

■ 2023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(67)/INF/4

2023 年核技术评论

总干事的报告

GC(67)/INF/4

国际原子能机构在奥地利印制
2023 年 9 月
IAEA/NTR/2023

目录

概要.....	5
总干事的前言.....	6
执行概要.....	7
A. 核电.....	11
A.1. 核电预测.....	11
A.2. 在运核电厂.....	13
A.3. 新的或扩大的核电计划.....	15
A.4. 核电技术发展.....	18
A.4.1. 先进水冷堆.....	18
A.4.2. 中小型反应堆或模块堆及微堆.....	19
A.4.3. 快堆.....	21
A.4.4. 核电的非电力应用.....	22
B. 核燃料循环.....	24
B.1. 前端.....	24
B.2. 后端.....	27
C. 退役、环境修复和放射性废物管理.....	28
C.1. 退役.....	28
C.2. 环境修复和天然存在的放射性物质管理.....	32
C.3. 放射性废物管理.....	34
D. 以核聚变研究和技术发展促进未来能源生产.....	36
E. 研究堆、粒子加速器和核仪器仪表.....	41
E.1. 研究堆.....	41
E.2. 粒子加速器.....	44
E.3. 核仪器仪表.....	46
F. 粮食和农业.....	47
F.1. 对食品安全危机作出快速响应.....	47
F.2. 食品辐照方面的进展：更多机器源用途和新的软束技术.....	51
G. 放射性同位素和辐射技术.....	56
G.1. 诊疗放射性药物的发展.....	56
H. 人体健康.....	58
H.1. 人工智能促进轮廓描绘和放射治疗规划.....	58

I.	海洋环境.....	62
I.1.	新兴关切污染物	62
I.2.	利用海洋环流的新型放射性示踪剂，改进对污染物迁移及海洋 和气候变化的理解和建模	65
	附件	69

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 2022 年令人瞩目的发展情况。
- 《2023 年核技术评论》涵盖以下选定领域：核电、核燃料循环、退役、环境修复和放射性废物管理、以核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、粮食和农业、放射性同位素和辐射技术、人体健康以及海洋环境。
- 草案文本以 GOV/2023/3 号文件提交理事会 2023 年 3 月会议。本最后文本根据理事会会议期间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，还是用于解决食品、健康、水和环境问题，核技术在解决我们许多最紧迫的挑战中都发挥着重要作用。

2022 年，全球气候危机与能源市场的动荡交织在一起，使成员国对核电帮助实现净零排放和确保能源供应安全的能力重新产生了兴趣。与此同时，越来越多的国家将核技术用于非动力应用，包括保护水资源、发展更智能的农业以及通过更好的癌症护理来拯救生命。

在埃及沙姆沙伊赫举行的 2022 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 27 届会议）期间，原子能机构督办了该大会有史以来第一个专门展示核技术对减缓气候变化以及监测和适应其影响的好处的展馆。此外，为了进一步加深对核电在电力以外的能源脱碳方面的潜力的了解，在“气候公约”缔约方大会第 27 届会议上还启动了“原子促进净零排放”倡议。在这些努力的基础上，原子能机构将在于阿拉伯联合酋长国迪拜举行的“气候公约”缔约方大会第 28 届会议上继续与成员国和更广泛的国际社会接触，讨论核能及其和平应用在解决气候危机方面所发挥的重要作用。

几十年来，核科学技术在帮助各国满足发展需求方面一直表现突出。它们当然可以表现得更优异，而且在更多领域。通过强调 2022 年核技术的主要发展，《2023 年核技术评论》将有助于成员国就面对当前和新的挑战所采取的适当路线作出知情决定。



图 FW-1. 原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西在埃及沙姆沙伊赫举行的 2022 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 27 届会议）上发言。

执行概要

1. 原子能机构连续第二年上调了其对未来几十年核电潜在增长的年度预测，以反映在对能源安全和气候变化日益关注的情况下，全球关于能源和环境的辩论发生的变化。可变可再生能源的日益普及可能是电网不稳定的一个原因，而核电厂可以通过稳定的清洁能源供应来弥补这一缺陷。原子能机构已将 2050 年的高值预测提高到 873 吉瓦，比前一年的高值假想方案上调了 10%。根据全球电气化水平，2050 年核电份额可能占到电力组合的 14%，比目前的 9.8% 大幅增加。
2. 2022 年底，全球在运核电装机容量达到 393.8 吉瓦（电），其由 32 个国家的 438 座在运核反应堆提供。2022 年，超过 7.4 吉瓦（电）的新容量在五个国家被接入电网。根据有关国家向原子能机构提供的报告，核动力堆群产生了约 2486.8 太瓦·时的低排放、可调度电力。
3. 2022 年的能源危机已经搁置了一些关于反应堆关闭的决定，促使营运者和监管机构采取行动以确保安全和可靠的长期运行。对于营运者通过电厂现代化和加强主要设备和系统将核电厂的运行寿期延长数十年以支持长期运行而言，强大的动力是对安全、清洁、可靠和具有成本效益的电力生产的持续和不断增长的需求。
4. 在 50 个表示有兴趣引进核电的成员國中，有 24 个国家处于决策前阶段，正在进行规划活动。其余 26 个国家正在寻求引进核电。到 2035 年，运行核电国家的数量可能会增加约 30%，与目前的 32 个国家相比，新增 10 至 12 个运行核电厂国家。对引进核电的兴趣越来越大，这需要充分发展核基础设施。
5. 水冷堆在商用核工业中继续发挥重要作用，目前占世界上所有在运民用动力堆的 95% 以上。全球核电技术发展的重点是加速部署先进堆，特别是中小型反应堆或模块堆，以及将核电的使用扩大到非电力应用，如地区供热、制氢和海水淡化。
6. 促进核能非电力应用的热电联产是一项可靠和成熟的技术，在世界范围内引起越来越大的兴趣，市场前景广阔，发展潜力巨大。若干国家正在考虑利用核反应堆产生的电力或热能制氢以及进行海水淡化。
7. 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首创中小型反应堆或模块堆设计。因此，若干启动核电国家已将中小型反应堆或模块堆纳入其技术考虑范围，或继续监测其发展。在 18 个成员國中，有超过 80 个来自主要技术路线的中小型反应堆或模块堆设计处于不同的开发和部署阶段。大量的工业和监管努力正在进行中，以促进设计开发和早期部署，包括通过原子能机构的中小型反应堆或模块堆平台和“核协调和标准化倡议”。

8. 随着强大计算能力和数据分析工具的出现，核工业正在拥抱人工智能（AI）、机器学习（ML）和深度学习技术，以改造操作系统和短期及长期维护系统，以及先进制造技术。区块链技术正展示出在整个核电供应链上的各种潜在应用。
9. 随着核聚变在私营部门的兴起，随之而来的资本投入的大幅增加和最近的突破，以及大型国际和国家聚变项目的进展，除了核聚变实验科学外，成员国还正在加速进行核聚变技术开发。基于人工智能的等离子体动力学建模和聚变实验的实时控制在功效上有了巨大的改进，为实现聚变能源提供了一条加速的路径。
10. 国际热核实验堆项目的第一等离子体运行取得了良好的进展。2022年6月，该项目达到了完成77%的里程碑。然而，由于2019冠状病毒病大流行的影响以及需要修理一些关键部件等技术挑战，预计原工作计划会出现延误。
11. 铀现货价格的持续上涨为铀生产行业注入了活力，若干初级生产商正在寻求重新启动其因现货价格低而被置于照管和维护状态的业务。随着过去两年铀市场出现积极的信号，勘探活动正在增加。
12. 全球乏核燃料以每年约7000吨重金属的速度积累，而贮存的存量约为32万吨重金属。对于那些制定了长期核计划并奉行开式循环战略的国家来说，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。对于实行闭合核燃料循环战略的国家，可以对乏核燃料进行后处理和回收，用于进一步的燃料生产。
13. 通过改进规划和实施，包括营运者和外部利益相关者改进退役方案的可视化，数字技术在推进核退役项目方面发挥着越来越重要的作用。正在深入研究增强现实和虚拟现实，以支持退役活动和营运者培训。
14. 环境修复的一个新趋势是将减少危害的概念扩展到受污染场址的聚合价值。作为循环经济的一部分，修复也是采矿作业的一个关键阶段，因为它提供了将场址恢复到适于未来生产目的的机会。
15. 2022年，放射性废物管理继续取得扎实进展，特别是在推进深部地质处置库计划和继续安全部署处置前技术方面。
16. 将弃用高活度源返还供应商进行再循环和处置的情况有所增加。已计划于2023年从十几个以上的成员国移除30多个高活度源。虽然许多国家在弃用密封放射源管理方面取得了进展，但弃用密封放射源的处置仍然是一个挑战，特别是在拥有规模较小核计划的国家。
17. 全球各国对研究堆的兴趣继续增加。除了233座在运研究堆外，还有11座正在建设中。运行至少40年的研究堆比例正在接近70%。一些运行高利用率研究堆的组织正在考虑将它们的有效寿期延长到80—100年。

18. 更大规模的人工智能应用一直在革命性地改变着高能物理学的世界。随着强子加速器被升级到更高的光度，每次碰撞产生的粒子数量也在增加。因此，跟踪探测器需要以更高的计数率运行，潜在地具有更高的背景计数，因为稀有探针发现通道是目标。

19. 目前，使用无人驾驶飞行器（无人机）进行辐射探测和监视的趋势受到趋向更有效载荷、安全性和飞行耐久性、阻力和制导精度的新参数的影响。新的用于辐射探测和伽马光谱分析的商业化无人机已经出现，为放射性测绘和其他应用提供了全面的解决方案。

20. 最近的危机和紧急情况，如 COVID-19 大流行、冲突和与气候有关的自然灾害，突显了全世界粮食供应在压力情况下的脆弱性，以及通过改革粮食控制系统和改善技术来提高韧性的必要性。将新的和正在出现的核分析技术应用于现场食品分析，能够有效应对影响食品供应和粮食安全的情况。

21. 目前在大约 70 个国家至少有一种食品被辐照，以改善食品安全、保持食品质量和延长保存期。由于经济和实用的优势，机器源辐照如低能量束（软电子或软 X 射线）的使用正在扩大。这种替代技术有助于补充伽马设施的现有能力，使食品辐照得到更广泛的应用。

22. 在诊疗学中，一种用于诊断癌症的放射性核素与另一种用于治疗放射性核素结合使用。分子成像以及诊疗应用方面的最新进展需要更多的、新兴的放射性同位素供临床医生使用。由于放射性核素生产的技术发展，用于放射性药物应用的有前景的放射性核素清单正在增加，这将有助于改善患者疗效。

23. 作为水分子中惟一的放射性同位素，氚是水循环过程的宝贵示踪剂，有助于估计地下水的补给和评估对污染的脆弱性。由于目前天然水体中的氚浓度较低，标准测量方法需要大量且耗时的氚富集才能获得准确和精确的结果。原子能机构开发的一个新的氚富集系统有望彻底改变成员国为水文监测目的在超低水平上确定水样中氚浓度的能力。

24. 大约一半的癌症患者需要在某个节点接受放射治疗。人工智能（AI）可以为全球医疗工作者的短缺提供一个解决方案。人工智能可以提高质量和标准化并节省时间，尤其是在勾画轮廓方面，这是放射治疗的关键步骤，在此过程中要勾勒出器官、正常组织和肿瘤。混合智能结合了自然智能和人工智能的优势，可用于需要手动调整或检查的具有挑战性的轮廓。

25. 新兴关切污染物“无声大流行”的警告信号很明确。新兴关切污染物是在环境中检测到的不属于监管监视计划范围的化学物质。被动采样技术可以检测出存在于海洋环境中的数千种化学品，并促进对以前未知化合物的识别。水取样和先进分析筛选技术的突破可以帮助解决海洋环境中存在的复杂的新兴关切污染物混合物所带来的一些挑战。

26. 放射性示踪剂被用来追踪海水的流动，以及了解海洋和沿海生态系统。它们能够监测放射性和非放射性污染物，如微塑料和甲基汞，并有助于识别和量化海产品中的生物毒素，评估海洋酸化对钙化生物的影响，以及评价随着温度升高的代谢过程。质谱测定法的最新进展为检测和分析极低浓度长寿命放射性核素提供了可能。

A. 核电

A.1. 核电预测

状况

1. 原子能机构连续第二年修订了其对未来几十年核电潜在增长的年度预测，以反映在对能源安全和气候变化日益关注的情况下，全球关于能源和环境的辩论发生的变化。

2. 在对全球核发电容量的新展望中，原子能机构将其对 2050 年的高值预测提高到 873 吉瓦，比前一年的高值假想方案上调了 10%。要实现这一预测，需要在现有机组中大规模实施长期运行，并在未来 30 年内新建近 600 吉瓦的容量。这将要求工业界在预算范围内按时交付，为获得融资提供便利，并在统一监管要求和工业方法的标准化方面取得进展。这种行动对中小型反应堆或模块堆和其他先进堆等新技术尤为重要，预计这些技术将通过向无法实现电气化的部门提供低碳热能或氢气在能源部门的去碳化中发挥关键作用。

873 吉瓦
2050 年

3. 根据全球电气化的水平，核电的份额可能占到电力组合的 14%，高于目前 9.8% 的数字。在低值情况下，到 2050 年核电装机容量将稳定在 400 吉瓦左右，但由于其他能源贡献的增大，核电份额可能下降到 6.9%。

4. 在 2022 年 11 月在埃及沙姆沙伊赫举行的《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第 27 届会议上，就核电对可负担得起的、有弹性的和安全的能源供应的贡献及其对为可再生能源的部署提供重要支柱的去碳化能源系统的贡献进行了高级别讨论（图 A.1）。清洁能源转型的融资，特别是核项目的融资，仍然是一个挑战，尽管在 2022 年出现了一些积极的发展，如将核电纳入欧洲联盟（欧盟）的可持续金融分类标准，以及世界各地的其他分类标准。

取决于全球电气化的水平，
核电的份额可占到



高达 **14%** 的电力组合，
高于今天的 **9.8%**。

在低值情况下，核电装机容量
到 **2050 年** 将保持稳定在 **400 吉瓦** 左右，
但核电份额可能降至 **6.9%**。



图 A.1. 原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西与联合国工业发展组织总干事格尔德·穆勒和联合国欧洲经济委员会执行秘书奥尔加·阿尔加耶罗瓦在“气候公约”大会第27届会议的“低碳技术对弹性净零能源系统的影响”会外活动中。(照片来源：原子能机构)

趋势

5. 人们对先进型和革新型反应堆技术包括中小型反应堆或模块堆及其应用的兴趣很大，而且越来越大。与先进的大型水冷堆一起，中小型反应堆或模块堆有望在未来 30 年内构成应对气候变化的低碳能源新增容量的大部分，并以可承受的价格确保能源供应的安全。核部门将继续应对一系列挑战，包括降低成本、能力建设，以及在监管和工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的努力，原子能机构总干事在 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者（政府、监管机构和行业）提供一个独特的机会，以中小型反应堆或模块堆技术为重点，为实现安全和可靠的先进堆全球部署的共同目标而发挥协同作用（图 A.2）。



图 A.2. 原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西在于 2022 年 6 月在奥地利维也纳原子能机构总部举行的“核协调和标准化倡议”启动会议上致开幕词。

6. 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，并参与到未规划的长期运行中。

A.2. 在运核电厂

状况

7. 2022 年底，全球在运核电装机容量达到 393.8 吉瓦（电），其由 32 个国家的 438 座在运反应堆提供。2022 年期间，超过 22.8 吉瓦（电）的总可用在运容量（27 座反应堆）处于暂停运行状态。

8. 2022 年有超过 7.4 吉瓦（电）的新容量并入电网，其中包括亚洲的 5.6 吉瓦（电）额外在运容量和欧洲的 1.6 吉瓦（电）。在中国，两座反应堆在 2022 年开始向电网供电。福清 6 号（1075 兆瓦（电））— 该场址上两座“华龙一号”

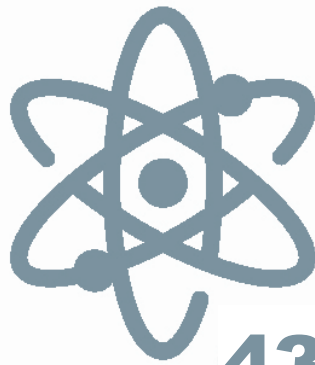
（HPR1000）示范堆中的第二座 — 于 1 月并网，而辽宁省的红沿河 6 号 — 总容量为 1061 兆瓦（电）的第三代 ACPR-1000 压水堆 — 于 5 月并网。在大韩民国，蔚珍核电站的 1340 兆瓦（电）压水堆（APR-1400）于 6 月并网。

9. 由中国提供的 HPR1000 反应堆于 3 月在巴基斯坦南部信德省的卡拉奇核电厂并网。阿拉伯联合酋长国巴拉卡核电厂的 3 号机组于 10 月开始运行，增加了 1345 兆瓦（电）的核电容量。芬兰的 Olkiluoto-3 1600 兆瓦（电）欧洲压水堆于 3 月并网。

10. 到 2022 年底，18 个国家有 59.3 吉瓦（电）总容量（58 座反应堆）正在建设中。近年来，在建的核电装机容量基本保持稳定，但亚洲除外，那里一直在持续增长，自 2012 年以来，有 56.1 吉瓦（电）（55 座反应堆）的运行容量被并入电网。

11. 全球约 66% 的运行反应堆容量（258.7 吉瓦（电），291 座反应堆）已运行超过 30 年，而超过 26%（101.5 吉瓦（电），128 座反应堆）已运行超过 40 年，3%（11 吉瓦（电），13 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的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。



在 2022 年底，全球在运的
核电容量达到了

393.8 吉瓦（电）

产生于

438 座在运反应堆

32 个国家



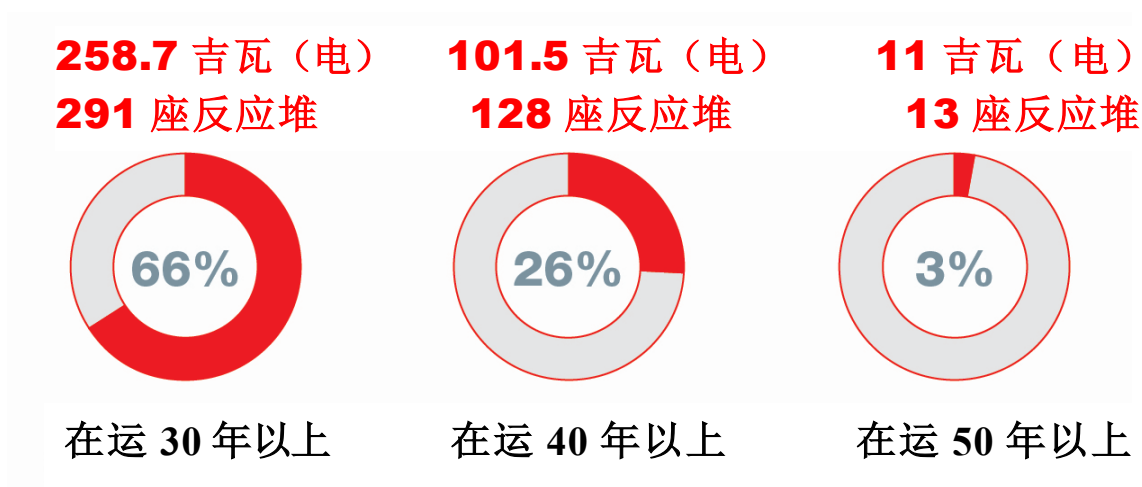
在 2022 年底
总容量为

59.3 吉瓦（电）

58 座反应堆

正建设于

18 个国家



12. 即使机组老化，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。

趋势

13. 在过去的 10 年里，核电装机容量一直稳步增长，2012 年和 2022 年期间增长了 20.3 吉瓦（电）。在这一期间，有 68 座反应堆的 67.8 吉瓦（电）核电容量已经并入电网，其中超过 83% 的容量增长发生在亚洲，那里共有 56.2 吉瓦（电）（55 座反应堆）的总容量被连接到电网。根据向原子能机构提供的报告，2022 年，核动力堆群产生了约 2486.8 太瓦·时的低排放、可调度电力。

14. 2022 年的能源危机使一些关于反应堆关闭的决定被搁置（在比利时、瑞典和美利坚合众国），促使营运者和监管机构实施行动，以确保安全可靠的长期运行。

A.3. 新的或扩大的核电计划

状况

15. 在 50 个表示有兴趣引进核电的成员國中，有 24 个国家处于决策前阶段，正在进行规划活动。其余 26 个国家则分属两个不同组别在寻求引进核电：

- 16 个国家处于决策阶段 — 考虑采用核电的国家，包括那些正在进行预可行性研究或积极准备基础结构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、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）。
- 10 个国家处于决策后阶段 — 已经决定并正在建设基础结构或者已经签署合同并将在不久的将来开始建设或已经开工建设的国家（孟加拉国、埃及、加纳、约旦、肯尼亚、尼日利亚、波兰、沙特阿拉伯、土耳其、乌兹别克斯坦）。



16. 在孟加拉国，第一个核电站的建设正在进行，计划于 2023 年在厂内交付燃料，并在未来几年内实现两台机组的商业运营。土耳其阿库尤核电站的四台机组在 2022 年仍在建设。这四台机组预计将于 2023 年至 2026 年进行调试。埃及埃尔达巴核电站 1 号机组和 2 号机组分别于 2022 年 7 月和 11 月浇筑了第一罐混凝土。埃及核电站管理局还于 2021 年申请了 3 号和 4 号机组的建造许可证。施工现场准备工作仍在继续。两个关键组织（核电站管理局和埃及核与辐射监管局）继续根据计划的需要发展组织能力。在波兰，已经完成了对到 2042 年 6000—9000 兆瓦（电）核电总装机容量压水堆建设的技术和供应商选择。

