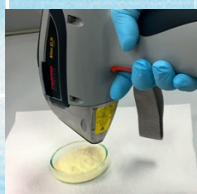


2017年核技术评论



60 年

IAEA 原子用于和平与发展

2017 年核技术评论

GC(61)/INF/4

国际原子能机构在奥地利印刷
2017年8月

IAEA/NTR/2017

序 言

为响应成员国的要求，秘书处每年编写一篇综合性“核技术评论”。

《2017 年核技术评论》突出强调世界各地 2016 年在以下选定领域令人瞩目的发展情况：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、癌症诊断和治疗以及降水、海洋酸化效应和文化遗产保护领域同位素研究的新发展。

草案文本已以 GOV/2017/2 号文件提交 2017 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所收到的成员国意见编写而成。

目 录

正文摘要.....	1
主体报告.....	5
A. 动力应用.....	5
A.1. 当今的核电.....	5
A.1.1. 新加入国.....	7
A.1.2. 扩展国.....	8
A.1.3. 运行国.....	8
A.2. 核电增长预测.....	9
A.3. 燃料循环.....	11
A.3.1. 前端.....	11
A.3.2. 供应保证.....	14
A.3.3. 后端.....	15
A.3.4. 退役、环境治理和放射性废物管理.....	17
A.4. 安全.....	22
B. 原子数据和核数据.....	24
C. 加速器和研究堆的应用.....	25
C.1. 加速器.....	25
C.1.1. 为原位辐射损伤调查开发的新型泵探针技术.....	25
C.1.2. 使用聚焦离子束的新生物兼容辐射剂量计.....	26
C.1.3. 基于加速器的中子散射.....	26
C.2. 研究堆.....	27
D. 粮食和农业.....	30
D.1. 利用核及相关技术确定食品真实性.....	30
D.1.1. 分析技术.....	30
D.2. 宇宙射线中子传感器：区域范围土壤水分监测的新方法.....	31
D.3. 利用辐射杂交制图开发用于支持家畜养殖计划的遗传工具.....	33
D.3.1. 利用放射性同位素技术绘制家畜基因组图谱.....	34
D.3.2. 辐射杂交图谱在畜牧养殖中的应用.....	34
D.3.3. 对粮食安全和可持续发展目标的影响.....	34

E. 人体健康.....	35
E.1. 前列腺癌的防治进展：诊断和治疗	35
E.1.1. 背景.....	35
E.1.2. 诊断.....	35
E.1.3. 近期发展和趋势.....	36
F. 水资源.....	37
F.1. 利用降水中的同位素诊断天气和气候领域的新发展	37
G. 环境.....	39
G.1. 利用同位素工具研究海洋酸化	39
G.1.1. 海洋酸化 — 其他二氧化碳问题.....	39
G.1.2. 海洋酸化的生物效应.....	40
G.1.3. 利用核技术了解海洋酸化的影响.....	41
H. 辐射技术.....	41
H.1. 文化遗产：利用辐射技术进行探索和保存	41
H.1.1. 探索和研究.....	42
H.1.2. 利用基于辐射的技术保存和加固人工制品	43

正文摘要

1. 随着 2016 年底在运反应堆达到 448 座，核电已拥有 391 吉瓦（电）全球发电容量，自 2015 年以来增加约 8.3 吉瓦（电）。2016 年，三座反应堆永久关闭，10 座新反应堆并网，三座反应堆开工建设。近期和长期增长前景仍集中在亚洲，特别是中国。在建的 61 座反应堆有 40 座在亚洲，自 2005 年以来并网的 55 座反应堆也有 47 座在亚洲。
2. 目前有 30 个国家正在使用核电，并且有大约同样数量的国家正在考虑、规划或积极努力将核电纳入其能源结构。在正在运行核电厂的 30 个国家中，13 个正在建设新厂或积极完成以前暂停的建设项目。已决定引进核电的几个国家正处于基础结构后期准备阶段。
3. 原子能机构 2016 年对 2030 年的预测表明，全球核电容量的低增长情景和高增长情景将介于 1.9%和 56%之间。核电及其已证实的低碳效益、大容量和可调度输出，能够为达到限制全球温升相对于工业化前水平远低于 2°C 的“巴黎协定”目标和实现“联合国可持续发展目标”做出显著贡献。革新型核电技术可以进一步减少温室气体排放，并将核电的作用扩展到新的应用。
4. 在世界范围内继续对核电厂做出安全改进，而且如常用安全指标所示，核电厂的运行安全性仍然很高。原子能机构修订了“安全要求”出版物，以纳入从福岛第一核电站事故汲取的教训。对与安全的领导和管理以及研究堆安全有关的其他两个“安全要求”也进行了修订。
5. 低铀价继续限制各公司为实施勘探、开展可行性研究、启动新建设项目和扩大现有项目募集资金的努力。第 26 版两年期“红皮书”这本关于铀的世界权威性参考报告表明，全球铀资源对于满足上文提及的高增长需求情景绰绰有余。
6. 浓缩和其他燃料循环设施的运行保持在相对稳定的水平。哈萨克斯坦原子能机构低浓铀银行新贮存设施的建造工作已经开始，并正在按进度实施。
7. 贮存中的核反应堆乏燃料约为 27.3 万吨重金属，并且正在以约每年 7000 吨重金属的速度积累。五座动力堆乏燃料离堆贮存设施已投入运行。
8. 预计未来数年世界范围内将有相当多的退役工作：有 158 座核动力堆已永久关闭或正在进行退役。全部在运反应堆超过 60%已运行 30 年或 30 年以上，其中约有 15%已有 40 年以上的堆龄。虽然一些反应堆可以继续运行更长时间，但许多将在今后 20 年内退役。此外，还有 480 多座研究堆和临界装置以及数百座其他燃料循环设施已经退役或正在进行退役。

9. 若干国家继续实施放射性废物深部地质处置项目。世界各地正在运行着所有其他各类放射性废物处置设施。弃用密封放射源管理的再循环和返还方案一直在增加。在若干国家，钻孔处置项目处在开发的不同阶段。成功的移除作业将许多弃用密封放射源置于适当的贮存条件下。

10. 国际合作编评数据库组织已激励在与核技术特别相关的氧、铁、铀和钍同位素的中子截面编评方面取得了进展。核结构和核衰变数据评价者国际网数据库已得到原子能机构核素实时图网站和供智能手机使用的“同位素浏览器”核信息应用程序的推动。

11. 加速器技术方面的进展和革新包括用于原地辐射损伤调查的新型泵探测光谱技术、新的生物兼容辐射剂量计的开发和基于加速器的中子散射。

12. 在全世界 56 个国家在运的 249 座研究堆和临界设施中，大约有一半的堆龄超过 40 年。老化管理、燃料供应的可持续性、乏燃料管理相关方案和加强研究堆的利用是研究堆界的重大挑战。七个国家正在建设新研究堆，而若干其他国家正在规划或考虑建设新研究堆，以作为促进核科学技术基础设施和计划（包括核电领域）发展的国家重点设施。原子能机构因特网反应堆实验室项目和由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心机制等倡议以及地区网络和联盟促进了利用研究堆促进核能力建设方面的国际合作。

13. 继续开展高浓铀最少化活动，包括将高浓铀研究堆燃料返还原产国。俄罗斯和美国产高浓铀燃料的返还计划多年来已取得值得称赞的结果。

14. 尽管一些设施存在着停堆和运行挑战，但 2016 年最常用医用同位素钼-99 的全球供应没有出现重大短缺。主要生产商在从基于高浓铀向基于低浓铀生产的转换工作上继续取得进展。

15. 食品贸易的全球化增加了对食品有效控制系统的需求，以保护消费者不受欺诈性供应食品之害。食品造假构成安全危险，因为假冒产品不会像真产品一样接受同样的控制，而且其构成成分不得而知。对支持食品认证和食品溯源的分析方法的需求迅速增长。如食品中天然存在的生物元素稳定同位素测量等一系列成本效益好的核和相关分析技术能够提供关于食品的地理来源和生产技术的信息。价格相宜的手持分析仪器仪表的最新开发正在促进在食物链上的多个环节进行食品认证测试，并显著加强了控制系统的效能。

16. 食品中天然存在的生物元素稳定同位素比率的测量常常能够提供关于其地理来源或生产技术的信息，而食品的元素概况则提供关于其安全性或毒性的重要信息，而且还能够有助于建立食品与其原产地的联系。这些技术与振动光谱学、脱氧核糖核酸分析和微生物指纹识别等其他技术相结合对认证食品非常有价值。

17. 农业占全球淡水消费的约三分之二。为了达到不断增长的人口所需的产量，农业系统必须努力提高效率。宇宙射线中子传感器是一种新装置，能够捕获和量化大面积范围内的土壤水含量，而没有传统评定系统的耗时和侵入性问题。这种装置提供的土壤湿度信息正在促进更好地管理越来越稀缺的水资源。

18. 脱氧核糖核酸芯片等基因组工具有助于评估出生时动物的育种价值。基因组图能够准确定位染色体上特定特征的位置，是确定负责生产特征和抗病性的基因和标记物的重要工具。放射性同位素技术能够通过模拟基因重组事件和在体外加速该过程克服家畜常规耗时的基因组绘图过程。

19. 开发和实施辐射杂交图和基因组工具将有助于制订提高家畜生产率和加强粮食安全的育种计划。已开发绵羊、水牛、山羊和猪的高分辨率基因组图，而且能够为一系列其他重要家畜开发高分辨率基因组图。这些图促进了广泛用于繁殖奶牛以提高牛奶生产率的脱氧核糖核酸芯片的开发。

20. 前列腺癌位于全世界男性中最常见的三种癌症之列，是除肺癌、肝癌、胃癌和肠癌之外最常见的男性癌症死亡致因之一。超半数的患者在前列腺切除术或外射束辐射治疗之后都经历生化复发。最近，开发出一种以前列腺特异性膜抗原为靶标的新分子，这是一种与前列腺癌细胞有关的酶。前列腺特异性膜抗原对开发正电子发射断层照相法—计算机断层照相法用放射性示踪剂可以是一个极好的分子靶，因为它能够探测疾病的早期复发。临床试验正在进行中。

21. 原子能机构全球降水同位素网自 1960 年以来一直在记录降水中氧和氢的同位素比。全球降水同位素网数据表明，这种同位素比具有很大的季节性变化。原子能机构最近的工作表明，在同位素比与造成降水的成云过程之间有很大的相关性。这一新知识将显著地扩大全球降水同位素网数据对于了解短期气象相关和长期气候相关过程的实用性，而且将促进对气候变化的监测和适应。

22. 海洋酸化目前正在明显地影响着许多海洋生物，包括鱼类、贝类、浮游生物和珊瑚，所有这些在不同方面对海洋和那些以海洋为生者的健康和福祉均至关重要。利用一组放射性同位素进行的实验正在处理海洋 pH 值的预计降低对这些海洋生物将产生何种影响，并使得能够对海洋酸化的广泛影响形成新的见解。需要这类信息来更好地预期对我们不断变化的海洋中沿海和海洋资源的可能影响。

23. 辐射技术能够用于保护各种广泛的宝贵文物。虽然射线照相法和计算机辅助断层照相法可以协助对人工制品进行详细研究，但辐射处理有助于消除有害昆虫或真菌感染。借助于辐射处理技术，珍贵的物品和文件能够被贮存和强化，这种技术已在世界文化遗产保护领域确立了独特的作用定位。

2017 年核技术评论

主体报告

A. 动力应用

A.1. 当今的核电

1. 截至 2016 年 12 月 31 日，全球共有 448 座在运核动力堆，总装机容量为 391 吉瓦（电）¹（见表 A-1）。这意味着与 2015 年相比，总容量增加约 8.3 吉瓦（电）。在在运反应堆中，约 82%属轻水慢化冷却堆；10.9%属重水慢化冷却堆；3.3%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。

2. 2016 年，10 座均属压水堆的新反应堆并网发电，与 2015 年相同。这些反应堆中，有五座在中国（昌江 2 号、防城港 2 号、福清 3 号、红沿河 4 号、宁德 4 号），其余在印度（库丹库拉姆 2 号）、大韩民国（新古里 3 号）、巴基斯坦（恰希玛 3 号）、俄罗斯联邦（新沃罗涅日 2 号核电站 1 号机组）和美利坚合众国（瓦茨巴 2 号）。

3. 仙台 1 号和 2 号于 2015 年重启，成为福岛第一核电站事故以来在日本首批恢复全面运行的核反应堆，此后，高滨 3 号和 4 号分别于 2016 年 1 月和 2 月重新开始运行，但不久之后再次关闭。2016 年 8 月，伊方町 3 号重新启动。2016 年 10 月，美国卡尔洪堡核电厂 1 号机组在运行 43 年后被永久关闭。

按地区分列的在建反应堆数目

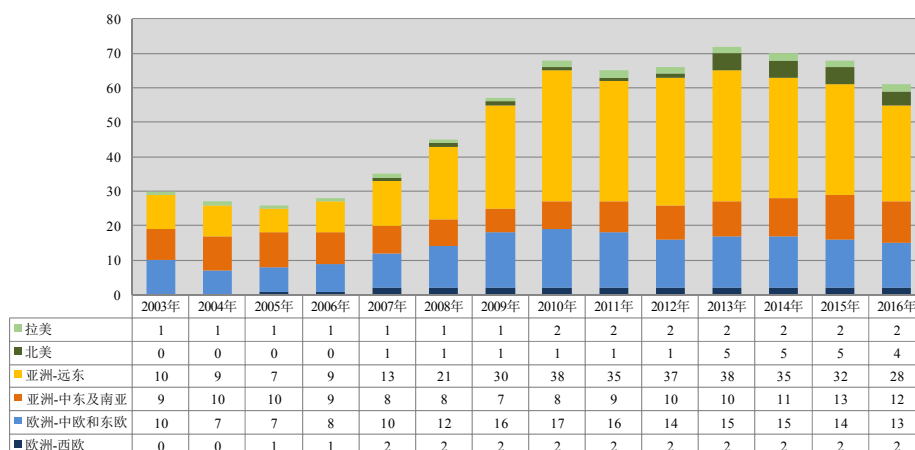


图 A-1. 按地区分列的在建反应堆数目（来源：原子能机构动力堆信息系统：<http://www.iaea.org/pris>）。

¹ 1 吉瓦（电）相当于 10 亿瓦（电）。

4. 截至 2016 年 12 月 31 日，共有 61 座反应堆在建。扩展以及近期和长期增长前景仍集中在亚洲（图 A-1），特别是中国。在在建反应堆总数中，有 40 座在亚洲，自 2005 年以来并网的 55 座新反应堆中有 47 座同样在亚洲。

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆（截至 2016 年 12 月 31 日）^a

国家	在运反应堆		在建反应堆		2016 年供应的核电量		截至 2016 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	月数
阿根廷	3	1 632	1	25	7.7	5.6	79	2
亚美尼亚	1	375			2.2	31.4	42	8
白俄罗斯			2	2 218				
比利时	7	5 913			41.4	51.7	282	7
巴西	2	1 884	1	1 245	15.0	2.9	51	3
保加利亚	2	1 926			15.1	35.0	161	3
加拿大	19	13 524			95.7	15.6	712	6
中国	36	31 384	21	21 622	197.8	3.6	243	2
捷克共和国	6	3 930			22.7	29.4	152	10
芬兰	4	2 752	1	1 600	22.3	33.7	151	4
法国	58	63 130	1	1 630	386.5	72.3	2 106	4
德国	8	10 799			80.1	13.1	824	7
匈牙利	4	1 889			15.2	51.3	126	2
印度	22	6 225	5	2 990	35.0	3.4	460	11
伊朗伊斯兰共和国	1	915			5.9	2.1	5	4
日本	43	40 290	2	2 653	17.5	2.2	1 781	5
大韩民国	25	23 133	3	4 020	154.3	30.3	498	11
墨西哥	2	1 440			10.3	6.2	49	11
荷兰	1	482			3.7	3.4	72	0
巴基斯坦	4	1 005	3	2 343	5.4	4.4	67	11
罗马尼亚	2	1 300			10.4	17.1	29	11
俄罗斯联邦	36	26 557	7	5 520	184.1	17.1	1 226	9
斯洛伐克	4	1 814	2	880	13.7	54.1	160	7
斯洛文尼亚	1	688			5.4	35.2	35	3
南非	2	1 860			15.2	6.6	64	3
西班牙	7	7 121			56.1	21.4	322	1
瑞典	10	9 748			60.6	40.0	442	6
瑞士	5	3 333			20.3	34.4	209	11
乌克兰	15	13 107	2	2 070	76.1	52.3	473	6
阿拉伯联合酋长国			4	5 380				
英国	15	8 918			65.1	20.4	1 574	7
美利坚合众国	99	99 868	4	4 468	804.9	19.7	4 210	9
总计 ^{b, c}	448	391 116	61	61 264	2 476.2		16 982	5

