养吸收）导致发育迟缓。² 肠道环境功能障碍的诊断标准尚不完善，最可靠的方法是通过侵入性活检来诊断肠道损伤。在肠道环境功能障碍普遍存在的大多数中低收入国家环境中，这种方法既不可行，在伦理上也不合理。

¹¹ 联合国粮食及农业组织、国际农业发展基金、联合国儿童基金会、世界粮食计划署和世界卫生组织，《2023 年世界粮食安全和营养状况：贯穿城乡连续体的城市化、农业粮食体系转型和健康膳食》，粮农组织，罗马（2023 年）。

¹² Owino, V. 等人，“全球儿童健康中的肠道环境功能障碍与发育迟滞/发育迟缓”，《儿科学杂志》第 138 卷第 6 期（2016 年）。

157. 呼气检测用于肠胃病学等人体健康应用，属于无创检测，可用于所有年龄段，包括儿童。¹³ 常见呼气检测包括氢气（H₂）、甲烷（CH₄）和碳-13（¹³C）标记的碳-13 二氧化碳（¹³CO₂）。氢气和甲烷呼气检测主要用于评定一般的碳水化合物吸收不良。^{3、14} 另一方面，碳-13 呼气检测用于评定胃肠病学中的多种症状，因为这些检测针对特定功能采用选定的碳-13 标记分子，测量呼气中作为代谢终产物的碳-13 二氧化碳。碳-13 呼气检测是一项成熟的临床应用，利用碳-13 尿素来诊断幽门螺旋杆菌。¹⁵ 尽管如此，呼气检测的应用在很大程度上仅限于临床环境，在公众健康营养方面的应用还很有限。

158. 碳-13 蔗糖呼气检测曾用于研究先天性蔗糖酶-异麦芽糖酶缺乏症的蔗糖消化情况¹⁶。口服含碳-13 的蔗糖后，呼出的碳-13 二氧化碳浓度显示肠道消化蔗糖的能力受损情况，反映出十二指肠蔗糖酶-异麦芽糖酶（肠道中将蔗糖分解成葡萄糖和果糖以供吸收和代谢的酶）的活性降低（图 H.1 和图 H.2）。碳-13 蔗糖呼气检测还被用作大鼠膳食中添加糖摄入量的标记。¹⁷ Ritchie 及其同事首次应用碳-13 蔗糖呼气检测评估澳大利亚腹泻儿童的肠道环境功能障碍。¹⁸ 在这项研究中，患有和未患有急性腹泻的原住民儿童以及由健康非原住民儿童组成的对照组口服了天然富含碳-13 的蔗糖（来自玉米，其碳-13 含量比甜菜糖略高）。90 分钟后，腹泻原住民儿童的碳-13 二氧化碳呼出浓度低于无腹泻儿童；健康非原住民儿童呼出碳-13 二氧化碳浓度较高。然而，这种测试并不灵敏，主要因为在天然碳-13 丰度（约 1.1%）可变的背景下玉米蔗糖的碳-13 二氧化碳信号不够明显。^{19、20}

¹³ Broekaert, I.J. 等人，“欧洲儿科胃肠病学、肝病学和营养学学会关于儿科胃肠病学中采用呼气检测的立场文件”，《儿科胃肠病学与营养学杂志》第 74 卷第 1 期（2022 年），第 123—37 页。

¹⁴ Hammer, H. F. 等人，“欧洲成人和儿童患者氢气和甲烷呼气检测的适应症、实施和临床影响指南：欧洲胃肠病学、内窥镜和营养学学会、欧洲神经胃肠病学和运动学学会、欧洲儿科胃肠病学、肝病学和营养学学会共识”，《欧洲胃肠病学联合杂志》第 10 卷第 1 期（2022 年），第 15—40 页。

¹⁵ Keller, J. 等人，“欧洲成人和儿童患者碳-13 呼气检测的适应症、实施和临床影响指南：欧洲胃肠病学、内窥镜和营养学学会、欧洲神经胃肠病学和运动学学会、欧洲儿科胃肠病学、肝病学和营养学学会共识”，由 EPC 支持，《欧洲胃肠病学联合杂志》第 9 卷第 5 期（2021 年），第 598—625 页。

¹⁶ Robayo-Torres, C.C. 等人，“先天性蔗糖酶异麦芽糖酶缺乏症和糖化酶补充患者的蔗糖消化碳-13 呼气检测”，《儿科胃肠病学与营养学杂志》第 48 卷第 4 期（2009 年），第 412—8 页。

¹⁷ Yazbeck, R. 等人，“碳-13 二氧化碳呼气检测 — 测量添加精制糖摄入量的无创生物标记的证据”，《应用生理学杂志》第 130 卷第 4 期（2021 年），第 1025—32 页。

¹⁸ Ritchie, B.K. 等人，“碳-13 蔗糖呼气检测：环境肠道健康的无创生物标记的新用途”，《儿科学杂志》第 124 卷第 2 期（2009 年），第 620—6 页。

¹⁹ 国际原子能机构，“稳定同位素比测定法的新方案”，1999 年 9 月 20 日至 23 日在维也纳举行的咨询组会议文集，原子能机构《技术文件》第 1247 号，原子能机构，维也纳（2001 年）。

²⁰ Butler, R.N. 等人，“稳定同位素技术用于胃肠功能障碍中宿主与微生物群反应评定”，《儿科胃肠病学与营养学杂志》第 64 卷第 1 期（2017 年），第 8—14 页。

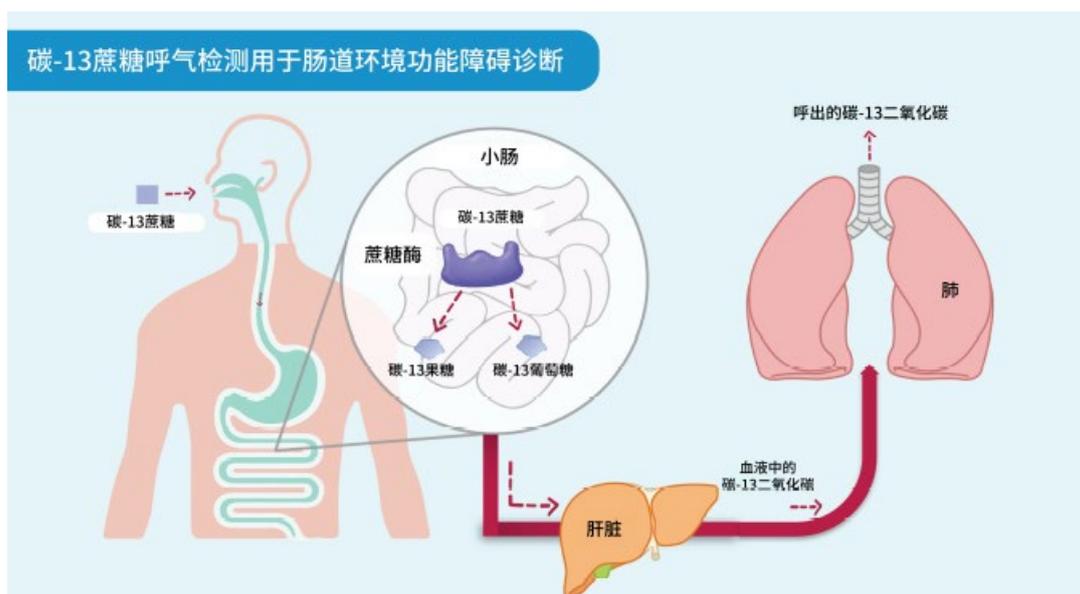


图 H.1. 一个人摄入准确称量后溶于少量水的碳-13 标记蔗糖。碳-13 蔗糖通过肠上皮细胞进入刷状缘，在那里被蔗糖酶-异麦芽糖酶水解为碳-13 果糖和碳-13 葡萄糖，然后被吸收到血液中，再输送到肝脏，以不同速度得到分解，从而产生能量，同时生成碳-13 二氧化碳并随呼吸呼出。碳-13 以碳-13 二氧化碳形式被呼出量与标记蔗糖中原始碳-13 量的比例可反映肠道的吸收能力，与蔗糖酶-异麦芽糖酶的活性相关。
(图片来源：原子能机构)



图 H.2. 对于大龄儿童和成人，如图所示，通过向呼吸袋中呼气来收集呼出气体。对于婴幼儿，可在呼吸袋上安装口罩。(图片来源：原子能机构)