17. 在沙特阿拉伯，发布了采购首批两台 1000—1600 兆瓦（电）核电站机组的招标说明书。约旦已开始进行可行性研究，以确定首选技术、供应商，并就使用中小型反应堆或模块堆进行电力生产和海水淡化作出投资决定。中小型反应堆或模块堆项目的招标说明书于 2026 年推出。加纳继续致力于发展核电计划所需的国家基础结构，包括进一步发展关键组织的能力。加纳将其对反应堆技术的选择扩大到中小型反应堆或模块堆，就发展约 1000 兆瓦（电）容量面向潜在供应商的征询意向书得到了五个供应商的

回应。首个核电厂计划于2023年开工建设，并于2029年进行调试。肯尼亚已宣布，将考虑建设一座研究堆和数座中小型反应堆或模块堆，而不是大型核电厂。在乌兹别克斯坦，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。首个核电厂计划于2026—2030年进行调试。2022年，菲律宾签署了对基于政府开展的一项研究的核能计划的国家立场文件。这一决定为进一步研究和评估大型反应堆（包括可能修复巴丹核电厂）与中小型反应堆或模块堆之间的现有方案铺平了道路。爱沙尼亚正在考虑将中小型反应堆或模块堆用于其核电计划，政府的核能执行组织编写了一份临时报告，其中评价了基于中小型反应堆或模块堆的核电计划的条件和可行性。对其中许多国家来说，在能源结构中引入核电是对其气候减缓目标的一项重大贡献。其中若干国家（埃及、约旦和土耳其）已将核电纳入其根据《巴黎协定》向《联合国气候变化框架公约》提交的国家自主贡献。

18. 2022年，斯里兰卡接待了一次原子能机构综合核基础结构评审（第一阶段）工作组访问。原子能机构还收到了爱沙尼亚的综合核基础结构评审第一阶段工作组访问申请、哈萨克斯坦的综合核基础结构评审第一阶段后续工作组访问申请和土耳其的综合核基础结构评审第三阶段工作组访问申请。2021年12月，原子能机构收到了孟加拉国的综合核基础结构评审第三阶段工作组访问申请，该访问将于2024年初进行。此外，还有15个成员国制定了积极的综合工作计划，随着COVID-19相关限制的放宽，各项活动已经恢复。

趋势

19. 到2035年，运行核电国家的数量可能会增加约30%，与目前的32个国家相比，新增10至12个运行核电厂国家。这一显著增加需要在原子能机构的支持下进一步加强这些国家的基础结构准备，以确保负责的部署。

20. 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首创中小型反应堆或模块堆设计。因此，若干启动核电国家已将中小型反应堆或模块堆纳入其

技术考虑范围，或继续监测其发展，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、罗马尼亚和南非这些正在扩大核电的国家。促使这些国家作出如此考虑，源于中小型反应堆或模块堆技术的进步，以及中小型反应堆或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，以及可进行模块化扩展。



到 **2035**
运行核电国家的数量
可能增加约 **30%**，
有 **10-12** 个新国家
运行核电厂。

21. 同时，10 个成员国在渐进型核电厂的基础上着手发展其核电计划，其进展显示了对大规模核电厂技术的持续兴趣。一些成员国报告打算利用正在运行的参考设计，吸取原设计国家监管机构和营运者的经验。

22. 无论一项计划是基于大型核电厂还是中小型反应堆或模块堆，都应该适当解决国家核电基础结构问题，包括核安全、核安保和保障的要求。

A.4. 核电技术发展

状况

23. 全球核电技术发展的重点是加快部署先进堆，包括中小型反应堆或模块堆等革新型反应堆，以及将核电的使用扩大到非电力应用，如地区供热、制氢和海水淡化。非传统的利益相关者对利用核电实现工业部门的去碳化也有明显的兴趣，特别是在能源密集型工业活动中。在世界的一些地方，利益相关者正在研究核电的各种应用，如浮动核电厂在热电联产模式下运行、微堆的小众应用（在偏远地区和小岛屿，替代柴油发电机等）以及核电的空间应用。由于可变可再生能源日益普及，进而对电网造成压力，先进堆作为为电网提供灵活性的清洁解决方案的势头越来越强。最后，随着强大计算能力和数据分析工具的出现，核工业正在拥抱人工智能（AI），特别是机器学习（ML）和深度学习技术，以改造操作系统以及短期和长期维护系统。

趋势

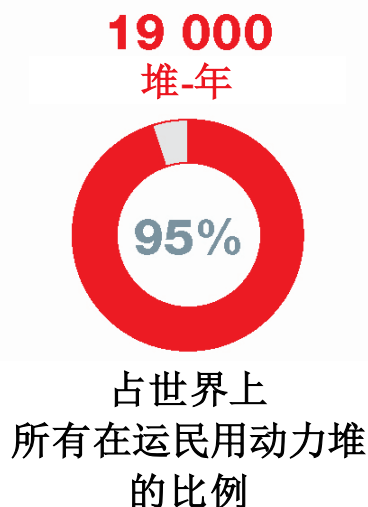
24. 除了成员国在先进堆技术开发方面的努力之外，越来越多的私营公司和初创企业正在开发新堆型，这些新堆型正在吸引公共和私人资金。这些公司带来颠覆性的商业模式和创新方法，如使用数字孪生、先进制造技术、人工智能和机器学习技术进行可能改变核系统设计、许可证审批和运行方式的广泛活动。人工智能有可能加强计算与从小规模实验或运行期间的传感器收集的实验数据的整合。这种整合，如果得到优化，可以使计算科学家开发出空前精确的物理模型，并有助于实验科学家最大限度地减少首个系统验证实验的成本和次数。它还使系统操作者有可能监测无法直接使用仪器的系统状态。人工智能方法和工具可用于基于物理学的预测分析，从而能够用来开展设计、制造和建设优化、提高运行有效性、改进新型反应堆设计迭代、检测基于模型的故障，以及加强控制系统。人工智能还可以在可靠性、安全性和整体效率方面为核工业带来更多好处。

A.4.1. 先进水冷堆

状况

25. 水冷堆继续在商用核工业中起着举足轻重的作用，达到了 1.9 万多个运行堆-年，而且目前占世界上所有在运民用动力堆的 95%以上。截至 2022 年底，在建的 57 座核反应堆中，有 54 座采用轻水或重水冷却。水冷堆部门 2022 年的主要发展包括中国、芬兰、巴基斯坦、大韩民国和阿拉伯联合酋长国的新连入电网。

水冷堆



26. 在若干国家，正越来越多地考虑、研究和实施现有水冷堆的先进型号，以便逐步部署先进和更高效的部分或全闭式燃料循环。若干成员国继续进行超临界水冷堆的研究与发展（研发）。加拿大超临界水冷堆的概念设计（重水慢化压力管式反应堆概念）和中国 CSR1000 的概念设计已经完成。欧洲创立了高性能轻水堆概念，并与中国合作，对一个堆内燃料质量鉴定试验设施进行了规划、设计和分析。在俄罗斯联邦，正在对革新型水冷慢化超临界压力动力堆进行概念研究，其中包括采用快谱堆芯的可能性。最近的设计侧重于超临界水冷堆设计的小型模块化版本，同时强调加强安全、安保、经济性和可持续性。

27. 成员国正在努力集中精力开发一体化能源系统，将可再生能源（尤其是可变能源太阳能和风能）与核电厂结合起来，提供基本电力负荷并增强电网的稳定性，以及用于非电力应用。

趋势

28. 在建先进水冷堆的功率输出从每台机组 1000 兆瓦（电）到 1700 兆瓦（电）不等，而且在渐进性大型水冷堆的设计阶段，目标是进一步提高功率输出。成员国之间有一种持续的趋势，即建立采用单一或多种反应堆类型的多机组场址。约有 30 个目前没有在建核电厂的国家正在考虑建设大型或小型水冷堆机组。

29. 对于营运者通过电厂现代化和加强主要设备和系统将核电厂的运行寿期延长数十年以支持长期运行而言，强大的动力是对安全、清洁、可靠和具有成本效益的电力生产的持续和不断增长的需求。

A.4.2. 中小型反应堆或模块堆及微堆

状况

30. 在 18 个成员国中，有超过 80 个来自主要技术路线的中小型反应堆或模块堆设计处于不同的开发和部署阶段。在过去的三年里，在部署方面已经取得了重大的成就。拥有两个 KLT-40S 压水堆模块的俄罗斯联邦“罗蒙诺索夫院士号”浮动核电厂于 2019 年 12 月并网，并于 2020 年 5 月开始商业运营，发电量为 70 兆瓦（电）。在中国，为了实现超高温反应堆创新技术，球床模块式高温堆示范工程于 2021 年 12 月并网，并在 2022 年 12 月达到 210 兆瓦（电）的初始满功率。



小型模块堆设计

在 **18** 个成员国

31. 在阿根廷，基于自然循环一体化压水堆的 CAREM-25 反应堆正处于建设的后期阶段，预计将在 2026 年实现首次临界。旨在作为多用途反应堆的 ACP100 反应堆于 2021 年 7 月在中国开始建造，并计划于 2026 年底开始商业运营。俄罗斯联邦雅库特正在建造基于 RITM-200N 反应堆的中小型反应堆或模块堆；该项目已获得环保批准，预计将于 2028 年开始商业运营。首个基于 RITM-200 反应堆的浮动式核电厂于 2022 年 8 月开始建造，俄罗斯联邦正在开发基于 RITM-400 反应堆的优化浮动式发电机组。在美利坚合众国，2022 年 7 月，核管理委员会批准了 NuScale 电厂初始设计的设计认证。NuScale 于 2022 年 12 月提交了一份标准设计批文申请，其中涉及将于 2029 年在爱达荷国家实验室演示的六模块配置的升级功率模块。法国正在开发 NUWARD 一体化压水堆设计，从两个各 170 兆瓦（电）的独立反应堆机组生产 340 兆瓦（电），以实现灵活运行。到 2030 年，将在法国为首个 NUWARD 反应堆浇筑第一罐混凝土。NUWARD 是法国核安全管理局牵头的一项欧洲早期联合审查所用的案例研究中小型反应堆或模块堆，捷克国家核安全办公室和芬兰辐射和核安全管理局参与了审查。在英国，核监管办公室正在对罗尔斯-罗伊斯中小型反应堆或模块堆进行通用设计评定，这是一座三回路压水堆，设计发电量为 470 兆瓦（电），计划于 2026 年开始建设。还有基于自然循环沸水堆技术的中小型反应堆或模块堆设计。美国核管理委员会和加拿大核安全委员会正在审查 BWRX-300 的建造许可证申请，这是一种源自美利坚合众国的 300 兆瓦（电）设计，计划在加拿大安大略省的达林顿核电厂和美利坚合众国田纳西州克林奇河场址部署。“加拿大小型模块堆行动计划”还概述了计划部署的微型模块堆，这是一种采用模块高温气冷堆技术的微堆，能产生 15 兆瓦（热），用于在乔克河实验室联产电力和工艺热。在大韩民国，110 兆瓦（电）系统一体化模块式先进反应堆（SMART）设计正在经历许可证审批过程，以与沙特阿拉伯合作获得联合标准设计批文。一个韩国财团已经开始开发一种革新型中小型反应堆或模块堆，即 170 兆瓦（电）压水堆，以提高安全性和经济性。

32. 熔盐堆也属于中小型反应堆或模块堆采用的技术路线。处于不同发展阶段的各种熔盐堆设计目前正在加拿大、中国、丹麦、法国、印度尼西亚、日本、荷兰、英国和美利坚合众国进行。

趋势

33. 成员国对中小型反应堆或模块堆及其应用的兴趣一直在增加。正在进行大量的工业和监管工作，以促进设计开发和早期部署。主要的趋势仍然是朝着更成熟或准备程度较高的技术领域发展，这特别是与一体化水冷堆和模块高温气冷堆有关。直到 2030 年左右，使用这些技术的中小型反应堆或模块堆设计将处于许可证审批过程的最前沿，其次是使用非水冷却剂的革新型反应堆的设计。2022 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进行中小型反应堆或模块堆中一个被称为微堆的子集的技术发展活动。微堆设计用于产生最多 10 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。

34. 更多的国家目前从事海基反应堆的设计开发。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，能生产 60 兆瓦（电）。丹麦的一家反应堆设计初创公司正在开发能生产约 100 兆瓦（电）的紧凑型熔盐堆。海基中小型反应堆或模块堆是为小众市场设计的，包括为偏远社区提供分布式电力和热能供应，海水淡化，以及通过与海洋和造船业合作的混合能源系统。

35. 在这种快速发展的情况下，原子能机构总干事于 2021 年建立的原子能机构中小型反应堆或模块堆平台正在为对中小型反应堆或模块堆发展、部署和监督感兴趣的成员国和其他利益相关方提供“一站式”服务，确保原子能机构提供协调和一致的支持，包括通过新推出的中小型反应堆或模块堆门户。

A.4.3. 快堆

状况

36. 2022 年，五座钠冷快堆在三个成员国运行：一座在中国，一座在印度，三座在俄罗斯联邦。印度也在调试 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆，而中国正在建造两台同类型（即 CFR-600）的钠冷快堆机组。虽然所有五座在运反应堆和所有三座在建反应堆都是由液态钠冷却，但重液态金属冷却剂技术正在吸引越来越多的关注，特别是在中小型反应堆或模块堆领域。俄罗斯联邦正在继续建造一座 300 兆瓦（电）的示范性铅冷快堆即 BREST-OD-300（图 A.3）和多用途快中子研究堆。若干国家还在开发其他若干有前途的冷却剂（如氦和熔盐）技术。在第四代国际论坛开发的六个革新型反应堆概念中，三个（钠、重液态金属和氦冷却）是快中子系统，而两个（熔盐和超临界水冷却）可以在快中子谱或慢化中子谱中运行。



图 A.3. 2022 年 9 月，BREST-OD-300 场址。（照片来源：国家原子能公司）

趋势

37. 钠冷快堆仍然是中期部署的主要选择；俄罗斯联邦正在开发大型的 1200 兆瓦（电）BN-1200 反应堆，中国正在规划 1 吉瓦（电）CFR-1000 反应堆，而美利坚合众国的泰拉能源公司正在开发与峰值可达 500 兆瓦（电）的熔盐储存相结合的 Natrium 反应堆。Natrium 可以取代一个典型的煤电厂，它也可以与其他可再生能源一起工作。若干国家正在开发铅冷快堆：英国-美利坚合众国 450 兆瓦（电）的西屋铅冷快堆、意大利-罗马尼亚 120 兆瓦（电）的欧洲先进铅冷示范快堆、瑞典的 SEALER-55 以及中国的若干中小型反应堆或模块堆型铅冷快堆设计。成立于 2021 年底的意大利-英国初创公司 Newcleo 正在开发微型（30 兆瓦（电））和小型（200 兆瓦（电））铅冷快堆。虽然法国推迟了工业示范用先进钠技术反应堆的开发，但关于钠冷快堆和相关燃料循环的研发正在进行，该国正在开发可能在铀钍循环中工作熔盐快堆。欧盟正在进行一个熔盐快堆项目 — SAMOSAFER，以开发和验证用于在严重事故中更好地控制行为的新安全屏障。

A.4.4. 核电的非电力应用

状况

38. 促进核能非电力应用的热电联产是一项可靠和成熟的技术，在世界范围内引起越来越大的兴趣，市场前景广阔，发展潜力巨大，因为目前只有一小部分核热被直接利用。目前，共有约 70 座核反应堆被用于非电力应用，这些应用大致分为海水淡化、地区供热、工艺加热和制氢。在这些应用中，每年的核热利用总量超过 2 太瓦·时（TW·h）的电当量。这些核反应堆中的大多数被用来进行地区供热，其中约有一半还提供工艺热。目前约有 10 个被用来为核能淡化海水提供能源，还有几个正在开始试点规模的制氢示范。

约 **70** 座核反应堆
目前正在用于
非电力应用

超过 **2 太瓦·时**
每年的电当量

39. 中国最近开始了一项重要的地区核能供热发展计划，加入了包括保加利亚、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一个现有用户群。在 2020 年启动与山东海阳核电站连接的地区供热网络后，2022 年正式启动的红沿河项目将避免与 12 100 吨煤相关的排放，硫磺、二氧化碳、粉尘、氮氧化物和灰烬的排放也将减少。浙江省秦山核电站 2021 年也启动了一个地区供热示范项目，目标是到 2025 年实现核能供热面积 400 万平方米，覆盖海盐县主城区及澉浦镇全域。

40. 一些国家已计划部署核能淡化海水，加入了该技术的经验丰富的用户群。在日本和俄罗斯联邦，若干海水淡化装置已经由核电厂提供动力，而印度在运行与核反应堆

耦合的海水淡化装置方面已经有了长期的经验，它计划在未来几年扩大其核能淡化海水能力。

41. 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在内的若干国家正在考虑利用核反应堆产生的电力或热能来制氢。目前正在进行高温制氢工艺与先进堆（如最近在中国开始运行的球床模块式高温堆）以及现有机组的耦合方面的研发。例如，在美利坚合众国，有五个不同的关于电解装置与现有核电厂耦合的项目，其中四个涉及与低温电解装置的电耦合，而一个在普雷里岛核电厂，也将利用核热来提高制氢的效率（图 A.4）。俄罗斯联邦打算在科拉核电厂进行清洁制氢示范，而法国已经宣布，到 2030 年，它的目标是开始建造一座小型模块堆，并利用现有的核电机组来进行清洁制氢。



图 A.4. 位于美利坚合众国明尼苏达州的普雷里岛核电厂，埃克西尔能源公司和合作伙伴正在那里部署一个使用高温蒸汽电解装置的试点制氢项目。

（照片来源：Shutterstock 公司）

趋势

42. 核能在供热和供电方面的潜力在世界范围内引起了越来越大的兴趣。这是对不断加大的应对气候变化的努力的回应，因为世界上许多地区正经历着化石燃料成本的不断增加。由于目前大部分的排放来自于电力部门之外，而且目前几乎所有的非电力应用的能源都是由化石燃料提供的，因此，核能作为少数几个不含碳的电力和热能来源之一，可以不受地理限制地大规模部署，而且可以全天候使用，因而特别令人感兴趣。此外，中小型反应堆或模块堆和微堆因其规模较小而提供了令人感兴趣的可能

性，因为若干热能需求中心的规模还不足以有效利用吉瓦级电厂产生的热能。最后，某些先进堆，如球床模块式高温堆，提供了与高温热供应相关的独特可能性，而高温热又可以有效用于若干工业应用。

B. 核燃料循环

B.1. 前端

状况

43. 在 2022 年第一季度，铀现货价格约为 52 美元/磅八氧化三铀。这相比 2021 年第三季度大幅上升，当时约为 32 美元/磅八氧化三铀。此外，自 2021 年以来，铀的现货价格上涨了约 42%，在过去两年中上涨了 64%以上（图 B.1）。铀现货价格的持续上涨为铀生产行业注入了活力，若干初级生产商正在寻求重新启动其因现货价格低而被置于照管和维护状态的业务。这包括加拿大的麦克阿瑟河矿和纳米比亚的蓝格·海恩里希矿。

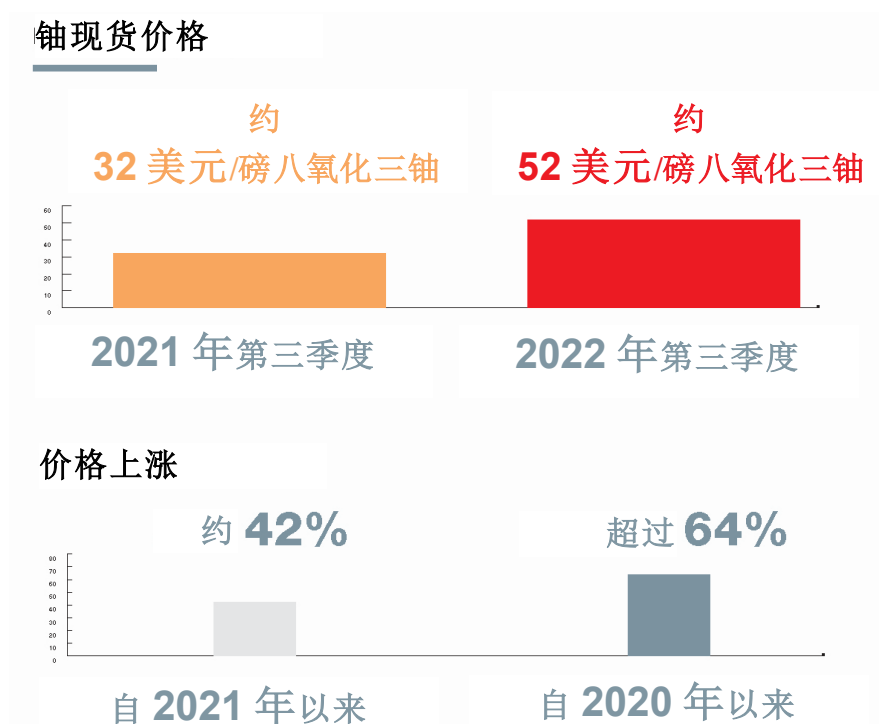




图 B.1. 2018 年以来的铀现货价格演变。(照片来源：UxC 公司)

44. 铀年产量最高的国家哈萨克斯坦宣布，它将把原地回收业务的产量从额定产能的约 70%提高到 90%。澳大利亚的蜜月铀矿也宣布重新启动其原地回收矿和加工设施。铀矿勘探在 2020 年达到低点，花费约 3920 万美元。随着过去两年铀市场出现积极的信号，勘探活动正在增加，2021 年约有 7100 万美元用于铀矿勘探。

45. 核燃料生产是一项成熟技术，并且多年来通过自动化和数字化不断改进，减少了运行废物的产生，增强了工作人员的辐射防护。它改进了经济性（将燃料循环从 12 个月延长到 18 个月和 24 个月，燃耗更深）、可靠性（燃料破损减少，新的燃料设计使燃料组件弓形结构最小化，抗震性能改善，掺杂燃料、衬里和双联包壳，耐腐蚀性提高）和可持续性（轻水堆和快堆燃料的再循环和多次再循环）。目前，全世界现有的核燃料制造能力足以满足预期的核电需求。