- a. 资料来源于原子能机构“动力堆信息系统”(www.iaea.org/pris)。
- b. 注：总计中包括中国台湾的下列数据：
在运 6 台机组，5052 兆瓦（电）；在建 2 台机组，2600 兆瓦（电）。
核发电量为 30.5 太瓦·时，占总发电量的 13.7%。
- 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）和中国台湾（212 年零 1 个月）的已关闭核电厂。

A.1.1. 新加入国

5. 在阿拉伯联合酋长国，位于巴拉卡的该国第一座核电厂的所有四座反应堆继续施工建设。1 号机组计划在 2017 年开始商业运行，其他三台机组接下来每年运行一台。2016 年 11 月，完成了一次原子能机构国际实物保护咨询服务工作组访问。阿联酋核能公司和韩国电力公司签署了一项长期合作伙伴关系的合资协议。阿拉伯联合酋长国已经寻求原子能机构，就研究与发展如何能够帮助确保其核电计划及其相关研究机构的可持续性提供指导。

6. 白俄罗斯位于奥斯特洛韦茨的第一座核电厂的两台机组继续施工建设，计划在 2019 年和 2020 年进行调试。第一台机组的反应堆压力容器已于 2016 年底交付到现场。2016 年，开展了一次原子能机构综合监管评审服务工作组访问。

7. 2015 年 12 月，孟加拉国与俄罗斯联邦核电建设出口公司签署了一份工程、采购和建设合同。2016 年 7 月，颁发了场址许可证，并与俄罗斯联邦达成了政府间信贷协议。卢普尔核电厂 1 号机组预计在 2023 年进行调试，2 号机组预计在 2024 年进行调试。

8. 2015 年 2 月，埃及与俄罗斯联邦国家原子能公司签署了一项关于在埃尔达巴建设一座新核电厂的项目开发协议，并随后与俄罗斯联邦又签署了一项政府间金融协议。埃尔达巴场址第一台机组计划于 2025 年建成，其他三台机组计划在 2027 年前完成。约旦已建立一个国际咨询小组，以审查该国核计划的执行进展情况，并聘请了顾问来领导计划于 2018 年做出投资决定的准备工作。2016 年 11 月，越南国会批可了政府取消该国核电计划的决定。国会最初于 2009 年批准建造两座总容量为 4000 兆瓦核电厂的计划。

9. 正在考虑、规划或积极努力将核电纳入其能源结构的新加入国一直在与原子能机构合作发展必要的核电基础结构。由于这些国家采取主权决定选择核电，他们与供应国合作建造其未来的核电厂。原子能机构通过嵌入其“里程碑方案”中的具体方法，在建立安全、可靠和可持续的计划中发挥重要作用。原子能机构通过同行评审和专家工作组访问、培训班以及系统地涵盖“里程碑方案”19 个核基础结构问题的模拟工具，协助这些成员国。由于在 2016 年开展了两次综合核基础结构评审工作组访问和两次后续工作组访问，自 2009 年启动以来开展的综合核基础结构评审工作组访问总数已在 15 个成员国达到 21 次。

A.1.2. 扩展国

10. 美国核管理委员会（核管会）向田纳西流域管理局颁发了瓦茨巴 2 号机组的 40 年期运行许可证，该机组于 2016 年 6 月并网发电，10 月开始商业运行。瓦茨巴场址是第一个遵守核管会与福岛有关事故减缓战略指令的场址。瓦茨巴 2 号机组的建设在 20 世纪 80 年代停工时完成了 80%，发展这种现有资产相对于建设新的基荷能力的替代方案，节省了时间和成本。

11. 在英国萨默塞特郡造一个由两座欧洲压水堆组成的 3200 兆瓦（电）核电厂的欣克利角 C 项目在 2016 年 7 月获得法国电力公司董事会批准，2016 年 9 月，英国政府批准了该项目以及有关投资的一些新条件。该电厂预计寿期为 60 年。法国电力公司预计第一座反应堆将在 2026 年初，即投资决定和政府批准后约 10 年投入运行。

12. 2016 年有三台机组开工建造，它们是：巴基斯坦的卡拉奇 3 号、中国的田湾 6 号和防城港 4 号。

A.1.3. 运行国

13. 在 450 座在运核动力堆中，有 293 座已经服役 30 年或 30 年以上。当反应堆达到其设计寿期终点时，要经过基本结构、系统和部件的安全评审和老化评价，以验证或延长允许其超原定服役期运行的许可证。近年来，许多拥有有效运行许可证的核动力堆，或可能已经获得运行许可证展期的核动力堆被业主/运营者选定提前关闭，在许多情况下，经济因素被列为主要原因。

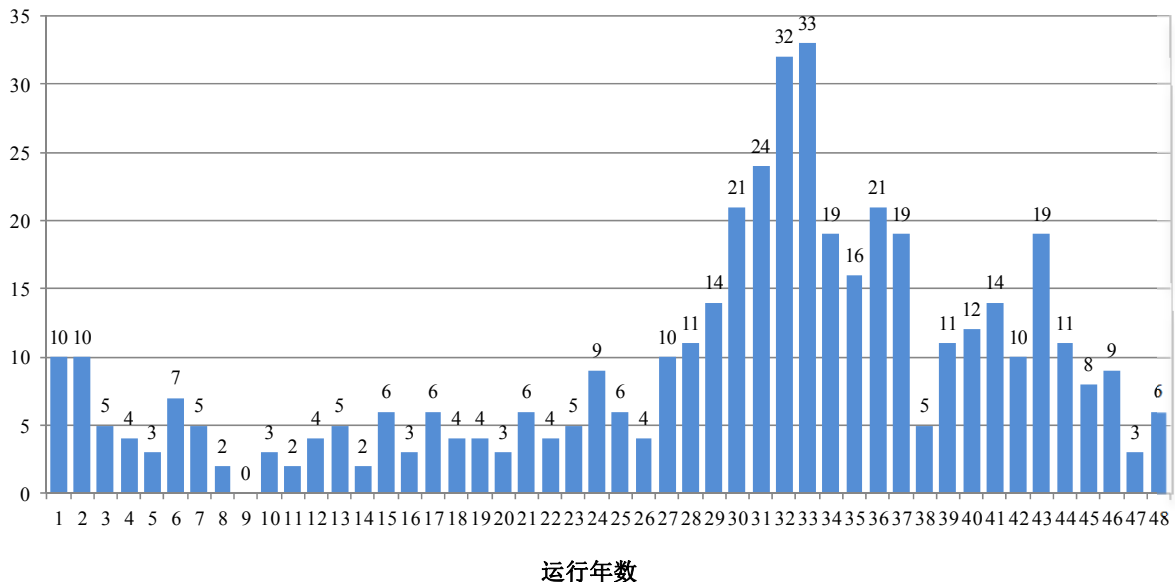


图 A-2. 在运核动力堆截至 2016 年 12 月 31 日按堆龄的分布情况（来源：原子能机构核动力堆信息系统：www.iaea.org/pris）。

14. 美国所有在运核电厂如果有一半运行许可证获得核管会展期，在最初 40 年设计寿期的基础上进行延长，那么到 2040 年，这些电厂的运行寿期可能达到 60 年。一些电力公司正在考虑将其电厂的运行寿期再延长 20 年，这需要为增加的运行时间申请第二次许可证展期。埃克隆公司位于宾夕法尼亚州的桃花谷核电站和道明尼资源公司位于弗吉尼亚州的萨里核电站是美国第一批将寻求第二次许可证展期的核电站，其总运行寿期将达到 80 年。

15. 瑞士的逐步取消核电政策表明，核电厂运行寿期的宪法限制为 45 年，但在 2016 年 11 月 20 日举行的全民公投中遭到拒绝。2015 年，瑞士约 33% 的发电量来自核电。

A.2. 核电增长预测

16. 预计核电在未来几年将继续在全球扩展，尽管在短期内，由于化石燃料价格低和可再生能源的竞争，增长速度将放缓。根据原子能机构 2016 年的预测（图 A-3），以 2015 年底 382.9 吉瓦（电）装机容量为基础，到 2030 年全球核电容量将达到 598 吉瓦（电），在高增长情景下增加 56%。不过，在低增长情景下，到 2030 年世界核电容量将增长 1.9%，达到 390 吉瓦（电）。考虑到更换许多正在退役的核动力堆，在未来 14 年内增加的实际新容量将远远超过全球核电容量的净增量。在低增长情景下，将增加约 150 吉瓦（电）新容量，而在高增长情景下，这一数字将上升到 300 吉瓦（电）。将这些预测扩展到 2050 年，核电装机容量在高增长情景下将增长到 898 吉瓦（电），而在低增长情景下，核电装机容量将与目前水平大致相同。

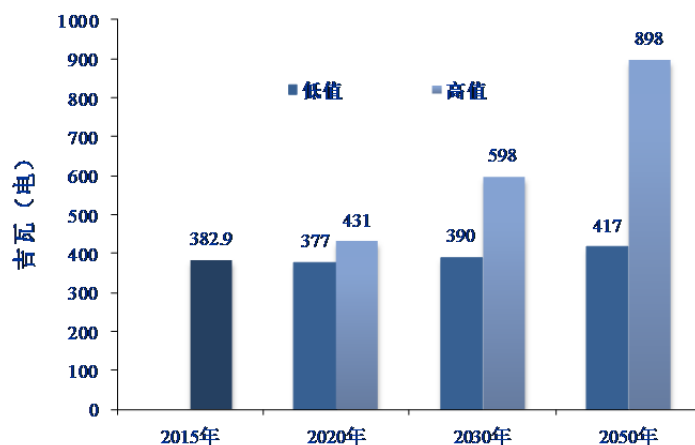


图 A-3. 世界核电容量预测（来源：到 2050 年期间的能源、电力和核电预测，原子能机构《参考数据丛书》第 1 号，2016 年）。

17. 这些预测是由原子能机构每年召集的一个专家小组编制的，是将逐个国家的评估进行合计得出的。专家审查所有运行中的反应堆、可能的许可证展期、计划停堆和预计在未来几十年的合理建设项目。这些预测既不旨在具有预见性，也不旨在反映从最低到最高可行情况未来可能的全部增长情景。尽管这些预测存在相当大的不确定性，但原子能机构、经济合作与发展组织（经合组织）国际能源机构和世界核协会的高增长情景均表明，到 2030 年全球核电容量可能增加到 600—700 吉瓦（电）（图 A-4）。

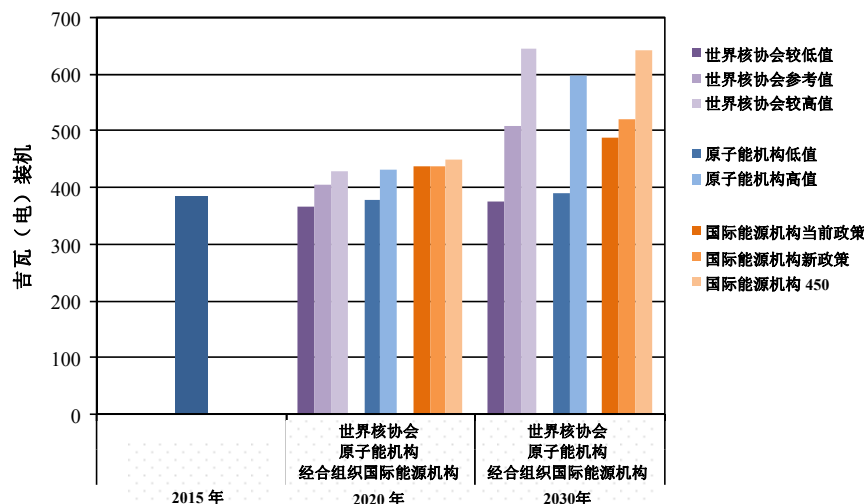


图 A-4. 原子能机构核电容量最新预测与经合组织国际能源机构 2016 年预测情景和世界核协会预测的比较（经合组织国际能源机构的数字基于总容量）。

18. 随着“巴黎协定”于 2016 年 11 月 4 日生效，各缔约方现在需要准备、通报和保持他们打算实现的国家连续自主贡献，以便使全球温升相对于工业化前水平，远低于 2°C ²。“巴黎协定”为逐步增加缓解气候努力，直到实现 2°C 目标，提供了框架。这是必要的，因为目前的国家缓解计划远远达不到满足 2°C 的目标。³

19. 核电因为其已证明的低碳效益、大容量和可调度产出，⁴ 可以大大有助于实现 2°C 目标和实现“联合国可持续发展目标”。⁵ 然而，充分利用核电的潜力需要大规模扩展，这符合上述的高增长预测（到 2050 年达到 898 吉瓦（电））。达到这些容量是具有挑战性的，因为现有电厂需要升级和延寿以允许继续运行，退役核电容量需要替换，以及需要一批新的建设来支持发展中经济体日益增长的能源需求。以这个速度的投资并不是前所未有的，但可能需要政府支持，减少投资者风险的新合同安排，以及将改善诸如核电等低碳替代方案的具有经济性的碳排放价格。

20. 创新在“巴黎协定”中被命名为实现 2°C 目标的关键。革新型核电技术，包括渐进型设计、中小型反应堆或模块式反应堆以及先进燃料循环，可以更有效地促进减少温室气体排放，并将核电的作用扩展到新的应用中。例如，核电可以通过向工业过程提供工艺热来进一步减少碳排放，并且还可以用于为处于干燥气候的城市生产脱盐水。但是，需要更多的研究、发展和示范投资。

² “巴黎协定”可查阅 http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php。

³ 原子能机构《2016 年气候变化与核电》手册可查阅 <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11090/Climate-Change-and-Nuclear-Power-2016>。

⁴ 原子能机构出版物《核电与可持续发展》（2016 年）可查阅 <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11084/Nuclear-Power-and-Sustainable-Development>。

⁵ 有关“联合国可持续发展目标”的更多信息，请参见 <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>。

A.3. 燃料循环

A.3.1. 前端

铀资源和生产

21. 经合组织核能机构和原子能机构于 2016 年 11 月印发了第 26 期双年度出版物《2016 年铀资源、生产和需求》，亦称“红皮书”⁶。该报告的一项重要结论是，目前所确定开采成本低于 130 美元/千克铀的已探明铀资源对于满足前文所述的高增长需求绰绰有余。主要挑战在于将这些资源投入生产所需的投资和专门知识。目前低迷的铀市场让这一状况雪上加霜。预测产能高于现有产能和承诺产能，足以满足高值增长需求情景。而现有产能和承诺产能也足以满足低值增长需求情景。

22. 铀现货价格在 2016 年期间始终徘徊于 42 至 75 美元/千克铀之间，自 2004 年以来从未如此低廉过。价格的走低大大限制了各公司为实施勘探、开展可行性研究和开发新扩展项目募集资金的能力。

