

2026 年核技术评论

总干事的报告

IAEA

GC(70)/INF/4

IAEA
原子用于和平与发展

大　　会

GC(70)/INF/4
2026年9月3日

普遍分发
中文
原语文：英文

第七十届常会

大会临时议程项目 16
(GC(70)/1、Add.1、Add.2、Add.3、Add.4 和 Add.5)

2026 年核技术评论

总干事的报告

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 2025 年令人瞩目的发展情况。
- 《2026 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、研究堆、聚变研究、海洋环境、人体健康、粮食和农业、放射性同位素和辐射技术、核数据、水资源、等离子体科学和技术、粒子加速器以及相关仪器仪表。
- 草案版本已通过 GOV/2026/5 号文件提交 2026 年 3 月理事会会议。本最后版本将根据理事会的讨论结果以及所收到的成员国的意见编写。

建议采取的行动

- 建议理事会审议和注意《2026 年核技术评论》。

目 录

2026 年核技术评论 ***1***
总干事的前言 iii
2026 年核技术评论 ***1***
执行概要 1
2026 年核技术评论 ***6***
报告正文 6
A. 核电 ***6***
A.1. 核电预测 6
A.2. 运核电厂 8
A.3. 新的或扩大的核电计划 10
A.4. 核电技术发展 14
A.4.1. 先进水冷堆 15
A.4.2. 中小型反应堆或模块堆及微堆 17
A.4.3. 快堆 21
A.4.4. 核电的非电力应用 22
A.5. 人工智能应用于核电和核燃料循环 24
B. 核燃料循环 ***26***
B.1. 前端 26
B.2. 后端 29
C. 退役、环境治理和放射性废物管理 ***31***
C.1. 退役 31
C.2. 环境治理和天然存在的放射性物质管理 33
C.3. 放射性废物管理 34
D. 研究堆 ***38***
E. 聚变能科学研究与技术发展 ***42***
F. 海洋环境 ***47***
F.1. 破解“永久性化学物质”之谜：核技术和同位素技术促进海洋健康和海产食品安全 47
F.2. 评定深海海底采矿对海洋环境的影响 51

G. 人体健康 ***54***
G.1. 利用人工智能，发展辐射医学 54
G.2. 通过粒子治疗提高癌症治疗精准度 56
H. 粮食和农业 ***59***
H.1. 利用核磁共振技术保障咖啡品质 59
H.2. 辐照技术促进安全贸易和虫害防治 61
H.3. 追踪抗生素和抗微生物药物耐药性在农业生态系统中的路径 64
H.4. 昆虫不育技术计划的通用遗传工具箱 67
I. 放射性同位素和辐射技术 ***70***
I.1. 铽同位素：个体化医学的未来 70
I.2. 利用辐射技术将塑料废物转化为宝贵资源 73
I.3. 便携式中子发生器促进工业流程清洁 76
J. 核数据赋能医用同位素生产 ***77***
J.1. 核数据赋能医用同位素生产 77
K. 水资源 ***79***
K.1. 氡-222：天然示踪剂助力水资源管理转型 79
L. 等离子体科学和技术的新兴应用 ***82***
M. 粒子加速器 ***85***
M.1. X 射线自由电子激光装置：创新与发展之光 85
M.2. 硼中子俘获疗法：精准辐射用于癌症治疗 86
N. 仪器仪表 ***88***
N.1. 人工智能赋能的能谱测量用于精确测定中子能量分布 88
N.2. 碳化硅探测器为核仪器仪表提供新机遇 89

总干事的前言

从为经济体提供可靠、负担得起的能源动力，到改善全球健康、粮食安全与环境保护，核技术始终是应对复杂全球挑战的重要工具。

在小型模块堆等反应堆技术创新以及供热、海水淡化和制氢等非电力应用支持下，核电在各国能源战略中的作用日益扩大。目前，全球有 31 个国家拥有在运核设施，其中部分国家正计划扩大其机群。此外，国际原子能机构正与 40 多个希望将核能纳入其未来能源战略的国家开展合作。

原子能机构的最新核电容量预测显示，在高增长情景下，为了支持经济发展，加强工业和交通电气化，实现建筑供暖和制冷，以及为数据中心和人工智能提供动力，到本世纪中叶，对可靠电力的需求将驱动核电容量扩大到 2.6 倍，达到近 1000 吉瓦（电）。

通过“核协调统一和标准化倡议”、“原子促进净零排放”和原子能机构小型模块堆及其应用平台等注重实践的倡议，原子能机构正提供支持，促进先进模块堆的早期有效部署。

2025 年，核技术背后的全球发展势头日益强劲。对聚变能的探索在多条路径上持续推进，但仍需要进一步的研究与发展。国际热核实验堆仍然是该领域的核心项目，建设工作稳步推进，已完成了九个真空室模块中三个的安装。同时，私营部门投资显著增加，私人发起的倡议继续推进。

在更广泛的核科学技术领域，同位素与分析技术正用于监测海洋污染物和评定深海海底采矿的影响。人工智能正越来越多地融入辐射医学，以提升诊断水平并推动癌症护理向个性化方向发展。

农业与食品安全领域正运用核方法打击欺诈，确保贸易安全，并追踪抗微生物药物耐药性的变化。基于辐射的新型回收技术可将塑料废物转化为宝贵资源，变废为宝，支持循环经济模式。

与此同时，等离子体科学正在健康、农业和工业领域不断开拓创新应用，彰显了核相关技术的广泛用途。

原子能机构通过“希望之光”、“核技术用于控制塑料污染”、“人畜共患疾病综合行动”和“原子用于粮食”等倡议，正将研究成果转化为现实影响力。我们借助实验室、协调研究项目及伙伴关系，协助各成员国应用核技术落实其国家优先事项。



图 FW.1. 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西在马尼拉举行的原子能机构“核技术用于控制塑料污染”国际高级别论坛上致开幕辞，2025 年 11 月。（照片来源：原子能机构）

所有这些工作的基础，是对科学卓越、创新、安全和能力建设的承诺。无论是通过生产医用同位素、开发新型放射性药物，还是通过利用放射性示踪剂进行水资源管理，原子能机构都支持成员国利用核科学造福人民。

《2026 年核技术评论》记录了过去一年的主要进展，并阐释了核技术如何为满足新兴需求而继续不断发展。我希望本报告能为成员国利用核科学技术共创繁荣与安全的未来提供信息和支持。

2026 年核技术评论

总干事的报告

执 行 概 要

1. 随着全球对核能这一清洁可靠能源的关注度持续提升，原子能机构已连续第五年上调对核电扩张的预测。原子能机构高值预测估计，到 2050 年，全球在运核电容量将增加一倍以上，达到 992 吉瓦（电），是 2024 年水平的 2.6 倍；低值预测则估计容量将增长 50%，达到 561 吉瓦（电）。高值预测中，小型模块堆预计将占新增容量的 24%，而低值预测中这一比例为 5%。

2. 截至 2025 年 10 月底，全球在运核电容量为 377.1 吉瓦（电），由 31 个成员国的 413 座反应堆提供。此外，总容量为 19.7 吉瓦（电）的 23 座反应堆停运。2025 年期间，核电厂的发电量为 2635.2 太瓦时，与 2024 年相比增长了 0.6%。此外，15 个国家共有 77.2 吉瓦（电）总容量（72 座反应堆）正在建设中。全球 35 个国家总容量为 506.5 吉瓦（电）的 658 座反应堆累积核运行经验超过 20 500 堆年。过去十年，全球核电容量一直处于稳定水平，从 2016 年的 370.2 吉瓦（电）增加到 2025 年的 379.9 吉瓦（电）。自 2016 年以来，约有 61.4 吉瓦（电）的新增容量（60 座反应堆）并入电网，其中 62%是在亚洲增加的。2016 年至 2025 年期间，核发电量增长了 6.4%，反映机群实绩改善。全球核电容量的约 67%（293 座反应堆，263.9 吉瓦（电））已运行超过 30 年，41%（190 座反应堆，135.5 吉瓦（电））运行超过 40 年。尽管机群老化，但核电实绩仍然保持了高水平：2025 年，全球负荷因子达到了 93%。

3. 为了促进社会经济发展，另有约 60 个国家正在探索核能或已承诺将核能纳入国家能源政策。其中，40 个国家正积极启动或推进其核电计划，包括通过努力建设必要的基础结构；同时，28 个国家处于决策阶段，14 个国家处于决策后阶段。除了目前在进行预可行性评定、基础结构开发或首座核电厂建造的 42 个国家之外，还有约 20 个国家已表示有意将核电纳入其未来能源战略。

4. 水冷堆一直是全世界核电厂的主流技术。目前提高燃料利用效率并减少废物的努力侧重于增强系统整体可靠性和改进燃料设计，通过增加铀-235 的富集度来延长燃料循环的持续时间，以及引入用来自乏核燃料后处理的再生材料（铀、钚）制成的燃料。

5. 对小型模块堆的总体兴趣继续增长，越来越多的成员国还考虑在首次部署核电时采用小型模块堆。2025 年全年，成员国对包括浮动核电厂和微堆在内的移动式核电厂及其应用的兴趣也日益浓厚。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。小型模块堆运行灵活，可以作为间歇性可再生能源的补充；其提供的地区供热、核能淡化海水和制氢等非电力应用，有助于构建多元化的清洁能源结构，提升其竞争力。

6. 部分成员国开展核能非电力应用已有数十年，如今越来越多的其他国家也开始探索此类应用，以加强能源安全和实现脱碳目标。目前，全世界有 64 座反应堆用于非电力应用。其中，位于 10 个成员国的 45 座核动力堆 2025 年为非电力应用提供了 2013 吉瓦时电热当量。对于利用核能为数据中心供电的兴趣尤为重要，且越来越重要，此外还可能利用核能为这些设施提供冷却。

7. 基于闭式燃料循环快中子堆的技术对核能的长期可持续性至关重要。快堆从天然铀中提取的能量远多于热堆，为能源需求和核废物管理提供了一种可持续的解决方案。虽然钠冷设计在能源生产方面已有数十年的运行经验，但液态重金属冷却反应堆仍处于早期发展或部署阶段。

8. 2025 年，人工智能对整个核能部门仍然具有吸引力，其应用已扩展至在运核电厂和核燃料循环设施。人工智能正被越来越多地整合到包括机器人、无人机和先进传感器应用在内的更广泛数字化进程中，以提升安全性、可靠性和运行效率。基于人工智能的系统越来越多地被用于预测维护、传感器校准和实时异常检测，有助于减少意外停堆，延长设备寿命。

9. 对聚变能的探索在多条路径上持续推进，公共和私人倡议都取得了稳步进展，投入了更多资金。国际原子能机构《2025 年世界聚变展望》报告显示，自 2010 年以来，私人聚变投资累计超过 100 亿美元，2024－2025 年从风险投资、公司和主权来源筹得的资金创下了历史纪录。全球范围内有 150 多座实验聚变设施在运行、建设或规划中，近 30 个聚变电厂设计处于不同的概念开发阶段，而国际热核实验堆等重大项目正在组装建设。

10. 根据经济合作与发展组织核能机构和原子能机构联合编写的出版物《2024 年铀资源、生产和需求》（又称“红皮书”），到 2050 年，全球铀需求在低增长情景下预计将增至 90 045 吨铀，在高增长情景下将增至 142 631 吨铀，较当前约六万吨铀的需求量将增长 50%至 144%。

11. 与未来铀需求量翻番形成对比的是，预计到 2040 年，现有矿山的铀产量将下降至少 50%。为了保证未来供应，将需要开发新矿山，扩建现有矿山或延长其服务年限，以及重启闲置矿山。新矿床的发现需要持续的长期勘探工作和投资。相对近期的创新和发展包括加大利用人工智能来提高采矿过程中的铀回收率，完善技术数据分析，以发现新的资源和扩大现有资源。

12. 当前核电机群的燃料开发活动重点主要是提升传统锆包壳二氧化铀燃料的性能和可靠性。先进燃料开发正在推动整个行业转型。新燃料技术引入了旨在提高效率、延长寿命和改进安全的创新材料和设计。部分燃料概念有望将延长运行周期并减少换料频率，有可能将停堆间隔期从 18 个月增至 24 个月。越来越多的小型模块堆开发商正在寻求革新型燃料设计，以实现更高效率、更大安全裕度和更长运行周期。这种先进燃料需要专门的制造设施和新的供应链。特别关注为快中子反应堆和更传统的热中子反应堆开发高效的燃料解决方案。

13. 截至 2025 年底，根据成员国向原子能机构提供的最新资料，全球贮存乏核燃料存量约为 32 万吨重金属。许多国家继续将所贮存乏核燃料从湿法贮存转为干法贮存。全世界对乏核燃料再循环和闭式燃料循环的兴趣有所增加，世界各地循环设施的扩建、重启和建造就证明了这一点。

14. 正在进行退役的动力堆和研究堆数量持续增加，呈永久关闭不久后立即拆除的趋势。截至 2025 年底，21 个成员国的 218 座动力堆被关闭，以待退役，另有 23 台机组完全退役。退役项目日益重视循环经济原则，其重点是通过高效再利用材料、减少废物和将场址重新用于未来的工业用途来实现可持续性。然而，挑战依然存在，特别是对于技术和财政资源有限的国家，因为这会影响其实施有效退役战略的能力。小型模块堆占地面积小，设计简化，相较于大型反应堆，有望缩短退役时间并减少废物量，因而在能源结构中的占比预计将上升。

15. 环境治理领域的新趋势继续反映对可持续实践的日益重视，包括应用循环经济原则以减少废物和提高资源效率。与此同时，正在逐步采用遥感、机器学习和机器人学等技术，以加强场址表征、加强监测和进行更安全的废物管理。

16. 各国正通过基础结构发展、先进表征、监管现代化和国际合作，积极加强放射性废物管理，以确保在多样化核背景下的安全性、合规性和环境保护。在标准化和协调统一方面，许多国家目前正在将废物分类和验收标准与国际标准保持一致。另一个新出现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，以及废物再利用和回收。这个方案可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。根据原子能机构“全球镭-226 管理倡议”，超过 85 个参与成员国有机会将弃用镭源转移到一些受援国，通过回收利用制成拯救生命的医用放射性同位素。

17. 截至 2025 年底，共有 235 座在运核研究堆，包括临时关闭的研究堆，分布在 54 个国家。此外，有 11 个国家正在建造 12 座新研究堆，同时还有 12 个成员国宣布了正式的建造计划。随着对医用放射性同位素、新先进堆设计所需新燃料和材料测试以及核教育和培训的需求不断增长，预计全球研究堆数量在不久的将来会适度增长。截至 2025 年底，54%的在运研究堆堆龄已超过 50 年。这些反应堆的持续安全运行需通过设施老化管理、整修和现代化改造计划提供支撑。

18. 为了应对复杂的环境和健康挑战，核技术和同位素技术被证明至关重要。海洋部门正运用这些方法跟踪全氟和多氟烷基物质等持久性污染物，并评定深海采矿的环境风险。为了促进海洋健康与海产食品安全，人工智能正与同位素数据相结合，以加强对污染物行为的检测和预测，支持更有效的监测和政策制定。

19. 在人体健康领域，人工智能正越来越多地融入辐射医学，以提高医学成像、治疗规划和个性化治疗的精确度和效率。医学物理师在安全实施人工智能系统中发挥着核心作用，原子能机构为此提供了结构化框架和培训，以支持成员国。粒子治疗（包括质子和碳离子束）继续取得进步，可提供副作用更少、靶向性更强的癌症治疗。粒子治疗设施在全球范围内的扩展，包括在中低收入国家的扩展，反映了临床接受度不断提高。

20. 核磁共振波谱法正用于验证咖啡等高价值食品的真实性，保护消费者和生产商免受欺诈。在人工智能驱动的数据分析支持下，低场核磁共振仪使此项技术更容易获得和转移。辐照技术仍然是促进生鲜产品安全国际贸易的关键植物检疫处理手段，更新后的标准现已允许使用更高能量的 X 射线，以提高效率和增强经济活力。

21. 抗微生物药物耐药性构成严重的全球健康威胁，农业被确认为抗生素抗性基因传播的关键路径。核技术和同位素技术正被用于追踪农业生态系统中的抗生素及抗生素抗性基因，为旨在减少环境和食物链污染的“同一健康”干预措施和政策提供证据支持。

22. 放射性药物的发展正推动个体化医学的进步，铽同位素正兴起为诊断和治疗应用中的配对药物，展现出广阔前景。具体而言，铽-161 正通过临床前和临床评价取得进展，有望改善癌症治疗的精确度和疗效。

23. 辐射技术正通过创新回收方法用于解决塑料污染问题。辐射辅助热解法将塑料废物转化为宝贵燃料和给料，变废为宝，支持循环经济目标。在原子能机构“核技术用于控制塑料污染”倡议下，先进试点项目，包括在阿根廷、印度尼西亚、马来西亚和菲律宾的项目，正在验证该技术扩大至工业规模的可行性。

24. 便携式中子发生器正成为现场生产短寿命放射性核素的实用解决方案，克服了传统放射性示踪剂方法在物流和监管方面的挑战。这些系统通过减少放射性废物促成实时工业过程优化，助力采矿和化学加工等部门实现更清洁、更安全的运营。

25. 顺应数据科学的全球普遍趋势，核科学技术领域的核数据和原子数据越来越多地由应用程序编程接口处理，这使得能够以编程方式访问数据，从而将其用于机器学习等先进软件应用。准确的核数据仍然是医用同位素生产、聚变研究和其他先进应用的基础，原子能机构的医用同位素浏览器和编评核数据库正被越来越多地用于优化同位素产额和最大限度地减少杂质。

26. 氡-222 被确立为地下水研究的重要天然示踪剂，便携式探测技术使得实时实地测量成为可能。原子能机构正引领将氡检测纳入水资源管理的努力，支持成员国评定地下水-地表水的相互作用、补给过程和污染风险。

27. 等离子体科学已超越聚变领域，拓展至农业、健康和环境治理领域的多种应用。低温等离子体被用于种子处理、伤口愈合、空气净化和废水处理。为支持等离子体技术在成员国的规模化部署，原子能机构正在推动国际合作与标准化。

28. 硼中子俘获疗法作为一种靶向癌症治疗手段正获得临床应用，目前全球基于加速器的在运设施已超过 30 座。中国、芬兰和日本等国近期开展的试验表明，该疗法对复发性头颈癌、乳腺癌和其他恶性肿瘤的疗效前景良好，为其更广泛的临床应用提供了支持。

29. 人工智能正在强化中子能谱测量，使复杂辐射场中的自动核素识别和光谱重建成为可能。碳化硅探测器正在成为极端环境中辐射探测的有力替代方案，为聚变研究、核设施和空间应用提供耐高温、抗辐射和快速响应时间。

30. X射线自由电子激光装置为结构生物学、材料科学和化学领域的超快和纳米级研究提供了前所未有的能力。X 射线自由电子激光装置通过全球 14 座在运设施或在建设施，为药物发现、催化和能源转换等领域的国际合作、能力建设和创新提供支持。

2026 年核技术评论

报 告 正 文

总干事的报告

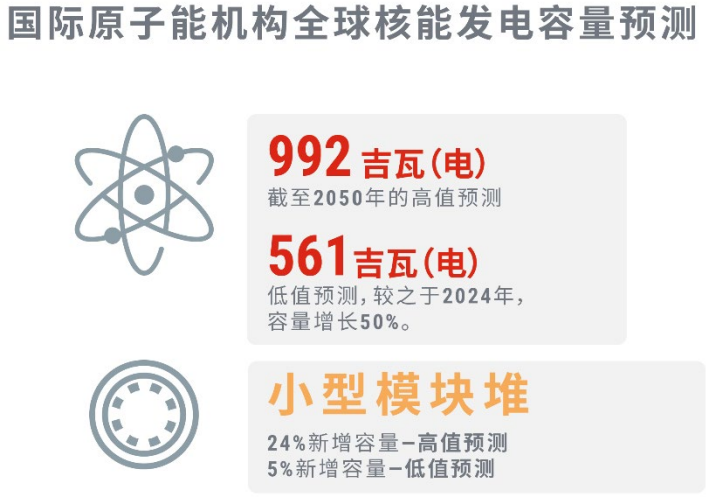
A. 核电

A.1. 核电预测

状况

1. 对清洁可靠能源的需求正在全球范围内推动对核电的兴趣。2023 年 12 月举行的《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）通过的首次“全球盘点”认识到，需要加快部署包括核能在内的所有低碳能源，以助力实现“巴黎协定”的目标。关于到 2050 年将核电装机容量增加两倍的呼吁，以及随后于 2024 年 3 月在布鲁塞尔举行的首届核能峰会，继续强化了核电背后的这一势头。对供应保证和电网可靠性的关切也激发了人们对核电的兴趣，认为核电是一种能够满足人工智能数据中心能源需求的技术，既有助于整合大部分可变可再生能源，同时还能确保家庭和工业可获得能负担得起的能源。这也是新兴市场和发展中经济体对核能产生兴趣的主要驱动因素之一。在原子能机构的协助下，有 40 多个国家正处于启动核计划的不同阶段。最后，正在为电力生产和非动力应用（如供热、海水淡化和氢生产）开发的更广泛反应堆技术（包括小型模块堆）进一步强化了对核电的兴趣。

2. 随着全球对核能这一清洁可靠能源的关注度持续提升，原子能机构已连续第五年上调对核电扩张的预测。原子能机构高值预测估计，到 2050 年，全球在运核电容量将增加一倍以上，达到 2024 年水平的 2.6 倍，而小型模块堆预计将在这一扩张中发挥关键作用。



3. 在高值预测中，核发电容量预计到 2050 年将增至 992 吉瓦（电）。在低值预测中，容量将增长 50%，达到 561 吉瓦（电）。高值预测中预计小型模块堆将占新增容量的 24%，而低值预测中的这一比例为 5%。

趋势

4. 发达经济体和发展中经济体对清洁能源的需求持续增长。人工智能应用的发展和数据中心的开发推动了对负担得起的可靠电力的这一需求。现有反应堆以及先进型和革新型反应堆技术（包括小型模块堆）正被考虑作为满足这一特定需求的选择。小型模块堆独具特点，使其不仅适合用于热电联产和工业应用，而且也适合作为“煤转核”过渡的一部分替代类似规模的燃煤电厂，还适合用于海洋应用。这些特点增加了小型模块堆的吸引力。原子能机构预测，在高增长情景下，小型模块堆在 992 吉瓦（电）总容量中可贡献多达 160 吉瓦（电）。

5. 2025 年，原子能机构与世界银行集团签署了具有里程碑意义的谅解备忘录。这不仅标志着世界银行在数十年后首次重新参与核电领域，也开启了国际金融部门的新篇章，并引发了原子能机构与主要开发银行建立伙伴关系的连锁反应。此后不久，原子能机构与亚洲开发银行（亚行）、欧佩克国际发展基金以及拉丁美洲和加勒比开发银行缔结了类似的战略谅解备忘录。这些合作旨在共同调动资金，强化技术专门知识，并释放核电在加强能源安全、提高抵御极端天气条件的能力及促进全球社会经济发展方面的全部潜力。



图 A.1. 2025 年 6 月，原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西与世界银行集团行长彭安杰在原子能机构与世界银行集团签署谅解备忘录的仪式上
（照片来源：世界银行）

6. 核部门将继续应对挑战，包括筹资、降低项目成本，以及在监管和行业层面加强协调与标准化，以提高竞争力并加快部署新的核动力堆。为了就此支持成员国，2022年启动了“核协调统一和标准化倡议”，以小型模块堆技术为重点，促进安全可靠先进堆的全球部署。该倡议的预期成果已然实现，目前正进入涵盖 2025－2026 年期间的第二阶段。

7. 随着对清洁、可靠、可调度电力需求的增长，一些曾决定逐步淘汰核电或出于经济原因已关闭核电厂的国家正在重新审视这些决定，投资于重启和翻新这些电厂，有的还获得了大型工业行为体（如数据中心）的财政支持。

A.2. 运核电厂

状况

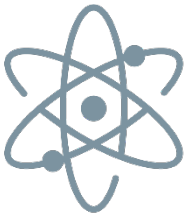
8. 截至 2025 年底，全球在运核电容量为 377.1 吉瓦（电），由 31 个成员国的 413 座反应堆提供。此外，有 23 座反应堆处于停运状态，总容量为 19.7 吉瓦（电），其中包括印度的四座反应堆（0.6 吉瓦（电））和日本的 19 座反应堆（19.0 吉瓦（电））。



9. 据报道，2025 年总发电量为 2635.2 太瓦时，较 2024 年增长 0.6%。美利坚合众国（美国）以占所报道核电总发电量的 30%（785.6 太瓦时）领跑，其次是中国和法国，分别占总发电量的 17%（438.6 太瓦时）和 14%（373.5 太瓦时）。

10. 2025 年，位于 10 个成员国的 45 座核动力堆为非电力应用提供了 2013 吉瓦时的电热当量。大部分热量（89.2%）被用于地区供热，共计 1796 吉瓦时，而工业供热用了 168 吉瓦时（8.4%）电热当量，49 吉瓦时（2.4%）被用于海水淡化。

11. 印度拉贾斯坦邦 7 号机组是一座 630 兆瓦（电）的加压重水堆，于 2025 年 3 月并网，并于 2025 年 4 月投入商业运行。成为该国第三座本土设计的在运 700 兆瓦（电）加压重水堆。中国国内设计的 HPR1000（华龙一号）— 漳州核电 2 号机组（1126 兆瓦（电））于 2025 年 11 月并网。2025 年 12 月，俄罗斯联邦库尔斯克核电厂二期的第一台革新型发电机组（配备 VVER-TOI 反应堆）与电网实现同步，容量达到 240 兆瓦（电）。

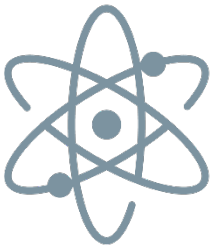


截至2025年底，
在建总容量为
77.2 吉瓦(电)
(72 座反应堆) 分布于
15 个国家。

12. 2025 年底，15 个国家共有 77.2 吉瓦（电）总容量（72 座反应堆）正在建设中。2025 年，中国开工建造了大部分新建项目，启动了九座反应堆的建设，总装机容量为 10.6 吉瓦（电）：六台 HPR1000 机组 — 金七门 1 号、宁德 6 号、三澳 3 号、石岛湾 2 号、太平岭 3 号和招远 1 号，以及三台 CAP1000 机组 —白龙 1 号、陆丰 1 号和陆丰 2 号。此外，俄罗斯联邦开始建造列宁格勒二期 4 号水水动力堆 V-492（1150 兆瓦（电））反应堆。

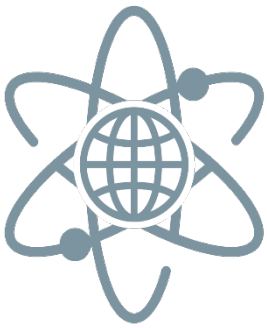
13. 2025 年期间，有 2.8 吉瓦（电）的核电容量（四座压水堆和三座轻水石墨反应堆）永久停止运行。在比利时，多伊尔 1 号机组（445 兆瓦（电））于 2025 年 2 月永久关闭，蒂昂热 1 号机组（962 兆瓦（电））于 2025 年 10 月永久关闭，多伊尔 2 号机组（445 兆瓦（电））于 2025 年 11 月永久关闭，从而完成了该国三座最老核动力堆所计划的退役。在台湾，马鞍山 2 号机组（938 兆瓦（电））在运行 40 多年后关闭。2025 年 12 月，运行了 50 年的俄罗斯联邦 Bilibino 核电厂 2 号、3 号和 4 号机组（每台 12 兆瓦（电））关闭，以待退役。

趋势



截至2025年底，全球 **71 年间累积核运行**经验超过
20 500 堆年，来自
658 座反应堆，总容量为
506.5吉瓦(电)，分布于
35 个国家。

14. 截至 2025 年底，全球 35 个国家总容量为506.5 吉瓦（电）的 658 座反应堆 71 年间累积核运行经验超过 20 500 堆年。过去十年，全球核电容量一直稳定在 2016 年的 370.2 吉瓦（电）至 2025 年的 379.9 吉瓦（电）之间。自 2016 年以来，约有 61.4 吉瓦（电）的新增容量（60 座反应堆）并入电网，其中 62%（45.5 吉瓦（电），44 座反应堆）在亚洲。2016 年至 2025 年期间，全球在运核电容量保持相对稳定，增长了 2.6%，而核发电量继续提高，增长了 6.4%，反映机群实绩改善。



全球核电容量的约 **67%** (293 座反应堆，263.7 吉瓦(电)) 已运行超过 **30** 年，
41% (190 座反应堆，163.8 吉瓦(电)) 运行超过 **40** 年。

15. 全球核电容量的约 67%（293 座反应堆，263.7 吉瓦（电））已运行超过 30 年，41%（190 座反应堆，163.8 吉瓦（电））运行超过 40 年。尽管机群老化，但核电运行实绩仍然保持了高水平：2025 年，全球负荷因子达 93%。

A.3. 新的或扩大的核电计划

状况

16. 为了促进社会经济发展，另有约 60 个国家正在探索核能或已承诺将核能纳入国家能源政策。其中，40 个国家正积极启动或推进其核电计划，包括通过努力建设必要的基础结构。

17. 28 个国家仍处于决策阶段，即这些国家正在评价核电潜力，但尚未作出最终决定。这些国家中的大多数已经完成或即将完成预可行性研究，旨在引导决策者了解核电的好处以及成功计划的要求。其他国家已经采取了初步措施，为支持未来落实而建立国家协调机制并起草战略路线图。



18. 14 个国家处于决策后阶段 — 即这些国家已经决定引进核电并且正在建设必要基础结构，或者已经签订合同并已经开始建造或很快将开始建造。这些国家有 60 多个机组在建，还有更多机组处于准备阶段。