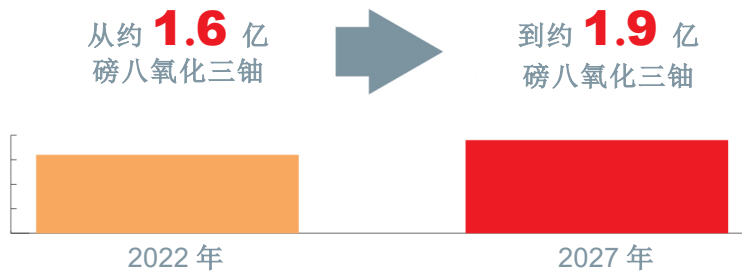
46. 若干成员国 — 其中一些为向原子能机构“先进技术和耐事故燃料测试和模拟”协调研究项目作出了贡献的成员国 — 正在进行研究、发展和示范计划，以部署使用先进制造技术如增材制造技术的耐事故先进技术燃料和创新燃料（如 3D 打印机形成用于陶瓷微胶囊燃料的核级碳化硅）。

47. 若干成员国已经在现有反应堆中对燃料进行再循环，并计划在未来的反应堆中这样做，而其他成员国则正在进行对燃料进行再循环或部署中小型反应堆或模块堆所用创新燃料的研究、发展和示范计划。目前正在研发用于轻/重水冷却的中小型反应堆或模块堆的二氧化铀和铀钚混合氧化物燃料和耐事故先进技术燃料、用于浮动和陆基轻水冷却的中小型反应堆或模块堆的陶瓷燃料、用于高温气体/熔盐/热管冷却的中小型反应堆或模块堆的三层各向同性燃料、用于液体金属/气体/热管冷却的中小型反应堆或模块堆类型快堆的金属或陶瓷燃料以及用于熔盐冷却的中小型反应堆或模块堆的熔盐燃料。

趋势

48. 全球预测表明，未来五年的铀需求将从每年约 1.6 亿磅八氧化三铀增加到约 1.9 亿

全球年铀需求预测



2022 年全球铀的年产量
据预测约为 **1.33 亿磅八氧化三铀**

的现货价格将从约 52 美元/磅八氧化三铀提高到约 65 美元/磅八氧化三铀。

磅八氧化三铀。据预测，2022 年全球铀的年产量约为 1.33 亿磅，其余的供应由不断减少的二次供应构成。由于预期铀的现货价格将进一步上涨，预计核电厂的采购部门将寻求预先购买铀精矿，并再次与铀供应商制定长期合同。这有可能进一步提高铀的现货价格，预计到 2027 年，铀

49. 预计新的铀矿将在未来五到 10 年内开放，包括在澳大利亚、巴西、加拿大、毛里塔尼亚和纳米比亚。然而，这些新业务的预测产量将不足以弥补目前由二次资源填补的供应缺口。因此，预计未来几年铀的勘探活动将增加，包括常规和非常规矿床类型。考虑到在确定和确认矿床后开发和试运行新铀矿的时间较长（10—15 年），需要勘探和确定新的铀矿储量。

50. 为了确保铀资源在需要的时候进入市场，未来的铀供应将得益于为进一步改善铀勘探和发展更具成本效益的新萃取技术而及时开展的研究和创新努力。关于铀工业的可持续性，以及从低品位和更具挑战性的铀矿床中回收，需要创新来推动边缘铀矿床进入生产。2022 年，铀矿开采业进行这种创新的一个例子是，在高品位不整合面型矿床中开发原地回收矿的可行性研究取得了积极成果。此外，低品位铀的选矿或提高品位显示出前景，并正在使以前不经济的矿床更具吸引力。生物浸取法是另一种正在开发的重大创新，用于从砂岩类矿床中进行铀的原地回收。最后，在其他采矿应用中使用的堆浸技术也显示出对某些铀矿作业的前景。

51. 在 2011 年的福岛第一核电厂事故之后，许多成员国的努力集中于改善现有的大规模轻水堆机组中使用的燃料的安全性，以及将在未来几代反应堆（包括中小型反应堆或模块堆）中使用的燃料的安全性。许多成员国正在实施部署耐事故先进技术燃料的密集计划，其中涉及到导引试验棒和导引试验组件的制造、辐照和辐照后检验、燃料性能评估、系统热工水力学以及严重事故规范的制定和验证。

52. 一些成员国计划发展燃料许可证审批基础结构，以支持在 2020 年代中期将燃耗和浓缩丰度扩展到传统限值之外，并安全和经济地使现有的轻水堆在平均燃耗增加的情况下实现 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变（即只通过改

变许可证审批程序)。为满足国内和全球的需求,需要通过可持续的数量来实现先进燃料技术的商业化和规模经济的趋势。

53. 核燃料发展的其他驱动因素有革新反应堆设计,如第四代反应堆和中小型反应堆或模块堆(从轻水堆燃料设计的缩小版到全新的第四代燃料设计)。所有类型的中小型反应堆或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。此外,高丰度低浓铀将需要制造许多创新的核燃料概念,如一些耐事故先进技术燃料和中小型反应堆或模块堆燃料。目前,仅俄罗斯联邦有一个高丰度低浓铀燃料生产的供应链,但美利坚合众国已计划为先进堆建立高丰度低浓铀基础设施。

B.2. 后端

状况

54. 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 32 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来说,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(图 B.2)。



图 B.2. 作为 2019 年阿根廷阿图查核电厂技术考察的一部分,原子能机构“乏燃料性能评估和研究 — 第四阶段”协调研究项目的参加者参观了正在建设的新贮存设施。

55. 在一些国家,乏核燃料通常在经过初始冷却时间后从湿法贮存设施转移到干法贮存设施。开发集中式临时贮存设施的工作继续进行。乏核燃料运输在一些国家是常规操作,而其他国家正在进行准备工作,以支持未来的运输活动。成员国正在其核电厂退役项目的框架内继续进行乏核燃料的拆除和迁移。

56. 2022 年 7 月,随着镁诺克斯后处理厂的关闭,英国停止了后处理业务,这导致了全球后处理能力大幅下降。在法国、印度和俄罗斯联邦,继续以商业化规模开发适合于现有机组和先进堆燃料的新循环利用技术。2022 年 12 月,俄罗斯联邦的 BN-800 反应堆几乎 100% 装载了混合氧化物燃料,作为实施“平衡核燃料循环”概念的一个步骤,该概念设想对乏核燃料进行后处理,将再生核材料作为核燃料进行再循环,并在快中子堆中对次锕系元素进行嬗变。俄罗斯联邦谢韦尔斯克建造铅冷快堆燃料后处理试点示范能源综合体的决定已经作出,将于 2024 年开始建造。美国能源部的各种计划

正在将国家实验室与大学和商业组织联系起来，以开发基于水法后处理和高温冶金处理等技术的可扩展解决方案。一体化熔盐堆的加拿大设计者陆地能源公司正在与澳大利亚核科学和技术组织（澳核科技组织）合作，以确定澳核科技组织的合成岩石处理工艺是否适合于对一体化熔盐堆的乏燃料盐进行整備。

趋势

57. 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，准备活动如制定表征计划的数量也在增加。

58. 原子能机构协调开展有关这一问题的研究活动，以收集成员国的运行经验和研究结果，并促进信息共享。考虑到通过生产具有较高初始浓缩丰度和较高燃料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。

59. 随着为现有反应堆和先进堆设计（包括中小型反应堆或模块堆）设想新的燃料设计，从而可能导致乏燃料管理中潜在的不同行为，将需要寻求创新的乏燃料管理解决方案，以便及时部署。

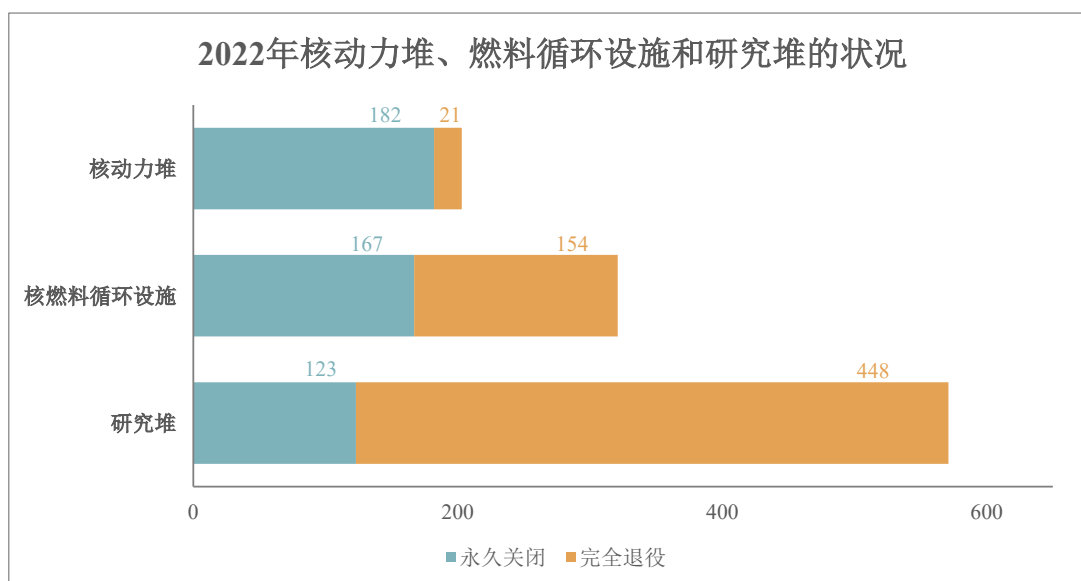
60. 尽管全球乏燃料后处理能力总体上有所下降，但人们对开发现有燃料先进再循环技术和支持先进堆部署和可持续性的再循环技术越来越感兴趣。将新的和创新的燃料循环与现有的燃料循环相结合，是应对当前能源供应挑战和确保核电可持续、安全和可靠发展的一项重要工作。

C. 退役、环境修复和放射性废物管理

C.1. 退役

状况

61. 2022 年，有五座动力堆永久关闭：比利时的多伊尔 3 号反应堆、英国的欣克利角 B-1 号和 B-2 号先进气冷堆及亨特斯頓 B-2 号先进气冷堆以及美利坚合众国的 Palisades 压水堆。在全球范围内，有 203 座核反应堆已经永久退役，其中 21 座已经完全退役。正在实施的主要动力堆退役计划有：德国有 27 座反应堆已永久关闭或目前正在退役中；日本有 24 座反应堆处于同样阶段；美国有 28 座反应堆已永久关闭或目前正在退役中，其中 18 座处于安全关闭状态，八座目前正在拆除。英国已经永久关闭了 36 座第一代和第二代气冷堆，它们大多正处于准备进入安全关闭状态的运行后阶段。



62. 世界各地的主要燃料循环设施场址正在进行退役活动，包括法国、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国的一些场址。总体而言，目前的主要重点是减少严重的危害风险，包括移除通常作为设施拆除的前奏贮存在水池或混凝土沟槽中的遗留废物。在英国的镁诺克斯公司后处理厂，正在进行运行后净化活动的准备工作。该场址也正在进入从其遗留水池和贮仓进行全面作业回收的模式。在法国阿格场址，正在继续移除和整备遗留废物，包括移除贮存在混凝土贮仓中的石墨和镁废物，以及对活度水平限制或不允许人类进入的单元进行去污。该场址所有钐手套箱的拆除工作也已完成，目前的重点是拆除全部的主要工艺设备溶解器、混合澄清槽和蒸发器。

63. 2022年，各核电厂都取得了重大的技术进展，例如，在斯洛伐克的博胡尼斯 V-1 核电厂，完成了两座反应堆压力容器、12 台蒸汽发生器和其他一回路部件的切割和包装（图 C.1）；在法国的超凤凰堆核电厂，完成了大型旋转屏蔽塞的切割；在美利坚合众国佛蒙特州扬基核电厂，完成了反应堆堆芯的拆除；在西班牙的何塞·卡夫雷拉核电厂，完成了最后一座大型建筑物涡轮机大楼的拆除。

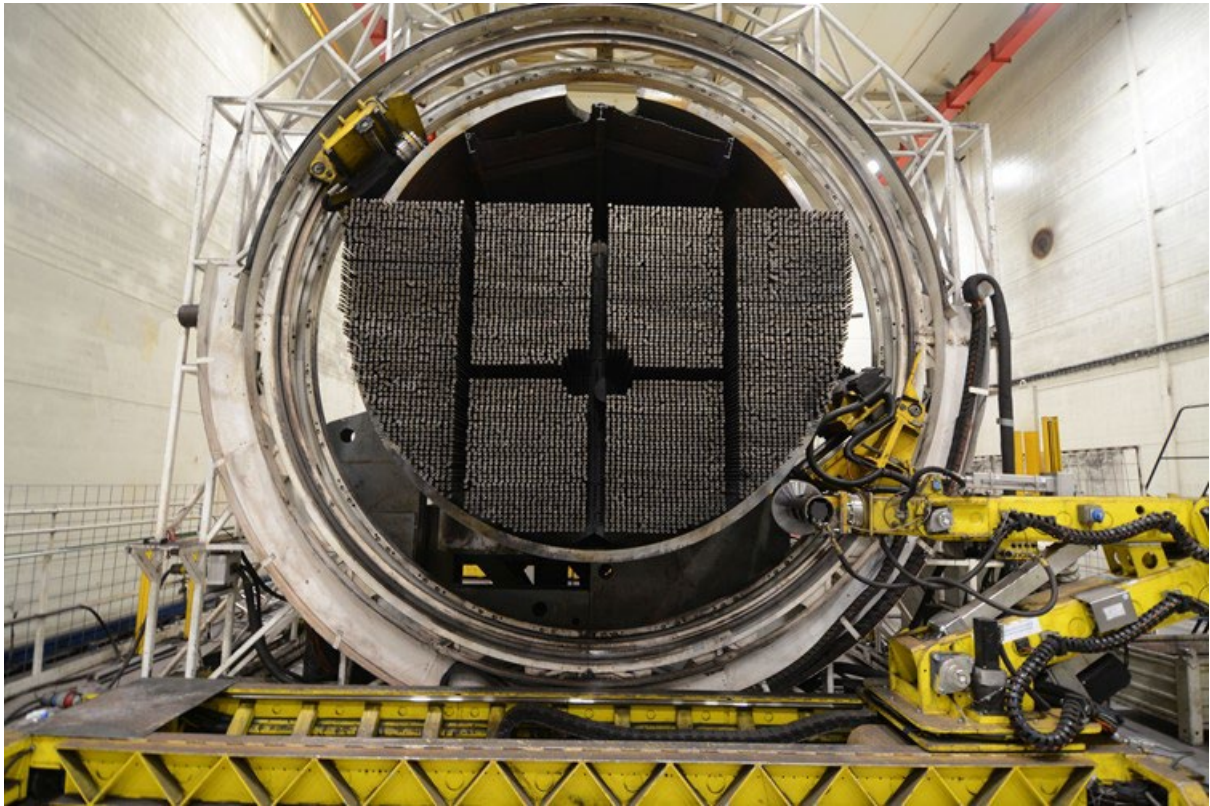


图 C.1. 切割博胡尼斯 V-1 核电厂的蒸汽发生器。
(照片来源：斯洛伐克核和退役公司)

64. 日本原子力开发机构的后端计划达到了一个重要的里程碑，成功完成了文殊快中子增殖堆第一阶段退役的主要部分；2022 年 10 月，来自堆芯的 530 个燃料组件以及容器外燃料贮存罐被移至乏燃料池。2022 年 4 月，完成了从一次冷却剂系统中移除散装钠的工作。

65. 2022 年 7 月 22 日，日本原子力规制委员会批准了东京电力公司 2021 年 12 月提交的关于安装先进液体处理系统处理水排放设施的实施计划修正案。排放预定于 2023 年开始，目前正在进行排放设施的安装。关于从反应堆压力容器中回收燃料碎片，已经决定首先从 2 号机组进行试验性回收。用于此目的的机械臂和机械手等设备的制造已经完成（图 C.2），目前正在努力提高其可操作性，并对将安装这些设备的安全壳贯穿区进行详细调查。

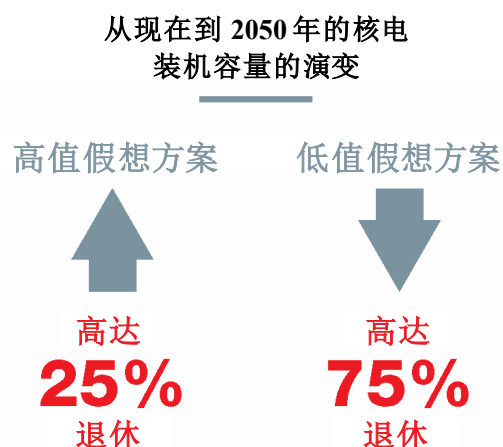


图 C.2. 福岛第一核电站用机械臂和机械手的测试大厅。
(照片来源：日本经济产业省)

趋势

66. 原子能机构目前对从现在到 2050 年的核电装机容量发展的预测分为“高值”和“低值”两种假想情况。就高值假想情况而言，除了广泛的新建计划外，约 25%的现有装机容量将退役，许多其他装机容量的寿期也将延长。就低值假想情况而言，高达 75%的现有装机容量将退役，而新建装机容量将取代这些损失的装机容量。因此，从现在到 2050 年的关闭速度目前存在着很大的不确定性。

67. 与近几年一样，核设施关闭的速度与新设施投入使用的速度基本一致。就核电厂而言，关闭的主要原因是英国第二代先进气冷堆因经济性原因退役，延长设施寿期的成本与持续运行的预期收入流不相符。就德国而言，由于目前的能源危机，最后三座在运设施的最终关闭时间已从 2022 年底推迟到 2023 年 4 月。



68. 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，呈现倾向于在永久关闭后早日拆除设施的趋势。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。

69. 通过改进规划和实施，数字技术以及虚拟现实和增强现实在推进核退役项目方面发挥着越来越重要的作用。潜在的好处涵盖设施寿期退役阶段的若干活动领域：提供改进的手段来收集、分析和显示规划拆除战略所需的信息；使用机器人确保人员安全；通过在具有真实效果的虚拟环境中模拟所规划的活动来促进运营者培训；支持准确定义未来的废物产生量，从而改进费用估算；以及使运营者和外部利益相关者改进退役方案的可视化。当退役阶段获得的知识将转移到核电厂设计者和运营者以及技术支持组织时，数字技术将为整个核工业带来更多的潜在利益。

C.2. 环境修复和天然存在的放射性物质管理

环境修复

70. 环境修复可能是一个缓慢的过程，因此，在某些情况下，会取得稳步进展，而在其他情况下，实施的障碍仍然是一个挑战。自 1989 年以来，美国能源部环境管理办公室在全国 92 个场址完成了遗留物清理工作，最近一次是在布鲁克海文国家实验室完成的。剩下的 15 个场址涉及一些最艰难和最昂贵的挑战。在欧洲和中亚解决铀矿开采遗留问题的努力正在取得进展。一种将无人机与高灵敏度伽马射线探测器相结合的新兴技术已经开发出来，并将在不久的将来投入使用，协助对中亚以前铀矿作业污染的场址进行表征。为了解决退役和修复两方面的专业职工队伍需求，由葡萄牙波尔图大学牵头的一个财团正在欧盟委员会“伊拉斯谟+”计划的支持下编制退役和环境修复科学硕士课程。

天然存在的放射性物质管理

71. 许多国家在管理其天然存在的放射性物质残留物方面面临着挑战（图 C.3）。目前正在为引进应对其需求所需的基础设施寻求支持。由于缺乏关于天然存在的放射性物质残留物的使用的政策，以及在天然存在的放射性物质被宣布为废物时缺乏处置方案，因而产生了瓶颈。许多成员国没有经认证的实验室，这构成了另一个障碍，增加了与运输这些物质到另一国家处置有关的挑战。



图 C.3. 有天然存在的放射性物质的铜采矿业残留物。

趋势

环境修复

72. 修复的一个新趋势是将减少危害的概念扩展到受污染场址的聚合价值。对现有老旧废物进行再处理，可以通过从地球化学和地质技术上对残留物进行稳定，避免进行成本高昂的修复。这将减少负债和相关的最终关闭成本，并可能创造适销对路的“绿色”产品。作为循环经济的一部分，修复是采矿作业的一个关键阶段，因为它提供了将场址恢复到适于未来生产目的的机会。一个例子是在美利坚合众国发起的一个计划，该计划正在分配大量资源用于在以前的矿区开发清洁能源，将这些场址转变为清洁能源中心。

73. 对于正在进行的和未来的项目，在项目伊始就开始制定关闭计划至关重要。然而，在场址一级充分利用这些机会，需要一个扩大的循环经济模式，这种模式承认既定的可持续发展方法，应在参与性决策过程的框架内涵盖环境、经济和社会层面。在这方面，有一种趋势是采用人工智能和机器学习来支持复杂情况下的决策，例如在环境修复领域。

天然存在的放射性物质管理

74. 循环性也存在于天然存在的放射性物质管理相关活动中。不同行业都在研究能够增加天然存在的放射性物质残留物价值的工艺。在农业中使用磷石膏作为土壤结构改良剂和建筑材料方面，以及在使用钛铁矿泥进行商业水泥制造和陶瓷制造等方面，都可能看到这一方向不断增长的趋势。充分利用天然存在的放射性物质相关工业过程中产生的残留物，将需要技术创新投资、国家层面的适当政策、对此类物质存量的了解以及创新融资机制，以便能够实现与 2030 年可持续发展议程的一致。

C.3. 放射性废物管理

状况

75. 2022 年，放射性废物管理继续取得扎实进展，特别是在推进深部地质处置库计划和继续安全部署处置前技术方面。

76. 虽然绝大多数放射性废物流的整备和处理技术已经具备并正在实施，但确定从技术和资金角度都最为适合的技术是一个挑战。技术选择需要有对废物及其特性的了解、适用的废物接受标准以及对管理法规要求的理解。巴基斯坦原子能委员会已经发展了核电厂废物和退役废物表征能力。与这些表征能力一道，为中低放废物处置设施制定废物接受标准的工作也在取得进展。一些存量少的国家正在为处置前废物管理制定集中式解决方案。克罗地亚已决定在切尔克佐瓦茨建立一个放射性废物管理中心，爱沙尼亚已将氦类设施退役，并将所有废物转移到帕第斯基场址的设施。