23. 虽然还在开展试验和其他研究，但许多铀项目仍处于暂停状态，或者财政影响很小，而一些已经启动或已进入施工后期阶段的项目则进入保养和维护了。2015 年生产了 60 496 吨铀金属，达到过去 10 年的最高产量，超过了 2014 年的 56 041 吨铀和 2013 年生产的 59 331 吨铀。

24. 哈萨克斯坦仍然是世界首屈一指的铀生产国，所产铀几乎全部来自其原地浸出矿，在 2000 年至 2012 年期间实现了产量的快速增长，但最近几年增幅已经放缓，预期 2016 年产量为 24 455 吨铀，而 2017 年产量预计与此相当。

25. 加拿大雪茄湖（世界最高品位铀矿，于 2015 年 5 月投入商业生产）年产能目前为 5000 吨铀/年，预计到 2018 年将增至 6900 吨铀/年。阿萨巴斯卡盆地报告的铀矿勘探结果仍然令人鼓舞，使加拿大保持了世界第二大生产国的地位。

26. 2016 年，纳米比亚新建 Husab 铀矿继续调试，已到了初步投产时刻，产能预计将在 24 个月期间逐步提升，直到 2018 年。满负荷产能每年可达 5770 吨铀，寿期很可能超过 20 年。纳米比亚的罗兴铀矿和兰格·海因里希铀矿在 2016 年继续运营。纳米比亚其他几个铀矿床继续低调开展可行性工作。

27. 澳大利亚四里原地浸出铀矿继续运营，满负荷生产模式下的年产能约为 1000 吨铀/年。兰格项目营运者澳大利亚能源资源公司继续加工其矿石储料来履行销售义务，并推进场址被关闭部分的恢复工作。2016 年产量不到 2500 吨铀，而 1997 年至 2009 年期间的年产量则在 4000 至 6000 吨铀之间。根据当前协议，开采和加工必须在 2020 年 1 月前停止，恢复工作需在之后的五年内完成。奥林匹克坝铜-铀-金-银矿营运者继续开

⁶ 《2016 年铀资源、生产和需求》可查阅 <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>。

展常规作业，同时进一步检验堆浸部分矿石的方案。澳大利亚西部几个铀矿床的研究和审批程序取得了进展，但尚未公布确切的开工日期和投运日期。

28. 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研究和审批工作取得了进一步进展。2016年11月在哥本哈根举办了第八届矿产资源评估讲习班，以评价该国的潜在铀资源。

29. 中国继续进行铀勘探活动，增加了国内外的开发支出。最近报告了推定资源支出的显著增加（超过100%），原因是加强了对国内几个沉积盆地的勘探活动。国外开发支出仍然很大（2014年和2015年超过15亿美元），主要是由于开发了纳米比亚的Husab矿。

30. 过去，由于技术、社会或政治原因，很大部分已探明铀资源并未投入生产。作为加强国际和国内供应安全努力的一部分，阿根廷和美国都有一些现行项目，力图评价未发现的铀资源。原子能机构继续与各主要参与者开展协作，通过培训讲习班和出版物，包括上述哥本哈根讲习班，向其他成员国提供这种评价技术。

转化和浓缩

31. 加拿大、中国、法国、俄罗斯联邦、英国和美国均运行商业规模转化厂。有五个公司开展商业浓缩服务：中国核工业集团公司（中国）、阿海珐集团公司（法国）、国家原子能公司（俄罗斯联邦）、美国能源公司（美国）和铀浓缩公司（欧洲和美国）。阿根廷、巴西、印度、伊朗伊斯兰共和国、日本和巴基斯坦运行着小型转化和浓缩设施。

32. 美国能源部已选定位于英国的设计、工程和项目管理咨询公司阿特金斯，与合资伙伴西屋公司和福陆公司一起运营肯塔基州的能源部帕杜卡气体扩散厂以及俄亥俄州皮克顿的朴茨茅斯气体扩散厂的贫化六氟化铀转化设施。以“中美洲转化服务公司”名称注册的合资企业将运营这两个设施，将能源部贮存的约76.5万吨铀浓缩工艺副产品——贫化六氟化铀存量转化为贫化铀氧化物，以备将来重新使用、储存、贮存或处置。

33. 美国的Centrus能源公司与美国能源部橡树岭国家实验室营运者UT-Battelle签署了一项合同，利用该公司的“美国离心机”技术，进一步开展商业规模的铀浓缩。2016年初，Centrus在其位于俄亥俄州皮克顿的设施成功完成了一个全套120台先进离心机级联的三年论证，证实了这些机器在实际运行工况下的长期性能和可靠性。Centrus利用当前市场不需要产能扩张的这段时间，继续探索技术改进和部署最具成本效益的商业浓缩能力的其他方式。

燃料制造

34. 2016年1月，美国核燃料开发公司Lightbridge获得监管部门对在挪威哈尔登研究堆试验其新开发的金属燃料的最终核准（预计辐照试验于2017年开始）。Lightbridge的先进金属燃料由锆铀合金制成，采用了特殊构造和燃料棒几何形状。据该公司称，

这使其能在高于目前所用铀氧化物燃料的功率密度下运行。后来，Lightbridge 于 2016 年 7 月获得了欧洲专利局对其金属核燃料棒设计的一项关键专利核准。

35. 2016 年 1 月，西屋电气公司宣布，其在英国的斯普林菲尔德核燃料制造厂已达到制造适于西屋公司小型模块堆设计的燃料组件的必要要求。2016 年 2 月，捷克国家电力公司授予西屋公司一项合同，为泰梅林核电厂提供六个导引试验组件，其中包括两个俄罗斯设计的 WWER-1000 机组。

36. 2016 年 3 月，中国核工业集团公司的子公司中核北方核燃料元件有限公司（中核北方）在其包头工厂启动了一条生产线，为中国石岛湾高温气冷堆核电站示范工程——球床模块式高温堆生产燃料元件。包头工厂还为中国 CAP1400 压水堆设计生产原型燃料组件，目前正在验证其性能。2016 年 5 月，中核北方在中国国家核安全局核准其为 400 吨铀/年的生产线供应铀两个月后，完成了第一条 AP1000 燃料生产线。中核北方在开始全面投产之前将制造两套假组件。

37. 2016 年 4 月，西屋电气公司宣布扩建其在瑞典韦斯特罗斯的核燃料厂。这家由日本东芝公司拥有多数股权的美国公司解释说，扩建是为了应对欧洲对 WWER-1000 反应堆核燃料供应多样化日益增长的需求。

38. 2016 年 5 月，环球核能燃料美国有限公司与俄罗斯 TVEL 核燃料公司（国家原子能公司的子公司）商定在美国为西屋压水堆生产 TVS Kvadrat 燃料。环球核能燃料美国有限公司将在联营中管理项目的美国部分，重点是许可证审批和质量保证以及提供工程服务，而 TVEL 将提供设计专门知识和技术支持，并将承担中试生产计划前几批组件的制造。TVEL 公司还于 2016 年 12 月与瑞士万腾福尔电力公司签署了一项合同，成为继阿海珐公司和西屋公司之后第三个为灵哈尔斯核电厂 3 号机组和 4 号机组供应燃料的公司。

39. 2016 年 6 月，巴西核工业公司与阿根廷国营公司——康努阿核燃料公司签署了出口浓缩铀的合同。根据合同，将向阿根廷出口 4 吨二氧化铀粉末，用作 CAREM 模块堆的首个燃料装载。

40. 2016 年 6 月，位于俄罗斯联邦埃列克特罗斯塔利的 TVEL 子公司——机械制造厂完成了英国塞兹韦尔 B 核电厂燃料芯块的验收试验。这是一个单机组压水堆电厂，占英国电力总需求的 3%。该机械制造厂还完成了致密混合铀钚氮化物燃料（将在西伯利亚化学联合集团组装）组成的 ETVS-14 和 ETVS-15 实验燃料组件各部件的验收试验。这些组件将用于别洛雅尔斯克核电厂 BN-600 快堆机组的试运行，并在未来用于铅冷 BREST-OD-300 型反应堆。

41. 2016 年 6 月，还在预定维护停堆期间为俄罗斯巴拉科沃核电厂 3 号机组装载了三个再生混合物燃料组成的实验燃料组件。再生混合物燃料由（乏燃料后处理产生的）铀和钚的未分离混合物生产而得，掺杂有少量浓缩铀。每个实验燃料组件包括六个装有再生混合物燃料的燃料棒以及标准铀燃料棒。再生混合物燃料将在巴拉科沃 3 号机

组停留至少两个燃料循环（约三年），经辐照的组件随后将送交辐照后检验。再生混合物燃料技术将有助于俄罗斯联邦实现闭式核燃料循环，并使其产生的放射性废物实现最小化。

42. 2016年6月，日本福冈高等法院维持佐贺区法院2015年3月的裁决，即九州电力公司玄海核电站3号机组（自2010年起停堆）可以使用混合氧化物燃料，其重启条件正在接受原子力规制委员会的审查。四国电力公司于2016年9月重新启动了伊方核电站3号机组的商业运行，部分采用混合氧化物燃料。

43. 2016年10月，Lightbridge和法国阿雷瓦核电公司签署了一项协定，在美国设立一家50/50合资企业，开发和制造压水堆、沸水堆、中小型反应堆和研究堆等大多数类型轻水堆的燃料组件，并进行商业化。

44. 同样在2016年7月，TVEL的诺沃西比尔斯克化学浓缩厂开始为中国田湾核电厂3号机组生产新一代TVS-2M核燃料。该机组正在建设中，计划于2018年调试。这种燃料的燃耗更深，可在两次换料停堆之间实现更长时间的运行。

45. 2016年8月，乌克兰国家核能发电公司与欧洲铀浓缩公司签署了一项合同。根据合同，欧洲铀浓缩公司将向瑞典韦斯特罗斯的西屋公司制造设施提供浓缩铀，用于为国家核能发电公司生产核燃料。

46. 日本关西电力公司2016年8月30日宣布，阿雷瓦集团公司开始在其位于法国的梅洛克斯混合氧化物燃料制造厂设施为高滨核电站4号机组制造16个混合氧化物燃料组件。

47. 2016年9月，哈萨克斯坦国家铀生产公司——哈萨克斯坦国家原子能公司的子公司乌尔巴冶金厂与中国广核集团（“中广核”）的子公司中广核铀资源公司签署了一项协议，在乌尔巴冶金厂现有设施基础上建设一座年产能达200吨的燃料组件生产厂，为中国的核动力堆供应燃料芯块。

48. 加压重水堆燃料技术领域的一个显著进展是，阿根廷国家原子能委员会最近在高压回路成功完成了1500小时耐久试验，以便验证阿图沙-2核电厂栅格间隔不同的新燃料设计。新设计的主要目的是简化燃料制造工艺并降低其成本。

A.3.2. 供应保证

49. 2010年12月，原子能机构理事会通过了GOV/2010/70号决议，其中核准按照GOV/2010/67号文件规定建立“原子能机构低浓铀银行”。2015年6月，理事会核准了原子能机构与哈萨克斯坦的“原子能机构低浓铀银行东道国协定”；2015年12月，原子能机构和哈萨克斯坦完成了在乌斯特-卡缅诺戈尔斯克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。自那时以来，原子能机构和哈萨克斯坦一直在推进执行该项目。

50. 2016年1月，哈萨克斯坦颁布了《原子能利用法》。在通过这项新法律之后，启动了对监管框架的升级，并已颁布了多项法规，还有一些法规处于最后审查阶段。可行性研究得出结论认为，为原子能机构低浓铀银行建造新的贮存设施，而不是升级现有设施，既更具成本效益，又将为简化而可靠的安保安排以及纳入设计的强化安全功能做好准备。原子能机构工作组于2016年3月访问了乌尔巴冶金厂，评估了新贮存设施设计方面的工作进展，并得出结论认为，设计有充分措施确保核安全和核安保。新贮存设施的建造工作从2016年夏季开始，哈萨克斯坦预计该贮存设施将于2017年下半年进行调试和准备接收低浓铀。原子能机构现已开始了一些活动，准备获取拟贮存在原子能机构低浓铀银行的低浓铀。“容器管理计划”正处于最后确定阶段，将确保容器在原位以及在随后运输过程中的长期安全和安保，无需定期从容器中倒装低浓铀。

51. 《2012年核技术评论》(GC(56)/INF/3号文件)介绍了已经到位的其他供应保证机制。

A.3.3. 后端

乏燃料管理

52. 贮存期限往往会延长到超过贮存设施的原有许可寿命，甚至超过其设计寿命。老化管理的重要性已成为近年来一个优先事项，这是因为制订先进再循环解决方案或建立最终处置设施都需要很长时间。在为相对短期使用而部署干法贮存系统的国家尤其如此。

53. 为了确保持续安全，特别是德国和美国，正在制订关于老化管理和辅助研究与发展项目的导则。例如，美国核管会在编写《贮存老化过程管理报告》，于2016年9月印发，以征求意见，从而帮助独立燃料贮存设施营运者更新许可证。为了确定拟提供给各成员国的导则的技术基础和方法，原子能机构还于2016年10月启动了一个关于乏燃料干法贮存系统老化管理计划的协调研究项目。

54. 截至2016年底，贮存乏燃料数量估计达到了27.3万吨重金属，并且正以每年约7000吨重金属的速度积累。⁷ 2016年期间，还有五个离堆乏燃料贮存设施投入运行。所有五个设施都采用干法贮存及混凝土屏蔽容器技术。这些设施分别位于伊格纳林纳(立陶宛)、帕洛弗迪(墨西哥)、塞兹韦尔(英国)、瓦茨巴(美国)和萨默(美国)。在27个国家运行的151个离堆贮存设施的全球分布情况见图A-5。美国现在拥有70个干法贮存设施，容纳了其乏燃料总存量的大约36%，而且每年还在继续增加新的干法贮存设施。当前的预测表明，到2020年美国将有74个独立乏燃料干法贮存设施。

⁷ 全世界的核电厂每年卸出约1万吨重金属乏燃料。

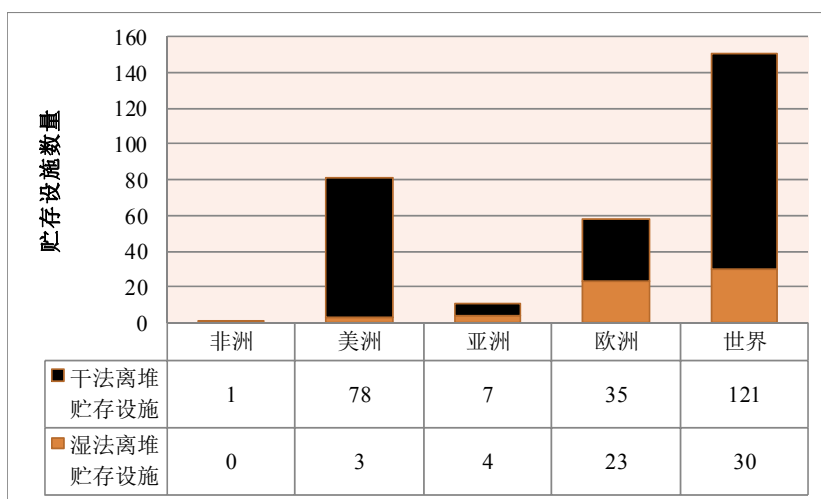


图 A-5. 离堆乏燃料贮存设施的全球分布。

55. 由于种种原因，在日本、西班牙和乌克兰落实新离堆贮存设施的工作出现了延误。其中一个项目是日本的陆奥离堆贮存设施，现在预计将于 2019 年投入运行。

56. 2016 年，英国威尔法核电厂在 2015 年 12 月 30 日关闭最后一座在运反应堆后，开始了卸料准备工作。威尔法核电厂从 20 世纪 70 年代起就拥有最早的动力堆燃料在运乏燃料干法贮存库。其目标是在 2018 年底对反应堆堆芯和相关干法贮存库进行卸料。英国商业、能源和工业战略部启动了一项新的英国核研究和创新计划。该计划从 2016 年至 2018 年的初期阶段获资 2000 万英镑（2500 万美元），涵盖五个主要专题：先进燃料、材料和制造、反应堆设计、先进再循环和战略工具包。这代表了政府对将英国能源创新支出翻番的更广泛承诺，预计到 2021 年每年支出将超过 4000 万英镑（5000 万美元）。