159. 用高浓度蔗糖（99%）可提高碳-13 蔗糖呼气检测的灵敏度。²¹ 原子能机构题为“应用稳定同位素技术评定肠道环境功能障碍并了解其对儿童成长的影响”的协调研究项目支持九个国家优化并应用碳-13 蔗糖呼气检测评定肠道环境功能障碍并了解肠道环境功能障碍对儿童成长的影响。在项目第一阶段，²² 在英国比较高浓度蔗糖示踪剂与天然浓度蔗糖的结果，优化和验证检测结果。对澳大利亚罹患乳糜泻的儿童进行了优化后的检测，并将与赞比亚成年人的活检结果和秘鲁儿童的肠道通透性检测结果进行了比较。在项目第二阶段，用该检测对孟加拉国、印度、牙买加、肯尼亚、秘鲁和赞比亚进行了横向研究，评定 12—15 个月大儿童的发育迟缓情况。

趋势

160. 碳-13 蔗糖呼气检测是一种无创呼气试验，旨在通过口服碳-13 蔗糖来测量肠道环境功能障碍的小肠损伤。在英国和赞比亚进行的验证研究表明，使用小剂量高浓度碳-13 蔗糖可以准确评定刷状缘酶活性，特别是肠道中的蔗糖酶-异麦芽糖酶活性。¹¹ 然而，该检测的局限性在于其结果与肠道内潜在生物过程并无直接关联。因此，研究人员一直致力于开发一种新的机理模型，以更好地了解肠道内的代谢动力学。²³ 这些模型强调了区分碳-13 蔗糖中果糖和葡萄糖代谢的重要性。为了更好地匹配碳-13 蔗糖呼气检测所涉及的生物机制，建议采用碳-13 标记葡萄糖。为了获得更全面的结果，碳-13 蔗糖呼气检测可与其他检测一起使用，以涵盖蔗糖消化以外的其他肠道环境功能障碍。

²¹ Schillinger, R. J. 等人，“碳-13 蔗糖呼气检测用于无创评定赞比亚成人环境性肠病”，《医学前沿》第 9 期（2022 年）。

²² Lee, G.O. 等人，“优化、验证和现场应用碳-13 蔗糖呼气检测评定资源贫乏地区儿童环境性肠病中的肠道功能：孟加拉国、印度、肯尼亚、牙买加、秘鲁和赞比亚前瞻性研究的研究方案”，《BMJ Open》第 10 卷第 11 期（2020 年）。

²³ Brouwer, A.F. 等人，“碳-13 呼气检测曲线所反映的代谢率的机制推断”，《药代动力学和药效动力学杂志》第 50 卷第 3 期（2023 年），第 203—14 页。

H.2. 保证质量：近距离放射治疗的新发展

状况

161. 宫颈癌作为世界各地妇女中第四种最常见的癌症，仍然是一项重大挑战。2020年，约 90% 的新发病例和死亡病例发生在中低收入国家²⁴。原子能机构的“希望之光”倡议旨在增加获得癌症护理的机会，特别关注 70% 人口无法获得放射治疗的非洲。“希望之光”第一波活动重点关注了七个国家：贝宁、乍得、刚果民主共和国、肯尼亚、马拉维、尼日尔和塞内加尔。在这些国家，宫颈癌是妇女中发病率最高或第二高的癌症。“希望之光”将通过提升认识、提供培训和能力建设以及增加获得治疗和护理的机会，应对与宫颈癌有关的挑战。



图 H.3. 在原子能机构第六十七届大会期间的原子能机构“希望之光”倡议会外活动上正式成立了五个首批“支持中心”。(照片来源：原子能机构)

162. 治疗宫颈癌需要结合手术、化学疗法和放射治疗。近距离放射治疗是放射治疗的重要组成部分，在这种疾病的管理中发挥着关键作用。现代近距离放射治疗以给药剂量与临床效果之间关系的确凿证据为支持。然而，由于近距离放射治疗的剂量明显高于外放射疗法，这就给治疗带来了独特的挑战：近距离放射治疗需要精心优化，以避免剂量不足或过量造成不良临床影响。

²⁴ Sung, H.等人，“2020年全球癌症统计：全球癌症数据库对36种癌症在全世界185个国家的发病率和死亡率估计”，《临床医师癌症杂志》第71卷（2021年），第209—49页。

163. 确保照射剂量施用一致性对这种治疗方案的质量和安全性至关重要。这还可以建立公众对近距离放射治疗的信心，因为过去报告的事件（包括一起死亡）都是人为失误所致，却削弱了公众信心。剂量学审核可以防止灾难性事件的发生，并最大限度地减少系统剂量差异。

164. 自 1969 年设立以来，原子能机构的邮寄剂量学审核计划通过原子能机构剂量学实验室向国家一级能力不足的成员国提供了各种放射治疗技术方面的审核服务。这项重要服务极大地促进了世界各地的安全放射治疗实践，惠及数百万癌症患者。

165. 近距离放射治疗教育和培训方面的差距日益扩大，这项技术不断增加的复杂性和培训设备的缺乏让这种情况更是雪上加霜。中低收入国家几乎不可能或根本不可能培养出能够安全有效使用这种技术所需的人力资源。

166. 原子能机构正利用虚拟现实这一创新工具，以具有成本效益的方式缩小这一技能差距，开发了基于虚拟现实的三维学习环境下妇科近距离放射治疗程序的电子学习材料（图 H.4）。作为真实患者的替代方案，该技术使受训人员能够进行近距离放射治疗练习，这有助于加强宫颈癌的治疗和管理，尤其是在资源有限的情况下。



图 H.4. 原子能机构关于妇科近距离放射治疗程序的新电子学习模块，与虚拟现实头戴设备一起使用。（照片来源：原子能机构）

趋势

167. 2021 年，原子能机构启动了一个题为“近距离放射治疗剂量学审核方法开发”的协调研究项目，旨在开发一种剂量学审核方法，其中包括复杂程度分为三个级别的临床实践审核。这种方法将使各国受益，确保妇科癌症得到安全有效的治疗。迄今为止，已开发出初级审核，评定关键剂量学参数（参考空气比释动能率）的准确性，还制作了一个简单、轻便、经济实用的仿真模型，适用于通过邮寄方式进行的远程剂量学审核（图 H.5）。

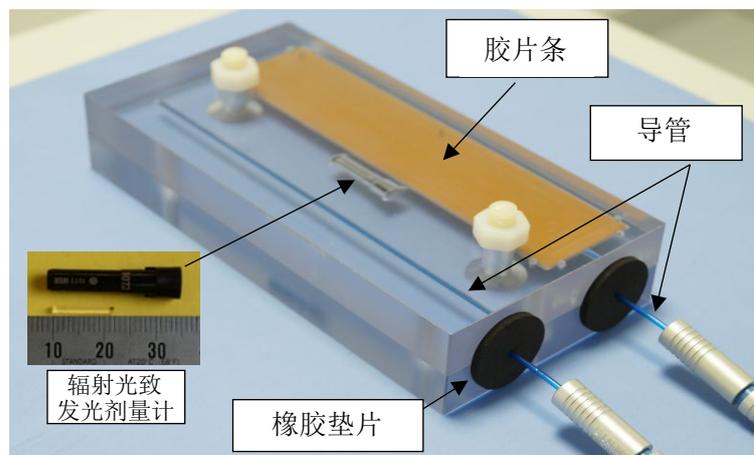


图 H.5. 原子能机构剂量学实验室开发的简单、轻便、经济实用的仿真模型，用于近距离放射治疗审核（辐射光致发光剂量计）。（照片来源：原子能机构）

168. 该方法正在十个参与国（巴西、中国、克罗地亚、希腊、印度、伊朗伊斯兰共和国、墨西哥、俄罗斯联邦、南非以及英国）接受测试，这些国家代表了不同的临床环境，确保了该方法的稳健性。由于试点结果如此喜人，近距离放射治疗审核服务不久将作为原子能机构邮寄剂量学审核计划的一部分提供。

169. 目前在该协调研究项目下进行的研究还旨在为更复杂的审核制定方法。通过端到端审核，医院将能够使用自己的施治器完成患者治疗的整个工作流程。这一发展反过来又将增强近距离放射治疗临床实践的信心，确保患者安全和治疗质量。

170. 2023 年 7 月，原子能机构在莫桑比克举办的一次讲习班上展示了原子能机构用于近距离放射治疗教育和培训的新虚拟现实工具的好处。在妇科近距离放射治疗技术投入临床应用之前，该国的专业人员能够操作与该技术相关的各种流程（图 H.6）。2023 年 11 月，在塞内加尔举行的非洲癌症研究和培训组织第 14 次非洲癌症问题国际会议期间，来自非洲各地的 150 多名放射肿瘤医师、医学物理师、剂量测定师和放射治疗师也在原子能机构的电子轮廓勾画讲习班上接受了这一工具的培训。



