

第五十七届常会

临时议程项目 18
(GC(57)/1 和 Add.1)

2013 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，其中主要突出强调了 2012 年令人瞩目的发展情况。
- 《2013 年核技术评论》涵盖以下领域：动力应用、原子数据和核数据、加速器和研究堆以及核科学和核应用。原子能机构网站¹提供了与《2013 年核技术评论》相关的补充英文文件，内容涉及：核能制氢技术和将从福岛第一核电站事故中汲取的初步教训用于先进核电厂技术发展。
- 有关原子能机构核科学技术相关活动的资料亦可参阅《国际原子能机构 2012 年年度报告》(GC(57)/3 号文件)，特别是其中的技术部分，还可参阅《2012 年技术合作报告》(GC(57)/INF/4 号文件)。
- 该文件已经修改，以便尽可能考虑理事会的具体意见和从成员国收到的其他意见。

¹ <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC57/Agenda/index.html>。

2013 年核技术评论

总干事的报告

正文摘要

1. 核电的全球发电容量在 2012 年增长到 372.1 吉瓦（电），截至这一年底共有 437 座在运反应堆。三座新反应堆并网发电，两座处于“长期关闭”状态的反应堆重启。在 2012 年只有三座反应堆永久关闭，而 2011 年有 13 座。截至 2012 年年底，共有 67 座新反应堆在建，这仍是很高的一个数字。虽然原子能机构对 2030 年的预测比 2011 年时所作的预测低了 1—9%，但仍然预期世界范围内的核能利用将显著增长，在 2030 年之前将增长 23%至 100%。大部分的增长预计将发生在已拥有在运核电厂的国家，特别是在预期增长最为强劲的远东。
2. 虽然一些国家推迟就启动核电计划作出决定，但其他国家继续实施引进核能的计划。2012 年 7 月，阿拉伯联合酋长国（阿联酋）成为 27 年中首个开始建造首座核电厂的国家。除了阿联酋外，包括白俄罗斯和土耳其在内的若干其他国家在 2012 年也在建造其首座核电厂方面取得了进展。
3. 在经济合作与发展组织（经合组织）核能机构和原子能机构联合印发的 2011 年版“红皮书”《2011 年铀资源、生产和需求》中，可以低于 130 美元/千克铀成本回收的已确定常规铀资源的估计数与上一版中相比略有下降，这是因为在很大程度上系哈萨克斯坦提高了铀产量，从而使全世界的铀生产总量得到了显著增加。2011 年报告在非洲发现了许多铀矿床新资源。铀的现货价格在 2011 年底为 135 美元/千克铀，到 2012 年下半年下降到约 110 美元/千克铀。2012 年底，铀的现货价格上涨到约 115 美元/千克铀。但铀的长期价格仍稳定在 158 美元/千克铀左右。
4. 2012 年 6 月关闭的法国乔治·贝斯扩散法浓缩厂被乔治·贝斯 II 厂所取代。2012 年 9 月，美国核管理委员会向通用电气-日立核能有限公司的附属公司全球激光浓缩公司颁发了全尺寸激光浓缩设施的首个建造和运行许可证。
5. 2012 年 7 月，韩国原子能研究院完成了用于高温处理乏氧化物燃料的高温工程综合非活性示范设施的建造。已在 8 月开始进行启动试验。
6. 在放射性废物管理领域，加拿大正在考虑发展三个地质处置设施，它们是：用于处

置低放废物和来自安大略电力公司的中放废物的布鲁斯场址设施、正在考虑用于处置低放废物和中放废物的乔克河实验室场址以及尚未确定的供加拿大乏核燃料处置库和专门技术中心使用的第三个场址。在西班牙，卡纳斯镇在 12 月被正式选定为集中贮存西班牙乏核燃料的场址。也是在这个月，芬兰核废物管理专家组织就其奥尔基洛托乏燃料处置设施向芬兰政府提交了处置库建造许可证申请，预计最终处置于 2020 年开始。

7. 约旦在 2012 年开始建造一座新研究堆，即一座 5 兆瓦多功能研究堆。截至 2013 年 1 月，共有 247 座研究堆在运行。原子能机构继续为最大程度地减少高浓铀在研究堆中使用的全球努力提供支持。2012 年 9 月，波兰玛利亚研究堆从高浓铀燃料转换为低浓铀燃料。墨西哥铀氢锆 III 型研究堆从高浓铀燃料转换为低浓铀燃料，并且其最终高浓铀燃料于 2012 年 3 月运回美国。2012 年 12 月，在将维也纳铀氢锆研究堆完全转换为低浓铀燃料后，从奥地利最终移出了所有高浓铀。在奥地利和墨西哥所作的努力标志着在全球范围内已将所有铀氢锆堆高浓铀燃料从国际核民用中移出。根据“俄罗斯研究堆燃料返还计划”，2012 年，原子能机构协助从乌克兰哈尔科夫物理和技术研究所返还了近 110 千克新鲜高浓铀燃料，从基辅核研究所返还了近 20 千克高浓铀乏燃料，从乌兹别克斯坦和波兰返还了近 100 千克高浓铀乏燃料，从波兰返还了 27 千克新鲜高浓铀燃料。

8. 《2013 年核技术评论》所涉及的核应用反映三个专题而重要的领域：利用核技术加强食品安全和粮食安全、防治癌症领域的新发展以及利用核技术应对气候变化的影响。

9. 通过食品辐照加强食品安全和粮食安全，这涉及在受控条件下对食品进行电离辐射照射。辐照设施通常使用钴-60 或铯-137 放射性同位素提供 γ 射线。但事实证明，由于放射性同位素源采购、运输和接收的复杂性，使用这些放射性同位素难以增加食品辐照的应用。其结果是，对电子束和 X-射线技术的兴趣不断增加，因为这些技术使用电能来产生电离辐射。这些技术提供了显著扩大食品辐射应用的可能性，从而加强食品安全和通过减少粮食损失和浪费帮助增加全球粮食供应。

10. 食品安全是核事故所致放射性释放后的一个严重关切。核技术被用于正在发展中的现场和实验室统一实践，以便农业当局能够在核事件后尽快有效和一致地评定食品安全。事故教训表明，需要改进食品数据和农业数据的报告和管理，这在若干国家受到影响和需要采取协调一致方案的情况下尤其如此。

11. 放射治疗旨在对肿瘤进行精确剂量的辐射，同时最大程度减少对周边正常组织的损害，是一种有效的癌症治疗方法。最近在光子放射治疗方面的进步提供了超出常规放射治疗的潜在显著优势，包括剂量分布改进、毒性减少、治疗实施迅速以及局部控制更精确，所有这些都导致增加了存活机会。过去 20 年中，对粒子治疗的兴趣增加，粒子治疗取得发展，质子束治疗和碳离子束治疗尤其如此。一项进一步的发展是三维近距疗法的利用，该疗法是通过将放射源放置在肿瘤或体腔附近或置入肿瘤或体腔中来实施辐射治疗。利用这些先进技术涉及额外的大量费用，必须将这些技术的潜在益处与传统方法进行权衡。

12. 在原子和分子一级对物质加以操控以设计新的材料、设备和结构的技术被称为“纳米技术”。一个令人感兴趣的发展是在医学领域。某些纳米结构的特定属性可有助于利用前所未有的方案防治癌症。这催生了被界定为纳米技术的医学应用的“纳米医学”这一新领域。针对癌细胞，定制的纳米级系统可以作为药物输送工具，能够将大剂量放射性核素输送到恶性细胞中而又不伤害正常组织，从而大大减少了通常伴随当前许多癌症疗法的副作用。

13. 核技术在认识气候变化、预测气候的未来发展和适应气候的影响方面起着重要的作用。在海洋环境中，海洋酸化等气候变化的影响正在对渔业、沿海水产养殖、珊瑚礁和其他沿海资源造成影响。核技术为有关海洋环境条件与海洋生态系统和海洋生物体之间相互作用的一些基本科学问题提供了答案。放射性核素和稳定同位素的利用已经帮助提高了对在过去几千年的时间里不断发生厄尔尼诺南徊现象的认识。目前还在利用核技术研究海洋酸化对海洋生态系统和海洋生物多样性的影响。

A. 动力应用

A.1. 当今的核电

1. 截至 2012 年 12 月 31 日，全世界共有 437 座核动力反应堆在运行，总容量达到 372.1 吉瓦（电）²（见表 A-1）。这与 2011 年数字比较略有增加，总容量增长约 3.3 吉瓦（电）。有三个新并网发电的反应堆：中国宁德 1 号机组（1000 兆瓦（电））和大韩民国新月城 1 号机组（960 兆瓦（电））和新古里 2 号机组（960 兆瓦（电））。另外，加拿大有两个闲置机组 — 布鲁斯 1 号和 2 号机组（各为 772 兆瓦（电））重新并网。

2. 2012 年仍然可以感受到福岛第一核电站事故的影响，开工新建反应堆总数相对较少。2012 年有 7 座反应堆开工建设，它们是：中国福清 4 号机组、石岛湾 1 号机组、田湾 3 号机组和阳江 4 号机组；大韩民国新蔚珍 1 号机组；俄罗斯联邦巴尔提斯克 1 号机组和阿联酋巴拉卡 1 号机组（图 A-1）。虽然超过了 2011 年的数字，但这远远少于 2010 年。当年，自 2003 年以来的稳定增长达到了顶峰，有 16 座反应堆开工建设。

² 1 吉瓦（电）相当于 10 亿瓦（电）。

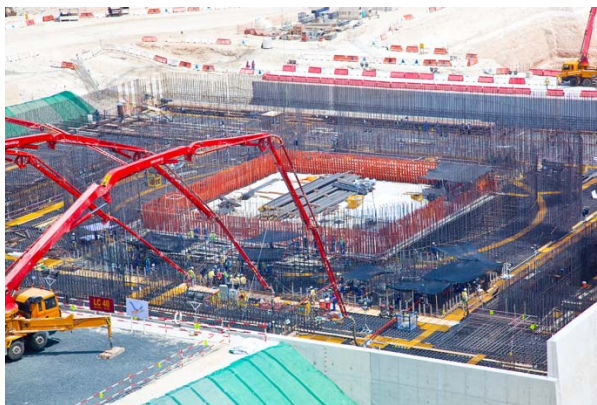


图 A-1. 阿联酋巴拉卡 1 号反应堆正在建设（照片来源：阿联酋核能公司）。

3. 另一方面，2012 年正式宣布永久关闭的反应堆只有三座：加拿大根蒂莱 2 号反应堆以及英国的奥尔德伯里 A1 号反应堆和威尔法 2 号反应堆。这三座反应堆已分别运行了 30 年、45 年和 41 年。这一数字远远少于 2011 年关闭的 13 座反应堆。

4. 截至 2012 年 12 月 31 日，在建反应堆有 67 座，这是个相当大的数字（图 A-2）。和往年一样，扩建以及近期和长期增长前景仍以亚洲尤其是中国为中心（参见表 A-1）。在建反应堆总数中，不少于 47 座在亚洲；同样在近期已并网发电的 48 座新反应堆中，有 38 座在亚洲。



图 A-2. 大韩民国的新古里 3 号反应堆正在建设。

5. 2012 年，美国 30 年来第一次为在沃格特和维西萨默核电站建造和运行四台 AP1000 机组颁发了许可证。

6. 世界各地对现有核电厂的长期运行仍然抱有兴趣。2012 年 5 月，在美国能源部和核管理委员会（核管会）赞助下，原子能机构在美利坚合众国犹他州盐湖城组织了第三次核电厂寿期管理国际会议。超过 350 名与会者代表 38 个成员国和三个国际组织出席了会议，讨论了福岛第一核电站事故对核电厂寿期管理和长期运行的影响。

7. 2012 年，许多国家仍继续保持了在运反应堆提高出力和更新或展期运行许可证的趋势。在法国，法国核安全管理局批准比热核电厂 2 号机组运行许可证满 30 年后展期 10 年，这是获得这类许可的法国第三台机组。在英国，核退役管理局得到允许，继续运行威尔法核电厂 1 号机组到 2014 年 9 月，但要从 2 号机组转移部分乏燃料。在美利坚合众国，核管理委员会（核管会）将流浪者和哥伦比亚核电厂机组运行许可证又展期了 20 年，使得全国许可证获准展期总数自 2000 年以来达到 73 个。此外，还有 13 项许可证展期申请目前正在审查中。而且，2012 年，六项提高出力申请获美国核管会批准，16 项提高出力申请目前正在审查中。

8. 受反应堆老化的影响，至少暂时关闭了两座反应堆。比利时多伊尔 3 号反应堆在按计划停堆过程中，进行了超声波在役检查，检查反应堆压力容器是否有堆焊层下裂纹。检查没有发现堆焊层下缺陷，却发现了大量近层状迹象，主要集中在上下堆芯段筒体。9 月对蒂昂热 2 号反应堆进行了类似检查，发现了类似迹象，但程度较轻。结果，多伊尔 3 号和蒂昂热 2 号反应堆截至年底依然为冷停堆，同时电力公司进行了工程评价，以确定是否能让其中任一反应堆安全地恢复运行。

9. 在比利时，由于多伊尔 3 号和蒂昂热 2 号反应堆出现了异常大量近层迹象，联邦核控制机构已组建了一个国际专家小组，涵盖领域包括反应堆压力容器技术、无损检验、断裂力学、ASME XI 程序评价、确定性安全评定和概率安全评定。

10. 在日本，2012 年 7 月重新启动了大井核电厂 3 号和 4 号机组，成为 2011 年 3 月福岛第一核电站事故后首批恢复运行的两个机组。有关日本核电未来的辩论在这一年一直在进行。12 月，自由民主党赢得全国大选，新任首相安倍晋三宣布，未来几年，政府将审查国家能源结构，重新审视前任政府宣布的核能政策。

11. 核电仍然是那些能源需求日益增长的国家一个增加电力生产的重要选择。2012 年，计划引进核电的国家都采取了重要措施。2012 年 7 月 18 日，阿联酋成为 27 年来第一个开建本国首座核电厂的国家。在获得联邦核监管局的建造许可证之后，阿联酋核能公司浇筑了第一罐混凝土。巴拉卡 1 号机组预计于 2017 年投入运行，而另外三个机组则计划于 2020 年投入运行。

12. 其他几个国家在 2012 年也为建设其首座核电厂采取了切实措施。2012 年 6 月，白俄罗斯接待了“综合核基础结构评审”工作组，其工作组的结论是白俄罗斯正在为核电计划做好充分准备。白俄罗斯 2012 年 7 月与俄罗斯联邦的国营原子能建设出口公司签署了一份合同，以开展场址工作和建造两座水冷和水慢化动力反应堆（水堆）机组。土耳其也在推进计划，于 2010 年签署了一份合同，在阿库尤场址建造四个水堆 1200 机组。土耳其还在 2012 年大会上宣布，正筹划在锡诺普场址兴建第二座核电厂，目前正与供应商谈判。还有一些国家也确认，有意继续制订国家核电计划；这些国家一直在建立基础结构，并正考虑可能的合同安排。其他几个成员国正在积极为核电计划做准备，但还没有最后决定是否继续执行计划。

13. 除了白俄罗斯，2012 年还进行了另外两次“综合核基础结构评审”工作组访问，一次到约旦，一次到越南。对约旦的“综合核基础结构评审”工作组访问于 1 月份进行，是审查该国行动计划的后续工作组访问，目的是为了响应 2009 年 8 月第一次“综合核基础结构评审”工作组访问时提出的建议。需要指出的是，约旦自 2009 年以来已取得了进展，特别是在核电厂项目相关活动方面。12 月成功执行了对越南的“综合核基础结构评审”工作组访问。

14. 原子能机构的“综合核基础结构评审”工作组访问是支持可持续能源发展整体工作的一部分。除了“综合核基础结构评审”工作组访问，原子能机构还帮助感兴趣的成员国提高自己分析和规划国家能源系统，对于那些正在运行或已经规划了核电计划的国家，则提升其制订核能系统长期战略规划的能力。2012 年，超过 125 个成员国使用了原子能机构的国家能源系统分析和规划工具。来自 69 个国家的 650 多名能源分析人员和规划人员接受了使用这些工具的培训。在核能系统长期战略规划方面，原子能机构的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”提供了一种基本方法、其他工具以及开展“核能系统评定”的培训和援助。2011 至 2012 年，白俄罗斯、印度尼西亚、哈萨克斯坦和乌克兰都在开展或已启动“核能系统评定”。

15. 原子能机构通过与世界各地的国家中心合作，发挥其培训援助的作用。今年 7 月，原子能机构与韩国电力公司国际核研究生院签署了一项实际安排。韩国电力公司国际核研究生院的使命是促进外国学生和员工进入韩国和平利用核能的教育和培训体系。实际安排为国际学生的招收、课程和研讨会及外展计划运作方面的合作奠定了基础。2011 年 10 月，原子能机构与中国国家原子能机构就核电厂建设领域的合作签署了一项实际安排。该安排加强了原子能机构与中国核电建设国际培训中心之间的合作，以确保安全建设新的核电厂。

16. 正在运行的商业反应堆中，约 82%属轻水慢化和冷却堆；11%属重水慢化重水冷却堆；3%是气冷堆；还有 3%为水冷却石墨慢化堆（图 A-3）。两座反应堆属于液态金属慢化和冷却堆。

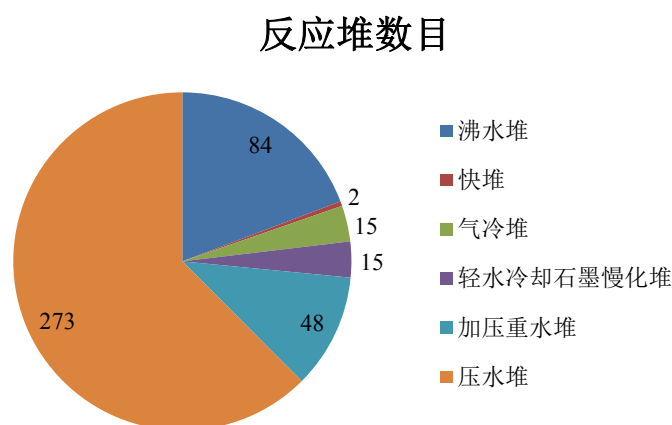


图 A-3. 当前的反应堆类型分布情况。

17. 虽然核工业历来追求规模经济，但对中小型反应堆的兴趣却越来越浓，部分是因为随着时间的推移它们允许规模较小但更加灵活的增量投资。“小型”是指低于 300 兆瓦（电）。“中型”指在 300 兆瓦（电）和 700 兆瓦（电）之间。大约有 45 个革新型中小型反应堆概念处在研发阶段。以下几段介绍了其中一些概念设计。

18. 阿根廷正在设计 CAREM-25 反应堆，即一种小型一体化加压轻水堆，所有一回路部件都置于反应堆压力容器内，电输出功率为 150—300 兆瓦（电）。2011 年 9 月开始进行 27 兆瓦（电）CAREM 原型厂的场址挖掘工作。

19. 在中国，中国核工业集团公司正在开发 ACP100，即也可用作供热和海水淡化的 100 兆瓦（电）小型综合模块式先进压水堆。它同时也在开发 ACP600，即适合较小容量电网的 600 兆瓦（电）双回路先进压水堆。

20. 在法国，法国海军造船公司正在开发 Flexblue，即一种 160 兆瓦（电）小型可移动模块式设计。这种水冷堆建在海床上，采用舰船用海上非能动核技术，以利用海洋这个无限和永远可利用的热阱。

21. 日本开发了一座 350 兆瓦（电）轻水堆，采用一体化一回路系统，称作一体化模块式反应堆。许可证审批之前须进行验证试验、组件和设计方法研发以及基本设计开发。日本还一直在开发 4S 型反应堆——一种非厂内换料液态钠冷快堆。该设计有两种可供选择的电输出水平：30 兆瓦（热）和 135 兆瓦（热）。

22. 大韩民国的系统一体化模块式先进反应堆设计热容量为 330 兆瓦（热），用于海水淡化。2012 年取得了国家核安全委员会的标准设计批文。

23. 俄罗斯联邦正在建造两座用于电力和工艺热联供的 35 兆瓦（电）KLT-40S 船装反应堆。KLT-40S 基于商用 KLT-40 船舶推进装置，是一种为核破冰船提供动力的先进反应堆变体。8.6 兆瓦（电）的 ABV-6M 正处在详细设计阶段。这是一种一次冷却剂自然循环的一体化加压轻水反应堆。正处在详细设计阶段的 8.6 兆瓦（电）RITM-200 是一种用于核破冰船的强制循环一体化反应堆。俄罗斯联邦还计划于 2013 年建造若干台 SVBR-100 机组。SVBR-100 是一种革新型小型模块化快堆，以铅铋共晶合金为冷却剂，输出功率为 100 兆瓦（电）。

