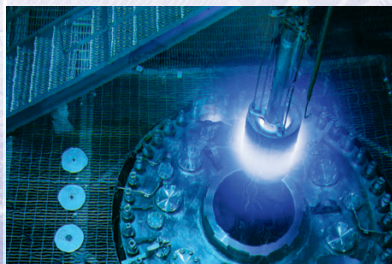
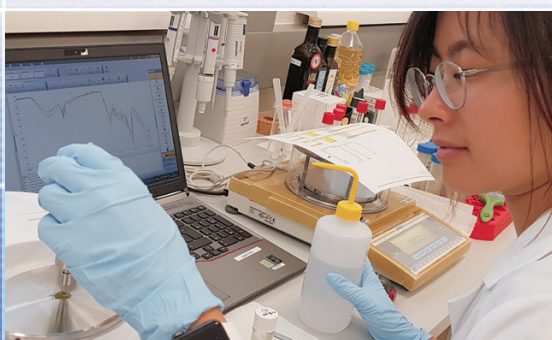
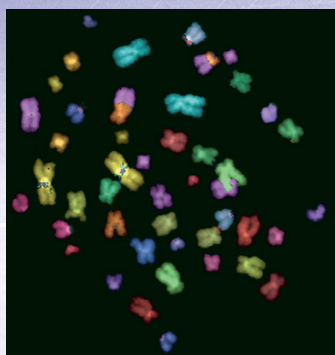


2020 年核技术评论



IAEA

国际原子能机构

2020 年核技术评论

GC(64)/INF/2

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”。

《2020 年核技术评论》涵盖以下选定领域：动力应用、先进裂变和聚变、加速器和研究堆应用、放射性同位素和辐射技术、人体健康以及核技术用于粮食和农业。

草案文本已以 GOV/2020/4 号文件提交 2020 年 3 月理事会会议。本最后文本系根据理事会期间进行的讨论以及从成员国收到的意见编写而成。

目 录

正文摘要	1
主体报告	5
A. 动力应用	5
A.1. 当今核电	5
A.1.1. 运行核电国家	8
A.1.2. 现有核电计划内的新项目	9
A.1.3. 启动核电国家	10
A.2. 核电增长预测	12
A.3. 燃料循环	14
A.3.1. 前端	14
A.3.2. 供应保证	16
A.3.3. 后端	17
A.4. 退役、环境治理和放射性废物管理	18
A.4.1. 核设施退役	18
A.4.2. 环境治理	20
A.4.3. 放射性废物管理	23
B. 先进的裂变和聚变	26
B.1. 先进的裂变	26
B.1.1. 水冷堆	27
B.2. 快中子系统	29
B.2.1. 气冷堆	30
B.2.2. 中小型反应堆或模块堆	32
B.2.3. 革新型核能系统国际倡议	34
B.2.4. 核动力的非电力应用	34
B.3. 聚变	35
C. 加速器和研究堆	37
C.1. 加速器和相关仪器仪表	37
C.1.1. 双束流设施为材料研究开辟新机遇	37
C.1.2. 文化遗产原位无损分析用可移动加速器（MACHINA）	38
C.1.3. 利用聚焦兆电子伏离子束进行全细胞成像	39
C.1.4. 激光驱动加速器技术具有多种应用前景	40
C.2. 研究堆	40

D.	放射性同位素和辐射技术	43
D.1.	应对塑料负担：核技术应用	43
D.2.	加速器技术的突破给医院带来了硼中子俘获疗法	45
D.2.1.	小型加速器中子源方面的进展	45
D.2.2.	诊疗放射性药物和硼中子俘获疗法	48
D.3.	医用同位素浏览器：抗癌和抗其他疾病领域用于新放射性同位素 生产路线的工具	48
E.	人体健康	49
E.1.	用于评定人体内蛋白质质量的新双同位素示踪剂方法	49
E.1.1.	蛋白质及其对儿童生长发育的影响	49
E.1.2.	蛋白质质量	50
E.1.3.	用于评定人体内蛋白质质量的双同位素示踪剂方法	50
E.1.4.	在田间生长期间用氧化氘对豆类植物进行内部标记	50
E.1.5.	使用以内部标记豆类制备的测试膳食进行人体研究	51
E.1.6.	方法的意义	51
E.2.	生物剂量测定法作为辐射应急和医学的有用诊断/预测工具	51
E.2.1.	生物剂量测定法将生物标记与剂量相关联	52
E.2.2.	标准生物剂量测定方法	53
E.2.3.	自 2000 年以来开发的新生物剂量测定方法集萃	53
E.2.4.	今后的方向	55
F.	粮食和农业	55
F.1.	加强昆虫不育技术在预防和根除入侵害虫方面的应用	55
F.1.1.	背景	55
F.1.2.	改良昆虫不育技术和战略	57
F.1.3.	防备入侵害虫	58
F.2.	用核技术支持食品溯源系统	59
F.2.1.	背景	59
F.2.2.	核技术	60
F.2.3.	数据库	62
F.3.	核技术用于温室气体监测，以减缓气候变化影响	63
F.3.1.	背景	63
F.3.2.	碳-13 技术拓展到野外	64
F.3.3.	氮-15 追踪技术用于测量氧化亚氮和确定氧化亚氮来源	64
F.3.4.	野外规模氮测量的新发展	65
F.3.5.	展望未来	66

正文摘要

1. 2019 年底，全世界的 443 座在运核动力堆（图 A-1）拥有 392.1 吉瓦（电）的总装机容量。2019 年，13 座反应堆永久关闭，六座并网，五座开工建设。近期和远期增长前景仍集中在亚洲，54 座在建反应堆中的 35 座以及 2005 年以来并网的 74 座反应堆中的 61 座都在亚洲。

按地区分列的 443 座在运反应堆

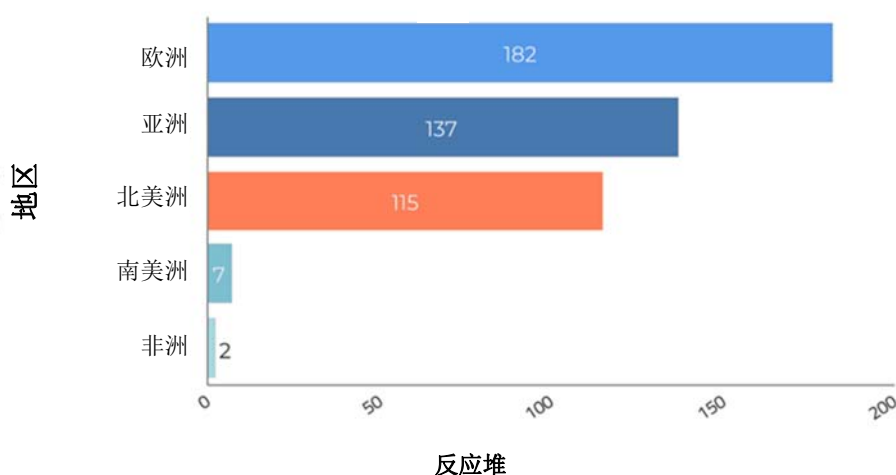


图 A-1. 2019 年的在运核动力堆。（来源：原子能机构“动力堆信息系统”
www.iaea.org/pris）

2. 目前有 30 个国家使用核电，有 28 个国家正在考虑、规划或积极致力于将核电纳入其能源结构。四个新加入核电国家正在建设其首座核电厂，其中有两座已接近完工，其他几个已决定引入核电的国家正处于后期基础设施准备阶段。

3. 原子能机构 2019 年对全球核电装机容量的预测就核电未来对全球电力生产的贡献给出了一个好坏参半的估计，这将部分地取决于能否大幅增加新容量来抵消潜在的反应堆退役。在到 2030 年的低值预测中，核电净装机容量将逐渐减少，随后，到 2050 年反弹到 371 吉瓦（电）。在高值预测中，装机容量到 2030 年将比目前水平增长 25%，达到 496 吉瓦（电），到 2050 年将增长 80%，达到 715 吉瓦（电）。到本世纪中叶，核电在全世界总发电量中的份额按低值预测约为 6%，按高值预测约为 12%，而 2019 年约为 10%。

在气候变化缓解、能源安全、环境和社会经济政策方面的优势是许多国家打算引入或扩大其核电计划的关键理由。原子能机构 2019 年 10 月与经济合作与发展组织核能机构合作组织的气候变化和核电的作用国际会议强调，核电可通过加速向低碳能源的转变，在帮助实现气候目标方面发挥关键作用。

4. 据预测，2019 年的世界铀产量与 2018 年相似，约 53 500 吨。持续低迷的价格导致铀矿勘探显著减少，新铀项目仍被搁置，以前活跃的一些矿山和加工设施仍处于保养和维护状态。全球转化、浓缩和燃料制造能力足以满足目前和预测的未来需求。
5. 2019 年 10 月，原子能机构在哈萨克斯坦专门建造的设施接收了一批低浓铀，从而正式建立了旨在向各国提供核燃料供应保证的原子能机构低浓铀银行。
6. 在未来几年，预计将对动力堆、研究堆、其他燃料循环设施、临界装置、加速器和辐照设施进行大量的退役工作以及相关的治理活动。已验证技术和新技术正在给这些领域带来持续改进。
7. 若干国家在高放废物和（或）申报为废物的乏燃料深部地质处置项目方面取得了进展。芬兰正在建造一座设施，瑞典正在等待对其许可证申请作出最后决定，法国正在最后确定其设施的许可证申请。弃用密封放射源钻孔处置项目正在若干国家取得进展，其中包括原子能机构支持在加纳和马来西亚开展的试点项目。全球范围内正在运行适用于所有其他类别放射性废物的处置设施。
8. 由于被认为能够促进全球向更可持续、更能负担得起和更可靠的能源系统的过渡，先进核反应堆及其应用正在世界每个地区呈现良好势头。这种技术包括中小型反应堆或模块堆，适合纳入到可变可再生能源占很大份额的未来无碳电力系统中。
9. 对利用核能进行海水淡化、氢生产、地区供热和制冷等非电力应用以及一些能源密集型工业应用的兴趣日益增加。中小型反应堆或模块堆特别适合于也被称为热电联产的这种应用，它可以抵消很大一部分的核电生产成本。
10. 在国际热核实验堆的建造工地，可看到已取得很大进展，超过 73% 的土木工程已经完成。预计国际热核实验堆将在 2035 年前后开始以满聚变功率运行。若干成员国也在开展广泛的聚变研究与发展计划。一个重要里程碑是建造 JT-60SA 机，这是欧洲与日本之间开展国际协作正在日本那珂市建造的一种超导托卡马克。
11. 正在 54 个国家运行的 250 座研究堆继续在支持医学、工业、教育和核电部门方面发挥重要作用。六个国家正在建造共计九座研究堆，11 个国家已计划建造共计 14 座研究堆。研究堆是发展核科学技术基础设施和计划的重要国家设施。2019 年，一个研究组织即韩国原子能研究院成为由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心。

12. 迄今，有 99 座研究堆和四座医用同位素生产设施已从使用高浓铀转换为低浓铀或已确认正在关闭。2019 年，在哈萨克斯坦 IVG.1M 研究堆转换为低浓铀燃料后，开始进行从 IVG.1M 研究堆向俄罗斯联邦返还高浓铀燃料的准备工作。还开始准备将哈萨克斯坦 IGR 研究堆的高浓铀燃料稀释到低于 20% 的浓缩丰度。截至 2019 年底，美国产高浓铀燃料返还计划完成了约 1600 千克新鲜和乏高浓铀研究堆燃料的移除，“遗漏移除计划”完成了约 2875 千克高浓铀燃料的移除或确认了其处置，俄罗斯产高浓铀燃料返还计划完成了约 2300 千克燃料的移除。

13. 辐射技术符合“绿色”化学的各项重要原则，并通过化学键的受控形成或断裂，在加工聚合物（也称塑料）等材料方面提供了多种可能性。辐射技术的性能已在聚合物化学中得到全面证明，其中包括聚合物的创新性改性、独特聚合物材料和复合材料的创造以及聚合物废物的回收。人们对这项技术的兴趣越来越大，成员国正越来越多地要求对辐射技术进行调整，以应对塑料废物回收方面的全球性挑战。

14. 硼中子俘获疗法是一项基于中子的技术，能够在肿瘤细胞一级进行选择性的辐照。硼中子俘获疗法特别适合治疗脑癌、头癌、颈癌和皮肤癌。硼中子俘获疗法利用中子和硼之间的反应选择性地仅摧毁癌细胞，可以成为一种与传统放射疗法截然不同的疗法，并有望成为癌症治疗的一种可行选择。世界各地的参与中心在硼中子俘获疗法方面取得了许多进展。在优化硼化合物和控制它们在肿瘤细胞中的积累方面已取得显著进展，并已开发出三维剂量计算系统。由于小型加速器中子生产技术的突破使得能够在医院和癌症研究中心安装这些设施，人们对该专题重新产生了兴趣。

15. 蛋白质质量对于满足整个发展中世界民众特别是孕妇和幼儿的营养需求非常重要。氨基酸在实现生命早期的健康成长中发挥着关键作用。基于氘和碳-13 的新微创同位素方法可测得必需氨基酸的真实回肠消化率，并能够评定人体内的食物蛋白质质量。这种新方法将有助于确定供人体消耗的优质植物蛋白质来源，特别是豆类蛋白质，并将成为联合国粮食及农业组织拟订人体所需蛋白质质量建议的依据。

16. 生物剂量测定方法有助于查明和量化人体内的辐射照射。回顾性生物剂量测定法甚至可能有助于揭示数年前接受的辐射照射。生物剂量测定方法最近被引入辐射肿瘤学和核医学，以及诊断和介入放射学。

17. 已经开发出一个新的网基工具——医用同位素浏览器，它使根据用户输入直接预测某种医用同位素的产量成为可能。医学科学家和放射性药物工业可使用该医学同位素浏览器发现尚未探索过的放射性同位素生产路径。这将大大有助于抗击癌症和其他疾病。治疗或诊断用医用同位素的生产依靠非常复杂的核反应过程，只有核物理学家通过测量和核反应理论才能获得这些过程。医用同位素浏览器通过同位素生产用图形用户界面，使许多非专业用户能够获得这些基本信息。

18. 入侵物种越来越普遍，正在导致全球生物多样性丧失。作为大面积虫害综合治理方案的一个重要组成部分，昆虫不育技术的部署可以阻止入侵种群立足，遏制或根除

入侵种群，而不会留下生态足迹。用于不育昆虫大规模生产、绝育和释放的改进技术和方案极大地提高了结合昆虫不育技术进行大面积虫害综合治理的成本效益。这为把这种技术扩展用于其他主要害虫包括影响植物、动物和人体健康的高度瞩目入侵害虫打开了大门。分析表明，促进在害虫立足之前做出快速反应的准备工作要比后来的根除运动代价小得多。

19. 许多食品由于与特定地理来源、生产方法和独特特征相关的“附加值”标签声明而得以以溢价出售。与原产地相关联的产品可以成为以保护当地资源为基础的可持续质量良性循环的一部分，这种资源包括作为食品增值的规格的农产品标签、传统手工制作标签、道德合规标签和营养标签。为了保护消费者免受食品欺诈和潜在意外食品安全问题的影响，必须使用分析性方法来核实这些附加值声明，为可追溯性系统提供支持。一些核技术、同位素技术和相关技术已证明适用于核实范围广泛的附加值标签声明。这些技术在为保护和宣传带附加值标签声明的食品的可追溯性系统提供支持方面具有很大潜力。成员国更广泛地使用这一技术将最终保护消费者和有信誉生产商，确保监管和道德合规，刺激国内市场，并减少国际贸易壁垒。

2020 年核技术评论

主 体 报 告

A. 动力应用

A.1. 当今核电

20. 截至 2019 年 12 月 31 日，全球共有 443 座在运核动力堆，总装机容量为 392.1 吉瓦（电）¹（表 A-1）。在这些在运反应堆中，83%属轻水慢化冷却堆，11%属重水慢化冷却堆，3%属轻水冷却石墨慢化堆，3%属气冷堆（图 A-2）。有三座液态金属冷却快堆。有近 89%的核发电量由 376 座轻水堆生产。

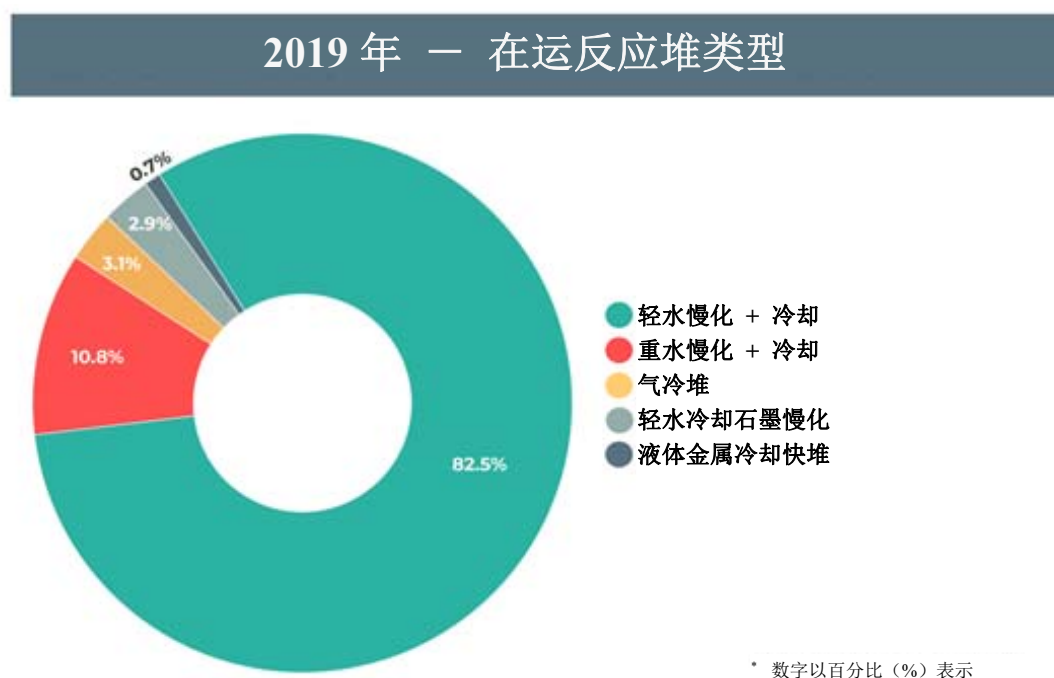


图 A-2. 按类型分列的核动力堆。（来源：原子能机构“动力堆信息系统”
www.iaea.org/pris）

21. 2019 年，有六座新压水堆并入电网：中国两座（台山 2 号 1660 兆瓦（电）和阳江 6 号 1000 兆瓦（电）），大韩民国一座（新古里 4 号 1340 兆瓦（电）），俄罗斯联邦三座（新沃罗涅日 2-2 号 1114 兆瓦（电）、罗蒙诺索夫院士 1 号 30 兆瓦（电）和罗蒙诺索夫院士 2 号 30 兆瓦（电）），从而使这一年期间全世界的新增总装机容量达到 5174 兆瓦（电）。共有 13 座反应堆被永久关闭：中国台湾的金山 2 号；德国菲利普斯堡 2

¹ 1 吉瓦（电）等同于 10 亿瓦电。

号；日本的玄海 2 号和福岛第二核电站 1 号至 4 号；大韩民国月城 2 号；俄罗斯联邦的比利比诺 1 号；瑞典灵哈尔斯 2 号；瑞士米勒贝格；以及美利坚合众国的流浪者 1 号和三里岛 1 号。

22. 截至 2019 年 12 月 31 日，共有 54 座反应堆在建。中国的漳州 1 号和太平岭 1 号、伊朗伊斯兰共和国的布什尔 2 号、俄罗斯联邦的库尔斯克 2-2 号和英国的欣克利角 C-2 号已开工建设。扩张以及近期和远期增长前景仍集中在亚洲（图 A-3），亚洲有 35 座反应堆在建。在 2005 年以来并网的 74 座新建反应堆中，有 61 座也在亚洲。

在建反应堆数量地区分布

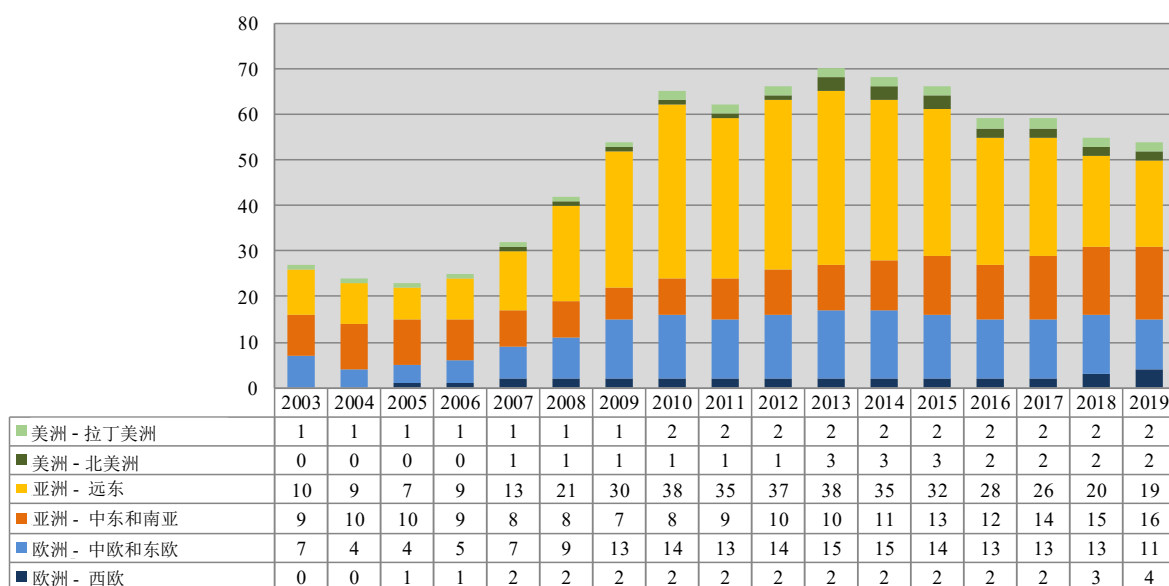


图 A-3. 在建反应堆数量地区分布。（来源：原子能机构“动力堆信息系统”

www.iaea.org/pris)

表 A-1. 全世界在运和在建的核动力反应堆（截至 2019 年 12 月 31 日）^a

国家	在运反应堆		在建反应堆		2019 年供应的核电量		截至 2019 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	7.9	5.9	88	2
亚美尼亚	1	375			2.0	27.8	45	8
孟加拉国			2	2160				
白俄罗斯			2	2220				
比利时	7	5930			41.4	47.6	303	7
巴西	2	1884	1	1340	15.2	2.7	57	3
保加利亚	2	2006			15.9	37.5	167	3
加拿大	19	13 554			94.9	14.9	769	6
中国	48	45 518	11	10 564	330.1	4.9	370	1
捷克共和国	6	3932			28.6	35.2	170	10
芬兰	4	2794	1	1600	22.9	34.7	163	4
法国	58	63 130	1	1630	382.4	70.6	2280	4
德国	6	8113					846	7
匈牙利	4	1902			15.4	49.2	138	2
印度	22	6255	7	4824	40.7	3.2	526	11
伊朗伊斯兰共和国	1	915	1	974	5.9	1.8	8	4
日本	33	31 679	2	2653	65.7	7.5	1899	6
哈萨克斯坦							25	10
大韩民国	24	23 172	4	5360	138.8	26.2	572	2
墨西哥	2	1552			10.9	4.5	55	11
荷兰	1	482			3.7	3.1	75	0
巴基斯坦	5	1318	2	2028	9	6.6	82	5
罗马尼亚	2	1300			10.4	18.5	35	11
俄罗斯联邦	38	28 437	4	4525	195.5	19.7	1334	5
斯洛伐克	4	1814	2	880	14.3	53.9	172	7
斯洛文尼亚	1	688			5.5	37.0	38	3
南非	2	1860			13.6	6.7	70	3
西班牙	7	7121			55.9	21.4	343	1
瑞典	7	7740			64.4	34.0	467	0
瑞士	4	2960			25.4	23.9	224	11
土耳其			1	1114	不适用	不适用		
乌克兰	15	13 107	2	2070	78.1	53.9	518	6
阿拉伯联合酋长国			4	5380				
英国	15	8923	2	3260	51.0	15.6	1619	7
美利坚合众国	96	98 152	2	2234	809.4	19.7	4505	8
总计 ^{b、c、d}	443	392 098	54	57 441	2586.2		18 329	10

a. 来源：原子能机构“动力堆信息系统”（www.iaea.org/pris）。

b. 2019 年供应的核电总量不包括德国七台反应堆机组的数据，因为这些机组的资料在印发时尚未提交。

c. 总计中包括中国台湾的下列数据：在运四台机组，3844 兆瓦（电）；在建两台机组，2600 兆瓦（电）。

d. 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（224 年零 1 个月）的已关闭和在运核电厂。

A.1.1. 运行核电国家

23. 截至 2019 年底，在 443 座在运核动力堆中，66%以上、达到 256.3 吉瓦（电）净装机容量的反应堆已运行 30 年以上。在役 40 年以上的核动力堆占全球装机容量的 17%。越来越多的核电厂正在实施长期运行和老化管理计划。