图 H.6. 莫桑比克保健专业人员（一名医学物理师和一名放射肿瘤医师）利用原子能机构新的虚拟现实工具接受近距离放射治疗培训。（照片：原子能机构）

171. 原子能机构的虚拟现实工具是一项非常宝贵的技术，可增加保健专业人员获得高质量培训和互动技能习得的机会，有助于克服物理、地理和后勤局限，促进技能高超的专业癌症护理人员队伍的发展，最终为全球健康和福祉做出贡献。

H.3. 查看心脏内部：核成像显示心脏淀粉样变性的关键作用

状况

172. 当心脏难以有效泵血，导致身体组织和器官缺乏氧气和营养物质时，就会出现心力衰竭。这可能表现为疲劳、气短和水肿等症状。严重时，心力衰竭会引发危及生命的并发症。早期检测和适当管理在改善治疗效果和降低并发症风险方面发挥着至关重要的作用。

173. 心力衰竭通常根据射血分数分为两大类。射血分数表示心脏每次搏动泵出血量的百分数。例如，射血分数为 60%意味着心脏每次收缩都能泵出 60%的血液。正常射血分数通常在 50%到 70%之间，但根据医学指南和测量所用的成像模式，射血分数可能会略有不同。射血分数低于正常范围，表明心脏有效泵血的能力下降，这是心力衰竭的常见特征。

174. 射血分数降低的心力衰竭伴随心肌功能减弱，心脏泵血效率降低。患有这种疾病的人，其射血分数通常低于 40%。射血分数保留的心力衰竭患者的心脏泵血功能正常，但肌肉僵硬，在两次心搏之间不能正常放松。射血分数正常或接近正常，通常等

于或大于 50%。由于心力衰竭的原因和治疗策略各不相同，这些分类有助于为治疗方案提供指导。应该指出的是，心力衰竭是一种复杂的疾病，不同病例的根本原因或诱因可能各不相同。

175. 射血分数保留的心力衰竭通常是多种因素共同作用的结果。常见的致病因素包括：导致心肌增厚和僵硬的高血压；影响心脏结构和功能的衰老；导致心肌僵硬的糖尿病；肥胖，尤其是腹部周围体重过重；因冠状动脉狭窄或堵塞使流向心肌的血液减少的冠状动脉疾病。一个重要致病因素是转甲状腺素蛋白淀粉样变心肌病，特点是心脏组织中沉积异常蛋白质（淀粉样蛋白）。这一疾病过去五年受到越来越多的关注。据估计，65 岁以上患心力衰竭的成人中，13—18%的人患有此病，中位生存期为 25—41 个月。

176. 医学研究和治疗策略的最新进展为心脏淀粉样变性患者带来了新的希望。针对淀粉样蛋白沉积潜在机制的创新药物已于 2019 年初上市，加上核心脏病学等完善的诊断成像工具，使保健服务提供者能够更早、更有效地进行干预。随着对心脏淀粉样变性认识的不断深入和治疗方法的不断推出，这种范式转换是一项重大突破，为患者带来了更加乐观的未来。尽管有这些积极进展，但转甲状腺素蛋白淀粉样变心肌病诊断不足还在阻碍着对这些治疗突破的充分利用。

趋势

177. 核心脏病学在评价心脏淀粉样变性方面发挥着举足轻重的作用。通过焦磷酸锆-99m 扫描等先进成像技术，核心脏病学能够精确检测心脏淀粉样变性，并将其与其他心脏疾病区分开来。这些成像模式为了解心肌受累情况提供宝贵信息，有助于早期诊断和风险分层（图 H.7 和 H.8）。通过评定淀粉样蛋白沉积的范围和严重程度，核心脏病学可协助临床医师制定适当的治疗干预措施并监测疾病进展。此外，这些技术的无创性使其在全面评价心脏淀粉样变性方面具有特别重要的价值，有助于更及时、更准确地控制病情。

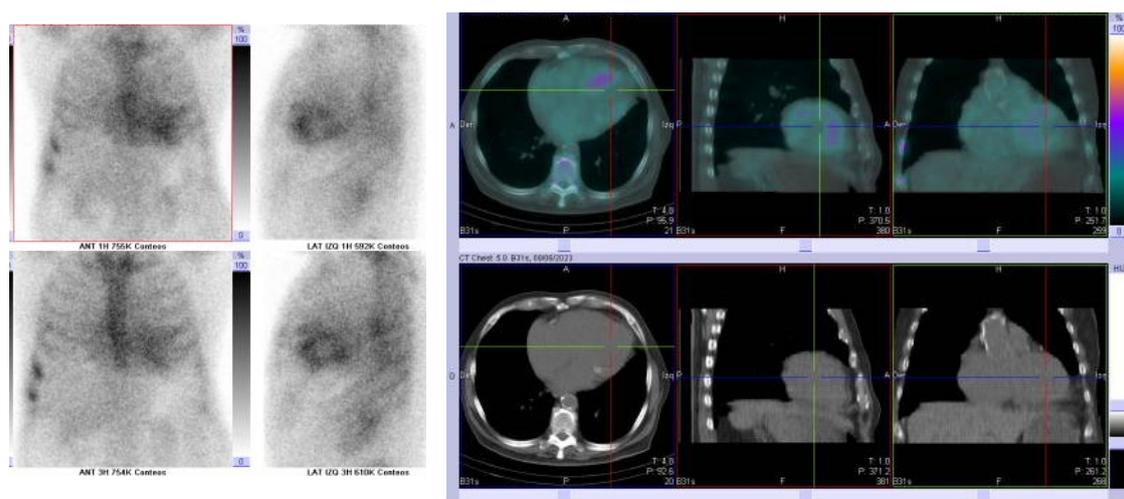


图 H.7. 心肌存在焦磷酸锆-99m 局灶性强摄取异常的患者静态前位像和侧位像（左）以及单光子发射计算机断层照相/计算机断层照相图像（右），与转甲状腺素蛋白淀粉样变心肌病一致。（照片来源：A. Jiménez-Hefferman/Juan Ramón Jiménez 医院）

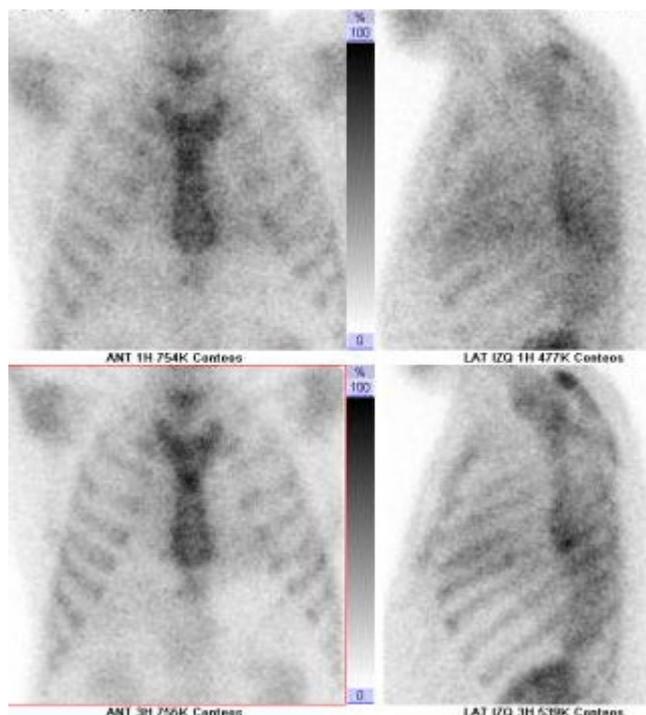


图 H.8. 患者心肌对^{99m}Tc-焦磷酸盐的摄取未见异常的静态前位像和侧位像，排除患者心力衰竭原因为转甲状腺素蛋白淀粉样变心肌病。
(照片来源：A. Jiménez-Hefferman/Juan Ramón Jiménez 医院)

178. 虽然^{99m}Tc-焦磷酸盐单光子发射计算机断层照相技术和专门知识已经存在，但许多国家对其在诊断转甲状腺素蛋白淀粉样变心肌病中的实际应用还很有限。由于该疾病当前的诊断标准是由欧洲和美利坚合众国专家制定的，因此这些标准是否适用于世界其他地区不同种族和社会经济背景的人群尚不得而知。

179. 原子能机构正在实施题为“原子能机构转甲状腺素蛋白淀粉样变心肌病研究(I-TAC 研究)”的协调研究项目，其目的是在全球范围内建立有效诊断转甲状腺素蛋白淀粉样变心肌病的可持续的精确^{99m}Tc-焦磷酸盐成像能力。这将有助于在全球范围内改进对射血分数保留的心力衰竭的识别和治疗。在寻求早期检测和拯救生命的治疗过程中，核心脏病学正成为世界灯塔，为心脏淀粉样变性患者照亮了一条希望之路。

