2021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(65)/INF/2

2021 年核技术评论

总干事的报告

GC(65)/INF/2

国际原子能机构在奥地利印制
2021 年 9 月
IAEA/NTR/2021

目录

前言 5

正文摘要 7

A. 核动力 10

A.1. 核电预测 10
A.2. 在运核电厂 11
A.3. 新的或扩大的核电计划 14
A.4. 核电技术发展 18
A.4.1. 先进水冷堆 18
A.4.2. 中小型反应堆或模块堆及微型反应堆 19
A.4.3. 快中子系统 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 27

B. 核燃料循环 30

B.1. 前端 30
B.2. 后端 34

C. 退役、环境治理和放射性废物管理 35

C.1. 退役 35
C.2. 环境治理 38
C.3. 放射性废物管理 39

D. 研究堆和粒子加速器 43

D.1. 研究堆 43
D.2. 粒子加速器和仪器仪表 47

E. 粮食和农业 50

E.1. 测量食品中残留物用放射性标记方法和创新核技术 — 满足公众健康和贸易需求 50

F. 人体健康 52

F.1. 微剂量学和纳米剂量学方面的进步 52

G. 放射性同位素和辐射技术 54

G.1. 放射性药物在传染病检测、诊断和管理中的作用 54

H. 环境 56

H.1. 利用核技术及核衍生技术增进对全球蓝碳的了解和应对气候变化影响 56

附件 60

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”。

- 《2021 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；粮食和农业核技术；人体健康；放射性同位素和辐射技术；以及环境。

- 草案版本已以 GOV/2021/2 号文件提交 2021 年 3 月理事会会议。最后版本将根据理事会的讨论结果以及从成员国收到的意见编写。

正 文 摘 要

1. 原子能机构 2020 年的预测与上一年的预测基本一致。在高值预测中，预计到 2050 年，全球核发电容量将增加 82%，达到 715 吉瓦（电），相当于全球发电量的 11%，2019 年的这一数值约为 10%。低值预测减少了 7%，降至 363 吉瓦（电），占全球发电量的 6%。

2. 2020 年底，全球核电总装机容量为 392.6 吉瓦（电），由 32 个国家的 442 座在运核动力堆生产。通过采取有效措施，核部门适应了关于冠状病毒病（2019 冠状病毒病）大流行的国家准则。2020 年初大流行开始时，原子能机构就建立了“核电厂 2019 冠状病毒病期间运行经验网”，以有助于共享关于为减轻大流行及其对核电厂运行的影响而采取的措施的信息。32 个有在运核电厂的国家中，无一国报告大流行对核电厂安全可靠运行造成了任何影响。

3. 作为一种清洁、可靠、可持续和现代的能源，在满足世界日益增长的能源需求和支持可持续发展和 2019 冠状病毒病大流行后恢复的同时，核电可为减少全球温室气体排放做出重要贡献。2020 年，核电提供了 2553.2 太瓦·小时电力 — 占世界低碳发电量的近三分之一。人们普遍认识到，为了应对清洁能源转型的挑战，核电必须发挥重要作用。

4. 约 5.5 吉瓦（电）的新核电容量并入电网，其来源是白俄罗斯、中国、俄罗斯联邦和阿拉伯联合酋长国的五座新压水堆。白俄罗斯启动白俄罗斯 1 号机组和阿联酋启动巴拉卡 1 号机组标志着两国首次实现核能发电。

5. 为实现近期部署而在全球范围内开展的中小型反应堆或模块堆技术发展活动取得了切实进展。在俄罗斯联邦，世界上第一座先进小型模块堆、唯一一座浮动核电厂罗蒙诺索夫院士号开始商业运行。有 70 多个主要技术路线的小型模块堆设计正处于开发阶段，可用于世界范围内的各种应用。

6. 正在为全球特别是北美和欧洲越来越多的核动力堆制定长期运行和老化管理计划。在美利坚合众国，桃花谷 2 号和 3 号核电机组的运行许可均已更新，安全可靠运行期已从 60 年延长至 80 年。

7. 共有 27 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，全球发电容量估计将增加 26 吉瓦（电）。

8. 在历经十多年的复杂建造阶段之后，国际热核实验堆已开始组装和集成，为此，核聚变界举行了庆祝活动。国际热核实验堆一旦投入运行，便将为开发和设计未来可用于能源生产的聚变反应堆提供大量科学和技术依据。

9. 由于 2019 冠状病毒病全球大流行，几个主要铀生产国或暂停铀生产业务，或大幅减产。总体而言，2020 年一次铀供应量较低，从而给旨在满足对作为核燃料的铀的需求的二次铀供应造成了较大的压力。

10. 在 2019 冠状病毒病大流行期间，为尽量减少大流行相关限制的影响，生产用于全球供应的医用放射性同位素的研究堆都宣布提供基本服务。

11. 虽然各国对中小型反应堆或模块堆有着相当大而且越来越浓厚的兴趣，但预计在今后二十年内，先进的大型水冷堆将占到新增容量的大部分。为了实现原子能机构的高值预测，在 2050 年之前，每年需要达到 16 吉瓦（电）或更高的并网率。然而，为促进新建项目，需应对大量挑战，包括降低成本和加强标准化以提高竞争力，以及与其他低碳能源一起在公平竞争的环境下获得融资。

12. 由于可变可再生能源接入电网的比例越来越大，电力生产以外的核能利用正在核能部门获得更大的吸引力。利用共计 64 座在运核动力堆为非电力应用生产了 3396.4 吉瓦·小时的电热当量：56 座反应堆支持地区供热和工艺热应用，八座支持海水淡化。除了在运输、工业和住宅部门等最终用户部门方面的作用外，核能热电联产正越来越多地被视为论证反对某些非赢利核电厂提前退役的经济理由的契机。对利用低温水冷堆进行核氢生产的兴趣预计将持续到商业阶段。

13. 观察到在高放废物和申报为废物的乏燃料所需的深部地质处置设施方面取得了重大进展。芬兰辐射和核安全管理局宣布，芬兰打算在 21 世纪 20 年代中期开始乏核燃料的最终处置。在瑞典，东哈马尔市议会对在福什马克建立乏核燃料处置库的计划投了赞成票。

14. 虽然推迟拆除在过去几十年里一直是设施业主采取的主要退役策略，但立即拆除方案一直都受到青睐。由于希望减少退役费用的不确定性，开始最终拆除退役电厂的时间表正越来越多地被提前。

15. 全球各国对研究堆的兴趣继续增加。许多国家利用各种机会接触现有研究堆，包括通过促进能力建设的原子能机构地区研究堆短训班，以及通过由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心机制。2020 年，新指定了罗马尼亚皮特什蒂核研究所，法国可替代能源和原子能委员会则被重新指定为由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心，为期五年。

16. 在粮食生产过程中，兽药和杀虫剂等化学品被用来预防和治疗动植物病虫害。这些化学物质在食品中的残留可能会引起公众健康和贸易方面的关切，并因此受到通过规定食品中所允许最高残留浓度的方式进行的监管。放射性标记化合物起着至关重要的作用，因为它们允许追踪和研究各种组织中的所有化学残留物。这些研究对制定可接受的标准至关重要。随着越来越多地生产新的药物和化学品，利用创新且具成本效益的分析技术对其进行监管的需求也一直在上升。

17. 微剂量学是辐射物理学的一个分支，涉及对被辐照物质内部微观结构中所吸收能量的空间分布的系统研究。尽管起源于 60 多年前，但微剂量学仍吸引着人们对辐射医学、辐射防护、辐射生物学和其他领域如空间研究方面的科学兴趣。在放射医学领域，微剂量学与离子束治疗特别相关，离子束治疗是一种先进的技术，它使用质子和碳离子束以消除许多肿瘤，从而最大限度地减少对健康组织的损伤。

18. 传染性疾病威胁着人类。各科学学科正在集中力量通过使用放射性药物的先进技术更好地了解此类疾病。用微生物特异性单克隆抗体制备的新型放射性药物正处于对细胞和生化过程进行非侵入性可视化正变得可行的阶段，从而改善了传染病的诊断和潜在治疗方案。

19. 19 世纪末以来，大气中的二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体迅速增加，导致全球变暖。海洋和沿海植被生态系统具有显著的有机碳固持潜力，因为它们可以从大气中捕获和储存二氧化碳，从而降低全球变暖速度。海洋捕获和储存的有机碳被称为蓝碳。核技术和核衍生技术有助于评估碳酸盐和大型海藻在蓝碳循环中的作用，确定碳的来源，了解影响蓝碳生态系统中固碳的因素及其相应预算，以及可促进蓝碳战略的管理行动。

A. 核动力

A.1. 核电预测

状况

1. 原子能机构 2020 年的预测[1]与上一年的预测基本一致。根据低值估计，到 2050 年，全球核发电容量将减少 7%，降至 363 吉瓦（电）[2]，占全球发电量的 6%，而 2019 年的这一数值约为 10%。高值预测则将增加 82%，达到 715 吉瓦（电），相当于全球发电量的 11%。

2. 为实现高值预测，既需要现有核动力堆群的广泛长期运行（通常运行超过 40 年），也需要作出重大努力，在三十年内新增约 500 吉瓦（电）的容量。这就要求在 2050 年之前，每年并网 16 吉瓦（电）以上的新容量 — 相比 2010 至 2019 年的平均并网率增加近三倍。这一速度尽管雄心勃勃，但仍然只是 20 世纪 80 年代中期达到的年并网率超过 30 吉瓦（电）这一创记录速度的一半。

趋势

3. 对中小型反应堆或模块堆有着相当大而且越来越浓厚的兴趣，特别是在偏远地区或电网较小的国家，但预计在今后三十年内，先进大型水冷堆将占到新增容量的大部分，以快速增加低碳能源容量以应对气候变化。核部门在这方面面临着大量挑战，包括降低成本和加强标准化以提高竞争力，以及与其他低碳能源一起在公平竞争的环境下获得融资。

---

[1] 国际原子能机构，《到 2050 年的能源、电力和核电预测》，《参考数据丛书》第 1 号，国际原子能机构，维也纳（2020 年）。

[2] 1 吉瓦（电）相当于 10 亿瓦（电）。

4. 将需要在认识到核电对有韧性且可靠的低碳电力系统[3]的贡献的同时提供强有力的政策支持。促进核能包括通过生产清洁氢气为其他能源部门的脱碳做出贡献的机会，也可能使核电成为一种对投资者更具吸引力的选择。

A.2. 在运核电厂

状况

5. 2020 年底，全球核电总装机容量为 392.6 吉瓦（电）[4]，由 32 个国家的 442 座在运核动力堆生产（附件表 A-1）。各国通过采取有效措施，展示了对冠状病毒病（2019 冠状病毒病）大流行的适应能力，体现了强大的组织文化。在 2020 年初大流行开始时，原子能机构就建立了“核电厂 2019 冠状病毒病期间运行经验网”，以共享关于为减轻大流行及其对核电厂运行的影响而采取的措施的信息。32 个有在运核电厂的国家中，无一国报告大流行引发了影响核电厂安全可靠运行的运行事件。

[3] 由于核电的存在，每年可避免约 20 亿吨的二氧化碳。

[4] 截至 2021 年 6 月 1 日向原子能机构动力堆信息系统报告的所有核动力堆数据。

6. 作为一种清洁、可靠、可持续和现代的能源，在满足世界日益增长的能源需求和支持可持续发展和 2019 冠状病毒病大流行后恢复的同时，核电可为减少全球温室气体排放做出重要贡献。2020 年，核电提供了 2553.2 太瓦·小时的无温室气体排放电力 —约占全球总发电量的 10%和世界低碳发电量的近三分之一。

7. 约 5.5 吉瓦（电）的新核电容量并入电网，它们来自五座新的压水堆：白俄罗斯白俄罗斯 1 号机组 1110 兆瓦（电）、中国田湾 5 号机组 1000 兆瓦（电）和福清 5 号机组 1000 兆瓦（电）、俄罗斯联邦列宁格勒二期 2 号机组 1066 兆瓦（电）、阿拉伯联合酋长国巴拉卡 1 号机组 1345 兆瓦（电）。白俄罗斯启动白俄罗斯 1 号机组和阿拉伯联合酋长国启动巴拉卡 1 号机组标志着两国首次实现核能发电。

