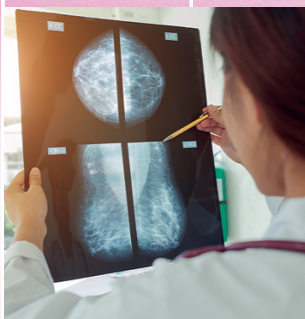


2019 年核技术评论



IAEA

国际原子能机构

2019 年核技术评论

GC(63)/INF/2

国际原子能机构在奥地利印制
2019年8月

IAEA/NTR/2019

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”。

《2019 年核技术评论》着重叙述全世界在以下选定领域的显著发展：动力应用，原子数据和核数据，加速器和研究堆应用，核技术用于粮食、土壤和牲畜管理，癌症诊断和治疗，降水中同位素、海洋酸化效应和文化遗产保护研究的新发展。

草案文本已以 GOV/2019/4 号文件提交 2019 年 3 月理事会会议。本最后文本系根据理事会的讨论结果和从成员国收到的其他意见编写而成。

目 录

正文摘要	1
2019 年核技术评论	1
主体报告	1
A. 动力应用	1
A.1. 当今核电	1
A.1.1. 运行核电国家	3
A.1.2. 扩大核电国家	4
A.1.3. 启动核电国家	6
A.2. 核电增长预测	7
A.3. 燃料循环	8
A.3.1. 前端	8
A.3.2. 供应保证	10
A.3.3. 后端	11
A.4. 退役、环境治理和放射性废物管理	12
A.4.1. 核设施退役	12
A.4.2. 治理	13
A.4.3. 放射性废物管理	14
B. 原子数据和核数据	17
C. 加速器和研究堆的应用	19
C.1. 加速器和相关仪器仪表	19
C.1.1. 离子束工程带来的突破性技术	19
C.1.2. 用加速器模拟反应堆材料损伤	19
C.1.3. 利用核分析技术开展大规模空气污染监测	20
C.1.4. 表面污染表征的实地测量	21
C.2. 研究堆	22
C.2.1. 产生冷中子的慢化剂新技术	24
D. 辐射技术	25
D.1. 宇宙射线断层照相技术：来自恒星的探测器	25
D.1.1. 应用	26

E. 人体健康.....	28
E.1. 现代乳房 X 射线照相的校准服务	28
E.1.1. 背景.....	28
E.1.2. 辐射质量.....	29
E.1.3. 剂量计.....	29
E.1.4. 校准.....	29
E.1.5. 进一步发展.....	30
E.2. 妇科癌症的放射导向外科手术	30
E.2.1. 背景.....	30
E.2.2. 宫颈癌.....	31
E.2.3. 子宫内膜癌.....	31
E.2.4. 卵巢癌.....	31
E.2.5. 未来趋势.....	32
F. 粮食和农业.....	32
F.1. 新的发展表明食品和植物检疫辐照的范式转变	32
F.2. 核技术促进作物和种植系统快速适应气候变化	35
F.2.1. 标记辅助突变育种加快气候智能型品种的开发.....	35
F.2.2. X射线计算机断层照相促进高通量无损植物表型.....	36
F.3. 同位素技术和核技术在动物营养方面的革新应用	37
F.3.1. 利用核技术研究和改善放牧牲畜的营养.....	38
F.3.2. 正构烷烃帮助估算采食量、消化率和食性选择.....	38
F.3.3. 粪便残余营养物的近红外光谱分析帮助估算养分含量、 主动采食量和食性选择.....	38
F.3.4. 能量色散X射线荧光精确测定牧草的矿物质含量.....	39

正文摘要

1. 2018 年底，450 座在运核动力堆的全球发电容量创纪录地达到 396.4 吉瓦（电），与 2017 年相比增加了 5 吉瓦（电）。2018 年，九座反应堆并网，七座永久关闭，五座开工建设。近期和远期增长前景仍集中在亚洲，55 座在建反应堆中的 35 座和 2005 年以来并网的 68 座反应堆中的 58 座都在亚洲。
2. 在目前运行核电厂的 30 个成员国中，有 14 个正在建造新反应堆或正在完成以前暂停的建设项目。还有 28 个国家正在考虑、规划或积极努力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，还有几个国家处于基础设施筹备的后期阶段。
3. 原子能机构 2018 年对全球核电容量的高值预测表明，到 2030 年将比当前水平增加 30%，到 2050 年容量接近翻倍；而在低值预测中，容量持续下降约 10 年，之后到 2050 年反弹至 2030 年水平。政府间气候变化问题小组特别报告中提出的排放途径反映了大幅扩大核电对减缓气候变化的贡献的必要性。
4. 作为权威性世界参考报告的双年度“红皮书”第 26 期表明，无论核能最终在满足未来电力需求和全球气候目标方面的作用如何，世界铀供应都能绰绰有余地满足可预见未来的预测需求。然而，低铀价继续制约公司投资勘探、可行性研究和新项目建设的能力。全球转化、浓缩和燃料制造能力足以满足核电装机容量高值和低值预测所反映的需求。
5. 关于原子能机构低浓铀银行，与中国的过境协定于 2018 年 2 月生效，与俄罗斯联邦和哈萨克斯坦授权机构的运输合同分别于 2018 年 9 月和 11 月签署。原子能机构与哈萨克斯坦国家原子能工业股份公司（哈原工）和欧安诺集团签署了低浓铀采购合同。
6. 迄今，已从核电厂卸出约 40 万吨重金属乏核燃料，其中约 25%正在进行后处理，其余的正在 27 个国家的反应堆水池或 151 个离堆乏燃料贮存设施中贮存。
7. 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将在这些领域带来持续改进。
8. 一些国家在高放废物和（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。弃用密封放射源的开创性钻孔处置项目在加纳和马来西亚已达到里程碑。所有其他放射性废物类别的处置设施正在全球范围内运行。
9. 在加强和改善全世界核电厂和研究堆的安全方面继续取得进展，原子能机构在所有安全领域开展了大量同行评审工作组访问和咨询服务。成员国继续在老化管理、内

部和外部危害管理、污染控制、运行经验利用、核电计划和中小型或模块化反应堆的监管框架以及退役和放射性废物管理等领域寻求原子能机构的援助。

10. 2018 年推出了几个对动力和非动力应用的所有研究和发展活动都至关重要的核数据库。启动了国际核数据评价网，以激励与核技术特别相关的核素中子截面评价方面取得进展。

11. 涉及加速器和离子束的新技术和仪器仪表在安全通信、材料损伤模拟、监测空气污染、减轻氮氧化物和硫氧化物对气候变化和环境污染的影响和测量表面污染等领域取得了令人鼓舞的成果。

12. 55 个国家的 252 座在运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。七个国家正在建造新的研究堆，而其他一些国家正在计划或考虑建造新的研究堆。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。2018 年，尼日利亚的微型中子源反应堆（微堆）从高浓铀燃料转换为低浓铀燃料，经辐照的高浓铀燃料已返还中国。核医学解决方案提供商 Curium 公司已完成靶件制造只用低浓铀的转换工作，使目前世界上销售的钼-99 约 75% 不使用高浓铀进行生产。虽然 2018 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，但生产商和卫生从业人员的努力弥补了部分生产波动。

13. μ 子射线照相是一项新兴技术，利用宇宙射线 μ 子形式的天然存在的本底辐射。宇宙 μ 子的能量大约是普遍 X 射线的 1 万倍，因此可以穿透甚至大型结构，同时不会留下超出天然本底水平的辐射剂量。 μ 子射线照相成像技术可用作研究全尺寸土木结构（如建筑物、桥梁和隧道）完整性的无损检测工具。这项技术也可应用于地球科学和考古学，以及核安全和核安保及放射性废物管理。

14. 每年有数百万女性接受低剂量乳房 X 射线照相进行乳腺癌筛查。必须提供尽可能最低的剂量，同时确保所有乳房大小和构成都有尽可能最佳的图像质量。现代乳房照相装置采用各种光束能量来实现这一目标。二级标准剂量学实验室帮助医院确保其剂量可追溯到商定的国际标准。剂量测定设备需要定期校准。建议使用能够对临床中发现的不同光束能量范围做出稳定响应的高质量电离室进行精确剂量测定。

15. 与全淋巴结清扫术相比，妇科癌症放射导向外科手术可降低短期和长期发病率。前哨淋巴结是转移过程的关键，因此它们的绘图和活检是许多癌症治疗的核心。前哨淋巴结活检被认为是在微转移阶段筛查淋巴结的惟一可靠方法。与妇科癌症相关的放射导向外科手术最相关的进展是将便携式 γ 射线照相机等仪器引入手术室。

16. 食品辐照是后期生产过程的一个重要组成部分，确保食品不含导致食物中毒的微生物、害虫或腐败生物，从而延长其保质期。传统上，食品辐照通常外包给大型独立设施，但新的辐照器和相关技术的开发正在为新方法铺平道路。技术正在使电子束和 X 射线发生器的尺寸缩小，并且机器源照射的最新发展表明将来可能更容易将辐照装置安装在食品包装线上。

17. 气候变化造成的严重作物损失需要创新的育种体系来确保全球粮食安全。植物突变育种、标记辅助选择和高通量表型的组合构成了植物快速适应气候变化的有力配方。正在制定工作流程，以便经济有效地识别导致特定表型的诱发突变，这些技术和方法正在越来越多地流向成员国。

18. 到 2050 年，全球对动物源食品的需求预计将增加 60—70%。为满足这种需求，畜牧业将需要基于技术使生产系统集约化。将需要加倍获取饲料和草料供应以及良好的牧场。同位素和核技术的创新应用可以帮助建立一个关于采食量、食性选择和牲畜食用草营养成分的数据库，指导适当的饲养和放牧管理策略。微量营养素研究可以为最大程度地提高动物健康和生产力所必需的矿物质补充提供基础。

2019 年核技术评论

主体报告

A. 动力应用

A.1. 当今核电

1. 截至 2018 年 12 月 31 日，全球共有 450 座在运核动力堆，总装机容量为 396.4 吉瓦（电）¹（见表 A-1），是迄今最高的数字。这表明与 2017 年相比，总容量增加约 5 吉瓦（电）。在运反应堆中，约 82.2%属轻水慢化冷却堆、10.9%属重水慢化冷却堆、3.1%属轻水冷却石墨慢化堆、3.1%属气冷堆。有三座液态金属冷却快堆。将近 89%的核发电量由 376 座轻水反应堆生产。

2. 2018 年，九座新的压水堆并网：中国七座（海阳 1 号、海阳 2 号、三门 1 号、三门 2 号、台山 1 号、田湾 4 号和阳江 5 号），俄罗斯联邦两座（列宁格勒二期 1 号和罗斯托夫 4 号）。七座反应堆被永久关闭：中国台湾的金山 1 号，日本的伊方 2 号、大饭 1 号、大饭 2 号和女川 1 号，俄罗斯联邦的列宁格勒 1 号，以及美利坚合众国的牡蛎溪。

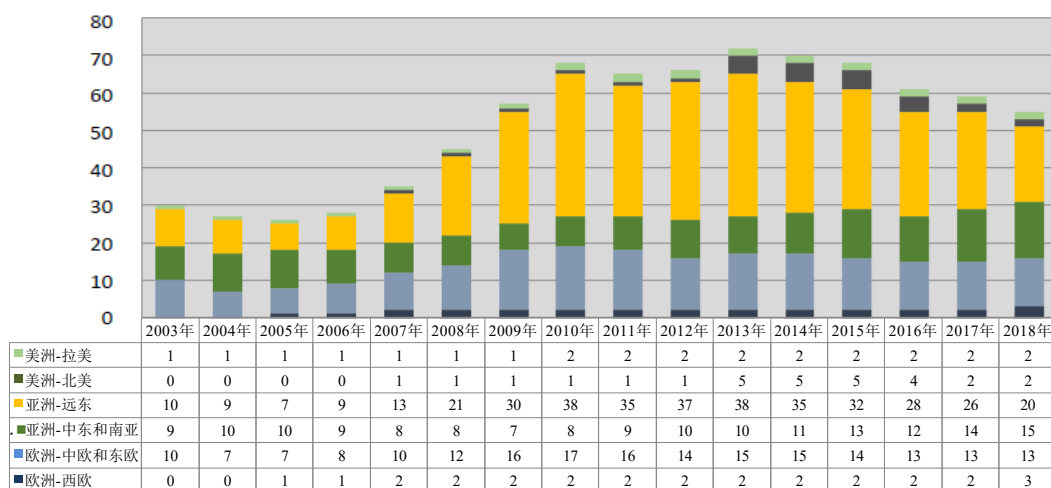


图 A-1. 按地区分列的在建反应堆数目。（资料来源：原子能机构动力堆信息系统 www.iaea.org/pris）

3. 截至 2018 年 12 月 31 日，有 55 座反应堆在建。阿库尤 1 号（土耳其）、库尔斯克二期 1 号（俄罗斯联邦）、罗布尔 2 号（孟加拉国）、新古里 6 号（大韩民国）和欣克利角 C-1 号（英国）开始建设。扩展以及近期和远期增长前景仍集中在亚洲（图 A-1），有 35 座反应堆在建。2005 年以来并网的 68 座新反应堆中有 58 座也在亚洲。

¹ 1 吉瓦（电）等同于 10 亿瓦电。

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆（截至 2018 年 12 月 31 日）^a

国家	在运反应堆		在建反应堆		2018 年供应的核电量		截至 2018 年的总运行经验	
	机组数	总容量 兆瓦（电）	机组数	总容量 兆瓦（电）	太瓦·时	占总发电量的 百分数	年数	月数
阿根廷	3	1 633	1	25	6.5	4.7	85	2
亚美尼亚	1	375			1.9	25.6	44	8
孟加拉国			2	2160				
白俄罗斯			2	2 220				
比利时	7	5 918			27.3	39.0	296	7
巴西	2	1 884	1	1 340	14.8	2.7	55	3
保加利亚	2	1 966			15.4	34.7	165	3
加拿大	19	13 554			94.4	14.9	750	6
中国	46	42 858	11	10 982	277.1	4.2	322	11
捷克共和国	6	3 932			28.3	34.5	164	10
芬兰	4	2 784	1	1 600	21.9	32.4	159	4
法国	58	63 130	1	1 630	395.9	71.7	2 222	4
德国	7	9 515			71.9	11.7	839	7
匈牙利	4	1 902			14.9	50.6	134	2
印度	22	6 255	7	4 824	35.4	3.1	504	11
伊朗伊斯兰共和国	1	915			6.3	2.1	7	4
日本	38	36 476	2	2 653	49.3	6.2	1 863	2
大韩民国	24	22 444	5	6700	127.1	23.7	547	5
墨西哥	2	1 552			13.2	5.3	53	11
荷兰	1	482			3.3	3.1	74	0
巴基斯坦	5	1 318	2	2 028	9.3	6.8	77	5
罗马尼亚	2	1 300			10.5	17.2	33	11
俄罗斯联邦	36	27 252	6	4573	191.3	17.9	1 298	6
斯洛伐克	4	1 814	2	880	13.8	55.0	168	7
斯洛文尼亚	1	688			5.5	35.9	37	3
南非	2	1 860			10.6	4.7	68	3
西班牙	7	7 121			53.4	20.4	336	1
瑞典	8	8 613			65.9	40.3	459	0
瑞士	5	3 333			24.5	37.7	219	11
土耳其			1	1 114				
乌克兰	15	13 107	2	2 070	79.5	53.0	503	6
阿拉伯联合酋长国			4	5 380				
英国	15	8 923	1	1 630	59.1	17.7	1 604	7
美利坚合众国	98	99 061	2	2 234	808.0	19.3	4 408	6
总计 ^{b, c}	450	396 413	55	56 643	2563.0		17 880	11

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

b. 说明：总计中包括中国台湾的下列数据：在运五台机组，4448 兆瓦（电）；在建两台机组，2600 兆瓦（电）；核发电量 26.7 太瓦·时，占总发电量的 11.4%。

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（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

