

第五十八届常会

临时议程项目 16

(GC(58)/1、Add.1 和 Add.2)

2014 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 2013 年令人瞩目的发展情况。
- 《2014 年核技术评论》涵盖以下领域：动力应用、先进的裂变和聚变、加速器和研究堆的应用、牧业生产和温室气体减排、数字成像和远距放射学、辐射技术用于废水和生物固体处理以及有害藻华。原子能机构网站¹以英文提供了与《2014 年核技术评论》相关的补充文件，内容涉及核知识管理的作用和核电与气候变化。
- 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《2013 年年度报告》(GC(58)/3 号文件)，特别是其中的技术部分，还可参阅《2013 年技术合作报告》(GC(58)/INF/5 号文件)。
- 已对该文件进行了修改，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/GC58/Documents/>

2014 年核技术评论

总干事的报告

执行摘要

1. 随着 2013 年底全世界在运核动力堆达到 434 座，核能已经拥有了 371.7 吉瓦（电）的全球发电容量。有四座新接入电网，并有 10 座新反应堆开工建设。白俄罗斯成为 30 年来开始建造首座核电厂的第二个核电新加入国。近期和长期增长预测仍集中在亚洲，特别是中国。2013 年，72 座在建反应堆是 1989 年以来的最高数字。其中有 48 座在亚洲，这与自 2000 年以来最新并网的 52 座新反应堆中有 42 座在亚洲一样。
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将核电作为能源结构的一部分纳入。在已运行核电厂的 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工作，12 个正计划建造新厂或完成暂停的建造工作。
3. 2013 年 6 月举行的原子能机构“21 世纪的核电部长级会议”重申，核电仍然是许多国家加强能源安全、减少多变的化石燃料价格的影响和缓解气候变化影响的一项重要选择。“最后声明”表示，“作为全球能源需求日益增长时代的一种稳定的基荷电力来源，核电是其他能源包括可再生能源的补充”。根据原子能机构 2013 年的预测，到 2030 年，预计核电增长率将介于低值预测 17%至高值预测 94%之间。这些数字略低于 2012 年的预测，反映了福岛第一核电站事故的持续影响、天然气价格低迷和可再生能源的使用日益增多。其他资料侧重于核电与气候变化之间的联系，因为核电、水电和风能是所有电力生产来源中寿期温室气体排放最低的。
4. 执行原子能机构“核安全行动计划”仍然是成员国、秘书处和其他相关利益相关者为加强安全所采取的行动的核心。继续在核电厂进行安全改进，包括落实从福岛第一核电站事故中汲取的教训。这样做对加强全球核安全框架起到了促进作用。由于共享和转让知识对于安全和高效管理核安全活动至关重要，还提供了更多专门论述“核知识管理”的资料。
5. 继续加强和研究先进裂变反应堆如水冷堆、快堆和气冷堆预期将推动更高效利用核燃料和减少放射性废物量。人们越来越关注中小型反应堆和利用核电厂开展非电力应用，如海水淡化、工艺热、地区供热和氢生产。
6. 铀的现货价格仍保持在七年低位，从而制约了各公司筹集资金进行将对未来生产产生影响的勘探和可行性研究。尽管据报道在若干国家出现了附加储量，但以往宣布的许多新项目却有可能延迟进行。

7. 全球铀浓缩能力继续着更高效能源技术的趋势。气体扩散厂于 2012 年和 2013 年纷纷关闭。在离心浓缩项目上取得了进展，激光浓缩已朝着商业化的目标迈进。

8. 总燃料制造能力一直相对恒定，但预计未来几年会有所增长，以满足预测的需求增长。

9. 乏燃料和高放废物处置设施尚未开始运作，储存中乏燃料的数量持续增加。从全球众多核电厂又卸出了 10 000 吨重金属乏燃料。这使得已卸出的乏燃料累计总量约为 370 500 吨重金属。

10. 世界各地正在运行适用于除被宣布为废物的高放废物和乏核燃料外的各类放射性废物的处置设施。芬兰、法国和瑞典的地质处置设施正在进行建造许可证审批工作。其他成员国在高放废物和乏核燃料处置的研究与发展方面也在取得进展。

11. 在退役领域有大量的工作要做。截至 2013 年 12 月，全世界已有 147 座动力堆永久关闭，400 多研究堆和临界装置以及数百个其他核设施如放射性废物管理或燃料循环设施已经退役或正在进行拆卸。在全部在运核动力堆中，约 40% 目前已有 30 多年堆龄，其中约有 7% 超过 40 年堆龄。尽管其中一些可能继续运行达到 60 年，但在未来 10 到 20 年，许多都将退出现役。

12. 2013 年，受福岛第一核电站事故影响地区的清污活动取得进展。日本拨付了大量资源，用以规划和实施大面积场外污染区的治理活动。为促使疏散人群重返家园做出了特别的努力。还在协调治理活动与重建和振兴努力方面取得了良好进展。

13. 随着国际热核实验堆建造工作的进行，该全球性磁约束聚变计划正在转变为一项越来越注重工业性电厂规模聚变能生产的计划。许多国家正在独立开发项目计划，并发起新的研发活动，以通向聚变能商业化准备就绪示范阶段。这些计划和活动共同构成了“聚变示范电厂”（DEMO）计划，尽管没有单一的或协调一致的聚变电生产示范路线图。

14. 越来越多的成员国对制订研究堆计划表现出兴趣，有些成员国计划使用自己的第一座研究堆作为国家引进的核科学技术基础设施。三个国家正在建造新研究堆，而若干国家已制订了正式的计划或正在考虑建造新研究堆。老旧反应堆正在被数量较少的多用途研究堆所取代，将需要加强国际合作才能确保对这些设施的广泛和高效利用。

15. 处理设施和老旧研究堆的运营挑战在 2013 年重现，但由于加强了需求管理和供应多样化，钼-99 的供应并未如 2007 年至 2010 年间那样受到严重影响。澳大利亚和南非继续成为非高浓钼-99 的主要供应国。南非继续将其工艺转化为专门使用低浓钼。比利时和荷兰继续其将商业规模生产工艺从高浓钼转向低浓钼的计划。

16. 捷克共和国、越南和匈牙利在其高浓钼乏燃料返还俄罗斯联邦后成为无高浓钼燃料国家。

17. 核技术继续显著促进“千年发展目标”。许多成员国确信，核电将通过减少碳排放对气候变化的关切作出响应。非动力技术也通过人体健康、粮食和农业、水资源管理、海洋和陆地环境以及放射性同位素生产和辐射技术方面的计划和技术合作做出显著贡献。核医学和放射治疗技术的安全和有效使用被用于遏制将在未来岁月严重影响发展中国家的不断增长的全球癌症流行。消除贫困和饥饿得到了原子能机构在粮食和农业方面工作的支持，这项工作采用核技术改进土壤和土地资源管理，以及发展能在边缘或盐碱土壤和恶劣条件下生长的作物品种。其他技术被用来提高畜牧生产和健康，防治破坏作物和传播动物和人类疾病的虫害，并对食品进行安全的辐照，以保护消费者免受食源性疾病的传播和减少食品变质。

18. 农业可持续发展没有可持续的水资源管理是不可能实现的。核和同位素技术被用来准确评定水资源的规模、位置和补给率以及检测地下水污染，这是对制订长期水资源管理战略至关重要的资料。利用核科学及其应用探测海洋和沿海地区放射性污染物及其最终去向、这些污染物对海洋生物的影响以及评定重要的海洋热碳循环过程和气候变化的影响可以对环境可持续性提供支持。利用辐射技术处理工业和废水排出流和污泥有助于节约水资源和改善土壤条件，从而对环境可持续性提供进一步支持。本年度“核技术评论”对其中若干核技术进行了较深入的探讨。

19. 随着人口的不断增长，对充足食物的需求也在不断增加；反过来，沿食品生产链所产生的温室气体量也不断增加，就家畜而言尤其如此。创新性核与核相关技术可以在动物营养、健康、繁殖和饲养方面发挥独特的作用，并由此促进可持续粮食安全，同时通过减少温室气体排放缓解气候变化。

20. 若干核技术被用于研究微生物蛋白质的摄取和利用，并开发出更好的饲料作物，以提高饲料的转化率和能量的利用率，从而与一套好的实践如改善牧场管理相结合，减少温室气体量。可以通过利用放射免疫分析（放免分析）中碘-125 标记的孕酮标识乳牛群中怀孕动物并随后将其用于减少参与繁殖的非多产动物比例的方式来增加动物生产能力。核技术还有助于表征家畜基因组，从而便利识别有利的基因性状，如那些有助于抵御疾病或能在恶劣气候或营养条件下茁壮成长的基因性状。

21. 作为原子能机构旗舰计划的“治疗癌症行动计划”从 2014 年起被转移到技术合作司，并升格为处级单位。这项新举措旨在进一步提高计划执行的有效性和效率。“治疗癌症行动计划”将侧重于为癌症防治相关活动进行资源调动和筹集资金；开发满足成员国需要的新的和经过改进的现有癌症防治相关产品和服务（如“治疗癌症行动计划”综合评定工作组、虚拟癌症防治大学和地区培训网络、“治疗癌症行动计划”示范验证点）；并建立和加强与伙伴特别是世界卫生组织（世卫组织）的联系，并重点强调各自任务的互补性。

22. X 射线成像是在医疗实践中最有力的工具之一，具有广泛的诊断应用范围，包括癌症检测和分期。此外，多种成像模式被用来制订放射治疗计划，核技术在全世界被用于改进癌症防治。在医疗放射学领域，从传统的（基于胶片的）成像转向数字成像

的需求日益增长。尽管数字成像有着显著的优势，如提高了可靠性和易用性，但也有从传统放射学转变的挑战，如高资本费用，包括人力资本开发。对发展中国家而言，总的挑战是要找到一个满足本国需要和情况的合适方法，以便从传统的胶片处理和存储有效过渡到数字采集和显示。

23. 与远程放射学相结合使用数字成像技术使得做出诊断可以不考虑图像获取地与从业者所在地之间的距离。因此，远程放射学是解决成像专家不均衡的地理分布和局部短缺的有效方法。技术作用的越来越大可能有助于缓解人力资源短缺，尽管这种技术需要更强大的通信网络，而且必须在技术基础设施支持方面出现新的角色。

24. 世界各地社会持续的城市化和工业化加剧了淡水供应的污染和城市下水道污泥的产生。利用核技术如电子束加速器处理工业废水排出流和污泥可以有助于保护水资源和保护动物生命和公众健康，并产生生物固体肥料，改善土壤条件。这些技术已成功地展示了它们在处理工业纺织品染料废水以及对下水道污泥进行消毒以提供高品质农业用生物固体肥料方面的效果。由于水短缺加剧，全世界对进行水的再利用的兴趣不断增加。目前正在对辐射技术与传统处理工艺相结合用于生产供间接饮用性复用的高品质水进行试验，而且这种技术有望在不久的将来成为占主导地位的处理技术。

25. 海洋生态系统是世界很大一部分人口重要的食物和收入来源。在一些地区，这些生态系统定期受到有害藻华的威胁。气候变化以及不断扩大的经济活动预计将增加这种事件发生的频率。藻毒素是例如贝类产业在贝类毒素超出监管水平时由于强制关闭收获设施而遭受巨大经济损失的原因。有害藻华发生的频率在淡水环境中也越来越多，从而对淡水水生物种和牲畜以及人类构成了威胁。受体结合分析等核技术已被证明为高效监测海产食品和环境中的藻毒素的工具以及研究气候变化对有害藻华和整个海洋生态系统的影响的工具。受体结合分析技术较传统的方法具有一个关键的优势，因为它非常有针对性，而且非常灵敏，从而为监管部门和生产商提供了关于有害藻华毒素的准确预警。

2014 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 2013 年 12 月 31 日，全世界共有 434 座核动力反应堆在运行，总容量达到 371.7 吉瓦（电）²（表 A-1）。这与 2012 年数字比较略有减少，总容量减少约 1.6 吉瓦（电）。2013 年有四座新反应堆并网发电：中国红沿河 1 号和 2 号机组（1000 兆瓦（电））及阳江 1 号机组（1000 兆瓦（电））以及印度库丹库拉姆 1 号反应堆（917 兆瓦（电））。

2. 在正在运行的商业反应堆中，约 81%属轻水慢化冷却堆；11%属重水慢化冷却堆；4%属轻水冷却石墨慢化堆；3%属气冷堆（图 A-1）。两座反应堆属于液态金属冷却快堆。

² 1 吉瓦（电）相当于 10 亿瓦（电）。

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆（截至 2013 年 12 月 31 日）^a

国家	在运反应堆		在建反应堆		2013 年供应的核电量		截至 2013 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	5.7	4.4	70	7
亚美尼亚	1	375			2.2	29.2	39	8
白俄罗斯			1	1 109				
比利时	7	5 927			40.6	52.1	261	7
巴西	2	1 884	1	1 245	13.8	2.8	45	3
保加利亚	2	1 906			13.3	30.7	155	3
加拿大	19	13 500			94.3	16	655	7
中国	20	15 977	29	28 774	104.8	2.1	160	0
捷克共和国	6	3 884			29.0	35.9	134	10
芬兰	4	2 752	1	1 600	22.7	33.3	139	4
法国	58	63 130	1	1 630	405.9	73.3	1932	3
德国	9	12 068			92.1	15.4	799	1
匈牙利	4	1 889			14.5	50.7	114	2
印度	21	5 308	6	3 907	30.0	3.5	397	6
伊朗伊斯兰共和国	1	915			3.9	1.5	2	4
日本	48	42 388	2	1 325	13.9	1.7	1646	4
大韩民国	23	20 721	5	6 370	132.5	27.6	427	1
墨西哥	2	1 330			11.4	4.6	43	11
荷兰	1	482			2.7	2.8	69	0
巴基斯坦	3	690	2	630	4.4	4.4	58	8
罗马尼亚	2	1 300			10.7	19.8	23	11
俄罗斯联邦	33	23 643	10	8 382	161.7	17.5	1124	2
斯洛伐克	4	1 815	2	880	14.6	51.7	148	7
斯洛文尼亚	1	688			5.0	33.6	32	3
南非	2	1 860			13.6	5.7	58	3
西班牙	7	7 121			54.3	19.7	301	1
瑞典	10	9 474			63.7	42.7	412	6
瑞士	5	3 308			25.0	36.4	194	11
乌克兰	15	13 107	2	1 900	78.2	43.6	428	6
阿拉伯联合酋长国			2	2 690				
英国	16	9 243			64.1	18.3	1527	7
美利坚合众国	100	99 081	4	5 633	790.2	19.4	3912	4
总计 ^{b, c}	434	371 733	72	69 367	2 358.9		15 660	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 39.8 太瓦·小时，占总发电量的 19.1%。

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（194 年零 1 个月）的已关闭核电厂。

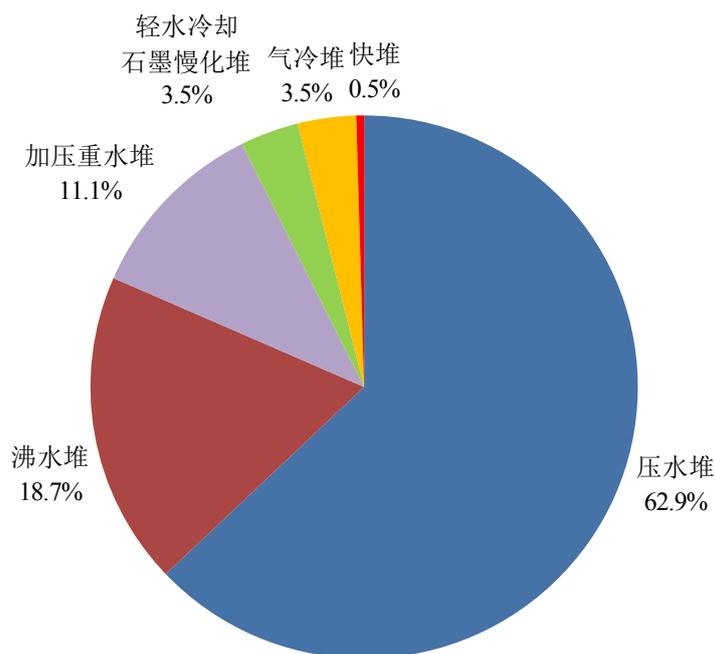


图 A-1. 当前的反应堆类型分布情况。

3. 开工新建反应堆数量从 2010 年的 16 座减少到 2011 年的 4 座，而 2012 年有 7 座开工新建反应堆，2013 年有 10 座（图 A-2），这表明自福岛第一核电站事故以来这一数量呈增长趋势。开工新建反应堆包括：美国萨默 2 号和 3 号以及沃格特 3 号和 4 号，中国田湾 4 号及阳江 5 号和 6 号，大韩民国新蔚珍 2 号，阿拉伯联合酋长国（阿联酋）的巴拉卡 2 号，以及白俄罗斯的白俄罗斯 1 号。继阿联酋 2012 年开工建造第一座核电厂之后，白俄罗斯是 30 年来开始建造首座核电厂的第二个核电新加入国。

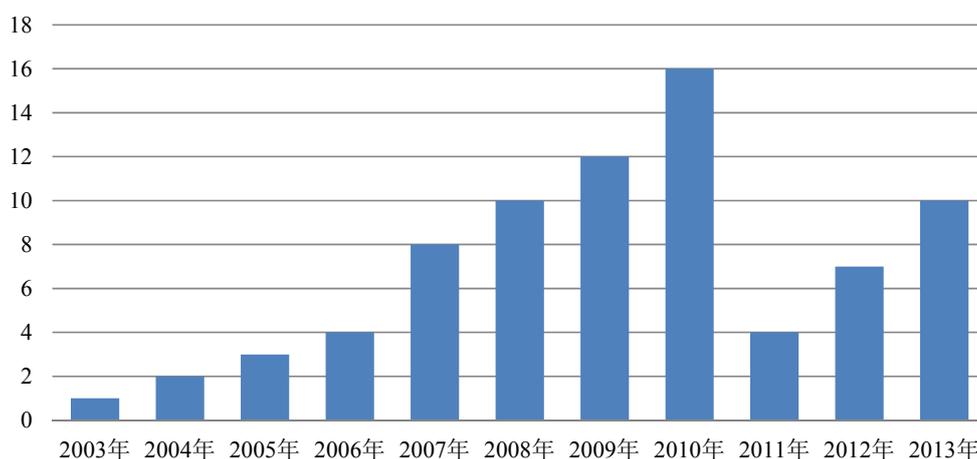


图 A-2. 开工建造动力堆的趋势。

4. 2013 年，六座反应堆正式宣布永久关闭：美国的水晶河 3 号、基瓦尼以及圣奥诺弗雷 2 号和 3 号，以及日本的福岛 5 号和 6 号。这比 2012 年关闭的反应堆多三座，但远少于 2011 年的 13 座。此外，西班牙的一座反应堆即圣玛丽亚-德加罗纳反应堆被宣布进入“长期关闭”状态。

5. 截至 2013 年 12 月 31 日，共有 72 座反应堆在建，是自 1989 年以来在建数量最多

的一年。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（图 A-3）。在建的 72 座反应堆中，有 48 座在亚洲，就如同自 2000 年以来最新并网的 52 座新反应堆中有 42 座在亚洲一样。

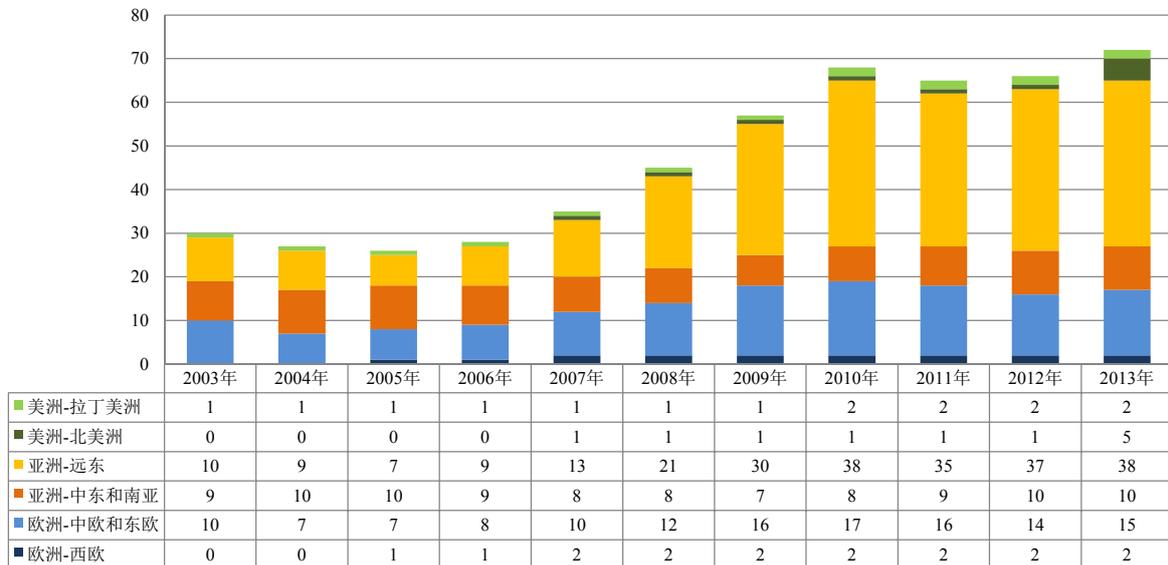


图 A-3. 按地区分列的在建反应堆数量。

6. 2013 年，在运反应堆提高出力和更新或展期运行许可证的趋势继续得到保持。加拿大核安全委员会已授予皮克林六座加压重水堆运行许可证五年展期。美国核管理委员会批准了三台机组提高出力：麦克奎尔 1 号和 2 号，以及蒙蒂塞洛。乌克兰国家核监管检查局授予南乌克兰核电站 1 号机组运行许可证 10 年展期。

7. 2013 年，若干国家在实现首座核电站目标方面取得了重要进展。2013 年 5 月，阿联酋的阿联酋核能公司在巴拉卡场址为其第二台机组浇注第一罐混凝土。正在审查另外两台机组的建造许可证申请。在四台机组中，预计第一台将于 2017 年投入运行，其余的则在 2020 年前投入运行。

8. 白俄罗斯于 2013 年 11 月为其首台机组白俄罗斯 1 号（图 A-4）浇注了第一罐混凝土。这是 2012 年 7 月与俄罗斯联邦的原子能建设出口公司签署合同要建造的两台水堆-1200 机组中的第一台。



图 A-4. 2013 年 11 月 6 日，白俄罗斯的首座核电站在奥斯特洛韦茨场址开工建设（照片由白俄罗斯核电站建设指挥部提供）。

9. 土耳其继续发展其核电计划基础结构，准备在阿库尤建造四台水堆-1200 机组。2013 年，阿库尤核电厂项目公司提交了项目环境影响评估报告。土耳其与日本签署了在锡诺普建造第二座核电厂的合作协定。2013 年 11 月，原子能机构的“综合核基础结构评审”工作组访问（图 A-5）得出结论认为，土耳其已在发展其核基础结构方面取得了进展，并就进一步行动提出了建议。