2020 年并网情况

巴拉卡 1 号机组

1345 兆瓦（电）

白俄罗斯 1 号机组

1110 兆瓦（电）

列宁格勒二期 2 号机组

1066 兆瓦（电）

福清 5 号机组

1000 兆瓦（电）

田湾 5 号机组

1000 兆瓦（电）

白俄罗斯 1 号机组

类型 压水堆	型号 VVER V-491
净容量 1110 兆瓦（电）	开工建设 2013 年 11 月 8 日
首次临界 2020 年 10 月 11 日	首次并网 2020 年 11 月 3 日
综合核基础结构评审第一和第二阶段工作组访问 2012 年	综合核基础结构评审第三阶段工作组访问 2020 年

巴拉卡 1 号机组

类型 **压水堆**	型号 **APR-1400**
净容量 **1345 兆瓦（电）**	开工建设 **2012 年 7 月 19 日**
首次临界 **2020 年 7 月 31 日**	首次并网 **2020 年 8 月 19 日**
综合核基础结构评审第二阶段工作组访问 **2011 年**	综合核基础结构评审第三阶段工作组访问 **2018 年**

8. 2020 年，世界上第一座先进小型模块堆、唯一一座浮动核电厂罗蒙诺索夫院士号开始商业运行。它位于俄罗斯联邦，临近北极海岸，有两台 35 兆瓦（电）的 KLT-40S 小型模块堆机组。

9. 在运核电装机容量中，约有 89.5%是轻水慢化冷却堆类型；6%是重水慢化冷却堆类型；2%是轻水冷却石墨慢化堆类型；剩余 2%是气冷堆类型。剩余 0.5%是三座液态金属冷却快堆。

10. 正在为全球特别是北美和欧洲越来越多的核动力堆制定长期运行和老化管理计划。在美利坚合众国，桃花谷 2 号和 3 号核电机组的运行许可均已更新，安全可靠运行期已从 60 年延长至 80 年。

11. 尽管有 2019 冠状病毒病大流行构成的挑战，但仍在进行各种整修和大型升级项目。例如，在此期间，加拿大完成了达灵顿 2 号机组的整修，比利时完成了多伊尔 1 号和 2 号机组控制和应急系统的现代化。在美利坚合众国，大海湾 1 号机组在按计划实施换料和维护停堆（包括设备升级和电厂汽轮机控制系统现代化）之后重返电网。

12. 这一年期间，随着六座核动力堆永久关闭，有 5.2 吉瓦（电）的核电容量退役：法国费斯内姆 1 号机组（一座 880 兆瓦（电）压水堆）和费斯内姆 2 号机组（一座 880 兆瓦（电）压水堆）、俄罗斯联邦列宁格勒-2 号机组（一座 925 兆瓦（电）轻水石墨反应堆）以及美利坚合众国杜安·阿诺德-1 号机组（一座 601 兆瓦（电）沸水反应堆）和印第安角 2 号机组（一座 998 兆瓦（电）压水堆）。瑞典的灵哈尔斯 1 号机组（881 兆瓦（电）沸水堆）在服役超过 46 年后，于 2020 年的最后一天被关闭。

趋势

13. 总体而言，在过去十年间，核电装机容量呈现出逐步增长的趋势，其中包括通过新建反应堆或对现有反应堆进行升级改造而增加的约 23.7 吉瓦（电）的新容量。核电生产呈现持续增长态势，自 2011 年以来，已扩大 6%以上。

14. 长期运行不仅对于向低碳电力系统过渡和实现净零碳目标至关重要，而且还使得有时间建立包括新核电厂在内的新的低碳发电能力。此外，现有核电厂还是最廉价的安全可靠低碳电力来源；然而，在过去十年间，部分反应堆被关闭，另有一些很可能会因为经济原因而在短期内关闭，尽管营运者已获许延长运行。美利坚合众国的情况尤其如此。在过去十年中，由于无法与低成本的页岩气或有补贴的可再生能源竞争，约有十座反应堆因经济原因关闭。该国一些地方已引入零排放信用等市场机制，评估核电对电力结构脱碳的贡献，并使现有电厂继续运行。在世界其他地区，适当的政策决定可能是允许现有反应堆长期运行的关键。

15. 此外，一些不确定因素仍与核电工业供应链联系在一起。短期内被视为非必要的产业的关闭将对全球核反应堆中长期供应的连续性产生未知影响。现有供应链正面临着可能会影响到进行中的业务、项目和停堆规划的多种挑战。不过，在新加入国，新的供应链正在显现，这可能会给该领域带来新的参与者。

A.3. 新的或扩大的核电计划

状况

16. 近年来，在建核电装机容量基本保持不变，2020 年，新建项目的增速有所放缓。亚洲地区的核电容量继续稳步扩大，2005 年以来，有来自 64 座反应堆共计 58.5 吉瓦（电）的在运容量并入电网。

17. 32 个使用核电的国家当中，有 19 个国家制定了扩大核电容量的项目，其中，白俄罗斯和阿拉伯联合酋长国已于 2020 年将其第一座核动力堆并网。这些项目包含了 52 座新反应堆，容量共计 54.4 吉瓦（电）。

18. 2019 冠状病毒病导致的旅行限制和边境关闭阻碍了承包商支持新建项目的能力。这使得远程和混合核查的使用更为广泛。在大流行期间，一些国家监管机构或是采用创新方法，或是根据监管视察的安全重要性调整其范围。

19. 表示有兴趣引入核电的 50 个成员国中，有 23 个国家处于决策前阶段，并开展了能源规划活动。另外 27 个国家正在寻求引入核电：

- 17 个处于决策阶段，即正在考虑核电，包括正在积极筹备基础设施但尚未作出决定的国家（阿尔及利亚、玻利维亚、智利、萨尔瓦多、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，即已经作出决定并正在建设基础设施，或是已经签署合同，正在准备或已经开始建设的国家（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）。

20. 根据上述 27 个成员国当前的国家计划，预计到 2035 年，将有 10 至 12 个新加入国引入核电，将使由 32 个当前在运成员国组成的群组增员约 30%。到 2035 年，这些新加入国的新增发电容量估计约为 26 吉瓦（电）。

根据当前27个成员国的国家计划

10-12个新加入国将在

2035

年前生产核电，将使由32个当前在运成员国组成的群组增员约30%

这些新加入国的新增发电容量估计约为26吉瓦（电）

21. 2020 年，由于 2019 冠状病毒病大流行造成的限制，只有白俄罗斯接待了一次综合核基础结构评审工作组访问（第三阶段工作组访问）。应相关国家政府的请求，已规划的其他工作组访问已被推迟到 2021 年进行：肯尼亚（第一阶段后续工作组访问）、斯里兰卡（第一阶段工作组访问）、乌干达（第一阶段工作组访问）和乌兹别克斯坦（第二阶段工作组访问）。此外，15 个成员国制定了积极的综合工作计划。一些成员国得以在 2019 冠状病毒病旅行限制实施之前进行了综合工作计划年度审查，其余综合工作计划则是通过虚拟会议接受审查。

22. 在孟加拉国，卢普尔核电厂的主要设备物项已经交付，反应堆压力容器于 2020 年初锻造并测试，计划于 2023 年进行调试。2020 年，土耳其阿库尤核电厂两台机组的建造工作仍在继续进行。1 号机组的反应堆压力容器已从制造厂运出，四台蒸汽发生器已交付现场。预计将于 2023 年对第一台机组进行调试。在埃及，代巴四机组核电厂的场址许可已签发，建造工程的场址准备工作正在继续。第一台机组的建造预计将于 2021 年下半年开始，但须经监管部门批准。

23. 沙特阿拉伯预计将于 2021 年底启动核电厂首批两台 1000－1600 兆瓦（电）大型机组的招标工作，于 2024 年选定核电厂的技术供应商，并计划于 2036 年对首台机组进行调试。

24. 波兰决定利用大型压水堆技术建造总装机容量为 6.0－9.0 吉瓦（电）的核电厂。第一座核电厂的建造工作计划于 2026 年启动，并将于 2033 年投入运行。

25. 约旦正循着两条平行道路，利用中小型反应堆或模块堆及大型核电厂发展核电计划（1000 兆瓦（电），基于建造-运行-转让/建造-拥有-运行-转让的模式），并优先考虑中小型反应堆或模块堆。预计将于 2026 年浇注第一罐混凝土，并于 2031 年开始商业运行。

26. 乌兹别克斯坦计划于2022年底开始建造总装机容量为2.400吉瓦（电）的核电厂。加纳计划于2023年开始建造其第一座核电厂，并于2029年进行调试。肯尼亚成立了一个新的组织 — 核电力和能源机构，发布了一份战略性环境评估报告供公开磋商，并计划于2035年之前部署核电厂。2020年7月，菲律宾发布一项行政命令，成立了核能计划机构间委员会，以研究引进核电的可行性。斯里兰卡正式请求进行一次综合核基础结构评审工作组访问。

趋势

27. 无论是在已使用核电国家还是在新加入国，新建项目都面临着两个经济方面的挑战：核电相对于替代能源技术的竞争力，以及如何获得资金以支付核电项目所需的投资。

28. 由于过去十年间的新建项目相对较少，核部门尚未享受到其部署受到大量政策和财政支持推动的可再生能源技术所历经的那种大幅成本削减。从平准化成本的角度看，这已影响到核电的竞争力。不过，越来越明确的是，技术成本还应当包含未来并入电力系统的成本，包括电网成本，以及后备或能量贮存成本。在系统层面，核电可与可再生能源和贮存解决方案相媲美。此外，核工业界发现，有可能通过简化设计、加强标准化、改善供应链监督和充分利用从首创项目中汲取的经验教训降低建造成本。

29. 第二项挑战涉及筹资渠道。从本质上讲，新建核项目属资本密集型项目，很少有电力公司能以自身资产为项目提供资金。政策支持可以减少项目开发商在建造或运行期间的风险，从而有助于从多方面确保融资，以在不确定的市场环境下获得收入，例如通过购电协议。（在购电协议中，购电方要么同意以涵盖项目全部成本加一定利润的固定价格获取合同电量，要么支付罚金。）

30. 若干新加入国，包括爱沙尼亚、加纳、约旦、肯尼亚、沙特阿拉伯和苏丹，已将小型模块堆设计纳入其技术评估。相比大型反应堆，中小型反应堆或模块堆可能有些优势，例如前期资本费用较低、适用于较小型电网及模块扩展的可能性。中小型反应堆或模块堆在未来十年左右成功部署可能鼓励更多启动核电国家对其加以考虑。

A.4. 核电技术发展

A.4.1. 先进水冷堆

状况

31. 水冷堆自诞生以来，在商用核工业领域发挥了重要作用，世界上绝大多数的在建核反应堆都是采用轻水冷却。

32. 一些国家还在越来越多地考虑、研究和实施先进水冷堆，以逐步部署先进和更高效的燃料循环，而无论是部分闭合还是全闭合。若干成员国正在进行超临界水冷堆的

研发。加拿大超临界水冷堆即重水慢化压力管式反应堆和中国超临界水冷堆 CSR1000 已完成概念设计。欧洲创造了高性能轻水堆的概念，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。俄罗斯联邦正在对具有超临界水冷却剂参数的革新型水冷水慢化动力堆进行概念研究，其中包括采用快谱堆芯的可能性。

趋势

33. 大多数先进水冷堆已增加功率输出，近期建造的项目中，每台机组的功率从 1000 兆瓦（电）到 1700 兆瓦（电）不等，而且，在大型渐进型水冷堆的设计阶段，已将进一步增加功率作为一项目标。建有相同或不同类型反应堆的多机组厂址成为明显趋势，这突出了商用核反应堆的规模经济。考虑建设核电厂的新加入国设想的第一批反应堆是先进水冷型反应堆。

A.4.2. 中小型反应堆或模块堆及微型反应堆

状况

34. 到 2020 年底，至少有 16 个成员国制定了积极的中小型反应堆或模块堆设计和技术开发国家计划，其中大多数是作为国际协作的一部分实施的。全球为实现近期部署开展的中小型反应堆或模块堆技术发展活动取得了切实进展。在运行小型模块堆技术方面达到了几个重大里程碑。[5]