图 A.2. 阿库尤核电厂施工现场。（照片来源：能源和自然资源部，土耳其）

19. 孟加拉国的卢普尔核电厂和土耳其的阿库尤核电厂的首台机组（均采用俄罗斯设计的 VVER-1200 反应堆）建造已接近完工。装料和试运行等初步调试活动计划于 2026 年 4 月晚些时候进行，预计在成功完成这些过程后将启动商业运行。除了这些首批核电厂项目外，土耳其正在推进其第二座和第三座核电厂的计划，孟加拉国也正考虑在卢普尔场址增加机组。同时，埃及配备四台俄罗斯设计的 VVER-1200 机组的埃尔达巴核电厂工作也在稳步推进。首台机组的关键部件，包括反应堆压力容器和蒸汽发生器，已于 2025 年底运抵现场。首台机组预计于 2028 年调试。

20. 乌兹别克斯坦致力于发展核电厂，并已在吉扎赫地区启动场址准备工作，计划建造两台各 55 兆瓦（电）的小型模块堆机组，以及两台 1000 兆瓦（电）的大型核电厂机组。沙特阿拉伯正继续与选定供应商就大型核电厂计划进行接洽，目标是在 2026 年底前完成技术和供应商选择。该国还表示有兴趣探索小型模块堆技术。波兰首座核电厂项目（包括三台西屋 AP1000 反应堆机组）的设计、采购和施工合同谈判正处于最后阶段。此外，波兰还在考虑第二座大型核电厂，并评定小型模块堆方案，以纳入通用电气维诺瓦公司的 BWRX-300 反应堆。

21. 2025 年 7 月 14 日至 18 日对斯里兰卡进行了综合核基础结构评审后续工作组访问，以评价 2022 年初次工作组访问期间所提建议的落实进展。斯里兰卡为其首座核电厂确定了五个潜在场址，并起草了一项全面的核法律，为其核电计划的制定和管理提供指导。

22. 越南选择恢复其 2016 年主要因财政拮据而暂停的核电计划。重启工作将优先开发两个大型核电厂项目。为支持这一倡议，越南于 2025 年 12 月接待了综合核基础结构评审第二阶段工作组访问。



图 A.3. 越南科技部副部长黎春定在于河内进行的综合核基础结构评审第二阶段工作组访问开幕会议上讲话，2025 年 12 月 1 日。（照片来源：科技部，越南）

23. 爱沙尼亚在其核电计划中仅考虑小型模块堆技术，爱沙尼亚费米能源公司计划部署两座通用电气维诺瓦公司的 BWRX-300 反应堆。在议会于 2024 年决定发展核电后，正通过议会正式磋商进程以颁布新的核法律。

24. 哈萨克斯坦正最终确定并签署两个大型核电厂项目的工程、采购和施工合同。建造首座核电厂的准备工作已经开始，由俄罗斯联邦的两台 VVER-1200 机组构成；第二座核电厂的技术选择已进入最后阶段，最有可能选择中国的“华龙一号”方案。初步项目的场址表征正在进行中。哈萨克斯坦已请求在 2026 年底或 2027 年初进行综合核基础结构评审第二阶段工作组访问。

25. 2024 年 12 月对菲律宾进行了综合核基础结构评审第一阶段后续工作组访问。一项总统令巩固了采用核电的国家政策决定。该国正根据一项长期可行性研究的结果，评价是重启最初建于 20 世纪 80 年代但从未投入运行的巴丹核电厂，还是启动一个新的大型核电厂项目。此外，人们对小型模块堆也表现出兴趣，特别是用于在孤立岛屿部署。

26. 2026 年 3 月对卢旺达和 2026 年 5 月对萨尔瓦多进行了综合核基础结构评审第一阶段工作组访问。此外，若干其他国家已正式请求原子能机构开展综合核基础结构评审工作组访问，以审查其核电计划的准备情况。

27. 除了首次寻求核电的国家外，一些拥有现有核电计划的国家已选择扩大装机容量。在这些国家中，目前有 60 多座新反应堆在建，另有若干项目处于规划和开发阶段。

趋势

28. 越来越多的国家正在探索将核电作为推进社会经济发展、加强能源安全和提高抵御极端天气条件的能力的一种手段。2025 年，又有九个国家加入了开展预可行性研究的行列，为引进核电的决策提供信息，拉丁美洲和南亚对此的兴趣日益浓厚。如图 A.4 所示，近年来，核电计划进入下一阶段的启动核电国家数量显著增加。

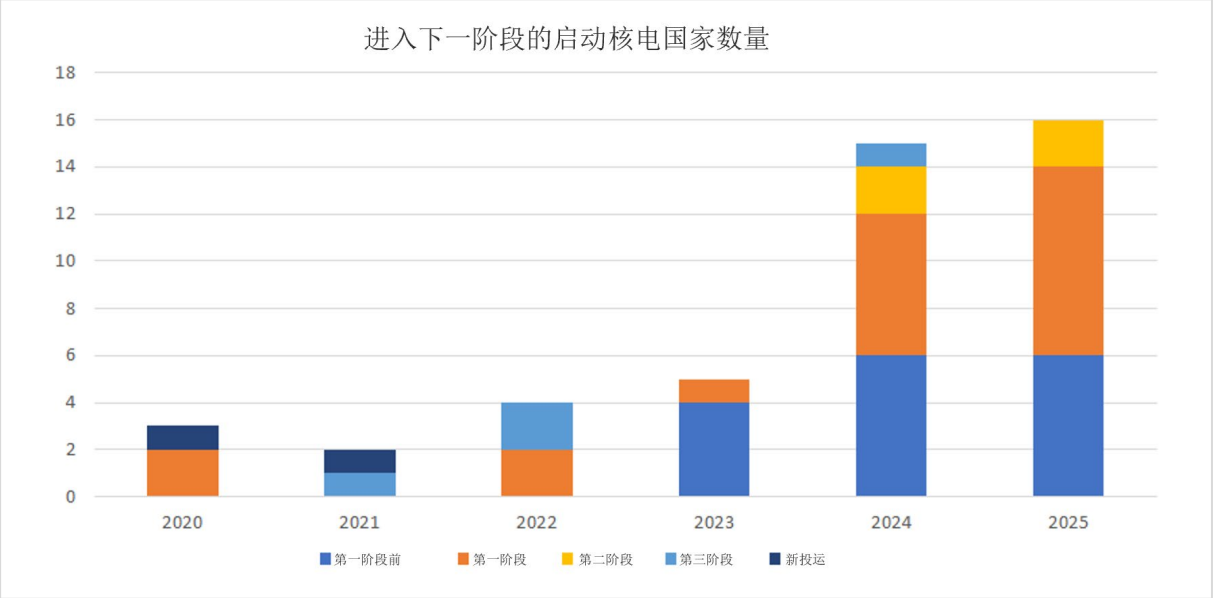


图 A.4. 各年度进入下一阶段的启动核电国家数量。
（图片来源：原子能机构）

29. 除了目前在进行预可行性评定、基础结构开发或首座核电厂建造的 42 个国家之外，还有约 20 个国家已表示有意将核电纳入其未来能源战略。为了支持这一日益扩大的兴趣，原子能机构为早期接触制定了特定援助。该倡议帮助各国建立国家协调机制，制定初步路线图并启动预可行性研究，为合理决策提供指导，从而促进进入下一阶段。

30. 若干成员国的核工业正通过扩大制造新部件的能力，积极支持全球对核电重新燃起的兴趣。许多国家已将小型模块堆纳入其技术规划，并正密切跟踪这方面的进展。对小型模块堆兴趣日益浓厚的驱动因素在于技术进步，以及此类反应堆相对于传统大型核电厂具有的明显优势，包括原始基本投资较少、适用于较小电网、非电力应用潜力以及模块化可扩展性。同时，基于革新型反应堆设计发展核电计划的成员国继续表达了对大规模核电厂技术的强烈兴趣。

A.4. 核电技术发展

状况

31. 2025 年底，《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第 30 届会议（“气候公约”缔约方大会第 30 届会议）突出强调了核能是一种关键的低碳解决方案，并重申了到 2050 年将在运核电容量增加两倍的集体目标。随着人工智能技术提供商对核能表现出明显兴趣，电力消费预测继续上调。“气候公约”缔约方大会第 30 届会议期间的会外活动强调，先进核动力堆技术不仅可以在发电方面发挥作用，还可以在工艺热及核氢生产等非电力应用方面发挥作用。这方面日益增长的兴趣突显出部署核电如何能够加强能源安全、增强电网可靠性并实现多个部门的深度脱碳。

32. 当前优先事项仍然是依靠经过验证且成熟的先进水冷堆设计，部署先进的大型核电厂用于发电。同时，人们越来越感兴趣的是小型模块堆，包括微型反应堆（微堆）以及一系列渐进型和革新型概念。小型模块堆技术不仅与发电有关，也与支持可持续能源未来的非电力应用有关。

33. 为了满足对可持续能源密集型工业过程的需要，正通过地区供热、海水淡化、工艺蒸汽输送和制氢等热电联产和非电力应用来充分利用可用热能。高温气冷堆、熔盐堆和快中子谱液态金属冷却堆等先进堆技术因其运行温度较高，因而具有较高热效率，从而特别具有吸引力。对创新应用的探索继续扩大，包括在海上用于热电联产和民用核动力推进，微堆用于离网和偏远地区，以及外层空间应用。

趋势

34. 水冷堆一直是全世界核电厂采用的主要技术。目前这一领域的趋势包括加强水冷堆安全性能，特别是通过采用非能动冷却系统来强化整体系统可靠性，以及改进燃料设计以提高燃料效率并减少废物。

35. 由于其较小的功率输出、简化设计和模块化结构，成员国越来越多地考虑将小型模块堆用于非电力用途和海上部署等多种应用。当前的开发工作侧重于提高可制造性和可建造性，同时吸纳从近期运行反馈中汲取的经验教训。

36. 快堆技术发展的重点在于通过纳入非能动安全系统和探索革新型反应堆来改进安全措施，即通过液态金属、气体和熔盐等不同冷却剂从反应堆排出热量。另一个关键重点是通过降低建造成本和强化快堆在大幅降低待最终处置的高放废物放射性毒性方面的作用，来增强其经济竞争力。

A.4.1. 先进水冷堆

状况

37. 水冷堆目前在全球商用核电机群中占主导地位。水冷堆技术致力于从安全角度加强设计，并促进当前和先进水冷堆概念的技术发展。先进水冷堆配备有能动和非能动安全系统。非能动安全系统需要的操作员干预最少，这有助于提高安全性。先进水冷堆的另一个特点是具备韧性更高的先进燃料技术、经改进的冷却方法和高效的废物管理策略。

38. 2025 年，对根据安全标准和监管要求生产的可靠能源的需求不断增加，全球更加关注提高水冷堆性能。

39. 材料科学、计算模拟和耐事故燃料研究进一步提高了反应堆效率，增强了其安全性。新近投运的水冷堆展示了非能动安全创新，其中包括中国的“华龙一号”、法国的 EPR、俄罗斯联邦的 VVER-1200、阿拉伯联合酋长国（阿联酋）的 APR1400 和美国的 AP1000。



图 A.5. 阿联酋巴拉卡核电厂 4 号机组。
（照片来源：酋长国核能公司运营部，阿联酋）

趋势

40. 原子能机构的动力堆信息系统中列有 15 个成员国的 58 座在建水冷堆，其中 55 座为压水堆，两座为沸水堆，一座为加压重水堆。



图 A.6. 欣克利角 C 第二座反应堆的穹顶吊装。
（照片来源：法国电力公司/欣克利角 C）

41. 先进水冷堆因其可靠性和安全性并越来越多地因其所纳入的非能动安全系统（这一系统增强了无需外部电力应对严重事故的能力，从而与全球安全标准保持一致）而受到重视。

42. 旨在进一步提高燃料利用率的最新发展包括先进的反应性管理方案（在运行过程中形成中子谱的概念）和混合氧化物燃料的扩大使用。一些研究还探讨在新设计中减少对可溶性硼的依赖，甚至包括实现无硼运行 — 尽管这还不是大型商用先进水冷堆的标准特性，但它已被纳入小型模块化轻水堆的设计。

43. 许多国家正在通过实现关键部件的现代化来延长现有反应堆的寿期，从而最大程度地提高既有基础结构的产出。此外，模块化建造技术正变得越来越普遍，使得能够更快和更具成本效益地部署。

44. 美国正在寻求重启已关闭的反应堆，以满足人工智能和数据中心扩展不断增长的电力需求并强化无碳能源目标。密歇根州的帕利塞兹核电站于 2022 年关闭，目前正在 15 亿美元联邦贷款担保和州政府的支持下进行重大翻新，并推进核管理委员会核准的许可证审批行动。宾夕法尼亚州的三里岛 1 号机组于 2019 年关闭，目标是在 2028 年重启，已获得 16 亿美元投资支持，并与微软签署了长期清洁能源合同。新时代能源公司与谷歌合作，计划重新调试爱荷华州 2020 年关闭的杜安·阿诺德能源中心，为谷歌不断扩大的人工智能和云数据中心提供电力。

45. 随着水冷堆适应不断发展的能源系统和气候优先事项，它们将在全球实现可靠的低碳能源解决方案方面发挥至关重要的作用。

A.4.2. 中小型反应堆或模块堆及微堆

状况

46. 各成员国越来越期待小型模块堆（包括微堆）在全球努力实现净零碳排放中发挥重要作用。这些先进核反应堆是主要的技术路线。小型模块堆采用模块化设计，每台机组的发电能力通常不超过 300 兆瓦（电），旨在为小型电网供电，取代退役的化石燃料电厂，并向偏远地区或离网地区供电。



图 A.7. 中国石岛湾球床模块式高温堆（HTR-PM）是世界上首座在运的第四代小型模块堆。（照片来源：中国华能集团）

47. 小型模块堆运行灵活，可以作为间歇性可再生能源的补充；其提供的地区供热、核能淡化海水和制氢等非电力应用，有助于构建多元化的清洁能源结构，提升其竞争力。小型模块堆具有高度模块化和标准化的特点，能够缩短建设进度、降低基建费用并提高融资可行性。

48. 中国的球床模块式高温堆（HTR-PM）属于高温气冷堆，通过两个模块提供 200 兆瓦（电），自 2023 年 12 月投入商业运行以来，已经运行了整整两年。俄罗斯联邦的“罗蒙诺索夫院士号”浮动核电厂由两台 KLT-40S 机组提供动力，现进入了第二个燃料循环。俄罗斯联邦和乌兹别克斯坦正在实施用 RITM-200N 反应堆（55 兆瓦（电））建造陆基低功率核电厂的项目，预定于下一个十年初进行调试。还有一些项目是建造配备 RITM-200S 反应堆（2 x 58 兆瓦（电））的浮动动力装置，为俄罗斯北部供应能源，预定于 2030 年进行调试。此外，配备 RITM-200M 反应堆（2 x 50 兆瓦（电））的浮动动力装置设计的出口版本的开发已经完成。此外，中国基于 125 兆瓦（电）ACP100 设计的“玲珑一号”核电厂已进入建设后期阶段，于 2025 年 9 月完成冷态功能调试。在加拿大，经监管核准后，已开始在达灵顿场址建造采用 BWRX-300 设计的首座小型模块堆，预计将于 2028 年前并网发电。总共规划了四台机组。

49. 对小型模块堆的兴趣正扩展到海上应用，包括远程操作的移动式核电厂以及石油和天然气部门的应用。小型模块堆用于民用核动力推进的潜力也同样引入注目。航运业认为小型模块堆是实现其 2050 年净零目标的可行途径。其紧凑的尺寸、先进的安全功能和模块化架构支持集成到船舶和海上设施等移动平台中。小型模块堆为推进系统和辅助系统提供可靠的低碳能源，提高了自主性，减轻了后勤负担。熔盐堆、高温气冷堆和轻水堆等技术正在成为浮动核电厂和核动力推进系统的解决方案。当前发展的重点工作是监管协调、成本优化以及将小型模块堆打造成传统化石燃料推进系统的替代方案。

50. 美国能源部正加快部署小型模块堆，以满足未来日益增长的电力需求。当前的举措以资金、许可证审批支持和示范项目为支撑，重点是第三代+和第四代小型模块堆和先进非轻水小型模块堆。主要计划包括美国能源部第三代+小型模块堆部署途径计划，该计划正在支持部署 Holtec 国际公司的 SMR-300，这是一座 300 兆瓦（电）压水堆，计划于 21 世纪 30 年代中期在密歇根州帕利塞兹场址投运，以及通用电气 Vernova Hitachi 公司的 BWRX 300，将部署在田纳西州克林奇河核场址。能源部的先进堆示范计划也在支持在怀俄明州凯默勒部署泰拉能源公司的 Natrium 反应堆，这是一种具有一体化熔盐储能装置的 345 兆瓦（电）钠冷快堆。X 能源公司的 Xe-100 是一座 80 兆瓦（电）高温气冷堆，将为陶氏公司位于德克萨斯州 Seadrift 的设施提供工业热能和电力。这些项目与 NuScale 公司的 VOYGR 和美国能源部反应堆试点计划支持的先进概念一起，旨在降低首创成本，扩大供应链并推动商业化应用。美国能源部的先进堆示范计划、反应堆试点计划及其核反应堆信息中心（包括该中心最近宣布的核能发射台）等项目有助于降低风险，支持选址并促进技术成熟，将小型模块堆和先进堆定位为美国能源未来的重要支柱。

51. 英国在其清洁能源和净零排放战略范围内中制定了明确的小型模块堆部署计划。2025 年，大英核电公司推进了其选择过程，缩小了技术选择范围，改革了选址政策，并确认了政府投资。大英核电公司在通用设计评定和公共资金的支持下，选择罗尔斯-罗伊斯小型模块堆作为其首选合作伙伴。计划于 21 世纪 30 年代初根据以工业脱碳为重点的基于标准的国家选址框架进行部署。

趋势

52. 对小型模块堆的总体兴趣继续增长，越来越多的成员国还考虑在首次部署核电时采用小型模块堆。2025 年全年，成员国对浮动核电厂和微堆及其应用的兴趣也有所增加。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 年左右实现早期部署。2025 年，法国、日本、俄罗斯联邦和美国继续开展作为小型模块堆子集的微堆技术开发活动。巴西、大韩民国和瑞典等新国家加入了这些工作，市场上的设计数量从 13 个增至 32 个。现有微堆设计旨在产生最高 20 兆瓦（电）的较低功率，为未来面向没有接入电网或电网有限且传统上由柴油发电厂供电的偏远地区社区和矿山等利基电力及地区供热市场提供最佳解决方案。微堆的特点不仅限于功率输出，还包括极少或无需现场组装、占地面积小、半自动控制系统、非能动

安全系统、长换料周期以及无需水基冷却等特性。微堆也正逐渐兴起为满足不断增长的外层空间电力需求的解决方案，提供可靠、高能量密度和可扩展的技术。

53. 越来越多的成员国正积极开展适合于岸上和近海应用的移动式浮动核电厂所用海基小型模块堆的设计和技术开发。首座浮动核电厂“罗蒙诺索夫院士号”基于 KLT-40S 压水堆设计，自 2020 年在俄罗斯联邦投入商业运行以来，已进入第二个四年运行周期。俄罗斯联邦为未来的浮动核电厂选择了 RITM-200M 设计，为陆基核电厂选择了 RITM-200N，而中国正在开发 ACP100S，这是目前在建的陆基 ACP100 反应堆的海上应用型号。采用熔盐堆技术的小型模块堆正兴起为前景广阔的海上电源。总部位于英国的核心电力公司正在制定一项以美国为依托的民用海上核计划，目标是在 21 世纪 30 年代中期将浮动核电推向市场。丹麦的一家初创公司正在设计用于浮动核电厂的 100 兆瓦（电）紧凑型熔盐堆。丹麦 Saltfoss 能源公司（前身为 Seaborg 技术公司）正在开发一种用于浮动动力驳船（200－800 兆瓦（电））的紧凑型熔盐堆，可以低压运行，产生高温热能，用于发电、海水淡化、制氢或工艺蒸汽生产。ThorCon 公司下属印度尼西亚 PT ThorCon 电力公司正在推进一个 500 兆瓦（电）钍熔盐堆（TMSR-500）项目，该项目将建在造船厂，以模块化方式部署。与此同时，荷兰王国的 Allseas 公司正计划结合紧凑设计、非能动安全系统和高温输出，为近海船舶和岸上工业场所建造基于高温气冷堆/三层各向同性燃料的 25 兆瓦（电）小型模块堆。大韩民国继续推进其紧凑型压水堆 BANDI，设计功率为 60 兆瓦（电）。

54. 这些海基小型模块堆旨在用于特定用途，包括为偏远社区、造船业和海水淡化提供分布式发电和供热，以及作为对可再生能源占比更高的混合能源系统的补充。为了便于部署，正在评定这些移动式小型模块堆项目的法律、监管和制度方面。

55. 许多小型模块堆设计采用水冷堆技术，特别是一体化压水堆和自然循环沸水堆，利用其与先进大型轻水堆设计的相似性。中国的 ACP100（玲珑一号）一体化压水堆项目正在建设阶段，目标是到 2030 年并入电网。加拿大于 2025 年 4 月颁发了建造许可证，允许在安大略省达灵顿核电厂部署四台 BWRX-300 机组。俄罗斯联邦计划在萨哈共和国（雅库特）的一个场址建造两座 RITM-200N 一体化水冷堆。此外，还计划在乌兹别克斯坦的一个场址建造两台 RITM-200N 一体化水冷堆机组。同一场址还将建造另外两台配备 VVER-1200 的大型核电厂机组。

56. 高温气冷堆技术在许多成员国得到积极研究与发展，引起了印度尼西亚、约旦和波兰等启动核电国家的兴趣。目前正在实施的项目都旨在设计和建造示范堆，并推进其商业部署。中国石岛湾球床模块式高温堆于 2023 年 12 月 6 日投入商业运行，与单台汽轮发电机系统相连的两座反应堆产生 500 兆瓦热功率，为电网提供 210 兆瓦（电）电力。日本正在推进其 30 兆瓦（热）高温工程试验堆的工作，成功完成了世界上首次棱柱形高温气冷堆的安全示范试验。俄罗斯联邦正在开发配备棱柱形燃料组件的 200 兆瓦（热）高温气冷堆反应堆机组，并正在进行关于该反应堆材料和主要设计要素的实证研究与发展工作，包括开发用于制造高温气冷堆燃料的试点工业技术。亚马逊已确认计划在西北能源公司位于华盛顿的哥伦比亚发电站部署四台基于 Xe-100 高温气冷堆

的机组（约 320 兆瓦（电））。化工生产商们也有意部署高温气冷堆，为石化和其他工业过程供热，X 能源公司与陶氏化学公司合作为美国的一家工厂提供工艺热就是证明。近期的发展表明，人们也在探索高温气冷堆技术的海洋应用，例如，全球近海能源行业的一家主要承包商目前正在寻求将高温气冷堆用于核动力推进，作为其设计、开发和部署岸上和近海高温气冷堆型小型模块堆的五年计划旗舰项目的一部分，目标是从 2030 年起进行部署。

57. 在此快速发展背景下，总干事于 2021 年设立的原子能机构小型模块堆及其应用平台（小型模块堆平台）继续协调原子能机构与小型模块堆有关的活动。小型模块堆平台由原子能机构三个部门的 17 个处提供支持。2025 年，小型模块堆平台通过举办一系列小型模块堆短训班，加强了向寻求尽早部署小型模块堆的成员国和利益相关方提供的支持，以帮助启动核电国家解决关键的技术和监管问题。这项新举措旨在提升全世界政府、监管机构和行业利益相关方对小型模块堆及其对国家能源结构潜在贡献的认识。该项目通过在肯尼亚（2025 年 5 月）、泰国（2025 年 7 月）和阿根廷（2025 年 8 月）举办的一系列专门能力建设讲习班（小型模块堆短训班）加以实施。



图 A.8. 2025 年 5 月在肯尼亚举办的小型模块堆短训班参加者正在讨论。
（照片来源：原子能机构）

58. 由于熔盐堆具有在高温和低压条件下运行的特点，因此人们对这种技术也越来越感兴趣。这些反应堆预计不仅可用于固定式陆基核电厂，还可用于浮动核电厂和民用核动力推进系统等海上用途。

A.4.3. 快堆

状况

59. 基于闭式燃料循环快中子堆的技术对于核能的可持续长期发展至关重要。快堆从天然铀中提取的能量远多于热堆，为能源需求和核废物管理提供了一种可持续的解决方案。钠冷快堆设计具有数十年的运行经验，这些经验正在通过俄罗斯联邦两座在运工业规模 BN-600 和 BN-800 反应堆和中国在运 CFR-600 混合氧化物燃料钠冷快堆（还有一座在建）得到发展。印度的 500 兆瓦（电）钠冷快堆原型快中子增殖堆正在调试中。在俄罗斯联邦，设计使用混合铀钚氮化物燃料的铅冷 BREST-OD-300 的建造正在推进，该反应堆预计将于 2028 年开始运行。该设施将验证在现场安装闭式核燃料循环系统的可行性。中国还在开发以金属燃料为燃料的 1200 兆瓦（电）CiFR-1000 反应堆。

趋势

60. 钠冷快堆仍然是快中子系统的首选方案。俄罗斯联邦除已有三座在运钠冷快堆之外，还在开发 1250 兆瓦（电）BN-1200 大型反应堆，并在建造将取代 BOR-60 的 150 兆瓦（热）多用途研究快堆。中国正在开发两种类型的钠冷快堆：以混合氧化物为燃料的 CFR-1000 和以金属为燃料的 CiFR-1000。最近以后者为重点。美国的泰拉能源公司正在建造与熔盐贮存系统结合运行的 Natrium 钠冷快堆。在法国，在“法国 2030”项目下，六家欧盟公司被选中开发快中子小型模块堆，其中三个项目基于液态金属技术（两个钠冷却，一个铅冷却），另三个基于熔盐技术。其他基于压水堆和高温堆的项目也在得到支持。最近，为了应对与天然铀供应有关的挑战，法国确认启动了一项既利用快中子动力堆又利用相关的混合氧化物燃料制造和后处理设施闭合核燃料循环的计划。

61. 虽然钠冷设计已有数十年的运行经验，但液态重金属冷却反应堆技术还不成熟。然而，因其固有安全特性和有望提高性能的事实，特别是在核废物嬗变方面，钠冷设计最近吸引了大量关注。若干成员国正在开发和建造新的铅冷快堆。俄罗斯联邦正在开发使用铀钚混合氮化物燃料的高功率铅冷快堆 BR-1200（设计功率 1255 兆瓦（电）），并计划建造一座新的 BR-1200 核电厂，作为具有厂内核燃料循环的工业电力综合体的一部分。2025 年 6 月，比利时-意大利-罗马尼亚联合的 350 兆瓦（电）EAGLES-300 铅冷快堆项目启动。该项目分三个阶段：比利时的 LEANDREA 技术示范堆、罗马尼亚的欧洲先进铅冷示范快堆和最后的欧盟 EAGLES-300 工业原型堆（见图 A.9）。



图 A.9. 签署 EAGLES-300 铅冷小型模块堆国际预许可协议。
（照片来源：原子能机构）

A.4.4. 核电的非电力应用

状况

62. 部分成员国开展核能非电力应用已有数十年，如今越来越多的其他国家也开始探索此类应用，以加强能源安全和实现脱碳目标。2025 年，有 64 座反应堆被用于非电力应用，如工业过程供热、地区供热和海水淡化。在这 64 座反应堆中，位于 10 个成员国的 45 座核动力堆 2025 年为非电力应用提供了 2013 吉瓦时的电热当量。这些热量的大部分（89.2%，即 1796 吉瓦时）用于地区供热，分布在保加利亚、中国、捷克共和国、匈牙利、罗马尼亚、俄罗斯联邦、斯洛伐克和瑞士。印度和瑞士的工业供热由 168 吉瓦时（8.4%）电热当量支持，而印度和日本的海水淡化则使用了 49 吉瓦时（2.4%）。



63. 核能及其提供工艺热的潜力继续引起成员国的高度关注。2025 年，包括石油和天然气、采矿、钢铁和石化行业公司在内的工业先进核能联盟作为一项国际协作倡议启动，旨在加快为工业应用部署先进的核热电解决方案。欧洲小型模块堆工业联盟也在评定小型模块堆作为钢铁、铝、石化、水泥、纸浆和造纸等能源密集型行业潜在热能提供者的作用，并成立了一个专门的技术工作组，力求查明在这些部门部署小型模块

堆相关的障碍和风险。俄罗斯联邦继续实施一项全面的研发计划，为建立一座拥有高温气冷堆和生产含氢产品（利用使用原子热的蒸汽-氧甲烷重整法）的化学技术装置的核电厂开发技术解决方案。美国陶氏公司和 X 能源公司提交了小型模块堆项目的施工许可证申请，旨在为工业化学品制造基地提供电力和工业蒸汽。

64. 成员国还在寻求开发其他非电力应用，包括地区供热、海水淡化和制氢。在日本，利用氦加热甲烷蒸汽重整方法的高温工程试验堆制氢项目的工作正在推进，计划于 21 世纪 30 年代投入运行。在中国，核能用于电力以外的应用继续增加，海阳核电站和石岛湾核电站正在实施或规划扩大地区供热项目，江苏徐圩、“玲珑一号”和田湾正在进行工艺供热和海水淡化项目。在俄罗斯联邦，地区供热已示范多年，包括世界上首座基于小型模块堆的浮动核电厂 —“罗蒙诺索夫院士号”。在欧洲，欧洲核能淡化海水项目正在通过制定耦合方案研究核能淡化海水的技术可行性，并通过比较不同条件下的核能淡化和化石燃料淡化方案研究其经济可行性。



图 A.10. 中国山东省海阳核电站对海阳市进行地区供热的管道。
（照片来源：原子能机构）

趋势

65. 对非电力应用的总体兴趣继续增长。为了促进这些项目的开发和部署，正在做出大量的工业和监管努力。混合和一体化能源系统特别引人注目，世界各地正在开展若干研发项目。对于利用核能为数据中心和人工智能供电的兴趣尤为重要，且越来越重要，此外还可能利用核能为这些设施提供冷却。这一领域正在进行大量协作努力和研究，参与数据中心建设的公司（包括亚马逊、微软、谷歌母公司 Alphabet 等）都显示出对核能的实在兴趣。