57. 俄罗斯联邦制订了“2016—2018 年和直至 2020 年”乏核燃料管理新计划，以取代已经过期的前一计划。计划包括将乏核燃料从俄罗斯各核电厂运往马雅克后处理厂或热列兹诺戈尔斯克采矿和化学联合体的集中暂时贮存设施，以便随后进行后处理。采矿和化学联合体场址有若干水池，今后可用于贮存来自新沃罗涅日加里宁巴拉科沃 WWER-1000 反应堆和罗斯托夫核电站及别洛雅尔斯克 BN-600 快堆的乏核燃料。从 2012 年开始，采矿和化学联合体场址还有一个集中干法临时贮存设施，可容纳来自列宁格勒、库尔斯克和斯摩棱斯克核电厂 RBMK-1000 反应堆的 8129 吨俄罗斯乏核燃料。马雅克后处理厂的后处理生产率提高了 35%。2016 年，该厂首次接收了来自列宁格勒核电厂 RBMK-1000 反应堆的乏核燃料，还开始对来自苏联和俄罗斯破冰船而在贮存设施积累了几十年的乏铀-钍燃料进行后处理。

58. 立陶宛在伊格纳林纳核电厂关闭之后建造了一个临时乏燃料贮存设施，用于贮存从该厂 1 号和 2 号机组卸出的乏核燃料。贮存容量相当于大约 190 个钢筋混凝土屏蔽容器，贮存空间约 1.7 万个燃料组件，贮存时间将达 50 年。该设施于 2016 年 6 月完成了冷试验，目前处于后期调试阶段。

59. 切尔诺贝利核电站禁区的财政困难和土地分配问题是造成乌克兰中央乏燃料贮存设施建造项目推迟到 2018 年底的主要因素。

60. 由于公众接受问题，中国江苏省连云港新核燃料后处理厂选址的初步工作已经暂停。然而，建设计划仍然存在，正在考虑从中国其他五个省份为该项目选址。

A.3.4. 退役、环境治理和放射性废物管理

核设施退役

61. 全世界有 158 座动力堆已关闭或正在退役，其中包括已完全退役的 17 座。超过 150 个燃料循环设施已永久关闭或正在退役，其中包括已完全退役的 127 个。此外，还有 180 多座研究堆已经关闭或正在退役。300 多座研究堆和临界装置已完全退役。

62. 2016 年期间，在英国邓杰内斯角 A 核电站部署了一些创新办法，例如利用潜水员清理原来的冷却水池。进一步的研发工作还在提供持续支持，主要在比利时、法国、日本、俄罗斯联邦、西班牙、英国和美国等有长期核电计划的国家。最近的例子是英国的“有挑战性环境中的远程应用”举措，于 2016 年 5 月正式启动。

63. 事故后的核电厂退役是好几个国家当下面临的特殊难题。日本福岛第一核电站的退役准备工作取得了显著进展（详情见下文方框）。事故后活动的另一个例子是经过几年建造工作并在国际捐助者支持下完成了乌克兰切尔诺贝利核电站 4 号机组的新安全封隔设施。



图 A-6. 切尔诺贝利核电站 4 号机组的新安全封隔设施（左，建造场址视图；右，3 号机组视图）。该结构高 108 米，长 162 米，宽 257 米，重约 3.6 万吨。（图片：切尔诺贝利核电站）

64. 保加利亚、立陶宛和斯洛伐克也在继续实施退役项目，在设计寿期终点前关闭了核电厂，并通过欧洲复兴开发银行获得财政支助。

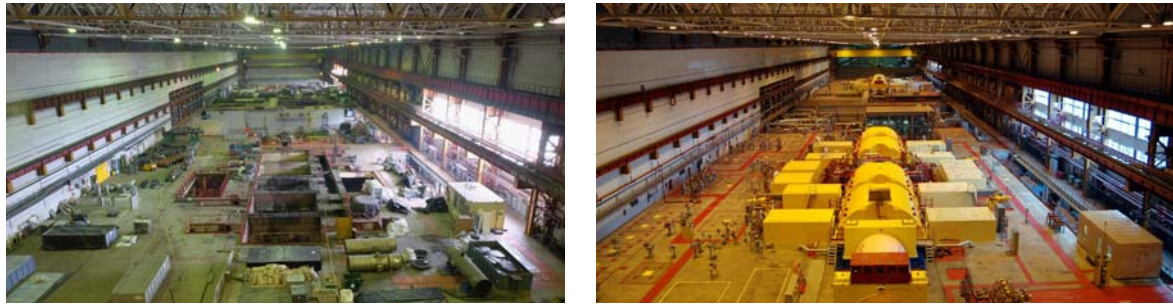


图 A-7. 立陶宛伊格纳林纳核电厂 1 号机组（左）和 2 号机组（右）汽轮机大厅的拆除活动（图片：伊格纳林纳核电厂）。

福岛第一核电站退役进展情况

福岛第一核电站六座反应堆中有四座出现了堆芯损坏和/或氢爆炸。这些反应堆的退役工作是史无前例的项目，正在日本当局通过的“中长期路线图”⁸和“技术战略计划”⁹框架内进行。在 2016 年 9 月原子能机构大会第六十届常会的一次会外活动中，日本代表突出强调了取得的进展，并提出了在国际社会合作下应对诸如燃料碎片回取等挑战的计划。

一个主要问题是污染水，就是流入反应堆厂房并与用于冷却燃料碎片的冷却剂混合的地下水。用核素去除系统处理污染水。为了让水远离污染源，工作之一就是为陆地一侧防渗墙安装了冷冻管以阻挡地下水，并从 2016 年 3 月开始部分冻结墙壁。为了防止污染水泄漏，2015 年 10 月关闭了海边防渗墙。

2014 年完全移除了贮存在 4 号机组水池中的 1535 个燃料组件。在为从 1 号机组（392 个燃料组件）、2 号机组（615 个燃料组件）和 3 号机组（566 个燃料组件）移除燃料组件做准备时，启动了对作业地板的去污和屏蔽工作，以便更多地减少辐射剂量。

采用了 μ 介子断层照相和机器人技术来检查反应堆机组一次安全壳的内部条件。1 号机组一次安全壳内部检查机器人确认，一回路再循环泵等设备无严重损坏，干井底部大面积覆盖着沉积物。对 2 号机组的 μ 介子断层照相显示，反应堆压力容器底部存在高密度物质阴影，似乎是燃料碎片。

⁸ 受污染水和退役问题省厅间议会 2015 年 6 月 12 日印发的《东京电力公司福岛第一核电站退役中长期路线图》可查阅 http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20150725_01b.pdf。

⁹ 原子力损害赔偿和退役支援机构 2016 年 7 月 13 日印发的《东京电力公司福岛第一核电站退役 2016 年技术战略计划》可查阅 http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20160926_SP2016esum.pdf。

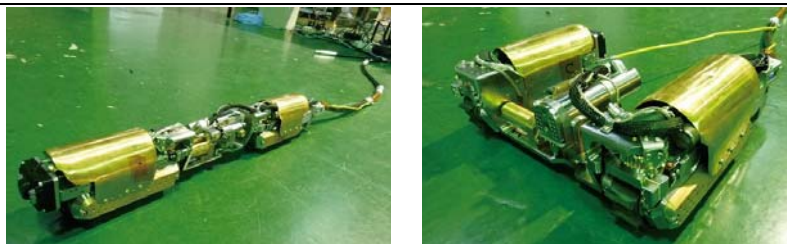


图 A-8. 用于检查 1 号机组一次安全壳内部的变形机器人（图片：日本国际核退役研究所）。

为了改善现场环境，正紧锣密鼓地开展去污工作。由于场区边界内的额外有效剂量小于每年 1 毫希沃特，因此，在场区大约 90% 的地方不再需要佩戴全面罩或穿防护服。

原子力损害赔偿和退役支援机构设立了退役研发合作理事会，通过促进与相关机构的合作来加强研发。日本原子力开发机构在日本建立了一个新的全球研发组织，称为退役国际联合研究中心。此外，日本原子力开发机构开始运作栎叶子远程技术开发中心，将开发和验证机器人等远程操作设备和相关过程。日本原子力开发机构还启动了大熊分析和研究中心的建造工作。

弃用密封放射源的管理

65. 进一步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。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。

66. 2016 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。从黎巴嫩和突尼斯（各有一个源）成功返还了法国制造的一类弃用密封放射源，还从喀麦隆返还了两个源。从乌干达的一个远距放射治疗头移除了一个一类弃用密封放射源，并转移到了安全可靠的贮存场所。在约旦，从一家医院移除了两个一类弃用密封放射源，并放到了安全可靠的贮存场所。在阿尔巴尼亚、布基纳法索、黎巴嫩和前南斯拉夫马其顿共和国等若干成员国启动了一类和二类源移除工作，这些工作有望于 2017 年完成。

67. 将移动热室纳入各种钻孔处置设计的工作取得了重要进展，这将最大程度地减少源操作，避免不必要的运输。另外还设计了一个移动工具包，以方便三类至五类弃用密封放射源的整备作业，并支持钻孔处置的准备工作。

68. 在印度尼西亚、马来西亚、尼泊尔、菲律宾、泰国和越南完成了有关弃用密封放射源整备的作业，并对这些国家的当地人员进行了适当培训。

69. 原子能机构将访问《国际密封放射源和装置目录》的授权范围扩大到了成员国的许多用户，由此方便识别在野外发现的弃用密封放射源。2016 年启动了源和装置的更多详细资料的编写工作，目的是进一步提高该目录的实用性。

70. 2016 年 10 月启动了从巴西移除高放弃用密封放射源的作业，预计于 2017 年 2 月完成。根据巴西、加拿大和美国之间的三边合作协定，将处理 80 多个原产于加拿大和美国的一类 and 二类弃用密封放射源，并运到海外。前一类将被送往位于德国莱比锡的 γ -服务再循环公司进行再循环，而后一类将返还到美国。这一作业将由南非核能公司训练有素的团队实施。

放射性废物预处理

71. 阿根廷已在埃塞萨原子中心开工建立一个设施，对来自国家原子能委员会（主要来自研究堆运行、放射性同位素生产和研究活动）和其他外部生成物（用于燃料制造及医疗、工业和研究应用）的低放废物进行水泥固化和压实。

72. 芬兰辐射和核安全管理局向洛维萨核电厂的富腾公司固化设施授予了全面运行许可证。该设施将处理电厂目前和未来运行产生的低放和中放废液（包括离子交换树脂和淤泥），是综合废物管理规划如何实现在单个设施有效管理过去遗留废物、当前运行废物和未来废物存量的良好例子。

73. 废物最少化是福岛第一核电站的重要目标，那里每天都会产生大量固体废物物品，如防护服（手套、防护服）和运行废物（纸张、塑料、抹布、木材）。因此，东京电力公司最近调试了一个杂项固体废物焚烧设施，包括两条生产线，每条的处理能力均为每小时 300 千克废物。所产生的灰是原始体积的一小部分，将现场贮存在桶中，等待处置。

74. 澳大利亚设计完成了一个全规模综合厂，采用“合成岩石”技术处理来自其钼-99 生产设施的废物。该厂将于 2017 年开工建造。合成岩石工艺将液态放射性废物固定成持久不变的“合成岩石”矩阵，以供处置。

75. 英国塞拉菲尔德厂调试了一个容器内玻璃固化厂。玻璃固化是一种定型技术，将液体和污泥固化成适合处置的玻璃废物体。GeoMelt 容器内玻璃固化系统专为处理较小体积的问题废物流而设计，这些废物流目前尚无处置途径。

76. 塞拉菲尔德公司（英国）2016 年 3 月宣布，已将历史性核燃料的整批库存从其乏燃料贮存池转移到了一个现代化贮存建筑。此举将已有 68 年历史的乏燃料池的放射性水平降低了 70%，大大减小了人和环境的风险。

放射性废物处置

77. 世界各地都在运行处置设施，用于处理除（被宣布为废物的）高放废物和（或）乏燃料之外的各类放射性废物。这些处置设施涵盖了极低放废物的深沟处置（如法国、西班牙、瑞典、美国），或干旱地区低放废物的深沟处置（如南非、美国）；处置

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、斯洛伐克、西班牙、英国）；以及位于各种深部地质构造处置中低放废物的专设设施（如捷克共和国、芬兰、德国、匈牙利、大韩民国、挪威、美国）。

78. 其他中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（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）。

79. 天然存在的放射性物质的废物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。

80. 在澳大利亚，南澳大利亚政府收到了核燃料循环皇家委员会的报告，并宣布落实所载十二条建议中的九条。这包括继续调查评价在南澳大利亚建立国际乏核燃料和中放废物贮存和处置设施的机会。

81. 保加利亚国家放射性废物处理公司获得了许可证，开始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。

82. 加拿大联邦政府预计在 2017 年末决定对安大略省金卡丁布鲁斯场址上安大略电力公司建议的中低放废物深部地质处置库进行环境评定。还启动了对加拿大核实验室关于在乔克河场址建立近地表低放废物和其他适当废物处置设施的建议的环境评定。

83. 中国就在北山地区的结晶质地层建造一个地下研究设施做出决定后，深部地质处置计划的制订随之推进。已在那里开展了场址调查以及在沉积物宿主地层选址的反复磋商。

84. 爱沙尼亚政府于 2016 年 3 月决定，该国未来的处置设施将与当前的集中贮存设施一起位于帕第斯基潜艇中心。

85. 芬兰于 2016 年 12 月开始了奥尔基洛托世界上首个乏核燃料地质处置设施的建造工作。

86. 应法国核安全管理局的请求，原子能机构于 2016 年 11 月对 Cigéo 高放废物地质处置项目“安全方案文件”进行了同行评审。

87. 德国政府收到了其国家高放废物贮存委员会的报告，其中提出了深部地质处置库的全国选址程序建议。所列详细建议涉及应考虑什么样的安全相关排除标准和比较评估标准，以及应该制订怎样的利益相关方参与程序来获得公众对选址决定的广泛接受。政府还收到了关于后端国家责任（包括对放射性废物处置的责任）的费用估算和供资的报告。

88. 在伊朗伊斯兰共和国，塔尔梅西近地表处置设施的建造工作继续进行，在开始处置作业之前，接受了首批废物包装容器，用于现场贮存。

89. 大韩民国根据其乏核燃料管理公众参与委员会的建议，制订了关于高放废物管理的国家政策，提出了制订地质处置计划的时间表，包括地下研究实验室的选址以及地质处置设施的建造和运行。月城中低放废物处置设施的第二阶段计划建造近地表处置室，目前正在进行许可证评审。

90. 俄罗斯联邦正在推进其战略，建立全国近地表处置设施网络。放射性废物管理国家营运者获得了在乌拉尔地区现有核场址进行近地表处置的两个许可证，同时正进一步推进另外两个现有核场址的处置许可证申请。地下研究设施许可证申请也正在评估中，这是克拉斯诺亚尔斯克附近已规划的未来深部地质处置设施的第一部分。

91. 2016年6月，瑞典辐射安全管理局核准了乏燃料深部地质处置库的许可证申请，预计2017年将举行另一次主要听证会。名为“短寿命放射性废物最终处置库”的短寿命中低放废物处置库扩建的许可证审批过程仍在进行中。

92. 瑞士推进了深部地质处置库选址进程的第二阶段。这涉及选址地区利益相关者对“地区会议”的积极参与、三维地震场址表征活动的完成以及钻孔场址表征计划钻孔许可证的获得。比较评估基于国家安全机构规定的13项标准和49项指标。