35. 在俄罗斯联邦，拥有两台 KLT-40S 机组的罗蒙诺索夫院士号浮动核电厂在并网发电六个月后，于 2020 年 5 月开始商业运行。有 70 多个主要技术路线小型模块堆设计正处于开发阶段，可用于世界范围内的各种应用。在中国，球床模块式高温堆（图 A-1）正在进行功能测试调试，以便于 2021 年投入运行。该反应堆将通过与蒸汽汽轮发电机系统连接的两个反应堆模块生产 210 兆瓦（电）。在阿根廷，CAREM 原型（图 A-2）已进入建造的后期阶段，目标是在 2024 年第四季度之前完成装料和进行启动调试，以生产共计 100 兆瓦（热）和 30 兆瓦（电）。CAREM 是一种一体化压水堆式小型模块堆群，在自然循环模式下运行，具有非能动安全设施。设计系采用国内技术开发，至少有 70%的部件和相关服务采购自阿根廷公司。

---

[5] 国际原子能机构，《小型模块堆技术发展的进步 — 对国际原子能机构先进反应堆信息系统的补充》，国际原子能机构，维也纳（2020 年）。

图 A-1. 中国的球床模块式高温堆开始进行系统热功能调试，以期于 2022 年开始商业运行。(照片来源：中国清华大学核能与新能源技术研究院)

图 A-2. 在阿根廷阿图查 2 号/内斯托尔 · 卡洛斯 · 基什内尔核电厂邻近的一个场址，CAREM 正处于建造的后期阶段，目标是在 2024 年之前投入运行，以期作为原型示范堆，生产 30 兆瓦（电）。
(照片来源：国家原子能委员会)

36. 中国已开始 125 兆瓦（电）ACP100（又称“玲珑一号”）— 一座按多用途小型动力堆设计的一体化压水堆 — 的场址准备。经过约五年的建造之后，预计于 2025 年之前进行启动调试，以用于发电、生产工艺热和进行海水淡化。在美利坚合众国，核管理委员会为 NuScale 电力公司 50 兆瓦（电）的小型模块堆签发了设计认证批准书，这是一座具备自然循环和完全非能动安全特性的一体化压水堆。该公司随后将 NuScale 电力公司模块的输出功率上调至 60 兆瓦（电），而后又宣布进一步上调至 77 兆瓦（电），并计划于 2022 年申请设计认证批准。NuScale 电力公司模块为单座核电厂提供的功率总增量可达 924 兆瓦（电）。第一个 NuScale 电力公司模块预计将于接下来的几年开始建造，并计划在 2030 年之前在爱达荷国家实验室开始运行。

37. 大韩民国和沙特阿拉伯联合完成了系统一体化模块式先进反应堆的项目前期工程，其结果是提出了两国共同拥有设计版权的 110 兆瓦（电）（365 兆瓦（热））一体化压水堆的初步安全分析报告。目前正在申请批准系统一体化模块式先进反应堆的设计变更，以便为了未来建造工作的目的，为详细的工程设计做好准备。日本发布了《通过 2050 年实现碳中和的绿色增长战略》，其中详细介绍了日本政府积极支持国际合作进行小型模块堆技术示范的内容。

38. 法国继续开发 NUWARD，以通过这项技术在未来十年内取代老化的燃煤发电厂。NUWARD 是一座基于压水堆的 340 兆瓦（电）小型模块堆，由两个 170 兆瓦（电）反应堆模块组成，具备强制对流和先进安全系统。同样，英国继续致力于英国小型模块堆技术开发，这是一种 450 兆瓦（电）、基于压水堆的三回路小型模块堆设计，目标是在 2030 年之前，在国内和国际上进行部署。

39. 俄罗斯联邦正在考虑建造一座 50 兆瓦（电）的 RITM-200，作为陆基小型模块堆，最初设计该一体化压水堆是为了用于核动力破冰船。

40. 加拿大中小型反应堆或模块堆路线图包含了化石和柴油发电厂的并网和离网替换的可能应用，包括在石油工业和采矿业的应用。至少有 12 个小型模块堆设计者/供应商与加拿大核安全委员会进行了合作，对拟议的反应堆概念（包括金属冷却快堆、熔盐堆、气冷堆和一体化水冷堆）进行供应商设计审查。全球第一电力公司为位于乔克河实验室的 15 兆瓦（热）气冷小型模块堆设施申请了场址准备许可证。该项目同时考虑了发电和工业过程供热。安大略电力公司最近表示，它正在选择拟在安大略省克拉灵顿的达灵顿新核项目场址部署的小型模块堆；以省级批准为条件，安大略电力公司正在考虑申请 2022 年的建造许可证。

趋势

41. 一些国家，包括加拿大、捷克共和国、日本、英国和美利坚合众国，加紧了中小型反应堆或模块堆中一个被称为微型反应堆的子集的开发活动。虽然尚未就微型模块堆的定义和功率范围达成全球共识，但有一项普遍理解，即它们将适于在偏远地区或小岛屿进行热电联供，并（或）替代柴油发电机。美国能源部场址上的一个项目正处

于核监管委员会主导的建设许可证审批流程，其中一个概念是正在由美利坚合众国一家初创企业奥克洛公司开发的 Aurora 1.5 兆瓦（电）快能谱反应堆。在加拿大，超安全核能公司的微型模块堆具有高温气冷棱柱块燃料堆堆芯，设计产量为 15 兆瓦（热）或约 5 兆瓦（电），已完成加拿大核安全委员会的供应商设计审查流程的第一阶段，并正在进行第二阶段的审查；铀浓缩公司的 U-Battery 是一座作为多用途动力堆设计、可从 10 兆瓦（热）中生产 4 兆瓦（电）的模块化高温气冷堆，打算着手进行加拿大核安全委员会的第一阶段供应商设计审查流程。

42. 随着开发活动越来越多，成员国对熔盐堆的兴趣日益增加。熔盐堆技术给予设计者极大的灵活性，产生了许多可能的概念，如热堆和快堆。熔盐堆既被设计成中小型反应堆或模块堆，也被设计成大型核电厂。一些熔盐堆开发商计划在未来十年内部署其设计。丹麦西博格技术公司开发的紧凑型熔盐堆已完成基本设计和第一阶段的监管批准。在加拿大，目前有两个熔盐堆设计正在通过加拿大核安全委员会的许可证审批前供应商设计审查流程：陆地能源公司的一体化熔盐堆（IMSR-400，195 兆瓦（电））处于加拿大核安全委员会供应商设计审查流程的第二阶段；Moltex 能源公司在加拿大和英国设计的稳定盐反应堆废物焚烧炉（SSR-W300）正在从概念设计向系统级设计过渡，并处于加拿大核安全委员会供应商设计审查流程的第一阶段。其他国家的其他几个熔盐堆概念正处于不同的开发阶段，可能会在未来几年内部署。

43. 一些国家进行了海基反应堆的开发。俄罗斯联邦为浮动动力装置开发了四种小型模块堆设计，为海底浸没式动力装置开发了一种设计，即‘SHELF’。中国至少有一种设计即 ACPR50S 可以为近海石油和天然气平台供电。接近 2020 年底时，大韩民国宣布开发 BANDI 60 — 一台基于压水堆的浮动动力装置。

44. 小型模块堆开发的共同目标是要证明，可通过系列生产的经济性降低模块建造的前期资本费用，而且设计简化和缩短建造时间可以促成负担得起的筹资计划。为协助成员国对其小型模块堆技术方面的需求和特异性有一个共同认识，原子能机构已开始制定关于小型模块堆设计和技术的通用用户要求和标准。该文件意在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和最终编制招标文件。在未来十年成功部署中小型反应堆或模块堆预计将鼓励更多启动核电国家考虑采用这类反应堆或模块堆并参与相关研发活动。

45. 原子能机构加大工作力度，向对集成了可变可再生能源、中小型反应堆或模块堆、能源存储和非电力应用的无碳混合能源系统感兴趣的成员国提供了支助。许多国家认为，中小型反应堆或模块堆，特别是输出功率低于 300 兆瓦（电）的反应堆或模块堆，可成为替代老化化石电厂的有效无碳电力来源。此外，随着间歇性可再生能源在各大洲的比例越来越高，中小型反应堆或模块堆被认为适合于与可再生能源协同提供基本负荷和灵活运行，以确保能源供应安全。

关于革新型核能系统的国际倡议

2000年确立的革新型核反应堆和燃料循环国际项目是在核能可持续性、长期战略及体制和技术创新方面开展国际合作的重要工具。

2020 年，革新型核反应堆和燃料循环国际项目发布了一套工具，通过其“分析支持用于增强核能可持续性”服务为各国提供在线燃料循环评定能力。

该项目还推出了一门新的电子学习课程，以支持全球专家使用各种工具和方法进行核能假想方案模拟、比较系统评价和绘制可持续核能路线图。革新型核反应堆和燃料循环国际项目启动了一个利用“分析支持用于增强核能可持续性”的协作项目，以创建关于特别适用于中小型反应堆或模块堆的可持续部署假想方案的案例研究。

A.4.3. 快中子系统

状况

46. 一些拥有先进核电计划的国家继续根据其国家计划开发快中子系统。在俄罗斯联邦，两座工业规模的钠冷快堆继续运行：BN-600（自 1980 年起）和先进的 BN-800（自 2016 年起）。正在设计当中的 BN-1200 反应堆将和俄罗斯的一系列钠冷快堆一样，以第四代国际论坛为革新型反应堆确立的强化安全水平为目标。印度即将完成其钠冷原型快中子增殖堆的调试。2010 年以来，中国一直在运行 20 兆瓦（电）钠冷中国实验快堆。革新型钠冷快堆 CFR-600 已于 2017 年开始建造。中国福建省霞浦县第二座 CFR-600 钠冷却型池式快中子反应堆开工建设。CFR-600 又称霞浦快堆示范项目，是中国实现闭式核燃料循环计划的一部分。法国在开发和运行钠冷快堆方面有着悠久的历史，但推迟了建造革新型原型钠冷快堆（工业示范用先进钠技术反应堆）的计划，而是把重点放在了研发计划上。作为快堆发展战略路线图的第一阶段，日本通过开展其“核能 x 创新促进（NEXIP）”计划的可行性研究，促进了包括小型模块堆在内的各种快中子堆技术之间的竞争。路线图的下一个目标是在 21 世纪中叶进行技术示范。

47. 在俄罗斯联邦，铅冷 BREST-OD-300 和铅-铋冷却小型模块堆 SVBR-100 正在进行许可证审批。欧洲联盟的一些国家正在联合开发欧洲先进铅冷示范快堆，罗马尼亚提议可将其建造在米奥文尼场址内。在英国，瑞典先进铅冷反应堆（SEALER）55 兆瓦（电）的 SEALER-英国核电厂正待英国商务、能源和产业战略部进行设计审查。

48. 2020 年，通用原子公司和法马通公司联合公布了一个新的 50 兆瓦（电）氦冷模块快堆的概念设计。欧洲联盟继续开发氦冷实验快堆 ALLEGRO。泰拉电力公司和通用日立核能公司发布了 Natrium（图 A-3）— 一种新型先进混合技术，其特点是将 345 兆瓦（电）的钠冷快堆与熔盐能源系统相结合，可用于将总输出功率提升至 500 兆瓦（电）。

图 A-3. 泰拉电力公司和通用日立核能公司开发的先进混合技术 Natrium。
（来源：泰拉电力公司）

趋势

49. 几乎所有新的快中子概念和革新型设计都是作为中小型反应堆或模块堆提出的。随着成熟钠技术的发展，新的快堆设计和快堆概念也一直在开发当中。此外，由铅和铅-铋共晶体等重液态金属冷却的快堆引起了越来越多的兴趣。另一种冷却剂氦被认为是一种可用于快中子系统的替代冷却剂。尽管快中子系统面临一些技术挑战，但其经济竞争力仍被认为是部署的主要障碍。尽管如此，这些反应堆仍有可能大幅降低放射性废物的量、毒性和寿命并从核燃料中得到更多，这些潜力加上各种新概念继续驱动着其技术发展。

A.4.4. 核动力的非电力应用

状况

50. 利用共计 64 座在运核动力堆为非电力应用生产了 3396.4 吉瓦·小时的电热当量。56 座反应堆支持地区供热和工艺热应用，八座支持海水淡化。

氢生产

51. 记录表明在核氢生产领域取得了重大进展。

52. 在核氢生产领域，一些成员国更加注重利用轻水堆的非高峰期功率进行氢生产。美国能源部与能源港、埃克西尔能源和亚利桑那公共服务三家公用事业公司签订合同，以便于 2020 年和 2021 年通过涉及若干国家实验室的项目在三个核电厂演示氢生产过程。在英国，法电能源公司正在牵头实施利用核电生产低碳氢的“希舍姆制氢”项目。