10. 已经决定引进核电的若干国家正处于基础结构后期准备阶段。继 2011 年就合作建造两台机组的卢普尔核电厂与俄罗斯联邦签署政府间协定之后，孟加拉国于 2013 年开始了场址准备工作。2013 年 10 月，约旦选择了俄罗斯联邦的原子能建设出口公司作为首选供应商，目前正在对阿姆拉场址进行表征。波兰计划兴建两座核电厂。2013 年 3 月的“综合核基础结构评审”工作组访问得出结论认为，波兰已取得了进展，并就进一步行动提出了建议。2013 年，越南完成了对总容量 4000 兆瓦（电）的宁顺核电厂两个场址的可行性研究。尼日利亚和埃及继续为引进核电发展其基础结构。约旦、尼日利亚和摩洛哥正式要求将“综合核基础结构评审”工作组访问安排在 2014 年。2013 年 1 月，南非成为第一个接受“综合核基础结构评审”工作组访问的第一个有在运核电厂的国家，工作组访问旨在审查其为规划新建设施筹备的核基础结构。

11. 若干国家继续考虑引进核电。一些国家正在积极准备就可能实施核电计划作出有根据的决策，而一些国家则正在制订自己的能源战略，纳入了核电方案。在这个阶段，除开发所需人力资源外，重点是开发支持核电计划所需的全面的法律和监管基础结构。



图 A-5. 2013 年 11 月 4 日至 14 日对土耳其进行“综合核基础结构评审”工作组访问期间，原子能机构和国际专家与土耳其同行在一起（照片由土耳其能源和自然资源部提供）。

12. 在已经运行核电厂的 30 个国家中，有 13 个国家在兴建新的核电厂，包括中国、大韩民国、俄罗斯联邦和美国，或者在积极完成之前暂停的建造工作，包括阿根廷、巴西和斯洛伐克。另有 12 个正在运行核电厂的国家正积极规划兴建新的核电厂，包括捷克共和国、匈牙利、南非和英国，或者完成暂停的建造工作，如罗马尼亚和美国。

13. 虽然核工业历来追求规模经济，但对中小型反应堆（中小型堆）也日益关注，部分原因是中小型堆所需投资较少，可降低财政投资风险。目前，有 26 个国家运行着 130 座中小型堆，总容量达 58.2 吉瓦（电），而在建的 72 座反应堆中，14 座是中小型堆。大约有 45 座革新型中小型堆概念处在研发阶段，B.1.4 节将详细介绍。

14. 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、工艺供热和地区供热（图 A-6）。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；三是直接作为汽车燃料，最可能用于轻型插电式混合动力氢燃料电池汽车。核电厂用于电力生产和非电应用，即核热电联供，可为大型能源用户带来各种经济利益，因为核电厂较高的效率可转化为更好的经济实绩，减少所有污染物的排放，提高可靠性和电能质量，更好地利用核燃料，以及灵活并入电网。B.1.6 节专门介绍核热电联供。

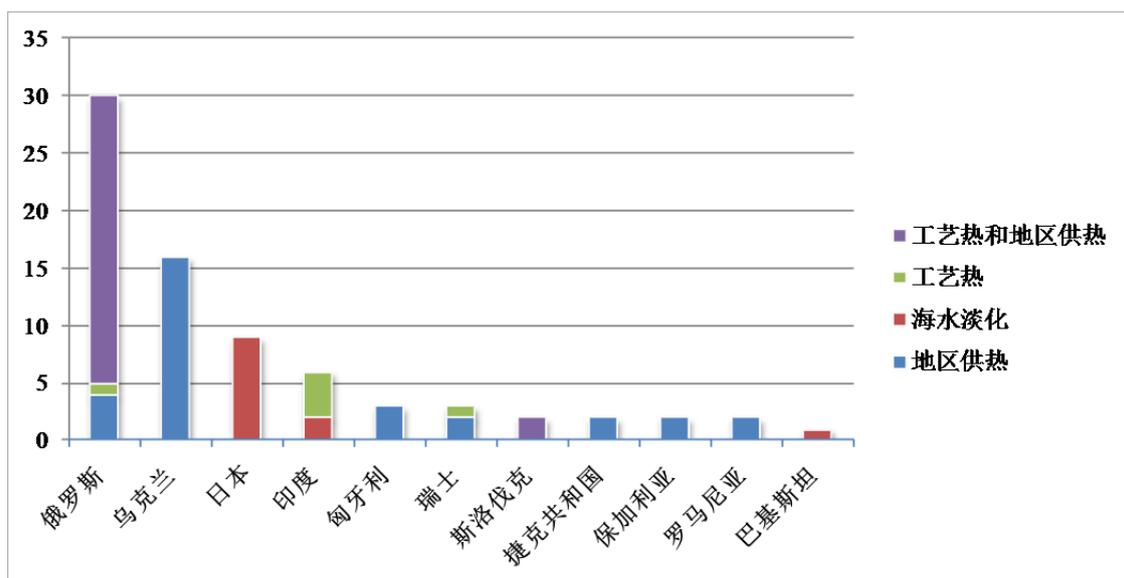


图 A-6. 同时用于非电目的和电力生产的反应堆数量。

A.2. 核电增长预测

15. 30 个国家已选择使用核电，并且有大约同样数量的国家正在考虑将核电作为能源结构的一部分纳入，因为它们发现了核电诱人的长期效益。2013 年 6 月在圣彼得堡召开的原子能机构“21 世纪的核电部长级会议”发出的主要信息之一就是，对许多国家而言，核能将在实现能源安全和可持续发展目标中发挥重要作用。核电作为一种清洁的低碳能源，有助于各国满足日益增长的电力需求，为应对气候变化问题而限制碳排放，减少能源供应的安全问题，以及降低对受地区价格差异和波动影响的化石燃料的依赖。

16. 根据原子能机构 2013 年的预测，到 2030 年，预计核电增长率介于低值预测 17% 至高值预测 94% 之间。这些数字略低于 2012 年的预测，被解释为反映了福岛第一核电站事故的持续影响、天然气价格低迷和补贴可再生能源的能力日益增强。

17. 根据高值预测，2030 年全球总容量将达到 722 吉瓦（电），在 2012 年水平上容量近乎翻倍。这一估计基于对经济和电力需求增长率，特别是远东地区，乐观但合理的假设。高值预测假设，有关气候变化和加强全球经济的国家政策将发生变化，从而导致更多国家在其能源结构中引进核电或扩大现有容量。

18. 根据低值预测，2030 年全球核电总容量将增加到 435 吉瓦（电），在 2012 年水平上仅增加 62 吉瓦（电）。这个估计假设目前的市场、技术和资源趋势继续下去，而支持越来越多地采用核电的法律、政策和法规几乎不变。低值预测反映了一些国家因福岛第一核电站事故而长时间暂停或决定不追求核电发展。

19. 预计最强劲的增长会出现于已经拥有在运核电厂的地区，以亚洲国家为首，包括中国和大韩民国。东欧（包括俄罗斯）以及中东和南亚（包括印度和巴基斯坦）也显示出强劲的增长潜力。

20. 其他评估也显示了堪比原子能机构预测的核增长。在经济合作与发展组织（经合组织）国际能源机构发布的《2013 年世界能源展望》中，核电按当前政策假想方案预计到 2030 年会增长至 513 吉瓦（电），而按新政策假想方案预计会增长至 545 吉瓦（电），但如果按将全球温度上升限制在 2°C 的最高假想，则会增长至 692 吉瓦（电）。这表明，原子能机构的低值预测是谨慎保守的，比国际能源机构的最低预测还少 78 吉瓦（电）。

21. 图 A-7 对原子能机构 2013 年的预测、国际能源机构 2013 年的假想方案和世界核协会 2013 年在《2013—2030 年全球核燃料市场供需状况》中的预测进行了比较。三个组织的高值假想结果类似。

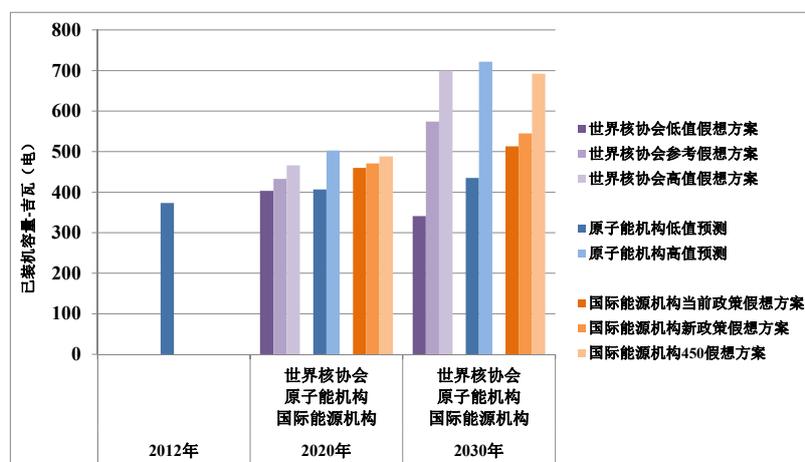


图 A-7. 原子能机构、世界核协会和国际能源机构的核能预测比较。

核电：一项低碳技术³

在所有发电方式中，核电、水电和风能的寿期温室气体排放最少。随着定于 2015 年签署的下一轮全球气候变化协定实行新的碳限制，这些技术将变得更加重要。以 Ecoinvent 数据库和美国国家可再生能源实验室的研究结果为主要依据看来，一座轻水反应堆的温室气体排放量中值估计为每千瓦时 14.9 克二氧化碳当量，其中包括从铀矿开采到废物处置的寿期排放。

³ 有关核电和气候变化的更多资料，见 <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC58/Documents/>。

高山和非高山水库以及径流系统的水电寿期温室气体排放堪比核电。风能排放量取决于风力涡轮机的大小（类别），较小机组（1—3 兆瓦）实际产生的单位容量排放少于较大机组（>3 兆瓦），因为较大机组的建造需要使用更多能源和材料。小型陆地和海上机组的排放量堪比核电，而较大机组的排放量可高出 10 倍。

从这些数值来看，化石能源的排放量是核电的 10 倍左右。例如，硬煤估计为每千瓦时约 1200 克二氧化碳当量，而常规天然气气体是煤的一半左右，每千瓦时约 650 二氧化碳当量。化石燃料温室气体排放量有可能通过采用碳捕获和碳整合予以减少，使煤排放量达到每千瓦时约 200 克二氧化碳当量，使天然气排放量达到每千瓦时 150 二氧化碳当量。

尽管核电的温室气体排放量本身已经较低，但随着浓缩铀生产更具能源效率，核燃料和核反应堆得到改进而提高利用率，以及核电厂寿命延长而减少兴建新设施的需求，未来的排放量将会更低。

A.3. 燃料循环

A.3.1. 铀资源和生产

22. 铀现货价格在 2013 年仍然低迷，降至七年最低，从年初的大约 115 美元/千克铀跌至年底时的大约 90 美元/千克铀。这种影响也见于所报告的长期价格中，长期价格在年初时约为 150 美元/千克铀，年底时跌至约 130 美元/千克铀。价格的下跌显著制约了各公司筹集资金进行勘探和可行性研究的能力，这将对未来生产产生影响。许多以前宣布的新项目有可能被推迟。被称为“红皮书”并由原子能机构和经合组织核能机构（核能机构）在 2012 年联合出版的《2011 年铀资源、生产和需求》估计，可以低于 260 美元/千克铀的成本回收的已确定常规铀资源总量为 710 万吨铀。



图 A-8. 基于技术贸易集团铀市场指标的铀价趋势。

23. 2013 年，包括澳大利亚、博茨瓦纳、加拿大、中非共和国、中国、捷克共和国、丹麦（格陵兰）、印度、约旦、蒙古、纳米比亚、俄罗斯联邦、斯洛伐克和南非在内的许多国家均报告发现了更多的资源。

24. 继续进行从东芬兰塔尔维瓦拉镍矿中生产作为副产品的铀的准备工作。该矿的铀资源为 2.2 万吨铀，预计产量为每年 350 吨铀。预计将于 2014 年开始进行铀提取。

25. 海水一直被作为非常规铀的来源进行研究。作为巨大能源的大约 45 亿吨铀以约十亿分之 3.3 的极低浓度（与浓度为 10 亿分之 1000 至 5000 的陆地岩石浓度相比）溶解在全世界的海洋中。继续对这一潜在来源进行了一些研究。

26. 世界核协会估计 2011 年的铀产量为 53 493 吨铀，2012 年为 58 394 吨铀，2013 年为 54 039 吨铀。

27. 原地浸出在 2009 年超出了作为主要生产方法的地下开采，原地浸出产量的比例预计在中期将继续增加。2012 年，哈萨克斯坦的若干原地浸出矿扩大，使该国的年产量增加了约 2250 吨铀。据世界核协会报告，原地浸出开采量占 2012 年世界总产量的约 45%。

28. 在纳米比亚，帕拉丁能源公司的蓝格·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。目前正在研究将年产量进一步增加到 3900 吨铀的第四阶段扩建。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。纳米比亚已开始进行胡萨贝铀矿（图 A-9）的建设，该矿预计在 2015 年前开始运行，到 2017 年，其最大生产能力可能达到 5770 吨铀。尼日尔一座生产能力为 5000 吨铀的新矿即伊姆拉伦矿可望在 2015 年前开始运行。



图 A-9. 纳米比亚的胡萨贝铀矿场址（照片由中国广核集团提供）。

29. 对博茨瓦纳莱特拉卡内项目的可行性研究正在进行中。2013 年 4 月宣布了颁发给坦桑尼亚联合共和国的首个铀矿许可证，但预计该项目将因铀市场低迷而被推迟。

30. 在南澳大利亚，类星体资源公司宣布将于 2014 年在四里东和四里西两个矿床开始原地浸出采矿作业。在西澳大利亚，Toro 能源公司的威卢纳铀矿得到了联邦政府对其原始矿床的最终环境审批，并且该公司从 Mega 铀矿公司手中购买了附近的梅特兰湖铀矿项目。

31. 在美国，怀俄明州 North Butte 原地浸出项目和失溪原地浸出项目分别于 2013 年 5 月和 8 月开始投入生产。

32. 在土耳其，完成了对 Temrezli 原地浸出项目的预可研，并颁发了必要的开发许可证。目前计划在 2016 年开始生产，年产量为 350 吨铀。

33. 2013 年，格陵兰议会（丹麦王国）投票赞成取消对提取包括铀在内的放射性物质的长期禁令。此举可使克瓦讷峡湾项目得以继续进行，目前正在对该项目开展可行性研究，以评价进行铀、稀土元素和锌生产的采矿作业。

34. 正在计划为瑞典中部的 Närke 项目制订一个初步冶金试验计划，那里的明矾页岩中可能含有超过 25.7 万吨的铀。在西班牙，颁发了对萨拉曼卡 1 号铀项目 Retortillo 矿床的环境许可证，并启动了颁发开发许可证和执照的正式程序。罗马尼亚宣布计划在尼亚姆茨开挖一个新铀矿，以补偿在苏恰瓦的现有矿山的资源枯竭。

35. 乌兹别克斯坦 2013 年完成了在中克孜勒库姆的三个铀原地浸出回收矿田的建设。中国国土资源部选出了六个铀矿作为“国家绿色矿山”。“绿色矿山”系指在日常作业中重视节能、减排和土地复垦的环境友好型采矿企业。伊朗伊斯兰共和国宣布在萨甘德铀矿山和阿尔达坎附近的相关选冶厂开始作业。

36. 世界核协会估计，2013 年的铀产量仅涵盖反应堆估计铀消耗量 64 978 吨铀的大约 83%。其余部分则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，按当前市场价格在经济上可行的估计资源总量即 530 万吨铀的使用期限为 78 年。

37. 非常规铀资源和钍进一步扩大了资源基础。当前对作为少量副产品可潜在回收的铀的估计量约为 800 万吨铀。2013 年 3 月，在美国佛罗里达州运行着一座示范厂的 Uranium Equities 公司宣布，一项研究发现，其从磷酸盐中提取铀的 PhosEnergy 工艺可行并具有成本效益。提交了关于巴西圣基特里娅 Itataia 矿山的环境影响评定，以便由两个工厂生产磷酸盐和铀浓缩物。

38. 世界范围的钍资源估计约有 600 万至 700 万吨。尽管钍一直在示范性地作为燃料使用，但在能够考虑将其作为燃料之前还需要开展大量的工作。在澳大利亚（Nolans Bore）、丹麦（格陵兰的克瓦讷峡湾）和南非（Steenkampskraal），有一些可能作为副产品生产钍和含钍残留物的稀土项目，预计它们将在近期投入生产。2013 年 4 月，托尔能源公司开始在挪威哈尔登实施钍混合氧化物燃料试验计划。

A.3.2. 转化、浓缩和燃料制造

39. 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 万吨铀。但

预计随着法国建设一座新电厂（阿雷瓦集团公司 Comurhex II 项目）和美国整修另一座电厂（霍尼韦尔大都会工程设施），情况将出现大的变化。

40. Comurhex II 项目的生产能力为 1.5 万吨铀并有可能扩大到 2.1 万吨铀，将替代位于马勒维西和特里卡斯坦场址的现有工厂。Comurhex II 将在 Comurhex I 停止生产后逐步开始生产。

41. 霍尼韦尔大都会工程设施（图 A-10）在进行旨在提高效率和减少工厂停工期的设备和工艺升级后已于 2013 年 6 月恢复了生产。



图 A-10. 美国伊利诺伊州霍尼韦尔大都会工程设施的新氟化氢气化器（照片由 Coverdyn 提供）。

42. 2011 年，俄罗斯联邦国家原子能公司决定开始实施一个将所有转化设施集中在一个场址即谢维尔斯克西伯利亚化学企业集团的项目。位于安加尔斯克的转化场址计划在 2014 年 4 月关闭。

43. 当前的转化服务需求总量（假设铀-235 浓缩尾料丰度⁴为 0.25%）每年在 6 万至 6.4 万吨铀之间。

44. 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即设在哈萨克斯坦的一座新三氧化铀提炼厂预计将在 2018 年前开始建造。该提炼厂将坐落在乌斯特卡缅诺戈尔斯克的乌尔巴冶金厂内，预计其生产能力将为每年 6000 吨三氧化铀。

45. 全球总浓缩能力目前约为每年 6500 万分离功单位，而总需求将近每年 4900 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（中核集团公司）、阿雷瓦集团公司（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（美国）。

⁴ 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。

46. 铀浓缩公司在德国、荷兰、英国和美国都运行着离心厂。截至 2012 年底，该公司在欧盟的总生产能力为每年 1470 万分离功单位。根据目前的许可证，该公司在美国的设施（图 A-11）的初始生产能力为每年 300 万分离功单位，2013 年早些时候作出了扩大到 570 万分离功单位的投资决定，目标是在 2022 年之前实现此生产能力。该公司已向美国核管会申请许可证修订，以授权该公司将其在美国的生产能力提高到每年 1000 万分离功单位。



图 A-11. 铀浓缩公司在美国新墨西哥州尤尼斯的浓缩设施（照片由铀浓缩公司提供）。

47. 美国能源公司的帕杜卡气体扩散浓缩厂是世界上最老的在运浓缩厂，在运行了 60 多年后于 2013 年结束了其商业运行。该公司希望 2014 年继续在该场址运行，以便管理库存、履行客户订单和满足其与美国能源部的租赁协议的周转要求。

48. 在美国，正在设计和规划两座使用离心浓缩的新设施：阿雷瓦集团公司的鹰石浓缩设施和美国能源公司的美国离心分离厂。鹰石浓缩设施目前正处于暂停状态，阿雷瓦集团公司正在寻找财政伙伴和优化资本支出的替代财政模式。美国能源公司完成美国离心分离厂建造工作的时间表取决于能否通过美国能源部的贷款保证计划获得资金。

49. 美国北卡罗来纳州威尔明顿全球激光浓缩设施在 2013 年 6 月完成了验证铀浓缩激光技术的试验回路计划的第一阶段。继更详细的第二阶段研究后，预计第一座商业设施将能够每年生产 600 万分离功单位。激光激发同位素分离系统有限公司称，美国能源部已经开始与全球激光浓缩公司就在帕杜卡场址建设浓缩其高丰度贫化铀尾料库存（约 10 万吨）的另一个激光浓缩厂的问题进行商谈。

50. 在法国，阿雷瓦集团公司除了其 2010 年 12 月落成的乔治·贝斯 II 南方厂铀浓缩设施外，于 2013 年 3 月正式启动了其北方厂铀浓缩设施。

51. 2013 年，TVEL 燃料公司在俄罗斯联邦运行的四个铀浓缩厂之一即设在泽列诺戈尔斯克的电化学厂（图 A-12）收到了运行至 2023 年的展期许可证。2012 年，TVEL 燃料公司和哈萨克斯坦国家原子能公司同意参加为计划达到每年 500 万分离功单位产能的乌拉尔电化综合厂浓缩设施筹集股本的活动。



图 A-12. 在俄罗斯联邦泽列诺戈尔斯克的电化学厂（照片由 TVEL 燃料公司提供）。

52. 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。阿根廷正在皮尔卡尼耶乌重建气体扩散能力。目前正在从美国进口浓缩服务。

53. 2013 年，当前全球总去氟转化⁵能力一直保持在每年约 6 万吨六氟化铀。

54. 当前对轻水反应堆燃料制造服务的年需求量保持在约 7000 吨燃料组件中的浓缩铀，但预计到 2015 年将增加至每年约 8000 吨铀。加压重水堆的需求为每年 3000 吨铀。现在大多数燃料类型都有若干相互竞争的供应商。全球总燃料制造能力对轻水堆燃料而言仍维持在每年约 13 500 吨铀（燃料元件和燃料棒束中的浓缩铀），对加压重水堆燃料而言为每年约 4000 吨铀（燃料元件和燃料棒束中的天然铀）。对于天然铀重水堆燃料，在阿根廷、加拿大、中国、印度和罗马尼亚是将铀纯化并转化为二氧化铀。

55. 在中国，中核集团公司宜宾燃料元件厂的产能 2012 年约为每年 600 吨铀。至于中核集团公司在内蒙古包头市为秦山坎杜型加压重水堆制造燃料组件的工厂（每年 200 吨铀），其燃料制造能力正在扩大到每年 400 年吨铀。正在包头建设一座为中国 AP-1000 反应堆制造燃料的新工厂。

56. 作为阿雷瓦集团公司和哈萨克斯坦国家原子能公司的合资企业，哈萨克斯坦计划的一个燃料制造设施预计于 2014 年竣工，并预期有每年 1200 吨铀的能力。

57. 计划能力为每年 400 吨铀的一个水水动力堆-1000 燃料制造厂一直在乌克兰斯莫利诺村附近建造。

58. 在过去的几年中，TVEL 燃料公司开发出了压水堆运行所用的燃料组件，计划于 2014 年将四个试验组件装入瑞典 Ringhals-3 号压水堆作试验性运行。

59. 再循环作业通过使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。阿雷瓦集团公司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

⁵ 为了制造浓缩铀燃料，加浓六氟化铀必须被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。

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。

60. 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（Krasnoyarsk-26）建造。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。

