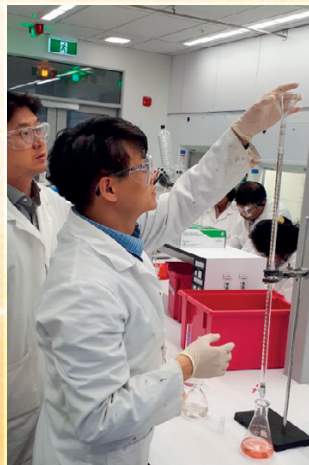
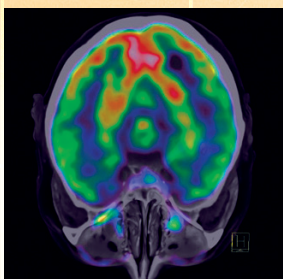


2018 年核技术评论



IAEA
国际原子能机构

2018 年核技术评论

GC(62)/INF/2

国际原子能机构在奥地利印制
2018 年 8 月

IAEA/NTR/2018

序 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”。

《2018 年核技术评论》涵盖以下选定领域：动力应用，先进裂变和聚变，加速器和研究堆应用，核技术用于粮食、土壤和牲畜管理，并涉及应急响应、放射治疗和神经精神病学领域的新发展、海洋中的塑料污染和放射性药物。

草案文本已以 GOV/2018/2 号文件提交 2018 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
主体报告	5
A. 动力应用	5
A.1. 当今核电	5
A.1.1. 新加入核电国家	7
A.1.2. 扩展核电国家	7
A.1.3. 运行核电国家	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	13
A.3.3. 后端	14
A.3.4. 退役、环境治理和放射性废物管理	15
B. 先进的裂变和聚变	18
B.1. 先进的裂变	18
B.1.1. 水冷堆	18
B.1.2. 快中子系统	19
B.1.3. 气冷堆	20
B.1.4. 中小型反应堆或模块堆	21
B.1.5. 革新型核能系统国际倡议	23
B.1.6. 核动力的非电力应用	24
B.2. 聚变	25
C. 加速器和研究堆的应用	26
C.1. 加速器	26
C.2. 研究堆	28
D. 粮食和农业	30
D.1. 粮食和农业核应急准备	30
D.1.1. 核应急响应的挑战	30
D.1.2. 应急响应决策支持系统的新发展	30
D.1.3. DSS4NAFA	31

D.2.	利用辐照开发新型有效疫苗预防动物和人畜共患疾病	32
D.3.	多同位素指纹识别从土壤到水体的农业污染物来源	36
E.	人体健康.....	38
E.1.	立体定向放射治疗：高精度放射治疗技术	38
E.1.1.	技术要求	38
E.1.2.	所需团队	39
E.1.3.	适应症	39
E.1.4.	原子能机构的贡献	40
E.2.	神经精神病学：阿尔茨海默氏病的分子成像革命	40
E.2.1.	背景	40
E.2.2.	诊断	41
E.2.3.	全球倡议和认识	41
F.	环境.....	43
F.1.	核技术用于海洋塑料研究	43
G.	放射性同位素生产和辐射技术.....	46
G.1.	α 疗法：含 α 发射体放射性药物的新型治疗性应用	46
G.1.1.	镭-223.....	47
G.1.2.	钷-225/铋-213发生器	47
G.1.3.	钷-225.....	47
G.1.4.	铋-211.....	48

正文摘要

1. 2017 年底，448 座在运核动力堆拥有 392 吉瓦（电）全球发电容量，自 2016 年以来增加约 1.2 吉瓦（电）。2017 年，五座反应堆永久关闭，四座并网，四座开工建设。近期和远期增长前景仍集中在亚洲，59 座在建反应堆中的 40 座和 2005 年以来并网的 59 座反应堆中的 51 座都在亚洲。
2. 目前有 30 个国家正在使用核电，有 28 个国家正在考虑、规划或积极致力于将核电纳入其能源结构。三个新加入核电国家正在建设其首座核电厂，其他几个已决定引入核电的国家正处于基础结构后期准备阶段。原子能机构 2017 年对全球核电装机容量的高值预测表明，到 2030 年将比当前水平增加 42%，到 2050 年容量将翻一番；而低值预测表明，在 2040 年之前装机容量将逐渐下降，到 2050 年又将反弹至当前水平。
3. 核电在气候变化缓解、能源安全、环境和社会经济政策方面的优势是许多国家打算引入核电或扩大现有计划的关键理由。在阿布扎比举行的原子能机构 21 世纪的核电部长级国际会议强调指出需要显著增加核电，以便全世界实现其气候和可持续发展目标。
4. 2017 年的世界铀产量与 2016 年水平相似，约 63 000 吨。价格低迷大大限制了各公司筹集勘探、可行性研究和新扩展项目建设资金的能力。全球铀资源、铀转化、铀浓缩和铀燃料制造能力对满足需求绰绰有余。
5. 位于哈萨克斯坦的原子能机构低浓铀银行贮存设施于 2017 年 8 月落成。2017 年 11 月发布了低浓铀采购招标书。
6. 全世界核电厂在加强和改进安全方面继续取得进展。最普遍的挑战包括组织改革的实施、调试活动的延迟、人员能力建设、维护活动的优化、电厂重大安全修改的评定、事故管理的加强和厂内应急准备与响应以及安全的领导和管理。原子能机构利用其安全标准和经改进的工具和材料，继续在这些领域协助和指导成员国。
7. 迄今，已从核电厂卸出约 400 000 吨重金属乏核燃料，其中约 25%正在进行后处理。在 27 个国家有 151 个离堆乏燃料干法贮存设施。
8. 今后数年，预计全世界将有大量的动力堆、研究堆、临界装置和其他燃料循环设施退役工作。
9. 若干国家在高放废物和（或）作为废物申报的乏燃料的深部地质处置项目和弃用密封放射源钻孔处置项目上取得了进展。所有其他各类放射性废物处置设施正在世界各地运行。
10. 若干成员国继续进行先进裂变反应堆的研究与发展（研发）和部署。大多数新加入核电国家考虑将具有增大功率输出的先进水冷堆作为其首座反应堆。基于长达数 10

年设计、建造和运行经验的若干快堆技术正在部署和发展。包括新加入核电国家在内的许多成员国正在致力于开发具有增加安全和效率特性的气冷堆。有 50 多座所有主要反应堆类型的中小型反应堆或模块堆正在开发，其中三座处于建造后期阶段。这些活动得到了若干革新型核能系统国际倡议的支持。

11. 对利用核能进行海水淡化、氢生产、区域供热、三次采油等非电力应用和其他工业应用的兴趣日益增加。热电联产可抵消相当一部分的核电生产成本。

12. 显然，国际热核实验堆场址取得了显而易见的重大进展，若干成员国正在实施广泛的聚变研发计划。聚变能源领域的另一个关键里程碑是优化仿星器 Wendelstein 7-X 首次制造出等离子体。

13. 加速器继续服务于环境研究、生物医学应用、材料科学、文化遗产表征、出处鉴定和放射性碳测龄。在 2017 年初发出“第一束光”后，中东第一个同步加速器光源“中东同步加速器辐射促进实验科学及应用科学国际中心”启用。

14. 56 个国家的 238 座在运研究堆继续在支持医疗、工业、教育和核电部门方面发挥战略作用。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）发展的国家重点设施。2017 年，两个新研究组织成为由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心。

15. 迄今，有 97 座研究堆和两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关闭。实现转换高通量、高性能研究堆所需的高密度低浓铀燃料的商业供应还需要开展进一步的工作。2017 年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。将加纳唯一一座研究堆从高浓铀燃料转换为低浓铀燃料的三年期项目于 2017 年完成，高浓铀燃料已于这一年返还中国。

16. 虽然偶尔的反应堆停堆造成了挑战，但使用最多的医用同位素钼-99 的全球供应通过主要国际生产商，供应链协调机构、政府利益相关方和所涉研究堆之间开展良好合作和集体采取预防行动得到了维持。

17. 作为核或辐射应急准备的一部分，快速鉴定能力被认为对防止潜在污染农产品到达消费者手中不可或缺。许多机构可能参与应急响应，大数据集的高效管理和解释对适当决策至关重要。信息技术决策支持系统工具有新的发展，这些工具使得能够改进大数量数据的实时管理和从时间与空间提供综合决策支持。但是，侧重确保就粮食和农业作出决定的工具并不多。为此，原子能机构开发了基于云的综合工具 DSS4NAFA，用于优化农业相关数据的收集、管理和可视化。在获得放射性核素浓度数据后，该工具可基于风险程度和具体耐受水平提出粮食和种植限制建议。将在 2018 年推出该工具的测试版本。

18. 自 20 世纪 50 年代以来，一直在进行旨在开发疫苗的病原体辐照研究，但过度辐照往往破坏疫苗的核酸结构和蛋白质结构。现代辐照器可以有效方式产生更高和更特

定的剂量，再加上基因组研究的进步和对免疫系统的更好了解，为各种新疫苗的开发开辟了领域。辐照疫苗技术的当前发展正在证明有潜力生产防治许多致病病毒、寄生虫和细菌的新疫苗，从而能够对动物健康和人类健康及发展中国家经济产生显著积极的影响。

19. 农业造成的河溪污染对人体健康、生物多样性和渔业有着不利影响。由于污染物来源的多源性，需要制订多种方案对溶质的来源和在土壤中的迁移进行明确表征。氮、碳、氧、硫和氢的稳定同位素都可用作示踪剂提供农业生态系统中的这种信息。每个元素的同位素元素都是独一无二的，因此可用来对经常重叠的来源进行指纹识别。使用多种稳定同位素示踪剂进行的研究与传统技术相结合，可提供多种污染途径的清晰画面，所提供的信息将有助于提高土地管理实践的可持续性。

20. 立体定向放射治疗是一种通过对肿瘤施用精确靶向辐射来治疗癌症的非手术性先进辐射技术，避免了与侵入性手术相关的显著风险，这对难以到达或靠近重要器官的那些部位而言尤其如此。这一系统涉及三维成像和四维肿瘤定位，以及高度聚焦的 γ 射线或 X 射线射束。使用线性加速器，可以对大型肿瘤进行一次性治疗。该技术可用于治疗医学上无法进行手术患者的许多脑功能性疾病、早期肺癌、前列腺癌、胰腺癌、肝癌和肾癌以及头癌、颈癌和脊髓癌。临床试验表明，在许多临床环境中，与传统的放射治疗相比，立体定向放射治疗可能成为一种成本效益好的治疗。

21. 痴呆症有多种形式，以阿尔茨海默氏病最为常见。早期阶段可能难以诊断出特别的临床症状。但核技术现正在确定潜在疾病过程方面发挥重要作用，有时在症状显现之前数年就能确定，从而使得能够作出适当的鉴别诊断。核医学也被称为分子成像，能够诊断各种脑部疾病及区分由神经退行性痴呆和诸如中风等有着类似症状的其他状况引起的症状。此外，放射性示踪剂可提供痴呆症的可靠生物学标志物，协助临床医生诊断不同的痴呆症。通过神经成像取得的进步正在提供有关疾病过程的关键知识，这将有助于改进治疗发展。

22. 海洋已成为包括塑料在内的许多陆源性污染的最终储存库。现在可以通过使用核和同位素技术进行的研究更好地了解微塑料对海洋生物的特殊影响。微塑料通过简单摄入造成不良影响，也可能沉积在内脏器官中，而可能成为污染物进一步转移（包括转移到人类）的有效媒介。当前研究正在探索微塑料和相关污染物在具有社会和经济重要性的海洋物种中的最终去向和毒性。

23. 几十年来，一直利用治疗用放射性药物杀死癌细胞。但是，所用的 β 粒子比相同能量的 α 粒子穿行更远。正是这一差别使得 α 粒子能够精确地进行癌细胞靶向定位，同时大大降低破坏靶向区之外或周围的其他组织的危险。正在对各种 α 发射体放射性核素进行临床前和临床一级的评价，以确定它们用作放射性药物的潜力，从而将进一步推动癌症治疗。

24. 2017 年，核应用实验室的改造项目达到了若干重要里程碑。新的虫害防治实验室落成，并开始进行塞伯斯多夫移动模块式实验室的工作。这一年期间筹集了进一步的预算外资金，从而使 31 个成员国和其他捐助者为实验室现代化提供的财政捐款总额达到近 3250 万欧元。为将原子能机构的伙伴关系和资源调动基础扩大到其传统伙伴之外而进行的努力导致与瓦里安医疗系统缔结了将一台直线加速器租赁给剂量学实验室使用 10 年的伙伴关系，一个成员国为该加速器的支持服务提供了实物捐助予以补充。原子能机构与岛津公司签署了通过“和平利用倡议”捐赠一台液相色谱仪的“合作备忘录”，以供开展在食品安全研究和培训领域更好地向成员国提供支持的活动。

2018 年核技术评论

主 体 报 告

A. 动力应用

A.1. 当今核电

1. 截至 2017 年 12 月 31 日，全球共有 448 座在运核动力堆，总装机容量为 392 吉瓦（电）¹（见表 A-1）。这表明与 2016 年相比，总容量增加约 1.2 吉瓦（电）。在在运反应堆中，约 81.9%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。将近 89%的核发电量由 370 座轻水反应堆生产。

2. 2017 年，有四座新的压水堆并网：中国有两座（福清 4 号机组、田湾 3 号机组、阳江 4 号机组），巴基斯坦有一座（恰什玛核电厂 4 号机组）。有五座反应堆被永久关闭：古里 1 号（大韩民国）、奥斯卡港 1 号（瑞典）、圣玛丽亚-德加罗纳（西班牙）、文殊堆（日本）和贡德雷明根-B（德国）。文殊堆和圣玛丽亚-德加罗纳在被宣布永久关闭之前一直处于长期关闭状态。

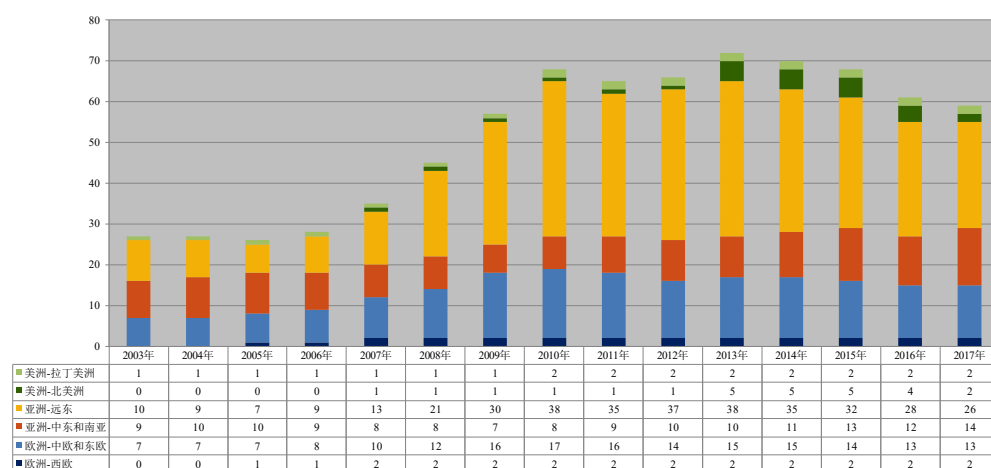


图 A-1. 按地区分列的在建反应堆数目。（资料来源：原子能机构动力堆信息系统 <http://www.iaea.org/pris>）

3. 截至 2017 年 12 月 31 日，共有 59 座反应堆在建。新古里 5 号（大韩民国）、库丹库拉姆 3 号和 4 号（印度）和卢普尔 1 号（孟加拉国）开始建造。扩展以及近期和远期增长前景仍集中在亚洲（图 A-1），有 40 座反应堆在建。2005 年以来并网的 59 座新建反应堆中有 51 座也在亚洲。

¹ 1 吉瓦（电）相当于 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 2017 年 12 月 31 日）^a