93. 2016年7月，英国坎布里亚郡规划部门核准在英国低放废物处置库建造两个新的处置室，并且可扩展到第三个处置室。这将确保靠近德里格村的该设施到2050年前的未来运行。该设施预计于2017年开工建设。

A.4. 安全

94. 全世界核电厂在加强和改进安全方面继续取得进展。这种改进包括确定和适用从福岛第一核电站事故汲取的教训、提高纵深防御的有效性、加强应急准备和响应能力、维持和加强能力建设，以及保护人类和环境免受电离辐射。

95. 原子能机构确定了加强全球核安全框架的核安全优先事项。这些核安全优先事项涵盖原子能机构在核安全、辐射安全、运输安全和废物安全方面的全部活动。原子能机构在原子能机构《安全标准丛书》中出版了经修订的“安全要求”，考虑了从福岛第一核电站事故汲取的教训。这些出版物包括五项适用于核电厂的“安全要求”，通过“修订案”的形式进行了重点突出的修订。此外，对与安全领导和管理以及研究堆安全有关的其他两项“安全要求”也进行了全面修订。继续审查和修订相关的“安全导则”¹⁰。

96. 对核电厂国际运行经验报告系统的数据分析表明，目前存在一些挑战，包括电厂设计或运行实践面对某些外部危险情况时以及在实施电厂改造时的脆弱性。数据还表明，承包商监督仍然是一个挑战，因老化引起的部件降质所涉事件数量正在增加。

¹⁰ 详情见原子能机构《2017年核安全评论》(GOV/2017/3号文件)。

97. 世界上越来越多的核动力堆都在执行长期运行和老化管理计划。截至 2016 年底，全球 450 座在运核动力堆中，有 46% 已经运行了 30 至 40 年，另有 15% 已经运行了 40 多年。

98. 国际核安全组（核安全组）指出，正在开发现代反应堆设计，以将内部事件的风险降低到非常低的水平。主要风险来源很可能在于外部事件，这在未来几年需要持续关注。参加原子能机构技术会议的专家继续表示有兴趣讨论福岛第一核电站事故的教训，涉及：(a) 与极端危害评价相关的不确定性；(b) 利用历史和史前数据评价外部危害的必要性；(c) 对外部危害叠加的考虑；(d) 对外部危害影响多机组场址的考虑；及 (e) 分析外部事件时概率方法的应用。

99. 核电厂的运行安全性仍然很高，原子能机构和世界核电营运者联合会收集的安全指标已表明了这一点。图 A-9 显示了每运行 7000 小时（约一年）的非计划手动和自动紧急停堆或关闭次数。紧急停堆只是几种可能的安全实绩指标之一，但该方法通常用来表示成功地通过减少需反应堆紧急停堆的不良和非计划热工水力和反应性瞬变次数提高了电厂的安全性。

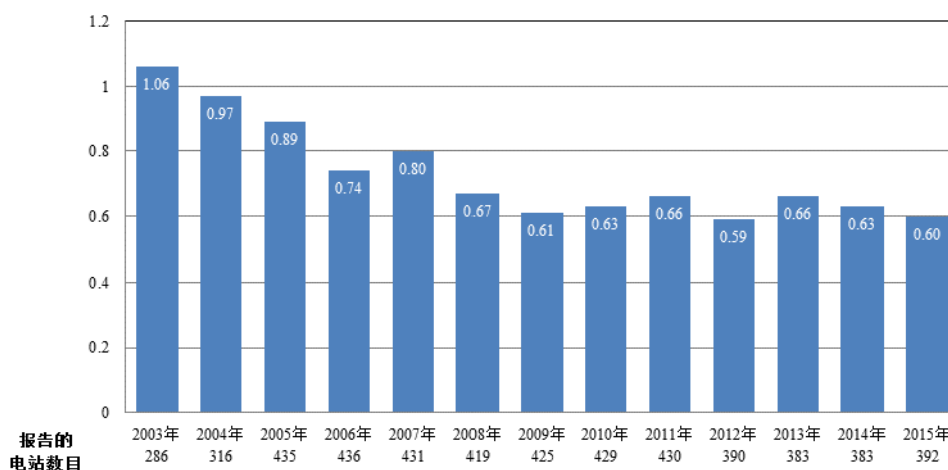


图 A-9. 平均紧急停堆率：机组每运行 7000 小时发生的自动和手动紧急停堆次数（数据来源：原子能机构动力堆信息系统：www.iaea.org/pris）。

100. 若干成员国面临着辐射医疗应用的集体剂量超过天然本底辐射剂量和其他人为源剂量的情况。随着辐射技术和平利用的增加，处于这种情况的成员国数目预计还会增多。很大比例（一些地区为 20—50%）的个人医疗照射都可以通过更适当地选择医疗程序和有效辐射防护措施避免。诊断成像中对患者辐射防护的现有最优化方法在全球仅得到部分采用。为了更广泛地适当采用这些方法来提高安全性和质量，还需要不断努力。

101. 复杂的放射治疗技术和程序越来越多地用于以前未采用这种技术的地区，因此，需要制订适当的安全措施。虽然专家们广泛认可放射治疗是一种有效的治疗方式，但也认识到还需进一步加强安全措施。

B. 原子数据和核数据

102. 由经合组织核能机构协调的国际合作编评数据库组织已推动在与核技术特别相关的核素即氧、铁、铀和钚同位素的中子截面编评方面取得进展。国际合作编评数据库组织协调全世界核科学领域专家之间努力的收益已导致改进了大型核临界和中子输运模拟的精确度。国际合作编评数据库组织的编评被认为是列入世界核数据库的候选，这些核数据库如核数据编评文件数据库（ENDF/B-VIII）（美国）、日本中子数据编评数据库、裂变和聚变联合编评数据库（经合组织核能机构）、中国核数据编评数据库和基于 TALYS 的核数据编评数据库（欧洲委员会/原子能机构）等。

103. 核结构和核衰变数据评价者国际网是旨在收集和编评核素基本结构和衰变性质的全球性协作倡议。在核结构和核衰变数据评价者国际网与原子能机构核素实时图网站和原子能机构 2013 年启用的同位素浏览器应用软件等现代通讯技术结合后，核科学家利用该网络数据库的情况近来有了很大的增长。供安卓和 iOS 操作系统免费使用的该应用软件使得能够在移动装置上检索核素资料，已被下载约四万次。

104. 实验核反应数据（EXFOR）数据库目前载有从 1935 年至今的超过 2.2 万个实验核反应数据集。这一独特的数据库是为所有核技术（主要为核电厂分析、燃料循环问题、革新反应堆设计、聚变和医用同位素生产）所利用的核数据库的基础。已建立新的协作伙伴关系，特别是在中国和印度，以使该数据库保持最新。

105. 目前正在通过革新核数据方案在完全不同量级上将物理现象与辐射损伤分析建立联系。借助当前的计算机能力，现在有可能在更好的科学基础上估计损伤响应函数，包括不确定性的定量表达，这些函数如 NRT-¹¹ 和 arc-（非热复合纠正）原子离位次数（dpa）和原子复位次数标准，以及比释动能（物质中释放的动能）和气体产生等。这些发展将对裂变和聚变反应堆以及加速器的屏蔽有影响。

106. 利用加速器的医用同位素生产领域以及用于确定这类医用同位素最佳生产路线的带电粒子诱发反应核数据库相关应用方面的活动和出版物有显著增加。

107. 大型核装置的基本核和原子数据不确定性传播目前已从传统临界领域扩展到安全和可靠核运行的其他方面。目前考虑不确定性估计的引人注目的研究领域包括裂变和聚变反应堆的辐射损伤评价、利用原子数据和分子数据进行聚变等离子体中氢和氦的状态分辨模拟以及获得面向钨等离子体材料中腐蚀和氙滞留的数据。

108. 2016 年 9 月，欧洲委员会联合研究中心、经合组织核能机构和原子能机构在比利时布鲁日联合举办了核数据用于科学技术国际会议，有约 450 名与会者出席。会议介绍了核数据技术方面的最新发展，如位于比利时赫尔的联合研究中心参考材料与测量研究所的实验可能性和利用 TALYS 程序生成核数据的更加系统性方案。

¹¹ NRT-dpa 标准系对材料中损伤的一种测量，由 Norgett、Robinson 和 Torrens 在 1975 年提出。

109. 已为氟的 α 诱发反应开发了改进的核数据，这对保障分析很有意义。

110. 中国在熔盐堆核数据编评方面正在投入更大的努力。由位于北京的中国核数据中心协调的各种实验和模拟活动目前是针对具有安全和经济影响的熔盐堆相关数据。

111. 欧洲委员会正在通过“解决核数据挑战”（CHANDA）项目大范围地投入进行核数据开发，来自几乎所有欧盟国家的实验室、大学和研究实验室正在核数据开发方面开展协作。重点是放射性废物最小化和快中子系统。新核数据库的开发将导致对先进堆系统进行高质量的计算分析。

C. 加速器和研究堆的应用

C.1. 加速器

112. 开发了粒子加速器以进一步认识科学家对原子核的内部结构和性质以及关于辐射与物质相互作用的物理定律进行研究所提出的基本问题。目前，全世界有数万台加速器应用于工业、医学、环境及包括亚原子物理学和天体物理学在内的基础研究，使数百万人在日常生活中受益。为了响应对加速器在前沿科学研究方面日益增长的需求以及保持和扩大具有强大社会效益的各种广泛应用，进一步改进和促进加速器技术至关重要。就加速粒子束的能量、类型和大小而言，技术革新正在推进加速器达到其极限。进一步的挑战是减小加速器的尺寸及降低其工业和医学应用的成本。

C.1.1. 为原位辐射损伤调查开发的新型泵探针技术

113. 实验和模拟增加了我们对辐射效应的了解。一个令人激动的发展是泵探针技术的迅速兴起，在该技术中，（诸如劳伦斯伯克利国家实验室的 NDCX-II 等诱发加速器或激光等离子体加速器发出的）短而强的离子脉冲能够诱发材料中结构力学方面发生变化，随后能够用快速结构探针（如超高速电子衍射或强 X-射线脉冲）原位追踪这种变化。这些新技术使得能够对离子辐射效应进行原位调查，由此促进了我们的基本了解，并能够加速开发在高辐射环境中具有增强性能和辐射硬度的新型材料。



图 C-1. 美国伯克利劳伦斯伯克利国家实验室的 NDCX-II 加速器¹²使得能够进行材料中结构力学研究。图片显示前景处装有靶终端站的 10 米长的加速器（图片：伯克利实验室）。

¹² 进一步的详情请见 P.A. Seidl 等《核仪器与方法》A800（2015 年），第 98 页至第 103 页。

C.1.2. 使用聚焦离子束的新生物兼容辐射剂量计

114. 用人造金刚石制造的辐射剂量计的特征较更加传统的装置有一些优势，包括辐射硬度和生物相容性，特别是在质子治疗中使用尤其如此。正在利用具有 5—250 兆电子伏的一系列广泛质子能量的聚焦离子束评价单晶金刚石装置作为精确剂量计的适宜性。扫描核微探针系统提供的高能束是对应于临床实践的，而低能束则使得能够测量该装置的细节性响应，以便能够评价新探测器的设计。利用 5.5 兆电子伏微光束的离子束诱发电荷技术生成的图像使得能够测量该装置的细节性响应以及电荷收集效率，该效率能够接近 100%。

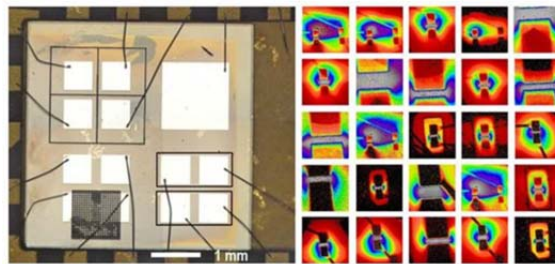


图 C-2. 图像显示人造设备级金刚石制造的原型剂量计的阵列和利用 5.5 兆电子伏氦正离子辐射的离子束诱发电荷技术测量的不同设计的辐射响应合成图（图片：墨尔本大学 D. Jamieson 教授、伍伦贡大学 J. Davis 博士及澳大利亚核科学和技术组织 D. Prokopovich 博士）。

C.1.3. 基于加速器的中子散射

115. 过去 10 年中，在质子加速器发展的带动下，诸如美国散裂中子源和即将建成的瑞士欧洲散裂源等散裂源中子的平均时间通量已超过最高通量束反应堆的平均时间通量。这些源前所未有的亮度加上中子的穿透性及由氢和磁矩所致中子强散射使得有望在能源和磁性材料、生命科学、考古学和地质学以及工程材料方面取得进展。

116. 对于这些应用，中子必须是慢化的，而且传统上这一直在大体积低温慢化剂中完成，只有一小部分中子从中被发射到实验设施。因此，正在将焦点放在新一代慢化剂材料和设计方面。通过选定氢的自旋异构体之一的仲氢，能够建成棒状或饼状冷慢化剂。这些设计减少中子吸收，而且能够更高效地在源周围放置光谱仪。类似地，固态甲烷是一种非常高效的冷慢化剂，但容易受到辐射损伤。因此，正在研究新的固态慢化剂材料和设计。需要准确了解候选材料的中子截面，并正在包括阿根廷、日本、南非和美国的研究加速器在内的许多研究加速器上进行必要的测量。如在俄罗斯联邦，正在开发能够将新材料的芯块吹入容器、后期移除和再生的原型设计，以此作为处理辐射损伤的另一种途径。



图 C-3. 截至 2016 年 10 月的瑞典隆德欧洲散裂源场址。由一台提供 5 兆瓦平均束流功率的 2 吉电子伏特脉冲式质子直线加速器供料，这台世界上最大功率的中子源将于 2019 年启动（来源：https://dam.esss.lu.se/asset-bank/images/assets/33/40_2S5D41851.jpg）。

C.2. 研究堆

117. 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，研究堆具有更多的设计多样性，而且还具有不同的运行模式，可以是稳态模式或脉冲模式。

118. 根据原子能机构的研究堆数据库，在 70 个国家已建成 774 座研究堆，截至 2016 年 12 月 31 日，其中 249 座正在 56 个国家运行。俄罗斯联邦拥有数量最多的运行或处于临时停堆的研究堆（55 座），其次是美国（42 座）、中国（17 座）和日本（14 座）。许多发展中国家也有在运研究堆，包括非洲的 10 座设施。在世界范围内，64 座研究堆以超过 5 兆瓦的功率水平运行，从而为各种产品和服务提供高中子通量。

表 C-1. 世界各地研究堆的常见应用¹³

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	165	51
中子活化分析	118	51
放射性同位素生产	87	43
中子照相	69	37
材料/燃料辐照	68	27
中子散射	45	30
地质年代学	27	23
嬗变（硅掺杂）	24	16
嬗变（半宝石）	17	10
中子治疗，主要是研发	16	11
其他 ^c	120	36

¹³ 基于原子能机构研究堆数据库的数据：<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>。

^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 截至 2016 年 12 月 31 日，所涉的 249 座研究堆中，有 230 座在运，19 座临时停堆。

^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。

119. 许多在运研究堆的利用因子仍相对很低，并且其中有一半已有 40 多年堆龄。它们大多数需要在战略规划、老化管理、现代化和整修领域予以持续关注。加强利用和创造更多收入的努力继续加大。在过去的三年中，41 座研究堆设施的营运组织编写了战略计划并提交原子能机构审查¹⁴。