2019 年，全球利用共计 71 座核动力堆（亚洲 14 座和欧洲 57 座）生产了 2146.72 吉瓦·小时电当量热，以支持核能的非电力应用。在这些动力堆中，10 座支持海水淡化（生产了 48.01 吉瓦·小时），56 座支持地区供热（1870.6 吉瓦·小时），32 座支持工艺热应用（1248.01 吉瓦·小时）。

24. 俄罗斯联邦有两座快堆正在运行。别洛雅尔斯克 3 号的净装机容量为 560 兆瓦（电），自 1980 年并网以来已供应了 140 777 吉瓦·小时的电力。别洛雅尔斯克 4 号的净装机容量为 820 兆瓦（电），自 2016 年投入商业运行以来已供应了 13 066 吉瓦·小时的电力。

25. 在非洲，Eskom 公司开始对其在南非的科贝赫反应堆进行大修，目的是将它们的运行寿期延长至少 20 年。

26. 在亚洲，中国开始利用两座最近调试的 AP1000 型反应堆进行热电联产。在中国台湾，通过了一项修订案，取消了所有核电厂在 2025 年停运的要求，落实了 2018 年 11 月举行的全民公决的结果。在印度，格格拉帕尔原子能电站在更换冷却剂通道和供料管后重启。

27. 日本的重点仍是治理福岛第一核电站场址以及重启闲置核电厂。自福岛第一核电站事故后停堆以来已启动了九座反应堆（全为压水堆）。鉴于安全是首要任务，战略能源计划（2018 年）预计，核能将成为到 2030 年实现“最佳能源结构”的基荷电力来源和到 2050 年实现去碳化的一个选项。

28. 在欧洲，法国将削减其核动力堆群的计划推迟了 10 年，并开始对其 900 兆瓦（电）特里卡斯坦 1 号反应堆进行升级和维护，这可使该机组能够再运行 10 年。然而，2019 年初公布的多年能源计划将 2035 年定为将核在国家电力结构中的份额降低至 50% 的最后期限。为实现该目标，将关闭 14 座反应堆，总装机容量将减少 12 600 兆瓦（电）。在比利时，多伊尔 3 号反应堆的混凝土维修工程已经完成，而罗马尼亚切尔纳沃德核电厂的现代化计划正在实施中。在瑞典，福什马克核电厂 1 号机组和 2 号机组的延寿已核准，而在乌克兰，将乌克兰 3 号反应堆的运行寿期延长 10 年的项目正在进行中。

29. 在拉丁美洲，阿根廷恩巴尔斯核电厂的装机容量增加了 1.33%，其运行寿期被延长了 30 年。

30. 在北美洲，加拿大对延寿项目进行了大量投资，已确定在 2020 年重启达灵顿 2 号反应堆。在美利坚合众国，大多数现有反应堆已将运行寿期延长到 60 年。核管理委员会已核准佛罗里达动力和照明公司将土耳其角 3 号和 4 号核能发电机组的运行增加 20

年的申请。这是核管理委员会第一次签发批准将反应堆运行从 60 年延长到 80 年的延期许可证。

31. 核电厂的可靠性随着时间的推移继续改进。图 A-4 示出每台机组每运行 7000 小时（约一年）的非计划手动和自动紧急停堆或关闭次数。

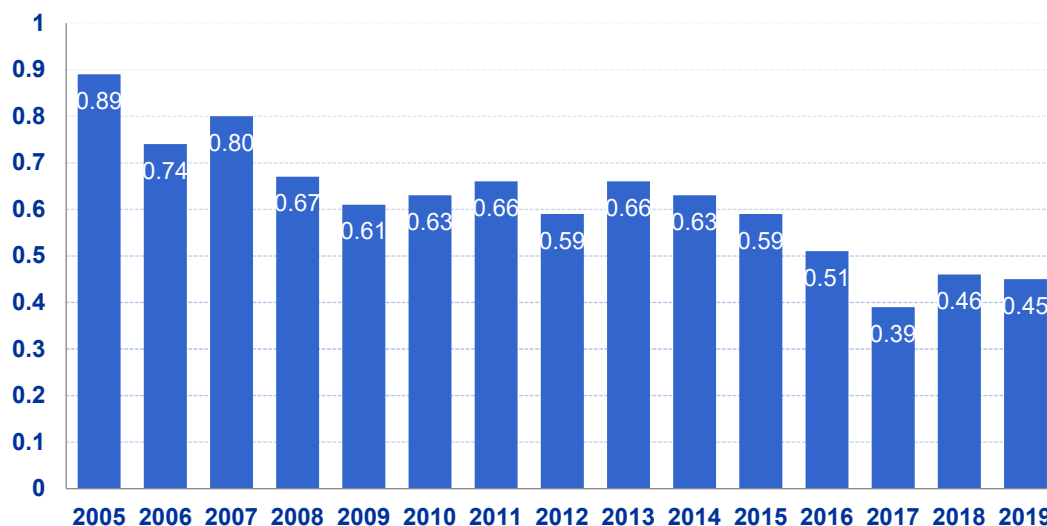


图 A-4. 平均紧急停堆率：机组每运行 7000 小时的自动和手动非计划紧急停堆次数。
(来源：原子能机构“动力堆信息系统” www.iaea.org/pris)

A.1.2. 现有核电计划内的新项目

32. 在运行核电厂的 30 个成员国中，有 15 个正在积极建造更多的核电机组。这表现为 45 个反应堆项目，总净装机容量为 46 567 兆瓦（电）。图 A-5 按各国正在建造的机组数量及其总净装机容量对这些国家进行了列表。

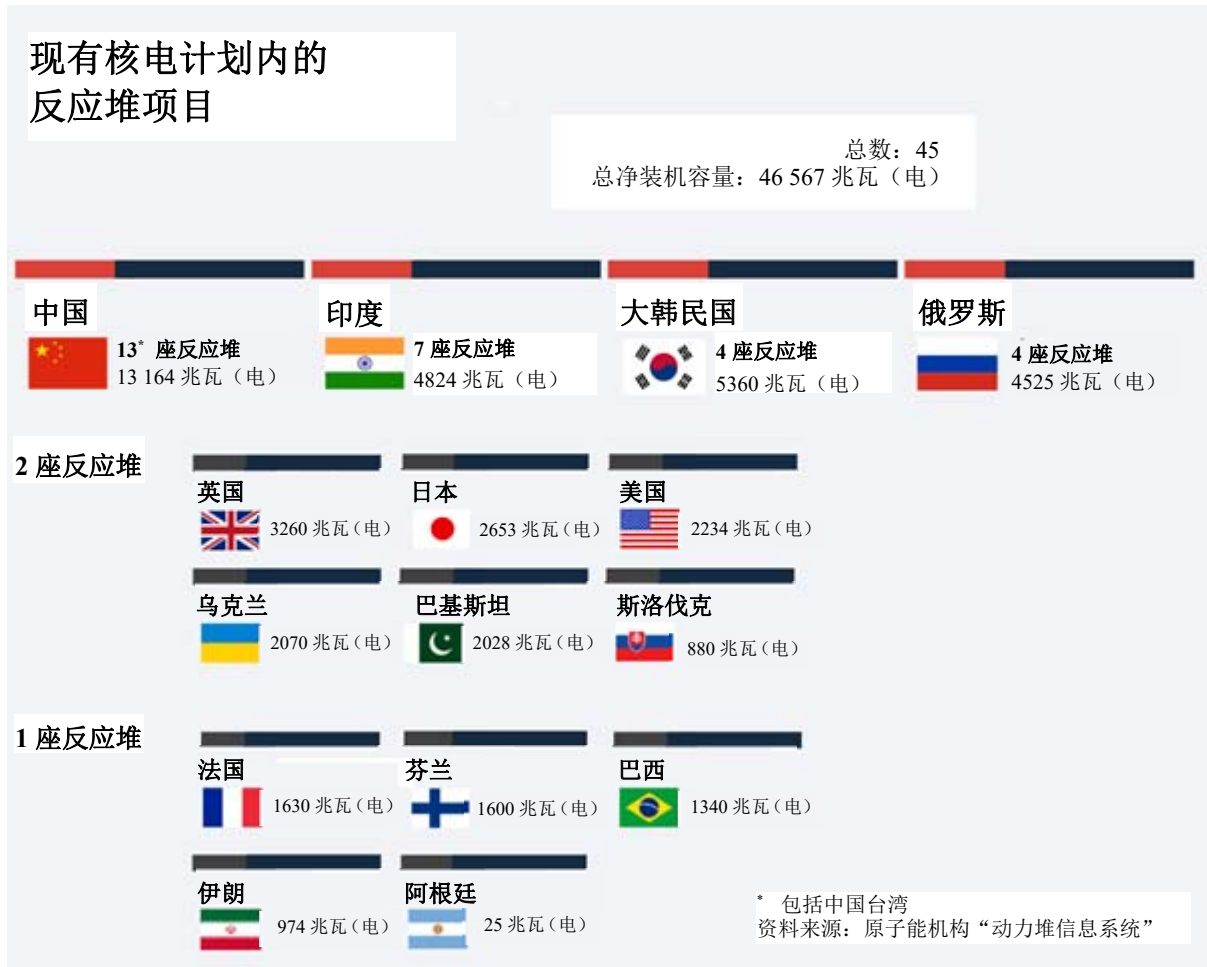


图 A-5. 有现有核电计划的 15 个成员国正在增建核电机组。

33. 2019 年，中国将第二座欧洲压水堆（台山 2 号）以及 APCR-1000 反应堆（阳江 6 号）并网，从而使在运核电机组总数达到 48 台。加上台湾的四座在运反应堆，中国的核电总装机容量达到了 49 362 兆瓦（电）。同时，芬兰和法国宣布计划分别于 2020 年 7 月和 2022 年底将其欧洲压水堆并网。在英国，已为欣克利角 C 的奠基浇筑了第一罐混凝土。

34. 2019 年 6 月，俄罗斯联邦的俄罗斯核电厂电能和热能生产联合企业获得了将罗蒙诺索夫院士号浮动核电站运行至 2029 年的许可证，12 月，该反应堆并网。（详情见第 152 段）。

35. 印度拥有 22 座在运反应堆和七座在建反应堆，预计到 2031 年将使合并发电容量为 15 700 兆瓦（电）的 21 座新核动力堆投入运行。

A.1.3. 启动核电国家

36. 在对核电表示兴趣的 28 个成员国中，18 个已启动核电基础结构研究，四个已作出决定和正在建设机构能力以及发展必要基础结构以备进行核电厂的承包和筹资，一个（埃及）已签署合同并正在进行建设准备，两个（孟加拉国和土耳其）已开工建造，另外两个（白俄罗斯和阿联酋）即将完成其首座核电厂的建设。

37. 在阿拉伯联合酋长国（阿联酋），巴拉卡核电厂四座反应堆的建设已基本完成，前两个机组的运行许可证签发在即。1号机组的装料定于2020年第一季度进行，2号机组的装料定于一年后进行。2019年9月开展了应急准备评审后续工作组访问。

38. 在白俄罗斯，在奥斯特洛韦茨的首座核电厂的建造正在进行中。在监管核准的前提下，第一台机组的装料定于2020年第一季度进行，第二台机组的调试定于2021年进行。白俄罗斯在2019年8月接受了原子能机构国家核材料衡控系统咨询服务工作组访问和运行前安全评审组工作访问，并请求于2020年2月开展综合核基础结构评审第三阶段工作组访问。

39. 在孟加拉国，卢普尔核电厂的建造正在进行中，1号机组和2号机组的调试预计分别于2023年和2024年进行。第二个核电厂项目的场址勘查正在进展中。预计于2020年进行综合监管评审服务工作组访问。预计于2021年进行国际实物保护咨询服务工作组访问和原子能机构国家核材料衡控系统咨询服务工作组访问。

40. 在土耳其，阿库尤核电厂第一台机组的建造继续进行，调试预计于2023年进行，而第二台机组的建造许可证已经签发。计划于2020年开展一次国际实物保护咨询服务工作组访问，并预计于2021年开展一次综合监管评审服务工作组访问。

41. 在埃及，继埃尔达巴四机组核电厂在2019年3月获得场址许可证审批后，计划在监管批准的前提下，于2020年年中开始建造。预计第一台机组的调试于2026年完成，其他机组的调试在2028年前完成。埃及于2019年1月接受了场址和外部事件设计工作组访问，于2019年10月至11月接受了综合核基础结构评审第二阶段工作组访问。

42. 沙特阿拉伯继续为并行建造一座小型模块堆和两座大型核电厂进行准备工作。这两座大型核电厂的场址表征正在进行中。系统一体化模块式先进反应堆的建造预计于2023年开始，调试预计于2028年开始。

43. 约旦继续开展技术评定，以选定适当的中小型反应堆或模块堆。一座基于选定中小型反应堆或模块堆技术的200–400兆瓦（电）电厂将于2030年之前进行调试。从更长远（2030年之后）来看，预计将建造一座大型核电厂。

44. 尼日利亚计划建造四台反应堆机组，官方预计第一台机组将于2027年运行。恢复完成可行性研究前的预可行性研究的决定可能导致目标日期的额外延迟。

45. 在波兰，继进行公众协商后，预计2020年将作出继续实施核电计划和建造一座核电厂的决定。第一台机组的调试预计于2033年进行。

46. 在认识与基于为建立安全、可靠和可持续的核电计划提供支持的“里程碑”方案发展必要核电计划基础结构相关的承诺和义务方面，成员国继续受益于原子能机构的援助。

2019 年，通过在以下八个成员国开展的国家技术合作项目更新了这些国家的“综合工作计划”和“国家核基础结构概况”：沙特阿拉伯（1 月）、土耳其（1 月）、约旦（2 月）、白俄罗斯（3 月）、波兰（3 月）、菲律宾（11 月）、肯尼亚（12 月）和孟加拉国（12 月）。2019 年，对埃及进行了综合核基础结构评审第二阶段工作组访问，对加纳进行了综合核基础结构评审第一阶段后续工作组访问，这使 2009 年以来实施的综合核基础结构评审工作组访问达到在 21 个成员国开展了 29 次。此外，有来自 52 个启动和扩大核电国家的约 490 名参加者通过参加 INT2018 号技术合作项目“支持明智决策并建设启动和实施核电计划的能力”框架内的 31 次跨地区培训活动而受益（图 A-6）。



图 A-6. 原子能机构通过专家同行评审工作组访问、旨在弥补已确定的差距的活动和能力建设向启动新核电计划的国家提供的综合支持帮助奠定首座核电厂的基础。

A.2. 核电增长预测

47. 经与地区专家磋商后编写并反映有关政策和市场状况的最新信息的原子能机构 2019 年预测（图 A-7）就核电未来对全球电力生产的贡献给出了一个好坏参半的估计，这将部分地取决于能否大幅增加新容量，来抵消潜在的反应堆退役。在到 2030 年的低值预测中，核电净装机发电容量将逐渐减少，随后，到 2050 年反弹到 371 吉瓦（电）。在高值情况下，到 2030 年容量将增至 496 吉瓦（电），到 2050 年容量将增至 715 吉瓦（电）。这意味着到 2030 年容量将比当前水平增加 25%，到 2050 年将增加 80%。到本世纪中叶，核电在全世界总发电容量中的份额按低值预测约为 6%，按高值预测约为 12%，而目前约为 10%。

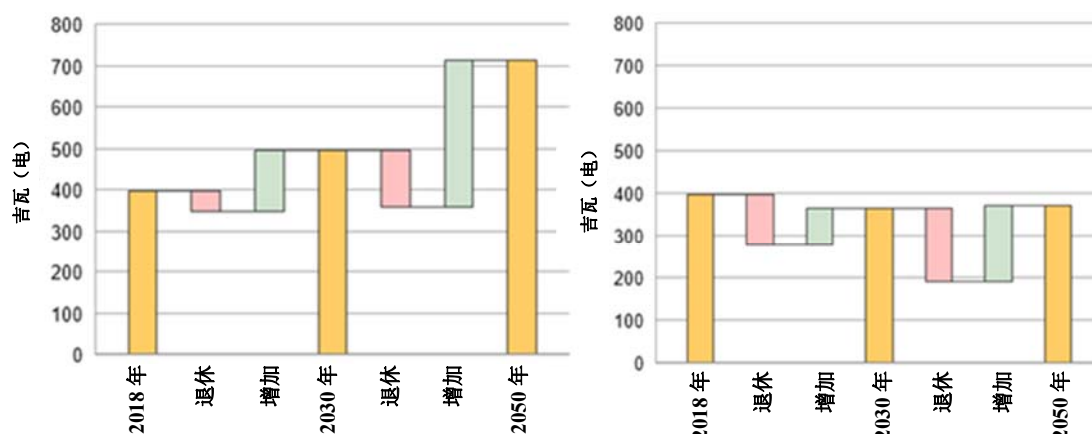


图 A-7. 全球核电容量的高值预测（左）和低值预测（右）。（来源：《到 2050 年的能源、电力和核电预测》，原子能机构《参考数据丛书》第 1 号，2018 年）

48. 两种预测之间的变动幅度很大，是因为计划在 2030 年前后退役的大量反应堆更换的不确定性，特别是在北美和欧洲地区。然而，由于最近宣布了一些地区现有核电厂的未来和长期扩大计划，因此 2019 年的预测比前几年的不确定因素少一些。可能需要大量新容量来抵消因堆龄、竞争力或其他因素导致的潜在反应堆退役。

49. 作为可持续能源转型的一部分，核能与其他低碳技术一起，可以满足到 2050 年不断增长的电力和非电能源需求。就 2050 年的核发电量而言，在严格的气候变化减缓假设方案中，总共有 90% 报告高于原子能机构最新的低值预测，同时有 60% 报告超过原子能机构的高值预测。

无论政府间气候变化专门委员会和国际原子能机构，还是各国政府、工业界和非政府组织，其全球能源假设方案都设想核电在减缓气候变化方面发挥越来越大的作用，以实现“巴黎协定”的目标。这一事实也体现在原子能机构 2019 年 10 月与经合组织核能机构合作组织的[气候变化和核电的作用国际会议](#)的结论中。

50. 与原子能机构预测所反映的当前政策和市场趋势以及各国根据“巴黎协定”提交的国家自主贡献中的适度缓解目标相比，这些假设方案表明，需要做出进一步努力来释放核电巨大的缓减潜力，从而实现宏大的全球气候目标。

A.3. 燃料循环

A.3.1. 前端

铀资源和生产

2019 年，铀现货价格仍然低迷，一般保持在 52 美元/千克铀至 57 美元/千克铀之间。铀现货价格自 2018 年以来保持相对不变（在 47 美元/千克铀至 59 美元/千克铀之间），自 2013 年以来持续低迷，导致铀勘探计划显著减少。

51. 处于规划或开发阶段的新铀项目仍被搁置，以前活跃的一些铀矿和加工设施仍处于保养和维护状态，以应对铀现货价格低。2019 年全球活跃铀矿的铀产量预计与 2018 年相似，2018 年产量为 53 498 吨铀。这意味着自 2016 年以来，全球铀产量减少约 15%。

52. 哈萨克斯坦仍然是世界最主要的铀生产国。2019 年，有八个铀矿在运营，而且全都采用原地回收技术，合计总产量据预测在 22 000 吨铀和 23 000 吨铀之间（略高于 2018 年 21 705 吨铀的产量）。在加拿大，第二大生产商雪茄湖铀矿和相关的麦克柯林湖选冶厂是 2019 年仅有的活跃的铀生产商，预测产量约为 7000 吨铀，同时，由于铀价格低，有两个铀矿和两个选冶厂处于无限期保养和维护状态。在澳大利亚，随着兰杰铀矿进入退役和治理阶段，其铀作业在 2019 年逐步缩减生产（预测从库存中加工出 1400 吨铀至 1800 吨铀）。奥林匹克坝铜矿生产铀（2019 年约为 3000 吨铀）作为一种副产品。四英里原地回收作业据预测在 2019 年生产了约 1200 吨铀。澳大利亚 2019 年的铀总产量据预测在 5600 吨铀和 5800 吨铀之间（略低于 2018 年 6517 吨铀的产量，原因是兰杰矿产量缩减）。

53. 在非洲，纳米比亚和尼日尔有活跃的铀矿。纳米比亚有四个已开发的铀矿，其中两个正在运行（罗辛和哈萨博，2019 年的预测产量分别为 2200 吨铀和 3028 吨铀），两个因低铀价而处于保养和维护状态（蓝格·海因里希和特雷科皮）。然而，2019 年末发布了一项预可行性研究，以期在 12 个月内重启蓝格·海因里希铀矿。尼日尔有两个正在运行的铀矿：索麦尔和康米纳克。这两个矿 2019 年的生产率预计与 2018 年持平（索麦尔矿为 1769 吨铀，康米纳克矿为 1115 吨铀）。2019 年非洲的铀总产量据预测为 8100 吨铀。

54. 中国的国家政策是确保，为核电中长期可持续发展提供充足的铀资源供应。中国国内目前有七个铀矿正在运行，综合年产量为 1650 吨铀。此外，中国参与了若干国外矿产开发项目，主要在哈萨克斯坦、纳米比亚和尼日尔。

55. 在约旦中部回收铀的可行性研究仍在继续，2020 年将对约旦中部场址（基于堆浸技术）的一个中试厂进行调试。在西班牙萨拉曼卡的一个铀浓缩物制造厂项目也在评价过程中。

转化和浓缩

56. 目前的转化和浓缩能力对满足全球需求绰绰有余，但市场分化而且生产集中在少数几个供应商。目前，有五个生产商满足全球对六氟化铀的大部分需求，其额定产能为每年 62 000 吨铀，但 2019 年的产能利用率仅有 56%（生产了约 34 500 吨）（图 A-8）。浓缩铀的全球供应主要来自商业浓缩厂以及二次供应，如以前生产的浓缩铀或尾料再浓缩。大多数浓缩能力集中在欧洲和俄罗斯联邦（欧安诺集团、铀浓缩公司和国家原子能公司），但中国核工业集团公司（中核集团公司）正在发展成为中国的浓缩服务国内供应商，并计划今后在国际上提供这些服务。



图 A-8. 2019 年全球转化和浓缩能力。

燃料制造

57. 为遵守欧洲原子能联营供应机构的核燃料供应多样化战略，保加利亚科兹洛杜伊核电厂于 2019 年 2 月宣布，根据一份 310 万保加利亚列弗（180 万美元）的合同，它聘请了西屋电气公司的瑞典分公司研究其核电厂两个机组（5 号和 6 号）的许可证审批和改良燃料整合方案。捷克电力公司于 2019 年 4 月宣布，它将向其泰梅林核电厂 1 号机组装载六个由西屋电气公司瑞典分公司生产的实验性燃料组件。俄罗斯 TVEL 燃料公司（国家原子能公司的一部分）是科兹洛杜伊核电厂和泰梅林核电厂的主要核燃料供应商，它定期向这些核电厂提供更持久的先进燃料（TVSA-12 和 TVSA-T.mod.2）。