24. 美利坚合众国正在发展四种一体化中小型压水堆：mPower 反应堆、NuScale 反应堆、西屋中小型堆和 Holtec 公司 SMR-160 中小型堆。mPower 反应堆由 2—6 个 180 兆瓦（电）模块组成。NuScale 电力公司设想了一种最多由 12 个 45 兆瓦（电）模块组成的核电厂。西屋公司的中小型堆是一种集非能动安全系统和经过证明的 AP-1000 部件为一体的 225 兆瓦（电）概念设计。同时还开始设计一种较新的中小型堆，即 Holtec 公司 SMR-160 中小型堆。这是一种 160 兆瓦（电）反应堆，依靠自然对流，从而消除对冷却泵的需求以及对外部电源的依赖。通用电气公司-日立公司正在开发动力堆革新型小型模块反应堆，这是一个 311 兆瓦（电）液态金属冷却快中子增殖堆，特点是有作为地震隔离装置的地下封隔和非能动气冷最终热阱。

25. 在印度，巴巴原子研究中心正在开发的 304 兆瓦（电）先进重水堆（AHWR）处于详细设计阶段。该反应堆将采用低浓铀和钍混合氧化物燃料，并纳入垂直压力管和非能动安全设施。卡尔帕卡姆的 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆（PFBR-500）处于最后建造阶段，计划于 2013 年第一季度进行启动调试。印度还有四座 700 兆瓦（电）加压重水堆和一座 500 兆瓦（电）快中子增殖堆，目前正在建设中。

26. 虽然电力生产是今天在运反应堆的最主要功能，但其中也有一些反应堆目前还用于海水淡化、工艺热供应和地区供热（图 A-4）。未来可能实现的其他非电力应用包括氢生产，一是用来提升油砂等低质石油资源，同时抵消与蒸汽甲烷重整有关的碳排放；二是用来支持基于生物质、煤或其他碳源的合成液体燃料的大规模生产；三是直接作为车燃料，最可能用于轻型插电式混合动力氢燃料电池汽车。

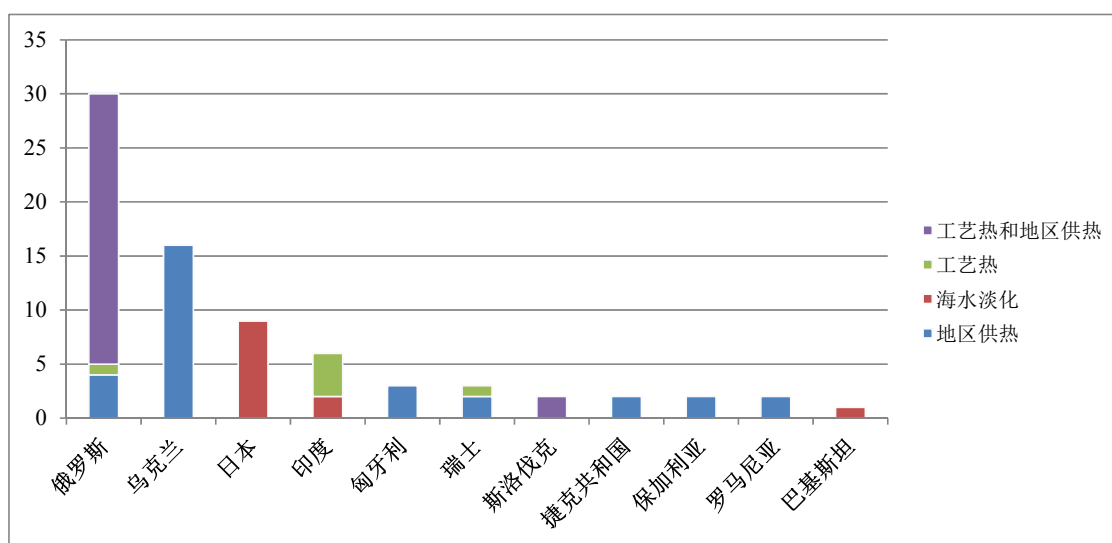


图 A-4. 目前用于非电力生产和电力生产的反应堆数目。

表 A-1. 全世界在运和在建核动力反应堆（截至 2012 年 12 月 31 日）^a

国 家	在运反应堆		在建反应堆		2012 年供应的核电量		截至 2012 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	2	935	1	692	5.9	4.7	68	7
亚美尼亚	1	375			2.1	26.6	38	4
比利时	7	5 927			38.5	51.0	254	7
巴西	2	1 884	1	1 245	15.2	3.1	43	3
保加利亚	2	1 906			14.9	31.6	153	3
加拿大	19	13 500			89.1	15.3	634	5
中国	17	12 860	29	28 844	92.7	2.0	141	7
捷克共和国	6	3 804			28.6	35.3	128	10
芬兰	4	2 752	1	1 600	22.1	32.6	135	4
法国	58	63 130	1	1 600	407.4	74.8	1874	4
德国	9	12 068			94.1	16.1	790	2
匈牙利	4	1 889			14.8	45.9	110	2
印度	20	4 391	7	4 824	29.7	3.6	377	3
伊朗伊斯兰共和国	1	915			1.3	0.6	1	4
日本	50	44 215	2	2 650	17.2	2.1	1596	4
大韩民国	23	20 739	4	4 980	143.5	30.4	404	1
墨西哥	2	1 530			8.4	4.7	41	11
荷兰	1	482			3.7	4.4	68	0
巴基斯坦	3	725	2	630	5.3	5.3	55	8
罗马尼亚	2	1 300			10.6	19.4	21	11
俄罗斯联邦	33	23 643	11	9 297	166.3	17.8	1091	4
斯洛伐克	4	1 816	2	880	14.4	53.8	144	7
斯洛文尼亚	1	688			5.2	36.0	31	3
南非	2	1 860			12.4	5.1	56	3
西班牙	8	7 560			58.7	20.5	293	6
瑞典	10	9 395			61.5	38.1	402	6
瑞士	5	3 278			24.4	35.9	189	11
乌克兰	15	13 107	2	1900	84.9	46.2	413	6
阿拉伯联合酋长国			1	1345				
英国	16	9 231			64.0	18.1	1511	8
美利坚合众国	104	102 136	1	1 165	770.7	19.0	3834	8
总计 ^{b, c}	437	372 069	67	64 252	2 346.2		15 246	9

a. 数据来源于原子能机构“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，5028 兆瓦（电）；在建 2 台机组，2600 兆瓦（电）。

核发电量为 40.4 太瓦·小时，占总发电量的 19.0%。

c. 总运行经验还包括意大利（81 年）、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（188 年零 1 个月）的已关闭核电厂。

A.2. 核电的前景

27. 福岛第一核电站事故预计将放缓或延迟而不是逆转核电的增长。原子能机构每年对全球核电的增长发布两种最新预测：低值预测和高值预测。2012 年对高值预测和低值预测所作的更新表明，到 2030 年，核电装机容量的低值预测增长 23%，高值预测增长 100%。但增长率低于 2011 年所作的预测，低值预测尤其如此。

28. 高值预测则假设，当前的金融和经济危机将较快被克服，以往的经济增长率和电力需求将恢复，尤其是在远东。高值预测还假设全球实行严格的气候变化缓解政策。低值预测假设当前的趋势继续，而影响核电的政策基本不变。但并未假设所有国家的核电目标都会实现。这是一种“保守但却看似合理”的预测。预测是在全球而非国家层面做出的。2012 年的低值预测考虑了核电在日本电力结构中所占比例的潜在下降。

29. 在低值预测中，全球核电装机容量到 2030 年增长到 456 吉瓦（电），比前一年预测的水平下降了 9%。在高值预测中，该装机容量到 2030 年增长到 740 吉瓦（电），增长幅度比 2011 年预测的低约 1%。相比以往未考虑福岛第一核电站事故的预测，低值预测下降了 16%，高值预测却出现了较为温和的 8% 的下降。低值预测表明相比福岛事故前预计的增长推迟了 10 年；事故前预测 2020 年实现的装机容量现在预测到 2030 年才能实现。

30. 大部分的增长将发生在已拥有在运核电厂的地区。预测远东出现最强劲的增长，到 2030 年，装机容量将从 2012 年底的 83 吉瓦（电）分别增长到低值预测的 153 吉瓦（电）和高值预测的 274 吉瓦（电）。西欧显示了低值预测与高值预测之间的最大差距。在低值预测中，西欧的核电装机容量从 2012 年底的 114 吉瓦（电）下降到 2030 年的 70 吉瓦（电）。在高值预测中，核电增长到 126 吉瓦（电）。在北美，低值假想方案预测略有下降，从 2012 年底的 115 吉瓦（电）降到了 2030 年的 111 吉瓦（电）。高值预测则预测增长到 148 吉瓦（电）。

31. 有实质性核电计划的其他地区是东欧、中东和南亚。无论低值预测还是高值预测，这些地区核电扩大的水平都比事故前预测的低 2—4 吉瓦（电）。

核电与可持续发展

32. 能源在实现可持续发展目标方面发挥着核心作用。各国在未来数年就燃料和能源技术所作的选择可以极大地决定世界会以多快的速度迈向一个可持续的未来。2012 年 6 月在巴西里约热内卢举行了一个大型国际会议，即联合国可持续发展大会（亦即通称的“里约+20”）。会议审查了自 1992 年联合国环境和发展会议（“地球问题首脑会议”）以来在可持续发展方面所取得的进展，并概述国家、地区和全球各级未来的行动路线。“里约+20”成果文件《我们希望的未来》详细阐述了涵盖单独和集体系列选择的发展路径，并涉及了若干优先问题，包括提供人人享有清洁能源的机会和确保所生产的能源不加剧气候变化。

33. 2012 年 11 月至 12 月在卡塔尔多哈举行了《联合国气候变化框架公约》缔约方大会第十八届会议，同时举行了“京都议定书”缔约方大会第八届会议。“京都议定书”缔约方商定了 2013 年至 2020 年的第二个承诺期。如果没有这一承诺，全球就会没有限制温室气体排放的国际协定，而如果没有对温室气体排放的限制，核电很低的排放就没有任何经济价值。虽然仍会有限制排放的国家或地区（如欧盟）法律，但在更严格、更全面的限制方面的进展就会发生逆转。

34. 由于影响能源选择的因素日益增多，设计出满足发展需求并为所有人提供可持续的现代能源服务的国家适当能源战略的工作正变得日益复杂起来。首先，这需要从社会、经济和环境的影响角度全面评价所有可能的能源供需方案。很多成员国尤其是发展中国家缺乏承担这样一项任务所需的本国专门知识和经验。为弥补这一差距，原子能机构一直在提供技术支持，以帮助建设本国专门知识。其次，低碳能源如核能最大程度减少了能源生产中排出的温室气体，并减轻了气候混乱对发展的负面影响。

35. 在研究能源选择时，不少国家正在考虑将核电作为备选方案。促进人们持续关注核电的因素包括全球对能源的需求不断增长以及对气候变化、化石燃料价格变化无常和能源供应安全的关切。

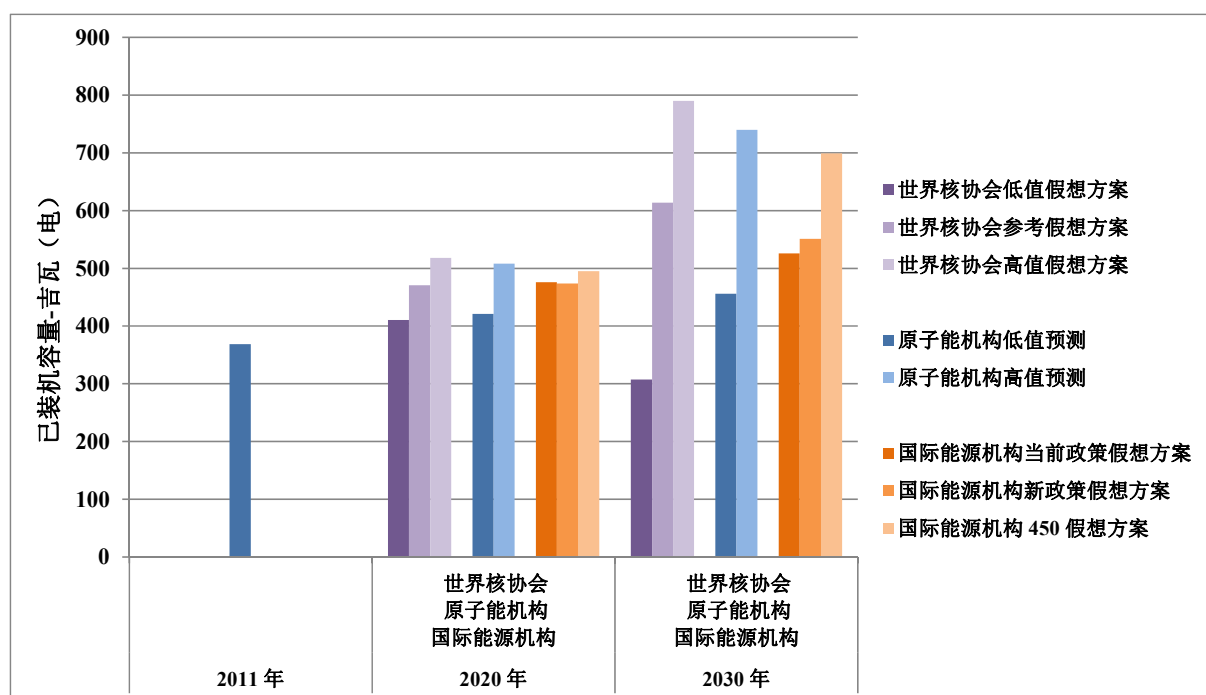


图 A-5. 原子能机构（蓝色）、世界核协会（紫色）2011 年报告《全球核燃料市场》和国际能源机构（橙色）《2012 年世界能源展望》关于核电预测的比较。

36. 经济合作与发展组织（经合组织）国际能源机构也发表了全球核电增长预测。按照国际能源机构《2012 年世界能源展望》，在被称为“新政策假想方案”的中间假想方案下，全球核发电容量将在 2030 年达到约 550 吉瓦（电）。这比国际能源机构一年前的预测约低 7%，相当于原子能机构低值预测中所见的与前一版相比较的类似降幅。图 A-5 对原子能机构 2012 年的预测、国际能源机构 2012 年的假想方案和世界核协会 2011 年的预测进行了比较。与原子能机构和国际能源机构的低值核假想方案一样，这三个组织的高值假想方案产生了类似的结果。

A.3. 燃料循环³

A.3.1. 铀资源和生产

37. 2012 年，原子能机构和经合组织核能机构共同出版了最新版“红皮书”——《2011 年铀资源、生产和需求》。该书估计，可以低于 130 美元/千克铀成本回收的已确定常规铀资源总量为 530 万吨铀。这比上一版（2010 年出版）的估计值低 1.4%。此外，可以介于 130 美元/千克铀至 260 美元/千克铀之间的成本回收的已确定常规资源据估计还有 180 万吨铀，使得可以低于 260 美元/千克铀成本回收的已确定资源总量达到 710 万吨铀。在 2011 年初出现两年来的高点之后，铀的现货价格在福島事故后出现下跌，年底时跌至 135 美元/千克铀。到 2012 年下半年，由于围绕日本核计划出现的不确定性，

³ 有关原子能机构核燃料循环相关活动的更详细资料可见最新的“年度报告”（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2012>）相关部分和 www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste。

现货价格下跌至 110 美元/千克铀左右，但年底时处在 115 美元/千克铀左右。但铀的长期价格仍稳定在 158 美元/千克铀左右。

38. “红皮书”报告的未探明资源总量（预测和估计储量）达到 1043 多万吨铀，与上一版报告的 1040 万吨铀略有增加。成本低于 130 美元/千克铀的未探明常规资源估计为 620 多万吨铀，成本介于 130 美元/千克铀至 260 美元/千克铀之间的还有 46 万吨铀。估计还另有 370 万吨铀的估计储量，其生产成本还未具体确定。

39. 2011 年报告在非洲的博茨瓦纳、马拉维、马里、毛里塔尼亚伊斯兰共和国、纳米比亚、坦桑尼亚联合共和国和赞比亚发现了许多铀矿床附加储量，这些国家的铀勘探活动仍然十分活跃。正在对坦桑尼亚联合共和国姆库尤河项目进行可行性研究。教科文组织世界遗产委员会核准了对坦桑尼亚塞卢斯禁猎区的边界变更，以作为发展姆库尤河铀矿场址的一个步骤。但潜在的矿井仍须受 Uranium One 公司采矿许可证申请的支配。2012 年还报告哥伦比亚、圭亚那、巴拉圭、秘鲁和瑞典发现了更多资源或新资源。

40. 非常规铀资源和钍进一步扩大了资源基础。非常规资源包括：与磷酸盐、有色金属矿石、碳酸盐岩、黑色片岩和褐煤伴生的潜在可回收铀；只能从中将铀作为一种少量副产品回收的资源；以及海水中的铀。目前，很少有国家报告非常规铀资源。潜在可回收铀目前的估计量约为 800 万吨铀。铀股份有限公司宣布其利用 PhosEnergy 工艺从磷酸中回收铀的活动示范厂于 2012 年 6 月开始了试验。2012 年 9 月，该公司宣布试验运行取得圆满成功，在这一过程中回收了 90% 以上的铀。已经委托进行了对 PhosEnergy 工艺的工程研究。

41. 芬兰政府于 2012 年 3 月颁发了从塔尔维瓦拉矿业公司在东芬兰索特卡莫运营的塔尔维瓦拉镍矿中提炼铀作为副产品的许可证（图 A-6）。开始铀生产仍需要有北芬兰区国家行政机构的环境许可证和辐射和核安全管理局的启动许可证。加拿大能源和矿产公司正在铀萃取回路的设计、建造、调试和运行方面向塔尔维瓦拉公司提供技术协助。非常规资源为 2.2 万吨铀。



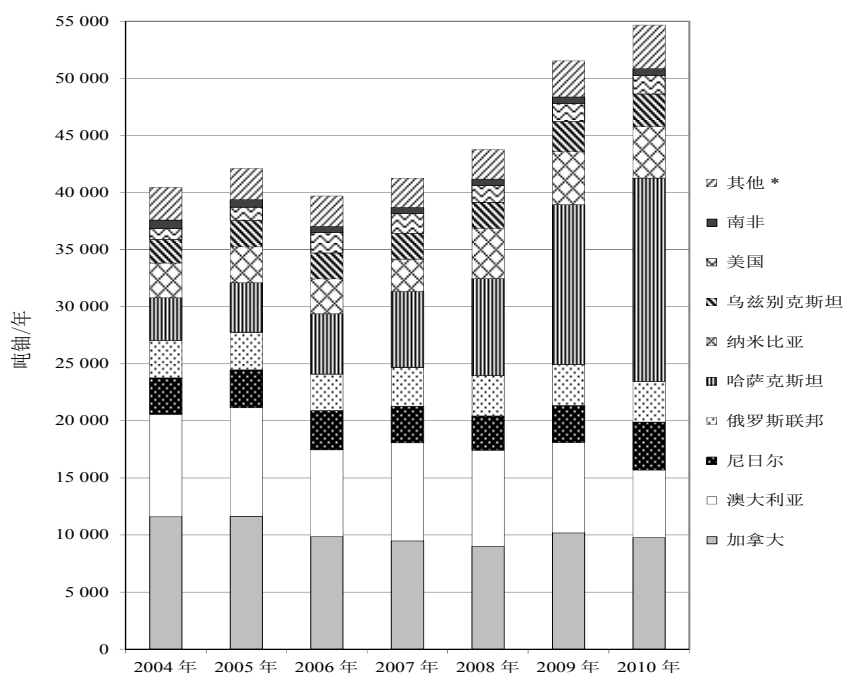
图 A-6. 芬兰塔尔维瓦拉公司的铀项目。

42. 世界范围的钍资源估计约有 600 万至 700 万吨。尽管钍作为燃料一直在进行示范性使用，但在其能够作为铀的替代物加以考虑之前还需要进一步开展大量的工作。在加拿大，坎杜能源公司于 2012 年 8 月与中国核工业集团公司的三个子公司签署了一项扩大合作以开发钍和再循环铀作为新坎杜型堆替代燃料的协议。该协议标志着加拿大与中国于 2008 年开始的合作进入了第三阶段。

43. 海水一直被作为非常规铀的来源进行着广泛的调查。在美国，橡树岭国家实验室报告开发出新的吸附剂材料。用高容量纤维制作的具有高面域特征的席垫先经过辐照，然后与具有铀亲和性的化合物产生化学反应。这种纤维产生高出五倍的吸附容量，吸取得更快，选择性更高。亚拉巴马大学的科学家正在利用基于甲壳质的纤维进行试验，这种甲壳质是一种可从虾壳中获取的长链生物聚合物。

44. “红皮书”报告了直到并包括 2010 年的全球勘探和矿山开发费用数据。2010 年的费用总额为 20.76 亿美元，比上一版“红皮书”报告的 2008 年的数字增加了 22%。

45. “红皮书”中报告的最近一年即 2010 年的铀产量为 54 670 吨铀（图 A-7）。澳大利亚、加拿大和哈萨克斯坦的产量占该产量的 62%。这三个国家加上纳米比亚、尼日尔、俄罗斯联邦、美国和乌兹别克斯坦共占到总产量的 92%。世界核协会估计 2011 年的产量为 54 610 吨铀，2012 年为 52 222 吨铀。



注：印度、纳米比亚、巴基斯坦和罗马尼亚的数字属于估计值。

图 A-7. 全球最新铀产量（来源：《2011 年铀资源、生产和需求》）。

46. 原地浸出⁴ 2009 年超出了作为主要生产方法的地下开采，原地浸出产量占世界总产量的比例预计今后将继续增加。2012 年，哈萨克斯坦的若干原地浸出矿开始扩大，该国的年产量增加了约 2250 吨铀。