I. 粮食和农业

I.1. 辐照技术促进疫苗发展：应用核技术预防家畜传染性疾病状况

180. 畜牧业中的传染性疾病会给世界带来巨大经济损失。例如，数个世纪以来，牛瘟流行病已在全球范围内造成许多家畜死亡，导致农村地区，特别是非洲和亚洲农村地区持续出现粮食短缺和大范围饥荒。2011年，由于开发了有效的疫苗并实施了广泛疫苗接种计划，才得以宣告世界摆脱了这一毁灭性疾病。

181. 疫苗通常是的一种具有成本效益的疾病预防方案。针对那些难以防治并可能引发毁灭性流行病的新发和再发病原体，非常需要加快疫苗开发和生产工作。对防治重点疾病的安全疫苗的需求日益增长，凸显出需要低成本、高效率基础结构的新疫苗生产平台评价的重要性。涉及病原体灭活的传统疫苗生产方案仍然是开发新型疫苗的高效快捷方法。

182. 目前，疫苗生产中使用的主要技术是化学灭活。然而，与化学灭活相比，辐照诱导灭活提供了许多潜在的显著优势。用于灭活的化学品有可能使负责激发免疫反应的基本病原体蛋白质改性。相比之下，辐照灭活保留了这些蛋白质以及病原体的结构完整性，这有助于在暴露于病原体时激发接种疫苗个体的免疫反应。然而，辐照灭活确实会损害病原体的遗传物质，使其不能繁殖和导致感染。虽然这项技术已经用了 50 多年，但直到最近因新型辐照器可以在较短时间内提供精确的辐照剂量，加上对免疫系统的强化认识实现了对疫苗接种反应的更有效评定，人们对利用辐照技术生产疫苗才重新燃起了兴趣。

183. 过去十年，原子能机构通过粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心在这一领域取得了重大进展，开展了关于辐照灭活用于针对 20 多种动物和人畜共患病病原体的疫苗的研究与发展。这项研究包括确定杀死病原体的合适辐照剂量，设定疫苗接种参数，以及观察疫苗接种后的情况。²⁵ 例如，辐照过的禽流感疫苗原型经测试显示出理想结果。²⁶

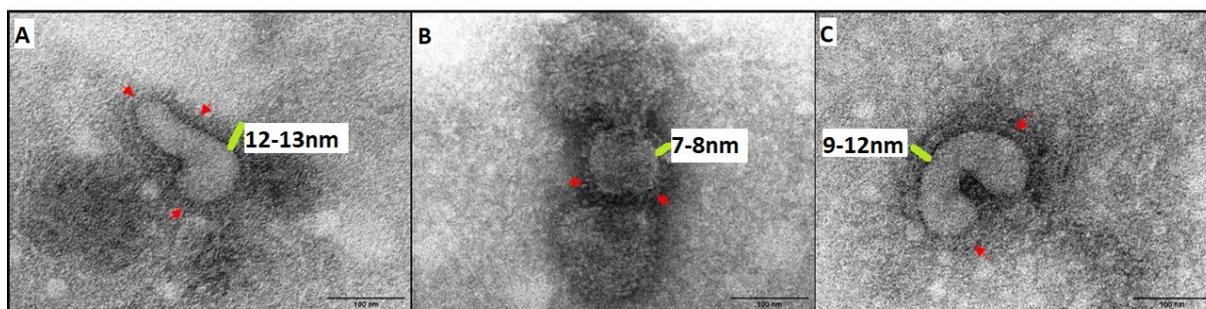


图 I.1. 辐照灭活疫苗与传统化学灭活疫苗的特点：A：活流感病毒；B：结构受损的化学灭活流感病毒；C：辐照灭活的流感病毒与活病毒结构相似，因此一旦接种，接种疫苗的个体会对病原体产生完美记忆，从而在暴露于病原体时予以抵抗。红色箭头显示候选疫苗中负责诱导免疫的分子，而绿色线条显示这些分子的长度。

(图片来源：F. Bonfante/意大利威尼斯动物预防实验研究所和
《兽医科学前沿》，2022 年 7 月 11 日)

²⁵ Cattoli, G., Ulbert, S. and Wijewardana, V., “社论：辐照技术促进疫苗发展”，《免疫学前沿》，2023 年 1 月 9 日。

²⁶ Alessio Bortolami 等人，“通过肠外或粘膜途径施用的电离辐照方法灭活的 H9N2 禽流感疫苗的保护效果”，《兽医科学前沿》第 9 卷，2022 年 7 月 11 日。

趋势

184. 除了用于生产灭活疫苗之外，辐照还可用于产生具有代谢活性但不具有复制性的有机体，这些有机体可作为潜在的候选疫苗，特别是针对细菌和寄生虫病的疫苗。可以将辐照剂量调整到使暴露于其中的微生物不能繁殖（即不能引起感染）、但仍可维持其代谢功能的水平。这种方法的优点是不仅针对病原体的结构而且针对其功能建立了免疫记忆。这种方法曾用于生产针对一种感染牛肺部的线虫的疫苗，随后投入了商业市场。目前，斯里兰卡正通过一个协调研究项目探索这种方法，以生产针对世界各地绵羊和山羊感染的线虫的辐照疫苗。

185. 最新技术进步还使人们能够利用电子束和其他辐照方法使病原体失去活性，从而不再用放射性物质通过 γ 射线生产辐照疫苗。

186. 另外，用锰离子 (Mn^{2+}) 和海藻糖等新辐射防护物质改善了辐照灭活过程中负责免疫的病原体分子的保存。

187. 技术创新还改进了辐照疫苗的生产过程。其中一个实例是在德国弗劳恩霍夫研究所开发的电子束灭活疫苗生产中使用连续的薄流体层，突尼斯目前正在通过协调研究项目进行研究，以生产抵抗影响鲈鱼的诺达病毒的辐照疫苗。



图 I.2. 斯里兰卡科学工作者评价了一只接种了抗捻转血矛线虫辐照疫苗的山羊的免疫反应，捻转血矛线虫是一种能毁灭成群绵羊和山羊、造成巨大经济损失的线虫。

(照片来源：T. Anupama/斯里兰卡佩勒代尼耶大学)

I.2. 宇宙射线中子传感器核技术与遥感图像结合促进农业用水管理状况

188. 农业区有 30 亿人面临严重或极严重的缺水问题。根据联合国粮食及农业组织（粮农组织）目前的预测，到 2050 年，全球人口中约有 57% 面临每年至少一个月的缺水。气候变化将使这一挑战更加严峻，因为极端天气会通过干旱或洪水影响农业生产的水利用率。这些极端效应会影响土壤水分和作物用水生产率，因此，获得相关准确和精确信息至关重要。

189. 监测土壤水分不仅对灌溉管理至关重要，而且对水文学模拟、地下水补给以及洪水和干旱预测也至关重要。传统方法和核方法可对局部（例如田地中的特定位置）土壤水分进行精确评定，而遥感技术则提供更大范围的综合数据。

190. 过去十年，宇宙射线中子传感器的开发取得了重大进展。原子能机构通过粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心，以题为“利用宇宙射线中子传感器加强农业复原力和水安全”的协调研究项目率先应用这一创新。该协调研究项目试图通过填补大范围的卫星成像和局地地面传感器之间的空白来解决精确测量土壤水分面临的挑战，从而有效管理农业用水。宇宙射线中子传感器通过探测靠近土壤表面的低能中子来运行，能够监测最多 40 公顷的大面积土壤水分。这项技术经过了精细化改进，更加方便决策者和农业社区获取，也更具成本效益。因此，各利益相关方正在迅速扩大采用这项技术。

191. 为了最大限度地发挥原子能机构通过粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心向成员国提供的援助的影响，原子能机构总干事格罗西与粮农组织总干事屈冬玉于 2023 年 10 月在罗马举行的世界粮食论坛期间共同发起了“原子用于粮食”（Atoms4Food）倡议（图 I.3）。该倡议以及新的研究与发展工作旨在应对日益增长的粮食安全需求带来的挑战并增强全球气候变化适应力。



图 I.3. 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于 2023 年 10 月 18 日在罗马举行的世界粮食论坛上发起了“原子用于粮食”倡议。(照片来源：原子能机构)

趋势

192. 直到最近，大多数宇宙射线中子传感器都基于使用正比计数管，后者通常采用氦-3 或硼-10 三氟化硼等气体。这些计数管虽然对中子（土壤水分的替代指标）高度灵敏，却相对昂贵，这阻碍了这项技术的全球转让。不过，目前研究机构和商业公司正在使用或测试基于锂及特定塑料和金属材料的探测器，这种探测器自 21 世纪初开发以来带来了价格的大幅下降。