77. 在制定了确保安全运行条件的全面计划后，乌克兰切尔诺贝利场址上的放射性废物处理和处置活动重新恢复，此前，这些设施于 2022 年 2 月关闭。

78. 通过原子能机构的“全球镭-226 管理倡议”，一些成员国已找到了弃用镭源处理方案。在冰岛，对镭-226 源进行了整备，以便于运输，供回收再生为放射性药物，为癌细胞提供靶向 α 治疗（图 C.4）。

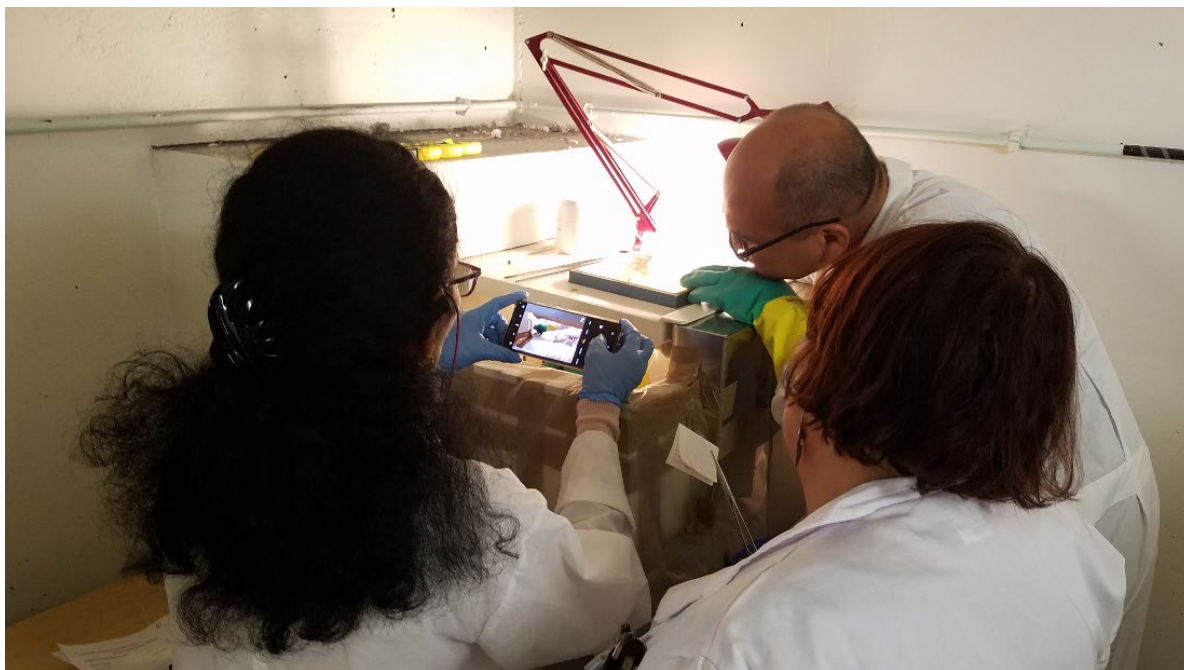


图 C.4. 在冰岛，对乏镅针进行整备，供用于回收再生目的。

79. 2020 年，加拿大启动了更新其放射性废物政策的包容性参与进程，并于 2022 年 2 月发布了放射性废物和退役政策草案，以征求公众意见。2022 年 8 月，加拿大发布了加拿大放射性废物管理战略的国家综合战略，以征求公众意见，其重点是知情废物管理，即国家存量中的所有废物流都有有计划的处置方案。加拿大核实验室于 2022 年 5 月宣布，在于 2021 年底关闭的地上工程密封土堆中放置了 130 万吨低放射性废物后，格兰比港项目开始处于长期维护和监测之中。

80. 高放废物深部地质处置库计划已经取得一些发展。芬兰废物管理组织芬兰核废物管理专家组织完成了前五个处置隧道的挖掘工作，为到 2025 年开始进行乏燃料最终处置做好了准备。2022 年 1 月，瑞典政府批准瑞典核燃料和废物管理公司开始在福什马克建造乏燃料处置库，并在奥斯卡港建造封装厂。随后在东哈马尔市场址进行的民意调查显示，超过 80% 的受访者赞成建造深部地质处置库，这是有史以来最高的支持率。根据法国的地质贮存工业中心项目，计划在 2022 年底前申请施工许可证。在俄罗斯联邦，为在克拉斯诺亚尔斯克地区建造深部地质处置库实验室而进行的岩体全面研究和实验室研究预计将于 2023 年完成。

81. 在深部地质处置库的选址方面，瑞士国家放射性废物处置合作组织于 2022 年 9 月为 Nördlich Lägern 提供了场址建议，并将于 2024 年提交许可证申请。加拿大核废物管理组织继续与志愿社区接触，打算在 2024 年推荐一个容纳深部地质处置库的场址。

趋势

82. 许多成员国继续提出和完善国家放射性废物管理政策和战略。对于欧盟成员国来说，这符合履行 2011 年 7 月 19 日第 2011/70/EURATOM 号理事会指令第 14.3 条规定义务的要求。

83. 将弃用高活度源返还供应商进行再循环和处置的情况有所增加。已计划于 2023 年从近十几个成员国移除 30 多个高活度源。虽然许多国家在弃用密封放射源管理方面取得了进展，但弃用密封放射源的处置仍然是一个挑战，特别是在拥有规模较小核计划的国家。预计马来西亚将在 2023 年完成弃用密封放射源的首次钻孔处置。其存量主要由弃用密封放射源组成的许多成员国以极大的兴趣关注着该项目。保加利亚、格鲁吉亚和加纳等国正在考虑这种处置技术。

84. 尽量减少放射性废物仍然是一个优先事项。热技术和超级压缩仍然是实现固体中低放废物大幅减容的全球工业标准。成员国目前正在广泛研究使用地质聚合物作为普通硅酸盐水泥的替代品。在法国，法国电力公司和威立雅公司成立了一家合资企业 Waste2Glass，将高放废物以外的废物加工成稳定耐久的玻璃废物体。在英国，哈维尔研究基地与危险废物管理公司 Augean 合作，对超高压水喷射技术进行改造，用于对研究基地的管道进行去污，从而使管道能够被回收利用，而不是被作为放射性废物处置。

85. 在遗留废物存量管理方面继续取得进展。在美利坚合众国的汉福特场址，首次开始大规模处理放射性化学废物，自 20 世纪 50 年代以来，已经产生了超过 5000 万加仑的废物，这些废物目前贮存在地下贮罐中，等待最终处置。荷兰正在建设一个新的多功能贮存设施，以贮存医用同位素生产中产生的历史放射性废物。该设施将提供可使用到 2050 年的贮存容量。在英国，已开始实施一项 20 年期计划，将镁诺克斯公司燃料加工过程中产生的镁屑废物从 6 米深的贮仓转移到专门建造的不锈钢废物容器中，再转移到一个现代化贮存设施。

86. 关于放射性废物管理领域的国际合作，捷克共和国捷克电力公司和斯洛伐克的核和退役公司签署了一份合作备忘录，以分享废物最少化和老化管理方面的专门知识。欧洲处置库开发组织协会或多国放射性废物解决方案继续努力为拥有少量长寿命中低放废物存量的成员国寻找多国解决方案。欧洲放射性废物管理联合计划继续让参与者参与发展安全管理放射性废物方面的合作。欧盟的实施放射性废物地质处置技术平台继续积极推进其关于到 2025 年在欧洲安全运行第一批乏燃料、高放废物和其他长寿命放射性废物地质处置设施的《2025 年愿景报告》。

D. 以核聚变研究和科技发展促进未来能源生产

状况

87. 国际热核实验堆项目取得了良好的进展（图 D.1）。2022 年 6 月，该项目达到了完成 77% 的里程碑。第一个真空容器扇区子组件，其中包含两个相关的环形场线圈和热

屏蔽元件，已经完成并安装在托卡马克坑中；第三个真空容器扇区已经被运送到国际热核实验堆场址。随着恒低温器顶盖的完成，恒低温器的所有元件现在都已完成。电厂系统已经取得了重大进展：冷却水系统已经交付并准备好进行调试；低温设备的建设已经完成，该设备目前正在进行功能测试；第一等离子体所需的设备已经 100% 安装在磁力转换大楼中。另一方面，最近对国际热核实验堆首创关键部件的分析结果表明，需要进行大量的维修。此外，国际热核实验堆组织还一直在解决法国核安全管理局提出的监管问题。

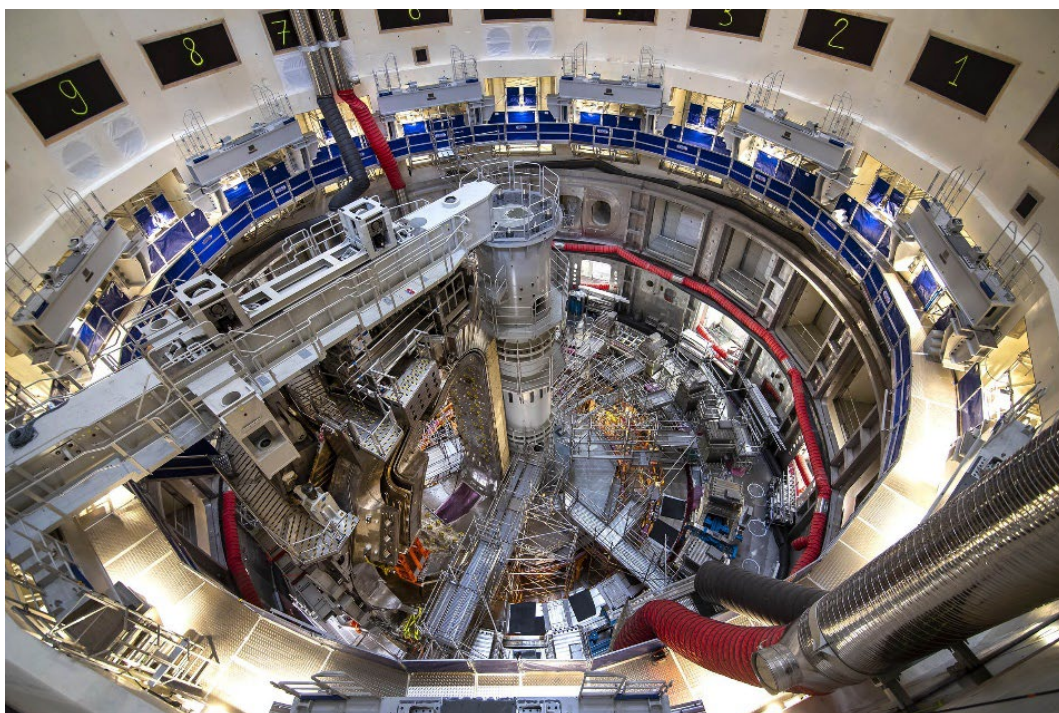


图 D.1. 在国际热核实验堆托卡马克大楼的中心。这个 30 米深的坑是国际热核实验堆机器组装的舞台。正在从下到上进行组装。
(照片来源：国际热核实验堆组织)

88. 为在西班牙建造国际聚变材料辐照设施（IFMIF）示范聚变电站定向中子源而成立联合体的工作继续取得进展，该设施对聚变材料的开发和验证至关重要。该项目的规划已经完成，用于支付建造费用的资金也正在落实中。同样，日本的 IFMIF 工程验证和工程设计活动项目通过完成其三个主要设施（测试设施、锂靶设施和加速器设施）的工程验证活动，继续在 IFMIF 的综合工程设计和为未来聚变中子源的建造、运行、利用和退役决策收集必要数据方面取得进展。

89. 日本 JT-60SA 托卡马克的调试于 2020 年 4 月开始，由于其中一个磁线圈的电压绝缘能力不足而中断。隔离能力的改进正在进行，预计将在 2023 年早些时候重新开始调试。

90. 2022 年 10 月，位于德国的世界上最先进的仿星器 Wendelstein 7-X (W7-X) 进入了它的第二个实验阶段（图 D.2）。W7-X 现在已经完全配备了一套水冷的等离子体面部部件，使得可以在 10 兆瓦的加热下放电长达 30 分钟，这应该能够实现连续运行。

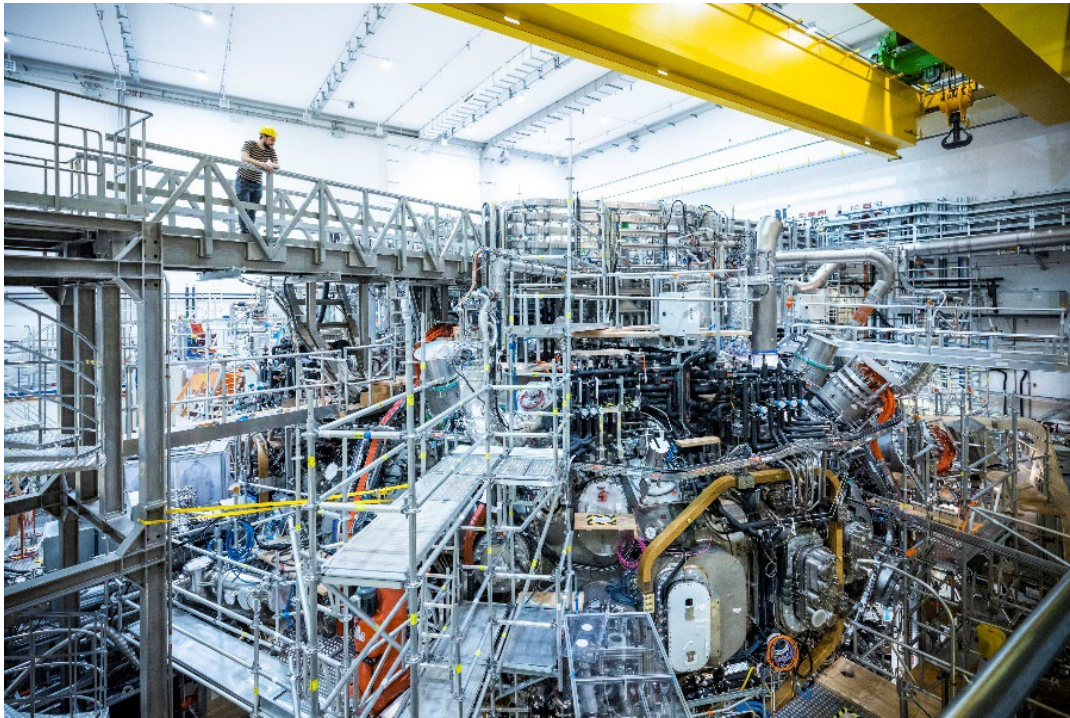


图 D.2. 凭借加倍的加热能力、40 个新的诊断装置和 6.8 公里长的冷却管道，W7-X 仿星器已经开始了它的第二次科学实验活动。
(照片来源：马克斯·普朗克等离子体物理研究所)

91. 2022 年 9 月发表的一份研究报告¹称，在大韩民国的韩国超导托卡马克先进研究设施进行的实验产生了满足电厂性能要求的等离子体聚变机制，包括超过 1 亿开的高温 and 充分控制不稳定性以确保几十秒的稳定状态运行。这些结果增强了人们对托卡马克设计的信心，认为它是通往商业聚变电站的一条有希望的道路。

92. 2022 年 12 月 13 日，美国能源部宣布实现了聚变能源的历史性科学突破。位于劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的国家点火设施的研究人员能够从 192 束激光束提供的总共 2.05 兆焦耳中产生大约 3.15 兆焦耳的聚变能量，从而在聚变实验中首次实现了大约 1.5 的目标能量增益。驱动激光束所需的能量约为 300 兆焦耳。

93. 旨在进行聚变净电增益示范的示范聚变电站（DEMO）概念继续由个别政府、私营公司和一些公私合营企业开发（图 D.3）。在中国、欧盟、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国，至少有 11 个 DEMO 概念处于不同的开发阶段，目标完成

¹ Han, H., Park, S.J., Sung, C. et al. A sustained high-temperature fusion plasma regime facilitated by fast ions. Nature 609, 269–275 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05008-1>.

日期在 2025 至 2055 年之间。在意大利，偏滤器托卡马克试验设施的建设继续取得进展，这是一个新的超导托卡马克，专门研究用于 DEMO 的先进偏滤器解决方案。

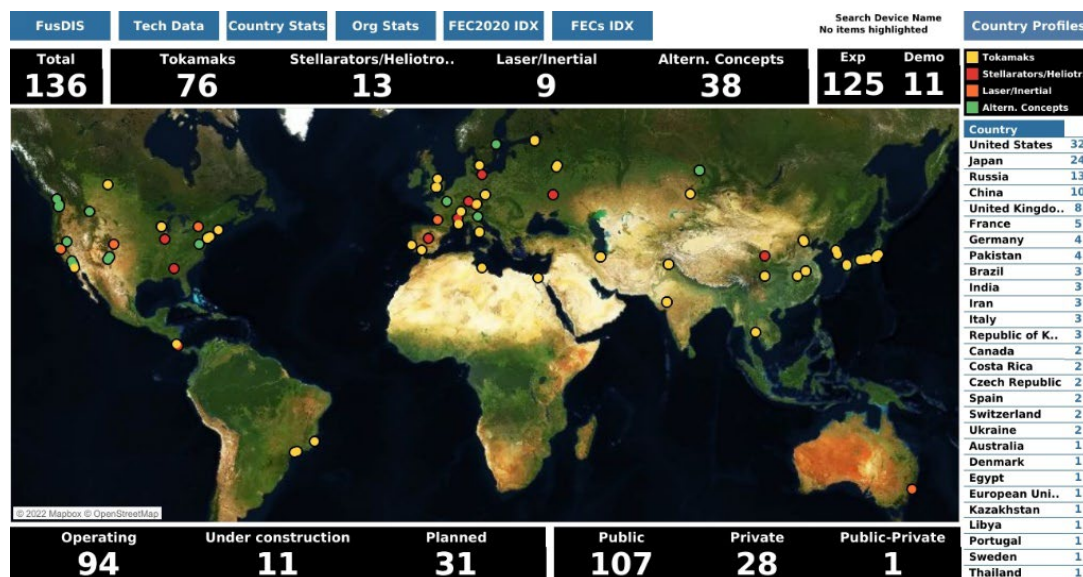


图 D.3. 超过 130 个公共和私人实验聚变装置正在运行、建设或规划中，而一些组织正在考虑示范聚变电站设计。（照片来源：原子能机构聚变装置信息系统）

94. 2022 年 10 月，英国政府宣布了其“用于能源生产的球形托卡马克” DEMO 型计划的地点 — 诺丁汉郡西伯顿的一个煤电站场，该计划的目标是在 2040 年之前完成，旨在对从聚变中产生净电力并生产氦作为自身燃料的能力进行示范。

95. 同样在 2022 年 10 月，美利坚合众国的通用原子公司宣布了一个稳态紧凑型先进托卡马克聚变中试厂的计划（图 D.4）。这种设计方案将依靠先进的传感器、控制算法和高性能计算机来控制等离子体、产生氦的碳化硅增殖毯以及为聚变反应提供动力所需的微波加热。

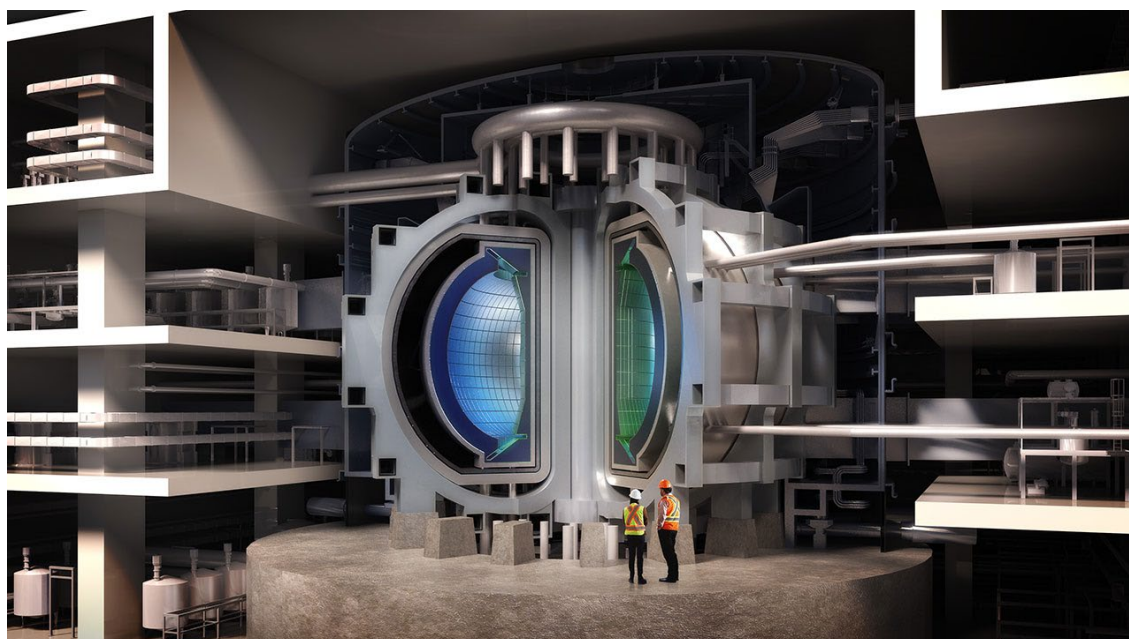


图 D.4. 通用原子公司聚变中试厂的内部效果图。（照片来源：通用原子公司）

96. 2022 年，私营部门投资继续大幅增长。私营部门公司宣称，它们总共吸引了约 50 亿美元，自 2021 年 6 月以来超过 30 亿美元。截至 2022 年，有 33 家这样的公司分布在世界不同地区，即澳大利亚、加拿大、中国、法国、德国、以色列、意大利、日本、英国和美利坚合众国（仅美利坚合众国就超过 70%）。