4. 截至 2018 年底，450 座在运核动力反应堆中有 66% 已经运行 30 年以上。越来越多的核电厂正在实施长期运行和老化管理计划。
5. 匈牙利已接近完成其反应堆运行寿期延长工作。匈牙利原子能管理局已批准波克什四台机组在达到其最初的 30 年许可证运行寿期后再运行 20 年。计划于 2020 年开始在波克什再建两台机组（称为波克什二期项目），预计将在 2026 年和 2027 年投入商业运行。
6. 2018 年 5 月，伊朗伊斯兰共和国在计划建设的两台机组的第一台即 1050 兆瓦（电）布什尔 2 号机组的施工场址开始土壤稳固工作。布什尔 2 号和 3 号机组预计将分别在 2026 年和 2027 年并网。
7. 在加拿大，达灵顿核电厂 2 号机组开始进行整修工作。对达灵顿所有四台坎杜堆机组进行整修的目的在于使该电厂能够持续运行至 2055 年，计划在 2026 年前完成整修工作。2018 年 8 月，皮克林核电厂被授予 10 年期运行许可证，这包括三个阶段：持续商业运行至 2024 年；稳定活动，如关闭后卸料和去水；以及监视下的安全贮存。
8. 英国政府致力于根据 2017 年“清洁增长战略”提供新的核电容量，已采取行动鼓励新的核建设，该行业提出高达 17.8 吉瓦（电）的新建容量。欣克利角 C 第一座反应堆正在进行场址准备工作，计划于 2025 年投入运行。
9. 2018 年 7 月，保加利亚科兹洛杜伊核电厂完成了升级改造，可将运行寿期延长至 2051 年。2018 年 6 月，内阁取消了 2012 年关于终止贝勒尼核电厂建设的决定，允许恢复该项目及相关场址工作。
10. 2018 年，墨西哥对扩大拉古纳维尔德核电厂装机容量进行了研究。
11. 2018 年 7 月，亚美尼亚确认正在致力于延长梅察莫尔核电厂 2 号机组的运行寿期。
12. 罗马尼亚计划通过在切尔纳沃德核电厂建造和调试 3 号和 4 号机组，进一步提高核发电容量。2018 年 5 月，决定 2026 年对切尔纳沃德 1 号机组进行关闭整修。
13. 2018 年 8 月，南非发布了最新的“综合资源计划/国家发展计划”，该计划并没有预测在 2030 年前增加其核能发电容量。
14. 2018 年 5 月，捷克电力公司开展了一项研究，展示泰梅林核电厂机组 60 年运行寿期不存在基本安全或技术障碍。同样在 2018 年 5 月，捷克政府推迟了关于建造新核机组的决定。
15. 比利时打算在 2025 年之前逐步取消核电厂。正如政府 2018 年 3 月批准的新能源战略所证实的那样，多伊尔 3 号反应堆将于 2022 年退役，蒂昂热 2 号将于 2023 年退役，其余机组将于 2025 年关闭。西班牙正在制定的“2021—2030 年国家综合能源和气候计

划”预计将确定核能在国家能源结构中的发展，包括核电厂的关闭时间表。德国继续推行逐步取消核电。瑞典和瑞士按计划维持现有的核电厂。

16. 原子能机构收集的安全指标表明，核电厂运行安全仍然保持高水平。图 A-2 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。紧急停堆只是几种常用的安全实绩指标之一。

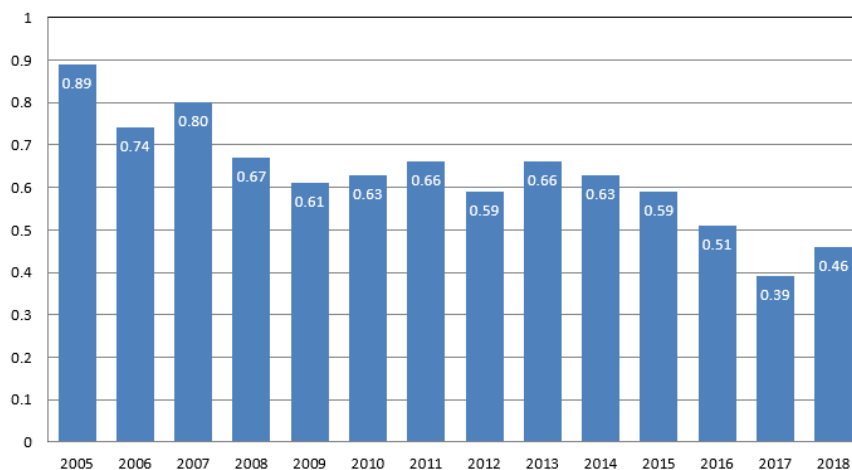


图 A-2. 平均紧急停堆率：机组每运行 7000 小时的自动和手动紧急停堆次数。（资料来源：原子能机构“动力堆信息系统” www.iaea.org/pris）

A.1.2. 扩大核电国家

17. 在运行核电厂的 30 个成员国中，有 11 个正在积极建造更多的核电机组或扩大核电计划。在进行中的 55 个反应堆项目中，46 个在拥有现有核电计划的国家，主要是中国（11 个）、印度（7 个）和俄罗斯联邦（6 个）。

18. 目前，中国有 46 台在运核反应堆机组，还有 11 台正在建设中。2018 年，有七台机组（三门 1 号和 2 号、台山 1 号、海阳 1 号和 2 号、阳江 5 号和田湾 4 号）并网。中国能源监管机构国家能源局预计将设定到 2030 年使核电容量达到 120 至 150 吉瓦（电）的目标。中国还计划到 2030 年在海外建造 30 座反应堆。

19. 俄罗斯联邦有 37 座核动力反应堆在运行，有六座反应堆在建。最新的俄罗斯联邦目标计划预计，核电在电力供应中的份额到 2030 年将达到 25—30%，到 2050 年增至 45—50%，到本世纪末达到 70—80%。2018 年 4 月，俄罗斯完成了浮动核电站“罗蒙诺索夫院士号”的建设，预计于 2019 年投入运行。

20. 芬兰的奥尔基洛托 3 号欧洲压水堆项目已进入调试阶段，完成了冷热功能测试。商业运行计划于 2019 年底开始。芬兰有四台核电机组正在运行，并计划扩大核电计划。奥尔基洛托 1 号和 2 号机组的运行许可证已获得延长，允许两台机组运行至 2038 年。汉希克维 1 号项目仍在进行许可证审批审查，计划于 2019 年开始建设。

21. 巴基斯坦“能源安全计划”设定的目标是到 2030 年核发电容量达到 8800 兆瓦（电），其中包括一座 1100 兆瓦（电）压水堆，预计 2020 年开工建设，2025 年开始商业运行。
22. 美利坚合众国有 98 座在运商用核反应堆。位于佐治亚州沃格特勒核电厂的 AP1000 型 3 号和 4 号机组正在建设中，计划于 2021 年和 2022 年开始运行。2018 年 7 月宣布位于爱荷华州的单机组杜安·阿诺德能源中心将于 2020 年底永久关闭，比其运行许可证的期满时间提前了五年。营运者已申请将以下机组的运行时间从 60 年延长至 80 年：佛罗里达州土耳其角 3 号和 4 号机组、宾夕法尼亚州桃花谷 2 号和 3 号机组，以及弗吉尼亚州萨里 1 号和 2 号机组。美国是第一个考虑将电厂运行寿期延长至 80 年的国家。单机组牡蛎溪核电厂经过近 49 年的商业运行后于 2018 年 9 月停止运行。
23. 在阿根廷，恩巴尔斯核电厂正在进行延寿和改造过程。这座 30 兆瓦（电）Carem-25 小型模块堆计划于 2022 年启动调试。2018 年 4 月，核监管机构延长了阿图查 1 号机组的运行许可证，允许运行至 2024 年。
24. 2018 年 3 月，印度的印度核电有限公司和法国的法国电力公司签署了关于建造计划中的杰塔普核电厂的协议，该电厂包括六座欧洲压水堆。10 月，印度与俄罗斯联邦签署了在一个尚未选定的场址建造一座包括六台 VVER 型机组的核电厂的协议。
25. 巴西政府寻求增加其核电生产，计划在 2025 年至 2030 年期间投入运行四座新的压水堆。1405 兆瓦（电）安哥拉 3 号机组于 2010 年恢复建设，初步计划于 2018 年启动。但在该机组完成约 60%时进展停滞，核电力公司正在寻求一种基于合作伙伴关系的模式来重新开始建设。5 月，原子能机构同行评审工作组访问发现，安哥拉 1 号的国有营运者核电力公司在这座反应堆的老化管理和长期运行准备方面取得了进展。
26. 法国维持着 58 台在运核电机组，弗拉芒维尔核电厂的一台新机组计划在 2019 年底前完成装料。据法国政府称，核电发展战略与《绿色增长能源转型法》和计划在 2019 年年中前通过的多年能源计划所设定的目标有关。该计划草案将 2035 年定为将核在国家电力结构中的份额减少至 50%的最后期限。为实现该指标，有 14 座现有反应堆将在 2035 年之前关闭。政府将在 2021 年之前与核工业界合作拟订一项工作计划，作为决定建造新核动力堆时的依据。
27. 根据 2017 年 12 月颁布的《第八个长期电力供需基本计划》，大韩民国将在 2023 年之前继续建设五台 APR-1400 型机组。但不会建造其他新的机组并延长现有电厂的运行寿期。2018 年 6 月，营运者韩国水电核电公司根据在政府出台能源过渡政策后进行的一项经济分析，决定关闭该国第二座最老核反应堆月城 1 号。该反应堆自 2017 年 5 月起已经停役进行计划维护。
28. 2018 年 7 月宣布斯洛伐克莫霍夫采核电厂 3 号机组预计于 2019 年第二季度投入运行。

29. 2018年7月，乌克兰罗夫诺3号机组的运行许可证被延长20年，因此该电厂可持续运行至2037年。2018年完成了恢复建造赫梅利尼茨基3号和4号机组的可行性研究。《乌克兰2035年前能源战略》预计到2035年核电将在该国电力生产中占50%的份额。

30. 2018年7月，日本政府批准了《基本能源计划》，确认到2030年核电份额约为20—22%。2018年6月，东京电力公司宣布了福岛第二核电站所有机组的退役计划。同月，玄海4号机组按照新的监管标准重新启动。2018年裁定大井3号和4号机组以及东海2号机组将获许继续运行。

A.1.3. 启动核电国家

31. 在正在考虑、规划或积极致力于将核电纳入能源结构的28个成员国中，有19个已开始对核电基础结构进行研究；五个已做出决定，并正在准备必要的基础结构；五个已签署合同，正在筹备或已开始建设。

32. 在阿拉伯联合酋长国（阿联酋），巴拉卡核电厂所有四座反应堆的建设都取得了进展。1号机组预计于2019年底/2020年初开始运行，2号机组计划一年后开始运行。应阿联酋请求，2018年进行了第三阶段综合核基础结构评审工作组访问。在白俄罗斯，位于奥斯特洛维斯的第一座核电厂的建设工作继续进行，第一台和第二台机组预定分别于2019年和2020年进行调试。在孟加拉国，卢普尔核电厂第二台机组完成了第一罐混凝土浇筑。1号和2号机组预计分别在2024年和2025年进行调试。第二个核电厂项目也作了规划。在土耳其，法令颁布了新的核立法。阿库尤核电厂已开始建造，第一台机组预计于2023年进行调试。在埃及，位于埃尔德巴的四机组核电厂正在接受场址许可证审查。建设工作预计于2020年开始，第一台机组预计于2026年进行调试。埃及已请求在2019年10月进行综合核基础结构评审第二阶段工作组访问。

33. 沙特阿拉伯预计将并行建造一座小型模块堆和两座常规核电厂。两座常规核电厂的采购过程正在进行中。小型模块堆预计于2020年开始建造；第一座大型核电厂预计于2021年开始建造，并于2028年进行调试。2018年7月进行了综合核基础结构评审第二阶段工作组访问。约旦也在制订双轨核电计划，包括在2019年之前选定总装机容量为200兆瓦（电）至600兆瓦（电）（取决于电力需求）的小型模块堆技术，供在2027—2028年部署，并建造一座约1000兆瓦（电）的大型压水堆，时间很可能是2030年后。2018年10月，乌兹别克斯坦与俄罗斯联邦签署了建造其第一座总装机容量达2400兆瓦（电）的双机组核电厂的协议。尼日利亚正在计划通过建造-拥有-运行-转让方式建设四座反应堆，第一台机组将于2027年投入运行。肯尼亚在决定继续核电计划之前，计划在2027年进行第一座核电厂调试。2018年11月进行了场址和外部事件设计工作组访问。肯尼亚已请求在2019年8月进行综合核基础结构评审后续工作组访问。肯尼亚最近表示有兴趣在建造核电厂之前建造一座研究堆。在波兰，如果政府决定继续执行核电计划，第一台机组预计在2030年进行调试。

34. 在以支持建立安全、可靠和可持续的核电计划的“里程碑”方案为基础发展必要的国家核基础结构方面，成员国继续受益于原子能机构的援助。这涉及系统地涵盖 19 个核基础结构问题的同行评审和专家工作组访问、培训班和工具。随着 2018 年在尼日尔、菲律宾、沙特阿拉伯、苏丹和阿联酋进行的五次综合核基础结构评审工作组访问，综合核基础结构评审工作组访问自 2009 年启动以来已在 20 个成员国开展了 27 次。

A.2. 核电增长预测

35. 与地区专家磋商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 2018 年预测（图 A-3）表明，核电可能难以维持其当前在全球能源结构中的地位。在到 2030 年的低值预测中，核电净装机发电容量从 2017 年底的 392 吉瓦（电）下降 10% 以上。在高值情况下，到 2030 年容量将增加 30%，达到 511 吉瓦（电）。从较长期来看，低值情况下容量将持续下降 10 年左右，到 2050 年反弹至 2030 年水平，核电在全球发电容量的份额将从目前的 5.7% 下降至 2.8%。在高值情况下，装机容量预计到 2050 年达到 748 吉瓦（电），占全球发电容量的 5.8%。

36. 低值和高值预测之间的很大差异归因于有关大量反应堆更换的不确定性，这些反应堆计划在 2030 年前后退役，特别是在北美和欧洲地区。

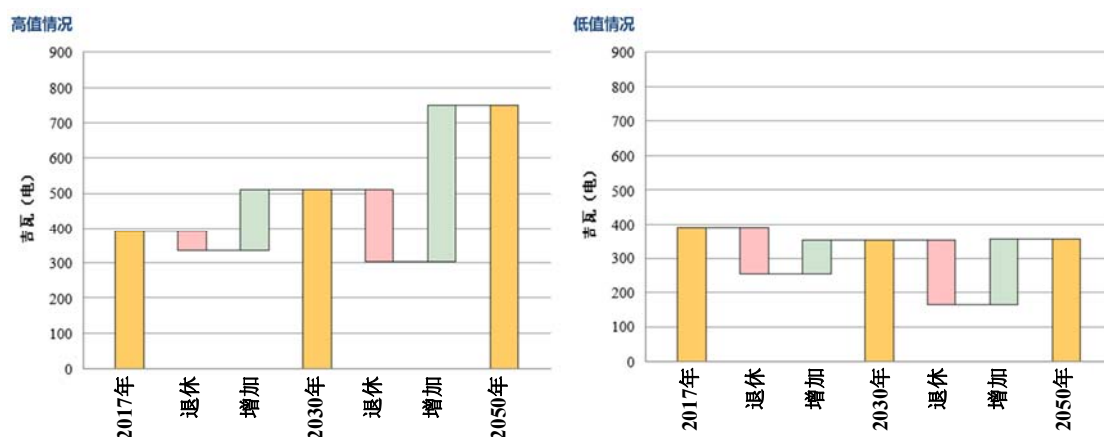


图 A-3. 全球核电容量的高值预测（左）和低值预测（右）。（资料来源：《到 2050 年的能源、电力和核电预测》，原子能机构《参考数据丛书》第 1 号，2018 年）

