

2016 年核技术评论

总干事的报告

概 要

- 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”。今年的报告随附于后，其中突出强调了 2015 年令人瞩目的发展情况。
- 《2016 年核技术评论》涵盖以下选定领域：动力应用、先进的裂变和聚变、加速器和研究堆应用、核技术用于工业、身体成像术用于人体健康、昆虫媒介疾病防治的发展和土壤管理。
- 已对该文件进行修改，尽可能考虑了理事会的具体意见和从成员国收到的其他意见。

2016 年核技术评论

总干事的报告

正文摘要

1. 随着 2015 年底在运反应堆达到 441 座，核能已经拥有了 382.9 吉瓦（电）的全球发电容量。五座反应堆永久关闭，10 座并网（自 1990 年以来的最高数量），八座开工建设。近期和长期增长预测仍集中在亚洲，特别是中国。在建的 68 座反应堆有 45 座在亚洲，自 2005 年以来并网的 45 座反应堆也有 39 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造项目，12 个正计划建造新厂或完成暂停的建造项目。原子能机构 2015 年所作的 2030 年预测表明，核电装机容量的低值预测是将增长约 2%，高值预测将增长约 70%。核电在减少温室气体排放方面的作用正在得到越来越广泛的认可。由于核电已经通过避免每年近 20 亿吨二氧化碳对缓解气候变化做出了相当大的贡献，因此，核电可对“联合国可持续发展目标”做出直接的贡献。
3. 继续在世界各地的核电厂进行安全改进。原子能机构发表了其关于福岛第一核电站事故的报告。《核安全公约》缔约方外交大会通过了《维也纳核安全宣言》，其中包括了防止发生具有放射性后果的事故和一旦发生事故时减轻这类事故后果的若干原则。
4. 全球年浓缩能力仍高于总需求量，同时，其他燃料循环活动的运作则保持在相对稳定的水平。建立国际原子能机构低浓缩铀银行所需的基本法律框架随着 2015 年 8 月与哈萨克斯坦签署“东道国协定”和相关技术协定业已完成。
5. 贮存中的核反应堆乏燃料约为 26.6 万吨重金属，并且正在以约 7000 吨重金属/年的速度积累。五个成员国的 10 座设施继续进行商用反应堆乏燃料的后处理。
6. 预计未来数年将有相当多的退役工作：全世界有 157 座核动力堆已永久关闭或正在进行退役。全部在运反应堆的 56% 以上已有 30 多年堆龄，其中约有 15% 已超过 40 年堆龄。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或正在进行退役。

7. 芬兰的昂卡罗设施被授予了首个乏核燃料深部地质处置设施建造许可证。世界各地正在运行着所有其他各类放射性废物处置设施。若干国家正在认真地考虑弃用密封放射源的处置方案，其中包括与其他废物在适宜设施中共处置、再循环、返还或在专用钻孔中处置。2015 年成功的移除作业使得许多弃用密封放射源处于适当的贮存条件之下。

8. 若干成员国继续研究、发展和部署先进裂变反应堆。全球对发展和部署快堆的兴趣与日俱增。由于需要灵活发电、通过非能动安全设施提高安全实绩以及提供更好的经济承受力，对中小型或模块化反应堆的兴趣也日益高涨。目前，大约有 50 个中小型或模块化反应堆设计和概念，三座中小型或模块化反应堆正在建设中。

9. 若干成员国广泛关注利用核能开展非动力应用，如海水淡化、制氢、地区供热、重油三次回收等工业应用。

10. 随着国际热核实验堆场址上基建工程的推进，目前正在为应对 21 世纪的宏伟工程挑战即提供核聚变能做出努力。

11. 在粒子物理学、核物理学和基于中子的物理学等领域以及在长寿命核废物嬗变领域，对高能质子加速器或离子束加速器的需求不断增加。

12. 在全世界 55 个国家在运的 246 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。因特网反应堆实验室、由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心以及地区网络和联盟等举措旨在促进能力建设包括教育和培训方面的国际合作。八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。

13. 继续开展使用高浓铀的最小化活动，包括将高浓铀研究堆燃料返还原产国。美国和俄罗斯原产高浓铀燃料的返还计划在实施多年后取得了值得称道的结果。加上乌兹别克斯坦，28 个拥有高浓铀的国家¹现在已无高浓铀。

14. 虽然 2015 年期间没有出现重大的医用同位素钼-99 供应短缺，但加工设施和老旧研究堆的运行挑战依然如故。由于需求变化、效率提高以及供应多元化，少量计划外停堆在行业内部得到了有效管理。

15. 核技术被广泛应用于深入研究复杂的物理和化学现象包括磨损、传质、腐蚀和侵蚀的工业过程。当表面不易接触或被覆盖结构所遮蔽时，薄层活化的核技术提供了测

¹ 加中国台湾。

量和监测磨损和腐蚀的一种有效方式。超薄层活化能够实现为几纳米的表面损耗测量灵敏度。

16. 新型辐射加工产品，如各种形状和尺寸的辐射合成纳米级材料（纳米颗粒、纳米纤维、纳米孔），被设想用于制备食品活性包装和伤口敷料，以及用作施药装置。目前正在开发具有优异阻气性且可防止氧气进入和惰性气体离开食品包装从而延长产品寿命的“活性”或“智能”包装。这种薄膜可通过将特定纳米颗粒纳入薄膜的方式制造出来，从而使其也含有酶、抗菌剂和帮助控制食品降质和腐败的其他成分。

17. 在印刷和涂料工业中，对减少污染和避免降解产物进入消费品程序的需要一直是涂料工业出现能量小于 300 千电子伏的低能量电子束加速器的主要因素。将可辐射固化聚合物和低聚物用于涂料、油墨和粘合剂使之聚合和交联避免了使用挥发性有机化合物。加速电压在 80 到 200 千伏之间和处理宽度达到 60 厘米的新一代高度紧凑和易于操作的电子束发射器的最新发展有可能进一步促进该技术的使用。

18. 在健康领域，对正在进行的身体成分评定工具开发表现出了相当大的兴趣，因为有证据表明，身体成分的各组分对慢性疾病风险、疾病进展和治疗反应有着显著影响。目前采用三种成像模式进行身体成分评定：双能 X 射线吸收测定法、定量计算机断层扫描法和磁共振成像法。双能 X 射线吸收测定法涉及按两种不同的 X 射线能量水平同时成像，对于测量骨矿物质密度、骨量、脂肪量、去脂软组织质量和脂肪百分比而言，这是一种高度准确和精确的模式。

19. 近来，二维和三维全身表面扫描系统已被提议作为新的身体成分评定平台，因为其高可及性、低成本和丰富的局部数据使其成为令人信服的局部身体成分评定方案。利用三维表面扫描仪获得的测量结果已被证明是高度精确的，而二维身体形状测量值却是利用标准数码照相机获取的。最近已经证明了如何从简单的全身轮廓中获得脂肪量指数和无脂肪量指数，而这种全身轮廓可以很容易地使用传统的照相机如在移动电话中找到的照相机获取，从而使得二维光学身体成分测量值非常适合于各种现场应用。

20. 综合利用基于辐射、遗传和共生体的方法来管理蚊虫病媒可能有助于降低相关的疾病负担。试点项目显示，昆虫不育技术可与其他防治策略结合起来有效地抑制蚊虫种群。对于昆虫不育技术和其他相关种群抑制干预措施而言，规模生产是必需的，但由于雌蚊是疾病传播体，因此，重要的是只释放雄蚊。可以利用两性异形和掺入血粉的方式小规模地进行雌雄分离，以便从生产线上消除雌蚊，但需要有效而强大的遗传选择性品系，以方便且安全地在规模饲养程度上消除雌蚊。现在正在努力确定适合于阿拉伯按蚊、白纹伊蚊和埃及伊蚊的新的形态或条件致死标记物，以便开发出有效的遗传选择性品系。

21. 除了采用辐照的传统昆虫不育技术外，作为昆虫大量携带的一种母系遗传共生细菌属，沃尔巴克氏体属细菌被评定为通过细胞质不亲和性（不亲和昆虫技术）抑制部

分地区主要蚊虫病媒种群的一个辅助工具。在没有强大的遗传选性品系的情况下，将昆虫不育技术与基于沃尔巴克氏体属细菌的方案结合起来的建议似乎有很大的潜力作为控制蚊虫病媒种群的一种有效和生物安全的方案，因为它消除了与释放多产和传播疾病雌蚊有关的危险。一个充满活力的种群抑制方案是在大面积害虫防治计划中将昆虫不育技术与其他兼容战术结合在一起，而且可能是可持续地管理蚊虫种群并潜在地防治它们所传播的多种疾病的惟一途径。

22. 不适当的农场管理实践造成的土地退化导致了肥沃土壤的流失和作物产量低下。耕地损失以及溪流和湖泊的沉积作用和污染也是一项显著的环境、社会和经济威胁。高达 14 亿人可能受到土地退化的影响，而生态系统服务损失估计每年达到 10.6 万亿美元。

23. 有助于评定土壤侵蚀和量化土壤保持有效性的战略长期以来一直是采用以下方面作为指导的：以往热核武器试验产生的铯-137 等散落放射性核素和天然存在的地球成因放射性同位素如铅-210 以及宇宙发生的放射性同位素如铍-7。最近在固有土壤有机生物标记物的特定化合物稳定同位素识别标志的基础上开发的法医稳定同位素技术使得可以对沉积物的来源进行区分和确定。通过将沉积物源头的特定化合物稳定同位素“指纹”与关于土壤和沉积物再分配的散落放射性核素资料联系起来，研究人员可以得到一种准确而有效的沉积物源头确定方法，用以确定容易发生土壤侵蚀的区域。利用这些综合性的同位素方法能使农业社区采取具体和有效的减缓措施，以尽量降低土壤肥力、作物产量和水质恶化的损失。

2016 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 2015 年 12 月 31 日，全世界共有 441 座在运核动力反应堆，总容量达到 382.9 吉瓦（电）²（见表 A-1）。这与 2014 年数字比较有所增加，总容量增长约 6.6 吉瓦（电）。
2. 在在运反应堆中，约 81.6%属轻水慢化冷却堆，11.1%属重水慢化冷却堆，3.4%属轻水冷却石墨慢化堆，3.2%属气冷堆。两座属于液态金属冷却快堆。
3. 2015 年 9 月 10 日，仙台 1 号机组成为日本自福岛第一核电站事故以来恢复全面运行的第一座核动力堆，随后，仙台 2 号机组于 2015 年 10 月 15 日恢复全面运行。原子力规制委员会 2015 年 5 月批准重启伊方 3 号机组，这也于 2015 年 10 月得到爱媛县议会批准。
4. 日本的五台反应堆机组（玄海 1 号机组、美滨 1 号和 2 号机组、岛根 2 号机组和敦贺 1 号机组）、德国的格拉芬莱因费尔德反应堆和英国的威尔法 1 号机组在 2015 年宣布永久关闭。
5. 2015 年，有 10 座新反应堆并网，这是 1990 年以来数量最多的一年。这些反应堆中有八座（昌江 1 号机组、防城港 1 号机组、方家山 2 号机组、福清 2 号机组、红沿河 3 号机组、宁德 3 号机组和阳江 2 号和 3 号机组）在中国，一座（新月城 2 号机组）在大韩民国，一座（别洛雅尔斯克 4 号机组）在俄罗斯联邦。
6. 2015 年有八台机组开工建设，它们是：中国的防城港 3 号机组、福清 5 号和 6 号机组、红沿河 5 号和 6 号机组和田湾 5 号机组，巴基斯坦的 K-2 机组，以及阿拉伯联合酋长国的巴拉卡 4 号机组。
7. 截至 2015 年 12 月 31 日，共有 68 座反应堆在建。扩展以及近期和长期增长预测仍集中在亚洲（图 A-1），特别是中国。在在建反应堆总数中，有 45 座在亚洲，自 2005 年以来并网的 45 座新反应堆中也有 39 座在亚洲。

² 1 吉瓦（电）相当于 10 亿瓦（电）。

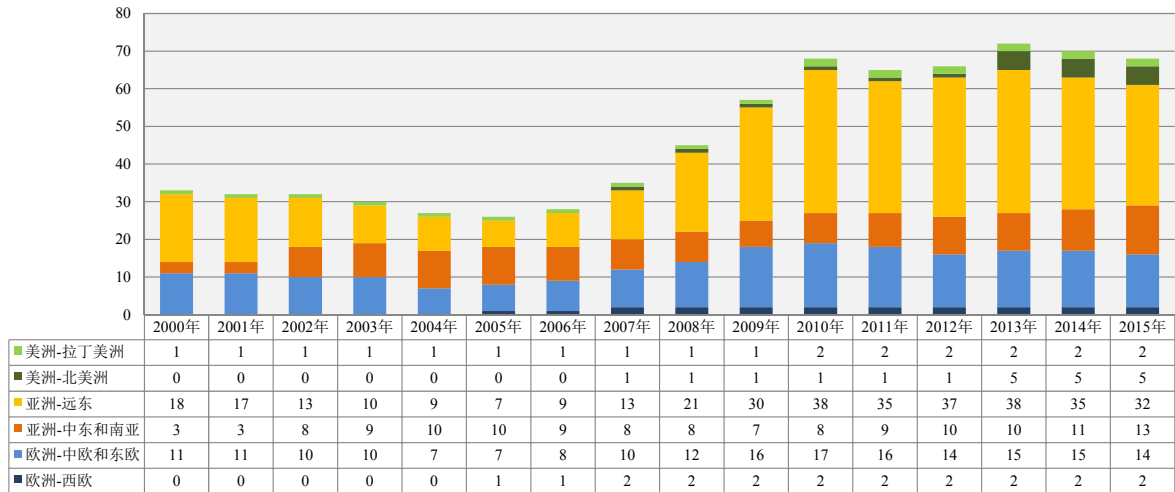


图 A-1. 按地区分列的在建反应堆数目。(资料来源: 动力堆信息系统
<http://www.iaea.org/pris>)

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆 (截至 2015 年 12 月 31 日) ^a

| 国家 | 在运反应堆 | | 在建反应堆 | | 2015 年供应的核电量 | | 截至 2015 年的总运行经验 | |
|----------|-------|---------------|-------|---------------|--------------|---------------|-----------------|----|
| | 机组数 | 总容量 兆瓦 (电) | 机组数 | 总容量 兆瓦 (电) | 太瓦·小时 | 占总发电量的 百分数 | 年数 | 月数 |
| 阿根廷 | 3 | 1 632 | 1 | 25 | 6.5 | 4.8 | 76 | 2 |
| 亚美尼亚 | 1 | 375 | | | 2.6 | 34.5 | 41 | 8 |
| 白俄罗斯 | | | 2 | 2 218 | | | | |
| 比利时 | 7 | 5 913 | | | 24.8 | 37.5 | 275 | 7 |
| 巴西 | 2 | 1 884 | 1 | 1 245 | 13.9 | 2.8 | 49 | 3 |
| 保加利亚 | 2 | 1 926 | | | 14.7 | 31.3 | 159 | 3 |
| 加拿大 | 19 | 13 524 | | | 95.6 | 16.6 | 693 | 6 |
| 中国 | 31 | 26 774 | 24 | 24 128 | 161.2 | 3.0 | 209 | 2 |
| 捷克共和国 | 6 | 3 930 | | | 25.3 | 32.5 | 146 | 10 |
| 芬兰 | 4 | 2 752 | 1 | 1 600 | 22.3 | 33.7 | 147 | 4 |
| 法国 | 58 | 63 130 | 1 | 1 630 | 419.0 | 76.3 | 2 048 | 4 |
| 德国 | 8 | 10 799 | | | 86.8 | 14.1 | 816 | 7 |
| 匈牙利 | 4 | 1 889 | | | 15.0 | 52.7 | 122 | 2 |
| 印度 | 21 | 5 308 | 6 | 3 907 | 34.6 | 3.5 | 439 | 6 |
| 伊朗伊斯兰共和国 | 1 | 915 | | | 3.2 | 1.3 | 4 | 4 |
| 日本 | 43 | 40 290 | 2 | 2 650 | 4.3 | 0.5 | 1 739 | 0 |
| 大韩民国 | 24 | 21 733 | 4 | 5 420 | 157.2 | 31.7 | 474 | 0 |
| 墨西哥 | 2 | 1 440 | | | 11.2 | 6.8 | 47 | 11 |
| 荷兰 | 1 | 482 | | | 3.9 | 3.7 | 71 | 0 |
| 巴基斯坦 | 3 | 690 | 3 | 1 644 | 4.3 | 4.4 | 64 | 8 |
| 罗马尼亚 | 2 | 1 300 | | | 10.7 | 17.3 | 27 | 11 |
| 俄罗斯联邦 | 35 | 25 443 | 8 | 6 582 | 182.8 | 18.6 | 1 191 | 4 |
| 斯洛伐克 | 4 | 1 814 | 2 | 880 | 14.1 | 55.9 | 156 | 7 |
| 斯洛文尼亚 | 1 | 688 | | | 5.4 | 38.0 | 34 | 3 |

| 国家 | 在运反应堆 | | 在建反应堆 | | 2015 年供应的核电量 | | 截至 2015 年的总运行经验 | |
|-------------------|-------|---------------|-------|---------------|--------------|---------------|-----------------|----|
| | 机组数 | 总容量 兆瓦 (电) | 机组数 | 总容量 兆瓦 (电) | 太瓦·小时 | 占总发电量的 百分数 | 年数 | 月数 |
| 南非 | 2 | 1 860 | | | 11.0 | 4.7 | 62 | 3 |
| 西班牙 | 7 | 7 121 | | | 54.8 | 20.3 | 315 | 1 |
| 瑞典 | 10 | 9 648 | | | 54.5 | 34.3 | 432 | 6 |
| 瑞士 | 5 | 3 333 | | | 22.2 | 33.5 | 204 | 11 |
| 乌克兰 | 15 | 13 107 | 2 | 1 900 | 82.4 | 56.5 | 458 | 6 |
| 阿拉伯联合酋长国 | | | 4 | 5 380 | | | | |
| 英国 | 15 | 8 918 | | | 63.9 | 18.9 | 1 559 | 7 |
| 美利坚合众国 | 99 | 99 185 | 5 | 5 633 | 798.0 | 19.5 | 4 111 | 4 |
| 总计 ^{b、c} | 441 | 382 855 | 68 | 67 442 | 2 441.3 | | 16 536 | 7 |

a. 资料来源于原子能机构“动力堆信息系统”(<http://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，5032 兆瓦 (电)；在建 2 台机组，2600 兆瓦 (电)。

核发电量为 40.8 太瓦·小时，占总发电量的 18.9%。

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 (200 年零 1 个月) 的已关闭核电厂。

8. 在 441 座在运核动力堆中，有 250 座已经服役 30 年或 30 年以上。当一座反应堆达到其设计寿命终点时，会对其基本结构、系统和部件进行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。

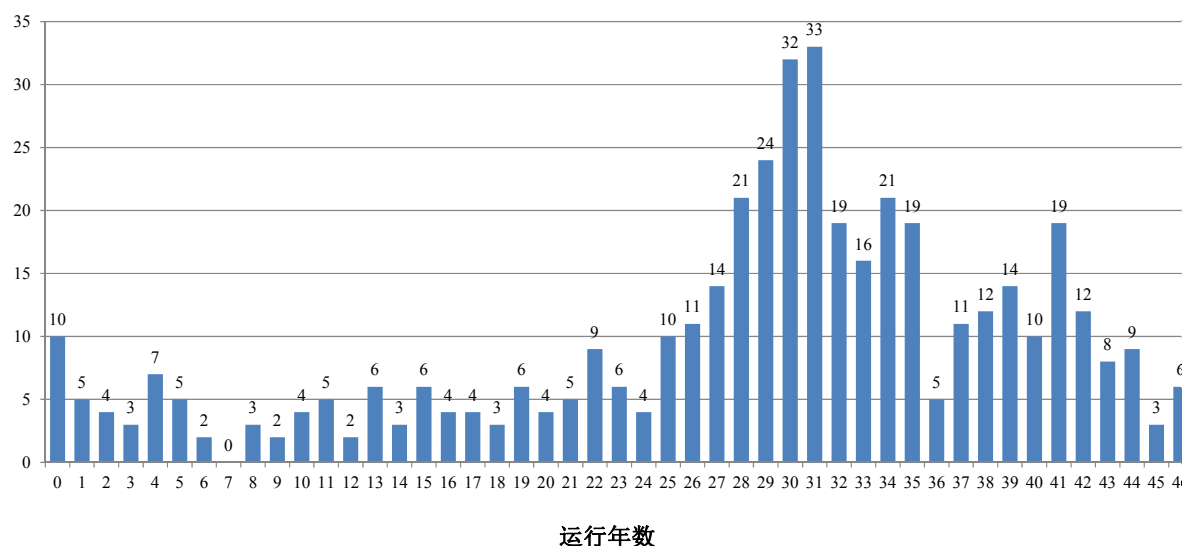


图 A-2. 在运核动力堆截至 2015 年 12 月按堆龄的分布情况。(资料来源：动力堆信息系统 <http://www.iaea.org/pris>)