趋势

97. 在美利坚合众国，2022 年 3 月举行的“为商业聚变能源制定大胆的十年愿景”白宫峰会启动了三项新的倡议，包括能源部全机构的新聚变倡议，一名新的聚变能源首席协调员加入了能源部负责科学和创新的副部长办公室。这些倡议的一个共同主题是认识到公私伙伴关系为加快聚变能源的研究、发展和示范提供了机会。因此，能源部科学办公室于 2022 年 9 月发布了一项资助机会公告，邀请与私营部门合作实施一个新的基于里程碑的聚变发展计划，以成功设计一个聚变中试厂。

98. 基于人工智能的等离子体动力学建模和聚变实验的实时控制在功效上有了巨大的改进，为实现聚变能源提供了一条加速的路径。其中一个例子是 2022 年发表的一项研究，该研究表明基于人工智能的控制系统如何通过操纵装置内的 19 个磁线圈，在瑞士的 TCV 托卡马克中创造并保持广泛的等离子体形状和配置（图 D.5）。作为最近启动的一个协调研究项目的一部分，原子能机构及其合作伙伴已经开发了用例和基准，并收集了相关数据，以便在国际层面上测试聚变科学中的人工智能应用。

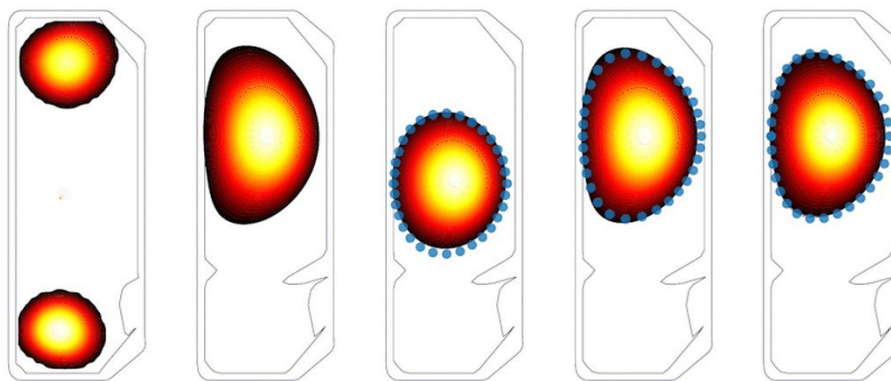


图 D.5. 用基于人工智能的系统控制器生成的不同等离子体形状和配置的范围。
从左到右：液滴、负三角形、类似国际热核实验堆的形状、雪花、拉长的等离子体。
（照片来源：DeepMind 公司和瑞士联邦洛桑技术研究所的瑞士等离子体中心）

99. 随着聚变在私营部门的兴起，随之而来的资本投入的大幅增加和最近的突破，以及大型国际和国家聚变项目的进展，除了实验科学外，成员国还在加速技术开发。在这种情况下，若干成员国正在考虑为聚变系统建立一个合适的安全框架的方案。现有的核设施（如核电厂或加速器）的设计安全标准和指南并没有照顾到与聚变电站相关的特殊性，也没有考虑其潜在的危险。

100. 目前，约有 10 个成员国对不同的实验聚变设施进行监管。一般来说，为了证明所提出的概念的可行性，这类设施的运行会产生极少量放射性物质。成员国正在适用并在必要时调整辐射防护或核设施/装置框架的现有授权和监督要求，以适应未来商业聚变设施的早期研发。这种方案只在近期内可行，未来需要在这一领域进一步发展。

101. 许多国家已经承认，需要建立更新或新的国家框架，以适应商业聚变设施的额外复杂性。这种复杂性可能包括使用或产生更大的放射性材料库存和极端的运行工况（如高温、真空条件和液态金属冷却剂技术），并需要开发新材料。此外，与裂变过程相比，聚变具有不同程度的危害和相关风险，因此可能需要一个专门的监管框架。对风险控制的期望和监管者的方案也可能不同。

102. 70 年的核裂变反应堆经验可能有助于通过在核裂变和核聚变之间形成技术发展的协同效应来发展用于能源生产的聚变技术。

103. 为聚变能制定一个适当的国家法律、制度和监管框架与这种新型技术的发展及其未来的商业部署有着内在的联系。众所周知，这一领域的全球协调将支持并加速全球聚变产业的兴起。

E. 研究堆、粒子加速器和核仪器仪表

E.1. 研究堆

状况

104. 截至 2022 年底，在 53 个国家有 233 座在运研究堆，包括临时关闭的研究堆。它们继续为科学界、医学界和工业界提供中子束和不可或缺的辐照服务，并为教育和培训做出贡献。附件中的表 E-1 列出了研究堆最常见的应用。



233 座在运研究堆

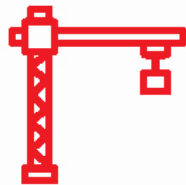
53 个国家，截至 2022 年底

105. 有 10 个国家正在建造 11 座新研究堆，

包括一个次临界装置和一个加速器驱动系统：阿根廷、多民族玻利维亚国、巴西、中国、捷克共和国、法国、大韩民国、俄罗斯联邦、沙特阿拉伯和乌克兰。14 个成员国有建造新研究堆的正式计划：孟加拉国、白俄罗斯、比利时、中国、印度、荷兰、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。相当数量国家正在考虑建设研究堆，它们是：阿塞拜疆、埃塞俄比亚、加纳、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、突尼斯和坦桑尼亚联合共和国。



11 座新研究堆在建于
10 个国家



14 个成员国正式规划
建造新研究堆



16 个成员国正在考虑
建造研究堆

106. 国际社会继续努力尽量减少民用部门的高浓铀使用。哈萨克斯坦的 IVG.1M 反应堆在 2022 年被转换为使用低浓铀。迄今，共有 108 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。全球所有钼-99（需求量最大的医用放射性同位素）的主要生产商都将在 2023 年 4 月前开始使用非高浓铀生产方法。共计有 6885 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进行处置。

趋势

107. 运行至少 40 年的研究堆比例正在接近 70%。许多营运组织已经或正在制定积极主动的战略和系统的老化管理、整修和现代化计划，以便使持续安全运行能够达到 60 年和更长时间。一些运行高利用率研究堆的组织正在考虑将它们的有效寿期延长到 80 年甚至 100 年（图 E.1）。以下方面正在成为这些计划公认的组成部分：从结构、系统和部件对安全和运行可靠性的影响方面对其进行筛选；确定和了解降质机理；检测、监测和减缓老化影响。

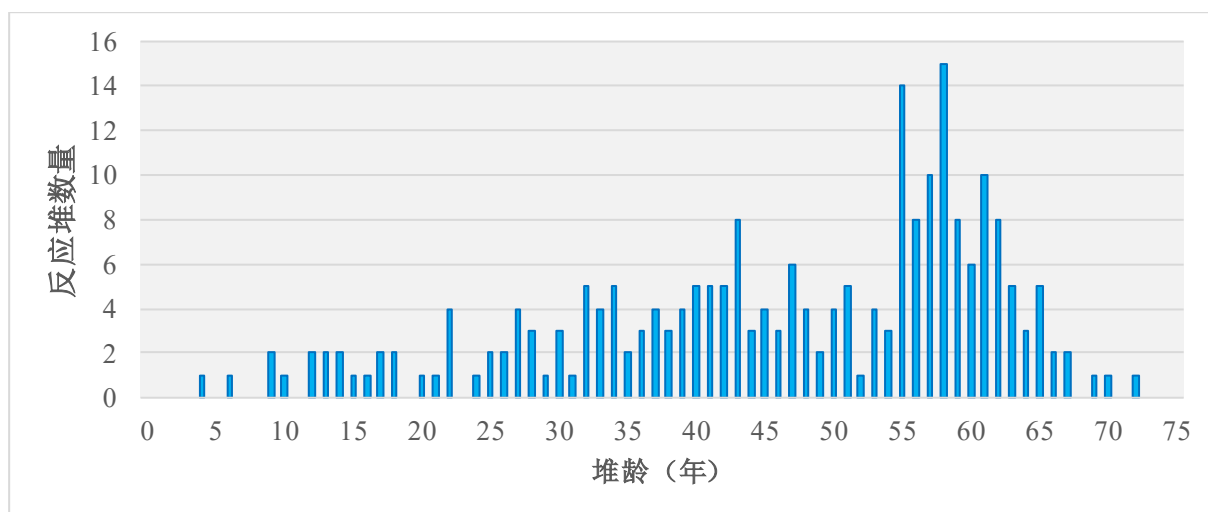


图 E.1. 2022 年 11 月在运研究堆按堆龄的分布情况。

(照片来源：原子能机构研究堆数据库)

108. 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和因特网反应堆实验室等国际和地区合作倡议获得机会利用研究堆。

109. 在 2019 冠状病毒病大流行导致活动有所减少之后，成员国正在加紧努力，提高其在运研究堆的利用率。虽然在放射性同位素生产恢复到大流行前的水平后，需求已经正常化，关键物流和供应链已经重建，但扩大其他应用，需要仔细考虑增长的潜力和可能限制这种潜力的制约因素。例如，目前在零功率或低功率研究堆和中子发生器取得的中子射线照相术发展为扩大这种技术的应用开辟了新的可能性，这种技术主要用于研发、文化遗产研究和工业应用。最初在海因茨·迈尔-莱布尼茨研究中子源开发的低成本、高质量系统，现在已在其他设施实施。得益于布拉格捷克技术大学 VR-1 反应堆新建的中子成像系统，已经获得了三维断层图像（图 E.2）。该反应堆在 500 瓦的功率下运行，低于以前认为对中子断层照相法来说可能的功率。在智利的 RECH-1 研究堆安装了一个类似的系统，而在原子能机构在塞伯斯多夫新建的中子科学设施成功地测试了另一个基于小型氘-氘和氘-氚中子发生器的系统。

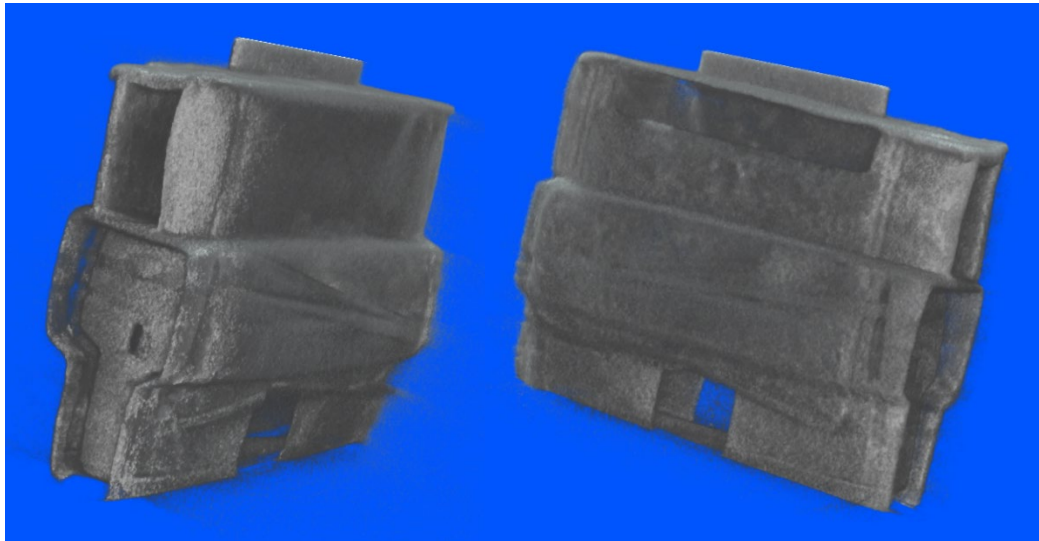


图 E.2. 在布拉格捷克技术大学的 500 瓦 VR-1 反应堆进行的古代西藏锁的断层照相生成的两个断面图（图像：捷克共和国布拉格市捷克技术大学；德国慕尼黑技术大学海因茨·迈尔-莱布尼茨中心）

E.2. 粒子加速器

状况

110. 硼中子俘获疗法是一种新型癌症疗法，是将肿瘤靶向硼药物和外部中子束结合使用。世界各地对硼中子俘获疗法的兴趣持续增长，特别是在日本批准在基于加速器的设施将硼中子俘获疗法作为治疗复发性、不可切除的头颈癌的常规临床疗法之后（图 E.3）。其他国家已有目前正达到常规临床治疗后期发展阶段的设施，如芬兰的赫尔辛基和中国的厦门，并且 2022 年有新的基于加速器的项目宣布，这包括在中国海南省的第二个设施和比利时布鲁塞尔的一个设施。现在有 11 个成员国的 20 多个基于加速器的硼中子俘获疗法设施正处于从规划到常规运行的不同阶段，一些公司正在为加速器、中子生产靶件和慢化部件、治疗规划和患者定位系统以及药品提供商业解决方案。在外联和能力建设方面，国际中子俘获治疗学会非常活跃，定期发布通讯，并组织了专门针对下一代硼中子俘获疗法专业人员的年度会议和活动。



图 E.3. 在最近于日本关西硼中子俘获疗法医疗中心举办的培训班上，正在对一名充当患者的学生进行姿态调整，为实施硼中子俘获疗法治疗做准备。
(照片来源：关西硼中子俘获疗法医疗中心)

趋势

111. 低能量电子加速器的主要工业用途之一是医疗产品包括一次性医疗设备的消毒。历史上，大多数辐射消毒是使用钴-60 等伽马源进行的。然而，由于供应链有限，以及与钴-60 的使用和管理相关的安全和安保关切，许多用户正在积极寻求基于加速器的替代品。多年来，直接电子束消毒法一直被用于有效地处理低密度产品。此外，为电子加速器配备一个电子到 X 射线的转换器可以产生足够强度的 X 射线通量用于其他工业用途。虽然这是一个相对高能耗的解决方案，但它结合了加速器（高剂量率和相应的高产品量）和伽马源（深层产品穿透）的优点。

112. 开发更强大、更可靠的电子加速器仍然是用户群体的主要目标，世界各地的一些技术供应商正积极进行这一领域的工作。现有设备的需求量很大，加速器生产商正在全力以赴地努力满足日益增长的兴趣。现在，许多公司提供完整的解决方案（电子加速器、X 射线转换靶、屏蔽结构、传送带、过程控制系统等），这些方案通常可以根据客户的需求进行定制，例如，最大限度地提高产量或加工精细产品，或提供更多的功能。所有这些正在进行的努力正在逐步改变辐照技术的局面，使加速器提供的产品和服务的份额增加。

E.3. 核仪器仪表

状况

113. 人工智能及其衍生产品在核仪器仪表方面的应用越来越广泛。最近，它被引入混合场辐射探测，用于辨别不同粒子产生的脉冲。一个典型的例子是辨别塑料闪烁体中的光子和中子信号。应用分类算法，可在对脉冲进行处理后成功地辨别脉冲。

114. 与之类似的科学领域生命科学也已受益于人工智能应用。用三维 X 射线或中子结晶学破译蛋白质折叠结构是一个长期性的科学问题。除了正在变得可及的先进检测仪器仪表外，包括私人供应商在内的人工智能界已将其努力重点放在成功预测蛋白质结构的深度学习算法上。最近，深度学习软件发展与可公开获得的工具相结合，在我们对精细到原子距离的人类蛋白质组折叠的理解方面产生了巨大影响，预计这些发展将在未来几年带来突破性的发现。

趋势

115. 更大规模的人工智能应用一直在革命性地改变着高能物理学的世界。随着强子加速器被升级到更高的光度，每次碰撞产生的粒子数量也在增加。因此，跟踪探测器需要以更高的计数率运行，潜在地具有更高的背景计数，因为稀有探针发现通道是目标。相应的重建算法需要处理更高的探测器命中、集群和轨迹的有效载荷。粒子物理学界已经引入使用机器学习算法来优化和加速轨迹重建，以及尽量减少轨迹错误识别的背景影响。粒子物理学界还组织了公开比赛，邀请参赛者输入他们的算法，以解决超大型强子对撞机的高亮度状态。随着探测器进入无触发读出时代，这方面的优化变得更加重要。和过去一样，粒子物理学领域的许多这类创新也有很大的潜力可以应用于先进的核仪器仪表。

116. 目前，使用无人驾驶飞行器（无人机）进行辐射探测和监视的趋势受到趋向更有效载荷、安全性和飞行耐久性、阻力和制导精度的新参数的影响。新的用于辐射探测和伽马光谱分析的商业化无人机已经出现，为放射性测绘提供了全面的解决方案。正在开发用于无人机自主运行的机器人式容器，远程任务可以实现无人值守的起飞和降落、充电或电池更换、天气保护等。由于全球导航卫星系统的精度不断提高，测量工作已经开始更多地关注对港口装卸码头、集装箱或建筑物等较小物体的精确扫描。

117. 基于硅光电倍增管的辐射探测器的使用提高了性能和紧凑性。用于温度补偿的内置电子装置和读出电子装置在实施无人机技术方面起着重要作用。塑料闪烁体、GAGG 探测器等探测器以及基于 ZnS(Ag)/6LiF 或 CLYC 和 CLLB 的能够进行伽马和中子探测的探测器正出现在基于无人机的系统中。

118. 塑料闪烁探测器的应用似乎是一个新的趋势。这种塑料在低比重（密度约为 1 克/立方厘米）、多形状和高检测灵敏度方面很有前景。现有的光谱处理算法使塑料探测器能够区分人工和天然存在的放射性物质同位素，或识别基本放射性核素特别是工业放射性核素。

119. 还引进了实时数据处理和后处理的新方法，以优化无人机完成辐射探测任务所需的时间。例如，可以将辐射传感器与光检测及测距相组合，从而能够实现实时的高分辨率三维伽马成像或具有中子/伽马分辨能力的双伽马射线和中子绘图。如图 E.4 所示，使用高分辨率相机进行三维摄影测量或光检测及测距，就能够应用代数重建技术来校正所有贡献面的距离，并能够使探测器以三维作出响应。

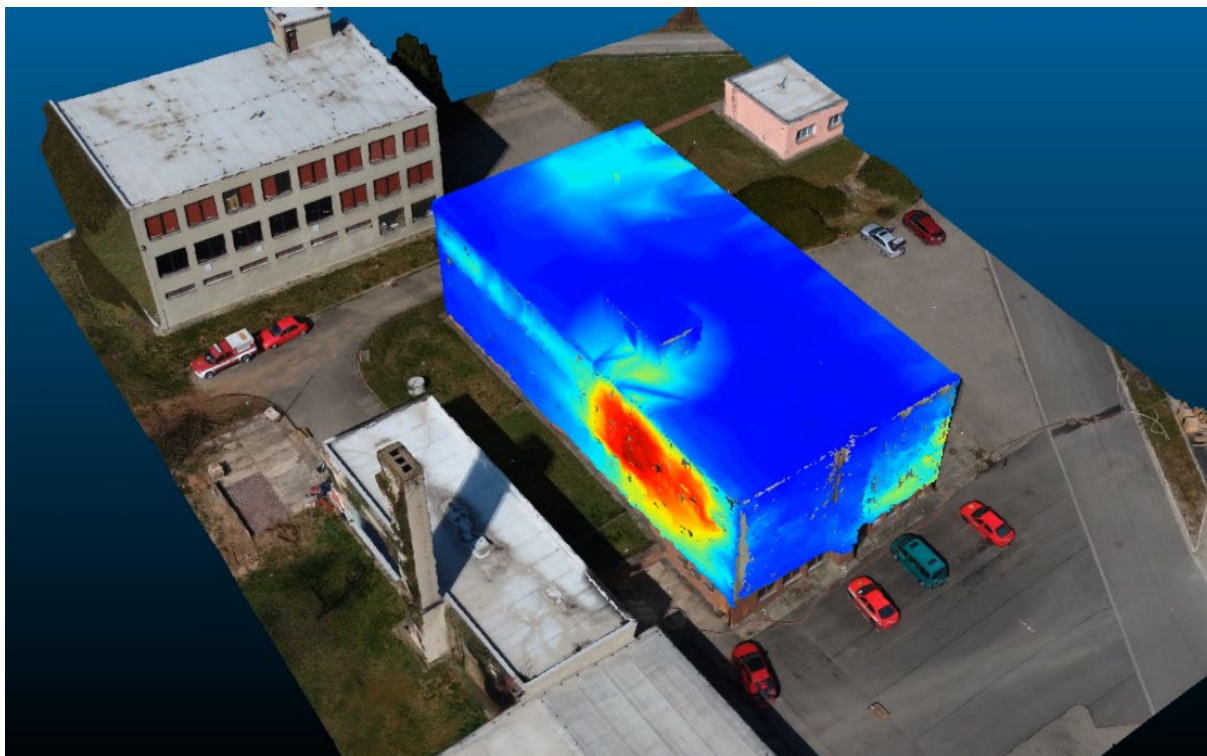


图 E.4. 利用无人机对含放射源/放射性物质建筑物进行三维放射学测绘的实例。
(图片来源：原子能机构)

F. 粮食和农业

F.1. 对食品安全危机作出快速响应

状况

120. 近期的各种事件，如 COVID-19 大流行、冲突和与气候有关的自然灾害，突显了全世界粮食供应在压力情况下的脆弱性，以及通过改革食品控制系统和改善技术支持来提高韧性的必要性。各种危机和紧急情况，如极端气候事件、自然灾害、流行病和大流行病，会破坏食品安全控制系统，损害食品安全和粮食安全，并为食品掺假和食品犯罪提供机会。加强成员国的准备和快速响应能力对于应对这些挑战至关重要。

121. 食品控制系统通常有赖于基于实验室的两级检测方案。具有成本效益的高通量检测方法已被用于筛查根据国家监管食品安全监测计划抽样的产品。结果表明污染有可能超过监管容忍水平的，随后都会采用更复杂且耗时的技术进行验证。核技术，如同