37. 政府间气候变化问题小组最近题为《全球变暖 1.5°C》² 的特别报告中提出的排放途径反映了大幅扩大核电对减缓气候变化贡献的必要性。在符合限制全球变暖在 1.5°C 的大多数途径中，核电到 2050 年的份额都有增加；例如，“决策者摘要”中突出强调的四种模式途径预测核发电量到 2030 年将增加至少 59%，到 2050 年将比 2010 年增加 501%。

38. 发展中世界，特别是在中国和印度等寻求满足快速增长的电力需求同时减少温室气体排放的亚洲，对核电的兴趣依然强烈。因此，在《联合国气候变化框架公约》下

² 政府间气候变化问题小组《全球变暖 1.5°C》，2018 年 10 月 1 日，<http://www.ipcc.ch/report/sr15/>。

持续进行的国际气候变化谈判，包括 12 月在波兰卡托维兹举行的缔约方会议第二十四届会议，是突出强调低碳核能在应对全球气候和能源挑战方面潜在作用的重要机会。

A.3. 燃料循环

A.3.1. 前端

铀资源和生产

39. 经合组织核能机构和原子能机构双年度联合出版物《2018 年铀资源、生产和需求》³（亦称“红皮书”）第 26 期表明，无论核能最终在满足未来电力需求和全球气候目标方面的作用如何，世界铀供应都能绰绰有余地满足可预见未来的预测需求。但报告强调指出，将需要大量投资和技术专门知识来确保及时将这些铀资源投入生产，包括来自目前处于保养和维护中的矿山的铀资源。

40. 铀现货价格在 2018 年仍相对低迷，一般在 47 美元/千克铀至 59 美元/千克铀范围内，略高于 2017 年的范围，全年总体上呈上升趋势。价格下降大大制约了公司为勘探、可行性研究和新建项目筹集资金的能力。许多铀项目仍处于搁置或低支出状态。一些已经启动或已进入施工后期阶段的项目仍处于保养和维护状态，或其产量有所减少。因此，2018 年全球产量很可能与 2017 年产量相似，2017 年产量为 59 342 吨铀，低于 2016 年报告的数量。

41. 哈萨克斯坦仍然是世界头号产铀国，生产的铀几乎全部来自原地浸出铀矿。产量经过 2000 年至 2016 年的迅速增长之后，2017 年产量减少至 23 400 吨铀，2018 年产量预计相似。

42. 在第二大产铀国加拿大，雪茄湖矿在 2017 年达到了 6925 吨的全部产能，2018 年预计达到类似产量。但由于铀需求和铀价格的持续低迷，2017 年 11 月宣布停止的麦克阿瑟河采矿作业和基湖选冶作业生产已在 2018 年 1 月改为无限期停产。

43. 纳米比亚的罗辛铀矿和哈萨博铀矿在 2018 年继续运行，而蓝格·海因里希铀矿于 2018 年 5 月被置于保养和维护状态，以应对长期低铀价。纳米比亚其他几个铀矿床继续低调开展可行性研究工作。

44. 澳大利亚四英里原地浸出铀矿 2018 年的产量约为 1500 吨铀。在兰杰项目中，产量仅来自矿石库存，而采矿和加工作业计划于 2020 年 1 月停止。总的来看，西澳大利亚的几个铀矿床的作业暂时搁置，或者正在进行一些其他研究，但没有确切的开工日期和投运日期。

45. 丹麦王国格陵兰科瓦内湾矿床的稀土、贱金属和铀项目的可行性和环境研究及审批工作仍在继续。

³ 2018 年 12 月在以下网址发表：<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>。

46. 中国继续增加国内外铀勘探和开发支出。2018年12月，中国铀业有限公司同意购买力拓在罗辛铀矿持有的69%股权。罗辛铀矿是世界上运营时间最长的露天铀矿，铀产量超过其他任何矿山。

47. 西班牙核安全委员会继续分析有关萨拉曼卡铀项目的文件，以便发布该委员会关于批准建造铀浓缩物制造厂的规定报告。这是该制造厂能够开始运行前需要获得的审批之一。

48. 正在巴西巴伊亚州的恩热纽铀矿开展对已枯竭的卡舒埃拉铀矿附近另一个露天矿作业的可行性和监管工作。

转化和浓缩

49. 目前的转化和浓缩能力对满足全球需求绰绰有余，尽管市场分化而且生产集中在少数几个供应商。

50. 2018年9月，欧安诺集团在法国特里卡斯坦举行了作为Comurhex二期项目一部分的新转化厂的启动仪式。菲利普·科斯特转化厂采用最先进的技术设计，其化学和能源消耗水平极低。三个火焰炉每年将生产高达1.5万吨的六氟化铀。

51. 富集铀的主要分子激光工艺是利用六氟化铀的激光激发同位素分离法。2018年6月，澳大利亚Silex Systems公司决定放弃收购在全球激光浓缩公司（通用电气公司、日立公司和加拿大能源矿产公司的合资企业）中的多数股权。Silex Systems公司表示，尽管处于与通用电气-日立公司谈判的后期阶段，但与全球激光浓缩公司的商业案例相关的风险太多。

燃料制造

52. 2018年1月，美国两家核燃料技术公司Lightbridge公司和法马通公司组建了对半持股的合资公司Enfission，对Lightbridge先进金属燃料的核燃料组件进行开发、许可证审批和商业化。这种燃料由锆铀合金制造，采用独特的成分和燃料棒几何形状。Enfission公司称这可改善现有和未来核电厂的经济性、效率和安全性。

53. 2018年1月，西屋电气公司宣布与乌克兰国家核电公司Energoatom签署一项合同，将其对乌克兰VVER型反应堆的核燃料供应从2020年延长到2025年。

54. 西屋公司及其八个欧洲联合会合作伙伴于2018年3月宣布成功完成了旨在使欧洲的俄罗斯设计VVER-440型反应堆的核燃料供应多样化的欧盟资助项目。

55. 2018年3月，美国埃德温·哈奇核电厂1号机组开始使用全球核燃料公司的耐事故燃料组件进行铅测试。这种组件由称为“IronClad”的铁-铬-铝燃料包壳材料和称为“ARMOR”的锆包覆燃料包壳组成。2018年5月，瑞典大瀑布电力公司选定GENUSA公司（由西班牙埃努萨公司和全球核燃料公司组建的合资企业）自2020年至2023年为福斯马克核电厂提供八次燃料换料。

56. 2018年4月，俄罗斯核燃料公司 TVEL（国家原子能公司“Rosatom”的一部分）与伊朗原子能组织和核电生产开发公司签署协议，将于2020年针对伊朗伊斯兰共和国布什尔核电厂 VVER-1000 型反应堆，用 TVS-2M 燃料元件盒取代 UTVS 型燃料组件。8月，TVEL 公司向捷克共和国泰梅林核电厂 VVER-1000 型反应堆供应了第一批改造型 TVSA-T.mod.2 核燃料。在俄罗斯联邦罗斯托夫核电站，向 VVER-1000 型反应堆装载了一批实验性的带防碎片过滤器的 TVS-2M 燃料元件盒，这是在该国的“核燃料零故障”项目下开发的。

57. 2018年5月，西班牙埃努萨公司和西屋电气公司签署了框架合作协议，合作开发西屋 EnCore 耐事故燃料。这种燃料结合了镀铬锆合金包壳、碳化硅包壳和硅化铀 (U_3Si_2) 燃料芯块等概念。

58. 2018年6月，印度核燃料联合企业宣布有意扩大其在海德拉巴和哥打的燃料和反应堆组件生产设施，以满足拟建新反应堆的需求。

59. 2018年8月，加拿大 SNC 兰万灵集团与秦山第三核电有限公司签署了实施坎杜堆-6 专用使用等效天然铀和天然铀的改造型 37-元件燃料束的工程服务合同和许可协议。这种燃料旨在用于中国浙江省秦山三期核电厂 1 号和 2 号机组。这将是这种既使用等效天然铀也使用天然铀的改造型燃料束的首次商业使用。

60. 2018年9月，法马通公司签署了一项合同，在2019年底向安特吉的阿肯色第一核电厂 1 号机组供应和安装铬包覆燃料棒。瑞典大瀑布电力公司也与法马通公司签订了合同，在2021年至2024年为福斯马克 3 号机组及灵哈尔斯 3 号和 4 号机组供应 10 次法马通公司在德国林根设施生产的燃料组件的换料。

61. 2018年10月，美国国家核安全管理局向在南卡罗来纳州萨凡纳河场址建设混合氧化物燃料制造设施（亦称“混合氧化物项目”）的联合体发出终止合同通知。该设施旨在通过将至少 34 吨武器级钚转化为商用核反应堆的燃料来处置这些钚。

62. 2018年12月，在俄罗斯联邦热列兹诺戈尔斯克采矿和化学联合公司为 BN-800 快中子堆进行了第一个工业批次的混合氧化物燃料的商业生产。

A.3.2. 供应保证

63. 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年完成了基本法律框架，以便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。

64. 2018年，与中国的过境协定生效，与俄罗斯联邦和哈萨克斯坦授权机构的运输合同签署。

65. “具体活动计划”接近完成，解决了包括哈萨克斯坦的监管框架、场址安全和安保相关问题在内的诸多问题。

66. 原子能机构与哈萨克斯坦国家原子能工业股份公司和法国欧安诺集团签署了低浓铀采购合同，目标是在 2019 年底前向原子能机构低浓铀贮存设施交付低浓铀。

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

乏燃料管理

68. 迄今，已从核电厂卸出 40 多万吨重金属。到目前为止，从商用动力堆卸出的燃料约 75%贮存在反应堆水池或干法和湿法乏燃料离堆贮存设施。目前在 27 个国家有 151 个离堆贮存场所。

69. 位于美国已关闭圣奥诺弗雷核电厂的地下干法贮存罐贮存系统于 2018 年 2 月接收了首批装有燃料的贮存罐。该地下设计因其能够抗极端地震事件而被选中。同样在 2018 年 2 月，美国核管理委员会宣布接受 2017 年 3 月提交的关于开发新墨西哥州利县综合临时贮存设施的许可证申请。该设施也计划使用地下干法贮存罐系统，最初贮存最多 8680 吨重金属乏燃料。

70. 2018 年 7 月，西班牙生态转型部要求核安全委员会暂停发布关于建造高放废物和乏核燃料拟议集中贮存设施的许可证申请的报告。实施暂停的活动日程于 2018 年 7 月 25 日获得核安全委员会核准。

71. 2018 年 8 月，日本开始从文殊原型快中子增殖堆钠填充贮存罐中移除乏燃料。燃料组件除去残留钠之后被转移到厂内贮存水池。

72. 在荷兰鲍塞尔核电厂，第一批混合氧化物乏燃料于 2018 年 5 月卸出并放入反应堆乏燃料水池。按设想，这些混合氧化物乏燃料在运输之前将在那里贮存四年。正如 2018 年 1 月发布的 OPERA 项目报告所述，荷兰的再循环战略将导致没有需深部地质处置的乏燃料。

73. 日本正在通过将燃料组件转移到厂内临时干法贮存设施在福岛共用乏燃料水池腾出空间。该临时设施自 2013 年 4 月开始运行，可贮存 50 个干法贮存罐。营运者 2018 年一直在进行实际操作培训，以便能够远程卸除 3 号机组乏燃料水池的燃料，并将燃料贮存在共用乏燃料水池中。

74. 在德国，离堆干法贮存设施的所有权自 2019 年 1 月 1 日起将从电力公司移交国有公司 BGZ。

75. 其余约 10 万吨从全球核电厂卸出的重金属已进行后处理。普通氧化物燃料每年的世界后处理能力约为 5000 吨，但这些能力目前并非全部投入使用。

76. 位于法国阿格的欧安诺两座核燃料后处理厂 UP2-800 和 UP3 年总产能为 1700 吨，

平均每年后处理 1000—1100 吨重金属（自 1976 年以来已经后处理 34 000 多吨乏核燃料）：提取的钷在马尔库尔场址的梅洛克斯混合氧化物燃料制造厂回用于混合氧化物燃料。欧安诺 2018 年继续对其第一代 UP2-400 后处理厂实施退役。

77. 位于俄罗斯联邦奥焦尔斯克的马雅克生产联合企业的 RT-1 后处理厂继 2017 年升级改造后，在 2018 年后处理了超过 32 吨重金属 VVER-1000 型乏燃料。此外，还完成了对 BN-600 快堆混合氧化物乏燃料的实验性后处理。位于克拉斯诺亚尔斯克的采矿和化学联合公司获得了运行第一个创新后处理技术试点示范中心的许可证，并在 2018 年对一个 VVER-1000 型乏燃料组件进行了后处理。第二个 250 吨重金属/年产能的试点示范中心正在建设中，计划于 2020 年完工。

78. 2018 年 1 月，中国和法国签署了在中国建造一座后处理和再循环厂的协议。6 月，欧安诺集团和中国核工业集团有限公司启动了这座年产能为 800 吨铀的后处理厂筹备工作。

79. 六所村后处理厂的营运者日本核燃料有限公司于 2017 年 12 月底宣布该设施已被推迟三年完工，以便能够满足其他监管要求，例如确保严重事故情况下的封闭和恢复。

80. 英国热氧化物后处理厂于 2018 年 11 月结束运行。它在运行寿期期间后处理了 9300 吨铀氧化物燃料，包括国内先进气体反应堆燃料、海外压水堆和沸水堆燃料以及英国原型反应堆燃料。

A.4. 退役、环境治理和放射性废物管理

A.4.1. 核设施退役

81. 截至 2018 年 12 月 31 日，全世界有 173 座动力堆已关闭或正在退役。其中 17 座反应堆已完全退役，还有更多正进入退役最后阶段。150 多个燃料循环设施已经永久关闭或正在退役，约 130 座已经退役。120 多座研究堆已经关闭或正在退役，440 多座研究堆已完全退役。

82. 成熟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。例如，法国、德国、俄罗斯联邦、斯洛伐克、西班牙和瑞典的几座核电厂在实施一回路部件去污和分割方面取得了技术进展。2018 年 6 月，意大利接受了原子能机构放射性废物和乏燃料管理、退役和治理综合评审服务工作组访问，审查核电厂管理公司 SOGIN 关于拆除加里利亚诺核电厂和特里诺核电厂的反应堆压力容器及内部部件的计划。该审查是对以前于 2017 年进行的放射性废物和乏燃料管理、退役和治理综合评审服务工作组访问的后续行动，目的是审查 SOGIN 所有场址的总体退役计划。

83. 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。实例包括科兹洛杜伊核电厂开始运行一个新的等离子体熔融设施用于处理退役废物、博胡尼斯核电厂完成冷却塔拆除工作以及切尔诺贝利 4 号机组新安全封隔设施全面运行。



图 A-4. 拆除法国舒兹 A 核动力堆部件（左），以及罗马尼亚默古雷莱研究堆的退役进展（右）。（照片来源：法国电力公司、原子能机构）

84. 关于研究堆的退役，位于罗马尼亚布加勒斯特附近默古雷莱的 2 兆瓦（热）VVR-S 反应堆生物屏蔽层拆除工作目前正处于后期执行阶段（图 A-4）。乌兹别克斯坦塔什干的“FOTON”均匀研究堆已完全退役，反应堆场址不受监管控制，现可用于其他工业用途。

85. 2018 年 10 月，日本原子力损害赔偿和退役支援机构发布了《东京电力控股公司 2018 年关于福岛第一核电站退役的技术战略计划》。福岛第一核电站场址的退役工作正在取得进展，陆地侧防渗墙（冻土墙）已完工，并准备从 3 号机组的乏燃料水池移除燃料。

A.4.2. 治理

86. 2018 年中亚铀遗留治理项目的筹备工作已取得进展。在欧盟委员会的资助下，“对塔吉克斯坦迭戈梅和塔博沙尔的铀生产遗留场址的管理和治理开展综合环境影响评估和可行性研究”项目已完成。在欧盟委员会资助的关于吉尔吉斯斯坦迈卢苏铀生产遗留场址的类似项目下开展了深入工作。根据由俄罗斯联邦进行技术性领导的独立国家联合体（独联体）政府间目标计划，已使吉尔吉斯斯坦的 Kadji-Sai 尾矿堆变得具有环境安全性。继续在 Tuyuk-Suu 设施和 Dalnee 设施进行大规模工程工作。2018 年 11 月，独联体政府首脑理事会核准了为定于 2020 年开始在塔吉克斯坦进行的治理活动提供资金。铀遗留场址协调组在原子能机构、欧盟委员会和受惠国代表的联合领导下协调国际社会为中亚国家治理其铀生产遗留场址提供的支持。