9. 在阿拉伯联合酋长国，酋长国核能公司在 3 月代表 Nawah 公司提交了运行许可证申请。Nawah 公司将是巴拉卡 1 号机组的营运组织和许可证持有者。预计联邦核监管

局将于 2016 年 10 月颁发运行许可证，允许进行巴拉卡 1 号机组的装料和热调试。巴拉卡 2 号、3 号和 4 号机组已全部开工建设，预计到 2018 年、2019 年和 2020 年分别投入运行。原子能机构在 2015 年 2 月进行了综合监管评审服务工作组访问，在 3 月进行了应急准备评审工作组访问，在 5 月进行了国际实物保护咨询服务工作组访问。

10. 白俄罗斯第一座核电厂两台机组的建造继续进行。奥斯特洛韦茨 1 号和 2 号机组的调试计划分别于 2018 年和 2020 年进行。

11. 土耳其继续发展其核电计划基础结构，并已最后完成核能法草案，其中全面涉及了安全、安保和保障问题。

12. 孟加拉国建立了作为未来运营者的卢普尔核电厂公司，并已开始与俄罗斯联邦就信贷协议和一般工程与施工合同进行谈判。波兰计划在 2019 年之前为其首座核电厂选定技术和场址、在 2022 年之前开始施工并在 2029 年之前使其首台机组投入运行，它已编制招标文件，并就计划于 2018 年之前采用的政府支助机制进行了谈判。越南实施了人力资源发展和公众宣传国家项目，并继续修订其《原子能法》，该法预计在 2016 年提交供核准。

13. 对尼日利亚（6 月）、肯尼亚（8 月）和摩洛哥（10 月）进行的综合核基础结构评审工作组访问确认了这些国家在发展各自核基础结构方面取得的进展，并就进一步的行动提出了建议。2015 年 6 月，约旦与俄罗斯联邦核电建设出口公司签署了开展供水研究和场址监督活动的合同。10 月，成立了约旦核电公司。目前正在对有关电网研究、电力市场研究及技术、法律和金融项目发展咨询服务的建议进行技术评价。埃及在 11 月与国家原子能公司签署了建造四座反应堆的协议。

14. 在考虑核电的许多国家，重点是制订知情决策、发展支持核电计划所需的综合性法律和监管基础结构以及发展所需的人力资源。

15. 利益相关者参与继续是处于核基础结构发展各阶段的国家的一个重要关注领域，因为这种参与有助于成员国及早处理各种关切和解释本国核电计划的依据、规划和进展。2015 年，原子能机构推动了在埃及、印度尼西亚、肯尼亚和沙特阿拉伯与利益相关者参与有关的专家工作组访问，并推动了在芬兰和日本的国际会议。

A.1.1. 扩展国

16. 美国核管理委员会（美国核管会）向田纳西流域管理局颁发了允许瓦茨巴 2 号机组运行至 2055 年 10 月的 40 年期运行许可证。瓦茨巴场址是第一个遵守美国核管会与福岛有关的事事故减缓战略指示的场址。

17. 法国弗拉芒维尔 3 号欧洲压水堆的建造正在进行中，预定期限和并网时间为 2018 年底之前。响应法国核安全管理局的要求，正在进行一系列测试，以确认压力容器封头和底部部件的冶金和机械特性符合要求。

18. 阿根廷核电公司和中国核工业集团公司（中核集团公司）完成了建设阿根廷第四座反应堆即坎杜型阿图查 3 号机组的技术和商业合同谈判，该反应堆的建设将需要八年。这两个组织间的框架协议还设想建设由中国设计的华龙一号压水堆作为阿根廷的第五座机组。

19. 芬兰芬诺能源公司向就业与经济部提交了关于该公司 Hanhikivi 项目的建造许可证申请。该申请的处理预计将需要至少两年时间。芬诺能源公司的目标是于 2018 年开始基于俄罗斯设计的 1200 兆瓦（电）水冷和水慢化动力堆（WWER-1200）建设该电厂，并于 2024 年开始运行。

A.1.2. 运行国

20. 对运行寿期的决定主要取决于电力市场状况和业务发展预测，有时也伴有社会和政治因素。在瑞典，有四座反应堆将早于原定时间关闭，因为它们被认为不盈利。灵哈尔斯 2 号机组将于 2019 永久关闭，灵哈尔斯 1 号机组则随继于 2020 年永久关闭，尽管它们都原定于 2025 年左右关闭。奥斯卡港 1 号机组何时关闭的最终决定将在退役时间表准备就绪后作出。自 2013 年 6 月以来因实施广泛的现代化计划而一直停运的奥斯卡港 2 号机组将不会重启。

21. 美国的安特吉能源公司将不晚于 2019 年 6 月关闭其在马萨诸塞州的单机组流浪者核电厂。它还以经济活力不断下降为由，打算于 2016 年早些时候或 2017 年早些时候关闭其在纽约的菲茨帕特里克核电厂。

22. 大韩民国自 1978 年开始运行并于 2007 年整修的最老在运反应堆古里 1 号机组已被核准运行至 2017 年。由于韩国水电和核电公司已宣布将不申请为古里 1 号机组办理许可证再审批程序以使之延期至 2027 年，因此，该机组于 2017 年 6 月关闭时将成为该国第一个进入退役阶段的核电机组。

A.2. 核电增长预测

23. 根据原子能机构 2015 年的预测（图 A-3），按高值预测，全球核电装机容量预计将从目前的 381.7 吉瓦（电）水平增长到 2030 年的 632 吉瓦（电）——在 15 年中增长约 70%。按低值预测，2030 年的核电装机容量将为 385 吉瓦（电），即大约保持目前水平。这些数字考虑了退休——今后 15 年中增加的实际新装机容量按低值预测将为约 150 吉瓦（电），按高值预测将为 300 吉瓦（电）。将这些预测扩大到未来，则导致到 2050 年，核电装机容量按高值预测将增长到 964 吉瓦（电），按低值预测将为零净增长。

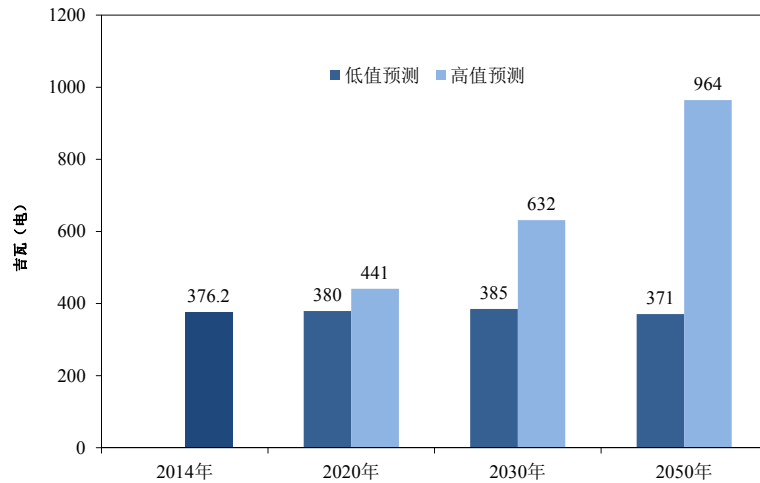


图 A-3. 世界核电装机容量预测。(来源:《直至 2050 年的能源、电力和核电估算》, 原子能机构《参考数据丛书》第 1 号, 2015 年)

24. 原子能机构、经合组织国际能源机构（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 年的增长将处于 600—700 吉瓦（电）范围，而低值假想方案反映了更大的增长不确定性（图 A-4）。

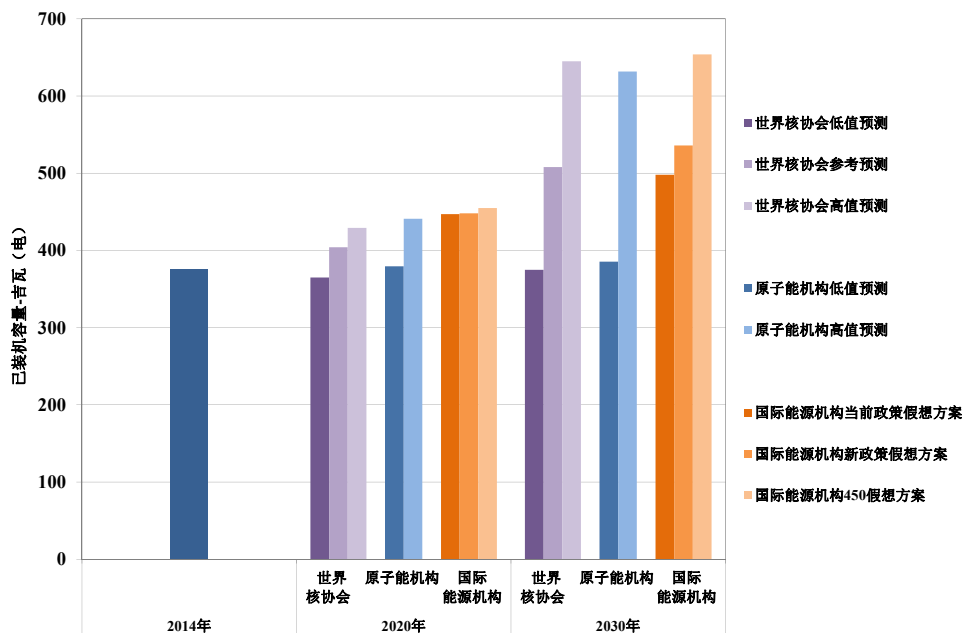


图 A-4. 原子能机构最新预测与国际能源机构 2014 年假想方案和世界核协会 2013 年预测的比较。

25. 核电通过每年避免近 20 亿吨二氧化碳，为缓解气候变化做出了显著贡献。为使核电有助于到 2100 年将全球变暖限制到 2 摄氏度，核电装机容量将需要符合高值预测，以避免到 2050 年的近 65 亿吨温室气体排放。《联合国气候变化框架公约》缔约方第二十一届会议（“气候变化公约”第二十一届会议）导致达成的“巴黎协定”既未确定也

未排除任何特定形式的能源。这使各国能够确定低碳能源组合，以抵消碳排放。“巴黎协定”还支持可持续发展。核电可直接促进联合国可持续发展目标 7 “所有人都能获得负担得起、可靠、可持续和现代化的能源”和目标 13 “采取紧急行动应对气候变化及其影响”。

A.3. 燃料循环

A.3.1. 前端

铀资源和生产

26. 2015 年，铀现货价格仍保持低迷，徘徊在 77 美元/千克铀至 86 美元/千克铀之间，而 2014 年中的低点约为 60 美元/千克铀。价格低迷大大限制了各公司为实施勘探、开展可行性研究、启动新建设项目及扩大现有项目募集资金的能力。

27. 世界核协会估计 2015 年的铀产量约为 5.7 万吨铀，大致维持了 2014 年的水平。超过 15 个国家目前正在进行铀生产。在一些生产国和超过 25 个潜在的新加入国，许多新项目正处于不同的发展阶段，这其中一些国家是在长期间断后重启铀矿开采。

28. 哈萨克斯坦保持了其作为世界首屈一指的铀生产国的地位，所产铀几乎全部来自其原地浸出矿。产量经过 2000 至 2012 年的迅速增长之后，最近保持了适度增加，2015 年为 2.38 万吨铀。

29. 第二大生产国是加拿大，其在阿萨巴斯卡盆地取得的铀矿勘探结果仍然令人鼓舞，如三 R 铀矿床，估计可在 14 年矿山寿命期间生产 3.877 万吨铀。雪茄湖有着世界上最高品位的铀矿，于 5 月开始了商业生产，预计在 2017 年之前将实现其每年 6900 吨铀的全部产能。

30. 纳米比亚新建的胡萨比铀矿于 2015 年进行了调试，计划于 2016 年初步投产。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 2015 年继续运营。

31. 澳大利亚 2014 年投产的四里原地浸出铀矿大幅提高了产量，产能达到了每年 1000 吨铀。兰格项目两个早期露天矿的地下开采原本可能延伸，但现已暂停了相关工作，且不会继续，因为其 2015 年的产量不到 2500 吨铀，而 1997 至 2009 年期间的年产量则在 4000 至 6000 吨铀之间。

32. 从丹麦王国格陵兰岛克瓦讷湾矿床提炼铀和稀土金属的精炼中试厂一期工程已达标，或已超过了目标。2 月份公布的估计数包括 22.81 万吨铀和 1113 万吨总稀土氧化物。像克瓦讷湾矿床这样的非常规铀资源显著扩大了资源基础。美国正在研究将海水作为另一种非常规铀来源。钍以往都是示范性地作为核燃料使用，但在能够考虑将其商业使用之前仍需要做大量的工作。世界范围的钍资源估计约有 600 万至 700 万吨。

转化和浓缩

33. 加拿大、中国、法国、俄罗斯联邦、英国和美国运行着商业规模的工厂，将八氧化三铀转化为六氟化铀。美国采用氟化物挥发干法工艺，而所有其它转化设施都采用湿法工艺。全球年总转化能力就六氟化铀而言为每年约 6 万吨铀。当前转化服务需求总量（假设铀-235 浓缩尾料丰度为 0.25%）也在每年 6 万至 6.4 万吨铀之间。

34. 全球总浓缩能力目前约为每年 6000 万分离功单位，而总需求约每年 5000 万分离功单位。有五家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）。

35. 阿根廷、巴西、印度、伊朗伊斯兰共和国、日本和巴基斯坦也有小型转化和浓缩设施在运行。

36. 美国核管会已批准了许可证修订，允许铀浓缩公司扩大其在新墨西哥州的尤尼斯铀浓缩厂。该计划要将产能从目前的 370 万分离功单位扩大到 1000 万分离功单位。但美国能源部已宣布将对其铀浓缩计划的供资削减约 60%。这些活动现在仅限于在田纳西州橡树岭开发新的美国离心铀浓缩技术。

37. 贫化六氟化铀被去氟转化为氧化铀或四氟化铀，以便以更稳定的形式长期贮存贫化铀。当前全球去氟转化总产能仍保持在每年 6 万吨六氟化铀左右。主要在运设施有法国特里卡斯坦的阿海珐厂、美国朴茨茅斯和帕迪尤卡的两座铀处置服务厂，以及俄罗斯联邦泽列诺戈尔斯克电化学厂的 W-ECP 去氟转化厂。国际同位素公司正在美国新墨西哥州建厂。铀浓缩公司英国 ChemPlants 已将目前在建的卡彭赫斯特尾料管理设施去氟转化厂的预计开工日期推迟到了 2017 年。该设施建成后将处理铀浓缩公司的欧洲贫化铀库存。

38. 南澳大利亚政府成立了该国首个核燃料方面的皇家委员会，研究燃料循环活动的拓展潜力。

A.3.2. 燃料制造

39. 当前每年对轻水堆燃料制造服务的需求量保持在约 7000 吨燃料组件浓缩铀，但预计不久的将来会增加至每年约 8000 吨铀。加压重水堆（重水堆）的需求量为每年 3000 吨铀。现在大多数燃料类型都有若干相互竞争的供应商。全球燃料制造总产能就轻水堆燃料而言保持在约每年 1.35 万吨铀（浓缩铀），就重水堆燃料而言保持在约每年 4000 吨铀（天然铀）。目前，巴西、中国、法国、德国、印度、日本、哈萨克斯坦、大韩民国、俄罗斯联邦、西班牙、瑞典、英国和美国在进行轻水堆燃料制造。用作天然铀重水堆燃料的铀在阿根廷、加拿大、中国、印度和罗马尼亚纯化并转化为二氧化铀。

40. 美国核管会已授权俄亥俄州佩里核电厂开始使用全球核燃料的 GNF2 高性能沸水堆燃料。该燃料的能量输出更高，同时可减少整个燃料循环的成本，降低铀总量和换

料时的平均富集度。该公司在 2015 年还提供了下一代 GNF3 沸水堆燃料组件（图 A-5），这提高了燃料的经济性、性能和运行灵活性。2015 年 4 月，阿海珐集团公司在美国的两个沸水堆启用了 ATRIUM 11 燃料。该新设计提供了更好的运行灵活性，这对已选择核电厂提高出力或容量因子优化战略的电力公司特别有价值。



图 A-5. 下一代 GNF3 沸水堆燃料。（照片由全球核燃料公司提供）

41. 美国亚利桑那公共服务公司已与西屋电气公司签署了亚利桑那州帕洛弗迪三个核反应堆机组下一代燃料的制造和交付合同。新燃料被称为 CE16NGF，采用了先进的包壳材料和可燃吸收剂以及先进的结构设计。该设计提高了燃料的效率和可靠性，同时延长了服务寿期。

42. 2015 年 5 月，美国一些电力公司就 Lightbridge 新型金属燃料设计的评审向核管会提交了正式意向书。这种燃料由锆-铀合金制成，采用了多瓣螺杆几何形状的独特构造。该设计具有完善的传热性能，从而使燃料能以比目前所用氧化铀燃料更高的功率密度运行。此燃料预计将从 2017 年开始在挪威的哈尔登研究堆接受辐照试验。

43. 一些工业和学术研究实验室目前正在研究各种耐受事故燃料概念。日本东芝公司和揖斐电公司已开发了用碳化硅制造核燃料部件的新技术，将其作为轻水堆锆合金包壳的替代品。燃料组件套罩将于 2016 年在研究堆接受试验，以期在 2025 年前实现商业化。英国国家核实验室和曼彻斯特大学启动了一个研究项目，包括先进的陶瓷复合包壳方面的工作，这可能为提高核燃料耐高温能力带来巨大潜力。

44. 中国石岛湾正在建造的一座高温气冷堆——示范性球床模块式高温堆的燃料元件已在荷兰完成了辐照合格性试验。4 月，伊朗伊斯兰共和国宣布启动该国第一座核燃料生产设施，将生产与布什尔核电站所用燃料类似的燃料。

45. 再循环作业通过使用堆后铀和混合氧化物燃料提供二次核燃料供应。目前，俄罗斯联邦埃列克特罗斯塔利每年为阿海珐集团公司生产约 100 吨堆后铀。阿海珐集团公司在法国罗芒厂的一条生产线每年将约 80 吨浓缩堆后铀重金属转化成供法国轻水堆使用的燃料。当前全球混合氧化物燃料制造能力约为 250 吨重金属，主要设施位于法国，而印度、日本和俄罗斯联邦则有一些较小型设施。

46. 印度和俄罗斯联邦制造供快堆使用的混合氧化物燃料。俄罗斯联邦的采矿与化工联合企业完成了一批混合氧化物燃料的标准燃料组件的制造，可供用于别洛雅尔斯克 4 号 BN-800 型反应堆。新生产线的建造已于去年完工，2015 年的年生产能力为 20 个燃

料组件，目标是在 2017 年前每年生产 400 个。年处理能力 130 吨重金属的日本混合氧化物燃料制造厂设施正在建造中，预计于 2019 年启动商业运行。

A.3.3. 供应保证

47. 2015 年完成了与哈萨克斯坦的法律框架，标志着原子能机构低浓铀银行项目从评估和可行性研究进入了全面实施阶段。继理事会批准之后，于 2015 年 8 月 27 日在哈萨克斯坦阿斯塔纳签署了《东道国协定》和两份附属技术协议。第一份附属技术协议是《国际原子能机构与乌尔巴冶金厂的设施营运者协议》，该冶金厂将成为原子能机构低浓铀银行的营运者。第二份附属技术协议系与能源部签订，系为建立原子能机构低浓铀银行而将实施的具体安排。根据协议，设立了联合协调委员会，由原子能机构和哈萨克斯坦共同主持，商定了一份自签署之日起预计 90 天内的“具体活动计划”。根据《东道国协定》，安全和安保均由哈萨克斯坦的核监管体系来确保，而“具体活动计划”则提供了一个路线图，说明如何按《东道国协定》要求遵循原子能机构安全标准和安保导则文件的可适用规定。安全（特别是地震安全）和安保领域的重要技术工作仍在继续进行。完成了对贮存设施方案的可行性研究，目前正在考虑一座新的建筑物。此前，同样是在理事会批准后，于 2015 年 6 月与俄罗斯联邦签署了一份过境协定。

48. 《2012 年核技术评论》(GC(56)/INF/3 号文件)描述了目前已建立的其他供应保证机制。

A.3.4. 后端

49. 截至 2015 年年底，贮存中的乏燃料约为 26.6 万吨重金属，并且正在以每年约 7000 吨重金属的速度积累。虽然大多数燃料采用湿法贮存在反应堆场址，但 27 个国家有 147 座离堆乏燃料贮存设施（图 A-6）。在干法贮存系统中，加拿大和美国的乏燃料存量最大，其各自国家存量的三分之一以上均贮存在干法贮存设施中。德国有超过 1000 个满载的金属两用干法贮存罐，预计到 2022 年底，该国所有乏燃料存量均用干法贮存。

