



# ■ 2022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(66)/INF/4



# 2022 年核技术评论

## 总干事的报告

GC(66)/INF/4

国际原子能机构在奥地利印制  
2022 年 9 月  
IAEA/NTR/2022



## 目录

前言.....	5
总干事的前言.....	6
正文摘要.....	7
A. 核电.....	11
A.1. 核电预测.....	11
A.2. 在运核电厂.....	12
A.3. 新的或扩大中的核电计划.....	15
A.4. 核电技术发展.....	18
A.4.1. 先进水冷堆.....	19
A.4.2. 中小型反应堆或模块堆（包括高温堆）.....	21
A.4.3. 快堆.....	23
A.4.4. 核动力的非电力应用.....	24
A.4.5. 以核聚变研究和技术发展促进未来能源生产.....	25
B. 核燃料循环.....	29
B.1. 前端.....	29
B.2. 后端.....	30
C. 退役、环境治理和放射性废物管理.....	32
C.1. 退役.....	32
C.2. 环境治理.....	35
C.3. 放射性废物管理.....	36
D. 研究堆和粒子加速器.....	38
D.1. 研究堆.....	38
D.2. 粒子加速器和仪器仪表.....	40
E. 原子数据和核数据.....	43
F. 环境.....	43
F.1. 利用辐射技术治理塑料污染.....	44
F.2. 利用核技术和同位素技术治理海洋环境塑料污染.....	45
G. 粮食和农业.....	49
G.1. 利用新型同位素指纹技术评估和缓解抗生素的持久性和转移 以及对抗菌素耐药性的影响.....	49
G.2. 利用太空诱导的遗传变异、植物育种和天体生物学应对气候变化.....	51

H.	人体健康 .....	53
H.1.	诊疗学：个性化癌症护理路线图 .....	53
H.2.	营养科学的进展：用数据帮助各国应对肥胖流行病问题 .....	55
I.	放射性同位素和辐射技术 .....	57
I.1.	生产医用放射性同位素的新途径 .....	57
J.	人工智能促进核科学和应用 .....	59
	附件 .....	61

## 前 言

- 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 2021 年令人瞩目的发展情况。
- 《2022 年核技术评论》涵盖以下选定领域：核动力；核燃料循环；退役、环境治理和放射性废物管理；研究堆和粒子加速器；原子数据和核数据；环境；粮食和农业；人体健康；放射性同位素和辐射技术；以及人工智能用于核科学和应用。
- 草案版本已以 GOV/2022/2 号文件提交 2022 年 3 月理事会会议。本最后版本根据理事会的讨论结果以及从成员国收到的意见编写。

## 总干事的前言

气候变化、空气污染、能源安全、食品安全、塑料污染、癌症和肥胖症是国际社会面临的众多全球性挑战。

在应对所有这些挑战时，我们必须使用我们掌握的所有工具。

核技术与其他技术相结合，有助于成员国就下列方面所采取的适当方针做出知情的决定：无论是利用人工智能处理所有的核问题，还是生产可靠的低碳能源，帮助了解 and 遏制塑料污染，还是通过更好的癌症护理和营养来拯救生命。

在英国格拉斯哥举行的 2021 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 26 届会议）上，国际原子能机构通过其独特的科学和循证的方案为辩论做出了贡献，该方案表明了核技术对于应对气候危机和有效处理其日益严重的后果是多么至关重要。为反映核技术日益增长的作用，国际原子能机构将在埃及沙姆沙伊赫举行的“气候公约”缔约方大会第 27 届会议上继续参与关于核能和核技术及应用的高级别对话。

《2022 年核技术评论》概述了一些关键核技术领域的现状，并突出强调了这些领域中有前景的新发展。



图 FW-1. 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西参观阿尔瓦罗·阿尔贝托海军上将核电厂。（巴西安格拉·杜斯雷斯，罗多维亚·里奥-桑托斯-伊托尔纳）



## 正文摘要

1. 自十年前福岛第一核电站事故以来，国际原子能机构（原子能机构）首次上调了对未来几十年用于发电的核电装机容量潜在增长的预测。总体而言，在过去的十年里，核电装机容量逐渐增加，其中包括因新机组并网和现有反应堆增容增加了约 20.7 吉瓦（电）容量。
2. 2021 年底，全球在运核电装机容量为 389.5 吉瓦（电），由 32 个国家的 437 座在运核动力堆提供。在这一年里，来自中国、巴基斯坦和阿拉伯联合酋长国的四座新压水堆，印度的一座加压重水堆以及中国的一座高温气冷堆的超过 5.2 吉瓦（电）的新核电容量被接入电网。在同一时期，8.7 吉瓦（电）的核电容量被永久退役。
3. 共有 26 个成员国正处于为新的核电计划筹备国家基础设施的不同阶段，到 2035 年，预计将有 10 至 12 个新加入国引入核电，营运国的数量将增加三分之一。吸引能源规划者和政策制定者关注的一项重要技术发展是，预计到 2030 年，将有若干座首创的中小型反应堆或模块堆出现和部署。因此，即使先进的大型水冷堆仍有望在未来三十年的新增容量中占大头，若干新加入的国家也已将中小型反应堆或模块堆纳入其技术考虑。对于大型先进反应堆和中小型反应堆或模块堆，都需要国家核电基础结构来保持对核安全、核安保和保障要求予以同样持续的严格关注。
4. 在 2019 冠状病毒病大流行期间，通过实施创新运行方案和保护工作人员的具体措施，世界各地的核电厂继续可靠地运行。核电舰队再次展示了其能够在这种具有挑战性的时期运行的韧性、可靠性和强适应性。
5. 长期运行仍非常重要，这不仅是为了低碳能源转型和实现净零碳目标，也是为了留出时间来建立新的低碳发电能力，包括新核电厂。
6. 许多成员国在用于近期部署的中小型反应堆或模块堆技术开发方面取得了切实的进展。除了于 2020 年 5 月投入商业运营的俄罗斯联邦罗蒙诺索夫院士号浮动核电厂外，中国也开始建造一座 125 兆瓦（电）的 ACP 反应堆。目前，有超过 70 种用于电气和非电气应用的小型模块堆设计正在开发中。若干国家还加强了对中小型反应堆或模块堆中一个名为微堆的子类的开发活动，根据设想，微堆是偏远地区或小岛屿热电联供的最佳解决方案，并（或）可取代柴油发电机。为协助成员国就其在小型模块堆技术方面的需求和具体情况达成共识，原子能机构启动了一个新的框架，用于制定关于中小型反应堆或模块堆设计和技术的通用用户要求和标准。
7. 核能在电力生产之外的使用正在全球范围内获得前所未有的势头。2021 年期间，共有 61 座运行中的核反应堆被用于非电力应用（海水淡化、地区供热和工艺加热），以产生约 2617 吉瓦-小时的电热当量，用于支持核能热电联产，包括五座支持海水淡化的核反应堆。

8. 尽管由于大流行病带来了前所未有的压力，而且在制造国际热核实验堆的一些首创部件时遇到了困难，但国际热核实验堆项目在机器和工厂组装方面仍保持了稳定的进展。在国际热核实验堆机器组装和集成方面取得了实质性的进展。已经开始了一些建立具体的核聚变监管框架的举措，核聚变监管框架是核聚变作为商业上可行的能源在国家层面发展的关键因素之一。

9. 铀价持续低迷迫使几个主要的铀生产商降低了生产速度。这已促使一些投资者、基金、贸易商和初级铀生产商在市场上购买八氧化三铀，以应对预测的八氧化三铀供需变化。由于 2021 年八氧化三铀库存的减少和交易的加速，自 2021 年第一季度至年底，现货价格一直大幅上涨。最近铀市场价格的上涨激励了一些投资，在 2021 年恢复了一些勘探和开发活动，并重新启动了一些初级生产。

10. 过去十年中导致核设施关闭的许多问题（政治和经济因素、维护和（或）整修成本以及电力市场状况）预计未来会继续存在；实际上，关闭的速度可能因当前堆群的堆龄情况而加快，尽管可能通过延寿得到部分弥补。在约 300 座目前已有 30 年或更长时间堆龄的核动力堆中，大部分可能在未来三十年内退役。预计研究堆也会有类似的发展，因为研究堆群有着大致类似的堆龄情况。目前的趋势似乎更倾向于立即拆除方案，而不是历史上首选的推迟拆除战略。

11. 一些成员国在 2021 年采取了重大步骤，以迈向在其低放废物设施进行处置的最后阶段。关于高放废物的深部地质处置库计划，芬兰废物管理组织即芬兰核废物管理专家组织（Posiva）于 2021 年开始在昂卡罗深部地质处置库场址挖掘第一批处置隧道。放射性废物管理领域的国际合作特别是促进深部地质处置计划的合作继续扩大。2021 年，弃用密封放射源的管理也取得了显著进展，特别是在回取和整备方面。

12. 全球各国对研究堆的兴趣继续增加。除了 235 座在运研究堆外，2021 年还有 11 座正在建设中。许多国家通过国际和地区协作倡议利用各种机会来获得研究堆。位于捷克共和国和大韩民国的两个因特网反应堆实验室开始向其他国家的学生传输实验。

13. 随着强大的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、机器学习和深度学习技术，用于开展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从传感器收集的实验数据的整合。人工智能/机器学习在各个领域的快速应用是一个明显的趋势，也将深刻地影响核物理和核数据库的发展。

14. 人工智能也有加速从人体健康到聚变和核科学等许多核领域的技术发展的巨大潜力。通过使专家能够快速分析存储在全球网络中与水有关的巨量同位素数据，人工智能已有助于科学家了解气候变化和人口增长对水资源的影响。它可以为防治癌症和更好地应对未来人畜共患疾病的暴发做出贡献。加强人工智能在核科学和应用中的使用需要强有力的国际伙伴关系和跨领域合作，以促进制定监管、伦理问题、教育和培训方面的导则，以及分享经验、知识和良好实践。

15. 加速器质谱测定法已被证明是一项超灵敏的技术，在与现代社会问题相关的分析应用中具有巨大的潜力。加速器质谱测定法目前被用于考古学、生物医学应用、气候变化研究、水文学、海洋学和日益受到社会和经济关注的许多其他领域。最近的技术发展也扩大了其应用领域，使得可以研究广泛的文化和自然遗产物品，以及检测伪造品和非法产品贸易。

16. 用于回收的革新型辐射技术和用于监测海洋的同位素示踪技术为处理塑料污染提供了解决方案，塑料污染是最紧迫的全球环境挑战之一，也是对可持续发展的一项直接威胁。2021 年启动的“核技术用于控制塑料污染”倡议以原子能机构的塑料污染治理工作为基础，而治理方式是利用辐射技术进行回收，以及利用同位素示踪技术进行海洋监测。

17. 伽马射线和电子束的创新应用可以使塑料垃圾得到有效分拣，从而进入回收流。核技术和同位素技术，加上海洋环流和扩散模型，有助于追踪塑料的来源及其在海洋中的最终去向。它们有助于科学家重建海洋塑料污染的历史趋势，并更好地了解微塑料的沉淀后老化。

18. 滥用和过度使用用于预防和治疗人类、动物和植物感染的抗微生物物质，如抗生素、抗病毒药物、抗真菌药物和抗寄生虫药物，是一项全球性的公共卫生威胁，目前每年导致 70 万人死亡。特定化合物稳定同位素分析和探测技术是评估抗微生物物质的有力工具。这种同位素技术和先进的分子技术的整合有望帮助更好地了解所施粪肥中抗生素的最终去向和动态及其对环境中抗生素抗性的影响。

19. 人们越来越有兴趣了解空间环境对产生植物基因组突变的影响和改变植物生理学，从而提高植物抵御地球上不利生长条件如由气候变化引起的条件的能力。可以预见，随着人们持续关注探索空间植物生物学，将其用于为宇航员提供食物，以及促进利用空间照射取得的宝贵突变来培育有韧性的作物品种，在该领域将取得快速进步。

20. 在癌症管理中，基于同位素的诊疗学系指将诊断和治疗相结合，使医疗专业人员能够专注于每个患者的具体需求。与传统的辐射治疗相比，这种诊疗方案通过用放射性子弹瞄准肿瘤而不伤害周围的健康组织，使其具有更大的特异性，从而提高治疗的有效性和安全性。目前，最突出的应用集中在神经内分泌肿瘤、淋巴瘤、前列腺癌、乳腺癌、肺癌和甲状腺癌。在培训医疗专家和科学专家以及建立专业医疗基础设施方面，越来越需要更广泛的国际合作和标准化。

21. 肥胖相关疾病在全球已达到流行病的程度，每年至少有 280 万人因超重或肥胖而死亡。据估计，到 2025 年，肥胖相关疾病每年将花费 1.2 万亿美元。双标记水稳定同位素技术所提供的能量消耗数据至关重要，它将为政策制定者提供证据，以制定更有效的营养和健康政策，从而应对全世界日益严重的肥胖流行病。但需要来自中低收入国家的更多数据，才能加强研究中的全球代表性，并使政策制定者能够获得证据，从而优先考虑基本的营养行动和解决肥胖流行病。

22. 用于癌症和其他慢性疾病的诊断和治疗，放射性同位素和放射性药物可以拯救生命。确保关键放射性同位素的持续供应十分必要。利用直线加速器和核电站的两条新生产路线，为加强和赋能世界上最常用的医用放射性同位素钼-99 的全球供应链开辟了广阔的前景。利用高能电子束生产钼-99 已经实现了商业化。

23. 核反应堆中的放射性同位素生产基于靶材中的中子俘获反应。研究堆通常用于生产核医学治疗应用所需的放射性同位素。在核电厂对靶件进行辐照是生产工业和近距离疗法所用钴-60 等放射性同位素的通常途径。2021 年，一座商业坎杜堆获得了监管机构的钼-99 生产授权。目前正在探索生产其他重要的短寿命医用放射性同位素，包括镓-177 和铟-166。这可能为设计者考虑具有放射性同位素生产能力的动力堆提供新的视野。

## A. 核电

### A.1. 核电预测

#### 状况

1. 自十年前福岛第一核电站事故以来，国际原子能机构（原子能机构）首次上调了对未来几十年用于发电的核电装机容量潜在增长的预测。原子能机构对这种低碳能源年度展望的变化尚未标志着一种新趋势，但它却发生在全世界致力于摆脱化石燃料以应对气候变化之际。许多国家正在考虑引进核电，以促进可靠和清洁的能源生产。2021年11月，在英国格拉斯哥举行的《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第26届会议（“气候公约”缔约方大会第26届会议）上，对利用核电进行了积极的高级别讨论，这是多年来缔约方会议首次进行此类讨论（图 A.1）。

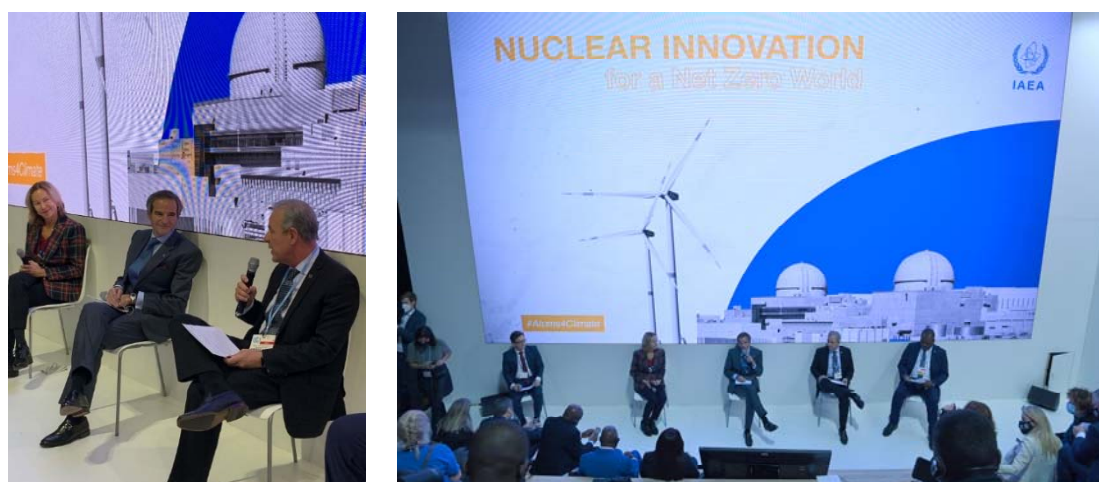


图 A.1. 格罗西总干事、巴西阿尔布开克部长、加纳普伦佩部长和联合国欧洲经济委员会执行秘书阿尔加耶罗娃在第二十六届缔约方会议上就核问题展开高级别对话。

2. 与 2020 年的全球装机容量（392 吉瓦（电），相当于发电量的 10.2%）相比，低值预测认为 2050 年全球核电装机容量基本保持在 394 吉瓦（电），在全球发电量中的份额下降到 6.3%。另一方面，高值预测认为装机容量将增加一倍以上，达到 792 吉瓦，相当于在发电量中的份额增加到 12.3%（图 A.2）。



图 A.2. 基于《参考数据丛书》第 1 号 2010—2021 年各版本数据的 2050 年核电装机容量高值和低值预测的演变。

3. 要实现高值预测，将需要现有核动力堆群广泛长期运行（通常运行超过 40 年），并在三十年内大力建设 550 吉瓦（电）的新容量。为此，需要在未来几十年里使新反应堆并网发电率至少翻一番，而且还需要加快革新型反应堆技术的示范和部署。

### 趋势

4. 人们对革新型反应堆技术包括中小型反应堆或模块堆的兴趣浓厚，且日益增加。然而，在未来三十年中，先进大型水冷堆预计将在应对气候变化的低碳能源方面占据大部分新增容量。核部门将继续应对一系列挑战，包括降低成本和加强标准化，以提高竞争力。

5. 将需要强有力的政策支持，同时承认核电对坚韧可靠的低碳电力系统的贡献，包括在与其他低碳能源公平竞争的环境下获得融资。促进核能为其他能源部门脱碳作出贡献（包括通过清洁制氢）的机会，也可以使核电成为对投资者更有吸引力的方案。

## A.2. 在运核电厂

### 状况

6. 2021 年底，全球核电总装机容量为 389.5 吉瓦（电），由 32 个国家的 437 座在运核动力堆提供（见表 A.1）。各国继续表现出对 2019 冠状病毒病大流行的适应能力，采取了有效措施以确保安全可靠运行，同时最大限度减少了对工作人员的风险，以体现强大的组织文化。2021 年期间，原子能机构继续通过核电厂 2019 冠状病毒病期间运行经验网，分享关于为减轻大流行的后果及其对核电厂运行的影响而采取的措施的信息。在 32 个有在运核电厂的国家中，无一国报告说大流行导致了影响核电厂安全可靠运行的运行事件。

# 437

## 座在运核动力堆

32 个国家

总装机容量  
389.5  
吉瓦（电）

~ 10 %

全球发电量



# 1/4

全球低碳发电量

7. 作为一种清洁、可靠、可持续的现代能源，核电为减少全球温室气体排放作出了显著贡献，同时满足了世界日益增长的能源需求，并为可持续发展和 2019 冠状病毒病大流行后的恢复工作提供了支持。来自六座新反应堆的超过 5.2 吉瓦（电）核电容量并入电网。这些反应堆包括四座新压水堆（中国田湾 6 号反应堆（1000 兆瓦（电））和红沿河 5 号反应堆（1061 兆瓦（电））、巴基斯坦卡拉奇核电厂 2 号反应堆（1017 兆瓦（电））和阿拉伯联合酋长国巴拉卡 2 号反应堆（1310 兆瓦（电））、一座加压重水堆（印度格格拉帕尔 3 号反应堆（630 兆瓦（电）））和一座高温气冷堆（中国石岛湾 1 号反应堆（200 兆瓦（电）））（图 A.3）。