193. 目前，宇宙射线中子传感器技术正与高分辨率遥感图像一起使用。将核技术和数字技术相结合，可每周监测大面积区域或流域的土壤水分。这项先进技术有可能为用于气候智能型灌溉的遥感带来革命性变化，从而大大改善决策者和农业社区获取基准数据的机会。这将加强农业水资源的可持续利用，实现旨在提高用水效率和增加淡水供应的可持续发展目标的具体目标 6.4。

194. 现在世界各国正首次将这项核技术与数字技术相结合，以帮助保护水资源，促进可持续的粮食生产。在非洲，23 个国家已引入该技术，涵盖了非洲大陆的主要土地利用类型和气候带，特别是那些面临干旱的气候带。这项工作还为环境研究开发了一系列潜在应用，如遥感数据验证、土壤水分趋势分析、作物用水生产率建模和湿地水利用率变化。



图 I.4. 在玻利维亚高海拔安第斯湿地安装了一台宇宙射线中子传感器，以研究湿地在气候变化下起到的水缓冲作用。（照片来源：T. Franz，内布拉斯加大学林肯分校）

195. 在多民族玻利维亚国，在海拔约 4500 米的高海拔湿地安装了一台宇宙射线中子传感器（图 I.4）。这些湿地靠近科迪勒拉山系高 6088 米的瓦伊纳-波托西山脉常年积雪部分，由于气候变化，该山脉超过三分之一的冰面已消失，影响到数百万玻利维亚人的供水。该设备可帮助科学工作者估计湿地的水缓冲能力，预测干旱程度和可能性，进而支持决策者制定气候变化适应政策。



图 I.5. 在地区技术合作项目 RAF5086 号“利用核技术促进不断变化的气候条件下的可持续农业（非洲地区核合作协定）”下，在奥地利塞伯斯多夫举办了宇宙射线中子传感器使用培训班。（照片来源：原子能机构）

196. 原子能机构通过粮农组织/原子能机构联合中心，借助培训计划和技术转让，力求优化和加强各国应用核技术实现可持续利用其水资源促进粮食安全的能力（图 I.5）。

197. 2023 年 12 月 29 日，原子能机构与阿根廷签署了一份谅解备忘录，旨在通过新发起的“原子用于粮食”倡议（图 I.6）加强粮食和农业领域的合作。该谅解备忘录确定了四个优先领域，包括食品辐照技术、动物健康、昆虫不育技术和生物基产品中可再生碳的鉴定。



图 I.6. 2023 年 12 月 29 日，原子能机构总干事格罗斯（右）与布宜诺斯艾利斯大学农学院院长费尔南多·维莱拉教授签署了原子能机构与阿根廷农业、畜牧和渔业部食品 and 生物经济秘书处关于在“原子用于粮食”倡议方面开展合作的谅解备忘录。
(照片来源：原子能机构)

J. 放射性同位素和辐射技术

J.1. 细胞靶向放射性药物的新型递送系统

状况

198. 使用放射性药物是为了诊断或治疗目的将放射性核素递送到相关器官、组织或细胞靶点的一种安全有效方法。放射性核素应递送到特定靶点，并仅在那里停留据临床要求所需的时间，避免在健康组织中积累和不必要的辐射照射。自 20 世纪 40 年代初以来，放射性碘一直被用于甲状腺疾病的诊断和治疗，是第一种以这种方式使用的放射性核素。此外，分别用于骨成像和骨转移放射性核素治疗的氟-18 氟化钠和镭-223/锶-

89 氯化物是简易放射性药物设计的其他类似例子。然而，当设计涉及不同的放射性核素时，放射性药物的使用就变得更加复杂，这些放射性核素需要用各种类型的载体（如小分子、多肽、抗体及其片段）标记，这些载体可以精确识别癌细胞上表达的细胞靶点²⁷（图 J.1）。

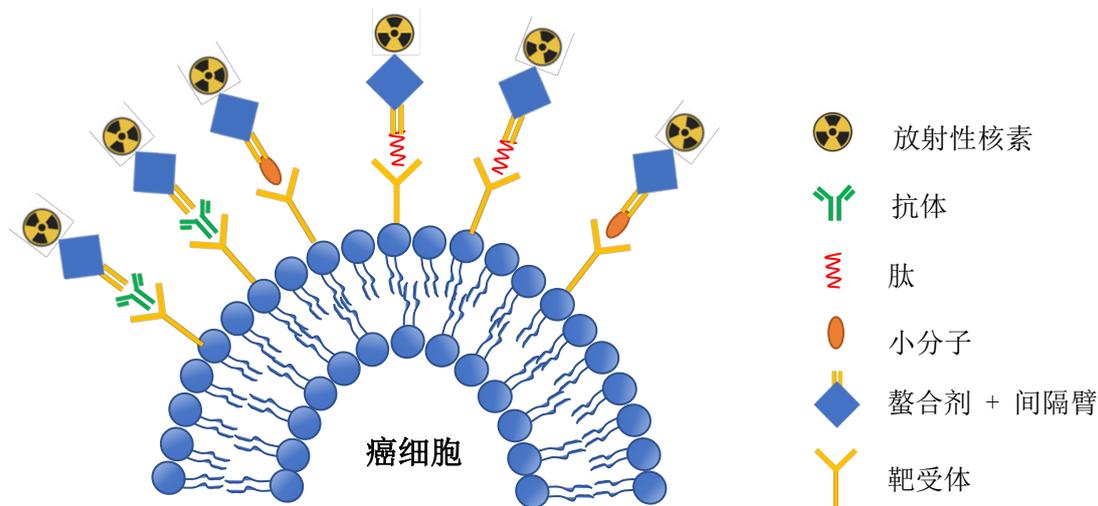


图 J.1. 放射性药物设计示意图。（图片来源：原子能机构）

199. 如今，放射性药物已证明其临床实用价值，不仅可用于器官功能成像，还可利用特定靶向放射性药物设计对癌细胞进行无创可视化。这一进步使得可以用新型药物进行个性化治疗，包括免疫疗法和治疗用放射性药物，如最近获准用于前列腺癌和神经内分泌癌的药物。²⁸ 进一步的治疗可用诊断用放射性药物进行监测。

200. 得益于技术发展和多个国家的协作网络，用于诊断成像或治疗的具有适当物理性质的放射性核素越来越多。²⁹ 生物医学研究也有助于开发有潜力用于新疾病特异性细胞靶向放射性标记和临床前开发的分子。然而，由于生物屏障相关的各种挑战以及细胞层面的相互作用会导致降解、代谢和引起毒性的不良反应，临床转化存在瓶颈。放射性核素随着短程 β 、 α 和俄歇电子的微粒发射而衰变，而没有适合成像的相关 γ 发射。因此，涉及这种放射性核素时，放射性药物制剂的优化复杂性增大。

²⁷ Bodei L.、Herrmann K.、Schöder H.、Scott A. M.和 Lewis J. S.，“肿瘤的放射诊疗学：当前挑战和新出现的机遇”，《自然评论 — 临床肿瘤学》第 19 卷，第 534—550 页（2022 年）。

²⁸ 食品和药品管理局网页：<https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cder/daf/index.cfm>

²⁹ RISMAMP 第一份可发表的摘要（PRISMAMP，2022 年）：
https://www.prismamp.eu/members/repository/Public/Publishable_summaries/PRISMAMP_PubSum_1.pdf

趋势

201. 克服这些放射性药物挑战的一种途径是使用类似于非放射性药物和疫苗的递送系统。目前正在广泛研究纳米递送系统，包括具有不同排列和组合的成像模式、药物和放射性核素的诊疗纳米系统，目的是提高药物的安全性和疗效。在生物系统中，细胞的许多内部机制都在纳米级（10⁻⁹ 毫微米）自然发生。因此，纳米粒子递送有望带来诸多好处，例如通过改变药物的药代动力学，提高靶点的放射性核素治疗浓度，同时减少副作用³⁰。纳米粒子递送系统包括不同的设计，如树枝体、脂质体、胶束、纳米胶囊和纳米球，以及不同类型的纳米粒子，如无机、聚合物、固体脂质等³¹（图 J.2）。