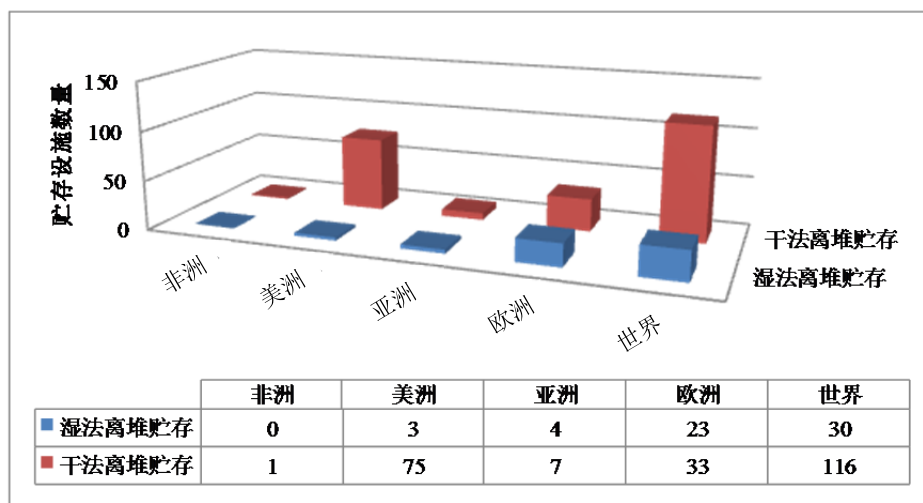


图 A-6. 离堆乏燃料贮存设施的全球分布。

50. 目前，有 12 个国家在规划、建造或调试干法贮存设施。日本、俄罗斯联邦、西班牙和乌克兰的项目最大。俄罗斯联邦列兹诺戈尔斯克最近建成了世界上最大的干法贮存容量，在 2012 年完工的一个部分之外又扩建了两个新的干法贮存室建筑物（一个用于高功率通道式反应堆，一个用于水水动力堆燃料）。预计新的贮存室将于 2016 年接收乏燃料。

51. 美国废物控制专家已向核管会申请在得克萨斯州安德鲁斯运行独立乏燃料贮存装置的许可证。阿海珐集团公司在设计、建造和运行拟建设施中发挥着主导作用。HOLTEC 国际公司和艾迪利能源联合公司公布了设计和建造一座集中乏燃料贮存设施的谅解备忘录。根据 HOLTEC 国际公司以最大安保方式建造地下干法贮存系统，该设施最多可容纳 7.5 万吨重金属。如果获批，设施将建在新墨西哥州东南部。

52. 2015 年全球商用反应堆乏燃料后处理的状况保持不变，中国、法国、印度、俄罗斯联邦和英国共有 10 座设施开展这样的后处理。法国和英国部署的处理能力最大，每年可进行约 1000 吨重金属的后处理。法国和俄罗斯联邦还向海外客户提供后处理服务。俄罗斯联邦的马雅克设施将其年处理能力提高到每年 200 吨重金属，并试验了后处理铍-铀燃料等非常规燃料的若干技术。印度有三座设施处理动力堆燃料，还有一座 60 吨重金属/年的中试设施处理钍氧化物燃料。中国有一座后处理中试厂，每年最多可进行 50 吨重金属的后处理。11 月，中国核工业集团公司和阿海珐集团公司签署了一份协议，旨在建造一座 800 吨重金属/年的乏燃料处理和再循环设施，预计将建在中国的甘肃省。建造工程计划于 2020 年开工，并于 2030 年完工。该场址还将容纳一座 3000 吨重金属容量的乏燃料贮存设施。目前，日本尚无商用后处理厂；但六所村 800 吨重金属/年的后处理厂正处于积极调试和安全审查中，预计在 2016 年 3 月前投入运行。

53. 根据 2013 年 6 月的《东京电力公司福岛第一核电站 1 号至 4 号机组退役中长期路线图》，计划于 2015 年第一季度实施福岛第一核电站 3 号机组的池内燃料移除工作。但多项挑战阻碍了这一目标的实现，包括移除燃料起吊机械控制台（已于 2015 年 8 月移除）及相关机械方面的困难，以及将 3 号机组反应堆厂房运行大厅的地板去污到 1 毫希/小时的目标剂量水平的能力。2015 年 6 月，根据现场情况修订了“路线图”，从而分别将移除 1 号和 3 号机组池中燃料的工作推迟到了 2020 年和 2017 年。

A.3.5. 退役、环境治理和放射性废物管理

核设施退役

54. 除世界各地的 441 座在运核动力堆之外，另有 157 座已经关闭或正在退役，其中包括 17 座已完全退役³。

³ 资料源于原子能机构“动力堆信息系统”（<http://www.iaea.org/pris>）。

55. 有 320 多座在运燃料循环设施，约 170 座已经关闭或正在退役，125 座已完全退役。此外，还有 246 座在运研究堆，180 多座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。

56. 自世纪之交以来，已获得了大量退役经验，取得最大进展的主要有长期运行核电计划的国家，特别是比利时、法国、德国、俄罗斯联邦、西班牙、英国和美国。2015 年在退役方面取得实质性进展的计划实例包括西班牙何塞·卡夫雷拉核电厂反应堆压力容器的分割、斯洛伐克博胡尼斯 V1 核电厂第二阶段退役工作的启动以及俄罗斯联邦题为“2008 年和到 2015 年期间的核和辐射安全”的大型联邦目标计划（包括知名的退役和环境治理活动）的完成。

57. 英国 10 座第一代镁诺克斯核电厂的退役工作继续取得进展。威尔法核电厂（威尔士安格尔西岛）已于 2015 年 12 月停止运行，这标志着 1956 年 8 月在卡尔德豪尔（英国坎布里亚郡）将世界上第一座工业规模核电厂接入电网而开启的镁诺克斯发电时代的终结。威尔法于 1971 年开始运行，现在进入了退役前的燃料卸载阶段。继续退役的还有敦雷的两座碱金属冷却快堆及其材料试验堆，以及温弗里斯的剩余两座研究堆。



图 A-7. 英国塞拉菲尔德的退役工作。（照片由核退役管理局/塞拉菲尔德有限公司提供）

58. 保加利亚、立陶宛和斯洛伐克也都有项目在继续推进，在设计寿期终点前关停核电厂，并通过欧洲复兴开发银行提供财政支助。

弃用密封放射源的管理

59. 包括加纳、马来西亚和菲律宾在内的若干国家正在认真地考虑弃用密封放射源的处置方案，包括与其他废物在适宜设施中的共处置、越来越多的再循环和返还方案或在专用钻孔中的处置。已经编写了适用于三类至五类源钻孔处置的通用安全论证文件，正在编写适用于一类和二类源钻孔处置的通用安全论证文件。加拿大已通过原子能机构承诺提供资金，支持加纳和菲律宾计划实施钻孔处置，而且已经发起了针对该项目的行动。

60. 2015 年开展了若干项成功行动，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。从洪都拉斯移除了三个弃用的一类 and 二类源，从摩洛哥移

除了一个一类源。在黎巴嫩完成了一个法国制造的一类弃用密封放射源的返还工作。在喀麦隆、黎巴嫩和突尼斯启动了另外共计四个法国制造的一类弃用密封放射源的返还工作，计划于 2016 年返还。

61. 取得重要进展的工作还涉及将南非核能公司移动热室与钻孔处置设计联系起来，旨在最大程度地减少源操作，取消不必要的运输。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。在孟加拉国、智利、马达加斯加、巴拉圭、秘鲁、菲律宾和斯里兰卡完成了涉及本国和地区人员培训和弃用密封放射源整备的作业。

62. 原子能机构将授权访问《国际密封放射源和装置目录》的范围扩大到成员国的许多个人，从而协助对野外所发现弃用密封放射源的识别。2015 年启动了增加更多源和装置详细资料的工作，目的是进一步提高该目录的实用性。

放射性废物处置

63. 在遗留设施方面，英国塞拉菲尔德取得了显著进展，特别是在两个历史性露天贮存池。在反应堆乏燃料贮存池，对全密封燃料进行提取，消除了贮存池附带的临界风险，将放射性存量减少了 50%。

64. 塞拉菲尔德的第一代镁诺克斯贮存池建于 20 世纪 50 年代，用于贮存、冷却和制备镁诺克斯乏核燃料，供再处理。贮存池于 1992 年停止运行，现在装有约 1400 立方米放射性污泥，及其他库存。2015 年 3 月，首次将第一代镁诺克斯贮存池的放射性污泥成功转移到了一个新调试的贮存点，实现了一个重要里程碑。

65. 英国发布了固体低放废物国家战略，促使开发了越来越多的替代处理和处置途径。因而，2015 年，核工业产生的 85% 低放废物都从英国低放废物处置库转向了一系列处理方案，包括金属再循环、焚烧以及在经许可填埋场的极低放废物处置。

66. 格鲁吉亚开始试运行一个废物处理工厂，以最大限度地减少废物并降低遗留废物构成的风险。工厂采用了等离子切割装置和定制的喷砂去污设施，去除一个低温站退役和氦冷低温核研究堆 IRT-M 的钢管表面附着的放射性污染物。

67. 瑞典和美国等一些国家的商业焚烧和金属熔炼作业继续提供具有成本效益的跨国放射性废物处理服务机会。例如，在特定情况下，加拿大核事业公司和加拿大核实验室可将某些低放运行和遗留废物送交美国持有许可证的服务提供商，送回时放射性废物体积大大降低。

68. 俄罗斯联邦新沃罗涅日核电厂将一个处理能力为每小时 250 千克的等离子体炉投入运行。该等离子体炉将用于处理该核电厂两个机组退役后的固体废物。此外，加里宁核电厂用于处理液态放射性废物的沥青固化设施达到了其设计能力，使得能够将减容提高 10 倍并向所有俄罗斯核电厂提供服务。

69. 待处置放射性废物的安全可靠贮存是有废物库存的成员国迫在眉睫的一个重要事项。荷兰中央放射性废物管理组织已经获得了许可证，为贫化铀和延长国家高放废物临时贮存而建造一个新的临时贮存建筑物。

70. 立陶宛已开始了对伊格纳林纳核电站固体放射性废物管理和贮存设施的冷试验，旨在处理核电站运行中产生的遗留废物。

71. 比利时收到了来自英国乏燃料后处理的总计 123 桶固化在水泥中的高活度液体废物的最后一桶。这种长寿命中放废物将贮存在迪塞尔一个专门建造的贮存设施中，等待处置。

72. 在印度巴巴原子研究中心，最近开发的新吸附工艺从高放废物分离出了大量的铯-137，用于生产玻化铯-137 铅笔，用于血液辐照仪。

73. 对美国新墨西哥州废物隔离中间工厂 2014 年 2 月放射性事件的调查认定，事件最可能的原因是废物不兼容性（硝酸盐接触有机物质）。这一结论强调，所有放射性废物管理计划都有必要制订综合性的强大表征程序，以确保遵守废物验收标准。

74. 在英国能源和气候变化部的合作下，英国在谢菲尔德大学启动了一座国家设施，MIDAS，用以支持核燃料循环的放射性废物管理。该设施为技术开发人员提供最先进的设备，包括专门用于高温处理的实验室，长期废物体性能研究，以及化学分析和放射化学分析。

75. 福岛核电站场址大量受污染水与地下水渗入的管理继续取得进展。处理了 100 多万立方米水，去除了主要污染物之一，铯。目前正在加强现有的先进液体处理系统，以便去除锶。此外，旨在控制地下水渗入反应堆和汽轮机厂房的地下水旁路系统已成功投入运行，将每天的地下水渗入减少了约 25%（或 100 立方米）。围绕 1—4 号机组周围区域的冰墙建造仍在继续。

放射性废物处置

76. 世界各地正在运行适用于除高放废物和乏燃料以外的各类放射性废物的处置设施。这些处置设施包括极低放废物的深沟处置（如在法国、西班牙、瑞典和美国），或干旱地区低放废物的深沟处置（如在阿根廷、印度、南非和美国）；处置低放废物的近地表专设设施（如在中国、捷克共和国、法国、印度、日本、波兰、斯洛伐克、西班牙和英国）；以及处置各种深度地质构造的中低放废物的专设设施（如在芬兰、德国、匈牙利、瑞典和美国）。

77. 其他中低放废物处置设施处于不同的许可证审批阶段，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）、立陶宛（斯塔巴提斯克斯）、罗马尼亚（萨利格尼）和斯洛文尼亚（克尔什科威尔比那）。

78. 天然存在的放射性物质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。

79. 芬兰废物管理组织 — 核废物管理专家组织收到了昂卡罗乏核燃料地质处置设施的建造许可证。按照许可证进行的建造工作能够于 2016 年底开始，预计该处置设施将于 2023 年做好运行准备。

80. 在瑞典，辐射和核安全管理局目前对瑞典核燃料和废物管理公司乏核燃料处置库的许可证申请的监管评审有了一些初步结果，称“瑞典核燃料和废物管理公司证明有望达到辐射和核安全管理局的核安全和辐射防护标准”。

81. 法国国家放射性废物管理机构正在编写 Cigéo 高放废物地质处置项目的总结报告，为计划于 2017 年进行的全面许可证申请工作做准备。

82. 加拿大在安大略省金卡丁布鲁斯核场址开发安大略电力公司极低放废物深部地质处置库的项目 5 月收到了为评价拟建设施而于 2012 年设立的联合审查小组的有利建议。面对全国和跨国界利益相关者的反对，及有关相对接近休伦湖的关切，环境和气候变化部部长将原定于 2015 年 12 月做出的官方决定推迟到了 2016 年。

83. 中国预见到的地质处置需求来自 48 座反应堆的 14 万吨乏燃料的后处理。正在北山场址建造一个实验隧道，作为建造首个支持地质处置计划的地下研究设施的前期工程。

84. 德国重新分配了放射性废物处置的责任，设立了两个新的联邦机构：联邦核废物管理公司和联邦核废物管理监管办公室。为了指导全国深部地质处置库的未来发展，于 2013 年成立了全国选址委员会，预计于 2016 年提出选址标准、对利益相关者参与的要求以及是否可以考虑地质处置的替代方案。

85. 伊朗伊斯兰共和国正在开发塔尔梅西场址的低放废物近地表处置库。选址许可证已经取得，处置场址中央贮存设施的建造已经完工。

86. 日本已指示核废物管理组织重新审视高放废物的深部地质处置库选址方法，并先后组织了一系列宣传活动，以提高普遍认识。

87. 大韩民国的月城地下仓储型处置库于 8 月启动（图 A-8）。处置设施的二期工程已经动工，计划于 2019 年完工。月城规划容纳 80 万桶低放废物和中放废物，运行 60 年。

88. 俄罗斯联邦正在发展克拉斯诺亚尔斯克深部地质处置库方面取得进展，并已批准建造一个地下研究设施，以进一步调查 Nizhnekamsky 地层情况。

89. 英国苏格兰北部敦雷一个新的低放废物处置设施的前两个坑室已开始接收废物。坑室设计可容纳该场址快堆和后处理厂退役的所有固体低放废物和拆除废物，从而最大限度地减少从偏远地方运输废物。德里格场址低放废物处置设施已成功展期了环境

许可证。2014 年，英国政府发布了一份题为《实施地质处置》的白皮书，描述了较高活度放射性废物的长期管理框架，概述了确定可能的地质处置设施场址的方法，其基础是与感兴趣的团体进行合作，从对话阶段和利益相关的参与开始。



图 A-8. 月城废物容器和首批处置活动。(照片由韩国放射性废物机构提供)

90. 美国能源部已向有意提供试验场、钻井承包商和场址管理团队的实体发出了征求建议书，要钻 5000 米深表征钻孔，作为其已规划深孔现场测试的一部分。此概念涉及在结晶基底岩钻孔（或系列钻孔）到约 5000 米的深度，将废物容器安放在钻孔距底部 3000 米处，然后将钻孔密封到地面。

A.4. 安全

91. 继续在世界各地的核电厂进行安全改进。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。

92. 原子能机构“核安全行动计划”仍然是成员国、秘书处和其他有关利益相关方加强核安全框架行动的核心。原子能机构继续通过分析相关技术问题，共享和传播从此事故汲取的教训。原子能机构与经合组织核能机构合作组织了“福岛第一核电站事故背景下加强研究与发展有效性国际专家会议”，另外还组织了“核或辐射应急响应的评定和预测国际专家会议”。

93. 原子能机构发表了有关福岛第一核电站事故的报告，其中包括五个详尽技术卷。该报告是广泛国际协作努力的成果，有来自拥有或无核电计划的 42 个成员国及若干国际机构的约 180 名专家组成的五个工作组参与。

94. 根据《核安全公约》缔约方第六次审议会议的决定，总干事于 2 月召集了一次外交大会，审议了瑞士提交的修正“公约”提案。外交大会一致通过了《维也纳核安全宣言》，其中包括指导缔约方落实该公约的目标之一的原则，即防止发生具有放射性后果的事故和在一旦发生事故时减轻这类后果。

95. 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。紧急停堆只是一种安全实绩指标，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。

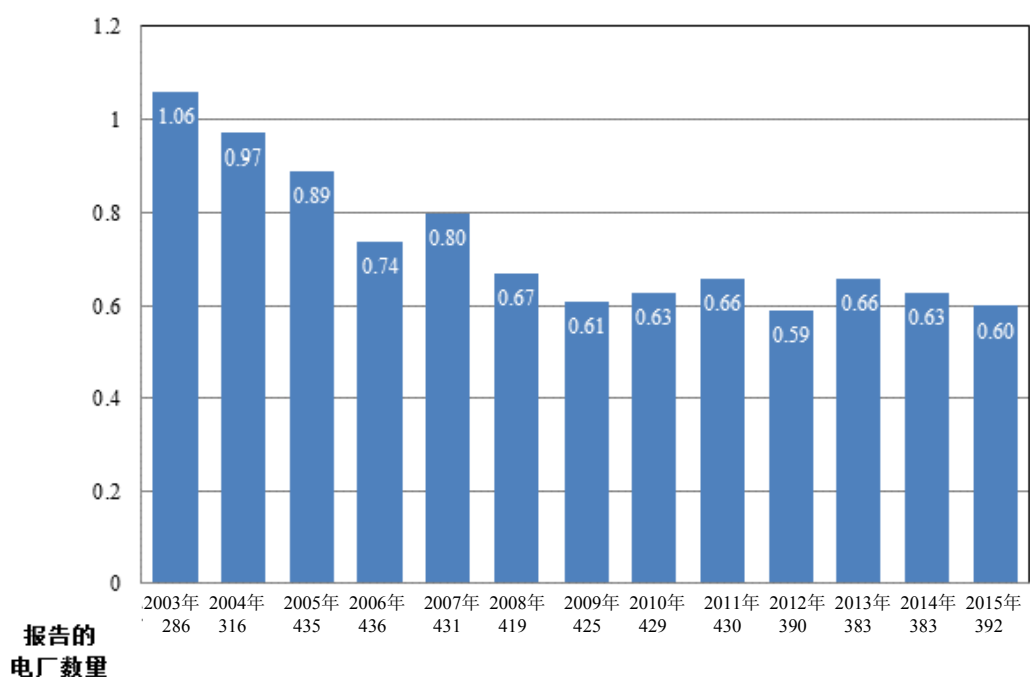


图 A-9. 平均紧急停堆率：每台机组运行 7000 小时发生的自动和手动紧急停堆次数。
(资料来源：动力堆信息系统 <http://www.iaea.org/pris>)

B. 先进的裂变和聚变

B.1. 先进的裂变

B.1.1. 水冷堆

96. 水冷堆自引入以来便一直在商用核工业中起着举足轻重的作用，达到了 1.6 万多个运行堆年，而且目前在世界所有在运民用动力堆中占 95% 以上。65 座在建核反应堆中，有 63 座为轻水或重水冷却堆。

97. 2015 年水冷堆领域的主要发展涉及四座新建、八座新接入电网、现有电厂提高出力 and 所有类型水冷堆继续增加容量因子，以及在尚未运行任何商用反应堆的国家拟议中的新机组。

98. 提高国家核电装机容量的一个有经济竞争力的方式是增加现有电厂经批准的输出功率。所有先进水冷堆都已增加输出功率，而近期建设的反应堆每台机组的容量从 1000 兆瓦（图 B-1）至 1650 兆瓦不等。此外，一个明显的趋势是建有单一类型或多种类型反应堆的多机组厂址，强调了商用核反应堆的规模经济。



图 B-1. 库丹库拉姆核电厂址在建的 WWER-1000 核电厂。(照片由原子能机构提供)

99. 在若干国家，现有水冷堆的先进型号也在越来越多地获得考虑、研究和实施，以便逐步部署先进和更高效的部分或全闭合的燃料循环。

100. 若干成员国正在进行超临界水冷堆的研发。加拿大超临界水冷堆即重水慢化压力管式反应堆概念的概念设计和中国超临界水冷堆（CSR1000）的概念设计已经完成。在欧洲，欧洲高性能轻水堆概念在若干年前就已启动。在俄罗斯联邦，超临界压力水堆（WWER-SCP）的概念研究正在进行，包括快谱堆芯的可能性。