A.5. 人工智能应用于核电和核燃料循环

状况

66. 2025 年，人工智能对整个核能部门仍然具有吸引力，其应用已扩展至在运核电厂和核燃料循环设施。人工智能正被越来越多地整合到包括机器人、无人机和先进传感器应用在内的更广泛数字化进程中，以提升安全性、可靠性和运行效率。尽管人工智能可优化决策并减少人为失误，但在安全关键应用中，最终决策仍由合格人员负责。人工智能的作用在于辅助 — 而非取代 — 人类判断，确保安全、透明度和问责制始终处于首要地位。

趋势

67. 基于人工智能的系统越来越多地被用于预测维护、传感器校准和实时异常检测，有助于减少意外停堆，延长设备寿命。例如，美国在康斯特雷逊能源公司桃花谷核电厂和利默里克核电厂部署的机器学习工具已实现显著的费用节省和运行优化。在非破坏性检验领域，人工智能驱动的工具正在不断提升检测的速度和准确性，特别是在交通不便的地区。美国电力研究所开发了混凝土和钢结构自动缺陷检测人工智能系统，可缩短检测时间并提高可靠性。中国、法国和大韩民国等国正在积极推进将人工智能与数字孪生、物联网和先进分析相结合的智能工厂概念。在美国，能源部启动了“创世纪使命”，与美国工业界合作创建一个将高保真模拟、实验数据和运行反馈连接起来的“数字主线”，以实现更快的资格认证和更具适应性的监管途径，从而为整个燃料循环提供更快、更安全、更便宜的核能和解决方案。大韩民国提出了一项国家倡议，即将人工智能应用于从规划和设计到运行和安全监督的整个核寿期。中国正在运用人工智能优化反应堆运行，并支持该国一项更广泛战略，以满足快速发展的人工智能和数字基础设施所带来的能源需求。俄罗斯国家原子能公司使用预测分析、机器视觉、基于大规模语言模型的人工智能代理和其他工具来解决高度复杂的问题。国家原子能公司已在新沃罗涅日核电厂启动了营运者信息支持系统的试点运行。该系统使得能够根据从动力机组的数百个过程系统接收的数据做出决策，并提供从几分钟到几天不等的预测。人工智能还被用于反应堆堆芯设计和燃料管理，通过优化燃料装料模式和延长燃料循环周期，提高性能并减少废物。这些工具正被越来越多地用于先进堆和燃料循环设施的设计，通过对复杂物理过程进行人工智能模拟，可加速开发进程并提高安全裕度。美国能源部的“创世纪使命”不仅侧重于展示人工智能在核能系统中的变革作用，将其应用于反应堆设计、自主运行、预测性维护、制造和场址保障，而且还与美国高性能计算和人工智能领域的全球领先者合作，提供人工智能集成系统，以提高下一代技术的性能、经济性、安全性、许可证审批和全球可扩展性。在英国，正如核退役管理局的战略和创新计划所反映的那样，人工智能赋能的工具和数字系统也在被应用于核退役和废物管理。英国的经验表明，数字和人工智能技术能够超越电厂运行，贯穿整个核寿期，包括终态管理和环境治理，并为成员国提供有用的国际参考。

68. 美国核管理委员会、英国核监管办公室和加拿大核安全委员会等多个监管机构共同强调，在将人工智能应用于核安全系统时，可解释性、人类监督和寿期管理至关重要。这些原则正日益影响关于核领域人工智能治理的国际讨论。原子能机构与电力研究所和经合组织核能机构等伙伴合作，继续通过国际监管实验室项目和创新支持在运核电厂国际网络等倡议，为成员国提供支持。这些平台可促进知识交流和用户案例分享，并推动制定人工智能部署通用框架。

69. 在新核电厂建造的项目管理和监督工作中，人工智能也发挥着一定作用，特别是在中国，人工智能工具已被用于监测进度、管理风险和优化资源配置。在美国，“创世纪使命”将为场址表征和建造提供人工智能驱动的解决方案，促进核能和燃料循环设施的开发，使其在整个寿期都能符合监管要求和环境监测战略。与此同时，核电运营商正与大型科技公司建立伙伴关系，以将无碳核能与人工智能数据中心的能源需求相匹配。



图 A.11. 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西出席人工智能与核能国际专题讨论会开幕式，强调了人工智能和核能正在如何推动相互加速的“良性循环”，2025 年 12 月 3 日。（照片来源：原子能机构）

70. 在 2025 年 12 月举行的人工智能与核能国际专题讨论会上，与会者确认，为支持人工智能和数字基础设施的快速扩张，对可靠、清洁电力的需求不断增长，核能为满足这方面需求提供了一个强有力的解决方案。行业利益相关方还分享了如何在寿期的每个阶段将人工智能解决方案融入现有核部门，以及这些方案在加速部署新核电容量、进一步提高安全性和性能方面发挥着怎样至关重要的作用。

B. 核燃料循环

B.1. 前端

状况

71. 2016－2021 年的历史市场价格保持在相对平稳的 20－30 美元/磅八氧化三铀（53－79 美元/千克铀）。自 2021 年以来，铀现货价格上涨了约 200%，2024 年 1 月达到 100 美元/磅八氧化三铀（263 美元/千克铀）的峰值。截至 2025 年 10 月 27 日，铀现货价格为 77.50 美元/磅八氧化三铀（204 美元/千克铀），远高于 2020 年之前的水平。



图 B.1. 2001－2025 年现货价格变化（截至 2025 年 10 月）。
（图片来源：UxC 有限公司）

72. 全球核燃料供应链正面临日益严重的失衡。转化能力已经不足，预计到 2040 年将进一步落后于需求，这突出表明需要进行大量新的投资和设施扩建。虽然全球浓缩能力目前超过了需求，但在地理上仍然分布不均。

73. 燃料制造部门历来都是以商业和技术因素推动的供应商之间的激烈竞争为特征。市场仍然主要呈区域化分布，反映了反应堆技术、监管环境和客户关系的差异。近年来，地缘政治压力加快了燃料制造能力多样化和本地化的努力。现有的燃料制造能力足以满足初始堆芯和换料的需求。

趋势

74. 根据经济合作与发展组织核能机构（经合组织核能机构）和原子能机构联合编写的出版物《2024 年铀资源、生产和需求》（又称“红皮书”），到 2050 年，全球铀需求在低增长情景下预计将增至 90 045 吨铀，在高增长情景下将增至 142 631 吨铀，较当前约六万吨铀的需求量将增长 50%至 144%。铀需求的增长激起了成员国对铀生产周期综合评审服务的兴趣。这些成员国包括阿根廷和乌克兰，2025 年 11 月对阿根廷进行了铀生产周期综合评审工作组访问，乌克兰则将于 2026 年接待同样的工作组访问。



图 B.2. 在对阿根廷进行铀生产周期综合评审工作组访问期间，专家们检查 Cerro Solo 铀矿项目的钻芯，2025 年 11 月。（照片来源：原子能机构）

75. 与未来铀需求量翻番形成对比的是，预计到 2040 年，现有矿山的铀产量将下降至少 50%。为了保证未来供应，将需要开发新矿山，扩建现有矿山或延长其服务年限，以及重启闲置矿山。铀产量的增加将需要积极市场条件下的持续投资，新矿床的发现则需要持续的长期勘探工作，而新铀矿的开发从发现到投入开采平均需要 10－15 年。此外，还需要在勘探和开采/加工技术方面进行大量的及时投资，包括具有成本效益的铀提取技术，用以开采非常规矿床类型（如磷酸盐和黑色页岩矿床中的铀），如果市场价格持续上涨，其中一些类型可能会变得经济可行。

76. 相对近期的创新和发展包括加大利用人工智能来提高采矿过程中的铀回收率，完善技术数据分析，以发现新的资源和扩大现有资源。未来的铀生产可能涉及瑞典，该国宣布了一项对《环境法》和《矿物法》的法律修订草案 — 将于 2026 年 1 月 1 日生效，允许在该国进行铀提取。由于政府为确保国内供应安全采取的铀生产激励措施，预计美国的铀产量也将增加。

77. 未来十年，核燃料生产的所有核燃料相关组成部分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，并且需要开发新型燃料，包括用于小型模块堆和先进堆的燃料。

78. 当前核电机群的燃料开发活动重点主要是提升传统锆包壳二氧化铀燃料的性能和可靠性。核燃料制造的主要进展包括生产过程的自动化和精简、质量保证和质量控制系统的重大改进以及增材制造和人工智能等尖端技术的整合。未来十年，在这些领域继续取得进展对于能够近期部署大型核电厂和小型模块堆的先进燃料均至关重要。

79. 展望未来，先进燃料开发正在推动整个行业转型。新燃料技术 — 通常被称为ATF，现在更多地被理解为“先进技术燃料”，而不仅仅是“耐事故燃料”— 引入了旨在提高效率、寿命和安全性的创新材料和设计。部分燃料概念有望将延长运行周期并减少换料频率，有可能将停堆间隔期从 18 个月增至 24 个月。这一变化因其经济效益引起了电力公司的强烈兴趣。低浓铀+燃料（铀-235 丰度达 5－10%）的引入进一步支持更高的燃耗和更长的运行周期。与此同时，燃料供应商正在投资高密度燃料形式、再循环技术和延长周期运行，这表明全球正在转向更加灵活、有韧性和性能驱动的核燃料供应链。还值得注意的是使用从乏核燃料后处理过程中提取的后处理铀生产的燃料的潜力。随着地球上的铀资源耗尽，这种燃料将越来越引起核电厂营运者的兴趣。

80. 许多小型模块堆设计使用类似于大型反应堆中所使用的常规低浓铀燃料。然而，越来越多的小型模块堆开发商正在寻求革新型燃料设计，以实现更高效率、更大安全裕度和更长运行周期。高丰度低浓铀对包括小型模块堆、高温气冷堆、熔盐堆、快堆和微堆在内的下一代先进反应堆越来越重要。高丰度低浓铀燃料在反应堆设计上具有更好的反应堆性能、更高的效率和更大的灵活性。

81. 这种先进燃料需要专门的制造设施和全新的供应链。这些燃料的质量鉴定和许可证审批至关重要，特别是对基于高丰度低浓铀的燃料而言。高丰度低浓铀可以利用现有浓缩技术进行生产；然而，这就需要建立专门的重新转化和燃料制造厂、更新监管和许可证审批框架以及重新设计运输容器，以符合强化的安全和临界要求。北美、欧洲和俄罗斯联邦正在探索高丰度低浓铀计划。俄罗斯国家原子能公司“Rosatom”拥有高丰度低浓铀工业生产所需全部基础设施和以各种形式生产铀-235 丰度达 19.75%的低浓铀+和高丰度低浓铀的技术能力。在美国，能源部成立了高丰度低浓铀联合体。此外，森图斯能源公司的示范级联自 2023 年以来一直在生产小数量的高丰度低浓铀，未来有可能得到更多的浓缩支持。能源部正在进行高丰度低浓铀重新转化的采购活动，重新转化合同将于 2026 年授予。在法国，欧安诺计划开始低浓铀+的生产，并辅之以开发 DN30-X、VP-55 和 TN Eagle 等新型运输屏蔽容器。与此同时，铀浓缩公司正在英国建造一座高丰度低浓铀生产设施，其厂房将在 2031 年之前开始生产，同时还在美国扩大浓缩能力。

B.2. 后端

状况

82. 全球贮存乏核燃料存量约为 32 万吨重金属。核电厂（如英国的希舍姆 1 号和哈特尔浦核电厂、亚美尼亚的亚美尼亚核电厂、加拿大的布鲁斯和达灵顿核电厂以及俄罗斯联邦的别洛雅尔斯克和罗斯托夫核电厂）的延寿导致卸出乏核燃料的数量增加。



图 B.3. 巴西安格拉核电厂乏核燃料干法贮存设施。（照片来源：核电厂管理公司）

83. 许多国家继续将所贮存乏核燃料从湿法贮存转为干法贮存，巴西安格拉核电厂 1 号机组就是最近的一个例子，目的是释放空间并支持核电厂延寿运行。乏核燃料干法贮存系统继续扩大（例如，在亚美尼亚核电厂和西班牙圣玛丽亚-德加罗纳核电厂）。新的干法贮存设施已获批准（如在埃及埃尔达巴核电厂，运行尚未开始）或已开工建设（如在中国台湾已关闭的国圣核电厂）。Holtec 国际公司取消了在美国新墨西哥州建立 HI-STORE 乏核燃料贮存设施的计划。东京电力公司成功从福岛第一核电站 2 号机组回收了燃料碎片样本，样本的表征对于制定安全有效的全面清除方法、确定管理路线和探索贮存系统的适宜性至关重要。

84. 许多乏核燃料和高放废物运输作业安全完成。加拿大核实验室提前完成了 3000 多个乏燃料棒束（共计 62.7 吨铀）从魁北克根蒂莱 1 号机组场址到安大略省乔克河实验室的运输，路程超过 500 千米。爱达荷州和美国能源部批准了对“1995 年和解协议”

的针对性豁免，使爱达荷国家实验室能够接收用于研究的高燃耗核燃料屏蔽容器，从而将促进核电厂干法乏燃料贮存许可证的更新。七个玻璃固化高放废物屏蔽容器通过铁路和海运从英国塞拉菲尔德场址运往德国的伊萨临时贮存设施。

85. 对乏核燃料再循环和闭式燃料循环的兴趣有所增加。奥克洛公司宣布计划在美国田纳西州橡树岭设计、建造和运营一座燃料再循环厂，以期将乏核燃料加工成金属燃料，供奥克洛奥极光快堆使用。俄罗斯联邦热列兹诺戈尔斯克采矿和化学联合公司的实验和示范中心正进入第二阶段，从实验运行过渡到工业规模的后处理，达到设计能力后，每年将能够处理多达 200 吨乏核燃料重金属。在俄罗斯联邦谢韦尔斯克的西伯利亚化学联合集团建造了一座为 BREST-OD-300 反应堆制造铀钚混合氮化物燃料的工厂，目前正处于试运行阶段。芝诺电力公司和欧安诺合作，使用镅-241（一种从阿格回收设施后处理的核废物中回收的同位素）为太空电池供电。Moltex 能源公司在废物转为稳定盐的乏核燃料再循环工艺上取得了进展，该工艺可将坎杜堆乏燃料转化为熔盐堆燃料，已用来自加拿大商用反应堆的乏燃料棒束通过加拿大核实验室开展的热室实验验证了该工艺，并启动了与加拿大核安全委员会的许可证预审批磋商。日本电力公司联合会将向法国欧安诺发送 200 吨乏核燃料，作为法国-日本混合氧化物乏燃料后处理示范研发的混合氧化物燃料再循环研究的一部分，以期深化对混合氧化物后处理的技术认识和优化未来的商业运行。

趋势

86. 乏核燃料从湿法贮存转向干法贮存的趋势仍在持续。核电厂正在增加干法贮存容量，以适应不断增加的乏燃料存量和不断延长的贮存期限。一些核电厂在反应堆开始运行和产生乏燃料之前，正在进行干法乏燃料贮存库的许可证审批和建造。由于正在超出原设计基准延长干法贮存设施的运行寿期，了解乏核燃料及贮存结构、系统和部件的性能和降质/老化机制仍然是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的关键。

87. 对乏燃料再循环兴趣有所增加，以期满足未来的核燃料需求，并通过当前采用的技术和未来将在工业上实施的先进技术加强核电的可持续性。如今，从乏核燃料中提取的铀正成功用作法国、荷兰王国和俄罗斯联邦轻水堆的燃料，从而大大节省了天然铀。新型反应堆的引入将随之带来一系列新的核燃料循环方案和相关协同作用。另一个重要趋势是越来越关注将乏燃料中的元素再循环用于除再循环燃料制造之外的应用（例如，用于提取放射性同位素用于医学、工业、研究和空间应用）。

88. 全球核材料运输作业继续安全无事故地进行。运输的原由包括研究、回收、高放废物后处理后的返回、释放设施空间以便继续运行，以及将乏燃料库存从多个场址整合到一个场址。

89. 通过联合研究活动（如原子能机构协调研究项目和协作中心、国际共享研发平台和资助项目）开展的国际合作和伙伴关系是应对先进堆（如小型模块堆/先进模块堆和第四代反应堆）燃料循环开发和实施挑战的关键，这些循环需要对研发和基础设施发展进行投资，以便在工业部署之前验证其安全性。

C. 退役、环境治理和放射性废物管理

C.1. 退役

状况

90. 正在进行退役的动力堆和研究堆数量持续增加，且永久关闭不久后立即拆除的趋势日益明显。推动这一转变的因素是政府政策、通过在安全关闭期间最大限度地减少设施维护来降低成本压力，以及对延迟拆除和废物管理成本不断攀升的担忧。

91. 退役对于其他核相关设施同样至关重要，例如燃料循环厂、工业和医疗放射设施、粒子加速器和遗留场址。对受事故影响的设施退役应予以特别关注，此类退役需要量身定制的方案和技术。



92. 保加利亚、加拿大、法国、德国、意大利、日本、立陶宛、俄罗斯联邦、斯洛伐克、西班牙、瑞典、英国和美国等各国核设施退役正在稳步推进。法国、德国和英国等已采取逐步淘汰核电政策或加速拆除战略的国家发放了越来越多的退役许可证。

93. 截至 2025 年底，21 个成员国的 218 座动力堆被关闭，以待退役，德国、日本、瑞士和美国的 23 台机组完全退役。比利时、法国、斯洛伐克、西班牙和美国的先进退役项目已接近完成。中国、大韩民国和巴基斯坦等刚开始开展退役工作的国家，将重点更多地集中在安全和技术方面，而孟加拉国、埃及和土耳其等启动核电国家正在应对成本核算和资金筹措方面的挑战。



图 C.1. 滨冈核电厂 2 号机组反应堆压力容器上盖的带锯切割工艺。（照片来源：日本中部电力公司）

94. 退役项目日益重视循环经济原则，其重点是通过高效再利用材料、减少废物和将场址重新用于未来的工业用途来实现可持续性。落实这些原则需要政策制定者、监管机构和地方社区之间的协同合作，而各方对核场址的未来规划可能持有不同看法。



图 C.2. 2025 年 10 月举办的“建设退役能力和提升退役技能：核退役管理试点短训班”。（照片来源：原子能机构）

95. 由于小型模块堆在能源结构中的占比预计将上升，监管机构、行业利益相关方和研究机构之间的协作对于确保安全、高效和对环境负责的退役过程至关重要。小型模块堆占地面积小，设计简化，相较于大型反应堆，有望缩短退役时间并减少废物量。然而，它们需要新的监管框架来应对其特有的退役挑战。对小型模块堆退役的关注演变，为创新提供了机会，尤其是在强调延长寿命、易于再制造和材料再利用的设计方面。

96. 鉴于这些发展，预计未来几年核退役局面将不断演进，而持续的国际合作、技能发展和技术进步将成为管理不同类型反应堆的多样化退役需求的关键。

趋势

97. 在大型核电厂退役项目中，近期的一项发展是涌现了由多家公司联合组成的整合多方专门知识的专业联盟。这些联盟在固定预算内管理复杂的退役任务，采用经过验证的标准化方案并承担项目风险，从而提高效率，加强成本控制。

98. 退役技术的部署也在持续进步，越来越多地依赖无人机和机器人等遥控操作和自主工具，用于去污、部件分割、测量、材料处理和自动化废物管理。

99. 展望未来，先进数字技术有望在核设施退役方面发挥关键作用，使核设施设计者、营运者、监管机构和未来利益相关方更便捷地利用现行项目带来的经验教训。

100. 对人工智能的更广泛利用将进一步推动核退役领域的数字化进程。增强版现实与虚拟现实的结合 — 将虚拟信息叠加至真实退役环境 — 将为营运者在执行复杂任务期间提供实时指导和关键数据。

101. 其他创新包括用于扫描结构和辐射状况的移动机器人，以及用于进入高剂量区域的遥控操作工具，这些将进一步提升安全性和操作效率。

C.2. 环境治理和天然存在的放射性物质管理

状况

环境治理

102. 截至 2025 年，全球在放射性污染场址的治理方面已取得重大进展，多个高风险区域正在积极开展退役和清理工作。切尔诺贝利、福岛以及欧洲和北美遗留核设施等关键场址正得到积极管理，重点是辐射封隔、废物清除和生态系统恢复。机器人、人工智能和无人机等技术在治理任务中的应用日益广泛，有效提升了安全性、效率和精确度。然而，挑战依然存在，特别是在污染情况复杂或存在历史遗留问题的区域，需要持续的技术创新和资金投入。尽管取得了进展，但鉴于清理工作的长期性，一些场址的监测和管理仍需持续数十年甚至数百年。

天然存在的放射性物质管理

103. 截至 2025 年，采矿、石油和天然气等行业中天然存在的放射性物质管理已受到更严格的监管，监测、废物管理和辐射防护规程均得到强化。然而，尽管取得了这些改进，在废物处置、污染控制和确保从业人员安全方面仍存在挑战。天然存在的放射性物质实践的全球标准化持续推进，但地区差异依然存在。

趋势

环境治理

104. 环境治理领域的新趋势表明，应用循环经济原则以减少废物、提高资源效率等可持续实践得到了优先考虑。遥感、机器学习和机器人学等技术发挥着至关重要的作用，能够实现更准确的场址表征、加强监测和进行更安全的废物管理。这些方案与包括原子能机构等组织倡导的框架在内的国际框架一致，鼓励在世界各地受污染场址采用可持续解决方案。

105. 复杂核场址治理工作正在推进，但对工作进度以及投资是否得到充分优化的关切依然存在。对于拥有前铀矿开采场址的国家，特别是资源有限的国家而言，为焕发生产“第二春”探寻创新解决方案至关重要。从场址表征到治理解决方案的先进技术的持续研究仍然不可或缺，这对于提升尾矿的价值尤为重要。

106. 展望未来，全球仍将重点关注可持续治理战略，以最大限度地减少对人体健康和环境的长期风险。各国政府、行业利益相关方和国际组织之间的协作对于制定符合公众期望的解决方案和建立社会对核能的信心至关重要。

天然存在的放射性物质管理

107. 管理天然存在的放射性物质仍然是一项挑战，特别是在近海石油和天然气平台退役方面。有效的管理需要整体方案，包括建立全面的残留物库存、采用具有成本效益的处置解决方案和通过循环经济实践实现残留物再利用。这些战略有助于实现可持续的及时退役，并减少环境影响。监测和废物处理技术的创新同样至关重要，同时需要开展全球合作，以分享最佳实践，确保对天然存在的放射性物质进行安全管理。

C.3. 放射性废物管理

状况

108. 各成员国正通过基础结构发展、先进表征、监管现代化和国际合作，积极加强放射性废物管理，以确保在多样化核背景下的安全性、合规性和环境保护。

109. 作为克尔什科核电厂的共同所有者，克罗地亚正在推进在切尔克佐瓦茨建造放射性废物管理中心的工作，以处置研究机构废物和克尔什科一半的中低放废物，预计将于 2026 年开始运营。在立陶宛，迈希加拉放射性废物贮存设施的固体废物已被转移到伊格纳林纳核电厂进行处理，该场址计划于 2026 年初无条件开放使用。

110. 遗留废物的表征和管理方面正取得重大进展。摩尔多瓦共和国正在制定其遗留废物管理计划，重点推进遗留废物回收、增强监管和技术能力，以及为长期可持续处置做准备，国际合作在其中发挥着核心作用。

111. 2025 年 7 月发布的核退役管理局集团战略草案概述了清理英国最老核场址的长期方案，重点是综合废物管理、可持续性和技术创新。最终确定的战略于 2026 年 3 月生效，强调使用人工智能、先进机器人技术和数字工具来提高安全性和效率。

112. 乌克兰通过了关于 2025－2032 年国家放射性废物管理目标环境计划的第 12356 号法律，其中概述了贮存设施的现代化改造、废物核算系统的完善和新处置基础结构的建造。对切尔诺贝利隔离区内遗留废物的全面表征，包括放射性核素分析、物理化学评定和地面穿透雷达调查，有助于开展治理工作和将废物转移到工程化处置场址，这是全世界最广泛的遗留管理计划之一。

113. 比利时核研究中心在解控最优化和可持续废物管理方面展示出领导力，整合了先进测量技术、贝叶斯空间建模以及反应堆屏蔽和金属回收的大规模应用，同时为遗留废物的表征和管理提供支持。

114. 极低放废物和低放废物的近地表处置在各大洲持续广泛采用，并越来越多地纳入国家放射性废物管理战略。

115. 在保加利亚，位于科兹洛杜伊附近的国家中低放放射性废物处置库项目第一阶段已于 2024 年完成，该设施正处于调试前测试阶段。据保加利亚核管理机构称，预计将在未来两年内进行全面调试。斯洛文尼亚正在推进威尔比纳竖井式处置设施的建造。挖掘工作已成功达到地表以下 25 米的深度，标志着该设施发展的一个重要里程碑。

116. 比利时采用基于伙伴关系的设施选址方案，积极推动当地社区参与决策过程。通过这一模式最终选定德塞尔作为未来处置设施的场址，该设施将由 34 个工程模块组成，已于 2025 年 9 月 18 日正式开工建设。该项目包括一个强大的研发计划、用于监测结构完整性和渗水情况的机器人系统，以及无硅混凝土和碳基复合材料等先进材料的研发。该设施计划于 2030 年启动运行。

117. 在俄罗斯联邦，在谢韦尔斯克（托木斯克州）和奥焦尔斯克（车里雅宾斯克州）完成了固体放射性废物近地表处置设施建设的第一阶段。这些设施将于 2026 年调试，剩余阶段将在 2035 年之前分阶段完成。



图 C.3. 比利时德塞尔未来处置设施示意图。(照片来源：比利时放射性废物和浓缩易裂变材料管理局)

趋势

118. 五个国家 — 加拿大、芬兰、法国、瑞典和瑞士 — 的国家计划在高放废物处置方面非常先进，极大地增强了全球对地质处置计划能够取得成功的信心。加拿大和瑞士都选定了场址。芬兰正在进行运行许可证的准备工作，瑞典的地质处置设施正在建设中。在法国，随着法国核安全和辐射防护管理局对建造许可证申请发表了有利意见，国家放射性废物管理机构用于贮存高中放长寿命放射性废物的地质贮存库的开发工作取得了显著进展。

119. 在标准化和协调统一方面，许多国家目前正在将废物分类和验收标准与国际标准保持一致。埃及在中低放废物预处置程序方面遵循原子能机构安全标准。葡萄牙更新了其监管框架，采用了与国际接轨的废物分类体系（极短寿命废物、极低放废物、低放废物、中放废物），以符合欧盟理事会第 2011/70/Euratom 号和第 2013/59/Euratom 号指令的要求。约旦研究与培训反应堆的放射性废物处理设施遵循与原子能机构安全标准相一致的废物接受要求。

120. 另一个新出现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，以及废物再利用和回收。这个方案可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。这一趋势的显著体现是法国电力公司在管道系统和反应堆内部构件中使用低钴钢，以降低长寿命钴-60 的活化风险。此外，西屋压水堆对废树脂、过滤器和放射源采取了严格的库存和追踪系统，以避免交叉污染。比利时的“限制退役和拆除过程中废物量的金属熔炼”（SMELD）项目侧重于金属熔炼和去污技术，以便能够安全循环利用退役核设施中的金属材料。该项目由比利时核研究中

心牵头，与冶金研究中心（CRM 集团）合作，旨在开发能够有效去除放射性污染物的先进熔炼技术，从而推动核部门的循环经济发展。

121. 工作重点是通过缩短表征时间和优化大规模废物处理流程来最大限度地提高效率。在美国萨凡纳河场址，使用机械臂和γ射线扫描对遗留废物桶进行了自动化表征。在法国阿格，自动化γ能谱测定法和废物处理系统简化了后处理残留物的表征流程。

122. 现代项目注重运用数字技术和先进废物表征技术。在意大利 Nucleco 公司，先进的程序融合了一系列创新技术，包括分段式γ扫描、断层γ扫描、归一化鬼成像γ射线成像仪和 X 射线照相法。这些技术可用于评定废物桶、外包装和复杂的废物体，有助于更准确和更高效地进行废物表征。在大韩民国月城核电厂，机器人系统和非破坏性分析技术被应用于遗留中低放废物表征。

123. 各成员国对在近地表处置设施中处置弃用密封放射源的可行性表现出浓厚兴趣，将其作为此类放射源管理的一种可行方案，并借鉴了中国、法国、英国和美国的经验。

124. 根据原子能机构“全球镭-226 管理倡议”，超过 85 个参与成员国有机会将弃用镭源转移到一些受援国，通过回收利用制成拯救生命的医用放射性同位素。截至 2025 年，已成功完成 14 批次运输，起运自克罗地亚、危地马拉和菲律宾等国。预计 2026 年还将另外进行 10 批次运输（来自埃塞俄比亚、格鲁吉亚、希腊、印度尼西亚、马来西亚和摩洛哥）。各成员国继续请求为移除弃用的一类源和二类源提供技术支持，此类工作往往涉及复杂的存量统计。2025 年，从阿尔及利亚、喀麦隆、摩洛哥和乌干达成功移除共计 10 个弃用高活度源。



图 C.4. 原子能机构承包商完成 B（U）型货包的封装操作，用于运输从乌干达坎帕拉一家医院移除的二类弃用密封放射源。
（照片来源：γ-服务再循环有限公司）



图 C.5. 在菲律宾回收此前已进行水泥固化处理的遗留镭-226 放射源。
（照片来源：菲律宾核研究所）

D. 研究堆

状况

125. 截至 2025 年底，共有 235 座在运研究堆，包括临时关闭的研究堆，分布在 54 个国家。这些研究堆继续产生中子束，为科学、医学和工业提供基本辐照服务，并支持各项教育和培训计划。附件中的表 E-1 总结了研究堆的主要应用。