61. 在世界范围内，2013 年大约有 30 座轻水堆使用混合氧化物燃料。

62. 2013 年 10 月，阿雷瓦集团公司梅洛克斯混合氧化物燃料制造设施开始为荷兰鲍塞尔核电厂生产混合氧化物燃料。在过去的 30 年中，来自鲍塞尔的 375 吨乏燃料在阿雷瓦集团公司的阿格工厂进行了后处理。

供应保证

63. 2010 年 12 月，理事会核准在哈萨克斯坦成立原子能机构低浓铀银行。在 2012 年和 2013 年，原子能机构秘书处继续就建立该银行的金融、法律和技术安排以及场址评定开展工作。成员国、欧盟和“反对核威胁倡议”为建立该银行认捐了超过 1.5 亿美元。到 2013 年底，科威特（1000 万美元）、挪威（500 万美元）、“反对核威胁倡议”（5000 万美元）、阿联酋（1000 万美元）和美国（约 5000 万美元）支付了全部认捐额，欧盟已支付 2500 万欧元认捐额中的 2000 万欧元⁶。

A.3.3. 核燃料循环后端

64. 目前对乏核燃料采取两种不同的管理战略。对燃料进行后处理，以提取可用材料（铀和钚）作为新燃料，或者干脆被视为废物并加以贮存以待处置。目前，中国、法国、印度和俄罗斯联邦对乏燃料进行后处理，而加拿大、芬兰和瑞典等其他国家则选择在志愿东道社区直接处置。大多数国家还没有决定采用哪种战略，目前正在对乏燃料进行贮存并密切关注与两种替代方案有关的最新发展情况。

65. 欧洲联盟（欧盟）理事会 2011/70/Euratom 号指令对欧盟成员国制订和维持乏燃料和放射性废物管理政策具有法律约束力。对乏燃料管理领域的注意力也已经转向论证干法贮存系统中乏燃料的行为，因为人们认识到，高放废物处置库在几十年内不会在许多主要核电国家发挥重要作用。

66. 英国 EDF 能源公司赛兹韦尔 B 核电厂乏燃料干法贮存设施于 2013 年 1 月开工建设。该设施预计在 2015 年前投入运行。

67. 继 2012 年暂停对新反应堆或反应堆许可证展期申请的所有最终裁决以待更新其“废物置信裁决”和“临时贮存规则”后，美国核管会于 2013 年 3 月发表了“废物置信通用环境影响报告书确定范围过程：摘要报告”。该通用环境影响报告书草案和建议

⁶ 《2012 年核技术评论》叙述了目前已建立的其他供应保证机制的情况。

的临时贮存规则于 2013 年提交公众评论。在废物置信管理局拟订经过更新的废物置信裁决和临时贮存规则的同时，核管会继续并行审查反应堆申请、许可证展期申请和场址特定的独立乏燃料贮存装置展期申请。

68. 2013 年，从所有核电厂大约卸出了 10 000 吨重金属乏燃料。全球累计卸出的乏燃料总量到 2013 年 12 月约为 370 500 吨重金属，其中约 253 700 吨重金属贮存在堆内或堆外贮存设施。在全球卸出的乏燃料累积量中，有不到三分之一即约 112 800 吨重金属已进行了后处理。2013 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约为每年 4800 吨重金属。

69. 2013 年，印度继续建造卡尔帕卡姆快堆燃料循环设施。拟建设施旨在为即将到来的原型快中子增殖堆和随后的另外两台机组制造燃料。

70. 日本核燃料有限公司六所村每年 800 吨重金属商业后处理厂准备在 2013 年底前进行调试，该厂的工作曾经由于 2011 年 3 月 11 日的地震和海啸而被暂停。两个熔炉之一的玻璃固化废物试生产已经圆满完成。一旦在监管机构批准后投入运行，该厂的最大后处理能力将达到每年 800 吨（图 A-13）。



图 A-13. 日本六所村后处理厂（照片由日本核燃料有限公司提供）。

71. 中国宣布了在一个新工厂对反应堆乏燃料进行后处理的计划，该厂有能力每年处理 800 吨乏燃料，并将与阿雷瓦集团公司合作建设。

72. 2013 年 10 月，英国政府宣布了与法国电力公司（法电）的一项协定，该协定发出了 20 年来在英国建造首座核电厂的放行信号。2008 英国政府白皮书说，新建工作将在不会对乏燃料进行后处理的基础上进行。欣克利角 C 核电厂目前的乏燃料管理战略将是：在反应堆贮存最长 10 年，然后在一个独立乏燃料贮存设施临时贮存，直到地质处置设施可用。这种贮存设施的设计基础是将浸入水池的热交换器与被动除热相结合的湿法贮存。巴西也正在对这种技术进行评定。

73. 2013 年 3 月至 5 月间，位于福岛第一核电站毗邻大海的屏蔽容器保管区的九个干法贮存罐被移至乏燃料共存池进行检查，并随后被迁移至新的临时屏蔽容器贮存保管区。检查结果显示，无论屏蔽容器还是燃料完整性均未受到损害。2013 年 11 月在该场址开始进行进一步的燃料回收作业，并从 4 号机组乏燃料池进行了例行清除，这标志着通向减少风险和退役的道路上一个重要里程碑。

74. 2013年10月，日本可再循环燃料贮存公司（东京电力公司和日本原子力发电公司的附属公司）完成了青森县陆奥市临时乏燃料贮存建筑的建设。它目前的许可证允许贮存3000吨铀乏燃料，计划的最终贮存能力为5000吨铀。原子力规制委员会见证了最终正式测试过程。但进一步的进展有赖于按照原子力规制委员会的新安全要求进行认证。

A.3.4. 退役、治理和放射性废物管理

75. 放射性废物产生于利用核技术进行的能源生产、研究活动、医学和工业应用。除了被宣布为废物或作为乏燃料后处理副产品产生的废物流外，放射性废物产生于核设施运行、退役和场址（包括遗留的和当前军用的以及事故后的场址）的相关治理期间。放射性废物的安全管理需要对废物流及其处理和整备进行适当的管理，并提供适当的贮存能力、设施之间的运输和最终处置。

全球放射性废物存量估计

76. 据报告，2013年全球贮存中的放射性废物存量约为6800万立方米（表A-2）。到2012年已处置的放射性废物的累积量约为7600万立方米，其中包括向深井注入了约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（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）。

77. 截至2013年12月，世界范围内已有467座贮存设施和154座废物处置设施正在运行⁷，以用于管理这些废物存量。

⁷ 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，可在线访问网站（<http://newmdb.iaea.org/>）。

表 A-2. 2012 年全球放射性废物估计存量⁸

废物类别	贮存 ⁹ [立方米]	累积处置量 [立方米]
极低放废物	163 000 ¹⁰	193 000
低放废物	56 663 000 ¹¹	64 992 000 ¹²
中放废物	8 734 000	10 588 000
高放废物	2 744 000	72 000 ¹³

来源：“网基废物管理数据库”（2013 年），国家正式报告和公开发表的数据。

退役

78. 截至 2013 年 12 月，世界范围内共有 149 座动力堆被永久关闭。总计有 16 座动力堆目前已被完全拆卸，还有 52 座动力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 17 座尚未确定具体的退役战略。世界总计 434 座在运核反应堆中有约 40% 目前已运行超过 30 年，而且其中约 7% 已超过 40 年。虽然一些反应堆可以继续运行多达 60 年，但许多将在今后 10 年至 20 年间退役。除非在特殊情况下，如仍未确定废物处置路线的石墨慢化反应堆，大多数成员国普遍优选的退役战略是“立即拆除”，即将放射性存量从场址移出，并在关闭后 15 年至 25 年时间内取消监管控制。

79. 在已被永久关闭的 480 座研究堆和临界装置中，70% 已经完全退役。有数百个其他核设施如放射性废物管理或燃料循环设施等已退役或正在进行拆除。

⁸ 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，由于以下因素的存在，逐年的估计贮存量还存在内在差异：(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。

⁹ 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。

¹⁰ 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的定义，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，这一估计量今后将很可能变得更大，而低放废物类别的估计量则会相应地减少。

¹¹ 贮存中的低放废物的估计量不包括据报告保存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。

¹² 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。

¹³ 该高放废物量合并了俄罗斯联邦报告的液体处置量和乌克兰报告的被认为在找到一个更长久的设计/位置或解决方案之前临时处置的约 4000 立方米固体放射性废物。乌克兰的高放废物处置量是对切尔诺贝利核电站 4 号机组进行紧急事故清理的结果。

80. 拥有大型核电计划的成员国，即在 20 世纪 50 年代和 60 年代开始核能生产的那些国家，已在处理其早期活动的遗留问题方面取得了显著进展。这些国家已开发出实施退役和环境治理计划的技术和专门知识。这些专门知识掌握在监管机构、执行组织以及为将要退役或治理的设施和场址的业主提供供应链服务的各种工程组织的手中。不过，仍需要为大型铀生产场址和用于早期研究活动的场址的全面治理作出数十年的进一步努力。在 2013 年期间，已实现核电厂活性退役方面实质性进展的例子有：

- 法国 — 从舒兹 A 核电厂退役和移出了蒸汽发生器，并将其处置在法国莫维尔斯超低放废物处置场；
- 西班牙 — 完成何塞·卡夫雷拉核电厂反应堆内部构件的分割和移出；
- 英国 — 布拉德韦尔核电厂乏燃料贮存水池退役，为在 2015 年前进入安全关闭做准备；
- 美国 — 作为取代早期推迟拆除战略而实施立即拆除之决定的一部分，正在从宰恩核电厂移出低放废物。

81. 在没有大型核能计划的成员国，进展程度往往更加缓慢。造成这种情况的原因包括缺乏适当的法律、政策和监管框架以及相关的筹资计划，缺乏适当的技术和专门知识，以及与受影响的利益相关方的协调机制不充分。

82. 日本当局继续实施“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”（2011 年发布，2012 年 6 月更新）。该路线图的第一阶段（2011 年 12 月至 2013 年 12 月）侧重于净化 and 稳定工作，为从乏燃料贮存水池移出燃料（第二阶段）做准备。从 4 号机组移出燃料的工作于 2013 年 12 月开始，比原定时间提前了一个月。从 3 号机组移出燃料的工作定于 2015 年进行，而从 1 号和 2 号机组移出燃料的工作则定在 2017 年。还在拟订第三阶段（2021 年 12 月之后）从反应堆厂房移出燃料碎片的计划。取决于已破损厂房的抗地震情况，这项工作可能有必要在厂房上建造新的上层建筑，以便能够支撑燃料起吊机械。这些问题将在 2014 年期间处理，并提出适当的解决方案建议。大量的研究与发展工作一直在继续，以便能够开发远程控制装置来探测一次安全壳的损毁情况。

治理

83. 环境治理涉及通过对污染本身（污染源）或对人类照射途径实施行动为减少土地现有污染物所产生的射线照射而可能采取的任何措施。全世界有许多正在实施或仍需要实施治理行动的场址。治理工作一般涉及巨大的资源，并需要适当的规划、良好的项目管理和合格的专业人员以及充分的监管框架。原子能机构正在通过实施退役和环境治理的制约因素项目对这些具体事项在实施治理和退役项目中的影响进行分析。在该项目完成后，预计原子能机构将能够提供为什么在这些活动方面一直未取得很大进展的明确说明，并提出创新性和革新性解决方案建议。

84. 2013 年的一个重大发展是在受福岛第一核电站事故影响的区域开展净化活动方面

取得了进展。日本当局已拨出大量的资源制订战略和政策以及在广大的厂外受污染区域实施治理活动。为了使被疏散的民众能够重返家园作出了特别的努力。在协调治理活动与重建和振兴努力方面也取得了良好进展。2013年10月进行的原子能机构后续工作组访问协助日本评定了自2011年上次工作组访问以来取得的进展，审查了治理战略、计划和工作，并与国际社会共享了该工作组的调查结果。

遗留放射性废物

85. 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为该领域国际计划的成功实施做出了贡献。退役核潜艇的拆除计划目前已接近完成。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。目前有65台潜艇反应堆装置被置于俄罗斯联邦西北的一个贮存设施和远东的三个贮存设施中。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。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（图A-14）和远东进行建造。回收沿俄罗斯联邦海岸分布的灯塔中使用的大功率放射性同位素热电发生器的国际计划也在成功实施。



图 A-14. 在俄罗斯西北建造放射性废物整备和长期贮存地区中心（照片由Energiewerke Nord GmbH 公司提供）。

放射性废物处理和整备

86. 液态放射性废物产生于核燃料循环的绝大部分环节，包括动力堆、后处理和废物处理设施以及退役活动。减少放射性内容物的处理技术包括化学沉淀、添加精细划分的放射性吸收剂（两者随后均为固体清除）和使用柱状离子交换吸收剂。作为备选，可采用蒸发或反渗透（原子级过滤）。通过增加对关键放射性核素的选择性和改进物理性质继续改善柱用专业离子交换吸收剂的特性，例如通过采用复合材料。通过利用国际上提供的处理设施进行的液态废物处理是福岛第一核电站事故治理的一个显著特征。上文提及的所有工艺均结合用于清除福岛各种大量的放射性核素。

87. 废物整备包括放射性核素的固化，并将废物放入包装容器中和提供附加包装。常用固化方法包括利用水泥、沥青或玻璃将中低放液态放射性废物固化，以及将高放液态放射性废物玻璃固化在玻璃基体中或将其包埋在金属基体中。当前的趋势继续是改进中低放废物固化工艺的特性。埃及、印度、俄罗斯联邦、塞尔维亚和美利坚合众国

拥有经改造的工艺，通过掺合剂加强水泥的物理性质和为特定废物种类或种类组定制固化可能性以及应对非活性废物种类的潜在有害影响。法国、中国、俄罗斯、瑞士、英国、美国开发了新型粘结剂来克服波特兰水泥性质方面的限制。法国报告了利用硫铝酸钙水泥稳定可溶性锌盐的情况。

88. 原子能机构最近评价了四种新型水泥材料：硫铝酸钙水泥、铝酸钙水泥、碱式硅酸盐和偏高岭土制造的地质聚合物以及磷酸镁水泥¹⁴。最近在地质聚合物材料方面有利的建造经验表明，它们更广泛地应用于废物整备是可能的。SIAL 地质聚合物展现出强化的抗压强度和铯-137 低浸出性，并已获得许可在捷克共和国和斯洛伐克用于处理放射性污泥和树脂固化。在澳大利亚、俄罗斯联邦、斯洛伐克和英国进行的研究很可能产生更多的知识，包括有关其长期持久性的信息。

放射性废物贮存

89. 废物贮存使得能够对废物进行适当的包容和隔离，并便于废物回取以进一步处理或处置。在过去 10 年期间观察到了放射性废物贮存的明显趋势，如延长贮存时间和强化安全贮存设施等。特别是对高活性放射性废物而言，这些已变得比较普遍。一份关于监管放射性废物贮存最佳实践的导则是 2012 年出版的英国核退役管理局的导则文件《高活性废物包的临时贮存 — 综合方案》。所采用的原则包括“从摇篮到坟墓”的寿期；一致性废物货包和贮存条件，以最大程度地减少废物的产生；预防胜于救治；有远见的设计；以及有效的知识管理。该导则设想贮存设施应当具有持续至少 100 年的能力。

90. 对于新的贮存设施，设计寿期应当一般为至少 100 年。此外，在建议使用经适当改造的现有结构作为贮存设施的情况下，应当证明该结构能够满足现代建造标准，为任何改造工作选择的材料是合适的，而且所形成的贮存设施符合至少 100 年的设计寿期目标。

放射性废物处置

91. 除高放废物和（或）乏燃料之外的所有类型放射性废物的处置设施在世界范围内都有运行。这些处置设施包括极低放废物的深沟处置（如在法国、西班牙和瑞典）或干旱地区低放废物的深沟处置（如在阿根廷、印度、南非、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、斯洛伐克、西班牙、英国和乌克兰）；处置中低放废物的地下专设设施（如在瑞典和芬兰）；在美国开展的低放废物钻孔处置；以及接收中低放废物的地质设施（如在匈牙利和美国）。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（如在挪威）。

¹⁴ 国际原子能机构，《水泥材料在放射性废物的长期贮存和处置中的行为：一个协调研究项目的成果》，原子能机构《技术文件》第 1701 号，原子能机构，维也纳（2013 年）。

92. 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。

93. 加拿大正在继续建造两个地质处置设施：第一个在安大略电力公司处置低放废物和中放废物的布鲁斯场址设施，它目前正处于许可证审批阶段，公众听证会已于 2013 年结束，监管决定预计将在 2014 年底或 2015 年初作出。第二个是未确定的加拿大乏核燃料处置库和专门技术中心场址。核废物管理组织与表示有兴趣了解加拿大安全、长期管理乏核燃料计划的 21 个自愿社区合作，已完成对这 21 个社区中八个社区的第一阶段初步评定，并正在继续对其余的 13 个社区进行评定。在这初步的八个社区中，四个社区被判定适合进入下阶段的评定。

94. 中国按照中期计划，2020 年之前在五个地区处置场址管理其中低放废物，总处置容量约为 100 万立方米。其中两个处置场址正在运行，当前处置容量为 2 万立方米和 8 万立方米，第三个场址正在建造，其余两个场址将进行开发。中国目前预见地质处置需求为来自 48 座反应堆的 14 万吨乏燃料。后处理之后产生的相应高放废物将需要一个处置解决方案。发展高放废物地质处置的计划包括一个地下研究实验室的选址（2014 年）、建造（2017 年）和 2020 年前投入运行；开展深部地质处置库的现场研发工作和 2040 年前开始建造深部地质处置库；以及在 2050 年之前开始处置运行。

95. 在芬兰，芬兰核废物管理专家组织希望不晚于 2014 年底或 2015 年初获得深部地质处置库建造许可证，并正在准备开展全尺寸论证来解决余留的科学技术问题，以便获得运行许可证。芬兰核废物管理专家组织期望在本世纪 20 年代初开始运行。

96. 法国国家放射性废物管理机构（Andra）正在准备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。2013 年，“Cigéo”设施计划已达到促进公众辩论全国委员会组织的最后公众磋商阶段。在一系列抗议后，不得不以在线辩论替代公众会议的初始计划。作为该过程的一部分，成立了一个公民委员会，该委员会随后“以推理方式”得出了不反对“Cigéo”项目的结论。如能在 2015 年提交许可证申请和 2018 年颁发建造许可证，“Andra”计划在 2025 年前进行处置调试。

97. 德国在 2013 年 6 月通过了处置库场址选择法令。一个独立的委员会将开展为释热废物选择新处置场址的过程。以前所考虑的戈莱本勘探设施并未被排除在新过程之外。

98. 在 2012 年 12 月剪彩仪式后，设计用来接收核电厂运行产生的 4 万立方米中低放废物的匈牙利巴塔帕蒂处置库开始了常规运行。该设计允许在废物被放入现有处置室的同时并行建造更多的处置室。

99. 在大韩民国，月城中低放废物处置中心的建造工作接近完成，该处置中心第一阶段接纳 10 万桶的工作将在 2014 年 6 月完成。政府成立了一个委员会对乏燃料的未来管理方案进行公开讨论。韩国原子能研究院地下研究隧道将进行扩大，以适应为支持地质处置而预期实施的研发计划。

100. 立陶宛近低放废物地表处置库的开发工作目前处于详细规划阶段，同时极低放废物处置库定于 2014 年下半年开始建造。在可以进行处置之前，废物货包被置入 4 千立方米的缓冲贮存设施，该设施于 2013 年 5 月获得了国家核电安全检查局颁发的运行许可证。

101. 波兰地质研究所采取了准备行动，以重启地质处置计划的开发工作。在为近地表处置设施选择候选场址的初步场址表征之后将进入当地公众和行政部门磋商阶段。

102. 在俄罗斯联邦，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，目的是研究处置长寿命中高放废物的可能性。计划容量是 7500 个释热废物屏蔽容器和 15.5 万立方米非释热废物。已在列宁格勒地区选择了低放废物和长寿命中放废物处置设施场址，该设施位于地表下 60 米至 70 米深处的粘土建造中（图 A-15）。其目的是在第一阶段运行期间在拱型处置室接收 5 万立方米低放废物。

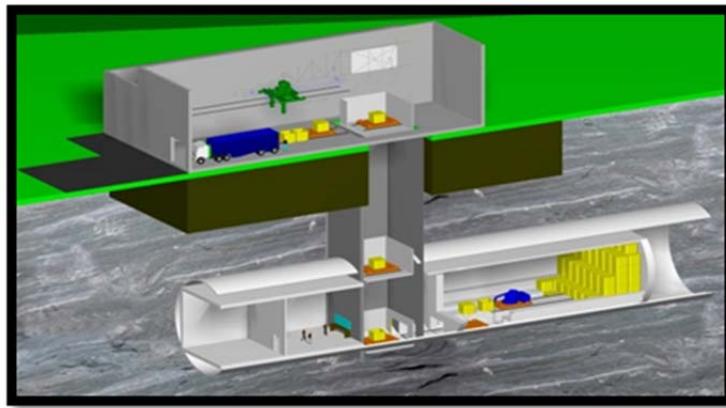


图 A-15. 在俄罗斯联邦规划的低放废物处置设施进行置入作业的概念（绘图由全俄综合电力技术设计和研究所提供）。

103. 在瑞典，乏燃料处置设施的许可证审批过程预计还要持续若干年。2013 年 9 月，瑞典核燃料和废物管理公司（SKB）提交了有关瑞典地质处置的最新研究、开发和示范计划以供审查，并且目前正在准备经修订的有关未来乏燃料管理计划费用的计算。这将作为基础以供政府决定向“核废物基金”捐助的费用，该计划则从这一基金获得资金。

104. 瑞士目前正在修订关于退役和处置基金的条例。修订未来费用概算的建议包括降低通货膨胀率（从 3%降至 1.5%）和以前概算所采用的投资回报率（从 5%降至 3.5%），以及增加 30%“不确定性折让”。联邦政府批准了国家放射性废物处置合作组织涵盖中低放废物和高放废物的综合废物管理计划。2013 年提出了关于近地表设施场所的建议，导致选择至少两个中低放废物和高放废物处置库场址的扇形计划过程第二阶段正在实施。

105. 乌克兰与欧洲委员会合作，正在制订国家放射性废物地质处置计划，并打算在 2017 年之前对三个潜在场址开展初步安全评定。在切尔诺贝利事故之后开发的布尔雅

克沃克中低放废物处置设施正在欧洲委员会资助的一个重建项目下进行扩容，从其目前约 70 万立方米容量再扩容 12 万立方米。

106. 英国西坎布里亚郡地区在 2013 年 1 月退出了地质处置场址选择过程。英国政府继续注重地质处置的发展，并正在就如何修订和改进场址选择过程征求建议。

107. 在美国，能源部废物隔离中间工厂第七室已获新墨西哥州环境局批准用于处置受到比铀重的人工放射性同位素污染的国防部门废物材料。在美国核未来蓝带委员会的建议基础上，高放废物和乏燃料管理国家战略预计发展更大的中间临时贮存设施，以及在地质处置场址的选址和表征方面取得显著进展。美国核管会将继续处理尤卡山项目许可证申请。