47. 近年来只有几座铀矿开始生产（如 2011 年在澳大利亚和 2010 年在尼日尔）。在俄罗斯联邦黑格丁，自 2010 年以来一直在进行原地浸出生产中心的建设。铁路基础设施已经实现现代化，一个新处理厂和硫酸生产设施已经竣工。到 2018 年，该中心将拥有每年 1800 吨铀的生产能力。在纳米比亚，帕拉丁公司的蓝格·海恩里希矿第三阶段扩建已于 2012 年完成，年产量增加到 2000 吨铀。第四阶段扩建将使年产量进一步增加到 3900 吨铀。由于目前的市场条件，阿雷瓦集团公司已经搁置了对纳米比亚特雷科皮矿的开发工作。

48. 在澳大利亚，2012 年 10 月，昆士兰州政府解除了玛丽·凯瑟琳矿于 1982 年停止生产以来阻止在该州开采铀矿的禁令。在南澳大利亚，Quasar 资源公司宣布将于 2013 年在四里东西两个矿床开始原地浸出采矿作业。2012 年 8 月，必和必拓公司宣布将对奥林匹克坝露天矿扩建项目的资本密集度较小的替代设计进行调查，以提高项目的经济性。其结果是，该公司无法在双联合同截止日期即 2012 年 12 月 15 日前批准奥林匹克坝扩建项目。在西澳大利亚，Toro 能源公司的威卢纳铀矿得到了州政府的最终环境审批。

49. 在加拿大，阿雷瓦资源公司于 2012 年 8 月获得了中西部矿床项目的环境审批。该项目涉及开发一个露天矿、建设一条连接中西部开发与麦克柯林湖的现有作业的专用运输道路以及提高位于麦克柯林湖的 JEB 选冶厂的生产能力，以适应对中西部矿石计划的选冶进度。

50. 在美国，Uranerz 能源公司在怀俄明州尼科尔斯牧场的原地浸出作业的建设工作于 2012 年 8 月开始进行。该公司于 2012 年 11 月宣布已经取得了建设和运行尼科尔斯牧场矿山所需的全部监管批文和许可证。2012 年 10 月，Ur-能源公司的失溪铀矿项目获得了最终监管审批。铀能源公司也获得了着手开发南德克萨斯州戈利亚德原地浸出铀矿项目所需的所有许可。但仍然需要取得含水层免管⁵，然后才能启动铀回收活动。

⁴ 传统（即地下）采矿作业首先将矿石从地下挖出，然后对其进行处理，以便取出所寻找的矿物。原地浸出作业是将矿石留在原地并通过以下方法从中获取矿物：利用浸出液将矿石溶解并将液体抽运到地表，然后便可从液体中回收矿物。因此，只有有限的地表扰动，并且不产生任何尾矿或废石。

⁵ 允许在饮用水供给系统也共享的地质层各部分进行原地浸出矿物开发的法律授权是美国联邦《安全饮水法》的一个重要组成部分。美国环境保护署必须在任何原地浸出回收活动发生前对每一个矿址签发含水层免管证明。

51. 据估计，2012 年的铀产量仅涵盖反应堆 67 990 吨铀估计铀消费需求的约 77%。⁶ 其余部分由以下五类二次来源提供：军用天然铀库存、浓缩铀库存、乏燃料后处理得到的铀、由来自后处理乏燃料的钚部分替代铀-235 的混合氧化物燃料以及贫化铀尾料再浓缩。按估计的 2012 年消耗率，530 万吨铀的使用期限为 78 年。这与其他商品（如铜、锌、石油和天然气）30—50 年的储量相比还是不错的。

A.3.2. 转化、浓缩和燃料制造

52. 六个国家（加拿大、中国、法国、俄罗斯联邦、英国和美国）运行着商业规模的将八氧化三铀转化为六氟化铀的工厂。阿根廷、巴西、伊朗伊斯兰共和国、日本和巴基斯坦则运行着小型转化设施。氟化物挥发干法工艺只在美国使用，而所有其它转换设施都使用湿法工艺。全球年总转化能力就六氟化铀而言仍稳定在每年约 7.6 万吨天然铀。但预计在法国（阿雷瓦集团公司 Comurhex II 项目（图 A-8））和美国（霍尼韦尔大都会工程厂）正在建设的新工厂将出现大的变化。当前的转化服务需求总量（假设铀-235 浓缩尾料丰度⁷为 0.25%）每年在 6 万至 6.4 万吨铀之间。哈萨克斯坦国家原子能公司与加拿大能源和矿产公司的一个合资企业——乌尔巴转化设施（哈萨克斯坦一座新的转化设施）——预计将在 2018 年前开始建造。该设施将与其它设施同处在乌斯特卡缅诺戈尔斯克的乌尔巴冶金厂内。生产能力预计为每年 1.2 万吨六氟化铀。



图 A-8. 法国在建的 COMURHEX II 转化设施。预计将在 2013—2014 年逐步启动。

⁶ “世界核动力堆和铀需求”，2012 年 4 月（<http://worldnuclear.org/info/reactors0412.html>）（2012 年 5 月 7 日访问）。

⁷ 该尾料丰度即贫化流中的铀-235 浓度间接决定着为提供特定产品丰度需要对特定数量铀所作的工作量。与固定数量浓缩铀和固定浓缩铀产品丰度有关的尾料丰度的增加降低了所需浓缩的数量，但增加了对天然铀和转化的需求，反之亦然。尾料丰度可以有很大的差别，并将改变对浓缩服务的需求。

53. 全球总浓缩能力目前约为每年 6500 万分离功单位，而每年的总需求将近 4500 万分离功单位。在中国（中核集团公司）、法国（阿雷瓦集团公司）、俄罗斯联邦（国家原子能公司）和美国（美国能源公司和铀浓缩公司）都有商业规模的工厂在运转。铀浓缩公司在德国、荷兰、英国（图 A-9）和美国运行着离心厂。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浓缩设施。



图 A-9. 铀浓缩公司在英国卡彭赫斯特的浓缩设施。

54. 正在建设中的有位于美国的两座利用离心浓缩法的新商业规模浓缩设施：阿雷瓦集团公司鹰石浓缩设施和美国离心分离厂。2012 年 9 月，颁发了将由通用电气-日立的附属公司全球激光浓缩公司建造的美国北卡罗来纳州全尺寸激光浓缩设施建造许可证。预计该厂将能生产 600 万分离功单位/年，并浓缩按重量计铀-235 丰度高达 8%的铀。

55. 阿根廷正在皮尔卡尼耶乌重建气体扩散能力。浓缩服务目前从美国进口。

56. 在法国，欧洲气体扩散公司 1979 年以来一直在运行的乔治·贝斯扩散法浓缩厂于 2012 年 6 月关闭。设在同一地点但所有权构成不同的乔治·贝斯 II 替代了该厂。该厂目前拥有每年 150 万分离功单位的装机容量，并计划在 2016 年前扩大到 750 万分离功单位。

57. 日本核燃料有限公司于 2012 年 3 月开始对青森县六所村经过改进的离心机级联进行商业运行。目前正在讨论将每年 15 万分离功单位的现有浓缩能力扩大至每年 150 万分离功单位以及根据国家原子能公司与东芝公司之间的一项协议利用俄罗斯离心机技术建设一个新浓缩厂的计划。

58. 全球 2012 年现有的总去氟转化⁸能力仍约为每年 6 万吨六氟化铀。

59. 在美国，核管会于 2012 年 10 月向国际同位素氟生产公司颁发了在新墨西哥州建造和运行贫化铀去氟转化设施的许可证。该设施拟称为“氟提取工艺流程和贫化铀转换厂”，将使用该公司拥有专利的氟提取工艺。

⁸ 为了制造浓缩铀燃料，必须将浓缩六氟化铀重新转化为二氧化铀粉末。这是浓缩燃料制造的第一步。它被称为重新转化或去氟转化。

60. 当前对轻水堆燃料制造服务的年需求量仍约为 7000 吨燃料组件中的浓缩铀，但预计到 2015 年将增加到每年约 8000 吨铀。就加压重水堆而言，其需求量为每年 3000 吨铀。大多数类型的燃料目前都有若干相互竞争的供应商。全球燃料总制造能力就轻水堆燃料而言仍约为每年 1.35 万吨铀（燃料元件和燃料棒束中的浓缩铀），就加压重水堆燃料而言约为每年 4000 吨铀（燃料元件和燃料棒束中的天然铀）。就加压重水堆天然铀燃料而言，阿根廷、加拿大、中国、印度和罗马尼亚对铀进行纯化并转化为二氧化铀。

61. 在中国，中核集团公司宜宾燃料元件厂 2012 年的生产能力约为每年 600 吨铀。就中核集团公司设在内蒙古包头为秦山坎杜加压重水堆制造燃料组件的工厂（每年 200 吨铀）而言，正在将其燃料制造能力扩大到每年 400 吨铀。正在包头建设一座为中国 AP1000 反应堆制造燃料的新工厂。此外，2012 年，国核维科锆铅有限公司开始对设在中国南通的一座新的海绵锆生产设施进行调试。这座新厂将生产用于制造核燃料组件包壳管的核级锆，以通过国核维科锆铅有限公司供应中国市场和通过西屋公司供应全球市场。

62. 哈萨克斯坦计划的预定于 2014 年竣工的燃料制造设施是阿雷瓦集团公司与哈萨克斯坦国家原子能公司的一个合资企业，预计拥有每年 1200 吨铀的生产能力。

63. 在乌克兰，在斯莫利诺村附近已经开始建造计划能力为在 2015 年达到每年 400 吨铀的一座 WWER-1000 燃料厂。该设施将由作为俄罗斯联邦和乌克兰之间合资企业的 TVEL 燃料公司建造，乌克兰占其中 51% 的股份。

64. 再循环作业通过利用后处理铀和混合氧化物燃料提供二次核燃料供应。目前在俄罗斯联邦埃列克特罗斯塔利每年为阿雷瓦集团公司生产约 100 吨后处理铀。阿雷瓦集团在法国罗芒工厂的一条生产线每年将后处理铀中约 80 吨重金属制造成法国轻水堆所需的燃料。全球当前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、印度和英国，在日本和俄罗斯联邦则有一些较小型设施。

65. 印度和俄罗斯联邦制造快堆所用的混合氧化物燃料。在俄罗斯联邦，BN-800 快堆混合氧化物燃料制造设施正在热列兹诺戈尔斯克市建造（Krasnoyarsk-26）。俄罗斯联邦还分别在季米特洛夫格勒原子反应堆研究所以及位于奥焦尔斯克的马雅克工厂建设了中试设施。

66. 在其他地方也制造轻水堆所用的混合氧化物燃料。在英国，塞拉菲尔德公司混合氧化物燃料制造厂的生产规模从每年 128 吨重金属减少到 40 吨重金属，2011 年 8 月，核退役管理局宣布对该厂的前景进行了重新评定并将关闭该厂。美国正在建造新的混合氧化物燃料制造设施，以利用多余的武器级钚。全世界目前约有 30 座轻水堆使用混合氧化物燃料。

供应保证

67. 理事会于 2010 年 12 月核准建立原子能机构低浓铀银行。在 2012 年期间，原子能机构秘书处继续致力于建立该银行的财政、法律和技术安排和场址评定工作。该银行将设在哈萨克斯坦乌尔巴冶金厂。成员国、欧洲联盟和“反对核威胁倡议”对设立低浓铀银行的认捐额已经超过了 1.5 亿美元。截至 2012 年底，挪威（500 万美元）、美国（约 5000 万美元）、“反对核威胁倡议”（5000 万美元）和科威特（1000 万美元）已经如数支付了认捐额，欧盟支付了 2500 万欧元认捐额中的 2000 万欧元，与阿拉伯联合酋长国（1000 万美元）的安排正在最后敲定中。⁹

A.3.3. 核燃料循环后端

乏核燃料和核燃料后处理

68. 目前对乏核燃料采取两种不同的管理战略。第一种战略是对燃料进行后处理，以提取可用材料（铀和钚）来制造新的燃料。第二种战略则简单地将乏燃料认为是废物，并进行贮存以待处置。目前，法国、中国、印度和俄罗斯联邦等国家对其大多数乏燃料进行后处理，而加拿大、芬兰和瑞典等其他国家则选择直接处置。大多数国家仍未决定采取哪种战略。它们目前正在贮存乏燃料，并在密切跟踪与上述两种选案相关的发展情况。

69. 将在以下段落简要阐述的 2012 年值得注意的发展包括芬兰泊西瓦公司提交处置库建造许可证申请；加拿大中止征询对乏核燃料处置库和专门技术中心的场址选择有兴趣的社区，因为需要时间对业已提交的 21 份“意向表达书”进行充分作复；美国核未来蓝带委员会提交一份报告建议除其他外，特别是制订一个选择国家核废物管理设施场址的以同意为基础的新方案，并设立一个单独专门执行废物管理计划的新组织。实施该委员会的建议将需要在美国管理核废物的立法方面做出重要改变。

70. 2012 年，所有核动力堆共卸出约一万吨重金属乏燃料。到 2012 年 12 月，全球已卸出的乏燃料累积总量接近 36.05 万吨重金属，其中约 25.07 万吨重金属贮存在反应堆现场或离堆贮存设施。全球卸出的乏燃料累积总量中不到三分之一即约 10.98 万吨重金属已进行了后处理。2012 年，分布在四个国家（法国、印度、俄罗斯联邦和英国）的全球商业后处理能力每年约为 4800 吨重金属。

71. 卡纳斯镇于 12 月被正式选定为西班牙乏核燃料贮存设施的东道场址（图 A-10）。该场址在地质学、地震学、气象学、水文学、场址几何学和与当地人口中心有关的风险方面被认为是合适的。该设施将接受目前在每个西班牙核电厂贮存的乏核燃料组件运输屏蔽容器和范德洛斯核电厂产生的、目前贮存在法国的玻璃固化废物。

⁹ 《2012 年核技术评论》对目前已经确定的其他供应保证机制作了描述。



图 A-10. 将在卡纳斯镇建造的乏燃料贮存设施的直观图。

72. 在印度，卡尔帕卡姆快堆燃料循环设施的建造工作继续进行。为即将建成的原型快中子增殖堆制造混合氧化物燃料细棒的工作目前正在塔拉普尔巴巴原子研究中心的先进燃料制造设施进行。

73. 在日本，日本核燃料有限公司于 2012 年 9 月宣布，它将继续在六所村建造年处理 800 吨重金属的商业后处理厂，该厂的建造曾因 2011 年 3 月 11 日的地震和海啸而被中止。建造工作定于 2013 年 10 月完成。

74. 在大韩民国，韩国原子能研究院于 2012 年 7 月完成了作为高温冶金处理¹⁰氧化物乏燃料的工程规模示范设施一部分的高温工程综合非活性示范设施的建造。高温工程综合非活性示范设施已于 2012 年 8 月开始启动试验，并正在进行后续操作和公用设施系统的运行和功能性能测试，这项工作计划于 2013 年初完成。

75. 在英国，塞拉菲尔德热氧化物后处理厂的现有后处理合同预计将于 2018 年之前完成。核退役管理局已确认该厂将随后关闭并进行退役，而不是开展延寿所需的基础设施发展工作。

放射性废物管理

76. 核技术在能源生产、研究活动、医学和工业应用方面的利用以及遗留的和目前的军用都产生放射性废物。放射性废物的安全管理需要充分的贮存能力，并最终需要进行处置。在世界范围内，各类放射性废物的处置设施不是在运行就是正在开发之中。截至 2012 年 12 月，世界范围内已有 464 个贮存设施和 154 个废物处置设施正在运行¹¹（图 A-11）。

¹⁰ 高温冶金处理系指非水法核燃料后处理方法，其中的材料在高温无水情况下被提取和精炼。

¹¹ 基于各成员国向原子能机构“网基废物管理数据库”提供的资料，可在线访问 <http://newmdb.iaea.org/> 网站。



图 A-11. 荷兰放射性废物管理组织的临时废物贮存设施。

全球存量估计

77. 据报告 2011 年（可提供的最新年份）处于贮存中的全球放射性废物存量约为 6800 万立方米¹²（表 A-2）。到 2011 年已处置的放射性废物的累积量约为 7600 万立方米，其中包括向深井注射了约 2900 万立方米的液体废物和处置了约 4000 立方米的固体高放废物，这些废物主要来自切尔诺贝利。处理过的高放废物年累积量相当恒定，全球范围内每年的平均累积率接近 850 立方米（不包括乏燃料）。

¹² 利用原子能机构“网基废物管理数据库”和有关该数据库中未报告国家的其他来源得出的估计数。

表 A-2. 2011 年全球放射性废物存量估计量（最新数据）¹³

废物分类	贮存 ¹⁴ [立方米]	累积处置量 [立方米]
极低放废物	153 000 ¹⁵	113 000
低放废物	56 663 000 ¹⁶	64 792 000 ¹⁷
中放废物	8 723 000	10 587 000
高放废物	2 743 000	72 000 ¹⁸

来源：“网基废物管理数据库”（2012 年）、正式国家报告和公开可得数据。

国家处置方案的发展

78. 目前已经建造并正在运行针对极低放、低放和中放废物的大量废物处置设施，不久的将来应当开始建造针对乏核燃料的一些处置设施。正在运行的废物处置设施包括深沟处置极低放废物（在法国、西班牙和瑞典）或在干旱地区处置低放废物（在阿根廷、印度、南非、美国）；近地表专设设施处置低放废物（在中国、捷克共和国、法国、印度、日本、斯洛伐克、西班牙、英国和乌克兰）；地下专设设施处置中低放废物（在瑞典和芬兰）；在美国开展的钻孔处置低放废物；以及接收中低放废物的地质设施（在德国和美国）。天然存在的放射性物质废物的处置方案根据国家规章有所不同，范围从深沟处置设施到地下专设设施（在挪威）。

79. 弃用密封放射源的处置方案包括与其它废物一起在适当的设施一并处置，或如在加纳、马来西亚、菲律宾和南非等国正在考虑的那样在专用钻孔中处置。

¹³ 表 A-2 中的数字系估计值，而不是对世界范围内目前管理的放射性废物数量的准确衡算。此外，由于以下因素所致，年年的估计贮存量总是有偏差：(a) 废物管理过程期间质量和体积的变化；(b) 报告方面的变更和成员国对其自身数据作出的更改或纠正；(c) 新成员国加入该数据库。

¹⁴ 废物在贮存期间或处置之前通常要通过各种操作步骤进行处理和整备。因此，放射性废物的质量和体积在处置前管理过程期间是不断变化的。这能够导致每年的估计贮存量出现偏差。

¹⁵ 极低放废物的估计量远少于低放废物的估计量，因为拥有可观废物存量的许多成员国没有定义极低放废物类别。但是，这些成员国有许多目前正在重新评价废物分类定义，以便更好地使其与《放射性废物分类》（原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-1 号，2009 年）中所建议的分类保持一致，因此，这一估计量今后将可能变得更大，而低放废物类别的估计量则相应地减少。

¹⁶ 贮存的低放废物的估计量不包括据报告保持在与周围环境没有隔离的特殊贮存库中的约 4×10^8 立方米液体的低放废物，因为这不符合《国际原子能机构安全术语》（2007 年）中所描述的原子能机构的“贮存”定义。因此，就纳入这一估计量而言，这种废物的状况仍然不确定。

¹⁷ 低放废物和中放废物累积处置估计量方面与上一份报告的显著变更系纳入了俄罗斯联邦的估计量所致。

¹⁸ 高放废物的这一体积系俄罗斯联邦所报告的液体处置与乌克兰所报告的被认为是在更加永久性设计/场所或解决方案找到之前临时处置的约 4000 立方米固体放射性废物的合并。乌克兰高放废物处置是对切尔诺贝利核电厂 4 号机组事故紧急净化的结果。

80. 芬兰、法国和瑞典已经为高放废物和（或）乏燃料地质处置设施的许可证审批采取了步骤。

81. 在比利时，比利时放射性废物和浓缩易裂变材料管理局为其已规划的在代瑟尔的近地表处置编写的安全论证文件是经合组织核能机构组织的一个国际同行评审的主题；2012年9月分发的这次评审的结论总体上是积极的。

82. 在加拿大，正在考虑发展三个地质处置设施：用于处置来自安大略电力公司的低放废物和中放废物的布鲁斯场址设施；正在考虑用于处置低放废物和中放废物的乔克河实验室场址；以及尚未确定的供加拿大乏核燃料处置库和专门技术中心使用的第三个场址。布鲁斯场址设施的工程和设计工作已部分完成。加拿大原子能有限公司目前正在调查乔克河实验室场址的适用性。至于第三个场址，该国核废物管理组织已于2012年9月30日暂停了希望参与加拿大乏核燃料处置库和专门技术中心场址选择过程的社区“表达意向”阶段，以便集中精力对已经在该日或之前正式表达意向的社区开展所需的详细研究。