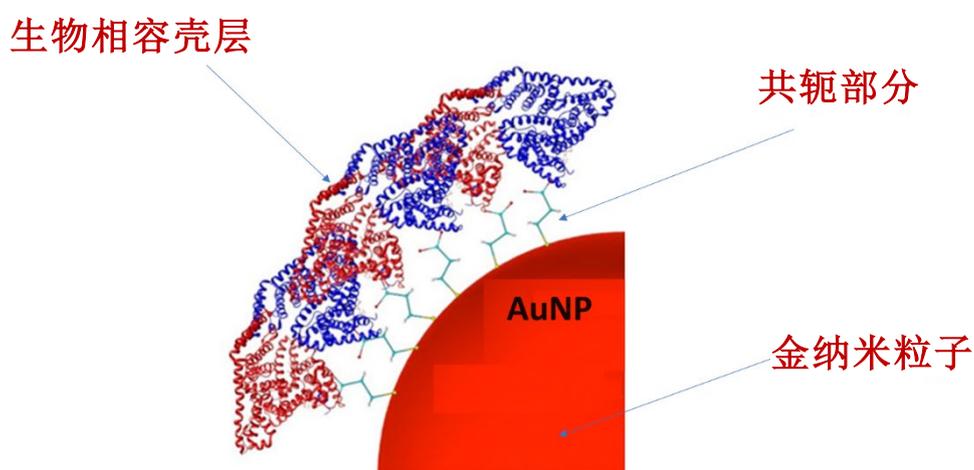


图 J.2. 用于放射性药物开发的共轭金纳米粒子示意图。
（图片来源：原子能机构）

202. 目前正在临床前评价的许多放射性药物均基于抗体、蛋白质或纳米药物，这些纳米药物有可能主动或被动地靶向肿瘤微环境。正在开发更好的递送系统，作为探索放射性核素靶向治疗隐藏潜力的一种方法。自从 2022 年诺贝尔化学奖授予点击化学和生物正交化学领域的研究人员，这些学科便受到越来越多的关注，也被应用于放射化学和递送系统，主要用于有效递送放射免疫共轭物（诊断或治疗用放射性核素与特定免疫物质的结合）。³²

³⁰ Jani, P., Subramanian, S., Korde, A., Rathod, L. and Sawant, K., “癌症诊疗纳米载体：单一平台上的双重功能”。Thangadurai, D.等人。“生命科学中的功能性仿生材料纳米技术”第 293–310 页（2020 年）。

³¹ Jalilian, A. R., Ocampo-García, B.等人，“国际原子能机构对于药物递送的纳米靶向放射性药物的贡献”，《药剂学》第 14 期，第 1060 页（2022 年）。

³² Kondengadan, S. M., Bansla, S., Yang, C.等人，“点击化学与药物递送：概览”，《药学学报》第 13 期第 1990 页（2023 年）。

203. 这些靶向递送系统均可与预靶向方案、化疗综合疗法或放射增敏剂结合使用。如图 J.3 所示，预靶向方案有可能彻底改变现代诊疗策略，因为它们可以在早期阶段将靶/本底比提高到 150 倍。初步结果表明，这些方法甚至胜过常规放射性核素靶向治疗方案。较快达到较高的靶/本底比和抗体的预积累使得可以用半衰期短的放射性核素，降低健康组织受到辐射的可能性。

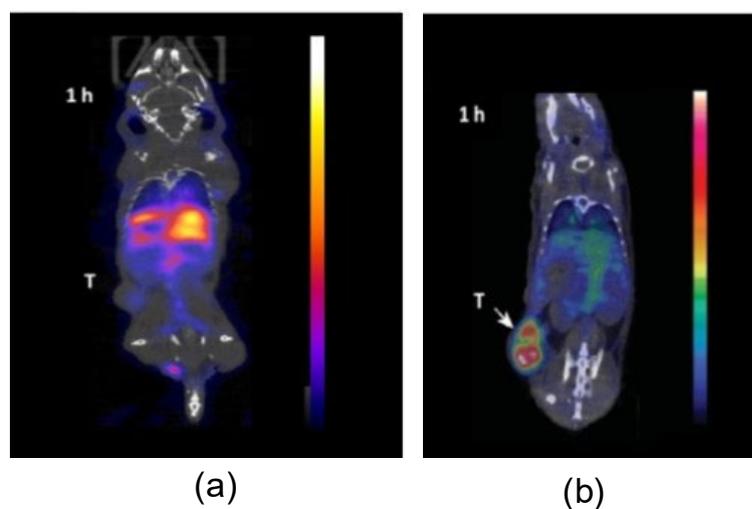


图 J.3. 采用常规方案 (a) 和预靶向方案 (b) 进行有效放射性药物递送情况下肿瘤相关糖蛋白 72 靶向单克隆抗体 CC49 放射免疫成像的可视化。
(照片来源:《制药学》第 15 期, 第 685 页 (2022 年)³³)

204. 原子能机构今后的活动将旨在汇集这一领域的多学科专家，以确定最有前景的系统，找出相关挑战，并为这些发展成果的临床转化制定解决方案。已为 2025 年规划了一个协调研究项目，以协助成员国为顺利采用这些发展成果做好准备，从而有效提供放射性药物。在这方面，原子能机构框架内的知识交流和技术转让非常重要。

J.2. 放射性示踪剂技术与用于矿山废水回收的人工湿地

状况

205. 尽管采矿业和矿物加工业对全球经济贡献巨大，但众所周知，它们也会对环境造成不利影响。含有机和无机污染物的矿山废水直接排放到环境中，不仅会造成环境污染，还会浪费日益减少的水资源。因此，回收和再利用对矿物加工业发展循环经济至关重要。

³³ García-Vázquez, R., Battisti, U. M. 和 Herth, M. M., “用于预靶向核成像的四嗪连接工具开发的最新进展”, 《制药学》第 15 期, 第 685 页 (2022 年)。

206. 传统废水处理系统在去除各种废水中的顽固污染物的能力方面以及在污泥堆积、处理和排放方面均存在很大的局限性。传统废水处理系统除了经常因机械故障或操作不当而崩溃之外，还费用高昂，而且在整个建造、运行和维护过程中都需要具备高水平技术能力的人员。过去几十年，原子能机构促进了放射性示踪剂技术的工业应用，目的是检查各种废水处理装置，如搅拌器、曝气池、澄清池、消化池以及沉淀和过滤装置。



图 J.4. 西班牙阿斯图里亚斯的贝尔蒙特德米兰达镇 Boinas 山谷采矿产生的废水。
(照片来源：Adobe 图库)

207. 放射性示踪剂技术在矿物加工业中发挥着重要作用，因为它可用于研究工厂的工艺流程并排除故障，从而更大程度地实现优化。尽管该技术适用于广泛的工业领域，但主要目标用户群包括石油和石化行业、矿物加工业和废水处理业。放射性示踪剂技术包括单独或结合使用密封放射源、开放源或核子控制系统，取决于所涉问题。在通常用于研究流体力学的开放源放射性示踪剂技术中，放射性示踪剂往往被注入工业系统。辐射探测器和集成数据采集系统测量系统出口处的示踪剂活度，生成出口年代曲线，提供有关流体流动的重要信息。

208. 尽管放射性示踪剂技术有助于提高传统废水处理厂的效率，但仍然需要更易于建造、操作和维护的替代方案。这种需求促使废水处理技术进一步发展，以克服这些长期存在的困难。

209. 与传统污水处理厂相比，人工湿地是一种极具吸引力的替代方案。人工湿地是一种工程系统，旨在利用湿地植物、土壤和微生物种群的自然功能来处理地表水、地下水或废物流中的污染物。人工湿地由于能耗低，机械基础设施简单，因而是一种具有成本效益的环保型系统。因此，过去五十年，人工湿地已成为一种可靠的处理技术，适用于所有类型的废水，包括污水、工业和农业流出物、填埋场浸出液和雨水径流。尽管人工湿地比传统污水处理厂具有优势，但对其复杂的流体力学的认识和理解仍然不足，这使得处理过程的高效运行和优化成为挑战。为了克服这一不足之处，原子能机构启动了一个协调研究项目，旨在为人工湿地研究开发一种放射性示踪剂方法，制定相关规程和导则，并验证人工湿地的水流模型。



图 J.5. 白罗斯传统废水处理系统。

(图片来源：原子能机构，改编自 Graphithèque/Adobe Stock)

趋势

210. 随着对依赖关键材料的新技术的需求不断增加，采矿业在可预见的未来有望实现增长。矿山复垦和关闭计划有赖于日益减少的水资源，对任何矿山最终是否成功都非常重要。这些计划考虑了与矿山及其污水处理厂相关的所有潜在问题，除长期采样之外，还可能包括一些关闭后的水处理。作为处理这一复杂假想方案的方式，循环经济模式最近也受到了关注，鼓励采用新技术和加工策略。

211. 利用人工湿地去除各种污染物的有效性众所周知。然而，对人工湿地的研究主要集中在生物和化学处理过程，采用黑盒测试比较流入和流出的污染物浓度，却忽视了作为污染物迁移和去除关键手段的流动特性对整个系统性能的重要性。