58. 2019 年 2 月，西屋电气公司宣布推出为沸水堆设计的新一代燃料组件（商业名称：Triton11，技术名称：11x11 沸水堆），以大幅减少燃料循环成本并提高运行的可靠性和安全性。新组件将首先在芬兰奥尔基卢奥托核电厂 1 号和 2 号机组进行测试，这些机组拥有 900 兆瓦（电）的 ABB-III 型沸水堆。

59. 2019 年 3 月，中核集团公司完成了压水堆国内核燃料组件的长期辐照试验，并开始为国内设计的华龙一号（HPR1000）压水堆大规模生产中国燃料第三代燃料组件（在位于中国四川省宜宾的中核集团公司主要的压水堆燃料元件制造厂制造，使用的是哈萨克斯坦乌尔巴冶金厂的燃料芯块）。

60. 由 TVEL 燃料公司制造的具有先进燃料芯块（由增加密度和导热率的二氧化铀和铀钼合金制成）和包覆材料（由镀铬锆或铬镍合金制成）四种不同组合的两个实验燃料组件于 2019 年 1 月被装入俄罗斯联邦季米特洛夫格勒原子反应堆研究所的 MIR 研究堆，并在 2019 年期间进行了测试。

61. 南方核电公司和法马通公司于 2019 年 4 月宣布，在春季换料停堆期间，已将首个含有氧化铬增强燃料芯块和铬包覆锆合金包壳的耐事故燃料组件装载到美利坚合众国佐治亚州沃格特勒核电厂 2 号机组。BWX 技术公司 2019 年 10 月宣布，它正在重启其位于美利坚合众国弗吉尼亚州林奇堡设施的现有碳化铀三层各向同性燃料生产线。

62. 2019 年 1 月，TVEL 燃料公司与印度原子能部签署了为塔拉普尔原子能电站沸水堆反应堆供应铀燃料芯块的合同（50 吨燃料芯块已在 2019 年 11 月前交付）。2019 年 7 月，TVEL 燃料公司与中核集团公司的两个子公司 — 苏能核电有限公司和中国原子能工业公司 — 签署了为中国江苏省田湾核电站的 7 号和 8 号机组供应核燃料的合同。也是在 2019 年 7 月，TVEL 燃料公司向中国实验快堆交付了一批核燃料。2019 年 8 月，TVEL 燃料公司被指定为孟加拉国卢普尔核电厂两个机组整个寿期的核燃料单一来源供应商。

63. 2019 年 8 月，由俄罗斯联邦热列兹诺戈尔斯克采矿和化学联合公司制造的 18 个燃料组件组成的第一批工业混合氧化物燃料被接收并装入了别洛雅尔斯克核电厂的 BN-800 快堆。在俄罗斯联邦，对用于水冷却和水慢化动力堆（水水动力堆）的再生混合物燃料（铀和钚的后处理混合物）和用于快堆的氮化物混合铀钚燃料的反应堆试验也在进行中。

64. 2019 年 9 月，乌克兰国家核能发电公司（国家核电公司）与西屋电气公司签署了一份初步协议，由西屋电气公司为乌克兰的 VVER-440 型反应堆生产燃料。2019 年 9 月，在预定换料停堆期间，为埃克隆公司的拜伦核电站 2 号机组装载了美利坚合众国爱达荷国家实验室制造的西屋 EnCore 燃料棒的导引试验组件，该组件由高密度 ADOPT 芯块（西屋公司掺杂铬和氧化铝的二氧化铀芯块，用于提高燃料的经济性）和硅化铀芯块（用于提高安全性和电厂经济性）组成，封装在一个铬包覆锆包壳中（用于提高抗氧化性和耐腐蚀性）。

A.3.2. 供应保证

65. 2010 年 12 月，原子能机构理事会核准建立原子能机构低浓铀银行。原子能机构与哈萨克斯坦于 2015 年完成了在哈萨克斯坦乌斯特-卡缅诺戈尔斯克的乌尔巴冶金厂场址建立原子能机构低浓铀银行的基本法律框架。

66. 原子能机构低浓铀银行在哈萨克斯坦（图 A-9）建成，并在原子能机构低浓铀贮存设施于 2019 年 10 月 17 日接收了根据与欧安诺集团的“供应合同”供应的 32 个满装 30B 型容器之后开始运行。另外，2019 年 12 月 10 日接收了根据与哈萨克斯坦国家原子能公司（Kazatomprom 公司）的“供应合同”供应的 28 个满装 30B 型容器。



图 A-9. 设在哈萨克斯坦、储存有低浓铀密闭容器的原子能机构低浓铀贮存设施。
(照片：哈萨克斯坦外交部)

67. 《2012 年核技术评论》（GC(56)/INF/3 号文件）介绍了已建立的其他供应保证机制。

A.3.3. 后端

乏燃料运输

68. 在美利坚合众国，核管理委员会于 2019 年 8 月认证了 Holtec 国际公司的 HI-STAR 100MB 型运输货包。该设计是对早期型号的改进，目的是使其相较于其前身能够运输燃耗更深、冷却时间更短的燃料。在 2018 年 8 月暂停之后，圣奥诺弗雷核电厂的乏燃料转移于 2019 年 5 月恢复。核管理委员会在结束对乏燃料罐放置在贮存库期间的事实的调查后，批准重新开始运行。

69. 8 月，白俄罗斯政府正式批准了该国的新核电厂乏燃料管理战略。该战略涉及将该核电厂乏燃料运送到俄罗斯联邦进行后处理以及将放射性废物返还白俄罗斯进行处置。

70. 在俄罗斯联邦，第一批受损乏核燃料组件从内尔帕造船厂的莱普斯浮动技术基地转移到摩尔曼斯克。作为欧洲复兴开发银行管理的一项计划的一部分，燃料最终将被送往马亚克工厂进行后处理。

乏燃料贮存

71. 迄今，已从核电厂卸出约 40 万吨重金属乏核燃料，其中约 30% 进行后处理，其余的则贮存在 27 个国家的反应堆水池或 151 个离堆乏燃料贮存设施中。2019 年，来自列宁格勒和库尔斯克核电厂的 6630 多个 RBMK-1000 乏燃料组件被转移到采矿和化学联合公司进行干法贮存。

72. 在日本，福岛第一核电站2号机组一次安全壳内的燃料碎片照片于2月发布。在进行摄影测量之后，利用具有操纵性能的远程探头进行进一步测量；它能够从五个地点提取碎片样本，用于进一步表征和分析。从福岛第一核电站3号机组水池中移除566个乏燃料组件的工作于2019年4月开始，此前清理了事故产生的反应堆维修层的瓦砾。这些燃料组件将被带到厂内集中水池。

73. 在英国，2019年8月启动了一个在塞拉菲尔德重新包装旧坏罐的五年计划，第一个罐被打开并重新包装成一个更坚固的现代式外层罐。镁诺克斯公司各反应堆的燃料卸载工作已经完成，从威尔法和卡尔德豪尔场址转移最后一批乏燃料的工作于9月完成。乏燃料在后处理前被运输到塞拉菲尔德贮存。正在进行的从敦雷快堆中移除剩余增殖元件的工作已经完成了一半。需要专门的远程工具来移除1977年反应堆关闭时留在原地被卡住的元件。

74. 在乌克兰，切尔诺贝利乏核燃料临时贮存设施（用于处理核和贮存切尔诺贝利核电站1号、2号和3号机组乏燃料废弃物的设施）于2019年9月完成预调试阶段，一旦营运者（切尔诺贝利核电站）从监管机构获得单独运行许可证，将正式进入全面调试。

乏燃料后处理

75. 自英国热氧化物后处理厂关闭以来，全球每年商用乏燃料的后处理能力约为4000吨（一旦六所村后处理厂再次全面运行，这一能力可能会提高）。

A.4. 退役、环境治理和放射性废物管理

A.4.1. 核设施退役

76. 截至2019年12月31日，全世界有186座动力堆已关闭或正在退役。其中17座反应堆已完全退役，还有更多正进入最后退役阶段。150多个燃料循环设施已经永久关闭或正在退役，约130个已经退役（图A-10）。



图 A-10. 2019 年全球退役状况。

77. 截至 2019 年 12 月 31 日，560 多座研究堆和临界装置已经永久关闭，其中约 440 座已经完全退役；近 70 座研究堆正在进行活性退役，约 60 座正在永久关闭，等待退役。

78. 2019 年 9 月，欧盟委员会联合研究中心与意大利负责退役和放射性废物管理国有公司核电厂管理公司签署了一份关于拆除 ISPRA-1 研究堆的协议。

79. 成熟退役技术的部署和研究与发展工作正带来持续改进，主要是在拥有广泛核电计划的国家。自爬升平台就是有效利用创新技术的一个例子，该平台系为协助拆除塞拉菲尔德场址遗留物后处理厂的通风管而设计（图 A-11）。

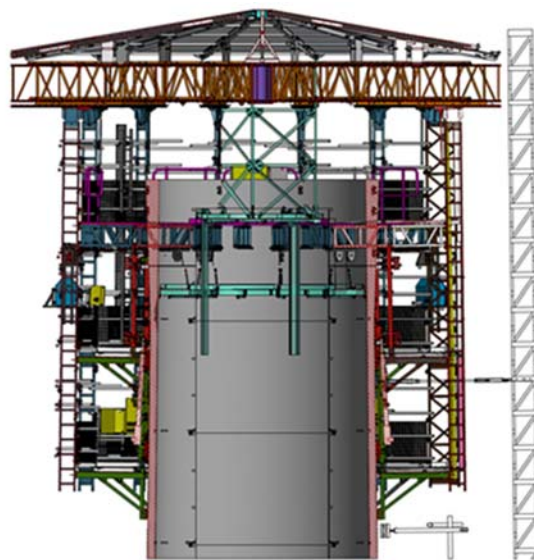


图 A-11. 为协助拆除塞拉菲尔德场址遗留物后处理厂的通风管而设计的自爬升平台
(照片：塞拉菲尔德公司)

80. 在欧洲复兴开发银行的支持下，保加利亚、立陶宛、斯洛伐克和乌克兰的核电厂退役项目继续取得进展。例子包括将蒸汽发生器从博胡尼斯 V-1 核电厂反应堆大厅移至汽轮机大厅，以便进一步破碎（图 A-12），以及启动伊格纳林纳核电厂关于拆除其高功率通道式反应堆和石墨贮存的项目。



图 A-12. 从斯洛伐克退役的博胡尼斯 V-1 核电厂拆除 12 台重 145 吨的蒸汽发生器中的最后一台。(照片：核和退役公司 JAVYS)

81. 欧洲联盟几个成员国提出的基于利益相关方的退役研究分析或“SHARE”项目已被欧盟委员会接受，并于 2019 年 6 月中旬开始实施。SHARE 项目打算在 2021 年底为技术和非技术领域研究提供一个包容性路线图，使利益相关方能够共同加强安全、降低成本并尽量减少核设施退役对环境的影响。

82. 日本原子力开发机构公布了后端路线图，其中表明了该机构关于其装置退役以及相关放射性废物处理和处置的长期政策。该路线图将在 2020 年接受一次“放射性废物和乏燃料管理、退役和治理综合同行评审”审查。

83. 2019 年 9 月，日本原子力损害赔偿和退役支援机构发布了“2019 年关于东京电力控股株式会社福岛第一核电站退役的技术战略计划”，其中包括确定 2 号机组燃料碎片回取方法的建议，2 号机组将是首个清除碎片的机组。福岛第一核电站场址退役工作正在取得进展，其中包括 2 号机组的内部调查和 3 号机组乏燃料池的燃料移除。

A.4.2. 环境治理

84. 场址运营者镁诺克斯公司在位于英国哈威尔场址的前液体排出物处理厂的治理方面取得了良好进展（图 A-13）。2018 年 2 月开始对 4.2 公顷的场址进行作业，截至 2019 年 10 月底，已成功挖掘、分析 54 000 吨材料，并将其交付至适当的场外处置路线。作业产生的所有废料都装入 0.9 立方米的散装袋中，并使用高分辨率伽马能谱对所有散装袋进行分析。预计治理工作将于 2020 年夏季前完成，随后将于 2021 年取消监管控制并恢复场址。竣工后，该场址将归还给土地所有者，作为哈威尔园区开发的一部分进行再利用。

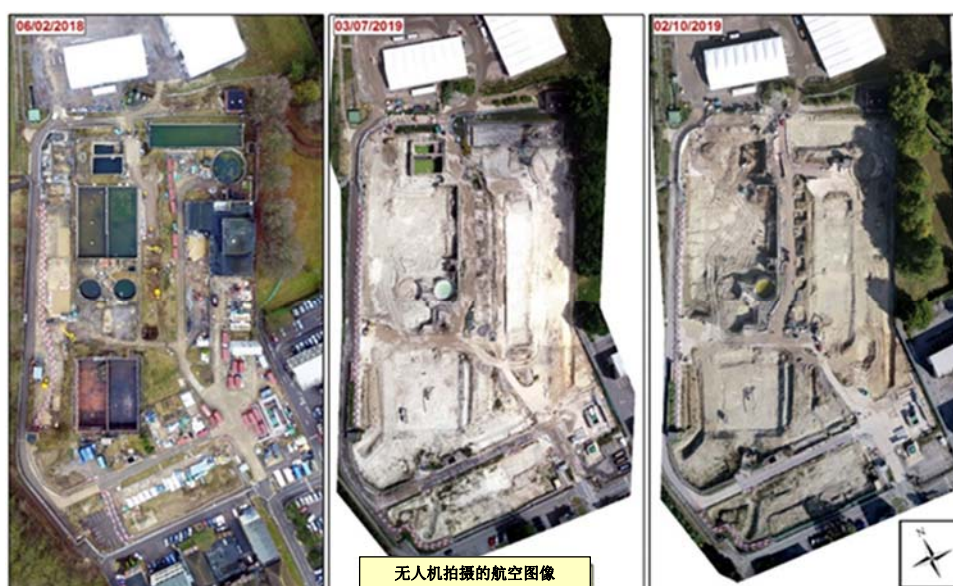


图 A-13. 无人机拍摄的航空图像显示了英国哈威尔场址液体排出物处理厂的治理进展。(照片：镁诺克斯公司)

85. 2019 年 2 月，兰杰铀矿（图 A-14）营运者澳大利亚能源资源公司完成了兰杰铀矿关闭可行性研究，该研究提供了一份详细的修复时间表和 8.3 亿澳元的相关成本估算。自 2012 年以来，逐步修复工作一直在进行，迄今为止，重要的里程碑包括用尾矿和废石回填 1 号矿坑、地下勘探下降坡道退役、尾矿从尾矿贮存设施疏浚至 3 号矿坑、建设和运行处理工艺用水的盐水浓缩装置和开始恢复植被。根据目前批复，采矿和加工活动必须在 2021 年 1 月前停止，以及最终修复工作必须在 2026 年 1 月前完成。一个关键的修复目标是使场址的生态系统与周围环境保持一致，以便最终将其纳入卡卡杜国家公园。



图 A-14. 兰杰铀矿场址。(照片：澳大利亚能源资源公司)

86. 在美利坚合众国，环境保护署几乎完成了密西西比磷酸盐公司场址一个关键特征的治理活动。耗资约 7200 万美元，在西石膏堆场上安装了一个独特的覆盖系统，覆盖

面积约为 235 英亩。覆盖系统的基础是线性低密度聚乙烯材料，这种材料将限制雨水渗透并减少放射性和化学污染物从堆场中浸出。覆盖系统能使场址永久关闭，同时最大限度地减少对人员和环境的风险。该场址于 20 世纪 50 年代开始运营，一直在生产肥料磷酸氢二铵。由于破产，运营于 2014 年停止，设施中贮存了超过 7 亿加仑的酸性污染废水，磷石膏废物分两堆处置。石膏堆是由浆状磷石膏和石膏堆积而成。

87. 2019 年 12 月，意大利在 Trisaia 场址的治理方面取得显著进展，完成了含放射性废物的钢筋混凝土结构物的移除。该垂直棱柱形结构物建于 1960 年代晚期，位于地下 6.5 米，质量约为 130 吨，体积为 54 立方米。

88. 2019 年，切尔诺贝利核电站冷却池退役项目完成。该项目于 2014 年开始，此前完成了若干放射学和生态学研究，并在原子能机构支持下开展了可行性研究和环境影响评估。这些研究建议停止向冷却池供水，以便降低池内水位。还建议在降低水位期间进行生态和放射性监测，以确保人员和环境始终安全。监测数据的结论是，正如可行性研究所预测的，生态变化和放射性污染物的再分布已广泛发生。退役大大降低了冷却池区域的运营成本，并降低了周围区域发生洪水的风险。该场址的生态状况每年都在不断改善，通过对禁区实施限制，健康和安全得以维持（图 A-15）。

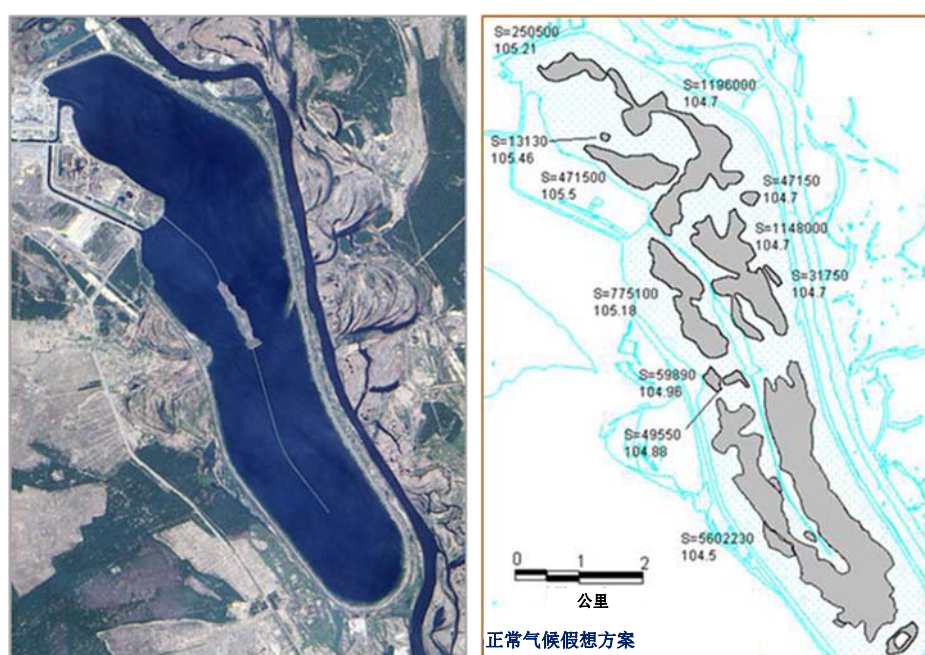


图 A-15. 左图：切尔诺贝利核电站冷却池退役前的航空图像。右图：计算机模拟显示退役后剩余的水体。（照片：切尔诺贝利核电站地震安全评价）

A.4.3. 放射性废物管理

弃用密封放射源的管理

正在积极探索弃用密封放射源的寿期末管理方案，包括在适宜设施与其他废物共处置。钻孔处置项目正在包括加纳和马来西亚在内的若干国家取得进展。马来西亚钻孔处置项目许可证于 2019 年 7 月由监管机构发放给马来西亚核能机构。

89. 为筹备处置项目，用于整备较低类别的弃用密封放射源（三类至五类）的移动工具箱设施于 2019 年 6 月完成调试，并于 2019 年 9 月运往马来西亚。钻孔作业预计将于 2020 年初开始。

90. 2019 年，加纳成功完成了三类至五类弃用密封放射源的表征和整备，这些弃用密封放射源已被转移到一个集中贮存设施，等待安置在加纳原子能委员会场址的一个钻孔处置系统中。

91. 2019 年进行了一些成功的作业，从用户设施移除了弃用密封放射源，并将其置于安全可靠的贮存条件之下。最后剩下的一个一类弃用密封放射源从北马其顿移除，两个（一类和二类）弃用密封放射源从阿尔巴尼亚移除。

92. 在其他几个成员国，包括克罗地亚、塞浦路斯、约旦、尼泊尔、尼加拉瓜、斯洛文尼亚和突尼斯，已经开始清除一类和二类源。

93. 库拉索岛完成了整备弃用密封放射源的操作，当地人员接受了关于弃用密封放射源管理的适当课堂培训和实际操作培训。

94. 除了正在使用的密封源外，在格林纳达、海地、巴布亚新几内亚、圣文森特和格林纳丁斯以及库拉索岛还建立和（或）更新了弃用密封放射源的国家库存清单。

95. 包括巴巴多斯、圭亚那、肯尼亚和马来西亚在内的几个成员国通过国家或地区培训提高了查找和回收无看管源的能力。

96. 借助成员国和内部利益相关方提供的输入，《国际密封放射源和装置目录》正在进行广泛的软件更新。2019 年正在努力增加更多关于源和装置的详细资料。

预处置

97. 位于美国能源部爱达荷国家实验室的高级混合废物处理项目于 2019 年 11 月完成任务。该项目于 2003 年首次接受委托，准备了超过 65 000 立方米的超铀中放废物，供在美利坚合众国新墨西哥州废物隔离中间工厂处置。高级混合废物处理项目结合使用了传统和高科技回收、表征和处理技术，包括机器人技术，以处理爱达荷国家实验室和美国能源部其他 15 个场址的中放废物。

98. 2019 年 7 月，切尔诺贝利核电站液体废物处理厂开始启动处理工作。截至 2019 年 9 月，已准备好 120 个废物包进行处置。工厂的设计能力为每天 42 个废物包（每个 200 升）。首批 120 个废物包已经转移到 Vector 生产综合设施进行处置。

99. 在芬兰，乏核燃料封装厂已经奠基，并于 2019 年 9 月开始建设。封装厂将准备乏核燃料以作最终处置。该封装厂是芬兰处置计划实施的一个关键组成部分，并与芬兰奥尔基卢奥托正在建设的地质处置设施相连（图 A-16）。



图 A-16. 芬兰核废物管理专家组织的乏核燃料封装厂的建设。
(照片：芬兰核废物管理专家组)

100. 在格鲁吉亚，已建议在某个场址建立一个临时贮存设施和一个处理设施，以管理该国的遗留废物。遗留废物产生于 20 世纪 50 年代至 80 年代的活动，包括放射源、放射性材料和其他被放射性物质污染的物项。欧洲联盟为计划在该场址建立的处理设施和临时贮存设施的设计提供了资金。瑞典辐射安全管理局与瑞典国际开发合作署合作，对支持该项目的国际采购进行协调，并向格鲁吉亚政府提供援助。摩尔多瓦正在推进一个管理氡类设施放射性废物的项目。目前正在为该设施的回收、放射性废物管理和去污制定详细的计划和辅助技术文件。

101. 2019 年 9 月，英国公布了一项放射性废物综合管理战略，其中涵盖核退役管理局管辖内包括 17 个场址产生的所有放射性废物。相关活动涉及核电厂、乏燃料后处理设施、研究机构和处置场址。此外，经过六年的工作，低放废物处置库场址上含钚污染物的掩体的去污工作已经完成。这项工作包括重新包装钚污染物并将其转移到英国塞拉菲尔德的安全贮存设施。

处置

102. 2019 年，许多成员国全年一直在运行低放废物设施和中放废物处置设施。其中包括：用于极低放废物深沟处置的设施（如法国、西班牙、瑞典）或用于干旱地区低放

废物深沟处置的设施（如南非、美利坚合众国）；用于低放废物的近地表专设设施（如在中国、捷克共和国、法国、印度、日本、俄罗斯联邦、斯洛伐克、西班牙、英国）；以及位于各种深度地质建造中的中低放废物所用专设设施（如捷克共和国、芬兰、德国、匈牙利、大韩民国、挪威、俄罗斯联邦和美利坚合众国）。