83. 中国管理中低放废物的中期计划是在2020年之前有五个地区处置场址投入运行，总处置容量约为100万立方米。其中位于甘肃省西北玉门附近和广东省南部大亚湾核电站附近的两个场址正在运行，目前的容量分别为2万立方米和8万立方米，而且今后有可能扩容到20万立方米和24万立方米。第三个场址在中国西南部，目前正在建造。位于华北和华东地区的余下两个场址的工作尚未启动。

84. 在芬兰，芬兰核废物管理专家组织正在推动昂卡罗地下研究设施的建造工作。该组织于12月向芬兰政府提交了关于昂卡罗场址的处置库建造许可证申请，并打算在2020年开始最终处置。

85. 在法国，国家放射性废物管理机构正在准备将于2025年调试的中放废物和高放废物可逆处置项目即“地质贮存工业中心（Cigéo）项目”的工业阶段，并且开展了提交许可证申请之前的可行性审查和正式的公众利益相关者参与过程。国家放射性废物管理机构还出版了2012年版国家放射性废物存量，包括现有国家废物的表征、体积和贮存地点等情况。

86. 在德国，政府于2012年11月宣布，正在戈莱本原子废物贮存设施开展的使该临时场址永久化为目的的所有勘查和调查工作将停止，直到就戈莱本的未来发展方向即进一步勘探、暂停或关闭等问题做出政治决定。

87. 在设计拟接收核电厂作业产生的4万立方米中低放废物的匈牙利巴塔帕蒂处置设施，已经完成了通向处置库的斜坡入口匝道（图A-12）、服务隧道以及首批两个处置室的建造工作。在12月举行的启用典礼上，用混凝土包封的由九个废物桶组成的第一个废物处置包被置入该设施中（图A-13）。作业概念规定在废物被放入现有处置室的时候将同时建造更多的处置室。



图 A-12. 匈牙利巴塔帕蒂国家放射性废物处置设施入口隧道。



图 A-13. 在匈牙利巴塔帕蒂处置设施放置第一个废物处置包。

88. 在大韩民国，旨在用于在竖井中处置 10 万桶中低放废物的庆州处置设施的建造工作目前预定于 2014 年 6 月完成。

89. 立陶宛放射性废物管理机构完成了场址调查，并正在考虑已规划的近地表处置设施的设计方案，该设施具有处置约 10 万立方米短寿命中低放废物的能力。

90. 在俄罗斯联邦，政府已批准关于放射性废物管理的三个基本文件，以支持在核能、净化作业、受污染场址治理以及具有高含量天然放射性核素的矿物和有机物质的萃取和加工领域的活动。建造放射性废物处置设施的工作也已启动。在西伯利亚克拉斯诺亚尔斯克地区尼兹涅坎斯克花岗岩地块（500 米深处）建造一个地下实验室的设计开发工作正在进行。该实验室将研究在该场址处置长寿命高放和中放废物的可能性。该处置设施将在 2021 年开始运行。此外，俄罗斯联邦西北部一座处置低放废物和长寿命中放废物的处置设施的初始设计工作（地质学和工程学研究）已经完成。该国第一座离堆商业干法贮存设施已在 2011 年开始运行，这是克拉斯诺亚尔斯克热列兹诺戈尔斯克采矿化学联合企业场址干法贮存的第一阶段。

91. 2012 年 6 月，核能机构任命的一个国际小组完成了对瑞典核燃料和废物管理公司提交的在奥斯卡港建造一个地质处置和封装厂许可证申请的积极审查，该公司希望这座工厂在 2025 年之前开始运行。

92. 在切尔诺贝利事故之后开发的乌克兰布尔雅克沃克中低放废物处置设施是根据欧洲委员会资助的一个重建项目，该项目计划在其目前约 70 万立方米容量基础上再扩容 12 万立方米。

93. 在美国，得克萨斯州安德鲁斯县一个新的放射性废物处置设施于 2012 年 4 月开始运行。该设施接收来自得克萨斯州、佛蒙特州和美国联邦政府的低放废物。这种浅地沟型处置设施包括两个毗邻的类似设计的处置库，一个用于处置商业废物，另一个则用于处置联邦政府的废物。

94. 已开展了一些成功的作业，从用户的工作场所移走弃用密封放射源，并通过将它们或移至国家放射性废物贮存设施或具备适当贮存条件的另一个机构而使之处于控制之下。在原子能机构的直接援助下，在洪都拉斯回收了包括一台陈旧 γ 辐照器在内的 125 个弃用密封放射源，并将其转移至国家贮存设施。同样在原子能机构的直接援助下，2012 年 2 月在哥斯达黎加回收了两台 γ 辐照器，对其进行了去污、表征、包装并将其从受污染的辐射舱运至一个具有更安全贮存条件的机构。为了确保更安全的长期贮存，2012 年 11 月在洪都拉斯和哥斯达黎加对若干弃用的镭-226 和铯-137 近距离治疗源进行了整備。此外，2012 年 9 月还与美国“防扩散和裁军基金”和“减少全球威胁倡议”合作，在原子能机构的直接援助下成功地完成了将载有 15 个弃用高活度放射源的一台印度产辐照器从洪都拉斯返还的工作。

遗留放射性废物

95. 为消除冷战后的核遗留问题正在做大量的工作。原子能机构的俄罗斯联邦国际核遗留问题倡议专家联络组在过去 15 年来已证明是促进交流信息和协调俄罗斯联邦核遗留计划的一个高效论坛。2012 年，该专家联络组最重要的成就之一是 11 月对一台有液态金属冷却剂的潜艇反应堆进行了成功的燃料拆卸。俄罗斯联邦在该专家联络组伙伴的大力帮助下，对 200 艘退役核潜艇中的大多数潜艇进行了燃料拆卸和拆除作业，仅留下五艘潜艇仍未拆除。燃料拆卸后的潜艇反应堆装置目前正处在进行密封的过程中，并已将它们置于一个长期贮存设施中。这些设施中的一个设施已于 2011 年在俄罗斯联邦西北部建成。第二个设施于 2012 年 5 月在俄罗斯联邦远东落成，并于 9 月接收了第一个反应堆部件进行贮存（图 A-14）。一个类似的计划正在美国开展，已拆除 114 艘核潜艇和核舰船。



图 A-14. 正在拆除一艘核潜艇。

96. 安全管理和移来自前海军基地的乏核燃料和废物目前是该专家联络组的优先事项。两个地区放射性废物整备和贮存中心正在俄罗斯联邦西北和远东进行建造。回收沿俄罗斯联邦海岸用于航行目的的大功率放射性同位素热电发生器（如灯塔用电池）的国际计划也在成功地实施。目前，该国 1007 个放射性同位素热电发生器大多已被回收，余下的只有 75 个。

放射性废物管理：处理福岛第一核电站事故

97. 福岛第一核电站事故造成了与管理位于现场以及散落在场址外广大区域的放射性废物有关的巨大挑战（图 A-15）。现场废物包括反应堆和汽轮机厂房内大量严重受污染的盐水，以及主要含铯放射性核素但也含高浓度的其他易裂变产物和可能的痕量超铀元素的残骸、砍伐的树木、土壤和金属等各种固体废物。场外废物包括海啸造成的破坏所产生的大量受污染的残骸，以及按计划在受放射性铯释放影响最严重的城镇、农田、林地和水域进行大规模净化/治理活动所致数量非常庞大的受污染材料（图 A-16）。

98. 目前正在通过当地和国际协作建立的净化设施中持续不停地处理反应堆和汽轮机厂房内累积的高放射性水以去除铯。经过处理的水贮存在罐中或在除盐后复用于冷却破损的堆芯。截至 2012 年 11 月，经过处理的水的累积体积约为 50 万立方米。已安装了去除铯以外放射性元素的多种核素去除设施，并正在为启动运行做准备。这一领域当前的主要挑战包括数量非常庞大的已处理水的贮存和导致将要处理和贮存的受污染水数量总在不断增加的地下水持续侵入这些建筑物的问题。现场累积的固体废物一直贮存在临时贮存设施中，目前正在进行取样和分析，以确定这些废物的特征和进一步管理的方案。

99. 将燃料碎片从破损反应堆中去除（“燃料拆卸”）涉及许多技术挑战。这项工作将需要在反应堆建筑物内极高辐射剂量条件下去做。因此，燃料拆卸将需要开发和部署专用工具、远程操作设备和使用先进技术。将需要开发用于仔细检查污染状况的远程控制装置或用于去污活动（如洗涤、净化/抽真空、刷涂/表层去屑和刷漆/喷洒去污剂）的远程操作和机器人技术，以防止对工作人员的不必要照射。计划通过国际专家和研究单位之间的多边合作进行这类装置和技术的研究与开发。

100. 《2011 年处理放射性污染特别措施法》于 2012 年 1 月 1 日在日本全面生效。正在根据这一法律开展场外去污的规划和实施以及废物的收集、转移、临时贮存和最终处置工作。目前正在总计 104 个县开展去污工作。这包括福岛第一核电站周围 20 公里范围内的区域或年辐射剂量超过 20 毫希沃特的地区。截至 2012 年 8 月，104 个县中有 78 个县完成了去污工作。此外，还在加大努力确保临时贮存设施的安全，目标是在一年时间内为设施找到一个场所，并在三年内开始运行。预期将从临时贮存开始的 30 年内进行最终处置。



图 A-15. 2011 年 10 月东京电力公司福岛第一核电站。



图 A-16. 2011 年 10 月伊达市富成小学校示范治理项目去除土壤的临时贮存。

退役

101. 截至 2012 年 12 月，世界范围内共有 142 座动力堆被永久关闭。这包括 2012 年宣布进入退役阶段或被永久关闭的 18 座动力堆。总计有 16 座动力堆目前已被完全拆卸，还有 52 座反应堆处于正在拆卸的过程中，59 座被保持在安全关闭模式或正等待开始最终拆除，三座已经被埋葬，另外 12 座尚未确定具体的退役战略。

102. 有 400 多座研究堆和临界装置目前已退役或正处于拆除过程中。有数百个其他核设施如放射性废物管理或核燃料循环设施等已退役或正在进行拆除。

103. 法国、西班牙、英国、乌克兰和美国在实施动力堆退役方面取得了显著进展。切尔诺贝利核电厂第四台机组新安全封隔设施正在进行的组装和西班牙何塞·卡夫雷拉核电厂核反应堆内部构件¹⁹的拆除都是技术成就的实例（图 A-17 和图 A-18）。然而，虽

¹⁹ “核反应堆内部构件”是反应堆压力容器内的主要结构，具有一种或多种功能，例如：支承堆芯、保持燃料准直、导引一次冷却剂流动、为反应堆压力容器提供辐射屏蔽和导引堆芯内仪器仪表。

然在若干国家取得了进展，但还需要在核基础结构欠发达的一些成员国加快退役项目的实施。



图 A-17. 何塞·卡夫雷拉核电厂（右）核反应堆内部构件（左）正在拆除（照片来源：西班牙国家放射性废物管理公司）。



图 A-18. 切尔诺贝利核电厂第四台机组新安全封隔设施正在组装（照片来源：切尔诺贝利核电厂）。

104. 仍然存在着相当大的退役挑战，如资金的可得性和废物处置方案以及获得适当的技术和人力资源等，特别是就发生严重事故后被关闭的核电厂的情况而言尤其如此。切尔诺贝利正在进行的退役和福岛第一核电站今后的退役就是这类核设施最明显的例子。缺乏适当的法律和监管框架在一些国家也是一个重要的限制因素。

105. 在日本，2012 年 8 月对福岛第一核电站退役的中长期路线图进行了更新。拟订了由核应急响应总部政府-东京电力公司中长期响应委员会发布的《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的进展状况》²⁰，旨在描述该电站退役及其相关放射性废物管理所需开展的所有活动的框架（图 A-19）。

²⁰ http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20120625_01a.pdf.

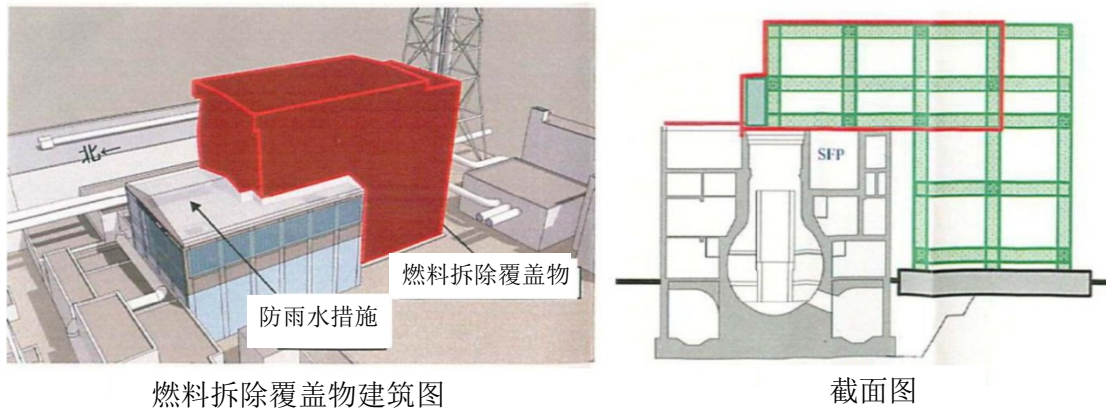


图 A-19. 从福岛第一核电站 4 号机组乏燃料水池拆除乏燃料的保护性覆盖物。

A.4. 安全

106. 2012 年，对核电厂安全的讨论主要侧重于确定和借鉴可从 2011 年 3 月福岛第一核电站事故中汲取的教训。虽然仍有教训有待汲取，但业已在国家层面和国际层面制订了借鉴从该事故中汲取的初步教训的行动计划，并且该行动计划正在落实之中。由 2011 年 9 月大会通过的原子能机构“核安全行动计划”确定了一个旨在加强全球核安全框架的工作计划。该“行动计划”确定了 12 项主要行动。²¹ 可以进一步汲取教训，并通过对“行动计划”进行更新将其酌情纳入这些行动中。

107. 2012 年，原子能机构召集了三次“行动计划”相关国际专家会议：3 月关于福岛第一核电站事故背景下反应堆和乏燃料安全的国际专家会议、6 月关于核或放射应急情况下增强透明度和提高通讯有效性的国际专家会议以及 9 月关于在福岛第一核电站事故背景下防范极端地震和海啸的国际专家会议。此外，日本与原子能机构共同发起并于 2012 年 12 月 15 日至 17 日举办了福岛核安全部长级大会，这次会议通过在部长一级和专家一级与国际社会共享从福岛第一核电站事故获得的进一步的知识和教训，帮助促进加强了世界范围内的核安全。

108. 从运行角度看，世界范围内核电厂的安全性仍然很高，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-20 显示了每 7000 小时动力堆临界运行发生的非计划紧急停堆或关闭总数。这通常被作为在改进电厂安全方面取得成功的一个指标。如图所示，虽然没有像在 20 世纪 90 年代所达到的那样显著的改进，但近几年一直在实现稳步改进。2010 年至 2011 年的增加与 2011 年 3 月日本地震引起的大量紧急停堆有关。

²¹ 原子能机构“核安全行动计划”文本可见：

http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/GC55Documents/Chinese/gc55-14_ch.pdf。

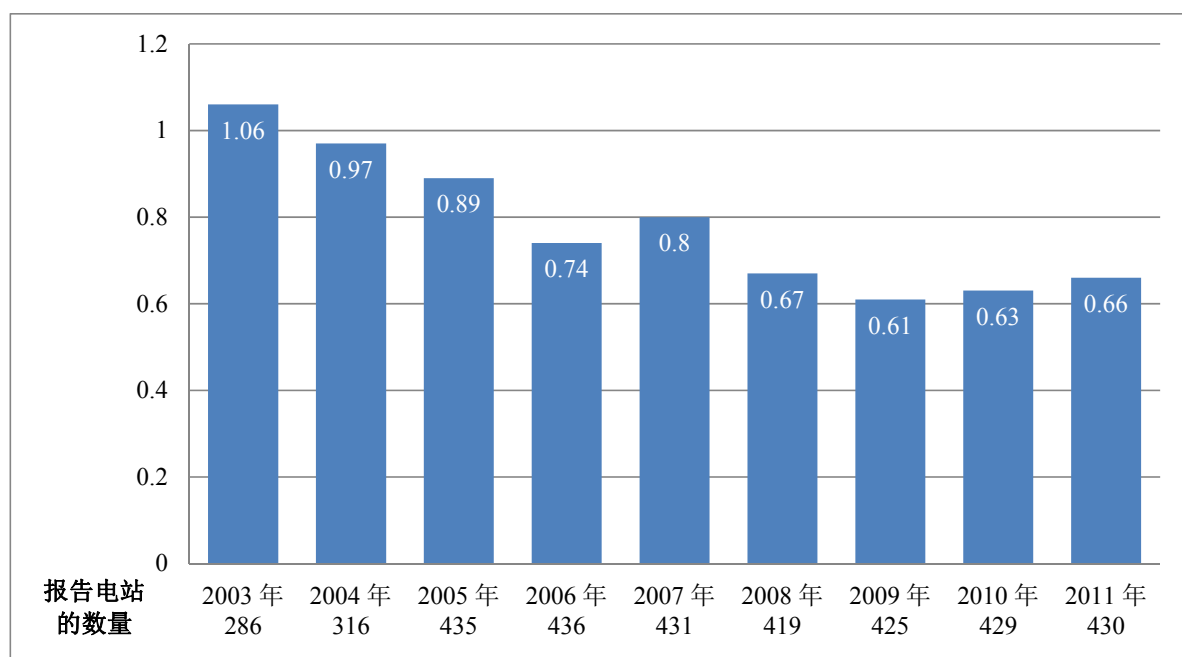


图 A-20. 包括自动和手动停堆在内的每7000小时动力堆临界运行发生的非计划紧急停堆总数。来源：原子能机构“动力堆信息系统”，网址是：<http://www.iaea.org/pris>。

109. 关于“核安全”的补充资料可见《2013 年核安全评论》和《国际原子能机构 2011 年年度报告》。

B. 原子数据和核数据²²

110. 准确的核数据和原子数据对所有核研究和创新都至关重要。这些数据是许多应用领域不可或缺的，如核动力（裂变）、研究堆、核聚变、医学、无损检验和环境监测。

111. 核数据工作由各区域数据中心在全球范围内展开。其中的一个核心中心设在原子能机构，其他包括法国巴黎的核能机构数据库、奥布宁斯克的俄罗斯核数据中心以及布鲁克海文国家实验室的美国国家核数据中心。原子能机构协调着联系这些中心的两个网络，即“核反应数据中心国际网”和“核结构和衰变数据编评者国际网”。“核反应数据中心国际网”主要面向实验核反应数据库，而“核结构和衰变数据编评者国际网”则监管编评核结构数据文件，并承担相应的横向评价。这些不断更新的数据库为核科学和技术的研发、能源和非能源应用提供了基本数据。

112. 过去一年，国际数据界一直在考虑改变核数据存储的格式。目前的技术可以实现将标准从当前和长期存在的“打卡”文本格式改为现代结构化语言，如 XML。如果能够商定，这种改变将是一项重要创新。

²² 自《2012 年核技术评论》开始，每两年讨论一次先进裂变和聚变发展，与原子数据和核数据发展方面的讨论轮换。增加这一关注点，可让我们更详细地描述重要趋势与发展情况。

113. 2011 年 5 月在美国举行了反应堆剂量学国际专题讨论会 (ISRD-14)，这次专题讨论会突出强调了能够让中子谱和注量得到准确测定的剂量学数据的重要性。虽然原子能机构的“国际反应堆剂量学文档”数据库已经提供这一标准多年，但最近已由一个新的剂量学文档所取代，即“国际反应堆剂量学和聚变文档”。新文档也由原子能机构生成，专为更广泛应用而设计，包括聚变。计划未来几年将验证并在必要时完善“国际反应堆剂量学和聚变文档”，特别是通过原子能机构来协调此项工作。

114. 用户将编评数据文档当作程序输入，用以设计装置，编写安全论证文件，以及开展基础科学。2011 和 2012 年期间，这些文件的三个新版本在全球发布：ENDF/B-VII.1 (美国)、JEFF-3.1.2 (欧洲) 和 JENDL-4.0 (日本)。预计未来几年这些文档将得到广泛验证和检测。这将有助于确定任何缺陷，然后进行进一步实验和计算，以帮助生成文档的完善版本。图 B-1 是三个数据库中钨中子俘获反应数据的例子，包括不确定性。此图由原子能机构开发的软件生成，可更好地进行视觉比较和传播各种数据来源的核数据。