国家	在运反应堆		在建反应堆		2017 年供应的核电量		截至 2017 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	1 633	1	25	5.7	4.5	82	2
亚美尼亚	1	375			2.4	32.5	43	8
孟加拉国			1	1 080				
白俄罗斯			2	2 220				
比利时	7	5 918			40.2	49.9	289	7
巴西	2	1 884	1	1 340	14.9	2.7	53	3
保加利亚	2	1 926			14.9	34.3	163	3
加拿大	19	13 554			95.1	14.6	731	6
中国	39	34 514	18	19 016	232.8	3.9	280	9
捷克共和国	6	3 930			26.8	33.1	158	10
芬兰	4	2 769	1	1 600	21.6	33.2	155	4
法国	58	63 130	1	1 630	381.8	71.6	2 164	4
德国	7	9 515			72.2	11.6	832	7
匈牙利	4	1 889			15.2	50.0	130	2
印度	22	6 255	7	4 824	34.9 ^b	3.2	482	11
伊朗伊斯兰共和国	1	915			6.4	2.2	6	4
日本	42	39 752	2	2 653	29.3	3.6	1 823	5
大韩民国	24	22 494	4	5 360	141.3	27.1	523	5
墨西哥	2	1 552			10.6	6.0	51	11
荷兰	1	482			3.3	2.9	73	0
巴基斯坦	5	1 318	2	2 028	8.1	6.2	72	5
罗马尼亚	2	1 300			10.6	17.7	31	11
俄罗斯联邦	35	26 142	7	5 520	190.1	17.8	1 261	9
斯洛伐克	4	1 814	2	880	14.0	54.0	164	7
斯洛文尼亚	1	688			6.0	39.1	36	3
南非	2	1 860			15.1	6.7	66	3
西班牙	7	7 121			55.6	21.2	329	1
瑞典	8	8 629			63.1	39.6	451	0
瑞士	5	3 333			19.6	33.4	214	11
乌克兰	15	13 107	2	2 070	80.4	55.1	488	6
阿拉伯联合酋长国			4	5 380				
英国	15	8 918			63.9	19.3	1 589	7
美利坚合众国	99	99 952	2	2 234	805.6	20.0	4 309	9
总计 ^{c、d}	448	391 721	59	60 460	2 503.1		17 430	6

a. 数据来源于原子能机构“动力堆信息系统”（<http://www.iaea.org/pris>）。

b. 印度的电力数据基于所提供的年度国家水平值，因为在本报告印发之时无法获得一些反应堆的数据。

c. 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 35.1 太瓦·时，占总发电量的 16.3%。

d. 总运行经验还包括意大利（80 年零 8 个月）、哈萨克斯坦（25 年零 10 个月）、立陶宛（43 年零 6 个月）和中国台湾（206 年零 1 个月）的已关闭核电厂。

A.1.1. 新加入核电国家

4. 在表示对核电感兴趣的 28 个成员国中，有 19 个已开始对核电基础结构进行研究；四个已做出决定，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。预计还有 21 个成员国将继续努力在下一个 10 年内做出建立核电计划的决定。

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四座反应堆均继续施工。1 号机组定于 2018 年开始运行，其他三台机组在随后的几年里相继运行。原子能机构 2017 年进行了教育和培训评价工作组访问和运行前安全评审组工作访问。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正在进行，两台机组预计定于 2019 年和 2020 年进行调试。最终安全分析报告已于 2017 年提交监管审查。2017 年，接待了一次原子能机构场址和外部事件设计工作组访问。

6. 在孟加拉国，卢普尔核电厂 1 号机组从 11 月 30 日开始进行安全相关施工。卢普尔两台机组预计分别在 2023 年和 2024 年进行调试。在土耳其，根据有限的建造许可证，从 10 月开始在阿库尤进行非核工程建设，1 号机组计划于 2023 年进行调试。埃及就埃尔达巴核电厂四台机组建设的四个主要协议完成了与俄罗斯联邦国家原子能公司的谈判，计划于 2023 年至 2026 年完成建设。

7. 约旦与俄罗斯联邦国家原子能公司之间的谈判取得了进展。随着关键的电网研究和冷却水研究的完成，预计在 2018 年做出最终投资决定。尼日利亚于 2017 年 10 月与俄罗斯联邦签署了关于一座核电厂的建造和运行以及一个核研究中心的协议，并签署了和平核技术合作路线图。波兰和沙特阿拉伯开展了国际招标工作，计划在 2018 年进行招标。肯尼亚即将就核电计划做出决定。

8. 成员国继续利用原子能机构的援助，根据支持建立安全、可靠和可持续的核电计划的“里程碑”方案，发展必要的国家核基础结构。这涉及系统地涵盖了 19 个核基础结构问题的同行评审和专家工作组访问、培训课程和工具。随着 2017 年在加纳进行的综合核基础结构评审工作组访问，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达到在 16 个成员国进行了 22 次。

A.1.2. 扩展核电国家

9. 目前有 38 座核动力堆在运，19 座正在建设中，中国继续拥有规模最大的扩展计划，已规划到 2030 年在海外建设 30 座反应堆。

10. 芬兰的奥尔基洛托 3 号欧洲压水堆项目已进入调试阶段，冷功能测试已经完成。继热功能测试之后，计划于 2019 年初开始商业运行。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。

11. 2017 年 3 月，欧洲委员会核准了波克什二期核电厂的新机组建设；2017 年 4 月，匈牙利原子能机构颁发了最终环境许可证和核电厂场址许可证。

12. 2017 年 9 月，巴基斯坦卡拉奇 2 号机组完成了三台蒸汽发生器的首台安装。卡拉奇 2 号机组是在该场址建造的两座中国“华龙一号”反应堆的第一座。（图 A-2）



图 A-2. 2017 年 9 月巴基斯坦卡拉奇 2 号机组施工工程。（照片来源：中国核工业建设集团公司）

13. 伊朗伊斯兰共和国布什尔 2 号机组 3 月开始非安全相关施工工程。这座 VVER-1000 型机组计划于 2024 年完成，布什尔 3 号机组随后在 2026 年完工。

14. 在美国，随着南方核电公司从西屋公司接管项目管理，沃格特 3 号和 4 号 AP1000 机组的建造继续进行，计划分别于 2021 年和 2022 年投入运行。由于经济原因，同样为 AP1000 反应堆的萨默 2 号和 3 号的建造于 2017 年 7 月暂停。

15. 5 月，阿根廷国家核电公司与中国核工业集团公司签署了两座新反应堆的协议：一座新的 720 兆瓦（电）坎杜反应堆计划于 2018 年开工建设，一座 1000 兆瓦（电）“华龙一号”反应堆随后于 2020 年开工。

16. 8 月，印度与俄罗斯联邦国家原子能公司签署了有关库丹库拉姆核电厂 5 号和 6 号机组的合同。两台机组均为 VVER-1000 型反应堆，将与印度核电公司合作建设。

17. 10 月，南非环境事务部授予了在毗邻在运的科贝赫核电厂的 Duvnefontein 建设和运行一座 4000 兆瓦（电）核电厂及相关基础设施的环境批准书。

A.1.3. 运行核电国家

18. 截至 2017 年底，448 座在运核动力反应堆中，47%已经运行了 30 年至 40 年，另有 17%运行了 40 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。

19. 法国电力公司为了实现安全运行现有核电厂机组远超 40 年的工业战略，启动了“大修”计划，其中涉及重大电厂翻新计划以提高性能和安全。该计划预计运作 10 年。至于法国部分现有核电厂的替换，弗拉芒维尔 3 号欧洲压水堆现在处于调试阶段，冷功能测试已经完成。在热功能测试后，计划在 2018 年年底开始商业运营。

20. 美国在运核电厂的许可证更新是成熟稳定的过程，99 座反应堆中有 86 座拥有运行长达 60 年的更新许可证。按照与首次许可证更新相同的监管程序，美国核管理委员会于 2017 年 7 月发布了有关电厂运行长达 80 年的后续许可证更新指导文件。

21. 保加利亚的科兹洛杜伊 5 号和 6 号反应堆的运行许可证分别在 2017 年和 2019 年到期。2017 年 11 月，保加利亚核管理机构将 5 号机组的运行许可证延长至 2027 年，首次允许核反应堆运行超出其原运行许可证期限。

22. 日本 42 座可运行反应堆中，有五座迄今已经审核检查，确认它们符合新的监管安全标准并恢复运行。它们是：九州电力公司的川内 1 号和 2 号；四国电力公司的伊方 3 号；关西电力公司高滨 3 号和 4 号。另有 20 座反应堆已申请重启。

23. 原子能机构和世界核电营运者联合会收集的安全指标表明，核电厂的运行安全仍然高水平。图 A-3 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。紧急停堆只是几种可能的、但常用的安全实绩指标之一。

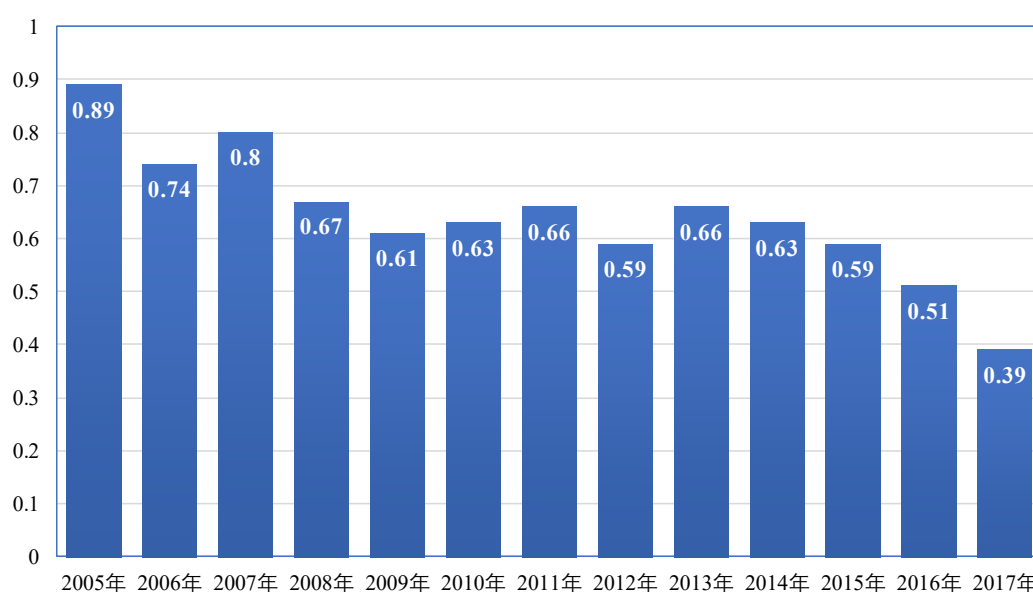


图 A-3. 平均紧急停堆率：机组每运行 7000 小时的自动和手动紧急停堆次数（数据来源：原子能机构动力堆信息系统：www.iaea.org/pris）。

A.2. 核电增长预测

24. 根据原子能机构 2017 年的预测（图 A-4），在高值假想方案下，全球核电容量预计到 2030 年将增加到 554 吉瓦（电），到 2050 年增加到 874 吉瓦（电）。这意味着到 2030 年将比当前水平增加 42%，到 2050 年容量将翻一番。在低值假想方案下，在 2040 年之前核电容量预计将逐渐下降，到 2050 年又将反弹到大约当前的水平。

25. 这些预测的范围很广，部分原因是计划在 2030 年左右及以后退役的反应堆相当多，特别是在北美和欧洲，以及是否将建造新的核容量来替代它们存在不确定性。

26. 原子能机构、经济合作与发展组织国际能源机构和世界核协会的高值假想方案一致表明到 2030 年的增长范围为 500—600 吉瓦（电），而低值假想方案反映更大的增长不确定性（图 A-5）。

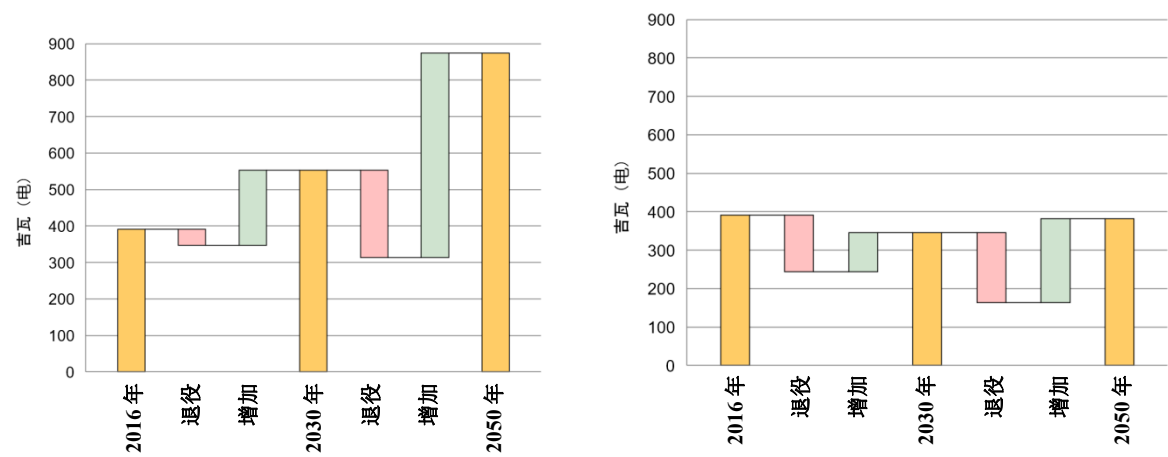


图 A-4. 全球核能力的高值预测（左）和低值预测。（资料来源：到 2050 年期间的能源、电力和核电预测，原子能机构《参考数据丛书》第 1 号，2017 年）。

27. 核电为减少全球温室气体排放做出重大贡献，同时满足日益增长的人口和支持可持续发展所不断增加的能源需求。核反应堆在运行期间几乎不产生温室气体排放或空气污染物，并且在整个寿期内只有非常低的排放量。因此，核电的使用每年避免排放近 20 亿吨二氧化碳。

28. 171 个国家批准的“巴黎协定”呼吁各国把全球平均温升幅度限制在高于工业化前水平 2℃ 以内。原子能机构、国际能源机构和世界核协会的调查结果强调，为了达到 2℃ 的目标，需要在较长的时期内更多地使用核电。核电在减缓气候变化以及确保能源安全和非气候环境与社会经济效益方面的优势，是许多国家（特别是发展中国家）打算在未来几十年内引入核电或扩大现有计划的重要原因。

29. 原子能机构 2017 年 10 月 31 日至 11 月 2 日在阿布扎比举行了 21 世纪的核电部长级国际会议。国家发言和小组讨论侧重于利用核电解决 3E（能源-经济-环境）三难问题、发展核电基础结构方面的挑战、核能的安全和可靠性方面以及核技术的创新和进步。会议强调，为实现可持续发展和气候目标，世界需要大量的核电增长。

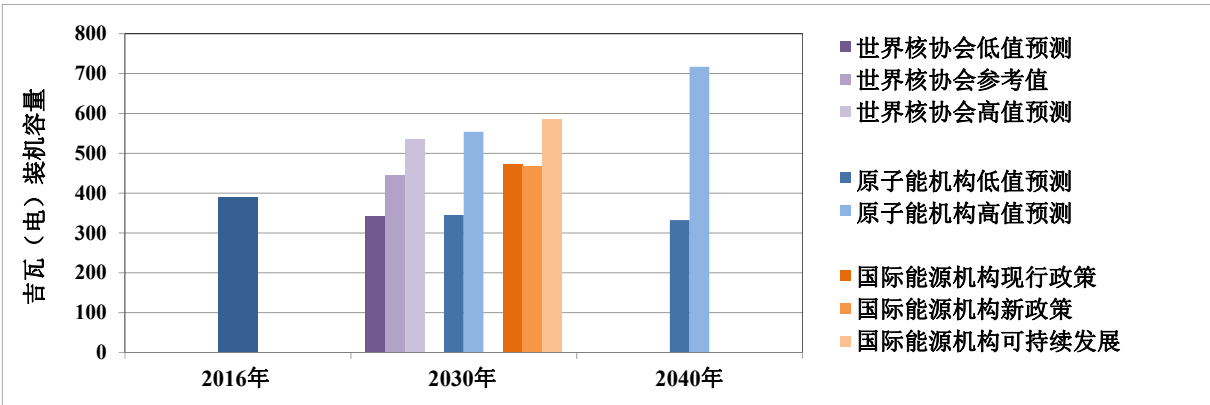


图 A-5. 原子能机构 2017 年核电装机容量预测与国际能源机构假想方案和世界核协会预测的比较（国际能源机构的数字基于总装机容量）。

A.3. 燃料循环

A.3.1. 前端

铀资源和生产

30. 2017 年，铀现货价格仍然低迷，一般保持在 42 美元/千克铀至 54 美元/千克铀之间。价格的走低大大限制了各公司筹集勘探、可行性研究和新扩展项目建设资金的能力。因此，2017 年的全球产量很可能与 2016 年产量相似，2016 年产量为 63 366 吨铀，而 2015 年为 60 496 吨铀。

31. 哈萨克斯坦保持了其作为世界领先铀生产国的地位，所产铀几乎全部来自其原地浸出矿。产量经过 2000 年至 2012 年的迅速增长之后，2015 年为 23 800 吨铀，2016 年为 30 062 吨铀，2017 年预计产量相似。

32. 加拿大是第二大生产国，雪茄湖（世界最高品位铀矿，于 2015 年 5 月投入商业生产）目前年产能为 5000 吨铀/年，预计到 2018 年初将增至 6900 吨铀/年。

33. 纳米比亚湖山铀矿于 2016 年投入商业生产，当年生产了 192 吨铀。产量预计将增长，满负荷产能可达 5770 吨铀/年，预测寿期超过 20 年。纳米比亚的罗兴铀矿和兰格·海因里希铀矿在 2017 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研究工作。