103. 此外，在保加利亚科兹洛杜伊核电厂附近雷蒂安娜场址的国家处置设施和伊朗伊斯兰共和国阿纳拉克核废物处置库场址，还正在建设低放废物处置设施。国家处置设施建设的第一阶段预计在 2021 年 7 月底完成，处置作业预计在 2023 年调试后开始（图 A-17）。在伊朗伊斯兰共和国，运营支持设施正在建设中，预计将于 2022 年完工，运营许可证计划于 2025 年发放。



图 A-17. 科兹洛杜伊核电厂附近雷蒂安娜场址的国家处置设施的建设，显示了行政综合大楼的一部分（左）、废物接收和缓冲贮存大楼（右）和 1 号处置平台的黄土水泥地基（最右）。

104. 在立陶宛，伊格纳林纳核电厂近地表处置设施的施工招标于 2019 年 3 月宣布，计划于 2020 年开始施工。在比利时，德塞尔设施的许可证申请于 2019 年 2 月提交。

105. 2019 年 9 月，克罗地亚和斯洛文尼亚之间关于一个潜在的低放废物联合处置库的谈判结束，双方达成一项建造和运营两个独立的国家处置库的协议。斯洛文尼亚将继续为建造位于克尔什科核电厂附近的威尔比那处置库准备许可证申请，克罗地亚将在切尔克佐瓦茨建造一个混凝土拱顶型处置库。

106. 位于伊拉克埃尔图韦萨的低放废物处置库的技术设计和相关安全评估于 2019 年夏天完成，并提交给作为营运者的伊拉克科学技术部和环境部。技术设计由欧盟委员会资助。

107. 在巴基斯坦，在博德瓦尔高原上为低放废物近地表处置设施选择了一个场址，并开始了初步设计工作。

108. 在德国，康拉德中放废物处置库的建设工作仍在继续，2号竖井废物转运站的挖掘工作已于2019年6月完成。

109. 一些成员国在处置高放废物方面正在取得重大进展。芬兰正在建造一座深部地质设施，瑞典正在等待对其许可证申请作出最后决定，法国正在完成对地质贮存工业中心设施的许可证申请。在芬兰，前两个废物运输隧道和前五个沉积隧道的施工合同已经授予，封装的乏核燃料将在这两个隧道中处置。隧道工程定于2020年初开始，将持续约两年半的时间。作为深部地质处置库许可证审批过程的一部分，监管机构核准了瑞典核燃料和废物管理公司的补充资料，其中对土地和环境法庭提出的问题作了答复。最终决定将由瑞典政府做出。在法国，在卡洛夫-牛津阶粘土岩中建设高放废物深部地质处置库的地质贮存工业中心项目正在取得进展，预计2020年将提交许可证申请。

110. 其他成员国在处置高放废物方面也实现了重大计划目标。在中国，2019年5月6日最终批准在戈壁滩北山地区（花岗岩地层）建设一个地下研究实验室。地下研究实验室旨在调查当地花岗岩作为高放废物深部地质处置库所在地的适宜性。该实验室计划在560米的深度建造，并将接受有意开展和参与研究的其他成员国的请求。此外，中国确定粘土层潜在处置库场址的工作也正在取得进展。第一个项目于2018年底完成，并于2019年10月被中国国家原子能机构验收。已经确定了有待进一步调查的两个潜在场址。

111. 在英国，在英格兰（2018年12月）和威尔士（2019年1月）启动了新的选址计划，以便为较高活度放射性废物建立一个深部地质处置库。目前，放射性废物管理有限公司（营运者）正积极与可能感兴趣的社区和广大公众接触，以提高认识、回答问题并讨论地质处置设施的所在地问题。放射性废物管理有限公司对与地质处置设施安全相关的地质数据进行了深度审查，以便为初步讨论提供参考。

112. 在美利坚合众国，能源部卡尔斯巴德外地办事处和核废物伙伴关系授予了一项在废物隔离中间工厂建造新的公用竖井的合同。新墨西哥州卡尔斯巴德的中低放废物处置库于2017年1月9日重新开放并于2017年4月10日接受第一批货物，而在此之后的新竖井是努力恢复满负荷运行的一个关键组成部分。

B. 先进的裂变和聚变

B.1. 先进的裂变

113. 先进核反应堆及其应用当前在世界每个地区都呈现出蓬勃发展的势头，因为其被视为能够促进全球向更可持续、更负担得起、更可靠的能源系统过渡的核能系统，还更适合集成到以可变电力生产方式占很大份额为特征的未来无碳电力系统中。具体而言，前景广阔的一项技术关乎中小型反应堆或模块堆，其可以满足清洁的基本负荷电

力需求，同时操作灵活，可适应各种可再生能源并满足需求。这种反应堆还特别适合于核动力的非电力应用，如海水淡化、氢生产、地区供热和制冷，以及若干能源密集型工业应用。

B.1.1. 水冷堆

114. 目前，采用渐进型和革新型技术设计的多种水冷堆在全球各地建造、调试或运行。过去 50 年运行水冷堆的许多经验教训仍然适用。水冷堆的最新技术进步包括现有设计的改进和新设计的发展，其共同目标是加强安全性、提高资源利用效率以及增强经济性。在大多数渐进型概念中，安全系统具有不依赖电力的非能动特性，包括更大的储水量，以便在非计划工况（如全厂持续断电）情况下能有数天而不是几小时的处理时间。水冷堆发展的另一个重要方面是设计、测试和建造小型模块化厂建一体化压水堆（见 B2.2 部分）。

115. 阿根廷规划了一座坎杜 6 型重水堆，正在考虑一座 HPR1000 压水堆。阿根廷还计划发展所有燃料生产能力。为了重启并在 2026 年之前完成巴西安格拉 3 号核电厂的建造，以供商业运行，正在寻求合作方案。

116. 在加拿大，安大略省达灵顿核电厂和布鲁斯核电厂的整修总投资 260 亿加元，预计于 2032 年前完成，而皮克林核电厂定于 2025 年前关闭。阿根廷、中国、罗马尼亚和英国正在考虑新建坎杜堆。

117. 中国的国家先进轻水堆发展计划仍然最为雄心勃勃。政府重启了新核电站批准过程，正考虑实施碳定价。所有新核电站都将采用全数字化操作，包括仪器仪表和控制以及反应堆保护系统。自 2013 年以来，秦山核电站九台机组一直保持着 ~90% 的容量因子。中国重水堆的重点在于长期运行和压力管延寿问题，以及换管准备。

118. 从现在到 2040 年，预计印度将占世界能源需求增长的 25%。现有核电厂的扩大有赖于印度 700 兆瓦（电）级重水堆和进口压水堆技术。巴巴原子研究中心正在开发一座四回路 ~900 兆瓦（电）先进压水堆（印度压水堆）和专用测试设施。印度的制造供应链得到了改善。

119. 在巴基斯坦，已经为卡拉奇核电厂重水堆提交了 2019—2024 年期间新的再许可审批申请。

120. 韩国电力公司在从事面向出口市场的压水堆开发，在现有 APR1400 反应堆基础上，增加 1 吉瓦（电）先进压水堆和革新型的 1250 兆瓦（电）完全非能动压水堆 iPOWER。重水堆研发活动主要涉及长期运行、燃料通道寿期管理和换管，以及严重事故管理导则。月城 2 号、3 号和 4 号机组可能是首批利用燃料通道寿期管理延长压力管设计寿命的坎杜 6 型反应堆。

121. 在罗马尼亚，继将压力管寿命延长超过 21 万小时设计寿命后，计划从 2026 年开始对切尔纳沃德 1 号机组进行整修。

122. 俄罗斯联邦的工作重点仍然是 20 座在运水动力堆的延寿，以及将其出力提高 4—10%。延寿基于技术和经济因素，会将寿期延长 11—30 年。国家原子能公司接到了向世界各地供应 36 台水动力堆机组的订单，这些订单目前处于谈判、规划和建造的不同阶段。

123. 美利坚合众国 30 个州的 60 个核电厂共有 98 座在运核反应堆，其供电量占全国年度总电量的五分之一。这些核反应堆的平均堆龄约为 38 年。堆龄最大的在运核动力堆是纽约九英里峰 1 号机组，1969 年 12 月便投入了商业运行。最新反应堆是瓦茨巴 2 号机组，于 2016 年投入使用。在建的两座新反应堆 — 乔治亚州基于西屋 AP1000 技术的沃格特勒 3 号和 4 号机组 — 预计于 2021 至 2022 年投入运行。

124. 加拿大、中国、日本、俄罗斯联邦和欧洲联盟是参与超临界水冷堆概念联合研发的“系统安排”的签署国（图 B-1 和图 B-2）。超临界水冷堆的主要目的是高效、经济和安全地发电。大多数超临界水冷堆核电厂的发展目标是发电能力超过 1000 兆瓦（电），运行压力在 25 兆帕左右，反应堆出口温度在 500 到 625 摄氏度之间。因此，超临界水冷堆发电的热效率在 43%到 48%之间，明显高于现有核反应堆系统。超临界水冷堆的堆芯出口温度高，有利于热电联产，包括产氢、供热和产蒸汽。

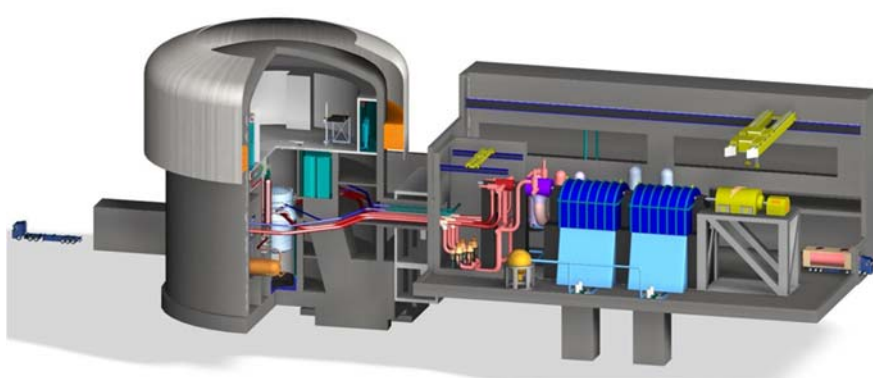


图 B-1. 加拿大超临界水冷堆设计：反应堆厂房与汽轮机厂房。（来源：原子能机构）

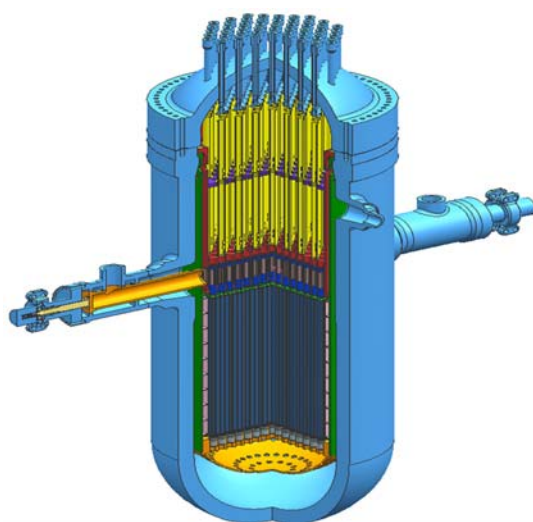


图 B-2. 中国超临界水冷堆设计的堆芯概念。（来源：原子能机构）

B.2. 快中子系统

125. 第一座发电的反应堆是美利坚合众国 1951 年的一号实验增殖堆。这座 100 千瓦（电）的反应堆采用液态金属钠钾合金冷却。自那时以来，最成熟的快堆技术——钠冷快堆——在世界各地得到了发展，通过中国、法国、德国、印度、日本、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国等若干国家的实验堆、原型堆、示范堆和商业堆获得了超过 400 堆-年的运行经验。国家和国际层面正在开发若干革新型（第四代）钠冷快堆、铅和铅铋共晶冷却快堆以及气冷快堆。此外，作为一种长期方案，还在开发熔盐快堆。

126. 中国正在设计和建造革新型示范钠冷快堆 CFR-600，计划于 2025 年将其投入运行。一些机构正在开发铅和铅铋冷却中小型反应堆或模块堆，包括加速器驱动系统。中国首座铅铋合金零功率次临界反应堆启明星 III 号于 2019 年 10 月 9 日达到首次临界（图 B-3）。零功率加速器驱动系统将用于研究把长寿命放射性废物转化为短寿命废物。



图 B-3. 启明星 III 号达到首次临界。（照片：中国原子能科学研究院）

127. 根据印度的三阶段核电计划，500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆（原型快堆）的建造已进入最后阶段；该反应堆正在进行后期调试，预计 2020 年达到首次临界。原型快堆将接替英迪拉·甘地原子研究中心 1985 年建造的 12 兆瓦（电）小型试验堆。计划在卡尔帕卡姆的同一场址再建两座快中子增殖堆。

128. 自 1980 年以来，俄罗斯联邦一直在运行工业原型钠冷快堆 BN-600。另一座 880 兆瓦（电）的钠冷快堆 BN-800 自 2016 年起投入商业运行。2019 年 8 月，在多用途研究快堆完成了反应堆压力容器的水力试验（图 B-4），该反应堆将于 2024 年取代 BOR-60 实验堆。铅冷 BREST-OD-300 和铅铋冷却 SVBR-100 正处于许可证审批过程。



图 B-4. 多用途研究快堆设施。

129. 法国政府决定延长其钠冷快堆技术研发计划并推迟建造第四代钠冷快堆原型堆 Astrid 的计划。比利时已决定建造能够在次临界和临界模式下作为加速器驱动系统运行的铅铋冷却反应堆 MYRRHA；首座设施预计于 2024 年底投入运行。瑞典先进铅冷反应堆（SEALER）55 兆瓦（电）的 SEALER-英国核电厂的设计（图 B-5）已提交英国商务、能源和产业战略部审核。欧洲正在开发的其他快堆设计包括具有中小型反应堆或模块堆类型特性的第四代铅冷快堆欧洲示范堆 ALFRED 和实验气冷快堆 ALLEGRO。罗马尼亚已提议在米奥文尼建造第四代铅冷快堆。

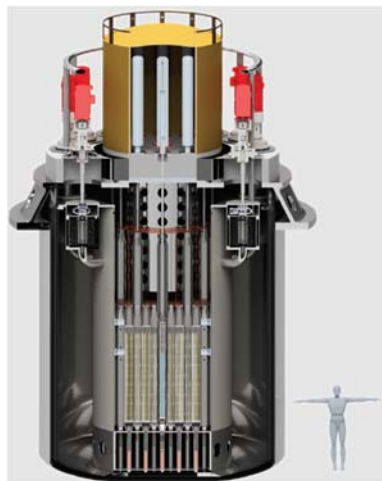


图 B-5. 55 兆瓦（电）SEALER-英国铅冷快堆设计。

130. 在美利坚合众国，泰拉电力公司完成了“增殖和燃烧”行波堆的堆芯概念设计。西屋公司正在开发一种 450 兆瓦（电）革新型铅冷小型模块堆。2019 年 2 月，美国能源部宣布了建造超高能中子通量辐照相关研究用多功能试验堆的计划。

131. 原子能机构通过组织和实施协调研究项目、讲习班和专题研究，支持其成员国发展快堆技术。具体而言，正在实施两个促进快堆技术进步的关键协调研究项目：第一个关于“中国实验快堆启动试验的中子学基准”；第二个是对美国快中子通量试验装置无保护性失流实验的多物理分析。

B.2.1. 气冷堆

132. 尽管气冷堆历史悠久，但目前仍处于商业运行的只有英国的 14 座先进气冷堆。其中一些反应堆预计将运行到 21 世纪 30 年代初，其寿期主要受核石墨性能限制。

133. 为近期部署而正在开发的气冷堆都是小型模块式高温气冷堆（高温气冷堆）。这些设计依靠固有安全特性，消除了大多数专设能动安全系统；涂敷颗粒燃料保证了放射性封隔。这些反应堆用氦作为冷却剂，用石墨作为慢化剂，在高于现有核电厂的高温（700 摄氏度或以上）下运行，将提高电力生产效率，并可能供应巨大的工艺热市场。

134. 加拿大正在开展若干小型模块堆许可证预审批活动，其中包括四种高温气冷堆设计。加拿大核安全委员会已收到首个小型模块式高温气冷堆的许可证申请。在安大略

电力公司和超安全核能公司的支持下，全球第一电力公司申请在安大略省乔克河部署一个高温气冷堆式微型模块堆发电厂。

135. 中国的球床模块式高温堆（HTR-PM）定于 2020 年投入商业运行。这座 210 兆瓦（电）的全规模示范电厂由两台反应堆机组与单台动力涡轮机耦合组成。为了未来部署，商用 HTR-PM600 设计会将相同的反应堆和蒸汽发生器配置（六台机组）与单台 650 兆瓦（电）动力涡轮机耦合，目前正审议在中国部署的若干可行性研究。HTR-10 实验堆更新项目已经完成，计划进行更多安全示范试验。

136. 在日本，预计明年将获准重启 30 兆瓦（热）高温工程试验堆。预计未来几年还将进行更多安全示范、氦动力涡轮机耦合以及耦合高温核氢生产示范。日本还通过国际伙伴关系，积极推动在国际上部署基于日本高温气冷堆技术的中小型反应堆或模块堆。

137. 在美利坚合众国，有关燃料质量鉴定的活动（辐照和加热试验）正在进行，并确认了三层各向同性燃料具有卓越的裂变产物滞留性。先进堆和高温气冷堆的总体设计要求已经公布，将有助于该国建立更适当的许可证审批框架。一些材料的质量鉴定工作仍在继续，而旨在证明非能动安全特性的试验设施正在得到支助。75 兆瓦（电）XE-100 球床设计和许可证预审批活动仍在进行中。

138. 许多启动核电国家正考虑部署高温气冷堆。沙特阿拉伯将高温气冷堆的部署列入了国家原子能项目，以便促进工艺热在石化工业的应用。约旦将高温气冷堆纳入了为电力生产、海水淡化和工艺热部署中小型反应堆或模块堆的可行性研究，而波兰仍在落实为工艺热应用部署高温气冷堆的计划。印度尼西亚不再推进 10 兆瓦（热）球床实验动力堆的建造，但研发工作继续，与中国合作开发商业规模反应堆的项目也在进行中。

139. 作为拟于 2020 年完成的 GEMINI+ 计划的一部分，欧盟委员会继续开展与高温气冷堆部署相关的活动。大韩民国和俄罗斯联邦正在进行技术开发。南非已停止研发新的 AHTR-100 球床概念。

140. 原子能机构发展并维护着关于辐照核石墨的核石墨知识库，其中包括方便未来部署石墨慢化堆的历史记录和知识。

141. 此外，原子能机构关于反应堆不确定性分析、模块式高温气冷堆安全设计标准制订以及高温气冷堆热用于更可持续清洁产品的矿物提取的协调研究项目均已完成，正在编写最后报告。

142. 鉴于成员国兴趣日浓、请求渐增，原子能机构在熔盐堆方面开展了数量有限的一些活动，正根据成员国的研发活动撰写一份关于熔盐堆技术状况的文件。在气冷堆方面共同感兴趣的一些领域包括高温材料、石墨性能和涂敷颗粒燃料（用于熔盐冷却堆设计）。

B.2.2. 中小型反应堆或模块堆

143. 供即时和近期部署的中小型反应堆或模块堆技术开发工作正在全球取得进展。原子能机构于 2019 年 10 月组织了气候变化和核电的作用国际会议。与会成员国表示，中小型反应堆或模块堆的典型输出功率为 300 兆瓦（电），可能是取代老化化石燃料发电厂的最有效的无二氧化碳电源。此外，随着间歇性可再生能源在各大洲的比例越来越高，就满足基本负荷以及可与可再生能源协同灵活运行以确保能源供应安全而言，中小型反应堆或模块堆被认为不可或缺。

144. 大规模部署中小型反应堆或模块堆的主要挑战在于论证：模块化将通过成批生产的经济性来实现承诺的较低水平化成本，以及设计的简化和建造时间的缩短是否会促成更便捷、更负担得起的筹资方案。在就可行的中小型反应堆设计和技术要求和标准达成共识方面，技术持有国与作为发展中经济体的启动核电国家之间仍然存在巨大的差距。因此，极为重要的是制订符合不同政策的中小型反应堆或模块堆顶级通用用户要求。

145. 针对各种应用，有 50 多项中小型反应堆设计和概念正处于不同的开发阶段。

146. 中国和俄罗斯联邦已完成两座采用中小型反应堆或模块堆的新核电站的建造，并且正进行启动调试，以便为并入电网做好准备；它们可能于 2020 年投入商业运行。

147. 在阿根廷，内斯托尔·卡洛斯·基什内尔核电厂场址的 CAREM-25 原型模块堆处于建造的后期阶段，目标是于 2022 年 9 月装料和进行启动调试。原型堆设计总功率为 100 兆瓦（热）和 34 兆瓦（电）。这座一体化压水堆式小型模块堆将在全自然循环模式下运行，具有非能动安全特性。CAREM-25 系采用国内技术开发，至少 70% 的组件和相关服务来自阿根廷公司。

148. 加拿大小型模块堆路线图预测了在电网内外替代化石和柴油发电厂的可能应用，包括在石油工业和采矿业。目前，12 名小型模块堆设计者/供应商正在与加拿大核安全委员会合作，全球第一电力公司正在申请乔克河实验室的小型模块堆场址准备许可证。

149. 中国已完成建造并正在调试球床模块式高温堆（HTR-PM）。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）。关于球床模块式高温堆的更多细节见 B. 2.1 部分。中国还启动了 ACP100（亦称“玲珑一号”）的建造项目。这是位于海南省昌江的一座 125 兆瓦（电）一体化压水堆，设计为多用途小型动力堆。建造工期估计为五年，预计 2025 年进行启动调试，将用于发电、工艺供热和海水淡化。在采用压水堆技术的海上中小型反应堆或模块堆方面，中国一直在进行三种型号浮动式小型模块堆设计即 ACPR50S、ACP100S 和 CAP-F 的技术开发。

150. 在 2019 年 9 月原子能机构大会第六十三届常会期间，法国可替代能源和原子能委员会、法国电力公司和原子技术公司组成的一个法国国家联合体宣布启动一座 170 兆瓦（电）一体化压水堆式小型模块堆 NUWARD，该模块堆具备强制对流和先进安全系统，可供 21 世纪 30 年代初部署到海外市场。

151. 大韩民国和沙特阿拉伯已经联手，以完成系统一体化模块式先进反应堆（SMART）的详细设计，这是一座两国拥有共同所有权的 110 兆瓦（电）（365 兆瓦（热））一体化压水堆。该反应堆将建在沙特阿拉伯，用于发电和海水淡化。新的优化设计增强了功率，并纳入了完全非能动安全特性。设计一旦完成，将在大韩民国提交认证，同时在沙特阿拉伯提交许可证申请。

152. 在俄罗斯联邦，罗蒙诺索夫院士号浮动核电厂（图 B-6）载有一座 KLT-40S 紧凑型压水堆式小型模块堆，从摩尔曼斯克装料码头拖行 4900 公里，于 9 月中旬抵达了楚科奇地区的佩韦克。该浮动核电厂于 2019 年 7 月获得运行许可证，后于 2019 年 12 月并网，有两个 35 兆瓦（电）KLT40S 反应堆模块，每小时总共生产高达 70 兆瓦（电）和 50 千兆卡路里热量，足以为一个约 10 万居民的小镇供电。该浮动核电厂的目的是取代已退役的比利比诺核电厂和老化的燃煤发电站、为一个采矿综合设施提供动力和为北极的石油钻塔供电。该浮动核电厂还可以生产淡化水。



图 B-6. 罗蒙诺索夫院士号浮动核电厂。（照片：国家原子能公司）

153. 俄罗斯联邦正考虑在萨哈（雅库特）共和国建造一座 50 兆瓦（电）一体化压水堆式小型模块堆 RITM-200。该反应堆最初是为核破冰船设计和部署的，现正开发供近期部署的陆基并网版。