弃用密封放射源的管理

108. 包括加纳、马来西亚、菲律宾和南非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，这些方案包括与其他废物在适宜设施中共处置、增加再循环数量和返还方案或在专用钻孔中处置。

109. 2013 年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。2013 年 4 月在菲律宾部署了移动热室，以整备 22 个高活性弃用密封放射源，并对其进行安全和可靠的贮存。在波斯尼亚和黑塞哥维那回收了五个弃用密封放射源，并从该国移出以进行再循环。在包括喀麦隆、黎巴嫩和摩洛哥在内的若干成员国启动了将法国制造的 1 类和 2 类弃用源进行返还的工作。苏丹的两个这类源的返还工作已于 2013 年完成。

110. 为将移动热室与钻孔处置设计概念建立联系作出了很大的努力，目的是最大程度地减源的操作和防止不必要的运输。

111. 编写和使用各种技术文件和培训模块，以协助成员国在安全和可靠地整备 3 类至 5 类弃用密封放射源方面达到技术娴熟。在埃及和摩洛哥完成了涉及这类源整备的作业，并对当地和地区的工作人员进行了培训。

112. 原子能机构将对《国际密封放射源和装置目录》的接触扩大到各国的许多被提名人员和欧洲刑警办事处等国际机构，从而促进了对野外发现的弃用密封放射源的识别。

113. 2013 年 10 月在阿拉伯联合酋长国阿布扎比举行的“放射源安全和安保：保持对源进行全寿期持续全球控制”国际会议突出强调了弃用密封放射源的管理和处置仍然存在大量挑战的事实，如缺乏获得认证的运输包、长期贮存设施和寿期终止管理导则等。

A.4. 安全

114. 2013 年，世界各地的核电厂继续进行安全改进，包括通过确定和运用从福岛第一核电站事故汲取的教训。几个关键领域已经取得了显著进展，如评价核电厂的安全薄弱环节；提高应急准备和响应能力；支持成员国规划启动核电计划；加强和保持能力建设；以及保护人与环境免受电离辐射。在这些和其他领域取得的进展促进加强了全球核安全框架。

115. 原子能机构继续分享和传播从福岛第一核电站事故中汲取的教训。福岛事故后大会通过的国际原子能机构“核安全行动计划”仍然是成员国、秘书处和其他有关的利益相关者所采取安全行动的核心。2013 年，原子能机构组织了核事故后的退役和治理问题国际专家会议（2013 年 1 月 28 日至 2 月 1 日）、福岛第一核电站事故背景下核安全中的人为因素和组织因素国际专家会议（2013 年 5 月 21 日至 24 日）以及有效的核监管体系国际会议（2013 年 4 月 8 日至 12 日）。2013 年，原子能机构印发了“国际原子能机构关于核事故后的退役和治理的报告”、“国际原子能机构关于福岛第一核电站事故背景下加强核监管有效性的报告”以及“国际原子能机构关于福岛第一核电站事故背景下核或放射应急准备和响应的报告”。

116. 总干事在大会第五十六届常会上宣布，原子能机构将编写拟于 2014 年完成的福岛第一核电站事故报告。该报告除其他外，将特别涵盖事故的描述和背景、安全评定、应急准备和响应、放射后果以及事故后恢复。

117. 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-16 显示了每运行 7000 小时（约一年）的非计划停堆次数。这通常用来反映通过减少需反应堆紧急停堆的不良非计划热工水力和反应性瞬变次数来提高核电厂安全性的成功。如图所示，近几年已经实现了稳步改进。2010 年至 2011 年的增加与 2011 年 3 月日本大地震引发的大量紧急停堆有关。

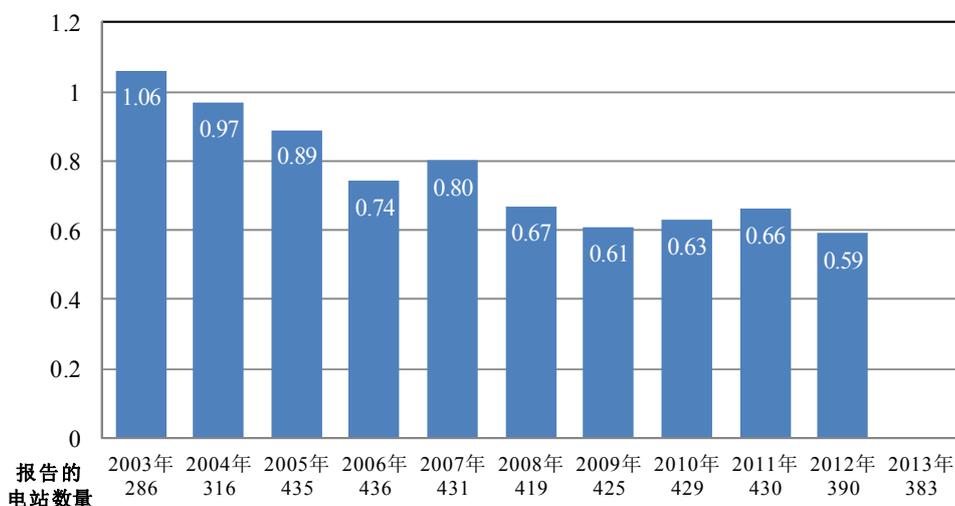


图 A-16. 平均紧急停堆率：每运行 7000 小时发生的自动和手动紧急停堆次数（资料来源：原子能机构动力堆信息系统 <http://www.iaea.org/pris>）。

118. 有关核安全的更多资料可见《2014年核技术评论》。

B. 先进的裂变和聚变

B.1. 先进的裂变

B.1.1. 水冷堆

119. 在加拿大，加拿大核安全委员会完成了对 740 兆瓦（电）“增强型坎杜堆 6”（EC6）设计的第三次也是最后一次许可证预审批评审。为了满足最新的加拿大和国际标准，设计中纳入了许多安全强化措施。坎杜能源公司还已完成先进的坎杜反应堆（ACR-1000）的开发，这种反应堆部件标准化极高，并使用稍加浓铀，以补偿轻水作为一次冷却剂的使用。ACR-1000 已完成许可证预审批评审的两个阶段。坎杜能源公司还正在与国际伙伴合作开发 EC6 设计的变体，以便利用包括后处理铀、混合氧化物和钚燃料在内的先进燃料。

120. 在中国，有 29 座压水堆在建，包括基于现有在运电厂技术的 650 兆瓦（电）和 1080 兆瓦（电）渐进型压水堆以及较新的 AP-1000 设计和欧洲压水堆设计。新的 CPR-1000 设计反应堆红沿河 1 号于 2013 年 2 月并网发电。中国继续开发 CAP-1400 设计和 CAP-1700 设计，两种设计都是 AP-1000 的放大版。与此同时，中国继续投资中国超临界水冷堆设计的研究。

121. 在法国，阿雷瓦集团公司继续销售 1600 兆瓦（电）级以上欧洲压水堆。该公司还在与日本三菱重工合作开发 1100 兆瓦（电）级以上 ATMEA1 型压水堆，并在与德国意昂集团公司合作开发 1250 兆瓦（电）级以上 KERENA 型沸水堆。ATMEA1 计划首次部署在土耳其锡诺普场址。

122. 印度有五座反应堆在建，包括四座 700 兆瓦（电）渐进型加压重水堆和一座 1000 兆瓦（电）水冷和水慢化动力堆。库丹库拉姆-1（水水动力堆）于 2013 年 10 月并网发电，第二台机组正处于启动测试中。巴巴原子研究中心正在最后确定 300 兆瓦（电）先进重水堆的设计，该反应堆将使用低浓铀和钚混合氧化物燃料，用重水慢化，并纳入垂直压力管和非能动专设安全设施。

123. 日本正在建设两座先进沸水堆。为了满足多样化的需求，日立-通用电气核能有限公司开发了 600 兆瓦（电）级和 900 兆瓦（电）级先进沸水堆（ABWR-600 和 ABWR-900）。为了满足美国和欧洲的需求，东芝公司改造了先进沸水堆，并分别开发了美国-先进沸水堆和欧盟-先进沸水堆。日本继续研发革新型超临界水冷堆设计。

124. 大韩民国正在按计划建造第一座先进动力堆 APR-1400。申请于 2013 年 10 月提交，美国核管会正在进行对 APR-1400 的设计认证过程。与此同时，2013 年继续开发 1500 兆瓦（电）APR+和 APR-1000。

125. 美国正在建设包括四座 AP-1000 反应堆在内的五座压水堆。核管会继续评审经济简化沸水堆（通用电气-日立核能有限公司）、美国-欧洲压水堆（阿雷瓦核电公司）和美国-先进压水堆（三菱重工）的设计认证申请。

126. 俄罗斯联邦继续建造七座水水动力堆，包括两座 WWER-1000 型和五座 WWER-1200 型反应堆（NPP-2006）。继续实施开发 WWER-1200A 以及基于当前 WWER-1200 设计的 WBER-600、WWER-600（NPP-2006/2）和 WWER-1800 的计划。此外，俄罗斯联邦还开展了有关革新型超临界水冷堆（WWER-SC）的设计工作，并继续建造用于专门用途的浮动式小型反应堆 KLT-40S。

B.1.2. 快中子系统

127. 快堆和相关燃料循环对核电长期可持续性的重要作用早已得到公认。可实现的绝对增殖比和从快堆乏燃料获得的裂变材料多次回收让铀和钚的能源潜力得到充分利用。这种技术通过减少高放和长寿命核废料，可保证数千年的能源供给，并可大大提高核电的可持续性。

128. 然而，只有在研究和技术开发能创造条件，确保快中子系统及相关闭式燃料循环的全部潜能得以实现，而且充分达到经济竞争力标准、严格的安全要求、可持续发展及公众接受程度时，才能实现快堆的大规模成功部署。

129. 自 1960 年以来，全世界都实施了重要的快堆开发和部署计划，让快堆和相关燃料循环技术知识达到了高度成熟。最成熟的快堆技术是钠冷快堆。这项技术有 350 堆-年历史，经验来自许多国家（如中国、法国、德国、印度、日本、俄罗斯联邦、英国和美国）的在运实验、原型、示范和商用规模钠冷快堆的设计、建造和运行。钠冷快堆的总体性能已经非常引人注目，取得了重要成就，如通过快堆燃料循环增殖新燃料的可行性论证，热效率值达到 43—45%，是核领域的最高值。这些反应堆中有几个反应堆的退役也已积累了不可或缺的经验。

130. 目前，有四座在运钠冷快堆：中国的中国实验快堆、印度的快中子增殖试验堆和俄罗斯联邦的 BOR-60 和 BN-600 反应堆。日本的两座钠冷快堆——常阳和文殊处于临时关闭中。预计将在 2014 年完成两座钠冷快堆的建造：印度的 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆（图 B-1）和俄罗斯联邦的商用 880 兆瓦（电）BN-800 反应堆。



图 B-1. 印度卡尔帕卡姆处于后期建造的原型快中子增殖堆（照片由英迪拉·甘地原子研究中心提供）。

131. 俄罗斯联邦通过运行七艘配备了铅铋冷却 155 兆瓦（热）反应堆的项目 705/705K 核潜艇，积累了一些诸如铅或铅-铋共晶体等液态重金属方面的经验。

132. 为了达到更高的安全性、可持续性、经济性、实物保护和抗扩散标准，正在国家和国际层面开发四种不同类型的快堆（表 B-1），即钠冷快堆、铅冷快堆、气冷快堆和熔盐快堆。

表 B.1 快堆设计

设计	类型	功率容量	设计单位
CFR-600	钠冷快堆，池式反应堆	600 兆瓦（电）	中国原子能科学研究院（中国）
Astrid	钠冷快堆，池式原型堆	600 兆瓦（电）	法国可替代能源和原子能委员会、法国电力公司、阿雷瓦核电公司、阿尔斯通公司、布伊格集团、Comex Nucléaire 公司、东芝公司、Jacobs 公司、劳斯莱斯和阿斯特里姆欧洲公司（法国）
FBR-1&2	钠冷快堆，池式反应堆	500 兆瓦（电）	英迪拉·甘地原子研究中心（印度）
4S	钠冷快堆，小型反应堆	10 兆瓦（电）	东芝公司（日本）
JSFR	钠冷快堆，环路型反应堆	750 兆瓦（电）（中型）、1500 兆瓦（电）（大型）	日本原子力开发机构（日本）
PGSFR	钠冷快堆，池式原型堆	150 兆瓦（电）	韩国原子能研究院（大韩民国）
BN-1200	钠冷快堆，池式反应堆	1220 兆瓦（电）	机械制造实验设计局（俄罗斯联邦）
MBIR	钠冷快堆，池式研究堆	100 兆瓦（电）	电力工程研究发展所（俄罗斯联邦）
PRISM	钠冷快堆，池式反应堆	311 兆瓦（电）	通用电气-日立公司（美国）
TWR-P	钠冷快堆，行波反应堆	600 兆瓦（电）	TerraPower 公司（美国）
MYRRHA	铅冷快堆，池式铅铋研究堆	—	比利时核研究中心（比利时）
CLEAR-I	铅冷快堆，池式铅铋研究堆	—	核能安全技术研究所（中国）
ALFRED	铅冷快堆，池式铅冷示范厂	125 兆瓦（电）	安萨尔多核能公司（欧洲/意大利）
ELFR	铅冷快堆，池式铅冷反应堆	630 兆瓦（电）	安萨尔多核能公司（欧洲/意大利）
PEACER	铅冷快堆，池式铅铋示范厂	300 兆瓦（电）	首尔国立大学（大韩民国）
BREST-OD-300	铅冷快堆，池式铅冷反应堆	300 兆瓦（电）	电力工程研究发展所（俄罗斯联邦）
SVBR-100	铅冷快堆，小型模块式铅铋反应堆	101 兆瓦（电）	AKME 工程公司（俄罗斯联邦）
ELECTRA	铅冷快堆，铅冷培训堆	—	皇家技术学院（瑞典）
G4M	铅冷快堆，小型模块式铅铋反应堆	25 兆瓦（电）	四代能源公司（美国）
ALLEGRO	气冷快堆，实验堆	—	欧洲原子能联营（欧洲）
EM ²	气冷快堆，高温堆	240 兆瓦（电）	通用原子公司（美国）
MSFR	熔盐快堆	1500 兆瓦（电）	国家科学研究中心（法国）

B.1.3. 气冷堆

133. 英国已经运行商用气冷堆多年。英国还有一座镁诺克斯型反应堆和 14 座先进气冷堆仍在运行。这些反应堆继续在高温气冷堆领域发挥着重要作用，并在应对高温气冷堆挑战方面与众多科技大学一道向营运者提供支持。在英国，高温气冷堆从根本上不同于二氧化碳气冷堆，区别在于其使用了涂敷颗粒燃料，气体出口温度较高 ($\geq 750^{\circ}\text{C}$)，并采用了氦气作为冷却剂。与在英国式微相对照的是，许多成员国都在追求发展高温气冷堆。

134. 中国达到福岛第一核电站事故背景下的安全再评定要求后，于 2012 年 12 月为球床模块式高温堆首浇混凝土（图 B-2）。这座 200 兆瓦（电）工业示范电厂由两个 250 兆瓦（热）反应堆机组构成，预计于 2017 年底前投入运行。



图 B-2. 中国威海市石岛湾球床模块式高温堆建设工地（照片由核能与新能源技术研究院提供）。

135. 中国的燃料制造技术已经确立，燃料球正在国际上接受正常和事故工况试验。包头新燃料元件制造厂于 2013 年开工建设，主要部件全尺寸试验将按已完成的 10 兆瓦氦气试验回路进行。HTR-10 型研究堆于 2013 年进行了升级，将用于获得进一步的运行经验、数据收集和试验。

136. 印度尼西亚的国家核能机构正在研究适合部署在爪哇岛、马都拉岛和巴厘岛之外的高温气冷堆的概念设计。活动的重点是研究需求、经济性、工艺热和燃料制造。

137. 日本的 30 兆瓦（热）高温工程试验堆正在接受监管评审。进一步的安全示范试验计划涉及一回路强制冷却损耗加容器冷却损耗，模拟全厂断电。为应对福岛第一核电站事故，日本原子力开发机构已着手设计一座完全基于固有安全设施的自然安全高温气冷堆和一座燃烧日本过剩钚的全烧高温气冷堆。氢生产开发工作仍在继续进行中。

138. 大韩民国继续投资生产氢气的高温气冷堆试验设施。还与工业热用户合作规划了工艺热应用。涂敷颗粒燃料的开发进展顺利，将在高通量先进中子应用堆中进行试验照射。

139. 继续进行俄罗斯-美国燃气轮机模块式氦冷反应堆联合项目的工作，以处置武器级钚，办法是将其用于电力生产和工艺热应用。重点在于反应堆的关键技术，如燃料、石墨、高温材料、燃气轮机功率转换系统和其他反应堆系统。

140. 乌克兰政府决定允许可能的高温气冷堆部署，并正在振兴工业设备和技术方面的相关研究。

141. 美国下一代核电厂项目的重点在于三层各向同性燃料质量检定、石墨和高温材料验证、说明非能动安全特性的试验设施及许可证审批框架的制订。最新制造的燃料已在高运行温度（1250℃）辐照中表现出卓越的性能，达到了极高燃耗（每初始金属原子裂变 19%），并在高达 1800℃ 的事故温度下，证明了反应堆设计和燃料性能方面的安全改进和大裕量。美国核管会一直在着力解决许可证审批方面的问题，特别是在基础事件选择、源项确定、封隔功能性能以及应急规划方面。

142. 原子能机构一直在实施高温气冷堆方面的两个协调研究项目，涉及加强对核石墨辐照蠕变行为的了解，以及高温气冷堆的反应堆物理学和热工水力学的不确定性分析及贫化。

143. 欧共体的热电联供研发先进高温反应堆项目旨在拓展欧洲高温气冷堆技术，以支持核热电联产，其重点在于工业应用耦合的一回路系统的安全方面。在波兰，一个调研建设高温气冷堆系统可能性的政府资助项目获得批准。德国的活动仅限于选定安全研究和对欧共体高温气冷堆计划的参与。荷兰佩滕核研究和咨询组及代夫特理工大学对欧共体计划提供支持。

144. 经合组织核能机构正在对高温气冷堆的棱柱状堆芯设计实施程序到程序的耦合中子学/热流体瞬态基准，以研究运行和事故工况，包括冷却剂损耗状况和湿气侵入。

B.1.4. 中小型反应堆

145. 中小型反应堆（中小型堆）有潜力成为社区相对孤立或电网有限的成员国发电的来源。中小型堆可能还是替换过时、老化或高碳排放电源的有效方式，而无需对现有基础设施进行任何重要改造。成员国注意到，利用核能的海水淡化已在一些成员国通过各种项目成功得到了论证，整体具有成本效益；同时认识到实施的经济性将取决于场址特定的因素。中小型堆也被视为热电联供的一项潜在技术方案。

146. 根据原子能机构采取的分类，小型反应堆是电功率输出小于 300 兆瓦（电）的反应堆，中型反应堆是电功率输出在 300 兆瓦（电）和 700 兆瓦（电）之间的反应堆。目前，有四个国家正在建设四座先进中小型堆：阿根廷、中国、印度和俄罗斯联邦。针对所有主要反应堆路线的中小型堆正在开发之中，包括轻水堆、重水堆、高温气冷堆和液态金属快堆。发展趋势一直是先进小型核反应堆，用于部署成多模块发电厂。一些水冷中小型堆在一回路系统采用了一体化方式，其核蒸汽供应系统部件与反应堆堆芯一起安装在一个共用容器内。本文件相关部分报告了小型高温气冷堆和液态重金

属冷却快堆的开发和部署进展。一些国家正在推进移动式核电厂的开发和应用，包括浮动式和海上中小型堆。

147. 大约有 45 个革新型中小型堆概念处在各研发阶段。以下段落介绍了准备近期部署的一些水冷中小型堆设计。

148. 阿根廷已开始部署模块式小型压水堆（CAREM 反应堆），即一种小型一体化加压轻水堆设计，所有一回路部件都装在反应堆压力容器内，电输出功率为 150—300 兆瓦（电）。已经完成了 27 兆瓦（电）CAREM-25 原型厂的场址挖掘工作。政府于 2013 年 10 月为 CAREM-25 颁发了建造许可证。预计于 2014 年第一季度浇注第一罐混凝土。

149. 中国开发了 300 兆瓦（电）和 600 兆瓦（电）压水堆。已部署若干台机组，三台 CNP-600 机组在建。巴基斯坦也部署了从中国引进的两台 CNP-300 机组，另有两台 CNP-300 机组在建。此外，中核集团公司一直在开发发电容量为 100 兆瓦（电）的 ACP-100，一座一体化压水堆型的中小型堆，水泵是横向安装在反应堆容器中的。中国计划在福建省建造两台 ACP-100 机组，用于电力生产和海水淡化。上海核工程研究设计院一直在开发一个采用非能动安全设施的 150 兆瓦（电）小型先进反应堆 CAP-150，以及一个浮动式 200 兆瓦（热）中小型堆 CAP-FNPP。

150. 法国的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反应堆。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且永远可用的热阱。

151. 印度有多台 220 兆瓦（电）、540 兆瓦（电）和 700 兆瓦（电）级的重水堆在运或在建。巴巴原子研究中心正在开发的 304 兆瓦（电）先进重水堆正处于详细设计阶段。

152. 意大利米兰理工大学继续进行先前在以西屋公司为首的国际财团下开发的国际反应堆的革新与安全项目的设计和开发。国际反应堆的革新与安全项目是一个轻水反应堆，具有模块式一体化的一回路系统配置，输出电功率 335 兆瓦（电），属中型反应堆。该反应堆概念设计符合强化安全、提高经济性、抗扩散和废物最小化的要求。

153. 日本开发了一座 350 兆瓦（电）中型轻水堆，采用一体化一回路系统，称作一体化模块式水冷反应堆。为支持许可证审批，正在进行验证试验、组件和设计方法研发以及基本设计开发。一体化模块式水冷反应堆专为电力生产和热电联供设计。

154. 大韩民国开发了热容量为 330 兆瓦的系统一体化模块式先进反应堆（SMART）设计，旨在供电力生产和海水淡化联合使用。启动了一项中试厂设计项目，以进行综合性能验证。这个 100 兆瓦（电）系统一体化模块式先进反应堆已于 2012 年 7 月获得国家核安全委员会的标准设计批文，目前正为同类首创的电厂建设做准备。

155. 俄罗斯联邦拥有两座用于电力和工艺热联供的 35 兆瓦（电）KLT-40S 反应堆的船装核电厂即将建造完工。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反应堆的先进版本。8.6 兆瓦（电）的 ABV-6M 正处在详细设计阶段。

这是一种一回路冷却剂自然循环的一体化加压轻水堆。正处在详细设计阶段的 50 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。

156. 美国正在开发四座一体化压水堆。B&W mPower 反应堆是一种双机组电厂设计，每个模块 180 兆瓦（电）。NuScale Power 设想为一座由 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。Holtec 公司的 SMR-160 是一座 160 兆瓦（电）反应堆，依靠自然对流，从而不再需要冷却剂泵，也不再依赖外部电源。预计 2014—2016 年期间将这四个概念的设计认证评审申请提交美国核管会。