126. 2025 年，荷兰王国结束筹备工作，开始建造新的 25 兆瓦的 PALLAS 研究堆，重点聚焦医用放射性同位素生产。

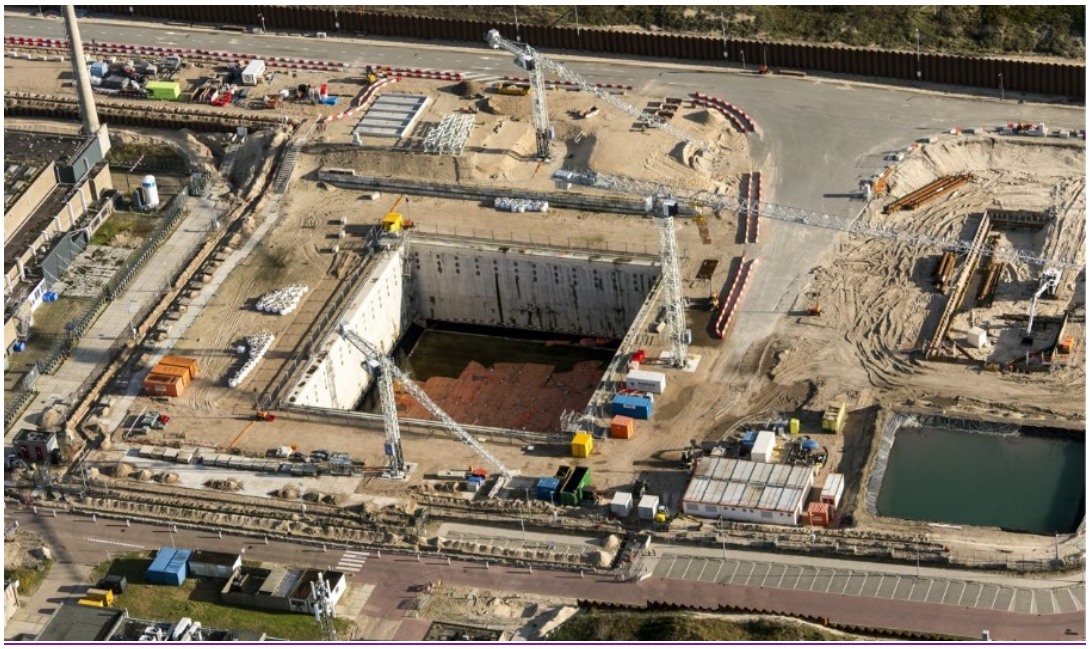


图 D.1. 荷兰王国 PALLAS 研究堆建造工程，2025 年 11 月。
（照片来源：核研究与咨询集团 PALLAS）

127. 法国在 100 兆瓦（热）儒勒·霍洛维茨反应堆的建造方面取得了重大进展，完成了50%以上的安装工作。该反应堆将进行燃料和材料辐照，并生产放射性同位素。



图 D.2. 法国儒勒·霍洛维茨反应堆的建造工程，2026 年。
（照片来源：法国可替代能源和原子能委员会）

128. 在报告所涉期间，正在建造的新研究堆有 12 座，分布在 11 个国家：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、荷兰王国、俄罗斯联邦、沙特阿拉伯和乌克兰。

129. 与此同时，12 个成员国制定了正式的新研究堆建造计划：孟加拉国、白罗斯、比利时、中国、印度、尼日利亚、南非、塔吉克斯坦、泰国、美国、越南和赞比亚。此外，还有大量国家正在考虑建立研究堆项目，其中包括阿塞拜疆、埃塞俄比亚、伊拉克、肯尼亚、马来西亚、蒙古、缅甸、尼日尔、卢旺达、塞内加尔、苏丹、突尼斯、土耳其、乌干达、英国、坦桑尼亚联合共和国和津巴布韦。



130. 国际社会继续努力尽量减少民用部门的高浓铀使用。最近的成就当属日本京都大学临界装置从使用高浓铀燃料转向使用低浓铀燃料，该装置是一座多堆芯临界设施，可用于研究、教育和培训。迄今为止，共有 111 座研究堆和医用同位素生产设施已从使用高浓铀转为使用低浓铀，或已确认正在关闭，有超过 6930 千克高浓铀从 48 个国家（和中国台湾）返还原产国或以其他方式得到处置。



图 D.3. 加纳原子能委员会在加纳阿克拉举办了关于高浓铀微型中子源反应堆堆芯卸料和包装的设备展示和国际培训班，2025 年 11 月。
（照片来源：原子能机构）

趋势

131. 全球在运研究堆数量于 1975 年左右达到峰值后便开始下降，自 2020 年以来，已稳定在 233 座至 235 座之间。随着对医用放射性同位素、新先进堆设计所需新燃料和材料测试以及核教育和培训的需求不断增长，预计研究堆数量在不久的将来会适度增长。特别是，目前在建的 12 座研究堆中，有八座旨在实现医用放射性同位素的工业规模生产。这些研究堆多为轻水冷却反应堆，紧凑堆芯的外围是大面积的重水或铍反射层，可在更大辐照空间内提供高热中子通量，从而提高放射性同位素生产能力。

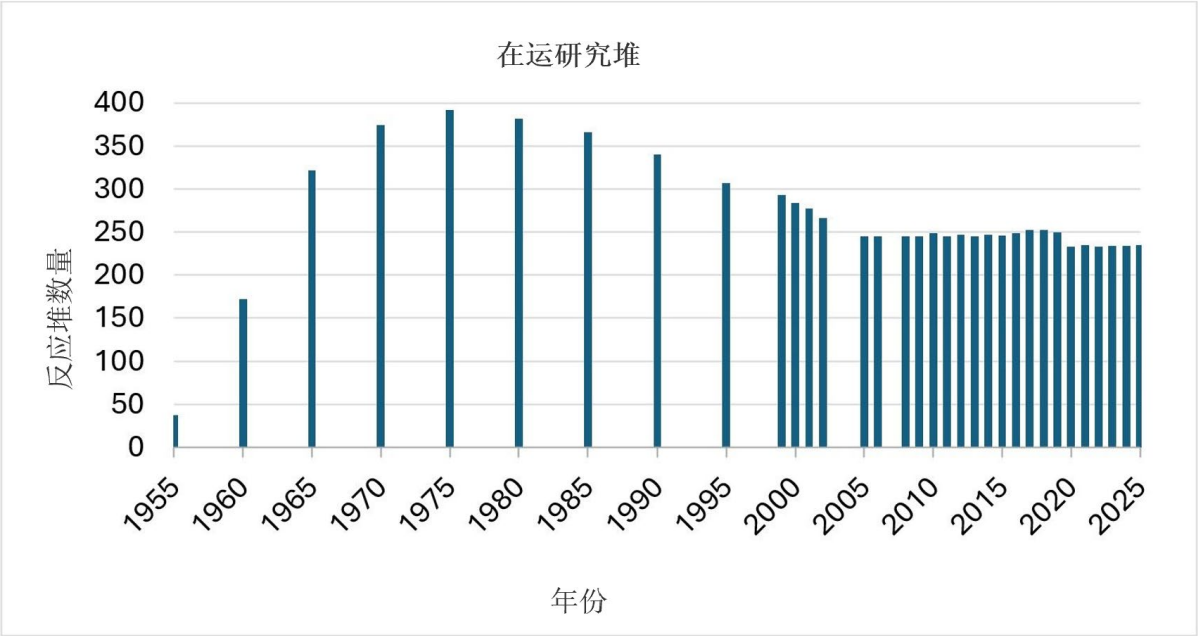


图 D.4. 1955－2025 年全球在运研究堆数量。
（图片来源：原子能机构研究堆数据库、“核技术评论”）

132. 截至 2025 年底，运行超过 50 年的研究堆占比达 54%。这些反应堆的持续安全运行需通过设施老化管理、整修和现代化改造计划提供支撑。

133. 研究堆界正在探索各种替代技术，用于管理研究堆乏燃料及其他研究相关裂变材料，这些技术不依赖传统的后处理工艺，尤其适用于存量较少的情况。当前考虑的方案包括各种热处理和化学处理方法，以及在惰性基体中进行固化，以形成适合处置的稳定废物形态。

E. 聚变能科学研究与技术发展

状况

134. 对聚变能的探索在多条路径上持续推进，公共和私人倡议都取得了稳步进展，投入了更多资金。国际原子能机构《2025 年世界聚变展望》报告显示，自 2010 年以来，私人聚变投资累计超过 100 亿美元，2024－2025 年从风险投资、公司和主权来源筹得的资金创下了历史纪录。



图 E.1. 原子能机构《世界聚变展望》旨在成为聚变能权威资料和最新情况的全球参考。本出版物第三期介绍了聚变能领域近期的一些成就，概述了全球目前处于不同开发阶段的数十个聚变电厂概念中的一些概念，强调了全球在聚变能发展方面所做的努力，并首次讨论了全球聚变能部署前景。它还特别关注了高温超导体及其在聚变能商业化中的潜在作用。（照片来源：原子能机构）

135. 截至 2025 年底，有 150 多座聚变实验设施正在运行、正在建设或规划中，而在加拿大、中国、德国、以色列、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、瑞典、英国和美国，还有 30 多个处于不同概念开发阶段的聚变电厂设计。目标完成日期从 21 世纪 20 年代末到 21 世纪 50 年代中期不等。这些项目由政府、私营公司和公私联合体推动。

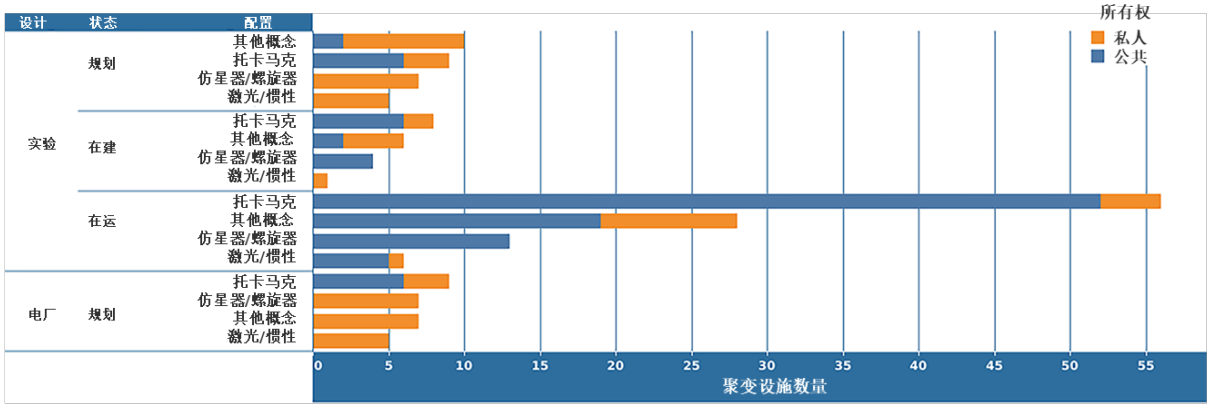


图 E.2. 截至 2025 年 12 月，有 150 多座实验聚变设施在运行、建设或已规划，近 30 个聚变电厂设计处于不同的概念开发阶段。
（图片来源：原子能机构聚变设施数据库）

136. 位于法国的国际热核实验堆项目目前处于托卡马克组装阶段，正在稳步推进，主要部件（包括真空室扇区现场接头和热屏蔽冷却管）已基本完成必要维修，所有主要磁体的制造工作均已完成。2025 年 4 月中旬安装了第一个真空室扇区模块，随后于 2025 年 6 月中旬安装了第二个模块 — 比原计划提前了六周，2025 年 11 月安装了第三个模块，2026 年 1 月安装了第四个模块。将构成国际热核实验堆托卡马克环向等离子体室的所有九个真空室扇区预计于 2027 年安装完毕。

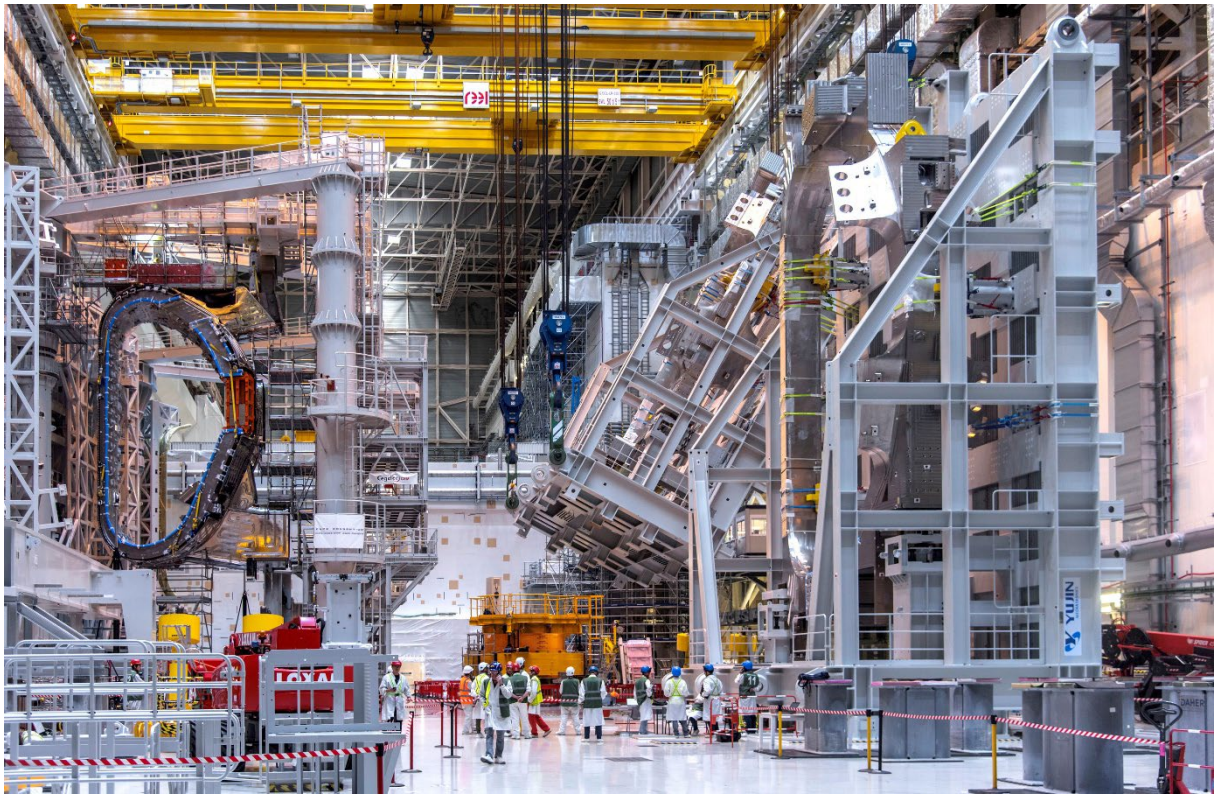


图 E.3. 无论对于真空室扇区还是环向场线圈，翻转活动都属于在国际热核实验堆组装大厅开展的最引人注目的作业之列。图中，16 号环向场线圈（由日本提供）（右）由平放位置起吊并翻转为垂直状态，然后套入分部组装工具臂（左），与 5 号真空室扇区配对组装。（照片来源：国际热核实验堆组织）

137. 低温设备已经实现了氦液化，目前正在建造一座测试设施，以对一些磁体进行安装前测试。电子回旋加速器加热系统已开始安装回旋振荡管，偏滤器正在制造中。

138. 在 2024 年和 2025 年，国际热核实验堆项目的进度实绩指数保持在 1.02，这意味着规划里程碑的实现超过了 100%，这是国际热核实验堆迄今为止的最强劲实绩。

139. 原子能机构世界聚变能小组第二次部长级会议于 10 月 14 日在中国成都举行，这是在加强聚变能高级别合作方面的一个重要里程碑。部长和高级代表们重申了公共计划与快速增长的私营聚变部门之间信息共享和协调的价值。会议提供了一个平台，用于评估全球进展，就时间节点与准备情况统一预期，并加强国际协作在支持全球聚变能协调发展方面的作用。



图 E.4. 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西和法国可替代能源和原子能委员会主席安妮-伊莎贝尔·艾蒂安弗在托卡马克坑内听取国际热核实验堆总干事彼得罗·巴拉巴斯基的说明。(照片来源：国际热核实验堆组织)

140. 据报告，全球领先的聚变研究设施取得了重大进展 [1]，包括 LM26（加拿大）、BEST、CRAFT、EAST 和 HL-3（中国）、WEST（法国）、AUG 和 W7-X（德国）、LHD（日本）、JT-60SA（日本/欧洲）、KTM（哈萨克斯坦）、Globus-M2 和 T-15MD（俄罗斯联邦）、SMART 和 TJ-II（西班牙）、K-STAR（大韩民国）、TCV（瑞士）、MAST-U、JET 和 ST40 退役（英国），以及 C2-W、Century、DIII-D、WHAM 和 SPARC（美国）。这些设施共同实现了创纪录的等离子体温度和持续时间，改进了等离子体控制，增强了材料性能，并在磁铁、加热、冷却和动力排气系统方面展现了创新。

141. 2025－2026 年，英国通过强有力而持续的政府行动加强了其在聚变能方面上的立场，承诺在五年内提供超过 25 亿英镑，核心是推进原型聚变能。英国原子能管理局通过“2025 年聚变材料路线图”加强了商业聚变的技术基础。私营部门势头不减，托卡马克能源公司正在推进高温超导磁体系统，而第一光聚变公司则勾勒了实现高增益、低成本惯性聚变的路径。

---

[1] 详见原子能机构总干事在中国成都举行的世界聚变能源集团第二次部长级会议暨国际原子能机构第 30 届聚变能大会联合开幕式上发布的原子能机构《2025 年世界聚变展望》。



图 E.5. 原子能机构世界聚变能源集团第二次部长级合影。
2025 年 10 月 14 日，中国成都。（照片来源：中国国家原子能机构）

142. 在美国国家点火装置，惯性约束聚变能继续取得进步，并进行了多次点火示范。2025 年 4 月，2.08 兆焦激光能实现了 8.6 兆焦的创纪录聚变产额，即靶增益大于 4。专家估计，对于净电力需求为零的惯性聚变能试验设施，在 10 赫兹重复率下需要增益 15。

143. 在法国可替代能源和原子能委员会的磁聚变研究所，WEST 托卡马克维持了 22 分钟的等离子体放电，这相当于注入 2.6 吉焦的能量，是长脉冲运行的重大进步。这一活动还标志着泰雷兹集团为等离子体加热开发的首台回旋振荡管投入使用。

趋势

144. 在清洁能源竞争日益激烈、私人投资规模空前和国家计划雄心勃勃的推动下，曾经概念式的科学构想现正成为日益可期的行业机遇。这些发展导致 2023 年成立了原子能机构世界聚变能源集团。

145. 国际原子能机构《2025 年世界聚变展望》详尽介绍了这一转变的各种迹象，记录了各国聚变战略的纷纷制定、公私合作模式和私营部门倡议作用的日益增强，以及旨在促进部署的政策以及法律和监管框架的同步发展。

146. 最新势头已将聚变从大体集中化的公共事业转变为一个由国家倡议、私营公司和混合财团组成的多元化生态系统，加快了进展，同时也要求在研发优先事项方面更加一致。

147. 约束物理学、动力排气、材料、氚增殖和系统工程的不同方案纷纷涌现，这反映了对于降低成本、风险管理和时间表的多种策略。一些参与者追求紧凑型概念，而另一些参与者则专注于大型设施。这些技术路径如果协调不当，就有可能使工作重复，并可能留下关键的技术空白得不到解决。

148. 共同的系统性挑战依然存在，例如，寻找在电厂规模条件下（材料、部件、燃料、机器人、成本等）下维持实绩的稳健解决方案。这些挑战凸显了持续协调研发的重要性。巩固从国际热核实验堆等国际项目中汲取的经验教训，投资专门的中子和材料测试设施，以及保持全球合作，同时保护知识产权，对于弥合科学进步和工程准备就绪之间的差距至关重要。

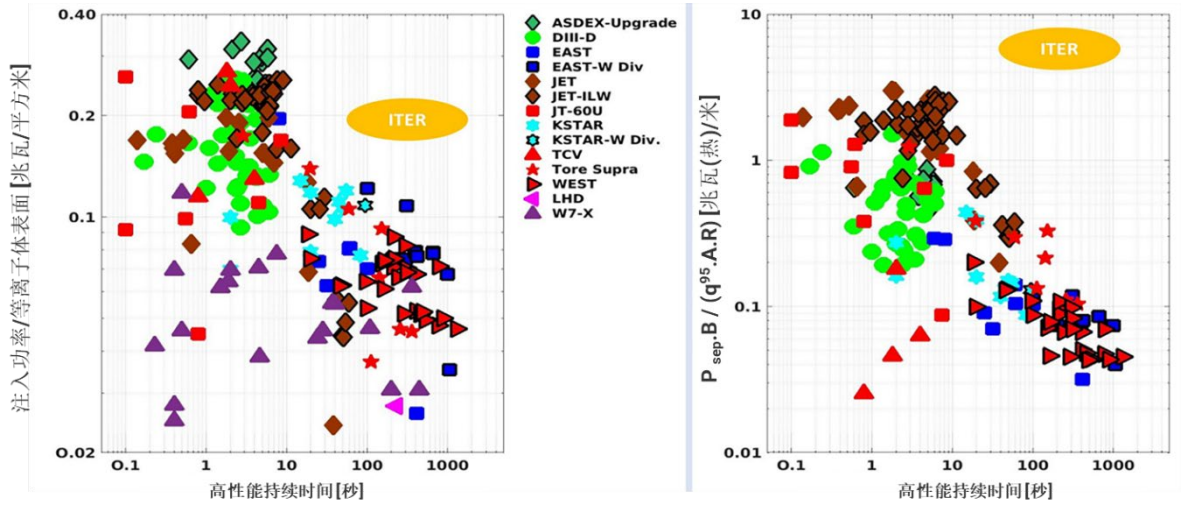


图 E.6. 聚变设施的排热性能，以单位表面积等离子体加热功率（P/S）和偏滤器品质因数表示。（Psep B/（q95 A R））。（图片来源：CICLOP 托卡马克数据库）

F. 海洋环境

F.1. 破解“永久性化学物质”之谜：核技术和同位素技术促进海洋健康和海产食品安全

149. 核技术和同位素技术使科学家能够量化并精确追踪海洋生态系统中遗留的特定全氟和多氟烷基物质（通常称为“永久性化学物质”）。这些工具为揭示全氟和多氟烷基物质如何在环境中迁移和在海产食品中富集提供了关键见解。然而，鉴于数十年来已有数千种新型全氟和多氟烷基物质及其转化产物出现，了解它们对海洋和沿海社区的全面影响仍是一项重大挑战。鉴于全氟和多氟烷基物质的规模、多样性和持续演变及其转化产物，将机器学习与同位素和化学数据相结合具有巨大潜力，有助于从复杂数据集中发现规律，识别全氟和多氟烷基物质的未知特征，并更好地预测其环境行为和风险。在这种情况下，这些数据驱动型方案对未来的监测、缓解和政策制定至关重要。

状况

150. 全氟和多氟烷基物质是一大类合成化学品，因防水、防油且耐热而被广泛使用。这些特性使其常见于不粘炊具、灭火泡沫、食品包装、纺织品和电子产品等。然而，其持久性意味着全氟和多氟烷基物质可在环境中存留数十年。如今，在全球范围内的海水、沉积物和海洋生物中，都发现了这类物质。与某些全氟和多氟烷基物质的接触

具有一系列健康影响，包括免疫、代谢和发育方面的影响，有些化合物还对某些癌症有影响。尽管一些遗留全氟和多氟烷基物质已被禁用，但工业界转而使用的那些替代品，安全性仍不明确。迄今已识别出 12 000 多种全氟和多氟烷基化合物，加之新变体继续涌现，给海洋健康和海产食品安全带来了持续风险。

151. 了解全氟和多氟烷基物质的来源、分布和迁移路径对合理决策至关重要（图 F.1）。由于不易分解，这些化学物质一旦释放，有些便可通过空气、水和土壤离开最初来源，进行远距离迁移。在海洋和淡水系统中，全氟和多氟烷基物质可在水、沉积物和生物体之间迁移，部分化合物会在鱼类和其他水生生物体内富集。空气中的全氟和多氟烷基物质也能在长距离迁移后沉降到生态系统当中。河流排放、地下水流动和洋流等自然过程促进了这些物质的进一步传播，使全氟和多氟烷基物质成为一个真正的全球性问题。

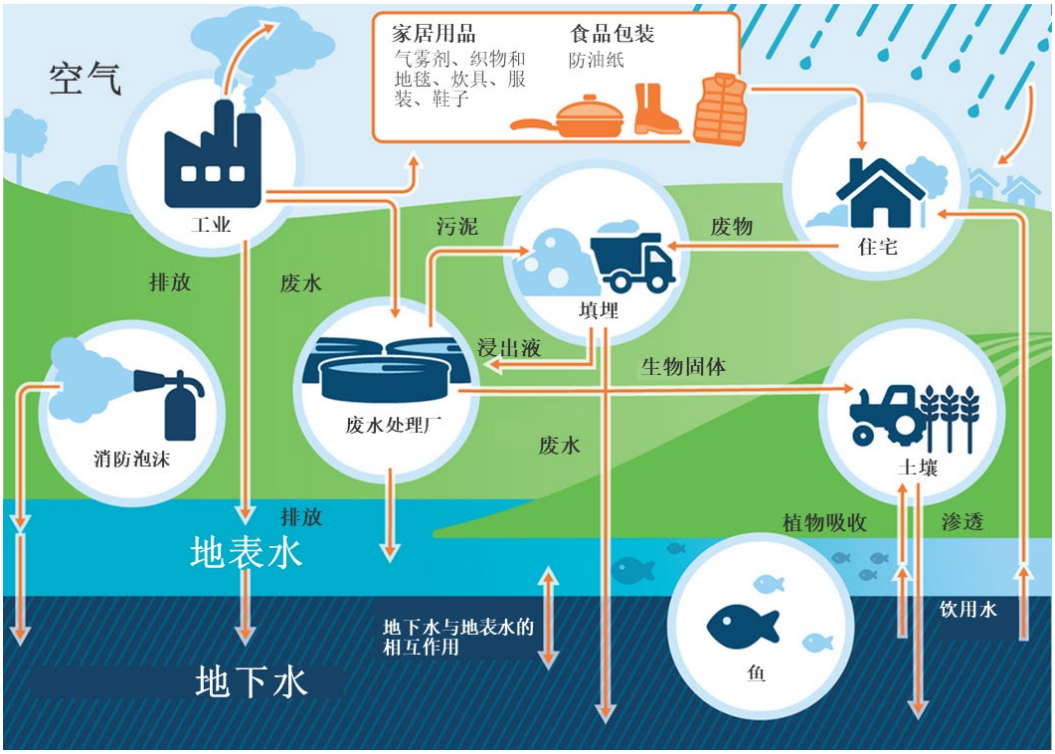


图 F.1. 环境中全氟和多氟烷基物质的来源和迁移路径。
（图片来源：明尼苏达州污染控制局）

152. 在海洋食物网中，一些全氟和多氟烷基物质会发生生物累积（在生物体内富集）和生物放大（越往食物链上层，浓度越高）。这意味着人类常食用的物种可能含有更高浓度的全氟和多氟烷基物质。随着全球海产食品消费量日益增长 — 超过十亿人将海产食品作为主要蛋白质来源 — 对海洋环境中的全氟和多氟烷基物质进行监测日益重要。对于高度依赖海产食品的沿海社区，食品安全尤为关键。

153. 核技术和同位素技术是准确检测和量化全氟和多氟烷基物质的关键，对已有商业分析标准的此类物质而言，尤其如此。可利用同位素标记化合物及色谱-串联质谱测定法进行靶向分析，从而对特定全氟和多氟烷基物质进行可靠测量（图 F.2）。然而，由于可用分析标准有限，仍有数千种全氟和多氟烷基物质前体未被检测到。总可氧化前

体分析可通过将全氟和多氟烷基物质前体转化为可测量的形式，帮助弥补这一差距。通过将靶向方法与总可氧化前体分析相结合，研究人员既能评估已知的全氟和多氟烷基物质，也能评估先前隐藏的此类物质，从而更清晰地掌握总体污染状况。



图 F.2. 国际原子能机构海洋环境实验室利用稳定同位素识别全氟和多氟烷基物质时，采用的是液相色谱-串联质谱测定法。（照片来源：原子能机构）

154. 除其他外，管理全氟和多氟烷基物质污染面临的一个主要挑战是会持续出现新化合物。一方面，全氟辛烷磺酸和全氟辛酸等已得到充分研究的遗留全氟和多氟烷基物质仍广泛存在，另一方面，在沿海水域和海洋生物中，新出现的短链和超短链全氟和多氟烷基物质检出率正持续攀升。这些新型化合物能躲避常规监测系统的检测，在环境中的行为模式可能也有所不同。由于分析上的局限性，许多全氟和多氟烷基物质仍无法被识别，导致难以评定生态系统和海产食品消费者面临的潜在风险。因此，为跟进不断演变的化学品用途，持续推动分析技术创新至关重要。

趋势

155. 为了更好地识别和了解环境中的未知全氟和多氟烷基物质，科学家们正越来越多地采用先进检测技术，即使并非特定目标化学物质，也可捕获。使用高分辨质谱测定法进行非靶向筛查有助于通过检索特征性化学片段，识别新型全氟和多氟烷基物质。尽管已利用该方案发现了多种此前未知的全氟和多氟烷基物质，但新化合物的多样性仍在持续增长，许多物质仍难以被检测到。这限制了全面评定风险和制定有效缓解策略的能力。

156. 机器学习正成为一个可用以分析复杂化学和同位素数据集的重要工具。算法能从环境和海产食品样本中发现一些传统方法可能会忽略的微妙模式。科学家可通过训练关于全氟和多氟烷基物质已知特征的模型，预测是否存在未知化合物及其转化产物。因此，将人工智能与环境化学相结合可改善早期检测并加强风险评定。

157. 预测性模拟还有助于研究人员和政策制定者更好地理解全氟和多氟烷基物质在海洋生态系统中的行为。这些模型模拟不同环境条件下全氟和多氟烷基物质通过水、沉积物和海洋生物进行迁移的情况，从而有助于预测污染热点和长期富集模式。如能与毒理学数据相结合，预测模型支持对海洋生物和海产食品消费者面临的健康风险进行早期评定。这些工具可指导各国政府制定有针对性的监测计划和法规。

158. 对政策制定者而言，先进分析工具、预测性模拟和机器学习的结合为加强环境治理提供了有力契机。这些技术能生成更清晰的证据，为预警系统提供支持，并帮助确定监测和缓解措施的优先次序。早期检测有助于进行主动干预，从而降低公共卫生和海洋生物多样性面临的风险。投资数据驱动型方案可改进监管准备，并为制定基于科学的适应性政策以应对不断演变的全氟和多氟烷基物质污染问题提供支持。