87. 2018 年，在德国东部铀生产遗留治理大型项目“维斯默特环境治理项目”下，完成了库尔米奇场址最后一个大型尾矿池的临时覆盖层放置工作（图 A-5）。因此，所有放射性尾矿（1.78 亿立方米）都得到安全覆盖。在库尔米奇尾矿池放置最后覆盖层的工作将持续到 2028 年。在其他一些场址，归联邦政府所有的维斯默特公司已经转向执行长期任务，主要是水处理和治理对象的长期监视与维护。



图A-5. 德国治理中的库尔米奇尾矿池, 2018年。(照片来源: 维斯默特股份有限公司)

88. 日本定期报告场外去污的进展情况。在空气剂量率测量值超过 0.23 微希沃特/小时 (相当于超过 1 毫希沃特/年) 的密集污染调查区, 各责任城市均在 2018 年 3 月之前完成了计划进行的去污活动。除“难以返回”区之外, 所有要求开展的全面去污工作现已完成。

89. 2018 年, 负责葡萄牙老铀矿治理计划的国有矿业开发公司完成了卡斯特莱霍、福米加、维尔维代拉、瓦拉斯和波瓦塞尔瓦斯的遗留矿环境治理工作。在乌尔吉尔利加, 矿业开发公司继续开展 20 世纪 40 年代为生产铀浓缩物而建造的旧化学处理厂的退役工作, 并于近期开始对另外五个老铀矿进行环境治理。在总共 62 个老铀矿中, 有 40 个目前已得到治理, 正在接受治理后维护, 并在必要时与主动和被动的水处理厂一起接受持续监测。

A.4.3. 放射性废物管理

弃用密封放射源的管理

90. 进一步探索了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。再循环和返还方案数量增加。加纳、马来西亚和菲律宾等几个国家的钻孔处置项目处于不同的发展阶段。马来西亚的钻孔处置项目实施已进入安全论证文件最终审查阶段, 钻探工作将于 2019 年初开始。

91. 2018 年进行了一些成功的作业, 从用户场所移除了弃用密封放射源, 并将其置于适当贮存条件的控制之下。随着最后一批源被运往美国, 巴西所有剩余的弃用 1 类和 2 类源移除工作最终完成。在这次迄今最大的使用移动热室的作业中, 集体活度达 1093 太贝可 (29 500 居里) 的 81 个远距治疗源被返还或送往源再循环公司。利用加拿大提供的资金, 从玻利维亚、厄瓜多尔、巴拉圭、秘鲁和乌拉圭移除了 27 个 1 类和 2 类弃用密封放射源, 并将其运走进行再循环。还从黎巴嫩移除了三个 1 类和 2 类弃用密封放射源。在阿尔巴尼亚、布基纳法索、塞浦路斯、尼泊尔、突尼斯和北马其顿等其他若干成员国启动了 1 类和 2 类源移除工作。

92. 拟与钻孔处置系统结合使用的移动工具箱设施的调试工作于 2018 年完成，计划于 2019 年初在马来西亚首次使用。

93. 在智利、塞浦路斯、加纳、洪都拉斯、印度尼西亚、约旦、马来西亚、斯洛文尼亚、斯里兰卡和越南完成了涉及整备弃用密封放射源的作业，这些国家的当地人员接受了关于弃用密封放射源整备的适当培训。两个成员国的研究机构随后获得其国家主管当局的批准并被颁发了许可证，以开展整备作业，这在今后将对该区域的其他成员国有所助益。

94. 在安提瓜和巴布达、巴哈马、巴巴多斯、伯利兹、多米尼克、圭亚那和巴布亚新几内亚建立和（或）更新了弃用密封放射源及正在使用的密封源的国家库存清单。

95. 《国际密封放射源和装置目录》可供更大的成员国用户群体访问，并便于识别在野外发现的弃用密封放射源。2018 年启动了增加更多关于源和装置的详细资料的工作。

放射性废物预处理

96. 2018 年 2 月，法国电力公司子公司 Cyclife 在 2017 年与 SOGIN 签署了一份协议后，开始对因意大利特里诺核电厂、加里利亚诺核电厂和拉蒂纳核电厂退役而产生的 1800 吨受放射性污染的金属进行处理作业。

97. 切尔诺贝利核电厂正在开始处理液态放射性废物，作为清理 1986 年核事故的重要一步，营运者们开始将该设施的大部分液态核废物转入长期贮存。切尔诺贝利的液态放射性处理厂将处理该事故以及该核电厂其他三座反应堆运行所产生的 22 000 吨污水。2018 年 1 月投入运营的废水处理厂预计在未来 20 年将以每年 2000 吨左右的速度清除水中的放射性污染物。

98. 保加利亚科兹洛杜伊核电厂的等离子体熔融设施已开始运行，这便于处理核废物以支持退役活动。该技术使得可以最低的放射性污染危险处理废物。废物的最终形态具有持久性，不含有机物和液体，实际上是一种具有化学惰性的非晶玻璃渣。此外，历史上在沥青或混凝土基体中整备的放射性废物可在等离子体设施中进行再处理，以制作符合科兹洛杜伊近地表处置设施验收标准的废物处置货包。利用等离子体技术，该设施将显著减少 2002 年至 2006 年间关闭的科兹洛杜伊 1 号和 4 号反应堆以及运行中的 5 号和 6 号反应堆的中低放废物的数量。在等离子体中，金属被熔化和氧化。混凝土碎块、砂石、无机颗粒、绝缘材料和石棉也被熔化。

99. 2018 年 4 月，在日本受损的福岛第一核电站启动了示范放射性废物玻璃固化技术的使用的项目，该项目包含两个主要部分。第一部分是开发和研究具有持久性废物形态的整备基体配方。将在法国可替代能源和原子能委员会马尔库尔实验室开展实验室规模（100 克）、台架规模（1 千克）和近工业规模（100 千克）的测试。该项目的第二部分是工艺实施、运行和维护原则及废物处置进行可行性研究。

100. 首次将放射性液体废物从地下废物罐转移到“超大容量”设施 — 6号盐岩处置单元的工作已在美国能源部萨凡纳河场址完成。盐岩处置单元旨在包容在南卡罗莱纳州场址进行去污无害盐废物固化所产生的低放废物浆。圆柱形混凝土罐基于一种商业上用于储存水和其他液体的设计。6号盐岩处置单元于去年完成，是该场址第一个超大容量盐岩处置单元，比该场址现有的其他盐岩处置单元大10多倍。6号盐岩处置单元直径约为114米，高约13米。计划总共建造七个这种超大容量单元以满足该场址的处置需求。

放射性废物处置

101. 世界各地都在运行处理除高放废物和（或）（申报为废物的）乏燃料之外的各类放射性废物的处置设施。这些设施包括极低放废物的深沟处置（如法国、西班牙、瑞典）或干旱地区低放废物的深沟处置（如南非、美国）；低放废物的近地表专设设施（如中国、捷克共和国、法国、匈牙利、印度、日本、波兰、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）。

102. 其他中低放废物处置设施以及加拿大（乔克河）的一处低放废物处置设施尚处于许可证审批或建造的不同阶段，如在比利时（德塞尔）、保加利亚（科兹洛杜伊-雷蒂安娜）、加拿大（金卡丁）、德国（康拉德）、伊朗伊斯兰共和国（塔尔梅西）、立陶宛（斯塔巴提斯克斯）、罗马尼亚（萨利格尼）和斯洛文尼亚（威尔比那）。

103. 天然存在的放射性物质废物的处置方案因国家规章而异，从深沟处置设施到地下专设设施（如在挪威）不一而足。

104. 保加利亚国家放射性废物公司继续在科兹洛杜伊核电厂附近的雷蒂安娜场址建造一座低放废物近地表处置设施。

105. 在伊朗伊斯兰共和国，塔尔梅西近地表处置设施建设仍在继续，在开始处置作业之前，对用于场内贮存的废物容器进行了验收。

106. 在芬兰，废物管理公司 Posiva 正在进行全尺寸现场系统测试，这是奥尔基洛托在建处置库获得运行许可证的一个条件。该测试旨在示证将封装在铜钢密闭容器中的核燃料组件放入在专门建造的处置隧道中的花岗石母岩中钻出的处置孔中所需的全面系统设计。这项测试包括用膨润土回填处置隧道及安装最终钢筋混凝土塞密封系统。该测试将利用两个配有加热元件的全尺寸密闭容器模拟预计乏燃料产生的余热。

107. 2018年1月，瑞典当局发布了影响瑞典核燃料和废物管理公司建议的瑞典乏燃料处置设施许可证审批过程的裁决。瑞典辐射安全管理局支持在福什马克建造最终处置设施，它认为瑞典核燃料和废物管理公司具备安全实施最终处置所需的能力。土地和环境法庭的声明指出，瑞典核燃料和废物管理公司的申请大部分符合批准要求，但就铜的腐蚀过程而言，铜制密闭容器的长期性能仍存在一些不确定性。瑞典核燃料和废物管理公司正在回应这项提供进一步信息的要求。

108. 法国对高放或中放长寿命放射性废物采用的管理解决方案是在卡洛夫-牛津阶粘土岩中进行深部地质处置。国家放射性废物管理机构地质贮存工业中心（Cigéo）项目旨在执行 2006 年通过的一项法律规定的这项决定。该机构正在完成详细设计阶段和进行基准最优化工作。在对安全方案文件的技术审查阶段之后，法国核安全管理局于 2017 年就其意见草案征询公众意见。法国核安全管理局在分析了收到的意见之后，于 2018 年 1 月发布了其意见，称该项目在安全方案文件阶段已总体上达到充分的技术成熟度。然而，关于国家放射性废物管理机构计划于 2019 年或 2020 年初提交的建设批准申请，需要提供补充资料说明处置设施结构、抵御自然灾害的装置的设计与规模、设施监测、基于焦油的废物高放密封容器潜在着火的预防和事故后情况管理的合理性。

109. 2018 年 11 月，瑞士联邦议会宣布了关于深部地质处置库行业计划第二阶段的决定。这使得瑞士放射性废物管理组织 — 国家放射性废物处置合作组织（Nagra）能够将重点放在其余三个潜在选址区域的更详细场址表征上。实际上，它已启动第三阶段和最后阶段，目的是在 2024 年之前提交地质处置设施许可证申请。

110. 2018 年 12 月，英国政府公布了关于与社区合作的政策，作为启动基于同意的国家地质处置设施选址的一部分。

B. 原子数据和核数据

111. 核数据库对于核应用（无论是电力还是非电力）领域的所有研发活动都必不可少，除了原子能机构保管的数据外，核数据库还由若干个机构发布。⁴ 2018 年最重要的发布如下：

- ENDF/B-VIII 核数据库由美国发布，在对核应用最为重要的核素，尤其是主要的铀同位素、铁、氧和氢的中子反应方面有重大变动。在评价瞬发裂变中子谱和裂变中子平均数等计量锕系元素裂变相关数量的新方法方面作出了重大努力。ENDF/B-VIII 已得到广泛验证，尤其是在临界基准方面。
- JEFF-3.3 核数据库由经合组织核能机构发布，预计主要用于欧洲反应堆分析、反应堆软件、燃料循环分析和聚变。
- 新的光核数据文件 JENDL/PD-2016 由日本发布，提供光核吸收、光核裂变、粒子与残留核素生成截面及发射粒子双微分截面等光子诱发核反应的数据。该数据库包含 2681 种核素的数据，入射光子能量范围从 1 兆电子伏到 140 兆电子伏。

⁴ 可查阅 <https://www-nds.iaea.org>。

- 核退役活化截面文件 JENDL/AD-2017 同样来自日本，旨在满足核设施退役期间放射性存量评价的需求。
- 继 TENDL-2015 之后新发布了基于 TALYS 的编评核数据库 TENDL-2017⁵。该数据集包含完整的 ENDF-6 格式化数据文件，其中包括 2813 种同位素（所有稳定或半衰期大于 1 秒的同位素）和入射中子、光子、质子、氦核、氘核、氚-3 和 α 粒子的协方差数据，入射能量最高达 200 兆电子伏。

112. 全吸收 γ 射线光谱学数据是现有衰变数据库的重要补充，因为这些数据可能对衰变热和反中微子光谱计算产生影响。因此，审查全吸收 γ 射线光谱学的现状并讨论新的数据要求非常重要。原子能机构 2018 年完成了对一系列广泛燃料系统中产生衰变热的主要裂变产物的衰变数据的详细评价，并由此导致了更新的全吸收和高分辨率 γ 射线光谱学测量的优先级表，评价结果将于 2019 年发布。

113. 国际核数据评价网于 2018 年启动，以激励在与核技术特别相关的核素的中子截面评价方面取得进展（图 B-1）。核物理学专家将协调其在创新性测量和模型模拟方面的工作，以制定出尽可能最佳的轻核素（如碳和氮的核素）、结构材料（如铬和镍）和重要的锕系元素（如钚同位素）的核反应数据表。除了改进基本核数据之外，核数据库中更新数据将通过热中子能量和快中子能量的整体临界基准直接进行验证。对这一发展作出贡献的专家主要来自中国、欧洲国家、日本和美国，原子能机构发挥了协调作用。

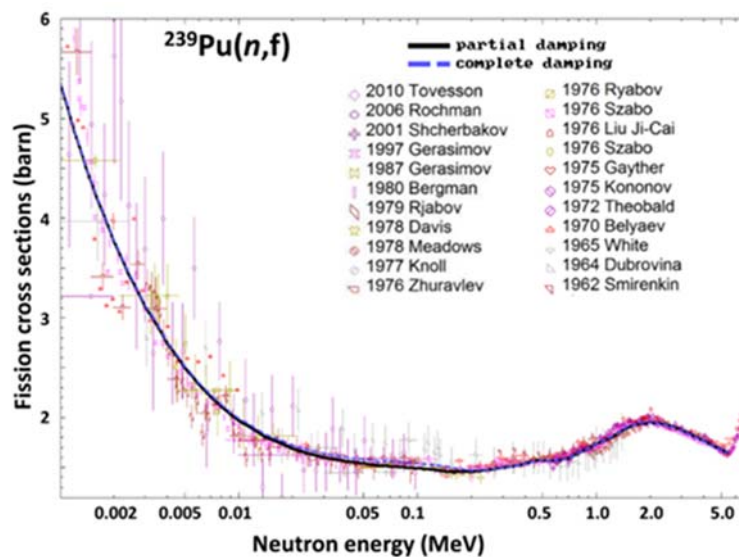


图 B-1. 与 INDEN 合作研究的钚-235 裂变截面现状。

⁵ 可查阅 https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html。

C. 加速器和研究堆的应用

C.1. 加速器和相关仪器仪表

C.1.1. 离子束工程带来的突破性技术

114. 由于加速器技术的最新发展，有可能在宽禁带半导体（如金刚石、碳化硅、氮化镓）到二维材料（如六方氮化硼）的多类材料中创造具有光学活性、原子大小的缺陷（图C-1）。这些系统为单光子发射提供了一个有前景的平台，单光子发射是一个新兴领域，可应用于安全通信（单光子态安全密钥分配）和细胞标记/传感。在原子能机构的支持下，目前正在国际协作努力框架内制定若干离子注入战略。在不久的将来，在量子安全通信和生物技术领域可以预见开拓性创新。