120. 在其他领域，国际协作继续促进和加强研究堆用于教育和培训目的。一个例子是因特网反应堆实验室项目，该项目于 2015 年启动，东道反应堆位于拉美和加勒比及欧洲。该项目寻求通过因特网将大学和研究机构与专用于教育和培训的在运研究堆相连。2016 年继续实施因特网反应堆实验室项目，在拉美和加勒比进行六次直播（阿根廷 CNEA RA-6 反应堆作为东道设施，受援组织在哥伦比亚、古巴和厄瓜多尔）以及在欧洲和非洲进行五次直播（法国可替代能源和原子能委员会 ISIS 反应堆作为东道设施，受援组织在白俄罗斯、立陶宛、突尼斯和坦桑尼亚联合共和国）。另一个例子是由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心机制，该机制由原子能机构协调推动，目的是促进成员国之间合作开展核能力建设和协作研发活动。继 2015 年指定首个由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心（即由萨克莱和卡达拉奇研究中心代表的法国可替代能源和原子能委员会）之后，俄罗斯联邦季米特洛夫核反应堆研究所在 2016 年被指定为由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心，以及比利时核研究中心（比利时莫尔）成为这种指定的一个候选单位。



图 C-4. 左：在原子能机构 RAF/1/005 号地区技术合作项目协调会议期间，从东道反应堆即法国萨克莱法国可替代能源和原子能委员会 ISIS 反应堆向坦桑尼亚原子能委员会直播的示范实验（图片：原子能机构）。右：从阿根廷巴里洛切东道反应堆 CNEA RA-6 进行的实验室直播（图片：国家原子能委员会）。

¹⁴ 原子能机构修订了 2001 年题为《研究堆战略规划：反应堆管理者导则》（原子能机构《技术文件》第 1212 号）的导则文件，纳入了新研究堆或主要整修项目的有关方面并通过许多实例共享了运行良好设施的经验。该修订本将于 2017 年作为原子能机构《核能丛书》第 NG-T-3.16 号出版。

121. 若干国家正在建造新的研究堆，作为促进核科学技术基础设施和计划（包括核电）发展的国家关键设施。新的研究堆建设正在阿根廷、巴西、法国、印度、大韩民国、俄罗斯联邦和沙特阿拉伯进行。包括白俄罗斯、比利时、多民族玻利维亚国、荷兰、美国和越南在内的一些成员国拥有建设新研究堆的正式计划。阿塞拜疆、孟加拉国、埃塞俄比亚、加纳、肯尼亚、科威特、黎巴嫩、马来西亚、蒙古、缅甸、尼日利亚、菲律宾、塞内加尔、南非、苏丹、塔吉克斯坦、泰国、突尼斯和坦桑尼亚联合共和国等其他成员国正在考虑建设这种设施。¹⁵ 2016年，约旦研究与培训反应堆这座位于约旦科学技术大学校园的5兆瓦（热）多用途反应堆的调试工作已成功完成。

122. 由原子能机构协调推动的¹⁶研究堆地区网络和联盟帮助促进国际合作，并使研究堆能够扩大其利益相关者和用户界。2016年，澳大利亚核科学和技术组织和荷兰代夫特反应堆研究所这两个研究堆组织分别被指定为原子能机构在材料研究多重分析技术、环境研究和工业应用以及基于中子活化和中子束的研究堆方法学领域的协作中心。

123. 到2016年底，有97座研究堆已经转换为使用低浓铀燃料或确认已永久关闭，其中包括一座使用高浓铀的钼-99生产设施。2016年的主要成就是3月达到临界的中国原型微型中子源反应堆转换为使用低浓铀燃料、4月达到临界的哈萨克斯坦WWR-K反应堆转换为使用低浓铀燃料以及从日本快中子临界装置移除所有高浓铀。原子能机构与中国、美国和其他利益相关方国家一道，继续支持加纳预计于2017年进行的转换和移除其微堆高浓铀堆芯的努力。支持尼日利亚微堆转换的活动已经启动。

124. 与高浓铀最小化有关的活动包括将高浓铀研究堆燃料返还浓缩这种燃料的原产国。到2016年底，根据原产美国的高浓铀燃料的返还计划，已完成近1300千克新鲜和乏高浓铀研究堆燃料的移除工作。在原产俄罗斯联邦的高浓铀燃料的返还计划下，同一期间移除了2228千克新鲜和乏高浓铀研究堆燃料。2016年9月，波兰、美国、俄罗斯联邦和原子能机构将来自波兰奥特沃克-斯维尔克玛利亚研究堆的最后剩余的61千克原产俄罗斯的高浓铀材料返还俄罗斯联邦。

125. 高通量、高性能研究堆的转换需要先进的铀-钼燃料。虽然已在该领域取得实质性进展，但还需要在辐照试验、辐照后检验和制造技术方面做进一步的工作，以实现以商业方式提供合格的高密度低浓铀燃料。

¹⁵ 原子能机构出版物《研究堆项目的具体考虑因素和里程碑》（原子能机构《核能丛书》第NP-T-5.1号）和一套辅助文件旨在对成员国在该领域提供帮助。

¹⁶ 原子能机构为波罗的海、加勒比、中非、中亚、东欧、地中海地区以及独立国家联合体和全球铀氢锆研究堆网络的几个不同的研究堆联盟提供支持。就最后这一例子而言，原子能机构最近推出了《铀氢锆研究堆的历史、发展和前景》（《技术报告丛书》第482号，原子能机构，维也纳，2016年）。

126. 虽然在 2016 年没有出现重大的钼-99 供应短缺，但加工设施的运行挑战依然存在。2016 年一些全球设施的停堆并未导致任何短缺。作为钼-99 生产的一个重要辐照设施的比利时 BR2 研究堆在经过 9 个月停堆进行延期维护和现代化活动后，于 2016 年 7 月 19 日重新启动。加拿大国家多用途研究堆于 2016 年 10 月 31 日停止生产钼-99，但仍处于“热停堆”状态，以作为 2016 年 11 月 1 日至 2018 年 3 月 31 日期间不太可能发生的全球短缺事件的一个后备生产能力。其他主要生产商一直在提高其产量，以弥补这种损失。

127. 钼-99 生产工艺从高浓铀转换为低浓铀的工作正在继续，澳大利亚核科学和技术组织和南非的 NTP 放射性同位素公司在基于低浓铀的钼-99 供应方面正在成为主要的供应商。2016 年，澳大利亚核科学和技术组织在新生产设施方面取得了显著的进展，该新设施的建造预计在 2017 年初完工。NTP 放射性同位素公司正在继续将其工艺转换为专门使用低浓铀。其他两个主要生产商，即比利时放射性元素研究所和荷兰 Mallinckrodt 公司，继续在支持其商业规模生产工艺从高浓铀向低浓铀转换方面取得进展。

D. 粮食和农业

D.1. 利用核及相关技术确定食品真实性

128. 食品质量和安全是食品工业和消费者均关切的大问题。反复出现的食品真实性问题和食品安全危机会危及公众健康，并导致公众对食品供应的完整性失去信心。食品贸易的全球化增加了对有效的食品管制制度的需要，以保护消费者不受污染食品和欺诈性供应食品之害。食品犯罪，即为了谋取经济利益有组织和大规模地故意对食品类商品错贴标签或掺假，已成为一种主要的犯罪活动，这会造成巨大经济损失和使整个经济部门名誉扫地，导致国际贸易壁垒。虽然食品欺诈是由经济利益所驱使，但通常存在食品安全风险，因为掺假或假冒产品将不会受到与正品产品同样的控制，其成分可能是未知的。例如，向奶粉中添加三聚氰胺以增加表观蛋白质含量，造成因三聚氰胺毒性所致的上千例疾病和若干婴儿死亡；将高品质特级初榨橄榄油与花生油等廉价油掺杂，其在标签上未注明，可能引起严重的过敏反应；甚至还有用马铃薯淀粉和工业合成树脂制成的假冒大米。

D.1.1. 分析技术

129. 对支持食品认证和可追溯性机制的分析方法的需求迅速增加，并且随着食品供应链日益复杂以及食品加工和技术进步，未来可能还会增加。核技术可提供食品真实性检测所需的关键属性。

130. 测量食品中生物元素（氢、碳、氮、氧和硫）的天然存在稳定同位素的比率，通常通过与在环境中或在生产过程中发现的同位素的比率相关联，可以提供它们的产地来源或生产技术的信息。重元素（例如锶）稳定同位素还可以提供与原产地区的地质

学有关的信息，这种“特征”通过土壤转移到植物和动物。因为稳定同位素是食品中原子的固有特征，所以它们的分布和比率难以操作用于欺骗性目的。

131. 食品的元素分析不仅能从潜在有毒元素的浓度方面提供有关食品安全的重要信息，还能提供食品与其产地关系的信息。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。例如，碱性金属，特别是铷和铯，容易在土壤中迁移并容易地转移到植物中，是地域标识的良好指标。

132. 代谢组学指纹识别，即对生物体中细胞过程或分子过程产生的代谢物进行分析，也被用于真实性检测。代谢组学可以是靶向的，聚焦于相关代谢物的组，以提供用于建模的直接功能信息；也可以是非靶向的，检测代谢组中可以区分样品组的模式，并且可以用于构建未知样品的分类模型。例如，使用质子核磁共振光谱学自动生成的指纹图谱，可用于筛查果汁和葡萄酒。

133. 这些技术与振动光谱学、基因分析和微生物指纹识别等其他技术相结合，对认证食品非常有价值。

134. 这种技术的成功应用需要研究其对不同食品类商品的应用，开发正宗食品测量结果的广泛数据库以及完善的统计分析和模拟。

可及的真实性检测技术

135. 分析仪器的最新发展使得所需的分析技术更容易获得。以前仅在实验室中使用的一些仪器现可以有更经济实惠的台式、便携式或手持式仪器可供使用，或许能提供筛查能力。例如，最近可供使用的比较经济实惠的台式核磁共振仪，能够进行先前在昂贵的高场核磁共振仪上进行的筛查分析，而这种高场核磁共振仪需要专门基础设施和专门人员。同样，手持式 X 射线荧光和近红外光谱仪现在可商购获得，并且应用于食品检测。有可能应用于真实性检测的其他台式或便携式技术包括离子迁移率光谱法，其使用镍-63 电离源并且最近已被广泛用于机场筛查爆炸物和毒品，还包括通过激光消融分子同位素光谱法测量同位素比率。

136. 现代技术的成本效益和可获得性，意味着食品工业中的利益相关者、监管机构和消费者可利用它们在食物链的多个点筛查食品，这将显著提高控制系统的有效性。必要时，可以在参考实验室使用高端验证技术对可疑产品进行检测，为后续调查提供更详细的信息。

D.2. 宇宙射线中子传感器：区域范围土壤水分监测的新方法

137. 农业占全球淡水消费的约三分之二。为了帮助应对全球气候变化和迅速增加的人口数量的挑战，世界各地农业社区必须最大限度地提高产量，同时通过灌溉提高用水效率。实现这一目标，将需要监测土壤水资源的方法，以提高灌水效率。测量土壤含水量的传统方法采用基于点的原位设备，传递设备放置点的代表性土壤含水量信息。在没有基于点的设备网络情况下，这种原位感测方法通常不能采集区域范围的土壤含

水量信息，包括其自然异质性信息。宇宙射线中子传感器是一种新颖装置，能够在大的空间区域（半径约为 250 米或面积为 20 公顷的圆形区域）中远程采集和量化区域范围的土壤含水量信息，而没有基于点的传统土壤含水量网络的耗费时间和侵入性问题。社区能够受益于宇宙射线中子传感器提供的土壤水分信息，从而更好地管理日益稀缺的水资源。

138. 宇宙射线中子传感器方法依赖对从宇宙进入大气的入射高能核粒子的检测。这些粒子有许多将与大气中的气体碰撞，由此失去能量并经历级联转化为较低能量的粒子，最终成为近土壤表面的中子（图 D-1）。这些中子容易被氢原子吸收。这意味着环境中氢的存在是入射中子从土壤和大气中消失的主要手段。对于某一特定环境中所有形式的氢而言，都是如此，无论这些氢源变化迅速（土壤水分），还是变化缓慢（植被、地表水，或土壤有机物质），还是不随时间而变化（粘土矿物或人体结构中的水）。宇宙射线中子传感器非能动性地检测穿过土壤和空气的这些中子，并确定每单位时间的中子计数。因为地表上的大部分氢以水的形式存在，所以可以在任何给定区域的土壤中存在的中子计数与水量之间建立关系。在宇宙射线中子传感器方法中包括用于去除土壤含水量之外的环境氢标志的校准过程。这一过程通过现场验证抽样活动进行。

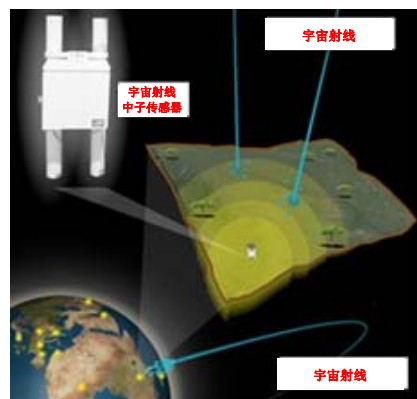


图 D-1. 图解入射宇宙射线与大气相互作用，形成土壤表面的中子，可以由宇宙射线中子传感器进行景观层面测量（图片：原子能机构）。

139. 将宇宙射线中子传感器技术用作农业环境中的固定土壤水监测工具，在世界各地的成员国中已经得到了很好的确立¹⁷。虽然这种方法具有生成区域范围土壤水分信息的很大能力¹⁸，但这种传感器对自然环境土壤含水量异质性的反应尚处于广泛调查

¹⁷ Zreda, M.、Shuttleworth, W. J.、Zeng, X.、Zweck, C.、Desilets, D.、Franz, T.、Rosolem, R.: “宇宙射线土壤水分观测系统”，《水文学与地球系统科学》第 16 期，第 4079—4099 页，2012 年。

¹⁸ Franz, T. E.、Wahbi, A.、Vreughenhil, M.、Weltin, G.、Heng, L.、Oismueller, M.、Strauss, P.、Dercon, G.、Desilets, D. “利用宇宙射线中子传感器监测混合土地使用农业系统中景观尺度的土壤含水量”，《应用与环境土壤科学》，文章编号 4323742，第 11 页，2016 年。

中^{19、20}。在努力改进宇宙射线中子传感器用于探索土壤含水量的空间异质性中，研究和开发了更新、更多功能的移动传感器。无论是背包形式还是附加到车辆上的移动传感器，其性能都与具有相同区域覆盖范围的固定传感器一样精准。可移动性使得这种传感器技术有能力探索环境中土壤水分的空间异质性（图 D-2），并且能够向科学家和农户显示土地干燥与不干燥的地方，以及精确灌溉所需的信息。然而，需要进一步探索这种移动方法，以优化其使用和供成员国的使用。粮农组织/原子能机构粮农核技术联合处目前正积极参与这些研发。

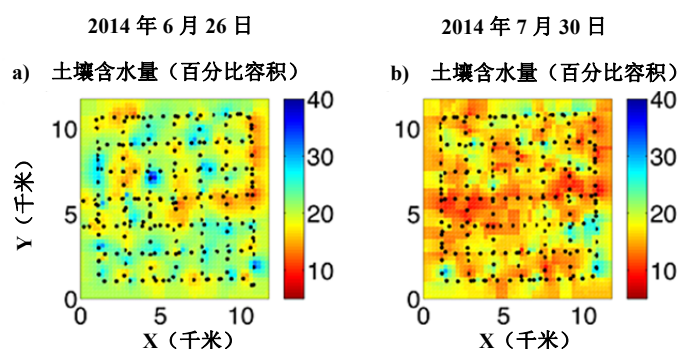


图 D-2. 移动宇宙射线中子传感器用于采集和量化农业景观中土壤含水量的空间变异性的能力。黑点表示间隔一个月的两次测量期间的测量位置（来源：Franz 等人，“用于多尺度实时监测的移动和固定宇宙射线中子探针的土壤水分测量综合分析”，《地球物理学研究通讯》第 42 期，第 3389—3396 页，2015 年）。