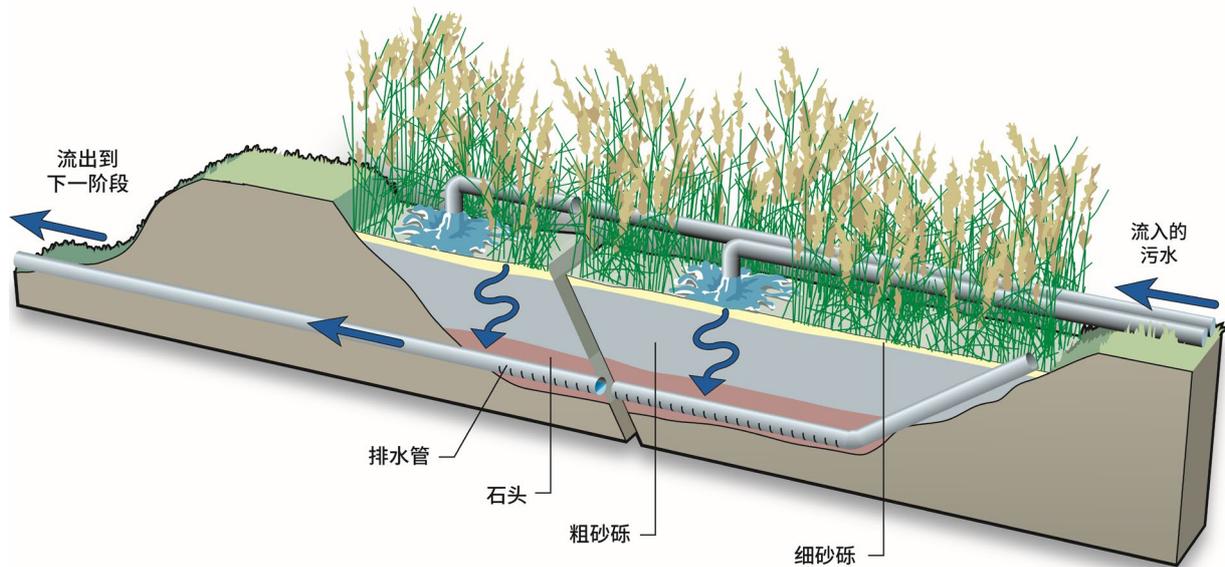


图 J.6. 人工湿地示意图。

(图片来源：原子能机构，改编自 Graphithèque/Adobe Stock)

212. 原子能机构正在开发一个有关用于矿山废水回收的人工湿地的水力性能的新协调研究项目，以便利用开放源放射性示踪剂技术与水力过程有关的设计参数以及水力过程与水质过程之间的相互依存关系。该协调研究项目将致力于开发模型和工具，通过提供详细的空间和时间信息来优化人工湿地的污染物去除效率，并预测湿地在各种条件下的动态反应。现有协调研究项目制定的在人工湿地使用放射性示踪剂的规程和导则将成为新协调研究项目的重要资源。

K. 同位素水文学

K.1. 追踪水循环：氡分析的新发展

状况

213. 氡是唯一融入水分子的放射性同位素，是水循环过程的宝贵示踪剂。由于氡的半衰期短（12.3 年），因而水文学中主要采用氡来估计地下水的补给以及评定易受污染的程度。氡是通过宇宙射线与高层大气中的氮-14 相互作用而自然产生的，产出率约为每年 258 克。氡也是核工业的副产品，数量与天然来源相当。

214. 1945—1963 年期间，由于热核装置大气试验，超过 500 千克的氡被释放到大气中，导致全球氡浓度增加，达到降水中天然水平的若干数量级。自 1963 年禁止大气试验以来，大气水中的氡浓度已慢慢衰减到稳定水平。由于当代天然水中的氡浓度较低，氡含量的测量在技术上具有挑战性。为了用商用液体闪烁计数器获得足够的衰变

计数，以便得出适合可靠水文应用的准确和精确结果，需要对氡进行大量富集（预浓缩 15 至 100 倍）。

215. 氡富集通常使用 20 世纪 60 年代初设计的带有镍-镍或不锈钢-低碳钢电极的碱性电解池来完成。最近于 2018 年进行的氡比对水平测试涉及约 90 个实验室，结果显示，全球超过 75% 的氡实验室使用 250 毫升或 500 毫升低碳钢碱性电解池系统来测量环境水样中的氡。然而，这些实验室中有近一半对水样中的低浓度和超低浓度氡得出的结果不准确，使得这些结果不适合水文应用。这一糟糕的表现要么是氡富集不足所致，要么因为数据后处理存在普遍性问题。



图 K.1. 水循环。(图片来源：原子能机构)

趋势

216. 为了满足对更高浓度氡富集的需求，原子能机构同位素水文学实验室开发并广泛测试了一种创新型聚合物电解质膜氡富集系统。该系统有望彻底改变成员国为水文和放射性警戒目的在超低水平上确定环境水样中氡浓度的能力。

217. 新的氡富集系统可以产生很高的预浓缩倍数（超过 60 倍），并避免了传统氡富集方法的一些缺点，其中包括使用危险的电解与中和化学品，以及需要大范围冷却和温度控制的复杂电解装置。此外，新的聚合物电解质膜系统旨在简化和缩短分析程序，使有意将氡作为示踪剂用于水资源评定和管理的成员国更容易进行氡分析。



图 K.2. 原子能机构由十个电解池组成的聚合物电解质膜氙系统的前视图，运行一组参考样品来测试准确性和精确度。(照片来源：原子能机构)

218. 氙富集技术的进步将有助于更好地区分自然和人为信号，并将增加天然氙基准数据的可用性。



图 K.3. 原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西在纽约联合国 2023 年水事会议期间的全球水分析实验室网启动仪式上致开幕词。
(照片来源：原子能机构)

L. 海洋环境

L.1. 人工智能改进对海洋微塑料污染的监测与研究

状况

219. 陆地塑料流入海洋，已将海洋环境变成了塑料废物的储存库。海洋生态系统面临的危机日益严重，因为每年有超过 1200 万吨的陆地塑料流入海洋，导致海洋中的微塑料和纳米塑料污染升级。为解决塑料污染急剧增加的问题，原子能机构的“核技术用于控制塑料污染”倡议正在努力监测微塑料，并评定其对海洋环境的影响。尽管人们对海洋塑料污染的认识有所进步，但由于微塑料的降解过程错综复杂，而且缺乏全面的聚合物数据库，因此对微塑料的定量和表征仍然困难重重。作为研究工作的一部分，“核技术用于控制塑料污染”正致力于建立一个全球可用的各种环境退化状态下的微塑料数据库。

220. 原子能机构正在与成员国密切合作，发展塑料废物升级再造为有价值产品的试点规模工厂。阿根廷、印度尼西亚、马来西亚和菲律宾已取得重大进展，目标是与工业

伙伴合作，在 2024 年建立技术规模原型。主要的应用前景集中在价格低廉、经久耐用和品质优良的建筑材料上，以及燃料和添加剂生产的辐射热解和铁路的改良枕木上。



图 L.1. 原子能机构海洋环境实验室的科学家利用振动光谱、拉曼光谱和傅立叶变换红外光谱分析海洋环境样品中微塑料的化学特性。(照片来源：原子能机构)

221. 傅立叶变换红外光谱、拉曼光谱和激光直接红外光谱等几种涉及光子与物质相互作用的技术已用于探测和表征聚合物和微塑料。这些方法依赖于包含参考光谱的数据库，将获得的粒子光谱与该数据库进行比较。参考光谱通常来自原始聚合物，而环境样品中的颗粒物很少保持原始状态，通常会因紫外线照射和氧化等因素而发生降解。这种降解改变了环境样品的物理化学性质，影响了它们与红外光的相互作用，导致光谱轮廓发生变化，从而增加了错误识别的风险。由于不同降解阶段的聚合物光谱数据库汇编工作既耗时费力，又不切实际，因此需要采用替代方案，将更快的分析技术与先进数据分析方法相结合，以利用原始样品和降解样品的现有信息。

222. 最近兴起的激光直接红外光谱成为原子能机构海洋环境实验室的一种替代技术，用于分析海水、海洋沉积物和海洋生物群样品中的微塑料和聚合物。与傅里叶变换红外光谱等技术不同，激光直接红外光谱的优势是在实际成像之前扫描样品，并且仅分析探测到颗粒物的区域。这就缩短了分析时间，尤其是对于颗粒物极少的样品。然而，该方法的一个缺点是可能会将相邻的两个颗粒物错误地识别为一个，因为每个颗粒物只记录一个光谱。此外，与傅立叶变换红外光谱等其他技术相比，激光直接红外