图 F.3. 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西与粮农组织总干事屈冬玉视察位于摩纳哥的国际原子能机构海洋环境实验室。(照片来源：原子能机构)

F.2. 评定深海海底采矿对海洋环境的影响

状况

159. 稀土元素对可再生能源系统、电池、电子学和医学应用等各种现代技术至关重要。对经济发展和国家安全而言，其重要性也在持续提升。这些元素大量富集于主要分布在太平洋克拉里昂-克利珀顿区的深海矿床，如富含锰、铜、镍、钴和碲的多金属结核。中西部太平洋海山上富含稀土元素的铁锰结壳、深海软泥和矿床同样具有可观储量。随着全球需求不断增长，开采这些深海资源的产业压力日益加大，难以优先考虑回收利用和循环经济解决方案。

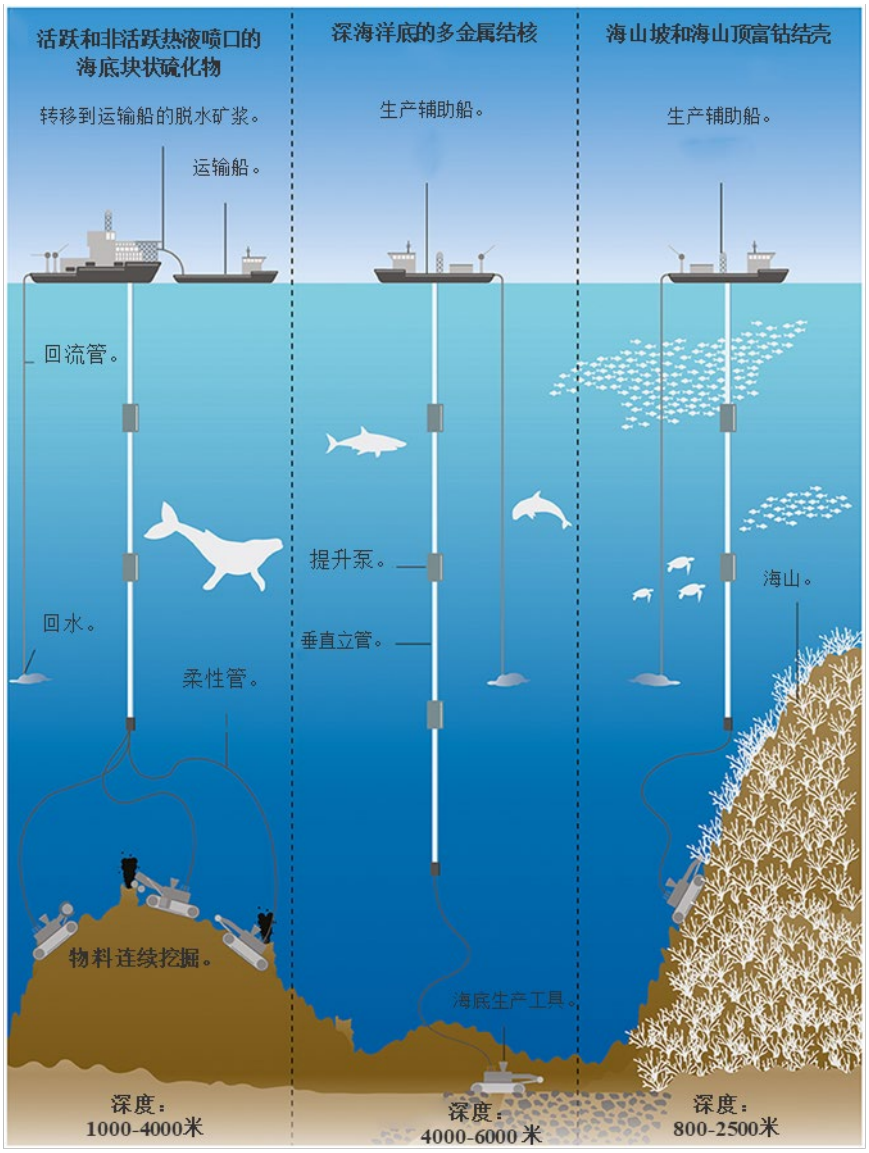


图 F.4. 深海海底采矿装置的主要类型及其作业环境示意图。图中呈现了代表性的开采技术和采矿条件。非比例图。（图片来源：改编自《海洋科学前沿》第 4 卷（2018 年）[2]）

---

[2] MILLER, K.、THOMPSON, K.、JOHNSTON, P.、SANTILLO, D.：“海底采矿概述，包括发展现状、环境影响和知识空白”，《海洋科学前沿》，**4**（2018）418，https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418。

160. 深海海底采矿会带来重大环境风险。采矿车辆会机械性地压实海床，用于采集结核的疏浚或抽吸作业则会严重扰动沉积物。此类破坏会影响脆弱的深海生态系统，而恢复可能需要数千年时间。采矿活动还会释放海底封存的有毒物质，所产生的生态影响在很大程度上尚不明确。疏浚作业产生的沉积物羽流会使滤食性生物窒息并覆盖周边动物群。在较浅水域排放尾矿会增加金属、加工化学品和悬浮颗粒的浓度，影响浮游植物的光合作用、浮游动物的摄食和新陈代谢，并可能会导致鱼类死亡。污染物一旦悬浮于水中，便可随洋流长距离迁移，从而增加在深海和表层食物网中发生生物累积和生物放大作用的可能性。采矿系统产生的噪音、光线和潜在泄漏物会给海洋生物带来进一步压力。[3、4、5、6]尽管对这些风险的认知日益增强，但关于这些污染物的最终去向、迁移性和生态影响，我们仍知之甚少，这突显出有必要在各种商业采矿作业开始前，开展全面的基线研究。

161. 大部分潜在的深海海底采矿区都位于国家管辖范围之外。在研究层面，一些重大国际倡议继续推进，包括 JPI Oceans 关于多金属结核开采的生态影响的长期行动（2013－2028 年）。

趋势

162. 原子能机构通过其海洋环境实验室，提供多种会用到放射性核素示踪剂和同位素特征的独特分析能力。在深海实地研究期间，可对海水和沉积物中铀、钍、镭和铅的天然同位素进行测量，以量化采矿活动后沉积物的位移情况。这些测量有助于确定沉积物羽流的扩散距离和速度、海床随时间变化的情况以及预计的恢复时间表。

163. 核技术和同位素技术还有助于评定深海海底采矿对栖息在这些生态系统中的关键物种的影响。通过在模拟深海环境的压力舱中进行实验室实验，研究人员得以将动物群暴露于结核、结壳和沉积物中常见的金属放射性同位素，包括镍、锰、锌、铬、硒、汞、钴和镉。这些研究有助于阐明此类元素的迁移会如何影响深海生物及其承担的生态功能。

164. 原子能机构已做好准备，支持建立关于深海海底采矿的环境影响的科学证据。这包括开展研究、进行建设能力和提供培训，以为各成员国提供支持。

---

[3] AMUDHA, K.等人：“水力采集过程中多金属结核流动区域带和垂直提升动作的影响”，《海洋工程》，**294**（2024）116745。

[4] BRÄGER, S.、RODRIGUEZ, G.Q.R.、MULSOW, S.：“国际海床管理局发布的深海海底采矿环境要求现状”，《海洋政策》，**114**（2020），文章编号 103258。

[5] KAIKKONEN, L.、VENESJÄRVI, R.、NYGÅRD, H.、KUIKKA, S.：“评定在深海和沿海海洋环境中进行海底矿物开采的影响：环境风险评定的现行方法与建议”，《海洋污染公报》，**135**（2018）1183－1197。

[6] LE, J.T.、LEVIN, L.A.、CARSON, R.T.：“将生态系统服务纳入深海海底采矿的环境管理”，《深海研究第二部分：海洋学专题研究》，**137**（2017）486－503。

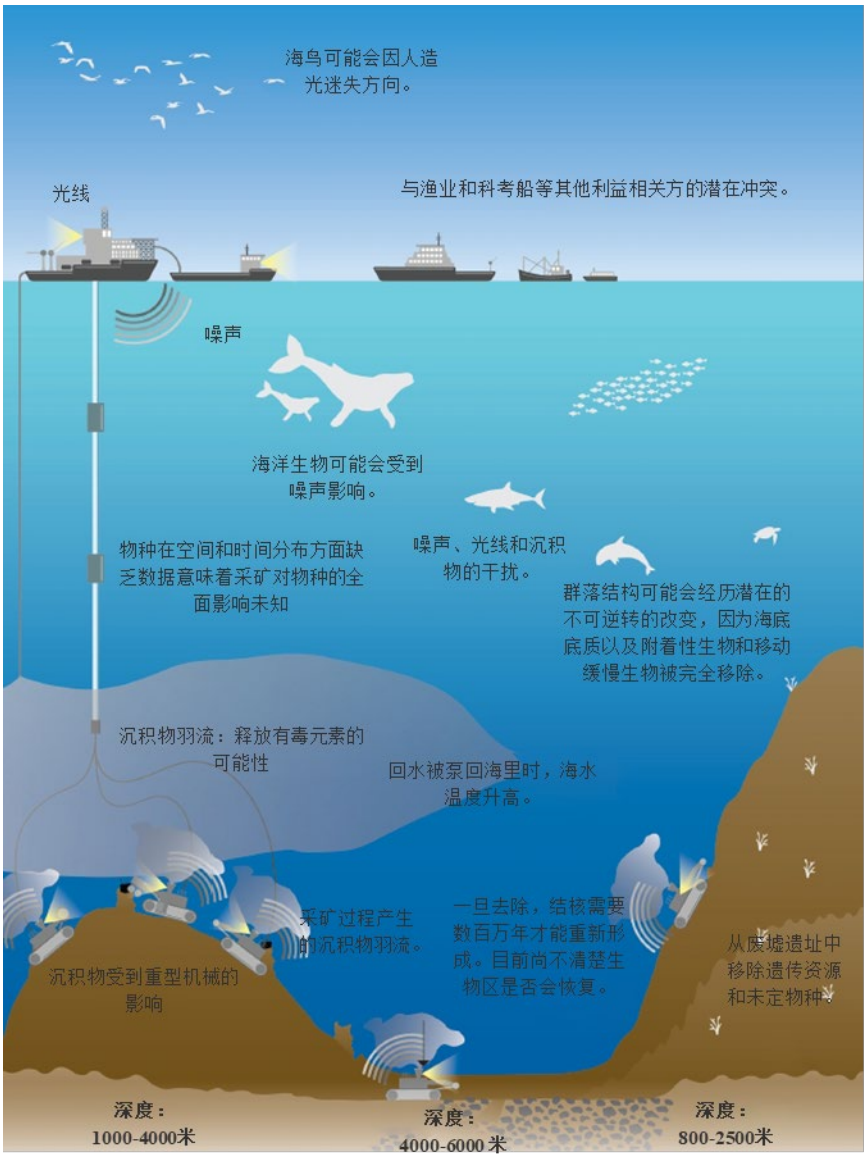


图 F.5. 深海海底采矿车辆对海洋环境的潜在影响示意图。作为前图的补充，阐释了采矿系统的环境影响。非比例图。

（图片来源：改编自《海洋科学前沿》第 4 卷（2018 年）[7]）

---

[7] MILLER, K.、THOMPSON, K.、JOHNSTON, P.、SANTILLO, D.：“海底采矿概述，包括发展现状、环境影响和知识空白”，《海洋科学前沿》，**4**（2018）418，https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418。

G. 人体健康

G.1. 利用人工智能，发展辐射医学

状况

165. 人工智能有望通过提高医疗程序的效力和效率，对医疗保健过程产生广泛影响。在医学成像领域，人工智能系统已被用于工作流程优化、图像获取与重建、影像配准与融合、疾病识别、表征与诊断、患者剂量估算、风险评定、疾病监测及响应评定等任务。人工智能技术的快速演进还与个体化医学的进步相互交融，为辐射肿瘤学开辟了新的治疗机遇。举例而言，人工智能支持的过程包括：个体化治疗决策支持、目标定位与分割、危及器官勾画、剂量预测与自动化规划、图像引导辐射疗法与运动管理以及治疗规划与设备质量保证。[8]

166. 尽管人工智能技术日益普及且易于使用，其临床实施仍面临诸多限制。虽然人工智能带来了新的能力，但在将这些工具纳入患者护理工作时，也引发了一些涉及伦理、安全和质量保证的重要问题。实施过程本身面临着重大技术、伦理和法律挑战，必须要先解决这些问题，才能安全、有效地大规模采用此类系统。

167. 要将人工智能成功纳入医疗保健领域，有赖于训练有素且能适应快速迭代技术的专业人员。特别是随着人工智能工具在临床环境中的部署，必须始终明确界定他们的作用和职责。核心实施团队通常由专攻辐射肿瘤学、核医学或诊断放射学的从业医师以及医学物理师组成，且通常由医学物理师主导该过程。团队还应咨询信息技术人员、数据科学家、知识工程师及数据保护和道德操守官员，以确保人工智能的使用安全、合规且合乎伦理。[9]

---

[8] 国际原子能机构：《医用物理学中的人工智能：具有临床资格的医学物理师的作用、责任、教育和培训》，《培训班丛书》第 83 号，原子能机构，维也纳（2023 年）。

[9] 国际原子能机构：《人工智能促进核应用、科学和技术加速发展》，原子能机构，维也纳（2022年）。

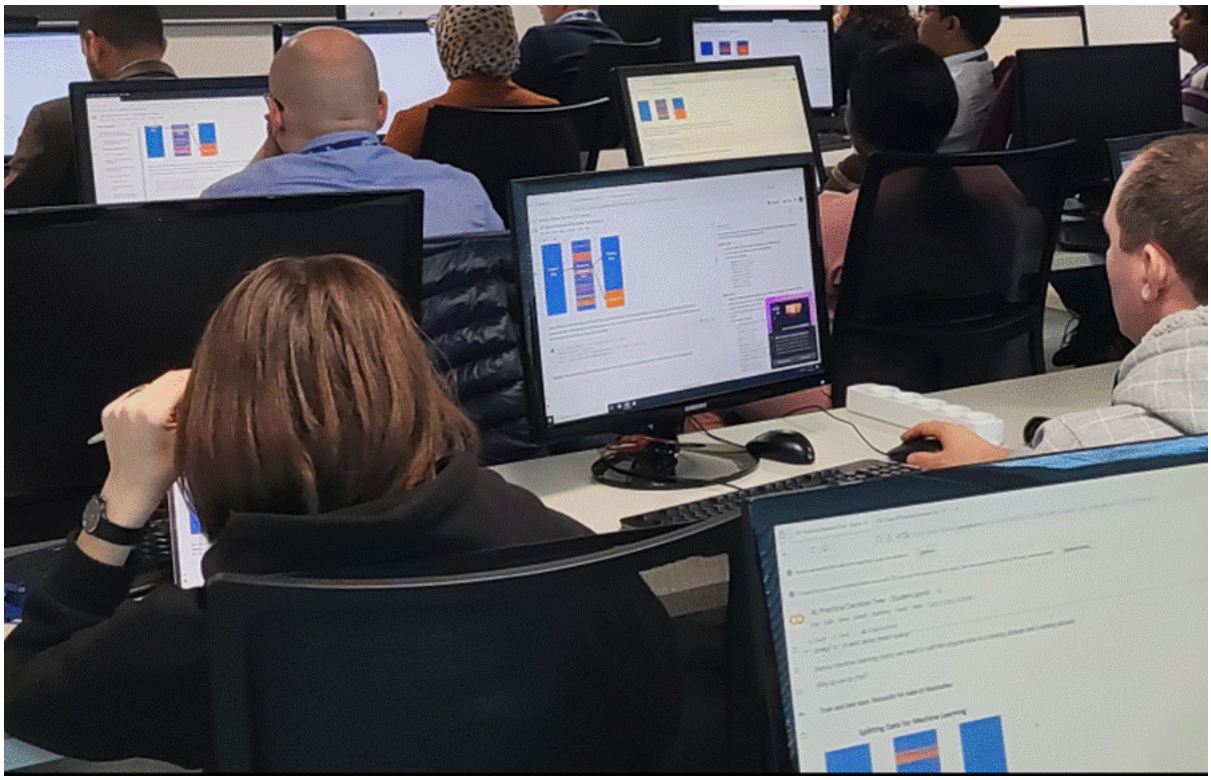


图 G.1. 原子能机构开展医学物理师培训，使其了解人工智能的概念，支持安全有效地将人工智能系统纳入临床环境。（照片来源：原子能机构）

趋势

168. 在临床实践范中，医学物理师在人工智能系统的选择和实施方面发挥着核心作用。原子能机构正积极支持制定结构化框架以协助成员国将人工智能纳入辐射医学，其出版物《医用物理学中的人工智能》对此作了详细介绍。作为该方案的一部分，原子能机构帮助界定了医学物理师的作用和职责，其中包括：制定技术规范；验收和调试设备；优化医疗程序的物理参数；支持物理、技术和安全层面的质量管理；对其他保健专业人员进行教育和培训以及促进研究与发展。原子能机构还概述了医学物理师教育和培训框架。[10]

169. 随着人工智能素养成为专业人员群体中一项越来越受重视的能力，精通人工智能模型的解读、评估和验证现已被视为当代医学教育的一项基本内容。医学物理师和其他保健专业人员必须了解重要的理论、伦理和监管原则，以确保人工智能技术在辐射医学领域的安全和知情应用。为此，原子能机构为全球受众提供多样化的实际操作培训机会（图 G.1）和电子学习资源，包括一个新推出的系列网络研讨会，全球注册人数超 3000 人。

170. 将人工智能系统引入临床实践时，必须与引进新的成像器件或治疗模式时一样，秉持同样严谨的态度。根据这一方针，原子能机构正在为医学物理师制定新的影像人

---

[10] 国际原子能机构：《医用物理学中的人工智能：具有临床资格的医学物理师的作用、责任、教育和培训》，《培训班丛书》第 83 号，原子能机构，维也纳（2023 年）。

工智能系统临床实施导则。即将推出的导则聚焦选型、实施和质量保证，会考虑到人工智能系统的完整工作流程，并强调对终端产品的评价（图 G.2）。该导则还可协助医学物理师制定技术规范，评定系统性能，并识别随时间推移可能出现的退化。

171. 预计未来几年，基于人工智能的技术被常规化地纳入医学成像和放射治疗的情况会更加普遍。随着这些系统日益普及，越来越有必要确保专业人员接受良好的教育和培训，以避免技能退化，并强化“人工智能方法无法取代专业技能”这一理念。如能满足这一需求，便能够以安全无缝的方式将人工智能系统纳入辐射医学服务，并确保各项产出始终具有可解释性、供应商中立性，且符合道德操守和监管要求。原子能机构将继续在这方面为成员国提供支持。

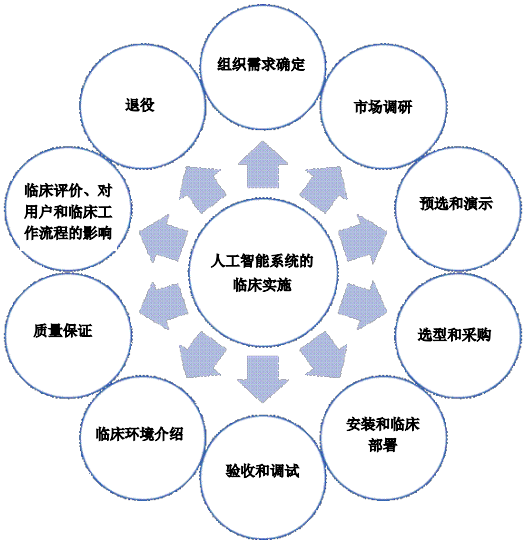


图 G.2. 影像人工智能系统临床实施过程示意图。各步骤同时体现了医学物理师的作用和责任。（图片来源：原子能机构）

G.2. 通过粒子治疗提高癌症治疗精准度

状况

172. 放射治疗是癌症治疗的一个重要组成部分，近半数癌症患者在治疗过程中需要接受放射类治疗。在辐射肿瘤学领域，粒子治疗已成为一个备受临床关注的领域。与传统高能 X 射线束不同，粒子治疗使用的是加速质子束或碳离子束。这些束流展示出独特的物理特性，即布拉格峰，意指束流的大部分能量都集中在粒子路径的末端，从而能够对肿瘤部位进行高精度、高剂量的照射，同时保护周围健康组织。

173. 快速创新同时提高了粒子治疗的技术水平和可行性。治疗规划系统的进步 — 如蒙特卡洛模拟和人工智能驱动的自适应治疗算法 — 提高了剂量精确度并加强了生物建模能力。现在，随着图像引导和束流输送技术（包括强度调制和动态弧形放射治疗技术）的发展，精准度得以提高，健康器官也得到了更好的保护。与此同时，机器人治疗床等先进定位系统正在不断改进患者摆位。近期的突破性进展还使质子治疗系统足够紧凑，从而可安装在传统直线加速器机房内。其他新兴技术，如超导同步加速

器、激光加速注入器以及采用高温超导磁体的旋转机架，正在推动碳离子束治疗系统实现更紧凑的设计。

174. 对于儿童癌症和邻近关键器官的肿瘤（如颅底肿瘤或肝癌），质子治疗具有独特的临床优势。碳离子束治疗因其独特的生物特性，在治疗对 X 射线疗法有抗性的癌症方面展现出潜力，包括骨肉瘤和体积巨大的肿瘤。

175. 粒子治疗设施需要复杂的基础设施，包括回旋加速器或同步加速器等加速器以及先进的束流输送系统。这些需求导致初期投资和运营成本较高。然而，随着技术的进步，这方面的可行性正稳步提升。虽然目前多数设施集中在高收入国家，但中低收入国家对粒子治疗的兴趣也日益增长，体现在西欧、北美和东亚以外地区规划安装的设施数量不断有所增加。

176. 粒子治疗的成功实施，要求精心进行战略设计，将这种先进模式纳入综合癌症护理。这包括评定最适合采用该项技术的患者群体和疾病类型；评价设备和设施需求；规划建造和调试工作以及培养有效提供该项服务所需的人力资源。需要对多类专业人员进行培训，包括放射肿瘤医师、医学物理师、放射治疗技师、护士和行政工作人员。可持续的商业模式对于确保长期可行性同样至关重要。

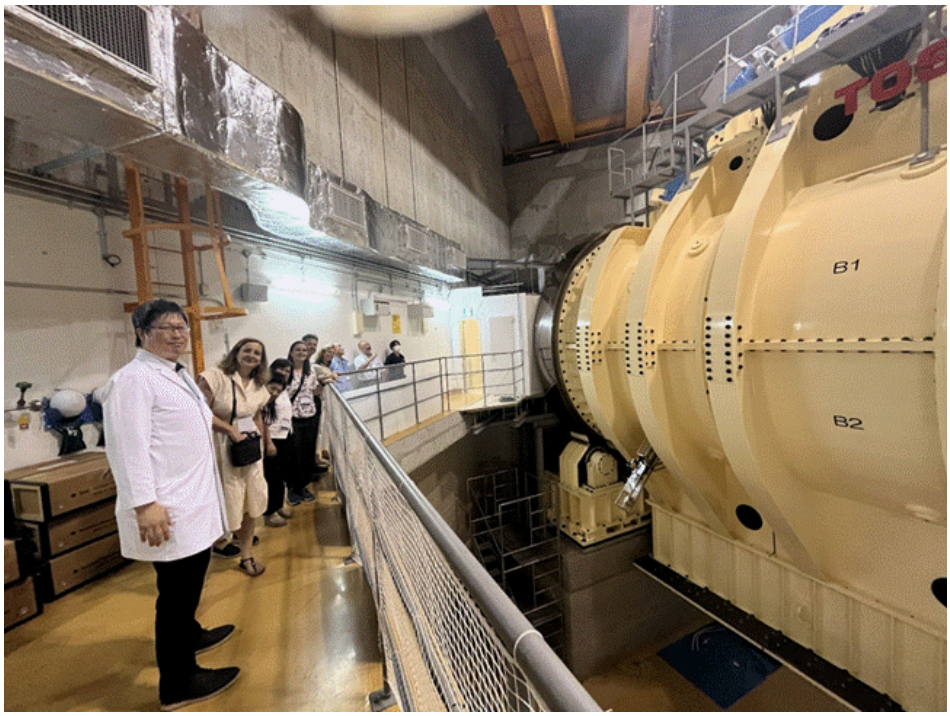


图 G.3. 参加原子能机构“先进放射治疗：支持中心重带电粒子放射治疗和精准技术的实施与临床整合”讲习班的专家观摩日本国立研究开发法人量子科学技术研究开发机构的碳离子束治疗机架装置，2025 年 8 月。（照片来源：原子能机构）



图 G.4. 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西参观意大利国家肿瘤强子治疗中心的同步加速器，2025 年 5 月。（照片来源：原子能机构）

趋势

177. 根据粒子治疗合作组的数据，截至 2025 年 10 月，有超过 140 个粒子治疗设施投入临床运营，它们分布在 20 多个国家，另有约 100 个设施处于建造或设计阶段，其中有几个位于中低收入国家。

178. 除大量有关粒子治疗的临床研究外，关于利用质子或电子束进行超高剂量率治疗的临床前研究也在加速推进。有新证据表明，超高剂量率治疗可能会在正常组织和恶性组织中诱发不同生物反应，有望降低毒性并改善治疗效果。这或许预示着未来放射治疗服务的重大变革。

179. 原子能机构近期发布了经修订的《外射束放射治疗中的剂量学国际实务守则》（原子能机构《技术报告丛书》第 398（Rev.1）号），其中包含最新的质子束和轻离子束剂量测定程序。该修订版纳入了笔形束扫描等新技术，并介绍了体现该领域进展的最新参数。原子能机构将于 2026 年 10 月举办医用辐射剂量学领域的标准、适用和质量保证国际专题讨论会，并将在会上重点介绍粒子治疗剂量学领域的成就与挑战。

180. 认识到粒子治疗已扩展至全球范围，原子能机构在 2025 年 6 月辐射肿瘤学的进展国际会议期间专门组织了一场相关会议。这次会议回顾了关于该疗法临床应用的现有科学证据，探讨技术进步并研究了对中低收入国家的影响。2025 年 8 月，原子能机构还与日本国立研究开发法人量子科学技术研究开发机构（隶属全球 16 家“希望之光”

支持中心网络）合作，举办了“先进放射治疗：支持中心重带电粒子放射治疗和精准技术的实施与临床整合”讲习班。此次活动提升了学员对该项技术的临床认知。

181. 认识到人力资源发展的重要性，原子能机构召开了一次顾问会议，以评估质子治疗实施工作的培训需求。原子能机构正联合全球专家，起草一份导则文件，概述教育和培训要求。



图 G.5. 来自 13 个国家的专家与原子能机构辐射肿瘤学专家共同起草质子束治疗设施技术导则。（照片来源：原子能机构）

H. 粮食和农业

H.1. 利用核磁共振技术保障咖啡品质

状况

182. 咖啡作为全球拥有最广泛消费人群的饮品之一，因其风味、提神功效和文化意义而备受珍视。咖啡支撑着生产国数百万居民的生计。商业化程度最高的两个咖啡品种是阿拉比卡咖啡和罗布斯塔咖啡。阿拉比卡咖啡豆由于风味和香气更佳，价格通常也更高。强劲的市场需求导致咖啡极易成为欺诈行为的目标。最常见的欺诈手段之一是将较廉价的罗布斯塔咖啡豆或阿拉比卡-罗布斯塔混合咖啡豆虚假标注为100%阿拉比卡咖啡豆。这些欺诈行为扰乱市场定价，损害正宗阿拉比卡咖啡豆种植者和生产者的利益，并误导了消费者，让他们为具有不同感官特性且品质较低的咖啡支付了高价。

183. 原子能机构通过其粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心（粮农组织/原子能机构联合中心）开展应用研究，开发使用核技术的分析方法，并支持成员国加强检验食品真实性的实验室能力。原子能机构围绕咖啡真实性开展的工作是题为“利用核技术鉴别具有高价值标注说明食品的真实性”的协调研究项目的一部分。为检测阿拉比卡咖啡中掺入罗布斯塔咖啡的情况，食品安全和控制实验室采用了核磁共振波谱法。

184. 核磁共振是一项强大的分析技术，利用了某些原子核 — 特别是那些质子或中子数为奇数的原子核，如氢-1（^{1}H）或碳-13（^{13}C）— 的磁性特性。当样品被置于超导

电磁体产生的强磁场并暴露于射频脉冲时，其原子核会跃迁至更高能级。脉冲停止后，原子核恢复原始状态并释放射频信号。通过分析这些信号，可以详细了解样品的分子结构和组成，进而通过检测化学标记物，精准区分阿拉比卡咖啡和罗布斯塔咖啡。

185. 可采用一个简易流程来区分阿拉比卡和罗布斯塔咖啡豆。首先，用氯仿从研磨咖啡中提取脂溶性成分。随后，通过质子核磁共振（^{1}H-NMR）生成核磁共振谱图。16-O-甲基咖啡醇（16-OMC）是罗布斯塔咖啡的一种已知标记物，该化合物会在谱图中形成特征峰，从而可准确检测样品中的罗布斯塔咖啡（图 H.1）。