34. 澳大利亚四英里原地浸出铀矿年产能约为 1400 吨铀/年。兰格项目 2016 年产量为 1994 吨铀，预计 2017 年为 1700—2000 吨铀，相比之下，1997 年至 2009 年期间的产能为 4000—6000 吨铀/年。根据当前协议，开采和加工必须在 2020 年 1 月前停止，恢复工作在五年内完成。奥林匹克坝铜-铀-金-银矿继续进行常规运营，同时继续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取得了进展，但尚未公布确切的施工日期和开矿日期。

35. 继续对丹麦王国格陵兰科瓦内湾矿床的稀土、贱金属和铀项目开展可行性和环境研究及审批工作。

36. 中国通过国内外的铀勘探和开发开支继续显示出对核增长的坚定承诺。国外开发支出仍然很大，主要是因为对纳米比亚湖山矿的开发。

37. 西班牙萨拉曼卡铀项目正在进行许可证审批，若干法律程序已按国家条例完成。该装置的建造和调试将需要在该国核安全监管机构提出报告后由政府授权。

38. 2017 年初，巴西核工业公司启动了巴西巴伊省恩热纽矿的工作，称该矿预计当年产出 73 吨铀浓缩物，潜在年产量为 280—300 吨铀浓缩物。正对现有卡埃蒂特矿的地下延伸或者另一个露天矿井开展可行性研究和监管工作。

39. 许多铀项目仍处于暂停状态，或者开支很小。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。2017 年 11 月的一项重要通告是暂停加拿大麦克阿瑟河矿和基湖矿作业生产，预计为 10 个月。

转化和浓缩

40. 目前的转化和浓缩能力对满足需求绰绰有余，但市场的分化使生产集中在少数几个厂，从而构成了挑战。

41. 2017 年 10 月，Centrus 能源公司与美国能源部橡树岭国家实验室签署了一项合同，继续共同合作，以降低 AC100 气体离心机浓缩技术成本和提高其效率。

42. 先进的“第九代+”气体离心机通过了必要测试并带来大幅节约能源的希望，从 2018 年起将在俄罗斯联邦斯维尔德洛夫斯克地区新乌拉尔斯克的乌拉尔电化学综合厂采用。

燃料制造

43. 根据 2017 年 1 月生效的一项合同，俄罗斯联邦国家原子能公司下属 TVEL 燃料公司将在 2017 年和 2018 年为俄罗斯合作伙伴建造的中国实验快堆生产和供应燃料组件。2017 年 9 月，TVEL 燃料公司与 HAEK CJSC 签署了合同，为 440 兆瓦的亚美尼亚 2 号反应堆下次换料供应核燃料，并储备燃料两年。

44. 2017 年 1 月，中国核工业集团公司下属包头核燃料公司获准生产西屋电气公司的 AP1000 核燃料棒。这使中国核工业集团公司能够完成其燃料棒生产线，并制造 AP1000 燃料组件。

45. 2017 年 7 月，包头中核北方核燃料元件有限公司开始了高温气冷堆燃料元件的规模化生产，这标志着从实验生产线到工业运行的转变。该设施已生产了约 20 万个球形燃料元件，有能力每年为山东省石岛湾在建高温气冷堆示范堆生产 30 万个球形燃料元件。

46. 日本原子力规制委员会于 2017 年 4 月允许对神奈川县横须贺全球核燃料-日本公司的燃料制造厂的燃料制造许可证进行修订，这是符合福岛第一核电站事故后引入的新监管要求的关键步骤之一。全球核燃料-日本公司是通用电气牵头联合日立公司和东芝公司的全球核燃料合资企业，设计和生产沸水堆燃料。

47. 2017 年 9 月，一批 16 个混合氧化物核燃料组件从法国运抵日本高滨核电站，供 4 号机组在 2018 年使用。原子燃料工业公司授予了阿海珐集团公司² 一项合同，为关西电力公司高滨 3 号和 4 号机组生产 32 个混合氧化物燃料组件。

48. 加拿大能源和矿产公司于 2017 年 5 月签署了 10 年展期协定，继续为布鲁斯核电厂供应核燃料。

² 在法国核工业重组后，阿海珐集团公司于 2018 年 1 月分拆为欧安诺（核燃料业务）和法马通（核反应堆业务）。

49. 2017 年 6 月，西屋电气公司推出了耐受事故燃料 EnCore™，希望最早于 2018 年制造领先试验棒。该公司表示，EnCore™ 燃料将提供设计基准变更的安全和更高的铀效率，从而有助于电力公司节省费用。

50. 2017 年 8 月，西屋电气公司展期了与新泽西美国电力公司 PSE&G 的合同，以便为萨拉姆核电厂的两台机组提供燃料。

51. 2017 年 9 月，阿海珐集团公司与美国核燃料开发商 Lightbridge 公司商定于 2018 年初启动一家 50:50 合资企业，以制造核电厂先进金属燃料的新生产线，并进行商业化。Lightbridge 公司开发的燃料可用于现有电厂和在建新电厂提高运行效率和安全。2017 年 10 月，Lightbridge 公司与挪威哈尔登研究堆营运者即能源技术研究所签署了订单，为试验其燃料设计和制造第二个辐照试验台架，这是将其燃料技术推向市场的一个里程碑。

52. 2017 年 2 月，阿海珐集团公司进入了美国能源部增强型耐受事故燃料的第二阶段，以期通过掺氧化铬芯块和铬包覆包壳提高效率和可靠性。

53. 俄罗斯联邦继续测试两类新燃料：轻水堆再生混合燃料和快堆铀钚混合氮化物燃料。

A.3.2. 供应保证

54. 原子能机构理事会于 2010 年 12 月核准建立原子能机构低浓铀银行。为了在乌斯特-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，原子能机构与哈萨克斯坦于 2015 年完成了基本法律框架。与俄罗斯联邦和中国的过境协定业已签订，目前正推进与这两个国家及哈萨克斯坦授权组织的运输合同谈判。

55. “具体活动计划”接近完成，解决了包括场址安全和安保相关问题在内的诸多问题。2017 年夏天，哈萨克斯坦原子能机构低浓铀贮存设施建造完工。原子能机构 2017 年 8 月的工作组访问确认，已根据原子能机构的安全标准和安保导则文件建造和调试了原子能机构低浓铀贮存设施，并为运行做好了准备；以及已实施了适当措施确保在其整个运行过程中对工作人员、公众和环境进行保护。该设施于 2017 年 8 月 29 日落成。

56. 审定“容器管理计划”方面也取得了进展，该计划将确保容器在原位和在随后运输中的长期安全和安保。2017 年 4 月的试验测试根据即将出台的相关国际标准化组织标准模拟了对容器重新认证的测试，其结果将为最终的“容器管理计划”提供资料。2017 年 11 月发布了低浓铀采购招标书。

57. 《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

58. 迄今，已从核电厂卸出约 40 万吨重金属。卸出的燃料中目前正接受后处理的比例约为 25%，到 2020 年这一比例预计将上升至 30%。目前有 151 个离堆乏燃料干法贮存设施分布在 27 个国家。

59. 2017 年有两个国家签署了新的离堆干法贮存设施合同：斯洛文尼亚的设施在克尔什科核电站，而巴西的设施则用于贮存安格拉 1 号和 2 号机组的乏燃料。目前正根据福島事故后安全导则设计克尔什科核电站，使其达到更高的抗震和防严重洪灾要求。

60. 2017 年，设计贮存期限为 100 年的英国塞兹韦尔 B 核电厂的干法贮存设施收到了首批装有燃料的屏蔽容器。

61. 匈牙利的波克什模块结构干法贮存设施以前的容量为 20 个坑室贮存 9308 组燃料组件，2017 年进行了扩容，增加了 4 个坑室。

62. 乌克兰切尔诺贝利核电站 ISF-2 号临时贮存设施由一个燃料切割/包装设施和乏燃料贮存模块组成，目前正在进行大功率沸腾管式堆燃料切割作业的调试试验。2017 年授予了在切尔诺贝利禁区内建造新的动力堆燃料集中干法贮存设施的监管许可。该设施计划于 2019 年开始运营。

63. 2017 年期间报告了一些工业创新活动，包括旨在降低应力腐蚀裂纹可能性的焊接干法贮存密封容器激光喷丸，以及方便检查贮存密闭容器的紧凑干法贮存模块的开发。

64. 在乏燃料后处理和再循环方面，法国扩大了将在阿格处理的轻水堆用燃料的范围。俄罗斯联邦也继续扩大奥焦尔斯克马雅克化学联合公司 RT-1 厂能够后处理的燃料范围。在这方面，2017 年对 RT-1 厂进行了升级，使其能够后处理 20 吨 VVER-1000 的燃料。

65. 2017 年 3 月，英国核退役管理局称，热中子堆氧化物燃料后处理厂将于 2018 年 11 月左右停止运营。自 1994 年以来，在该厂后处理了约 9500 吨氧化物燃料。

66. 2017 年 8 月，印度英迪拉·甘地原子研究中心与印度斯坦建筑公司签订了合同，未来四年期间在卡尔帕卡姆建造快堆燃料循环设施。俄罗斯联邦目前正在核反应堆研究所建造多功能放射化学研究设施。俄罗斯联邦国家原子能公司于 5 月宣布，该设施将纳入国际研究中心的框架内，以测试快堆闭合燃料循环的技术。

67. 2017 年 8 月，俄罗斯联邦安德烈耶娃湾北方舰队贮存设施的首批乏燃料经火车运抵马雅克工厂（距离 3000 公里）进行后处理。计划用估计 50 车皮将所有 2.2 万个核潜艇乏核燃料元件运往马雅克，估计在那里要处理 5 年至 10 年。

A.3.4. 退役、环境治理和放射性废物管理

核设施退役

68. 全世界有 164 座动力堆已关闭或正在退役。其中 17 座反应堆已完全退役，还有若干座正进入退役最后阶段。已经永久关闭或正在退役的燃料循环设施超过 150 座，还有约 125 座已经退役。已经关闭或正在进行退役的研究堆超过 180 座，有 300 多座研究堆和临界装置已完全退役。

69. 主要是在比利时、法国、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、西班牙、英国和美国等有着广泛核电计划的国家进行的研究与发展工作正在产生持续的改进。2017 年 4 月，日本原子力开发机构在福岛县富冈町开放了新的先进退役科学共同实验室研究中心。富冈町国际共同研究大楼将作为先进退役科学共同实验室的中央设施，供国家和国际机构从事研发工作。2017 年，法国阿海珐集团公司完成了利用激光技术后处理厂裂变产物蒸发器的拆除工作。

70. 2017 年修订了日本福岛第一核电站反应堆退役的“中长期路线图”和“技术战略计划”。主要问题仍然是流入反应堆厂房并与冷却燃料碎片的滞留水混合的地下水形成的受污染水，目前正用核素去除系统处理这些受污染水。自 2016 年以来，为陆地一侧防渗墙安装了冷冻管来阻拦地下水，墙的最后一部分的冷冻从 2017 年 8 月开始进行。

71. 在欧洲复兴开发银行的支持下，保加利亚、立陶宛、斯洛伐克（图 A-6）和乌克兰的核电厂退役项目取得了显著进展。



图 A-6. 2017 年 10 月，拆除斯洛伐克 V1 博胡尼斯核电厂冷却塔。（照片来源：核和退役公司）。

治理

72. 日本定期报告场外去污的进展。截至 2017 年 3 月底，已经完成福岛第一核电站方圆 20 公里内特别去污区亦是事故后第一年年度额外有效剂量率预计超过 20 毫希区域的全区去污工作。关于测定的空气剂量率超过 0.23 微希/小时（相当于在特定条件下额外剂量超过 1 毫希/年）的密集污染调查区，已完成 89 个市的去污工作，还有剩余 3 个市将在 2018 年 3 月底前完成。

弃用密封放射源的管理

73. 若干成员国对弃用密封放射源的寿期末管理给予了进一步支持。加纳和马来西亚在钻孔处置项目上取得进展，而其他几个国家也表示对可能实施钻孔处置有兴趣。建立并维护存量清单仍然是一些成员国的优先事项。

74. 在捐助者的支持下，2017 年为阿尔巴尼亚、玻利维亚、厄瓜多尔、黎巴嫩、前南斯拉夫马其顿共和国、巴拉圭、秘鲁、突尼斯和乌拉圭启动了高活度源移除项目，预计于 2018 年完成。从利比里亚的一家医院移除了一个高活度弃用密封放射源，并进行了安全可靠的贮存。

75. 在加纳、洪都拉斯和马来西亚等若干成员国完成了三类至五类弃用密封放射源的整备作业。在这些工作组访问期间培训了废物营运者和监管工作人员，提升了他们安全管理弃用密封放射源的能力。

76. 将移动热室纳入钻孔处置系统的工作取得了重大进展，这将最大程度地减少高活度源操作和避免不必要的运输。2017 年 9 月在南非演示了这一整合工作。此外，组装移动工具包以支持三类至五类弃用密封放射源整备作业的工作继续取得进展。预计 2018 年初开始培训成员国使用工具包。

77. 若干成员国参加了作为原子能机构援助管理弃用密封放射源的倡议于 2017 年启动的合格技术中心的初步设计和评价过程。

放射性废物预处理

78. 塞拉菲尔德公司于 2017 年 2 月宣布，塞拉菲尔德乏燃料贮存池的首桶 500 升放射性污泥（包括藻类、腐蚀产物和风化物）已在该场址的封装厂进行了水泥固化，封盖的废物体做好了供长期处置的准备。塞拉菲尔德公司表示，污泥移除项目的实施比计划提前了 10 年，费用只有预计 2 亿英镑（2.49 亿美元）的一半。

79. 美国能源部爱达荷场址独一无二的超级压实器已运行超过了 10 万小时，能用 1800 吨压力将 200 升废物压实后装入桶中。在过去 14 年期间，该压实器已压实了超过 23.8 万桶废物残渣，估计节省了向废物隔离中间工厂运送近 4.3 万立方米废物所需的 6000 卡车货运量。

80. 镁诺克斯公司及其子公司利用创新处理技术成功移除了英国布拉德韦尔核电站共计 65 吨燃料元件碎片。这些固体废物经过重新分类后，在低放废物处置库进行了处置。

81. 在美国汉福德低放废物处理设施成功安装了两个 300 吨熔炉中的第一个。西北太平洋国家实验室为该熔炉开发了一个高放废物玻璃配方的算术算法，以便对每一批要进行玻璃固化的高放废物实现废物和添加剂的最佳混合配比。

82. 巴巴原子研究中心的研究人员宣布，利用从放射性废物萃取铯-137 制造了铯-137

玻璃固化“铅笔”。这一密封源半衰期为 30 年，可替代目前用于食品辐照、近距离治疗和医疗设备灭菌的钴-60 源（半衰期较短，为 5.3 年）。

83. 俄罗斯北部赛达湾可处理 1 万立方米固体放射性废物的处理设施的建造，现已完成了国家环境影响评定，要在俄罗斯西北核废物处理商 SevRAO 支持下整备和管理这类放射性废物。

84. 瑞士联邦核安全检查局核准在保罗·谢尔研究所建造中低放核废物临时贮存设施。在维纶林根规划的“东堆场”大楼将贮存医疗和工业领域应用放射性同位素产生的废物，直至深部地质处置库可供使用。

85. 中国广核集团有限公司和清华大学的研究人员联合开发了一种处理工业废水的电子束辐照系统。通过用电子束照射流出物，可将 70 多种复杂化学特质分解成更小的分子，从而可用正常的生物学过程予以处理和消除。

放射性废物处置

86. 世界各地都有用于处置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的处置设施在运行。这些处置设施包括用于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）；以及位于各种深度地质建造中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）。中低放废物处置设施处于许可证审批或建造的不同阶段，如在比利时、保加利亚、加拿大、德国、伊朗伊斯兰共和国、立陶宛、罗马尼亚和斯洛文尼亚。天然存在的放射性物质废物的处置方案因国家规章而异。

87. 2017 年，加拿大的乏燃料处置计划进展到深部地质处置设施选址阶段，最初意向中的 22 个社区有七个继续参与场址选择过程。对于金卡丁中低放废物地质处置设施的许可证申请，环境和气候变化部要求提供有关安大略电力公司所提交的环境影响报告的更多资料，供加拿大环境评价机构进一步评审。

88. 中国关于未来玻璃固化高放废物存量的地质处置计划继续实施，正对结晶岩和沉积岩建造进行场址调查。中国正考虑在北山地区结晶岩建造中建设地下研究设施的计划，并对内蒙古沉积建造展开进一步地表场址调查。

89. 芬兰核废物管理专家组织正在奥尔基洛托建设世界上首个乏核燃料深部地质处置设施。为了准备冷调试和热调试，该组织审查了技术和业务进展状况，如全尺寸原地系统测试及其他建造和运行试验，目的是获得运行许可证。

90. 法国放射性废物管理组织即国家放射性废物管理机构继续利用原地示范设施和科学实验实施技术开发，以确保所规划的深部地质处置设施的许可证申请具备可靠的科学和技术基础。