101. 原子能机构继续维护和更新“先进反应堆信息系统”，这是包括设计组织提供的资料的数据库。

B.1.2. 快中子系统

102. 自 1960 年以来，全世界一直在实施重要的快堆开发和部署计划，使快堆和相关燃料循环技术知识达到了高度成熟。这些反应堆因其提供高效、安全、可持续和清洁能源的特有能力，而增加了全球对开发这些反应堆的兴趣。

103. 钠冷快堆、铅冷和铅-铋冷却快堆以及气冷快堆目前都在国家和国际上按照更高的安全性、可持续性、经济性、实物保护和抗扩散性标准进行开发。此外，还将熔盐快堆概念作为一种长期方案进行考虑。

104. 最成熟的快堆技术即钠冷快堆已有 400 多堆-年经验，这些经验都是通过包括中国、法国、德国、印度、日本、俄罗斯联邦、英国和美国在内的许多国家在运实验、原型、示范和商用机组的设计、建造和运行获得的。

105. 俄罗斯 BN-600 钠冷快堆于 2014 年达到了 86% 的负荷因子，从而表现出令人印象深刻的运行实绩。BN-800 钠冷快堆（图 B-2）已于 2015 年并入电网。革新型 BN-1200 的最终设计已经完成。2015 年 5 月，钠冷多用途研究快堆获得了监管当局的建造许可证，初步土木工程已经完成，设想在 2020 年取代 BOR-60 反应堆。关于液态重金属技术，已经完成一种先进的铅冷快堆概念 BREST-OD-300 和一种铅-铋冷却模块化快堆 SVBR-100 的工程设计。

106. 在印度，快中子增殖试验堆自 1985 年以来一直在运行；500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆的建造已经完成，并正在进行调试，预计在 2016 年实现首次临界。印度正计划在同一厂址再建两座快中子增殖堆。

107. 随着中国实验快堆于 2014 年 12 月达到 100% 的满功率，中国快堆技术发展的第一阶段已经实现。革新型 CFR-600 计划于 2023 年投入运行。中国铅基 CLEAR-I 反应堆也在进行初步工程设计。

108. 在日本，常阳实验快堆和文殊钠冷快堆原型堆处于长期关闭状态。包括示范日本钠冷快堆的关键技术和概念设计的快堆循环技术发展第二阶段计划也已中止。

109. 在大韩民国，第四代原型钠冷快堆的初步设计正在进行，并同时开展辅助性研发活动。初始安全资料文件已于 2015 年底提交韩国核监管当局。

110. 在欧洲，正在开发的概念有：法国第四代钠冷快堆工业原型堆 ASTRID、欧洲第四代铅冷快堆示范堆 ALFRED、实验气冷快堆 ALLEGRO 和基于加速器驱动系统的铅铋冷却中试研究堆 MYRRHA。ASTRID 将在 2015 年底之前完成概念设计阶段。MYRRHA 已达到前端工程设计的第二阶段。

111. 在美国，快堆工作主要集中在建设基础技术能力和一些革新型技术方案。随着从以前许多实验钠冷快堆的运行获得了大量实验数据，能源部正在对研发活动提供支持，包括在先进材料、安全和革新型燃料领域。私营公司也在研究快堆设计。



图 B-2. 俄罗斯联邦别洛雅尔斯克核电厂的 BN-800 商业快堆已于 2015 年 12 月并入电网。（照片由俄罗斯国家核电厂电力和热力生产联合企业提供）

B.1.3. 气冷堆

112. 当剩下的最后一座镁诺克斯堆 Wylfa 1 于 2015 年底停止运行时，第一代气冷堆的时代便宣告终结。英国继续进行 14 座先进气冷堆的商业运行。许多成员国仍在继续开发高温气冷堆。这类反应堆使用涂敷颗粒燃料，能够达到非常高的燃耗，以较高的温度（ $\geq 700^{\circ}\text{C}$ ）运行和使用氦作为冷却剂。目前只考虑小型模块式高温气冷堆概念设计，以期这种堆能够仅依靠固有安全设施而非专设能动安全系统。正在考虑为电力生产以及热电联产目的进行近期部署，以服务于巨大的工艺热市场。

113. 在中国，球床模块式高温堆（HTR-PM）的建造和主要部件制造进展顺利（图 B-3）。这座 200 兆瓦（电）工业示范电厂由两台 250 兆瓦（热）反应堆机组构成，预计

于 2017 年底前投入运行。一座 600 兆瓦（电）商业电厂正在进行设计，可能的厂址业已确定。已确立工业规模的燃料制造技术，并于 2014 年通过所计划的事故工况下试验完成了国际燃料球辐照试验。包头新核燃料制造厂的建造和调试已经完成，制造工作计划于 2016 年开始进行。

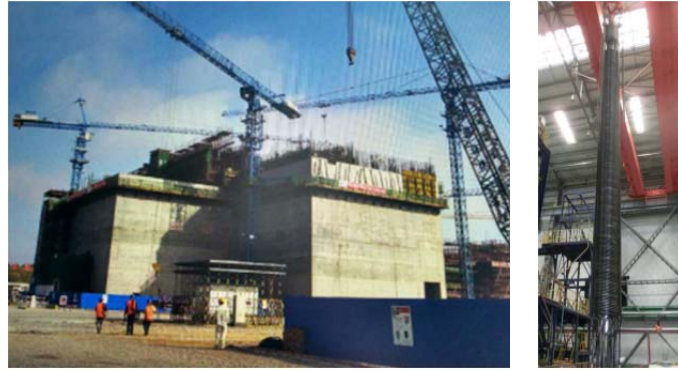


图 B-3. 中国威海市石岛湾球床模块式高温堆的建造现场（左）和蒸汽发生器（右）。
（照片由核能与新能源技术研究院提供）

114. 印度尼西亚国家核能机构完成了 10 兆瓦（热）球床实验动力堆的概念设计和初步安全分析报告，并向监管机构提交了初始场址评价。还预见未来进行商业热电联产部署。

115. 在日本，一旦完成重启 30 兆瓦（热）高温工程试验堆的监管审查，就将计划进行进一步的安全示范试验以及氦气轮机与氢生产厂的耦合。

116. 在美国，高温气冷堆活动继续作为能源部“先进反应堆概念”计划的一部分。活动侧重于燃料质量鉴定、石墨和高温材料的质量鉴定、证明非能动安全特征的试验设施和制订许可证审批框架。私营公司也在开发气冷堆设计。

117. 哈萨克斯坦、南非、乌克兰和欧洲委员会正在进行与高温气冷堆有关的一些活动。俄罗斯联邦继续进行能够加热 ASTRA 临界设施到不同温度的准备工作，大韩民国完成了涂敷颗粒燃料的首次辐照试验。

B.1.4. 中小型反应堆或模块堆

118. 对中小型反应堆或模块堆及其应用的兴趣不断增加。过去 10 年，重点一直是先进模块堆。它们代表着主要的路线和冷却剂类型，能够生产高达 300 兆瓦（电）的电力，随着需求增加，其部件可作为模块进行工厂生产和运输到场址或电力公司。中小型反应堆或模块堆发展的关键驱动力是满足对面向更广泛的用户和应用的灵活动力生产的需求，并取代老化的化石燃料机组、通过非能动安全设施加强安全实绩和提供更好的经济承付能力。全球约有 50 种中小型反应堆或模块堆设计和概念。它们大多处于不同的开发阶段，有一些据称可在近期部署。不过，有三种中小型反应堆或模块堆正在阿根廷、中国和俄罗斯联邦建造。

119. 许多近期可部署的中小型反应堆或模块堆是一体化压水堆型。有三种中小型反应堆或模块堆处于建造的后阶段：俄罗斯联邦的 KLT-40S 是一种基于压水堆的移动式核电厂，每个模块容量 35 兆瓦（电），预计 2019 年前生产电力和并入电网；在阿根廷，称作 CAREM-25 的自然循环一体化压水堆原型堆容量 31 兆瓦（电），预计在 2018 年 10 月可启动调试和临界；在中国，由两座 250 兆瓦（热）反应堆组成的气冷球床模块式高温堆将提供 200 兆瓦（电），预计将在 2017 年底之前作为工业示范电厂投入运行。

120. 就旨在用于近期部署的中小型反应堆或模块堆而言，在大韩民国，系统一体化模块式先进反应堆（SMART）是一种提供 100 兆瓦（电）的一体化压水堆，已于 2012 年收到该国核安全和核安保委员会的标准设计批文。2015 年 9 月，签署了在沙特阿拉伯部署一座系统一体化模块式先进反应堆的项目前期工程协定。

121. 在中国，ACP100 反应堆是一座具有 100 兆瓦（电）容量的一体化压水堆，目前正在接受原子能机构的“反应堆一般性安全评审”。计划在福建省建造一座有两台 310 兆瓦（热）机组的工业示范厂。

122. 俄罗斯联邦有若干其他近期可部署的浮动的移动式核电厂小型模块堆设计，包括生产 50 兆瓦（电）的 RITM200、生产 6 兆瓦（电）的自然循环小型模块堆 ABV6-M 以及电功率输出为 300 兆瓦（电）的 VBER-300。

123. 在美国，NuScale 电力公司正在准备于 2016 年最后一个季度向核管会提交对 NuScale 反应堆设计的设计认证申请。这是一种由 12 个反应堆模块组成的自然循环一体化压水堆，每个模块具有 50 兆瓦（电）净电功率。另一种一体化压水堆设计是巴布科克·威尔科克斯技术服务公司/贝克特尔公司的 Generation mPower 双模块反应堆，每个模块的额定功率为 180 兆瓦（电）。西屋公司生产 225 兆瓦（电）的小型模块堆和霍尔台克公司生产 160 兆瓦（电）的自然循环小型模块堆 SMR-160 也在开发中。

124. 在日本，4S（“超级安全、小型和简单”）是一种无需厂内换料的钠冷反应堆。4S 提供两种输出：30 兆瓦（热）和 135 兆瓦（热），作为一种多用途应用的分布式能源。模块式简化中小型反应堆（也称为“DMS”）是一种自然循环沸水堆型中小型反应堆，电输出功率 300 兆瓦（电）。

125. 有许多小型模块堆设计正处于概念设计阶段：在印度，具有 304 兆瓦（电）容量和自然循环一回路系统的压力管重水堆 AHWR300-LEU 正在开发中。

126. 在法国，Flexblue 是一种移动式海底系泊小型模块堆，每个模块的容量 160 兆瓦（电）。Flexblue 被设计为从岸上控制室进行远程操作。

127. 在加拿大，一体化熔盐堆（IMSR）正在开发，将提供三种设计：IMSR80、IMSR300 和 IMSR600，电容量分别为 32.5 兆瓦（电）、141 兆瓦（电）和 291 兆瓦（电）。若干其他国家的商业集团也在设计熔盐堆。



图 B-4. 中小型反应堆或模块堆部署状况。

B.1.5. 革新型核能系统国际倡议

128. 由于对资源可用性、气候变化和能源安全的日增关切，过去几十年发起了许多关于革新型核能系统的国际倡议。

129. 认识到采取行动确保核能以可持续方式发展的必要性，2000 年作为一个原子能机构项目启动了“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”。2015 年，泰国成为该项目第 41 个成员，该项目将技术持有者和使用者汇聚在一起，共同考虑实现所希望的核反应堆和燃料循环创新所需的国际和国家行动。

130. 2014—2015 年作为原子能机构的《核能丛书》报告出版了三个关于经济、基础结构和环境影响包括资源贫化领域可持续性评定的手册。正在印度尼西亚、罗马尼亚和乌克兰进行基于“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法学的核能系统评定。

131. “第四代国际论坛”是一项国际合作努力，组织它的目的是开展确定下一代核能系统的可行性和实绩能力所需的研发工作。该论坛有 13 个成员，工作重点是其 2012 年《第四代核能系统技术路线图》及其 2013 年更新本中所述的六个核能系统：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。

132. 对实施一个或多个选定系统的合作研发感兴趣的“第四代国际论坛”成员在明确的合同框架内合作实施有明确定义的可交付成果、里程碑和时间表的共同研发项目。

133. “第四代国际论坛”和“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的成员举行侧重于经济、抗扩散及风险和安全的特定评定方法的年度接口会议。他们还交流关于六个选定反应堆技术的正在执行项目的信息。

134. “第四代国际论坛”与原子能机构合作在 2011 年启动的钠冷快堆领域的另一项重要活动是制订“安全设计标准”和在派代表参加该论坛的设计组织之间开展将这些标准与“安全设计准则”进行统一的工作，以及对期望钠冷快堆第四代系统所具有的高水平安全加以量化。2014 年出版了钠冷快堆“安全设计标准”第一版。目前正在考虑将这一活动扩展到超高温反应堆和铅冷快堆等其他第四代系统。

135. 2007 年由欧盟发起的“可持续核能技术平台”促进了对实现“欧洲战略能源技术计划”所需的核裂变技术的研究、发展和验证。《“可持续核能技术平台”战略研究及创新议程和部署战略》最近得到了更新。该平台汇聚了来自工业界、研究界、学术界、技术安全组织和非政府组织的 100 多个欧洲利益相关方及国家代表。

136. 在该平台的框架下，欧盟在 2010 年发起的“欧洲可持续核工业倡议”涉及欧洲在验证第四代快中子堆技术、其辅助研究基础结构、燃料设施和研发工作方面的需要。该倡议重点是开发两个平行技术：作为基准解决方案的钠冷快中子堆技术，并于 2020 年前后开始在法国建造一座为此项技术提供有力支持的原型堆（Astrid）；以及替代性铅冷快堆（ALFRED）和气冷快堆（ALLEGRO）技术。此外，还有一个铅-铋辐照设施（MYRRHA）将支持包括锕系元素再循环嬗变在内的快堆技术部署。

B.1.6. 核动力的非电力应用

137. 若干成员国广泛关注利用核能开展非动力应用，特别是用于海水淡化、制氢、地区供热、重油三次回收和其他工业应用。

138. 热电联产（即电力和工艺热生产，见图 B-5）技术业已进行示范和得到证实。对于核能热电联产，在地区供热和海水淡化范畴内有着丰富的经验，74 座核反应堆的总共累计经验超过 750 个运行年。当前处于核能热电联产模式的核电厂能够实现 30% 以上的总体热效率增长，电力生产成本降低达 20% 之多，而且具有更好的电网灵活性。当为非常高的冷却剂出口温度设计的革新性先进核能系统可以利用时，诸如制氢等需要高温热或蒸汽的许多工业过程将从一种非常可靠、丰富和可持续的能源获益。

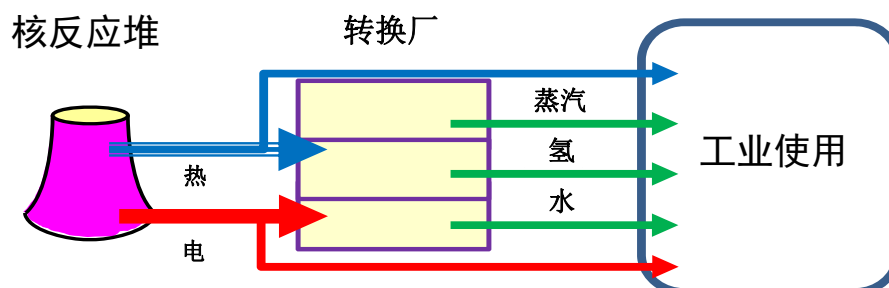


图 B-5. 核反应堆与厂内工业装置耦合的一般结构图。

139. 最近，俄罗斯联邦与阿尔及利亚、埃及和约旦签署了关于利用核动力进行海水淡化的协定，并正在与沙特阿拉伯进行有关这方面的讨论。沙特阿拉伯已与大韩民国签

署了建造两台用于热电联产（包括海水淡化）的 SMART 330 兆瓦（热）压水堆的谅解备忘录，并正在与法国讨论未来利用核能淡化海水的计划。美国加利福尼亚代阿布洛峡谷核电厂每天能生产近 150 万加仑的饮用水，但仅使用了这一能力的 40% 供厂内消费。考虑已将该核电厂运行许可证展期到 2024 年和 2025 年，并鉴于最近的严酷旱情，营运者于 2015 年 5 月同意向东道县供水，以帮助扑灭山火。目前也正在考虑将这种饮用水纳入公共供水系统。

140. 制氢是一个广泛活动的主题，特别是在美国和欧盟。目标是向运输部门开放这种核能应用，以及减少当前对相关价格波动、有限供给和有温室气体排放的化石燃料的依赖。若干国家正在实施研发计划，而且可以利用实验室规模的以及来自较早期高温气冷堆计划部件试验的核能高温应用方面的一些经验。在成功地开发和运行了 30 兆瓦（热）高温工程试验堆后，日本正在通过一个项目建造高温工程试验堆，以示范通过燃气轮机发电和利用热化学裂解水工艺产氢的热电联产。预计该系统将于 2022 年投入运行。该项目旨在充分开发该系统技术，包括计划在 2030 年建造产氢和淡化海水热电联产商用厂 GT-HTR300 所需的许可证审批数据库。中国在建的球床模块式高温堆能够用于生产工艺蒸汽或产氢。有业界参与的其他研发工作正在加拿大、印度、大韩民国和其他国家进行。

141. 欧盟到 2050 年无碳化的能源政策和主要目标可能使欧洲首先开始大规模实施核能热电联产。由于拥有庞大的工业市场，欧洲正在展示出对核能热电联产于炼油厂、化工厂和其他工业的日益浓厚的兴趣，这些设施中的燃化石燃料热电联产厂可直接由同时提供大量工艺蒸汽和电力的核反应堆所取代。法国进行的一项研究表明，目前在运核反应堆可以很容易地进行改造，以高效地供应大规模供热网。这一步骤可能在能源管理方面开辟新的视角，并为未来实现巨大的节能铺平道路。

B.2. 聚变

142. 提供核聚变能源被广泛认为是 21 世纪的宏伟工程挑战。随着 2006 年建立国际热核实验反应堆项目，中国、欧盟、印度、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和美国加入了为和平目的验证超过 500 兆瓦聚变能生产的科学和技术可行性和安全功能的努力。

143. 国际热核实验堆各方多年的辛勤努力正在结出硕果，目前该设施已初具规模，并在各方面取得进展。托卡马克综合设施第一层（表面积 9600 平方米，1.5 米厚度连续四层钢筋混凝土 — 两层 50 厘米，一层 30 厘米，一层 20 厘米）于 2014 年最后一个季度完工，这标志着一个大型土建工程合同的结束和建设阶段的开始（图 B-6）。



图 B-6. 国际热核实验堆建设工地 2015 年 8 月鸟瞰图（左）。截至 2015 年 10 月 21 日（右），国际热核实验堆生物屏蔽（将环绕机器的 3.2 米厚的“环”）的 200 度段已完工。（照片：国际热核实验堆提供）

144. 国际热核实验堆的基础设施遵守法国的核安全要求，将成为法国最大的核设施和世界上有史以来首座核聚变设施。2015 年 5 月，该项目达到了一个建设的里程碑，因为首批电厂部件（即将把 400 千伏电网与交流配电系统连接起来的共四个电力变压器中的两个）被安装在其永久位置。

145. 即使在合作伙伴应对国际热核实验堆的种种严峻挑战时，人们也广泛重视了解超越国际热核实验堆的科学和技术问题的必要性，以及现在就着手解决这些问题的必要性。总的来说，制订利用聚变能的解决方案的活动包含一项“示范聚变电站计划”。

146. 2015 年 5 月 11 日至 15 日在中国合肥中国科学技术大学举办了第三届原子能机构“示范聚变电站计划”讲习班，其目的是讨论“示范聚变电站”的部分主要科学、技术和计划问题，并确定可能导致这些问题解决的设施和计划活动。一个相关的目的是确定通过国际合作取得更大进展的机会。

147. 讲习班的成果表明，国际热核实验堆对聚变计划的主要贡献将是推进对燃烧等离子体物理学的了解。此外，国际热核实验堆将在富有挑战性的等离子体稳定性和控制问题上取得显著的进展，这些问题包括预测和避免或缓解等离子体大破裂和边缘局域模的控制。

148. 在动力排气技术方面，国际热核实验堆将有助于确定等离子体表面部件长期照射对等离子体的影响，如第一壁和偏滤器材料的离子损伤。只要“示范聚变电站”采用与国际热核实验堆相类似的加热和电流驱动系统，国际热核实验堆就将提供对若干关键部件技术可行性的直接验证。最后，国际热核实验堆将通过试验包层模块计划推动包层技术发展。经验表明，技术设计和集成分析应尽可能详细，并应在向监管者发布初步安全分析之前进行所有验证和资格认证。国际热核实验堆将提供供“示范聚变电站”设计者使用的全面的物理和技术数据库，该数据库将支持进行必要的分析，以满足初步安全分析中对细节的需求。