### 新核电容量并网兆瓦（电）数

来自四座新压水堆、一座加压重水堆和一座高温气冷堆的 5.2 吉瓦（电）新核电容量并入电网

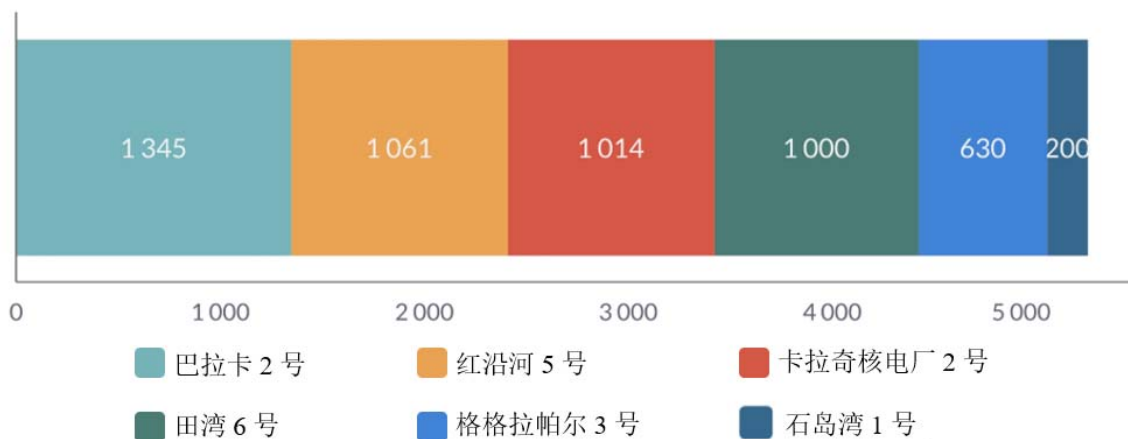




图 A.3. 2021 年 12 月，总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西访问了阿拉伯联合酋长国的巴拉卡核电厂，并会见了年轻的核专业人员。

8. 在全球特别是在北美和欧洲，正在为越来越多的核动力堆制定长期运行计划和老化管理计划。美国核管理委员会（核管会）批准了道明尼能源公司就位于弗吉尼亚州东南部的萨里 1 号和 2 号反应堆的运行许可证展期 20 年提交的申请。此举将使这两座动力堆的运行寿期延长至 80 年，分别运行到 2052 年和 2053 年。另外，法国核安全管理局宣布，它已完成对法国电力公司（法电）将 900 兆瓦（电）机组中 32 座反应堆再延长十年寿期的计划的审查。管理局的结论是，法电计划采取的措施与管理局规定的措施相结合，开启了这些反应堆在第四次定期安全审查后再继续运行十年的前景。特里卡斯坦 1 号和比热伊 2 号反应堆延长运行所需的最新设计研究和设备更换已完成，使这些反应堆能够运行到 2031 年。

9. 在 2021 年期间，永久退役的核电容量为 8.7 吉瓦（电）（10 座反应堆）。这些损失容量有一半源于德国三座反应堆关闭：布罗克多夫（压水堆（1410 兆瓦（电））、格罗德（压水堆（1360 兆瓦（电））和格拉芬赖因费尔德-C（沸水堆（1288 兆瓦（电）））。英国三座气冷堆 — 邓杰内斯 B-1 号（545 兆瓦（电））、邓杰内斯 B-2 号（545 兆瓦（电））和亨特斯顿 B-1 号（490 兆瓦（电））退役。另外三座关闭的反应堆是巴基斯坦卡拉奇核电厂 1 号（加压重水堆（90 兆瓦（电））、俄罗斯联邦库尔斯克 1 号（轻水冷却石墨慢化堆（925 兆瓦（电））、美利坚合众国印第安角 3 号（压水堆（1030 兆瓦（电）））。中国台湾国圣 1 号（沸水堆（985 兆瓦（电）））也被关闭。

### 趋势

10. 总体而言，在过去的十年里，核电装机容量逐渐增加，其中包括由于新机组并网和现有反应堆增容而增加的约 20.7 吉瓦（电）容量（图 A.4）。



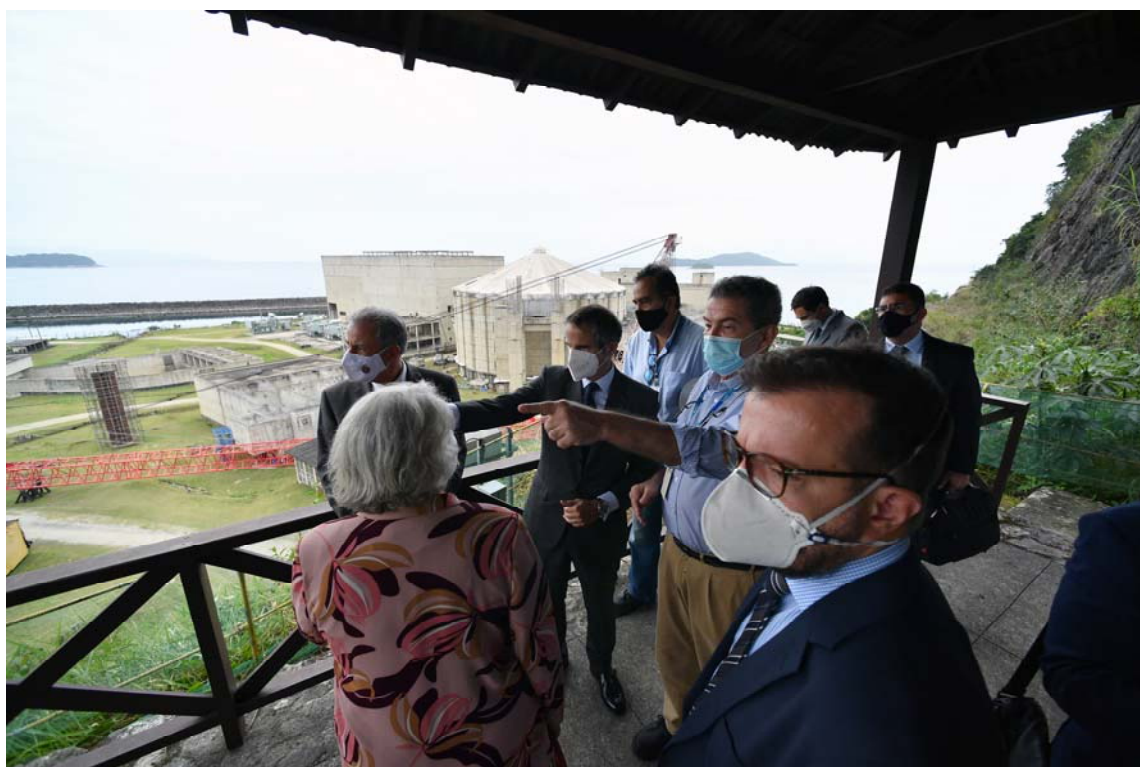


图 A.4. 原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西参观巴西阿尔瓦罗·阿尔贝托海军上将核电厂，并见证安格拉三号反应堆的建设。

11. 长期运行是必不可少的，这不仅是为了向低碳电力系统过渡和实现净零碳目标，也是为了留出时间来建设新的低碳发电能力，包括新的核电厂。此外，现有核电厂是安全可靠的低碳电力的最廉价来源。然而，一些反应堆在过去十年中被关闭，另一些反应堆可能在短期内因经济原因被关闭，尽管营运者获得了延长运行的许可证。此外，现有供应链正面临多种挑战，这些挑战可能会影响持续运行、项目和停堆规划。不过，新的供应链正在启动核电国家出现，这可能会给该领域带来新的参与者。

### A.3. 新的或扩大中的核电计划

#### 状况

12. 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 个国家则分成两个不同类别在寻求引进核电：

- 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的国家（孟加拉国、埃及、加纳、肯尼亚、约旦、尼日利亚、波兰、沙特阿拉伯、土耳其、乌兹别克斯坦）。



13. 在孟加拉国，首个核电厂建设正在进行中，两台机组计划分别于 2024 年和 2025 年开始商业运行。土耳其阿库尤核电厂的四台机组在 2021 年仍在建设。这四台机组预计将于 2023 年至 2026 年进行调试。在埃及，核电厂管理机构于 2021 年 7 月申请了埃尔达巴 1 号和 2 号机组的建造许可证。施工现场准备工作仍在继续。两个关键机构（核电厂管理机构和埃及核与辐射管理机构）正在根据该计划的需要进行重组。在波兰，PGE EJ 1 公司在 2021 年 3 月被国库完全收购并更名为 PEJ。PEJ 将作为投资者，为计划到 2042 年建设核电总装机容量达 6000—9000 兆瓦（电）的压水堆提供投资。首批两个核电厂计划于 2026 年和 2032 年开始建设，第一台机组将于 2033 年进行调试。在阿根廷，位于毗邻阿图察 1 号电厂的厂址上的 CAREM 反应堆正处于建造的后期阶段，以期作为原型示范堆生产 32 兆瓦（电）。

14. 在沙特阿拉伯，目前正在编制采购首批两台 1000—1600 兆瓦（电）核电机组的招标说明书。约旦已决定双轨并行来发展核电计划，在建造-拥有-营运-转让的基础上发展一个 1000 兆瓦（电）级大型核电厂，同时把中小型反应堆或模块堆作为重中之重。中小型反应堆或模块堆项目的招标说明书文件已起草完毕，预计将在 2022 年初定稿并发布。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机构的能力。能源部已就发展约 1000 兆瓦（电）容量发出征求潜在供应商意向书。首个核电厂计划于 2023 年开工，2029 年进行调试。肯尼亚已宣布，将考虑建设一座研究堆和一个大型核电厂，并研究建设中小型反应堆或模块堆。尼日利亚虽因关键机构改组和 2019 冠状病毒病大流行而有所拖延，但已恢复核电计划活动，包括更新预可行性研究和可行性研究，以重新评估核电厂项目的经济可行性。对其中许多国家来说，在能源

结构中引入核电是对其气候缓解目标的一项重大贡献。其中一些国家（埃及、约旦、土耳其）已将核电纳入其根据“巴黎协定”提交给《联合国气候变化框架公约》的“国家自主贡献”。

15. 2021 年，原子能机构进行了三次综合核基础结构评审工作组访问，即对肯尼亚进行了第一阶段后续工作组访问，对乌干达进行了第一阶段工作组访问，对乌兹别克斯坦进行了第二阶段工作组访问。计划对斯里兰卡进行的第一阶段工作组访问因 2019 冠状病毒病被推迟（图 A.5）。原子能机构还收到赞比亚关于开展综合核基础结构评审第一阶段工作组访问的请求，收到孟加拉国关于开展综合核基础结构评审第三阶段工作组访问的请求，这两次访问将分别于 2022 年和 2023 年进行。



图 A.5. 原子能机构审查乌干达核电基础结构发展情况。

16. 此外，还有 15 个成员国制定了积极的“综合工作计划”。由于 2019 冠状病毒病的影响，通过与核心小组的虚拟会议对“综合工作计划”进行了全面审查或中期审查。

### 综合核基础结构评审工作组访问



## 趋势

17. 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。

到 2035 年，



运行核电国家的数量可能会  
增加约 **+30%** \*

新增 **10 - 12** 个新国家运行核电厂。

18. 吸引能源规划者和政策制定者关注的一个重要技术发展是，几个首创中小型反应堆或模块堆设计预计到 2030 年可以获得和部署。因此，一些新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、苏丹和赞比亚等新启动核电国家，以及保加利亚、捷克共和国、罗马尼亚和南非等正在扩大核电国家。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，如前期资本费用较低、适用于较小电网、非电力应用，以及可进行模块化扩展。

19. 应该强调的是，核电计划无论基于大型核电厂还是基于中小型反应堆或模块堆，国家核电基础结构都需要对核安全、核安保和核保障要求予以同样持续的严格关注。

20. 与此同时，10 个成员国在着手基于渐进型核电厂发展核电计划，所取得进展说明对大型核电厂技术的兴趣持续不断，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运营者的经验。

## A.4. 核电技术发展

### 状况

21. 渐进型核动力堆，即只对现有核电厂进行适度修改或改进的设计，在世界许多地方已成为十分稳固的现实。白俄罗斯、中国、日本、俄罗斯联邦、阿联酋都有先进的水冷堆在运行。在其他国家，如阿根廷、法国、芬兰、英国和美国，不同功率容量的先进水冷堆已处于建设后期阶段，有一些正在进行调试。俄罗斯联邦有两座工业规模的钠冷快堆正在运行，其首座铅冷快堆也已开始建设。中国和印度的快堆也在运行或建设中。中国第一座采用球床技术的模块高温气冷堆已于 2021 年 12 月并网发电。

22. 同时，成员国对快速开发和早期部署革新型反应堆的兴趣日益浓厚，革新型反应堆即与现有实践相比，在设计方案或系统配置方面融入概念性改变的先进设计。所有主要反应堆路线，即水冷堆、高温气冷堆和超高温气冷堆、钠冷、铅冷和气冷快中子谱反应堆、熔盐堆以及最近的微型反应堆，都有革新型概念在开发中。一些近期概念的开发工作几乎已经完成，而另一些更具创新性的设计仍有许多工作要做，包括研发、可行性测试、安全案例的全面开发。不过，全球已有一些设计者和供应商在开发一些革新型反应堆的原型堆和示范堆。

23. 在过去的十年里，核工业和越来越多的成员国将兴趣集中在一类特殊的先进反应堆，即用于近期部署的小型模块堆上。许多小型模块堆设想用于先进大型反应堆不可行的小众电力或能源市场。小型模块堆有望为广泛的用户和应用，包括替代老化的化石电厂、偏远地区和非电网地区，提供灵活的发电需求，为电力应用和非电力应用提供热电联产，实现核能与可再生能源复合系统。

### 趋势

24. 随着强大的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、机器学习和深度学习技术，以开展广泛的愿景活动，这些活动可能会改变核系统的设计、许可证审批和运行方式。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、进行制造和建设优化、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. 自商业核工业形成以来，水冷堆在其中发挥了重要作用，目前占世界上所有运行的民用动力堆的95%以上。截至2021年底，在建的51座核反应堆中，有48座采用轻水或重水冷却。

26. 2021年先进水冷堆的主要发展包括：开工建设一座HPR-1000反应堆（中国昌江3号）、两座VVER-1200（V-491）反应堆（中国田湾7号和徐大堡3号）以及一座VVER（V-509）反应堆（土耳其阿库尤3号）；以及一座APR-1400反应堆（阿拉伯联合酋长国巴拉卡2号）、一座ACPR-1000反应堆（中国红沿河5号）、一座CNP-1000反应堆（中国田湾6号）、一座ACP-1000反应堆（巴基斯坦卡拉奇核电厂2号）和一座PHWR-700反应堆（印度格格拉帕尔3号）并网发电。

27. 随着先进和更高效的燃料循环的逐步部署，一些国家也在越来越多地考虑、研究和实施现有水冷堆的高级版。

28. 四个国家（加拿大、中国、日本和俄罗斯联邦）和欧盟正在参与超临界水冷堆设计概念的联合研究和发展。超临界水冷堆的主要目的是高效、经济和安全地发电。开发的大多数超临界水冷堆电厂发电能力超过 1000 兆瓦（电），工作压力约 25 兆帕，反应堆出口温度在 500°C 至 625°C。因此，超临界水冷堆可以以 43% 至 48% 的热效率发电，这大大高于目前核反应堆系统的发电热效率。超临界水冷堆的堆芯出口温度高，有利于热电联产，包括制氢、供热和蒸汽生产。大多数超临界水冷堆概念都是为超过 1000 兆瓦（电）的大型基荷发电而开发的，对于小的偏远社区、小规模采矿作业和石油生产来说，这被认为有些过度。通过模块化配置，超临界水冷堆概念可以缩小规模以满足当地部署的需要。小型和超小型超临界水冷堆概念的开发也已开始；中国正在开发 150 兆瓦（电）小型超临界水冷堆概念，用于示范电厂。加拿大超临界水冷堆（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（图 A.6）。

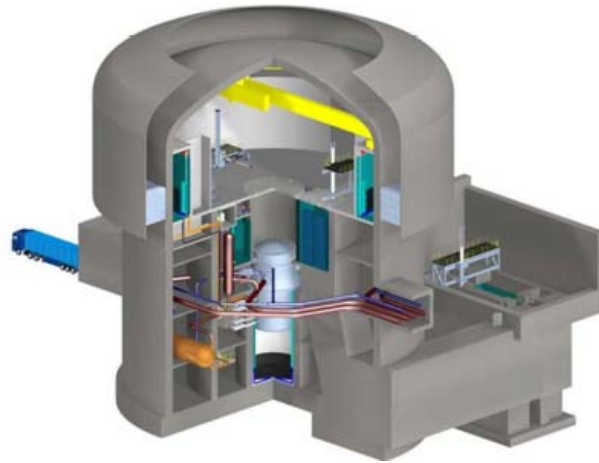


图 A.6. 加拿大超临界水冷堆设计 — 反应堆厂房剖视图。  
(图片来源：加拿大核实验室 Schulenberg 和 Leung)

29. 在欧洲，高性能轻水堆概念解决了在超临界水条件下运行的高效轻水堆的经济可行性，预期效率约为 44%，目标蒸汽出口温度为 500°C，而不超过现有包壳材料限值。俄罗斯联邦的概念性革新型水冷水慢化动力堆（VVER）设计（其冷却剂处于超临界压力）还包括采用快中子谱堆芯的可能性。

### 趋势

30. 大多数先进水冷堆都提高了功率输出，最近建设的每台机组发电能力从 1000 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。此外，一个明显趋势是采用单一或多个反应堆类型的多机组场址，这突出了商用核反应堆的规模经济。约有 30 个目前没有在建核电厂的国家正在考虑建设核电厂。这些新启动核电国家设想首批反应堆采用先进水冷类型堆。

#### A.4.2. 中小型反应堆或模块堆（包括高温堆）

##### 状况

31. 2021 年，许多成员国在用于近期部署的中小型反应堆或模块堆技术开发方面取得了切实的进展。目前有超过 70 种针对不同应用的主要技术路线的小型模块堆设计正在开发中。

32. 在俄罗斯联邦，配有两个 KLT-40S 型反应堆模块的罗蒙诺索夫院士号浮动核电站在 2019 年 12 月并网发电后，已于 2020 年 5 月投入商业运行，为佩韦克港口提供低碳电力和热能。在中国，球床模块式高温气冷堆已于 2021 年 12 月 20 日并网发电（图 A.7）。它的两个反应堆模块分别于 2021 年 8 月和 11 月达到临界。这座球床模块式高温气冷堆将作为示范电厂，发电能力达 210 兆瓦。在阿根廷，CAREM-25 反应堆，作为一种原型一体化压水堆，在内斯托尔·卡洛斯·基什内尔核电厂场址处于建设的后期阶段，当前目标是在 2024 年装料和启动调试，总热功率和电功率分别为 100 兆瓦和 34 兆瓦。



图 A.7. 中国球床模块式高温气冷堆于 2021 年 12 月 20 日并网发电。  
(照片来源：中国清华大学核能与新能源技术研究院)

33. 2021 年 7 月，中国开始在海南省昌江建造一座 125 兆瓦（电）ACP100 反应堆，也称“玲龙一号”。这座一体化压水堆被设计成一座多用途小型动力堆。在美利坚合众国，核管理委员会颁发了纽斯凯尔反应堆标准设计的标准设计批文。纽斯凯尔动力模块是一座采用自然循环的一体化压水堆。由六个电功率各为 77 兆瓦的模块组成的纽斯凯尔动力模块将在未来三年内在爱达荷国家实验室附近的一个场址开始建造，并在 2029 年之前投入运行。