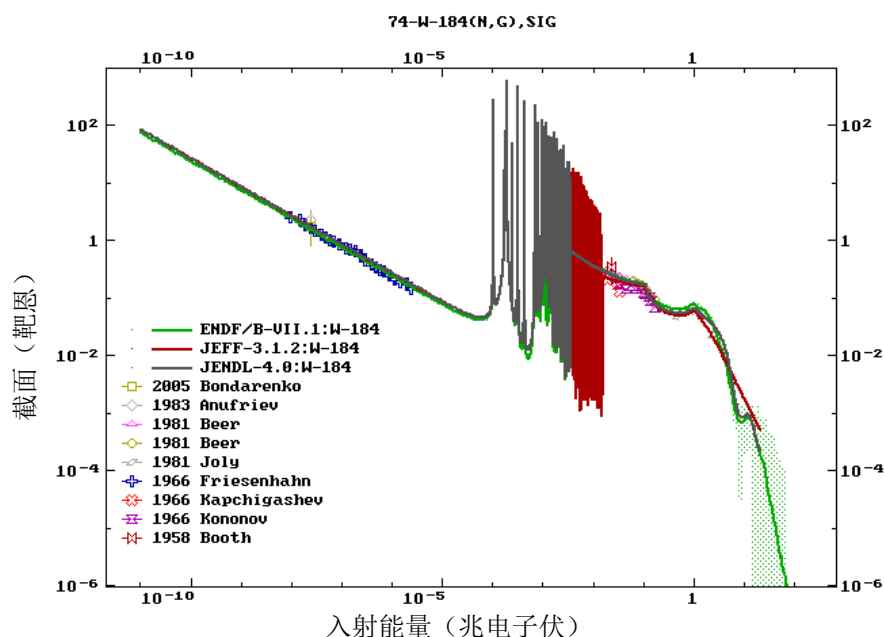


图 B-1. 三个最近编评数据库的数据实例，包括“实验核反应数据库”的一系列实验数据。右侧阴影部分所表示的 ENDF/B-VII.1 信息是多么的不确定。

115. 上述编评数据文档已达到了一定成熟程度，有许多合并数据。但是，还存在几个已确认的不足之处，都处于典型地难以由单一评价项目加以解决的规模。国际合作被视为解决之道。核能机构的核数据编评合作活动已取得了不少进展，发表了 30 份报告。有人提出，这应该用称作“国际合作编评数据库组织”的一种新工作定式加以大幅拓展，以加快核反应数据编评的进步。编评伊始，将考虑六个优先同位素系列，即 ^1H 、 ^{16}O 、 ^{56}Fe 、 $^{235, 238}\text{U}$ 和 ^{239}Pu 。此计划旨在提供明确的编评，让所有项目都能采用，而且将来在核能机构和原子能机构等国际组织管理下，还能解决核数据更广范围的问题。

116. 聚变是一种重要的潜在能源。“国际热核实验堆项目”²³ 旨在论证和平利用聚变能的科学技术可行性和安全特性。在该项目下，正在建设一个电站规模装置，预计将论证生产 500 兆瓦聚变能的可行性（图 B-2）。“聚变编评核数据库-2.1”是设计“国际热核实验堆项目”的参考数据源，而经完善的“聚变编评核数据库-3”已在原子能机构协调的一个研究项目下建立，以帮助分析结果。

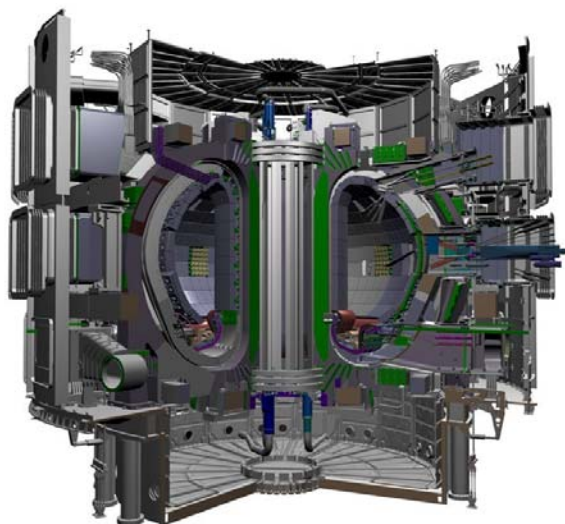


图 B-2. 在法国为研究聚变能生产而正在建设的“国际热核实验堆项目”装置剖面图。该装置的设计中使用了大量的核数据和原子数据，其运行和试验分析中也将用到。

117. 2012 年 10 月在美国圣地亚哥举行的第二十四届国际原子能机构聚变能会议吸引了来自 37 个成员国和五个国际组织的约 850 人参加，提交论文约 700 篇，其中包括位于英国的欧洲联合环聚变装置上的类似国际热核实验堆堆壁的实验结果（图 B-3）。

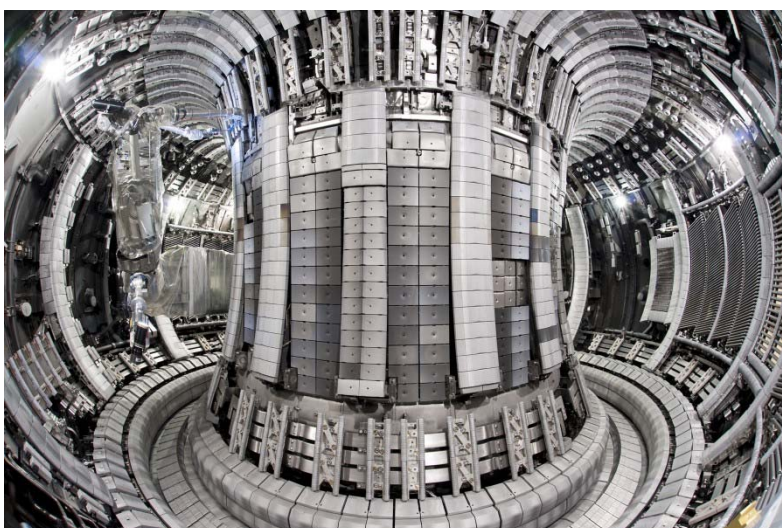


图 B-3. 已完成安装的类似国际热核实验堆堆壁的欧洲联合环真空容器内部。

²³ 有关“国际热核实验堆项目”的更多信息，见 <http://www.iter.org/>。

118. 材料分析核技术越来越流行，私营工业已实施了以前只在核实验室采用的方法，作为标准“桌面”设备的一部分。一些国际会议专门讨论这一主题。2013年6月，将在美国西雅图召开第二十一届国际离子束分析会议。原子能机构已经完成了有关为离子束分析提供数据的离子束分析核数据库的协调研究项目，目前正在实施相关分析技术的另一个项目，即粒子诱发 γ 射线发射。

119. 产生强烈脉冲硬 X-射线的新设施正带来原子和分子数据领域的进步。2009年，美国斯坦福直线加速器相干光源进行了调试，日本理化学研究院播磨研究所的 SACLA 设施于 2011 年上线，2012 年向外界用户开放。这些设施发出的 X-射线用来照亮目标，范围从单个原子和分子到活细胞和纳米级晶体。高强度和短脉冲长度使得有可能在极端条件下研究物质，以及从原子级研究复杂过程，例如生物分子中的过程。

120. 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的“国家点火装置”包括 192 台大功率激光器，将紫外光聚焦到一个空腔，然后转换为 X-射线。“国家点火装置”在其运行初始阶段（2009 至 2012 年）一直致力于通过加热和压缩氘氚靶丸实现净能量获取。预计的能量获取并没实现，这部分地表明需要极端条件下的准确的物质原子数据。“国家点火装置”正在继续运行。

121. 虚拟原子和分子数据中心是一个欧洲信息技术基础设施项目，初始供资涵盖 2009 至 2012 年，现已成功为约 20—25 个数据库提供了原子和分子数据通用界面，应用于等离子体物理和天体物理。界面和相关查询工具建立在原子能机构协调的国际研究小组开发的“原子、分子和固体的可扩展标识语言计划”基础上。2009 年发布了版本 0.1，2012 年发布了版本 1.0。虚拟原子和分子数据中心的一个后续项目目前正在进行中。

122. 原子和分子过程数据库越来越以计算数据为基础。但在最近几次会议上，有人已提出了问题，即实验截面等计算截面具有不确定性，须加以量化。2012 年 9 月，在韩国大田举行了“国际原子能机构-韩国国家核聚变研究所关于聚变中原子、分子和等离子材料相互作用过程的数据编评联合技术会议”，这次会议旨在审查误差传播和敏感性分析的问题、编评数据库现状、理论和实验数据集的编评、编评方法和半经验拟合的作用。这是同类会议中的首次会议，对于振兴聚合原子和分子过程中不确定性分配和数据编评的国际工作具有重要作用。

123. 2013 年，核数据用于科学技术国际会议将在美国纽约举行。本次会议将展示为各种应用活动生成或使用核数据的科学家和工程师们的工作。

C. 加速器和研究堆

C.1. 加速器

124. 对电子、质子和其他类型的带电粒子进行加速，以产生在研究和技术中使用的X-射线、中子、带电粒子束和放射性同位素。基于加速器的技术被视为服务于社会和经济发展的一个关键要素，在能源、卫生、农业、环境、材料、自然资源和教育部门有着一系列广泛的应用。

125. 已经开发出了具有许多不同设计的加速器。这些加速器尺寸各异，一些小到足可安装在桌面上，而另一些则可能有数十公里长。加速器可能呈线型或圆型。通过采用不同技术，加速器可以脉冲方式或连续地产生或加速带电粒子束。加速器是具有重要社会影响的基于核物理学的大量各类应用的主要工具，这些应用例如包括：生产氟-18、铜-64 和碳-11 等放射性同位素以制备癌症诊断中使用的放射性药物；直接使用加速器束治疗癌症；矿物和石油勘探；半导体芯片加工；医疗设备和食品灭菌；人工制品测龄，还有许多其它应用等等。人们在不断探索加速器的新型应用，一个显著进展是一直成功地利用医用回旋加速器生产钨-99m，这是世界上最广泛使用的诊断用放射性核素。

材料表征

126. 核技术在新材料开发中扮演着关键角色。离子束分析是考古学、生物医学、环境污染监测、粮食和农业、法证学、工业、采矿、文化遗产研究等领域用于表征材料特性和性能的一个重要工具。离子束分析技术通常是非破坏性的，但材料特性可能受到离子辐照的强烈影响。

127. 存在着与核燃料循环后端核裂变产生的半衰期长的放射性同位素相关联的环境关切。这种关切已导致加大研究和发展力度，以开发出一种在快裂变反应堆或加速器驱动系统中通过嬗变²⁴减少放射性废物量的技术，包括在原子能机构，它正在“快堆和加速器驱动系统的技术进步”项目范围内采取一些举措。

128. 利用同步加速器辐射、中子、离子和电子束的实时材料表征是应对能源相关应用中利用某些材料方面现有研究与技术挑战的一个极有价值的手段。更好地了解由于这种利用或由于使材料性能降低的老化所产生的因素可能有助于应对这些挑战。更精密的材料如最大程度减少能源消耗的材料材料的开发可以有助于缓解对地球自然资源的压力，并限制环境压力。被加速的粒子可以在这种新材料的开发过程中发挥重要作用：

²⁴ 一种元素转化为另一种元素。正在将嬗变作为将较长寿命放射性核素转化为较短寿命或稳定放射性核素的手段进行研究。

离子束加速器产生的离子可用于模拟材料在裂变或聚变反应堆中所受的辐射损伤；它们还可用于通过离子注入技术创造新材料；最后，它们还可被用于分析这些材料。所创造的新材料样品很小，因此被称为“模型材料”。为了实现成本效益，这种材料一旦制造出来，就必须开发更简易的替代生产方法。制造过程的现场和实时表征可以通过促进更好地了解所需的所有步骤来促进实现这一点。

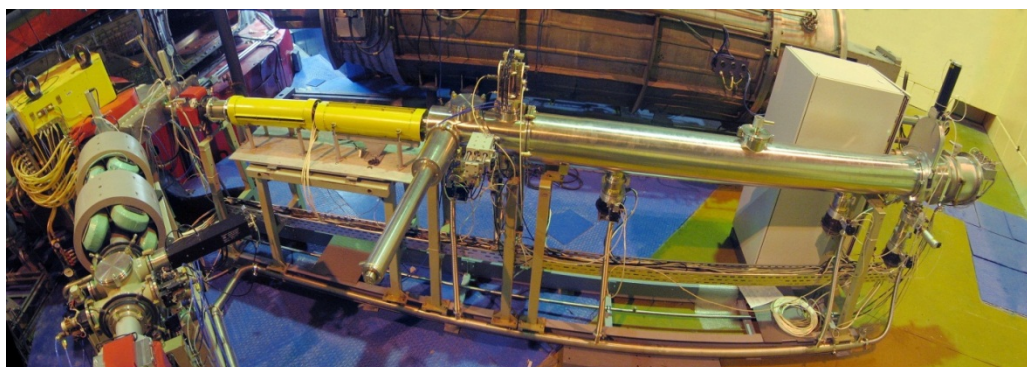


图 C-1. 在俄罗斯联邦联合核研究所 U400M 回旋加速器设施正在开发一种用于电子装置辐射硬度测试的新离子束线。

利用离子束进行元素和分子成像

129. 多年来，二次离子质谱法已经发展成一种强有力的元素分析手段，在半导体等材料领域尤其如此。最近，这一手段一直被用于制作高分辨率分子浓缩表面图像（图谱），其横向分辨率不到一微米。分子材料深度断面方面的新发展可能最终提供被分析材料的全三维图像。但该技术的缺点是分析必须在真空中进行。如表 C-1 所示，目前可用的大气压力质谱测定技术包括基于基质辅助激光解吸电离、实时直接分析和解吸电喷雾电离技术具有各不相同的空间分辨率范围。探测限值还可能除其他外，特别由于选择所用的溶剂而受到影响。另一个缺点是一些技术可能破坏分子信息。迄今还没有任何质谱测定技术能够在具有高空间分辨率的环境压力条件下提供高质量的分子图谱。

130. 兆电子伏二次离子质谱法最近已作为能产生化学以及元素信息的技术出现。该方法采用兆电子伏能量范围内经过离子加速器加速的重离子，并集中应用在核微探针设施。从样品辐照过的表面发出的次级分子离子利用飞行时间法进行探测。兆电子伏二次离子质谱法预计大有希望应用在有机分子绘图领域，特别是生物医学、文化遗产和法证学研究。

131. 可以从真空系统中提取兆电子伏离子，并通过薄窗引向空中。该技术在过去一直被广泛用于在环境条件下利用常规离子束分析技术开展物体元素分析。许多关键领域将受益于高分辨率环境压力分子成像系统。这些领域包括：考古定年学、地质和环境科学、法证学和生物医学。表 C-1 对一些主要分子成像技术做了比较。

表 C-1. 一些主要分子成像技术的比较[Spoto, G 和 Grasso, G., “艺术品和考古物品研究中的空间分辨质谱测定技术”, 《分析化学趋势》, 2011 年, 第 30 卷, 第856—863 页]

信息	基质辅助 激光解吸 电离质谱仪	次级离子 质谱仪	环境质谱仪	纳米次级 离子质谱仪	兆电子伏 二次离子 质谱仪	激光剥蚀电 感耦合等离 子体质谱仪
空间 分辨率	10 微米	有机物 > 200 毫微米	> 50 微米。正在 开发亚微米型。	50 毫微米	1 微米	> 100 微米
探测到的 分子尺寸	达到~150 千道 尔顿 (大蛋白)	达到~2 千道 尔顿 (小蛋白)	达到~50 千道尔 顿 (中蛋白)	元素	达到~10 千道 尔顿 (大肽)	元素
三维能力	有待开发	有 (5 毫微米 深度分辨率)	可能开发	有	可能开发	一些
环境和实时	一些 (大气压 基质辅助激光 解析/离子源)	×	✓	×	✓	×
便携	有台式	×	✓	×	×	×
量化	有内部标准, 但很难	相对量化	有内部标准	可用同位素 标记量化	不详	✓

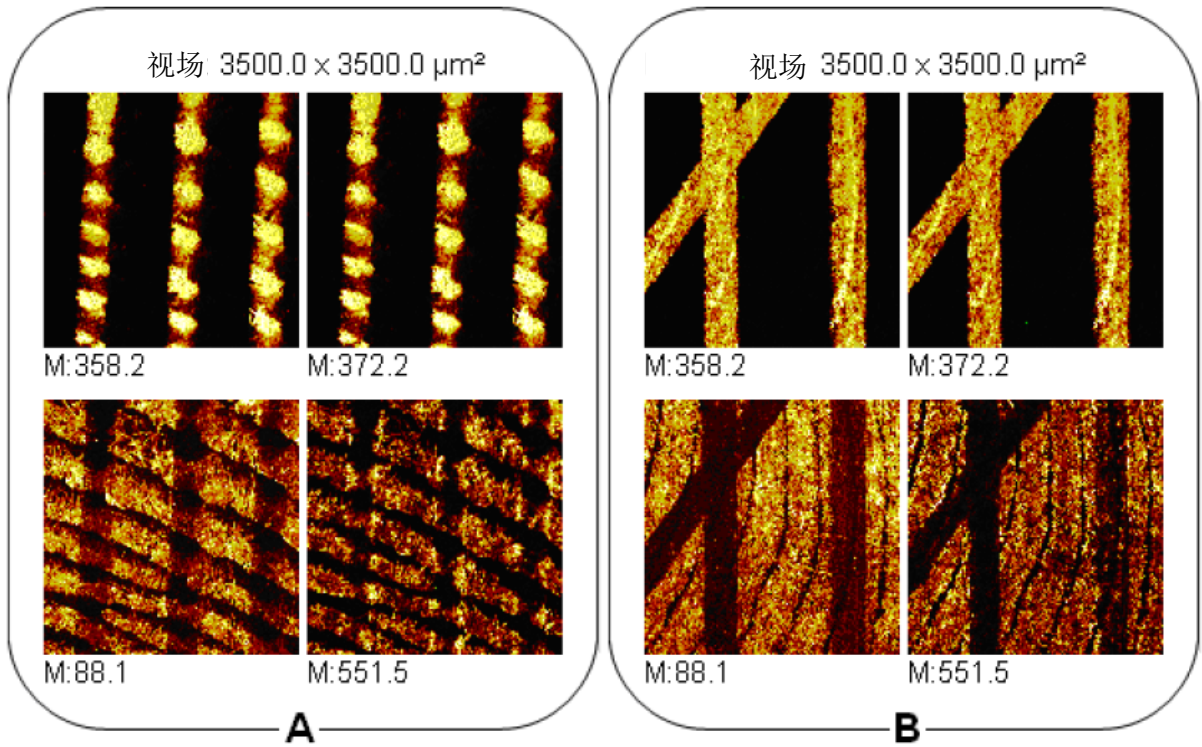


图 C-2. 通过千电子伏飞行时间谱仪得到的印花纸坯上(A)在划墨线后和(B)在划墨线前所留指纹的正离子图像。N.J. Bright, R.P. Webb, S. Bleay, S. Hinder, N.I. Ward, J.F. Watts, K.J. Kirkby 和 M.J. Bailey, 《分析化学》, 第 84 卷 (第 9 期), 第 4083—4087 页, (2012 年)。

132. 2012 年出版的一项规程利用常规千电子伏飞行时间谱仪成像技术来确定指纹是在划墨线前还是划墨线后留下的。图 C-2 中的图像显示了采用与墨水和指纹有关的质谱峰的一种情形之间的差异。图 C-2 A 显示, 当指纹留在现有墨线上方时, 与染料对应

的墨水分子（M:358.2 和 M:372.2）在发现指纹纹路的区域被遮盖（从 M:88.1 和 M:551.5 确定）。图 C-2 B 显示，当越过已在纸上留下的指纹划墨线时，墨水分子（M:358.2 和 M:372.2）的离子特征便遮盖并防止探测到可以判断出指纹分子的离子特征（从 M:88.1 和 M:551.5 确定）。

C.2. 研究堆

133. 研究堆包含一般不用于生产电力的一系列不同的反应堆类型。研究堆的主要用途是提供研究和各种应用包括教育和培训所需的中子源。研究堆的规模小于主要功能是生产电力的动力堆。研究堆功率额定值以兆瓦表示，其输出功率范围在零（如临界装置）到 200 兆瓦（热）之间，而典型的大型动力堆为 3000 兆瓦（热）（即 1000 兆瓦（电））。

134. 截至 2013 年 1 月，全世界共有 247 座在运研究堆设施。此外，还有 15 座研究堆处于临时关闭模式，150 座已被长期关闭。在正在运行的反应堆中，49 座属于高容量的，运行功率水平较高，而且提供较高的中子通量。还有 304 座研究堆已经退役。另外还有四座在建，其中两座在法国（儒勒·霍洛维茨反应堆和 RES 堆），一座在约旦（次临界设施），一座在俄罗斯联邦（PIK 反应堆）²⁵。最后，有六个研究堆项目已经正式列入规划，它们分别位于：阿根廷（RA-10）、比利时（MYRRHA）、巴西（RMB）、约旦（JRTR）、荷兰（PALLAS）和俄罗斯联邦（MBIR）。五个项目在 2012 年前已经取消。图 C-5 和图 C-3 以及表 C-2 分别显示了运行中研究堆堆龄、功率水平和利用的分布情况。