149. 若干国际热核实验堆缔约各方已将注意力转向研究旨在超越国际热核实验堆的集成装置。与国际热核实验堆相比，这些研究是国家性的，目前仅处在前期概念设计阶段。表 B-1 概述了讲习班上所介绍的四个此类装置的信息。

| | 欧洲 | 日本 | 大韩民国 | 中国 (第一阶段) |
|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| 任务 | 净电力 ($Q_{eng} > 1$) 氚自给自足 | 净电力 ($Q_{eng} > 1$) 氚自给自足 | 净电力 ($Q_{eng} > 1$) 氚自给自足 聚变环境下材料和 部件试验 | 聚变环境下材料和 部件试验 全氚燃料循环 |
| P_{fus} | 2000 兆瓦 | 1500 兆瓦 | ≥ 300 兆瓦 | 50—200 兆瓦 |
| TBR | > 1.0 | > 1.05 | > 1.0 | ≥ 1.0 |
| 脉冲长度 | 2 小时 | 2 小时至稳定状态 | 稳定状态 | 1000 秒至稳定状态 |
| 占空比 | $\sim 70\%$ | | | 30—50% |
| P_{elec} | 500 兆瓦 | 200—300 兆瓦 (净值) | ≥ 150 兆瓦 (净值) | 不适用 |
| 氚增殖 | 待确定 — 正在 考虑固体和锂铅 增殖堆 | 固态增殖堆, 压水堆技术 | 固态增殖堆, 压水堆技术 | 固态增殖堆, 压水 堆技术, 约 1/10 “示范聚变电站” 规模的闭式氚循环 |
| 磁位形 | 托卡马克 | 托卡马克 | 托卡马克 | 托卡马克 |
| 维护 | 远程操控 | 远程操控 | 远程操控 | 远程操控 |

表 B-1. 当前任务和计划的下一步性能目标纳入了超越国际热核实验堆的聚变装置。

P_{elec} = 电力； P_{fus} = 聚变电； Q_{eng} = 工程功率放大因数；TBR = 氚增殖率。

150. 这些研究有望在本世纪中叶在走向“示范聚变电站”方面取得令人印象深刻的进步，但需要有与一整套“示范聚变电站”就绪指标相对照的预期进步定量标准，用以评定即使所有这些项目都成功地进行可能仍然存在的差距。应当指出的是，这些机器本身特别是它们的后期阶段普遍存在差距，因此，必须在近期开展对它们的研发工作。

151. 在一些关键问题上存在未解的疑问，其中包括燃烧等离子体物理与控制、材料和部件技术、机器的可用性和磁位形方案。普遍认为，没有任何单一装置可能会同时解决“示范聚变电站”的所有问题，但同时目前尚不清楚需要多少机器，也不清楚最优组合会如何多样化。因此，在实施对于工作的国际规划和协调战略以进一步满足当前没有充分满足的“示范聚变电站”需求、减少重复和更加稳健地应对技术挫折和延误方面，似乎会有一项显著的优势。

C. 加速器和研究堆的应用

C.1. 加速器

C.1.1. 大功率质子加速器

152. 在粒子物理学、核物理学和基于中子的物理学等各领域以及在长寿命核废物嬗变领域，对高能质子加速器或离子束加速器的需求不断增加。这些应用一般需要具有吉电子伏范围的极高平均功率和能量的束流，它们显著超出了大多数现有设施的能力。图 C-1 显示了将束功率推向 10 兆瓦的当前项目和计划项目。

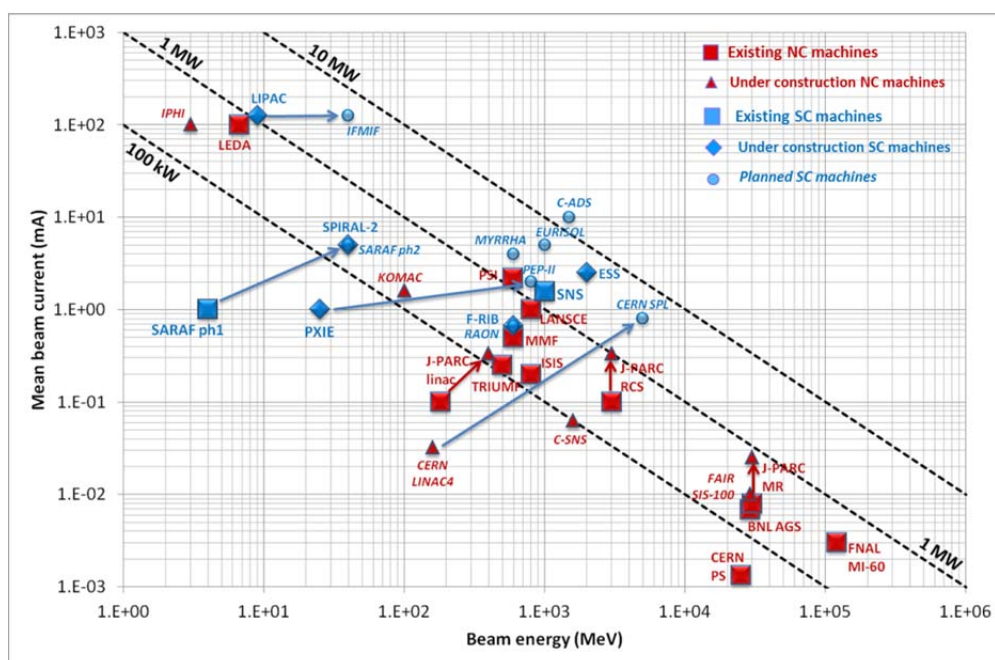


图 C-1. 全世界的高功率质子/中子束项目。资料来源：Jean-Luc Biarrotte，核物理研究所，法国奥赛；复载自：J.-L.BIARROTTE “高功率质子/氘核加速器”，《第十六次射频超导性国际会议文集》，法国巴黎，2013 年，联合加速器会议网站（2014 年），第 35 - 41 页。

153. 加速器驱动系统是基于具有增强可靠性能力的多兆瓦超导质子直线加速器的专用嬗变设施可能的解决方案。由除其他外特别是欧洲联盟和“中国加速器驱动系统项目”共同出资的比利时 MYRRHA 项目为在 10 年至 15 年中展示高功率加速器驱动系统技术提供了机会。

C.1.2. 离子束技术路线图

154. 基于加速器的离子束技术包括一组分析和改性技术，其中，带电粒子（ $Z=1、2$ 或更高）的能量（0.1—100 兆电子伏）束被引导到要分析或改性的材料上。这些技术已使用了 50 多年，大部分的基础物理学、数据和机器都已成熟。离子束技术的发展已导

致对许多领域做出了贡献（图 C-2），例如，在利用宇宙成因同位素进行气候研究、发展强化材料、了解反应器部件老化以及发展可能对人体健康产生巨大影响的强子治疗方面。

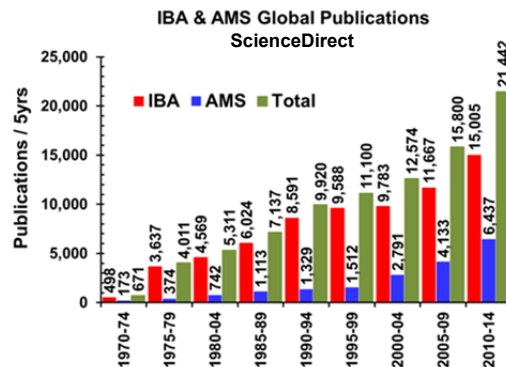


图 C-2. 与离子束技术利用有关的出版物数量呈增加趋势。（图片由澳大利亚核科学和技术组织 David Cohen 提供）（IBA：离子束分析；AMS：加速器质谱测定法）

155. 原子能机构在协调制订离子束技术路线图方面发挥了牵头作用，该路线图将包括加速器科学和相关技术中期（5 年至 15 年）战略规划的所有方面。国际专家的广泛讨论已导致形成初稿，制订了技术发展优先事项并确定了相应的度量。预计离子束技术路线图将于 2016 最终完成。相关文件可见原子能机构的“加速器知识门户”：<https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx>。

C.1.3. X 射线技术用于材料表征和成像

156. 同步加速器辐射被用于推进多学科科学领域的基本知识和促进技术应用已有 30 多年。第四代同步加速器光源将为科学家开辟新的可能性。当前项目包括瑞典隆德的 MAX IV 项目（预计于 2016 年开始全面运行）和巴西的“天狼星”项目（预计于 2018 年调试）。加速器技术的最新进展提供了低发射度辐射，并从而提供了高亮度和更好的连贯性。预计将在高分辨率 X 射线成像领域取得突破性发展，例如，在重叠关联成像术中，将能够利用空间分辨率进行图像重建，这种图像重建远远优于常规技术所提供的图像重建。这些新的同步加速器源可促进先进像素化、能量色散或单计数 X 射线探测器的并行开发。

157. 一个很好的例子是 384 硅-二极管阵列 Maia X 射线荧光探测器，它已在不同的同步加速器光束线上被证明能够提供元素和化学形态快速成像。宏 X 射线荧光成像具有按事件同步光束尺寸定制的空间分辨率，已发现在生物系统和艺术品检测中具有突出应用（图 C-3）。X 射线光学和相关方法的并行发展也可以在由相对较宽的 X 射线束照射时提供对大面积样本的空间分辨分析。全域 X 射线照相机概念正在迅速成为一种有前景的分析方法，它可经改造用于同步加速器光源、粒子诱发 X 射线发射束线或便携式 X 射线荧光光谱仪（图 C-4）。



图 C-3. 改编自：L.MONICO 等人，“使用 Maia 探测器阵列的全光谱 XANES 成像作为研究文森特·梵高绘画上铬黄色颜料变化过程的新工具”，《分析原子光谱学杂志》第 30 卷（2015 年）第 613—626 页。

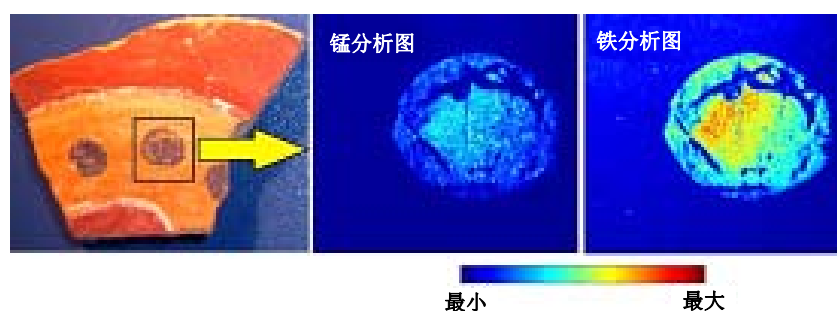


图 C-4. 在意大利国家核物理研究所对纳斯卡文明（秘鲁）时期彩绘陶器上的锰黑色装饰进行的全域粒子诱发 X 射线发射分析。

C.1.4. 复合离子和中子束技术用于痕量元素指纹和分子指纹

158. 离子和中子束技术在痕量元素分析中的应用已经非常成熟，可通过运行加速器或研究堆的一些成员国的认证实验室提供这种服务。应用包括：用于医学或生物学目的的毛发、指甲、皮肤、植物和动物物质的分析；玻璃、农产品/食品和文化遗产物品出处的鉴定；弹药、枪击残留物、子弹和核爆炸源的鉴定；环境污染的鉴定和跟踪。

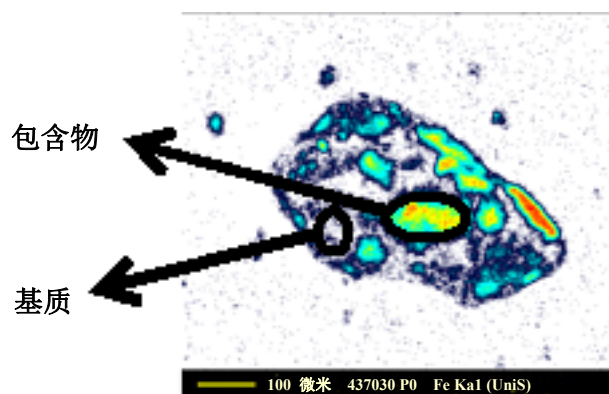


图 C-5. 使用聚焦离子束测量的 α 石英样品的二维元素图像。通过能够进行化学计量的区域选择性确定，可以将铁包含物与基质很好地分开，这对出处鉴定目的非常有用。（图片由英国萨里大学 Melanie Baley 提供）

159. 原子能机构正在通过利用离子束和中子束方法间的协同作用进行高精度痕量元素和分子分析，协助发展一种多分析方法。此外，将开发“实际”物品（如那些表面粗糙的物品或湿样品）中痕量元素的高分辨率二维/三维绘图，用于确定材料的出处（图 C-5）。

C.2. 研究堆

160. 研究堆主要用作研究和各种应用的中子源，最常见的应用如表 C-1 所示。其功率范围从零（如临界组件或亚临界组件）可达到约 200 兆瓦（热），这相对于典型核电厂 3000 兆瓦（热）仍很小。相比动力堆，研究堆不仅具有更多的设计多样性，还具有不同的运行模式，可以是稳态模式或脉冲模式。

表 C-1. 世界各地研究堆的常见应用⁴

| 应用类型 ^a | 所涉研究堆数量 ^b | 拥有被利用设施的成员国 |
|-------------------|----------------------|-------------|
| 教学/培训 | 173 | 54 |
| 中子活化分析 | 124 | 54 |
| 放射性同位素生产 | 89 | 44 |
| 材料/燃料辐照 | 73 | 28 |
| 中子照相 | 71 | 40 |
| 中子散射 | 48 | 32 |
| 嬗变（硅掺杂） | 26 | 17 |
| 地质年代学 | 27 | 23 |
| 嬗变（半宝石） | 18 | 10 |
| 中子治疗，主要是研发 | 18 | 12 |
| 其他 ^c | 128 | 36 |

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

^b 来自所考虑的 265 座研究堆（246 座在运，19 座临时关闭；截至 2015 年 11 月）。

^c 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。

161. 迄今，截至 2015 年 12 月 31 日，已在 67 个国家建设 754 座研究堆，有 246 座正在 55 个国家运行。俄罗斯联邦拥有数量最多的运行研究堆（63 座），其次是美国（42 座）、中国（17 座）和法国（10 座）。许多发展中国家也有研究堆（如非洲有八座设施在运行）。在世界范围内，58 座研究堆以超过 5 兆瓦的功率水平运行，从而为支持高容量应用提供高中子通量。

162. 许多在运研究堆的利用因数仍很低，并且其中有一半已有 40 多年堆龄。因此，它们大多都需要持续关注，以促进为利用、老化管理、现代化和整修制订详细的战略规划

⁴ 资料来源：原子能机构“研究堆数据库”（<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>）。

划。加强利用和创造更多收入的努力继续加大。在过去的两年中，33 座研究堆设施编写了战略计划并提交原子能机构审查。原子能机构还通过纳入新研究堆或主要整修项目的有关方面以及以许多事例共享运行良好设施的经验，修订了其研究堆战略规划导则。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。一个例子是在拉丁美洲和欧洲的因特网反应堆实验室项目，其目的是实现各大学与专用于教育和培训的在运研究堆的互连互通。2015 年 9 月，该项目在拉丁美洲启动（以阿根廷为东道国），2015 年 10 月在欧洲和非洲启动（以法国为东道国）。

163. 若干国家作为发展核科学和技术基础设施和计划包括核电的国家重点设施，正处于建设新研究堆的不同阶段。新的研究堆建设正在阿根廷、巴西、法国、印度、约旦、大韩民国、俄罗斯联邦和沙特阿拉伯进行。若干成员国拥有建造新的研究堆的正式计划，包括白俄罗斯、比利时、多民族玻利维亚国、荷兰、美国和越南。阿塞拜疆、孟加拉国、埃塞俄比亚、加纳、科威特、黎巴嫩、马来西亚、蒙古、缅甸、尼日利亚、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国家正在考虑建设新的研究堆⁵。为建造法国儒勒·霍洛维茨反应堆和俄罗斯联邦多用途研究快堆等多用途研究堆建立了国际合作。

164. 由原子能机构推动的⁶研究堆地区网络或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群体。此外，2014 年原子能机构还启动了一个新的协作机制，即由原子能机构指定的国际研究堆示范中心。2015 年，法国可替代能源和原子能委员会在其萨克莱和卡达拉奇研究中心被指定为首个国际研究堆示范中心，而 2016 年预计还将收到其他组织的指定申请。

165. “减少全球威胁倡议”的继任者美国能源部材料管理和最少化办公室在 2015 期间继续开展最大程度减少民用核部门的高浓铀使用的任务。到 2015 年底，在该办公室实施范围内的 200 座研究堆中，有 94 座已经转换为使用低浓铀燃料或确认已关闭，其中包括一座使用高浓铀的钼-99 生产设施。主要成就包括牙买加将低浓铀燃料堆芯装载到安全低功率临界实验 II 型反应堆、中国从原型微型中子源反应堆（微堆）卸出高浓铀燃料以备进行转换以及俄罗斯将铀-钼低浓铀导引试验组件插入在季米特洛夫格勒的 MIR 反应堆进行辐照。原子能机构继续支持加纳预计于 2016 年进行的转换和转移其微堆高浓铀堆芯的努力。

166. 最低程度使用高浓铀的活动包括将高浓铀研究堆燃料返还进行铀浓缩的原产国。到 2015 年底，美国原产的高浓铀燃料的返还计划已完成了其目标的 76%，移出了近 1300 千克高浓铀研究堆新燃料和乏燃料。原产俄罗斯的高浓铀返还计划完成了 86%，

⁵ 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，维也纳，2012 年）和一套辅助文件旨在对成员国在这方面起到帮助作用。

⁶ 原子能机构支持波罗的海、加勒比、中非、中亚、东欧和地中海地区与独立国家联合体的几个不同研究堆联盟以及全球铀氢锆研究堆网络。

移出了近 2165 千克高浓铀研究堆新燃料和乏燃料。2015 年 12 月，从格鲁吉亚第比利斯增殖堆 1 中子源设施移出了未经辐照的俄罗斯产高浓铀。随着从乌兹别克斯坦 IIN-3M FOTON 反应堆移出辐照液态高浓铀燃料（图 C-6），有高浓铀的 28 个国家⁷现已无高浓铀。



图 C-6. 装有辐照液态高浓铀燃料的运输用密封容器（左图）。载有液态高浓铀燃料容器货包的卡车驶入将乌兹别克斯坦 IIN-3M FOTON 反应堆燃料返还俄罗斯联邦的货机（右图）。

167. 高通量、高性能研究堆的转换需要有目前正在开发的先进甚高密度铀-钼燃料。虽然在该领域取得了实质性进展，但还需要特别是为辐照和辐照后检验计划以及在制造技术领域进行进一步的努力和试验，以实现以商业方式提供合格的低浓铀燃料。

168. 虽然 2015 年期间没有出现重大的钼-99 供应短缺，但加工设施和老旧研究堆的运行挑战依然如故。由于需求变化、效率提高以及供应多元化，少量计划外停堆在行业内部得到了有效管理。医用同位素生产工艺继续从高浓铀向低浓铀靶件转换，而澳大利亚核科学和技术组织和南非 NTP 放射性同位素公司是基于低浓铀的钼-99 的主要供应商。澳大利亚核科学和技术组织预计其新钼-99 生产设施将于 2016 年早些时候完工，该设施将使每周的产量增加到每天 3500 居里。南非 NTP 放射性同位素公司继续将其工艺转换为专门使用低浓铀。比利时放射性元素研究所和荷兰 Mallinckrodt 制药公司继续在转换努力上取得进展。尽管加拿大核实验室正在寻求将国家多用途研究堆的运行延期到 2018 年 3 月 31 日，但加拿大打算于 2016 年 10 月 31 日停止该研究堆的钼-99 常规生产。比利时的 BR2 反应堆是主要的钼-99 辐照设施之一，它已于 2015 年 2 月停堆进行延期维护和现代化活动，以便该设施为其运行许可证在 2016 年后延期 10 年做好准备。它预计于 2016 年 7 月恢复正常运行。国际钼-99 产业界已成功地努力对生产规划时间表作出调整，以考虑到这一延期停堆。俄罗斯联邦在 2015 年也增加了钼-99 生产。

⁷ 加中国台湾。

D. 辐射技术的新兴工业应用

169. 辐射技术正在以量身定制的方式不断地用于各种工业应用，而不论是制造工厂的故障排查，还是实现高价值材料生产质量的改善，还是减少工业废水污染物。本部分将概述近年来取得明显影响和促成工业规模应用的辐射技术。