91. 2017 年 3 月，德国议会按照高放废物贮存委员会的建议，修订了有关地质处置选址的法律，其中包括选址决定基于安全相关标准并规定利益相关方全面参与。同样在 2017 年，核电厂营运者根据核后端责任法律向国家核废物处置供资基金转入了 241 亿欧元，由此将所有贮存和处置责任转移给了国家。营运者仍需负责退役、废物处理和整备活动。

92. 2017 年 7 月，日本经济、贸易和产业省出版了一份地质处置相关科学特征全国地图，作为实行最终处置的第一步。

93. 俄罗斯联邦放射性废物管理国家营运者开始运行其在斯维尔德洛夫斯克地区新乌拉尔斯克的首个近地表低放废物处置设施。这是计划用来处理全国遗留放射性废物的七个此类设施中的第一个。

94. 瑞典土地和环境法庭于 10 月完成了对瑞典核燃料和废物管理公司乏燃料地质处置建造许可证申请的环境许可证审批，将向政府提交其结论。奥斯卡港市政当局、瑞典辐射安全管理局和其他主管部门重申，它们赞成根据《环境法》授予许可，而东哈马尔市政当局则要在全民公投后才给出最后答复。

95. 瑞士放射性废物管理组织即国家放射性废物处置合作组织提交了申请，要求进一步调查地质处置库计划选址地区 Nördlich Lägern 地下岩石建造的地质和水文地质特征。

96. 美国废物隔离中间工厂超铀中低放废物地质处置设施的事故后恢复工作已充分进展到允许在 2017 年 4 月重新开始运行，但与 2014 年事故前相比放置率有所降低。

B. 先进的裂变和聚变

B.1. 先进的裂变

97. 核电是一项成熟、经过测试的技术，有助于提高能源安全，减少化石燃料价格波动的影响，使经济更具竞争力，排放的温室气体和其他污染物比化石燃料低得多。与任何其他工业部门一样，技术³的研发和不断创新对于保持核电竞争力是必不可少的，即使在变化的商业环境中，包括对于启动核电国家，也是一个有吸引力的选择。

B.1.1. 水冷堆

98. 水冷堆在核工业中发挥着关键作用，已具有超过 1.7 万堆-年的商业运行经验。全球所有在运民用动力反应堆的 95%以上和 58 座在建反应堆中的 56 座都是用轻水或重水进行冷却。2017 年，中国和巴基斯坦有三座新建水冷堆并网发电，印度和大韩民国有两台机组开始建设（图 B-1）。大多数新加入核电国家选择先进水冷堆作为其第一座反应堆，就像在白俄罗斯和阿拉伯联合酋长国的情况一样。原子能机构 2017 年 6 月举

³ 获取更多信息请参阅原子能机构的先进反应堆信息系统：<https://aris.iaea.org>。

行的第六次核装置安全专题问题国际会议重点论证了包括中小型反应堆或模块堆在内的先进水冷核电厂的安全。

99. 大多数先进水冷堆增加了功率输出。近期建造的那些水冷堆的单位输出功率为1000—1700兆瓦，在渐进型设计中规划进一步增加输出。建有单一或多种类型反应堆的多机组厂址成为明显趋势，这有利于规模经济。若干国家为逐步部署更高效的部分或完全闭式燃料循环，正在考虑、研究和建造现有水冷堆的先进版。印度在实施采用钚/铀-233燃料循环的钚基核能三阶段战略——重水堆、快堆和先进重水堆方面正在取得进展。中国用由轻水堆乏燃料和贫铀尾矿组成的天然铀当量混合物对一座在运坎杜堆进行了满堆芯装料。

100. 若干成员国正在开展超临界水冷堆的研发。加拿大超临界水冷堆（重水慢化压力管式反应堆）和中国超临界水冷堆 CSR1000 已完成概念设计。欧洲建立了欧洲高性能轻水堆的概念，并与中国合作对一个堆内燃料鉴定试验设施进行了规划、设计和分析。俄罗斯联邦正在对具有超临界水冷却剂参数的革新型水冷慢化动力堆进行概念研究，其中包括采用快谱堆芯的可能性。

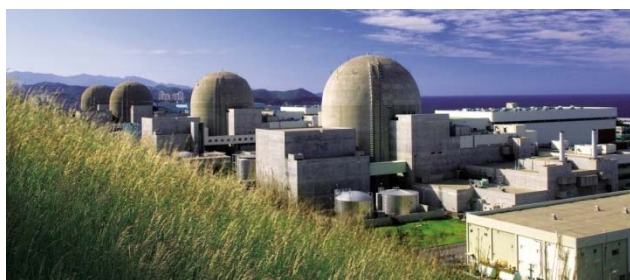


图 B-1. 大韩民国 Hanul（原蔚珍）核电厂有六台机组在运行，另有两台在建。（照片来源：韩国水电和核电公司）

B.1.2. 快中子系统

101. 自1960年以来，世界各地一直在推行重大快堆计划。2017年6月在俄罗斯联邦叶卡捷琳堡举行的第三届“快堆和相关燃料循环：促进可持续发展的下一代核系统”国际会议的结论是，基于快堆的闭式核燃料循环能为数代人提供高效、安全、可持续的清洁能源，特别是在资源保护及高放和长寿命核废物管理方面。国家和国际层面正在开发若干革新型钠冷快堆、铅和铅铋共晶冷却快堆和气冷快堆。也正在开发熔盐快堆作为一种长期方案。

102. 通过在中国、法国、德国、印度、日本、俄罗斯联邦、英国和美国等一些国家开展的实验堆、原型堆、示范堆和商用堆的设计、建造和运行，最成熟的快堆技术即钠冷快堆已有超过420堆-年的经验。

103. 俄罗斯的钠冷快堆 BN-800 于2016年10月投入商业运行（图 B-2）。将在2020年取代 BOR-60 实验快堆的多用途研究钠冷快堆 MBIR 正在建设中，2017年制造了该反

应堆压力容器。关于液态重金属技术，BREST-OD-300 铅冷快堆正处于许可证审批中。



图 B-2. BN-800 钠冷快堆于 2016 年 10 月 31 日开始商业运行。(照片来源：俄罗斯联邦国家核电厂电力和热力生产联合企业)

104. 在印度，500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆已建成，预计 2018 年将达到首次临界。还有两座快中子增殖堆计划建在同一场址。

105. 2017 年，处于工程设计阶段的中国铅基堆“麒麟一号”被选为加速器驱动系统和快堆开发的参考堆。革新型 CFR-600 处于工程设计阶段，计划于 2025 年投入运行。

106. 2016 年 12 月，日本政府决定对长期关闭的文殊原型钠冷快堆实施退役。由于快堆技术被认为对于日本的未来能源结构至关重要，因此革新型钠冷快堆 JSFR 的开发工作将继续进行。

107. 在欧洲，法国政府批准钠冷快堆工业原型堆 ASTRID 的基本设计阶段进行到 2019 年底。在比利时，能够在亚临界和临界模式下作为加速器驱动系统运行的铅铋冷却反应堆 MYRRHA 的建造正在考虑中，目标是在 2024 年底之前建成第一个研发设施。瑞典先进铅堆（SEALER）正在接受加拿大核安全委员会的许可证预审批。目标是在 2021 年底前开始建设这种 3—10 兆瓦（电）“电池”反应堆，用于北极社区和采矿作业的商业电力生产，并在 2025 年对示范机组进行调试。正在开发的其他概念包括第四代铅冷快堆欧洲示范堆 ALFRED 和实验气冷快堆 ALLEGRO。

108. 在美国，泰拉电力公司完成了“增殖和燃烧”行波堆的堆芯概念设计，并正在开发熔盐堆。西屋公司正在开发一种 450 兆瓦（电）革新型铅冷小型模块堆。

B.1.3. 气冷堆

109. 英国继续进行 14 座先进气冷堆的商业运行，并正在开展延寿研究。许多成员国正在开发具有固有安全特性的小型模块化高温气冷堆，这种反应堆消除了对大多数专设能动安全系统的需要。高温气冷堆使用涂敷颗粒燃料，使用氦气作为冷却剂并在高温（ $\geq 700^{\circ}\text{C}$ ）下运行，将提高效率并为工艺热市场提供服务。

110. 在中国，球床模块式高温堆（HTR-PM）已建成。这座 200 兆瓦（电）工业示范电厂包括两座 250 兆瓦（热）反应堆，预计于 2018 年投入运行。反应堆压力容器已安

装，其中一台机组已装入堆芯构件和石墨球（启动堆芯的一部分）。目前正在设计一座 600 兆瓦（电）的商业电厂，对五个可能的场址正在进行可行性研究。包头商业规模球床燃料制造厂于 2016 年开始投产。

111. 沙特阿拉伯确定未来在其国家原子能项目中部署高温气冷堆，已与中国签署了建立长期战略合作伙伴关系的谅解备忘录，以实现技术本地化和自主化。2017 年，完成了一项包括石化业的工艺热应用的联合可行性研究。

112. 2017 年 9 月，波兰能源部长接受了一个咨询委员会要求部署高温气冷堆的报告，高温气冷堆也将替代目前由烃源提供的超过 6500 兆瓦的工业用热。该计划包括承建 10 兆瓦（热）欧洲高温实验堆，以促进新技术和人力资源的发展。

113. 印度尼西亚国家核能机构获得了其 10 兆瓦（热）球床实验动力堆的初始场址许可证，正寻求获得建设资金。

114. 在日本，对重启 30 兆瓦（热）高温工程试验堆的监管审查结果尚在等待中，之后才能开展进一步安全和技术论证试验。

115. 美国的活动侧重于三结构各向同性涂敷颗粒燃料的燃料鉴定，以供未来部署。在为先进反应堆特别是高温气冷堆建立新的许可证审批框架方面取得了进展。

116. 欧洲委员会通过 GEMINI+ 计划、南非通过研发新的先进高温堆球床概念、大韩民国和俄罗斯联邦通过开发和维护关键技术继续开展高温气冷堆相关活动。三个原子能机构协调研究项目分别涉及分析的不确定性、安全设计标准制订以及高温气冷堆热在更加可持续的清洁矿物开采中的应用。

B.1.4. 中小型反应堆或模块堆

117. 许多成员国对中小型反应堆或模块堆越来越感兴趣。这些高达 300 兆瓦（电）功率的新一代反应堆的部件和系统可在工厂制造，然后以模块形式在现场安装。中小型反应堆或模块堆着眼于那些大型反应堆不可行的小型电力市场或能源市场，可满足广泛用户和应用的灵活发电需求，包括替换老化的化石电厂，为小电网国家、偏远和离网地区提供能源，以及提供混合核能和可再生能源系统。它们也更适合于非电气应用中的局部使用或专门使用，例如工业过程、制氢和海水淡化用热。尽管中小型反应堆或模块堆有望拥有增强的安全特性，并且更加负担得起，但这些特性还没有得到充分的示证。

118. 所有主要堆型的 50 多座中小型反应堆或模块堆设计正在开发中，其中三个处于建造后期阶段：阿根廷的 27 兆瓦（电）CAREM-25（150—300 兆瓦（电）一体化压水堆 CAREM 原型堆）（图 B-3）计划在 2019 年启动调试、中国的 HTR-PM 计划于 2018 年投入运行、俄罗斯联邦配备两台 35 兆瓦（电）KLT-40S 压水堆模块的船载浮动核电厂计划于 2018 年启动调试。



图 B-3. 正在建造的 CAREM-25（左），最终电厂总体布置（右）。（照片来源：阿根廷国家原子能委员会）

119. 加拿大核安全委员会已经收到 10 份许可证审批前供应商设计审查申请，加拿大国家实验室已表示有兴趣成为示范性中小型反应堆或模块堆的中心。2017 年发布的长期战略报告包括 2026 年前在乔克河选定一座新的小型模块堆场址的目标。

120. 配备中国核工业集团公司两个 ACP100 模块的第一座工业示范厂计划于 2018 年在海南昌江核电站场址开工建设。中国广核集团已开始为海上浮动式反应堆 ACPR50S 制造系统和部件，预计在 2022 年并网发电。上海核工程研究设计院已完成 CAP150 和 CAP200 的概念设计阶段。

121. 在法国，由法国电力公司牵头的包括法国可替代能源和原子能委员会、法国海军集团和原子技术公司在内的一个联合体正在开发一个陆基 150—170 兆瓦（电）一体化压水堆型小型模块堆。法国海军集团还继续开发一座 160 兆瓦（电）的水下移动压水堆 Flexblue。

122. 阿卜杜拉国王核能和可再生能源城在 2015 年就在沙特阿拉伯部署两台机组达成一致意见后，已获得韩国原子能研究院 100 兆瓦（电）系统一体化模块式先进反应堆（SMART）的设计共同所有权。约旦原子能委员会正在与阿卜杜拉国王核能和可再生能源城和韩国原子能研究院合作，就建造两台供发电和海水淡化使用的 SMART 机组开展可行性研究。

123. 俄罗斯联邦开发了一座供核破冰船使用的 50 兆瓦（电）一体化反应堆 RITM-200，预计将在 2020 年进行调试。为接近革新型快堆的特点，开发了 100 兆瓦（电）多用途铅铋共晶冷却快堆 SVBR-100。这项技术已用于俄罗斯的一些核潜艇中。设计组织正在开展有关中试厂的工作，预计到 2030 年进行系列生产。

124. 英国政府于 2016 年 3 月启动竞争，通过技术经济评估等研究进一步探讨中小型反应堆或模块堆的潜力，并为业界提供与政府就驱动因素和推动力量展开合作的机会。罗尔斯·罗伊斯公司正在开发英国的小型模块堆，一种带标准化可移动模块的环型 450 兆瓦（电）压水堆。

125. 2017 年 3 月，美国核管会接受了 NuScale 电力公司有关一座由 12 个各具 45 兆瓦（电）功率的模块组成的一体化压水堆的设计认证申请以进行立项和审查。NuScale 电

力公司计划到 2026 年在爱达荷州启动其第一座电厂的商业运行，并且已经启动在英国近期部署的计划。美国能源部“加快核能创新通道”计划正在为 Holtec 国际公司开发的另一座一体化压水堆 SMR-160 的开发工作提供支持。

126. 新进入市场的是熔盐燃料（和冷却）先进反应堆。熔盐堆的几个潜在优点包括运行温度更高（提高效率）、冷却剂压力低、高放废物的数量减小和寿命降低、安全特性显著、消除与固体燃料高燃耗效应有关的挑战和燃料循环灵活（铀、钍、钍循环）。加拿大陆地能源公司正在开发的一体化熔盐堆 IMSR400 是许多概念设计之一，功率约为 190 兆瓦（电）。

127. 为了快速部署中小型反应堆或模块堆，需要克服一些挑战。应该有一个强健的监管框架对体制问题进行监管审查。技术挑战包括多模块小型模块堆电厂的控制室人员配备和人因工程，确定应急规划区的规模，制定新的规范和标准以及建立有弹性的供应链。此外，虽然中小型反应堆或模块堆每个机组需要的前期资本较少，但其发电成本可能高于大型反应堆。它们的经济竞争力必须与备选方案相权衡，并通过规模经济来推行。实际上，第一批商用小型模块堆机组预计在 2025 年至 2030 年之间启动，随后将大规模部署。国际合作和伙伴关系是推进小型模块堆发展和部署的关键。

B.1.5. 革新型核能系统国际倡议

128. 在过去的几十年里，几项关于革新型核能系统的国际倡议已经启动，以帮助解决不断增长的能源需求、铀燃料资源获取、乏核燃料再循环以减少未来地质处置负担、提高热效率、通过设计增强安全和抗扩散的问题。

129. 2000 年在原子能机构设立的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”将技术开发商、供应商和客户汇聚起来，考虑采取国际和国家行动，以实现在核反应堆和燃料循环方面所期望的革新，促进核电的长期可持续性。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”目前有 42 个成员，其中包括 41 个原子能机构成员国和欧洲委员会。

130. 2016 年印发了一本关于评定环境胁迫因素可持续性的最新《“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”手册》。罗马尼亚和乌克兰正在根据“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法学进行核能系统评定，中国、印度和俄罗斯联邦正在对其最新的钠冷快堆设计进行有限的范围评定。2017 年，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”指导委员会核可以过去几年在该项目下开发的核能系统情景模拟、分析和路线图工具为基础，为成员国开发一项新的服务。新服务将补充现有的核能系统评定服务。

131. 2017 年，澳大利亚加入了第四代国际论坛。该论坛是一项研究下一代核反应堆的可行性和性能的国际合作努力。论坛的 14 个成员在六个核能系统中的一个或多个系统方面开展合作研发：气冷快堆、超高温反应堆、超临界水冷堆、钠冷快堆、铅冷快堆和熔盐堆。第四代国际论坛-原子能机构年度接口会议讨论了用于评定经济性和抗扩散领域的方法，并就正在执行的项目进行了信息交流。