34. 到 2021 年底，至少有 16 个成员国制定了积极的国家中小型反应堆或模块堆设计和技术开发计划，其中大部分计划是在国际合作下进行的。2021 年 7 月，日本恢复了其高温工程试验堆的运行，该反应堆采用棱柱式堆芯，热功率达 30 兆瓦。早些时候，大韩民国和沙特阿拉伯共同完成了系统一体化模块式先进反应堆（SMART）的项目前期工程阶段，从而产生了这座 110 兆瓦（电）一体化压水堆的初步安全分析报告。法国在开发 NUWARD 方面取得了进展，NUWARD 是一座采用强制对流和先进安全系统的 340 兆瓦（电）（两座 170 兆瓦（电）反应堆）一体化压水堆型小型模块堆，可能在本世纪 30 年代初期部署在国外市场。同样，英国继续致力于开发英国小型模块堆技术，这是一种基于压水堆的 470 兆瓦（电）三回路小型模块堆设计，将在 2030 年前在国内外部署。俄罗斯联邦已决定于 2024 年在雅库特开始建设电功率为 50 兆瓦的陆基一体化压水堆 RITM-200N。已有若干 RITM-200 堆机组部署在核动力破冰船上。加拿大的小型模块堆路线图和“行动计划”预计，小型模块堆可能应用于在电网内外替代化石燃料发电厂和柴油发电厂，包括用于石油业和采矿业。

### 趋势

35. 2021 年，一些国家，包括加拿大、捷克共和国、日本、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国，还加强了小型模块堆中一个被称为微堆的子类的开发活动。根据设想，采用主要技术路线的微堆是偏远地区或小岛屿热电联供的最佳解决方案，并（或）可替代柴油发电机。

36. 更多的国家参与了海基反应堆的开发。俄罗斯联邦已开发四种用于浮动动力装置的小型模块堆设计和一种用于海底浸没式动力装置的名为“SHELF”的设计（图 A.8）。中国至少有一种名为 ACPR100、为近海石油和天然气平台提供电力的设计。大韩民国也在继续开发 BANDI-60 — 一种基于压水堆的浮动动力装置。



图 A.8. 配有两座 KLT-40S 型反应堆的罗蒙诺索夫院士号核电站自 2020 年 5 月在俄罗斯联邦佩韦克开始商业运行，发电能力为 70 兆瓦。

（照片来源：俄罗斯国家原子能公司阿夫里坎托夫机械工程实验设计局）



37. 小型模块堆的共同发展目标是要证明，功率降低和模块化将通过连续生产的经济性降低前期资本费用，以及设计简化和缩短建造时间可以促成负担得起的融资计划。为了协助成员国对小型模块堆技术的需求和特殊性有一个共同认识，原子能机构已为制定小型模块堆设计和技术的通用用户要求和标准启动一个新的框架。国家通用用户要求和标准文件的主要好处在于提供一套主要的政策、技术和经济要求，以便利启动核电国家进行反应堆技术评估并最终编制招标文件。在未来十年成功部署小型模块堆预计将鼓励更多启动核电国家考虑小型模块堆并参与相关的研发。

### A.4.3. 快堆

#### 状况

38. 俄罗斯联邦继续在别洛雅尔斯克核电厂运行两座工业规模的钠冷快堆 BN-600 和 BN-800，并正在设计将建在同一场址的第四代钠冷快堆 BN-1200。多用途研究快堆正在季米特洛夫格勒建设中。2021 年 6 月，在谢韦尔斯克浇筑了首座铅冷实验和示范堆 BREST-OD-300 的第一罐混凝土。中国继续在福建省霞浦县建设第二座钠冷快堆 CFR-600。在印度，500 兆瓦（电）钠冷原型快中子增殖堆的首次临界和调试原计划在 2020 年实现，但被推迟。2021 年，泰拉电力公司和通用日立核能公司宣布计划在美国怀俄明州建造一座先进混合 Sodium 反应堆，其特点是将 345 兆瓦（电）的钠冷快堆与熔盐能源系统相结合，将峰值输出功率提升至 500 兆瓦（电）（图 A.9）。



图 A.9. 比尔·盖茨在泰拉电力公司展示一个钠冷却子组件的实尺度模型。  
(照片来源：盖茨笔记)

## 趋势

39. 钠冷快堆以其成熟的技术和超过 400 堆年的运行经验，占据在运和新建快中子核能系统的主体。同时，液态重金属冷却剂技术正在吸引越来越多的关注，特别是在小型模块堆领域，一些革新型设计基于铅冷或铅铋共晶冷却反应堆。其他冷却剂，如氦和熔盐，也被一些国家在其革新型反应堆概念设计中视为一种有前景的技术。总体而言，快堆被认为是未来可持续核能的一个关键组成部分，因为任何核电的广泛发展都需要利用天然铀和（或）钍资源的全部潜力。

### A.4.4. 核动力的非电力应用

#### 状况

40. 2021 年，共有 61 座在运核反应堆被用于非电力应用（海水淡化、地区供热和工艺加热），每年产生超过 2167 吉瓦·小时的电热当量。在这些反应堆中，48 座支持区域供热，三座反应堆支持工业工艺供热，五座支持区域供热和工艺供热，还有五座支持海水淡化。

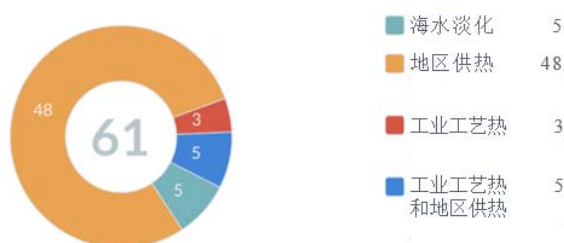
41. 将核能用于电力以外的其他有用产品，在全球受到前所未有的关注，特别是因为它提供了生产热或氢或其他产品而不产生任何碳排放的可能性。核能供热技术具有成熟的技术路线、广阔的市场前景和巨大的发展潜力。和保加利亚、捷克共和国、匈牙利、罗马尼亚、俄罗斯联邦、斯洛伐克、瑞士和乌克兰等国家一样，中国也加入到有经验的地区供热使用者的行列，于 2020 年底开始利用山东海阳核电站提供地区供热。利用海阳 1 号和 2 号机组（采用 AP1000 技术的三代反应堆）提供的热量，可以取代燃煤锅炉，实现每年减少 18 万吨二氧化碳的排放。浙江省秦山核电站也启动了地区供热示范项目，目标是到 2025 年实现核能供暖面积 400 万平方米，覆盖海盐县主城区及澉浦镇全域。

42. 一些国家正在考虑利用源于核反应堆的电力或热能制氢。根据原子能机构最近利用建模工作进行的概况调查，如果天然气价格仍然远高于过去几十年的低水平，核能可能是清洁制氢的最具成本效益的手段。这种转变发生在天然气成本达到每百万英热单位 10—15 美元的时候。这个成本大大低于今年下半年在欧盟、英国和亚洲部分地区已经观察到的成本。

43. 法国在 2021 年 10 月宣布，计划到 2030 年开始建造一座小型模块堆，并利用其他核电厂以电解法清洁制氢。俄罗斯联邦已选择科拉核电厂场址，用于试验利用电解法清洁制氢技术。同样在 2021 年，美国宣布提供 2000 万美元资金，示范利用核能清洁制氢技术。这将有利于实现今年发起的“氢能攻关”倡议目标，即在十年内实现制氢成本每千克 1 美元。



用于非电力应用的核反应堆数量



## 趋势

44. 新兴技术，如小型模块堆和微堆，正集中于具有较小功率输出的系统，可以提供电网以外的应用，如地区网络低碳供热、工业工艺热、制氢和灵活发电。微堆特别适合于为分散的离网市场提供清洁和具有成本竞争力的能源。特别令人感兴趣的是能够实现高温输出的先进反应堆概念，它可以大大扩展热能利用的机会。一些国家在进行高温堆开发，日本正在取得重大进展，而中国最近在山东启动了首台球床模块式高温气冷堆机组。

### A.4.5. 以核聚变研究和技术发展促进未来能源生产

#### 状况

45. 尽管大流行病带来了前所未有的压力，而且在制造国际热核实验堆的一些首创部件时遇到了困难，但国际热核实验堆项目在机器和设备组装方面仍保持着稳定进展。国际热核实验堆机器的组装和集成取得了实质性进展，包括：在托卡马克坑内安装了圆柱形低温恒温器下隔热罩，焊接了前两个低温恒温器段，在托卡马克坑内安装了前两个超导磁体，以及两个环向场线圈（来自欧洲和日本）和首个中央螺线管模块（来自美国）抵达现场，该模块将与堆叠在一个 18 米高的结构中的六个独立模块组装在一起（图 A.10）。



图 A.10. 重 110 吨的国际热核实验堆中央螺线管模块被装入一艘普通货船船舱，该模块将从美国运往位于法国的国际热核实验堆现场。五层楼高、1000 吨重的中央磁铁将在国际热核实验堆等离子体中感应出 1500 万安培的电流，以启动每个等离子体脉冲，并提供等离子体的垂直稳定性。为此，中央螺线管的磁场强度将达到 13 特斯拉，大约比地球磁场强 28 万倍。（照片来源：美国国际热核实验堆）

46. 2021 年 5 月 10 日至 15 日以虚拟方式举行的第二十八届原子能机构聚变能会议证明了全球正在进行的理论、实验、技术和材料开发的质量，并证明了在当前运行装置性能方面取得的重大进展，包括最近上线的一些新装置，即日本的 JT-60SA、中国的中国环流器二号 M 装置（HL-2M）和英国的 MAST-U。

47. 在欧洲的“欧洲联合环”托卡马克进行的氘和氘-氘活动准备实验的结果为国际热核实验堆准备其破裂缓解系统提供了重要信息，以及面向等离子体部件和核技术的关键结果。在德国的优化 Wendelstein 7-X 仿星器上进行的实验的分析结果证实，等离子体的能量损失减少了，这使人们相信早期仿星器设计的缺点可以被克服，仿星器类型装置也可能适用于电厂。英国原子能管理局在卡勒姆聚变能源中心进行的新的 MAST-U 实验结果证明了一种革新型排热系统的有效性，该系统旨在使紧凑型聚变电厂在商业上可行。这个被称为“超 X 偏滤器”的新系统将使未来的商用托卡马克中的部件能够使用更长时间，从而增加电厂的可用性，并提高其经济可行性。正在意大利国家新技术、能源和可持续经济发展局弗拉斯卡蒂场址建造的分流器托卡马克试验（DTT）设施在今后数十年期间还将测试不同的分流器几何形状，并在尽可能与实际燃烧等离子体相似的高输送功率密度等离子体中对它们进行比较。

48. 俄罗斯联邦库尔恰托夫研究院庆祝升级后的 T-15MD 托卡马克装置开始运行（图 A.11）。该 T-15MD 托卡马克装置研究计划的目标是解决国际热核实验堆的最紧迫问

题。在美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的国家点火设施进行的实验在聚变能生产示范方面迈出了重要一步，实现了超过 1.3 兆焦耳的聚变能产量。

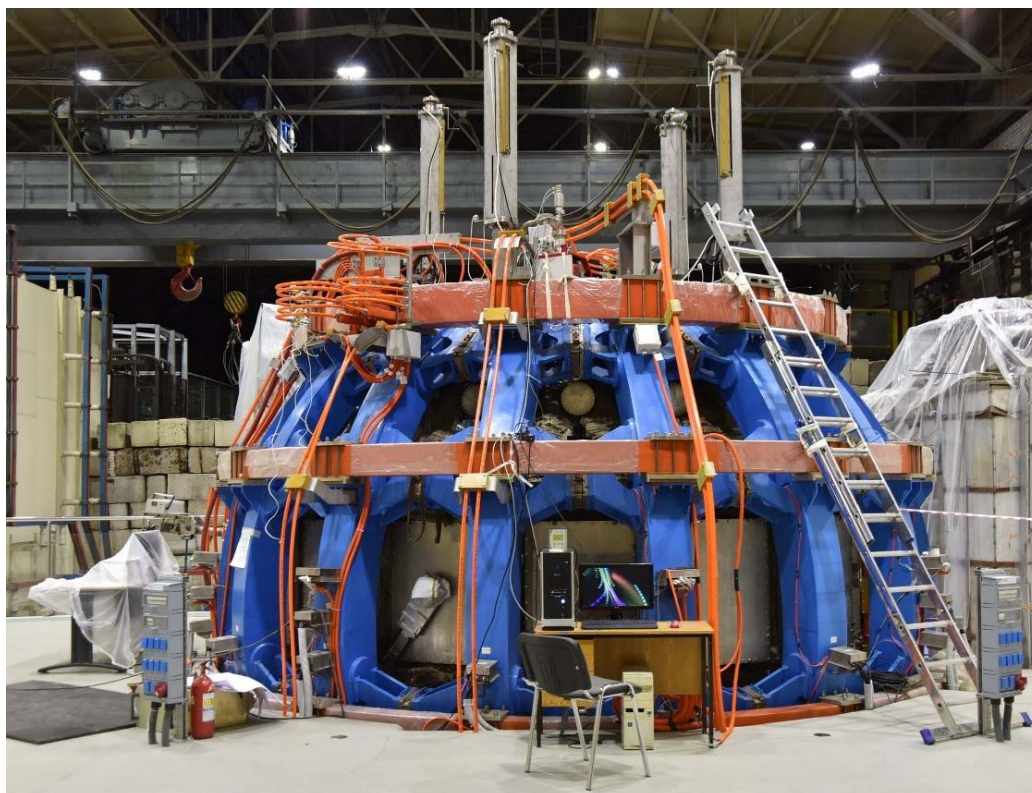


图 A.11. T-15MD 托卡马克装置用水冷却，能够在等离子体轴上产生 2 特斯拉的环向磁场；它还将装备强大的附加等离子体加热系统（输入等离子体的总功率可达 20 兆瓦），并有现代工程基础设施。等离子体中的电流应达到 2.0 毫安，持续时间为 10 秒。T-15MD 托卡马克装置的建造历时十年，其实验计划将有助于国际热核实验堆电厂和未来聚变电厂的运行。（照片来源：库尔恰托夫研究院）

49. 将核聚变发展为商用可行能源的关键因素之一是建立核聚变装置的适当安全和监管框架。2021 年期间，中国、欧洲、英国和美国已开始采取一些举措，在国家层面建立具体核聚变监管框架。原子能机构还开始收集该领域的所有可用信息，以便在国际层面提供导则和最佳实践，最终目标是促进聚变监管框架的协调一致。

## 趋势

50. 在过去的七年里，一直在加快建立由私人资本支持的核聚变企业。世界各地，尤其是在国际热核实验堆项目的成员国（中国、欧盟、印度、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和美利坚合众国）以及英国，都有新公司成立。此外，在澳大利亚新南威尔士大学，2020 年成立了一家分拆式初创公司。事实证明，在美国推出的公私资助伙伴关系模式非常成功，其他成员国正在研究复制这种方案。在聚变装置信息系统，可查阅当前正在运行、建设或规划中的所有具有实验和示范设计的公私聚变装置的概况<sup>1</sup>（图 A.12）。

<sup>1</sup> <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>

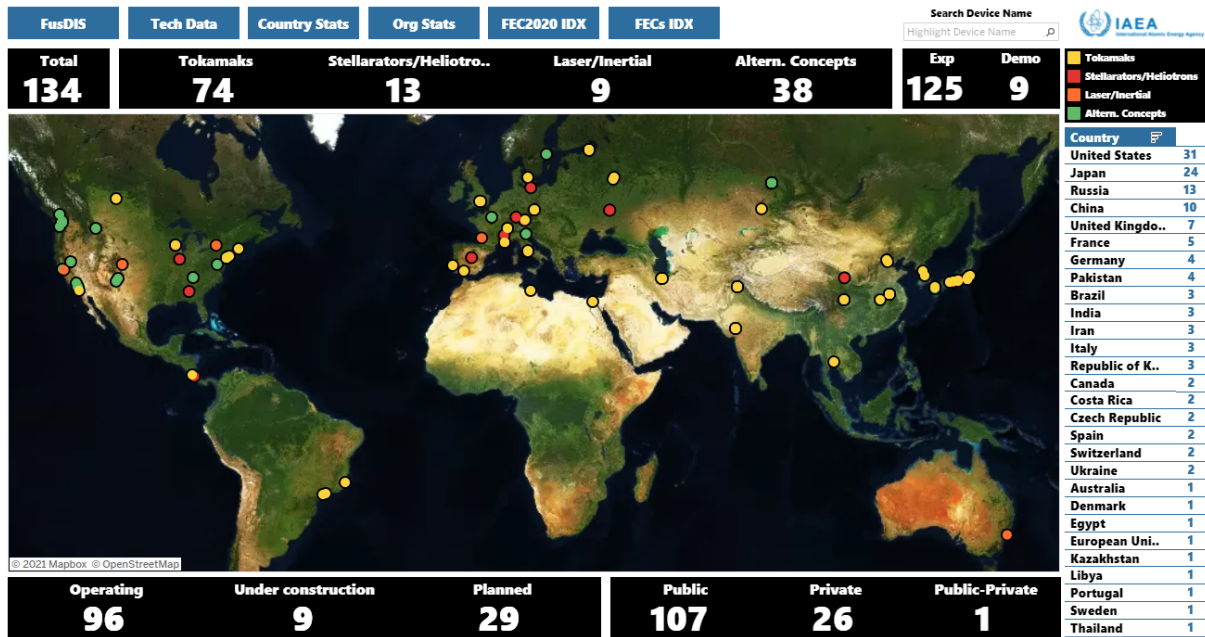


图 A.12. 超过 130 个公私实验聚变装置正在运行、建设或规划中，而一些组织正在考虑示范聚变电厂的设计。（来源：原子能机构聚变装置信息系统）

51. 英国原子能管理局发起了一项雄心勃勃的倡议，以证明到 2040 年利用核聚变产生净电力的能力，其中将涉及建造“能源生产用球形托卡马克”（STEP）。该电厂将提供在设施整个运行寿期内进行维护以及燃料自持性方面的知识和经验。预计到 2024 年将批准“能源生产用球形托卡马克”的概念设计，其第一阶段是将球形托卡马克并入国家电网，生产净能源，但不用于商业目的。已拨款 2.22 亿英镑（2.64 亿欧元）用于启动“能源生产用球形托卡马克”设计工作。当前，正在对英国境内不同场址进行调研，预计在 2022 年底前作出最终决定（图 A.13）。



图 A.13. 规划中的“能源生产用球形托卡马克”厂房视图。  
（图片来源：英国原子能管理局）

## B. 核燃料循环

### B.1. 前端

#### 状况

52. 在 2021 年第一季度，铀现货价格约为 26.5 美元/磅八氧化三铀。价格持续保持在这一水平迫使一些初级生产商将其经营保持在维护和维持状态，或降低生产率<sup>2</sup>。自 2011 年以来，市场上出现了铀供应过剩；然而，由于对核燃料用铀持续不断的需求和初级生产的减少，全球八氧化三铀库存已稳步下降，以应对持续低迷的市场价格。在 2020 年和 2021 年，库存减少的趋势明显。

53. 全球初级生产的持续低迷贯穿 2020 年并持续至 2021 年，暴露了铀市场的脆弱性。这促使一些投资者、基金、贸易商和初级铀生产商在市场上购买八氧化三铀，以应对预测的八氧化三铀供需变化。例如，哈萨克斯坦国家原子能公司在 2021 年 10 月宣布，它打算参加一个实物铀基金（名为 ANU 能源基金），该基金将持有实物铀作为长期投资。过去在铀市场上从未观察到全球不同数量的非核公用事业行为体这样购买八氧化三铀的情况。由于 2021 年八氧化三铀库存的减少和交易的加速，2021 年 10 月底的现货价格自 2021 年第一季度以来已经上涨了 74%，达到约 46 美元/磅八氧化三铀。