D.1. 辐射技术用于工业与工程

170. 薄层激活是一种为技术先进部门如汽车工业、能源工业和冶金业提供在线研究微米或纳米程度磨损或腐蚀可能性的核技术。在非工业背景下，海岸线和海床经受着侵蚀、输运、沉积和固结过程。基于放射性同位素的示踪剂和密封源往往成为进行海洋环境中沉积物输运研究的不可替代的工具，同时提供了重要的参数，以允许对土木工程结构进行更有效的设计、维护和优化，并可以提示对沿海资源加强保护和管理。

D.1.1. 薄层活化用于测量材料的磨损、侵蚀和腐蚀情况

171. 核技术被广泛应用于深入研究复杂的物理和化学现象，包括磨损、传质、腐蚀和侵蚀。众所周知，工业设备、运输系统、核和常规电厂以及管道等的可靠性受到降质过程如磨损、腐蚀和侵蚀的很大影响。因此，制订出对上述过程有效的检测、测量和监测方法具有十分重要的意义。适当的监测方法能防止工业设备和运输车辆在运行过程中发生危险事故，并避免由于机械故障引起的生产损失。

172. 当表面不易接近或被覆盖结构所遮蔽时，核技术便成为最有效的磨损和腐蚀测量和监测方式。只有机械的所需部位表层由带电粒子活化的薄层活化技术提供了对关键部件（尽管其不可接近性）进行监测的手段。所涉及的低活度水平使得很容易对样品进行操作，并可实现很高的测量灵敏度。

173. 主要由于在对所研究的部件采用的放射性标记方法方面取得的进步所致，在现代工业各个分支利用示踪剂技术评定机器磨损和腐蚀方面正在不断取得进展。制订了不同的标记方法，以便以相对较低的活度测量纳米级材料损耗，如超薄层活化，该方法依赖于由核反应产生的重放射性原子核的反冲注入，并允许实现几纳米的表面损耗测量灵敏度。

D.1.2. 辐射技术用于研究沉积物输运

174. 对海洋和河流沉积物输运的研究对土木工程和沿海地区的保护和管理至关重要。海岸线和海床属于动态地带，沉积物要经历侵蚀、输运、沉积和固结这几个时期。滩涂受到侵蚀的主要原因包括风暴和人类活动，如建造海堤、码头以及河口疏浚。所有这些活动都扰乱了沉积物的自然流动。人为因素现在由于气候变化的影响而变得愈益复杂化。虽然许多现行政策和实践可能会加速海岸侵蚀过程，但有可行的可得方案减轻这种损害，并提供可持续的海岸线。

175. 核技术可以有助于研究沉积动力学和确定用于加强土木工程结构的设计、维护和优化的重要参数。放射性同位素用于示踪剂和密封源已被证明在沉积物输运研究中特别有价值。

176. 放射性示踪剂比常规示踪剂更敏感和更准确，而且是对沉积物输运途径进行直接实时评定的惟一明确无误的方法。许多国家的研究小组开发出了利用放射性示踪剂的各种沉积物跟踪和监测技术。

177. 除放射性示踪剂外，密封源技术也可以提供关于沉积在航道或港池中沉积物的密度以及关于悬浮流动的沉积物浓度的信息。

178. 放射性示踪剂和密封源技术可以做出重要的贡献的两个典型的问题领域是：易受侵蚀的滨海带和经过长期后退并往往造成沙滩损失的海岸线的管理；以及解决不当选用倾倒场所进行港口疏浚作业的问题，因为这可能会导致倾倒物重新回到疏浚后的通道。

179. 由于利用放射性示踪剂和密封源技术进行沉积物跟踪和监测有着巨大的环境、经济和社会效益，因此，原子能机构促进技术转让，并向成员国提供关于这一系列技术的培训。

180. 计算流体力学（水动力学）模拟现在是一个常用的自然系统管理工具，并越来越多地用于研究颗粒物和污染物的最终去向和行为。放射性示踪剂技术经常被用于验证水动力学模型，以增强对这种模型的预测值的置信度。实验跟踪和数值模拟是研究复杂系统的补充方法。示踪剂数据基于直接观察，但限于该系统的被标记部件以及受到限制的时空域。数值模型在理论上可以容纳所有的重要参数，但却受其基本假设和可获得的计算能力的限制。单独来看，这两种方法都有局限性，但它们共同提供了一种十分强大的复杂系统研究方法。在过去的几年中，已经很清楚的是，在该领域协同使用模拟和放射性示踪剂研究方法可以对解决自然系统中的复杂问题作出显著的贡献。

D.2. 辐射技术用于开发“绿色”产品和工艺

181. 通过生产较高性能和较低能耗的产品，各工业部门正在努力变得更加环保。辐射加工技术在促进开发创新“绿色”产品和工艺方面具有成功的历史。本分节将侧重论述被设想用于制备食品活性包装和伤口敷料以及用作施药装置的新型辐射加工产品，如各种形状和尺寸的辐射合成纳米级材料（纳米颗粒、纳米纤维、纳米孔）。对与传统上用于涂料和固化行业的化学品相关的环境污染的关注是利用低能量电子束辐射来努力制造这样的产品其背后的主要驱动力。

D.2.1. 纳米辐射工程材料

182. 反应（聚合、交联、受控降解和移植）的辐射引发是一个功能强大的纳米级材料合成和（或）改性工具，因为这种方法能够在任何温度下创造新的属性，而且没有将需要在事后费力费钱去除的有毒添加剂或残留物。当产品打算用于医学应用时，这一

点是特别有利的。另外，这种材料可以用废弃物制备：例如，已经成功地用废弃的塑料袋制造出了碳纳米管。

D.2.1.1. 医学应用

183. 在纳米颗粒制备和剪裁方面的进步已经导致生产出了一系列可广泛应用于医疗保健和有强劲需求的产品。已经提出将许多纳米级系统如量子点、有机和无机纳米球、树枝体、脂质体和聚合物纳米颗粒用于医学应用。就柔性形状、具有多个偶联位点的大尺寸表面、携带可应某些刺激释放的药物的内部空间或口袋以及人体细胞内化的可能性而言，纳米凝胶作为纳米级尺寸交联聚合物网络具有独特的优势。波兰率先进行了这种纳米凝胶的辐射合成，世界各地特别包括阿根廷、巴西、意大利、泰国和土耳其的许多研究人员迅速采用了这一方法。这种纳米凝胶可用合成或天然聚合物以及生物分子如蛋白质和肽来制备。除了用作在原地释放以对抗各种疾病的特定药物有效载体的载体外，纳米颗粒还正在被掺入伤口敷料，以加快愈合和抵御感染。受控辐射降解被成功用于制备纳米多孔聚合物膜，这种膜还可以加以实用化，以制备可以选择性地过滤和分离各种生物分子的膜。

D.2.1.2. 先进的涂料和食品包装材料

184. 根据最近的一项调查，食品保存期、新鲜度和质量是消费者重点考虑的事项。⁸ 针对这一需求，正在开发“活性”或“智能”包装。例如，具有优异阻气性且可防止氧气进入和惰性气体离开包装的薄膜已表明能有效延长产品寿命，且不损失新鲜度。这种薄膜可通过将特定纳米颗粒掺入薄膜的方式制造出来，从而使其也含有酶、抗菌剂和帮助控制食品降质和腐败的其他成分。这种生物活性食品包装在埃及用醋酸纤维素通过掺入银纳米颗粒制作，而氧气和水蒸汽渗透性下降的包装则用聚己酸内酯和壳聚糖薄膜通过加入氧化石墨烯制成。埃及科学家们还正致力于通过将聚苯胺纳米纤维掺入聚己酸内酯薄膜的方式生产海产品智能包装。这种包装会在与从腐烂的海产品发出的蒸汽相互作用时改变颜色，从而清楚地表明食品的新鲜度或新鲜度损失情况。在加拿大，纳米纤维素被添加到用生物源材料制作的包装中，以进行加固，以及使材料适合用于进一步化学改性，从而适应特定的包装需求。

D.2.2. 辐射固化

185. 全球印刷和涂料业都在寻求较少或不使用溶剂从而避免污染以及降质毒副产物迁移进入消费品的更加环境安全的程序。欧洲委员会 2007 年第 2007/19/EC 号指令是第 2002/72/EC 号指令的第四修正案，通常被称为“塑料指令”，该指令规定未经批准的物质迁移进入食品中的最高水平为十亿分之十，这是促使包装行业寻找新技术的最新发展的一个例子。对可替换有害工艺和材料的环境友好工艺和材料不断增长的需求一直

⁸ “废物及资源行动计划”，《消费者对食物垃圾和食品包装的态度》，班伯里（2013 年）。

是涂料工业出现能量小于 300 千电子伏的低能量电子束加速器应用的主要因素。将可辐射固化聚合物和低聚物用于涂料、油墨和粘合剂使之聚合和交联避免了使用挥发性有机化合物进行固化，从而使涂料业和相关产业能够通过实现在生产过程中显著减少有毒空气污染物排放和大大降低产品中的有毒化学品水平遵守清洁空气的要求。除了这些优点之外，电子束固化的产品和工艺还节省能量和空间，同时提高质量和生产效率。

186. 要想辐射固化技术在印刷和涂料工业得到更广泛的应用，就必须不断发展加速器技术，以使商用电子束技术做到在工业规模上切实可行。加速电压在 80 到 200 千伏之间和处理宽度达到 60 厘米的新一代高度紧凑和易于操作的电子束发射器的最新发展有可能进一步促进该技术的使用，因为这将允许开发、优化和继续发展广泛应用的新产品和新工艺，如通过交联进行固化和材料开发。

E. 医学成像技术的进步

187. 用于身体成分评定的医学成像技术的进步使一些参数得以量化，如脂肪量、去脂质量和骨矿物质密度，以及特定器官和组织质量，包括脂肪、肌肉和内脏质量。身体成分评定用于从健康监测到疾病状态及风险管理等诸多应用。越来越多的证据表明，身体成分的各组分对慢性病风险、病程进展、治疗反应和健康结果都有显著影响。因此，人们对身体成分评定工具和预报不良后果的风险模型的当前发展有着浓厚兴趣。目前，有三种成像方式广泛用于身体成分评定：双能 X 射线吸收测定法、量化计算机断层扫描法和磁共振成像法。

E.1. 用于身体成分评定的最新成像技术进步

E.1.1. 身体成分是健康指标

188. 过去几十年间，超重和肥胖的全球流行出现了惊人发展。世界卫生组织（世卫组织）估计，全球有近 20 亿成年人超重，其中 6 亿多人肥胖 — 这个数字在 1980 年的基础上翻了一番。⁹ 自那时以来，成年人和儿童人口中的这些代谢疾病早已达到流行比例。肥胖与糖尿病、心血管疾病、骨关节炎和癌症等若干慢性病直接相关，严重影响到生活质量和期望寿命。超重和肥胖的经济成本预计每 10 年会翻一番，造成保健总支出显著增加。

189. 评估健康风险和肥胖的可用工具受到了高度重视。这些工具大多为非成像方法，廉价易用，包括根据身高和体重的各种组合计算肥胖指数的方法，例如身体质量指

⁹ 世卫组织，肥胖和超重，《实况报道》第 311 号，<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/en/>，2015 年 1 月更新。

数、体形指数、身体圆度指数，及人体测量学肥胖指标，如腰围、腰臀比。然而，要阐明身体成分与疾病之间的潜在因果机理，则往往需要更复杂的身体指标。例如，虽然世卫组织采用身体质量指数对超重和肥胖进行了分类，但这一方法并未涵盖有关脂肪和去脂组织相对量的信息，也未提供关于全身脂肪分布的资料，而这两者均已证明与代谢综合症独立相关。身体成分量化的另一步骤是采用能够量化全身各腔室脂肪量和去脂质量的方法，如生物电阻抗分析和空气置换体积描记法。但这些都未能将单独的组织腔室分离出来，必须要有真正二维和三维的成像方法来细分组织类型和空间区域，并调查与疾病、发病率和死亡率的关联。双能 X 射线吸收测定法、量化计算机断层扫描法和磁共振成像法在世界各地得到广泛应用，用于详尽的身体成分评定。最近，三维光学表面扫描已成为了一种新的身体成分分析工具。¹⁰

E.1.2. 双能 X 射线吸收测定法的进步

190. 就测量骨矿物质密度、骨量、脂肪量、去脂软组织质量和脂肪率而言，双能 X 射线吸收测定法是一种高度准确和精确的方法。这种方法涉及在两个不同 X 射线能量水平同步成像。双能 X 射线吸收测定法扫描利用了不同组织类型的独特衰减特性，用于计算二维图像的面密度属性。在双能 X 射线吸收测定法模型中，骨矿物质密度等于骨矿物质质量除以骨投影面积，单位为克/平方厘米。脂肪量是脂质量（甘油三酯、磷脂膜等），因为所有脂类具有相似的 X 射线衰减特性。直到最近，双能 X 射线吸收测定法仍不能区分组织类型，如皮肤、肌肉、肝脏及皮下脂肪组织和内脏脂肪组织。直到今天，情况基本仍然如此；但是，现在可采用专门的估计算法报告下腹的皮下脂肪组织和内脏脂肪组织。此外，事实证明，双能 X 射线吸收测定法对肝脏铁含量的测量按照参考标准已达到很准确的程度。¹¹ 图 E-1 是一份典型的双能 X 射线吸收测定报告。

¹⁰ S.Y. LEE、D. GALLAGHER, “人体成分评定方法”, 《现行临床营养与代谢护理》第 11 期 (2008 年) 第 566—572 页。

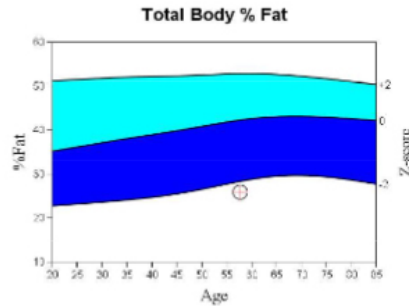
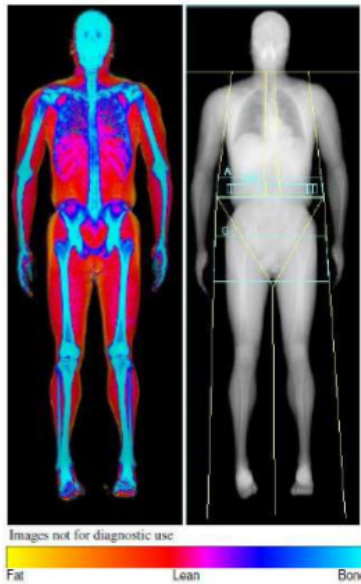
¹¹ J.A. SHEPHERD 等人, “双能 X 射线吸收测定法与血清铁蛋白结合比铁蛋白本身能更好地预报肝铁含量和含量变化”, 《临床骨密度测量学杂志》第 13 期 (2010 年) 第 399—406 页。

HOLOGIC TEST
4776 S W 8TH Street
Bedford, MA 01730

Telephone: 781-999-7300

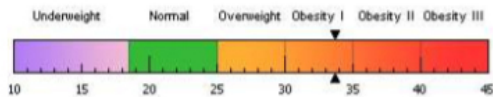
Fax: 781-260-0671

| | | |
|------------------------|-------------------|------------------|
| Name: sample, patient | Sex: Female | Height: 54.0 in |
| Patient ID: 987654 | Ethnicity: White | Weight: 140.0 lb |
| DOB: February 13, 1957 | Menopause Age: 50 | Age: 57 |



Source: 2008 NHANES White Female

World Health Organization Body Mass Index Classification
BMI = 33.8 WHO Classification Obesity I



BMI has some limitations and an actual diagnosis of overweight or obesity should be made by a health professional. Obesity is associated with heart disease, certain types of cancer, type 2 diabetes, and other health risks. The higher a person's BMI is above 25, the greater their weight-related risks.

Body Composition Results

| Region | Fat Mass (g) | Lean + BMC (g) | Total Mass (g) | % Fat | %Fat Percentile YN | Percentile AM |
|--------------|--------------|----------------|----------------|-------------|--------------------|---------------|
| L Arm | 984 | 2066 | 3050 | 32.3 | 20 | 5 |
| R Arm | 1094 | 2123 | 3217 | 34.0 | 28 | 8 |
| Trunk | 6750 | 20123 | 26874 | 25.1 | 20 | 4 |
| L Leg | 2354 | 7055 | 9409 | 25.0 | 1 | 1 |
| R Leg | 2525 | 7258 | 9783 | 25.8 | 1 | 1 |
| Subtotal | 13707 | 38625 | 52333 | 26.2 | 7 | 1 |
| Head | 886 | 3091 | 3978 | 22.3 | | |
| Total | 14593 | 41717 | 56310 | 25.9 | 7 | 1 |
| Android (A) | 1119 | 2853 | 3972 | 28.2 | | |
| Gynoid (G) | 2626 | 6327 | 8953 | 29.3 | | |

Scan Date: October 16, 2014 ID: A10161401
 Scan Type: a Whole Body
 Analysis: October 16, 2014 15:28 Version 13.5.1
 Auto Whole Body Fat Beam
 Operator: mid
 Model: QDR Workstation (S/N 061263)
 Comment:

Adipose Indices

| Measure | Result | Percentile YN | Percentile AM |
|---|-------------|---------------|---------------|
| Total Body % Fat | 25.9 | 7 | 1 |
| Fat Mass/Height ² (kg/m ²) | 7.76 | 37 | 13 |
| Android/Gynoid Ratio | 0.96 | | |
| % Fat Trunk/% Fat Legs | 0.99 | 88 | 70 |
| Trunk/Limb Fat Mass Ratio | 0.97 | 78 | 47 |
| Est. VAT Mass (g) | 145 | | |
| Est. VAT Volume (cm ³) | 156 | | |
| Est. VAT Area (cm ²) | 30.0 | | |

Lean Indices

| Measure | Result | Percentile YN | Percentile AM |
|--|--------|---------------|---------------|
| Lean/Height ² (kg/m ²) | 20.9 | 97 | 96 |
| Appen. Lean/Height ² (kg/m ²) | 9.21 | 97 | 96 |

Est. VAT = Estimated Visceral Adipose Tissue
 YN = Young Normal
 AM = Age Matched

TBAR1058 - NHANES BCA calibration

HOLOGIC®

图 E-1. 豪洛捷公司双能 X 射线吸收测定法系统的典型身体成分报告列出了身体多个局部的身体成分结果，包括手臂、小腿和躯干。最新发展包括对所估计下腹内脏脂肪组织面积、体积和质量，以及其他一些去脂指数，包括阑尾去脂质量指数的报告。(图片由豪洛捷公司提供)

191. 双能 X 射线吸收测定法的辐射剂量非常低，相当于接收本底辐射一天的剂量 (~8 微希)。然而，在技师接受过适当培训的情况下，双能 X 射线吸收测定法的测量-重测

精度非常高：重复扫描同一个人的体脂率偏差系数只有 1.0%或更少。^{12、13} 除全身之外，双能 X 射线吸收测定法可以报告手臂、小腿和躯干等局部腔室的脂肪、去脂软组织和骨矿物质质量。这一点无法用简单的非成像方法（生物电阻抗分析、空气置换体积描记法等）来实现。不过，双能 X 射线吸收测定法也有局限性。其中之一是三腔室模型无法明确从功能性蛋白质的去脂质量中分离出水分。虽然双能 X 射线吸收测定法并未明确采用水合作用假设来解决身体成分质量问题，但水合作用状态变化可解释为去脂组织质量的变化。因为脂肪按重量计也含有约 15%的水分，所以，如果脂肪也发生变化，那么对肌肉量变化的监测就会迷惑不清。双能 X 射线吸收测定法是一种专业的成像模式，普遍使用的 X 射线系统往往没有这一功能，因为这需要特殊的光束过滤以及两种衰减近乎完美的空间配准。

192. 在临床试验中，双能 X 射线吸收测定法的使用比其他身体成分评定方法更为广泛。与全身计算机断层照相法相比，这种方法所用剂量更低；与磁共振成像法相比，这种方法则更为廉价。双能 X 射线吸收测定法的体脂率测量值与那些用计算机断层照相法和磁共振成像法测得的数据高度相关 ($r > 0.99$)¹⁴，却更加精确。根据扫描仪型号和患者体形大小，全身扫描时间从 3 分钟至 10 分钟不等。类似品牌和型号的双能 X 射线吸收测定法系统可以使用硬脂酸和水等标准仿生组织替代物来方便地进行现场交叉校准。各品牌之间的交叉校准目前只能用标准化方程扣除系统偏差的办法来实现。结合使用组织替代物和标准化方程，便可汇集各临床中心的数据。最后，为了提供具有代表性的国别代谢健康和营养样本，已做出了大规模努力，包括美利坚合众国的全国健康和营养调查以及大韩民国的全国健康和营养调查。

E.1.2.1. 双能 X 射线吸收测定法涉及的特殊部位

193. 自双能 X 射线吸收测定法出现以来，全身扫描确定的软组织报告部位为手臂、小腿、躯干和头部。但近年来，为了报告这些解剖学部位以外的特殊部位逐步开展了一些工作。双能 X 射线吸收测定法系统能估计内脏脂肪，包括横截面积或组织体积。^{15、16}