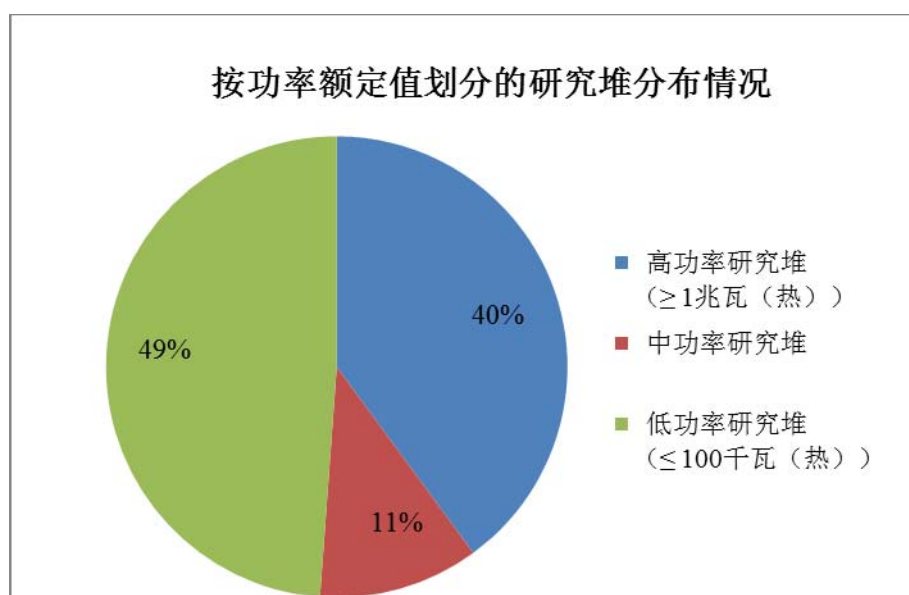


图 C-3. 可运行研究堆功率额定值统计分析（来源：原子能机构研究堆数据库，截至 2012 年 8 月）。

²⁵ 根据载有当前和以往运行研究堆记录的原子能机构研究堆数据库（<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>）。

表 C-2. 全世界研究堆的通常应用情况 [原子能机构《技术文件》第 1234 号]

应用类型	所涉研究堆数量 ^a	主持被利用设施的成员国
同位素生产	92	45
中子散射	50	33
中子照相	71	40
材料辐照	70	28
嬗变（半宝石）	20	11
嬗变（掺硅）	29	19
教学/培训	165	53
中子活化分析	124	54
地质年代学	25	21
硼中子俘获疗法，包括研发	22	12
其他 ^b	103	31

^a 在所考虑的 252 座研究堆中（229 座在运、15 座临时关闭、4 座在建、4 座列入计划，2012 年 8 月）。

^b 其他应用包括仪器仪表校准和测试及剂量测定、屏蔽实验、反应堆物理学实验、核数据测量以及公关旅行和研讨会。

135. 15 个成员国正在考虑或计划建造新研究堆。阿塞拜疆、黎巴嫩、沙特阿拉伯、苏丹和突尼斯正处于计划建造研究堆的早期阶段。约旦已开始建造一座 5 兆瓦多用途反应堆，而越南已计划建造一座新研究堆，以作为一个总括性核电厂商业合同的一部分。具有现行核电计划的国家如阿根廷、巴西、法国、印度、大韩民国、荷兰、俄罗斯联邦和南非也正在建造或计划建造适合于特定实验和商业用途的新研究堆²⁶。



图 C-4. 2012 年，中国先进研究堆在累积运行 70 多个小时内达到 60 兆瓦额定功率。其结果是，通过取得第一批所需质量的中子散射谱对五台中子束仪器进行了调试。

²⁶ 原子能机构最近的一份出版物《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）能对成员国在这方面起到帮助作用。

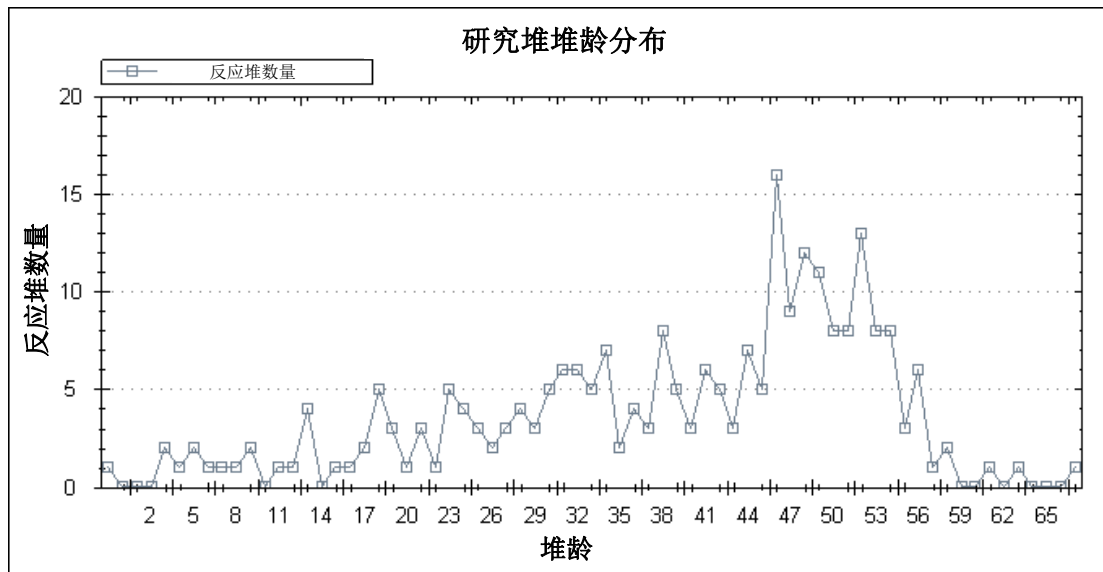


图 C-5. 可运行研究堆的堆龄分布。

136. 随着老旧研究堆退役并被数量更少但用途更多的反应堆所替代，在运研究堆和临界装置的数量预计还会继续减少。将需要更多地开展国际合作，以确保对这些设施的广泛利用和高效使用。2012 年，在原子能机构推动下²⁷，现有研究堆地区网络或联盟帮助促进了这种合作，并协助研究堆扩大了其利益相关者基础。

137. 2012 年原子能机构推出了一项新服务 — “研究堆运行和维护评定”，以便对研究堆设施进行全面的运行和维护同行评审；核查遵守现有设施程序的情况；就需要改进的领域提出建议以及促进工作组专家和研究堆工作人员之间相互的知识和经验转移。2012 年 12 月，在美国国家标准和技术研究所中子研究中心完成了首次“研究堆运行和维护评定”工作组访问，而在此之前，曾于 2012 年 6 月举行了一次先期工作组会议。2012 年 10 月，还为赴意大利帕维亚大学铀氢锆研究堆的“研究堆运行和维护评定”工作组访问举行了一次先期工作组会议。主要访问预计将于 2013 年进行。

138. “减少全球威胁倡议”在 2012 年全年继续履行使命，以最大程度减少高浓铀在全球民用核部门的存在。2009 年，“减少全球威胁倡议”的范围从 129 座扩展到涵盖约 200 座使用高浓铀燃料运行的研究堆，截至 2012 年底，其中的 82 座反应堆已经转换为使用低浓铀燃料或在转换前被关闭。例如，在墨西哥，铀氢锆 III 型研究堆从高浓铀燃料转换为低浓铀燃料，并且其最终高浓铀燃料于 2012 年 3 月运回美国。在波兰，2012 年 9 月，玛利亚研究堆被完全转换成使用特别设计的低浓铀燃料。2012 年 12 月，“减少全球威胁倡议”宣布，在将维也纳铀氢锆研究堆完全转换为低浓铀燃料后，已从奥地利最终移出所有高浓铀。墨西哥和奥地利燃料的安全返还标志着已将所有铀氢锆堆高浓铀燃料从民用商业中移出。

²⁷ 原子能机构在波罗的海、加勒比（包括来自拉丁美洲的参与）、中非、中亚、东欧和地中海组建了若干研究堆联盟。

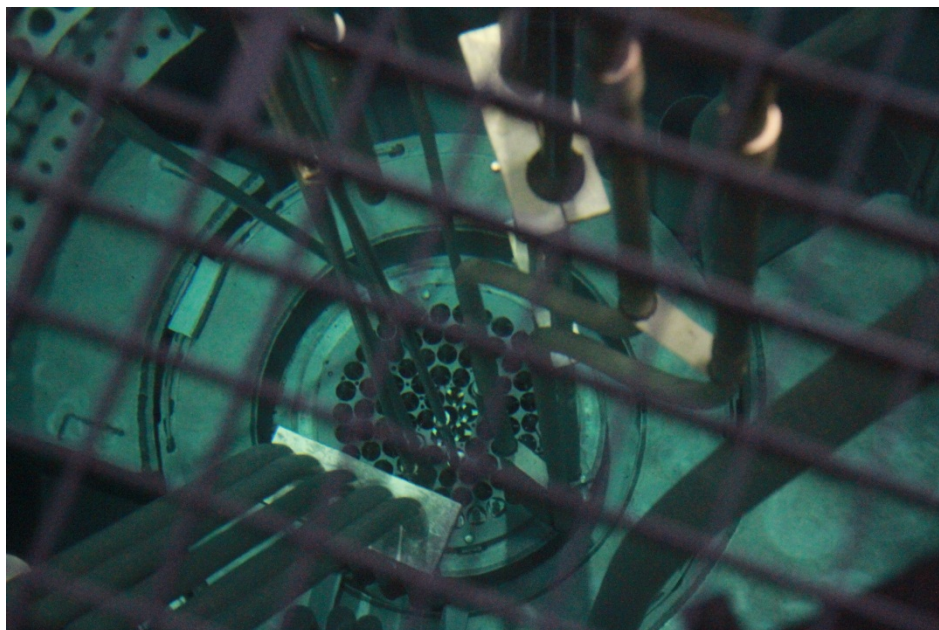


图 C-6. 维也纳技术大学使用低浓铀燃料的铀氢锆 Mark-II 型研究堆堆芯。该反应堆于 2012 年从高浓铀转换为低浓铀。

139. 在原子能机构的支助下，若干成员国将高浓铀研究堆燃料返还给了原产国。俄罗斯研究堆燃料返还计划继续向俄罗斯联邦安全返还高浓铀新鲜燃料和乏燃料。2012 年，原子能机构协助从乌克兰哈尔科夫物理和技术研究所返还了近 110 千克高浓铀新鲜燃料，并且在基辅核研究所的研究堆从高浓铀转换为低浓铀后从该所返还了近 20 千克高浓铀乏燃料。2012 年 8 月和 9 月，完成了从乌兹别克斯坦和波兰近 100 千克高浓铀乏燃料的另两批装运作业。还成功完成了从波兰的另外一批装运工作，移出了约 27 千克新鲜高浓铀。中国继续努力将该国的微型中子源反应堆从使用高浓铀转换为使用低浓铀，并且正计划与已经购置了这类反应堆的成员国合作，帮助它们转换反应堆和返还高浓铀燃料。

140. 在转换为低浓铀并返还高浓铀燃料后，还常常进行重要的基础设施升级。例如，在向俄罗斯联邦返还所有高浓铀后，借助于财政和技术支持，乌克兰正在哈尔科夫物理和技术研究所建造一座以低浓铀作燃料、由加速器驱动的次临界设施。该设施计划于 2014 年开始运行。

141. 2012 年，虽然有关中、长期供应的问题仍然存在，但过去若干年的供应短缺最终缓解和生产水平已恢复正常。医用同位素生产工艺从使用高浓铀转换为使用低浓铀的工作在此期间重新作为重点继续推进。澳大利亚宣布扩大其低浓铀钼-99 生产能力，以满足全球约 25% 的需求。为了实现这一产出，将在 2016 年前建造一座新的出口规模的核医疗制造厂，还将建造一座配套的合成岩石技术废物处理厂，以处理这种钼-99 厂扩

大所产生的额外废物。²⁸ 南非继续进行用低浓铀靶件制造的钼-99 的商业生产以及将其工艺转换为专门使用低浓铀，而两个主要的医用同位素生产国比利时和荷兰也开始执行将其商业规模生产工艺从使用高浓铀转换为使用低浓铀的工作计划。最后，印度尼西亚在 2011 年底成为完全基于低浓铀的小规模生产国。

142. 高通量和高性能研究堆的转换需要有目前正在开发的先进超高密度铀-钼燃料。虽然 2012 年在铀-钼燃料的开发和资格认证方面取得了实质性进展，但还需要特别是在辐照和辐照后检验计划的范畴内以及在制造技术领域进行进一步的努力和试验，以实现以商业方式及时提供合格的超高密度低浓铀燃料。

143. 在相关铀氢锆研究堆转换之后，全球对铀氢锆燃料的需求开始下降。在 2010 年研究堆燃料会议²⁹ 后，“铀氢锆国际”宣布，疲软的燃料供应商业局面考验着其长期的燃料供应能力。自那时以来，燃料价格一直大幅度攀升，对全世界 38 座可运行铀氢锆堆中的若干座堆的持续运行构成考验。

144. 2012 年，原子能机构继续支持进一步利用研究堆开展教育和培训。这样的项目包括找到增加可提供培训班的数量和类型的途径以及将研究堆纳入基础科学教育。

D. 加强粮食安全和食品安全的新技术

D.1. 制订战略和开发技术以准备和响应影响粮食和农业的核和放射紧急情况

145. 在制订对可能影响粮食和农业的潜在核或放射紧急情况做准备和响应的战略时需要考虑许多因素。虽然一个共同的方案有其好处，但任何战略都必须考虑当地、场址特定条件，以便发挥其效用。

146. 在切尔诺贝利事故和福岛第一核电站事故期间，都向环境释放了放射性核素。在福岛，土壤和植物中探测到有高水平放射性铯和碘，而一项食品监测计划得出了导致 2011 年 3 月 21 日发布对具体食品销售的首批限制的数据。像切尔诺贝利事故一样，福岛第一核电站事故也清楚地证明，在事故发生后尽快实施对食品和土壤采用一致的取样方案和分析战略的经协调的现场和实验室实践乃至至关重要。

²⁸ 合成岩石技术是澳大利亚利用热等静压将核副产品量（与水泥固化等其他方法相比）减少多达 99% 的技术。

²⁹ 2010 年研究堆燃料管理国际专题会议由欧洲核学会与原子能机构合作组织，于 2010 年 3 月 22 日至 25 日在摩洛哥马拉喀什举行。

D.1.1. 应急准备和响应：需要采取协调的分析程序和取样方案

147. 在发生导致向环境释放放射性同位素的任何事件后，应当采用取样战略来确定所关切的放射性同位素以及污染的量级和空间分布情况。应当采用一个基于适当基准资料的标准方案，以避免放射性核素浓度的不准确对比。例如，在农业用地被污染后，选择的土壤取样深度（表土与作物生根区）需要保持一致。



图 D-1. 在受影响的稻田进行土壤取样（照片由日本农林水产省提供）。

148. 在现场取样和实验室分析实践方面缺乏统一的方案还能产生不一致的数据，从而使得做出正确的决策变得很困难。例如，从绿叶蔬菜的表面清洗放射性核素能够影响所探测的放射性核素的数量，以及采用不同的实验室程序（清洗样品或不清洗样品）可能使实施食品限制所用的数据的解释复杂化。

149. 因此，粮食和农业管理当局使用统一的方案和程序至关重要。应当对这些程序进行设计，以确保对不同的土壤和食物类型采取在统计学上合理数量的样品，并兼具适当的时间和空间分布。应当制订有助于确定分析不确定性的重要性、所用分析设备类型和所采用方法（如现场分析或实验室分析）并包括取样点（现场、采集点、运输期间、配送中心、零销点或市场）的导则。



图 D-2. 在奥地利格拉本艾格现场监测放射性核素的测试技术[原子能机构，2012年]。

D.1.2. 取样数据的处理和解释

150. 大量的食物取样数据能够带来很大的后勤挑战。描述性元数据（有关信息内容的数据）以及关系型数据库的建立和组织在大量的数据被收集时是基本必需的。这有助于维护数据质量，使得能够生成详细的地图和数据输出，并为政府、消费者和监管者提供准确的信息。

151. 数据管理方面的另一个挑战是数据集之间地理分辨率的深度和范围。例如，至关重要是，与产区关联的食物样品和土壤样品具有类似的地理空间（地理参考）分辨率，以使得能够叠加和更准确地显示数据。就此而言，全球定位系统能够通过提供位置信息增加这些数据的价值，从而使全世界的利益相关方都受益。这些信息还有助于在同样的场址开展补充取样，这有助于监测食物和土壤中放射性核素浓度的时间变化。

D.1.3. 绘制数据图

152. 绘图是一项可以通过利用地面、空中和水基调查对重大事故后放射性核素沉积情况进行监测来予以促进的重要活动，例如，在结合航空和地面调查来绘制放射性核素沉降物空间范围图时即是这种活动。这种资料连同土壤和食物监测数据是确定受影响区域、提供污染情况的更明确情景及制订技术和社会经济方面可行的恢复农业生产的治理方案所必需的。这些数据还有助于实施旨在及时交流合理建议的农业对策，包括有关配送和消费特定农业、林业和渔业产品的限制。

153. 还可以利用安装在合适的车辆上或人员携带的 γ 射线探测仪来有效地实施地面监测。这类设备应当包括全球定位能力，以便记录取样位置，从而使得能够快速确定重要污染点并能够及时和可靠地进行决策。野外移动监测还可使得确定可能需要进一步详细取样和监视的精确位置更加容易。最近的发展包括将地理参考数据与地理空间绘图技术联系在一起，以便向决策者和公众快速传播信息。

D.1.4. 结论

154. 负责当局在灾难性灾害（包括核事故）期间和之后的领导力至关重要。这包括根据汲取的教训采取行动以及制订战略和开发技术，以改进今后对核和放射紧急情况的准备和响应。

155. 有必要制订统一取样方案和分析战略（包括土壤、农业社区和食物）的现场和实验室实践，并管理对商品进行监测的计划。还需要改进食物和农业数据的报告和管理。在许多国家都受到一次事件影响时，这尤其是一个问题，需要有一个有关数据收集和管理的统一方案。现代化设备和软件也有助于提供及时和准确的数据，以便监管者能够在可获得的最充分资料的基础上做出其响应决策。

156. 最后，需要制订和实施切实可行、及时、有效和统一的响应措施，以便恢复农业生产和确保食物安全。这些措施的实施将会在响应以后的紧急事件期间加强准确和适

当的数据收集，并使得能够实施基于科学的对策和治理战略，以消除不确定性和恢复对食物供应的信心。

D.2. 食品辐照技术的新应用

157. 食品辐照在提高食品质量、确保食品安全和减少食物传播疾病的风险方面的作用多年来已为人所知，并且其潜力十分明确。食品辐照通过减少食品腐败、损失和浪费以及通过防止有经济意义的虫害传播而同时提供对有利可图的出口市场的准入，能够在应对这些挑战方面发挥关键的作用。

158. 据联合国粮食与农业组织（粮农组织）称，每年生产用于人类消费的所有食品有约三分之一损失或浪费掉。世界卫生组织也估计认为，食物传播和水传播疾病每年致死 220 万人，而且其中约 190 万是儿童³⁰。因此，通过安全应用食品辐照技术减少食品损害和浪费并提高食品质量和安全可以对全球粮食安全产生直接和显著的影响。随着这项技术越来越广泛地被接受并得到国际标准的支持，辐照食品的出口和贸易正在不断增长。

D.2.1. 食品辐照技术

159. 食品辐照是涉及食品质量和安全的为数不多的技术之一，因为该技术能够控制食品腐败和食物传播病原微生物（通过灭活和灭杀这些微生物）以及有害害虫（通过使害虫无繁殖能力）而不会显著影响食物的口感和有益健康的属性。经辐照处理的食物提供与加热、冷藏、冷冻或化学处理等其他替代方法同样的益处，但不会显著提高食品温度或留下潜在有害残留物。通过防止处理后的食品与微生物危害的交叉污染，辐照还可用于保护包装食品。



图 D-3. 印度尼西亚雅加达国家核能机构同位素和辐射技术应用中心的研究人员正在制备供免疫系统受损者食用的即食便餐，增加了饮食品种并最大程度减少了食物传播疾病的危险[原子能机构，2012 年]。

³⁰ 食品安全 — 秘书处 2010 年 3 月 25 日提交第六十三届世界卫生大会的报告（A63/11 号文件），
http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA63/A63_11-ch.pdf。

160. 食品辐照涉及使食品在受控的条件下接受电离辐射。可根据粮农组织/世卫组织营养法典联委会和《国际植物保护公约》的国际公认标准将 γ 射线、电子束和 X-射线能够用于食品应用。各种类型的电离辐射都有不同的性质，并因此呈现不同的技术利弊，但一般而言，给定剂量的 γ 射线、电子束或 X-射线能够产生相同的病原体和腐败菌生物体灭活、延缓成熟和防止害虫繁殖的效应。

161. 食品辐照技术自 20 世纪初提出并在 20 世纪 50 年代开发出制造大功率辐射源的技术以来有了显著的发展，并且目前包括电离辐射和不同处理技术的新应用，例如与冷气贮存或调节气贮存技术相结合的应用。

162. 目前，食品辐照主要在亚洲及太平洋地区和美洲开展，但全球范围内没有足够的处理食品的辐照设施。电离辐射主要用于医疗装置和药物灭菌、保护人工制品、加工化妆品和包装材料以及改进消费品和制成品的材料。大多数设施是多用途的，处理各种广泛的产品，因而虽然食品可能是其生产量的很小一部分，但少数设施被设计用来高效地施用处理食品所用的相对低的剂量（0.1 至 10 千戈瑞）。