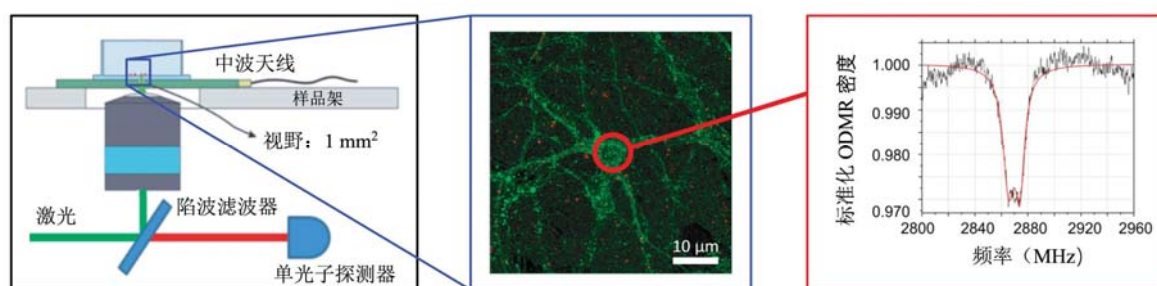


图 C-1. 将离子束应用于创造置入培养中的活体神经元细胞的发光纳米金刚石：成像和信号采集实验装置原理图（左）；突显置入发光纳米金刚石的共聚焦显微图像（中）；光学探测的纳米金刚石的磁共振（右）。（Paolo Olivero 提供，都灵大学、意大利国家核物理研究所和意大利国家计量研究所）

C.1.2. 用加速器模拟反应堆材料损伤

115. 离子束经适当选择和调谐后，能够对裂变或聚变反应堆中存在的热中子和快中子引起的材料损伤进行实验模拟。由于目前尚无具有足够高通量的聚变中子专用源来模拟与聚变反应堆第一壁所经历的辐射条件相关的辐射条件，离子束加速器被用作一种替代手段，以尽可能地再现微结构变化以及材料构成，从而进行详细的微结构表征研究。例如，几百千伏到几兆伏的一至三个静电加速器可在单束、双束或三束配置中耦合运行，以创造弹道损伤并同时植入相关嬗变元素，如氦和氢，它们是结构材料中主要的中子诱发反应产物。

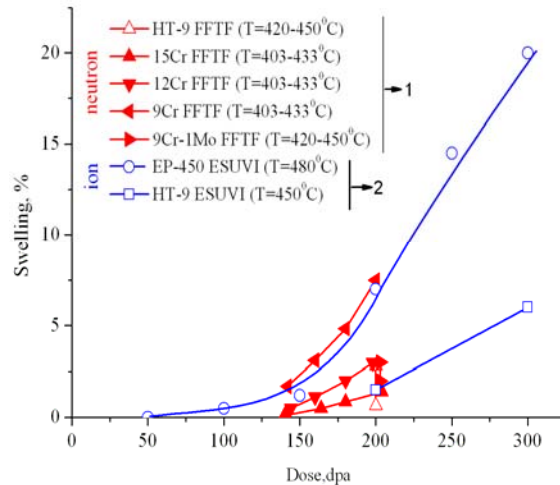


图 C-2. 快中子（红色）和离子束（蓝色）辐射引起的材料膨胀对比，以不同损伤剂量（dpa：每个原子的位移）的函数表示。（V. Voyevodin 提供，哈尔科夫物理和技术研究所）

116. 然而，在这种方法完全合格之前，需要以一种标准化活动形式开展国际努力和协调，以便确定不同场址结果的再现性、加速器最佳实践导则以及离子束辐射可用于快速筛选未来核结构材料的程度。在这方面，原子能机构协调着⁶一项全球巡回辐射实验，以比较 T91 钢在离子束加速器中以及在离子束加速器和同一材料在俄罗斯联邦 BOR-60 快研究堆中的辐射之间的损伤微结构。

C.1.3. 利用核分析技术开展大规模空气污染监测

117. 空气污染是影响环境和人类健康的全球性问题，空气质量管理在降低排放水平方面发挥着重要作用。然而，缺少数据来支持识别影响主要城市人口的污染源以及明确其跨界迁移路径。为制定更好的缓解战略和工具，成员国正在原子能机构的支助下利用核分析技术和其他补充方法来确定气载颗粒物的元素构成（图 C-3）。这些信息可用于识别主要的污染源（源解析）及其对所观察到的污染的具体贡献（存量）。若干技术具有以下优势：多项基本能力、不具破坏性（从而可保存样本以作进一步分析）、可快速获取约二十种与源识别相关的化学元素的信息。在这些技术中，离子束分析、X 射线荧光光谱测定法和中子活化分析最为常用。

⁶ 基于原子能机构之前的题为“结构材料中辐射效应的加速器模拟和理论模型设计”的协调研究项目，研究结果于 2018 年公布。

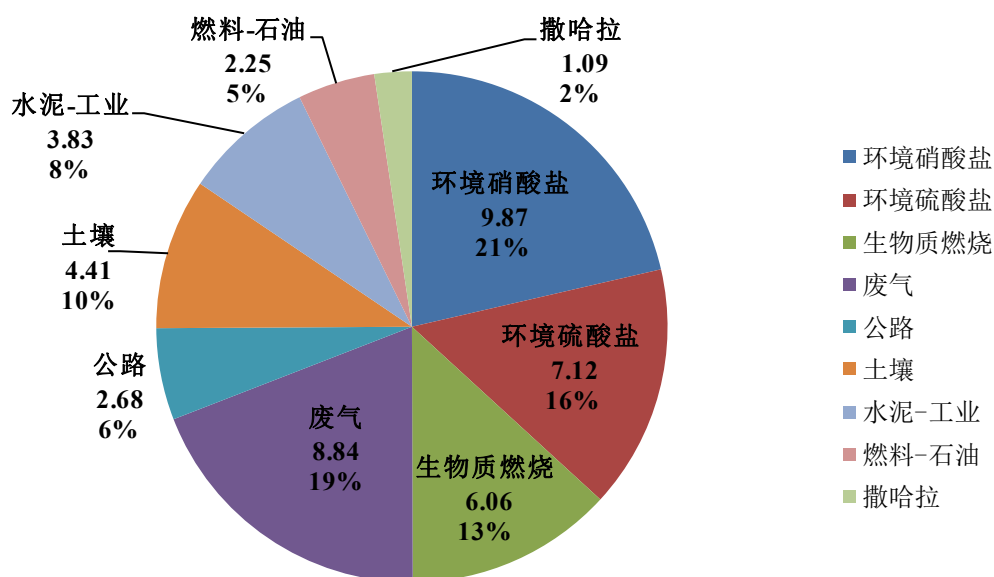


图 C-3. 污染源相对贡献（存量）实例，基于利用各种核技术对样本进行的元素分析。
（资料来源：原子能机构）

118. 在原子能机构利用空气过滤器所载的城市灰尘样本开展的水平测试活动期间，也反映出对这一主题的兴趣和该主题的重要性日益增加，来自 33 个成员国的 40 多个分析实验室参加测试并提交了结果，作为其质量保证和质量控制程序的一部分。

C.1.4. 表面污染表征的实地测量

119. 铀矿采冶是一种密集型工业，在很多国家遗留了受辐射影响的场址，这些场址受到的监管控制不符合目前的国际标准。对石油等其他矿物资源的开采也导致天然存在的放射性物质大量积累。其他场址因核事故和（或）放射性事故以及核武器试验而受到污染。例如，仅在中亚地区，尾矿库就占 50 多个场址，尾矿和废石数量超过 8 亿吨。这些场址原则上可导致公众受到对健康产生不利影响的电离辐射照射。

120. 最先进的便携式仪器仪表、地理信息系统的免费访问及地理统计建模工具的开发为在各种环境场景和隔间开展原地调查提供了多种选择。原地技术的分析性能已达到很高水平，与其他传统技术相比具有很多优势，包括快速测定污染物浓度/活性、识别热点、降低调查成本以及快速确定污染物的空间分布。原地测量还可根据需要改进高精度实验室分析的取样策略。

121. 应成员国要求，原子能机构 2018 年在这一领域的活动包括：在乌兹别克斯坦实地示证放射性测绘，以支持在放射性废物处置完成之后开放 FOTON 公司辐射和技术综合设施场址；在巴西示证基于无人机的放射性测绘系统的性能，以便在出现核紧急情况时进行场址测量；为墨西哥举办关于放射性测量、原地技术和方法学的国家培训班提供支持。

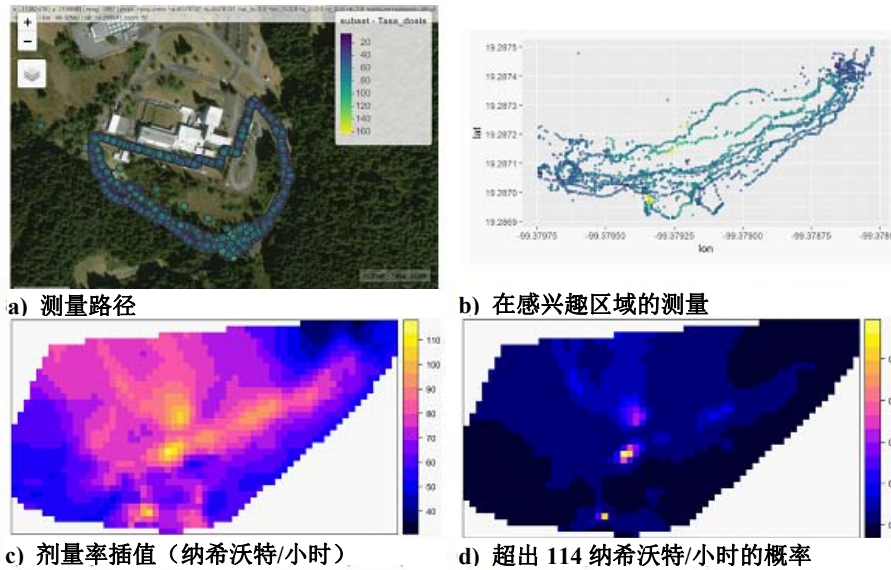


图 C-4. 作为 MEX7011 号技术合作项目下国家培训班的一部分开展的实地测量活动的结果实例。测量路径在地图上示出，包括调查区域的剂量率插值以及超过某特定水平的概率估值。（资料来源：原子能机构）

C.2. 研究堆

122. 表 C-1 列出研究堆最常见的应用。这些研究堆的功率范围从零（如临界装置或次临界装置）到约 200 兆瓦（热）。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，可以是稳态模式或脉冲模式。

表 C-1. 世界各地研究堆的常见应用 ⁷

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	163	53
中子活化分析	119	53
放射性同位素生产	84	44
中子射线照相	72	40
材料/燃料辐照	68	29
中子散射	47	31
地质年代学	25	22
嬗变（硅掺杂）	23	20
嬗变（宝石）	19	15
中子治疗，主要是研发	14	12
其他 ^c	119	36

^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 考虑的 239 座研究堆中（截至 2018 年 12 月 31 日，226 座在运，13 座临时关闭）。

^c 其他应用包括仪器仪表校准和测试、屏蔽实验、核数据测量、公众参观和研讨会。

⁷ 基于原子能机构研究堆数据库的数据：<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>。

123. 根据原子能机构的研究堆数据库，在 67 个国家已建成 841 座研究堆，其中 252 座正在 55 个国家运行。俄罗斯联邦拥有数量最多的在运研究堆（59 座），其次是美国（50 座）、中国（17 座）和日本（9 座）。在世界范围内，有 66 座研究堆以 5 兆瓦或更高的功率水平运行，因而提供可支持高产率产品和服务的高中子通量。

124. 研究堆对于为医学和工业提供放射性同位素，为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文化遗产和环境研究服务提供中子束不可或缺。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，38 座设施向原子能机构提交了战略计划，以征求关于其可持续高效利用的进一步建议。

125. 半数在运研究堆都已超过 40 年。它们的寿期可超过 60 年，但及时制定适当的老化管理、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。有鉴于此，已经在孟加拉国、刚果民主共和国、葡萄牙和乌兹别克斯坦开展了研究堆运行和维护评定同行评审工作组访问。预计 22 个成员国处于永久关闭状态的 56 座研究堆中有若干座将在今后不久开始准备退役。2018 年 6 月，挪威哈尔登沸水反应堆业主永久关闭了该反应堆，从而失去了一座重要的燃料和材料研究试验设施。3 月，加拿大主要的医用放射性同位素生产商——国家多用途研究堆在运行 61 年之后也被永久关闭。

126. 阿根廷、法国、印度、大韩民国、俄罗斯联邦、沙特阿拉伯和乌克兰正在建造新研究堆。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。原子能机构最初的两次研究堆综合核基础结构评审同行评审工作组访问在尼日利亚和越南举行，目的是为启动新研究堆项目的成员国提供支助和指导。赞比亚接受了一次研究堆综合核基础结构评审预备性工作组访问。2018 年 9 月，在印度巴巴原子研究中心特朗贝北部场址建造的 2 兆瓦池式研究堆投入运行。

127. 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，原子能机构在 2018 年巩固和扩大了其工具和手段：因特网反应堆实验室，主要用于学术教育的一个远程培训工具（2018 年继续为非洲地区、欧洲地区、拉丁美洲和加勒比地区提供广播课程）；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；以及目前由比利时、法国、俄罗斯联邦和美国六座设施实施的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。

128. 法国国家核科学和技术研究所推出了一个新的多模式平台“增强型虚拟开放核心”（Enhanced Virtual Open Core），以提供反应堆物理学和运行方面的教育和培训。

129. 研究堆乏核燃料的持续安全、可靠和经济管理与贮存对若干成员国是一项挑战，可行的后端方案的确定也是如此，这些都必须考虑到防扩散、国家政策、经济性和环境要求与限制以及技术问题。拥有一座或多座研究堆和没有或只有小型核电计划的许多国家面临着数量相对较小的乏核燃料的最终处置问题；考虑到国际研究堆乏核燃料返还计划的有限期限，这些国家可能被迫就其研究堆的前景作出决定。正在进行由原子能机构协调的集体努力，以开发决策支持模型，帮助成员国选择符合其情景的最可行方案。

130. 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。2018 年 11 月，尼日利亚微型中子源反应堆（微堆）从高浓铀燃料转换为低浓铀燃料，经辐照的高浓铀燃料已于 12 月返还中国。截至目前，高浓铀燃料返还美国的计划完成了超过 4415 千克新鲜和乏高浓铀燃料的移除或确认处置，俄罗斯产高浓铀燃料返还计划完成了约 2280 千克燃料的移除。

131. 2018 年 1 月，领先的核医学解决方案提供商 Curium 公司已完成靶件制造只用低浓铀的转换工作，使目前世界上销售的钼-99 约 75% 不使用高浓铀进行生产。2018 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。2018 年没有新的钼-99 生产商开始运行。美国北极星医用放射性同位素公司在 2018 年开始使用非高浓铀靶生产钼-99。

132. 2018 年 10 月，比利时联邦政府决定为开发不使用高浓铀生产钼-99 的革新型加速器技术提供大量财政捐款（供 2019—2020 年使用）。政府还在 2018 年 9 月决定以大量的大规模投资（在 2019—2037 年期间）支持开发适合于高科技应用的多用途混合研究堆。适合于高科技应用的多用途混合研究堆是一种加速器驱动系统，将主要用于研究嬗变、开发下一代医用放射性同位素和研究先进材料。

C.2.1. 产生冷中子的慢化剂新技术

133. 冷慢化剂通过在低温下使用认真选择的物质可提供能量极低的中子。这类中子特别适合于材料科学研究。产生冷中子束的创新性设计包括开发芯块状固体慢化剂，如 JINR-Dubna 的 IBR-2 脉冲研究堆运行使用的慢化剂。固体冷慢化剂通常用甲烷制成，甲烷的辐射分解产生氢气，由此引起的膨胀可能损坏慢化剂容器。不过，JINR-Dubna 系统中的小芯块（图 C-5）由更耐辐射的碳氢化合物制成并被持续吹入慢化剂容器，在其使用寿命末容易被移除，因此可减少受损的可能性。这种创新性方法正被应用于基于研究堆和加速器驱动的中子源。此外，原子能机构 2018 年完成的协调研究项目成果还包括关于这类高级慢化剂的创新性设计、原型研究和实际规模测试的其他一些重要发现。