132. 2016 年，第四代国际论坛发表了题为“第四代钠冷快堆系统安全方案和设计工况的安全设计准则”的报告，为开发商和供应商提供关于快堆堆芯反应性和排热损失的导则。这是继 2011 年第四代国际论坛与原子能机构合作开展的制定钠冷快堆安全设计标准活动后的又一项活动。钠冷快堆安全设计标准于 2013 年发布。

133. 欧盟可持续核能技术平台汇集了来自工业、研究、学术、安全、政府和非政府组织的 100 多名欧洲利益相关方，以促进先进裂变技术的研究、开发和示范，实现“欧洲战略能源技术计划”。在可持续核能技术平台下于 2010 年启动的“欧洲可持续核工业倡议”处理第四代快中子反应堆技术示范的需求。在其战略研究和创新议程中，可持续核能技术平台优先考虑各种下一代系统，并提出以下项目开发建议：ASTRID 钠冷快堆项目作为参考解决方案，2020 年左右在法国建造一座原型堆；ALFRED 铅冷快堆作为第一个选择方案，在比利时 MYRRHA 的支持下，在另一个愿意接纳该项目的欧洲国家建造一座实验反应堆，论证该技术；ALLEGRO 气冷快堆作为第二个选择方案，也需要在一个欧洲国家建造技术示范堆。

134. 设计无碳能源未来路线图的最新国际倡议之一是核能机构的“2050 年核创新”。“2050 年核创新”涉及许多经合组织国家以及可持续核能技术平台、第四代国际论坛、世界核协会和原子能机构的代表，其目的是帮助确定全球核裂变研发优先事项、推动其实施并确定加强合作的机会。

B.1.6. 核动力的非电力应用

135. 核能用于非电力应用，也被称为核能热电联产，正引起人们的兴趣。热电联产可用于海水淡化、制氢、区域供热、三次采油和其他工业应用，也有助于确保能源安全、可持续性和应对气候变化。通过回收利用余热，热电联产可使核电厂的整体热效率提高 30% 以上，如果渗透到这些市场，可将供暖和运输对环境的影响降低 35%。

136. 最近的研究表明，利用余热的热电联产可以抵消核能发电成本的很大一部分。例如，高温气冷堆废弃的余热可用于海水淡化，将抵消天然气或燃油电厂海水淡化产水成本的很大一部分。

137. 随着海水淡化技术的不断进步，如低温作业系统、余热回收系统、高效的能源和工艺系统以及创新的工艺优化等，核电厂的核能海水淡化将是未来一个可行的选择。集成的混合热膜设计被认为是利用从核电厂冷凝器排放的余热或从低压汽轮机后阶提取并被送往多效蒸馏脱盐系统的低品质工艺蒸汽余热的最佳选择。这可以减少能源消耗、海水摄入量和排水费用。包括中国、埃及、约旦、巴基斯坦和沙特阿拉伯在内的若干成员国已表示或重新燃起对核能海水淡化的兴趣。正在开发的若干反应堆设计，如大韩民国的 SMART 将利用余热进行海水淡化。

138. 随着高温堆设计和核能制氢特别是高温蒸汽电解方面取得的进展，核能制氢可能在未来的氢经济中发挥越来越大的作用，并有助于应对气候变化。目前的低温核反应堆也可以通过先进的低温水电解来产氢。这个过程的经济性可以通过利用非峰值发电来改善。

139. 无论是区域供热还是其他用途，核电厂都可以利用当前的技术选项，长距离（约 100 千米）输送大量的热量（吉瓦），提供足够具有成本效益的工艺热或蒸汽。当从核电厂回收的热量超过阈值时，供给客户的热量的成本可能是有竞争力的。

B.2. 聚变

140. 国际热核聚变实验堆项目已取得重大进展，现场施工和装配工作更加显而易见（图 B-4）。大型部件不断到达现场，其他部件正在制造中。核心团队活动是完成设计、技术整合和核安全。与此同时，参与国际热核实验堆的各方开展的一系列研发计划正在支持最终确定面对等离子体部件、加热和电流驱动、诊断和控制系统。国际热核实验堆和七家国内机构在对进度表进行多次修改后得出结论，第一批等离子体将在 2025 年底前生产。

141. 另一个聚变能里程碑是德国马克斯·普朗克等离子体物理研究所的优化仿星器 Wendelstein 7-X (W7-X) 首次制造出等离子体（图 B-4）。这台机器的主要目的是按聚变相关参数示证稳态等离子体运行，从而验证该仿星器是可行的聚变发电厂概念。在完成 W7-X 的主要施工阶段并成功调试设备后，2015 年 12 月至 2016 年 3 月期间每周三天进行等离子体运行，构成 10 周的等离子体运行。虽然低温恒温器内的磁场线圈及其支撑结构在整个运行期间保持在低温温度（100K）（在磁场中，W7-X 线圈的运行温度为 4K），但是每天等离子体运行中磁场斜坡升降。

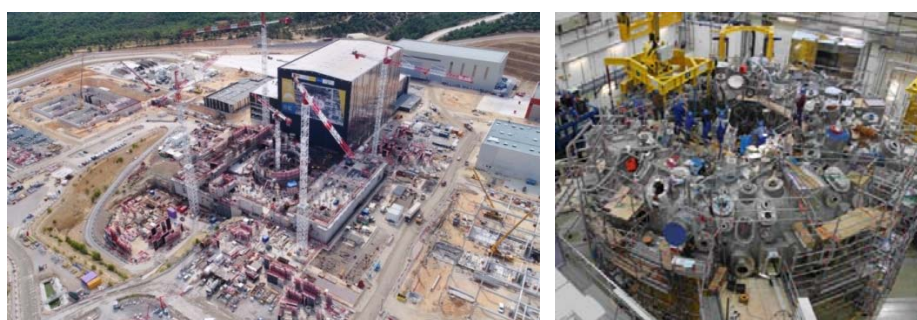


图 B-4. 左图：2017 年 10 月国际热核实验堆现场。（照片来源：国际热核实验堆执行官员）。右图：仿星器 Wendelstein 7-X 的外观图（照片来源：马克斯·普朗克等离子体物理研究所）

142. 有关聚变工程、一体化、电厂设计、材料安全的几个研发计划仍在继续。中国、欧洲和日本正在进行大量有关聚变中子源的研发工作。由欧洲和日本联合开展的国际聚变材料辐照设施的工程验证和工程设计活动旨在制定一个详细、全面、完全一体化的工程设计，并验证国际聚变材料辐照设施每个子系统原型的连续稳定运行。锂靶设施、低 β 半波谐振器和其他子系统的性能已得到验证。国际聚变材料辐照设施线性原型加速器计划于 2019 年完成验证。

143. 中国小型聚变中子源仍在建设中，预计到 2018 年底实现快中子通量达到 $10^{14} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

144. 原子能机构正在制定小型试样测试技术的标准和导则，该技术将与聚变专用中子源一起用于材料选择和鉴定程序中。

C. 加速器和研究堆的应用

C.1. 加速器

145. 离子束加速器最常见的应用包括环境研究、生物医学应用、文化遗产表征和出处鉴定、材料科学和放射性碳测龄。⁴

全细胞超分辨率核显微镜

146. 具有几兆电子伏离子能量的离子束加速器与精密聚焦系统相结合，可提供直径为几十纳米的光束。这为以大大低于光学衍射极限的分辨率对全生物细胞进行成像提供了机会。

147. 聚焦系统和光检测仪器的最新发展已使得在利用核微探针进行生物成像方面取得进展。图 C-1 显示在含荧光纳米金刚石的培养基中培养的全 HeLa 细胞的组合荧光和结构成像。用于成像的光点尺寸是 30 纳米，这是 1.6 兆电子伏离子有史以来达到的最小光束尺寸之一。这些发展有助于了解辐射对单活细胞的影响以及开发新的疗法和药物。

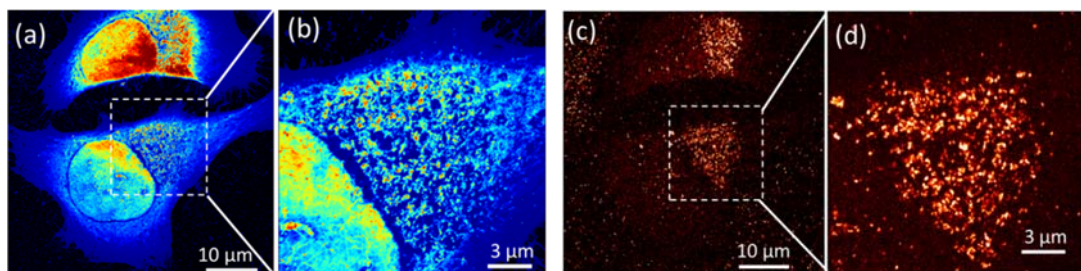


图 C-1. HeLa 细胞的纳米金刚石摄取。(a) 和 (b) 扫描透射离子显微镜图像显示密度差异。细胞核清晰可见。(c) 和 (d) 离子束诱导荧光成像显示纳米金刚石的位置（照片来源：新加坡国立大学离子束应用中心，A/P Andrew Bettiol）。

利用离子束进行年龄测定

148. 离子束技术应用在犯罪调查、食品安全与卫生问题、文化遗产人工制品和环境样品领域也极其有用。通过放射性碳测龄确定绝对年龄对识别伪造物非常有用，现已成为文化遗产诊断学中一个非常成熟的工具（图 C-2）。放射性碳测龄系基于使用加速器质谱测定法测量样品中的碳-14 残余浓度。原子能机构在 2017 年启动了一个协调研究项目，以提高核分析技术从业人员和法医科学界从业人员的认识和消除他们之间的差距。

⁴ 更多资料见原子能机构加速器知识门户：<https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators>。



图 C-2. 在意大利莱切萨伦托大学测年和诊断中心对著名的青铜像“山羊狼”进行取样（左图）。该青铜像被认为是公元前 500 年左右伊特鲁里亚人的作品。采集了原始铸芯的样品，用光学显微镜选择了有机残留物，在加速器端站（右图）进行的放射性碳测龄给出的最终答案是：该雕像是在公元 1100—1200 年之间的某个时刻制造的，因此比过去认为的少了约 16 个世纪。（图片提供：萨伦托大学 G. Quarta、L. Calcagnile）。

同步光用于中东实验科学和应用中心向用户输出了第一束同步加速器光

149. 同步光用于中东实验科学和应用中心于 2017 年 1 月发射了其“第一束光”，并于 5 月启动（图 C-3）。约旦的新研究设施拥有一个 2.5 京电子伏特的第三代同步加速器光源，这是中东地区第一个同类光源，它可以发出从红外线到硬 X 射线波长的高亮度辐射，供用于包括生物学、先进材料、文化遗产和凝聚物质物理学在内的各种科学应用。同步光用于中东实验科学和应用中心以教科文组织作为牵头国际组织，一直受益于原子能机构许多成员国、欧洲联盟和欧洲核研究组织的支持。



图 C-3. 同步光用于中东实验科学和应用中心的内存储环具有偏转和聚焦磁铁，电子束在加速时通过它们循环（左图）。由同步光用于中东实验科学和应用中心控制室数据采集系统实现可视化的第一个输出光束。（照片来源：原子能机构）

C.2. 研究堆

150. 截至 12 月 31 日，已在 67 个国家建造了 797 座民用研究堆，⁵ 其中有 254 座在 55 个国家⁶ 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 57 座研究堆以 5 兆瓦或更高的功率水平运行，因而提供可支持高容量产品和服务的高中子通量。

151. 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（表 C-1）。它们为教育和培训做出战略性贡献。随着许多老化研究堆退役，必须高效利用、妥善管理和可持续运行剩余设施和新设施。原子能机构鼓励研究堆营运者制订或更新关于其设施利用的战略计划。过去三年中，41 座设施向原子能机构提交了战略计划，以征求进一步的建议。

152. 半数在运研究堆都已超过 40 年。它们的寿期可达到或超过 60 年，但及时制订适当的老化管理、整修和现代化计划无比重要。鉴于减少这类设施资金的总体趋势和有限的继承规划，完善的管理系统、运行和管理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。预计 27 个成员国处于永久关闭状态的 122 座研究堆中有若干座将在今后不久开始准备退役。

153. 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（一个加速器驱动系统）正在建造新研究堆。若干成员国拥有建造新研究堆的正式计划，这包括白俄罗斯、比利时、玻利维亚、荷兰、尼日利亚、塔吉克斯坦（完成 Argus-FTI 反应堆）、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。约旦科学技术大学的 5 兆瓦多用途约旦研究和培训反应堆进行了调试，并于 2017 年 11 月获得运行许可证。在满足福岛事故后安全要求后，京都大学的零功率 KUCA 研究堆和 5 兆瓦 KUR 研究堆以及近畿大学的零功率 UTR 研究堆于 2017 年恢复运行。大韩民国的 30 兆瓦多用途 HANARO 研究堆在因反应堆厂房技术改造而关闭三年多后于 12 月恢复运行。

⁵ 资料来源：原子能机构“研究堆数据库”（<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>）。

⁶ 加中国台湾。

表 C-1. 世界各地研究堆的常见应用^a

应用类型	所涉研究堆数量 ^b	拥有这类设施的成员国数量
教学和培训	157	53
中子活化分析	114	52
放射性同位素生产	83	43
中子照相	68	38
材料和燃料辐照	62	26
中子散射	44	29
地质年代学	25	22
嬗变（硅掺杂）	23	16
嬗变（宝石）	18	11
中子治疗，主要是研发	14	11
革新型核能研究	15	10
其他 ^c	118	37

^a 原子能机构出版物《研究堆应用》（原子能机构《核能丛书》第 NP-T-5.3 号，2014 年）更详细地描述了这些应用。

^b 考虑的 238 座研究堆中（截至 2017 年 11 月，217 座在运，21 座临时停堆）。

^c 如仪器仪表校准和测试、屏蔽实验、核数据测量、公众参观、研讨会。

154. 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，2017 年，原子能机构加强和扩大了其四个工具和手段：主要提供学术教育的远程培训工具即因特网反应堆实验室（2017 年继续向非洲地区、欧洲地区及拉丁美洲和加勒比地区提供广播课程）；主要面向年轻专业人员提供基础培训的研究堆地区短训班和提供高级操作培训的东欧研究堆倡议（2017 年，泰国和越南联合组织了一期研究堆地区短训班，并在奥地利、捷克共和国和匈牙利举办了第 13 次东欧研究堆倡议培训班）；向年轻和资深专业人员提供特定高级培训的由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心计划（比利时的核研究中心及美国能源部的爱达荷国家实验室和橡树岭国家实验室在 2017 年获得指定）。

155. 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，以开发决策模型，帮助成员国选择符合其情景的最可行方案。

156. 迄今，有 97 座研究堆和两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。2017 年，加纳微型中子源反应堆（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被返还中国。正在向尼日利亚微堆的转换提供支持。高

密度低浓铀燃料（如铀-钼）的开发和质量鉴定对转换高通量、高性能研究堆非常必要；尽管已取得了显著进展，还需在辐照试验、辐照后检验和制造技术方面进行进一步的工作，以实现它们的商业供应。

157. 截至 2017 年底，美国产高浓铀燃料返还计划完成了约 1300 千克新鲜和乏高浓铀研究堆燃料的移除，俄罗斯产高浓铀燃料返还计划完成了约 2250 千克燃料的移除。

158. 在法国，阿海珐集团公司扩大了待处理研究堆用燃料的范围，如硅化物燃料，2017 年首次对该燃料进行了后处理。

159. 2017 年一些全球钼-99 靶辐照设施和处理器的短暂停堆没有导致供应短缺大到足以影响患者，因为供应链管理机构和主要国际生产商的努力以及保健从业人员有效的缓解努力弥补了这种波动。加拿大国家多用途研究堆在 2016 年停止钼-99 日常生产没有对全球供应造成消极影响。钼-99 生产过程继续从高浓铀转换到低浓铀。2017 年，澳大利亚核科学技术组织完成了其新生产设施的建设。NTP 放射性同位素公司（南非）宣布将其生产过程全面转换为使用低浓铀。两个其他主要生产商即比利时放射性元素研究所和荷兰 Curium 公司（IBA 分子公司和 Mallinckrodt 核医学有限责任公司合并成立）继续在将生产过程从高浓铀转换为低浓铀方面取得进展。

D. 粮食和农业

D.1. 粮食和农业核应急准备

D.1.1. 核应急响应的挑战

160. 迅速确定受影响的粮食产区并防止潜在受污染产品到达消费者手中是在核应急期间必须克服的一些挑战。然而，放射性污染数据的传统处理对响应时间和响应的准确性都具有影响。由于核应急的规模可能很大，因此可能涉及不同机构的多个实验室，提供常常通过各种方法获得的多方面信息。对这些庞大且往往多样化的数据进行有效和高效的管理可能决定响应的质量。