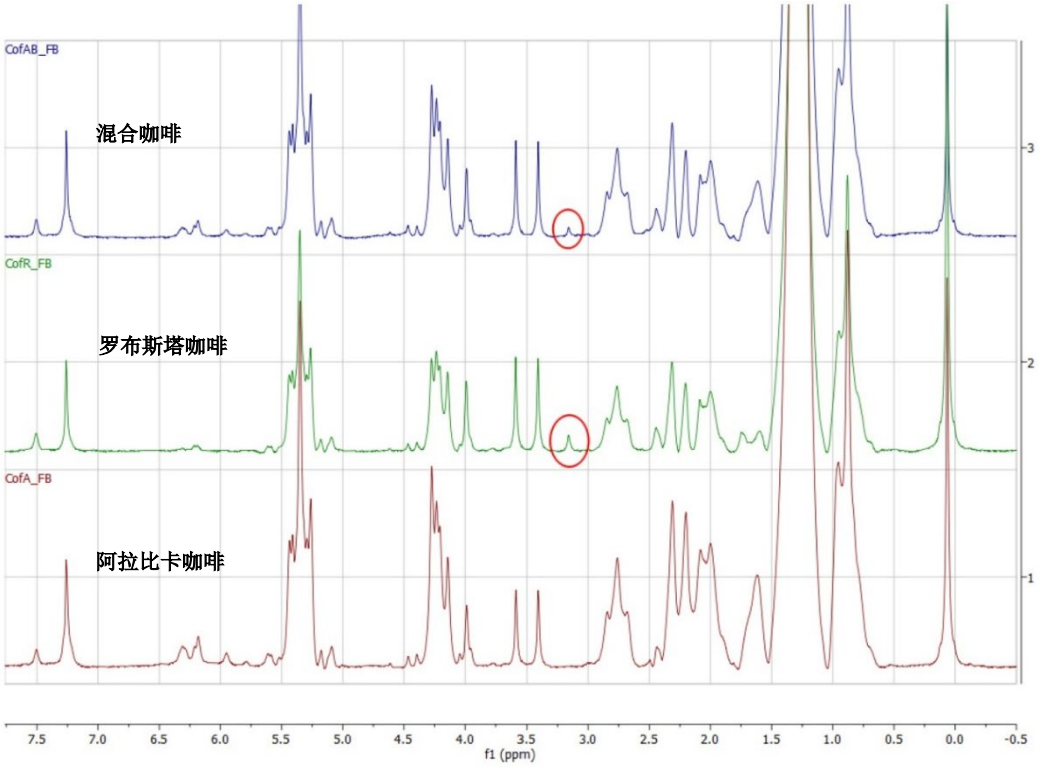


图 H.1. 阿拉比卡咖啡豆、罗布斯塔咖啡豆及 50/50 混合咖啡豆提取物的质子核磁共振谱图。3.16 ppm 附近标记的特征峰对应 16-O-甲基咖啡醇，是罗布斯塔咖啡的一种已知标志物。（图片来源：原子能机构）



图 H.2. 我们无法凭肉眼对咖啡豆品种进行可靠识别，尤其是在烘焙后。但可利用核磁共振技术，区分阿拉比卡和罗布斯塔咖啡。（图片来源：原子能机构）

趋势

186. 1945 年，核磁共振波谱法的原理首次得到确认。早期的分析应用依赖高场强仪器，这类仪器虽具备高灵敏度和高分辨率，但由于需要使用液氦或低温冷却器将电磁体冷却至接近绝对零度，仪器需占用大量空间，且成本高昂。为克服这些局限，低场核磁共振波谱法快速发展，在分析复杂食品样品方面展现出巨大潜力。低场核磁共振仪可在显著较低的磁场强度下运行，体积更小、价格更低且便于携带。可利用信号增强技术对较弱的磁场进行补偿，以便对结果作出可靠解读。除检测品种掺假外，核磁共振还能识别大麦、玉米、咖啡豆壳、大豆、稻米或小麦等廉价掺假物。

187. 人工智能、机器学习和深度学习领域的最新进展进一步提升了核磁共振的效用。这些工具可自动执行复杂的谱图处理任务，优化信号提取并加速数据解读，从而在食品安全和真实性核实等多个学科领域实现更高效的应用。

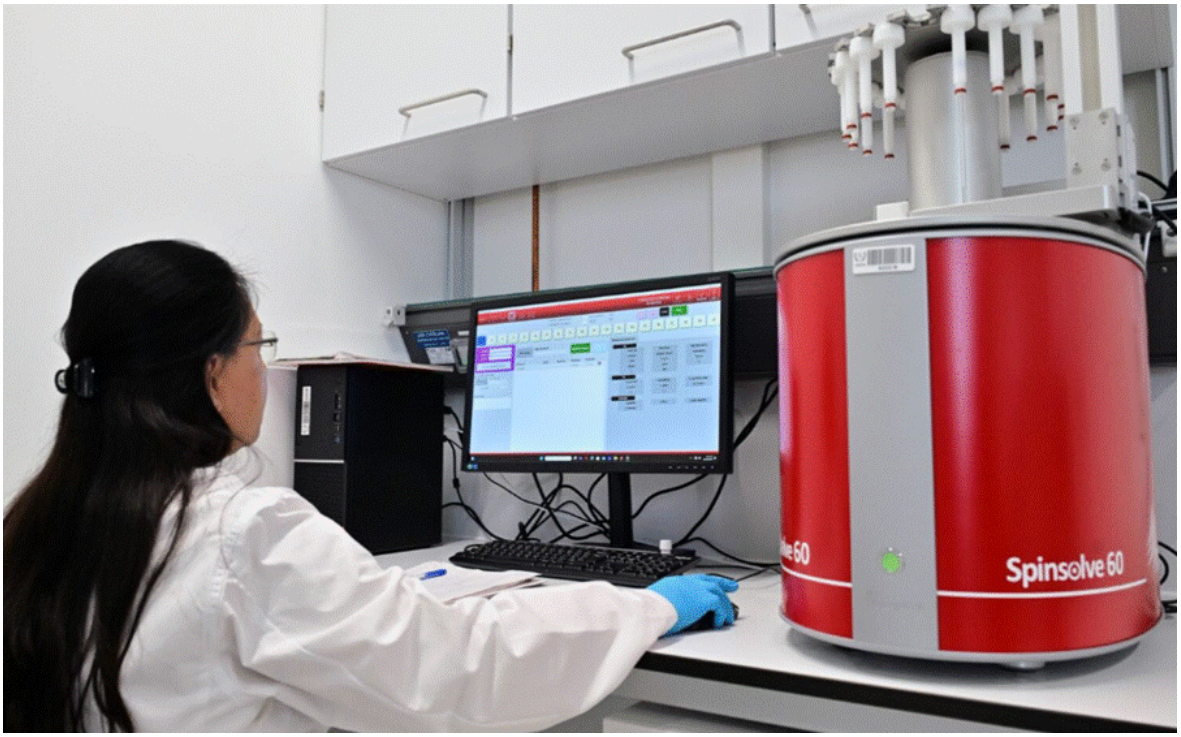


图 H.3. 将咖啡样品装入台式低场核磁共振仪的自动取样器。
（照片来源：原子能机构）

H.2. 辐照技术促进安全贸易和虫害防治

状况

188. 随着新鲜水果和蔬菜在国际范围内交易，对植物健康、农业和环境构成风险的生物体也随之传播。害虫的侵入和暴发给各国政府、农民和消费者造成了沉重的经济负担。辐照技术提供了一种有效解决方案，使原本因害虫侵入风险而受到限制的新鲜农产品能够进行安全贸易。原子能机构、联合国粮食及农业组织（粮农组织）和《国际植物保护公约》秘书处与成员国研究人员合作，致力推动开发和应用经改进的植物检疫辐照处理方法。



图 H.4. 辐照番石榴 — 墨西哥出口量最大的辐照商品之一。
（照片来源：原子能机构）

189. 利用电子束、X 射线或 γ 射线进行电离处理是一种非化学植物检疫处理方法，可防止果蝇、螨虫和象鼻虫等害虫传播。这些束流和射线能穿透包装好的果蔬，且对温度或品质的影响极小。辐照过程中，原子获得或失去电子，形成离子，这些离子会快速重组。这种电离作用会破坏包括害虫脱氧核糖核酸在内的关键生物分子，导致昆虫不育或无法发育。所需辐照剂量较低（通常低于一千戈瑞），既能有效灭杀害虫，又不会影响新鲜农产品的营养价值和感官品质。

190. 1970 年，粮农组织与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夏威夷召集了一个专家小组来评定电离辐射的潜力。该小组确认辐照是一项具有商业应用前景的技术，并建议启动国际研究计划，由此开始，粮农组织/原子能机构在食品辐照领域开展了长期工作。此后，多个协调研究项目持续推动了科学进步和剂量测定研究。早期的一项重大突破涉及果蝇物种，研究表明，对卵和幼虫施加 0.075 至 0.250 千戈瑞的辐射剂量可阻止成虫羽化。这一发现证明了通用处理方案的可行性，即采用基于单一辐射剂量的处理方案便可有效防治各种商品中的诸多害虫物种。



图 H.5. 墨西哥果蝇侵害芒果。（照片来源：原子能机构）

趋势

191. 这些协调研究项目为制定 21 项辐照标准提供了依据，《国际植物保护公约》秘书处已将这些标准作为“国际植物检疫措施标准”（植物检疫标准）发布。“植物检疫标准”第 18 号概述了将辐射用作植物检疫措施的基本要求，“植物检疫标准”第 28 号的 20 个附件则具体说明了个别受管制害虫的处理方法。目前，在“植物检疫标准”第 28 号列出的 43 种处理方法中，辐照处理占到近半数。多数获批剂量针对特定害虫，另有三种通用处理方法适用于果蝇（实蝇科）、按实蝇属物种（包括图H.5中的墨西哥果实蝇）及卷叶蛾科。

192. 虽然全球贸易数据有限，但美国农业部动植物卫生检验局的公开信息显示，已授权使用美利坚合众国（美国）境内的指定辐照设施对入境生鲜产品进行辐照处理。智利（芒果、葡萄）、哥伦比亚（芒果、蓝莓）、多米尼加共和国（芒果）、厄瓜多尔（鳄梨、灯笼果）、格林纳达（加椰檬果、紫槟榔青和黄槟榔青、芒果）、印度尼西亚（菠萝）、牙买加（芒果）、墨西哥（多种水果）、巴基斯坦（芒果）、秘鲁（无花果、石榴、蓝莓、芦笋）和南非（柿子、荔枝）等国可将未经处理的货物装入防虫集装箱，运往美国进行辐照处理。此外，美国农业部的预清关计划授权在农产品出口前，使用生产国（包括澳大利亚、印度、墨西哥、南非、泰国和越南）的辐照设施对产品进行处理。

193. 虽然钴-60 产生的 γ 射线仍是应用最广泛的技术，但商业领域正在越来越多地采用由机器产生辐射的方法，包括电子束和 X 射线。《国际植物保护公约》秘书处根据原子能机构的计算和协调研究项目的近期结果，修订了“植物检疫标准”第 18 号，允许使

用最高 7.5 兆伏的高能 X 射线。该标准与先前五兆伏的限值一样安全、有效，但可将 X 射线的生产效率提高近一倍，从而增强了这项技术的经济可行性。此次修订强化了 X 射线的作用，与电子束和 γ 射线一样，它们都是商业贸易领域公认的电离辐射处理方法。

194. 虽然辐照主要导致电离作用，但理论上，五兆伏以上的 X 射线可通过活化作用在食品中诱发短暂放射性。由于所有食品天然含有微量放射性，关注的焦点在于辐照是否会提升这些放射性水平。研究表明，在实践当中，活化作用可以忽略不计：只有在实验条件下，使用远超植物检疫处理用量的超高剂量时，才可检测到活化产物。即使施加十倍于检疫所需剂量的辐照，活化效应仍微乎其微。因此，经修订的“植物检疫标准”第 18 号确认，就商业食品贸易而言，X 射线技术与电子束和 γ 射线辐照一样，安全且可接受。

H.3. 追踪抗生素和抗微生物药物耐药性在农业生态系统中的路径

状况

195. 抗微生物药物耐药性已成为 21 世纪最严峻的全球健康威胁之一，危及人类与动物医学、食品生产和可持续发展领域的进展。“同一健康”框架认为人类、动物和环境健康相互关联，根据该框架，抗生素抗性基因的传播现已被视为一项跨部门挑战。每年有超过 100 万人直接死于对抗生素耐药的细菌感染，抗微生物药物耐药性导致的总死亡人数估计高达 470 万。若不加强缓解措施，到 2050 年，每年可直接归因于抗微生物药物耐药性的死亡人数或可达到近 200 万，同时抗微生物药物耐药性还是另 800 多万人死亡的影响因素。从现在到本世纪中叶，与抗微生物药物耐药性有关的全球累计死亡人数或会超过 3900 万。这场危机不仅威胁公共卫生，更危及全球粮食安全、生计和经济稳定。

196. 农业在应对抗微生物药物耐药性挑战的过程中起着关键作用。土壤和农场环境现已被确认为抗性基因积累和传播的主要储存库。常被用作肥料的牲畜粪便通常含有动物用药残留的抗生素，以及耐药细菌和能在微生物物种间转移抗性的可移动遗传因子。随着时间推移，这会导致抗生素抗性基因通过土壤、水系、农作物，并最终在人类群体中循环传播。了解遗留和新出现的抗生素残留物在农业环境中的行为模式对于制定科学有效的干预措施至关重要。

197. 最令人担忧的暴露途径之一是通过食物传播。在施用粪肥的土壤或使用再生水灌溉的土壤中种植的作物（如生菜）会吸收抗生素残留物并滋生耐药细菌。而后，这些作物会将抗生素抗性基因引入人类食物链（图 H.6）。为应对这一挑战，原子能机构正通过粮农组织/原子能机构联合中心，运用核技术和稳定同位素技术，追踪农业生态系统中的抗生素和抗生素抗性基因。通过绘制它们在土壤、水和植物界面间的移动情况，这些工具可帮助各国识别污染热点，设计有针对性的缓解策略，并加强符合“同一健康”方针的政策，保护人类、动物和环境健康。

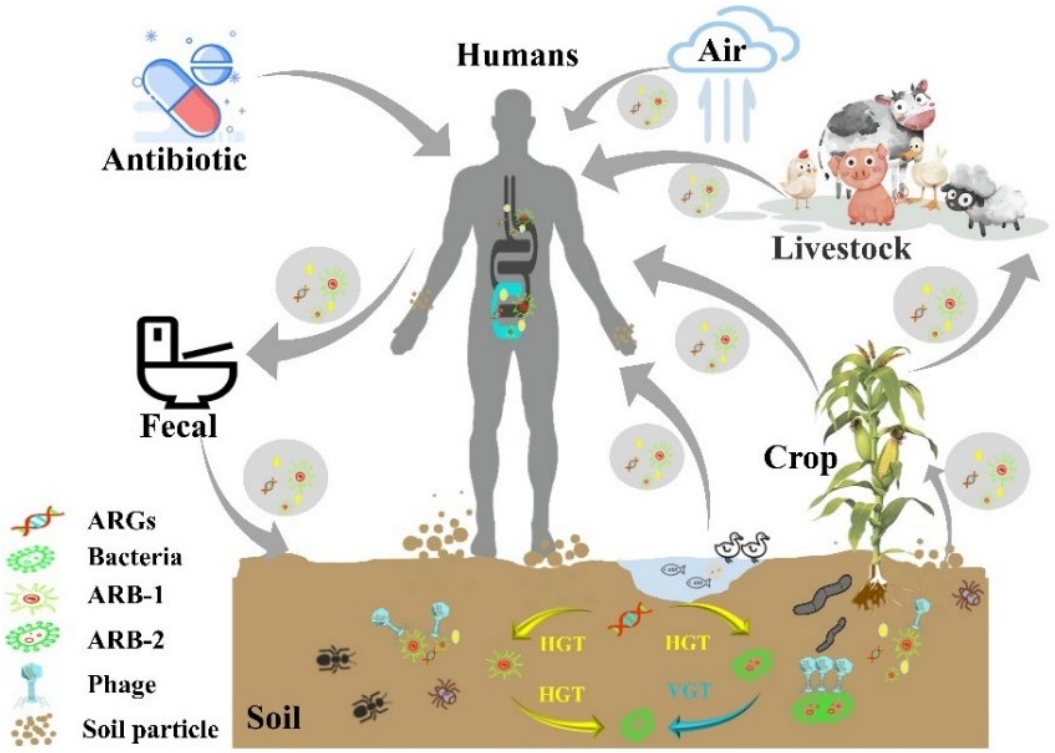


图 H.6. 抗生素抗性基因在土壤生态系统中的传播路径及其对公共卫生的影响。土壤是抗生素抗性基因的一个主要储存库，这些基因可通过水平基因转移进行传播，迁移至植物相关微生物组，并从环境细菌转移至人类或动物病原体。[11]

趋势

198. 了解抗微生物药物残留物和抗生素抗性基因在农业生态系统中的迁移情况已成为一项全球研究重点。原子能机构正通过各种协调研究项目及得到澳大利亚和英国支持的“和平利用倡议”，引领重大国际行动。这些倡议运用核技术和同位素技术，对各种抗生素和抗性机制进行高精度追踪。一个重要里程碑就是成功合成了全碳-13 标记的抗生素磺胺甲噁唑并将其用到了巴西、中国、南非和越南生菜作物使用的有机肥料中。该同位素示踪剂使得能够直接对磺胺甲噁唑在土壤、水和植物等环境组成部分间的迁移进行量化，从而生成可靠的关于真实农业条件下抗生素的迁移和转化的实地证据。

[11] WANG, F. 等人：“土壤生态系统中的抗生素抗性：“同一健康”视角”，《环境科学与健康前沿观点》，**20**（2021）100230。



图 H.7. 采用气相色谱-同位素比质谱测定法分析碳-13 标记的抗生素。
（照片来源：原子能机构）

199. 为准确监测磺胺甲噁唑的动态，中国和德国的研究人员开发并验证了一种联合使用气相色谱法和同位素比质谱测定法的新方法（图 H.7）。该方案可使磺胺甲噁唑适于分析，并能精确量化碳和氮同位素。这些同位素特征的变化揭示了磺胺甲噁唑如何通过土壤和植物进行分解和迁移。

200. 现场试验表明，碳-13 标记的磺胺甲噁唑会快速从土壤中消散，但在初期，它会在植物根部附近富集，这证实植物能吸收该物质并将其转运到植物组织中。单独施用有机肥料会在短时间内增加抗生素抗性基因，添加磺胺甲噁唑则会导致抗生素抗性基因出现持久且显著的上升。研究人员还采用激光腔衰荡光谱法，追踪了碳-13 标记的二氧化碳排放情况，从而测量了磺胺甲噁唑的降解和矿化程度（图 H.8）。与部分标记相比，全碳-13 标记的磺胺甲噁唑的分解速度要快很多，这突显出全同位素标记对环境影响评定的准确性至关重要。



图 H.8. 使用激光腔衰荡光谱分析仪测定碳-13 标记的二氧化碳以及碳-13 标记的磺胺甲噁唑的同位素特征。（照片来源：原子能机构）

H.4. 昆虫不育技术计划的通用遗传工具箱

状况

201. 昆虫不育技术是大面积虫害综合治理工作的一个重要组成部分。六十多年来，除南极洲以外的各大洲均已成功利用该项技术来防治虫害和病媒。昆虫不育技术指为园艺、兽医或医学相关目的，通过规模饲养、处理和释放不育昆虫，实现同种害虫物种种群的抑制、遏制、定殖预防或根除。昆虫的绝育是通过使用剂量受控的γ射线、X 射线或电子束进行辐照来实现的。[12]

202. 尽管可以同时释放不育雄虫和雌虫的方式实施昆虫不育技术，但大量研究表明，仅释放不育雄虫明显更加高效且具有成本效益。一项行之有效的能够只释放雄虫的策略就是开发遗传选性品系。

203. 可使用传统遗传学技术构建遗传选性品系。该方案有赖于识别一个可选标记物 — 如一个可见性状（如蛹色；见图 H.9）或条件依赖性特征（如温度敏感性）— 并将其

[12] DYCK, V.A.、HENDRICHS, J.、ROBINSON, A.S. 编著《昆虫不育技术：大面积虫害综合治理的原则和实践》第二版（2021 年），CRC 出版社，博卡拉顿。

与特定性别关联。标记基因的正常版本与雄性相关联，突变版本与雌性相关联。可通过辐射诱导的相互染色体易位达成这一点，从而实现高效的雌雄分离。[13]

204. 目前已成功开发若干遗传选性品系，包括地中海实蝇的“维也纳 8 号”菌株，这是迄今最成功的遗传选性品系之一，由位于塞伯斯多夫虫害防治实验室历经多年定向研究与发展培育而成。然而，为支持针对影响园艺、畜牧业和人体健康的更广泛害虫和病媒实施昆虫不育技术，亟需开发新的遗传选性品系。迄今用于开发遗传选性品系的遗传学方案具有不可预测性，属劳动密集型，进展缓慢且难以跨物种推广。



图 H.9. 野生实蝇科果蝇蛹呈褐色。已发现白蛹和黑蛹突变体并将其用作昆虫不育技术中遗传选性品系的可选标记物。（照片来源：原子能机构）

趋势

205. 昆虫分子生物学和遗传学领域的进步推动开发了一种更具普遍性、更精简的生成遗传选性品系的方案 [14]（图 H.9）。第一步是揭示关键可见性状或条件依赖性性状（如

---

[13] FRANZ, G.、BOURTZIS, K.、CÁCERES, C.：“对果蝇实用且可操作的基于传统遗传方法的遗传选性系统，给其他适于进行大规模饲养以实施昆虫不育技术的物种提供一个范例”，载于 DYCK, V.A.、HENDRICHS, J.、ROBINSON A.S.编著的《昆虫不育技术：大面积虫害综合治理的原则和实践》（第二版）（2021 年），CRC 出版社，博卡拉顿，575－604。

[14] PETRUCCI, G. 等人：“开发新古典遗传选性品系，促进害虫和病媒防治”，《昆虫科学》（2025 年）（待刊）。

白蛹或棕蛹或温度敏感致死表型等）的分子基础。目前已鉴定出这些性状背后的基因和突变，为这种新方案奠定了基础。[15、16、17、18]

206. 生物信息和分子分析证实，导致白蛹、黑蛹和温度敏感致死性状的基因在多个昆虫不育技术目标物种中都存在且高度保守[步骤 2]（图 H.10）。

207. 基因编辑技术已使我们能够针对多种害虫和媒介物种，靶向诱导这些突变[步骤 3]。例如，已在东方果实蝇、橄榄果实蝇、番石榴果实蝇和南亚寡鬃实蝇中引入白蛹突变体，在按实蝇、果实蝇、蜡实蝇和棍腹实蝇中则培育出了靶向黑檀体基因的黑蛹突变体。在每个案例中，都通过开展这些工作，培育出了稳定的突变系。[19、20、21]

208. 下一步[步骤 4]是将标记基因的正常（野生型）版本连接到 Y 染色体上的雄性决定区，如对实蝇科果蝇采用的做法。可通过基因编辑，或利用辐照诱导相互染色体易位来实现这一点。

209. 将携带与雄性性状关联的野生型标记物的雄虫与来自突变系的雌虫（例如，棕蛹雄虫与白蛹雌虫）杂交即可得到一个遗传选性品系。在该系统中，雄虫由棕蛹发育而成，雌虫由白蛹发育而成，这就使得能够通过蛹色分选，直接进行雌雄分离[步骤 5]。

210. 实地应用前，必须对每个遗传选性品系的生产力、品质和遗传稳定性进行严格评定。在运行中的昆虫不育技术计划中，雄虫会在蛹期或成虫期接受特定剂量的辐照以实现绝育，从而确保它们在释放后无法繁殖。

211. 2025 年，为支持开发新的遗传选性品系和可扩展的雌雄分离系统，原子能机构通过粮农组织/原子能机构联合中心启动了一个协调研究项目，目的是在新的昆虫不育技术相关物种中验证这一通用遗传选性品系开发方案，并研究如何运用人工智能和机器人技术来构建自动化、稳健且具有成本效益的雌雄分离系统，以适应大规模、可运行的昆虫不育技术计划。

---

[15] WARD, C.M. 等人：“实蝇科的白蛹表型由主要易化子超家族转运蛋白的平行突变引起”，《自然—通讯》，**12** 1（2021）491。

[16] PAULO, D.F. 等人：“功能基因组学揭示实蝇科果蝇的黑蛹表型与黑檀体基因相关”，《通讯生物学》，**8** 1（2025）60。

[17] SOLLAZZO, G. 等人：“Deep orange 基因编辑诱导地中海实蝇出现温度敏感致死表型”，《BMC 生物技术》，**24** 1（2024）7。

[18] AUMANN, R.A.等人：“解码并控制地中海实蝇温度敏感致死基因，促进虫害防治”，《美国国家科学院院刊》，**122** 28（2025）e2503604122。

[19] IOANNIDOU, C. 等人：“基于 CRISPR/Cas9 技术在果实蝇中开发白蛹突变系以促进昆虫不育技术应用”《昆虫科学》（2025 年）（待刊）。

[20] GONG, Z.、IOANNIDOU, C.、SCHETELIG, M.F.、DROSOPOULOU, E.、BOURTZIS, K.：“开发经基因编辑的南亚寡鬃实蝇和桃实蝇白蛹品系以支持昆虫不育技术应用”，《普通昆虫学》（2025 年）（待刊）。

[21] PAULO, D.F.等人：“功能基因组学揭示实蝇科果蝇的黑蛹表型与黑檀体基因相关”，《通讯生物学》，**8** 1（2025）60。

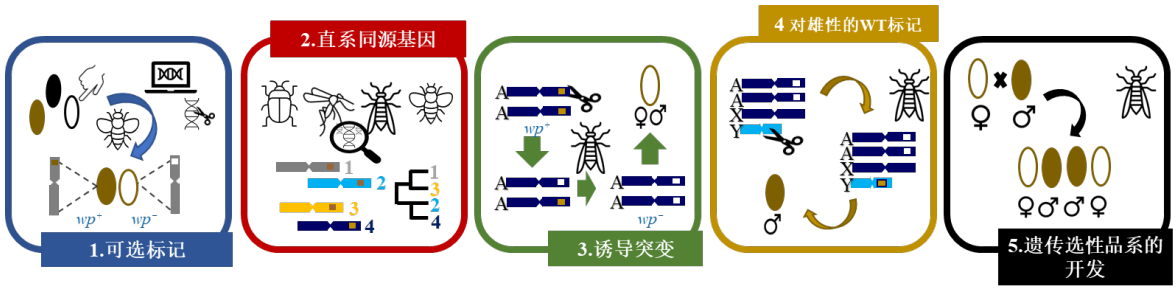


图 H.10. 为应用昆虫不育技术开发新古典遗传选性品系所需步骤示意图。（图片来源：原子能机构）



图 H.11. 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西和欧佩克国际发展基金总裁阿卜杜勒哈米德·阿尔哈利法参观原子能机构位于奥地利塞伯斯多夫的实验室，2024 年 10 月。（照片来源：原子能机构）

I. 放射性同位素和辐射技术

I.1. 铽同位素：个体化医学的未来

状况

212. 诊疗一体化将治疗和诊断相结合，是个体化医学的一个关键支柱。通过根据个体患者的需求定制诊断和治疗策略，诊疗一体化可以改善治疗效果，同时最大限度地减少副作用。

213. 得益于发射 α 和俄歇的放射核素的可得性以及疾病特异性载体分子数量的不断增多，诊疗一体化放射性药物领域正在迅速发展。临床上的成功，尤其是在治疗前列腺癌和神经内分泌肿瘤方面的成功，已将放射性诊疗一体化推向肿瘤学的前沿。可靠的合适放射性同位素供应对于这些应用至关重要。影响供应的因素包括靶材的可用性和成本、辐照条件、纯化工艺、废物管理和物流。

214. 放射性药物的生物特异性主要取决于其载体分子。该分子必须能够同时标记诊断和治疗用放射性核素，且其功能不受影响。理想情况下，它应该能够快速且选择性地在肿瘤中积聚，在健康组织中的摄取量极低，并能迅速从非靶区清除（图 I.1）。从实验室研究到临床应用，放射性药物的开发是一个复杂的过程，需要经历多个开发阶段，并符合严格的安全要求。放射性化合物的保质期短也带来了进一步的挑战。

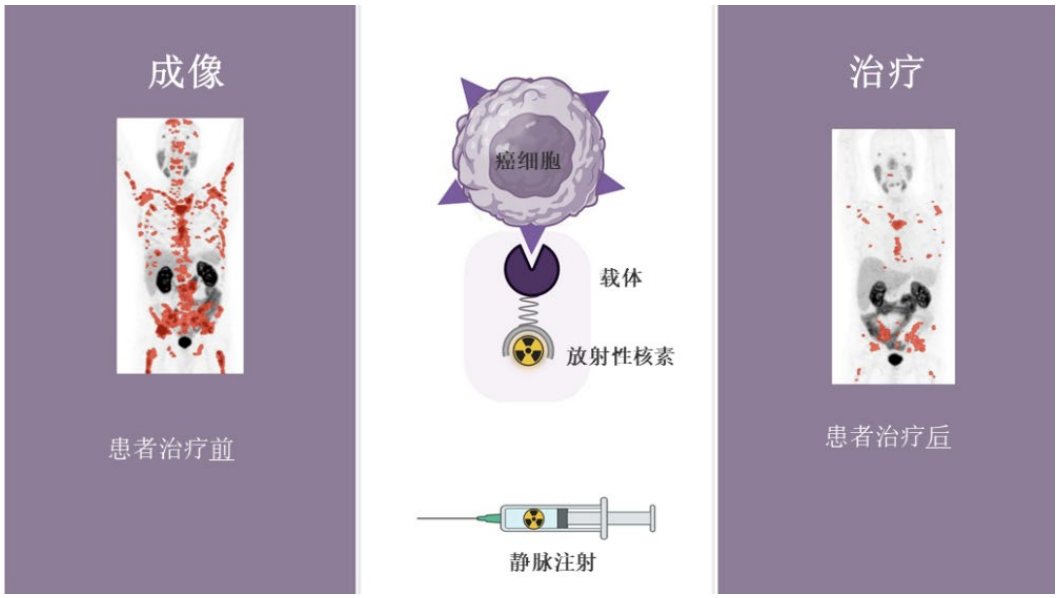


图 I.1. 诊疗一体化放射性药物及其应用示意图。
（图片来源：J. Kleynhans，鲁汶天主教大学）

215. 工业界投资的增加正在推动同位素生产、靶向配体、放射性标记技术和评估方法的发展。这扩大了探索各种放射性诊疗剂的临床前和临床研究的范围。

趋势

216. 将诊断和治疗放射性核素整合到单一放射性药物设计中，为药物开发和临床应用都带来了显著优势。铽尤其具有前景，因为它有四种同位素，这些同位素具有非常优异的、适用于成像和治疗的核特性（图 I.2）。具体而言，铽-152（^{152}Tb）适用于正电子发射断层照相，铽-155（^{155}Tb）适用于单光子发射计算机断层照相，铽-161（^{161}Tb）适用于使用俄歇电子进行负 β（β^-）治疗以提高精度，而铽-149（^{149}Tb）适用于靶向 α 粒子治疗。