¹² C. POWERS、B. FAN、L.G. BORRUD、A.C. LOOKER、J.A. SHEPHERD，“双能 X 射线吸收测定法身体成分测量值及与其共向变量关联的长期精确度”，《临床骨密度测量学杂志》第 18 期（2013 年）。

¹³ R.J. TOOMBS、G. DUCHER、J.A. SHEPHERD、M.J. DE SOUZA，“最新技术进步对双能 X 射线吸收测定法评定身体成分的正确度与精确度的影响”，《肥胖症》第 20 期（2012 年）第 30—39 页。

¹⁴ J. KULLBERG 等人，“全身脂肪组织分析：磁共振成像法、计算机断层照相法和双能 X 射线吸收测定法的比较”，《英国放射学杂志》第 82 期（2009 年）第 123—130 页。

¹⁵ L.K. MICKLESFIELD、J.H. GOEDECKE、M. PUNYANITYA、K.E. WILSON、T.L. KELLY，“双能 X 射线与临床计算机断层照相法测量内脏脂肪效果一样”，《肥胖症》第 20 期（2012 年）第 1109—1114 页。

¹⁶ S. KAUL 等人，“用双能 X 射线吸收测定法量化内脏脂肪”，《肥胖症》第 20 期（2012 年）第 1313—1318 页。

这些内脏脂肪组织的估计办法是从腹部脂肪总量中减去上层皮下脂肪估计量。双能 X 射线吸收测定法和计算机断层照相法所得内脏脂肪组织测量值的相关性非常高 ($r > 0.90$)。

E.1.2.2. 用双能 X 射线吸收测定法扫描肥胖患者

194. 过去，受扫描仪承重量和检查床尺寸的限制，双能 X 射线吸收测定法难以扫描体重较大的患者。最近，一些型号的双能 X 射线吸收测定法扫描仪将检查床承重量增加到了 227 公斤。还有针对肥胖患者的略高剂量专业扫描模式。如果肥胖患者难以对准扫描区域，则可将患者水平偏移定位在床上，然后采用“半扫描”或“反射”分析规程。借助充分扫描的相应肢体数据来估计检查床以外的手臂或小腿成分。

195. 为了取得精确的身体成分数据，扫描、分析和解释的质量极为重要。现在，专为监测双能 X 射线吸收测定法系统校准而设计的组织替代物已有商业供应。这些组织替代物已被用于纵向校准校正和类似系统之间的交叉校准。然而，迄今为止开发的组织替代物中，尚无一款替代物表现出适于不同品牌和型号系统之间的交叉校准。

E.1.3. 量化计算机断层照相法和磁共振成像法的进步

196. 如果需要独立于周围组织的器官的成分或体积数据，则必须采用三维成像方法。计算机断层扫描和磁共振成像是常见的临床可用方法，可以分离各个器官，如单独的肌肉、心脏、大脑、肝脏等器官。逐层将各个器官与周围组织分离开来。磁共振成像法和计算机断层照相法的主要局限在于资源贫乏地区很难用到，相对于其他方法成本较高，而且就计算机断层照相法而言，患者剂量较大。然而，全功能临床系统可扫描身体任何部位，并可容纳各种体形的人体。脂肪和肌肉组织量化可使用多种技术来实现，包括吸收测定法（计算机断层照相法）、饱和模式（磁共振成像法）或组织分割（计算机断层照相法和磁共振成像法）。

197. 计算机断层扫描是研究特定局部脂肪堆积的领先技术。其在身体成分评定方面最常见的研究应用是量化皮下、内脏和肝脏脂肪。计算机断层照相法对内脏和整个腹部脂肪的预报准确度非常高。该技术的可复制性也很好，重复测量差异小于 1%。

198. 对成年人的研究更倾向于采用计算机断层照相法，因为它快捷、现成可用并易于进行规程执行和扫描分析。计算机断层扫描还可校准到衰减的绝对标准。磁共振成像是儿童和青少年研究的首选方法，因为这类研究中的剂量考虑很重要。¹⁷ 全身磁共振成像法扫描的自动分割分析的先进算法最近得到了证实，¹⁸ 数家公司予以了引进。图

¹⁷ S. OWENS 等人，“肥胖儿童的内脏脂肪组织和心血管风险因素”，《儿科学杂志》第 133 期（1998 年）第 41—45 页。

¹⁸ A. KARLSSON 等人，“用全身水分-脂肪磁共振成像法的多图谱分割方法自动量化评定局部肌肉体积”，《磁共振成像杂志》第 41 期（2015 年）第 1558—1569 页。

E-2 就是一个例子。本图的磁共振成像法扫描花了不到 10 分钟时间，采用了三点迪克森（脂肪和水分分离）扫描规程，对所有主要肌肉群、内脏脂肪和皮下脂肪进行了彩色分割显示，可报告器官体积、含水量和脂肪量。

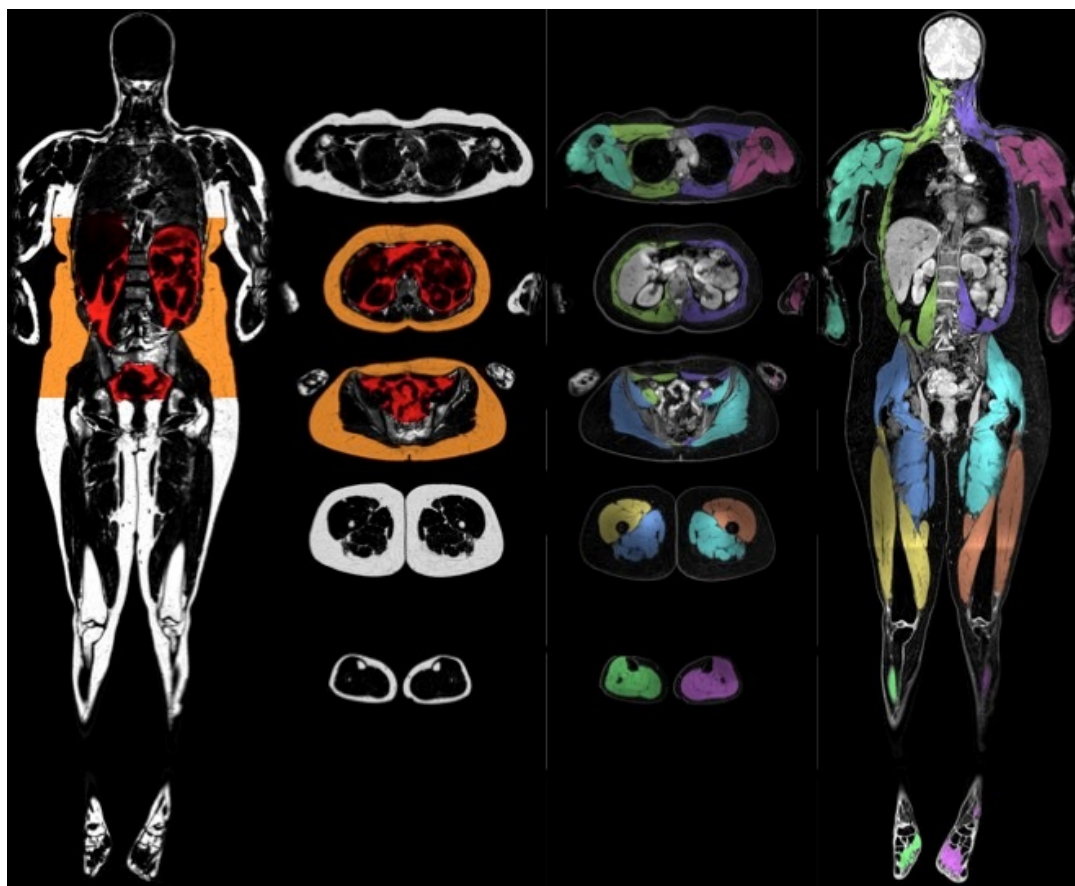


图 E-2. 用脂肪（左）磁共振成像图像和水分（右）磁共振成像图像的磁共振成像图像自动分割实例。腹部皮下脂肪组织和内脏脂肪组织分别用橙色和红色标记，覆盖在脂肪图像上。将用不同颜色显示的十大主要肌肉群覆盖到水分图像上。自动执行分割。六分钟即可获得全身图像。（图片由瑞典林雪平大学 Olof Dahlqvist Leinhard 提供）

E.1.4. 新兴技术：二维和三维全身表面扫描

199. 长期以来，体形一直被用作健康指标。为此，腰臀比得到了广泛采用。此外，肌肉高度发达或脂肪过多都显而易见，甚至对漫不经心的观察者亦如此。最近已建议将二维和三维全身表面扫描系统用作身体成分评定的新平台。高利用率、低成本和丰富的局部数据使这些方式成为令人信服的局部身体成分评定方案。

200. 用标准数码相机采集二维体形测量值。最近已经证明了如何从简单的全身轮廓中获得脂肪量指数和无脂肪量指数。¹⁹ 用移动电话所配置相机等传统照相机便可轻松获得这种全身轮廓图像，从而使得二维光学身体成分测量值非常适于各种现场应用。三维表面扫描仪和相应的扫描处理算法可提供快速、无创、可量的体形测量解决方案。用三维表面扫描仪获得的测量值已被证明高度精确。当前的扫描算法可以从全身扫描自动衍生出 400 多种长度、面积和体积的测量值。

201. 最近的事实表明，使用八台照相机结构照明的三维表面扫描仪所得局部体积和长度的测量值可用来精确预报双能 X 射线吸收测定法衍生的身体成分测量值。²⁰ 图 E-3 是双能 X 射线吸收测定法与三维表面扫描匹配的一个例子。各种三维的身体局部体积和厚度测量值可用来预报整个身体以及腹部、髋部、躯干和小腿部位的脂肪量和体脂率（R² 分别等于 0.95 和 0.89）。但还需要对参考方法（双能 X 射线吸收测定法和同位素稀释）进行更多验证。

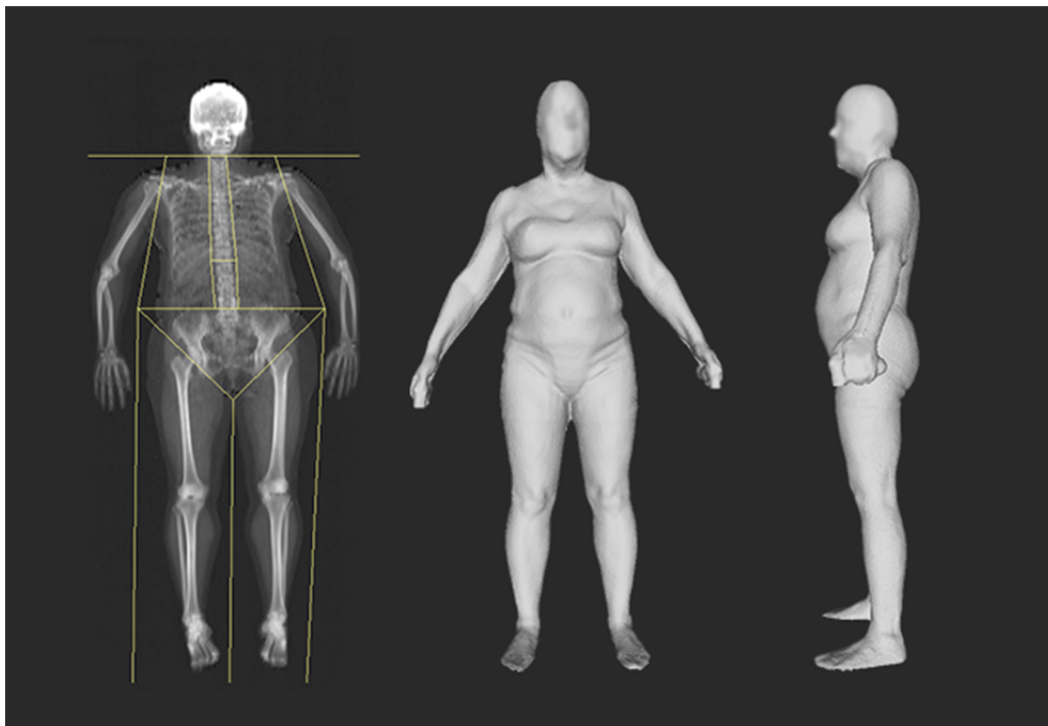


图 E-3. 冠状（中）图和矢状（右）图显示的与三维光学表面扫描匹配的全身双能 X 射线吸收测定法扫描（左）。从三维表面扫描所得体形测量值，如躯干宽度和厚度，以及小腿和躯干局部体积，可用于准确估计双能 X 射线吸收测定法将测出的脂肪和去脂身体成分。（图片由美国旧金山加利福尼亚大学的 J.A. Shepherd 提供）

¹⁹ B. XIE 等人，“从全身轮廓获得精确的身体成分测量值”，《医学物理学》第 42 期（2015 年）第 4668—4677 页。

²⁰ J.J. LEE、J.H. FREELAND-GRAVES、M.R. PEPPER、W. YU、B. XU，“通过立体视觉身体成像评估的大腿体积比用磁共振成像测量的内脏脂肪组织预报值的有效性”，《美国人类生物期刊》第 27 期（2015 年）第 445—457 页。

202. 除准确的身体成分估计之外，三维人体表面扫描仪还可用于获得若干其他临床相关测量值，包括直接测量值，如腰围，以及简单的衍生指数，如腰臀比、腰围与身高比。这些扫描仪提供了直接测量身体表面积的最方便方法。同样，这一方法也是局部体积测量的最方便工具，而这些测量值可用于计算躯干与小腿体积比——这是糖尿病、高血压、代谢综合症和死亡率的重要风险因素的量度。²¹

F. 综合运用基于辐射、遗传和共生体的方法管理蚊虫病媒

F.1. 蚊虫及蚊虫传播的疾病

203. 蚊虫传播的疾病是一个全球性的人体健康和福祉威胁。按蚊属蚊虫（图 F-1）传播疟疾，每年造成 60 多万人死亡，而伊蚊属蚊虫埃及伊蚊和白纹伊蚊则传播登革热等疾病，是对 100 多个国家超过 25 亿人的威胁。²² 蚊虫传播的许多疾病，特别是那些由高度侵袭性白纹伊蚊传播的疾病，近年来一直向先前未受影响的地区蔓延。



图 F-1. 吸血雌性阿拉伯按蚊蚊虫。

204. 疟疾可通过化学疗法进行治疗，例如用青蒿素药物，其开发者是 2015 年诺贝尔医学奖的共同得主²³。目前尚无疫苗用于防治基孔肯雅病、登革热或新出现的齐卡病毒，使用抗病毒药物不是很有效。因此，控制蚊虫媒介对于减少疾病负担至关重要，

²¹ J.P. WILSON、A.M. KANAYA、B. FAN、J.A. SHEPHERD，“躯干与小腿体积比作为糖尿病和死亡率的体形新指标”，《PLoS One》杂志第 8 卷第 7 期（2013 年）。

²² 世界卫生组织，“媒介传播疾病”，《简报》第 387 号，世卫组织，日内瓦（2014 年）。

²³ E. CALLAWAY、D. CYRANOSKI，“抗寄生虫的药物横扫 2015 年诺贝尔医学奖”，《自然》第 526 期（2015 年）第 174—175 页。

目前主要通过应用经杀虫剂处理的材料和室内滞留喷洒以及使用杀幼虫剂来试图做到这一点。

205. 正如世界卫生组织所确认的那样，现在急需新的蚊虫防治方法，因为不稳定的资源可用性、可用工具所遭遇的日益增大的阻力以及蚊虫媒介行为的变化危及到在该领域迄今取得的收益，所有这一切均使其更难以达成目标。另一个有希望的方法是昆虫不育技术，它可与其他防治策略结合起来有效地抑制蚊虫种群。²⁴

F.2. 昆虫不育技术作为控制蚊虫种群的工具

F.2.1. 开发用于对付蚊虫的昆虫不育技术

206. 在过去的 10 年中，在开发适用于四种传播疾病的蚊虫（阿拉伯按蚊、冈比亚按蚊、埃及伊蚊和白纹伊蚊）的“昆虫不育技术包”方面取得了许多进展。该技术包包括规模饲养设备、人工饲料、使用 γ 射线和 X 射线的绝育菌方法、质量控制方法和进行关于利用昆虫不育技术管理蚊虫种群的可行性研究的标准操作程序。目前可以提供由可广泛而又易于获得的配料构成的适合于按蚊和伊蚊的一种通用幼虫饲料。^{25、26} 使用这种液体幼虫饲料和相关的标准操作程序，按蚊和伊蚊幼虫可以在装有一种新颖的倾斜托架系统上的大托盘中进行高效规模饲养^{27、28}（图 F-2）。笼子设计得便于喂食血液、投送糖、收集虫卵和清洗。²⁹ 除了随意提供的 10%糖源外，还使用一种经过改良的 Hemotek 牌薄膜喂食器，用于向雌蚊提供血粉和向笼底喷水，以促进产卵。³⁰ 虫卵通过冲刷笼底的方式收集，然后进行干燥并可靠地加以量化，以便在下一个生产周期的饲养盘中实现可预测的幼虫密度（图 F-3）。可以使用 γ 或 X 射线辐照器对作为后期蛹的雄蚊在其出现和释放之前进行绝育处理（图 F-4）。已经为最重要的目标蚊虫种类

²⁴ R.S. LEES、J.R.L. GILLES、J. HENDRICHs、M.J.B. VREYSEN、K. BOURTZIS, “回到未来：对付蚊虫病媒的昆虫不育技术”，《昆虫科学的当前观点》第 10 期（2015 年）第 156—162 页。

²⁵ D. DAMIENS、M.Q. BENEDICT、M. WILLE、J.R. GILLES, “一种廉价而有效的阿拉伯按蚊（双翅目：蚊科）幼虫饲料：像马、鸟或鱼那样吃？”《医用昆虫学期刊》第 49 期（2012 年）第 1001—1011 页。

²⁶ A. PUGGIOLI 等人, “促进规模饲养中白纹伊蚊（双翅目：蚊科）幼虫发育的三种饲料的效率”，《医用昆虫学期刊》第 50 期（2013 年）第 819—825 页。

²⁷ F. BALESTRINO、M.Q. BENEDICT、J.R. GILLES, “有利于加强蚊虫规模饲养的新幼虫托盘和托架系统”，《医用昆虫学期刊》第 49 期（2012 年）第 595—605 页。

²⁸ F. BALESTRINO、A. PUGGIOLI、J.R. GILLES、R. BELLINI, “白纹伊蚊（双翅目：蚊科）规模饲养所用新幼虫饲养装置的验证”，《公共科学图书馆-综合》第 19 期（2014 年）。

²⁹ F. BALESTRINO、A. PUGGIOLI、R. BELLINI、D. PETRIC、J.R. GILLES, “白纹伊蚊（双翅目：蚊科）规模生产笼”，《医用昆虫学期刊》第 51 期（2014 年）第 155—163 页。

³⁰ D. DAMIENS 等人, “不同的血液和糖馈送机制对阿拉伯按蚊群落（双翅目：蚊科）生产率的影响”，《医用昆虫学期刊》第 50 期（2013 年）第 336—343 页。

之一即阿拉伯按蚊编制了剂量反应曲线，^{31、32} 以便选择既提供足够的不育性同时又允许雄蚊与野生雄蚊有效竞争的最佳剂量。



图 F-2. 为规模饲养幼虫期蚊虫而开发的液体幼虫饲料、托盘和支架。(照片由原子能机构提供)

³¹ C. NDO 等人, “蛹和成虫期阿拉伯按蚊遗传选用品系 ANO IPCL1 的 X 射线绝育”, 《热带学报》第 131 期 (2014 年) 第 124—128 页。

³² H. YAMADA、M.J. VREYSEN、J.R. GILLES、G. MUNHENGA、D.D. DAMIENS, “遗传工程、狄氏剂处理和辐射对野外笼养雄性阿拉伯按蚊交配竞争力的影响”, 《疟疾杂志》第 13 期 (2014 年) 第 318 页。