161. 实现这一点，可以利用强大的信息技术决策支持系统，通过该信息收集和集中所有相关信息，以实时数据处理为目标。

D.1.2. 应急响应决策支持系统的新发展

162. 信息技术决策支持系统工具和算法的发展使得能够改进对大量数据的实时管理和提供综合决策支持。在现场和实验室数据收集中使用移动技术，可减少人为错误和实现更快的信息处理。

163. 现代信息技术决策支持系统为提高响应能力提供了清晰的视觉帮助。例如，以图形方式表示收集阶段（显示样品收集或分析状况的图示）、分析/验证阶段（显示放射

性浓度/沉积的图示）和决策阶段（协助提出食品限制场所建议的仪表板）的可能性。食品污染图可以立即提供，以便所有相关方可以做出明智的决定。提供带有预先设定颜色范围的地图图例也可以用来促进利益相关方和公众之间的风险沟通。

164. 可视化评定实时数据的能力有助于衡量可能的响应情景的成本和利益。由情景预测过程中每个利益相关方确定的阈值和行动水平适应于农业和食品流动限制建议中不同水平的风险承受能力。这些决策支持功能提高了利益相关方的能力，把重点放在手头最重要的事情上 — 确保食品和消费者的安全。

D.1.3. DSS4NAFA

165. DSS4NAFA 是由粮农组织/原子能机构粮农核技术联合处开发的一个基于云的信息技术决策支持系统，用于指导原子能机构和粮农组织的成员国在影响粮食和农业的核应急期间做出响应（图 D-1）。该系统通过最先进的算法优化数据的收集、管理和可视化。DSS4NAFA 有别于其他系统的具体特点是使用现代技术，如移动工具和先进的地理可视化来克服在核应急中遇到的物流挑战；并且具有用户友好型数据分析组件，以提出响应行动建议。DSS4NAFA 采用模块化方式构建，包括多个信息技术组件，这些组件是集成的，但可单独交换，使系统非常灵活和适应性强。该工具的测试版将于 2018 年推出。



图 D-1. 利用现代信息技术系统优化和响应影响粮食和农业的核紧急情况。
DSS4NAFA 工作原理概述。（资料来源：粮农组织-原子能机构）

166. DSS4NAFA 是一个创新型系统，用于评定和解释粮食和农业放射性污染数据，并提高食品安全当局的核应急响应能力。它支持决策者确定取样位置并分配样品和实验室分析任务；提供强大的视觉解释工具，集成从地方到国际范围内在核应急期间收集和处理的三维数据。

167. 在获得放射性核素浓度数据后，食品限制仪表盘整理包括事故空间分布和时间分辨率在内的信息，并根据风险水平和规定的耐受水平提出食物和种植限制。DSS4NAFA 的使用可降低数据收集物流管理的复杂性，预测数据分析情景，并提出制定决策的限制行动建议。

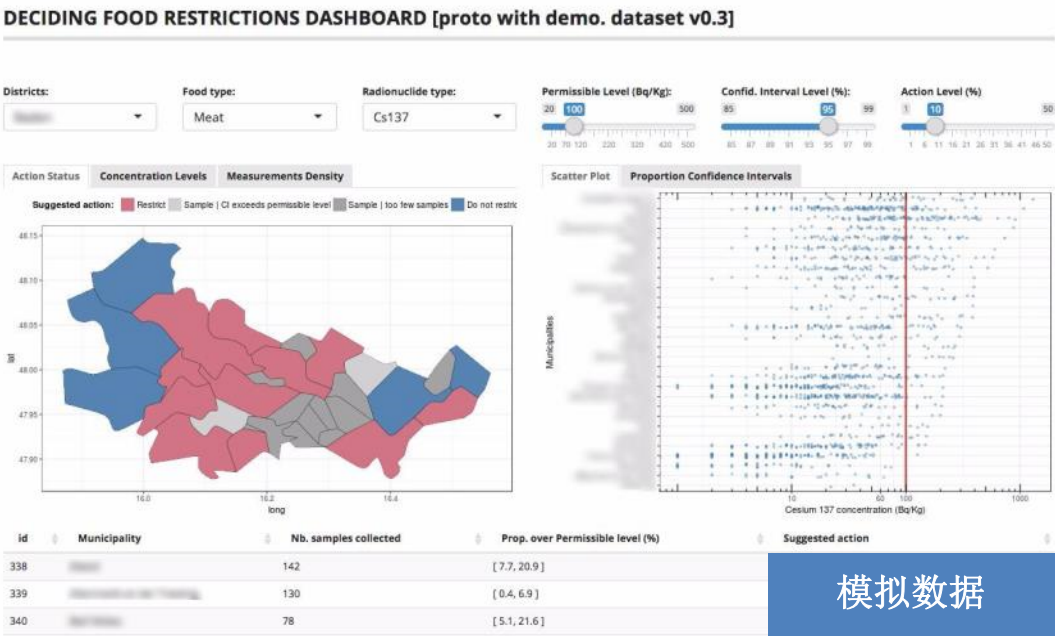


图 D-2. 限制仪表板是 DSS4NAFA 的一个专门模块，根据放射性核素浓度信息和可调整置信水平区间提出决策行动建议，为决策者提供帮助。利益相关方可采取三种行动方案 (1) 限制食物或种植、(2) 不限制食物或种植或 (3) 进行更多取样。(来源：粮农组织-原子能机构)

168. DSS4NAFA 能够管理大量数据，而不会对用户造成负荷过重。其使用的实例包括污染数据的空间和时间可视化、样品采集器优化分配使用和分析实验室设施使用的交互式图形图像，以及用于确定需要采取食物限制区域的仪表板。

169. 系统平台可通过智能手机应用程序或基于桌面界面的办公系统进行现场访问，从而精简使用和通信。这些功能的结合将整个过程中的所有利益相关方汇集起来，提高了强大的应急响应能力。

D.2. 利用辐照开发新型有效疫苗预防动物和人畜共患疾病

170. 牲畜生产力的提高有助于全球数百万家庭增加收入。提供和使用有效的疫苗，可减少疾病负担，对畜牧业至关重要。通过使用疫苗可预防许多从动物传染到人类或从人类传染到动物的疾病（人畜共患病）。

171. 疫苗的使用也可减少动物养殖中的治疗剂使用，并且有助于减少抗寄生虫药和抗微生物药的用量。虽然上个世纪见证的生物技术进步有助于开发许多新型牲畜疫苗，但由于缺乏有效的疫苗或目前可用的疫苗疗效差，一些破坏性的跨界传染病继续给牲畜生产者造成负担。

172. 制造疫苗的最好方法之一是使用完整的非感染性病原体作为诱导免疫的手段。辐照技术以多种合理的方式用于开发疫苗（图 D-3）。在一种方法中，病毒等病原体经受较高的 γ 辐照剂量（25–30 千戈）进行病原体完全灭活。这种方法对于没有活的生物体要注入宿主的高致病性生物体是可取的。然而，与通常用于疫苗制备的化学方法相比，通过辐照灭活不会破坏抗原。

173. 或者，当生物体仍然具有代谢活性时，使用低剂量的辐照来终止生物体的复制或致病能力。这是由于遗传物质中出现部分破坏或发生某些突变。因此，这些疫苗被称为“代谢活性和复制缺陷”。⁷

174. 在第三种方法中，利用经辐照的病原体增加或改善疫苗中所含的另一种相关或不相关的微生物体的免疫原性。

175. 增强疫苗效力的化合物被称为佐剂，它们经常用于疫苗制备。辐照技术也可间接用于提高疫苗的有效性和安全。这类应用之一是对现有疫苗进行辐照，以确保用于接种的制剂中没有感染性污染生物体。或者，可以辐照疫苗佐剂，改变其结构（例如聚合）以增强免疫或保护效应。

176. 自 20 世纪 50 年代以来，科学家们试图通过辐照病原体来制造疫苗。然而，辐照技术的典型使用是过度辐照病原体，从而破坏这些候选疫苗的核酸和蛋白质结构。我们最近对使用辐照技术的理解是基于发现现代辐照器可有效地产生更高和更特定的辐照剂量。与此同时，对免疫系统的认识也得到扩大，导致可利用精确工具和技术评价免疫接种后的免疫反应。

177. 加上基因组学研究的进展，这些发展已引起辐照疫苗研究的复兴，并扩大了新型有效疫苗的开发。例如，新型电子束照射器可在几分钟内产生高达 30 千戈的照射剂量，防止自由基等不需要的副产物积累，在使用较长时间辐照时自由基积累是不可避免的。

178. 最近发现的放射防护化合物也有助于保护负责疫苗抗原性的结构。其中，从抗辐照细菌分离出来的一种化合物即 Mn^{2+} -肽复合物通过清除辐照过程中产生的自由基，可保存受较高剂量 γ 射线照射的病毒和细菌的免疫原性蛋白。⁸

179. 上述技术进步和创造性疫苗方法已超越了最初的基本实验。在人类医学中，从辐照的蚊虫收获的代谢活性非复制性疟疾孢子体已被用于诱发防止疟疾感染的免疫力。将在人类临床试验中使用的候选疫苗需要强有力的概念证明和高安全标准。

⁷ Magnani, D.M., Harms, J.S., Durward, M.A., Splitter, G.A., “不分裂但具有代谢活性的 γ -辐照羊种布鲁氏菌对小鼠中毒性羊种布鲁氏菌攻击的保护”，《传染与免疫》第 77 卷第 11 期（2009 年）第 5181 页至第 5189 页。

⁸ Gayen, M. 等, “异常球菌 Mn^{2+} -肽复合物：甲病毒疫苗开发的一种新方案”，《疫苗》第 35 卷第 29 期（2017 年）第 3672 页至第 3681 页。

180. 辐照后疟疾疫苗不仅达到了临床试验阶段，而且还证明能显著防止后续感染。⁹ 辐照也被用于人类免疫缺陷病毒 1 型病毒的完全灭活，随后在人类临床试验中证明它是安全的，并增强了抗人类免疫缺陷病毒抗体应答。

181. 基于这些积极的发展和我们对辐照选择性控制使用的新认识，许多公立和私营机构加大了开发“放射性疫苗”的力度。由德国弗劳恩霍夫细胞治疗和免疫学研究所科学家引领的研究表明，低能电子辐照维持了马痘疹病毒和猪繁殖与呼吸综合征等病毒的抗原特性，甚至维持了流感中的保护性免疫应答。¹⁰

182. 美国威斯康星大学麦迪逊分校和普渡大学进行的研究均表明，用代谢活性辐照布鲁氏菌细菌给小鼠接种疫苗可防止它们在接触挑战性感染时生病。布鲁氏菌是一种具有全球经济影响的经济致衰性动物疾病，也是一种人畜共患病。这些只是在开发用于牲畜疾病的辐照疫苗时进行的成功实验的几个例子。其他正在进行的开发跨界动物疾病辐照疫苗的实验包括口蹄疫和出血性败血症。

183. 原子能机构通过一个涉及六个对口方（孟加拉国、埃及、埃塞俄比亚、伊朗伊斯兰共和国、斯里兰卡和苏丹）的协调研究项目，在这一领域开创了新一代研究工作，以评价生产实验性辐照疫苗的新方法（图 D-4）。

184. 来自这些国家的科学家致力于不同的动物疾病或人畜共患病病原体，证明了针对候选疫苗开发的差异辐照剂量的概念。目前正在进行实验来确定这类疫苗是否可以在动物受到感染病原体挑战的情况下保护动物。已报告的第一个突破是捻转血矛线虫（一种反刍动物胃肠寄生虫）的原型辐照疫苗。接受两剂口服辐照捻转血矛线虫幼虫后，受到挑战的动物得到 100% 保护。

185. 原子能机构正在进行试验，开发预防两种严重影响养猪业的猪病毒——猪流感和猪繁殖与呼吸综合征的原型辐照疫苗。它还正在开发和提供测量接种辐照生物体后诱发的免疫应答的工具。正在开发测量细胞介导免疫的技术，这是家畜免疫学发展不足的领域，但在研究病毒性疾病时非常重要。

186. 原子能机构还正在开发一个识别牛免疫标记的单克隆抗体库，并将其分发给成员国实验室。就具体病原体而言，科学家最近发现了受低剂量辐照影响的锥虫属寄生虫基因组的“热点”。这一发现将有助于研制药物和疫苗防治对发展中国家畜牧生产具有深远影响的寄生虫。

⁹ Sissoko, M.S. 等, “在马里恶性疟原虫孢子体疫苗通过直接静脉接种于接触疟疾的健康成人对于预防恶性疟原虫的安全性和功效：一项随机双盲 1 期试验”, 《柳叶刀-传染病》第 17 卷第 5 期 (2017 年) 第 498 页至第 509 页。

¹⁰ Fertey, J. 等, “通过低能电子辐照灭活的病原体保持抗原特性和诱发保护性免疫应答”, 《病毒》第 8 卷第 11 期 (2016 年) E 部分第 319 页。

187. 随着差异辐照技术的概念得到验证和确立，研究工作正集中于疫苗生产的流程开发和规模扩大上。开展辐照疟疾疫苗实验的 Sanaria 生物技术公司正在探索使用机器人来生产疫苗，而德国弗劳恩霍夫研究所正在试验开发一种新型自动化技术程序，将电子束辐照转为工业规模进行疫苗生产。该协调研究项目的一些对口方已采取主动行动，使辐照疫苗的干制剂达到热稳定性，这可有助于运送到无法维持冷链疫苗的偏远地区。

188. 虽然辐照疫苗技术的许多发展只处于研究阶段，但当前的发现强有力地证明该技术有潜力应用于开发防治许多致病病毒、细菌和寄生虫的有效疫苗。投资这项技术将有助于控制许多疾病，并可能对发展中国家的经济和健康产生重大影响。

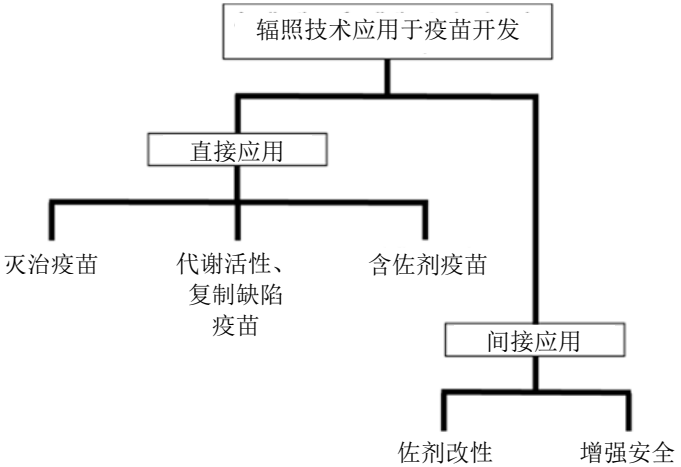


图 D-3. 辐射技术可用于开发新疫苗，提高现有疫苗的功效率和安全性。（资料来源：原子能机构-粮农组织）



图 D-4. 在伊朗伊斯兰共和国，一名科学家正在配制一种辐照疫苗（左），而一名苏丹科学家正在从羊身上抽血（右），以评价疫苗的功效率。（照片来源：伊朗伊斯兰共和国 Farahnaz Motamedi-Sedeh 核科学技术研究所和苏丹 Mihad Alawad 中央兽医研究实验室）

D.3. 多同位素指纹识别从土壤到水体的农业污染物来源

189. 原子能机构目前正在致力于制定示踪农业污染物来源的议定书和准则，开发创新的土壤和水管理实践，以减少环境中的农业污染物。

190. 河流和溪流的农业污染对人类健康、生物多样性和渔业有着直接的负面影响。为满足日益增加的粮食需求，农业系统不断扩大和集约化常常导致过度使用和滥用有机和无机肥料及杀虫剂等农用化学品。从全球来看，高作物产量主要是通过大量使用农用化学品实现的，而灌溉促使农业污染物从土壤转移到水体。在大多数高收入国家和许多新兴经济体，农业污染已经超过家庭和工业的污染，成为内陆和沿海水域退化的主要原因。在欧盟，38%的水体受到农业污染的巨大压力¹¹（图 D-5）。在美利坚合众国，农业是河流和溪流污染的主要来源，是湿地污染的第二个主要来源，是湖泊污染的第三个主要来源。¹²

191. 有关农业生态系统污染的主要知识空白是来源识别和占比分配，这个领域需要更多的数据、研究和方法整合。识别这些来源的贡献并确定其占比，对于国家机构和政府制定适当的政策和管理实践并采取针对性应对措施至关重要。当农业生态系统发生多源污染时，污染元素的量化和质量平衡等传统技术不能有效地评价不同来源的相对贡献。因此，需要采取补充办法来弥补这些差距。作为对传统方案的补充，主要化学元素的稳定同位素是表征和量化农业生态系统中溶质来源及其通过土壤和水体迁移的关键。

192. 化学元素氮、碳、氧、硫和氢的稳定同位素已成功用于示踪和监测农业生态系统中溶质和水的来源和迁移。¹³ 研究表明，取决于污染源的源头，每个元素的同位素特征是独一无二的，因此可用来指纹识别来源。磷是提高作物生产力的一种关键肥料，为了示踪和监测其从土壤到水体的来源，使用无机磷酸盐中的氧-18 同位素标记（ $\delta^{18}\text{O-PO}_4$ ）。将特定化合物同位素分析应用于微污染物，依赖于监测源和出口之间稳定同位素组成变化的能力，从而量化农业生态系统中化学或生物化学转化的程