54. 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，并减少了反应堆的燃料破损。全世界现有的核燃料制造能力足以满足预期的核电需求，并正在展示当前和下一代核动力堆设计用于辐照的新先进技术燃料的安全行为方面取得良好进展，其中包括中小型反应堆或模块堆（例如，法马通公司的 GAIA 设计包括 PROtect 增强型耐受事故燃料以及全球核燃料公司和西屋公司由涂敷锆合金包壳和掺二氧化铀芯块构成的耐事故燃料概念、TVEL 燃料公司带有铬包覆锆包壳和铬镍合金的 TVS-2M 型燃料组件、国家原子能公司设计用于在轻水堆对铀和钚进行多次循环的 REMIX 燃料和清洁堆芯公司使用钍和高丰度低浓铀组合大幅改善坎杜堆燃料性能的“富生命先进核能”燃料技术）。

55. 英国国家核实验室从成熟度、经济性和安全性的角度评估了几种先进技术燃料设计。

#### 趋势

56. 自 2012 年以来，由于铀价格持续低迷，并且自 2020 年初开始受到 2019 冠状病毒病大流行的进一步影响，铀勘探支出一直在稳步下降。铀市场价格最近的上涨激励了一些投资，一些勘探和开发活动在 2021 年恢复，一些初级生产也重启。

---

<sup>2</sup> 另一个主要铀生产商哈萨克斯坦的哈萨克斯坦国家原子能公司宣布将其原地浸出矿山的产量减少 20%，这种减产将持续到 2021 年。

57. 2021 年铀现货价格的急剧上涨促使一些拥有处于维护和维持状态的铀矿和加工设施的营运商<sup>3</sup> 开始调研重启计划。全球八氧化三铀库存的进一步减少和铀现货价格的持续上涨，可能会激励其他处于维护和维持状态的铀矿和加工设施重新开工，并为了商业目的或国内供应安全而开发新的铀项目<sup>4</sup>。

58. 推进小型铀矿床进入生产阶段，需要进行创新。2021 年，铀矿开采行业正在进行的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。生物浸出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。

59. 自 2011 年以来，国际努力的重点是提高现有轻水堆所用燃料的安全性和性能。核燃料发展的其他驱动因素是革新型反应堆设计，如第四代反应堆和中小型反应堆或模块堆（从缩减版的轻水堆燃料设计到全新的第四代燃料设计），其中一些已经达到示范规模（如中国的球床模块式高温堆）；以及改善核电的经济性和可持续性（延长燃料辐照周期、提高燃耗、零缺陷活动、革新型燃料制造方法、新的燃料循环以及从乏核燃料中多次再循环核材料）。许多革新型核燃料概念（如先进技术燃料或中小型反应堆或模块堆燃料）的制造都需要高丰度低浓铀。

## B.2. 后端

### 状况

60. 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 30 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，面临的主要挑战是需要更多的乏核燃料贮存容量和不断延长的贮存期（100 年以上）。

61. 乏核燃料在经过初始冷却时间后，从湿法贮存转移到干法贮存。随着减少这些初始冷却时间的做法变得越来越普遍，干法贮存系统需要改进排热能力<sup>5</sup>。乌克兰和美利坚合众国的新集中贮存设施已经获得了许可证。一些国家进行乏核燃料的运输，并例行实施旨在改进运输的措施。各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。捷克共和国的研究人员开发了一项利用乏燃料产生的放射性衰变热进行水加热、被称为“Teplator”的创新技术，并获得了专利<sup>6</sup>。

---

<sup>3</sup> 例如，纳米比亚的蓝格·海因里希铀矿在 10 月宣布，它正在研究重启其闲置铀矿和加工设施所需的关键路径要素。

<sup>4</sup> 一个例子是蒙古的巴德拉克能源项目，该项目在 7 月份宣布开始在其 Zuuvch Ovoo 矿床进行试点测试。此外，约旦铀矿公司在 7 月宣布，其示范工厂已全面调试，有能力每年加工 70 吨矿石。这些测试的结果将用于评价这些矿床的技术、环境和经济可行性，以及它们是否会推进到全面生产。

<sup>5</sup> 5 月，来自牡蛎溪核电厂的最后一批乏燃料组件在反应堆永久关闭 32 个月后被置于干法贮存，创造了卸料速度纪录。容器装料活动在 21 周内安全完成。

<sup>6</sup> 4 月，布拉格捷克技术大学和皮尔森西波西米亚大学的研究人员提出了一项利用乏燃料棒产生的放射性衰变热进行水加热的专利创新解决方案。



62. 预计将出现向实施再循环方向的发展：在法国，这是一项成熟的工业规模活动；在日本，电力公司联合会计划到 2030 年在 12 个机组使用混合氧化物燃料<sup>7</sup>；在俄罗斯联邦，位于克拉斯诺亚尔斯克采矿和化学联合公司的试验性示范设施正处于最后的建设阶段，用于测试新的乏核燃料后处理技术以便随后进行大规模部署<sup>8</sup>；在美国，奥克洛公司与阿贡国家实验室开展合作，进行电解精炼技术研发，使燃料再循环用于先进裂变发电厂<sup>9</sup>。

63. 在一些国家（中国、法国、日本、大韩民国、俄罗斯联邦），研发项目继续研究选择性分离次锕系元素使其在快堆和（或）次临界系统中进一步嬗变，以最大程度地减少高放核废物的负担。

64. 英国国家核实验室发布路线图，其中概述了先进燃料循环发展在低碳能源未来支持核能方面的作用。

### 趋势

65. 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，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制仍然至关重要。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促进信息共享。

66. 随着时间的推移，核反应堆管理的效率增益使得核反应堆排放的乏核燃料减少，但一次浓缩度提高和燃耗加深的趋势导致余热增加和包壳脆化风险增大，这些可能影响乏核燃料管理步骤。

67. 将需要进行研究，以管理基于采用更高铀-235 浓缩度（达到 20%）和新包壳材料的新设计（如渐进型先进技术燃料和高丰度低浓铀燃料）的乏核燃料，特别是进行与更高的热负荷和长期潜在的不同燃料行为有关的研究。在不久的将来，集中贮存设施可能是一种解决方案，用于容纳已关闭动力堆的乏燃料，以便能够进行全面的场址退役和恢复。

68. 目前正在对轻水堆的钚多次再循环先进工艺（俄罗斯的 REMIX、法国的 CORAIL 和 MIX）进行验证测试，以便将来能够过渡到快堆钚的多次再循环战略。

69. 对发展供今后十年左右部署的基于不同设计的中小型反应堆或模块堆的兴趣提高，为此，将需要安全、可靠和可持续的相关燃料循环发展。

---

<sup>7</sup> 2 月，电力公司联合会根据六所后处理厂和混合氧化物燃料制造厂的最新“运行计划”和过去一年业务环境方面的改变，修订了钚利用计划。

<sup>8</sup> 此外，在俄罗斯联邦，建造示范快堆闭合核燃料循环基础设施的工作正在进行，自 2017 年以来，俄罗斯联邦一直在进行 BN-800 快堆混合氧化物燃料的工业生产，大功率沸腾管式堆和水动力堆的核燃料正在利用再生铀进行制造。

<sup>9</sup> 6 月，美国能源部向阿贡国家实验室提供资金，以开始研发电解精炼技术，使燃料再循环用于先进裂变发电厂。奥克洛公司为该资金提供了配套资金。

70. 这一努力适用于持续致力于推进先进堆的实施，为此，将需要安全、可靠和可持续的相关先进燃料循环。

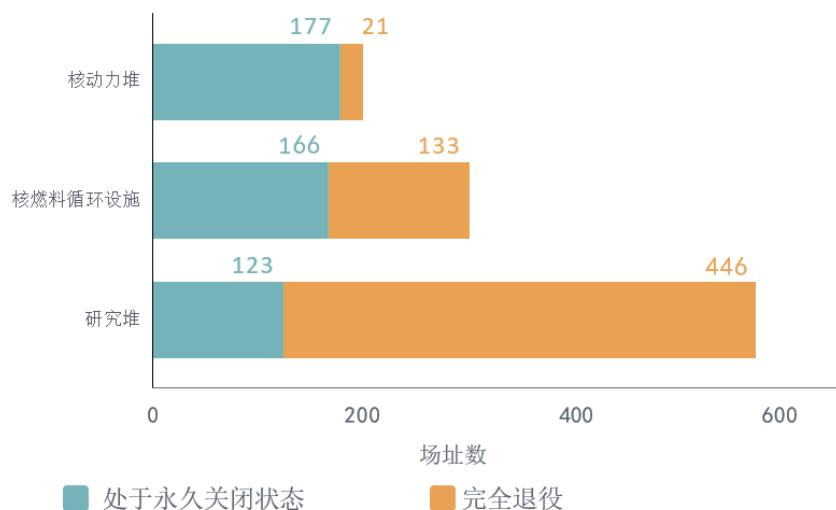
## C. 退役、环境治理和放射性废物管理

### C.1. 退役

#### 状况

71. 2021 年，有五座核反应堆永久关闭：英国的邓杰内斯角 B1 号和 B2 号反应堆、美国的印第安角 3 号反应堆、巴基斯坦的卡拉奇核电厂 1 号反应堆和中国台湾的国圣 1 号反应堆。这与过去十年中反应堆永久关闭的速度大体一致，在此期间，有 57 座反应堆退役（其中 18 座在日本，12 座在美国）。邓杰内斯角 B1 号和 B2 号反应堆的关闭是英国先进气冷堆群中第一批被永久关闭的反应堆，其余反应堆预计将在本十年结束前被关闭。卡拉奇核电厂 1 号坎杜型反应堆将是巴基斯坦反应堆群中第一座被永久关闭的反应堆。

核动力堆、燃料循环设施和研究堆状况



72. 2021 年 11 月，美国加利福尼亚州洪堡湾核电厂 3 号机组的许可证被终止，该场址被解控，供不受限制地使用。这样，完全退役的核动力堆数量达到了 21 座，另有 177 座约占全球反应堆群 28%<sup>10</sup> 的反应堆已处于永久关闭状态或目前正在退役中。此外，166 个核燃料循环设施处于永久关闭状态或正在退役中，133 个设施已完全退役。还有 123 座研究堆已经永久关闭或正在退役中，446 座研究堆已完全退役。正在实施中的主要动力堆退役计划是：德国、日本和美国分别有 27 座、26 座和 25 座反应堆处于永久关闭状态或目前正在退役中。

<sup>10</sup> 全球反应堆群包括 442 座在运反应堆（69%）、177 座处于永久关闭状态的反应堆（28%）以及 21 座完全退役的反应堆（3%）。

73. 在那些遭受重大事故的核反应堆场址方面，正在取得进展，包括在 2011 年日本东部大地震后遭受事故的日本福岛第一核电站（图 C.1）。从福岛第一核电站 1 至 4 号机组的乏燃料池移除乏燃料的工作继续按计划进行，目前的重点是 1 号机组和 2 号机组（3 号机组和 4 号机组已经完成）。乌克兰切尔诺贝利核电站受损的 4 号机组也达到了一个重要里程碑，即新安全封隔设施于 2021 年 8 月获得了运行许可证（图 C.2）。美国三哩岛 2 号机组的退役工作于 2020 年 12 月移交给一个专业退役联合体；受损设施的退役工作现已开始，预定于 2037 年完成。



图 C.1. 福岛第一核电站乏燃料的管理。

74. 关于燃料循环设施的退役活动，设施拆除的一个重要前奏一般是清除遗留废物，这些废物通常贮存在水池或混凝土沟槽中。在各主要设施，继续在退役的这一方面取得显著进展，包括：清除了英国塞拉菲尔德遗留燃料贮存池的污泥，清除了法国阿格混凝土贮仓中贮存的遗留石墨和镁废物，拆除了美国橡树岭气体扩散厂的建筑物并清除了基础混凝土板，以及拆除了俄罗斯联邦马亚克生产联合企业的放射化学厂以前使用的几座受到放射性污染的建筑物。

75. 正在退役中的研究堆主要位于法国、德国、日本、俄罗斯联邦、英国和美国。斯堪的纳维亚半岛正在进行几个研究堆退役项目。2021 年期间，在芬兰的 FiR-1 反应堆达到了一个重要里程碑，即该反应堆的辐照燃料被运到了美国。取得的进展的另一个例子是位于茨城县的日本原子力开发机构大洗研究所，其关于日本材料试验堆的退役计划于 2021 年 3 月获得了核准。整个拆除进度分为四个阶段，第一阶段拆除工作已经开始。



图 C.2. 在切尔诺贝利核事故 35 周年纪念仪式上，总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西在新安全封隔设施前向受害者致敬。

## 趋势

76. 过去十年中导致核设施关闭的许多问题（政治和经济因素、维护和（或）整修成本以及电力市场状况）预计今后将继续存在，实际上，关闭速度可能因目前反应堆群的堆龄情况而加快，尽管可以通过延寿得到部分弥补。在约 300 座目前已有 30 年或更长时间堆龄的核动力堆中，大部分可能在今后 30 年内退役。预计研究堆也会有类似发展，因为该堆群的堆龄状况大致相同。

77. 一个越来越大的趋势是，一旦设施被永久关闭，就应及早拆除。立即拆除策略的选择通常受政府政策影响，例如，法国和德国实施了大力支持这种做法的政策。项目在遥远的未来发生的成本不确定性对设施业主也可能是一个重要因素，许多业主倾向于避免背负具有高度不确定性的长期债务。这似乎是美国目前出现背离延迟拆除策略的趋势的一个强大驱动因素。

78. 迟延拆除历来是石墨慢化堆的首选策略，这是因为缺乏普遍接受的辐照石墨长期管理战略，还因为这种反应堆通常比水慢化堆大得多，因此其拆除活动的复杂性显著提高。然而，即使对于这种反应堆，目前的趋势似乎也倾向于更直接的拆除方案。例如，英国的核退役管理局已决定对其每个镁诺克斯堆场址采取场址特定的退役策略，因此，邓杰内斯角 A 反应堆和特劳斯瓦尼兹各反应堆正在“边做边学习”的基础上进行早期拆解。伊格纳林纳核电厂正在进行立即拆除其设施的工作，包括在立陶宛建立长期地质处置设施之前先建立一个辐照石墨贮存设施。

## C.2. 环境治理

### 状况

79. 环境治理包括消除过去采用的不适当管理实践造成的土地区域（土壤和地下水）污染的解决方案。遗留场址可包括核场址（涉及多余的研究和燃料循环设施）、前核试验场址、受过去铀矿开采和加工作业以及其他涉及使用天然存在的放射性物质的活动影响的场址或受重大核或放射性事故影响的场址。核工业已经在 31 个国家留下了足迹，这还不包括铀矿开采和加工场址。

80. 在这些国家中的大多数国家，这种足迹相当小；然而，有一些国家拥有建立已久、涵盖民用和军用部门在内的核工业，其核运营（包括发电、后处理和实验过程）与多余的设施、核废物和遗留场址混合在一起。尽管如此，核运营造成的土地污染，比如在欧洲，只占该大陆受污染土地的 0.1%。在世界范围内，已更加认识到需要解决受天然存在的放射性物质相关行业影响的场址问题。

81. 在美国，2020 年启动了萨凡纳河盐废物处理设施，并完成了橡树岭东田纳西州技术园的去污和退役活动。2022 年，预计能源部环境管理办公室将处理洛斯阿拉莫斯国家实验室的地下水铬污染问题，并在爱达荷国家实验室所在地完成有针对性的掩埋废物挖掘工作。

82. 在日本，福岛第一核电站事故导致的去污活动继续快速进行。特别去污区的全区域去污工作已按计划完成。各市在密集污染调查区进行的去污工作也已完成。这意味着根据“处理放射性污染特别措施法”进行的不包括限制区在内的全区域去污工作已经完成。环境中的空气剂量率一直在持续下降。截至 2021 年 4 月底，已有约 10 730 000 立方米被清除的土壤和废物被运至临时贮存设施。预计到 2022 年 3 月底，几乎所有被清除土壤将被运至临时贮存设施。

### 趋势

83. 在一些国家，由于缺乏资源，治理工作停滞不前。因此，治理工作的筹资构成了一项关键挑战。在欧洲联盟的牵头下，国际社会建立了中亚环境治理账户。需要填补资金缺口，为解决该地区前铀矿开采遗留场址问题的紧急工作提供资金。截至 2021 年 9 月，该缺口估计为 4000 万欧元。然而，仅仅依靠公共资金，可能不足以支持所需的所有治理行动。因此，一个重要的挑战是为治理工作建立创造性的新金融机制，特别是实施那些能够导致调动私人资本的举措。

84. 一个趋势是建立包容性决策机制，但这需要明确行为者的角色和责任并加强协调；与当地利益相关方进行对话，以更好地处理受影响区域/社区概念；以及预测相关管理规程。可以将公民科学作为公众参与和合作进行科学研究以增加科学知识的实践。除其他外，这使人们能够监测自己的家园和环境，并影响人们与政府和其他重要机构的关系。国家组织和国际组织需要做好在决策和参与性决策过程中处理这种关系的准备。

### C.3. 放射性废物管理

#### 状况

85. 2021 年，澳大利亚政府宣布了将在南澳大利亚州的纳潘迪设立国家核废物贮存设施的计划。该设施将永久处置低放废物，并临时贮存中放废物。与之类似，意大利正在开展一项进程，以确定国家处置库的适当区域，用来处置 78 000 立方米极低放废物和低放废物，以及长期临时贮存约 17 000 立方米中放和高放废物。该处置库将是一个近地表设施，配备一个开发核领域研究活动的科技园。

86. 2021 年，一些成员国的低放废物设施朝着最后处置阶段迈出了重要步伐。在斯洛伐克的莫霍夫采处置设施，极低放废物的最后覆盖层已获得批准。在英国，今年进行了准备工作，以便在低放废物处置库场址的 8 号坑室和部分沟槽中的废物上加装覆盖层。此外，还正在考虑该场址是否可用于建立近地表处置设施，目前正在对下层基岩进行现场调查（图 C.3）。



图 C.3. 在英国低放废物处置库为支持在设施的一部分加装最后覆盖层进行的准备工作。（图片来源：英国核退役管理局，2021 年）

87. 在高放废物深部地质处置库实施方面也取得了显著进展。例如，芬兰废物管理组织 — 芬兰核废物管理专家组织 — 2021 年 12 月提交了运营许可证申请，以及 2023 年中旬之前在翁卡洛深部地质处置库进行首次乏燃料处置的计划。瑞典核燃料和废物管理公司正在等待政府作出决定，以便在为其深部地质处置库建议的场址开始进行施工和地下确认研究。法国国家放射性废物管理机构预计将在 2022 年之前提交中高放废物深部地质处置设施建设许可证申请。瑞士国家放射性废物处置合作组织和加拿大核废物管理组织也已开始进行与选择建立乏燃料深部地质处置库的场址有关的活动。

88. 这些成员国的进展是在经过几十年的研发（主要是在地下研究设施进行）之后取得的。目前有 13 个正在运行的地下研究设施。中国于 2021 年 6 月开始建设北山地下研究实验室，并作为原子能机构地质处置协作中心向国际合作开放了未来的地下研究设施研究、发展和示范计划。

89. 2021 年，弃用密封放射源管理取得显著进展，特别是在回取和整备方面。在约旦，从一个地下贮存坑中回取了遗留弃用放射源，并将其整备到了新废物包装中（图 C.4）。



图 C.4. 在约旦一个遗留废物贮存场址回取放射源并将其整备到新废物包装中。  
(照片来源：约旦原子能委员会)