157. 2012 年，原子能机构印发了题为《中小型反应堆设计现状》的小册子，¹⁵ 它是对原子能机构“先进反应堆信息系统”的补充。表 B.2 列出了可供近期和中期部署的水冷中小型堆设计。

¹⁵ 见 <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/smr-status-sep-2012.pdf>

表 B.2 可供近期和中期部署的水冷中小型反应堆设计

设计	类型	装机容量 [兆瓦 (电)]	设计单位	状况
CAREM-25	自然循环一体化压水堆	27	国家原子能委员会 (阿根廷)	一台单机组原型 堆在建
CNP-300	二回路压水堆	315	中国中核集团公司 (中国)	三台机组在运, 两台机组在建
ACP-100	一体化压水堆	100	中国核工业集团公司 (中国)	详细设计
CAP-150	一体化压水堆	150	上海核工程研究设计院 (中国)	概念设计
Flexblue	海底停泊小型模块式 反应堆	160	法国海军造船公司 (法国)	概念设计
AHWR300- LEU	压力管	304	巴巴原子研究中心 (印度)	详细设计
IMR	自然循环一体化模块式 压水堆	335	三菱重工株式会社 (日本)	概念设计
SMART	一体化压水堆	100	韩国原子能研究院 (大韩民国)	2012 年 7 月取得 标准设计批文
ABV-6M	自然循环一体化压水堆	8.6	机械制造实验设计局 (俄罗斯联邦)	详细设计
VBER-300	一体化压水堆	325	机械制造实验设计局 (俄罗斯联邦)	详细设计
RITM-200	一体化压水堆	50	机械制造实验设计局 (俄罗斯联邦)	详细设计
KLT-40S	船载浮动核电厂	70	机械制造实验设计局 (俄罗斯联邦)	两台机组处于最 后建造阶段
WWER-300	一体化压水堆	300	Gidropress 公司 (俄罗斯联邦)	详细设计
VK-300	沸水堆	250	动力工程研究发展所 (俄罗斯联邦)	概念设计
UNITHERM	极小型自然循环一体化 压水堆	2.5	动力工程研究发展所 (俄罗斯联邦)	概念设计
Shelf	海底停泊小型模块式反 应堆	6	动力工程研究发展所 (俄罗斯联邦)	概念设计
IRIS	一体化压水堆	335	“国际反应堆的革新与安全 项目”国际集团 (意 大利)	概念设计
B&W mPower	一体化压水堆 (双壳, 180 兆瓦 (电))	360	B&W Generation mPower 公司 (美国)	详细设计
NuScale	一体化自然循环压水堆 (12 模块, 45 兆瓦 (电))	45	NuScale 电力公司 (美国)	详细设计
Westinghouse SMR	一体化压水堆	225	西屋电气公司 (美国)	详细设计
Holtec SMR- 160	一体化压水堆	160	Holtec 公司 (美国)	详细设计

B.1.5. 革新型核能系统国际倡议

158. 由于对能源供应、气候变化和能源安全的日增关切，并鉴于核能具有为满足全世界日益增长的能源需求做出显著贡献的潜力，在过去几十年中发起了若干关于革新型核能系统的国际倡议。

159. 特别是在世纪之交，一些原子能机构成员国认识到有必要采取行动，以确保以可持续方式发展核能。结果是，继大会通过一项决议后，在 2000 年发起了作为原子能机构项目的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”，以帮助确保核能能够被用于促进以可持续的方式满足全球在 21 世纪的能源需求。主要目的是将技术持有者和用户召集在一起，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。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”组主要由作为该项目成员的 38 个成员国和欧洲委员会提供资金。肯尼亚在 2013 年作为第 39 个成员参加了该项目。

160. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”正在修订其采用整体方案从以下七个领域评定革新型核能系统的方法学：经济性、基础结构、废物管理、抗扩散性、实物保护、环境和安全。白俄罗斯根据该方法学完成了“核能系统评定”，评定报告已由原子能机构作为提供给成员国的参考文件予以印发。在印度尼西亚、罗马尼亚和乌克兰的“核能系统评定”正在进行中。

161. “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究与发展。该论坛有 13 个成员，工作重点是其 2002 年印发的《第四代核能系统技术路线图》¹⁶ 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。

162. 有兴趣在一个或更多选定系统方面开展合作研发的“第四代国际论坛”成员签署了相应的“系统安排”。在每个“系统安排”内，并在明确确定的合同框架内，设立了有限数量的具有明确确定的可交付成果、里程碑和时间表的共同研发项目。

163. “第四代国际论坛”和“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”举行了侧重于经济性、抗扩散和实物保护、风险和安全以及先进模拟领域的特定评定方法的年度接口会议。

164. “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旨在在派代表参加该论坛的设计组织之间统一安全要求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的“安全设计标准”。“第四代国际论坛”在 2013 年印发了“设计安全标准”第一阶段报告，原子能机构、经合组织核能机构、“多国设计评论计划”和“第四代国际论坛”成员国的一些监管者正在对该报告进行审查。“设计安全标准”第二阶段报告将量化设计标准，并将包括制订关于如何执行一般标准的详细导则。

¹⁶ 可见 <http://www.gen-4.org/PDFs/GenIVRoadmap.pdf>

165. “第四代国际论坛”的工作范围涵盖研发的可行性和实绩阶段，而不涵盖其验证阶段。因此，原型堆不属于该论坛的权限范围之一。

166. 2007 年在欧洲联盟正式发起了“可持续核能技术平台”，以促进对实现“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。

167. 目前，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。该平台的活动重点是维持裂变技术的安全性和竞争力、为 2020 年提供长期废物管理解决方案、完成具有更高可持续性的新一代裂变堆的验证以及在 2050 年之前将核裂变应用扩大到电力生产以外的领域。

168. 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以及辅助研究基础设施、燃料设施和研发工作方面的需要。其工作重点是开发两项平行技术：作为参考解决方案的钠冷快中子堆技术，并在 2020 年前后在法国建造一座为此技术提供有力支持的原型堆；一项或为铅冷快堆或为气冷快堆的替代技术，并在愿意作为此计划东道国的另一个欧洲国家建造一座验证此项技术的实验堆。

B.1.6. 促进核能非电力应用的热电联供

169. 将核反应堆与工业应用相结合即进行核热电联供具有若干实际好处，例如：通过再利用核电厂产生的废热实现节约、提高电厂的总体热效率、增加电网的灵活性以及减少温室气体排放和环境影响。一般而言，所有核反应堆都能用于非电力应用。热电联供过程可能因技术、反应堆类型、燃料类型和温度水平而异。可作为底循环，利用通常被排放到环境中的一些热进行海水淡化和地区供热。这样，就能将总热量利用效率提高到 70%至 80%，而现有轻水堆的总热量利用效率约为 33%。轻水堆、超临界水冷堆和液态金属快堆都是进行地区供热和海水淡化等使用低温工艺热应用的热电联供的适当候选反应堆。高温气冷堆、气冷快堆和熔盐堆等高温堆更适合用于使用高温工艺热应用的热电联供和氢生产。间接循环方案被认为适合于所有反应堆（图 B-3）。

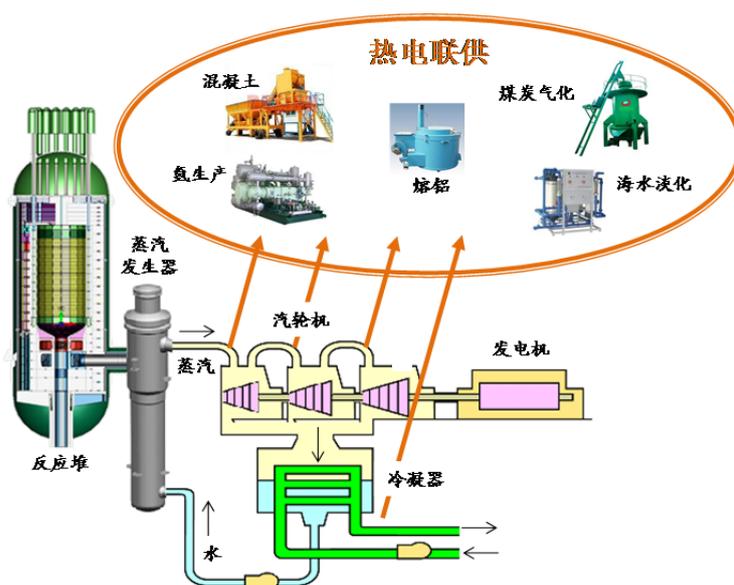


图 B-3. 热电联供示意图。

170. 热电联供对燃料合成（包括氢生产）、煤炭气化和石油开采等许多能源密集型应用来说是一种理想方案。核能可能是实现热电联供方案的市场潜力的重要选择方案。在低温范围，地区供热（80—150℃）和海水淡化（65—120℃）是最显著的应用。在中温范围，存在着石油炼制、油页岩加工和油砂加工等许多热应用。石化、钢铁和氢生产通常需要高温热。

171. 30 多年来，轻水堆的技术和商业可行性已在各国的许多在运电厂得到验证。在以化石燃料电厂作为地区供热的普遍应用的保加利亚、匈牙利、俄罗斯联邦、斯洛伐克、瑞士和乌克兰，也有着与核电厂相耦合的地区供热系统。这些核电厂提供的供热容量在 20 兆瓦（热）至 250 兆瓦（热）之间，这通常是反应堆热功率总量的很小一部分。利用从汽轮机提取的蒸汽将地区供热用水或蒸汽加热到 130—150℃。

172. 日本和美国一直使用轻水堆电厂、哈萨克斯坦一直使用钠冷快堆 BN-350 同时进行海水淡化。在日本，所有核电厂都设在沿海场址。关西电力公司、九州电力公司和四国电力公司运行的一些核电厂都拥有海水淡化系统，这些系统利用核电厂提供的热和（或）电为蒸汽发生器和饮用水的现场供应提供给水补充系统。使用了多效蒸馏、多级闪蒸和反渗透海水淡化工艺。它们各自的海水淡化能力在每日约 1000 立方米至 3000 立方米之间。

173. 德国的史塔德核电厂是一座 1892 兆瓦（热）、640 兆瓦（电）的压水堆，它向位于 1.5 公里之外的一个盐厂供应蒸汽，验证了用于工业应用的热电联供。该核电厂的蒸汽供应具有很高的时间利用率，并在 1983 年至 2003 年期间获得了良好的运行经验。另一个例子是瑞士戈斯根核电厂的 970 兆瓦（电）压水堆，它自 1979 年以来一直向附近的一个纸箱厂供应工艺蒸汽。工艺蒸汽是使用从压水堆提取的蒸汽通过三级蒸汽循环产生的，然后被通过管道经过 1.75 公里的距离输送到纸箱厂。瑞士的贝兹瑙核电厂拥有两台 365 兆瓦（电）压水堆机组，也被用于地区供热。

174. 还利用坎杜堆验证了热电联供。例如，加拿大布鲁斯核电厂 20 年来已经成功地在生产电力的同时为重水生产提供了热力。2008 年，一个日淡化能力为 6300 立方米的海水淡化厂被与印度的马德拉斯原子能电站相耦合。其混合海水淡化工艺结合了多级闪蒸工艺和反渗透工艺。最终的混合水被供应给工业/市政应用。使用 1 兆瓦（电）的热-电能量，用多级闪蒸工艺能每日生产 1500 立方米水，用反渗透工艺能每日生产 1800 立方米水。因此，在改装后，将实现每日 6300 立方米水的产量，而核电生产减少了约 4 兆瓦的电力输出。2010 年，巴基斯坦调试了世界上最新的核能热电联供厂。这是又一个改装项目，这一次是将一台多效蒸馏机组与作为 125 兆瓦（电）坎杜堆-重水堆电厂的现有卡拉奇核电厂相耦合。建成后的海水淡化厂每日从海水中生产 1600 立方米水。同一场址上还一直运行着一个提供内部用水、使用反渗透工艺每日生产 454 立方米水的工厂。

175. 所有高温堆都适合用于热电联供。正如从表 B-3 中看到的那样，球床堆、棱柱模块反应堆和气冷快堆等气冷堆概念可为工业工艺和氢生产供热。为了从中受益，欧盟

发起了“核热电联产供工业倡议”。此外，超高温反应堆系统被认为是大规模氢生产的主要候选系统。热电联供使超高温反应堆成为对大型工业综合设施具吸引力的一个热源。超高温反应堆可部署在精炼厂和石化工业，以便以不同温度的大量工艺热替代其他来源，包括用于氢生产以提升重质原油和含硫原油的品质。

表 B-3. 最具前景的第四代气冷堆系统的能源产品应用潜力

反应堆	球床堆	棱柱模块堆	气冷快堆	超高温堆
热功率（兆瓦（热））	250	600	600	600
电功率（兆瓦（电））	110	286	288	300—360
出口温度（℃）	850	850	850	950—1300
一回路压力（兆帕）	7.75	7.07	7.0	6.8—8.0
氢生产	是	是	是	是
海水淡化	是	是	是	是
高温工艺热（石油精炼厂、重油脱硫）	是	是	是	是
地区供热	是	是	是	是

176. 核能热电联供厂如果作为共处同一场址的工厂建造，将带来更多的益处，因为它们可因此共享许多常规公用设施和基础设施，从而减少成本和土地利用。通常，关注更多的是通过将核电厂与考虑中间回路的热电联供机组相耦合所实现的安全方面。

B.2. 核聚变

177. 将核聚变科学、工程和技术发展到可以向电网供应聚变能的地步是 21 世纪最令人兴奋的挑战之一，而且可能是最有价值的挑战之一。

178. 随着 2006 年设立国际热核实验堆项目，世界上若干国家加入了为和平目的验证超过 500 兆瓦聚变能的科学和技术可行性及安全性能的努力。

179. 2012 年 11 月 10 日，法国政府颁布了授权建立国际热核实验堆核设施的“2012—1248 号政令”，这是国际热核实验堆和全球聚变能发展计划的一个里程碑式的成就。国际热核实验堆场址的建设工作正在进之中，新的总部大楼已于 2012 年 10 月投入使用。将大部件从马赛港运输到国际热核实验堆场址的 104 公里“特别行程”也完美无缺，而且于 2013 年 9 月利用测试车队（复制国际热核实验堆最大和最重部件载荷的一辆 800 吨的拖车）进行了圆满的测试（图 B-4）。这一成功的前兆为将于 2014 年夏天开始的国际热核实验堆实际部件的交付铺平了道路。



图 B-4. 国际热核实验堆场址 2013 年 9 月的状况（左）。模仿国际热核实验堆最大载荷重量和尺寸（高 10 米、长 33 米、宽 9 米）有遥控车辆跟随的 800 吨拖车连续四个晚上以每小时 5 公里平均速度行驶，以测试 104 公里长的“特别行程”（右）（照片由国际热核实验堆提供）。

180. 截至 2013 年 11 月 21 日，在巴黎签署“国际热核实验堆协定”七年后，现场土建工程的所有主要合同均已签署（实现了该项目的一个关键里程碑），主要部件的制造均在各行业内稳步推进。这包括关键部件如超导线圈、真空容器和低温恒温器。2013 年，约有 500 名建设者活跃在国际热核实验堆场址上。这一数字将在 2014—2015 年建设活动高峰期上升到 3000 名。目前整体进度包括 2020 年 11 月完成机器安装和等离子体首次运行。2013 年 11 月，做出了将导致项目费用节省的一项重要决定，即运行将从全钨偏滤器（磁约束核聚变装置中的等离子体动力排气区）而不是本应在钨偏滤器第二阶段运行期间替换的碳纤维偏滤器开始进行。

181. 随着国际热核实验堆建造工作的进行，该全球性磁约束聚变计划正在转变为一项越来越注重工业性电厂规模聚变能生产的计划。许多国家正在独立开发项目计划，并发起新的研发活动，以通向聚变能商业化准备就绪示范阶段。这些计划和活动共同构成了“聚变示范电厂”计划，尽管没有单一的或协调一致的聚变电力生产示范路线图。

182. 解决“聚变示范电厂”科学和技术问题和设施的要求是共同关注的事项，即使各国有不同的侧重点和优先事项。原子能机构于 2012 年开办了一系列的年度“聚变示范电厂”计划讲习班，以推动有关确定和协调活动的国际合作。紧接着在美国圣地亚哥第 24 届原子能机构聚变能会议之后，2012 年 10 月在加利福尼亚大学洛杉矶分校举办了第一届原子能机构“聚变示范电厂”计划讲习班。讲习班的讨论突出强调，国际热核实验堆路线图必须包括一体化聚变核设施和聚变材料辐照设施。目前正在对其中一些主要设施进行规划。该路线图以及最佳协作模式将通过各方为建设和利用这些大型设施所采取的举措来定义。

183. 作为一个例子，最近就根据“欧洲聚变发展协议”¹⁷ 发布了一项实现聚变能的正

¹⁷ <http://www.efda.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

式路线图。该路线图将对聚变能的探索细分为八项任务。对于每项任务，它都审查了目前的研究状况，指出了未解决的问题，提出了研发计划，并对所需资源做了估计。它指出了需要加强产业参与和寻求欧洲以外的所有合作机会。根据该路线图，以几百兆瓦级为电网生产净电力的“聚变示范电厂”的聚变电厂预计在 21 世纪 40 年代初期开始运行，并将成为欧洲朝着商用聚变电厂迈进的一个步骤。欧洲聚变能计划从科学驱动向工业驱动和技术驱动型企业的转变从 2014 年 1 月起得到了由新的 EUROfusion 财团取代“欧洲聚变发展协议”的支持。这一新的组织将采取以项目为导向的方法，同时支持路线图任务、基本等离子体工艺研究和培养国际热核实验堆新一代科学家。其他国际热核实验堆缔约方国家正在逐步兴起类似的路线图行动。

184. 2013 年 12 月在原子能机构总部举办了第二届“聚变示范电厂”计划讲习班，并围绕三个主要专题进行了讨论：聚变物理工程设计规范、等离子体动力排气和杂质控制以及等离子体假想方案和控制。

185. 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室“国家点火装置”采用有高功率激光器参与的惯性约束方案，以产生有望从加热和压缩低温氘-氚芯块中取得高能量增益的聚变反应。2013 年，“国家点火装置”达到了被认为属于实现点火所必需的许多要求，而实现点火是反应释放出与进入整个系统的能量同样多的能量的点：空腔中 X 射线强度充足，通向目标的能量传递精确，并达到期望的压缩水平。但仍然需要至少克服一个主要的障碍，即内装燃料混合物的密封容器过早开裂。

186. 作为该领域的一项主要活动，第 25 届原子能机构聚变能会议将于 2014 年 10 月在俄罗斯联邦圣彼得堡举行。

C. 加速器和研究堆的应用

C.1. 加速器

187. 加速器开发领域正在迅速发展，已使得可以进行具有社会影响的创新应用。迄今，加速器技术开发工作在定义一个加速机的形状和长度时一直面临着两个主要参数：可以施加到一束被加速粒子的最大磁场和加速器可以达到的最大加速梯度。直至今日，在假定使用超导体的情况下，最大可实现磁场大约为 20 特斯拉。预计随着可能允许有高达 30 特斯拉磁场的新的超导体的出现会取得一些进展。这种磁场强度的增加无疑是一大进步，但却不能被视为加速器研发突破。但通过最近取得的巨大加速梯度，一项突破已经到来：代替传统加速器可以达到的 20—50 兆电子伏/米，等离子体尾波场加速器可以在同样距离内将电子束加速到 200 兆电子伏。在等离子体尾波场加速器内，高强度低能电子束（或强短激光脉冲）对通过激光电离气体或通过由入射电子聚束本身场电离而形成的等离子体进行激发。图 C-1 对工作原理作了说明：

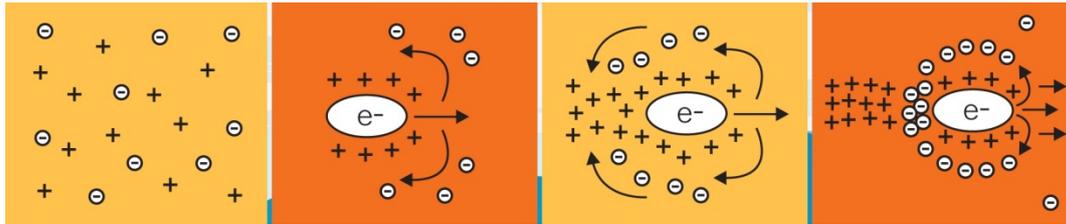


图 C-1. 从左至右：(a) 正离子和自由电子形成等离子体；(b) 电子聚束进入等离子体，并排斥所有自由电子。正离子被吸引在电子聚束周围；(c) 已经位移的自由电子现在被留在电子聚束后面的正离子所吸引；(d) 处在电子聚束后面新位置的自由电子对电子聚束进行加速。

188. 等离子体加速器具有巨大的潜力，可以在传统加速器所需空间的很小一部分范围内提供强大的电子束。长度可能的缩短以及相应的成本下降可以令未来产生“桌面”激光等离子体加速器。正如劳伦斯伯克力国家实验室所证实的，穿过与尺寸比手掌小、充满了氢等离子体的毛细管的激光脉冲创建了一个可以在短短 3.3 厘米内将电子束加速到 10 亿电子伏特的尾波场。

189. 同步光是由电子以近乎光速在一个环形结构中循环而产生的。电子由于所有沿圆周分布的弯转磁铁的磁场而发生偏离。这种同步光由明亮的红外线、紫外线和 X 射线组成。光束被沿切线方向发射到沿通向束线（即由一系列舱室组成的仪器）的直线方向运动的电子的轨道。第一个舱室包括像狭缝、滤光片、反射镜和单色仪这样的仪器。

190. 同步加速器辐射允许对物质的结构细节进行研究，尤其是在可与单个原子的位置相比较的规模上的研究。基于同步光的分析方法能够提供有关材料空间结构、化学和电子结构、微观结构以及表面、界面、薄膜和多层膜特性的信息。同步加速器辐射可以用来创建物质横截面图像，以便对其纳秒间隔的行为进行分析。因此，对于对纳米技术具有相关性的新材料开发、电子与通信、能源生产和储存、医药保健、运输和环境等种类繁多领域的应用研究而言，这是一个不可或缺的工具。

191. 还利用加速器来生产氟-18、铜-64 和碳-11 等放射性同位素。原子能机构 2011 年启动的一个协调研究项目的重点是在回旋加速器中直接生产关键医用同位素钼-99 及其衰变产物锝-99m。与在反应堆中使用铀靶生产钼-99 的典型裂变工艺不同，这些技术使用的是钼-100 靶。直线加速器可用于通过浓缩钼-100 的嬗变生产钼-99，而回旋加速器可用于通过辐照钼-100 直接生产锝-99m。

192. 加拿大在该领域的计划由阿尔伯塔大学（回旋加速器）、加拿大粒子与核物理国家实验室（回旋加速器）和普雷里同位素生产企业（直线加速器）牵头。验证商业数量的同位素生产的活动正在进行中，同时，加拿大粒子与核物理国家实验室已在最近宣布具备了足以供应 10 家至 20 家医院的核医学部门的生产能力。这两项技术的一个显著环境和经济优势是所产生的废物很少，并且对各项目的验证已表明，钼-100 的回收效率在 90% 的范围内。满足监管要求和处理其余技术和商业挑战的工作正在进行中。