154. 2019 年，英国继续从事英国小型模块堆技术开发，这是一种基于压水堆的三回路小型模块堆设计，装机容量为 450 兆瓦（电），目标是在 21 世纪 30 年代获得国内部署的设计核准。

155. 在美利坚合众国，NuScale 公司从 2017 年第一季度开始接受核管理委员会（美国核管会）的设计认证评审，估计将于 2022 年底获得设计认证。NuScale 电力模块是具有自然循环和完全非能动安全特性的一体化压水堆。一个 60 兆瓦（电）NuScale 电力模块为单座核电厂提供的功率总增量可达 720 兆瓦（电）。目前设计和许可证审批活动

针对的电厂参考规模为 12 模块配置，该电厂预计于 21 世纪 20 年代中叶在爱达荷国家实验室投入运行。

156. 大多数水冷式中小型反应堆或模块堆都是紧凑型、一体化或回路式压水堆。但日本和美利坚合众国加强了自然循环沸水堆 BWRX-300 的设计和技术开发项目，这种沸水堆设计功率为 300 兆瓦（电），为简化型设计，具有非能动安全特性。这种直接蒸汽循环的沸水堆式小型模块堆设计的开发基于核管理委员会许可的 1520 兆瓦（电）经济简化沸水堆。

157. 在整个 2019 年，中小型反应堆或模块堆中名为微型模块堆的一个子类也在若干国家包括加拿大和美利坚合众国也得了发展。一个例子是高温气冷微型模块堆，其堆芯为棱柱体，设计容量约为 5 兆瓦（电）。微型模块堆已提交加拿大核安全委员会进行供应商设计评审。对于微型模块堆的定义和功率范围，目前尚无全球共识。在美利坚合众国，称为 SMR-160 的一体化压水堆设计也一直在接受设计评估。

158. 原子能机构于 2019 年启动了一个新项目，该项目旨在支持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。

B.2.3. 革新型核能系统国际倡议

159. 原子能机构于 2000 年设立的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”将技术开发商、供应商和客户汇聚起来，为促进核电的长期可持续性而考虑采取国际和国家行动，以实现核反应堆和燃料循环方面所需的革新。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”现有 42 个成员，包括原子能机构的 41 个成员国和欧洲委员会。项目提供了一个国际论坛，以考虑感兴趣的问题和政策协调，让技术持有者和用户能够就相关领域展开合作，并交流需求和意向。

160. 为了推动 21 世纪可持续核能发展的全球愿景，核能系统假想方案模拟、分析和路线图工具文件已进入最后出版阶段。2019 年在墨西哥和俄罗斯联邦举办了使用这些工具的讲习班和培训活动，还计划 2020 年在泰国举办一项这样的活动。2019 年还在大韩民国举办了“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”小型模块堆的机遇与挑战对话论坛。这样的对话论坛使得“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”能够让成员国了解核能系统可持续性方面不断发展的的问题。

B.2.4. 核动力的非电力应用

无论是通过热电联产，还是与其他可再生能源资源综合利用，核能用于非电力应用的模式可以渗透到范围广泛的各个部门，包括：海水淡化、运输（如用于燃料电池汽车的氢生产）、住宅（地区供热和制冷）和工业（石化、钢铁和合成燃料生产工业）。

161. 2019 年，为了支持核能的非电力应用，全球利用共计 74 座在运核动力堆（亚洲 15 座、欧洲 59 座）生产了 2122.92 吉瓦·小时的电当量热。在这些反应堆中，11 座支持海水淡化（用电 31.4 吉瓦·小时），58 座支持地区供热（1979.27 吉瓦·小时），33 座支持工艺热应用（1313.86 吉瓦·小时）。全世界对核能非电力应用的兴趣继续增长。核能用于这些部门，为确保能源安全和应对气候变化提供了一种可持续的途径。对核电厂余热（即核电厂凝汽器排出的热量）进行回收和将其用于非电力应用，可全面提高核电厂的热效率，并可减轻热量排放到河流或其他水体中产生的环境影响。利用回收的余热进行热电联产，可抵消相当一部分核电生产成本。例如，高温气冷堆的余热可用于海水淡化，从而导致对由燃气或燃油发电厂驱动的海水淡化厂生产的水的价格的成本抵免。实际上，核电厂还可以提供具有成本效益的充足工艺热或蒸汽，用于若干其他应用，包括地区供热和制冷。

162. 2019 年 11 月，中国宣布海阳成为中国首个由海阳核电站两台 AP1000 机组工艺热供热的城市。海阳核电站业主山东核电公司表示，到 2021 年，该项目将扩大到涵盖整个海阳市。山东核电公司估计，这两台机组未来可满足 2 亿平方米住房的地区供热需求，每年可节省 660 万吨煤。目前已有技术解决方案可实现以最小热量损失长距离（~100 公里）输送大量的热量（~吉瓦）。

163. 考虑核电厂项目时，利用从核电厂凝汽器排放的热量或从低压涡轮机后阶作为低品质工艺蒸汽提取并送往多效蒸馏脱盐系统的热量进行海水淡化被视为一个可行的选择。这种海水淡化方式可在电厂整个寿期（建造、运行和退役）满足其用水需求。低温作业系统、余热回收系统、高效能源和工艺系统以及创新的工艺优化等海水淡化相关技术的进步增强了核能淡化海水的潜力。热膜一体化混合脱盐被认为是核能淡化海水的最佳选择。这可以减少能源消耗、海水摄入量和排水费用。巴西、中国、埃及、印度、约旦、巴基斯坦和沙特阿拉伯等若干成员国已表示或重新燃起了对核能淡化海水的兴趣。

164. 利用核能制氢，可使灵活的核反应堆在未来的氢经济和减缓气候变化方面发挥关键作用。目前的在运核电厂可以通过先进的低温水电解产氢。这一过程的经济性可通过利用非峰值发电来改善。近年来，若干其他制氢技术也取得了进展，其中包括高温电解和热化学或电热-化学制氢循环。这些技术可以集成到未来的高温堆设计中。

B.3. 聚变

165. 国际热核实验堆的建造已经取得了实质性进展，超过 73% 的土木工业已完成（图 B-7）。最近再次确认了日期为 2016 年的施工进度修订本，原定于 2025 年底前生产首批等离子体的最后期限保持不变。托卡马克大楼已准备好按计划于 2020 年 3 月安装低温恒温器底座，围绕这一组件的工作将持续四年多。预计国际热核实验堆将从 2035 年开始以满聚变功率运行。



图 B-7. 2014 年 4 月（左）和 2019 年 10 月（右）的国际热核实验堆施工现场照片。
（照片：国际热核实验堆）

166. 2019 年 6 月，原子能机构和国际热核实验堆组织通过签署“实际安排”，加强了业已存在的长期合作。根据新的安排，国际热核实验堆组织将与原子能机构及其 171 个成员国共享其在核聚变安全和辐射防护方面的经验。这两个组织还将实施等离子体物理学和聚变工程学的教育倡议，协调公共宣传活动，并在知识管理和人力资源发展方面开展合作。

167. 聚变作为未来能源发展的另一个重要里程碑是 JT-60SA 机的建造（图 B-8），这是欧洲与日本开展国际协作、在日本那珂市建造的一种超导托卡马克。

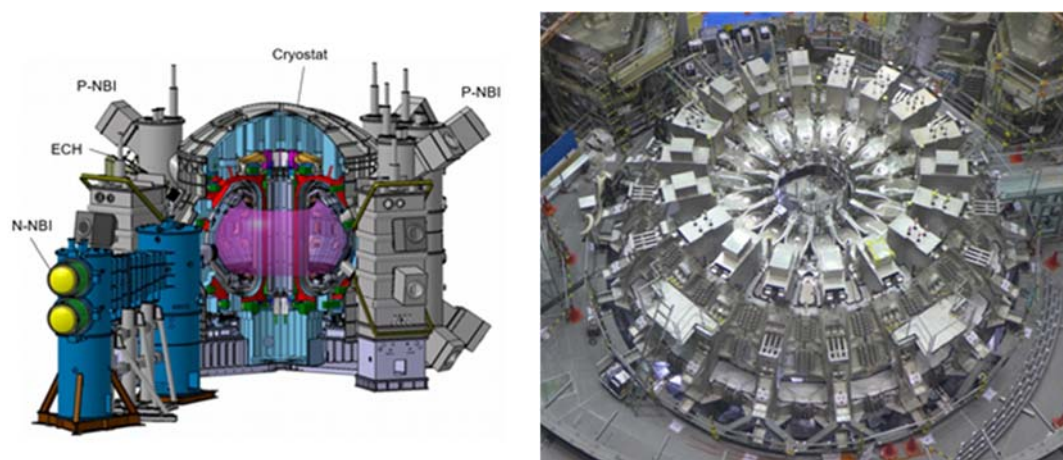


图 B-8. JT-60SA（左）示意图与接近完工的环面组件照片。
（来源：P. Barabaschi 等人，在 2018 年原子能机构聚变能会议上介绍）

168. JT-60SA 预计于 2020 年进行调试，有望比国际热核实验堆早五年投入运行，因而其实验将支持国际热核实验堆的调试和运行。JT-60SA 的一些研究课题包括高能粒子物理学、聚变工程学、运行模式发展，以及最重要的等离子体生产和控制方案。JT-60SA 实验还将补充与国际热核实验堆的联合研究，解决未来示范聚变电厂（如示范聚变电站）可能面临的一些最具挑战性的物理和技术问题。

169. 2019 年 10 月在俄罗斯联邦莫斯科举办的第六次原子能机构示范聚变电站计划讲习班的主题是等离子体稳定性、材料科学以及示范聚变电站相关运行条件的影响。来自 14 个国家、欧洲联盟聚变能源组织和国际热核实验堆组织的近 60 名专家参加了这次活动。这样的讲习班每两年举行一次²，本次讨论了示范聚变电站的主要科学和技术挑战，并分析了计划、任务和各种可能的行动方针。虽然每位参与者都可能有个个人研究重点，但讲习班的目的是协调互利工作、促进国际协作。

170. 2019 年，美国能源部启动了一项国内核聚变计划，该计划重点关注重大技术发展，包括一系列筹资和促进公私伙伴关系的举措。此举旨在作为试点计划，利用关键的聚变研发领域的机会，加速聚变能发展方面的进步。

171. 与此同时，过去五年建立了大量私营公司和公私伙伴关系，主要在加拿大、英国和美利坚合众国，但也有一些在欧洲其他国家和中国。在这一背景下，美利坚合众国成立了核聚变工业协会，作为致力于用聚变能为世界供电的公司的国际网络，目标是将聚变能作为一种新能源予以推广。

172. 这些新实体的出现在一定程度上得到了私人资本的支持，这有可能会改变主要依靠政府资助项目取得进展的传统聚变发展模式。因此，需要制定该领域的国际导则和标准，以协助进行设计，并促进许可证审批过程、安全和安保程序、废物管理计划和未来聚变反应堆的全面可行性研究，包括成本效益分析和社会经济影响评估假想方案。

C. 加速器和研究堆

C.1. 加速器和相关仪器仪表

173. 本部分介绍加速器技术及其应用和相关仪器仪表的主要发展。最常见的加速器应用包括：生产癌症医学诊断和治疗用放射性同位素；产生医疗设备和食品灭菌用强 X 射线源；产生材料科学分析和辐照用带电粒子束；放射性碳测年；应用范围从矿物和石油勘探到核数据测量或强散裂中子源的基于加速器的中子生产。

C.1.1. 双束流设施为材料研究开辟新机遇

174. 能够使不同加速器产生的两个离子束同时组合的双离子束设施（图 C-1）在萨格勒布落成，加强了克罗地亚的材料研究，并扩大了具有这种尖端能力的设施的全球供应。

175. 鲁德·博斯科维奇研究所氦离子源和 DiFU 双束流设施在原子能机构支持下安装，将有助于科学家测试和开发各种能源技术中使用的新结构材料。裂变和聚变反应不仅产生高能中子，而且还可能产生会在暴露一段时间后损坏反应堆结构和部件的气体（氢和氦）。离子束技术可以模拟这些极端条件，并有助于开发出强大到足以维持这种反应的新材料。

² 欲了解更多情况，见 https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/DEMO_landing.aspx。



图 C-1. 克罗地亚鲁德·博斯科维奇研究所的氦离子源和 DiFU 双束流设施。
(来源：原子能机构)

176. 在这样的设施中，两个束流都对准一个由于其坚固性通常被用于核反应堆的材料——钢制样品，以模拟裂变或聚变反应产物如何与该材料相互作用并改变该材料。除了可能破坏材料的晶体结构之外，这种核相互作用还产生氦、氢等嬗变气体产物。这可能导致在钢内部形成气泡，从而引起材料膨胀。通过了解这些反应如何以及何时发生，科学家可以调整材料以消除这些不良影响。

C.1.2. 文化遗产原位无损分析用可移动加速器（MACHINA）

177. MACHINA 是通过意大利国家核物理研究所（INFN）和瑞士欧洲核研究组织（CERN）之间的国际合作开发的下一代紧凑型粒子加速器，有可能在对文化遗产物品进行原位元素分析方面实现突破。MACHINA 满足策展人、艺术史学家和修复师对艺术品进行原位非侵入性离子束分析的需求，这种分析是研究不可移动的无价艺术品（例如易碎壁画和大型绘画或对运输敏感的绘画）的一个关键因素。

178. 如图 C-2 所示，MACHINA 是一个基于欧洲核研究组织开发的高频射频四极场（HF-RFQ）技术的紧凑型可运输系统。该系统重量轻（约 300 公斤），运输方便，拆卸/重新组装整个系统只需两个小时。它非常坚固和紧凑（2.5 米 x 0.6 米的面积，可调高度约 1 米），并且具有超低功耗（总功率 7—8 千瓦）。第一个原型³将在意大利佛罗伦萨嵌石细工工厂使用，并有望向欧洲其他实验室和博物馆提供。

³ 详细资料见 <http://home.infn.it/en/media-outreach/2015-03-26-11-50-59/2693-piccolo-preciso-e-potente-arriva-machina-l-acceleratore-per-i-beni-culturali-2>。

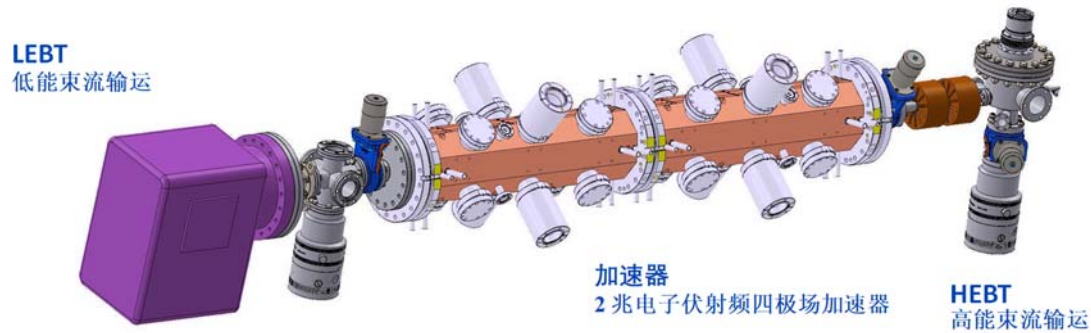


图 C-2. MACHINA 主要部件示意图。可以在加速器的高能侧提取离子束，以对人工制品进行分析。最初的应用是基于粒子诱发 X 射线发射（PIXE）技术，其中 X 射线系由于粒子与物质的相互作用而产生。然后对已发射的 X 射线进行检测，并在数据评估之后确定样品组成。（照片：MACHINA 项目）

C.1.3. 利用聚焦兆电子伏离子束进行全细胞成像

179. 以低于 100 纳米空间分辨率看到全细胞内部图像结构的能力对于生物学中的广泛应用非常重要，这种应用包括药物递送、辐射生物学和粒子束治疗（成像辐射增感剂）。兆电子伏加速器产生的高聚焦离子束为这些应用提供了独特的机会。通过同时检测透射离子的能量（扫描透射离子显微术）和它们产生的可见光，研究人员可以记录图像，用于探索结构和粒子定位。这种形式的定量相关显微术可以成为研究细胞结构和功能的有力工具。图 C-3 显示纳米颗粒很难进入细胞核，因此在放射生物学实验中对细胞的后续辐照期间直接 DNA 损伤可能受到阻碍。

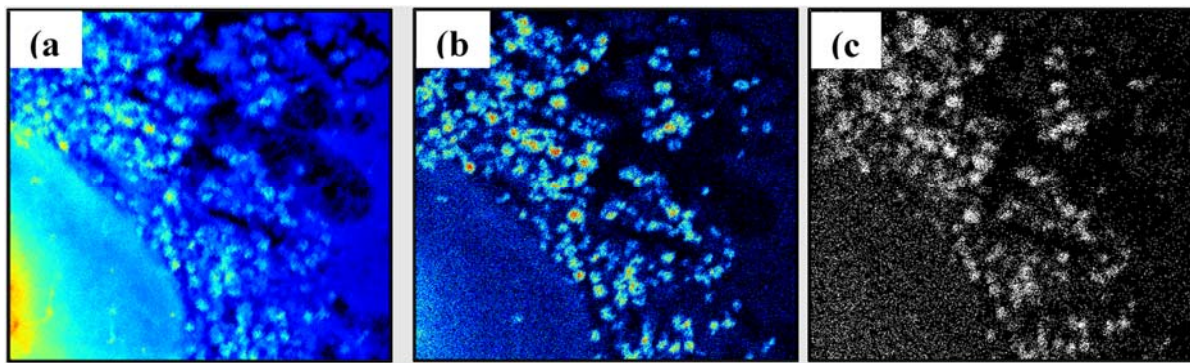


图 C-3. 海拉细胞中稀土上转化纳米颗粒的摄取图像（13 微米扫描尺寸）。利用三种离子束成像方式对 100 纳米纳米棒在细胞核边缘的积累情况进行探索：(a) 显示密度的轴上扫描透射离子显微术；(b) 显示纳米颗粒散射增强的离轴扫描透射离子显微术；(c) α 粒子诱导荧光。使用了 1.6 兆电子伏 α 粒子束以低于 50 纳米的空间分辨率对该细胞进行成像。（图像由新加坡国立大学物理系离子束应用中心 Andrew Bettiol 提供）

180. 事实上，纳米颗粒可以用于靶向细胞的特定区域，如线粒体。在（粒子束治疗情况下的）放射敏化实验中，人们可能希望能观察到通过这些纳米颗粒增强的线粒体DNA的辐射损伤效应。细胞线粒体大约有一微米大小，因此高分辨率成像至关重要。荧光探针和纳米颗粒可以同时靶向线粒体，因此相关成像方法有助于定位线粒体和纳米颗粒。然后可以对纳米颗粒的位置和不同辐照剂量的影响进行系统的研究。

C.1.4. 激光驱动加速器技术具有多种应用前景

181. 最近高功率激光技术的进步⁴导致了在飞秒范围内产生极短光脉冲的激光器的发展，其强度非常高，超过 10^{21} 瓦/平方厘米。通过将脉冲引导到固体箔上，可产生强光子、离子和中子源（图C-4），这些源随后可用于广泛的应用，如航空航天中的无损检测方法；大型物体的射线照相成像；锂离子电池的运行状态诊断；辐射加工制备智能功能材料；以及敏感核材料的有源中子探测，包括核废物表征。

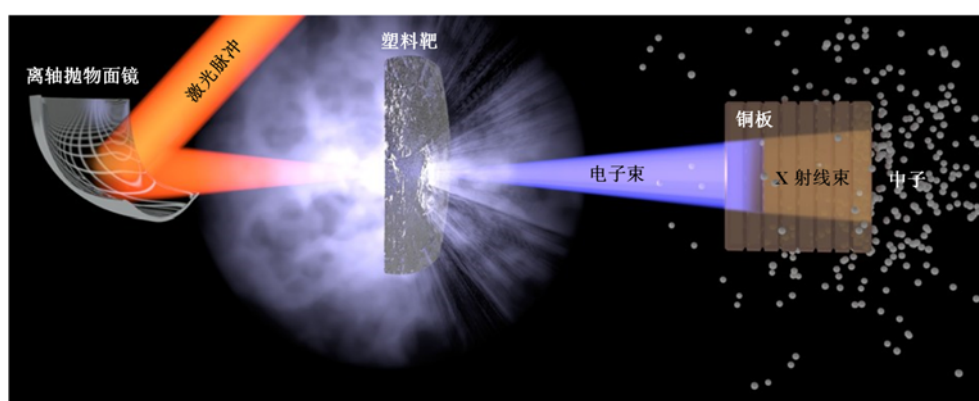


图 C-4. 使用激光加速技术产生的电子和次级中子的示意图。

（照片：Ishay Pomerantz，以色列特拉维夫大学）

182. 迄今为止，基于激光的技术显示出支持加速电场的潜力，其强度至少比传统加速器大四个数量级，国际科学界在今后10年内生产小型化和便携式粒子加速器的目标似乎是可行的。

C.2. 研究堆

183. 图C-5列出研究堆最常见的应用。其功率范围可以从零（如临界装置或次临界装置）到约200兆瓦（热）不等，后者相对于典型核电厂3000兆瓦（热）仍很小。相比动力堆，研究堆具有更大的设计多样性，而且还具有不同的运行模式——稳态模式或脉冲模式。

⁴ 资料来源：在原子能机构大会第六十三届常会上举办的题为“用于核应用的激光驱动中子源”的会外活动，由德国组织。



图 C-5. 世界各地研究堆的常见应用^a。

^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）更详细地描述了这些应用。

^b 在所考虑的 237 座研究堆（224 座在运，13 座临时停堆，截至 2019 年 12 月 31 日）中。

^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。

根据原子能机构的研究堆数据库，已在 67 个国家建成 818 座研究堆，其中 250 座正在 54 个国家运行。俄罗斯联邦拥有数量最多的在运研究堆（59 座），其次是美利坚合众国（50 座）、中国（17 座）和德国（7 座）。在世界范围内，有 63 座研究堆以 5 兆瓦或更高的功率水平运行，从而为工业和医疗产品和服务提供高中子通量。六个国家正在建造共计九座研究堆，11 个国家已计划建造共计 14 座研究堆。

184. 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，研究堆都是不可或缺的。它们为教育和培训做出战略性贡献。随着许多老化研究堆退役，必须高效利用、妥善管理和可持续高效运行剩余设施和新设施。原子能机构鼓励研究堆营运者制定或更新关于其设施利用的战略计划。过去三年中，23 座设施向原子能机构提交了战略计划，以征求进一步的建议。2019 年，原子能机构开发了研究堆综合利用评审，以协助成员国优化其研究堆的利用，并对意大利进行了首次试验性的研究堆综合利用评审工作组访问。

185. 世界上半数以上在运研究堆已超过 40 年。它们的寿期可达到或超过 60 年，但及时

制订适当的老化管理、整修和现代化计划无比重要。鉴于减少对这类设施供资的总体趋势和有限的继承规划，完善的管理系统、运行和维护及寿期管理计划对它们能够以成本效益好的方式履行使命将至关重要。在这方面，研究堆运行和维护评定同行评审工作组访问非常有用，孟加拉国、刚果民主共和国、印度尼西亚、葡萄牙、泰国和乌兹别克斯坦都进行了这种同行评审工作组访问。在 23 个成员国处于永久停堆状态的 58 座研究堆中，预计有若干座将在今后不久开始准备退役。

186. 阿根廷、法国、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）正在建造新研究堆。若干成员国拥有建造新研究堆的正式计划，其中包括白俄罗斯、比利时、玻利维亚、荷兰、尼日利亚、塔吉克斯坦（Argus-FTI 反应堆已建成）、泰国、美利坚合众国、越南和赞比亚。阿塞拜疆、孟加拉国、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。新研究堆综合核基础结构评审为着手开展新研究堆项目的成员国提供支助和指导。对尼日利亚和越南进行了并正对泰国和赞比亚进行新研究堆综合核基础结构评审。