## 趋势

90. 在过去几年中，许多成员国启动或重启了国家放射性废物管理政策和战略的制定工作，并在 2021 年取得了显著进展。在这一年里，加拿大政府与包括土著人民在内的公众、利益相关方和专家一起，对加拿大的放射性废物政策进行了审查并使之现代化。在英国，根据核退役管理局关于处理现有和预期退役废物的新国家战略，低放废物处置库公司在 2021 年 7 月成为核退役管理局的直属子公司。

91. 对扩大所有类型的放射性废物贮存和处置能力的需求越来越大，随着今后十年更多的核电厂计划退役，这一趋势预计将加速。为了应对这一需求，目前正在进行若干许可证申请和新的建设。例如，由于现有乏燃料设施正接近满负荷，大韩民国核安全和核安保委员会在 2020 年核准在月城核电厂建设额外的乏燃料临时贮存能力。

92. 过去几十年中，对与公众进行持续和审慎考虑的合作的关注也稳步增加。由于 2019 冠状病毒病大流行，成员国利用虚拟手段开展了大量的利益相关方参与工作，其结果是扩大了外展（例如，在意大利举行的支持国家处置库选址过程的国家研讨会进行了网播）。

93. 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，特别是在核计划规模较小的国家。马来西亚正计划在 2022 年对弃用密封放射源进行首次钻孔处置。观察到将弃用高活度源返还供应商进行再循环和处置的情况增加。2022 年，有 50 多个高活度源被计划从十几个以上的成员国移除。

94. 放射性废物管理领域特别是深部地质处置计划方面的国际合作继续扩大。欧洲联盟于 2009 年推出的实施放射性废物地质处置技术平台继续积极推进其《2025 年愿景报告》，其中详述了到 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愿景。同时，以前称为欧洲处置库开发组织并自 2021 年以来作为多国放射性废物解决方案协会设立的 ERDO 继续开展工作，探索在欧洲实施一个或多个共享地质处置库。

## D. 研究堆和粒子加速器

### D.1. 研究堆

#### 状况

95. 截至 2021 年底，在 53 个国家有 235 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 D-1 列出了研究堆最常见的应用。



96. 有 10 个国家正在建造 11 座新研究堆：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（图 D.1a、图 D.1b 和图 D.1c）。2021 年，多民族玻利维亚国的第一座研究堆浇筑了第一罐混凝土，俄罗斯联邦的 PIK 反应堆则进入了调试测试的最后阶段。南非制定了建造一座新研究堆的正式计划 — 目前拥有这种计划的成员国有孟加拉国、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。





图 D.1a. 在阿根廷的埃塞萨原子中心建造 RA-10 研究堆。（照片来源：阿根廷国家原子能委员会）



图 D.1b. 在法国卡拉奇安装儒勒·霍洛维茨反应堆的封盖。（照片来源：法国原子能委员会）



图 D.1c. 在多功能研究快堆反应堆腔基底安装地板，俄罗斯联邦季米特洛夫格勒国家科学中心原子反应堆研究院。（照片来源：俄罗斯国家原子能公司）

97. 国际社会继续努力尽量减少民用部门的高浓铀使用。迄今，来自 48 个国家（和中国台湾）的 6826 千克高浓铀被返还其原产国或以其他方式进行了处置。此外，已有 107 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低浓铀或已确认正在关闭。为开发用于高性能研究堆的新型高密度低浓铀燃料进行了广泛的研发工作。比利时放射性元素研究所仍然有望在 2022 年实现钼-99 生产向低浓铀的全面转换，届时，这一大需求量医用同位素的全球生产商都将使用非高浓铀生产方法。美国能源部国家核安全管理局通过竞争方式向私营公司授予了三项新的成本分担合作协议，以便在 2023 年底前实现非高浓铀钼-99 的商业规模生产。

## 趋势

98. 运行至少 50 年的研究堆比例正在接近 50%。为了确保其持续安全和可靠运行并提高利用率，许多设施已经建立或正在建立积极的战略和系统的老化管理、整修和现代化。一些运行高利用率研究堆的组织正在准备或考虑将它们的有效寿期延长到 80 年甚至 100 年（图 D.2）。最常见的例子之一是用新的数字系统取代过时的模拟仪器仪表和控制系统。

99. 许多国家利用机会，通过国际和地区协作倡议利用研究堆。2021 年，东道反应堆位于捷克共和国和大韩民国的两个因特网反应堆实验室开始向其他国家的学生进行实验传输，并且欧洲核实验教育平台启动，在小型研究堆为世界各地的大学和年轻核专业人员提供实践培训。

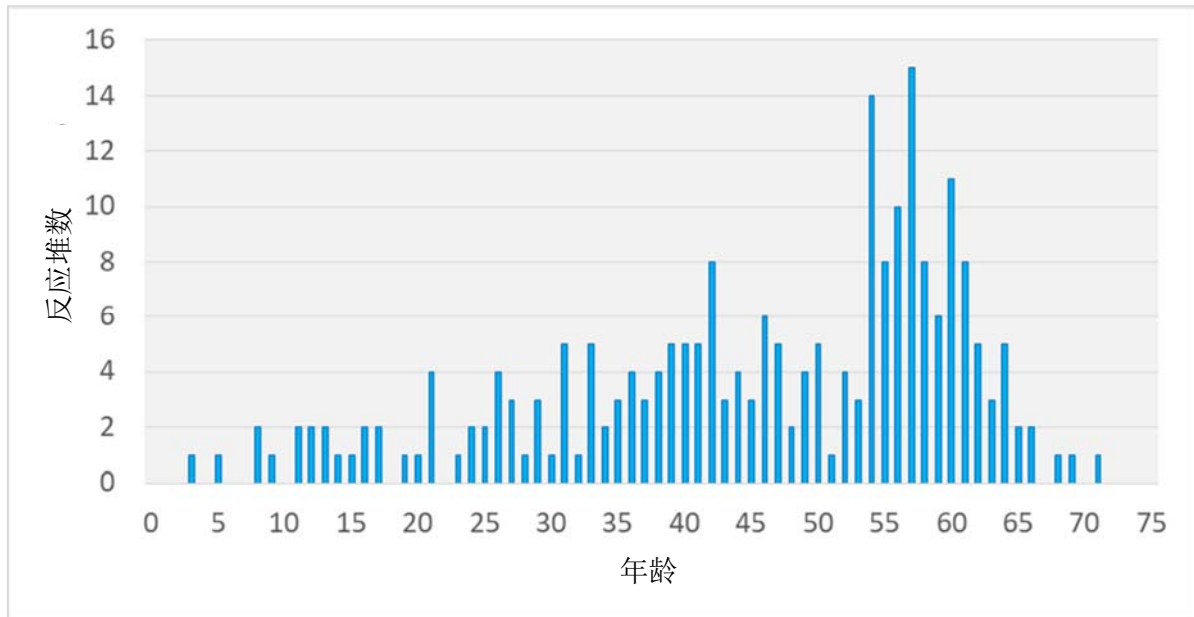


图 D.2. 2021 年 11 月在运研究堆的堆龄分布情况。  
(来源：原子能机构研究堆数据库)

100. 中子散射在世界范围内被用来应对一些挑战，包括在健康和生命科学领域的挑战，以提供关于包括病毒、蛋白质和退行性疾病在内的生物功能的信息，并协助开发新的药物和治疗方法。中子散射有助于了解与食品和水的生产、污染、净化和保护有关的过程。它在研究保护环境和应对气候变化的新能源（包括氢贮存、燃料电池、太阳能电池和新型电池）方面发挥着重要作用。它被用于许多其他研发、工业应用和工程应用。虽然用最先进的中子散射仪器进行的前沿研发通常是在高性能高通量中子源上进行，但最近在紧凑型加速器中子源方面的技术发展，特别是随着先进原位样本环境的加入，正在为中通量研究堆和加速器中子源的中子散射开辟新的机会。

## D.2. 粒子加速器和仪器仪表

### 状况

101. 长期以来，研究堆一直是可用于中子束研究的最强中子源。然而，稳态反应堆固有的局限性，加上民用高浓铀使用的减少，意味着研究堆在中子通量方面没有明显的性能改进。许多技术领域的稳步改进使加速器中子源开始挑战研究堆的作用。

102. 在 13 个参加成员国的支持下，正在瑞典隆德附近建设的欧洲散裂源预定于 2023 年投入运行。欧洲散裂源的时间积分通量将使它成为世界上最亮的中子源，取代法国格勒诺布尔劳厄-朗之万研究所高通量反应堆已经保持了近半个世纪的地位。欧洲散裂源产生中子的散裂靶是一个氦冷却旋转钨轮，其上由一个 5 兆瓦（平均）质子直线加速器提供 2 京电子伏特的脉冲质子束。

## 趋势

103. 加速器质谱测定法被证明不仅是一种进行单个原子计数的超灵敏技术，而且是一种基于加速器的方法，在与现代社会问题有关的分析应用方面具有巨大潜力。加速器质谱测定法目前被用于考古学、生物医学应用、气候变化研究、水文学、海洋学和日益受到社会和经济关注的许多其他领域。加速器质谱测定法也可以成为核监管应用的极强大工具，特别是就放射性废物设施而言。正如过去五年所证明的那样，加速器质谱测定法已被用于寻找与核装置退役和长期安全有关的重大问题的解决方案，如场址和废物表征以及放射性废物设施的环境监测。加速器质谱测定法能够量化的用于场址表征的相关放射性核素包括碳-14、碘-129、氯-36、钨-99、氦-81、铍-10 和铝-26，而用于废物表征的关键放射性核素有氢-3、碳-14、氯-36、铯-135、碘-129、钨-99、铀-236、钍-93 以及钚-240、钚-241 和钚-242。监管机构特别感兴趣的是核反应堆中使用的混凝土的表征。这引发了对如钙-41 等一些新放射性同位素进行新的加速器质谱测定法可行性研究。

104. 加速器质谱测定法技术的最新技术发展也扩大了其应用领域，使得能够研究广泛的文化和自然遗产物品，以及检测伪造品和非法产品贸易。例如，加速器质谱测定法尖端技术的发展已使艺术品中的各涂层、颜料、粘合剂和画布的测龄成为可能（图 D.3）。

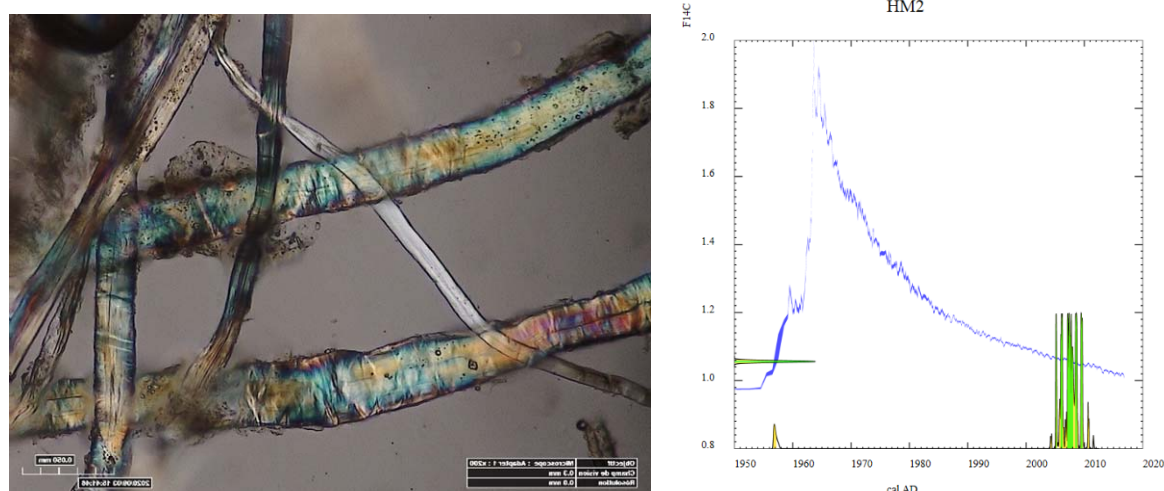


图 D.3. 对一幅后印象派绘画进行分析。左图：从涂层收集的植物性织物纤维。右图：使用加速器质谱测定法测量进行的年龄测定显示，织物纤维的来源时间是在所称艺术家逝世之后，从而证明这幅绘画系伪造。

（图片来源：法国巴黎萨克雷大学碳测量实验室）

105. 放射性碳测年是利用碳-14 的衰变来确定含碳物体的年代。作为一种天然存在的碳放射性同位素，碳-14 作为全球碳循环的一部分内置于所有含碳材料（有机和无机）中。碳-14 的半衰期为  $5700 \pm 30$  年，碳-14 检测是确定过去 55 000 年形成的标本年龄的一种有用工具。

106. 迄今为止，假冒品检测领域最具说服力的标准是关于材料时代错误的科学证明，这基于对艺术品中存在的材料与它们最早的发现或生产日期信息进行比较得出。放射性碳测年是一种非常有吸引力的方法，因为它能提供所用材料的绝对年龄和明确的时间框架。

107. X 射线荧光光谱测定法是一种非破坏性的快速多元素同步分析技术，用于对不同性质和成分的样本进行表征。X 射线荧光对于许多基础和应用研究项目是一种具有成本效益的选择。与 X 射线聚焦装置结合使用，可以非破坏性地测定二维和三维的元素分布。同步辐射源提供高强度的 X 射线，具有可调的能量选择和空间聚焦，可用于材料科学各领域（如纳米材料、生物材料和能源材料）进行元素分布、近表面和超痕量分析的各种最先进技术（图 D.4）。

108. 根据原子能机构最近开发的交互式 X 射线荧光实验室图<sup>11</sup>中提供信息，目前在 100 多个国家有 1200 多个 X 射线荧光设施；然而，在许多情况下，它们的能力尚不为可能受益于这种强大分析技术的最终用户群体所熟知。

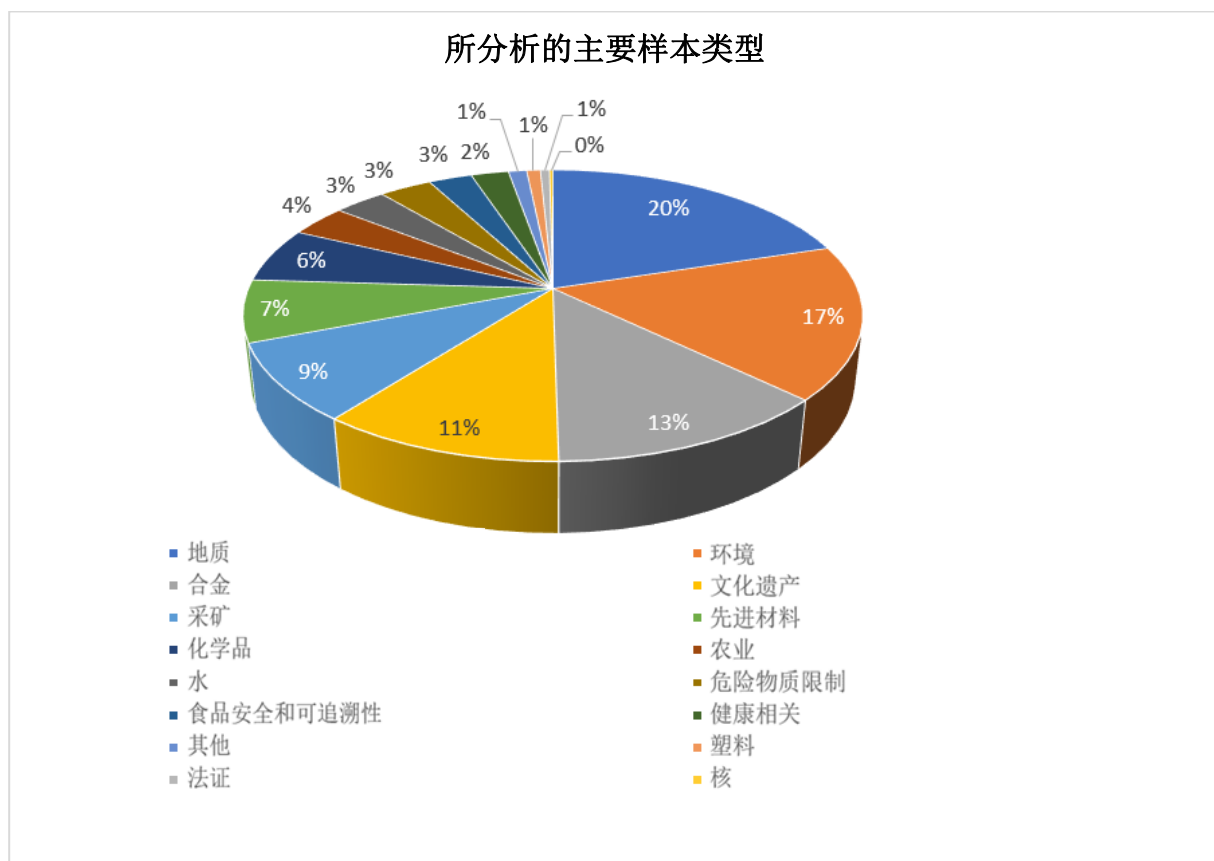


图 D.4. 选定 X 射线荧光设施的主要应用领域。

<sup>11</sup> <https://nucleus-new.iaea.org/sites/nuclear-instrumentation/Pages/World-Map-XRF-laboratories.aspx>

## E. 原子数据和核数据

### 状况

109. 发展聚变反应堆，需要关于原子尺度相互作用的高质量数值数据库。有了这些数据，就能对设计进行计算模拟。目前的研究重点是模拟等离子体和候选聚变反应堆壁材料的相互作用过程，以及建立氢气与反应堆壁材料相互作用的基本原子学模型（图 E.1）。实验研究的重点是液体核聚变材料的基本原子结构，以及利用线性等离子体装置和星形核聚变装置进行聚变等离子体-液体金属实验。理论/计算研究主要用于中子辐照效应和氢渗透模拟。

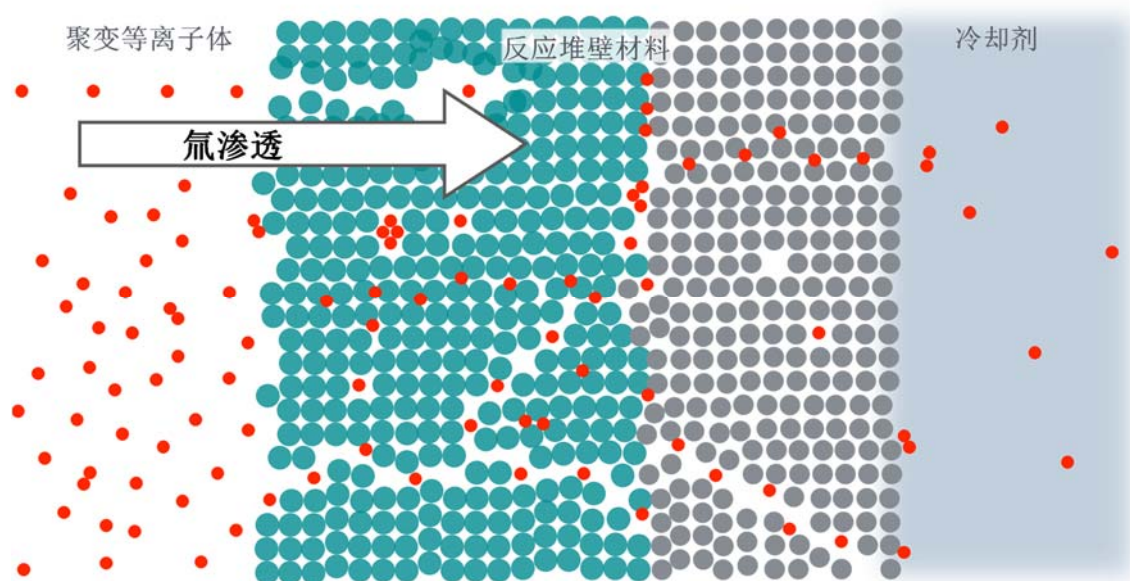


图 E.1. 聚变反应堆壁中的氚渗透过程示意图。

### 趋势

110. 人工智能/机器学习在各个领域的快速采用是一个明显趋势，将对核物理和核数据库的发展产生很大影响。可能的应用范围从诸如 TALYS 这样的核模型代码参数的预测、实验数据的趋势分析和实验核反应数据库的自动构建，到通过现代化和自动化的数据流对核电厂异常情况的检测和定位等等，不一而足。现代数据分析技术在改进核应用的核数据评价方面有很大的潜力。