193. 通过专门的计划和活动，原子能机构核能谱测量与应用实验室支持开发适用于跨学科应用和基础研究的实验室基于加速器的 X 射线能谱测定技术。在核能谱测量与应用实验室 2011 年发起的一个研究与发展项目的基础上，原子能机构和意大利埃利特拉设施于 2013 年签署了一项建造和运行一个新的 X 射线荧光束线的合同。原子能机构提供的新实验站于 2013 年最后一个季度安装在了该束线上。这将使得能够为成员国开展以下方面的实际操作培训：与 X 射线反射性和 X 射线吸收光谱学相结合的先进的 X 射线能谱测定技术，如 X 射线荧光、全反射 X 射线荧光和掠入射 X 射线荧光/掠出射 X 射线荧光；促进相关研究活动和学术计划。

194. 为此目的，2013 年发起了一个协调研究项目，以便通过支持先进的实际操作培训、指导试验工作以及在埃利特 X 射线荧光束线的超高真空室终端站（图 C-2）开展研究活动，提高成员国在基于同步加速器辐射的 X 射线能谱测定法方面的研究的质量和竞争力。

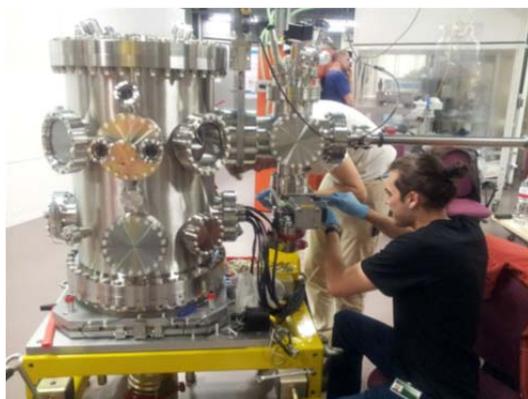


图 C-2. 装配超高真空室终端站。

195. 辐射损伤是科学家、策展人、保护者和考古学家表征历史文物时共同关心的问题。由于高剂量沉积，所研究的材料有退化的风险。损伤有时是人的肉眼可见的，如玻璃形成色心或有机化合物褐变。即使没有样品或物体直接的视觉后果，但信息的潜在损失或者更糟糕地从辐射损伤区检索到误导或偏颇的信息也是一个重要的分析性风险。

196. 迄今已经对由于纸张离子束分析所产生的褪色进行了若干系统性研究，如报告对在各种条件下暴露于兆电子伏质子所产生的两种经人工老化处理布料纸（有骨底色和无任何底色）进行标记的一项研究。¹⁸ 图 C-3 是从这项研究中采取的，显示了一系列典型的观测结果。作者们的结论是，只要该照射条件保持低于一定的标准，就没有可见的标记被观测到，即使在旨在模拟大约 100 年老化的湿度和温度循环过程之后也是如此。

¹⁸ 米洛塔 P. 等人，“在维也纳环境研究加速器对文艺复兴银尖笔画进行质子诱发 X 射线发射测量”，《物理学研究中的核仪器与方法》B 部分：射束与材料及原子的相互作用，第 266 卷（2008 年）第 2279 页至第 2285 页。

197. 文化遗产材料的辐射损伤是一个重要的老化和退化机理。但当为表征和保护目的对文化遗产样品进行照射时也出现类似的过程。原子能机构正在通过技术会议、巡回试验和发展最佳实践和做法来解决这些问题。其目的是提出如何表征对文化遗产材料的辐射诱导效应的定义。这样的定义将超越直接目视检查，将确定周边领域的相关活动，以提供有关对多样化的、有时独特的文化遗产材料的损伤机理的有价值信息，将审议辐射损伤的监测策略，并将提出缓解战略。

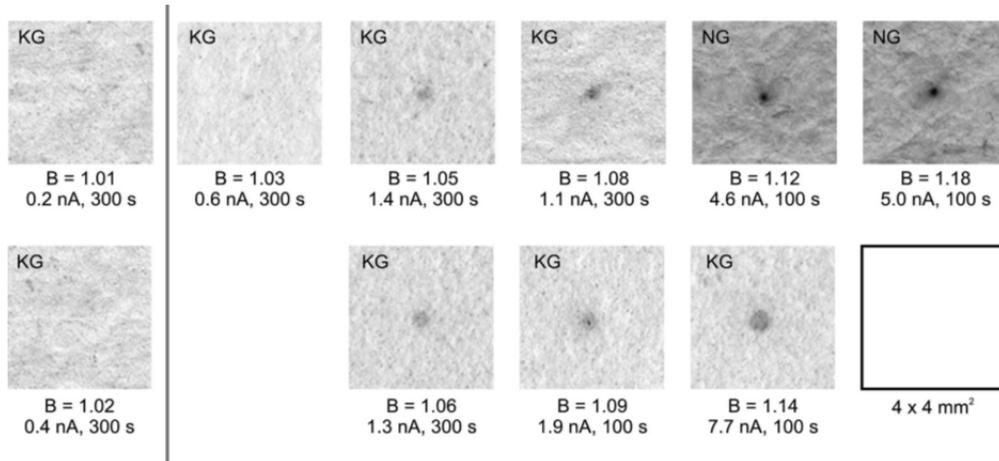


图 C-3. 按逐步加大质子照射量排列的纸张受照区加速老化后的放大影像。NG 是未打底的布料纸；KG 是骨白色打底的布料纸。黑值 B（本质上是一个点和它的环境的灰度值之间的比率）表示射束诱导变色的量。就用垂直线与其部分分开的、B 值达到 1.02 的最左边的数字而言，没有见到任何效应。（资料来源：米洛塔等人，2008 年）

198. 原子能机构正在为了全球加速器用户、研究人员和分析服务提供者的利益推出一个新的“加速器知识门户”。该知识门户不仅提供全球兆伏粒子加速器数据库，它还拥有若干联网和社区功能，以便将离子束加速器社区连接在一起，以及向加速器用户和决策者提供资讯。

C.2. 研究堆

199. 如表 C-1 所示，研究堆主要用来提供供研究和各种应用包括教育和培训所用的中子。研究堆功率额定值以兆瓦表示，其输出功率范围在零（如临界或次临界装置）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）。

200. 截至 2013 年 12 月 31 日，全世界共有 245 座在运研究堆¹⁹。此外，还有 20 座研究堆处于临时关闭模式，142 座已被长期关闭。在正在运行的反应堆中，57 座属于高容量的，运行功率水平高于 5 兆瓦，而且提供较高的中子通量。还有 338 座研究堆已经退役。大多数在运研究堆仍严重未得到充分利用，十分老旧，因此，需要持续进行老化管理、现代化和整修。

¹⁹ 资料来源：原子能机构研究堆数据库（<http://nucleus.iaea.org/RRDB>）。

表 C-1. 世界各地研究堆的常见应用²⁰

应用类型	所涉研究堆数量 ^a	拥有被利用设施的成员国
教学/培训	174	54
中子活化分析	128	54
放射性同位素生产	96	43
材料/燃料辐照 ^c	80	29
中子照相	72	41
中子散射	50	33
嬗变（硅掺杂）	30	19
地质年代学	26	22
嬗变（半宝石）	21	12
硼中子俘获疗法，主要是研发	18	12
其他 ^b	137	35

^a 在所考虑的 280 座研究堆中，245 座在运，20 座临时关闭，5 座在建、10 座列入计划，2013 年 12 月 31 日。

^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、核数据测量以及公众参观和研讨会。

^c 原子能机构正在编写一种综合目录“研究堆对部署革新型核能系统和技术的能力和承载力”。

201. 近年来，成员国对发展研究反应堆计划的兴趣一直在稳步增长。一些成员国处在新项目的不同阶段，有些成员国希望使用本国第一座研究堆作为国家引进的核科学技术基础设施。法国、约旦（图 C-4）和俄罗斯联邦正在建造新研究堆。若干成员国拥有正式的新研究堆建造计划，这些成员国是阿根廷、比利时、巴西、印度、大韩民国、荷兰、俄罗斯联邦、沙特阿拉伯和南非。



图 C-4. 左图：约旦零功率次临界装置 2013 年 6 月获得运行许可证（照片由约旦科技大学提供）。右图：5 兆瓦约旦研究与培训反应堆截至 2013 年 10 月完成 49%（照片由约旦原子能委员会提供）。

202. 其他成员国如孟加拉国、白俄罗斯、科威特、黎巴嫩、尼日利亚、苏丹、泰国、突尼斯、坦桑尼亚联合共和国和越南正在考虑建造新研究堆²¹。

²⁰ 资料来源：原子能机构研究堆数据库（<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>）。

²¹ 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）旨在对成员国在这方面起到帮助作用。

203. 随着老旧研究堆退役并被数量较少的多用途反应堆所替代，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。2013 年，在原子能机构推动下²²，研究堆地区网络或联盟帮助促进了国际合作，并协助扩大了研究堆的利益相关者基础。

204. 美国发起的“减少全球威胁倡议”在 2013 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 2013 年底，其中的 88 座反应堆已经转换为使用低浓铀燃料或在转换前被关闭。

205. 最近与高浓铀最少化有关的多方面国际支持与合作的一个良好的例子是为乌兹别克斯坦塔什干 FOTON 研究堆制订高浓铀燃料拆卸和退役计划。截至 2013 年底，乌兹别克斯坦政府正致力于为该反应堆场址退役的实施提供资金。

206. 此外，在捷克共和国，LVR15 研究堆被完全转换为低浓铀燃料，最后 70 千克高浓铀乏燃料于 2013 年 4 月被运回俄罗斯联邦。在越南，继大勒铀氢锆研究堆从高浓铀燃料转换为低浓铀燃料之后，近 12 千克高浓铀乏燃料的最终库存于 2013 年 7 月返回俄罗斯联邦。在匈牙利，10 兆瓦布达佩斯研究堆的堆芯转换于 2013 年 1 月完成，其最后一批超过 49 千克高浓铀于 2013 年 10 月和 11 月间被空运到俄罗斯联邦（图 C-5）。这些项目的完成导致这三个成员国全部成为无高浓铀燃料的国家。²³



图 C-5. 左图：紧固装载越南大勒核研究所至俄罗斯联邦高浓铀乏燃料特种运输包装件上的螺栓。右图：在匈牙利布达佩斯研究堆高浓铀乏燃料运输屏蔽容器上加装保护性外包装。该外包装被设计成能允许航空运输。

207. 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，原子能机构“和平利用倡议”正在为墨西哥铀氢锆 Mark III 型反应堆的全面现代化计

²² 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不同的研究堆联盟。

²³ 自 2002 年开始实施原子能机构、美国和俄罗斯联邦的一项联合倡议以来，已经通过 56 次装运作业将总共超过 2000 千克由俄罗斯提供的高浓铀转移到俄罗斯。

划提供资金。在向俄罗斯联邦返还所有高浓铀后，借助于美国能源部的财政和技术支持，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。

208. 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合作，帮助它们转换反应堆和返还高浓铀燃料。

209. 继钼-99 供应短缺在 2012 年得到缓解之后，加工设施和老旧研究堆的运行挑战在 2013 年又重新开始。由于需求管理的变化以及在一定程度上的供应多元化，这种短缺没有造成 2007 年至 2010 年间所见规模的危机。医用同位素生产过程继续从高浓缩铀转换到低浓铀。澳大利亚和南非继续成为非高浓铀钼-99 的主要供应国，南非继续将其工艺转换为专门使用低浓铀。另外两个主要医用同位素生产国比利时和荷兰继续将其商业规模生产工艺从高浓铀转向低浓铀的计划。

210. 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 2013 年前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，以实现以商业方式及时提供合格的低浓铀燃料。

211. 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。自 2010 年以来，一直没有提供新的燃料元件，对全球若干铀氢锆堆的持续运行提出了挑战。由于这些共同的威胁，铀氢锆界于 2012 年 6 月发起建立了“全球铀氢锆研究堆网络”。该网络于 2013 年 11 月通过设立指导委员会的方式正式建立。该网络将应对全世界 38 座在运铀氢锆设施所面临的挑战，主要是寻找解决新燃料供应、延长美国乏核燃料返还计划、提高利用率、老化管理、运行和维护等问题的替代方案。

212. 2013 年，各项活动继续促进和加强研究堆用于教育和培训目的。国际项目包括：找到增加培训课程数量、类型和质量的途径的项目；向全世界发展中国家的年轻专业人员提供接触机会的项目；促使研究堆参与有关核科学与技术的基础教育和专门教育的项目。

D. 利用核技术在减少温室气体的同时提高牧业生产

213. 生产充足的粮食以满足日益增长的人口的消费需求一直是一项全球性挑战，而需要能源消费并因而促进温室气体排放的粮食获取所产生的环境影响又加剧了这一挑战。包括牲畜在内的农业部门占全球总排放量的约 22%²⁴。良好的畜牧生产实践既能提高牲畜和牲畜产品的数量和质量，又能减少温室气体排放。

²⁴ 联合国粮食及农业组织，《通过牲畜应对气候变化 — 对排放和减排机会的全球评定》粮农组织，罗马（2013 年）。

214. 本部分侧重论述可开发和用于改进牲畜营养、繁殖和培育并从而促进可持续粮食安全同时又通过减少温室气体排放减缓气候变化的革新型核和核相关技术。联合国粮食及农业组织（粮农组织）将这视为气候智能型农业²⁵。

D.1. 环境友好的牲畜管理

215. 为了将全球气温增幅限制在 2°C²⁰ 即《联合国气候变化框架公约》认为气候变化影响可能变得不可逆的水平以下，畜牧业必须应对增加产量以提供全球粮食安全同时减少温室气体排放总量以保护环境这两方面的挑战。因此，需要开展研究，以开发能够同时实现这两个目标的最先进技术和平台。

D.1.1. 满足对动物来源食品的日增需求

216. 到 2050 年，由于人口增长、收入提高和城市化，动物来源食品的消费量预计将增加 70%。因此，将需要多方面增加畜牧生产。目前的估计是，畜牧对人为温室气体排放总量的贡献约为 14.5%（71 亿吨二氧化碳当量/年）²¹。饲料生产和加工以及牲畜瘤胃中饲料的发酵是畜牧温室气体排放的两个主要来源，它们分别占畜牧相关排放量的 45%和 39%。源自畜牧的温室气体大多来自牛（65%），而牛排放的温室气体有 31%为肠道甲烷。这被认为是营养素流失，因此，提高饲料消化效率将减少肠道甲烷流失。

217. 畜牧相关温室气体排放的其他来源是粪便贮存和处理（10%）、牧场和饲料作物扩大到以前的林区（9%）以及化石燃料消费进入了行业供应链上的各个类别（20%）。可通过采用良好耕作实践提高饲料利用效率及个体和畜群生产率，实现中短期温室气体减排目标和畜牧生产的增加。就长期解决方案而言，需要开展创新研究，以促进培育更健壮和更有生产力且适应恶劣气候、抗病能力强和能够食用低质量草料和作物残留物的牲畜（图 D-1）。还需要开展研究，以提高作物残留物的可消化性而又不损害谷物产量，以及开发能够在恶劣气候条件下生长同时能产生具有更大可消化性的更大生物量的牧草以供牲畜食用。



图 D-1. 乍得的本地库里牛产奶量高且适应恶劣的环境条件。

²⁵ <http://www.fao.org/climatechange/climatesmart/en/>

D.1.2. 减少温室气体排放的良好实践

218. 根据粮农组织的资料，如果一个社区的所有生产者都采用气候智能型农业实践，则可将来自畜牧的温室气体排放减少 30%，前 10% 的同行生产者已经采用了这些实践²⁶。研究的目标应当是通过改进实践而不是通过改变各牲畜种类和地区之间相异的生产系统来减少温室气体排放。温室气体减排干预措施不得增加其他部门的能源消费。例如，通过进行生产系统集约化和平衡草料与谷物的配给，美国和西欧的畜牧工业每生产 900 万吨至 1000 万吨蛋白质排放约 6 亿吨二氧化碳当量。相比之下，拉丁美洲和加勒比地区在使用低质量牧场和草料与有限的谷物补充喂养牲畜后，生产同等数量的蛋白质则排放 13 亿吨二氧化碳当量。

219. 但需要进行研究，以确定通过在饲料中增加谷物实现畜牧生产集约化是否会因增加化石燃料消费和谷物生产而增加温室气体排放。过多地利用水进行更密集的畜牧生产还可能引起其他的环境关切。这说明需要进行充分的研究，以设计出在增加畜牧生产的同时将温室气体排放尽可能保持在最低的整体方案。

D.1.3. 在增产和减排干预之间实现双赢

220. 在任何生产系统的管理中，盈利性通常都是决定性因素，可能推动采用任何温室气体减排实践。因此，这类技术将需要提高在个体牲畜一级和畜群一级的畜牧生产效率。大多数减排干预措施确实能给环境和农场经济都带来益处。例如，更好质量的饲料和饲料平衡不仅降低肠道和粪便的温室气体排放量，还有助于增加生产率和收入²⁷。经改进的育种和牲畜健康实践有助于减少育种费用（被安排用于育种但尽管消费资源却尚未生育的牲畜）和相关排放。

221. 已发现小农户使用既产肉又产奶的牲畜进行的双用途养殖排放的温室气体排放量比专门、单独的肉牛和奶牛养殖产生的温室气体排放量低四倍²⁸。基因表征和标志物辅助育种及改进饲养可有助于提高乳用动物的产肉质量和数量。例如，原子能机构关于对小型反刍动物进行基因表征以促进抗肠胃寄生虫能力的协调研究项目确定了 12 个参项成员国中抗肠胃寄生虫能力更强的绵羊和山羊品种（图 D-2）。可利用已通过技术合作项目转让的脱氧核糖核酸提取、辐射杂交板制图、基于离子质子的全基因组测序，单核苷酸多态性微阵列、基因分型等能力进行其他基因组相关研究，例如，进行牲畜品种的特征以获得基础代谢率和更好地利用低质量草料和作物残留物及副产品。

²⁶ P.J. Gerber、H. Steinfeld、B. Henderson、A. Mottet、C. Opio、J. Dijkman、A. Falcucci 和 G. Tempio（2013 年）。《通过牲畜应对气候变化 — 对排放和减排机会的全球评定》。联合国粮食及农业组织（粮农组织），罗马。

²⁷ HRISTOV 等人，“专题 — 牲畜作业产生的甲烷和一氧化二氮排放的迁移：一、对肠道甲烷减排方案的审查”，《动物科学杂志》第 91 卷（2013 年）第 5045—5069 号。

²⁸ P.J. Gerber、H. Steinfeld、B. Henderson、A. Mottet、C. Opio、J. Dijkman、A. Falcucci 和 G. Tempio，2013 年。《通过牲畜应对气候变化 — 对排放和减排机会的全球评定》。联合国粮食及农业组织（粮农组织），罗马。



图 D-2. 安哥拉本地山羊抗病能力强，并可在低质量牧场上生存。

D.2. 利用核技术解决温室气体排放

222. 涉及稳定同位素和放射性同位素及辐射的核技术是动物生产和健康研究的重要工具。核技术用于牲畜研究和诊断的比较优势是其提供了比非核技术更高的特异性和敏感性²⁹。以下段落中描述的核技术涉及温室气体量化以及与肠道发酵、粪便分解、饲料和草料生产、饲料利用效率和牧场管理有关的减排实践。

D.2.1. 提高低质量粗饲料的可消化性

223. 提高在反刍动物中的可消化性依赖于膳食平衡，这种平衡可导致瘤胃中的发酵因产生挥发性脂肪酸（乙酸，丁酸，丙酸）并从而为反刍动物提供营养素的微生物而得到改善。这一过程的另一个结果是微生物质量的增长，这满足了宿主反刍动物的一部分蛋白质需求。在此过程中，草料和微生物脱氧核糖核酸和核糖核酸中存在的嘌呤碱基被降解为嘌呤衍生物如黄嘌呤、次黄嘌呤、随尿排泄的尿酸和尿囊素。

224. 尿中嘌呤衍生物检测是一种估计微生物蛋白供给的非侵入性体内技术，优于侵入性常规技术。碳-14 示踪剂如碳-14 标记尿酸和碳-14 标记尿囊素已被用于开发嘌呤吸收和尿中嘌呤衍生物排泄关系的模型³⁰。注入碳-14 标记的乙酸和丙酸的办法被用于估计挥发性脂肪酸的产生速率。可利用氮-15 尿素、氮-15 碳酸氢铵和氮-15 氯化铵研究瘤胃中低质量纤维的微生物降解、微生物质量、非蛋白氮的利用、尿素循环、微生物蛋白质合成和氨基酸互换。

225. 微生物蛋白质合成速率由瘤胃内微生物中磷-32、磷-33、氮-14 或硫-35 的结合决定。标记矿物质如磷-32、硒-75、钙-45、砷-76 和铜-67 被用于研究家畜体内的矿物质

²⁹ VILJOEN 等人，“论核技术在牲畜疾病诊断和控制中的作用”，《热带动物健康和生产》，第 44 卷（2012 年）第 1341—1355 页。

³⁰ H.P.S. MAKKAR，“对同位素和核技术用于畜牧生产的审查”，《动物饲料科技》第 140 卷（2008 年）第 418—443 页。

失衡。钴-58 乙二胺四乙酸、钇-104 邻二氮杂菲和铬-51 标记的草料被用于确定通过率。碳-13/碳-14 标记的碳酸氢钠注入技术被用于估计瘤胃中二氧化碳的产生。这些研究为提高可消化性提供了基础，这反过来提高了饲料的转化率和能量利用并减少了每单位产物的温室气体排放量。此外，可利用使用氢-3 或碳-14 标记的甲烷的同位素稀释来估计反刍动物的甲烷排放量³¹。

D.2.2. 利用瘤胃微生物的基因表征提高瘤胃消化率

226. 瘤胃微生物在复杂植物结构降解为其自身生长和宿主动物生长所需的营养素方面发挥着至关重要的作用。已通过研究核糖体小亚单位核糖核酸或相应基因描述了瘤胃中微生物群落的系统发育多样性。磷-32 标记的寡核苷酸探针、变性梯度凝胶电泳、荧光原位杂交和实时聚合酶链反应有助于表征和量化瘤胃微生物及其动态。基于脱氧核糖核酸的稳定同位素探测在将微生物遗传信息与生物学功能相联系方面具有很大潜力。采用新一代测序技术的宏基因组研究有助于确定瘤胃微生物基因组和质体的完整情景。这使得能够确定将作为单个蛋白质进化结果在单个蛋白质中出现的新基因序列以及单个蛋白质在瘤胃消化率中的功能特性这些新领域³²。

D.2.3. 在进行牲畜育种以提高生产率的同时保持对当地条件的适应性

227. 确定目标基因和表征当地牲畜基因组和已适应的牲畜基因组将有助于确定有利基因特性，如那些决定着抗病（如胃肠道寄生虫、锥虫病）能力或在恶劣气候或营养条件下茁壮成长能力的基因。同位素标记的脱氧核糖核酸探针斑点杂交技术以及辐射杂交制图，与聚合酶链反应等非核生物技术以及用于基因表征的下一代测序相结合，有助于牲畜的标记物辅助育种，以提高生产率和适应性。