¹¹ 联合国世界水资源评估方案（2015 年）。《2015 年联合国世界水发展报告：可持续发展世界之水》。巴黎，联合国教育、科学及文化组织。

¹² 美国国家环境保护局（2016 年）。水质评估和每日最大总负荷信息。
https://ofmpub.epa.gov/waters10/attains_index.home。

¹³ Skrzypek, G.、Mydlowski, A.、Dogramaci, S.、Hedley, P.、Gibson, J.J.、Grierson, P.F.（2015 年），“利用水力计算机估算基于水稳定同位素组成的蒸发损失”，《水文杂志》第 523 期第 781 页至第 789 页，<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.010>。

度。¹⁴、¹⁵、¹⁶ 农业生态系统中的多种污染物来源可能会出现重叠的同位素特征，使得通过单一同位素示踪剂进行来源识别和占比确定即使有可能，也很困难。

193. 对复杂农业生态系统中宏量营养素和微污染物潜在多种来源的全面表征，需要多种示踪剂综合方案。溶质的稳定碳、氧、氮和硫同位素特征可表征各种来源的比例贡献，而水分子的稳定氢和氧同位素可表征水循环（水源和蒸发损失）的特征。这种分析溶质和水的综合方案允许将污染物扩散途径与水流路径分离。稳定同位素技术应用的优势在于，它们提供了一种廉价的分析方法，可替代通常需要完善基础设施的费力且耗时的全面监测。因此，粮农组织/原子能机构联合处启动了一个协调研究项目，以制定和验证关于使用多种稳定同位素示踪剂监测农田和景观规模农业的土壤、水和营养性污染物的准则。

194. 与传统技术相结合时，这种方案应有助于在成员国采取适当的补救措施，并建立更好和更加可持续的土地管理实践。



图 D-5. 左图：农业生态系统环境中农业污染物示意图（照片来源：法国国家科学研究中心 Gwenaël Imfeld）右图：受污染物影响的多瑙河三角洲水质（照片来源：原子能机构-粮农组织）

¹⁴ Tamburini F.、Pfahler V.、von Sperber C.、Frossard E.、Bernasconi S.M.（2014 年），“利用氧同位素揭示土壤-植物系统中的磷转化：综述”，《美国土壤科学学会杂志》第 78 期第 38 页至第 46 页。

¹⁵ Granger, S.J.、Harris, P.、Peukert, S.、Gou, R.、Tamburini, F.、Blackwell, M.S.A.、Howden, J.K.、McGrath, S.（2017 年），“温带农业土壤中磷酸盐稳定氧同位素的变化”，《国际土壤科学杂志》第 285 期第 64 页至第 75 页。

¹⁶ Elsner M.、Imfeld, G.（2016 年），“环境中微污染物的特定化合物同位素分析 — 当前发展和未来挑战”，《生物技术当前述评》第 41 期第 60 页至第 72 页。

E. 人体健康

E.1. 立体定向放射治疗：高精度放射治疗技术

195. 立体定向放射外科是一种非手术性先进辐射技术，用于向肿瘤和大脑的一些功能异常精确地施用靶向辐射。立体定向放射治疗有时被称为立体定向消融辐射治疗，是同一技术的延伸，用于对身体的颅外病灶施用辐射。

196. 在立体定向放射外科或立体定向放射治疗中，整个剂量以一至五次施用；而在常规放射治疗中，剂量在几周内每日多分次施用。这两项技术都是侵入性手术的重要替代方法，特别是对于不能进行手术的患者及对于难以到达或靠近重要器官的肿瘤和异常。没有切口，不适感极小，恢复时间更短，而且一般鲜有与手术有关的风险（如感染）。

197. 实施立体定向放射外科和立体定向放射治疗需要疾病病灶和设备方面的专门知识。因此，需要为立体定向放射外科和立体定向放射治疗设计一个具体针对疾病病灶和所用设备的流程。

E.1.1. 技术要求

198. 立体定向放射外科或立体定向放射治疗计划要求有充足的工作人员，以确保其安全性和质量。这些技术的误差范围比常规放射治疗的要小，因为每个分次使用的剂量更高，而分次数更少。因此，用于提供这种治疗的设备必须符合最严格的技术要求，包括关于机械公差和调试的技术要求。在实际治疗前，在一个仿真模型上对整个治疗过程进行端到端的测试。立体定向放射外科和立体定向放射治疗通常涉及以下所述的成像、固定以及计划制订和治疗实施。

三维成像和四维肿瘤定位

199. 高分辨率成像可确定肿瘤的位置、大小和形状，有助于确定靶（肿瘤）在体内的确切坐标，并指导治疗计划的制订。计算机断层照相法、磁共振成像和正电子发射断层照相法/计算机断层照相法均用于此目的。一般而言，计算机断层照相法扫描用于基线成像，提供有关电子密度的精确信息，并且通常具有非常低的空间畸变。就许多立体定向放射治疗靶（如肺和腹部）而言，正电子发射断层照相法-计算机断层照相法以及在脑部病变和肝脏病变情况下磁共振成像是首选的成像工具，因为它们与计算机断层照相法相比能够对正常和异常组织进行更好的分界。

患者的固定、就位和体位保持

200. 在成像和治疗过程中，肿瘤的位置可能因呼吸或身体运动而变化，或者肿瘤可能发生形状和大小变化。由于这种类型的治疗需要毫米级的精度，故需要用患者特定的定制固定装置使患者保持不动，从而使治疗过程中靶的移动最小。在立体定向放射治

疗过程中，有许多方法可用于评定、处理和监测呼吸运动，包括慢速计算机断层照相法、四维计算机断层照相法、腹部压迫、门控和屏气技术。四维计算机断层照相法成像能够进行内部靶体积重建，以考虑到呼吸周期所有阶段的肿瘤位置。实时动态靶跟踪也有可能。

高度聚焦 γ 射线束或 X 射线束

201. 可以使用直线加速器、伽马刀单元或带电粒子加速器实施立体定向放射外科和立体定向放射治疗。线性加速器可以一次（立体定向放射外科）或多次（立体定向放射治疗）治疗较大的肿瘤。

202. 伽马刀设备是瑞典神经外科医生雷克塞尔 1951 年在瑞典发明的，这是第一个用于实施立体定向放射外科手术的设备。它具有多个钴辐射源，可以产生高度聚焦 γ 射线，这些 γ 射线全部瞄准靶区。它对治疗通常小于 4 厘米的中小颅内病变非常理想，但要注意避免对视神经器官和脑干等结构使用高剂量。

203. 重带电粒子质子立体定向放射外科的主要优点是光束停止在与其能量有关的深度。不存在出射剂量和质子的锐射束剖面使得能够以比光子辐照所施用的剂量更低的整体剂量进行靶辐照。这是一种昂贵的治疗方式。

E.1.2. 所需团队

204. 立体定向放射外科和立体定向放射治疗需要一个高水平、多学科的工作人员团队，包括放射肿瘤医师、医学物理师、放射治疗技师、放射科医师、神经外科医生和神经科医生。放射肿瘤医师领导治疗团队，神经外科医生偶尔承担共同领导任务。

205. 放射肿瘤医师标出待治疗靶的轮廓和正常组织，开出适当的放射剂量，批准治疗计划并解释放射外科手术的结果。医学物理师确保提供精确的辐射剂量、使用计算机化治疗规划系统来设计治疗方案以及计算按开出的剂量对一个靶或多个靶进行治疗所用的照射时间和射束配置。放射治疗技师使患者在治疗台上就位并操作设备。

E.1.3. 适应症

206. 脑部的许多良性、恶性和功能性疾病都可采用立体定向放射外科手术治疗。立体定向放射治疗已用于各种适应症，包括医学上不能手术患者和拒绝手术患者的早期肺癌、肺转移、原发性肝癌、肝转移、器官局限性前列腺癌、胰腺癌、肾上腺转移、医学上不能手术患者的原发性肾癌、特定胸内和腹内淋巴结转移、复发性和原发性头颈部癌、脊柱肿瘤和椎骨转移。

207. 治疗后，良性肿瘤可能需要 18 个月到两年才能萎缩，而恶性肿瘤和转移性肿瘤萎缩得更快。许多肿瘤保持稳定和无活性，不发生变化，并可能随着时间的推移稳定或退化。立体定向放射外科和立体定向放射治疗作为一种非侵入性、通常可在一天或一周内在门诊环境中完成的治疗选择，不仅可以潜在地节约医院资源，而且还可能使患

者能够更快地恢复常规日常活动。治疗的副作用取决于肿瘤病灶和所用剂量。幸运的是，立体定向放射外科和立体定向放射治疗的副作用预计处于可接受限内。

E.1.4. 原子能机构的贡献

208. 2014 年，原子能机构启动了一个肝细胞癌的立体定向放射治疗对比经动脉化疗栓塞的随机研究协调研究项目。亚太地区、非洲和欧洲的 11 个癌症中心参加了该研究。此外，原子能机构正在支持一个立体定向放射治疗的临床应用地区项目，并正在帮助成员国启动或升级它们的立体定向放射治疗服务。参项国家的许多放射肿瘤医师、医学物理师和放射治疗师都已接受包括质量保证和质量控制在内的立体定向放射治疗各方面的培训。

209. 立体定向放射外科/立体定向放射治疗得到了广泛认可，其利用越来越多。良好临床研究公布的结果确立了它们在各种临床环境中的作用。此外，正在通过许多原发性和继发性癌症的大量临床试验对单独或与靶向药物或免疫治疗联合进行的立体定向放射外科/立体定向放射治疗进行评定。临床前数据显示，免疫治疗可增加辐射介导局部肿瘤响应；同样，高剂量辐射可增加免疫治疗的全身效应，从而使立体定向放射外科/立体定向放射治疗成为与免疫治疗相结合的理想模式。在许多临床环境中，与传统放射治疗相比，立体定向放射外科/立体定向放射治疗可能是成本效益更好的治疗。

E.2. 神经精神病学：阿尔茨海默氏病的分子成像革命

E.2.1. 背景

210. 痴呆症是一种进行性、基本上不可逆的、以精神功能受损为特征的神经退行性疾病，影响到记忆、思维、行为和日常活动能力。全世界估计 4700 万痴呆症患者中，三分之二生活在发展中国家。

211. 在早期阶段，可能难以诊断出特别的临床症状；但在症状显现之前数年，核技术即可在确定潜在疾病过程方面发挥重要作用。

212. 痴呆症有许多不同类型，阿尔茨海默氏病最为常见，约占全世界病例的 60—70%。其他常见类型的痴呆症包括血管性或多梗塞性痴呆（约占 25%）、路易体痴呆症（占 15%）和额颞叶痴呆症。帕金森病、梅毒和克雅二氏症等疾病也能引起痴呆。一个人可能有不止一种类型的痴呆症。

213. 位列癌症之后最可怕的疾病的阿尔茨海默氏病等疾病，在世界各地都是一项沉重负担，有着很大的医疗和社会经济影响。痴呆症是世界范围内造成老人残疾和依赖性的主要原因之一。

214. 虽然没有已知的治疗痴呆症的方法，但根据病因的不同，可以采取各种特定方案来处理症状、规划护理以及向护理人员和家庭成员提供指导。此外，一些药物可能在早期阶段是有益的，从而能延缓疾病的发展；还有其他措施可改善痴呆症患者及其护

理人员的生活质量。因此，更早、更准确的鉴别诊断对改善患者护理至关重要。

215. 痴呆症通常通过疾病史评估和旨在显示有意识的智力活动（如思考、推理或记忆）的认知测试的结果来诊断。检测可能的认知障碍是确定患者是否应接受进一步评估的第一步。

E.2.2. 诊断

216. 核医学亦称分子成像，在过去几十年中发展显著。自 20 世纪 90 年代以来，使用放射性药物氟代脱氧葡萄糖的正电子发射断层照相法脑成像以及脑灌注单光子发射计算机断层照相法成像一直在包括阿尔茨海默氏病和其他形式的痴呆症在内的各种脑部疾病的临床诊断中发挥着重要作用。

217. 分子成像研究对复杂的痴呆病例以及在其他状况也存在而且尚不清楚应将症状归因于哪种疾病时是有帮助的。中风是一种常见的合并症状况，能自行影响大脑功能，有些症状与神经退行性痴呆症引起的症状相似。分子成像使医生能够区分这些状况。

218. 正电子发射断层照相法是一种评价神经退行性疾病患者特别是进行痴呆症诊断的成熟手段。当使用氟代脱氧葡萄糖时，可以评价大脑的葡萄糖代谢，使得能够进行及早适当诊断、鉴别诊断、进行性痴呆症早期识别、疾病进展监测和药物治疗反应评价。

219. 示踪剂还为研究潜在痴呆症的神经病理学如淀粉样蛋白和 tau 蛋白的积累以及炎症或血管疾病的存在提供了新视角。使用各种示踪剂的正电子发射断层照相法成像可提供痴呆症的可靠生物标志物，这些标志物能够帮助临床医生诊断各种痴呆症，特别是在存在重叠疾病的病例中。

220. 最近，淀粉样蛋白正电子发射断层照相法成像已在许多国家的临床环境中提供使用。淀粉样蛋白正电子发射断层照相法扫描可准确检测体内作为阿尔茨海默氏病基本病理过程之一的淀粉样斑块。这种扫描对评定大脑中的异常蛋白质沉积极具针对性，可有助于改进诊断和治疗建议。目前正在多个中心的试验中评价其临床价值。

221. 其他新的正电子发射断层照相法成像是评价 tau 蛋白和炎症。Tau 是一种微管相关蛋白，对神经元的稳定性和功能必不可少，其过度磷酸化和异常聚集与被称为“tau 蛋白病”的各种神经退行性疾病有关。其中最常见的是阿尔茨海默氏病。

222. 这些技术不仅可以改善患者的日常护理，而且还可以提供有关疾病过程本身的关键知识，这将有助于改善治疗的发展。

E.2.3. 全球倡议和认识

223. 有若干全球倡议应对痴呆症负担。其中一些最重要的倡议是：将痴呆症确定为一个全球优先事项、快速发展神经成像和进行新治疗替代方案的医学研究。此外，一些

组织正在将痴呆症列入其议程，如七国集团的抗痴呆症全球行动倡议、世卫组织的抗痴呆症全球行动部长级会议和最近的比尔及梅琳达·盖茨基金会。

224. 原子能机构参与了提高对痴呆症和其他神经系统疾病重要性认识的当前发展和活动。这些活动包括关于核医学技术在脑血管和神经系统疾病（包括痴呆症）成像中的重要性的协调研究项目、地区培训班和国家讲习班。原子能机构建立了原子能机构神经成像联盟，以研究利用正电子发射断层照相法-计算机断层照相法等现代技术的神经成像在正确诊断轻度认知功能障碍和确定艾滋病毒感染、脑血管疾病和创伤性脑损伤等合并症状的存在是否导致所作诊断不如对无合并症状患者的诊断准确方面所具有的价值。目前，在这部分患者方面的科学证据有限；因此，新信息将使成员国受益。在日本大阪大学医学研究生院举办的原子能机构核医学专业人员课程侧重讲述了核医学技术在包括脑瘤、癫痫和痴呆症在内的脑血管疾病和神经系统疾病成像中的重要性。还在阿根廷、巴西、菲律宾、斯洛文尼亚和泰国举办了关于神经成像的讲习班，以提高核医学医生在解读包括痴呆症在内的核神经病学研究结果方面的能力。

225. 为了支持继续医学教育，原子能机构的“人体健康园地”网站设有关于神经成像的专门部分，为访问者提供教学案例、讲座、推荐书目和导则、医疗扫描结果通报指南以及原子能机构培训班所用的教育材料。

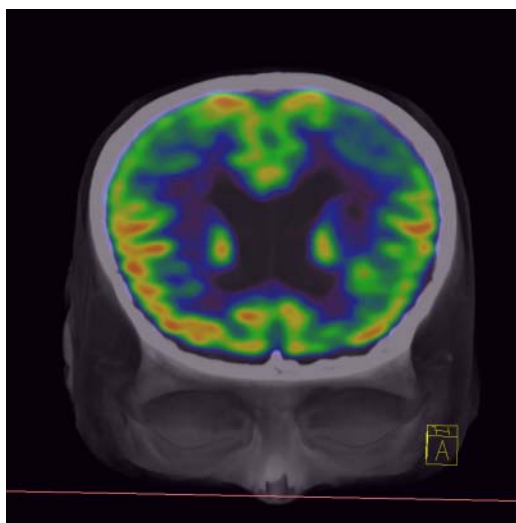


图 E-1. 对一名患有糖尿病的 65 岁女性阿尔茨海默氏病患者进行的正电子发射断层照相法/计算机断层照相法体积重建研究。用氟 18-氟代脱氧葡萄糖进行核医学正电子发射断层照相法/计算机断层照相法研究，以确定痴呆症类型和疾病程度。（照片来源：墨西哥国家神经病学和神经外科研究所 Ivan Diaz 博士）