## F. 环境

111. 塑料污染是全球最紧迫的环境挑战之一，直接威胁着可持续发展。2021 年启动的“核技术用于控制塑料污染”倡议以原子能机构的塑料污染治理工作为基础，而治理方式是利用辐射技术进行回收，以及利用同位素示踪技术进行海洋监测。

## F.1. 利用辐射技术治理塑料污染

### 状况

112. 辐射技术能够加强传统塑料机械回收并为化学回收提供便利，在减少塑料和聚合物废物方面独具特色与优势。 $\gamma$  射线和电子束的创新应用可使塑料废物得到有效分拣，从而进入回收流。这可提高再生塑料的质量和价值，将塑料废物转化为其他更高价值的产品，有助于先进塑料回收或化学塑料回收。这些应用还可通过分解塑料聚合物废物，用作化学原料，从而节约能源。

### 趋势

113. 菲律宾正在开发一项应用，它使用辐射诱导接枝聚合，使天然纤维与回收塑料有效相容。辐射诱导聚合可增强纤维与塑料粘合，从而改善整体热机械性能（图 F.1）。菲律宾盛产各种天然纤维，如蕉麻纤维、香蕉纤维、菠萝纤维和黄麻纤维，它们都以优良的机械性能而闻名。然而，大多数木质纤维素纤维所固有的亲水性限制了其在复合材料中的应用，因为界面粘合很差。辐射诱导接枝聚合克服了这种不混溶性，使它们能够混合或达到均匀性。

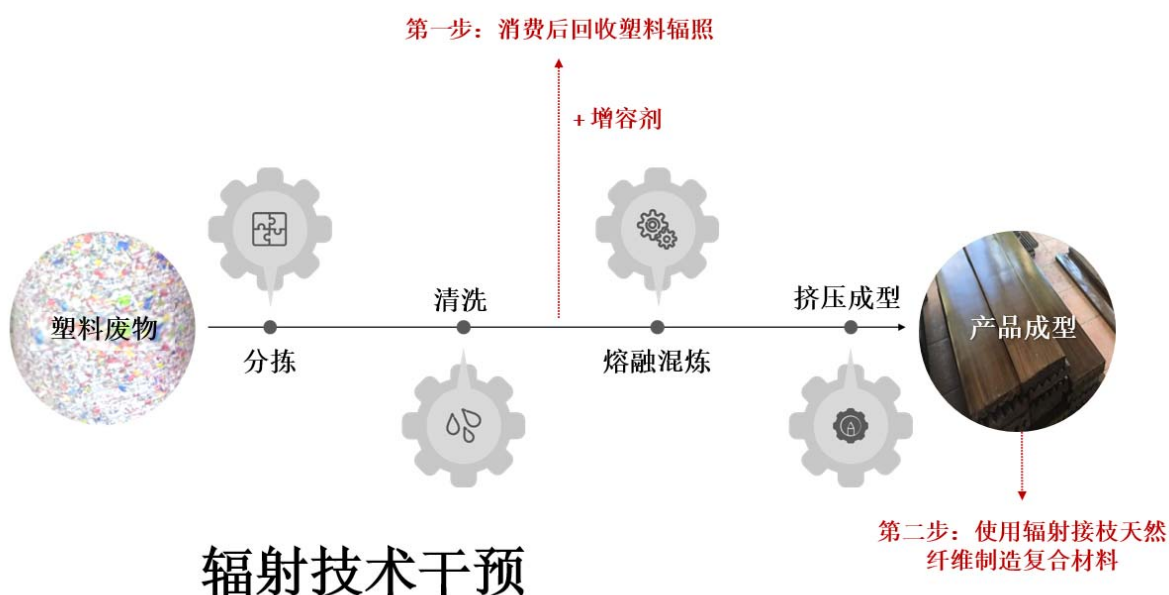


图 F.1. 菲律宾拟议使用辐射接枝天然纤维和经辐照的消费后回收塑料的复合材料制造方案。（图片来源：菲律宾核研究所）

114. 印度尼西亚正在开发的另一项应用利用辐射技术解决两种废物流带来的挑战。在这种方案中，塑料垃圾经辐照，与生物质纤维废物形成稳定复合材料，从而可利用塑料和棕榈废物制成建筑材料（图 F.2）。辐射技术有利于生物质分解、成分相容，以及在最终产品中交联，以定制其特性。

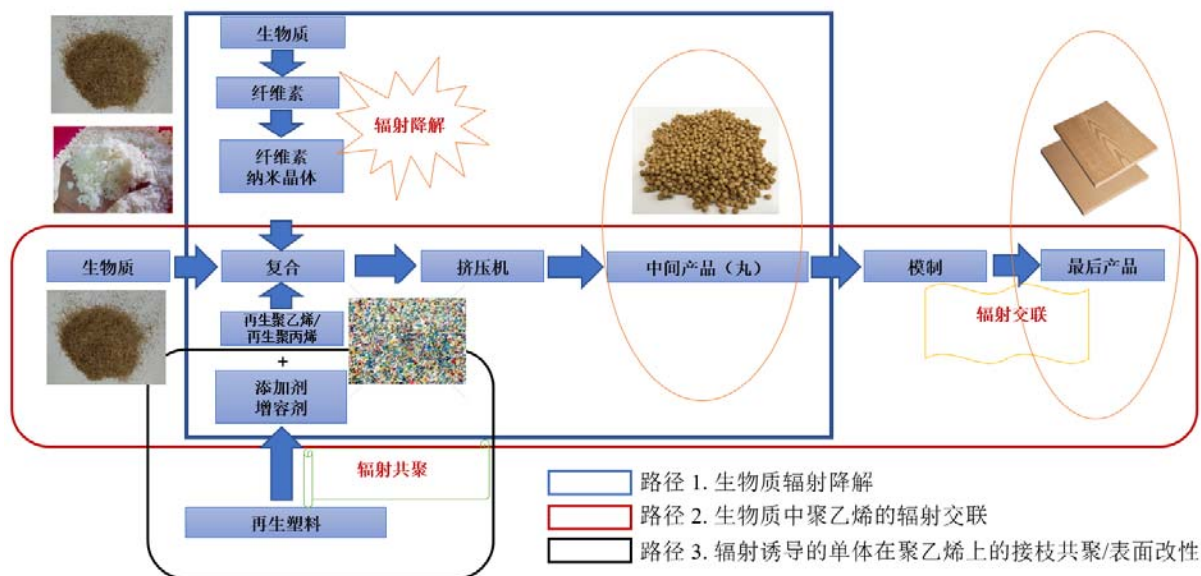


图 F.2. 拟议使用天然纤维和再生塑料（再生聚乙烯和再生聚丙烯）增强木塑复合材料的生 产步骤方案。（图片来源：印度尼西亚国家核能机构）

## F.2. 利用核技术和同位素技术治理海洋环境塑料污染

### 状况

115. 海洋成为陆上许多管理不善和未经回收塑料的最终处置地。虽然在过去十年中全球科学界在更好地了解海洋环境塑料污染及其对各种水生生物的潜在影响方面取得了巨大进展，但对海洋中微塑料的浓度和后果仍然缺乏了解。大塑料（图 F.3）对海洋生物引人注目的可见影响已经有据可查，但微塑料即直径小于 5 毫米的颗粒物所造成的潜在危害却不甚明了。由于这一问题的规模很大，塑料污染已成为全球环境关切的问题，因此吸引了各国政府、民间社会、科学家和非政府组织的关注。



图 F.3. 在地中海沿岸水域用浮游生物网捕捞的大塑料。

116. 全球在海洋塑料污染方面开展的科学努力大大受益于核技术的使用。近年来开发了一系列核技术和同位素技术，用于确定海洋环境中塑料碎片的成分、大小和数量。这些技术依靠光谱成像技术，如傅里叶变换红外光谱学和拉曼显微镜学，来确定自然样本中的聚合物类型和量化大于 10 微米的塑料颗粒数量。作为对这些技术的补充，热解-气相色谱-质谱测定法和热脱附-气相色谱法结合质谱检测可以同时识别聚合物，并分析每种类型的塑料聚合物（从 500 微米到千分之一微米）的质量以及与环境复杂的样本中的塑料颗粒相关的有机添加剂。

117. 所有这些核技术和同位素技术都可以应用于对海洋环境中的塑料进行全球监测。它们连同海洋环流和散布模型一起，有助于追踪塑料的来源及其在海洋中的去向。这些技术与测量沉积物中的环境放射性核素（铍-7、铅-210、铯-137 和钷-239/钷-240）和 X 射线荧光相结合，使科学家能够确定沉积物柱芯的地质年代学。这有助于科学家重建海洋塑料污染的历史趋势，更好地了解微塑料的沉积后老化。

118. 核技术还为了解微塑料向海洋生物的转移及其对这些生物的影响作出了实质性贡献。一些微塑料颗粒非常小，以致被这些生物摄入并进入其器官，影响其生存。此外，微塑料还可能成为其他污染物的载体。最近的研究强调了基于实验室的核技术在量化微塑料及其相关污染物的移动和生物影响方面，以及在检测微塑料对海洋生物造成的压力方面的作用。核成像技术，如自动射线照相法、正电子发射断层照相法和单光子发射计算机断层照相法，除了用于生物分布评估外，也可用于测量塑料在组织和生物体层面的形态影响。



## 趋势

119. 为了弥补在监测和表征海洋塑料污染方面的知识差距，特别是关于较小颗粒的知识差距，需要进行一系列的研究和开发工作。必须更好地了解塑料颗粒本身的物理效应，包括它们在海洋环境中的积累、迁移和营养转移。

120. 为了研究生物群积累塑料颗粒的情况，大多数研究通过摄入组织和过滤分离颗粒进行全身或特定组织测量，或使用组织切片和组织学评估，然后进行视觉和（或）光谱确认。在使用传统技术时遇到的局限性可以通过核方法解决，即利用核方法形成放射性塑料颗粒或放射性塑料，然后用放射性示踪工具进行追踪。虽然最近放射性塑料与碳-14-聚合物（ $\beta$  发射体）一起使用，但未来发展可能会利用发射  $\gamma$  的放射性塑料来评估微塑料摄入后的留存情况及其在食物链中的转移。原子能机构及其合作者正在开发的其他核技术涉及使用稳定同位素标记的微塑料，这可能会在了解微塑料的转移及其对海洋生物的影响方面带来重大进展。

121. 研究人员也开始考虑更小尺度的塑料碎片，即所谓的纳米塑料。目前，环境中的纳米塑料还无法量化。虽然有分析方法（荧光法和热解-气相色谱-质谱测定法）在实验室研究纳米塑料（图 F.4），但这些技术不一定适合评估环境样本。核技术和同位素技术在解决和监测微塑料碎片和量化纳米塑料方面未来可以发挥作用。根据尺寸（即微塑料和纳米塑料）分离和表征塑料碎片的挑战日益受到关注，因为纳米尺寸范围的塑料可能与生物系统具有更复杂和危险的相互作用。流场-流分离法与热解-气相色谱-质谱测定法联用，是一种可用于确定纳米塑料对环境潜在影响的有前途方法。用于量化海洋环境中塑料颗粒的其他新兴技术包括：电感耦合等离子体质谱法，通过碳-13 检测获得纳米塑料和微塑料的粒度分布和质量浓度信息；以及工程研究中常用的三维计算机断层照相法。

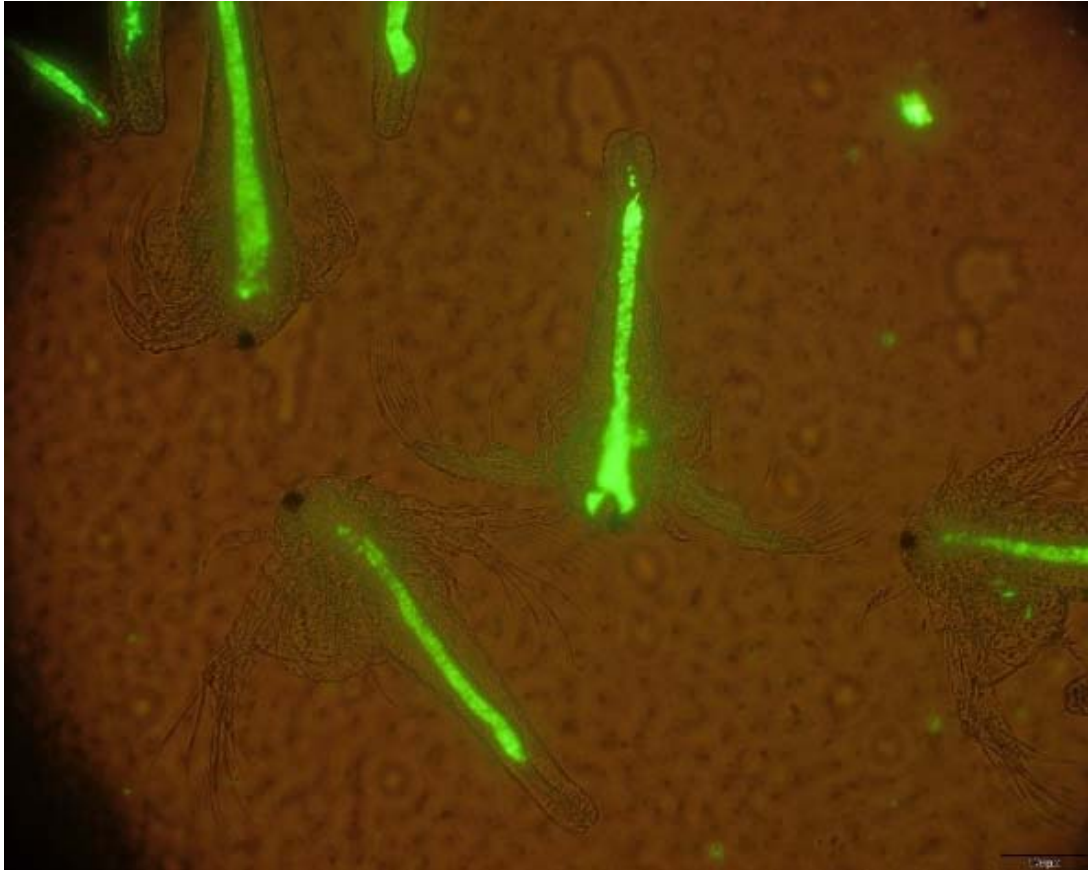


图 F.4. 卤虫无节幼体（卤虫早期生命阶段）摄入纳米塑料通过荧光可见。

122. 需要考虑和解决纳米塑料在环境中可能存在的风险和危害，而目前基于实验室的核技术已经能够做到这一点。然而，迄今，对纳米塑料在环境中的去向和影响只进行了少量的探索。

123. 期望核技术和同位素技术在监测海洋污染和更好地评估其对海洋生物影响方面取得进展，必须有两项关键的发展：一是必须提高世界各地开展海洋塑料数据监测和评估活动的的能力，以达到同等水平；二是必须通过比较、协调和标准化来减少监测方法验证方面的差异，以确保结果可靠。需要有反映海洋中发现的各种聚合物类型、各种尺寸范围、不同形状和老化状态的微塑料颗粒的参考材料，但目前尚不存在。

124. 核技术和同位素技术将在可持续治理海洋塑料污染、加强知情决策和科学管理我们的海洋方面发挥关键作用。

## G. 粮食和农业

### G.1. 利用新型同位素指纹技术评估和缓解抗生素的持久性和转移以及对抗菌素耐药性的影响

#### 状况

125. 抗微生物物质，如抗生素、抗病毒药物、抗真菌药物和抗寄生虫药物，用于预防和治疗人、动物和植物的感染。虽然它们可以拯救生命，但它们的滥用和过度使用是导致耐药性病原体发展的主要因素。世界卫生组织已宣布抗菌素耐药性是全球十大公共卫生威胁之一，目前每年造成 70 万例死亡，预计到 2050 年将达到每年 1000 万例死亡。

126. 抗生素广泛用于牲畜和家禽饲养，以控制疾病和促进生长。10%至 90%的给药药物没有被动物完全吸收或代谢，而是通过尿液和粪便排泄。这些排泄的尿液和粪便，无论是直接作为粪肥（图 G.1）还是间接作为污水污泥，随后可能以肥料或土壤改良剂的形式施用于农地，将细菌和抗微生物物质及其代谢产物释放到土壤中。



图 G.1. 与粪便一起施用的土壤肥力改良剂将抗微生物剂及其代谢物（抗微生物基因）释放到田地中。（照片来源：切萨皮克湾计划）

127. 当细菌、病毒、真菌和寄生虫随着时间变化时，就会出现抗菌素耐药性。它们变异和适应，不再对抗微生物物质产生反应，从而使感染更难治疗。在人、动物、食物、植物和环境（特别是在水和土壤中）都发现了耐抗微生物剂生物。这些生物体具有进化优势，并可引发微生物群即携带耐抗微生物剂基因的菌群的发展。虽然抗菌素耐药性已在人和动物健康方面得到广泛研究，但其对土壤和水的影响仍然未知。

128. 抗微生物物质通过环境的转移可能导致抗微生物剂在植物、动物和食物中的残留，而食物链为微生物群的大量存在提供许多生态位，并在其中可能出现抗菌素耐药性。因此，食物和环境在抗菌素耐药性向人类转移的复杂途径中起着重要作用。评估抗菌素耐药性的来源和去向并制定管理方案将有助于减少相关死亡人数。这符合“同一个健康”方案，即承认人、家畜和野生动物、植物以及更广泛的环境（包括生态系统）的健康是密切相关和相互依存的。

129. 当前的常规化学方法可用于评估抗微生物物质在环境和食品中的传播，研究细菌的抗性，但无法解释抗微生物物质和抗菌素耐药性在农业系统中的去向、动态和持久性。它们可以作为即时快照测量抗微生物剂浓度存量，但无法测量代谢物等未知量。抗微生物物质不断被引入农田；然而，由于反复使用，它们的浓度处于稳定状态。在这样的环境中，很难检测这些化学物质随时间降解情况，而且使用常规分析方法不可能评估抗微生物物质在施用后在环境中扩散的速度、新施用的输入物转化或代谢的速度以及形成的代谢物、抗微生物剂代谢物对耐抗微生物剂菌群发展的贡献，以及当前这种输入相对于同一抗微生物物质先前和后续输入的重要性。

## 趋势

130. 特定化合物稳定同位素分析和探测技术是评估抗微生物物质的有力工具。它们可用于使用气相色谱-同位素比质谱测定法和液相色谱-同位素比质谱测定法测量环境样本中天然存在的稳定同位素（如碳-13和氮-15）的比值，还可使环境治理决策者了解潜在的污染源和降解程度。稳定同位素探测技术用于确定特定污染物的生物降解是否会或确实发生在受污染场地。各种稳定同位素探测方法均使用同位素标记的污染物（碳-13 加氮-15 和氧-18）来检测和量化生物降解过程，并描述产生这些活动的微生物的特征。为了了解抗微生物剂和抗菌素耐药性在食物链中的动态，建议使用同位素技术和基因组测序的综合方案。这可能有助于研究动物体内抗微生物剂的动态和排泄及其在环境中（特别是在土壤和水中）的去向，以及耐抗微生物剂基因的演变和传播。