位素稀释质谱测定法和稳定同位素比测定法，在这种检测中发挥着重要作用。为确保粮食供应中不会留有受污染食品，筛查检测偏向于最大限度地减少假阴性结果（即受污染食品未被测出）。然而，由于分析方法的性能和测量误差，可能会出现假阳性结果（即未受污染食品被错误地归类为受污染食品），进而影响到生产商和食品工业。第二级检测——确认性检测——会积极识别污染情况，极少有假阳性结果。这种类型的食品控制系统同时保护消费者和生产商，并有助于促成贸易。

122. 不断变化的环境条件正在改变作物、牲畜和渔业生产中的天然毒素模式。例如，不断变化的气候条件促进了会产生真菌毒素的真菌在它们以前未曾出现过和生产者不必考虑这种威胁的地方的生长。气温升高，加上富营养化，很可能会增加许多水生生态系统中蓝藻水华的频率和持续时间以及商业鱼类物种中甲基汞的生物累积，进而带来额外的食品安全风险（图 F.1）。

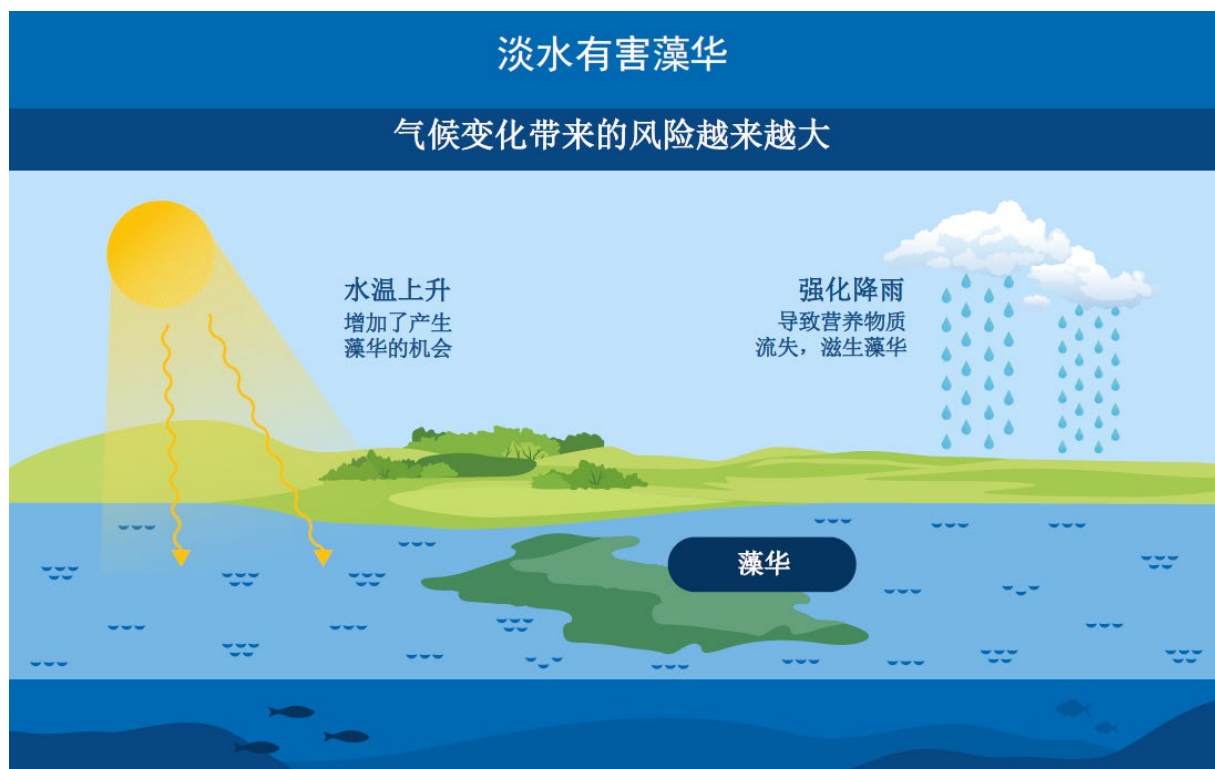


图 F.1. 由于气候变化，海产品因蓝藻水华（有害藻华）污染而产生毒素的风险增加。（图片来源：原子能机构，基于 www.climatecentral.org/climate-matters/harmful-algal-blooms）

123. 气候变化还会影响害虫和病媒的流行和分布，进而需要调整农药和兽药的使用。如果残留物留存在食品中，可能会构成额外风险。对家畜使用抗微生物剂还涉及抗微生物药物耐药性问题，而这会导致耐药细菌的发展，并有可能通过受污染食品发生转移。

124. 这些驱动因素中的每一个，无论是单独还是组合，都会对“同一健康”方针的各组成部分产生重大影响，特别是在食品和饲料供应的安全性和完整性方面。在正常控制系统遭到破坏的情况下，这些效应会有所加剧，COVID-19 大流行的影响就证明了这一点，尽管该疾病并非食源性疾病。

趋势

125. 在紧急情况下，当供应链被破坏，食品控制实验室和食品控制系统受到损害或无法使用时，最高优先事项是要确保粮食供应始终是安全的。保护消费者健康并防止卫生部门面临更多食品安全问题有助于防止危机恶化。因此，在危机情况下，应将重点转移到快速、易于实施的筛查方法上，以维持食品安全标准，并确定或确认受污染食品的来源。而后，可将可得资源专用于高端技术，以提供对危机控制和管理至关重要的信息。

126. 快速食品检测得到了各种核技术和同位素技术以及同位素组分测定法的支持，这些技术可以单独使用，也可与补充技术一起使用。核分析技术有赖于强大的参数，如质量、自旋、磁矩、原子核和内壳电子的能级以及元素组成的同位素测量值。

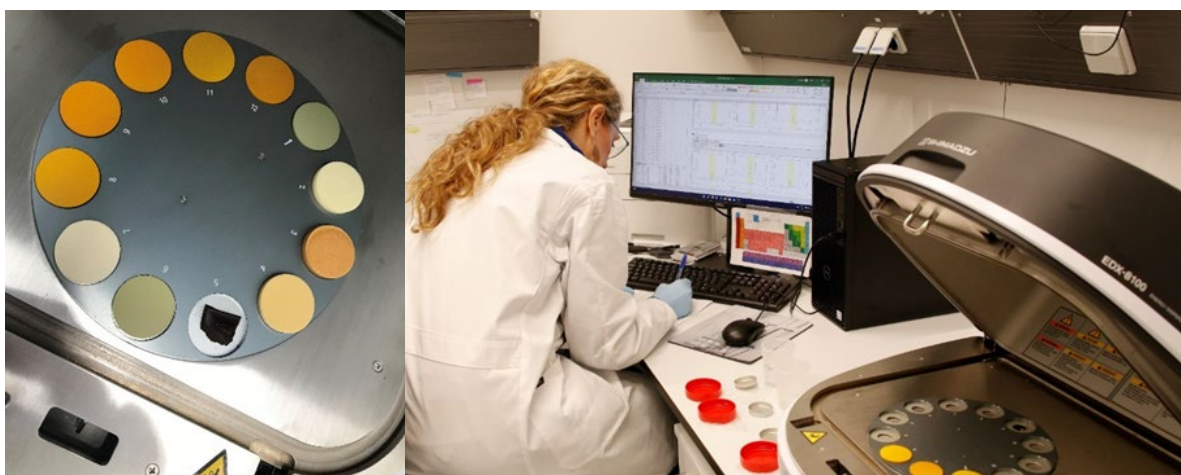


图 F.2. 在奥地利塞伯斯多夫粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心的食品安全和控制实验室，利用台式能量色散 X 射线荧光分析姜黄样品，检测有毒元素。
(照片来源：原子能机构)

127. 半导体、光子和其他技术的最新进展促成了分析仪器的小型化，出现了各种台式、手持和便携式设备，不仅可应用于实验室，还可应用于整个食品生产和供应链的各个节点。这些进展还通过为决策工作提供信息，为危机中的快速干预措施提供了支持。

128. 其中一个例子，就是为快速筛查食品，开发能量色散 X 射线荧光的各种应用，以按照世界卫生组织规定的监管水平，检测元素营养素和有毒金属如铅、镉和砷。² 该项技术有手持式和台式两种形式（图 F.2），可由非专业的操作人员在实地或现场使用。它只需极少的样品制备，并且不使用对环境有害的试剂。结合化学计量学工具，能量色散 X 射线荧光的预测性能也可扩展用于食品欺诈问题。

² Byers, H.L., McHenry, L.J., Grundl, T.J., XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits, Food Chemistry: X 1, Vol. 1 (2019).

129. 另一个例子是气相色谱法-离子迁移谱法，这种技术采用的是低能量氙氢化物辐射源。顶空气相色谱法-离子迁移谱法（图F.3）可用于检测微生物挥发性有机化合物的指纹，这些指纹表明存在真菌，预警食品中可能存在真菌毒素生产，并允许采取控制措施³。气相色谱法-离子迁移谱法可以检测食品中的许多其他污染物和有害指纹，其中包括甲醇和环氧乙烷，前者是一种化学品，可以在掺假的酒精饮料中找到，摄入后有有毒代谢物，后者则是一种有毒杀虫剂，自2020年以来，曾导致欧洲多次召回受污染食品产品。



图 F.3. 在奥地利塞伯斯多夫粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心的食品安全和控制实验室进行顶空气相色谱法-离子迁移谱法分析，检测食品污染物的特征指纹。（照片来源：原子能机构）

130. 这些及其他一些快速核分析技术，如台式核磁共振光谱法和通过光腔衰荡光谱法进行的稳定同位素分析，结合便携式光谱方法，如表面增强喇曼光谱仪和傅里叶变换红外光谱仪，提供了一套强大的分析仪器。这类工具在现场食品分析中的应用正在迅速发展，将进一步促成对影响粮食供应的紧急情况或危机作出有效响应。

³ Wang, S., Mo, H., Xu, D., Hu, H., Hu, L., Shuai, L., Li, H., Determination of volatile organic compounds by HS-GC-IMS to detect different stages of *Aspergillus flavus* infection in Xiang Ling walnut, Food Science & Nutrition, Vol. 9, Issue 5 (2021).

F.2. 食品辐照方面的进展：更多机器源用途和新的软束技术状况

131. 食品辐照即以一种无化学物质的方式提高食品安全、保持食品质量和延长保存期。无论是通过伽马光子、电子束还是 X 射线，电离辐射对食物都很温和，但对微生物和害虫却很强硬。由于辐照不会导致食品温度显著升高，因此有控制地应用辐照既不会损害营养品质，也不会对食品的味道、质地或外观产生显著影响。在常规食品辐照中，射束具有能量和穿透力，这意味着即便是预制食品也可以被辐照；包装还可保护食品在处理后感免受外部污染的风险。

132. 约 70 个国家允许对至少一种食品进行辐照，在大约 50 个国家中，有 160 多个辐照设施对食品进行常规处理（图 F.4）。在当前流行的商业模式中，商业辐照中心作为多用途服务提供商发挥作用：它们在预定的剂量范围内，为一系列产品持续提供经认证的电离辐射剂量，以满足包括医疗、制药和食品在内的各部门客户的需求。

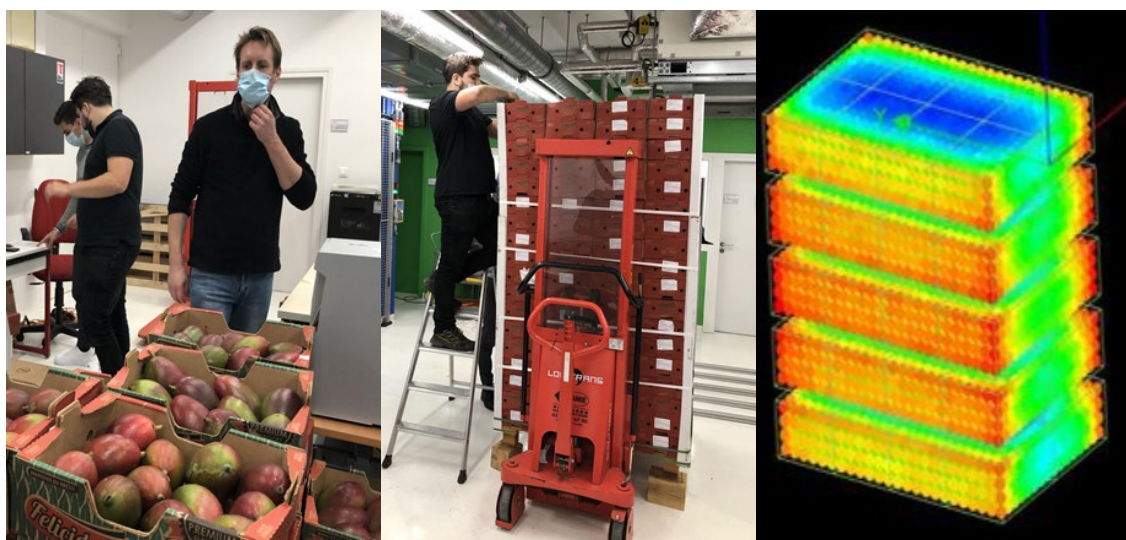


图 F.4. 法国一家食品辐照设施的专家正在进行测试，以验证对托盘上的芒果进行 X 射线辐照可以实现适当植物检疫处理所需的最小剂量（左图和中图）。

剂量图表明了吸收剂量所发生的变化（右图）。（照片来源：法国 Aerial）

133. 目前，几乎所有的辐照食品都是在使用来自钴-60 的伽马射线的专业设施中加工的，钴-60 是一种放射性同位素，能发出 1.17 和 1.33 兆电子伏的高能光子。约有 90% 的商业食品辐照设施使用伽马射线，其他的则是利用机器源辐照来产生电产生的高能电子束（高达 10 兆电子伏）和（或）X 射线（通常高达 5 兆电子伏，不过有些国家允许高至 7.5 兆电子伏）。约有 5% 的食品辐照服务提供商除了其钴-60 辐照装置外，还投资于电子束和 X 射线机器源能力。由于对钴源的需求持续增长，而钴-60 的生产需要几年的准备时间，技术的多样性正变得愈发重要。钴-60 放射性核素正变得越来越昂贵，这使得电子束甚至 X 射线辐照都成了颇具吸引力的替代方案，同时，对使用机器源的软束技术的兴趣也有所提升（图 F.5）。

134. 食品辐照效用的一个良好范例就是香料等干制食品，在这类食品中，许多微生物，包括食源性病原微生物如沙门氏菌、蜡样芽孢杆菌和产气荚膜梭菌，都可以在脱水状态下生存。⁴ 虽然污染水平可能很低，但将这些干香料加入食品既为这些微生物提供了水，也提供了丰富的环境，使它们能够迅速繁殖并茁壮成长。因此，有必要进行微生物还原处理，以尽量降低消费者生病的风险和减少由食品腐败变质造成的贸易损失。热处理虽然有效，但也会去除掉使香料具有独特风味、鲜艳色彩和香气以及促进健康属性的挥发性成分。相比之下，电离辐射在破坏上述微生物的同时，对香料中负责其感官体验、质量和健康属性的成分的影响却极小。电离辐射还可减慢成熟速度，防止大蒜、生姜、洋葱和土豆等食物长芽。



图 F.5. 软电子食品加工设备。Laatu 机器使用两个低能电子灯（图片中间的红色把手），在干燥成份从电子流飘落的过程中，对其进行加工。与蒸汽法相比，它的能耗降低了高达 80%，提供了一种具有成本效益的微生物还原方案。（照片来源：布勒）

⁴ 香料和干芳香草中的微生物危害：会议报告（《微生物风险评估丛书》第 27 号，粮农组织/世卫组织，罗马，2022 年）。

135. 由于能够阻止害虫的发展和繁殖，电离辐射也被用作一种植物检疫处理手段，以便能够跨越检疫边界开展贸易。例如，它可以确保具有重大经济意义的害虫，如果蝇和象鼻虫，无法通过新鲜水果和蔬菜贸易在新的地区传播和安家落户。

136. 原子能机构与联合国粮食及农业组织（粮农组织）一直在帮助成员国建立和扩大食品辐照服务，以减少食品损失和浪费，并促进干香料以及新鲜和冷冻海产品和水果贸易（图 F.6）。最近的一个例子，就是越南得以确保每年向美利坚合众国出口价值2000 万美元的新鲜芒果、火龙果和荔枝，并扩大了与澳大利亚的贸易。



图 F.6. 2022 年 10 月 31 日，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曲冬玉在奥地利维也纳原子能机构总部签署了两个组织关于加强粮农组织/原子能机构在粮食和农业和平应用核技术领域合作的谅解备忘录。（照片来源：原子能机构）

趋势

137. 一个值得注意的趋势是机器源辐照有所扩大。“机器的崛起”得益于其经济实用的优势。与伽马辐照形成对比的是，电离辐射的机器源可以打开和关闭，根据需要发射辐射束。如此一来，它们就避免了与放射性同位素有关的采购、安全和安保（运输、贮存和处置）问题。尽管伽马辐照是一种简单、可靠且成熟的技术，在未来很多年都可以使用，但替代技术有助于补充现有能力，使食品辐照得到更广泛的应用。

138. 原子能机构支持成员国通过协调研究，努力开发机器源食品辐照的新型和实际应用。⁵ 该领域的新进展包括开发了能够模拟食品辐照过程并快速确定最佳处理参数的工具。中国和越南的研究单位已经设计、建造、测试和安装了新的装置，帮助商业高能电子束辐照中心建立模型并计算不同装载配置的剂量分布。这些装置能够事先确定最佳设置，允许在设施进行快速测试，并最终减少射束停用时间，提高生产力。中国清华大学的专家通过与技术公司同方威视合作开发商业产品，进一步推进了这一概念。⁶ 这些工具以及其他地方正在开发的类似工具皆旨在促进伽马射线和 X 射线辐照设施以及电子束设施的良好实践并提高其生产力。

139. 美利坚合众国德克萨斯 A&M 大学是原子能机构的一个协作中心，其研究重点是有哪些高效快速的方法可用以估算一系列不同环境中病原微生物的十进制还原剂量。十进制还原剂量指将原本存活的微生物种群杀灭 90%所需的辐照剂量。计算有效灭菌辐照剂量时，可采用十进制还原剂量的倍数。德克萨斯 A&M 大学一项由原子能机构资助的研究例证了应用研究是如何开拓新的方向来应对不断变化的需求的，对该项研究而言，即需要加强各项技术，帮助避免病原体通过食品转移，进而预防食源性大流行病。

140. 辐照技术发展方面的一个有趣趋势与改变和调整机器源装置中的射束能量的能力有关。例如，可将能量以千电子伏为单位的低能量束（软电子或软 X 射线）用于相对紧凑的辐照灯，这类辐照灯可以安全地放置在柜子或其他装置中。这使得将食品辐照引入工厂变得可行，因为可以将这类软束装置安装到食品生产线上。由于软电子无法穿透整块食物，它们可以有效处理那些微生物主要存在于食物表面或靠近食物表面的物项，如整个带壳蛋（图 F.7 和图 F.8）、整块生肉和家禽肉以及完整的干种子（草药和香料）。当射束需要穿透小批量食物时，也可以使用软 X 射线。

⁵ 《电子束和 X 射线食品辐照应用的发展：一个协调研究项目的最终报告》（原子能机构《技术文件》第 2008 号，维也纳，2022 年）。

⁶ Qin H., Yang, G., Kuang, S., Wang, Q., Liu, J., Zhang, X., Li C., Han, Z., Li, Y., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, Radiation Physics and Chemistry, Vol. 143 (2018) 8–13.