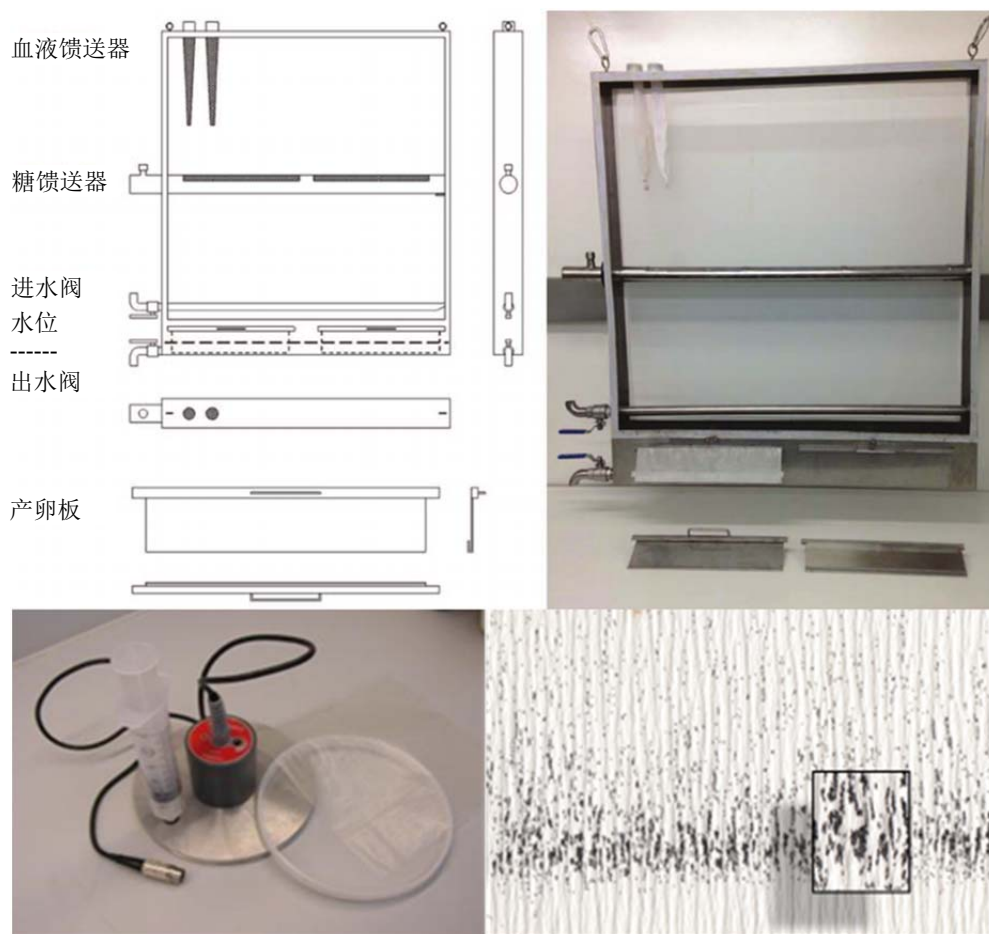


图 F-3. 伊蚊成虫规模饲养笼、血液馈送装置和收集到滤纸上的卵。(照片由原子能机构提供)



图 F-4. γ 射线 (左) 或 X 射线 (右) 辐照器用于雄蚊的绝育。(照片由原子能机构提供)

207. 由于雄蚊暴露于若干过程包括规模饲养、绝育、运输和释放的压力之下，因此，保证良好的昆虫质量便成为一个主要问题。除了在生产期间记录的质量控制参数外，

还在半野外条件下进行了竞争力研究，以评定昆虫质量。野外笼子模拟半野外条件，并提供良好的自然环境替代，以进行这样的实验以及行为研究，包括成群移动调查和交配兼容性。野外笼子被用于试验不育雄蚊与野生雄蚊的各种比例的效果以及不育雄蚊的年龄对交配成功的影响。从苏丹、从布基纳法索以及从中国和意大利取得的分别关于阿拉伯按蚊、冈比亚按蚊和白纹伊蚊的初步数据帮助改进了生产过程，从而提高了作为包括昆虫不育技术组成部分的成功大面积虫害综合治理计划的关键因素的不育雄蚊的竞争力。

F.2.2. 进一步的技术要求

208. 就适合于蚊虫的昆虫不育技术而言，与其他生物学基础的方案一样，最重要的只是释放雄蚊，因为雌蚊是疾病媒介，而雄蚊不叮人吸血，因此不会传播疾病。可以利用伊蚊两性异形^{33、34}或在血粉中掺入对雌性阿拉伯按蚊有毒的化学物质如伊维菌素的方式³⁵小规模地进行雌雄分离，以便从生产线上消除雌蚊。需要解决的主要挑战是开发出有效和强壮的遗传选性品系，以方便且安全地在规模饲养程度上消除雌蚊。³⁶基于抗杀虫剂突变的阿拉伯按蚊遗传选性品系（狄氏剂处理将杀死所有敏感雌蚊，但杀不死有抵抗力的雄蚊）已经提供了好几年，最近对其用于野外释放的可能性作了评定。该品系显示出低繁殖率和遗传不稳定性，经狄氏剂处理过的卵孵出的成年雄蚊被发现少量杀虫剂残留物。因此，该品系没有被推荐用于大规模作业应用。³⁷目前正在努力确定适合于阿拉伯按蚊以及白纹伊蚊和埃及伊蚊的新的形态或条件致死标记物，以便开发出有效的遗传选性品系。

209. 除了正在开发的蚊虫昆虫不育技术包外，这些技术还必须扩大到在作业层面加以应用。对消灭其他害虫的昆虫不育技术的大规模使用继续显现出新技术可以进一步提高效率从而导致产生更多成功的虫害防治计划的领域。有待解决的关键问题是不育雄蚊的处理、运输到目标区域和实际释放，这些都必须在不对其生存或释放后的交配性能造成显著影响的情况下得到实现。

³³ D.A. FOCKS, “经过改进的蚊虫（双翅目：蚊科）发育阶段、性别和种类分离器”，《医用昆虫学期刊》第 17 期（1980 年）第 567—568 页。

³⁴ D.O. CARVALHO 等人，“用于在巴西野外释放的转基因埃及伊蚊的规模生产”，《视频实验期刊》第 83 期（2014 年）第 3579 页。

³⁵ H. YAMADA、S.M. SOLIBAN、M.J. VREYSEN、D.D. CHADEE、J.R. GILLES, “通过将血粉掺入毒物的方式消除雌性阿拉伯按蚊，以作为昆虫不育技术背景下的雌雄分离方法”，《寄生虫与病媒》第 6 期（2013 年）第 197 页。

³⁶ J.R. GILLES 等人，“实施蚊虫昆虫不育技术计划：探索蚊虫雌雄分离的遗传、分子、力学和行为方法”，《热带学报》第 132 期补编（2014 年）第 S178—S187 页。

³⁷ H. YAMADA 等人，“阿拉伯按蚊遗传选性品系 ANO IPCL1 及其在病媒综合管理计划中适用于昆虫不育技术的可能性”，《热带学报》第 142 期（2015 年）第 138—144 页。

F.3. 补充方法及其与昆虫不育技术结合起来控制蚊虫种群

F.3.1. 蚊虫控制的补充遗传学方法

210. 除昆虫不育技术外，还开发了若干其他方法用于管理蚊虫病媒种群。这种技术平台可大致分为两类。第一类包括“自限性”方法，它被定义为其效果随着时间的推移不能在环境中持久存在的方法。因此，需要连续释放才能实现所需的种群抑制效果。所有种群抑制方法，如昆虫不育技术、释放携带显性致死基因昆虫的转基因方法和基于共生体的不亲和昆虫技术，都是自限性方法的例子。第二类包括了“自持性”方法，它被定义为其效果通过积极地选择随着时间的推移能在环境中持久存在的“侵入性”方法。这可以被用来以一种无法传播疾病的种群替代目标蚊虫种群。已建议采用不同的方法利用转基因技术或共生细菌来实现这一点。

211. 释放携带显性致死基因昆虫的转基因方法是基于使用携带致死基因的遗传系统。³⁸ 携带释放携带显性致死基因昆虫系统的纯合子品系只能在存在通常为抗生素四环素的阻抑物的情况下在实验室进行饲养。缺乏这种阻抑物就会杀死后代。已在巴西大开曼岛和在巴拿马的抑制试验中对携带这种遗传盒的埃及伊蚊 OX513A 进行了评估。释放后的 OX513A 雄性和野生雌性之间交配产生的后代继承致死遗传盒的一个拷贝，并在蛹期之初死亡。小规模地开展了采用陆续释放转基因雄性的方式进行的抑制试验，据报告，抑制水平平均达到了 70—80%。^{39、40} 与此方法相关联的问题包括缺乏高效健全的性别鉴定系统，而绝对需要这一系统，才能消除释放传播病原体雌性的机会、规模饲养条件下抗性演进的可能性以及与知识产权、某些方面的公众负面看法和监管批准有关的问题。

F.3.2. 基于共生体的方案

212. 其他两种方法，即不亲和昆虫技术和种群置换方案，都是基于母系遗传共生细菌属的沃尔巴克氏体菌。它与若干生殖异常的诱导有关，最常见的一种异常是细胞质不亲和性，这种不亲合性的最简单的形式表现为受感染的雄性和未受感染的雌性之间的杂交胚胎致死性。⁴¹

213. 这种共生体已经被利用为抑制（不亲和昆虫技术）或替换主要蚊虫病媒种群数量的工具。种群抑制的不亲和昆虫技术方案已在小规模先行试验中对尖音库蚊、致倦库

³⁸ L. ALPHEY, “蚊虫的基因控制”, 《昆虫学年评》第 59 期 (2014 年) 第 205—224 页。

³⁹ D.O. CARVALHO 等人, “在巴西通过持续释放转基因雄蚊抑制野外埃及伊蚊种群”, 《公共科学图书馆·被忽略的热带疾病》第 9 卷 (2015 年)。

⁴⁰ A.F. HARRIS 等人, “通过持续释放经工程改造的雄蚊成功抑制野外蚊虫种群”, 《自然生物学学报》第 30 卷 (2012 年) 第 828—830 页。

⁴¹ J.H. WERREN、L. BALDO、M.E. CLARK, “沃尔巴克氏体菌：无脊椎动物生物学的杰出操盘手”, 《自然评论:微生物学》第 6 期 (2008 年) 第 741—751 页。

蚊、波利尼西亚伊蚊和白纹伊蚊进行了测试。^{42、43} 这种方案的主要问题是，它也需要一个目前没有的完美性别鉴定系统，以消除释放多产和携带病原体的雌性的风险。一些沃尔巴克氏体菌株还能够阻断主要人类病原体，包括疟原虫、登革热和基孔肯雅病。⁴⁴ 转染了黑腹果蝇沃尔巴克氏体菌株的埃及伊蚊品系表现出强烈的细胞质不亲和性，并且还提供对登革热的保护；所释放的这种埃及伊蚊品系取代了澳大利亚昆士兰州凯恩斯附近未受感染的种群。然而，黑腹果蝇沃尔巴克氏体菌感染对繁殖力和幼虫生产有负面影响，感染频率通常不会达到 100%，这表明感染了黑腹果蝇沃尔巴克氏体菌的埃及伊蚊可能无法迅速侵入邻近的种群。⁴⁵ 关于种群替代战略的可持续性和生物安全性的其他问题包括抗性的潜在发展或病原体的阻断可能是局部的，在某些联合共生体中甚至是不存在的。实际上，沃尔巴克氏体菌感染可能增加与其他病原体包括虫媒病毒的感染[F.24]。⁴⁶

F.3.3. 对成功应用遗传控制方法的进一步要求

214. 基于昆虫不育技术、转基因或共生体的任何种群抑制计划的大规模实施关键取决于高效健全的雌雄分离方法的可用性，因为雌性释放会造成显著的病原体传播风险。在不存在高效雌雄分离方法的情况下，安全有效的策略将需要将昆虫不育技术与基于共生体的方案结合起来，以控制蚊虫病媒种群。针对白纹伊蚊蚊种进行了这种组合方案的概念验证。^{47、48}

215. 无论哪种方法或方法组合对某一区域的特定蚊虫病媒最有效，都需要政府支持和公众参与才能确保成功实施。就转基因方法而言，这可能是一个更大的挑战，因为相比基于使用共生体的方法，公众的反对声往往更大，而且需要更严格的监管批准。另

⁴² H. LAVEN, “通过细胞质不亲和性根除致乏库蚊”, 《自然》第 216 期 (1967 年) 第 383—384 页。

⁴³ R.S. LEES、J.R.L. GILLES、J. HENDRICHs、M.J.B. VREYSEN、K. BOURTZIS, “回到未来：对付蚊虫病媒的昆虫不育技术”, 《昆虫科学的当前观点》第 10 期 (2015 年) 第 156—162 页。

⁴⁴ L.A. MOREIRA 等人, “埃及伊蚊的沃尔巴克氏体菌共生体限制与登革热、基孔肯雅病和疟原虫的感染”, 《细胞》第 139 期 (2009 年) 第 1268—1278 页。

⁴⁵ A.A. HOFFMAN 等人, “黑腹果蝇沃尔巴克氏体菌感染在侵入埃及伊蚊种群后的稳定性”, 《公共科学图书馆-被忽略的热带疾病》第 8 卷 (2014 年)。

⁴⁶ B.L. DODSON 等人, “沃尔巴克氏体菌增加环喙库蚊感染西尼罗河病毒”, 《公共科学图书馆-被忽略的热带疾病》第 8 卷 (2014 年)。

⁴⁷ D. ZHANG、X. ZHENG、Z. XI、K. BOURTZIS、J.R.L. GILLES, “昆虫不育技术与不亲和性昆虫技术相结合：I - 沃尔巴克氏体菌感染对受三重和双重感染白纹伊蚊菌株的身体素质的影响”, 《公共科学图书馆-综合》第 10 期 (2015 年)。

⁴⁸ D. ZHANG、R.S. LEES、Z. XI、J.R.L. GILLES、K. BOURTZIS, “昆虫不育技术与基于沃尔巴克氏体菌的方法相结合：II - 旨在最大限度地减少意外雌性释放后果的更安全的白纹伊蚊种群抑制计划实施方案”, 《公共科学图书馆-综合》第 10 期 (2015 年 a 部分)。

一方面，昆虫不育技术容易被当地民众所接受，且不需要监管批准。利用转基因菌株和基于共生体的方案还涉及知识产权问题，如果要在在操作层面应用这样的技术，就必须解决这些问题。然而，新的方法将必须得到支持，因为进化的力量将肯定促使对传统灭蚊方法甚至最终对新的转基因的和基于沃尔巴克氏体菌的病原体保护方法的抗性越来越强。与此相反，对昆虫不育技术的方案却不会产生任何抗性，因为照射是以随机的方式诱导出对目标昆虫的显性致死突变。一个充满活力的种群抑制方案是在大面积害虫防治计划中将昆虫不育技术与其他兼容战术结合在一起，而且可能是管理蚊虫种群并潜在地防治它们所传播的多种疾病的惟一途径。

G. 促进有效土壤保持措施的同位素技术

G.1. 综合利用散落放射性核素和特定化合物稳定同位素技术促进有效的土壤保持措施

216. 不适当的农场管理实践造成的土地退化导致了肥沃土壤的流失和作物产量低下，从而助长了粮食不安全。耕地损失以及溪流和湖泊的沉积作用和污染也是一种显著的环境、社会和经济威胁。

217. 2015 年 9 月，“土地退化经济性倡议”在联合国大会第七十届会议上发表一份报告，表明土地退化所致生态系统服务损失每年高达 10.6 万亿美元以及全世界有 14 亿人直接受到土地退化的影响。⁴⁹

218. 为了鼓励更加可持续地利用和管理农业资源，迫切需要获得关于土壤再分布（侵蚀/沉积作用）的数量和空间范围的定量可靠数据，以及更好地了解驱动侵蚀和沉积过程的关键因素。这种更好的了解将帮助指导在哪里适用适当的土壤保持措施，以高效地控制侵蚀造成的土壤流失，并从而减少经济、社会和环境的影响。

G.1.1. 散落放射性核素用于量化侵蚀率和沉积作用

219. 源自 20 世纪 50 年代至 60 年代热核武器试验的铯-137 等散落放射性核素和铅-210 等天然存在的地球成因放射性同位素以及铍-7 等宇宙成因放射性同位素的利用能够有助于评定土壤侵蚀和量化土壤保持战略的有效性。

220. 在通过沉降作用沉积在土地上之后，散落放射性核素与微细土壤颗粒牢固地结合，因而成为非常有用的土壤示踪剂。这些示踪剂能够帮助确定土壤侵蚀和沉积率，并能够随后用于评价控制土壤侵蚀的土壤保持措施的效力，从而防止与土壤侵蚀相关的过度沉积。由于铅-210 和铯-137 的起源和半衰期不同，它们各自能够为建立大面积

⁴⁹ “土地退化经济性倡议”，《土地的价值：可持续的土地管理造就繁荣的土地和积极的回馈》，《报告》，“土地退化经济性倡议”，波恩（2015 年）。

集水区中长期土壤侵蚀历史提供可靠的依据。在将铍-7 纳入后，散落放射性核素还使得能够评价短期侵蚀损失（表 G-1）。虽然许多研究仅利用单一散落放射性核素，但两个乃至三个散落放射性核素的利用能够通过产生不同时间尺度的数据集提供有关侵蚀历史的更多宝贵资料。⁵⁰

221. 在世界范围内，从单独田块到流域规模，人们越来越多地利用散落放射性核素量化大范围农业环境的土壤侵蚀和沉积率，由此清楚地示证了这些同位素技术的效力和潜力。⁵¹

表 G-1. 在侵蚀和（或）沉积过程后，铯-137、铅-210 和铍-7 用于量化土壤再分配率的比较优势和局限性。⁵²

| 散落放射性核素 | 来源 | 能量 (千电子伏) | 时间 | | 取样 | 规模 | 探测器 | 测量 | | 沉积物测龄 |
|------------------|--------|--------------|--------|-----------------|--------|----------|---------------|-----|---------------------------------|-------|
| | | | 半衰期 | 寿期 | | | | 实验室 | 现场 | |
| ¹³⁷ 铯 | 人为制造 | 662 | 30.2 年 | 50 年 (中期) † | 样品 | 小块田到大流域 | 正常高纯 锗 γ | 容易 | 容易 | 可行 |
| ²¹⁰ 铅 | 天然地球成因 | 46 | 22.8 年 | 100 年 (长期) † | 样品 | 小块田到流域 | 宽能范围 高纯锗 γ | 较难 | 有限且不可靠 | 可行 |
| ⁷ 铍 | 天然宇宙成因 | 477 | 53.3 天 | ≤6 分 (短期) * | 细分深度递增 | 局地小块田到大田 | 正常高纯 锗 γ | 容易 | 较长计数时间 (较之 ¹³⁷ 铯) | 可行 |

G.1.2. 特定化合物稳定同位素技术用于确定沉积物来源

222. 最近在固有土壤有机生物标记物的特定化合物稳定同位素识别标志的基础上开发的法医稳定同位素技术使得可以对沉积物的来源进行区分和确定。因此，可利用来自不同土地用途的特定化合物稳定同位素识别标志来补充通过散落放射性核素数据提供的资料。

223. 这是可能的，因为绝大多数植物群落产生各种有机化合物，这些化合物从植物根部渗入土壤，并与土壤颗粒相结合，从而以其生物标记给特定土地用途打上标签。虽然所有植物都产生类似的生物标记，但这些生物标记中碳-13 稳定同位素特征通常对每个植物品种有所不同。特定化合物稳定同位素技术基于测量土壤中植物来源脂肪酸直链（碳 14 至碳 24）的碳-13 稳定同位素特征。通过将土地用途的特定化合物稳定同位

⁵⁰ 国际原子能机构，《利用散落放射性核素评定土壤侵蚀和土壤保持战略的有效性》，原子能机构《技术文件》第 1741 号，原子能机构，维也纳（2014 年）。

⁵¹ L. MABIT 等人，散落 ²¹⁰ 铅作为土壤和沉积物示踪剂用于集水区沉积物平衡调查：评论，《地球科学评论》第 138 卷（2014 年），第 335—351 页。

⁵² A. TAYLOR、WH. BLAKE、H.G. SMITH、L. MABIT、M.J. KEITH-ROACH，《利用散落铍-7 作为流域土壤和沉积物示踪剂的设想和挑战》，《地球科学评论》第 126 卷（2013 年），第 85—95 页。

素指纹与沉积带中沉积物的散落放射性核素建立联系，研究人员可以得到一种准确而有效的确定沉积物来源的方法，用以确定容易发生土壤侵蚀的区域。

224. 特定化合物稳定同位素技术和散落放射性核素技术是研究土地沉积物再分配和来源的互补方法。散落放射性核素提供关于农业体系范围内土壤再分配量（或关于其排放处沉积作用）的信息，而特定化合物稳定同位素指纹则提供有关这些沉积物来源的信息。

225. 建立对如何减少土壤侵蚀和随后沉积作用相关农业环境问题的更好了解是成功抗击土壤退化的关键要求，也是缓解许多预期的气候变化影响的关键要求。利用这些综合性同位素方法可使农业社区采取具体和有效的减缓措施，如利用少耕、覆盖、遮盖作物、梯田耕作、等高种植和修建矮石墙和围栏等，所有这些都最大程度地减少土壤肥力、作物生产率和水质恶化及大坝沉积的损失（图 G-1 和图 G-2）。



图 G-1. 越南林同省利用梯田和等高耕作促进茶园土壤保持。（照片由原子能机构提供）



图 G-2. 斯里兰卡因侵蚀造成从集水区到水坝的沉积物运输。(照片由原子能机构提供)