53. 中国已在核氢生产的研发方面取得进展。上海应用物理研究所完成了对性能稳定的 5 千瓦固体氧化物电解池堆的长期测试，并利用高温蒸汽电解技术建立了一个 20 千瓦的制氢厂。新目标的重点是固体氧化物电解池和堆场制造，以及 200 千瓦和兆瓦规模制氢厂示范项目，它们将与钍基熔盐堆耦合，以实现大规模制氢。

54. 加拿大的核实验室继续开发铜-氯混合热化学技术，用于核氢生产。目标是建立一个用于示范的实验室规模的集成系统，争取将其扩展为一个原型厂。日本通过碘-硫热化学水分离工艺实现了闭环自动持续制氢，速率高达约 30 升/小时，持续时间长达 150 小时，这将最终导致利用未来在高温气冷堆生产的温度超过 900 摄氏度的热制氢。已获得重要数据，以调查材料和部件的性能和可靠性，并改善实现长期运行所需的流体和反应控制技术。

55. 在利用核电厂进行地区供热方面，俄罗斯联邦在启动罗蒙诺索夫院士号浮动核电厂的过程中取得了突破性进展。根据需要，该核电厂可以为俄罗斯联邦北极海岸外的石油钻塔供电，为海水淡化厂供电以生产淡水以及产热用于地区供热。罗蒙诺索夫院士号核电厂将逐步取代比利比诺核电厂（图 A-4），后者已获许延长运行五年以上。比利比诺核电厂是世界上时间最久的核能热电联供厂之一，为比利比诺市提供电力和热力。其他国家，如中国和大韩民国，已宣布各自开发本国浮动核电厂的计划。

图 A-4. 俄罗斯联邦用于热电联供的比利比诺核电厂。
（照片来源：俄罗斯国家核电厂电力和热力生产联合企业）

趋势

56. 在世界范围内，将核能用于电力生产以外正呈现出前所未有的势头。除了在运输、工业或住宅部门等最终用户部门脱碳方面的作用外，核能热电联产正越来越多地被视为论证反对某些非赢利核电厂提前退役的经济理由的契机，特别是在可变可再生能源系统在电网中所占份额越来越大的情况下。对利用水冷堆进行核氢生产的兴趣预计将持续到商业阶段，特别是如果示范项目取得成功的话。

57. 然而，首先需要解决与贮存和运输氢气相关基础设施问题有关的挑战。从不同国家正在进行的项目中汲取的经验教训预计将加快利用常规电解法扩大核氢生产的规模。还可能继续开发高效工艺，促进核氢生产。在未来几年内，预计将核能用于独立工厂的非电力应用、用于热电联供或用作与可再生能源相结合的多功能用途一体化能源系统的一部分的概念将是一种值得关注的趋势。此类应用包括生产淡水、生成氢作为燃料和能源载体、为住宅和商业建筑提供地区供热和制冷，以及服务于许多其他产业，包括炼钢、石化精炼和合成燃料的生产。

58. 原子能机构建立了氢生产经济性评价程序、氢计算器和原子能机构核氢生产工具包，以支持成员国对比其他替代方案，对利用核能制氢进行技术-经济性评价。

A.4.5. 以核聚变研究和技术发展促进未来能源生产

状况

59. 在历经十多年的复杂建造阶段（包括场址准备及主要系统和部件的设计和制造）之后，国际热核实验堆已开始机器组装和集成（图 A-5 和图 A-6），为此，核聚变界举行了庆祝活动。国际热核实验堆项目定于2025年12月进行首次等离子体运行，到2020年底，已完成约 70%的进度。国际热核实验堆一旦投入运行，便将为开发和设计未来可进行能源生产的聚变动力堆提供大量科学和技术依据。

图 A-5. 1250 吨重的低温恒温器底座将是第一个将安装在 30 米深的托卡马克组装坑底部的大型部件。(照片来源：国际热核实验堆组织)

图 A-6. 低温恒温器底座安装完毕后，375 吨重的低温恒温器下气缸降至底部，并与底座焊接。(照片来源：国际热核实验堆组织)

60. 欧洲联合环是一个有着强化加热功率和类似国际热核实验堆堆壁的托卡马克，一直在准备进行氘实验活动，目的是进行测试并为接下来等量混合氘和氚的实验做好准备。欧洲联合环的氘氚实验活动定于 2021 年夏季开始，将为国际热核实验堆的运行提供独特的物理和技术依据。其主要性能目标之一是在静止条件下产生 15 兆瓦的热功率并持续约 5 秒，以研究聚变能生产的关键物理学问题。

61. 在使用高功率激光的惯性聚变约束领域，美利坚合众国的国家点火装置一直在通过以下方式不断提高实验性能：提高从激光能量到燃料舱吸收的能量的能量耦合效率，查明能量泄露的若干来源，以及开发缓解技术以提高实验性能。提高耦合效率有利于改善能源生产的前景。

趋势

62. 对政府和私人资助的聚变研究和技术的投资持续增加。有 90 多个政府资助的聚变装置正在运行、建设或规划当中（图 A-7）。此外，20 多家私营部门聚变公司正在研究和开发各种基于不同燃料、替代性约束几何构型和高温超导磁体等新技术的小型装置和方法。

63. 美国能源部、美国核管理委员会与核聚变工业协会共同主办了一场虚拟的聚变监管框架公共论坛。该论坛的目的是与美国和其他国家的监管机构一道开始就涉及在公共或私营部门的支持下开发和建立聚变能反应堆系统的计划的监管框架进行对话。

图 A-7. 目前有 100 多个（公共和私人）聚变装置正在运行、建造或规划当中。（来源：聚变装置信息系统）。

64. 作为新制定的材料和技术计划如美利坚合众国橡树岭国家实验室的材料等离子体照射实验的一部分，同时，在欧洲EUROfusion财团的“MAT”计划之下，正在进行一些特定实验，以解决与等离子体照射下的材料行为及腐蚀有关的问题。此外，在没有专门辐照设施可用于聚变材料研究的情况下，在橡树岭国家实验室高通量同位素反应堆等研究堆中进行的作为欧洲联盟、日本和美利坚合众国之间合作项目的辐照活动正在取得关键成果。

65. 美国能源部聚变能源科学办公室通过“LaserNetUS”倡议拨款 1800 万美元，资助美利坚合众国和加拿大高强度激光设施的运行和用户支持。该倡议订立于 2018 年，旨在为大学和国家实验室的科学家提供更多接触此类设施的机会。在日本，由 20 个研究所的约 40 名成员组成的激光聚变战略委员会正在考虑开发高重复频率激光系统，以对聚变等离子体进行数据驱动分析，并用基于聚变的中子源测试激光聚变反应堆工程。在加拿大，通用聚变公司在过去十年中一直在开发磁化靶聚变技术，并公开表示计划建立一个示范设施。通用聚变公司已与加拿大核安全委员会联系，要求开展许可证审批前接触活动，以了解许可证审批流程将如何进行。加拿大核安全委员会还正在与寻求开展聚变研发活动作为技术开发一部分的初创公司进行许可证审批前的讨论。

B. 核燃料循环

B.1. 前端

状况

66. 由于全球 2019 冠状病毒病大流行，几个主要铀生产国或暂停铀生产业务，或大幅减产。全球 90%以上的铀生产集中在澳大利亚、加拿大、哈萨克斯坦、纳米比亚（图 B-1）、尼日尔、俄罗斯联邦和乌兹别克斯坦。由于全球铀产量下降，供应不足（由二次供应弥补的短缺）导致 2020 年一季度现货价格上涨了 41%。不过，这仍然低于重启闲置铀矿或开发新铀矿所需的价格。随着加拿大雪茄湖铀矿（世界上最大的铀生产商）在因全球疫情而停产五个月之后于 9 月份恢复开采，铀现货价格在 2020 年三季度下降了约 15%。

图 B-1. 纳米比亚湖山露天铀矿鸟瞰图。
（照片来源：斯科铀业公司）

67. 欧洲、日本、俄罗斯联邦和美利坚合众国正在开发的耐受事故燃料或先进技术燃料有时需要更高浓度的铀-235，以弥补其包壳材料中子透明度的损失。因此，正在对浓度高于 5%但低于 20%的高丰度低浓铀燃料进行测试。

68. 全球核燃料公司提供的耐受事故燃料组件首次被装入一座美国反应堆。使用该公司“ARMOR”包覆锆包壳和“IronClad”耐受事故燃料方案的领先试验组件被安装在美利坚合众国埃克隆公司的克林顿核电厂内。

69. 带有商业反应堆实验性耐受事故燃料棒的首批俄制核燃料组件在新西伯利亚化学浓缩厂生产并通过验收，该厂是俄罗斯国家原子能公司燃料生产子公司 TVEL 燃料公司的制造设施。这些燃料棒被装入俄罗斯联邦罗斯托夫核电厂的一个水水动力堆-1000 机组中。

70. 2018 年初安装在南方核电公司埃德温·哈奇核电厂 1 号机组的耐受事故燃料领先试验组件完成了 24 个月的燃料循环，领先试验棒的样本目前正在进行测试。对燃料棒的初步检查已经完成。将在美国能源部橡树岭国家实验室对燃料棒的材料和包覆特性作进一步的评估。

71. 比利时 ENGIE Electrabel 公司的多伊尔核电厂 4 号机组已经安装 EnCore 耐受事故燃料的领先试验组件。Doel 核电厂 4 号机组是世界上第二个安装了 EnCore 组件的商用反应堆，也是欧洲第一个。

72. 美国泰拉电力公司宣布了与核燃料和服务提供商 Centrus 能源公司开展合作的计划，以建立商业规模的高丰度低浓铀国内生产能力。这将是很多下一代反应堆设计所需要的燃料，包括近期宣布的由泰拉电力公司和通用日立核能公司设计的钠动力贮存系统。

73. 俄罗斯联邦热列兹诺戈尔斯克采矿和化学联合公司完成了俄罗斯联邦别洛雅尔斯克核电厂 4 号机组的第一批满重载铀-钚混合氧化物燃料（图 B-2）的生产。该机组的营运者俄罗斯国家核电厂电力和热能生产联合企业及其授权代表 ZAES 已验收 169 个燃料组件。

图 B-2. BN-800 快堆的混合氧化物燃料组件。
（照片来源：俄罗斯联邦采矿和化学联合公司）

74. 加拿大核实验室在其加拿大核研究倡议下与小型模块堆技术开发商签订了四项协作协议。第一个是与超安全核能公司的子公司 USNC-Power 公司签订的关于开展研究以支持超安全核能公司的微型模块堆的协议。该项目将包括与超安全核能公司全陶瓷微封装燃料制造相关的研究。第二个是与总部在英国的 Moltex 能源公司合作，为 Moltex 能源公司的稳定盐堆（一个 300 兆瓦（电）的小型模块堆）的核燃料开发计划提供支持。第三个是与总部在美国的凯罗斯能源公司合作，进行技术研究和工程设计，以更好地分离、分析和贮存凯罗斯能源公司提议的小型模块堆设计运行过程中产生的氚。第四项协议是与陆地能源公司合作开发和测试技术，用于跟踪将在陆地能源公司的一体化熔盐堆设计中使用的拟议液体燃料的行为。

75. Holtec 国际公司选择法马通公司为其 SMR-160 反应堆提供核燃料。两家公司已经签订旨在完成所有必要工程设计工作的协议，以便为 SMR-160 提供法马通公司可供商用且经过验证的 17x17 GAIA 燃料组件。

76. X 能源公司的三层各向同性燃料 TRISO-X 开始在麻省理工学院核反应堆实验室的研究堆进行辐照。辐照试验的数据将用于支持向 X 能源公司的 Xe-100 和其他三层各向同性反应堆发放许可。

77. 超安全核能公司在美利坚合众国犹他州盐湖城建立了一个新的设施，用以支持开发其专有的全陶瓷微胶囊燃料 — 一种下一代铀碳氧化物三层各向同性颗粒燃料设计，该设计用碳化硅取代了传统三层各向同性燃料中已有 50 年历史的石墨基质。这个新设施开发的材料将被用于超安全核能公司的微型模块堆和其他核反应堆，包括气冷堆、轻水堆、坎杜堆和熔盐冷却堆。