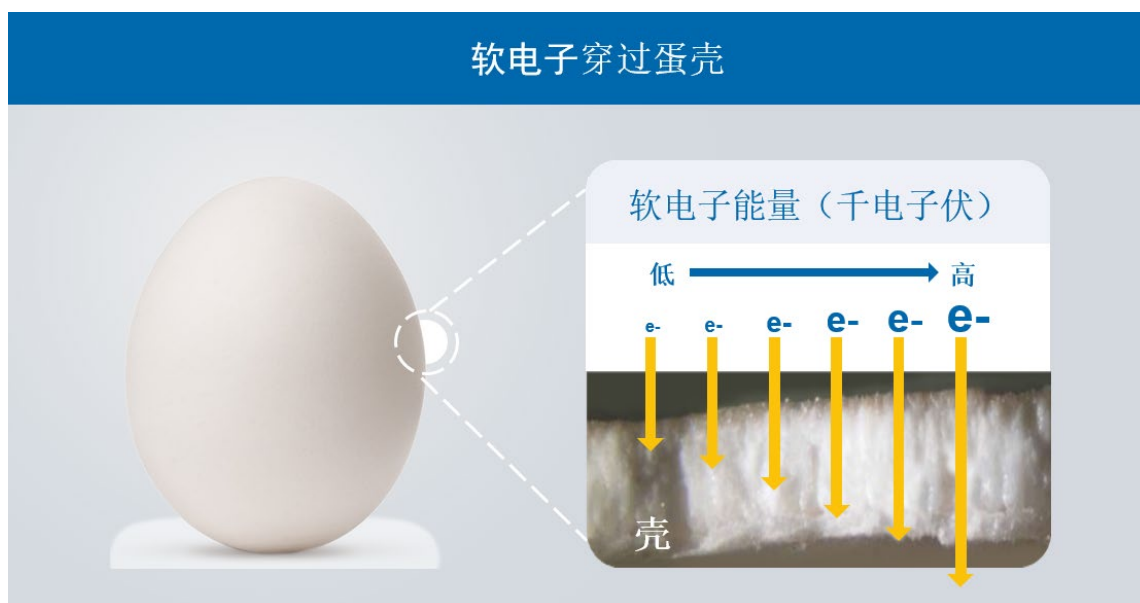


图 F.7. 利用具有不同能量的软电子 (e^-) 穿透蛋壳到不同深度的概念展示。目的是确保电子能够破坏主要存在于新鲜全蛋蛋壳表面或近表面的沙门氏菌。(图片来源: 原子能机构, 基于日本东京都立产业技术研究中心 N.Takaoka 的工作)

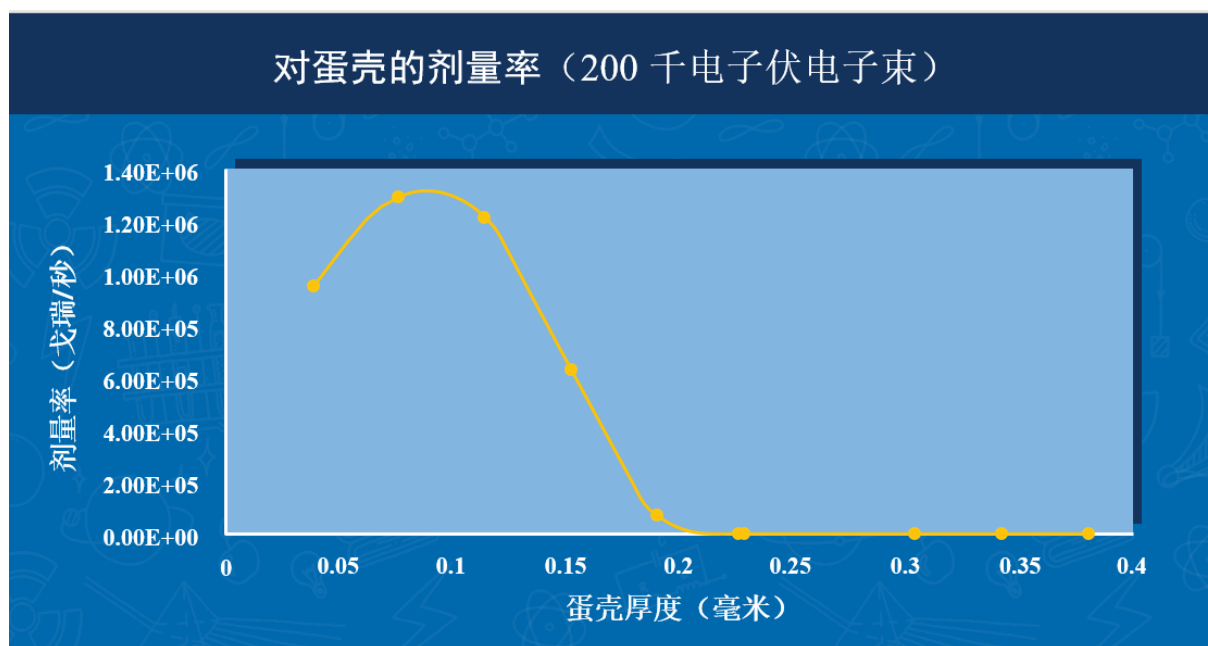


图 F.8. 模拟建模, 估计 20 万电子伏软电子在蛋壳中的辐射范围, 并确定瞄准深度小于 0.2 毫米的沙门氏菌的可行性。(图片来源: 原子能机构, 基于同方威视技术股份有限公司 Y. Liu、H. Qin、H. Shi 和中国清华大学 H. Zhang 的工作)

141. 研究表明，软电子可以改善一些食品的质量，同时也是一种很有前景的表面和近表面微生物去污方法。例如，食品工程公司布勒开发了一个可使干燥成份通过软电子束（<30 万电子伏）的自由落体系统，这种方法可以确保将微生物污染控制和维持在可接受的水平。^{7、8} 针对小批量物项发展软 X 射线辐照的一个实例是柜式辐照器，一般用于医疗仪器的消毒，韩国原子能研究院先进辐射技术研究所的研究人员将其作为一种食品加工手段进行了研究。研究人员的目的是利用医院里现成的软束技术，为免疫系统受损患者提供卫生标准极高的食物，而这种低能量（16 万电子伏）X 射线技术已被证明能够确保鲜切蔬菜符合这一标准。

142. 目前，原子能机构正在开展一个以低能量束革新机器源食品辐照的协调研究项目，重点是应对各项技术挑战和提升新兴软束技术的潜力。参与非洲和亚洲及太平洋地区技术合作项目的国家已表示有兴趣了解软束辐照在全世界的商业可行性，并希望加以实现。

G. 放射性同位素和辐射技术

G.1. 诊疗放射性药物的发展

状况

143. 诊疗剂将一种用于诊断癌症的放射性核素与另一种用于治疗的放射性核素相结合。虽然有些单一放射性同位素在衰变时会产生一些适用于诊疗的辐射，但使用成对放射性同位素的情况更为常见（图 G.1）。

144. 在核医学中应用诊疗剂的一个经典例子，就是将碘-123 的 γ 射线与碘-131 的 β 射线相结合，用于诊断和治疗甲状腺疾病。由于提供了有益于诊断和治疗的放射性同位素配对（如诊断性镓-68 和治疗性镥-177），在过去十年间，诊疗方案已变得越来越普遍。由于它们表现出类似的化学性质，镥和镓的放射性药物可以有相同或类似的药物设计（螯合剂加连接到不同靶向载体如各种肽、抗体或小有机分子的连接剂）。具有用正电子发射断层照相法诊断性镓-68 进行放射性标记的肿瘤特异性载体的放射性药物使得能够对肿瘤进行诊断和活体内表征，从而允许进行正电子发射断层照相法筛查、靶向表达的治疗前证明、分期和选择患者进行放射性核素治疗。使用以同一载体标记的治疗性镥-177 放射性药物对患者进行治疗时，可通过分子靶向放射性药物治疗，针对患者的癌症，提供有选择性的个性化管理。

⁷ Laatu: *Non-thermal, in-plant microbial reduction solution for dry foods* (Bühler, 2019).

⁸ Schottroff, F., Lasarus, T., Stupak, M., Hajslova, J., Fauster, T., Jäger, H., Decontamination of herbs and spices by gamma irradiation and low-energy electron beam treatments and influence on product characteristics upon storage, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, Vol. 14 1 (2021) 380–395.

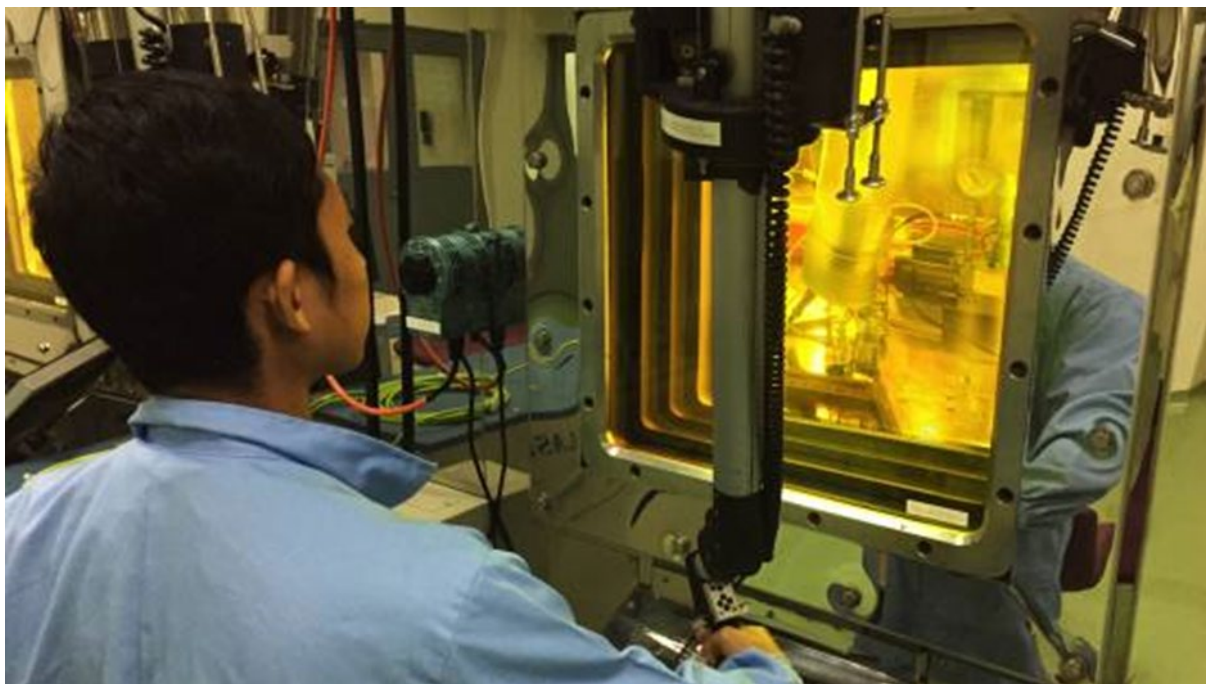


图 G.1. 全世界至少有 80 个成员国正在使用各种放射性同位素和载体分子生产诊疗放射性药物。

145. 目前，镓-68 和镥-177 肽和酶抑制剂已被成功用作神经内分泌肿瘤和前列腺癌的载体。然而，仍然需要为镥-177 找到更好的诊断性匹配物，即相比镓-68，具有更相似的化学性质的诊断性放射性核素，同时还需要成对的新型 α 、 β 或俄歇发射体以及适当匹配的诊断制剂。

趋势

146. 为充分利用核医学中诊疗配对的潜力并改善患者疗效，需要针对放射性药物和放射性同位素，进行更多的研究和开发。目标是开发更为匹配的成对放射性核素，优化更稳定的螯合剂分子，并通过生物和生化设计扩大特定靶向载体的数量。

147. 镥-177 放射性药物的生产可以“添加载体”和“无载体”两种形式进行，二者目前均是在研究堆中生产的。自 2022 年以来，无载体镥-177 也可以在核动力堆中生产，该技术由法马通公司开发，并首次在加拿大布鲁斯核电厂实施。镥-177 由于其半衰期中等、 β 粒子发射可用于治疗、 γ 射线发射可用于诊断成像，已在核医学应用中发挥了一定作用，并使许多研究人员和科学家得以开发出新的诊疗放射性药物。随着最近在靶向分子如肽、免疫片段和小分子方面取得进展，与药剂开发相关的新活动和新计划正在世界范围内展开。

148. 诊疗放射性药物已进入临床用于癌症治疗。然而，分子成像方面的最新进展，如正电子发射断层照相法-计算机断层照相法和正电子发射断层照相法-磁共振成像法，以及靶向治疗（使用 α 和 β 发射体），都要求向临床医生提供更多新兴放射性同位素。目

前正在研究多对新的面向诊疗应用的放射性同位素，如可广泛应用于诊断性单光子发射计算机断层照相法和治疗（ β 和 α 治疗）的钷的放射性同位素（图 G.2）。

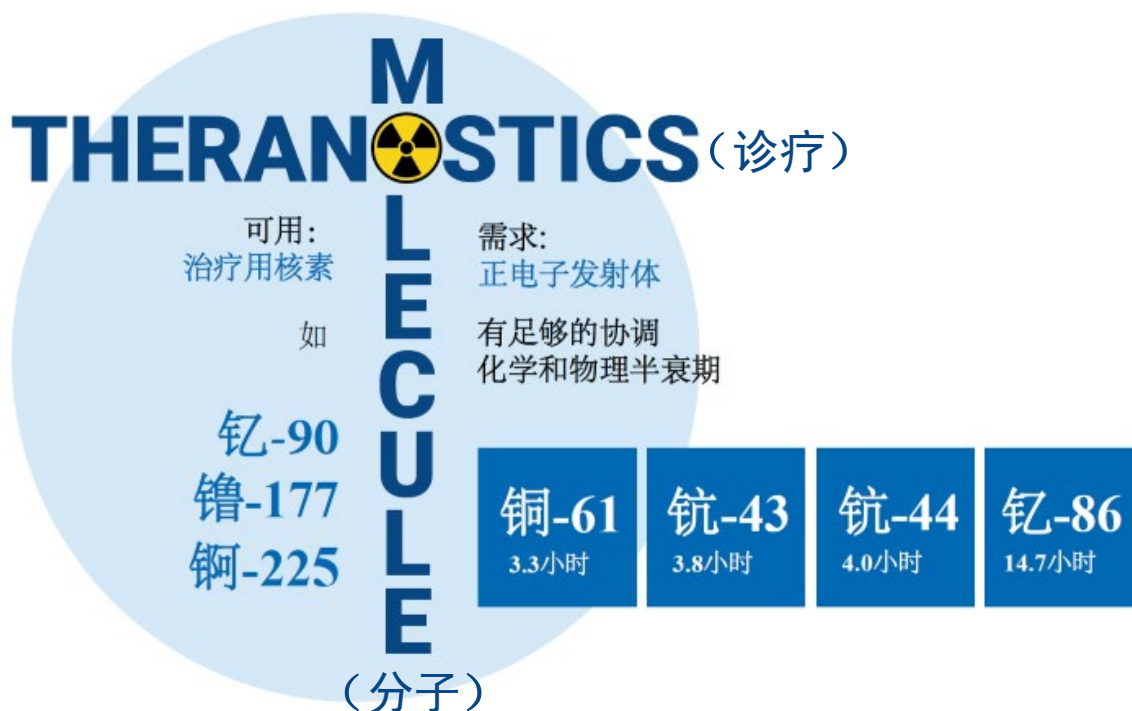


图 G.2. 图表显示了推进放射性药物开发所需的诊疗放射性同位素。
(图片来源：原子能机构，基于德国约翰内斯·谷登堡-美因茨大学 F. Rösch 的工作)

149. 由于放射性核素生产的技术发展，用于放射性药物应用的有前景的放射性核素清单正在增加。然而，将选定放射性核素有效输送到细胞内的分子靶仍然是放射性药物开发面临的一个挑战。需要优化配方、详细表征和开展临床前评估，以便为药代动力学有所改进且副作用最小的诊疗产品开发和实施更高效的新型递送系统。

H. 人体健康

H.1. 人工智能促进轮廓描绘和放射治疗规划

状况

150. 放射治疗是癌症治疗的一个重要支柱，约有一半的癌症患者需要在某个节点接受放射治疗。近几十年来，随着放射治疗设备、三维成像和信息技术的创新以及癌症生物学知识的增加，放射肿瘤学取得了迅猛发展。使用人工智能的新递送技术和相关成像模式实现了高度优化的精确放射治疗，并有助于改善肿瘤控制和癌症患者护理。预计使用这些工具可使观察者之间的差异有所减少，并为临床工作人员节省时间。

151. 放射治疗的工作流程是一个复杂的过程，由若干耗时的步骤组成并由不同工作人员小组实施，会对治疗质量产生影响，并进而影响患者疗效。全球范围内都存在保健人员短缺的情况，其中包括放射肿瘤医师、医学物理师和放射治疗技师。原子能机构建议每 250 例癌症病例配备一名放射肿瘤医师⁹，但对大多数成员国而言，这在未来几十年内都是无法切实实现的。人工智能可为日益增长的人力资源需求提供一个解决方案。

152. 进行放射治疗时，不仅需要精确瞄准肿瘤，还需保护正常组织和结构，以尽量减少损害和副作用。在为放射治疗做准备的过程中，轮廓描绘是至关重要的一步，在此期间，各种器官、正常组织和肿瘤的轮廓都会被勾画出来。这些轮廓通常会与共识指南和图谱一致（图 H.1）。



图 H.1. 原子能机构对放射治疗和核医学服务领域的保健专业人员进行培训，包括通过创新且具成本效益的方法。（照片来源：原子能机构）

153. 为提高耗时的轮廓描绘过程的效率，有几种工具可供使用或正在开发当中，如自动轮廓描绘，它采用了基于图谱的轮廓以减少轮廓的可变性。有一种算法会选择与患者最相似的影像，然后，再利用可变形影像配准，将图谱上的轮廓转移到病人的轮廓上。最近，包含有高质量患者轮廓描绘数据的大型匿名临床数据集已被用于开发基于人工智能的深度学习算法。

⁹ 制定放疗方案：临床、医用物理学、辐射防护和安全方面（原子能机构，2008年）。

趋势

154. 人工智能作为一种工具，可被用以提高放射治疗工作流程各步骤的质量和标准化程度并进一步节省时间。这可能会使辐射管理更加安全、更加准确。人工智能正在迅速扩展到临床护理领域，预计会将放疗规划的范式从涉及多个专家小组的复杂过程转变为自动化过程。至关重要的是，应为保健提供者提供必要的培训，以安全地实施和监测相关系统。让公众了解相关优势和风险也至关重要。

155. 癌症靶区和有危险器官的选择和轮廓描绘是现代化放射治疗的一个关键步骤。定义肿瘤总体积、临床靶体积和有危险器官的概念和术语一直在不断发展。轮廓描绘标准仍然是手动的，自动轮廓描绘工作流程则可以图谱和深度学习方法为基础。基于图谱的自动轮廓描绘所依据的，是一个已准备好并已描绘轮廓的计算机断层照相法病例“库”。深度学习是一种机器学习技术，利用深度神经网络创建模型，随着经验和时间的积累而学习和改进。市面上已有基于图谱的商业深度学习自动轮廓描绘软件包。

156. 虽然基于深度学习的自动分割在研究中的表现非常有前景，但在很大程度上并未对实际临床效益进行研究。尽管已将自动分割用于临床实践，但可能仍然需要人工手动调整或检查轮廓，而且，仍需不断开展教育活动并将描绘准则付诸实践。使用人工智能进行分割的局限性在于，在某些情况下，决策需要依据的，并不仅仅是成像信息。

157. 解决该项挑战的一个方案就是混合智能，它结合了自然智能和人工智能的优势，利用五个不同模块对计算机断层照相图像进行器官分割¹⁰。这种方法得出的结果与人类专家进行轮廓描绘后取得的结果相似——但明显更具时间效率（图 H.2）。

158. 原子能机构最近对核技术和人工智能相关现状、挑战和机遇的概述强调，需要界定放射治疗专业人员的角色和责任，并为基于人工智能的技术的选择、调试、实施、数据共享和持续质量保证提供一个明确框架¹¹。

159. 原子能机构将支持制定一个框架，以指导成员国实施人工智能，进行轮廓描绘。作为这项支持的一部分，2022 年启动了一个协调研究项目，以调查放射治疗中，特别是对头颈癌而言，以电子学习干预促进人工智能辅助的轮廓描绘技能的有效性。虽然医生、医学物理师或放射治疗技师们仍然担心知识可能会消失，但人工智能似乎正在不断提高质量和提升时间效率。鉴于全球癌症护理人员短缺，在有适当监管的情况下，加大人工智能在轮廓描绘方面的作用将是一项令人欣慰的进展。

¹⁰ Udupa J. K., Liu T., Jin C., et al. Combining natural and artificial intelligence for robust automatic anatomy segmentation: Application in neck and thorax auto-contouring, *Medical Physics* (2022).

¹¹ 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）。

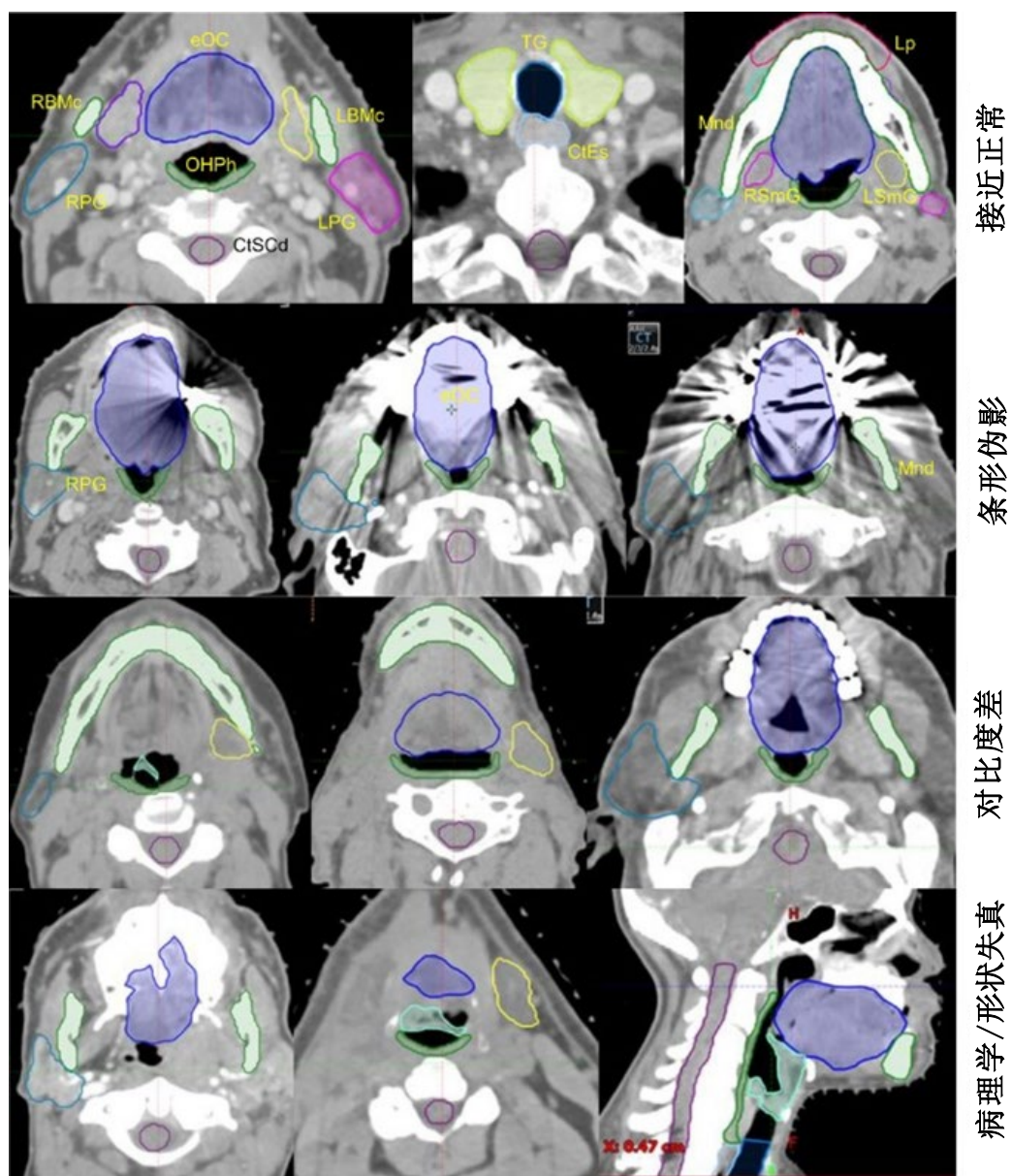


图 H.2. 颈部计算机断层照相扫描显示图像质量存在偏差，如条形伪影、对比度差和形状失真，这可能会带来一些挑战。在这种情况下，可将混合智能作为一种有效方法，用于放射治疗中的轮廓描绘。（照片来源：《医用物理学》，2022 年）