131. 为了应用上述技术追踪农业系统中的抗微生物剂，原子能机构启动了题为“利用同位素技术评估农业系统中抗微生物剂的去向和对抗菌素耐药性的影响”的协调研究项目。已开发特定化合物稳定同位素分析技术，用于追踪农业集水区杀虫剂或兽用抗微生物剂的来源和去向。该技术用于监测农业应用后抗生素的来源、动态和传播，并评估对环境的潜在影响。第一步是协调用于诊断和监测施于粪肥的标记合成抗生素的技术。目前，商业合成标记抗生素的数量不足阻碍了该方法的现场测试。

132. 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，正在与慕尼黑工业大学合作，通过有机合成法合成标记的磺胺甲恶唑和四环素（人类和兽医学中常用的抗生素），用于与来自澳大利亚、巴西、中国、南非和越南的合作伙伴进行的现场合作研究。其目的是制定分析方案或导则，以追踪人类和牲畜用药中的抗生素通过排泄物、粪肥、用于灌溉的受污染地表水和地下水以及农业径流在环境中的流动。位于塞伯斯多夫的原子能机构水土管理和作物营养实验室将提供关于利用同位素技术监测环境中抗微生物剂的实际操作培训。它还将为发展中国家应用该方法制定缓解环境中抗生素

扩散的战略提供导则。位于塞伯斯多夫的原子能机构粮食和环境保护实验室将通过使用同位素稀释分析和特定化合物稳定同位素分析，协助分析粮食中的抗微生物剂。

133. 分子/生物技术的最新发展，如鸟枪法宏基因组学，可用于检测和量化耐抗微生物剂基因。对其他遗传因子或基因（如类整合子整合酶）的分析，通常可以很好地替代对人为污染包括污染环境中耐药细菌的总体存在情况的分析。位于塞伯斯多夫的原子能机构动物生产和健康实验室将凭借其基因组测序平台为该项目作出贡献，方法是通过提供分子技术和实验室分析实际操作培训，以识别耐抗微生物剂菌株和跟踪抗菌素耐药性相关基因。同位素技术（如特定化合物稳定同位素分析）和更先进分子技术的结合，有望促使人们更好地了解施用粪肥中抗生素的抗去向和动态及其对环境中抗生素抗性的影响。

## **G.2. 利用太空诱导的遗传变异、植物育种和天体生物学应对气候变化状况**

134. 太空经常用于天体生物学研究。自 20 世纪 50 年代末开始太空探索以来，地球轨道内外普遍存在的特殊条件，特别是辐射环境和微重力，激发了一系列生物实验。许多实验都集中在微重力对植物生长的影响上，例如在国际空间站，或在地球上模拟的太空环境中，如美国国家航空航天局空间生命科学实验室。

135. 这些实验的重点一直放在基础生物学上，以了解在太空微重力条件下高效种植植物的能力。结果表明，重力改变对细胞增殖和生长、基因表达和表观遗传学有影响。最近的实验探索了太空诱导的遗传变异，以观察新品种植物是否能耐受地球上的恶劣条件，如气候变化造成的恶劣条件。2021 年 1 月，法国研究人员的 320 根葡萄藤插条载荷在国际空间站内滞留十个月后被送回地球。在这个实验中，研究人员主要研究国际空间站内部环境中的微重力对葡萄藤基因组和生理性能的影响。出于类似的研究目的，一家植物科学公司即前沿生物科学公司于 2020 年将大麻和烟草的组织培养物送至国际空间站。

136. 迄今，世界上大多数天体生物学实验都是以微重力对植物生物学的影响为重点，而外太空的辐射环境也被用来诱导作物种子的遗传变异，以便通过突变育种进行作物改良。在过去 15 年中，中国已发布 30 多个新的作物突变品种，这些品种通过使用轨道卫星、高空气球暴露于太空或地球上的模拟宇宙辐射进行诱变的方式培育而成。这些项目利用了外太空特有的辐射环境和微重力的组合来诱发遗传变异。在外太空时，种子暴露在外部空间环境中，不像在国际空间站的内部环境中那样受到辐射保护。

137. 研究太空对植物种子影响的天体生物学实验仍然非常有限，其主要关注种子和几种微生物的存活率。对微生物进行太空辐射照射，首次是 1965 年在地球上空 150 公里处的探空火箭上，然后是 1966 年在地球上空 300 公里处的“双子座”9 号和 12 号任务中，最后是 1974 年在“阿波罗”16 号任务从月球返回期间。从那时起，进行了一系列生物实验，主要是为证明生命能够在极端恶劣的太空条件下存活，而且主要集中在细

菌、藻类、地衣以及有限程度上的植物种子上。这些实验是在特定平台上进行的，如长时间照射设施、欧洲可回收运载器、和平号空间站、“路径分析用生物信息学方法”研究计划、国际空间站第一利用阶段外装有效载荷、国际空间站日本实验舱 TANPOPO 实验、生物体/有机物暴露于轨道应力纳米卫星及其“活生物体空间环境生存能力”有效载荷。商业有效载荷的最新可用性现在有助于在国际空间站进行植物材料内或外有效载荷的天体生物学实验。

## 趋势

138. 在已发表的文献中，关于太空环境在作物基因组和生理层面的诱变效应的科学信息是有限的。中国科学家报告说，在用可回收的“实践八号”卫星送入太空的小麦种子中，太空辐射和微重力诱发的突变最为频繁。这表明宇宙射线和微重力之间存在协同效应，而微重力的单一效应远低于宇宙射线的效应<sup>12</sup>。还有一些科学家揭示了通过航天诱变产生的耐盐突变体所涉及的途径和基因<sup>13</sup>。还将作物种子送入新的中国空间站的首舱，并作为嫦娥四号空间任务的一部分送往月球表面。

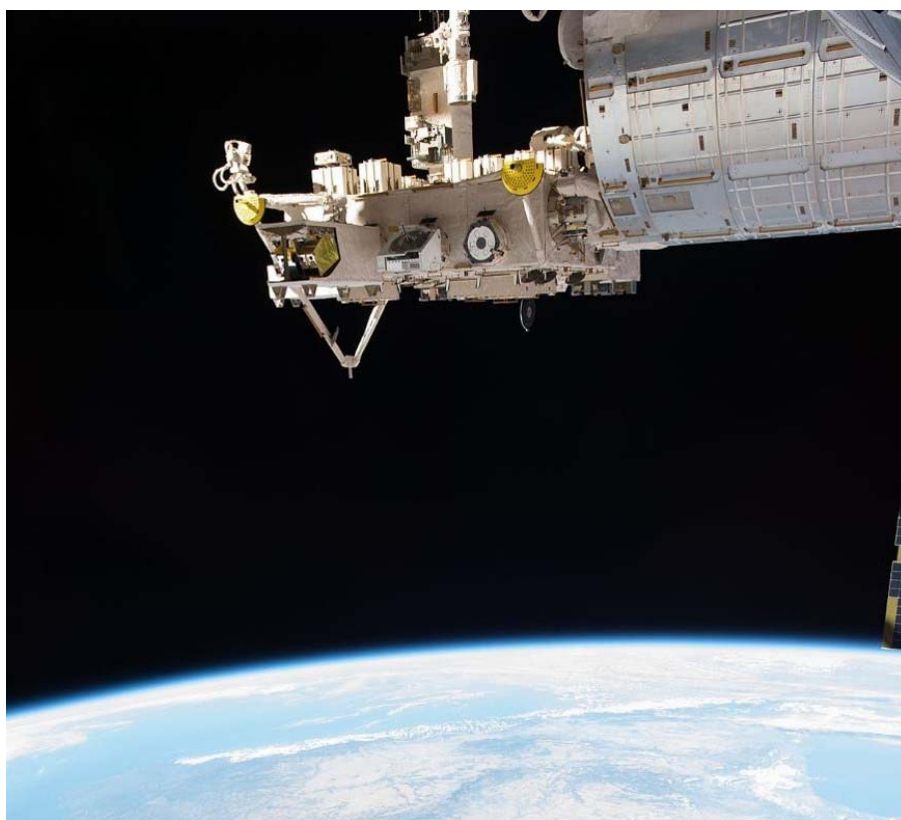


图 G.2. 国际空间站的 Nanoracks 外部平台。(照片来源：Nanoracks 公司)

<sup>12</sup> 郭会君等，“实践八号卫星飞行环境中不同因素对小麦的诱变效应”，《作物学报》第 36 卷第 5 期，2010 年。

<sup>13</sup> 熊宏春等，“航天诱变耐盐小麦突变体的耐盐胁迫关键代谢途径及相关基因研究”，《科学报告》第 7 期第 2731 页，2017 年。

139. 现在，人们越来越有兴趣了解太空环境对植物基因组产生突变的影响，以及改变植物生理学，从而提高植物抵御地球上不利生长条件（如气候变化引起的不利生长条件）的能力。现在，至少有两个商业实体能够对发送到国际空间站的种子或植物材料的有效载荷进行管理，它们希望填补空白，以促进或开展关于宇宙辐射和微重力在改变植物对恶劣生长条件的适应性方面的影响的研究。可以预见，随着人们对探索太空植物生物学的持续兴趣，该领域将取得快速进展，既可以为宇航员提供食物，也可以利用太空照射产生的有价值突变培育有适应性的作物品种。

140. 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，将于 2022 年首次涉足天体生物学和太空育种领域，进行一项实验，计划将两种植物<sup>14</sup> 种子分内部和外部有效载荷分别置放在国际空间站内外，持续为期三至七个月。就外部有效载荷而言，将使用 Nanoracks 外部平台，该平台半永久性安装在日本实验舱暴露设施（图 G.2）上。外部有效载荷将安装在国际空间站的加压空间内，然后托管在外面。这将是世界上第一次系统性探索，以了解和利用宇宙辐射和微重力对诱导遗传变异的影响，使其可能用于开发能够承受地球上恶劣生长条件（如气候变化所带来的恶劣生长条件）的作物。

## H. 人体健康

### H.1. 诊疗学：个性化癌症护理路线图

#### 状况

141. 每种癌症都是由不同类型的细胞组成的。为了获得最佳的医疗护理，治疗选择应基于对癌症亚型的识别，这些亚型可以很容易利用核医学表征，从而实现个性化的治疗方案。

142. 在过去的几年里，随着正电子发射断层照相法的发展，特别是使用氟-18 氟代脱氧葡萄糖显像，以及采取放射性核素靶向治疗新方案等，核医学取得了显著的发展。这些发展为个性化的癌症管理铺平了道路。以特定生物标记为靶点的放射性药物是评估疾病位置和扩散、确定预后价值、评估治疗反应以及支持治疗规划或引导活检的有力工具。此外，一旦用  $\beta$  或  $\alpha$  发射体标记，针对不同实体瘤和血液肿瘤所表达的相关分子标志物的放射性药物就可以用于放射性核素靶向治疗。

143. 现代核医学在实现“个性化”或“精确性”医学方面发挥着至关重要的作用，使得可以选择适合患者病情或疾病倾向的具体治疗方法。因此，它可以处理与个体独特特征有关的风险评估、诊断、治疗监测和放射性核素治疗，从而提高生活质量和公众健康。这直接有助于实现关于良好健康和福祉的联合国“可持续发展目标 3”。

---

<sup>14</sup> 一个是拟南芥，一种小型开花植物，通常用作植物生物学中的模式生物；另一个是双色高粱，简称高粱，因其米粒用于人类食物、动物饲料和乙醇生产而种植。

144. 基于同位素的诊疗学是指将诊断和治疗结合起来，使医学专业人员能够关注每个患者的具体需求。在诊疗学中，嵌入不同放射性同位素的类似分子被用于诊断或治疗目的。一种放射性同位素被用于高精度地确定癌症的位置和扩散以及癌细胞的具体类型，另一种放射性同位素则发射出辐射杀死癌细胞。与更广泛地针对疾病及其大体部位的常规辐射治疗相比，诊疗学方法通过用放射性子弹瞄准肿瘤，同时不伤害周围健康组织，使之具有更大的特异性，从而既提高了治疗的有效性，又提高了治疗的安全性（图 H.1）。

145. 原子能机构支持成员国在安全和适当的临床实践范围内建立诊疗设施和接受诊疗学培训，有助于向个性化医疗过渡。

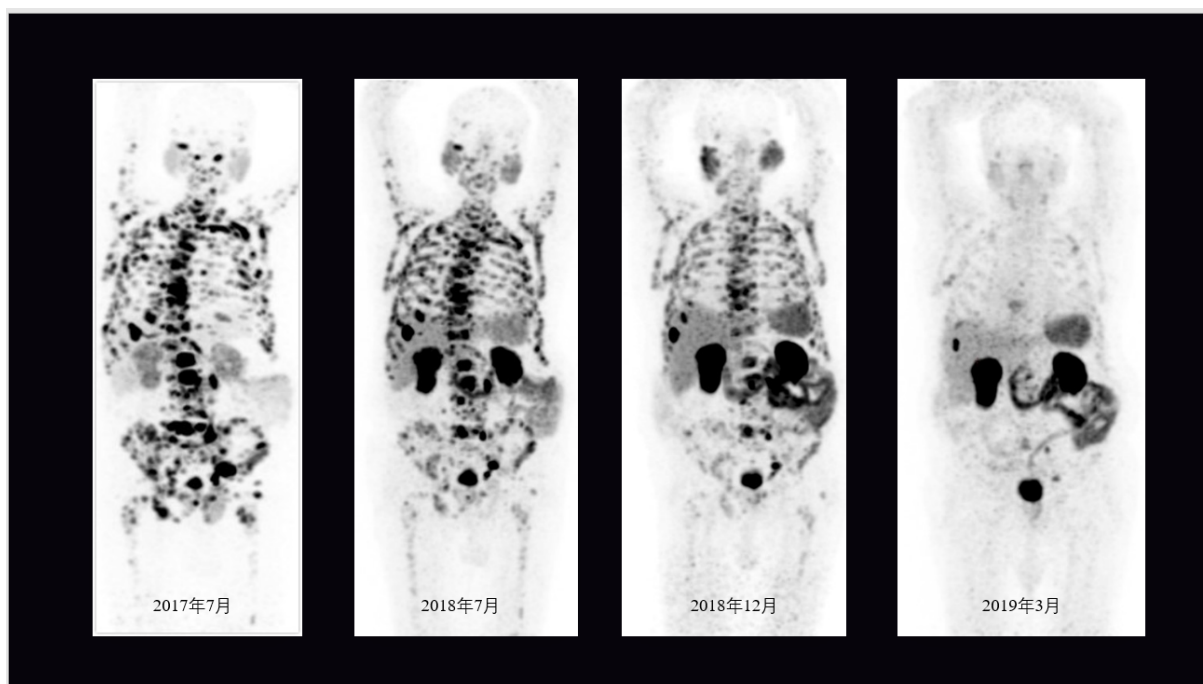


图 H.1. 一名 82 岁前列腺癌患者的诊疗进展，其前列腺癌已扩散至淋巴结和骨骼。  
从左到右：从诊疗开始到接近完全缓解情况。（照片来源：贝鲁特美国大学医学中心）

## 趋势

146. 近几十年来，精准医学，特别是靶向诊断成像，以及治疗方法取得了重大进展。这在一定程度上归功于新分子和新技术的发展，它们促使临床诊疗应用的数量及其全球使用均快速增长。

147. 临床应用正在加速增长。目前最突出的应用是对神经内分泌肿瘤、淋巴瘤、前列腺癌、乳腺癌、肺癌和甲状腺癌患者的治疗。

148. 诊疗学的未来有赖于开发旨在针对特定肿瘤细胞的新分子，从而可以在减少副作用的同时治疗一些晚期癌症。在这个迅速发展的领域，在培训医疗和科学专家以及建立专门的医疗基础设施方面，越来越需要更广泛的国际合作和标准化。



## H.2. 营养科学的进展：用数据帮助各国应对肥胖流行病问题

### 状况

149. 营养是所有国家在实现关于良好健康和福祉的“可持续发展目标 3”方面的一个重要考虑因素。在营养不良仍然处于令人震惊的高水平的同时，肥胖也在加剧。根据《2021 年全球营养报告》<sup>15</sup>，成人超重和肥胖在几乎每个地区和国家都在上升。22 亿人超重，其中 7.72 亿人受肥胖影响。2020 年，大约 6% 的五岁以下儿童被认为超重，其中近一半生活在亚洲，超过四分之一生活在非洲。肥胖是糖尿病、心血管疾病、癌症、肌肉骨骼疾病和总体死亡率的主要风险因素。肥胖相关疾病已在全球达到流行病的程度，每年至少有 280 万人因超重或肥胖而死亡。据估计，到 2025 年，全球肥胖相关疾病每年将花费 1.2 万亿美元。为了应对肥胖流行病问题，公众和国家及国际决策者必须齐心协力，支持有效的营养干预、行动和政策。在这方面，由双标记水稳定同位素技术提供的能量消耗数据至关重要，将为决策者提供证据，以制定出应对全球日益严重的肥胖流行病问题的更有效营养和健康政策。

150. 用双标记水测量的总能量消耗是指一个人消耗的能量数量。它对确定能量摄入需求很重要。总能量消耗数据有助于制定和评价营养和体育活动干预措施，同时也是验证简单能量摄入技术的黄金标准。原子能机构支持双标记水技术的应用，因为它是唯一能够在无拘束生活条件下评估总能量消耗而不干扰日常活动的技术，因此非常适合在野外环境中使用。

151. 双标记水方法采用氘和氧-18 两种稳定同位素示踪剂来测量一个人的能量消耗。受试者喝下定量含有这两种非放射性同位素的水，这些水与人体内的水混合。这些同位素通过尿液、汗液和呼吸排出身体。在喝这些水之前和喝之后的 7 至 14 天内收集尿样。氘只以体液的形式排出人体，而氧-18 可通过体液和二氧化碳呼吸更快地排出人体。氘和氧-18 消除率之差是二氧化碳产生率的一个量度，由此可以计算出能量消耗。

152. 虽然这种方法无创、安全，且易于在野外环境中应用，但由于所需同位素和分析设备的成本，应用于大量人群可能成本高昂。因此，使用双标记水的研究往往规模较小；然而，汇集许多研究的数据可以解答仅靠单项研究无法解答的某些问题，如气候变化将如何影响不同人群的能量需求。为了便于汇集全球双标记水数据以回答重要问题，2018 年 12 月，原子能机构启动了一个数据库，其中包含过去三十年的人类能量消耗测量数据。截至 2021 年 11 月，该数据库包括来自 32 个国家 7600 多名年龄在八天至 95 岁之间受试者的数据。近 65% 的研究参与者是女性，大部分数据来自高收入国家。

---

<sup>15</sup> <https://globalnutritionreport.org/reports/2021-global-nutrition-report/>

## 趋势

153. 原子能机构的双标记水数据库可被视为对抗肥胖问题的规则改变者。2021 年基于其数据分析发表的新发现结果表明，稳定同位素技术对于我们了解人体健康特别是肥胖危机至关重要。

154. 发表在《科学》杂志上的一篇文章<sup>16</sup> 推翻了我们以前对新陈代谢的理解（图 H.2）。这篇文章利用原子能机构双标记水数据库的数据，研究了人一生中每日能量消耗的变化，并表明从出生到九十岁，新陈代谢实际上有四个不同的阶段。生命的重要阶段，如青春期、孕期和更年期，以及性别和中年衰老，并不像以前认为的那样影响新陈代谢。这些发现将帮助科学家们更好地了解有关代谢健康的重要问题，以及如何帮助人们在每个生命阶段过上更健康的生活。