187. 计划建设或维持其科学技术计划（包括核电）所需国家核能力的成员国继续对利用研究堆表现出兴趣。因此，2019 年，原子能机构整合和扩大了四种手段和工具：主要提供学术教育的远程培训工具即因特网反应堆实验室（2019 年继续向拉丁美洲和加勒比地区提供广播课程，在摩洛哥启用了因特网反应堆实验室的一个东道反应堆，在亚洲和太平洋地区以及欧洲建立因特网反应堆实验室的反应堆方面取得了重大进展）；提供基础培训的研究堆地区短训班；主要面向年轻专业人员提供高级实际操作培训的东欧研究堆倡议（2019 年，在日本组织了一期研究堆短训班，并在奥地利、斯洛文尼亚和捷克共和国举办了第 15 次东欧研究堆倡议培训班）；向年轻和资深专业人员提供特定高级培训的由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心计划。

188. 迄今，有 99 座研究堆和四座医用同位素生产设施已从使用高浓铀转换为低浓铀或已确认正在关闭。2019 年，在哈萨克斯坦 IVG.1M 研究堆转换为低浓铀燃料后，开始进行从 IVG.1M 研究堆向俄罗斯联邦返还高浓铀燃料的准备工作。还开始准备将哈萨克斯坦 IGR 研究堆的高浓铀燃料稀释至低于 20% 的浓缩丰度。

189. 截至 2019 年底，美国产高浓铀燃料返还计划完成了约 1600 千克新鲜和乏高浓铀研究堆燃料的移除，“遗漏移除计划”完成了约 2875 千克高浓铀燃料的移除或确认了其处置，俄罗斯产高浓铀燃料返还计划完成了约 2300 千克燃料的移除。

190. 将医用同位素生产商从使用高浓铀靶件转为使用低浓缩铀靶件的国际努力仍在继续。2019 年，全球一些钼-99 靶辐照设施和加工设施的短暂停产导致一些地区供应短缺。供应链管理机构和主要国际生产商的努力以及卫生从业人员有效的缓解努力弥补了部分生产波动。目前，世界上销售的钼-99 约有 75% 是在没有使用高浓铀燃料或靶件的情况下生产的。美利坚合众国一家新的钼-99 生产商于 2018 年开始采用非铀靶件进行商业运营，并于 2019 年开始扩大其生产设施。

D. 放射性同位素和辐射技术

D.1. 应对塑料负担：核技术应用

191. 塑料产量的快速增长和随之而来的塑料废弃物给环境带来了巨大的问题。包括热塑性塑料（通常称为“塑料”）和橡胶在内的易得且相对便宜的合成聚合物的广泛使用产生了大量的聚合物废物，给户外环境下的废物管理带来了相应挑战。

192. 聚合物因成本低、易于制造、重量轻和良好的机械特性而广泛使用。世界人口的日益增长加上这些材料的优势，导致全球塑料的环境负担急剧增加。过去 20 年中，合成聚合物的产量增加了 240%。如果这一趋势继续下去，到 2050 年，将有大约 120 亿吨聚合物废物最终进入垃圾填埋场或环境中。⁵

193. 许多聚合物废物是难以分离甚至不可分离的数种不同材料的组合物，这使得对它们的再利用成为难题。与天然聚合物不同，合成聚合物降解缓慢，并逐渐分解成被称为微塑料的小颗粒，对生态系统造成污染。迄今所产生的塑料废物数量的最新统计数据显示，截至 2015 年，已产生约 63 亿吨聚合物废物（5800 吨为一次产生，500 吨为二次产生），其中约 9% 已回收，12% 已焚烧，79% 已废弃、堆积在填埋场或自然环境中。

194. 目前，减轻这一废物负担依赖于多种技术，而这些技术的应用取决于地方、地区 and 国家的废物管理和废物缓解推动因素。全世界的平均回收率仍然很低，并因国而异（表 D-1）。

表 D-1. 全球塑料回收

地区/国家	回收 (%)	能量回收 (%)	得到管理：填埋 (%)	管理不当 (未知) (%)
非洲	12	1	26	62
亚洲和大洋洲	24	25	15	37
欧洲（包括土耳其）	27	31	33	9
北美洲	11	13	72	4
南美洲和中美洲 （包括墨西哥）	15	11	30	44

数据来源：2018 年全球塑料流动情况（Conversio 市场与战略公司，2018 年 2 月，
https://www.conversio-gmbh.com/res/Global_Plastics_Flow_Feb10_2020.pdf）

195. 迄今，聚合物废物的回收由鲜少使用辐射处理的大型设施进行。辐射技术（图 D-

⁵ R.Geyer、J.R.Jambeck、K.L.Law，“所制造的所有塑料的生产、使用和最终去向”，《科学进展》第 3 卷第 7 期：e1700782（2017 年）。

1) 符合“绿色”化学的各项重要原则，并通过化学键的受控形成或断裂为材料加工提供了多种可能性。

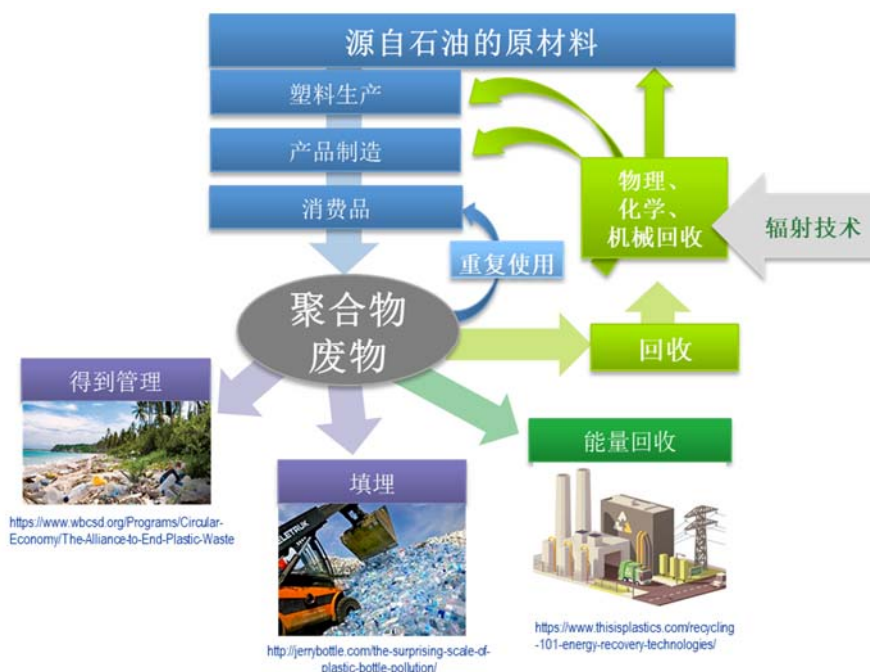


图 D-1：塑料产品的生命周期和塑料废物的产生与处理。（来源：原子能机构）

196. 成员国正越来越多地要求对辐射技术进行调整，以应对聚合物废物回收方面的全球性挑战。核技术有潜力促进建立塑料循环经济，并能够补充常规方法来减少塑料废物量。这些辐射技术具有可扩展性，这意味着它们可用于辐照甚至是大数量的聚合物废物。这种辐照过程可用于做两件事：改变塑料的结构和性质或分解塑料以制造原料。在这两种情况下，改性后或功能化的新材料或原料都能用于生产商业上可行的回收塑料消费品，从而在减少废物量的同时创造有利可图的利益。

197. 利用辐射技术有一项显著的额外优势，就在于辐射是一种“绿色”技术，避免了化学聚合物回收中使用的溶剂，否则这些溶剂将会助长环境污染和碳排放。鉴于许多热塑性塑料用常规技术只能回收一次或两次，当不再可能对塑料废物进行一次回收时，使用辐射技术再循环成新产品便特别具有了吸引力。因此，利用辐射技术回收塑料废物是一项创新贡献，能够补充常规的塑料废物回收方法。

198. 核技术还可利用同位素示踪剂对海洋微塑料在环境中的影响进行可靠和准确的监测和评定。同位素示踪剂具有准确确定环境中塑料废物的发生、监测其移动和对其进行评估所需的无与伦比的精确度和灵敏度。这些信息可用于指导政策决策。

199. 然而，用于新材料合成和有毒液体和气体消毒的成熟辐射技术方法不能直接转用于聚合物废物。因此，需要进行新的研究与发展。在任何可能的情况下，聚合物的回收和再利用都是可取的，而回收过程的效率、经济性和可持续性至关重要。

一种将塑料废物转化为可进行可持续和可扩展利用的材料的新兴应用是利用这种废物来提高水泥浆和混凝土的机械性能和耐久性。全球水泥生产是第三大碳排放源，因此，在混凝土中使用再生塑料还能产生额外的积极环境影响。⁶

200. 未来进行塑料回收的辐射设施应使用中小型企业提供的具有成本效益的集成电子束设备。聚合物的辐射改性最好在没有过度压力的空气环境中使用具有优化参数的电子束处理方式。自一开始开发基于回收聚合物废物的新型材料系统，就应该考虑关于材料可追溯性的标准监管准则。

D.2. 加速器技术的突破给医院带来了硼中子俘获疗法

D.2.1. 小型加速器中子源方面的进展

什么是硼中子俘获疗法？

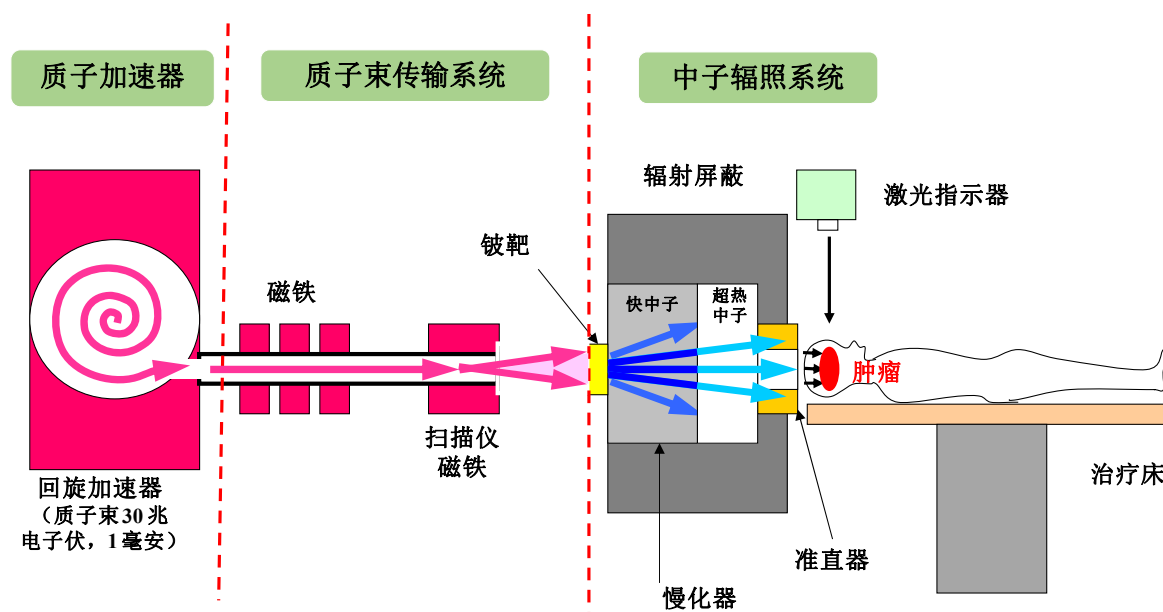
硼中子俘获疗法是一种独特疗法，它基于选择性地将硼化合物输送到肿瘤组织中，然后用中子辐照肿瘤组织的想法。这些中子被硼俘获，随后发生 α 粒子发射和锂核反冲，两者在相当于单个细胞大小的极短停止距离内都有极高的能量转移。在细胞内的生物效应高和在细胞一级对肿瘤细胞损伤的精确定位是硼中子俘获疗法在临床治疗中的主要优势。随着加速器技术的最新进步，硼中子俘获疗法离成为临床癌症治疗的可能选择又近了一步。

201. 硼中子俘获疗法迄今一直主要在能够为患者辐照提供所需中子束强度和质量的反应堆中实施。过去 20 年里，全世界有 1000 多名患者在此类设施中接受了治疗，并在硼化合物的优化包括其使用及其在肿瘤细胞中的积累控制方面取得了显著进展。然而，其中许多反应堆已经关闭或中止了其硼中子俘获疗法相关活动，这特别是由于将反应堆环境与临床要求相结合的困难。目前，只有四座反应堆继续提供硼中子俘获疗法作为一种可能的癌症治疗。尽管如此，以建立和运行基于粒子加速器的小型中子源为目的的硼中子俘获疗法设施和项目数量一直显著增加，这些设施和项目全部位于大学医院或癌症治疗中心。其中一些设施已经开始临床试验，而且在世界各地，更多的设施正在考虑之中。

202. 图 D-2 示出基于加速器的硼中子俘获疗法的各技术组成部分，其中显示，质子在从几毫安至几十毫安的平均束流下被加速到从几兆电子伏至 30 兆电子伏的能量范围，

⁶ C.E.Schaefer 等人，“辐照再生塑料作为混凝土添加剂用于改善化学机械性能和降低碳足迹”，《废物管理》第 71 卷（2018 年），第 426 页至第 439 页。

并与轻元素靶如锂或铍碰撞。结果，如图所示，产生了快中子，这些快中子依次被准直、慢化和引导到患者辐照区。图 D-3 也示出了一些重要的设施要素。



(图片由住友重机械工业株式会社提供)

图 D-2. 基于加速器的硼中子俘获疗法示意图。

(来源：日本住友重机械工业株式会社)

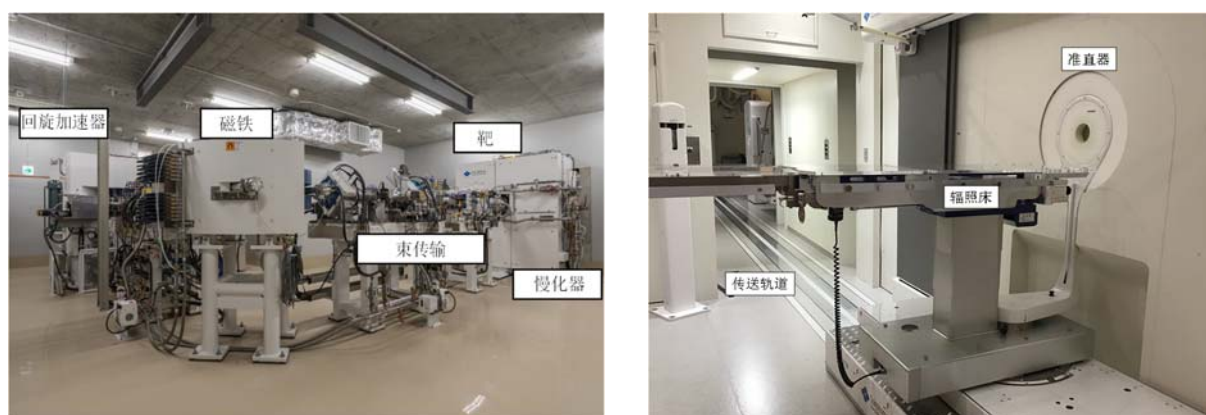


图 D-3. 一个基于加速器的硼中子俘获疗法中心中的加速器和靶组件 (左图) 以及患者辐照区 (右图)。(照片：日本关西硼中子俘获疗法医疗中心)

203. 原子能机构目前正在审查和更新 2001 年出版的题为《中子俘获疗法现状》的原子能机构《技术文件》(原子能机构《技术文件》第 1223 号)，以反映过去 20 年从基于反应堆的硼中子俘获疗法设施获得的所有成果，并纳入新趋势和在基于加速器的住院硼中子俘获疗法中心取得的进展。表 D-2 概述各基于加速器的硼中子俘获疗法设施及其技术参数和完成状况。

表 D-2. 基于加速器的硼中子俘获疗法设施及其完成状况列表。(来源：原子能机构)

国家	设施	加速器	射弹 (入射能量) + 靶	设计最大 (当前) 电流 (毫安)	现状
日本	京都大学	回旋 加速器	p (30.0 兆电子伏) + 铍	1 (1)	临床试验
	南东北病院硼中子 俘获疗法设施 研究中心				
	关西硼中子俘获 疗法医疗中心				
	筑波大学	直线 加速器	p (8 兆电子伏) + 铍	5 (1.8)	调试
	国家癌症中心医院	直线 加速器	p (2.5 兆电子伏) + 锂	20 (12)	临床试验 *
	江户川医院硼中子 俘获疗法中心				建造
	名古屋大学	静电 加速器	p (2.8 兆电子伏) + 锂	15 (1)	调试
芬兰	赫尔辛基大学医院	静电 加速器	p (2.6 兆电子伏) + 锂	30 (20)	临床试验 *
阿根廷	巴里洛切原子中心	静电 加速器	d (1.4 兆电子伏) + 铍	30 (1)	建造
俄罗斯 联邦	布德克尔核物理 研究所	静电 加速器	p (2.0 兆电子伏) + 锂	10 (2)	开发中
以色列	索雷克应用研究 加速器设施	直线 加速器	p (4.0 兆电子伏) + 锂	20 (2)	开发中
中国	厦门弘爱医院	静电 加速器	p (2.5 兆电子伏) + 锂	10 (-)	开发中
意大利	国家核物理研究所	直线 加速器	p (4.0 兆电子伏) + 铍	30 (-)	开发中
大韩民国	基于质子加速器的 硼中子俘获疗法 设施	直线 加速器	p (10.0 兆电子伏) + 铍	8 (-)	开发中

* 设施已投入运行，并已计划进行临床试验。

D.2.2. 诊疗放射性药物和硼中子俘获疗法

204. 诊疗放射性药物可用作治疗和诊断的组合，提供从传统医学到个性化精准医学方法的过渡。硼中子俘获疗法的有效性很大程度上取决于硼浓度及其在靶向肿瘤细胞中的分布。在大多数情况下，硼苯丙氨酸在硼中子俘获疗法中被用作硼-10载体。氟-18标记硼苯丙氨酸（氟-18-硼苯丙氨酸）已开发出来，并成功地应用于利用正电子发射断层照相法监测硼苯丙氨酸的药物动力学。因此，氟-18-硼苯丙氨酸正电子发射断层照相法不仅使得能够获得有关肿瘤的信息，还能够评价肿瘤和正常组织中的硼积累，以及显示肿瘤对硼中子俘获疗法的反应。目前，基于氟-18-硼苯丙氨酸正电子发射断层照相法的硼中子俘获疗法适用于各种癌症，如恶性胶质瘤、头颈癌、黑色素瘤、间皮瘤、肝癌和肺癌（图 D-5）。

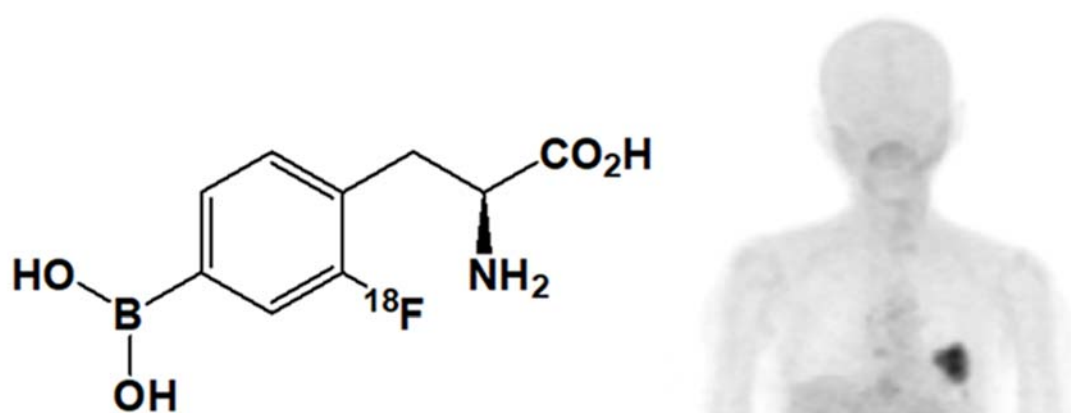


图 D-5. 左图：氟-18 标记硼苯丙氨酸的分子结构。右图：肺转移性恶性黑色素瘤中硼化合物积聚的正电子发射断层照相法图像。（来源：日本大阪大学）

205. 如果能够提高靶细胞中的硼浓度，就能够进一步提高硼中子俘获疗法的效率。由于硼苯丙氨酸的每个分子仅含有一个硼-10 原子，因此需要开发在其结构中含有更高数量硼-10 原子的细胞靶向剂。世界各地许多关于引入这种分子的研究正在取得进展；但鉴于药物开发的漫长过程，新分子的测试和在硼中子俘获疗法中的应用还需要一些时间。

D.3. 医用同位素浏览器：抗癌和抗其他疾病领域用于新放射性同位素生产路线的工具

206. 原子能机构已经开发出一个新的网基工具，它使根据用户输入直接预测医用同位素的产量成为可能。医学科学家和放射性药物工业可利用医用同位素浏览器发现尚未探索的放射性同位素生产路线。这将大大有助于抗击癌症和其他疾病。治疗或诊断用医用同位素的生产依靠非常复杂的核反应过程，只有核物理学家通过测量和核反应理论才能获得这些过程。医用同位素浏览器通过图形用户界面，使许多非专业用户能够获得这些基本信息。

207. 医用同位素浏览器在原子能机构于 2019 年 10 月至 11 月在维也纳举行的放射性药物发展趋势国际专题讨论会上正式发布。第一个版本仅限于带电粒子加速器产生的同位素。用户可以指定加速器的特性，如射弹（质子、氘、氚、氦-3 或 α 粒子）、毫安电流、入射和出射能量以及靶材料和所需生产的放射性同位素。几乎可以立即获得作为辐照和冷却时间函数的所需同位素产量以及关于所有所产生的杂质的完整描述。下一版本还将包括使用研究堆和电子束生产医用同位素（图 D-6）。

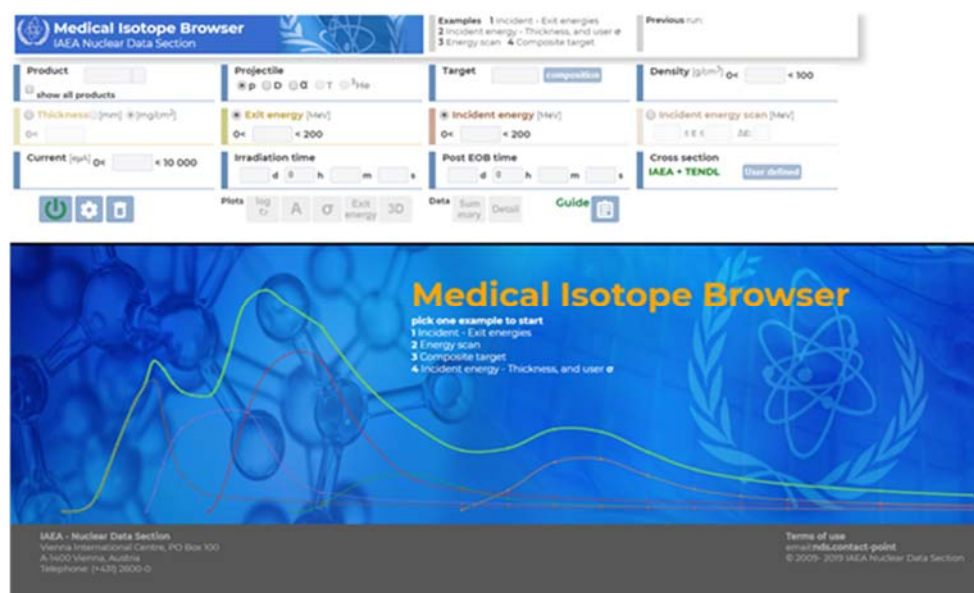


图 D-6. 医用同位素浏览器主页的网址为 <http://nds.iaea.org/mib>

E. 人体健康

E.1. 用于评定人体内蛋白质质量的新双同位素示踪剂方法

E.1.1. 蛋白质及其对儿童生长发育的影响

208. 生命头两年的蛋白质供应不仅决定生长，还影响以后肥胖和患非传染性疾病的风险，并可能影响急性营养不良的恢复速度。蛋白质由非必需氨基酸和必需氨基酸组成。前者可在体内合成，而必需氨基酸必须通过饮食提供。生长迟缓高风险儿童经常食用缺乏大多数必需氨基酸（其中包括色氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸）的食物。然而，关于早期儿童生长对必需氨基酸的需求和消化率的现有数据不足。