I. 海洋环境

I.1. 新兴关切污染物

状况

160. 据估计，全球制造的合成化学品超过 14 万种，并有新的人为化学品还在不断开发当中。这些化学品的使用频率和高产量会对生态系统和人体健康造成损害，预计到 2050 年，相关数值会增加两倍。这些化学品中的一小部分常被称为优先物质，成员国会海洋环境中的此类化学品进行监管和监测。然而，在水生环境中观察到的毒性效应中，只有一小部分可以归因于这些已知优先物质的存在。¹²

161. 在这种情况下，人们越来越关注新兴关切污染物，即在环境中检测到的不属于监管监视计划范围的物质。尽管我们已知或怀疑新兴关切污染物会对生态系统和人体健康产生不利影响，但对于其最终去向和生物效应，仍知之甚少。这其中包括塑化剂、阻燃剂、“不粘”含氟物质（常被称为“永远的化学品”）、农药、药品和个人护理产品。工业和生活污水处理、填埋场浸出液、地表水径流、农业用地上施用的粪肥和生物固体以及大气沉积都是水生环境中新兴关切污染物的来源（图 I.1）。就海洋生态系统的健康而言，长期持续存在、会在生物体内发生生物积累并具有毒性的物质尤其令人担忧。

162. 原子能机构位于摩纳哥的海洋环境实验室一直在针对水、沉积物和生物区系等各种海洋环境组成部分中不同新兴关切污染物类别内的特定化合物，开发各种分析方法。在整个分析过程中，使用这些目标新兴关切污染物的同位素标记类似物，结合质谱测定技术，可以准确测量痕量和超痕量水平的此类污染物。这种方法被称为“同位素稀释分析”，对于确定海洋食物网和海产品中已知和新出现的化学威胁的存在和分布特征至关重要，特别是在研究不足地区，其目的是为决策者提供科学证据。

163. 然而，“无声大流行”的警告信号明确存在。进入全球市场的新合成化学品数量不断增加，与其化学特性相关的知识差距又加剧了这一问题。此外，尽管有越来越多的证据表明在水生环境中，这些化学品无处不在，但监测、评估和管理措施方面仍存在不足。

¹² 见 Brack, W., Klamer, H.J.C., Alda, M.L.D. and Barcelo, D., Effect-directed analysis of key toxicants in European river basins: A review, *Environmental Science Pollution Research*, Vol. 14(1) (2007)。

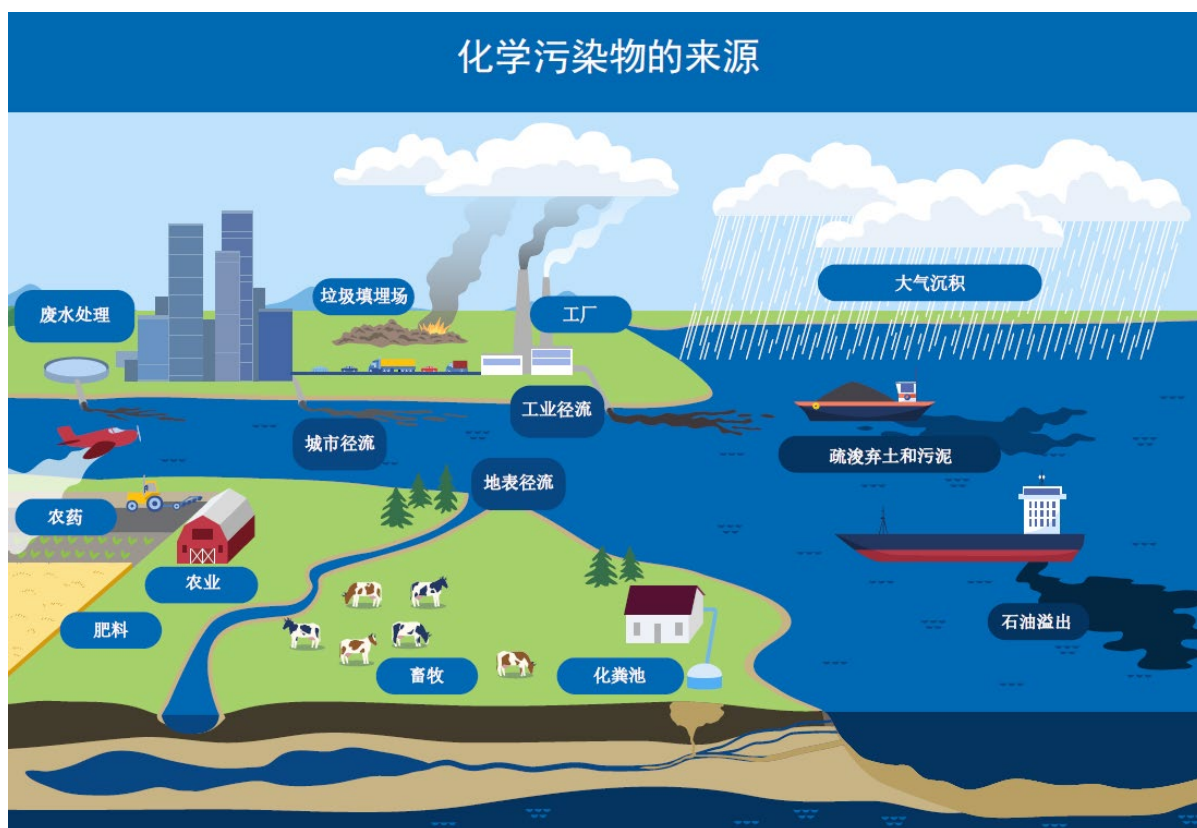


图 I.1. 越来越多的新合成化学品被释放到环境中。创新的水取样和分析筛选技术可以帮助科学家识别和量化这些污染物对生态系统和人体健康的影响。
(图片来源: Rudzhan/stock.adobe.com, 由原子能机构修订)

趋势

164. 正在制定更全面的战略，以监测海洋环境中的已知化学污染物并确定新的潜在有害物质。创新水取样工具加上在质谱测定技术方面取得的进步使我们能够更准确地筛选出大量已知或可疑污染物，并识别未知化学品。

165. 作为一种可靠、强大且具成本效益的水质监测工具，被动采样技术的出现为应对水生环境特有的化学污染所带来的一些挑战提供了一个极具吸引力的解决方案。被动采样装置仅由单一材料组成，如硅橡胶片，或是由一种固定在渗透膜后面的材料组成，以便部署在水生环境当中，以积累化学污染物（图 I.2）。



图 I.2. 准备在海上部署的被动采样装置。
(照片来源：英国环境、渔业和水产养殖科学中心)

166. 被动采样装置可以在几天到几个月的时间内对水体进行连续采样。如此一来，与通常在水中测量到的水平相比，化学污染物的积累可达到几千倍，这就使得在传统的少量抓样取样不够灵敏的情况下，更容易检测。

167. 在部署之前，将碳-13 标记的氘化参考化合物形式的稳定同位素加载到这种被动采样器上，可以准确量化采样的水量，并对污染物进行时间积分测量。被动采样装置还有一个优点，即只对水相中化学品自由溶解的部分进行采样，因此，能更准确地反映出可能会被生物体吸收的生物可利用污染物。甚至可以专门针对可能会在整个海洋食物网中进行生物累积的有机污染物使用这些装置。

168. 若能与采用了色谱分离和高分辨率、高精度质谱测定法的最先进分析仪器结合使用，被动采样器将可以检测出存在于海洋环境中的数千种化学品，并促进对以前未知化合物的识别。它们有可能成为海洋环境中新兴关切污染物的高效预警系统，可以部署在偏远地区或研究不足地区，并易于运送至分析实验室。

169. 水取样和先进分析筛选技术方面的这些突破可以作为强有力的新工具，被用以应对海洋环境中存在的复杂的新兴关切污染物混合物所带来的一些挑战。这些发展将有助于填补人为化学污染物的存在、其在生态系统中的移动及其随后对海洋生态系统功能的影响等方面的知识空白，进而确保海洋环境中的释放物可以尽早得到管理。

I.2. 利用海洋环流的新型放射性示踪剂，改进对污染物迁移及海洋和气候变化的理解和建模

状况

170. 在过去几十年里，有各种各样的放射性核素被释放到海洋当中。它们在空间和时间上的分布可能相当复杂，但通常离不开四个一般过程：输入函数/输入源、放射性衰变、生物地球化学和海洋过程。由于它们是通过若干物理、化学和生物途径在整个大气层和水圈中迁移，对其海洋分布演变情况进行观察后，我们获得了关于各种作用过程的性质和规模的独特信息。

171. 自 20 世纪 40 年代以来，人工制造的放射性核素已通过包括核电生产及核武器开发、生产和试验在内的各种活动，进入海洋环境。自那时起，人工放射性核素的释放就已被细致地记录下来，并进行了大量研究，以解决它们在海洋环境中的迁移和最终去向问题，并将其用作示踪剂，以更好地了解各种海洋和海洋过程。这方面的认识可以为评估不利的环境或人体健康后果以及快速评估未来放射性核素释放（特别是计划外释放）的影响提供依据。

172. 由于引入这些物质时的历史和地理特征非常广泛，它们的环境行为也各不相同，每种示踪剂都反映了海洋迁移过程的不同部分（图 I-3）。这些属性，加上一系列地球化学特征，如半衰期和粒子亲和力，使人工引入的放射性核素成了非常有用的工具，可借以更好地了解海洋模式和跟踪污染物。

温盐环流

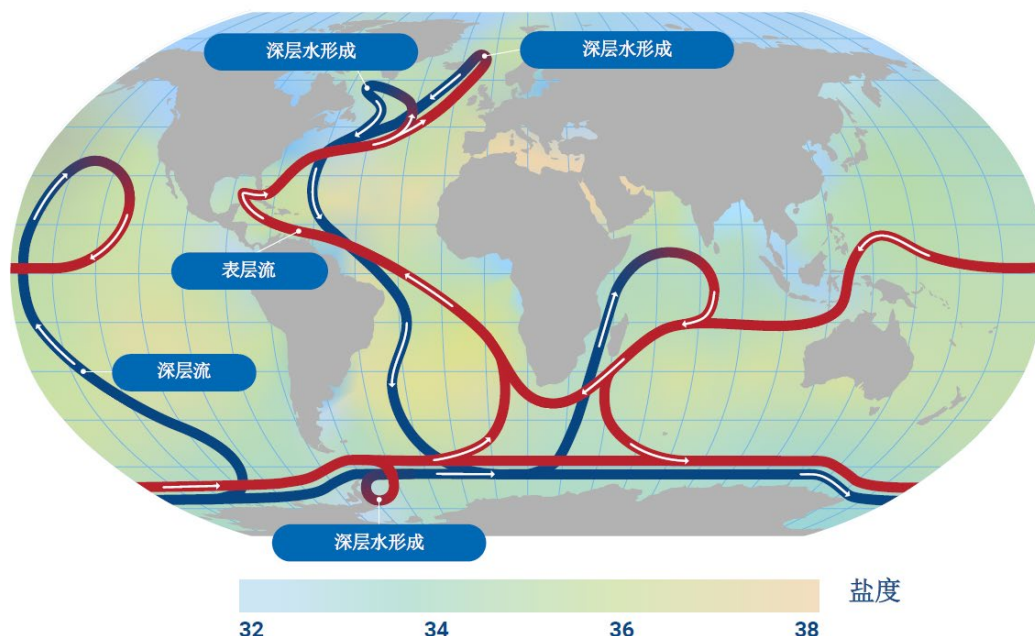


图 I.3. 温盐环流，又称全球海洋传送带，是一种推动水跨海洋流动和混合的重要机制。放射性示踪剂可被用于追踪海水的流动。（图片来源：美国国家航空航天局地球观测站，由原子能机构修订）

173. 通过核技术（包括衰变/质量计数和核反应活化）使用放射性示踪剂对于了解海洋和沿海生态系统也非常有价值。这些技术有利于监测放射性和非放射性污染物（如微塑料和甲基汞）的吸收和生物放大作用。通过原子能机构“核技术用于控制塑料污染”倡议下的项目，这些技术还被用于确定海洋微塑料污染的来源、追踪其路径和了解其去向。它们还有助于识别和量化海产品中的生物毒素，评估海洋酸化对钙化生物的影响，以及评价伴随温度升高的代谢过程。

174. 随着全球数据集的增长，海洋生态系统建模已成为一种重要分析方法，可用以整合知识、数据和信息，以更好地了解生态系统的运作及污染物的迁移和输送。人工放射性核素通过提供地面实况测量数据，在帮助测试这些模型的有效性方面发挥着重要作用。要预测人类对环境的影响并就未来活动作出合理的政策决定，就必须了解海洋中的输送过程。

趋势

175. 早期海洋测量的特点是数据稀少且有时不可靠。各种尖端技术和新技术使测量微小浓度的物质成为可能，但也带来了大量样品物流问题和潜在严重交叉污染问题。

176. 环境样品中放射性核素的浓度水平普遍较低，而且可用样品量较小，这就要求开发出高效的技术。从放射性衰变计数过渡到使用质谱法（如加速器质谱测定法、电感

耦合等离子体质谱测定法、共振电离质谱测定法、二次离子质谱测定法和热电离质谱测定法) 进行原子计数, 是放射性分析技术的一次重大范式转变。

177. 最近, 加速器质谱测定法在探测效率和同质异位素抑制方面的重大进展也为分析超低环境浓度的其他长寿命放射性核素开辟了可能性 (图 I.4)。



图 I.4. 正在部署一个多功能取样器, 收集未受扰动的沉积物样品, 以分析污染物和气候变化迹象。沉积物保存了年代信息, 放射性示踪剂将被用于确定这些自然档案中记录的过去事件的日期。(照片来源: 原子能机构)

178. 镅-99、碘-129、铀-236、镎-237、钚-239 和钚-240 的半衰期较长，这使得它们在海洋学示踪剂应用中占据重要地位，有助于研究大范围循环过程。由于碘-129 和铀-236 在海水中的可溶性质，以及测量技术方面的新进展使得能够探测出极低浓度这一事实，关于水团输送过程的研究已开始关注这两种元素。与传统的质谱测定技术相比，加速器质谱测定系统可在应用简单快速的化学程序后，以极具竞争力的探测限值（即碘-129/碘-127 和铀-236/铀-238 的原子比为 10^{-13} 及以下），确定小体积海水样品中的浓度。

179. 超灵敏放射性分析技术在海洋科学中一直发挥着重要作用。新的单原子计数技术的进一步发展将为新的激动人心的科学研究开辟机会。

180. 基于激光的超灵敏分析技术、惰性气体的超痕量同位素检测、串列式加速器的正离子源和离子阱技术等方面都取得了一些颇具前景的进展。分析技术的进步将进一步支持从批量样品分析转变为通过分析仪器在线耦合，进行特定化合物同位素分析。这些进展将使得能够针对许多放射性核素，采用单原子计数技术，而这将是海洋放射性核素超灵敏分析领域的一项重大成就。

附件

表 A-1. 2022 年世界核电状况^a

国家	在运反应堆		在建反应堆		2022 年供应的核电量		截至 2022 年的总运行经验	
	机组数	总容量 兆瓦 (电)	机组数	总容量 兆瓦 (电)	太瓦·时	占总发电量的百分数	年数	月数
阿根廷	3	1 641	1	25	7.5	5.4	97	2
亚美尼亚	1	416			2.6	31.0	55	3
孟加拉国			2	2 160				
白俄罗斯	1	1 110	1	1 110	4.4	11.9	2	2
比利时	6	4 936			41.7	46.4	324	4
巴西	2	1 884	1	1 340	13.7	2.5	63	3
保加利亚	2	2 006			15.8	32.5	173	3
加拿大	19	13 624			81.7	12.9	903	0
中国	54	52 181	20	20 284	395.4	5.0	513	2
捷克共和国	6	3 934			29.3	36.7	188	10
埃及			2	2 200				
芬兰	5	4 394			24.2	35.0	176	2
法国	56	61 370	1	1 630	282.1	62.6	2 449	0
德国	3	4 055			31.9	5.8	834	8
匈牙利	4	1 916			15.0	47.0	150	2
印度	19	6 290	8	6 028	42	3.1	594	11
伊朗伊斯兰共和国	1	915	1	974	6.0	1.7	11	4
日本	10	9 486	2	2 653	51.9	6.1	2 020	6
大韩民国	25	24 489	3	4 020	167.5	30.4	644	9
墨西哥	2	1 552			10.5	4.5	61	11
荷兰	1	482			3.9	3.3	78	0
巴基斯坦	6	3 262			22.2	16.2	98	9
罗马尼亚	2	1 300			10.2	19.3	41	11
俄罗斯联邦	37	27 727	3	2 700	209.5	19.6	1 447	7
斯洛伐克	4	1 868	2	880	14.8	59.2	184	7
斯洛文尼亚	1	688			5.3	42.8	41	3
南非	2	1 854			10.1	4.9	76	3
西班牙	7	7 123			56.2	20.3	368	2
瑞典	6	6 937			50.0	29.5	486	0
瑞士	4	2 973			23.2	36.4	236	11
土耳其			4	4 456				
乌克兰 ^e	15	13 107	2	2 070	NA	NA	563	6
阿拉伯联合酋长国	3	4 011	1	1 310	19.3	6.8	4	0
英国	9	5 883	2	3 260	43.6	14.2	1 658	9
美利坚合众国	92	94 718	2	2 234	772.2	18.2	4 825	9
全球^{b, c}	438^d	393 823^d	58	59 334	2 486.6	NA	19 764	11

说明：NA — 未提供。

^a 来源：原子能机构动力堆信息系统，成员国截至 2022 年 6 月底提供的数据。

^b 总计中包括中国台湾的下列数据：三台 2859 兆瓦 (电) 在运机组，供电量为 22.9 太瓦·时，占总电力结构的 9.1%。

^c 总运行经验还包括意大利 (80 年零 8 个月)、哈萨克斯坦 (25 年零 10 个月) 和立陶宛 (43 年零 6 个月) 的已关闭核电厂，以及中国台湾 (239 年零 8 个月) 的已关闭和在运核电厂。

^d 总计中包括仍停运机组的数据：印度 (4 个机组；639 兆瓦 (电)) 和日本 (23 个机组，22 193 兆瓦 (电))。

^e 总发电量不包括乌克兰反应堆机组，因为截至本报告发布时，2022 年的运行数据尚未提交。

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	161	51
中子活化分析	116	50
放射性同位素生产	82	41
中子成像	69	37
材料/燃料辐照	68	26
中子散射	44	28
地质年代学	24	21
嬗变（硅掺杂）	23	15
嬗变（宝石）	20	12
中子治疗，主要是研发	15	12
核数据提供	16	9
其他 ^c	116	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）更详细地叙述了这些应用。

^b 来自所考虑的 233 座研究堆（截至 2022 年 12 月，223 座在运，10 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

AEC	碱性电解池
AGR	先进气冷堆
AI	人工智能
ALFRED	欧洲先进铅冷示范快堆
ALPS	先进液体处理系统
AMR	抗微生物药物耐药性
AMS	加速器质谱测定法
ANSTO	澳大利亚核科学和技术组织（澳核科技组织）
ATF	先进技术燃料
ATF-TS	先进技术和耐事故燃料
BIS	招标说明书（标书）
BNCT	硼中子俘获疗法
CECs	新兴关切污染物
COP27	2022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27届会议）
COVID-19	2019冠状病毒病（COVID-19）
CRP	协调研究项目
CT	计算机断层照相法
CTV	临床靶体积
D10	十进制还原剂量
DEMO	示范聚变电站
DGR	深部地质处置库
DOE	美国能源部
DSRS	弃用密封放射源
DTT	偏滤器托卡马克试验
EDXRF	能量色散X射线荧光
EU	欧洲联盟（欧盟）
FAO	联合国粮食及农业组织（粮农组织）
GC-IMS	气相色谱法-离子迁移谱法
GTV	肿瘤总体积
GW	吉瓦
GW(e)	吉瓦（电）
HALEU	高丰度低浓铀
HEU	高浓铀
HI	混合智能
HPR1000	华龙一号
HTR-PM	球床模块式高温堆
IFMIF	国际聚变材料辐照设施

IMSR	一体化熔盐堆
INIR	综合核基础结构评审
ISR	原地回收
keV	千电子伏
KP-FHR	卡伊洛斯电力公司氟盐冷却高温堆
KSTAR	韩国超导托卡马克先进研究
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
LTO	长期运行
LWR	轻水堆
MeV	兆电子伏
MHTGR	模块高温气冷堆
ML	机器学习
MMR	微型模块堆
MOX	混合氧化物
MSFR	熔盐快堆
MSR	熔盐堆
MW(e)	兆瓦（电）
NHSI	核协调和标准化倡议
NIF	国家点火装置
NORM	天然存在的放射性物质
NPP	核电厂
NPPA	核电厂管理局
OAR	有危险器官
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）
RD&D	研究、发展和示范
RTT	放射治疗技师
SCWR	超临界水冷堆
SDA	标准设计批文
SFR	钠冷快堆
SMART	系统一体化模块式先进反应堆
SMRs	中小型反应堆或模块堆
SNF	乏核燃料

STEP	用于能源生产的球形托卡马克
t HM	吨重金属
TRIC	氚比对活动
TRISO fuel	三层各向同性燃料
TW · h	太瓦·时
UAV	无人驾驶飞行器（无人机）
WAC	废物接受标准
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