163. 目前，大多数辐照食品都利用 γ 辐照进行处理。例如，中国大约 170 个食品辐照设施中有 95% 以上利用 γ 辐照。就欧洲联盟国家辐照食品的设施而言，这种情况是相似的，那里有 26 个设施利用 γ 辐照，还有六个设施利用电子束辐照。但世界上利用电子束的情况正在不断增加，而且无论在研究实验室还是在大规模商业设施，对利用电子束和 X-射线处理食品的兴趣都在增长。

D.2.2. 辐射源

164. 放射性同位素辐照设施使用钴-60 或铯-137 放射性同位素提供 γ 射线。钴-60 因其较高的 γ 射线能量和作为金属的固有稳定性而在商业设施和大多数研究规模辐照器中使用，但一些研究辐照器也使用具有较长半衰期的铯-137。 γ 辐射的一个缺点是，它不能被“关闭”，因而设施必须连续运行来充分经济地利用这种放射性物质。此外，放射性衰变意味着食品受电离辐照的持续时间每个月不得不加长几个百分点，以及放射源必须用补充数量的放射性同位素定期进行校准以维持可接受的加工效率。这些设施必须设计成能够确保安全封隔大功率放射性同位素源，但又相对容易操作。

165. 机器源设施即那些产生电子束或 X-射线的设施用电产生电离辐射，因此它们较之放射性同位素设施的优点之一是在不需要时可将它们关闭。通过以磁场和电场方式加速电离流产生电子束。它们高速施放剂量，并且不到一秒钟就能给出 γ 辐照设施将用几个小时才能施放的剂量。但是，电子束不能穿透食品达到与 γ 射线所达到的一样深的深度，而且不适合一步到位处理大宗食品货物。它们能够以非常快的速度加工较小的散料包装食品物项。电子束已经在用于医疗、材料改性和环境工业方面的商业应用，但少数电子束设施被设计用来高效地处理食品，还需要进行研究以进一步开发用于食品应用的电子束技术。

166. 在金属靶例如钨、钨或金加速电子时产生 X-射线来形成 X-射线流。虽然相当多的能量会以热的形式丧失，但 X-射线辐照正在引起越来越大的兴趣，原因是它比电子束具有更强的穿透性，因此能够用于辐照大宗货包而无须辐射源。夏威夷的一个设施使用 X-射线来辐照供出口到美国大陆的新鲜果蔬，而瑞士的一个大型设施目前正在使用这种技术进行医疗装置的灭菌。随着具有更高的效率和改进的工程学的新一代 X-射线机可以提供使用，X-射线辐照今后将很可能变得更加普及。

表 D-1. 放射性同位素辐照器和机器源辐照器的比较

	放射性同位素辐照	机器源辐照	
应用	对食品进行 γ 辐射照射	对食品进行电子束扫描	对食品进行 X-射线照射
源	辐射源是放射性同位素（通常是钴-60）	辐射源是用电运行的机器	
穿透力	强穿透辐射（适用于托架装食品）	有限穿透（适用于纸包装食品）	强穿透辐射（适用于托架装食品）
处理时间	合理的加工时间（分/小时）	非常快的加工时间（秒/分）	中等加工时间（分/小时）
在不使用时	始终发生辐射，不使用时必须贮存在一个安全的位置	能够被关闭，因而节省能源	
发展阶段	成熟技术，在研究领域和商业规模上使用	需要为食品应用做更多的开发工作。在研究领域和商业规模上使用，但主要用于非食品物项	一项正在发展中的技术。需要在食品应用方面作更多工作。在一些研究领域和少数商业规模设施中使用
普及程度	大多数辐照食品在这类设施中处理	一些食品用电子束处理	一个商业规模设施使用 X-射线辐照食品
维护	源强度随时间而减弱，需要进行补充	需要良好的电力供应，并需要对机器进行维护	



图 D-4. 在越南河内使用 γ 辐照技术制备供出口的安全产品[C.布莱克本, 2012 年]。

D.2.3. 趋势

167. 由于对恐怖主义的担忧和放射性同位素源跨境运输所涉日益加剧的物流复杂性，实践证明在世界许多地方交付放射性同位素源颇为困难。对电子束和 X-射线技术越来越感兴趣的主要原因之一是它们能够避免与放射性同位素源有关的采购、运输、贮存、处置和保障问题。食品辐照也有额外的好处在于基于机器的技术不涉及放射性物质及其核的意味，并因此减轻了消费者的负面看法。因此，设想电子束和 X-射线技术将发展为一个替代的食品辐照选案。

D.2.4. 辐照食品的出口和贸易

168. 虽然在世界范围内鲜有经辐照食品数量方面的可靠数据，但已知每年都有大量且越来越多的高价值食品经过辐照并出售。在世界大多数地区，进行辐照以符合卫生要求的食品数量尽管很少但会越来越多。例如，2012 年发表的数据表明，在欧洲联盟有超过 9263 吨的食品主要是青蛙腿、家禽和香料接受了辐照。

169. 大量且比例越来越高的食品正在出于植物检疫原因（例如消除果蝇、螨和粉蚧）而接受辐照，并且这种相对较新的商业应用正在刺激辐照食品方面的贸易。例如，在动植物卫生检验局发布关于允许将辐照作为防治除处于某些生命阶段的蛾之外的害虫的一种“一般性”检疫处理方法的决定后，对新鲜果蔬进行低剂量（低于 1 千戈瑞）辐照并向美国出口。动植物卫生检验局还允许来自巴基斯坦的芒果在运抵美国时进行辐照，并且正在墨西哥建造一个面向美国市场的新的食品辐照能力。美国最近的监管发展还扩大了对用于在进口站点处理进口新鲜产品的 γ 和电子束设施的批准范围。企

业正在着手利用这些许可，这因此也激发了对那些否则将没有食品辐照能力的国家的兴趣。辐照新鲜果蔬的贸易很可能将继续快速增长。

170. 包括澳大利亚、印度、墨西哥、新西兰、泰国、美国和越南在内的若干国家正在开展辐照新鲜产品方面的贸易。这种情况正在推动与通过防治新鲜产品中具有虫害检疫重要性的害虫实现食品辐照商业化有关的国家方案和战略的跨地区协调发展趋势。《国际植物保护公约》的国际植物检疫措施标准包括通过原子能机构《辐射用作植物检疫措施的准则》和《受管虫害植物检疫处理准则》等研究倡议制订的标准对这种趋势提供了支持；后一准则包括通过原子能机构协调研究项目制订的 14 种国际上商定的植物检疫辐照处理方法。

D.2.5. 结论

171. 城市化程度提高、人口增长和气候变化正在引起对安全、有益健康和高质量食品的提供和经济可承受性的关切。最大程度减少收获后粮食损失的常规方法包括使用熏蒸和其他化学处理法因其对公众和环境的潜在危害性后果而正在越来越多地接受严格的审查，其中就包括根据《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》的规定受到限制的某些化学处理法。如果食品的提供和经济可承受性要在今后几年取得实质性改进，就有必要增加使用食品辐照，特别是电子束和 X-射线辐照技术。这些技术能够提供在世界范围内确保食品质量和减少收获后损失的有效和安全的处理方法。

172. 今后的发展可能将包括研究利用电子束和 X-射线辐照技术进一步开发食品辐照能力的工作。这些新技术对于监管者、决策者、研究人员和食品工业制订有关增加辐照食品贸易的倡议和政策将是非常重要的。

173. 辐照还提供能够确保出口符合卫生和植物检疫要求的收获后处理办法，从而取得对出口市场的准入和获得外汇，并因此有助于创收，这使得除此以外无法利用国际贸易机会的食品生产商能够直接受益。

E. 利用核技术抗癌的新发展

E.1. 癌症放射治疗的最新进步

174. 放射治疗通过对肿瘤施以精确的剂量对癌症进行有效的治疗，同时最大程度减少对周边正常组织的损害。光子放射治疗方面的最新进步提供了超出常规放射治疗的潜在巨大优势。这种进步包括强度调整放射疗法、图像引导放射疗法、立体定向放射疗法、立体定向放射外科、立体定向全身放射疗法、机器人放射治疗、螺旋断层放射治疗、容量弧型调制疗法和呼吸门控放射治疗等技术。这些技术在《2012 年核技术评论》中作了简要介绍。³¹

³¹ 原子能机构《2012 年核技术评论》。

E.1.1. 与采用上述技术有关的问题

175. 上述技术中的一些技术允许对离散确定的肿瘤体积精确且非侵入性地施用以往无法想象的辐射剂量。这些技术具有剂量分布得到改进、毒性减少、治疗实施迅速以及局部控制得到加强的潜在优势，所有这一切都导致存活机会增加。但这些技术都处在不同的临床发展阶段，进入普遍医疗实践将需要来自设计良好的随机化试验的更多辅助数据。³² 强度调整放射疗法使不伤害正常组织变得更容易的证据正在显现。例如，最近对有关强度调整放射疗法的临床证据进行的审查³³发现，在对局部晚期头部和颈部癌症进行放射治疗期间，强度调整放射疗法维持了腮腺唾液分泌，减少了急性和晚期口干症。该疗法还减少了前列腺癌患者的晚期直肠毒性，同时允许安全剂量递增，而且似乎降低了若干其他肿瘤部位的毒性。在乳腺癌方面，与切向乳腺癌放射疗法相比，强度调整放射疗法减少了急性毒性，并改进了美容术。

176. 基础三维适形放射治疗现在被视为标准技术方案，它按每名患者合理的费用水平为大多数患者提供了优质治疗。碳离子束疗法、质子束疗法和立体定向全身放射疗法等一些新技术适合于治疗特定类型的癌症和具体的临床情形，但无法替代基于三维适形光子治疗的传统标准放射疗法。

177. 为了选择最适宜的技术，必须掌握关于所涉技术的明确信息。其中一些技术的早期试验主要侧重于临床环境中作为主要终点的可行性，而最近则一直将重点放在结果上。这些新技术还需要就纳入生命质量措施的参数如患者报告的结果和质量校正寿命作出评定³⁴。



图 E-1. 为图像引导放射疗法装配的一台现代医用直线加速器。该装置使得能够通过治疗前频繁进行靶区和（或）健康组织成像和根据这些图像采取行动以调整辐射靶来提高放射治疗精度。（照片：爱德华多·罗森布拉特，欧洲放射治疗和肿瘤学学会论坛，伦敦，2011年。）

³² 罗森布拉特等人，《放射治疗与肿瘤学》，2012年。

³³ J. 斯塔弗思，2010年《临床肿瘤学》。

³⁴ 维克拉姆、科尔曼和德耶，2009年《肿瘤学》，第一部分和第二部分。

E.1.2. 先进放射治疗技术的费用和效用

178. 是否使用新的和先进的放射治疗技术取决于其费用和效用。这种技术具有较高的基建和运行费用，涉及较严格的质量保证计划，而且需要有适当合格的工作人员。能满足先进技术需要的质量保证程序目前正在制定之中，将需要与正规的比较临床试验结合起来实施。将先进技术方案引入辐射肿瘤学还需要考虑总体需求和优先事项，因为熟练的放射治疗专业人员和资金的可得性以及设备的可维护性等因素在这方面均具有重要意义。有必要对辐射肿瘤学家、医用物理学家、放射治疗技师、管理人员和维护工程师进行培训。上述每一位专业人员都需要大量的培训，这不仅是在将采用的新技术方面的需要，而且也要按照将从事所涉领域的工作的基本教育要求水平需要进行经常培训。



图 E-2. 机器人放射治疗是一种无框机器人放射外科治疗系统。该装置的两个主要组成部分是从小型直线加速器产生的辐射和使得能够将能量从任何方向传递到身体任何部位的机械臂。(照片：爱德华多·罗森布拉特，欧洲放射治疗和肿瘤学学会论坛，伦敦，2011 年。)

E.1.3. 粒子放射疗法用于治疗癌症

179. 粒子放射疗法指的是将“较重的”亚原子粒子用于放射治疗。电子虽然可以被视为一种“粒子”，但却通常在临床实践中使用，且没有特别的放射治疗特性。较重的粒子（中子、质子、碳离子）在组织中穿行时会在每单位轨道长度（例如厘米）沉积更多的能量。因此，它们更有可能损害脱氧核糖核酸并杀死细胞。光子或 X 射线辐射在更接近人体表面沉积高剂量辐射。吸收剂量随光子穿行组织的深度而下降。光子在人体表面几乎不沉积能量。此外，光子在组织中穿行即将结束时释放最大能量（或产生强电离）。这种能量释放被称作“布拉格峰”——在“布拉格峰”前面，辐射剂量低，而在“布拉格峰”后面，剂量在很短的距离内下降到零。

180. 采用粒子放射疗法治疗癌症有着悠久的历史。该疗法是 20 世纪 50 年代发展起来的，最初的治疗是利用质子束进行的，随后是利用负 π 介子（带电亚原子粒子）和中子束进行治疗。过去 20 年中，对粒子放射疗法的兴趣增加，粒子放射疗法取得发展，质子束疗法和碳离子束疗法尤其如此。全世界现有 40 个粒子放射治疗中心，包括六个碳离子束治疗中心。此外，还有 25 个设施正在建设和发展之中。³⁵

181. 但费用对这些设施仍然是一个问题。对利用碳离子、质子和光子的外射束放射治疗所做的费用分析³⁶表明，基建费用介于 2300 万欧元和 1.38 亿欧元之间（取决于特定治疗组合），运行费用每年从 900 万欧元至 3600 万欧元不等。就质子设施而言，已经发展了较新的紧凑型商业解决方案。基于这些新模式的单机设施的费用约为 1600 万欧元，而传统的质子配置的费用为 9500 万欧元。

182. 有关粒子放射疗法的另一个问题是现有科学证据在多大程度上支持这样的主张，即这种疗法优于治疗实体肿瘤所用的标准光子束疗法。³⁷ 工作在粒子束设施的一些专家声称，没有必要也没有理由进行比如质子与光子的临床试验比较，因为质子能量的物理剂量分布和沉积明显占优。

183. 但其他专家则坚持认为，就像任何其他创新医疗模式一样，需要有科学证据方能证明耗费资源的模式相对于标准治疗的合理性。他们声称，仅根据物理剂量分布就推测粒子疗法优于光子疗法，这样不足以证明有理由用粒子疗法来替代光子束疗法。

184. 因此，需要有关于辐射生物学、放射物理学和粒子束疗法临床结果的更全面数据。

E.1.4. 近距疗法

185. 近距疗法是通过将放射源放置在肿瘤或体腔附近或置入肿瘤或体腔中来实施辐射治疗。尤其就妇科癌症而言，近距疗法已经从二维方案逐步走向基于剖成像的三维规划。在该现代方案中，在插入近距疗法施治器之后便对患者进行计算机断层照相或磁共振成像扫描。这使得不仅能够看到施治器，还可以看到肿瘤本身、其延伸部分以及有辐射损伤危险的邻近器官。随后，所开出的辐射剂量不是跟过去一样针对一个点，而是针对一个体积，其中不仅包括癌性肿瘤及其延伸部分，而且还包括有很高癌细胞污染危险的体积。³⁸

186. 根据所选技术的不同，费用可能有很大的差别。三维近距疗法、体积调制弧疗法和立体定向放射疗法等一些技术可以使用一些现已安装的放射治疗组成部分进行成像或规划。其他技术如使用碳离子或质子的技术需要全新的专门设施。

³⁵ 粒子放射治疗合作组。

³⁶ 佩特斯等人，《放射治疗与肿瘤学》，2010 年。

³⁷ 霍尔茨沙伊特等人，《放射治疗与肿瘤学》，2012 年。

³⁸ 艾梅德尔等人，《放射治疗与肿瘤学》，2005 年。

187. 为了补充这些设施，有必要提出额外的质量标准要求，包括新设备、更多的工作人员和分配给质量保证相关活动的时间。

188. 将先进技术纳入治疗系统及其可持续性需要在建筑物和设备方面进行额外投资，发展更多训练有素的人力资源，以及就所涉精密复杂设备签订昂贵的维护合同。

E.2. 癌症成像和治疗所用放射性药物的发展

189. 癌症是一种当细胞的内部生物化学、分子构造被异常改变从而避开通过复杂的细胞信号传递网络调节组织生长的通常控制机理时所产生的疾病。这是一个错综复杂的过程，尽管已经取得了很大的进步，但对许多癌症仍然缺乏有效的治疗手段。本节突出强调了在原子和分子级别了解癌症方面最新的一些发展情况。

E.2.1. 纳米技术和纳米医学

190. 纳米技术是在原子和分子一级对物质加以操控以创造新的材料、装置和结构。在分子一级，与相同的原子组相比，单个原子可能有着不同的特性。

191. 由于原子级别不同的行为模式，在抗癌斗争中其尺寸也很重要。基于某些纳米结构具体特性的前所未有的方案可能有助于抗癌，这已导致出现了被定义为纳米技术医学应用的纳米医学的新领域。它利用纳米材料经过改进且常常新颖的物理、化学和生物学特性，以便能够早期诊断和防治癌症，并改进对这种疾病的诊断、治疗和跟踪。

E.2.2. 可能有益于癌症治疗的纳米材料的特性

192. 细胞毒类化学药物和放射性标记化合物（放射性药物）在历史上一直属于最有效的癌症治疗工具。化学疗法和放射性核素疗法杀死癌细胞，但也杀死健康细胞。通常，化疗药物与放射性药物都是很容易扩散和穿透组织的小分子，但制备辨别癌症与正常细胞的药物仍很困难。但纳米材料可以提供一种选择性地瞄准癌细胞而不损害健康组织的途径，因为肿瘤结构中有一种以往未被利用的弱点。肿瘤需要形成新的血管来供应氧和其它营养物质，以维持其快速细胞复制。作为新血管迅速生长的结果，它们是不规则的和易漏的，与健康血管相比，血管壁上有更多和更大的间隙。间隙的尺寸在几百到几千纳米之间。与此相对照，正常血管的孔隙为 2 到 6 纳米之间。范围在 10 到 300 纳米的纳米粒子属于穿过肿瘤血管间隙而不大量穿透健康组织的适当尺寸。事实上，由于被称为增强渗透滞留效应的纯物理现象的结果，纳米粒子还是有选择地堆积在肿瘤组织中。

193. 纳米粒子能够在其内核中接纳治疗物质，然后与增强渗透滞留效应结合起来帮助进行施治。通过这种方式，纳米粒子的表层将在封结化合物通向生物靶标的旅程期间对其进行保护。内含物可能在抵达靶组织后被释放出来，以发挥疗效。纳米粒子可以被设计成为响应靶区出现的物理和化学变化例如在遇到肿瘤核心的酸性环境时释放其治剂。目前进行着涉及对已确定的癌症治疗用化疗药物进行纳米技术重组的大量临床试验。

E.2.3. 制药学纳米技术方面的进步

194. 放射性核素疗法利用放射性标记载体即放射性药物，并将这种药物设计成向肿瘤部位内部施放局部化的辐射源。放射性药物有两个剂量组件，即载体和在亚核粒子释放期间衰变的微量放射性核素。肿瘤放射性核素疗法的疗效产生于放射性核素释放并由肿瘤吸收的 α 粒子或 β 粒子。理想的放射性药物应该有选择性地向肿瘤组织输送放射性核素，但没有辐射到达正常组织。

195. 无论对肿瘤成像还是肿瘤治疗而言，新型肿瘤靶向放射性药物的研究目前都属于最引人关注的领域之一。在这方面，在制药学纳米技术方面最近取得的进步已向制订基于新型纳米载体设计的很有前景的方案转变，其目的是改进放射治疗结果和诊断质量。一项大的挑战是如何将放射性核素牢牢地拴在载体分子上，看起来纳米技术方案可能证明特别具有优势。将几个放射性原子封装在一个纳米粒子壳内提供了避免放射性向健康组织蔓延同时向目标癌细胞投送治剂的简易方案。定制的纳米级系统可以作为靶向施药工具，这种工具能够将大剂量放射性核素施放到恶性细胞中而又不伤害正常组织，从而大大减少了通常伴随当前许多癌症疗法的副作用。

E.2.4. 癌细胞靶向治疗

196. 纳米系统的另一个重要特征是极高的表面-体积比，这使得纳米粒子的外表（蛋白质环）尤其适合于包覆大量基团（分子的一部分），以给予系统额外的功能特性。例如，携带带正电荷的（阳离子的）蛋白质环的纳米粒子可以轻易地穿透大多数细胞膜，因为它们拥有净负电荷。相反，被中性电荷分子包裹的纳米粒子将在人体内呈现不同的分布，而且可能接近其他特定靶点。利用能完成与癌细胞外膜上的受体相互作用的功能分子如抗体或肽进行纳米粒子的表面包覆也能提高肿瘤的选择性和特异性。对纳米粒子表面也进行包覆将有助于避开免疫系统识别的分子以及有助于跟踪粒子在人体内的行走路线以确保其抵达预定地点的分子组（图 E-3）。