134. 另一个主要的创新是液态冷慢化剂的开发。这涉及在催化剂的帮助下从液态氢中分离出一种核“自旋态”（例如仲氢）。在这种设计中，有用的冷中子可以在没有进一

步相互作用的情况下穿行相当长的距离，从而可构建低维冷慢化剂（指状、饼状），在这些慢化剂周围可更加有效地安装填充中子散射仪器。

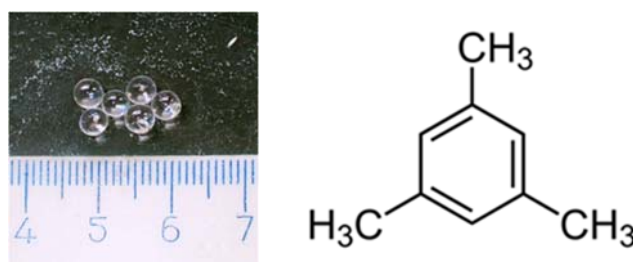


图 C-5. 在 JINR-Dubna 制造并用于慢化快中子的芯块图像（左），以及它们的分子结构示意图。（由 JINR Dubna 提供）

D. 辐射技术

D.1. 宇宙射线断层照相技术：来自恒星的探测器

135. μ 子射线照相是一项新兴技术，利用宇宙射线 μ 子形式的天然存在的本底辐射。当初级高能宇宙射线与地球大气层相互作用产生高能 μ 子时，就会产生地面宇宙射线 μ 子。它们的特性与电子相似，但具有更大的质量。宇宙 μ 子的能量大约是普通 X 射线的 1 万倍，主要通过电离释放能量。这类 μ 子能穿透非常大的结构。 μ 子带有电荷，在物质中穿行时失去能量而留下电离径迹。这使得它们可以在闪烁和电离探测器中被探测到，并可以测量它们的轨迹。

136. 这项基于 μ 子散射或吸收的技术的主要优点是，它可能在不使用任何放射源的情况下以完整的方式探测封闭容积（即使是嵌入式容积）中高原子序数材料的密度变化。 μ 子射线照相至少需要两个探测器平面，以便能够确定被探测到的宇宙 μ 子的轨迹，通常使用三个或四个探测器平面以提高分辨率和效率。可以通过重建与物体相互作用前后的 μ 子轨迹对小物体进行成像，而对于大物体，可通过将通量与控制测量值进行比较来形成二维图像。 μ 子射线照相的结果不一定局限于二维图像；通过旋转靶或周围的探测器，可以整合拍摄同一容积的若干探测器的信息而形成三维图像。

137. 目前正在世界范围内瞄准各种应用领域，例如测量深度为 1 公里的火山岩浆的厚度；查明埃及金字塔中先前未发现的洞穴⁸和意大利那不勒斯的地下建筑⁹。这些结果表明， μ 子可用作研究建筑物、桥梁和隧道等土木结构的一个新手段。近年来，关于这个专题的出版物数量显著增加。

⁸ K. Morishima 等人，通过观察宇宙射线 μ 子发现胡夫金字塔中的大空洞，《自然》杂志第 552 期，第 386 页至第 390 页（2017 年）。

⁹ G. Saracino 等人，根据在埃西亚山（那不勒斯）的观测用宇宙射线 μ 子对地下洞穴进行成像，《科学报告》第 7 期，文章编号：1181（2017）。

D.1.1. 应用

138. 这项成像技术的应用领域仍在不断扩大，包括地球科学、核安全和核安保、土木工程和考古学。在这些领域中，可以发现将屏蔽、分辨率和时间尺度相结合的应用，对于这些应用， μ 子断层照相技术是一种合适的成像方法。图 D-1 显示了众多应用中的几种应用。

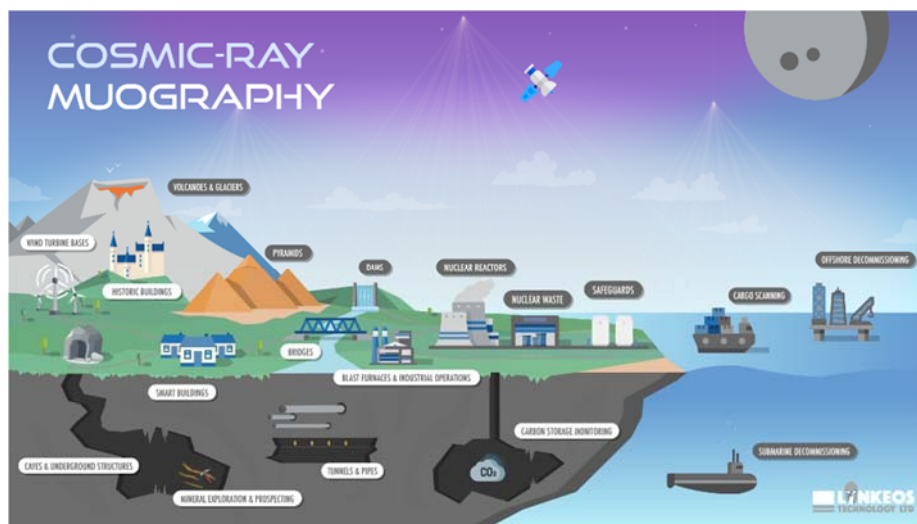


图 D-1. 展示 μ 子断层照相技术众多应用的信息示意图（资料来源：英国 Lynkeos 科技有限公司）

139. 在地球科学领域，最典型的应用是火山内部成像。例如，法国、意大利和日本的火山学家一直在使用这种方法。^{10、11、12} 利用这项技术，可能预测火山喷发，从而提前做好准备，并尽量减少自然灾害的影响。图 D-2 示出日本樱岛火山第一张高分辨率 μ 子成像图像。

¹⁰ R. D'Alessandro, 意大利的火山和 μ 子射线照相的作用, 英国皇家学会《哲学学报》第 377 卷第 2137 期, 2019 年 1 月。

¹¹ L. Oláh, 高分辨率 μ 子图像对樱岛山观测的局限性研究, 英国皇家学会《哲学学报》第 377 卷第 2137 期, 2019 年 1 月。

¹² L. Oláh, H. K. M. Tanaka, T. Ohminato 和 D. Varga, 利用气体跟踪探测器绘制樱岛火山高分辨率低噪点 μ 子图像, 《科学报告》第 8 期, 文章编号: 3207 (2018), 第 1 页至第 13 页。

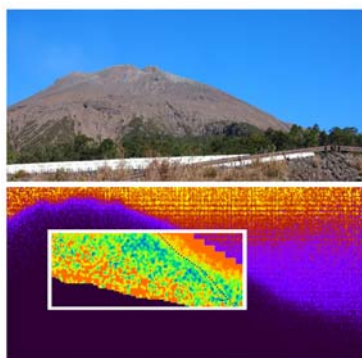


图 D-2. 成功拍摄了正在喷发的火山图像。下方插图以 10 米×10 米的分辨率示出火山内部（照片来源：Oláh 等人⁹，日本东京大学）

140. 开发工业应用 μ 子断层照相系统是科学界目前面临的一个挑战。高炉和旋转炉等工业设备的内损耗用现有技术不容易测量。这类设施对于能够用于量化损耗的透射和散射成像太大。因此， μ 子断层照相技术在诊断过程中可发挥作用，使企业的生产过程在节能和经济成本方面更加高效。进一步的土木工程应用包括对历史建筑、桥梁和风力涡轮机等大型结构以及也可能对石油钻塔上的结构进行监测。在意大利热那亚最近的桥梁灾难之后，土木工程应用现在可能会得到更快的发展。

141. 核安全和核安保提供了 μ 子射线照相的其他重要应用。将放射性物质和废物贮存在为封闭辐射而设计的屏蔽容器中这一事实也意味着类似的辐射不可用于对其内容物进行成像。 μ 子射线照相区分核燃料和其他金属的能力不仅对核安保领域的应用（特别是出于国家安全的货物筛查）至关重要，¹³ 而且对干法贮存罐的监测和几何形状复杂的遗留放射性废物的表征等保障相关应用也至关重要。^{14、15}

¹³ J.M. Durham 等人，通过宇宙射线 μ 子散射测量核查密封干法贮存罐中的乏核燃料，《应用物理评论》第 9 卷第 044013（2018）期。

¹⁴ C.L. Morris 等人， μ 子断层照相技术应用于燃料屏蔽容器监测，英国皇家学会《哲学学报》第 377 卷第 2137 期，2019 年 1 月。

¹⁵ G. Yang 等人，新颖的 μ 子成像技术，英国皇家学会《哲学学报》第 377 卷第 2137 期，2019 年 1 月。

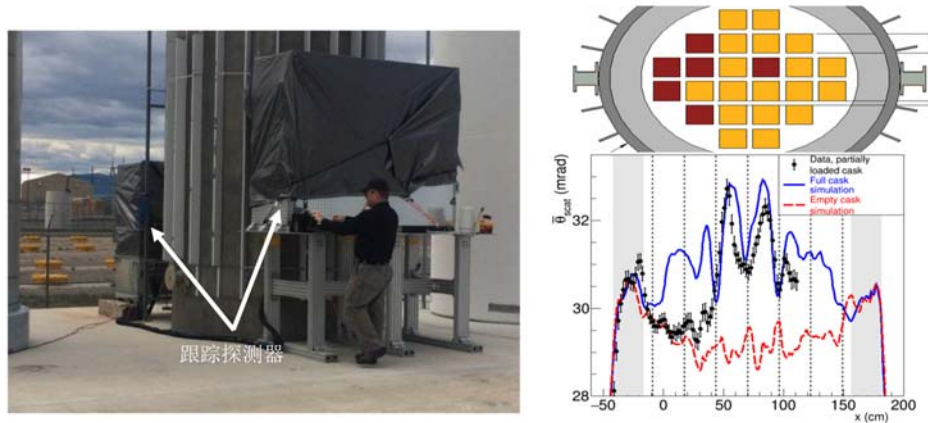


图 D-3. 放置在部分装载的 MC-1 贮存罐两侧的 μ 子跟踪器照片 (左)。显示缺失 (红色) 和装载 (黄色) 燃料束位置的示意图 (右上)。实验信号 (黑色) 与完全装载的屏蔽容器的蒙特卡罗期望值 (蓝色) 和空屏蔽容器的蒙特卡罗期望值 (红色) 对比 (右下) (照片来源: Christopher Morris, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室)

142. 在货物集装箱内搜寻特种核材料或许是 μ 子断层照相首批潜在应用之一。核废物容器中内容物质成像和核废物处理过程的质量保证是核安全领域的其他关键应用。¹⁶ 最近在英国塞拉菲尔德场址部署了一个示范系统。最终, 核反应堆自身也能利用宇宙 μ 子进行成像。在日本, 一组研究人员在福岛第一核电站反应堆开展了堆芯熔化物成像工作, 这得到了表明这项工作应该是可行的模拟结果的支持。¹⁷

143. μ 子射线照相预计将成为一种在其他成像技术中占有一席之地的技术, 尤其是凭借其特殊优势: 辐射剂量不超过天然本底; 能够穿透厚物体的能力以及测量密度和原子序数的能力。该技术的主要缺点是在很多应用中需要长时间照射。

E. 人体健康

E.1. 现代乳房 X 射线照相的校准服务

E.1.1. 背景

144. 乳房 X 射线照相是一种用低剂量 X 射线筛查和诊断乳腺癌的乳房成像技术。这种技术用于乳腺癌早期检测的人口筛查计划, 因此许多妇女在这一过程中受到辐射照射。必须精确测定检查所用的辐射剂量, 以便实现风险和利益最优化。世界卫生组织

¹⁶ D. Mahon 等人, 核废物表征的首张 μ 子成像, 英国皇家学会《哲学学报》第 377 卷第 2137 期, 2019 年 1 月。

¹⁷ H. Miyadera 等人, 利用 μ 子对福岛第一核电站反应堆进行成像, 美国物理联合会《进展》第 3 卷第 052133 (2013) 期。

已将质量保证确定为成功实施乳房 X 射线照相成像的一个关键标准。通过质量保证，乳房 X 射线照相系统的辐射剂量和质量（辐射光谱）都可以进行调节以提高图像质量，同时使辐射剂量尽可能低。

145. 在这一最优化过程中，精确剂量测定有着重要的作用。用于测量的剂量测定设备需由经认证的校准实验室进行校准。校准必须可以追溯至国际单位制，以便不同机构测量的剂量都可以追溯到一套独一无二的国际标准，从而方便比较。为医院提供可追溯校准的二级标准剂量学实验室通常具有这一职能。

E.1.2. 辐射质量

146. 采用钼阳极和钼过滤的常规 X 射线管用于屏片乳房 X 射线照相。这种辐射质量一直被用作临床剂量测定和校准的一个标准。现代乳房 X 射线照相装置采用范围更广的辐射质量，通过不同的阳极/过滤片组合及管电压选择来实现。数字乳房 X 射线照相系统通常采用基于钨阳极的 X 射线管。这在临床上能够以较低的患者剂量得到更高的图像质量。

147. 二级标准剂量学实验室适用的辐射质量是标准化的并且现在基于钼阳极/过滤片组合。所面临的挑战在于全面涵盖临床所用系列辐射质量，以便能在所有临床状况下实现精确测量。钼阳极 X 射线管仅用于乳房 X 射线照相校准，而钨阳极一般用于另一类型 X 射线诊断放射学成像及相关校准。这可能会给二级标准剂量学实验室带来经济压力，因为实验室需要专门为乳房 X 射线照相校准采购钼阳极 X 射线系统。

E.1.3. 剂量计

148. 传统上，医学剂量测定采用电离室。电离室的响应通常不是非常依赖入射束的能量，因此，可用于测量范围很广的不同辐射束质量（能量）。半值层用作确定辐射束质量的一个替代值。因此可针对一些辐射质量规定电离室校准系数，而其他能量的系数可通过不同半值层值之间的插值推算。这样，就可以对医院现有完整范围的不同乳房 X 射线照相辐射质量进行精确剂量测定。

149. 最近，半导体剂量计的临床应用越来越多，并逐渐取代了电离室，因为这些剂量计更加小巧灵便，易于操作，而且还可用于通过一次照射测量若干其他数量（如半值层、管电压）。但是，与电离室相比，半导体剂量计响应的固有能量依赖性更显著。因此，制造商正在开发多种基于辐射质量的内部补偿方法来补偿这种影响。不过许多用户并不完全明白该如何进行这种矫正。这为剂量测定和乳房 X 射线照相所用剂量计的校准带来了更多挑战。

E.1.4. 校准

150. 剂量测定设备应由二级标准剂量学实验室定期进行校准。在校准过程中，将剂量计响应与国家可追溯性参考标准进行比较，确定剂量计的校准系数。通常，二级标准剂量学实验室不能针对临床可能使用的大量束质量提供校准。

151. 对于电离室的校准，辐射质量的变化并不是什么问题，因为电离室响应对能量的依赖可忽略不计。但半导体剂量计却不是这样，其能量依赖性更显著。

E.1.5. 进一步发展

152. 原子能机构剂量学实验室为原子能机构/世界卫生组织二级标准剂量学实验室网成员提供乳房 X 射线照相剂量测定可能需要的全范围辐射质量访问权。剂量学实验室已校准了若干型号的剂量计。基于剂量学实验室校准结果（图 E-1），发现一些新的半导体剂量计可很好地补偿辐射质量变化。这意味着可以将其用于测定临床所用大范围的辐射质量。