78. 与中国原子能工业公司签订了一份关于运输原子能机构低浓铀银行运营所需低浓铀和（或）设备的合同，其中对往返该银行的第二条运输路线作出了规定。位于哈萨克斯坦的原子能机构低浓铀银行已从 2019 年 10 月开始运营。《2012 年核技术评论》（GC(56)/INF/3 号文件）描述了目前已建立的其他供应保证机制。

趋势

79. 总体而言，2020 年一次铀供应量较低，预计产量约为 46 500 吨。这约占全球铀需求量的 69%，从而给旨在满足对作为核燃料的铀的需求的二次铀供应造成了较大的压力。

80. 为了确保向当前和未来的核电厂可持续供应核燃料，世界将需要更多的铀矿。根据历史记录，由于经济、技术、环境或社会方面的限制，很少有已查明的铀矿床有望进入开采和生产阶段。因此，需要创新才能将少量铀矿床推进到生产阶段。铀矿开采行业正在对高品位不整合面型矿床原地回收技术进行评估就是 2020 年在这方面进行创新的一个例子。

81. 生物浸出法是另一种正在开发的重大创新，用于从砂岩型矿床中进行铀的原地回收。在过去十年里，中国一直在进行这项技术的研究，以提高这些类型矿床的回收和治理。

82. 在现有核电厂机组中使用高燃耗燃料被认为是改善燃料循环可持续性的一种方案，因为天然铀的年消耗量是随着卸料燃耗时间的延长而下降的。

B.2. 后端

状况

83. 据来自原子能机构“核电厂 2019 冠状病毒病期间运行经验网”的反馈，乏燃料贮存设施的运行没有受到疫情的显著影响，只是出现了一些燃料中断导致运行延迟的情况。从全球范围来讲，贮存的乏核燃料以每年约 7000 吨重金属的速度积累，而贮存的存量即将达到 30 万吨重金属。

84. 在日本首次这种设施的运行中，从伊方核电站移除了混合氧化物乏燃料，又在一个月后从高滨核电站移除这种乏燃料。混合氧化物乏燃料棒将暂时贮存在一个冷却池中。日本政府正根据其能源政策开展与这种乏燃料的后处理有关的研发。

85. 对于那些制定了长期核计划并奉行开放循环战略的国家来说，面临的主要挑战是场内乏核燃料贮存能力不断下降和贮存期限不断延长（超过 100 年）。

86. 2020 年 1 月，大韩民国月城核电厂的干法贮存设施扩建工程获得了批准。这是一个重要步骤，因为现有贮存能力已经接近用光。

87. 美国核管理委员会发布了已计划的新墨西哥州集中临时贮存设施的环境影响评估草案。

88. 在最后一个乏核燃料贮存罐提前一年交付后，立陶宛已关闭的伊格纳林纳核电厂达到了在场内安全管理和贮存其两个 RBMK-1500 反应堆所有乏核燃料的全部能力。

趋势

89. 原子能机构对研究活动进行协调，以加深对乏核燃料在各种贮存系统中的持续行为以及贮存系统的老化和退化机理本身的了解。这将有助于确保乏核燃料能够继续安全贮存并运输到处置设施和后处理设施。

90. 随着时间的推移，核反应堆管理效率的提升导致从核反应堆卸载的乏核燃料有所减少。不过，这也导致初始丰度和燃耗的提高，致使余热和包壳脆化风险增加，从而可能会影响到乏核燃料管理步骤。

91. 在不久的将来即将采用的新型燃料设计将会把丰度最高提到 8%，并且将采用包覆包壳材料，从而为现有贮存系统带来潜在挑战，因为这需要了解它们的长期行为，以便正确分析所有乏核燃料包括贮存、运输和处置在内的管理步骤的安全性。

92. 乏燃料被一些国家视为一种宝贵的能源资源，而再循环技术的开发正在取得进展。轻水堆钚多次再循环先进工艺（法国的 CORAIL 和 MIX 工艺以及俄罗斯联邦的再生混合工艺）正在进行示范，以便能够过渡到快堆钚多次再循环战略。这些再循环的燃料预期将使自然资源能够得到更有效的利用，减少所产生的核废料的数量和放射性毒性，并降低扩散风险。

C. 退役、环境治理和放射性废物管理

C.1. 退役

状况

93. 在2020年永久关闭的六座核动力堆分别是：法国费斯内姆核电厂1号和2号机组、俄罗斯联邦列宁格勒-2 号机组、瑞典的灵哈尔斯 1 号机组（881 兆瓦（电）沸水堆）和美利坚合众国杜安·阿诺德-1 号机组和印第安角核电厂 2 号机组。这一数字低于有 13 座反应堆停止运行的 2019 年。截至 2020 年底，共有 171 座反应堆已经关闭或正在退役。其中，有 20 座反应堆已经退役。全世界还有 158 座燃料循环设施和 125 座研究堆处于永久关闭状态或正在退役。大约 131 座燃料循环设施和 446 座研究堆已经退役。

94. 德国、日本和美利坚合众国正在实施最大规模的核电厂退役计划。德国有 26 个核电厂处于退役状态，其余六个正在运行的核电厂将在2022年底前永久关闭。在2019年收到退役许可证后，贡德雷明根 B 机组和菲利普斯堡 2 号机组开始退役。2011 年日本东部大地震导致相当一部分的日本核电厂永久关闭。2020 年，日本 60 个商用核电厂中共有 24 个永久关闭或已处于退役状态。在过去十年里，美利坚合众国永久关闭了几个无利可图的反应堆，并有 18 个正在实施的退役计划。其中，有七座设施正在实施立即拆除战略，七座被安全关闭，另有四座正在从安全关闭向立即拆除过渡。有三座美国核电厂计划于 2020 年完成退役：拉克罗斯（威斯康星州）、洪堡湾（加利福尼亚州）和宰恩（伊利诺伊州）。

95. 切尔诺贝利和福岛退役项目取得了重要进展。2020 年 9 月，切尔诺贝利核电厂附近新建的临时乏核燃料贮存设施（图 C-1）开始进行热试验，与此同时，每日处理能力为 10 吨的废物自由排放设施开始运行。

图 C-1. 第一个装有 93 个乏燃料组件的双壁屏蔽筒即将离开乏燃料处理设施以便贮存一百年。
（照片来源：国有专业企业切尔诺贝利核电厂）

96. 日本报告称，到 2020 年 8 月，先前贮存在贮存箱中等待先进液体处理系统处理的锶含量下降的水已经处理完毕，贮存箱将重新用于贮存先进液体处理系统处理过的水。日本政府仍在考虑先进液体处理系统处理过的水的若干处理方案，其中包括蒸汽释放或排入大海，但尚未做出最终决定。

97. 在法国，阿格场址（图 C-2）的退役工作取得进展，那里的欧安诺 UP2-400 后处理厂正在拆除。在利用人工智能技术的分拣系统的导引下，运行团队开始回取贮存在混凝土贮仓中的 600 吨遗留石墨和镁废物，而主厂房的拆除活动在继续进行。拆除钚精加工车间干手套箱的工作已经完成，并开始进行其他作业，以便拆除原溶解和萃取建筑中的第二个溶解器，并拆除原铯源制造车间的机械热室。该车间的化学热室已在过去三年中使用遥控设备拆除。

图 C-2. 位于法国诺曼底阿格的欧安诺场址鸟瞰图。(照片来源：欧安诺公司)

98. 法国电力公司开始建造一座石墨反应堆退役示范设施。预计该设施将于 2022 年前投入运行，以便于试验石墨慢化堆拆除技术。作为一个例外情况，俄罗斯联邦国家原子能公司计划在其早期铀石墨反应堆退役方面采用掩埋策略，并正在着手建造一个示范中心来试验这种方案。该设施预计在 2021 年前投入运行。

99. 在欧盟委员会联合研究中心所在地，负责退役的意大利国有企业 Sogin 公司开始了 ISPRA-1 研究堆退役的初步活动。

趋势

100. 虽然推迟拆除在过去几十年里一直是设施业主采用的主要退役策略，但立即拆除方案一直受到青睐。另外，开始最终拆除退役电厂的时间表正越来越多地被提前，一些推迟拆除策略被改为立即拆除。这种变化是由于希望减少退役费用的不确定性所致。

101. 寻求实施完整退役项目的专业退役和废物管理联合体越来越多地参与进来。例如，美利坚合众国最近出现了许可证责任和全部退役资金从电力公司转移到退役联合体并由退役联合体接管项目实施全部责任的情况。

102. 另一个趋势是使用数字化、机器人和自动化技术的情况有所增加，包括用于规划和模拟、电厂配置管理和知识管理，以及用于支持废物回收、表征和拆除工作的实施。

103. 在很多情况下，没有乏核燃料最终处置解决方案和放射性废物处置库会对退役进程形成制约。因此，在将要退役的设施场址或附近建造乏燃料和放射性废物贮存设施已成为一种广泛采用的措施，以便能够在即使没有设施对这些材料进行最终处置的情况下也能使退役工作得以进行下去。例如，德国 BGZ 临时贮存公司正在接管乏燃料和放射性废物长期贮存的全部责任，以便能够切实尽快拆除设施。

C.2. 环境治理

状况

104. 由于 2019 冠状病毒病大流行，2020 年在环境治理方面开展的活动有限。不过，在对人或环境构成重大风险或具有经济再利用潜力的场址，治理工作仍在继续进行。

105. 治理工作从吉尔吉斯斯坦境内的谢卡夫塔场址开始，关闭了六座矿井，并将五个废石场避迁到一个更偏远的现有废石场。当地村庄周围因采矿作业产生的大约 70 万立方米废物将被清除并被稳定在一个新的场所，以确保对人和环境进行保护。这项工作由欧洲复兴开发银行的中亚环境治理账户提供资金，是更广泛的中亚铀遗留场址环境治理战略总计划的一部分。2020 年期间，继续按计划实施在独立国家联合体政府间治理计划框架内开展的吉尔吉斯斯坦（明库什场址）和塔吉克斯坦（伊斯蒂克洛尔的黄山和 1－4 号尾矿堆）的治理项目。

106. 在美利坚合众国，拆除原橡树岭气体扩散厂场址上剩余建筑板材的工作（图 C-3）已经完成，使得能够进行将该场址交给当地社区用于经济开发的监管批准过程。工程完工后，将腾出 500 多公顷土地，以便作为曼哈顿计划国家历史公园的一部分进行再利用。

图 C-3. 美利坚合众国田纳西州原橡树岭气体扩散厂场址治理工作的进展情况。
（照片来源：美国能源部）

趋势

107. 作为很多场址的一种优化方案，对表征和监测技术的关注继续支持向长期管理和控制过渡。

108. 2020 年观察到的主要趋势是，循环经济的概念越来越多地应用于天然存在的放射性物质残留物管理。在这方面，重点放在可重复使用的二次资源上，目的是保护一次资源。这一趋势的一个重要例子是美国环境保护署最近批准将磷石膏用于政府道路建设项目。类似做法的推广将需要建立建设性的伙伴关系，以便能够产生也能解决社会和监管问题的创新解决办法。

109. 在“开发用于铀矿开采遗留区勘探和监测的无人机γ能谱仪”项目下进行了首次试飞。该研究项目由德国联邦教育和研究部提供资金，目的是为中亚铀遗留场址的表征提供支持。一般来说，在小型无人机上使用相对较小的γ能谱仪主要是用于调查高度污染区。不过，目前正在研究使用这种配置来调查低水平的放射性污染。新系统将探索使用体积更大的探测器、起飞重量高达 25 千克的无人机以及溴化铈等新型闪烁晶体材料。这项技术的开发将有助于在难以进入和穿越的山区或面积较大、调查可能耗费时间的地区进行放射性污染的快速调查。

110. 核工业处理受污染材料的经验正在推动其他工业处理天然存在的放射性物质的努力。例如，石油和天然气平台的退役是与天然存在的放射性物质相关的工业活动范围内的一项重大发展。在美利坚合众国外大陆架，大约有 1885 个活跃生产平台，其中 60%以上的平台已有 25 年以上的历史。据估计，全球约有 600 项离岸资产将在 2016 年至 2021 年期间退役。