155. 另一篇发表在《当代生物学》上的文章<sup>17</sup> 重点讨论了体育活动对能量平衡的影响，并表明增加体育活动并不会导致像以前认为的那样高的总能量消耗。这是由于补偿，即更多的运动导致基础代谢的降低。此外，肥胖或严重肥胖的人可能比瘦人更难通过体育活动燃烧脂肪。这些新发现也对抗击超重和肥胖的公共卫生战略具有重要影响。

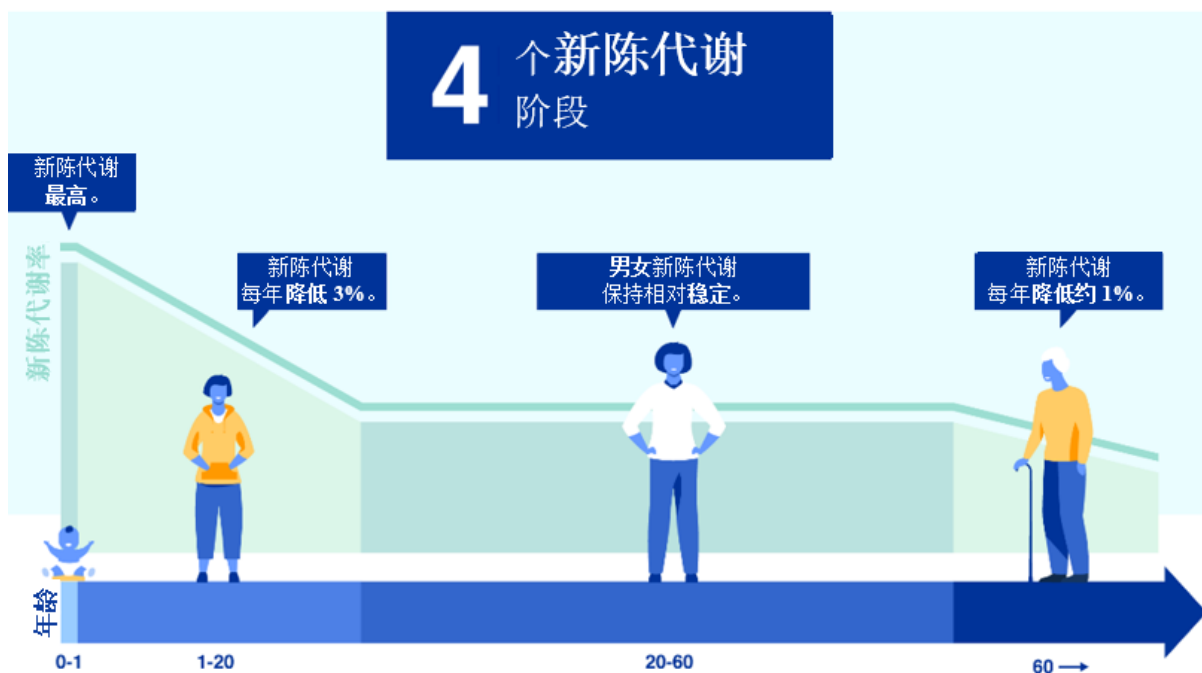


图 H.2. 发表在《科学》杂志上的这篇里程碑式的研究推翻了以前对新陈代谢的理解。

156. 正在开展更多研究和编写更多出版物，关注的问题包括：影响水周转的因素和人每日需要的清洁饮水量，环境温度和全球变暖对能量需求的影响，以及在肥胖流行病期间能量消耗是否下降等。然而，需要中低收入国家提供更多数据，以加强全球代表

<sup>16</sup> “人一生中的每日能量消耗”，《科学》第 373 卷第 6556 号，2021 年 8 月 13 日。

<sup>17</sup> “人体能量补偿与肥胖”，《当代生物学》第 31 卷第 20 期，2021 年 10 月 25 日。

性，并使决策者能够获得证据，以确定基本营养行动的优先次序和应对肥胖流行病。原子能机构将支持一项新的协调研究项目，以从中低收入国家收集更多的能量消耗数据，并确保原子能机构的双标记水数据库持续增长和代表所有成员国。

## I. 放射性同位素和辐射技术

### I.1. 生产医用放射性同位素的新途径

#### 状况

157. 放射性同位素和放射性药物用于癌症和其他慢性病的诊断和治疗，可以挽救生命。确保关键放射性同位素的持续供应至关重要。医用放射性同位素，如钼-99/锝-99m、氟-18、镓-68、碘-131 和镱-177，目前在研究堆和回旋加速器中通过用中子或质子等高能粒子轰击靶材引起的核反应的方式进行生产。在 2007 年至 2010 年期间钼-99 供应中断以及 2019 冠状病毒病大流行期间配送中断之后，研究人员和生产商正在开发生产医用放射性同位素的替代方法。在加拿大，回旋加速器生产的锝-99m 已获得批准，并正在进行商业化。

158. 利用直线加速器和核电厂生产钼-99 的两条新路线为加强和赋能世界上最常用的医用放射性同位素的全球供应链开辟了广阔的前景。全球还在努力通过光动力学 ( $\gamma$ , n) 反应生产用于创新和有效治疗剂的医用放射性同位素，特别是生产铷-225 和铜-67。

159. 回旋加速器之外的加速器技术可用于生产医用放射性同位素（图 I.1）。在直线加速器中照射的靶会发生 ( $\gamma$ , n) 反应，并能够生产多种医用同位素，如钼-99、铷-225、钴-67 和钷-47。原子能机构正在编写的一份出版物将涵盖该过程的所有阶段。

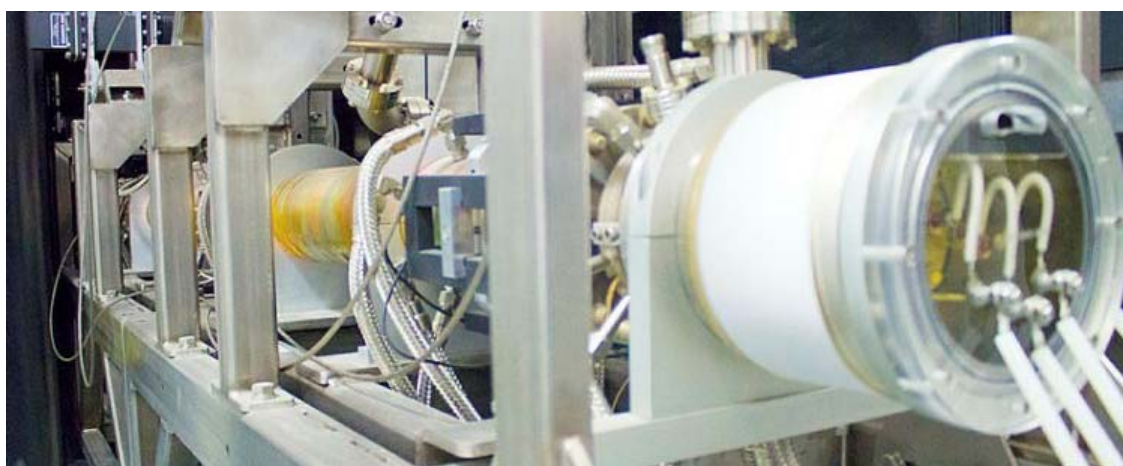


图 I.1. 加拿大同位素创新公司的直线加速器视图。  
(照片来源：加拿大国家光源)

## 趋势

160. 通过这种光动力学反应也可以生产铜-67 和镓-225 放射性同位素。铜-67 由于其半衰期中等、其  $\beta$  粒子发射可用于治疗、其  $\gamma$  射线发射可用于诊断成像，因此吸引了许多研究人员和科学家开发诊疗性放射性药物，特别是基于单克隆抗体的药物。在美国和澳大利亚，最近基于光动力学 ( $\gamma, n$ ) 反应的研究已成功生产出高质量的铜-67，用于放射性药物的生产和临床试验应用。

161. 核素镓-225 对于癌症患者的靶向  $\alpha$  治疗也有很有意义。关于生产镓-225 的新光动力学路线的报告<sup>18</sup> 表明，与其他路线相比，生成的产品杂质更少，数量更多。这是一个重要的结果，有望帮助满足全球对镓-225 日益增长的需求。原子能机构的一个新的协调研究项目将着重于镓系放射性药物的生产和质量控制。

162. 反应堆中的放射性同位素生产基于靶材中的中子俘获反应。通常情况下，研究堆被用来生产核医学治疗应用所需的放射性同位素。在核电厂辐照靶是生产一些放射性同位素（如用于工业和近距离治疗的钴-60）的通常途径。2021 年，监管机构批准一座商用坎杜型核电厂生产钼-99（图 I.2）。正在探索一种类似的方案，用于在核电厂生产其他重要的短寿命医用放射性同位素，包括镭-177 和钷-166。这一发展也可能为设计者考虑具有放射性同位素生产能力的动力堆提供新的视野。



图 I.2. 2021 年，加拿大核安全委员会批准达灵顿核电厂生产拯救生命的医用放射性同位素钼-99。（照片来源：安大略电力公司）

<sup>18</sup> “用电子加速器生产镓-225”，《应用物理学杂志》第 129 期，104901（2021）。

163. 这些应用目前仅限于少数几个国家，其更广泛的采用可能会在未来带来医用放射性同位素生产范式的转变。

## J. 人工智能促进核科学和应用

### 状况

164. 人工智能是指组合数字数据、处理算法以及不断提高计算能力以开发出能够以类似于人类逻辑和推理的方式处理复杂问题的系统的技术集合。人工智能技术可以分析大量数据，以学习和评估如何完成特定任务，这种技术称为机器学习。

165. 人工智能正在以指数级速度发展，已经能够对各种来源的海量数据进行分类和解释，以执行广泛的任務，并帮助应对世界上许多最紧迫的挑战。从核医学到水资源管理，再到核科学和核工业，它在加速许多核领域的技术发展方面具有巨大潜力。例如，人工智能识别数据模式和分析来自卫星、无人机或医疗扫描仪的高分辨率图像的能力可以改善对人道主义紧急情况反应，检测标志着干旱或洪涝的全球水文气候变化，监测和优化农业生产力，跟踪动物和海洋迁移，以及帮助医学专业人员识别和治疗癌症和其他疾病。

166. 同位素科学与人工智能相结合，为从小的同位素变化中提取新信息提供了一个可解释的框架，在同位素水文学、生态学、法证学和食品安全等众多领域提供了巨大的潜力。专家们已经应用基于人工智能的方案来快速分析存储在全球网络（如由原子能机构和世界气象组织维护的全球降水同位素网）中的大量水相关同位素数据。利用人工智能促进对这些数据的有效和高效分析，有助于科学家了解气候变化以及气候变化和人口增长对全球水资源可用性的影响。

167. 在核聚变和核科学研究中，机器学习通过最大限度地提高从实验数据和模拟数据中提取的信息数量和适用性，能够优化持续、安全和高效的设施运行所需的实验规划和实时控制解决方案。

168. 人工智能还可能有助于抗癌，同时有助于降低相关成本。基于人工智能的方案被用于通过改进图像解释和精确描述肿瘤轮廓来支持癌症诊断和治疗，从而使得能够制定准确的治疗计划以及开展适应性放射治疗，即适应个体患者体内解剖变异的放射治疗过程。机器学习在为预测个体病程和治疗反应而进行的医学成像方面发挥着越来越重要的作用。人工智能还将在原子能机构的“人畜共患疾病综合行动”倡议中发挥重要作用，有助于专家预测、识别、评估和遏制未来的人畜共患疾病爆发。

### 趋势

169. 加强人工智能在核科学和应用中的使用需要跨学科共同努力，包括信息管护和共享，以及透明的开发活动，以协调和支持来自广泛领域的研究人员之间的协作。

170. 人工智能技术需要强有力的国际伙伴关系和跨领域合作，以制定监管、伦理问题、教育和培训方面的导则，以及分享经验、知识和良好实践。其中包括人工智能的应用需要具有包容性、公正性和公平性，以惠及整个社会。这对人工智能应用于旨在为后世实现公平可持续发展的核技术尤为重要。

171. 原子能机构认识到人工智能带来的好处和机遇，以及它面临的挑战，包括对透明度、信任、安全和道德准则的关切，正在寻求公开对话和合作，以促进人工智能在核科学和技术方面的应用，从而更好地支持其成员国和平利用核技术。

172. 由国际电信联盟（国际电联）和联合国系统中包括原子能机构在内的 38 个组织组织的“人工智能造福人类”运动，是一个全年运行的数字平台，旨在确定人工智能的应用，以加速实现“可持续发展目标”（图 J.1）。原子能机构于 2021 年 11 月在“人工智能造福人类”范围内举办的两次网络研讨会，以及 2021 年 10 月举行的具有开创性的人工智能促进核技术和应用技术会议，为讨论、确定和促进核科学、核技术和核应用提供了一个跨领域国际论坛。



图 J.1. “人工智能造福人类”平台汇集了联合国系统的 38 个组织。  
(照片来源：国际电联)

173. 这些活动强调了数据库开发和数据可访问性如何才能成为人工智能应用的真正推动因素。它们强调必须在可行的情况下建立集中式和联合式存储库，用于收集精心策划的数据，以实现人工智能和机器学习的应用；促进联邦学习（移动模型而不是数据），进行逐个数据库的模型训练，以及建立文献库，收集人工智能和机器学习所需的核技术和应用方面的参考资料。

174. 原子能机构寻求通过建立“人工智能用于原子”知识共享平台、支持监管和培训以及促进道德准则指导，为核科学和应用领域的持续人工智能创新奠定基础。

## 附 件

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力堆<sup>a</sup>

国 家	在运反应堆		在建反应堆		2021 年供应 的核电量		截至 2021 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	1641	1	25	10.2	7.2	94	2
亚美尼亚	1	448			1.9	25.3	47	8
孟加拉国			2	2160	NA	NA		
白俄罗斯	1	1110	1	1110	5.4	14.1	1	2
比利时	7	5942			48.0	50.8	317	7
巴西	2	1884	1	1340	13.9	2.4	61	3
保加利亚	2	2006			15.8	34.6	171	3
加拿大	19	13 624			86.6	14.3	807	6
中国	53	50 034	16	15 967	383.2	5.0	470	0
捷克共和国	6	3934			29.0	36.6	182	10
芬兰	4	2794	1	1600	22.6	32.8	171	4
法国	56	61 370	1	1630	363.4	69.0	2393	0
德国	3	4055			65.4	11.9	830	11
匈牙利	4	1916			15.1	46.8	146	2
印度	22	6795	8	6028	39.8	3.2	554	9
伊朗伊斯兰共和国	1	915	1	974	3.2	1.0	10	4
日本	33	31 679	2	2653	61.3	7.2	1965	6
大韩民国	24	23 091	4	5360	150.5	28.0	620	2
墨西哥	2	1552			11.6	5.3	59	11
荷兰	1	482			3.6	3.1	77	0
巴基斯坦	5	2242	1	1014	15.8	10.6	92	11
罗马尼亚	2	1300			10.4	18.5	39	11
俄罗斯联邦	37	27 727	4	3759	208.4	20.0	1410	7
斯洛伐克	4	1868	2	880	14.6	52.3	180	7
斯洛文尼亚	1	688			5.4	36.9	40	3
南非	2	1854			12.2	6.0	74	3
西班牙	7	7121			54.2	20.8	357	1
瑞典	6	6882			51.4	30.8	480	0
瑞士	4	2960			18.6	28.8	232	11
土耳其			3	3342	NA	NA	NA	NA
乌克兰	15	13 107	2	2070	81.1	55.0	548	6
阿拉伯联合酋长国	2	2762	2	2690	10.1	1.3	1	9
英国	12	7343	2	3260	41.8	14.8	1648	6
美利坚合众国	93	95 523	2	2234	771.6	19.6	4694	4
<b>总计<sup>b, c</sup></b>	<b>437</b>	<b>389 508</b>	<b>56</b>	<b>58 096</b>	<b>2653.1</b>	<b>NA</b>	<b>19 170</b>	<b>9</b>

说明：NA：不适用。

<sup>a</sup> 资料来源：原子能机构动力堆信息系统（www.iaea.org/pris），截至 2022 年 5 月 31 日。

<sup>b</sup> 总计中包括中国台湾的以下数据：三台 2859 兆瓦（电）在运机组和 26.8 太瓦时供电量，占总体电力结构的 10.8%。

<sup>c</sup> 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（236 年零 8 个月）的已关闭和在运核电厂。

**表 D-1. 世界各地研究堆的常见应用<sup>19</sup>**

应用类型 <sup>a</sup>	所涉研究堆数量 <sup>b</sup>	拥有这类设施的成员国数量
教学/培训	162	50
中子活化分析	117	49
放射性同位素生产	83	41
中子射线照相	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	11
核数据测量	14	7
其他 <sup>c</sup>	118	34

<sup>a</sup> 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。

<sup>b</sup> 来自所考虑的 235 座研究堆（截至 2021 年 12 月，220 座在运，15 座临时关闭）。

<sup>c</sup> 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。

---

<sup>19</sup> 截至 2021 年 12 月状况。



## 简称表

AI	人工智能
AMR	抗菌素耐药性
AMS	加速器质谱测定法
ASN	核安全管理局（法国）
ATF	先进技术燃料
BioPAN	路径分析用生物信息学方法
COP26	《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第 26 届会议 （“气候公约”缔约方大会第 26 届会议）（2021 年）
COP27	《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第 27 届会议 （“气候公约”缔约方大会第 27 届会议）（2022 年）
COVID-19	2019 冠状病毒病
DGR	深部地质处置库
DLW	双标记水
DSRS	弃用密封放射源
DTT	分流器托卡马克试验设施
EDF	法国电力公司
ESS	欧洲散裂源
EXPOSE	第一利用阶段外装有效载荷
EURECA	欧洲可回收运载器
FAO	联合国粮食及农业组织（粮农组织）
FEPC	日本电力公司联合会
GURC	通用用户要求和标准
GW(e)	吉瓦（电）
GW·h	吉瓦·小时
HALEU	高丰度低浓铀
HEU	高浓铀
HTR	高温堆
HTTR	高温工程试验堆
INIR	综合核基础结构评审
iPWR	一体化压水堆
ISF	临时贮存设施
ISS	国际空间站
ITU	国际电讯联盟（国际电联）
IWP	综合工作计划
JMTR	日本材料试验堆
LDEF	长时间照射设施
JEM	日本实验模块

LEU	低浓铀
LTO	长期运行
LWR	轻水堆
MOX	混合氧化物燃料
MW(e)	兆瓦（电）
MW(th)	兆瓦（热）
NDA	核退役管理局
NDC	国家自主贡献
NNL	国家核实验室（英国）
NORM	天然存在的放射性物质
NPM	纽斯凯尔动力模块
NPP	核电厂
NPPA	核电厂管理局（埃及）
NRC	核管理委员会(美国)
NUTEC Plastics	核技术用于控制塑料污染
O/OREOS	生物体/有机物暴露于轨道应力
PCR	消费后回收
PET	正电子发射断层照相法
PHWR	加压重水堆
PWR	压水堆
R&D	研究与发展（研发）
rPE/rPP	再生聚乙烯和再生聚丙烯
SCWR	超临界水冷堆
SDA	标准设计批准
SESLO	活生物体空间环境生存能力
SFR	钠冷快堆
SMART	系统一体化模块式先进反应堆
SMR	中小型反应堆或模块堆
SNF	乏核燃料
STEP	能源生产用球形托卡马克
TEE	总能量支出
t HM	重金属吨
UKAEA	英国原子能管理局
UNFCCC	联合国气候变化框架公约（气候公约）
URF	地下研究设施
WCR	水冷堆
XRF	X 射线荧光
ZODIAC	人畜共患疾病综合行动





**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