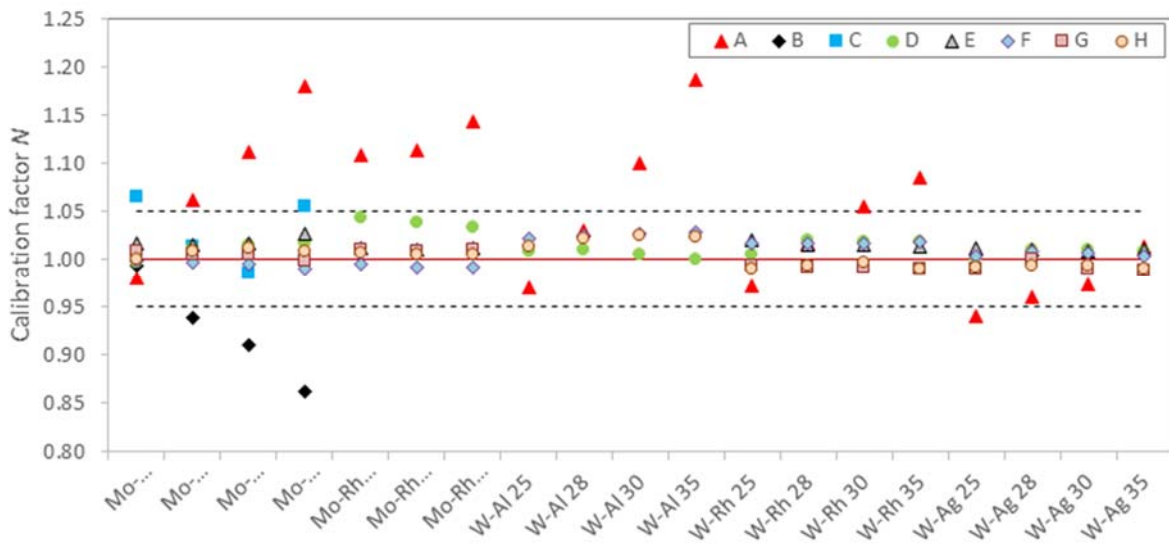


图 E-1. 原子能机构剂量学实验室为八个半导体剂量计（A-H）测定的作为辐射质量的函数的校准因子 N（mGy/mGy）。

153. 然而，成员国的二级标准剂量学实验室不一定具备可用于校准乳房 X 射线照相所用剂量计的所有这些辐射质量。因此，鼓励半导体制造商开发一种标准化的方法，可用于在标准化条件下校准剂量计。

154. 利用钼阳极/过滤片机器产生一套标准的辐射质量以校准乳房 X 射线照相所用的剂量计并非目前的临床趋势。因此，应开发采用钨阳极的新标准辐射质量。半导体剂量计应包括一种可利用这些标准辐射质量验证和确认其在所有临床辐射质量中的性能的校准模式。这将避免剂量测定错误，为全世界乳腺癌的高质量诊断或筛查做出贡献。

E.2. 妇科癌症的放射导向外科手术

E.2.1. 背景

155. 癌症是世界上造成死亡的主要原因之一。与全淋巴结清扫术相比，对外阴、子宫内膜和宫颈恶性肿瘤实施放射导向外科手术可降低短期和长期发病率。

156. 前哨淋巴结是原发肿瘤直接淋巴引流的首站局部淋巴结，因此也被认为是接受淋巴转移细胞芽孢的首批淋巴结。前哨淋巴结绘图和活检已成为癌症手术（乳腺和黑色素瘤）的常规技术，有助于最大程度地缩短手术过程。

157. 前哨淋巴结检测可提供淋巴结状态的预后信息，并有助于避免过度治疗引起的发病率。此外，由于目前还没有能够检测微转移的成像模式，前哨淋巴结活检被认为是筛查淋巴结和发现局部淋巴结微转移疾病的惟一可靠方法。

E.2.2. 宫颈癌

158. 宫颈癌是发达国家第三大、发展中国家第一大最常见妇科癌症，是育龄妇女死亡的主要原因。宫颈癌一般局部扩散到邻近的盆腔脏器，但也会扩散到局部淋巴结，在一些罕见病例中还见到向肺、肝、骨或脑的血源性转移情况。前哨淋巴结检测对于宫颈癌的有用性已在多达 507 名妇女身上并通过 831 名患者的复审进行了研究。利用这种组合技术发现，检出率为 93.5%和 96%、阴性预测值高（94%和 97%）以及假阴性率 8%。一个有意义的结果是小于两厘米肿瘤的检出率和阴性预测值都较高（94%对 84%和 99%对 89%）。

E.2.3. 子宫内膜癌

159. 子宫内膜癌是发达国家女性生殖道最常见的恶性肿瘤。盆腔或腹主动脉旁淋巴结受累标志着预后较差，五年存活率在 44%到 52%之间。对于高危子宫内膜癌（G3，子宫肌层受累比例大于 50%）或高危肿瘤组织（透明细胞、浆液性乳突状腺、癌肉瘤）患者，护理标准是手术分期，包括盆腔和腹主动脉旁淋巴结清扫术。但对于低风险子宫内膜癌，淋巴结受侵发生率很低，目前尚无明确的治疗共识。就某些患者而言，对整个肿瘤样本进行病理检查后，可以修改和提高组织学低级别。在这些病例中，提前手术分期是有益的。

160. 对淋巴结受侵的诊断可以修改护理方案和引入辅助治疗。此外，必须强调的是，大多数子宫内膜癌患者均因肥胖和相关并发症而具有较高的手术风险。在这种情况下，即使是高风险肿瘤患者，如果可以避免系统淋巴结清扫术，前哨淋巴结概念可以显著降低术后发病率。利用前哨淋巴结检测不仅可以在不增加全淋巴结清扫术并发症的情况下提供手术分期，而且还可以提高分期的敏感度，对选定的淋巴结进行免疫组织化学检查。虽然对子宫内膜癌的前哨淋巴结检测进行了若干研究，但目前尚缺乏足够的科学证据对此进行验证。

E.2.4. 卵巢癌

161. 早期卵巢癌阳性淋巴结发病率较低，在 5.1%至 15%之间。盆腔和腹主动脉旁淋巴结清扫术涉及延长手术时间，并可能增加发病率。不过，可以考虑卵巢癌前哨淋巴结检测。

E.2.5. 未来趋势

162. 与妇科癌症最相关的技术进步是便携式伽玛相机等术中器械的引入。这种装置提供术中图像，对前哨淋巴结进行切除前定位。切除以后，手术部位的附加图像可通过失去活性确认成功切除。这个过程需要 5 分（外阴和宫颈癌）到 15 分钟（子宫内膜癌），属于整个手术过程相对较短的一段时间。

163. 妇科癌症的高代谢行为使得对复发肿块的诊断和正电子发射断层照相引导定位成为可能。很容易通过正电子发射断层照相/计算机断层照相诊断的复发性疾病可能表现为沿腹腔大面积扩散，这就必须用化疗进行治疗；或表现为一个孤立的小肿瘤灶。在这些特殊病例中，可以利用手持术中正电子发射断层照相探针引导手术，识别肿瘤块并将其与正常组织或瘢痕组织区分开来。正电子发射断层照相引导手术在检测隐匿性病变或纤维化组织覆盖的病变时特别有用。主要技术难点在于肝、脾、肾、膀胱等周围组织的生理性摄取很强。这种强活性加上一些器械空间分辨率低使得其不适合引导边缘切除。这种手术的好处之一是因用探针直接定位病变可降低手术发病率，同时可缩小切口。推荐术前用正电子发射断层照相图像定位肿瘤病灶和制定切除计划。

164. 尽管这种程序有潜在的好处，但正电子发射断层照相引导手术仍未得到广泛应用。主要问题是：a) 非特异性定位，因为探针检测到的既可能是肿瘤组织，也可能是炎症组织；b) 技术难度，如上所述，因为腹腔内活性很强（建议最小比例为 1.5:1）而且探头的大小也使其不可以用于腹腔镜手术；c) 工作人员辐射，尽管一些研究表明每年最多可进行 260 小时这种手术；d) 经济原因。

165. 最近，对妇科恶性肿瘤特别是宫颈癌试验了一种新的示踪剂；该制剂显像所用的新设备包括一台多光谱荧光摄像机，用于示踪剂术中显像。荧光示踪剂（吡啶菁绿）在手术开始时注射，然后在盆腔手术检查时显像。

F. 粮食和农业

F.1. 新的发展表明食品和植物检疫辐照的范式转变

166. 作为正常食品业务作业的一部分在“内部”进行食品辐照长期以来一直是一个梦想。目前，食品辐照通常外包给专业承包商经营的大型独立设施，但新的辐照器、剂量测定系统和应用的发展正在为新方法铺平道路。技术发展使电子束和 X 射线发生器的尺寸不断缩小，而机器源照射的最新发展表明将来可能更容易将辐照装置安装在食品包装线上或作为食品生产设施的一部分。

167. 辐照涉及传送食品穿过电离辐射束进行食品加工。电子束可以穿透包装和食物，就像 X 射线可以穿透人体一样，但与医用 X 射线不同的是，其目的是传递能量，在不显著提高温度的情况下产生一些变化。包装前的固态食品和甚至冷冻食品都可以用这种方法处理，引起的食品不良变化最小，处理后再用包装对食品加以保护。不过，这

是一个耗时的昂贵过程，生产商除非不得已是不会对食品进行辐照处理的。只有在辐照处理带来一些有益变化而改善或维护优质产品时才会使用。例如：利用辐照确保食品不含导致食物中毒的细菌；减少腐坏生物数量，从而让食品更长时间地保鲜；在不使用化学品情况下防止发芽（如生姜、山药、大蒜、洋葱及马铃薯）；或者作为一种植物检疫处理手段，防止入侵生物（苍蝇、昆虫、象鼻虫和螨虫，以及可能存在的鼻涕虫、蜗牛，甚至是违禁种子）传播。后一用途对于新鲜水果和蔬菜的运送特别重要，因为害虫可能藏身于这些水果和蔬菜中，并通过国际贸易在新的地方安家落户，从而可能破坏当地环境和农业。随着因健康和/或环境关切而越来越限制熏蒸化学品的使用，辐照应用既不会留下有害的化学残留物，对食品质量的不良影响也极小。

168. 需要有大功率电离辐射源，而这样的源需要得到适当管理。大多数食品辐照采用的是钴-60 γ 射线。发射钴-60 γ 射线的能量为 1.17 兆电子伏和 1.33 兆电子伏，质量为零，因此这种射线可以穿透大体积的庞大产品（例如，可以一次性辐照载满一袋袋香料的托盘）。辐射源以每月约 1% 的速率衰减（钴-60 的半衰期约为五年），因此每个月需要略微延长一点照射时间，以便达到相同能量（辐射剂量）的效果。随着时间的推移，还需补充辐射源。

169. 有些食品可用电子束辐射进行辐照。电子束能量可能高达 10 兆电子伏；电子束中的每个电子都有一个完整的负电荷，质量很小但可感知。尽管这意味着电子束可以在需要时开启，并可利用磁场予以导向和聚焦，但这也意味着它们会与食品中的原子相互作用和碰撞，在相对较短距离内以很高的速率转移能量。电子束无法非常深入地穿透，因此适合用于辐照厚度几个厘米左右的包装食品。

170. 用 X 射线辐照处理的食品种类要少得多。在 X 射线辐照中，电子束轰击金属靶，将电子的动能转换为 X 射线，一般能量可达 5 兆电子伏，但在一些国家可达 7.5 兆电子伏。X 射线和 γ 射线一样具有穿透力，因为它们的质量均为零，所以 X 射线在一次性辐照载有大体积食品的大托盘时也很有用。然而，当电子束在金属靶中转换时，只有百分之几导致形成 X 射线，大量能量都以热量形式浪费了。

171. 电子束和 X 射线均由机器产生，通过改变机器参数或通过设计可以设置不同的束特性和能量。与钴-60 相比，这些源可以在不需要时关闭。此外，历史表明，机器很容易接受技术革新。

172. 无论采用放射性核素辐照还是采用机器源辐照，当前的业务模式往往都涉及辐射设施，这些设施作为独立服务提供商与其他方签订辐照服务合同。商业辐照设施通常位于主要的贸易路线或运输枢纽，例如为港口和机场服务的货运终点站。设施本身基本上就是一个大仓库，其中心有一个辐照装置。食品从仓库非辐照区（货物接收区）进入辐照室，接受辐照束定时照射和因此产生的特定最低辐射剂量，然后离开辐照室进入仓库的辐照后仓储区（货物分发区）。食品将在分发区存放，直到通过检查所记录的受照射时间及其在整个过程中所携带剂量计的确认读数证实其已接受适当辐照处理。一旦证实经过了适当辐照，食品即可运往其所有者指定的任何地方。

173. 这一成熟的业务模式很可能会延续，但新技术正在使辐照装置小型化。尽管这些小型化装置目前只提供低能量束源，但在行业中正将其作为正常生产过程的一部分用于消毒工厂的包装材料、医疗设备和生物样品。随着时间推移，小型电子束和 X 射线发生器可能会功率越来越大，因此对食品辐照也更加有用。这些发展指明了食品未来可以在包装线上、在生产过程中或在农场新鲜收获时进行辐照的前景。为实现这一范式转变，现在是奠定坚实的技术基础支持电子束和 X 射线辐照的好时机，以便最终为食品和植物检疫辐照提供新的商机。原子能机构正与联合国粮食及农业组织合作，目标是加快研究与开发，以促进电子束和 X 射线实用技术发展，开启新的和经改进的食品辐照处理的未来潜力。

174. 美国目前的研究活动包括建造便携式低能（160 千电子伏）柜式 X 射线辐照仪，¹⁸ 用来产生电离辐射，对盒装水果进行杀虫，以此作为检疫处理。大韩民国进行的研究正在评估低能量 X 射线对食品微生物特性、物理化学特性和感官特性（颜色、味道、气味和质地）的影响。此概念针对将在医院使用的小型 X 射线柜机，以确保高危患者（如免疫缺陷患者）的食品安全。日本和波兰研究人员正在合作开发一种新的食品和农产品辐照方法，涉及用能量低于 300 千电子伏的电子实现有限穿透。这是一种去除食品表面细菌、霉菌和酵母菌的新应用。这种处理类同于对黑胡椒籽、白胡椒籽和众香籽粒的常规（10 兆电子伏）电子束辐照。这种表面处理在减少和消除微生物方面与常规辐照一样有效。¹⁹

175. 此外，正在研发机器源辐照设施的辅助工具。中国开发了一种对盒装产品进行辐照处理前扫描的 X 射线装置概念验证，以确定食品包装是否符合适当电子束辐照规范。²⁰ 越南正在发展一种类似概念，但利用小型准直钴-60 源的 γ 射线对盒装产品进行电力束辐照前的检测扫描。这两种装置都已在商业电子束设施中进行了试验——它们可对质量厚度（电子束的一个关键参数）进行快速测量并可用不同算法准确预测电子束辐照的剂量分布。在实际处理之前，可通过模拟快速评定电子束辐照的有效性，并获得优化的产品配置。中国的最新研究正在测试一种剂量分布三维模拟系统，这可能带来辐射处理剂量测定的大变革。

176. 2015 年，食品工程集团 Bühler 与小型电子束灯具生产商 COMET 建立了战略伙伴关系，共同研制了一种用低能量电子束进行干货微生物净化处理的机器²¹，若干台这种新装置正在不同的香料加工厂接受评价。电子束和 X 射线设施供应商 Mevex 开发了

¹⁸ P. Follett 和 R. Kirk, 《出口水果害虫检疫便携式 X 射线柜机》

https://www.cherrygrowers.org.au/assets/PASE_Portable_X-ray_Machine.pdf。

¹⁹ U. Gryczka、W. Migdał、S. Bułka, “采用低能电子束对农产品的微生物辐射净化过程的有效性”，《辐射物理学与化学》第 143（2018）期，第 59 页至第 62 页。

²⁰ H. Qin 等人, “电子束辐照处理前受照物品的 X 射线质量厚度检测概念发展”，《辐射物理与化学》第 143（2018）期，第 8 页至第 13 页。

²¹ C. Hertwig、N. Meneses、A. Mathys, “作为干货表面替代性非热力净化技术的大气压冷等离子体和低能电子束综述”，《食品科技趋势》第 77（2018）期，第 131 页至第 142 页。

一种紧凑型自屏蔽 X 射线系统“Mevex X 射线盒”，既可用于研究，也可用于高价值商品（包括食品和农产品）的小规模商业处理。该辐照器加上屏蔽装置占地约两平方米，可提供高达 2 兆电子伏的能量。其设计旨在对直径 40 厘米的转台上高达 40 厘米的产品实施高剂量率照射。中国的大型电子束和 X 射线设施提供商同方威视正进一步努力开发一款新型质量厚度检测工具，能够在电子束设施中商业使用，对产品进行辐照前的检查、验证和可能的剂量绘图，从而节省时间和成本并提高生产力。