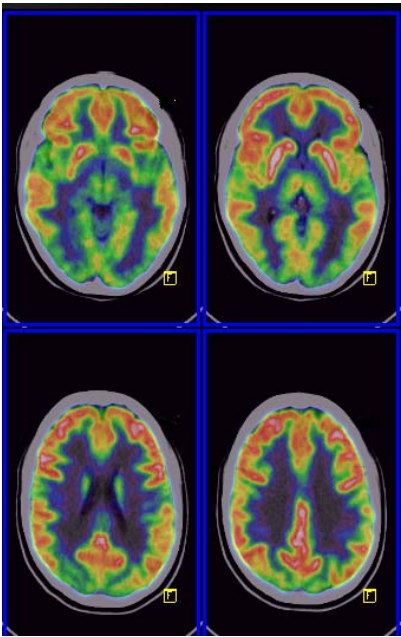


图 E-2. 有高血压病史和痴呆症临床体征的 75 岁男性患者。用氟 18-氟代脱氧葡萄糖进行核医学正电子发射断层照相法/计算机断层照相法研究，以确定痴呆症类型和疾病程度。扫描确认与阿尔茨海默氏病相关的变化（照片来源：墨西哥国家神经病学和神经外科研究所 Ivan Diaz 博士）

F. 环境

F.1. 核技术用于海洋塑料研究

226. 海洋覆盖地球表面 70%以上的面积，显然与形成地球上宜人的气候和减轻气候变化的一些负面影响有关联。如果管理得当，海洋还可以在很大部分世界人口的就业和生计方面发挥重要作用。不幸的是，海洋也是包括各种农业、市政和工业有机污染物和无机污染物排放的大量陆源性污染的最终储存库。这类活动的一个产物便是现在在海洋中随处可见大小各异的塑料碎片，海洋中的海底生物、浮游动物、软体动物、鱼类、海鸟和鲸鱼等海洋动物可能会摄入较小的塑料颗粒。虽然大块塑料对海洋生物引人注目的明显影响已有充分的资料记录，但直径小于 5 毫米的通常被定义为颗粒的微塑料^{17、18}可能造成的危害远没有那么清楚（图 F-1）。

¹⁷ Andrady, A.L., “海洋环境中的微塑料”。《海洋污染公告》第 62 号，第 1596 页至第 1605 页。F 部分多次提到该出版物。

¹⁸ 联合国环境规划署，《海洋塑料废物和微塑料：激发行动和指导政策变化的全球教训与研究》。环境规划署，内罗毕（2016 年）。F 部分多次提到该出版物。



图 F-1. 包括微塑料在内的塑料废物现在在海洋中随处可见，可能被各种海洋生物摄入和进行生物累积，从而可能对人类构成健康风险。照片来源：J.L.Teyssie/原子能机构。

227. 为了帮助提供信息及制订更好的缓解策略和工具，原子能机构正利用核技术和同位素技术评定常见和新出现的环境胁迫因素的影响，包括塑料对海洋生物的影响。目前正在开发此类技术来量化海洋微塑料及随附有机污染物在沿海和海洋生态系统及其相互关联的食物网中的迁移。一些有机污染物被有效地从海水中吸附到塑料表面；这些微塑料及其随附污染物对海洋生物构成了额外的威胁。¹⁹ 核技术可促成研究“吸附动力学”，或有机污染物如何附着到微塑料宿主上，以及污染物降解过程和速率。这些方法在受控实验水族馆中使用可提供定量数据，为了解海洋微塑料的生物影响打开一个独特的窗口。

228. 海洋塑料是合成有机聚合物，通常生产成本低廉，设计上却非常经久耐用。所有的塑料最终都会变脆，碎裂成更小的碎片。这些碎片经长时间紫外线辐射照射后会进一步降解。在海洋中发现最多的聚合物是高低密度的聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯。所有这些聚合物共占全球塑料产量的 95%以上。²⁰ 由于这些聚合物专为抗腐蚀设计，所以大多数塑料都被认为“难以降解”，将在海洋环境中存留上百年甚至更长时间。

229. 在许多海洋生物中都发现了塑料微粒，包括我们作为日常饮食的一部分赖以消费的物种，如许多软体动物和有鳍鱼。这些塑料微粒由于很小，可能会在某些内脏器官中沉积，而成为污染物化学转移的有效媒介。²¹ 除仅仅摄入微塑料造成的不良影响之

¹⁹ Law, K.L.、Thompson, R.C., “海洋中的微塑料”。《科学》第 345 期，第 144 页至第 145 页。F 部分多次提到该出版物。

²⁰ Cole, M.、Lindeque, P.、Halsband, C.、Galloway, T.S., “海洋环境中的微塑料污染物：评论”。《海洋污染公告》第 62 号，第 2588 页至第 2597 页。

²¹ Engler, R.E., “海洋中海洋废物与有毒化学品之间复杂的相互作用”。《环境科学与技术》第 46 期，第 12302 页至第 12315 页。

外，还可能发生二次毒性效应，因为被清除的污染物在器官内与微塑料分离，随后可能发生生化转化（图 F-2）。来自微塑料的不良生物影响的例子包括内分泌干扰（即改变基因表达），现已在一些不经意摄入塑料化合物的鱼身上观察到了这种影响。²² 我们对微塑料及随附污染物在人体中的预期演变和毒性的认识仍然存在重大空白，原子能机构开展的新研究将试图填补这一空白。



图 F-2. 蚌、蠕虫、鱼类和浮游动物（如图所示）等海洋生物摄入微塑料的情况尚未得到充分研究。Cole, M. 等（2013 年），“海洋生物摄入微塑料”，《环境科学与技术》，2013 年，第 47（12）期，第 6646—6655 页。

230. 基于实验室的核技术将提供关于各种塑料微粒及其随附有毒污染物的相互作用和影响的关键新资料，这种污染物包括持久性有机污染物和微量元素，如汞、镉和铅。

231. 放射性同位素特别适合量化微塑料及其随附污染物的迁移和生物影响。利用环境浓度和具有商业意义的海洋生物就可以设计利用放射性同位素作为微塑料示踪剂的实验。以这种方式，可用放射性标记的塑料微粒来示踪生物体内的实际摄入率，包括关于微塑料随时间降解过程的资料。同样，也可用这些放射性标记技术来定量评定生物体内的生物化学转化和最终消除的生物动力学。

232. 可以应用化合物特定质谱测定法或高分辨率感应耦合质谱测定法等利用污染物的同位素特征示踪其来源和途径的互补分析方法来完成整个情景。因此，核技术和同位素技术的应用可提供一个处理关于微塑料生物影响的重要未决问题的独特机会，包括例如对不同生命阶段水生物种的潜在影响；评定对人口、社区和生态系统的影响；理解内化动力学（如穿过肠道壁的转移）；更好地评价作为所吸附持久性有机污染物和痕量金属摄入和生物累积的重要媒介的作用。

²² Lusher, A.L.、Hollman, P.C.H.、Mendoza-Hill, J.J., “渔业和水产养殖中的微塑料：认识微塑料的出现及其对水生生物和食品安全的影响”。粮农组织《渔业和水产养殖技术文件》第 615 号，罗马。

233. 从这项新研究收集的信息将促进了解微塑料及其随附有机污染物在具有社会和商业意义的海洋生物中的作用，并有助于加强成员国的海产品安全/保障计划，而这些计划必须依赖于准确、及时的食物卫生监测。

G. 放射性同位素生产和辐射技术

G.1. α 疗法：含 α 发射体放射性药物的新型治疗性应用

234. 治疗用放射性药物含有发射高能粒子的放射性同位素，这些高能粒子在其遇到的物质上相当快地沉积其能量——这种特性被称为高传能线密度。粒子辐射的穿行范围和能量在物质上的沉积速度取决于粒子的能量和质量。本质上属于电子的 β 粒子比相同能量的 α 粒子穿行得更远。换言之，几乎比电子重 7300 倍的 α 粒子沉积能量的距离比相同能量的 β 粒子短得多。因此， α 粒子的传能线密度远高于 β 粒子。

235. 用释放 β 粒子的碘-131 等放射性同位素标记的第一代治疗用放射性药物应用于癌症和其他疾病患者的治疗已有数 10 年。虽然 β 粒子因其长射程（一般在组织中以毫米为单位）而对于杀死癌细胞十分有效，但即使在优化的条件下仍能损害邻近的健康细胞。另一方面， α 粒子在活组织中具有较高的传能线密度和较短的射程范围，一般仅有几微米。因此，它们为特定辐照通常在微米范围的靶细胞提供了更好的选择。如果将 α 发射体放射性药物定位于被视为亚细胞靶的靶细胞核附近， α 放射性药物疗法将是成功方案。这里面临的挑战是将 α 发射体充分靠近靶细胞，以引起期望的靶向损伤。

236. 表 1 列出有潜力用于放射性药物的各种 α 发射体放射性核素。在过去的几十年中，为实现有效的基于 α 发射体的放射性药物进行的大量努力已经产生一些非常有希望的结果。

表 G-1. α 发射体放射性核素及其应用

放射性核素	半衰期	产物	应用
锕-225	10 天	铀-233 衰变链 钍-229 (α 衰变) 镭-226 (p, 2n)	肽放射性核素疗法
镭-224	3.66 天	钍-228 (α 衰变)	乳腺癌和前列腺癌骨转移患者的姑息治疗
镭-223	11.4 天	锕-227 衰变链 钍-227 (α 衰变)	
铋-213	45.6 分钟	锕-227 衰变链 锕/铋发生器	肽放射性核素疗法
铋-212	60 分钟	锕-227 衰变链 镭-铋/铅发生器	肽放射性核素疗法（可能性）
砒-211	7.2 小时	铋-209 (α , 2n)	放射免疫疗法

G.1.1. 镭-223

237. 镭-223 氯化物是第一代 α 发射体放射性药物之一。这是一种有吸引力的 α 发射体放射性药物，因为它是一种易于制备和了解的简单化学无机分子。2013 年，镭-223 氯化物获得美国食品和药品管理局批准用于缓解骨骼疼痛，并从此以后一直以 Xofigo 名称上市。与钙化学上相似的镭非常高效地自然积累在骨组织中。作为一种缓解骨转移患者疼痛的治疗用放射性药物，镭-223 氯化物具有优异的性能。它目前用于治疗前列腺癌和卵巢癌转移患者。然而，生产商数量有限和生产镭-223 的技术复杂性导致其在大多数国家特别是发展中国家供应量有限，成本高且可及性低。

G.1.2. 钷-225/铋-213 发生器

238. 使用镭-223 氯化物的经验推动着研究走向通过使用靶向分子（如肽和抗体）开发可用于靶向骨转移之外肿瘤的放射性药物。对可用于标记肽/抗体的多价 α 发射体放射性核素的寻求导致了对 α 发射体铋-213 的探索，铋-213 半衰期 45.6 分钟，可用作“治疗诊断用”（起诊断和治疗作用）放射性核素。考虑到铋-213 的短半衰期和直接生产的限制，钷-225/铋-213 发生器是生产医院放射性药物所用铋-213 的最佳方法。钷-225/铋-213 发生器具有高比活度，并且由于良好的化学和物理性质，已经在大量的临床前研究和若干临床试验中使用。该系统证明了使用肽和免疫分子作为靶向剂的靶向 α 疗法的可行性、安全和治疗效果。²³ 一些研究机构已充分建立了使用钷-225/铋-213 放射性核素发生器生产钷-225 的方法。但是，由于生产商数量有限，该发生器还没有广泛供应。目前在研究机构进行的生产仅覆盖来自正在进行的临床试验的有限需求。²⁴ 市场评估和需求概述是澄清实际市场需求所必需的。

G.1.3. 钷-225

239. 钷-225 最近已被直接标记和用于临床应用，并已显示出作为治疗诊断用放射性药物的强大潜力。已利用附着于前列腺癌细胞靶向部分即前列腺特异性膜抗原（PSMA）的钷-225 治疗晚期前列腺癌的患者，其结果（如图 G-1 所示）吸引了全世界对这种放射性药物的兴趣。与钷-225 前列腺特异性膜抗原的制备和分配有关的问题之一是钷-225 的生产和供应，因为所有的生产路线都有一定的缺点。为了满足所预见的不久的将来对钷-225 的巨大需求，必须解决所有这些问题。加拿大核实验室正在建造一台钷-229 毫居里级加速器，每年能生产数以十计毫居里的钷-225。

²³ Morgenstern, A., Bruchertseifer, F., Apostolidis, C., “铋-213 和钷-225 发生器的性能和两种发生器衍生的发射 α 的放射性同位素不断发展的治疗应用”，《通用放射性药物》第 5 卷（第 3 期）（2012 年）第 221 页至第 227 页。

²⁴ McDevitt, M.R. 等, “治疗性临床应用钷-225/铋-213 发生器系统：建设和运行”，《应用辐射与同位素》第 50 期（1999 年）第 895 页至第 904 页。

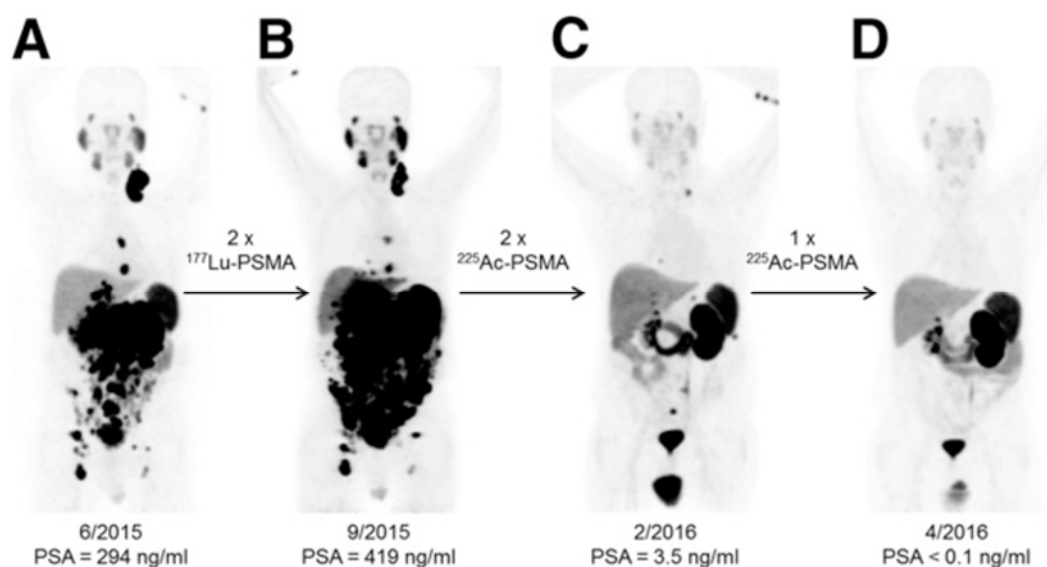


图 G-1. 与初始肿瘤扩散 (A) 相比的患者 $^{68}\text{Ga-PSMA-11}$ 正电子发射断层照相法/计算机断层照相法扫描, 两次发射 β 的 $^{177}\text{Lu-PSMA-617}$ 循环后再分期呈现了进展 (B)。相比之下, 在第二次 (C) 和第三次 (D) 发射 α 的 $^{225}\text{Ac-PSMA-617}$ 循环之后, 再分期呈现了令人印象深刻的应答反应。²⁵

G.1.4. 碲-211

240. 另一个众所周知的具有放射性药物所用适当特性的 α 发射体是碲-211。由于使用很少有的 α 粒子加速回旋加速器、产量低且标记效率低, 卤化物放射性核素碲-211 存在生产限制。这在过去 10 年限制了它的应用。²⁶ 迄今为止, 还没有关于基于这种放射性核素的放射性药物临床试验的报道。因此, 克服生产和可用性问题的挑战仍在继续。²⁷

241. 近来在使用发射 α 的放射性药物方面的成功引起了对使用这种分子治疗癌症的强烈兴趣。在世界范围内探索以持续方式使用这些药物是相关和适时的。

²⁵ Clemens Kratochwil, C.等, “ $^{225}\text{Ac-PSMA-617}$ 用于转移性去势抵抗前列腺癌的前列腺特异性膜抗原靶向 α 辐射治疗”, 《核医学期刊》第 57 期 (2016 年) 第 1941 页至第 1944 页。

²⁶ Elgqvist, J., “靶向 α 疗法: 第一部分”《最新放射性药物》第 4 卷 (第 3 期) (2011 年) 第 176 页。

²⁷ 国际原子能机构《治疗用发射 α 的放射性核素和放射性药物技术会议的报告》(2013 年) http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/TM-44815-report-Alpha-Therapy.pdf。



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(62)/INF/2