C.3. 放射性废物管理

状况

111. 在高放废物和申报为废物的乏燃料所需的深部地质处置设施的开发方面继续取得重大进展。这包括加强了对所需资源的认识和早期规划，如设计和实施得到科技发展支持的选址方案、与利益相关方开展合作以及持续提供这些资源。

112. 阿拉伯联合酋长国设立了一个专门负责未来废物管理的信托基金，使其成为第一个在其首座核电厂并入电网之前就有此类供资安排的国家。

113. 澳大利亚政府宣布成立澳大利亚放射性废物管理局，作为发展澳大利亚放射性废物管理能力的下一项重要措施。澳大利亚放射性废物管理局将与行业、社区和政府机构等利益相关方合作，以最佳方式管理放射性废物。澳大利亚参议院经济立法委员会建议经澳大利亚议会通过 2020 年国家放射性废物管理修正（场址规格、社区基金和其他措施）法案。该项立法规定将南澳大利亚的纳潘迪作为未来低放和中放废物设施的场址。

114. 比利时放射性废物和浓缩裂变材料机构就拟议的有关建议进行地质处置的高活度和（或）长寿命放射性废物最终处置的国家计划进行了一次公众磋商。

115. 芬兰辐射和核安全管理局通知为芬兰核电厂供应铀的国家当局，芬兰打算在 21 世纪 20 年代中期开始对乏核燃料进行最终处置。由于处置后无法对核材料进行正常检查，因此，必须在开始最终处置之前对与此种检查有关的程序作出明确的规定。芬兰昂卡罗处置设施正在地下 400 多米深处建造，那里的处置过程计划于 2024 年开始（图 C-4）。法国和瑞典正在进行在已确定的场址进行深部地质处置的许可证审批流程。若干其他国家，包括日本、瑞士、英国和美利坚合众国，正在逐步推进其深部地质处置项目。

图 C-4. 芬兰昂卡罗处置设施的处置过程计划于 2024 年开始。原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西于 2020 年 11 月访问了昂卡罗。
（照片来源：TVO/Tapani Karjanlahti）

116. 在英国，核退役管理局公布了各遗留场址的放射性废物管理、退役和环境治理战略草案。在为期 12 周的公开磋商中，所有利益相关方都被邀请就草案提出意见、问题和反馈。作为一个基于同意的多年期选址进程的第一步，核退役管理局还宣布在坎布里亚的科普兰成立一个工作组，以便与当地社区讨论地质处置设施的开发和机会问题。另外，还在 Tradebe Inutec 公司的温弗里斯场址开工建设一个可变设施，用以处理低放废物和边缘中放废物。

117. 瑞士国家放射性废物处置合作组织（Nagra）建议在该国的未来国家处置库或 ZWILAG 维伦林根中间贮存设施建设一座乏燃料封装厂（图 C-5）。

图 C-5. 瑞士 ZWILAG 容器贮存大厅被用于贮存来自后处理厂的玻璃固化高放废物和来自瑞士核电厂的乏燃料元件。(照片来源：ZWILAG)

118. 在美利坚合众国，能源部批准萨凡纳河场址的一个盐废物处理设施开始作业，以处理贮存罐中存放的高放液体废物。

119. 在国家选址过程的第一步，德国公布了一份可能适合作为高放废物处置场址的地区名单。根据德国从 2017 年开始实施的一项法律规定的选址标准和基于科学的方法，由联邦放射性废物处置公司制定的名单和筛选过程确定了覆盖全国 54%地表的 90 个地区具有潜在的地质适宜性。

120. 日本核废物管理组织启动了在位于北海道的两个行政区（寿都町镇和神惠内村）的文献调查，以评估是否可能在那里找到一个可能适合建造一个深部地质处置库的场址，以作为为此种设施选址的过程的第一步。寿都町镇已决定申请进行该文献调查，神惠内村接受了日本政府进行这种调查的建议。

121. 加拿大核废物管理组织在安大略省南布鲁斯市获得 600 多公顷的土地用于开展研究，南布鲁斯市是加拿大乏核燃料深部地质处置库选址过程的两个潜在东道城市之一。联邦政府还发起了包容性参与过程，以使加拿大的放射性废物政策现代化。

趋势

122. 在放射性废物管理相关专题上，国际合作日益集中在研究、开发和示范方面。很多欧洲联盟国家取得进展是由于它们履行了《废物框架指令》规定的义务所致。

123. 作为一个自筹资金就共同感兴趣的研究、发展和示范专题开展合作的放射性废物管理组织联合体，放射性废物地质处置技术实施平台发布了其最新的《战略研究议程》，该议程聚焦于未来深部地质处置库的实施效率和产业化以及发展对较小存量可行的其他概念。

124. 欧洲放射性废物管理联合计划向感兴趣的最终用户展示了其综合路线图。路线图为放射性废物管理走向终点提供了一个结构化方案，其中包括差距分析和进一步的研究、发展和示范需求、侧重于小存量管理的战略研究和知识管理以及强调培训和知识传播的重要性。

125. 欧洲联盟启动了“放射性废物处置前管理”项目，该项目侧重于除核燃料和高放废物之外的放射性废物流的处置前处理和整备所需的研究、发展和示范。

126. 欧洲处置库发展组织工作组启动了一个有克罗地亚、丹麦、荷兰、挪威和斯洛文尼亚参与的合作项目，目的是协调各国在评估高放废物存量钻孔处置的可行性方面作出的努力。

127. 对于废物管理而言，成功案例越来越多是一个有利的趋势。在瑞典，东哈马尔市议会投票赞成拟由瑞典核燃料和废物管理公司在福什马克建造一个乏核燃料处置库的计划（图 C-6）。授权该项目的最终决定权在瑞典政府。

图 C-6. 福什马克地下处置设施艺术渲染图。（来源：瑞典核燃料和废物管理公司）

128. 在法国，活化废物整备和贮存设施 ICEDA 获得了运营许可证，从而使法国电力公司能够整备和贮存放射性废物，为今后按照法国一整套综合处置解决方案处置这种废物做好准备。

129. 约有 42 个成员国提名了乏燃料和放射性废物信息系统国家协调员，而到 2020 年底，已有 83 个成员国成为《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》的缔约国。

D. 研究堆和粒子加速器

D.1. 研究堆

状况

130. 在 2019 冠状病毒病大流行期间，为了尽量减少大流行相关限制的影响，生产用于全球供应的医用放射性同位素的研究堆都宣布提供基本服务。影响到全世界研究堆的运行和新研究堆的建设。所有反应堆运行组织都采取了积极的措施，以确保大流行期间设施和人员的安全。一些出于教育、培训和研究目的运行研究堆的研究机构和高校暂时关闭了其设施，并将其保持在安全关闭状态。原子能机构对基于反应堆的主要医用放射性同位素生产商的调查显示，由于 2019 冠状病毒病的限制，放射性同位素的运输出现困难；该调查评估了疫情对供应链连续性的影响。秘书处组织了一次非正式技术简况介绍会，向成员国介绍了研究堆中放射性同位素的生产情况以及使用医用回旋加速器、放射性药物的运输和生产以及 2019 冠状病毒病大流行期间放射性药物需求的情况。

131. 下列八个国家正在建造 11 座新的研究堆：阿根廷、巴西、法国、印度、大韩民国、俄罗斯联邦、沙特阿拉伯和乌克兰（一个加速器驱动系统）。若干成员国制定了有关建造新研究堆的正式计划，其中包括孟加拉国、白俄罗斯、比利时、玻利维亚、中国、荷兰、尼日利亚、塔吉克斯坦（完成 Argus-FTI 反应堆）、泰国、美利坚合众国、越南和赞比亚。阿塞拜疆、埃塞俄比亚、加纳、肯尼亚、马来西亚、蒙古、缅甸、尼日尔、菲律宾、塞内加尔、南非、苏丹、突尼斯和坦桑尼亚联合共和国等其他国家正在考虑建设新设施。

132. 对于提供医学和工业用放射性同位素和提供中子束用于私营和公共部门的材料研究和无损检验、分析和辐照服务以及用于文化遗产和环境研究服务，研究堆仍是不可或缺的。它们可以为教育和培训做出战略性贡献（图 D-1）。附件中的表 D-1 列出了研究堆最常见的应用。

图 D-1. 研究堆拥有从培训和教育到工业应用、医学应用等一系列用途。
（照片来源：原子能机构）

133. 虽然数字中子成像通常使用高强度中子源进行，但射线照相法和计算机断层照相法等标准中子成像现在也可以使用堆芯通量约为 10^{12} $s^{-1}cm^{-2}$ 的较低强度中子源进行。这要归功于在天文相机方面取得的最新进展，它们已导致开发出了相对简单的低成本数字中子成像系统。图像质量在标准应用中具有竞争力，足以满足约 80%的成像应用（图 D-2）。这一发展将使核成像扩展到使用无论基于研究堆的还是基于加速器的较低强度中子源。2020 年，原子能机构推出了涵盖这一扩展内容的中子成像电子学习课程。

图 D-2. 大黄蜂的高分辨率三维 CT 图像。
（照片来源：德国慕尼黑工业大学 Burkhard Schillinger）

134. 迄今为止，已有 107 座研究堆和四座医用同位素生产设施从使用高浓铀转为低浓铀或确认已关闭。2020 年，哈萨克斯坦消除了其最后剩余的未经辐照的高浓铀，将其稀释为 20%以下的浓缩铀，并继续为移除和处置经辐照的高浓铀燃料做好准备。总的来说，国际计划已完成近 6815 千克中国、俄罗斯、美国和其他来源的高浓铀移除或经确认的处置工作。

135. 使医用同位素生产商从使用高浓铀靶件过渡到使用低浓缩铀靶件的国际努力仍在继续。比利时国家放射性元素研究所开始商业供应使用低浓铀生产的钼-99，与其他全球领导者一起生产这种需求量很大的医用放射性同位素，计划进一步增加其非高浓铀钼-99 的产量，并到 2022 年实现完全转化。

趋势

136. 全球对研究堆的兴趣继续增加。许多国家利用各种机会接触现有研究堆，包括通过促进能力建设的原子能机构地区研究堆短训班，以及通过由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心机制。2020 年，新指定了位于罗马尼亚皮特什蒂的核研究所，法国可替代能源和原子能委员会被重新指定，为期五年。使用原子能机构的因特网反

应堆实验室等电子学习和能力建设工具越来越重要，秘书处和成员国对这些工具的兴趣和支持也有所增加。

137. 全球 60%以上在运研究堆的堆龄都超过了 40 年。它们的寿期可达到或超过 60 年，但最重要的是要及时制订适当的老化管理、整修和现代化计划。鉴于这类设施供资下降的大趋势和继承规划有限，健全的管理系统、运行和维护及寿期管理计划对于研究堆能够以具有成本效益的方式履行使命将至关重要。

D.2. 粒子加速器和仪器仪表

状况

138. 在过去十年里，很多成员国对开发小型加速器中子源以替代老化的中低功率研究堆的兴趣日益增加，全世界约有 20 个国家正在实施 50 多个此类项目。小型加速器中子源包括很多种类的加速器，其目的是为各种应用提供 10^{11} 至 10^{13} s^{-1} cm^{-2} 的中子通量。2020 年，德国的于利希黑尔姆霍茨中心完成了基于强电流质子直线加速器的小型加速器中子源装置的概念设计，该装置将作为一个国家中子散射设施。这种需要小型中子源的设施相对便宜，是一种轻型基础设施，能够为很多分析仪器提供服务，并适合高校和私营工业，从而能够更广泛地提供和应用中子束技术。

139. 如图 D-3 所示，另一个例子是高强度新型超导直线加速器及其实验大厅。该设施名为“螺旋-2”号，目前正在法国国家大型重离子加速器研究中心进行调试，将探测短寿命重核，并利用带电粒子和中子束解决裂变和聚变以及材料科学方面的应用问题。来自直线加速器的轻离子束（包括撞击铅和铋靶的 α 粒子和锂-6 或锂-7）也将用于研究更高效的某些癌症治疗用放射性同位素生产方法。

图 D-3. 基于超导大功率（200 千瓦）直线加速器的“螺旋-2”号设施。“中子用于科学”束线将提供前所未有的 1 至 40 兆电子伏的能量中子束强度 — 与其他类似装置相比，高出两个数量级。
（图片：法国国家大型重离子加速器 Alahari Navin）