F.2. 核技术促进作物和种植系统快速适应气候变化

177. 干旱、极端温度、洪水和土壤养分缺乏或矿物毒性直接影响植物生根和生长以及间接通过影响疾病、昆虫和杂草等生物胁迫因素的性质和强度对作物产量产生影响。如果不对作物生产采取适当的适应措施，气候变化将减少作物产量，并导致粮食不安全乃至造成粮食系统崩溃，特别是在发展中国家。这还会导致作物物种地理分布的变化。

178. 气候变化造成的作物灾难性损失要求开发革新型育种体系，以确保全球粮食安全。在后基因组时代，植物突变育种、标记辅助选种和高通量表型分析相结合构成植物快速适应气候变化的强大配方。面对作物生产在每个生长季节所面临的非生物和生物胁迫，植物育种的日常工作就是努力改良作物性能。

F.2.1. 标记辅助突变育种加快气候智能型品种的开发

179. 植物突变育种仍然是为快速适应气候变化而促成新遗传变异的最快方法。突变育种与低成本、高通量的下一代基因分型以及与精确高通量表型分析相结合是加速这种适应的关键。这一过程有助于科学家了解突变育种所产生的遗传变异的分子基础，从而开发和利用分子标记来加快选种和品种开发。因此，基于全基因组关联分析的分子标记技术，以及对特定等位基因/基因家族/基因通路与表型性能的遗传关联更有针对性的识别、验证和利用都将有助于加快育种。

180. 原子能机构与粮农组织合作，目前已制订了一套有成本效益地识别引起特定表型的诱发突变的工作流程，并已开始通过进修培训向成员国转让这一工作流程。分子生物学规程业已制定，目前正在落实数据分析所需的计算资源。该工作流程可为下一代测序支持的基因制图方案提供便利。2018 年的一项重大成就是首次在原子能机构实验室应用了分子标记分析，具体而言就是对大麦（橙色外稃）的饲料品质性状进行了分析。已确定了这一性状的成因突变，并开发了一种标记分析方法。目前一个大麦育种计划正在测试基因分型分析，该计划的目的是将橙色外稃性状基因渗入到冬季饲料包头大麦中。这一分析准确预测了表型，因而有助于标记辅助选种。此外，正在进一步对早熟、矮化高粱的实验性研究，尝试通过对高粱分离群体的几百株个体进行全基因组测序绘制出其性状图谱，然后分析对比基因型，以确定成因遗传位点（图 F-1、F-2）。

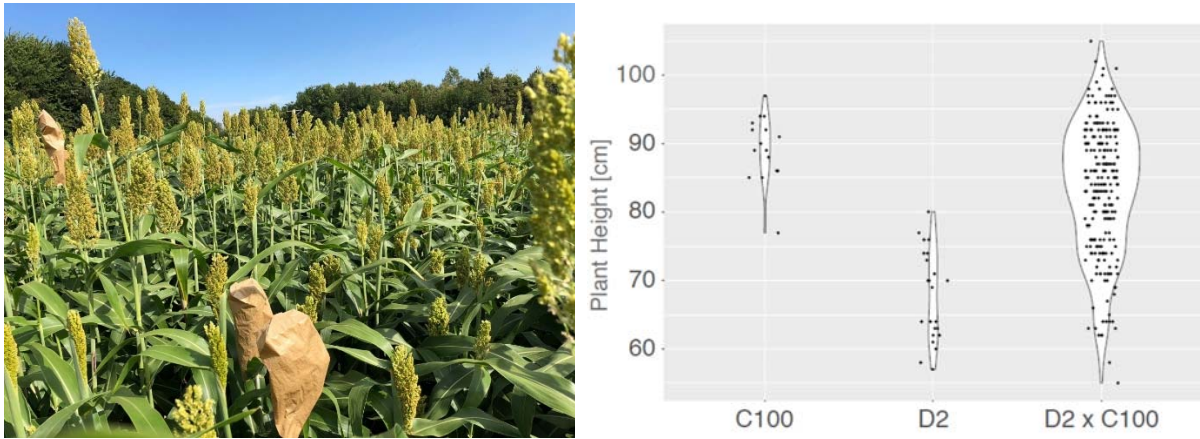


图 F-1. 奥地利塞伯斯多夫农田里种植的植物（2018 年夏季）；用孟德尔方法分离突变矮化植株。右图示出野生型、突变型和 F2 后代植物株高分布。

181. 虽然突变育种与分子标记技术相结合是加快作物适应气候变化的最终目标，但突变育种继续独立用于开发适应不利气候条件的品种。通过突变育种技术转让，巴基斯坦最近推出了三种适应高温胁迫、纤维产量和品质持续的棉花突变品种。目前，巴基斯坦约 20% 的棉花种植区种植着这些突变品种，预计今后两年内这一比例将上升到 30—40%。无独有偶，赞比亚和津巴布韦的农民最近发现，通过突变育种培育的豇豆品种的产量增加了 10—20%，而这些品种的耐旱性和抗虫害能力也得到了加强。

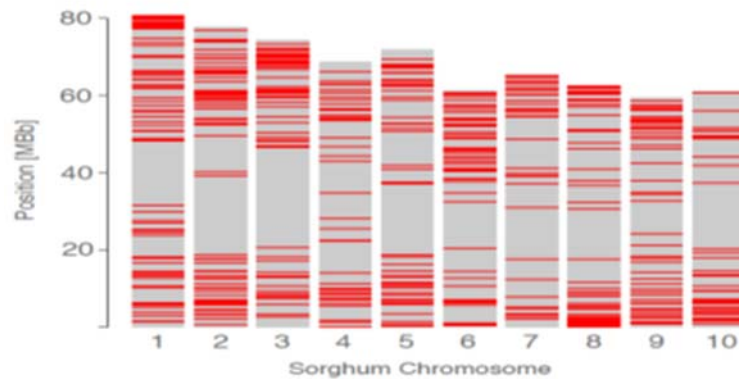


图 F-2. 通过六个突变系的全基因组测序确定的高粱染色体单核苷酸多态性和小插入缺失的分布。

F.2.2. X 射线计算机断层照相促进高通量无损植物表型

182. 缺乏对整株植物或植物组织进行高通量无损筛选的设施目前被公认为作物改良的一个重要瓶颈，特别是在较好性状植株选择阶段。在认识植物维管功能（即木质部和韧皮部的维管功能）以及相关流体动力学方面，核磁共振成像越来越普遍使用。如今，一个相关的核技术 — X 射线计算机断层照相也在例行用于包括植物学在内的非医学应用，在植物表型中正越来越多地利用 X 射线计算机断层照相预测估计植物形态和解剖性状。植物学应用 X 射线计算机断层照相分析的例子包括筛选水胁迫下存活的植物、评价植物耐荫性和叶片光截获能力、分析根系病害以及根系发育和根与根的相

互作用。这些技术的优势主要来自其无损性和实时量化生理过程的能力。将继续对仪器仪表进行改进以获取宏观和微观层面图像，同时 X 射线计算机断层照相的高通量使用也在逐渐增加。利用高通量无损核成像技术补充植物突变育种中已建立的基因组和分子工作流程以及现有的表型方案将能够加快植物突变育种过程。

F.3. 同位素技术和核技术在动物营养方面的革新应用

183. 到 2050 年，全球对动物源食品的需求预计将增长 60—70%。²² 为了在一定时间范围内以可持续方式完成增加牛奶、肉、蛋和其他可食用动物产品供应的艰巨任务，畜牧业需要以技术为基础强化其生产系统。饲料和牧草的供应以及优良牧场、草地和牧区的利用需要增加一倍，以满足在动物营养方面的预期需求。动物与人类之间的饲料和粮食竞争加剧，加上畜牧生产对环境的影响，使得这一状况更加严峻。

184. 目前，有近 8 亿吨谷物（占谷物总产量三分之一）用作牲畜饲料，到 2050 年这一数字预计将超过 11 亿吨²³。2006 年，全球畜牧业温室气体排放量估计为全年 71 亿吨二氧化碳当量，占所有人为温室气体排放量的 14.5%²⁴。需要将核技术与常规技术相结合进行革新型研究与发展，不仅改进当前的圈养和放牧系统，而且还要扩大饲料和牧草来源范围，以利用未用草地和牧区、工业副产品、食物废物、单细胞藻类的批量生产和水培牧草生产，同时探索其他鲜为人知的非常规动物饲料。这将有助于建立一个优质数据库，为政治决策和潜在投资者提供必要信息。

185. 除格陵兰岛和南极洲以外，地球陆地面积 40% 以上都被草地覆盖，如果草地作为牲畜饲料来源得到优化利用，则将惠及全世界数百万农民。²⁵ 在热带地区，反刍动物是主要的牲畜，其生产严重依赖于天然牧场放牧（图 F-3）。可利用核和同位素技术建立一个关于采食量、食性选择和牧草营养成分以及构成动物饲料的牧草物种的数据库。这是各种管理决策所必需的，例如，优化不同种类动物的饲料分配、选择适当的植物物种用于补播退化牧场和牧区以及制订适当的补充战略。草地的有效利用也为增加碳整合、土地开垦和提高牲畜生产力提供了可能性。

²² 粮农组织，“粮食和农业的未来：趋势与挑战”（2017 年）粮农组织，罗马
<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>。

²³ H.P.S. Makkar，“饲料需求状况与非粮食饲料战略对粮食安全和气候变化的意义综述”，《动物》第 12（2018）期，第 1744 页至第 1754 页。

²⁴ 粮农组织，“重要事实和结论”，<http://www.fao.org/news/story/en/item/197623/icode>。

²⁵ J.M. Suttie、S. G.Reynolds、C. Batello，《世界草地》（2005 年），罗马，粮农组织
<http://www.fao.org/docrep/008/y8344e/y8344e05.htm>。



图 F-3. 在津巴布韦的公共草地上共同饲养放牧牲畜是一种常见做法。

F.3.1. 利用核技术研究和改善放牧牲畜的营养

186. 涉及体内饲喂试验、体外消化率分析以及圈养系统所用饲料和草料食品学分析的常规技术被认为对估算放牧牲畜主动采食量和食性选择的效果不佳。近来，革新型核技术和常规技术相结合应用工具和方案的发展进步为分析和估算混合牧场放牧牲畜采食量、食性选择和消化率面临的挑战带来了解决方案。

187. 原子能机构一直与成员国合作开发动物营养工具，以便综合应用长链正构烷烃特定化合物稳定碳-13 同位素和近红外谱测定法估算反刍牲畜采食量、食性选择、饲料构成和消化率。这有助于在放牧的同时通过饲料添加来优化牲畜的营养摄入，并防止牧场和草场被过度放牧。

F.3.2. 正构烷烃帮助估算采食量、消化率和食性选择

188. 所有构成动物饲料的高等植物外表都有一个蜡质层（正构烷烃），不同物种植物的这种蜡质层区别明显，因此可以通过分析这种蜡质层的量化数据来区分构成动物饲料的植物物种。为此，已将正构烷烃用作粪便标记物估算植物消化率，并将这些数据与粪便排出量相结合用于计算牲畜采食量。正构烷烃作为粪便标记物可能来源于饲料（内部标记物）或经口饲喂（外部标记物）。虽然正构烷烃作为一种粪便标记物可以区分反刍动物饲料中的许多植物，但并不能辨别所有植物，尤其不能辨别混合牧场的几十种植物。但是，正构烷烃碳同位素富集度则可准确辨别混合牧场的植物物种。正构烷烃与碳-13 技术相结合应用已被证明在估算采食量、饲料构成和消化率方面非常有效。在皂化、萃取和提纯后，可利用气相色谱/燃烧同位素比质谱法分析特定化合物稳定碳同位素（碳-13/碳-12）。此外，一种有前景的基于激光的创新技术即光腔衰荡光谱已成功用于碳-13 含量的测定，能够在更短的时间内和以更简单的样品预处理提供测量结果。

F.3.3. 粪便残余营养物的近红外光谱分析帮助估算养分含量、主动采食量和食性选择

189. 近红外光谱分析涉及利用广谱近红外光（多种波长或频率）照射饲料或粪便样品，近红外光能够被相关样品吸收、传输、反射或散射。照射波长范围一般在 800—2500 纳米。在与样品相互作用前后测量作为波长函数的光密度，可计算样品引起的漫

反射（即吸收和散射的混合）。近红外光谱提供粗蛋白、纤维含量、植物物种比例和形态学组分、主动采食量和饲料消化率的定性数据。采用双盲技术，通过湿法化学和近红外光谱分析互检样品发现，近红外光谱分析的标准偏差小 60—85%。这表明，与常规的湿法化学分析数据相比，近红外光谱分析的人为误差更少，数据更加一致。²⁶

190. 近红外光谱已成为一种通用性技术，无需样品制备，可以降低费用，缩短分析时间，并且能够透过玻璃和包装材料扫描样品。

F.3.4. 能量色散 X 射线荧光精确测定牧草的矿物质含量

191. 牧草占反刍动物饲料的很大部分；但牧草的矿物质含量却差异巨大，这会影响动物的生产性能和健康。能量色散 X 射线荧光是一种无损多矿物光谱技术，使得矿物分析和评价简单、直接而且一致。这项技术涉及以 20—40 千电子伏扫描各种新鲜植物、干草或牧草制成的干燥研磨牧草样品，配套有铝滤波器以及采用如 Bruker SpectraEDX（Bruker，德国汉堡）等适当软件进行的校准。²⁷ 测定反刍动物饲料中的常见矿物质（钠、镁、磷、硫、氯、钙、钾、锰、铁、铜、锌）含量时，测定系数在 0.93—0.99 之间，而变量系数也在可接受范围（5—14%）内。能量色散 X 射线荧光可在各种畜牧生产系统中实地应用，以测定矿物质含量。收集到的数据将为加强牲畜健康和提高牲畜生产力的矿物质补充提供依据。

192. 饲料是可盈利和可持续畜牧生产的关键，影响着牲畜的生长、健康、福祉、生产力和产品质量，占有畜牧业经营成本的 70%以上。饲料不仅受资源可得性的影响，而且还直接影响到资源基础（牧场、草地和环境）。要满足对动物源食品日益增长的需求，就需要提高牲畜生产力并限制其对环境的影响。为了实现这一目标，上述三种技术经过验证后结合应用可以全面揭示饲料和牧草的营养成分、对牲畜而言的可达性和适口性及其消化率，从而支持促进生长、健康和生产性能的营养和能量转化。碳-13 和正构烷烃技术可测定所采食植物的种类和数量，能量色散 X 射线荧光技术可测定饲料的矿物质成分，近红外光谱则可估算牲畜粪便中残留的营养成分。近红外光谱技术目前用于估算圈养动物的采食量、饲料构成和养分含量。对于放牧牲畜而言，碳-13 和能量色散 X 射线荧光技术可以与近红外光谱结合使用，这三种技术相结合可以整体估算饲料营养成分、采食量和饲料构成（图 F-4）。此外，近红外光谱和能量色散 X 射线荧光技术均具便携性，所需维护工作最少，比湿法化学的人为错误率更低，不需要任何样品制备。未来发展将包括这三种技术之间的集成方案，以测定牲畜采食质量和数量。

²⁶ M.B. De Ondarza、R.Ward，“准确分析：近红外光谱与湿法化学”，《荷氏酪农》（2013年2月）第129页。
<http://www.foragelab.com/Media/Accurate%20analysis%20NIRS%20versus%20wet%20chemistry.pdf>

²⁷ P. Berzaghi、A. Lotto、M. Mancinelli、F. Benozzo，“技术说明：用 X 射线荧光快速测定牧草矿物质”，《乳业科学杂志》第 101（2018）期，第 9967 页至第 9970 页。



图 F-4. 利用正构烷烃及其稳定碳同位素数据对近红外光谱测定技术进行数学算法验证, 并结合能量色散 X 射线荧光进行矿物质分析, 可为饲料和牧草分析以及牲畜营养评价提供完整便携的解决方案。



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(63)/INF/2