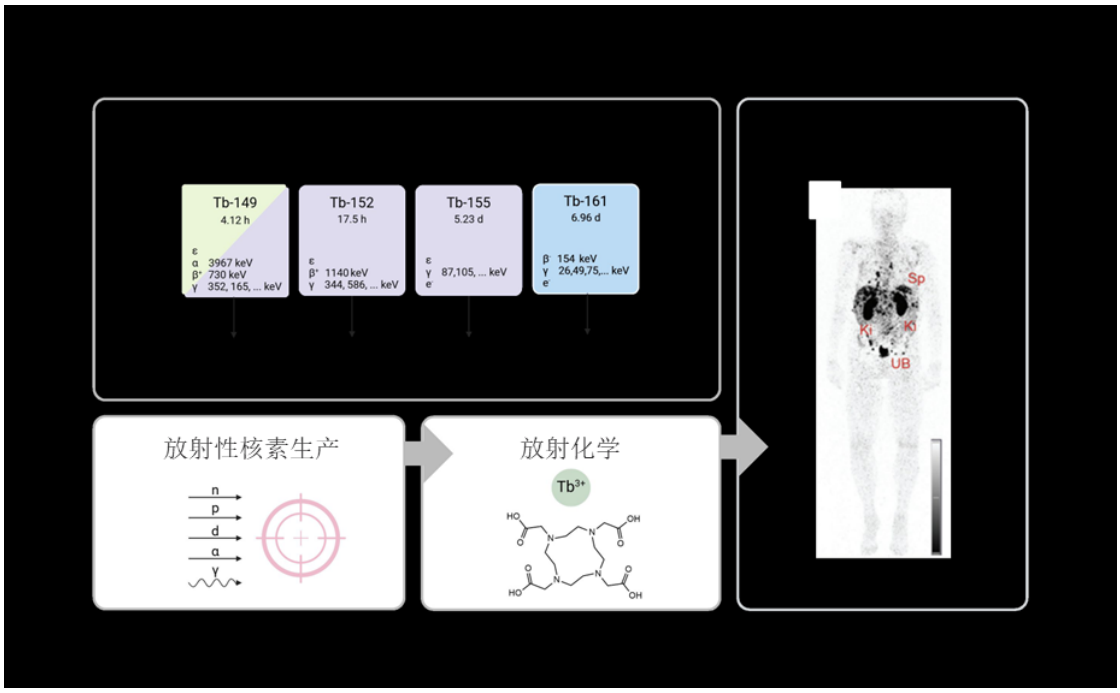


图 I.2. 用于诊疗一体化配对的铽放射性同位素。
（图片来源：J. Kleynhans，鲁汶天主教大学）

217. 其中，铽-161 在生产和临床前评估方面最为先进。其物理和化学性质与镥-177（^{177}Lu）相似，包括 6.95 天的半衰期、适用于治疗的负 β 发射（平均能量约为 154 千电子伏）以及适用于单光子发射计算机断层成像 — 计算机断层成像的 γ 发射。其超短程电子使其能够高效杀死癌细胞。目前正在进行临床试验，以评价其在患者治疗中的应用潜力。

218. 铽-161 可在研究堆中或使用质子/电子加速器进行生产。最实用的方法是使用高通量堆中的富集钆靶，从而获得高比活度的铽-161。需要进行提纯以去除靶材和杂质。全球多座研究堆均可生产铽-161，且已有商业供应商投入运营。目前至少有五项临床试验正在进行中，另有更多试验处于临床前开发阶段。未来发展方向包括与其他放射性药物、免疫疗法和化疗的联合治疗。

219. 铽-149 可用于靶向 α 疗法，并可通过正电子发射断层成像进行后续监测。铽-149 的半衰期较短，目前由欧洲核研究组织生产，其纯度较高，但生产难度较大。需要对长寿命子体同位素的放射毒性进行仔细评估。

220. 在诊断方面，由于具有使用广泛可得的医用回旋加速器进行生产的可行性，铽-155 尤其具有吸引力。单光子发射计算机断层照相机的全球普及进一步支持了基于铽-155 的成像技术融入常规临床实践。

221. 这些进展凸显了铽同位素在个体化核医学中日益重要的作用。为支持这一发展，原子能机构将启动一个协调研究项目，侧重于铽放射性药物特别是配对放射性核素铽-161 和铽-155 的开发。该协调研究项目将制定使用单克隆抗体、肽或小分子等载体对肿瘤靶向铽放射性药物进行放射性标记和质量控制的方案。参与成员国将受益于铽基放射性药物生产和供应方面本地能力、知识和技术的提升。

222. 关于镥-177 和铽-161 放射性药物的治疗效果，仍存在一些悬而未决的研究问题。提升全球开发高效、先进的诊疗一体化放射性药物的能力，将有助于完善知识库，并加速未来针对乳腺癌、前列腺癌及其他恶性肿瘤等癌症的临床研究。

I.2. 利用辐射技术将塑料废物转化为宝贵资源

状况

223. 塑料主要源自石油，可在环境中存留数百年之久。这种持久性导致其在垃圾填埋场、水道及河流溪流等自然生态系统中大量堆积，塑料碎片危害水生生物并恶化水质（图 I.3）。2019 冠状病毒病大流行进一步加剧了这一问题，个人防护设备的广泛使用仅在第一年就为全球垃圾填埋场增加了约 350 万吨废物。其中大量废物已进入淡水系统，凸显出改进废物管理和寻求可持续替代方案的紧迫性。

224. 塑料随时间分解为微塑料，其中常含对生态系统构成严重威胁的有害添加剂。焚烧等传统处理方式因有毒排放及对人体健康与环境的负面影响，正面临日益强烈的公众反对。

225. 先进化学回收技术 — 通过受控分解将聚合物转化为原料或燃料 — 为难回收塑料提供了前景可期的解决方案。但该技术要求严苛，需高温处理并消耗大量能源。

226. 辐射辅助热解提供了一种创新替代方案。通过应用电离辐射，该技术可降低分解温度和活化能，实现更高效的处理并节约能源，尤其适用于混合的消费后塑料等复杂塑料废物流。

227. 当前研究聚焦于将伽马射线或电子束辐照与热解结合，以提升塑料废物转化为燃料和石脑油等高价值产品的效率。参与国开展的试点研究已取得令人鼓舞的成果。

228. 马来西亚在“核技术用于控制塑料污染”倡议下的项目彰显了其在塑料废物管理领域的领先地位。该国与 Mensilin 绿色能源公司（图 I.4）合作，采用辐照作为预处理手段加速聚合物分解，提升其转化为液体燃料的效率。此举支持马来西亚向循环经济转型，并展现了辐射技术在工业规模解决塑料污染问题中的潜力。

229. 2025 年 11 月，在菲律宾马尼拉举办了推进这些核能解决方案的高级别论坛，凸显了日益增强的国际势头。论坛由菲律宾政府主办，各国领导人、亚洲开发银行与原子能机构参加了论坛，其中展示了技术进展，指出了规模化挑战，并强化了国际合作在将辐射技术转化为工业与环境效益中的作用（图 I.5）。

230. 该项目预计将于 2025 年 12 月达到概念验证阶段，达到 3 级技术成熟度 — 验证塑料转燃料工艺的关键里程碑。尽管辐射介导化学回收的前景明确，但仍需进一步投资与研究以推动该技术走向完全成熟。



图 I.3. 河流中的塑料聚集，凸显环境影响。
（照片来源：Ting Teo Ming，马来西亚核能机构）



图 I.4. 马来西亚 Mensilin 绿色能源公司的热解装置。
（照片来源：Ting Teo Ming，马来西亚核能机构）



图 I.5. 在马尼拉举行的“核技术用于控制塑料污染”国际高级别论坛合影，2025 年 11 月。（照片来源：原子能机构）

趋势

231. 辐射辅助催化热解正成为一项极具前景的技术，兼具废物资源化与清洁能源生产双重效益。该工艺可实现塑料废物中氢气与液体燃料的协同生产，将环境负担转化为宝贵资源。通过将塑料转化为可用燃料和原料，该技术可减少填埋量，防止污染物渗入海洋及淡水生态系统，并有助于降低对化石燃料的依赖。这项技术推动了塑料与能源行业的双向循环发展。

232. 基于当前题为“利用电离辐射回收结构材料和非结构材料聚合物废物”的协调研究项目，计划于 2027 年初启动一个新的协调研究项目。该项目将重点提升辐射辅助化学回收技术，特别关注环境安全（图 I.6）。目标包括识别并降低有毒副产物与危险气体排放，确保实施安全性。项目还将开展寿期评定以衡量环境足迹，确保符合循环经济目标与负责任创新实践。

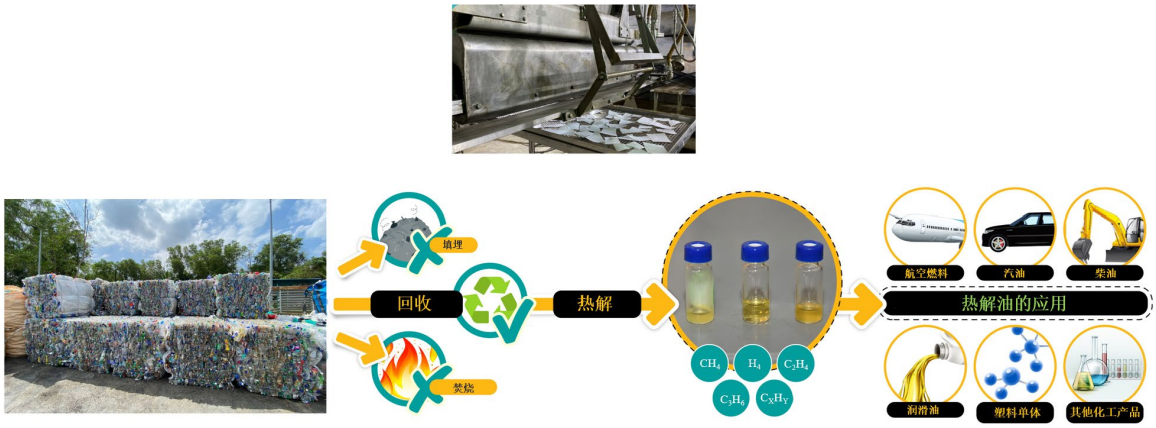


图 I.6. 辐射辅助热解方案。（图片来源：Ting Teo Ming，马来西亚核能机构）

I.3. 便携式中子发生器促进工业流程清洁

状况

233. 放射性示踪剂对优化工业流程至关重要。锝-99m（^{99m}Tc）、溴-82（^{82}Br）、铬-51（^{51}Cr）、金-198（^{198}Au）、钪-46（^{46}Sc）和碘-131（^{131}I）等放射性核素能实现对工艺流程、设备性能及产品质量的精准无损监测。其伽马辐射可实现外部检测而不干扰运行，使放射性示踪技术在泄漏检测、流量分析和工艺诊断方面极为高效。

234. 尽管具备这些优势，放射性示踪剂的广泛应用仍面临物流与监管挑战。多数放射性核素在集中式设施（如研究堆或粒子加速器）中生产，这些设施通常远离工业区。这就需要采用寿命更长的同位素来涵盖运输时长，从而使得放射性库存增加、废物管理复杂化。不断演变的监管框架也限制了获取与应用渠道，制约了传统放射性示踪方法的可扩展性。

235. 为克服这些挑战，原子能机构已召集专家磋商与技术会议，探索创新解决方案。一种前景可期的方案是部署便携式紧凑型加速器中子发生器。该系统可在使用点直接生成短寿命放射性核素，既减少对远距离生产设施的依赖，又最大限度减少放射性废物产生，不仅能实现放射性示踪剂的应用，也能进行直接的在线中子测量。通过解决供应链和监管限制问题，便携式中子发生器为工业流程优化提供了更安全、更灵活且对环境更负责的解决方案，符合现代运营与安全要求。

趋势

236. 便携式中子发生器正成为突破传统放射性示踪剂局限的实用方案。现场生产短寿命放射性核素可消除运输延迟，减少放射性库存，并实现快速部署。不间断生产的实时诊断技术提升了工艺效率和运行安全性，使该系统在动态工业环境中的故障排查、优化和控制方面具有独特价值。

237. 为推动该技术发展，原子能机构正启动一个专注于优化工业用紧凑型加速器中子源的协调研究项目。研究重点包括束流整形、靶材设计、探测系统、屏蔽技术及次级活化管理。这些进展旨在提升安全性、运行效率和易用性，使中子技术能够应用于从化工厂到采矿作业的日益复杂的场景。

238. 该协调研究项目还将着力制定标准化流程、操作指南及成本效益框架，以支持跨工业领域的安全、可扩展且一致的实施。通过促进便携式中子发生器的广泛应用，该项目助力实现更清洁、更安全、更高效的工业流程，同时最大限度减轻环境影响。

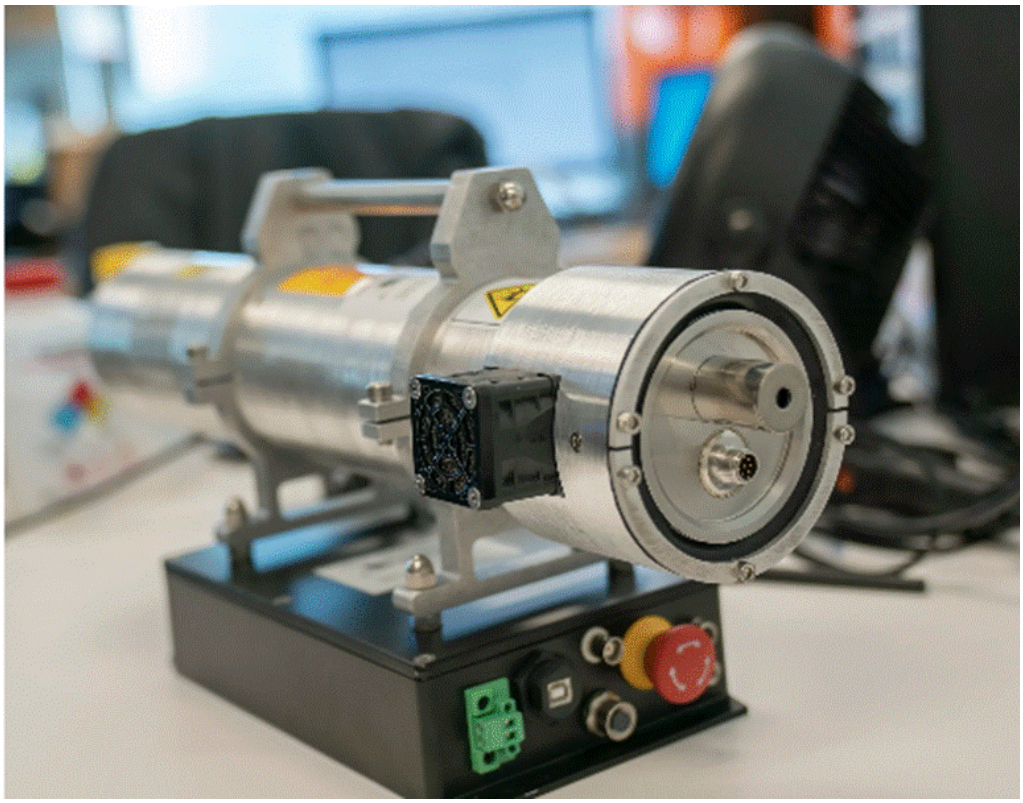


图 I.7. 用于现场生产短寿命放射性核素的便携式中子发生器。
（照片来源：星火工业公司）

J. 核数据赋能医用同位素生产

J.1. 核数据赋能医用同位素生产

状况

239. 核数据是医用同位素生产的基础，为优化从靶材设计、辐照规划到辐照后处理的每个环节提供定量依据。数据不准确或不完整会降低同位素产率，增加杂质含量，并引发安全或废物管理问题。两大关键领域至关重要：衰变数据与反应截面数据。

240. 衰变数据涵盖半衰期、分支比及γ射线发射特性。这些数据对活度测定、剂量学精度和放射化学纯度具有决定性作用。在医学应用中，衰变特性还决定着患者剂量、成像质量及安全规程。例如，正电子发射断层照相法的示踪剂依赖于精确表征的正β（β^+）发射概率和γ射线能量。编评核结构数据文件是此类衰变数据的权威来源。

241. 反应截面数据对正电子发射断层照相法同位素生产至关重要，该领域通常在回旋加速器和加速器设施中使用质子束和氘核束。氟-18（^{18}F）、碳-11（^{11}C）、氮-13（^{13}N）和氧-15（^{15}O）等关键正电子发射断层照相法的同位素主要通过质子束生产。新兴应用如诊疗一体化常需更高能量的质子或氘核束，而相关反应截面数据往往缺乏。原子能机构的编评核数据库或 TALYS 等核反应代码可用于精确预测同位素产率。

趋势

242. 2025 年 6 月在马德里举行的第十六届核数据用于科学技术会议强调，精确反应截面数据的需求正在日益增长，尤其在诊疗一体化应用领域。钪、铽等同位素正成为极具前景的候选材料，导致对衰变截面和反应截面数据的需求同步增长。原子能机构的医用同位素浏览器及基于 TALYS 的编评核数据库正日益被用于估算同位素产额。

243. 同等重要的是辐射过程中产生的非目标同位素杂质。例如，锆-89（^{89}Zr）通过一种使用钇-89 的众所周知的反应 ^{89}Y(p,n) ^{89}Zr 而制成（图 J.1）。然而，当回旋加速器能量超过 14 兆电子伏时，锆-88（^{88}Zr）杂质产额急剧上升（图 J.2）。准确评估这些截面对于最大化产额同时最小化杂质至关重要，可确保同位素生产的安全高效。

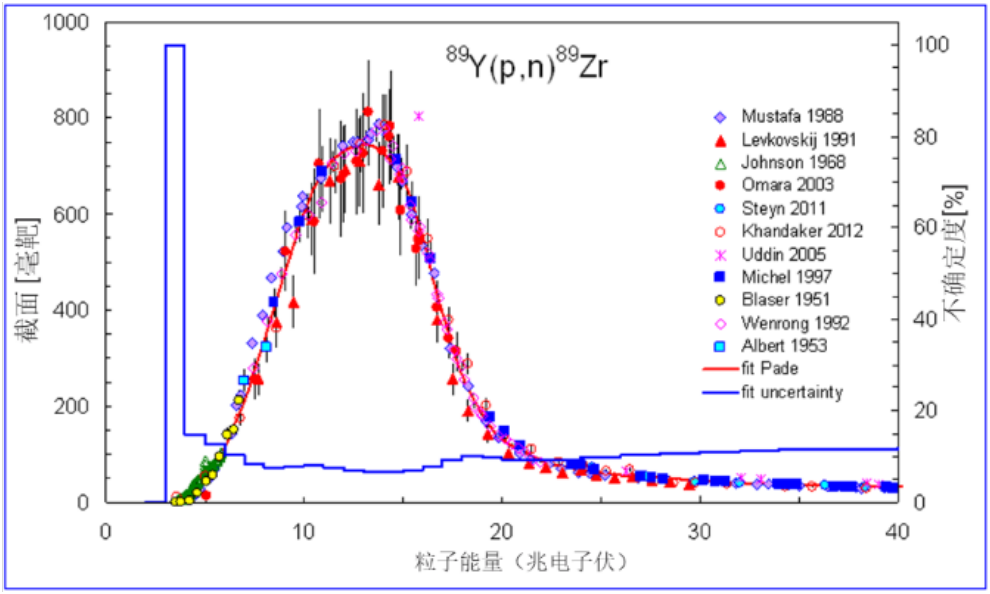


图 J.1. ^{89}Y(p,n)^{89}Zr 反应截面众所周知，不确定度约为 10%。
（图片来源：图由原子能机构医学门户生成 [22]）

[22] 载于：https://nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/MEDVChart.html

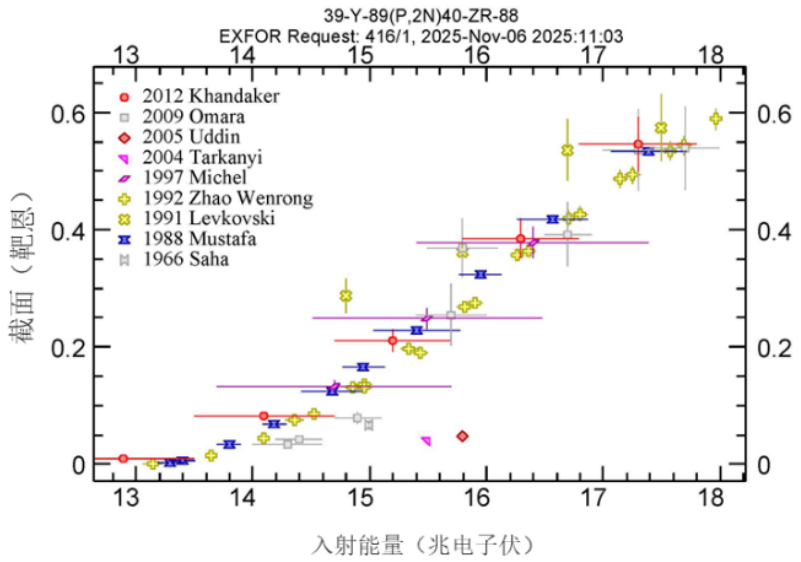


图 J.2. $^{89}Y(p,2n)^{88}Zr$ 反应截面存在较大不确定性，尚未完成评估。
（图片来源：图由原子能机构实验核反应数据生成 [23]）

K. 水资源

K.1. 氡-222：天然示踪剂助力水资源管理转型

状况

244. 评估水平衡的不同组成部分对有效的水资源管理至关重要。每个组成部分都能揭示水在系统中的流动与蓄积规律，有助于识别潜在失衡、短缺风险或节水机会。量化这些要素使决策者能够制定可持续分配策略，预测气候多变性的影响，并确保农业、工业和生活用水的长期供给。了解水平衡还有助于流域综合管理，以及减轻干旱、洪涝及土地利用变化的影响。

245. 在此背景下，天然放射性惰性气体氡（^{222}Rn）已成为地下水研究的变革性示踪剂。其化学惰性、高迁移率及短半衰期（3.82 天）特性，使其在追踪地表水与地下水系统间的快速水交换方面尤为有效。这些过程直接影响地下水的渗入、储存与排泄。通过检测和量化这些交互作用，氡能提升对地下水流径及水通量时变特征的监测精度，从而推动更精准、更知情的水资源管理。

246. 氡在识别地下水排泄区、估算流量及表征补给过程方面同样具有重要价值。其在地下水的富集程度取决于岩石类型，因而成为地下环境的有效指示剂。在易受快速补给和污染影响的脆弱含水层（常作为非正规或应急定居点的饮用水源）中，氡追踪短期水流运动的能力尤为关键。

---

[23] 载于：https://www-nds.iaea.org/exfor/

247. 历史上，氡在水文学中的广泛应用受限于技术与后勤障碍。高灵敏度便携式原位探测器缺失，实验室检测方法成本高昂且稀缺，需专业人员与基础设施支持。这些限制阻碍了技术普及，尤其在分析能力有限的成员国，导致氡潜力未能充分发挥。

趋势

248. 便携式氡检测技术的最新创新成果，使高灵敏度测量得以直接在现场完成，从而减少对实验室基础设施的依赖，并扩大了氡检测方法的应用范围。这一转变为复杂地下水系统的全新研究提供了可能，尤其在传统工具力有未逮的领域。

249. 原子能机构正引领将氡检测纳入主流水资源管理的努力。通过有针对性的研究、能力建设及协调行动，原子能机构正开发并验证氡检测方法学，以应对水文学方面的新挑战。原子能机构正与成员国及技术开发商协作，统一采样与分析规程，确保各地区氡数据的一致性与可比性。

250. 拉丁美洲及加勒比地区、非洲和亚洲的多个试点项目，正展示便携式氡监测系统在地下水-地表水实时测量的应用。这些应用验证了方法论的有效性，彰显了氡在复杂环境中的实用价值，同时强化了其作为水资源评估可靠工具的作用。

251.“利用同位素评定气候和水文学变化对湿地-地下水生态系统相互作用的影响”协调研究项目于 2021 年启动，正在推进以氡为基础评定气候多变性和对湿地-地下水相互作用的水文影响（图 K.1）。具体举措包括：建设国家能力；制定标准化采样分析指南；以及将氡纳入多示踪剂框架以提升水文模型精度。这些举措共同确立了氡作为可持续水管理的强有力决策支持工具的地位。



图 K.1. 作为“利用同位素评定气候和水文学变化对湿地-地下水生态系统相互作用的影响”协调研究项目的一部分，与国际专家共同开展了氡现场采样技术验证及标准化方案测试。（照片来源：M. Mazza，平原水文研究所，阿根廷）

252. 能力建设仍然是原子能机构方案的核心。结构化学习路径 — 包括电子学习模块、实际操作数据判读和实地培训（图 K.2.）— 确保成员国能够安全有效地实施氡监测。技术合作项目促进技术转让，弥合研究与实践之间的差距，并使各国能够在日常水评估中采用氡方法。



图 K.2. 作为原子能机构能力建设工作的一部分，在毛里求斯开展了使用多台氡检测仪调查地下水与地表水相互作用的高级实地培训。
（照片来源：S. Santoni，科西嘉大学，法国）

253. 通过将基于氡检测的方法学纳入水资源战略，原子能机构旨在加强成员国地下水资源的可持续性和安全性。这些举措旨在支持知情决策，加强机构能力，并应对与缺水、污染和气候多变性有关的挑战。通过不断的创新、协作和知识交流，氡正在成为现代水管理的重要工具。

L. 等离子体科学和技术的新兴应用

状况

254. 等离子体是物质的第四种状态，占可见宇宙的 99%以上，存在于恒星、闪电和极光中。在地球上，等离子体已成为多个领域科学技术创新的多功能工具，为农业、健康、水和环境等领域的解决方案做出贡献。

255. 等离子体在气体获得足够能量使其原子或分子电离时形成，产生带电和中性粒子的混合物。电离通过放电、电磁辐射或热激励发生。等离子体通常分为高温或低温两种。高温等离子体是聚变能研究的基础，而低温等离子体则在接近室温下运行，使得受控的表面反应和化学转化成为可能。这种多功能性促使其在工业流程、生物医学技术和环境修复领域得到广泛应用。

256. 等离子体研究已发展成为一个多学科领域，融合了物理、化学、工程和生命科学。早期应用包括照明和焊接，后期发展支持半导体制造、表面改性和薄膜沉积。如今，等离子体科学支撑着广泛的工业和社会应用，反映了其技术相关性和不断扩大的范围。

257. 在农业领域，等离子体应用正在迅速增长。等离子激活水和直接等离子照射可以提升种子发芽率、植物韧性和作物产量，同时作为环保消毒剂。等离子处理也在食品保存和包装灭菌领域被探索，以减少食品供应链中的化学品使用和废物。

258. 在医疗保健领域，低温等离子体可以在不造成热损伤的情况下使细菌和病毒失活，使其适合消毒、伤口治疗和癌症治疗。便携式等离子体设备正在为医院和偏远环境而开发，以提供低成本、高效的医疗保健解决方案。

259. 等离子体技术正日益应用于空气净化、废水处理和温室气体减排。非热等离子体可以在不添加化学添加剂的情况下分解病原体（细菌、病毒）和污染物（挥发性有机化合物、工业化学品、氮氧化物、全氟化合物），为传统修复方法提供了可持续的替代方案。

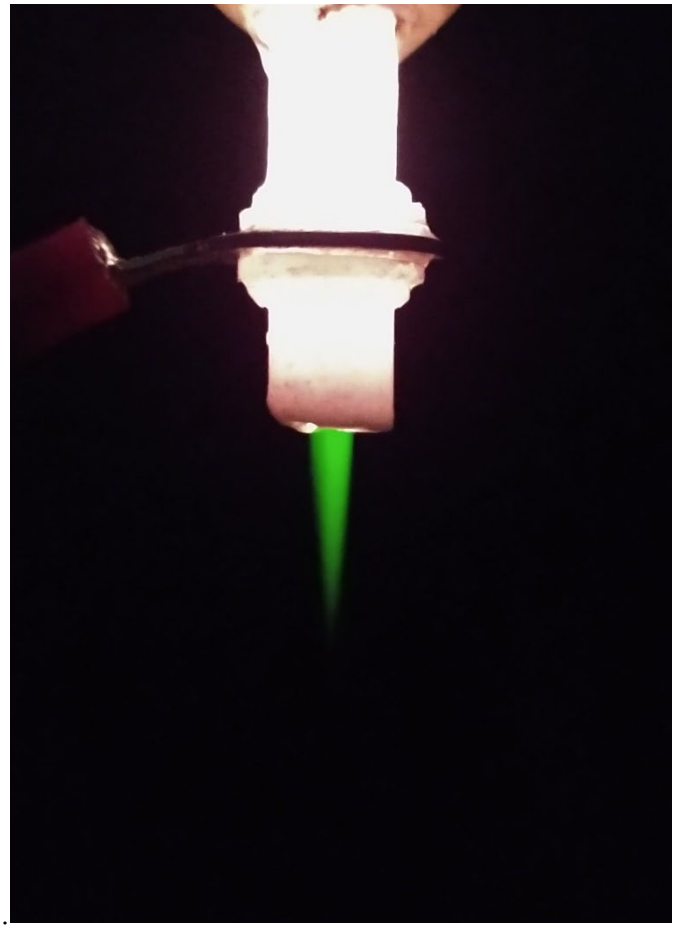


图 L.1. 大气压氩等离子体喷流显示绿色氧气发射，也见于北极光。等离子喷流是环境和材料应用的多功能工具。（图片来源：普林斯顿协作低温等离子体研究设施，普林斯顿等离子体物理实验室，美国）