D.3. 利用辐射杂交制图开发用于支持家畜养殖计划的遗传工具

140. 为提高牛奶、肉和纤维的生产力，农场动物的遗传改良传统上基于选择和养殖高产动物。随着基因组学的最新进展，现在可以使用诸如基因芯片等基因组工具来估计动物刚出生时的养殖价值。开发用于动物评价的基因芯片，需要对动物基因组进行测序和制图。基因组图谱可精确定位具体特征在生物体染色体上的位置。它们是鉴定造成疾病或形成生产和繁殖特征基因的至关重要的工具。

141. 可以使用常规方法或放射性同位素技术开发基因组图谱。常规制图方法，例如遗传连锁图谱，基于自然重组事件，并且需要连续几代的纯种动物。就家畜而言，这样的方法不仅需要高额的费用和大量的时间（代间隔时间长），而且得到的图谱分辨率低。应用放射性同位素技术有助于克服这些限制，方法是模仿基因重组事件和加速基因组制图过程，更快地开发工具，以提高牲畜生产力。

¹⁹ Desilets, D.、Zreda, M.、Ferre, T. P. A.: “大自然的中子探测器：与宇宙射线难以捉摸的尺度下的地表水文”，《水资源研究》第 46 期，W11505，第 7 页，2010 年。

²⁰ Avery, W. A.、Finkenbiner, C.、Franz, T. E.、Wang, T.、Nguy-Robertson, A. L.、Suyker, A.、Arkebauer, T.、Muñoz-Arriola, F.: “将全球可用的数据集结合到用于估计场尺度土壤含水量的移动宇宙射线中子探测器方法中”，《水文学与地球系统科学》第 20 期，第 3859—3872 页，2016 年。

D.3.1. 利用放射性同位素技术绘制家畜基因组图谱

142. 钴-60 或 X 射线可以用于成功地照射家畜基因组，并随机将家畜基因组打断成几个片段。通常使用范围在 30 戈和 150 戈之间的辐射剂量，在啮齿动物细胞中恢复家畜基因组被打断的染色体片段。染色体末端在照射后迅速愈合，并且在来自家畜物种的细胞与啮齿动物细胞融合时插入或移位到啮齿动物染色体中。随后分析约 90—100 个这样的啮齿动物与家畜杂交细胞的基因标记的存在与否。对于给定剂量的辐射，在染色体中位置较远的标记更可能被破坏并且被置于可以整合到不同杂交细胞的单独染色体片段中。这种破损的频率不仅有助于估计标记之间的距离，而且有助于确定它们在染色体上的顺序，从而建立家畜基因组的密集图谱。这种辐射杂交图谱的分辨率通常取决于所使用的辐射剂量，剂量越大，图谱分辨率越高。因此，辐射杂交图谱具有非常的优越性，特别是在以比常规技术更低的成本和更短的时间范围生成家畜基因组的高分辨率图谱方面。

D.3.2. 辐射杂交图谱在畜牧养殖中的应用

143. 高分辨率辐射杂交图谱促进了广泛用于养殖奶牛以提高牛奶产量的基因芯片的开发。所得的基因组选择技术通过显著增加用于牛奶生产的年遗传增益，使人工授精产业发生了根本变化。基于这种技术选择的年轻人工授精公牛的市场份额现在在许多工业化国家已经达到 50%以上，其他基于农业的发展中国家期待在其奶牛生产系统中实施这种新技术。同样，为包括绵羊、水牛和猪在内的其他家畜物种开发了高分辨率基因组图谱。最近，原子能机构开发的辐射杂交板被世界各地的研究人员用于收集首个基因组序列草案²¹，并用于为发展中国家开发另一个重要的家畜物种山羊的高分辨率全基因组图谱²²。这也有助于开发可用于养殖山羊以提高羊肉产量的基因芯片。

D.3.3. 对粮食安全和可持续发展目标的影响

144. 辐射杂交图谱和基因组工具还不能用于许多农业上重要的家畜物种，例如骆驼、斑牛、羊驼、美洲驼、牦牛、驴、大额牛和兔子。这些牲畜物种茁壮生长于热沙漠气候和高海拔寒冷地区这两种主要的极端环境，有助于大量边缘农民的生计。例如，骆驼在非洲和亚洲几百万游牧民的生计中发挥着重要作用，特别是骆驼奶的需求在一些国家迅速增长。

145. 开发和实施辐射杂交图谱和基因组工具将有助于建立养殖计划，以提高这种牲畜的生产力和加强粮食安全。成员国对利用辐射杂交板绘制上述物种基因组图谱的需求近年来大大增加。原子能机构通过其粮农组织/原子能机构实验室作为一个枢纽，为其

²¹ Dong, Y.等人（2013 年），“驯化山羊基因组的测序和自动化全基因组光学制图”。《自然生物技术》第 31 期，第 135—141 页。

²² Du, X.等人（2014 年），利用密集辐射杂交图谱对山羊基因组拼接的更新，实现了对牛科动物进化重排的详细分析。《BMC 基因组学》第 15 期，第 625 页。

成员国开发和分发这些辐射杂交板和其他必要资源，例如相关的生物参考资料、绘图资源和软件工具。



图 D-3. (左) 照射骆驼细胞以构建辐射杂交板。(右) A. 从培养皿中取出活的杂交细胞。B. 用于基因组制图的辐射杂交细胞集落 (图片：原子能机构)。

E. 人体健康

E.1. 前列腺癌的防治进展：诊断和治疗

E.1.1. 背景

146. 前列腺癌位于全世界男性中最常见的三种癌症之列，是除肺癌、肝癌、胃癌和肠癌之外最常见的男性癌症死亡致因之一。在前列腺切除术或外射束放射治疗后，54% 的患者可能出现生化复发。生化复发的定义是血清前列腺特异抗原的值增加。在根治性前列腺切除术后，可以预测前列腺床中的局部复发率约达 80%。所使用的治疗类型不仅基于前列腺特异抗原水平，而且基于其他诊断成像检测，例如排除转移的骨扫描，或显示局部复发的计算机断层扫描或核磁共振成像。

147. 诸如列线图等可用的预测工具尽管在区分局部复发和远处复发方面具有良好的灵敏度，但并不提供关于复发的真实部位（例如淋巴结与骨，或骨盆与骨盆外）或转移的实际数目的信息。此外，许多前列腺癌患者前列腺特异抗原水平升高，可能与局部复发和全身性复发都相符。为此，考虑仅由列线图提供的风险概率，就无法规划靶向抢救治疗。因此，若怀疑局部复发，则通常对患者采取针对前列腺床的挽救性放疗，或者若怀疑全身性复发，则用激素疗法，如雄激素剥夺疗法进行全身治疗。

E.1.2. 诊断

148. 常规成像，包括计算机断层照相法、骨闪烁照相法和磁共振，在患者出现生化复发对其进行再分期时，精度值较低。胆碱正电子发射断层照相法-计算机断层照相法 (PET-CT)，如果在早期生化复发的患者，即根治性治疗后具有低血清前列腺特异抗原的患者身上实施，则显示的灵敏度不是最佳的。在过去 10 年中，核医学技术，例如碳-11 标记胆碱和氟-18 标记胆碱正电子发射断层照相法，被认为比常规诊断成像更准确

用于对生化复发患者进行再分期，从而区分仍局限在骨盆内的局部复发与全身性复发。

149. 为了从预后的角度获得最佳结果，实施拯救治疗的最佳时机是疾病扩散范围较小时，而不是血清前列腺特异抗原水平刚达到根治疗后可检测的值时。在这种情况下，能否实施一种诊断检测，即有可能将或许可治愈的初始复发或局部复发与仅通过姑息治疗方法可治疗的全身性复发区分开来，则可能是至关重要的。

E.1.3. 近期发展和趋势

150. 最近，开发了一种以前列腺特异性膜抗原为目标的新分子。前列腺特异性膜抗原是一种膜酶，与其在健康的前列腺组织中的表达情况相比，主要表达于前列腺癌细胞中。在早期疾病复发诊断的初步研究中，最近开发的镓-68 标记前列腺特异性膜抗原，作为用作 PET-CT 成像的放射性药物的前列腺特异性膜抗原细胞外抑制剂，显示出比氟-18 标记胆碱 PET-CT 技术明显更高的准确度。这些研究还发现，在识别可疑病变的复发方面，与氟-18 标记胆碱 PET-CT 技术相比，镓-68 标记前列腺特异性膜抗原 PET-CT 技术能够提供更准确的肿瘤-本底放射性活度比。

151. 在对根治疗后生化复发患者的更大人群进行进一步研究发现，前列腺癌生化复发患者，即使血清前列腺特异抗原值非常低，在对其进行再分期中，镓-68 标记前列腺特异性膜抗原 PET-CT 技术也能具有超强的诊断能力。近几个月来，这种示踪剂的使用一直是科学界特别和越来越感兴趣的课题。在使用组织学分析作为验证正电子发射断层照相法结果的参考标准的研究中，这种放射性药物也显示出较高的特异性 (>90%) (图 E-1)。最后，文献中没有一项研究结果报告了这种技术出现不良事件或临床可检测的药理作用。

152. 由于上述原因，前列腺特异性膜抗原可作为开发 PET-CT 成像放射性示踪剂的优异分子靶，因为它能够检测疾病的早期复发。

153. 镓-68 标记前列腺特异性膜抗原用于诊断的临床性能的成功，促成了用相同分子、但用高能同位素（例如镭-177 或钇-90）标记的治疗方法的开发。临床试验迄今已显示出非常好的结果，但是需要更多的试验来验证这种新的治疗方法。用相同的分子进行诊断和治疗称为“诊疗”，前列腺特异性膜抗原在前列腺癌防治方面便是如此。

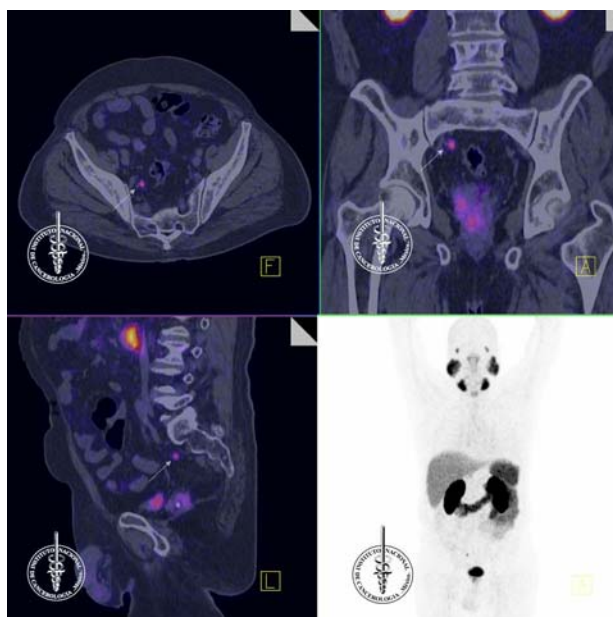


图 E-1. 接受过手术和化疗治疗的前列腺癌男性患者。用镓-68 标记前列腺特异性膜抗原 PET-CT 技术进行核医学研究以评价治疗后随访情况。箭头显示的是示踪剂在淋巴结中的异常吸收，表明该疾病复发（图片：墨西哥国家癌症研究所）。

F. 水资源

F.1. 利用降水中的同位素诊断天气和气候领域的新发展

154. 降水是河流、湖泊和含水层中所有水的最终来源。降水形成过程基本有两种：对流降水和层云降水。对流降水（如雷暴雨）强度高（短时间内大量降雨），但发生区域有限（约 10—25 平方公里），而层云降水强度低，但持续时间长得多，发生区域也更大（>500 平方公里）。对流降水会造成更多的水灾和其他灾害，预计将随着气候变暖而增多。

155. 由于氧和氢的原子质量的差异，它们的同位素比在对流云或层状云中的表现不同，并因此应含有不同的同位素比。使用同位素变异性来划分有多少雨为对流型或层云型，有可能获得对云过程以及它们如何在不同季节变化的了解，从而提高为短期天气模拟和长期气候变化影响制作云过程模型的能力。

156. 利用同位素变异性了解气候如何影响地球水循环的潜力在 20 世纪 50 年代初被认识到，并且是原子能机构 1960 年与世界气象组织（气象组织）合作建立全球降水同位素网时的主要考虑因素之一。来自全球降水同位素网的同位素数据导致认识到，极地冰和大陆冰（在南极、北极、格陵兰、安第斯山脉和喜马拉雅山脉的冰）中含有水循环作为对气候变冷或变暖的反应所发生的变化历史记录。

157. 已知全球降水同位素网和其他观测提供的不同类型的云的降水中的同位素数据是不同的，例如，快速阵雨与长时间缓慢降雨相比就不同。但这些同位素差异在过去并未被认为足以帮助提高对云过程的认识。原子能机构最近的工作²³表明，实际上，在同位素比和造成降水的云过程之间有着很大的相关性，这一新知识有可能极大地扩大全球降水同位素网数据对认识短期天气相关过程和长期气候相关过程的有效性。

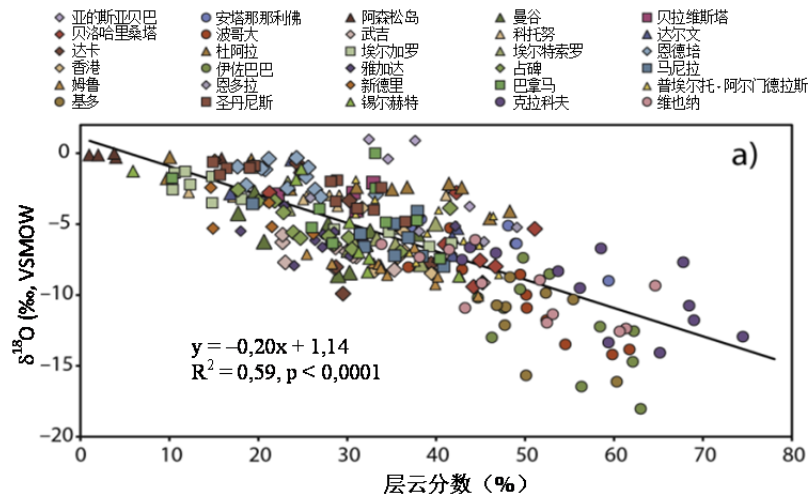


图 F-1. 在全球降水同位素网选定的热带和中纬度站以复合月降雨样品测量的长期平均氧-18 含量与层云降水分数的关系。雨分数的其余部分为对流降水（来源：P. Aggarwal 等人，“水同位素比中揭示的对流降水和层云降水比例”。《自然地球科学》第 9 卷）。

158. 来自日本和美国空间机构 1998 年联合发射的热带降雨测量任务卫星上的雷达数据被用于估算 1998 年至 2014 年各降雨类型的比例。在将这些降雨类型比例与来自全球降水同位素网的同期同位素数据相结合后，即可发现这两个参数之间的紧密相关性（图 F-1）。对流降雨的同位素比较高，而层云降雨的同位素比较低。按日或按月时间尺度收集的大部分降雨是两种降雨类型的混合物。

159. 在此之前，降水的氙含量被认为表明了大陆水分和海洋水分的混合。但上述最近研究表明，氙含量也随着降雨类型比例变化。发现当云层非常低（达到高于地面以上约 6 公里）时，对流降雨具有较高的氙含量，并且一些冰粒子水分在高于 5 公里的海拔会增加，在该海拔，氙含量天然较高。这是因为氙是在平流层中产生，并通过水分交换到达对流层（云和降水在那里形成）。

²³ Pradeep K. Aggarwal, Ulrike Romatschke, Luis Araguas-Araguas, Dagnachew Belachew, Frederick J. Longstaffe, Peter Berg, Courtney Schumacher 和 Aaron Funk, “水同位素比中揭示的对流降水和层云降水比例”，《自然地球科学》第 9 卷，第 624 页至第 629 页。

160. 对日以下降水或每日降水中稳定同位素和氡的例行测量将有助于更好地理解造成雨分数变化的云动态的短期变异性。同位素数据可用作独立诊断工具，监测降水类型的变异性和气候变化对降水类型的影响。