D.2.4. 提高畜群一级的生产率和减少温室气体排放

228. 提高奶牛群中产奶奶牛的比例可导致减少所生产的每单位牛奶的温室气体排放量。在放射免疫分析（放免分析）中，碘-125 标记的孕酮已用于测定血液、牛奶、其它体液和粪便中的孕酮³³。黄体酮是一种生殖激素，它的测定有助于例如奶牛和水牛妊娠、周期性和生殖障碍的诊断。这种诊断可导致提高生殖效率、增加牛犊生产数量和提高每头牛的产奶量。还开发了用于分析其他生殖激素如雌激素、睾丸激素、促卵泡激素、促黄体激素、马绒毛膜促性腺激素和人类绒毛膜促性腺激素的放免分析。

229. 已经确定了其在血液和其他体液中的出现可被用于妊娠早期诊断的若干分子，而

³¹ 见脚注 21。

³² FOUTS 等人，“利用新一代测序技术确定牛瘤胃中的原核生物和真菌多样性”，《PLoS One》杂志，第 7 卷（2012 年）。

³³ 国际原子能机构，“改进热带和亚热带条件下饲养牛人工授精计划的放免分析和相关技术”，原子能机构《技术文件》第 1220 号，原子能机构，维也纳（2001 年）。

聚合酶链反应和放免分析可被用于检测这类分子的存在。这些分子包括妊娠相关糖蛋白、早期妊娠因子、干扰素-tau 和干扰素-tau 激活基因。鉴于干扰素-tau 在母体血液中的快速出现，它对早期妊娠诊断特别具有前景。早期妊娠诊断是通过识别没有妊娠但适合繁殖的牲畜对畜群生产率进行管理的非常重要的工具。可利用这种诊断来减少非生产性牲畜比例和提高畜群一级的生产率。

D.2.5. 热带草料的表征和选择以及草料农学的发展

230. 突变诱发被广泛用于提高草料作物的产量和质量。定性改良包括更高的可消化性（如低木质素含量）和更大的营养素含量（如经改进的蛋白质组成），这些可通过不牺牲产量来实现。作物突变育种在开发能更好地适应恶劣条件（如耐涝渍、干旱、盐碱和极端温度）的饲料作物方面也颇为有效。因此，这些作物的产量因其能够在边缘地区种植而提高。

231. 作物-牲畜混合生产系统的目的是最大程度提高牲畜和包括供人类消费的谷物在内的作物的产量，同时最大程度减少对肥料、水和能源等资源的需求。可利用稳定同位素评价这类改进。牲畜通过提供用作土壤肥料的粪便和耕作时的牵引力，对混合农业系统的可持续集约化做出了很大贡献。在这类系统中，一个过程的产出成为另一个过程的投入，并且营养素向环境中的泄漏例如以温室气体排放形式发生的泄漏保持在最低水平。

232. 豆类和非豆科作物一同种植时具有互补功能，从而提供质量更好和数量更多的草料。草类利用豆科作物固定到土壤中的氮气生产出数量更大、质量更高的生物量。只能利用氮-15 稀释技术准确测量固氮和向其他作物中的氮转移，该技术要求用氮-15 肥料（例如，氮-15 硫酸铵/氮-15 尿素）标记土壤。此外，还可利用磷-33 标记的肥料估计豆科草料生产中磷利用的效率。

D.2.6. 改进牧场管理以促进可持续畜牧业和可持续环境

233. 将林业与放牧相结合的林草复合系统具有全草牧场型畜牧生产系统所没有的优势³⁴。林草复合系统不仅最大程度地减少温室气体排放及土壤和水道的化学污染，而且还通过最大程度减少车辆、化肥和除草剂的使用保持生物多样性（图 D-3）。此外，林草复合系统有助于提供具有较好保水性的健康土壤、可供更多牲畜食用的富含蛋白质的叶子形式的更多饲料以及在炎热天气中使动物更舒适的荫凉，这反过来又促进了吃草时间的延长和营养的改善，从而导致与单独的无林牧场相比增加了每单位土地面积上的产奶量和（或）产肉量。双标记水（氧-18 和氢-2）法被用来估计放牧牲畜的能量消耗。

³⁴ <http://www.cam.ac.uk/research/news/sustainable-livestock-production-is-possible>。



图 D-3. 畜牧生产的林草复合系统减少了温室气体排放及土壤和水道的化学污染并保持了生物多样性。

D.2.7. 通过沼气技术进行粪便管理和回收利用

234. 在存储和处理过程中，粪便中的有机物被转化成导致一氧化二氮排放的甲烷和氮气。当粪便在液体介质比如在深污水池或存放池中处理时，排放量会发生增加。稳定氮-15 标记的排泄物可被用来监测环境中所排泄氮的命运和生成关于温室气体排放的数据。

235. 沼气是一种能够从粪便中通过粪便中有机物含量的厌氧微生物消化产生的可再生能源。沼气生产可减少有机废水污染，否则，这种污染会消耗氧气和导致地表水中的氧气水平降低。沼气的排出流还可保持土壤中作为作物生产所需养分的氮和磷。此外，该气体中含有从大气二氧化碳中固定到植物中的碳，这导致沼气生产具有碳中性，不会促进温室气体排放。根据粮农组织的资料，如果所有的牛粪都被转化成沼气而不是被允许分解，则全球温室气体排放量可减少 4%或 9900 万吨³⁵。

D.3. 结论

236. 可将核技术与使用分子工具结合用于创新研究与技术发展，实现畜牧生产的可持续增长，同时减少温室气体排放。随着人口及其对动物产品需求的扩大以及随着减缓气候变化变得比以往任何都更加必要，实现这两个目标也在变得越来越重要。

237. “粮农组织/原子能机构粮农核技术联合计划”继续开发和验证旨在在全球范围内有助于温室气体减排的信息和技术包。这类信息和技术包将加强粮食安全和改善生活水平。为了最大程度发挥他们的影响，应当提高对上述这些技术和实践可用性的认识，并使广泛的利益相关方（私营部门、民间社会、国际组织、研究和学术界）参与解决畜牧生产增长及其助长或可能助长温室气体气体的问题。

³⁵ GERBER 等人，《通过牲畜应对气候变化 — 对排放和减排机会的全球评定》，粮农组织，罗马（2013 年）。

E. 数字成像和远距放射学：最新发展、趋势和挑战

E.1. 数字成像的技术和优势

238. 一直到上世纪末，绝大多数医学成像检查都使用胶片作为图像捕获、显示和储存的介质。但是，在 20 世纪 70 年代，随着计算机断层照相扫描机的发明和当代正电子发射断层照相扫描机的发展，开启了医学诊断成像的数字图像革命。继这些核成像技术的发展之后又在 20 世纪 80 年代发明一种非核成像技术即磁共振成像法以及在 20 世纪 90 年代发明了数字 X 射线获取系统（如计算机射线照相法和数字射线照相法等）。计算机断层照相法、正电子发射断层照相法和磁共振成像法等现代医学成像技术较之其以前的技术产生数量显著增加的诊断信息，由此导致需要对这些信息进行有效和高效的管理。这种不断增长的需求已驱动广泛地采用数字图像管理技术，这些技术因其有能力使现代核和非核成像技术成本效益更好和更易于利用而成为目前进行图像捕获、显示和储存的首选方法。

239. 与涉及胶片的替代方案相比，在使这类好处（表 1）成为可能方面，数字捕获、储存和显示存在一些内在优势。尽管数字设备的初始费用高于常规系统，但长期来看，数字技术通过降低的运行费用将带来总体费用节省，因为它不需要化学品、胶片、胶片处理和胶片储存。虽然有这些优势，但实施全数字医学成像系统包括报告、存档和图像分发（图 E-1）是一项复杂的工作。这类系统并非一个“交钥匙”、“一款通用”的技术解决方案，因为它们必须对不同的诊断活动和最终用户进行量身定制，并需要大量的操作培训。

表 E-1. 数字放射学对比基于胶片的传统放射学的优势³⁶

1	高效的信息传播和加强对图像的获取
2	数字图像获取系统的动态范围显著改善，以便在各个图像中捕获更多和更加多样性的解剖学结构
3	可靠性得到改善，在没有丢失诊断信息的情况下无误差回取图像
4	易于使用
5	多模式、复合成像的潜力
6	保留作为一系列数字图像的动态诊断信息
7	向多个地理区域同时传送和显示图像
8	图像处理 and 加工、特征提取和增强
9	便于专家（如放射学家与转诊医生）之间互动
10	能够广泛传播诊断成像分专业领域的专门知识
11	在获取图像后即可提供经批准的查阅者进行研究
12	使建立检查序列和专门制作以及对诊断数据进行整合成为可能
13	消除了环境问题，如弃置的胶片、化学废物

³⁶ 国际原子能机构，“在世界范围内实施放射学领域的数字成像”，原子能机构，维也纳（编写中）。



图 E-1. 数字成像链的典型工作流程（来源：www.carestream.com）。

E.2. 从模拟系统转向数字系统

E.2.1. 一般挑战

240. 即使数字成像的总体影响普遍非常积极，但从常规（荧光屏-胶片）放射学向数字成像的过渡仍是一个必须有效实施的重大转变。已使用了一个世纪基于胶片的传统方法不能轻易地被放弃。此外，所需资本费用包括人力资本发展费用和快速地向数字技术转变的必要性对一些用户也构成挑战。在这方面，宣传战略和对变革管理原则的认识至关重要。³⁷ 由于实施这类过渡所需时间和投资变化很大而且在该过程开始时受到环境的严重影响，因而这是一个特别的挑战。

241. 虽然这类步骤能够最大程度地减少这些转变所导致的困难，但将会经常出现一个调整期，在此期间这种过渡可能造成困惑、混乱、甚至功能失调。但几乎普遍的情况是，在数字成像使用的初始期过后，用户将会承认并赞赏数字成像较之胶片成像的优势。

E.2.2. 实施和对医疗人员的具体挑战

242. 放射学工作人员（放射学家、放射照相师和协理人员）应当是为项目提供主题事项专门知识的更广泛的工作人员咨询小组的一部分。这将使得所有放射学工作人员有机会就进行中的规划和图纸发表意见和做出贡献。规划并提供必要的新培训包括基本的计算机知识应当是实施计划的一部分。由于任何过渡的最快速度取决于工作人员适应变革的能力，有效和进行中的工作人员发展和培训计划便是数字成像项目最重要的组成部分之一。

243. 任何放射学服务的最终用户均为转诊患者的医生。胶片的缺乏可能扰乱一些医生的工作，数字成像的采用因而可能一开始就影响到他们提供临床服务。需要对医生进行使用计算机系统进行图像分发培训，而且他们将作为有关放射学领域外数字成像分发有效性的正面和负面反馈的一个有价值的来源。在项目规划阶段，应当明确在向数

³⁷ 美国放射学学院、美国医学物理学家协会、医学影像信息学协会，《ACR-AAPM-SIIM 医学成像电子实践的技术标准》，美国弗吉尼亚州雷斯顿（2012年）。

<http://www.acr.org/~media/ACR/Documents/PGTS/standards/ElectronicPracticeMedImg.pdf>

字成像过渡期间和之后将如何为现有用户提供服务。该规划还应当确定对医学成像服务有特定要求的那些医生和科室（例如心脏病学和整形外科）。这些人员与数字成像实施小组之间的密切互动乃至至关重要。必须清楚地表明开发这种服务是为了向作为放射学服务用户的他们提供最大的利益。

244. 如果一个设施拥有内部或当地的信息技术部门或科室，则该小组应当在初期就参与筹备向数字成像过渡的工作。但至关重要的是，该信息技术小组应了解解决方案务必遵循数字成像界在世界范围内充分确定的标准和实践。这可能要求项目指导委员会和信息技术小组之间订立谅解备忘录，以确定所需的输入。如果自由软件和现成硬件成为这种解决方案的一部分，则当地信息技术小组应当在规划安装图像获取设备前及早备好这些部件。

E.3. 远距放射学

245. 数字成像技术的主要优势之一是，通过远距放射学应用，不管获取图像的场所与专家所在地之间的距离远近都有能力提供专家诊断意见。远距放射学能够以许多方式予以定义，但一般而言可将其定义为向远离获取图像场所的中心传输成套全分辨率、全整合图像，以用于初始诊断解释和（或）专家二次磋商。这类技术在发达国家已得到普遍利用，而且虽然一些发展中国家也在利用远距放射学，但它在这些国家的实施情况仍然有限。³⁸

246. 远距放射学能够在局地（例如在同一座设施中）、在一个共享综合设施或一个城市的建造物之间或世界任何地方的卫生设施之间使用。它提供对需要现场具有放射学解释能力的工作人员的传统成像解释方案的替代方案。远距放射学能够：

- 增加对专家医学意见的接触，以用于初始解释或二次解释；
- 为公共设施不足的中心提供对医学图像报告的接触；
- 支持患者咨询和向患者通报治疗决定；
- 为遥远地区提供对图像解释的接触；
- 值班报告，以便在正常工作时间之后及时提供解释；
- 平衡具有不同工作人员水平的各中心间报告工作负荷，以确保报告的及时周转。

³⁸ A. PAL、V. W. MBARIKA、F. COBB-PAYTON、P. DATTA、S. MCCOY，“远程医学在发展中国家传播：印度的实例”，电气与电子工程师协会《生物医学信息技术学报》第9期（2005年）第59页至第65页；F. ZENNARO等，“改善有限资源国家中保健质量的数字放射学：安哥拉的可行性研究”，《PLoS One》杂志第8期（2013年）。

E.3.1. 技术

247. 远距放射学不断发展演变，以采用现代技术和提供不同的用途。³⁹ 当与可远程接触的图片存档和通讯系统或中心档案结合使用时，远距放射学与任何其它形式的远程接触没有区别。通常采用因特网和网基瘦客户端技术（在这种技术中，计算机需要与服务器连接以便充分发挥作用）。目前由于这些进步而成为可能的另外的利用实例包括居家非全日制或全日制解释工作、包括跨时区在内的不同场址间解释工作的负荷平衡以及向能够提供更多专门知识的第三方外包紧急和（或）最终的解释工作。

248. 从技术角度，向世界上大多数地方传送图像都不是问题，但有效的远距放射学解决方案还需要适当的工作流程，以便以高效的方式处理大量的远距放射学案例。图像的大小从几兆字节到数百兆字节，范围很广，而且大型图集的传送可能极其缓慢而不实用。于是，需要适当规划和资源而且可能是采用这种技术的一个障碍的可利用网络成为远距放射学应用的一个关键组成部分。

249. 网络类型将取决于当地能否提供，而所需的带宽将取决于拟传送的图像大小和数量。但是，特别是由于需要向外部用户提供鉴定证书和控制其接触，当地系统扩展到提供远程接触可能受到网络性能的限制，尤其在农村地区以及有安保问题的地区。

250. 远距放射学设备包括所有图像获取设备应当符合相应的国际标准化组织指定的有关与工作站通讯、远程通讯装置和图像储存的医学数字成像和通讯标准。一些场所没有用于连接转诊医生或远距放射学识读服务的任何手段（或计划），而其他场所则能够利用内部和外部网络作为医学成像链的一部分。

251. 最后，由于目前生成临床图像的场所与审查和报告这些图像的场所之间可能有相当远的距离，因此，重要的是双方场所均应就责任和为确保患者数据保密将遵循的访问权限政策达成明确的谅解和协议。

E.3.2. 实施的实例

252. 远距放射学不同于传输主要为讨论或示证目的发送的少量有限质量图像。后者的一个例子是利用移动电话或电子邮件等非医学通讯技术。大多数移动电话和目前使用中的其他形式的便携计算机都具有有限的存储容量、网络和处理器速度，因此，它们不可能被用于进行初始诊断解释和报告。但是，这种情况正在迅速改变，而且能够预期不久的将来这类装置在发送和审查医学图像方面将变得越来越重要。

³⁹ N. D. JOHNSON, “2010 年远距放射学：技术和组织问题”，《儿科放射学》第 40 期（2010 年）第 1052—1055 页。



图 E-2. 在平板电脑上显示计算机断层照相图像（来源：www.carestream.com）。

253. 远距放射学实施的最常见实例之一涉及国家或地区的周边医院与中心机构的连接。这为可能没有解释图像经验的农村地区医生从大型、学术或专科医院的专业医生寻求初始诊断解释支持提供了机会。可以做这项工作来提供准确的诊断，并从而在当地进行更有效的治疗，或在需要时确定将患者转诊到具有更高医疗水平的设施的必要性。这类远距放射学项目的直接受益者是相关的医院工作人员，而更重要的是患者，其图像得以通过放射学家进行专家识读。⁴⁰

254. 筛查乳房造影已被证明是乳腺癌早期检测的一个有力的工具。若干研究已证明采用双识读法（这种方法提供两个专家识读以确保更可靠的诊断）和利用识读者在审查图像方面积累的经验可增强乳腺癌的检出率。⁴¹ 在有组织的远距放射学（远距乳房造影）框架内，如果由乳房检查中心部门的专家级放射学家进行独立的第二次乳房造影识读，则参加筛查计划的各中心将受益匪浅（图 E-3）。由于识读大量的图像，这些识读者将在乳房造影识读方面具有先进技能和经验，并能够提高筛查计划的有效性。



图 E-3. 数字乳房造影工作站（来源：www.healthcare.siemens.co.uk）。

⁴⁰ F. ZENNARO 等人，“改善有限资源国家中保健质量的数字放射学：安哥拉的可行性研究”，《PLoS One》杂志第 8 期（2013 年）。

⁴¹ J.K. LEADER 等人，“远程管理筛查乳房造影的多点站远距乳房造影系统：技术、运作和临床问题评定”，《数字成像杂志》第 19 期（2006 年）第 216—225 页。

E.4. 结论

255. 鉴于数字成像提供的优势和可能性，现在正越来越多地弃置基于胶片的检查而青睐能够提供重要的核和非核成像技术的效率和可获得性的数字获取、处理和显示。这种转变目前在发达世界更加常见，虽然发展中国家也在开始受益并可能通过更广泛地采用数字技术进行放射学检查取得进一步的利益。

256. 远距放射学能够成为一种解决不均匀的地域分布和当地成像专家短缺的实际和有效的方法。不断加强的技术作用可能有助于缓解工作人员短缺，但在技术基础结构支持方面的新任务将是必要的。对发展中国家的挑战是寻找一种适合其需求和情况的方法学，以便从传统胶片处理和储存有效地转变到数字获取和显示。

F. 辐射技术用于废水和生物固体处理：环境保护的解决方案

F.1. 辐射技术在环境保护中的作用

257. 世界各地社会的持续城市化和工业化是造成本已贫乏的淡水供应污染和产生大量市政下水道污泥的一个主要因素。废水和污泥中药物、纺织染料、杀虫剂和内分泌干扰物等有机污染物的出现进一步加剧了这一问题，因为这类化学物质即使在痕量水平也可能深刻影响水生生物、陆生动物和人类。工业和废水排出流和污泥的处理有助于节约水资源和改善土壤条件。

258. 废水处理技术的持续进步和日益严格的废水排放要求确保了大部分经过处理的废水排出流都可予安全排放。但这些处理并不足以能够进行水的再利用或污泥的利用，并因此应研究替代应用技术。已成功部署了使用 γ 和电子束技术的辐射技术，以验证工业纺织品染料废水的处理和下水道污泥的消毒，从而将它们用于农业。

259. 利用辐射技术处理不同有机污染物的做法尚未被广泛纳入全面使用，但它的实用性和效率已在各种作业规模上得到证明，这项技术在处理新兴废水和污泥处理挑战方面具有很大潜力。鉴于工业排出流和废物一般不混杂在一起，而是需要在源头进行处理，因此，对这类技术可进行配置以使其适合不同的废物处理需求。

F.2. 当前在进行废水和污泥处理以供再利用方面存在的问题

260. 由于水短缺加剧，全世界对进行水的再利用的兴趣增加。但与此同时，潜在的微生物和化学水污染特别是新的痕量污染物造成的污染，已成为一个越来越大的关切。因此，开发成本效益好和可靠的水回收技术对成功实施水的再利用项目至关重要。

261. 目前正在对辐射技术及其与常规工艺的结合等先进处理技术进行试验，以便生产供间接地重新用于饮用的高质量水，即在进行常规水处理之前先经过特殊处理的循环水。预计这类技术在不久的将来将成为主要的处理技术。

262. 不断向日益严格的废水排放标准发展的趋势有利于环境，但这些标准也导致增加

了下水道污泥的产生。目前有包括焚烧、在填埋场处置或用作肥料或土壤养分在内的一些下水道污泥处置方案可供使用，尽管污泥的组成可能限制了这些选择。

263. 今后，预计废水处理厂与其说是市政废物的处理和后续处置场所，不如说是高价值资源回收作业场所。但这要成为现实，至关重要的是确定能够以成本效益好的方式对市政生物固体进行消毒和稳定的技术。在这方面，正在越来越重视产生不带来公众健康或环境风险并能够进行有益利用的高质量生物固体。

F.3. 废水和污泥处理领域辐射技术应用的现状

F.3.1. 纺织印染废水的电子束处理

264. 纺织印染和染料生产工业占全球工业水污染的近 20%。全世界每年生产的染料超过七亿吨，染色过程极其耗水，每吨成品纺织品需要约八万立方米水。从该工业流出的水具有很高的化学需氧量，这表明由于盐度和广泛化学品的存在，有机污染物浓度很高而生物降解性却很低。

265. 用于染料废水处理的常规生物处理工艺除了需要很长的处理时间外，还由于合成染料的复杂化学结构而不能对其进行降解。电子束加速器产生的高能电子已被证明能有效地将这些复杂染料降解成更简单的分子，从而促进它们随后的生物降解。该工艺可以很容易地与现有生物处理工艺相结合。已发现含最多 3%粘土的固体颗粒的存在对摧毁这些化学物质没有不利影响。含强吸光化合物的溶液不会降低该工艺的效能，并且该工艺不需要额外的化学物质。所达到的降解水平使副产品易于通过后续生物处理工艺进行处理，从而最大程度减少处理费用。使用高达 400 千瓦功率的加速器已被证明极其可靠和耐用，并接近 $\geq 99\%$ 的运行可利用率。这种加速器可在现场或远程场地完全进行自动化作业，并具有超过 30 年的寿期。

266. 大韩民国大邱印染工业综合设施的电子束设施已证明电子束技术能够每日以一千戈瑞的剂量和每立方米 0.30 美元的经济成本有效地处理多达一万立方米的纺织染料废水。⁴² 这种高功率加速器的价格约为 200 万美元，其中包括加速器及其安装，而管道、其他设备和施工的费用约为 100 万美元。目前，这是世界上这种类型的惟一设施，所述初始成本是建设更多设施的障碍。一些国家中环境监管和治理费用的日益增加正在导致许多纺织印染公司搬迁到环境监管不太严格的国家，这突显需要提高这类技术的能力和成本效益，以鼓励更广泛的采用。