260. 推进等离子体科学发展还需要价格合理的教育和实验室设备，以便人们能够亲身体验电离物理和电磁现象。这些工具加强了科学、技术、工程和数学教育，并增强了新兴等离子体相关领域的技术能力。

261. 等离子体研究与人工智能、机器学习、先进制造和环境科学的结合，使其成为推动更清洁、更智能、更具韧性的技术的推动者。原子能机构通过出版物、协调研究项目和专门的知识交流平台为成员国提供支持。

趋势

262. 等离子体应用正经历快速增长，这得益于电子学、诊断学、建模和计算工具的进步。经改进的诊断技术和模拟使得可以精确控制等离子体过程和提高预测能力。人工智能与机器学习的整合进一步加快了开发进程，使得实时最优化、优化等离子源设计和预测维护成为可能。这些趋势为能够在工业、环境和生物医学领域部署的智能、自适应等离子体技术提供了支持。

263. 跨学科协作依然是进步的核心。等离子体物理学、化学、材料科学、生物学和医学的融合持续催生创新应用。要全面实现等离子体技术，必须重点关注标准化、可扩展性和工业化实施。

264. 持续投资于连接学术界、产业界和国际组织的协作研究网络，对于促进知识交流和技术转移至关重要。新兴等离子体应用还为尚未参与聚变研究的成员国提供了切入点，从而得以开展先进科学和工程方面的能力建设。

265. 聚变科学与技术依赖多个学科。例如，用于磁约束聚变的高温超导体开发就受益于材料合成和表面工程方面的低温等离子体工艺。通过参与等离子体科学，成员国可以加强科研基础设施，建立技术专长，并为未来参与聚变能源奠定基础。

266. 原子能机构一直积极推动协调和信息交流。2023 年，首届等离子体科学和技术的新兴应用技术会议汇聚了来自 37 个成员国的 70 多位专家。会议强调了等离子体在农业、健康和环境方面的重要性，并确定了国际研究和培训计划的优先事项。

267. 基于此，原子能机构将发布题为《等离子体科学和技术的新兴应用》的原子能机构《技术文件》，回顾技术现状、挑战及未来等离子体活动的优先事项。一个题为“等离子体科学、技术和应用的发展”的新协调研究项目旨在桥接研究与实施，同时促进国际合作、最佳实践分享及可扩展等离子体应用的发展。该协调研究项目支持诊断标准化、数据共享和实验的可重复性。

M. 粒子加速器

M.1. X 射线自由电子激光装置：创新与发展之光

状况

268. X 射线自由电子激光装置是能够产生强相干 X 射线脉冲的大型加速器设施。自由电子被加速到相对论性能量，并通过波荡器引导，产生具有异常亮度、长横向相干长度和超短持续时间（低至飞秒和阿秒级别）的脉冲。这些特性提供了远超传统同步辐射源的能力，使结构生物学、纳米级成像、超快材料科学、高能密度物理学和非线性X射线相互作用的前沿研究成为可能。

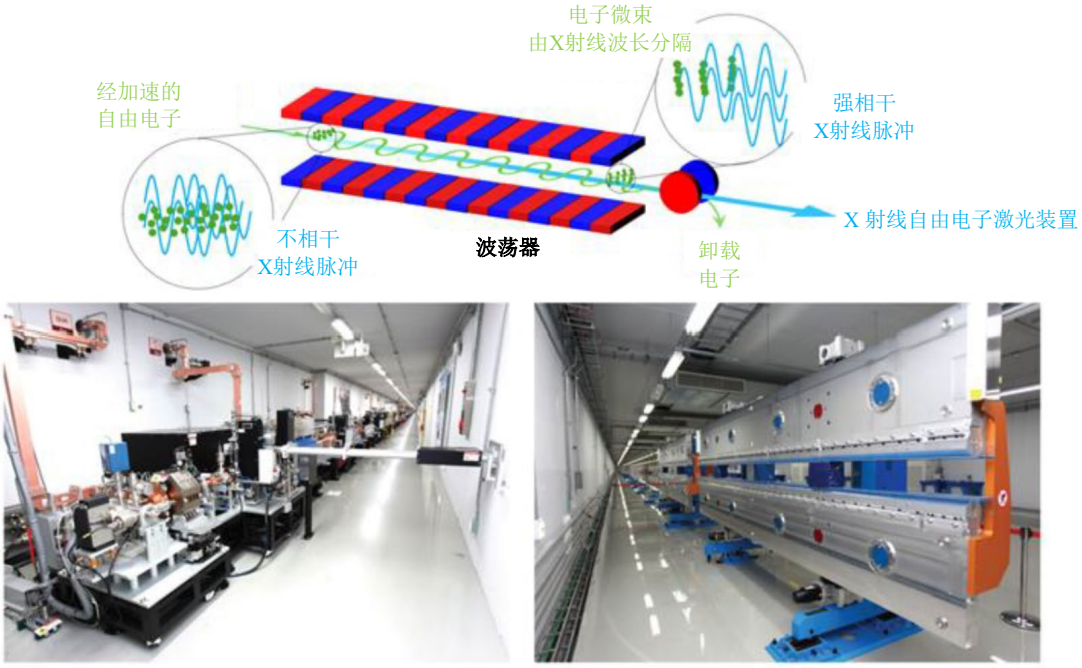


图 M.1. 强而相干的 X 射线自由电子激光装置脉冲产生示意图（上）；电子枪（左下）；以及大韩民国浦项加速器实验室 X 射线自由电子激光装置的波荡器（右下）。（图片来源：SaeHwan Chun，浦项加速器实验室 X 射线自由电子激光装置，浦项加速器实验室，浦项工科大学）

269. 根据原子能机构的加速器知识门户，目前在九个国家共有 14 座 X 射线自由电子激光装置设施：11 座在运行，一座在调试，两座正在设计或建造中。这些设施作为开放接入用户设施运行，通过竞争性的国际项目建议书计划分配束流时间。

270. 大韩民国浦项加速器实验室 X 射线自由电子激光装置（PAL-XFEL）自 2017 年起投入运行，提供软 X 射线（0.3－1 千电子伏）和硬 X 射线（2－20 千电子伏）波荡器线。其实验站支持共振 X 射线散射、傅里叶变换全息术、光谱学、衍射、溶液散射、相干 X 射线成像、显微镜术和串行飞秒晶体学。这些能力展示了 X 射线自由电子激光装置独特的科学潜力。

271. 除了研究之外，X射线自由电子激光装置还通过提供能力建设、培训和知识传播，为原子能机构成员国的优先事项提供支持。开放获取计划和国际协作使包括发展中国家科学家在内的科学家能够亲身体验先进加速器技术，从而加强国家科学与技术基础设施。

趋势

272. X射线自由电子激光装置开发迅速推进，重点是提高实验通量和精度。目前的策略包括高重复率运行以最大限度地提高数据收集效率，以及低重复率运行以实现增强的光束稳定性，从而满足需要精细控制 X 射线脉冲特性的实验需求。研究人员还在开发先进的束流模式和定时方案，包括用于 X 射线泵浦-X 射线探针实验的分束延迟光学、锁相脉冲和阿秒脉冲发生。现有设施正在扩大光束线和实验站的数量，同时全球范围内不断涌现新的 X 射线自由电子激光装置项目。这些发展支持更高的重复率性能、多维光谱学、非线性 X 射线科学和先进的成像技术。综合来看，X 射线自由电子激光装置正成为研究跨越物理学、化学、生物学、材料科学及工业应用（包括能量转换、催化、药物发现和下一代信息技术）的超快和纳米尺度现象的不可或缺工具。

M.2. 硼中子俘获疗法：精准辐射用于癌症治疗

状况

273. 近几十年来，癌症治疗大幅演变，从传统方法转向了旨在最大限度地提高治疗效率并减少副作用的更具针对性的治疗方案。尽管有这些进步，许多患者仍面临治疗失败。

274. 硼中子俘获疗法（BNCT）是一种能够提升特异性和效率的非侵入性技术，尤其针对侵袭性或难治性肿瘤而言。这是一种两步疗法，首先将非放射性硼原子选择性地输送到肿瘤细胞，然后用中子束照射。[24] 硼-10 原子的中子俘获反应会产生 α 粒子和反冲锂核，它们在极短的范围内沉积高能，极其精准地杀伤肿瘤细胞。

275. 硼中子俘获疗法的临床试验可追溯到 1951 年布鲁克海文石墨研究堆，随后在全球其他研究堆设施进行了研究。该疗法效率极高，通常比传统放疗需要的治疗次数更少。

趋势

276. 提供与低至中等通量研究堆相当的中子强度的紧凑型加速器基中子源的出现，使硼中子俘获疗法能够直接在医院环境中进行。2020 年，基于加速器的硼中子俘获疗法在日本获得首个临床批准，标志着一个重大里程碑，为研究中心、硼中子俘获疗法设施及私营部门项目的进一步扩展铺平了道路。[25] 目前，全球有 30 多个基于加速器的硼

---

[24] 国际原子能机构：《硼中子俘获疗法的进展》，非丛书出版物，原子能机构，维也纳（2023 年）。

[25] MATSUMURA, A. 等人：“日本推进临床硼中子俘获疗法的举措”，《癌症生物治疗与放射药物》，**38** 3（2023）201－207，https://doi.org/10.1089/cbr.2022.0056。

中子俘获疗法设施运营，采用中硼医疗的极锋刀（NeuPex）、nuBeam 和 NeuCure 套件等系统。

277. 严谨的临床研究已证明硼中子俘获疗法具有治疗效益，促使其获得监管批准并获得更广泛的临床采用。在中国，最近有两个项目获得了临床试验授权。厦门弘爱医院硼中子俘获疗法中心已获得研究性新药许可，并已完成 Ia 期试验（侧重安全性和剂量发现），目前正在进行 Ib 期试验（测试患者安全性和早期疗效）。东莞人民医院于 2025 年 4 月开始为其 Ia 期试验进行招募。厦门还开展了三项由研究者发起的试验，累计治疗患者超过 50 人。[26]

278. 2025 年 5 月在芬兰赫尔辛基大学医院综合癌症中心也启动了硼中子俘获疗法治疗，同时评估 nuBeam 套件对此前曾通过常规放射治疗的局部或区域复发、无法手术的头颈癌的安全性和疗效。[27]

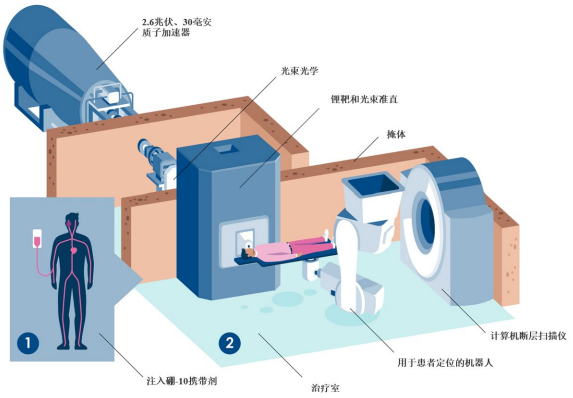




图 M.2. 芬兰赫尔辛基大学医院的医院硼中子俘获疗法中心。设施布局（左）；以及治疗室（右）。（图片来源：赫尔辛基大学医院）

279. 硼中子俘获疗法的应用范围正在扩大到涵盖多种恶性肿瘤（包括脑部和中枢神经系统）、头颈癌、肝细胞癌、肺癌和皮肤癌。[28] 2024 年在日本江户川医院进行的复发乳腺癌试点试验表明，硼中子俘获疗法可能作为一种有效的替代治疗，特别是对常规治疗有抵抗性的癌症。临床结果显示前景可期，完全缓解率为 51%，总体缓解率为 74%，一年和两年的无病生存率和总生存率统计数据良好。[29]

---

[26] ZHANG Zizhu 等人：“在中国大陆计划开展和正在进行的硼中子俘获疗法临床研究及最新进展概述”，《癌症》（巴塞尔），**15** 16（2023）4060，https://doi.org/10.3390/cancers15164060。

[27] 见“基于加速器的硼中子俘获疗法用于头颈癌治疗”，https://www.clinicaltrials.gov/study/NCT07058116?locStr=Finland&country=Finland&rank=4 。

[28] Zhou Tianyun 等人：“硼中子俘获疗法临床试验的现状及新进展”，《美国癌症研究杂志》，**14** 2（2024）429－447。

[29] HIROSE, K.、SATO, M.：“日本国民健康保险体系下，硼中子俘获疗法针对头颈部复发鳞状细胞癌的临床结果和预后因素：对最初 47 名患者的回顾性研究”，《国际放射肿瘤学、生物学、物理学杂志》，**120** 3（2024）796－804。

280. 展望未来，制定和采用协调一致、国际认可的方法学框架对于硼中子俘获疗法被认可为传统靶向癌症疗法至关重要。原子能机构致力于继续支持和协调旨在推动硼中子俘获疗法发展的国际活动。

N. 仪器仪表

N.1. 人工智能赋能的能谱测量用于精确测定中子能量分布

状况

281. 快中子能谱测量在核物理研究和应用（包括医学、放射性同位素生产、辐射防护、国土安全和核不扩散）中发挥着关键作用。与带电粒子不同，中子不会直接电离物质，这使得其探测和能量测量本质上更为复杂。能谱测量技术则依赖中子与原子核的相互作用，这为推断中子能量分布提供了间接手段。准确表征这些光谱至关重要，因为它们携带对基础研究和应用核技术至关重要的特定特征。

282. 在实验环境中，中子的产生和与物质的相互作用会产生复杂的混合辐射场，其由快中子和热中子组成，伴随着强烈的光子闪光。这使中子探测和光谱分析变得复杂，因而需要有确保精确能量测定同时有效甄别光子诱导信号的技术。

283. 在现有方法中，有机闪烁体特别适合在此类环境中进行快中子能谱测量。这些探测器利用中子-质子弹性散射产生反冲质子，从而产生与能量成正比的闪烁光。有机闪烁体有液态、塑料型和晶体形态；如芪（晶体）和 EJ-309（液体）等材料通过脉冲形状甄别实现卓越的中子/光子甄别，同时具备快速响应时间和高探测效率。

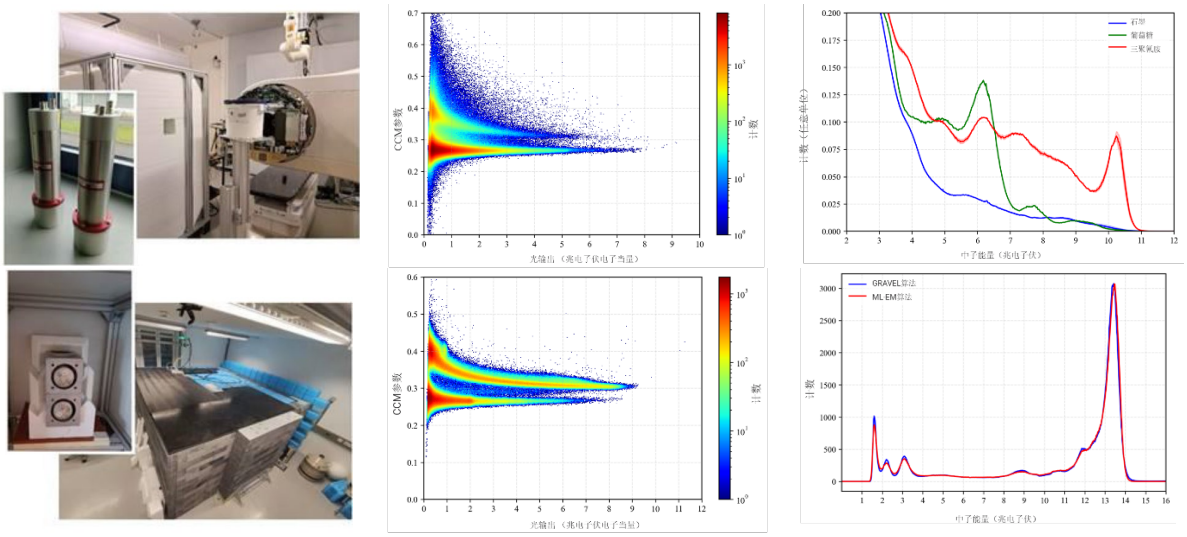


图 N.1. 采用 EJ-309 液体有机闪烁体测量由医疗电子直线加速器束流与不同介质相互作用产生的中子能谱（上）；以及经精确光子甄别与能谱重建后由氘-氘中子发生器产生的中子能谱（下）。（图片来源：法国替代能源与原子能委员会亨利·柏克勒尔国家实验室和巴黎萨克雷大学，法国）

趋势

284. 在运行环境中解读中子能谱仍然具有挑战性，因为光谱常因材料复杂性、几何效应和探测器响应而扭曲，使得人工或基于阈值的分析不够可靠。为解决这些限制，引入了基于人工智能的工具，从化学计量学技术中汲取灵感，采用了机器学习框架，以检测和识别已测得中子能谱中的特定特征。高级实现方案在其训练和验证数据集中整合了多项实验的真实能谱和真实的辐照场景。为了增强稳健性和可解释性，人工智能模型集成了用于不确定性量化的蒙特卡洛模拟、对模拟与实验数据的混合训练，以及使用非负最小二乘法的谱重建模块。这些改进使人工智能工具不仅能检测特定特征的存在，还能基于辐照介质的预测成分重建合理的中子能谱。此类方法在非法材料检测、环境监测、废物表征和复杂物体的无损分析中具有广泛适用性，能够支持涵盖多个领域更准确、自动化且基于物理原理的中子能谱测量。

N.2. 碳化硅探测器为核仪器仪表提供新机遇

状况

285. 硅技术革命由变得更小更强（即摩尔定律）的芯片推动，让硅芯片在日常生活中变得普及。然而，硅作为半导体在某些高功率应用方面已达到极限。碳化硅已成为电力电子的首选材料，使电子车载充电器、太阳能逆变器和风能变流器成为可能。其宽禁带和卓越的材料特性使得设计更小、工作电压更高、功率密度更高和热力性能提升，为传统硅器件失效的极端环境下的运行提供了支持。

286. 碳化硅具有几个关键优势：(a) 更好的热导率，允许更高效的散热和更简单的冷却需求；(b) 更高的击穿电压（高达硅的 10 倍），非常适合高功率应用；(c) 通过更快的切换和减少能量损耗提升功率转换效率；(d) 高温运行，便于极端环境下的使用。

287. 采用碳化硅技术面临的挑战包括晶圆成本较高、缺陷密度增加以及需要坚固封装以应对极端运行条件。全球对碳化硅日益增长的兴趣体现在“欧洲芯片倡议”中，其中包括一条专注于宽禁带半导体（如碳化硅）的旗舰试点产品线。

趋势

288. 随着碳化硅在电力电子领域日益重要，其在辐射探测方面的潜力也日益受到关注。碳化硅的宽禁带（2.36－3.26 电子伏）使其对可见光不敏感，从而导致漏电流低且适用于紫外光电探测器。其高导热率和减少的热量产生使得运行稳定，几乎没有或无需冷却。碳化硅探测器能够耐高温，并对带电粒子、中子和伽马射线具有固有的辐射硬度，且随着时间推移的老化效应和激活极小。这些特性使碳化硅探测器适合在核设施、工业环境或太空等极端环境中部署。

289. 此外，高载流子迁移率和宽禁带实现了优异的时间分辨率、快速电荷收集、降低热噪声、降低检测阈值以及改善信噪分离。这些优势推动了基于碳化硅的快中子、热中子、伽马射线、质子及其他带电粒子探测器在核研究和应用领域的发展趋势。当前工作重点是优化用于中子通量和能谱测量的探测器设计和性能，这些研究对聚变研究包括评估中子对偏滤器部件的影响、氚生产及中子诱导活化具有重要意义。最新研究结果表明，碳化硅探测器有望成为单晶金刚石探测器的一个有前景的替代品，单晶金刚石探测器目前用于监测极端环境中的等离子体温度。

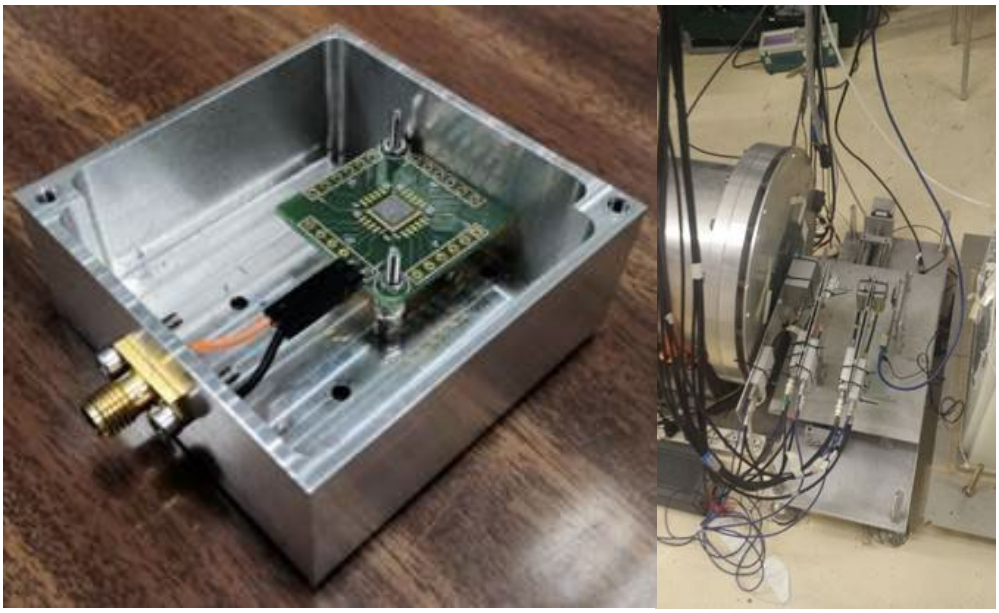


图 N.2. 基于碳化硅的快中子探测器（左）；以及用于在欧洲核研究组织中子飞行时间装置中子束线进行测试的实验装置（右）。
（照片来源：布鲁诺·凯斯勒基金会）

附件

表 A-1. 全世界的在运和在建核动力堆（2025 年 12 月 31 日）[a]

国家	在运反应堆		停运反应堆		在建反应堆		核电供应量	
	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）	太瓦时	核电 比例%
阿根廷	3	1 631			1	25	10.8	7.3
亚美尼亚	1	416					2.7	30.6
孟加拉国					2	2 160		
白罗斯	2	2 220					15.9	39.5
比利时	2	2 056					22.6	33.7
巴西	2	1 884			1	1 340	14.9	2.2
保加利亚	2	2 006					14.7	38.3
加拿大	17	12 714					81.1	13
中国	58	56 488			36	39 193	438.6 [b]	5
捷克共和国	6	3 972					30.3	42.1
埃及					4	4 400		
芬兰	5	4 369					31.3	39.6
法国	57	63 000					373.5	68.1
匈牙利	4	1 916					15.2	45.2
印度	21	7430	4	639	6	4 768	49.1	3.2
伊朗伊斯兰共和国	1	915			1	974	5.1	1.3
日本	14	12 631	19	19 048	2	2 653	94.7	9.4
大韩民国	26	25 609			4	5 360	175.5	31
墨西哥	2	1 552					9.8	3.9
荷兰王国	1	482					3.8	2.7
巴基斯坦	6	3 262			1	1 117	23.7	16.5
罗马尼亚	2	1 300					10.1	20.5
俄罗斯联邦	34	27 969			5	5 000	204.9	18.7
斯洛伐克	5	2 306			1	440	18.0	64.4
斯洛文尼亚	1	696					5.5	39.7
南非	2	1 854					10.2	5.5
西班牙	7	7 123					51.5	18.9
瑞典	6	7 012					44.8	26.7
瑞士	4	2 973					18.4	27.1
土耳其					4	4 456		
阿拉伯联合酋长国	4	5 348					39.8	22
英国	9	5 883			2	3 260	32.9	10.7
乌克兰	15	13 107			2	2 070	NA	NA
美利坚合众国	94	96 952					785.6	17.7
全球	**413**	**377 076**	**23**	**19 687**	**72**	**77 216**	**2 635.2** [c]	**N/A**

说明：NA — 不详；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 2025 年 7 月 2 日前提供的数据进行了更新。

[b] 总发电量包括中国台湾的下列数据：2 太瓦时发电量。

[c] 总发电量不包括乌克兰，因其未提交 2025 年的运行数据。

表 D-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	164	52
中子活化分析	118	51
放射性同位素生产	83	41
中子射线照相	68	36
材料/燃料辐照	68	27
中子散射	45	28
地质年代学	22	19
嬗变（硅掺杂）	22	13
嬗变（宝石）	21	12
中子治疗，主要是研发	16	12
核数据测量	19	13
其他 [c]	117	34

[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 235 座研究堆（截至 2025 年 11 月，228 座在运，七座临时关闭）。

[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。

表 E-1. 低温等离子体源实例及其在农业、健康和环境领域的应用

等离子体源类型	工作原理	典型条件	代表性应用
介质阻挡放电	交流高电压穿过有绝缘介质的电极，会在气体中产生微放电。	大气压；20－100°C	**农业：**促进种子发芽、害虫灭活、食品和包装保鲜。 **健康：**表面消毒、仪器消毒。 **环境：**空气和水净化。
电晕放电	尖细电极附近的强电场使周围空气局部电离。	大气压；20－80°C	**农业：**温室中空气传播的病原体灭活。 **健康：**空气消毒，医疗环境中的病原体控制。 **环境：**减少氧化氮/硫氧化物，产生臭氧。
等离子体射流/流注	高压电（直流/射频）使流经狭窄喷嘴或管道的气体发生电离；然后，电离后的气体被喷射到空气中，形成延伸到电极之外的定向等离子体羽流（射流/流光）。	大气压；20－60°C	**农业：**种子处理、生物膜控制、等离子体活化水生产。 **健康：**伤口愈合、皮肤病治疗、微生物灭活、氩等离子体凝固。 **环境：**局部表面清洁，微塑料降解。
滑动弧放电	电弧被气流驱动沿发散电极滑动。	大气压；低温-高温	**农业：**通过固氮合成肥料。 **环境：**废气处理。
微波等离子体	微波场在流动气体中或在界面处维持等离子体。	低气压；<200°C	**农业：**等离子体活化水促进植物生长。 **健康：**医疗器械灭菌。 **环境：**净水。
射频等离子体	射频电场电离腔室或反应器中的气体。	低气压（10^{-3} －10^{-1} 毫巴）；25－150°C	**农业：**可生物降解薄膜表面改性、牛饲料谷物去污。 **健康：**医疗器械去污。 **环境：**表面清洁，催化剂活化。
脉冲放电	高压脉冲在气体或液体中产生瞬态等离子体。	低气压；低温－高温	**农业：**灌溉用水杀菌。 **健康：**等离子体活化液体用于消毒。 **环境：**水和废水净化、药物降解。

辉光放电	低气压下，电极之间的持续直流或交流/射频放电。	低气压（0.1－10 毫巴）；50－200°C	**农业：**包装材料表面活化。 **健康：**灭菌室。 **环境：**分析光谱仪。

简 称 表

AMR	抗微生物药物耐药性
ARDP	先进反应堆示范计划
AI	人工智能
ATF	先进技术燃料
BNCT	硼中子俘获疗法
SCK CEN	比利时核研究中心
COP28 2023	2023 年《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第 28 届会议（2023 年“气候公约”缔约方大会第 28 届会议）
COP30 2025	2025 年《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第 30 届会议（2025 年“气候公约”缔约方大会第 30 届会议）
CRP	协调研究项目
CT	计算机断层照相法
EF	射血分数
EPRI	电力研究所
CERN	欧洲核研究组织
EU	欧洲联盟（欧盟）
FAO	联合国粮食及农业组织（粮农组织）
FNPPs	浮动核电厂
GC-IRMS	气相色谱-同位素比质谱测定法
GSS	遗传选性品系
GJ	吉焦
GW	吉瓦
GW(e)	吉瓦（电）
GW • h	吉瓦时
GBN	大英核电公司
HALEU	高丰度低浓铀
HEU	高浓铀
HPR1000	华龙一号
HLW	高放废物
HTGR	高温气冷堆
HTTR	高温工程试验堆
HTGRs	高温气冷堆
HTR-PM	球床模块式高温堆
INL	爱达荷国家实验室
IANC	工业先进核能联盟
IRFM	磁聚变研究所

INIR	综合核基础结构评审
ILW	中放废物
IPPC	国际植物保护公约
ISOP	创新支持在运核电厂国际网络
ISPM(s)	国际植物检疫措施标准
ITER	国际热核实验堆
IUPCR	铀生产周期综合评审
IND	研究性新药
LEU	低浓铀
LFR	铅冷快堆
LILW	中低放废物
LMICs	中低收入国家
LLW	低放废物
LWR	轻水堆
MBIR	多用途研究快堆
ML	机器学习
MW/MW(e)	兆瓦/兆瓦（电）
MNUP	混合铀钚氮化物
MOX	混合氧化物
MOU	谅解备忘录
MSR	熔盐堆
NIF	国家点火装置
NORM	天然存在的放射性物质
NDA	核退役管理局
NEA	核能机构
NHSI	核协调统一和标准化倡议
NMR	核磁共振
NPP	核电厂
NRC	核管理委员会（核管会）
NRIC	核反应堆信息中心
OECD	经济合作与发展组织（经合组织）
PFAS	全氟和多氟烷基物质
PET	正电子发射断层照相法
PHWR	加压重水堆
PFBR	原型快中子增殖堆（原型快堆）
PRIS	动力堆信息系统
PWR	压水堆
RF	射频

REE(s)	稀土元素
R&D	研究与发展（研发）
RPP	反应堆试点计划
SPECT	单光子发射计算机断层照相法
SFR	钠冷快堆
SMRs	中小型反应堆或模块堆
SIT	昆虫不育技术
SNF	乏核燃料
t HM	吨重金属
TW • h	太瓦时
tU	吨铀
TNPPs	移动式核电厂
WCR	水冷堆
UAE	阿拉伯联合酋长国（阿联酋）
UK	英国
USA	美利坚合众国（美国）
USDA-APHIS	美国农业部动植物卫生检验局
DOE	美国能源部
^{235}U	铀-235
VLLW	极低放废物
VSLW	极短寿命废物
XFEL(s)	X 射线自由电子激光装置



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

26-11372C