140. 图 D-4 说明了另一个使用超导大功率（200 千瓦）直线质子/氘核加速器的项目，该项目已进入二期，即能量从 5 兆电子伏增加到 40 兆电子伏，预期中子源强度高达 10^{15} 中子/秒，用于各种应用，包括利用中子进行基础研究。

图 D-4. 结合创新液态锂靶中子生产技术（右）的超导大功率（200 千瓦）直线质子/氘核加速器（左）。（图片：Dan Berkowitz，以色列索雷克核研究中心）

141. 芬兰赫尔辛基大学医院在医院环境使用的基于中子源的小型质子加速器（设计运行电量为 30 毫安的 2.6 兆伏静电加速器）已进入试运行的最后阶段，其主要目标是开始硼中子俘获疗法试验，然后转向用于患者治疗。中子是在旋转的锂靶上产生的。

142. 在应用于无人机的辐射传感器领域取得了显著进展。基于溴化镧（III）（$LaBr_3$）或溴化铈（III）（$CeBr_3$）探测器等闪烁体探测器的 γ 能谱测量系统比简单的盖革-米勒计数器更受欢迎。在无人机放射性测绘的辐射探测方面，最近取得的成就是基于硅光电倍增器并通过内置温度补偿偏置发生器和前置放大器增强的闪烁探测器的商业可用性。这使得能够对探测器信号进行快速数字信号处理，并利用精准的全球导航卫星系统地理参考实时处理所有测量数据，从而产生高分辨率的辐射水平和放射性同位素识别测绘图（图 D-5）。

图 D-5. 结合 3D 航空摄影测量的高分辨率放射性地图（红色表示高剂量率）。这张地图是用一架无人机连续两次飞行获得的。（图片：原子能机构）

趋势

143. 在辐射监测领域，基于无人机平台的系统正在加速发展，主要原因是无人机技术的扩展、辐射探测器设计的小型化以及全球导航卫星系统和快速数据处理算法。对移动监测系统的灵活性和可操作性的需求日益增长意味着，在危险区域或人员无法进入的区域，人们正在优先考虑基于无人机的解决方案，利用其进行放射性测绘、辐射源搜索以及辐射事件或事故后的快速应急响应。无人机在承受温度和湿度、防水和防尘等操作条件方面变得更加坚固耐用。此外，由于在延长飞行时间、环境传感、先进测绘能力以及通过利用人工智能改进的数据处理算法方面有了更好的选择，无人机的自主性正在增加。

144. 基于机器学习的方法在以下方面具有极大的潜力：推进核医学中的癌症分期和通过放射疗法治疗癌症等多个领域的核科学和应用；加快在核聚变研究方面取得进展；以及帮助保护环境特别是全球水资源免受过度开发和污染。最近的多个实例证明了法证情报为不同国家打击犯罪提供技术解决方案的力量。痕迹证据分析是法证调查的重要组成部分。机器学习算法正在越来越多地应用于法证学，以帮助解决一些先前未能解决的挑战。机器学习方法也可以用作识别模式和对各种样本进行分类的工具，为应对这些挑战提供了一种有价值的手段。

145. 例如，在对玻璃进行法证分析过程中，通常使用样本的元素强度比来对其进行比较。如果玻璃碎片足够大，则法证从业者可以通过碎片追踪到它们原来的形状和出处。不过，对于小的碎片，使用传统方法就无法做到这一点。在此情况下，粒子诱发X射线发射和中子活化分析等核分析技术如果与机器学习工具和玻璃特定的制造数据库（存货清单）结合起来，就可用于将嫌疑人与犯罪现场进行匹配（图 D-6）。

A) 玻璃碎片
B) 粒子诱发X射线发射技术
C) 光谱
D) 机器学习算法
E) 嫌疑人包里的玻璃碎片和汽车里的玻璃碎片吻合
F) 不在场证明反证

图 D-6. 基于机器学习的工作流程。首先，从犯罪现场收集样本（A），并送去利用粒子诱发 X 射线发射技术进行元素分析（B）。对测量结果进行分析（C），并将其传递给机器学习模型（D），从而对样本进行分类（E）。有了这些知识，警方调查人员就可以证实或反驳嫌疑人不在场的证明（F），证明在肇事逃逸案件中，在嫌疑人身上发现的碎片与肇事车辆上的碎片被归入同一类，而在海滩上发现的碎片不归入同一类，从而表明嫌疑人与肇事车辆存在关联。（图片：以色列巴-伊兰大学及其纳米技术和先进材料研究所）

E. 粮食和农业

E.1. 测量食品中残留物用放射性标记方法和创新核技术 — 满足公众健康和贸易需求

状况

146. 在世界范围内的食品生产过程中，都在使用兽药和杀虫剂（包括除草剂）等化学物质。然而，化学物质在食品中的残留引起了公众健康和贸易方面的关切，因此必须按规定食品中所允许最高残留浓度的最高残留限量标准进行监管。最高残留限量影响贸易，世界贸易组织《实施卫生和植物检疫措施协定》就参照了食品法典委员会制定的最高残留限量。统一的最高残留限量有利于政府、农民、贸易商和公众。当最高残留限量缺失时，贸易会受到严重干扰 [6]。有好几种用于食品生产的化合物目前缺少最高残留限量。

147. 为了确定兽药的最高残留限量，从而填补食品标准中的空白，需要从涉及使用放射性标记材料的动物代谢（残留物耗尽）研究中获得信息。核技术除其他外，可以使代谢研究所需的可追溯性和准确测量成为可能。

[6] 增强型法典的联盟；可从以下网址获得 https://agrifood.net/iafn-codex-coalition。

148. 以碳-14、硫-35、磷-32 和氢-3 等同位素进行放射性标记的药物或相关化合物在目标食用动物中施用，并用于跟踪它们的分布和分解为残留物和关键代谢物，特别是在可食用组织（如肌肉、肝脏、肾脏和脂肪）中。放射性标记研究被认为是代谢研究的“黄金标准”，用于人类和兽医药品和农用化学品部门，产生数据以促进安全性评估，从而最终保护消费者。放射性水平的确定目前涉及动物组织的燃烧和溶解，而这需要可靠的精确测量技术来确认残留物的类型和浓度。

趋势

149. 化学物质在食品生产中的使用在世界各地正在发生变化。每年都有药物/化学品被开发出来以应对新的挑战。因此，对监管这些化学品的需求增加了，而满足这种需求就需要进行没有替代技术的放射性标记研究。放射性标记的化合物起着至关重要的作用，因为它们允许追踪和研究各种组织中的所有化学残留物。

150. 在代谢研究中，需要氢-3 和碳-13 核磁共振、液体闪烁计数和放射性受体/免疫测定等工具和技术来分析和表征动物组织中的放射性标记化合物。生成准确的数据还需要有得到高分辨率质谱测定法支持的创新性且具有成本效益的核分析技术/方法，如竞争性放射性受体分析等。自动射线照相方面的新技术也正在作为一种附加的研究工具出现，促进了完整组织和器官中放射性的定量和可视化。

151. 最近的报告表明，食用动物体内的兽药也可能导致一些残留物，这些残留物不容易从组织中提取出来，因此在供人类食用的食品的实验室分析中无法检测到。这些残留物可能会给消费者带来毒理学问题。因此，需要开发创新的分析方法来揭示这些“隐藏”的危害。

152. 在一些地区，另一个新出现的食品安全问题是，需要科学数据来帮助为可能具有地方和区域意义的食品如内脏（动物内脏）设定标准和最高残留限量。这类食物将成为新的放射性标记动物代谢研究的主题。目前，在进行放射性标记动物研究时，单一药物和（或）化学品是研究的目标，尽管在食品生产中使用药物组合。单一药物使用研究中生成的信息因而是不完整的。因此，今后将进行使用化学组合的放射性标记研究。

153. 放射性标记研究可以进一步促进的一个相关的新兴感兴趣领域是全球呼吁风险管理人员统一动物和植物生产中使用的化合物的标准和最高残留限量，而不是目前的做法，即分别为动物和植物产品设定标准，因为这无助于清楚了解所消费食品中的危害水平。

154. 鉴于缺少最高残留限量对发展中国家经济和消费者需求的影响，这些国家越来越有兴趣参与放射性标记动物研究，并为制定标准提供科学数据。在这方面，原子能机构最近启动了一个关于畜牧生产中使用的兽药和相关物质损耗的新的协调研究项目，该项目引起了若干成员国的兴趣。规划中的研究涉及牛、马、鱼、山羊和绵羊等动物物种（图 E-1），并有可能推广到某些作物，特别是与饲料污染有关的作物。预计该协

调研究项目将有助于减少发展中国家在进行风险评定数据生成和最高残留限量设定所需的放射性标记研究方面对外部设施和研究机构的依赖，从而促进贸易和保护消费者。

图 E-1. 苏丹放射性标记耗竭研究所用部分目标动物。
（照片来源：原子能机构）

F. 人体健康

F.1. 微剂量学和纳米剂量学方面的进步

状况

155. 微剂量学是辐射物理学的一个分支，涉及对被辐照物质内部微观结构中所吸收能量的空间分布的系统研究。尽管起源于 60 多年前，但微剂量学仍在辐射医学、辐射防护、辐射生物学和其他领域如空间研究方面引起极大的科学兴趣。

156. 在放射医学领域，微剂量学与离子束治疗特别相关，离子束治疗是一种先进的技术，它使用质子和碳离子束而不是传统的光子辐照来治疗肿瘤，从而最大限度地减少对健康组织的损伤。在本应用中，吸收剂量的标准测量值不足以解释辐射的结果，因为放射生物效能沿人体内临床离子束的路径而变化。

157. 因此，在辐射防护和辐射医学的许多模态中，宏观加权因子被应用于吸收剂量，以便说明特定辐射质量的生物效能（目标材料中感兴趣位置处根据类型和能量的粒子的相对数量）。例子包括近距疗法中使用的质子和离子束、中子和千伏 X 射线。微剂量学和纳米剂量学（也称为结构微剂量学）提供辐射量，以捕捉辐射相互作用的性质的影响，从而捕捉决定其生物效能的不同辐射质量的特性。

158. 微剂量学是一个广泛的、跨学科的领域，其范围从模拟和建模，到专用检测器和仪器仪表的开发，以及临床和其他应用。

159. 没有一种微型剂量仪能够恰当地表征所有不同的电离辐射，世界范围内最近的研究集中在为特定应用开发的检测器上。对于治疗应用中使用的强离子束流，目标是将检测器缩小到亚毫米大小，而为了辐射防护和空间目的，研制了大面积微型剂量仪。

趋势

160. 在微剂量学可能成为评估辐射技术不同用途中的生物效应的标准之前，仍有许多问题需要解决。一个基本里程碑是微剂量数据的标准化，其中包括对不确定性预算的研究。

161. 第一步包括开发用于报告微剂量学的共享方法和机制。仍需努力比较在敏感体积、形状和材料方面不同的微剂量仪，以获得无歧义和与检测器无关的结果。此外，应研究微剂量数据，以预测检测器特定用途所采用的参数：离子束治疗中的传能线密度（图 F-1）、放射生物学中的相对生物效能以及辐射防护中的品质因数。

图 F-1. 离子束治疗的规划和实施是微剂量学能够做出有价值贡献的领域之一。该图显示位于奥地利维纳诺伊施塔特的 MedAustron 离子束治疗中心的辐照室，肿瘤患者在其中接受质子和碳离子束治疗。安装在天花板上的机械臂托住患者治疗床，X 射线成像环用于患者定位。（来源：MedAustron 离子束治疗中心，奥地利，作者：Kästenbauer/Ettl.）

162. 原子能机构可以在提供该领域所需的多学科专门知识和环境方面发挥战略性作用。在原子能机构于 2020 年 10 月组织的微剂量学及其应用的新趋势和进展技术会议期间，确定了未来研究的方向，其中包括离子束、辐射防护各方面、生物建模和纳米剂量学等主要主题。这些方向将用于指导原子能机构在未来计划周期的相关研发工作。

G. 放射性同位素和辐射技术

G.1. 放射性药物在传染病检测、诊断和管理中的作用

状况

163. 传染病是对人类的威胁，当前的 2019 冠状病毒病大流行就是证明。虽然所有科学学科都在集中努力，以通过使用先进技术更好地了解此类疾病，但放射性药物的发展正处于这样一个阶段，即，细胞和生化过程的无创可视化正在成为可能，为使用人类传染病放射性药物的诊断和潜在治疗方法铺平了道路。