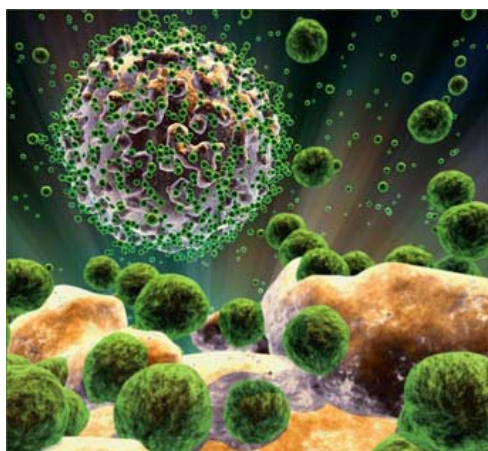


图 E-3. 包覆双层脂类分子外壳纳米尺寸球状粒子（绿色）漂浮在细胞外液中攻击癌细胞以施放治剂的图示。

197. 据估计，2006 年有近 240 个纳米产品进入药物研究渠道。纳米脂质体是由两层脂类包裹的中空气泡，常常成为精选的纳米载体，以用于施放其内腔所载的治疗用放射性核素。表 E-1 列出了正在进行临床评价的选定纳米靶向癌症放射性药物。

表 E-1. 选定的纳米靶向癌症放射性药物

纳米载体	放射性核素
脂质体	碘-131、钇-90、镱-188、铜-67
脂质体	镱-186
脂质体	铟-111、镱-188
脂质体	铟-111、镱-188
脂质体/免疫脂质体	锕-225
免疫脂质体	钇-90
脂质体和树枝体	硼-10

198. 除脂质体外，世界各地的研究人员还正在探索利用各种天然和人造聚合物纳米球以及抗体、核糖核酸和脱氧核糖核酸作为纳米载体的可能性。

E.2.5. 国际研究与发展

199. 正在就利用辐射技术合成靶向施放治剂所用的纳米结构载体开展大量的研究。在原子能机构一个协调研究项目的框架内，阿根廷、巴西、中国、埃及、匈牙利、印度、意大利、大韩民国、马来西亚、波兰、塞尔维亚、泰国、土耳其和美国已经制订了针对纳米粒子和纳米凝胶合成物的能精确控制产品结构、尺寸和功能的方法。若干成员国还一直致力于实现与现有大规模辐照设施和程序的兼容性（意大利），以及详细制订适用于基于蛋白质的纳米粒子和纳米凝胶（阿根廷、巴西）、天然聚合物（马来西亚和泰国）、合成聚合物（埃及、匈牙利、意大利、大韩民国、马来西亚、波兰和土耳其）和无机化合物（中国、法国、印度、大韩民国和塞尔维亚）的程序。

200. 还制订了适用于混合纳米结构的程序，在这种程序中，纳米粒子和纳米凝胶的表面被功能聚合物和生物分子包覆，以增加其生物相容性（法国、意大利和泰国）。泰国通过辐射分解产生了基于壳聚糖（从虾或其他甲壳类动物的硬壳中产生的一种物质）的纳米粒子。这些和类似的纳米粒子可以成为固化选定放射性核素的潜在候选粒子。

201. 尽管若干靶向放射性药物纳米载体已成功地用于在临床前和临床上对肿瘤模型进行成像和处理，但仍有许多挑战有待解决，如纳米载体的长期稳定性、其产量的相应增加以及纳米载体可能的毒性和降解产物。

E.2.6. 结论

202. 相比常规放射性核素靶向疗法，纳米载体多功能靶向技术可以向肿瘤细胞施放较高的放射性核素、化疗药物和（或）成像剂的有效载荷。通过有选择性地杀死病变细胞同时不伤害健康组织，从而减少副作用和为患者提供更大的舒适感，这可以在改进癌症治疗方面发挥关键的作用。但仍有挑战需要应对，包括纳米载体的长期稳定性和无毒性以及在保持产品技术规格的同时将合成方法成功地提升至工业规模。这些挑战将需要通过扩大物理学家、化学家、生物学家、医生、研究机构、医院、工业和国际组织之间的合作加以解决。

F. 应对气候变化影响的核技术

F.1. 转变农业以应对气候变化挑战

203. 全球人口估计到 2050 年将增至超过 90 亿，从而将导致对增加农业生产的需求。随着水和肥料的供给达到最大限度以及土壤质量和肥力的恶化，全球粮食安全已成为一个严峻挑战。此外，气候变化还影响着可能减少水的可获得性的降雨和天气事件并对农业生产所需环境条件产生影响。气候变化影响着农业活动，但农业活动也影响着气候变化。农业被认为是造成全球气候变化的一个重要原因，因为农业对超过 14% 的全球温室气体排放负有责任³⁹。因此，农业必须通过确定和采用能够减少农业温室气体足迹的新技术和新实践进行重要转变，以应对适应气候变化及减轻对土地生产率和粮食安全之影响的挑战。

F.1.1. 通过气候智能型农业应对气候变化和粮食安全挑战

204. 粮农组织及其伙伴正在推动向气候智能型农业的转变。气候智能型农业被定义为能够可持续地提高生产率、恢复力（适应力）和减少/消除温室气体（减缓）并同时增强实现国家粮食安全和目标的农业。

205. 气候智能型农业涉及既适应气候变化又减缓气候变化。调整农业领域是必要的，以避免损失并营造恢复力。调整实践包括保护性农业、提高水利用效率、集水、作物多样性、动物选种和采用综合作物-牲畜生产系统。减缓包括减少化肥使用和动物粪肥所致温室气体排放，并同时通过植物进行后续土壤有机质贮存加强大气中温室气体的消除。

206. 2012 年，支持世界粮食安全委员会的粮食安全和营养问题高级别专家组报告了制

³⁹ 粮农组织（2012 年）“使气候智能型农业成为更广泛景观方案的主流”，第二届全球农业、粮食安全与气候变化会议的背景文件，越南河内，2012 年 9 月 3 日至 7 日。

订有关气候适应型农业和粮食安全战略的重要性。就此而言，气候智能型农业将以经济、社会和环境上可持续的方式提振粮食生产和农村发展，特别是在发展中国家尤其如此。这种低排放农业因更高效地利用资源和减少能耗而不会损害粮食安全。

F.1.2. 核技术在气候智能型农业中的作用



图 F-1. 越南咖啡种植园里留在土壤表面的作物残茬减少了土壤蒸发。

207. 有关植物利用所摄取的水分比例（蒸腾作用）和土壤蒸发所失去的水分比例的资料是必需的，以便提高农业的水生产率，这对于减少对水的总体利用至关重要，特别是在水稀缺的环境中尤其如此。这种资料可用于制订管理实践，以便最大程度地利用水和增加对土壤盐渍度的了解。可以利用测量灌溉水中氧-18 和氘的同位素特征以及作物周围土壤、作物和大气中水存在情况来区分蒸发和蒸腾以及估算灌溉土壤的相关水流失情况。可利用这种技术来量化不同作物生长阶段和各种不同灌溉系统的植物用水情况和通过蒸发的水流失情况，并增加对土壤中盐渍度根源的了解。这对于开发新的实践和技术以改进灌溉、提高作物水生产率以及土壤和水盐渍度管理是非常有用的。



图 F-2. 在巴西，农田池塘中集水是雨浇地农业区灌溉的一个重要水源。

208. 土壤有机质是土壤肥力和质量的一个重要组成部分。碳和氮是土壤有机质的两个基本组成部分。土壤有机质的一部分在水分存在时会分解，向大气释放出二氧化碳。其他部分是稳定和不分解的，并因此不向环境释放二氧化碳。添加作物残茬和动物粪肥以及采用豆类作物和作物轮种增加了土壤有机质。可以就地利用便携式野外测量仪器对土壤以及所释放的二氧化碳和氧化亚氮中的碳和氮同位素特征进行测量，并将其

用于量化农业土壤中流失的有机质的来源。可利用这种资料来确定加入更多碳和氮稳定的土壤有机质的管理实践，并从而减少土壤中二氧化碳和氧化亚氮的排放。

209. 有关作物水需求的资料对于准确安排灌溉进度和在变化的气候条件下预测作物产量是十分重要的。估算这种需求则需要有关大面积土壤水含量的资料。这在过去是一种挑战，因为大多数土壤水测量都是以点为基础的。这意味着需要进行大量的测量，既代价高昂又耗时。利用从宇宙射线和土壤中天然产生的中子方面的最新发展补充了点测量，以提供对整个大田一级土壤水含量的可靠测量，并从而整合了很大面积（大到 40 公顷）土地的土壤水分数据。这项技术还提供关于直到 70 厘米深土壤水含量的资料，可以将其用于评价水分布均匀性和效率，并使得比较容易安排何时和在何地需要进行灌溉，从而减少了对水的总体需求。

210. 需要开发投入较少产量更高并能更好地适应变化的气候所引起的不利环境的作物品种。利用核技术的突变诱发产生遗传变异，为增加的生物多样性做出了贡献。突变育种用于开发在不利环境包括引发洪水、疾风和极端温度的气候变化条件下具有更高的生产率和更好的产量稳定性的品种。改良的突变种子有助于减少土地使用并进行更好、对环境更友好的种植。一个例子是已开发的能承受秘鲁海拔 5000 米恶劣气候条件的耐寒大麦突变品种。这些突变品种增强了 700 万安第斯土著人的粮食安全，并改善了他们的生计。还有，在孟加拉国沿海地区引种了耐盐水稻突变品种。这些突变品种能够在盐碱土壤中繁茂生长，因此可以使用新的地区进行农业生产。

211. 最大的进步将是所希望突变特性加速育种法的开发，这种方法可以将育种周期从 10—15 年缩短至 2—3 年，从而对成员国有关开发具有一系列特性的新作物品种的需求提供一种快速响应，这些特性如较短的生长期以及对水和盐碱胁迫、风暴和极端气温的耐受性等。



图 F-3. 秘鲁高地耐冰雹大麦。这些大麦品种携带一个产生悬垂麦穗并因此防范风暴破坏的突变体。这使得大麦能够在前所未有的高海拔生长，而且将秘鲁大麦的产量提高了六倍。

212. 繁育能够靠更加稀缺的饲料资源存活的健康牲畜，并同时提高牲畜饲料的能量利用率和减少作为副产品产生的温室气体排放，这是一个很大的挑战。对牲畜的消化系统开展了代谢和遗传分析，以表征或测定产生甲烷菌的生态学和多样性，从而确定存在哪些微生物及其在消化营养成分方面的作用。这使得能够制订使瘤胃微生物和（或）基于瘤胃的饲料添加剂在增强能量摄取及减少甲烷和二氧化碳排放方面的效率达到最优化的战略。此外，使用遗传标记为所需特性如湿热环境适应性、抗疾病和奶肉产量高等选择捐精牲畜将有助于在今后数十年促进畜牧业发展。在所有这些调查中，不是将核和核相关技术用作示踪剂（示踪营养成分代谢途径的营养成分同位素标记）就是用作实验室方法（放射免疫分析、基于分子的遗传分析等）来测量目标参数。

F.1.3. 结论

213. 高效的气候智能型农业需要有关影响土壤-水-作物-牲畜相互作用的因素和驱动力的资料，以便能够使农业系统有效地适应气候变化。至关重要的是监测和评价不同的田间适应性和减缓战略，以推广最好的农田管理实践，从而增强恢复力、粮食安全和长期收益。同位素和核技术为协助持续改进气候智能型农业提供了新的信息。

F.2. 研究气候变化及其对海洋环境影响的核技术



图 F-4. 沿海资源受到气候变化的威胁，其中珊瑚礁是重要的生物多样性生态系统以及许多海洋物种的栖息地和繁殖场（照片来源：罗伯特 B. 顿巴）。

214. 开发和制订能够使海洋环境及其资源适应气候变化以及减轻气候变化对它们的影响的手段和战略非常重要。正如在联合国秘书长发起的“海洋契约”中和在联合国可持续发展大会（里约+20）期间举行的国际讨论中所强调的那样，达到这一目标将需要加强特别是对更加脆弱的生态系统进行海洋科学研究、监测和观察方面的国际合作。

215. 自 19 世纪以来，二氧化碳的大气浓度已从百万分之 280（280ppm）增加到 2011 年的 390ppm。二氧化碳是控制地球上全球热平衡的主要温室气体。海洋吸收二氧化碳量约占主要因化石燃料燃烧和改变土地使用所致人为二氧化碳年排放总量的三分之一。

216. 大气二氧化碳的增加已知是气候变化和相关问题的一个主要促进因素，相关问题如全球变暖、海平面上升、海洋酸化、氧耗尽以及极端气候事件发生的频率和强度增加等。气候变化反过来对渔业资源、沿海水产养殖、珊瑚礁和其他沿海资源以及大型低海拔沿海城市人类居住方式产生各种重大的直接和间接影响。水循环的改变也造成沿海侵蚀以及可能导致富营养化（水变得过于富含营养物、藻类和植物生长旺盛和更多地分解而以此消耗更多氧气并最终导致水中氧耗尽的过程）及海产品和水产养殖产品受污染的营养物和污染物分布、迁移和生物多样性方面的变化。

217. 核技术对了解有关海洋环境条件对海洋生态系统和海洋生物体的影响的一些基本科学问题非常重要。

218. 放射性核素和稳定同位素可用于研究历史气候研究中的各种环境参数，如温度、降雨和海水酸度等。可利用冰川、沉积物、冰盖和珊瑚作为贮存和记录其形成时环境条件的“贮存系统”或“记录器”。放射性核素和稳定同位素还可用于更好地了解钙化或化学品生物累积和有机体对不断变化的环境条件的相关响应等生理学过程。

219. 原子能机构环境实验室一直利用和开发核和同位素技术来促进总体了解与气候变化有关的海洋环境方面的变化，包括海洋变暖和海洋酸化。

F.2.1. 厄尔尼诺南徊现象

220. 厄尔尼诺南徊现象是一个引人注目的气候事件，这种现象每隔几年发生一次，并对太平洋地区许多国家的气候和经济产生很大的影响。它还对南极冰的形成有一定影响。南徊伴随着热带东太平洋表面海水温度的变化（变暖和变冷分别被称为厄尔尼诺现象和拉尼娜现象）和热带西太平洋空气表面压力的变化。它还局地改变了控制我们星球气候的关键过程之一的海洋循环。

221. 这些气候模式震荡的极端情况造成世界上许多地区发生洪水和干旱等恶劣气象条件，并对许多国家的渔业产生严重影响。那些依赖农业和渔业的国家特别是濒临太平洋的那些国家受影响最重。

222. 利用放射性核素和稳定同位素对厄尔尼诺南徊现象进行的研究表明，在厄尔尼诺事件期间热带地区和亚热带地区海洋温度变换，并伴随着蒸发和同位素分馏方面的变化，这表现为海水中氘、碳-13、碳-14 和氧-18 同位素成分的变化。可以在沉积物、珊瑚、冰川、洞穴水库或树轮中研究这些变化。这些调查有助于解释上溯几千年期间厄尔尼诺南徊现象的发生情况。

F.2.2. 碳循环

223. 海洋是一个主要的碳汇，数量越来越多的二氧化碳的捕集正在造成海洋变得更加酸性。“沉降粒子”是从海洋表面到海底迁移碳和污染物的主要机制。这包括大气碳，这种碳通过粒子沉降从二氧化碳被转化成生物质并被螯合进入深水。因此，必须了解控制物质从海洋表面向海底流动的机理。

224. 天然放射性核素钍-234 一直被越来越多地用于进行公海和沿海环境中上层海水粒子通量和碳排出量的量化。钍-234 是一种粒子活性同位素，是由其溶解母体铀-238 的放射性衰变在海水中产生的。铀-238 和钍-234 测量总活性之间的不平衡反映数日至数周时间里从海洋表面的净粒子输出率。

225. 与气候变化有关的若干环境过程可能改变海洋中碳循环和碳螯合。大气中二氧化碳的增加和所致海水中二氧化碳的增加正在逐渐影响海洋的酸度。水酸度的增加能够影响导致粒子形成和通过水柱（从表面到海床的理论上的水柱）沉积的若干生物学过程。温度变化影响着世界许多地理区域春季-夏季水柱分层的季节性时间。这影响到粒子和碳排出的动力学，因为水柱分层是粒子向下流动中一个关键的物理过程。较暖的温度业已表明影响着高纬度海冰的范围和厚度。

F.2.3. 海洋酸化的影响

226. 模拟研究已清楚地表明，极地和热带地区特别容易受到不断升高的温度和海洋酸化作用气候变化合并效应的影响。原子能机构正在开展调查海洋酸化效应的实验研究，以期更好地预测它们对海洋生物多样性的影响。

227. 放射性同位素是调查海洋有机物对不断升高的温度、不断增加的二氧化碳分压及不断减少的盐度和氧含量之响应情况的有价值的工具。它们已被用于提供证据来说明预期伴随全球海洋变化的一些生物学效应。正在利用核技术对若干重要的生物学过程进行研究，这些过程包括钙化、生物矿化、新陈代谢和痕量元素的生物累积。

228. β 辐射钙-45 同位素目前常被用于测量包括造礁珊瑚物种在内的许多物种的钙化率。它可以给出钙质结构中净钙化率的良好估计值。可以通过纳入钙质结构的其他重要元素如锶-85 等来调查生物矿化作用。

229. 放射性同位素在调查各种不同的环境条件下的代谢过程方面特别有用。例如，锌金属酶碳酸酐酶是海洋有机物碳摄取中促进光合作用、生物矿化过程和系统酸基平衡的一种催化剂，而且易受海洋酸化或海水中缺氧的影响。通过研究放射性同位素锌-65 的摄取动力学，利用这种同位素来评定升高的二氧化碳分压对有机物新陈代谢的影响。总而言之，鉴于钴-57、钴-60、锰-54 或硒-75 等放射性同位素相对应的稳定同位素的代谢重要性，这些放射性同位素都很重要。这些痕量元素具有至关重要的生理学功能，会受到变暖、海洋酸化、缺氧（氧耗竭）或盐度变化的影响。利用采用了钠-22 和氯-36 等放射性示踪剂的高灵敏度技术研究了离子调节等具体的生理学过程。

F.2.4. 未来影响

230. 今后，预计因酸化所致海洋碳酸盐化学方面的变化或由于沿海地区淡水的不断释入所致海洋盐度的变化将改变痕量元素的化学形成过程并改变海洋有机物对它们的生物利用率。此外，温度、碳酸过多（升高的二氧化碳）、缺氧（低氧）和盐度变化还将妨碍离子调节等生理学功能。可以利用溶解的放射性示踪剂调查在不断增加的二氧化碳分压情况下生物累积能力。放射性同位素分析已为了解海洋有机物的毒性机理和评定海产品污染对人类消费的危险提供了有价值的信息。这些技术具有高灵敏度和分辨率，可用于了解由碳驱动的对海洋有机物的影响，并减少在不断变化的海洋化学所造成的生物结果方面存在的不确定性。可靠的数据和减少的不确定性对于建立有关海洋酸化对渔业影响的精确模型和估计所产生的社会经济影响乃至至关重要。

F.2.5. 稳定同位素用于气候变化研究

231. 稳定同位素正在用于研究海洋中与气候变化、海洋酸化和全球碳循环高度相关的各种过程。

232. 化石燃料示出两种稳定碳同位素（碳-12 和碳-13）的独特比率，这些燃料的燃烧在大气中留下特有的同位素特征。通过碳同位素的海洋测量可示踪这种人工讯息在海洋中的侵入情况，因此，可将碳-13 用作一种指纹来调查海洋是如何作为温室气体汇集地的。溶解在海水中的碳-13 还被正在钙化的有机物摄取，因此，可利用壳中碳-13 特征作为一种古气候年代测定工具。目前还在根据长寿命块状珊瑚中硼-11 的同位素组成开展海水酸度的重现工作。海洋微体化石的碳酸盐壳中或长寿命珊瑚中锁定的氧同位素记录（氧-18/氧-16）等替代指标已被广泛用于估计既往的海洋表面温度、盐度和循环体系如过去厄尔尼诺南徊现象的强度和频率以及相关的冰河期-间冰期变化等。降雨中氧同位素和氢同位素比率的长期变化也反映风暴路径、气团轨迹、雨水历史和空气温度等局地气候条件方面的变化，所有这些可能都会受到水团循环变化的强烈影响。氮同位素比率也被用作水柱中繁殖率和营养水平变化及氮化合物来源的一个记录。

233. 利用稳定同位素示踪气候变化的其他新技术包括测量在沉积物等环境档案中保存的特定脂类生物标记物的碳和氢稳定同位素组成。源自曾经是活的有机物的特定脂类生物标记物可回溯追踪其原始化合物，而且它们的稳定同位素组成反映它们生成时的环境和气候条件。因此，可将它们用作指标来重现温度、二氧化碳水平、湿度、海洋繁殖率和源自土壤侵蚀的沉积物输入情况以及以地质年代评定流域植物和人为影响。

F.2.6. 结论

234. 核和同位素技术是促进了解与气候变化有关的海洋环境中化学、生物学和生态学改变的独特工具。

235. 内在的天然放射性核素时钟使得能够对同位素指标在其中替代许多环境参数的环境记录进行测龄。海洋化石的碳酸盐壳中、长寿命珊瑚中或沉积物中的历史气候条件的重现能够用于帮助预测温度、降雨量和海水酸度等参数的行为。

236. 需要这种知识来研究今后的气候条件对包括渔业和水产养殖业在内的海洋生命和生态系统的生态学和社会经济影响，并帮助社会制订减轻或适应这些条件的战略，这将要求在特别是对更加脆弱的生态系统进行海洋环境科学研究、监测和观察方面持续加强国际合作。