E.1.2. 蛋白质质量

你知道吗？

蛋白质消化率因蛋白质来源而异；动物来源的蛋白质往往比从植物性饮食中获取的蛋白质更容易消化。

209. 蛋白质质量被定义为一种特定蛋白质在被消耗时提供足够量的生物可利用必需氨基酸以维持身体保养、生长、生理需求、身体活动和抗感染能力的有用性的量度。蛋白质的必需氨基酸构成、消化率和随后的氨基酸吸收很重要。这些特征会被整合到特定食物的蛋白质质量评分方法中。例如，赖氨酸和苏氨酸在大多数谷物中含量不理想，而蛋氨酸在豆类中含量不足。

E.1.3. 用于评定人体内蛋白质质量的双同位素示踪剂方法

210. 目前可用于测量上肠道氨基酸消化率的方法是侵入性的，因为它们需要获取小肠的流出物，而这是通过人体肠道插管来完成的。不过，这可以通过使用氘 (^2H) 和碳-13 (^{13}C) 的双同位素示踪剂技术以相对非侵入性的方式进行，其中需同时喂食一种内部同位素标记测试蛋白质和一种不同同位素标记“标准”蛋白质。“标准”蛋白质要么是游离氨基酸混合物（不需要消化），要么是消化率已预先确定的全蛋白质（例如同位素标记螺旋藻）。然后，餐后血液中不同标记的必需氨基酸的比率使得能够评价测试蛋白质真实的必需氨基酸消化率。这项技术是应联合国粮食及农业组织（粮农组织）的呼吁，在原子能机构支持的题为“植物性饮食中蛋白质的生物利用率”的协调研究项目背景下开发的。作为该协调研究项目的一部分，在法国和英国专家的技术支持下，并根据粮农组织推荐的“可消化必需氨基酸评分方法”，对巴西、印度、牙买加、墨西哥、摩洛哥、巴基斯坦和泰国各种当地种植的豆类植物进行了蛋白质质量评价。该方法包括下述两个阶段。

E.1.4. 在田间生长期间用氧化氘对豆类植物进行内部标记

211. 豆类的内部标记通过注入一剂氧化氘作为豆类植物浇水程序的一部分进行。让这些植物长到自然成熟，然后收获干种子（图 E-1）。



图 E-1. 生长过程中使用氧化氘对豆类植物进行内部标记。

（照片：泰国玛希隆大学 Wantanee Kriengsinyos 女士）

E.1.5. 使用以内部标记豆类制备的测试膳食进行人体研究

212. 双同位素法通过八小时（成人）或六小时（儿童）喂食方案实施。在成人方案中，要采集五份血样（起始一份，然后在食用测试膳食后五、六、七和八小时每小时各采集一份），而在幼儿方案中，仅采集三份血样：起始一份，第五小时至第六小时各一份。例如，使用氧化氘对测试豆类或食品进行内部标记，同时加入少量碳-13 标记“标准”蛋白质，以便将测试豆类中必需氨基酸与同时喂食的标准蛋白质中必需氨基酸进行外观比较。可商购获得的高浓度碳-13 单细胞蛋白质（碳-13-螺旋藻）可用作标准蛋白质。血液中标记氨基酸相对于测试膳食的出现情况用于计算豆类蛋白质的消化率（图 E-2）。此外，通过将标记氨基酸（ ^{13}C -苯丙氨酸）添加到测试膳食中，可以根据血液中该标记氨基酸的出现情况来估计氨基酸吸收。



图 E-2. 测试膳食和正在食用测试膳食的研究参与者。
（照片：泰国玛希隆大学 Wantanee Kriengsinyos 女士）

E.1.6. 方法的意义

213. 该方法已经在印度一群婴儿和两岁以下幼儿中应用，用于估计四种经常食用的食物真实的必需氨基酸消化率。结果表明，蛋氨酸和苏氨酸等关键必需氨基酸的消化率很低。研究还表明，食物的氨基酸消化率分数与儿童身高呈正相关。关于氨基酸消化率的新信息将极大地有助于充实粮农组织根据可持续发展目标 2 — 实现全球零饥饿 — 为各年龄段人群提供的蛋白质质量建议。随着气候变化和水资源短缺危机的出现，谷物蛋白质来源的蛋白质含量和产量都有可能下降，而豆类蛋白质含量可能受影响较小。有机会确定耐旱植物品种的蛋白质含量和消化率，并利用双示踪剂法等精确技术预测未来优质蛋白质的供应。

E.2. 生物剂量测定法作为辐射应急和医学的有用诊断/预测工具

生物剂量测定法有助于确定个人或患者接受的辐射剂量。这种方法使用可通过显微镜观察到的生物学标志物，如染色体异常。

214. 生物剂量测定法使用通常取自受辐射照射个体的生物样本，如血液，以评定他们比如通过吸入或食入受到的辐射照射。牙釉质或骨骼的电子顺磁共振也用于追溯性剂

量测定，这种方法有时被称为生物剂量测定法。在辐射应急或核应急情况下，生物剂量测定法对于及时确定受照个体（如受照工作人员或公众）所受辐射剂量至关重要。回顾性生物剂量测定法甚至可能有助于揭示多年前如在切尔诺贝利事故中甚至是广岛和长崎的原子弹轰炸中接受的辐射照射。生物剂量测定法也可以用于临床应用，如帮助放射肿瘤医师改善医疗结果。

E.2.1. 生物剂量测定法将生物标记与剂量相关联

215. 生物剂量测定法是放射生物学最发达的分支之一；它的技术方面得到了极大改进，已实现国际标准化。⁷ 生物剂量测定法有四项 ISO 标准，它们为实施生物剂量测定服务提供国际指导。这些标准是：ISO 19238:2014 号、ISO 21243:2008 号、ISO 17099:2014 号和 ISO 20046:2019 号标准。

216. 简而言之，校准曲线用于将生物标记与患者接受的剂量相关联（图 E-3）。确定剂量对于选择正确的医疗策略治疗事故中受到辐射照射的个体非常重要。校准曲线是基于经验数据的数学模拟的结果；不显示错误。

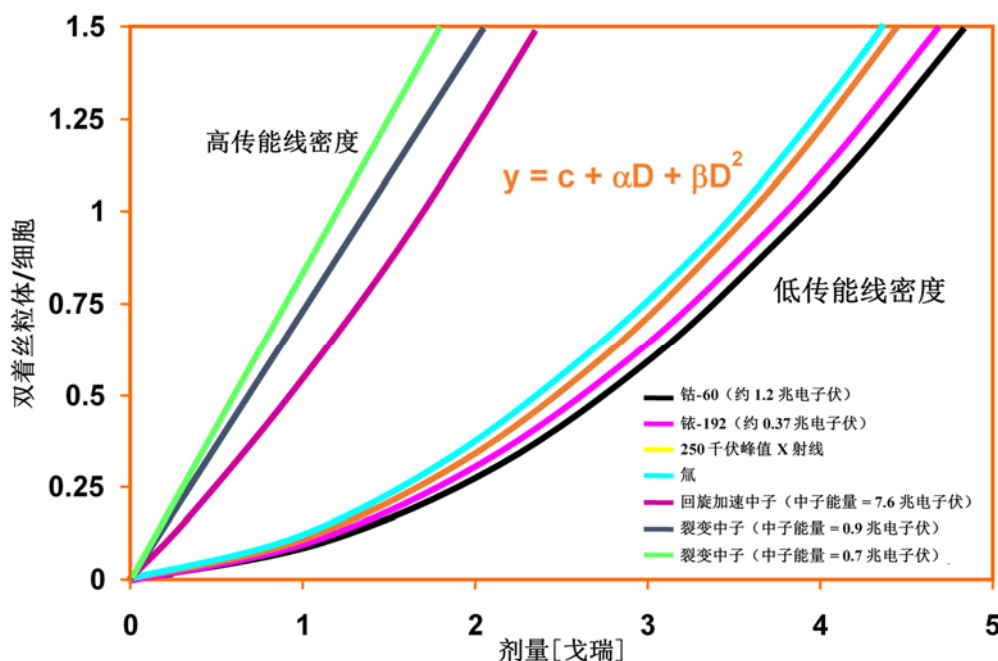


图 E-3. 高低两种传能线密度辐射的线性和线性二次双着丝粒体剂量反应曲线。

（来源：《细胞遗传剂量学：在辐射应急准备与响应中的应用 — 培训材料》，
《应急准备和响应丛书》EPR-Biodosimetry/T 2012，原子能机构，2013 年）

⁷ 原子能机构《细胞遗传剂量学：在辐射应急准备与响应中的应用》，EPR-Biodosimetry 2011（2011 年），第 132 页。

E.2.2. 标准生物剂量测定方法

217. 目前正在使用的细胞遗传学生物剂量测定标准化方法有四种：(1) 常规的不稳定性染色体畸变（“双着丝粒”）分析；(2) 用荧光原位杂交方法（“易位分析”）测量稳定性染色体畸变；(3) 早熟染色体凝集分析；(4) 胞质分裂阻断微核测定。

E.2.3. 自 2000 年以来开发的新生物剂量测定方法集萃

218. 几种新方法最近被引入生物剂量测定实践，将使该领域发生革命性变化。⁸ 可以使用肽核酸-荧光原位杂交方法（图 E-4）检测人淋巴细胞中的辐射诱发双着丝粒染色体。这是一种确定不稳定性染色体畸变的改良方法，可以更有效地对双着丝粒畸变进行评分。在杂交中使用端粒和着丝粒探针可以在分析时提高双着丝粒染色体检测的分辨率。

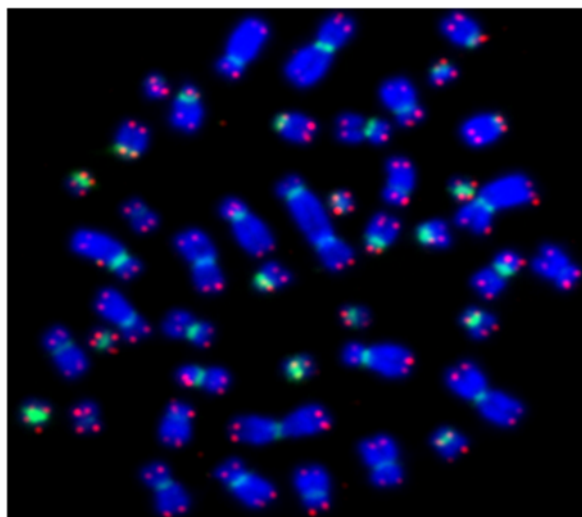


图 E-4. 肽核酸-荧光原位杂交蓝色素 3（端粒）和异硫氰酸荧光素（着丝粒）肽核酸探针，由红色和绿色信号描绘，用显示为蓝色的 4', 6-二氨基-2-苯基吲哚复染。（照片：新加坡国立大学 Hande 教授）

219. 多色荧光原位杂交技术是另一种方法，它能够检测人淋巴细胞中的电离辐射诱发染色体易位形式的染色体间畸变（图 E-5）。

⁸ D.Zeegers 等人，“电离辐射照射的生物标记：多参数方法”，《基因组完整性》第八卷（第 1 期）（2017 年）。

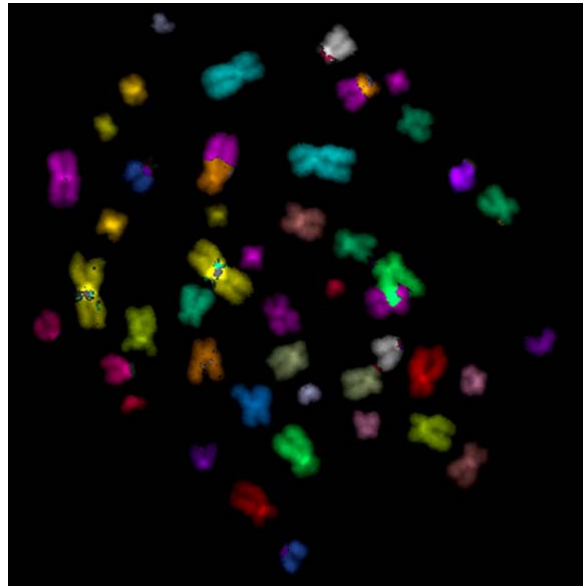


图 E-5. 在多色荧光原位杂交技术中，使用组合标记为每条染色体（1 至 22，X 和 Y）涂上不同的颜色，产生 24 色杂交，因此，对于任何染色体间的易位，都可以观察到单个染色体上的颜色连接。（照片：新加坡国立大学 Hande 教授）

220. 最后，多色染色体显带技术可以说是最先进的生物剂量测定方法，因为它能够检测染色体畸变。这种生物标记被认为是高传能线密度辐射的独特特征（图 E-6）。⁹

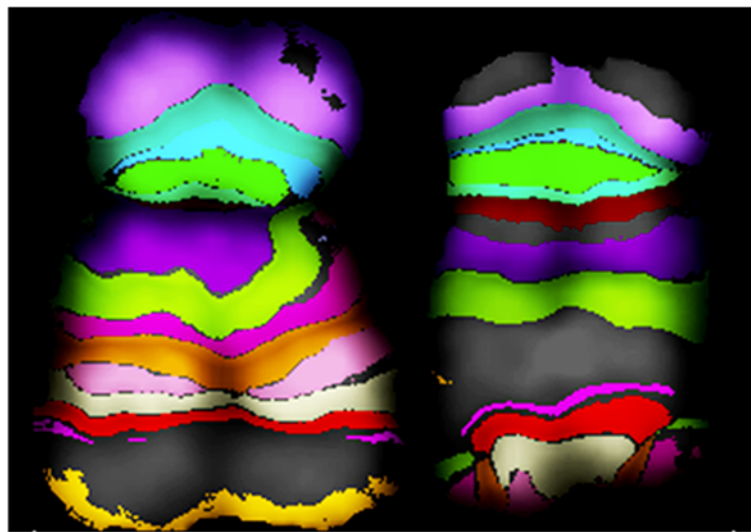


图 E-6. 通过使用区域特异性染色体染料，检测到 5 号染色体存在多色染色体显带荧光原位杂交染色体畸变。（照片：新加坡国立大学 Hande 教授）

⁹ V.Vinnikov 和 O.Belyakov, “辐射照射生物标记的临床应用：局限性和通过协调研究可能的解决方案”。《辐射防护剂量学》，2019 年。

E.2.4. 今后的方向

221. 新的生物剂量测定方法有助于查明和量化人体内的辐射照射，并阐明这种照射的可能来源和特征。生物剂量测定方法最近被引入辐射肿瘤学和核医学，以及诊断和介入放射学。¹⁰原子能机构推出了一个新的协调研究项目，以解决促进生物剂量学专家和辐射肿瘤医师之间对话的问题。¹¹ 预计生物剂量测定方法的显著改进将有助于更全面地评定计划性或意外医疗辐射照射的后果。

F. 粮食和农业

F.1. 加强昆虫不育技术在预防和根除入侵害虫方面的应用

F.1.1. 背景

222. 入侵物种会干扰生态系统服务或破坏整个生态系统，导致许多当前列为濒危或受威胁物种的本土物种减少。¹² 物种入侵的影响仅次于栖息地破坏，是全球生物多样性丧失的一个原因。¹³ 入侵害虫防治及放弃产出的成本巨大，是一个需要进行有效地区协调和国际协调的跨界问题。

223. 各地理区域之间国际运输和贸易、人口迁移、牲畜和农产品流动速度迅速加快，大大增加了害虫物种入侵新地区的可能性。过去 200 年，非本土物种的引进比率从 1500 至 1800 年期间的平均每年 7.7 个增加至 1996 年创纪录的 585 个。¹⁴ 随着时间的推移，节肢动物和其他无脊椎动物已成为越来越高效的入侵者，其引进数量在过去 45 年间呈现出指数增长。据估计，入侵物种对世界经济造成的损失约为 1.4 万亿美元，2002 年约占世界经济总量的 5%。

F.1.1.1. 入侵害虫与气候变化的关系

224. 人为温室气体排放造成的气候变化不仅正在导致许多物种分布的变化，而且正在促进入侵害虫在过去不适宜生长地区更多地生存。¹⁵ 虽然货物流通的增加正在加速许

¹⁰ V. Vinnikov 和 O. Belyakov, “医学放射学实践中的辐射照射生物标志物：合作研究和国际原子能机构（原子能机构）生物剂量学/放射生物学实验室的作用”，《保健物理学》，2020 年。

¹¹ 出处同上。

¹² H.Charles 和 J.Dukes, “物种入侵对生态系统服务的影响”，《生态学研究》第 193 卷（2007 年）第 217 页至第 237 页。

¹³ D.Pimentel 编著，《生物入侵：外来植物、动物和微生物物种入侵的经济和环境代价》，第二版，（2011 年）CRC 出版社，博卡拉顿，第 369 页。F 部分多次提到该出版物。

¹⁴ P.E.Hulme, “贸易、运输与麻烦：全球化时代入侵物种的管理途径”，《应用生态学杂志》第 46 期（2009 年）第 10 页至第 18 页。

¹⁵ L.H.Ziska、J.S.Dukes 编著，《物种入侵与全球气候变化》，（2014 年）国际应用生物科学中心，沃灵福德，第 368 页。

多害虫的重新分布，但气候及相关土地使用的变化将有可能产生新的小生境，让新的害虫能够在新的领土立足，使物种分布范围发生重大转变（图 F-1）。



图 F-1. 入侵害虫实例（仙人掌蛾、仙人掌螟）。
（照片：Ignacio Baez，美国农业部植物卫生科学和技术中心）

225. 到 2050 年的气候变化预测表明，入侵节肢动物数量将平均净增加 18%。这一扩张状况不仅指植物病虫害，也包括由媒介物传播的疾病，不仅影响媒介物的时空分布和种群动态，而且还加快了它们的生命周期（包括寄生虫的生命周期）、传播方式和在新宿主生长的机会。较高的温度会加快害虫和病原体发育速度，缩短其每代时间，从而增加每年的世代数目，这反过来又会导致病原体/寄生虫的种群规模扩大，并很可能突变为毒性更强的品系。为了减缓或解决气候和全球化引发的这些新虫害问题，需要制定新的立法和政策，¹⁶ 包括需要支助开发革新型防治方法，如昆虫不育技术，以减缓和控制这些生物入侵，并遏止非本地害虫种群的地理扩张。

F.1.1.2. 昆虫不育技术是预防和根除入侵害虫的工具

226. 根除入侵害虫的活动往往缺乏像外科手术般去除目标种群所有个体的工具，必须依赖于不加区别地大规模喷洒杀虫剂，以及彻底消除受侵扰动物和植物，甚至大规模摧毁整个畜群、作物和果园。

¹⁶ C.Perrings、K.Dehnen-Schmutz、J.Touza、M.Williamson，“如何管理全球化下的生物入侵”，《生态学和进化趋势》，第 20 卷（第 5 期）（2005 年）第 212 页至第 215 页。

昆虫不育技术的部署

作为大面积虫害综合治理方案的一个重要组成部分，昆虫不育技术的部署可以阻止入侵种群立足，以及遏制和根除入侵种群，而不会引起公众的反对或留下生态足迹。由于这一技术具有物种针对性，并因此不影响其他有益生物或非目标生物，故而成为有助于根除入侵害虫种群的理想工具。此项技术具有逆向密度依赖性：目标种群越少，达到根除目标就越快；鉴于此，这一技术的整合在根除活动后期阶段尤其有效。该技术还可与其他生物学抑制方法很好地结合，并可从空中使用，因此对不规则地形和交通不便地区很有效。

F.1.2. 改良昆虫不育技术和战略

227. 过去几十年，用于不育昆虫大规模生产、绝育和释放的改良技术和方案极大地提高了结合昆虫不育技术进行大面积虫害综合治理的成本效益。这为把这种技术扩展用于其他主要害虫（包括影响植物、动物和人体健康的高度瞩目入侵害虫）打开了大门，其中包括利用昆虫不育技术根除由于害虫入侵和新近初步立足引起的疫情。如果成员国面临入侵物种的引入，国际昆虫灭杀和绝育数据库汇编并提供 360 多种昆虫物种的昆虫绝育推荐剂量数据。

228. 加利福尼亚州和佛罗里达州针对地中海果蝇的预防性释放计划是预防性昆虫不育技术方案的一个例子。¹⁷ 美国这些州日益受到地中海果蝇入侵，使得城市地区，特别是那些有国际机场的地区，反复发现和爆发疫情。这种入侵与水果走私以及货物运输和航空运输数量的快速增长有关。这催生了广泛且昂贵的根除计划，最初主要是在城市地区上空喷洒马拉硫磷诱饵，但引起了公众的极大愤慨。为此，加利福尼亚州于 1994 年开始执行一项地中海果蝇预防性释放计划，其范围目前已覆盖洛杉矶盆地和奥兰治县 4582 平方公里。与实施预防性释放计划前那些年相比，加利福尼亚州的疫情减少了 98% 以上。佛罗里达州实施预防性释放计划的地区再也没有爆发过地中海果蝇疫情。¹⁸ 因此，尽管不断有这种入侵害虫侵扰，美利坚合众国本土仍然被国际公认为无地中海果蝇。

229. 多米尼加共和国根除地中海果蝇是利用昆虫不育技术根除由于害虫入侵和新近初步立足引起的疫情的一个例子。据报道，多米尼加共和国 2015 年 3 月出现了地中海果蝇。多米尼加共和国的主要贸易伙伴立即实施了进口禁令，禁令对水果和蔬菜出口

¹⁷ R.V.Dowell、I.A.Siddiqui、F.Meyer、E.L.Spaugy，“加利福尼亚州南部地中海果蝇预防性释放计划”，第 369 页至第 375 页。见 K.H.Tan 主编，《果蝇和其他害虫的大面积防治 — 马来西亚槟榔屿州 1998 年 5 月 28 日至 6 月 5 日大面积防治害虫国际会议和第五届具有经济重要性的果蝇国际专题讨论会合并会议文集》，马来西亚理科大学出版社（2000 年），马来西亚。

¹⁸ 美国农业部，“地中海果蝇预防性释放计划 — 2014 年对佛罗里达萨拉索塔和加利福尼亚洛斯阿拉米托斯不育昆虫释放设施的审查”，（2014 年）第 30 页。

造成了估计约 4000 万美元的损失，并危及数以千计的就业岗位。作为应急响应，多米尼加共和国政府制定了“多米尼加共和国消灭地中海果蝇计划”。

230. 粮农组织/原子能机构粮农核技术联合处与美国农业部和危地马拉-墨西哥-美国消灭地中海果蝇计划密切合作，向多米尼加共和国提供技术援助，以昆虫不育技术作为主要灭虫工具，抑制这种主要入侵害虫。参与援助多米尼加共和国这一重大努力的其他组织有国际植物和动物健康地区组织和美洲国家农业合作研究所。从 2015 年 10 月到 2017 年 5 月，从危地马拉 El Pino 设施运送并在受影响地区释放了超过 40 亿只不育蝇（图 F-2）。2017 年 7 月，官方正式宣布已根除地中海果蝇。¹⁹ 如果任由这种破坏性入侵害虫孳生，那么整个加勒比地区及其所有贸易伙伴就将已经面临着毁灭性疫情和巨额出口收入损失的巨大风险。



图 F-2. 准备空中释放不育昆虫。（照片：危地马拉消灭地中海果蝇计划）

F.1.3. 防备入侵害虫

231. 许多地区或国家目前并无某些害虫物种，但这些害虫的入侵只是个何时发生的时间问题，而不是会不会发生的问题（图 F-3）。全球旅行和贸易的趋势使得任何物种都越来越有可能到达世界上的任何地方。