161. 利用基于同位素变化的降水分区的技术发展将有助于改进气候模型（或全球循环模型）和对流降水模拟。这一领域的准确和更完备信息能够促进成员国预测和减缓气候变化影响的能力。

G. 环境

G.1. 利用同位素工具研究海洋酸化

162. 世界海洋覆盖了地球表面的 70%以上，对确定地球上的气候至关重要。如果以可持续方式加以管理，则海洋在提供就业机会和为全世界人口提供食物方面也可发挥重要作用。海洋产生我们呼吸的氧气的一半以上，同时吸收大量的过剩热量和我们产生的二氧化碳等重要温室气体。不过，我们现在知道，海水化学的根本性变化正在全世界的海洋中发生。

G.1.1. 海洋酸化 — 其他二氧化碳问题

163. 自工业革命开始以来，二氧化碳排放量一直稳步增加，如今，大气中的二氧化碳浓度已超过了 400 ppm (0.04%)。目前，海洋能够吸收每年释放到大气中的约四分之一的二氧化碳。随着大气中的二氧化碳水平稳定上升，海洋中的二氧化碳水平也在升高（图 G-1）。虽然一开始科学家们专注的是去除海洋二氧化碳的好处，但数年的海洋观测现已清楚地表明还存在着不利的一面：海洋吸收的二氧化碳正在通过所谓的海洋酸化过程改变海水的化学。

164. 作为该过程的一部分，会释放游离氢（ H^+ ）离子，导致海水 pH 值降低，并在一些游离氢离子与碳酸盐结合形成碳酸氢盐（ HCO_3^- ）时导致碳酸盐（ CO_3^{2-} ）离子浓度降低。Palaeo 重建表明，海水的 pH 值已经保持相对恒定达数百万年之久；但在自工业革命开始以来的过去一个半世纪中，已在全球观察到 pH 的系统性降低。虽然当今的 pH 值下降可能看似相对较小（0.1 个单位或酸度增加约 26%），但目前现有最好的科学预测²⁴表明，持续排放可能在本世纪将海水表层 pH 值再降低一个 0.4 单位（相当于酸度增加约 150%）。

²⁴ O.Hoegh-Guldberg 等人（2007 年）。“快速气候变化和海洋酸化下的珊瑚礁”，《科学》，2007 年 12 月 14 日，第 318 卷，第 5857 期，第 1737 页至第 1742 页，DOI: 10.1126/science.1152509。

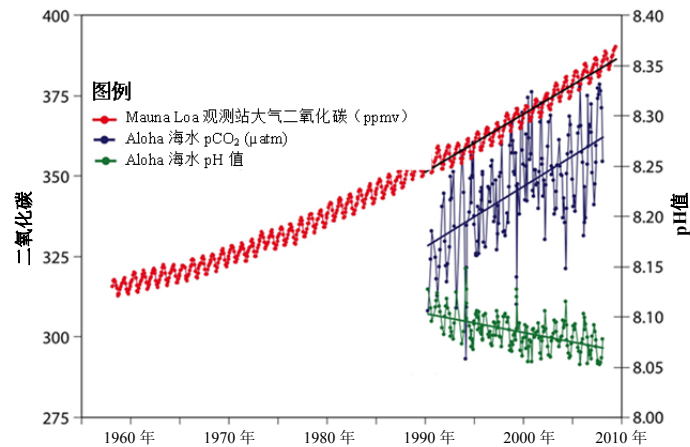


图 G-1. 在夏威夷 Mauna Loa 观测站和夏威夷海洋时间序列站 ALOHA 测量到的不断增加的大气 $p\text{CO}_2$ 和不断降低的海水表层 pH 值（来源：R.A.Feely、S.C.Doney 和 S.R.Cooley，2009 年。“海洋酸化：高二氧化碳世界的现状和未来变化”。《海洋学》，第 22 卷第 4 期，第 36 页至第 47 页。

G.1.2. 海洋酸化的生物效应

165. 随着海洋酸化影响全球海洋化学，基本生物过程也受到影响，有时是以严重方式受到影响。广泛种类海洋生物（如许多软体动物、甲壳类动物、珊瑚、珊瑚藻和有孔虫）使用碳酸根离子构建其碳酸钙骨架。重要的是，碳酸根离子也是作为形成海洋食物链基础之组成部分的微观浮游生物的椰子体钙化板的基础。此外，溶解二氧化碳水平可能影响海洋生物的生理，海洋生物通常依赖于窄范围的环境参数，包括溶解二氧化碳和 pH 值。

166. 海洋生物可能受持续海洋酸化影响的方式有许多。在鱼类中，增加的海洋二氧化碳能够产生广泛的影响，包括改变行为、耳石（鱼的耳骨）形成、幼体生长和捕食者-被捕食行为。在牡蛎、蛤和扇贝等具有碳酸钙壳的贝类中，海洋酸化可能通过影响它们的生长、生理和生存而产生损害。在其他海洋生物依靠其获得营养并且其中有一些会钙化的浮游生物中，海洋酸化能够影响生长、生理和生存，从而可能对整个食物网产生影响——例如，海洋蝶蛹的壳已经非常薄，并且这些壳能够在 pH 值为 7.8 的海水中快速溶解，而根据当前预测，这一 pH 值是 2100 年预期的海水 pH 值。在具有碳酸钙骨架的珊瑚中，在日益增加的海洋酸化条件下建造和维持这些结构将更加困难，并且珊瑚与其共生腰鞭毛虫的联系也会受到影响，导致珊瑚白化。广泛观测表明，升高的二氧化碳对珊瑚具有很强的白化效应（图 G-2）。



图 G-2. 马绍尔群岛广泛的珊瑚白化（图片：原子能机构）。

G.1.3. 利用核技术了解海洋酸化的影响

167. 一些放射性同位素独特地适用于量化海洋酸化的生物效应，包括钙-45 适用于研究钙化率，碳-14 适用于评定海洋浮游植物的初级繁殖，锶-85 适用于评定生物矿化率，锌-65 适用于研究海洋生物的代谢率，一套放射性标记微量元素（如银-110n、镉-109、钴-57、钴-60、锰-54、硒-75）适用于研究生物累积和净化的 pH 值依赖率。长寿命珊瑚中硼-10 和硼-11 的同位素组成能够用于重建海水 pH 值，以便理解过去的环境条件和使所预测的未来海洋 pH 值的变化具有来龙去脉。

168. 海洋酸化科学²⁵ 近年来取得了巨大进步。利用放射性同位素以多示踪剂方案研究所预测的海洋 pH 值降低将如何影响海洋生物，加强了当今的实验。在原子能机构环境实验室，关于海洋酸化对选定珊瑚、贝类和鱼类的影响的受控实验表明，在长期暴露于降低的环境 pH 值之中后，会发生显著的代谢和生理变化。放射性同位素应用的发展包括成对同位素研究（例如铯 134、137）正在使得能够对海洋酸化在累积应力（如温度和（或）溶解氧）增加情况下在未来海洋环境中的广泛影响获得新认识。

H. 辐射技术

H.1. 文化遗产：利用辐射技术进行探索和保存

169. 文化遗产物体通常是需要谨慎处理和复杂保存技术的无价和珍贵人工制品。利用辐射技术进行物体的详细检查、强化及帮助控制它们的退化和降质。如果需要，还能够对人工制品进行消毒，从而更好地加以保存。辐射技术正在变得越来越先进和越来越能够为负责管理文化人工制品的机构所接受。

²⁵ 海洋酸化国际协调中心是这一领域信息的枢纽：
<https://www.iaea.org/ocean-acidification/page.php?page=2181>。

H.1.1. 探索和研究

170. 辐射技术可有助于调查一幅画的真实性或确定在表层之下是否还有一层、确定一件人工制品是用金制成还是仅仅为镀金或者在运输一件老雕像之前评定其脆弱性 - 所有这些都不会对物体造成任何损坏。X 射线荧光是一种可协助对材料进行元素分析的工具，并经常被博物馆用于研究各种人工制品（图 H-1）。

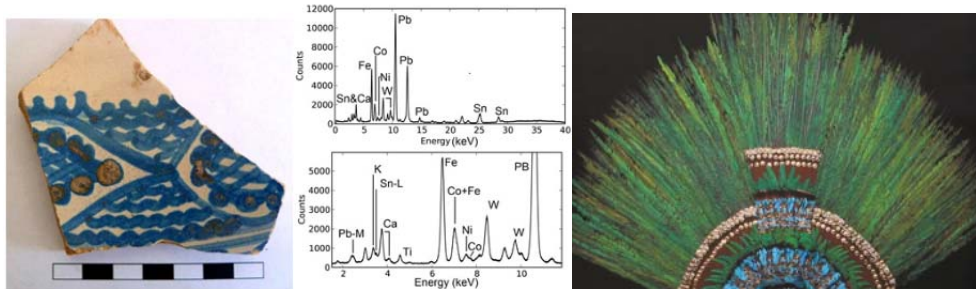


图 H-1. 对一件 7 世纪陶器（左）和一件罕见的 16 世纪墨西哥头片的元素分析，使用手持式 X 射线荧光设备对该头片的分析揭示了原有金色装饰和后增特性（右）（图片：原子能机构）。

171. 正如医学放射照相进行人体内部构件成像一样，射线照相技术能够揭示雕像的内部结构和找出可能的弱点。各种射线照相技术（如常规 X 射线照相术、 γ 射线照相术、基于加速器的射线照相术、放射线透视、 β 射线照相术或二次电子射线照相术、电子发射射线照相术、中子射线照相术、自动射线照相术和计算机辅助断层扫描）都有助于研究和探索艺术品（图 H-2、H-3 和 H-4）。

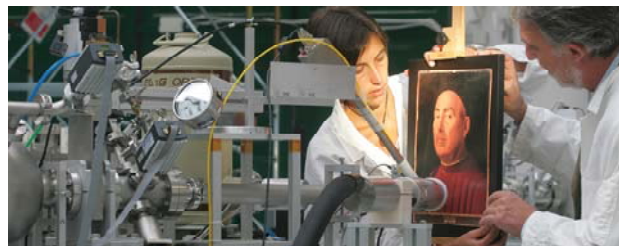


图 H-2. X 射线技术的变种（如颗粒诱导的 X 射线发射和基于加速器的技术）被博物馆常规用于研究艺术品，如来自意大利都灵古代艺术博物馆的这一例品（图片：意大利 INFN）。



图 H-3. 射线照相表明，位于法国 Vieil-Évreux 的木星雕像的头部和躯干系通过焊接连接（图片：J.L.Boutaine）。

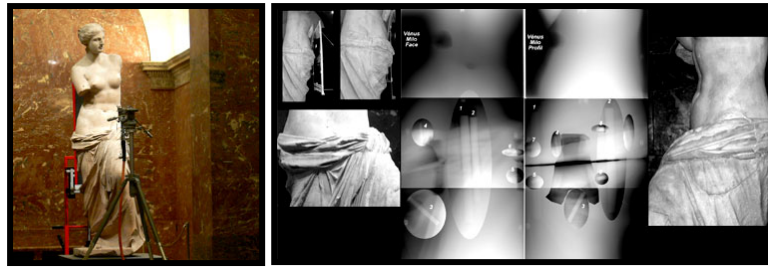


图 H-4. 显示了法国卢浮宫博物馆“米洛的维纳斯”雕像内部结构的 γ 射线照相被用于运输前的决策（图片：原子能机构）。

H.1.2. 利用基于辐射的技术保存和加固人工制品

172. 文化遗产人工制品的感染能够导致加速退化并对处理该物体的人员构成健康风险。在医学和农业中用于处理大量物体的常规消毒技术（如熏蒸）使用有毒化学品，如甲醛、乙醇或环氧乙烷，或需要严格的条件，如许多文化人工制品不能承受的高温和高压。20 世纪 50 年代的实验（食植性昆虫的 γ 辐照）首先表明了电离辐射的生物杀灭效应。由于辐射处理技术在工业中已经成熟，其在文化遗产人工制品消毒中的使用业已增多。对医疗产品、食品和组织移植物灭菌已非常成熟的辐射处理为文化遗产物体的处理提供了一种无添加剂的室温下选择。由于辐射不仅避免了有毒化学品的使用，而且还确保了均匀、完全的渗透，而不管物体的大小和形状，并且不留下任何残留有害物质，因此，对文化遗产保存是一个有吸引力的选择 — 对人员以及环境都是安全的。辐射去污由授权人员在经批准的设施中安全操作。

拉美西斯二世木乃伊的消毒

173. 在开罗埃及博物馆展出的拉美西斯二世木乃伊在 1976 年被运到法国展览，并被发现感染了幼虫、昆虫和各种各样的真菌感染，尽管没有任何病原菌。法国国家自然历史博物馆与埃及当局达成协议，于 1977 年在 Nucléart 地区保护工作室使用 γ 辐照对该木乃伊进行了消毒。在巴黎和格勒诺布尔的实验室和博物馆联盟操控了精心规划和测试后的辐射治疗。为了确定辐照剂量以有效根除所有真菌（超过 60 种）而不影响木乃伊的毛发、纺织品、皮肤和牙齿等其他组分，从其他木乃伊上采集了 400 多个样品进行试验。该木乃伊外形大（1.72 米长）且不规则，加之内有多种材料，使得需要使用施放 18 千戈瑞均匀剂量的精确数学模型进行复杂的剂量计算。在使用两个模型木乃伊进行验证后，对拉美西斯二世木乃伊成功进行了辐照，并将它送回了埃及，它在 40 年后仍保持着良好状态。

葡萄牙的 RADIART 项目

174. 使用~4 千戈瑞的辐射剂量对里斯本国家瓷砖博物馆 18 世纪的葡萄牙瓷砖进行了处理，以便对造成绿色染色的表面细菌和内部真菌进行灭活。辐照过程显示微生物效率高于 70%。

意大利卡萨西亚研究中心

175. 意大利国家新技术、能源和可持续经济发展局卡萨西亚研究中心对 γ 辐射对材料的效应进行的研究表明，电离辐射对有害昆虫（以 0.2—0.5 千戈瑞的剂量）和微真菌（以 3—8 千戈瑞的剂量）的灭菌效率极高。研究表明，即使辐射剂量为 10 千戈瑞，纯纤维素或纸张上的照相印刷品的色牢度也得到保持，而无论该过程是否涉及使用蛋白、银明胶、火棉胶或苯胺，这表明了辐射技术对处理老旧和微生物感染照片的有用性。

巴西的时间胶囊

176. 在里约热内卢市的一块基石里发现了一个由木头和铅制成的装有巴西帝国时代（19 世纪）一些最古老文件的盒子。在修复之前，在巴西国家核能委员会核能和能源研究所的多用途 γ 辐照设施使用 8—10 千戈瑞的辐射剂量对盒子进行了处理（图 H-5）。



图 H-5. 接受真菌处理的时间胶囊（图片：巴西圣保罗巴西国家核能委员会核能与能源研究所 P. Vasquez）。

保存冷冻猛犸幼崽“赫罗马”

177. 2008 年，在俄罗斯联邦西伯利亚发现了一头猛犸幼崽的冰冻标本。该猛犸幼崽是在赫罗马河的岸边发现的，故被命名为“赫罗马”，它估计有 5 万多岁，或许是已知最古老的标本。虽然保存良好，但需灭活它可能携带的任何痕迹的细菌或其他潜在的病原微生物。 γ 辐照是用于对整个标本进行非破坏性生物杀灭处理的最合适技术。2010 年 7 月，冷冻猛犸幼崽在法国的格勒诺布尔被施以 20 千戈瑞的剂量，现保存良好并对外展出。（图 H-6）。



图 H-6. 经 2010 年 7 月辐照后保存的猛犸幼崽“赫罗马”（图片：格勒诺布尔原子能和可替代能源委员会 ARC-Nucléart 地区保护工作室 Quoc Khoi TRAN 博士）。



60 年

IAEA 原子用于和平与发展

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