164. 传染病早期检测和治疗的重要性是控制和降低患者发病率和死亡率的主要因素。对感染的免疫反应是一个复杂的现象，理想的放射性药物应能特异性地将活的感染生物与体内的非病原体、其他感染和炎症区分开来。它应仅在感染组织中显示定量蓄积和充分滞留，以便准确诊断和（或）评估治疗反应。

165. 有几种放射性药物在临床感染的无创检测中发挥着重要作用。但没有一种能明确区分具体的感染原因，或不同类型的感染。

* 《感染成像用锝-99m 放射性药物药盒的研制》（原子能机构《技术文件》第 1414 号）

** 《放射性标记的自体细胞：临床使用的方法及标准化》（原子能机构《人体健康丛书》第 5 号）

趋势

166. 目前，随着感染（包括近几十年来威胁生命的病毒感染，如人体免疫缺陷病毒（艾滋病毒）、严重急性呼吸系统综合征、禽流感、埃博拉病毒和 2019 冠状病毒病感染）的复杂性不断增加，正在鉴定几种有希望的分子，以便将其用于检测和诊断人体或人体样本中的特定感染。

167. 20 多年来，原子能机构与粮农组织合作，对来自世界各地的专家进行培训并为其提供装备，以使用核和核衍生免疫（如放射免疫分析、酶联免疫吸附测定）技术以及分子（聚合酶链反应）技术。这些敏感和特定的技术及其应用越来越多地被用于跨境动物和人畜共患疾病的早期和快速检测、表征、监测和控制。最近，这些技术已被用于诊断具有大流行潜力的传染病，如非洲猪瘟、口蹄疫、埃博拉、寨卡病毒、禽流感、中东呼吸综合征和非典，以及最近的 2019 冠状病毒病。位于塞伯斯多夫的原子能机构实验室向 120 多个成员国提供专家指导和服务、标准作业程序、个人防护设备培训、技术能力建设和测试程序培训，以及原子能机构的 2019 冠状病毒病成套设备/试剂/消耗品支助。

168. 单克隆抗体可以在专业实验室大规模生产，自 1973 年发现以来已经有所发展，现在可以用于新的大分子生物治疗。用于肿瘤治疗的单克隆抗体可能附着于肿瘤特异性抗原，并用作将放射性核素递送至特定肿瘤部位的载体。这种新技术是在使用含发射光子的放射性同位素的放射性标记单克隆抗体时出现的，这种抗体在注射到人体内后，可用于癌症诊断。这被称为放免液闪法。

169. 下一步，科学家们制备了放射性标记的单克隆抗体，这些单克隆抗体含有发射β的放射性同位素，能够识别和靶向肿瘤细胞，用高能 β 粒子轰击肿瘤细胞，以摧毁癌细胞。这被称为放射免疫疗法。

170. 研究发现，外源微生物表面分子可在宿主中引发微生物特异性单克隆抗体的产生，因此允许将放免液闪法和放射免疫疗法用于检测各种传染性疾病，包括真菌、病毒或细菌威胁，以及在治疗中的潜在应用。临床试验数据库显示，至少有 88 项关于对 2019 冠状病毒病患者使用单克隆抗体的临床试验研究。初步研究还探索了基于特异性病毒表面抗原使用放免液闪法诊断 2019 冠状病毒病。一个例子涉及使用重组抗体“抗 SARS-CoV-2 刺突糖蛋白 S1”（CR3022），该抗体最初以商业规模开发，用于体外试验，如酶联免疫吸附测定，现在被认为是一种可能潜在用于 2019 冠状病毒病诊断的试剂（图 G-1）。这种单克隆抗体已成功地用碘-131 进行了标记，用于结合研究和概念验证测试，并建议用作 CR3022 的放射性标记治疗版本。

图 G-1. 用于诊断目的的抗严重急性呼吸综合征冠状病毒 2 型（SARSCoV2）放射标记诊疗 CR3022 单克隆抗体的潜在开发示意图。（来源：原子能机构）

171. 然而，许多问题仍未得到解答，如病毒基因组的突变将如何影响该方法的有效性。

172. 根据一项研究，治疗性放射性药物铋-213 抗人类免疫缺陷病毒 1 型糖蛋白 41-成功清除了感染艾滋病毒的外周血单核细胞和单核细胞，而不损害人的血脑屏障，这可能为治疗艾滋病毒感染铺平了道路。

173. 与使用微生物特异性单克隆抗体制备的新型放射性药物相关的这些令人鼓舞的最新进展证明了对于诊断和治疗传染性疾病的潜力，探索其用途对所有成员国来说既相关又及时。

H. 环境

H.1. 利用核技术及核衍生技术增进对全球蓝碳的了解和应对气候变化影响

状况

174. 自 19 世纪末以来，大气中二氧化碳（CO_2）、甲烷（CH_4）和一氧化二氮（N_2O）等温室气体急剧增加，导致全球变暖加剧，而化石燃料燃烧、水泥生产和人为或土地使用变化产生的二氧化碳排放是主要原因。海洋在调节全球气候系统方面发挥着重要作用，它从大气中捕获和储存二氧化碳，即充当人为二氧化碳的净汇，并大大降低了全球变暖的速度。

175. 海洋从大气中捕获二氧化碳的两个主要机制是溶解度泵（通过气体交换吸收二氧化碳，并将富含二氧化碳的水向下输送到深海）和生物泵（从地表水向深海垂直输出光合产生的颗粒有机碳）。

趋势

176. 海洋捕获并储存的有机碳被称为蓝碳。海草床、潮汐沼泽和红树林等植被覆盖的沿海生态系统在其沉积物中积累并储存了大量的有机碳。尽管这些生态系统的全球总面积远小于陆地森林生态系统，但它们的全球有机碳固存潜力巨大，这意味着它们是基于自然的全球气候变化适应战略中的一个主要考虑因素（图 H-1）。这些使用短寿命放射性同位素测定年代的沉积物记录也可以用于探测遗留的塑料污染（图 H-2）。原子能机构环境实验室开发了从沿海红树林环境中采集的沉积物岩芯中使用例如过量铅-210、铍-7、钍-234 和铯-137 作为短寿命放射性示踪剂提取的年代学模型。

图 H-1. 蓝碳沿海生态系统的全球分布。
（改编自 https://thebluecarboninitiative.org）

图 H-2. 作为原子能机构摩纳哥环境实验室进行的研发的一部分，将鱼暴露于微塑料中。(照片来源：原子能机构)

177. 此外，目前由于广泛的生境退化造成的沉积碳损失规模巨大，因此有必要针对生境的创造和恢复采取协调行动，并实施创造性的生态工程解决方案。

178. 通过固碳和温室气体抵消将沿海蓝碳生态系统纳入现有缓解战略，需要对有机碳固存的准确累积率进行量化，而目前这种量化是有限的，且存在很大的不确定性。可以使用碳-14 来确定千年时间尺度上的有机碳固存量，而使用环境中存在的放射性核素，如铅-210、铯-137 和钚同位素，则可以实现十年/百年时间尺度上的估计。这提供了一个与联合国“可持续发展目标”和联合国“海洋科学促进可持续发展十年”框架内的管理行动相一致的时间框架，从而能够确定有机碳固存量及其因自然和人类改变而随时间变化的情况。

179. 放射性核素还可以对自然或人为扰动是否可能造成碳损失（例如通过沉积物再悬浮和侵蚀过程）提供独特的评估。使用寿命较短的放射性核素，如钍-228、钍-234 和铍-7，作为数周、数月甚至数年时间尺度的沉积动力学示踪剂，将与支持碳减排量化和融资的蓝碳政策框架的建立相一致。

180. 虽然在过去的十年里，已经对沿海植被区的蓝碳进行了一些研究（图 H-3），但许多问题仍未得到解答。这些问题包括以下方面，诸如：评估在很大程度上研究不足的全球热点（例如巴西和亚洲的海草和红树林）；气候变化和其他扰动将如何影响沿海植被系统中的蓝碳；大型海藻的作用；以及维持和增强沿海蓝碳栖息地固碳的最佳管理行动。核技术和核衍生技术有助于评估碳酸盐和大型藻类在碳循环中的作用，确定碳的来源，了解影响蓝碳栖息地中固碳的因素及其相应的预算，以及促进蓝碳战略的管理行动。

图 H-3. 在坦桑尼亚联合共和国桑给巴尔采集的沉积物岩芯，用于评估作为固碳潜力衡量标准的有机碳的存量和埋藏率。
（照片来源：Gloria Salgado，埃迪斯科文大学，澳大利亚珀斯）

181. 原子能机构旨在研究蓝碳科学的若干方面和在未来十年转让相关核技术。通过原子能机构环境实验室，原子能机构目前正在参与澳大利亚、巴西、丹麦、法国、印度、缅甸、新西兰、坦桑尼亚联合共和国和美利坚合众国的蓝碳项目。原子能机构还参与了一个由“海洋 2050”协调的创新项目，以评估世界各地海藻养殖场的固碳能力。正在制定国家和地区技术合作项目，以评估水生系统固碳对基于自然的气候变化适应战略、环境保护和社会经济效益的重要性。

附　件

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆
（截至 2020 年 12 月 31 日）[a]

国　家	在运反应堆		在建反应堆		2020 年供应的核电量		截至 2020 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·小时	占总发电量的百分数	年数	月数
阿根廷	3	1641	1	25	10.0	7.5	91	2
亚美尼亚	1	415			2.6	34.5	46	8
孟加拉国			2	2160				
白俄罗斯	1	1110	1	1110	0.3	1.0	0	2
比利时	7	5942			32.8	39.1	310	7
巴西	2	1884	1	1340	13.2	2.1	59	3
保加利亚	2	2006			15.9	40.8	169	3
加拿大	19	13 624			92.2	14.6	788	6
中国	50	47 528	13	12 565	344.7	4.9	418	8
捷克共和国	6	3934			28.4	37.3	176	10
芬兰	4	2794	1	1600	22.4	33.9	167	4
法国	56	61 370	1	1630	338.7	70.6	2337	0
德国	6	8113			60.9	11.3	852	7
匈牙利	4	1902			15.2	48.0	142	2
印度	22	6255	7	4824	40.4	3.3	548	11
伊朗伊斯兰共和国	1	915	1	974	5.8	1.7	9	4
日本	33	31 679	2	2653	43.1	5.1	1932	6
哈萨克斯坦							25	10
大韩民国	24	23 150	4	5360	152.6	29.6	596	2
墨西哥	2	1552			10.9	4.9	57	11
荷兰	1	482			3.9	3.3	76	0
巴基斯坦	5	1318	2	2028	9.6	7.1	87	5
罗马尼亚	2	1300			10.6	19.9	37	11
俄罗斯联邦	38	28 578	3	3459	201.8	20.6	1372	5
斯洛伐克	4	1837	2	880	14.4	53.1	176	7
斯洛文尼亚	1	688			6.0	37.8	39	3
南非	2	1860			11.6	5.9	72	3
西班牙	7	7121			55.8	22.2	350	1
瑞典	6	6882			47.4	29.8	474	0
瑞士	4	2960			23.0	32.9	228	11
土耳其			2	2228	未提供	未提供		
乌克兰	15	13 107	2	2070	71.5	51.2	533	6
阿拉伯联合酋长国	1	1345	3	4035	1.6	1.1	0	5
英国	15	8923	2	3260	45.7	14.5	1634	7
美利坚合众国	94	96 553	2	2234	789.9	19.7	4600	10
总计 [b,c]：	442	392 612	52	54 435	2553.2		18 772	10

a. 来源：原子能机构的动力堆信息系统（www.iaea.org/pris），截至 2021 年 6 月 1 日。

b. 总计中包括中国台湾的下列数据：在运 4 台机组，3844 兆瓦（电）。

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）、立陶宛（43 年零 6 个月）的已关闭核电厂和中国台湾（232 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

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	50
中子活化分析	116	49
放射性同位素生产	82	41
中子射线照相	70	37
材料/燃料辐照	67	26
中子散射	44	28
地质年代学	23	20
嬗变（硅掺杂）	22	15
嬗变（宝石）	19	12
中子治疗，主要是研发	15	12
核数据测量	14	7
其他[c]	117	34

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

[b] 来自所审议的 236 座研究堆（221 座在运，15 座临时关闭；截至 2020 年 11 月）。

[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。

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

21-01295C