¹⁹ J.L.Zavala-López、G.Marte-Díaz、F.Martínez-Pujols，“多米尼加共和国成功地大面积根除地中海果蝇”。见 J.Hendrichs、R.Pereira 和 M.J.B.Vreysen 编著，《大面积虫害综合治理：发展与实地应用》（即将出版）。



图 F-3. 利用犬只在出入境口岸进行行李植物检疫检查，检测入侵物种的未成熟阶段。
(照片：阿根廷 FUNBAPA 基金会)

232. 成本效益分析结果一般都表明，比起不得已进行大规模和耗资巨大而成功与否并不确定的根除运动，或者让一种主要害虫长久立足而后再予以长期防治而言，廉价得多的做法是为物种入侵做好准备，以便在虫害发生时能够迅速有效地作出反应。应用昆虫不育技术防治主要入侵害虫的潜力巨大；然而，当爆发害虫入侵新疫情时，昆虫不育技术包往往却不可使用或仅部分可用。因此，重要的是针对可能入侵、危害最大且适于应用昆虫不育技术的非本土害虫开发昆虫不育技术包。²⁰

233. 昆虫不育技术大面积应用所用技术的优化以及为防治其他备受关注的害虫而实现的技术多样化，将进一步扩大该技术的应用，并将构成一项战略工具，用于应对旅行和贸易增加及气候变化等因素导致害虫入侵数量日增的情况。

F.2. 用核技术支持食品溯源系统

F.2.1. 背景

234. 许多食品由于与特定地理来源、生产方法和独特特征相关的“附加值”标签声明而得以以溢价出售。与原产地相关联的产品可成为以保护当地资源以及粮农组织出版物《关联人、产地和产品》²¹ 所述其他因素为基础的可持续质量良性循环的一部分。

235. 用于核实地理标志的前景最广阔的分析方法包括稳定同位素和微量元素分析；磁共振光谱法，包括核磁共振和电子顺磁共振或电子自旋共振光谱法；以及质谱测定分析。此外，欧洲联盟建议，新注册地理标志应提及核实产品来源和（或）基本特质的适当分析程序。

²⁰ 入侵物种专家小组，全球入侵物种数据库，全球入侵物种计划（2018 年）。
<http://www.issg.org/database/species/search.asp?st=100ss&fr=1&str=&lang=EN>

²¹ 粮农组织，《通过地理标志加强可持续粮食系统：经济影响分析》（2018 年）。

什么是地理标志？

“地理标志”是对其特定品质、声誉或其他特性主要归因于其地理起源或地理环境的食品的原产地和（或）生产方法所作的界定。采用地理标志的好处包括质量保证（声誉）、公平竞争、保护（国内或国际）市场上的品牌、价格溢价、将有价值的产品与农村地区联系起来、重新连接消费者与生产者以及保护传统。在欧洲联盟的农产品和食品原产地与注册数据库中可以找到注册地理标志产品的概述，其中包括了来自世界各地的数千种粮食产品。

F.2.2. 核技术

236. 下文各段介绍了适用于食品来源检测的主要核技术或同位素技术。这些技术除其他外，特别包括：用热电离质谱测定法和多接收器电感耦合等离子体质谱测定法进行重元素的稳定同位素比率分析；用电感耦合等离子体质谱测定法、电感耦合等离子体光发射光谱法、X 射线荧光、中子活化分析及相关技术进行多元素分析。此外，还可以采用用于代谢物分析或非靶向筛查的核磁共振波谱法和质谱法等技术，以及其他用于推定检测的快速核方法，如离子迁移谱法。

237. 这些技术的广度和互补性为确定食品原产地和真实性以支持食品溯源系统和具有附加价值的食品奠定了坚实基础。此外，在目前缺乏分析解决方案的国家和地区，就知识传承及快速实施和培训而言，每项技术在成功促进食品原产地和掺假检测方面的追踪记录都至关重要。

稳定同位素测量

238. 核技术利用的是以同位素比质谱测定法测量的生物元素氢、碳、氮、氧和硫的稳定同位素比率方面的全球系统变化、锶的重同位素变化和其他生物地球化学指标。作为初步近似值，自然丰度稳定同位素测量值反映关于植物光合作用或吸收物（碳和氮同位素比率）及地理来源（氢、氧、硫和锶同位素比率）的信息。例如，食品中生物元素氢、碳、氮、氧和硫的天然存在稳定同位素比率的测量值常常反映关于食品地理来源或生产技术的信息，途径则是通过与环境同位素比率或例如动物饲养方法的关联。用热电离质谱测定法或多接收器电感耦合等离子体质谱测定法测得的锶同位素也可以反映产区的地质学相关信息，这类信息通过土壤生物利用率传递给植物和动物。由于食品的稳定同位素“指纹”与产区特征存在内在联系，因此，人为操纵和伪造这种指纹在经济上是不可行的。

元素分析

239. 用电感耦合等离子体质谱测定法进行食品元素分析，可反映将食品与产地以及可能改变元素分析的任何工艺（如选冶或研磨）联系起来的宏观、微观和微量元素浓度

方面的重要信息。植物具有的组分反映了其所生长的底层土壤中存在的生物可利用的和已调动的养分情况。例如，碱金属特别是铷和铯在土壤中很容易被调动并输送给植物，因此是良好的地理身份指标。

240. 微量元素利用率取决于若干因素，如土壤的 pH 值、水分和孔隙度，以及土壤中的粘土和腐殖质含量。因此，鉴于现有土壤的种类和生物利用度，元素组成可提供表征地理来源和可追溯性的食品独特标志组合，以及验证或支持溯源系统的独立手段。同样，动物组织的多元素组成在一定程度上反映动物所食植物的组成，并可与特定产区挂钩，例如就以牧草喂养的奶牛和肉牛而言。此外，元素分析可从潜在有毒元素（如砷、镉、铅和汞）浓度角度反映食品安全信息。

代谢指纹分析（代谢组学）

241. 对食品代谢物的分析是通常用于真实性检测的另一项重要技术。代谢物源于生物体中细胞过程或分子过程，可用核磁共振波谱法和质谱测定法进行表征。代谢组学可以是靶向的，侧重于相关代谢物组，反映代谢组学建模的直接功能信息；也可以是非靶向的，检测代谢物组中的模式，这既可以区分样品组，也可用于根据代谢模式或指纹构建未知样品分类模型。所有这些技术都非常依赖多变量统计分析来处理 and 解释结果（图 F-4）。

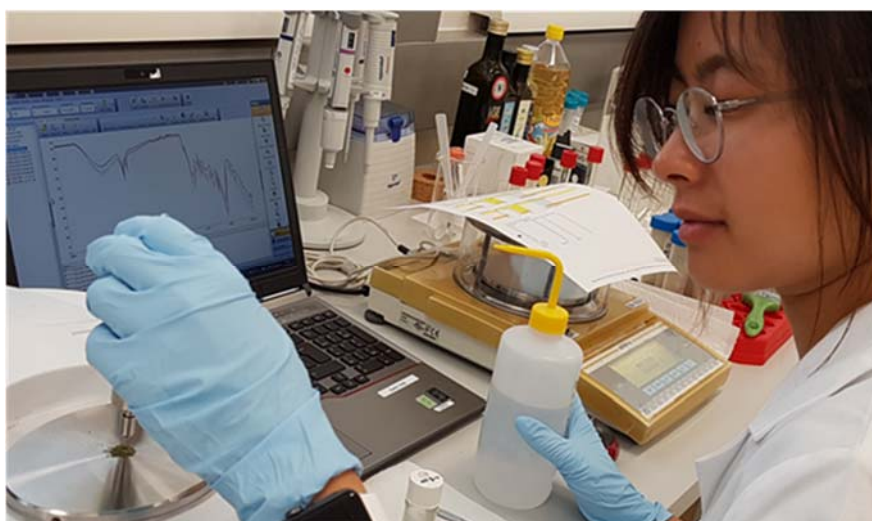


图 F-4. 原子能机构工作人员在分析绿茶样品。（照片：原子能机构）

242. 核磁共振和电子顺磁共振可用于研究食品中经简单成分分离或未经事先成分分离的复杂混合物，并可提供食品地理来源、是否有掺杂物、质量及工艺流程方面的信息。应用这类技术的一个例子是用质子高场核磁共振波谱法进行分析，以确定蜂蜜、果汁和葡萄酒的原产地以及其中是否存在掺杂物。将未知样品的分析结果与已知来源的真实样品数据库比对，若为真品，则显示阳性匹配；若非真品，则显示异常指纹。这些技术的另一个优点是可以进一步分析光谱异常区，以确定所掺杂的化学品。此外，电子顺磁共振表征提供了一种灵敏和准确的测量技术，用于在磁场下检测具有不成对电子的有机自由基物种，从而显示水果和蔬菜种植者、香料生产商和其他类似产

品供应链是否满足了质量保证和安全标准。电子顺磁共振通过检测食品样品中的抗氧化剂、纤维素自由基和结晶糖自由基来确认食品辐照的使用。食品辐照是用经批准的电离辐射水平处理食品的过程，以消除致病微生物和延长这些食品的保质期。它还用于通过使用旨在提高食品安全性的加工技术来消除昆虫和有害细菌（如肉类和家禽中常见于多种食品中的大肠杆菌），确保灭活寄生虫和病原微生物时的微生物安全性。

筛查技术

243. 分析仪器仪表的最新发展使一些核和电子顺磁技术更便于携带和获得。以前仅用于实验室的各种仪器表现在有更经济的台式、便携式或手持式可供使用，能够筛查食品的非典型特征或异常情况。例如，最近有了相对经济的台式核磁共振仪和电子顺磁共振仪来进行以前需要专门基础设施和专门人员在昂贵的高场磁共振仪上进行的筛查分析。

244. 同样，便携式和手持式 X 射线荧光光谱仪如果能提高相对灵敏度，可在食品检测中用于进行元素指纹分析。在食品真实性筛查方面具有很大潜力的另一种台式和便携式技术是采用非常低能量辐射源的顶空气相色谱法—离子迁移谱法。多年来，离子迁移谱法一直广泛用于机场筛查爆炸物和非法药物，直到最近才通过检测食品中的挥发性有机成分应用于食品真实性和原产地确认。例如检测乳制品、大米和高价值蔬菜、种子和坚果油（如摩洛哥坚果油）的真实性和原产地。

F.2.3. 数据库

245. 为了将上述技术应用于食品原产地的确认和溯源系统的独立验证，有必要在若干年度或收获周期中表征真实地理标志食品的稳定同位素和微量元素分析和代谢“指纹”的自然变化。然后，可将此类信息纳入参考数据库或食品原产地数据库，以比较可疑的假冒或掺假食品。虽然有方法，也有技术，但现有数据库的缺乏及（或）其相互操作性的有限是将该方法用于在食品原产地和真实性检测中开展稳定同位素和微量元素分析和代谢物指纹分析的主要障碍。

你知道吗？

食品原产地数据库是有组织的数据收集，其中的数据按照既定规程经过了分析，且取自于具有代表性的众多真实样品。

246. 这样一个数据库的目的是定义食品某些特性的自然（和允许的技术）变异性。这种“自然”变异性作为比较参考基准，用于检测可疑样品或对市场样品进行常规监测，以侦查食品欺诈，如贴错标签和掺假。考虑到这类支持食品溯源系统（如有针对性召回或分门别类召回）的数据库的最终目的以及若检测发现食品不合格的影响，这

些数据库必须有独立和可信赖的全球性托管机构的良好支持，以便成员国可经常用于比较可疑的假冒伪劣食品。

247. 一系列核技术及相关分析技术都可用于食品原产地检测，以支持或独立验证食品溯源系统。预计未来的发展将包括进一步小型化用于一级筛查的分析仪器，采用纳米材料等新出现的技术和先进数据处理工具来开发便携式的快速、非侵入性仪器，这将显著增加可检测的食品样品数量。例如，已开发了用普通智能手机作为筛查装置的食品扫描仪原型。这些技术具有成本效益，且方便获得，这意味着食品工业中的利益相关方、监管机构甚至消费者都可将其用于在食品价值链的多个点筛查食品，因此将显著提高控制系统的有效性。

248. 将这类仪器集成到食品检测系统中，预计将触发范式转换，应用高度敏感的特定核技术和同位素技术提供关键信息的实验室将从处理大量合格样品转向处理已被认定可疑的少数更相关样品。

F.3. 核技术用于温室气体监测，以减缓气候变化影响

F.3.1. 背景

249. 包括二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）和氧化亚氮（N₂O）在内的主要温室气体的排放正在导致全球变暖，从而正在影响农业生产系统的可持续性。政府间气候变化专门委员会最近的数据清楚地表明，人为温室气体排放量达到了历史最高水平²²。自1900年以来，地球表面的平均气温上升了约0.8摄氏度，大部分上升发生在20世纪70年代中期。农业和土地利用的变化产生了温室气体排放总量的约25%，主要因为化肥和动物粪便的低效利用、过度放牧和森林砍伐。虽然农业正在通过温室气体排放相当大地促进气候变化，但其本身也是气候变化的受害者，因为气候变化对水供应、土壤肥力和质量以及对作物生产力产生了负面影响。

250. 除直接来源外，温室气体还来自不同的间接来源，包括农业系统中的氨（NH₃）挥发（图 F-5）。据报告，在不同农业生态系统中都有范围广泛的氨排放（占施用氮的10%到60%）。²³ 农业中如此大比例的氨流失对农艺、环境和经济都有影响。例如，排放的氨会导致健康问题和环境问题，包括呼吸系统炎症、水的富养化和土壤酸化。此外，氨是导致全球变暖的强效温室气体氧化亚氮的二次来源。此外，温室气体排放的时空变异性对各农业生态系统和土地利用范围内的测量和管理以及后者固有的空间异

²² IPCC, 2014: 气候变化 2014: 综合报告。政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第一工作组、第二工作组和第三工作组报告[核心撰写小组、R.K.Pachauri 和 L.A.Meyer (eds.)]。瑞士日内瓦 IPCC，共151页，政府间气候变化专门委员会，2019年。出版物[WWW 文件]。政府间气候变化专门委员会—国家温室气体清单工作队。URL <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/index.html>

²³ M.Zaman、S.Saggar、A.D.Stafford，“减少尿素用于牧业系统造成的氨损失：正丁基硫代磷酰三胺（NBTPT）的效果、灌溉时机与灌溉量”，《新西兰草原协会会议文集》第75期（2013年）第209页至第214页。

质性构成了重大挑战。同位素技术提供了确定排放路径的工具，反过来说明其本身是有效的减缓技术。

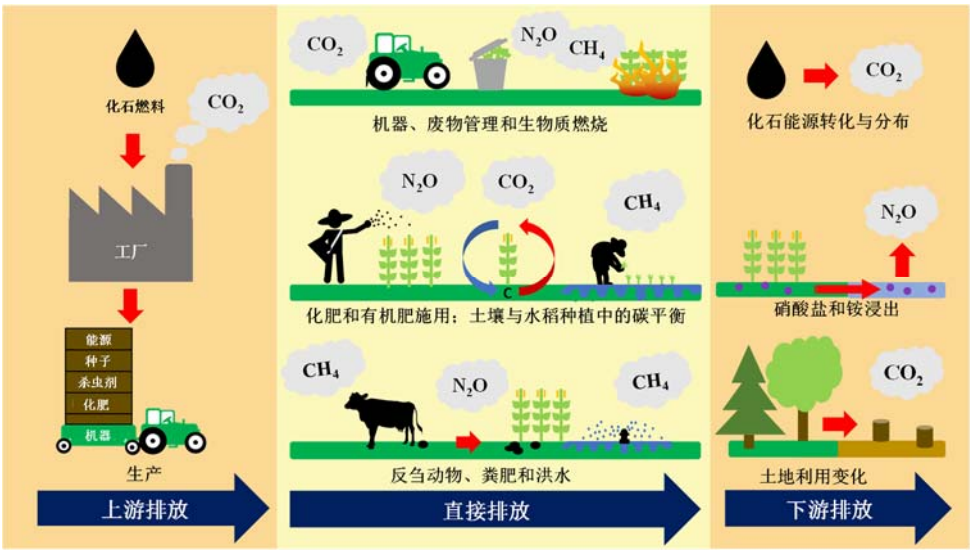


图 F-5. 作物生产直接（种植系统）和间接（上下游）温室气体排放示意图。

F.3.2. 碳-13 技术拓展到野外

251. 目前，碳-13 领域的创新使我们能够将碳循环研究从小规模实验室实验拓展到野外规模。为了实现这种拓展，必须有一种用于实时碳-13 分析的先进工具，如激光二氧化碳碳同位素分析仪。²⁴ 此外，通过用碳-13 同位素标记植物材料，可以评定土壤有机质的周转及其在农业生态系统中的固存和稳定。原子能机构的水土管理和作物营养实验室一直在进行二氧化碳排放的研究和发展，成员国现在可以获得碳-13 标记的植物材料。这些技术工具基于碳-13 同位素的应用，将不仅有助于提高土地管理对气候变化的适应能力，而且有助于了解未来气候假想情景（气温变化、不同降雨量）将如何进一步影响碳储存和二氧化碳排放。这些技术可提供对被隔离在土壤中或从不同土壤碳库中释放出来的碳数量的明确估计。²⁵

F.3.3. 氮-15 追踪技术用于测量氧化亚氮和确定氧化亚氮来源

252. 为了了解氧化亚氮排放，有必要对经二氮（N₂）排放造成的氮损失进行量化。二氮是一种非温室气体，其排放量远远大于氧化亚氮。为了精确测量土壤的温室气体排放，来自粮农组织/原子能机构粮农核技术联合计划和德国吉森尤斯图斯-李比希大学的科学家们一起进行了大量的实验室和野外实验。这些研究的成果是开发了一种氮-15

²⁴ C. Müller 等人，“通过氮-15 追踪模型定量测定氧化亚氮排放路径”，《土壤生物学和生物化学》第 72 期（2014 年）第 44 页至第 54 页。

²⁵ L. Keidel 等人，土壤团聚体和土壤有机碳含量对温带草原土壤中二氧化碳长期升高的深度依赖性响应，《土壤生物学和生物化学》第 123 期（2018 年）第 145 页至第 154 页。

(^{15}N) 追踪技术, 该技术不同于同位素稀释技术, 可在短期和长期野外研究中精确测量温室气体排放并确定其在土壤中的来源。^{26、27}

253. 最近的工作突出了同位素技术的重要性, 这些技术让我们可以深入了解农业生态系统中氮和碳的运动和去向, 包括土壤中的储存量和对大气的排放量。了解土壤复杂性以及促进土壤肥力和温室气体产生的相互作用因素是发展气候智能型农业实践的一个先决条件。图 F-6 是量化来自永久性草地氧化亚氮路径的这种追踪方法的结果示例。类似的方法也可以通过用合适的碳-13 源来识别甲烷和二氧化碳的产生和消耗过程。

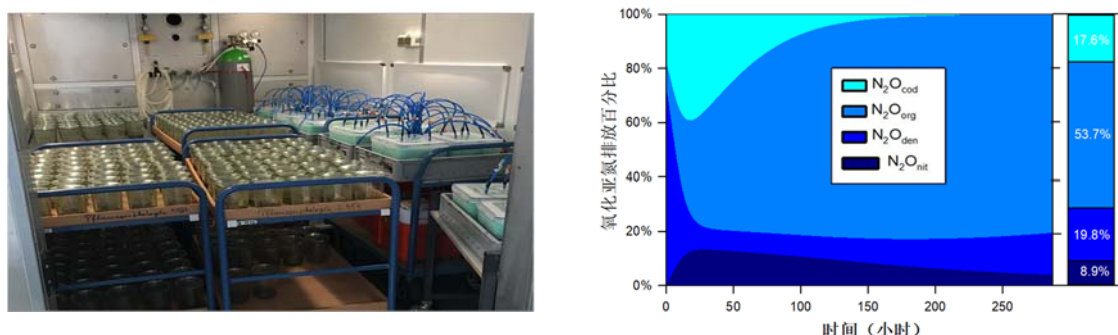


图 F-6. 氮-15 追踪研究的实验室孵化装置 (左) 与确定永久性草地氧化亚氮排放路径的氮-15 追踪研究的结果; $\text{N}_2\text{O}_{\text{nit}}$ = 硝化作用; $\text{N}_2\text{O}_{\text{den}}$ = 反硝化作用; $\text{N}_2\text{O}_{\text{org}}$ = 异养硝化作用; $\text{N}_2\text{O}_{\text{cod}}$ = 协同反硝化作用。(来源: Müller 等人, 2014 年)。²⁸

F.3.4. 野外规模氮测量的新发展

254. 缺乏廉价、技术含量低的测量技术意味着只能开展有限的野外研究来测量世界范围内的氮损失。目前已有若干复杂方法可以利用, 如风洞、腔衰荡光谱和微气象技术。然而, 这些技术非常昂贵, 需要高度娴熟的现场技术人员来进行操作。这使得许多希望测量不同农业管理系统中氮损失的发展中国家和机构无法利用。

255. 为了开发低成本的可靠氮测量方法, 原子能机构与巴西农业研究公司和巴拉那农艺科学研究所开展合作, 开发了一种采用塑料瓶的简易氮装置 (图 F-7)。

²⁶ C. Müller 等人, “通过氮-15 追踪模型定量测定氧化亚氮排放路径”, 《土壤生物学和生物化学》第 72 期 (2014 年) 第 44 页至第 54 页。

²⁷ G. Moser 等人, “通过野外氮-15 追踪解释吉森 FACE 中二氧化碳浓度升高状况下氧化亚氮排放量的翻倍”, 《全球变化生物学》第 24 期 (2014 年) 第 3897 页至第 3910 页。

²⁸ C. Müller 等人, “通过氮-15 追踪模型定量测定氧化亚氮排放路径”, 《土壤生物学与生物化学》第 72 期 (2014 年) 第 44 页至第 54 页。



图 F-7. 测量氨挥发所用简易开放装置视图。Araújo 等人 (2009 年)²⁹ 和 Jantalia 等人 (2012 年)³⁰ 介绍过此装置细节。

256. 为了测试和验证新开发的氨测量方法的准确性，采用了氮-15 法。将氮-15 标记尿素施于安装在玉米作物行间空地的渗漏计表面。将塑料瓶制成的开放装置（图 F-7）安装在每个渗漏计上，有四种不同的施氮比率，装置与土壤表面之间的距离也各不相同，在监测期间有的装置移动，有的不移动（静态与动态）。

257. 采用这种简易开放装置法是一种合适的可靠技术，可以量化农业土壤中氨的挥发损失，每个装置的制作成本不到 1 美元。发达国家和发展中国家都在推广采用这种新的氨测量方法，帮助监测和应对畜牧业和农业氨排放的环境影响。将其效率与野外使用氮-15 技术的其他几种现有方法进行了比较，获得了非常相似的结果。因此，这种方法以其实用性、准确性和可靠性迅速获得认可，已在巴西、智利、中国、哥斯达黎加、伊朗伊斯兰共和国、巴基斯坦、西班牙和美利坚合众国得到科学家成功采用。该装置可以精确地测量氨损失，以便按照气候智能型农业实践，大范围减少温室气体，减轻环境影响。

F.3.5. 展望未来

258. 随着这些测量工具和模型的进步，为野外实验以及在农业生态系统层面推进具体应用设想了进一步的研究与发展活动。2020 年将启动一个关于该主题的新协调研究项目，以进一步增进了解温室气体排放的复杂过程，并制定更多减少温室气体的减缓方案和固碳方案。

²⁹ E.S.Araújo 等人，“校准半开放静态处理室用于定量测定土壤挥发氨”，《巴西农业研究》，第 44 卷第 7 期（2009 年）第 769 页至第 776 页。

³⁰ C.P.Jantalia 等人，“氮源对半开放静态处理室测量氨挥发的影响”，《农学杂志》第 104 卷第 6 期（2012 年）第 1595 页至第 1603 页。



www.iaea.org

International Atomic Energy Agency
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

GC(64)/INF/2