光谱在分析衰减颗粒物时更容易出现错误识别，因为激光直接红外仪器记录的红外波段更窄。因此，有必要开发更有效的分类方法，以最大限度地降低错误识别的风险。

趋势

223. 尽管机器学习在微塑料识别领域的应用仍然有限，但它可以成为改进分类的宝贵工具。包括深度学习和强化学习在内的机器学习已成为生物医学工程和水研究等各个科学领域和工业部门不可或缺的一部分。机器学习涉及训练数学模型，使用源自统计学和计算机科学的方法，根据观察到的数据进行预测或作出决策。因此，将机器学习应用于聚合物和微塑料识别，可以提高环境设置的准确性。



图 L.2. 原子能机构目前正在与阿根廷南极研究所合作开展一个项目，旨在分析在南极采集的海水和沉积物样品中发现的微塑料。（照片来源：原子能机构）

224. 人工智能正在成为微塑料识别领域的基本工具。人工智能利用机器学习算法来揭示海洋环境中降解聚合物的复杂性，代表了一种范式转换。在特定环境条件下生成降解聚合物光谱的能力使研究人员能够以前所未有的精确度辨别微塑料的类型。这种光谱洞察不仅有助于区分不同的塑料成分，还能让研究人员深入了解聚合物的来源及其在不同海洋环境中的行为。

225. 人工智能与环境保护的融合正值与海洋塑料污染作斗争的关键时刻。其光谱分析速度快，再加上对生成降解聚合物光谱的物理、化学和生物过程的模拟，使人工智能成为观察和克服微塑料污染所带来复杂挑战的精密透镜。随着我们继续探索技术创新与环境管理的交叉领域，人工智能有望成为实现无塑料海洋的有力工具。

附件

表 A-1. 全世界的在运和在建核动力堆^a

国家	在运反应堆		暂停运行反应堆		在建反应堆		核发电量	
	机组数	总容量 兆瓦（电）	机组数	总容量 兆瓦（电）	机组数	总容量 兆瓦（电）	太瓦 （电）时	核电份额 百分比
阿根廷	3	1 641			1	25	9.0	6.3
亚美尼亚	1	416					2.5	31.1
孟加拉国					2	2 160		
白罗斯	2	2 220					11.0	28.6
比利时	5	3 908					31.3	41.2
巴西	2	1 884			1	1 340	13.7	2.2
保加利亚	2	2 006					15.5	40.5
加拿大	19	13 699					83.5	13.7
中国	55	53 152			24	24 948	406.5	4.9
捷克共和国	6	3 934					28.7	40.0
埃及					3	3 300		
芬兰	5	4 394					32.8	42.0
法国	56	61 370			1	1 630	323.8	64.8
匈牙利	4	1 916					15.1	48.8
印度	19	6 290	4	639	8	6 028	44.6	3.1
伊朗伊斯兰共和国	1	915			1	974	6.1	1.7
日本	12	11 046	21	20 633	2	2 653	77.5	5.5
大韩民国	26	25 825			2	2 680	171.6	31.5
墨西哥	2	1 552					12.0	4.9
荷兰王国	1	482					3.8	3.4
巴基斯坦	6	3 262					22.4	17.4
罗马尼亚	2	1 300					10.3	18.9
俄罗斯	37	27 727			3	2 700	204.0	18.4
斯洛伐克	5	2 308			1	440	17.0	61.3
斯洛文尼亚	1	688					5.3	36.8
南非	2	1 854					8.2	4.4
西班牙	7	7 123					54.4	20.3
瑞典	6	6 944					46.6	28.6
瑞士	4	2 973					23.4	32.4
土耳其					4	4 456		
阿拉伯联合酋长国	3	4 011			1	1 310	31.2	19.7
英国	9	5 883			2	3 260	37.3	12.5
乌克兰	15	13 107			2	2 070	NA	NA
美利坚合众国	93	95 835			1	1 117	742.4	18.5
全球^{b, c}	413	371 539	25	21 272	59	61 091	2 508.7^c	N/A

说明：NA — 未提供；N/A — 不适用。

^a 来源：原子能机构动力堆信息系统（www.iaea.org/pris）根据成员国 2024 年 6 月 16 日提供的数据进行了更新。

^b 总数字包括来自中国台湾的以下数据：两台运行中机组，1874 兆瓦（电），供电 17.2 太瓦·时，占总电力组合的 6.9%。

^c 总发电量不包括乌克兰，因为没有提交 2023 年的运行数据。

表 E-1. 世界各地研究堆的常见应用

应用类型 ^a	所涉研究堆数量 ^b	拥有这类设施的成员国数量
教学/培训	162	51
中子活化分析	119	50
放射性同位素生产	83	40
中子射线照相	69	34
材料/燃料辐照	67	26
中子散射	45	28
地质年代学	25	22
嬗变（硅掺杂）	24	15
嬗变（宝石）	21	12
中子治疗，主要是研发	16	11
核数据测量	17	11
其他 ^c	116	35

^a 原子能机构出版物《研究堆的应用》（原子能机构《核能丛书》第 NP-T-5.3 号，维也纳，2014 年）更详细地介绍了这些应用。

^b 来自所考虑的 234 座研究堆（截至 2023 年 12 月，225 座在运，9 座临时关闭）。

^c 其他应用包括仪器仪表的校准和测试、屏蔽实验、创建正电子源和核废物焚烧研究。

简称表

¹³ C-SBT	碳-13 蔗糖呼气检测
^{99m} Tc-PYP	焦磷酸锝-99m
AEC	碱性电解池
AI	人工智能
ARAO	斯洛文尼亚放射性废物管理机构
ATF	先进技术燃料
ATTR-CMP	转甲状腺素蛋白淀粉样变心肌病
CFS	英联邦聚变系统
CIRES	收集、存贮和处置工业中心
COP28 2023	2023 年《联合国气候变化框架公约》缔约方大会（“气候公约”缔约方大会第 28 届会议）
COVID-19	2019 冠状病毒病
CRNS	宇宙射线中子传感器
CRP	协调研究项目
CT	计算机断层照相法
DAQ	探测器数据采集
DEMO	示范聚变电厂
DTT	偏滤器托卡马克试验
EED	肠道环境功能障碍
EF	射血分数
FAO	联合国粮食及农业组织（粮农组织）
FTIR	傅立叶变换红外
FPGA	现场可编程门阵列
GJ	10 亿焦耳
GW	吉瓦
GW(e)	吉瓦（电）
HALEU	高丰度低浓铀
HEU	高浓铀
HFpEF	射血分数保留的心力衰竭
HFrEF	射血分数降低的心力衰竭
HPR1000	华龙一号
HTGR	高温气冷堆
HTTR	高温工程试验堆
IFMIF	国际聚变材料辐照设施
INIR	综合核基础结构评审

INL	爱达荷国家实验室
JET	欧洲联合环
keV	千电子伏
LDIR	激光直接红外
LEU	低浓铀
LFR	铅冷快堆
LIDAR	光检测及测距
LILW	中低放废物
LLNL	劳伦斯·利弗莫尔国家实验室
LMICs	中低收入国家
LTO	长期运行
LWR	轻水堆
MARVEL	微堆应用、研究、验证和评价
MeV	兆电子伏
MHTGR	模块高温气冷堆
MIT	麻省理工学院
ML	机器学习
MMR	微型模块堆
MSFR	熔盐快堆
MSR	熔盐堆
MW(e)	兆瓦（电）
NHSI	核协调统一和标准化倡议
NIF	国家点火装置
NORM	天然存在的放射性物质
NP	纳米粒子
NPP	核电厂
NPPA	核电厂管理局
NRAD	中子射线照相反应堆
NRC	核管理委员会（核管会）
OECD/NEA	经济合作与发展组织核能机构（经合组织核能机构）
PET	正电子发射断层照相法
PEM	聚合物电解质薄膜
PRIS	动力堆信息系统
PWR	压水堆
R&D	研究与发展（研发）
SCWR	超临界水冷堆
SFR	钠冷快堆

SMART	系统一体化模块式先进反应堆
SMRs	小型模块堆
SNF	乏核燃料
SPECT-CT	单光子发射计算机断层照相法/计算机断层照相法
STEP	能源生产用球形托卡马克
t HM	吨重金属
TLAA	时限老化分析
TW · h	太瓦·时
UGV	无人驾驶地面车辆
UKAEA	英国原子能管理局
WCR	水冷堆
WHO	世界卫生组织（世卫组织）



IAEA

国际原子能机构
原子用于和平与发展

国际原子能机构

地址:Vienna International Centre, P.O. Box 100

1400 Vienna, Austria

电话:(+43-1) 2600-0

传真:(+43-1) 2600-7

电子信箱:Official.Mail@iaea.org

网址:www.iaea.org