⁴² HAN Bumsoo 等人，“工业规模电子束废水处理厂的运行”，《辐射物理与化学》第 81 卷（2012 年）第 1475—1478 页。



图 F-1. 使用电子束加速器处理废水（照片由大韩民国电子束技术公司提供）。

F.3.2. 利用高能辐射进行污泥处理

267. 高能辐射是灭活病原菌的一种有效和高效方法，该技术已经在世界范围内大规模用于医疗设备的消毒。基于类似概念，许多国家已对利用辐射技术净化下水道污泥进行了研究。经消毒的污泥被发现是有助于将氮固定在土壤中的根瘤菌等有用细菌的有效载体，并已在大规模试验中被证明是优良富集粪便。⁴³ 因此，可以用生物固体取代不太环保的化肥。

268. 印度瓦多达拉污泥消毒研究辐照器设施自 1992 年以来的成功和持续运行表明，以三千戈瑞剂量用钴-60 γ 辐射辐照含有约 5% 固体含量的下水道污泥可以灭活 99.99% 的病原菌。这项技术易于与现有污水处理厂相结合。此外，污泥消毒研究辐照器设施在运行中产生的有机肥副产品被农学家和园艺学家有效利用，他们已证明这种副产品提高了生产率。但处理过程所需的高通量和定期补充极大数量的钴-60 的需要限制了这项具有潜在益处技术的推广。

269. 近年来，高能电子束技术已被证明作为一种消毒技术的高度有效性，它导致显著减少了各种目标细菌病原体和病毒病原体的数量。结果表明，8 千戈瑞至 15 千戈瑞的剂量摧毁了显著数量的细菌病原体、病毒病原体和原生动植物病原体。能够提供所需剂量的高能电子束处理系统的工程规格已经制定、建模和进行实证验证。蒙特卡罗模拟法（有助于解释定量分析和决策中的风险的计算机化数学方法）和实证试验已经证实，向每日约 1500 立方米不同固体浓度和水质的生物固体流提供统一的电子束剂量具有技术可行性和成本效益。⁴⁴ 除了技术可行性外，初步成本估算分析表明，与利用嗜

⁴³ S. GAUTAM 等人，“促进市政污泥安全处置和农业利用的 γ 辐照”，《水环境研究》第 77 卷（2005 年）第 472—479 页。

⁴⁴ S. PILLAI，德州农工大学农业生命研究所，《个人通讯》（2013 年）。

热菌消化进行热干燥、堆肥制造和石灰稳定等一些当代处理方法相比，基于高能电子束的消毒可以具有极高的成本效益。

270. 此外，已经在电子束辐照与二氧化氯和高铁酸盐等化学氧化剂相耦合的情况下实现了病原体的协同消毒。电子束辐照和高铁酸盐处理的结合被发现在微生物病原体消毒、破坏雌激素活性和稳定生物固体方面具有有效性。将电子束辐照器与高铁酸盐相结合以生产高质量生物固体的成本约为每干吨 70 美元，显著低于其他当代技术。通过将电子束辐照与化学氧化剂相结合来进行市政生物固体消毒和稳定的能力为再利用生物固体和资源回收开辟了一些机会。

F.4. 利用辐射技术解决新出现的水污染物

271. 在水处理领域，被称为内分泌干扰物（能通过干扰激素系统引起疾病的化学物质）以及个人护理产品和药物的化学物质正在引起日增关切，因为它们不能通过常规处理工艺彻底去除或摧毁。这些化学物质的痕量每立方分米 1 毫微克即对水生动物具有危害性，很难用现有方法进行处理。此外，由于人口增长和世界范围内目前在用药物的多样化，这些化学物质在往往接收废水排放的淡水环境中的浓度也已逐渐增加。

272. 这类化合物可以在先进氧化工艺中使用涉及自由基的新兴技术来处理。据报道，电离辐射方法在分解二恶英、多氯联苯和内分泌干扰物等持久性有机污染物方面具有有效性⁴⁵。γ 射线辐照已被证明能在 200 戈瑞剂量上降解废水中的内分泌干扰物及其辐照产品。一个使用电子束辐照器进行此种目的工作的处理厂的估计成本为每立方米 0.17 美元。对药物进行的实验也表明，可以使用辐照技术高效地从水中去除已被证明对淡水物种有害的双氯芬酸等药物。⁴⁶

273. 2010 年，韩国原子能研究院开发了一种移动式电子束加速器，并已利用该加速器对下水道排出流中所含许多这类化学物质的处理进行了现场研究。初始浓度为每升 0.5 毫克的主要抗生素和内分泌干扰物被小于 1.5 千戈瑞的辐照剂量完全分解，大肠菌群和其他微生物也被同一辐照剂量杀灭。该研究表明，藻类中抗生素产生的毒性因辐照照射而减少。该移动式电子束加速器被设计成一个能够很容易地运送到各种工业设施的示范装置，以展示电子束加速器对以成本效益好的方式处理不同类型废水的潜力，其目的是鼓励进一步采用该技术。从这项研究中获得的结果对赢得韩国环境部对利用辐射处理下水道排出流的先进方法颁发的“新优秀技术”认证发挥了重要作用。⁴⁷

⁴⁵ A. KIMURA 等人，“通过电离辐射分解废水中的持久性药物”，《辐射物理学和化学》第 81 卷（2012 年）第 1508—1512 页及其中的参考文献。

⁴⁶ R. HOMLOK 等人，“使用辐照技术消除水中的双氯芬酸”，《光化层》第 85 卷（2011 年）第 603—608 页。

⁴⁷ M.J. LEE 等人，“下水道排出流中新兴有机污染物和各种基质中多氯联苯的辐射诱发分解”，在原子能机构“污染物、废水和污泥的辐射处理技术会议”上提交的论文，2013 年 3 月 4 日至 8 日，原子能机构，维也纳。



图 F-2. 安装在污水处理厂的移动式电子束加速器（照片由韩国原子能研究院提供）。

F.5. 今后的研究需求和挑战

274. 虽然与辐射技术用于废水、污泥和其他污染物处理有关的工艺已得到相当好的了解和认可，但今后几年中可能影响工业的新现挑战和利用新应用响应这些挑战的潜在益处表明，应当在发展这些应用方面开展进一步的工作。这些新现挑战代表着今后支持发展辐射技术在工业中的应用以促进环境治理的机会。

275. 其中的一个挑战是废水和污泥中存在令人关切的新兴化学物质，需要在市政废水处理厂对它们进行全面和一致的分析。需要具备这方面的能力，以评定废水和污泥中是否存在其浓度对人体和动物健康及环境构成风险的有毒有机化合物，并随后评价和确保辐照在废水处理中的有效性。

276. 对三级排出流进行辐照以确保排出流在排放到环境之前的最高质量构成了另一项挑战，这需要使用电子束加速器对高数量废水进行处理后获得有关消毒水平的实证数据。此外，移动式电子束加速器的可用性为发生可能影响水服务的自然灾害或类似紧急情况时提供经消毒的非饮用用途的清洁水提供了新机会，但还需要对这类应用进行进一步的研究。这在气候变化相关自然灾害的频率和严重性不断增加的背景下可能尤其具有相关性。

F.6. 结论

277. 辐射技术在用于处理废水和下水道污泥时具有解决各种环境、公众健康和资源需求与挑战的潜力。它们已经成功证实了它们在工业纺织品染料废水处理方面以及在进行下水道污泥消毒以便为农业应用提供更多资源方面的有效性。最近的研究证明，辐射引发降解具有将令人关切的新兴有机化合物转变为危害较小的物质或将其浓度降低到允许范围内的潜力。辐射技术在处理各种有机污染物方面的实用性和效率已在各种作业规模上得到证明。

278. 移动式电子束设施的开发使辐射技术人员能够在实际工作条件下向最终用户证明这些工艺，而移动式设施还可用于响应自然灾害和其他紧急情况。此外，如上所述等应用具有为将经处理的废水重新用于城市灌溉和工业用途提供支持的潜力，这将有助于应对世界范围内由于人类不断增长的需求和气候变化而日益严重的水短缺。随着进一步的研究与发展，这类辐射技术将能够证明它们对人类具有很大的价值。

G. 应对不断变化的海洋环境中的有害藻华

G.1. 核技术用于跟踪海产品和环境中的海洋生物毒素

G.1.1. 有害藻华毒素对海产品贸易的影响

279. 水产动物产品作为动物蛋白的来源和贸易商品对许多发展中国家非常重要。全球对海产品的需求一直在增加，促进了进口和本地生产。由于捕捞业的人口处于停滞状态，水产养殖业目前贡献的海产品占全球海产品供应总量的 50%以上。海产品是国际上贸易量最大的食品类商品，发展中国家的海产品出口超过了咖啡、可可、茶叶、烟草、肉和大米的价值总和。⁴⁸ 此外，发展中国家占全球海产品出口的约 50%。⁴⁹

280. 出口商遵守进口国监管要求的能力已成为渔业部门市场准入的主要障碍。⁵⁰ 进口的牡蛎、蛤、扇贝和贻贝等海产品须有标签、可追踪性和官方认证，以确保质量和安全。许多国家的地方监管当局一直特别重视制订和执行关于海洋生物毒素的监管限值和标准。

281. 海洋生物毒素是由某些显微海洋藻类产生的，它们可以在一定条件下开花和达到很高的密度，形成有害藻华，这种有害藻华也被称为“赤潮”。通过进食，鱼和贝类可能积聚这些毒素，对人类消费造成危险。海产品可能因此具有致命性，即使水质看似清澈和没有有害藻华。有毒和无毒海产品具有相同的口感和外观，烹饪和冷冻并不能杀灭有害藻华毒素。

282. 有害藻华毒素能给贝类产业造成巨大经济损失，因为当贝类中的毒素超过监管水平时，收获设施会被强制关闭。在没有实施监管计划的情况下，海产品毒素控制的缺失构成了对消费者的风险和出口障碍。毒性爆发也可能引起社会恐慌（包括不知情的消费者避免食用所有海产品造成的更广泛影响），对旅游业造成不利影响，并鼓励从管制地区进口鱼类，从而损害本地渔业。核技术可被用于鉴定和测量海产品中的有害藻华毒素，以及研究环境和气候变化对有害藻华种类的主导地位、分布模式及未来爆发的可能频率的影响。

⁴⁸ 粮农组织，“食品展望：关于全球食品市场的两年期报告”，粮农组织，罗马（2013年）。

⁴⁹ A.G.J. TACON、M. METIAN，“鱼问题：水产品对人类营养和全球食品供应中的重要性”《渔业科学评论》第 21 卷（2013 年），第 22—38 页。

⁵⁰ 粮农组织，“食品展望：关于全球食品市场的两年期报告”，粮农组织，罗马（2013 年）。

283. 应成员国提出的解决有害藻华影响的请求，原子能机构一直在通过技术合作计划发展和加强在海产品和有害藻华管理方面的国家和地区能力及藻类毒素检测能力，以促进可持续的安全海产品供应。



图 G-1. 有害藻华毒素可能在蚌、鱼等可食用海洋生物体内积聚。智利的贸易海产品（左）和在波利尼西亚的一个鱼市（右）。

G.1.2. 利用新验证的核方法分析藻类毒素

284. 核基受体结合分析是一种为分析与麻痹性贝毒、腹泻性贝毒、神经毒性贝毒和雪卡鱼中毒有关的藻类毒素而开发的特异灵敏方法。⁵¹ 核基受体结合分析建立在产生于样品提取液中的毒素能够与氘-3 放射性标记生物毒素（如氘-3 贝类毒素或氘-3 短裸甲藻毒素）竞相与其药理靶蛋白（即受体）相结合的基础之上。可以使用液体闪烁计数器对这种结合进行量化，这种计数器可在传统小瓶中或使用酶标仪来测量放射性同位素的 β 辐照。

285. 核基受体结合分析是核技术的重要应用，它能避开与广泛用于检测毒素的常规方法即鼠生物分析法有关的问题。核基受体结合分析提供对样品综合毒性效力的估计，具有高度特异性，并具有非常低的检测限值，这使得这项技术能够向监管当局和生产商提供有关有害藻华的重要早期预警信息。

286. 微孔板格式的核基受体结合分析（图 G-2）的高通量最大程度减少了试剂的使用和放射性废物的产生。用于这种方法的放射性物质属于免管数量（如每板约 5—37 千贝可的氘-3 放射性标记毒素），并被认为在运输、实验室辐射防护计划和废物处置方面具有安全性。核基受体结合分析法使用说明易于遵循，原子能机构《技术文件》第

⁵¹ 原子能机构，《放射性受体结合分析：方法手册》，原子能机构，维也纳（编写中）；M.Y. BOTTEIN DECHRAOUI、J. TIEDEKEN、R. PERSAD 等人，“使用两种检测方法区分雪卡毒素和短裸甲藻毒素：应用于佛罗里达群岛大梭鱼”，《毒素》第 46 卷（2005 年）第 261—270 页。

1729 号则对有关程序作了详述。⁵² 该文件是与美国国家海洋和大气管理局和教科文组织政府间海洋学委员会（海委会）合作编写的，是对海委会关于有害藻华的《手册和导则丛书》第 59 号的补充。⁵³

287. 在原子能机构的支持下，美国国家海洋和大气管理局将这种方法提交给了国际分析机构协会。核基受体结合分析现已被认可为该协会关于贝类体内麻痹性贝毒测量的“第一行动官方法”。⁵⁴ 包括原子能机构协作中心菲律宾核研究所在内的七个成员国（澳大利亚、智利、意大利、新西兰、菲律宾、泰国和美利坚合众国）的九个实验室参加了导致该认可的实验室间比对活动。沿着这一成就，原子能机构及其成员国正在努力针对能够使用核基受体结合分析有效和高效检测出来的其他毒素如造成腹泻性贝毒、神经毒性贝毒和雪卡鱼中毒的毒素发展类似的实验室间活动。

288. 正在国家和国际一级采取进一步的行动，以促进监管机构实施核基受体结合分析。例如，已将受体结合分析提交美国州际贝类卫生会议实验室方法审查委员会，该委员会通过州和联邦控制机构、贝类行业和学术界之间的合作促进贝类卫生。美国国家贝类卫生计划目前正在审议将核基受体结合分析作为“经批准的有限使用方法”。此外，根据原子能机构有害藻华问题咨询委员会对 INT7017 号跨地区技术合作项目的建议，正在考虑通过欧洲联盟海洋生物毒素基准实验室，按照欧洲联盟有关规章进行一项水平测试。

⁵² 原子能机构，《放射性受体结合分析：方法手册》，原子能机构，维也纳（编写中）。

⁵³ B. REGUERA、R. ALONSO、A. MOREIRA、S. MENDEZ，“产生毒素的微藻监测计划的设计和实施”，政府间海洋学委员会（2011 年）。

⁵⁴ F.M. VAN DOLAH、S.E. FIRE、T.A. LEIGHFIELD、C.M. MIKULSKI、G.J. DOUCETTE，“使用受体结合分析测定贝类体内的麻痹性贝类毒素：协作研究”，《国际分析机构协会杂志》第 95 卷（2012 年）第 795—812 页。

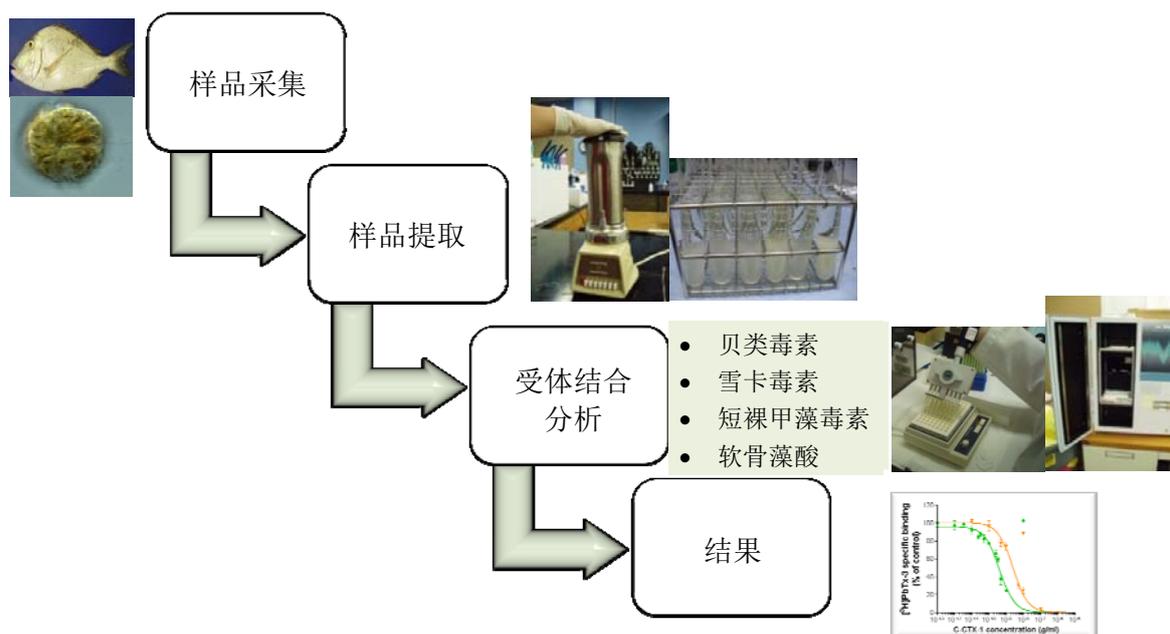


图 G-2. 对海产品样品实施化学萃取程序并使用放射性受体结合分析法检测其毒素水平（根据 Reguera 等人的资料修改）。⁵⁵

G.2. 利用核技术研究过去和现在的环境与气候变化有关的有害藻华

289. 有害藻华种类的生长、毒性和地理分布受局地 and 全球气候和环境变化的影响。沿海和内陆水域的富营养化（也称“超营养作用”）是为日益增长的人口生产食品和能源以及伴随产生的废物和污水所造成的直接后果。氮的大气沉积（以酸雨中的氮氧化物形式）也是富营养化的一个来源。

290. 海洋生态系统中有机营养素和（或）发生变化的营养素比率的过载往往造成水体中藻类生物量的增加，并已与蓝藻和腰鞭毛虫的大量繁殖相关。⁵⁶ 富营养作用目前被认为是全球最大的污染问题之一。⁵⁷ 就此而言，放射性核素和稳定同位素可用于提高对碳和氮循环的认识，并从更广泛意义上提高对人为活动在有害藻华发生地点之影响的认识。

291. 一些最有害的产毒素腰鞭毛虫（如裸甲藻和 *Pyrodinium*）可产生被埋入海洋沉积

⁵⁵ B. REGUERA、F. BOISSON、H.T. DARIUS、M.Y. DECHRAOUI BOTTEIN, “有毒微藻水华：核技术能够为它们的管理提供什么”，“同位素用于水文学、海洋生态系统和气候变化研究”：2011年3月27日至4月1日在摩纳哥举办的国际专题讨论会文集，原子能机构，维也纳（2011年），第483—491页。

⁵⁶ D.M. ANDERSON、P.M. GLIBERT、J. M.BURKHOLDER, “有害藻华和富营养作用：营养素的来源、组成和后果”，《河口和海岸》第25卷（2002年）第704—726页。

⁵⁷ R.W. HOWARTH、K. RAMAKRISHNA、E. CHOI 等人, “营养管理、响应评定”，《生态系统和人类福祉》，岛屿出版社（2005年）第295—311页。

物中的孢囊；一个可能变成化石的静止期。可利用核技术从含有这类化石的沉积物岩心中提取有价值的信息，以揭示环境和气候变化对有害藻华种类的主导地位及分布的影响。这些技术包括应用采用铅-210/钍-210 取得的沉积速率和年代测定。在这种情况下，利用稳定同位素比率作为指标，还能够重建古气候条件，这种重建使得能够更好地了解孢囊产生时的主要环境条件。

292. 稳定同位素工具包括例如碳-12/碳-13、氧-16/氧-18 或氮-14/氮-15 比率的测定。后一比率经常被用作繁殖率变化以及水柱中的营养素水平和氮化合物来源的记录器。这些因素与沉积物中孢囊产生和孢囊丰度的关系有助于认识非生物参数在有害藻华发生中的作用。

293. 这些类型的数据集极少，但对于确定一种有害藻华种类是否已在最近进入新的区域以及一种有害藻华种类的繁殖在频率、强度和地域扩展上是正在增加还是仅在经历正常的 10 年尺度波动，它们不可或缺。这种信息对了解和预测有害藻华事件的变化、使用适当分析工具及早有效和高效地检测出毒素以及调整生态系统服务和海产品安全管理战略颇为重要。

294. 在过去的 10 年中，气候变化和富营养作用也与包括湖泊和河口在内的淡水生境中有害藻华毒性的不断提高具有关联性。藻类天然发生在淡水中，在有利条件下，它们在淡水中能够像其海洋中的同类那样迅速繁殖。在可见于湖泊或河口的淡水藻类中，蓝藻产生威胁水生生物、生态系统健康及人畜饮用水安全的烈性毒素。已知这类毒素能一次杀死数百头牲畜。已在世界各地的许多湖泊观察到产生贝类毒素的蓝藻属，并已在新西兰进入处理厂的水中和整个水处理过程中检测到处于低水平的这种毒素。⁵⁸ 对于海洋有害藻华毒素，核基受体结合分析法似乎是一个很有前景的工具，它可以很容易地被调整用于监测淡水有害藻华毒素。这是核基受体结合分析法在今后的一个潜在应用领域。



图 G-3. 发生淡水有害藻华中毒的陆地和水生动物（照片由美国伍兹霍尔海洋研究所提供）。

⁵⁸ A. KOUZMINOV、J. RUCK、S.A. WOOD, “新西兰对饮用水中有毒蓝藻的风险管理方案”, 《澳大利亚和新西兰公共卫生杂志》第 31 卷（2007 年）第 275—281 页。

G.3. 结论

295. 预计有害藻华对海洋生态系统及其所提供的重要食物来源的影响今后将越来越严重。发展中国家将尤其感受到这些影响，其中将包括严重依赖海产品作为其主要蛋白质来源的若干小岛屿发展中国家。受体结合分析法等核技术是高效监测海产品和环境中藻类毒素及提高对气候多变性对有害藻华和海洋生态系统影响之认识的成熟工具。

296. 地区和跨地区方案对应对正在影响环境、公众健康和社会经济福祉的这一主要环境挑战的跨境性和加强提高全球气候和环境变化背景下有害藻华管理效率所需的多国合作至关重要。在海委会“全球有害藻华的生态学与海洋学研究计划”的营养素管理全球伙伴关系框架内，原子能机构与海委会和环境规划署以及海委会政府间有害藻华小组合作，正在努力建立早期预警系统和改进对环境和全球变化对有害藻华之影响的预测和评定。所有这些措施都对确保海洋生态系统服务和海产品安全的可持续管理至关重要。

297. 为了响应成员国对减缓和管理有害藻华事件及其影响表达的日增兴趣，原子能机构已经扩大和加速了其解决有害藻华对环境和海产品安全之影响的活动。已向拉丁美洲、亚洲及太平洋和非洲地区的若干成员国转让核基受体结合分析技术和专门知识，并且在今后几年中还将进一步加强这些努力。